
L'analogia: un potente strumento per la divulgazione della fisica

Tommaso Dorigo

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Padova

L'analogia è una figura retorica di vasto uso nel linguaggio scritto e parlato. Essa è cucita nel tessuto stesso del nostro linguaggio (a volte mescolata all'iperbole, o altri meccanismi). Spesso non ci rendiamo nemmeno conto di stare ragionando per analogia: frasi come "Vuole bene alla sua gatta come a una figlia", o "Mi sento come se mi fosse crollato il mondo addosso" ci vengono spontanee e ci permettono di comunicare efficacemente in maniera figurata delle caratteristiche della sorgente (la gatta nel primo esempio, o me stesso nel secondo) attraverso il potere evocativo del *target* dell'analogia (la figlia, e rispettivamente me sotto le macerie).

A ben vedere, tutti noi facciamo quotidianamente uso di analogie, piccole o grandi, dichiarate o impercettibili, nel comporre ragionamenti in forma orale o scritta. Sebbene ne siamo meno consci, le utilizziamo costantemente anche in azioni che non passano attraverso una codifica verbale (ad esempio, quando utilizziamo per uno scopo contingente uno strumento progettato per una funzione diversa). L'analogia è infatti un processo cognitivo fra i più potenti, ed è considerato uno degli strumenti fondamentali dell'apprendimento. Attraverso l'analogia siamo in grado di estrapolare le nostre conoscenze e competenze a sistemi più complessi, riducendone la

difficoltà.

Nelle scienze esatte, tuttavia, abbiamo il problema di non poter deformare a piacimento alcune parti del sistema: se trascuriamo l'aspetto quantitativo delle leggi fisiche o delle equazioni matematiche attorno alle quali vorremmo adattare la nostra o altrui intuizione, per renderle più accessibili, solitamente perdiamo una parte importante del potere esplicativo dell'analogia che formiamo. O se in mancanza di meglio ci accontentiamo di analogie imperfette, che descrivono solo parte delle funzionalità o caratteristiche dei concetti dei quali cerchiamo una semplificazione, rischiamo di confondere invece di chiarire.

Diventa quindi utile chiedersi se esista una ricetta, o se vi siano quantomeno delle linee guida, per decidere se un'analogia è utile o meno. Cercherò qui di rispondere alla domanda nell'ambito della divulgazione della fisica delle particelle, un campo in cui ho accumulato una certa esperienza, o quantomeno una consuetudine. Il terreno ove ho raccolto le mie informazioni sul potere e sui limiti di analogie create per spiegare concetti di fisica delle particelle, nel corso degli ultimi 20 anni (vent'anni!), è il mio *blog*, "*A Quantum Diaries Survivor*" [1]. Il blog riceve oltre un milione di visite all'anno. Anche se nel corso degli anni ho lentamente diminuito il mio

impegno divulgativo con quel mezzo, a causa di comprensibili spostamenti nelle mie priorità lavorative, vi pubblico ancor oggi diversi articoli al mese. Uno dei temi ricorrenti in questi articoli è quello di commentare e spiegare ad un pubblico misto (in parte costituito da studenti e ricercatori, ma in predominanza formato da semplici lettori interessati alla scienza ma non forniti di un background specifico in fisica fondamentale) i recenti risultati di fisica provenienti dagli esperimenti ai *colliders*, e altri argomenti a questi correlati. Recentemente, in corrispondenza di un maggiore impegno di ricerca verso tematiche di *computer science*, ho aumentato la frequenza di articoli che discutono nuove tecniche in *machine learning* e intelligenza artificiale, nondimeno mantenendo la fisica fondamentale come l'obiettivo degli sviluppi e delle tecniche discusse.

Negli anni di maggior impegno divulgativo, che hanno coinciso con gli anni in cui i *blog* erano ancora molto di moda, i miei articoli nel *blog* ricevevano in media una dozzina di commenti nei primi giorni dopo la pubblicazione *online*; i commenti talvolta innescavano discussioni interessanti e a volte controverse, che arricchivano il valore dei pezzi pubblicati. I commenti erano e sono lo strumento principe per comprendere quanto i testi siano adatti ai lettori ed al loro *background*, e se i concetti trattati e il linguaggio espositivo siano alla loro portata e rispondano al loro interesse. Spesso infatti i commentatori offrono, direttamente o indirettamente, utili informazioni sull'efficacia di una spiegazione. Ragionando sui metodi più efficaci per spiegare concetti di fisica ostici, in un continuo tentativo di portare per mano i non esperti verso la comprensione dell'importanza e del significato delle misure in fisica delle particelle, mi sono così trovato a ragionare sulla costruzione dell'analogia.

Per iniziare una discussione sull'analogia come strumento di comunicazione, è opportuno partire da una nota frase di Albert Einstein:

"In the explanation of physics phenomena, everything should be made as simple as possible, but not simpler than that".

(“Nella spiegazione dei fenomeni fisici, tutto dovrebbe essere reso quanto più semplice possibile, ma non più semplice di così”).

Un pericolo è dunque l'eccessiva semplificazione: nel tentativo di rendere familiare ciò che ci è ostico includiamo nell'analogia troppo poco dettaglio, deteriorando la corrispondenza fra *target* e sorgente e impedendo la comprensione di quest'ultima; o peggio, deformiamo la realtà fisica per far funzionare la figura retorica, asservendo così il fine allo strumento invece che l'opposto. Possiamo mettere Einstein alla prova dei suoi standards citando una analogia di sua invenzione:

"You see, wire telegraph is a kind of a very, very long cat. You pull his tail in New York and his head is meowing in Los Angeles. Do you understand this? And radio operates exactly the same way: you send signals here, they receive them there. The only difference is that there is no cat."

(“Vedi, il telegrafo a fili è una sorta di gatto lunghissimo. Tiri la sua coda a New York e la sua testa miagola a Los Angeles. Lo capisci? E la radio opera esattamente nello stesso modo: mandi segnali da qui, e li ricevono lì. L'unica differenza è che non c'è il gatto.”)

Questa analogia è indubbiamente semplice. Ma è semplice quanto serve, o troppo semplice? Questo dipende dagli ascoltatori cui ci si rivolge: per un bambino la spiegazione è perfetta, mentre se offerta agli studenti di un corso di tecnica delle comunicazioni essa risulterebbe imbarazzante. Quindi il grado di complessità di un'analogia, proprio come in generale il livello di una spiegazione, deve essere calibrato opportunamente.

Appare pertanto evidente che bisogna avere ben chiare due cose quando si costruisce un'analogia per spiegare un concetto in fisica: *in primis*, quali siano le competenze dei nostri ascoltatori; e *in secundis*, cosa vogliamo che gli ascoltatori davvero interiorizzino nel venire esposti all'analogia che costruiamo. È dunque utile cercare di riconoscere alcuni fattori che permettano di giudicare se un'analogia è appropriata per i nostri ascoltatori, se permette di raggiungere lo scopo prefisso, o se è troppo complicata, e potenzialmente distrae dall'obiettivo. Possiamo mettere a fuoco questi fattori attraverso l'analisi di un esempio: una analogia ben costruita ma che in

realità non possiede un vero potere esplicativo. Ci viene in aiuto a questo scopo la famosa spiegazione della rottura della simmetria elettrodebole per mezzo del comportamento di commensali ad una tavola imbandita, una analogia dovuta a Abdus Salam, uno dei fisici teorici che hanno originariamente formulato il modello standard delle interazioni elettrodeboli. Immaginiamo dunque di cercare di spiegare come la scelta di uno dei possibili stati di vuoto di un sistema fisico costituito da un doppietto di campi scalari complessi $\phi = [\phi_1 + i\phi_2, \phi_3 + i\phi_4]$ rompa la simmetria del sistema. Potremmo tentare con il testo seguente:

“Vi trovate a cena e, insieme agli altri commensali, sedete intorno a un tavolo rotondo. Notate che il piatto di verdura si trova a destra del vostro piatto, ma anche a sinistra del piatto del commensale seduto alla vostra destra. Non sapete quale piatto prendere, fino a quando qualcuno prende quello alla propria destra. Ora che la scelta è stata fatta il sistema non è più degenere, e c'è una sola risposta logica a quale sia il vostro piatto di verdura! Similmente, nella Lagrangiana del campo di Higgs esiste una degenerazione, una moltitudine di stati possibili equivalenti, e la scelta di un particolare valore di ϕ determina quale sia la realizzazione fisica del sistema.”

Personalmente ho sempre trovato poco efficace questa analogia, nonostante la eleganza della sua esposizione. Se esaminiamo attentamente il suo utilizzo, infatti, ci risulta chiaro che abbiamo speso forse venti secondi a creare negli ascoltatori l'immagine della tavola imbandita ed a porli di fronte al dilemma di quale piatto di verdura scegliere, implicitamente immedesimandoli nell'instabile vuoto quantistico. Ma cosa abbiamo ottenuto con questa operazione? Abbiamo forse spiegato come avviene questa scelta, o cosa succede ai gradi di libertà che vengono trasferiti dal campo di Higgs alla massa dei bosoni vettori? Queste domande rimangono nell'aria e non trovano risposta, non essendovi nella costruzione alcuna corrispondenza fra i concetti fisici da esse evocati e gli elementi della tavola imbandita. Ciò che abbiamo spiegato è in realtà unicamente in

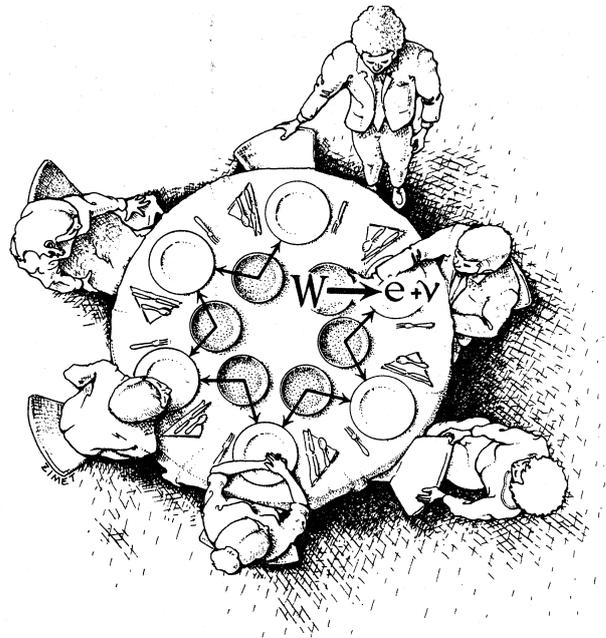


Figura 1

che cosa consiste la rimozione di degenerazione. Ma non serviva certo apparecchiare una tavola per ottenere questo modesto risultato!

È dunque opportuno domandarsi sempre quale sia l'effettivo valore di una analogia. Nella letteratura specifica il valore di una analogia è solitamente identificato con il suo potere predittivo delle caratteristiche incognite della sorgente. Questo si può valutare utilizzando delle proprietà della similarità fra sorgente e *target* che sono legate alla forza dell'analogia che si può trarre fra essi: la rilevanza delle somiglianze alla caratteristica o funzione oggetto dell'inferenza logica, il loro numero, e la loro varietà. Tuttavia, nel caso di applicazioni didattiche, vi sono addizionali unità di misura che forniscono un importante metro valutativo. Ad esempio, risultano critiche la familiarità degli ascoltatori con il *target*, quanto breve ne è la necessaria descrizione, e quanto è nota la parte del *target* oggetto dell'inferenza. Quelli citati sono elementi dipendenti dagli ascoltatori; un elemento più generale è invece quanto effettivamente coincide, in *target* e sorgente, la fenomenologia della parte oggetto dell'inferenza. La somiglianza potrebbe infatti essere solo accidentale, o lessicale, e rendere l'analogia inefficace o sterile.

Nell'esempio della rottura di simmetria, la degenerazione rimossa dalla scelta del piatto o dallo stato di vuoto non possiede caratteristiche in

grado di estendere la deduzione. Dove sono i bosoni di Goldstone rimossi dalla scelta? Sarebbe bello poter dire che il primo commensale li abbia mangiati, ma la cosa non funziona. Per contro, nell'analogia di Einstein vista sopra, oltre al potere predittivo (i segnali si possono propagare tanto attraverso un filo quanto lungo il sistema nervoso di un gatto) la potenza esplicativa giace sia nella familiarità del target quanto nella predicibilità della risposta del gatto (miagolio) alla sollecitazione (tirare la coda). Inoltre la fenomenologia è coincidente, un fatto alquanto sorprendente che impreziosisce la costruzione: si tratta infatti in entrambi i casi, gatto e telegrafo, di segnali elettrici propagati in un filo!

È altresì utile identificare alcuni problemi tipici che analogie non ben costruite possono presentare, e che le rendono inefficaci o poco adatte allo scopo prefisso. In primo luogo, va notato che l'analogia deve avere come obiettivo quello di estendere la nostra comprensione della sorgente attraverso lo studio di un *target* familiare. A volte tuttavia le caratteristiche già note di sorgente e target sono molto simili, mentre quelle che vogliamo spiegare non sono per nulla simili o mal si prestano a una deduzione. Manca in altre parole un vero e proprio potere deduttivo. In secondo luogo, dobbiamo chiederci se è facile concentrarsi sulle caratteristiche oggetto dell'inferenza, o se piuttosto il *target* scelto sia complicato o presenti caratteristiche che rischiano di distrarre l'ascoltatore: in altre parole, l'analogia può non essere economica, e può in tal caso rendere difficile la messa a fuoco delle caratteristiche che ci interessano del target scelto. Un pericolo è anche quello di ricercare troppe caratteristiche simili in sorgente e *target*, portando troppo avanti una buona analogia e distraendoci così dallo scopo originario, rischiando di mancare l'obiettivo che ci eravamo posti.

Possono inoltre esistere controindicazioni di natura esterna ad una altrimenti valida analogia. R. Dawkins nel suo libro "The God Delusion" [2] parla di un "ultimate burqa" che ci ha permesso per secoli di vedere solo una piccola parte del mondo attraverso una fessura; la scienza ha gradualmente aperto questa fessura, portando la speranza di poter un giorno liberarci del tutto dal burqa. Questa analogia ha dei meriti, ma può risultare offensiva per un musulmano:

caveat emptor. Un altro esempio viene dallo studio di un ginecologo, il quale nel sicuramente nobile sforzo di spiegare la situazione ad una paziente, si lancia nella confezione della seguente ipotesi: "Immagini che questa stanza sia la sua vagina". La persona che riporta questa frase spiega: "Avrebbe dovuto inventarsi un'analogia che non implicasse l'immaginarsi di stare nella mia vagina. Mi ha preso così alla sprovvista che non riuscivo a ricordare quale muro fosse la mia cervice".

Un'altrimenti buona analogia può risultare imperfetta: una differenza importante fra sorgente e *target* può allora rendere fallaci le conclusioni che se ne derivano, se non se ne limita il dominio di applicabilità. Prendiamo ad esempio la famosa, ed altrimenti fruttuosa, analogia usata per descrivere le interazioni deboli di corrente carica con quelle elettromagnetiche: entrambe agiscono per mezzo dello scambio di un bosone vettore (un fotone nell'elettromagnetismo, o un bosone W nell'interazione debole); questo ci permette di comprendere alcune proprietà della sorgente, ed anche di costruire metodi di calcolo quantitativi in quasi perfetta corrispondenza. Tuttavia l'ipercarica debole non si propaga lungo le linee fermioniche connesse al bosone W emesso o assorbito, come fa invece la carica elettrica; questo fatto potrebbe venir erroneamente trasmesso a chi ci ascolta se non porriamo attenzione a limitare il contesto applicativo dell'analogia utilizzata.

Per concludere, è utile notare come esistano confronti fra sistemi che non sono affatto in relazione di corrispondenza fra essi nella parte su cui si pone l'accento: queste sono false analogie. Il caso più comune si ha quando la proprietà oggetto dell'inferenza o deduzione è l'essenza di ciò che distingue sorgente e *target*. Assumendo erroneamente che in uno stadio vi sia per definizione erba su cui correre, un giocatore potrebbe presentarsi allo stadio del ghiaccio con scarpe da calcio.

* * *

Desidero ora discutere brevemente alcuni esempi di analogie, originali e non, da me utilizzate nel mio *blog* per spiegare concetti di base in fisica delle particelle, identificando quando possibile i loro eventuali elementi di forza e di

debolezza secondo l'approssimativa categorizzazione operata supra. Iniziamo con un concetto piuttosto complicato: l'intrinseca debolezza delle interazioni deboli.

Sappiamo che la grande massa dei bosoni W e Z che mediano tali interazioni è la ragione della loro debole intensità: la loro massa impedisce ai bosoni di mediare interazioni di lungo raggio, ed è un parametro che determina l'intensità dell'interazione. Possiamo dunque proporre il testo seguente:

“Per comprendere come un mediatore massivo può essere meno efficace ed agire più debolmente di uno senza massa, confrontate una tazza di cioccolata calda con una tavoletta di cioccolato: il vapore caldo disperde intorno alla tazza molte piccolissime particelle leggere, che si possono facilmente annusare a distanza. Invece la tavoletta può solo rilasciare poche piccole scagliette solide di cioccolato se vi andate molto vicino e inalate con forza. Le scagliette sono più massicce e meno abbondanti dei corpuscoli che evaporano dalla tazza, e sono pertanto incapaci di trasportare lontano il profumo di cioccolata; inoltre, anche a piccola distanza l'odore che si può sentire dalla tavoletta è meno intenso, per via della minor quantità di scaglie rilasciate quando la annusate.”

Prima di discutere pregi e difetti di questa analogia, vediamo come l'ho utilizzata nel *blog*, cercando di spremere il massimo significato possibile.

“Il comportamento dell'odore di cioccolato dalla tazza e dalla tavoletta può essere assimilato al comportamento delle interazioni elettromagnetiche e deboli a bassa energia: le prime appariranno molto più intense. Ora però si immagina di costruire uno *sniffer*, un dispositivo che analizzi l'odore di corpi solidi e liquidi allo stesso modo: la sostanza oggetto del test viene vaporizzata e lo spettro di assorbimento del vapore viene analizzato. Lo *sniffer* troverà che la cioccolata calda e la tavoletta hanno la stessa intensità di profumo. Similmente, le

interazioni elettromagnetiche e deboli diventano egualmente forti ad alta energia, una volta che la massa di particelle di cioccolato o scagliette, ovvero fotoni e bosoni W e Z , diventa irrilevante.”

Va osservato come a dispetto del bonus esplicativo della seconda parte di questa analogia, che introducendo un nuovo elemento (lo *sniffer*) cerca di spiegare l'unificazione elettrodebole, sarebbe stato probabilmente meglio fermarsi alla prima parte: ci siamo innamorati troppo dell'analogia e l'abbiamo usata per spiegare più aspetti della sorgente di quanto ci eravamo originariamente proposti. L'analogia ora vista è stata anche criticata per la mancanza di spiegazione del raggio finito dell'interazione forte (che è mediata da gluoni, che pure hanno massa nulla). Quest'ultima non appare tuttavia una critica valida, per lo stesso motivo già citato: una buona analogia non deve per forza spiegare più di quanto previsto.

Accettato che la seconda parte dell'analogia sia troppo spinta, e forse utile solo in un ambito diverso da quello didattico del *blog*, in quanto affronta il concetto troppo complesso dell'unificazione ad alta energia delle interazioni elettrodeboli, concentriamoci sulla sua prima parte. Possiamo innanzitutto presumere un'ottima familiarità dei nostri ascoltatori con il *target*, e una discreta rilevanza delle caratteristiche comuni (emissione di particelle di diversa massa), che però non sono in grande numero o varietà. La fenomenologia (intensità dell'odore/intensità dell'interazione) è invece un punto debole dell'analogia: essa è solo apparentemente riconducibile allo stesso comportamento delle caratteristiche oggetto dell'induzione logica, in quanto l'odore in realtà si ricava da singole molecole comunque vaporizzate, non da interi corpuscoli. L'analogia ha però un buon potere predittivo, ed il *target* è economico. Secondo questi criteri, l'analogia in questione risulta uno strumento ragionevolmente efficace per spiegare il concetto in discussione.

Un secondo esempio dal quale possiamo attingere è la spiegazione del cosiddetto problema della “naturalzza” della massa del bosone di Higgs. La massa del bosone di Higgs riceve delle correzioni quantistiche dovute a diagrammi contenenti *loops* di particelle virtuali. Queste correzioni dipendono da un parametro di taglio

(*cut-off*): esso è il massimo valore dell'energia delle particelle virtuali che circolano in questi loops. Se assumiamo che il *cut-off* sia all'enorme energia corrispondente alla massa di Planck (M_{Pl}), queste correzioni sono gigantesche; questo fatto ha portato alcuni fisici teorici a ipotizzare che esista nuova fisica a una scala molto minore di M_{Pl} , che fornisca un corrispondente *cut-off* più piccolo, rendendo meno eclatante la coincidenza (la cancellazione mutua di questi numeri enormi). Il problema è stato spiegato da Michelangelo Mangano con una interessante analogia:

“Immaginate di chiedere a dieci amici di fornirvi un numero reale irrazionale compreso fra -1 e +1. Fate la somma dei dieci numeri così raccolti, e scoprite che il risultato è diverso da zero solo alla trentesima cifra decimale (0.000000000000000000000000000001). Cosa concludete? Siete disposti a ritenerlo un caso, o la prendete come una evidenza che i vostri amici si siano messi d'accordo?”

Se esaminiamo attentamente questa analogia, ci accorgiamo che non è chiaro il suo potere deduttivo. Cosa conosciamo nel *target* che non conosciamo nella sorgente? La poca probabilità che la somma di grandi numeri dia un numero piccolo non è un concetto che richieda una analogia per essere assorbito. L'ascoltatore è certamente in grado di considerare il gioco dei dieci numeri, ma quel sistema non ha nulla in comune con le correzioni quantistiche alla massa del bosone di Higgs che sia più semplice da comprendere nel *target* che nella sorgente. Inoltre, prendere un intervallo da -1 a +1 è forse elegante, ma allontana dall'idea dell'enormità del *cut-off* M_{Pl} , che è una importante caratteristica della sorgente.

Possiamo migliorare l'analogia di Mangano costruendo un sistema *target* che abbia come parametro la dimensione dei dieci numeri: dalla piccolezza della loro somma possiamo dedurre la dimensione del parametro, e la necessità di un *cut-off*. Siamo allora portati a proporre un testo come il seguente:

“Immaginiamo che un amico giochi alla roulette, e punti delle somme sul rosso, dieci volte. La quantità della somma

puntata è decisa in modo assolutamente casuale (ad esempio estraendo un numero *random* con un computer), ma inferiore a un certo limite massimo M predefinito:

$$\text{somma puntata} = MR ,$$

(con R compreso fra 0 e 1). L'amico dopo dieci puntate si trova in attivo di un euro. Cosa possiamo dedurre sul massimo M che egli si era imposto per ciascuna puntata? Possiamo pensare che $M = 1000$ miliardi di euro? No! Siamo ovviamente portati a ritenere che il massimale M fosse di pochi euro!”

Questa versione è migliore dell'originale visto sopra perché ci permette di capire più velocemente come i fisici teorici deducano che ci debba essere un *cut-off*, nuova fisica a una scala di energia non troppo alta. Il punto focale dell'analogia è non tanto nel paradosso della cancellazione di grandi numeri, che è apparente anche nella sorgente, ma nella inferenza logica che si può operare su M .

Prendiamo ora in considerazione la versione migliorata dell'analogia di Mangano, e analizziamola criticamente secondo i parametri discussi in precedenza. Innanzitutto, il *target* è certamente familiare ai nostri ascoltatori. Inoltre, le caratteristiche oggetto della deduzione (i numeri grandi) sono rilevanti alla inferenza (la loro mutua cancellazione). Non si tratta poi di una analogia molto spinta: il numero di caratteristiche comuni ai due sistemi sorgente e *target* è molto ridotto. La fenomenologia, punto cruciale, è coincidente: la deduzione che M (la scala di nuova fisica, o la massima puntata) non possa essere grande verte sulla coincidente base fenomenologica, qui la semplice aritmetica, o se si vuole anche un'inferenza Bayesiana. Quanto al potere deduttivo, esso è certamente presente e forte; l'analogia non è però molto economica, in quanto dobbiamo chiamare in causa una ricetta particolare per calcolare le nostre puntate. Nel complesso si tratta di una ottima analogia, in grado di far capire con immediatezza un concetto piuttosto elusivo, la deduzione che nuova fisica debba essere dietro l'angolo. Si può anche notare come il sistema sorgente sia estremamente complicato da spiegare,

mentre il target sia semplice e potenzialmente familiare agli ascoltatori.

Nel 2012 sottoposi ai lettori del mio *blog* le considerazioni sull'uso delle due analogie ora viste per spiegare il problema della naturalezza. Ne nacque una interessante discussione *online*, a seguito della quale un lettore propose il seguente miglioramento alle versioni proposte dell'analogia in questione:

“Supponiamo che la somma di profitti e perdite di dieci aziende sia pari a dieci euro. Conoscendo solamente questo fatto, e assumendo che i profitti e le perdite a priori siano più o meno egualmente probabili, che dimensioni possiamo stimare per gli incassi di ciascuna compagnia? Ci si potrebbe aspettare degli incassi tipici di banchetti di vendita di limonata! Saremmo invece molto sorpresi se ci dicessero che queste aziende hanno incassi dell'ordine di miliardi di euro ciascuna, in quanto sarebbe in tal caso molto improbabile ottenere una somma pari a un numero così piccolo come 10 euro: verrebbe allora il dubbio che qualcuno abbia messo assieme con molta attenzione la lista di aziende per ottenere di proposito un profitto totale così vicino a zero. I fisici, similmente, sospettano che l'innaturale, quasi perfetto bilanciamento delle correzioni quantistiche alla massa del bosone di Higgs sia dovuto a una struttura nascosta che non abbiamo ancora scoperto.”

È chiaro il vantaggio di questa versione sulle precedenti: oltre a presentare una situazione molto più familiare di una “puntata casuale” o di una collezione di numeri irrazionali, il budget di una azienda, i profitti e le perdite, l'analogia è anche molto semplice e diretta. La creazione di questa analogia dimostra l'efficacia del processo di revisione e l'autovalutazione dei pro e contro dei testi proposti.

Infine, prendiamo in considerazione il tentativo di spiegare il comportamento di quark e gluoni nel protone in analogia con l'estensione di una molla. Va detto che questa è una tentazione naturale per un fisico: il potenziale di interazione del-

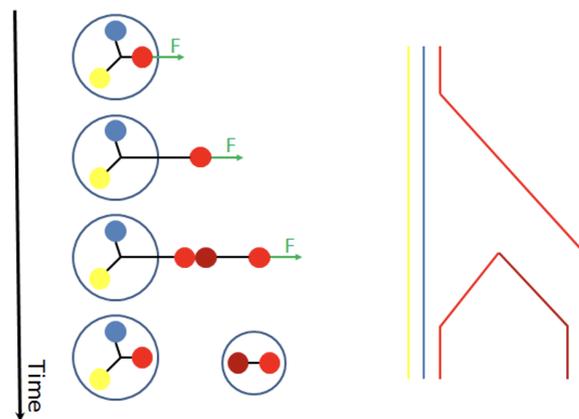


Figura 2: Il tentativo di estrarre un quark (pallina rossa nel grafico a sinistra) da un protone (formato da tre quarks di colore diverso) per mezzo di una forza F porta all'allungamento della linea di forza che collega i quarks fra loro. Non appena l'energia investita nell'allungamento diventa sufficiente, essa si trasforma nella massa di una nuova coppia quark-antiquark (terzo diagramma dall'alto). Il nuovo quark torna infine nel protone a rimpiazzare quello rimosso, e la rimanente coppia quark-antiquark si stabilizza in un mesone. Nel grafico a destra viene riportata schematicamente la posizione dei quarks corrispondente alle quattro configurazioni mostrate a sinistra; ogni linea colorata qui rappresenta la propagazione nello spazio-tempo di un quark.

la forza forte cresce con la distanza inter-quark in modo simile all'energia potenziale di una molla. Tuttavia l'analogia è solo parziale. Una molla troppo estesa si deforma, non si rompe; inoltre i suoi estremi non sono parte essenziale del sistema. L'ascoltatore può venire confuso se non comprende il giusto livello al quale l'analogia funziona.

Stabilito che la spontanea analogia fra molla e stringa di interazione forte esibisce degli evidenti limiti, la domanda da porsi in questo caso appare la seguente: cosa vogliamo effettivamente che l'ascoltatore comprenda? Chiaramente vogliamo trasmettere la nozione che i quark sono confinati all'interno degli adroni dalla forza forte, e spiegare in maniera intuitiva a cosa ciò è dovuto. Se mettiamo a fuoco il nostro obiettivo, ci risulta evidente che in questo caso un grafico ben concepito (vedi Fig. 2) può essere molto più efficace dell'analogia nello spiegare i dettagli del comportamento dei quarks. In effetti, fare ricorso

alla visualizzazione grafica dei fenomeni fisici è un'alternativa spesso preferibile alla semplice descrizione e comparazione analogica: con grafici sufficientemente ben progettati e con una attenta descrizione del loro contenuto, si riescono ad evidenziare le caratteristiche da comprendere ed a spiegare in modo semplice concetti apparentemente ostici senza perdere di vista le specificità del sistema fisico in esame.

Il grafico ora visto mi permette di concludere questa breve discussione sottolineando come l'analogia sia uno strumento imprescindibile, ma non l'unico, per spiegare la fisica. Essa è tanto più utile quanto maggiore è la necessità di una semplificazione, ovvero quanto maggiore è il divario fra il livello di preparazione degli ascoltatori e la complessità dei concetti che si vogliono far loro digerire. I pro e i contro di una analogia vanno valutati attentamente di caso in caso, facendo attenzione ad evitare alcuni errori tipici, in particolare, la mancanza di potere predittivo, la scarsa familiarità degli ascoltatori con il *target*, e la imperfezione delle corrispondenze fra sorgente e *target*. Un'auto-valutazione di queste e altre caratteristiche delle analogie che formiamo nella nostra azione didattica è un utile esercizio, che in ogni caso consiglio caldamente.



[1] http://www.science20.com/quantum_diaries_survivor

[2] R. Dawkins: *The God Delusion*, Mariner Books, Boston (2008).



Tommaso Dorigo: è un fisico delle particelle elementari. Collabora con gli esperimenti CMS e SWGO, e ha fondato, e dirige, la collaborazione MODE (<https://mode-collaboration.github.io>), che studia l'ottimizzazione del *design* di esperimenti in fisica fondamentale con *deep learning*. Dal 2022 Dorigo è anche presidente dell'organizzazione USERN (Universal Scientific Education and Research Network, <https://usern.org>), un network di 25 mila membri che supporta l'interdisciplinarietà e la diffusione della scienza.