

Is a theory of everything possible? Critical reflections and variations on the theme (È possibile una teoria del tutto? Riflessioni critiche e variazioni sul tema)

Davide Fiscaletti*

Abstract

The evolution of the history of physics shows how natural phenomena can be grouped into discrete regimes, among which there are precise relationships and specific connecting elements but which, with an excellent approximation, can be considered independent of each other. Here it is clarified, in the light of the developments of contemporary physics, in what sense theory of everything means "theory that aims to explain a specific and limited level of energy", highlighting the link between the world we experience daily and the background of the theories of everything.

Keywords: theories of everything; quantum gravity; principle of collective organization.

Riassunto

L'evoluzione della storia della fisica mostra come i fenomeni naturali possono essere raggruppati in regimi discreti, tra cui esistono precise relazioni e specifici elementi di raccordo ma che, con un'ottima approssimazione, si possono considerare indipendenti l'uno dall'altro. Qui si chiarisce, alla luce degli sviluppi della fisica contemporanea, in che senso teoria del tutto significa "teoria che si propone di spiegare un livello di energia specifico e limitato", evidenziando il legame tra il mondo che sperimentiamo quotidianamente e il background delle teorie del tutto.

Parole Chiave: teorie del tutto; gravità quantistica; principio di organizzazione collettiva.[†]

* SpaceLife Institute, San Lorenzo in Campo, Italy; spacelife.institute@gmail.com.

[†] Received: 2021-11-21; Accepted: 2021-12-28; Published: 2021-12-31; doi: 10.23756/sp.v9i2.688. ISSN 2282-7757; eISSN 2282-7765. ©Fiscaletti. This paper is published under the CC-BY licence agreement.

1. Introduzione

Si legge spesso, anche su pubblicazioni divulgative, come uno degli scopi della fisica – e forse lo scopo principale – sia quello di trovare una teoria del tutto la quale dovrebbe descrivere la natura a qualsiasi livello di distanza, tempo ed energia, una singola struttura concettuale in grado di spiegare in modo unificato tutte le forze del cosmo e tutta la materia. Se si riuscisse a scoprirla, sarebbe il raggiungimento del Sacro Graal della fisica, una singola equazione dalla quale si potrebbero derivare tutte le leggi della natura. La scoperta di una siffatta teoria, testata in modo rigoroso, potrebbe anche consentirci di dare delle risposte ad interrogativi che hanno assillato l'umanità da secoli, riguardo al senso dell'universo, all'esistenza di un creatore. Molti scienziati, compreso lo stesso Einstein, si sono cimentati, senza successo, nella ricerca di una teoria del tutto. Ancora oggi, nonostante le rivoluzioni scientifiche del '900 e i progressi ottenuti negli ultimi decenni, possiamo dire di essere lontani dal trovare la fantomatica “equazione di Dio”. Alla luce dell'evoluzione del pensiero scientifico, è allora lecito chiedersi: cos'è veramente una teoria del tutto, cosa può dirci riguardo all'universo e quale ruolo effettivo può avere?

Nel suo recente libro *Teorie del tutto*, Frank Close inizia la sua trattazione dando una definizione generale di teorie del tutto come “teorie che si basano sugli studi in ogni campo del sapere (per esempio, fisica, matematica, astronomia, ecc...) con lo scopo di spiegare il funzionamento dell'universo come lo conosciamo” (Close, 2018). Sulla base di questa definizione, possiamo dire che una teoria del tutto costituisce una realtà mutevole nel senso che, nel corso della storia, determinate scoperte possono mettere in crisi la spiegazione dell'universo fino a quel momento dominante portando a una nuova teoria che accresce ed estende il tutto già noto, e questo compatibilmente con una visione della scienza come entità dinamica, che è in costante evoluzione e riorganizzazione, con l'idea – originariamente proposta da Anassimandro nel VI sec. a.C. – che la scienza nasce da ciò che non sappiamo e dalla messa in discussione di qualcosa che credevamo di sapere, che la scienza consiste nel guardare più lontano, nell'esplorazione continua di nuove forme di pensiero per concettualizzare il mondo.

Al netto di un'analisi storica generale, emerge il seguente quadro riguardo alle varie teorie sviluppate dalla fisica. Nel corso dei secoli, la fisica ha potuto fare dei progressi nella spiegazione dei fenomeni della natura senza possedere una vera e propria teoria del tutto intesa come teoria in grado di descrivere la natura a qualsiasi livello di distanza, tempo ed energia, perché i fenomeni naturali possono essere raggruppati in regimi discreti, possono essere suddivisi in un insieme di strati, di livelli di descrizione tra cui esistono precise relazioni e specifici elementi di raccordo ma che, con un'ottima approssimazione, si

possono considerare indipendenti l'uno dall'altro. Una teoria che si propone di descrivere un dato regime della natura funziona – e quindi si può considerare una sorta di “teoria del tutto per quello specifico dominio” – perché la natura mette efficacemente in quarantena le manifestazioni degli altri strati, nel senso che questi non sembrano avere alcun peso effettivo nella descrizione dei fenomeni del livello in considerazione. In altre parole, il funzionamento della natura ci insegna che siamo in grado di formulare una “teoria del tutto” dove tutto significa “all'interno di un livello di energia specifico e limitato”. Inoltre, una teoria del tutto può considerarsi “forte” quando permette di fornire una spiegazione unificata di fenomeni disparati e fornisce predizioni che possono poi essere testate sperimentalmente: sono sempre gli esperimenti a decidere quali teorie descrivono la natura e quali invece sono belle idee e nient'altro. In questo articolo, analizzando la situazione attuale della fisica teorica nei primi due decenni del XXI secolo, ci proponiamo di ragionare intorno a questa specifica formulazione di teoria del tutto come “teoria che si propone di spiegare un livello di energia specifico e limitato”: cercheremo di contestualizzarla, chiarendo quale possa essere il legame tra lo spazio-tempo macroscopico che sperimentiamo nelle nostre vite e il background delle teorie del tutto più sofisticate che abbiamo a disposizione, alla luce degli sviluppi della fisica contemporanea.

2. Nubi all'origine di una nuova fisica

All'alba del 1900, alla luce dei successi nella descrizione del mondo fisico ottenuti fino ad allora dalla meccanica di Newton (che forniva una descrizione unificata del moto dei corpi terrestri e del moto dei corpi celesti) e dalla teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell (che forniva una descrizione unificata di elettricità, magnetismo e fenomeni luminosi), Lord Kelvin proclamò che ormai non c'era più niente di nuovo da scoprire nella fisica, che non rimanevano altro che misurazioni sempre più precise. In realtà, Lord Kelvin evidenziò anche la presenza di due nubi nella fisica di quell'epoca, ovvero da un lato il risultato negativo dell'esperimento di Michelson-Morley, riguardante il fatto che non si era rilevata nessuna differenza nella velocità della luce misurata da corpi in movimento, e dall'altro lato i risultati sperimentali riguardanti la luce emessa dai corpi incandescenti (il problema della radiazione emessa dal cosiddetto “corpo nero”, ovvero un corpo in grado di assorbire perfettamente tutta la radiazione che lo colpisce). E, in effetti, Lord Kelvin le scelse proprio bene queste due nubi, perché di lì a poco avrebbero portato alla nascita di una nuova fisica, vale a dire di nuove teorie del tutto. Nel 1905, com'è noto, con la pubblicazione di un famosissimo lavoro, Albert Einstein avrebbe mandato in frantumi l'immagine classica del mondo fino ad allora dominante elaborando

la teoria della relatività speciale (Einstein, 1905) – con la quale riuscì ad aggirare l'incompatibilità tra le equazioni di Newton e quelle di Maxwell riguardo all'impossibilità di viaggiare testa a testa a fianco di un raggio di luce – e, nel giro di pochi decenni, grazie ai contributi di vari eminenti scienziati, sarebbe nata la meccanica quantistica, la teoria più generale delle cose piccole, con equazioni che vanno oltre quelle di Newton e che comportano che l'energia esista in pacchetti discreti, che permette di spiegare, tra le altre cose, l'esistenza della materia così come la conosciamo ovvero in uno stato di stabilità (problema su cui la teoria di Maxwell incontrava enormi difficoltà, portando al paradosso per cui l'attrazione elettrica avrebbe dovuto far precipitare gli elettroni nel nucleo atomico nel giro di poche frazioni di secondo). La teoria della relatività speciale e la meccanica quantistica hanno portato così ad esplorare una nuova fisica, accrescendo il tutto fino a quel momento conosciuto.

Per quanto riguarda la relatività speciale, va enfatizzato che questa teoria può essere considerata la teoria del tutto che permette di studiare il dominio delle elevatissime velocità, e quindi le proprietà dei fasci di luce e dello spaziotempo, in situazioni in cui si può trascurare la gravità e qui la chiave di volta per comprendere le cose consiste nell'unificazione di spazio, tempo, materia ed energia: Einstein mostrò infatti che spazio, tempo, materia ed energia sono parti di una più grande simmetria basata su rotazioni in quattro dimensioni. Ma, nel tentativo di pervenire a una descrizione unificata dei più disparati fenomeni interconnessi, è la rivoluzione quantistica ad aver determinato gli sviluppi e scenari più fecondi.

Nel corso del XX secolo, la meccanica quantistica, alla luce di incontrastati successi predittivi, è diventata in pratica la teoria del tutto in grado di spiegare tutto ciò che è più grande di un nucleo atomico, mettendo in quarantena i range di distanze più piccole. La meccanica quantistica ha portato inoltre alla nascita della teoria quantistica dei campi, che può essere considerata il suo più potente frutto maturo e la sua vera interpretazione realistica e, nella seconda metà del XX secolo, si è rivelata essere la sintassi principale che consente di descrivere le particelle elementari e di specificare il modo in cui interagiscono. Grazie ai lavori pionieristici di Dirac (1927) e Jordan (1927) e, soprattutto, agli imperituri contributi di Tomonaga (1946), Schwinger (1948), Feynman (1949) e Dyson (1949), la prima teoria quantistica dei campi ad essere stata formulata è l'elettrodinamica quantistica o QED, che si è rivelata poi essere la teoria del tutto relativa al campo elettromagnetico – e quindi al modo in cui gli elettroni interagiscono con i fotoni – e all'interno della struttura atomica escluso il nucleo. La QED forniva in pratica una trattazione della luce e degli elettroni che obbedisse alla meccanica quantistica e alla relatività speciale, permettendo di calcolare cose come la forza magnetica dell'elettrone con un grado accuratezza sorprendente,

pari a una parte su cento miliardi. Il successo predittivo ed empirico della QED è tuttora ineguagliato e ha portato alla formulazione del cosiddetto Modello Standard della fisica delle particelle, la struttura teorica fondamentale che fornisce una trattazione unificata delle particelle e delle forze (esclusa la gravità).

Ora, se andiamo ad analizzare in dettaglio la situazione attuale della fisica alla luce del Modello Standard, è possibile individuare rilevanti analogie con quanto era accaduto a fine '800. Infatti, proprio come fino alla fine dell'800 la scienza poté formulare teorie di grande successo trascurando la necessità di considerare cosa succedeva a regime microscopico e alle alte velocità e quindi di sviluppare meccanica quantistica e relatività, all'inizio del XXI secolo ci troviamo in una situazione analoga riguardo alla gravità nel senso che il Modello Standard può essere considerato una teoria del tutto se si mette in quarantena la gravità (Close, 2018). Il Modello Standard presenta, al suo interno, tre grossi pilastri: la cromodinamica quantistica, che spiega l'esistenza dei nuclei atomici, la quantum flavourdynamics, che descrive processi come la trasmutazione degli elementi tramite i decadimenti radioattivi, e l'elettrodinamica quantistica. La cromodinamica quantistica descrive la forza nucleare che tiene assieme i quark costituenti neutroni e protoni invocando dei campi, che possono essere considerati una generalizzazione delle equazioni di Maxwell, chiamati campi di Yang-Mills (dal nome dei due fisici, Chen Ning Yang e Robert L. Mills che nel 1954 introdussero queste nuove entità come un insieme di nuove e più potenti versioni del campo di Maxwell): quando vennero applicati ai quark, i campi di Yang-Mills vennero chiamati gluoni, in quanto agiscono come una colla che tiene assieme i quark (Yang e Mills, 1954). In modo analogo, per spiegare i processi di decadimenti radioattivo – che sono la ragione, tra le altre cose, per cui l'interno del nostro pianeta è così caldo e che sono causati dalla cosiddetta forza nucleare debole – i fisici introdussero una nuova simmetria, postulando che elettroni e neutrini potessero essere accoppiati: negli anni '70 Steven Weinberg, Sheldon Glashow e Abdus Salam svilupparono così la cosiddetta teoria elettrodebole, che unificava l'elettromagnetismo con la forza nucleare debole, in cui un altro campo di Yang-Mills (costituito dai bosoni vettori W e Z) descriveva l'interazione tra elettroni e neutrini. Analizzando cromodinamica quantistica, quantum flavourdynamics e QED, quello che salta immediatamente agli occhi è che questi tre diversi approcci risultano molto simili dal punto di vista del formalismo matematico: questa somiglianza è tale per cui diventa lecito considerare la possibilità che forse costituiscono elementi speciali di una sola teoria del tutto, che descrive la dinamica degli atomi, i nuclei, i protoni, i neutroni e i loro quark costituenti a energie superiori a quelle accessibili con il LHC di Ginevra, ma nessuno dei tre dice nulla riguardo alla gravità. Il punto cruciale è che il Modello Standard è una teoria unificata che funziona così

bene quando viene applicata agli atomi e alle loro particelle costituenti, ignorando la gravità, perché c'è un'immensa distanza che separa le energie più elevate raggiungibili negli esperimenti attualmente alla nostra portata dalle enormi energie della cosiddetta scala di Planck (la scala di distanza, tempo ed energia che si ottiene combinando tra loro in modo opportuno la costante di gravitazione universale newtoniana, la velocità della luce e la costante di Planck e che, in qualche modo, può essere associata alla piccolezza estrema della costante di gravitazione universale). Questo significa che, se in futuro riuscissimo ad effettuare esperimenti ad energie vicine alla scala di Planck, non potremmo più mettere in quarantena gli effetti della gravità sulle particelle.

Il Modello Standard era in grado di predire con accuratezza tutte le proprietà della materia che uno poteva riscontrare andando a ritroso fino a una frazione di secondo dopo il Big Bang, quando tutte le quattro forze fondamentali erano fuse in un'unica superforza che obbediva ad una sorta di (ignota) simmetria fondamentale, che con l'espansione e il raffreddamento dell'universo si sarebbe scissa nelle simmetrie frammentate della forza debole, della forza forte e della forza elettromagnetica. Nel Modello Standard, per spiegare questo processo che è in grado di rompere la simmetria originaria, chiamato rottura di simmetria, si invoca l'idea che lo spazio-tempo sia permeato da un nuovo campo, il fantomatico bosone di Higgs. Nonostante nel 2012-2013 abbia fatto molto scalpore la scoperta dei quanti di questo campo, che costituiva il tassello mancante della teoria, il Modello Standard appare una teoria sgraziata, raffazzonata, in cui per cucire assieme le varie forze della natura si invocano una ventina di parametri, i cui valori devono essere inseriti a mano. E, soprattutto, non fa alcun riferimento alla gravità, che sappiamo essere la forza fondamentale che regola il comportamento su larga scala dell'universo (Kaku, 2021).

D'altra parte, se prendiamo in considerazione la gravità, oggi sappiamo che la teoria di Newton non può essere considerata una consistente teoria del tutto: partendo dal principio secondo cui le leggi della natura assumono la stessa forma per tutti gli osservatori indipendentemente dal loro stato di moto, Einstein mostrò che Newton si sbagliava a livello concettuale riguardo alla gravità e con la sua teoria della relatività generale – la cui formulazione definitiva ebbe luogo nel 1915 – chiarì che la gravità è una distorsione della struttura spazio-temporale, che la gravità distorce o incurva sia lo spazio sia il tempo, ossia rende di tipo non euclideo lo spazio-tempo caratteristico della relatività speciale. In particolare, nella sua teoria Einstein introdusse un'equazione fondamentale, l'equazione tensoriale del campo gravitazionale – contenente dieci equazioni numeriche che assumono la stessa forma in tutti i sistemi di riferimento e si riducono all'equazione classica di Newton nel caso di campi gravitazionali deboli – la quale mette in relazione la geometria dello

spazio-tempo con la distribuzione di materia ed energia al suo interno. Questa equazione non è però l'unica che si può ricavare a partire dai postulati della relatività generale nel senso che i principi della relatività generale ammettono anche un ulteriore contributo, che risulta avere conseguenze osservabili su scale cosmiche, vale a dire la cosiddetta costante cosmologica, una sorta di densità di energia (chiamata sovente energia oscura) che pervade tutto lo spazio e che ha l'effetto di allontanare le galassie una dall'altra. Così, se la teoria quantistica dei campi fornisce la sintassi del Modello Standard della fisica delle particelle, in maniera simile la relatività generale fornisce il modello standard per la cosmologia, chiamato modello Lambda-CDM (dove CDM sta per cold dark matter, ovvero materia oscura fredda) o modello del Big Bang, che contiene le nostre conoscenze riguardo alla materia oscura (quella fantomatica materia invisibile invocata per spiegare la velocità angolare delle galassie, il loro moto all'interno degli ammassi di galassie, ecc...) e all'energia oscura.

Una possibile sorgente dell'energia oscura potrebbe essere rappresentata dagli effetti quantistici associati alla gravità. Ci si aspetta allora che una teoria della gravità quantistica abbia per la natura del vuoto implicazioni analoghe a quelle della QED sulle fluttuazioni virtuali dell'energia del vuoto elettromagnetico, ma tra relatività generale e teoria quantistica c'è qualcosa che stride, c'è un'incompatibilità di fondo e il tentativo di unificarle in una sintesi più generale incontra grossi problemi.

Così, proprio come alla fine dell' '800 lo scenario della fisica presentava due nubi – identificate opportunamente da Lord Kelvin – allo stesso modo in questo inizio di III millennio la nostra ricerca di una teoria del tutto si trova di fronte a due grossi ostacoli. Il primo è rappresentato dal problema della costante cosmologica quando si cerca di unificare teoria quantistica dei campi e relatività generale, problema che è strettamente correlato alla comparsa di buchi neri alla scala di Planck. Se la teoria quantistica dei campi implica che il vuoto sia permeato di particelle e antiparticelle che appaiono e scompaiono su scale temporali sempre più veloci e distanze sempre più piccole, la gravità introduce un paradosso in quanto le fluttuazioni vicine alla scala di Planck corrispondono a energie enormi e, di conseguenza, comporta che buchi neri appaiono e scompaiono istantaneamente, eliminando dall'universo osservabile tutte le distanze inferiori a 10^{-35} metri. A distanze piccolissime, perciò, lo spazio-tempo diventa una schiuma frastagliata dove le fondamenta della teoria quantistica dei campi sembrano svanire e questo comporta che la comparsa di buchi neri alla scala di Planck non può essere messa in quarantena. La comparsa di buchi neri alla scala di Planck implica che nella teoria quantistica dei campi la grandezza dell'energia oscura, o della costante cosmologica, è 120 ordini di grandezza inferiore del valore osservato sulla base dei dati relativi all'espansione dell'universo.

Il secondo ostacolo nel tentativo di costruire una teoria del tutto della gravità quantistica riguarda la spiegazione dell'esistenza stessa di strutture materiali. La materia ha le caratteristiche che possiede e, quindi, è così come ci appare perché la gravità ha un'intensità molto inferiore rispetto alle interazioni nucleare forte ed elettromagnetica. Ne deriva così un problema gerarchico: le dimensioni degli atomi e delle strutture macroscopiche si spiegano solo se c'è qualcosa che contrasta le fluttuazioni del vuoto sul campo di Higgs – il campo invocato dal Modello Standard per rendere conto della massa delle particelle – le quali comportano che le masse delle particelle elementari dovrebbero essere 17 ordini di grandezza più grandi di quelle osservate. Qualsiasi teoria del tutto, la quale voglia aggredire la gravità quantistica e quindi la scala di Planck, come requisito essenziale dovrà necessariamente superare i due ostacoli qui menzionati (Close, 2018).

3. Alcune proposte al bazar della realtà

La prospettiva tradizionale, seguita in tutto il secolo scorso, per trovare una teoria del tutto della gravità quantistica consiste nel formulare una versione quantistica della relatività generale. A questo proposito, esistono molte procedure diverse e quindi il problema può essere considerato puramente tecnico, almeno per quanto riguarda la costruzione della teoria e si tratta di un problema formidabile, in virtù delle molte ed enormi difficoltà matematiche che si hanno applicando le varie procedure di quantizzazione della relatività generale. Esistono approcci canonici, covarianti, perturbativi, non-perturbativi (per una rassegna dettagliata, vedi per esempio: Carlip, 2015; Oriti, 2009). Da ognuno abbiamo imparato molto, ma tutti sono incompleti, con i loro pregi ed i loro difetti. Tutti questi approcci condividono lo stesso oggetto di base: un campo gravitazionale quantistico, cioè uno spaziotempo quantistico, e questo significa che lo spazio, il tempo, la geometria sono necessariamente soggetti a fluttuazioni e determinabili solo in maniera probabilistica e che varie grandezze fisiche da continue diventano discrete.

La teoria unitaria della gravità quantistica forse più nota e più studiata è la cosiddetta teoria delle superstringhe. Molti fisici pensano che la teoria delle superstringhe è il candidato principale per poter arrivare a una singola equazione che sia in grado di rispondere a tutte le domande sul cosmo. In questa teoria, alla scala di Planck l'universo non è fatto di particelle puntiformi ma di minuscole corde (stringhe) unidimensionali vibranti, dove ogni nota corrisponde a una particella subatomica ed è possibile fornire una descrizione quantistica unificata di tutte le interazioni fondamentali sulla base dell'idea che queste stringhe abitano in un background a molte dimensioni (Greene, 1999; Kaku, 1999; Kaku, 2017; Woit, 2007). Più precisamente, la teoria delle superstringhe comporta che l'universo potrebbe aver avuto in origine 10

dimensioni; tuttavia, a causa della sua instabilità, sei di quelle dimensioni finirono poi per arrotolarsi su se stesse, diventando così troppo piccole per poter essere osservate, vale a dire che il nostro universo potrebbe davvero avere 10 dimensioni ma i nostri atomi sarebbero troppo grandi per poter accedere alle altre 6 dimensioni[‡]. L'ipotesi è che, a grandi distanze o a energie molto maggiori dell'energia di Planck, la teoria quantistica sia un'approssimazione a una teoria delle stringhe più generale. Un pregio importante delle stringhe sta nel fatto che, mentre nella teoria quantistica dei campi la gravità è impossibile, qui la gravità è già necessariamente inclusa, corrispondendo alla vibrazione più bassa delle stringhe.

La ragione dell'interesse che suscita la teoria delle stringhe sta nel fatto che questa teoria permette di coniugare meccanica quantistica e relatività generale evitando gli infiniti che si incontrano quando si applicano le procedure quantistiche alla gravità nell'ambito del Modello Standard. E riesce in questo obiettivo invocando una simmetria che fornisce un'unificazione di tutte le particelle dell'universo, chiamata supersimmetria, la quale implica la possibilità di mantenere inalterata la struttura delle equazioni scambiando tra loro le particelle dell'intero universo. Più precisamente, la supersimmetria permette di scambiare tra loro bosoni (le particelle che trasmettono le interazioni, come fotoni, gluoni) e fermioni (le particelle costituenti la materia ordinaria, come elettroni, protoni e neutroni): la teoria prevede che ogni particella ha una sua super-partner, chiamata "sparticella", il superpartner di un fermione è un bosone, mentre il superpartner di un bosone è un fermione (per esempio, il superpartner dell'elettrone è chiamato "selettrone", quello del quark "squark"). Un aspetto allettante della supersimmetria è che, se la natura fosse supersimmetrica a distanze inferiori a 10^{-18} metri, e quindi le particelle subatomiche si manifestassero nel range di energie comprese tra 100 GeV e 1000 GeV, si potrebbero evitare le enormi fluttuazioni nella teoria quantistica dei campi e risolvere così il problema della gerarchia. Ma c'è un intoppo di non poco conto: al momento non esistono prove sperimentali dirette che la natura legga la supersimmetria (Close, 2018).

Nonostante numerose indagini sulle fondamenta della teoria delle stringhe abbiano portato allo sviluppo di intuizioni matematiche ed implicazioni in ambiti inattesi, non ci sono stati molti progressi nell'intento originale di arrivare ad un'unica equazione per descrivere tutte le particelle e le forze. In particolare, sono emerse cinque diverse versioni della teoria delle stringhe in 10 dimensioni e, inoltre, le equazioni della teoria comportano un numero

[‡] Nelle teorie che prevedono l'esistenza di dimensioni addizionali, una delle soluzioni per spiegare la loro non osservabilità invoca appunto il cosiddetto processo della "compatificazione", nel quale le dimensioni addizionali sono arrotolate fino ad assumere una struttura talmente piccola che nessun esperimento attualmente eseguibile può rivelarne l'esistenza.

incredibilmente enorme di soluzioni (10^{500}) ovvero di universi, in cui la supersimmetria si manifesta in modi che corrispondono grosso modo alla nostra situazione, ma che sono caratterizzati da diversi valori della costante cosmologica. Il fatto di considerare un multiverso suggerisce nuovi scenari di trattare la nube della costante cosmologica: tra gli infiniti universi ci troviamo proprio in quello in cui la costante cosmologica ha il valore giusto affinché si siano potute formare le galassie e le stelle sopravvivano per miliardi di anni in modo da permettere l'evoluzione di forme di vita intelligente, ma non si riesce comunque a spiegare qual è il motivo profondo per cui nel nostro universo è avvenuto questo (malgrado l'ipotesi dell'inflazione eterna suggerisca in questo senso degli scenari interessanti da esplorare).

Per quanto riguarda gli sviluppi teorici della teoria delle stringhe, va sottolineato che nel 1995 Edward Witten scoprì che le cinque diverse versioni della teoria delle stringhe in dieci dimensioni potevano essere derivate da una sottostante, più fondamentale, teoria a undici dimensioni, nota come teoria M (dove M sta per madre), basata su membrane, le quali appunto potevano collapsare in cinque modi distinti in una stringa a 10 dimensioni (Witten, 1995). La teoria M – diversamente dalle cinque versioni della teoria delle stringhe originale – presenta però l'inghippo di non essere esprimibile nel formalismo di teoria del campo e consiste in una serie di equazioni disgiunte che vengono mirabilmente a descrivere la stessa teoria. Un altro risultato significativo venne ottenuto tre anni dopo da Juan Maldacena, il quale mostrò che una teoria supersimmetrica di Yang-Mills – che descrive il comportamento di particelle subatomiche in quattro dimensioni – era matematicamente equivalente a una certa teoria delle stringhe (cosa che fino ad allora era ritenuta impossibile) e questo comportava che c'erano profonde connessioni inaspettate tra la forza gravitazionale e la forza nucleare definite in dimensioni del tutto differenti (Maldacena, 1998). Inoltre, da questa scoperta emerse un altro sviluppo inatteso, vale a dire il cosiddetto principio olografico, l'idea che il mondo tridimensionale che sperimentiamo nelle nostre vite costituisce in realtà una proiezione del mondo reale, che è a 10 o 11 dimensioni. Tuttavia, nonostante i pregi nella trattazione della gravità e nell'affrontare svariati inghippi del Modello Standard e gli interessanti sviluppi qui menzionati, come abbiamo sottolineato prima, molteplici sono gli aspetti problematici della teoria delle stringhe, su cui la teoria continua a ricevere svariate legittime critiche: che la sua matematica potrebbe non avere nulla a che fare con la realtà fisica (per esempio, appunto non sono ancora state trovate prove a sostegno della supersimmetria), che predice l'esistenza di molti universi paralleli con caratteristiche differenti e, soprattutto, che non può essere testata (nel senso che per testarla bisognerebbe arrivare all'energia di Planck, che è un milione di miliardi di volte più grande dell'energia prodotta attualmente dall'LHC).

Inoltre, va puntualizzato che la teoria delle stringhe, pur essendo basata su meccanica quantistica e relatività generale, non considera l'indipendenza dal background prevista dalla relatività generale come fondamentale, in quanto il suo apparato matematico comporta la separazione del campo gravitazionale in due componenti, l'una considerata come un background fissato, l'altra trattata come un campo quantistico. Infatti, una corretta teoria autenticamente relativistica, alla luce dei risultati della relatività generale, dovrebbe essere indipendente dal background, ovvero le teorie che estendono la relatività generale alla trattazione della scala di Planck dovrebbero avere a che fare con una struttura base fondamentale ed invariante, vale a dire dovrebbero implicare che l'ultimo livello della realtà fisica sia lo stesso in ogni sistema di riferimento e quindi di fatto per ogni osservatore (Fiscaletti, 2017). Oggi abbiamo a disposizione diverse interessanti teorie che possiedono questi requisiti, per esempio la teoria dei twistor sviluppata dal fisico britannico Roger Penrose e, soprattutto, la gravità quantistica ad anelli (o teoria dei loop), che forse può essere considerata la teoria più significativa della fisica attuale la quale, al fine di fornire una trattazione quantistica dell'interazione gravitazionale e quindi di aggredire la scala di Planck, affronta direttamente il problema che, come previsto dalla relatività generale, in natura non esiste in verità alcun background e costruisce una teoria quantistica di campo in una forma che non richiede un background (Rovelli, 1997; Rovelli, 2001; Rovelli, 2003; Rovelli, 2004; Rovelli, 2010). Questa teoria – sviluppata principalmente da Rovelli e Smolin – consiste in sostanza in un'applicazione diretta della meccanica quantistica alla relatività generale: dapprima, il campo gravitazionale viene identificato con la struttura metrica dello spazio-tempo e, poi, questa identificazione viene estesa anche in regime quantistico; però questa teoria non consente, al momento, di fornire una descrizione unificata di tutte le 4 interazioni fondamentali. Mentre nella teoria delle stringhe tutte le forze sono campi che si manifestano sotto forma di particelle mediatrici, compresa la forza di gravità che sarebbe trasmessa dal gravitone, uno stato di stringa privo di massa, il quale esiste nello spazio-tempo, invece nella teoria dei loop è lo spazio-tempo stesso ad essere quantizzato. La gravità quantistica a loop deve il suo nome ai cammini chiusi che portano da un quanto di spazio a quello vicino, fino a ritornare al punto di partenza, cammini i quali determinano la curvatura dello spazio-tempo. Benché questa teoria, non portando ad un'unificazione di tutte le forze, non appaia molto ambiziosa, in realtà suggerisce il concetto rivoluzionario che, al livello più fondamentale, l'universo possa essere visto come un set di campi coesistenti e sovrapposti l'uno all'altro, di cui uno è proprio il campo gravitazionale cioè lo spazio-tempo (Al-Khalili, 2020).

L'aspetto più significativo ed allettante della gravità quantistica ad anelli sta appunto nel fatto che essa predice che lo spazio non è continuo, non è

infinitamente divisibile, ma che ha una struttura granulare alla scala di Planck, data da una rete di anelli, di “loop”. Questi anelli costituiscono in pratica le linee di forza del campo gravitazionale e, come tali, altro non sono che i fili con cui è tessuto lo spazio. Alla luce della gravità quantistica a loop, quindi, le linee di forza del campo gravitazionale quantistico tessono lo spazio come una maglia tridimensionale di anelli intrecciati. Il significato fisico di questi loop sta nei punti in cui essi si toccano, chiamati “nodi”, e nei tratti di linea compresi tra un nodo e l’altro, chiamati “legami” (in inglese “link”). I nodi rappresentano le eccitazioni quantistiche del campo gravitazionale vale a dire i quanti elementari di spazio, i quanti elementari di cui è fatto il volume. I link degli anelli che attraversano la superficie della regione in considerazione sono i quanti elementari dell’area. La gravità quantistica a loop stabilisce perciò che, alla scala di Planck, lo spazio è quantizzato: l’area e il volume di una data regione di spazio non possono assumere valori arbitrari, ma solo uno spettro discreto di valori. Esistono cioè un’area minima e un volumetto minimo: in un’operazione di misura su una qualsiasi regione del campo gravitazionale, non è possibile osservare un’area o un volume che siano più piccoli della scala di Planck. La discretizzazione della geometria spaziale predetta dalla gravità quantistica a loop può essere considerata una proprietà genuina dello spazio, indipendente dall’intensità del campo gravitazionale effettivo in un dato luogo. Così, si apre l’interessante prospettiva di osservare effetti di gravità quantistica persino in assenza di forti campi gravitazionali, vale a dire nel limite di spazio piatto (Fiscaletti, 2017).

Inoltre, proprio come la meccanica quantistica consente di determinare precisamente, per esempio, i livelli energetici dell’atomo di idrogeno, in modo analogo la gravità quantistica a loop permette di calcolare esplicitamente lo spettro dei valori che possono assumere l’area e il volume dello spazio, fornendo così predizioni empiriche dettagliate della fisica alla scala di Planck. Se la QED è la teoria fondamentale che fornisce una descrizione matematica del campo elettromagnetico in regime quantistico permettendo di ricavare i fotoni come quanti elementari di questo campo, in modo analogo la teoria dei loop predice l’esistenza di atomi elementari di spazio dell’ordine della scala di Planck, descrivendo in forma matematica precisa questi atomi elementari di spazio e le equazioni che determinano il loro evolversi: le equazioni generali della meccanica quantistica applicate al campo gravitazionale di Einstein.

E’ importante sottolineare che nella gravità quantistica a loop non ha senso dire che i loop, e quindi i nodi di una rete, sono collocati nello spazio, perché qui non c’è alcun background fissato. Mentre nell’ambito della QED i fotoni, quanti del campo elettromagnetico, stanno nello spazio, nella teoria dei loop i quanti di spazio sono essi stessi lo spazio, contengono solo l’informazione – espressa dai link della regione – su quali sono altri quanti di spazio adiacenti. La localizzazione di singoli quanti di spazio non è definita rispetto a qualcosa,

ma è definita solo dai link, e solo in relazione l'uno all'altro. Perciò solo la posizione relativa di un loop rispetto ad un altro loop ha senso. In sintesi, nell'ambito della visione proposta da Rovelli, a piccolissima scala, lo spazio può essere visto come uno schiumeggiare, un frastagliarsi fluttuante di quanti elementari che agiscono l'uno sull'altro e tutti insieme agiscono sulle cose e si manifestano in queste relazioni come elementi finiti intrecciati (Rovelli, 2014). Inoltre, per quanto riguarda la concezione del tempo, va sottolineato che nella teoria dei loop non c'è alcuna dimensione temporale indipendente lungo la quale avviene la dinamica, non c'è un ben definito concetto di tempo e il tempo deve essere reintrodotta come una lettura su un determinato orologio fisico.

Infine, va anche menzionato che la gravità quantistica a loop ha portato a interessanti sviluppi in ambito cosmologico, suggerendo come lo spazio-tempo non finisce al big bang o al big crunch: la sua geometria quantistica estende lo spazio-tempo ad altre branche macroscopiche e suggerisce una nuova strada per il "recupero delle informazioni" nel processo di evaporazione di un buco nero. Se già negli anni '70 del secolo scorso Wheeler espresse la speranza che effetti di gravità quantistica avrebbero potuto risolvere la questione della singolarità del Big Bang nelle soluzioni di Friedman, Lemaitre, Robertson, Walker (FLRW) della relatività generale, e da allora ci sono stati molti lavori in questo senso, nella cosmologia prevista dalla gravità quantistica a loop, questa speranza di Wheeler è stata realizzata in un senso preciso: il big bang è sostituito da uno specifico big bounce (grande rimbalzo) e tutte le osservabili fisiche rimangono finite nel corso della loro evoluzione. Perciò, la cosmologia della teoria dei loop introduce la significativa prospettiva di estendere lo scenario inflazionario standard alla scala di Planck in una maniera consistente, portando a predizioni osservabili. Si scopre che, grazie a un'interazione imprevista tra l'ultravioletto e l'infrarosso, gli effetti della geometria quantistica dalla fase preinflazionaria della dinamica lasciano alcune firme alle scale angolari più grandi, che possono spiegare alcune anomalie osservate nella radiazione cosmica di fondo (Ashtekar e Bianchi, 2021).

Alla luce di teoria delle stringhe e teoria dei loop, possiamo dire che una teoria definitiva del tutto – in grado di affrontare e risolvere in modo consistente le due nubi della scienza del XXI secolo sopra menzionate – avrà caratteristiche nuove nella trattazione della scala di Planck, ma a basse energie si ridurrà alla teoria quantistica dei campi, però sulla base dei dati attuali non sappiamo stabilire se e quale di queste due specifiche teorie potrà guidarci verso una soluzione. In altre parole, alla luce della situazione della fisica teorica attuale, possiamo dire di essere ancora ben lontani dal trovare la fantomatica "equazione di Dio": disponiamo di teorie che sembrano sì molto promettenti ma presentano svariate questioni irrisolte. Da un lato, la teoria delle stringhe, che sembra la migliore strada da percorrere per realizzare

l'unificazione delle quattro forze della natura, continua a restare una speculazione teorica, non avendo ancora fornito alcuna predizione verificabile. Dall'altro lato, la gravità quantistica a loop, che sembra il modo più ragionevole per quantizzare lo spazio-tempo, non ci dice come combinare la gravità con le altre tre forze. E non sappiamo se una di queste due diverse visioni sia corretta o se sarà necessario unificarle o trovare nuovi approcci completamente diversi con cui affrontare il muro di Planck (Al-Khalili, 2020).

In effetti, va sottolineato che, sebbene la prospettiva contenuta in teoria delle stringhe e teoria dei loop (basata sulla quantizzazione diretta del campo gravitazionale) sia radicale per implicazioni concettuali e fisiche, recentemente alcuni scienziati hanno cercato altre vie per unificare relatività generale e meccanica quantistica da cui sono emerse nuove ulteriori prospettive sul problema della gravità quantistica che introducono forse scenari ancora più estremi (Oriti, 2018a).

Le singolarità gravitazionali, ovvero le situazioni in cui, secondo la relatività generale, la curvatura dello spaziotempo cresce senza limiti, come all'interno dei buchi neri o al Big Bang, nonché la stessa termodinamica dei buchi neri, in particolare il loro possedere un'entropia finita, vengono interpretati da svariati fisici come un segnale di inapplicabilità più generale del continuum spaziotemporale e dell'idea di campi di interazione (incluso il campo gravitazionale, quantizzato o meno) anch'essi continui che vivono su di esso e suggeriscono l'esistenza di entità microscopiche fondamentali, e discrete, che costituiscono ciò che chiamiamo spaziotempo e di cui la geometria e i campi con cui lo descriviamo sono soltanto manifestazioni (approssimate) collettive (Oriti, 2018b). Oltre alla gravità quantistica a loop, approcci che sviluppano idee di questo tipo in modo ancora più radicale sono le cosiddette teorie di campo su gruppi, in cui lo spaziotempo emerge da strutture più fondamentali e non spaziotemporali in sé. Nella prospettiva della teoria dei gruppi, quindi, l'oggetto della gravità quantistica, e quindi la costruzione di una teoria del tutto, significa considerare uno spaziotempo emergente, non soltanto quantistico. In questo quadro, il problema della gravità quantistica prende una nuova forma, e si carica di compiti ulteriori, ponendosi obiettivi ancora più estremi, vale a dire: a) individuare e descrivere matematicamente le entità quantistiche, non-spaziotemporali e discrete che costituiscono l'universo al livello più fondamentale, e la loro dinamica; b) mostrare in che senso lo spaziotempo come lo conosciamo e la sua dinamica effettiva in termini di Relatività Generale e teoria quantistica dei campi emergono in una approssimazione e nelle circostanze appropriate, preceduti, magari, da un regime in cui lo spaziotempo e la geometria sono già 'emersi' e manifestano proprietà quantistiche (il regime corrispondente al problema della gravità quantistica tradizionale) (Oriti, 2018a, 2018b, 2019 e 2017). Riguardo alla ricerca delle entità non spaziotemporali più fondamentali da cui dovrebbe

emergere lo spazio-tempo e al modo in cui dovrebbero emergere lo spaziotempo e tutte le nozioni che su esso si basano, i risultati ottenuti dipendono da quale approccio specifico alla gravità quantistica consideriamo, dal contesto specifico (formalismi diversi presentano candidati diversi per le entità fondamentali e ricorrono a tecniche e idee diverse) (Oriti, 2019 e 2017).

Il punto cruciale è però che, qualsiasi siano le entità fondamentali, lo spaziotempo continuo e la sua descrizione in termini di campi di materia e interazione può emergere solo alla fine di un'approssimazione continua che coinvolga un gran numero di queste entità fondamentali e che sia resa possibile dal risultato della loro dinamica collettiva. A livello più tecnico, questa intuizione a sua volta suggerisce che un ruolo fondamentale debba essere svolto dal gruppo di rinormalizzazione, che è esattamente lo strumento che ci permette di ottenere la dinamica effettiva (e approssimata) macroscopica di sistemi quantistici formati da molti corpi microscopici. Inoltre, se si deve analizzare la dinamica collettiva di un numero grande di entità quantistiche interagenti, un altro fatto veramente importante è che il risultato di questa dinamica collettiva non è unico, nel senso che un sistema di questo tipo si può organizzare in una molteplicità di fasi distinte, alle quali corrisponde una fisica molto diversa. Proprio come in fisica dei sistemi di materia condensata classica e quantistica abbiamo fasi macroscopiche con proprietà osservabili molto diverse, a partire dagli stessi costituenti elementari (ovvero elettroni che interagiscono tramite campo elettromagnetico), in maniera simile nel caso dello spaziotempo, assumendo sia anch'esso costituito da 'molti corpi quantistici' (non spaziotemporali) ci dobbiamo aspettare che questi possano organizzarsi in fasi diverse.

Le teorie di campo sui gruppi, in sintesi, sono una descrizione 'atomica' e quantistica dello spaziotempo stesso, una teoria di campo in cui i 'quanti' fondamentali sono i costituenti elementari dello spaziotempo stesso, i suoi 'atomi' costitutivi, in cui l'universo può essere di fatto trattato come un fluido o un condensato, alla stregua dell'emergere della descrizione idrodinamica del fluido stesso, a partire dalla sua descrizione atomica/molecolare. Per quanto riguarda questo nuovo tipo di approcci, quali conseguenze osservative allora dobbiamo aspettarci? Come sottolineato da Daniele Oriti, tutte le strutture e i concetti su cui si basa tutta la fisica moderna potrebbero essere qui messi in discussione, scoprendo per esempio che gli effetti di gravità quantistica sono ovunque attorno a noi, come osservazioni e dati sperimentali già nelle nostre mani, che non mettevamo in relazione con la gravità quantistica in quanto si riferivano a fenomeni 'macroscopici', e che invece avrebbero la loro spiegazione più profonda nella gravità quantistica, proprio perché lo spaziotempo in sé, compresi i suoi aspetti macroscopici, ha natura emergente (Oriti, 2018a). A questo proposito, potremmo trovare una nuova chiave di spiegazione, in termini appunto di gravità quantistica, della materia oscura

(invocata per spiegare la formazione delle galassie a spirale e le loro curve di rotazione) e dell'energia oscura, fenomeni tuttora in attesa di spiegazione appropriata, e normalmente approcciati da un punto di vista puramente cosmologico. Un interessante aspetto di questo tipo di approcci è che qui la cosmologia viene ottenuta al livello di approssimazione idrodinamica, concentrandoci sulla dinamica collettiva delle entità fondamentali e sulle loro osservabili globali, trascurando le loro fluttuazioni e interazioni microscopiche, cioè quello che ci aspettiamo da una teoria macroscopica continua. Diversi modelli realistici delle teorie di campo su gruppi, sotto l'assunzione che l'universo sia omogeneo e isotropo, permettono di dedurre la dinamica effettiva del volume dell'universo dalle equazioni idrodinamiche del condensato, portando a diverse possibili evoluzioni dell'universo, tutte allettanti, caratterizzate in particolare da una serie ciclica di espansioni e contrazioni.

Infine, va sottolineato che, per affrontare la gravità quantistica, in un quadro epistemologico simile a quello delle teorie di campo sui gruppi, possono essere collocati anche altri svariati approcci recenti. Tra questi possiamo menzionare, in particolare: il toy model di Quantum Graphity di Fotini Markopoulou e collaboratori (Konopka, Markopoulou e Severini, 2008; Hamma et al., 2009), in cui la gravità e la geometria emergono da una rete di grafi alla scala di Planck e le connessioni di questi grafi esibiscono un comportamento collettivo emergente alle basse temperature simile a quello di un superfluido; oppure approcci che invocano, riguardo alla storia dell'universo, una fase pre-Big Bang rappresentata da un background atemporale, da blocchi di informazione primordiale, come, per esempio: la teoria dell'universo arcaico di Ignazio Licata e Leonardo Chiatti (Licata e Chiatti, 2010), in cui l'evoluzione dell'universo viene vista come una formazione estesa a partire da uno stato atemporale caratterizzato da un'informazione non-locale molto elevata, in un quadro che descrive l'idea del Big Bang come una "nucleazione" di un substrato pre-spaziale e atemporale dell'ordinaria struttura spazio-temporale che contiene dentro di sé tutte le possibilità di evoluzione implicate dalla relatività generale e dalla fisica quantistica, chiamato vuoto arcaico, in una ipersfera atemporale a 5 dimensioni (chiamata tecnicamente spazio-tempo di de Sitter); oppure il modello di universo atemporale da me sviluppato in lavori recenti, in cui l'arena dei processi è un vuoto quantistico tridimensionale, di natura atemporale e non-locale, composto da elementari grani di energia della scala di Planck e le cui proprietà fisiche più universali sono la densità di energia (le cui variazioni determinano l'apparizione di particelle materiali) e processi di riduzione di stato (di creazione-annichilazione di particelle quantistiche) (Fiscaletti, 2015; Fiscaletti, 2016; Fiscaletti e Sorli, 2016a; Fiscaletti e Sorli, 2016b; Fiscaletti e Sorli, 2016c; Fiscaletti e Sorli, 2018; Fiscaletti, 2018).

4 Conclusioni: la chiave di volta (provvisoria!) per comprendere le cose

Analizzando l'evoluzione del pensiero scientifico e filosofico, ad uno sguardo complessivo, possiamo notare che esiste da sempre una tensione tra un approccio meccanicistico-riduzionista, secondo cui l'universo sarebbe una macchina inerte, governata da esatte leggi matematiche, in cui i vari fenomeni diventano via via più nitidi allorché vengono frazionati in parti e componenti sempre più piccole, e un approccio olistico-sistemico, secondo le cose nell'universo sono tutte correlate l'una con l'altra formando una rete interconnessa e tra i vari livelli della natura esiste una struttura gerarchica a generazione interdipendente (Fiscaletti, 2020). I tentativi al bazar della realtà – esaminati in questo articolo – per aggirare e superare gli ostacoli della fisica attuale, segnatamente la nube cosmologica e la nube gerarchica, ed arrivare ad una teoria del tutto in grado di affrontare la scala di Planck, sembrano suggerirci il fallimento di un approccio meramente riduzionista, o comunque la necessità di integrare il riduzionismo con una visione integrata più ampia la quale tenga conto della necessità – per comprendere nei dettagli più intimi il funzionamento dell'universo fisico – di considerare più scale di grandezza e livelli organizzativi tra i quali esistono precise ipotesi di raccordo. In realtà, il fatto che nella descrizione dei fenomeni nel tentativo di pervenire alle loro cause ultime, e quindi di arrivare ad una teoria del tutto, sia necessario passare allo studio dei comportamenti collettivi, in un quadro in cui le leggi sono viste come conseguenza di un ordine ed un'organizzazione superiori che caratterizzano i sistemi in considerazione (e in cui le leggi che caratterizzano ciascun livello di descrizione non possono essere viste separatamente dagli altri livelli ma esiste una stretta interdipendenza tra i diversi livelli di descrizione dei processi) non è poi nuovo, essendo in parte già stato chiarito nel 1972 dal premio Nobel per la fisica Philip Anderson – riguardo al fenomeno della superconduttività – nel suo fondamentale articolo-manifesto intitolato *More is different*, e poi in successivi lavori di alcuni eminenti fisici della materia condensata, tra cui il premio Nobel Robert Laughlin (Laughlin e Pines, 2000; Laughlin et al., 2000; Laughlin, 2005). Tuttavia se si analizzano gli sviluppi della fisica teorica riguardo ai tentativi proposti per trovare una teoria del tutto volta a descrivere il regime della gravità quantistica, come teoria delle stringhe e teoria dei loop (fino ad arrivare agli approcci più recenti di teorie di campo sui gruppi ed altri modelli alternativi), questi elementi rappresentati da organizzazione collettiva, esistenza di distinti livelli descrittivi a generazione interdipendente, acquisiscono uno statuto ontologico nuovo e denso di prospettive feconde.

Se superconduttività, fenomeni di condensazione bosonica, svariati aspetti del vuoto quantistico previsto dalle teorie dei campi, ci suggeriscono in modo

inequivocabile che, nonostante la ricerca scientifica abbia individuato dei costituenti chiave a più livelli energetici ed organizzativi, come può essere la sequenza “classica” molecole-atomi-nuclei-quarks..., è assolutamente illusorio pensare che esista un livello fondamentale dal quale poter ricavare tutte le strutture superiori applicando l’armamentario matematico a partire soltanto dalle interazioni fondamentali, che l’universalità dei comportamenti collettivi – pur essendo compatibile con i costituenti elementari di un sistema – non è deducibile dalle proprietà di tali costituenti, in qualche maniera anche le teorie fondamentali della fisica che hanno l’obiettivo ambizioso di essere “teorie del tutto riguardo al dominio della gravità quantistica”, come stringhe, loop, teorie di campo sui gruppi (nonché svariati altri approcci alternativi), per come sono costruite, ci insegnano che – per comprendere appieno le cose – occorre invocare l’idea che esistano opportuni livelli strettamente correlati tra cui bisogna assumere precise ipotesi di raccordo. In altre parole, la vera chiave di volta, la vera chiave di lettura unificante di gravità quantistica e teorie del tutto è l’emergenza, in un quadro in cui, proprio come nella superconduttività, l’elemento cruciale è rappresentato dalla rottura spontanea di simmetria, l’idea che sotto determinate condizioni si generano delle proprietà, delle forme di organizzazione collettiva che non sono presenti nelle regole fondamentali, nei costituenti elementari e nel background previsti dalla teoria.

Questo avviene nella teoria delle stringhe, per esempio, quando vogliamo spiegare l’esistenza delle dimensioni addizionali compattificate, quando vogliamo spiegare come emerge il nostro universo a partire dal multiverso previsto dal suo formalismo matematico, ecc... Infatti, se il nostro mondo tridimensionale è la proiezione di stringhe a 11 dimensioni (nelle cinque versioni distinte della teoria) o 10 dimensioni (nella teoria M), questo potrebbe essere causato da processi di organizzazione collettiva a partire dal background delle dimensioni addizionali: si può dire che è in qualche modo la rottura della simmetria associata alla formazione degli atomi che fa sì che noi non possiamo accedere alle dimensioni addizionali e rappresenta quindi la vera chiave interpretativa del principio olografico, del fatto che siamo soltanto un’ombra di un mondo a 10 o 11 dimensioni. D’altra parte, l’esistenza – dimostrata da Maldacena – di uno stretto legame tra teorie supersimmetriche di Yang-Mills in 4 dimensioni e una teoria delle stringhe a 10 dimensioni, evidenziando come questi due diversi livelli siano interdipendenti e che tra di essi ci siano precisi elementi di raccordo, può essere essa stessa letta come una prova rilevante a supporto del principio di organizzazione collettiva come elemento cruciale alla base dell’emergenza del nostro mondo a 4 dimensioni. Inoltre, il problema del multiverso si potrebbe affrontare assumendo che molti di questi universi paralleli siano instabili e decadano nel nostro universo familiare in seguito a processi di rottura spontanea della simmetria di un vuoto quantistico – la “schiuma spazio-temporale” di cui parlava Hawking – in cui

universi-bolla entrano ed escono in continuazione dall'esistenza: in quest'ottica, sarebbe l'organizzazione collettiva associata all'instabilità dei vari universi paralleli a far sì che, in seguito a processi di rottura spontanea di simmetria delle leggi e dei costituenti fondamentali, questi universi saltino fuori dal vuoto per ritornarvi subito dopo. Sarebbero perciò l'emergenza, il principio di organizzazione collettiva e la rottura spontanea di simmetria di leggi e costituenti fondamentali gli elementi cruciali che spiegano il motivo per cui, forse, tra l'infinità degli universi paralleli previsti dalla teoria delle stringhe, il nostro ha qualcosa di speciale che ha consentito l'evoluzione di forme di vita intelligente.

In maniera analoga, nella teoria dei loop, abbiamo visto che lo spazio costituisce uno schiumeggiare, un frastagliarsi fluttuante di quanti elementari che agiscono l'uno sull'altro e tutti insieme agiscono sulle cose e si manifestano in queste relazioni come elementi finiti intrecciati e il tempo non esiste come realtà fondamentale. Questo significa allora che, nella gravità quantistica a loop, per poter spiegare come si origina il mondo ordinario spazio-temporale occorre invocare un principio di organizzazione collettiva delle entità che descrivono il livello della scala di Planck costituito da atomi di spazio, nodi e link. Inoltre, il principio di organizzazione collettiva e la rottura spontanea della simmetria come elementi cruciali che caratterizzano il legame tra il quadro dell'universo previsto dalla teoria dei loop e il mondo macroscopico che sperimentiamo nelle nostre vite acquisisce uno statuto ontologico ancora più preciso prendendo in considerazione la visione, proposta da Rovelli, del "tempo termico", ovvero l'idea che la nozione familiare di tempo emergerebbe a livello termodinamico, quando si dà una descrizione statistica approssimativa di un sistema con un gran numero di gradi di libertà – quando il mondo è descritto in termini dei parametri macroscopici che abbiamo scelto – in altre parole il tempo sarebbe l'espressione della nostra ignoranza, un riflesso della nostra conoscenza incompleta dello stato del mondo (Rovelli, 1993a; Rovelli, 1993b; Rovelli, 2009).

Se comprendiamo come, riguardo al problema di affrontare la gravità quantistica e di aggredire il muro di Planck, la vera chiave di volta unificante è rappresentata dall'emergenza e dal principio di organizzazione collettiva, ne deriva che non è da escludere che in futuro possano venire alla luce inattesi collegamenti tra teoria delle stringhe e gravità quantistica ad anelli. Al netto di un'attenta analisi dell'immagine del mondo che queste due teorie dipingono e del legame di questa immagine con il nostro mondo quotidiano, si deduce che esse non sono poi così distanti, dato che condividono la medesima idea di fondo, vale a dire che lo spazio-tempo ordinario emergerebbe da una struttura pre-spaziale discreta e non-locale in seguito a processi di organizzazione collettiva e di rottura spontanea della simmetria che vige al livello fondamentale.

Infine, la teoria dei campi su gruppi evidenzia in maniera ancora più radicale l'idea che, per comprendere appieno il funzionamento dell'universo alla scala della gravità quantistica, occorre invocare l'esistenza di opportuni livelli strettamente correlati tra cui bisogna assumere precise ipotesi di raccordo, che l'elemento cruciale è rappresentato dalla rottura spontanea di simmetria. Qui il punto cruciale è che, sotto determinate condizioni, lo spaziotempo continuo e la sua descrizione in termini di campi di materia e interazione emergono dalla dinamica collettiva di un gran numero di entità fondamentali non spazio-temporali: l'arena dell'universo sarebbe cioè caratterizzata da diverse fasi e lo spazio-tempo ordinario emergerebbe come organizzazione collettiva del condensato di atomi non spazio-temporali in seguito a una rottura spontanea della simmetria che vige tra i singoli costituenti elementari.

In definitiva, alla luce dell'analisi fatta in questo articolo riguardo alle caratteristiche delle principali teorie correnti per affrontare la gravità quantistica, possiamo dire che la locuzione "teoria che si propone di spiegare un livello di energia specifico e limitato" può ricevere una nuova suggestiva chiave di lettura: la costruzione e le caratteristiche delle teorie del tutto della gravità quantistica di cui disponiamo, segnatamente teoria delle stringhe, teoria dei loop e gli approcci recenti di teoria dei campi su gruppi ci insegnano che la natura mette efficacemente in quarantena quello che prevede la teoria al livello più fondamentale (nel senso che questi non sembrano avere alcun peso effettivo nella descrizione dei fenomeni del livello in considerazione) come conseguenza di un fondamentale principio di organizzazione collettiva determinato da opportuni processi di rottura spontanea di simmetria. D'altra parte, alla luce degli sviluppi della fisica teorica corrente – come sottolinea puntualmente Ignazio Licata nel suo illuminante libro *Piccole variazioni sulla scienza* – possiamo aggiungere quest'altra considerazione: le teorie del tutto più sofisticate a nostra disposizione forniscono (o si propongono di fornire) una sintesi tra modelli microscopici di interazione e cosmologia, una teoria del tutto non può considerarsi completa senza fornire una storia dello spazio-tempo e della materia e perciò deve permettere di individuare una o più relazioni significative tra il micro e il macro, in sempre più profonda e intima connessione (come può essere per esempio un legame tra il bosone di Higgs e la costante cosmologica). Se la strada per raggiungere questi obiettivi sembra ancora lunga, lo sviluppo di approcci alternativi come teoria dei campi su gruppi, la Quantum Gravity, la teoria dell'universo arcaico e del vuoto quantistico tridimensionale atemporale (e forse di svariati altri approcci qui non menzionati) sembra suggerirci che forse la vera chiave di volta del tutto – e quindi dell'equazione di Dio – è il principio di organizzazione collettiva e la rottura spontanea delle simmetrie, in altre parole l'aspetto eraclideo dei sistemi sotto studio, e che la struttura gerarchica a generazione interdependente dei

vari livelli descrittivi con cui ci si presenta la natura fa svanire in modo inequivocabile la distinzione tra teorie “fondamentali” e teorie “fenomenologiche” (Licata, 2016).

Riferimenti bibliografici

- Al-Khalili, J. *Il mondo secondo la fisica*. Torino: Boringhieri. 2020.
- A. Ashtekar, E. Bianchi. A short review of loop quantum gravity. arXiv:2104.04394v1. 2021.
- S. Carlip et al. Quantum Gravity: A Brief History of Ideas and Some Prospects. *International Journal of Modern Physics D*, 24/11, 1530028. 2015.
- Close, F. *Teorie del tutto*, Torino: Boringhieri. 2018.
- P.A.M. Dirac. The quantum theory of the emission and absorption of radiation. *Proceedings of the Royal Society A*, 114/767, 243-265. 1927.
- F. Dyson. The radiation theories of Tomonaga, Schwinger, and Feynman. *Physical Review*, 75/3, 486-502. 1949.
- A. Einstein. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 17/10, 891-921. 1905.
- R.P. Feynman. Relativistic cut-off for quantum electrodynamics. *Physical Review*, 74, 1430-1438. 1949.
- Fiscaletti, D. *The timeless approach. Frontier perspectives in 21st century physics*. Singapore: World Scientific. 2015.
- D. Fiscaletti. About dark energy and dark matter in a three-dimensional quantum vacuum model. *Foundations of Physics*, 46/10, 1307-1340. 2016.
- Fiscaletti, D. *Il quadro olografico. Le frontiere non-locali della fisica moderna*. Roma: Di Renzo Editore. 2017.
- D. Fiscaletti. Towards a non-local timeless quantum cosmology for the beyond Standard Model physics. *Bulgarian Journal of Physics*, 45/4, 334-356. 2018.
- Fiscaletti, D. *Le immagini dinamiche. Forma e qualità nella scienza moderna*, Trieste: Asterios Editore. 2020.
- D. Fiscaletti, A. Sorli. About a three-dimensional quantum vacuum as the ultimate origin of gravity, electromagnetic field, dark energy ... and quantum behaviour. *Ukrainian Journal of Physics*, 61/5, 413-431. 2016a.
- D. Fiscaletti, A. Sorli. Dynamic quantum vacuum and relativity. *Annales UMCS Sectio AAA: Physica*, LXXI, 11-52. 2016b.

- D. Fiscaletti, A. Sorli. About electroweak symmetry breaking, electroweak vacuum and dark matter in a new suggested proposal of completion of the Standard Model in terms of energy fluctuations of a timeless three-dimensional quantum vacuum. *Quantum Physics Letters*, 5/3, 55-69. 2016c.
- D. Fiscaletti, A. Sorli. "Quantum relativity: variable energy density of quantum vacuum as the origin of mass, gravity and the quantum behaviour. *Ukrainian Journal of Physics*, 63/7, 623-644. 2018.
- Greene, B. *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. New York: Vintage Books. 1999.
- H. Alioscia, F. Markopoulou, S. Lloyd, F. Caravelli, S. Severini, K. Markstrom. A quantum Bose-Hubbard model with evolving graph as toy model for emergent spacetime. <https://arxiv.org/abs/0911.5075>. 2009.
- P. Jordan. Zur quantenmechanik der gasentartung. *Zeitschrift für Physik*, 44/6, 473-480. 1927.
- Kaku, M. *Introduction to Superstrings and M-Theory*. Berlino: Springer. 1999.
- Kaku, M. *Iperspazio. Un viaggio scientifico attraverso gli universi paralleli, le distorsioni del tempo e la decima dimensione*. Cesena: Macro Edizioni. 2017.
- Kaku, M. *L'equazione divina. La ricerca di una teoria del tutto*. Milano: Rizzoli. 2021.
- T. Konopka, F. Markopoulou, S. Severini, Quantum graphity: a model of emergent locality. *Physical Review*, 77, 104029. 2008.
- R. Laughlin, D. Pines. The theory of everything. *PNAS*, 97/1, 28-31. 2000.
- Laughlin, R. *Un universo diverso. Reinventare la fisica da cima a fondo*. Torino: Codice Edizioni. 2005.
- R. Laughlin, D. Pines, J. Schmalian, O. Stojkovic Branko e P. Wolynes. The middle way. *PNAS*, 97/1, 32-37. (2000)
- Licata, I. *Piccole variazioni sulla scienza*. Bari: Edizioni Dedalo. 2016.
- I. Licata, L. Chiatti. The archaic universe: big bang, cosmological term and the quantum origin of time in projective cosmology. *International Journal of Theoretical Physics*, 48/4, 1003-1018. 2009.
- I. Licata, L. Chiatti. Archaic universe and cosmological model: "big-bang" as nucleation by vacuum. *International Journal of Theoretical Physics*, 49/10, 2379-2402. 2010.
- J.M. Maldacena. The Large N limit of superconformal field theories and supergravity. *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, 2/4, 231-252. 1998.

- D. Oriti (ed.). *Approaches to Quantum Gravity*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2009.
- D. Oriti. The universe as a quantum gravity condensate. *Comptes Rendus Physique* 18, 235-245. 2017.
- D. Oriti. L'universo emergente della gravità quantistica. *Ithaca: Viaggio nella Scienza*, MCXIV, 2067. 2018a.
- D. Oriti. "Spacetime as a quantum many-body system". In Giuseppe Angilella e Claudio Amovilli (eds.), *Many-body approaches at different scales*, New York: Springer. 2018b.
- D. Oriti. "Levels of spacetime emergence in quantum gravity". In Nick Huggett, Baptiste Le Bihan, Christian Whutrich (eds), *Philosophy beyond spacetime*, Oxford: Oxford University Press. 2019.
- C. Rovelli. Statistical mechanics of gravity and thermodynamical origin of time. *Classical and Quantum Gravity*, 10/8, 1549-1566. 1993a.
- C. Rovelli. The statistical state of the universe. *Classical and Quantum Gravity*, 10/8, 1567-1578. 1993b.
- C. Rovelli. Loop Quantum Gravity. *Living Reviews in Relativity*, <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-1998-1/>. 1997.
- C. Rovelli. "Quantum spacetime". In Craig Callender e Nick Huggett (eds.), *Physics meets philosophy at the Planck scale*, Cambridge: Cambridge University Press. 2001.
- C. Rovelli. Loop quantum gravity. *Physics World*, 7, 1-5. 2003.
- Rovelli, C. *Quantum gravity* Cambridge: Cambridge University Press. 2004.
- C. Rovelli. Forget time. arXiv:0903.3832v3 [gr-qc]. 2009.
- C. Rovelli. A new look at loop quantum gravity. arXiv:1004.1780v1 [gr-qc]. 2010.
- Rovelli, C. *La realtà non è come ci appare*. Milano: Raffaello Cortina Editore. 2014.
- J. Schwinger. On Quantum-Electrodynamics and the Magnetic Moment of the Electron. *Physical Review*, 73, 416-417. 1948.
- S.I. Tomonaga. On a Relativistically Invariant Formulation of the Quantum Theory of Wave Fields. *Progress of Theoretical Physics*, 1/2, 27-42. 1946.
- E. Witten. String theory dynamics in various dimensions. *Nuclear Physics B*, 443/1, 85-126. 1995.

D. Fiscaletti

Woit, P. *Neanche sbagliata. Il fallimento della teoria delle stringhe e la corsa all'unificazione delle leggi della fisica*. Torino: Codice Edizioni. 2007.

C.N. Yang, R. Mills. Conservation of Isotopic Spin and Isotopic Gauge Invariance. *Physical Review*, 96, 191-196. 1954.