

Verso nuove concezioni di spazio e materia

Carlo Roselli

1. *Idee innovative che precorrono la rivoluzione scientifica del Novecento*

Nel 1854, il matematico tedesco Bernhard Riemann (1826-1866) tenne a Gottinga un discorso con il quale si aprì una nuova concezione cosmologica in cui spazio e materia sono pensabili in modo interdipendente. La materia determina la geometria dello spazio curvo e la geometria dello spazio decide il moto della materia¹. A sostegno di questa sua concezione, Riemann aveva dovuto affrontare alcune questioni riguardanti i concetti fondamentali della geometria, che erano rimasti immutati nonostante i recenti sviluppi. In particolar modo, egli s'interessò al fatto che le strutture geometriche erano state sempre concepite in una, due e tre dimensioni, secondo la natura della loro estensione; una dimensione per le linee, due per le superfici e tre per i volumi. Riemann si era chiesto se una tale restrizione numerica delle dimensioni fosse una proprietà logicamente necessaria della natura. Se lo era stato certamente anche filosofi e matematici fin dal tempo di Euclide, ma senza aver mai potuto fornire una risposta soddisfacente. Riemann era convinto che questa impasse avesse la sua spiegazione nel fatto che nessuno aveva mai pensato di sviluppare un concetto generale di grandezze pluriestese, con il quale sarebbe stato possibile render conto della logica che si nasconderebbe nelle forme reali dello spazio, e poterne così determinare le relazioni metriche. La dimensionalità fu così da lui concepita in un ordine numericamente infinito di dimensioni definibili matematicamente. Le varietà discrete² di Riemann offrono la possibilità di fissare un modello di collegamento tra geometria e fisica con utili soluzioni a problemi della scienza contemporanea.

Nel 1867, il fisico inglese William Thomson (1824-1907), in seguito noto con il nome di Lord Kelvin, dopo un lungo periodo di riflessioni sulla struttura della materia ipotizzò che questa fosse costituita di piccolissimi *nodi* da lui chiamati “atomi vortice” o “atomi mulinello”. Ciascuno di tali atomi era da lui concepito come un'onda che si incurva e si avvolge in uno spazio ristretto e che, dopo un cammino più o meno complicato, finisce col chiudersi su se stessa. Gli atomi vortice, a seconda del tipo di nodo che formano, possiedono specifiche proprietà fisico-chimiche, cosicché possono esistere separatamente oppure collegarsi fra loro per formare molecole.

Un'altra idea interessante sul modo di concepire la materia, lo spazio vuoto e la loro reciproca relazione apparve nel 1870, quando il filosofo e matematico inglese William K. Clifford (1845-1879) pubblicò la sua opera “Filosofia della Natura della Materia”, in cui descriveva un modello

¹ Queste idee furono accolte da Einstein dopo che ebbe formulato la teoria della relatività ristretta. Com'è noto, questa teoria predice che le distanze e gli intervalli di tempo dei sistemi fisici di riferimento possono contrarsi e dilatarsi, per decelerazione e accelerazione, lungo la direzione del moto. Einstein intuì un legame tra gravitazione e geometria dello spazio-tempo, e il riferimento cardine della sua teoria era il *principio di equivalenza*, in base al quale gli effetti locali della gravità sono equivalenti agli effetti di un sistema di riferimento accelerato. Questo principio era già accertato sperimentalmente ma non ancora ben compreso dalla scienza. Infatti, il principio di equivalenza si riferisce alla massa inerziale e alla massa gravitazionale (massa a riposo). La teoria poté così essere generalizzata, estesa cioè agli effetti della gravità, facendo un'ulteriore predizione: le distanze e il tempo, oltre a dilatarsi e a contrarsi, si incurvano, si distorcono, e alla curvatura è associata la gravità. Lo spazio-tempo, per essere soggetto a distorsioni causate dalla presenza di massa richiedeva una geometria atta a giustificare il campo unitario e pullulante di vibrazioni causate da quelle interazioni che si svolgono fra i diversi punti materiali e che vengono abitualmente associate a forze.

² Le varietà riemanniane sono basate, oltre che sull'idea di spazi pluridimensionali, sulla nozione di curvatura elaborata da Gauss. Ad esse è stato applicato il calcolo differenziale infinitesimo elaborato da Gregorio Ricci-Curbastro e da Tullio Levi-Civita.

sulla morfologia dello spazio. Per la prima volta fu abbandonato il concetto filosofico di sostanza in favore di un'idea cosmologica di *pura morfodinamica*.

Clifford è stato il primo scienziato a immaginare che le particelle cosiddette “materiali” siano essenzialmente *nodi* o grumi dello spazio vuoto. In base a tale ipotesi, l'universo in tutte le sue varietà espressive altro non sarebbe che un gioco di sola forma prodotta dalla capacità del vuoto di autorganizzarsi. A quel tempo queste idee non incontrarono molti entusiasmi, ma furono poi guardate con un certo interesse da Einstein che, a tempo debito, le trovò utili per lo sviluppo della teoria della relatività generale.

Le idee di Clifford vennero anche riprese nel 1960 dal fisico John Wheeler (1911-2008) che tentò di mettere a punto un modello del mondo basato su nient'altro che la pura geometria dello spazio-tempo vuoto, da lui chiamata "geometrodinamica". Wheeler, riproponendo la geometria di Riemann per il continuo-spazio-temporale e corredandola di nuove idee, sperava di giungere ad una visione unitaria e coerente delle particelle nella loro interconnessione con le varie forze della natura.

Una delle idee più curiose di Wheeler fu quella di “*gallerie di tarlo*”, immaginando che la presenza di una particella carica costituisse l'ingresso ad un microscopico cunicolo nello spazio che la metterebbe in comunicazione con un'altra particella identica ma con carica opposta in un altro luogo dell'universo. Per diverse ragioni di incompletezza, la teoria venne abbandonata dallo stesso autore, che soprattutto si rese conto di non poter spiegare la natura dello spazio-tempo introdotto nella teoria per averne una base costruttiva. Egli ripose poi la sua fiducia in uno studio più approfondito della fisica quantistica, convinto che prima o poi si sarebbe potuto riconoscere nel quanto elementare d'azione di Planck, piuttosto che nello spazio-tempo, il cosiddetto mattone fondamentale della natura.

2. *Stringhe e Superstringhe*

Non passarono molti anni che qualcun altro intravide nella teoria di Wheeler una limitazione diversa da quella da lui stesso riconosciuta, e precisamente nel fatto che il suo modello era basato su quattro sole dimensioni (tre spaziali e una temporale). Entrò così in scena una vecchia proposta di Theodor Kaluza (1824-1907) e Oscar Klein (1894-1977),³ che prevedeva l'esistenza di un'extra dimensione spaziale arrotolata a guisa di un microscopico *cappio*.

Questa proposta, insieme alla nozione di gallerie di tarlo introdotta da Wheeler e agli ultimi sviluppi della teoria dei campi quantistici (al tempo delle ideazioni di Kaluza e Klein non era ancora nota l'esistenza dei campi nucleari debole e forte), si rivelò un contributo essenziale alla nascita delle teorie geometrodinamiche delle stringhe e delle superstringhe, chiamate in generale “teorie di Kaluza-Klein”. Le stringhe avrebbero sostituito i punti che prima rappresentavano gli elementi base della natura, cioè i quanti.

Yoichiro Nambu (1921-2016), docente di fisica all'Università di Chicago, è stato uno dei primi fisici teorici a suggerire l'idea di stringhe (o corde). Verso la fine degli anni Cinquanta, egli impostò

³ Lo scienziato polacco Theodor Kaluza, dotato di una spiccata immaginazione per i processi fisici, nel 1921 si sentì tentato di estendere la teoria della relatività generale di Einstein, incorporandovi l'elettromagnetismo, fornendo quindi una prima impostazione geometrica alla teoria dei campi. Kaluza trovò così il modo di mostrare come l'elettromagnetismo sia a tutti gli effetti una forma di gravità associata allo spazio-tempo attraverso una quinta dimensione. Dunque, la sua idea, semplice ma geniale, consisteva nel caratterizzare la teoria dell'elettromagnetismo, così com'era stata formulata da Maxwell, con un'extra dimensione a noi non accessibile. Nell'universo a cinque dimensioni di Kaluza il campo gravitazionale si comporterebbe come la somma di due campi indistinguibili: quello della gravità e quello dell'elettromagnetismo, che noi invece distinguiamo sensibilmente, essendo condizionati dal punto di vista di uno spazio-tempo quadridimensionale. Secondo i ragionamenti di Kaluza, un'onda elettromagnetica o una particella altro non sarebbero che un'increspatura o un movimento nella quinta dimensione. Attraverso questa concezione geometrica, il campo unificato apparirebbe come una pura strutturazione dinamica del vuoto. Ma come immaginare uno spazio-tempo pentadimensionale? Fu il fisico svedese Oscar Klein a fornire nel 1926 una risposta al quesito di come visualizzare la dimensione extra di Kaluza: questa sarebbe arrotolata in una circonferenza così microscopica, o cappio, da confondersi con un punto dello spazio (cosicché, se potessimo esplorare una linea dello spazio, questa ci apparirebbe come un percorso cilindrico). I cappi non si troverebbero nello spazio, ma essi stessi lo estenderebbero. La visualizzazione di uno spazio quadridimensionale non è tuttavia permessa, e per questo si può ricorrere soltanto ad una rappresentazione bidimensionale. Klein riuscì a calcolare la circonferenza dei cappi servendosi del rapporto fra il valore sperimentale dell'unità di carica elettrica trasportata dalle particelle e il valore dell'intensità della forza gravitazionale: il rapporto risultò pari a circa 10^{-32} cm.

il primo modello basato sulle stringhe, che però riguardava soltanto alcune particelle elementari. Nella concezione di Nambu una stringa è un “oggetto” monodimensionale della lunghezza di circa 10^{-13} cm che può ruotare e che, avendo una sua tensione intrinseca, può vibrare in una infinità di *modi* alla velocità della luce. Il suo modo fondamentale implica la frequenza più bassa e ad essa corrisponde una particella elementare.

Il modello proposto da Nambu si è evoluto per un ventennio nell'intento, non riuscito, di eliminare alcuni problemi che condurrebbero a contraddizioni. Ad esempio, poiché le sue stringhe oscillano alla velocità della luce, non si sa come spiegare la presenza delle particelle dotate di massa. Inoltre, dato che le stringhe interagiscono congiungendosi e dividendosi, e dato che le loro estremità rappresentano una sorta di marchio di riconoscimento, non si può escludere che le due estremità di una stringa si congiungano fra loro formando un *loop* chiuso, ma in questo caso non si saprebbe quale senso assegnare a un tale oggetto privo di spiccate caratteristiche topologiche per poter interagire con altri loops e dar luogo a processi di auto-organizzazione.

Chi invece è considerato il padre fondatore di oggetti primordiali estesi chiamati “stringhe” e introdotti per la ricerca di una teoria di completa unificazione dei campi, ovvero della *gravità quantistica*, è il fisico italiano Gabriele Veneziano (1942), che nel 1968 al CERN di Ginevra, nel corso di sue analisi su alcuni dati sperimentali concernenti la forza nucleare forte, trovò che una vecchia formula di Eulero chiamata “funzione beta”, da lui ideata per descrivere un insieme di curve geometriche, risultava idonea anche per una descrizione matematica coerente delle interazioni fra le particelle elementari nel contesto del Modello Standard.

Claude Lovelace (1934-2012) della Rutgers University lavorò sulle implicazioni delle stringhe di Nambu e scoprì che l'equazione atta a descriverle conteneva un termine che, per essere relativisticamente corretto, doveva dare zero come risultato, e ciò comportava che la stringa monodimensionale avrebbe soddisfatto le richieste della relatività generale soltanto se vibrasse in uno spazio a ventisei dimensioni (delle quali una temporale, tre dello spazio ordinario e ventidue arrotolate in una microstruttura).

Dopo i successi ottenuti nei primi anni Settanta dalla teoria quantistica che descrive le interazioni forti (Cromo Dinamica Quantistica), il modello di Nambu finì con l'essere accantonato dalla comunità scientifica che preferiva dar credito a diversi tipi di approcci, quali le *teorie di grande unificazione (dei campi)* e la *supersimmetria*. Quest'ultima, chiamata anche SUSY (dall'inglese Super Symmetry), è uno schema teorico che permette di pensare la forza elettrodebole e la forza nucleare forte connesse alla forza gravitazionale. In altre parole, essa è ciò che si richiede per la *completa* unificazione dei campi.

La supersimmetria prevede la *supergravità*, una teoria della gravità quantistica descritta come una teoria di Kaluza-Klein, ed è considerata da molti studiosi un requisito fondamentale per una qualsivoglia descrizione autoconsistente dell'universo fisico. Essa, oltre alle particelle note con spin $\frac{1}{2}$, 1 e 0, prevede anche l'esistenza di una particella di massa zero e *spin 2* chiamata “*gravitone*” (una stringa che, secondo la teoria, vibra con un'ampiezza d'onda pari a zero), responsabile di trasferire la forza gravitazionale tra le masse. Mentre la gravità convenzionale non pone alcun limite al numero delle dimensioni dello spazio-tempo, la supergravità pone un limite non superiore a *undici dimensioni*. Ovviamente, quando si parla di dimensioni spaziali in numero maggiore di tre, dato il loro carattere di astrattezza, le si possono intendere come proprietà definibili matematicamente oppure come *quasi-dimensioni*.

Per comprendere la nozione di supersimmetria, si deve tener conto della ripartizione che i fisici fanno delle particelle in due classi distinte: da una parte le particelle di scambio di forza con spin intero, chiamate “*bosoni*” e, dall'altra, le particelle con *spin semintero*, chiamate “*fermioni*”.⁴ La

⁴ I campi delle interazioni tra le particelle materiali (quelle facenti parte della famiglia dei *fermioni*, caratterizzati da *spin semintero*, ove il termine *spin* denota il momento angolare intrinseco della particella) sono associate a quattro forze che risultano operare in modo fra loro indipendente, e sono interpretate come scambio di altre particelle (*quanti*) chiamate “messaggere” (quelle facenti parte della famiglia dei *bosoni*, caratterizzati da *spin intero*). La *forza gravitazionale* è la più debole, ha un raggio d'azione illimitato e agisce su tutta la materia. La sua pur debole intensità d'azione è dunque cumulativa, cosicché fa sentire apprezzabilmente i suoi effetti su larga scala. Il *gravitone* è l'ipotetica particella messaggera responsabile di trasmettere la forza.

supersimmetria richiede semplicemente che per ogni particella fermionica misurata in unità quantistiche, esista una corrispondente particella bosonica, chiamata “superpartner”, e viceversa.

Particella e superpartner hanno la stessa massa, mentre lo spin del superpartner è diminuito di $\frac{1}{2}$ rispetto alla particella di partenza. Pertanto, in base alla SUSY, l'elettrone, il quark e il neutrino, che hanno spin $\frac{1}{2}$, hanno come corrispettivi superpartner, lo *s-elettrone* lo *s-quark* e lo *s-neutrino*, tutti e tre con spin 0, mentre al fotone, al gluone e ai bosoni W e Z, che hanno spin 1, corrispondono, nell'ordine, il *photino*, il *gluino*, il *wino* e lo zino, tutti con spin $\frac{1}{2}$; infine, al gravitone, che ha spin 2, corrisponde il *gravitino* con spin $\frac{3}{2}$.⁵

Dal momento che l'esistenza di questi tipi di particelle non è mai stata provata, e non volendo rinunciare tuttavia all'idea che esista una tale simmetria, si è portati a supporre che essa debba in qualche modo essere *rotta* e, dunque, difficilmente identificabile.

La supersimmetria è un'idea nata negli anni settanta. Poiché è riconosciuta l'esistenza di due famiglie distinte di particelle, e cioè i fermioni associati alla materia e i bosoni associati alle forze, la nozione di supersimmetria è stata introdotta allo scopo di giustificare questa separazione che la natura deve essere stata capace di operare, in modo tale che due aspetti diversi di una stessa cosa occultino la loro effettiva relazione.

D'altro canto era già accertato che un fotone (la particella messaggera che trasmette la forza elettromagnetica e che fa parte della famiglia dei bosoni) se dotato di sufficiente energia può trasformarsi, come previsto dalla teoria della relatività, in un elettrone più un positrone (particelle, queste ultime, che fanno parte della famiglia ben distinta dei fermioni) e viceversa. Chiaramente, questo processo fisico è caratterizzato dalla simmetria. Non sembra invece possibile trasformare un fotone in un elettrone e viceversa, per cui rimane difficile comprendere la presenza di quella *massa netta* che costituisce il nostro universo apparentemente asimmetrico (la quantità di materia visibile non risulta essere controbilanciata da una equivalente quantità di antimateria); sembra dunque ragionevole supporre che e a fronte di tale asimmetria sia all'opera una qualche forza compensativa.

Si è allora pensato che, in generale, ogni simmetria richieda un *campo di gauge*,⁶ la cui caratteristica consiste nel conservare l'invarianza globale di simmetria nonostante le trasformazioni che il campo patisce in ogni suo punto. E poiché la supersimmetria è un concetto geometrico, i teorici dei campi quantistici hanno cercato di esplorare un suo possibile collegamento con la gravità, che nella teoria della relatività generale è presentata, appunto, in chiave essenzialmente geometrica dello spazio-tempo. La proprietà della geometria dello spazio-tempo di incurvarsi o distorcersi viene perciò interpretata come campo di gauge. In questo senso, la gravità è ciò che compensa gli effetti della curvatura dello spazio-tempo, e in una geometria curva il cammino più breve è quello che riflette, assecondandola, tale curvatura.

Verso la fine degli anni settanta, alcuni studiosi ripresero a lavorare sulle stringhe, consapevoli però che, per poter render conto dell'esistenza delle due diverse famiglie di particelle (fermioni e bosoni), si richiedeva un modello spaziale ad almeno dieci dimensioni. Includendo la gravità, si sarebbero concepite le stringhe come microstrutture fondamentali di lunghezza pari a quella di Planck ($1,616 \times 10^{-33}$ cm), di spessore nullo e ripartite in tre dimensioni spaziali, una temporale e

Segue, in ordine di intensità, la *forza nucleare debole*, tipica del decadimento neutronico (chiamato più propriamente *decadimento beta*) in cui un neutrone si trasforma in un protone, un elettrone e un antineutrino elettronico (trasformazione che è alla base dei processi di fusione all'interno delle stelle). La forza nucleare debole ha raggio breve d'azione (10^{-15} cm) e agisce su tutte le particelle tranne che sui fotoni. Le sue particelle messaggera sono i *bosoni* (W^+ , W^- e Z^0), la cui esistenza era stata prevista verso la fine degli anni sessanta da Steven Weinberg e da Abdus Salam e confermata sperimentalmente nel 1983 al CERN di Ginevra sotto la direzione di Carlo Rubbia, per mezzo del grande acceleratore superprotosincrotrone. C'è poi la *forza elettromagnetica* (tipica delle reazioni chimiche). Il suo raggio d'azione è infinito (per raggio infinito d'azione si intende che l'intensità della forza è inversamente proporzionale al quadrato della distanza). La sua azione interessa esclusivamente le particelle che possiedono una carica elettrica. La particella messaggera è il *fotone*. Infine, c'è la *forza nucleare forte*, che ha un raggio d'azione breve (10^{-13} cm). Essa agisce su *quark* e *gluoni* che sono gli ipotetici costituenti elementari degli *adroni* (*protoni* e *neutroni* che formano la famiglia dei *barioni*, costituiti da tre *quark*, mentre *pioni*, *kaoni* ed altre particelle formano la famiglia dei *mesoni*, costituiti da un *quark* e un *antiquark*). Le loro particelle messaggera sono i *gluoni*.

⁵ Come si può notare, i superpartner dei bosoni assumono il nome con la desinenza “ino”, mentre quelli dei fermioni prendono il prefisso “s-”.

⁶ “Gauge” significa calibro o strumento di misura.

sette dimensioni arrotolate su se stesse, ovvero compattificate in eptasfere. Le stringhe vibrano in infiniti modi e, come già ipotizzato da Nambu, il modo fondamentale della vibrazione caratterizza una particella nel suo stato fondamentale o di minima energia. Tutte le particelle classificate nel Modello Standard sono conseguenza delle diverse modulazioni di frequenze più basse.

Le diverse teorie di stringa o superstringa, incluse alcune loro varianti più moderne, sono nate in contrapposizione con la concezione puntiforme delle particelle, al fine di evitare gli effetti problematici degli *infiniti* derivanti dal calcolo delle grandezze fisiche, e sono state guardate dalla scienza in varie occasioni come una felice promessa per la formulazione di una concezione nuova e unitaria della realtà, visto che le stringhe sono sicuramente più trattabili dei punti geometrici e adatte a fornire una spiegazione intuitiva della natura "discreta" della meccanica quantistica.

Le teorie di superstringa sono caratterizzate dall'esistenza di un numero di dimensioni spaziali compreso tra nove e venticinque, più una temporale. Nelle loro varie formulazioni è tornata molto utile quell'idea di *loop chiuso* che aveva rappresentato un ostacolo alle precedenti ricerche di Nambu.

La *Teoria delle Superstringhe* a dieci dimensioni di Michael Green (1946) e John H. Schwarz (1941), nata dalla fusione dei concetti di *stringhe* e *supersimmetria*, è subito sembrata molto credibile per la risoluzione di tutti i problemi. In essa i costituenti elementari sono oggetti estesi che possono ruotare, vibrare e interagire fra loro, oltre che a descrivere campi e forze senza incorrere in paradossi.

Dopo la pubblicazione della sua versione finale avvenuta nel 1984 (anno ricordato come *prima rivoluzione delle superstringhe*), si è anche sperato che essa fosse veramente una teoria fisica completa, fosse cioè in grado di unificare la gravità e la fisica quantistica, e di descrivere tutta la varietà di fenomeni della nostra esperienza.⁷ C'è però da osservare che sono state formulate ben cinque teorie di superstringa, ciascuna basata su uno schema interpretativo del tutto diverso rispetto alle altre. Pertanto, o quattro di esse sono sbagliate o, cosa ancor più plausibile, lo sono tutte e cinque.

Verso la metà degli anni novanta, queste teorie hanno conosciuto una *seconda rivoluzione* per merito del fisico statunitense Edward Witten (1951), che le ha interpretate come cinque aspetti diversi di una teoria più fondamentale a undici dimensioni chiamata "Teoria M".⁸

Le Teorie di superstringa, essendo concepite geometricamente e dinamicamente, sono presentate nei loro rispettivi modelli teorici come oggetti associati non solo alle particelle, ma anche alle forze che agiscono su di esse.

Il grande successo delle superstringhe sta nel fatto che, in seguito al lavoro di Witten, da queste teorie emergono soltanto due modelli possibili di simmetria fra cui scegliere, anziché una grande varietà di modelli che renderebbe molto più imbarazzante il criterio di scelta per capire quale tra essi sia il più credibile. Entrambi i modelli hanno il pregio di offrire, accanto alle formulazioni matematiche, un sostegno geometrico, che tuttavia non presenta alcuna novità significativa per superare gli schemi tradizionali riguardanti la logica dello spazio, in quanto concepito come uno sfondo *continuo* in cui si trovano ad agire le grandezze estese. Pertanto, ciò che è discutibile nelle geometrie classiche è altrettanto discutibile in queste teorizzazioni: i punti adimensionali vengono semplicemente ignorati e si pone l'accento soltanto sulle grandezze estese (stringhe e brane), introdotte arbitrariamente e senza una soddisfacente spiegazione dei loro aspetti qualitativi.

L'interesse verso le teorie di superstringa è però andato ultimamente spegnendosi a causa di una serie di debolezze ravvisate al loro interno, prima fra tutte il controllo sperimentale piuttosto improbabile dovuto all'estrema piccolezza degli oggetti da scandagliare. Infatti, l'energia richiesta per poterli osservare può essere prodotta da acceleratori di particelle la cui circonferenza abbia una

⁷ Dalla teoria sarebbero tuttavia escluse le spiegazioni di fenomeni complessi, soprattutto quello dell'esperienza conscia.

⁸ La Teoria M (Teoria Madre) è una branca della fisica che riprende l'insieme delle teorie delle Superstringhe fra loro concorrenti ed è basata sull'idea di oggetti chiamati "brane", ovvero membrane bidimensionali (o quadridimensionali secondo alcuni teorici) che si muovono in undici dimensioni e la cui attività produrrebbe come risultato l'insieme completo della realtà fisica, e cioè spazio, tempo, materia e forza.

lunghezza di circa 10^{18} chilometri, quindi, fuori dalla portata di un realistico sviluppo tecnologico attualmente immaginabile. Manca poi una soddisfacente descrizione del processo di compattificazione delle stringhe e non viene giustificato il meccanismo responsabile della rottura di simmetria.

3. *Twistors e numeri complessi*

Veniamo adesso a un interessante lavoro sviluppato da Roger Penrose (1931), anche in questo caso con l'intento di formulare una teoria di completa unificazione delle leggi di natura, ma seguendo una strada del tutto diversa da quella intrapresa dagli studiosi delle stringhe.

In un primo momento, egli ha presentato un modello in cui lo spazio-tempo è costituito di entità estese fondamentali simili ai raggi luminosi e chiamate *linee nulle* o *spinori*, e in seguito si è messo alla ricerca di un modello di universo basato su particolari oggetti matematici simili a vortici e chiamati *twistors*.⁹ Con le sue idee, tuttora in fase di sviluppo, egli conta di poter prima o poi risolvere i nodi cruciali che affliggono la fisica contemporanea, assumendo come riferimento cardine la nozione di *numero complesso*.

Un numero complesso è dato dall'insieme somma di due sistemi numerici, uno di numeri reali e l'altro di numeri immaginari. In base alla definizione fornita per la prima volta dal matematico italiano Raphael Bombelli (1526-1572), un numero immaginario è dato dal prodotto di un qualunque numero reale per un'unità immaginaria i che, moltiplicata per se stessa, dà come risultato -1 . Nella matematica dei numeri reali non esistono numeri che, moltiplicati per se stessi, diano come risultato numeri negativi. Di conseguenza, per poter risolvere equazioni del tipo $x^2 + 1 = 0$ (da cui $x = \sqrt{-1}$), si richiede il dominio di nuovi enti numerici.

Le prime idee che portarono alla nozione di numero immaginario sono rintracciabili nell'opera del fiammingo Albert Girard (1595-1632), *Invention nouvelle en l'algebre* (1629), in cui l'autore ammetteva *radici negative*, anticipando forse l'idea cartesiana di retta numerica. "Il negativo in geometria – scriveva Girard – indica una regressione, mentre il positivo indica una progressione".

L'idea di radici negative suscitò ben presto l'interesse di molti algebristi. L'italiano Girolamo Cardano (1501-1576), nell'esaminare la radice quadrata di un numero negativo come ad esempio $\sqrt{-9}$, scriveva: "tale radice non è 3 positivo né 3 negativo, ma qualche cosa di natura nascosta". Renato Cartesio (1596-1650) nel 1637 scriveva che "le radici non sono sempre entità reali, ma qualche volta esse vanno pensate come immaginarie". Gottfried Wilhelm von Leibniz (1596-1716) parlava del numero immaginario come di un ente "anfibo tra essere e non essere". I numeri immaginari finirono in seguito con l'essere completamente accettati dai matematici interessati allo studio della matematica complessa.

Penrose si chiede con estremo interesse come mai le procedure matematiche per descrivere i processi quantistici richiedano l'uso dei numeri complessi, mentre le teorie classiche, come ad esempio la relatività generale, si servono dei soli *numeri reali*. Egli è convinto che l'universo fisico, anche se apparentemente distinto in due ordini diversi di comportamento, quello del microcosmo quantistico e quello del macrocosmo a noi familiare, sia di fatto un tutt'uno assoggettato alle regole della matematica dei numeri complessi.

Secondo Penrose, tutte le equazioni che descrivono i fenomeni classici, come l'elettromagnetismo di Maxwell e la gravitazione einsteiniana, non sarebbero corrette in quanto espresse da numeri reali. Ciò equivale a supporre che la logica dei numeri reali costituisca una sorta di operazione concettuale arbitraria, mentre la logica dei numeri complessi rappresenti coerentemente ciò che in natura si troverebbe di fatto in una sovrapposizione di stati inestricabili. Penrose si riferisce al fatto che in meccanica quantistica l'equazione di Schrödinger conserva la sovrapposizione complessa di stati della funzione d'onda, mentre la procedura della sua riduzione, dove compaiono numeri reali, è del tutto arbitraria.

⁹ Roger Penrose, *The Road to Reality*, Alfred A. Knopf, New York 2005, p. 982, Fig. 33.15.,

Penrose, tuttavia, pur introducendo nuove idee per la manipolazione dei numeri complessi, non riesce a tradurre con una rappresentazione geometrica soddisfacente quella profonda proprietà dei numeri immaginari che in fisica potrebbe essere associata all'idea di *instabilità*.

I twistors sono rappresentati da Penrose con immagini geometriche dall'impatto piuttosto suggestivo, e costituirebbero un compromesso fra l'idea di particella e l'idea di punto dello spazio-tempo. Le diverse particelle elementari note ai fisici potrebbero essere il risultato di accoppiamenti di questi twistors. Un singolo twistor potrebbe costituire una particella priva di massa, come il fotone o il gravitone, mentre la combinazione di due o più twistors potrebbe dar luogo a particelle dotate di massa, come l'elettrone, il protone e via dicendo. Inoltre, gli stessi punti dello spazio-tempo potrebbero risultare dalla combinazione di twistors, o meglio dall'insieme dei raggi luminosi che passano per ogni dato punto.

Una delle difficoltà incontrate da Penrose deriva dal concetto matematico di continuità, in base al quale fra due punti qualsiasi di un continuo, per quanto siano ravvicinati, esiste un numero infinito di punti. I punti dello spazio-tempo generati dai twistors sarebbero invece distinti, esisterebbero cioè in numero finito in un dato intervallo. Questa idea è però introdotta senza una soddisfacente spiegazione, dal momento che i twistors, per via dell'indeterminatezza quantistica, sono fisicamente immaginati come particelle indistinte, sfocate e, come accade nel modello standard, non è comprensibile come esse possano relazionarsi tra loro per dar luogo all'auto-organizzazione delle forme esperibili in natura. Tornerò a parlare di Penrose nella Parte Terza per esporre le sue (e le mie), argomentazioni relative al fenomeno della coscienza.

4. *Gravità quantistica a loop*

Le prime idee che hanno aperto uno spiraglio verso la ricerca della gravità quantistica risalgono a Wheeler, che aveva immaginato lo spazio costituito fondamentalmente da una sorta di schiuma fluttuante. Wheeler, riflettendo su questa intuizione, con la collaborazione del fisico americano Bryce De Witt (1923-2004), formulò un'equazione (chiamata "equazione Wheeler-De Witt") che però risultava di difficile comprensione. Nello stesso periodo, il fisico Abney Ashtekar (1928-2015) si adoperò a riscrivere la Teoria della relatività generale in una forma alquanto semplificata che ebbe l'effetto di richiamare l'interesse di alcuni scienziati sulla questione della gravità quantistica. Di lì a poco vennero proposte diverse varianti dell'equazione di Wheeler-De Witt, ma tutte discutibili e non conclusive.

Fra le tante soluzioni a tale equazione, particolarmente interessanti risultavano quelle scritte dai fisici Lee Smolin (1955) e Ted Jacobson (1954), per il fatto che ciascuna di esse descriveva un *loop*, e cioè una linea chiusa nello spazio.

Il fisico italiano Carlo Rovelli (1956) e Smolin, che avevano stretto amicizia dopo essersi incontrati in una conferenza incentrata sul tema della gravità quantistica, furono entrambi attratti da queste linee chiuse e si accinsero a lavorare insieme per cercare di capirne il significato. Le interpretarono come

linee di Faraday del campo gravitazionale. Ma ci sono due novità rispetto alle linee di Faraday. La prima è che ora siamo nella teoria quantistica. Nella teoria quantistica tutto è discreto e "quantizzato". Ciò implica che la ragnatela continua, infinitamente fine, delle linee di Faraday diventa ora una vera ragnatela, con un numero finito di fili distinti. Ogni singola linea che determina una soluzione descrive uno dei fili di questa ragnatela. La seconda novità, quella cruciale, è che stiamo parlando di gravità, e quindi, come ha capito Einstein, non stiamo parlando di campi immersi nello spazio, bensì della struttura stessa dello spazio.¹⁰

La *gravità quantistica a loop* è una teoria quantistica basata sulla granularità dello spazio e su una matematica rigorosa, ma al momento non è dato sapere se sia una teoria della gravità e, comunque, non ha la pretesa di proporsi come una Teoria del Tutto.

¹⁰ Carlo Rovelli, *La realtà non è come ci appare*, Raffaello Cortina Editori, Milano 2014, cit. p. 141.

Per ora, le teorie più promettenti per raggiungere l'obiettivo di conciliare meccanica quantistica e relatività generale sono la supergravità, le superstringhe, i twistors e la più recente teoria a loop di Rovelli e Smolin, sulla quale stanno attualmente lavorando diversi gruppi di ricercatori sparsi in tutto il mondo.

Lo scopo di queste teorie, ad eccezione della gravità quantistica a loop per le osservazioni poc'anzi espresse, è di ricercare un modello che descriva, addirittura senza parametri, l'universo primitivo nella sua iniziale semplicità. Si ricerca insomma una sola e semplice equazione fondamentale dalla quale siano derivabili tutti i parametri. In altre parole, la teoria richiede di essere autoconsistente, deve cioè essere in grado di fissare e spiegare essa stessa i parametri che comporta. La teoria delle superstringhe è apparsa come la più rispondente a questi requisiti ma, dopo essere stata oggetto delle critiche cui si è sopra accennato, i ricercatori dell'unificazione completa delle leggi fisiche sono tornati a prendere in considerazione teorie meno esotiche.

Non si dovrebbe dimenticare che attualmente la scienza, nonostante gli sforzi in cui si trova impegnata, è in fase regressiva e che, a mio parere, la fusione della meccanica quantistica e della relatività generale appare al momento una meta illusoria. Dico questo credendo che la scienza seguirà a percorrere una strada sbagliata fintantoché non prende in seria considerazione le implicazioni filosofiche che derivano, non solo dalle anomalie affioranti dalle teorie fisiche dominanti, ma anche dal crollo delle certezze in matematica avvenuto con la formulazione dei teoremi di Gödel.¹¹

D'altro canto, è innegabile che negli ultimi decenni la fisica si è spinta troppo in avanti senza passare per la filosofia e confidando eccessivamente nella correttezza della logica e nel potere delle matematiche.

Tutto questo ha come conseguenza una situazione piuttosto irritante, e cioè che intorno alle diverse teorizzazioni fisiche (teorie allo sbaraglio o teorie ironiche, come le definisce il giornalista statunitense John Horgan)¹² che aspirano alla ricerca di principi fisici più profondi si sono venute a creare delle sovrastrutture matematiche di così vaste proporzioni che soltanto pochi specialisti sono in grado di comprenderle.

Vorrei aggiungere che la richiesta dell'autoconsistenza della teoria fisica finale appare del tutto irrealistica, a meno che non si riesca a far balenare un'idea illuminante dalle implicazioni filosofiche dei teoremi di Gödel (ad esempio trovando un modo condivisibile per modificare le basi classiche su cui poggia l'intera costruzione logico-matematica). In assenza di idee radicalmente innovative, si dovrà rinunciare, quantomeno, al sogno vagheggiato da quei fisici che aspirerebbero a formulare la Teoria del Tutto, peraltro con una semplice equazione.

Ma, a mio modo di vedere, anche un significativo successo in qualche ambito della matematica, ancorché necessario, non sarebbe sufficiente a rendere la teoria autoconsistente e mi sforzerò di spiegarne le ragioni in un altro mio scritto (v. online "Il Nulla, il Cosmo, la Coscienza"), dove riprenderò queste ultime osservazioni e dove, dopo un resoconto sugli sviluppi delle teorie cosmologiche del ventesimo secolo, esprimerò alcune mie personali riflessioni su quella domanda che fisici fondamentalisti e filosofi considerano la madre di tutte le domande: *perché mai esiste qualcosa anziché niente?*

¹¹ V. online mio articolo "Le ombre di Gödel tra mondo matematico e mondo fisico".

¹² J. Horgan, *La fine della scienza*, Biblioteca Scientifica 26, Adelphi Edizioni, Milano, 1998.