

# Capire e comunicare la scienza

Conoscenze e scelte condivise  
in una società aperta

a cura di Franco Giudice

BIBLIOTECA DEGLI SCHOLARS «FRANCO ANELLI»

*Direttore*

Antonio Ballarin Denti

Pubblicazioni della collana:

1. *Testimonianze sul futuro. L'Università Cattolica si affaccia al suo secondo secolo*, a cura di A. Ballarin Denti
2. *Capire e comunicare la scienza. Conoscenze e scelte condivise in una società aperta*, a cura di F. Giudice

[www.vitaepensiero.it](http://www.vitaepensiero.it)

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633.

Le fotocopie effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da CLEARedi, Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali, Corso di Porta Romana 108, 20122 Milano, e-mail: [autorizzazioni@clearedi.org](mailto:autorizzazioni@clearedi.org) e sito web [www.clearedi.org](http://www.clearedi.org)

© 2024 Vita e Pensiero - Largo A. Gemelli, 1 - 20123 Milano  
ISBN 978-88-343-5724-8

GIUSEPPE TANZELLA-NITTI

## Congestture, previsioni e risultati in astronomia e astrofisica

### *Introduzione*

Il rapporto fra scienza e comunicazione ha conosciuto nelle ultime decadi sviluppi e trasformazioni. Il finanziamento pubblico della ricerca scientifica, per esempio, dipende oggi assai più che in passato dal consenso mediatico e dalla capacità degli scienziati di mettere in campo argomenti capaci di attrarre l'interesse dell'opinione pubblica. Quasi tutti gli Enti e gli Istituti di ricerca si sono muniti di un ufficio comunicazione proprio, facendo sì che la 'comunicazione scientifica' diventasse un curriculum universitario proposto in master e lauree specialistiche. La scienza – o ciò che si desidera le assomigli – è divenuta oggetto di strategie di comunicazione per fini di marketing, e per questo introdotta in vari ambiti della vita quotidiana, come il benessere, l'alimentazione e la produttività. Ne è risultata, con il tempo, anche una certa modificazione delle immagini della scienza e dello scienziato, con un ruolo che oscilla fra ottimismo e catastrofismo. È alla scienza, in definitiva, che si pensa quando si affrontano dibattiti di grande attualità, come l'intelligenza artificiale, la cura dell'ambiente, la difesa dalle pandemie, le nuove tecnologie, ma anche i nuovi armamenti.

Si parla così di 'cittadinanza scientifica', o anche della necessità di un'educazione civica alla scienza (Pitrelli - Tallacchini, 2023). La politica e la comunità civile hanno infatti bisogno di conoscere da vicino i risultati e il modo di lavorare della scienza per effettuare le loro scelte e orientare gli sviluppi futuri della società. Ciò si realizza, di solito, mediante l'aiuto di consulenti e di esperti, ma il desiderio di una più diffusa maturità scientifica, necessaria per l'esercizio stesso della democrazia, suggerisce una competenza più estesa, specie in temi quali l'energia nucleare, la responsabilità ecologica o alcune questioni di bioetica.

Non va infine dimenticato che la comunicazione scientifica e la divulgazione dei risultati delle scienze continuano a esercitare importanti ricadute sulla società e sulla cultura anche in ciò che potremmo chiamare l'aspetto 'ideale' delle scienze. Il grande pubblico non ha perso interesse per le *big questions* che ripropongono i grandi interrogativi sull'origine e sull'evoluzione del cosmo, sull'origine della vita e la sua eventuale diffusione nell'universo, sull'evoluzione dell'essere umano sul nostro pianeta (Swain, 2003). Complice un modo rinnovato e accattivante di comunicare, con queste tematiche la divulgazione scientifica riempie tuttora gli scaffali dei bookstore, ispira serie TV e film di successo, prolifera nella documentazione offertaci sul web.

È facile riconoscere che in tutti gli ambiti appena ricordati sorgono con una certa frequenza questioni della massima importanza: il rapporto fra comunicazione scientifica e verità, la necessità di traduzioni fra linguaggi diversi, i modi di valutare le fonti, ma anche, più semplicemente, la differenza fra congetture e teorie, fra risultati provvisori o *in progress* e conoscenze acquisite. Le brevi riflessioni che intendo qui sviluppare mirano a chiarire proprio alcune di tali questioni, impiegando come ambito di discussione quello delle *big questions* e della loro portata filosofico-culturale, limitatamente al campo della cosmologia e dell'astrofisica.

### *1. Impatto mediatico e sociale delle ricerche di ambito astronomico e astrofisico*

La ricerca in astronomia, astrofisica e cosmologia, insieme alla tecnologia spaziale che ne sostiene ormai gran parte degli studi, rappresenta uno dei settori scientifici di maggiore impatto mediatico sul pubblico. I contenuti associati a questo ambito di ricerca – siano essi frutto di divulgazione attenta e documentata oppure di giornalismo frettoloso e sensazionalista – posseggono comunque un alto grado di recettività. Vediamo quali sono gli aspetti che sembrano favorire l'impatto di queste scienze sull'opinione pubblica.

Un primo aspetto riguarda il carattere fortemente *estetico* del loro oggetto. Pensiamo alle ricostruzioni pittoriche provenienti dai grandi telescopi spaziali, lo Hubble Space Telescope (1990), il James Webb Space Telescope (2021) e, più recentemente, Euclid (2023). Le loro immagini ci hanno immerso in ammassi di galas-

sie lontani centinaia di milioni, talvolta miliardi di anni luce dall'osservatore, ci hanno mostrato le nebulose della nostra Via Lattea con un dettaglio e un grado di risoluzione mai raggiunto prima. La bellezza straordinaria di queste ricostruzioni fotografiche – si tratta quasi sempre di immagini composte fra loro e ricostruite in modo digitale con codici cromatici – si è imposta in molti canali di comunicazione per venire poi riproposta in innumerevoli scenografie. Provenienti da una distanza minore, ma non meno spettacolari, sono le immagini rese possibili dalle missioni spaziali, sia umane sia automatiche, realizzate in orbita intorno alla terra o in direzione degli altri corpi del sistema solare. Siamo stati in grado di osservare da vicino il suolo del pianeta Marte, abbiamo seguito dal vivo l'impatto di una cometa sul pianeta Giove, siamo stati invitati a navigare fra gli anelli di Saturno e a esplorare da vicino il suolo dei suoi satelliti, siamo atterrati con le nostre sonde automatiche su asteroidi grandi quanto un campo da calcio.

L'astronomia e la cosmologia ci fanno riflettere su quale sia la 'posizione' dell'essere umano nel cosmo, la sua collocazione fisica nell'universo osservabile ma anche la possibilità di recarsi, in modo più o meno stabile, su altri corpi celesti (ritorno sulla Luna, esplorazione di Marte, migrazioni su altri pianeti...). Diversa la percezione del cosmo secondo i diversi registri di comunicazione: come ambiente favorevole, ricco di risorse e disponibile a generare uno sviluppo economico capace di diventare in pochi decenni il primo booster dell'economia mondiale (*space economy*), oppure come ambiente ostile, luogo di eventi che potrebbero rivelarsi catastrofici per la nostra esistenza.

Attraverso questi scenari, il grande pubblico sembra ritrovare interesse verso le grandi domande, talvolta disattese dai filosofi della contemporaneità, che accompagnano da sempre la ricerca scientifica sul cosmo: Siamo frutto del caso o di qualche finalismo? Siamo soli nel cosmo o abbiamo altri compagni di viaggio? Da dove veniamo e verso dove andiamo? Oggi come in passato, l'impatto mediatico di queste domande è sostenuto dalla letteratura e dal cinema. Ci riferiamo sia alla letteratura di fantascienza e ai romanzi di grande diffusione, come sono stati per esempio quelli di Isaac Asimov (1920-1992), sia a opere colte di alto contenuto filosofico, come i romanzi di C.S. Lewis (1898-1963). Innumerevoli, poi, i film di successo con i quali la scienza entra in contatto con il pubblico a partire da temi di frontiera nell'ambito del-

la fisica e della cosmologia: *2001 Space Odyssey* (1968) avvia il dibattito del rapporto fra uomo e macchina, *Contact* (1997) introduce il ruolo della religione nella ricerca di vita extraterrestre, *Interstellar* (2014) inserisce la visione relativistica dello spazio-tempo nei grandi temi dell'esistenza come la vita, la morte e l'amore.

La fisica e la cosmologia conquistano gli spazi della comunicazione anche per il valore 'controintuitivo' della loro descrizione del mondo, che pone forti sfide al senso comune. Se la meccanica quantistica e la relatività generale ci hanno abituato a pensare in termini di paradossi – fenomeni di non località, sovrapposizione di vari mondi possibili, contrazione dello spazio-tempo –, l'astrofisica ci presenta l'inconsueta fisica dei *black holes* e la cosmologia ci pone di fronte agli enigmi della materia oscura e dell'energia oscura; la fisica delle particelle e la teoria dei campi ci obbligano a confrontarci con fenomeni che avvengono in un mondo invisibile, soggetto solo a misure indirette e ricostruzioni che dipendono dalle specifiche teorie che assumiamo per poterlo studiare. Siamo costretti a ragionare in termini di tempi e di spazi, di densità, di temperature e di energie semplicemente *non immaginabili*. Ciò rende la comunicazione attraente, ma anche tremendamente difficile, perché costretta a 'immaginare' ricorrendo a metafore, come quelle che la ricerca scientifica inevitabilmente impiega nel suo lavoro.

Si giunge così all'inaspettato paradosso che le discipline scientifiche che affrontano le domande filosoficamente ed esistenzialmente più importanti – come è fatta la materia?, qual è il nostro ruolo nel cosmo?, qual è l'origine del nostro universo? – siano anche quelle che debbano maggiormente ricorrere a paradigmi cangianti e a scenari di difficile rappresentazione. Non sorprende, allora, che alcuni autori abbiano suggerito che nelle grandi narrazioni della scienza l'impiego del linguaggio del mito diviene non solo una possibilità, ma perfino una necessità (Capasso, 2022; Hesse, 1988; Ivanova - French, 2020).

## *2. Osservabilità, riproducibilità, esperienza: alcune particolarità della ricerca astrofisica e cosmologica*

Analogamente alla prassi seguita in altri settori sperimentali, chi studia la fisica dei corpi celesti (astrofisica) e l'universo nel suo in-

sieme (cosmologia) formula delle ipotesi e ne valuta le conseguenze osservabili, applicando ciò che viene comunemente chiamato metodo ipotetico-deduttivo. Nell'impiego di questo metodo, poi, è importante saper distinguere quali diverse cause (note o sconosciute) potrebbero dar luogo agli stessi effetti, perché a volte dall'osservazione di un effetto non è sempre possibile risalire in modo apodittico all'esistenza di una sola causa capace di determinarlo<sup>1</sup>. Quando le ipotesi propongono grandi *visioni totalizzanti*, giungendo talvolta a proporre ciò che i fisici chiamano *teorie del tutto*, il metodo ipotetico-deduttivo diviene sempre meno praticabile. Quando cosmologia e astrofisica puntano a concettualizzare l'universo nel suo insieme, come un unico oggetto, l'attesa di conferme sperimentali diventa più problematica, talvolta impossibile. Se la scala della grande maggioranza dei fenomeni astrofisici non consente la loro riproducibilità in laboratorio, la cosmologia ha un oggetto per definizione non riproducibile, l'intero cosmo fisico. In merito al contenuto veritativo delle visioni cosmologiche totalizzanti, diviene allora importante riconoscere con che tipo di 'insufficienza' sperimentale abbiamo a che fare: si tratta di dati che potranno un giorno arrivare (insufficienza sanabile), o si tratta, invece, di conferme che non potremo mai ottenere (insufficienza insanabile)?

La 'teoria di unificazione delle forze' (Grand Unifed Theory, GUT), che certamente appartiene a una classe di visioni totalizzanti, ammette una controparte sperimentale: le insufficienze sperimentali che tuttora ci impediscono di confermarla in modo esauriente sono pertanto da qualificare come 'sanabili'. Come è noto, le GUT ricercano un quadro teorico capace di unificare gravitazione, elettromagnetismo, forza nucleare debole e forza nucleare forte, impiegando il formalismo della meccanica quantistica e della relatività generale (Davies, 1986). La scoperta delle onde gravitazionali ci dice che siamo sulla strada giusta, ma i nostri accelerato-

---

<sup>1</sup> Se, per esempio, formulo l'ipotesi che vi sia un pianeta extrasolare opaco in rotazione intorno a una stella e che questo pianeta abbia specifiche caratteristiche (diametro, massa), posso dedurre quale sarà la curva di luce teorica cui dovrebbe soggiacere la stella durante il passaggio del pianeta opaco sul suo disco luminoso e confrontarla con le curve di luce sperimentali. Tuttavia, potrebbero esserci anche altre cause che diano origine a quella medesima curva di luce (variazioni di luminosità intrinseca della stella o altro); per affermare l'esistenza del pianeta in rotazione, queste altre cause dovranno essere accuratamente escluse formulando altre ipotesi e compiendo altre osservazioni.

ri di particelle non raggiungono ancora un'energia sufficiente per scoprire se esistono o meno i 'gravitoni', cioè le particelle responsabili di trasmettere la forza di gravità in un modello di gravità quantizzata. Nei decenni passati avevamo ottenuto conferme sperimentali per giustificare dei quadri di unificazione parziale delle forze, come in occasione della verifica dell'unificazione elettro-debole, realizzata nel 1983 al CERN a Ginevra, con la scoperta dei bosoni di scambio W e Z, un risultato che valse il premio Nobel nel 1984 a Rubbia e a van de Meer, dopo il Nobel assegnato nel 1979 a Salam, Weinberg e Glashow nel quadro della stessa teoria.

Diverso è il caso, invece, di quelle visioni totalizzanti che puntano a una descrizione completa e autosufficiente del cosmo fisico mediante una 'teoria del tutto' (Theory of Everything, TOE). Scopo di un simile quadro teorico è individuare una rappresentazione formale globale dalla quale dedurre il *perché ultimo* dell'esistenza del tutto, ovvero di ogni cosa: leggi di natura, massa-energia, geometria, spazio-tempo (Hawking, 2015). Il 'tutto' al quale una TOE fa riferimento opera pertanto in ambito sia fisico sia cosmologico. Il punto importante è che, nelle TOE, l'assenza di verifiche sperimentali rappresenta un'insufficienza 'insanabile', fino a divenire una questione di principio. Una 'teoria del tutto', infatti, sembra ignorare due ragioni filosofiche fondamentali. La prima è che la scienza lavora con quantità misurabili, e dunque deve partire da qualcosa di *dato*. Lo studio delle trasformazioni, oggetto della scienza, presuppone un'ontologia, una filosofia dell'essere. In una 'teoria del tutto', la scienza dovrebbe dare ragione dei suoi stessi presupposti, logici e ontologici: sarebbe come chiedere a una sintassi di dare ragione della semantica che vi associamo, o al linguaggio di dare ragione delle intenzioni che esprimiamo attraverso di esso. La seconda ragione è che un 'discorso sull'intero' non è praticabile dalle scienze empiriche, semplicemente perché l'*intero* non è oggetto di esperienza (Agazzi, 1991). L'intero può essere solo oggetto di riflessione metafisica, e dunque filosofica: quando la cosmologia fisica tenta di concettualizzarlo, sta inconsapevolmente assumendo un discorso filosofico, come riconoscono talvolta i cosmologi di professione nelle prefazioni ai loro volumi (Coles - Lucchin, 1995).

La centralità che il rapporto con le osservazioni possiede nella pratica del metodo scientifico, porta alla distinzione fra 'cosmologia osservativa' e 'cosmologia teorica'. La prima prevede degli 'os-

servabili', cioè resta sempre disponibile a osservazioni, dirette o indirette, di conferma. La seconda può invece lavorare anche solo sulla consistenza fisico-matematica dei 'modelli di universo'. A seconda della specifica geometria spazio-temporale nella quale ci si colloca e dei parametri prescelti per le equazioni di campo gravitazionale, i modelli di universo possono diventare numerosissimi, dando origine a 'famiglie di soluzioni'. Come la matematica o altre discipline squisitamente teoretiche, anche la cosmologia non osservativa è materia estremamente importante, ma possiede un rapporto assai peculiare con la realtà dei fatti (Heller, 2011). Quando radicalizzata, essa potrebbe perfino non prevedere degli osservabili, trasformandosi così in una *if-then science*: se (*if*) si danno certi presupposti parametrizzati, allora (*then*) si ottengono alcuni modelli di universo. In senso stretto, questi ultimi non sono risultati (*evidence*), né rappresentano una 'scoperta', ma indicano dei semplici 'output'.

Modelli di infiniti universi, ciascuno sviluppatosi in regioni spazio-temporali indipendenti e incomunicabili, possono essere un output, ma non un risultato che attenda di essere confermato dall'esperienza. Una TOE come quella prevista dai modelli di Hartle e Hawking, che prevedono un universo auto-contenuto senza alcuna dipendenza dal tempo, formulando la congettura che il tempo possa opportunamente venire trasformato in una variabile immaginaria, è una teoria consistente ma inverificabile (Hartle - Hawking, 1983). In senso stretto, anche per i modelli che prevedono una singolarità spazio-temporale iniziale, non è possibile dare una dimostrazione scientifica di cosa sia questa *singolarità*, semplicemente perché la nostra fisica, per mancanza di leggi consistenti, non può essere applicata a lunghezze inferiori a  $10^{-33}$  centimetri e a tempi più brevi di  $10^{-43}$  secondi. I 'modelli di universo in espansione' generano però degli osservabili, suscettibili di essere poi tradotti in esperimenti e in programmi di osservazione. Possiamo così verificare che il nostro universo è davvero transitato da fasi di altissima densità e altissima temperatura verso fasi di progressiva strutturazione e graduale raffreddamento, o anche verificare se la sua espansione sarà crescente e indefinita, si fermerà, oppure invertirà il suo verso, dando luogo a un collasso gravitazionale di tutto il cosmo.

In astrofisica, come anche in altre discipline, la disponibilità di super calcolatori ha causato un enorme progresso nella ricerca

scientifico, consentendo di lavorare mediante simulazioni che sostituiscono le osservazioni con risultati computazionali. La sperimentazione non è esclusa, ma viene messa in secondo piano, perché non disponibile o perché troppo costosa. Ma a volte può essere dimenticata. Nella comunicazione scientifica occorre allora ricordare che la ‘realtà’ che vogliamo studiare è stata fatta oggetto di una massiva modellizzazione e che i ‘risultati’ sono un output prodotto dalla simulazione di modelli. La comunità scientifica è consapevole di questo stato di cose e manifesta il desiderio di orientare i metodi di simulazione computazionale verso la predizione sperimentale, come deve essere (Bisikalo et al., 2023).

### 3. *Saper riconoscere le condizioni necessarie e/o sufficienti che concorrono alla comparsa di un fenomeno*

Nella comunicazione scientifica, specie quando rivolta al grande pubblico, riveste un’importanza particolare distinguere in modo accurato quando siamo in presenza di condizioni soltanto *necessarie* per l’occorrenza di un certo fenomeno, e quando, invece, conosciamo le condizioni *necessarie e sufficienti* per determinarlo<sup>2</sup>. Se la scoperta di elementi che costituiscono le condizioni solo necessarie per l’accadimento di un certo fenomeno viene presentata come prova sufficiente a mostrare che questo fenomeno veramente si è dato o potrà darsi in futuro, non si sta comunicando in modo corretto: ciò equivarrebbe a proporre come conclusione certa ciò che non lo è.

È importante ricordare che solo conoscendo *simultaneamente* le condizioni necessarie e sufficienti che danno origine a un fenomeno, si sarà in grado di computare, all’interno di certa teoria, la probabilità che quel determinato fenomeno accada. Per calcolare

---

<sup>2</sup> Per formare un cristallo di ghiaccio è *necessaria* la presenza di atomi di idrogeno e di ossigeno, *ma non è sufficiente* averle sotto forma di molecole d’acqua: occorrono anche specifiche condizioni di pressione e di temperatura che determinino la transizione di fase da acqua liquida a ghiaccio solido. In condizioni ordinarie di pressione, portare l’acqua a 100 °C è già condizione *necessaria e sufficiente* per l’ebollizione e il passaggio dallo stato liquido allo stato gassoso. Affinché l’evoluzione di stella termini in una supernova è necessario che si esaurisca la combustione nucleare degli elementi leggeri (H, He), ovvero la stella non produca più energia radiativa. Tuttavia, ciò *non è sufficiente*: soltanto se la stella ha una massa più grande di circa 8 Masse solari allora potrà collassare e poi subito esplodere, dando origine a una supernova.

la probabilità di un certo evento è infatti indispensabile conoscere tutti gli elementi che vi concorrono. Per quanto raffinata sia la teoria della distribuzione statistica messa in campo, se non conosciamo tutti gli elementi in gioco non potremo *predire* quel particolare fenomeno. Quando ignoriamo i nessi causali che conducono a un certo fenomeno e che ci permetterebbero di prevederlo per deduzione logica, siamo portati a prevedere il suo accadimento solo per inferenza statistica, cioè mediante la raccolta di molti dati. È questo il modo di lavorare delle intelligenze artificiali, che non ragionano in termini di ipotesi creative da verificare, ma misurano solo l'enorme quantità di dati di cui si nutrono. La comunicazione scientifica è talvolta tentata a sorvolare questo aspetto, offrendo come conoscenza certa ciò che non lo è. Solo la simultanea conoscenza delle sue condizioni necessarie e sufficienti, retta da nessi causali, è in grado di dirci che abbiamo 'capito' un fenomeno, e ci pone in grado di affermare quando esso si potrà dare in natura.

Uno degli ambiti ove una trasposizione da condizioni necessarie a condizioni necessarie e sufficienti è presentata con maggiore facilità – e il ruolo delle inferenze statistiche impiegato oltre la portata del loro reale significato – riguarda il fenomeno della *vita biologica*: la sua origine sul nostro pianeta (abiogenesi), la sua presenza su pianeti diversi dalla Terra (vita nel cosmo, pianeti extrasolari), il posto che la vita, e la vita intelligente, occupa nell'universo (Principio antropico e, in parte, *intelligent design*).

La presenza di acqua e di carbonio, condizioni necessarie per avere delle forme di vita *earth-like*, o la statistica derivante dall'enorme quantità di stelle nella nostra e in altre galassie aventi dei pianeti orbitanti, divengono per molti divulgatori scientifici osservazioni adeguate per concludere che la vita nel cosmo sia un fenomeno assai diffuso, con tutte le conseguenze che ne derivano. Così, anche la scoperta di pianeti extrasolari nella 'zona abitabile' intorno a una certa stella viene non di rado presentata come dimostrazione dell'alta probabilità che la vita brulichino da tempo in questi scenari. È noto come il calcolo della probabilità di avere vita intelligente nel cosmo sia stato per molto tempo legato al computo dei valori forniti dall'equazione che Frank Drake formulò nel 1961 (Drake, 1961; Vakoch - Dowd, 2015). Tale equazione, basata sul prodotto di alcuni parametri che misurano condizioni *necessarie* a ospitare la vita intelligente, è stata a lungo proposta come for-

mula che computava il numero di civiltà effettivamente esistenti nel cosmo. Anche il ‘Principio cosmologico antropico’ (Barrow - Tipler, 2002), che riunisce in modo sistematico la scoperta di una serie di coincidenze cosmiche risultate a posteriori favorevoli alla vita (per esempio, i rapporti numerici fra le costanti di natura associate alle forze fisiche fondamentali, o le circostanze che hanno condotto alla produzione di determinati elementi chimici, nei luoghi giusti al momento giusto...), viene prospettato come dimostrazione che la comparsa della vita sia un fenomeno verso cui l’universo inevitabilmente punta. Anche in questo caso, come nei precedenti, si lascia giocare alle condizioni *necessarie* perché ci sia vita, o perché ci sia vita intelligente, il ruolo di condizioni *necessarie e sufficienti* per poterla originare, su un determinato pianeta o nell’intero panorama del cosmo, dimenticando che ancora non conosciamo perché la vita compaia, né quali siano gli elementi sufficienti alla sua comparsa<sup>3</sup>.

Ai fini di una corretta divulgazione scientifica risulta interessante distinguere, nella presentazione del Principio antropico, ciò che appartiene ai dati e dunque riguarda *risultati* da tutti condivisibili, da ciò che riguarda invece quadri filosofici che trascendono i dati, sebbene ricevano da essi delle suggestioni. Tale distinzione è stata introdotta dagli stessi cosmologi, che hanno sentito il bisogno di distinguere fra Principio antropico *weak* e Principio antropico *strong* (Carter, 1974).

Il primo (WAP) mette in evidenza che numerose caratteristiche fondamentali del nostro universo (costanti di natura, leggi fisiche, proprietà delle particelle elementari ecc.) non posseggono un qualsivoglia valore numerico, ma presentano dei valori fra loro sintonizzati (*fine tuning*), che consentono all’universo di sussistere e di generare ambienti adatti a ospitare la vita. Dai delicati rappor-

---

<sup>3</sup> Dal punto di vista epistemologico può essere interessante notare che il Principio antropico è però in grado di fare anche alcune ‘previsioni’ ed è questo il motivo per cui gli scienziati cominciarono a occuparsene nella seconda metà del Novecento. Esso prevede per esempio il valore dell’età minima del nostro universo (tale che al suo interno si siano sviluppati osservatori intelligenti); è anche in grado di prevedere l’esistenza di livelli eccitati degli atomi di carbonio e di ossigeno necessari a favorire la sintesi dell’elio e la produzione del carbonio (elemento necessario alla vita); prevede inoltre che debbano esistere fenomeni capaci di produrre elementi chimici più pesanti del ferro, anch’essi necessari alla vita ma non originati nella nucleosintesi delle stelle – un fenomeno che, come sappiamo, si dà di fatto nell’esplosione delle supernovae; e altre previsioni ancora.

ti di quei valori dipendono infatti la formazione di galassie, quella delle stelle e dei pianeti, la distribuzione delle masse e delle atmosfere stellari secondo sequenze opportune, la stabilità dei nuclei atomici, e altre caratteristiche del nostro cosmo. A livello di analisi empirica, i risultati segnalati dal WAP posseggono uno scarso valore filosofico, trattandosi di occorrenze fattuali. La sintonia numerica e la concatenazione fisica delle cause non fa accedere ad alcun finalismo intenzionale, ma solo a delle coincidenze cosmiche di carattere originario, non selezionate in sede evolutiva, condizioni *necessarie* per strutturare il cosmo così come lo conosciamo e dare origine a nicchie fisico-chimiche adatte a ospitare la vita.

Il secondo (SAP) possiede invece uno specifico peso filosofico e intende presentare la formazione della vita, e della vita intelligente (osservatori), come lo scopo finale dell'esistenza e dell'evoluzione del cosmo, quasi il suo prodotto inevitabile. Tale prospettiva non è richiesta dai dati scientifici, ma esprime solo un tentativo di interpretazione totalizzante del cosmo nel suo insieme, peraltro suscettibile di interpretazioni opposte: l'universo mostrebbe un finalismo totalmente immanente a sé stesso (lettura naturalista-materialista) oppure manifesterebbe l'esistenza di un'intenzionalità trascendente che ne ha causato l'esistenza e ne ha progettato l'evoluzione fisica e biologica (lettura teista). Si comprende bene che solo il SAP può essere presentato come *Principio*, mentre il WAP di fatto non lo è; e si comprende anche che l'aggettivo 'antropico' non è di pertinenza del WAP, trattando quest'ultimo le condizioni necessarie alla comparsa della vita, non alla comparsa di osservatori intelligenti (Tanzella-Nitti, 2002a). Il WAP, infine, potrebbe essere a ragione presentato come un insieme di risultati in *consonanza* con l'ipotesi di una Intelligenza creatrice che trascende il cosmo, ma certamente non come una dimostrazione razionale della sua esistenza. Non siamo infatti in presenza di alcuna deduzione, ma solo di un'abduzione: se esistesse un'Intelligenza personale che trascende il cosmo e lo crea, allora l'aspetto 'progettuale' del cosmo sarebbe un suo effetto osservabile.

#### 4. *Congetture, previsioni, scoperte scientifiche e visioni filosofiche*

Mantenendo come campo di riflessione quello della ricerca scientifica in campo astrofisico e cosmologico, al grande pubblico giun-

ge non solo la comunicazione di risultati e di scoperte scientifiche, ma anche quella di congetture, visioni apriori e prospettive filosofiche di vario genere. Non è sempre facile distinguere le une dalle altre, specialmente, come abbiamo visto, quando si veicolano visioni totalizzanti. Come in ogni ramo della ricerca vi sono congetture che danno origine a previsioni accurate le quali, verificate con successo, si tramutano in nuove acquisizioni. Fin dalla sua origine, l'astronomia ha sempre cercato di trasformare il moto regolare dei cieli in previsioni osservative, all'inizio servendosi solo dell'induzione, poi, con la progressiva scoperta delle leggi fisiche, mediante ragionamenti deduttivi. Con il tempo, le congetture possono trasformarsi in previsioni grazie alla messa in campo di una teoria fisica consistente, e le previsioni potranno poi trasformarsi in scoperte; le visioni apriori e i modelli teoretici, se non posseggono grandezze osservabili, resteranno invece sempre tali.

Nella comunicazione dei risultati scientifici compaiono talvolta pre-comprensioni di taglio idealista, che appartengono al genere di *visioni apriori*, non fondate empiricamente<sup>4</sup>. Si pensi, per esempio ad affermazioni come: esistono infiniti universi fra loro incomunicabili (*multiverse* o *many-universes models*); non vi è bisogno di alcun Creatore per dare origine all'universo; la comparsa della vita nel cosmo è frutto del caso; l'essere umano è il risultato necessario dell'evoluzione cosmica. Degno di nota, per la comunicazione scientifica, il fatto che la visione dei *many-universes* venga affiancata quasi sempre all'esposizione delle 'coincidenze cosmiche' associate al Principio antropico, allo scopo di rimuoverne l'eventuale significato filosofico. A chi risultasse sorpreso dal fatto che il nostro universo risulti così bene sintonizzato sulle condizioni necessarie alla vita, gli si assicura che il nostro universo è solo, casualmente, uno dei tanti.

Come visto in precedenza, l'interazione fra scienza e filosofia è particolarmente intensa quando si lavora nell'ambito delle teorie cosmologiche. I modelli cosmologici descrivono la storia dell'universo (dimensioni, densità, dinamica globale) e ne indicano, se così lo prevedono, lo sviluppo nel tempo. I modelli sono frutto di

---

<sup>4</sup> Si noti, tuttavia, la differenza fra 'precomprensioni idealiste' e 'presupposti filosofici della conoscenza scientifica'. Questi ultimi sono i presupposti di ambito metafisico, logico, ontologico o anche antropologico i quali, consistenti con una filosofia di taglio realista, rendono la scienza possibile, sebbene siano indimostrabili dall'interno del metodo scientifico.

una specifica teoria (in genere basata su dati osservativi) e devono essere in grado di fare predizioni, affinché il metodo scientifico possa discriminare quale sia il modello ‘giusto’. Maggiore pretesa di onnicomprensività possiede il modello, maggiori saranno le premesse filosofiche implicite e minore la sua disponibilità a generare osservabili. I modelli cosmologici ‘non partono da zero’, ma devono sempre trattare grandezze quantitative (spazio-tempo, geometria, leggi fisiche ecc.); inoltre, essi assumono come ‘ricevuti’ il fondamento ontologico del reale fisico e le sue specificità formali (leggi di natura, razionalità ecc.).

Lo stretto rapporto con la dimensione filosofica meta-empirica ha condotto alcuni autori a introdurre conclusioni teologiche innecesarie nella proposta al pubblico di alcuni di questi modelli. Così i modelli di Big Bang, che prevedono una singolarità spazio-temporale iniziale, sono stati talvolta commentati come prova di una creazione dell’universo dal nulla, o comunque come rappresentazioni in piena sintonia con esso. I modelli di universo di stato stazionario o i modelli di universo auto-contenuto, che rimuovono la dipendenza del tempo in prossimità della singolarità, sono stati invece adottati come giustificazione che non vi sia bisogno di un Creatore (Hawking - Mlodinow, 2011). Modelli cosmologici quantistici che descrivono la comparsa del nostro universo dalla fluttuazione del vuoto associato al campo gravitazionale quantizzato sono stati invocati da alcuni come dimostrazione che non vi è necessità di presupporre una ‘creazione divina dal nulla’, da altri come modelli che la renderebbero invece del tutto plausibile. Tutti questi esempi, è facile notarli, mostrano una scarsa comprensione dell’immagine trascendente che la teologia associa a Dio creatore e un impiego per nulla accurato dei vari livelli di causalità – materiale, formale, efficiente, intenzionale – con i quali una filosofia della natura e un’opportuna ontologia descriverebbero la realtà (Tanzella-Nitti, 2002b).

Con il termine *congetture* indichiamo delle ipotesi verificabili, e dunque congruenti con il metodo scientifico; la loro formulazione poggia su osservabili, fisici o cosmologici, o almeno poggia sull’idea che all’interno di un certo quadro teoretico degli osservabili esistano davvero, sebbene non siano stati ancora definiti in modo rigoroso. Fra queste potrebbe essere inclusa, per esempio, la congettura dei *baby universes* (Hawking, 2000), la quale ipotizza che in prossimità dell’epoca di ‘inflazione’ si sarebbero originate dall’universo appena venuto in essere molteplici regioni spazio-tempo-

rali divenute poi fra loro indipendenti: al loro interno (se il nostro fosse uno di questi) esisterebbero però degli osservabili, dei residui del fenomeno di *splitting*, che si potrebbero rintracciare e misurare. Appartiene al genere delle congetture anche l'affermazione che nell'universo esista vita extraterrestre, anche intelligente, trattandosi di un'occorrenza verificabile, se avremo fortuna.

Le *previsioni* sono lo snodo tipico di ogni buona attività scientifica. Esse toccano aspetti emblematici del lavoro degli astronomi e degli astrofisici. Una volta confermate sperimentalmente, le previsioni sono lecitamente presentate come *scoperte*. Ne conosciamo molti esempi illustrativi, nel passato come nel presente. La scoperta del pianeta Nettuno, osservato nel 1846 da G. Galle e H. d'Arrest, ricercatori motivati dai calcoli effettuati l'anno prima da U. Le Verrier. La scoperta della deflessione dei raggi luminosi dovuta alla curvatura dello spazio-tempo in prossimità di campi gravitazionali intensi, prevista dalla relatività generale di Einstein, confermata da Arthur Eddington osservando l'eclissi di Sole del 29 maggio 1919, e poi più volte rilevata nelle fotografie dei telescopi spaziali, ove può notarsi la deflessione dei raggi luminosi provenienti da sorgenti lontane quando osservate lungo la stessa linea di vista di ammassi di galassie a noi più vicini. La curvatura dello spazio-tempo intorno al Sole verrà poi riconfermata dalle misure della precessione del perielio di Mercurio, realizzata con precisione progressiva fino ai nostri giorni. Si è poi trasformata in scoperta la previsione dei *black holes*, teorizzati nel 1916 da K. Schwarzschild come 'soluzione' del collasso gravitazionale indefinito di una massa, la cui esistenza in astrofisica è stata progressivamente dedotta, a partire dagli anni Settanta del Novecento, sia dall'osservazione delle stelle binarie con una componente collassata, sia dalla fenomenologia di molti nuclei galattici attivi; di un buco nero abbiamo poi ottenuto nel 2019 anche una 'immagine indiretta', fotografando per la prima volta l'anello di accrescimento che circonda il buco nero al centro della galassia M87. Ai giorni nostri, un bell'esempio di congettura tramutatasi prima in ipotesi rigorosa e poi in verifica sperimentale è rappresentato dalla scoperta delle onde gravitazionali avvenuta il 14 settembre 2015 grazie agli interferometri del Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) negli Stati Uniti, a Livingston (Louisiana) e Hanford (Washington), successivamente confermate dal nostro interferometro VIRGO, European Gravitational Observatory (EGO) gestito

dall'INFN a Cascina (Pisa); l'emissione di queste onde, prevista anch'essa dalla relatività generale come perturbazione dello spazio-tempo quando il campo gravitazionale viene trattato come un campo elettromagnetico, è dovuta a variazioni repentine di enormi masse, come accade per esempio nella collisione di stelle di neutroni massicce oppure nell'esplosione di supernovae.

Al tempo stesso, chi lavora in astrofisica sa bene che esiste anche un altro genere di scoperte. Sono quelle che non procedono dalla verifica di previsioni formulate entro quadri teorici ragionevoli o consolidati, ma accadono casualmente, per *serendipity*, come risultato della curiosità o di osservazioni inaspettate. Ne sono esempi famosi: la scoperta della legge periodo-luminosità nelle stelle variabili pulsanti di tipo Cefeide, dovuta a miss H.S. Leavitt nel 1912; la scoperta del fondo di radiazione cosmica, il *cosmic microwave background* (CMB) alla temperatura di 2,7 °K, rilevato casualmente da Arno Penzias e Robert Wilson nel 1964, radiazione prevista da George Gamow nel 1948 (a una temperatura poco superiore) però mai cercata sistematicamente; la scoperta delle pulsar, stelle di neutroni rotanti, realizzata nel 1967 a Cambridge da miss Jocelyn Bell Burnell, che però causò un controverso premio Nobel ad A. Hewish e M. Ryle nel 1974.

Infine, come in altre discipline, anche in astrofisica e in cosmologia possiamo distinguere due tipi di risultati: quelli indipendenti dalle teorie fisiche adottate o dai modelli cosmologici impiegati, e quelli che dobbiamo inevitabilmente ritenere *theory-laden*, cioè dipendenti dalle teorie e dai modelli adottati, e dunque suscettibili di diverse interpretazioni. Il fatto, per esempio, che vi sia una certa 'energia oscura' dipende in certa misura anche dal quadro generale di riferimento che assumiamo per la nostra comprensione dello spazio-tempo; così, l'affermazione che esiste una 'massa mancante' potrebbe dipendere dalla nostra comprensione di cosa siano le particelle rappresentate dal c.d. modello standard.

##### *5. Orientarsi nella comunicazione: di cosa parliamo quando parliamo di stelle*

Molteplici espressioni comunemente impiegate nella divulgazione scientifica richiedono in realtà alcune precisazioni. Vediamone, a titolo di esempio, solo alcune.

Che cosa intendiamo davvero quando parliamo di 'età dell'universo'? Se ci limitiamo all'*osservabilità*, nel calcolo del tempo non possiamo risalire più indietro del tempo che oggi ci separa dalla superficie di ultimo scattering fra fotoni e particelle, quando materia e radiazione si sono disaccoppiate, una volta terminato l'equilibrio di corpo nero, circa 379.000 anni dopo il Big Bang; se invece includiamo quanto *teoricamente deducibile* dall'espansione del cosmo, possiamo risalire indietro solo fino al 'tempo di Planck',  $10^{-43}$  secondi dopo il Big Bang, intervallo temporale corrispondente al raggio di  $10^{-33}$  centimetri, distanza minima in cui è possibile per noi applicare le leggi della fisica. In entrambi i casi ci troviamo di fronte a un punto diverso da  $t = 0$ , senza poter dire nulla su quanto tempo ci voglia per arrivare all'*inizio*. In sostanza, quando diciamo che l'età dell'universo è di 13,8 miliardi di anni, secondo le stime oggi più accreditate, è come se stessimo parlando dell'età anagrafica di un essere umano calcolata a partire da quando egli viene alla luce, di cui ignoriamo però il tempo di gestazione nel seno materno: mentre per una nuova vita umana dobbiamo solo aggiungere 9 mesi, non abbiamo strumenti per osservare, né leggi fisiche per dedurre, quanto sia durata la gestazione dell'universo.

Quando i media parlano del Big Bang come di una 'grande esplosione iniziale' dovrebbe restare chiaro che stiamo parlando di una metafora. L'universo non è mai esploso. Abbiamo solo inferenze indirette che ha avuto luogo un'espansione dello spazio-tempo e che l'universo, in circa 13,8 miliardi di anni, è passato dalla formazione delle prime particelle (quark, protoni, elettroni, neutroni) e dei primi quanti di energia (fotoni gamma) alla formazione di galassie, nelle quali si sono avvicendate diverse generazioni di stelle, molte delle quali con pianeti intorno a esse. E tutto ciò in modo assolutamente silenzioso, senza alcuna esplosione: le onde sonore, fra l'altro, avrebbero bisogno di un mezzo per propagarsi e la densità media dell'universo è troppo bassa per propagare onde acustiche...

Una precisazione è dovuta anche in merito all'espressione 'estrarre energia dal vuoto', impiegata dai modelli cosmologici che descrivono l'universo come un singolo oggetto quantistico (sovrapposizione di stati) e il suo inizio come una 'fluttuazione del vuoto quantistico'. Nell'elettrodinamica quantistica relativistica, la geometria dello spazio-tempo, incluso il vuoto geometrico,

possiede una ‘energia virtuale’. La produzione di una grande quantità di energia, per esempio durante collisioni molto energetiche fra particelle (simili a quelle realizzate nei nostri acceleratori di particelle sulla terra), consente alla geometria dello spaziotempo di rilasciare l’energia che essa contiene, per esempio trasformando energia in materia con la creazione di ‘coppie’ particelle + antiparticelle. Nel vuoto quantistico esistono le leggi della meccanica quantistica e quelle della metrica che impieghiamo: risulta allora chiaro che il vuoto di cui stiamo parlando è ‘pieno’ di molte cose, e non è paragonabile al *nulla ontologico* di cui parlano la metafisica dell’essere e la teologia della creazione.

È originale, ma sostanzialmente vera, l’affermazione, anch’essa più volte usata dalla divulgazione scientifica, che ‘noi siamo figli delle stelle’. Per quanto riguarda gli elementi materiali che costituiscono la nostra corporeità, gli elementi chimici di cui tutti noi esseri umani siamo formati, come il carbonio, l’ossigeno, il potassio, il calcio ecc., furono prodotti all’interno di almeno tre generazioni di stelle, per fusione di nuclei più leggeri, mediante reazioni termonucleari. A questi elementi chimici ne vanno aggiunti altri, di peso atomico maggiore del ferro, che non vengono cotti nella ‘cucina stellare’, ma richiedono energie ancora più alte, come quelle sviluppate in occasione delle esplosioni delle supernovae, fase finale delle stelle più massicce.

Molte delle metafore e delle immagini che impieghiamo quando parliamo di stelle sono state coniate dagli stessi protagonisti della ricerca scientifica, che le hanno ideate proprio per favorire la comunicazione delle loro ricerche e dei loro risultati. La divulgazione scientifica ne ha bisogno, specie quando si desiderano illustrare scenari e fenomeni lontani da quelli della vita ordinaria. I buoni divulgatori si distinguono proprio per la loro capacità di venire incontro al grande pubblico attraverso esempi e analogie attraenti. Le metafore hanno una vita assai lunga e il loro impiego giunge fino a ‘valle’, sulle pagine dei quotidiani e nei mass media. In questa progressiva cascata – scienziati, divulgatori esperti, giornalisti – la metafora può restare la stessa, ma il suo senso può a volte cambiare, perché diverso è il contesto cognitivo con il quale l’immagine viene concepita e trasmessa. L’idea che l’universo abbia avuto origine da una ‘esplosione iniziale’, o che la vita sulla terra si sia formata in un ‘brodo primordiale’ può essere ripetuta in tutti questi diversi livelli di comunicazione, senza operare alcu-

na *traduzione*, ritenendo che il suo significato resti inalterato. In realtà qualcosa può cambiare da un livello all'altro, e cambia certamente al livello dell'utente finale, quello del pubblico, che attribuisce a queste medesime immagini il significato per ciascuno più immediato. Ciò trae con sé una riflessione finale: una buona comunicazione scientifica non dovrebbe mai rinunciare a operare le necessarie traduzioni, anche dove, a prima vista, sembrerebbe potervi fare a meno. Se questo dovesse richiedere qualche precisazione e alcuni distinguo, ciò non andrà a scapito del successo della comunicazione. Richiede solo un po' di fatica in più, quella che di solito associamo a un lavoro ben fatto.

### *Bibliografia*

AGAZZI E. (1991), *The Universe as a Scientific and Philosophical Problem*, in E. AGAZZI - A. CORDERO (eds.), *Philosophy and the Origin and Evolution of the Universe*, Dordrecht, Kluwer, pp. 1-51.

BARROW J. - TIPLER F. (2002), *Il Principio Antropico*, Milano, Adelphi.

BLUE C. (2005), *Communicating Astronomy to the Public*, in M. PASACHOFF - J.R. PERCY, *Teaching and Learning of Astronomy. Effective Strategies for Educators Worldwide*, Proceedings of a Special Session at the IAU XXV General Assembly, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 235-237.

BISIKALO D. - WIEBE D. - BOILY C. (2023), *The Predictive Power of Computational Astrophysics as a Discovery Tool*, Cambridge, Cambridge University Press.

CAPASSO G. (2022), *Narrare le origini. Perché la scienza ha bisogno dei miti*, Documentazione Interdisciplinare di Scienza e Fede, <https://disf.org/editoriali/2022-05/>

DAVIES P. (1986), *Superforza. Verso una teoria unificata dell'Universo*, Milano, Mondadori.

CARTER B. (1974), *Large Number Coincidences and the Anthropic Cosmological Principle*, in M.S. LONGAIR (ed.), *Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data*, Dordrecht, Reidel, pp. 291-298.

COLES P. - LUCCHIN F. (1995), *Cosmology. The Origin and Evolution of Cosmic Structure*, Chichester, Wiley and Sons, p. XII.

CHRISTENSEN L.L. (2007), *The Hands-on Guide for Science Communicators. A step-by-step Approach to Public Outreach*, New York, Springer.

- DRAKE F. (1961), *Project Ozma*, «Physics Today», 14 (4), pp. 40-46.
- HARTLE J.B. - HAWKING S.W. (1983), *Wave Function of the Universe*, «Physics Review», 28, pp. 2960-2975.
- HAWKING S. (2000), *Buchi neri e universi neonati*, Milano, Rizzoli.
- HAWKING S. (2015), *La teoria del tutto. Origine e destino dell'universo*, Milano, Rizzoli.
- HAWKING S. - MLODINOW L. (2011), *Il grande disegno*, Milano, Mondadori.
- HELLER M. (2011), *How to Become Science? The Case of Cosmology*, in W. ARBER - J. MITTELSTRASS - M. SÁNCHEZ SORONDO (eds.), *The Scientific Legacy of the 20th Century*, Vatican City, Pontifical Academy of Science.
- HESSE M.B. (1988), *Physics, Philosophy, and Myth*, in R.J. RUSSELL - W.R. STOEGER - G.V. COYNE (eds.), *Physics, Philosophy, and Theology. A Common Quest for Understanding*, Città del Vaticano, Libreria Editrice Vaticana, pp. 185-202.
- IRVIN A. - WYNNE B. (1996), *Misunderstanding Science? The Public Reconstruction of Science and Technology*, Cambridge, Cambridge University Press.
- IVANOVA M. - FRENCH S. (eds.) (2020), *The Aesthetics of Science. Beauty, Imagination and Understanding*, New York, Routledge.
- PITRELLI N. - TALLACCHINI M. (2023), *Manifesto per una educazione civica della scienza*, Torino, Codice edizioni.
- STEANE A. (2023), *Liberating Science. The Early Universe, Evolution and the Public Voice of Science*, Oxford, Oxford University Press.
- SWAIN H. (ed.) (2002), *Big Questions in Science*, New York, Vintage.
- TANZELLA-NITTI G. (2002a), *Antropico, principio*, in G. TANZELLA-NITTI - A. STRUMIA, *Dizionario Interdisciplinare di Scienza e Fede*, Roma, Città Nuova-Urbaniana University Press, pp. 102-120.
- TANZELLA-NITTI G. (2002b), *Creazione*, in G. TANZELLA-NITTI - A. STRUMIA, *Dizionario Interdisciplinare di Scienza e Fede*, Roma, Città Nuova-Urbaniana University Press, pp. 300-321.
- VAKOCH D.A - DOWD M.F. (eds.) (2015), *The Drake Equation. Estimating the Prevalence of Extraterrestrial Life through the Ages*, Cambridge, Cambridge University Press.

*Giuseppe Tanzella-Nitti*

È Professore Ordinario di Teologia fondamentale presso la Pontificia Università della Santa Croce a Roma e Adjunct Scholar del Vatican Observatory. Dirige il Centro di ricerca di Documentazione Interdisciplinare di Scienza e Fede (DISF) e la Scuola Internazionale Superiore per la Ricerca Interdisciplinare (SISRI). Già dottore in astronomia nel 1977 presso l'università di Bologna, si è dedicato fino al 1987 alla ricerca scientifica, svolgendo lavori nel campo dell'astronomia extragalattica, prima presso l'Istituto CNR di Radioastronomia di Bologna e poi come astronomo all'Osservatorio Astronomico di Torino. È stato co-autore del primo Catalogo Generale di Velocità Radiali di Galassie (*A Catalogue of Radial Velocities of Galaxies*, 1983). Dottore in teologia dogmatica nel 1991 presso la Pontificia Università della Santa Croce a Roma, ha rivolto il suo interesse, fra l'altro, ai rapporti fra Rivelazione cristiana e pensiero scientifico. Fra i volumi di cui è autore: *Questions in Science and Religious Belief* (1992), *Mistero trinitario ed economia della grazia* (1997), *Passione per la verità e responsabilità del sapere* (1998), *Teologia e scienza. Le ragioni di un dialogo* (2003), *Filosofia e Rivelazione. Attese della ragione, sorprese dell'annuncio cristiano* (2008), *Faith, Reason and the Natural Sciences. The Challenge of the Natural Sciences in the Work of Theologians* (2009), *Scienza, Filosofia e Teologia. Avvio al lavoro interdisciplinare* (con A. Strumia, 2014), *La Rivelazione e la sua credibilità. Percorso di Teologia Fondamentale* (2016), *Scientific Perspectives in Fundamental Theology. Understanding Christian Faith in the Age of Scientific Reason* (2022). Ha realizzato una *Teologia fondamentale in contesto scientifico* in quattro volumi (2015-2022). Ha progettato e diretto insieme ad Alberto Strumia il *Dizionario Interdisciplinare di Scienza e Fede*, in due volumi, per il quale ha firmato 15 voci (2002).