

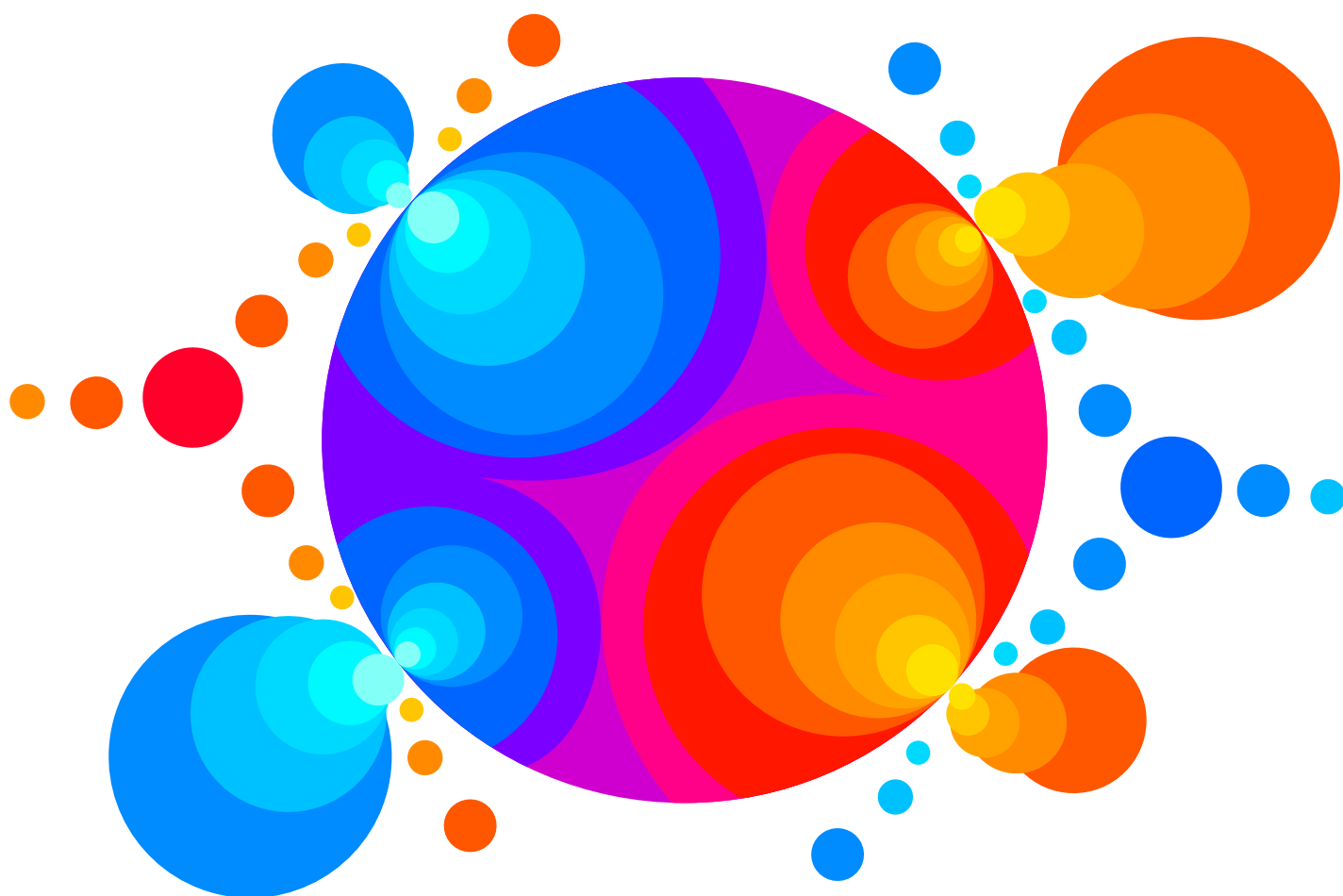
Numero XV
Anno 2020


DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E FISICA
"Ennio De Giorgi"


UNIVERSITÀ
DEL SALENTO

Viaggio nella Scienza

Ithaca



Cambiamenti climatici

Ithaca: Viaggio nella Scienza

Una pubblicazione del Dipartimento di Matematica e Fisica “Ennio De Giorgi” dell’Università del Salento.

Registrazione presso il Tribunale di Lecce n. 6 del 30 Aprile 2013.
e-ISSN: 2282-8079

Direttore Responsabile
Luigi Spedicato.

Ideatore
Giampaolo Co’.

Comitato di Redazione
Adriano Barra,
Rocco Chirivì,
Paolo Ciafaloni,
Maria Luisa De Giorgi,
Vincenzo Flaminio,
Luigi Martina,
Giuseppe Maruccio,
Marco Mazzeo,
Francesco Paparella,
Carlo Sempi.

Segreteria di Redazione
Daniela Dell’Anna.

© 2013-2023 Dipartimento di Matematica e Fisica “*Ennio de Giorgi*”.

© 2023 per i singoli articoli dei rispettivi autori.

Il materiale di questa pubblicazione può essere riprodotto nei limiti stabiliti dalla licenza
“*Creative Commons Attribuzione – Condividi allo stesso modo 3.0 Italia*” (CC BY-SA 3.0 IT).

Per il testo della licenza: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/it/deed.it>

Ithaca: Viaggio nella Scienza
è disponibile sul sito:

<http://ithaca.unisalento.it/>

Scriveteci all’indirizzo:

ithaca@unisalento.it

3 In questo numero

5 Nuovo Coronavirus: conoscenze work in progress
Antonella De Donno, Alessandra Panico

13 Cause ed effetti dei cambiamenti climatici
Roberto Battiston

25 Il cambiamento climatico e la questione degli
eventi estremi
Sergio Pinna

37 La nostra specie, le leggi della natura e le priorità
scientifiche
Ferdinando Boero

47 Cambiamento climatico e protezione delle coste
Marco Delle Rose, Corrado Fidelibus, Mario Marcello
Miglietta

57 Crisi climatica e inquinamento atmosferico
Cristina Mangia, Pierina Ielpo, Rita Cesari, Maria Cristina
Facchini

- 69** **Clima e risorse idriche tra atmosfera e sottosuolo**
Paolo Martano, Marco Delle Rose
- 81** **Tecnologie fotovoltaiche innovative per ridurre il costo dell'elettricità**
Cosimo Gerardi
- 105** **La fusione nucleare controllata e il cambiamento climatico**
Danilo Dongiovanni, Lori Gabellieri, Piero Martin, Angelo Antonio Tuccillo, Gregorio Vlad, Fulvio Zonca
- 125** **Dai pattern ai frattali, passando per il caos**
Deborah Lacitignola
- 135** **L'attrattore di Lorenz**
Mario Leo
- La lezione mancata**

In questo numero

I tempi richiesti per realizzare un numero di *Ithaca* non permettono di seguire la cronaca. In questo momento, l'attenzione di tutti noi è, comprensibilmente, rivolta allo sviluppo della pandemia generata dal virus **COVID-19**, a cui il primo articolo di questo numero, scritto da Antonella De Donno e Alessandra Panico, è dedicato.

In tempi più tranquilli, solo sei mesi fa, avevamo ritenuto che un argomento di interesse generale fosse quello riguardante i cambiamenti climatici, e questo è il tema trattato dalla maggior parte degli articoli di questo numero di *Ithaca*.

Il primo contributo è quello di Roberto Battiston che presenta dati che quantificano l'entità del cambiamento climatico e che mostrano una correlazione con l'emissione antropogenica di CO₂ nell'atmosfera.

Segue l'articolo di Sergio Pinna che discute della possibile relazione tra eventi estremi e cambiamenti climatici.

Ferdinando Boero presenta il punto di vista di uno zoologo per quanto riguarda le conseguenze dei cambiamenti climatici sulle specie animali, inclusa la nostra.

L'articolo di Marco Delle Rose, Corrado Fidelibus e Mario Marcello Miglietta considera la relazione tra il cambiamento climatico e la modifica delle coste marine, ed i problemi legati alla loro protezione.

Il rapporto causa ed effetto tra cambiamento climatico ed inquinamento atmosferico è discusso nell'articolo di Cristina Mangia, Pierina Ielpo, Rita Cesari e Maria Cristina Facchini.

La relazione tra risorse idriche e cambiamenti climatici è discussa nell'articolo di Paolo Martano e Marco Delle Rose.

Dato che gran parte dell'emissione di CO₂ nell'atmosfera da parte dell'uomo è dovuta alla pro-

duzione di energia, seguono due articoli che fanno il punto sulla situazione attuale di due fonti di produzione di energia che non generano CO₂.

L'articolo di Cosimo Gerardi analizza lo stato presente e lo sviluppo delle celle fotovoltaiche, oggi prototipi di laboratorio ma pensate per produzione, ed utilizzo, su grande scala.

Lo stato e le prospettive riguardanti la fusione nucleare è discusso nell'articolo di Danilo Dongiovanni, Lori Gabellieri, Piero Martin, Angelo Antonio Tuccillo, Gregorio Vlad, Fulvio Zonca.

L'analisi dei fenomeni atmosferici ha stimolato lo studio e l'interesse per la teoria del caos. Per questo motivo abbiamo inserito in questo numero di *Ithaca* due articoli riguardanti la teoria caos deterministico.

Un primo articolo di Deborah Lacitignola fa una panoramica sullo sviluppo di questa teoria e ne presenta la relazione con la geometria dei frattali.

Il secondo articolo, di Mario Leo, è leggermente più specifico, per questo è presentato come *lezione mancata*, e si riferisce ad un particolare, ma paradigmatico, sistema caotico: l'attrattore di Lorenz.

Buona lettura,
il Comitato di Redazione

Nuovo Coronavirus: conoscenze work in progress

Antonella De Donno, Alessandra Panico

*Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche e Ambientali,
Università del Salento, Lecce*

Le malattie che si trasmettono, quelle che definiamo malattie infettive, hanno da sempre destato preoccupazione nel genere umano. Questa paura innata persiste anche nell'uomo del ventunesimo secolo, quando si trova di fronte a infezioni nuove con caratteristiche non ancora descritte e, soprattutto, quando una cura o un vaccino non sono ancora disponibili.

Il Coronavirus

I virus sono dei microorganismi estremamente piccoli, hanno una dimensione compresa tra 20 e 300 nanometri e sono visibili solo al microscopio elettronico. Ne esistono di molti tipi diversi, alcuni infettano l'uomo, altri solo gli animali, pochi virus possono infettare entrambi. La struttura elementare di un virus è costituita da un nucleo racchiuso da un rivestimento formato da proteine detto **capside**. Il nucleo è formato da materiale genetico, cioè da un acido nucleico, che può essere DNA oppure RNA.

A differenza dei batteri, che sono sempre dei microrganismi ma di dimensioni più grandi, i virus si replicano esclusivamente all'interno delle cellule dei tessuti dell'organismo, quindi, quando penetrano nel corpo umano, assumono il con-

trollo di alcune cellule e ne utilizzano le strutture per creare altre copie del virus. Ciò danneggia la cellula e, infine, ne determina la morte. Tuttavia, alcuni virus possono restare all'interno delle cellule per lungo tempo senza ucciderle. La maggior parte dei virus provocano la malattia poco dopo il contatto con l'ospite e possono determinare disturbi comuni come malessere, debolezza e febbre che scompaiono dopo breve tempo. Altri virus, invece, determinano una malattia di lunga durata (ad esempio, il virus dell'immunodeficienza umana, cioè l'HIV, e l'herpesvirus). Inoltre, alcuni virus sono strettamente correlati allo sviluppo di tumori, come i virus dell'epatite B (HBV) e C (HCV) responsabili di epatite cronica che può degenerare in epatocarcinoma, o il papilloma virus (HPV) responsabile del cancro alla cervice uterina.

I virus possono infettare le persone per via aerea, alimentare, sessuale o attraverso vettori (soprattutto insetti come zanzare e zecche); possono causare disturbi locali a carico di diversi apparati (ad esempio dell'apparato respiratorio, digerente o urogenitale) o generali (sistemici) qualora si diffondano in tutto l'organismo.

Per quanto riguarda la capacità infettiva, in genere, i virus sono fortemente selettivi nell'attaccare specie e tessuti, cioè infettano solo un tipo di

cellula o di organo e, preferenzialmente, in esemplari appartenenti ad una determinata specie. La resistenza dei virus nell'ambiente è estremamente bassa, anche se alcuni virus (ad esempio alcuni virus respiratori) possono sopravvivere a lungo.

Alcuni tipi di virus possono essere combattuti con efficaci farmaci (antivirali) o prevenuti grazie a vaccinazioni specifiche. Ma il più delle volte sono i sintomi provocati dai virus ad essere trattati, utilizzando comuni farmaci, come antipiretici, decongestionanti, antinfiammatori, ecc. Al contrario, gli antibiotici sono utili per combattere le infezioni batteriche ma non hanno nessun effetto sui virus.

L'inizio del 2020 è stato segnato da un'epidemia causata da un nuovo virus appartenente alla famiglia dei coronavirus, denominato SARS-CoV-2, responsabile della COVID-19 (questo il nome dato dall'OMS alla patologia che causa) [1], che dalla Cina si sta espandendo anche in altri Paesi del mondo.

I coronavirus sono un'ampia famiglia di virus respiratori che possono causare malattie da lievi a moderate, dal comune raffreddore a sindromi respiratorie come la MERS (sindrome respiratoria mediorientale, Middle East respiratory syndrome) e la SARS (sindrome respiratoria acuta grave, Severe acute respiratory syndrome). I coronavirus sono comuni in molte specie animali (come i cammelli e i pipistrelli) e nella popolazione umana, ma in alcuni casi, seppur raramente, possono passare dall'animale all'uomo grazie a mutazioni evolutive. Un nuovo coronavirus è, dunque, un nuovo ceppo di coronavirus che non è stato precedentemente mai identificato nell'uomo. Il nome **coronavirus** si riferisce al caratteristico aspetto del virus che presenta delle proiezioni bulbose tutt'intorno alla superficie che ricorda, appunto, una corona.

I coronavirus sono stati identificati a metà degli anni '60 e sono noti per infettare l'uomo ed alcuni animali (inclusi uccelli e mammiferi). Le cellule bersaglio primarie sono quelle epiteliali del tratto respiratorio e gastrointestinale.

Ad oggi, sette Coronavirus hanno dimostrato di essere in grado di infettare l'uomo:

- Coronavirus umani comuni: HCoV-OC43 e HCoV-HKU1 (*Betacoronavirus*) e HCoV-229E e HCoV-NL63 (*Alphacoronavirus*); essi possono causare raffreddori comuni ma

anche gravi infezioni del tratto respiratorio inferiore.

- Altri Coronavirus umani (*Betacoronavirus*): SARS-CoV, MERS-CoV e SARS-CoV-2.

Il serbatoio naturale di SARS-CoV-2 è sicuramente rappresentato dai pipistrelli. Studiando la sequenza genomica di questo nuovo virus, si è subito visto che esso presentava fortissime omologie di sequenza (96%) con altri coronavirus già studiati in alcune specie di pipistrelli presenti in Cina. Per cui è estremamente probabile (anche per le conoscenze già acquisite con SARS e MERS) la sua provenienza da questi questi mammiferi [2]. Tuttavia, non è stato ancora chiarito se esiste un ospite intermedio, cioè se un altro animale più vicino all'uomo possa aver trasmesso questo coronavirus agli esseri umani, o se si tratti, invece, di una trasmissione zoonotica diretta dai pipistrelli.

Per quanto riguarda la capacità del nuovo coronavirus di infettare le cellule, è stato osservato che esso è molto simile al virus della SARS, infatti, presentano circa il 80.2% di omologie di sequenza genomica, sebbene ci sia variabilità da regione a regione della sequenza virale [3]. Questa scoperta ha importanti implicazioni per la comprensione dei meccanismi di trasmissibilità e patogenesi del nuovo coronavirus. Come nel caso del virus della SARS, anche per il SARS-CoV-2 l'infezione dell'epitelio delle vie respiratorie inferiori viene mediata dall'interazione della proteina di superficie (*Spike*) del virus con il recettore d'ingresso ACE2 ("Angiotensin Converting Enzyme 2") [3]. Tuttavia, è possibile che in questo processo intervengano altri recettori e altre proteine (non ancora noti) che facilitano l'ingresso del virus nelle cellule e, conseguentemente, la propagazione dell'infezione. Inoltre, la differenza principale tra i coronavirus che causano un raffreddore e quelli che causano una grave malattia è che i primi infettano principalmente le vie aeree superiori (il naso e la gola), mentre i secondi prosperano nelle vie aeree inferiori (i polmoni) e possono portare alla polmonite. Il recettore ACE2, infatti, è maggiormente espresso nel tratto respiratorio inferiore [4] e per tale motivo questi virus potrebbero provocare effetti più drastici a livello polmonare.

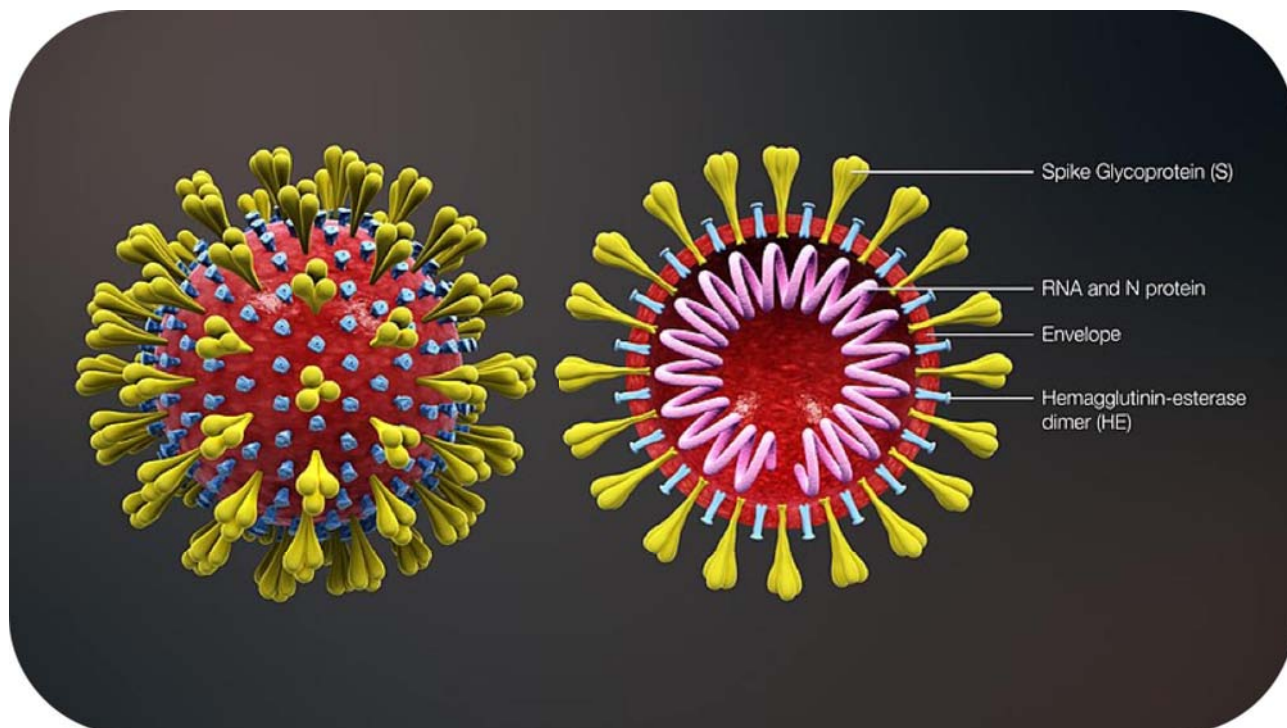


Figura 1: *Struttura del nuovo coronavirus*

Dalla descrizione dei primi studi condotti grazie all'isolamento del nuovo coronavirus, sembra che esso non abbia un forte effetto citopatico, ossia non è particolarmente in grado di danneggiare direttamente le nostre cellule. Il danno alle cellule, ed in particolar modo a quelle polmonari, sembra essere dovuto alla fortissima risposta infiammatoria che SARS-CoV-2 è in grado di stimolare, scatenando, quindi, un'inflammatione acuta nei polmoni che limita gli scambi gassosi. Quando una cellula rileva un invasore rilascia delle proteine chiamate interferoni, che ostacolano la replicazione del patogeno. Gli interferoni innescano una cascata di attività antivirali, come l'arresto della sintesi proteica dell'ospite e la morte cellulare indotta. Purtroppo, la maggior parte di questi processi è anche negativa per l'ospite [5].

Sicuramente è stato fatto qualche passo in avanti nella comprensione delle caratteristiche molecolari di questo nuovo virus, ma molto deve essere ancora fatto al fine di mettere a punto strategie terapeutiche e vaccinali efficaci.

I ricercatori hanno già messo a disposizione kit molto rapidi ed economici che consentono la diagnosi in breve tempo [6], il che sarà molto importante per la sorveglianza sanitaria in tutto il mondo. Tuttavia, non esistono al momento

farmaci specifici contro i coronavirus patogeni per l'uomo.

L'utilizzo della stessa porta d'ingresso nelle cellule da parte di SARS-CoV-2 e SARS-CoV implica che eventuali farmaci contro il virus della SARS, potrebbero essere in grado di interferire e forse bloccare entrambe le infezioni. Durante la pandemia di SARS, venne somministrato il medicinale Kaletra, contenente due farmaci (lopinavir e ritonavir) inibitori dell'enzima virale proteasi di HIV, che si dimostrò efficace nell'attenuare i sintomi della malattia e diminuire quindi la mortalità dei pazienti trattati. Poiché lo studio non comprendeva un gruppo di controllo non trattato non vi è la prova definitiva di un effetto protettivo contro il SARS-CoV [7], né è chiaro il meccanismo d'azione antivirale esercitato verso il coronavirus, molto diverso da HIV. Un altro farmaco, il remdesivir, un inibitore a largo spettro di RNA polimerasi virali che ha dimostrato una certa efficacia sia in vitro che in modelli animali di SARS e MERS-CoV [8], ha iniziato la fase di sperimentazione clinica sull'uomo e molti altri trials sono in corso in Cina per testare varie opzioni di trattamento [9].

Per la SARS, sono stati preparati efficaci sistemi di immunizzazione passiva basati su anticorpi monoclonali in 9-12 mesi [10, 11], pertanto non si

esclude che lo stesso possa essere fatto anche per il nuovo coronavirus. Nella comunicazione quotidiana si registra una certa confusione sul tema vaccino. È stato ipotizzato, infatti, che grazie alle moderne tecnologie, si potrà arrivare in poche settimane o mesi allo sviluppo di un vaccino. In realtà si dovrebbe parlare di candidati vaccinali che dovranno seguire il percorso predefinito di fase 1 (tossicità), fase 2 (dosaggio, modalità di somministrazione) e fase 3 (efficacia clinica) che, nella migliore delle ipotesi, richiederà almeno un anno, un tempo non realisticamente utile per la presente epidemia, almeno per quanto ne sappiamo fino ad oggi. Pertanto, ci vorrà del tempo per preparare un vaccino che possa essere utilizzato in modo sicuro negli esseri umani, ma i ricercatori di tutto il mondo sono già al lavoro per raggiungere questo obiettivo.

Il contagio

Il 31 dicembre 2019, le autorità sanitarie cinesi notificavano un focolaio di casi di polmonite ad eziologia non nota nella città di Wuhan (Provincia dell'Hubei, Cina) [12]. Molti dei casi erano stati nei giorni precedenti presso un locale mercato del pesce, che, però, vendeva anche altri animali vivi come, per esempio, conigli, serpenti e altri animali selvatici. Il 9 gennaio 2020, il CDC cinese (il Centro per il controllo e la prevenzione delle malattie) identificava un nuovo coronavirus, SARS-CoV-2, come causa eziologica di queste patologie [13].

Le autorità sanitarie cinesi, dopo un primo momento nel quale la diffusione del virus era riconducibile al solo contatto tra uomini e animali, confermavano poi anche la trasmissione interumana.

Le conoscenze attuali ci dicono che, come altre malattie respiratorie, l'infezione da nuovo coronavirus può causare sintomi lievi come raffreddore, mal di gola, tosse e febbre, oppure sintomi più severi quali polmonite, difficoltà respiratorie, sindrome respiratoria acuta grave, insufficienza renale e persino la morte [14].

La prima misura preventiva è stata quella di mettere in isolamento la città di Wuhan ed altri centri urbani vicini (sono coinvolte circa 58 milioni di persone), interrompendo i collegamenti e i trasporti pubblici, con l'obiettivo di far sì

che il virus si diffondesse il meno possibile al di fuori delle aree della Cina in cui si è verificato il maggior numero di contagi [15].

Nei *Situation Reports* pubblicati periodicamente dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), viene fatto il punto della situazione. Il motore principale della trasmissione del nuovo coronavirus SARS-CoV-2 è rappresentato dal contatto con i casi sintomatici, quindi con persone che hanno già contratto l'infezione e manifestato i sintomi della malattia [16].

Il virus si diffonde principalmente attraverso il contatto con le goccioline del respiro delle persone infette, ad esempio quando starnutiscono o tossiscono o si soffiano il naso. Tuttavia, nuovi studi indicano una possibile trasmissione del virus da persone infette con lieve sintomatologia [17].

Il nuovo coronavirus circola prevalentemente in Cina dove è segnalato il maggior numero di casi. Negli altri paesi la maggioranza dei casi riportati ha effettuato recentemente un viaggio in Cina, altri si sono manifestati in coloro che hanno vissuto o lavorato a stretto contatto con persone infettate sempre nelle zone focolaio dell'epidemia [18].

A partire dai primi casi segnalati a inizio gennaio nella città di Wuhan, nel giro di un paio di settimane il nuovo coronavirus COVID-19 si era già esteso in altri Paesi dell'Asia orientale (Giappone, Thailandia, Singapore, Corea del Sud, Taiwan, ecc.) per poi propagarsi nei giorni successivi anche nell'emisfero occidentale del globo (Stati Uniti, Francia, Germania, Italia, Canada, ecc.) e in Australia.

Un recente studio ha descritto le caratteristiche di 138 pazienti ricoverati in un ospedale di Wuhan nel mese di gennaio. Il primo dato che emerge è che la fascia d'età maggiormente colpita è compresa tra i 55 e i 60 anni; i sintomi più frequenti sono febbre, spassatezza, tosse secca, ma anche dolori muscolari, difficoltà respiratorie, mal di gola e, più raramente, nausea e diarrea. In media sono 5 i giorni che passano tra i sintomi più lievi e quelli più importanti, mentre sono 7 i giorni tra i primi sintomi e il ricovero in ospedale. Questo è sicuramente un fattore che ha favorito la diffusione del virus nella provincia dell'Hubei durante le prime settimane dell'epidemia. I pazienti maggiormente a rischio di sviluppare

forme più gravi dell'infezione sono quelli più anziani (da 65 anni in su) e quelli affetti da altre patologie, come ipertensione, diabete e malattie cardiovascolari. Un altro dato importante che riporta questo studio è che molte delle trasmissioni sono avvenute all'interno dell'ospedale, tra operatori sanitari e pazienti già ricoverati per altri motivi [18]. Infine, un'ultima considerazione riguarda il fatto che non sono state descritte forme gravi di infezione da nuovo coronavirus nei soggetti al di sotto dei 15 anni, quindi i bambini risultano (per motivi non ancora ben chiariti scientificamente) meno colpiti da questo virus rispetto agli adulti.

Per quanto riguarda il tasso di letalità, i dati finora disponibili indicano che quello del nuovo coronavirus (circa 3%) è inferiore rispetto a quello osservato per altri coronavirus come SARS (9,6%) e MERS (34,4%), ma la sua contagiosità risulta sensibilmente maggiore [19, 20].

Sono molte le persone contagiate e la maggior parte delle morti registrate si sono verificate in Cina e sempre nella Repubblica Popolare è nato anche il primo bimbo già contagiato dal virus che gli è stato trasmesso dalla madre [21].

Fortunatamente, è molto alto anche il numero delle persone dimesse dagli ospedali che guariscono dalla malattia. Per visualizzare e tracciare in tempo reale l'evoluzione dell'epidemia di coronavirus nel mondo esiste una mappa on-line sviluppata dal Center for Systems Science and Engineering della statunitense Johns Hopkins University che segnala il numero totale dei casi confermati, delle morti e delle guarigioni [22]. Tuttavia, è necessario sottolineare che è nota l'epidemiologia dei casi più gravi, cioè quelli che si recano in ospedale per ricevere cure mediche, mentre non sono disponibili informazioni riguardanti i casi asintomatici o che hanno sintomi lievi o che addirittura non ne hanno e che non richiedono interventi sanitari di rilievo. Pertanto, il numero delle persone contagiate potrebbe essere più alto rispetto al dato attualmente conosciuto.

Il 30 gennaio 2020 l'OMS ha dichiarato che questa epidemia rappresenta un'emergenza di sanità pubblica di rilevanza internazionale [23]. Subito dopo, il Consiglio dei ministri del nostro Paese ha dichiarato lo stato di emergenza sanitaria per l'epidemia da nuovo coronavirus, attivando tutti gli strumenti normativi precauzionali previsti

in Italia in questi casi. È stata istituita una Task force che si riunisce quotidianamente per coordinare, in raccordo continuo con le Istituzioni internazionali competenti, tutte le azioni di controllo da assumere al fine di limitare la diffusione del virus.

I primi due casi di infezione da SARS-CoV-2 nel nostro Paese si sono verificati a Roma: si trattava di due turisti cinesi ricoverati all'Istituto nazionale per le malattie infettive "Lazzaro Spallanzani". Successivamente, è stato confermato anche il primo contagio di un cittadino italiano, poi guarito, che faceva parte del gruppo dei 56 italiani rimpatriati da Wuhan con un volo militare che erano stati prontamente messi in quarantena.

L'Italia sin dalle prime fasi dell'epidemia, ispirandosi al principio di precauzione, ha implementato controlli aeroportuali per i cittadini provenienti dalla zona sede del focolaio epidemico e attuato accurate misure di controllo: misurazione della temperatura corporea, identificazione ed isolamento dei malati, procedure per il rintraccio e il monitoraggio protetto dei contatti stretti che, unitamente ad un efficiente sistema di sorveglianza epidemiologico e microbiologico, possono limitare una ulteriore trasmissione del virus. Inoltre, dopo la conferma dei primi due casi in Italia, il Governo ha ritenuto opportuno interrompere i collegamenti con la Cina. A partire dal 21 febbraio 2020, però, in Italia sono risultati positivi al test del SARS-CoV-2 molti cittadini che non avevano viaggiato in Cina, quindi si tratta di casi non importati ma secondari, ossia derivanti da un contagio avvenuto localmente. Le zone focolaio dell'epidemia sono state messe in quarantena, al fine di limitare gli spostamenti e i contatti sociali e, quindi, l'ulteriore diffusione del virus.

Le raccomandazioni da parte delle autorità sanitarie alla popolazione per ridurre il rischio di infezione da SARS-CoV-2 sono simili a quelle indicate per le altre malattie infettive. Il consiglio è di lavarsi spesso le mani con acqua e sapone (per almeno venti secondi), di starnutire e tossire in un fazzoletto o portandosi l'incavo del gomito alla bocca (in questo modo non si contaminano gli oggetti che si toccano con le mani e, allo stesso tempo, non ci si porta nulla alla bocca dopo aver toccato superfici potenzialmente contaminate) e

di evitare il contatto stretto con soggetti affetti da infezioni respiratorie acute. Inoltre, si raccomanda di non mangiare carne cruda o poco cotta e di evitare il contatto con animali selvatici e di fattoria [16].

All'Istituto Spallanzani, intanto, è stato isolato il virus responsabile dell'infezione. Ciò consentirà di avere la sequenza genetica, che potrà essere confrontata con i ceppi già isolati anche in altri Paesi come Cina, Francia e Australia, e di poter disporre del virus vivo in coltura. Questo risultato sarà utile per mettere a punto strategie terapeutiche e definire eventuali target vaccinali. Al momento, infatti, non esistono terapie specifiche, vengono curati i sintomi della malattia (la cosiddetta terapia di supporto) in modo da favorire la guarigione, ad esempio fornendo supporto respiratorio [24].

Secondo l'OMS il rischio di diffusione del virus a livello globale è alto e la probabilità che si verifichino ulteriori casi importati in Europa è considerata medio-alta, pertanto, tutti i Paesi sono stati incoraggiati a rafforzare le misure preventive, la sorveglianza attiva, l'individuazione precoce dei casi e il loro isolamento seguendo adeguate procedure gestionali e di contenimento [24].



- [1] A. E. Gorbalenya *et al.*, "Severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: The species and its viruses - a statement of the Coronavirus Study Group" *bioRxiv*, 2020. doi: 10.1101/2020.02.07.937862.
- [2] D. Paraskevis, E. G. Kostaki, G. Magiorkinis, G. Panayiotakopoulos, G. Sourvinos, S. Tsiodras, "Full-genome evolutionary analysis of the novel corona virus (2019-nCoV) rejects the hypothesis of emergence as a result of a recent recombination event.", *Infect Genet Evol*, 2020. doi: 10.1016/j.meegid.2020.104212:104212.
- [3] M. Hoffmann, H. Kleine-Weber, N. Krueger, M. A. Mueller, C. Drosten, S. Poehlmann. "The novel coronavirus 2019 (2019-nCoV) uses the SARS-coronavirus receptor ACE2 and the cellular protease TMPRSS2 for entry into target cells", *bioRxiv*, 2020. doi: 10.1101/2020.01.31.929042.
- [4] S. Bertram *et al.* "Influenza and SARS-coronavirus activating proteases TMPRSS2 and HAT are expressed at multiple sites in human respiratory and gastrointestinal tracts", *PLoS One*, 2012;7:e35876.
- [5] G. Li *et al.*: Coronavirus infections and immune responses , *J Med Virol*. vol? (2020) 1.
- [6] V. Corman, T. Bleicker, S. Brünink, C. Drosten, M. Zambon, "Diagnostic detection of Wuhan coronavirus 2019 by real-time RT-PCR. Geneva", World Health Organization, 2020 January 13 (<https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/wuhan-virus-assay-v1991527e5122341d99287a1b17c111902.pdf>).
- [7] C. M. Chu *et al.*, Group HUSS: Role of lopinavir/ritonavir in the treatment of SARS: initial virological and clinical findings , *Thorax* **59** (2004) 252.
- [8] T. P. Sheahan *et al.*: Comparative therapeutic efficacy of remdesivir and combination lopinavir, ritonavir, and interferon beta against MERS-CoV. , *Nat. Comm.* **11** (2020) 222.
- [9] G. Li, E. De Clercq, "Therapeutic options for the 2019 novel coronavirus (2019-nCoV)" *Nature Reviews Drug Discovery*. (2020) doi: 10.1038/d41573-020-00016-0.
- [10] J. Meulen *et al.*: Human monoclonal antibody as prophylaxis for SARS coronavirus infection in ferrets , *Lancet* **363** (2004) 2139.
- [11] E. Traggiai *et al.*: An efficient method to make human monoclonal antibodies from memory B cells: potent neutralization of SARS coronavirus , *Nat Med* **10** (2004) 871.
- [12] Wuhan Municipal Health Commission, 31 December 2019. (<http://wjw.wuhan.gov.cn/front/web/showDetail/2019123108989>).
- [13] European Centre for Disease Prevention and Control. *Pneumonia cases possibly associated with a novel coronavirus in Wuhan, China 9 January 2020*. ECDC: Stockholm; 2020. (<https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/Threat-assessment-Pneumonia-cases-possibly-associated-to-a-novel-coronavirus-in-Wuhan-China.pdf>).
- [14] S. R. Weiss, J. L. Leibowitz: Coronavirus pathogenesis , *Adv. Virus Res.* , (81) 2011. 85
- [15] R. Horton: Online: 2019-nCoV outbreak-early lessons , *The Lancet* **395** (2020) 395.
- [16] Novel coronavirus (2019-nCoV): Situation report - 12, 1 February 2020. Geneva: World Health Organization, 2020. (https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200201-sitrep-12-ncov.pdf?sfvrsn=273c5d35_2).
- [17] L. Zou *et al.*: SARS-CoV-2 Viral Load in Upper Respiratory Specimens of Infected Patients , *N. Engl. J. Med.* (2020) doi: 10.1056/NEJMc2001737.
- [18] D. Wang, B. Hu, C. Hu, F. Zhu, X. Liu, J. Zhang, B. Wang , H. Xiang, Z. Cheng, Y. Xiong, Y. Zhao, Y. Li, X. Wang, Z. Peng. : Clinical Characteristics of 138 Hospitalized Patients With 2019 Novel Coronavirus-Infected Pneumonia in Wuhan, China. , *JAMA* (2020) doi:10.1001/jama.2020.1585..
- [19] J. T. Wu, K. Leung, G. L. Leung: Nowcasting and forecasting the potential domestic and international

spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study , *The Lancet* (2020) doi: 10.1016/S0140-6736(20)30260-9..

- [20] Z. Cao, Q. Zhang, X. Lu, D. Pfeiffer, Z. Jia, H. Song, D. D. Zeng: Estimating the effective reproduction number of the 2019-nCoV in China , *medRxiv* (2020) doi:10.1101/2020.01.27.20018952.
- [21] H. Chen *et al.*: Clinical characteristics and interuterine and vertical transmission potential of COVID-19 infection in nine pregnant women: a retrospective review of medical records. , *The Lancet* (2020) doi.1016/S0140-6736(20)30360-3.
- [22] <https://gisanddata.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/bda7594740fd402994299423467b48e9ecf6>
- [23] Statement on the second meeting of the International Health Regulations (2005) Emergency Committee regarding the outbreak of novel coronavirus (2019-nCoV), 30 January 2020. Geneva: World Health Organization, 2020. ([https://www.who.int/news-room/detail/30-01-2020-statement-on-the-second-meeting-of-the-international-health-regulations-\(2005\)-emergency-committee-regarding-the-outbreak-of-novel-coronavirus-\(2019-ncov\)](https://www.who.int/news-room/detail/30-01-2020-statement-on-the-second-meeting-of-the-international-health-regulations-(2005)-emergency-committee-regarding-the-outbreak-of-novel-coronavirus-(2019-ncov))).
- [24] European Centre for Disease Prevention and Control. Outbreak of acute respiratory syndrome associated with a novel coronavirus, China: first local transmission in the EU/EEA - third update. 31 January 2020. ECDC: Stockholm; 2020. (https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/novel-coronavirus-risk-assessment-china-31-january-2020_0.pdf).



Antonella De Donno: professore ordinario di Igiene e Medicina Preventiva (MED/42) presso l'Università del Salento. Ha conseguito la laurea in Scienze Biologiche e la Specializzazione in Microbiologia Medica e Virologia. Coordina un gruppo di ricerca che opera presso il Laboratorio di Igiene del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche ed Ambientali dell'Università del Salento. Le linee di ricerca sviluppate sono riconducibili alle seguenti aree tematiche: epidemiologia e prevenzione delle malattie infettive prevenibili con vaccinazione; sviluppo e standardizzazione di procedure molecolari da applicare al controllo delle matrici ambientali (acque e alimenti) per il rilevamento di virus; applicazione di studi epidemiologici analitici e sperimentali di interazione ambiente-salute umana; studio di biomarcatori di effetto biologico precoce (micronuclei) e stima del rischio sanitario. È referente

per l'Università del Salento della Rete di Prevenzione Oncologica Leccese (attualmente Centro Salute Ambiente Lecce) e del Centro Interuniversitario per la Ricerca sull'Influenza e le altre Infezioni Trasmissibili (C.I.R.I.-I.T.). Autrice di più di 150 articoli scientifici pubblicati su riviste internazionali, ha partecipato e coordinato progetti di ricerca in ambito locale, nazionale e internazionale e gestito trials clinici.

Alessandra Panico: ha conseguito la laurea in Biologia presso l'Università del Salento e attualmente svolge il suo dottorato di ricerca presso il laboratorio di Igiene del Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche ed Ambientali (Di.S.Te.B.A.) dell'Università del Salento. Si occupa di epidemiologia molecolare e prevenzione delle malattie cronico-degenerative. In particolare, studia nuovi strumenti per la valutazione dei rischi sanitari e il monitoraggio degli indicatori di effetto biologico precoce (danno al DNA e presenza di micronuclei) nella mucosa orale dei bambini in relazione a contaminanti ambientali e stili di vita.

Cause ed effetti dei cambiamenti climatici

Roberto Battiston

*Dipartimento di Fisica, Università di Trento,
Trento Institute for Fundamental Physics and Applications (TIFPA)*

In questo articolo cerco di dare una semplice panoramica sul tema dei cambiamenti climatici. Una corretta informazione di base deve fare parte del bagaglio culturale di ogni persona che voglia essere in grado di discutere di questi temi. Ce n'è davvero bisogno: sono moltissimi, infatti, gli interessi che rallentano le azioni correttive o addirittura contestano l'esistenza del problema. La scienza ha da tempo fatto la sua parte nel chiarire cosa sta succedendo e non saranno mai troppe le persone che siano in grado di passare in modo autorevole e informato questo messaggio nella società.

Listen to science!

I venerdì per il futuro si susseguono coinvolgendo un numero sempre maggiore di ragazzi e adulti, la mobilitazione inizia a coinvolgere istituzioni. In meno di due anni Greta ne ha fatta di strada: dalla protesta solitaria davanti al parlamento svedese alle decine di milioni di persone che si mobilitano in tutto il mondo. Sta cambiando qualcosa, si sta veramente mettendo in moto un movimento che potrà portare ad una azione globale, coerente e tempestiva per fermare la deriva climatica creata dall'uomo ed i devastanti effetti di cui abbiamo fino ad ora avuto un numero crescente di impressionanti, assaggi?

Siamo in moltissimi ad augurarcelo, non solo, ad impegnarci per un cambiamento, anche

culturale, ormai non rimandabile. Cambiamento necessario ma non sufficiente per passare ad una fase operativa: ci sono e ci saranno, infatti, forti opposizioni, che si declinano nei modi più disparati, incluso l'attacco violento, sessista, generazionale nei confronti di Greta e di coloro che la seguono e sostengono le stesse idee. Dove non ci si spinge all'attacco volgare, si argomenta stravolgendo i dati climatici e gridando al complotto.

Come se il clima e il suo cambiamento fosse una questione di opinioni o qualcosa di troppo complesso per essere discusso in modo rigoroso.

O, peggio, una occasione di notorietà per ottenere una intervista o un invito ad un talk-show televisivo; vi sono ormai più esperti in clima in Italia che allenatori di calcio, che è tutto dire.

Greta è però portatrice di un messaggio di una semplicità rivoluzionaria: "listen to science", non ascoltate me, ascoltate la scienza. E allora facciamo due passi per rinfrescare a noi stessi di che cosa stiamo parlando, che cosa ci dice, insomma, la scienza.

Uno sguardo lungo

Se guardiamo un quadro con il naso attaccato alla tela vediamo dei tratti sfuocati. Per avere una visione chiara delle cose, occorre scegliere il giusto punto di vista. Per esempio guardando cosa è successo al clima della Terra nel corso degli ultimi 500 milioni di anni.

Impossibile? No, la scienza ce lo permette.

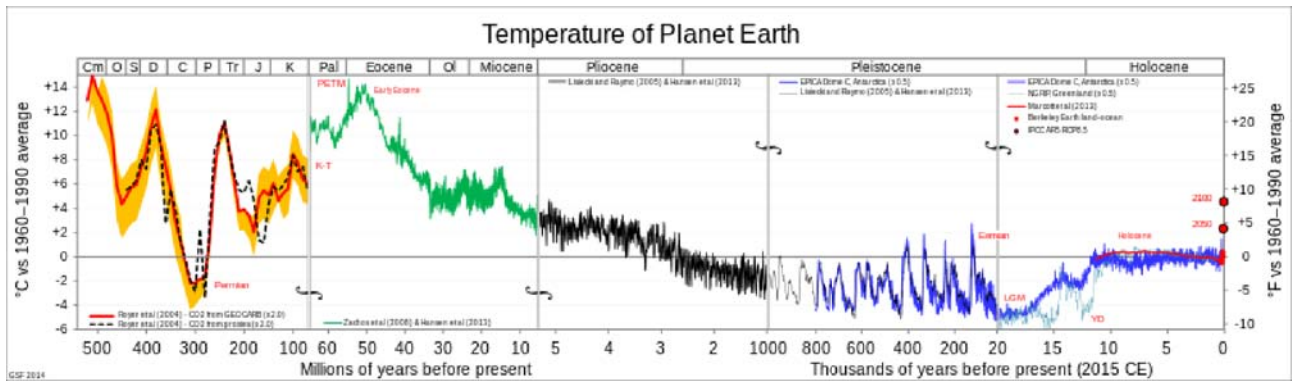


Figura 1: Analisi paleoclimatica dell'andamento della temperatura negli ultimi 500 milioni di anni [1]. La linea orizzontale che definisce lo zero indica la temperatura media della seconda metà del secolo scorso.

La paleoclimatologia è il campo di ricerca che ricostruisce gli elementi del clima, in particolare la temperatura delle epoche passate, usando una grande varietà di tecniche consolidate sviluppate nel corso del tempo. Tra le molte cose si studiano i depositi marini e gli strati del ghiaccio del polo sud, archivi fedeli di quello che è successo al clima migliaia o milioni di anni fa.

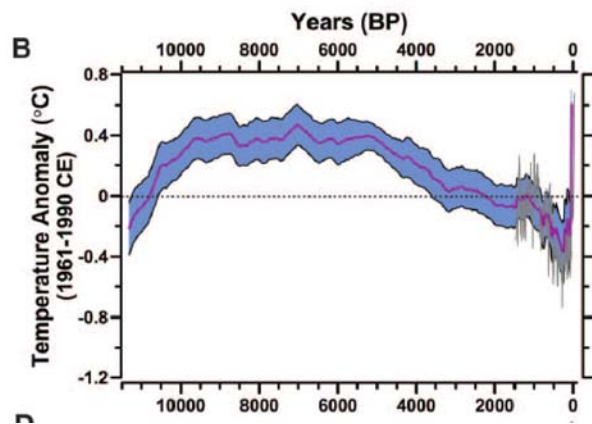


Figura 2: Analisi paleoclimatica dell'andamento della temperatura negli ultimi 11 mila di anni [2].

La Figura 1 riporta la temperatura media globale del pianeta negli ultimi 500 milioni di anni, riportata rispetto alla media della seconda metà del secolo scorso! La scala orizzontale non è lineare, altrimenti sarebbe impossibile avere una visione di insieme: il primo quadrante copre 400 milioni di anni, il secondo 40 milioni di anni, il terzo 4 milioni di anni, il quarto un milione di anni, il quinto 20.000 anni arrivando fino ai giorni nostri. Possiamo notare molte cose nell'andamento della temperatura. In epoche lontane, nel Permiano, la temperatura ha oscillato, più volte, complessivamente di 18 gradi,

nell'ambito di qualche centinaio di milioni di anni. In quel lungo periodo deve essere successo di tutto: estinzioni di massa di piante ed animali, sviluppo di specie diverse, migrazioni massicce, completo scioglimento (e riformazione) di tutti i ghiacci del pianeta, con la variazione di centinaia di metri del livello del mare.

Noi però non c'eravamo.

Dal Pliocene in poi, cioè da quando apparvero gli ominidi, circa 5 milioni di anni fa, la temperatura ha continuato a scendere, partendo da circa 4 gradi sopra i valori attuali, e arrivando a 4 gradi sotto il valore attuale nei periodi più freddi del Pleistocene, l'ultimo milione di anni in cui si è sviluppato l'Homo Erectus. Negli ultimi 60 mila anni, periodo in cui si è affermato l'Homo Sapiens, abbiamo assistito ad un lungo periodo freddo e arido, seguito da una risalita ed un periodo di estrema stabilità (entro più o meno un grado) negli 11 mila anni cui si sono sviluppate tutte le civiltà storiche. Notiamo nel grafico due puntini rossi all'estrema destra, corrispondenti al 2050 e al 2100, un periodo brevissimo su questa scala, in cui improvvisamente la temperatura potrebbe superare quella che c'era all'inizio del Pliocene, cinque milioni di anni fa quando i mari erano 25 metri più alti di oggi.

Rivediamo i dati su una scala temporale di 11 mila anni, Figura 2: si conferma una variabilità molto modesta entro più o meno 0.5 gradi. La zona in azzurro chiaro dà una idea dell'incertezza sui valori riportati (poco più di un decimo di grado). A destra in fondo c'è il solito piccolo rosso che schizza sopra i 0.4 gradi, crescendo di 0.8 gradi in un intervallo di tempo molto breve.

Concentriamoci ora sugli ultimi 1500 anni, co-

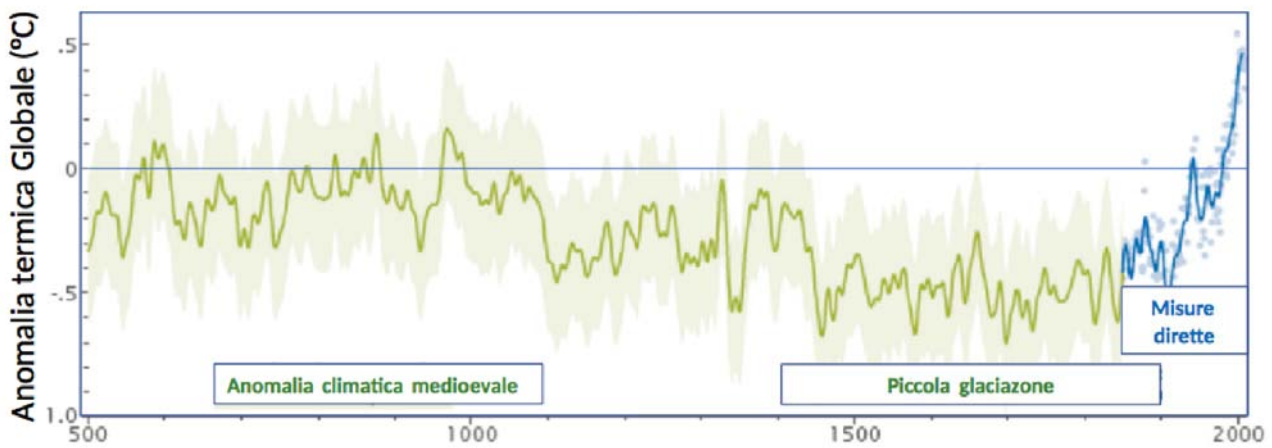


Figura 3: Andamento della temperatura negli ultimi 1500 anni ricavato da dati paleoclimatici (linea verde) confrontato con l'andamento basato su misure strumentali moderne (linea blu). I dati indicano come la temperatura globale sia più alta oggi di quanto non sia stata almeno negli ultimi 15 secoli (adattato da Mann et al. 2008 [3]). La linea dello zero indica la temperatura media degli anni '70 del secolo scorso.

me riportato nel grafico della Figura 3. Le oscillazioni sono contenute all'interno di circa mezzo grado, tranne quando schizzano verso l'alto di quasi un grado nell'ultimo secolo. Notiamo in questo grafico che il periodo caldo fra il 900 d.C. ed il 1300 d.C., chiamato Anomalia Climatica Medioevale, corrisponde ad un valore di un paio di decimi più alto di quello della fine del secolo scorso, ed il periodo freddo corrispondente alla piccola glaciazione avvenuta tra il 1400 ed i 1900, corrisponde a valori di 3-4 decimi di grado sotto il valore di quello della fine del secolo scorso. Si tratta di variazioni piuttosto piccole ma che hanno causato grandi cambiamenti del clima.

Cosa si impara da questi dati?

In primo luogo, la nostra specie si è sviluppata in un contesto particolarmente stabile dal punto di vista climatico.

Poi, che tutte le civiltà esistite su questo pianeta si sono sviluppate nel corso di 11 mila anni di straordinaria stabilità climatica. Le piccole variazioni della temperatura globale, corrispondenti a meno di mezzo grado, hanno portato a cambiamenti climatici molto importanti, periodi caldi o mini glaciazioni, che hanno influenzato sostanzialmente l'andamento delle civiltà del tempo.

Infine, che non vi è mai stata in tutta la storia del clima, una variazione così rapida come ai giorni nostri! Durante le glaciazioni la temperatura variava di 1 grado ogni mille anni, nell'ul-

timo secolo è salita di 0.8 gradi (8 volte di più), e oggi sta salendo di 0.15-0.20 gradi ogni dieci anni, 20 volte di più!

È un fenomeno che non è mai stato osservato in tutta la storia del pianeta. A cosa è dovuto? Una ipotesi molto ragionevole è che la causa sia la rivoluzione industriale che in meno di due secoli ha moltiplicato enormemente l'impatto dell'uomo sul pianeta (aria, acqua, materie prime, agricoltura). Prima della fine del 1800, l'impatto umano sul clima non poteva che essere molto limitato.

Ma se vogliamo essere rigorosi, gli indizi fino ad ora raccolti non bastano a dimostrare che l'influenza umana sia sufficiente a modificare la temperatura. Vogliamo quindi assicurarci che non siano piuttosto in corso fenomeni naturali, ad esempio dovuti al Sole o a lenti movimenti periodici della rotazione terrestre.

Il nostro amico Sole

Il Sole è la fonte dell'energia del nostro pianeta. Il suo flusso di energia è molto stabile: esso è cresciuto di meno dell'1% in 100 milioni di anni. In un secolo questa lenta variazione ha portato ad una crescita di meno di un milionesimo dell'1%; assolutamente trascurabile. In confronto è molto più grande, ma sempre trascurabile, il cambiamento di circa 1 per mille legato ai cicli solari che si susseguono ogni 11 anni. Insomma

IPCC

L'**Intergovernmental Panel on Climate Change** (IPCC) è il gruppo di lavoro delle Nazioni Unite per coordinare le scienze legate ai cambiamenti climatici. L'IPCC è stato creato per fornire ai politici informazioni affidabili sui cambiamenti climatici, le loro implicazioni e i potenziali futuri rischi, a anche per pianificare azioni di adattamento e attenuazione dei fenomeni.

la nostra stella si comporta benissimo, sulla scala temporale che ci riguarda.

Anche le oscillazioni periodiche delle caratteristiche orbitali della Terra, descritte nella teoria di Milankovitch (modifiche dell'asse di rotazione, assestamenti delle masse liquide o solide) [4] hanno periodi lunghi rispetto al secolo in cui è stato osservato il drastico cambiamento della temperatura.

La risposta della Terra alla radiazione solare varia invece enormemente di più ed in tempi molto brevi: è questa la vera causa dei cambiamenti climatici.

Lo spettro di luce solare che raggiunge la Terra ha il picco nella luce visibile (44%), ma ha un'importante componente infrarossa (53%) e una piccola componente ultravioletta (3%), che invece i nostri sensi non percepiscono. Cosa accade a questa energia una volta raggiunta la Terra? Il 35% dell'energia viene riflesso nello spazio, il 51% assorbito dalla superficie, che ne riemette il 17% nello spazio e il 34% nell'atmosfera, e il 14% assorbito dall'atmosfera, che ne riemette però il 48% nello spazio, dovendo irradiare anche la parte ricevuta dalla superficie.

Qualsiasi fattore modifichi questi numeri anche solo dell'1% ha un impatto sul clima.

Talvolta in senso positivo: l'esplosione del Monte Pinatubo nel 2001 ha inserito nell'alta atmosfera, la troposfera, grandi quantità biossido di zolfo schermando la Terra dalla luce solare. Di conseguenza la temperatura del pianeta per circa tre anni è tornata ai valori pre-industriali!

Talvolta in senso negativo: nell'ultimo secolo l'aumento della densità dei gas serra nella parte bassa dell'atmosfera è stato molto importante,

+35%, e repentino. Nello stesso, brevissimo periodo di tempo, abbiamo assistito ad un aumento di 0.8 gradi, e ora si va al ritmo di 0.15-0.20 gradi ogni dieci anni. Di questo passo, potrà aumentare di 2-6 gradi entro la fine del XXI secolo con conseguenze disastrose.

La pistola fumante: il ciclo globale del carbonio

Perché parliamo tanto del carbonio quando discutiamo di mutamenti climatici? Il carbonio è un elemento come un altro. È abbondante sulla Terra, anche se non rientra nei primi otto elementi che compongono il nostro pianeta. La maggior parte del carbonio è presente nelle rocce ed è inerte nelle scale temporali di interesse umano, secoli o millenni. Il resto del carbonio è accumulato nella forma di CO₂ (anidride carbonica) nell'atmosfera (2%), nella biomassa e nel suolo (5%), come combustibile fossile in vari giacimenti geologici (8%) e sciolto in forma ionica negli oceani (85%).

Il carbonio che interessa il clima è quello sciolto in forma gassosa.

L'anidride carbonica nell'atmosfera ha infatti un ruolo fondamentale nel determinare la quantità di calore che la Terra riceve dal Sole, nella forma di radiazione scambiata con la nostra stella e con lo spazio profondo. I gas presenti nell'atmosfera, in particolare la CO₂, assorbono l'energia irradiata dalla Terra e la irradiano in tutte le direzioni. L'energia irradiata verso il basso riscalda la superficie della Terra e la bassa atmosfera. Più è grande la quantità di CO₂ più aumenta la quantità di radiazione catturata dall'atmosfera e irradiata verso la Terra; si tratta del cosiddetto effetto serra. Lo stesso accade per il metano, CH₄, un altro gas serra molto importante che fa parte del ciclo globale del carbonio.

Solo nel periodo 2007-2016, l'umanità ha immesso nell'atmosfera, come CO₂, la quantità di 10.7 Gigatonnellate (GtC) ogni anno (una GtC = 10⁹ tonnellate di carbonio = 10¹⁵ grammi). È principalmente il risultato della combustione di fossili primari (~9.4 GtC/yr) e del cambiamento di uso delle superfici (~1.3 GtC/yr). Si stima che l'oceano abbia assorbito il 22% di questo carbonio (~2.4 GtC/yr) e che la biosfera terrestre

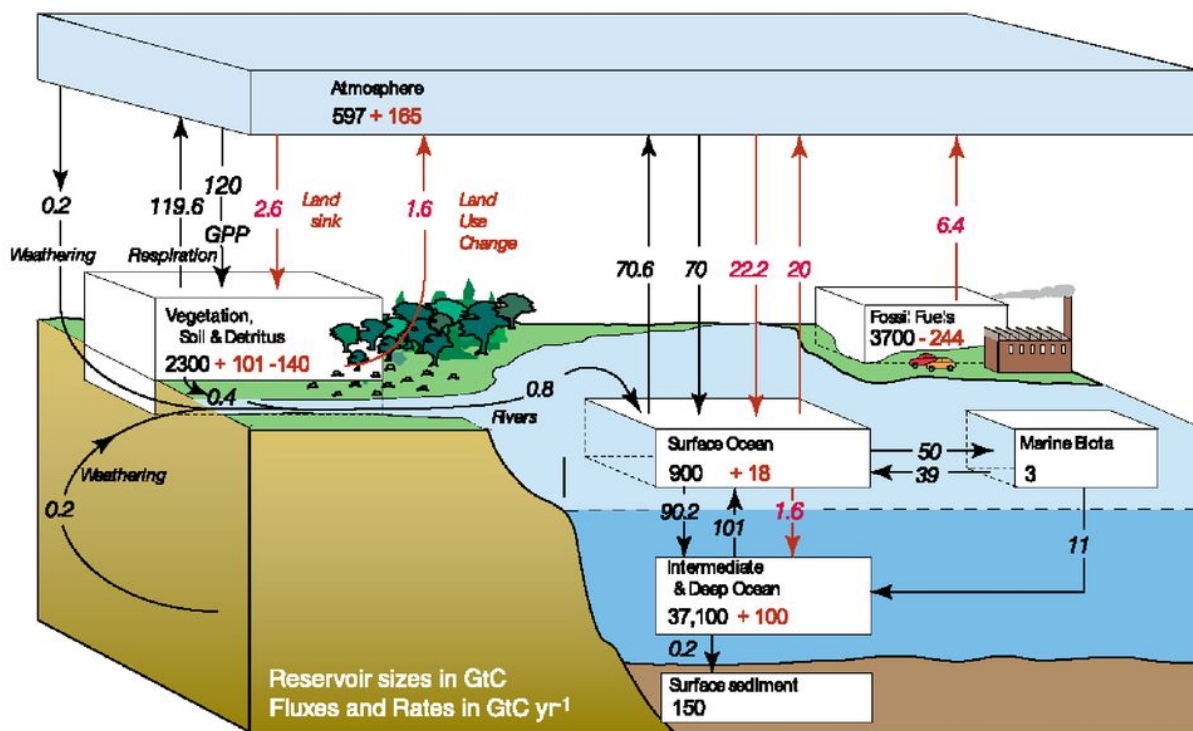


Figura 4: Dall'IPCC AR4 (2007): il ciclo globale del carbonio per gli anni '90, che mostra i principali ussi annuali in GtC/yr: ussi pre-industriali naturali in nero e ussi antropogenici in rosso (modificato da Sarmiento e Gruber, 2006, [6] con variazioni nelle dimensioni del campione da Sabine et al., [7]). I ussi lordi generalmente hanno incertezze superiori a $\pm 20\%$, ma sono stati mantenuti importi frazionari per raggiungere un equilibrio complessivo quando si includono stime in frazioni di GtC/yr per trasporto oviale, agenti atmosferici, sepoltura in acque profonde, ecc. "GPP" è il lordo annuale (terrestre) della produzione primaria. Il contenuto di carbonio atmosferico e tutti i ussi cumulativi dalla fine del 1750 risalgono alla fine del 1994.

abbia assorbito un altro 28% (~ 3.0 GtC/yr), mentre il 6% delle emissioni finisce in altre forme di assorbimento [5].

Negli ultimi decenni, quindi, solo $\sim 50\%$ del carbonio emesso è rimasto nell'atmosfera influenzando il riscaldamento globale. Anche se rimangono delle incertezze nel bilancio globale del carbonio, è chiaro che vari processi naturali sono al lavoro per ridurre significativamente il ritmo al cui la quantità di carbonio si accumula nell'atmosfera.

Risulta però altrettanto chiaro che i processi naturali non sono sufficienti a limitare la crescita della CO_2 nell'atmosfera; l'andamento futuro del cambiamento climatico, dipenderà in modo essenziale dal bilancio tra le **sorgenti umane** e l'**accumulo nei depositi naturali** come gli oceani e

la biosfera terrestre.

Prima della rivoluzione industriale il contributo umano era trascurabile rispetto ai processi naturali, che rappresentavano quindi un meccanismo di stabilizzazione importante. Oggi le cose sono cambiate.

La reazione chimica fondamentale che regola questi processi è la seguente:



Se è percorsa verso destra il carbonio viene fissato tramite la fotosintesi, se è percorsa verso sinistra, si tratta dei processi di respirazione o di combustione dove il carbonio viene liberato in forma gassosa. Il ciclo globale del carbonio coinvolge una serie complessa di processi biologici, chimici e fisici. Lo schema mostrato nella Figura

4 (IPCC Report AR4) [6, 7], mostra le principali riserve di carbonio in gigatonnellate di carbonio, GtC e i flussi principali in GtC per anno, GtC/yr. Si tratta delle stime migliori disponibili per gli anni '90: questi valori sono aggiornati annualmente dal Global Carbon Budget project [5] e sono parte integrante dei rapporti IPCC (Cias et al. 2013) [8].

È interessante studiare in dettaglio questo schema. I valori in nero rappresentano i valori preindustriali dello scambio di carbonio. Quelli in rosso sono il contributo addizionale umano. Le frecce danno il segno del flusso, i numeri assoluti, con il loro segno, danno la quantità accumulata.

Ad esempio, all'inizio degli anni '90, l'atmosfera aveva accumulato 165 GtC rispetto al periodo preindustriale e stava accumulando $-2.6 + 1.6 - 22.2 + 20 + 6.4 = +3.2$ GtC/yr all'anno come risultato della somma dei 5 numeri in rosso; notiamo che nel periodo preindustriale lo scambio tra atmosfera e superficie era pari a $-0.2 + 119.6 - 120 + 70.6 - 70 = 0$ GtC/yr, vale a dire in equilibrio.

Allo stesso modo l'oceano aveva accumulato 118 GtC rispetto al periodo preindustriale e stava accumulando $+22.2 - 20 = +2.2$ GtC/yr all'anno come risultato di 2 numeri in rosso; nel periodo preindustriale il flusso verso l'oceano era $+0.8 - 70.6 + 70 = +0.2$ GtC/yr, anch'esso in sostanziale equilibrio, in ogni caso non verso l'atmosfera.

Infine il terzo serbatoio, quello della vegetazione e del suolo, aveva diminuito di 39 GtC il suo contenuto ($+101-140 = -39$ GtC) ma stava recuperando accumulando $+2.6-1.6=1$ GtC/yr. Anch'esso prima della rivoluzione industriale era in equilibrio: $-119.6-0.4+120=0$ GtC/yr.

Il risultato inequivocabile dello studio del ciclo globale del carbonio è quindi che:

1. l'uomo ha cambiato l'equilibrio del ciclo del carbonio inserendo nell'atmosfera una grande quantità di CO₂ e altri gas che producono effetto serra: questo è il nocciolo del problema;
2. metà di questo contributo si accumula nell'atmosfera, questa è la cattiva notizia;
3. metà di questo contributo ritorna negli oceani e nel carbonio accumulato nella biomassa. Questa è la buona notizia anche se non

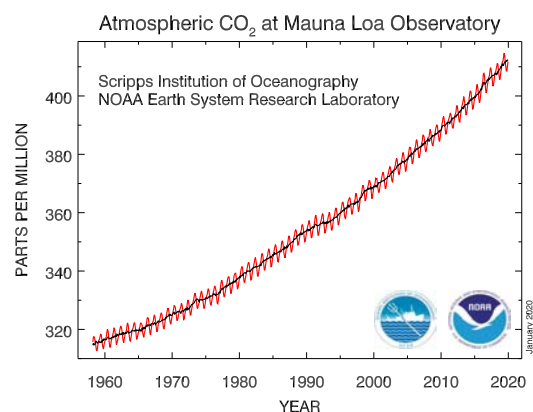


Figura 5: andamento della CO₂ nell'atmosfera [9].

dobbiamo trascurare gli effetti dell'acidificazione della massa oceanica sullo stato di salute della biomassa marina.

L'aumento della CO₂ atmosferica viene monitorato direttamente dagli anni '50. Nella Figura 5, osserviamo sia il ciclo stagionale, legato all'andamento della biosfera nell'emisfero Nord, sia la crescita ininterrotta del valore assoluto [9].

I contributi alla CO₂ nell'atmosfera sono dovuti principalmente alle seguenti sorgenti.

1. *Combustione di combustibili fossili.* Negli anni '90 questa sorgente ha emesso 6.4 GtC/yr, nel decennio 2007-2016, 9.4 GtC/yr. Nel periodo 2000-2009, le emissioni sono aumentate del 3.3% per anno, principalmente a causa della crescita delle emissioni dei paesi in via di sviluppo. Nel periodo 2012-2016, la crescita si è significativamente ridotta, ma rimane consistente con lo scenario peggiore usato nel Report IPCC AR5 (RCP8.5) [10].
2. *Riduzione della superficie ricoperta da foreste per gli scopi dell'agricoltura o dell'aumento delle aree abitate.* Valutare questo processo con precisione non è facile data la differenza delle condizioni a cui esso avviene, ma il risultato è certamente rilevante ai fini del bilancio complessivo.
3. *Modifica delle condizioni dello scambio di CO₂ con gli oceani.* Ad esempio un aumento della temperatura del mare porterebbe ad una diminuzione della capacità di assorbire CO₂.

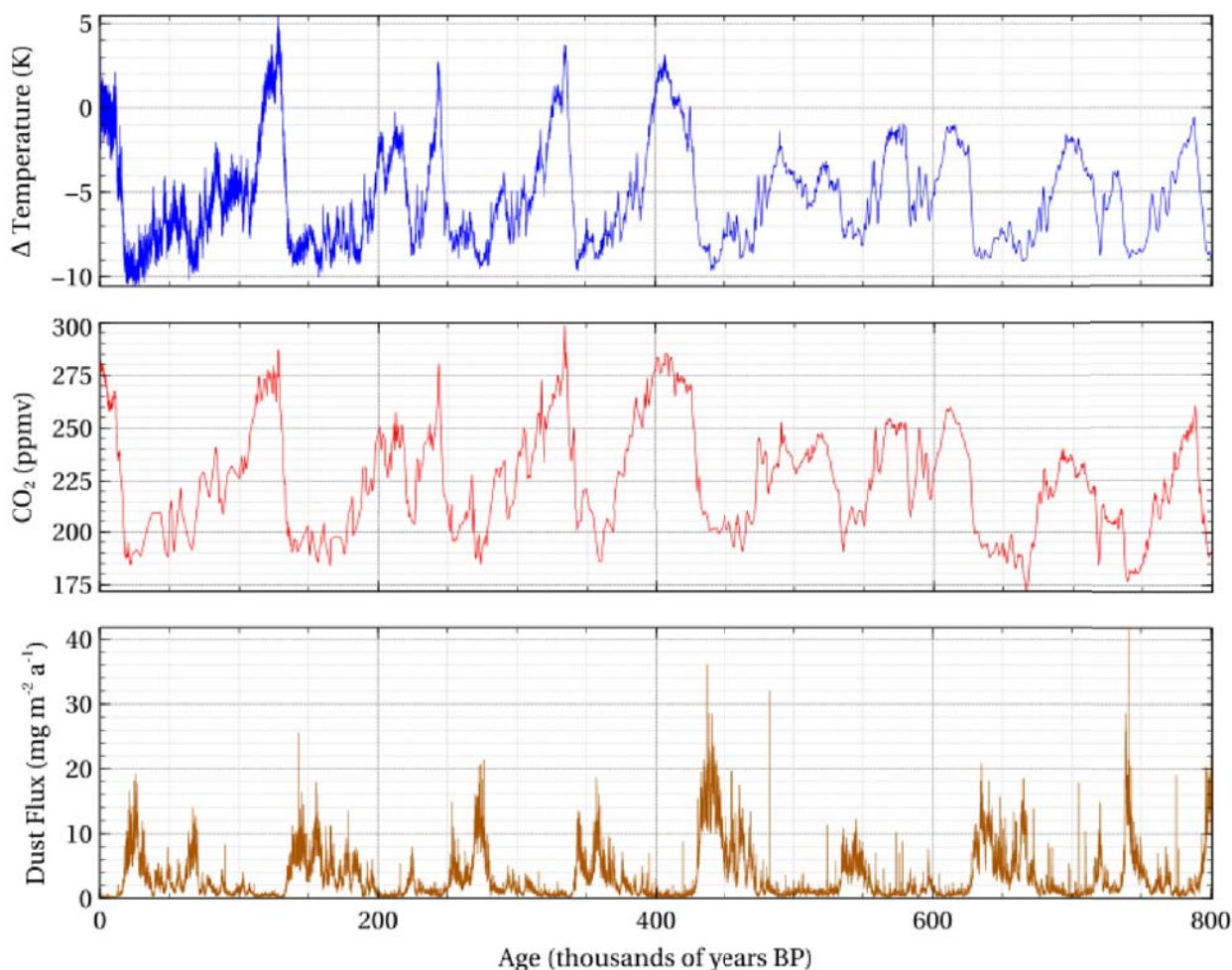


Figura 6: Andamento della temperatura nell'atmosfera (grafico superiore), della CO₂ (grafico centrale) e della densità di polvere (grafico inferiore) negli ultimi 800 mila anni [11, 12].

Appare chiaro che i punti 1 e 2 possono essere influenzati da politiche industriali e sociali tese a contenere il danno ambientale, mentre per il punto 3 è molto più difficile prevedere forme di intervento.

Ma è davvero l'uomo a cambiare le condizioni del clima?

Dopo quello che è stato detto nel paragrafo precedente sembrerebbe ci sia poco da discutere. L'impronta dell'uomo sul clima è dovuta all'immissione di grandi quantità di gas serra nell'atmosfera, con l'effetto di intrappolare negli strati bassi dell'atmosfera una parte del calore che ci giunge dal Sole.

Che la presenza dei gas serra faccia aumentare la temperatura del pianeta lo si desume da un

gran numero di osservazioni. Abbiamo visto in precedenza come la paleoclimatologia ci permetta di ricostruire l'andamento della temperatura e della presenza di gas serra nell'atmosfera nel corso degli ultimi centinaia di migliaia di anni. Nel pannello centrale della Figura 6 vediamo la concentrazione di anidride carbonica (CO₂) nell'atmosfera negli ultimi 400 mila anni. In quello superiore l'andamento della temperatura media nello stesso periodo. Occorre fare attenzione perché la scala dei tempi è rovesciata, lo zero corrisponde ad oggi e via via che si va a destra si va indietro nel tempo. Si può notare la perfetta corrispondenza tra gli aumenti della CO₂ nell'aria e gli aumenti della temperatura. In questa figura, l'aumento della CO₂ e della temperatura nell'ultimo secolo non è visibile a causa della scala supercompressa, ma è evidente nei grafici espansi.

Come abbiamo ricordato, nonostante le molteplici evidenze legate all'immissione dei gas serra nell'atmosfera, negli anni '80-'90 c'è stato chi ha sostenuto che l'immissione di CO₂ nell'atmosfera fosse l'effetto e non la causa del riscaldamento globale.

In linea di principio, infatti, una correlazione tra due quantità non stabilisce quale sia la causa e quale l'effetto: è l'immissione dei gas nell'atmosfera, originata dall'attività umana, la causa dell'aumento della temperatura, oppure è il riscaldamento naturale del pianeta che aumenta la CO₂ nell'atmosfera liberando gas serra intrappolati nel suolo o negli oceani? Visti i numeri presentati nella Figura 4, un piccolo riscaldamento del mare, potrebbe infatti avere l'effetto di immettere nell'atmosfera grandi quantità di CO₂.

È interessante a tal fine ricordare gli studi effettuati negli anni '90 da Benjamin Santer, un climatologo del Lawrence Livermore National Laboratory in California i cui risultati contribuirono in modo decisivo a confermare l'evidenza dell'impronta dell'attività umana sul clima [13].

Santer studiò l'andamento nel tempo della temperatura delle diverse parti della colonna atmosferica. L'idea è piuttosto semplice: se la causa è il riscaldamento del pianeta Terra da parte del Sole e la conseguenza sono i gas serra nell'atmosfera, la colonna atmosferica dovrebbe seguire l'andamento termico del pianeta. Viceversa, se il riscaldamento è dovuto all'inserimento dei gas serra nell'atmosfera creando un sottile velo in grado di intrappolare nella troposfera, la parte bassa dell'atmosfera, parte della radiazione emessa dalla Terra, l'andamento della temperatura della parte alta dell'atmosfera, la stratosfera, dovrebbe essere diverso, in quanto non sarebbe raggiunta da parte dell'emissione termica.

Santer trovò in effetti che negli ultimi cinquant'anni, mentre la temperatura della bassa troposfera cresceva al ritmo della temperatura della Terra (Figura 7c), la temperatura della bassa stratosfera scendeva (Figura 7a), in totale controtendenza con il riscaldamento del pianeta. I grafici della Figura 7 sono stati aggiornati fino al 2012: si nota la presenza di alcuni picchi nel grafico della stratosfera, corrispondenti ad eruzioni vulcaniche che immettono polveri nella stratosfera causando un rapido, ma temporaneo, aumento

della temperatura della stratosfera per un effetto schermante analogo al quello della CO₂.

Questo studio fece scalpore negli anni '90, perché le sue implicazioni erano chiarissime: esiste un'impronta nell'andamento della temperatura nell'ultimo secolo della colonna atmosferica che dimostra che la causa del riscaldamento del pianeta è dovuta all'immissione dell'atmosfera dei gas serra da parte dell'uomo e non viceversa.

Inutile dire che Santer fu violentemente attaccato per questi risultati, che però furono rapidamente accettati dalla stragrande maggioranza della comunità scientifica internazionale. Per i suoi meriti scientifici Santer fu nominato presidente del gruppo di lavoro che nel 1995 scrisse l'ottavo capitolo del secondo rapporto IPCC, che si concludeva con l'affermazione che è riconoscibile un effetto dell'attività umana sul clima.

Più di vent'anni fa la scienza aveva già fatto la sua parte nel riconoscere e denunciare cosa stava accadendo al clima a causa della presenza delle attività umane.

I numeri dell'economia dei cambiamenti climatici

Il cambiamento climatico è probabilmente la più grande sfida che l'umanità abbia dovuto affrontare, con effetti profondi e drammatici su persone, ambiente ed economia.

È necessario capire di cosa stiamo parlando anche da un punto di vista sociale ed economico. Ecco esempi di quello che accadrà senza azioni correttive e di adattamento:

- l'agricoltura potrebbe perdere il 30% del suo valore entro il 2050. 500 milioni di piccole imprese agricole ne pagherebbero le gravi conseguenze;
- il numero di persone a cui mancherà l'acqua almeno un mese all'anno salirà da 3,6 miliardi a 5 miliardi nel 2050;
- la crescita del livello del mare e l'aumento di violente tempeste, forzerà lo spostamento di centinaia di milioni di persone verso l'interno, con costo stimato in più di 1000 miliardi di dollari ogni anno, solo per il periodo da oggi fino al 2050;

Atmospheric Temperature Changes in CMIP-5 Simulations

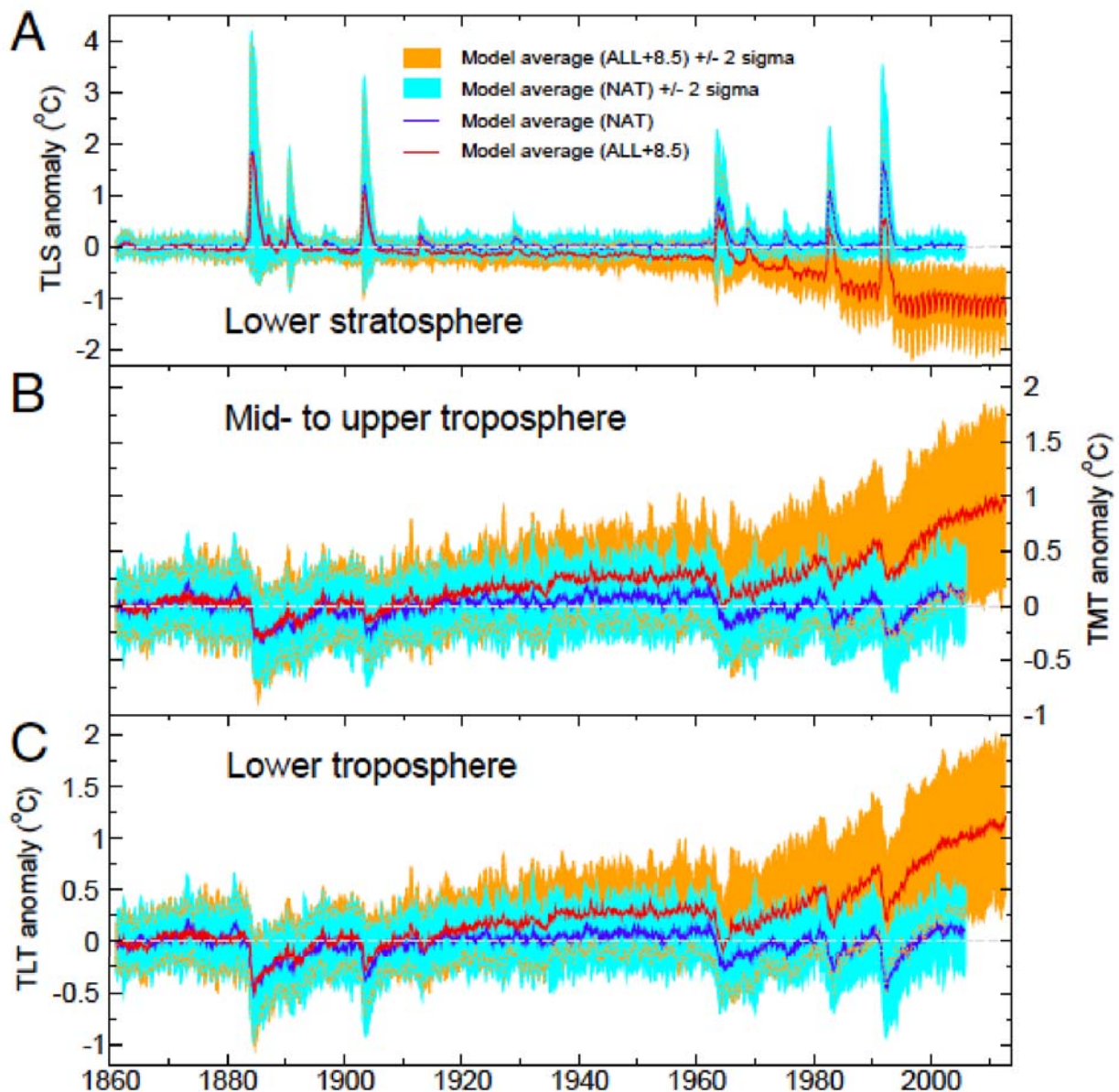


Figura 7: Serie temporali nella bassa stratosfera (A) e nella troposfera superiore (B) e inferiore (C), confrontati con i modelli che includono (colore arancione) o escludono (colore azzurro) le forzanti di origine umana. L'opposto andamento della temperatura nella bassa (B e C) e alta (A) atmosfera, corrisponde alle osservazioni e rappresenta l'impronta che dimostra che il meccanismo che porta al riscaldamento corrisponde al filtro dovuto ai gas serra, che trattiene il calore nella bassa atmosfera [13, 14, 15].

- più di 100 milioni di persone scenderanno sotto il livello di povertà già entro il 2030.

Affrontare queste grandi sfide può però diventare una opportunità sociale ed economica. Una Commissione internazionale dell'ONU che ha affrontato questo problema, ha evidenziato come il ritorno sull'investimento vari da 2:1 a 10:1, con un beneficio che supera di gran lunga i costi indotti dalla gestione dei danni dovuti ai

cambiamenti climatici.

Come discutere dei cambiamenti

Non c'è dubbio che per affrontare e risolvere la questione dei cambiamenti climatici occorra ascoltare la scienza e agire di conseguenza.

Ma non è così facile. Cambiare mentalità e abitudini è una delle cose più difficili per la nostra

specie, senza contare gli enormi interessi economici e politici che si intrecciano attorno a questi temi. D'altra parte non possiamo aspettare gli effetti del ricambio generazionale; non c'è tempo, dobbiamo organizzarci ed agire.

Per questo motivo è importante comunicare, comunicare molto, comunicare bene. Occorre essere preparati per ribattere agli argomenti capziosi, alle fake news, alle posizioni di parte. Qui il tema si sposta dalla scienza, ad un dibattito di importanza vitale, in cui non si può lasciare il campo a chi provoca, a chi alza la voce, a chi ha una agenda nascosta ed è interessato a fare perdere a tutti tempo e risorse sempre più preziose.

Questi sono solo alcuni esempi di botta e risposta che è necessario essere preparati a sostenere in un dibattito pubblico, a tavola o al bar:

Il clima è sempre cambiato! → Certo, ma ora è l'uomo l'elemento dominante

Non c'è consenso. → Il 97% degli esperti concorda che l'uomo è la causa del riscaldamento globale

I modelli non sono affidabili → I modelli riproducono con successo l'andamento della temperatura dal 1900, globalmente, a Terra, nell'atmosfera e negli oceani

Animali e piante possono adattarsi → I cambiamenti climatici causeranno l'estinzione di massa di specie che non possono adattarsi su tempi scala così brevi.

Più di 200 esempi di questi scambi si possono trovare sul sito

<https://skepticalscience.com/argument.php>.

Ne consiglio caldamente la consultazione. Una corretta comunicazione sui temi del cambiamento climatico è altrettanto importante dell'attivazione della raccolta differenziata o della riduzione dell'uso della plastica non riciclabile; è necessario rendere questi temi onnipresenti nella discussione politica e nel dibattito pubblico a tutti i livelli, partendo dalla scuola.

Come acrobati sul filo

Abbiamo visto come sia complessa l'interazione tra le parti che costituiscono il nostro pianeta

e tra il nostro pianeta e la nostra stella, il Sole. Noi esistiamo e siamo giunti all'attuale livello di sviluppo perché la scala dei tempi dei cambiamenti sono sempre stati lenti e siamo sempre rimasti nelle vicinanze dell'equilibrio: nell'ultimo secolo, l'impatto dell'uomo sul clima li ha enormemente accelerati e ci sta portando fuori dal delicato equilibrio che ha caratterizzato le ultime migliaia di anni.

L'esistenza della nostra specie assomiglia a quella del funambolo che sale su un altro funambolo, che a sua volta è seduto su una sedia appoggiata sopra un filo teso nel vuoto. Questo miracolo di equilibrio può funzionare, certo, ma solo se gli acrobati sono allenati, pienamente coscienti degli effetti delle loro azioni. Saremo in grado di essere bravi come loro?

Così come gli acrobati sul filo si sono esercitati a lungo e sanno bene quali sono le forze in gioco che determinano il loro equilibrio anche noi dobbiamo imparare a ascoltare la scienza e agire di conseguenza.

Ha ragione Greta: non c'è più tempo da perdere, occorre passare all'azione!



- [1] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:All_palaeotemps.svg
- [2] S. A. Marcott, J. D. Shakun, P. U. Clark, A. C. Mix: A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years , *Science* **339** (2013) 1198.
- [3] M.E. Mann, Z. Zhang, M.K. Hughes, R. S. Bradley, S. K. Miller, S. Rutherford: Proxy-Based Reconstructions of Hemispheric and Global Surface Temperature Variations over the Past Two Millennia , *Proc. Natl. Acad. Sci.* **105** (2008) 13252-13257.
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Milankovitch_cycles
- [5] C. Le Quere et al.: Global Carbon Budget 2017 , *Earth Syst. Sci. Data* **10** (2018) 405.
- [6] J. L. Sarmiento and N. Gruber: *Ocean Biogeochemical Dynamics*. Princeton University Press, Princeton, Woodstock (2006).
- [7] C. Sabine: The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂ , *Science* **305** (2004) 367.
- [8] P. Ciais et al.: Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system , *Biogeosciences* **11** (2014) 3547.
- [9] <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- [10] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

- [11] J. Jouzel, V. Masson-Delmotte, O. Cattani, G. Dreyfus, S. Falourd, G. Hoffmann, B. Minster, J. Nouet, J. M. Barnola: Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the past 800,000 Years , *Science* **317** (2007) 793.
- [12] D. Lüthi, M. Le Floch, B. Bereiter, T. Blunier J.-M. Barnola, U. Siegenthaler, D. Raynaud, J. Jouzel, Jean, H. Fischer: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present , *Nature* **453** (2008) 379.
- [13] B. D. Santer, J. F. Painter, C. Bonfils, C. A. Mears, S. Solomon, T. M. Wigley, . . . F. J. Wentz: Human and natural influences on the changing thermal structure of the atmosphere , *Proc. Nat. Acad. Sc.* **110** (2013) 17235.
- [14] F. Lambert, B. Delmonte, J. R. Petit, M. Bigler, P. R. Kaufmann, M. A. Hutterli, T.F. Stocker, U. Ruth, J. P. Steffensen: Dust-climate couplings over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core , *Nature* **452** (2008) 616.
- [15] F. Lambert, M. Bigler, J. P. Steffensen, M. Hutterli, H. Fischer: Centennial mineral dust variability in high-resolution ice core data from Dome C, Antarctica , *Climate of the Past* **8** (2012) 609.



Roberto Battiston: è stato presidente dell’Agenzia spaziale italiana (ASI) dal 2014 al 2018. Fisico sperimentale, specializzato nel campo della fisica fondamentale e delle particelle elementari, è uno dei maggiori esperti di raggi cosmici. Ha coordinato assieme al premio Nobel Samuel C. C. Ting la realizzazione dello spettrometro magnetico alfa (AMS), operante sulla Stazione spaziale internazionale dal 2011 e dedicato alla ricerca dell’antimateria e della materia oscura. Ha pubblicato circa 500 articoli scientifici sulle più importanti riviste internazionali. Editorialista della Stampa, Repubblica e dell’Adige svolge una intensa attività come saggista e divulgatore. Ha pubblicato di recente *Fare Spazio* (2019, La Nave di Teseo) e *La prima alba del Cosmo* (2019, Rizzoli).

Il cambiamento climatico e la questione degli eventi estremi

Sergio Pinna

Dipartimento di Civiltà e Forme del Sapere, Università di Pisa

Nell'ambito del dibattito sui cambiamenti climatici in atto, la questione degli eventi estremi ha assunto un'importanza tale da essere frequentemente identificata con l'idea stessa di detti cambiamenti. In effetti è ormai convinzione diffusa a tutti i livelli che il riscaldamento globale abbia procurato (e ancor più procurerà in futuro) un marcato aumento per intensità e frequenza di vari fenomeni meteorologici estremi. L'analisi statistica dei dati climatologici non è però in grado di confermare tale situazione, non avendo fatto emergere nel complesso delle apprezzabili tendenze alla crescita di svariate grandezze. La teoria della correlazione diretta fra temperatura globale e incidenza degli eventi estremi è anche in contrasto con le informazioni derivanti dalla climatologia storica, visto che è proprio nella fase fredda, detta *Piccola Età Glaciale*, che le manifestazioni violente risultano essersi concentrate molto di più rispetto a quanto rilevato per i periodi caldi, compreso il XX secolo.

Un argomento davvero fondamentale nel dibattito

È indubbio che il cambiamento climatico sia oggi un tema di continua discussione e che esso venga sempre affrontato con toni di forte drammatizzazione, al punto che movimenti quali il ben noto *Friday for Future* parlano di crisi climatica in atto e di imminenti gravissimi rischi per l'ambiente e l'uomo. A mio giudizio, gli incrementi della temperatura globale già manifestatisi e quelli ipotizzati per i decenni a venire non sono affatto sufficienti a giustificare da soli quelle paure sul clima ormai diffusissime nella nostra società. Sono convinto infatti che la causa principale dei suddetti timori risieda in una sorta di associazione automatica che gran parte dell'opinione pubblica fa tra l'idea di **riscaldamento climatico** e quella di **clima impazzito**. Con questo voglio dire che certe informazioni ripetute in modo martellante hanno convinto le masse del fatto che l'innalzamento termico registratosi nel corso del XX secolo abbia procurato un vero e proprio sconvolgimento delle caratteristiche del clima, facendo aumentare nettamente il pericolo di svariati fenomeni meteorologici estremi (cicloni tropicali, tornado, piogge intense, tempeste di vento ecc.).

Queste mie considerazioni sono confortate da-

gli esiti di tanti sondaggi pubblici, quale ad esempio uno condotto dall'ARPA del Friuli-Venezia Giulia, negli ultimi mesi del 2017, raccogliendo le opinioni di un campione di oltre 3400 soggetti. Alla richiesta di esprimere con un punteggio da 1 a 10 quale fosse il grado di gravità assegnato al problema dei cambiamenti climatici, un 75% ha indicato i tre valori più alti; un 87% ha dichiarato poi di aver riscontrato di persona che il clima sta mutando. Tra gli effetti più temuti del cambiamento, la percentuale maggiore (oltre il 70%) è andata proprio all'aumento degli eventi estremi, confermando così come sia questo l'aspetto che catalizza l'interesse della gente e che in definitiva ne alimenta le preoccupazioni [1].

L'idea del clima impazzito costituisce ormai un tipico caso di politicamente corretto che conduce alla ripetizione acritica di concetti considerati quasi come dei dogmi. Visitando, ad esempio, il sito web dell'agenzia toscana per la protezione dell'ambiente, possiamo porre l'indicatore del mouse sul termine "cambiamento/i climatico/i" e far aprire così una scheda ove si legge la relativa definizione: "Alterazione dell'equilibrio naturale del clima globale del nostro pianeta. I cambiamenti climatici principali riguardano l'aumento, in intensità e frequenza, di fenomeni estremi (uragani, temporali, inondazioni, siccità), l'aumento del livello dei mari, la desertificazione, l'aumento di temperatura e la perdita di biodiversità". Uno splendido concentrato di assurdità, sul quale pare che ben pochi abbiano da obiettare.

È d'altra parte la stessa iconografia, che inamovibilmente accompagna ogni intervento di divulgazione, a farci capire come sia consolidata l'associazione del riscaldamento globale al progressivo aumento di vari fenomeni di pericolo; sono infatti costantemente utilizzate immagini che rappresentano alluvioni devastanti, terreni sconvolti da lunghi periodi di siccità, violenti tornado, bufere di vento, uragani ecc. (Fig. 1).

La questione del rapporto fra temperatura globale ed eventi estremi

In merito alla relazione fra temperatura ed eventi estremi, vi sono due teorie diametralmente op-



Figura 1: Un saggio della tipica iconografia utilizzata per la divulgazione in tema di cambiamenti climatici; si tratta sempre di pericolosi eventi estremi, in grado di scatenare i timori nell'opinione pubblica.

poste. Una prima è quella che possiamo considerare come ufficiale, in quanto accreditata dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), il notissimo Panel creato dall'ONU per fare progressivamente il punto sugli studi relativi ai mutamenti futuri del clima, per effettuare una valutazione delle loro possibili conseguenze negative, e per poi proporre delle adeguate linee d'azione atte a mitigarle. Della teoria contraria a quella dell'IPCC il sostenitore probabilmente più autorevole è Richard Lindzen, professore emerito di scienze dell'atmosfera al MIT.

Teoria ufficiale: correlazione diretta - La crescita delle temperature causa una maggiore evaporazione, per cui in atmosfera sale il contenuto di vapore acqueo (legge di Clausius-Clapeyron) e, conseguentemente, il livello energetico, col risultato di modificare il ciclo idrologico, determinando manifestazioni violente sempre più frequenti ed intense.

Tesi Lindzen: correlazione inversa - Le manifestazioni meteorologiche estreme sono determinate dal contrasto di masse d'aria con temperature molto diverse; infatti la quantità di energia che alimenta i moti derivanti dalla cosiddetta **instabilità baroclina** (è quella che si manifesta in un fluido quale l'atmosfera terrestre, cioè soggetto a rotazione e caratterizzato dalla presenza di gradienti orizzontali di temperatura, o di densità).

tà, e da una stratificazione stabile) dipende dalle differenze orizzontali di temperatura che caratterizzano l'atmosfera nei suoi primi 10 km circa di spessore. Poiché è ormai acclarato che i cambiamenti climatici sono sempre assai più ampi nelle alte latitudini rispetto a quanto accade nella fascia intertropicale (su questo anche tutti i modelli fisico-matematici di circolazione globale concordano), ne risulta allora che in un mondo più caldo si avranno necessariamente minori contrasti termici e perciò moti atmosferici mediamente meno intensi, col risultato finale di osservare una riduzione degli eventi estremi [2].

È però interessante notare che fino agli inizi degli anni Novanta i climatologi erano in sostanza convinti della correlazione inversa, come emerge dallo stesso primo Report dell'IPCC, pubblicato nel 1990. In esso si può infatti leggere che non era previsto, col *global warming*, alcun particolare aumento della variabilità del clima e soprattutto che era ipotizzabile una riduzione nell'intensità delle tempeste delle medie latitudini, proprio perché il fattore determinante era riconosciuto nel contrasto termico equatore-poli. Successivamente le posizioni del Panel sono andate mutando e la teoria della correlazione diretta si è imposta quale paradigma ufficiale.

Cosa si evince dall'analisi delle serie di dati

Lo studio dei dati climatologici conduce in alcuni casi a conclusioni sicuramente affidabili, mentre in altri un'effettiva definizione delle tendenze di lungo periodo può non essere evidente, lasciando così spazio a interpretazioni un po' differenti. Ciò premesso, un fatto mi pare inequivocabile: non emerge nel complesso alcuna variazione temporale degli eventi estremi che possa essersi tradotta in modificazioni ambientali davvero percettibili. Ne deriva quindi che l'idea del clima impazzito è generata da una realtà virtuale e non da mutamenti veramente avvenuti; le note che seguono dovrebbero essere sufficienti a dimostrarlo.

Ciclone tropicali (ed extratropicali) - Per quanto riguarda la frequenza degli uragani, che

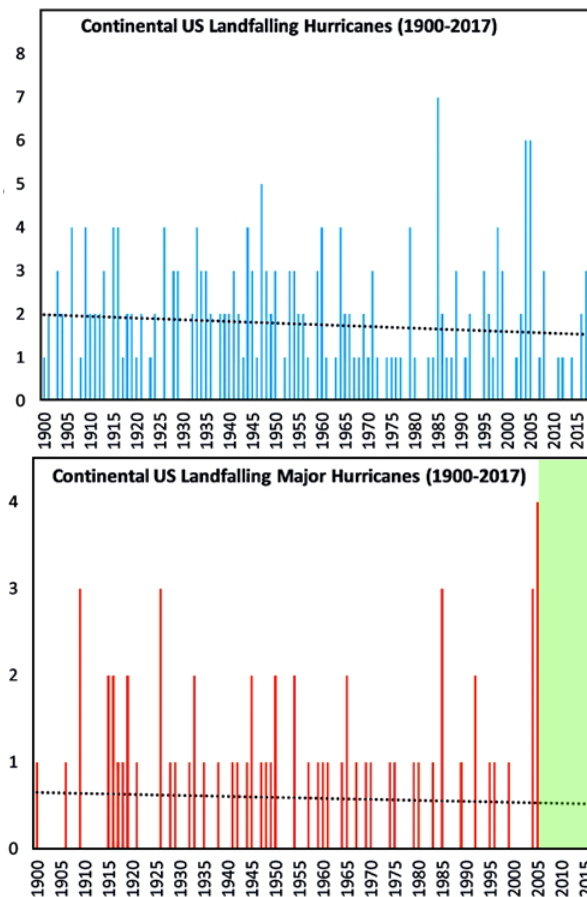


Figura 2: Frequenza annua degli uragani che hanno comportato il landfall sugli USA. In azzurro è rappresentato il numero totale, in rosso quello degli eventi di categoria 3 o superiore; relativamente a questi ultimi, la striscia verde serve a evidenziare il recente lungo periodo di assenza.

hanno comportato il *landfall* (termine utilizzato quando il centro della struttura tocca la costa) sul territorio continentale degli USA, si osserva un moderato trend negativo 1900-2017, sia per gli eventi di tutte le cinque categorie, sia limitatamente a quelli maggiori, cioè ricadenti nelle tre classi più elevate (Fig. 2) [3]. Rispetto a questi ultimi, è da rilevarne il lungo periodo d'assenza, protrattosi dal settembre 2005 all'agosto 2017, che risulta il più esteso in assoluto dall'inizio delle rilevazioni nel 1851.

Sempre per le variazioni della frequenza, assai interessanti sono pure i dati riferiti alla parte occidentale del Pacifico boreale e forniti dall'ente nazionale giapponese (JMA). Sia la serie 1951-2016 del numero totale dei cicloni che quella 1977-2016, relativa ai soli uragani, hanno tendenza di segno negativo (Fig. 3). Le verifiche statistiche non consentono di parlare di trend significativi,

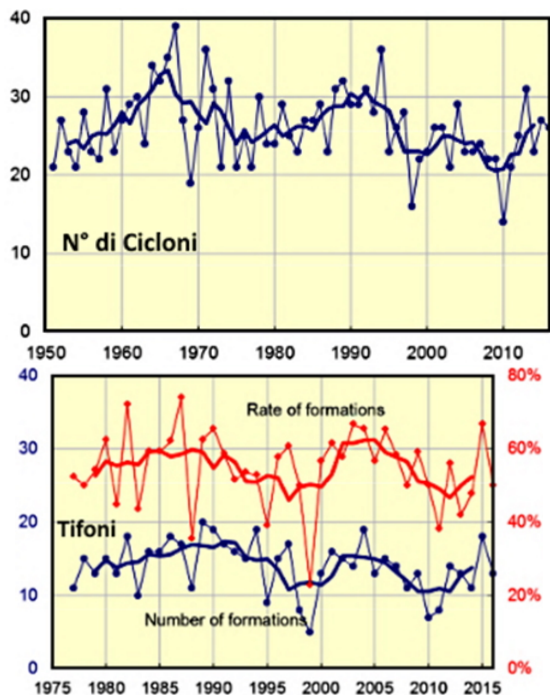


Figura 3: L'andamento della frequenza dei cicloni tropicali nel bacino occidentale del Pacifico boreale; il grafico in basso è relativo a quelli che hanno raggiunto la forza di tifone (termine utilizzato in quest'area geografica per indicare l'uragano).

ma, tenendo conto che i livelli di confidenza sono intorno all'85%, ne deriva un certo segnale di decremento e non certamente di crescita. Da segnalare anche che la fase di massimo assoluto non corrisponde a periodi recenti, ma si colloca nella parte centrale degli anni '60, cioè quando le temperature - sia dell'aria, sia degli oceani - erano considerevolmente inferiori alle attuali.

Oltre alla frequenza, è poi importante verificare l'andamento dell'energia complessiva sviluppata, una grandezza che viene espressa mediante il calcolo di un indicatore (ACE, *Accumulated Cyclone Energy*) derivante dalla sommatoria di tutte le rilevazioni della velocità massima del vento (elevata al quadrato), effettuate, con cadenza di sei ore, per ciascun ciclone formatosi durante l'anno. Nella Figura 4 è riportato il grafico dell'andamento del suddetto indice, prodotto dalla NOAA e relativo al bacino atlantico per il periodo 1950-2015; ne emerge una notevole variabilità ed una complessiva stabilità dei valori.

Nel gennaio del 2007 la tempesta di vento Kyrrill colpiva l'Europa con venti di forza di uragano, causando la morte di 47 persone e ingenti danni materiali, stimati in quasi 10 miliardi di dollari. Immaneabilmente, l'evento fu visto come una

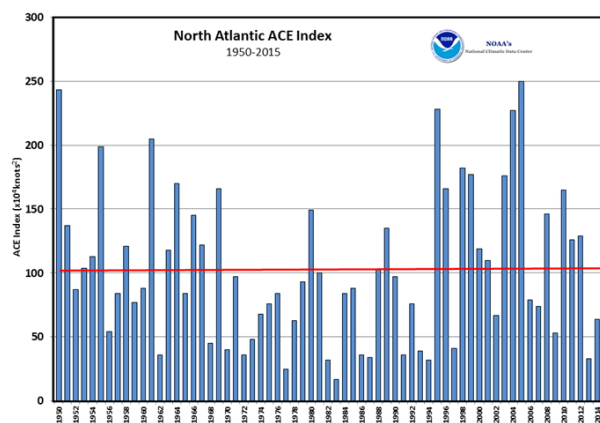


Figura 4: L'andamento 1950-2015 dell'indice ACE per i cicloni dell'Atlantico settentrionale, secondo l'agenzia americana NOAA.

dimostrazione degli effetti sconvolgenti dei cambiamenti climatici, ma una ricerca condotta in proposito l'anno successivo ha appurato che non ci sono variazioni reali nelle conseguenze generate da questo tipo di fenomeni [4]. Per il periodo 1970-2008 in 29 paesi europei, è stata esaminata la serie temporale dei dati sulle perdite economiche dovute alle tempeste, omogeneizzando i valori alla situazione del 2008, in ragione dei cambiamenti nella popolazione, nella ricchezza e nell'inflazione (Fig. 5); dall'analisi non è apparsa alcuna tendenza.

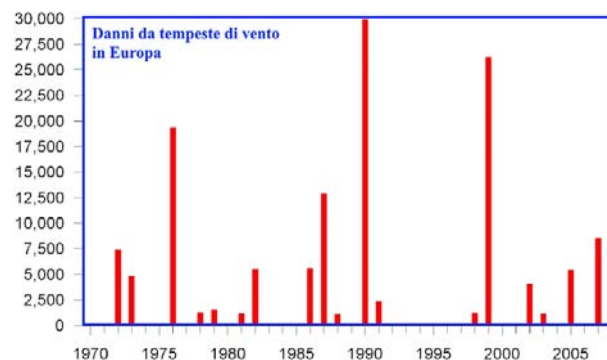


Figura 5: Danni causati in Europa dalle grandi tempeste di vento; i dati sono espressi in milioni di dollari e normalizzati alle condizioni del 2008.

Tornado - Per l'Europa (per cui anche per l'Italia), gli studi sistematici sono piuttosto recenti e perciò non c'è una documentazione che consenta delle attendibili valutazioni sull'evoluzione temporale di questi fenomeni; ne deriva che le frequenti informazioni che circolano in merito a presunti aumenti del pericolo dei tornado nel nostro Paese possono sicuramente essere ritenute delle notizie prive di senso scientifico.

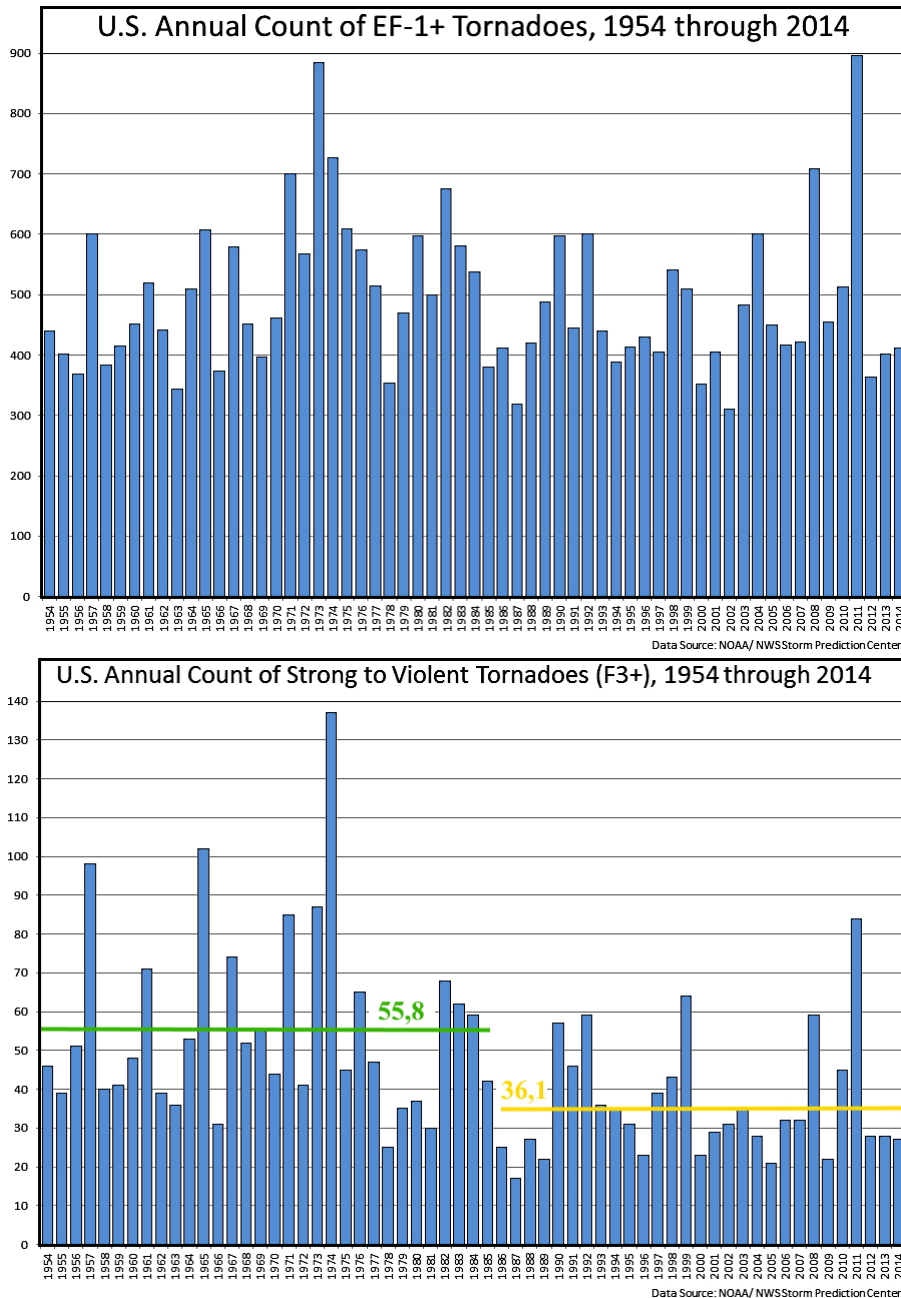


Figura 6: Numero totale annuo dei tornado non inferiori alla categoria 1 e di quelli non inferiori alla 3. In questo secondo caso, ho riportato nel grafico i valori medi dei due sottoperiodi 1954-1985 e 1986-2014.

Gli unici archivi dai quali è possibile ricavare delle statistiche utili sono quelli statunitensi, poiché una raccolta regolare dei dati è iniziata già alla metà del XX secolo. Nel sito ufficiale della NOAA (www.ncdc.noaa.gov) è contenuto un resoconto che contiene i grafici riportati nella figura 6 e relativi al numero annuo di tornado di categoria 1/+ e a quello dei tornado violenti, cioè di categoria non inferiore a 3.

L'esame della figura ci dice che nel primo caso non appare una tendenza chiara, e si può notare

come la fase di maggiore frequenza ricada nella prima metà degli anni '70, quando il clima era più fresco rispetto al periodo attuale. Molto significativo l'andamento degli eventi violenti, che mostra una marcata e brusca diminuzione manifestatasi intorno al 1985: fino a tale data si aveva una media annua di 55,8 tornado, mentre si scende a 36,1 per gli anni successivi. Altre ricerche hanno appurato che a tale diminuzione è corrisposto un calo simile nell'entità dei danni subiti dal territorio americano; in pratica, una situazione

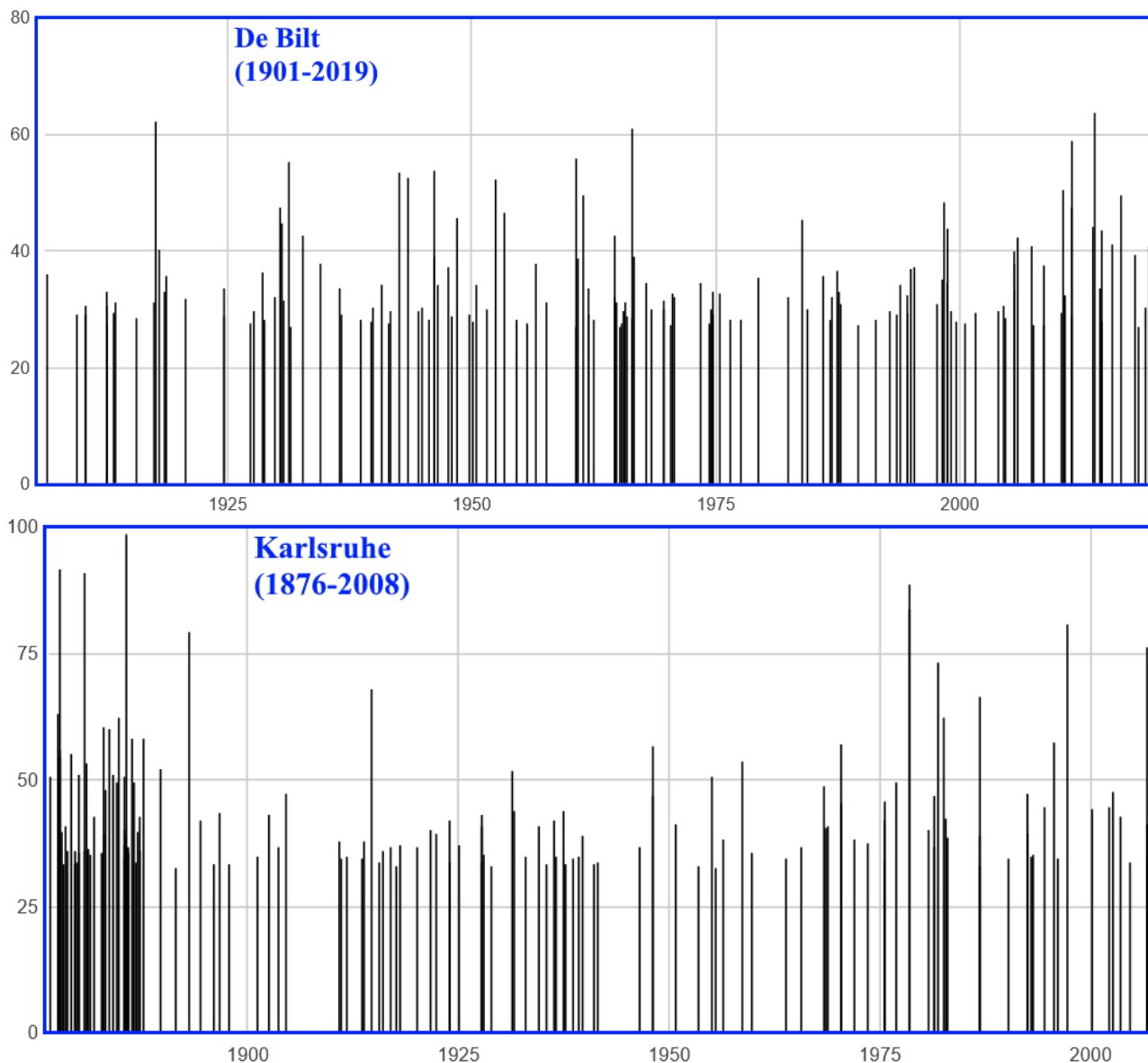


Figura 7: I 150 valori record di pioggia giornaliera, per le serie storiche di De Bilt (Olanda) e Karlsruhe (Germania); i grafici sono reperibili sul sito web di Wetterzentrale.

ne opposta rispetto alla percezione comune dei fatti in oggetto.

Piogge intense e alluvioni - In bibliografia si trovano molti lavori pubblicati negli ultimi tempi, che arrivano a risultati spesso non paralleli, facendo sì che le questioni rimangano un po' controverse.

Per apprezzare i veri ordini di grandezza delle cose in gioco, credo sia anzitutto utile partire dal lavoro di Westra del 2013 [5], in quanto è forse il più citato da chi sostiene che si sia verificato un marcato aumento nell'intensità delle precipitazioni. Vengono studiate le tendenze dei massimi di pioggia giornaliera nell'anno, per poi verificare le eventuali correlazioni con l'andamento

della temperatura globale; sono utilizzate 8326 stazioni, in base al criterio della disponibilità di almeno 30 valori, nell'intervallo 1900-2009. Nel lavoro si afferma seccamente che: "trend crescenti, statisticamente significativi, possono essere rilevati a scala globale", ma, dalla lettura del testo, si constata che le serie con tendenza significativa sono soltanto il 10.6% del totale (l'8.6% crescenti e il 2.0% in diminuzione); pertanto quasi il 90% delle serie è più o meno stazionario.

Dalla correlazione con le temperature, è scaturito che le piogge estreme considerate aumentano, per 1° di riscaldamento, di una quantità compresa fra il 5.9 ed il 7.7%; in pratica, sulla base della crescita della temperatura globale, si

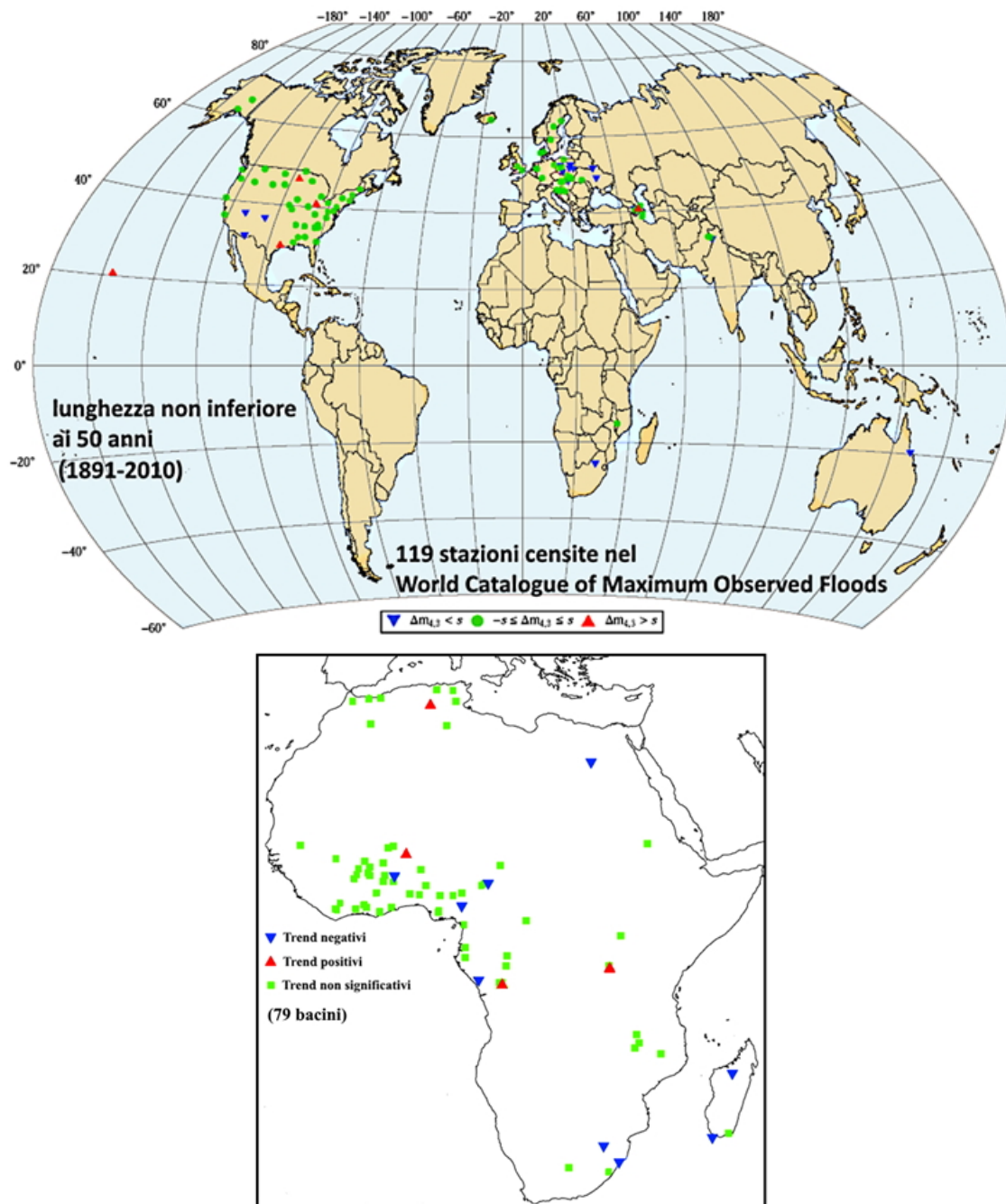


Figura 8: La localizzazione delle stazioni di misura considerate in due studi di cui nel testo. I simboli esprimono il risultato dell'analisi dei trend lineari delle serie storiche del valore annuo della portata di picco: verde = trend non significativo; blu = decrescente; rosso = crescente.

sarebbe avuto un incremento stimabile attorno al 5.5% al secolo. Anche ammettendo di prendere questi risultati come ben rappresentativi di quanto avvenuto nel ciclo idrologico, un punto mi pare che resti chiaro: non risultano modificazioni nei caratteri pluviometrici che possano aver dato luogo a mutamenti ambientali in pratica apprezzabili.

Un'utile verifica che anche un non esperto può

fare in pochi minuti è quella che deriva dalla visita al sito tedesco *Wetterzentrale.de*, uno dei più noti ed affidabili in campo meteorologico, nella cui sezione dell'archivio dati sono reperibili pure statistiche e diagrammi su estremi climatici, per numerose stazioni della Germania e dell'Olanda. I grafici della Figura 7 provengono appunto da questa fonte e riportano i 150 maggiori valori di pioggia giornaliera per le serie più lunghe repe-

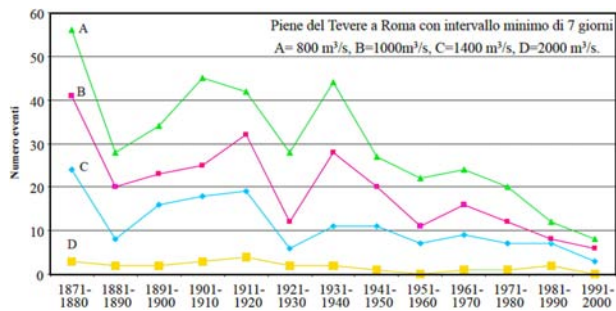


Figura 9: Numero di episodi di piena (per decennio) del Tevere a Roma; è palese la tendenza alla diminuzione.

ribili nei due citati Paesi. Esaminando i rispettivi diagrammi, sarà sufficiente valutare la collocazione temporale dei singoli eventi record e delle fasi nelle quali appare un evidente addensamento delle barre, indicante quindi una maggiore frequenza di episodi intensi. Penso che tutti concorderanno sul fatto che non risalta alcun segnale di cambiamento, soprattutto se inteso nel verso di un incremento dell'intensità. In verità, il grafico di Karlsruhe presenta una concentrazione proprio nella parte iniziale, suggerendo così una possibile tendenza al calo; sicure affermazioni sono però molto problematiche perché in serie così lunghe non si può escludere l'esistenza di qualche problema di omogeneità.

In Italia la questione delle piogge ha assunto aspetti grotteschi, con la diffusione del ridicolo mito delle *bombe d'acqua*, ormai interpretate da molti come dei fenomeni del tutto nuovi anche rispetto a pochi decenni or sono. Ovviamente nessuno studio è in grado di confermare simili assurdità ed anzi nel 2019 è uscito un articolo che dovrebbe risultare esaustivo sull'argomento [6]. Un gruppo di ricerca del Politecnico di Torino ha studiato i dati delle piogge annue massime su intervalli di 1-3-6-12-24 ore, per 1346 stazioni del nostro territorio, caratterizzate da avere almeno 30 valori nel periodo 1928-2014. I risultati hanno indicato che solo una percentuale assai ridotta delle suddette serie aveva dei trend significativi, con un numero più o meno equivalente fra quelli positivi e quelli negativi; un quadro generale quindi di perfetta stazionarietà.

Che non siano avvenute delle trasformazioni sensibili nel ciclo idrologico è dimostrato dalle risultanze di numerosi studi sull'andamento delle piene fluviali in tantissimi bacini del globo.

La Figura 8 riporta i risultati di due lavori che complessivamente hanno interessato 198 stazioni di misura in Europa, Stati Uniti e Africa [7, 8]; in netta maggioranza appaiono i bacini con situazione stazionaria, mentre, fra i restanti con trend significativo, sono quelli di segno negativo ad essere i più numerosi. Un esempio riferito all'Italia ci è dato da un libro pubblicato nel 2001, nel quale sono fornite varie statistiche in merito alle piene del Tevere a Roma, dal 1871 alla fine del secolo scorso [9] (Fig. 9); ne emerge una chiara diminuzione della frequenza del fenomeno nel tempo, in netto contrasto perciò con la percezione comune di questo genere di fatti.

Le risultanze degli studi di climatologia storica sono in contrasto con la teoria ufficiale

In relazione alle oscillazioni del clima avvenute negli ultimi dodici secoli, è ben noto che sono due le fasi più importanti riconosciute dagli esperti: una calda detta Optimum Climatico Medievale (OCM) ed una successiva fredda, conosciuta come Piccola Età Glaciale (PEG). Sulla loro estensione temporale non vi è un totale accordo fra gli studiosi, anche perché nell'azione delle suddette fasi sussistono differenze geografiche talora sensibili. Comunque, l'OCM si può ritenere che inizi verso il 900 e termini nel corso del XIII secolo; la sua acme pare collocarsi fra il 1100 e il 1150. Alcuni scienziati ritengono che la PEG prenda corpo poco dopo il 1300 e che quindi segua quasi senza soluzione di continuità il periodo caldo. I secoli XIV e XV risultano in effetti assai più freschi dei precedenti, però con alcuni intervalli, almeno in Europa, piuttosto caldi; è per questo che la prassi più frequente sia quella di parlare di PEG a partire dal 1500 fino poi alla seconda metà dell'Ottocento.

Le variazioni termiche di OCM e PEG sembrano essere state contenute come media globale, anche se è certo che alle latitudini medio-alte dell'emisfero boreale la loro incidenza è stata rilevante. Ad ogni modo, trattandosi comunque di periodi complessivamente di lunghezza poli-secolare, credo che si prestino bene per fornire un test in merito ai rapporti fra temperature ed eventi estremi. Voglio cioè dire che, se è vera

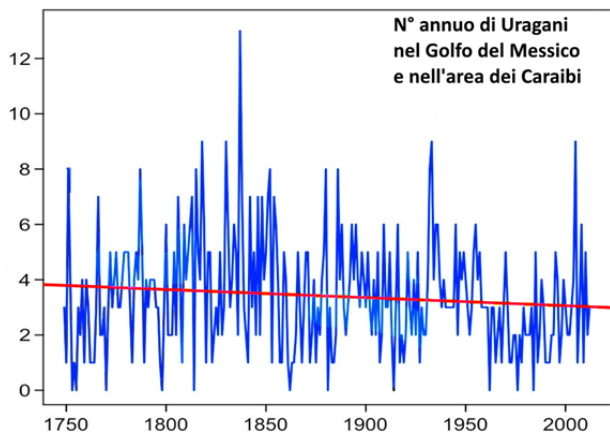


Figura 10: Numero annuo di uragani dal 1749 al 2012.

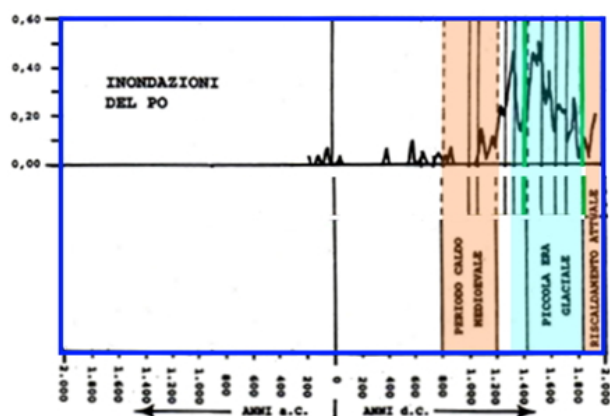


Figura 11: La frequenza degli eventi alluvionali del Po, negli ultimi due millenni.

l'ipotesi che il riscaldamento globale porterà ad un incremento per entità e frequenza di vari fenomeni meteorologici estremi, dovrei anche aver riscontrato un'evidente prevalenza di tali fenomeni nell'OCM (clima caldo) in confronto alla condizione della PEG (clima freddo).

In realtà, tutti quelli che sono i riscontri disponibili in merito a questa problematica indicano una situazione diametralmente opposta, con estremi pertanto molto più rari nelle fasi calde, ossia nell'OCM e nel XX secolo, rispetto a quanto evidenziato per la PEG. Di seguito ne fornirò, in modo sintetico, diversi esempi.

Gli uragani nel Golfo del Messico - Un gruppo di ricerca messicano, incrociando le informazioni provenienti da diverse fonti storiche, ha ricostruito la frequenza degli uragani nell'area del Golfo del Messico e del Mar dei Caraibi, a partire dall'anno 1749 [10]; utilizzando poi le statistiche Hurdatt (dell'Hurricane Center statunitense), hanno infine ottenuto una serie continua del fenomeno 1749-2012 (Fig. 10). Si osserva un

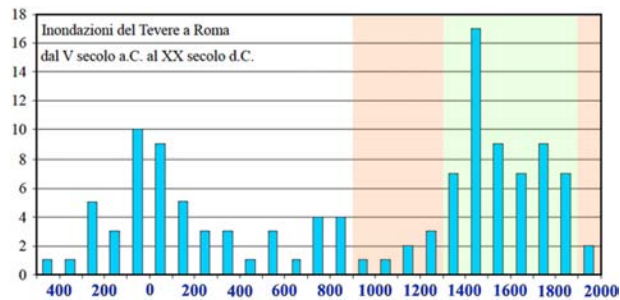


Figura 12: Gli episodi di esondazione del Tevere a Roma negli ultimi 25 secoli.

andamento decrescente nel lungo periodo, ma soprattutto è significativo da un lato che il periodo di massima ricada nella seconda metà dell'Ottocento, quindi nella parte conclusiva della PEG, e dall'altro che i valori dell'ultimo trentennio (global warming recente) siano nel complesso piuttosto bassi.

Le inondazioni del Po - In un lavoro del 1998, il geomorfologo Cortemiglia ha proposto alcune ricostruzioni di climatologia storica relative al territorio italiano [11]. In proposito, la Figura 11, riferita alla frequenza degli eventi alluvionali del Po, ne indica un consistente massimo nella PEG, rispetto a quanto riscontrato per il periodo caldo medievale ed anche per l'ultimo secolo.

Le esondazioni del Tevere a Roma - In una pubblicazione del 2001 già richiamata in precedenza, è anche riportato un grafico relativo al numero di esondazioni del Tevere nella città di Roma, avvenute negli ultimi 2500 anni [9]. Dal X al XIII secolo sono 7 gli episodi rilevati, mentre dal XIV al XIX sono ben 56; nella fase calda del Medio Evo si è avuta quindi una media di circa 1.8 episodi/secolo, a fronte di una di 9.3 nella successiva fresca e poi fredda (Fig. 12). Una differenza talmente forte da implicare necessariamente una marcata diversità nei caratteri pluviometrici, cioè con intensità delle piogge superiore in concomitanza di un clima più freddo.

Le piene del Reno a Basilea - Basandosi su misurazioni giornaliere (disponibili dal 1808), e su dati pre-strumentali (documentazioni storiche e segni sugli edifici del livello raggiunto dalle acque di esondazione), è stata valutata l'entità dei maggiori eventi di piena nella città di Basilea, a partire dall'anno 1268 [12]. Sono stati riconosciuti 49 grandi episodi, dei quali 6 classificati come catastrofici (portata massima stimata in oltre 6

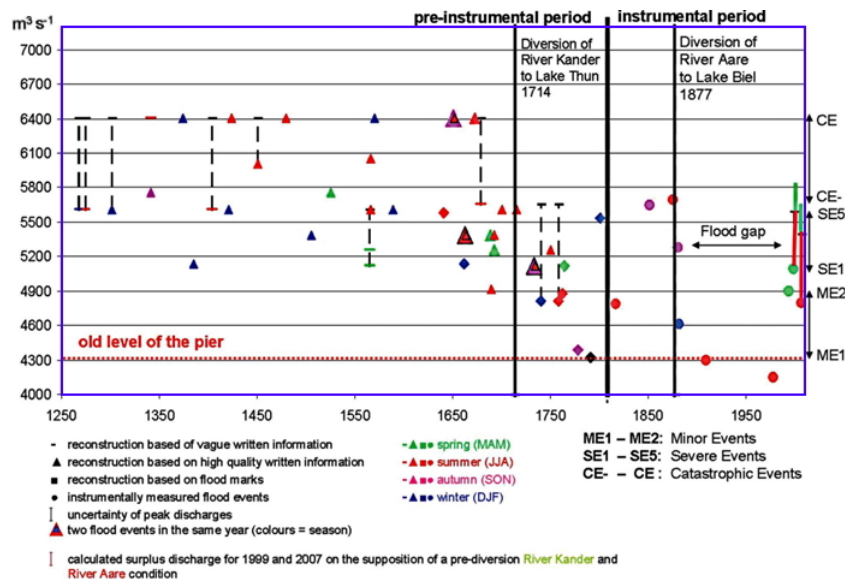


Figura 13: Date ed entità delle grandi piene del Reno a Basilea, a partire dal 1268.

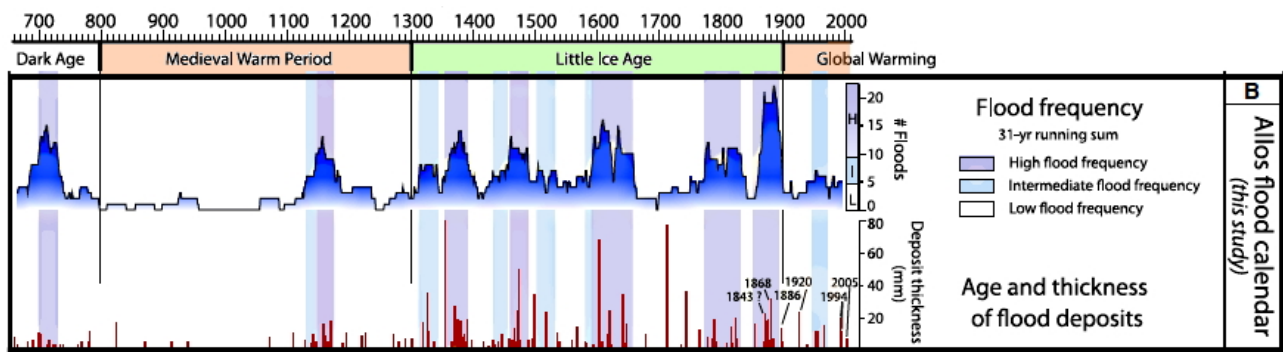


Figura 14: La frequenza delle piene nel bacino tributario del lago di Allos, nelle Alpi mediterranee francesi, in base a studi degli strati sedimentari depositatisi negli ultimi 1400 anni.

mila m³/s) e gli altri 43 come gravi (fra 5 e 6 mila m³/s). Se i sei estremi risalgono tutti a prima del 1700, anche i rimanenti si concentrano in periodi ormai lontani, visto che dopo il 1876 si sono avuti solo i casi del 1999 e del 2007, con un intervallo quindi di ben 121 anni senza piene di rilievo (Fig. 13); in sostanza, una media di un evento importante ogni 13 anni circa prima del 1877, a fronte di due soli episodi nei 134 anni successivi, cioè nella fase del riscaldamento recente. Solo parte di tale marcata differenza può essere addebitata agli interventi di modifica idraulica realizzati nel 1714 e nel 1877 (si veda sempre nella figura 13). In effetti, anche valutando il surplus di portata derivante dal riportare i valori di picco del 1999 e del 2007 alla situazione antecedente alle modifiche antropiche nel bacino, non si oltrepassano comunque i 5800 m³/s; si è quindi sicuri che tale soglia non sia stata superata da 140 anni a questa parte, a fronte invece di una

media di questi eventi nella PEG che, dalle risultanze dell'indagine storica, può essere stimata in circa 3 al secolo. Pertanto, a giudizio degli Autori della ricerca, deve necessariamente essersi anche verificato un consistente cambiamento delle caratteristiche del clima, nel senso di una diminuzione dell'intensità delle piogge.

Le piene nel bacino del lago di Allos - Un gruppo di ricerca francese ha condotto un'indagine geomorfologica basata sullo studio dei sedimenti di fondo dell'Allos, un piccolo lago naturale di montagna (2200 metri di quota), situato nel dipartimento delle Alpi dell'Alta Provenza. Sono stati classificati 160 strati alluvionali, interpretati come depositi prodotti da fenomeni di piena negli ultimi 1400 anni [13]; non avendo individuato alcuna evidenza di variazioni significative nei meccanismi erosivi del bacino, gli studiosi transalpini hanno così ritenuto che gli strati possano adeguatamente rappresentare la

storia dei caratteri pluviometrici della regione, segnalando in pratica le variazioni nella frequenza degli eventi intensi. La figura 14 riassume i risultati della ricerca e mostra come le piene si siano concentrate nella Piccola Età glaciale, rimanendo invece molto rare durante quasi tutto il Medioevo caldo; pure dopo il 1900, cioè nella fase del global warming, il numero appare essere notevolmente basso.

Si tratta di un contributo molto importante, anche perché la considerazione ora fatta deriva dall'uso di proxy data ambientali, che paiono pertanto confermare le informazioni storiche di altri lavori.

Gli eventi estremi in Norvegia - In un volume dedicato alla Piccola Età Glaciale [14], viene fornito un quadro dell'occorrenza di varie tipologie di eventi estremi in Norvegia (Fig. 15). La loro frequenza è massima fra il 1650 ed il 1750, cioè in quello che è il periodo che pare, per l'Europa, aver rappresentato l'acme del freddo. In corrispondenza del riscaldamento post 1850, il numero di episodi si riduce drasticamente.

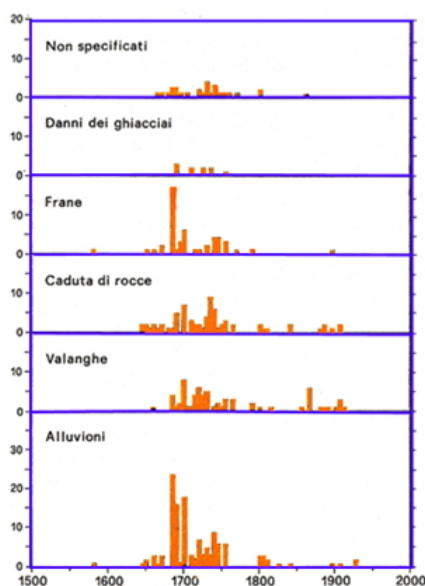


Figura 15: Frequenza di eventi estremi in Norvegia.

Gli eventi idrologici gravi in Italia negli ultimi 12 secoli - Basandosi sulle informazioni reperibili nei registri documentali storici, è stato ricostruito il più lungo elenco di eventi idrologici devastanti che sia oggi disponibile per l'Italia [15]. Valutandone le caratteristiche, ad ognuno di essi è stato associato un indice quantitativo di gravità, la cui sommatoria relativa ai casi avvenuti in ogni singolo anno (SSIS, Storm Severity In-

dex Sum), ha consentito di disporre di una serie temporale 800-2017. Il suo andamento, riportato nella figura 16, ci dice inequivocabilmente che le tempeste più severe prevalevano nella PEG, mentre durante la fase calda medievale e poi anche in quella del riscaldamento recente l'incidenza degli eventi era inferiore.

I risultati di questa indagine sono in sostanza concordanti con quelli raggiunti in un altro lavoro uscito nel 2000 e mirato a identificare, sempre grazie a fonti storiche scritte, i periodi di maggiore frequenza delle tempeste del Mediterraneo settentrionale, nell'ultimo millennio [16]. Ancora una volta tutta l'attenzione per gli eventi estremi è ricaduta sulla PEG, essendo stato infatti appurato che:

- il Mare Adriatico ha avuto due marcate fasi di massimo, corrispondenti alla prima metà del XVI secolo e alla seconda metà del XVIII;
- a ovest della nostra Penisola, l'acme per le tempeste è stata nella prima metà del XVII, con altri due massimi relativi nel XV e nell'ultima parte del XVIII secolo.

È assai probabile che qualcuno, dopo aver letto queste note derivanti dagli studi sul clima degli ultimi due millenni, si sia posto la domanda di come la questione che ne emerge - cioè la dicotomia tra le risultanze della climatologia storica da un lato e la teoria ufficiale sugli eventi estremi dall'altro - venga affrontata dall'IPCC. Ebbene, la risposta è semplicissima: il problema è di fatto ignorato nei documenti del Panel.



- [1] S. Pinna: *Il cambiamento climatico; la religione del XXI secolo*. tab edizioni, Roma (2019)..
- [2] R. Lindzen: *Straight Talk about Climate Change*. Academic Questions, Springer (2017).
- [3] P. J. Klotzbach et al.: "Continental U.S. hurricane landfall frequency and associate damage", *Bullettin of American Meteorological Society* ? (2018) 1359.
- [4] J. I. Barredo: "No upward trend in normalised wind-storm losses in Europe: 1970-2008", *Natural Hazards and Earth System Sciences* **28** (2010) 97.
- [5] S. Westra et al.: "Global increasing trends in annual maximum daily precipitation", *Journal of Climate* **26** (2013) 3904.

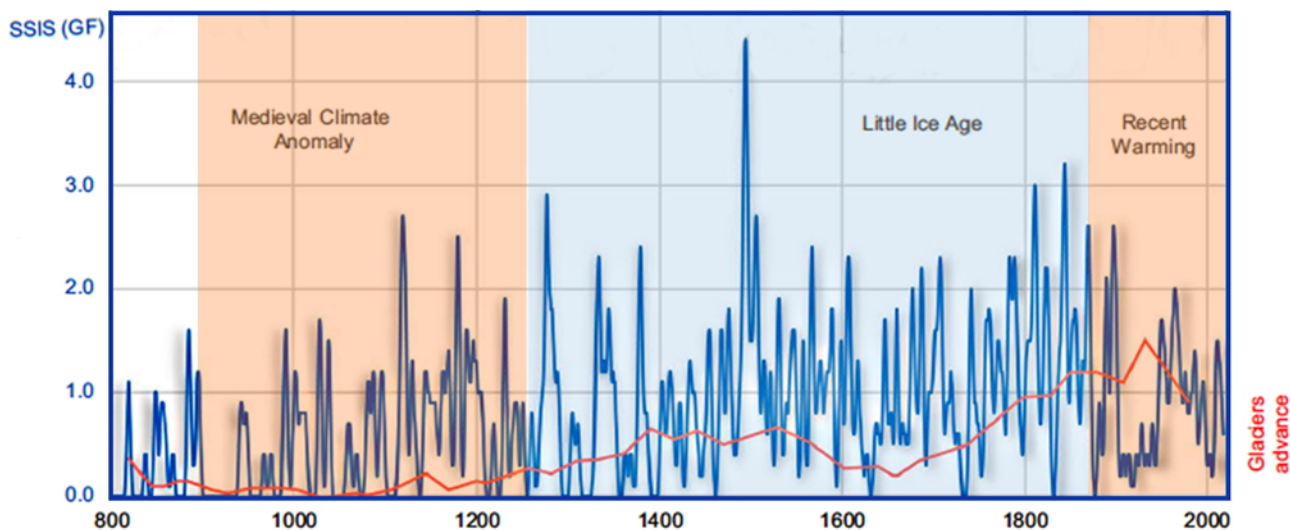


Figura 16: Andamento lisciato con filtro gaussiano a 11 anni dell'indicatore di gravità degli eventi idraulici dannosi (SSIS) in Italia per il periodo 800-2017. Il diagramma in rosso riporta la situazione di ritiro/avanzamento del ghiacciaio islandese Langjökull.

- [6] A. Libertino et al.: "Evidence for increasing rainfall extremes remains elusive at large spatial scales: the case of Italy", *Geophysical Research Letters* **46** (2019) 7437.
- [7] D. Bouziotas et al.; "Long-term properties of annual maximum daily river discharge worldwide" *European Geosciences Union General Assembly* (2011) Vienna.
- [8] G. Di Baldassare et al.: "Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation", *Geophysical Research Letters* **3** (2010) .
- [9] M. Bencivenga, P. Bersani; "Le piene del Tevere a Roma, dal V secolo a. C. all'anno 2000", Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, Roma (2001).
- [10] B. Rojo-Garibaldi et al.: "Nonlinear analysis of the occurrence of hurricanes in the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea", *Nonlinear Processes in Geophysics* **25** (2018) 291.
- [11] G. C. Cortemiglia: "Il contributo dell'analisi geomorfologica nella ricerca delle cause esplicative dell'evento alluvionale del 6.11.1994 in provincia di Alessandria", *Memorie della Società Geografica Italiana* **LV** (1998) 53.
- [12] O. Wetter et al.: "The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence", *Hydrological Sciences Journal* **56** (2011) 733.
- [13] B. Wilhelm et al.: "1400 years of extreme precipitation patterns over the Mediterranean French Alps and possible forcing mechanisms", *Quaternary Research* **78** (2012) 1.
- [14] J. M. Grove: *The Little Ice Age*. Methuen, Londra (1988).
- [15] N. Diodato et al.: "A millennium-long reconstruction of damaging hydrological events across Italy", *Nature - Scientific Reports* (2019) .
- [16] D. Camuffo et al.: "Sea storms in the Adriatic Sea and the Western Mediterranean during the last millennium", *Climatic Change* **46** (2000) 209.



Sergio Pinna: è professore ordinario di Geografia all'Università di Pisa, ateneo nel quale è anche docente di Climatologia. I suoi principali interessi di ricerca sono rivolti alla valutazione dei rischi naturali, alle variazioni spaziali e temporali del clima e ai vari aspetti del rapporto fra clima e uomo.

La nostra specie, le leggi della natura e le priorità scientifiche

Ferdinando Boero

*Dipartimento di Biologia, Università di Napoli Federico II,
CoNISMa - CNR, Genova,
Stazione Zoologica Anton Dohrn, Napoli*

La nostra specie è un prodotto dell'evoluzione biologica e vive all'interno di sistemi ecologici (ecosistemi) da cui trae beni e servizi. La natura viva obbedisce a leggi che vanno oltre quelle che regolano la natura non viva. La legge della crescita impone a tutte le specie uno sforzo riproduttivo che ha come risultato l'aumento numerico degli individui che le rappresentano. La legge del limite impedisce che la crescita di qualunque specie possa andare oltre la capacità portante: il numero massimo di individui che un dato ecosistema può sostenere. Tutte le specie obbediscono attivamente alla prima legge (la crescita) e sono sottoposte passivamente alla seconda (il limite) che viene imposta dal sistema di sostegno e non dalla specie che, se potesse, continuerebbe a crescere all'infinito. La nostra specie, pur essendo in grado di capire anche la legge del limite, continua a perseguire la crescita infinita e sta erodendo le proprie possibilità di continuare ad avere un ruolo nel gioco della natura. Oggi, la priorità per la nostra sopravvivenza è di comprendere la struttura e la funzione degli eco-

sistemi e prendere atto della legge del limite, in modo da riparare agli errori del passato. Il primo sintomo di questi errori è il cambiamento climatico. Gli scienziati che studiano la natura vivente ripetono da decenni che ci stiamo comportando in modo poco avveduto, ma altri scienziati non accettano gli allarmi e ne negano il valore, entrando in campi in cui non sono competenti. Undicimila scienziati che lavorano in campi ambientali avvertono l'umanità che abbiamo sei priorità non più eludibili:

- 1 - cambiare il modo di produrre energia, in modo da uscire finalmente dall'età del fuoco,
- 2 - smettere di introdurre inquinanti nell'ambiente,
- 3 - rispettare la natura, comprenderne la struttura e la funzione e darle la possibilità di rigenerarsi,
- 4 - produrre cibo in modo sostenibile,
- 5 - concepire un'economia che non miri solo alla crescita del capitale economico, senza considerare la conseguente erosione del capitale naturale,
- 6 - fermare la bomba demografica: il pianeta

non può sostenere un numero infinito di umani e, quindi, ci dobbiamo fermare. Se non lo faremo noi volontariamente lo farà la natura, imponendo la legge del limite. Non esistono priorità più impellenti, ne va della nostra possibilità di sopravvivere come specie intelligente.

Introduzione: le stagioni non sono più quelle di una volta?

Spesso avviene, quando si affrontano questioni complesse, che si formino fazioni che sostengono tesi contrapposte. Il cambiamento climatico è una questione complessa e genera accese controversie nell'opinione pubblica.

Non ci sono dubbi che il clima di oggi sia molto differente da quello di 50 anni fa. Chi, come me, ha superato abbondantemente il mezzo secolo di vita attiva può fare il confronto diretto. I miei punti di riferimento mi dicono che le cose sono cambiate. Sono un biologo marino e ricordo che 50 anni fa nelle mie immersioni in Mediterraneo incontravo specie che, oggi, sono quasi scomparse, sostituite da specie tropicali. Lo strato di mare che si riscaldava in superficie in estate arrivava a profondità relativamente basse. Si scendeva e, a 12 metri in mar Ligure e a 20 o più nello Ionio, si incontrava il taglio, il punto in cui si passa dall'acqua scaldata dal sole estivo a quella più fredda, sottostante. Nel 2019, alla fine di agosto, a 50 m di profondità c'erano ancora 28 gradi, a Santa Maria di Leuca: una temperatura che a quella profondità non dovrebbe arrivare, e invece ...

Qualcuno dice che non è un grosso problema: risparmiamo in inverno perché abbiamo meno bisogno di riscaldamento e, in estate, se fa troppo caldo possiamo accendere l'aria condizionata! Purtroppo il riscaldamento globale ha ben altre ricadute. Il caldo eccessivo scioglie le calotte polari, con effetti drammatici che vanno dall'innalzamento del livello del mare allo stravolgimento della circolazione oceanica e, di conseguenza, anche di quella atmosferica. Venezia affonda e il clima cambia.

I motori freddi

Quando l'acqua salata gela si forma ghiaccio fatto di acqua dolce: il sale passa nell'acqua sottostante, su cui galleggia il ghiaccio. La formazione di ghiaccio implica la desalinizzazione dell'acqua marina. Ne deriva che, sotto al ghiaccio polare, l'acqua riceve il sale dell'acqua sovrastante, diventata ghiaccio, ed è comunque molto fredda: alta salinità e bassa temperatura fanno aumentare la densità e l'acqua densa affonda: si attiva il motore freddo. La formazione di ghiaccio sia in artico sia in antartico innesca i motori freddi polari, e l'affondamento delle acque dense genera la grande circolazione oceanica che collega tutti gli oceani. Se l'acqua scende in profondità ai poli, in altre parti dell'oceano globale l'acqua risale e si scalda. Come avviene, ad esempio, nel golfo del Messico, da dove parte la Corrente del Golfo che, risalendo verso l'Artico, mitiga il clima dell'Europa settentrionale. Quell'acqua calda, arrivata in Artico, gela e attiva il motore freddo.

Il riscaldamento globale scioglie il ghiaccio e libera quindi acqua dolce, poco densa, che galleggia sull'acqua sottostante. Quest'acqua fredda va incontro alla Corrente del Golfo e la ferma, impedendo la mitigazione del clima nordico e l'innesco del motore freddo. Paradossalmente, il riscaldamento globale fa sciogliere il ghiaccio artico, ferma la Corrente del Golfo, e genera un clima più freddo nell'Europa Settentrionale. L'alterazione delle correnti oceaniche ha effetti sull'atmosfera, visto che le nuvole non sono altro che acqua marina che evapora (lasciando il sale in mare) e poi ricade come pioggia, o neve. Dato che le perturbazioni viaggiano di solito da ovest verso est, la pioggia che cade in Italia è spesso l'acqua evaporata in Atlantico. Quanto più salgono le temperature, tanta più acqua evapora dagli oceani, e quanta più acqua sale tanta più ne scende, anche in atmosfera. I fenomeni si estremizzano: dopo le siccità estive arrivano le alluvioni autunnali.

Clima atmosferico e clima oceanico sono strettamente collegati e i due sistemi, in effetti, sono un solo grande sistema in cui l'acqua cambia di stato passando da liquido, a solido, a vapore. Quando guardiamo le nuvole in cielo vediamo l'acqua dell'oceano in un altro stato. E quando piove è l'oceano che ci bagna. Poi, attraverso i fiu-

mi e le falde, l'acqua torna all'oceano e ai mari. I modelli di circolazione oceanica e atmosferica dovrebbero essere accoppiati, visto che i due sistemi sono accoppiati!

Da cosa a perché

Stiamo attraversando un periodo di grande cambiamento climatico ma un conto è dire cosa succede, e nessuno oramai lo mette in dubbio, altro conto è capire perché sta succedendo tutto questo, e individuare le cause del cambiamento.

La comunità scientifica che si occupa di clima e in generale di ecologia oramai non ha dubbi: il riscaldamento globale è dovuto alla nostra azione sugli ecosistemi planetari. Ma esistono ricercatori che hanno opinioni differenti. Dicono: il clima è sempre cambiato, durante la storia del pianeta. Ci sono stati periodi più freddi (le glaciazioni) e periodi più caldi. Se guardiamo i fossili vediamo che le faune e le flore sono sempre cambiate, anche in modo drammatico. I dinosauri si sono estinti, e non siamo noi ad averli uccisi: non c'eravamo! Come allora, anche oggi le cose cambiano. Non è colpa nostra, e tutto questo avverrebbe anche senza di noi.

Succede spesso che, ad un'ondata di freddo, i giornali sfornino titoli che mettono in dubbio il riscaldamento globale perché si attraversa un periodo freddo in una parte del mondo. Queste posizioni sono tipiche dell'uomo della strada ma ci sono anche uomini di scienza che mettono in dubbio le nostre responsabilità riguardo al cambiamento climatico. Di solito, però, non si tratta di esperti di clima o di ecologia.

Chi si occupa di queste tematiche dice che i cambiamenti di oggi avvengono ad una rapidità che non trova riscontri nella storia passata e che i responsabili di questa velocità siamo noi, con le nostre attività [1]. Questa è la posizione dell'IPCC, il panel internazionale sul cambiamento climatico a cui partecipano centinaia di ricercatori specializzati nello studio del clima. Vent'anni fa il panel era molto cauto nell'identificare nelle nostre azioni la causa diretta del cambiamento. Ora non ha dubbi. I dati degli ultimi decenni sono inequivocabili: non si è mai visto un cambiamento così rapido e la responsabilità è nostra, visto il nostro stile di vita.

Chi ha ragione?

Non c'è modo per verificare sperimentalmente se la ragione è tutta da una parte oppure dall'altra, o in mezzo.

Per farlo avremmo bisogno di almeno altri due (ma sarebbe meglio averne di più) pianeti identici al nostro, ma solo il nostro dovrebbe essere abitato da noi. Gli altri, i controlli, dovrebbero essere senza di noi, ma con tutto il resto della natura. Questo ci permetterebbe di confrontare le condizioni di qui con quelle dei pianeti di controllo.

Non abbiamo pianeti di controllo e non possiamo provare sperimentalmente l'entità del nostro impatto. Ma possiamo confrontare porzioni terrestri in cui la nostra specie non ha un forte impatto con altre porzioni dove le nostre attività sono pervasive. Pensiamo ad esempio ad una foresta tropicale e a un campo sottoposto a coltura intensiva. Le foreste tropicali sono abitate da migliaia di specie di batteri, protisti, funghi, piante, e animali. Queste formano ecosistemi in cui le piante, autotrofe, ridanno vita alla materia (con la fotosintesi) consumando anidride carbonica e producendo ossigeno, mentre gli animali, con il loro metabolismo eterotrofo, consumano carbonio (i viventi sono fatti in gran parte di carbonio, e gli animali mangiano altri viventi) e ossigeno (necessario per bruciare il cibo) e producono anidride carbonica. Gli organismi che muoiono sono riciclati dai batteri e dai funghi eterotrofi che riportano la materia in uno stato elementare, mettendola a disposizione delle piante che le ridaranno vita.

L'anidride carbonica è essenziale per la vita delle piante e c'è qualcuno che dice che non ci dovremmo preoccupare: senza anidride carbonica le piante non possono produrre ossigeno! Di che ci lamentiamo? Il fatto è che se ce n'è troppa le cose cambiano. Anche l'ossigeno è essenziale per noi, ma se respirassimo ossigeno puro non staremmo bene! Inoltre, molto del carbonio non viene bruciato dagli erbivori, viene fissato nel legno degli alberi e finisce poi nel terreno senza diventare anidride carbonica; si ottiene così il sequestro del carbonio: nel corso di milioni di anni il carbonio sequestrato fossilizza, diventando carbone, o gas, o petrolio.

Ora mettiamo l'uomo in questo ecosistema.

L'agricoltura prevede l'eradicazione di tutte le specie animali e vegetali e la loro sostituzione con una sola specie: quella che vogliamo sfruttare, coltivandola. Gli ecosistemi naturali sono distrutti con i disboscamenti e chi sopravvive viene ucciso con veleni: i pesticidi. Gli erbicidi uccidono le piante (ad eccezione di quelle che coltiviamo) mentre gli insetticidi uccidono gli animali. La biodiversità ricchissima della foresta viene sostituita da una sola specie. Visto che questo distrugge i naturali processi ecologici di riciclo, dobbiamo nutrire con fertilizzanti chimici le specie che coltiviamo. E le dobbiamo innaffiare. Siamo sette miliardi, e dobbiamo mangiare. E così bruciamo le foreste (lo stiamo facendo in Amazonia e in Africa, dopo aver distrutto le nostre) e le sostituiamo con le coltivazioni intensive.

Anche le piante coltivate producono ossigeno e consumano anidride carbonica. Ma subito dopo vengono consumate dagli erbivori: noi, oppure gli animali di cui ci nutriamo. Il metabolismo degli organismi che consumano quelle piante, inclusi noi, consuma ossigeno e produce anidride carbonica. Nulla rimane sequestrato nel legno o nel terreno.

Il metabolismo, come quello di tutti gli eterotrofi, prevede che si bruci (ossidi) carbonio (il combustibile), usando l'ossigeno come comburente, e si produca anidride carbonica come prodotto di scarto. Ma noi non bruciamo solo il carbonio derivante dal nostro nutrimento. Oltre a energia metabolica, noi bruciamo anche combustibili al di fuori del nostro corpo, per produrre ulteriore energia. Abbiamo distrutto le foreste, bruciando il legno per riscaldarci, poi siamo passati ai combustibili fossili: carbone, gas e petrolio. L'energia che produciamo, bruciandoli, sostiene tutte le nostre attività ed è parte del nostro metabolismo allargato. I combustibili fossili sono carbonio che non è stato utilizzato per produrre energia (e anidride carbonica) e che è stato invece sequestrato nei depositi fossili. Il sequestro del carbonio è un processo che stabilizza il clima e che avviene da milioni di anni. In pochi decenni abbiamo estratto e bruciato il carbonio sequestrato nel corso di intere ere geologiche e ora lo stiamo immettendo in atmosfera sotto forma di anidride carbonica. Gran parte delle terre emerse idonee alla produzione agricola sono state profondamente alterate, e il processo continua

perché l'accrescersi della popolazione umana richiede sempre crescenti produzioni alimentari. A terra abbiamo distrutto quasi tutti i sistemi naturali, e ora tocca al mare. Abbiamo distrutto quasi tutte le popolazioni naturali di specie marine commerciali, e ora stiamo passando dalla pesca all'acquacoltura, l'equivalente marino dell'agricoltura.

L'età del fuoco

La storia della nostra specie si distingue in diverse età. Inizia con l'età della pietra, continua con l'età del rame, seguita da quella del bronzo e poi del ferro. Ora parliamo di era atomica. Ma in effetti siamo rimasti all'età del fuoco: siamo ancora una specie che brucia combustibili. Non basta il nostro metabolismo, l'energia corporea che ci tiene in vita. Abbiamo anche un metabolismo extracorporeo, e bruciamo combustibili per ottenere altri tipi di energia.

Quando questo si moltiplica per sette miliardi di umani (con alcune popolazioni che consumano moltissimo e altre meno) abbiamo comunque una media pressione sul sistema che ne determina il cambiamento drastico. Quello che facciamo si vede anche dallo spazio. Provate a guardare il Mato Grosso su Google Earth e poi guardate il Kansas. La desertificazione procede. Certo, i deserti si sono formati anche prima del nostro avvento evolutivo, ma oggi stiamo velocizzando la loro formazione. L'agricoltura è a tutti gli effetti un deserto potenziale, mantenuto in vita artificialmente.

Possiamo dire che tutto questo non abbia impatti? Non parliamo poi delle grandi industrie, delle megalopoli, di automobili e aeroplani, del riscaldamento delle città, dell'impermeabilizzazione del suolo, della cementificazione, dello sbarramento dei fiumi e della bonifica delle paludi.

Gli impatti locali delle singole attività si sommano e interagiscono tra loro. Anche alle maggiori profondità oceaniche troviamo la nostra spazzatura. I pesticidi si diffondono fin nel grasso degli orsi polari, al polo nord, e in quello dei pinguini, al polo sud.

Come reagiscono gli ecosistemi e la biodiversità?

Formazioni imponenti, costruite dai viventi in migliaia di anni, degradano rapidamente a causa delle temperature elevate. La grande barriera corallina australiana, lunga duemila chilometri, è in rapida regressione. Gli animali che la abitano sono adattati alle temperature più elevate presenti negli oceani. Queste temperature sono rimaste stabili e ottimali per il tempo necessario alla formazione della barriera e ora tutto si sfalda, in tempi brevissimi.

Lo stesso avviene per le specie che vivono in climi temperati o freddi. Il Mediterraneo è sempre più interessato da mortalità massive di specie adattate a condizioni che non ci sono più e, al loro posto, arrivano le specie tropicali, a centinaia. Le faune e le flore si spostano, abbandonando aree divenute ostili, cercandone altre che possano soddisfare le loro esigenze. Anche i rappresentanti della nostra specie lo fanno: le migrazioni e le guerre sono di solito dovute a cambiamenti radicali delle condizioni ambientali, soprattutto con fenomeni di siccità e carestia che, a loro volta, innescano guerre per l'accaparramento di risorse limitate.

Tutto questo è sempre avvenuto: le formazioni coralline erano presenti anche in Mediterraneo, le troviamo sulle nostre montagne, fossili. Ma ci sono voluti milioni di anni per portarle all'estinzione, con catastrofi dovute alla deriva dei continenti. Anche la grande barriera corallina australiana sarebbe morta, prima o poi. Tutte le specie presenti oggi sul pianeta moriranno e saranno sostituite da altre specie, è un fenomeno normale che possiamo ricavare dallo studio dei fossili. Sarà normale che tutti gli umani presenti oggi sul pianeta muoiano, sostituiti da altri umani e, poi, sarà normale che anche la nostra specie si estingua, magari per evolvere in qualcosa d'altro. Come è sempre successo. Non sono la morte e l'estinzione in sé ad essere un problema, è la velocità del cambiamento ad essere innaturale: le Nazioni Unite stimano che nei prossimi 50 anni si estinguerà un milione di specie [2]. È vero che il nostro pianeta ha già visto radicali cambiamenti in tempi relativamente brevi: quando i primi esseri produttori di ossigeno apparvero sul pianeta, l'atmosfera cambiò e gli organismi

anaerobi (intolleranti all'ossigeno) andarono in crisi e finirono relegati in ambienti dove questo veleno non arriva. Le nuove condizioni aprirono la strada agli organismi che respirano ossigeno, fino a noi. Quello che per gli anaerobi è un veleno mortale, per noi e per tutti gli aerobi è di vitale importanza. Oggi al posto degli aerobi, a cambiare le condizioni ambientali in tempo brevissimo ci siamo noi. Fa parte dei processi evolutivi e l'evoluzione è un processo inarrestabile: la stabilità non esiste, in natura, se non per brevi periodi. Le specie nascono, crescono, si trasformano, muoiono.

Le leggi della natura

Noi siamo un prodotto dell'evoluzione e tutto quello che facciamo è comunque un prodotto della natura. Compresa le nostre distruzioni. Il successo di una specie si misura con la sua numerosità. Una legge di natura, infatti, dice: tutte le specie tendono ad aumentare di numero, e questo avviene attraverso i processi riproduttivi: la legge della crescita. Un'altra legge, però, dice: non tutte le specie possono crescere a dismisura perché le risorse per sostenerle si erodono man mano che il numero di esemplari aumenta: la legge del limite [3]. Le specie di maggior successo sono quelle con tantissimi individui, ma sono proprio loro ad essere in pericolo, perché consumano le risorse ad esse necessarie e, facendolo, modificano gli ecosistemi che le sostengono, deteriorandoli nelle caratteristiche più necessarie alla loro stessa esistenza. Il deterioramento, però, è un fenomeno relativo. Condizioni per noi pessime potranno essere ottimali per altre specie e saranno loro a prendere il nostro posto. La storia della natura procederà. Il collasso delle specie dominanti apre la strada ad altre specie. Lo studio dei fossili ci mostra come la materia vivente abbia subito almeno cinque estinzioni di massa: le specie dominanti sono scomparse e sono state sostituite da altre specie che, a loro volta, sono diventate dominanti. I dinosauri sono un esempio proverbiale di questo successo, e la loro scomparsa ha aperto la strada a uccelli e mammiferi, compresi noi.

Misurare il nostro successo

Se per le altre specie il successo si misura con la loro biomassa, per noi non è così. Oltre alla nostra biomassa bisogna aggiungere quella delle specie che abbiamo domesticato, siano esse animali o vegetali, perché esse ricadono sotto il nostro controllo e servono per i nostri scopi. Nessun'altra specie ha condizionato in modo così pervasivo l'esistenza di altre specie, se non per instaurare simbiosi mutualistiche con vantaggi reciproci. Nel caso della domesticazione, invece, i vantaggi sono solo nostri visto che, di solito, le specie domestiche finiscono per essere mangiate. Il nostro impatto, quindi, non è solo quello dei nostri corpi, ma anche quello dei corpi di tutti gli esseri che soddisfano i nostri bisogni e che poi, invariabilmente, sono metabolizzati e trasformati in rifiuti e anidride carbonica.

Nessuna specie ha fatto altrettanto, nessuna specie ha avuto tanto successo quanto la nostra.

Lotka e Volterra

I due grandi matematici elaborarono indipendentemente [4, 5] un modello che predice le interazioni tra due specie: una preda e un predatore. Spiegato a parole, il modello prevede che se la preda è abbondante e il predatore non lo è, l'abbondanza di risorse porterà ad un aumento del predatore (la prima legge della natura) ma la sua crescita eserciterà una pressione negativa sulla specie preda che, quindi, diminuirà. La diminuzione delle prede determinerà un limite per la crescita del predatore (la seconda legge della natura) che, di conseguenza, diminuirà di numero. Le risorse limitate, infatti, non permetteranno la sopravvivenza di tutti i predatori. La diminuzione della pressione predatoria darà una nuova possibilità di crescita alla specie preda che, quindi, aumenterà. Il suo aumento rappresenterà una nuova opportunità di crescita per il predatore. Il sistema, quindi, vede le oscillazioni sfasate di preda e predatore. In ecologia non esistono sistemi con due sole specie, e le equazioni perdono potenza man mano che il numero di interattori aumenta, come previsto dal problema dei tre corpi di [6] e dalla teoria del caos di [7].

La biodiversità, con un numero altissimo di specie che interagiscono in una rete inestricabile

di relazioni, rende gli ecosistemi molto resilienti. I predatori hanno parassiti e patogeni che ne limitano il numero, oppure sono a loro volta oggetto di predazione da parte di altri predatori. Darwin, ad esempio, fu il primo a scoprire quelle che oggi si chiamano cascate trofiche [8], infatti, scoprì che i bombi sono indispensabili per l'impollinazione del trifoglio e sono oggetto di predazione da parte dei topi di campagna. Se i topi di campagna sono abbondanti, il trifoglio è meno rigoglioso. Ma in vicinanza dei paesi, dove vivono molti gatti, i topi sono sterminati, i bombi sono più abbondanti e il trifoglio è rigoglioso. I gatti favoriscono il trifoglio! In questo sistema interagiscono trifoglio, bombi, topi, gatti ma nei sistemi complessi il numero di specie che interagiscono può raggiungere le migliaia, con reti di interazioni che ancora stentiamo a comprendere, visto che non abbiamo descritto la maggior parte delle specie che abitano il pianeta [9].

Stiamo modificando in modo radicale un sistema di cui non conosciamo la struttura e la funzione, se non a grandissime linee. La comprensione, però, è agevolata dal fatto che stiamo agendo da predatori nei confronti del resto della natura, la nostra preda. Le equazioni di Lotka e Volterra a questo punto ci possono aiutare a capire. Usiamo il resto della natura per soddisfare i nostri bisogni. Siamo predatori di quello che mangiamo o usiamo direttamente, e distruggiamo tutto quello che interferisce con i nostri scopi con disboscamenti, pesticidi, etc.

L'era delle conseguenze

Aver obbedito in modo radicale alla prima legge della natura, quella della crescita, ci sta ora esponendo ai rigori della seconda: quella del limite. La nostra presenza modifica l'ambiente che ci sostiene e lo rende sempre più inadatto alla nostra sopravvivenza. La legge del limite è stata espressa anche in altra forma, con il concetto di capacità portante: il numero massimo di individui di una specie che un dato ecosistema è in grado di sostenere. La capacità portante è il limite. Il sistema terra non può sostenere un numero infinito di umani e, quindi, non possiamo crescere all'infinito.

Il successo di una specie vegetale può portare a saturare l'ambiente e la competizione tra gli

individui è per lo spazio. Quando lo spazio è totalmente coperto dalla specie dominante, non è possibile che nuovi individui possano attecchire. La morte degli individui giunti alla fine del proprio ciclo vitale apre letteralmente spazio ai giovani alberi. La foresta, in questo caso, non prevede la crescita della popolazione dominante ma il suo mantenimento alla numerosità massima che lo spazio a disposizione (la risorsa limitata) consente. Si raggiunge cioè la capacità portante e si instaura il cosiddetto equilibrio. Per gli animali, che si nutrono di altri organismi, la competizione può diventare feroce. Se gli individui crescono troppo, non saturano l'ambiente (come fanno le piante) ma lo depauperano, portando alla quasi estinzione delle specie preda, come prevede il modello di Lotka e Volterra. Noi, invece di diminuire a causa della rarefazione delle risorse, abbiamo evoluto sistemi di estrazione sempre più efficienti, continuando ad aumentare di numero. Quando caccia e raccolta non sono state più sufficienti, abbiamo inventato l'agricoltura e l'allevamento del bestiame. E quando l'agricoltura tradizionale ha iniziato a produrre meno, abbiamo inventato l'agricoltura intensiva. E quando questa non ha più dato i risultati attesi abbiamo iniziato a modificare il genoma delle specie, in modo da renderle sempre più produttive.

Questa rincorsa nello sfruttare la natura in modo sempre più efficace porta all'estinzione di specie e alla distruzione di habitat, con perdite di biodiversità e malfunzionamento degli ecosistemi. La nostra specie non si nutre di sostanze disciolte e di luce (come le piante), ha bisogno di molte altre specie che le forniscono beni (cibo, materiali) e servizi (produzione di ossigeno, riciclo dei nutrienti, etc.). Noi siamo arrivati da poco sul palcoscenico della natura, e le cose funzionavano a meraviglia prima della nostra venuta, e possono tranquillamente funzionare anche senza di noi. Siamo noi ad avere bisogno del resto della natura, mentre il resto della natura non ha assolutamente bisogno di noi. Non c'è bisogno di spiegare, a questo punto, chi vincerà in una competizione tra noi e il resto della natura: vincerà la natura. Non riusciremo a vivere tanto a lungo da distruggerla perché la nostra azione distruttiva incide prima di tutto sulle specie che sfruttiamo e senza le quali non possiamo vivere.

Siamo preparatissimi oramai a sfruttarle, ma non riusciamo, per esempio, a distruggere le specie che consideriamo nocive. L'evoluzione le rende resistenti ai nostri veleni e invece di eradicarle le rinforziamo. Gli insetti nocivi diventano resistenti agli insetticidi che, invece, sterminano gli insetti impollinatori (come le api) e i predatori di insetti nocivi, prima di tutto gli uccelli, mentre i batteri patogeni diventano resistenti agli antibiotici che, invece, hanno forti impatti sui batteri che vivono nel nostro intestino, senza i quali non riusciamo a digerire e ad assimilare il cibo.

Questa battaglia tra noi e il resto della natura ha raggiunto punti cruciali, il conto inizia ad essere presentato, e siamo impreparati ad affrontare le conseguenze della nostra stupidità.

Il nostro interesse è di prolungare quanto più possibile la durata della nostra specie, e questo si otterrà se non modificheremo eccessivamente le condizioni che hanno portato alla nostra affermazione evolutiva. Ma fa parte della storia della vita che tutte le specie di maggior successo facciano quel che stiamo facendo noi: iniziano con pochi individui, poi crescono talmente di numero da schiantare gli ecosistemi che le supportano, e il gioco ricomincia con altre specie.

Migliaia di scienziati avvertono

Gli scienziati che si occupano di ambiente stanno lanciando moniti sempre più pressanti per convincere il resto dell'umanità che siamo in una situazione pericolosissima. I fatti sono talmente evidenti che persino le autorità ecclesiastiche lanciano allarmi e il Sommo Pontefice, con la sua enciclica *Laudato Si'* [10] chiede la conversione ecologica e, in seguito, considera l'ecicidio come un grave peccato. Non era mai successo prima che un'autorità religiosa di quel calibro chiedesse la conversione a una scienza: l'ecologia. I politici riconoscono l'importanza del problema, e firmano convenzioni sempre più ambiziose, ma poi tutto continua come se niente fosse: business as usual. Alla fine i paradigmi economici prevalgono su quelli ecologici, e l'unica legge predicata dagli economisti è quella della crescita senza limiti: un'aspettativa che obbedisce alla legge della crescita ma poi va contro natura perché non riconosce quella del limite.

Più di undicimila ricercatori di tutto il mondo hanno elaborato e sottoscritto un appello per l'emergenza climatica [11]. La parte riguardante l'ambiente marino è stata scritta proprio dall'autore di questo breve saggio, come contributing reviewer. In generale, gli scienziati chiedono che si affrontino sei problemi, innescando tendenze che ci potranno permettere di uscire dall'emergenza climatica:

1. **Energia:** siamo ancora nell'era del fuoco. Dobbiamo uscirne perché i combustibili sono a base di carbonio e la loro combustione consuma ossigeno e genera anidride carbonica. Quando si dice che questo ci riporterebbe nelle caverne si commette un errore madornale: nelle caverne già adoperavamo il fuoco! Dobbiamo smettere. Non si tratta di tornare indietro ma, invece, di andare avanti. Dobbiamo produrre energia senza bruciare combustibili, e non solo quelli fossili. Se bruciamo legno distruggiamo le foreste e interrompiamo il sequestro del carbonio, liberando anidride carbonica con la combustione. L'innovazione tecnologica deve andare in questa direzione, senza furbizie. Chi proponeva le centrali nucleari come soluzione nascondeva il problema dello smaltimento delle scorie e della dismissione degli impianti obsoleti. Per non parlare della persistenza degli effetti degli incidenti e della loro letalità. Dobbiamo produrre energia pulita, pensando a cosa faremo degli impianti quando arriveranno al fine vita e a cosa significa utilizzare alcuni materiali necessari per alcuni sistemi di produzione energetica, come le terre rare. Dobbiamo smettere di proporre soluzioni di breve termine che, nel medio e lungo periodo, causano problemi maggiori dei problemi iniziali che esse stesse avrebbero dovuto risolvere. Chi metterà a punto tali sistemi di produzione energetica avrà anche grandi vantaggi economici, e sarà un benefattore dell'umanità.
2. **Inquinanti:** non alteriamo l'ambiente con la sola produzione energetica: i nostri sistemi di produzione prevedono l'utilizzo di veleni (ad esempio i pesticidi) e la produzione di sostanze dannose come prodotti indesiderati (ma in certi casi inevitabili) dei sistemi indu-

striali. Dobbiamo inventare nuovi modi di produrre i beni che ci sono necessari, senza che si debba pagare un prezzo ambientale per averli.

3. **Natura:** stiamo esercitando una pressione insostenibile sulla natura che, invece, ci sostiene. Senza il resto della natura la nostra specie non può vivere. Dobbiamo conservare il patrimonio naturale e lavorare per restaurarlo, qualora fosse stato distrutto. La biodiversità e gli ecosistemi hanno un valore, non hanno un prezzo, proprio come la salute. Non ci sono soldi che possano pagare la nostra salute, se la perdiamo. Ci sono costi per le cure, non guadagni. Gran parte delle malattie hanno cause ambientali: per curare la nostra salute e il nostro benessere dobbiamo prenderci cura della natura. Invece abbiamo scelto di curare i sintomi (le malattie) tralasciando le cause (la distruzione dell'ambiente).
4. **Cibo:** l'agricoltura intensiva prevede l'eradicazione di ogni forma di vita (la biodiversità) e la sua sostituzione con una sola specie: quella oggetto di coltivazione. Per i motivi spiegati sopra, l'efficienza energetica di questo modo di produrre cibo è bassa, ed è ancora più bassa con l'acquacoltura di carnivori. I salmoni, le spigole, le orate sono carnivori nutriti con farine di pesce selvatico. Mangiamo leoni che nutriamo con le zebre! Dobbiamo eliminare gli sprechi alimentari, e dobbiamo nutrirci principalmente di vegetali, o di animali filtratori, come le cozze.
5. **Economia:** Concepiamo l'economia con un solo obiettivo: la crescita economica. Nel farlo dimentichiamo i costi ambientali e quelli per la salute umana (vedi il caso di Taranto). Un'economia basata sulla crescita infinita diventa obesa, e l'obesità è una malattia che, alla fine, limita le possibilità di sviluppo (non di crescita). L'obesità si cura con la dieta, e mettersi a dieta non significa carestia. Un'economia sana deve essere sostenibile e, per esserlo, non deve erodere il capitale naturale (la natura) per crescere. Se questo

avviene poi collassano gli ecosistemi e, alla fine, collassa anche l'economia.

6. **Popolazione:** siamo più di sette miliardi e non possiamo continuare a crescere, soprattutto obbedendo ai paradigmi che impongono la crescita di tutti i misuratori economici. In occidente abbiamo smesso di crescere perché il nostro tenore di vita è aumentato e le donne non sono più considerate macchine per produrre figli. La bomba demografica si disinnesci con l'equa ripartizione delle risorse tra i popoli. Se questo non avviene, loro scappano dal disagio e vengono da noi. L'Italia da questo punto di vista ha fortunatamente smesso di crescere, ma (anche se questo non è scritto nel rapporto) stiamo subendo una intollerabile emorragia di giovani con alto livello di istruzione.

Sostenibilità

La risposta a questo allarme è la sostenibilità. Bisogna ridisegnare i processi di produzione e di consumo ed è in questa direzione che si misura lo sviluppo di un paese. Abbandonare i vecchi sistemi di produzione e consumo comporterà sacrifici occupazionali da una parte, ma aprirà nuove prospettive da altre parti. Chi lo capirà sarà in vantaggio rispetto a chi non lo capirà e ogni paese deve fare la sua parte, senza attendere che siano gli altri a farlo.

Una nuova cultura

I responsabili della catastrofe ecologica, economica e sanitaria hanno operato secondo principi errati (lo dimostrano i risultati della loro applicazione) e non possono proprio loro essere chiamati a correggere i danni che hanno procurato. La conversione ecologica predicata da Francesco nella sua *Laudato Si'* dimostra come questo bisogno di innovazione verso un nuovo modo di vedere il mondo sia trasversale a due visioni un tempo contrapposte: quella scientifica e quella religiosa. Occorre ora innestare questi principi nella fabbrica della cultura: la scuola, dalle elementari all'università. Il Ministro Fioramonti sta proponendo di introdurre l'educazione ambientale nei programmi scolastici. Bisognerà vedere

chi sarà chiamato ad aggiornarli e se i docenti saranno preparati a svolgere temi che sono assenti in gran parte degli attuali percorsi di formazione. Le cose spiegate in questo articolo non fanno parte dei programmi scolastici pre universitari e della stragrande maggioranza dei programmi universitari. Ignorare la composizione della biodiversità e il funzionamento degli ecosistemi non è considerato disdicevole dagli attuali esponenti della cultura (inclusa la scienza).

Identificare le priorità

Lo studio di ogni argomento teso a diminuire la nostra ignoranza merita di essere perseguito e la voglia di conoscenza è una caratteristica biologica della nostra specie. Esistono però campi di indagine che rivestono particolare urgenza. Il nostro peso sugli ecosistemi li sta portando al collasso e questo mette in pericolo la nostra sopravvivenza. Non mi risulta che ci siano urgenze più impellenti. Per affrontare questo problema dobbiamo migliorare le nostre conoscenze su biodiversità e funzionamento degli ecosistemi perché da essi dipendiamo direttamente e su essi agiscono i nostri impatti distruttivi. Tutti i trattati internazionali concordano che la situazione sia estremamente seria, ma poi gli sforzi economici del finanziamento alla ricerca non vanno in questa direzione. Non voglio fare l'elenco degli argomenti su cui si investe moltissimo, e non voglio innescare una guerra tra branche della scienza. È un dato di fatto che non sappiamo quante specie abitano il nostro pianeta e quanto ognuna di esse contribuisca al funzionamento degli ecosistemi. Dobbiamo ridurre l'ignoranza in questo campo, se vogliamo intervenire in modo razionale ed efficace su questioni che riguardano la salute degli ecosistemi che ci sostengono.

Esiste, invece, un disaccoppiamento tra le priorità identificate e gli sforzi per soddisfare le necessità conoscitive per affrontarle. Accade che ricercatori impegnati in altri campi della scienza si sentano minacciati per quel che riguarda i finanziamenti che fino ad ora hanno ricevuto e che, per mantenerli, tendano a sminuire la gravità della situazione. Quelli che lo fanno, però, hanno credenziali scientifiche sulla biodiversità e sul funzionamento degli ecosistemi pari a

quelle di un ecologo sulle particelle elementari, i buchi neri e le onde gravitazionali: nessuna.

L'autorevolezza degli esponenti della scienza non è trasversale ad ogni branca della ricerca, ma si limita alla tematica oggetto della loro specializzazione.

Il confronto tra le varie discipline è salutare, come è salutare la loro collaborazione. Certamente la storia naturale ha ricevuto scarsissima attenzione e i risultati sono evidentissimi: stiamo distruggendo le premesse per la nostra sopravvivenza a causa della nostra ignoranza sulla struttura e il funzionamento dei sistemi che ci sostengono e che stiamo irresponsabilmente distruggendo. La strada verso un rapporto armonico tra noi e la natura passa dal supporto scientifico al rapporto stesso. Descrivere la struttura degli ecosistemi (la biodiversità) e comprendere la loro funzione è oggi la priorità scientifica più impellente, alla quale dovremmo dedicare risorse rilevanti. Per il momento non lo stiamo facendo e la natura ci sta avvertendo in modo sempre più drastico che queste scelte sono scellerate.



- [1] <https://www.ipcc.ch/>
- [2] J. Tollefson: "Humans are driving one million species to extinction", *Nature* **569** (2019) 171.
- [3] F. Boero: *Ecco perché i cani fanno la pipì sulle ruote delle macchine. L'uomo e il suo rapporto con gli altri animali e le leggi della natura*. Manni Editori, San Cesario (2018).
- [4] A. J. Lotka: "Elements of physical biology", *Science in the Twentieth Century* **21** (1926) 341.
- [5] V. Volterra: "Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically", *Nature* **118** (1926) 558.
- [6] H. Poincaré: "Sur le problème des trois corps et les équations de dynamique", *Acta Mathematica* **13** (1890) 1.
- [7] E. N. Lorenz: "Can chaos and intransitivity lead to interannual variability?", *Tellus* **42 (A)** (1990) 378.
- [8] C. Darwin: *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. John Murray, London (1859).
- [9] F. Boero: "The study of species in the era of biodiversity: a tale of stupidity", *Diversity* **2** (2010) 115.
- [10] Francesco: *Lettera Enciclica Laudato Si' del Santo Padre Francesco sulla Cura della Casa Comune*. La Santa Sede, Città del Vaticano (2015).
- [11] W. J. Ripple, C. Wolf, T. M. Newsome, P. Barnard, W. R. Moomaw, "World Scientists Warning of a Climate Emergency", *BioScience*, (2019), biz088 <https://doi.org/10.1093/biosci/biz088>

Ferdinando Boero: Professore di Zoologia dell'Università di Napoli Federico II, associato al CNR-IAS di Genova, rappresenta il CoNISMa nell'European Marine Board, presiede il Consiglio Scientifico della Stazione Zoologica Anton Dohrn di Napoli. Ha partecipato alla stesura di documenti strategici sulla sostenibilità marina per il G7, la Commissione Europea, L'European Academies Science Advisory Council. Insignito della Medaglia Alberto I dell'Institut Océanographique di Parigi e della Medaglia per le Scienze Fisiche e Naturali dell'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL.

Cambiamento climatico e protezione delle coste

Because waves are the prime destructive force, to design a safe structure, facts must be obtained about the expected waves and their action.

Ira Augustus Hunt

Marco Delle Rose

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, CNR, Lecce

Corrado Fidelibus

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento, Lecce

Mario Marcello Miglietta

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, CNR, Padova

Le aree costiere sono particolarmente sensibili al cambiamento climatico perché, oltre alle conseguenze legate alle variazioni di temperatura e precipitazioni, subiscono direttamente anche quelle dovute agli aumenti del livello medio del mare e dell'altezza delle onde. Le proiezioni dei modelli climatici prevedono che, entro la fine del XXI secolo, il livello medio del Mediterraneo potrebbe essere più alto di oltre mezzo metro rispetto all'attuale. Un altro effetto del riscaldamento dell'atmosfera terrestre nel Mediterraneo, ossia l'aumento dell'intensità e/o della frequenza di fenomeni meteorologici estremi, come i cicloni con caratteristiche tropicali (noti come *medicane*), potrebbe inoltre accelerare alcuni processi di erosione costiera. Tutto ciò comporterebbe notevoli impatti ambientali ed economici. Verranno qui illustrati alcuni esempi e discusse le conseguenze sulle opere e sulle attività dell'uomo.

La previsione degli impatti

Prevedere le conseguenze ambientali ed economiche del cambiamento climatico è un'attività scientifica complessa. Ovvio prerequisito è la disponibilità di ipotesi attendibili circa le variazioni dei parametri meteorologici (temperatura e umidità dell'aria, pressione atmosferica, radiazione solare) e dei fenomeni atmosferici (evaporazione, precipitazioni, vento). La previsione degli impatti sulle coste nel prossimo futuro necessita poi di un ulteriore dato, ossia di accurate stime della quota del livello medio marino. Uno dei metodi più utilizzati per questo scopo consiste nell'elaborare le serie di dati idrometrici disponibili per stabilire quantitativamente le tendenze in funzione di determinate variazioni climatiche. Per ciò che attiene l'innalzamento globale del mare calcolato in base a misure reali (dall'inizio del XIX secolo, cioè da quando sono in funzione un discreto numero di stazioni sparse per gli oceani e i mari), esso è compreso tra 16 e 21 centimetri, di cui circa 7 negli ultimi 30 anni [1]. Quest'ultimo dato indica un'evidente accelerazione del feno-

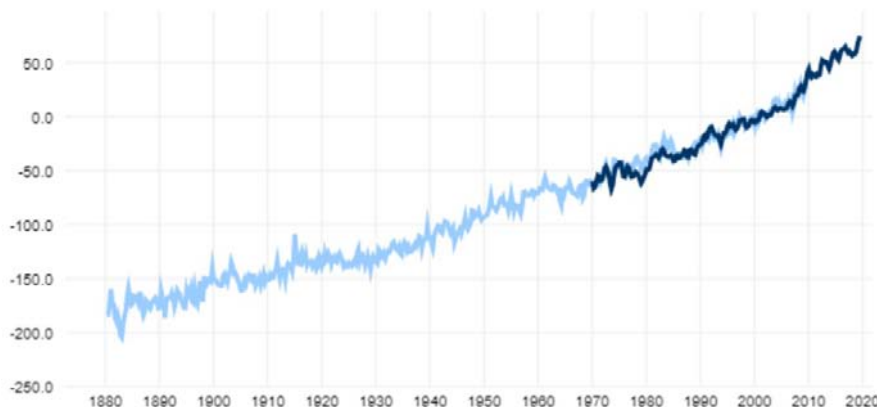


Figura 1: La linea azzurra mostra l'innalzamento del livello medio marino (in mm) in base a dati satellitari e misure idrometriche [2]. La linea blu si basa sui dati recentemente elaborati dalla Università delle Hawaii (<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-sea-level>).

meno [2] (figura 1), dovuta sia allo scioglimento dei ghiacci continentali (Antartide, Groenlandia), sia alla dilatazione delle masse d'acqua oceaniche (causata, a sua volta, dal riscaldamento delle loro superfici).

Per quanto riguarda le proiezioni del livello del Mar Mediterraneo, è stato stimato che esso potrebbe salire, in media, fino a 20 centimetri entro il 2050 e fino a 57 centimetri entro il 2100 [3]. Questi innalzamenti determineranno incrementi della vulnerabilità delle aree costiere ai fenomeni di allagamento, giacché le condizioni idrodinamiche potenzialmente più dannose risultano dalla combinazione dei livelli massimi di alta marea con le onde più alte prodotte durante le tempeste più estreme [4]. Di pari passo, aumenteranno anche i rischi di erosione delle coste e i relativi impatti socio-economici [5].

Il concetto base che unisce gli eventi estremi al riscaldamento climatico è l'aumento dell'energia immagazzinata nell'atmosfera, che renderà più ricorrenti le ondate di calore. Numerose ricerche scientifiche hanno mostrato la proporzionalità diretta tra riscaldamento climatico e numero, o intensità, degli eventi estremi attesi, ivi comprese le tempeste marine [6, 8, 7]. Vari tipi di eventi estremi sono stati analizzati attraverso diversi metodi di ricerca. Ad esempio, soluzioni analitiche e simulazioni Monte Carlo sono state utilizzate per quantificare l'effetto prodotto sul numero delle ondate di calore [9]. È stata così definita una relazione quasi lineare tra il numero di estremi caldi e la tendenza al riscaldamento. Tuttavia, per eventi che superano un valore soglia di deviazioni standard dalla media delle serie temporali utilizzate per le simulazioni, la dipendenza dal riscaldamento risulta fortemente non

lineare. Ciò a testimoniare la complessità delle risposte del sistema climatico terrestre alle variazioni di ogni singola componente. L'insieme delle simulazioni prodotte dai modelli di cambiamento climatico utilizzati negli studi dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) fornisce interessanti indicazioni sullo scenario climatico atteso al termine del secolo in corso [6]. Le simulazioni mostrano, in modo concordante, aumenti sia del numero dei giorni caldi, sia della durata delle ondate di calore, mentre gli estremi freddi sono previsti in diminuzione. Maggiori incertezze vi sono invece per ciò che riguarda gli eventi estremi di aridità e di pioggia, con l'eccezione di alcune aree geografiche. Pertanto, l'aumento di aridità nel bacino del Mediterraneo e quello delle precipitazioni eccezionali alle alte latitudini nell'emisfero settentrionale, risultano tra gli scenari con maggiori probabilità.

L'evoluzione nel tempo dell'intensità dei sistemi ciclonici di origine tropicale, in funzione dei cambiamenti climatici, è da tempo oggetto di particolare attenzione da parte degli studiosi. Il quadro delineato è piuttosto variegato. I record geologico-paleoclimatici (serie stragrafiche) mostrano variazioni secolari del numero di cicloni tropicali, sebbene non si identifichino tendenze significative per l'intero arco temporale coperto dalle misure idrometriche. Tuttavia, negli ultimi decenni sono stati osservati trend significativi, ad esempio, per quanto riguarda l'Oceano Atlantico [10]. Inoltre, i modelli climatici prevedono per il prossimo futuro una riduzione del numero atteso di cicloni tropicali su scala globale, unitamente però all'incremento delle intensità di quelli estremi [11]. Anche la letteratura scientifica che si occupa degli effetti del riscaldamento

damento climatico sulla tempestosità nel Mar Mediterraneo è ricca di contributi. Vari modelli oceanografici hanno implementato simulazioni barometriche con serie di misure del livello marino registrate, nell'ultimo secolo, da apposite stazioni di monitoraggio. A scala dell'intero bacino, vi è accordo in questi studi nel prevedere una tendenza generale di diminuzione della tempestosità, relativamente alla frequenza dei picchi locali e alla durata ed estensione areale delle mareggiate [12, 13]. A scala di maggior dettaglio, le previsioni basate su questo tipo di modellistica risultano invece di segno opposto per diversi mari del Mediterraneo, tra cui l'Adriatico meridionale e il Tirreno. Peraltro, la suddetta tendenza generale non risulta completamente giustificata dalla variazione del livello del mare indotta dalla pressione atmosferica.

Altre simulazioni utilizzano **modelli climatici accoppiati** (oceano-atmosfera) su scala globale o regionale ma comunque con alta risoluzione. Con questo approccio, e considerando diversi scenari di riscaldamento al termine dei prossimi 50 anni, si trovano importanti aumenti (rispetto ai valori attualmente misurati) delle altezze d'onda prodotte dalle tempeste sulle coste direttamente colpite dai cicloni tropicali [8]. Altri studi condotti sull'area mediterranea giungono ad analoghe conclusioni, sia mediante l'uso di modelli climatici accoppiati [14], sia attraverso altre metodologie quali analisi statistico-deterministiche [15]. Insomma, anche per le coste che si affacciano sul *Mare Nostrum* ci sono ragionevoli elementi per porre ancora più attenzione, già nell'immediato futuro, al problema della protezione dagli eventi estremi associati a intense tempeste. Nella sezione successiva, vengono quindi descritte le caratteristiche principali di perturbazioni atmosferiche tipiche del Mediterraneo, i *medicane*.

I *medicane*

A causa delle sue peculiari caratteristiche, il bacino del Mediterraneo è una delle aree nel mondo con più frequente genesi di cicloni. Molti di questi vortici sono a scala sinottica (scala orizzontale di migliaia di km), e sono responsabili delle perturbazioni atmosferiche che interessano comunemente le medie latitudini. Tuttavia,

le immagini satellitari hanno mostrato che esistono occasionalmente cicloni a mesoscala (scala orizzontale di decine/centinaia di km), che mostrano caratteristiche simili ai cicloni tropicali, sebbene siano più deboli e piccoli. Essi sono generalmente chiamati *medicane*, acronimo per uragani mediterranei [16]. Questi cicloni mostrano da satellite la presenza di un occhio privo di nubi sopra il loro centro, da cui si estendono bande a spirale di precipitazione. Inoltre, a differenza dei cicloni extra-tropicali, tipici delle nostre latitudini, hanno un nucleo centrale caldo, soprattutto in prossimità della superficie del mare, dove essi si sviluppano. Infatti, i processi di interazione aria-mare, attraverso gli intensi flussi superficiali che trasferiscono energia dall'oceano all'atmosfera, sono fondamentali per la loro intensificazione, insieme con il rilascio di calore latente dovuto alla convezione [17].

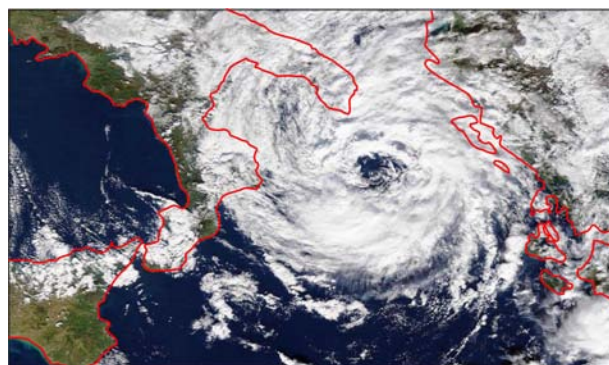


Figura 2: Immagine del satellite Terra MODIS, 18 Novembre 2017, ore 11.30 (ora locale).

Due sono le regioni più interessate da questo tipo di cicloni: la zona delle isole Baleari e quella del mar Ionio. I cicloni appartenenti a quest'ultima categoria si formano generalmente sottovento alla catena dell'Atlante, poi si spostano sul Mediterraneo meridionale, dove prendono energia dalla calda superficie del mare. Mentre alcuni di questi si spostano da ovest verso est, spingendosi sulle coste del Mediterraneo orientale, la maggior parte mostra una traiettoria verso nord-est, interessando la Sicilia, la Grecia, oppure spingendosi sino al Salento. Il 26 settembre 2006 un intenso Medicane attraversò in poche decine di minuti la penisola Salentina dallo Ionio verso l'Adriatico con un vento massimo misurato presso l'aeroporto di Galatina di 145 km/h [18]. Più recentemente, il 18 Novembre 2017 il ciclone "Numa" ha lambito le coste del sud Salento [19],

producendo venti intensi e forti precipitazioni (figura 2).

Negli ultimi anni, si è registrato un rinnovato interesse sui *medicane*, dovuto al forte impatto di questi vortici, spesso associati a venti e precipitazioni particolarmente intensi sulle aree costiere del Mediterraneo. Talvolta, i forti venti determinano onde molto alte. Ad esempio, il ciclone "Rolf", che ha interessato il Mediterraneo occidentale tra il 5 e il 9 novembre 2011, ha causato venti a 10 m di quota superiori a 108 km/h responsabili di altezze d'onda significativa sino a 8 m, che hanno in parte interessato la costa francese del Mediterraneo [20].

Un altro argomento di forte interesse sono le implicazioni del cambiamento climatico per l'intensità e la localizzazione geografica dei *medicane*. Recenti studi, che utilizzano simulazioni con modelli climatici regionali e globali, concordano nel prevedere nel clima futuro un aumento di intensità di questi cicloni, ma una leggera diminuzione del loro numero [7]. In altri termini, le condizioni favorevoli al loro sviluppo saranno meno frequenti, ma aumenterà il numero degli eventi molto intensi, grazie anche alla più alta temperatura del mare e, quindi, alla maggiore energia disponibile. Comunque, i risultati di questi studi dovranno essere verificati in futuro utilizzando modelli con risoluzioni più elevate, che sono diventate disponibili negli ultimi anni, possibilmente utilizzando sistemi modellistici accoppiati che rappresentano in modo coerente i processi di interazione aria-mare. I progressi nella formulazione dei modelli e nella loro risoluzione forniranno una più adeguata rappresentazione del rischio di cicloni intensi in un contesto di cambiamento climatico.

Su alcune recenti mareggiate

La costa ionica del Salento (Puglia) è stata colpita negli ultimi anni da intense mareggiate, i cui effetti sono stati evidenziati dai media con riferimento sia ai danni alle infrastrutture e agli arretramenti degli arenili, sia ai pericoli per la pubblica incolumità. Peraltro, dopo essere stato lambito dal *medicane* "Zorbas" [21], nell'autunno 2018 il Salento è stato anche interessato da altri fenomeni meteorologici estremi quali anomalie termiche e precipitazioni eccezionali [22]. Sei epi-

sodi di **mare agitato** e **molto agitato** sono stati registrati, tra Ottobre e Novembre, dalla stazione Liby dell'Aeronautica Militare di S. Maria di Leuca in base al codice aeronautico internazionale (*aeronautical Q-signal*) QUK, unitamente a elevati valori di lunghezza d'onda stabiliti mediante il codice QUL nei bollettini METAR di interesse per la meteorologia aeronautica. Oltre a numerosi danni a beni materiali, le mareggiate hanno anche causato lo spostamento di vari blocchi di roccia sulla piattaforma costiera. Uno di essi, con volume inferiore a 1 m³ (peso stimato inferiore alla 2 tonnellate), è stato staccato dalla massa rocciosa secondo piani di discontinuità stratigrafica e tettonica, lasciando ben in vista la nicchia di distacco a indicare la posizione del blocco precedente l'impatto delle onde di tempesta (figura 3).



Figura 3: Torre Suda; in alto, sono evidenziati il blocco staccato dalla massa rocciosa (in primo piano) e un suo frammento (sullo sfondo); in basso, la nicchia di distacco ubicata a circa 7 m dal blocco.

Questa singolare situazione ha permesso di effettuare uno specifico studio teorico-osservazionale [23]. In particolare, per deter-

minare l'altezza delle onde in mare aperto [24], la velocità del flusso sulla piattaforma (onda di *bore*) in corrispondenza della posizione iniziale del masso [25] è stata messa in relazione con le condizioni dinamiche per le quali lo stesso può essere rimosso [26]. Il risultato ottenuto (3.6 m) è paragonabile con le altezze delle onde significative registrate dalla stazione di S. Maria di Leuca (valori compresi tra 2.5 e 6 m) nel periodo considerato. Ciò suggerisce una bassa capacità del fondale antistante la costa a dissipare per attrito l'energia del moto ondoso. Occorre rilevare che per lo spostamento del blocco di figura 3 si può escludere come evento causativo l'impatto sulla costa di uno tsunami. Infatti, nel periodo considerato, il terremoto potenzialmente **tsunamigenico** più rilevante, quello di magnitudo Mw 6.8 verificatosi a largo di Zante il 26 Ottobre 2018 (per il quale la Protezione Civile nazionale ha dichiarato un'allerta arancione per le coste di Puglia e Calabria) ha prodotto solo un innalzamento di una decina di centimetri nel Golfo di Taranto [23].

Condizioni meteorologiche estreme si sono nuovamente manifestate sulla costa ionica del Salento il 12-13 Novembre 2019. Un profondo vortice ciclonico in moto verso nord nel Mediterraneo centrale, di cui alcuni modelli prevedevano un'evoluzione in medicane, ha portato venti di scirocco con raffiche di 100 km/h sul Salento ionico. I valori di QUL riportati presso la stazione di S. Maria di Leuca dal mattino del 12 novembre al pomeriggio del 13 sono compresi tra 6 a 8, quelli di QUK tra 7 e 9. La lunghezza delle onde morte ha quindi superato i 200 m. Lo stato del mare è stato da **grosso** a **tempestoso** con relative altezze delle onde significative comprese tra 9 e oltre 14 m. La tempesta scatenata dal ciclone ha causato danni alle infrastrutture e disagi alle attività. A Gallipoli, il lungomare è stato chiuso al traffico a causa di blocchi di roccia rimossi dalle barriere frangiflutti e frammenti di manufatti, trascinati nel mezzo della carreggiata dalla furia delle onde. Il blocco di dimensioni maggiori presentava un volume di circa 3 m³ e un peso stimato di circa 8 tonnellate (figura 4). In altre località, la tempesta ha divelto muretti del lungomare distanti dalla linea di costa sino a circa 25 metri. Risulta estremamente complesso determinare l'energia delle onde che può aver

spostato tali blocchi. Valutazioni orientative sono tuttavia possibili ricorrendo, anche in questo caso, a formule idrodinamiche **speditive**, per le quali forma dei blocchi e profilo della costa sono geometricamente semplificate, e conseguire a ritroso il valore di tale energia [23, 25]. Sulla base di queste formule, per i blocchi spostati durante la tempesta del 12-13 Novembre 2019, le altezze in mare aperto delle onde risultano comprese tra 3.8 e 6.8 m, valori congruenti con le altezze delle onde significative misurate dalla stazione di S. Maria di Leuca.

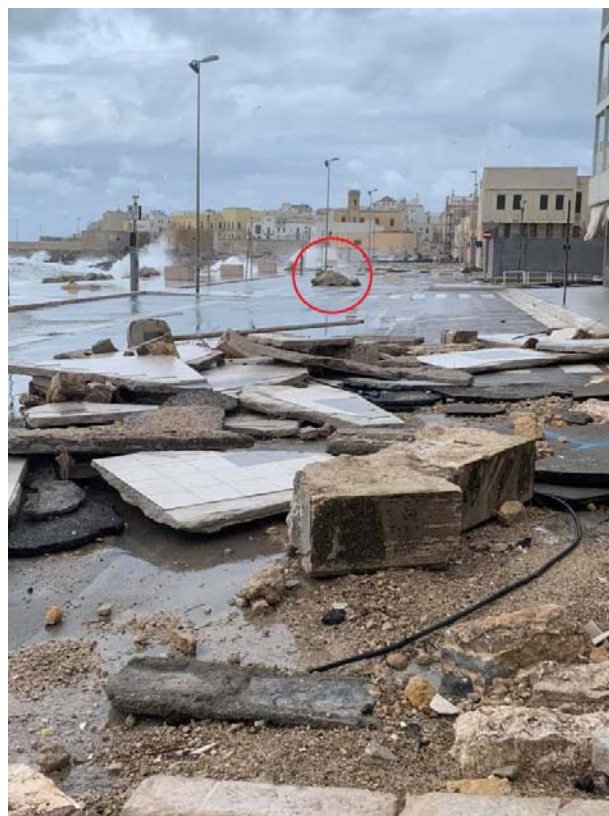


Figura 4: Gallipoli, lungomare della Giudecca; effetti della mareggiata del 12-13 novembre 2019. Il blocco asportato dalla barriera frangiflutti è evidenziato dal cerchio rosso.

Gli esempi descritti evidenziano comunque la necessità di proteggere le coste dalle onde di tempesta mediante la programmazione di adeguati interventi ingegneristici.

La protezione delle coste

L'innalzamento del livello marino e l'intensificazione delle perturbazioni cicloniche costituiscono motori meccanici dell'alterazione delle coste, che si sostanzia in danni diffusi a infrastruttu-

Lo spostamento di blocchi costieri per effetto di onde di tempesta

Nella letteratura scientifica non mancano episodi ben documentati di trasporto di blocchi di roccia causati da onde di tempesta (si vedano ad esempio [28, 29, 30]). Quello descritto da C. A. Süssmilch [31] ha un significato particolare, trattandosi dello spostamento per circa 50 metri di un masso di ben 235 tonnellate (volume 100 m^3). In base ai modelli idrodinamici e alle equazioni solitamente utilizzati, le onde di tempesta non dovrebbero possedere energia sufficiente per spostare un blocco di tali proporzioni. Ciò evidenzia come le semplificazioni modellistiche, pur necessarie per l'avanzamento delle conoscenze e per le applicazioni pratiche, possono talvolta non cogliere la reale complessità dei fenomeni naturali. Processi non considerati dai modelli possono essere determinanti, come ad esempio l'aumento di altezza dell'onda all'impatto con la costa per effetto di ben definite interazioni tra più onde frangenti in gruppo (*wave amplification*, teoricamente sino a oltre 5 volte l'altezza dell'onda significativa in mare aperto, [32]). Non a caso, quindi, alcuni ricercatori sostengono la necessità di definire un nuovo paradigma scientifico per l'analisi del processo idrodinamico in questione, anche avvalendosi di modelli tridimensionali che richiedono notevoli risorse computazionali [33, 34].

Infine, due precisazioni terminologiche. 1) L'altezza dell'onda significativa (H_s) corrisponde alla media delle altezze del terzo più alto delle onde. Tali altezze possono essere stimate da osservatori esperti oppure elaborate da misure ondametriche. Si tratta di un parametro di peculiare importanza sia in oceanografia, sia in ingegneria. Valga ad esempio il fatto che H_s è considerato nella progettazione delle opere di protezione delle coste. 2) Le onde che risalgono la terraferma, dopo aver sormontate le ripe costiere e in determinate situazioni topografico-batimetriche, assumono una forma simile a quella delle onde di marea che si muovono controcorrente lungo le foci dei grandi fiumi (*tidal-bore* della letteratura in lingua inglese). Ecco perchè sono denominate *bore-like waves* o, più semplicemente, onde di *bore*.

re ed edifici. Imperativo è ridurre i danni con specifici progetti di protezione costiera. In generale, due approcci possono essere utilizzati nella redazione di tali progetti: un approccio *hard* e uno naturalistico (*soft engineering approach*) [27]. Con il primo si concepiscono barriere frangiflutti, blocchi con muro di cemento a tergo e pennelli, con il secondo approccio ripascimenti, dune e paludi salmastre.

L'approccio *hard* è convenzionale e largamente usato e abusato nel passato, è intuitivo e provvede alla necessità di conseguire un risultato sicuramente nel breve termine. In molte situazioni le opere costruite con questo approccio hanno funzionato e continuano a funzionare; tuttavia, in assenza di una visione dilatata rispetto al problema locale, esse sovente comportano l'aumento di erosione e squilibri ecologici nei settori di costa confinanti. Inoltre, in base ai previsti tassi di innalzamento del livello del mare, mentre le quantità dei materiali e i costi associati per le opere di estensione limitata dovrebbero aumentare linearmente, per quelle di portata maggiore, quali ad

esempio le protezioni di grandi contesti urbani, i futuri incrementi dei costi dei materiali e del lavoro, potrebbero contribuire ad un aumento non lineare delle spese da sostenere [35].

Con le opere naturalistiche si dispiega una azione di mitigazione considerando importanti estensioni costiere per un orizzonte temporale nel medio/lungo termine, nel quadro di una analisi olistica dei fattori dominanti i processi di erosione e delle interazioni tra questi [36]. Esse costano meno delle strutture *hard* e possono garantire le stesse capacità di protezione. Tuttavia, il loro uso è condizionato da fattori ambientali e vincoli fisici ed è complessa la loro evoluzione, con modelli di previsione particolarmente incerti. I ripascimenti degli arenili, per esempio, sono applicati più volte con oneri addizionali particolarmente corposi.

Perciò può risultare conveniente ricorrere a un approccio ibrido, combinando la flessibilità dell'approccio *hard* con i benefici ecologici della *soft engineering* [37]. Ad esempio, in Olanda è in corso di attuazione il progetto *Sand Motor*, per il

quale si prevede di associare a barriere strutturali una penisola artificiale sabbiosa, che si prevede l'oceano rimodelli in spiagge e dune. Secondo l'approccio ibrido, barriere, blocchi e pennelli dovrebbero costruirsi insieme a strutture naturali, quali appunto paludi e dune, spostando gli edifici verso l'entroterra quando indispensabile. Tale modello potrebbe essere adattabile, peraltro, nell'area costiera compresa tra San Cataldo e Le Cesine (provincia di Lecce, figura 5), dove a ridosso degli specchi d'acqua salmastra, le barriere frangiflutti messe in opera a più riprese negli ultimi decenni, condizionano l'evoluzione delle dune e dei canali di collegamento con il mare (bocche). Questo approccio *soft* fornirebbe protezione nel medio/lungo termine contro eventi non estremi, mentre l'impatto dei cicloni dovrebbe trasferirsi alle strutture solide artificiali. Con progetti di questo tipo si incrementerebbe la resilienza della costa [38].

L'approccio naturalistico, anche ibridizzato, non è tuttavia applicabile nelle aree fortemente urbanizzate. L'innalzamento del livello del mare obbligherà comunque a rimuovere o spostare infrastrutture ed edificazione, pertanto potrebbe essere logico implementare in concomitanza strutture naturalistiche. Diverse città costiere si apprestano a modificare l'assetto delle loro zone costiere in questo modo, si veda l'esempio di Seoul in Corea.

Tuttavia, indipendentemente dal rapporto tra strutture naturali e artificiali, l'approccio ibrido nel contesto di una analisi olistica predispone al coinvolgimento di tutti i soggetti interessati alla protezione costiera relativamente a una estensione più ampia e nel medio/lungo termine. Inevitabilmente, la progettazione deve scalare a livello regionale o più che regionale nell'ambito di piani, i cui singoli elementi devono essere realizzati secondo programmazione con chiara disponibilità di fondi. Particolare importanza, soprattutto alla luce della evoluzione climatica, è l'osservazione e il monitoraggio durante e dopo la realizzazione delle opere, allo scopo di procedere se necessario con miglioramenti (figura 5).

Bisogna comunque scongiurare il ricorso al gigantismo strutturale cioè a un approccio *iperghard*, per il quale si procederebbe alla realizzazione di opere strutturali di enormi dimensioni. Per esempio, il Royal Netherlands Institute for

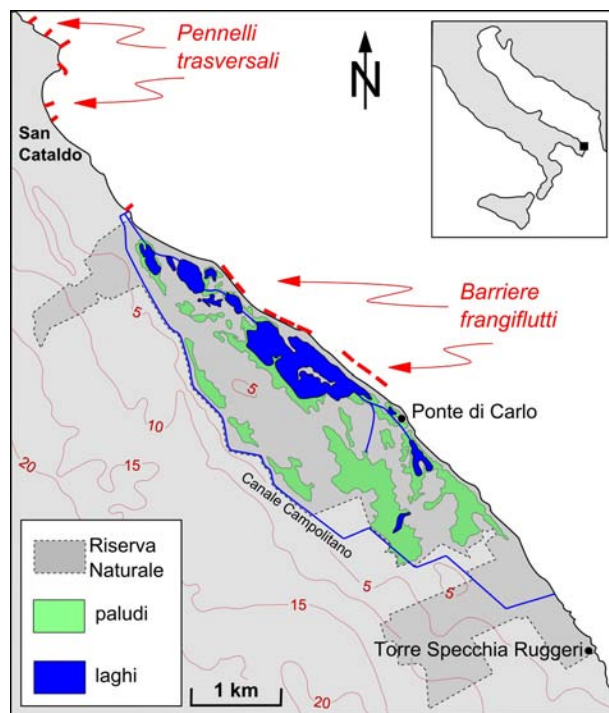


Figura 5: Carta schematica della zona San Cataldo - Le Cesine (Provincia di Lecce). Sono evidenziate le opere di protezione costiera che necessitano di osservazione e monitoraggio.

Sea Research ha recentemente proposto la costruzione di una prima diga di 475 km tra il nord della Scozia e la Norvegia e di una seconda diga di 160 km tra la Francia Occidentale e il sud-est dell'Inghilterra per segregare completamente il mare del Nord e proteggere circa 25 milioni di abitanti dai danni derivanti dall'innalzamento del livello del mare. Il costo di una tale opera si aggirerebbe tra 250 e 500 miliardi di euro. Risulta ben evidente che un'opera del genere, ancorché tecnicamente fattibile (la profondità del mare del Nord non supera i 130 m, si potrebbero quindi costruire delle barriere su piattaforme), comporterebbe un cambio drastico dell'ecosistema, con conseguenze difficilmente prevedibili, a parte alcuni complicati problemi economici. Si potrebbe derubricare facilmente la proposta a provocazione, tuttavia vi è la tentazione di procedere con il gigantismo strutturale che già nel passato per altre situazioni ha comportato problemi irreversibili e intollerabili, mentre sarebbe decisamente auspicabile istruire le popolazioni costiere verso la resilienza e procedere con progetti semplici, diffusi, pianificati e condivisi.



- [1] W.V. SWEET, R. HORTON, R.E. KOPP, A.N. LEGRANDE, A. ROMANOU; "Sea level rise", In: *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, U.S. Global Change Research Program 1* (2017) 333.
- [2] J.A. CHURCH, N.J. WHITE: "Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century", *Surveys in Geophysics* **32** (2011) 585.
- [3] A. VECCHIO, M. ANZIDEI, E. SERPELLONI, F. FLORINDO: "Natural Variability and Vertical Land Motion Contributions in the Mediterranean Sea-Level Records over the Last Two Centuries and Projections for 2100", *Water* **11** (2019) w11071480.
- [4] H.F. STOCKDON, R.A. HOLMAN, P.A. HOWD, A.H. SALLENGER: "Empirical parameterization of setup, swash, and runup", *Coastal Engineering* **53** (2006) 573.
- [5] E.J. THEUERKAUF, A.B. RODRIGUEZ, S.R. FEGLEY, R.A. LUETTICH: "Sea level anomalies exacerbate beach erosion", *Geophysical Research Letters* **41** (2014) 5139.
- [6] B. ORLOWSKY, S.I. SENEVIRATNE: "Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension", *Climatic Change* **110** (2012) 669.
- [7] M. A. GAERTNER, J. J. GONZALEZ-ALEMAN, R. ROMERA, M. DOMINGUEZ, V. GIL, E. SANCHEZ, C. GALLARDO, M. M. MIGLIETTA, K. WALSH, D. SEIN, S. SOMOT, A. DELL'AQUILA, C. TEICHMANN, B. AHRENS, E. BUONOMO, A. COLETTE, S. BASTIN, E. VAN MEIJGAARD, G. NIKULIN: "Simulation of medicanes over the Mediterranean Sea in a regional climate model ensemble: impact of ocean-atmosphere coupling and increased resolution", *Climate Dynamics* **51** (2018) 1041.
- [8] B. TIMMERMANS, C. PATRICOLA, M. WEHNER: "Simulation and Analysis of Hurricane-Driven Extreme Wave Climate Under Two Ocean Warming Scenarios", *Oceanography* **6** (2018) oceanog.2018.218.
- [9] S. RAHMSTORE, D. COUMOU: "Increase of extreme events in a warming world", *Proceedings of the National Academy of Sciences* **108** (2011) 17905.
- [10] G. HOLLAND, C.L. BRUYÈRE: "Recent intense hurricane response to global climate change", *Climate Dynamics* **42** (2014) 617.
- [11] K.J.E. WALSH ET ALII: "Tropical cyclones and climate change", *WIREs Climate Change* **7** (2016) 65.
- [12] M. MARCOS, G. JORDÀ, D. GOMIS, B. PERÉZ: "Changes in storm surges in southern Europe from a regional model under climate change scenarios", *Global and Planetary Change* **77** (2011) 116.
- [13] Y.S. ANDROULIDAKIS, K.D. KOMBIADOU, C.V. MAKRIS, V.N. BALTİKAS, Y.N. KRESTENITIS: "Storm surges in the Mediterranean Sea Variability and trends under future climatic conditions", *Dynamics of Atmospheres and Oceans* **71** (2015) 56.
- [14] J.J. GONZALEZ-ALEMAN, S. PASCALE, J. GUTIERREZ-FERNANDEZ, H. MURAKAMI, M.A. GAERTNER, G.A. VECCHI: "Potential increase in hazard from Mediterranean Hurricane activity with global warming", *Geophysical Research Letters* **46** (2019) 1754.
- [15] R. ROMERO, K. EMANUEL: "Medicane risk in a changing climate", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **118** (2013) 5992.
- [16] M.M. MIGLIETTA: "Editorial, Mediterranean tropical-like cyclones (Medicanes)", *Atmosphere* **10** (2019) 206.
- [17] M.M. MIGLIETTA, R. ROTUNNO: "Development mechanisms for Mediterranean tropical-like cyclones (medicanes)", *Quaternary Journal of the Royal Meteorological Society* **145** (2019) 1444-1460.
- [18] A. MOSCATELLO, M. M. MIGLIETTA AND R. ROTUNNO: "Numerical analysis of a Mediterranean 'hurricane' over south-eastern Italy", *Monthly Weather Review* **136** (2008) 4373.
- [19] A.C. MARRA, S. FEDERICO, M. MONTOPOLI, E. AVOLIO, L. BALDINI, D. CASELLA, L. D'ADDERIO, S. DIETRICH, P. SANÒ, R. TORCASIO, G. PANEGROSSI: "The precipitation structure of Mediterranean tropical-like cyclone Numa: Analysis of GPM observations and numerical weather prediction model simulations", *Remote Sensing* **11** (2019)
- [20] A. RICCHI, M. M. MIGLIETTA, F. BARBARIOL, A. BENETAZZO, A. BERGAMASCO, D. BONALDO, C. CASSARDO, F. M. FALCIERI, G. MODUGNO, A. RUSSO, M. SCLAVO, S. CARNIEL: "Sensitivity of a Mediterranean tropical-like cyclone to different model configurations and coupling strategies", *Atmosphere* **8** (2017) 1.
- [21] R. PORTMANN, J.J. GONZALEZ-ALEMAN, M. SPRENGER, H. WERNLI: "Medicane Zorbas: Origin and impact of an uncertain potential vorticity streamer", *Weather and Climate Dynamics Discussion in review* (2019) wcd-2019-1
- [22] F. CONGEDO: "Autunno 2018: la stagione dei fenomeni estremi salentini", <https://www.supermeteo.com/autunno-2018-la-stagione-dei-protect\discretionary{\char\hyphenchar\font}{-}{-}fenomeni-estremi-salentini/>.
- [23] L. CIRICUGNO, M. DELLE ROSE, C. FIDELIBUS, L. ORLANDUCCI, M. MANGIA: "Sullo spostamento di massi costieri causato da onde "estreme" (costa ionica salentina)", *Geologi e Territorio* **2/19** (2019) 15.
- [24] I.A. HUNT: "Design of seawalls and breakwaters", *ASCE Journal of Waterways and Harbours Division* **85(WW3)** (1959) 123.
- [25] J.C COX, J. MACHEMEHL: "Overload bore propagation due to an overtopping wave", *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng* **112** (1986) 161.
- [26] N.A.K. NANDASENA, R. PARIS, N. TANAKA: "Reassessment of hydrodynamic equations: Minimum flow velocity to initiate boulder transport by high energy events (storms, tsunamis)", *Marine Geology* **281** (2011) 70.
- [27] H. HAUSMANN: "Soft vs Hard Engineering for Coastal Defense Adaptation", *A Climate Institute Publication* (2019).
- [28] G. MASTRONUZZI, P. SANÒ: "Large boulder accumulations by extreme waves along the Adriatic coast of southern Apulia (Italy)", *Quaternary International* **120** (2004) 173-184.
- [29] N. SAINTILAN, K. ROGERS: "Recent storm boulder deposits on the Beecroft Peninsula, New South Wales, Australia", *Geographical Research* **43** (2005) 429.

- [30] L.A. NAYLOR, W.J. STEPHENSON, H.C.M. SMITH, O. WAY, J. MENDELSSOHN, A. COWLEY: "Geomorphological control on boulder transport and coastal erosion before, during and after an extreme extra-tropical cyclone", *Earth Surface Processes and Landforms* **41** (2016) 685.
- [31] C.A. SÜSSMILCH: "Note on some recent marine erosion at Bondi", *Royal Society of New South Wales Journal Proceeding* **46** (1912) 71.
- [32] F. CARBONE, D. DUTYKH, J.M. DUDLEY, F. DIAS: "Extreme wave runup on a vertical cliff", *Geophysical Research Letters* **40** (2013) 3138.
- [33] A. ZAINALI, R. WEISS: "Boulder dislodgement and transport by solitary waves: Insights from three-dimensional numerical simulations", *Geophysical Research Letters* **42** (2015) 4490.
- [34] R. WEISS, A. SHEREMET: "Toward a new paradigm for boulder dislodgement during storms", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* **18** (2017) 2717.
- [35] S.N. JONKMAN, M.M. HILLEN, R.J. NICHOLLS, W. KANING, M. VAN LEDDEN: "Costs of Adapting Coastal Defences to Sea-Level Rise - New Estimates and Their Implications", *Journal of Coastal Research* **29** (2013) 1212.
- [36] H. A. BATTJES: "Developments in coastal engineering research", *Coastal Engineering* **53** (2006) 121.
- [37] J. A. G. COOPER, J. MCKENNA: "Working with natural processes: the challenge for coastal protection", *The Geographic Journal* **174** (2008) 315.
- [38] A. E. SUTTON-GRIER, K. WOWK, H. BAMFORD: "Future of our coasts: the potential for natural and hybrid infrastructure to enhance the resilience of our coastal communities, economies and ecosystems", *Environmental Science and Policy* **51** (2015) 137.



Marco Delle Rose: è ricercatore in Scienze della Terra presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR. Ha fatto parte del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche dal 2002 al 2009. Nel 2012 e nel 2019 ha partecipato a missioni scientifiche nel Deserto di Nazca (Perù) finalizzate allo studio degli effetti prodotti da mega-eventi *El Niño* avvenuti nel passato. Si occupa di idrogeologia, geomorfologia e cambiamenti climatici.

Corrado Fidelibus: è ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento e titolare dell'insegnamento di Geotecnica per il corso di Diploma di Laurea in Ingegneria Civile dello stesso ateneo. Dottore di ricerca in Geotecnica, è stato dal 2002 al 2007 assistente senior alla ricerca (Oberassistent) presso il Dipartimento di Scienze della Terra del

Politecnico Federale di Zurigo (ETH). La sua attività scientifica si inquadra nella meccanica delle rocce, nella geo-idrologia e nella geomeccanica computazionale con riferimento principalmente a problemi di carattere ambientale.

Mario Marcello Miglietta: è dirigente di ricerca presso ISAC-CNR, di cui è membro del Consiglio d'Istituto e tra i coordinatori dell'area strategica *Osservazioni e modelli per la meteorologia ed il clima*. Dottore di Ricerca in Fisica, ha fatto parte del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare dal 1993 al 2001. La sua attività scientifica si focalizza sugli eventi intensi nel contesto del cambiamento globale, in particolare precipitazioni orografiche, cicloni, supercelle e trombe d'aria nel Mediterraneo.

Crisi climatica e inquinamento atmosferico

Se pensate veramente che l'economia sia più importante dell'ambiente, provate a trattenere il fiato mentre contate i soldi.

Guy McPherson

Cristina Mangia

Istituto di Scienze dell' Atmosfera e del Clima (CNR-ISAC), Lecce

Pierina Ielpo

Istituto di Scienze dell' Atmosfera e del Clima (CNR-ISAC), Lecce

Rita Cesari

Istituto di Scienze dell' Atmosfera e del Clima (CNR-ISAC), Lecce

Maria Cristina Facchini

Istituto di Scienze dell' Atmosfera e del Clima (CNR-ISAC), Bologna

Inquinamento atmosferico e cambiamenti climatici sono due fenomeni strettamente interconnessi ed interagenti. Innanzitutto, sorgenti di sostanze inquinanti sono allo stesso tempo anche sorgenti di sostanze climalteranti. Inoltre, molti inquinanti sono in grado di influenzare il bilancio radiativo del pianeta, con implicazioni climalteranti sia raffreddanti che riscaldanti. Infine, i cambiamenti climatici influenzano la qualità dell'aria sia da un punto di vista dell'incremento o diminuzione di emissioni naturali e/o antropogeniche, sia dal punto di vista delle condizioni meteorologiche che influenzano dispersione e accumulo di inquinanti. Sebbene le due criticità si sviluppino su differenti ordini di grandezza spazio-temporali, entrambe pongono questioni di giustizia ambientale e

la necessità di ripensare un modello economico che riduca l'utilizzo dei combustibili fossili e tenga insieme questioni ambientali ed equità sociali.

Introduzione

L'inquinamento atmosferico e la crisi climatica rappresentano due emergenze ambientali. Si stima che l'inquinamento atmosferico causi 6.5 milioni di morti all'anno attraverso l'esposizione a particolato fine (PM_{2.5}) e ozono (O₃) e che, senza azioni di contenimento, tale esposizione possa diventare nel 2050 la prima causa ambientale di morte [1, 2]. Sul piano climatico, si stima che le attività umane abbiano causato un riscaldamento globale di circa 1 °C rispetto ai livelli preindustriali. Se continuerà l'attuale tasso annuale di emissioni è probabile che tale riscaldamento raggiungerà 1.5 °C tra il 2030 e il 2052 con il rischio

di impatti sempre più pesanti su sistemi naturali ed umani [3]. Sebbene gli ordini di grandezza spazio-temporali sui quali si sviluppano le due criticità siano differenti, esse sono strettamente interconnesse [4, 5]. Le sorgenti di inquinanti atmosferici legate all'utilizzo di combustibili fossili possono essere allo stesso tempo anche sorgenti di sostanze climalteranti. Il tempo di permanenza in atmosfera di tali sostanze è variabile, alcune di esse vengono rimosse per deposizione o tramite reazioni chimiche. Se il tempo di permanenza varia da poche ore ad alcune settimane, sono definite come sostanze a vita breve. Molti degli inquinanti modificano le proprietà delle nubi, interagiscono con la radiazione solare e terrestre assorbendola o riflettendola, perturbando il bilancio energetico planetario con implicazioni sul clima, sia con *forcing* positivo (riscaldamento del clima), che con *forcing* negativo (raffreddamento del clima). Con *forcing* radiativo si intende la capacità della singola sostanza/composto di agire sul bilancio della radiazione entrante o uscente nel sistema atmosfera [6]. Ma se da una parte l'inquinamento atmosferico può incidere sul sistema climatico, dall'altra il clima e le sue variazioni influenzano la qualità dell'aria. I cambiamenti climatici possono sia incrementare o ridurre le emissioni naturali e/o antropiche, sia influenzare la meteorologia che guida i fenomeni di trasporto, diffusione e rimozione degli inquinanti. La crisi climatica e l'inquinamento atmosferico, figli dello stesso modello produttivo, pongono una serie di problematiche di giustizia ambientale e necessitano di uno sguardo sistemico sul piano delle cause e quello degli interventi.

In uenza degli inquinanti atmosferici sul clima

Il sistema produttivo attuale, basato essenzialmente sull'utilizzo di combustibili fossili nelle sue molteplici espressioni (produzione di energia, processi industriali, agricoltura, allevamento, gestione dei rifiuti), è responsabile delle emissioni di sostanze gassose e particellari che modificano la composizione chimica dell'atmosfera con impatti diretti ed indiretti sulla salute e sul sistema climatico. Questo vuol dire che una stessa sorgente può emettere

contemporaneamente sostanze inquinanti e sostanze climalteranti, e che a loro volta alcuni inquinanti possono avere un impatto sul sistema climatico o essere precursori di specie climalteranti.

Di seguito analizzeremo i principali composti che hanno effetti sia sulla salute umana e sugli ecosistemi che sul sistema climatico.

Ozono troposferico e suoi precursori

Ozono

L'ozono (O_3) è un inquinante secondario, cioè non viene immesso direttamente in atmosfera, ma si forma attraverso reazioni chimiche tra ossidi di azoto (NO_x), composti organici volatili non metanici (NMVOC), monossido di carbonio (CO) e metano (CH_4) in presenza di radiazione solare. Queste ultime sostanze sono dette precursori. Il biossido di azoto (NO_2), in presenza di radiazione solare, innesca una serie di reazioni che portano dapprima a produzione di ozono, e successivamente ad una situazione di equilibrio tra le diverse specie (ozono ed ossidi di azoto). Tale equilibrio è alterato dalla presenza di composti organici volatili, che a loro volta, in presenza di radiazione solare, innescano altri processi di ossidazione che portano a produzione di ozono. Il potenziale di formazione dell'ozono dei differenti VOC dipende dalla loro reattività, che è diversa da specie a specie. Inoltre le reazioni chimiche tra NO_x , VOC ed O_3 sono non lineari [7], dipendendo dal rapporto tra la concentrazione di NO_x e di VOC. Così, ad es., una diminuzione di NO_x può portare ad un aumento di O_3 in situazioni in cui il rapporto VOC/ NO_x è basso, come nei centri urbani. In tali regimi, detti *VOC-limited*, agire sulle emissioni di VOC è più efficace per ridurre localmente i valori di picco di O_3 . Allontanandosi dai centri urbani, la concentrazione di NO_x inizia a diminuire più velocemente di quella dei VOC, a causa delle reazioni chimiche, della meteorologia e delle ulteriori sorgenti di precursori. Si raggiunge quindi un regime, detto *NO_x -limited*, in cui il rapporto VOC/ NO_x aumenta. In tali situazioni una riduzione degli NO_x è più efficace per ridurre le concentrazioni di O_3 .

Come inquinante atmosferico, l'ozono ha una serie di effetti negativi sulla salute umana. Può

indurre ridotta funzionalità polmonare, disturbi respiratori, aggravamento di malattie preesistenti come l'asma, con conseguenti aumenti di ricoveri ospedalieri e mortalità prematura. L'attuale valore limite raccomandato dall'OMS per l'ozono è di $100\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ (media 8 h), sebbene effetti avversi all'esposizione di ozono si registrino al di sotto della soglia. L'esposizione a lungo termine all'ozono può anche avere effetti cronici. Studi recenti attribuiscono all'inquinamento da ozono circa 0,3 milioni di decessi prematuri a livello globale ogni anno [1]. L'ozono è anche una sostanza fitotossica con effetti avversi sulla vegetazione e sugli ecosistemi in generale. Come forte ossidante penetra nelle piante attraverso gli stomi delle foglie ed avvia una catena di reazioni che degradano le piante, riducendo i tassi di fotosintesi e influenzandone negativamente la crescita.

Ma oltre ad essere un inquinante atmosferico l'ozono è anche un gas serra attivo. Si stima che il suo forcing radiativo dal 1750 al 2011 sia dell'ordine $+0.35\text{W}\text{m}^{-2}$, di cui $+0.40\text{W}\text{m}^{-2}$ è attribuito all'ozono troposferico e $-0.05\text{W}\text{m}^{-2}$ all'ozono stratosferico [6]. L'ozono ha poi un effetto indiretto sul sistema climatico: limitando la crescita e la fisiologia delle piante riduce l'efficienza di rimozione di CO_2 da parte della vegetazione [8].

Ossidi di azoto

Precursori dell'ozono ed inquinanti atmosferici di per sé, gli ossidi di azoto NO_x (NO , NO_2 , etc) sono generati prevalentemente dai processi di combustione per reazione diretta ad alta temperatura ($>1.200\text{ }^\circ\text{C}$) tra l'azoto (N_2) e l'ossigeno (O_2) presenti nell'aria. Fonti principali sono i trasporti, le attività industriali ed il riscaldamento domestico. Il biossido di azoto (NO_2) può essere originato anche da processi produttivi senza combustione, come ad esempio la produzione di acido nitrico, fertilizzanti azotati, e da sorgenti naturali (attività batterica, eruzioni vulcaniche, incendi).

Da un punto di vista di impatto sulla salute il biossido di azoto è tra gli ossidi di azoto il più pericoloso, con una tossicità fino a quattro volte maggiore di quella del monossido di azoto. Forte ossidante ed irritante, esercita il suo effetto tossico principalmente sugli occhi, sulle muco-

se e sui polmoni. In particolare è responsabile di specifiche patologie a carico dell'apparato respiratorio (bronchiti, allergie, irritazioni, edemi polmonari che possono portare anche al decesso) [9, 10]. Inoltre, trasformandosi in presenza di umidità in acido nitrico, esso è una delle cause della formazione delle cosiddette "piogge acide", che provocano ingenti danni alle piante e più in generale alterazioni negli equilibri ecologici ambientali. La permanenza in atmosfera degli ossidi di azoto può variare da ore a giorni ed è strettamente legata, oltre che alle emissioni, alle reazioni chimiche in cui essi sono coinvolti. Come detto, la non linearità delle reazioni fotochimiche porta ad una difficile gestione di tale inquinante. Riduzioni di emissioni di ossidi di azoto a livello locale possono portare ad incrementi locali di concentrazioni di ozono e viceversa. Un esempio di come un aumento di ossidi di azoto in un'area portuale dia origine ad una diminuzione locale della concentrazione di ozono è studiato in [11]. In aree urbane ad elevato traffico si può osservare il cosiddetto "effetto settimana": a riduzioni di emissioni di ossidi di azoto associate ad una riduzione del traffico domenicale si registrano concentrazioni più elevate di ozono. Analogamente concentrazioni elevate di ozono spesso non si verificano nelle aree ad elevate concentrazioni di ossidi di azoto, ma in aree rurali (per alcuni casi di studio in Puglia si veda [12, 13]).

La non linearità dei processi chimici che portano alla formazione di ozono si ripercuote sull'impatto che gli ossidi di azoto hanno sul sistema climatico. Esistono infatti alcune incertezze sulla direzione del forcing radiativo associato a tali sostanze. Alcuni studi sembrano indicare un forcing radiativo positivo a breve termine (< 1 anno) ed un effetto negativo a lungo termine (circa 10 anni o più) [4].

Composti organici volatili non metanici

I Composti Organici Volatili non Metanici (NM-VOC) sono composti di natura organica caratterizzati da basse pressioni di vapore a temperatura ambiente, che si trovano quindi in atmosfera principalmente in fase gassosa. Il numero di tali composti è estremamente alto e comprende oltre agli idrocarburi volatili semplici anche specie

ossigenate quali chetoni, aldeidi, alcoli, acidi ed esteri. I VOC rivestono un ruolo fondamentale nella formazione di inquinanti secondari, come l'ozono ed il particolato. I singoli NMVOC non giocano il medesimo ruolo nella formazione degli ossidanti fotochimici poiché, a causa della diversa reattività, hanno tempi di permanenza in atmosfera diversi.

Le emissioni naturali degli NMVOC provengono dalla degradazione del materiale organico e dalla vegetazione. Il flusso di emissione dei biogenici dipende dalla radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) e/o dalla temperatura. Le emissioni antropiche, invece, sono principalmente legate alla combustione incompleta degli idrocarburi ed all'evaporazione di solventi e carburanti. Sorgenti antropiche rilevanti sono quindi trasporto su strada, fonti industriali, uso di solventi e combustione di biomassa.

Gli effetti negativi degli NMVOC sulla salute derivano dal loro contributo all'ozono ed al particolato atmosferico, ma anche dalla intrinseca tossicità di alcuni di loro. Alcuni composti NMVOC, come formaldeide, benzene o stirene, sono potenzialmente mutageni o cancerogeni. L'etilene esercita anche un effetto dannoso sulle piante rallentandone la crescita.

Monossido di Carbonio

Il monossido di carbonio (CO) è emesso direttamente da tutti i processi di combustione incompleta dei composti carboniosi. Le sorgenti possono essere sia antropiche (traffico veicolare, riscaldamento, attività industriali come la produzione di ghisa e acciaio, raffinazione del petrolio, lavorazione del legno e della carta, etc.) che naturali (incendi, vulcani, emissioni da oceani, etc.).

Da un punto di vista della salute, alte concentrazioni (> 1000 ppmv) di CO possono essere letali, con morte risultante da asfissia. Concentrazioni inferiori possono causare mal di testa, affaticamento, nausea e vomito. Recenti studi epidemiologici hanno infine dimostrato l'associazione causale tra aumento delle concentrazioni di CO ed incremento della mortalità giornaliera totale, di quella specifica per malattie cardiovascolari e respiratorie a breve termine.

Prendendo parte alle diverse reazioni fotochimiche e contribuendo alla formazione di CO₂, anche l'ossido di carbonio ha un effetto indiretto sul clima con forcing radiativo positivo.

Metano

Il metano (CH₄) è tra i precursori dell'ozono, oltre ad essere un gas serra con un elevato forcing radiativo positivo, circa 30 volte maggiore rispetto a quello della CO₂. La maggior parte (le stime vanno dal 60% all'80%) delle emissioni mondiali di CH₄ sono di origine antropica e derivano principalmente dall'estrazione dei combustibili fossili, dalla decomposizione dei rifiuti solidi nelle discariche, da varie attività agricole e di allevamento (processo di digestione del bestiame).

Concludendo, sebbene alcuni inquinanti come gli NO_x, gli NMVOC ed il CO abbiano un piccolo o quasi nullo forcing radiativo, è possibile associare anche a loro un effetto climalterante, seppur indiretto, per il loro essere precursori dell'ozono.

Particolato

Il materiale particolato (aerosol) presente in atmosfera è costituito da una miscela di particelle solide e liquide, che possono rimanere sospese anche per lunghi periodi. Le particelle sono costituite da una miscela di elementi quali carbonio organico, black carbon, solfati, nitrati, sabbia, polveri minerali, spray marino, ecc.[14, 15]. Il particolato può essere di tipo primario se immesso in atmosfera direttamente dalla sorgente o secondario se si forma successivamente, in seguito a trasformazioni chimico-fisiche di altre sostanze [7]. Il particolato viene generalmente distinto in classi dimensionali, che tengono conto della capacità di penetrazione nelle vie respiratorie da cui dipende l'intensità dei suoi effetti nocivi.

Numerosi studi hanno mostrato che all'inquinamento da PM₁₀ (Particulate Matter di dimensione aerodinamica < 10 μm in diametro) e PM_{2.5} (Particulate Matter di dimensione aerodinamica < 2.5 μm in diametro) sono associati effetti dannosi per la salute umana, sia a breve (effetti acuti) che a lungo (effetti cronici) termine.

Tra i principali effetti acuti documentati vi sono aumento della mortalità giornaliera per tutte le cause, e in particolare per cause cardiovascolari, aumento dei ricoveri per asma e malattia polmonare ostruttiva cronica (BPCO), aumento dei ricoveri per malattie cardiovascolari, diminuzione della funzionalità polmonare e aumento dei sintomi respiratori acuti in bambini e adulti. Tra gli effetti a lungo termine vi sono una riduzione dell'aspettativa di vita stimata di 1-2 anni, ed effetti quali diminuzione della funzionalità polmonare e aumento dei sintomi di bronchite sia negli adulti che nei bambini. La tossicità del particolato, e quindi la sua capacità di generare danni alla salute, può essere amplificata dalla capacità di assorbire sostanze gassose come gli IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici) e metalli pesanti, alcuni dei quali sono potenti agenti cancerogeni (c.d. effetti sinergici).

Gli aerosol, a seconda della loro composizione, hanno effetti diretti sul clima assorbendo o disperdendo le radiazioni e quindi contribuendo al riscaldamento o al raffreddamento. Possono anche avere effetti indiretti sul clima quando agiscono come nuclei di condensazione per le nubi (CCN), o si depositano su neve o ghiaccio. Da una prospettiva climatica gli aerosol vengono suddivisi in base al loro *forcing* radiativo positivo (black carbon) o negativo (principalmente solfati e carbonio organico).

Black Carbon

Il black carbon (BC) è l'insieme di particelle carboniose in grado di assorbire luce con lunghezza d'onda caratteristica nello spettro del visibile (380 – 760nm). Le particelle di BC sono emesse da combustione incompleta di materia carboniosa e combustibili a base di carbonio. Fonti importanti includono la combustione di combustibili fossili, combustione di biomassa, processi industriali, biocarburanti, motori diesel, vecchi fornelli domestici largamente utilizzati in molti paesi in via di sviluppo [16, 17]. È contenuto principalmente nella frazione fine del particolato (PM_{2.5}) e può per questo essere inalato facilmente veicolando anche molecole organiche e particelle metalliche con effetti negativi sulla salute. Diversi studi hanno associato all'esposizione a breve e lungo termine di black carbon

un aumento di disturbi respiratori, asma, BPCO, un aumento di morbilità e mortalità respiratoria e cardiovascolare, cancro al polmone. Altre ricerche suggeriscono che l'esposizione a lungo termine di PM_{2.5} con una elevata frazione BC può avere effetti di mortalità maggiori rispetto ad altre miscele di PM_{2.5} [9, 1].

Da un punto di vista climatico, il BC è un potente climalterante a causa del suo efficiente assorbimento della radiazione solare e conseguente capacità di riscaldamento dell'area circostante [18]. Oltre ad assorbire la radiazione solare quando è in sospensione in atmosfera, il BC può ridurre la quantità di luce solare riflessa quando si deposita su superfici caratterizzate da elevato albedo come neve e ghiaccio, accelerandone lo scioglimento. Interagendo con la formazione delle nubi, inoltre, il BC influisce sulla circolazione regionale e sui regimi di precipitazione. La complessità degli effetti sui quali incide e dei fattori che ne influenzano formazione e trasporto rende alquanto difficile la determinazione del forcing radiativo che viene stimato intorno 1.1 W m^{-2} , al secondo posto dopo la CO₂.

Ridurre le emissioni di BC potrebbe quindi non essere solo una possibile strategia per mitigare il riscaldamento globale, ma gioverebbe anche direttamente alla salute umana.

Solfati

Un'altra componente chiave del particolato fine (PM_{2.5}) è costituita dai solfati [19]. I solfati si originano in atmosfera dall'ossidazione di SO₂. Le emissioni naturali sono associate ad eruzioni vulcaniche ed agli oceani, essendo questi ultimi una rilevante sorgente naturale di Dimetilsolfuro DMS. Il fitoplancton che ricopre le superfici oceaniche è costituito da Dimetil solfoniopropionato (DMSP) il quale, per azione batterica, viene degradato in Dimetilsolfuro che è volatile e viene quindi emesso in atmosfera. Attraverso processi di ossidazione il DMS si trasforma in solfati. Le emissioni antropiche più rilevanti di SO₂ sono originate dalla combustione di carbone fossile e petrolio. Le fonti principali sono la produzione industriale e quella di energia da parte delle centrali termoelettriche. Altre fonti sono la lavorazione di materie plastiche, la desolfurazione dei gas naturali, l'incenerimento dei rifiuti

ed il trasporto, terrestre e marittimo. Inoltre la diffusione del metano per il riscaldamento ha ridotto l'emissione degli ossidi di zolfo dovuti al riscaldamento. Dato il suo breve tempo di permanenza, dell'ordine di pochi giorni, la sua distribuzione a scala globale ricalca quella delle emissioni.

Da un punto di vista della salute, l'esposizione prolungata ai solfati e al biossido di zolfo determina effetti a carico dell'apparato respiratorio come tracheiti, bronchiti, polmoniti. In atmosfera l' SO_2 contribuisce all'acidificazione delle precipitazioni, con effetti tossici sui vegetali, acidificazione dei corpi idrici e impatto sulla vita acquatica. Proprio a causa degli effetti sulla salute e sugli ecosistemi, nel tempo le emissioni di SO_2 sono state ridotte.

Da un punto di vista climatico, i solfati sono la categoria di aerosol più significativa con effetto raffreddante. Agiscono con forcing radiativo negativo sia mediante una maggiore dispersione della radiazione solare, sia attraverso effetti indiretti derivanti dalla loro capacità di fungere da nuclei di condensazione delle nubi. Un aumento di nuclei di condensazione nelle nubi può portare ad aumentare la riflettività delle nuvole rendendole più dense e dando loro un contenuto più elevato di acqua liquida.

Una riduzione della SO_2 antropogenica di circa il 50% in tutto il mondo nel corso del prossimo secolo avrebbe un notevole impatto positivo sulla qualità dell'aria e sulla salute. Tuttavia comporterebbe, secondo l'IPCC, un significativo effetto di riscaldamento sul clima globale di circa 0.36°C , anche se un tale effetto potrebbe essere parzialmente compensato da una riduzione di altre specie con forcing radiativo di segno opposto come il BC.

Aerosol organico

Con aerosol organico (OA) si intende la frazione di particolato carbonioso differente dal black carbon. In genere è una frazione significativa di PM sia negli ambienti inquinati che incontaminati. Può essere sia di origine primaria che secondaria. La frazione primaria (POA) si forma durante i processi di combustione ed è emessa principalmente come particelle submicroniche. Il particolato organico di origine secondaria può

aver origine in atmosfera dalla conversione gas-particella di composti organici volatili, dalla condensazione di composti volatili a bassa tensione di vapore e dall'assorbimento fisico o chimico di specie gassose sulla superficie di particelle [20, 21].

Su scala globale, la fonte principale di POA è rappresentata dalla combustione della biomassa ed è caratterizzata da forte stagionalità e significativa variabilità interannuale. In ambienti urbani è in genere associata alle emissioni da traffico con particelle di dimensioni iniziali che raggiungono un picco inferiore a 100 nm. Altre fonti di POA comprendono i biocarburanti, cottura dei cibi, bioparticelle come polline, batteri e detriti vegetali, spray marino, erosione del suolo.

Dalla prospettiva della qualità dell'aria e della salute umana, l'OA è una delle maggiori frazioni di $\text{PM}_{2.5}$, pertanto riduzioni dell'OA sarebbero utili in termini di mortalità prematura e morbilità.

L'aerosol organico può sia disperdere che assorbire la radiazione solare (a seconda della sua composizione e delle percentuali di Brown carbon di cui è costituito), il che complica la valutazione del suo impatto climatico. Nel complesso, secondo l'IPCC, il forcing radiativo associato alle due componenti è dell'ordine di $0,12$ [da -0.4 a $+0.1$] Wm^{-2} . Le emissioni di OA e dei suoi precursori sono spesso associate ad emissioni di altre specie che possono subire processi atmosferici paralleli. La forma primaria è spesso co-emessa con il black carbon durante la combustione di combustibili fossili e di biomassa, e ciò complica le stime del forzante radiativo degli aerosol a livello di singola specie e complessivamente. Quindi da un punto di vista climatico una riduzione delle emissioni dell'OA avrebbe un impatto scarsamente limitato sul clima.

Tab.1 sintetizza il ruolo delle varie sostanze sulla salute, sugli ecosistemi e sul clima. Fig.1 illustra in modo schematico come un miglioramento della qualità dell'aria possa impattare sul forcing radiativo e quindi sul clima [6].

Tabella 1: Principali inquinanti atmosferici: tempo di permanenza in atmosfera, e effetti sulla salute ed ecosistemi, e effetti sul clima.

Composto	Tempo di permanenza in atmosfera	Effetti sulla salute e sugli ecosistemi	Effetti sul clima
Biossido di carbonio (CO ₂)	Secoli	Acidificazione dell'oceano, fotosintesi	Riscaldamento
Metano (CH ₄)	8 anni	Precursore di O ₃	Riscaldamento
Ozono (O ₃)	1 mese	Danni alla salute e alla vegetazione	Riscaldamento
Biossido di zolfo (SO ₂)	1 settimana	Danni alla salute, acidificazione degli ecosistemi	Raffreddamento, precursore di PM
Ossidi di azoto (NO _x)	1 settimana	Danni alla salute, effetti sugli ecosistemi, precursore di O ₃	Raffreddamento, precursore di PM
Black carbon Black Carbon (BC)	1 settimana	Danni alla salute	Riscaldamento
Composti organici volatili (VOC)	Variabile	Danni alla salute, precursori di O ₃	Precursori di O ₃ , Precursori di PM

Influenza del clima sull'inquinamento atmosferico

La qualità dell'aria è influenzata dalle emissioni e dalla meteorologia. Agendo sulle circolazioni atmosferiche e i regimi idrogeologici, i cambiamenti climatici possono alterare le condizioni meteorologiche ed emissive che influenzano la qualità dell'aria. Questo effetto è stato chiamato in inglese *climate penalty*. In generale, i fenomeni che guidano la dispersione e la diluizione di inquinanti sono legati alle caratteristiche dello strato limite atmosferico, il cui sviluppo è strettamente dipendente anche dalle condizioni di vento, temperatura, pressione e umidità a scala sinottica. Venti più intensi e strati di rimescolamento più profondi tendono a disperdere e diluire maggiormente gli inquinanti. Mentre strati di rimescolamento poco profondi e basse velocità del vento limitano il movimento verticale, intrappolando l'aria vicino la superficie con conseguente innalzamento delle concentrazioni di inquinanti [22, 23]. Questo è ad es. il caso della Pianura Padana, che è una delle aree più inquinate d'Europa, sia a causa delle sorgenti emissive presenti sul territorio, sia a causa dei fenomeni di stagnazione dell'aria [24]. Un incremento di fenomeni di stagnazione, come previsto da alcuni modelli climatici [25], potrebbe quindi portare ad un incremento di fenomeni di accumulo di inquinanti. Inoltre, variazioni climatiche come

aumenti di temperatura, persistente alta pressione, aria stagnante, favoriscono, in generale, la reattività fotochimica e la concentrazione di inquinanti secondari, tra cui ozono e particolato fine. Le stesse condizioni meteorologiche possono, inoltre, avere un effetto sulle emissioni di precursori dell'ozono e particolato, come ad esempio un aumento di emissioni di NO_x, legato all'utilizzo massiccio di impianti di condizionamento nei periodi estivi o di emissioni biogeniche di NMVOC, favorite da alti valori di temperatura e radiazione solare. A questo si aggiunge che modifiche anche a livello locale dei regimi di precipitazione possono influire sulla rimozione o meno in atmosfera del particolato. Infine, un aspetto rilevante riguarda l'influenza del cambiamento climatico sul rischio incendi, già molto frequenti in Area Mediterranea nei periodi estivi [26], che potrebbero quindi aumentare a causa dell'aridità atmosferica che accelererebbe l'essiccamento della biomassa infiammabile. I composti emessi direttamente dalla combustione e di biomassa, o prodotti come inquinanti secondari, possono essere trasportati per lunghe distanze, con conseguente aumento della loro concentrazione in atmosfera.

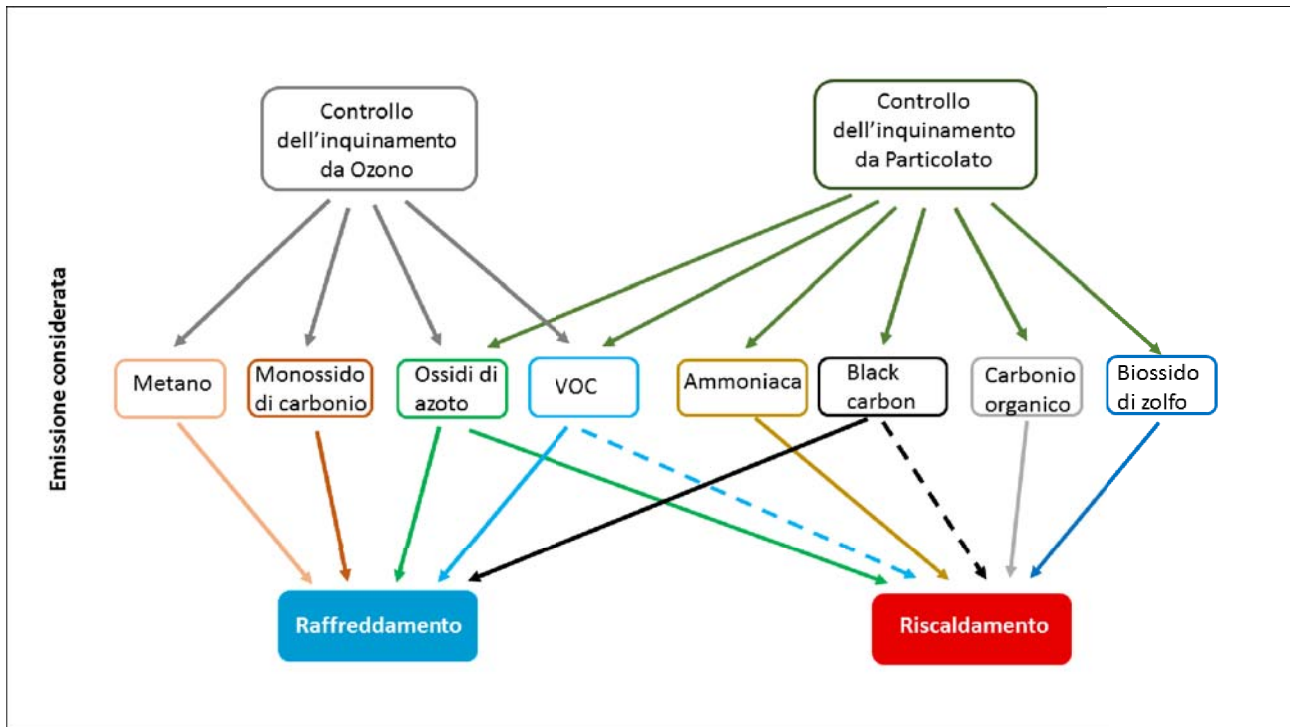


Figura 1: Diagramma schematico dell'azione di controllo su specifiche emissioni e impatto sul clima. Le linee solide rappresentano l'impatto noto, quelle tratteggiate indicano impatto incerto. Rielaborata da [6].

Inquinamento atmosferico, crisi climatica ed impatti sociali

Numerose ricerche internazionali hanno evidenziato come i fattori di rischio legati all'esposizione all'inquinamento atmosferico si distribuiscono in modo differente all'interno di una stessa comunità e tra varie comunità, e questa distribuzione dipende da caratteristiche sociali come il reddito, lo stato sociale, l'occupazione, il genere, e l'età [27]. I meccanismi per cui una condizione sociale di deprivazione amplifichi l'effetto dell'altra possono essere differenti. Come messo in evidenza da recenti studi epidemiologici e dal movimento per la giustizia ambientale, le comunità a basso livello di stato socio economico sono più concentrate laddove maggiore è l'inquinamento atmosferico e le persone maggiormente vulnerabili agli insulti ambientali sono quelle con minori risorse e con uno stato di salute più compromesso [28, 29, 30, 31, 32]. Ma lo stesso livello di esposizione ambientale può comportare un rischio maggiore sulla salute in alcuni gruppi di popolazione più deprivati [33]. Ciò potrebbe essere dovuto ad una minore capacità di rispondere allo stress ambientale che agisce in sinergia con altre pressioni sulla salute. In questo caso di-

suguaglianze socio economiche potrebbero agire come modificatori di effetto influenzando la relazione esposizione all'inquinamento atmosferico - effetto sanitario. Spostandosi dall'inquinamento ambientale ai cambiamenti climatici si ritrova il tema della giustizia ambientale o più specificamente giustizia climatica. Mentre le maggiori emissioni antropogeniche di gas climalteranti provengono dai paesi più industrializzati, gli effetti delle variazioni climatiche sono distribuiti diversamente tra le varie regioni del mondo con differenti impatti socio-economici che dipendono dalla vulnerabilità delle varie regioni e che tenderanno ad aumentare le disuguaglianze già esistenti [34, 35]. Come indicato nel rapporto dell'IPCC Riscaldamento globale 1.5 °C [3] "le popolazioni soggette ad un rischio sproporzionatamente maggiore di conseguenze avverse con un riscaldamento globale di 1,5 °C e oltre includono popolazioni svantaggiate e vulnerabili, alcune popolazioni indigene, e comunità locali che dipendono da mezzi di sostentamento agricoli o costieri (confidenza alta). Le regioni a rischio sproporzionatamente maggiore comprendono gli ecosistemi dell'Artico, le regioni aride, i Paesi in via di sviluppo delle piccole isole e i paesi meno sviluppati (confidenza alta)". Sempre se-

condo l'IPCC è necessario tenere insieme l'etica e l'equità per poter affrontare la distribuzione diseguale degli impatti negativi associati a un riscaldamento globale di 1,5 °C o più.

Strategie di riduzioni

La riduzione delle concentrazioni atmosferiche di ozono troposferico e black carbon rappresenta una opportunità concreta per migliorare la qualità dell'aria e rallentare il cambiamento climatico a breve termine. Ma, essendo sostanze a vita breve la loro riduzione può essere considerata come una strategia a breve termine che integra, senza sostituire, la riduzione delle emissioni di CO₂ e di altri gas climalteranti. Inoltre, considerando la bassa permanenza in atmosfera di tali sostanze, i benefici della riduzione delle loro emissioni riguarderanno prevalentemente le regioni che attuano misure di riduzione, che quindi variano in base alla regione e all'interno della stessa regione. Accanto a strategie di riduzione dell'utilizzo dei combustibili fossili (carbone, petrolio, gas) da attuare in tutto il mondo, è anche necessario considerare le peculiarità di ciascuna regione. In Africa, ad esempio, è necessario ridurre le emissioni di black carbon derivanti dalla biomassa utilizzata nella cottura dei cibi e migliorare la qualità dell'aria indoor. In Asia è necessaria una riduzione delle emissioni di black carbon dalle attività di estrazione e combustione del carbone, dai veicoli diesel e dalle cucine a biomassa. In America latina e nei Caraibi è fondamentale la salvaguardia della foresta amazzonica e la riduzione del black carbon da incendi. Nel Nord America e in Europa è invece particolarmente rilevante una riduzione delle emissioni di metano derivanti dalle attività agricole e dalla distribuzione del gas naturale a lunga distanza [36] ed una riduzione di black carbon derivante dal riscaldamento a biomassa residenziale. La traduzione in politiche concrete ed efficaci nel ridurre contemporaneamente gli inquinanti atmosferici dannosi per la salute e capaci di alterare il clima, si scontra sovente con le interconnessioni fra gli elementi del sistema ambientale, che a loro volta condizionano i risultati delle scelte socioeconomiche. Emblematico può essere l'esempio della ricerca della sorgente energetica ottimale per riscaldare gli edifici residenziali. La scelta varia

tra fonte solare diretta (pannelli solari termici con accumulo di calore) e indiretta (fotovoltaico e pompa di calore), biomasse (vegetali o di sintesi) e combustibili fossili. La complessità prima richiamata richiede una conoscenza specifica del territorio e la ricerca della soluzione che minimizzi i danni. In questo caso, nell'individuazione della soluzione dovrebbe giocare un ruolo preminente la riduzione drastica del fabbisogno di energia utile per ottenere il comfort termico voluto. La soluzione vincente sia per il clima che per la salute, ad esempio in Italia, sarebbe ristrutturare o eliminare gli edifici colabrodo che dissipano all'esterno il calore generato dagli impianti. Un altro aspetto rilevante nell'individuare strategie di riduzione di sostanze climalteranti è quello degli impatti sociali che tali strategie comportano e dei possibili feedback che possono innescare. Un esempio è costituito da alcune strategie di contenimento delle emissioni CO₂ che riguardano la forestazione su ampie zone del pianeta [37]. Sebbene questa attività avrebbe effetti positivi sia sul clima che sull'ambiente, un recente studio delle Accademie delle Scienze USA [38] individua in questa attività una serie di criticità socio-economiche, tra cui il suolo sottratto ad altre pratiche di utilizzo locale (produzione di cibo o fibre) con perdita di biodiversità, la gestione della biomassa legnosa accumulata, necessaria per esempio per impedire che il carbonio vada in fumo un po' alla volta (legna utilizzata come combustibile) o tutto insieme (incendi naturali o dolosi).

In un quadro estremamente complesso di strette interconnessioni tra qualità dell'aria, crisi climatica ed impatti sociali, le strategie di mitigazione dovrebbero maggiormente favorire politiche win-win rispetto alle win lose, ovvero favorire opzioni che tengano nel dovuto conto sia il miglioramento della qualità dell'aria che la mitigazione del riscaldamento climatico che gli impatti sociali, piuttosto che favorire opzioni che tengano in conto uno degli aspetti a scapito degli altri [39, 5, 31].

Conclusioni

Il clima e la qualità dell'aria sono fenomeni strettamente interconnessi sia sul piano strettamente ambientale che sociale. Molte delle policies e del-

le strategie di riduzione delle emissioni possono avere effetti opposti sulla qualità dell'aria e sul clima ma il considerarli insieme aumenterebbe i benefici per la salute pubblica e l'ambiente, riducendo al contempo gli impatti negativi non previsti. Alla luce dei danni alla salute in tutto il mondo derivanti dalle esposizioni a SO₂, BC, O₃ e suoi precursori è necessario agire ad una loro riduzione indipendentemente dalla politica climatica. La riduzione delle emissioni di queste sostanze può inoltre contribuire a modificare i tassi di riscaldamento a breve termine, agire sul regime di precipitazioni e circolazioni regionali che vanno ad incidere sull'accumulo di inquinamento. I programmi di riduzione di CO₂ possono anche apportare benefici alla qualità dell'aria considerando la riduzione degli inquinanti atmosferici co-emessi alla CO₂.

Le connessioni ai vari livelli richiedono un approccio sistemico nel considerare l'intero pianeta nelle sue dimensioni ambientali e sociali come un sistema unico. Su tutti i livelli domina l'evidenza dell'urgenza di una riduzione dell'utilizzo dei combustibili fossili.



[1] P. J. Landrigan *et al.*: "The Lancet Commission on pollution and health", *The lancet* **391** (2017) 462.

[2] OECD: *OECD Environmental Outlook to 2050*. OECD Publishing, Paris (2012).

[3] IPCC: *Summary for policymakers. Global warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. V. Masson Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, et al. (Eds.), Geneva (2018).

[4] E. Von Schneidemesser *et al.*: "Chemistry and the linkages between air quality and climate change", *Chem. Rev.* **115** (2015) 3856.

[5] M. C. Facchini, S. Fuzzi: "Qualità dell'aria e cambiamenti climatici: due facce della stessa medaglia", *Ingegneria dell'ambiente* **4** (2017) 344.

[6] IPCC: *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom (2013).

[7] J. H. Seinfeld, S. N. Pandis: *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. Wiley-Interscience, New York (2006).

[8] S. Sitch *et al.*: "Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink", *Nature* **448** (2007) 791.

[9] B. Brunekreef, S. T. Holgate: "Air pollution and health", *The lancet* **360** (2002) 1233.

[10] E. A. L. Gianicolo *et al.*: "Acute effects of urban and industrial pollution in a government-designated Environmental risk area: the case of Brindisi, Italy", *International journal of environmental health research* **23** (2013) 446.

[11] R. Cesari *et al.*: "Influence of Ship Emissions on Ozone Concentration in a Mediterranean Area: A modelling approach", *Air Pollution Modeling and its Application XXV, Springer Proceedings in Complexity* (2018) 317.

[12] I. Schipa, A. Tanzarella, C. Mangia: "Differences between weekend and weekday ozone levels over rural and urban sites in Southern Italy", *Environmental monitoring and assessment* **156** (2009) 509.

[13] C. Mangia *et al.*: "A numerical study of the effect of sea breeze circulation on photochemical pollution over a highly industrialized peninsula.", *Meteorological Applications* **17** (2010) 19.

[14] M. Amodio *et al.*: "Chemical characterization of fine particulate matter during peak PM10 episodes in Apulia (South Italy)", *Atmospheric Research* **90** (2008) 313.

[15] M. Amodio *et al.*: "Characterization of particulate matter in the Apulia Region (South of Italy): features and critical episodes.", *J. Atmos. Chem.* **63** (2009) 203.

[16] T. C. Bond *et al.*: "Bounding the Role of Black Carbon in the Climate System: A Scientific Assessment", *J. Geophys. Res. Atmos.* **118 n.11** (2013) 5380.

[17] P. Ielpo *et al.*: "Chemical characterization of biomass fuel particulate deposits and ashes in households of Mt. Everest region (NEPAL)", *Science of the Total Environment* **573** (2016) 751.

[18] V. Ramanathan, G. Carmichael: "Global and Regional Climate Changes Due to Back Carbon", *Nature Geosci.* **4** (2008) 221.

[19] V. Ramanathan, Y. Feng: "Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives", *Atmospheric environment* **43(1)** (2009) 37.

[20] M. C. Facchini *et al.*: "Important Source of Marine Secondary Organic Aerosol from Biogenic Amines", *Environ. Sci. Technol.* **42 n. 24** (2008) 9116.

[21] C. D. O'Dowd *et al.*: "Biogenically driven organic contribution to marine aerosol", *Nature* **431 n. 7009** (2004) 676.

[22] R. B. Stull: *An introduction to boundary layer meteorology*. Springer Science & Business Media, Germany (2012).

[23] G. A. Degrazia *et al.*: "Turbulence parameterisation for PBL dispersion models in all stability conditions", *Atmos. Env.* **34** (2000) 3575.

[24] R. Cesari, C. T. Landi, A. Maurizi: "The coupled chemistry-meteorology model BOLCHEM: an application to air pollution in the Po Valley (Italy) hot spot", *Int. J. Environment and Pollution* **65** (2019) 1.

- [25] D. E. Horton, N. S. Diffenbaugh: "Response of air stagnation frequency to anthropogenically enhanced radiative forcing", *Environmental Research Letters* 7 (2012) 044034.
- [26] R. Cesari *et al.*: "Modelling dispersion of smoke from wildfires in a Mediterranean area", *Int. J. Environment and Pollution* 55 n.1-2-3-4 (2014) 219.
- [27] WHO: *Environmental health inequalities in Europe: Assessment report*. WHO, Ginevra (2012).
- [28] M. Armiero: *Introduzione in Ecologia dei poveri, di Joan Martinez Alier*. Jaca Book, Milano (2009).
- [29] A. Hajat, C. Hsia, M. S. O'Neill: "Socioeconomic disparities and air pollution exposure: a global review", *Current Environ Health reports* 2 (2014) 440.
- [30] R. Pasetto *et al.*: "Environmental justice in the epidemiological surveillance system of residents in Italian National Priority Contaminated Sites (SENTIERI Project)", *Epid. Prev.* 41(2) (2017) 134.
- [31] C. Mangia, M. Cervino, M. Portaluri, E.A.L. Gianicolo: "Ridurre l'inquinamento e le disuguaglianze sociali migliora la salute globale", *Riessioni Sistemiche* 17 (2017) 207.
- [32] EEA: *Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe*. EEA Report, Lussemburgo (2019).
- [33] F. Forastiere *et al.*: "Socioeconomic status, particulate air pollution, and daily mortality: differential exposure or differential susceptibility", *Am. J. Ind. Med.* 50(3) (2017) 208.
- [34] D. Schlosberg, L.B. Collins: "From environmental to climate justice: climate change and the discourse of environmental justice", *WIREs Clim Change* 5 (2014) 359.
- [35] C. Mangia: *Genere e cambiamenti climatici*. Scienza, genere e società. Prospettive di genere in una società che si evolve a cura di S. Avveduto, M.L. Paciello, T. Arrigoni, C. Mangia, IRPPS-CNR Monografie, 2015 (217).
- [36] S. Kirschke *et al.*: "Three decades of global methane sources and sink", *Nature* 6 (2013) 813.
- [37] J. F. Bastin *et al.*: "The global tree restoration potential", *Science* 365 (2019) 76.
- [38] O. S. Board: *Negative emissions technologies and reliable sequestration: A research agenda*. National Academies Press, Washington D. C. (2019).
- [39] M. Williams: "Tackling climate change: what is the impact on air pollution?", *Carbon Management* 3:5 (2012) 511.

competenza nei processi di dinamica atmosferica. L'attività di ricerca negli anni si è intersecata con l'interesse più ampio verso il rapporto scienza e società, con particolare riferimento alle tematiche ambientali e di genere.

Pierina Ielpo: laureata in chimica e Ph.D. in Scienze Ambientali, è ricercatrice presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR nell'ambito della chimica ambientale rivolta principalmente allo studio di aerosol e qualità dell'aria, dei processi chimico fisici che avvengono in atmosfera e del *source apportionment* in ambiente urbano, suburbano e remoto.

Rita Cesari: è laureata in fisica ed attualmente è ricercatrice CNR, presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima. La sua attività di ricerca riguarda lo studio della turbolenza nello strato limite planetario e la dispersione e trasformazione di inquinanti atmosferici mediante modelli euleriani e lagrangiani.

Cristina Facchini: è direttrice dell'Istituto di Scienze Atmosferiche e Clima, CNR. La sua attività scientifica generale rientra nel campo del cambiamento globale, con una competenza specifica nei processi fisici e chimici di aerosol e nubi e loro effetti sul cambiamento della composizione atmosferica, sulla qualità dell'aria e sul clima.

Cristina Mangia: laureata in fisica, è ricercatrice presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR. La sua attività scientifica è incentrata sullo studio dell'inquinamento atmosferico e il suo impatto sulla salute, con una specifica

Clima e risorse idriche tra atmosfera e sottosuolo

Paolo Martano

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, CNR, Lecce

Marco Delle Rose

Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, CNR, Lecce

La vita, almeno così come la conosciamo, ha bisogno di acqua liquida per svilupparsi e mantenersi giacché le reazioni metaboliche di base avvengono in fase acquosa, e questo genera limitazioni importanti per poter essere ospitata su un pianeta, sia sulla chimica (presenza di acqua libera in superficie) che sulla fisica (temperatura e pressione in superficie), e quindi sul suo clima. Verso il traguardo degli 8 miliardi di esseri umani, la Terra non appare più tanto grande per il fabbisogno idrico della specie, che ammonta ad oltre $5 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{anno}$. Tale valore arriva a raddoppiare se calcolato come *impronta idrologica* ossia come quantità totale di acqua mobilizzata per tutte le attività umane. In ogni caso, il nostro fabbisogno è ancora inferiore al bilancio totale tra evapotraspirazione (evaporazione di superficie + traspirazione della copertura vegetale) e precipitazione sulla terraferma, dal quale dipende la ricarica delle risorse idriche. Tuttavia il rapido aumento della popolazione e quindi dell'utilizzo (che va avvicinandosi al li-

mite del bilancio naturale), la disuniforme distribuzione legata al clima delle diverse aree del pianeta e il fatto che l'acqua utilizzata nelle principali attività (industria, agricoltura ed anche uso domestico) spesso non possa essere direttamente riutilizzata o rimessa nel ciclo ambientale, fanno sì che la disponibilità di acqua dolce costituisca un problema di importanza crescente.

Clima e Ciclo Idrologico

Le risorse idriche sono quindi strettamente associate alla climatologia della regione interessata, ed in questa prospettiva l'interazione tra clima e ciclo idrologico e le loro possibili variazioni congiunte, sia globali che regionali, sono sempre più oggetto di studio e ricerca.

Il concetto di ciclo idrologico schematizza la successione dei processi di accumulo e di trasferimento dell'acqua, con in relativi cambi di stato fisico, tra atmosfera, idrosfera, litosfera e biosfera. La figura 1 mostra le sue componenti, ottenute mediante una complessa e attenta combinazione di dati di misura di superficie, rianalisi con dati satellitari e modelli di simulazione numerica (tutti necessari, perché i dati da satellite sono

legati alla calibrazione con misure in superficie, queste sono spesso mancanti su vaste aree, per esempio gli oceani, o molto sparse: basti pensare alle misure di evapotraspirazione che hanno bisogno di strumentazione dedicata e quindi spesso con scarsa copertura spaziale e temporale [1], e a quelle di precipitazione, che è una grandezza molto variabile anche su brevi distanze, ma si stima che la superficie totale coperta dai pluviometri usati per il monitoraggio globale non arrivi a quella di un campo di calcio! [2]).

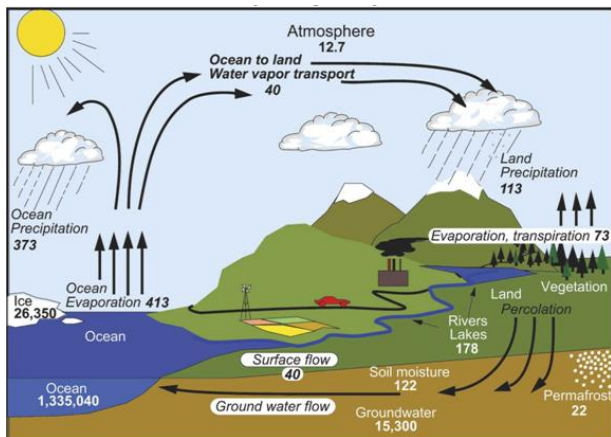


Figura 1: Il ciclo idrologico: dati di medi annuali di flusso e contenuto idrico (in migliaia di km^3). Da [3].

In bianco risaltano i serbatoi di acqua e in nero gli scambi medi annuali. Gli oceani costituiscono evidentemente il grande serbatoio idrico primario mentre l'acqua si ridistribuisce sulla superficie attraverso il bilancio precipitazione/evaporazione e poi attraverso l'infiltrazione nel suolo sotto la superficie dei continenti. Si può notare che la quantità di evaporazione e precipitazione annuale sono ben superiori al contenuto medio di acqua in atmosfera, che è limitato dalla pressione di vapore saturo (equazione di Clausius-Clapeyron). Mediante una semplice divisione, si vede immediatamente come il tempo medio di ricambio (o permanenza) dell'acqua in atmosfera sia dell'ordine di appena una decina di giorni, il che implica il fatto che la precipitazione e l'evaporazione totali (cioè la somma della evaporazione dai bacini idrici e della evapotraspirazione dalla superficie solida) si bilancino su scala annuale (figura 1). Il contenuto idrico dei suoli e dei bacini idrici superficiali (fiumi, laghi) è ben più limitato rispetto agli altri serbatoi naturali (ghiacciai, falde idriche) e costituisce, per lo più, un transito verso il ritorno in atmosfera (eva-

potraspirazione) o il trasferimento al mare, diretto o attraverso il passaggio intermedio negli acquiferi del sottosuolo. Questo passaggio chiude il ciclo cominciato con l'evaporazione oceanica. Infatti sulla superficie dell'oceano l'evaporazione supera la precipitazione mentre il contrario avviene sulla terraferma, dove l'evapotraspirazione è limitata dalla porosità dei suoli e dalla risposta fisiologica della vegetazione (un problema modellistico interdisciplinare, multiscala ed estremamente complesso!) e il surplus di precipitazione ritorna quindi all'oceano attraverso l'idrografia di superficie. Il ciclo idrologico è fortemente accoppiato al bilancio energetico della superficie terrestre. Il 50% circa della radiazione solare disponibile alla superficie viene utilizzato come calore latente di evaporazione e contribuisce a raffreddare la superficie, mentre il vapore prodotto è un efficace gas serra. Inoltre, la sua condensazione in nubi rilascia di nuovo parte del calore nell'atmosfera (a volte con effetti molto evidenti, come i cicloni tropicali), mentre le nubi influiscono nuovamente sia sulla radiazione solare incidente che su quella termica emessa di ritorno dalla superficie terrestre. Oltre a queste risposte rapide alla radiazione incidente, le masse oceaniche sono poi il volano lento che invece mitiga, ritardandoli, i possibili cambiamenti di regime termico sia locale che globale, mentre le masse ghiacciate tendono ad agire da fattore di amplificazione dei cambiamenti che si verificano a scala climatica (*feedback* positivo; maggiori dettagli sulle interazioni tra clima e ciclo idrologico alla fine di questa sezione). A causa di queste strettissime interrelazioni, un intenso programma di ricerca internazionale (GEWEX, www.gewex.org) è attivo dagli anni '90, anche per coordinare gli sforzi ed i progetti regionali (in Europa per esempio HyMeX, www.hymex.org) che cercano di comprendere e modellare al meglio l'interazione tra ciclo idrologico, bilancio energetico terrestre, e clima.

Come è noto, infatti, negli ultimi decenni è stato misurato un aumento globale della temperatura media alla superficie del pianeta, che si attesterebbe intorno ai $0.9\text{ }^\circ\text{C}$ nel decennio 2006-2016 rispetto alla media di riferimento del 1850-1900 [4]. Siamo abituati a considerare e osservare le variazioni caotiche a breve termine delle variabili meteorologiche (il tempo atmosferico), o

quelle periodiche diurne e stagionali, e anche, più recentemente, alcune variazioni interannuali più lente (le cosiddette **teleconnessioni** tra cui la giustamente famosa ENSO, *El Niño Southern Oscillation*), che modulano il comportamento del sistema atmosfera-oceano, tuttavia, anche l'insieme delle caratteristiche statistiche delle variabili meteorologiche (e cioè il clima) può cambiare, anche se la loro osservazione deve coinvolgere evidentemente periodi temporali di alcuni decenni almeno. Nonostante la Terra abbia avuto notevoli variazioni climatiche nel corso della sua storia, sia passata per epoche più calde di quella attuale per esempio nel Mesozoico e anche attraverso glaciazioni cicliche nel Quaternario, il tasso di riscaldamento globale dell'ultimo secolo non sembra avere attualmente una spiegazione diretta, convincente, e sostenibile in termini quantitativi, eccezion fatta per l'aumento dell'effetto serra dovuto all'aumento della anidride carbonica e altri gas serra immessi dalle attività antropiche dall'inizio dell'era industriale [5]. In effetti questo momento storico è stato proposto anche come inizio di un'epoca geologica denominata Antropocene per i mutamenti su larga scala indotti sul pianeta dalla attività umana a causa soprattutto dell'aumento di ordini di grandezza dell'utilizzo di energia pro capite attraverso l'introduzione su larga scala dei motori e la necessità dell'uso di combustibili fossili per fornire grandi quantità di energia concentrata [6] (l'organismo umano è una macchina biologica di appena 100 W circa di potenza media, in equilibrio con il bilancio energetico della biosfera, che utilizza pochi watt per metro quadro di radiazione solare incidente, ma ad esempio il conducente di una piccola automobile ha già a disposizione un motore della potenza di decine di kilowatt [7]). In effetti, per quanto riguarda il clima, il tasso di aumento annuale di CO₂ risulta in ragionevole accordo con le emissioni antropogeniche annuali stimate e gli studi della sua composizione isotopica, che mostrano una diminuzione progressiva del contenuto di isotopi del carbonio ¹⁴C e ¹³C provano che l'esubero di CO₂ in atmosfera non ha origine dal metabolismo biologico planetario, ma in gran parte da fonti fossili [5]. Si è anche ipotizzato che l'immissione di gas che hanno effetto sul clima (climalteranti) nell'atmosfera, e quindi una sua apprezzabile variazione in composizio-

ne chimica sia cominciata già oltre diecimila anni orsono all'inizio della epoca storica, con l'avvento delle pratiche agricole (diossido di carbonio, CO₂) e dell'allevamento (metano, CH₄), ma è sicuramente con l'avvio dell'era industriale che l'immissione di gas climalteranti è cresciuta con una rapidità sconosciuta in precedenza.

Il sistema atmosfera-oceano è una macchina termica attivata dal flusso di radiazione solare (in gran parte visibile, ad alta temperatura) e in equilibrio termodinamico con questo flusso attraverso un flusso uscente di radiazione termica (infrarossa, a bassa temperatura). L'effetto serra causato alla presenza dell'atmosfera mantiene la temperatura media in superficie prossima ai 15°C, invece che intorno ai circa -20°C che si avrebbero se questa fosse direttamente in equilibrio termico con la radiazione solare incidente, e che si ottengono equiparando il flusso netto di radiazione solare entrante a quella termica uscente dalla superficie totale del pianeta attraverso la legge di Stefan-Boltzmann per la radiazione di corpo nero. L'effetto è tanto maggiore quanto maggiore è l'assorbimento della radiazione termica all'interno del mezzo (in questo caso la miscela di gas attivi in atmosfera), come risulta evidente anche dai più semplici modelli fisici basati solo sulla emissione di corpo nero [8] (vedi riquadro).

Una variazione di temperatura della superficie e della troposfera (la parte bassa dell'atmosfera soggetta alla convezione termica indotta dalla superficie e che contiene circa il 75% della massa totale di aria nei suoi 10 km circa di spessore medio) avviene in compensazione di una variazione del flusso di radiazione termica uscente alla sua sommità (in prima approssimazione ancora la legge di Stefan-Boltzmann del corpo nero) a causa di un mutato assorbimento a partire dagli strati più bassi, o più in generale dallo sbilanciamento tra flusso solare entrante e flusso totale uscente (la cosiddetta forzante radiativa [9]), flussi che sarebbero uguali in uno stato di equilibrio termodinamico. Questo sbilanciamento può avvenire per svariate ragioni: variazioni del flusso solare incidente, variazione di concentrazione di gas climalteranti, variazioni di albedo (riflettività) della superficie o della stessa troposfera, ecc. Nel caso dei gas serra tale variazione può essere in effetti calcolata in maniera più precisa

Equilibrio radiativo in atmosfera grigia

Il modello di equilibrio radiativo più semplice [8] è quello ad atmosfera in generale grigia nell'infrarosso (ma trasparente alla radiazione visibile). La radiazione infrarossa proviene quindi dalla superficie riscaldata (qui piatta per semplicità) e ogni spessore dz di atmosfera assorbe (legge di Lambert) ed emette (legge di Stefan-Boltzmann) due flussi di radiazione infrarossa (F_1 verso l'alto e F_2 verso il basso). Prendendo l'asse z verticale verso l'alto con $z = 0$ alla sommità della atmosfera e $z = z_0$ alla superficie si possono definire le seguenti relazioni

$$\begin{aligned}\frac{dF_1}{dL} &= F_1 - B \\ \frac{-dF_2}{dL} &= F_2 - B ,\end{aligned}$$

dove lo spessore ottico L è

$$L(z) = - \int_0^z \rho(z')k(z') dz' .$$

Ovviamente $L(0) = 0$, e definiamo $L(z_0) \equiv L_0$ e $B(z_0) \equiv B_0$.

Nell'equazione precedente abbiamo indicato con ρ la densità dell'aria, e con k la costante di assorbimento. Il coefficiente B dipende dall'altezza e dalla temperatura secondo la relazione $B(z) \propto \sigma T^4(z)$. Assumendo lo stato stazionario si ha:

$$\rho C_p \frac{dT}{dz} = \frac{d(F_1 - F_2)}{dz} = 0 ,$$

che implica $(F_1 - F_2) = \Delta F = \text{costante}$. Quindi dalle condizioni al contorno alla sommità dell'atmosfera e alla superficie del pianeta, $F_2(0) = 0$, $F_1(z_0) = B_s$, si ottiene:

$$B(z) = \Delta F(L(z) + 1)/2, \quad B_s - B_0 = \Delta F/2, \quad B_s = \Delta F(L_0 + 2)/2,$$

che mostrano quindi sia il tipico salto di temperatura tra la superficie e lo strato inferiore dell'atmosfera ($B_s - B_0$ che innesca la convezione), sia l'aumento della temperatura per entrambi all'aumentare dello spessore ottico L , e quindi con la concentrazione di gas serra (ρk).

sulla base della variazione misurata dei componenti di gas serra (CO_2 e CH_4 in primo luogo, ma anche altri, come ossidi di azoto e ozono troposferico) attraverso modelli costruiti sulla fisica degli scambi radiativi delle molecole coinvolte [8]. All'interno di un ragionevole intervallo di incertezza dovuto alla complessità modellistica, la forzante radiativa complessiva può essere calcolata non solo per i gas serra ma anche per le altre componenti che influiscono sulla forzante a breve termine (aerosol, variazioni della irradianza solare, variazioni di albedo a causa di cambio di uso del suolo ecc.). Si può poi utilizzare questa forzante in modelli numerici climatici sia per seguire l'andamento nel tempo delle temperature e del clima in generale, che per trovare la risposta della superficie in termini di aumento di tempe-

ratura all'equilibrio, quella che si avrebbe se il bilancio radiativo tornasse nullo, quando cioè anche il riaggiustamento lento dovuto a vari fattori tra cui la inerzia termica degli oceani e la risposta dei ghiacciai ha avuto luogo, supponendo costante la forzante a breve termine. L'aumento della temperatura di equilibrio corrispondente alla forzante attuale oscillerebbe grosso modo tra 1°C e 3°C circa rispetto alla media 1850-1900 [5]. Quello attualmente misurato è vicino all'estremo inferiore di questo intervallo, a causa dei riaggiustamenti lenti a cui si è accennato. Infatti se i tempi di risposta dell'atmosfera alle forzanti termiche sono di alcuni giorni, quelli degli oceani, a causa della massa in gioco di più di due ordini di grandezza superiore e della alta capacità termica dell'acqua, spaziano anche su decenni.

Questo ci fa capire che il riscaldamento globale che stiamo osservando oggi potrebbe ancora variare anche se la composizione dell'atmosfera venisse congelata allo stato attuale. Ma, visto che la previsione di equilibrio a lungo termine non è verificabile subito e, come anche quelle generate dai modelli numerici che seguono l'evoluzione temporale del sistema climatico con la concentrazione dei gas climalteranti, ha un intervallo di incertezza non trascurabile, non potremmo pensare che l'attuale riscaldamento possa essere legato ad altri fenomeni che in tempi passati hanno causato i cambiamenti del clima? In realtà la variazione di contenuto di CO₂ risulta correlata con la variazione delle temperature in pressoché tutte le epoche geologiche alle quali si può risalire dai carotaggi nei ghiacciai polari e nei fondali oceanici, anche se l'inizio delle fasi interglaciali sembra precedere l'aumento di CO₂[10]. Inoltre, la variazione dell'effetto serra con il contenuto di gas climalteranti risulta da cento anni di raffinamento di una teoria che si serve dei risultati della moderna spettroscopia supportata dai calcoli quantomeccanici della interazione delle molecole gassose con la radiazione, e che viene utilizzata nel contesto della fluidodinamica atmosferica attraverso calcoli numerici sofisticati inglobati nei modelli attuali di previsione climatica [9]. È noto tuttavia che i grandi cambiamenti ciclici globali di temperatura dell'era quaternaria sono correlati con le variazioni cicliche dei parametri dell'orbita terrestre, che causano periodiche variazioni della radiazione solare incidente (cicli di Milankovich), come provano appunto i carotaggi dei sedimenti oceanici. Questi fanno sì che la Terra in questa era geologica si sia comportata come un sistema essenzialmente bistabile, che è passato da stati di glaciazioni a stati interglaciali ogni 10⁵ anni circa, in fase con alcune variazioni cicliche dei parametri orbitali, che nonostante causino una forzante solare probabilmente insufficiente da sola per passare da una glaciazione a una fase interglaciale, riescono a innescarle ugualmente attraverso le perturbazioni generate dalle fluttuazioni intrinseche al sistema oceano-atmosfera, cioè le dinamiche interne a più breve termine a cui si è già accennato, e il *feedback* associato alla formazione del ghiaccio stesso (vedi più avanti in questa stessa sezione) [11, 12].

Questo può darci informazioni sullo stato attuale e futuro del pianeta? La Terra è entrata circa 15000 anni fa in un periodo interglaciale, e si trova ora, nello spazio dei parametri che caratterizzano le variazioni a lungo termine della sua orbita, in una posizione molto vicina a due glaciazioni passate dell'era quaternaria. La figura 2, estratta da un recente studio [13] mostra, insieme alle ultime glaciazioni del Quaternario, la posizione di queste due glaciazioni, denominate MIS11 e MIS19 (dove MIS è l'abbreviazione di *Marine Isotope Stage*, che si deduce, previa datazione radiometrica, dal rapporto tra ¹⁶O e ¹⁸O calcolato su campioni prelevati da sedimenti oceanici).

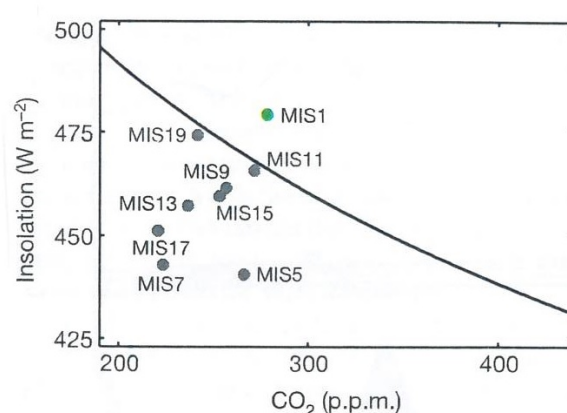


Figura 2: *Insolazione critica: i punti indicano le posizioni della Terra all'inizio delle ultime glaciazioni del Quaternario rispetto alla linea critica di innesco (curva continua), nel piano insolazione-concentrazione di anidride carbonica. MIS1 indica la posizione nell'Olocene preindustriale. Da [13].*

La regione al di sotto della linea continua rappresenta condizioni di possibile innesco delle glaciazioni nel piano della forzante relativa alla concentrazione di CO₂ rispetto alla radiazione solare calcolata dai parametri orbitali a 65° dell'emisfero nord (una ragionevole misura per la forzante orbitale, dato che le glaciazioni, privilegiano l'innescio nell'emisfero nord caratterizzato dalla più alta concentrazione di terra solida, per l'azione di *feedback* del ghiaccio di superficie). La linea continua è stata infatti calcolata usando un modello climatico tarato per simulare bene le due glaciazioni MIS11 e MIS19 in termini di condizioni orbitali di innesco e di ghiaccio totale (ri)prodotto. Queste sono state scelte proprio

perché la loro posizione in termini dei parametri orbitali è vicina a quella attuale. La curva (logaritmica rispetto alla concentrazione di CO₂) è stata quindi ottenuta cambiando i parametri orbitali in modo da ottenere valori soglia per l'innesco della glaciazione nel modello consistente con questi vincoli paleoclimatici, in funzione della concentrazione di CO₂, e pertanto è la linea critica che determina l'innesco o meno della transizione interglaciale/glaciale. Questo è confermato a posteriori dal fatto che tutti i punti che rappresentano lo stato del pianeta all'innesco delle precedenti 8 glaciazioni vengono a trovarsi al di sotto della linea critica nel grafico, ma la posizione della Terra nell'Olocene, cioè la nostra epoca (preindustriale) ne è al di sopra (MIS1). L'ultima glaciazione aspettata in ordine di tempo quindi sembra sia stata mancata già con la concentrazione pre-industriale di CO₂ di 280 ppm (non sarebbe neanche una cattiva notizia), e c'è anche chi ritiene, come si è accennato, che tale concentrazione, sia già dovuta all'attività umana sulla Terra a partire dalla introduzione dell'agricoltura [14]. Comunque siano andate le cose, con la attuale concentrazione di CO₂ (410 ppm) ci accorgiamo che il nostro pianeta risulta ben lontano oramai dalla linea critica, e risulterebbe già lontano per decine di migliaia di anni a venire dalla prossima eventuale glaciazione [13], potendo forse anche entrare in una fase di transizione non più direttamente assimilabile alla storia climatica della Terra dell'ultimo milione di anni [15]. Uno dei cosiddetti *tipping points*, o punti di non ritorno visibili per marcare un cambio di regime climatico, può essere proprio la completa fusione della calotta artica, a causa degli effetti di retroazione che possono innescarsi [10].

Ma tornando al ciclo idrologico: come interagisce questo con la forzante radiativa e la variazione della temperatura globale? In vari modi [16].

1. Il vapore acqueo è esso stesso un gas serra e un suo aumento globale in atmosfera (vedi punto 6 e sezione seguente) avrebbe in sé un *feedback* (retroazione) positivo sulla forzante radiativa (cioè rinforza, retroagendo, la stessa causa della sua variazione, e cioè l'aumento di temperatura).
2. Le nubi però hanno una potente albedo (ri-

flessione) sulla radiazione solare entrante e congiuntamente assorbono e riemettono nell'infrarosso. Una variazione della copertura nuvolosa in generale si comporta quindi in maniera potenzialmente ambigua rispetto alla forzante radiativa, dipendendo da fattori diversi come la altezza della nube e la sua microstruttura a livello di dimensioni e densità delle goccioline. La produzione di nubi da parte del vapore disponibile è anche fortemente condizionata dalla presenza o meno di minuscoli nuclei di condensazione (aerosol, o particolato), e l'insieme di fenomeni implicati, la cui dinamica continua ad essere oggetto di studio e ricerca, è uno dei fattori principali che contribuiscono alla incertezza già menzionata delle previsioni dei modelli climatici.

3. Atmosfera e oceano sono enormi masse fluide con grande capacità termica, tuttavia come già accennato, mentre l'atmosfera ha una inerzia termica di alcuni giorni per un forzante esterno, l'oceano, a causa della massa enormemente superiore e della grande capacità termica dell'acqua, risponde su scale di anni o decenni, e questo suggerirebbe come il riscaldamento previsto all'equilibrio per gli attuali livelli di CO₂ in atmosfera (410 ppm contro le circa 280 dell'epoca preindustriale) sia probabilmente ancora da raggiungere.
4. Queste due grandi masse fluide sono fortemente accoppiate dal punto di vista termodinamico e questo accoppiamento è associato, oltreché alle dinamiche a scala diurna o di pochi giorni (evaporazione, brezze, cicloni ecc.) anche alle variazioni stagionali o interannuali del clima regionale (ad esempio i monsoni o le cosiddette teleconnessioni come *El Niño*) e ad alcune caratteristiche importanti del clima del pianeta come lo conosciamo oggi. Per esempio il clima dell'Europa è legato alla presenza di un nastro trasportatore oceanico la cosiddetta **circolazione termoalina** che convoglia acque calde verso il nord Atlantico in superficie e acque fredde e salate di ritorno in profondità dal circolo polare artico verso il sud. Il funzionamento di questo convogliatore di calore è direttamente dipendente dalla densità delle

acque polari superficiali, e quindi dalla loro salinità e temperatura, che sono legate alla presenza e quantità di ghiaccio artico e alla quantità di precipitazioni.

5. L'aumento globale delle temperature provoca un aumento del livello del mare attraverso la lenta espansione termica degli oceani: il calcolo è complesso data la grande dipendenza del coefficiente di espansione termica dell'acqua dalla temperatura e la stratificazione termica dell'oceano, e si fa con modelli numerici, tuttavia l'ordine di grandezza della variazione di altezza è dell'ordine dei centimetri per grado °C. La possibile progressiva fusione delle calotte glaciali terrestri (non di quelle marine ovviamente) aggiunge tuttavia il rischio di un aumento di livello più sostanziale. I due processi sono già in atto e l'ultimo se avviato è soggetto ad una intrinseca accelerazione dovuta all'effetto di forte diminuzione dell'albedo della superficie non ghiacciata, e quindi al potenziale aumento della temperatura, nella zona di scioglimento del ghiaccio (lo stesso *feedback* che all'inverso favorisce il progredire di una glaciazione una volta iniziata).
6. La forzante radiativa e il conseguente aumento delle temperature hanno un effetto diretto sulla evaporazione dalla superficie del pianeta e sulla pressione di vapore in atmosfera.

I primi quattro punti rappresentano il *feedback* del ciclo idrologico sull'aumento globale delle temperature e sul clima globale in generale, che è ancora non del tutto chiarito e oggetto di studio. Il quinto può causare un aumento sia della attività erosiva sulle coste, sia dell'intrusione di acque marine negli acquiferi costieri. L'ultimo riguarda direttamente l'effetto della forzante radiativa sul passaggio del vapore acqueo in atmosfera, cioè la dinamica del bilancio evaporazione/precipitazione, e quindi, per quanto detto, sulla disponibilità delle risorse idriche sulla terraferma per l'utilizzo umano: che cosa potremmo aspettarci in questo caso?

Precipitazione, evaporazione e risorse idriche

Possiamo ricavare una informazione sia pure a carattere molto generale, usando due note equazioni della termodinamica basica applicata all'atmosfera: l'equazione di Clausius-Clapeyron, per la pressione del vapore saturo in funzione della temperatura, e l'equazione di Priestly-Taylor per l'evapotraspirazione da una superficie saturata (oceano) in atmosfera in funzione della temperatura e del flusso netto di radiazione (vedi riquadro).

Usando una temperatura media in superficie di 15 °C, possiamo calcolare le variazioni percentuali della pressione di vapore e della evaporazione per un grado di aumento della temperatura. Il risultato di questo calcolo, pur grossolano, è che la pressione di vapore aumenta di circa il 6% mentre l'evaporazione globale di circa il 2%. Che conclusioni possiamo trarne? Dato che il tempo di permanenza delle molecole di acqua in atmosfera è di pochi giorni concludiamo che anche la precipitazione media annuale su scala globale dovrà aumentare di circa il 2% per grado °C per bilanciare la evaporazione. Tuttavia la capacità dell'atmosfera di immagazzinare vapore aumenta del 6%, assumendo quindi un maggiore potenziale di accumulo locale di vapore, e quindi di potenziale intensità di precipitazione producibile. Quindi possiamo aspettarci la possibilità di un aumento di intensità locale delle precipitazioni in misura maggiore del loro aumento medio globale, e conseguentemente, per pareggiare il bilancio, anche un allungamento locale dei periodi secchi (dove locale non vuol dire necessariamente nello stesso posto, anzi le stesse considerazioni suggerirebbero che le precipitazioni potrebbero intensificarsi dove già sono intense e così i periodi di secca, il che sembra effettivamente verificarsi [17, 18]). Un indice denominato HY-INT (Hydroclimatic Intensity [19]), può descrivere questo fenomeno a partire da dati di misura o di simulazione numerica. Si tratta del prodotto tra la massima intensità di pioggia annuale nei giorni piovosi (cioè con precipitazione maggiore di 1 mm), normalizzata alla media sull'intero periodo in studio, e la massima durata annuale dei periodi secchi (giorni consecutivi con precipitazione minore di 1mm), anch'essa

Vapore acqueo: Clausius-Clapeyron e Priestley-Taylor

L'espressione

$$S = dP/dT = Q_v/(TV) ,$$

è l'equazione di Clausius-Clapeyron, da cui si ottiene anche, ricavando il volume specifico del vapor d'acqua V dalla equazione di gas perfetti:

$$dP/P = (Q_v M_v) dT / (RT^2) ,$$

dalla quale si ottiene la variazione percentuale di pressione parziale del vapore P per grado di temperatura assoluta T . (Q_v = calore latente di evaporazione, M_v = peso molecolare dell'acqua, R = costante dei gas perfetti).

L'equazione di Priestley-Taylor per la evaporazione potenziale E in atmosfera in funzione della radiazione solare incidente E_r si scrive come:

$$E = A(s E_r) / (s Q_v + C_p)$$

dove C_p è il calore specifico dell'aria alla pressione atmosferica costante P_a , $s = r S / P_a$ dove r è il rapporto tra i pesi molecolari medi del vapore e dell'aria secca, e A una costante adimensionale. Dalle equazioni precedenti si ricava:

$$dE/E = (dP/P - 2dT/T)[C_p / (s Q_v + C_p)]$$

che è sempre minore di dP/P per variazioni positive di temperatura.

parimenti normalizzata alla media dell'intero periodo considerato. Nel lavoro del 2011 [19], Giorgi e collaboratori mostrano che questo indice risulta in generale crescita sui dati globali di rianalisi meteorologica disponibili nell'ultimo trentennio, così come nelle simulazioni da modelli climatici nello stesso trentennio e per questo secolo. La stessa crescita, che evidenzia un graduale cambio nella modalità di distribuzione temporale delle precipitazioni, si ha anche a scala regionale in quasi tutti i continenti, anche se con modalità differenti nelle varie aree del pianeta [20].

Pur non avendo valore di tendenza climatica, la figura 3 mostra come esempio l'indice HY-INT calcolato dal 2003 al 2016 dai dati pluviometrici della stazione micrometeorologica ISAC-CNR di Lecce (www.basesperimentale.le.isac.cnr.it), che cresce in maniera statisticamente significativa durante il periodo considerato, almeno nel semestre caldo (aprile-settembre) [21].

Il regime delle precipitazioni deve avere evidentemente un effetto diretto sui bacini idrici superficiali e sugli acquiferi sotterranei che da es-

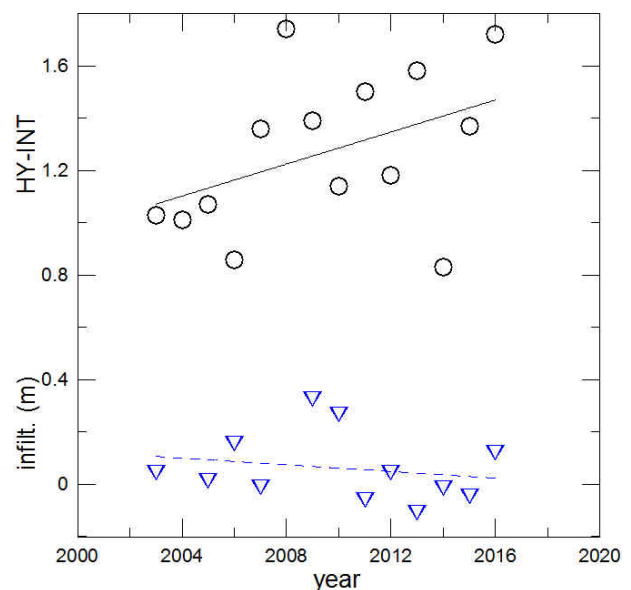


Figura 3: Indice di intensità idroclimatica (HY-INT, vedi testo) e infiltrazione superficiale dal database della stazione micrometeorologica ISAC-CNR (www.basesperimentale.le.isac.cnr.it), per il periodo 2003-2016 (semestre aprile-settembre). Adattato da: [21].

se si alimentano e che alimentano direttamente il consumo umano. Una parte delle acque piovane

che si infiltra nel suolo, dopo aver attraversato spessori più o meno cospicui di roccia (la cosiddetta zona vadosa) per effetto della sola forza di gravità, si accumula nel sottosuolo per formare i serbatoi sotterranei. Questi ultimi contengono una percentuale rilevante del volume delle acque dolci della Terra (figura 1) e costituiscono le principali riserve idriche disponibili per il soddisfacimento dei nostri bisogni che, come già accennato, ammontano a oltre $5 \times 10^3 \text{ km}^3/\text{anno}$ [22]. L'impatto ambientale di questo imponente consumo d'acqua, si può esprimere in termini di **impronta idrologica** ossia di acqua dolce incorporata nei prodotti e nelle attività di tipo agricolo, industriale e domestico, un concetto analogo quindi a quello di **impronta ecologica** [23]. Le stime della impronta idrologica in Italia arrivano fino a 6400 litri d'acqua pro capite al giorno, una quantità che pone il nostro paese al quarto posto su scala mondiale e al primo su quella europea, e che attualmente vengono assicurati per oltre la metà mediante importazione di prodotti esteri (l'Italia è così il quinto importatore d'acqua del pianeta). Il rapporto tra l'acqua prelevata e consumata come impronta idrologica e quella realmente disponibile dal bilancio idrologico è un ulteriore parametro che consente di valutare la possibilità di sostenere nel tempo gli stili di vita all'origine dei consumi. Ma tornando al prelievo locale per uso diretto, in Puglia, dove gli acquiferi costituiscono la risorsa idrica principale, la domanda d'acqua continua a crescere soprattutto nelle aree del Tavoliere e delle Murge a causa dell'incremento delle superfici irrigabili avvenuto negli ultimi decenni. Tuttavia, un incremento dei prelievi si è registrato anche nel settore potabile, sicché nel Salento il prelievo dai pozzi per tale uso ha superato il 75% del fabbisogno [24].

L'acquifero profondo del Salento

Le riserve idriche della penisola salentina sono immagazzinate in diversi acquiferi, il principale dei quali è il più profondo ed ha un'estensione pari a quella dell'intera penisola, mentre gli altri costituiscono serbatoi circoscritti e superficiali. L'acquifero profondo è formato da rocce calcaree (molto permeabili perché diffusamente carsificate) e contiene una massa di acqua dolce

che galleggia, con l'interposizione di una fascia di transizione a contenuto salino gradualmente variabile, sull'acqua marina di intrusione continentale (relazione di Ghyben-Herzberg, vedi riquadro).

La falda idrica contenuta in questo acquifero costituisce l'unica risorsa autoctona di acqua potabile. Come molti acquiferi costieri quindi, l'acquifero profondo salentino è soggetto al possibile incremento dell'intrusione di acqua marina dovuto sia a cause naturali, sia a cause antropiche [25]. Questo rischio aumenta prevalentemente con la diminuzione del livello piezometrico derivante dall'aumentare dell'emungimento per usi antropici, ma la potenziale tendenza alla crescita del livello del mare certamente non va in direzione della riduzione del rischio. La ricarica dell'acquifero avviene attraverso l'infiltrazione di acque piovane nel sottosuolo. Una prima stima della infiltrazione su scala annuale o stagionale può essere ricavata dalla differenza tra precipitazione e evapotraspirazione, e risulta annualmente mediamente pari a circa la metà della precipitazione stessa, come risulta da una media pluriennale dal database della stazione micrometeorologica ISAC-CNR di Lecce. In mancanza di dati certi, stimando un prelievo di acqua per uso agricolo pari a 5 volte circa quello domestico [22], ma tenendo presente che la metà delle acque di irrigazione mediamente torna nel sottosuolo, e considerando un uso domestico pro capite tipico di 200 litri al giorno circa (il prelievo è probabilmente maggiore, date le notevoli perdite nella distribuzione) [26], si può calcolare che quel 75% del fabbisogno idrico locale estratto dall'acquifero ammonta a più del 20% della infiltrazione annuale sul Salento, e cioè costituisce già una parte non trascurabile della ricarica potenzialmente disponibile, stimata probabilmente per difetto. Questa rappresenta solo la porzione effettivamente estratta, senza tener conto di quella che degrada per salinizzazione o inquinamento. Se poi si dovesse considerare l'impronta idrologica totale annuale della popolazione, questa supererebbe già la disponibilità di ricarica per infiltrazione, e quindi la sostenibilità locale del consumo [27]. La figura 3 mostra l'andamento della infiltrazione per la stagione estiva (aprile-settembre) dal database della stazione ISAC CNR per il periodo 2003-2016 (i valori negativi corrispondono al

L'acquifero costiero e l'infiltrazione

La relazione di Ghyben-Herzberg deriva direttamente dall'applicazione del principio di Archimede all'acqua marina di intrusione continentale e alla massa di acqua dolce proveniente dalla superficie attraverso la infiltrazione efficace, e che galleggia su quella marina perchè meno densa. In prima approssimazione quindi la altezza Z della massa di acqua dolce al di sotto del livello del mare è legata a quello della altezza H al di sopra da:

$$Z = H \rho_d / (\rho_s - \rho_d)$$

dove ρ_d e ρ_s sono rispettivamente le densità dell'acqua dolce e salata. L'infiltrazione efficace I (volume di acqua disponibile per la ricarica dell'acquifero per unità di superficie) è stimabile dal bilancio idrologico di superficie. In regioni sprovviste di bacini idrici superficiali rilevanti, e quindi con trascurabile scorrimento in superficie (*runoff*), questo si può scrivere come:

$$I = P_c - E - \Delta\Theta T_s$$

in funzione della precipitazione P_c e della evapotraspirazione E cumulate nello stesso intervallo di tempo. Il termine $\Delta\Theta T_s$ rappresenta l'immagazzinamento temporaneo nel suolo di spessore T_s quando il suo contenuto d'acqua mediato in verticale varia di una quantità $\Delta\Theta$. I flussi verticali di evapotraspirazione possono essere misurati direttamente attraverso il metodo della *eddy covariance* calcolando cioè il prodotto medio tra le fluttuazioni della umidità atmosferica e quelle della velocità verticale dell'aria, misurate attraverso strumentazione micrometeorologica a campionamento rapido (con frequenza >10 Hz).

disseccamento del suolo per evapotraspirazione). Un aumento della intensità idroclimatica sembra corrispondere quindi anche a una diminuzione della infiltrazione, pur non essendo quest'ultima statisticamente significativa e richiedendo una analisi più estesa e approfondita al fine di trarre conclusioni. Ma come risponde l'acquifero a variazioni della distribuzione temporale di precipitazione e evapotraspirazione? Questo dipende dalla scala tipica dei tempi di ricarica tramite infiltrazione, che non sono facili da stimare data la complessità della conformazione dello strato roccioso sovrastante (la cosiddetta zona vadosa), che ha caratteristiche di permeabilità che possono variare di molti ordini di grandezza anche per volumi relativamente contenuti. Tuttavia si può ottenere qualche informazione correlando misure di livello in opportuni pozzi di monitoraggio con misure di infiltrazione dalla superficie. Si deve disporre di due serie temporali di misure di livello e di infiltrazione, sufficientemente lunghe ma con passo temporale breve, e calcolarne un prodotto medio normalizzato (correlazione) per ciascun intervallo di n passi di sfasamento tem-

porale tra le due serie stesse. Questo è stato fatto utilizzando dati di campagne di misura di lungo periodo di livello dei pozzi di monitoraggio e misure simultanee su vari anni di precipitazione, evapotraspirazione e anche contenuto idrico del suolo, dalle quali è possibile una stima più precisa della cosiddetta **infiltrazione efficace** (vedi riquadro). Il grafico della funzione di correlazione per il livello medio dei pozzi di monitoraggio è mostrato nella figura 4, dove si osserva un picco per uno sfasamento di circa 2-3 giorni, e un risultato molto simile si ottiene per i singoli pozzi [21].

Questo permette di affermare che una parte considerevole della ricarica derivante dalla precipitazione locale avviene nel giro di pochissimi giorni e che quindi l'acquifero è potenzialmente soggetto a seguire lo stress idrico derivante da un allungamento dei periodi di siccità. Questa rapida ricarica lascia supporre un notevole grado di fratturazione e presenza di ampie cavità connesse nella zona vadosa. Questo fatto è confermato anche attraverso misure di contenuto di acqua in percentuale nella massa rocciosa, effettuate

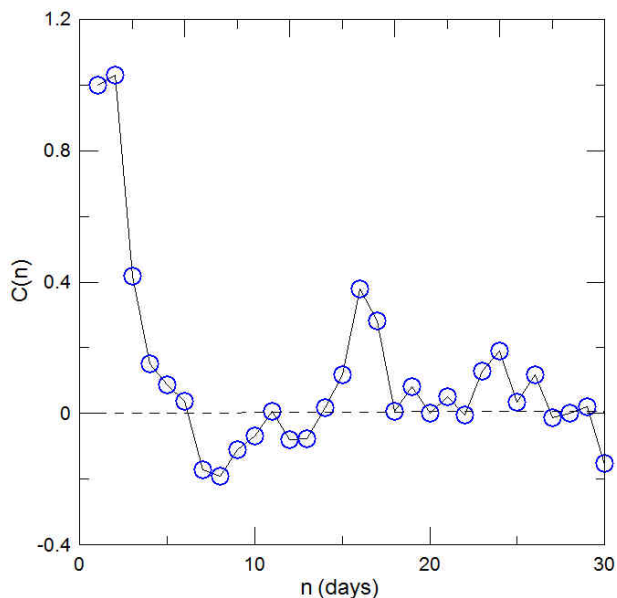


Figura 4: Correlazione tra variazioni di livello piezometrico medio di alcuni pozzi dell'acquifero salentino e infiltrazione efficace calcolata dal database della stazione micrometeorologica ISAC-CNR. Adattato da: [21].

comparando con la quantità di infiltrazione le variazioni di livello in alcuni pozzi di monitoraggio durante una serie di eventi piovosi limitati e intensi. Il risultato conferma una alta capacità e quindi un notevole contenuto di cavità della massa rocciosa [28]. Il quadro che emerge è simile a quello di un grande serbatoio sotterraneo che accumula rapidamente gli apporti dalla superficie in virtù di un alto grado di fratturazione e di carsificazione della roccia. L'acquifero profondo è quindi soggetto sia all'infiltrazione dalla superficie di sostanze inquinanti specie in occasione di intensi eventi piovosi, sia all'intrusione dell'acqua marina quando, viceversa, la ricarica è scarsa e il prelievo antropico è elevato, come nei periodi di siccità. Entrambe queste condizioni, come si è visto, mostrano un generale aumento in frequenza con la tendenza climatica globale. Una risorsa idrica di importanza primaria quindi, ma al contempo fragile e da salvaguardare, perchè doppiamente esposta alle conseguenze delle attività umane, sia attraverso il suo sfruttamento diretto che attraverso i possibili effetti antropici sul clima [29].



- [1] W. Brutsaert: *Evaporation into the atmosphere*. Kluwer Acad.Pub., Alphen aan den Rijn (1982).
- [2] C. Kidd, A. Becker, G. J. Huffman, C. L. Muller, P. Joe, G. Skofronick-Jackson, D. B. Kirschbaum: "So, how much of the Earth surface is covered by rain gauges?", *BAMS* **1** (2017) 69.
- [3] K E. Trenberth, L. Smith, T. Qian, A. Dai, J. Fasullo: "Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data", *J. of Hydrometeorology* **8** (2007) 758.
- [4] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): *Summary for policymakers*. IPCC, (2018).
- [5] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): *Climate Change. The physical science basis*. IPCC, (2013).
- [6] P. J. Crutzen: *The Anthropocene*. in: *Earth System Science in the Anthropocene*, Springer, Berlino (2006).
- [7] L. Sertorio, E. Renda: *Ecofisica*. Boringhieri, Torino (2009).
- [8] J. T. Houghton: *The physics of atmospheres*. Cambridge University Press, Cambridge (1986).
- [9] V. Ramaswamy *et al.*: "Radiative forcing of climate: the historical evolution of the radiative forcing concept, the forcing agents and their quantification and applications", *Meteorological Monographs* **59** (2019) 14.1.
- [10] F. Paparella: "La fine del ghiaccio artico ed il futuro del clima", *Ithaca, Viaggio nella scienza II* (2013) 57.
- [11] Budyko M.I.: "The effect of solar radiation on the climate of the Earth", *Tellus* **21** (1969) 611.
- [12] R. Benzi, G. Parisi, A. Sutera, A. Vulpiani: "Stochastic resonance in climate change", *Tellus* **34** (1982) 10.
- [13] A. Ganopolsky, R. Winkelmann, H. J. Schellnuber: "Critical insolation-CO₂ relation for diagnosing past and future glacial inception", *Nature* **259** (2016) 6494.
- [14] W. F. Ruddiman: "The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago", *Clim. Change* **61** (2003) 261.
- [15] W. Steffen *et al.*: "Trajectories of the Earth system in the Anthropocene", *PNAS* **115** (2018) 181014115.
- [16] M. T. Chahine: "The hydrological cycle and its influence on climate", *Nature* **359** (1992) 373.
- [17] M. R. Allen, W. J. Ingram: "Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle", *Nature* **419** (2002) 228.
- [18] K. E. Trenberth, A. Dai, R. M. Ramussen, D. B. Parsons: "The changing character of precipitation", *BAMS* **84** (2003) 1205.
- [19] F. Giorgi, E.-S. Im, E. Coppola: "Higher Hydroclimatic intensity with global warming", *Journal of Climate* **24** (2011) 5309.
- [20] F. Giorgi, F. Raffaele, E. Coppola: "The response of precipitation characteristics to global warming for climate projections", *Earth Syst. Dynam.* **10** (2019) 73.
- [21] M. Delle Rose, P. Martano: "Infiltration and Short-Time Recharge in Deep Karst Aquifer of the Salento Peninsula (Southern Italy): An Observational Study", *Water* **10** (2018) 10030260.

- [22] M. Marani: *Processi e modelli dell'idrometeorologia*. Univesità di Padova, Padova (2004).
- [23] M. M. Mekonnen, A. Y. Hoekstra: "The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products", *Hydrology and Earth System Sciences* **15** (2011) 1577.
- [24] M. Maggiore, P. Pagliarulo: "Circolazione idrica ed equilibri idrogeologici negli acquiferi della Puglia", *Geologi e Territorio* **1/04 suppl.** (2004) 13.
- [25] M. Delle Rose, A. Federico, C. Fidelibus: "A computer simulation of groundwater salinization risk in Salento peninsula (Italy)", *In Risk Analysis II, Witpress* (2000) 465.
- [26] ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica): *Report Acqua, Testo Integrale* <https://www.istat.it/it/files/2019/03/TestointegraleReportAcqua2019.pdf> (2019)
- [27] E. Bonamente, S. Rinaldi, A. Nicolini, F. Cotana: "National Water Footprint: Toward a Comprehensive Approach for the Evaluation of the Sustainability of Water Use in Italy", *Sustainability* **9** (2017) su9081341.
- [28] M. Delle Rose, C. Fidelibus, P. Martano: "Assessment of Specific Yield in Karstified Fractured Rock through the Water-Budget Method", *Geosciences* **8** (2018) 8090344.
- [29] S. Corti S. et al.: *Clima, cambiamenti climatici globali e loro impatto sul territorio nazionale*. ISAC CNR, (2009).



Paolo Martano: è ricercatore in Fisica dell'Atmosfera presso L'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR. Si occupa di micrometeorologia e interazione atmosfera-superficie.

Marco Delle Rose: è ricercatore in Scienze delle Terra presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR. Si occupa di idrogeologia, geomorfologia e cambiamenti climatici.

Tecnologie fotovoltaiche innovative per ridurre il costo dell'elettricità

Cosimo Gerardi

Enel Green Power, Ricerca e Sviluppo - Tecnologia Fotovoltaica - 3SUN - Catania

Il costo per Watt delle celle solari si è ridotto così velocemente negli anni, che i costi di fabbricazione dei moduli fotovoltaici incidono poco sui costi totali di un impianto fotovoltaico: sono i costi di installazione e gestione e quelli dei materiali di base che determinano principalmente il costo per la produzione di elettricità. L'aumento di efficienza e l'energia prodotta dall'impianto costituiscono oggi le leve più importanti per la riduzione dei costi complessivi.

La tecnologia dei moduli fotovoltaici si è evoluta nella direzione di massimizzare l'efficienza di conversione e l'energia prodotta in media da un impianto fotovoltaico cercando di ottimizzare la raccolta di luce e ridurre le perdite. In questo lavoro discuteremo dello stato dell'arte della tecnologia fotovoltaica per impiego terrestre che è in gran parte basata sul silicio, il secondo elemento più abbondante sulla terra, e delle prospettive di sviluppo futuro che puntano a superare i limiti imposti dalle caratteristiche dei materiali.

Introduzione

Negli ultimi anni il fotovoltaico ha dimostrato di avere un ruolo centrale nella transizione verso le fonti di energia rinnovabile e per la riduzione dell'emissione di CO₂. Considerando i trend di crescita, la sostenibilità del fotovoltaico è migliorata notevolmente grazie ai progressi tecnologici, che hanno permesso di ridurre la quantità di materiale utilizzato e avere una miglior resa manifatturiera.

Questo articolo riporta una rassegna dello stato della tecnologia fotovoltaica, prevalentemente basata sul silicio cristallino e multicristallino, e che vede la Cina in prima fila con più del 90% della produzione mondiale. Le tecnologie più diffuse utilizzano una architettura di dispositivo e processi proposti negli anni '80 e portati al massimo livello di ottimizzazione in termini di prestazioni e costi negli ultimi anni. Mostriamo che alcune recenti soluzioni, come i moduli bifacciali, possono fare aumentare significativamente le prestazioni in termini di energia prodotta dai moduli al silicio. Inoltre descriveremo la tecnologia a eterogiunzione, che è in fase di industrializzazione ed espansione in questo periodo e che potrebbe dare all'Europa la possibilità di diventare leader nel settore del fotovoltaico. Infine, si discuterà delle future evoluzioni tecnologiche

Watt picco (Wp)

Il Watt picco (Wp) rappresenta l'unità di misura della potenza teorica massima erogabile da un generatore elettrico (modulo fotovoltaico) o viceversa la potenza teorica massima assorbibile da un carico elettrico.

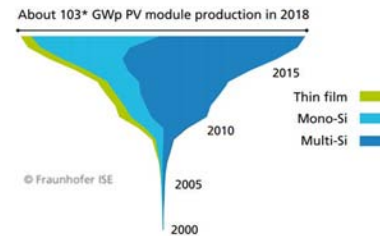
basate su nuove architetture e nuovi materiali, che nei prossimi anni permetteranno di aumentare notevolmente l'efficienza delle celle solari per applicazioni terrestri.

Il Mercato del fotovoltaico

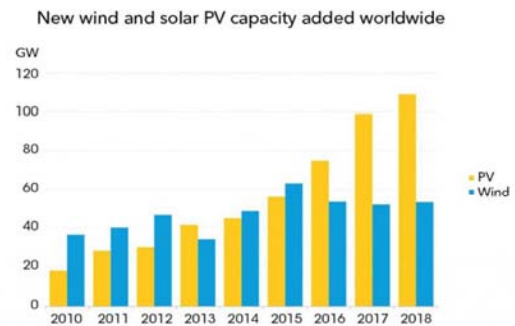
Il mercato mondiale della tecnologia dei moduli, o pannelli, fotovoltaici è dominato dalla tecnologia che si basa sul silicio multicristallino¹ e monocristallino. Quest'ultimo sta guadagnando terreno grazie alla più alta efficienza raggiunta dalle celle solari, riuscendo a compensare quasi del tutto il costo maggiore di produzione del wafer di silicio monocristallino. La tecnologia più diffusa si basa sull'utilizzo delle fette di silicio cristallino e ha una quota di mercato vicina al 95%, le tecnologie a film sottile hanno quote significativamente più basse, si tratta prevalentemente di moduli al tellururo di cadmio (CdTe) o moduli al seleniuro di rame indio e gallio ($\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$) noto con l'acronimo CIGS. I moduli a film sottile raggiungono efficienze minori e hanno il problema della tossicità del cadmio o della poca disponibilità di indio che è un elemento raro. Inoltre, il film sottile richiede anche l'utilizzo di materiali, come vetro, incapsulante e materiali per l'interconnessione, molto specifici e non standardizzabili, rendendo difficile abbassare i costi complessivi di produzione.

Nel 2018 i moduli di silicio cristallino hanno raggiunto efficienze fra 17% e 18%, con le tecnologie più performanti, che sono arrivate a oltre il 20% (per mercati di applicazioni ad alte prestazioni e costo più alto, cosiddetti *high-end*). In

¹Le celle solari al silicio cristallino sono realizzate con fette di silicio monocristallino (cristallo singolo di silicio) o multicristallino (policristallo). Il silicio multicristallino è essenzialmente silicio policristallino caratterizzato da grani di silicio orientati diversamente ma di piccole dimensioni.



Data: from 2000 to 2010: Navigant; from 2011: IHS. Graph: PSE GmbH 2019



Source: BloombergNEF. Note that the capacity added figures in this chart are preliminary estimates.

Figura 1: Pannello superiore. Quote di mercato delle tecnologie fotovoltaiche per applicazioni terrestri. (Fonte: Fraunhofer ISE 2019 [2], che ha stimato che nel 2018 sono stati prodotti intorno a 103 GWp. Pannello inferiore. Installazioni fotovoltaiche (PV) ed eoliche (Wind) per anno. Si tratta di dati pubblicati da Bloomberg New Energy Finance il 16 gennaio 2019. È evidente che il fotovoltaico è in forte crescita.

termini di capacità globale installata cumulata, nel 2018 si è superata la soglia dei 500 GWp e si prevede di arrivare a oltre 1 TWp entro il 2023 [1].

La produzione annuale di moduli supera i 100 GWp/anno [2]. Favorita dalla drastica riduzione dei prezzi, è ragionevole pensare che la domanda crescerà ancora in modo significativo negli anni successivi.

Il mercato sarà sempre più condizionato, non soltanto dal costo dei moduli, ma anche dalle migliori prestazioni e affidabilità dei moduli e dei sistemi, che contribuiranno ad abbassare il costo finale dell'energia, definito con il Costo Livellato dell'Energia (Levelized Cost of Energy, LCOE) [3].

Il valore LCOE, che si misura in \$ / MWh, rappresenta una stima economica del costo medio necessario per finanziare e mantenere un impianto di produzione energetica nel corso della sua vita utile, in rapporto alla quantità totale di energia

generata durante lo stesso intervallo di tempo².

Prospettive per un futuro con più fotovoltaico

Grazie alla grande riduzione dei costi, il fotovoltaico si è ormai ben affermato come un nuovo attore, molto importante, nella corsa al controllo del riscaldamento globale del nostro pianeta. Oggi, la tecnologia fotovoltaica rappresenta una delle opzioni più economiche per fornire elettricità e continua ad evolversi con grande enfasi sull'aumento della efficienza di conversione, che ha il maggior impatto sulla riduzione dei costi. I risultati delle attività di ricerca nel fotovoltaico mostrano che ci sono prospettive per aumentare ulteriormente l'efficienza delle celle solari, portando ad una ulteriore riduzione dei costi, a livelli impensabili fino a pochi anni fa. La spinta verso una maggiore efficienza di conversione deriva dal fatto che i costi di fabbricazione delle celle solari hanno un andamento di riduzione molto simile a quello osservato nella microelettronica, attraverso l'aumento dei volumi e l'avanzamento tecnologico del processo di fabbricazione.

Di contro, i costi degli altri componenti del modulo, come il vetro, il materiale polimerico incapsulante, le cornici di alluminio, i diodi di protezione e i materiali per l'interconnessione non beneficiano di questi vantaggi. L'aumento di efficienza della cella porta ad una diminuzione diretta di questi costi, meno trattabili, riducendone le quantità richieste. In sostanza, si può affermare che l'aumento dell'efficienza della cella è stato il fattore principale che ha portato alla riduzione dei costi dei moduli negli ultimi anni.

L'efficienza ha un impatto addirittura maggiore a livello di sistema a causa della riduzione del numero dei moduli, dei costi di logistica, di installazione, di manutenzione e dei costi associati all'estensione del terreno necessario per l'installazione dell'impianto.

L'aumento di efficienza caratterizzerà i trend futuri di mercato con la possibilità di raggiunge-

²Il costo livellato dell'energia costituisce quindi un valore di riferimento per il prezzo a cui vendere l'energia per unità di energia elettrica generata, al fine di avere un adeguato ritorno economico dei costi di finanziamento e manutenzione dell'impianto stesso durante il suo ciclo di vita.

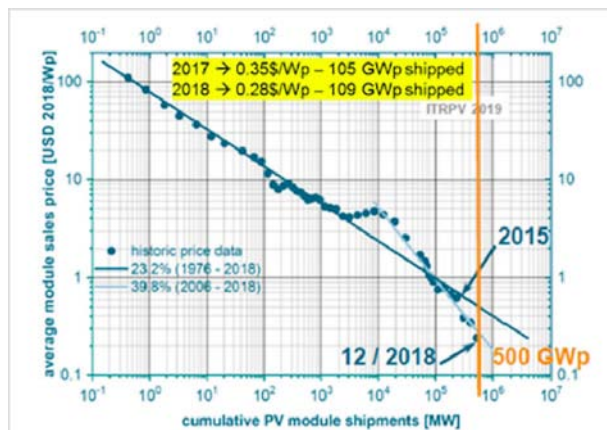


Figura 2: Andamento dei prezzi di vendita in dollari in funzione della quantità di moduli utilizzati in impianti fotovoltaici (Fonte: International Technology Roadmap of Photovoltaics 2019)[4].

re efficienze anche superiori al 30% nei prossimi anni, tramite l'implementazione di nuovi materiali e architetture di dispositivo, utilizzando un mix di tecnologie consolidate, come il silicio, e nuovi materiali. Tali materiali potranno aumentare la parte di spettro solare assorbita, grazie alle architetture a giunzione multipla. In esse diversi tipi di cella sensibili alle varie componenti spettrali potranno catturare gran parte dello spettro: dalle frequenze più alte come blu e verde, a quelle più basse come il rosso.

Verosimilmente, ciò comporterà l'apertura verso lo sviluppo di nuovi mercati come l'integrazione architettonica dei moduli fotovoltaici e l'utilizzo nel settore dei trasporti, perché l'aumento di efficienza porterà all'utilizzo ridotto di area e dispositivi più leggeri.

Nonostante il grande entusiasmo a livello mondiale per i progressi della tecnologia fotovoltaica e le grandi prospettive di sviluppo, l'industria fotovoltaica europea è purtroppo in crisi e lotta per la sopravvivenza. Al contrario l'industria asiatica, in particolar modo quella cinese, detiene oltre il 90% delle quote di mercato dei moduli fotovoltaici prodotti. L'industria europea e in particolare quella italiana (che guida la classifica delle fabbriche più importanti a livello europeo con il sito Enel Green Power di Catania) ha delle risorse molto importanti su cui fare affidamento, come la competenza tecnologica sviluppata da centri di ricerca e sviluppo tecnologico, e il know-how sviluppato dalla catena dell'industria

europea che è costituita da produttori di materiali e da costruttori di macchinari in grado di sviluppare linee di produzione automatizzate, digitalizzate e molto efficienti.

In quest'ambito, sviluppare linee industriali basate su processi innovativi con capacità produttive superiori a 1 GWp/anno³ è di fondamentale importanza per una significativa ripartenza dell'industria europea, accelerando lo sviluppo di dispositivi innovativi.

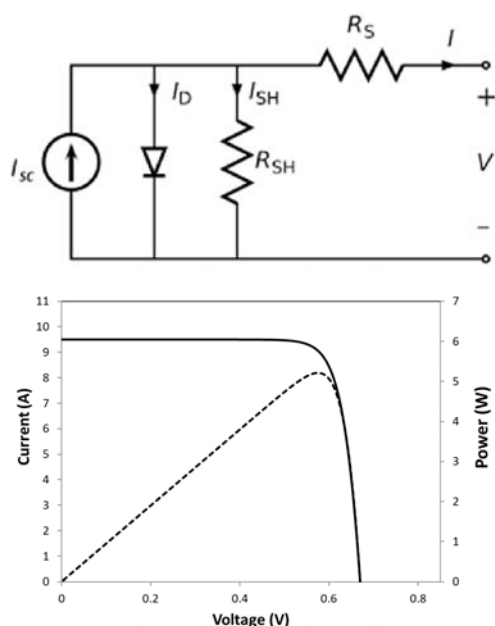


Figura 3: Pannello superiore: schema del circuito equivalente di una cella solare quando viene illuminata. Il generatore di corrente rappresenta la corrente generata dalla luce, il diodo rappresenta la giunzione, R_s è la resistenza serie che rappresenta essenzialmente le perdite ohmiche e R_{SH} è la resistenza di shunt che causa perdite di potenza in presenza di cammini alternativi (I_{SH}) per la corrente generata dalla luce. Pannello inferiore: corrente, cambiata di segno, linea continua, e potenza erogata dal circuito, linea tratteggiata, in funzione del voltaggio (caratteristica $I - V$).

³Per essere competitivi non basta l'innovazione che porta a dispositivi e processi produttivi più efficienti, è necessaria anche l'economia di scala. Per questo motivo è necessario che una fabbrica abbia una capacità produttiva di un certo volume per poter competere sul mercato. 1GWp/anno è un valore appropriato per poter competere con le fabbriche asiatiche.

Cella solare: breve descrizione dei principi di funzionamento

L'effetto fotovoltaico, che consiste nella generazione di una tensione quando un dispositivo viene esposto alla luce, fu scoperto da Becquerel nel 1839, in una giunzione formata fra un elettrodo e un elettrolita [5]. Da allora sono state fatte altre dimostrazioni, anche se il primo risultato sostanziale è stato dimostrato nel 1940 da Ohl in una giunzione p-n di silicio [6]. Ciò nonostante, le celle solari non destarono molto interesse se non a partire dal 1954, grazie ai lavori di Chapin [7] sul silicio mono cristallino e di Reynolds sul solfuro di cadmio [8].

Da allora, si sono realizzate celle solari con diversi materiali, utilizzando diverse architetture e vari tipi di materiali semiconduttori, inorganici, organici e ibridi organici-inorganici.

La cella solare convenzionale, tipicamente una giunzione $p - n$, o $p - i - n^4$, è caratterizzata da un materiale semiconduttore che assorbe la luce (assorbitore) con una singola banda di energia proibita (o *band-gap*), E_g . Quando la cella è esposta alla luce, i fotoni con energia inferiore a E_g non contribuiscono all'output della cella⁵. Un fotone con energia maggiore di E_g genera una carica elettrica, e l'energia in eccesso rispetto a E_g viene dissipata come calore. Per ricavare l'efficienza di conversione ideale, si deve considerare la struttura a bande del semiconduttore utilizzato. Si assume che la cella solare abbia caratteristica I-V di diodo ideale, con il circuito ideale rappresentato in Figura 3.

La corrente caratteristica del dispositivo rappresentato dal circuito in figura è data da:

$$I = I_d - I_{sc} = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \right] - I_{sc} , \quad (1)$$

dove I_d è la corrente che scorre attraverso il diodo, I_{sc} la corrente di corto circuito che corrisponde alla corrente delle cariche generate dalla luce e I_0 è la corrente di saturazione del diodo. La carica dell'elettrone è q , k è la costante di Boltzmann, T è la temperatura assoluta. La potenza

⁴Con p, n si indica il tipo di drogaggio accettore o donatore, rispettivamente, con i si indica lo stato intrinseco, non drogato, del semiconduttore)

⁵Trascurando considerazioni relative all'assorbimento assistito dai fononi e dall'influenza dei livelli eccitonici.

Fill factor

Il Fill Factor (o Fattore di Riempimento) è il rapporto fra l'area del rettangolo massimo (data dal prodotto $I_m V_m$) inscritto nella curva $I - V$ e l'area del rettangolo minimo che circonda la curva $I - V$ (area data dal prodotto $I_{SC} V_{oc}$). Poiché la caratteristica $I - V$ è curva, tale rapporto è sempre < 1 . Esso si avvicina tanto più ad 1, quanto più è squadrata la curva caratteristica.

Air Mass Coefficient

AM1.5G è il coefficiente di massa d'aria (air mass coefficient). Il coefficiente definisce la lunghezza del cammino della luce attraverso l'atmosfera terrestre. È espresso come rapporto relativo alla lunghezza del cammino ottico ad un angolo definito rispetto allo zenith. AM1.5 si riferisce al rapporto del cammino a circa 42° rispetto allo zenith, e viene preso come riferimento globale per il fotovoltaico terrestre (G: global).

Spingersi verso il limite... e oltre

Le celle solari assorbono la luce del Sole facendo passare gli elettroni dalla banda di valenza del semiconduttore alla banda di conduzione, o nei livelli presenti nel *band-gap*, da dove la maggior parte di essi viene estratta come corrente elettrica fra i terminali della cella. Alcuni di questi elettroni eccitati dalla luce, comunque ritornano allo stato fondamentale prima di essere estratti, in altre parole si ricombinano.

La massima efficienza di conversione energetica si ottiene quando tutta la ricombinazione avviene in modo inverso a quello dell'assorbimento, vale a dire tramite ricombinazione radiativa, per cui gli elettroni ritornano in banda di valenza. Negli anni '60 Shockley e Queisser (S-Q), utilizzando il principio di bilancio dettagliato, determinarono i limiti radiativi nei confronti della efficienza di conversione energetica [9].

S-Q elaborarono la teoria immaginando una cella solare ideale al buio e all'equilibrio termico. Tale cella in condizioni ideali assorbe tutta la luce incidente, in questo caso data dalla radiazione di corpo nero a temperatura ambiente. Tramite il principio del bilancio dettagliato, la cella deve anche emettere tale radiazione. Poiché la cella è al buio, la sorgente dei fotoni emessi con energia maggiore di E_g viene fornita dalla transizione in banda di valenza dei portatori di carica che si trovano in banda di conduzione. Molti fotoni emessi in questo modo vengono riassorbiti dalla cella prima di poter essere estratti come corrente fra gli elettrodi.

Integrando il numero di fotoni nella radiazione di corpo nero emessa nell'intervallo di energia al di sopra di E_g , si può ricavare il tasso di ricombinazione radiativa totale nel dispositivo all'equilibrio termico. Una tensione V applicata a una cella solare farà aumentare in modo esponenziale il prodotto delle concentrazioni dei portatori di carica nella regione di giunzione, con esponente dato da qV/kT .

S-Q fecero l'assunzione che, in una cella solare ideale, tale incremento esponenziale avviene in tutto il volume della cella.

Quindi, in condizioni ideali, il tasso di ricombinazione radiativa, che dipende dal prodotto delle concentrazioni dei portatori, aumenta dello stesso fattore.

in uscita dalla cella solare è data da:

$$P(V) = IV = I_0 V \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \right] - I_{sc} V \quad (2)$$

La condizione di massima potenza si ottiene uguagliando a zero la derivata prima di $P(V)$. Si può dimostrare che la potenza massima si ottiene nel modo seguente:

$$P_m = I_m V_m = F_F I_{SC} V_{oc} \quad (3)$$

con

$$P_m \sim I_{SC} \left[V_{oc} - \frac{kT}{q} \ln\left(1 - \frac{q}{kT} V_m\right) - \frac{kT}{q} \right] \quad (4)$$

e

$$F_F = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (5)$$

dove V_m e I_m sono la massima corrente e massima tensione. La tensione di circuito aperto V_{oc} si ottiene ponendo a zero la corrente I nella equazione (1), F_F è il **Fill factor**.

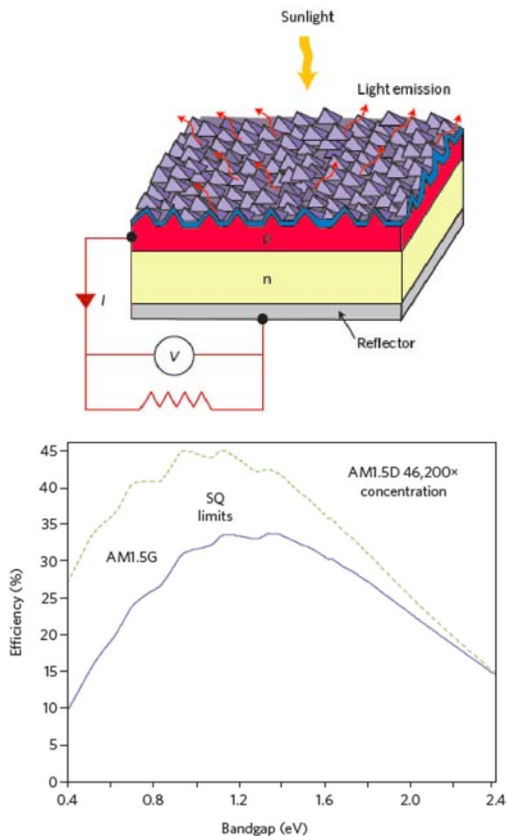


Figura 4: Pannello superiore: rappresentazione del principio del bilancio dettagliato fra luce emessa ed assorbita, al buio e in equilibrio termico in una cella solare. Shockley e Queisser utilizzarono tale bilancio per calcolare il limite teorico di efficienza per un dato materiale [9]. Pannello inferiore: efficienze teoriche per celle solari. Limiti di S-Q per lo spettro solare AM1.5G e in condizioni di forte concentrazione, ottenuta amplificando l'intensità della luce con lenti o specchi [10]. Per il silicio ($E_g=1.15$ eV) il limite teorico di efficienza in condizioni AM1.5G è di 29.5%.

Facendo un bilancio che coinvolge elettroni e fotoni ad ogni valore di tensione, si può dedurre la curva corrente-tensione (I-V) di una cella solare ideale esposta al sole. Ciò permette di calcolare l'efficienza limite teorica della cella. Oggi, alcune tecnologie fotovoltaiche sono così progredite che le loro prestazioni tendono ad avvicinarsi ai cosiddetti limiti radiativi.

La teoria S-Q fu originariamente formulata considerando E_g come solo parametro indipendente, assumendo che la risposta della cella si annullasse bruscamente appena sotto il valore di E_g . Più correttamente la teoria dovrebbe tener conto dell'energia di soglia E_t a cui si verifica la condizione di forte assorbimento. Infatti, a causa

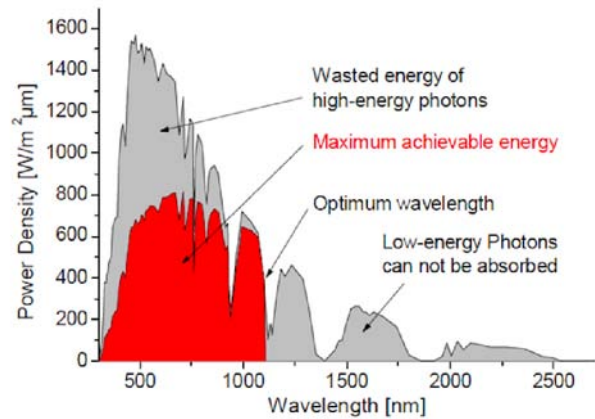


Figura 5: Perdite spettrali in una cella solare. La figura mostra la massima energia raggiungibile rispetto allo spettro solare AM1.5G.

della presenza dei livelli eccitonici, l'assorbimento avviene in realtà ad energie minori di E_g per la maggior parte dei semiconduttori. Nella tabella presentata in Fig. 6 sono riportate le efficienze record ottenute in laboratorio per i vari tipi di materiali [10].

Le Tecnologie fotovoltaiche per impiego terrestre

Le tecnologie fotovoltaiche per impiego terrestre si dividono essenzialmente in due gruppi. Al primo gruppo appartengono le principali (*mainstream*) tecnologie che dominano il mercato mondiale. Queste si basano sull'assemblaggio di celle solari ottenute processando fette (*wafers*) di silicio cristallino, policristallino o multicristallino. Oggi la tecnologia industriale si sta sempre più concentrando sull'utilizzo del silicio monocristallino. Le fette di silicio monocristallino sono ottenute con processi ad elevata temperatura, e si ricavano da un lingotto di silicio accresciuto da silicio fuso.

La tecnologia utilizzata per la realizzazione dei lingotti si definisce metodo Czochralski, o CZ [11]. Nel metodo CZ un seme cristallino viene immerso nel silicio fuso (ottenuto fondendo silicio policristallino a temperature superiori a $1420^\circ C$) con un'asta finché inizia a fondere. Il seme viene quindi sollevato dal fuso molto lentamente, mentre viene ruotato. Man mano che l'asta ruota, il diametro del lingotto cresce formando un cono iniziale. Il diametro viene aumentato

Material	Organization	η (%)	E _{th} (eV)
Si	Kaneka (Japan)	26.7	1.100
$\mu\text{c-Si:H}$	AIST (Japan)	11.9	1.320
a-Si:H	AIST (Japan)	10.2	1.758
GaAs	Alta (China-USA)	29.10	1.418
InP	NREL (USA)	24.20	1.321
GaInP	LG (S. Korea)	21.40	1.845
CIGS	SF (Japan)	23.35	1.088
CdTe	FSLR (USA)	22.10	1.321
CZTSSe	DG (S. Korea)	12.60	1.140
CZTSSe	IBM (US)	12.60	1.160
CZTS	UNSW (Australia)	11.00	1.490
Perovskite	KR (S. Korea)	24.20	1.574
OPV	SC/CSU (China)	15.60	1.42
Dye	Sharp (Japan)	11.90	1.507

Figura 6: Record ottenuti dalle migliori celle solari in laboratorio. η è l'efficienza di conversione. Nel caso del silicio il valore record è ottenuto su cella con dimensioni simili a quelle delle celle industriali. Negli altri casi le dimensioni sono inferiori e in alcuni casi (come Perovskite, CZTS, CdTe, GaInP) si tratta di celle di dimensioni molto piccole e non industrializzabili [10]. In tabella sono indicate le organizzazioni dei laboratori che hanno realizzato le celle record. E_{th} è l'energia di soglia che deve avere un fotone per essere assorbito ed è data dal band-gap a cui si deve sottrarre il livello di energia degli eccitoni.

fino a raggiungere il valore desiderato. La solidificazione progressiva all'interfaccia fra solido e liquido genera un unico monocristallo di grandi dimensioni a simmetria cilindrica. Una velocità di crescita tipica è dell'ordine di alcuni millimetri per minuto. Infine, la parte cilindrica con diametro costante viene accresciuta, controllando la temperatura e la velocità di sollevamento.

Le fette di silicio, con spessori di 150-200 μm , si ottengono affettando il lingotto, che da blocco a geometria cilindrica è stato trasformato in un mattone a forma di quasi parallelepipedo. Il taglio avviene quindi con un filo diamantato. Le fette assumono una forma quasi-quadrata o *pseudo-square*. Una volta processate per ottenere un diodo e gli elettrodi per estrarre le cariche, le celle solari vengono interconnesse in un modulo fotovoltaico. Generalmente, una cella ha dimensioni di 156.75 mm \times 156.75 mm, e per fare un modulo ne occorrono 60 o 72. In generale, comunque le dimensioni delle fette di silicio seguono un trend di aumento di dimensioni e tenderanno ad aumentare sempre più grazie al miglioramento del processo di crescita del silicio. Le celle sono interconnesse in stringhe e tipicamente sono collegate in serie.

Grazie al notevole miglioramento della qualità del silicio cristallino oggi è possibile ottenere

moduli con efficienze fra il 18% e il 19%, per i moduli monocristallini più comuni, e oltre il 20% per i prodotti *high-end*, ad elevate prestazioni.

Alcuni dei moduli al silicio cristallino oggi in commercio sono bifacciali, vale a dire, sono progettati per catturare anche una parte di luce solare (riflessa o diffusa dal terreno) attraverso la parte posteriore, contribuendo così ad aumentare la produzione media di energia di un impianto solare.

Il secondo gruppo di tecnologie fotovoltaiche comprende i moduli che si ottengono depositando il materiale fotovoltaico in forma di film sottile su vetro o altri materiali a basso costo, come plastica e acciaio. Tali tecnologie si basano su processi di deposizione a film sottile su grandi aree e quindi soggetti a problemi di uniformità ed omogeneità.

La disomogeneità condiziona fortemente le prestazioni dei moduli a film sottile, quando si scalano le dimensioni a valori di interesse commerciale. Per questo motivo hanno efficienze significativamente più basse dei moduli di silicio cristallino.

Si tratta comunque di materiali depositi a temperatura relativamente bassa e con spessori di pochi micron. Per il film sottile si effettua un tipo di interconnessione monolitica, ottenuta ef-

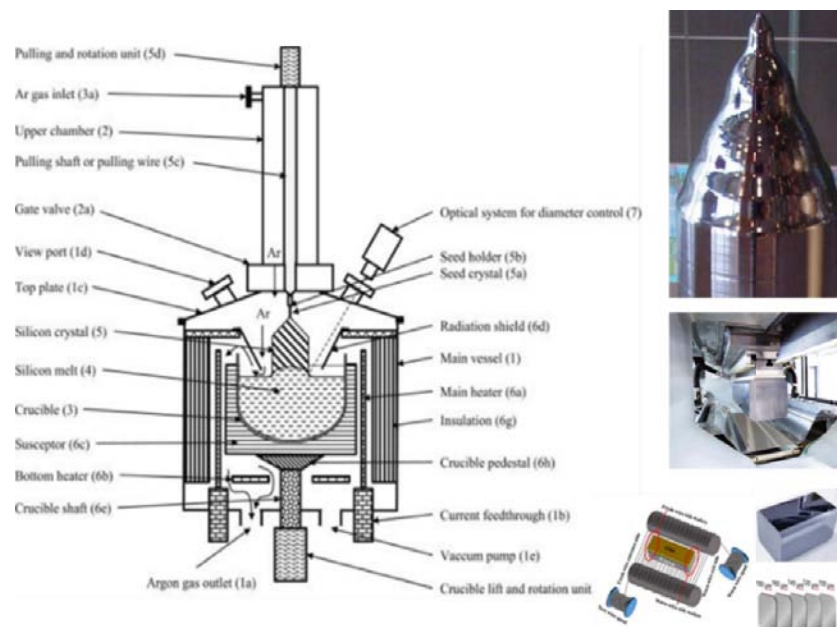


Figura 7: Sinistra) Apparato Czochralski per la crescita di monocristalli. (Centro) Parte finale di un cristallo di silicio cresciuto con tecnica CZ. (a) Sistema con filo diamantato utilizzato per tagliare il mattone di silicio (brick), ottenuto dal lingotto (a destra in alto). Tale operazione permette di realizzare fette di silicio con forma pseudo-square con spessori che sono intorno ai 180-150 μm . Nuove tecnologie fotovoltaiche, come la HJT descritta in seguito, puntano all'utilizzo di fette ancora più sottili da 120 a 100 μm , per ridurre ulteriormente i costi del silicio. Il filo diamantato induce un certo danneggiamento della superficie del silicio e la zona danneggiata viene rimossa nei processi di attacco chimico durante la fabbricazione delle celle solari.

fettuando deposizione sequenziale di materiale e taglio tramite ablazione laser per definire le zone attive, creare le interconnessioni fra le varie parti del modulo e tracciare le regioni di isolamento. È molto importante anche sviluppare un sistema di cattura della luce utilizzando strutture di dimensioni sub-micrometriche sul vetro o sui contatti trasparenti (tipicamente ossido di stagno drogato con fluoro o ossido di zinco drogato con boro o con alluminio), per aumentare il cammino ottico della luce.

Con questi sistemi, che in parte si ispirano al funzionamento degli occhi di alcuni insetti come le falene (*moth eye*), si riesce ad aumentare notevolmente lo spessore equivalente del materiale attivo, facendo rimbalzare la luce alle interfacce interne e diffondendola in orizzontale.

Generalmente la categoria delle tecnologie a film sottile comprende il CdTe, il CuInGaSe₂ (CIGS), il silicio amorfo idrogenato, spesso utilizzato in architettura *Tandem* con il silicio microcristallino, e i moduli di materiale organico (*Organic PhotoVoltaic OPV*).

Negli ultimi anni, dal punto di vista della ricerca, si è affermato un nuovo materiale fotovoltaico,

ibrido organico-inorganico, che presenta proprietà molto interessanti. Si tratta della *perovskite*, della quale discuteremo nei prossimi paragrafi.

Il fotovoltaico a film sottile ha avuto un periodo di crescita importante fra il 2008 e il 2012, quando si è verificata una seria crisi di approvvigionamento del silicio. La crisi è stata tuttavia temporanea e la tecnologia basata sul silicio cristallino è tornata a dominare il mercato, riuscendo ad imporsi soprattutto a causa della maggiore efficienza e alla standardizzazione della catena di approvvigionamento dei materiali come vetro, polimeri incapsulanti, materiali per interconnessione, ecc. Grazie a questi vantaggi i moduli di silicio cristallino presentano prezzi inferiori non solo in termini di costo per Watt, ma soprattutto in termini di costo / kilowattora, grazie ad una maggiore affidabilità e ad una maggiore erogazione annua di energia elettrica.

La Figura 9 riporta il trend delle quote di mercato delle principali tecnologie che si basano sull'utilizzo di silicio cristallino. La tecnologia più diffusa fino a poco tempo è nota come Al-BSF che utilizza un contatto continuo di alluminio (Al) sul retro.

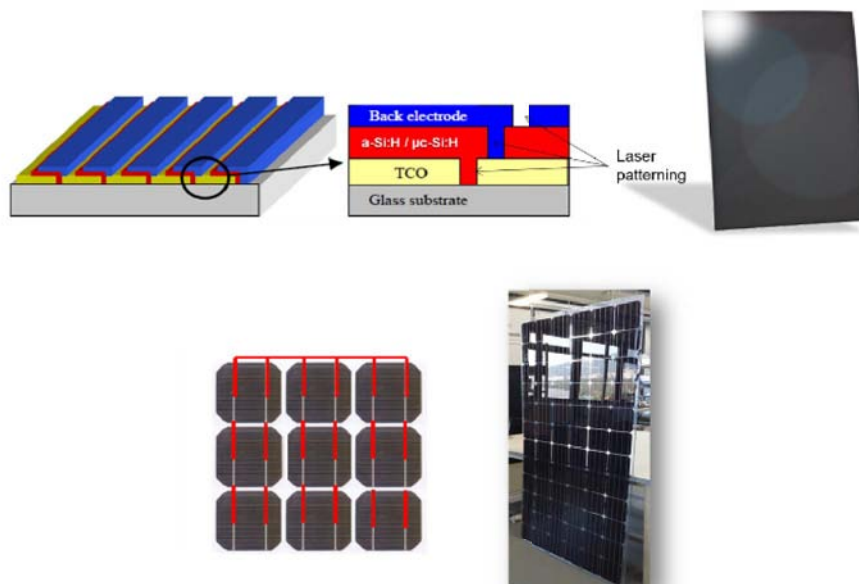
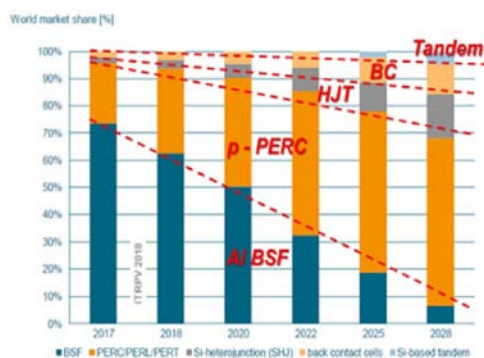


Figura 8: Confronto fra tecnologia a film sottile (in alto), in questo caso si tratta di film sottile di silicio amorfo e microcristallino, e silicio cristallino (in basso) che si basa sull'assemblaggio di fette di silicio.



Technology	Type	η Manuf	η Record
Aluminum Back Surface Field (Al BSF)	Si Mono p-type	19%	21.5%
Passivated Emitter Rear Contact (PERC)	Si Mono p-type	21.5-22%	24%
Silicon Hetero Junction Technology (HJT)	Si Mono n-type	23%	25.5%
Back Contact	Si Mono n-type	24%	27%
Tandem (Perovskite / Si, III-V/Si, CGS/Si)	Si + wide band	-	28%

Figura 9: (in alto) Trend di mercato per le tecnologie che utilizzano silicio cristallino (mono e multi cristallino). (In basso) Prestazioni record e i valori medi ottenuti in produzione. Le celle Tandem silicio perovskite sono ancora sperimentali.

In questa cella il processo per realizzare il contatto si basa su un processo serigrafico (*Screen Printer*) con paste metalliche, che stampa una griglia metallica, o uno strato continuo metallico, sul wafer. Poi un processo di sinterizzazione ad alta temperatura (detto *firing*) forma una lega di metallo-silicio fra la parte attiva della cella e

lo strato metallico. Tale contatto crea un campo elettrico all'interfaccia posteriore della cella solare (*back-surface field*, BSF), che serve a ridurre la velocità di ricombinazione superficiale.

La tecnologia Al-BSF utilizza prevalentemente wafer di silicio multicristallino di tipo *p*, drogati con boro. La giunzione viene formata tramite un processo di diffusione ad alta temperatura ($>800^{\circ}\text{C}$), per cui il drogante di tipo *n*, generalmente fosforo, diffonde nel silicio creando una giunzione *p-n* nella parte frontale della fetta di silicio. Solo la parte frontale della cella solare viene passivata depositando un dielettrico, tipicamente nitruro di silicio, che svolge anche la funzione di strato antiriflesso.

Dopo un processo di ispezione, le fette di Si vengono trattate con un attacco in bagno chimico sulla faccia frontale, che determina la formazione di piramidi alte alcuni μm . Esse hanno la funzione di ridurre la riflessione e distribuire la luce obliquamente nel silicio, permettendo di aumentare l'assorbimento ottico.

Dopo il trattamento chimico i wafer sono sottoposti al processo di diffusione, utilizzando ossicloruro di fosforo POCl_3 come precursore del fosforo, che diffonde con un processo ad elevata temperatura (superiore a 800°C) nel wafer di tipo *p*. Sul fronte della cella solare si deposita uno strato dielettrico di passivazione e antiriflesso

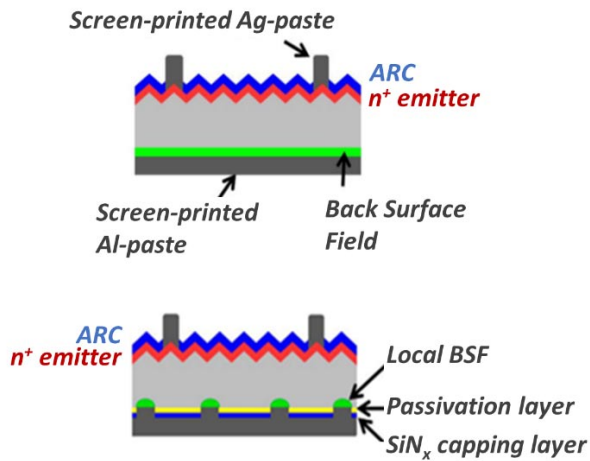


Figura 10: (In alto) Struttura della cella solare Al-BSF. Sulla parte frontale ci sono le sottili strisce di argento (fingers), che hanno larghezza di 40-60 μm , che sono stampate con la serigrafia, utilizzando pasta d'argento. Nella parte posteriore si nota lo strato continuo di Al ottenuto tramite processo serigrafico con pasta di Al. Il processo di sinterizzazione ad elevata temperatura causa la formazione di una lega di silicio e alluminio che origina lo strato BSF. (In basso) Architettura della cella PERC. Si possono notare i punti di apertura dei contatti sul retro, attraverso il dielettrico di passivazione che è formato da uno strato di pochi nanometri di Al_2O_3 e uno strato più spesso di Si_3N_4 . Nei punti di apertura dei contatti si vengono a formare le regioni di campo elettrico BSF.

(nitruro di silicio).

Come discusso precedentemente, la tecnologia per la realizzazione dei lingotti di silicio monocristallino si è evoluta in termini di riduzione dei costi, rendendo sempre più conveniente, almeno in termini di costo per Watt di potenza di picco generata dalla cella solare, l'impiego di silicio monocristallino.

Le celle solari ottenute con silicio monocristallino possono utilizzare fette di silicio di tipo p (drogato con boro) o silicio di tipo n (drogato con fosforo). Il silicio monocristallino di tipo n è utilizzato per celle solari di maggiore efficienza, perché è meno suscettibile alla ricombinazione intrinseca, così come alla ricombinazione di tipo Shockley-Read-Hall (SRH) con contaminanti come il ferro [12]. Inoltre, per una data resistività, il silicio di tipo n ha una corrente di saturazione al buio (*dark current*) più bassa. Come risultato la vita media dei portatori è significativamente

più alta di quella del silicio di tipo p .

Il silicio di tipo n viene però realizzato a costi dal 5% al 10% più alti rispetto al silicio di tipo p . Il vantaggio del più basso costo ha portato alla maggior diffusione delle tecnologie basate su silicio p rispetto a quelle di silicio n . Tuttavia presenta maggiore tendenza al deterioramento delle celle solari, a causa di fenomeni di degrado indotti dalla luce e legati alla presenza di complessi boro-ossigeno.

Recentemente molte delle aziende manifatturiere sono passate all'utilizzo di fette di silicio monocristallino. Per aumentare ulteriormente l'efficienza della cella solare e trarre maggior beneficio dall'utilizzo del silicio monocristallino, si è pensato di modificare anche l'architettura della cella solare, migliorando la passivazione delle superfici e ottenendo una diminuzione significativa della velocità di ricombinazione. In particolare si è introdotta la passivazione dello strato fortemente drogato con fosforo ($n+$), ottenuto per diffusione nella fetta di Si di tipo p (definito *emitter*). Tale architettura si definisce PERC che significa Passivated Emitter and Rear Cell⁶. Con la cella PERC si ottiene un significativo miglioramento in termini di efficienza. Se da un lato ci sono più passaggi da compiere in fase produttiva, l'aumento di rendimento consente un abbassamento dei costi a livello sistemico.

Nella cella PERC si estende il concetto della passivazione superficiale della faccia frontale anche alla faccia posteriore della cella, depositando uno strato dielettrico di passivazione (tipicamente ossido di alluminio e nitruro di silicio). Inoltre poiché il contatto diretto dello strato continuo di metallo sul silicio introduce un gran numero di centri di ricombinazione, si effettua il contatto sul retro attraverso dei piccoli fori aperti nello strato di dielettrico. Si utilizza un laser ad infrarosso che causa l'ablazione del dielettrico in alcuni punti (*local contacts opening*). In questo modo si migliora la qualità elettronica del contatto all'interfaccia fra metallo e silicio, riducendo i centri di ricombinazione. In seguito al processo di firing (sinterizzazione) si vengono a formare gli strati di BSF solo nelle zone di contatto. La ricombinazione può essere ridotta ulteriormente definendo una regione diffusa localmente con

⁶L'acronimo PERC può anche essere indicato anche con Passivated Emitter and Rear Contact.

alte concentrazioni di drogante appena sotto il contatto con il metallo.

È importante sottolineare che l'architettura tradizionale della cella è stata regolarmente usata sin dalla metà degli anni '80. Da allora, mantenendo le stesse architetture si è avuto un notevole sviluppo tecnologico, con paste conduttive migliori per i contatti frontali, *fingers* (piste metalliche) più sottili e rivestimenti antiriflesso ottimizzati.

Ci sono voluti circa 30 anni perché l'industria fotovoltaica raggiungesse i livelli di efficienza ottenuti in origine nei laboratori di ricerca.

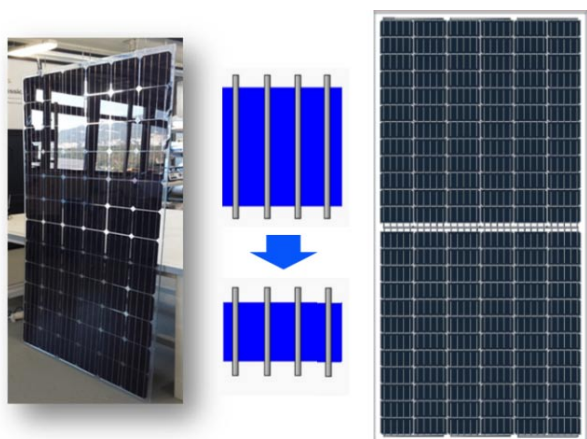


Figura 11: A sinistra un modulo a 72 celle, con celle intere. Al centro il passaggio da una cella intera alla cella divisa in due. A destra il modulo assemblato con 144 mezza celle. L'area di silicio risultante è più grande con conseguente aumento della potenza del modulo.

Negli ultimi anni la geometria del modulo di silicio si è complicata ulteriormente con l'introduzione di schemi di assemblaggio più sofisticati che utilizzano il concetto di *half cell* e *shingling* [13].

L'approccio *half cell* (mezza celle) consiste nel tagliare in due parti le celle solari ed assemblarle sul modulo. In altre parole da una struttura a 72 celle intere si passa ad una struttura a 144 mezza celle. Il vantaggio deriva dalla riduzione delle perdite dovute alla resistenza serie che si riduce dimezzando l'area della cella, ma anche da una migliore gestione della luce catturata grazie all'aumento della frazione di area attiva di silicio nel modulo. Il miglioramento si traduce in un aumento relativo del 3-4% della potenza del modulo. Il processo di taglio e separazione delle celle, ottenuto con laser e conseguente cli-

vaggio meccanico, può indurre danneggiamento delle celle degradando le proprietà elettroniche e meccaniche e causare problemi di affidabilità [13].

Dal punto di vista dell'affidabilità, i moduli fotovoltaici presentano fenomeni di degrado in seguito all'esposizione all'ambiente esterno e alla luce stessa. Tali fenomeni condizionano l'affidabilità dei moduli commerciali che sono realizzati per resistere anche in zone con climi estremi per molti anni. Fra i fenomeni di degrado più conosciuti vi è quello indotto dalla esposizione alla luce (*Light Induced Degradation*, LID).

Il fenomeno della LID nel silicio cristallino fu osservato per la prima volta negli anni '70 [14]. Quando le celle al silicio cristallino iniziarono a diffondersi, la LID iniziò a destare molta preoccupazione a causa dell'impatto sulla stabilità a lungo termine degli impianti. Il fenomeno della LID è legato ai complessi boro-ossigeno (B-O) [15], difetti composti da un atomo sostituzionale di boro e due atomi di ossigeno interstiziali. La formazione e la soppressione di tali complessi metastabili sono attivate termicamente, ma dipendono anche dalla intensità della luce. La LID è quindi legata al tipo di drogaggio del silicio e si manifesta in wafer di Si drogati con boro, comunemente usato per ottenere il drogaggio di tipo *p*. La LID non si osserva o si manifesta in minima parte nelle fette di Si di tipo *n*.

Oggi tale fenomeno viene mitigato, ma non completamente soppresso, con un processo di illuminazione (*illumination annealing*). Di recente è stato scoperto un nuovo fenomeno di degrado del silicio di tipo *p*, indotto sempre dalla luce ma attivato dalla temperatura [16].

Tale fenomeno è noto come *Light and elevated Temperature Induced Degradation* (LeTID) e può portare a riduzioni importanti della potenza (dal 5% al 10%) [17].

Un altro importante fenomeno di degrado è noto come PID (*Potential Induced Degradation*) ed è legato alla migrazione del sodio o di altre impurità che dal vetro si muovono nel silicio, causando fenomeni di correnti di perdita che portano al repentino degrado del modulo [18].

Il degrado PID può essere ridotto con appositi strati barriera che bloccano la migrazione del sodio e altri ioni mobili. In particolare, è molto importante lo strato di incapsulante che deve agire

Bifacial cell in world market

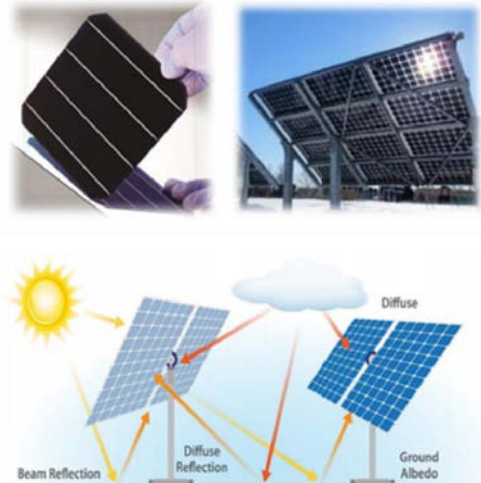
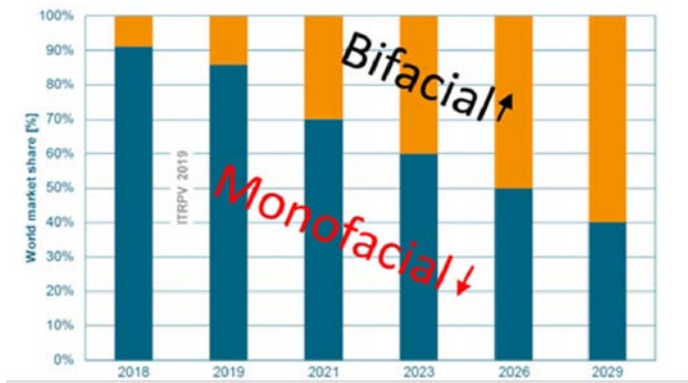


Figura 12: Il segmento di mercato dei moduli bifacciali è destinato a crescere negli anni come mostrato nella figura tratta dall'analisi della ITRPV 2019 [4]. La quota di mercato aumenterà dal 10% nel 2020 al 40% nel 2028. Un modulo bifacciale è in grado di rispondere anche alla luce che arriva sulla faccia posteriore per diffusione o riflessione del terreno, aumentando le prestazioni dal 5% al 25% in più in base all'albedo del terreno.

come barriera non solo per l'umidità ambientale, ma anche per la migrazione delle impurezze provenienti dal vetro. Gli incapsulanti sono fogli polimerici a base di etilene vinil acetato (EVA) o di poliolefine (POE), che sono laminati insieme al vetro, le celle solari e lo strato polimerico di tedlar usato comunemente sul retro del modulo.

Moduli bifacciali

La tecnologia bifacciale si è consolidata sul mercato di recente. I moduli bifacciali sono in grado di utilizzare la luce che arriva sia sulla faccia frontale che sulla faccia opposta. L'opzione è in grado di offrire un aumento medio dell'energia prodotta dal 5% al 20% o anche maggiore in caso di installazioni in terreni con elevata riflettività o albedo. Con tale approccio è possibile aumentare le prestazioni dei moduli senza un aumento significativo dei costi, anche se è richiesto l'utilizzo di un vetro, o uno strato polimerico, trasparente sul retro del modulo. Il segmento di mercato relativo ai moduli bifacciali è cresciuto notevolmente in pochi anni e si prevede che continui a crescere ancora nei prossimi anni. Si prevede infatti che la quota di mercato dei moduli bifacciali supererà il 30% della produzione fra il 2021 e il 2022 [2].

Le celle solari bifacciali sono realizzate ponendo una griglia metallica sia sulla superficie fron-

tale che su quella posteriore, facendo in modo che la luce raggiunga il materiale assorbente anche dalla faccia posteriore della fetta di silicio.

Quando l'elettrodo metallico continuo sul retro viene sostituito con una griglia metallica, la superficie di contatto si riduce e la resistenza di contatto aumenta le perdite resistive. Quindi è necessario trovare un compromesso fra la quantità di luce che attraversa le griglie e mantenere una bassa resistenza di contatto.

Il compromesso determina le prestazioni finali delle celle solari bifacciali sia in termini di efficienza di conversione misurata sulla faccia frontale che del rapporto di bifaccialità (definito come il rapporto fra l'efficienza misurata sul retro e quella misurata sulla faccia frontale).

Non tutte le architetture di celle solari al silicio cristallino o policristallino presentano un rapporto di bifaccialità elevato, anche se hanno una griglia sul retro per far passare la luce. Le tecnologie più diffuse come le PERC+ (variante bifacciale delle PERC) richiedono un'ottimizzazione della passivazione anche sul retro. Tipicamente, le celle PERC+ presentano un rapporto di bifaccialità intorno al 60-70%. È difficile superare questi valori a causa dello spesso strato di passivazione sul lato posteriore che assorbe una parte di luce. Vi sono altre architetture che presentano una maggiore simmetria nella struttura della cella, come nel caso della cella a eterogiunzione di

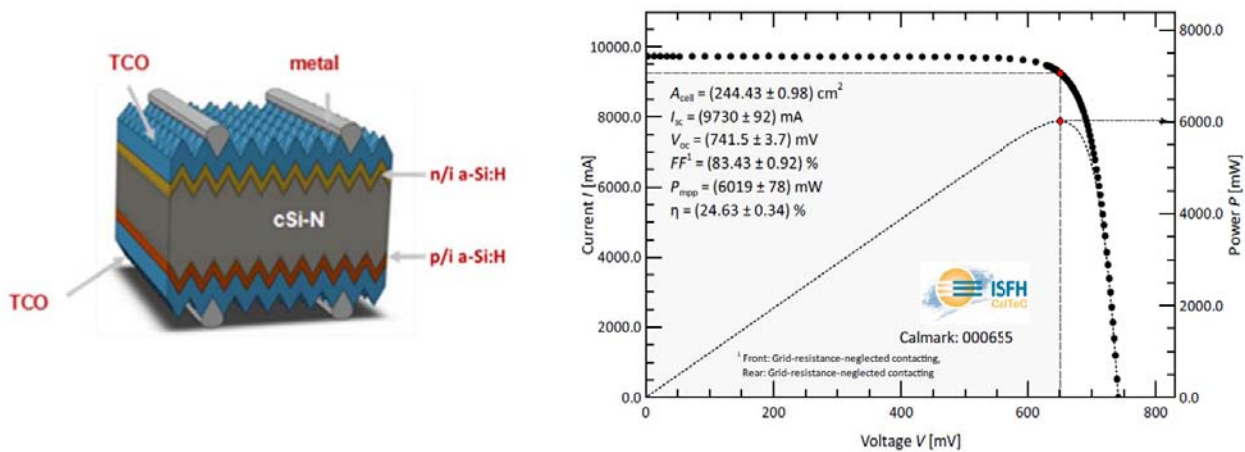


Figura 13: Rappresentazione schematica di una cella ad eterogiunzione di silicio (HJT). La cella è costituita da silicio monocristallino di tipo n con spessore di circa 140 μm sulle cui facce sono depositati strati molto sottili di silicio amorfo idrogenato con la sequenza n/i o p/i. lo strato intrinseco (i) è a contatto con la superficie testurizzata del silicio, e viene attraversato dalle cariche per effetto tunnel. A destra, le prestazioni record di una cella di Si HJT, che raggiunge il 24.6% di efficienza, realizzata nell'ambito delle attività di ricerca e sviluppo di Enel Green Power in collaborazione con il centro di sviluppo tecnologico INES - Liten del CEA Francese (Institut Nationale de L'Énergie Solaire - Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives). Il risultato record è stato certificato ufficialmente dal Cal-Tech dell'ISFH tedesco (Institut für Solarenergieforschung in Hamelin) a gennaio 2020. È un prototipo industriale che si può trasferire in produzione per essere fabbricata in massa nel prossimo futuro. Le attività di ricerca coinvolgono i più importanti centri di sviluppo tecnologico europei nell'ambito del programma Europeo "Horizon 2020", denominato Ampere [19], coordinato da Enel Green Power.

silicio che discuteremo nel prossimo paragrafo.

La Tecnologia a eterogiunzione di silicio

Migliorare l'efficienza di conversione delle celle solari è cruciale per favorire l'utilizzo di energia fotovoltaica. Proprietà essenziali per il dispositivo come: la vita media dei portatori di carica, la resistenza serie e le proprietà ottiche devono essere tutte ottimizzate per ridurre le ricombinazioni e le perdite ottiche e resistive [20].

Il progresso della qualità elettronica del silicio monocristallino è una leva importantissima per aumentare l'efficienza delle celle solari di silicio. Essenzialmente, le celle solari devono generare il maggior numero di cariche tramite l'assorbimento della luce, ma anche assicurare che tali cariche in eccesso siano raccolte efficacemente e non si ricombinino mentre si muovono verso gli elettrodi. Questa è la caratteristica principale per evitare la ricombinazione delle cariche alle superfici della fetta di silicio, che diviene sempre più importante con la riduzione dello spessore del silicio nelle celle solari.

Nel tempo sono stati introdotti diversi approcci per ridurre la ricombinazione. Tuttavia, nonostante il fatto che il dielettrico usato per la passivazione consenta una riduzione significativa della ricombinazione superficiale, il contatto diretto del metallo con il silicio, che introduce centri di ricombinazione, rappresenta un limite importante per le tecnologie che utilizzano silicio cristallino. Nelle celle solari più diffuse, come le PERC, si ottiene un compromesso fra la superficie totale di contatto e la passivazione superficiale tramite piccole aperture effettuate localmente nel dielettrico, utilizzando un laser. Il problema viene quindi ridimensionato ma non eliminato. Per migliorare ulteriormente le prestazioni della cella solare è necessario eliminare ogni struttura che induca la ricombinazione dei portatori di carica nel silicio.

La tecnologia a eterogiunzione di silicio (Hetero Junction Technology, HJT) combina i vantaggi delle celle a silicio monocristallino (c-Si) con il buon coefficiente di assorbimento della luce e le eccellenti proprietà di passivazione del silicio amorfo idrogenato. La cella trae beneficio dall'alto band gap (E_g) del silicio amorfo idrogenato ($E_g = 1.75 \text{ eV}$) che, grazie all'eterogiunzione

con il silicio cristallino ($E_g = 1.15$ eV), consente una migliore passivazione degli strati di superficie. Rispetto agli approcci più comuni (Al-BSF e PERC), la passivazione della cella a eterogiunzione è una soluzione più elegante con contatti passivanti non metallici, che si comportano simultaneamente come strato di passivazione e di contatto.

Una caratteristica di fondamentale importanza per le celle HJT è che i contatti metallici sono elettronicamente separati dalla parte attiva di silicio che assorbe la luce, grazie all'inserimento di uno strato con band gap più grande (silicio amorfo) e un contatto non metallico trasparente TCO (*Transparent Conducting Oxide*), ottenuto con una lega di ossido di indio e di stagno (*Indium Tin Oxide*, ITO). Ciò porta a valori record di V_{oc} , senza la necessità di aprire contatti localmente. Grazie a questa caratteristica, la cella HJT raggiunge efficienze più alte rispetto alle tecnologie convenzionali, superando senza problemi il 23%, con la possibilità di avvicinarsi di più al limite teorico di S-Q.

Nelle HJT le cariche generate dalla luce possono fluire abbastanza lentamente attraverso lo strato di passivazione da generare una elevata tensione e, contemporaneamente, sono veloci abbastanza da evitare la ricombinazione. Tale strato agisce come una membrana semipermeabile per l'estrazione dei portatori di carica. Il concetto di HJT ha una certa affinità con la struttura metallo-isolante-semiconduttore (MIS), che si basa sull'effetto tunnel quantistico attraverso un sottile strato dielettrico [12]. Per una cella HJT si può utilizzare uno strato molto sottile di silicio amorfo idrogenato di pochi nanometri che si comporta come barriera tunnel. Per trarre vantaggio dall'elevato livello di passivazione della struttura HJT è importante utilizzare silicio monocristallino con elevata lunghezza di diffusione dei portatori minoritari, è quindi necessario utilizzare wafer di tipo n .

Poiché si riesce a migliorare ulteriormente la passivazione del silicio con processi molto efficaci e a bassa temperatura, vi è un grande interesse da parte dei costruttori dei moduli fotovoltaici. La cella HJT detiene il record di efficienza del silicio, vicino al 27%, riportato nella Figura 7.

La Figura 14 riporta il confronto fra i flussi di processo per la fabbricazione rispettivamente

N - PERT	P - PERC	HJT
Inspection	Inspection	Inspection
Texturing	Texturing	Texturing
Diffusion	N Diffusion	A-Si(i)a-Si(p) rear
PSG-REM	PSG-REM	TCO front/rear
Oxide rear	AlOx rear	Print front
A-Si/pcSi/ rear	SiNx rear	Print rear
Etch backrear	SiNx front	Test/ Sort
AlOx front	Laser opening	
SiNx front	Print front	
SiNx rear	Print rear	
Print rear	Firing	
Print rear	Test/ Sort	
Firing		
Test/ Sort		

13 Steps	11 Steps	7 Steps
More process steps	More process steps	Less process steps
High Temperature	High Temperature	Low Temperature
Diffusion 800°C	Diffusion 800°C	Deposition 200°C
Thickness > 150 μm	Thickness > 150 μm	Compatibility with Thickness < 100 μm
Efficiency:	Efficiency:	Efficiency:
21.5 ÷ 22.5 %	21.0 ÷ 22.0 %	22.5 ÷ 24.5 %

Figura 14: Confronto fra i flussi di processo per realizzare celle PER e PERT e celle HJT. Il processo HJT ha un minor numero di operazioni rispetto a PERC e PERT. Questo rende molto più efficace l'utilizzo di operazioni automatizzate, riducendo i costi necessari per realizzare le celle. Inoltre a tecnologia HJT è un processo a bassa temperatura e ciò permette di preservare al meglio le proprietà intrinseche delle fette di silicio e permette l'utilizzo di fette più sottili. Il processo PERC e PERC+ si basa sulla diffusione di droganti e richiede quindi alte temperature (>800°C) che degradano le caratteristiche elettriche e meccaniche del wafer. Per la HJT i processi di deposizione avvengono a temperatura relativamente bassa e la massima temperatura è inferiore a 200°C, consentendo di preservare le proprietà elettriche e meccaniche dei wafer e permettendo l'utilizzo di wafer più sottili (riducendo il costo del silicio).

della cella PERC e della cella HJT. Dopo l'ispezione iniziale dei wafer di silicio si effettua il processo di testurizzazione dei wafer in un bagno chimico a base di KOH, lavaggi con acqua, con HCl e uno step finale in acido fluoridrico. In seguito si effettua la deposizione del silicio amorfo idrogenato con tecnica PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) con la sequenza i/n sulla faccia frontale e i/p sulla faccia posteriore (i : intrinseco, n : drogato con fosforo, p : drogato con boro). La PECVD è una tecnica di deposizione che, generando plasmi con campi elettrici oscillanti a radiofrequenza, permette di dissociare i gas precursori a base di silano (SiH_4 per formare silicio amorfo), fosfina (PH_3 per il drogaggio di tipo n), di-borano (B_2H_6 per il drogaggio di tipo

p) e idrogeno (H_2). Una volta dissociato il silicio si deposita sul substrato in modo conforme in forma amorfa. È possibile controllare in modo molto preciso lo spessore dello strato depositato (si tratta di 5nm per lo strato di silicio amorfo intrinseco e meno di 10nm per il silicio amorfo drogato *p* o *n*). La temperatura del processo di deposizione è inferiore ai 200°C. Il silicio amorfo contiene un'alta percentuale di idrogeno (silicio amorfo idrogenato, a-Si:H), che contribuisce sia a definire il *band-gap* che a fornire un ricco serbatoio di idrogeno, il quale agisce come passivante dei legami insaturi del silicio cristallino (*dangling-bonds*) all'interfaccia. Dopo la deposizione degli strati di passivazione con il silicio amorfo si effettua una deposizione di ossido trasparente conduttivo (*Transparent Conducting Oxide*, TCO) tramite *Physical Vapor Deposition* (PVD). Si tratta di una tecnica di deposizione sotto vuoto in cui si utilizza un materiale solido come precursore, che viene bombardato da ioni inerti (argon) o reattivi (ossigeno). Dalla fase solida si passa alla fase vapore grazie al processo di erosione (*sputtering*) del target bombardato dagli ioni. Gli atomi o le molecole rimosse dal target si depositano sul substrato. In questo caso si ottiene un film di TCO che è una lega a base di ossido di indio e in minor parte di ossido di stagno. Per tale motivo si definisce ITO (*Indium Tin Oxide*). Lo strato di ITO ha la funzione di pellicola trasparente conduttiva con una resistenza di strato da 5 a 100 Ω /quadro. Essa agisce da finestra, per far sì che la luce raggiunga il materiale attivo sottostante, e come contatto ohmico per l'estrazione della carica dal sistema fotovoltaico. Per raccogliere la carica in modo più efficace è necessario anche depositare una griglia metallica (di argento) che viene stampata per serigrafia sul TCO. Pur basandosi su processi tecnicamente più sofisticati, la tecnologia HJT è caratterizzata da un flusso di processo semplice con un numero limitato di operazioni, significativamente minore rispetto alle tecnologie convenzionali. La cella HJT ha una struttura simmetrica e le superfici del silicio vengono passivate con strati depositi di spessore equivalente sia sul fronte che sul retro della cella [21, 22, 23].

La struttura simmetrica e l'utilizzo di una griglia frontale e una sul retro della cella rende le celle HJT compatibili con l'architettura bifacciale,

permettendo elevate prestazioni. Infatti, mentre la tecnologia PERC+ presenta un fattore di bifaccialità che non supera il 70%, la elevata simmetria della struttura della cella HJT, mostra una bifaccialità fra il 90 e il 95%. Oltre alle migliori prestazioni in termini di efficienza di conversione e di bifaccialità le celle HJT presentano altri vantaggi, che si osservano principalmente nella quantità di energia elettrica prodotta in media in un campo solare. La migliore passivazione superficiale consente un maggior controllo delle prestazioni della cella all'aumentare della temperatura, con un coefficiente di degrado che è significativamente minore rispetto alle celle di silicio convenzionali (PERC, AI-BSF). Oltre alla stabilità in temperatura si osserva per le HJT un miglior comportamento a bassa irradianza, che si spiega con le buone proprietà di antiriflesso del TCO anche ad angoli radenti e bassa intensità luminosa. Il comportamento dei moduli HJT tende ad essere persino più favorevole nel tempo grazie al minor degrado. Essi presentano grande resistenza nei confronti dei fenomeni classici di degrado di cui soffrono le celle di silicio convenzionali (LID, PID, LeTID). La maggior resilienza della tecnologia HJT rispetto a fenomeni di degrado, che aggirano le tecnologie PERC e AI-BSF, deriva dalla combinazione dell'utilizzo delle fette di silicio di tipo n con la deposizione di silicio amorfo idrogenato e la deposizione del TCO. Il TCO, depositato su entrambe le facce della cella solare, oltre ad essere un contatto e comportarsi come strato di antiriflesso agisce anche da barriera al sodio ed altre impurezze, che migrando nel silicio causano il fenomeno PID (*Potential Induced Defects*). Infine, l'utilizzo di fette di silicio n rende le celle HJT immuni al fenomeno della LID, perché l'assenza del boro aiuta a eliminare il degrado della V_{oc} durante l'esposizione alla luce. Nella Figura 15 sono riportate le caratteristiche di migliori prestazioni, sia in termini di maggior efficienza, migliore produzione di energia e le caratteristiche di migliore affidabilità dei moduli HJT rispetto alle altre tecnologie in commercio. In termini di costo livellato dell'energia (LCOE) la tecnologia HJT ha le caratteristiche migliori per ridurre significativamente il costo per la produzione di energia (vedi Figura 16). La tecnologia HJT presenta una serie di caratteristiche interessanti per poter diventare la tecnologia più

Caratteristiche dei moduli HJT	Vantaggi rispetto alle tecnologie convenzionali
Processo con minor numero di operazioni e facilmente automatizzabile	Minor costo di fabbricazione
Processi a bassa temperatura (<200°C)	Migliori proprietà elettroniche della cella. Possibilità di ridurre lo spessore di silicio e quindi ridurre i costi relativi al silicio
Passivazione eccellente e contatti selettivi	Elevata Voc grazie alla riduzione delle correnti di ricombinazione
Basso coefficiente di degrado con la temperatura grazie alla eccellente passivazione delle superficie della cella	> 8% di generazione di energia nelle regioni con climi caldi.
Modulo isolato in strutture vetro-vetro e cella isolata dal TCO	Migliore affidabilità con un degrado inferiore a 0.2%/anno
Alta simmetria della architettura della cella fattore di bifaccialità del 90-92%	Guadagno bifacciale, maggiore delle altre tecnologie. Maggiore produzione di energia fino a +25% nel caso di albedo favorevoli

Figura 15: Caratteristiche e vantaggi della tecnologia HJT rispetto alle tecnologie convenzionali

diffusa dal punto di vista industriale. Se confrontata con le principali tecnologie basate sul silicio cristallino, essa ha notevoli vantaggi in termini di efficienza di conversione, di produzione media di energia e di maggiore resilienza che la caratterizzano per un minore costo dell'elettricità.

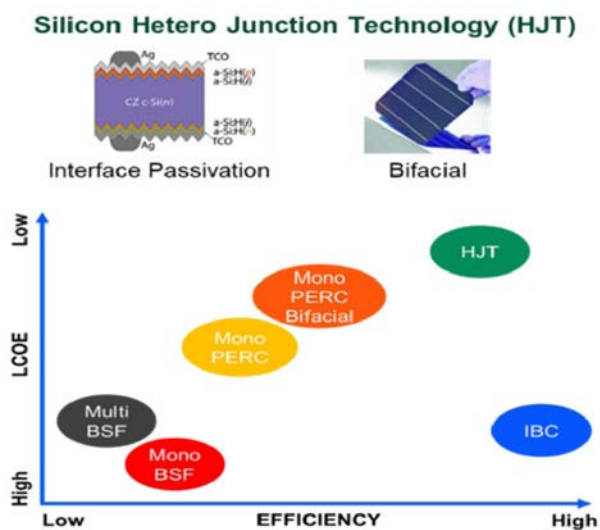


Figura 16: Confronto fra le varie tecnologie presenti in commercio, basate sull'utilizzo di silicio cristallino. Dal punto di vista del costo livellato dell'energia la tecnologia HJT presenta il miglior comportamento [23].

Il principale vantaggio della tecnologia HJT è dato dalla migliore passivazione con il silicio amorfo delle superfici del silicio, ottenuta con la deposizione di silicio amorfo. La passivazione riduce notevolmente la ricombinazione dei portatori rispetto alle altre tecnologie come le Al-

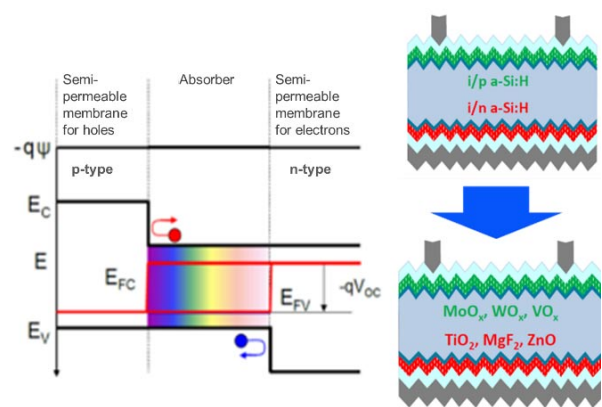


Figura 17: Struttura idealizzata di cella con contatti selettivi per elettroni e lacune (a sinistra). In corrispondenza dell'elettrodo nella regione p, gli elettroni (in rosso) in banda di conduzione vedono una barriera che li respinge in direzione opposta, verso il contatto della zona n. Viceversa le lacune (in blu) nella banda di valenza vedono la barriera nella zona n e vengono respinte per essere raccolte nella zona p. A destra in alto una struttura con contatti selettivi rappresentata da eterogiunzione di silicio cristallino e silicio amorfo di tipo p e n, separati dal silicio cristallino da una sottile barriera tunnel di silicio amorfo intrinseco. In basso a destra una struttura innovativa ottenuta con MoO_x, WO_x o VO_x per selezionare le lacune e TiO₂, MgF₂, ZnO per selezionare elettroni.

BSF e le PERC. Quest'ultime, pur migliorando lo schema di passivazione rispetto alle celle Al-BSF, hanno comunque il problema del contatto diretto del metallo con il silicio, che induce la presenza di centri di ricombinazione. Nel caso

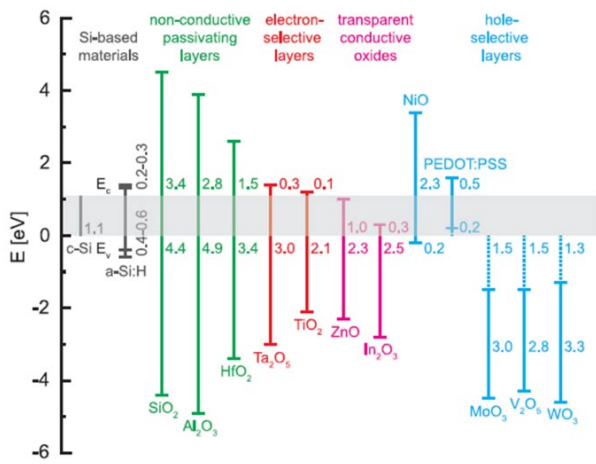


Figura 18: Livelli di offset di banda di conduzione e banda di valenza di vari materiali rispetto al silicio cristallino. Per i materiali che hanno una affinità elettronica maggiore di quella del silicio cristallino (come vari tipi di TCO, MoO₃, V₂O₅ e WO₃). Si riporta anche la differenza energetica in eV fra la banda di conduzione di tali materiali e la banda di valenza del silicio cristallino. I valori sono comunque indicativi perché i valori esatti dipendono da diversi aspetti come il metodo di deposizione, la stechiometria, e il livello di drogaggio [24].

delle HJT il metallo non contatta direttamente il silicio cristallino e la presenza di strati ad alto band-gap di silicio amorfo e del TCO, su cui si effettua il contatto con la griglia metallica, implica una drastica riduzione dei centri di ricombinazione, inducendo anche una diversa dinamica della ricombinazione grazie all'offset energetico che si instaura alla interfaccia fra silicio cristallino e silicio amorfo. È possibile migliorare ulteriormente la struttura dei contatti per ridurre l'impatto della ricombinazione, rendendoli ancora più selettivi nei confronti dei portatori di carica.

Contatti selettivi

Per ridurre le perdite per ricombinazione associate ai contatti è quindi importante sviluppare una struttura di contatto che, simultaneamente, passi la superficie del semiconduttore mentre possa selettivamente estrarre solo il tipo di portatore di carica necessario, elettrone o lacuna.

Nel caso della tecnologia del silicio cristallino, realizzare tale struttura è diventato un obiettivo importante per migliorare le prestazioni della

cella solare, permettendo di avvicinarsi sempre di più al limite teorico di S-Q. Tali contatti consistono di alcune strutture con particolari materiali interposti fra il silicio e l'elettrodo di metallo, che sopprimono efficacemente la ricombinazione negli stati di interfaccia del silicio cristallino e, contemporaneamente, si comportano come membrane semipermeabili che riescono a selezionare il tipo di portatore di carica opportuno. In corrispondenza degli elettrodi di una cella solare le lacune vengono estratte dal lato *p* della giunzione *p - n*, gli elettroni vengono estratti dal lato *n*. Tuttavia, i portatori minoritari possono trovarsi nella regione vicina al contatto e ricombinarsi in corrispondenza dei difetti di stati di interfaccia.

È necessario fare in modo che solo i portatori maggioritari si trovino in contatto, vale a dire le lacune nella zona di contatto con la regione di tipo *p* e gli elettroni nella zona di contatto di tipo *n*. Utilizzando materiali con alta E_g e, con opportuna funzione lavoro, è possibile creare in corrispondenza degli elettrodi degli offset in banda di conduzione (per gli elettroni) o di valenza (per le lacune) in grado di respingere via i portatori minoritari, facendo passare solo i portatori maggioritari, che sono raccolti in corrispondenza dell'elettrodo. Un tipo di struttura con buone caratteristiche di passivazione e di selezione è rappresentato dal silicio amorfo posto alle interfacce del silicio cristallino nella cella a eterogiunzione, che al momento porta al valore di efficienza di conversione più alto ottenuto. Le buone caratteristiche di selezione del silicio amorfo possono essere ulteriormente migliorate, utilizzando quindi altri materiali (come MoO_x per le lacune e TiO_x per gli elettroni) che a contatto con il silicio possano indurre offset di banda di conduzione o di valenza più alti. Non è comunque facile trovare dei metodi compatibili con processi industriali a basso costo, che permettano di depositare strati sottili senza danneggiare le interfacce. Fra le tecniche che si stanno studiando per questo scopo vi sono la *Remote Plasma Physical Vapor Deposition* (RPPVD) e la *Pulsed Laser Deposition* (PLD), che permettono di ridurre l'energia degli atomi depositati su una superficie minimizzando il danneggiamento di tale superficie.

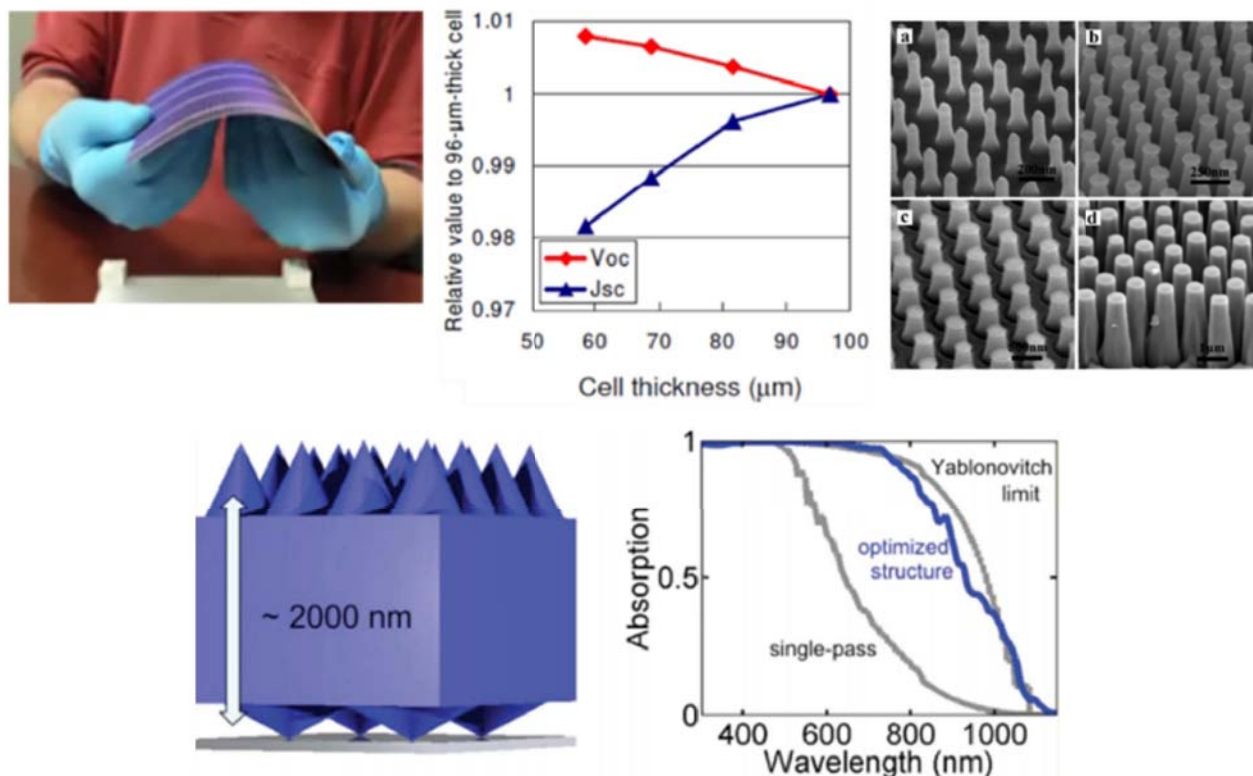


Figura 19: La riduzione dello spessore di silicio costituisce una leva importante per ridurre i costi. Con i processi di taglio convenzionali è possibile ridurre lo spessore fino a 100 μm . Per spessori inferiori si devono usare tecnologie alternative perché diventa difficile controllare la quantità di silicio che viene sprecata. È importante comunque far notare che per le tecnologie convenzionali PERC i processi termici elevati necessari per realizzare le giunzioni riducono la robustezza meccanica delle fette di silicio, per cui è molto difficile processare fette di spessore inferiore a 150 μm . Processi a bassa temperatura, come nel caso della fabbricazione delle celle solari HJT, permettono di utilizzare fette di silicio più sottili. Tuttavia, la riduzione dello spessore del silicio al di sotto dei 100 μm implica una riduzione della corrente foto-generata a causa della riduzione del volume di silicio. Per recuperare la corrente che si perde con lo spessore è necessario introdurre concetti di photon management che permettono di aumentare il cammino ottico della luce o comunque di aumentare l' intrappolamento della luce. Vi sono diversi approcci che usano nanostrutture realizzate sul silicio come quelle indicate in figura, utilizzare nanostrutture metalliche che permettono un accoppiamento fra fotoni e plasmoni. Ad esempio, la figura di sotto mostra che realizzando apposite nanostrutture sul fronte e sul retro del wafer sottile è possibile ottimizzare l'assorbimento dal caso in cui si considera solo un passaggio della luce a quello in cui i fotoni vengono fatti passare più volte nel silicio, grazie alle strutture nanometriche, aumentando così l'assorbimento [25].

Silicio ultrasottile

I vantaggi dell'utilizzo di fette di silicio più sottili sono molteplici, ma il più importante è ridurre la quantità di materiale e quindi il costo. In un modulo al silicio cristallino di efficienza elevata il costo delle fette di silicio arriva a coprire circa il 30% del costo di tutto il modulo. La riduzione di alcune decine di micron può portare a diminuire i costi in modo significativo. Tuttavia, ridurre lo spessore della fetta al di sotto di 150 μm è difficile, a causa della mancanza di tecnologie mature per fabbricare e maneggiare le fette e la

difficoltà di evitare lo spreco di silicio durante il taglio. Inoltre, la riduzione dello spessore delle fette di silicio le rende meccanicamente meno resistenti, causando rottura dei wafer durante i processi ad elevata temperatura. Nel caso delle celle HJT il budget termico contenuto ($<200^{\circ}\text{C}$) rende possibile l'utilizzo di fette molto sottili con spessore anche inferiore ai 100 μm . La riduzione dello spessore comunque riduce il volume di silicio e quindi la capacità di assorbire la luce. Al di sotto i 100 μm la corrente di corto circuito, che corrisponde all'integrale del flusso di fotoni assorbiti, inizia ad abbassarsi (vedi figura 19).

Per ovviare alla perdita di corrente è necessario aumentare l'intrappolamento della luce. Per recuperare la corrente è necessario introdurre concetti di *photon management*, che incrementano il cammino ottico della luce o comunque di aumentano l'intrappolamento della luce nel materiale assorbente. Vi sono diversi approcci che usano nanostrutture realizzate sul silicio come quelle indicate in figura, oppure nanostrutture metalliche che permettono un accoppiamento fra fotoni e plasmoni [10, 25]

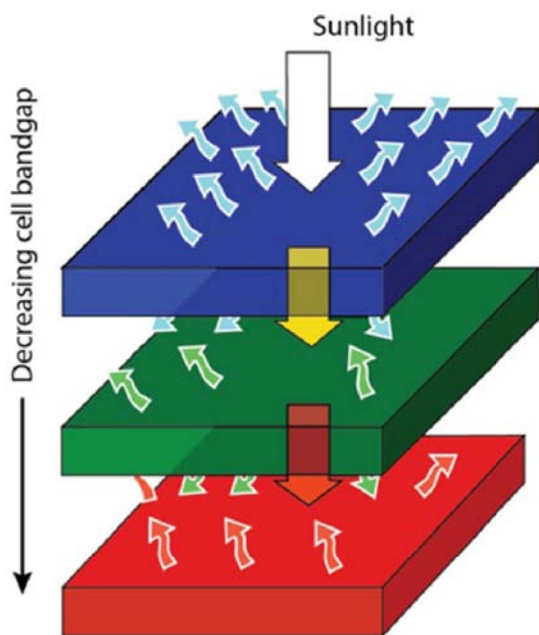


Figura 20: Cella solare Tandem. Celle solari con diverso band-gap vengono disposte una sull'altra. Nel caso indicato, la cella più alta ha E_g più alta e assorbe la luce a maggiore energia, facendo passare i fotoni a più bassa energia che vengono assorbiti dalle celle sottostanti; la prima cella assorbe la componente blu, la seconda la verde e la terza la rossa, utilizzando così gran parte dello spettro solare. Dal punto di vista teorico, questo approccio può portare ad efficienze molto alte. Tuttavia, dal punto di vista termodinamico l'entropia correlata al numero di giunzioni aumenta [10, 25]. Per poter estrarre corrente da tale sistema è necessario che le celle siano interconnesse in serie o in parallelo. Nel primo caso, la corrente del sistema è determinata dalla corrente più bassa, che di solito è data dall'ultima cella a cui arriva meno luce e genera la corrente minore. Nel caso di collegamento in parallelo è necessario fare un adattamento in tensione. In pratica l'approccio a due celle risulta essere un buon compromesso fra assorbimento di luce e minimizzazione delle perdite.

Cella solare Tandem

Come abbiamo visto l'efficienza di conversione massima del silicio in condizioni ideali è data dal limite S-Q che è intorno al 29%.

Il limite è definito considerando la ricombinazione Auger⁷ e le perdite intrinseche come, fra le altre, la trasparenza del silicio nei confronti dei fotoni che hanno energia più bassa del *band-gap* e le perdite per termalizzazione dei fotoni di alta energia, che generano elettroni o lacune ad elevata energia e dissipano la loro energia in calore.

Un approccio tecnologico interessante è fornito dalla cosiddetta struttura *Tandem*, in cui celle di diverso *band-gap* sono sovrapposte. Le celle solari sono essenzialmente dei dispositivi che generano corrente convertendo fotoni, tutti quelli che hanno energia superiore al *band-gap*, in elettroni che vanno a fluire nel carico resistivo connesso tra i due terminali.

Dal punto di vista della conservazione dell'energia, il flusso di cariche può continuare fino a quando la tensione sul carico raggiunge un valore corrispondente al valore del *band-gap* ($V = E_g/q$). In pratica, il valore più alto di efficienza si raggiunge quando la tensione raggiunge il 60-70% del valore del *band-gap*. La potenza massima è determinata quindi dalla corrente generata dal numero massimo di fotoni assorbiti moltiplicata per tale voltaggio.

In genere, celle con basso *band-gap* generano corrente più alta, celle con *band-gap* alto forniscono una maggiore uscita in tensione e minor corrente. Le condizioni ottimali si hanno per valori intermedi, nell'intervallo 1.0 ÷ 1.6 eV. Le celle al silicio ($E_g = 1.1$ eV) e al CIGS (1.08 eV) hanno E_g vicine al valore basso dell'intervallo ottimale, quelle al GaAs ($E_g = 1.45$ eV) e CdTe ($E_g = 1.5$ eV) sono più vicine al valore alto. La cella in alto nella sequenza assorbe i fotoni ad alta energia (blu) ed è trasparente per i fotoni a più bassa energia, che vengono assorbiti dalle celle sottostanti. Se i *band-gap* sono adattati in modo tale che entrambe le celle assorbano approssimativamente lo stesso numero di fotoni, esse si possono disporre

⁷Nella ricombinazione Auger l'energia di un elettrone che transita dalla banda di conduzione alla banda di valenza viene conservata trasferendo l'energia ad un altro elettrone o a una lacuna [12].

in serie. La cella superiore può convertire alla sua massima efficienza; poiché la cella sottostante fornisce il 50% della sua quota di fotoni alla cella superiore, questa opererà al 50% della sua efficienza massima. Se entrambi i *band-gap* sono compresi nell'intervallo ottimale (1.0 ÷ 1.6 eV), si ottiene la massima efficienza. Tuttavia, per riuscire ad avere il massimo di assorbimento di fotoni adattando i *band-gap* non si riesce a trovare la condizione ideale e restare con entrambi i *band-gap* nell'intervallo ottimale. Ciò limita il valore massimo di efficienza per una cella *Tandem* con due celle in serie a circa il 40%.

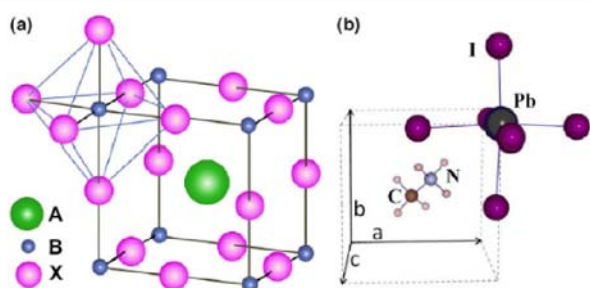


Figura 21: (Sinistra) Struttura ABX_3 che caratterizza la perovskite, con la struttura ottaedrica BX_6 e il catione A più grande posizionato in un sito cubico-ottaedrico. (Destra) Cella unitaria della perovskite cubica $CH_3NH_3PbI_3$ [28].

Per un approccio *Tandem* a due giunzioni le celle solari di silicio possono essere utilizzate come *bottom-cell* a causa della bassa E_g (1.1 eV), relativamente alta V_{oc} (che nel caso della cella di eterogiunzione di silicio, HJT, raggiunge valori più alti per il silicio, intorno a 750mV) e alta efficienza. Trovare la controparte ideale da utilizzare come *top-cell* con *band-gap* più grande è invece più difficile. Le celle solari che si basano su materiali del gruppo III e del gruppo V come GaAs o InP, sono interessanti per la loro alta efficienza e *band-gap* vicino al valore ideale per una *top-cell*. Tuttavia, i costi di fabbricazione elevati di tali materiali non favoriscono la diffusione su grande scala per applicazioni commerciali terrestri.

Una possibile risposta all'esigenza di sviluppare una cella *Tandem* che sia industrializzabile per applicazioni terrestri può venire dalle celle solari a *perovskite*. Tali celle possono essere utilizzate come cella superiore in una cella *Tandem* con una *bottom-cell* di silicio.

Il nome *perovskite* deriva dal nome del cristallografo russo Perovski, che per primo ha identifi-

cato la struttura cristallina con la formula ABX_3 , con X rappresentato da un atomo di ossigeno o di un alogeno. Il catione più grande A occupa un sito cubico-ottaedrico condiviso con dodici anioni X, mentre il catione più piccolo B è stabilizzato in un sito ottaedrico condiviso con sei anioni X. Le *perovskiti* più studiate finora sono state degli ossidi con proprietà ferroelettriche o superconduttive. Le *perovskiti* con elementi alogeni hanno avuto poca attenzione, fin quando è stato scoperto che potevano mostrare interessanti caratteristiche con transizione semiconduttore-metallo con dimensionalità crescente [27].

Oltre alla variazione delle proprietà elettriche, tali materiali mostrano una riduzione del *band-gap* quando la dimensionalità cresce da 2D a 3D. Questa caratteristica è importante perché la riduzione del *band-gap* ha aperto la strada alle applicazioni fotovoltaiche [29, 30, 31].

Si è iniziato con applicare una *perovskite* 3D, denominata *Methylammonium*⁸ (MA) con formula chimica $CH_3NH_3PbX_3$ (X = Br, I), come attivatore inorganico nelle celle di tipo dye-sensitized solar cells (DSSC) nel 2009 [28]. Risultati significativi sono stati ottenuti con la struttura $CH_3NH_3PbI_3$, che con un appropriato spessore di TiO_2 , usato come elettrodo ha mostrato un coefficiente di assorbimento dieci volte superiore di quello dei coloranti molecolari convenzionali a base di rutenio usati nelle celle solari a colorante organico.

Il catione $CH_3NH_3PbX_3$ è adatto come materiale assorbitore per *perovskiti* stabili. A questo si sono associate le molecole di *Formamidinium* (FA). Per migliorare la stabilità della morfologia si è introdotto il Cs nella struttura FA/MA, che favorisce anche la collezione di carica aumentando l'efficienza della cella (struttura con catione triplo Cs/FA/MA). L'utilizzo di TiO_2 con l'aggiunta di cloro ha permesso di migliorare la passivazione e raggiungere una migliore stabilità. Nel corso degli anni nei laboratori di tutto il mondo sono stati fatti notevoli progressi, aumentando l'efficienza della cella solare da 2-3% a oltre il 23%.

Recentemente si è proposto di utilizzare *perovskiti* drogate con *Guanidinium* ($(C(NH_2)_3^+)$, GUA) che permettono di aumentare la vita media dei portatori e quindi la tensione di circuito aperto migliorando ulteriormente la stabilità.

⁸Bromuro o ioduro di piombo.

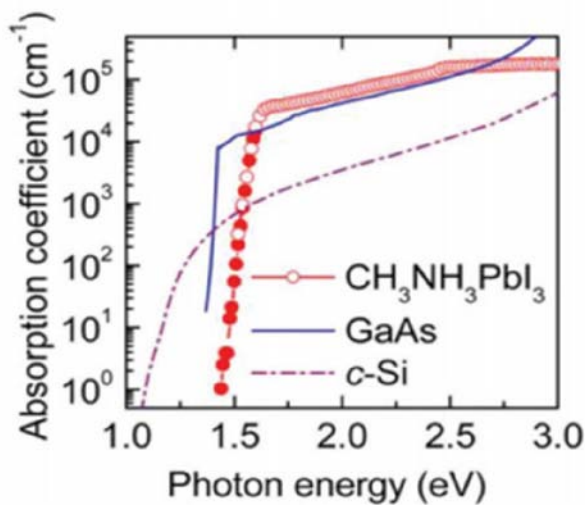
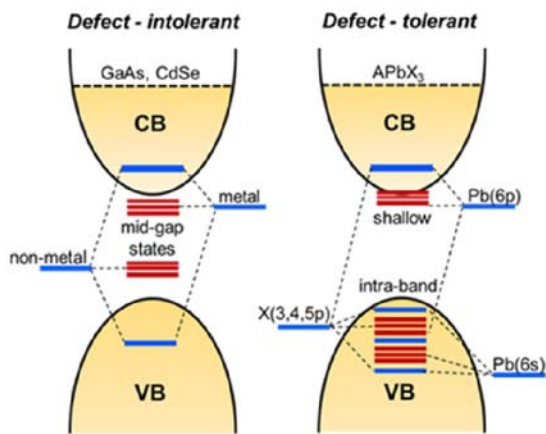


Figura 22: Confronto fra diagrammi a bande diretti nel caso meno tollerante ai difetti e nel caso della perovskite che viene considerata defect tolerant. Tale struttura porta a una curva di assorbimento molto ben definita e con uno spigolo netto. La perovskite ha livelli eccitonici con energia molto bassa (inferiore a kT) e masse efficaci molto basse; non ha stati profondi nella energy gap e anche bassi tassi di ricombinazione non radiativa. Inoltre la perovskite è caratterizzata da grandi lunghezze di diffusione e può raggiungere alti V_{oc} grazie al suo band gap che si può regolare variando la composizione. [32]

Le celle alla perovskite possono essere fabbricate in modi diversi. Tali metodi includono tecniche di deposizione basate su processi in soluzione come lo *spin-coating*, *slot-die coating*, oppure su processi in vuoto come l'evaporazione termica o la deposizione chimica da fase vapore.

Si tratta comunque di processi che potenzialmente si possono scalare per applicazioni

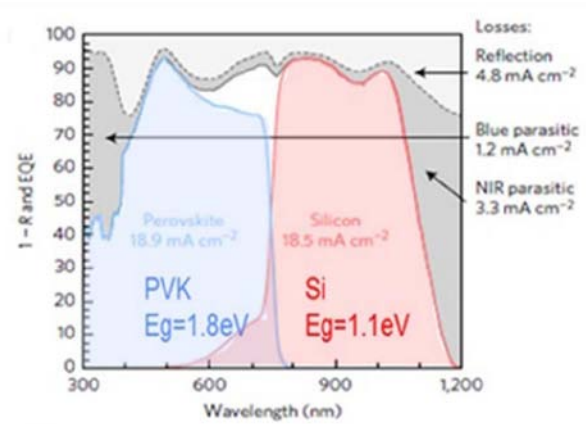


Figura 23: Efficienza quantica EQE, in blu e rosso, e perdite ottiche ($1-R$, dove R è la riflettanza della cella), in grigio, per una Tandem con cella top con 1.8 eV e una cella bottom di silicio, come il sistema perovskite/silicio. La top-cell perovskite ha un band-gap di 1.8 eV e la bottom cell di silicio ha un band-gap di 1.1 eV. La top-cell utilizza la parte di spettro nel blu e la bottom-cell utilizza la parte del rosso [33].

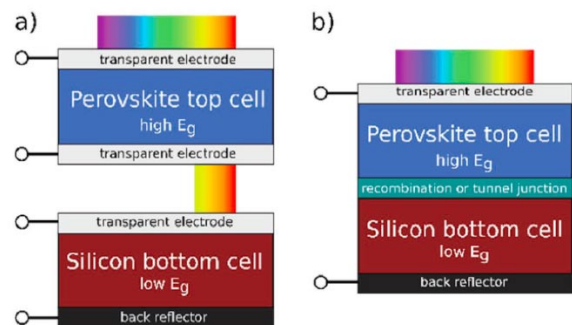


Figura 24: (Destra) Cella Tandem a quattro terminali. (Sinistra) Cella Tandem monolitica a due terminali [33].

industriali a basso costo.

È importante sottolineare però che le prestazioni stabili delle celle a perovskite sono ottenute solo in laboratorio con processi di cristallizzazione in atmosfera controllata e in azoto. Per poter passare a processi di tipo industriale è necessario che si introducano processi di preparazione in aria. È fondamentale quindi che il materiale che compone la perovskite sia ben schermato nei confronti dell'ambiente in modo da non avere problemi con l'umidità.

Dunque, nonostante progressi notevoli dal punto di vista scientifico, le perovskiti sono ancora in uno stadio sperimentale e presentano notevoli

li problemi di scalabilità di processo su grande area (le alte prestazioni sono ottenute su celle solari da laboratorio di aree di pochi cm^2).

Un altro aspetto limitante per la diffusione delle *perovskiti* su scala industriale e commerciale riguarda la presenza di piombo che ha una tossicità elevata.

Per fare in modo che le celle a *perovskite* siano utilizzabili in una struttura *Tandem* industriale è necessario risolvere i problemi di scalabilità, affidabilità e della tossicità dovuta al piombo. La comunità scientifica è comunque molto concentrata a trovare la soluzione ai problemi di scalabilità e affidabilità della *perovskite* e ogni anno si registrano progressi notevoli.

Ritornando all'architettura di dispositivo fotonico, una cella solare *Tandem* può essere ottenuta in diversi modi e diverse configurazioni, ognuna delle quali ha vantaggi e svantaggi.

Con riferimento alla Figura 24, l'architettura più immediata è quella ottenuta sovrapponendo meccanicamente le celle con una configurazione a quattro terminali (4T). Le due celle sono realizzate in maniera indipendente e disposte una sull'altra e contattate individualmente.

Questa configurazione comporta comunque problemi legati alla trasparenza dei contatti, che devono essere attraversati dalla luce nell'intervallo di lunghezza d'onda opportuno per poter essere assorbita dalla cella superiore e da quella inferiore.

Durante il funzionamento, le due celle della struttura *Tandem* 4T possono essere tenute indipendenti ai loro punti di massima potenza, con sistemi di inseguimento (solar tracking) separati. Ciò in particolare riduce le limitazioni sulla scelta del *band-gap* della *top-cell* e rende il sistema meno sensibile alle variazioni spettrali.

Di conseguenza la struttura a quattro terminali può raggiungere efficienze più alte, con celle top con *band-gap* che possono variare fra 1.6 eV e 2.0 eV, con un valore ottimale di circa 1.8 eV, quando si usa una cella sottostante di silicio (vedi Figura 25).

La Figura 24 mostra anche una *Tandem* monolitica a due terminali (2T) ottenuta con una *top cell* di *perovskite* e una *bottom-cell* di silicio; la *perovskite* è depositata sulla cella di silicio. Le due celle sono quindi connesse elettricamente in serie, tramite uno strato di interfaccia che permette

il passaggio della corrente fra le due celle tramite ricombinazione oppure tramite una giunzione a effetto tunnel quantistico.

Rispetto alla struttura a quattro terminali una *Tandem* 2T richiede solo un elettrodo trasparente riducendo l'impatto degli assorbimenti di luce parassiti e in linea di principio riduce il numero di processi e il costo di fabbricazione.

Seguendo la legge di Kirchhoff una *Tandem* monolitica avrà una tensione di circuito aperto data dalla somma delle V_{oc} delle due celle (top e bottom). L'aumento di V_{oc} porta dei benefici in termini di riduzione di perdite resistive nel sistema fotovoltaico. Inoltre le due celle devono essere progettate per generare correnti simili, perché la cella con corrente più bassa limita la corrente totale della *Tandem*. Questo limita il *band-gap* della *top-cell* a un valore di $1.7 \div 1.8$ eV. Inoltre, quando la *top-cell* viene depositata sulla *bottom-cell* si deve fare in modo che il processo non degradi le prestazioni di quest'ultima. La *bottom-cell* deve poi comportarsi come un buon substrato durante la deposizione della *top-cell* e ciò è alquanto difficile a causa della testurizzazione della superficie della cella di silicio.

Usando il principio del bilancio dettagliato, descritto in precedenza, si può ottenere il limite teorico per una cella *Tandem perovskite/silicio* che è intorno al 40%. Nel caso di *Tandem* 2T si trova una finestra molto stretta e l'efficienza diminuisce bruscamente appena ci si sposta dal valore ideale di *band-gap* della *top-cell*, a causa del vincolo di adattare le correnti delle due celle [33].

Conclusioni

L'aumento incredibile dei volumi di produzione dei moduli fotovoltaici e la corrispondente riduzione dei costi hanno notevolmente aumentato le prospettive per una veloce transizione verso un futuro più sostenibile. La tecnologia delle celle solari al silicio continuerà ad evolversi fino a raggiungere efficienze molto vicine al limite teorico del silicio del 29%, calcolato da Shockley e Queisser.

L'utilizzo di schemi avanzati di passivazione in celle ad eterogiunzione che utilizzeranno silicio molto sottile agevolerà tale evoluzione. Ciò porterà ad una ulteriore riduzione dei costi, assi-

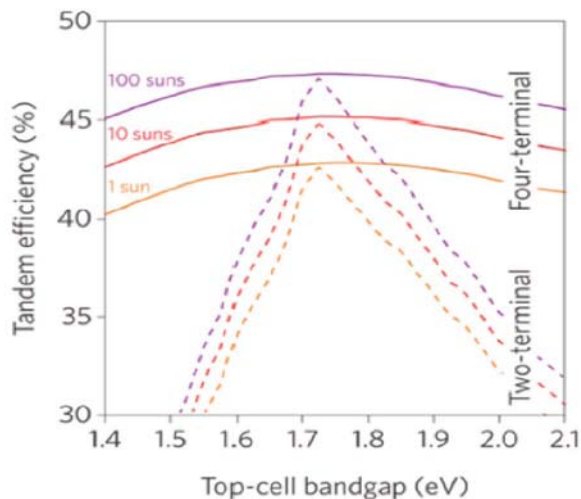


Figura 25: Limite teorico dell'efficienza di una struttura Tandem a due terminali e a quattro terminali in funzione del band-gap della top-cell [33].

stata anche dallo sviluppo delle architetture dei moduli bifacciali. Nei prossimi anni vedremo la transizione verso una nuova tecnologia che permetterà di superare il limite teorico del silicio superando il 29% di efficienza. L'opzione migliore sarà probabilmente l'architettura Tandem in cui si assocerà una cella bottom al silicio cristallino ultra-sottile ottenuta con processo industriale ben consolidato ad una cella top a film sottile ottenuto con materiale a basso costo. La sfida sarà trovare il materiale adatto dal punto di vista della stabilità, della non tossicità e della ampia disponibilità delle risorse.

Continuando con il trend di crescita osservato negli ultimi anni, il fotovoltaico sarà sempre più affermato e riuscirà a diventare la fonte di elettricità a costo più basso, fornendo una soluzione sostenibile alla sfida posta dal riscaldamento globale.

Alcune proiezioni pubblicate di recente stabiliscono che entro il 2050 le installazioni di moduli fotovoltaici supereranno i 20 TW, e ci sono anche studi che proiettano tale valore oltre i 50 TW, considerando scenari che ipotizzano una forte de-carbonizzazione dell'elettricità seguita dall'elettrificazione di quasi tutte le componenti del sistema energetico [1]. I primi passi della ricerca sulle celle solari sono stati guidati dalla necessità di fornire energia ai satelliti e dal lancio della nuova era di esplorazione spaziale.

Gli sforzi successivi di R&D, con grandi investimenti negli Stati Uniti, in Europa, Giappone

e, negli ultimi anni, in Cina, hanno portato l'industria fotovoltaica al punto di avere un ricavo superiore ai 100 miliardi di dollari all'anno. Nei prossimi anni sarà richiesto un grande impegno di ricerca focalizzato su nuovi materiali, progettazione dei moduli, affidabilità, integrazione di prodotto e metodologia di produzione per uno sviluppo possibile del fotovoltaico su una scala di molti terawatt.



- [1] N. M. Haegel et al.: "Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy", *Science* **364** (2019) 6443.
- [2] IHS Markit 2019. Photovoltaics Report. On line. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE GmbH. Freiburg, 14 November 2019 (www.ise.fraunhofer.de)
- [3] E. Vartiainen et al., "PV LCOE in Europe 2015-2050". 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference, September 14 - 18, 2015, Hamburg, Germany.
- [4] International Technology Roadmap of Photovoltaics. VDMA (Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau German) Engineering Federation. 10th Edition. March 2019. (<http://www.itprv.org>) www.itprv.org. VDMA Lyoner str. 18. 60528 Frankfurt Am Main. Germany.
- [5] E. Becquerel: "On Electric Effects under the Influence of Solar Radiation", *Compt. Rend.* **9** (1839) 561.
- [6] R.S. Ohl. "Light-Sensitive Electric Device". US Patent 2,402,662. (1941).
- [7] D. M. Chapin et al.: "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power", *J. Appl. Phys.* **25** (1954) 676.
- [8] D.C. Reynolds et al. Photovoltaic Effect in Cadmium Sulfide Phys. Rev. 961954533
- [9] W. Shockley and H. J. Queisser: "Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells", *J. Appl. Phys.* **32** (1961) 510.
- [10] M.A. Green, S.P. Bremner: "Energy conversion approaches and materials for high-efficiency photovoltaics", *Nature Materials* **16** (2016) 23.
- [11] J. Friedrich et al., *Czochralski Growth of Silicon Crystals Handbook of Crystal Growth (Second Edition) Volume 2A*, P. Rudolph Ed., Elsevier, Amsterdam, (2015) Pages 45-104.
- [12] S.M. Sze, K.K. Ng: *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley Interscience, Hoboken New Jersey (2007).
- [13] M. Mittag et al., Techno-Economic Analysis of Half Cell Modules, "The Impact of Half Cells on Module Performances and Costs". 36th EU PV Solar Energy Conference, 9-13 September 2019, Marseille, France.
- [14] H. Fischer, W. Pschunder, "Investigation of Photon and Thermal Changes in Silicon Solar Cells". Proceedings of the 10th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Palo Alto, CA, USA, 13-15 November 1973.

- [15] J. Schmidt, K. Bothe: "Structure and transformation of the metastable boron- and oxygen-related defect center in crystalline silicon", *Phys. Rev. B* **69** (2004) 24107.
- [16] F. Fertig et al.: "Mass production of p-type Cz silicon solar cells approaching average stable conversion efficiencies of 22%", *Energy Procedia* **124** (2017) 338.
- [17] M. Pander et al., "Benchmarking light and elevated temperature induced degradation (LeTiD)", 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Brussels, Belgium 2018.
- [18] J. Berghold, et al. "Potential Induced Degradation of Solar Cells and Panels", Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, 2010, pp. 3753-3759.
- [19] <http://www.ampere-h2020.eu/>. Portale Programmi Horizon 2020 della Comunità Europea.
- [20] K. Yoshikawa, et al.: "Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%", *Nature Energy* **2** (2017) 17032.
- [21] G. Condorelli et al. "Contamination control challenges on SHJ solar cell processing". 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC).
- [22] G. Condorelli et al.. "High Efficiency Hetero-Junction: From Pilot Line To Industrial Production". Published in: 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC).
- [23] C. Colletti et al., AMPERE: An European project aimed to decrease the Levelized Cost of Energy with innovative heterojunction bifacial module solution ready for the market. Published in: 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC).
- [24] J. Melsken et al.: "Passivating Contacts for Crystalline Silicon Solar Cells: From Concepts and Materials to Prospects", *J. of Photovoltaics* **8** (2018) 373.
- [25] Ken Xingze Wang, Zongfu Yu, Victor Liu, Yi Cui, and Shanhui Fan: "Absorption Enhancement in Ultrathin Crystalline Silicon Solar Cells with Antireflection and Light-Trapping Nanocone Gratings", *Nano Letters* **12** (2012) 1616.
- [26] K. A. Bush et al.: "23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability", *Nature Energy* **17009** (2017) 1.
- [27] C. H. Henry: "Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells", *J. Appl. Phys.* **51** (1980) 4494.
- [28] N. G. Park: "Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology", *Materials Today* **18** (2015) 65.
- [29] D. B. Mitzi, et al.: "Conducting tin halides with a layered organic-based perovskite structure", *Nature* **369** (1994) 467.
- [30] Q. Jiang et al.: "Surface passivation of perovskite film for efficient solar cells", *Nature Photonics* **13** (2019) 460.
- [31] S. D. Stranks, et al.: "Electron-Hole Diffusion Lengths Exceeding 1 Micrometer in an Organometal Trihalide Perovskite Absorber", *Science* **342** (2013) 341.
- [32] N. Torabi, et al.: "Progress and challenges in perovskite photovoltaics from single- to multi-junction cells", *Materials Today Energy* **12** (2019) 70.
- [33] J. Werner et al.: "Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: Marriage of Convenience or True Love Story? - An Overview", *Adv. Mater. Interfaces* **5** (2018) 1700731.

Cosimo Gerardi: è responsabile della Ricerca e Sviluppo per la Tecnologia Fotovoltaica nella Unità 3SUN di Enel Green Power di Catania. Si occupa di definire la roadmap tecnologica per la realizzazione di moduli fotovoltaici realizzati per Enel Green Power.

La fusione nucleare controllata e il cambiamento climatico

Danilo Dongiovanni

ENEA, FSN, C. R. Frascati, 00044 Frascati (Roma) Italia

Lori Gabellieri

ENEA, FSN, C. R. Frascati, 00044 Frascati (Roma) Italia

Piero Martin

*Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Padova, Italia e Consorzio RFX
Consorzio CREATE, Università degli Studi Federico II, Via Claudio 21,
I-80125 Napoli, Italia*

Angelo Antonio Tuccillo

ENEA, FSN, C. R. Frascati, 00044 Frascati (Roma) Italia

Gregorio Vlad

ENEA, FSN, C. R. Frascati, 00044 Frascati (Roma) Italia

Fulvio Zonca

L'energia prodotta dalla fusione nucleare nelle stelle ha reso possibile la vita così come oggi la conosciamo. Probabilmente, sui tempi lunghi, la sopravvivenza delle condizioni ambientali che permettono la vita sul nostro pianeta potrà essere garantita dalla realizzazione di una fonte di energia basata sulla fusione. La sfida è molto complessa e richiede uno sforzo interdisciplinare al limite delle conoscenze attuali. Il nostro paese ha raccolto questa sfida fin dalla declassificazione della ricerca sulla fusione alla fine degli anni '50 del secolo scorso. In questi decenni si è costruita una rete di eccellenze che lega enti di ricerca, università ed industrie ponendo il nostro paese in prima linea nella ricerca sulla fusione per capacità teoriche, sperimentali e realizzative.

Introduzione

Da tempo gli scienziati ci hanno messo in allarme a proposito del clima: siamo prossimi ad un punto critico. Quel momento nel quale azioni che fino ad allora avevano causato cambiamenti impercettibili originano invece una modifica drammatica dello stato del nostro ecosistema. Recentemente la rivista Nature ha pubblicato uno studio di Merritt Turetsky sul permafrost, il terreno perennemente ghiacciato che ricopre circa un quarto delle zone emerse nell'emisfero nord [1]. Esso ha cristallizzato al suo interno piante, animali e microrganismi ed è quindi un enorme serbatoio di gas serra (basti pensare che ne contiene circa il doppio di quelli presenti in atmosfera) ed è rimasto per fortuna finora sigillato grazie alla sua bassa temperatura. L'articolo si sta riscaldando a velocità quasi doppia rispetto al resto del pianeta, il permafrost già comincia a mostrare le prime perdite e Turetsky afferma che siamo di fronte al risveglio di un pericoloso gigante. Un rapido rilascio dei gas serra contenuti

nel permafrost sconvolgerà il clima e renderà assai difficile se non impossibile ottenere il risultato di stabilizzare l'aumento di temperatura del pianeta entro un grado e mezzo rispetto ai livelli pre-industriali. Per invertire la rotta e fermarsi prima del fatidico ultimo passo è necessaria una vera e propria rivoluzione del nostro modo di produrre e consumare e cambiamenti radicali nel settore energetico. La nostra attuale dipendenza dai combustibili fossili ci impedisce infatti una sostanziale riduzione delle emissioni di gas serra. Per affrancarci da questa dipendenza occorre una rapida inversione di rotta verso scenari energetici decarbonizzati. Scenari che sul breve-medio termine includano quindi rinnovabili e nucleare da fissione, ma che sul lungo termine puntino a soluzioni innovative come ad esempio riprodurre in laboratorio il processo di fusione, che alimenta il sole e le stelle. Un processo che libera energia senza emissioni di CO₂, senza le scorie radioattive di lunga durata della fissione e in maniera sicura.

Con la fusione nucleare controllata due nuclei leggeri idrogeno o suoi isotopi si uniscono per dare origine a un nucleo più pesante liberando così una notevole quantità di energia che può essere convertita in energia elettrica. Un processo che ricercatori di tutto il mondo stanno cercando di riprodurre in laboratorio. Il sole è letteralmente un esempio lampante del funzionamento della fusione in natura: esso brucia nell'insieme dei suoi processi di fusione nucleare circa 600 milioni di tonnellate di idrogeno al secondo: riprodurli sulla terra è però complicato. Sulla terra gli scienziati utilizzano esperimenti a forma di ciambella (toroidi) al cui interno il plasma, cioè il gas di isotopi dell'idrogeno -combustibile della fusione - viene riscaldato a temperature di decine di milioni di gradi e tenuto in posizione con appositi campi magnetici.

Realizzare questi dispositivi è una sfida complessa anche perché non appena il plasma devia di poco dalle condizioni ottimali il processo si spegne naturalmente. Questo limite è però anche un grande vantaggio essendo alla base della sicurezza intrinseca di un futuro reattore a fusione, che proprio per leggi naturali non potrà quindi mai scappare di mano come invece può accadere per gli attuali reattori a fissione.

La ricerca sulla fusione è iniziata nel secondo

dopoguerra. Nei decenni passati c'è stato talvolta un eccesso di ottimismo che ha alimentato nell'opinione pubblica una certa disillusione, ma i ricercatori sono oggi più prudenti e hanno idee chiare sulla strada da seguire.

L'Europa è in prima linea e ha elaborato una strategia (*Roadmap*) per ottenere elettricità dalla fusione nella seconda metà di questo secolo. Pilastro di questo piano è ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), un esperimento in costruzione in Francia grazie ad una collaborazione tra Unione Europea, principale partner, e Cina, Corea, India, Giappone, Russia e USA. Con 500 MW di energia dalla fusione ITER dimostrerà la fattibilità del processo. Dopo un inizio travagliato e alcuni ritardi la sua costruzione oggi è in corso e le attività sperimentali inizieranno alla fine di questo decennio, con l'obiettivo di preparare il prossimo passo verso il reattore dimostrativo DEMO, che sarà il reattore a fusione prototipo connesso in rete.

Energia da fusione nel Centro Ricerche ENEA di Frascati

Le attività di ricerca per lo sfruttamento pacifico dell'energia prodotta da reazioni di fusione nucleare hanno visto la comunità scientifica del centro ENEA di Frascati impegnata fin dall'inizio di questo percorso: la fine degli anni '50. Le attività sono state svolte con il coordinamento del Consorzio EUROfusion [2] nel contesto dell'associazione EURATOM. In questo anno 2020 si celebrano 60 anni trascorsi dalla firma del contratto di associazione tra il consorzio europeo e l'ENEA [3]. Il rilievo della ricorrenza sarà sottolineato con una mostra commemorativa ed eventi scientifici.

Gli interessi e le linee di lavoro si sono, nel corso del tempo, differenziate con l'obiettivo di esplorare e dare un contributo nei settori che la comunità ha ritenuto più promettenti, sia di carattere sperimentale, che teorico: di modellistica e simulazione numerica.

Le collaborazioni in ambito internazionale sono state sempre una componente importante e linfa vitale per progredire e condividere il lavoro svolto. Nei laboratori che ospitano altri progetti di rilievo per la fusione in Europa e nel mondo

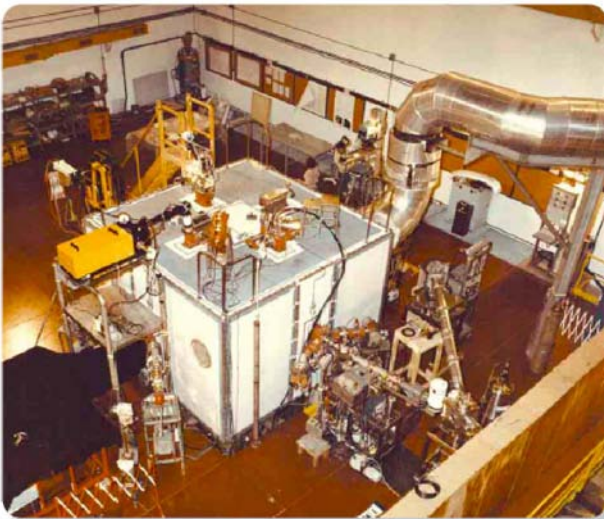
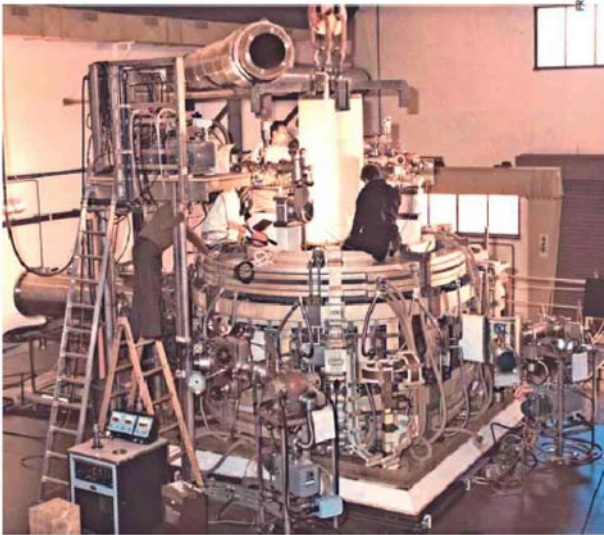


Figura 1: Frascati Tokamak FT: inizia le operazioni nel 1977.

(Francia, Germania, Inghilterra e Svizzera, oltre ad USA, Giappone, Cina e Corea), i ricercatori del Centro di Frascati hanno collaborato e contribuito con progetti e programmi scientifici. Attività di teoria e modellistica hanno fatto e continuano a far parte di collaborazioni strutturate all'interno del Consorzio EUROfusion (Work Packages, Enabling Research Projects) e di partecipazioni internazionali a gruppi nell'ambito della International Tokamak Physics Activity (ITPA [4]) e di IAEA Technical Meeting [5], e collaborazioni negli USA e in Cina, anche attraverso un'intensa attività di formazione e specializzazione. Nonostante la sinergia di collaborazione con le istituzioni nazionali che lavorano in questo stesso settore di ricerca si è mantenuta costante e fruttuosa durante l'intero periodo storico di lavoro. Tra le varie attività, importante ricordare il ruolo

fondamentale svolto dall'esperimento Reversed Field Pinch del Consorzio RFX di Padova. Questa è una configurazione a confinamento magnetico alternativa al Tokamak e questo esperimento per dimensioni è il più grande al mondo di questo genere [6].

La costruzione e lo sfruttamento di esperimenti Tokamak a confinamento magnetico nel Centro ENEA di Frascati hanno avuto un rilievo importante, così com'è avvenuto nel resto del mondo, e i due impianti realizzati (Frascati Tokamak [7] e Frascati Tokamak Upgrade [8]) hanno dato risultati determinanti nel panorama mondiale contribuendo alle scelte di indirizzo per il futuro.

Le scelte che hanno guidato la progettazione dei due impianti sperimentali per la fusione nucleare a confinamento magnetico, Frascati Tokamak (FT) [7] e Frascati Tokamak Upgrade (FTU) [8], li hanno resi unici al mondo per l'ampio spettro di parametri accessibile nella sperimentazione. Per questo motivo il loro contributo al panorama scientifico mondiale ha potuto mantenersi di rilievo e interesse durante tutto il corso della loro esistenza in attività.

Nasce alla fine degli anni '70 il progetto FT (Frascati Tokamak) [7]. In quegli anni la linea del confinamento magnetico nella configurazione Tokamak si era ormai affermata assumendo un ruolo di riferimento.

La via verso il successo per la fusione nucleare si trovava comunque a un bivio di scelte per ottenere alte prestazioni fusionistiche: incrementare le dimensioni oppure accrescere l'intensità del campo magnetico e, di conseguenza, la densità di corrente. FT (figura 1) appartiene alla seconda linea con la sua forma compatta (raggio maggiore del toro di 0.8m e raggio minore circa 0.2m), un campo magnetico di 10 Tesla e corrente di plasma di 1MA. Le alte correnti necessarie per generare l'alto campo magnetico sono raggiunte grazie al raffreddamento in azoto liquido (circa $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$) dei magneti in rame.

La combinazione di un alto campo magnetico e delle piccole dimensioni permette di ottenere un'alta densità di corrente. La prima e importante conseguenza di questo è la grande potenza ohmica a esso associata, in altre parole la possibilità di raggiungere alte temperature con il solo riscaldamento indotto dalla corrente di plasma.



Figura 2: Frascati Tokamak FTU: inizia le operazioni nel 1989

Inoltre la densità di corrente è proporzionale alla densità di particelle per unità di volume e, quindi, questa scelta permette di ottenere alte densità di plasma, in altre parole di avvicinarsi a un buon rendimento del sistema. FT ha raggiunto una densità di particelle per unità di volume pari a $7.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, mai ottenuta in altre macchine, un valore record del prodotto della densità per il tempo di confinamento dell'energia di $4 \times 10^{19} \text{ s} \times \text{m}^{-3}$ [9]. I sistemi di riscaldamento addizionale di un Tokamak assumono un ruolo di rilievo cruciale per arrivare al traguardo ambizioso del bilancio di potenza positivo. Per questo la comunità scientifica di Frascati ha dotato FT di sistemi di riscaldamento che sfruttano l'assorbimento di onde elettromagnetiche da parte del plasma. Radiofrequenze nell'intervallo 1-10 GHz (2.45 GHz e 8 GHz in FT) possono trasferire energia e momento alle particelle di plasma [10].

Agli inizi degli anni '90 diventa operativo il Frascati Tokamak Upgrade (FTU) [8] (figura 2) (Tabella 1) che apre una seconda stagione del programma di ricerca della comunità scientifica di Frascati in quest'ambito. Il nuovo Tokamak segue la stessa linea di progetto, una macchina

	FT	FTU
Raggio maggiore (m)	0.2	0.3
Raggio minore (m)	0.83	0.935
Corrente di plasma (MA)	1.0	1.6
Campo magnetico toroidale (T)	10	8
Riscaldamento addizionale (MW)	0.5	4.5
Numero di ports	4	12
Durata della scarica (s)	1.2	1.6
<i>full performance</i>		
Durata della scarica (s) 4T	1.2	4.0

Tabella 1: Parametri dei Tokamaks FT e FTU

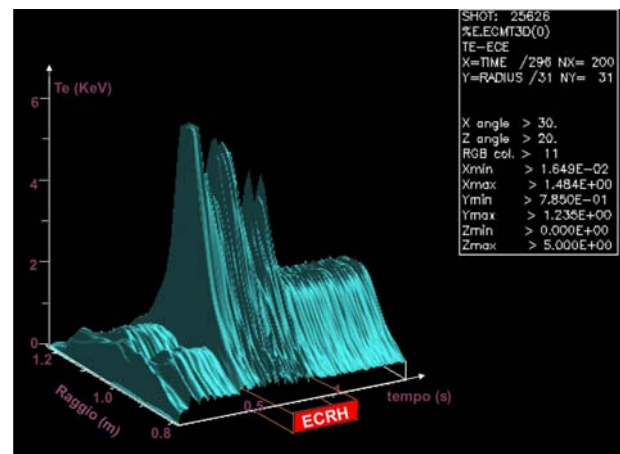


Figura 3: Immissione di riscaldamento EC: profilo di temperatura elettronica misurata con il sistema di misura Electron Cyclotron Emission

compatta (con un volume circa 2 volte e mezzo quello di FT) e con un alto campo magnetico (8T e 1,6MA di corrente di plasma, con magneti di rame raffreddati in azoto liquido), in cui i riscaldamenti sono di gran lunga potenziati in tipologia e potenza per 4.6 MW totali. All'impianto di radiofrequenza Lower Hybrid, alla frequenza 8 GHz su FTU [11, 12, 13], si aggiunge il riscaldamento alla frequenza ciclotronica elettronica ECRH a 140 GHz per 2 MW di potenza totali (figura 3) a cura dell'Istituto del CNR ISTP di Milano [14]. Un lanciatore dotato di specchi orientabili (figura 4) permette di modificare il profilo di deposizione della potenza seguendo le richieste dei programmi sperimentali.

Le temperature raggiunte (12 keV, ovvero 100 Milioni di gradi (figura 5) [15, 16] e le densità record ottenute (di $\approx 7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) (figura 6) con l'ausilio di una sistema di immissione di *pellet* solidi di combustibile con velocità di 1.3 Km/s [17]

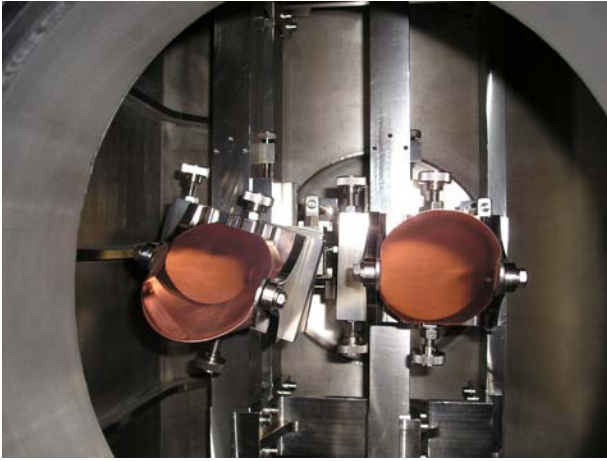


Figura 4: Sistema di lancio di onde Electron Cyclotron di FTU: specchi per trasferire la potenza dalla linea di trasmissione agli specchi di iniezione nel plasma, 4 specchi indipendenti per focalizzare 500 kW di potenza ciascuno. densità di potenza pari a 200 MilioniW/m²

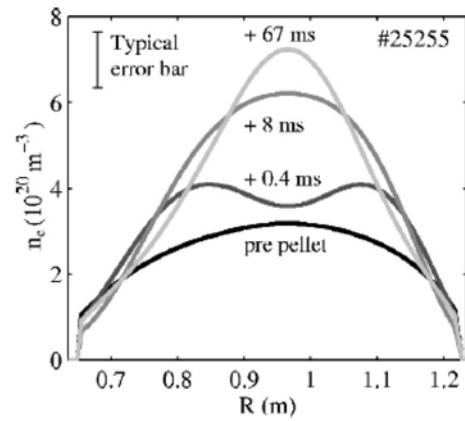


Figura 6: Misura di un profilo della densità degli elettroni di FTU lungo il diametro della sezione poloidale del toro durante esperimenti di iniezione di pellet di combustibile.

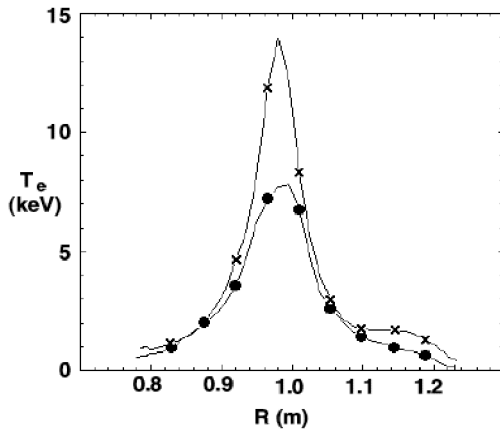


Figura 5: Misura di un profilo della temperatura degli elettroni di FTU lungo il diametro della sezione poloidale del toro durante esperimenti di riscaldamento con radiofrequenza Ciclotronica Elettronica (ECRH). (IAEA Conference, Kyoto (Japan), 1998)

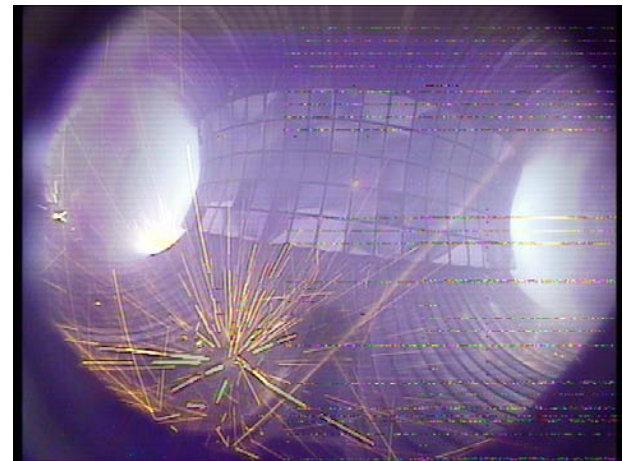


Figura 7: Interno della camera da vuoto di FTU con fasci elettroni runaway

hanno dato a FTU un ruolo centrale nelle discussioni scientifiche della ricerca mondiale sulla fusione termonucleare controllata nel corso della sua esistenza in operazione. Grazie alla versatilità di quest'impianto è stato possibile dedicare una cospicua parte delle attività delle campagne sperimentali allo studio del possibile impatto dei grandi flussi di potenza sulle pareti materiali del reattore; in particolar modo agli studi di tecniche per impedire danneggiamenti delle parti che si affacciano al plasma (figura 7). Infatti, nel fluido

combustibile durante i fenomeni di improvvisa perdita di confinamento e disruzione, i grandi campi elettrici possono accelerare elettroni veloci (generazione primaria) che un fenomeno a valanga può trasformare in grandi correnti di particelle con velocità relativistiche (figura 8), che, come un pennello caldo, possono danneggiare in maniera significativa le pareti della camera da vuoto. FTU ha potuto studiare in maniera estesa i processi di formazione e i modi per mitigare la dannosità di questi fenomeni generati dai fasci di elettroni *runaway* (RE) [18, 19]. In aggiunta alla principale linea di ricerca, la decisione di non trascurare esperimenti a confinamento magnetico di altra impostazione, come la macchina PROTO-SPHERA [20, 21], si è rivelata importante per esplorare configurazioni diverse che pos-

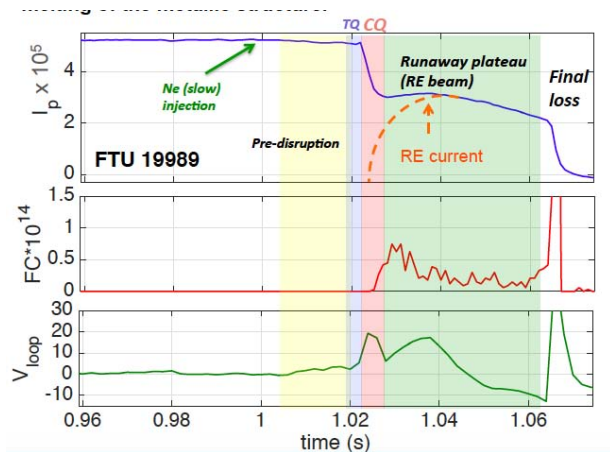


Figura 8: Segnali di una scarica di plasma di FTU: corrente di plasma, U235 camere a fissione e tensione di giro, che mostrano la formazione di corrente di elettroni runaway provocata per mezzo di un'iniezione di gas Neon nella scarica di plasma. D.Carnevale et al., *Runaway electron beam control*, ISSN:014036, PPCF, 2018

sano permettere un miglior rendimento, sebbene ancora da verificare in termini di potenzialità e fattibilità.

Il fenomeno che consente la formazione spontanea, da una colonna centrale di plasma, di un plasma toroidale magnetizzato capace di circondarla è conosciuto in astrofisica come riconnessione magnetica. Gli studi condotti sulla riconnessione magnetica in astrofisica conducono a ipotizzare che questa configurazione di confinamento di plasma realizzata in laboratorio possa fornire una potenza considerevole di riscaldamento, rendendo non necessario il riscaldamento aggiuntivo, come invece avviene nei Tokamak.

Il rendimento di un combustibile compresso ad alte densità è esplorato, con un diverso approccio, dalla fusione inerziale che utilizza l'energia di un potente laser per innescare le reazioni di fusione termonucleare. L'attività di ricerca condotta dalla comunità scientifica di Frascati nella linea della fusione nucleare a confinamento inerziale si fonda su un impegno consolidato, che, agli inizi degli anni '70, ha permesso di osservare i primi neutroni prodotti da reazioni di fusione con queste tecniche. Le ricerche sono proseguite con la costruzione del laser ABC [22]. L'impianto laser ABC dei laboratori di Frascati è, ancora oggi, il laser con la più alta energia per impulso presente in Italia, ma anche uno dei pochi

in Europa con caratteristiche simili. La comunità scientifica del Centro di Frascati ha segnato, con le proprie attività, passi importanti su questo cammino.

La fisica teorica per la fusione nucleare

Il tessuto sul quale si fondano le scelte e il coordinamento di queste attività è l'analisi interpretativa e predittiva dei fenomeni fisici che viene fatta dalla fisica teorica del plasma. Gli studi e i risultati ottenuti nel Centro ENEA di Frascati in quest'ambito hanno accompagnato e indirizzato le attività e le scelte di questo laboratorio, ma anche, in alcuni campi e con un ruolo di rilievo, in ambito internazionale.

Le attività di fisica teorica comprendono sia ricerche di natura prettamente analitico-formale che simulazioni numeriche; tra queste due linee di ricerca, si pone idealmente come ponte la concezione e lo sviluppo di modelli teorico-numeric. Le stesse attività di simulazione hanno la molteplice caratteristica di essere uno strumento di ricerca teorica, potendo emulare un esperimento in condizioni controllate a priori e a piacere, oltre che di interpretazione e predizione di quanto si è osservato o si realizzerà negli esperimenti. La ricerca sulla fisica delle onde di Alfvén e della loro mutua interazione con i diversi tipi di particelle energetiche, presenti in un plasma vicino alle condizioni d'ignizione, hanno rappresentato da diverso tempo un'eccellenza internazionalmente riconosciuta ai laboratori ENEA sulla fusione termonucleare [24, 25].

Per raggiungere e mantenere le condizioni d'ignizione è necessario che il campo magnetico sia sufficientemente intenso da poter confinare (cioè mantenere al suo interno per un tempo sufficientemente lungo) le particelle alfa (nuclei di atomi di Elio) prodotte nelle reazioni termonucleari tra Deuterio e Trizio, in maniera da consentire loro di cedere la propria energia cinetica al plasma termico mantenendolo così sufficientemente caldo da favorire nuove reazioni di fusione. In tali condizioni la velocità di propagazione di un particolare tipo di onde Alfvéniche, le cosiddette onde di Shear Alfvén, si trova a essere dello stesso ordine di quella delle particelle alfa prodotte

Le onde di shear Alfvén nei plasmi termonucleari

Le onde di Alfvén, scoperte da Hannes Alfvén [23] sono oscillazioni elettromagnetiche di bassa frequenza nei plasmi magnetizzati. Le onde di Alfvén si trovano in natura e nei plasmi di laboratorio. As esempio, le onde di Alfvén sono spesso eccitate dalle particelle cariche di alta energia prodotte da tempeste geomagnetiche e dal riscaldamento addizionale nei plasmi. Poiché le onde di Alfvén sono associate a perturbazioni elettromagnetiche, le particelle cariche possono scambiare energia e momento con le onde, producendo accelerazione, riscaldamento e trasporto in direzione trasversale al campo magnetico di equilibrio. Le onde di *shear* Alfvén, come onde trasversali e incompressibili, sono caratterizzate da un debole smorzamento e risultano facili da eccitare. In particolare modo, la perdita rapida di particelle alfa e ioni di alta energia a causa delle onde di shear Alfvén è una questione rilevante per i plasmi termonucleari come ITER [25, 26].

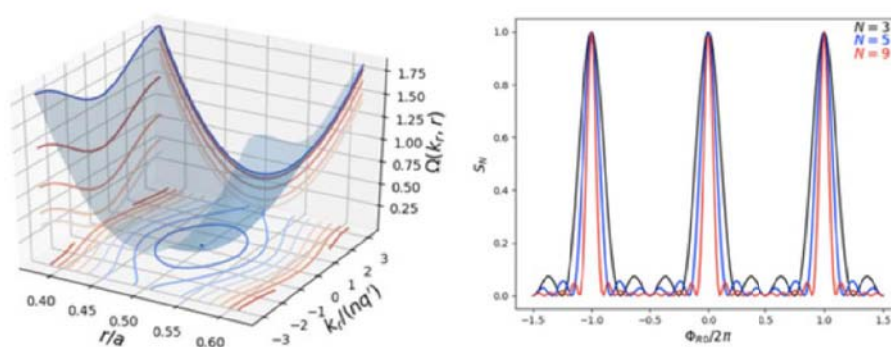


Figura 9: Relazione di dispersione di un pacchetto d'onde shear Alfvén (sinistra) che illustra la frequenza in funzione della posizione radiale e del vettore d'onda. A destra, illustrando l'intensità in funzione del numero di riflessioni all'interno del plasma, si evidenzia la formazione di instabilità per frequenze chiaramente distinte.

nella reazione di fusione, nonché di particelle energetiche generate da diversi tipi di riscaldamento aggiuntivo [26, 27]. In questo contesto, fenomeni risonanti tra onde Alfvéniche e particelle energetiche possono indurre, da una parte, la crescita esponenziale dei modi stessi (cioè una sorta di vibrazioni delle linee di campo magnetico e di diverse altre grandezze fisiche del plasma stesso, quale velocità e pressione del fluido) (figura 9), e, una volta raggiunta un'ampiezza sufficientemente grande, generare fenomeni di turbolenza che possono avere, come effetto, un trasporto anomalo delle particelle energetiche verso la zona periferica del plasma, con conseguente perdita in energia (figura 10). In tal modo, l'auto-riscaldamento del plasma da parte delle particelle alfa in esso prodotte può diminuire e, in casi peggiori, si può avere il danneggiamento

delle strutture materiali che si affacciano al plasma, qualora le particelle energetiche siano espulse in grandi quantità o in maniera concentrata. L'attività di ricerca in tale ambito ha permesso di formulare una teoria completa della dinamica sia lineare che non lineare [26, 27]. Affiancata a quest'attività di natura analitico-formale, si è sviluppata un'attività complementare di modellizzazione e simulazione numerica di tale fenomenologia, che ha permesso di sviluppare strumenti numerici all'avanguardia, che sfruttano le tecniche più avanzate di High Performance Computing (HPC) ad alto parallelismo di calcolo [28].

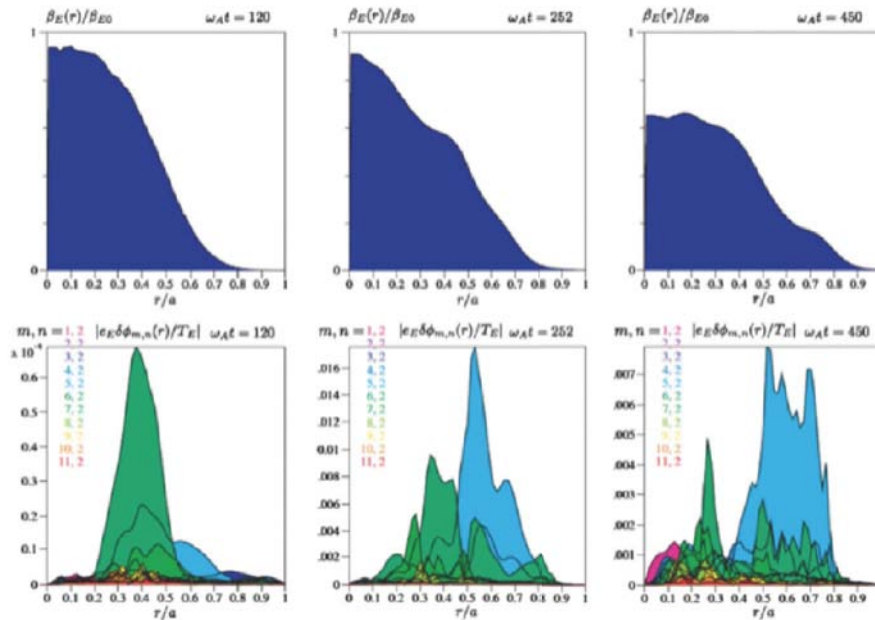


Figura 10: Evoluzione temporale dei profili radiali della densità di energia delle particelle alfa e corrispondente struttura radiale del potenziale scalare fluttuante di un pacchetto d'onde shear Alfvén. La fase di instabilità (sinistra) innesca un effetto valanga (centro) seguito da una saturazione (destra). La normalizzazione della scala temporale è in unità della frequenza angolare di Alfvén inversa. Da Ref. [28].

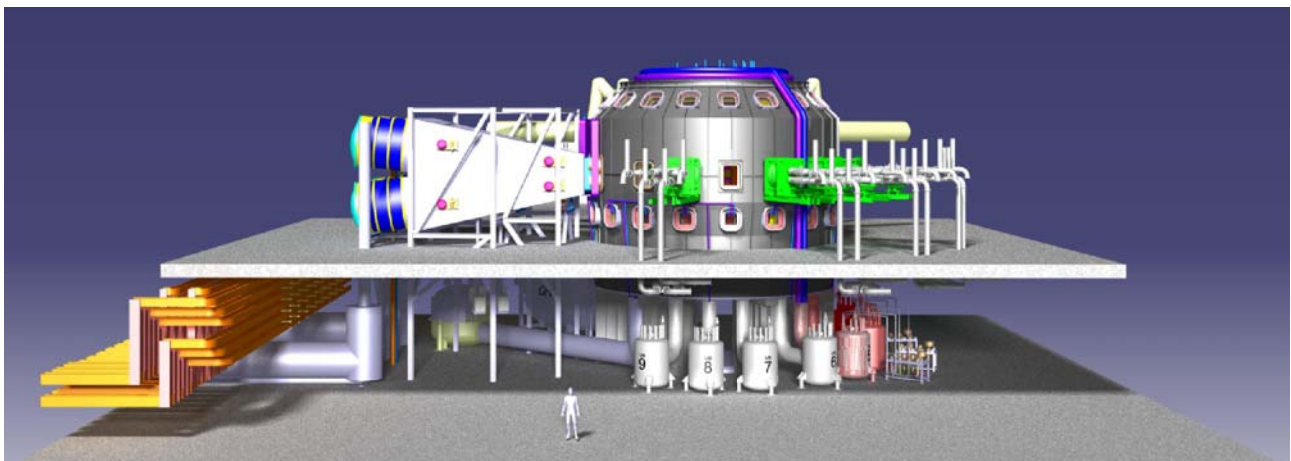


Figura 11: Immagine costruttiva del progetto DTT

Il progetto Divertor Tokamak Test: verso la costruzione del prototipo di reattore

La comunità scientifica fusionistica nazionale si fonda su una storia di rilievo internazionale anche delle altre istituzioni che, in parallelo al Centro di Ricerche dell'ENEA di Frascati, hanno dato contributi importanti, anche lavorando in sinergia tra di loro. In questi giorni inizia, nei laboratori ENEA di Frascati, la realizzazione di un nuovo progetto: Il Divertor Tokamak Test [29]. Il

progetto è stato concepito in ENEA e si avvale della collaborazione delle Università e degli altri Enti di ricerca Italiani che, fondandosi sulla storica collaborazione nazionale, stavolta si trovano uniti su questo comune obiettivo. DTT [29] (figura 11) nasce per affrontare una delle missioni cruciali per la realizzazione del reattore a fusione e questo viene fatto con il supporto e il coordinamento del consorzio EUROfusion che attribuisce a DTT una missione importante a fianco di ITER e di importanza strategica nel cammino verso la realizzazione del prototipo di reattore DEMO.

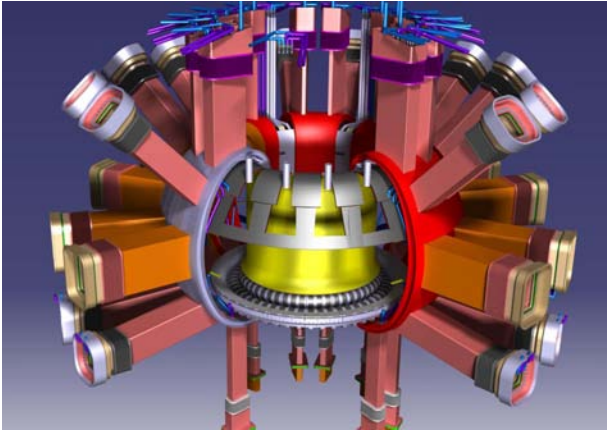


Figura 12: Immagine del divertore di DTT

Nel futuro reattore l'80% dell'energia prodotta dalle reazioni di fusione è trasportata fuori dal plasma dai neutroni prodotti nelle reazioni di fusione Deuterio-Trizio ed è convertita in energia elettrica. Una parte dell'energia prodotta è distribuita in maniera isotropa come radiazione elettromagnetica ed è assorbita dalle pareti materiali del sistema senza picchi di carico. Invece occorrerà gestire il residuo, ma consistente, flusso di calore che si riverserà sulle pareti esterne trasportato dalle particelle cariche sulle superfici periferiche in modo localizzato. Infatti, mentre il confinamento nel reattore sarà il risultato delle linee di campo magnetico che formano un insieme di superfici magnetiche chiuse e annidate una dentro l'altra, alla periferia del plasma una sottile regione (spessore dell'ordine del centimetro) avrà linee di campo magnetico aperte che faranno confluire particelle e calore diritte su di un dispositivo creato per sopportarne il carico: il divertore (figura 12). Questo è un elemento importante che deve essere studiato per poter sopportare questi grandi carichi termici e che potrà essere sostituito se dovesse subire danneggiamenti. Il flusso di calore atteso sul divertore è superiore a 10 MWatt per metro quadrato, confrontabile con quello medio della superficie del Sole. Le soluzioni offerte dalla attuale tecnologia dei materiali non sono in grado di raggiungere questi livelli di flussi di potenza.

DTT avrà la flessibilità necessaria per provare nuove e diverse configurazioni e materiali per il divertore: si lavora per aumentare la parte di energia trasportata dalla radiazione, mentre lo studio dei materiali costituisce uno dei settori di ricerca di maggior rilievo. Inoltre si indaga

nella direzione di una ottimizzazione della topologia magnetica. Ovviamente si dovrà dimostrare che la capacità di smaltimento del calore sarà raggiunta senza degrado significativo del confinamento ottimale del plasma. DTT, unico tra gli esperimenti in funzione o attualmente proposti, potrà fare queste ricerche cruciali per il futuro in scenari nei quali non solo le prestazioni del bordo, ma anche della parte centrale del plasma, quella cioè dove in un futuro reattore si produrranno le reazioni di fusione (figura 13), sono confrontabili con quelle di ITER e DEMO.

	DTT	ITER	EU DEMO
R(m)	2.14	6.2	9.1
a(m)	0.65	2	2.93
A (R/a)	3.3	3.1	3.1
I_p (MA)	5.5	15	19.6
B(T)	6	5.3	5.7
Heating PTOT (MW)	45	120	460
P_{SEP}/R (MW/m)	15	14	17
Pulse Length (s)	95	400	7600

Tabella 2: Confronto parametri DTT, ITER, DEMO

A questo scopo, grazie alla disponibilità di sistemi di riscaldamento addizionale che accoppiano al plasma 45 MWatt, DTT raggiungerà valori di potenza specifica, definita come il rapporto tra la potenza uscente dalla superficie di plasma divisa per il raggio maggiore, paragonabili a quelli di ITER e DEMO (Tabella 2). Il campo magnetico di questo progetto è generato da un sistema di magneti superconduttori (figura 14). La comunità scientifica Nazionale ha una posizione di rilievo mondiale nella ricerca in questo settore, evidenziata dai contributi dati allo sviluppo degli elementi superconduttori per gli esperimenti ITER e JT-60SA [30]. Il progresso della tecnologia della superconduttività sarà cruciale per il buon funzionamento del futuro reattore ed anche in questo caso DTT costituisce una flessibile palestra di ricerca e sviluppo (figura 15). Gli impulsi di DTT saranno di durata fino a circa un minuto e mezzo, tempi sufficientemente lunghi da garantire un completo ed efficiente utilizzo di ogni singolo impulso. Nel progetto DTT si usano materiali superconduttori già usati per dispositivi esistenti, in particolare per ITER, come il Niobio3-Stagno o il Niobio-Titanio. Anche in quest'ambito DTT si propone come un esperi-

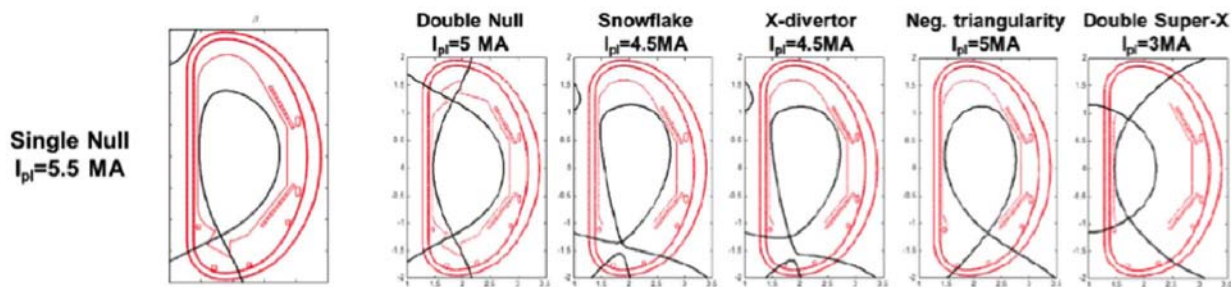


Figura 13: Flessibilità nella topologia magnetica: diversi scenari possibili per DTT

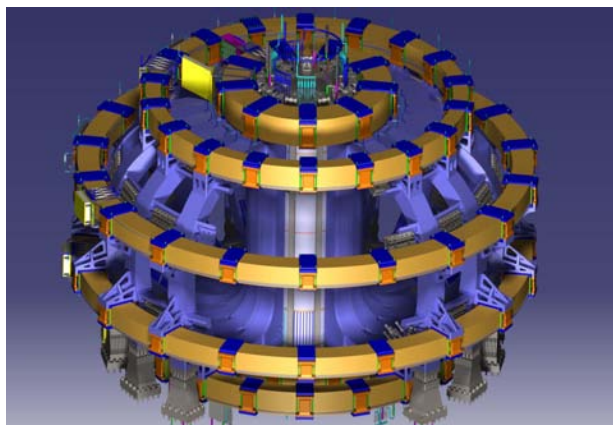


Figura 14: Sistema di magneti superconduttori di DTT: 18 settori toroidali in colore viola, 6 avvolgimenti poloidali in colore giallo, all'interno i 6 settori del solenoide centrale

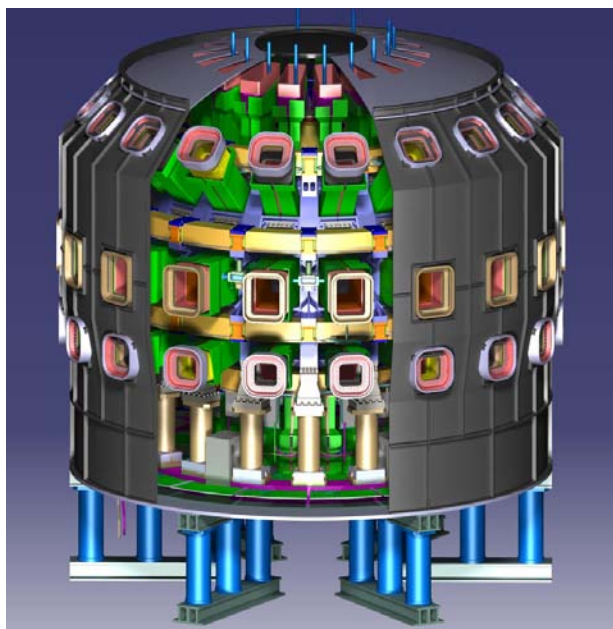


Figura 15: I magneti superconduttori di DTT protetti dal thermal shield (verde) e chiusi nel criostato che li mantiene in vuoto

terno del solenoide centrale, il cruciale insieme di bobine che in un tokamak induce la corrente di plasma e mantiene il campo magnetico poloidale, viene infatti lasciato spazio per l'inserimento di un modulo fatto da superconduttori ad alta temperatura, materiali che oggi sono in fase di studio in sistemi di piccole dimensioni e il perfezionamento dei quali rappresenterà una vera rivoluzione di innovazione tecnologica.

DTT sarà il più completo e flessibile esperimento al mondo per affrontare e risolvere il problema dello smaltimento della potenza nel reattore a fusione del futuro. La progettazione, costruzione e sfruttamento della struttura sperimentale DTT sono affidate al Consorzio a responsabilità limitata DTT S.c.a r.l., costituito il 10 settembre 2019 per l'adempimento della sua missione legale di realizzazione del progetto. I partner del Consorzio sono: ENEA, ENI e CREATE (Consorzio di ricerca e sviluppo tra industrie e Università italiane). Altri potenziali partner del Consorzio DTT, che hanno già inviato lettere d'intenti o richieste formali sono: INFN e Consorzio RFX, Università degli Studi della Tuscia, Politecnico di Torino e Università degli Studi di Milano-Bicocca. DTT avrà il supporto della Regione Lazio, che lo ospita, oltre al supporto Nazionale, della BEI (Banca Europea per gli Investimenti), di EUROfusion e della Cina.

Questo sarà un progetto di eco e rilievo internazionale, ma, al tempo stesso, è un progetto tutto Italiano e lavorerà a fianco dell'industria italiana nei settori dell'innovazione tecnologica, in sinergia con la ricerca italiana, in particolar modo nei settori delle tecnologie di supporto necessarie agli impianti di fusione nucleare. Inoltre DTT sarà una forza trainante per l'economia locale oltre che per l'industria Nazionale. Il laboratorio DTT accoglierà le generazioni dei giovani ricercatori

mento che guarda al futuro, pronto ad essere un vero e proprio laboratorio di innovazione: all'in-

Italiani, che potranno formarsi insieme con la comunità scientifica internazionale che collaborerà con e sarà parte integrante dei programmi di ricerca del progetto. Il laboratorio sarà una fucina di formazione dove cresceranno i giovani specialisti e professionisti negli ambiti della fisica e dell'ingegneria che proseguiranno le loro carriere, secondo le loro aspettative, nei numerosi ambiti correlati della ricerca o dell'industria.

Il cambiamento climatico e gli aspetti ambientali e socio-economici della fusione

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [31] definisce come inequivocabile il riscaldamento del sistema climatico globale e afferma che vi sia una chiara influenza umana su di esso. In particolare, osserva come le emissioni di gas serra di origine antropogenica (principalmente CO₂) abbiano raggiunto i valori più alti nella storia e come sia estremamente probabile che gli effetti di tali emissioni siano stata la causa dominante del riscaldamento osservato a partire dalla metà del XX secolo. I rischi connessi ai cambiamenti climatici di origine antropogenica legati ai predetti fattori sono stati riconosciuti dalla comunità internazionale durante la conferenza sul clima tenutasi a Parigi nel 2015, COP21 [32] e, con l'obiettivo di ridurre l'occorrenza e/o mitigarne significativamente le conseguenze, 195 paesi hanno adottato un accordo finalizzato a limitare l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto dei 2 °C sopra i livelli pre-industriali [32]. In una prospettiva di riduzione rischi si sancisce inoltre l'importanza di adoperarsi al fine di limitare detto aumento a 1.5 °C, consapevoli del fatto che molte delle conseguenze fisiche di un cambiamento climatico scalino in modo non lineare rispetto all'aumento della temperatura globale [33]. I *Representative Concentration Pathways* (RCPs) [34] sono scenari ambientali che, includendo anche l'evoluzione temporale di emissioni e concentrazioni di gas serra fino al 2100, supportano la definizione di vincoli alle emissioni di CO₂ compatibili con gli obiettivi di contenimento del riscaldamento globale. RCP2.6 è lo scenario di riduzione più drastico e unico compatibile con l'obiettivo di contenere l'incres-

mento di temperatura globale ben al di sotto dei 2 °C, esso prevede un valore di stabilizzazione dopo il 2100 del forzante radiativo a 2.6 W/m² con concentrazioni CO₂ eq. ~490 ppm al picco prima del 2100 e successivo declino. Similmente si sono definiti scenari meno restrittivi RCP4.5 (CO₂ eq. ~650 ppm dopo il 2100), RCP6 (CO₂ eq. ~850 ppm dopo il 2100).

La principale fonte antropica di gas serra è la CO₂ proveniente dall'uso di combustibili fossili per produzione di energia, trasporti e riscaldamento e [35] indica il settore energetico come il maggior contributore ai gas serra (33.1 Gt CO₂ *energy-related emissions* nel 2018). Ne consegue che ogni realistica strategia di riduzione delle emissioni di gas-serra non può prescindere da una transizione del sistema energetico verso l'utilizzo di tecnologie di produzione a basse emissioni di CO₂ e/o il possibile contributo negativo al bilancio di emissioni dato dall'integrazione di tecnologie di *Carbon Capture and Sequestration* (CCS). Il piano europeo di implementazione di una economia *climate-neutral* prevede inoltre come fattori strategici l'elettrificazione del sistema energetico su larga scala. Si richiede quindi una profonda trasformazione del sistema energetico resa ancor più complessa dall'inerzia del sistema al cambiamento dovuta sia alla sua dimensione e frammentazione che alla forte dipendenza rispetto a scelte passate. In questo contesto di stringenti vincoli alle emissioni di gas serra e in un'ottica di pianificazione sostenibile a lungo termine, è necessario quindi anche pianificare il contributo di ogni fonte di energia disponibile anche in una prospettiva di possibile crescita della domanda di energia elettrica da soddisfare. La fusione nucleare è una fra le nuove possibili fonti disponibili per l'umanità ed ha la potenzialità di fornire grandi quantità di energia con ridotte quantità di combustibile ed assenza di emissioni di gas serra durante l'operazione dell'impianto.

L'uso commerciale della fusione con caratteristiche in grado di competere nel sistema energetico (ad esempio in termini di quantità netta di energia prodotta, disponibilità, costo finale del kWh, ecc.) non è previsto prima del 2050 e la nostra attuale comprensione del potenziale e dell'impatto socio-economico e ambientale della fusione come fonte di energia si basa sulle conoscenze acquisite nelle campagne sperimen-

tali e sullo studio e la progettazione dei sistemi del reattore. Una parte di questi programmi di studio (intorno agli anni 1995-2002) si è focalizzata esclusivamente sulla valutazione degli aspetti ambientali e di sicurezza [36] e aspetti socio-economici del *Fusion Power Plant* (FPP) [37]. Sulla base delle informazioni di progetto disponibili per i vari modelli di reattore, detti programmi hanno svolto analisi integrate tenendo in considerazione l'intero ciclo di vita del reattore: dal consumo di risorse o i rilasci legati alla costruzione dell'impianto (inclusi gli effetti indiretti in termini di CO₂ ad esempio legata al trasporto di materiali per la costruzione), all'impatto dell'operazione e manutenzione dell'impianto (inclusi ipotetici eventi incidentali), fino al suo decommissioning e smaltimento degli eventuali rifiuti radioattivi. I risultati di questi programmi di studio sono stati poi aggiornati nell'ambito di altre analisi più generali sulla definizione concettuale del progetto di FPP come i *Power Plant Conceptual Studies* [38] fino all'ultimo programma EUROfusion per il design di un reattore dimostrativo [39] in prospettiva FPP. Di seguito si propone una sintesi dei principali risultati dei predetti programmi di studio e recenti sviluppi, valide per il reattore di potenza FPP (e non applicabili alle facility di ricerca come DTT).

Sostenibilità ambientale in termini di risorse

Per quanto concerne il ciclo del combustibile, la reazione di fusione nucleare di riferimento per lo sfruttamento energetico prevede l'uso di Deuterio e Trizio in proporzione di 50% e 50%. La disponibilità naturale del deuterio sulla terra è praticamente illimitata costituendo circa lo 0.03% in massa dell'idrogeno presente nell'acqua degli oceani. Il trizio è un elemento naturalmente poco abbondante poiché instabile (decade in ³He con decadimento β ed emivita di circa 12 anni). Esso è presente sulla terra per reazioni in alta atmosfera con raggi cosmici, ma può essere prodotto artificialmente con varie reazioni nucleari fra cui con deuterio (²H(n, γ)³H) e Litio (⁶Li(n, α)³H, ⁷Li(n, α)³H)¹.

A parte un iniziale [40] inventario di trizio necessario per lo *start-up* del reattore inizialmente fornito dagli impianti di fissione in operazione

¹ Altre reazioni con azoto, boro o fissione ternaria di uranio

di tipo CANDU, il ciclo del combustibile prevede la generazione del trizio con reazioni fra il litio presente in un mantello triziogeno insieme con materiali che realizzano reazioni di moltiplicazione di neutroni (Pb e Be) per aumentare l'efficienza risultante del processo di generazione di trizio e i neutroni generati nella reazione di fusione. Quindi, generando il trizio come prodotto di reazioni nucleari del litio, il reattore raggiunge a regime l'autosufficienza in trizio con un ciclo interno. Per questo motivo la sostenibilità in termini di risorse della fusione nucleare come fonte di energia è valutata considerando litio e deuterio come combustibile.

Il fabbisogno annuale di combustibile di un reattore a fusione in grado di produrre 1GWe (assumendo un'efficienza di conversione termica di circa il 33%) dipende da vari fattori tuttora soggetti a forte incertezza, quali: il concetto di mantello triziogeno considerato (ad esempio nel disegno concettuale del DEMO europeo la lega eutettica di LiPb, ovvero ortosilicati di litio Li₄SiO₄ e Berillio), la relativa percentuale in ⁶Li (40%-90%), l'assorbimento neutronico da parte dei materiali nella camera di reazione ed il TBR (*tritium breeding ratio*) risultante (obiettivo attuale intorno a 1.1 per compensare le perdite). In prima approssimazione si stimano necessari meno di 100 kg di Deuterio e 300 kg - 500 kg di Litio. Considerando il fattore di arricchimento, l'efficienza di reazione del litio (variabile a seconda del concetto di mantello) e la necessità di sostituzione ogni 5 anni del mantello durante la vita dell'impianto (circa 40 anni), si sale a qualche decina di tonnellate medie annue di litio naturale. L'attuale stima di risorse naturali di litio pari a circa 80 × 10⁶ tonnellate [41], garantisce la sostenibilità di approvvigionamento di litio per uso fusionistico [42]. Alcune potenziali criticità nel lungo termine potrebbero emergere dall'uso concorrente di litio (batterie) laddove restasse un elemento centrale anche per quelle tecnologie.

La valutazione dell'impatto del reattore a fusione nucleare in termini di sicurezza della popolazione e dell'ambiente è storicamente stata improntata a linee guida, quadro normativo e metodologico definito per i reattori nucleari a fissione. Le analisi di sicurezza si focalizzano quindi sulla gestione e confinamento degli inventari radioattivi al fine di quantificare i limiti

massimi in termini di rilascio e determinarne l'accettabilità in termini di dose da esposizione a radiazioni degli operatori e della popolazione in ogni possibile condizione operativa e incidentale prevista durante l'intero ciclo di vita dell'impianto, incluso il suo decommissioning e smaltimento dei rifiuti radioattivi.

Per quanto concerne le emissioni durante l'operazione dell'impianto abbiamo già ribadito che essa non implica rilasci di CO₂ o altri gas serra ed emissioni possibilmente risultanti in piogge acide. Alcune emissioni serra, come per molti impianti, sono previste in fase di costruzione e considerate come esternalità del sistema.

Il potenziale rilascio di materiale radioattivo (in forma liquida o gassosa) in normale operazione e manutenzione è stato stimato negli studi [38] avere un impatto di massima dose al pubblico di circa 1 μ Sv/anno (inferiore alla dose corrispondente ad una radiografia a un arto). Queste stime sebbene soggette a revisione in linea con il dettaglio del progetto e la verifica di ulteriori possibili percorsi di rilascio [43], hanno ampi margini di sicurezza in relazione ai limiti nazionali (1 mSv/anno al pubblico).

I rilasci in caso di incidente dipendono dagli inventari radioattivi presenti nell'impianto e dalle modalità di loro mobilitazione ad esempio in conseguenza della rottura di strutture di contenimento. I principali inventari radioattivi mobilizzabili sono costituiti da trizio, prodotti di corrosione attivati derivanti dai circuiti di raffreddamento (ad acqua o LiPb in alcuni concetti) e polveri attivate derivanti da disruzioni del plasma e fenomeni di erosione/sputtering sulle strutture che si affacciano alla camera di reazione. Per studiarne la mobilitazione occorre considerare tutte le possibili modalità di perdita del confinamento dovuta ad eventi catastrofici esterni (sisma, etc.) o interni, ad esempio causati dall'effetto sulle strutture delle varie forme di energia associata a componenti dell'impianto (al plasma, ai magneti, etc.) attraverso vari fenomeni (es. disruzioni).

Esiste però una importante differenza fra un impianto nucleare a fusione ed uno a fissione legata alla modalità intrinseca di evoluzione della reazione in situazioni incidentali. Infatti, la reazione di fusione richiede precise condizioni fisiche per il plasma nella camera di reazione che

vengono mantenute in un ristretto dominio operativo grazie a un complesso insieme di sistemi attivi (atti al confinamento magnetico, al pompaggio delle impurezze e gestione del vuoto in camera di reazione, al riscaldamento del plasma, ecc.) al venir meno dei quali essa si esaurisce in pochi ms-s. La reazione di fusione nucleare non può quindi intrinsecamente dare luogo a deriva incontrollata e ciò caratterizza l'impianto con un elemento di sicurezza passiva, cioè basata su evoluzione naturale dei processi e non legata all'intervento di sistemi attivi.

Anche l'innalzamento di temperatura delle strutture di contenimento della camera di reazione dovuto al calore di decadimento (decay heat) è minore e più lento (10 W/kg dopo un giorno) [43] che nella fissione e può potenzialmente essere gestito senza l'immediato intervento di sistemi attivi per evitare di compromettere la struttura di contenimento.

Una estensiva e dettagliata serie di analisi incidentali effettuata per i PPCS [38] hanno dimostrato che la massima dose al pubblico derivante dall'occorrenza postulata delle più severe combinazioni di eventi incidentali concepibili risulterebbe comunque sotto il valore raccomandato per l'evacuazione della popolazione.

Consideriamo infine l'impatto ambientale di lungo termine a seguito del *decommissioning* dell'impianto. A differenza degli impianti a fissione attuali, la reazione di fusione DT non dà luogo intrinsecamente a produzione di elementi radioattivi, in particolare risultano assenti elementi transuranici (ad eccezione di minime quantità derivanti dalle impurezze nei materiali, es. berillio). Il flusso neutronico emergente dal plasma dà però luogo all'attivazione dei materiali di prima parete. Inoltre, viste la quantità e l'alta energia dei neutroni prodotti, sommata ad altri carichi di radiazione e particelle emergenti dal plasma, le grandi strutture che circondano il plasma hanno una breve vita qualificata e richiedono diverse sostituzioni nel corso della vita dell'impianto. Ciò implica potenzialmente grossi volumi di materiali contenenti radionuclidi di cui operare eventualmente lo smaltimento finale. La ricerca è quindi focalizzata sullo sviluppo di opportuni materiali per le strutture della camera di reazione, come gli acciai RAMS (*Reduced-activation martensitic steels*) che oltre ad offrire caratteristiche funzio-

nali di resistenza ai carichi fusionistici rispettino anche stringenti limiti per alcune impurezze (es. Nb, Mo, Ni). Alcuni radionuclidi a lunga emivita (es. ^{94}Nb , ^{14}C) potrebbero infatti contribuire a innalzare la classificazione da *Low Level Waste* (LLW) a *Intermediate Level Waste* (ILW) di ingenti quantità di materiali [51] secondo i criteri di riferimento esistenti per i depositi di smaltimenti dei rifiuti radioattivi provenienti dalla produzione di energia da fissione nucleare.

La contaminazione delle strutture con trizio derivante dalle sue proprietà di permeazione e diffusione nei materiali è un'altra caratteristica del reattore a fusione e sebbene non comporti alcun problema nel lungo periodo (>100 anni) pone dei problemi di accettabilità da parte dei depositi di smaltimento orientando le strategie di gestione verso la massimizzazione del recupero (con benefici anche in termini economici) per riutilizzarlo nel ciclo del combustibile o lo stoccaggio on-site per 50-100 anni [50].

La fusione ha quindi la potenzialità di non lasciare rifiuti radioattivi a lungo-termine (>100 di anni) per le future generazioni e non richiederà il loro stoccaggio in depositi geologici profondi, ma la ricerca in corso sui materiali a bassa attivazione (per eliminare le impurezze non funzionali) e lo sviluppo di procedure di trattamento per il riciclaggio ed il riutilizzo dei materiali funzionali restano fondamentali in prospettiva del reattore a fusione.

Come ultimo aspetto rilevante in termini di accettabilità sociale è infine opportuno menzionare l'assenza di materiali soggetti a trattato di non proliferazione in un reattore a fusione che possano portare allo sviluppo di armi nucleari secondo le attuali conoscenze.

Possibile contributo alla produzione di energia *carbon-free* in scenari di lungo periodo

Abbiamo finora dato una breve panoramica delle caratteristiche della fusione in prospettiva di impatto ambientale. Ci si può ora interrogare su quali condizioni di contesto socio-economico e proprie della tecnologia ne favoriscano o meno la diffusione effettiva nel sistema energetico. Il programma di ricerca EUROfusion prevede una attività di ricerca socio-economica appunto finaliz-

zata ad investigare il possibile ruolo della fusione come tecnologia generatrice di energia elettrica nel futuro sistema energetico globale. Con questo scopo è stato sviluppato a partire dal 2004 e sulla base del generatore di modelli TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) [44], l'EUROfusion TIMES Model (ETM) [45, 46], che integra la fusione fra le tecnologie generatrici di energia elettrica (vedi riquadro **Modello Tecnologia Fusione**).

In accordo con il TIMES Framework, il sistema energetico è modellizzato in termini di una serie di tecnologie agenti in vari settori (industria, agricoltura, residenziale, etc.) e *commodities* (materie prime, servizi energetici, emissioni) legati da una complessa catena di produzione e consumo. Caratterizzate le tecnologie, le *commodities* e relative interrelazioni (anche in modo regionalmente differenziato (EUROPA, AFRICA etc.), il modello fornisce proiezioni dell'evoluzione del sistema globale sull'orizzonte temporale considerato, in termini di una configurazione di equilibrio del sistema energetico tale da massimizzare il surplus economico netto risultante.

L'orizzonte temporale considerato per tale evoluzione parte dalla decade di iniziale disponibilità commerciale della tecnologia (2050) e procede fino al 2100. Su orizzonti così lunghi l'evoluzione di un sistema energetico può essere fortemente influenzata da svariati fattori socio-economici di contesto (accettazione pubblica di una data tecnologia, responsabilità ambientale, quadro normativo, ecc.) che implicino dei vincoli ad esempio sulle emissioni e/o fattori agenti sull'evoluzione della domanda di energia in relazione a *driver* quali la crescita della popolazione o del prodotto interno lordo globale.

Per esplorare l'impatto sull'evoluzione del sistema energetico di questi fattori si è quindi affermato l'uso delle analisi di scenario, ovvero possibili evoluzioni alternative del sistema energetico risultanti da un insieme di ipotesi internamente coerenti riguardanti le variabili principali e loro relazioni storicamente osservate. L'approccio ETM è stato quello di esplorare lo spazio delle possibili condizioni future socio-economiche di contesto, definendo una matrice di scenari originata da diverse *storylines* (descrizioni di futuri possibili) caratterizzati da differenti ipotesi circa l'evoluzione della domanda di energia, il livello

Modello Tecnologia Fusione

Caratterizzazione dei costi del reattore di Fusione nel modello ETM [45, 46]. I costi dell'impianto, in parte corrispondente ai modelli di reattore PPCS AB [38], calano nel tempo evolvendo da un reattore base ad uno avanzato in ragione di una curva di apprendimento tecnologica. I *Fixed Operating and Maintenance cost* (FIXOM), includono anche i costi di *decommissioning*, mentre i *Variable Operating and Maintenance cost* (VAROM), includono i costi di smaltimento dei rifiuti. I costi esterni per la generazione di elettricità, relativamente bassi per la fusione e comparabili con le rinnovabili, quantificano e inglobano nel modello di costo anche fattori quali ad esempio l'impatto ambientale delle minime emissioni in operazione (Trizio), o le emissioni dei trasporti per la costruzione dell'impianto, o degli effetti di lunghissimo termine dei radionuclidi smaltiti (^{14}C , ^{94}Nb) [48].

	Basic dal 2050 (dopo il 2060)	Advanced dal 2070 (dopo il 2080)
Specific Capital (\$ ₂₀₀₅ /kW)	5910 (4425)	4220 (3255)
FIXOM (M\$ ₂₀₀₅ /GWa) (M\$ ₂₀₀₅ /PJ)	65.8 2.16 (1.64)	65.3 2.14 (1.64)
Costi esterni (euro-cents/kWh) EUROcent2017/kWh	0.11	0.09
Efficienza	42	60
Combustibile	Litio arricchito al 90% 0,0045 M\$/PJ	

di responsabilità ambientale, la stringenza degli obiettivi di riduzione delle emissioni serra (in linea con diversi RCP) o la propensione ad accettare ritorni di investimento sul breve o lungo periodo (*hurdle rates*).

È bene ribadire che, basandosi sulla consistenza delle relazioni interne al modello del sistema energetico definite in accordo con la conoscenza attuale, questi strumenti sono utili a migliorare la comprensione dei fattori più rilevanti per l'ingresso della fusione nel *mix* di tecnologie di generazione elettrica, ma non forniscono previsioni validabili in termini assoluti. Ciò premesso, in figura 16 è mostrata la risultante quota di generazione elettrica per gruppi di tecnologie, in due scenari rappresentativi. La fusione acquisisce una quota più significativa della generazione elettrica in scenari caratterizzati da vincoli ambientali più stringenti (RCP2.6) che spingano

verso una forte elettrificazione del sistema. Il relativamente alto costo di investimento iniziale della fusione richiede anche un contesto economico che favorisca l'attitudine all'investimento con ritorno a lungo periodo. Analisi parametriche [49] attuate variando rispetto allo scenario base Harmony- RCP2.6, i costi della fusione (+30%) o includendo nel modello i costi relativi alle esternalità per le varie tecnologie, hanno infatti evidenziato la rilevanza di questi fattori che portano ad una minor quota di generazione elettrica da fusione risultante al 2100 del -31% e -22% rispettivamente. Scenari in cui si esclude la fusione dal sistema energetico e/o si riduce la capacità installabile di impianti a fissione vedono le quote delle rinnovabili intermittenti raggiungere valori fino al 60% del *mix*, rendendo più complessa la gestione della rete. La fusione, anche in chiave di graduale sostituzione della fissione, po-

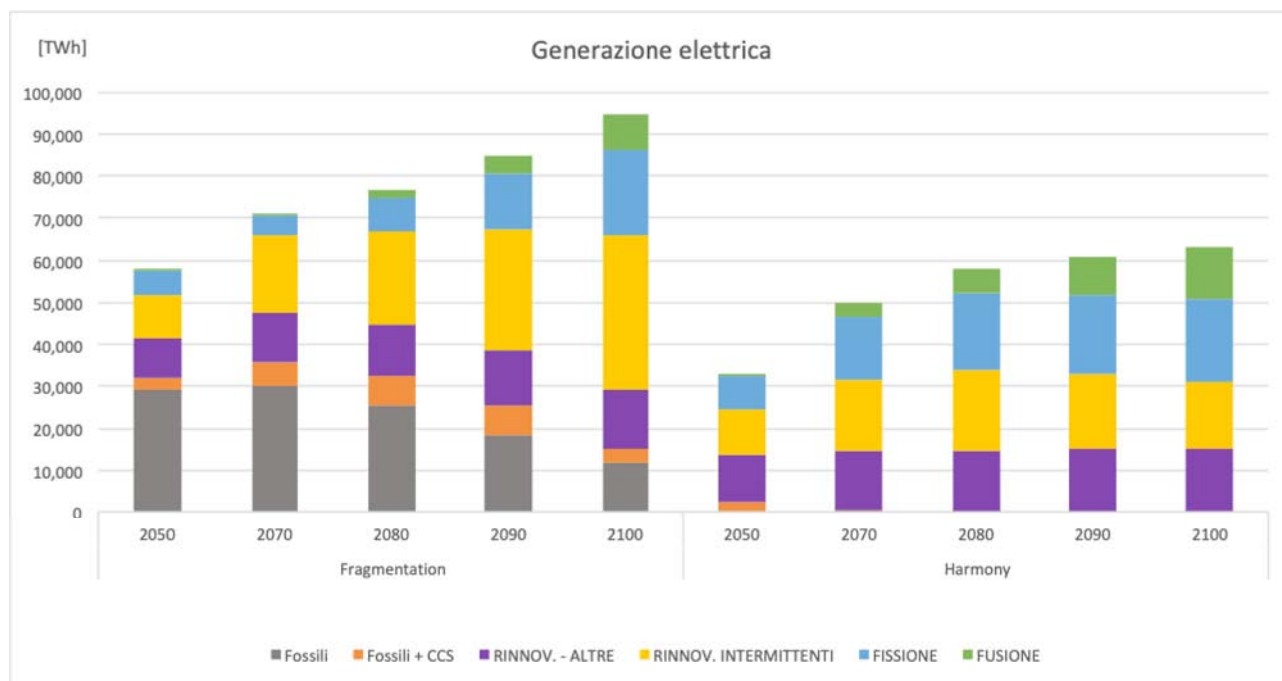


Figura 16: Generazione elettrica nel sistema energetico in due scenari relativi a contesti socio-economici molto diversi. La famiglia di scenari “Fragmentation” è caratterizzata da scarsa responsabilità ambientale, obiettivi meno stringenti di emissioni (RCP6) e con scarsa cooperazione fra le regioni in termini di possibile compensazione delle quote di emissione, un’ottica di breve periodo negli investimenti. La “Harmony” è invece caratterizzata da un contesto di forte responsabilità ambientale, stringenti vincoli alle emissioni RCP2.6 con cooperazione fra le varie regioni e disponibilità all’investimento con un’ottica di lungo termine. Ref. [49], EUROFUSION <https://collaborators.euro-fusion.org/collaborators/socio-economics/>.

trebbe quindi utile contribuire a ridurre le quote di generazione da fonti non programmabili attenuando l’impatto di queste problematiche di gestione.

Uno sguardo al futuro

Con l’Europa che si è prefissata l’obiettivo di diventare entro il 2050 un’economia a zero emissioni nette nell’ambiente (rilevanti per l’effetto serra), è naturale chiedersi quale possa essere il ruolo dell’energia da fusione termonucleare controllata nel prossimo futuro. L’ambizioso obiettivo dell’impatto ambientale netto zero passa per la progressiva sostituzione con fonti rinnovabili a basso impatto ambientale, e quindi sostenibili, delle fonti di energia basate sull’utilizzo dei combustibili fossili. Ma chiaramente l’energia da fusione non sarà pronta per l’utilizzo su larga scala in tempo utile per contribuire a questa transizione virtuosa. Il ruolo dell’energia da fusione è semmai quello di fornire un’opzione ulteriore in uno scenario futuro in cui la domanda complessiva di energia andrà aumentando,

divenendo accessibile a una frazione crescente della popolazione mondiale con un tenore di vita ecosostenibile sempre migliore. A seconda degli scenari possibili e dell’importanza relativa dell’energia da fusione, di cui si è parlato ampiamente in precedenza, potranno cambiare le nostre abitudini di vita e la geografia delle aree regionali di influenza nel mondo globalizzato della seconda parte del XXI secolo. In questo senso, lo sviluppo e l’utilizzo dell’energia da fusione potrà avere un importante impatto politico, oltre che socio-economico e ambientale di cui abbiamo detto.

L’energia da fusione si pone inoltre come elemento importante nella spinta verso lo sviluppo di nuove tecnologie. Dei superconduttori ad alta temperatura e dei nuovi materiali si è parlato in breve per il ruolo che avranno in prospettiva di ITER e DEMO e perché sono aspetti importanti del programma di ricerca Italiano sulla fusione con l’esperimento DTT in costruzione a Frascati, a sessant’anni dalla prima Associazione dei Laboratori di Frascati con l’EURATOM. Al di là dell’impatto diretto che queste nuove tecnologie

avranno sullo sviluppo e l'utilizzo dell'energia da fusione, non è facilmente prevedibile come esse potranno cambiare la nostra vita di ogni giorno. Sappiamo però che queste nuove tecnologie hanno già ora importanza nella ricerca di frontiera nei settori più avanzati della scienza: si pensi all'utilizzo dei magneti superconduttori nell'esperimento LHC al CERN e all'utilizzo di nuovi materiali nell'industria aerospaziale.

Un ultimo importante aspetto da ricordare è che la fusione termonucleare controllata, nata come costola dall'astronomia e dall'astrofisica grazie al lavoro di pionieri come Lyman Spitzer e Yakov Zel'dovich, affonda le sue radici nella fisica del plasma. In quanto tale conserva una componente importante di ricerca che non solo permetterà in futuro di sviluppare approcci sempre più efficienti e ecosostenibili, ma anche concetti innovativi di reattori a fusione. Spingendosi più in là, i ricercatori di tutto il mondo stanno già pensando alle nuove sfide che una sorgente praticamente illimitata di energia potrebbe rendere accessibili. Si pensi, ad esempio, alla propulsione a plasma che potrebbe essere una soluzione per la missione umana su Marte.



- [1] M. R. Turetsky *et al.*: Permafrost collapse is accelerating carbon release , *Nature* **569** (2019) 32.
- [2] <https://www.euro-fusion.org>
- [3] https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/nucleare/50anni-fusione-pdf
- [4] <https://www.iter.org/org/team/fst/itpa>
- [5] <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/Fusion%20Portal.aspx>
- [6] M. Zuin *et al.*: Overview of the RFX-mod fusion science activity , *Nuclear Fusion* **57** (2017) 102012.
- [7] U. Ascoli-Bartoli *et al.*, "Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research" (Proc. 7th Int. Conf Innsbruck, 1978) Vol. 1, IAEA, Vienna (1979) 149.
- [8] F. Alladio *et al.*, "Heating experiments on FT tokamak in the Lower Hybrid frequency range", in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1990 (Proc. 13th Int. Conf. Washington, DC, 1990), Vol. 1, IAEA, Vienna (1991) 153.
- [9] F. Alladio *et al.*: Energy confinement at high density in the FT tokamak , *Nucl. Fusion* **22** (1982) 479.
F. Alladio *et al.* "Density limit for lower hybrid wave-electron interaction and minority hydrogen absorption in FT" *Nucl. Fusion* **24** (1984) 725.
- [10] F. Alladio *et al.*: Energy confinement and plasma heating during lower hybrid experiments , *Plasma Physics and Controlled Fusion* **26** (1984) 157.
- [11] A. A. Tuccillo *et al.*, "Current drive at plasma densities required for thermonuclear reactors", Proceedings of the International Workshop on Strong Microwaves in Plasmas, Nizhny Novgorod, Russia, August 15-22 1993, V.1, pag. 47 (1994).
- [12] V. Pericoli-Ridolfini *et al.* : High Plasma Density Lower-Hybrid Current Drive in the FTU Tokamak , *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 93.
- [13] R. Cesario *et al.* "Current drive at plasma densities required for thermonuclear reactors" *Nature Comm.* (2010), DOI: 10.1038/ncomms1052, <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms1052>
- [14] S. Cirant *et al.* : High power heating and current drive experiments with EC waves in FTU tokamak , *AIP Conference Proceedings* **485** (1999) 221. <https://doi.org/10.1063/1.59734>
- [15] P. Buratti *et al.* : High core electron confinement regimes in FTU plasmas with low-or reversed-magnetic shear and high power density electron-cyclotron-resonance heating , *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 560.
- [16] J.R. Martín-Solís *et al.*: Comparison of runaway dynamics in LH and ECRH heated discharges in the Frascati Tokamak Upgrade , *Nucl. Fusion* **45** (2005) 1524.
- [17] D. Frigione *et al.* : High density operation on frascati tokamak upgrade , *Nucl. Fusion* **36** (1996) 1489.
D. Frigione *et al.* "Steady improved confinement in FTU high field plasmas sustained by deep pellet injection" *Nucl. Fusion* **41** (2001) 1613.
- [18] B. Esposito *et al.* : Runaway electron generation and control , *Plasma Physics and Controlled Fusion* **61** (2019) 014044.
- [19] D. Carnevale *et al.* : Runaway electron beam control , *Plasma Physics and Controlled Fusion* **61** (2019) 014036.
- [20] F. Alladio *et al.*: Design of the PROTO-SPHERA experiment and of its first step (MULTI-PINCH) , *Nucl. Fusion* **46** (2006) S613.
- [21] P. Micozzi *et al.* : Ideal MHD stability limits of the PROTO-SPHERA configuration , *Nucl. Fusion* **50** (2010) 1.
- [22] A. Caruso, "Inertial confinement physics and technology group progress report" (1994 1995), ENEA, RT/ERG/FUS/96/18. (1996) http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/067/29067556.pdf
- [23] H. Alfvén: Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves , *Nature* **150** (1942) 405.
- [24] G. Vlad, F. Zonca and S. Briguglio: Dynamics of Alfvén waves in tokamaks , *Riv. Nuovo Cimento* **22** (1999) 1.
- [25] L. Chen and F. Zonca: Physics of Alfvén waves and energetic particles in burning plasmas , *Rev. Mod. Phys.* **88** (2016) 015008.

- [26] L. Chen and F. Zonca: Theory of Alfvén waves and energetic particle physics in burning plasmas , *Nucl. Fusion* **47** (2007) S727.
- [27] F. Zonca *et al.* : Energetic particles and multi-scale dynamics in fusion plasmas , *Plasma Physics and Controlled Fusion* **57** (2015) 014024.
- [28] G. Vlad *et al.* : Consistency of proposed burning plasma scenarios with alpha-particle transport induced by Alfvénic instabilities , *Plasma Physics and Controlled Fusion* **46** (2004) S81.
- [29] DTT Divertor Tokamak Test facility Interim Design report, https://www.dtt-project.enea.it/downloads/DTT_IDR_2019_WEB.pdf
- [30] <http://www.jt60sa.org/>
- [31] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf
- [32] <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>
- [33] L. Cozzi, T. Gould, "What would it take to limit the global temperature rise to 1.5°C?" (2019) <https://www.iea.org/commentaries/what-would-it-take-to-limit-the-global-temperature-rise-to-15c>
- [34] R. Moss *et al.*: The next generation of scenarios for climate change research and assessment , *Nature* **463** (2010) 747.
- [35] Global Energy & CO2 Status Report 2019 , IEA, Paris (2019) <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>
- [36] "Safety and Environmental Assessment of Fusion Power" EUROPEAN COMMISSION Directorate General XII Fusion Programme Brussels, EURFUBRU XII-217/95 Ed.: Jurgen Raeder *et al.*
- [37] G. Borrelli *et al.* "Socio-Economic Research on Fusion Summary of EU Research" 1997 2000. EFDA RE RE 1, July 20, 2001.
- [38] D. Maisonnier *et al.*: Power plant conceptual studies in Europe , *Nucl. Fusion* **47** (2007) 1524.
- [39] G. Federici *et al.*: European DEMO design strategy and consequences for materials , *Nucl. Fusion* **57** (2017) 092002.
- [40] M. Kovari, M. Coleman, I. Cristescu, R. Smith: Tritium resources available for fusion reactors , *Nucl. Fusion* **58** (2018) 026010.
- [41] U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey "Mineral commodity summaries 2020" <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>
- [42] A. M. Bradshaw, T. Hamacher, U. Fischer: Is nuclear fusion a sustainable energy form? , *Fusion Engineering and Design* **86** (2011) 2770.
- [43] N. Taylor, P. Cortes: Lessons learnt from ITER safety & licensing for DEMO and future nuclear fusion facilities , *Fusion Engineering and Design* **89** (2014) 1995.
- [44] <http://www.iea-etsap.org/web/Documentation.asp>
- [45] H. Cabal *et al.*: Fusion power in a future low carbon global electricity system , *Energy Strategy Reviews* **15** (2017) 1.
- [46] W.E. Han, D. J. Ward: Revised assessments of the economics of fusion power , *Fusion Engineering & Design* **84** (2009) 895.
- [47] D. J. Ward, I. Cook, Y. Lechon, R. Saez: The economic viability of fusion power , *Fusion Engineering & Design* **75-79** (2005) 1221.
- [48] T. Hamacher *et al.*: A comprehensive evaluation of the environmental external costs of a fusion power plant , *Fusion Engineering & Design* **56 57** (2001) 95.
- [49] F. Gracceva *et al.* : Il ruolo della fusione negli scenari di lungo periodo , *Energia, ambiente e innovazione* **2** (2019) 67. DOI 10.12910/EAI2019_016
- [50] Di Pace *et al.* *Radioactive Waste Management of Fusion Power Plants*, IntechOpen, Chapter 14 in *Radioactive Waste*, ed. R. A. Rahman, London (2012).
- [51] M. R. Gilbert *et al.* : Waste implications from minor impurities in European DEMO materials , *Nucl. Fusion* **59** (2019) 076015.

Daniilo Dongiovanni: dopo la laurea in Fisica nel 2001 presso l'Università di Bologna, si è specializzato nello sviluppo di modelli di *machine learning* e *pattern recognition* in applicazioni di *imaging* medico. Ha lavorato presso l'INFN in progetti di calcolo distribuito per la fisica delle alte energie. Dal 2012 è ricercatore presso il gruppo di sicurezza nucleare del dipartimento fusione nucleare del centro di ricerca ENEA di Frascati dove si occupa di analisi di sicurezza e affidabilità dei sistemi per impianti di ricerca in fusione nucleare quali ITER e DEMO europeo. Collabora dal 2014 al progetto *Socio Economic Studies* del consorzio europeo EUROfusion.

Lori Gabellieri: si laurea in Fisica presso l'Università degli Studi di Padova nel 1985. Dal 1987 fino ad oggi è ricercatore nel gruppo Fisica della Fusione a Confinamento Magnetico nel Centro ENEA di Frascati ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile. Si è interessato principalmente allo studio della radiazione emessa dal plasma nell'intervallo VUV SXR e Hard X, avendo cura dell'aspetto sperimentale di progettazione e funzionamento delle diagnostiche, di quello che concerne lo sfruttamento scientifico dei risultati prodotti nel corso dei programmi scientifici e dello sviluppo nuove diagnostiche in

questo settore. Dal 2016 ha coordinato i sistemi di misura diagnostici sull'impianto FTU Tokamak. Dal 1 gennaio 2020 ha una assegnazione al consorzio DTT S.c.a r.l. nata per la realizzazione e gestione della facility Divertor Tokamak Test. In quest'ambito collabora al coordinamento dei sistemi di misura diagnostica del Tokamak e alla cura degli aspetti di comunicazione e di pubbliche relazioni del progetto.

Piero Martin: Piero Martin è un fisico sperimentale che insegna, ricerca e racconta. Insegna all'Università di Padova e svolge la sua attività di ricerca sulla fusione termonucleare controllata. *Fellow dell'American Physical Society* e autore di 130 pubblicazioni in riviste scientifiche internazionali, è stato responsabile scientifico di grandi imprese di ricerca, come l'esperimento RFX a Padova e la Task Force Europea *Eurofusion Medium Size Tokamak*. Dal 2017 è membro dell'*executive board* di DTT, il nuovo esperimento di fusione italiano.

Angelo Antonio Tuccillo: si laurea in Fisica con lode presso l'Università di Roma Sapienza nel settembre 1978. Da luglio 1981 a dicembre 2019 ha fatto parte del gruppo di ricerca sulla fusione dell'ENEA di Frascati come esperto di diagnostica e di riscaldamento addizionale dei plasmi. È stato direttore del Comitato Europeo per la Lower Hybrid (CCLH 1999–2005) e ha diretto le Task Force Europee per i riscaldamenti addizionali (TFH, 2000–02) e per gli scenari avanzati del JET (TFS2, 2002–4). Dal 2004 al 2017 è stato membro EU dell'*Integrated Operation Scenario* dell'*International Tokamak Programme Activity*. Ha diretto il gruppo di Fisica del Plasma di Frascati dal 2010 al 2019. Dal 2015 è membro del *Fusion Programme Consulting Committee* della IEA e dal 2017 dello *Scientific and Technological Advisory Committee* del programma fusione Europeo. Dal pensionamento, avvenuto a gennaio 2020, è collaboratore del Progetto DTT.

Gregorio Vlad: ha conseguito la laurea in Fisica (1981) e il titolo di Dottore di Ricerca in Fisica (1987) presso l'Università Sapienza di Roma. Dal 1984 lavora presso i Laboratori ENEA di Frascati, nella Divisione di Fisica della fusione a confinamento magnetico. È stato ospite come *visiting physicist* presso diverse istituzioni

(MIT (USA), JET Culham (UK), Chalmers University (Sweden), CRPP-EPFL (CH), Max-Planck-Institute für Plasmaphysik, Garching (Germany), e altre). La sua attività include la teoria e la simulazione numerica nel campo della stabilità magnetoidrodinamica (MHD), dei modi di Alfvén in presenza di particelle energetiche, del trasporto dell'energia in plasmi di interesse termonucleare. Dal 2015 è responsabile del Laboratorio di Teoria, Simulazione e Modelling della Divisione di Fisica nel Dipartimento FSN dell'ENEA. È autore di più di 160 articoli su riviste internazionali e a conferenze con referee.

Fulvio Zonca: ha conseguito il Ph.D. in Astrophysical Sciences presso la Princeton University nel 1993. È Dirigente di Ricerca presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati dove lavora dal 1988, e Professore Aggiunto dal 2009 presso l'Institute for Fusion Theory and Simulation, Zhejiang University, Hangzhou, in Cina, presso la quale è Qìushì Chair Professor dal 2020. È *Principal Investigator* del progetto *Multi-scale Energetic particle Transport in fusion devices*, un progetto *Enabling Research* per l'implementazione della *fusion roadmap* del Consorzio Eurofusion. È autore di più di 160 articoli su riviste internazionali, tra cui *Physics of Alfvén waves and energetic particles in burning plasmas* (Review of Modern Physics 88, 015008, 2016) col Prof. Liu Chen.

Dai pattern ai frattali, passando per il caos

*Vedere un mondo in un granello di sabbia e un paradiso in
una fiore selvatico, tenere l'infinito nel palmo della mano e
l'eternità in un'ora*

William Blake

Deborah Lacitignola

*Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione,
Università di Cassino e del Lazio Meridionale*

In questo articolo, come nella vita, **Matematica e Natura sono compagne di viaggio. A prima vista questo binomio può apparire forse alquanto stravagante e, su questo, sarebbe senz'altro d'accordo William Shakespeare che così faceva parlare il suo Hamlet: "Ci sono più cose in cielo e in terra, Orazio, di quante ne sogni la tua filosofia."**

E come dargli torto? perché, quando si pensa alla Natura, si pensa a qualcosa di così straordinariamente complesso, così sorprendente nell'estrema varietà delle sue forme ed altrettanto esuberante nelle sue imprevedibili manifestazioni, da non poter essere ridotto a semplice prodotto del pensiero umano, catturato da una formula o codificato da un teorema. Ed è invece questo che rievoca la Matematica: un mondo astratto, accessibile a pochi, distante anni luce da quello naturale; un mondo fatto di numeri, formule, teoremi e dimostrazioni. Ma Matematica e Natura, sono davvero due realtà inconciliabili?

Nel 1623 Galileo Galilei aprì la strada ad un so-

gno delineando, nel *Il Saggiatore* i primi tratti di una unione destinata a durare a lungo.

"la filosofia naturale è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi, io dico l'universo, ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua e conoscer i caratteri nei quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto. ([1], VI, 232)"

Ispirati dalle sue parole e dalle sue scoperte, generazioni di scienziati hanno portato avanti il sogno di decifrare questo misterioso *libro della natura*. E, sebbene Charles Darwin abbia elaborato la sua grande teoria dell'evoluzione e dell'origine delle specie senza fare uso di una sola formula matematica, nel XX secolo la matematica, ispirata dalla biologia, diviene uno strumento incredibilmente versatile per decifrare il misterioso mondo della natura.

Se è vero infatti che la natura, con la sua enorme varietà di forme e di strutture, è da sempre stata la musa ispiratrice di una moltitudine di scrittori, poeti e pittori, è altrettanto vero che questa grande varietà di forme e di strutture ha egualmente sorpreso, intrigato ed appassionato un gran numero di matematici, volti a scoprire delle regolarità nella grande diversità delle strutture naturali, in modo da poterne decifrare i misteri.

Patterns everywhere

In questo ambito si colloca, a metà del XX secolo, la teoria della *pattern formation*, nata con lo scopo di spiegare i meccanismi alla base della formazione di strutture del mondo naturale, dalla livrea dei pesci alle dune di sabbia del deserto. Questi scenari, sebbene appartenenti a mondi completamente diversi, possono essere spiegati all'interno di un framework matematico comune, che ha come precursore Alan Turing.

Alan Turing, brillante genio matematico, è noto ai più come padre della *computer science* e come colui che riuscì nell'intento di decrittare i codici segreti nazisti, codificati con la macchina denominata *Enigma*. In tal modo compì quell'importante impresa che Winston Churchill definì "*the secret weapon that won the war*". Alan Turing fu anche il fautore di una teoria matematica affascinante e rivoluzionaria in grado di spiegare i meccanismi alla base del ripetersi di una moltitudine di strutture, i *pattern*, ossia forme che ricorrono quasi magicamente nel mondo intorno a noi: dall'organizzazione sferica delle cellule in un embrione alla disposizione a spirale dei petali su un fiore, dalle onde sulle dune di sabbia del deserto alle macchie del leopardo o alle strisce delle zebre.

L'idea di Turing, ispirata anche dall'affascinante opera di Sir D'Arcy Wentworth Thompson [2], era che ci dovesse essere qualche principio matematico in grado di spiegare la formazione delle innumerevoli strutture che ricorrono nel mondo naturale. Così nel 1952 pubblicò l'articolo *The chemical basis of morphogenesis* [3], destinato a diventare una pietra miliare nel campo della *pattern formation*. Turing dimostrò come la diversità dei *pattern* che osserviamo in natura possa essere spiegata mediante una tipologia di modelli matematici, detti di reazione diffusione, e attra-

verso un meccanismo oggi noto come instabilità di Turing.

Grazie alla teoria di Turing sulla *pattern formation*, la domanda "perché il leopardo ha le sue macchie?" non è stata più appannaggio esclusivo di biologi o scrittori. Nel 1907, lo scrittore Rudyard Kipling aveva dato a questa domanda una suggestiva risposta nel racconto *How the Leopard Got His Spots*, pubblicato nella raccolta *Just so stories* [4], in cui racconta come gli animali siano venuti in possesso dei tratti che li caratterizzano per mezzo di divertenti e fantasiose spiegazioni. Rudyard Kipling immaginò che le caratteristiche macchie a forma di rosetta del leopardo fossero da attribuire al trasloco del leopardo in una "grande e fitta foresta, i cui alberi erano tutti immersi in strane ombre a chiazze, a pallini, a spruzzi, a strisce, a righe e a diagonali" e ad un etiope che glielo dipinse per farlo mimetizzare meglio tra le chiazze d'ombra della vegetazione.

Circa 80 anni dopo, grazie al meccanismo di instabilità di Turing, anche il matematico fu in grado di dire la sua. Così, nel 1988, James D. Murray, uno dei pionieri delle applicazioni della matematica in campo biologico, pubblicò sulla rivista *Scientific American* l'articolo *How the Leopard Gets Its Spots* [5] il cui titolo richiamava quello del racconto di Kipling. Murray, utilizzando la classe di modelli di tipo reazione-diffusione e sfruttando il meccanismo di instabilità di Turing, mostrò come fosse possibile riprodurre, al variare di certi parametri di controllo, le diverse tipologie di macchie presenti sulla pelliccia dei grandi felini, leopardi inclusi.

Il meccanismo di instabilità di Turing è oggi universalmente riconosciuto come uno dei principali meccanismi responsabili dell'insorgere di fenomeni di auto-organizzazione spaziale [6, 7]. A partire dal famoso articolo di Murray, tale principio matematico si è infatti affermato come valido *trait d'union* tra il mondo matematico ed il mondo naturale, alimentando così un gran numero di fruttuose e stimolanti ricerche in ambito biomatematico.

Qualcosa di altrettanto sorprendente accadde, sempre a partire dalla seconda metà del '900, quando nel mondo scientifico si fece strada l'esperienza frattale [8].

L'anima frattale della Natura

"La geometria frattale cambierà a fondo la vostra visione delle cose. Continuare a leggere è pericoloso. Si rischia di smarrire definitivamente l'immagine inoffensiva che si ha di nuvole, boschi, galassie, foglie, piume, fiori, rocce, montagne e di molte altre cose. Mai più tornerete a recuperare le interpretazioni di tutti i questi oggetti che finora vi erano familiari." (Micheal Barnsley [9]).

Con questo avvertimento Micheal Barnsley apre il suo libro *Fractals Everywhere* [9], mettendo in guardia il lettore sul fatto che il viaggio tra i frattali è un viaggio senza ritorno.

Sfidando il monito di Barnsley, il nostro viaggio tra i frattali inizia proprio immaginando un paesaggio: un bosco verde che rinfresca l'ambiente, una catena di montagne dalle forme frastagliate che si staglia all'orizzonte, un lago increspato da una brezza leggera e nubi bianche che adornano il cielo. Difficilmente potremmo rappresentare gli elementi di questa bellissima cornice naturale usando la geometria classica: la geometria di Euclide. Questa geometria, che da più di 2000 anni appartiene al bagaglio culturale dell'uomo (e dei matematici), è utilissima per descrivere il mondo...ma un mondo antropico, quello creato dall'uomo per l'uomo, un mondo cioè fatto di elementi regolari, linee rette e curve perfette. Ma, nel mondo della nostra bellissima cornice naturale in cui ogni elemento ha un aspetto irregolare, rugoso, frastagliato, la geometria di Euclide ha davvero ben poco da offrire perché, riflettendoci bene,

"...le nubi non sono sfere, le montagne non sono coni, le coste di un'isola non sono cerchi, le cortecce degli alberi non sono lisce e i fulmini non viaggiano secondo una linea dritta..." [10].

In altre parole, la natura ha un'anima frattale. Il termine **frattale** fu coniato nel 1975 dal matematico Benoit Mandelbrot nel libro *Les Objets Fractals: Forme, Hasard et Dimension* [11] per descrivere alcuni oggetti matematici poco convenzionali in quanto irregolari, frammentati, rugosi. Questo neologismo deriva dal latino *fractus* e il suo significato è appunto frammentato.

Proprio come i frattali, il mondo della Natura è rugoso, increspato, irregolare anche se i suoi oggetti, le nubi, le montagne, i fulmini, gli alberi sembrano mostrare un ordine all'interno della loro irregolarità. Ci sono infatti strane proprietà capaci di accomunare un cavolo ad una felce o ad un fiocco di neve. Osservando ad esempio con una lente di ingrandimento un cavolo romano, ed ingrandendo sempre di più, si otterrà sorprendentemente ancora un cavolo romano. La proprietà che ha il cavolo di riprodurre se stesso, anche a scale molto piccole, viene detta autosimilarità. Il cavolo rivela dettagli ad ogni ingrandimento, ha cioè una struttura fine e ha un aspetto di ordinata irregolarità.

E, in natura, non è un caso isolato, basta osservare le felci, gli alberi, i fiocchi di neve. La loro struttura è un regalo dell'evoluzione perché è uno dei tanti modi in cui le forme viventi si sono adattate per sopravvivere e prosperare in un particolare habitat. Ad esempio, la forma del cavolo romano è vantaggiosa perché dà a questa pianta la possibilità di usufruire della luce da tutte le possibili angolazioni, consentendole di crescere bene anche in luoghi scarsamente illuminati.

Ma cosa è precisamente un frattale? Secondo Mandelbrot, "Un frattale è un oggetto geometrico fatto di parti in un certo senso simili al tutto" [10]. Gli oggetti frattali sono dunque figure geometriche, esattamente come il cerchio o il triangolo, ma possiedono alcune proprietà speciali, che li rendono capaci di cogliere quelle peculiari caratteristiche ravvisabili, ad esempio, nel cavolo romano. Un oggetto frattale ed un cavolo romano condividono infatti la proprietà dell'autosimilarità, della struttura fine e della ricorsività. Un frattale, quindi, non si può descrivere come luogo di punti che soddisfano determinate condizioni analitiche o geometriche. La sua costruzione è invece basata su un algoritmo, ossia un metodo che deve essere utilizzato per disegnare la curva. E questo algoritmo non è mai applicato una volta sola: la procedura è iterata un numero infinito di volte. Mandelbrot era infatti fermamente convinto che fosse possibile trovare una nuova rappresentazione della realtà a partire dall'idea di base secondo cui, in natura, il piccolo non è nient'altro che una copia del grande. Applicando reiteratamente una semplicissima formula e avvalendosi dei computer IBM per la sua rap-

presentazione grafica, ottenne quello che oggi è considerato il più famoso dei frattali: il frattale di Mandelbrot.

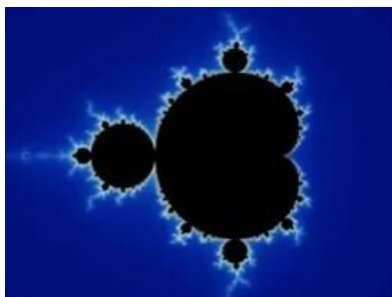


Figura 1: Il frattale di Mandelbrot.

Ma il frattale di Mandelbrot aveva celebri antenati...

I frattali prima dei frattali

Tra la fine dell'800 ed i primi anni del '900, matematici del calibro di Cantor, Peano, Hilbert, Von Koch e Sierpinski avevano creato degli strani oggetti matematici che si erano da subito rivelati completamente estranei agli schemi della geometria classica e, per questo, erano entrati a far parte della categoria dei mostri matematici dell'epoca [12]. Questi mostri matematici avrebbero solo in seguito trovato una collocazione teorica precisa, una propria identità frattale, grazie allo straordinario intuito di Mandelbrot che per primo formalizzò le proprietà di queste figure, evidenziando il loro stretto legame con le forme tipiche della natura.

In particolare, nel 1872, Cantor ricavò il suo mostro matematico partendo da un segmento di lunghezza unitaria, dividendolo in tre parti uguali, rimuovendo la parte centrale e ripetendo lo stesso procedimento sui due segmenti rimasti. Iterando questo procedimento all'infinito ottenne quella che è oggi nota come **polvere di Cantor** perché, all'infinito, la lunghezza degli intervalli diviene nulla e rimangono solo (infiniti) singoli punti. Dal canto suo Peano, nel 1890, scoprì una curva in grado di riempire il piano senza buchi, impressionando a tal punto Hilbert da far guadagnare alla sua curva l'appellativo di **Curva Mostruosa**. Altri due esempi andarono ad arricchire la galleria di mostri matematici dell'epoca: la curva di Von Koch ed il triangolo di Sierpinski.

La curva di Von Koch fu ideata nel 1904 dal matematico svedese Hjelte Von Koch che la definì come il limite di una sequenza infinita di curve sempre più grinzose.

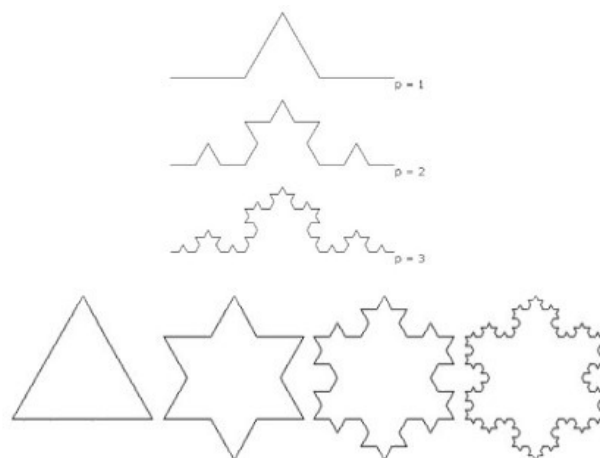


Figura 2: Procedimento per generare la curva di Von Koch e il fiocco di neve di Von Koch.

Tale curva limite aveva la curiosa proprietà di essere infinitamente lunga ma contenuta in un'area finita. Ciò che Von Koch non comprese era che questa curva di lunghezza infinita sarebbe stata un modello ideale per descrivere alcune forme del mondo reale, come le linee costiere. Aveva tutte le caratteristiche per essere un frattale e, ripensato all'interno della teoria di Mandelbrot, fu successivamente trattato come tale, divenendo il famoso **fiocco di neve di Von Koch**. Anche il cosiddetto **triangolo di Sierpinski**, ideato nel 1915 dal matematico Waclaw Sierpinski, è un chiaro esempio di struttura auto-similare, che si ripete cioè allo stesso modo su scale differenti. Il triangolo di Sierpinski si ottiene a partire da un triangolo equilatero pieno che viene suddiviso in quattro triangoli equilateri e quello centrale viene poi rimosso. I triangoli pieni rimasti vengono poi suddivisi allo stesso modo. Eseguendo la stessa procedura un numero infinito di volte si ottiene il triangolo di Sierpinski, un frattale.

Sierpinski introdusse il suo triangolo nel 1916, tuttavia questo oggetto era ben noto agli artisti già da alcuni secoli. I primi prototipi del triangolo di Sierpinski fecero la loro comparsa nel XII secolo sul pulpito del Duomo di Ravenna, considerato un vero e proprio capolavoro dell'arte Cosmatesca, nella quale il frattale di Sierpinski si rivelò essere uno degli elementi più caratterizzanti.



Figura 3: Procedimento iterativo per generare il triangolo di Sierpinski.



Figura 4: Dettagli di pavimenti cosmateschi adornati con triangoli di Sierpinski.

Accolte con entusiasmo da alcuni, con scetticismo ed ostilità da altri, queste figure infinitamente irregolari e capaci di ripetersi indefinitamente su scale differenti, per diversi anni furono oggetto di studi che ne misero in luce le proprietà, in primis quella dell'auto-somiglianza. Gli ultimi ad occuparsene, intorno al 1920, furono i due matematici francesi Pierre Fatou e Gaston Julia, dopo di loro, il silenzio. Fino a quando, nel 1975, Benoit Mandelbrot rispolverò, dal dimenticatoio in cui erano piombati, questi oggetti esoterici ed inutilizzabili riabilitandoli ed inserendoli all'interno di una nuova geometria: la geometria frattale.

"Nel presente saggio vengono studiati oggetti naturali assai diversi [...] ricorrendo all'aiuto di un'ampia famiglia di oggetti geometrici ritenuti finora esoterici e inutilizzabili, e che io mi propongo di dimostrare che meritano di essere presto integrati nella geometria elementare in ragione della semplicità, della diversità e della portata davvero straordinaria delle loro nuove applicazioni. Benchè il loro studio sia di pertinenza di discipline scientifiche diverse, tra cui la geometria, l'astronomia [...], gli oggetti naturali hanno in comune la caratteristica di essere di forma estremamen-

te irregolare o interrotta; per studiarli ho concepito, messo a punto e largamente utilizzato una nuova geometria della natura. La nozione che fa da filo conduttore sarà designata con uno dei due neologismi sinonimi oggetto frattale e frattale da me concepiti per le necessità di questo libro e che si richiamano all'aggettivo latino *fractus*, che significa interrotto o irregolare" (Benoit Mandelbrot - *Les objets fractals* [11]).

In queste parole emerge tutta la forza unificante dell'idea di Mandelbrot: usare gli oggetti di questa nuova geometria come modelli per rappresentare gli elementi del mondo naturale, impresa fino ad allora impossibile, perché fuori dalla portata della geometria euclidea. Come evidenziato nel libro *The fractal geometry of Nature* [10], che Mandelbrot pubblicò nel 1982, le potenzialità applicative dei frattali apparivano infinite: dalla misurazione delle coste alla struttura dell'apparato circolatorio e respiratorio, dalle bolle di sapone alle nuvole e ai fiocchi di neve.

L'arte della rugosità

Per Benoit Mandelbrot i frattali erano strumenti di quella che lui definì **l'arte della rugosità** [13], espressione che indica l'aspetto aspro, ruvido e incostante del mondo e che è in qualche modo l'essenza delle forme della natura. Queste caratteristiche rendono arduo misurare, ad esempio, la lunghezza esatta di una linea costiera perché una costa è piena di anfratti e di irregolarità. Ma, in questa complessità, è possibile ravvisare un ordine, quello dato dall'auto-somiglianza.

Alla domanda: "Quanto misurano le coste della Gran Bretagna?", Mandelbrot rispondeva pubblicando, nel 1967, l'articolo *How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension* sulla prestigiosissima rivista *Science* [14].

In questo articolo sosteneva che la lunghezza della costa era funzione del passo di misurazione: se la costa viene misurata con passi sempre più corti, la sua lunghezza cresce indefinitamente. Essa possiede cioè un perimetro che tende all'infinito, pur essendo finita l'area ad esso sottesa. In definitiva, come conseguenza dell'auto-somiglianza, diminuendo la lunghezza del passo di misurazione, la lunghezza della costa aumenta perché si tiene conto di sinuosità sempre più piccole. Infatti, a differenza delle curve della geometria euclidea, che quando sono ingrandite sono assimilabili a delle linee rette, il frastagliamento delle linee costiere non si dissolve ingrandendo la scala.

Per definire in modo più quantitativo tale livello di frastagliamento, Mandelbrot utilizzò il concetto già esistente di dimensione di Hausdorff-Besicovitch ed introdusse la dimensione frattale, cioè una quantità statistica capace di indicare quanto completo appare un frattale per riempire lo spazio. Una linea costiera, ad esempio, ha una dimensione frazionaria compresa tra uno e due e, più la linea della costa è frastagliata, più tale numero è vicino a due. La dimensione frattale diviene dunque un indicatore della irregolarità e della complessità di una struttura: tanto più alto è il suo valore numerico, tanto più è irregolare e morfologicamente complessa la figura in esame. Dotata di questo strumento, la geometria frattale è dunque capace di analizzare e caratterizzare quantitativamente numerose forme della natura. Essa è in grado di classificare le coste ed i confini degli Stati in funzione del loro livello di irregolarità; non riesce a prevedere dove può cadere un fulmine, ma può prevedere quanto esso è frastagliato e può aiutare a comprendere meglio gli effetti degli uragani partendo dalla identificazione delle caratteristiche frattali delle nuvole e dei fulmini.

I frattali come impronte digitali del caos

Negli anni '80 i frattali divennero parte integrante di un'altra teoria matematica emergente, la teoria del caos che, proprio come i frattali, era destinata a rivoluzionare il campo della matematica e delle sue applicazioni [15]. Per molto tempo si è infatti pensato che la natura fosse governa-

ta da leggi di causa-effetto e che la descrizione dei fenomeni naturali fosse fondata sull'indissolubile binomio meccanicismo-determinismo. Almeno fino a quando Poincaré, studiando i pianeti del sistema solare, si accorse che i loro moti in realtà non erano prevedibili con precisione assoluta e, su tempi estremamente lunghi, diventavano addirittura imprevedibili. Poincaré si era imbattuto in quella che sarebbe poi divenuta **la teoria del caos**, infrangendo un sogno che i matematici accarezzavano da secoli: descrivere e prevedere esattamente l'evoluzione futura di ogni sistema deterministico a partire dalle sue condizioni iniziali.

Si inizia dunque a profilare con grande evidenza il parallelismo tra geometria frattale e teoria del caos. Così come la geometria frattale metteva in luce tutta l'inadeguatezza della geometria euclidea nel descrivere le forme proprie del mondo naturale, così la teoria del caos evidenziava tutti i limiti del determinismo della scienza galileiana e della sua capacità di fare previsioni. Veniva dunque proposto un nuovo paradigma per identificare gli schemi nascosti che regolano i comportamenti naturali e che, fino ad allora, erano stati considerati delle semplici ed inspiegabili irregolarità. Che il legame tra geometria frattale e teoria del caos sia molto più forte di come possa apparire a prima vista, lo si intuisce osservando che, il primo oggetto matematico della teoria del caos, il celebre **attrattore a farfalla** del modello matematico di Edward Lorenz ha una struttura frattale.

Introdotta dal fisico Edward Lorenz nel 1963 nell'ambito di studi riguardanti il problema delle previsioni del tempo [16], questo sistema di equazioni differenziali debolmente non lineari, apparentemente molto semplice, mostrò per la prima volta che condizioni iniziali molto vicine potevano dar luogo a traiettorie che divergevano esponenzialmente. Questo nuovo fenomeno mise dunque in luce come, per certi sistemi di equazioni differenziali, i sistemi caotici, la benchè minima variazione o indeterminazione nelle condizioni iniziali poteva avere grandi conseguenze sull'andamento futuro del fenomeno, conseguenze difficili da prevedere in un'ottica esclusivamente deterministica. Questo tipo di comportamento prese il nome di **effetto farfalla**, dal titolo di una comunicazione di Lorenz "Predi-

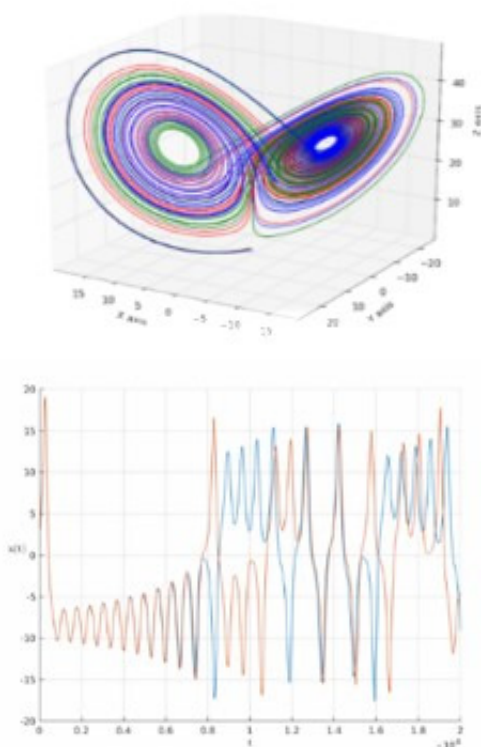


Figura 5: Attrattore di Lorenz e dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali.

cibilità: può il battito d'ali di una farfalla in Brasile causare un tornado in Texas?" [17] e diede inizio ad un nuovo modo di descrivere i fenomeni naturali, quello del **caos deterministico**.

Quello di Lorenz fu il primo modello ad esibire un attrattore strano [18]. Per capire la portata di questa singolare proprietà occorre ricordare che le soluzioni dei sistemi dissipativi, pur partendo da condizioni iniziali diverse, tendono asintoticamente ad un insieme di stati, detto attrattore. Tale attrattore può essere un punto (nel caso che la dinamica di lungo periodo sia di tipo stazionario), una curva regolare detto ciclo limite (nel caso che la dinamica di lungo periodo sia di tipo periodico), un toro (nel caso la dinamica di lungo periodo sia di tipo quasiperiodico) oppure una struttura frattale (nel caso che il sistema esibisca una dinamica caotica) e, in tal caso, l'attrattore viene detto strano. Un attrattore strano è quindi un attrattore avente dimensione frattale e caratterizzato da una forte dipendenza dalle condizioni iniziali. C'è caos ogni qualvolta c'è una dinamica determinata da un attrattore strano. I frattali divengono dunque le impronte digitali del caos e il modello di Lorenz è il primo esem-

pio di sistema di equazioni differenziali in bassa dimensionalità, in grado di generare frattali.

In fondo una dinamica caotica non è dissimile da ciò che si ottiene mescolando un impasto: il caos è cioè il frutto di un mescolamento. Infatti, sebbene traiettorie che partono da punti vicini si separano con velocità esponenziale, grazie ad un meccanismo di *stretching* (stiramento) e *folding* (ripiegamento), le traiettorie che partono sull'attrattore rimangono comunque confinate in una regione di spazio limitata. In termini quantitativi, l'effetto del mescolamento è descritto dal concetto matematico di transitività topologica, secondo cui il sistema evolve nel tempo in modo che ogni data regione nel suo spazio delle fasi si sovrappone indefinitamente a qualsiasi altra regione. Invece, il grado di sensibilità alle condizioni iniziali è misurato dall'esponente di Lyapunov che rappresenta il tasso di divergenza esponenziale di due orbite che partono infinitesimamente vicine. Se tale esponente di Lyapunov è positivo, allora il sistema presenta una dipendenza sensibile dai dati iniziali e il suo reciproco fornisce il tempo caratteristico del sistema, il tempo cioè a partire dal quale si manifesta il caos. Il termine **caos deterministico** non è pertanto sinonimo di disordine ma piuttosto di predicibilità solo a breve termine. Infatti, a differenza dei sistemi deterministici (quelli per cui conoscendo le condizioni iniziali si può prevedere l'evoluzione futura del sistema in ogni istante), i sistemi caotici diventano imprevedibili in tempi brevi perché, qualunque incertezza sullo stato iniziale cresce con legge esponenziale. Per questi sistemi esiste così un limite, un orizzonte temporale di previsione, oltre il quale il futuro non può essere previsto.

Le strutture frattali sono il risultato di dinamiche non lineari caotiche sottostanti, cioè testimonianze tangibili della natura caotica del fenomeno che si è modellizzato. Dinamiche caotiche e strutture frattali sono dunque espressioni diverse, ma intimamente legate, dello stesso mondo: il mondo della natura.

Frattali...al cinema

Sia la teoria del caos che la geometria frattale hanno potuto svilupparsi ed emergere grazie alla potenza di calcolo dei moderni calcolatori che,



Figura 6: Esempio di procedimento iterativo usato per generare sfondi montani realistici

negli anni, sono divenuti sempre più raffinati e potenti consentendo loro una varietà enorme di applicazioni: dalla biologia alla medicina, dalla finanza alle scienze sociali, dalla musica all'arte.

La potenzialità della geometria frattale di produrre immagini molto realistiche di pianeti, satelliti, nubi e montagne è stata utilizzata, fin dai primi anni '80, nel settore dell'intrattenimento e del cinema [19]. *Avatar*, famosissimo film di James Cameron del 2009, ha dimostrato cosa fosse possibile ottenere con i frattali nel magico mondo di Pandora, i cui incantevoli paesaggi hanno suscitato meraviglia e stupore. Questi paesaggi sono espressione tangibile della potenza della matematica frattale: in alcuni casi ispirati a paesaggi reali, come le bellissime montagne fluttuanti che richiamano i monti Huangshan in Cina, in altri casi frutto della fervida fantasia di James Cameron. Ma prima di *Avatar*, altri film avevano già utilizzato le straordinarie potenzialità di questa nuova matematica, dando vita ad una vera e propria rivoluzione nel mondo dell'animazione digitale. Infatti, a pochi anni dalla pubblicazione del libro di Mandelbrot *Les Objets Fractales* [11], Loren Carpenter, ispirandosi a quella lettura, ideò degli algoritmi innovativi basati su iterazioni frattali per realizzare un simulatore di volo. L'obiettivo era quello di creare uno sfondo montuoso quanto più verosimile possibile. Carpenter considerò un paesaggio composto da quattro macro-triangoli che suddivise poi in quattro triangoli ciascuno.

Ripetendo questo procedimento per un numero molto alto di iterazioni, ottenne una montagna frastagliata ed estremamente realistica che, nel 1980, fu presentata nel cortometraggio animato *Vol libre* [20]

Il risultato fu talmente impressionante che Carpenter fu incaricato di generare non solo uno sfondo montuoso, ma addirittura un intero pianeta. Nacque così la famosissima *Genesis Sequen-*

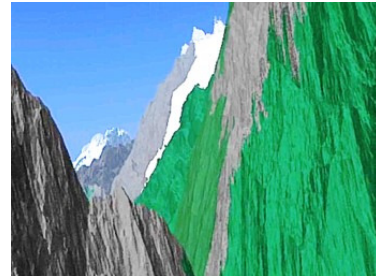


Figura 7: Un fotogramma modificato dal cortometraggio *Vol libre*

ce che, in *Star Trek II - L'ira di Khan* (1982), mostra la genesi della vita su un pianeta completamente morto, divenendo la prima sequenza in un film ad essere interamente generata al computer.



Figura 8: Alcuni fotogrammi simbolo del film *Viaggio nella luna* (1902).

Siamo davvero lontani anni luce dalle affascinanti scene di *Viaggio nella luna* (1902), [21] uno dei capolavori del cinema di fantascienza ai suoi esordi. Una delle immagini iniziali del film, la navicella spaziale che precipita sull'occhio della Luna, è entrata nell'immaginario collettivo divenendo una di quelle sequenze che hanno fatto la storia del cinema. Rivedere questa scena ci dà una misura precisa di quanto i frattali abbiano cambiato il volto del cinema fantascientifico.

Il segreto di tanto successo

Ma qual è il segreto di tanto successo?

C'è qualcosa di familiare nei frattali. Io ho avuto subito questa sensazione: la primissima volta che li ho visti ed ero

certamente la prima persona ad osservarli! Non c'era assolutamente la possibilità che qualcuno fosse riuscito a scorgervi prima di me... Ma dopo alcuni giorni o forse ore, se non minuti, mi apparivano già familiari. Vi riconoscevo delle proprietà che avevo già visto da qualche parte. Ma dove? Bene, innanzitutto nei fenomeni, ma anche nell'arte (Benoit Mandelbrot) [22].

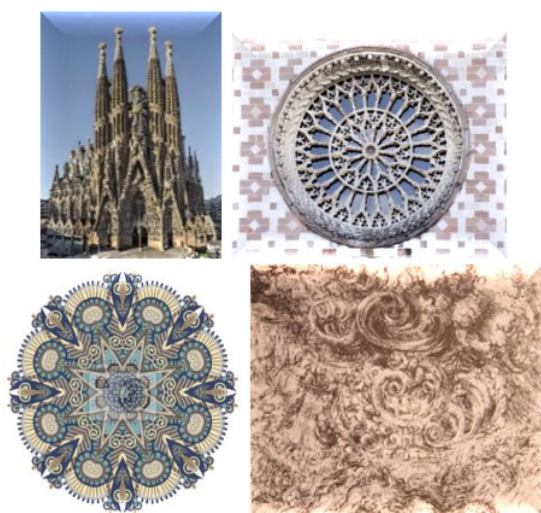


Figura 9: Esempi di frattali nell'arte: dall'architettura alla pittura

E l'arte è difatti ricca di forme frattali, come se le idee alla base di questa geometria siano qualcosa di profondamente e atavicamente insito nell'animo umano e nelle sue manifestazioni. Il fascino dei frattali risiede forse nel fatto che, pur essendo figure complesse, hanno una complessità che non ci disorienta, perché nasce da leggi semplici ed è in sostanza un ripetersi, quasi rassicurante, di un'idea iniziale.

Benoit Mandelbrot ha saputo ben scrutare il libro della natura citato da Galilei, svelando alcuni dei suoi misteri...

Non ho mai avuto la sensazione di inventare. Non ho mai avuto la sensazione che la mia immaginazione fosse abbastanza ampia da poter inventare cose straordinarie a tal punto. Erano lì, solo che nessuno le aveva mai viste prima. È meraviglioso. L'obiettivo della scienza è iniziare dal caos e spiegarlo con una formula semplice...e questo è

una sorta di sogno della scienza (Benoit Mandelbrot) [22].

E in questo sogno, che grandi sognatori come Galilei, Turing, Mandelbrot, Lorenz hanno contribuito ad alimentare, Matematica e Natura sono e saranno sempre l'una parte integrante dell'altra, due aspetti indissolubili dello stesso magico universo: l'universo della Conoscenza.

Ringraziamenti

Questo articolo è stato realizzato sotto gli auspici del Gruppo Nazionale per la Fisica Matematica (GNFM-Indam) ed è dedicato alla memoria del Prof. Claudio Tebaldi a cui queste tematiche erano particolarmente care. Negli anni della sua permanenza presso l'Ateneo del Salento, il Prof. Tebaldi diede inizio ad un interessante filone di ricerca inerente lo studio e le applicazioni dei sistemi dinamici non lineari e della teoria delle biforcazioni. Fu inoltre tra i promotori della Laurea Honoris Causa in Matematica conferita, nel 1992, dall'Ateneo del Salento al Prof. Edward Lorenz, padre della teoria del caos.

Ringrazio Claudio per avermi fatto scoprire, durante le sue lezioni, i sistemi dinamici come strumento per modellizzare il mondo e per avere sempre incoraggiato la mia matematica ispirata dalla biologia. Su questi punti cardine si è poi sviluppata la mia attività di ricerca che, ancora adesso, cerca di far emergere il caos dall'apparente ordine delle cose naturali e mi consente di guardare la realtà con occhi frattali.



- [1] G. Galilei: *Il Saggiatore, nel quale con bilancia esquisita e giusta si ponderano le cose contenute nella Libra astronomica e filosofica di Lotario Sarsi Sigensano, scritto in forma di lettera all'ill.mo et rever.mo mons.re d. Virginio Cesarini acc.o linceo m.o di camera di N.S.* Giacomo Mascardi, Roma (1623).
- [2] D. W. Thompson: *On Growth and Form*. Cambridge University Press, Cambridge (1917).
- [3] A. M. Turing: "The chemical bases of morphogenesis", *Phil. Trans. Royal Soc. London* **B 237** (1952) 37.
- [4] R. Kipling: *Just so stories*. Doubleday, Garden City, New York (1907).
- [5] J. D. Murray: "How the Leopard Gets Its Spots", *Scientific American* **258** (1988) 80.

- [6] J. D. Murray: *Mathematical Biology II; Spatial models and biomedical applications*. Springer, Berlino (2002).
- [7] D. Lacitignola: "The Mathematical Beauty of Nature and Turing Pattern Formation", *Matematica, Cultura e Società Rivista dell'Unione Matematica Italiana Serie I, Vol.1, N. 2* (Agosto 2016) .
- [8] H. O. Peitgen, P. H. Richter: *La bellezza dei frattali*. Bollati-Boringhieri, Torino (1987).
- [9] M. F. Barnsley: *Fractals Everywhere*. Dover, città (2012).
- [10] B. B. Mandelbrot: *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Company, New York (1982).
- [11] B. B. Mandelbrot: *Les objets fractals - Forme, hasard et dimension*. Flammarion, Parigi (1975).
- [12] G. Bianciardi: "Geometria Frattale", *Scienze e Ricerche* 7 (2015) 11.
- [13] B. B. Mandelbrot, *Fractals and the art of roughness*, su ted.com, febbraio 2010
- [14] B. B. Mandelbrot: "How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension", *Science, New Series* 156 (1967) 636.
- [15] J. Gleick: *Caos*. Rizzoli, Milano (1989).
- [16] E. N. Lorenz: "Deterministic Nonperiodic Flow", *J. Atmos. Sci.* 20 (1963) 130.
- [17] E. N. Lorenz, "Predictability", American Association Advance of Science 139th meeting, Washington D. C., Dec. 1972.
- [18] C. Sparrow: *The Lorenz equations: Bifurcations, Chaos and Strange Attractors*. Springer, Berlino (1982).
- [19] A. Grossi: "Quando le cose si fanno complesse: i frattali in natura", *MATEpristem* (2017) .
- [20] kottke.org. 2009. Vol Libre, an amazing CG film from 1980. [online] Available at: <http://kottke.org/09/07/vol-libre-an-amazing-cg-film-from-1980>
- [21] Viaggio nella Luna, su Moving Image Archive, Internet Archive. <https://archive.org/details/Levoyagedanslalune>
- [22] Intervista a Mandelbrot all'interno del documentario "Fractals: The Colors of Infinity" di Arthur Clarke (1994) <https://topdocumentaryfilms.com/fractals-colors-infinity/> Dal minuto 45:05-al minuto 49:12.



Deborah Lacitignola: è Professore Associato in Fisica Matematica all'Università di Cassino e del Lazio Meridionale. La sua attività di ricerca si avvale degli strumenti propri dei sistemi dinamici non lineari e della teoria delle biforcazioni e concerne lo studio e lo sviluppo di modelli matematici con applicazioni in biologia, chimica e scienze della vita.

L'attrattore di Lorenz

Mario Leo Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento, Italy

Il sistema dinamico caotico con attrattore strano, proposto da E. Lorenz nel 1963, è analizzato in modo dettagliato e inquadrato nel contesto dello sviluppo storico della teoria dei sistemi dinamici con comportamento caotico. L'importanza del lavoro di Lorenz per la comprensione dei vari aspetti del caos deterministico e dei fenomeni turbolenti viene illustrata nel quadro dei principali contributi, dati negli anni successivi nello stesso settore, da D. Ruelle, F. Takens, M. Feigenbaum e M. Hénon.



Figura 1: *Edward Norton Lorenz*

Introduzione

Alla fine degli anni '50, il matematico e meteorologo statunitense Edward Norton Lorenz (West Hartford, 23 maggio 1917 - Cambridge, 16 aprile 2008; Fig. 1) era impegnato nello sviluppo di modelli matematici per descrivere i movimenti di masse d'aria nell'atmosfera. In quel periodo, con

l'utilizzo dei calcolatori che si andava diffondendo nel settore delle previsioni meteorologiche, da una parte si tentava di fare previsioni del tempo, risolvendo numericamente sistemi di equazioni che presumibilmente governavano le dinamiche dell'atmosfera; dall'altra, si cercava di fare delle previsioni su base statistica, utilizzando osservazioni meteorologiche precedenti.

Scettico su questo secondo metodo, Lorenz decise di lavorarci su e, dopo parecchi tentativi di drastiche semplificazioni delle equazioni che in quel periodo venivano utilizzate per le previsioni del tempo, mise a punto un sistema di dodici equazioni differenziali ordinarie. Gli avevano messo a disposizione un piccolo computer, un Royal McBee, che eseguiva ben (!!!) sessanta moltiplicazioni al secondo e, con questo computer, riusciva, in un minuto, a simulare il comportamento del tempo in un giorno. Dopo vari tentativi ottenne una soluzione periodica, cioè un comportamento del tempo che si ripeteva dopo circa 90 giorni. Cercando di riprodurre questa soluzione con il metodo della regressione lineare, scoprì che ciò non era possibile, a meno che il suo sistema di equazioni non generasse una soluzione non periodica, una che, con la terminologia moderna, chiameremmo caotica. Dopo vari tentativi, riuscì ad ottenere una soluzione inconfondibilmente non periodica e quando applicò il metodo della regressione lineare, trovò che le sue previsioni erano tutt'altro che accettabili.

Continuò allora a generare questo tipo di soluzioni. Come ha raccontato lo stesso Lorenz [1], un giorno del 1961 decise di analizzare più in dettaglio una di queste soluzioni, ma invece di partire dall'inizio dell'elaborazione, utilizzò dei

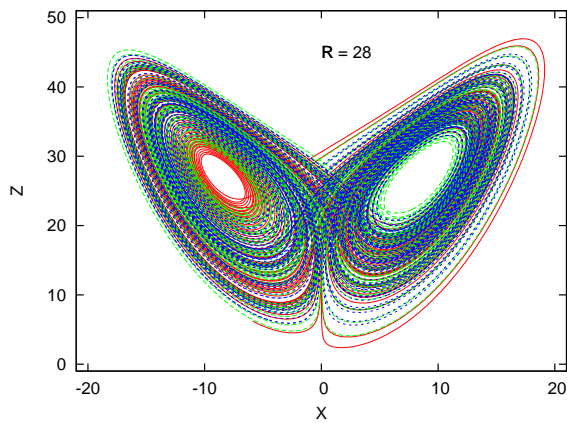


Figura 2: L'attrattore di Lorenz

dati intermedi, ottenuti precedentemente, come dati di ingresso. Quando andò a confrontare le due elaborazioni, si accorse che inizialmente erano quasi simili, ma poi la differenza cresceva più o meno esponenzialmente, quasi raddoppiando ogni quattro giorni simulati, per essere poi completamente diverse dopo due mesi simulati. All'inizio pensò ad un non corretto funzionamento del computer, ma poi si rese conto che il problema era legato al fatto che non aveva immesso le condizioni iniziali con sufficiente precisione. Lorenz aveva programmato il calcolatore per stampare i valori delle dodici variabili tutti su una sola riga e, per ottenere ciò, i valori venivano stampati con sole tre cifre decimali, mentre il calcolatore utilizzava nei calcoli numeri con sei cifre decimali. La simulazione numerica era stata perciò ripetuta con una precisione iniziale ridotta. Una differenza davvero minima aveva prodotto cambiamenti notevoli nell'andamento delle traiettorie.

Lorenz rimase colpito da questo fenomeno, e si rese subito conto che, se l'atmosfera reale si fosse comportata come il suo semplice sistema di equazioni, previsioni del tempo a lungo termine sarebbero risultate impossibili a causa dell'incertezza sui valori di vari parametri, quali la temperatura, la pressione e la velocità dei venti. La dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali, connessa alla non-linearità delle equazioni differenziali, era la causa di questo comportamento dei moti non periodici che ora chiamiamo caotici. Successivamente, nel 1963, ottenne risultati simili con un sistema di tre equazioni differenziali ordinarie, relativo ad un problema classico di fluidodinamica; la convenzione di

Rayleigh-Bénard.

Storicamente era stato il fisico francese Bénard a studiare per primo questo processo [2]. Agli inizi del 1900 egli eseguì i primi esperimenti sulla convezione termica di uno strato di fluido scaldato dal basso e soggetto alla gravità. Bénard lavorò con sottili strati di fluido, dell'ordine del millimetro, giacenti su una piastra metallica mantenuta ad una temperatura uniforme e aventi la superficie superiore libera. In queste condizioni, si accorse che, a secondo del gradiente di temperatura che imponeva al fluido, poteva ottenere differenti condizioni di moto nel sottile strato di fluido. Aumentando il gradiente, si ottenevano dapprima configurazioni stazionarie di quiete e quindi, superato un valore di soglia, configurazioni a celle convettive di varia forma. Con un ulteriore aumento del gradiente, si ottenevano, infine, configurazioni del fluido turbolente.

L'analisi teorica di questo comportamento dello strato di fluido fu sviluppata in seguito da Lord Rayleigh nel 1916 [3], a partire dalle equazioni di Navier-Stokes. L'indagine di Lord Rayleigh portò alla definizione di un numero, detto appunto numero di Rayleigh, ed al calcolo teorico di un valore di soglia, oltre il quale si innescava il movimento del fluido. In termini delle temperature T_i della piastra inferiore e T_s della piastra superiore, con l'analisi della stabilità lineare dell'esperimento, si trovò che se la differenza $T_i - T_s$ superava un valore critico, il sistema diventava instabile, l'instabilità manifestandosi con la formazione di celle convettive. Con l'analisi lineare non era possibile comunque analizzare il comportamento del fluido, aumentando ulteriormente il gradiente di temperatura.

Nel 1962 B. Saltzman [4], considerando variazioni solo in due dimensioni, introducendo uno sviluppo in serie di Fourier e troncando la serie per lavorare con un numero finito di termini, ricavò un set di equazioni differenziali ordinarie nonlineari relativo a 52 variabili. La risoluzione numerica di tale modello evidenziò, comunque, che solo poche variabili dominavano la dinamica del sistema.

Nel 1963 entra in scena Lorenz che, un po' empiricamente, seleziona le tre variabili da lui ritenute fondamentali, ottenendo un sistema di tre equazioni differenziali ordinarie. Lorenz pubblicò il suo lavoro [5], "*Deterministic Nonperio-*

dic Flow", sul Journal of the Atmospheric Sciences, una rivista di Meteorologia dell'American Meteorological Society.

Nonostante l'importanza e la novità dei risultati che Lorenz descrisse nell'articolo del 1963, l'interesse sul suo lavoro crebbe enormemente soprattutto dopo la conferenza tenuta nel dicembre del 1972, al convegno annuale dell'American Association for the Advancement of Sciences a Washington, DC, intitolata: "*Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?*" ("*Può il battito di ali di una farfalla in Brasile provocare un tornado in Texas?*"). Dopo questo efficace titolo, la metafora della farfalla, soprattutto per merito del già citato libro di J. Gleick, è stata utilizzata in contesti sempre più ampi e il termine *butterfly effect* è diventato un'espressione ricorrente per indicare il fenomeno della dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali¹.

La nozione di effetto farfalla, comunque, come notò lo stesso Lorenz, non era nuova. Essa figurava già, per esempio, nel racconto di Ray Bradbury "*Rumore di tuono*", scritto nel 1952 [6]. In questo racconto, la morte di una farfalla preistorica, e la conseguente sua mancata riproduzione, aveva cambiato l'esito di un'elezione presidenziale.

Il lavoro rimase sconosciuto anche ai Fisici, che notoriamente riservano poca attenzione agli articoli di meteorologia, fino al 1975, anno in cui i fisici J. B. McLaughlin e P. C. Martin ne capirono l'importanza e ne diffusero i risultati e le implicazioni [7].

Ovviamente l'importanza del sistema di equazioni ottenuto da Lorenz trascende ormai il modo in cui questo sistema fu ottenuto, risiedendo essenzialmente nelle proprietà inaspettate delle sue soluzioni, nella loro affascinante novità e nell'impulso che lo studio di questo sistema portò nella comprensione della fisica e della matematica dei sistemi dinamici con comportamento caotico.

Ma qual'era il contesto scientifico, nell'ambito

¹Si racconta che, durante una conferenza di Lorenz, ci fu un intervento di un meteorologo che parlò di battito di ali di un gabbiano. Quando Lorenz decise di partecipare alla conferenza del 1972, si dimenticò di inviare il titolo della Comunicazione. Uno degli organizzatori, Philip Merilees, ricordando quell'intervento, assegnò quel titolo alla comunicazione di Lorenz, sostituendo la farfalla al gabbiano, forse influenzato dal fatto che l'attrattore di Lorenz ha la forma di una farfalla.

dei sistemi dinamici, in cui si inserivano i risultati ottenuti da Lorenz?

Il contesto scientifico

La teoria dei sistemi dinamici è strettamente connessa con molte aree della Fisica e della Matematica, della Chimica e della Biologia. I suoi metodi e i suoi risultati hanno grandemente stimolato la ricerca in molti settori sia teorici che sperimentali, dando anche origine ad una nuova area di dinamica applicata denominata **dinamica non lineare** o **teoria del caos**.

Un sistema dinamico, grosso modo, è costituito da due ingredienti: una regola, che specifica come evolve un sistema nel tempo e le condizioni iniziali che specificano lo stato iniziale di partenza. Come ben sappiamo, le regole che descrivono i fenomeni naturali sono quasi sempre espresse nella forma di equazioni differenziali o equazioni alle differenze finite.

Ancora all'inizio del secolo scorso, si pensava che l'evoluzione temporale di un qualsiasi sistema fisico potesse essere sempre prevista, una volta assegnate le condizioni iniziali. Tale convinzione era certamente giustificata da indiscutibili successi come, per esempio, la possibilità di prevedere con molti anni di anticipo le eclissi, ed era tanto radicata nel mondo scientifico, che nel Settecento il grande matematico Simon de Laplace era arrivato addirittura ad affermare che, date la posizione e la velocità di tutte le particelle dell'Universo, egli sarebbe stato capace di prevederne l'evoluzione futura per tutta l'eternità [8].

Agli inizi del Novecento si ha, però, il crollo del determinismo di Laplace per due ragioni molto diverse. La prima è connessa con la formulazione della Meccanica Quantistica e il principio di indeterminazione di Heisenberg, secondo il quale c'è una limitazione alla precisione con cui la posizione e la quantità di moto (e quindi la velocità) di una particella possono essere simultaneamente misurate. La seconda è sostanzialmente legata all'impossibilità di prevedere l'evoluzione di certi sistemi, addirittura macroscopici, a causa della sua sensibile dipendenza dalle condizioni iniziali.

La visione di Laplace potrebbe essere vera nel caso di sistemi dinamici lineari e anche non li-

neari, purché lontani dai regimi di comportamento caotico. Per ogni sistema che evolve in modo regolare, se lo stato del sistema viene leggermente perturbato, ci aspettiamo che il conseguente cambiamento che si osserverà nella sua evoluzione sia anch'esso piccolo, o per lo meno proporzionale alla perturbazione introdotta.

In realtà, già il grande fisico matematico francese Henri Poincaré, fondatore della Teoria dei sistemi dinamici, si era reso conto (1896) che anche sistemi molto semplici, con pochi gradi di libertà, potevano presentare un comportamento aleatorio, nel senso che, pur essendo, in linea di principio, il loro futuro completamente determinato dal passato, in pratica le piccole incertezze sulle condizioni iniziali rendevano il loro comportamento, prevedibile a breve scadenza, alla lunga imprevedibile.

Partendo da un problema apparentemente semplice, il moto di tre corpi che interagiscono tra loro attraverso la forza di gravità, ma che portava ad equazioni del moto non lineari, Poincaré ottenne risultati che lo portarono a descrivere in modo chiaro il fenomeno del caos deterministico. In "Science et méthode" [9] egli scriveva:

"...Se conoscessimo esattamente le leggi della natura e la situazione dell'Universo all'istante iniziale, potremmo predire esattamente la situazione di quello stesso Universo in un momento successivo. Ma se pure accadesse che le leggi naturali non avessero più alcun segreto per noi, anche in tal caso potremmo conoscere la situazione iniziale solo approssimativamente. Se una tale conoscenza ci permettesse di prevedere la situazione successiva con la stessa approssimazione, non ci occorrerebbe di più e diremmo che il fenomeno è stato predetto e che è governato dalle leggi. Ma non è sempre così; può infatti accadere che piccole differenze nelle condizioni iniziali ne producano di grandissime in quelle successive. Un piccolo errore nelle prime produce un errore enorme nelle seconde. La previsione diviene impossibile..."

La difficoltà, secondo Poincaré, non stava perciò tanto nelle regole, nelle equazioni, ma piuttosto nella difficoltà di formulare, con grande precisione, le condizioni iniziali e nella dipendenza sensibile da queste condizioni iniziali di quei sistemi dinamici che attualmente vengono detti caotici. In questi sistemi, un effetto qualunque, per quanto piccolo, acquista rapidamen-

te proporzioni macroscopiche, condizionando drasticamente la loro evoluzione.

Consideriamo, per esempio, condizioni iniziali molto vicine, rappresentate da due punti separati da una piccola distanza d_0 . Può succedere che in certi sistemi la separazione fra le traiettorie che hanno origine dai due punti aumenti esponenzialmente come $d_0 e^{\lambda t}$. Questo significa che, se la distanza iniziale d_0 è più piccola della risoluzione δ del nostro apparato di misura, esisterà un tempo \bar{t} , dato dalla relazione

$$d_0 e^{\lambda \bar{t}} > \delta$$

dopo il quale vedremo due traiettorie distinte corrispondenti alla stessa condizione iniziale. Il teorema di unicità, per la soluzione di un'equazione differenziale, vale se partiamo idealmente da un punto ($d_0 = 0$), ma ciò, in pratica, non è possibile in Fisica [10]. Per esempio, se l'insieme delle condizioni iniziali è dato dai numeri reali tra 0 e 1, di questi possiamo fissare, con un numero finito di cifre, solo i numeri razionali: quelli irrazionali, avendo un numero infinito di cifre decimali, sarebbero determinati solo con un tempo di acquisizione infinito e con una memoria di capacità infinita.

La dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali mette in crisi anche la reversibilità del tempo, nonostante le equazioni mantengano un'invarianza formale per inversione temporale. Se invertiamo il tempo, i numeri di partenza, che esprimono le condizioni iniziali, sono a loro volta troncati, per cui anche l'evoluzione inversa presenterà la stessa dipendenza sensibile e si arriverà, al tempo $t = 0$, ad una soluzione diversa da quella con cui si era partiti inizialmente.

Le considerazioni di Poincaré sfuggirono ai contemporanei; negli Stati Uniti, l'unico matematico a prenderle sul serio fu, negli anni venti e trenta, George D. Birkhoff, che poi avrebbe avuto, fra i suoi allievi al MIT, un certo Edward Lorenz. Solo a partire dalla seconda metà del secolo scorso, le idee di Poincaré hanno avuto un enorme sviluppo, soprattutto quando all'analisi teorica dei sistemi dinamici si è affiancato l'uso massiccio di simulazioni numeriche eseguite con i calcolatori.

L'amplificazione esponenziale degli errori relativi all'indeterminazione con cui si conosce lo

stato iniziale di un sistema è, dunque, la seconda ragione dell'insuccesso di Laplace. Per prevedere allora esattamente l'evoluzione di questi sistemi occorrerebbe un'informazione infinita sulle condizioni iniziali e questo non è possibile.

Del resto, questa impossibilità si evince anche da un altro punto di vista. Per analizzare, con l'ausilio degli strumenti matematici, il comportamento di un sistema fisico, dobbiamo innanzitutto isolarlo e separarlo dalla complessità degli altri fenomeni presenti nel mondo reale. Questo genere di **riduzione**, in cui si considerano solo pochi oggetti, o poche particelle, è caratteristico del modo di lavorare in tutti i settori della ricerca scientifica. Al sistema in esame è associato un set di variabili, che dobbiamo misurare per determinare tutto ciò che vogliamo sapere del nostro sistema in un dato momento. Un set di variabili ci fornisce una **con gurazione del sistema**. Per rappresentare l'insieme di tutte le configurazioni possibili, definiamo uno spazio astratto: lo **spazio delle con gurazioni**, detto, a secondo del contesto, **spazio delle fasi** o **spazio degli stati**. Ogni punto dello spazio delle configurazioni rappresenta un possibile stato del sistema. L'intera storia di qualunque sistema è quindi contenuta in un'unica curva (o poche curve), congelata nello spazio delle configurazioni.

Tutto si basa sull'ipotesi secondo la quale le leggi della Fisica, più le condizioni iniziali, determinano il futuro del sistema in esame. Ora, a parte il problema relativo al fatto se le leggi che stiamo assumendo rimangano le stesse allo scorrere del tempo se, date le condizioni iniziali, il futuro è determinato, quali sono le limitazioni nell'assegnazione delle condizioni iniziali nell'analisi di un sistema fisico reale o non interamente costruito a tavolino? Se nella trattazione di un sistema fisico reale, il cui comportamento dipende sensibilmente dalle condizioni iniziali, vogliamo aumentare la precisione sui dati iniziali, dobbiamo necessariamente prendere in esame altri fenomeni che hanno concorso a determinare quelle condizioni, per cui siamo costretti ad andare indietro nel tempo e considerare necessariamente regioni dello spazio-tempo sempre più grandi di quella in cui abbiamo isolato, ridotto, il nostro sistema dinamico. E questo non si può fare indefinitamente.

Questa problematica, in un contesto diverso,

era già chiara ad Heisenberg quando, nel 1927, col suo Principio di indeterminazione, dimostrò l'impossibilità, in linea di principio, di seguire *la traiettoria dell'elettrone*, non per la inesattezza di una formula matematica, ma per l'impossibilità di conoscerne con precisione assoluta lo stato iniziale. Scriveva Heisenberg :

Nella formulazione netta della legge di causalità "se conosciamo il presente, possiamo calcolare il futuro", è falsa non la conclusione, ma la premessa. Noi non possiamo, in linea di principio, conoscere il presente in ogni elemento determinante.

Neppure l'intelligenza evocata da Laplace potrebbe conoscere, contemporaneamente, la posizione e la velocità di una particella quantistica e prevedere, quindi, il futuro.

Scelto allora un set di condizioni iniziali, fissati i valori di tutti i parametri presenti nel modello che descrive il sistema fisico e integrate le corrispondenti equazioni di evoluzione analiticamente o numericamente, otterremo la configurazione del sistema in funzione del tempo, che sarà sempre la stessa, se integriamo di nuovo il sistema con lo stesso set di condizioni e con gli stessi valori dei parametri. Il comportamento del sistema è perciò **deterministico**.

Se però il nostro sistema dipende in modo sensibile dalle condizioni iniziali, o dal valore di qualche parametro, la sua configurazione finale potrà essere completamente diversa se il set dei dati iniziali o dei valori dei parametri varia anche di pochissimo. In questo senso si usa l'ossimoro di **caos deterministico**, due parole che sembrano contraddirsi a vicenda, ma che descrivono compiutamente il comportamento di questi sistemi, per significare cioè il fatto che, pur avendo un comportamento deterministico, hanno evoluzioni completamente diverse anche per piccole variazioni delle condizioni iniziali. Ciò porta, ad esempio, all'impossibilità di fare previsioni corrette a lungo termine in campo meteorologico: poiché i dati iniziali sono sempre approssimati, come del resto i modelli di calcolo, la soluzione che si calcola può risultare molto diversa da quella reale.

Come puntualizzava Lorenz, qualsiasi proprietà che possiamo stabilire, risolvendo un sistema di equazioni differenziali relativo ad un

modello dell'atmosfera, è una proprietà del sistema. Noi possiamo solo sperare che essa sia anche una proprietà dell'atmosfera [12].

Una causa non prevista, anche irrilevante, può produrre una piccola variazione nelle condizioni iniziali o nei parametri presenti nel sistema e portare quindi a situazioni totalmente imprevedibili. È l'effetto farfalla della conferenza di Lorenz del 1972. Nella metafora dell'effetto farfalla, un semplice movimento di molecole d'aria, generato dal battito d'ali di una farfalla, può causare una catena di movimenti di altre molecole, tale da causare un tornado nel Texas.

Il concetto di caos emerge allora in modo naturale nell'ambito dello studio dei sistemi dinamici. L'evoluzione di questi sistemi viene in genere analizzata nello spazio degli stati, le cui coordinate fissano lo stato del sistema e può essere descritta in funzione di una variabile tempo che può variare in modo continuo o assumere valori discreti. Nel primo caso si parla di **usso**, nel secondo di **applicazione** o **mappa**. Così, ad esempio, l'evoluzione temporale di un pendolo nello spazio delle fasi è descritta da un flusso, mentre invece la popolazione degli insetti, che nascono ogni anno in una data zona, viene descritta introducendo una variabile discreta.

Un esempio di sistema dinamico molto facile da studiare è offerto proprio dal pendolo semplice. Per descrivere completamente questo sistema dinamico bastano la posizione e la velocità: i loro valori fissano lo stato del sistema nello spazio delle fasi in ogni istante di tempo. Quando il pendolo oscilla, il suo punto rappresentativo si sposta, in questo spazio, descrivendo una curva detta curva di fase o orbita. Nel caso ideale di un pendolo privo di attrito in moto oscillatorio, l'orbita è una curva chiusa; in presenza di attrito, l'orbita del pendolo smorzato è una curva a spirale che converge asintoticamente verso la posizione di equilibrio stabile. Questo punto fisso, verso cui convergono tutte le orbite, è detto **attrattore**.

Gli attrattori sono forme geometriche che caratterizzano il comportamento asintotico di un sistema nello spazio degli stati. Il pendolo con attrito è solo un caso particolare di sistema dissipativo le cui orbite, per effetto della dissipazione, vengono attratte verso un punto fisso dello spazio degli stati, corrispondente ad uno stato di

equilibrio stabile.

Altri sistemi, come ad esempio quello descritto dall'equazione di Van der Pol [11], hanno invece, come attrattore, un'orbita periodica che viene detta **ciclo limite**. Un ciclo limite descrive oscillazioni stabili, come il moto di un orologio a pendolo o il battito cardiaco.

Un'altra forma di attrattore più complicata è il **toro**. Questa forma è associata ad un moto, detto anche **quasi periodico**, dato dalla sovrapposizione di due o più oscillazioni indipendenti. La caratteristica più importante di un moto quasi periodico è che, nonostante la sua complessità, esso è prevedibile. Anche se l'orbita non si ripete mai esattamente, come accade se il rapporto tra le frequenze del moto non è un numero razionale, il moto resta regolare. Le orbite, che inizialmente sono vicine tra loro sul toro, rimangono tali al trascorrere del tempo e la prevedibilità a lungo termine è assicurata.

Possiamo allora definire formalmente un attrattore A come:

un insieme chiuso invariante, nel senso che ogni traiettoria con punto di partenza interno ad esso rimane all'interno per $t \rightarrow \infty$. Esso inoltre attrae un insieme aperto U di condizioni iniziali, che costituisce il suo bacino di attrazione; è, inoltre, un insieme minimale, vale a dire non c'è un sottoinsieme proprio di A che soddisfa le condizioni precedenti.

Punti fissi stabili con dimensione euclidea $D = 0$, cicli limite stabili con dimensione $D = 1$ e il toro con dimensione $D = K$, se K è il numero di frequenze incommensurabili, sono gli **attrattori classici** associati a moti regolari o ordinati.

Fino ad oltre la metà del Novecento, c'era la tendenza a spiegare moti complicati in termini di moti quasi periodici, con la conseguente ricerca dei **modi normali** e delle **armoniche fondamentali**. Per esempio, la teoria di Landau della turbolenza nei fluidi [13] proponeva che, al crescere di un parametro di controllo, il moto del fluido passasse da un moto indipendente dal tempo, in ogni punto, ad un moto periodico, poi ad un moto quasi periodico a due periodi, poi a tre, quattro, e così via. Quando il numero delle frequenze diventava sufficientemente grande, allora il fluido appariva dotato di un moto irregolare, ovvero turbolento.

Le difficoltà incontrate nel determinare quantitativamente le frequenze in questione hanno condotto ad un ripensamento profondo della spiegazione della turbolenza sulla base dell'ipotesi dei moti quasi periodici. È emersa chiaramente la necessità della presa in considerazione di moti non quasi periodici per la rappresentazione corretta dei fenomeni turbolenti e di altri fenomeni (modelli di evoluzione di popolazioni o di reazioni chimiche, moti di sistemi meccanici semplici).

Questo era più o meno lo stato dell'arte prima del lavoro di Lorenz. Con il suo lavoro entra in scena un moto non quasi periodico, caratterizzato da un tipo diverso di attrattore: un attrattore caotico, che in seguito sarà chiamato **attrattore strano**, caratterizzato da una dimensione non intera.

Il sistema di Lorenz

Il sistema di Lorenz (SdL), proposto nel 1963, è il primo modello fenomenologico di un processo dinamico, caratterizzato da pochi gradi di libertà, con comportamento caotico, cioè non associato ad un moto quasi periodico. Come abbiamo già detto, questo modello fu derivato da Lorenz imponendo un certo numero di drastiche semplificazioni al problema idrodinamico della convezione termica in un fluido uniforme, soggetto al campo gravitazionale, contenuto in una regione compresa tra due piastre. Esso è descritto dal seguente sistema di equazioni differenziali:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -\sigma(x - y) \\ \dot{y} &= Rx - y - xz \\ \dot{z} &= xy - bz,\end{aligned}\quad (1)$$

dove il punto sopra il simbolo indica la derivata rispetto al tempo.

Le variabili x , y , e z avevano originariamente il seguente significato: x era proporzionale alla velocità del flusso del fluido in circolazione; y era proporzionale alla differenza di temperatura tra gli elementi di fluido in moto ascendente e discendente e z era proporzionale alla distorsione del profilo della temperatura nella direzione verticale che, in condizioni di equilibrio, era lineare con l'altezza.

I parametri σ ed R erano proporzionali rispettivamente al numero di Prandtl e al numero di Rayleigh, mentre b era legato alle dimensioni della cella.

Questo sistema di equazioni non lineari accoppiate, dall'aspetto apparentemente molto semplice, non è integrabile analiticamente. Per comprenderne la dinamica, così come si ottiene con l'integrazione numerica delle sue equazioni, è fondamentale lo studio della stabilità delle sue soluzioni stazionarie:

$$\begin{aligned}(x, y, z) &= (0, 0, 0) \\ (x, y, z) &= \\ &(\sqrt{b(R-1)}, \sqrt{b(R-1)}, R-1) \equiv C_1 \quad (2) \\ (x, y, z) &= \\ &(-\sqrt{b(R-1)}, -\sqrt{b(R-1)}, R-1) \equiv C_2,\end{aligned}$$

che si ottengono imponendo le condizioni:

$$\dot{x} = \dot{y} = \dot{z} = 0.$$

Per $0 \leq R \leq 1$, si ha allora un'unica soluzione stazionaria, l'origine. Per $R > 1$, a questa soluzione si aggiungono le due soluzioni C_1 e C_2 . Lo studio della stabilità di queste soluzioni mostra che l'origine è stabile per $R < 1$ e diventa instabile per $R > 1$. Per $R = 1$ si ha una biforcazione: l'origine diventa instabile e si generano le due soluzioni C_1 e C_2 .

Tutti i risultati numerici che saranno presentati di seguito e la loro discussione sono relativi all'integrazione del SdL con $\sigma = 10$ e $b = 8/3$; R sarà allora il parametro di controllo.

Una proprietà del sistema di Lorenz è la sua invarianza sotto la trasformazione discreta:

$$x \rightarrow -x \quad y \rightarrow -y \quad z \rightarrow z$$

Questa invarianza implica l'esistenza di soluzioni autosimmetriche (vale a dire soluzioni che sono trasformate in sé stesse dalle relazioni precedenti) e di soluzioni simmetriche a coppia (nel senso che ogni soluzione della coppia è trasformata nell'altra dalla trasformazione). Per esempio, abbiamo visto che per $R = 1$ si passa da una soluzione autosimmetrica, l'origine, a due soluzioni non più autosimmetriche, ma ottenibili l'una dall'altra con l'operazione di simmetria. Tutto ciò è più evidente quando si considera il

bacino di attrazione delle tre soluzioni stazionarie. Per $R < 1$, se si applica la trasformazione di simmetria alla condizione iniziale, la soluzione stazionaria resta sempre l'origine. Per $R > 1$, se si applica la trasformazione di simmetria alla condizione iniziale, si passa da C_1 a C_2 . Per $R = 1$ si ha allora una rottura della simmetria, con passaggio della stabilità da una soluzione autosimmetrica a due soluzioni simmetriche.

La stabilità della soluzione stazionaria $x = y = z = 0$ si analizza perturbando il sistema nell'intorno dell'origine e linearizzando il sistema ottenuto. Si ha:

$$\begin{cases} \delta \dot{x} = -\sigma(\delta x - \delta y) \\ \delta \dot{y} = -\delta y + R\delta x \\ \delta \dot{z} = -b\delta z \end{cases}$$

Per quanto riguarda le perturbazioni δZ , si vede subito che esse evolvono nel tempo come e^{-bt} , per cui decadono esponenzialmente a 0. Per analizzare l'evoluzione delle perturbazioni δx e δy , consideriamo soluzioni della forma:

$$\begin{cases} \delta x = e^{\lambda t} u \\ \delta y = e^{\lambda t} v \end{cases}$$

Sostituendo si ha:

$$\begin{cases} (\lambda + \sigma)u - \sigma v = 0 \\ -Ru + (\lambda + 1)v = 0 \end{cases}$$

L'esistenza di una soluzione non banale comporta la condizione:

$$\begin{vmatrix} \lambda + \sigma & -\sigma \\ -R & \lambda + 1 \end{vmatrix} = 0$$

da cui:

$$\begin{aligned} 2\lambda_+ &= -(1 + \sigma) + \sqrt{(1 + \sigma)^2 - 4\sigma(1 - R)} \\ 2\lambda_- &= -(1 + \sigma) - \sqrt{(1 + \sigma)^2 - 4\sigma(1 - R)} \end{aligned} \quad (3)$$

Per $0 \leq R < 1$, entrambe le radici sono negative, le perturbazioni δx e δy decadono nel tempo e la soluzione stazionaria $(0, 0, 0)$ è asintoticamente stabile. Per $R = 1$, $\lambda_- = -(1 + \sigma)$, la radice λ_+ è nulla e diventa positiva per $R > 1$, per cui l'origine è marginalmente stabile e diventa instabile per $R > 1$.

Allora, per $0 \leq R \leq 1$ l'unica soluzione stazionaria è l'origine che è quindi l'unico attrattore

del sistema. La presenza di una radice positiva, per $R > 1$, indica che all'origine è associata una varietà stabile bidimensionale ed una varietà instabile unidimensionale. Per $R > 1$, C_1 e C_2 diventano allora, come vedremo, gli attrattori stabili del sistema. Per $R = 1$ si ha quella che viene chiamata una **biforcazione pitchfork supercritica**, illustrata in Fig. 3.

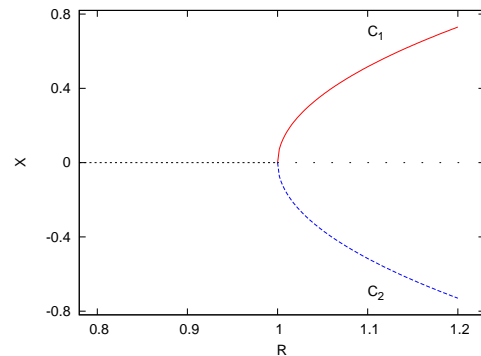


Figura 3: Valori di x in funzione di R . Si nota la Biforcazione supercritica per $R = 1$. I risultati sono ottenuti con $\sigma = 10$ e $b = 8/3$. Questi valori sono stati utilizzati anche per tutti i calcoli i cui risultati sono presentati nelle altre figure.

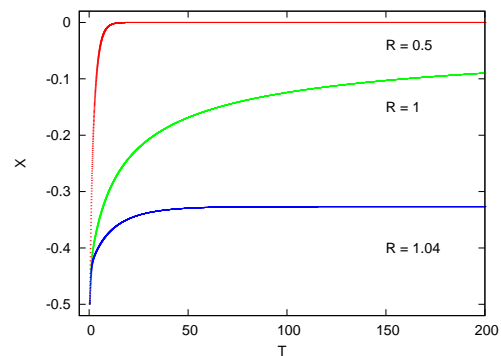


Figura 4: Valori di x in funzione del tempo di integrazione no ad un massimo valore di 200. Condizioni iniziali: $X = -0.5, Y = -0.5, Z = 0.5$. Si noti come nel caso $R = 1.0$ (stabilità marginale), alla fine del tempo di integrazione, non sia stato ancora raggiunto il punto stazionario, l'origine, a differenza del caso $R = 0.5$ (l'origine) ed $R = 1.04$ (il punto C_2 di coordinata $X = -0.3266$).

In Fig. 4 è riportata, in funzione del tempo, la variabile X nei tre casi: $R = 0.5, R = 1.0$ ed $R = 1.04$.

Analizziamo ora la stabilità delle soluzioni non banali C_1 e C_2 . Consideriamo il punto C_1 . Considerazioni analoghe valgono per il punto C_2 . Perturbando e linearizzando il sistema

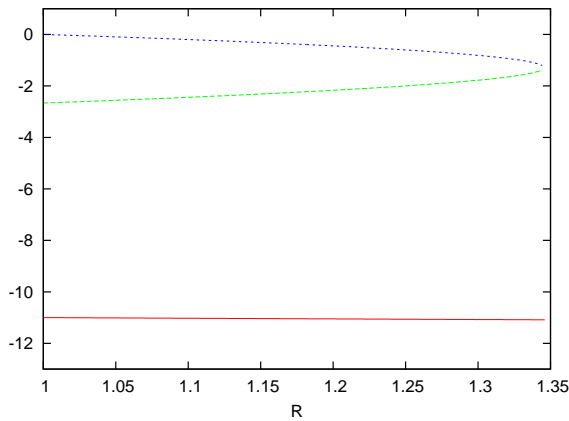


Figura 5: Le tre radici reali, tutte negative, dell'equazione (4) in funzione del parametro R tra $R = 1$ ed $R = 1.346$.

nell'intorno della soluzione stazionaria

$$x_0 = y_0 = \sqrt{b(R-1)}, \quad z_0 = R-1,$$

ponendo

$$\begin{cases} \delta x = e^{\lambda t} u \\ \delta y = e^{\lambda t} v \\ \delta z = e^{\lambda t} w \end{cases}$$

e cercando soluzioni non banali per u, v e w , si ottiene l'equazione:

$$\lambda^3 + \lambda^2(1+b+\sigma) + \lambda b(R+\sigma) + 2\sigma b(R-1) = 0 \quad (4)$$

Questa equazione di terzo grado, per gli autovalori della matrice Jacobiana associata al sistema linearizzato, ha tre radici reali o una radice reale e due complesse coniugate. Poiché nell'equazione ogni termine è positivo per $\lambda > 0$ ed $R > 1$, si ha che le tre radici reali sono negative, per R appena maggiore di 1, per cui la soluzione stazionaria è stabile.

Aumentando ulteriormente R , viene raggiunto il valore $R_s = 1.3456171$ in cui due degli autovalori di C_1 e C_2 diventano complessi coniugati con parti reali negative. In questo regime, l'orbita tende a C_1 o a C_2 , spiralizzando intorno al punto fisso. Questo comportamento è illustrato nel grafico a sinistra nella Figura 6 dove è mostrato l'andamento oscillante smorzato della variabile x , il cui valore converge verso quello della coordinata x del punto fisso C_1 . Fin qui non si osserva alcuna dinamica caotica, né caos transitorio.

Per vedere come si innesca il caos, continuiamo ad aumentare il parametro R . Quello che

si verifica è che la spirale iniziale, intorno a C_1 (C_2), aumenta in dimensione fino a quando, per $R > R_0 \sim 14.174828815$, con i punti C_1 e C_2 sempre stabili, si ha un cambiamento radicale del comportamento del flusso. Per $R > R_0$, le orbite che hanno origine sulla manifold instabile dell'origine crescono sempre di più e vengono attratte dal punto stazionario presente nell'altro semispazio, come mostrato dai pannelli centrale e destro della Figura 6.

Si noti la sensibile dipendenza dal parametro R . La variazione di poche unità sulla nona cifra decimale porta il sistema, posizionato asintoticamente sull'attrattore C_1 , a trasferirsi asintoticamente sull'attrattore C_2 .

Aumentando ancora R si osserva prima un regime di caos transitorio, con C_1 e C_2 unici attrattori ancora stabili e poi un regime in cui, oltre a C_1 e C_2 , appare un attrattore caotico. Si hanno tre bacini di attrazione distinti e lo stato asintotico del sistema dipende dalle condizioni iniziali. La Fig. 7 mostra i tre attrattori per $R = 23$.

Con un ulteriore aumento del valore di R , si raggiunge infine un valore critico R_c , in corrispondenza del quale le due radici complesse sono immaginarie pure e, per $R > R_c$, la loro parte reale risulta positiva: la soluzione stazionaria diventa instabile e si ha un unico attrattore: l'attrattore di Lorenz.

Ponendo nell'Eq. (4) $\lambda = \pm i\omega$ per $R = R_c$, si ottiene:

$$R_c = \frac{\sigma(\sigma + b + 3)}{\sigma - b - 1} \quad (5)$$

$$\omega^2 = \frac{2\sigma b(\sigma + 1)}{\sigma - b - 1} \quad (6)$$

Si noti che per $\sigma < b + 1$, non esiste alcun valore positivo di R_c che soddisfa la prima relazione e lo stato stazionario C_1 (C_2) è sempre stabile. Se, invece, $\sigma > b + 1$, come si ha nel caso $\sigma = 10$ e $b = 8/3$, lo stato stazionario è instabile per $R > R_c$. In definitiva, i punti stazionari C_1 e C_2 sono sempre stabili nell'intervallo $1 < R < R_c = 24.73684$ e, per $R = R_c$, perdono la loro stabilità attraverso quella che viene chiamata una **biforcazione di Hopf subcritica**. È difficile rendere evidente questa biforcazione in quanto il ciclo limite che esiste prima di essa è instabile.

Nella Fig. 8 sono riportate le tre radici reali, la parte reale e le parti immaginarie delle due radici

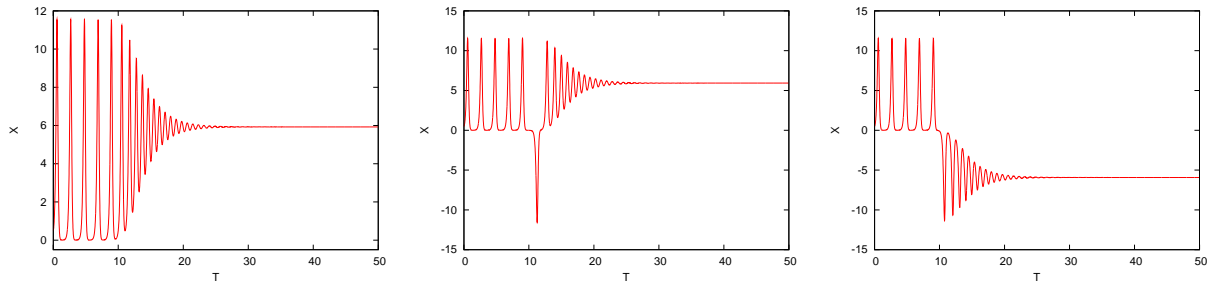


Figura 6: X in funzione del tempo T per $R = 14.174828815$ (gra co a sinistra), $R = 14.174828818$ (gra co centrale), $R = 14.174828819$ (gra co a sinistra). Condizione iniziale: $X = Y = Z = 0.5$.

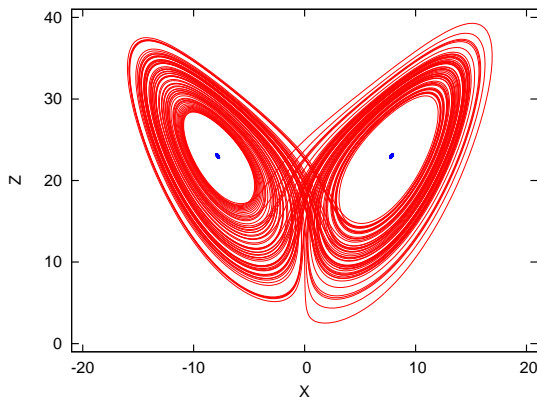


Figura 7: Tre attrattori per $R = 23$. Condizioni iniziali: $x = -5, y = 5, z = 10$ per l'attrattore caotico (colore rosso); $x = y = z = 0.5$ (C_2 :colore verde); $x = y = -0.5, z = 0.5$ (C_1 :colore blu).

complesse coniugate dell'Eq. (4) tra $R = 1.346$ ed $R = 30$.

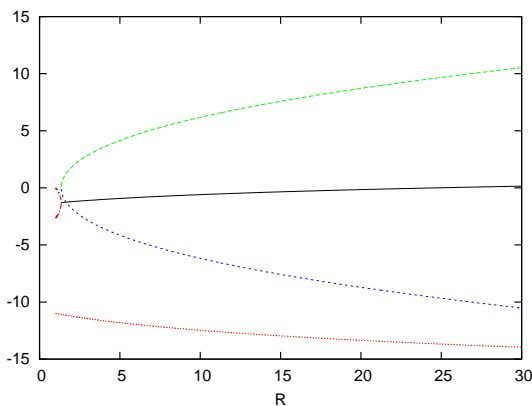


Figura 8: Le tre radici reali (colore rosso), la parte reale (colore nero) e le parti immaginarie delle due radici complesse coniugate dell'equazione (4) in funzione del parametro R , tra $R = 1$ ed $R = 30$.

In Fig. 9 sono infine riportate le proiezioni sui

piani (x,z) , (x,y) e (y,z) dell'orbita per $R = 28$. Il sistema di Lorenz è stato integrato per un tempo $T = 2000$, con un passo di integrazione $t = 0.001$ e con un transitorio uguale a 1990. I tre colori, nella figura, sono relativi a tre attrattori con condizione iniziale $X = Y = -0.5; Z = 0.5$ e con altre due condizioni iniziali leggermente diverse. I punti di intersezione che appaiono nelle figure sono il risultato della proiezione in due dimensioni: le traiettorie, infatti, non si possono intersecare, come si potrebbe osservare in una rappresentazione tridimensionale.

Per $R > R_c$, un dato iniziale preso a caso, non evolve né verso l'origine, né verso gli altri due punti fissi C_1 e C_2 , che ora rappresentano stati di equilibrio instabili. Uno stato iniziale evolve senza mai fermarsi e il suo moto non è né periodico, né quasi periodico, ma si configura molto irregolare, anche se si svolge asintoticamente su un sottoinsieme dello spazio dei dati che ha misura nulla. Per la divergenza del flusso si ha infatti nel caso del SdL:

$$\frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{z}}{\partial z} = -(\sigma + b + 1) \quad (7)$$

Per il teorema di Liouville il SdL è allora a volume contraente e si può inoltre dimostrare che è anche confinato.

Essendo allora un sistema dissipativo e confinato, il SdL doveva evolvere, nello spazio degli stati e secondo lo schema classico pre-Lorenz, verso una regione avente volume nullo; l'attrattore poteva allora essere un punto fisso o un ciclo limite. Come abbiamo visto, l'integrazione numerica delle equazioni, nel caso particolare di $\sigma = 10, b = 8/3, R = 28$, evidenziò invece, la presenza di un attrattore di tipo nuovo:

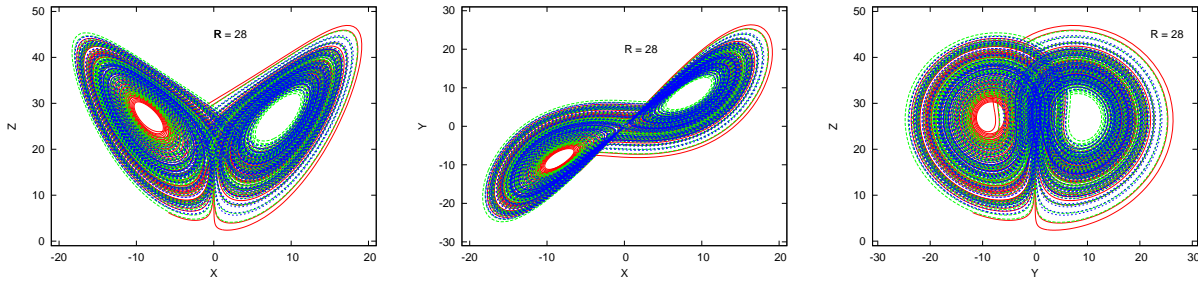


Figura 9: L'attrattore di Lorenz per $R = 28$. Proiezioni dell'orbita sui piani (x,z) , (x,y) e (y,z) .

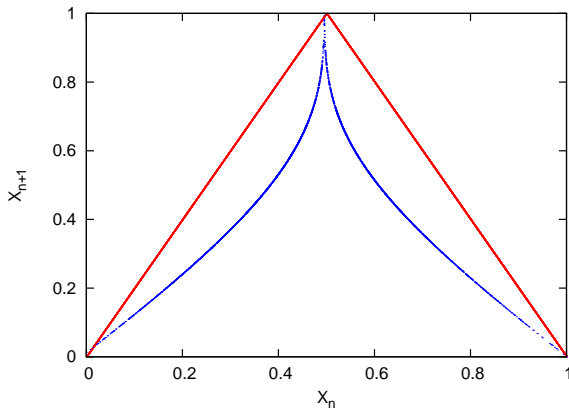


Figura 10: Gra co della mappa a tenda (colore rosso) e della mappa relativa alla variabile X , costruita con la successione dei valori dei massimi relativi della variabile Z del SdL

l'attrattore di Lorenz.

In questo moto così irregolare, Lorenz riuscì tuttavia a trovare una sorta di regolarità. Egli infatti osservò che, dopo un transiente iniziale, il valore di una coordinata, Lorenz considerò la z , rilevata ad istanti t_1, t_2, \dots scelti in modo che la $z(t)$ avesse un massimo relativo agli istanti di osservazione, generava successioni z_1, z_2, \dots molto diverse per diversi valori iniziali, ma legate fra loro, con ottima approssimazione, da una legge della forma $z_{n+1} = f(z_n)$, con f deducibile dall'esame dei dati. Ponendo $x = (z - z_{min}) / (z_{max} - z_{min})$, dove z_{min} e z_{max} sono rispettivamente il valore minimo ed il valore massimo di z , la f può essere considerata come una trasformazione dell'intervallo $[0, 1]$ in sé stesso.

In prima approssimazione, la funzione f può essere scritta analiticamente in modo semplice

come:

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= 2X_n \quad \text{per } X_n \leq \frac{1}{2} \\ X_{n+1} &= 2 - 2X_n \quad \text{per } X_n > \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

Questa mappa ha un grafico a tenda, (Fig. 10), con una derivata a modulo costante uguale a 2 e discontinua in $x = 1/2$, ove cambia segno.

La mappa a tenda ha una dipendenza sensibile dai dati iniziali: la differenza $x'_n - x$ fra due successioni, con dati iniziali x'_0, x_0 , anche molto vicini, cresce esponenzialmente come 2^n , finché, ovviamente, $x'_n - x_n$ è piccolo, in modo che x'_n e x_n cadano nella stessa metà dell'intervallo $[0, 1]$.

Inoltre, se si sceglie un dato iniziale a caso x $[0, 1]$, con distribuzione uniforme, e si considera la storia $\bar{\sigma}(x_0)$ di x_0 sugli insiemi $P_1 = [0, 1/2]$ e $P_2 = [1/2, 1]$, vale a dire se si definisce la successione $\bar{\sigma}(x_0) = (\sigma_0, \sigma_1, \dots)$, con $\sigma_i = 1, 2$ tali che $f^i(x_0) \in P_{\sigma_i}$, allora la probabilità che il dato iniziale x_0 sia tale che i primi k elementi della successione $\bar{\sigma}(x_0)$ coincidano con una stringa arbitrariamente data è 2^{-k} . Questo significa che il moto di un x_0 , scelto a caso in $[0, 1]$, con distribuzione uniforme, produce successioni di simboli $\sigma_0, \sigma_1, \dots$ che hanno la stessa statistica di quelle prodotte dal lancio di un dado perfetto a due facce e sono, perciò, isomorfe ad uno schema di Bernoulli: tali successioni sono ad entropia o complessità positiva [14].

Nonostante il suo carattere deterministico, la divergenza esponenziale delle traiettorie ci dice che per prevedere il valore di x_n in termini di x_0 e per n grande è necessaria una conoscenza del dato iniziale x_0 con una precisione in pratica irrealizzabile. Inoltre il moto è talmente caotico da poter essere utilizzato, in linea di principio,

per produrre successioni di numeri a caso, come quelli che si ottengono lanciando un dado perfetto.

Si può dimostrare che un moto quasi periodico non può generare moti che manifestino queste proprietà, per cui il SdL, per R grande, descrive moti caotici, salvo dati iniziali eccezionali, formanti un insieme di misura nulla nello spazio dei dati iniziali, fra cui i dati con $x = y = 0$.

Queste due proprietà di dipendenza sensibile e di divergenza esponenziale si possono intuire direttamente osservando la Fig. 11 che mostra come variano asintoticamente in funzione del tempo le coordinate X e Z per $R = 28$.

La figura evidenzia delle oscillazioni di ampiezza sempre crescente attorno ad uno stato di equilibrio instabile, fino a che, quando le oscillazioni diventano troppo ampie, il punto rappresentativo inizia ad oscillare attorno all'altro stato di equilibrio instabile. Gli intervalli di tempo durante i quali l'orbita si sviluppa nell'intorno di un punto, prima si sviluppa nell'intorno dell'altro, sono distribuiti casualmente e non c'è alcuna regolarità nel processo.

Questo comportamento è tipico di un sistema dinamico con comportamento caotico ed è legato a due processi fondamentali che subisce l'orbita in funzione del tempo: le operazioni di stiramento e di piegatura che hanno luogo nello spazio degli stati. La divergenza esponenziale, connessa con la sensibile dipendenza dalle condizioni iniziali, è un fenomeno ovviamente locale in quanto, essendo finita la regione occupata dall'attrattore nello spazio degli stati, due orbite, situate sull'attrattore, non possono divergere esponenzialmente indefinitamente. Ne segue che l'attrattore deve ripiegarsi su se stesso per cui due orbite, pur sviluppandosi in regioni diverse, devono, prima o poi, passare l'una accanto all'altra.

Il processo di stiramento e piegatura può avvenire più volte e può produrre pieghe entro altre pieghe, all'infinito. Per avere un'idea di questo processo di mescolamento delle orbite nello spazio degli stati in un sistema che evolve caoticamente, basta pensare ad un panettiere che impasta il pane e immaginare ciò che accade alle traiettorie vicine, pensando a quello che succede quando si versa nella pasta, per esempio, una goccia di colorante blu. L'operazione di impasto è la combinazione di due azioni: lo stendimento

della pasta, che fa diffondere il colorante ed il ripiegamento della pasta su se stessa. Dapprima la chiazza di colorante semplicemente si allunga, ma poi viene ripiegata e, dopo un tempo piuttosto lungo, si trova stirata e ripiegata molte volte. Osservandolo da vicino, si vede che l'impasto consiste di molti strati, alternativamente blu e bianchi e che la distribuzione del colorante all'interno della pasta appare casuale. Uno studio più accurato metterebbe in evidenza, comunque, una struttura ordinata e ripetitiva: una struttura frattale.

Ebbene, l'attrattore che descrive il moto asintotico nel modello di Lorenz per valori di $R > R_c$ è un insieme frattale.

Siamo giunti così a caratterizzare con due proprietà fondamentali l'attrattore di Lorenz: una dinamica, legata alla dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali, che si manifesta con la divergenza esponenziale locale, quantificabile con degli esponenti caratteristici detti **esponenti di Lyapunov** introdotti nel 1982 dal fisico e matematico russo A. M. Lyapunov, con lo scopo di determinare criteri di stabilità delle soluzioni di un certo tipo di equazioni differenziali [15]; l'altra geometrica, connessa con la sua struttura frattale e quantificabile con la dimensione frattale.

Ma nel 1963, i frattali non erano ancora nati. Sarebbero stati introdotti solo nel 1975 dal matematico francese Benoit Mandelbrot (1924-2010) nel saggio "*Les objets fractals*" [16].

L attrattore strano

Il matematico e fisico belga David Pierre Ruelle (1935) ha dato notevoli contributi alla matematica e alla fisica del caos. Sul fenomeno della turbolenza nutriva dei dubbi sul quadro classico congetturato da Lev D. Landau [13]. Che cosa accade quando ha inizio la turbolenza? Prima che la turbolenza si sviluppi completamente, quali fasi intermedie ci sono?

Secondo l'ipotesi di Landau, quando in un sistema viene immessa energia, compaiono, una per volta, frequenze diverse ed il numero di equazioni che descrivono il moto dovrebbe aumentare corrispondentemente all'aumento dei gradi di libertà e ai moti presenti nel sistema. I Fisici avevano accettato questo quadro, anche se nessuno era in grado di predire quando un aumento

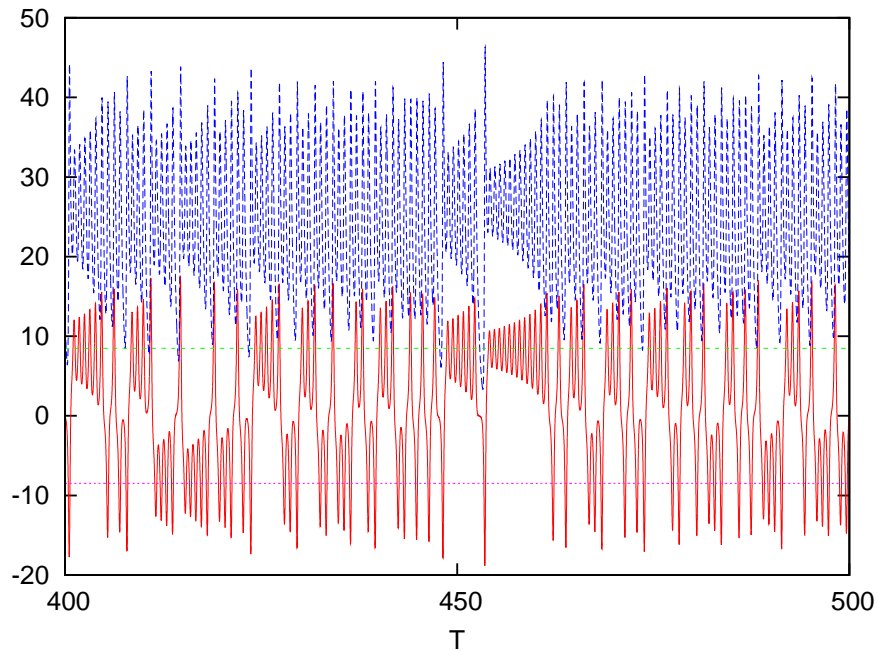


Figura 11: $R = 28.0$. Le coordinate x (colore rosso) e z (colore blu) in funzione del tempo. La linea retta verde $x = [B(R-1)]^{1/2}$ indica la coordinata x del punto C_1 ; la linea retta viola $x = -[B(R-1)]^{1/2}$ indica la coordinata x del punto C_2 .

di energia avrebbe fatto comparire nella dinamica del sistema una nuova frequenza o quale sarebbe stata la frequenza successiva. Nessuno aveva mai osservato il nascere di queste frequenze, anche perché nessuno aveva mai sottoposto a controllo sperimentale il paradigma di Landau per l'inizio della turbolenza.

Negli anni '70 del secolo scorso, la ricerca sulle transizioni di fase aveva risolto molti problemi. I metodi matematici e le tecniche con cui erano state studiate queste transizioni potevano applicarsi al moto dei fluidi? In una cella di fluido, per esempio, come abbiamo già visto, un liquido riscaldato dal basso passa improvvisamente da uno stato di quiete ad uno di moto. Aveva nulla a che fare questo tipo di transizione con i mutamenti che si verificano in una sostanza in una transizioni di fase? A differenza delle transizioni di fase, comunque, le biforcazioni nei fluidi non comportavano alcun mutamento nella sostanza stessa. Quello che succedeva era semplicemente che un liquido in quiete diventava un liquido in movimento.

Nel 1973 Harry Swinney del City College di New York e Jerry Gollub, un giovane diplomato di Harvard, pensando ad una connessione tra le transizioni di fase e l'instabilità nei fluidi, deci-

sero di esaminare un sistema classico di liquido confinato tra due cilindri verticali. Un cilindro ruotava all'interno dell'altro, trascinando con sé il liquido nella sua rotazione. I cilindri, ruotando, producevano il cosiddetto flusso di Couette-Taylor. Quando la rotazione diventava più veloce, si verificava una instabilità: il liquido formava una configurazione simile ad una serie di tubi sovrapposti. Attorno al cilindro apparivano bande in forma di ciambelle, una sopra l'altra. Questo fenomeno era già stato osservato e misurato da G. I. Taylor nel 1923 [17].

Landau aveva scritto che, al crescere di un flusso, sarebbero apparse in un sistema nuove frequenze, una alla volta. Ma l'esperimento non confermò la teoria. Dall'abstract dell'articolo di Swinney e Gollub [18]:

" Misure di dispersione della luce sulla velocità radiale locale, dipendente dal tempo, in un fluido rotante rivelano tre distinte transizioni con l'aumento del numero di Reynolds, ognuna delle quali aggiunge una nuova frequenza allo spettro delle velocità. Ad un maggiore, precisamente definito, valore del numero di Reynolds tutti i picchi discreti scompaiono improvvisamente. Le

nostre osservazioni contraddicono il quadro di Landau sulla formazione della turbolenza, ma sono, forse, consistenti con le proposte di Ruelle e Takens."

Non c'era nessuna nuova frequenza, nessun accumulo graduale di complessità. Il flusso diventava improvvisamente caotico.

I risultati dell'esperimento illustravano in qualche modo un fenomeno di turbolenza che Ruelle aveva ipotizzato due anni prima. Pur non avendo alcuna esperienza sul moto dei fluidi, Ruelle aveva sviluppato sulla turbolenza un quadro alternativo a quello di Landau. Insieme al matematico olandese Floris Takens aveva pubblicato nel 1971 un articolo dal titolo "On the nature of Turbulence" [19], un titolo che ricordava quello dell'articolo di Landau "Sul problema della turbolenza". Invece di vedere nella turbolenza un accumulo di frequenze, che conducevano ad un'infinità di moti indipendenti che si sovrapponevano, i due autori avevano ipotizzato che, per generare la complessità della turbolenza, fossero sufficienti solo tre moti indipendenti.

Secondo Ruelle, inoltre, la dissipazione di energia in un flusso turbolento doveva condurre ad una sorta di contrazione dello spazio delle fasi, ad un'attrazione verso un attrattore. Questo attrattore non poteva essere un punto fisso, in quanto il flusso non si fermava mai. Nel sistema veniva dissipata energia ma, d'altra parte, ne veniva anche immessa. L'altra possibilità era allora che l'attrattore fosse un ciclo limite. Ora gli attrattori, per definizione, sono strutture stabili. Una caratteristica ben nota della turbolenza era la presenza simultanea dell'intero spettro dei cicli possibili. Nella turbolenza non viene mai prodotto alcun ritmo singolo ad esclusione di altri ed in questo senso la turbolenza è come un rumore bianco. Un ciclo limite, quindi, non poteva formarsi.

C'era forse un qualche tipo di attrattore, non ancora noto, stabile, che descrivesse lo stato finale di un sistema dinamico, con un piccolo numero di dimensioni? Quale tipo di orbita poteva essere attratta in uno spazio limitato in modo tale, però, da non ripetersi mai e da non intersecarsi mai? Per produrre poi ogni ritmo, l'orbita avrebbe dovuto essere una linea infinitamente lunga in un'area finita. Insomma, un attrattore

con queste proprietà, che Ruelle e Takens battezzarono **attrattore strano**, avrebbe dovuto essere un frattale, anche se questa parola, nel 1971, non era stata ancora inventata.

Secondo Ruelle e Takens, un attrattore del genere doveva esistere da qualche parte. La reazione della comunità scientifica all'articolo di Ruelle e Takens fu molto fredda, soprattutto perché la nozione di uno spettro continuo, associato a pochi gradi di libertà, sembrava alquanto innaturale. Ma ci furono dei fisici che si resero conto dell'importanza dell'articolo e cominciarono a svilupparne le implicazioni.

In effetti, nel 1971, esisteva già nella letteratura scientifica uno schizzo di questo attrattore. Era l'attrattore dell'articolo di Lorenz del 1963. Certo, non aveva l'aspetto che possiamo ammirare ora nella miriade di rappresentazioni che è possibile avere con gli attuali calcolatori. Nell'articolo di Lorenz era un'immagine con solo due curve a destra, una contenuta nell'altra, e cinque a sinistra. Per tracciare queste sette spire si era reso necessario un enorme lavoro con il calcolatore. Ma sebbene Lorenz ne avesse disegnato un frammento, si poteva intravedere, nello scarno schizzo, più di quello che aveva disegnato: una sorta di doppia spirale, che stilizzava le ali di una farfalla: un'immagine di affascinante bellezza, che raramente è possibile osservare in un articolo scientifico.

L'attrattore era stabile, aveva un piccolo numero di dimensioni, era aperiodico e non poteva mai intersecarsi. Le curve rimanevano sempre all'interno di uno spazio finito ed un numero infinito di traiettorie, al trascorrere del tempo, poteva essere contenuto in uno spazio finito. In altre parole, l'attrattore scoperto da Lorenz era proprio una realizzazione dell'attrattore strano ipotizzato e cercato da Ruelle e Takens ed era un insieme frattale.

Come possiamo allora caratterizzare matematicamente una struttura del genere? Come abbiamo già accennato, un sistema dinamico deterministico si dice caotico se la sua evoluzione nel tempo è caratterizzata da una sensibile dipendenza dalle condizioni iniziali, cioè se due traiettorie $\mathbf{x}(t)$ e $\mathbf{x}'(t)$, inizialmente vicine, si allontanano esponenzialmente:

$$\delta\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}'(t) - \mathbf{x}(t) \sim \epsilon e^{\lambda t}$$

Se allora si vuole predire lo stato del sistema con una tolleranza δ , non è possibile andare oltre il tempo di predicibilità T_p dato dalla relazione:

$$T_p \sim \frac{1}{\lambda} \ln \frac{\delta}{\epsilon}$$

Praticamente, T_p è determinato essenzialmente dall'esponente di Lyapunov λ . Nei sistemi con una forte dipendenza dalle condizioni iniziali, dopo un tempo $T_p \sim k/\lambda$, dove k dipende, seppure poco, dalle condizioni iniziali, non ha più senso parlare di previsioni dello stato del sistema.

Come è ben noto, è possibile definire tutto uno spettro di esponenti di Lyapunov (EL) λ_i . Si consideri un sistema dissipativo d-dimensionale. Una sfera d-dimensionale, con centro in $\mathbf{x}(0)$ all'interno dell'attrattore, di raggio ϵ molto piccolo, si deforma, durante l'evoluzione temporale, in un ellisse il cui volume diminuisce con il tempo. Se al tempo t l'ellisse ha semiassi $l_i(t)$, gli esponenti caratteristici di Lyapunov $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \dots \geq \lambda_d$, per t molto grande, sono definiti dalla relazione:

$$\lambda_i = \frac{1}{t} \ln[l_i(t)/\epsilon] \quad (9)$$

Il primo esponente λ_1 coincide con il λ introdotto precedentemente e nei sistemi dissipativi si ha sempre $\sum_i \lambda_i < 0$.

Gli EL permettono di classificare gli attrattori: (a) per un punto fisso asintoticamente stabile tutti gli EL sono negativi; (b) per un ciclo limite si ha $\lambda_1 = 0$ e $\lambda_i < 0$ per $i > 1$; il moto su un toro k-dimensionale avrà k EL nulli.

Possiamo allora dire che:

un insieme denso e limitato è un attrattore caotico se è un attrattore e se $\lambda_1 > 0$.

La presenza di stiramento ($\lambda_1 > 0$) provoca la dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali. Se oltre a λ_1 ci sono altri EL positivi, si parla di ipercaos. L'attrattore di Lorenz ha un esponente di Lyapunov positivo per cui è un attrattore caotico. Perché viene chiamato strano?

La sua stranezza attiene alla sua dimensione frattale, che non è un numero intero.

Come è ben noto, il termine **frattale** fu introdotto nel 1975 dal matematico francese Benoit Mandelbrot (1924-2010) nel saggio "Les objects

fractals", per indicare un sistema che gode della proprietà di **autosimiglianza**: una qualunque parte di un sistema che gode di questa proprietà, per quanto piccola, opportunamente ingrandita, rivela una struttura identica a quella dell'intero sistema. In generale, tale proprietà di invarianza di scala dà luogo ad una dimensione non intera.

I concetti di autosimiglianza e di dimensione non intera erano stati discussi da F. Hausdorff nel 1919 ed in una certa misura anche da H. Poincaré nel 1885. Per lungo tempo, però, queste idee furono considerate esclusivamente come delle curiosità matematiche; solo in tempi recenti sono state sviluppate per descrivere strutture fortemente irregolari che sono molto comuni nei fenomeni naturali.

Una proprietà che esprime in termini qualitativi la complessità delle figure frattali è quella della **dimensione frazionaria**, ovvero della **dimensione frattale** o **dimensione di similitudine**. La familiare dimensione topologica (euclidea) di un frattale non coincide con questa dimensione. Mandelbrot suggerì di definire **frattale** un insieme che ha dimensione non intera rispetto ad una qualsiasi definizione di dimensione.

Oltre a quella euclidea, ci sono molte definizioni di dimensione di un insieme di punti. Ricordiamo la **dimensione di Hausdorff**, la **dimensione di ricoprimento** o **box-counting**, la **dimensione di correlazione**, la **dimensione di Lyapunov**, ecc.. Diamo, qui di seguito, la definizione di dimensione di ricoprimento.

"Dato uno spazio metrico S ed un insieme limitato $E \subseteq S$, per ogni numero reale $\epsilon > 0$, è possibile ricoprire E con un numero finito di sfere di raggio ϵ . Detto $N(\epsilon)$ il più piccolo di questi numeri, la quantità :

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln \frac{1}{\epsilon}} \quad (10)$$

è detta **dimensione di ricoprimento di E** ."

Si può dimostrare che, per tutte le figure geometriche sufficientemente regolari, la nozione di definizione data coincide con la nozione intuitiva di dimensione e, in particolare, si trova che d è un numero intero. Esistono tuttavia insiemi la cui dimensione di ricoprimento non è intera. Per esempio, per l'intreccio di Sierpinski, sia la dimensione di ricoprimento, che quella di

Hausdorff sono uguali a $\ln 3 / \ln 2 = 1.58496$; la stessa cosa si verifica per l'insieme di Cantor, con le due dimensioni uguali a $\ln 2 / \ln 3 = 0.630$ e per l'isola di Koch con entrambe le dimensioni uguali a $\ln 4 / \ln 3 = 1.2618$.

In genere, la dimensione di un frattale, maggiore della sua dimensione topologica, è minore della dimensione topologica dello spazio euclideo in cui il frattale è immerso, con qualche eccezione: per la curva di Peano, che è immersa in un piano, la dimensione di ricoprimento è uguale a $\ln 9 / \ln 3 = 2$, il valore massimo consentito.

La dimensione di ricoprimento fa parte di un set di dimensioni generalizzate D_q con q intero maggiore o uguale a zero, per mezzo delle quali si può caratterizzare un attrattore.

Consideriamo un sistema dinamico dotato di attrattore in R^n e una successione di N punti appartenenti all'attrattore ai tempi $t_0 = 0, t_1 = t, \dots, t_{N-1} = (N-1)t$. Ricopriamo l'intero attrattore con celle cubiche di lato ϵ . Sia $N(\epsilon)$ il numero di celle contenenti almeno uno degli N punti. La probabilità P_k di trovare un punto dell'attrattore nella k -esima cella (con $k = 1, 2, \dots, N$) si può calcolare tramite la relazione $P_k = \lim_{N \rightarrow \infty} N_k / N$, dove N_k è il numero di punti che cadono nella k -esima cella. Allora, l'insieme di dimensioni generalizzate D_q , con cui si può caratterizzare l'attrattore, è definito da:

$$D_q = \frac{1}{q-1} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{k=1}^{N(\epsilon)} P_k^q}{\ln \epsilon} \quad (11)$$

Per $q = 0$ la (11) fornisce la dimensione di ricoprimento, per $q = 1$ definisce quella che viene chiamata **dimensione di informazione**:

$$D_1 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=1}^N P_k \ln P_k}{\ln \epsilon} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{-S(\epsilon)}{\ln \epsilon} \quad (12)$$

dove la quantità $S(\epsilon) = -\sum_{k=1}^N P_k \ln P_k$ è detta **informazione di Shannon**.

Per $q = 2$ si ha:

$$D_2 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{k=1}^N P_k^2}{\ln \epsilon} \quad (13)$$

che fornisce la definizione della **dimensione di correlazione**.

Un calcolo concreto della dimensione frattale di un attrattore può essere eseguito utilizzando

il metodo di Grasberger e Procaccia [20]. Per un segnale variabile $\vec{x}(t_i)$, si introduce la funzione di correlazione di Grasberger e Procaccia, definita come:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i \neq j}^N \theta(r - |\vec{x}(t_i) - \vec{x}(t_j)|) \quad (14)$$

dove N è il numero di punti della serie temporale e θ è la funzione a scalino di Heaviside.

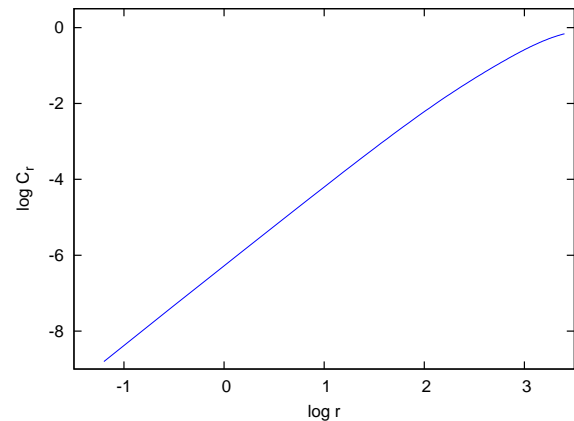


Figura 12: Il logaritmo della funzione di correlazione C_r in funzione del logaritmo del raggio r , per $R = 28$ ed una serie temporale di 30000 punti.

In pratica, per un sistema tridimensionale come quello di Lorenz, si prende un punto della serie temporale e si considera la sfera di raggio r centrata su questo punto. Si calcola il numero di punti all'interno di questa sfera e si ripete l'operazione per tutti i punti. La somma di tutti i punti interni, divisa per $N(N-1) \approx N^2$, fornisce la funzione di correlazione di Grasberger e Procaccia. Se, per r piccolo, $C(r)$ varia secondo la legge di potenza

$$C(r) = \gamma r^{d_c} \quad (15)$$

ovvero se si ha:

$$\log C(r) = \log \gamma + d_c \log r \quad (16)$$

con un fit della curva $\log C(r)$ in funzione di $\log r$, si può calcolare d_c , che è una buona approssimazione della dimensione frattale D_2 .

Tipicamente il grafico si deforma sia per r grande, in quanto il numero delle coppie con distanza minore di r satura, sia per r piccolo dove le

coppie si rarefanno. La stima della pendenza del grafico va quindi effettuata per valori di r intermedi. Questo metodo in genere funziona, fornisce cioè la dimensione dell'attrattore, per sistemi che sono sicuramente caratterizzati da caos deterministico, nel caso cioè in cui si sappia preventivamente che esiste un attrattore del sistema in esame.

Nel caso generale di segnali di origine sperimentale, tuttavia, quasi sempre non si sa se il sistema è dominato da processi stocastici o da caos deterministico. In Fig. 12 è riportato il logaritmo della funzione di correlazione in funzione del logaritmo di r , per $R = 28$. Il valore stimato di d_c è di 2.09. Valori di d_c circa uguali si hanno per R compreso tra 25 e 30. Inoltre, un calcolo numerico approssimato della dimensione di ricoprimento D_0 dell'attrattore, per $R = 28$, fornisce il valore $D_0 = 2.92$.

Il sistema di Lorenz per grandi valori del parametro R .

Per grandi valori del parametro R , le coordinate x, y e z non sono particolarmente convenienti per l'integrazione numerica in quanto scalano in modo differente; l'integrazione numerica del SdL diventa più agevole introducendo una trasformazione di scala per la variabile indipendente t e per le variabili dipendenti x, y e z .

Consideriamo le trasformazioni di scala introdotte da Howard [22]: $x = x'/\epsilon$; $y = y'/(\sigma\epsilon^2)$; $z = z'/(\sigma\epsilon^2)$; $t = \epsilon t'$; $\epsilon = 1/(\sigma R)$.

Nelle nuove variabili t', x', y' e z' , ribattezzate per comodità t, x, y e z , il SdL si scrive:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y - \epsilon\sigma x \\ \dot{y} &= -xz + x - \epsilon y \\ \dot{z} &= xy - \epsilon bz \end{aligned} \quad (17)$$

Nel limite $\epsilon \rightarrow 0$ ($R \rightarrow \infty$), queste equazioni si riducono ad un sistema conservativo integrabile, le cui soluzioni possono essere espresse in termini delle funzioni ellittiche jacobiane. Introducendo la variabile $w = 1 - z$, nel caso $\epsilon = 0$, gli integrali del moto possono essere espressi come:

$$\begin{cases} \frac{x^2}{2} + w = A \\ y^2 + w^2 = B^2 \end{cases}$$

Questi due integrali primi definiscono una famiglia a due parametri di soluzioni periodiche. Per B fissato, le soluzioni giacciono su un cilindro di raggio B disposto lungo l'asse x . Quando $A < B$, c'è una soluzione autosimmetrica, quando $A > B$ ci sono due soluzioni ottenibili l'una dall'altra tramite l'operazione di simmetria (anche nelle nuove variabili il SdL conserva la simmetria $(x, y, w) \rightarrow (-x, -y, w)$).

Per avere una visione globale del tipo di soluzioni che il SdL ha quando il parametro R diventa molto grande, al limite infinito, possiamo costruirci una sorta di mappa di Poincaré. Un flusso continuo può generare una mappa discreta in almeno due modi: con una mappa a tempo T e con una mappa di Poincaré. Una mappa a tempo T si costruisce campionando il flusso ad intervalli di tempo $t = nT$ con $n = 0, 1, 2, \dots$. Molto più importante è la mappa di Poincaré. Sia γ l'orbita di un flusso in R^n . È spesso possibile individuare una sezione trasversale locale Σ intorno a γ di dimensione $n - 1$, in modo tale che tutte le orbite in un intorno di γ attraversino Σ . L'esperienza mostra che le proprietà essenziali di un sistema di equazioni differenziali sono riflesse nelle proprietà equivalenti della mappa. Per esempio, un'orbita periodica "semplice" corrisponde ad un punto fisso della mappa; l'orbita periodica è stabile se, e solo se, il punto fisso è stabile. In questo modo le proprietà asintotiche del sistema risultano visibili più chiaramente e più facilmente rappresentabili graficamente. Il problema risulta inoltre più semplice in quanto si ha a che fare con una mappa invece che con un sistema di equazioni differenziali e la dimensione del sistema da studiare è ridotta di una unità. Il tempo di calcolo, comunque, non diminuisce in quanto, in generale, non è possibile ottenere un'equazione esplicita per la mappa.

Per costruirci, allora, una mappa di Poincaré, consideriamo il piano $x = 0$ e, per ogni valore di ϵ , monitoriamo i valori di y, w e t quando l'orbita attraversa questo piano per x crescenti. Grafici di biforcazione possono allora essere costruiti riportando i valori di y, w o degli intervalli di tempo T tra due successivi attraversamenti del piano

$x = 0$, in funzione del parametro di biforcazione ϵ . Nella Fig. 13 è mostrata la mappa di Poincaré relativa alla variabile y per ϵ compresa tra 0.014 e 0.034.

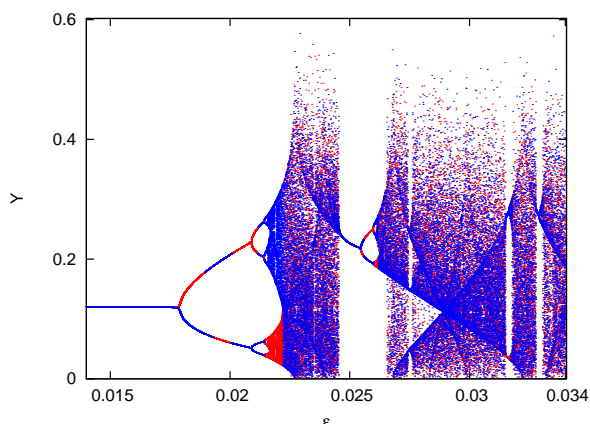


Figura 13: y in funzione di ϵ sul piano $x = 0$. Si è prima realizzata una mappa con la condizione iniziale $x = y = w = 0.5$ per ogni valore di ϵ . Poi si è realizzata un'altra mappa con la condizione iniziale simmetrica $x = x = -0.5$; $w = 0.5$. Il grafo di questa figura è il risultato della sovrapposizione delle due mappe di Poincaré.

La mappa di Poincaré è stata realizzata integrando il SdL per un tempo $T = 2000$ con un passo di integrazione $\Delta T = 10^{-3}$ e rilevando i dati dopo un transiente uguale a 1000. I valori di ϵ tra 0.014 e 0.034 corrispondono ai valori del parametro R rispettivamente tra ~ 510.20 e ~ 86.51 .

Dall'analisi della mappa, si possono ricavare gli intervalli di ϵ all'interno dei quali il SdL ammette soluzioni periodiche. Si possono individuare agevolmente cinque finestre di periodicità più o meno estese, con la prima finestra che si estende da $\epsilon = 0$ a $\epsilon \approx 0.022$, intervallo corrispondente ai valori di R da ∞ a $R \sim 206.61$.

Una biforcazione, in un sistema che possiede una proprietà di simmetria, si verifica, in genere, con la rottura della simmetria originaria. Nel SdL, per $\epsilon = 0$ e con le condizioni iniziali che abbiamo fissato, si ha un'orbita autosimmetrica ($A < B$). All'aumentare di ϵ , l'orbita si mantiene autosimmetrica fino ad $\epsilon \approx 0.018$ ($R \approx 308.64$), dove si ha una rottura della simmetria.

La transizione con rottura della simmetria è chiaramente evidente nella Fig. 14, dove sono riportate le proiezioni delle orbite sul piano (x, z) , relative alle 2 condizioni iniziali $(x, y, w) =$

$(0.5, 0.5, 0.5)$ e $(x, y, w) = (-0.5, -0.5, 0.5)$ per $\epsilon = 0.0175$ (prima della rottura) ed $\epsilon = 0.018$ (dopo la rottura). Le coordinate x e z che compaiono nelle due figure sono quelle del SdL originario: prima della rottura della simmetria le orbite si sovrappongono, dopo la rottura si hanno due orbite distinte.

Utilizzando la descrizione simbolica, secondo la quale un'orbita periodica viene indicata con una sequenza delle lettere R ed L , a seconda che spirizzi nella regione $x > 0$, o nella regione $x < 0$, tutte le orbite periodiche della prima finestra presentano una struttura RL , che si ripete man mano che si verificano le biforcazioni. All'aumentare di ϵ , si hanno perciò orbite del tipo $RL, (RL)^2, (RL)^3, (RL)^4$ e così via fino al valore di accumulazione di $\epsilon \approx 0.022$, al di là del quale si ha caos.

Ogni finestra periodica è caratterizzata da una sequenza propria. Così, nella seconda finestra, che si estende da $\epsilon \approx 0.0245$ ($R \approx 166.60$) ad $\epsilon \approx 0.0262$ ($R \approx 145.68$), le orbite periodiche hanno una struttura R^2L^2 , nella terza presentano una struttura del tipo $RLLRLRRL$ ed attraversano in tre punti il piano $x = 0$. Nella quarta finestra le orbite hanno una struttura RLL (LRR per l'orbita immagine) e la transizione al caos avviene per raddoppiamento di periodo. Infine, la struttura delle orbite nella quinta finestra è del tipo $RRRLLL$ e anche in questo caso il sistema tende al caos con il raddoppiamento di periodo.

Da Lorenz a Feigenbaum ed Hénon

Come si è già detto, i risultati ottenuti da Lorenz, non suscitavano nell'immediato molto interesse, ma con il passare degli anni, inevitabilmente, si incrociarono con il lavoro di molti fisici e matematici che, spinti da interessi diversi da quelli di Lorenz, erano approdati allo studio del caos. Uno di questi era il fisico statunitense Mitchell Feigenbaum (1944-2019).

Feigenbaum era giunto al Los Alamos Laboratory nel 1974, assunto per studiare la turbolenza. Era convinto che la ricerca in quel campo non avesse ancora colto gli aspetti fondamentali dei processi non lineari. Fisico delle particelle elementari, conosceva molto bene la teoria del

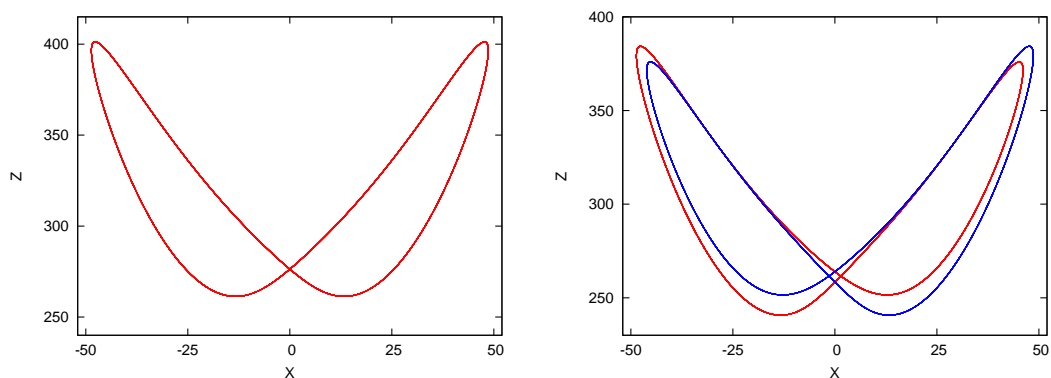


Figura 14: Proiezione delle orbite sul piano x, z per $\epsilon = 0.0175$, prima della rottura della simmetria, e per $\epsilon = 0.018$, dopo la rottura della simmetria.

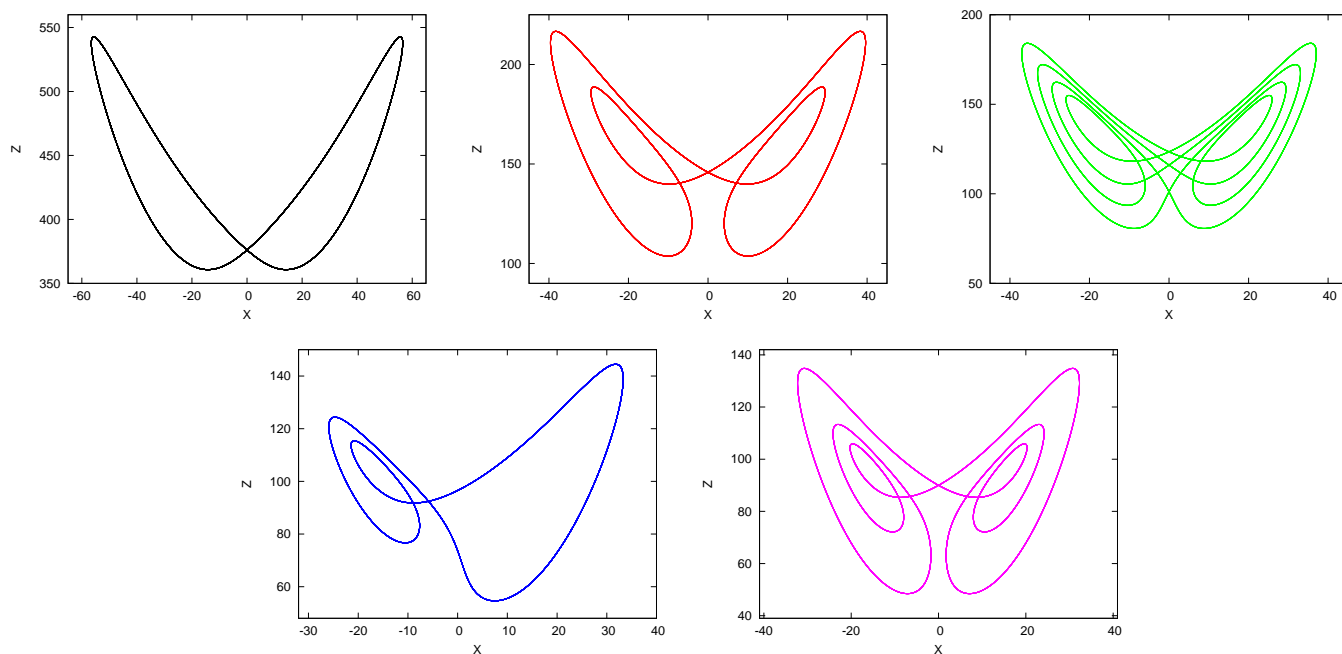


Figura 15: Proiezione dell'orbita sul piano (x, z) per $\epsilon = 0.015$ (prima *nestra* periodica, colore marrone); $\epsilon = 0.025$ (seconda *nestra* periodica, colore rosso); $\epsilon = 0.02745$ (terza *nestra* periodica, colore verde); $\epsilon = 0.03152$ (quarta *nestra* periodica, colore blu); $\epsilon = 0.0328$ (quinta *nestra* periodica, colore viola). Le coordinate x e z sono quelle del SdL nella forma originaria.

gruppo di rinormalizzazione di Kenneth Wilson. Ma cosa poteva dire questa teoria sull'inizio della turbolenza, quando un sistema ordinato diventava caotico? Non c'era alcuna prova che la transizione obbedisse a leggi di scala.

Risolvere un sistema di equazioni differenziali non lineari era nella maggior parte dei casi impossibile. Decise, perciò, di cominciare con lo studio di una mappa simile a quella studiata da Robert May, nel contesto della biologia delle popolazioni:

$$X_{n+1} = \lambda X_n(1 - X_n) \quad (18)$$

Nonostante la sua apparente semplicità, Feigenbaum non riuscì subito a comprendere tutti gli aspetti che questa mappa conteneva in relazione alle dinamiche che hanno luogo in un sistema caotico. Del resto, la stessa cosa era successa ad altri fisici, biologi e ai tre matematici di Los Alamos Metropolis, Paul Stein e Myron Stein che l'avevano studiata insieme ad altre mappe nel 1971 [23].

È comunque strano che nessuno si fosse reso conto allora che già nel 1964 Lorenz aveva considerato la medesima mappa per rispondere ad un preciso interrogativo sul clima: la meteorologia della Terra ha una media a lungo termine? Esiste insomma un clima? Come sottolineò Lorenz, le condizioni meteorologiche medie per gli ultimi 12000 anni sono molto diverse da quelle dei 12000 anni precedenti, quando la maggior parte dell'America settentrionale era ricoperta da ghiacci. C'era un clima che aveva ceduto il posto ad un altro per qualche motivo, oppure un sistema come quello dei fenomeni meteorologici non poteva mai convergere verso una media?

Come May, Lorenz indagò che cosa accadeva iterando la mappa. Quando i valori del parametro di controllo erano piccoli, egli osservò che il sistema raggiungeva un punto fisso stabile e interpretò questo risultato nel modo più semplice possibile: il sistema produceva un clima che non cambiava mai nel tempo. Al crescere del parametro osservò che il sistema oscillava fra due punti. Anche in questo caso il sistema convergeva verso una media. Oltre un certo limite, Lorenz osservò il caos. La media fluttuava in modo instabile. Piccole variazioni del valore del parametro di controllo comportavano variazioni considerevo-

li della media. Per analogia, il clima della Terra non avrebbe mai potuto assestarsi in una posizione di equilibrio con un comportamento medio a lungo termine. Ovviamente, queste analogie non avevano una giustificazione scientifica.

Lorenz, se da una parte era conscio che non poteva in alcun modo giustificare l'uso di una mappa tanto semplice per trarre conclusioni sul clima terrestre, dall'altra era intimamente convinto che l'equazione alle differenze finite cogliesse molti aspetti, matematici e fisici, delle transizioni da un regime di flusso ad un altro e del fenomeno dell'instabilità. Lorenz pubblicò i risultati della sua ricerca su *Tellus* [24], una rivista svedese di meteorologia. Nessuno legge *Tellus*, ebbe a dire un fisico [1] e questo è forse il motivo per cui Feigenbaum non sapeva nulla del lavoro di Lorenz.

Nell'estate del 1975, ad un convegno ad Aspen, nel Colorado, Feigenbaum aveva assistito ad una conferenza di Steve Smale sulla mappa quadratica alle differenze finite. Secondo Smale, c'erano questioni interessanti ancora aperte sul comportamento della mappa nel suo passaggio dal regime periodico a quello caotico. Feigenbaum decise allora di concentrarsi sulla regione di confine tra ordine e caos nella mappa quadratica, sperando che il comportamento della mappa in questa regione potesse suggerirgli qualcosa sulla transizione in un fluido da un regime di flusso regolare ad uno turbolento. Scopri che nell'evoluzione verso un comportamento caotico, questa regione era caratterizzata da una cascata di raddoppiamenti di periodo al variare del parametro di controllo. Calcolando, con la sua calcolatrice, i valori λ_n del parametro in cui si verificavano questi raddoppiamenti, Feigenbaum fece la scoperta straordinaria di una regolarità: i raddoppiamenti di periodo si verificavano sempre più rapidamente ed i valori manifestavano una convergenza geometrica, per n , verso il valore critico $\lambda_c = 3.5700$. Feigenbaum calcolò il rapporto di convergenza e trovò un numero: 4.669:

$$\delta_F = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n - \lambda_{n-1}}{\lambda_{n+1} - \lambda_n} = 4.669 \dots \quad (19)$$

Si trattava di una scoperta importante, in quanto la convergenza geometrica significava che qual-

cosa nell'equazione presentava un'invarianza di scala e l'invarianza di scala è un marchio della teoria della rinormalizzazione.

Ma la cosa ancora più sorprendente era che altre equazioni alle differenze finite, di forma e significato diversi, manifestavano la convergenza verso lo stesso numero che, con un calcolo più preciso, fatto dallo stesso Feigenbaum, era diventato 4.6692016090. Questo risultato fu dimostrato, per una larga classe di famiglie di sistemi dinamici, da P. Callet, J. P. Eckmann ed O. E. Lanford III nel 1980 [25]. Quadratica o trigonometrica che fosse la mappa, il risultato era sempre lo stesso. Emergeva un ordine, che sembrava non avere una connessione con la mappa originaria. Non aveva nulla a che fare con parabole, con seni o con nessuna particolare funzione. Questa universalità, che Feigenbaum aveva scoperto, era simile a quella degli esponenti critici nelle transizioni di fase. Pur essendo possibile trovare esempi in cui il rapporto nell'Eq. (19) era diverso da δ_F , tuttavia δ_F era il valore normale.

L'universalità faceva sperare che risolvendo un problema facile, i fisici potessero risolvere problemi molto più difficili. Inquadrando inoltre la sua teoria nella cornice del gruppo di rinormalizzazione, Feigenbaum la rese uno strumento di calcolo per i fisici.

L'evoluzione verso il caos, caratterizzata dal meccanismo del raddoppiamento di periodo e dalla sua proprietà di universalità, costituisce il cosiddetto **scenario di Feigenbaum**.

In Fig. 16 è riportato il grafico di biforcazione della mappa quadratica (18).

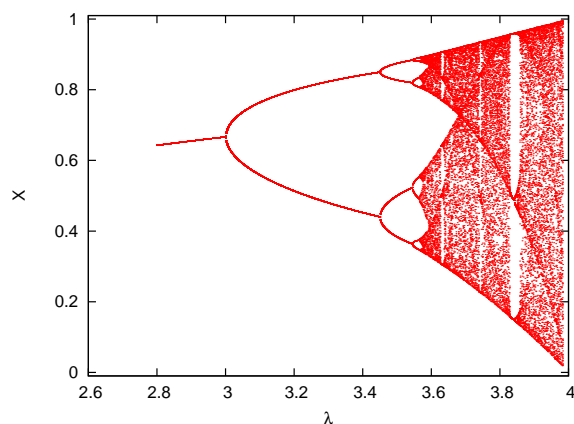


Figura 16: Diagramma di biforcazione della mappa quadratica.

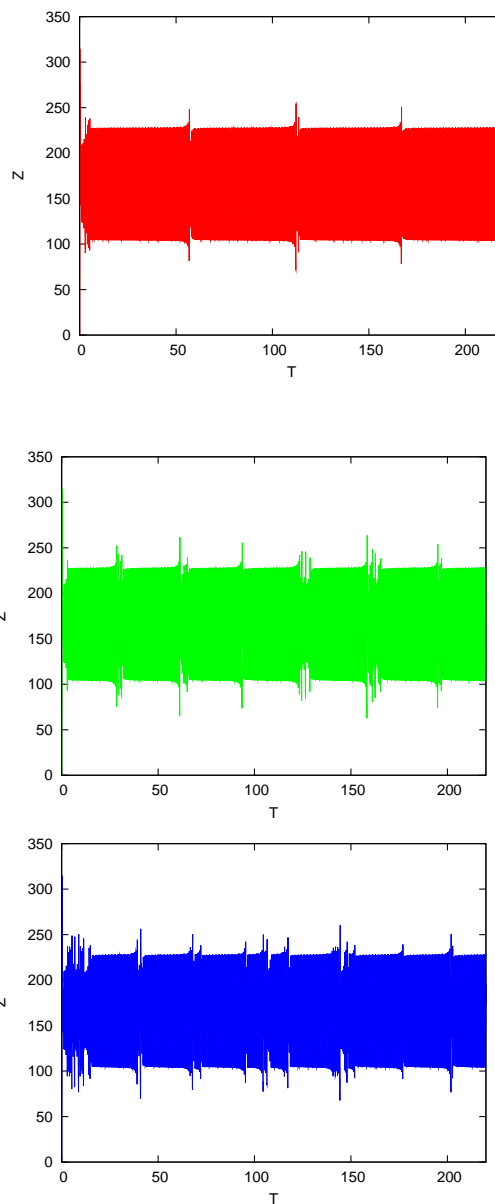


Figura 17: z in funzione del tempo T per $R = 166.07$ (colore rosso), $R = 166.09$ (colore verde) ed $R = 166.10$ (colore blu).

Altri scenari sono possibili. I risolti nel campo sperimentale del lavoro di Lorenz e successi-

vamente di quello di Ruelle e Takens furono molto importanti, nel senso che spinsero a realizzare molti esperimenti per controllare l'impossibilità, nella maggior parte dei sistemi, dei moti quasi periodici con più di tre frequenze. Questi esperimenti riguardavano sistemi dissipativi reali, reazioni chimiche, oppure simulazioni numeriche con i calcolatori. Nel giro di pochi anni risultò evidente che lo schema sviluppato da Ruelle e Takens, il cosiddetto **scenario di Ruelle e Takens**, era corretto: nello scenario di Ruelle e Takens rimangono, della teoria di Landau, solo le prime tre transizioni: la transizione da punto fisso a ciclo limite, quella da ciclo limite a traiettoria con due frequenze e quella da traiettoria con due frequenze a traiettoria con tre frequenze. Dopo, si ipotizza la transizione ad un moto caotico caratterizzato da un attrattore strano. Mentre lo scenario di Landau richiede un gran numero di gradi di libertà, quello di Ruelle e Takens ammette il caos anche in un sistema con soli tre gradi di libertà.

Un altro scenario molto comune, oltre a quello di Ruelle e Takens e a quello di Feigenbaum è lo **scenario dell'intermittenza**. In questo scenario l'attrattore, inizialmente costituito da un'orbita periodica, si avvicina, al crescere del parametro di controllo R , ad un'orbita periodica simile instabile, fino a confondersi con essa, per $R = R_c$, per poi sparire per $R > R_c$: una **collisione** fra orbite periodiche di opposta stabilità, con successiva **annichilazione**. Se C è la curva descritta dall'orbita periodica stabile per $R = R_c$, per $R > R_c$ resta comunque una traccia di questa orbita, cosicché un punto dell'orbita che venga a trovarsi nelle vicinanze di C , tende a rimanervi a lungo seguendo da vicino la curva C , tanto più a lungo quanto più R è vicino ad R_c ; successivamente si allontana, spendendo altrove un intervallo di tempo più o meno lungo, per ritornare poi di nuovo nelle vicinanze della curva C e ripetere un'evoluzione simile. Quello che si osserva è allora un moto che sembra periodico per un tempo abbastanza lungo (**fase laminare**), cambiando poi qualitativamente carattere per un intervallo di tempo di lunghezza casuale. Si ha dunque un regime intermittente in cui si alternano fasi laminari e fasi non laminari.

I tre scenari descritti, i più comuni, possono apparire simultaneamente in uno stesso modello

in diverse regioni di variabilità del parametro di controllo. Non esauriscono, comunque, tutte le possibilità. La transizione al caos nel SdL, per $R = R_c \sim 24.74$, non rientra, per esempio, in uno di essi e fornisce un quarto scenario. Nel SdL, il punto di equilibrio stabile, C_1 o C_2 , perde la stabilità per $R = R_c$, ma per $R > R_c$ non si osserva un attrattore periodico con periodo uguale a $2\pi/\omega$, se $\pm\omega$ è la parte immaginaria dei due autovalori, ma appare direttamente un moto caotico.

Lo scenario dell'intermittenza nel SdL appare comunque per grandi valori del parametro R al confine tra una finestra periodica e il caos. Consideriamo, per esempio, la finestra periodica che si estende da $R = 146$ a $R = 166$ con orbite del tipo R^2L^2 . In Fig. 17 è riportata, in funzione del tempo, la variabile z per $R = 166.07$, $R = 166.09$ ed $R = 166.10$. La figura evidenzia chiaramente l'alternanza di fasi laminari con fasi non laminari. L'alternanza risulta più frequente e più complessa, ma mano che ci si allontana dal bordo superiore della finestra periodica.

Uno scenario di intermittenza si manifesta anche sul bordo superiore della quinta finestra periodica per $R = 93.1585$. In Fig. 18 è mostrato questo scenario per tre valori di R .

L'impulso allo studio dei moti caotici dato dai lavori di Lorenz, di Ruelle e Takens contribuì a chiarire questioni molto importanti relative alla dinamica del caos nei sistemi dinamici. Da una parte si cercò di visualizzare gli attrattori strani. L'attrattore di Lorenz era un attrattore tipico? Quali altri tipi di attrattore erano possibili? Dall'altra si cercò sperimentalmente di confermare o confutare l'idea dell'applicabilità degli attrattori strani al caos in natura.

In Giappone, lo studio dei circuiti elettrici condusse Yoshisuke Ueda a scoprire una serie molto bella di attrattori strani [26]. In Germania, Otto Rössler, un medico che non esercitava la professione, propose, nel 1976 [27], un sistema di tre equazioni differenziali ordinarie, molto simile al SdL, che esibiva una dinamica caotica caratterizzata da un attrattore con una struttura frattale.

Ma forse, l'esempio più significativo di attrattore strano fu fornito da uno scienziato molto lontano dalla fisica e dalla matematica della turbolenza e dalla fluidodinamica: l'astronomo del-

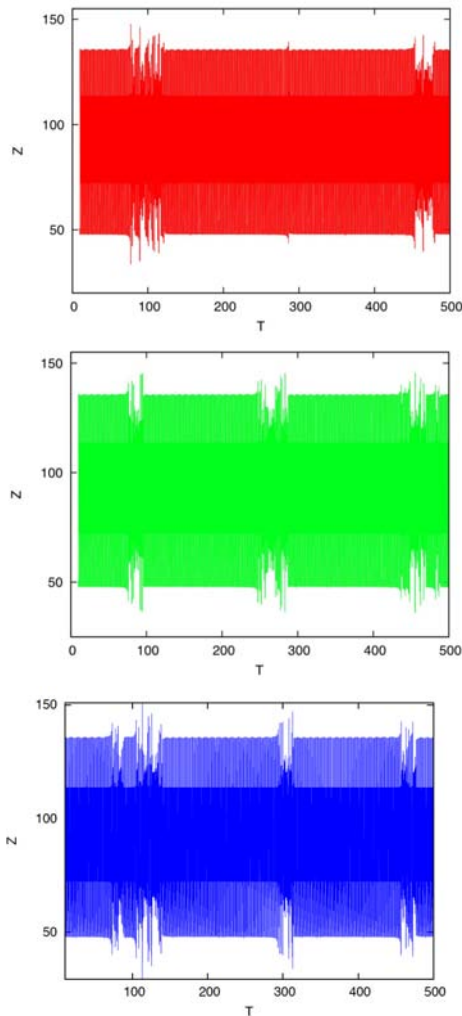


Figura 18: La variabile z in funzione del tempo T per $R = 93.158515$ (colore rosso), $R = 93.158520$ (colore verde) ed $R = 93.158550$ (colore blu).

l'Osservatorio di Nizza Michel Hénon. La meccanica celeste differisce da quella della maggior parte dei sistemi terrestri. I sistemi astronomici non sono dissipativi e in assenza di dissipazione lo spazio delle fasi non si contrae, né si piega o si stira per produrre una struttura frattale. Un attrattore strano non può formarsi. Hénon si era interessato della stabilità e dell'evoluzione degli ammassi globulari, aggregazioni dense di stelle. Le orbite stellari all'interno delle galassie, su una scala di tempo di 200 milioni di anni, assumono un carattere tridimensionale, anziché descrivere perfette ellissi. Per semplificare il problema, Hénon usò perciò una tecnica paragonabile alla realizzazione di una mappa di Poincaré. Immaginò un piano posto ad un lato della galassia, in

modo tale che ogni orbita lo attraversasse e andò a studiare la configurazione di punti che in questo modo veniva a formarsi.

Prima di Hénon, una generazione di astronomi aveva osservato e calcolato centinaia di orbite, interessandosi però solo a quelle che si rivelavano periodiche; lo stesso Hénon si aspettava che tutte le orbite dovessero essere regolari. All'Università di Princeton, dove si era recato in visita nel 1962 e dove, per la prima volta, ebbe accesso ai computers, insieme al suo allievo Carl Heiles, osservò invece qualcosa di totalmente nuovo quando si aumentava l'energia nel loro sistema astratto: un disordine diffuso, mescolato a strutture ordinate che suggerivano **isole e catene di isole** [28]. Difficile dare una descrizione matematica di una configurazione simile di punti ed Hénon passò ad altri problemi.

Ma quattordici anni dopo, quando sentì parlare per la prima volta degli attrattori di Ruelle e Lorenz, sebbene i sistemi dissipativi non fossero il suo campo di ricerca e tenendo forse presenti quelle strutture complesse di punti e isole che aveva ottenuto numericamente con Heiles, pensò di sviluppare una sua idea sul caos. Invece di lavorare con equazioni differenziali, decise di considerare equazioni alle differenze finite e partì dall'idea che la chiave, per comprendere il caos, doveva risiedere nei ripetuti stiramenti e piegamenti dello spazio delle fasi alla maniera di un pasticcere che ripetutamente stira e piega l'impasto. Il risultato di questa sua convinzione fu la mappa che ora ha il suo nome, appunto la mappa di Henon:

$$\begin{aligned} X_{n+1} &= 1 + Y_n - A X_n^2 \\ Y_{n+1} &= B X_n \end{aligned} \quad (20)$$

In Fig. 19 sono riportati l'attrattore che Henon ottenne ponendo $A = 1.4$ e $B = 0.3$ e il grafico di biforcazione della sua mappa in funzione del parametro A . Come nell'attrattore di Lorenz, sempre più particolari possono essere osservati con una serie di immagini di ingrandimento progressivamente crescente. I punti vagano in modo casuale e, dopo un certo numero di iterazioni, si materializza l'attrattore mostrato in figura. Le varie dimensioni dell'attrattore di Henon (correlazione, Hausdorff, ricoprimento, Lyapunov...)

sono tutte maggiori di uno e variano tra ≈ 1.23 (correlazione) e ≈ 1.27 (ricoprimiento).

Conclusioni

Il SdL è stato il primo sistema dinamico continuo a pochi gradi di libertà caratterizzato da un comportamento caotico con attrattore strano. Lorenz mostrò che i fenomeni atmosferici non possono essere previsti, con precisione fissata, oltre un tempo in pratica assai breve, anche se da un punto di vista matematico essi sono descritti da equazioni deterministiche. Il suo grande merito fu quello di mostrare che, sebbene le equazioni che descrivevano il suo sistema, dal punto di vista quantitativo, non potessero essere considerate una buona approssimazione del problema fisico reale, pur tuttavia esse potevano essere utilizzate, in generale, per comprendere proprietà significative di molti sistemi reali aventi un comportamento caotico.

Con il suo lavoro chiarì inoltre che non erano necessari molti gradi di libertà per osservare fenomeni molto disordinati, quali la turbolenza. Sistemi deterministici, anche molto semplici, possono essere caratterizzati da moti caotici e da una varietà di scenari nella loro evoluzione verso il caos, da renderli addirittura possibili generatori di numeri a caso. Non è inoltre necessario, perché si inneschi in questi sistemi un comportamento caotico, alcun rumore di fondo, ovvero una perturbazione stocastica agente sul sistema, anche se, ovviamente, un rumore di fondo può rendere caotico un moto non caotico. In questo caso, però, il disordine diminuirà al diminuire del rumore, mentre l'effetto di un rumore di fondo, su un moto intrinsecamente caotico di un sistema deterministico, è invece trascurabile, beninteso se il rumore è piccolo.

Il SdL evidenzia inoltre in modo significativo la differenza tra il caos deterministico e il caos di Boltzmann. In Boltzmann, la stocasticità fa muovere il sistema su una regione dello spazio delle fasi che ha la stessa dimensionalità N di tutto il sottospazio permesso dagli integrali primi del moto; nel caos deterministico dei sistemi dissipativi, non si conserva il volume nello spazio delle fasi e asintoticamente, e indipendentemente dalle condizioni iniziali, il sistema sarà confinato

in una regione di dimensioni D minori di N e l'attrattore sarà un frattale.

La scoperta di Lorenz è inoltre notevole, sotto un altro aspetto non meno importante, quando si vanno a considerare gli enormi sforzi e investimenti finanziari profusi in tutto il mondo per la realizzazione di programmi sempre più sofisticati per le previsioni meteorologiche. Negli anni Cinquanta e Sessanta fu messo a punto un programma internazionale che utilizzava le nuove tecnologie del computer digitale e del satellite artificiale. Sotto la guida di von Neumann, fu addirittura costruito un computer per permettere **il controllo del tempo**. Negli anni Ottanta, per realizzare il programma di von Neumann, al National Meteorological Center degli Stati Uniti fu utilizzato il supercomputer Control Data Cyber 205, che poteva effettuare milioni di operazioni al secondo, da confrontare con le sessanta moltiplicazioni al secondo del Royal McBee, il computer di Lorenz. Il modello di Lorenz era costituito da dodici equazioni, quello che risolveva il supercomputer ne conteneva centinaia di migliaia, che tenevano conto di migliaia e migliaia di dati in input. L'Europa non era da meno, con il suo European Centre for Medium Range Weather Forecasts, nei pressi di Londra.

Dati sperimentali venivano immessi nel computer come condizioni iniziali delle equazioni differenziali dei vari modelli e se qualche modello prevedeva un risultato bizzarro, i programmatori correggevano le equazioni per indirizzare i risultati verso previsioni più ragionevoli. Si diceva che l'European Centre facesse risparmiare miliardi di dollari ogni anno grazie alle sue previsioni.

Ma nel programma di von Neumann e in quelli elaborati successivamente non si teneva conto dell'insorgere del caos, dell'effetto farfalla. Al di là di due o tre giorni, anche le più accurate previsioni diventavano poco attendibili e dopo una settimana risultavano inutili.

Lorenz scopri per caso, nel 1961, l'effetto farfalla e da allora rivolse sempre più la sua attenzione alla matematica dei sistemi che non si posizionavano mai in uno stato stazionario, sistemi che, nel corso del tempo, quasi si ripetevano, ma mai in modo completo. I fenomeni meteorologici sono un sistema del genere e questo fatto aumenta le difficoltà della loro previsione da parte dei me-

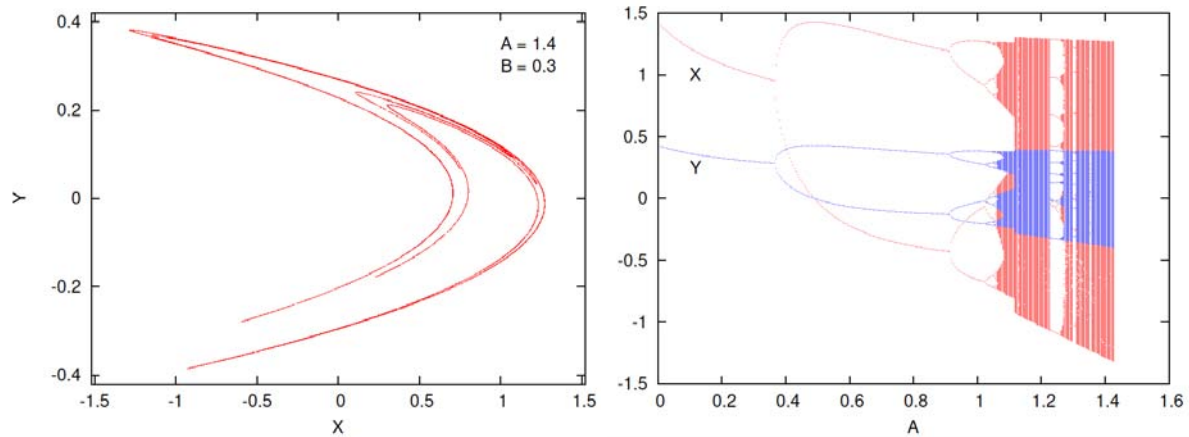


Figura 19: L'attrattore di Henon per $A = 1.4$ e $B = 0.3$ e il diagramma di biforcazione di x (colore rosso) ed y (colore blu) in funzione del parametro A .

teorologi. L'effetto farfalla, inoltre, costituisce un fenomeno essenziale e non marginale, per produrre la complessità della meteorologia terrestre. Se le piccole perturbazioni, pensava Lorenz, restano piccole, invece di crescere a dismisura in certe circostanze, allora, il tempo si evolverebbe più o meno sempre allo stesso modo. L'effetto farfalla, cui successivamente sarebbe stato dato il nome tecnico di **dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali**, costituisce allora il meccanismo essenziale per spiegare l'aleatorietà a lungo termine delle previsioni meteorologiche.

Nella sua versione in miniatura, a dodici equazioni, dei fenomeni meteorologici, Lorenz era riuscito mirabilmente a simulare sia l'aperiodicità, sia la dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali. Poi, da matematico, lasciò stare le previsioni del tempo e andò alla ricerca di un sistema ancora più semplice, che producesse lo stesso comportamento complesso e, ispirato da un problema classico di fluidodinamica, la convezione termica, giunse alla formulazione del suo famoso sistema di tre equazioni. Del modello originario, non era rimasto quasi nulla, solo la nonlinearietà. Chissà quanti Fisici e Matematici hanno pensato di poterlo risolvere negli anni successivi!

Benché il SdL non fornisse un modello completo della convezione, risultò che descriveva esattamente altri sistemi reali. Le sue equazioni descrivono esattamente, per esempio, una vecchia dinamo, nella quale la corrente elettrica scorre attraverso un disco che ruota in un campo magnetico. In certe condizioni la dinamo può invertirsi e alcuni fisici suggerirono che il comportamento

di tale dinamo potesse fornire una spiegazione per un altro fenomeno di inversione, quello del campo magnetico terrestre [29].

Nel 1972, il fisico matematico Willem Malkus [30] fece vedere che un caso speciale delle tre equazioni del SdL descriveva anche un particolare tipo di ruota idraulica, costituita da una ruota a cui sono appesi dei secchi bucati sul fondo, che gira sotto la spinta di un getto d'acqua continuo. Questo particolare tipo di ruota è allora un sistema dissipativo al quale viene fornita continuamente energia. Il getto d'acqua, che proviene dall'alto, riempie i secchi, che fanno girare la ruota. I secchi, essendo bucati, si riempiono e si svuotano, a seconda della quantità d'acqua, dando origine ad un movimento irregolare e imprevedibile.

Ci vollero molti anni prima che tutte le proprietà del SdL, con la sua meravigliosa doppia spirale simile ad una farfalla, fossero pienamente comprese. Questo si verificò quando altri fisici, matematici, biologi ed astronomi, partendo da ambiti culturali diversi, si imbarcarono nel caos dei sistemi dinamici. Solo allora si resero conto delle straordinarie novità contenute nell'articolo di un meteorologo, pubblicato anni prima su una rivista di meteorologia.



- [1] J. Gleick, *Caos - La nascita di una nuova scienza*, BUR Le scoperte, Mondadori Libri S.p.A. (2018).
- [2] H. Bénard: "Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide", *Rev. Gen. Sci. Pures Appl.* **11** (1900) 1261.

- [3] Lord Rayleigh, "On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side", *Phil. Mag.* **32**, 529 (1916).
- [4] B. Saltzman, "Finite Amplitude Convection as an Initial Value Problem", *J. Atm. Sci.*, **19**, (1962) 329.
- [5] E. N. Lorenz, "Deterministic Nonperiodic Flow", *J. Atm. Sci.* **20**, (1963) 130.
- [6] R. Bradbury, *Rumore di tuono*, in *Fantastiche vacanze. 33 "viaggi alieni" proposti dai migliori autori di SF*, Arnoldo Mondadori Editore (1989).
- [7] J. B. McLaughlin, P. C. Martin, "Transition to turbulence in a statically stressed fluid system", *Phys. Rev. A* **12**, (1975) 186.
- [8] P. S. de Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, M.me Ve. Courcier, 2^a ed., Paris, (1814), p.3.
- [9] H. Poincaré, *Science et méthode*, Flammarion, Paris (1908).
- [10] F. T. Arecchi, "Ordine", *Enciclopedia delle Scienze Fisiche*, **IV**, Treccani, Roma (1994), p. 307.
- [11] P. Bergé, Y. Pomeau, Ch. Vidal, *L'ordre dans le caos*, Hermann, Paris, (1988).
- [12] Dal manoscritto letto in occasione del Conferimento della Laurea "Honoris Causa" a Lorenz, da parte dell'Università del Salento, Lecce (1992).
- [13] L. Landau, C. R. (Dokl.) Acad. Sci. URSS **44**, (1944) 311. L. Landau, E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics*, Pergamon, London, England (1959).
- [14] G. Gallavotti, "Caos", *Enciclopedia delle scienze sicche*, **I**, Treccani, Roma (1992), p. 493.
- [15] A. M. Lyapunov, *Problème Général de la Stabilité du Mouvement* (transl. from Russian); Ann. Fac. Sci. Univ. Toulouse **9**, pp. 203-475, 1907. Riprodotto in Ann. Math. Study, vol. 17, Princeton 1947. Anche *The General Problem of the Stability of Motion*, Taylor and Francis, London (1992).
- [16] B. Mandelbrot, *Les objets fractals, form, hasard et dimension* (1975). *The fractal geometry of nature*, H. Freeman and Company, San Francisco (1982).
- [17] G. I. Taylor, "Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders", *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, **A 223**, (1923) 289.
- [18] J. P. Gollub and H. L. Swinney, "Onset of turbulence in a rotating fluid", *Phys. Rev. Lett.*, **35**, (1975) 927.
- [19] D. Ruelle, F. Takens, "On the nature of turbulence", *Comm. Math. Phys.*, **20**, (1971) 167.
- [20] P. Grasberger, I. Procaccia, "Characterization of strange attractors", *Phys. Rev. Lett.* **50**, (1983) 346.
- [21] J. Eckmann, D. Ruelle, "Ergodic theory of chaos and strange attractors", *Rev. Mod. Phys.*, **57**, (1985) 617.
- [22] L. N. Howard - *Notes on the 1974 Summer Study Program in Geophysical Fluid Dynamics* - at WHOI, Woods Hole Oceanographic Inst., Woods Hole, Ma.
- [23] N. Metropolis, M. L. Stein, and P. R. Stein, "On Finite Limit Sets for Transformations on the Unit Interval", *Jour. of Combin. Theory (A)* **15**, (1973) 25.
- [24] E. Lorenz, "The problem of Deducing the Climate from the Governing Equations", *Tellus* **16**, (1964) 1.
- [25] P. Callet, J. P. Eckmann, O. E. Lanford III, "Universal Properties of Maps on an Interval", *Comm. Math. Phys.*, **76**, (1980) 211.
- [26] Y. Ueda, "Random Phenomena Resulting from Non-linearity in the System Described by Duffing's Equation", *Int. Jour. of Non-Linear Mechanics*, **20**, (1985) 481.
- [27] O. E. RöSSLer, "An Equation for continuous chaos", *Phys. Lett. A*, **57**, (1976) 397.
- [28] M. Hénon, C. Heiles, "The applicability of the third integral of motion: Some numerical experiments", *Astr. Jour.*, **69**, (1964) 73.
- [29] K. A. Robbins, "A Moment Equation Description of Magnetic Reversals in the Earth", *Proc. of the Nat. Acad. of Sciences*, **73**, (1976) 4297.
- [30] W. V. R. Malkus, "Non-periodic convection at high and low Prandtl number", *Mem. Soc. R. Sci. Liege Collect.*, **IV**, (1972) 125.

Mario Leo: è stato Professore associato di Fisica Generale presso il Dipartimento di Fisica dell'Università del Salento, dove ha svolto la sua attività didattica e di ricerca fin dal 1968, dopo aver conseguito la laurea in Fisica nel 1967 presso l'Università di Roma "La Sapienza". È attualmente in pensione. Ha tenuto corsi di Fisica dei reattori nucleari, Laboratorio, Fisica Generale e Fisica dei sistemi dinamici. La sua attività di ricerca ha riguardato la Fisica dei fasci di particelle negli acceleratori, del free electron laser, del klystron ottico, effetti non lineari nelle celle solari e in semiconduttori amorfi, le equazioni di evoluzione non lineari e la Fisica e la Matematica dei solitoni, caos, la Fisica del sistema Fermi-Pasta-Ulam.

Numero XV Anno 2020

Viaggio nella Scienza

Ithaca



Cambiamenti climatici

