
Convezione in fluidi stratificati: il caso delle dita di sale.

Francesco Paparella

*Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi" - Università del Salento - Lecce
Division of Sciences - New York University - Abu Dhabi*

Come sanno tutti coloro che hanno osservato una pentola piena d'acqua posta sul fornello, se una massa d'acqua è scaldata dal basso, poiché l'acqua calda, essendo meno densa di quella fredda, tende a risalire, si generano dei moti convettivi. Ma che cosa succede se si scalda l'acqua dall'alto? Ad una prima analisi parrebbe impossibile che si possa generare del moto: se la densità del fluido aumenta con l'aumentare della profondità, una condizione di assenza di moto dovrebbe perdurare indefinitamente, ed essere stabile rispetto a piccole perturbazioni. Ed in effetti, se si tratta di acqua pura, senza nessun soluto, è proprio così. Ma se l'acqua contiene un soluto che può cambiarne la densità (ad esempio il sale), sorprendentemente, l'ipotesi che lo stato di assenza di moto sia stabile non può affatto essere data per scontata.

Nel 1956 apparve un brevissimo articolo del grande oceanografo Henry Stommel (in collaborazione con Arons e Blanchard) dallo strano titolo "Una curiosità oceanografica: la fontana salina perpetua" [1]. In quel lavoro si osservava che

se un lungo tubo di rame (o di un altro materiale conduttore del calore) fosse stato immerso verticalmente nell'oceano e si fosse innescato, tramite una pompa, un moto verso l'alto dell'acqua contenuta nel tubo, una volta staccata la pompa il moto avrebbe continuato a persistere, producendo una "fontana perpetua"!

Il motivo del moto dell'acqua su per il tubo può essere spiegato se si osserva come è stratificato l'oceano (Figura 1). Salvo che nelle regioni polari, gli strati superficiali dell'oceano sono assai più caldi e salati delle acque che giacciono in profondità, che, invece, sono fredde e relativamente poco salate. Una maggiore salinità (a parità di temperatura) rende più densa l'acqua, mentre una maggiore temperatura (a parità di salinità) la rende meno densa. Quindi, nell'oceano, la stratificazione di salinità e quella di temperatura hanno effetti contrapposti sulla densità. Tuttavia l'effetto della temperatura è quasi sempre dominante rispetto a quello della salinità, e, pertanto, l'acqua vicino alla superficie è meno densa di quella che si trova a maggiore profondità, e quindi la prima galleggia placidamente sulla seconda.

Se ora torniamo a concentrarci sulla fontana di Stommel, osserviamo che mentre l'acqua profonda risale lungo il tubo essa, è posta a contatto

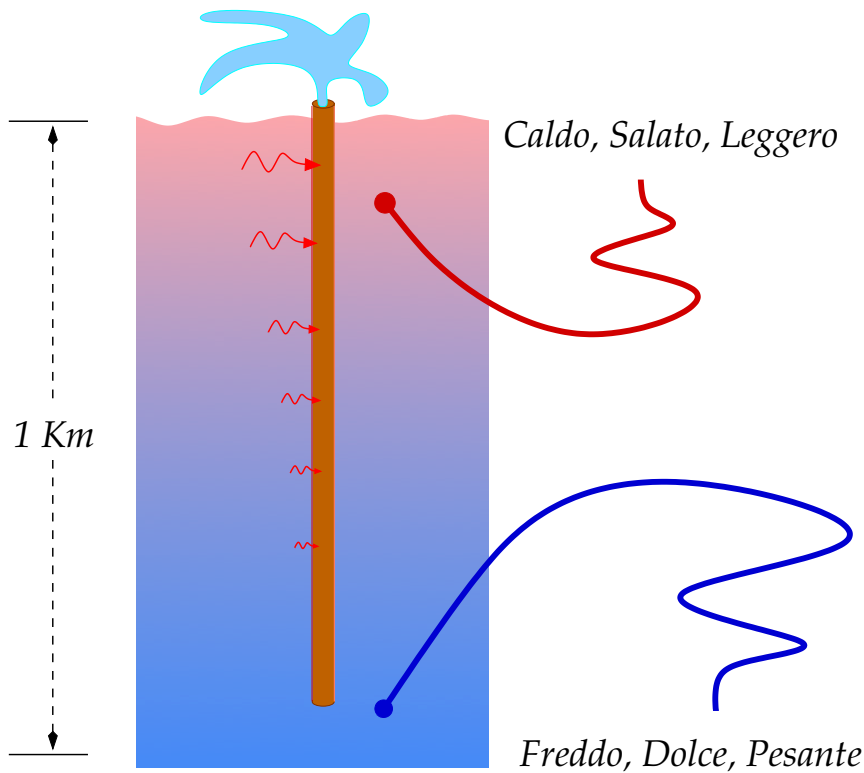


Figura 1: La fontana salina perpetua di Henry Stommel. Un tubo di materiale conduttore di calore è immerso nell'oceano. Mentre l'acqua risale, si scalda, ma non acquista salinità. Pertanto il peso della colonna d'acqua nel tubo è inferiore a quello di una colonna d'acqua di pari lunghezza fuori dal tubo, e si genera una spinta verso l'alto.

termico tramite le pareti con l'acqua a profondità più bassa, la cui temperatura aumenta con l'approssimarsi della superficie. Pertanto l'acqua dentro al tubo ha una temperatura quasi uguale a quella fuori dal tubo. Non così la salinità! Un solido tubo metallico può permettere la conduzione della temperatura, ma non certo della salinità. Quindi l'acqua dentro al tubo conserva la bassa salinità dell'acqua profonda. In pratica, la differenza tra la colonna d'acqua all'interno del tubo ed una colonna d'acqua di pari sezione ed altezza fuori dal tubo è che la colonna nel tubo contiene meno sale. Alla base del tubo esiste una spinta verso il basso dovuta al peso della colonna d'acqua interna al tubo, ed una verso l'alto, pari al peso della colonna d'acqua esterna al tubo, la cui pressione idrostatica, per il principio di Pascal, si redistribuisce omogeneamente. Ma la colonna nel tubo, poiché contiene meno sale, ha una massa, e quindi un peso, inferiore a quella della colonna fuori dal tubo. Pertanto la spinta verso l'alto è leggermente più alta di quella verso il basso, e l'acqua continua ad essere risucchiata dal fondo verso l'alto.

Il lettore attento potrebbe domandarsi dov'è il trucco. Si tratta di un pesce d'Aprile fuori stagione e sto solo descrivendo l'ennesima versione di una farlocca macchina del moto perpetuo? La

risposta è no. Sperimentalmente, una versione miniaturizzata della fontana salina può essere costruita in laboratorio. Da un punto di vista teorico, non si tratta di "moto perpetuo" nel senso comune del termine. Una analisi attenta mostra che il moto dell'acqua nel tubo è prodotto convertendo in energia cinetica una parte dell'energia potenziale immagazzinata ... ecco questo non è immediatamente agevole da cogliere. Da dove prende la fontana la sua energia? Diventerà più chiaro un po' più avanti.

In mancanza di altri sviluppi, questa osservazione sarebbe rimasta ciò che era stata dichiarate essere: una mera curiosità. Ma nel 1960, un altro grande oceanografo, Melvin Stern, capì un fatto cruciale [2]: per produrre piccole fontane saline all'interno del mare non c'è bisogno di tubi!

Le dita di sale

Immaginiamo di predisporre un piccolo acquario in cui sia stato preparato uno strato inferiore d'acqua dolce e fredda che gradatamente sfuma verso l'alto in uno strato d'acqua calda e salata, avendo cura, però di non esagerare con la salinità, in modo tale che che la densità dell'acqua diminuisca a mano a mano che ci si muove dal

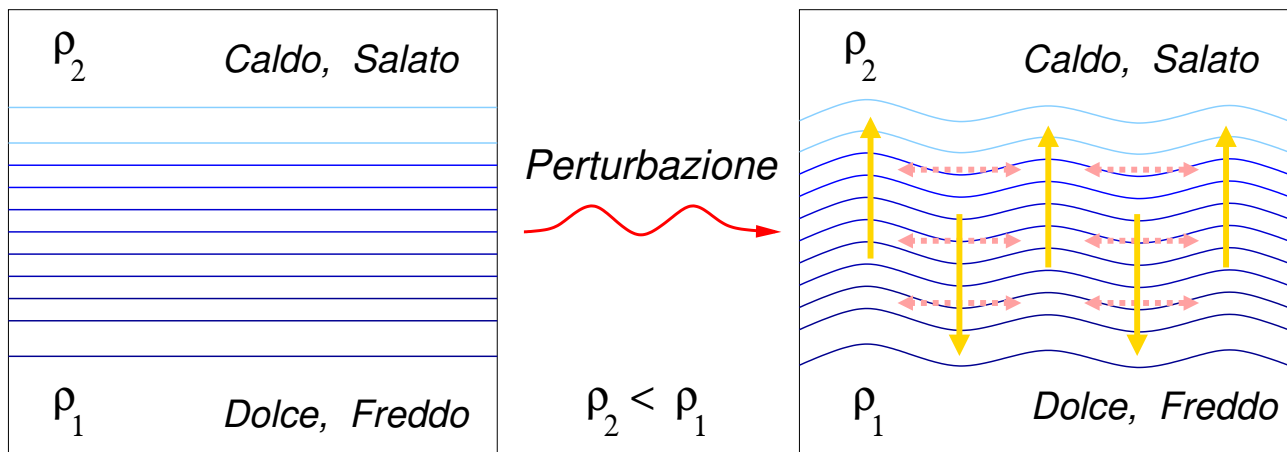


Figura 2: L'instabilità termoalina di Melvin Stern: le porzioni d'acqua spostate verso il basso dalla perturbazione cedono temperatura a favore di quelle spostate verso l'alto. La salinità, invece, non diffonde altrettanto rapidamente, perciò le porzioni spostate verso il basso si ritrovano ad essere pesanti, ed affondano, mentre, al contrario quelle perturbate verso l'alto diventano più leggere e salgono.

fondo verso la superficie. Avremo preparato una idealizzazione da laboratorio dell'oceano.

Ora chiediamoci, come fece Melvin Stern: che cosa succede se una minuscola perturbazione fa oscillare quest'acqua? Non sto parlando di grandi rimestamenti, ma di oscillazioni di ampiezza infinitesimale, talmente piccole ed evanescenti che in laboratorio non c'è nemmeno bisogno di produrle apposta: minuscole vibrazioni dovute al camminare delle persone, o alla voce di chi parla, o al fatto che l'acqua non è proprio perfettamente ferma all'inizio dell'esperimento, sono già perturbazioni sufficienti ad innescare l'instabilità di cui stiamo per parlare.

Esaminiamo una porzione d'acqua che sia stata spostata verso l'alto dalla perturbazione (Figura 2). Essa si ritrova circondata da masse d'acqua leggermente più calde, dalle quali acquista calore per diffusione termica. Se non ci fosse il sale, questa porzione d'acqua, mantenendo comunque una temperatura lievemente inferiore di quella del fluido circostante, rimarrebbe anche lievemente più densa. Perciò dopo poco tenderebbe a scendere verso la sua posizione di equilibrio, e la perturbazione di smorzerebbe. Ma nel nostro caso il sale c'è, e l'informazione chiave è che esso diffonde quasi cento volte più lentamente della temperatura. Quindi la nostra porzione d'acqua che è stata spostata verso l'alto, anche se acquista salinità per diffusione dall'acqua circostante, non lo fa altrettanto rapidamente che con la temperatura. In breve, avremo una porzione d'acqua quasi altrettanto calda dell'acqua

originariamente posta a quell'altezza, ma con un severo deficit di salinità. Ma quindi, la nostra porzione d'acqua, ormai calda ma non salata, si ritroverà ad essere meno densa dell'acqua che la circonda, e proseguirà a spostarsi verso l'alto, amplificando la perturbazione. Allo stesso modo, una porzione d'acqua spostata verso il basso dalla perturbazione cede calore con una certa rapidità, e cede salinità molto più lentamente. Essa quindi si raffredda, ma rimane salina, e quindi diventa più densa del fluido circostante, col risultato che continuerà ad affondare.

I calcoli di Melvin Stern mostrarono che questo quadro schematico descritto verbalmente è corretto. Se la stratificazione della salinità è sufficientemente intensa, perturbazioni di ampiezza infinitesimale tendono a crescere, e si trasformano in un moto in colonne alternate, una ascendente ed una discendente, che velocemente scambiano lateralmente temperatura, ma solo molto più lentamente scambiano salinità. Anziché avere una singola colonna d'acqua che si muove in un tubo abbiamo ora una schiera di colonne d'acqua che si muovono, in su ed in giù, senza bisogno di tubi! La differenza tra la diffusività della temperatura e quella della salinità è sufficiente a creare delle disomogeneità nel campo di densità che innescano il moto. Otto anni dopo Alan Turing, Melvin Stern aveva indipendentemente scoperto un nuovo caso in cui la differenza fra le diffusività di due sostanze (o, meglio, di due campi scalari) produce una instabilità che porta alla formazione di strutture coerenti (per una intro-

duzione divulgativa alla instabilità di Turing si veda [3]).

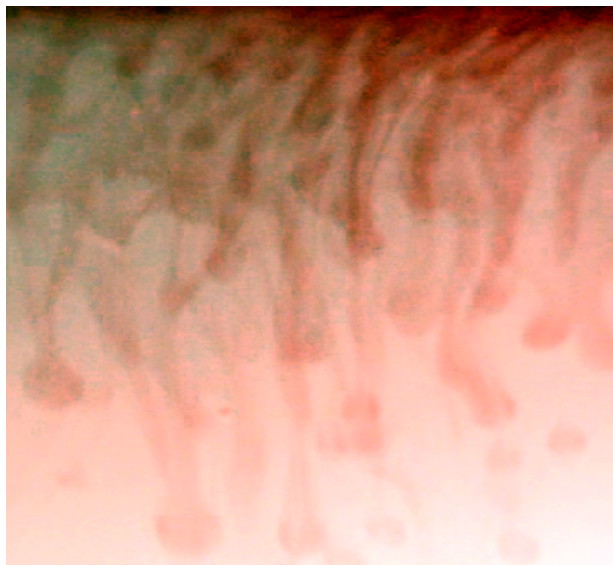


Figura 3: Dita di sale prodotte in un esperimento casalingo. L'esperimento può essere facilmente riprodotto, seguendo le istruzioni riportate nel riquadro a fronte.

Mentre Stern faceva i suoi calcoli, come egli stesso racconta, Stommel ed il suo collega Alan Faller erano impegnati in laboratorio per verificare che i tubi fossero davvero superflui. Riprodurre in un piccolo contenitore un graduale passaggio dal caldo al freddo e dal dolce al salato, sebbene possibile, non è agevole. Così si limitarono a versare uno strato di acqua calda e salata (con del colorante aggiunto per visualizzare le strutture) al di sopra di uno strato di acqua dolce e fredda. Dopo pochi istanti videro formarsi delle strutture uguali a quelle riprodotte in Figura 3.

In un esperimento come quello di Stommel e Faller, col passare del tempo le dita di sale trasportano salinità dallo strato superiore a quello inferiore. La temperatura, invece, poiché è così abile a diffondere lateralmente, non è trasportata verticalmente con altrettanta efficacia: lo strato superiore rimane relativamente tiepido, e quello inferiore non si scalda un gran che. In altre parole, il flusso verticale di salinità è maggiore di quello di temperatura. Ma questo vuol dire che lo strato superiore, che già era meno denso di quello inferiore, diventa ancora meno denso. Mentre quello inferiore, arricchendosi di salinità, senza scaldarsi troppo, diventa ancor più denso. Le dita di sale sono quindi un fenomeno assai

peculiare, perché trasportano la densità da regioni a densità più bassa a regioni a densità più alta (cioè *controgradiente*, per usare il gergo tecnico), mentre quasi tutti gli altri fenomeni di mescolamento (inclusa la convezione ordinaria) fanno il contrario.

Questa peculiarità svela anche quale sia la fonte di energia che muove le dita di sale: la massa di sale che dallo strato superiore è trasportata verso lo strato inferiore perde energia potenziale. Quest'ultima è tramutata in energia cinetica del fluido. Il fatto che le dita di sale si muovano assai lentamente testimonia che la conversione non è agevole. I processi diffusivi che permettono l'estrazione di energia potenziale sono relativamente lenti, cosicché in un esperimento come quello di Stommel e Faller le dita di sale rimangono in movimento (gradualmente sempre più lento) per un'ora o poco più prima di esaurire l'energia potenziale immagazzinata nel campo di salinità. Nel caso della fontana di Stommel essa è "perpetua" solo perché il debole zampillo di acqua profonda non è in grado di produrre una diluizione apprezzabile della salinità superficiale: la riserva di energia potenziale della salinità oceanica è enorme, e non è intaccabile da una singola fontana salina.

Dal laboratorio all'oceano

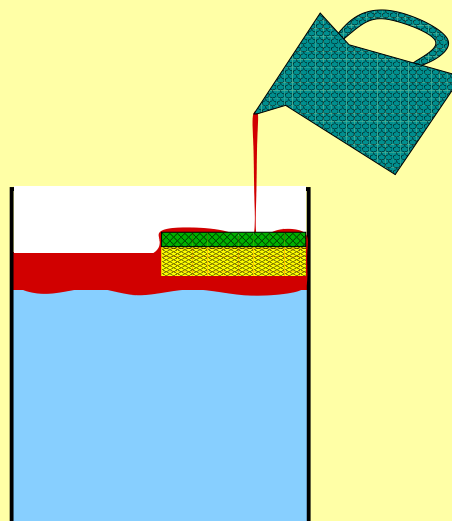
Le dita di sale sono una stranezza da laboratorio oppure si formano spontaneamente nelle profondità oceaniche? A scala globale, la stratificazione che si trova in tutti gli oceani tropicali e subtropicali, con acqua calda e salata in cima ad acqua più fredda e meno salata, è mantenuta approssimativamente costante nel tempo dai processi di evaporazione e precipitazione, i cui effetti, nel tempo, ed opportunamente orchestrati dalle grandi correnti oceaniche, si bilanciano l'un l'altro, fino ad ottenere una stratificazione quasi stazionaria.

Mentre la comunità oceanografica cominciava a sospettare che le minuscole fontane saline fossero qualcosa di più di una curiosità, Melvin Stern e Stewart Turner proseguivano a compiere esperimenti concentrandosi sul caso in cui l'effetto contrapposto di salinità e temperatura sulla densità è quasi uguale, e cioè sul caso in cui

La Ricetta delle Dita di Sale

Un esperimento qualitativo per produrre le dita di sale in casa è semplice da fare. Ecco ciò che è necessario:

- Un contenitore dalle pareti trasparenti. Una grossa caraffa o un vaso di vetro con le pareti lisce possono essere sufficienti.
- Una spugna. Quelle per la pulizia delle pentole vanno benissimo.
- Un bricco nel quale si possa scaldare dell'acqua. È importante che abbia un beccuccio che permetta di versare l'acqua senza sbradolare.
- Colorante alimentare di un colore vivace. Quello in polvere, se si riesce a trovarlo, è preferibile. Altrimenti una o due fiale sono sufficienti.
- Sale fino.
- Acqua.



Dallo strato superiore d'acqua salata e colorata si protendevano delle strutture tubolari, terminanti in dei bulbi vagamente simili a polpastrelli, che scendevano lentamente verso il basso. Alternate fra di esse, ascendevano colonne d'acqua dolce e trasparente. Erano state osservate per la prima volta le dita di sale!

Riempite d'acqua il vaso di vetro fino a circa 3/4 della sua altezza. Posate la spugna a galleggiare sull'acqua nel vaso, con il lato ruvido rivolto verso l'alto. Versate dell'acqua nel bricco e scaldatela fino quasi a portarla all'ebollizione. Versate nel bricco un quarto di cucchiaino di sale fino e colorante alimentare fino ad ottenere un liquido di colore assai intenso. Molto lentamente, avendo cura di non produrre schizzi o sbradature, versate il contenuto del bricco sulla spugna (può essere utile tenerla ferma con una forchetta).



A questo punto, se tutto è andato per il verso giusto, state osservando uno stato di acqua colorata che galleggia sopra ad uno strato di acqua trasparente. Per un po' non succederà nulla: lo strato superiore è ancora troppo caldo ed il sistema è stabile. Nel giro di alcuni minuti (dipende da quanto sale avete messo nel bricco) cominceranno ad apparire delle forme colorate come quelle mostrate nella Figura 3 che lentamente (si va da pochi minuti a un'ora, a seconda della quantità di sale e di acqua nel bricco), riempiranno l'intero vaso, rendendo il colore omogeneo.

La parte più difficile dell'esperimento è preparare correttamente i due strati iniziali. Se il contenuto del bricco è versato troppo velocemente, o direttamente nel vaso, senza essere rallentato dalla spugna, i due strati si mescoleranno meccanicamente, e le dita di sale non appariranno (per lo stesso motivo, non provate a rimuovere la spugna dopo aver preparato i due strati). Un altro errore comune è quello di mettere troppo sale. Così si rischia di rendere lo strato superiore più denso di quello inferiore, che quindi sprofonderà producendo una o due grandi celle convettive. In effetti, avendo a disposizione del colorante alimentare in polvere, si può fare a meno del tutto del sale: qualche cucchiaino di colorante (la quantità ottimale va trovata con prove ed errori) incrementa la densità dell'acqua del bricco tanto quanto il sale da cucina, e la rende perfettamente visibile.

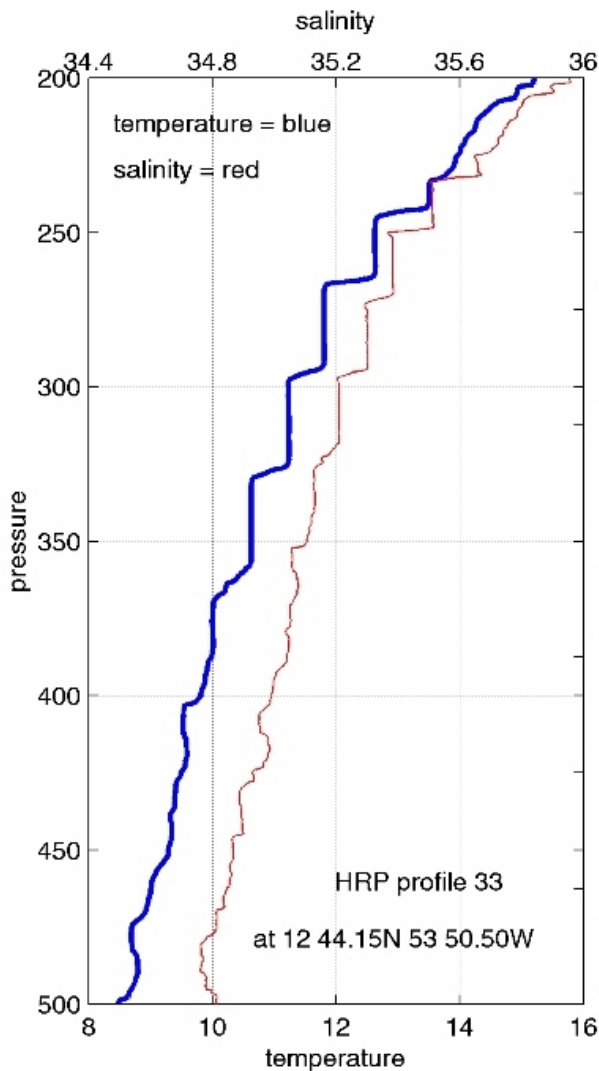


Figura 4: Una scalinata termoalina osservata nell'Atlantico tropicale. La scala di pressione è in 10^4Pa , ed equivale approssimativamente alla profondità in metri; quella di temperatura in $^{\circ}\text{C}$; quella di salinità in psu (unità pratiche di salinità). Tratto da: <http://hrp.whoi.edu/hrpgrp/sftre/stairs1.html>

il rapporto tra densità dello strato inferiore e quella dello strato superiore è solo di poco superiore ad uno. Tanto più ci si avvicina a questo limite, tanto più vigoroso diventa il moto delle dita di sale. Non si tratta di esperimenti di facile esecuzione (soprattutto nella cucina di casa), ma Stern e Turner svilupparono nuove tecniche sperimentali che permettevano loro di compiere delle osservazioni accurate [4]. Il risultato fu una scoperta eccezionale: uno strato di dita di sale in moto sufficientemente vigoroso si scinde spontaneamente in due strati separati da una regione omogenea all'interno della quale appaiono moti convettivi di tipo ordinario. Temperatura,

salinità e densità diventano quasi costanti nelle regioni convettive, e sviluppano forti gradienti negli strati nei quali permangono le dita di sale.

A questo punto l'interesse degli oceanografi era del tutto destinato. Se si misura come variano la temperatura e la salinità al variare della profondità, in molte aree tropicali degli oceani si ottiene un profilo scalettato, come quello mostrato in Figura 4. In quelle regioni i parametri sono quelli favorevoli a dita di sale in moto vigoroso. La distribuzione di temperatura e salinità in quelle aree dell'oceano è dunque causata dalle dita di sale? La risposta definitiva venne da una grande campagna oceanografica lanciata nella seconda metà degli anni '80, denominata C-Salt (una descrizione accessibile si trova in [5]). Per dirimere la questione si arrivò perfino a immergere ad oltre 300m di profondità un apparato fotografico nella speranza di cogliere una immagine delle minuscole strutture elongate. Che, infatti, non mancarono di farsi vedere! Quella ed altre campagne di misurazione dimostrarono che la dinamica delle minuscole dita di sale determina nell'oceano la presenza di strutture alte, nel loro complesso, centinaia di metri, e che si estendono lateralmente per centinaia di chilometri.

Per avere un quadro completo del fenomeno rimaneva da rispondere a due domande: qual è il meccanismo che genera la struttura scalettata a partire da profili inizialmente a pendenza costante? E, soprattutto, è possibile esprimere in termini quantitativi la quantità di sale e di temperatura trasportata dalle dita di sale in funzione dei parametri a grande scala?

Problemi irrisolti

Purtroppo ad entrambe le domande non è ancora possibile dare una risposta definitiva, anche se molti progressi sono stati compiuti su entrambi i fronti.

Saper calcolare il flusso di salinità e di temperatura prodotto dalle dita di sale è necessario se si vuole inserire una descrizione di questo fenomeno nei modelli oceanografici e climatologici a grande scala. Una simulazione numerica che abbraccia l'intero pianeta, o anche solo piccoli mari come il Tirreno o l'Adriatico, non ha la risoluzione necessaria per riprodurre strutture di scala centimetrica, come le dita di sa-

le. Non è prevedibile se e quando i calcolatori saranno sufficientemente potenti da permettere una tale simulazione. Di certo non succederà nell'arco delle nostre vite. Pertanto, se si vuole inserire l'effetto delle dita di sale in simulazioni come quelle odierne, che hanno risoluzioni orizzontali non inferiori a qualche chilometro e verticali dell'ordine delle decine di metri, è necessario trovare una formula che legghi il trasporto verticale di temperatura e salinità, dovuto alle dita di sale, alla pendenza a grande scala dei profili stessi di temperatura e salinità.

L'importanza di questo compito diventa evidente quando si considera che il trasporto di temperatura e salinità può far cambiare i profili stessi che lo determinano, rendendo il problema fortemente non-lineare (qualcosa di simile accade anche nella convezione ordinaria, v. "Retroazioni" nell'articolo [6] in questo stesso numero). In linea di principio, anche in mancanza di una precisa comprensione teorica del problema, si potrebbero interpolare i dati di laboratorio ed usarli nei modelli oceanici e climatologici. Purtroppo l'esatto regime di parametri oceanici non è riproducibile in laboratorio: bisognerebbe usare delle vasche alte decine di metri riuscendo a regolare temperatura e salinità alla perfezione. Quindi, più che di interpolazione, si tratta di estrapolazione, dal regime di parametri accessibile in laboratorio a quello rilevante per l'oceano. Finora i risultati non sono stati entusiasmanti. Le formule disponibili riescono, al più, a cogliere l'ordine di grandezza del fenomeno, ma le discrepanze fra una formulazione ed un'altra sono notevoli e la loro origine non ben compresa.

Anche per il secondo problema irrisolto, quello della formazione delle scalinate termoaline, sono state proposte molte possibili spiegazioni, ma nessuna, finora, si è imposta chiaramente come quella corretta. In parte, a parere dell'autore, questo è dovuto al fatto che la quasi totalità di queste spiegazioni parte da un modello teorico nel quale le dita di sale mantengono una estrema coerenza verticale, ed appaiono come alte colonne di fluido. Insomma, il punto di partenza è ancora quello della fontana di Stommel degli anni '50.

Ma questa idealizzazione è inadeguata a descrivere il regime di convezione vigorosa dal quale si sviluppano le scalinate. In questo regime

le colonne perdono coerenza a causa di instabilità secondarie (già note, in effetti, fin dagli anni '80) che rompono le lunghe dita di sale in tante gocce quasi sferiche, metà delle quali ha al suo interno un deficit di salinità e si muove verso l'alto, mentre l'altra metà ha un eccesso di salinità e si muove verso il basso (Figura 5).

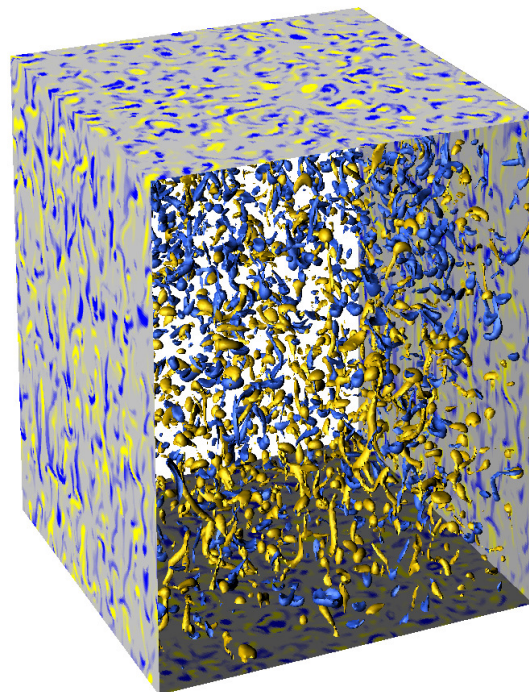


Figura 5: Visualizzazione tridimensionale di una simulazione numerica in cui il regime delle dita di sale elongate verticalmente è stato sostituito da quello delle gocce quasi sferiche (tratto da [7]).

Recenti simulazioni numeriche ad altissima risoluzione suggeriscono un nuovo meccanismo di formazione delle scalinate [8]. È stato osservato che tanto più è vigorosa la convezione nel regime delle gocce, tanto più le gocce che viaggiano nella stessa direzione appaiono aggregate insieme in grappoli. Questo è ragionevole, perché se la velocità di una singola goccia è sufficientemente alta da trascinare parte del fluido che la circonda, in esso si scatenano le stesse instabilità diffusive che abbiamo descritto discutendo la Figura 2, portando alla formazione di nuove gocce che viaggiano nella medesima direzione di quella originaria.

Mentre una singola goccia è troppo piccola per produrre un mescolamento apprezzabile del fluido che la circonda, un grosso grappolo ha energia cinetica sufficiente per farlo, e quindi, al suo passaggio, rende il fluido verticalmente un po' più omogeneo. Inoltre, non è troppo difficile

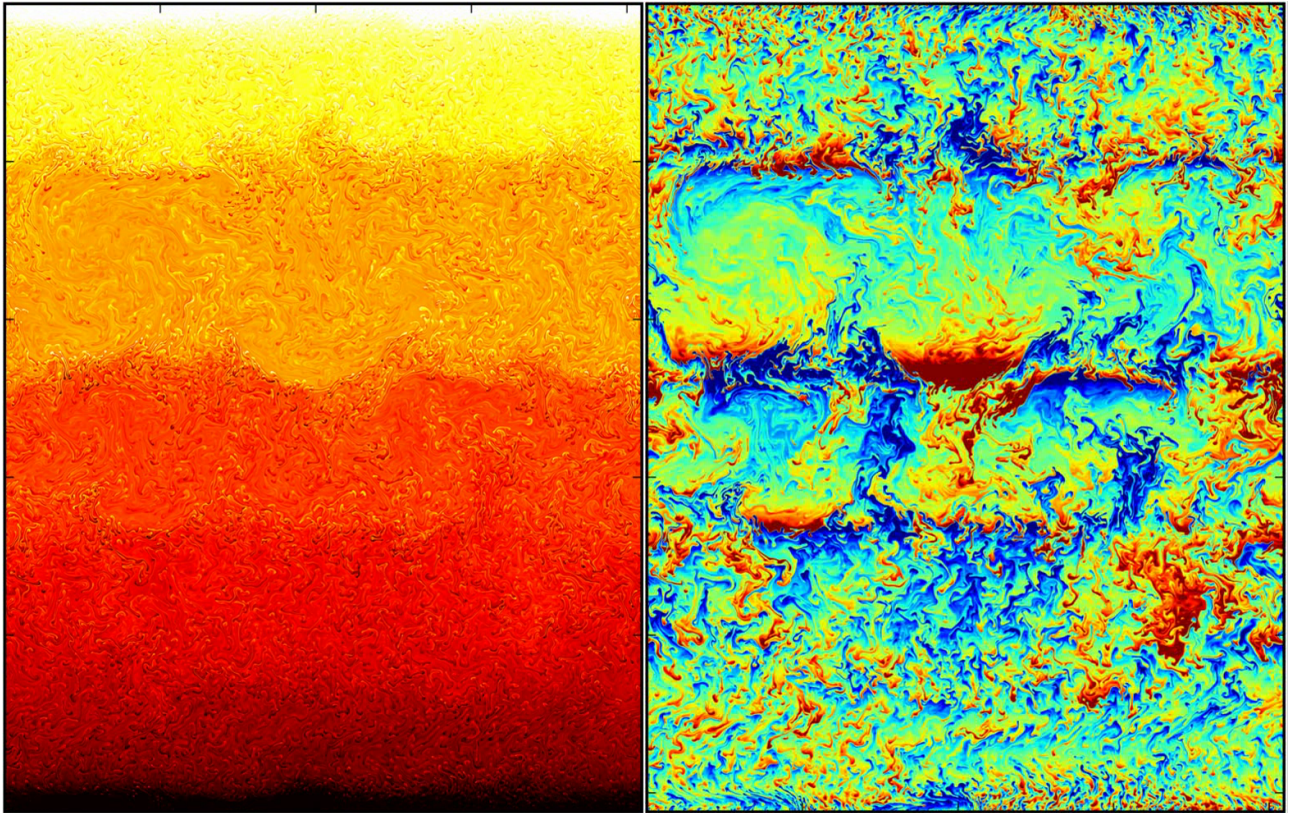


Figura 6: Formazione di scalinate termoaline in una simulazione numerica. Il riquadro di sinistra mostra la densità del fluido (più è chiaro il colore più è leggero il fluido). Il riquadro di destra mostra l'anomalia di salinità rispetto alla media orizzontale (blu indica carenza di salinità, rosso un eccesso). Nella parte superiore si è già formato uno strato ben mescolato. Un secondo strato è in formazione subito sotto. In basso si vedono grappoli di gocce termoaline con simile anomalia di salinità.

convincersi che la convezione può essere vigorosa solo dove i cambiamenti verticali di densità sono relativamente bassi. Là dove la densità cambia rapidamente con l'altezza, una goccia (p.es. che viaggia verso l'alto) non può avere una grande velocità, altrimenti, non avendo avuto il tempo di far diffondere lateralmente la temperatura, si ritroverebbe in una regione di fluido meno densa della propria densità, e finirebbe col ricadere verso il basso. Un ragionamento analogo si applica alle gocce che viaggiano verso il basso.

Questi fatti rendono possibile un meccanismo di retroazione: là dove, per caso, la densità è verticalmente un poco più omogenea che in altri luoghi, le gocce potranno muoversi con velocità leggermente maggiore, e sarà facilitata la formazione di grappoli di gocce, che, con la loro azione di mescolamento, renderanno ancora più omogenea quella regione di fluido, fino al formarsi di una alternanza di regioni del tutto mescolate, e di regioni con forti variazioni verticali di densità: le scalinate termoaline.

Oltre l'oceano

Buona parte della ricerca riguardo alle forme di convezione in cui, oltre alla temperatura, almeno un soluto partecipa nel determinare la densità del fluido è avvenuta in oceanografia. Ma fenomeni come quelli descritti in questa breve sintesi, e collettivamente noti come *doppiamente diffusivi*, occorrono in natura non solo negli oceani.

Indipendentemente dagli oceanografi, fin dalla fine degli anni '40 del secolo scorso, la comunità dei fisici stellari, sulla base di ragionamenti puramente teorici, ebbe ragione di sospettare che instabilità doppiamente diffusive (non solo quella che produce le dita di sale, ma soprattutto un'altra, chiamata in gergo *semiconvezione*) potessero avere un qualche ruolo nella convezione stellare (si veda l'articolo [9] in questo stesso numero). In tal caso il fluido è il plasma stellare di idrogeno ionizzato, ed il ruolo del sale è svolto (generalmente) dall'elio.

Tornando sul nostro pianeta, altri casi in cui

la diffusione doppia produce fenomeni interessanti si trovano in geofisica. Durante il processo di solidificazione delle camere magmatiche, poiché sostanze diverse cristallizzano a temperature diverse, si possono innescare instabilità convettive dovute alla contemporanea presenza di più soluti. Analogamente, si ritiene che fenomeni di questo tipo siano presenti nel mantello terrestre, in particolare alla base dei continenti, e nelle piattaforme continentali in subduzione (per una introduzione generale alla convezione nel mantello si può fare riferimento all'articolo [10] in questo stesso numero).

Infine fenomeni doppiamente diffusivi sono possibili in metallurgia, ed hanno rilevanza nei processi industriali di preparazione di manufatti metallici a partire da materiali fusi. Ma, in questo caso, l'obiettivo è generalmente quello di evitare le instabilità, e mantenere il materiale omogeneo.

Una rassegna ancora attuale su questi argomenti si trova in [11].



- [1] H. STOMMEL, A. B. ARONS, D. BLANCHARD: "An oceanographical curiosity: the perpetual salt fountain", *Deep-Sea Research* **3** (1956) 152–153.
- [2] M. E. STERN: "The "Salt-Fountain" and Thermohaline Convection", *Tellus* **12** (1960) 172–175.

- [3] F. PAPARELLA: "Al confine tra matematica, biologia e arte: la morfogenesi di Turing", *Ithaca* **4** (2014) 27–36.
- [4] M. E. STERN, J. S. TURNER: "Salt fingers and convecting layers", *Deep-Sea Research* **16** (1969) 497–511.
- [5] R. W. SCHMITT: "The Caribbean Sheets and Layers Transects (C-SALT) Program", *EOS* **68** (1987) 57–60.
- [6] E. A. SPIEGEL: "La convezione da cima a fondo", *Ithaca* **8** (2016) 5–16.
- [7] J. VON HARDENBERG, F. PAPARELLA: "Non-Gaussian buoyancy statistics in fingering convection", *Physics Letters A* **374** (2010) 2646–2653.
- [8] F. PAPARELLA, J. VON HARDENBERG: "Clustering of salt fingers in double-diffusive convection leads to staircase-like stratification", *Physical Review Letters* **109** (2012) 014502.
- [9] M. BAZOT: "La convezione nelle stelle", *Ithaca* **8** (2016) 59–84.
- [10] J. WITHEHEAD: "Convezione nel mantello", *Ithaca* **8** (2016) 17–32.
- [11] J. S. TURNER: "Multicomponent Convection", *Annual Review of Fluid Mechanics* **17** (1985) 11–44.

Francesco Paparella: Laureato in Fisica presso l'Università di Torino, ha conseguito il dottorato in Geofisica presso l'Università di Genova. È attualmente "visiting assistant professor" della New York University presso il nuovo campus di Abu Dhabi (in congedo dall'Università del Salento). Si occupa di meccanica dei fluidi (applicata alla geofisica) e di sistemi dinamici (applicati alla meccanica dei fluidi ed all'ecologia).

