

# Astronomia Multimessaggera

Luciano Di Iorio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Convitto Nazionale Mario Pagano di Campobasso, Italia

## Parole Chiavi

*Astronomia multimessaggera, fisica olografica, simmetrie, acceleratore di particelle subatomiche*

## Abstract

L'astronomia multimessaggera rappresenta una rivoluzione nello studio dell'universo, consentendo l'analisi integrata di onde gravitazionali, radiazione elettromagnetica, neutrini e raggi cosmici per comprendere fenomeni astrofisici estremi. Questo approccio ha inaugurato una nuova era con l'evento GW170817, dimostrando come la combinazione di diversi segnali permetta una visione più completa rispetto all'astronomia tradizionale. L'articolo esplora il legame profondo tra l'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande, mettendo in relazione la fisica delle particelle con la cosmologia. Viene analizzato il ruolo fondamentale delle simmetrie e della loro rottura nella formazione della struttura dell'universo, dalla scala subatomica fino alla rete cosmica delle galassie. Particolare attenzione è dedicata al Modello Standard, ai meccanismi di interazione tra particelle e ai processi che hanno caratterizzato l'universo primordiale, incluse le transizioni di fase e la formazione degli stati della materia. Sono inoltre descritti gli strumenti sperimentali e tecnologici che hanno reso possibile l'attuale avanzamento della ricerca, come acceleratori di particelle, rivelatori e telescopi di nuova generazione. L'articolo evidenzia anche le connessioni interdisciplinari tra fisica, teoria dell'informazione e intelligenza artificiale, sottolineando come modelli come quello di Ising e le reti neurali condividano principi comuni di emergenza e organizzazione della complessità. In conclusione, l'astronomia multimessaggera emerge come un paradigma unificante capace di integrare osservazione, teoria e tecnologia, offrendo nuove prospettive sulla natura della materia, dell'energia e dell'informazione, e contribuendo a una comprensione sempre più profonda dell'origine e dell'evoluzione dell'universo.

## Autore Corrispondente

Luciano Di Iorio  
Personale Educativo,  
Convitto Nazionale Mario Pagano di  
Campobasso, Italia  
e-mail: lucianodiiorio13@gmail.com

L'astronomia multimessaggera consente di ottenere informazioni complementari, superando i limiti della sola astronomia ottica e svelando la fisica dei buchi neri, stelle di neutroni e supernovae. È un approccio rivoluzionario che permette di risolvere enigmi che la sola luce non potrebbe spiegare. È un metodo che combina simultaneamente onde gravitazionali, fotoni (luce), neutrini e raggi cosmici per studiare fenomeni astrofisici estremi. L'evento GW170817 del 2017 ha segnato il punto di nascita dell'astronomia multimessaggera. La fusione delle due stelle di neutroni è stata rilevata sia dalle onde gravitazionali (LIGO e Virgo) che da un lampo di raggi gamma (Fermi e INTEGRAL). Questa sinergia ha permesso di ottenere una visione completa dell'evento: la luce ha mostrato la materia espulsa, le onde gravitazionali hanno rivelato quanto erano massicci gli oggetti.

L'Universo è fatto di materia ed energia, ma anche di informazione. John Wheeler pone le basi per la moderna comprensione della fisica come elaborazione di informazioni. È un'ipotesi scientifica chiamata Fisica dell'Informazione o Universo Olografico. Sempre più fisici sostengono il concetto che ogni entità del mondo fisico *l'It* derivi la sua esistenza da *bit* di informazione (come John Wheeler "It from Bit"). In termodinamica, esiste un legame diretto tra l'energia e l'informazione. La nostra conoscenza dei fenomeni submicroscopici ci permette di capire l'universo, ma la comprensione dei fenomeni nucleari spiega qual'è la sorgente di energia del sole e delle stelle. Sarebbe impossibile tracciare la posizione e la velocità di ogni singola molecola (in una mole di gas ce ne sono circa  $6,022 \times 10^{23}$ ). L'universo è stato sinora osservato tramite le onde elettromagnetiche di diversa frequenza emesse dai corpi celesti (prima la luce, poi le onde radio, gli infrarossi, i raggi X e  $\gamma$ ). Una gran parte della materia nell'universo non emette radiazioni elettromagnetiche. L'esistenza di questa materia invisibile è stata messa in evidenza indirettamente tramite la sua interazione gravitazionale con la materia che emette onde elettromagnetiche. La luce non è altro che la componente della radiazione elettromagnetica che il nostro occhio può rivelare. Le galassie a spirale, come la nostra galassia, sono un agglomerato di  $\sim 10^{11}$  stelle disposte in una forma di un nucleo centrale e di un disco schiacciato e ruotante. Un sistema termodinamico è qualsiasi aggregato di materia o radiazione abbastanza grande da essere descritto da parametri macroscopici senza riferimento ai singoli costituenti atomici o subatomici. Il marchio di fabbrica della termodinamica è la generalità, si applica a tutti i tipi di sistemi, fissa dei limiti sui processi fisici consentiti e stabilisce relazioni tra proprietà apparentemente non correlate. Le proprietà derivano dalle proprietà di simmetria delle leggi fondamentali della fisica.

Quando si incomincia a studiare un sistema, la prima domanda che i fisici si pongono è quali sono le sue simmetrie. Le immagini ci permettono di capire che cosa succede. Consideriamo le foto di sistemi con 1000 spin di lato sopra la temperatura critica. L'immagine è un mosaico di pixel bianchi e neri, solitamente simulazioni numeriche di modelli di fisica statistica; da queste immagini i fisici estraggono i dati numerici che verranno utilizzati per formulare una descrizione del sistema mediante leggi matematiche. Gli astronomi per descrivere la struttura di un sistema incominciano da una mappa con misurazioni precise di distanze e dimensioni di oggetti celesti. Gli strumenti a disposizione degli astrofisici sono il telescopio, il radiotelescopio, interferometro per osservare l'universo in modi diversi, analizzando diverse lunghezze d'onda o sfruttando principi fisici differenti per comprendere le leggi fisiche che lo governano. Le immagini introducono il concetto di simmetria, divenuto sempre più importante in fisica. Riconoscere una simmetria semplifica la descrizione matematica di un sistema. Inoltre permette di prevedere l'esistenza di particelle prima ancora che vengano osservate, come nel caso del bosone di Higgs. Un campo può essere osservato solo attraverso i suoi effetti su un'altra sorgente dello stesso campo. Due particelle interagiscono quando si scambiano quantità di moto dovuto a un campo. Una particella è sorgente di uno o più campi coi quali modifica le proprietà dello spazio circostante. Una seconda particella che si trovi nel campo della prima e che possa essere sorgente dello stesso tipo di campo è soggetta a una forza. La prima particella sente la stessa forza, in verso opposto, in virtù del campo creato dalla seconda. La simmetria guida i fisici nella ricerca di strutture profonde e unificanti della realtà. Per Charles Sanders Peirce, l'immagine è spesso un'icona, poiché rimanda al suo oggetto in virtù di un rapporto di somiglianza.

L'immagine funge da significante (la forma visibile) che rinvia a un significato (il concetto o l'idea che genera nell'osservatore).

Per Barthes il testo verbale (es. didascalia) guida l'interpretazione dell'immagine, limitando le sue possi-

bili interpretazioni.

Il linguaggio visivo è capace di produrre senso attraverso l'interdipendenza tra elementi. Le immagini introducono il concetto di simmetria. In semiotica strutturale, il senso non nasce da elementi isolati, ma dalle relazioni tra di essi. Il modello principale è il *Quadrato Semiotico* di Algirdas J. Greimas. Questa struttura si basa su opposizioni binarie e sulle loro negazioni (ad esempio, il rapporto vita e morte e il rapporto vita non-vita). La semiotica parla spesso di isomorfismo, ovvero una "simmetria di struttura" tra il piano dell'espressione (come una cosa appare) e il piano del contenuto (cosa significa).

È necessario prima individuare i tratti essenziali, descrivere con un modello la struttura e cominciare un'analisi per scoprire una struttura concettuale. Una mappa dell'universo come *Regalade* offre agli astronomi uno strumento unico per localizzare con precisione ottanta milioni di galassie distribuite sull'intero cielo osservabile. *Regalade* è un catalogo che include misurazioni precise della distanza e delle dimensioni di tutte le galassie censite, risultante da quattordici cataloghi ampiamente utilizzati. Il catalogo permette l'osservazione di vari livelli di organizzazione, prodotto da strumenti tecnici che permettono di scendere dall'universale al particolare. Il telescopio James Webb ha creato la mappa più precisa di sempre della materia oscura, potrebbe aiutare gli scienziati a capire finalmente dove si trova e di cosa è fatta. Istituto nazionale di astrofisica (Inaf), ha reso pubblico il terzo set di dati del LoTs-Dr3, uno dei più ambiziosi programmi di mappatura del cielo radio a bassa frequenza. Con il radiotelescopio europeo Lofar è stato possibile fare le osservazioni che hanno consentito di produrre una rappresentazione del cielo radio a bassa frequenza di straordinario dettaglio e di realizzare il censimento più completo mai ottenuto dei buchi neri supermassicci in fase di accrescimento.

Decine di diversi fenomeni emergenti verranno studiati e compresi sia qualitativamente che quantitativamente. Le galassie, gli ammassi stellari, i buchi neri. Le mappe attuali coprono sei miliardi di anni luce di distanza, avranno un impatto enorme ai fini della ricerca scientifica e per l'astronomia multimessaggera. I ricercatori si aspettano di incontrare, mentre combineranno pezzi meno complicati in un sistema più complicato, di capire i tipi di comportamento essenzialmente nuovi che possono risultare. Un grande numero di interazioni semplici può dare origine a un comportamento complesso e ordinato. Usando le medie statistiche, la complessità del caos microscopico si annulla e lascia il posto a leggi termodinamiche semplici, incredibilmente precise. Nella fisica delle particelle governa la classificazione una distinzione: fermioni da una parte, bosoni dall'altra. Tutto l'Universo rientra ordinatamente in queste due categorie.

Un fenomeno fisico emergente può essere predetto o spiegato osservando le singole parti di un sistema con le tecniche mutuata dalla meccanica quantistica e dalla fisica statistica. Le tecnologie sperimentali per verificarli esistono. Un team di fisici dell'Università di Oklahoma ha esplorato il comportamento degli anioni, particelle teorizzate negli anni settanta. L'anione è né bosonica né fermionica. I modelli teorici mostrano che gli anioni unidimensionali possono assumere due nature distinte. Fornire uno spazio al di là della fisica tradizionale da indagare con nuove tecnologie sperimentali è fondamentale per verificarne l'esistenza. Ci sono certamente più livelli di comprensione dell'universo. Una radiogalassia la cui coda disegna la forma di un cuore nello spazio profondo. *Un cuore spaziale* composto da getti di particelle relativistiche emessi dal nucleo di una galassia a 2,5 miliardi di anni luce da noi. L'immagine è stata ottenuta nell'ambito della mappatura radio a bassa frequenza del cielo realizzata con il radiotelescopio europeo Low Frequency Array (Lofar), uno degli strumenti più avanzati al mondo per l'osservazione dell'universo alle basse frequenze radio. Nel silenzio cosmico dell'universo si cerca di captare i segnali, di esplorare la natura della materia oscura e di indagare fenomeni di fisica che sfuggono alle tecniche tradizionali. Come le condizioni iniziali alla nascita dell'universo e il modo in cui i buchi neri inghiottono informazione. La conoscenza si sposta dal visibile verso l'invisibile, un circolo virtuoso che governa la struttura della materia.

L'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande descrivono un metodo che lega la struttura dell'universo alla sua evoluzione. Un metodo che regola il comportamento dell'invisibile nel mondo subatomico. Le particelle subatomiche possono rappresentare lo studio del reale in sé stesso. Giungere alla sua essenza, alla natura fondamentale delle cose. Una combinazione di ricerca scientifica, intuizione e abilità matematica. Sono in gioco profondi problemi concettuali e tecnici. Una ricerca italiana pubblicata su *Physical Review Letters* dimostra che i circuiti fotonici quantistici si comportano spontaneamente come reti neurali. I fotoni che obbediscono spontaneamente alle equazioni di Hopfield in un chip di pochi millimetri invitano a cer-

care le simmetrie che la natura nasconde sotto la superficie apparente delle cose. *La realtà fisica è percorsa da connessioni invisibili*: sistemi apparentemente diversi come i sistemi fotonici, le reti neurali, oppure i mercati finanziari, obbediscono alle stesse equazioni rivelando simmetrie nascoste. Sono simmetrie di due premi Nobel: Parisi nel 2021 (gli è stato assegnato per la scoperta dell'interazione tra disordine e fluttuazioni nei sistemi fisici dalla scala atomica a quella planetaria) e Hopfield nel 2024 (gli è stato assegnato per scoperte e invenzioni fondamentali che consentono l'apprendimento automatico con reti neurali artificiali). Sono simmetrie che emergono solo quando si trova la struttura matematica per descriverle. Quello che vediamo è il fenomeno (la luce di una stella, la forma di una galassia), ma sotto la superficie si nasconde un'impalcatura di simmetrie e invarianze matematiche che è il linguaggio del cosmo. Le leggi della fisica non cambiano nel tempo. In fisica, ogni legge di conservazione (come la conservazione dell'energia) è il risultato di una simmetria matematica sottostante. Gli astronomi intuiscono l'esistenza di un oggetto non perché lo vedono, ma perché la mappa matematica presenta un buco, una simmetria interrotta. Gli astronomi e i fisici usano i gruppi di Lie per descrivere come le forze interagiscono. La struttura stessa dell'atomo e delle galassie risponde a queste regole di invarianza. Per descrivere le strutture cosmiche, gli astronomi usano un insieme di strumenti matematici a seconda della scala di grandezze fisiche che stanno osservando. Per descrivere la gravità (il campo per eccellenza in astronomia), gli astronomi non usano semplici numeri, ma tensori (un tensore è una struttura matematica che descrive come lo spazio-tempo si curva in presenza di massa). L'equazione di campo di Einstein: il lato sinistro descrive la geometria, il lato destro descrive la materia. Questa matematica calcola l'orbita dei pianeti o la deviazione della luce vicino a un buco nero. È possibile trattare i dati come se fossero particelle in un campo di forze, ciò collega la fisica statistica all'intelligenza artificiale moderna e che ha portato al Nobel per la Fisica 2024. Gli astronomi e i fisici amano questo approccio. Trattare i dati come entità fisiche permette di applicare le leggi della termodinamica all'informazione e permette di usare strumenti tecnologici e matematici come un metodo di calcolo. Ciò collega fisica statistica all'intelligenza artificiale moderna, la soluzione è nello stretto legame tra matematica, tecnologia e ricerca. I risultati della fisica quantistica non smettono mai di sorprendere e questa volta lo fa con un risultato assurdo. Scoperta una particella di luce che *viaggia in 37 dimensioni*: la nuova frontiera della ricerca scientifica. Un team internazionale di scienziati è riuscito a creare una particella di luce multitasking che ha la capacità di simultaneità temporale (vivere contemporaneamente) in ben 37 dimensioni, un numero che va ben oltre le tre dimensioni spaziali - più il tempo - che percepiamo ogni giorno. La fisica quantistica è una mappa dell'universo invisibile capace di mostrare con chiarezza il legame profondo tra la materia oscura e il cosmo e descrivere matematicamente addirittura la sua struttura fine ( $\alpha \sim 1/137$ ) per giungere alla divisione più estrema nei livelli energetici degli atomi. Gli apparati sperimentali sono interessanti sia per la tecnica utilizzata sia per illustrare vari aspetti della fisica delle alte energie.

Consideriamo il collisionatore LEP situato in un tunnel circolare di 27 chilometri al confine tra Svizzera e Francia del CERN di Ginevra. In funzione dal 1989 sino al 2000, raccoglievano dati 4 rivelatori tra cui OPAL. Esperimenti ermetici di questo tipo vengono talvolta chiamati rivelatori  $4\pi$ . OPAL era un rivelatore di particelle progettato per studi ad alta precisione, inclusa la misurazione dei bosoni e la ricerca di nuove particelle come il bosone di Higgs. Era un rivelatore con struttura cilindrica dove venivano osservati eventi semplici. Tra gli elementi principali di OPAL figura un grande rivelatore a tracce per particelle cariche immerso in un campo magnetico uniforme. È uno strumento per il tracciamento della traiettoria e la posizione di una particella. Il campo magnetico uniforme costringe le particelle cariche a muoversi su traiettorie elicoidali attorno alla direzione del campo magnetico, permettendo di misurare l'impulso.

Quando una particella carica veniva prodotta nell'urto, la sua traiettoria diventava un'elica. Questo rivelatore è a sua volta racchiuso in una struttura cilindrica lungo la cui superficie esterna è avvolto un conduttore in alluminio (solenoidale). Nell'interspazio, tra avvolgimento solenoidale e giogo magnetico, risiede il calorimetro elettromagnetico che serve per l'identificazione e la misura dell'energia di ogni fotone o elettrone che vi giunga. Il cuore pulsante di un esperimento di fisica delle alte energie è il rivelatore microvertice ad elementi di silicio, situato vicino al punto di collisione per identificare i vertici di decadimento delle particelle. I vertici di decadimento è il punto esatto nello spazio tridimensionale in cui una particella instabile cessa di esistere e si trasforma in due o più particelle diverse. Le camere di vertice circondano il rivelatore di microvertice. Le camere di vertice sono i sottorilevatori posizionati più vicini al punto di interazione.

Mentre il solenoide esterno in alluminio fornisce il campo magnetico necessario, le camere di vertice forniscono la risoluzione spaziale estrema (nell'ordine dei micrometri) necessaria per distinguere i punti di decadimento. Con la risoluzione micrometrica possiamo chiaramente vedere uno spazio vuoto tra il vertice primario e quello secondario. Questa è la prova inconfutabile che lì è esistita una particella instabile. Il punto di origine della particella e il punto di nascita sembrerebbero lo stesso punto, non potremmo dire se è successo qualcosa di nuovo. Dopo le camere di vertice incontriamo i dispositivi di tracciamento a gas: la Camera JET e un insieme di camere a deriva, chiamate Camere-z, progettate per coprire volumi più ampi e misurare le traiettorie su distanze maggiori. Quando una particella carica entra nella Camera JET immersa nel campo magnetico, subisce la forza di Lorentz. Questa forza la costringe a seguire una traiettoria circolare (piano trasverso). Il piano trasverso rappresenta la componente della quantità di moto di una particella. Dalla direzione della curvatura si capiva se la particella era positiva o negativa. Una particella carica in un campo magnetico segue una traiettoria curva. Dalla Camera JET otteniamo il momento trasverso, dal TOF otteniamo la velocità. Risultato: combinando momento e velocità, possiamo calcolare la massa della particella. Questo permette di distinguere le particelle che hanno la stessa carica e momento simile, ma masse diverse. Sulla superficie esterna del solenoide è localizzato il rivelatore di tempo di volo (spesso abbreviato in TOF, dall'inglese Time of Flight), costituito di un insieme di contatori a scintillazione che permettono di misurare il tempo intercorso tra la produzione di una particella e il suo arrivo in uno scintillatore. Questa è una posizione strategica: il TOF serve a fornire la velocità della particella. Il localizzatore TOF sulla superficie esterna del solenoide in alluminio offre diversi vantaggi. Più il rivelatore è lontano dal punto di collisione, maggiore è il tempo di volo e più facile è distinguere particelle con velocità leggermente diverse. *Il TOF è il pezzo mancante del puzzle per dare un nome alle particelle.*

Segue il calorimetro elettromagnetico. Ci sono due rivelatori: l'ECAL il calorimetro della sezione elettromagnetica e l'HCAL il calorimetro di quella adronica. Il rivelatore più esterno (rivelatore di muoni) serve per identificare e tracciare i muoni. Per determinare la sezione d'urto di ogni reazione, occorre misurare con precisione la luminosità di LEP nel punto di interazione. La luminosità è fatta misurando la frequenza delle collisioni elastiche positrone-elettrone. Per trasformare il numero di eventi osservati in una sezione d'urto (è la misura della probabilità che una reazione avvenga) dobbiamo conoscere con estrema precisione la luminosità. Per misurare lo scattering vengono posizionati dei piccoli calorimetri ad alta precisione molto vicini al tubo del fascio di particelle (monitor di luminosità). Il tragitto non si limita a contare le particelle ma le traccia: decadimenti, tracciamento centrale nel campo del solenoide in alluminio, identificazione tramite velocità, misura dell'energia e identificazione finale. Questo è il percorso che fa la particella.

Con i quattro esperimenti al LEP del CERN di Ginevra tra cui OPAL sono iniziate una serie di misure di altissima precisione dei parametri della teoria elettrodebole e di verifica del Modello Standard. I quattro esperimenti hanno rappresentato una nuova era in termini di grandezza, complessità e accuratezza delle apparecchiature e nel numero di fisici che partecipano a un singolo esperimento. La fisica delle particelle è basata su esperimenti in cui le interazioni delle particelle vengono studiate grazie all'uso di rivelatori, più o meno sofisticati. La tecnologia restituisce dati che costringono la teoria a evolversi. Per testare queste teorie sempre più complesse, abbiamo dovuto costruire macchine che sono tra le opere ingegneristiche più grandi della storia umana. Gli scienziati stanno già progettando il successore dell'LHC: un tunnel lungo 91 chilometri che promette di esplorare confini della fisica ancora inimmaginabili.

Come è possibile che da regole probabilistiche e astratte emerga il nostro mondo macroscopico concreto? È una configurazione statisticamente stabile e decoerente di un immenso numero di eventi quantistici. Il mondo macroscopico non è separato da quello quantistico. *Un sistema quantistico rimane astratto e probabilistico finché è isolato.* Un sistema quantistico isolato può esistere in una sovrapposizione di stati (ad esempio, essere in due posti contemporaneamente). Appena una particella tocca un fotone di luce o una molecola d'aria, la sua funzione d'onda interagisce con l'ambiente (Decoerenza Quantistica). In fisica quantistica il termine osservazione è sinonimo di interazione. *Basta un urto* e le opzioni probabilistiche (essere in due posti diversi) si eliminano a vicenda in frazioni di secondo infinitesime. Il risultato è che il sistema "decade" in uno stato unico e concreto. Un sistema quantistico rimane astratto e probabilistico solo finché è isolato. Questo spiega perché costruire un acceleratore come l'LHC o un computer quantistico sia un'impresa titanica. Gli scienziati devono creare zone di "silenzio assoluto". Come ad esempio: riuscire a

riprodurre temperature vicine allo zero assoluto per ridurre le vibrazioni termiche che distruggerebbero lo stato quantistico. Creare questo ambiente significa eliminare l'entropia stessa dell'universo. Per mantenere le particelle nel loro stato puro e probabilistico, gli scienziati devono costruire dei macchinari di isolamento estremo, perché la superficie terrestre è costantemente bombardata da neutrini, raggi cosmici o radiazioni ambientali. Ricordiamo A. Zichichi (Presidente Infn) che progettò di costruire e realizzare il laboratorio del Gran Sasso a centinaia di metri di profondità, in quanto la roccia sovrastante funge da scudo naturale, filtrando il rumore di fondo dell'universo e permettendo ai rilevatori di rivelare solo le collisioni create artificialmente. Mentre al CERN il silenzio è fondamentale per rilevare segnali estremamente deboli, nei computer quantistici (come quelli di Google) il silenzio è la condizione di esistenza del calcolo. Se un solo fotone di calore entra nel processore quantistico, il bit quantistico (qubit) decade. L'informazione si perde perché interagisce con l'ambiente. Il futuro prossimo è realizzare macchine più silenziose, perché permettono di osservare fenomeni ancora più deboli, come i segnali della Materia Oscura.

Gli Acceleratori di Particelle (CERN) permettono di studiare la struttura della materia ai tempi del Big Bang, ricreare quelle condizioni di energia in un tunnel di 27 km. Senza la tecnologia dei magneti superconduttori, il Bosone di Higgs sarebbe rimasto solo un'ipotesi matematica.

I Telescopi Spaziali (James Webb & Euclid) non sono semplici cannocchiali, ma laboratori che leggono l'infrarosso e mappano la materia oscura, permettendoci di vedere l'universo quando aveva poche centinaia di milioni di anni. Con i Rivelatori di Onde Gravitazionali (LIGO e Virgo) la tecnologia ha raggiunto vette impensabili: misuriamo variazioni di distanza inferiori al diametro di un protone su bracci laser di 4 km. Si è passato da modelli semplici a modelli più complessi fino a giungere a teorie complete. Nel campo sperimentale si è avuto un rapidissimo progresso tecnologico. Le prime esperienze venivano effettuate da pochi fisici con piccoli acceleratori. Le esperienze attuali sono fatte presso acceleratori circolari aventi molti chilometri di circonferenza (oppure acceleratori lineari) che a causa di queste dimensioni le principali esperienze coinvolgono centinaia e talvolta migliaia di fisici. *Per i fisici delle particelle*, i primi attimi dell'universo costituiscono un acceleratore senza limiti di energia. *Per gli astrofisici*, l'applicazione delle teorie fisiche rappresenta l'unico modo per capire cosa accade. *La discussione ha messo in evidenza le connessioni profonde tra cosmologia e fisica subnucleare. Per questo, si dice che studiare l'estremamente piccolo significa studiare e comprendere la nascita dell'universo.*

La storia dell'universo primitivo è divisa in due ere e in più epoche: era della radiazione ed era della materia; epoca della Grande Unificazione, epoca elettrodebole, ecc. Queste sono solo alcune delle possibili suddivisioni. Le transizioni fra epoche sono chiamate transizioni di fase, riprendendo il linguaggio della termodinamica. L'ipotesi di un universo che ha avuto un'origine puntiforme e che ha iniziato subito ad espandersi, porta a pensare a temperature iniziali colossali che diminuiscono col passare del tempo. *Il punto di origine è la singolarità, dove tutta l'energia era concentrata in un volume infinitesimo.* Tutta la materia e l'energia dell'intero cosmo erano ammassate in uno spazio più piccolo di un atomo. In quel punto, la temperatura era di circa  $10^{32}$  K (la cosiddetta Temperatura di Planck).

È possibile illustrare questo concetto evolutivo con un esperimento ideale. Consideriamo un gas di particelle posto in un contenitore, esempio un gas di azoto in una stanza. Alla pressione ambiente di 1 atmosfera e alla temperatura di  $20^{\circ}\text{C}$  si può considerare che le molecole di azoto siano gli oggetti indivisibili e si può pensare al gas come costituito di tante palline, le molecole, di dimensioni molto piccole tali da poter essere considerate quasi puntiformi. Queste molecole si muovono di moto disordinato, ognuna in modo indipendente dalle altre. A queste condizioni le molecole viaggiano nel vuoto, urtano le pareti del recipiente e rimbalzano indietro. Supponiamo di innalzare la temperatura del gas. A livello submicroscopico, l'effetto immediato è l'aumento della velocità media delle molecole e quindi della loro energia cinetica media. Il moto disordinato è lo stesso, ma tutto avviene più rapidamente. Continuiamo ad aumentare la temperatura, c'è forte pressione, per cui dovremo rafforzare le pareti della stanza. Ad un certo momento però la temperatura diventa così elevata, conseguentemente l'energia cinetica di ogni molecola è così alta, che in un urto fra due molecole, una molecola (o entrambe) può venire eccitata. Si dice che si ha un *urto inelastico*. L'energia cinetica si trasforma in energia di eccitazione di una molecola. Poco tempo dopo essere stata eccitata (una frazione di milionesimo di secondo), la molecola si diseccita emettendo radiazione elettromagnetica infrarossa o visibile. Il gas è diventato più complesso: esso è costituito di molecole, molecole eccitate e

radiazione elettromagnetica infrarossa. Se innalziamo ancora la temperatura, si giunge a un certo valore critico. A questa temperatura esiste una piccola frazione di molecole con energia notevolmente superiore a quella media. Può quindi avvenire che in un urto una o entrambe le molecole di azoto si rompano in due atomi di azoto. Con temperature ancora superiori si ottiene una semplificazione: quando tutte le molecole si sono scisse in atomi, possiamo pensare che il nostro sia un gas formato di atomi di azoto, più radiazione elettromagnetica. Continuiamo ad alzare la temperatura e quindi l'energia cinetica media degli atomi di azoto. Si ripete quanto già avvenuto per le molecole: a un certo istante l'energia delle collisioni è sufficiente per eccitare gli atomi e sufficiente per ionizzare, cioè per staccare un elettrone da un atomo. Entriamo in una nuova situazione con un gas di elettroni, ioni positivi di azoto (cioè atomi a cui manca un elettrone) e radiazione elettromagnetica. Possiamo ora pensare ad essa come a un gas di fotoni, un insieme di "quanti di luce". Un gas di questo tipo, con elettroni, ioni positivi e fotoni, si trova negli strati esterni del Sole. Proseguendo nel nostro esperimento ideale con l'aumentare della temperatura raggiungeremo altre fasi, corrispondenti ad atomi di azoto senza due elettroni, poi senza tre, ecc., fino al momento in cui tutti gli elettroni saranno staccati dal nucleo dell'azoto. Ora abbiamo un nuovo tipo di gas, costituito di nuclei positivi di azoto, di elettroni e di fotoni di media energia (raggi X). Abbiamo quello che si chiama un *plasma*, cioè uno stato formato di cariche elettriche, positive e negative, e radiazione elettromagnetica. È questo *il quarto stato della materia* (oltre ai tre stati ben noti: solido, liquido e gassoso), *uno stato molto abbondante nell'universo*, perché è lo stato che si trova nelle stelle. Questo gas non può più essere contenuto in nessun recipiente perché negli urti delle particelle del gas con le pareti, esse verrebbero distrutte (se il numero di particelle del gas è elevato).

Occorre contenerlo nel vuoto tramite campi magnetici, come si cerca di fare nelle macchine (Tokamak). Un ulteriore aumento della temperatura, cioè dell'energia di collisione, provoca la rottura dei nuclei di azoto in neutroni e protoni. Ora il nostro gas è costituito di elettroni, protoni, radiazione elettromagnetica (raggi  $\gamma$ ) più antineutrini. I raggi gamma ( $\gamma$ ) sono radiazioni elettromagnetiche ad altissima energia, frequenza elevata e lunghezza d'onda brevissima, emesse dal decadimento nucleare o da eventi cosmici violenti. Sono altamente ionizzanti e penetranti. Si pensa che innalzando ancora la temperatura si dovrebbero avere come oggetti elementari i leptoni e i quark, i fotoni e i gluoni - nuovo stato della materia. Si dovrebbe osservare un'altra transizione, passando a un nuovo tipo di gas in condizioni di densità elevata. Lo stato con quark e gluoni è stato chiamato *plasma di quark e gluoni* - potrebbe essere questo il quinto stato della materia? La scoperta di questo eventuale quinto stato della materia è uno degli obiettivi del nuovo acceleratore LHC (Large Hadron Collider) del CERN. Le stelle primitive conservano gas molto antico, poco rimescolato. Una stella debolissima dalla luce fioca con una composizione chimica quasi incontaminata e livelli di metalli ai minimi storici è PicII-503 ed è stata individuata ai margini dell'alone della Via Lattea, nella galassia Pictor II una minuscola galassia dove esiste questa stella primitiva considerata una sorta di "cella frigorifera cosmica". Gli astronomi suddividono le stelle in generazioni in base alla loro composizione chimica. Le primissime, nate da un universo composto quasi solo da idrogeno e elio, erano prive di metalli. Le successive contengono elementi pesanti prodotti dalle esplosioni delle precedenti. Gli scienziati analizzano gli oggetti stellari per ricostruire fasi perdute dell'universo primordiale. Per gli astronomi, quasi tutto ciò che non è idrogeno o elio viene chiamato "metallo". Ferro, calcio, carbonio, ossigeno, silicio nascono dentro le stelle tramite reazioni di fusione nucleare, oppure vengono forgiati nelle fasi finali più violente, come supernove e fusioni di stelle di neutroni.

Oggetti di questo tipo chiariscono come l'universo sia passato da un gas leggero uniforme a un cosmo pieno di galassie, pianeti e corpi celesti. Era una fase in cui nell'universo i metalli presenti nel gas interstellare erano pochissimi. Senza di loro non esisterebbero pianeti rocciosi, atmosfere complesse, né molecole. Un aggregato di materia o radiazione è un sistema termodinamico che può essere descritto da parametri macroscopici senza riferimento ai costituenti atomici o subatomici.

Il Modello Standard descrive quasi tutto ciò che conosciamo della materia, è una teoria estremamente complessa e richiede equazioni complesse per essere descritta formalmente. Descriverlo formalmente significa condensare tutte le interazioni fondamentali (eccetto la gravità) in un'unica, densissima espressione: la Lagrangiana. La versione estesa occupa un'intera lavagna di equazioni fitte include tutti i componenti dei vettori e le matrici. In termini concettuali è possibile descrivere la Lagrangiana del Modello Standard.

Può essere suddivisa in quattro settori: il Settore di Gauge descrive le interazioni fondamentali attraverso la dinamica dei mediatori delle forze, i gluoni (forte), i bosoni W e Z (debole) e i fotoni (elettromagnetica); il Settore Fermionico (Materia), descrive come i quark e i leptoni interagiscono con i bosoni di gauge attraverso la derivata covariante; il Settore di Higgs introduce la rottura spontanea della simmetria, senza questo settore, tutte le particelle avrebbero massa nulla; infine il Settore di Yukawa, descrive l'interazione tra il campo di Higgs e i fermioni, è il meccanismo attraverso il quale quark ed elettroni ottengono la loro massa.

C'è un lato più estremo e affascinante della fisica. Parliamo di oggetti dove la materia e le leggi della fisica vengono spinte ai loro limiti assoluti. L'astrofisica delle alte energie. Una supernova non è solo un'esplosione, Quando una stella massiccia esaurisce il combustibile nucleare, il suo nucleo non può più contrastare la gravità. Il nucleo implode in una frazione di secondo. L'onda d'urto della materia contro il nucleo ultradenso espelle gli strati esterni nello spazio. Se il residuo del collasso ha una massa tra circa 1,4 e 3 volte quella del Sole, si forma una stella di neutroni. Alcune ruotano velocemente emettendo fasci di radiazioni (pulsar) o possiedono campi magnetici trilioni di volte più forti di quello terrestre (magnetar). Se la massa del residuo supera il limite Tolman-Oppenheimer-Volkoff nulla può fermare il collasso. Si forma un buco nero.

Pmr 1 è il prodotto di una stella prossima alla fine del proprio ciclo vitale, una nebulosa planetaria la cui forma ricorda *un cervello racchiuso nella scatola cranica*, da cui il nickname di nebulosa "cranio esposto". Situata a circa 5 mila anni luce da noi, la nube di gas e polveri è stata immortalata per la prima volta oltre dieci anni fa dal telescopio spaziale Spitzer. Le nuove immagini del telescopio James Webb ne rivelano ora dettagli inediti, accentuando l'aspetto "encefalico". Dalla sua massa dipenderà la propria esistenza, l'astro continuerà a perdere materia fino a quando non rimarrà soltanto il nucleo destinato a raffreddarsi lentamente nel corso di miliardi di anni. L'astronomia multimessaggera permette di ottenere una visione completa di eventi estremi. Siamo alla comprensione, a livello profondo, delle forze e delle leggi dell'estremamente piccolo. Le leggi che governano la struttura della materia sono legate alla struttura dell'universo e alla sua evoluzione. Questa realtà oggettiva può presentarsi sotto due aspetti: come verità di ragione e verità di fatto. Le verità di ragione sono necessarie, quelle di fatto sono contingenti. Sono questi i due modi d'essere del reale, retto ciascuno da leggi proprie, ciascuno con proprie inconfondibili caratteristiche, cui corrispondono poi anche i due diversi modi di conoscenza del reale: razionale e sensibile. Ecco due definizioni di questi due tipi di verità: Le verità di ragione si fondano su puri principi logici; quelle di fatto invece sull'esperienza. Le une riguardano l'essenza, le altre l'esistenza, quelle il necessario, queste il contingente. Vi è un'infinità di mondi possibili che non implicano contraddizione, così come si possono fare romanzi che non si effettueranno mai e che sono tuttavia possibili. Per essere possibile basta che una cosa sia intelligibile. La Nebulosa Elica è un esempio di nebulosa planetaria. Sebbene dal punto di vista terrestre sembri un occhio, l'Elica è in realtà un tunnel di gas incandescenti lungo mille miliardi di miglia. Al suo centro si trova una stella nana bianca. Il telescopio spaziale James Webb della NASA ha ingrandito la Nebulosa Elica per offrire una visione ravvicinata del possibile destino finale del nostro Sole e del nostro sistema planetario.

Nell'immagine ad alta risoluzione del telescopio spaziale James Webb, la struttura del gas espulso da una stella morente viene messa a fuoco. L'immagine rivela come le stelle riciclano la loro materia restituendola al cosmo, seminando le future generazioni di stelle e pianeti.

L'immagine del JWST mostra la struttura ad anello che le è valsa il nickname di "Occhio di Dio". Esplorare i segreti dell'universo e il nostro posto in esso, osservare in modo incredibilmente dettagliato un oggetto astronomico, mostrare la struttura profonda dell'universo, questo è il compito della ricerca scientifica e dell'astronomia.

Un team della Nasa ha prodotto una mappa dell'universo invisibile con un livello di dettaglio senza precedenti, capace di mostrare con chiarezza il legame profondo tra la materia oscura e la materia ordinaria. Mostra in dettaglio la struttura fine della rete cosmica su una grande area: non solo i grandi ammassi, ma anche quelli meno massivi e più lontani, e i filamenti che li collegano. La rappresentazione descrive come la materia oscura si distribuisca in filamenti, ammassi e regioni sotto dense, delineando la cosiddetta "rete cosmica". I dati indicano con precisione che la materia oscura fornisce l'impalcatura gravitazionale su cui si formano e crescono le galassie. *L'osservazione dell'Universo in una distorsione infinitesimale*, grande

meno di una frazione di un atomo, *vuol dire misurare l'onda gravitazionale* e capire non solo ciò che vediamo, ma anche ciò che non vediamo. L'analisi nel gennaio del 2025 del segnale di onde gravitazionali più pulito mai registrato ad oggi ha permesso di validare ancora una volta la teoria della Relatività Generale, con il più alto tasso di precisione di sempre. Le onde gravitazionali hanno portato con sé anche una nuova astronomia, chiamata Multi Messaggera. Questo metodo consente di ottenere informazioni complementari, superando i limiti della sola astronomia ottica e svelando la fisica dei buchi neri, stelle di neutroni e supernovae. Lo studio delle interazioni tra costituenti è la conoscenza, le nozioni fondamentali di meccanica quantistica e possibilmente del suo formalismo matematico. La terminologia e alcuni concetti appaiono complessi. Nel caso elettromagnetico, due particelle interagiscono quando si scambiano quantità di moto, questo scambio è dovuto a un campo. La particella è sorgente di un campo col quale modifica le proprietà dello spazio circostante; una seconda particella che si trova nel campo della prima e che è sorgente dello stesso tipo di campo è soggetta a una forza. Anche la prima particella "sente" la stessa forza, in verso opposto del campo creato dalla seconda. Un campo può essere misurato solo attraverso i suoi effetti su un'altra sorgente dello stesso campo. Dal punto di vista quantistico, in perfetta analogia con l'elettromagnetismo, l'interazione è vista come emissione e assorbimento, da parte di due particelle fermioniche interagenti, di una particella bosonica virtuale. Tali particelle bosoniche virtuali sono le "portatrici" del campo. Come i campi, anche le particelle virtuali non possono essere rivelate direttamente, perché sono "nascoste" dal principio di indeterminazione. Attualmente si conoscono quattro tipi di interazioni: le interazioni gravitazionale, debole, elettromagnetica e forte. Lo spazio è un ambiente dinamico e strutturato, dove la gravità governa il movimento di entità enormi su distanze inimmaginabili. La materia e le leggi della fisica vengono spinte ai loro limiti assoluti. Ci sono stelle il cui nucleo implode ed espelle gli strati esterni nello spazio emettendo fasci di radiazioni. Oggetti dove la massa del residuo supera il limite collassa e forma un buco nero. Oggetti dove l'energia potenziale nucleare si trasforma in radiazione.

Oggetti come la nebulosa planetaria la cui forma ricorda *un cervello racchiuso nella scatola cranica*, da cui il nickname di nebulosa "cranio esposto". Sono immagini dell'universo.

L'astronomia multimessaggera è un modello della ricerca scientifica che si occupa anche dell'energia oscura, una forza misteriosa che sembra essere responsabile della materia capace di produrre senso, attraverso l'interdipendenza tra elementi. Cercare le simmetrie che la natura nasconde sotto la superficie apparente delle cose attraverso un oggetto celeste è concreta.

Se accettiamo l'idea che l'Universo sia un sistema termodinamico e di informazione, il Principio Olografico suggerisce che la nostra realtà tridimensionale (più il tempo) sia in realtà una "proiezione" di dati. L'analogia dell'Ologramma è iniziata cercando di capire cosa succede all'informazione quando cade in un buco nero. Una ricerca italiana pubblicata su *Physical Review Letters* dimostra che circuiti fotonici quantistici si comportano spontaneamente come reti neurali. Da tempo la fisica teorica trova interessanti punti di contatto tra sistemi fisici complessi, come ad esempio i vetri di spin e ciò che fa il cervello ad esempio quando recupera un ricordo. La ricerca, firmata da ricercatori del CNR, IIT, e di diverse università conferma questo suggestivo parallelismo studiando la luce - quella quantistica, fatta di fotoni identici che interferiscono tra loro. I fotoni identici in un circuito ottico integrato si comportano come una rete di Hopfield, uno dei modelli matematici più famosi per descrivere la memoria associativa. C'è stato un dialogo continuo tra teorie ed esperimenti. La teoria spinge la tecnologia al limite, e la tecnologia restituisce dati che costringono la teoria a evolversi. Le mappe come Google Earth mostrano solo formazioni che hanno almeno una dimensione. Se Google Earth cercasse di modellare ogni ruscello o strada come un oggetto solido tridimensionale fin dall'inizio il sistema collaserebbe. Per costruire qualsiasi cosa in mare dobbiamo sapere cosa c'è sotto. Quello che vediamo in superficie con Google Earth è solo una superficie, uno specchio che nasconde una complessità geologica che va ben oltre il semplice modello visivo. Parisi mostra il cammino che ha condotto allo studio e alla descrizione matematica dei comportamenti collettivi emergenti, quelli cioè che compaiono solo se il numero di agenti coinvolti (elettroni, molecole, neuroni, ...) è elevato. Non è possibile capire guardando al comportamento dei singoli elementi e per la comprensione dello studio delle interazioni tra costituenti è necessaria la conoscenza delle nozioni fondamentali di meccanica quantistica e possibilmente del suo formalismo matematico. Per una migliore comprensione consideriamo l'astronomia come multimessaggera che indica alcune possibili vie per la ricerca scientifica, AI è una tecnologia che conduce allo

suo libro per simulare la complessità dell'Universo.

Il cuore della struttura geometrica è la dimensionalità del Modello di Ising che determina il comportamento fisico del sistema nella transizione di fase. *Una proprietà intrinseca delle particelle elementari come gli elettroni è lo spin.* Lo spin è responsabile del magnetismo nei materiali. Le particelle cariche dotate di spin si comportano come piccoli magneti. Lo spin non indica un movimento di rotazione di una particella, ma il suo momento angolare. I fermioni hanno spin semintero, gli elettroni protoni neutroni hanno tutti spin  $\frac{1}{2}$ , i bosoni hanno spin intero (il Bosone di Higgs ha spin 0). A una 1-dimensione, si forma una catena di spin, gli spin sono disposti lungo una linea, ogni spin interagisce solo con i suoi due vicini. A due 2-dimensioni, si forma il reticolo piano, gli spin sono disposti su una griglia (solitamente quadrata) e ogni spin ha quattro vicini. A tre 3-dimensioni, ogni spin è al centro di un reticolo cubico e interagisce con sei vicini. Per il modello di Ising in 3D non esiste una formula, è uno dei grandi problemi aperti della fisica. La dimensione in 2D è dove il modello di Ising mostra tutta la sua importanza, perché è il punto esatto in cui emerge un comportamento collettivo complesso. Per visualizzare cosa succede, immaginiamo una scacchiera dove ogni casella può essere bianca (+1) o nera (-1); il protagonista è il calore. Il sistema cerca un equilibrio tra due forze opposte: l'energia degli spin di stare tutti allineati (ordine), l'entropia creata dall'agitazione termica (disordine). Immagina un pezzo di ferro ad alta temperatura. Gli spin puntano in tutte le direzioni: il sistema è simmetrico perché non c'è una direzione privilegiata. La Transizione di fase si ha con il raffreddando, gli spin sotto la temperatura critica improvvisamente puntano tutti verso l'alto (o tutti verso il basso). Il risultato di questo comportamento è che la simmetria spaziale è rotta. Il sistema ha scelto uno stato di minima energia. Questo crea il campo magnetico. L'Universo primordiale era perfettamente simmetrico e caldissimo, proprio come la griglia di Ising ad alta temperatura (tutte le direzioni erano uguali), raffreddandosi, sceglie una direzione per il magnetismo. L'Universo raffreddandosi ha scelto delle direzioni per le sue forze fondamentali. C'è stata una Separazione delle Forze: la forza elettromagnetica e quella nucleare debole una volta erano la stessa cosa.

Si sono separate tramite una transizione di fase identica a quella che avviene sulla griglia di spin. Il modello di Ising non è solo un esercizio per studenti, ma è lo "scheletro logico" di come l'ordine emerge dal caos. Un universo perfettamente simmetrico sarebbe un vuoto caldissimo e uniforme. La realtà "interessante" (stelle, pianeti, esseri umani) nasce quando la simmetria si rompe. Quando la griglia di Ising si raffredda, sceglie una direzione. Rompe la simmetria per creare un ordine. Senza questa "rottura", non avresti il magnetismo, non avresti la massa delle particelle, non avresti una freccia del tempo.

La realtà è letteralmente tenuta insieme dalle simmetrie: sono esse che impediscono all'universo di dissolversi nel nulla o di comportarsi in modo imprevedibile.

Se consideriamo la griglia di spin come l'unità minima è possibile comprendere la struttura alla base delle simmetrie: le leggi matematiche (l'Hamiltoniana H) mostrano agli spin come interagire; la simmetria decide quali configurazioni sono possibili; la rottura della simmetria genera la complessità che emerge dall'interazione locale, gli spin si allineano per creare un campo magnetico o si dispongono in un reticolo cristallino per dare rigidità. È un modello di semplificazione che permette di rappresentare i concetti fondamentali della fisica: Universalità, Simmetria e Informazione. È una semplificazione dei problemi di un modello linguistico di come le interazioni governano la realtà dell'Universo. La griglia di spin del modello di Ising, questa semplice scacchiera di spin, diventa lo specchio della realtà e lo scheletro logico di come l'ordine emerge dal caos. Questi stessi concetti di "simmetria rotta" sono alla base degli algoritmi di Intelligenza Artificiale che usiamo oggi per imitare il cervello umano. La tecnologia più all'avanguardia, l'Intelligenza Artificiale, affonda le sue radici proprio in quella griglia di spin. Il modello di Ising è stato uno dei primi schemi usati nella fase iniziale per la configurazione computazionale dell'Intelligenza Artificiale. Il legame tra Ising e AI passa attraverso un modello chiamato Macchina di Hopfield (o rete neurale ricorrente), Le moderne AI (come quelle che creano immagini o testi) discendono dalle Macchine di Boltzmann, che sono evoluzioni dirette del modello di Ising. Il calore nel modello di Ising crea disordine, in AI il Raffreddamento Simulato porta all'equilibrio stabile. All'inizio, diamo alla rete temperatura elevata per permettere di esplorare molte soluzioni. Poi raffreddare il sistema aiuta l'algoritmo a non restare bloccato in una soluzione e trovare la configurazione del minimo assoluto di esistenza. La capacità di elaborare informazioni rappresenta il punto di massima efficienza computazionale è il punto di ottimizzazione dove l'elaborazione

è più efficiente. Il sistema è stabile, trasmette e conserva segnali complessi. È dove nasce l'intelligenza nelle moderne AI. Le transizioni di fase si osservano durante l'addestramento nel memorizzare i dati a memoria e a estrarre le regole logiche sottostanti. I grandi modelli linguistici (LLM) mostrano capacità improvvise (come saper risolvere problemi matematici) solo dopo aver superato una certa soglia di parametri e dati, una vera e propria transizione di fase. Se l'entropia è troppo alta, l'informazione si perde nel disordine. Se l'entropia è troppo bassa, il sistema è troppo rigido per apprendere. La transizione di fase è il punto di ottimizzazione termodinamica dove l'elaborazione è più efficiente. È il momento in cui un sistema smette di essere un insieme di parti isolate e inizia a funzionare come un'entità intelligente e coordinata. Osservando il cielo notturno si rimane molte volte a bocca aperta davanti alle stelle di una notte stellata. *L'Universo è un sistema termodinamico, quasi come i pixel di uno schermo o i bit di un processore, un gigantesco sistema di informazione astronomica, un 'immensità di movimento cosmico.* Questa descrizione è un'ipotesi scientifica chiamata "Universo Olografico" o "Fisica dell'Informazione".

Guardiamo le mappe della Cosmic Web (la rete cosmica) e le confrontiamo con una simulazione del Modello di Ising, la somiglianza non è casuale: è il risultato di come l'informazione e la materia si organizzano nello spazio. La materia oscura e le galassie si dispongono lungo filamenti che collegano grandi nodi (ammassi di galassie), lasciando immensi vuoti nel mezzo. I filamenti sono come sinapsi dove è conservata l'informazione. La caratteristica più incredibile evidenziata è come sistemi di scale di grandezze radicalmente diverse possano organizzarsi secondo principi simili. Proprio come le sinapsi collegano i neuroni in una fitta rete neuronale nel cervello, i filamenti di materia oscura e gas collegano le galassie, creando una "ragnatela cosmica" che attraversa l'universo. Simulazioni avanzate, a differenza delle simulazioni precedenti, come Illustris TNG (The Next Generation) include non solo la materia oscura e la gravità, ma anche il gas cosmico, la formazione di stelle, l'evoluzione dei buchi neri supermassicci e, per la prima volta su questa scala, i campi magnetici intergalattici. Illustris TNG hanno mostrato che le linee di forza del campo magnetico interstellare si allungano lungo i filamenti in un modo che ricorda graficamente le sinapsi che si estendono tra i neuroni. *Nonostante le somiglianze visive e strutturali, si tratta di fenomeni di natura differente, governati da leggi fisiche diverse (gravità per il cosmo, impulsi elettrochimici per il cervello), ma la loro comparazione resta un campo di ricerca attivo per comprendere i principi della complessità.* In AI (Reti Neurali), i nodi sono i neuroni artificiali, i filamenti sono le connessioni matematiche che determinano l'importanza di un segnale. AI potrebbe essere una delle simulazioni cosmologiche più avanzate e dettagliate mai realizzate. Le simulazioni sono progettate per ricostruire l'evoluzione dell'universo dal Big Bang ai giorni nostri. Ogni parte del sistema è consapevole di ciò che accade a grande distanza. Uno spin interagisce a distanza minima è il comportamento definito 'interazione di scambio', che è la forza principale che allinea gli spin nei materiali ferromagnetici, è un effetto quantistico che diminuisce rapidamente con la distanza.

Questa regola locale genera un ordine.

Nell'Universo accade lo stesso: la gravità o i campi quantistici agiscono localmente, ma il risultato finale è la struttura a ragnatela delle galassie che vediamo su miliardi di anni luce. Le memorie magnetiche dei primi computer (e in parte i moderni hard disk) funzionano esattamente come una griglia di Ising:

Uno spin Su (+1) è un bit 1.

Uno spin Giù (-1) è un bit 0.

Raffreddando il sistema (mantenendo la temperatura bassa), costringiamo gli spin a restare allineati, "congelando" l'informazione. Se scaldasse troppo il tuo hard disk, gli spin inizierebbero a fluttuare come nel modello di Ising ad alta temperatura, e i tuoi dati svanirebbero nel disordine termico (entropia).

La temperatura nello spazio interstellare è estremamente fredda, vicina allo zero assoluto, misurando circa 2,7 Kelvin (-270,42 °C), a causa della radiazione cosmica di fondo. Non tocca mai lo zero assoluto (0 K o -273,15 °C), che è un limite teorico irraggiungibile, ma lo sfiora, rendendo lo spazio profondo un ambiente quasi a zero energia. Oggi i fisici studiano varianti della griglia come il Vetro di Spin, una griglia dove le connessioni sono a spin uguali e altre a spin opposti. Questo crea un sistema frustrato e incredibilmente complesso, usato per studiare l'intelligenza artificiale. Se il sistema si trova in una configurazione in cui l'energia è minima, rimarrà in quella configurazione a meno che qualcosa dall'esterno non lo solleciti: è una configurazione di equilibrio stabile, ottimizzazione del sistema. Un team di ricercatori è riuscito a realizzare e studiare una molecola in cui gli elettroni si muovono seguendo un percorso elicoidale. Il comportamento

degli elettroni dentro questa molecola è diverso da quello osservato finora in qualsiasi altra struttura conosciuta. Una topologia elettronica chiamata halfMöbius realizzata nei laboratori IBM, la molecola è stata creata atomo per atomo. Nei campioni dell'asteroide Ryugu sono state trovate tutte le cinque basi azotate che compongono il DNA e l'RNA, le molecole alla base di ogni forma di vita conosciuta. Il DNA alieno non si sarebbe formato sulla Terra, ma nel cosmo, dando adito a nuove teorie sull'origine del Sistema Solare.

Un sistema complesso può comportarsi a lungo nello stesso modo, rimanendo in quello che potremmo chiamare uno stato di equilibrio. Un sistema semplice non cambia (o cambia irreversibilmente) nel tempo. Un sistema complesso assume continuamente diverse configurazioni e può passare da una configurazione all'altra. L'aspetto fondamentale della teoria della complessità è l'esistenza di equilibri multipli per lo stesso sistema. Il sistema si trova in una configurazione in cui l'energia è minima, rimarrà in quella configurazione a meno che qualcosa dall'esterno non lo solleciti: è una configurazione di equilibrio stabile. Il comportamento di un sistema in cui gli spin possono ruotare in tutte le direzioni è complicato. Non confondiamo Rainer Weiss, Nobel nel 2017 per la rilevazione delle onde gravitazionali con LIGO, con Pierre-Ernest Weiss, il fisico pioniere nello studio del magnetismo e famoso per 'i domini di Weiss'. Weiss ipotizzò l'esistenza di magnetini elementari che interagendo fra loro a basse temperature si allineano con quelli vicini formando un campo magnetico macroscopico. Mentre ad alte temperature i magnetini puntano nelle direzioni più disparate e alla fine il campo magnetico risultante è praticamente nullo. *Molti anni dopo sarà la meccanica quantistica a fornire una spiegazione per l'origine dei magnetini e a chiamarli spin. Immaginare gli spin come piccole freccette che sono fissate ad atomi e che hanno la possibilità di ruotare teoricamente su sé stesse e di orientarsi in direzioni differenti producendo un campo magnetico nella direzione in cui puntano. È una visione classica per visualizzare un concetto quantistico complesso. Le leggi della meccanica quantistica impongono che la freccetta dell'elettrone si orienti prevalentemente lungo due direzioni principali: parallela (spin up) o antiparallela (spin down) al campo.* A basse temperature la tendenza degli spin ad allinearsi è dominante. Il sistema diventa ordinato: una decisa maggioranza degli spin punta nella stessa direzione e il sistema si magnetizza. Alzando la temperatura, invece, l'energia termica agita gli spin, facendoli puntare in direzioni casuali. Questa schematizzazione rappresenta una grande semplificazione della realtà. Grazie alla sua semplicità, divenne la fase iniziale per la formulazione della fisica statistica di Boltzmann. *La fisica statistica unita alla meccanica quantistica offre il quadro teorico.* La meccanica statistica quantistica è essenziale per comprendere le proprietà della materia a livello atomico e subatomico, superando i limiti della fisica classica. Gli effetti quantistici (come il principio di indeterminazione) estendono i metodi statistici classici (Boltzmann, Gibbs) al mondo microscopico, dove la quantizzazione dell'energia e la natura ondulatoria della materia diventano rilevanti.

La meccanica quantistica unita alla metafisica, alla filosofia e alla psicologia sfidano l'intuizione classica, costringendo a una revisione di concetti fondamentali della realtà. Sono interpretazioni metafisiche della fisica quantistica che affrontano le implicazioni ontologiche dei fenomeni quantistici. Una forma di intelligenza o coscienza superiore che "sente" e risponde ai desideri e alle vibrazioni. L'energia più potente e reale che muove l'universo. La Pyramide Inversée viene citata nelle pagine finali del best seller di Dan Brown: Il codice da Vinci. Il protagonista conclude affermando che la piramide di pietra è in realtà solo l'apice di una piramide più grande, forse delle stesse dimensioni della piramide inversa, incassata nel pavimento e con una camera segreta. L'Universo senziente e pieno di amore descrive una visione del cosmo non come un insieme caotico di materia inerte, ma come un'entità intelligente, cosciente e intrinsecamente benevola è una forza fisica e informazionale che unisce. Un ambito scientifico e tecnico per indicare tutto ciò che è relativo alla sua teoria e alle tecnologie che la gestiscono. "I comportamenti su grande scala sono in qualche modo definiti a priori, prescindendo dalla loro realizzazione fisica: esistono in una specie di iperuranio come sistemi esattamente invarianti di scala" (Le Simmetrie Nascoste di G. Parisi, 2026 Rizzoli). L'Universo mantiene il mistero sulla sequenza strutturata degli eventi principali che compongono il sistema. La struttura dell'Universo è dominata per la maggior parte da componenti ancora ignote: la materia oscura (invisibile delle galassie), l'energia oscura (responsabile dell'espansione accelerata) e la rottura di simmetria che permette alla materia di prevalere sull'antimateria. La ricerca scientifica include l'intreccio e allo stesso tempo ci offre un'idea. Si crea un'immagine e messaggi criptici che non siamo soli nell'universo che i misteri sono tanti. È la natura della ricerca astronomica che permette allo spazio cosmico di incidere

nell'immaginario. È un aspetto dell'astronomia di unire la rigorosa indagine scientifica a una visione spettacolare e quasi magica dell'universo. I fisici si concentrano su come le interazioni microscopiche portino a un ordine macroscopico, cercando di capire non solo le parti, ma l'organizzazione del tutto.

Una connessione profonda esiste tra raggi cosmici e fisica subnucleare. I raggi cosmici, provenendo dall'esterno del sistema solare, interagiscono nell'atmosfera terrestre dando luogo a particelle instabili. La comprensione dei meccanismi di accelerazione e delle interazioni con il materiale interstellare è legata alla conoscenza della fisica subnucleare.

## CONCLUSIONE

Lo studio delle onde gravitazionali ha portato con sé una nuova astronomia, l'astronomia multimessaggera. Le onde gravitazionali sono le increspature dello spazio-tempo generate da eventi cosmici violenti. Le onde gravitazionali le ha rilevate lo strumento Ligo in Usa, e i dati sono stati analizzati dalle collaborazioni internazionali Ligo e Virgo. L'annuncio è stato dato a Cascina (Pisa), dove si trova lo strumento Virgo che fornisce anche la prima prova diretta dell'esistenza dei buchi neri. È stata la collisione tra due buchi neri avvenuta un miliardo di anni fa a provocare il primo segnale delle onde gravitazionali mai scoperto, rilevato dalle antenne dello strumento Ligo ed analizzato fra Europa e Stati Uniti. Con i segnali gravitazionali si studiano i fenomeni oscuri dell'universo, quelli che non si possono vedere con i segnali elettromagnetici. Si è aperta una nuova astronomia ma anche un nuovo dominio della fisica, al confine tra la relatività generale e la fisica quantistica. Il Nobel per la Fisica 2017 è stato assegnato alla scoperta delle onde gravitazionali, è stato assegnato a Rainer Weiss, Barry C. Barish e Kip S. Thorne per il loro contributo decisivo alla rilevazione. Con l'Einstein Telescope, il rivelatore di onde gravitazionali di nuova generazione che l'Italia si è candidata a ospitare in Sardegna, vedere più lontano sarà possibile. Per esplorare l'universo più a fondo e studiare quanto è accaduto nel passato, quindi eventi più vicini al momento del Big Bang. L'Einstein Telescope è il futuro prossimo. Gli Acceleratori di Particelle (CERN) permettono di studiare la struttura della materia ai tempi del Big Bang, ricreare quelle condizioni di energia in un tunnel di 27 km. I Telescopi Spaziali (James Webb & Euclid) non sono semplici cannocchiali, ma laboratori che leggono l'infrarosso e mappano la materia oscura, permettendoci di vedere l'universo quando aveva poche centinaia di milioni di anni. Con i Rivelatori di Onde Gravitazionali (LIGO/Virgo) la tecnologia ha raggiunto vette impensabili: misuriamo variazioni di distanza inferiori al diametro di un protone su bracci laser di 4 km. Nel campo sperimentale si è avuto un rapidissimo progresso tecnologico. Si può dire che la nostra conoscenza dei fenomeni submicroscopici ci permette di capire l'universo e che fisica e cosmologia sono divenute discipline strettamente correlate. Per analizzare strutture a dimensioni sempre più piccole occorre studiare collisioni a energie sempre più grandi. Occorre perciò disporre di acceleratori sempre più potenti. Le leggi fisiche che descrivono i fenomeni di collisione diventano più semplici ad alte energie, nel senso che le leggi acquistano un grado più elevato di simmetria matematica.

## BIBLIOGRAFIA

Parisi, G. (2025). *Le simmetrie nascoste*. Rizzoli.

Braibant, S., Giacomelli, G., & Spurio, M. (2012). *Particelle e interazioni fondamentali*. Springer-Verlag Italia.

Faggin, F. (2024). *Oltre l'invisibile*. Mondadori.

Zanghì, N. (n.d.). *Manualetto di termodinamica*. Dipartimento di Fisica, Università di Genova; INFN.

Dyson, F. (2007). *Advanced quantum mechanics*. World Scientific Publishing.

Wired Italia. (n.d.). <https://www.wired.it>

Everyeye Tech. (n.d.). <https://tech.everyeye.it>

HDblog. (n.d.). <https://www.hdblog.it>

Scienza in Rete. (n.d.). <https://www.scienzainrete.it>

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). (n.d.). <https://collisioni.infn.it>