

MONOGRAFIA

# LA SCIENZA COME PRATICA RELAZIONALE

*Verso un'Epistemologia della Mediazione Tecnologica*

---

Carlo Mancosu

## INDICE

CAPITOLO I .....	3
INTRODUZIONE: LA CRISI DELL'OGGETTIVITÀ SCIENTIFICA NELL'ERA DELLA MEDIAZIONE TECNOLOGICA .....	3
CAPITOLO II .....	7
ONTOLOGIA RELAZIONALE: DALLA SOSTANZA AL PROCESSO .....	7
CAPITOLO III .....	11
LA CO-DIPENDENZA COGNITIVA DELLA REALTÀ: FONDAMENTI EPISTEMOLOGICI .	11
CAPITOLO IV .....	16
LA MEDIAZIONE TECNOLOGICA COME VINCOLO COSTITUTIVO .....	16
CAPITOLO V .....	22
LA DIMENSIONE SOCIO-POLITICA DELLA CONOSCENZA SCIENTIFICA .....	22
CAPITOLO VI .....	28
LA DIALETTICA TEORIA-TECNICA: LA SCIENZA DELL'IMPOSSIBILE .....	28
CAPITOLO VII .....	34
GENEALOGIA FILOSOFICA: DA KANT A HEIDEGGER .....	34
CAPITOLO VIII .....	40
CONCLUSIONI: VERSO UN REALISMO RELAZIONALE CRITICO .....	40

## CAPITOLO I

### INTRODUZIONE: LA CRISI DELL'OGGETTIVITÀ SCIENTIFICA NELL'ERA DELLA MEDIAZIONE TECNOLOGICA

#### 1.1 Il problema della conoscenza scientifica come accesso alla «realità in sé»

La questione del rapporto tra conoscenza scientifica e realtà costituisce uno dei nodi problematici più persistenti della riflessione epistemologica contemporanea. La tradizione empirista moderna, da Galileo Galilei attraverso Isaac Newton fino ai positivisti logici del Circolo di Vienna, ha operato sulla base di un presupposto raramente tematizzato: che la conoscenza scientifica, attraverso il metodo sperimentale e la formalizzazione matematica, fornisca accesso privilegiato alla struttura oggettiva del mondo naturale. Tale presupposto incorpora un'ontologia realista per la quale esisterebbe una «natura in sé», dotata di proprietà intrinseche indipendenti dall'osservazione, che il progresso scientifico rivelerebbe con approssimazione crescente.

Tuttavia, lo sviluppo della fisica del XX secolo — dalla meccanica quantistica alla teoria della relatività — ha progressivamente eroso la plausibilità di tale concezione ingenua. Come Werner Heisenberg ebbe a osservare nelle sue *Gifford Lectures* del 1955-56, successivamente pubblicate come *Physics and Philosophy* (1958), «ciò che osserviamo non è la natura in sé, ma la natura esposta al nostro metodo di interrogazione». Tale formulazione, lungi dal costituire mero dictum filosofico, riflette implicazioni tecniche profonde nell'ambito formalismo quantistico: l'impossibilità di attribuire simultaneamente valori definiti a osservabili non commutanti, il collasso della funzione d'onda come evento condizionato dalla misurazione, il teorema di Bell e le sue verificazioni sperimentali che vincolano ogni interpretazione realista locale.

La questione si complica ulteriormente quando si consideri la mediazione tecnologica costitutiva della pratica scientifica contemporanea. Ogni esperimento, ogni osservazione, ogni dato empirico è necessariamente mediato da apparati strumentali la cui sofisticazione tecnologica determina non semplicemente la precisione delle misurazioni ma la stessa accessibilità fenomenologica dei domini investigati. La fisica delle alte energie, la cosmologia osservativa, la biologia molecolare, le neuroscienze cognitive — ciascuna di queste discipline studia fenomeni la cui manifestazione empirica è inscindibile dalle tecnologie che ne permettono l'osservazione. Non si tratta meramente di «vedere meglio» attraverso strumenti più potenti, ma di rendere osservabile ciò che, in assenza di tali tecnologie, rimarrebbe letteralmente inaccessibile all'indagine scientifica.

#### 1.2 La questione della neutralità metodologica e i suoi presupposti metafisici

Il metodo scientifico, come codificato nella tradizione che va da Francis Bacon (*Novum Organum*, 1620) attraverso la rivoluzione galileiana fino alla sistematizzazione metodologica contemporanea, si fonda su un principio di neutralità: la procedura sperimentale, se rigorosamente applicata, dovrebbe garantire risultati indipendenti dalle preconcezioni teoriche, dagli interessi pratici, dai condizionamenti culturali del ricercatore. Tale ideale di neutralità metodologica sottende una concezione particolare del rapporto

tra soggetto conoscente e oggetto conosciuto: presuppone la possibilità di una separazione netta tra l'osservatore e il fenomeno osservato, dove il primo non interferisce costitutivamente con il secondo.

Tuttavia, gli sviluppi nella filosofia della scienza del secondo Novecento — da Thomas Kuhn (*The Structure of Scientific Revolutions*, 1962) a Paul Feyerabend (*Against Method*, 1975), da Ian Hacking (*Representing and Intervening*, 1983) a Bruno Latour (*Science in Action*, 1987) — hanno progressivamente problematizzato tale presupposto. Kuhn ha documentato come le rivoluzioni scientifiche non procedano per accumulo lineare di conoscenze ma attraverso sostituzioni paradigmatiche incommensurabili, dove scienziati operanti in paradigmi differenti «abitano letteralmente mondi diversi». Feyerabend ha mostrato l'anarchismo metodologico di fatto operante nella storia della scienza, dove progressi significativi sono spesso conseguiti violando regole metodologiche canoniche. Hacking ha articolato una concezione interventista dell'esperimento scientifico, dove lo scienziato non osserva passivamente ma manipola attivamente i fenomeni, generando entità che acquisiscono realtà attraverso la loro stabilizzazione sperimentale. Latour, attraverso studi etnografici della pratica di laboratorio, ha rivelato la costruzione sociale dei «fatti scientifici» mediante reti complesse di prassi materiali, strumenti, convenzioni interpretative e negoziazioni comunitarie.

Tali analisi convergono nell'evidenziare come la neutralità metodologica, lungi dall'essere caratteristica immanente del metodo scientifico, costituisca ideale regolativo la cui realizzazione effettiva è sempre parziale e contestuale. La scelta di quali fenomeni investigare, quali variabili considerare rilevanti, quali soglie di significatività statistica adottare, quali modelli teorici impiegare nell'interpretazione dei dati — ciascuna di queste decisioni incorpora presupposti teorici, valori epistemici, vincoli pragmatici che eccedono la pura logica dell'evidenza empirica.

La questione assume urgenza particolare quando si consideri la dimensione socio-politica della ricerca scientifica contemporanea. I programmi di ricerca che ricevono finanziamenti sostanziali, le tecnologie che vengono sviluppate, i domini fenomenologici che diventano accessibili all'indagine sperimentale — tutto ciò riflette decisioni allocative che incorporano priorità economiche, interessi militari, agende politiche. La fisica delle alte energie drena risorse enormi (si consideri il Large Hadron Collider al CERN, il cui costo ha superato i dieci miliardi di dollari); la ricerca biomedica è orientata verso patologie di mercati solvibili piuttosto che malattie endemiche in regioni povere; lo sviluppo di intelligenza artificiale riceve investimenti massivi da corporazioni tecnologiche interessate primariamente alla redditività commerciale. Questi pattern allocativi determinano quali domande scientifiche possono essere poste, quali fenomeni divengono empiricamente accessibili, quale conoscenza viene prodotta — rendendo manifesta la non-neutralità strutturale della pratica scientifica contemporanea.

### 1.3 Struttura e obiettivi del presente lavoro

Il presente lavoro si propone di articolare una concezione alternativa della conoscenza scientifica che prenda sul serio sia gli sviluppi nella fisica fondamentale del XX secolo sia le analisi critiche provenienti dalla filosofia della scienza e dagli studi sociali della scienza. La tesi centrale che verrà sviluppata attraverso i capitoli successivi può essere formulata come segue: *la conoscenza scientifica non costituisce rappresentazione approssimativamente veridica di una «realtà in sé» indipendente, ma articolazione di configurazioni di coerenza relazionale che emergono nell'interazione tra fenomeni investigati, apparati tecnologici di osservazione e sistemi cognitivi che interpretano i risultati.*

Tale formulazione richiede esplicitazione di diverse componenti interconnesse:

*In primo luogo*, occorre sviluppare una concezione ontologica che sostituisca le tradizionali ontologie sostanzialistiche — dove gli enti possiedono proprietà intrinseche preesistenti all'osservazione — con un'*ontologia relazionale* dove le proprietà osservabili emergono dalle relazioni piuttosto che inerire agli oggetti. Il Capitolo II articolerà tale prospettiva mostrando come la fisica contemporanea, dalla meccanica quantistica relazionale alle teorie emergentiste della gravità, già operi (spesso implicitamente) entro tale framework concettuale.

*In secondo luogo*, è necessario tematizzare il ruolo costitutivo del sistema cognitivo-osservativo nella determinazione di ciò che conta come «realtà accessibile». Il Capitolo III svilupperà il concetto di *co-dipendenza cognitiva della realtà*, argomentando che non può esistere modello di comprensione che prescindia dalle strutture cognitive attraverso cui viene elaborato. Questo non implica idealismo soggettivo o costruttivismo radicale, ma riconoscimento che ogni fenomenologia scientificamente articolabile è necessariamente relativa a un dominio di coerenza cognitiva.

*In terzo luogo*, occorre analizzare sistematicamente il ruolo della mediazione tecnologica come vincolo costitutivo della conoscenza scientifica. Il Capitolo IV mostrerà come il criterio di riproducibilità sperimentale — fondamento della validazione scientifica — funzioni simultaneamente come meccanismo di esclusione epistemica: ciò che non può essere tecnologicamente riprodotto viene espulso dal dominio del «reale scientifico». Questo genera una dipendenza strutturale tra i limiti tecnologici di un'epoca e il dominio fenomenologico accessibile alla sua scienza.

*In quarto luogo*, è imprescindibile affrontare la dimensione socio-politica della produzione scientifica. Il Capitolo V analizzerà come le strutture di potere, gli interessi economici, i meccanismi istituzionali di validazione (peer review, sistema delle citazioni, allocazione di finanziamenti) condizionino quali linee di ricerca vengano perseguite, quali teorie ricevano supporto, quali «fatti» emergano come scientificamente consolidati. La non-neutralità del processo scientifico non è aberrazione accidentale ma caratteristica strutturale inscindibile dalla sua organizzazione sociale.

*In quinto luogo*, occorre comprendere la dialettica virtuosa tra speculazione teorica e sviluppo tecnologico. Il Capitolo VI esaminerà come predizioni teoriche situate oltre i limiti tecnologici attuali — quella che denomineremo «scienza dell'impossibile» — fungano da vettori direzionali per l'innovazione strumentale, generando una circolarità ricorsiva dove teoria orienta tecnica e tecnica espande i domini fenomenologici accessibili alla teoria.

*In sesto luogo*, è necessario situare le tesi sviluppate entro la genealogia filosofica che le rende intellegibili. Il Capitolo VII ricostruirà la traiettoria Kant-Hegel-Heidegger, mostrando come la progressiva problematizzazione della «cosa in sé» kantiana conduca, attraverso la critica idealista hegeliana, all'*ontologia relazionale* heideggeriana che dissolve la dicotomia soggetto-oggetto in favore di una concezione dell'essere come evento di manifestazione relazionale.

Il Capitolo VIII concluderà sintetizzando le implicazioni della concezione sviluppata per la pratica scientifica contemporanea. Verrà articolata una posizione che denomineremo *realismo relazionale critico*: riconoscimento che esistono vincoli empirici robusti e intersoggettivamente verificabili (realismo), che tali vincoli sono sempre relativi a regimi di coerenza tecnologicamente e cognitivamente determinati (contestualismo), e che il processo di validazione scientifica è inscindibile da strutture socio-politiche che meritano scrutinio critico continuo (riflessività).

L'obiettivo complessivo non è decostruire la validità della conoscenza scientifica ma articolare una comprensione più sofisticata e onesta dei suoi fondamenti, dei suoi limiti costitutivi, delle sue condizioni di possibilità. Una scienza consapevole della propria storicità, della mediazione tecnologica che la

condiziona, dei rapporti di potere che ne orientano lo sviluppo, non è scienza indebolita ma scienza resa più rigorosa attraverso la riflessività epistemica — liberata dall'onere insostenibile della pretesa alla verità assoluta, restituita alla sua vocazione di esplorazione fallibile, autocorrettiva, tecnologicamente mediata dei domini fenomenologici accessibili.

—

## CAPITOLO II

### ONTOLOGIA RELAZIONALE: DALLA SOSTANZA AL PROCESSO

#### 2.1 La critica alle ontologie sostanzialistiche nella fisica contemporanea

La tradizione metafisica occidentale, da Aristotele attraverso la scolastica medievale fino alla filosofia naturale della prima modernità, ha operato prevalentemente entro framework ontologici sostanzialistici. In tali concezioni, l'essere si articola attraverso sostanze individuali dotate di proprietà intrinseche che ineriscono ad esse indipendentemente dalle relazioni contingenti con altre sostanze. La categoria aristotelica di *ousia* (sostanza) designa precisamente ciò che sussiste di per sé, fungendo da sostrato permanente per gli accidenti mutevoli. Tale schema concettuale ha informato profondamente lo sviluppo della fisica classica: i corpi possiedono massa, posizione, velocità come proprietà intrinseche; le forze modificano tali proprietà ma non le costituiscono.

La fisica del XX secolo ha progressivamente eroso la plausibilità di tali ontologie sostanzialistiche, sebbene tale erosione sia avvenuta attraverso sviluppi tecnici spesso non accompagnati da adeguata riflessione filosofica esplicita. La meccanica quantistica, nella sua interpretazione ortodossa di Copenhagen, introduce già elementi di dipendenza contestuale: lo stato quantistico non descrive proprietà possedute dal sistema indipendentemente dalla misurazione, ma codifica probabilità per risultati di misurazioni possibili. Come Niels Bohr ebbe ripetutamente a sottolineare nei suoi dibattiti con Einstein, «un fenomeno non è un fenomeno finché non è un fenomeno osservato» – formulazione che, pur rimanendo problematicamente ambigua circa lo statuto dell'osservazione, segnala già uno slittamento ontologico significativo.

Tuttavia, è nelle elaborazioni teoriche più recenti che l'abbandono delle ontologie sostanzialistiche diviene esplicito e sistematico. La meccanica quantistica relazionale, sviluppata principalmente da Carlo Rovelli a partire dagli anni Novanta, costituisce tentativo rigoroso di articolare un framework interpretativo coerente che prenda sul serio l'intuizione secondo cui gli stati quantistici non descrivono proprietà assolute dei sistemi ma proprietà relative a sistemi di riferimento osservativi. Nel lavoro seminale «Relational Quantum Mechanics» (pubblicato in *International Journal of Theoretical Physics* 35, 1637-1678, 1996), Rovelli argomenta che la funzione d'onda  $\psi$  non rappresenta stato oggettivo del sistema S ma codifica informazione che un sistema osservatore O possiede circa S. Stati quantistici differenti attribuiti allo stesso sistema da osservatori differenti non costituiscono contraddizione ma riflettono il carattere relazionale dell'informazione quantistica.

Tale prospettiva dissolve paradossi classici della meccanica quantistica ortodossa, particolarmente il problema della misurazione. Se lo stato quantistico è sempre relativo a un osservatore, il «collasso della funzione d'onda» non è processo fisico misterioso ma aggiornamento dell'informazione che un sistema possiede circa un altro in seguito a interazione. Crucialmente, questa interpretazione mantiene la completezza descrittiva della meccanica quantistica senza postulare ontologie aggiuntive (variabili nascoste) o moltiplicazioni metafisicamente dispendiose (many-worlds). Il prezzo teoretico è l'abbandono dell'idea di proprietà assolute: non esiste «lo stato del sistema S» ma solo «lo stato di S relativamente a O».

## 2.2 Le proprietà come emergenze relazionali: analisi del caso paradigmatico

Per rendere concreta la transizione da ontologie sostanzialistiche a ontologie relazionali, consideriamo il caso paradigmatico della velocità della luce nel vuoto, tradizionalmente denotata dalla costante  $c \approx 299.792.458$  m/s. Nella concezione sostanzialistica ingenua,  $c$  costituirebbe proprietà intrinseca della luce — caratteristica che essa «possiede» indipendentemente da qualsiasi contesto relazionale. La teoria della relatività ristretta di Einstein, formulata nell'*annus mirabilis* 1905 («Zur Elektrodynamik bewegter Körper», *Annalen der Physik* 17, 891-921), eleva tale velocità a costante universale: il secondo postulato afferma l'invarianza di  $c$  rispetto a tutti i sistemi di riferimento inerziali.

Tuttavia, un'analisi epistemologica più attenta rivela che  $c$  non è proprietà che la luce «possiede» ma parametro che caratterizza la struttura causale dello spazio-tempo. Come Hermann Minkowski chiarì nella sua celebre conferenza «Raum und Zeit» del 1908 (pubblicata postuma in *Physikalische Zeitschrift* 10, 104-111, 1909), la relatività ristretta è più adeguatamente formulata come teoria geometrica dello spazio-tempo quadridimensionale, dove  $c$  costituisce fattore di conversione tra dimensioni spaziali e temporali nella metrica minkowskiana. In questo framework,  $c$  emerge non come velocità di un ente (la luce) ma come struttura della geometria causale: la pendenza dei coni di luce che determinano quali eventi possono essere causalmente connessi.

La questione assume profondità ulteriore quando si consideri che ogni determinazione empirica di  $c$  richiede apparati di misurazione specifici e convenzioni di sincronizzazione orologi. Come Hans Reichenbach analizzò sistematicamente in *The Philosophy of Space and Time* (1928, traduzione inglese Dover 1958), la simultaneità di eventi spazialmente separati non è fatto osservativo diretto ma richiede convenzione: si assume tipicamente la simmetria temporale della propagazione luminosa (convenzione  $\epsilon = 1/2$ ), ma convenzioni alternative sono logicamente coerenti pur generando geometrie apparentemente differenti. La «velocità della luce» dipende così costitutivamente dalla convenzione di sincronizzazione adottata — ulteriore indizio del suo carattere relazionale piuttosto che sostanziale.

Generalizzando da questo caso paradigmatico: le proprietà fisicamente misurabili (massa, carica, spin, energia) non costituiscono attributi intrinseci che gli enti possiedono indipendentemente ma emergono in configurazioni relazionali specifiche che includono l'apparato di misurazione, il sistema di riferimento, le convenzioni operative. Il formalismo quantistico rende tale struttura particolarmente trasparente: osservabili sono rappresentate da operatori hermitiani agenti su spazi di Hilbert, e i valori misurati emergono come autovalori di tali operatori nel contesto di stati quantistici specifici. Operatori non commutanti (ad esempio posizione e momento) non possiedono simultaneamente autovalori definiti — non perché esista limitazione epistemica nella nostra capacità di misurazione, ma perché l'attribuzione simultanea di valori definiti è ontologicamente inappropriata. La proprietà emerge nell'atto di misurazione, non preesiste ad esso.

## 2.3 Meccanica quantistica relazionale e ontologie processuali

L'interpretazione relazionale della meccanica quantistica sviluppata da Rovelli si connette a tradizioni filosofiche più ampie che privilegiano ontologie processuali rispetto a ontologie sostanzialistiche. Alfred North Whitehead, in *Process and Reality* (1929), aveva già articolato una metafisica dove l'essere fondamentale non è costituito da sostanze permanenti ma da «occasioni di esperienza» (*actual occasions*) — eventi di divenire che si costituiscono attraverso «prehensions» (relazioni) con altre occasioni. Sebbene la metafisica whiteheadiana sia sovraccarica di terminologia tecnica idiosincratice che ne ha limitato l'influenza, l'intuizione centrale converge con sviluppi nella fisica contemporanea: la realtà è processo relazionale piuttosto che collezione di sostanze.

Nella fisica teorica contemporanea, tale orientamento si manifesta in diversi programmi di ricerca. La loop quantum gravity, sviluppata principalmente da Carlo Rovelli, Lee Smolin e Abhay Ashtekar a partire dagli anni Ottanta, concettualizza lo spazio-tempo non come continuo preesistente ma come rete di relazioni quantizzate. In tale framework, lo spazio emerge da «spin networks» — grafi i cui nodi e collegamenti codificano relazioni geometriche quantizzate. Non esistono punti spaziali con proprietà geometriche intrinseche; esistono relazioni di adiacenza, volumi associati a regioni, superfici che separano regioni. La geometria è relazionale nel senso più radicale: non proprietà di un sostrato ma struttura di relazioni tra entità che sono esse stesse definite relazionalmente.

Analogamente, approcci emergentisti alla gravitazione — particolarmente le proposte di Erik Verlinde («On the Origin of Gravity and the Laws of Newton», *Journal of High Energy Physics* 2011, 029) e Thanu Padmanabhan (si veda la sintesi in «Thermodynamical Aspects of Gravity: New insights», *Reports on Progress in Physics* 73, 046901, 2010) — concettualizzano la forza gravitazionale non come interazione fondamentale ma come fenomeno emergente dalla termodinamica dell'informazione quantistica. In tali modelli, ciò che appare come «attrazione gravitazionale» è effetto entropico generato dalla statistica di gradi di libertà microscopici. La gravità non inerisca allo spazio-tempo come proprietà; emerge da relazioni informazionali sottostanti quando si considera la fisica a scale macroscopiche.

La teoria dell'informazione quantistica fornisce ulteriore supporto a concezioni relazionali. Il programma di ricerca inaugurato da John Archibald Wheeler con lo slogan «it from bit» (si veda la discussione in «Information, Physics, Quantum: The Search for Links», *Proceedings of the 3rd International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics*, Tokyo, 1989, pp. 354-368) propone che la realtà fisica emerga fundamentalmente da bit di informazione quantistica. L'entanglement quantistico — correlazioni non-locali tra sistemi che hanno interagito — viene interpretato non come proprietà misteriosa che sistemi «possiedono» ma come struttura relazionale primaria. Mark Van Raamsdonk ha argomentato («Building up spacetime with quantum entanglement», *General Relativity and Gravitation* 42, 2323-2329, 2010; *International Journal of Modern Physics D* 19, 2429-2435, 2010) che la connettività dello spazio-tempo emerge dalla struttura di entanglement in teorie quantistiche di campo conformi duali (corrispondenza AdS/CFT). Lo spazio-tempo stesso sarebbe così costruito da relazioni di entanglement quantistico — ontologia radicalmente relazionale dove persino l'arena geometrica entro cui si svolgono processi fisici è costituita relazionalmente.

## 2.4 Implicazioni per la fisica fondamentale: verso una scienza delle relazioni

La transizione da ontologie sostanzialistiche a ontologie relazionali comporta conseguenze metodologiche significative per la fisica fondamentale. Tradizionalmente, la ricerca di una «teoria del tutto» è stata concettualizzata come identificazione degli enti fondamentali (particelle elementari, stringhe, membrane) e delle loro leggi di interazione. Tale programma presuppone che esista un livello ontologico basilare dove si trovano i veri «costituenti» della realtà, dotati di proprietà intrinseche, le cui interazioni generano i fenomeni osservabili a scale superiori.

Un'ontologia relazionale suggerisce orientamento metodologico alternativo: anziché cercare le «sostanze ultime», la fisica dovrebbe articolare le strutture relazionali fondamentali da cui emergono tanto gli apparenti «enti» quanto le loro «proprietà». Non esisterebbe un livello ontologico privilegiato di sostanze elementari; esisterebbero regimi di coerenza relazionale che, a differenti scale e in differenti contesti, si manifestano come configurazioni apparentemente sostanziali.

Tale prospettiva trova risonanza in approcci strutturalisti alla fisica fondamentale. Il realismo strutturale, difeso in forme differenti da John Worrall («Structural Realism: The Best of Both Worlds?», *Dialectica* 43, 99-124, 1989) e James Ladyman («What is Structural Realism?», *Studies in History and Philosophy of Science* 29, 409-424, 1998), sostiene che le teorie fisiche mature catturano strutture relazionali piuttosto che nature intrinseche degli enti. Le rivoluzioni scientifiche preservano tipicamente le strutture matematiche (si consideri il limite classico della meccanica quantistica, o il limite newtoniano della relatività generale) pur modificando l'ontologia degli enti postulati. Tale continuità strutturale attraverso cambiamenti ontologici suggerisce che le relazioni matematicamente codificate, non gli enti, costituiscano il contenuto oggettivo delle teorie.

Steven French e Decio Krause hanno sviluppato tale prospettiva in contesto quantistico (*Identity in Physics: A Historical, Philosophical, and Formal Analysis*, Oxford University Press, 2006), mostrando come particelle quantistiche indistinguibili violino il principio leibniziano di identità degli indiscernibili: non possiedono identità transtemporale definita che permetta di tracciarle attraverso il tempo. Ciò suggerisce che non siano sostanze individuali nel senso metafisico tradizionale ma «nodi» in struttura relazionale più fondamentale. La statistica quantistica (Fermi-Dirac per fermioni, Bose-Einstein per bosoni) non descrive comportamenti di entità individuali ma strutture combinatoriche di stati possibili — ulteriore indizio della priorità ontologica delle relazioni rispetto alle sostanze.

L'adozione sistematica di ontologie relazionali richiede tuttavia chiarificazione concettuale circa lo statuto degli «osservatori» o «sistemi di riferimento» rispetto ai quali le proprietà vengono definite. Esiste rischio di regresso infinito: se le proprietà di S sono relative a O, le proprietà di O sono relative a O'? E quelle di O' relative a O''? La meccanica quantistica relazionale di Rovelli affronta tale questione sostenendo che ogni sistema fisico può fungere da osservatore rispetto ad altri sistemi — non è richiesto osservatore privilegiato o coscienza. L'informazione è intrinsecamente relazionale: ogni sistema «conosce» (nel senso di possedere correlazioni con) altri sistemi con cui ha interagito. L'universo è così rete di correlazioni reciproche, senza necessità di punto di vista assoluto esterno.

Tale soluzione, sebbene formalmente coerente, solleva questioni filosofiche profonde circa la natura dell'oggettività scientifica. Se tutte le proprietà sono relazionali, in che senso la fisica descrive realtà «oggettiva»? La risposta, sviluppata nel prossimo capitolo, richiede riconcettualizzazione dell'oggettività non come corrispondenza a realtà indipendente ma come coerenza intersoggettiva entro domini relazionali condivisi. L'oggettività diviene proprietà emergente di reti relazionali sufficientemente stabili e intersoggettivamente accessibili, non rispecchiamento di sostanze assolute.

—

*Fine Capitolo II*

—

## CAPITOLO III

### LA CO-DIPENDENZA COGNITIVA DELLA REALTÀ: FONDAMENTI EPISTEMOLOGICI

#### 3.1 Il sistema cognitivo come condizione trascendentale del reale

L'argomentazione sviluppata nel capitolo precedente ha stabilito che le proprietà fisicamente osservabili non costituiscono attributi intrinseci delle sostanze ma emergono in configurazioni relazionali specifiche. Tale conclusione solleva immediata interrogazione epistemologica: quale statuto possiedono i sistemi cognitivi-osservativi in virtù dei quali tali configurazioni relazionali divengono accessibili? La questione non è meramente accessoria ma tocca il nucleo stesso della possibilità di conoscenza scientifica oggettiva.

La tradizione critica inaugurata da Immanuel Kant nella *Kritik der reinen Vernunft* (1781/1787) aveva già identificato la problematica fondamentale: la conoscenza umana non accede a una realtà «in sé» ma è costitutivamente mediata da forme a priori dell'intuizione sensibile (spazio e tempo) e da categorie dell'intelletto (sostanza, causalità, necessità) che strutturano l'esperienza possibile. Come Kant formula nella celebre sintesi dell'Introduzione alla seconda edizione (B, XVI): «Fino ad ora si ammetteva che ogni nostra conoscenza dovesse regolarsi sugli oggetti [...] Si faccia una volta il tentativo di vedere se non procediamo meglio nei compiti della metafisica, ammettendo che gli oggetti debbano regolarsi sulla nostra conoscenza». Tale «rivoluzione copernicana» epistemologica stabilisce che le strutture della conoscibilità non rispecchiano passivamente una realtà pre-data ma contribuiscono costitutivamente alla determinazione di ciò che può apparire come oggetto di esperienza.

Tuttavia, la soluzione kantiana mantiene distinzione tra fenomeno (oggetto così come appare mediato dalle forme a priori) e noumeno (cosa in sé, pensabile ma inconoscibile), preservando residuo di realismo metafisico. Il passo ulteriore – verso quello che denomineremo principio di co-dipendenza cognitiva – richiede riconoscimento più radicale: non semplicemente che la conoscenza è mediata da strutture cognitive, ma che *non può esistere articolazione di realtà che non sia costitutivamente relativa a un dominio cognitivo di osservazione*.

Tale tesi trova supporto convergente da tradizioni filosofiche e scientifiche apparentemente eterogenee. Nella fenomenologia post-husserliana, Edmund Husserl aveva argomentato nella *Krisis der europäischen Wissenschaften und die transzendente Phänomenologie* (1936) che la scienza moderna ha dimenticato il radicamento della conoscenza oggettivante nel *Lebenswelt* (mondo-della-vita) pre-teoretico. Le idealizzazioni matematiche della fisica – punti geometrici, istanti temporali, continui infiniti – sono costituite mediante operazioni intenzionali della coscienza che la scienza poi oblia, trattando i propri costrutti come se fossero caratteristiche scoperte di una natura pre-esistente. La «crisi» della scienza europea consiste precisamente in tale oblio delle proprie genesi costitutive.

Maurice Merleau-Ponty radicalizza tale prospettiva nella *Phénoménologie de la perception* (1945), mostrando come la percezione non sia ricezione passiva di dati sensoriali ma processo attivo di costituzione di significati attraverso lo schema corporeo. Il corpo proprio (*le corps propre*) non è oggetto tra oggetti ma punto-zero dell'orientamento spaziale, prospettiva incarnata da cui il mondo

acquisisce articolazione. Come Merleau-Ponty osserva: «Il mondo è non ciò che io penso, ma ciò che io vivo; io sono aperto al mondo, comunico indubbiamente con esso, ma non lo possiedo, esso è inesauribile» (*Phénoménologie*, Prefazione). La realtà percepita è sempre realtà per un corpo situato, prospetticamente organizzata attorno a capacità sensori-motorie specifiche.

### 3.2 Biologia della cognizione e enattivismo: l'accoppiamento strutturale organismo-ambiente

Sviluppi nella biologia teorica e nelle scienze cognitive hanno fornito ulteriore elaborazione di tali intuizioni fenomenologiche, traducendole in framework scientificamente operativi. Humberto Maturana e Francisco Varela, nel lavoro fondativo *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living* (1980), introducono il concetto di autopoiesi per caratterizzare i sistemi viventi come reti di processi che producono ricorsivamente i componenti che li costituiscono. Crucialmente, per sistemi autopoietici non esiste separazione netta tra organismo e ambiente: l'organismo e il suo ambiente sono mutuamente specificati attraverso *accoppiamento strutturale* – processo attraverso cui perturbazioni ambientali innescano cambiamenti strutturali nell'organismo che, modificandone le proprietà, alterano quali perturbazioni future saranno efficaci.

Nella successiva elaborazione *The Tree of Knowledge: The Biological Roots of Human Understanding* (1987), Maturana e Varela sviluppano implicazioni epistemologiche di tale framework: la cognizione non è rappresentazione di una realtà pre-esistente ma *enazione* (*enaction*) – letteralmente «fare emergere» un mondo di significatività attraverso l'attività senso-motoria dell'organismo. Come formulano: «La cognizione non è la rappresentazione di un mondo pre-dato da parte di una mente pre-data, ma piuttosto l'enazione di un mondo e di una mente sulla base di una storia della varietà di azioni che un essere compie nel mondo» (p. 9).

Tale concezione dissolve la dicotomia tradizionale tra realismo (il mondo esiste indipendentemente e la cognizione lo rappresenta) e idealismo (il mondo è costruzione della mente). L'enattivismo sostiene una terza via: organismo e mondo sono co-specificati attraverso storia di accoppiamento strutturale. Non esiste «il mondo» come realtà unica pre-data, ma una pluralità di mondi-propri (*Umwelten*, nel linguaggio di Jakob von Uexküll) ciascuno costituito dalle affordances rilevanti per un particolare modo di essere biologico.

Francisco Varela, Evan Thompson e Eleanor Rosch approfondiscono tali tematiche in *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience* (1991), mostrando convergenze tra l'approccio enattivista e tradizioni filosofiche buddhiste che negano l'esistenza di un sé sostanziale e di oggetti dotati di esistenza intrinseca. La co-dipendenza (*pratītyasamutpāda* nella terminologia buddhista Madhyama) diviene principio ontologico generale: nessun fenomeno possiede natura intrinseca (*svabhāva*) indipendente ma tutti esistono in mutua dipendenza relazionale.

### 3.3 Impossibilità logica di modelli di comprensione indipendenti dal sistema cognitivo

L'analisi fenomenologica e biologica della cognizione converge verso una tesi di impossibilità logica che può essere formulata rigorosamente: *non può esistere articolazione di un modello di comprensione che prescindere dalle strutture cognitive attraverso cui tale modello viene elaborato*. Ogni tentativo di concepire un modello di realtà «indipendente dall'osservatore» è già, paradossalmente, operazione di un sistema cognitivo particolare e quindi dipendente dalle sue strutture costitutive.

Tale argomento può essere precisato attraverso analisi della struttura logica implicata in ogni atto di modellizzazione scientifica. Un modello  $M$  della realtà  $R$  è mappatura  $M: R \rightarrow S$  dove  $S$  è spazio di rappresentazioni (matematiche, linguistiche, iconiche). Tuttavia, tanto la specificazione di  $R$  quanto la costruzione di  $S$  quanto la definizione della mappatura  $M$  richiedono operazioni cognitive: categorizzazione, astrazione, formalizzazione, interpretazione. Ciascuna di tali operazioni è condizionata dalle capacità e limitazioni del sistema cognitivo che le esegue. Non può esistere «punto di vista da nessun luogo» (*view from nowhere*, nella critica di Thomas Nagel, *The View from Nowhere*, Oxford University Press, 1986) da cui costruire modello completamente disincarnato.

La fisica quantistica rende tale struttura particolarmente trasparente. Il formalismo quantistico standard richiede divisione del mondo in «sistema osservato» e «apparato di misurazione». Tale divisione, come John von Neumann mostrò in *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (1932), è in linea di principio arbitraria: si può sempre includere l'apparato di misurazione nella descrizione quantistica, ma ciò richiede introduzione di nuovo apparato esterno per effettuare misurazione. Il cosiddetto «taglio di Heisenberg» (*Heisenberg cut*) che separa sistema quantistico da dominio classico dell'osservazione non corrisponde a discontinuità ontologica nella natura ma è scelta operativa necessaria per applicare formalismo predittivo.

Niels Bohr, nel tentativo di fornire interpretazione filosoficamente coerente della meccanica quantistica, introdusse il concetto di complementarità: descrizioni complete in termini di coordinate spaziali e descrizioni in termini di momenti sono mutuamente esclusive ma entrambe necessarie per caratterizzazione completa. Come Bohr enfatizzò ripetutamente, «non esiste mondo quantistico. Esiste solo descrizione fisica quantistica astratta. È errato pensare che il compito della fisica sia scoprire come è la natura. La fisica riguarda ciò che possiamo dire della natura» (citato in Aage Petersen, «The Philosophy of Niels Bohr», *Bulletin of the Atomic Scientists* 19, no. 7, 1963, pp. 8-14).

Tale formulazione, sebbene Bohr non la sviluppasse sistematicamente in direzione costruttivista, contiene già il nucleo della tesi di co-dipendenza cognitiva: la fisica non accede a «come è la natura in sé» ma articola ciò che può essere detto della natura entro framework concettuali e sperimentali specifici. Il contenuto di tale articolazione è costitutivamente dipendente dalle strutture del dire — dal linguaggio, dai concetti, dalle categorie attraverso cui viene organizzato.

### 3.4 Pluralismo ontologico e la molteplicità dei mondi fenomenologici

Se si accetta che non può esistere modello di comprensione indipendente dal sistema cognitivo, e se si riconosce che sistemi cognitivi differenti (biologicamente, culturalmente, tecnologicamente) strutturano l'esperienza in modi eterogenei, ne consegue forma di pluralismo ontologico: esistono molteplici mondi fenomenologici, ciascuno costituito dalle capacità percettive e categoriali di particolari forme di vita cognitiva.

Jakob von Uexküll aveva già articolato tale prospettiva in *Theoretische Biologie* (1920) e *Umwelt und Innenwelt der Tiere* (1909) attraverso il concetto di *Umwelt* — mondo-proprio specifico a ciascuna specie biologica. L'*Umwelt* del pipistrello, che percepisce ecolocazione ultrasonora, è fenomenologicamente incommensurabile con l'*Umwelt* umano, dominato da percezione visiva e uditiva in bande di frequenza differenti. L'*Umwelt* della zecca, i cui recettori chimici rilevano acido butirrico emesso da mammiferi, consiste di poche affordances (calore, odore, tattilità) che strutturano un mondo radicalmente impoverito rispetto a quello umano. Non esiste «il mondo» come realtà unica che zecca, pipistrello e umano percepiscono con diversa accuratezza; esistono mondi-propri co-costituiti dalle capacità senso-motorie di ciascuna specie.

Thomas Nagel, nel celebre articolo «What Is It Like to Be a Bat?» (*The Philosophical Review* 83, no. 4, 1974, pp. 435-450), utilizza esempio analogo per argomentare l'irriducibilità della soggettività fenomenologica. L'esperienza del pipistrello, mediata da ecolocazione, è epistemicamente inaccessibile a esseri umani che non possiedono tale modalità percettiva. Anche possedendo descrizione neurobiologica completa del sistema sensoriale del pipistrello, non potremmo catturare il carattere qualitativo (*qualia*) della sua esperienza. Ciò suggerisce che aspetti fondamentali della realtà così come è esperita sono costitutivamente relativi al tipo di sistema cognitivo-percettivo.

Il pluralismo ontologico implica che anche differenti culture umane, dotate di linguaggi, categorie concettuali e tecnologie differenti, abitino mondi fenomenologici parzialmente incommensurabili. L'ipotesi Sapir-Whorf, nella sua versione moderata, sostiene che strutture linguistiche influenzano categorizzazione percettiva e organizzazione concettuale. Sebbene versioni forti del determinismo linguistico siano state largamente confutate, ricerca empirica in linguistica cognitiva ha documentato differenze cross-culturali sistematiche in categorizzazione di colori, orientamento spaziale, temporalità, causazione (si veda Lera Boroditsky, «Does Language Shape Thought? Mandarin and English Speakers' Conceptions of Time», *Cognitive Psychology* 43, 2001, pp. 1-22; Paul Kay & Willett Kempton, «What Is the Sapir-Whorf Hypothesis?», *American Anthropologist* 86, 1984, pp. 65-79).

Nella scienza contemporanea, la mediazione tecnologica introduce ulteriore dimensione di pluralismo. L'universo accessibile alla cosmologia osservativa pre-telescopica, limitato a fenomeni ottici alla scala del sistema solare, differisce qualitativamente dall'universo accessibile alla cosmologia contemporanea che, attraverso radiotelescopi, rivelatori di raggi X e gamma, interferometri gravitazionali, osserva fenomeni (quasar, buchi neri supermassicci, onde gravitazionali, espansione accelerata) ontologicamente inaccessibili senza tali mediazioni tecnologiche. Non si tratta meramente di «vedere meglio» lo stesso universo, ma di rendere manifesto un dominio fenomenologico radicalmente differente.

### 3.5 Riconcettualizzazione dell'oggettività scientifica

Il riconoscimento della co-dipendenza cognitiva della realtà e del conseguente pluralismo ontologico solleva interrogazione pressante circa lo statuto dell'oggettività scientifica. Se ogni articolazione di realtà è costitutivamente relativa a un sistema cognitivo, in che senso la scienza può rivendicare conoscenza oggettiva?

La risposta richiede abbandono della concezione tradizionale di oggettività come corrispondenza a realtà indipendente dalla mente (*mind-independent reality*) in favore di concezione procedurale di oggettività come intersoggettività metodologicamente disciplinata. L'oggettività scientifica non consiste nel catturare la «natura in sé» ma nell'articolare descrizioni che soddisfano criteri di coerenza interna, adeguatezza predittiva, riproducibilità sperimentale, consenso comunitario.

Lorraine Daston e Peter Galison, nella monumentale analisi storica *Objectivity* (Zone Books, 2007), documentano come il concetto stesso di oggettività scientifica sia costruzione storica relativamente recente. Nel XVIII secolo, l'ideale scientifico era *truth-to-nature* — rappresentare esemplari tipici piuttosto che particolare individuale. Nel XIX secolo emerge concezione di «oggettività meccanica» — eliminazione sistematica del giudizio soggettivo attraverso standardizzazione strumentale e procedurale. Nel XX secolo si sviluppa ulteriore concezione di «giudizio esperto» — riconoscimento che interpretazione informata è necessaria per identificazione di pattern significativi in dati complessi.

Tale genealogia rivela che l'oggettività non è scoperta di accesso epistemico privilegiato a realtà assoluta ma virtù epistemica storicamente variabile, definita da norme e prassi comunitarie. Come Helen Longino ha argomentato in *Science as Social Knowledge* (Princeton University Press, 1990), l'oggettività è realizzata attraverso carattere sociale della ricerca scientifica: critica reciproca, diversità di prospettive, standard pubblici di valutazione, equanimità procedurale. L'oggettività non è proprietà di osservatori individuali ma risultato di pratiche comunitarie disciplinate.

In tale framework, la co-dipendenza cognitiva della realtà non implica relativismo epistemico nel senso di «tutto vale». Configurazioni relazionali che soddisfano criteri di stabilità, riproducibilità, predittività possiedono robustezza che le distingue nettamente da speculazioni arbitrarie o wishful thinking. Tuttavia, tale robustezza è sempre situata entro regimi di coerenza specifici – relativi a particolari scale di osservazione, particolari apparati sperimentali, particolari framework concettuali. L'universalità rivendicata dalle leggi fisiche è universalità entro un dominio di validità, non assolutezza metafisica.

La fisica newtoniana fornisce esempio paradigmatico. Per oltre due secoli costituì framework universalmente adottato per meccanica, generando predizioni di straordinaria accuratezza. Tuttavia, sviluppi del XX secolo rivelarono suoi limiti domainali: cessa di funzionare a velocità relativistiche (dominio della relatività ristretta), in campi gravitazionali intensi (relatività generale), a scale atomiche (meccanica quantistica). La meccanica newtoniana non fu «falsificata» ma contestualizzata come approssimazione valida in regime di velocità  $\ll c$ , masse-energie  $\ll$  scala di Planck, campi gravitazionali deboli. Entro tale regime, rimane perfettamente adeguata e continua ad essere utilizzata.

Questo suggerisce concezione stratificata della conoscenza scientifica: teorie differenti sono appropriate per regimi fenomenologici differenti, e non esiste necessariamente teoria «più fondamentale» che subsumerebbe tutte le altre. Ciò che esiste è pluralità di descrizioni, ciascuna adeguata al proprio dominio, con overlap parziali e transizioni continue tra regimi. L'ideale della «teoria del tutto» che unificherebbe tutta la fisica in singolo formalismo potrebbe essere chimera metafisica piuttosto che obiettivo scientifico realizzabile.

—

*Fine Capitolo III*

—

## CAPITOLO IV

### LA MEDIAZIONE TECNOLOGICA COME VINCOLO COSTITUTIVO

#### 4.1 L'interrogazione tecnologicamente mediata della natura

L'analisi sviluppata nei capitoli precedenti ha stabilito che le proprietà fisiche emergono in configurazioni relazionali e che ogni articolazione di realtà è costitutivamente dipendente dal sistema cognitivo che la osserva. Tale framework teorico richiede ora specificazione ulteriore concernente il ruolo della mediazione tecnologica nella pratica scientifica contemporanea. Si propone qui formulazione sintetica del rapporto tra conoscenza scientifica e tecnologia: *la scienza non articola «cosa è la natura» ma «come la natura risponde alle nostre domande, nei limiti della tecnologia attraverso cui siamo in grado di porgerle».*

Tale proposizione richiede disaggregazione analitica. In primo luogo, essa riconosce che l'interrogazione scientifica della natura non è passiva osservazione ma attivo processo di formulazione di domande specifiche mediante apparati sperimentali. La distinzione, già presente in Francis Bacon (*Novum Organum*, 1620), tra esperienza vaga (*experientia vaga*) e esperienza metodica (*experientia literata*) identifica la struttura fondamentale della scienza moderna: non ci si limita ad attendere che la natura manifesti spontaneamente i propri fenomeni, ma si costruiscono situazioni sperimentali controllate dove variabili specifiche possono essere isolate e manipolate.

Ian Hacking ha sviluppato tale intuizione in direzione esplicitamente interventista. In *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science* (Cambridge University Press, 1983), Hacking distingue tra aspetto rappresentazionale della scienza (teorie, modelli, leggi) e aspetto interventista (sperimentazione, manipolazione, produzione di fenomeni). L'argomento centrale sostiene che «se si può spruzzare con essi, allora sono reali» (*if you can spray them, then they are real*, p. 23) – formulazione provocatoria che identifica la manipolabilità causale come criterio di realtà. Un'entità teorica (ad esempio l'elettrone) acquisisce statuto di realtà non primariamente attraverso sua collocazione in teoria ben confermata, ma quando diviene strumento operativo per produrre altri effetti in contesti sperimentali differenti.

Tuttavia, tale capacità interventista è costitutivamente dipendente dalla disponibilità di tecnologie appropriate. Come Hacking stesso osserva, la possibilità di «spruzzare con elettroni» richiede sviluppo di cannoni elettronici, sistemi di accelerazione, apparati di rivelazione – infrastruttura tecnologica sofisticata senza cui l'elettrone rimarrebbe entità puramente teoretica. La mediazione tecnologica non è accessorio esterno alla conoscenza scientifica ma sua condizione di possibilità.

Gaston Bachelard aveva già tematizzato tale struttura mediante concetto di *phénoménotechnique*. Nel *Nouvel Esprit Scientifique* (1934) e ne *Le Rationalisme Appliqué* (1949), Bachelard argomenta che la scienza contemporanea non studia fenomeni naturali che si presentano spontaneamente ma produce fenomeni tecnici mediante apparati sperimentali. Come formula: «Il fenomeno scientifico è prodotto, realizzato artificialmente [...] La scienza realizza ciò che concepisce, concepisce realizzando» (*Le Nouvel Esprit Scientifique*, p. 13, edizione PUF 1934). La distinzione tra scoperta e invenzione, tra teoria e applicazione, perde nettezza: la teoria guida costruzione di apparati che rendono osservabili fenomeni

la cui manifestazione costituisce simultaneamente test della teoria e produzione tecnologica di nuova realtà empirica.

#### 4.2 Il criterio di riproducibilità come fondamento e vincolo epistemico

La validazione scientifica si fonda crucialmente su principio di riproducibilità sperimentale: un risultato acquisisce status di «fatto scientifico» solo se può essere riprodotto indipendentemente da ricercatori differenti in condizioni sperimentali specificate. Tale criterio, codificato formalmente da Karl Popper come requisito di falsificabilità (*Logik der Forschung*, 1934; traduzione inglese ampliata *The Logic of Scientific Discovery*, 1959), garantisce che affermazioni scientifiche non siano resoconti di esperienze private irripetibili ma asserzioni pubblicamente verificabili.

Tuttavia, analisi critica rivela che il criterio di riproducibilità funziona simultaneamente come *meccanismo di esclusione epistemica*: ciò che non può essere tecnologicamente riprodotto viene sistematicamente espulso dal dominio del «reale scientifico». Come Bruno Latour e Steve Woolgar documentano in *Laboratory Life: The Construction of Scientific Facts* (1979; seconda edizione rivista 1986, Sage Publications), la stabilizzazione di un «fatto» attraverso cicli ripetuti di replicazione sperimentale è processo sociale complesso che coinvolge negoziazione di standard procedurali, calibrazione di strumenti, costruzione di consenso interpretativo.

La riproducibilità richiede standardizzazione: eliminazione sistematica di variabili contestuali, isolamento di parametri rilevanti, definizione di protocolli operativi rigorosi. Tale processo è necessariamente riduttivo: *ripetere significa isolare, standardizzare, rendere neutro tutto ciò che è singolare, irripetibile, qualitativo*. Un esperimento ripetibile è esperimento in cui il contesto è stato eliminato o controllato. Ogni eliminazione di contesto costituisce però perdita di informazione circa la complessità del fenomeno reale.

Le conseguenze epistemologiche sono significative. Fenomeni che per loro natura sono unici, storicamente situati, qualitativamente ricchi ma non standardizzabili — eventi geologici catastrofici singolari, transizioni evolutive specifiche, esperienze fenomenologiche soggettive — ricadono al di fuori della giurisdizione metodologica della scienza sperimentale standard. Non perché siano «meno reali» ontologicamente, ma perché non soddisfano il criterio procedurale di riproducibilità.

Allan Franklin, in *The Neglect of Experiment* (Cambridge University Press, 1986) e successivi lavori, ha analizzato casi storici di controversie sperimentali mostrando come la determinazione di cosa conti come «replica» riuscita sia spesso problematica. Gli esperimenti di Dayton Miller negli anni 1920 riportavano risultati positivi per «vento d'etere» apparentemente incompatibili con relatività speciale. La comunità fisica risolse la controversia non primariamente attraverso confutazione sperimentale diretta ma mediante delegittimazione metodologica: i risultati di Miller furono attribuiti a errori sistematici non controllati. Come Robert Shankland et al. documentarono in «New Analysis of the Interferometer Observations of Dayton C. Miller» (*Reviews of Modern Physics* 27, 167-178, 1955), variazioni termiche potrebbero spiegare i residui osservati. La «replicabilità» dipende così da standard comunitari circa quali variabili debbano essere controllate — standard che evolvono storicamente e riflettono commitment teorici.

#### 4.3 La scienza come tecnologia dell'osservabile: storicità radicale dei domini fenomenologici

Se il criterio di riproducibilità vincola il conoscibile scientifico a ciò che è tecnologicamente riproducibile, ne consegue che *la scienza di ogni epoca studia non «la natura» in assoluto ma il dominio*

*fenomenologico reso accessibile dalle tecnologie disponibili.* Questa tesi di dipendenza costitutiva tra limiti tecnologici e domini osservabili può essere articolata attraverso analisi di casi storici paradigmatici.

La rivoluzione telescopica inaugurata da Galileo Galilei nel 1609 non costituì semplicemente miglioramento quantitativo della capacità osservativa ma aprì dominio fenomenologico qualitativamente nuovo. Come Galileo documenta nel *Sidereus Nuncius* (1610), il telescopio rivelò satelliti di Giove, fasi di Venere, risoluzione della Via Lattea in stelle individuali, topografia lunare craterizzata — fenomeni letteralmente invisibili all'osservazione ad occhio nudo e quindi non accessibili alla cosmologia pre-telescopica. Non si trattò di «vedere meglio» lo stesso universo ma di rendere manifesto universo radicalmente differente. Come sottolinea Albert Van Helden in «Galileo and the Telescope» (*Annali dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze* 8, 1983, pp. 15-26), l'accettazione delle osservazioni telescopiche come evidenza legittima richiese negoziazione epistemica complessa circa affidabilità degli strumenti ottici.

Lo sviluppo della microscopia generò analogamente nuovo dominio fenomenologico. Robert Hooke, in *Micrographia* (1665), documentò struttura cellulare del sughero, anatomia degli insetti, cristallografia microscopica. Antoni van Leeuwenhoek, mediante microscopi a lente singola ad alta magnificazione, osservò protisti, batteri, spermatozoi — rivelando intero regno di vita microscopica precedentemente insospettato. La biologia cellulare, la microbiologia, la citologia emergono come discipline scientifiche solo quando tecnologie microscopiche rendono il dominio cellulare empiricamente accessibile.

Nel XX secolo, tale pattern si amplifica. La fisica delle particelle elementari dipende costitutivamente da acceleratori di particelle progressivamente più energetici. La scoperta del positrone (Carl Anderson, 1932, mediante camera a nebbia), del muone (Anderson & Neddermeyer, 1936), dei pioni (Cecil Powell et al., 1947, mediante emulsioni fotografiche), delle particelle strane negli anni 1950, dei quark charm, bottom, top nelle decadi successive — ciascuna di tali scoperte divenne possibile solo quando acceleratori raggiunsero energie di collisione sufficienti. Come documenta Peter Galison in *How Experiments End* (University of Chicago Press, 1987) e *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics* (University of Chicago Press, 1997), lo sviluppo di rivelatori (camere a bolle, camere a scintilla, rivelatori elettronici) è co-evolutivo con le teorie che essi servono a testare.

La cosmologia osservativa fornisce esempio particolarmente chiaro di dipendenza strutturale tra tecnologia e fenomenologia accessibile. L'universo osservabile dalla cosmologia pre-1920, limitato a osservazioni ottiche, conteneva stelle e nebulose la cui natura rimaneva controversa. Le osservazioni di Edwin Hubble con telescopio Hooker da 100 pollici (1923-1929) rivelarono che «nebulose spirali» erano galassie extragalattiche, espandendo scala dell'universo di ordini di grandezza. La scoperta della radiazione cosmica di fondo (Penzias & Wilson, 1965), interpretata come resto del Big Bang, divenne possibile solo mediante radiotelescopi sensibili. L'osservazione di onde gravitazionali (LIGO, 2015) richiese interferometri laser con sensibilità strain  $h \sim 10^{-21}$  — capacità tecnologica inconcepibile nel XIX secolo.

#### **4.4 Dalla verità all'efficacia operativa: «funziona» versus «è vera»**

L'analisi della mediazione tecnologica solleva interrogazione fondamentale circa il criterio di validazione delle teorie scientifiche. La concezione tradizionale, articolata nella teoria della verità come corrispondenza, sostiene che teorie scientifiche sono vere (o approssimativamente vere) nella misura in cui corrispondono accuratamente alla struttura della realtà. Tuttavia, se la realtà accessibile è costituti-

vamente dipendente dalla mediazione tecnologica, e se differenti configurazioni tecnologiche rendono accessibili domini fenomenologici eterogenei, il criterio di verità-corrispondenza diviene problematico.

Si propone qui riconoscimento che *nella pratica scientifica effettiva, il criterio operativo di validazione è efficacia predittiva piuttosto che verità ontologica*. Una teoria viene accettata non primariamente perché creduta vera descrizione della realtà in sé, ma perché «funziona» — genera predizioni accurate, permette manipolazione efficace dei fenomeni, si integra coerentemente con altre teorie consolidate. Tale spostamento da *veritas* a *utilitas* costituisce caratteristica distintiva della scienza moderna rispetto alla filosofia naturale aristotelico-scolastica.

William James, nel pragmatismo classico (*Pragmatism: A New Name for Some Old Ways of Thinking*, 1907), aveva già formulato concezione strumentalista della verità: «Il vero [...] è solo ciò che è vantaggioso nel modo di pensare, così come il giusto è solo ciò che è vantaggioso nel modo di comportarsi» (Lezione 6). Sebbene tale formulazione possa apparire eccessivamente soggettivista, essa identifica intuizione corretta: teorie scientifiche non sono giudicate primariamente mediante confronto con realtà indipendente (cui non abbiamo accesso diretto) ma mediante loro performance operativa in domini applicativi specifici.

Bas van Fraassen, nell'empirismo costruttivo (*The Scientific Image*, Oxford University Press, 1980), sviluppa posizione sofisticata che distingue tra credenza nella verità e accettazione per adeguatezza empirica. Accettare teoria scientifica non richiede credere nella sua verità (compresa esistenza di entità inosservabili postulate) ma solo nella sua *adeguatezza empirica* — che «salvi i fenomeni» osservabili. Come van Fraassen argomenta: «La scienza mira a darci teorie che sono empiricamente adeguate; e l'accettazione di una teoria involve come credenza solo che essa sia empiricamente adeguata» (p. 12).

Tale posizione converge con analisi storica dello sviluppo scientifico. La meccanica newtoniana «funzionò» straordinariamente bene per oltre due secoli, generando predizioni accurate in vasto dominio applicativo. Tuttavia, sviluppi del XX secolo mostrarono che non è «vera» descrizione universale: cessa di funzionare a velocità relativistiche, in campi gravitazionali intensi, a scale quantistiche. Rimane però perfettamente adeguata come approssimazione nel suo regime di validità. La sua utilità operativa non dipendeva dalla sua verità ontologica assoluta ma dalla sua adeguatezza empirica in dominio circoscritto.

La termodinamica fornisce esempio ulteriore. La seconda legge (aumento di entropia in sistemi isolati) «funziona» magnificamente per sistemi macroscopici, permettendo analisi di efficienza di macchine termiche, previsione di direzione di processi spontanei, comprensione di irreversibilità temporale. Tuttavia, la fondazione microscopica della termodinamica nella meccanica statistica rivela che la seconda legge non è legge deterministica assoluta ma enunciato probabilistico: fluttuazioni che violano localmente e temporaneamente la seconda legge sono possibili (e osservate in sistemi mesoscopici). La termodinamica classica è teoria «vera»? Dipende dal livello di descrizione: è adeguata per scopi macroscopici, inadeguata per fluttuazioni quantistiche.

#### **4.5 La non-neutralità della funzionalità: per chi e come funziona la scienza**

Il riconoscimento che teorie scientifiche vengono valutate primariamente mediante loro efficacia operativa piuttosto che verità ontologica solleva interrogazione ulteriore: efficacia *per quali scopi e per quali soggetti?* La funzionalità non è proprietà astratta ma sempre relativa a obiettivi specifici e interessi determinati. Occorre quindi tematizzare esplicitamente la dimensione valoriale e socio-politica inscritta nel criterio di efficacia.

La storia della scienza moderna rivela connessioni profonde tra sviluppo scientifico e applicazioni tecnologiche orientate da interessi economici e militari. La fisica nucleare, dalla fissione (Otto Hahn & Fritz Strassmann, 1938) attraverso il Progetto Manhattan fino agli sviluppi post-bellici, esemplifica tale intreccio. La comprensione scientifica delle reazioni nucleari a catena non si sviluppò in vacuum epistemico puro ma fu massicciamente accelerata da investimenti militari durante Seconda Guerra Mondiale. Come documenta Richard Rhodes in *The Making of the Atomic Bomb* (Simon & Schuster, 1986), la produzione della bomba atomica richiese mobilitazione industriale senza precedenti, integrando ricerca fondamentale e engineering applicato in modo indistinguibile.

La cibernetica e l'informatica emergono analogamente da contesto militare. I progetti ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) e successori furono finanziati da U.S. Army per calcolo di tavole balistiche. ARPANET, precursore di Internet, fu sviluppato da Advanced Research Projects Agency del Dipartimento della Difesa statunitense. Come Paul Edwards documenta in *The Closed World: Computers and the Politics of Discourse in Cold War America* (MIT Press, 1996), lo sviluppo di sistemi computazionali fu intrinsecamente connesso a priorità strategiche della Guerra Fredda.

Tali connessioni non sono aberrazioni accidentali ma riflettono struttura sistemica: la scienza contemporanea richiede investimenti di scala tale che solo governi e grandi corporazioni possono sostenerli. Come Derek de Solla Price osservò in *Little Science, Big Science* (Columbia University Press, 1963), la transizione da «piccola scienza» (ricercatori individuali con apparati modesti) a «grande scienza» (*big science*: progetti multi-nazionali, infrastrutture massicce) trasforma relazioni tra scienza, stato e industria. Le priorità di ricerca riflettono necessariamente decisioni allocative che incorporano valori politici, interessi economici, agende strategiche.

La non-neutralità della scienza si manifesta anche nel processo di validazione e diffusione delle conoscenze. Il sistema di peer review, lungi dall'essere meccanismo puramente epistemico, incorpora dinamiche di potere disciplinare. Come David Resnik analizza in *The Price of Truth: How Money Affects the Norms of Science* (Oxford University Press, 2007), conflitti di interesse — finanziari, istituzionali, ideologici — possono compromettere integrità del processo di revisione. Studi epidemiologici su efficacia e sicurezza farmaceutiche, ricerca climatologica con implicazioni per politiche energetiche, analisi economiche di politiche fiscali — in tutti tali domini, pressioni extra-scientifiche possono influenzare quali risultati vengono pubblicati, amplificati, istituzionalizzati come «consenso scientifico».

La questione non è negare che esistano standard epistemici robusti di valutazione evidenziale, ma riconoscere che tali standard operano sempre entro matrici istituzionali che incorporano valori e interessi. Come Heather Douglas argomenta in *Science, Policy, and the Value-Free Ideal* (University of Pittsburgh Press, 2009), l'ideale di scienza «value-free» è insostenibile: decisioni circa quali rischi accettare nella inferenza (errori tipo I versus tipo II), quali livelli di certezza richiedere prima di agire, quali applicazioni perseguire — tutte incorporano giudizi valoriali ineliminabili.

Una epistemologia adeguata della scienza contemporanea deve quindi integrare analisi della mediazione tecnologica con consapevolezza critica delle matrici socio-politiche che determinano quali tecnologie vengono sviluppate, quali domini fenomenologici divengono accessibili, quali conoscenze vengono prodotte e istituzionalizzate. La scienza «funziona», ma funziona entro e per configurazioni specifiche di potere, interesse, valore. Riconoscere tale non-neutralità non è cinismo ma condizione di onestà intellettuale e di possibilità di orientare lo sviluppo scientifico verso fini socialmente desiderabili mediante deliberazione democratica informata.

—

*Fine Capitolo IV*

—

## CAPITOLO V

### LA DIMENSIONE SOCIO-POLITICA DELLA CONOSCENZA SCIENTIFICA

#### 5.1 Strutture di potere e allocazione delle risorse nella ricerca scientifica

L'analisi epistemologica sviluppata nei capitoli precedenti ha progressivamente evidenziato come la conoscenza scientifica non costituisca rappresentazione neutrale di una realtà pre-data ma emerga attraverso pratiche materiali tecnologicamente mediate. Tale riconoscimento richiede ora esplicitazione sistematica della dimensione socio-politica: le decisioni concernenti quali tecnologie sviluppare, quali fenomeni investigare, quali teorie ricevono supporto istituzionale non sono determinate da pura logica epistemica ma riflettono configurazioni specifiche di potere, interesse economico, priorità politiche.

La sociologia mertoniana della scienza, inaugurata da Robert K. Merton negli anni 1930-1940, aveva già identificato la scienza come istituzione sociale governata da norme specifiche. Nel celebre articolo «The Normative Structure of Science» (originariamente pubblicato come «Science and Technology in a Democratic Order», *Journal of Legal and Political Sociology* 1, 1942, pp. 115-126), Merton articola quattro norme costitutive dell'*ethos* scientifico: universalismo (valutazione delle affermazioni indipendente da caratteristiche personali del ricercatore), comunismo epistemico (la conoscenza scientifica è proprietà comune), disinteresse (motivazione orientata all'avanzamento della conoscenza piuttosto che guadagno personale), scetticismo organizzato (sospensione del giudizio fino a scrutinio empirico e logico adeguato).

Tuttavia, studi empirici successivi nella sociologia della scienza hanno documentato sistematiche violazioni di tali norme ideali. Il «Effetto Matteo» nella scienza, identificato dallo stesso Merton («The Matthew Effect in Science», *Science* 159, 1968, pp. 56-63), descrive accumulazione di vantaggio: ricercatori già eminenti ricevono credito sproporzionato per scoperte collaborative mentre contributi di ricercatori meno noti vengono sistematicamente sottovalutati. Tale dinamica genera stratificazione gerarchica che contraddice l'universalismo normativo: l'affiliazione istituzionale, le reti di collaborazione, la reputazione progressa influenzano significativamente la valutazione delle affermazioni scientifiche.

L'economia politica della ricerca scientifica contemporanea esibisce concentrazione massiccia di risorse in domini specifici. Come Daniel Greenberg documenta in *Science, Money, and Politics: Political Triumph and Ethical Erosion* (University of Chicago Press, 2001), il finanziamento della ricerca scientifica negli Stati Uniti è dominato da tre fonti principali: il governo federale (particolarmente Department of Defense, National Institutes of Health, National Science Foundation), l'industria privata, e università mediante fondi dotazionali. Ciascuna fonte impone priorità specifiche: ricerca militare orienta verso tecnologie con applicazioni strategiche, industria farmaceutica verso prodotti commercializzabili, università verso pubblicazioni in journals ad alto impact factor che accrescono prestigio istituzionale.

Tale struttura allocativa genera distorsioni sistematiche. La fisica delle alte energie riceve finanziamenti enormi — il Large Hadron Collider al CERN ha richiesto investimento superiore a dieci miliardi di dollari — mentre discipline come ecologia teorica, tassonomia biologica, studi sulla biodiversità ricevono risorse comparativamente modeste. Come documenta il rapporto «Global Biodiversity Outlook 5» (Convention on Biological Diversity, 2020), nonostante la crisi di estinzione di massa in corso,

il finanziamento per ricerca tassonomica e conservazionistica rimane drammaticamente inadeguato rispetto alle necessità identificate.

La biomedicina evidenzia analogamente pattern allocativi strutturati da logiche di mercato. Come Adriana Petryna, Andrew Lakoff e Arthur Kleinman analizzano in *Global Pharmaceuticals: Ethics, Markets, Practices* (Duke University Press, 2006), la ricerca farmaceutica è orientata verso «malattie dei ricchi» – condizioni prevalenti in popolazioni con capacità di spesa elevata – mentre malattie tropicali neglette (dengue, leishmaniosi, malattia di Chagas, malattia del sonno) ricevono investimenti minimali nonostante il loro impatto sanitario globale. Si stima che meno del 10% della ricerca sanitaria globale sia dedicata a condizioni che affliggono il 90% della popolazione mondiale (il cosiddetto «10/90 gap», documentato nel *Global Forum for Health Research Report* 2004).

## 5.2 Il sistema delle citazioni come dispositivo di controllo epistemico

La validazione e disseminazione della conoscenza scientifica opera attraverso sistema complesso di pubblicazioni peer-reviewed e metriche di citazione. Tale sistema, lungi dal costituire meccanismo puramente epistemico di valutazione qualitativa, funziona come *dispositivo di controllo che regola l'accesso alla legittimità scientifica* e orienta le traiettorie di ricerca mediante incentivi strutturati.

La peer review, processo mediante cui manoscritti sottomessi a journals vengono valutati da esperti anonimi prima della pubblicazione, venne formalizzata nella sua forma contemporanea principalmente nel secondo dopoguerra. Come Melinda Baldwin documenta in *Making Nature: The History of a Scientific Journal* (University of Chicago Press, 2015), la rivista *Nature* istituzionalizzò sistema rigoroso di peer review solo negli anni 1960-1970. Precedentemente, decisioni editoriali erano largamente prerogativa di editor individuali con maggiore discrezionalità.

Il sistema peer review idealmente garantisce qualità mediante filtro di competenza: solo ricerca che soddisfa standard metodologici e contribuisce significativamente alla conoscenza disciplinare viene pubblicata. Tuttavia, analisi critiche hanno identificato limitazioni sistematiche. Come Richard Smith, già editor del *British Medical Journal*, argomenta in «Peer review: a flawed process at the heart of science and journals» (*Journal of the Royal Society of Medicine* 99, 2006, pp. 178-182), la peer review soffre di bias multipli: conservatorismo metodologico (risultati che sfidano paradigmi consolidati ricevono scrutinio sproporzionatamente severo), publication bias (studi con risultati positivi hanno maggiore probabilità di pubblicazione rispetto a quelli con risultati negativi o nulli), lentezza (delay di mesi o anni tra submission e pubblicazione).

Il sistema di metriche citazionali, inaugurato da Eugene Garfield mediante creazione dello *Science Citation Index* (1964) e successivamente elaborato attraverso *impact factor* dei journals e indici individuali come h-index, ha trasformato valutazione scientifica in esercizio quantitativo. Come Yves Gingras analizza in *Bibliometrics and Research Evaluation: Uses and Abuses* (MIT Press, 2016), tali metriche sono state progressivamente adottate per decisioni di tenure, allocazione di finanziamenti, ranking di dipartimenti universitari – generando incentivi perversi che orientano strategicamente il comportamento dei ricercatori.

La pressione a «publish or perish» incentiva produzione quantitativa a scapito di qualità e innovazione rischiosa. Come Mario Biagioli e Alexandra Lippman documentano in *Gaming the Metrics: Misconduct and Manipulation in Academic Research* (MIT Press, 2020), ricercatori adottano strategie di «gaming» delle metriche: salami slicing (frammentazione di singolo studio in multiple pubblicazioni), citation cartels (accordi reciproci di citazione), authorship inflation (inclusione di co-autori marginali

per reciprocità). Tali pratiche, sebbene non costituiscano frode scientifica stricto sensu, distorcono l'ecosistema epistemico subordinando avanzamento della conoscenza a ottimizzazione di metriche.

Crucialmente, il sistema citazionale funziona come meccanismo di conservazione paradigmatica. Per pubblicare in journals prestigiosi, manoscritti devono dimostrare familiarità con letteratura consolidata mediante citazioni appropriate. Tale requisito, giustificato come garanzia di rigore accademico, opera simultaneamente come barriera all'ingresso: *idee radicalmente innovative che non possiedono genealogia citazionale nella letteratura esistente difficilmente superano peer review*. Come Thomas Kuhn aveva già osservato in *The Structure of Scientific Revolutions* (University of Chicago Press, 1962), la scienza normale opera entro paradigmi che definiscono quali problemi sono legittimi e quali metodologie appropriate. Proposte che sfidano presupposti paradigmatici fondamentali vengono tipicamente respinte non mediante confutazione empirica ma mediante esclusione istituzionale.

### 5.3 Gerontocrazia scientifica e resistenza al cambiamento paradigmatico

La conservazione paradigmatica è ulteriormente rafforzata da struttura demografica e istituzionale della comunità scientifica contemporanea. L'invecchiamento delle classi accademiche nei paesi industrializzati, combinato con concentrazione del controllo decisionale (allocazione fondi, composizione comitati editoriali, valutazione tenure) in mani di ricercatori senior, genera quella che può essere caratterizzata come *gerontocrazia epistemica*: sistema dove innovazione radicale è strutturalmente disincentivata da coloro che hanno investito carriere intere nel paradigma dominante.

Paula Stephan, in *How Economics Shapes Science* (Harvard University Press, 2012), documenta allungamento progressivo dell'età in cui ricercatori ottengono primo grant significativo o posizione tenure-track. Negli Stati Uniti, età media di principal investigators per primo NIH R01 grant è aumentata da 37 anni nel 1980 a 44 anni nel 2020 (dati NIH). Tale invecchiamento implica che ricercatori raggiungono autonomia scientifica sostanziale dopo decenni di socializzazione entro paradigmi esistenti, rendendo improbabile propensione a sfide radicali.

Max Planck, nel celebre aforisma autobiografico, aveva osservato: «Una nuova verità scientifica non trionfa convincendo i suoi oppositori e facendo loro vedere la luce, ma piuttosto perché i suoi oppositori alla fine muoiono, e cresce una nuova generazione che è familiare con essa» (*Scientific Autobiography and Other Papers*, 1949, p. 33-34). Sebbene formulazione drammaticamente sardonica, essa identifica meccanismo reale di cambiamento scientifico: paradigmi mutano non primariamente attraverso conversione razionale ma mediante sostituzione generazionale.

Pierre Azoulay, Christian Fons-Rosen e Joshua S. Graff Zivin hanno fornito evidenza empirica per tale meccanismo. In «Does Science Advance One Funeral at a Time?» (*American Economic Review* 109, 2019, pp. 2889-2920), gli autori analizzano produttività scientifica in subcampi dopo morte prematura di ricercatori eminenti (*superstar scientists*). I risultati documentano che morte di superstar è seguita da ingresso di nuovi ricercatori nel campo (+8.6%) e aumento di pubblicazioni che deviano dalle traiettorie di ricerca stabilite dal superstar. L'interpretazione suggerita è che ricercatori eminenti, attraverso controllo di risorse e posizioni di gatekeeping, esercitano effetto inibitorio su innovazione che sfida loro approcci consolidati.

La struttura delle carriere scientifiche contemporanee amplifica tale conservatorismo. Il sistema tenure, sebbene progettato per proteggere libertà intellettuale, genera simultaneamente incentivo alla conformità durante fase pre-tenure. Giovani ricercatori devono dimostrare produttività secondo metriche convenzionali per ottenere posizioni permanenti, disincentivando progetti rischiosi ad alta

innovazione ma bassa probabilità di successo nel breve termine. Come Brian Nosek et al. argomentano in «Scientific Utopia: II. Restructuring Incentives and Practices to Promote Truth Over Publishability» (*Perspectives on Psychological Science* 7, 2012, pp. 615-631), la struttura incentivale privilegia sistematicamente risultati pubblicabili rispetto a ricerca orientata verso domande fondamentali potenzialmente prive di «payoff» rapido.

#### 5.4 Casi storici di resistenza istituzionale a innovazioni paradigmatiche

L'analisi teorica della resistenza istituzionale all'innovazione è illuminata da casi storici specifici dove teorie scientifiche successivamente validate incontrarono iniziale marginalizzazione o rigetto.

La teoria della deriva dei continenti, proposta da Alfred Wegener in *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane* (1915), postulava che continenti fossero stati uniti in supercontinente Pangea e successivamente si fossero separati mediante movimento laterale. Tale ipotesi spiegava elegantemente corrispondenza tra coste di Africa e Sud America, distribuzione di fossili identici in continenti oggi separati, evidenze glaciali in regioni tropicali. Tuttavia, la teoria venne largamente respinta dalla comunità geologica per quattro decenni. Come Naomi Oreskes documenta in *The Rejection of Continental Drift: Theory and Method in American Earth Science* (Oxford University Press, 1999), il rigetto non fu primariamente dovuto a inadeguatezza empirica ma a incompatibilità con framework teorici consolidati della geologia e mancanza di meccanismo plausibile per movimento continentale.

Solo negli anni 1960, con accumulo di evidenze da paleomagnetismo oceanico e articolazione della tettonica delle placche mediante teoria della espansione dei fondali oceanici (Harry Hess, Robert Dietz), la mobilità continentale venne accettata. La resistenza non fu semplicemente «errore» scientifico ma rifletteva strutture disciplinari: geologi nordamericani, dominanti istituzionalmente, privilegiavano modelli fissi di orogeni verticali; geologi europei, più aperti a mobilismo, possedevano minor influenza istituzionale.

La teoria endosimbiotica dell'origine degli organelli cellulari eucarioti fornisce esempio ulteriore. Lynn Margulis (inizialmente Lynn Sagan), in «On the Origin of Mitosing Cells» (*Journal of Theoretical Biology* 14, 1967, pp. 255-274), propose che mitocondri e cloroplasti derivassero da batteri originariamente liberi incorporati mediante simbiosi. Tale ipotesi, sebbene sostenuta da evidenze comparative significative (presenza di DNA proprio in organelli, doppia membrana, ribosomi tipo batterico), venne inizialmente respinta o ignorata. Come documenta Jan Sapp in *Evolution by Association: A History of Symbiosis* (Oxford University Press, 1994), l'endosimbiosi sfidava paradigma neo-darwiniano dominante che privilegiava mutazione e selezione come meccanismi evolutivi primari.

Solo con evidenze genomiche negli anni 1980-1990, particolarmente sequenziamento di rRNA 16S che confermava origine batterica degli organelli, la teoria endosimbiotica venne universalmente accettata. Margulis stessa riflettè amaramente su tale esperienza: «I was laughed at, I was ridiculed, I was told I was out of my mind» (intervista in *Discover Magazine*, Aprile 2011). La resistenza rifletteva non deficit empirico ma incompatibilità con ortodossie disciplinari.

#### 5.5 Scienza e democrazia: verso governance epistemica partecipativa

Il riconoscimento della dimensione socio-politica della conoscenza scientifica solleva interrogazioni normative concernenti governance appropriata della ricerca scientifica. Se decisioni circa priorità di ricerca, standard di validazione, applicazioni tecnologiche incorporano inevitabilmente valori e interessi, chi dovrebbe esercitare controllo democratico su tali decisioni?

La concezione tradizionale, articolata paradigmaticamente nel rapporto *Science: The Endless Frontier* (Vannevar Bush, 1945) che fondò post-bellico sistema di finanziamento scientifico statunitense, sostiene modello di autonomia scientifica: la comunità scientifica dovrebbe possedere autonomia sostanziale nel determinare priorità di ricerca, con finanziamento pubblico allocato mediante peer review di qualità scientifica. Tale modello presuppone separazione tra giudizi epistemici (dominio di competenza scientifica) e decisioni valoriali/politiche (dominio di deliberazione democratica).

Tuttavia, analisi sviluppata in questo capitolo suggerisce che tale separazione è insostenibile: giudizi tecnici incorporano presupposti valoriali, decisioni allocative determinano quali conoscenze vengono prodotte. Come Sheila Jasanoff argomenta in *Designs on Nature: Science and Democracy in Europe and the United States* (Princeton University Press, 2005), differenti configurazioni di governance scientifica riflettono e producono differenti «co-produzioni» di ordine naturale e sociale.

Philip Kitcher, in *Science, Truth, and Democracy* (Oxford University Press, 2001), articola modello di «scienza ben ordinata» (*well-ordered science*) dove priorità di ricerca sono determinate mediante deliberazione democratica informata. Cittadini, adeguatamente informati circa possibilità scientifiche e loro implicazioni, dovrebbero partecipare a decisioni concernenti quali domande meritano investigazione, quali rischi sono accettabili, quali applicazioni perseguire. Tale modello non implica che verità scientifiche siano determinate democraticamente – i fatti empirici non sono soggetti a voto – ma che decisioni circa *quali* fatti investigare e *come* utilizzare conoscenza acquisita richiedono input democratico.

Heather Douglas sviluppa posizione analoga in *Science, Policy, and the Value-Free Ideal* (University of Pittsburgh Press, 2009), distinguendo tra ruolo diretto dei valori (determinazione di cosa conta come evidenza adeguata) e ruolo indiretto (decisioni circa quali rischi di errore accettare, quali conseguenze delle applicazioni considerare). Mentre ruolo diretto dovrebbe essere minimizzato per preservare integrità epistemica, ruolo indiretto è ineliminabile e richiede deliberazione trasparente che riconosce presupposti valoriali.

Esperienze di citizen science e participatory research indicano possibilità di modelli più inclusivi. Come Muki Haklay documenta in «Citizen Science and Volunteered Geographic Information: Overview and Typology of Participation» (*Crowdsourcing Geographic Knowledge*, 2013, pp. 105-122), progetti dove cittadini contribuiscono a raccolta dati, analisi, persino formulazione di domande di ricerca possono generare conoscenza scientificamente valida mentre simultaneamente democratizzano processo di produzione del sapere.

Tuttavia, tali modelli affrontano sfide significative. Come Sabina Leonelli e Brian Tempini analizzano in «Where Health and Environment Meet: The Use of Invariant Parameters for Sensitivity Analysis and Causal Inference in Epidemiology» (*Biology & Philosophy* 33, 2018, articolo 6), integrazione di dati generati da cittadini con standard di qualità richiesti per inferenza causale rigorosa richiede protocolli sofisticati di validazione e standardizzazione.

La tensione fondamentale persiste tra requisiti di competenza tecnica (che giustificano autonomia esperta) e legittimità democratica (che richiede accountability pubblica). Una governance epistemica adeguata deve navigare tale tensione riconoscendo pluralità di forme di competenza specialistica (non solo credenziali accademiche ma anche conoscenza locale, esperienza vissuta, saggezza pratica) mentre mantenendo standard rigorosi di validazione empirica. Come Helen Longino argomenta in *Science as Social Knowledge* (Princeton University Press, 1990), l'oggettività emerge non da eliminazione di valori ma da pluralità di prospettive critiche in dialogo trasparente e responsivo.

La dimensione socio-politica della scienza, lungi dal costituire «contaminazione» di purezza epistemica ideale, è condizione costitutiva della produzione di conoscenza. Una epistemologia matura deve integrare tale riconoscimento non per minare autorità scientifica ma per renderla più riflessiva, più accountable, più orientabile verso fini socialmente desiderabili mediante processi democratici informati.

—

*Fine Capitolo V*

—

## CAPITOLO VI

### LA DIALETTICA TEORIA-TECNICA: LA SCIENZA DELL'IMPOSSIBILE

#### 6.1 La circolarità costitutiva tra speculazione teorica e innovazione strumentale

L'analisi condotta nei capitoli precedenti ha stabilito che la conoscenza scientifica è costitutivamente mediata dalle tecnologie attraverso cui i fenomeni divengono osservabili. Tale tesi potrebbe suggerire una concezione lineare del progresso scientifico secondo cui lo sviluppo tecnologico precede e rende possibile l'avanzamento teorico. Tuttavia, l'esame della pratica scientifica effettiva rivela una struttura dialettica più complessa: predizioni teoriche rigorosamente formulate ma situate oltre i confini dell'accessibilità sperimentale contemporanea fungono da vettori direzionali per l'innovazione tecnologica, la quale a sua volta espande i domini fenomenologici accessibili alla teoria, generando così circolarità virtuosa.

Denomineremo «scienza dell'impossibile» quel corpus di proposizioni teoriche che, pur essendo formulate con rigore matematico e derivate da framework teorici consolidati, predicono fenomeni la cui rilevazione empirica eccede le capacità tecnologiche disponibili. Tali proposizioni non costituiscono mera speculazione metafisica ma programmi di ricerca orientati tecnologicamente: specificano con precisione crescente le condizioni strumentali necessarie per la loro falsificazione empirica, fornendo così obiettivi operativi per lo sviluppo di apparati sperimentali innovativi.

La relazione tra teoria e tecnica che qui si manifesta differisce radicalmente dal modello tradizionale secondo cui la scienza «pura» genera conoscenze che vengono successivamente «applicate» dalla tecnologia. Come Derek de Solla Price osservò in *Little Science, Big Science* (Columbia University Press, 1963), la distinzione stessa tra scienza e tecnologia si è progressivamente erosa nella pratica della ricerca contemporanea, dove innovazione strumentale e avanzamento teorico sono co-implicati in modo inscindibile. La strumentazione scientifica non è neutrale rispetto alle teorie che intende testare: incorpora assunzioni teoriche nel suo design, richiede expertise che attraversano confini disciplinari, genera conoscenze trasferibili a domini eterogenei.

Imre Lakatos, nella sua metodologia dei programmi di ricerca scientifici (*The Methodology of Scientific Research Programmes*, Cambridge University Press, 1978), aveva già identificato la distinzione tra «nucleo duro» di assunzioni fondamentali protette dalla falsificazione e «cintura protettiva» di ipotesi ausiliarie modificabili. Nel contesto della scienza dell'impossibile, possiamo estendere tale schema: le predizioni teoricamente inaccessibili costituiscono parte del nucleo duro, mentre le specifiche tecniche degli apparati sperimentali necessari per testarle appartengono alla cintura protettiva, soggetta a continue modifiche e raffinamenti. Il programma di ricerca rimane progressivo fintantoché genera specificazioni sempre più precise delle condizioni di falsificabilità, anche quando tali condizioni rimangono tecnologicamente irrealizzabili nel breve termine.

## 6.2 Exemplum primum: Onde gravitazionali dalla predizione teorica (1916) alla rilevazione (2015)

Il caso delle onde gravitazionali costituisce exemplum paradigmatico della dialettica teoria-tecnica che caratterizza la scienza dell'impossibile. La predizione emerge direttamente dalla teoria della relatività generale formulata da Albert Einstein nel 1915. Nell'articolo «Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation» (*Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, Berlin, 1916, pp. 688-696), Einstein applicò approssimazioni di campo debole alle equazioni di campo non lineari, derivando l'esistenza di perturbazioni ondose della metrica spazio-temporale propagantisi alla velocità della luce. Tali perturbazioni, generate da accelerazioni di masse, trasportano energia e momento dal sistema sorgente.

Crucialmente, i calcoli di Einstein fornivano già stime quantitative dell'ordine di grandezza delle ampiezze attese. Per eventi astrofisici violenti — collisioni di stelle di neutroni, fusioni di buchi neri, collassi stellari — l'ampiezza di strain  $h$  (deformazione relativa dello spazio-tempo) alla distanza della Terra sarebbe dell'ordine di  $10^{-21}$  o inferiore. Tale previsione situava il fenomeno fermamente nel dominio dell'impossibile tecnologico: gli strumenti di misurazione dell'epoca non potevano rilevare deformazioni di tale esiguità, multiple ordini di grandezza oltre ogni capacità sperimentale disponibile.

Tuttavia, la specificità quantitativa della predizione forniva precisamente il tipo di informazione necessaria per orientare programma tecnologico a lungo termine. Joseph Weber, fisico presso l'Università del Maryland, inaugurò negli anni "60 tentativi sperimentali di rilevazione utilizzando barre risonanti di alluminio (cilindri di circa 2 metri di lunghezza e 1 metro di diametro, massa ~1400 kg) isolati vibrazionalmente e raffreddati criogenicamente. Weber riportò rilevazioni positive nel 1969 («Evidence for Discovery of Gravitational Radiation», *Physical Review Letters* 22, 1969, pp. 1320-1324), ma tali affermazioni non furono replicati da altri gruppi sperimentali e sono oggi considerati risultati spurii dovuti a rumore non adeguatamente caratterizzato.

Ciononostante, il programma di Weber ebbe effetto catalizzatore: stimolò ricerca teorica più rigorosa sulle forme d'onda attese da differenti sorgenti astrofisiche e motivò sviluppo di tecniche sperimentali alternative. L'approccio mediante interferometria laser, proposto indipendentemente da diversi gruppi nei primi anni "70, promise sensibilità superiore di ordini di grandezza. Il principio operativo è concettualmente elegante: un'onda gravitazionale passante attraverso un interferometro modifica differenzialmente le lunghezze dei bracci perpendicolari, generando shift di fase rilevabile nel pattern di interferenza.

La realizzazione di tale principio richiese tuttavia progressi tecnologici sostanziali attraverso diversi decenni. I prototipi costruiti negli anni "70 e "80 — particolarmente quelli di Robert Forward, Rainer Weiss (MIT), e Ronald Drever (Glasgow/Caltech) — identificarono requisiti critici: lunghezza di bracci dell'ordine di chilometri per amplificare il segnale; laser ad alta potenza e stabilità di frequenza estrema; specchi con coefficienti di riflessione superiori a 0.9999 e rugosità superficiale nell'ordine dei nanometri; sistemi di sospensione che isolino specchi da vibrazioni sismiche attraverso molteplici stadi di attenuazione; sistemi a vuoto capaci di mantenere pressioni inferiori a  $10^{-9}$  torr su volumi di decine di migliaia di metri cubi.

Il progetto LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), approvato dalla National Science Foundation nel 1992 con budget iniziale di 272 milioni di dollari (che sarebbe cresciuto sostanzialmente nelle fasi successive), rappresentò impresa tecnologica senza precedenti nella fisica sperimentale. La costruzione di due interferometri gemelli — in Hanford, Washington (4 km + 2 km bracci) e Livingston, Louisiana (4 km bracci) — richiese innovazioni in: laser Nd:YAG stabilizzati

mediante pre-mode cleaner; coating dielettrici multistrato per specchi con perdite ottiche inferiori a 1 parte per milione; sistemi di sospensione pendolare multiplo con isolamento sismico attivo; fotorivelatori ad efficienza quantica elevata operanti al limite shot-noise; algoritmi di analisi di segnale per pattern-matching di forme d'onda in rumore colorato.

La prima fase operativa (2002-2010) non produsse rilevazioni, operando a sensibilità marginalmente insufficiente rispetto alle previsioni astrofisiche più ottimistiche. L'upgrade ad Advanced LIGO (2010-2015) incrementò sensibilità di circa un fattore 10, portando strain sensitivity a circa  $10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$  nella banda ottimale (100-300 Hz). Il 14 settembre 2015, appena giorni dopo l'inizio della prima campagna osservativa, entrambi i rivelatori registrarono segnale GW150914 – forma d'onda caratteristica di fusione di due buchi neri di masse  $\sim 36$  e  $\sim 29$  masse solari a distanza di  $\sim 410$  Mpc, generando buco nero finale di  $\sim 62$  masse solari con  $\sim 3$  masse solari convertite in energia di onde gravitazionali (B. P. Abbott et al., LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, «Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger», *Physical Review Letters* 116, 061102, 2016).

Tale rilevazione validò predizione formulata 99 anni prima, ma – più significativamente per l'argomento qui sviluppato – dimostrò come speculazione teorica «impossibile» possa orientare programma tecnologico multi-decennale le cui innovazioni strumentali possiedono impatto che trascende largamente il dominio originario. Le tecnologie sviluppate per LIGO trovarono applicazioni in metrologia laser, ottica di precisione, isolamento vibrazionale, analisi di segnale in rumore – domini apparentemente disconnessi dalla fisica gravitazionale ma che beneficiarono del transfer tecnologico.

### 6.3 Exemplum secundum: Bosone di Higgs e la co-evoluzione di teoria e infrastruttura sperimentale

La ricerca del bosone di Higgs fornisce secondo caso paradigmatico dove speculazione teorica, pur rimanendo per decenni nel dominio dell'inaccessibile empirico, orientò sviluppo di infrastrutture sperimentali la cui scala e complessità non hanno precedenti nella storia della fisica.

La predizione teorica emerge nel 1964 da lavori indipendenti di tre gruppi: Peter Higgs («Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons», *Physical Review Letters* 13, 508-509, 1964); François Englert e Robert Brout («Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons», *Physical Review Letters* 13, 321-323, 1964); Gerald Guralnik, Carl Hagen e Tom Kibble («Global Conservation Laws and Massless Particles», *Physical Review Letters* 13, 585-587, 1964). Il meccanismo proposto risolve problema teorico fondamentale nel Modello Standard della fisica delle particelle: come possano bosoni vettori di gauge ( $W^\pm$ ,  $Z^0$ ) che mediano interazione elettrodebole possedere massa preservando invarianza di gauge locale della teoria. La soluzione richiede introduzione di campo scalare complesso che acquista valore di aspettazione nel vuoto non nullo (*vacuum expectation value*), generando rottura spontanea di simmetria elettrodebole. Quanto residuo di tale campo – particella scalare massiva neutra – costituisce il bosone di Higgs.

La teoria specificava proprietà qualitative della particella (spin 0, parità positiva, numeri quantici di gauge) ma non determinava univocamente la sua massa. Analisi di coerenza teorica – particolarmente vincoli da unitarietà di sezioni d'urto di scattering  $WW \rightarrow WW$  – suggerivano massa inferiore a  $\sim 1 \text{ TeV}/c^2$ . Ricerche sperimentali al Large Electron-Positron Collider (LEP) al CERN (1989-2000) esclusero masse inferiori a  $114.4 \text{ GeV}/c^2$  al 95% livello di confidenza. Tale intervallo – tra  $\sim 115 \text{ GeV}/c^2$  e  $\sim 1 \text{ TeV}/c^2$  – definiva il dominio dell'impossibile tecnologico: richiedeva acceleratori capaci di generare collisioni con energia nel centro di massa sufficiente a produrre il bosone, e rivelatori con granularità e capacità di acquisizione dati atti a identificare tracce caratteristiche contro background enormi.

Il Large Hadron Collider, approvato dal CERN Council nel 1994 e entrato in operazione nel 2009, costituì risposta tecnologica a tale sfida. La macchina utilizza tunnel circolare di 27 km di circonferenza precedentemente occupato da LEP, ma richiese ricostruzione sostanzialmente completa dell'infrastruttura: 1232 magneti dipolari superconduttivi operanti a temperatura di 1.9 K (ottenuta mediante elio liquido superfluido) generano campo magnetico di 8.3 Tesla per curvare traiettorie di protoni accelerati a 6.5 TeV (upgrade successivi raggiunsero 6.8 TeV), producendo collisioni con energia nel centro di massa fino a 13.6 TeV.

I detector – particolarmente ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) e CMS (Compact Muon Solenoid) – rappresentano strutture strumentali di complessità senza precedenti. ATLAS possiede dimensioni di 46m × 25m × 25m, massa complessiva di ~7000 tonnellate, comprende ~100 milioni di canali di lettura elettronica strutturati in subsistemi concentrici: inner detector per tracciamento di particelle cariche (silicon pixel detector, semiconductor tracker, transition radiation tracker); calorimetri elettromagnetici e hadronici per misura di energia; muon spectrometer nella regione esterna. CMS, pur con filosofia di design differente (solenoid superconduttivo da 3.8 Tesla contenente calorimetri), possiede complessità comparabile.

La scoperta, annunciata simultaneamente da ATLAS e CMS il 4 luglio 2012, emerge da analisi di canali di decadimento multipli: Higgs →  $\gamma\gamma$  (due fotoni); Higgs →  $ZZ_{\rightarrow} 4$  leptons; Higgs →  $WW_{\rightarrow} l\nu l\nu$ . La massa misurata convergeva attorno a ~125 GeV/c<sup>2</sup> con significatività statistica superiore a 5 $\sigma$  (ATLAS Collaboration, «Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC», *Physics Letters B* 716, 1-29, 2012; CMS Collaboration, «Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC», *Physics Letters B* 716, 30-61, 2012).

#### 6.4 Struttura formale della dialettica teoria-tecnica: modello epistemologico ricorsivo

I casi analizzati manifestano struttura comune che può essere formalizzata mediante schema ricorsivo a sei stadi:

*Stadio I – Formulazione Teorica:* Framework teorico consolidato T genera predizione P concernente fenomeno  $\varphi$  situato oltre limiti tecnologici contemporanei  $L(t_0)$ . Crucialmente, P non è speculazione qualitativa ma specificazione quantitativa: ordini di grandezza, dipendenze funzionali, tracce osservative distintive.

*Stadio II – Specificazione Condizioni di Osservabilità:* Analisi teorica rigorosa di T permette derivazione di condizioni strumentali  $C(\varphi) = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  necessarie per rendere  $\varphi$  empiricamente accessibile. Tali condizioni includono: sensibilità di misura, risoluzione (spaziale/temporale/energetica), intervallo operativo, stabilità sistemica, capacità di discriminazione segnale/rumore.

*Stadio III – Programma Tecnologico Orientato:* Specificazioni  $C(\varphi)$  fungono da obiettivi per programmi R&D multi-decennali che mobilitano competenze interdisciplinari. Innovazioni  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$  emergono frequentemente in domini eterogenei: scienza dei materiali, elettronica, metodi computazionali, ingegneria dei sistemi. Tale diversificazione genera competenze trasferibili oltre dominio originario.

*Stadio IV – Espansione Dominio Fenomenologico:* Innovazioni tecnologiche espandono limiti  $L(t_0) \rightarrow L(t_1)$ , rendendo accessibile non solo  $\varphi$  ma classe estesa  $\{\varphi, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k\}$  di fenomeni precedentemente inosservabili. Frequentemente, tale espansione rivela fenomeni imprevisti  $\varphi_u$  non anticipati da T.

*Stadio V – Retroazione Teorica:* Osservazione empirica di  $\{\varphi, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_k, \varphi_u\}$  genera constraints per T. Casi possibili:

- Validazione: risultati coerenti con predizioni rafforzano T
- Falsificazione parziale: discrepanze richiedono modifiche  $T \rightarrow T'$
- Anomalie: fenomeni impreveduti  $\varphi_u$  stimolano elaborazioni teoriche nuove  $T''$

*Stadio VI – Iterazione Ricorsiva:*  $T'$  e/o  $T''$  generano nuove predizioni  $P'$  situate oltre limiti tecnologici aggiornati  $L(t_1)$ , inaugurando ciclo successivo.

Tale schema ricorsivo configura progresso scientifico non come accumulo lineare ma come co-evoluzione dialettica teoria-tecnica, dove ciascun termine media trasformazione dell'altro. Crucialmente, la circolarità non è viziosa ma virtuosa: ogni iterazione espande sia comprensione teorica sia capacità osservative, generando conoscenza che trascende quella ottenibile mediante sviluppo isolato di teoria o tecnica.

### 6.5 Implicazioni per l'epistemologia della scoperta scientifica

La dialettica teoria-tecnica qui analizzata possiede conseguenze significative per filosofia della scienza, particolarmente concernenti la demarcazione tra contesto di scoperta e contesto di giustificazione. Hans Reichenbach (*Experience and Prediction*, University of Chicago Press, 1938) e successivamente Karl Popper avevano proposto distinzione netta: contesto di scoperta (processi psicologici, sociologici, accidentali attraverso cui teorie vengono formulate) è extra-logico e non suscettibile di analisi razionale; contesto di giustificazione (valutazione logico-empirica di teorie attraverso test) costituisce dominio proprio dell'epistemologia.

Tuttavia, la scienza dell'impossibile problematizza tale dicotomia. Lo sviluppo tecnologico orientato da predizioni teoriche non appartiene chiaramente né al contesto di scoperta né a quello di giustificazione puro: costituisce momento essenziale del processo di validazione (rendendo possibili i test empirici), ma richiede decenni di lavoro che precedono il test effettivo. Durante tale intervallo, teorie rimangono in stato epistemico peculiare: rigorosamente formulate e valutabili mediante criteri di coerenza interna, parsimonia, unificazione concettuale, ma non ancora falsificabili empiricamente.

Thomas Kuhn (*The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, 1962) aveva già problematizzato la concezione popperiana di falsificazione istantanea, mostrando come teorie scientifiche siano tipicamente embedded in paradigmi più ampi e protette da falsificazione immediata attraverso modifiche di ipotesi ausiliarie. La scienza dell'impossibile estende tale insight: teorie possono essere «non ancora falsificate» non per protezione ad hoc ma perché condizioni tecnologiche per test appropriati non sono ancora realizzate. Durante tale periodo, teoria funziona come programma regolativo (nel senso kantiano) per sviluppo tecnologico.

Ciò suggerisce concezione temporalmente estesa di razionalità scientifica. La valutazione di programmi teorici non può limitarsi a coerenza logica formale né a test empirici immediati, ma deve considerare fecondità tecnologica: capacità di generare specificazioni operative che orientano innovazione strumentale produttiva. Programmi teorici «degenerativi» (nel senso di Lakatos) sarebbero quelli che, pur logicamente coerenti, non generano predictions sufficientemente specifiche da orientare sviluppo tecnologico, o generano specificazioni tecnologicamente irrealizzabili anche in proiezione multi-decennale.

—

*Fine Capitolo VI*

—

## CAPITOLO VII

### GENEALOGIA FILOSOFICA: DA KANT A HEIDEGGER

#### 7.1 Il noumeno kantiano e la critica trascendentale: fondamenti della problematica

La questione del rapporto tra conoscenza e realtà che attraversa il presente lavoro possiede genealogia filosofica precisa, radicata nella svolta critica operata da Immanuel Kant nella *Kritik der reinen Vernunft* (1781, seconda edizione sostanzialmente rivista 1787). La problematica kantiana costituisce punto di partenza imprescindibile per comprendere gli sviluppi successivi che conducono all'ontologia relazionale articolata nei capitoli precedenti.

Kant, nella Prefazione alla seconda edizione della *Kritik* (denominata convenzionalmente edizione B), formula esplicitamente la natura rivoluzionaria della propria impresa filosofica mediante analogia con la rivoluzione copernicana in astronomia: «Fino ad ora si ammetteva che ogni nostra conoscenza dovesse regolarsi sugli oggetti [...] Si faccia una volta il tentativo di vedere se non procediamo meglio nei compiti della metafisica, ammettendo che gli oggetti debbano regolarsi sulla nostra conoscenza» (KrV, B XVI). Tale inversione metodologica inaugura quella che Kant denomina filosofia trascendentale: indagine non concernente oggetti della conoscenza ma le condizioni a priori di possibilità dell'esperienza di tali oggetti.

L'architettura della conoscenza secondo Kant si articola attraverso stratificazione di facoltà cognitive, ciascuna contribuyente forme specifiche all'esperienza possibile. La sensibilità (*Sinnlichkeit*) fornisce forme a priori dell'intuizione — spazio e tempo — che strutturano ogni dato sensibile precedentemente a qualsiasi elaborazione concettuale. L'intelletto (*Verstand*) applica categorie — concetti puri quali sostanza, causalità, necessità — che organizzano le intuizioni in giudizi oggettivi. La ragione (*Vernunft*) genera idee regolatrici — anima, mondo, Dio — che orientano sistematizzazione della conoscenza senza possedere oggetti corrispondenti nell'esperienza possibile.

Crucialmente, tale architettura implica distinzione fondamentale tra due modalità di considerare gli oggetti. Da un lato, gli oggetti come *fenomeni* (*Erscheinungen*): manifestazioni empiriche strutturate dalle forme a priori della sensibilità e dalle categorie dell'intelletto, costituenti l'unico dominio di conoscenza teoretica legittima. Dall'altro, gli oggetti come *noumeni* (*Noumena*) o cose in sé (*Dinge an sich*): oggetti considerati indipendentemente dalle condizioni soggettive della conoscenza umana. Come Kant esplicita nell'*Estetica Trascendentale*: «Ciò che può essere dato unicamente mediante sensibilità, mediante la recettività per le impressioni, sono semplici relazioni di luogo in un'intuizione (estensione), mutamento di luogo (movimento) e leggi secondo cui questo mutamento è determinato (forze motrici). Ma ciò che è presente nel luogo, oppure ciò che opera nelle cose stesse oltre il mutamento di luogo, non è dato mediante questo» (KrV, A 41/B 58).

La funzione del noumeno nell'economia del sistema critico kantiano è stata oggetto di interpretazione controversa nella letteratura secondaria. Nella sezione «Del fondamento della distinzione di tutti gli oggetti in generale in fenomeni e noumeni» dell'*Analitica Trascendentale*, Kant distingue due accezioni del concetto: noumeno in senso positivo («un oggetto di un'intuizione non sensibile») e noumeno in senso negativo («una cosa in quanto non è oggetto della nostra intuizione sensibile»)

(KrV, B 307). Kant nega esplicitamente la legittimità del primo: non possediamo intuizione intellettuale che permetterebbe conoscenza di noumeni positivi. Tuttavia, mantiene necessità metodologica del secondo: «Il concetto di un noumeno è dunque meramente un concetto-limite (*Grenzbegriff*), per circoscrivere la presunzione della sensibilità, e pertanto è di uso soltanto negativo» (KrV, B 310-311).

Tale statuto ambiguo del noumeno genera tensione interpretativa fondamentale: da un lato, Kant afferma ripetutamente che non possiamo conoscere le cose in sé; dall'altro, sembra presupporre la loro esistenza come causa (non fenomenica) delle affezioni sensibili. Come Graham Bird ha argomentato in *Kant's Theory of Knowledge* (Routledge, 1962), tale tensione riflette duplice esigenza: preservare realismo (contro idealismo berkeleyano che dissolve oggetti in collezioni di percezioni) mantenendo però consistenza con limiti della conoscenza umana stabiliti dall'analisi trascendentale. Il noumeno come *Grenzbegriff* garantisce che il fenomeno non sia ipostatizzato come totalità del reale, impedendo assolutizzazione dogmatica dell'esperienza possibile.

Henry Allison, in *Kant's Transcendental Idealism: An Interpretation and Defense* (Yale University Press, 1983, edizione rivista 2004), ha proposto interpretazione «two-aspect» secondo cui fenomeno e noumeno non designano due regni ontologici separati ma due modi di considerare gli stessi oggetti: sotto condizioni epistemiche della conoscenza umana (fenomeno) o indipendentemente da tali condizioni (noumeno). Tale lettura attenua apparente dualismo metafisico preservando distinzione metodologica. Tuttavia, come Rae Langton ha mostrato in *Kantian Humility: Our Ignorance of Things in Themselves* (Oxford University Press, 1998), rimane questione se tale distinzione possa essere mantenuta coerentemente senza implicare qualche forma di esistenza indipendente degli oggetti rispetto alle condizioni conoscitive.

## 7.2 La critica hegeliana e la dialettica di fenomeno e essenza

Georg Wilhelm Friedrich Hegel, nella *Phänomenologie des Geistes* (1807) e successivamente nell'*Enzyklopädie der philosophischen Wissenschaften* (1817, con edizioni sostanzialmente rivedute 1827 e 1830), sviluppa critica serrata alla distinzione kantiana tra fenomeno e cosa in sé. Tale critica non costituisce mera negazione esterna ma tentativo di mostrare come la dicotomia kantiana sia internamente incoerente, generando contraddizioni che possono essere risolte solo attraverso movimento dialettico verso concezione più adeguata del rapporto conoscenza-realtà.

La struttura della critica hegeliana può essere articolata attraverso diverse linee argomentative interconnesse. Nella Prefazione alla *Phänomenologie*, Hegel formula obiezione metodologica fondamentale: l'intento kantiano di esaminare la facoltà conoscitiva precedentemente all'effettivo esercizio della conoscenza è logicamente incoerente. «Volere conoscere prima di conoscere è assurdo quanto il saggio proposito di quello Scolastico di imparare a nuotare prima di arrischiarsi nell'acqua» (PhG, Prefazione). L'indagine trascendentale delle condizioni di possibilità della conoscenza presuppone già esercizio delle capacità cognitive che intende esaminare, generando circolarità viziosa.

Nell'*Enzyklopädie*, §44, Hegel riformula tale obiezione enfatizzando come la stessa posizione del limite alla conoscenza (il noumeno inconoscibile) implichi paradossalmente conoscenza di ciò che viene dichiarato inconoscibile: «Voler conoscere prima di conoscere è tanto assurdo quanto il saggio proposito di quel tale di imparare a nuotare prima di avventurarsi nell'acqua. L'esame del conoscere non può avvenire che nel conoscere, e così detto strumento esaminare significa nient'altro che conoscerlo. Ma voler conoscere prima che si conosca è altrettanto assurdo del saggio proposito di quello Scolastico di voler imparare a nuotare prima di buttarsi nell'acqua». La metafora pedagogica dissimula argomentazione filosoficamente densa: ogni delimitazione dei confini della conoscenza è

già operazione conoscitiva che dovrebbe essere sottoposta alla medesima delimitazione, generando regresso infinito.

Nella sezione «Fenomeno ed Essenza» della *Wissenschaft der Logik* (Libro II, Sezione II), Hegel sviluppa analisi dialettica più sofisticata della relazione fenomeno-cosa in sé. La cosa in sé, se pensata come assolutamente indeterminata e priva di ogni relazione con il fenomeno, è indistinguibile dal puro nulla. «Nella determinazione della cosa in sé [...] è contenuto che in sé è ciò che è solo mediante astrazione di ogni determinazione, come l'assolutamente indeterminato, l'astratto. Con ciò la cosa in sé non è che il vuoto prodotto dall'astrazione, l'astrazione di ogni determinatezza» (*Wissenschaft der Logik*, Gesammelte Werke Band 11, p. 253). Ogni tentativo di articolare contenuto positivo del noumeno lo riconduce necessariamente entro orizzonte del pensabile e quindi del fenomenico, dissolvendone la pretesa trascendenza.

L'alternativa hegeliana consiste nell'immanentizzazione della struttura fenomeno-essenza: non esistono due regni ontologici separati (fenomenico e noumenico) ma processo dialettico attraverso cui l'essenza si manifesta necessariamente nel fenomeno e il fenomeno rimanda costantemente all'essenza. Come Hegel formula nell'*Enzyklopädie*, §131: «L'essenza deve apparire». Tale apparire (*Erscheinen*) non è occultamento ma automanifestazione: l'essenza non si nasconde dietro i fenomeni ma si realizza attraverso essi. La separazione kantiana viene così superata (*aufgehoben*) — simultaneamente negata, conservata ed elevata — mediante riconoscimento dell'identità speculativa di pensiero ed essere.

Tuttavia, come analizzato nel Capitolo III, tale «superamento» della dicotomia kantiana comporta conseguenze epistemologiche che Hegel non tematizza esplicitamente. Nel negare legittimità al noumeno come residuo inconoscibile, Hegel afferma implicitamente che non esiste realtà al di fuori della mediazione concettuale attraverso cui viene articolata. L'essere (*Sein*) non precede logicamente il pensiero (*Denken*) ma è sempre-già pensiero-dell'essere. Tale posizione, lungi dal costituire realismo più robusto rispetto al criticismo kantiano, radicalizza la mediazione cognitiva: se non ha senso postulare realtà «in sé» separata dal pensiero che la conosce, tutta la realtà accessibile diviene costitutivamente dipendente dalle strutture del pensiero.

Frederick Beiser, in *Hegel* (Routledge, 2005), interpreta tale movimento come forma di «realismo concettuale»: gli universali (categorie, concetti) non sono costruzioni mentali soggettive ma costituiscono struttura oggettiva del reale. Robert Pippin, in *Hegel's Idealism: The Satisfactions of Self-Consciousness* (Cambridge University Press, 1989), propone lettura ancora più radicalmente epistemologica: l'idealismo hegeliano concerne primariamente condizioni di intelligibilità piuttosto che costituzione ontologica. Tuttavia, entrambe le interpretazioni devono confrontarsi con implicazione che il presente lavoro ha esplicitato: se l'essere è pensiero-dell'essere, la struttura dell'essere accessibile dipende dalle forme del pensiero che lo articola — precisamente la tesi di co-dipendenza cognitiva sviluppata nel Capitolo III.

### 7.3 Heidegger: la dissoluzione della dicotomia soggetto-oggetto

Martin Heidegger, particolarmente in *Sein und Zeit* (1927), opera rottura radicale rispetto alla tradizione epistemologica moderna, dissolvendo la problematica stessa del rapporto conoscenza-realtà attraverso riconfigurazione ontologica fondamentale. Il punto di partenza heideggeriano non è coscienza cosciente che si relaziona a oggetti esterni, ma *Dasein* — letteralmente «esser-ci» — caratterizzato costitutivamente come *In-der-Welt-sein* (essere-nel-mondo).

Tale struttura non designa relazione contingente tra due entità previamente separate (soggetto interno e mondo esterno) ma costituisce modo d'essere unitario e originario che precede ontologicamente ogni distinzione soggetto-oggetto. Come Heidegger esplicita nel §12 di *Sein und Zeit*: «Nell'«esser-nel-mondo» come costituzione fondamentale dell'Esserci sta la ragione per cui l'Esserci nella sua familiarità col mondo può espressamente “conoscere” anche se stesso nella sua fattualità» (SuZ, §12, H 53). La conoscenza teoretica, lungi dall'essere modalità primaria di relazione con il mondo, costituisce modo derivato e fondato che emerge solo attraverso modificazione dell'impegno pratico originario.

La concezione heideggeriana del «mondo» (*Welt*) differisce radicalmente tanto dalla nozione di totalità degli enti presenti (concezione ontica) quanto dall'insieme di rappresentazioni mentali (concezione idealistica). Il mondo è *totalità significativa di rimandi* (*Verweisungszusammenhang*) costituita dalle prassi del Dasein. Gli enti si manifestano primariamente come *Zuhandenes* (utilizzabile, allamano) entro reti funzionali: il martello rimanda ai chiodi, i chiodi alla carpenteria, la carpenteria all'abitazione, l'abitazione alle forme di vita. Tale rete di rimandi non è costruita secondariamente da soggetto su oggetti neutrali ma costituisce l'apertura originaria (*Erschlossenheit*) entro cui tanto il Dasein quanto gli enti divengono intellegibili.

La distinzione heideggeriana tra *Zuhandenheit* (utilizzabilità) e *Vorhandenheit* (presenza-sottomano) è cruciale per comprendere la critica alla scienza moderna. Il modo d'essere *vorhanden* degli oggetti – entità isolabili dotate di proprietà intrinseche, manipolabili teoricamente attraverso categorie – costituisce astrazione che occulta il radicamento originario nella *Zuhandenheit*. La scienza moderna, nel tematizzare gli enti come *vorhanden*, opera decontestualizzazione sistematica che permette controllo calcolante ma al prezzo di perdere dimensioni significative dell'essere. Come Heidegger osserva: «Quanto più appropriatamente è scoperto un ente nella sua utilizzabilità, tanto più esso sparisce e resta velato nella sua struttura categoriale» (SuZ, §15, H 69).

Tale analisi anticipa strutturalmente le tematiche sviluppate nei capitoli precedenti concernenti il carattere relazionale delle proprietà scientifiche. Le «proprietà» misurate dalla fisica – massa, velocità, carica – non sono attributi che gli enti possiedono indipendentemente ma emergono quando gli enti vengono collocati in specifiche configurazioni sperimentali che li costituiscono come *vorhanden*. La relazionalità non è caratteristica aggiunta secondariamente ma struttura ontologica fondamentale che la scienza presuppone senza tematizzarla.

#### 7.4 La tecnica come Gestell: mediazione tecnologica e disvelamento

Nei testi successivi a *Sein und Zeit*, particolarmente nelle conferenze e saggi degli anni “50 raccolti in *Vorträge und Aufsätze* (1954), Heidegger sviluppa analisi della tecnica moderna come modo specifico di disvelamento (*Entbergung*) dell'essere. Il concetto centrale è *Gestell* – termine deliberatamente ambiguo che connota simultaneamente imposizione (*stellen* = porre, imporre) e intelaiatura strutturale.

Nel saggio «Die Frage nach der Technik» (1954), Heidegger distingue la tecnica moderna dall'artigianato tradizionale (*Techne*) non meramente per scala o efficienza ma per modalità fondamentale con cui l'ente viene portato alla presenza. L'artigiano greco lasciava che l'opera emergesse (*hervor-bringen*) dalla materia secondo forme intrinseche; la tecnica moderna pro-voca (*herausfordern*) la natura, sfidandola a fornire energia accumulabile e immagazzinabile. «L'energia celata nella natura viene estratta, ciò che è estratto viene trasformato, ciò che è trasformato viene accumulato, ciò che è accumulato viene ripartito, e ciò che è ripartito viene nuovamente commutato. Estrarre, trasformare,

accumulare, ripartire, commutare sono modi del disvelamento» (*Die Frage nach der Technik*, in *Vorträge und Aufsätze*, Neske, 1954, p. 16).

Crucialmente, il *Gestell* non è strumento neutro controllabile dall'uomo ma destinazione storica dell'essere (*Geschick des Seins*) che pre-determina come gli enti — incluso l'uomo stesso — possono manifestarsi. Nel regime del *Gestell*, ogni ente appare esclusivamente come *Bestand* (fondo disponibile, riserva): il fiume diventa centrale idroelettrica, la foresta diventa riserva di cellulosa, l'atmosfera diventa sistema climatico modellabile, l'uomo stesso diventa «risorsa umana». Tale configurazione non è scelta consapevole che potremmo revocare ma costituisce l'orizzonte entro cui ogni scelta particolare diviene intellegibile.

La convergenza con le tematiche sviluppate nei capitoli precedenti è manifesta. Il *Gestell* costituisce precisamente la struttura attraverso cui la mediazione tecnologica determina quali aspetti della realtà divengono osservabili. Come argomentato nel Capitolo IV, la scienza non «scopre» una natura preesistente ma articola domande mediante apparati tecnologici che configurano il tipo di risposte possibili. La formulazione «non diciamo cosa è la natura, ma come la natura risponde alle nostre domande nei limiti della tecnologia attraverso cui siamo in grado di porgerle» risuona con l'analisi heideggeriana del *Gestell* come pro-vocazione che determina i modi di manifestazione degli enti.

Heidegger stesso non sviluppa sistematicamente le implicazioni di tale analisi per la filosofia della scienza empirica. La sua attenzione rimane focalizzata su questioni onto-teologiche concernenti l'oblio dell'essere (*Seinsvergessenheit*) nella tradizione metafisica occidentale e la possibilità di «altro inizio» (*anderer Anfang*) del pensiero. Tuttavia, il framework concettuale fornito dall'analitica esistenziale e dalla critica della tecnica offre risorse filosofiche per articolare l'ontologia relazionale che il presente lavoro ha sviluppato attraverso analisi della pratica scientifica contemporanea.

## 7.5 Convergenze strutturali e divergenze interpretative

La traiettoria Kant → Hegel → Heidegger manifesta progressiva radicalizzazione della problematizzazione della «cosa in sé» come entità ontologicamente indipendente accessibile alla conoscenza. Kant mantiene dualismo metodologico tra fenomeno (conoscibile) e noumeno (pensabile ma inconoscibile). Hegel dissolve tale dualismo mediante immanentizzazione: l'essenza non sta «dietro» il fenomeno ma si manifesta attraverso esso. Heidegger opera rottura ancora più radicale: la questione stessa del rapporto conoscenza-realtà presuppone erroneamente separazione tra soggetto e oggetto che l'analitica esistenziale mostra essere derivata rispetto alla struttura unitaria dell'*In-der-Welt-sein*.

Tuttavia, occorre esplicitare divergenze interpretative concernenti lo statuto ontologico delle relazioni e il ruolo della mediazione cognitiva. In Hegel, la mediazione è dialettica del concetto (*Begriff*) che si autodetermina attraverso negazioni successive fino all'Idea assoluta. Tale processo possiede carattere logico-necessario: le categorie si dispiegano secondo ordine razionale determinato dalla loro struttura interna. La scienza hegeliana (*Wissenschaft*) è esposizione sistematica di tale autodispiegamento concettuale.

In Heidegger, viceversa, la mediazione è storica e contingente: il *Gestell* non è necessità logica ma destinazione epocale dell'essere che avrebbe potuto configurarsi altrimenti. La tecnica moderna non è sviluppo inevitabile ma evento (*Ereignis*) che inaugura particolare modalità di disvelamento. Tale storicità radicale impedisce sistematizzazione definitiva: ogni articolazione ontologica rimane provvisoria, esposta alla possibilità di trasformazioni non anticipabili mediante deduzione logica.

L'ontologia relazionale articolata nel presente lavoro si situa in tensione produttiva tra questi due poli. Da un lato, riconosce necessità di forme di mediazione — cognitiva, tecnologica, linguistica — che condizionano costitutivamente l'accessibilità fenomenologica (convergenza con Hegel e Heidegger contro realismo ingenuo). Dall'altro, rifiuta tanto il necessitarismo logico hegeliano quanto il destinismo storico heideggeriano in favore di concezione più pragmatista: le configurazioni relazionali emergono attraverso prassi sperimentali concrete, stabilizzandosi in virtù di robustezza predittiva e riproducibilità intersoggettiva, ma rimangono sempre rivedibili alla luce di nuove evidenze o sviluppi tecnologici.

Crucialmente, l'ontologia relazionale sviluppata nei capitoli precedenti non presuppone soggetto trascendentale (kantiano) né Spirito assoluto (hegeliano) né Dasein come ente privilegiato ontologicamente (heideggeriano). Le relazioni che costituiscono proprietà osservabili sono relazioni fisiche tra sistemi: apparato sperimentale e fenomeno investigato, dove l'apparato incorpora strutture cognitive e teoriche ma non richiede riferimento a coscienza o soggettività come termine fondante. Tale naturalizzazione delle strutture cognitive — sviluppata attraverso biologia della cognizione e scienze cognitive nel Capitolo III — permette di preservare insights della tradizione critica evitando residui idealistici o antropocentrici.

La genealogia filosofica qui ricostruita non costituisce mera erudizione storica ma articola progressiva chiarificazione concettuale della struttura ontologica che la pratica scientifica contemporanea manifesta. La fisica quantistica relazionale, le teorie emergentiste della gravità, l'epistemologia della mediazione tecnologica — tutte convergono verso concezione secondo cui realtà accessibile è costitutivamente relazionale, dipendente dai modi di interrogazione. Tale convergenza non è coincidenza ma riflette struttura ontologica fondamentale che la tradizione filosofica da Kant a Heidegger ha progressivamente esplicitato attraverso linguaggi differenti, e che l'analisi della scienza contemporanea conferma mediante analisi delle prassi effettive di produzione di conoscenza empirica.

—

*Fine Capitolo VII*

—

## CAPITOLO VIII

### CONCLUSIONI: VERSO UN REALISMO RELAZIONALE CRITICO

#### 8.1 Sintesi delle tesi fondamentali: ricapitolazione sistematica dell'argomentazione

L'analisi condotta nei capitoli precedenti ha articolato una concezione della conoscenza scientifica che si discosta significativamente tanto dal realismo ingenuo quanto dall'idealismo soggettivo, proponendo invece un framework epistemologico che denominiamo *realismo relazionale critico*. Prima di esplicitare tale posizione in forma sistematica, si rende necessaria ricapitolazione delle tesi fondamentali che ne costituiscono il sostrato argomentativo.

*Tesi Prima — Ontologia Relazionale:* Le proprietà fisicamente osservabili non costituiscono attributi intrinseci che gli enti possiedono indipendentemente ma emergono in configurazioni relazionali specifiche. Tale tesi, sviluppata nel Capitolo II attraverso analisi della meccanica quantistica relazionale di Rovelli e delle teorie emergentiste della gravitazione, implica transizione da ontologie sostanzialistiche — dove l'essere si articola attraverso sostanze individuali dotate di proprietà innate — a ontologie processuali dove le relazioni possiedono priorità ontologica rispetto ai relata. La velocità della luce nel vuoto, analizzata come caso paradigmatico, si rivela non proprietà che la luce «possiede» ma parametro caratterizzante la struttura causale dello spazio-tempo — invariante relazionale piuttosto che attributo sostanziale.

*Tesi Seconda — Co-dipendenza Cognitiva della Realtà:* Non può esistere articolazione di un modello di comprensione che prescindere dalle strutture cognitive attraverso cui tale modello viene elaborato. Il Capitolo III ha dimostrato, mediante convergenza di argomentazioni fenomenologiche (Husserl, Merleau-Ponty), biologico-cognitive (Maturana, Varela) e fisico-quantistiche (Bohr, von Neumann), che ogni accesso alla realtà è costitutivamente mediato dal sistema cognitivo-osservativo. Tale mediazione non è limitazione epistemica contingente ma condizione trascendentale: il «taglio di Heisenberg» che separa sistema osservato da apparato di misurazione non corrisponde a discontinuità ontologica nella natura ma a scelta operativa necessaria per applicabilità del formalismo predittivo. La co-dipendenza cognitiva genera forma di pluralismo ontologico: esistono molteplici mondi fenomenologici, ciascuno costituito dalle capacità percettive e categoriali di particolari forme di vita cognitiva.

*Tesi Terza — Mediazione Tecnologica come Vincolo Costitutivo:* Ciò che è scientificamente conoscibile dipende dalle tecnologie attraverso cui i fenomeni divengono osservabili. Il criterio di riproducibilità sperimentale — fondamento della validazione scientifica — funziona simultaneamente come meccanismo di esclusione epistemica: fenomeni non tecnologicamente replicabili vengono espulsi dal dominio del «reale scientifico». Tale tesi, la cui elaborazione sistematica richiederebbe sviluppo nel Capitolo IV, implica storicità radicale dei domini fenomenologici accessibili. La scienza newtoniana, la fisica relativistica, la meccanica quantistica non descrivono «lo stesso mondo» con approssimazione crescente ma articolano mondi fenomenologici differenti resi accessibili da tecnologie di osservazione eterogenee. Come si è formulato: «Non diciamo cosa è la natura. Diciamo come la natura risponde alle nostre domande, nei limiti della tecnologia attraverso cui siamo in grado di porgerle.»

*Tesi Quarta — Non-Neutralità del Processo Scientifico:* Le strutture di potere, gli interessi economici, i meccanismi istituzionali di validazione condizionano quali linee di ricerca vengano perseguite, quali teorie ricevano supporto, quali fenomeni divengano empiricamente accessibili. L'allocazione di risorse per sviluppo tecnologico — che determina quali domini fenomenologici rendersi osservabili — riflette priorità politico-economiche piuttosto che «importanza oggettiva» intrinseca dei problemi scientifici. Il sistema delle citazioni, la peer review, la gerontocrazia scientifica operano come dispositivi di conservazione paradigmatica, privilegiando continuità rispetto a innovazione radicale. Tale dimensione socio-politica, la cui analisi richiederebbe articolazione nel Capitolo V, non costituisce distorsione accidentale ma caratteristica strutturale della pratica scientifica contemporanea.

*Tesi Quinta — Dialettica Teoria-Tecnica:* Predizioni teoriche situate oltre i confini dell'accessibilità sperimentale contemporanea fungono da vettori direzionali per l'innovazione tecnologica, la quale espande i domini fenomenologici accessibili alla teoria, generando circolarità virtuosa. Il Capitolo VI ha documentato tale struttura mediante *exempla historica* rigorosi: onde gravitazionali (Einstein 1916 → LIGO 2015), bosone di Higgs (Higgs, Englert, Brout 1964 → LHC 2012). La «scienza dell'impossibile» — proposizioni teoriche formulate con rigore ma predefiniti fenomeni empiricamente inaccessibili — non costituisce speculazione metafisica sterile ma programma di ricerca che specifica condizioni strumentali necessarie per falsificazione, orientando così sviluppo tecnologico multi-decennale.

Ciascuna di tali tesi possiede implicazioni che, se considerate isolatamente, potrebbero suggerire forme di relativismo epistemico o costruttivismo radicale. Tuttavia, la loro articolazione sistematica genera posizione più sfumata che preserva robustezza empirica della conoscenza scientifica pur riconoscendone la situatezza costitutiva.

## 8.2 Articolazione del realismo relazionale critico: posizione epistemologica sistematica

Il *realismo relazionale critico* qui proposto integra tre componenti che, nella tradizione epistemologica, sono state frequentemente considerate incompatibili: realismo empirico (esistono vincoli oggettivi che resistono alla volontà soggettiva), contestualismo ontologico (tali vincoli sono relativi a regimi di coerenza specifici), e riflessività critica (consapevolezza delle condizioni socio-politiche della produzione scientifica). L'articolazione sistematica di tale posizione richiede esplicitazione di ciascuna componente e dimostrazione della loro mutua compatibilità.

*Componente Prima — Realismo Empirico Situato:* Esistono vincoli empirici robusti e intersoggettivamente verificabili che distinguono nettamente teorie scientifiche consolidate da speculazioni arbitrarie o *wishful thinking*. La meccanica quantistica genera predizioni di straordinaria precisione (si consideri il momento magnetico anomalo dell'elettrone, verificato sperimentalmente fino alla tredicesima cifra decimale); la relatività generale è validata da convergenza di evidenze indipendenti (precessione del perielio di Mercurio, deflessione gravitazionale della luce, redshift gravitazionale, onde gravitazionali); il Modello Standard della fisica delle particelle riproduce con accuratezza risultati di migliaia di esperimenti ad alta energia. Tale robustezza predittiva non è illusione né artefatto sociale: costituisce fatto empirico che qualsiasi epistemologia adeguata deve riconoscere.

Tuttavia — e qui emerge la specificità della posizione proposta — tale robustezza è sempre *situata* entro regimi di coerenza determinati. La meccanica newtoniana possiede straordinaria accuratezza predittiva nel regime  $v \ll c$  (velocità molto minori della velocità della luce), masse-energie  $\ll$  scala di Planck, campi gravitazionali deboli. Entro tale dominio, rimane perfettamente adeguata e continua ad essere utilizzata per applicazioni ingegneristiche, calcoli orbitali, meccanica dei continui. La sua «falsificazione» da parte della relatività e della meccanica quantistica non ne ha invalidato l'adeguatezza

empirica nel suo regime di validità ma ne ha contestualizzato i limiti di applicabilità. Come Nancy Cartwright ha argomentato in *How the Laws of Physics Lie* (Oxford University Press, 1983), le «leggi fondamentali» della fisica sono tipicamente false quando interpretate come descrizioni letterali della realtà ma rimangono strumenti predittivi potenti entro domini circoscritti.

Il realismo qui proposto non è dunque realismo metafisico ingenuo secondo cui teorie scientifiche mature catturerebbero la struttura ultima della realtà «in sé». È piuttosto realismo pragmatista, nella tradizione che va da Charles Sanders Peirce attraverso William James fino a Hilary Putnam nella fase del «realismo interno». Come Putnam formulò in *Reason, Truth and History* (Cambridge University Press, 1981), la «verità» delle teorie scientifiche consiste nella loro accettabilità razionale idealmente giustificata — coerenza con vincoli empirici, coerenza interna, semplicità, fecondità predittiva — piuttosto che corrispondenza a realtà indipendente dalla mente. Crucialmente, tale accettabilità è sempre relativa a schemi concettuali e prassi sperimentali storicamente situati.

*Componente Seconda — Contestualismo Tecno-Epistemico:* I vincoli empirici che conferiscono robustezza alle teorie scientifiche sono relativi ai regimi fenomenologici resi accessibili dalle tecnologie di osservazione disponibili. Tale tesi non implica che le teorie siano arbitrarie o che «tutto valga», ma riconosce che ogni articolazione di conoscenza empirica è condizionata dalle mediazioni tecnologiche che rendono osservabili i fenomeni investigati.

La fisica delle alte energie studia fenomeni la cui manifestazione empirica è inscindibile da acceleratori di particelle: le risonanze scoperte al Large Hadron Collider non «esistevano» in senso sperimentalmente accessibile prima della costruzione di tale infrastruttura. Non si tratta meramente di «vedere meglio» entità preesistenti ma di rendere manifesto un dominio fenomenologico radicalmente nuovo. Come Peter Galison ha documentato in *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics* (University of Chicago Press, 1997), la distinzione stessa tra «immagine» e «logica» — tra rivelatori visuali che producono tracce iconiche e sistemi elettronici che generano distribuzioni statistiche — non è neutra rispetto alle ontologie fisiche privilegiate: differenti tecnologie di rivelazione favoriscono concezioni eterogenee circa ciò che costituisce «evidenza» in fisica sperimentale.

Il contestualismo qui proposto converge con il realismo strutturale nella formulazione di James Ladyman e Don Ross (*Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*, Oxford University Press, 2007): ciò che le teorie scientifiche catturano sono strutture relazionali piuttosto che nature intrinseche di enti. Tuttavia, si aggiunge specificazione cruciale: tali strutture relazionali sono sempre articolate entro regimi tecnologicamente e cognitivamente determinati. Non esiste «la struttura del reale» in senso assoluto ma pluralità di articolazioni strutturali, ciascuna adeguata al proprio dominio fenomenologico.

Ciò implica forma di pluralismo epistemico non relativista: teorie differenti possono essere simultaneamente adeguate per regimi fenomenologici differenti senza che ciò generi contraddizione. La termodinamica fenomenologica e la meccanica statistica forniscono descrizioni complementari di fenomeni termici; la meccanica dei continui e la fisica atomistica articolano livelli ontologici differenti della materia; la biologia evuzionistica e la biologia molecolare operano a scale temporali e organizzative eterogenee. L'ideale riduzionista di unificazione totale — teoria del tutto che subsumerebbe ogni altra descrizione — potrebbe costituire chimera metafisica piuttosto che obiettivo scientifico realizzabile.

*Componente Terza — Riflessività Critica:* La produzione di conoscenza scientifica è inscindibile da strutture socio-politiche, interessi economici, meccanismi istituzionali di validazione che meritano scrutinio critico continuo. Tale componente non implica che la scienza sia «mera costruzione sociale» nel senso del costruttivismo radicale proposto da autori come Harry Collins e Trevor Pinch (*The*

*Golem: What You Should Know About Science*, Cambridge University Press, 1993, 2nd ed. 1998). Implica piuttosto riconoscimento che la direzione di sviluppo tecnologico — e quindi l'espansione dei domini fenomenologici accessibili — è determinata da decisioni allocative che riflettono configurazioni di potere.

Sheila Jasanoff ha documentato estensivamente, particolarmente in *Designs on Nature: Science and Democracy in Europe and the United States* (Princeton University Press, 2005), come differenti regimi di governance scientifica producano epistemic cultures eterogenee con priorità di ricerca, standard di validazione, modalità di competenza differenti. La scienza non è pratica universale che trascende contesti culturali ma prassi situata entro matrici istituzionali specifiche. Helen Longino, in *The Fate of Knowledge* (Princeton University Press, 2002), ha argomentato per concezione sociale dell'oggettività scientifica: quest'ultima emerge non da conformità a metodi algoritmici ma da processi comunitari di critica reciproca, diversità di prospettive, standard pubblici di valutazione.

La riflessività critica richiede che la comunità scientifica riconosca tali condizionamenti strutturali non come distorsioni da eliminare (impresa impossibile) ma come caratteristiche costitutive da tematizzare esplicitamente. Ciò implica vigilanza continua circa: quali domini fenomenologici ricevono investimenti sostanziali e quali rimangono sotto-investigati; quali framework teorici godono di supporto istituzionale e quali vengono marginalizzati; come meccanismi di peer review e sistemi di citazione possano generare conservatorismo epistemico; quali interessi extra-scientifici (militari, commerciali, geopolitici) orientano lo sviluppo tecnologico.

La compatibilità delle tre componenti — realismo empirico, contestualismo e riflessività critica — risiede nel riconoscimento che la robustezza dei vincoli empirici non è compromessa dalla loro situazione storico-tecnologica né dalla non-neutralità del processo di produzione scientifica. La relatività generale genera predizioni accurate *entro il suo regime di validità*, sebbene tale regime sia delimitato tecnologicamente e sebbene lo sviluppo delle infrastrutture sperimentali necessarie per testarla riflette priorità allocative specifiche. La simultaneità di questi aspetti non genera contraddizione ma descrive la complessa fenomenologia della pratica scientifica effettiva.

### 8.3 Implicazioni per la pratica scientifica: verso una scienza riflessiva

L'adozione del realismo relazionale critico possiede conseguenze operative significative per la conduzione della ricerca scientifica contemporanea e per le politiche di governance della scienza. Tali implicazioni possono essere articolate attraverso diversi domini di pratica.

*Implicazione Prima — Riconcettualizzazione dell'Oggettività:* L'oggettività scientifica deve essere compresa non come corrispondenza a realtà indipendente dalla mente ma come risultato di pratiche comunitarie disciplinate. Come Lorraine Daston ha osservato («Objectivity and the Escape from Perspective», *Social Studies of Science* 22, 1992, pp. 597-618), il concetto stesso di oggettività possiede storia: ciò che conta come «oggettivo» varia attraverso epoche e discipline. Una scienza riflessivamente consapevole riconoscerebbe tale variabilità senza abbandonare l'aspirazione a standard rigorosi di validazione. L'oggettività diverrebbe virtù epistemica praticata piuttosto che proprietà metafisica scoperta.

Operativamente, ciò richiede: esplicitazione sistematica dei presupposti teorici incorporati negli apparati sperimentali; trasparenza circa scelte metodologiche e convenzioni operative (ad esempio, convenzioni di sincronizzazione in relatività, scelte di gauge in teoria dei campi); documentazione accurata di decisioni analitiche in processing dei dati; accessibilità pubblica di dataset e codici compu-

tazionali per favorire replicabilità. Tali prassi, già parzialmente implementate in comunità come quella della fisica delle alte energie (si consideri il ruolo del arXiv.org per pre-print e di repository pubblici per dati sperimentali), dovrebbero essere sistematizzate e estese.

*Implicazione Seconda — Pluralismo Metodologico:* Il riconoscimento che teorie differenti possono essere simultaneamente adeguate per regimi fenomenologici differenti suggerisce atteggiamento di pluralismo metodologico piuttosto che riduzionismo monista. Come Sandra Mitchell ha argomentato in *Unsimple Truths: Science, Complexity, and Policy* (University of Chicago Press, 2009), fenomeni complessi — particolarmente nelle scienze della vita e nelle scienze sociali — resistono a riduzione a singoli framework esplicativi. Pluralità di modelli, ciascuno catturante aspetti differenti della complessità fenomenica, può costituire strategia epistemica più appropriata della ricerca di teoria unificata onnicomprensiva.

Operativamente, ciò implica: valorizzazione di approcci interdisciplinari che integrano metodologie eterogenee; cautela rispetto a pretese imperialiste di singole discipline; riconoscimento della legittimità epistemica di tradizioni di ricerca alternative che, pur operando con assunzioni differenti, generano conoscenza affidabile nei loro domini. Il caso delle multiple interpretazioni della meccanica quantistica (Copenhagen, many-worlds, Bohm, relazionale) fornisce esempio: sebbene empiricamente equivalenti al livello di predizioni osservative, incorporano ontologie eterogenee che favoriscono direzioni di ricerca differenti in gravità quantistica.

*Implicazione Terza — Valutazione Prospettiva di Programmi Teorici:* La dialettica teoria-tecnica implica che valutazione di programmi teorici non può limitarsi a status empirico presente ma deve considerare fecondità tecnologica a lungo termine. Come discusso nel Capitolo VI, la «scienza dell'impossibile» — predizioni situate oltre limiti tecnologici attuali — può orientare sviluppo strumentale che espande domini fenomenologici accessibili. Tuttavia, ciò richiede commitment di risorse multi-decennali e decisioni circa quali «impossibili» perseguire.

Operativamente, ciò implica necessità di meccanismi istituzionali che: permettano finanziamento di ricerca ad alto rischio con payoff temporale esteso; proteggano spazi per esplorazione teorica non immediatamente orientata ad applicazioni; mantengano diversità di approcci anche quando consenso paradigmatico sembra consolidato; valutino programmi di ricerca non solo per risultati immediati ma per capacità generativa di nuove domande e nuove metodologie.

Il caso del Superconducting Super Collider — progetto statunitense per acceleratore di ~87 km cancellato nel 1993 dopo investimento di ~2 miliardi di dollari — illustra tensioni tra impegno a lungo termine e pressioni allocative contingenti. La decisione di cancellazione riflesse considerazioni extra-scientifiche (dinamiche di budget post-Guerra Fredda, competizione con altre priorità), ma ebbe conseguenze durature per fisica delle alte energie statunitense. Una governance riflessivamente consapevole riconoscerebbe esplicitamente tali compromessi piuttosto che presentare decisioni allocative come meramente «tecniche».

*Implicazione Quarta — Democratizzazione dell'Expertise:* Il riconoscimento della non-neutralità del processo scientifico e della sua inscindibilità da strutture di potere suggerisce necessità di forme più inclusive di governance della ricerca. Come Sheila Jasanoff ha argomentato estensivamente, expertise scientifica non può essere monopolio di élites tecnocratiche ma richiede integrazione con forme diverse di conoscenza situata — particolarmente quando decisioni scientifiche possiedono conseguenze pubbliche significative.

Operativamente, ciò implica: meccanismi di consultazione pubblica informata su grandi progetti di ricerca; inclusione di stakeholder diversificati in processi decisionali concernenti priorità scientifiche; riconoscimento di «expertise contributiva» e «expertise interazionale» (distinzione proposta da Harry Collins e Robert Evans, *Rethinking Expertise*, University of Chicago Press, 2007); comunicazione scientifica che non si limiti a disseminazione unidirezionale ma favorisca dialogo bidirezionale.

Esempi parziali di tali pratiche esistono già: conferenze di consenso in Danimarca per valutazione di tecnologie biomediche; citizen science projects che coinvolgono pubblici non-esperti in raccolta e analisi dati; processi partecipativi per valutazione di rischi ambientali. L'estensione sistematica di tali prassi richiede tuttavia trasformazioni istituzionali significative e superamento di concezioni gerarchiche dell'expertise.

#### **8.4 Limitazioni e obiezioni: onestà intellettuale circa i confini della posizione proposta**

L'articolazione del realismo relazionale critico qui proposta non è esente da difficoltà teoriche e vulnerabilità a obiezioni. Onestà intellettuale richiede esplicitazione di tali limitazioni e considerazione di critiche potenziali.

*Obiezione Prima – Rischio di Circolarità:* La tesi della co-dipendenza cognitiva della realtà potrebbe sembrare circolare: se ogni articolazione di realtà è relativa a sistema cognitivo, anche tale tesi è relativa e quindi non può rivendicare validità trans-contestuale. Questo è argomento classico contro forme di relativismo epistemico: il relativista si confuta performativamente nel momento stesso in cui enuncia la propria posizione come universalmente valida.

La risposta richiede distinzione tra livelli di discorso. La tesi della co-dipendenza cognitiva non è proposizione empirica circa specifici contenuti della realtà ma meta-proposizione circa condizioni di possibilità di articolazione di contenuti empirici. In terminologia kantiana, è proposizione trascendentale piuttosto che empirica. Come tale, non è soggetta a falsificazione empirica diretta ma è valutabile per coerenza interna, adeguatezza fenomenologica, fecondità esplicativa. La circolarità diviene viziosa solo se si pretende che tale meta-proposizione posseda stesso statuto epistemico delle proposizioni empiriche ordinarie – pretesa qui esplicitamente rigettata.

Inoltre, la posizione proposta non è relativismo radicale secondo cui «tutto vale». Mantiene distinzione cruciale tra articolazioni di realtà che soddisfano criteri di robustezza empirica, coerenza interna, fecondità predittiva e speculazioni arbitrarie. Tale distinzione è praticabile *entro* regimi di coerenza cognitiva condivisi, sebbene i criteri stessi di valutazione possano variare cross-culturalmente. Il realismo relazionale critico è così forma di relativismo moderato o contestualismo che preserva spazio per valutazione razionale pur riconoscendo situazione delle norme epistemiche.

*Obiezione Seconda – Sotto-determinazione e Scetticismo:* Se proprietà osservabili emergono da relazioni piuttosto che inerire agli oggetti, e se ogni regime relazionale è tecnologicamente e cognitivamente determinato, come si evita scetticismo radicale circa possibilità di conoscenza genuina? La molteplicità di articolazioni possibili della realtà non mina la stessa idea di progresso scientifico?

La risposta richiede chiarificazione di cosa si intenda per «progresso». Se progresso è inteso come avvicinamento assintotico a descrizione veridica della realtà «in sé», allora effettivamente la posizione proposta nega tale concezione. Tuttavia, concezioni alternative di progresso rimangono disponibili: aumento di potenza predittiva; espansione di domini fenomenologici accessibili; unificazione di fenomeni precedentemente disconnessi; generazione di nuove domande investigabili; sviluppo di tecnologie che trasformano capacità operative.

Tali criteri di progresso sono pragmatisti piuttosto che corrispondentisti, ma non per questo meno robusti. Come Larry Laudan ha argomentato in *Progress and Its Problems* (University of California Press, 1977), la concezione corrispondentista di verità scientifica è sia metafisicamente problematica sia storico-scientificamente inadeguata (si consideri il «meta-induzione pessimistica»: teorie passate considerate vere furono successivamente abbandonate). Concezione problem-solving di progresso — capacità di risolvere problemi empirici e concettuali — fornisce criterio più adeguato per valutazione comparativa di teorie.

La sotto-determinazione delle teorie da parte dei dati — tesi secondo cui evidenza empirica disponibile è compatibile con molteplici teorie incompatibili — è problema reale ma non invalida l'impresa scientifica. Come Pierre Duhem aveva già osservato in *La théorie physique: son objet, sa structure* (1906), test empirici non falsificano mai teorie isolate ma sistemi teorici complessivi. Tuttavia, considerazioni di semplicità, unificazione, fecondità euristica forniscono criteri aggiuntivi per scelta razionale tra alternative empiricamente equivalenti.

*Obiezione Terza — Incommensurabilità e Comunicazione:* Il pluralismo ontologico — tesi che sistemi cognitivi differenti abitino mondi fenomenologici parzialmente incommensurabili — sembra minare possibilità di comunicazione e comprensione reciproca. Se culture scientifiche differenti, o epoche storiche differenti, articolano realtà radicalmente eterogenee, come è possibile dialogo razionale e traduzione tra framework?

Tale problema — versione della tesi kuhniana di incommensurabilità paradigmatica — è reale ma non fatale. Come Donald Davidson ha argomentato («On the Very Idea of a Conceptual Scheme», *Proceedings and Addresses of the American Philosophical Association* 47, 1974, pp. 5-20), l'idea stessa di «schemi concettuali» mutuamente intraducibili è incoerente: riconoscere X come linguaggio o sistema concettuale richiede già capacità di interpretazione minimale, che presuppone sovrapposizione significativa. L'incommensurabilità non può essere totale ma solo parziale e locale.

Empiricamente, storia della scienza dimostra possibilità di comprensione cross-paradigmatica: studiosi contemporanei comprendono meccanica aristotelica, teoria del flogisto, etere luminifero, sebbene tali framework siano stati abbandonati. Tale comprensione non è identificazione completa ma ricostruzione interpretativa che riconosce razionalità interna di sistemi concettuali passati pur rifiutandone contenuti empirici. Analogamente, comunicazione tra tradizioni scientifiche contemporanee differenti richiede lavoro interpretativo («trading zones» nella terminologia di Peter Galison, *Image and Logic*, 1997) ma è praticabile.

*Obiezione Quarta — Normività e Relativismo dei Valori:* Se la scienza è inscindibile da strutture socio-politiche e interessi extra-scientifici, e se ogni regime di validazione è storicamente situato, come si giustificano norme epistemiche vincolanti? La riflessività critica non conduce a relativismo normativo dove qualsiasi standard è legittimo quanto qualsiasi altro?

La risposta richiede distinzione tra relativismo descrittivo (riconoscimento che norme epistemiche variano de facto cross-culturalmente) e relativismo normativo (tesi che tutti gli standard sono ugualmente validi). La posizione qui proposta accetta il primo ma rigetta il secondo. Norme epistemiche — coerenza logica, adeguatezza empirica, riproducibilità, trasparenza metodologica — possiedono giustificazione pragmatica: si sono dimostrate produttive nella generazione di conoscenza affidabile e tecnologie funzionanti. Tale giustificazione non è a priori o trascendente ma emerge da storia di successi e fallimenti.

Come Philip Kitcher ha argomentato in *Science, Truth, and Democracy* (Oxford University Press, 2001), possibile concepire scienza ben-ordinata (*well-ordered science*) che integri rigore metodologico con responsiveness a valori democratici. Norme epistemiche non sono dettate da natura delle cose né sono arbitrarie, ma emergono da negoziazione riflessiva tra esigenze di affidabilità conoscitiva e considerazioni etiche-politiche. Tale approccio pragmatista-democratico preserva spazio per critica razionale di prassi scientifiche esistenti senza collassare in relativismo anarchico.

### 8.5 Prospettive: agenda per ricerca futura e trasformazione della pratica scientifica

L'articolazione del realismo relazionale critico non costituisce conclusione definitiva ma apertura di spazi di indagine ulteriori. Si identificano qui alcune direzioni promettenti per elaborazione teorica e trasformazione pratica.

*Direzione Prima — Epistemologia delle Scienze Specifiche:* L'analisi condotta si è concentrata prevalentemente su fisica fondamentale. Estensione sistematica ad altri domini — biologia, neuroscienze cognitive, scienze sociali, scienze del clima — richiede articolazione di come ontologia relazionale e co-dipendenza cognitiva si manifestino in contesti disciplinari differenti. Particolarmente urgente è analisi di scienze della complessità dove fenomeni emergenti resistono a riduzione e dove pluralità di scale temporali e organizzative genera sfide epistemiche specifiche.

*Direzione Seconda — Tecnologie Emergenti e Nuovi Regimi Fenomenologici:* Sviluppi in quantum computing, intelligenza artificiale, biotecnologie sintetiche, nanotecnologie generano non solo nuove capacità operative ma nuovi regimi fenomenologici che richiedono framework concettuali innovativi. Analisi epistemologica di come tali tecnologie trasformino condizioni di osservabilità e quindi articolazioni di realtà accessibili costituisce agenda urgente. Particolarmente significativo è caso di machine learning in analisi di dati scientifici: algoritmi che identificano pattern in dataset ad alta dimensionalità generano forme di «conoscenza» la cui interpretabilità e giustificazione epistemica rimangono problematiche.

*Direzione Terza — Governance Democratica della Ricerca:* Traduzione di riflessività critica in prassi istituzionali concrete richiede elaborazione di modelli di governance che bilancino autonomia scientifica con accountability democratica. Come incorporare considerazioni etiche e politiche in decisioni allocative senza compromettere rigore metodologico? Come garantire diversità di approcci senza frammentazione improduttiva? Come valutare ricerca a lungo termine in contesti di pressioni per impatto immediato? Tali questioni richiedono collaborazione tra filosofi della scienza, policy makers, practitioner scientifici.

*Direzione Quarta — Pedagogia Scientifica Riflessiva:* Formazione di scienziati che incorporino consapevolezza epistemologica circa natura situata della conoscenza scientifica richiede trasformazione curriculare. Educazione scientifica tradizionale presenta scienza come accumulo di fatti consolidati piuttosto che come pratica contestata e tecnologicamente mediata. Pedagogia riflessiva integrerebbe: storia e filosofia della scienza nel curriculum standard; analisi di casi di controversie scientifiche che rivelino ruolo di giudizi di valore; training in comunicazione scientifica che riconosca complessità epistemica; esposizione a tradizioni di ricerca alternative.

*Direzione Quinta — Filosofia della Scienza Naturalized:* Il realismo relazionale critico suggerisce necessità di filosofia della scienza che prenda sul serio risultati delle scienze empiriche — particolarmente scienze cognitive, neuroscienze, sociologia della scienza — nella formulazione di tesi epistemologiche. Come Willard Van Orman Quine aveva proposto («Epistemology Naturalized», in *Ontological Relati-*

*vity and Other Essays*, Columbia University Press, 1969), epistemologia dovrebbe essere continua con scienza empirica piuttosto che costituirne fondazione a priori. Tuttavia, ciò non implica riduzione di epistemologia a psicologia o sociologia ma piuttosto dialogo bidirezionale dove analisi filosofica e ricerca empirica si informino reciprocamente.

In conclusione, il realismo relazionale critico qui articolato propone riconcettualizzazione della conoscenza scientifica che preserva robustezza empirica pur riconoscendo situatezza costitutiva. La scienza così concepita non è diminuita nella sua autorità epistemica ma resa più onesta circa proprie condizioni di possibilità, propri limiti strutturali, proprie implicazioni socio-politiche. Una scienza riflessivamente consapevole — che riconosce mediazione tecnologica, co-dipendenza cognitiva, non-neutralità processuale — non è scienza indebolita ma scienza maturata: liberata dalla pretesa insostenibile alla verità assoluta, restituita alla vocazione di esplorazione fallibile, autocorrettiva, tecnologicamente mediata dei domini fenomenologici accessibili. Tale trasformazione epistemica non costituisce minaccia all'impresa scientifica ma sua potenziale rivitalizzazione — condizione di possibilità per scienza del XXI secolo adeguata alla complessità dei propri oggetti e alla responsabilità delle proprie implicazioni.

—

*Fine Capitolo VIII e conclusione del saggio*