

Quando un'analogia guida la scienza. Il ruolo metodologico dell'analogia nella termodinamica dei buchi neri

di Vincenzo Fano - Marco Sanchioni

Analogy is often understood as an inferential tool for justifying projections across domains, yet such a reading proves insufficient when analogy orients theoretical development over the long term. We therefore introduce the notion of analogical support – a form of methodological justification distinct from both heuristics and empirical confirmation, capable of rendering rational the continuation of research programmes even under conditions of limited empirical access – taking black hole thermodynamics as our case study.

Keywords: Analogy, Analogical Reasoning, Black Holes, Philosophy of Physics

1. Introduzione

In molte aree della scienza contemporanea, in particolare nei domini in cui l'accesso empirico è limitato, la ricerca procede attraverso una forte dipendenza da strutture teoriche indirette¹. In tali situazioni, lo sviluppo della conoscenza scientifica non può essere descritta adeguatamente come una semplice successione di ipotesi sottoposte a verifica empirica. Piuttosto, essa assume la forma di uno sviluppo progressivo guidato da quadri concettuali che orientano la formulazione dei problemi, delimitano lo spazio delle soluzioni ammissibili e conferiscono coerenza ai programmi di ricerca nel lungo periodo².

Tra gli strumenti che svolgono questa funzione orientativa, l'analogia occupa un ruolo centrale. Tradizionalmente, la filosofia della scienza ha interpretato l'analogia come una forma di ragionamento che consente di trasferire proprietà da un dominio noto a uno meno noto, sulla base di una struttura di similarità. In questa prospettiva, il suo valore epistemico è valutato nei termini della plausibilità delle singole inferenze che essa rende possibili. Tuttavia, questa lettura inferenziale risulta insufficiente quando si considerano quei casi in cui l'analogia non si limita a sostenere ipotesi isolate, ma contribuisce a strutturare intere traiettorie di ricerca.

In tali contesti, il problema non è tanto stabilire se una specifica proiezione analogica sia giustificata, quanto comprendere in che senso il ricorso continuato a un'analogia possa risultare razionale, anche in presenza di tensioni teoriche persistenti e in assenza di conferme empiriche dirette. L'analogia, in altre parole, sembra operare non solo come strumento inferenziale, ma come elemento che contribuisce alla stabilità e alla continuità dei programmi di ricerca sotto condizioni di incertezza.

Questo lavoro si propone di chiarire tale funzione introducendo la nozione di *supporto analogico*. Con questa espressione intendiamo una forma di giustificazione metodologica distinta sia dall'uso euristico dell'analogia sia dal suo eventuale

1 - Un esempio emblematico è fornito dalla gravità quantistica. Gli effetti quantistici della gravità dovrebbero diventare rilevanti alla scala di Planck, caratterizzata da una lunghezza $L_P \sim 10^{-35}m$ e da un'energia $E_P \sim 10^{19} GeV$. Le energie attualmente accessibili negli esperimenti di fisica delle particelle, come quelli realizzati al Large Hadron Collider, raggiungono al massimo circa 104 GeV, rimanendo quindi molti ordini di grandezza al di sotto della scala in cui tali effetti dovrebbero manifestarsi direttamente. In queste condizioni, lo sviluppo teorico procede inevitabilmente in assenza di un accesso empirico diretto.

2 - Si veda, in una direzione affine, il dibattito sulle *non-empirical virtues* o *super-empirical virtues*, intese come criteri teorici – quali coerenza interna, semplicità, potere unificante o capacità esplicativa – che possono guidare la valutazione e lo sviluppo delle teorie in assenza di evidenza empirica diretta. Per una discussione sistematica, cfr. R. Dawid, *String Theory and the Scientific Method*, Cambridge University Press, Cambridge 2013; J.W. McAllister, *Beauty and Revolution in Science*, Cornell University Press, Ithaca 1996;

ruolo confermativo. Il supporto analogico, come vedremo, riguarda le condizioni che rendono razionale proseguire nello sviluppo di un programma di ricerca guidato da un'analogia, anche in presenza di difficoltà concettuali non ancora risolte. Per articolare questa proposta, faremo riferimento alla nozione di programma di ricerca, reinterpretata in modo da distinguere tra diverse forme di sviluppo teorico. In particolare, sosteniamo che, nei contesti in cui l'accesso empirico è limitato, la produzione di sviluppi teorici significativi può costituire una forma di progresso metodologicamente significativa, pur in assenza di nuove predizioni empiricamente controllabili. È proprio in questo spazio che il supporto analogico acquista rilevanza.

Il caso della termodinamica dei buchi neri fornisce un esempio particolarmente istruttivo di questa dinamica³. In tale contesto, un'analogia inizialmente formulata a livello formale ha progressivamente acquisito un ruolo strutturante nello sviluppo teorico, contribuendo sia alla formulazione di nuove domande sia alla riorganizzazione di quadri concettuali esistenti. Allo stesso tempo, essa ha generato tensioni profonde, che non hanno tuttavia condotto all'abbandono del programma di ricerca, ma piuttosto alla sua ristrutturazione. In questo senso, il caso dei buchi neri funge da esempio esplicativo attraverso cui articolare una tesi metodologica più generale.

L'obiettivo del lavoro è dunque duplice. Da un lato, si intende mostrare che il ruolo epistemico dell'analogia non può essere esaurito nei termini del ragionamento analogico tradizionalmente inteso. Dall'altro, si propone una caratterizzazione del supporto analogico come forma intermedia di giustificazione metodologica, distinta sia dalla generazione di ipotesi sia dalla loro conferma. Questa prospettiva consente di comprendere come, in alcune aree della scienza contemporanea, la razionalità della ricerca possa essere sostenuta nonostante l'assenza di evidenza empirica diretta e la presenza di tensioni teoriche significative.

L'articolo è organizzato come segue. Nella Sezione 2 introduciamo una tipologia delle analogie scientifiche e ne discutiamo il ruolo epistemico. Nella Sezione 3 sviluppiamo la nozione di supporto analogico e ne analizziamo le implicazioni metodologiche. Nella Sezione 4 consideriamo il caso della termodinamica dei buchi neri come studio esemplare. Infine, nella Sezione 5 discutiamo le implicazioni più generali della nostra proposta per la filosofia della scienza.

3 - Con "termodinamica dei buchi neri" si intende l'insieme di risultati, sviluppati a partire dagli anni Settanta, che stabiliscono una corrispondenza tra le leggi della meccanica dei buchi neri e le leggi della termodinamica. In questo quadro, grandezze geometriche come l'area dell'orizzonte e la cosiddetta *surface gravity* assumono un ruolo analogo rispettivamente all'entropia e alla temperatura. Per le formulazioni classiche di questo quadro si vedano J.D. Bekenstein, *Black Holes and Entropy*, in «Physical Review D», 7 (1973), pp. 2333-2346; J.M. Bardeen - B. Carter - S.W. Hawking, *The Four Laws of Black Hole Mechanics*, in «Communications in Mathematical Physics», 31 (1973), pp. 161-170; S.W. Hawking, *Particle Creation by Black Holes*, in «Communications in Mathematical Physics», 43 (1975), pp. 199-220.

2. Analogia e ruolo epistemico nelle scienze naturali

Per comprendere il ruolo dell'analogia nei contesti considerati, conviene anzitutto distinguere tra *analogia* e *ragionamento analogico*. Con il primo termine intendiamo una relazione di corrispondenza tra due domini, un sistema sorgente e un sistema bersaglio, stabilita attraverso una mappatura tra proprietà, relazioni o strutture. Il ragionamento analogico consiste invece nell'uso inferenziale di tale corrispondenza: a partire da similarità già riconosciute tra i due domini, si attribuiscono al dominio bersaglio proprietà ulteriori non ancora osservate o stabilite. L'analogia, dunque, è la relazione di corrispondenza; il ragionamento analogico è l'uso epistemico che se ne fa.

Una parte significativa della letteratura filosofica ha analizzato l'analogia soprattutto in questa seconda accezione, cioè come forma di ragionamento che consente di estendere il contenuto conoscitivo oltre le informazioni iniziali. In questa prospettiva, sviluppata in modi diversi da Hesse, Gentner e Bartha, l'attenzione si concentra sulle condizioni sotto le quali il trasferimento di proprietà da un dominio a un altro può dirsi epistemicamente giustificato. Nei lavori di Hesse, per esempio, l'analogia viene ricostruita attraverso la distinzione tra aspetti positivi, negativi e neutri: i primi corrispondono a somiglianze già stabilite tra i due domini, i secondi a differenze note, mentre i terzi individuano proprietà ancora non determinate⁴. Il suo interesse epistemico consiste proprio nel permettere un'estensione controllata di questi aspetti neutri, sulla base della struttura già condivisa. Gentner insiste invece sul fatto che la forza dell'analogia dipende principalmente dall'allineamento tra relazioni, piuttosto che dalla semplice somiglianza tra proprietà isolate: ciò che conta non è tanto la presenza di tratti comuni, quanto la possibilità di mettere in corrispondenza sistemi di relazioni strutturalmente analoghi⁵. Bartha, infine, ne offre una ricostruzione normativa, trattando il ragionamento analogico come una forma di inferenza ampliativa sottoposta a vincoli di coerenza globale e di rilevanza delle corrispondenze, e quindi valutabile in termini di condizioni di accettabilità razionale⁶. Nonostante queste differenze, il punto comune è chiaro: l'analogia viene valutata primariamente in funzione della sua capacità di sostenere proiezioni plausibili.

4 - M. Hesse, *Models and Analogies in Science*, University of Notre Dame Press, Notre Dame 1966;

5 - D. Gentner, *Structure-Mapping: A Theoretical Framework for Analogy*, in «Cognitive Science», 7 (1983), pp. 155-170;

6 - P. Bartha, *By Parallel Reasoning: The Construction and Evaluation of Analogical Arguments*, Oxford University Press, Oxford 2010.

Per chiarire meglio questo quadro, è utile distinguere tre forme di analogia, a seconda del livello al quale la corrispondenza tra i due domini si stabilisce⁷.

Una prima forma è l'*analogia materiale*. In questo caso, la corrispondenza riguarda principalmente proprietà osservabili o aspetti fenomenici. Un esempio classico è l'analogia tra il flusso di calore e il flusso di un fluido. In entrambi i casi si parla di intensità del flusso, di gradienti e di equilibrio, e questa somiglianza descrittiva ha storicamente favorito il trasferimento di intuizioni da un dominio all'altro. Tuttavia, a questo livello, la corrispondenza resta relativamente superficiale: il fatto che due fenomeni presentino tratti osservabili simili non implica ancora che siano governati dalla stessa struttura teorica o che i rispettivi concetti svolgano lo stesso ruolo esplicativo. Per questo motivo, un'analogia materiale può essere utile per formulare ipotesi iniziali, ma in genere sostiene proiezioni epistemicamente più deboli.

Una seconda forma è l'*analogia formale*. Qui la corrispondenza non riguarda soltanto ciò che si osserva, ma la struttura matematica con cui i due sistemi vengono descritti. L'esempio più noto è quello dell'oscillatore armonico: la stessa equazione differenziale descrive una massa attaccata a una molla, un circuito elettrico oscillante e, in altri contesti, determinati modi di un campo. In questi casi, la similarità non è soltanto fenomenica. Essa riguarda la forma della legge che governa il sistema. Proprio per questo, l'analogia formale ha una forza epistémica maggiore di quella puramente materiale: se due sistemi condividono la stessa struttura matematica, è ragionevole aspettarsi che proprietà dimostrate in un caso possano essere trasferite, almeno in parte, anche nell'altro. Naturalmente, questa forza resta condizionata dal fatto che l'identità formale non garantisce ancora identità fisica o ontologica; ma consente proiezioni più robuste di quelle basate su una semplice somiglianza osservativa.

Una terza forma è l'*analogia funzionale*. In questo caso, la corrispondenza si estende al ruolo teorico svolto dalle grandezze o dalle strutture coinvolte. Non basta più che due sistemi si somiglino empiricamente o siano descritti da equazioni analoghe; occorre che gli elementi corrispondenti svolgano funzioni simili all'interno della spiegazione del fenomeno. Un buon esempio è offerto dall'uso della nozione di potenziale in contesti diversi: in meccanica e in elettrostatica, il potenziale

7 - La tripartizione qui proposta tra analogia materiale, formale e funzionale non pretende di offrire una classificazione normativa o esaustiva delle forme di analogia. Essa mira piuttosto a distinguere diversi livelli ai quali può stabilirsi una corrispondenza tra domini, al fine di chiarirne il diverso peso epistémico. In letteratura sono presenti sistematizzazioni alternative. In particolare, Hesse distingue tra analogie "orizzontali", che mettono in relazione sistemi diversi sulla base di somiglianze strutturali, e analogie "verticali", che collegano livelli differenti di descrizione all'interno di uno stesso dominio teorico. Cfr. M. Hesse, *Models and Analogies in Science*, University of Notre Dame Press, Notre Dame 1966.

non è soltanto una grandezza formalmente analoga, ma svolge anche un ruolo comparabile nell'organizzare la dinamica del sistema, nel vincolare il moto e nel rendere possibile una formulazione unificata delle leggi. Quando questo livello funzionale è presente, l'analogia acquista una profondità maggiore, perché la corrispondenza non riguarda soltanto il comportamento dei sistemi o la forma delle equazioni, ma anche il modo in cui certe grandezze contribuiscono alla spiegazione.

Questa distinzione tra analogia materiale, formale e funzionale permette di articolare con maggiore precisione il peso epistemico delle analogie. Non tutte le corrispondenze sostengono inferenze con la stessa forza. Una somiglianza limitata al piano osservabile fornisce in genere un appoggio modesto. Una corrispondenza formale offre invece una base più robusta, perché riguarda la struttura interna della descrizione teorica. Una corrispondenza anche funzionale è ancora più forte, perché coinvolge il ruolo esplicativo delle strutture messe in relazione. In questo senso, ciò che rafforza un'analogia non è la presenza di una similarità qualsiasi, ma la convergenza di più livelli di corrispondenza tra i due domini⁸.

È però essenziale evitare un possibile equivoco. Dire che un'analogia rende una certa ipotesi più plausibile non significa dire che la confermi. La plausibilità generata dall'analogia non coincide con una forma di evidenza empirica. Un'analogia può rendere ragionevole prendere in considerazione una certa ipotesi, può orientare la sua formulazione e può motivarne lo sviluppo; ma non basta, da sola, a stabilirne la verità. La sua funzione epistemica consiste piuttosto nel selezionare e organizzare possibilità teoriche, non nel determinarne lo statuto empirico. Questa caratterizzazione è particolarmente importante nei contesti in cui l'accesso empirico è limitato. In tali casi, l'analogia non opera come sostituto della conferma, ma come criterio di orientamento teorico. Essa può contribuire a restringere lo spazio delle possibilità, a rendere alcune linee di sviluppo più promettenti di altre e a guidare l'esplorazione concettuale in assenza di verifiche dirette.

8 - La distinzione tra analogia materiale, formale e funzionale ha qui una funzione analitica e non introduce categorie rigidamente separate. In molti casi scientifici, una stessa analogia può infatti combinare simultaneamente diversi livelli di corrispondenza. Proprio per questo, il peso epistemico di un'analogia non dipende semplicemente dalla presenza di una singola similarità, ma dalla convergenza di più dimensioni analogiche. In generale, una corrispondenza soltanto materiale tende a sostenere proiezioni più deboli rispetto a una corrispondenza anche formale, mentre la presenza di un livello funzionale rafforza ulteriormente l'analogia, poiché coinvolge non solo la struttura matematica o fenomenica dei sistemi, ma anche il ruolo esplicativo svolto dalle strutture corrispondenti all'interno della teoria.

3. Dal Ragionamento Analogico al Supporto Analogico

Le considerazioni sviluppate nella sezione precedente permettono di chiarire un primo punto: l'analogia non può essere valutata soltanto nei termini della plausibilità delle singole inferenze che essa rende possibili. Questo livello di analisi è certamente importante, e descrive con precisione molti casi in cui una corrispondenza tra due domini consente di formulare nuove ipotesi o di estendere proprietà da un *sistema sorgente* a un *sistema bersaglio*. Tuttavia, esso non esaurisce il ruolo epistemico dell'analogia nella pratica scientifica. In numerosi casi, infatti, l'analogia non si limita a sostenere inferenze puntuali, ma contribuisce a organizzare un'intera linea di sviluppo teorico nel tempo. In tali contesti, il problema metodologico cambia natura. Non si tratta più soltanto di stabilire se una certa proiezione analogica sia più o meno plausibile, ma di comprendere in che senso il ricorso continuato a un'analogia possa risultare razionale anche quando esso si accompagna a tensioni, difficoltà o fallimenti parziali.

Per articolare questo secondo livello è utile ricorrere, almeno in prima approssimazione, alla nozione di programma di ricerca. Non è necessario, per il momento, assumere tutti i dettagli della ricostruzione lakatosiana⁹. Basta coglierne l'intuizione di fondo: la scienza non procede soltanto per ipotesi isolate, ma attraverso strutture relativamente stabili che orientano nel tempo la formulazione dei problemi, la selezione delle strategie teoriche e la valutazione dei risultati. Un programma di ricerca, in questo senso, non è una singola teoria, ma una struttura teorica organizzata attorno a un nucleo di assunzioni centrali, protetto da ipotesi ausiliarie e accompagnato da criteri che ne orientano lo sviluppo e la valutazione nel tempo¹⁰.

Ora, in molti casi l'analogia può contribuire precisamente a questo livello. Essa non si limita a suggerire una proprietà nuova, ma fornisce un principio di organizzazione. Un'analogia stabile può fungere da quadro di orientamento per un programma di ricerca, perché rende intelligibile il trasferimento di intere famiglie di domande da un dominio all'altro. Una volta che due domini vengono messi in cor-

9 - I. Lakatos, *Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes*, in *Philosophy, Science and History*, Routledge, London 2014, pp. 89-94;

10 - La nozione di programma di ricerca è qui utilizzata in un senso lato, ispirato a Lakatos, senza assumerne integralmente l'apparato metodologico. Essa consente di rendere esplicita una dimensione già presente, seppure in forme diverse, in altri modelli della dinamica scientifica: da un lato, l'idea popperiana di sviluppo per congetture e confutazioni; dall'altro, la nozione kuhniana di paradigma come quadro relativamente stabile che orienta la ricerca. Rispetto a questi approcci, il riferimento a Lakatos permette di tematizzare in modo più esplicito la continuità e la struttura interna dei processi di sviluppo teorico. Cfr. K. R. Popper, *The Logic of Scientific Discovery*, Routledge, London 2005; T.S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago 1997; I. Lakatos, *Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes*, in *Philosophy, Science and History*, Routledge, London 2014, pp. 89-94.

rispondenza in modo sufficientemente robusto, l'analogia non suggerisce soltanto una risposta, ma un'agenda di lavoro. Essa contribuisce a stabilire che cosa debba ancora essere spiegato, quali difficoltà siano davvero decisive e quali, invece, possano essere trattate come tensioni locali.

Questa funzione organizzativa si vede bene nei casi in cui un'analogia continua a operare anche dopo l'emergere di difficoltà rilevanti. Se l'analogia fosse soltanto uno strumento per formulare inferenze puntuali, la comparsa di una disanalogia importante dovrebbe semplicemente ridurre la plausibilità delle proiezioni interessate. Ma quando l'analogia sostiene un programma di ricerca più ampio, la situazione è diversa. In tal caso, una difficoltà può essere trattata non come una confutazione immediata dell'analogia, ma come un problema interno al programma: qualcosa che richiede riformulazione, approfondimento, o revisione di alcune assunzioni. In altre parole, l'analogia entra a far parte della dinamica del programma e, proprio per questo, la sua valutazione non può essere ridotta a quella delle singole inferenze.

Un esempio storico aiuta a chiarire il punto. Nella seconda metà dell'Ottocento, l'elettromagnetismo fu spesso modellato per analogia con sistemi meccanici continui. In Maxwell, per esempio, il campo elettromagnetico viene rappresentato come uno stato di tensione e movimento di un mezzo elastico: le linee di forza sono interpretate come linee di tensione, mentre fenomeni come l'induzione vengono ricondotti a processi analoghi a vortici o a correnti in un fluido. Questa analogia suggeriva che le interazioni dovessero propagarsi localmente nel mezzo e che grandezze come il campo avessero un correlato fisico reale, non meramente formale. Tuttavia, già alla fine del secolo, questo quadro incontrava difficoltà: non era possibile fornire una descrizione coerente dell'etere come mezzo meccanico, e alcune proprietà richieste dalle equazioni di Maxwell risultavano incompatibili con i modelli elastici disponibili. Nonostante ciò, tali problemi non portarono immediatamente all'abbandono dell'analogia. Al contrario, la struttura matematica del campo, originariamente introdotta in quel contesto analogico, venne mantenuta e sviluppata, mentre il riferimento al mezzo meccanico fu progressivamente rielaborato e infine abbandonato. Ciò mostra che l'analogia poteva continuare a sostenere lo sviluppo teorico anche quando alcune sue implicazioni specifiche risultavano difficili da mantenere. Il punto non è se, a posteriori, quel programma fosse "giusto" o "sbagliato", ma che la sua razionalità metodologica non può essere compresa soltanto in termini di singole inferenze analogiche.

È precisamente questo tipo di dinamica che la nozione di *supporto analogico* intende catturare. Con l'espressione *supporto analogico* intendiamo una forma di giustificazione metodologica che riguarda non la plausibilità di una singola ipotesi, ma la razionalità del proseguimento di un programma di ricerca guidato da un'ana-

logia. Più precisamente, diremo che un'analogia fornisce supporto analogico quando contribuisce a rendere metodologicamente giustificato il proseguimento di una linea di ricerca, anche in assenza di conferma empirica diretta e anche in presenza di difficoltà teoriche ancora aperte.

Questa definizione richiede necessariamente alcuni chiarimenti. Anzitutto, il supporto analogico non coincide con il ruolo euristico dell'analogia. Un'analogia può essere euristicamente feconda nel senso minimo di suggerire nuove ipotesi o nuove domande. Ma ciò non basta ancora per parlare di supporto analogico. Il supporto analogico richiede qualcosa di più: che l'analogia non si limiti a produrre intuizioni iniziali, ma continui a sostenere lo sviluppo teorico nel tempo, contribuendo a orientare il lavoro concettuale e la gestione delle difficoltà interne al programma. In secondo luogo, il supporto analogico non coincide con una forma di conferma. Dire che un'analogia sostiene un programma di ricerca non significa dire che essa fornisca evidenza a favore della verità delle ipotesi coinvolte. Il punto è diverso. L'analogia può rendere razionale continuare a lavorare entro una certa linea teorica senza per questo aumentare direttamente il grado di conferma empirica delle sue tesi. Il supporto analogico riguarda le condizioni sotto le quali una certa traiettoria di ricerca merita di essere perseguita, non la misura in cui le sue ipotesi debbano essere considerate vere. In terzo luogo, il supporto analogico non è una proprietà puramente soggettiva. Non basta che gli scienziati trovino un'analogia "ispiratrice" o "suggestiva". Per parlare di supporto analogico deve esserci una base più oggettiva: l'analogia deve contribuire effettivamente alla produzione di sviluppo teorico, alla riorganizzazione di problemi, alla formulazione di vincoli, o alla ricomposizione di tensioni che altrimenti resterebbero opache. In questo senso, il supporto analogico non descrive semplicemente una motivazione psicologica, ma una forma di legittimazione metodologica.

Si può allora formulare il punto in modo più preciso. Un'analogia fornisce supporto analogico quando:

- (i) stabilisce una corrispondenza sufficientemente robusta da rendere intelligibile il trasferimento di problemi e strutture da un dominio a un altro;
- (ii) continua a orientare lo sviluppo teorico anche oltre la formulazione iniziale di singole proiezioni;
- (iii) contribuisce alla produzione di sviluppi teorici significativi anziché limitarsi a sorreggere intuizioni vaghe o puramente descrittive¹¹;

11 - In un senso affine, come vedremo in seguito, alla nozione lakatosiana di contenuto teorico nuovo: un programma è progressivo quando le sue modifiche non si limitano a proteggere il nucleo da difficoltà già note, ma introducono elementi teorici che eccedono tali difficoltà, eventualmente anche anticipando nuove conseguenze empiriche.

(iv) mantiene questa funzione anche in presenza di difficoltà, purché tali difficoltà non distruggano il nucleo della corrispondenza.

A questo punto si vede meglio anche la differenza rispetto al ragionamento analogico. Il ragionamento analogico riguarda il passaggio da una corrispondenza riconosciuta a una proprietà ulteriore. Il supporto analogico riguarda invece la funzione che l'analogia svolge in una dinamica di ricerca più ampia. Il primo è locale; il secondo è globale. Il primo ha come oggetto una proiezione; il secondo una traiettoria teorica. Il primo si misura nei termini di plausibilità inferenziale; il secondo nei termini di razionalità metodologica del proseguimento della ricerca.

Per collocare questa nozione all'interno del paradigma lakatosiano, occorre ora precisare in che senso un'analogia possa contribuire alla progressività di un programma di ricerca. In Lakatos, la distinzione fondamentale è tra programmi progressivi e programmi regressivi. Un programma è progressivo quando le sue modifiche conducono a sviluppi teorici o empirici nuovi; è regressivo quando gli aggiustamenti servono principalmente a proteggere il programma da difficoltà già note, senza produrre avanzamenti significativi.

Se adottiamo questo schema, il punto diventa il seguente: un'analogia può fornire supporto analogico nella misura in cui contribuisce a sostenere un programma progressivo, o almeno non regressivo. Più precisamente, la funzione metodologica dell'analogia si manifesta quando essa non si limita a proteggere il programma da obiezioni, ma continua a generare risultati teorici non banali, ed eventualmente conferme empiriche. Tali risultati possono assumere forme diverse: l'introduzione di nuovi vincoli strutturali, la riorganizzazione di problemi fino ad allora separati, la formulazione di nuove connessioni concettuali, o l'integrazione coerente di principi che apparivano in tensione.

Qui però emerge una difficoltà. Nei contesti di frontiera, specialmente nella fisica teorica contemporanea, la progressività empirica è spesso difficile da stabilire. Vi sono programmi che producono un notevole sviluppo teorico senza generare, almeno nel breve periodo, nuove predizioni direttamente controllabili¹². Se ci attenessimo rigidamente al criterio lakatosiano più forte, dovremmo forse considerarli sospesi o metodologicamente indeterminati. Ma una conclusione simile rischierebbe di essere troppo severa, e soprattutto di non descrivere adeguatamente la pratica effettiva della ricerca in questi domini. Per questo motivo conviene distin-

12 - Un esempio paradigmatico è la teoria delle stringhe, spesso discussa come un programma teoricamente fecondo nonostante l'assenza di predizioni empiriche direttamente controllabili nel breve periodo. Come argomenta Dawid, la sua razionalità metodologica è stata sostenuta da criteri non empirici, quali la coerenza interna, l'unificazione teorica e l'assenza di alternative comparabili. Cfr. R. Dawid, *String Theory and the Scientific Method*, Cambridge University Press, Cambridge 2013.

guere tra una forma forte e una forma debole di progressività. Un programma sarà *fortemente progressivo* quando i suoi sviluppi teorici si accompagnano a nuove conseguenze empiriche controllabili. Sarà invece *debolmente progressivo* quando, pur in assenza di tale crescita empirica, esso continua a produrre sviluppi teorici significativi, non meramente difensivi. La nozione di *progressività debole* non sostituisce quella lakatosiana standard, ma ne estende l'applicazione a contesti in cui l'accesso empirico è fortemente limitato.

Questa distinzione è importante per la nozione di supporto analogico. Se il programma guidato da un'analogia è fortemente progressivo, allora il ruolo metodologico dell'analogia appare relativamente chiaro. Ma anche quando il programma è soltanto debolmente progressivo, l'analogia può continuare a fornire un sostegno reale, purché essa contribuisca a generare sviluppo teorico non banale. In questo senso, il supporto analogico è compatibile con una forma di razionalità metodologica che non coincide con la conferma empirica, ma che nemmeno si riduce a mera persistenza conservativa.

Resta tuttavia da chiarire il ruolo delle disanalogie. Come visto nella sezione precedente, ogni analogia è inevitabilmente parziale. La presenza di differenze tra dominio sorgente e dominio bersaglio non elimina di per sé la funzione metodologica dell'analogia. Ciò che conta è il peso di tali differenze. Se esse riguardano aspetti secondari o locali, il programma può continuare a svilupparsi senza che il nucleo della corrispondenza venga compromesso. Se invece colpiscono proprio gli elementi che rendono l'analogia teoricamente feconda, allora la sua funzione di orientamento può indebolirsi fino a dissolversi. Ne segue che il supporto analogico non è una proprietà incondizionata. Esso dipende da un equilibrio tra due fattori: da un lato, la capacità dell'analogia di continuare a sostenere sviluppo teorico; dall'altro, il grado in cui le disanalogie lasciano intatto il nucleo della corrispondenza. Quando il primo fattore prevale e il secondo non è distruttivo, l'analogia conserva la propria funzione metodologica. Quando invece le disanalogie colpiscono il centro stesso del trasferimento analogico e il programma smette di produrre sviluppo teorico genuino, il supporto analogico viene meno.

Possiamo quindi formulare la tesi generale di questa sezione nel modo seguente. Il ruolo epistemico di un'analogia non si esaurisce nella plausibilità delle inferenze che essa giustifica. In certi casi, l'analogia contribuisce a sostenere il proseguimento razionale di un programma di ricerca nel tempo. Questa funzione, che abbiamo chiamato *supporto analogico*, dipende dal fatto che l'analogia continui a orientare sviluppo teorico non banale e che le disanalogie emergenti non distruggano il nucleo della corrispondenza che rende il programma fecondo.

È precisamente in questo senso che il caso della termodinamica dei buchi neri risulta filosoficamente istruttivo. Esso non costituisce soltanto un insieme di infe-

renze analogiche più o meno plausibili, ma un esempio in cui una analogia ha contribuito a organizzare e sostenere una linea di ricerca di lungo periodo, pur attraversata da tensioni concettuali profonde. La sezione seguente mostrerà in che modo questo caso possa essere letto alla luce della nozione di supporto analogico qui introdotta.

4. La termodinamica dei buchi neri e il paradosso dell'informazione

Il caso della termodinamica dei buchi neri offre un esempio particolarmente chiaro del ruolo che un'analogia può assumere nello sviluppo teorico. In questo contesto, un'analogia inizialmente formulata a livello formale è stata progressivamente rielaborata, messa sotto pressione da tensioni concettuali e infine trasformata attraverso nuovi sviluppi teorici.

Il punto di partenza è abbastanza noto. All'inizio degli anni Settanta, Bekenstein propose che i buchi neri possedessero un'entropia proporzionale all'area dell'orizzonte degli eventi¹³. Questa proposta si fondava su una analogia tra le leggi della meccanica dei buchi neri e le leggi della termodinamica: in particolare, la crescita dell'area dell'orizzonte ricordava il comportamento dell'entropia nei processi irreversibili. Poco dopo, Bardeen, Carter e Hawking formularono in modo sistematico le cosiddette "leggi della meccanica dei buchi neri", che riproducevano in modo sorprendente la struttura formale delle leggi termodinamiche¹⁴.

A questo stadio, tuttavia, l'analogia era puramente formale. Le grandezze coinvolte – area, massa, superficie di gravità – occupavano posizioni strutturalmente analoghe a quelle di entropia, energia e temperatura, ma mancava un elemento cruciale: i buchi neri, nella teoria classica, non emettono radiazione. Essi si comportano come assorbitori perfetti. Di conseguenza, non esisteva alcun meccanismo fisico che giustificasse l'attribuzione di una temperatura¹⁵.

Questa assenza costituiva una disanalogia rilevante. In un sistema termodinamico ordinario, la temperatura non è una semplice etichetta formale, ma una grandezza che governa lo scambio di energia con l'ambiente. Senza un processo di emis-

13 - J.D. Bekenstein, *Black Holes and Entropy*, in «Physical Review D», 7 (1973), pp. 2333-2346;

14 - J.M. Bardeen, B. Carter, S.W. Hawking, *The Four Laws of Black Hole Mechanics*, in «Communications in Mathematical Physics», 31 (1973), pp. 161-170.

15 - Per una ricostruzione filosofica della natura inizialmente formale dell'analogia tra meccanica dei buchi neri e termodinamica, cfr. D. Wallace, *The Case for Black Hole Thermodynamics, Part I: Phenomenological Thermodynamics*, in «Studies in History and Philosophy of Modern Physics», 64 (2018), pp. 52-67; Id., *The Case for Black Hole Thermodynamics, Part II: Statistical Mechanics*, in «Studies in History and Philosophy of Modern Physics», 66 (2019), pp. 103-117.

sione, l'identificazione tra superficie di gravità e temperatura rimaneva priva di fondamento fisico. L'analogia, pur suggestiva, risultava quindi incompleta. La situazione cambiò radicalmente con il lavoro di Hawking¹⁶. Mostrando che, in presenza di effetti quantistici, i buchi neri emettono radiazione con spettro termico, Hawking fornì il tassello mancante. I buchi neri non sono oggetti completamente "neri", ma sistemi che irradiano come corpi caldi, con una temperatura ben definita.

Questo risultato non rappresenta soltanto una scoperta indipendente, ma una trasformazione dell'analogia stessa. La corrispondenza tra meccanica dei buchi neri e termodinamica non è più soltanto formale, ma acquisisce una dimensione funzionale: i buchi neri non si limitano a soddisfare equazioni simili a quelle termodinamiche, ma si comportano effettivamente come sistemi termici. In questo senso, la radiazione di Hawking può essere vista come una realizzazione fisica di ciò che l'analogia suggeriva.

Tuttavia, proprio questa scoperta ha generato una nuova tensione, forse più profonda della precedente. La radiazione di Hawking è termica. Nella descrizione semiclassica, ogni modo della radiazione è distribuito secondo uno spettro di corpo nero, determinato unicamente da parametri macroscopici del buco nero, come massa, carica e momento angolare, e non dalle condizioni iniziali che hanno portato alla sua formazione. Di conseguenza, la radiazione appare priva delle correlazioni necessarie per codificare l'informazione microscopica dello stato iniziale. Se il buco nero evapora completamente, il processo nel suo insieme descrive una transizione da uno stato quantistico puro a uno stato misto, ossia a una distribuzione termica che conserva solo grandezze macroscopiche e non permette, neppure in linea di principio, di ricostruire lo stato iniziale¹⁷.

Questo scenario entra in conflitto con un principio centrale della meccanica quantistica: l'unitarietà dell'evoluzione. In un sistema quantistico isolato, l'evoluzione conserva l'informazione. Anche quando un processo appare irreversibile a livello macroscopico, come nel caso dei sistemi termodinamici ordinari, l'informazione non viene distrutta, ma dispersa in correlazioni sempre più complesse. In linea di principio, uno stato iniziale può essere ricostruito a partire dallo stato finale. Nel caso dei buchi neri, la situazione sembra diversa. La radiazione termica prodotta da Hawking appare priva delle correlazioni necessarie per una tale ricostruzione. Ne segue quello che è noto come paradosso della perdita dell'informazione: o la meccanica quantistica deve essere modificata, oppure la descrizione semiclassica

16 - S.W. Hawking, *Particle Creation by Black Holes*, in «Communications in Mathematical Physics», 43 (1975), pp. 199-220.

17 - S.W. Hawking, *Breakdown of Predictability in Gravitational Collapse*, in «Physical Review D», 14 (1976), pp. 2460-2473.

dell'evaporazione dei buchi neri è incompleta¹⁸. Dal punto di vista della nostra analisi, è importante osservare che questa tensione può essere letta come una nuova disanalogia rispetto al modello termodinamico.

Questa disanalogia non ha condotto all'abbandono dell'analogia termodinamica. Al contrario, ha orientato lo sviluppo successivo della ricerca. Invece di rinunciare all'idea che i buchi neri siano sistemi termodinamici, molti lavori hanno cercato di comprendere in che modo l'unitarietà potesse essere restaurata all'interno di un quadro compatibile con la struttura termodinamica.

Un passo decisivo in questa direzione è stato il lavoro di Page¹⁹, che ha riformulato il problema in termini di entanglement. Se l'evaporazione del buco nero è un processo unitario, allora l'entropia della radiazione non può crescere indefinitamente. Dopo una fase iniziale di aumento, essa deve raggiungere un massimo e poi diminuire, fino a tornare a zero quando il sistema finale è puro. Questo comportamento, noto come "curva di Page", rappresenta ciò che ci si aspetta da un sistema quantistico finito che evolve unitariamente. Per lungo tempo, tuttavia, questo risultato è rimasto in tensione con il calcolo di Hawking, che predice invece una crescita monotona dell'entropia. Negli ultimi anni, nuovi sviluppi nella gravità semiclassica hanno mostrato come questa tensione possa essere risolta. Senza entrare nei dettagli tecnici, l'idea centrale è che il calcolo originale di Hawking non include tutti i contributi rilevanti. Quando si tiene conto di effetti più sottili, la dinamica dell'entropia della radiazione risulta compatibile con la curva di Page e quindi con l'unitarietà²⁰. Questo risultato può essere interpretato come una revisione interna del quadro teorico, che permette di mantenere sia la struttura termodinamica sia i principi della meccanica quantistica. In altri termini, la disanalogia introdotta dalla non-unitarietà non viene accettata come definitiva, ma utilizzata come guida per individuare i limiti della descrizione precedente e sviluppare un quadro più completo²¹.

Nel suo insieme, questa sequenza di sviluppi mostra una dinamica caratteristica. L'analogia iniziale tra buchi neri e sistemi termodinamici viene prima formulata a livello formale, poi messa in difficoltà da una disanalogia rilevante (l'assenza di

18 - Per una discussione filosofica del paradosso dell'informazione e del ruolo dell'unitarietà, cfr. E. Cinti, M. Sanchioni, *I paradossi dei buchi neri. Una spiegazione elementare per comprendere l'universo*, Carocci, Roma 2022; Id., *The Devil in the (Implicit) Details: On the AMPS Paradox and Its Resolution*, in «International Journal of Theoretical Physics», 60 (2021), pp. 3234-3253.

19 - D.N. Page, *Average Entropy of a Subsystem*, in «Physical Review Letters», 71 (1993), pp. 1291-1294;

20 - G. Penington, *Entanglement Wedge Reconstruction and the Information Paradox*, in «Journal of High Energy Physics», 2020 (9), pp. 1-45.

21 - Per un'analisi filosofica più approfondita del ruolo del supporto analogico nel contesto della termodinamica dei buchi neri e del paradosso dell'informazione, cfr. V. Fano, M. Sanchioni, *Black Hole Thermodynamics as Scientific Analogy* (manoscritto in preparazione).

radiazione), quindi rafforzata da un nuovo risultato (la radiazione di Hawking), e infine nuovamente problematizzata da una tensione più profonda (la perdita di informazione). Questa tensione, a sua volta, non porta all'abbandono dell'analogia, ma a una sua rielaborazione, che conduce a nuovi sviluppi teorici. È proprio questa dinamica – fatta di corrispondenze, tensioni e riformulazioni – che rende il caso della termodinamica dei buchi neri particolarmente adatto a chiarire il ruolo metodologico dell'analogia nei contesti in cui lo sviluppo teorico procede in condizioni di accesso empirico limitato.

5. Conclusioni

Le analisi sviluppate in questo articolo consentono di trarre una conclusione generale sul ruolo epistemico dell'analogia nei contesti di ricerca caratterizzati da accesso empirico limitato. L'analogia non può essere compresa esclusivamente come uno strumento inferenziale volto a giustificare singole proiezioni tra domini. In molti casi rilevanti, essa svolge una funzione più ampia: contribuisce a sostenere nel tempo lo sviluppo di un programma di ricerca, orientandone le direzioni, selezionando i problemi ritenuti significativi e rendendo metodologicamente razionale il proseguimento della ricerca anche in presenza di difficoltà teoriche non risolte.

È precisamente questa funzione che abbiamo cercato di articolare attraverso la nozione di *supporto analogico*. Tale nozione consente di distinguere tra due livelli che vanno distinti chiaramente: da un lato, la plausibilità delle inferenze analogiche; dall'altro, la razionalità del mantenimento di una traiettoria teorica guidata da un'analogia. Mentre il primo livello riguarda la giustificazione locale di singole ipotesi, il secondo riguarda la dinamica complessiva di un programma di ricerca. Il supporto analogico si colloca a questo secondo livello e non coincide né con il ruolo euristico dell'analogia né con una forma di conferma empirica.

Il caso della termodinamica dei buchi neri mostra con particolare chiarezza questa distinzione. In esso, l'analogia non si limita a sostenere alcune inferenze isolate, ma contribuisce a strutturare un'intera linea di sviluppo teorico. Ciò che emerge in modo particolarmente significativo è il ruolo delle disanalogie. Lungi dal costituire semplici anomalie da eliminare o segnali immediati di fallimento, le disanalogie si rivelano elementi interni alla dinamica del programma.

Questo punto merita di essere enfatizzato. La dinamica osservata non è quella di una progressiva eliminazione delle disanalogie, ma piuttosto quella di una loro trasformazione in vincoli per lo sviluppo teorico. Le disanalogie rilevanti non interrompono necessariamente il programma; al contrario, possono contribuire a ridefinirne gli obiettivi e a guidarne la ristrutturazione. In questo senso, esse svolgono una funzione metodologica positiva: segnalano i limiti del quadro corrente e, al tempo stesso, orientano la ricerca verso forme più articolate di coerenza teorica.

L'analisi proposta in questo articolo apre diverse linee di sviluppo.

Una prima direzione riguarda l'estensione della nozione di supporto analogico ad altri contesti della fisica teorica contemporanea. In particolare, negli ultimi anni si è sviluppata una seconda linea analogica, parallela a quella termodinamica, che mette in relazione i buchi neri con sistemi di informazione quantistica. In questo caso, nozioni come entanglement, codici di correzione degli errori e complessità computazionale vengono utilizzate per analizzare la struttura della gravità quantistica e della corrispondenza olografica. Anche qui, l'analogia non sembra operare soltanto come fonte di inferenze puntuali, ma come principio di organizzazione di un programma di ricerca. Un'analisi sistematica di questo secondo asse analogico potrebbe permettere di raffinare la nozione di supporto analogico proposta in questo lavoro.

Una seconda direzione riguarda il rapporto tra analogia e pluralità di programmi. Se diverse analogie possono coesistere e orientare lo sviluppo teorico in modi parzialmente indipendenti, si pone il problema di comprendere come esse interagiscano, si rafforzino o entrino in tensione tra loro. Nel caso dei buchi neri, l'analogia termodinamica e quella informazionale sembrano talvolta convergere, talvolta suggerire prospettive differenti. Comprendere questa interazione potrebbe offrire un quadro più articolato della dinamica dei programmi di ricerca in fisica teorica.

Infine, una terza direzione riguarda la portata generale della nozione di supporto analogico nella filosofia della scienza. Se l'analogia può sostenere in modo strutturato lo sviluppo teorico in condizioni di accesso empirico limitato, allora essa rappresenta un elemento costitutivo della razionalità scientifica in tali contesti, e non un semplice ausilio contingente. Questo suggerisce la necessità di integrare più esplicitamente il ruolo delle analogie all'interno delle teorie metodologiche della scienza, in particolare nei domini in cui la relazione tra teoria ed esperienza non può essere ridotta a uno schema diretto di verifica.

VINCENZO FANO

Professore ordinario di Logica e Filosofia della scienza presso il Dipartimento di Scienze Pure e Applicate (DiSPeA) dell'Università di Urbino Carlo Bo
vincenzo.fano@uniurb.it

MARCO SANCHIONI

Professore stabile straordinario di Filosofia della Scienza presso l'Istituto Universitario Sophia
marco.sanchioni@sophiauniversity.org