

Astronomia

Alle porte dell'Universo

Luciano Di Iorio¹¹Convitto Nazionale Mario Pagano di Campobasso, Italia

Parole Chiavi

Fisica quantistica, matematica, relatività, materia oscura, energia oscura, entanglement, rete cosmica, meccanica delle matrici, cosmologia, intelligenza artificiale quantistica, tunnel quantistico, teletrasporto quantistico, neutrino e particella demone

Introduzione

L'opera esplora il legame profondo tra matematica, fisica e cosmologia come linguaggi fondamentali per la comprensione dell'universo. Attraverso un percorso che unisce la meccanica quantistica, la relatività generale e le più recenti scoperte sulla materia e sull'energia oscura, il testo illustra come la matematica sia uno strumento capace di descrivere la struttura invisibile della realtà. Dalle reti di spin alla teoria dell'entanglement, fino alle simulazioni quantistiche e ai modelli cosmologici contemporanei, emerge un quadro unificato in cui le equazioni diventano chiavi interpretative dei fenomeni naturali e delle connessioni profonde tra microcosmo e macrocosmo. La riflessione si estende anche all'aspetto umano e conoscitivo della ricerca scientifica, mostrando come il linguaggio matematico possa aprire "porte teoriche" verso nuove dimensioni del reale.

Autore Corrispondente

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

1. INTRODUZIONE

La scelta del linguaggio matematico può aprire la porta a “Universi teorici” completamente nuovi, può cambiare ciò che percepiamo come realtà, espandendo i confini di ciò che consideriamo possibile. Un insieme di assiomi che descrivono il dominio di interesse, può con la loro analisi, rivelare informazioni importanti sulla struttura sottostante. È lo spazio dove si può ritrovare la costruttività per capire meglio l’universo, non un mero risultato tecnico. Sono sistemi di riferimento che utilizziamo per descrivere azioni e reazioni che influenzano la materia e l’energia.

2. LE ORIGINI DELLA MECCANICA QUANTISTICA

Agli inizi del Novecento si è andata delineando una nuova struttura matematica che porterà a formulare relazioni tra le energie dei livelli atomici e all’apertura di nuove possibilità verso la comprensione dell’universo. Una nuova meccanica, un nuovo quadro teorico: la Meccanica Quantistica. Uno degli oggetti celesti più studiati è la *materia oscura*. È una componente di materia che, diversamente dalla materia conosciuta, non emetterebbe radiazione elettromagnetica e sarebbe attualmente rilevabile solo in modo indiretto attraverso i suoi effetti gravitazionali. Scienziati e ricercatori hanno rivelato una scoperta prima sconosciuta, tale parte collegata alla superficie attraverso la meccanica quantistica, era uno spazio totalmente inaccessibile all’uomo. Un nuovo capitolo nella storia della ricerca è stato aperto grazie a una collaborazione internazionale e alla sofisticata capacità di analisi dei dati relativi ai fenomeni quantistici. L’Universo *indagato* dall’uomo appare come una sfera centrata sulla Terra con massa ed energia. All’esterno appare ordinario; tuttavia racchiude un mondo quantistico fatto di particelle subatomiche: un reticolo di piccoli volumi di spazio interconnessi e superfici. Una *rete di spin* è un reticolo quantistico che suggerisce una struttura emergente solo a scale microscopiche; è un sistema composto da miliardi di particelle che si comportano come un’unica entità. La rete di spin, in fisica teorica e in particolare nella teoria della gravità quantistica, è utilizzata per rappresentare gli stati quantici e le interazioni tra particelle. Le scoperte ad essa legate hanno contribuito a chiarire il “confine” tra i mondi. “È la scienza che riesce a creare in modo quasi “poetico” ordine e funzionalità dentro l’invisibile, trasformando la materia in architettura” (Lucrezia Lamastra - Università Cattolica - IIPiacenza.it 08/10/2025). Nel mondo invisibile della fisica subatomica, esistono concetti come quello delle particelle virtuali, senza le quali non potremmo spiegare quasi nulla di ciò che accade nella materia. Non “vivono” nel nostro mondo, bensì solo per un istante infinitesimale (e le teorie sui buchi neri dipendono proprio da loro). Questo risultato ha fatto della fisica quantistica una delle teorie più accurate mai concepite. Tra le tante particelle che sono state ipotizzate per spiegare la composizione della misteriosa materia oscura una è l’assione. L’assione è una particella subatomica finora confinata solo alle previsioni teoriche per *descrivere l’evoluzione dell’universo nel tempo*. Questa particella è sfuggita e non interagisce con dimensioni microscopiche di rilevamento, anche nei laboratori più avanzati. Un sistema sperimentale ideato e realizzato da gruppi di ricerca dell’INFN e del CEA francese rivoluzionerà la ricerca di particelle leggere di materia oscura, chiamati assioni. In astronomia si sono sviluppati e perfezionati numerosi strumenti di ricerca (supercomputer, quantum computing) in laboratorio per lo studio di calcoli quantistici molto complessi. I computer quantistici, guidano la ricerca scientifica da dispositivi di calcolo a laboratori sperimentali per esplorare nuovi stati della materia. Il progresso scientifico, ha reso possibili risultati sperimentali ottenuti sotto forma di particelle subatomiche che descrivono l’evoluzione dell’universo e l’emergere dell’AI quantistica sembrano rendere possibile comprendere come l’energia oscura sia responsabile dell’espansione dell’universo. Un team internazionale di astronomi ha scoperto il più piccolo oggetto di materia oscura mai identificato, con una massa di circa un milione di volte quella del Sole (aggregati stellari privi di stelle), utilizzando il lensing gravitazionale (quando la luce di oggetti distanti attraversa lo spazio, può essere deflessa dalla gravità di masse intermedie, creando distorsioni caratteristiche nell’immagine finale) per rilevare la sua influenza sulla luce di oggetti distanti. La ricerca ha impiegato una rete di radiotelescopi globali (Green Bank Telescope nel West Virginia, la Very Long Baseline Array nelle Hawaii e la rete europea EVN, che collega radiotelescopi distribuiti tra Europa, Asia, Sudafrica e Porto Rico) che hanno funzionato come un unico strumento delle dimensioni della Terra. L’oggetto celeste, completamente

buio e impercettibile alla vista diretta, è stato scovato grazie alla sua influenza gravitazionale sulla luce che transitava nelle sue vicinanze. (“Scoperto il più piccolo grumo di materia oscura mai visto” Tomshw.it 13/10/2025). La materia oscura è una componente di materia che, diversamente dalla materia conosciuta, non emetterebbe radiazione elettromagnetica e sarebbe attualmente rilevabile solo in modo indiretto attraverso i suoi effetti gravitazionali. La materia “mancante” dell’universo, rappresenta un passo importante nella conoscenza dei misteri che si nascondono nelle profondità dello spazio. Il CERN sta riscrivendo la comprensione della struttura della materia ha condotto esperimenti rivoluzionari facendo scontrare nuclei di ossigeno e neon per studiare il plasma di quark-gluoni, la *materia primordiale* esistente nei primi microsecondi dopo il Big Bang. Il *plasma* di quark-gluoni è una condizione estrema della materia che esiste nell’universo durante i primi microsecondi dopo il Big Bang, prima ancora che si formassero gli atomi.

3. L’UNIVERSO OSSERVABILE E LA MATERIA OSCURA

La luce emessa subito dopo il Big Bang viaggia nello spazio e nel tempo da 13,8 miliardi di anni, possiamo osservare l’universo fino a una distanza che è equivalente al tempo del movimento della luce di 13,8 miliardi di anni. Di conseguenza, possiamo osservare l’Universo fino ad una distanza che corrisponde a un tempo di viaggio della luce di 13,8 miliardi di anni. Questa distanza equivale a circa 45 miliardi di anni luce. La descrizione o l’osservazione di qualsiasi fenomeno o corpo celeste oltre questo limite non è possibile, poiché la luce proveniente da queste regioni remote ancora non raggiunge i nostri telescopi spaziali. I tentativi per la comprensione dell’Universo nascono soprattutto attraverso l’esplorazione spaziale. A tal fine, un gruppo di ricercatori ha presentato un concetto di telescopio spaziale con uno specchio non circolare, ma allungato e rettangolare. Secondo i calcoli, questa configurazione consentirebbe di distinguere un pianeta simile alla Terra dalla luce della sua stella madre in tempi molto più rapidi rispetto agli strumenti attuali. Per l’esplorazione scientifica spaziale, il prototipo di motore al plasma promette di ridurre il tempo di viaggio verso Marte dai sei mesi di oggi ai 30 - 60 giorni di un futuro prossimo. Inoltre, la concretizzazione dell’energia da fusione nucleare basata su un plasma stabile per oltre 17 minuti indica che la fusione può essere sostenuta per tempi lunghi.

Ai confini dell’universo non sappiamo cosa c’è, sappiamo cosa c’è nell’*universo osservabile, il nostro orizzonte cosmologico (un confine apparente)*. Sfruttando i dati dei telescopi, gli astronomi sono stati in grado di sviluppare la prima incredibile mappa logaritmica dell’universo osservabile. È un modo per rappresentare numeri molto grandi o molto piccoli in modo compatto. Ciò permette di visualizzare insieme oggetti estremamente distanti e oggetti molto vicini, che altrimenti non potrebbero essere rappresentati su una scala lineare.

L’universo osservabile ha un diametro di circa 93 miliardi di anni luce. Su una mappa con scala lineare, le galassie e le strutture cosmiche più vicine sarebbero schiacciate, mentre le strutture più lontane occuperebbero spazi enormi, rendendo la visualizzazione impossibile. Una mappa logaritmica comprime le distanze più grandi, rendendo visibile la struttura dell’universo. Una mappa logaritmica mostra le strutture a grande scala dell’universo, come la rete cosmica di filamenti e vuoti che separano i superammassi di galassie, su un’unica rappresentazione. Essa permette di vedere sia la vicinanza di galassie come Andromeda sia la distanza di galassie molto più lontane che fanno parte dell’universo osservabile. Quando parliamo di universo, si intende l’universo indagato dall’uomo (strutture visibili come le galassie). Parlare di universo come una sfera (una rappresentazione) dal diametro di circa 93 miliardi di anni luce centrata sul nostro pianeta indica un confine apparente chiamato orizzonte cosmologico. Le galassie oltre questo orizzonte sono invisibili ai nostri telescopi, anche se possono esistere. Grazie all’espansione dell’universo, questo orizzonte è in costante movimento. Il *modello standard* della cosmologia, chiamato anche modello Lambda-CDM, è il più semplice quadro teorico in grado di fornire una buona descrizione di tutti i fenomeni cosmologici osservati. Ogni galassia, ogni stella, ogni pianeta di questa sfera è un corpo celeste realmente osservato.

Nell’opera dell’artista (pittore) argentino Pablo Carlos Budassi è rappresentato in una sola immagine tutto l’universo. È una libera interpretazione. A differenza delle mappe realizzate dall’università di Princeton, usate dallo stesso Budassi come modello, la rappresentazione artistica è circolare. Utilizzando le foto Nasa, Budassi ha quindi sistemato le stelle, i pianeti, le galassie più remote fino al plasma residuo del Big Bang. I

modelli sono schemi che rappresentano un potente strumento di lavoro e comunicazione. Nel campo della fisica quantistica, gli scienziati di Oxford hanno utilizzato il programma OSIRIS per simulazioni 3D, creando un raggio di luce dal vuoto assoluto (la luce apparentemente generata dal nulla). Hanno di fatto trasformato il nulla in qualcosa. Queste simulazioni 3D, estremamente dettagliate, portano la comunità scientifica un passo più vicino a comprendere i meccanismi universali della meccanica quantistica.

Che cosa accomuna una particella subatomica e la matematica, entrambe sono capaci di agire sul mondo. G. Parisi (Premio Nobel per la Fisica nel 2021) racconta come lo strumento matematico si sia dimostrato concettualmente indispensabile per descrivere e interpretare i casi “disordinati” delle sue ricerche, e per trovare le regole che, a livello microscopico, dessero ragione del comportamento macroscopico dei sistemi complessi in esame come la materia. Parisi è un premio Nobel che mette al centro la fisica delle particelle elementari. Un gruppo di ricercatori dell’Università dell’Illinois ha osservato per la prima volta una particella teorizzata quasi settant’anni fa e mai rilevata prima: un’entità priva di massa e carica, soprannominata “particella demone”: è qualcosa che non lascia traccia né elettrica né gravitazionale. Il “demone” essendo privo di massa, può esistere a qualsiasi energia e, almeno in teoria, a qualsiasi temperatura, diventando un candidato ideale per spiegare fenomeni che ancora sfuggono. Ciò che si osserva è che la materia ordinaria - quella che compone stelle, pianeti, gas e polveri - costituisce una certa frazione dell’Universo. I calcoli mostrano un vuoto di circa il 40%. I calcoli non coincidevano con ciò che si osservava. *Oggi quella materia mancante ha un volto concreto. Un team internazionale ha individuato la materia mancante.* È dispersa in sottilissimi filamenti di gas caldissimo, distribuita tra le galassie come una rete invisibile, strutture finora eluse dai telescopi. *I filamenti della rete cosmica non erano mai stati osservati direttamente* prima d’ora, perché sono oscurati dal riflesso delle galassie che li circondano. Queste strutture sono state scoperte dalle osservazioni di sorgenti lontane, come i quasar e i nuclei galattici, la cui luce attraversa il cosmo e interagisce con il gas intergalattico lasciando minuscoli segni negli spettri luminosi. I ricercatori hanno potuto analizzare i segni confrontandoli con simulazioni numeriche che hanno permesso di confermare la previsione teorica: i modelli erano corretti.

Sono strutture (gassose) che non brillano né si concentrano in galassie, ma formano una rete diffusa (cosmic web) che collega e sostiene l’universo visibile. È una scoperta che conferma l’esistenza di una struttura solo teorizzata di collegamento con il resto dell’universo, un’interconnessione tra le strutture. I filamenti non sono composti solo da gas, ma anche da materia oscura, una materia che interagisce solo tramite la gravità e che è invisibile poiché non emette luce (“Risolto uno dei grandi enigmi. Scoperto il 40% della materia mancante nell’Universo” everyeye.it 26/07/2025). Dal *modello standard della cosmologia* che considera materia oscura ed energia oscura fondamentali quanto la materia regolare la luce e la gravità, risulta una rete cosmica simile a quella osservabile nell’Universo. L’Universo include materia oscura ed energia oscura. L’energia oscura è una forma ipotetica di energia responsabile dell’espansione accelerata dell’universo. Le simulazioni, utilizzando supercomputer, mostrano un’immagine dell’Universo simile alle osservazioni effettuate. L’intelligenza artificiale quantistica (QAI) è un campo emergente dell’informatica che applica il potere trasformativo del quantum computing alla ricerca e allo sviluppo di prodotti di intelligenza artificiale migliorati, come gli algoritmi di machine learning, le reti neurali e i modelli linguistici di grandi dimensioni. Mentre Einstein dibatteva sulla natura “spettrale” dell’entanglement quantistico, Schrödinger formulava un modello ondulatorio per la descrizione del comportamento di un elettrone, Heisenberg formulava il principio di indeterminazione o Maxwell forniva una descrizione completa del fenomeno elettromagnetico, probabilmente nessuno di loro avrebbe mai immaginato che un giorno miliardi di persone avrebbero portato in tasca dispositivi che funzionano grazie a questi principi, in quello che potrebbe essere un punto di svolta per innumerevoli settori, tra cui la ricerca farmaceutica, la climatologia, la data science, la creazione di modelli meteorologici, la finanza, la comprensione dell’universo e l’emergere dell’AI quantistica. La ricerca sembra rendere possibile la realizzazione delle tecnologie più avanzate e sperimentali della scienza quantistica. La linea di sviluppo della Meccanica Quantistica prende spunto dai fenomeni di assorbimento e emissione della luce, dalla descrizione empirica alla formulazione delle relazioni tra le energie dei livelli atomici, dell’intensità di radiazione e di assorbimento della luce e dalla frequenza. La matematica è un linguaggio fondamentale per la descrizione dell’universo. La matematica fornisce gli strumenti per capire le strutture, le leggi e i fenomeni dell’universo. Utilizzando la matematica, si possono rappresentare gli

oggetti celesti, le forze della natura, lo spazio-tempo e l'evoluzione dell'universo.

Ecco come la matematica viene utilizzata: la Geometria descrive la forma dell'universo; la Relatività Generale utilizza equazioni differenziali per descrivere la gravità come curvatura dello spaziotempo; in Astronomia la matematica è utilizzata per calcolare le orbite dei pianeti e le traiettorie delle stelle; mentre la Cosmologia utilizza modelli matematici per studiare l'origine, l'evoluzione e la struttura dell'universo. Infine la Fisica, in particolare la meccanica quantistica, si basa su equazioni matematiche per descrivere il comportamento delle particelle subatomiche e degli atomi. In meccanica quantistica due o più particelle sono legate come un unico sistema anche a grande distanza (Entanglement - intreccio). Un'informazione data a una particella si traduce istantaneamente all'altra e viceversa. I due elettroni anche qualora venissero separati rimangono in comunicazione tra loro sebbene li separi un enorme spazio. Nel 2022 ad Alain Aspect, John Clauser ed Anton Zeilinger hanno assegnato il premio Nobel per l'entanglement. I tre hanno aperto la strada alla *scienza dell'informazione quantistica* che utilizza i qubit invece dei bit. A differenza di un bit classico (0 o 1) il qubit può esistere in uno stato di sovrapposizione 0, 1, o entrambi contemporaneamente e gli elementi possono comunicare a qualunque distanza indipendente dallo spazio che li separa. Questo fenomeno è la conseguenza della crittografia quantistica su internet per creare chiavi crittografiche sicure e inviolabili. Il *tunnel quantistico* ha contribuito a chiarire il "confine" tra il mondo microscopico e quello *macroscopico*, aprendo la porta ai computer quantistici (Nobel per la Fisica 2025 per l'effetto tunnel macroscopico e quantizzazione dell'energia in un circuito elettrico: J. Clarke, M.E. Devoret e J.M. Martinis). Per anni, tuttavia, l'effetto tunnel rimase confinato al mondo microscopico. Dopo aver lanciato una particella di elettrone contro una barriera energetica a volte non rimbalza ma l'attraversa come se non esistesse (1928 G. Gamow). Ci sono tutte una serie di scoperte che ci avvicinano al Nobel del 2025, a tutti gli scienziati che hanno contribuito è stato conferito il Premio Nobel, come per i materiali superconduttori. La superconduttività è un fenomeno quantistico su scala macroscopica, la proprietà di alcuni materiali (con la temperatura prossima allo zero assoluto) di non resistenza al passaggio di corrente. Il collegamento diretto è con lo sviluppo del computer quantistico, grazie alla quantizzazione dell'energia in un circuito macroscopico (un circuito elettrico superconduttore costruito dai tre Nobel del 2025) e ad una proprietà astratta dell'intero circuito comportarsi quantisticamente (la differenza di fase di una funzione d'onda macroscopica attraverso la giunzione di Josephson) hanno costruito un circuito elettrico grande come il palmo della mano (tra il 1984 e il 1985) in cui le leggi della meccanica quantistica delle particelle subatomiche, apparentemente incompatibili con il mondo macroscopico che vediamo attorno a noi, continuano a restare in vigore.

Le numerose osservazioni astronomiche portano prove valide che la parte visibile del nostro Universo rappresenta solo una percentuale minima della *massa* complessiva. La maggior parte della materia contenuta nel Cosmo interagisce pochissimo con gli atomi della materia ordinaria. Osservando il moto dei corpi celesti, che è governato dalla forza di gravità, è possibile sapere quanta massa c'è nei dintorni. Tutti i corpi dotati di massa risentono della forza di gravità dovuta ai corpi circostanti. A loro volta, i corpi esercitano una forza su tutti gli altri, per quanto oscuri e silenziosi. È la relatività generale che ha definito la gravità. La presenza di massa e energia deforma lo spazio-tempo. La teoria è alla base del cosiddetto modello standard della cosmologia del Big Bang, usato per descrivere l'evoluzione dell'universo.

4. LE EQUAZIONI DELL'UNIVERSO

Le equazioni che descrivono l'universo sono diverse. Le principali sono: l'equazione di campo di Einstein (relatività generale), l'equazione $E=mc^2$ (relatività ristretta), le equazioni di Friedmann (cosmologia), l'equazione di Schrödinger (meccanica quantistica) e le equazioni di Maxwell (elettromagnetismo).

Inoltre, esistono altre equazioni importanti per descrivere fenomeni specifici, come le equazioni che descrivono le *forze* che governano le interazioni tra le particelle fondamentali. Le forze sono responsabili di tutti gli eventi che si verificano nell'universo, dall'aggregazione degli atomi, alla formazione delle stelle.

Le equazioni di campo di Einstein descrivono la gravità come curvatura dello spazio-tempo, causata dalla presenza di massa e energia. In altre parole, definiscono come la geometria dello spazio-tempo viene deformata in presenza di oggetti con massa e energia, Le equazioni di campo sono il pilastro della teoria

della relatività generale di Einstein, che fornisce una nuova comprensione della gravità rispetto alla legge di gravitazione universale di Newton. La gravità, secondo la teoria di Einstein, non è una forza nel senso classico, ma piuttosto una manifestazione della curvatura dello spaziotempo, un tessuto quadridimensionale (3 dimensioni spaziali + 1 dimensione temporale). La presenza di massa e energia nello spazio-tempo causa questa curvatura. Più è alta la densità di massa e energia, maggiore sarà la curvatura. Le equazioni di campo di Einstein descrivono come la gravità è la curvatura dello spazio-tempo causata dalla presenza di materia ed energia. La relatività generale considera lo spazio-tempo come un tessuto che può essere curvato o distorto dalla presenza di massa e energia. Le equazioni di campo di Einstein utilizzano il tensore stress-energia per descrivere la distribuzione di massa e energia nello spaziotempo. Il tensore energia-impulso, o tensore stress-energia, è una rappresentazione matematica che descrive il flusso di energia e quantità di moto (impulso, è una grandezza fisica vettoriale che descrive il movimento di un corpo) all'interno di uno spazio-tempo. In pratica, questo tensore contiene informazioni su come l'energia e la quantità di moto sono distribuite e si muovono, influenzando sulla curvatura dello spazio-tempo. È sulle sfide tecniche verso un futuro energetico che $E=mc^2$ questa equivalenza tra massa ed energia è alla base della fisica nucleare e trova applicazione nell'energia nucleare. La fusione nucleare, unisce due nuclei atomici leggeri (come il deuterio e il trizio) in un nucleo più pesante, liberando una quantità enorme di energia. La fissione è legata alla rottura di un atomo.

In Germania la tecnologia della fusione è l'investimento come soluzione energetica del futuro. Una struttura per ottenere la fusione dei nuclei atomici è un obiettivo di una startup, replicare le condizioni del nucleo presente nelle stelle. Una centrale basata su tecnologia *stellarator*.

Max Planck Institute di fisica del plasma e Proxima Fusion, una startup guidata dall'italiano Francesco Sciortino, afferma di aver sviluppato un concetto di centrale per ottenere energia da fusione in modo continuo e sicuro. L'entrata in funzione di Alpha (Proxima Fusion) è prevista per il 2031 e rappresenterà la prima centrale a fusione al mondo con tecnologia *stellarator*. Il gruppo di lavoro è già composto da oltre 80 persone e sono distribuite tra Monaco, Zurigo e Oxford.

Google e la start-up statunitense Commonwealth Fusion Systems (CFS) hanno annunciato una partnership per sviluppare e implementare a livello commerciale l'energia da fusione nucleare. La missione principale di CFS, spin-off del Massachusetts Institute of Technology è quella di sviluppare dispositivi a fusione di propria concezione, tra cui il tokamak SPARC attualmente in costruzione. Il funzionamento di SPARC è previsto entro il 2026 e la fusione commerciale di ARC entro il 2030.

Un altro esempio nell'ambito delle sfide tecniche arriva direttamente dagli Stati Uniti, Bill Gates è impegnato in un progetto all'avanguardia per la costruzione del reattore Natrium. Il reattore verrà costruito sul sito di una vecchia centrale a carbone in via di dismissione, trasformando un simbolo dell'era fossile in un potenziale emblema dell'energia pulita del futuro. TerraPower, l'azienda fondata dallo stesso Gates, ha come obiettivo di rendere la centrale commercialmente attiva entro il 2031.

($E=mc^2$) Albert Einstein arrivò alla formula, in un saggio di 3 pagine pubblicato il 27 settembre 1905 ovvero, la rivoluzione scientifica del Novecento, la relatività speciale o ristretta.

($E = mc^2$) significa che l'energia (e) è uguale alla massa (m) moltiplicata per la velocità della luce (c elevata al quadrato). Siccome c vale 300 mila chilometri al secondo, il moltiplicatore è molto grande. Si intuisce subito che in una piccolissima quantità di materia si nasconde una enorme quantità di energia. La materia, in generale, è definita come tutto ciò che ha una massa e occupa uno spazio. La relatività speciale ($E=mc^2$) stabilisce che l'energia è una forma di massa.

L'equazione dimostra l'equivalenza tra massa ed energia. Il termine "c al quadrato" (c^2) rappresenta il quadrato della velocità della luce nel vuoto. Le dimensioni fisiche di un'energia sono proprio quelle di una massa moltiplicata per una velocità al quadrato. (C^2) è la costante di conversione che collega la massa alla corrispondente energia (è l'elemento di cui abbiamo bisogno per rendere massa ed energia equivalenti). La luce è portatrice di massa, in particolare i fotoni, sono portatori di energia. Einstein dimostrò che la massa relativistica, che in realtà non è una massa nel senso classico ma una misura dell'energia del corpo, aumenta quando si muove a velocità vicine a quella della luce.

($E=mc^2$) è una fase, un passaggio rivoluzionario che cambiò il paradigma di ricerca. L'energia è pari alla massa moltiplicata per il quadrato della velocità della luce.

L'equazione ($E=mc^2$) di Einstein mostra che piccolissime quantità di massa potrebbero essere trasformate in un'immensa quantità di energia e viceversa.

La massa e l'energia sono equivalenti secondo la formula. Questo è stato dimostrato da Walton e Cockroft 1932.

La teoria della relatività di Einstein è una delle teorie di maggior successo della storia della scienza, tanto che le sue previsioni continuano ad essere confermate come dimostrano le scoperte dai buchi neri al redshift gravitazionale, al principio di equivalenza dimostrato nello spazio dal satellite Microscope.

L'equazione di Friedmann è una delle formule fondamentali della cosmologia, derivata dalla Relatività Generale di Einstein, che descrive l'evoluzione dell'universo nel tempo. In sostanza, essa spiega come l'espansione dell'Universo sia influenzata dalla sua densità di materia ed energia. Le equazioni di Friedmann nascono dalla applicazione delle equazioni di campo di Einstein alla metrica di Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW), la quale descrive un universo omogeneo, isotropo e in espansione.

Queste equazioni quantificano l'evoluzione del fattore di scala dell'Universo nel tempo, un parametro che misura l'espansione relativa dello spazio. L'equazione di Friedmann è uno strumento essenziale per comprendere l'evoluzione dell'Universo e per predirne il futuro, ad esempio, se l'espansione accelera o decelera.

Le equazioni includono parametri come la costante di Hubble, che misura la velocità di espansione attuale. In alcuni modelli cosmologici, le equazioni di Friedmann includono anche un termine per l'energia oscura. Questo termine, spesso associato alla costante cosmologica, rappresenta l'energia del vuoto che contribuisce all'espansione accelerata dell'universo. Queste equazioni mettono in relazione la curvatura dello spazio-tempo con la densità di materia, radiazione e, appunto, energia oscura. L'energia oscura è una forza misteriosa che sembra essere responsabile dell'accelerazione dell'espansione dell'Universo. La materia oscura e l'energia oscura sono due delle più grandi sfide della cosmologia moderna. Entrambe costituiscono la maggior parte della composizione dell'universo, ma sono invisibili e non osservabili direttamente. La materia oscura, pur non emettendo luce, esercita un'influenza gravitazionale sugli oggetti visibili. Si stima che costituisca circa il 27% della composizione dell'Universo. La sua natura è ancora sconosciuta e la ricerca si concentra sull'identificazione delle particelle che potrebbero comporla.

L'energia oscura è una forma di energia che pervade lo spazio e che si pensa sia responsabile dell'espansione accelerata dell'universo. La sua natura è ancora più misteriosa della materia oscura, e la sua esistenza è dedotta dall'osservazione dell'accelerazione dell'espansione cosmica. Si stima che costituisca circa il 68% della composizione dell'universo, inoltre, secondo il principio di equivalenza di Einstein ($E = mc^2$), è in grado di dar conto della maggior parte della massa dell'Universo. Le previsioni di Einstein funzionano solo per il macrocosmo, ovvero per sistemi di grandi dimensioni. Quando ci si avventura nel mondo microscopico, i fenomeni osservabili sono regolati da leggi formulate da un'altra descrizione della realtà, efficace almeno quanto la relatività generale: la fisica quantistica. Nel mondo dei quanti, spazio e tempo non sono continui come nella relatività generale, ma discreti. Esistono limiti alla loro divisibilità, al di sotto dei quali spazio e tempo perdono di significato. Gli scienziati cercano un modo per coniugare la meccanica quantistica con la relatività di Einstein per descrivere la gravità. È un dissenso al quale gli scienziati non sono riusciti a trovare una soluzione condivisa nemmeno con la teoria delle stringhe. Gli scienziati cercano un modo, una "teoria del tutto" in grado di descrivere i fenomeni con una sola equazione.

Per rappresentare le osservabili fisiche (come l'energia) e la loro evoluzione nel tempo le matrici sono ampiamente utilizzate in fisica, in particolare nella meccanica quantistica. Gli strumenti concettuali della fisica classica si delinearono oggetti di ricerca incompleti per la comprensione dello studio dell'atomo. L'impossibilità in meccanica quantistica di descrivere la costruzione matematica dello spazio-tempo e di descrivere la traiettoria delle particelle subatomiche dovuta al dualismo della materia e della luce di comportarsi come onde o come particelle in funzione del comportamento causale del fenomeno (e quindi), portò a una nuova struttura matematica della natura, lontano dal mondo di Galileo, Newton, Maxwell.

Einstein, durante lo sviluppo della teoria della relatività generale, utilizzò il calcolo tensoriale (elaborato da Ricci Curbastro e dal suo allievo Levi Civita), che richiede calcoli complessi. Le matrici, invece, offrono una forma più compatta per esprimere i tensori e semplificare alcuni calcoli. Le matrici consentono di descrivere i 'salti quantici' degli elettroni nell'atomo tra gli stati stazionari.

La meccanica delle matrici, formulata da Heisenberg, Born e Jordan, è una delle prime formulazioni complete della meccanica quantistica.

La nuova struttura matematica che fu proposta per descrivere l'atomo di Bohr si basò, in modo equivalente sulla:

- teoria della funzione d'onda introdotta da Erwin Schrödinger;
- teoria delle matrici, sviluppata da Heisenberg.

In tale nuova struttura della meccanica quantistica le grandezze fisiche, come la posizione e la quantità di moto, sono rappresentate da matrici, e l'evoluzione temporale di un sistema è descritta dall'evoluzione di queste matrici. Questo approccio permette di descrivere i salti quantici degli elettroni e di superare il modello atomico di Bohr. Le matrici di Pauli sono utilizzate per descrivere lo spin delle particelle e le matrici sono utilizzate per descrivere le interazioni tra particelle elementari, come gli elettroni e i quark, e matrici possono essere utilizzate per rappresentare lo spazio-tempo in teorie di stringhe, La fisica matematica si occupa dello studio dei problemi fisici con metodi matematici rigorosi, e le matrici sono uno strumento essenziale per queste ricerche sono un linguaggio potente e versatile che permette di descrivere e analizzare una vasta gamma di fenomeni fisici, dalla meccanica quantistica alla fisica delle particelle e alla teoria delle stringhe.

La teoria della funzione d'onda, introdotta da Erwin Schrödinger nel 1926, descrive il comportamento degli elettroni (e di altre particelle) in termini di onde di probabilità anziché di traiettorie definite. Questa teoria rivoluzionò la fisica quantistica, introducendo il concetto che non è possibile conoscere con certezza la posizione di una particella, ma solo la probabilità di trovarla in un determinato punto dello spazio e in un determinato istante. La funzione d'onda (Ψ) è una funzione matematica che descrive lo stato di un sistema quantistico, come un elettrone in un atomo. Il suo valore, in un dato punto dello spazio e del tempo, fornisce la probabilità di trovare la particella in quella posizione.

È l'*interpretazione probabilistica* della meccanica quantistica, permettendo di associare una probabilità a ciascun punto dello spazio per la presenza di una particella, quando si effettua una misurazione, la funzione d'onda "collassa", e la particella assume un valore definito. Un concetto teorico che cerca di spiegare come le particelle quantistiche, che descritte in uno stato di sovrapposizione, cioè in più posizioni o stati contemporaneamente, si riduce a uno stato, un risultato specifico, quando vengono misurate. La natura ondulatoria della materia rimane uno degli aspetti più affascinanti della meccanica quantistica. L'equazione di Schrödinger afferma che gli atomi esistono come pacchetti di probabilità simili a onde nello spazio, che collassano poi in particelle discrete (separate e individuali, che possono essere contate, a differenza di qualcosa di "continuo" che è indivisibile si trova in ogni punto di un intervallo) dopo l'osservazione.

Per la prima volta in assoluto, i fisici hanno catturato un'immagine chiara dei singoli atomi che si comportano come un'onda. L'immagine mostra atomi fluorescenti che si trasformano in piccole macchie confuse di pacchetti d'onda ed è la dimostrazione del fatto che gli atomi esistono sia come particelle che come onde, uno dei capisaldi della meccanica quantistica. La natura ondulatoria della materia rimane uno degli aspetti più affascinanti della meccanica quantistica. La dualità onda-particella afferma che tutti gli oggetti di dimensioni quantistiche, e quindi tutta la materia, esistono sia come particelle che come onde allo stesso tempo. L'equazione di Schrödinger afferma che gli atomi esistono come pacchetti di probabilità simili a onde nello spazio, che collassano poi in particelle discrete dopo l'osservazione ("Grazie a una nuova tecnica, gli scienziati sono riusciti a catturare gli atomi di litio mentre si trasformano in onde quantistiche" *PassioneAstronomia.it* 4 agosto 2025).

Il primo esempio di unificazione di fenomeni diversi, dando luogo a uno dei più importanti risultati scientifici di tutti i tempi è la scoperta delle onde elettromagnetiche. Esse non solo esistono in natura, ma si possono propagare nel vuoto, in mezzi come l'atmosfera e nelle guide ottiche. Quando l'uomo comprese la possibilità di trasportare energia e quindi "informazione" da un punto all'altro dello spazio, diede origine a una seconda rivoluzione dopo quella industriale, la "rivoluzione tecnologica". Grazie a queste scoperte l'uomo ha potuto inventare oggetti che si basano sulle onde elettromagnetiche e che ormai appartengono alla nostra vita quotidiana come la radio, i cellulari. La ricerca quantistica di Maxwell, o meglio, l'impatto delle sue equazioni della meccanica quantistica, si manifesta principalmente nel modo in cui queste equazioni descrivono il comportamento delle onde elettromagnetiche, che in seguito hanno avuto un ruolo cruciale nella formulazione della teoria quantistica della luce. Sebbene Maxwell non abbia sviluppato una

teoria quantistica, le sue equazioni hanno gettato le basi per la comprensione di fenomeni che hanno portato alla nascita della meccanica quantistica. Maxwell, uno dei più importanti scienziati mai vissuti, *...fu il padre dell'elettromagnetismo, il primo esempio di unificazione di fenomeni diversi.*

Heisenberg e Schrödinger sono due figure chiave nella meccanica quantistica, ma hanno approcci diversi alla descrizione del mondo quantistico.

Lo stesso Heisenberg è noto per il suo principio di indeterminazione, che afferma l'impossibilità di conoscere con precisione assoluta sia la posizione che la quantità di moto di una particella contemporaneamente. La sua formulazione della meccanica quantistica, nota come rappresentazione di Heisenberg, si concentra sull'evoluzione temporale degli operatori, diventano dipendenti dal tempo.

Schrödinger, d'altra parte, è famoso per la sua equazione d'onda, che descrive l'evoluzione temporale dello stato di un sistema quantistico, rappresentato da una funzione d'onda. La rappresentazione di Schrödinger si concentra sull'evoluzione temporale della funzione d'onda, gli operatori rimangono fissi, sono costanti.

Utilizzando il potente strumento della matematica, mise insieme tutti i risultati sperimentali ottenuti sotto forma di quattro equazioni differenziali, esprimendo in questo modo tutte le leggi empiriche elaborate nei decenni precedenti e unificando in un'unica teoria l'elettricità e il magnetismo.

Le equazioni di Maxwell sono un insieme di equazioni fondamentali che descrivono il comportamento dei campi elettrico e magnetico, fornendo una descrizione completa del fenomeno elettromagnetico. In sostanza, le equazioni di Maxwell unificano elettricità e magnetismo, dimostrando che essi sono due manifestazioni di un unico fenomeno: il campo elettromagnetico. La funzione d'onda di Maxwell si riferisce al risultato delle sue equazioni che descrivono il comportamento delle onde elettromagnetiche. Maxwell dimostrò che campi elettrici e magnetici variabili possono propagarsi nello spazio come onde, e queste onde sono caratterizzate da una funzione d'onda, che descrive come i campi elettrico e magnetico variano nello spazio e nel tempo e le equazioni di Maxwell sono fondamentali per comprendere il comportamento delle onde elettromagnetiche, e la funzione d'onda è uno strumento matematico che le descrive.

La scelta del linguaggio matematico può aprire la porta a "Universi teorici" completamente nuovi, può cambiare ciò che percepiamo come realtà, espandendo i confini di ciò che consideriamo possibile. Un insieme di assiomi che descrivono il dominio di interesse, può con la loro analisi, rivelare informazioni importanti sulla struttura sottostante. È lo spazio dove si può ritrovare la costruttività per capire meglio l'universo, non un mero risultato tecnico. Sono sistemi di riferimento che utilizziamo per descrivere azioni e reazioni che influenzano la materia e l'energia.

L'Universo indagato dall'uomo appare anche come una sfera centrata sull'*osservatore* (l'uomo) con massa ed energia. All'esterno appare ordinario, ma all'interno racchiude un mondo quantistico fatto di particelle subatomiche. Un reticolo di piccoli volumi di spazio interconnessi e superfici. È un sistema composto da miliardi di particelle comportarsi come un'unica entità. La rete di spin in fisica teorica è utilizzata per rappresentare le interazioni tra particelle. Scoperte che hanno contribuito a chiarire il "confine" tra il mondo microscopico e quello macroscopico. La matematica crea ordine e funzionalità dentro l'invisibile. Nel mondo invisibile della fisica subatomica, esistono concetti come quello delle particelle subatomiche.

5. ENTANGLEMENT E UNIFICAZIONE DEL TUTTO

Che cosa accomuna una particella subatomica e la matematica, entrambi sono capaci di agire sul mondo. G. Parisi (Premio Nobel per la Fisica nel 2021) ha dimostrato come lo strumento matematico sia concettualmente indispensabile per descrivere e interpretare le sue ricerche a livello microscopico dei sistemi complessi in esame come la materia. Uno degli oggetti celesti più studiati è la materia oscura. È una componente di materia che sarebbe attualmente rilevabile solo in modo indiretto attraverso i suoi effetti gravitazionali. La materia "mancante" dell'universo, rappresenta un passo importante nella conoscenza dei misteri che si nascondono nelle profondità dello spazio. Tale parte collegata alla superficie attraverso la meccanica quantistica, era uno spazio totalmente inaccessibile all'uomo. Un nuovo capitolo della ricerca, frutto della capacità di analisi dei dati raccolti relativi ai fenomeni quantistici. La Meccanica Quantistica si è rivelata un linguaggio fondamentale per la descrizione dell'universo basata su equazioni matematiche per descrivere il comportamento delle particelle subatomiche e degli atomi.

Nel mondo invisibile della fisica subatomica, esistono concetti matematici senza i quali non potremmo spiegare quasi nulla di ciò che accade nella materia. Sono un risultato che ha fatto della fisica quantistica una delle teorie più accurate mai concepite.

Quando la meccanica quantistica usando gli strumenti giusti della matematica riesce a descrivere qualcosa che non si conosceva e creare soluzione delle equazioni collegando la superficie con una parte completamente mancante mette a disposizione della ricerca un quadro teorico. Tecnologie che influenzano profondamente la nostra vita quotidiana, dimostrando ancora una volta come la comprensione dei fenomeni quantistici possa trasformarsi in innovazioni concrete.

Descrivendo il modo di risolvere il problema la programmazione logica (si basa su importanti risultati teorici) definisce i metodi di dimostrazione automatica. Descrive cioè la struttura logica del problema, ovvero aver determinato che una certa formula è un teorema che costituisce il calcolo per risolverlo. La programmazione funzionale si basa su una serie di funzioni che possono richiamarsi l'una con l'altra seguendo un paradigma di assiomi per calcolare il valore di convergenza e poter esprimere una funzione qualsiasi come una somma di altre funzioni, più semplici da trattare. È lo schema di un linguaggio logico semplice. È un linguaggio funzionale. Se si parla della nostra capacità di capire la natura dello spazio e del tempo, di comprendere a fondo il tessuto della realtà fisica, allora la teoria quantistica della gravità è semplicemente il più efficace strumento scientifico della nostra epoca. L'espressione "la descrizione della materia" si tratta di un'espressione che indica la possibilità di accedere a nuove dimensioni, conoscenze, o esperienze che prima erano inaccessibili, una soglia come l'ha definita Jenette tra la materia conosciuta e la materia "mancante" (oscura) che affronta il «quesito fondamentale» dell'esistenza. Modi diversi di descrivere le caratteristiche dell'esplorazione, utilizzano un'immagine per la comprensione della relazione.

L'universo è organizzato in modo tale che le galassie possono essere trovate isolate, in gruppi o in ammassi, ma è probabile che siano coinvolte in un super ammasso di galassie. Questi superammassi sono collegati da filamenti con enormi vuoti che si interpongono tra di essi (costituiscono la "cosmic web"). La rete cosmica rappresenta l'interconnessione tra queste strutture. Un nuovo studio, nato dalla collaborazione tra un astrofisico e un neurochirurgo italiano e pubblicato sulla rivista *Frontiers in Physics*, mette a confronto due tra i più enigmatici e complessi sistemi che esistano in natura – la rete delle galassie che compongono l'universo e la rete dei neuroni all'interno del cervello umano – analizzandone somiglianze e differenze 2020 INAF Da una parte, enormi filamenti che permeano gli spazi intergalattici, collegando le strutture più dense dell'universo e formando l'infrastruttura cosmica in cui nascono e si evolvono, nel corso di miliardi di anni, galassie, stelle e pianeti. Dall'altra, le reti filamentose di neuroni che costituiscono il cervello umano, in grado di ricevere, elaborare e trasmettere impulsi nervosi, e dare luogo alle complesse funzioni cognitive della mente.

Usando uno strumento chiamato "Esploratore spettroscopico multi unità" dell'Osservatorio Europeo Australe, con questo strumento i ricercatori si sono focalizzati su un antico gruppo di galassie situate nella costellazione dell'Acquario. Usando il riflesso della luce delle giovani stelle in formazione, sono poi riusciti a tracciare una vaga mappa di questa rete. Tuttavia, lo studio di questa struttura è ancora molto complicato. La debolezza dei filamenti li rende difficili da rilevare. È una scoperta straordinaria, che conferma l'esistenza di una struttura solo teorizzata (cosmic web). A prima vista, l'organizzazione macroscopica del cosmo e quella microscopica delle reti neurali appaiono sorprendentemente simili.

Una soglia dell'universo un intreccio terrestre e spaziale per delineare come delle particelle cosmiche subatomiche come il neutrino attraversano interi pianeti senza quasi interagire portando con sé messaggi dallo spazio più profondo fino a una profondità di 2400 m sotto la superficie nel Mar Mediterraneo al largo della Sicilia.

Particelle subatomiche generate da fenomeni cosmici come l'esplosione di una stella, un getto di blazar o l'attività di un buco nero.

La fisica quantistica studia il comportamento di atomi e particelle subatomiche. Uno strumento della meccanica quantistica per descrivere le connessioni alla base dell'universo è l'entanglement ed è per lo studio del teletrasporto quantistico, una forma particolare di entanglement quantistico, nella quale più particelle restano collegate in un equilibrio estremamente stabile. Rappresenta le interazioni tra particelle elementari subatomiche secondo le regole della meccanica quantistica. È la chiave di volta per la comprensione delle

informazioni su scala subatomica. Siamo abituati ad interrogarci sull'immagine che via via è stata elaborata, un intreccio dalle dimensioni microscopiche che rappresenta un sistema quantistico che emerge solo dal comportamento delle particelle subatomiche. Il modello mostra un nucleo piccolissimo mentre gli elettroni orbitano a grande distanza lasciando un enorme spazio vuoto tra di essi.

Secondo la meccanica quantistica, gli elettroni non orbitano su traiettorie precise, ma esistono in una "nube di probabilità" che riempie lo spazio intorno al nucleo. È un modello che deriva dalla meccanica quantistica e dalla risoluzione dell'equazione di Schrödinger. Le nuvole di probabilità non hanno confini netti e la loro forma dipende dallo stato quantico dell'elettrone. La nuvola si può definire una regione dove la probabilità di trovare l'elettrone è superiore a una certa soglia, ad esempio il 90%. Il vuoto all'interno dell'atomo non è un vuoto assoluto, ma è attraversato dai campi quantici che descrivono gli elettroni. Anche il vuoto più profondo è infatti pieno di attività quantistica, come le particelle virtuali che compaiono e scompaiono. Da questi campi possono emergere continuamente coppie di particelle virtuali che nascono e muoiono in un istante. Non "dal nulla", la loro apparizione non viola le leggi della fisica, ma è permessa grazie al principio di indeterminazione di Heisenberg, che permette a queste particelle di esistere per un tempo brevissimo poi scompaiono. Le particelle virtuali del vuoto quantistico non sono create da un ricercatore, ma nascono spontaneamente a causa delle fluttuazioni quantistiche. La loro esistenza è stata verificata sperimentalmente tramite l'effetto Casimir. Le particelle virtuali mediano le interazioni tra le particelle reali. La loro origine risiede nelle leggi fondamentali della fisica quantistica che regolano il comportamento della materia e dell'energia su scale subatomiche. Il vuoto quantistico è una proprietà intrinseca del vuoto che (come nell'universo) anche all'interno di un atomo, è un "mare" dinamico di energia e fluttuazioni.

La scelta del linguaggio matematico si concentra sulla struttura degli argomenti G. Parisi (Premio Nobel per la Fisica) racconta come lo strumento matematico si sia dimostrato concettualmente indispensabile per descrivere e interpretare i casi "disordinati" delle sue ricerche. Il premio Nobel per la fisica ha studiato sistemi complessi, che vanno dalle particelle subatomiche ai sistemi neurali e al comportamento di sistemi come un pezzo di vetro. Il suo lavoro include la comprensione del disordine e delle fluttuazioni che si trovano sia in sistemi fisici di piccole dimensioni che di grandi dimensioni, come le particelle e le scale planetarie.

Un reticolo di piccoli volumi di spazio interconnessi, una rete di spin (è uno strumento matematico) che semplifica i calcoli complessi, una rappresentazione grafica che usa nodi e collegamenti (spazi interconnessi) per descrivere sistemi quantistici.

Scoperte che hanno contribuito a chiarire il "confine" tra il mondo microscopico e quello macroscopico.

Nel mondo invisibile della fisica subatomica, esistono concetti come quello delle particelle virtuali, senza le quali non potremmo spiegare quasi nulla di ciò che accade nella materia. L'Entanglement, o correlazione quantistica è uno dei fenomeni della fisica moderna che ha contribuito a chiarire il "confine" tra il mondo microscopico e quello macroscopico. Questo fenomeno prevede che due o più particelle restano legate tra loro indipendentemente dalla distanza che le separa e lo stato di una influenza immediatamente quello dell'altra. Uno strumento che rappresenta le interazioni tra particelle elementari subatomiche secondo le regole della meccanica quantistica. La chiave di volta per la comprensione delle informazioni su scala subatomica sono i diagrammi ideati da Richard Feynman, che rappresentano schematicamente le interazioni tra particelle elementari secondo le regole della meccanica quantistica. I diagrammi di Feynman è un linguaggio che ha rivoluzionato il modo in cui i fisici teorici affrontano i calcoli nella teoria della meccanica quantistica. Sono un espediente matematico ideato da Feynman, per descrivere come le particelle reali interagiscono. Questi diagrammi rappresentano visivamente le interazioni, tracciano il percorso delle interazioni tra particelle reali.

6. CONCLUSIONE

Le scoperte ci mostrano che in quel legame invisibile tra particelle che comunicano a distanza, c'è la stessa forza che unisce l'universo e l'uomo. la vera energia quantistica è l'entanglement e non è soltanto un concetto scientifico: è una metafora l'immagine di un cosmo interconnesso.

La fisica quantistica ci insegna che l'universo è interazione, ogni cosa è connessa a un'altra da un intreccio invisibile di energia e conoscenza.