

Carmine Vona

Il Perché' delle Cose



Saggio 1

I Buchi Neri

Definizione, Origine e Caratteristiche

Una raccolta di saggi di natura scientifica presentati in forma semplice per i non “addetti ai lavori”

Con il Patrocinio del Comune di Moschiano
2025



Prefazione

Non è un mistero che moltissime volte tutti noi siamo intimoriti quando ci troviamo di fronte a trattati o semplici pubblicazioni scientifiche soprattutto perché spessissimo i loro autori fanno ricorso a formule astruse e/o linguaggi difficile da comprendere e che spesso ottengono l'effetto opposto e ci allontanano invece che avvicinarci alla materia trattata. Fortunatamente di tanto in tanto c'è qualcuno che, soprattutto in base alla propria esperienza, si rende conto di questa limitazione e si adopera per rendere il tutto più alla portata di quelli che non hanno tanta dimestichezza con la matematica, fisica, e scienza in generale.

È il caso del Carmine Vona, Moschianese d'origine, Dottore in Fisica ed affermato ex professore e dirigente di importanti Istituti Finanziari a livello mondiale che, con l'aiuto delle sue nipoti, ha cercato di porre rimedio a questa situazione.

Il Perché delle Cose è una serie di saggi di natura scientifica il cui obbiettivo è quello di spiegare in maniera elementare i concetti fondamentali di alcune teorie e misteri della scienza ai "non addetti ai lavori" o, in generale, a persone che hanno scarse conoscenze scientifiche, senza far ricorso alla matematica avanzata. Alcune versioni preliminari di questi saggi sono state redatte dalle nipoti del dott. Carmine Vona, sotto la guida del consulente scientifico del ginnasio/liceo (High School) che esse frequentavano, e, successivamente, estese ed arricchite dal dott. Vona in modo da renderle autosufficienti. Altri saggi sono il risultato del lavoro congiunto del dott. Vona e delle sue nipoti, alle quali il dott. Vona cercava di spiegare, in termini a loro accessibili, teorie scientifiche molto avanzate.

L'opera completa è costituita da 8 saggi su vari argomenti scientifici e 2 "addendum"

- | | |
|-----------|---|
| Saggio 1 | – Definizione, Origini e Caratteristiche dei Buchi Neri nell'Universo |
| Saggio 2 | – Il Corpo Umano – Parte I e Parte II |
| Saggio 3 | – Fisica delle Particelle – Parte I e Parte II |
| Saggio 4 | – Teoria della Relatività |
| Saggio 5 | – Meccanica Quantistica – Parte I e Parte II |
| Saggio 6 | – Entanglement, Meccanica Quantistica e Informatica Quantistica |
| Saggio 7 | – Intelligenza Artificiale (IA): Che cosa è? Come funziona? |
| Saggio 8 | – Addendum al Saggio sulla IA: Premi Nobel 2024 per la Fisica e Chimica |
| Saggio 9 | – Il Ruolo della Matematica nelle Scienze (Che cosa è la Matematica) |
| Saggio 10 | – Addendum al Saggio "Il Ruolo della Matematica nelle Scienze"
(Come spiegare l'equazione EFE di Einstein a un(a) ragazzo/a di 13-14 anni) |

Ringraziamo quindi gli autori dei saggi per aver voluto condividere il loro lavoro con tutti noi, nella speranza che esso possa istigare, soprattutto nei più giovani, quella curiosità intellettuale fondamentale per l'avanzamento della cultura e del progresso e di cui tutti noi abbiamo bisogno.

Versione Digitale

Una versione digitale di questo documento in formato PDF può essere trovata alla URL www.prolococaputo.org nella sezione “Le Nostre Iniziative” oppure usando il QRC a lato.



Saggio 1 – Definizione, Origini e Caratteristiche dei Buchi Neri nell'Universo

Sophia Vona e Carmine Vona

Redatto 4 Maggio 2017

Sommario In questo saggio gli autori descrivono, in termini accessibili a giovani studenti la cui istruzione non va oltre quella delle scuole medie inferiori, cosa sono i “**buchi neri**”, che sono stati scoperti in alcune regioni dell'Universo; come e quando questi buchi neri si formano, da chi e come sono stati scoperti, come si relazionano agli altri corpi celesti che popolano l'Universo e perché gli autori del saggio sconsigliano fortemente ai loro lettori di prendere in considerazione la possibilità di emigrare in un buco nero, qualora se ne presentasse l'occasione.

Note Biografiche sugli Autori:

Sophia Vona

Al tempo della stesura di questo Saggio, Sophia Vona era studentessa liceale presso il liceo (High School) di Charlotte, North Carolina, USA

Carmine Vona

Nato a Moschiano (Av) e laureato in Fisica presso l'Università Federico II di Napoli, il Dott. Vona ha insegnato Esercizi di Fisica presso la stessa Università e Fisica Generale all'Università di Natal in Brasile prima di trasferirsi negli Stati Uniti dove, con il titolo di Vice Presidente Esecutivo e Chief Information Officer (CIO), per decenni è stato a capo del Dipartimento di Tecnologia della Bankers Trust Company, una delle più prestigiose banche di Wall Street.

Il Dott. Vona ha anche conseguito la docenza in Computer Science presso l'Università dello Stato di New York (USA) ed ha insegnato Linguaggi di Programmazione all'International Computer Institute di New York.

Tavola dei Contenuti

1.0	Premessa	1
2.0	Introduzione	1
3.0	Materia, Forze Naturali e Ciclo di Vita delle Stelle	2
3.1	<i>Definizione della Materia</i>	<i>2</i>
3.2	<i>Forze Naturali</i>	<i>4</i>
3.3	<i>Nascita e Morte di una Stella</i>	<i>5</i>
4.0	Definizione, Nascita, Scoperta e Caratteristiche dei Buchi Neri...	7
4.1	<i>Definizione di Buco Nero.....</i>	<i>7</i>
4.2	<i>Nascita di un Buco Nero</i>	<i>7</i>
4.3	<i>Scoperta dei Buchi Neri.....</i>	<i>8</i>
4.4	<i>Caratteristiche e Proprietà dei Buchi Neri</i>	<i>12</i>
5.0	Note	14
Nota 1	<i>Principio di Esclusione di Pauli</i>	<i>14</i>
Nota 2	<i>Legge di Gravità di Newton</i>	<i>16</i>
Nota 3	<i>Newton e l'Incidente della Mela</i>	<i>17</i>
Nota 4	<i>Definizione di Spazio e Tempo (Space-Time)</i>	<i>17</i>
Nota 5	<i>Definizione di Binary Star.....</i>	<i>21</i>
Nota 6	<i>Domande di Sophia Vona</i>	<i>21</i>
Nota 7	<i>Temperatura all'Interno di un Buco Nero</i>	<i>22</i>
Nota 8	<i>Eventi che Portarono alla Scoperta dei Buchi Neri.....</i>	<i>22</i>
Nota 9	<i>La Geometria di Riemann e la Geometria di Euclide.....</i>	<i>24</i>
Nota 10	<i>Glossario</i>	<i>27</i>
	<i>Riconoscimenti e Ringraziamenti.....</i>	<i>29</i>
	<i>Bibliografia</i>	<i>29</i>

1.0 Premessa

La prima versione di questo saggio è stata compilata da Sophia Vona, una matricola alla High School di Charlotte, N.C., USA, sotto la supervisione del consulente scientifico della sua scuola. L'obiettivo di queste esercitazioni era di introdurre giovani studenti ad argomenti e teorie scientifiche avanzate facendo ricerche sulle materie assegnate, su Internet o su libri di testo, e quindi compilare un saggio sull'argomento.

Il saggio iniziale è stato poi ampliato e arricchito sufficientemente dal dott. Carmine Vona (nonno di Sophia) per garantire che tutti gli argomenti accessori fossero illustrati con sufficienti dettagli in modo da rendere il saggio autonomo e comprensibile a studenti molto giovani che potrebbero non avere (e probabilmente non hanno) sufficienti conoscenze di base per comprendere teorie scientifiche avanzate. Mentre il saggio presenta e/o fa riferimento a formule ed equazioni matematiche avanzate, gli autori hanno cercato di spiegare i concetti alla base di queste formule ed equazioni, riducendo al minimo i dettagli tecnici. Gli autori utilizzano anche un linguaggio e una terminologia familiare agli studenti delle scuole elementari e medie e, quando necessario, semplificano materie complesse e sacrificano il rigore scientifico a favore di un linguaggio semplicistico, sperando che ragazzi di 12-15 anni non si perdano nei dettagli matematici avanzati. Per i lettori un po' più sofisticati, gli autori hanno fornito spiegazioni e/o approfondimenti tecnici nelle Note raggruppate alla fine del saggio.

Come nota a margine informiamo i lettori che una versione compressa di questo saggio è stata presentata da Sophia Vona ai suoi compagni di classe. Sophia è stata quindi selezionata, quale rappresentante della sua scuola, a partecipare a un concorso internazionale sponsorizzato dal Pentagono al quale hanno partecipato quasi 3.000 partecipanti. Nella classifica finale del concorso, la presentazione di Sophia è stata classificata fra le prime 2% dei partecipanti. Il lettore, che desidera vedere la presentazione di Sophia sui buchi neri o una presentazione simile sulla Fisica delle Particelle, può cliccare sul link sottostante.

<https://www.youtube.com/watch?v=uLDEEKdnM-I&t=14s>

2.0 Introduzione

Fin dagli albori delle civiltà, guardando il cielo in una notte stellata, l'uomo è sempre stato affascinato dal grandissimo numero di punti luminosi che sembrano incastrati nella volta celeste. Nel corso degli anni, le persone hanno imparato che non tutti questi punti luminosi sono uguali. Con l'avvento di strumenti come il **"telescopio"**, gli scienziati hanno potuto osservare meglio questi oggetti celesti e si sono resi conto che alcuni di essi brillano di luce propria e sono stati chiamati **"Stelle"**. Altri oggetti celesti sono in realtà agglomerati di stelle e altra materia celeste e sono stati chiamati **"Galassie"**. Poi è stato scoperto che alcuni oggetti celesti non brillano di luce propria, ma riflettono semplicemente la luce proveniente dalle stelle vicine e sono stati chiamati **"Pianeti"** o **"Satelliti"**. Al liceo abbiamo poi imparato a conoscere il nostro **sistema planetario** composto da una stella, chiamata **Sole**, i suoi nove pianeti che ruotano attorno ad essa e dei satelliti, come la Luna, che ruota attorno ad un pianeta chiamato **Terra**. Abbiamo anche

appreso che il nostro **Sole** è solo una di circa cento miliardi di stelle che compongono una galassia, chiamata **Via Lattea**. Negli ultimi cento anni, abbiamo anche appreso che nell'Universo, oltre alla nostra Via Lattea, ci sono miliardi (forse anche trilioni di altre galassie) e nessuno di questi corpi celesti è ancorato alla volta celeste. Invece, questi corpi celesti si allontanano l'uno dall'altro in quello che sembra essere un Universo in continua espansione. Gli scienziati hanno anche formulato teorie che spiegano razionalmente come i movimenti dei corpi celesti si relazionino tra loro e hanno scoperto **leggi fisiche**, che ci consentono di seguire i movimenti dei corpi celesti e persino di prevederne la posizione in qualsiasi momento futuro. Le teorie e le leggi della fisica vengono solitamente formalizzate attraverso equazioni che, in effetti, simulano il comportamento del sistema in esame. Nel saggio intitolato “**Teoria della Relatività**” abbiamo appreso come Albert Einstein ha formulato le **equazioni EFE** per simulare il comportamento dei corpi celesti nell'Universo e prevederne l'evoluzione.

Dai primi decenni del XX secolo, gli scienziati hanno iniziato a sospettare l'esistenza di oggetti celesti molto massicci che nemmeno i nostri telescopi più potenti sono in grado di vedere. A questi oggetti massicci e invisibili è stato dato il nome di **Buchi Neri**. In questo saggio forniremo risposte alle seguenti domande:

- **Cos'è un buco nero?**
- **Come si crea un buco nero?**
- **Come sono stati scoperti i buchi neri?**
- **Caratteristiche e proprietà dei buchi neri**

Prima di fornire risposte alle domande sopra menzionate, tuttavia, desideriamo introdurre alcune informazioni di base su:

1. **La materia di cui è fatta la Terra e il resto dell'Universo;**
2. **Le forze naturali che agiscono sulla materia;**
3. **Il ciclo di vita delle stelle.**

Queste informazioni saranno molto utili per comprendere appieno i **buchi neri**, che sono l'oggetto di questo saggio.

3.0 Materia, Forze Naturali e Ciclo di Vita delle Stelle

3.1 Definizione della Materia

Tutti gli oggetti che vediamo e/o tocchiamo nella vita di tutti i giorni sono fatti di materia. Più di duemila anni fa i greci conclusero che la materia è, in definitiva, costituita da particelle elementari indivisibili alle quali fu dato il nome di “**atomi**” [dal greco α-τεμνω (pronuncia: a-temno) che significa “indivisibile”]. Il concetto che l'atomo fosse indivisibile durò fino alla fine del XIX secolo, quando si scoprì che l'atomo stesso è costituito da particelle più piccole, quando i fisici scoprirono che l'**elettrone**, il **protone** e il **neutrone** sono particelle subatomiche. Successivamente, nella seconda metà del XX secolo, si scoprì che i protoni e i neutroni sono costituiti da particelle ancora più piccole, chiamate **quarks**. La Figura 1 mostra le

componenti dell'atomo e la Figura 2 mostra le componenti di un protone e di un neutrone. Altre particelle subatomiche sono state scoperte più recentemente.

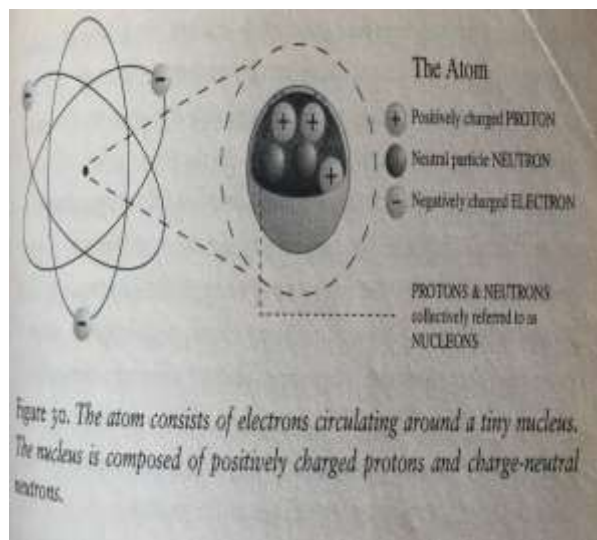


Figura 1

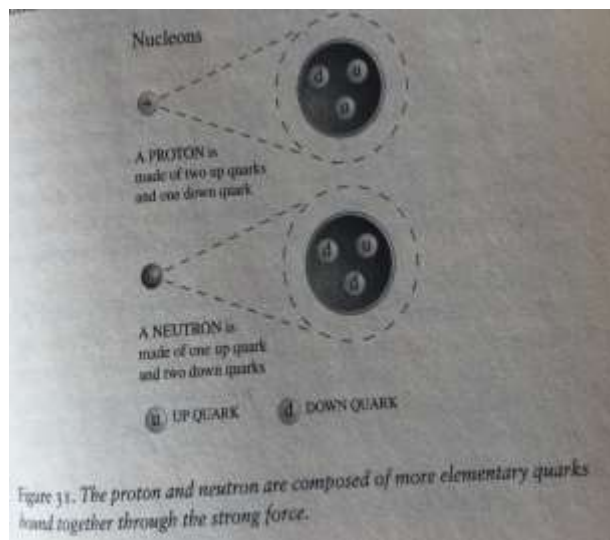


Figura 2

(source: Warped Passages by L. Randall)

Facciamo notare che gli atomi sono oggetti piccolissimi e, pertanto, invisibili all'occhio umano. Infatti, neanche gli atomi degli elementi più pesanti (come l'Uranio) sono visibili a occhio nudo. L'atomo mostrato nella Figura 1, con 3 elettroni in orbita attorno al nucleo, è stato ingrandito molto più di un milione di volte per farlo apparire come in Figura 1.

Per dare un'idea di quanto piccoli siano gli atomi, diciamo solo che i loro diametri si misurano in **pico-metri** ($1 \text{ pm} = 1 \text{ pico-metro} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}$). L'atomo mostrato in Figura 1 (con 3 elettroni in orbita) è, probabilmente, il Litio (Li) e il suo diametro è approssimativamente 300 pm (leggi 300 pico-metri = 300 trilionesimi di metro). Facciamo anche notare che il diametro del nucleo di un atomo è circa mille volte più piccolo del diametro dell'atomo, perciò lo si misura in **Femto-metri** ($1 \text{ Femto} = 1 \times 10^{-15} \text{ m}$).

Si noti pure che la distanza di ciascun elettrone dal nucleo è pari a mille volte la dimensione del nucleo stesso. In altre parole, stiamo dicendo che più del 99% dello spazio occupato da un atomo è spazio vuoto! Nel notare quanto detto in questo paragrafo, Sophia ha posto la seguente domanda al nonno:

- **Se l'atomo di qualsiasi elemento è più del 99% spazio vuoto, perché, quando versiamo l'acqua sul marmo (una sostanza prevalentemente fatta di Calcio e Carbonio), l'acqua scivola via? In altre parole: perché l'acqua non va a infiltrarsi nello spazio vuoto degli atomi di Calcio e di Carbonio?**

La risposta a questa domanda fu data da Wolfgang Pauli, un fisico austriaco, quando formulò il cosiddetto **Principio di Esclusione di Pauli** (vedi Nota 1) che gli valse il premio Nobel nel 1945. Il Principio di Esclusione, in effetti, stabilisce che due particelle identiche (per es., due elettroni) non possono occupare lo stesso spazio contemporaneamente. Ciò significa che gli elettroni che orbitano intorno al nucleo di un atomo formano una specie di scudo, per cui, se l'elettrone di un altro atomo si avvicina al primo, viene respinto. Nella domanda formulata da Sophia abbiamo gli elettroni che orbitano intorno ai nuclei di Calcio

e Carbonio (di cui il marmo è costituito). Quando Sophia versa l'acqua sul marmo, siccome le molecole di acqua (formate da atomi di idrogeno e ossigeno, H_2O) contengono anch'esse elettroni, questi ultimi vengono respinti, per cui all'acqua non è permesso di infiltrarsi negli spazi vuoti del marmo o del carbonio. Il risultato finale è che l'acqua scivola via. Al che Sophia ha posto un'altra domanda:

- **Va bene, gli elettroni che orbitano gli atomi di Calcio e Carbonio respingono gli elettroni dell'acqua e impediscono all'acqua di infiltrarsi negli spazi vuoti di Calcio e Carbonio. Ma se uno provasse a schiacciare (invece di semplicemente versare) l'acqua sul Calcio e Carbonio, si potrebbe vincere la resistenza opposta dagli elettroni contenuti negli atomi di Calcio e Carbonio?**

La risposta a questa domanda è **Sì**, ma solo se la pressione con cui l'acqua viene schiacciata sul marmo è molto, molto, molto alta. Quanto alta? Lo vedremo nella Sezione 3.3 di questo saggio, quando parleremo della **“morte di una stella”**.

3.2 Forze Naturali

I fisici hanno scoperto che in natura ci sono quattro Forze Fondamentali:

1. **Forza di gravità,**
2. **Forza elettromagnetica,**
3. **Forza debole e**
4. **Forza forte.**

Per capire come si formano i buchi neri, abbiamo bisogno di capire solamente la Forza di Gravità e come funziona. Le altre tre forze, insieme ad alcuni principi fisici di base [es., il Principio di Esclusione di Pauli (vedi Nota 1)], sono quelle che, in condizioni normali, tengono insieme le particelle elementari che costituiscono l'atomo.

Forza di Gravità La Forza di Gravità (chiamata anche Forza Gravitazionale o, semplicemente, Gravità), è una delle quattro forze fondamentali esistenti in natura. È stata scoperta da Isaac Newton quando quest'ultimo è stato colpito da una mela cadutagli sulla testa [vedi Nota 3]. La legge della fisica che regola questa forza prende il nome da Newton ed è chiamata **Legge di Gravitazione Universale di Newton**. La Legge di Gravitazione Universale di Newton afferma che una “particella” attrae ogni altra particella dell'Universo con una forza che è direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra i loro centri [vedi Nota 2]. Questa legge si applica alle particelle minuscole così come agli oggetti massicci come la Terra, la Luna, il Sole e qualsiasi altro corpo celeste, non importa quanto siano grandi o piccoli. Infatti, è questa legge che tiene i nostri piedi incollati al suolo e ci impedisce di essere scagliati nello spazio dalla forza centrifuga causata dalla rotazione della Terra. Ed è questa stessa legge che è responsabile della creazione dei buchi neri, come vedremo più avanti in questo saggio.

3.3 Nascita e Morte di una Stella

Nascita di una stella. Una stella nasce quando grandi quantità di gas, per lo più idrogeno, iniziano a crollare su sé stesse a causa delle attrazioni gravitazionali (discusse sopra) che gli atomi di questo gas esercitano l'uno sull'altro. All'aumentare della concentrazione di gas, aumenta anche la sua forza gravitazionale, attirando così più gas dalle aree adiacenti, il che, a sua volta, fa aumentare ulteriormente la forza gravitazionale. Poiché il volume complessivo occupato da questi atomi si contrae sotto la forza gravitazionale, gli atomi si scontrano tra loro più frequentemente e con velocità sempre crescente, provocando così il riscaldamento del gas. All'aumentare del calore, il gas diventa così caldo che, quando gli atomi si scontrano non rimbalzano più l'uno contro l'altro, invece, si fondono e formano Elio [questo è lo stesso processo che avviene nelle esplosioni di bombe all'idrogeno]. Quando si arriva a questo punto, allora **nasce una stella** perché il calore, sprigionato da questo processo di fusione degli atomi di idrogeno in elio, è ciò che fa brillare la stella. Inoltre, man mano che il calore aumenta, aumenta anche la pressione del gas verso l'esterno (pressione termica). Questo processo continua finché la pressione termica è sufficientemente alta da controbilanciare la pressione gravitazionale verso l'interno. In altre parole, il calore fa espandere il gas, mentre la forza gravitazionale tende a comprimere il gas. Quando queste due forze (pressione gravitazionale e pressione termica) si equivalgono viene raggiunto l'equilibrio. A quel punto, il gas smette di contrarsi, mentre la stella continua a bruciare il suo combustibile (gli atomi d'idrogeno) per controbilanciare la pressione gravitazionale e, allo stesso tempo, irradia luce in tutte le direzioni. Questo è fondamentalmente il processo che avviene all'interno del nostro Sole e di tutte le altre stelle e questo processo continuerà fino a quando tutto il carburante disponibile sarà stato consumato. [Se il lettore di questo saggio è preoccupato che il Sole possa un giorno rimanere senza carburante e quindi spegnersi, ha ragione! Se io fossi nei suoi panni, però, non mi preoccuperei più di tanto, perché il Sole ha abbastanza carburante da durare per altri cinque miliardi di anni, prima di spegnersi].

Morte di una stella. Nel paragrafo precedente (Nascita di una stella) abbiamo imparato che, per sostenersi, una stella brucia carburante. Questo, ovviamente, fa sorgere un dubbio:

➤ **Cosa accadrà quando una stella esaurirà il suo carburante?**

Quando una stella esaurisce il suo carburante, inizia a raffreddarsi. Senza il calore generato dal combustibile che brucia, la pressione compressiva generata dalla forza gravitazionale non è più controbilanciata dalla pressione termica espansiva e la stella ricomincia a contrarsi. Quando la stella diventa molto piccola, le particelle che la compongono si avvicinano molto l'una all'altra. A questo punto entra in gioco il Principio di Esclusione di Pauli [*due particelle identiche di materia non possono trovarsi nello stesso posto contemporaneamente*] e ci si potrebbe aspettare che le forze di repulsione, generate da particelle che cercano di occupare lo stesso spazio contemporaneamente, controbilancino le forze gravitazionali che continuano a esercitare pressione compressiva. In altre parole, proprio come prima la pressione termica contro-bilanciava quella gravitazionale, questa volta sarebbero le forze provenienti dal Principio di Esclusione di Pauli a contro-bilanciare la pressione gravitazionale.

Ciò è esattamente quello che accade quando una stella esaurisce il suo carburante. C'è un limite, però, alla forza di repulsione che il Principio di Esclusione di Pauli può fornire. Questo limite è stato calcolato dal fisico indiano Chandrasekhar e dal fisico russo Landau. I loro calcoli hanno dimostrato che, se la massa

della stella morente è inferiore a una volta e mezzo la massa del nostro Sole, allora le forze di repulsione tra gli elettroni generate dal Principio di Esclusione sono sufficienti per controbilanciare la forza di gravitazione. In tal caso la stella smette di rimpicciolirsi e si stabilizza in quella che gli astronomi chiamano **"nana bianca"**. Quest'ultima è, in effetti, una stella di bassissima luminosità, di colore tendente a un bianco sbiadito, con un raggio di poche migliaia di chilometri (più o meno paragonabile alle dimensioni della Terra, il cui raggio è poco più di 6.000 Km) e una densità di qualche centinaio di tonnellate per centimetro cubo (cm^3). Queste nane bianche si reggono e sono stabili perché le forze di repulsione tra gli elettroni (ricorda: non possono esserci due elettroni nello stesso posto contemporaneamente, secondo il Principio di Esclusione di Pauli), contro-bilanciano esattamente la forza compressiva dovuta alla gravità. Tutto questo accade se la massa della stella morente è inferiore a una volta e mezzo la massa del nostro Sole.

➤ **E se la massa della stella morente è superiore a una volta e mezzo la massa del nostro Sole, cosa accadrà?**

Se la massa della stella morente è superiore a una volta e mezzo la massa del nostro Sole, allora le forze di repulsione tra gli elettroni, generate dal Principio di Esclusione, non sono più sufficienti per controbilanciare la forza di gravitazione e, quindi, fermare il collasso della stella. In tal caso la stella continua a collassare (cioè, a rimpicciolirsi). In questo processo di rimpicciolimento, gli elettroni degli atomi, che orbitano intorno ai nuclei, si avvicinano sempre più ai nuclei nei quali sono annidati protoni e neutroni. A un certo punto gli elettroni (che sono dotati di carica elettrica negativa "-") sono così vicini ai protoni (che sono dotati di carica elettrica positiva "+") che si uniscono in matrimonio, dando, così, luogo a nuovi neutroni. In altre parole, elettroni e protoni scompaiono (perché danno luogo a nuovi neutroni) e quello che rimane non è più una massa fatta da atomi, ma una massa enorme di neutroni.

Bisogna ricordare che il Principio di Esclusione di Pauli si applica non solo agli elettroni, ma anche ad altre particelle subatomiche come i neutroni. I fisici Chandrasekhar e Landau hanno calcolato che, se la stella morente è più grande di una volta e mezzo, ma meno del doppio della massa del Sole, la forza di repulsione tra i neutroni entrerà in azione e impedirà alla stella di rimpicciolirsi oltre un certo limite. In altre parole, la forza di repulsione tra i neutroni riuscirà a fermare il collasso della stella. I suddetti scienziati hanno dimostrato che una stella morente, con massa inferiore al doppio della massa del Sole, finirà col trasformarsi in un oggetto oscuro che gli astronomi chiamano **"Stella di Neutroni"**. Queste ultime hanno un volume molto più piccolo delle nane bianche (hanno un raggio di una quindicina di chilometri), ma sono molto, molto più pesanti delle nane bianche, con una densità di qualche centinaio di milioni di tonnellate per centimetro cubo (cm^3). In altre parole, la massa di una stella di neutroni è circa un milione di volte più densa della massa delle nane bianche.

Conclusioni: una stella morente, avente una massa inferiore a una volta e mezzo ($1\frac{1}{2}$) la massa del Sole, diventerà una "Nana Bianca" alla sua morte. Invece, una stella morente avente una massa compresa tra 1 volta e mezzo e il doppio della massa del Sole, diventerà una "Stella di Neutroni" alla sua morte.

Nella prossima sezione vedremo cosa succede quando muore una stella la cui massa è superiore a due volte la massa del Sole.

4.0 Definizione, Nascita, Scoperta e Caratteristiche dei Buchi Neri

Con le conoscenze acquisite finora, possiamo ora rispondere alle quattro domande che ci siamo posti alla fine della Sezione 2.0 di questo saggio, ovvero:

- **Cos'è un buco nero?**
- **Come nasce un buco nero?**
- **Come sono stati scoperti i buchi neri?**
- **Caratteristiche e proprietà dei buchi neri**

4.1 Definizione di Buco Nero

In questa sezione forniremo una risposta alla domanda:

- **Cos'è un buco nero?**

Un **buco nero** è una regione dell'Universo in cui la presenza di un corpo celeste super-massiccio crea un campo gravitazionale così forte che nulla può sfuggirgli. La forza di gravità nelle vicinanze di un corpo celeste super-massiccio è così forte che nessun oggetto, nessuna particella e nemmeno la luce possono sfuggire alla sua presa. Infatti, se un astronomo puntasse l'occhio del suo telescopio in direzione di tale corpo super-massiccio, vedrebbe semplicemente buio pesto, buio assoluto. Questo perché non c'è luce proveniente dal corpo celeste super-massiccio [non un singolo fotone (i fotoni sono i portatori di luce) può sfuggire alla sua presa, a causa della forza gravitazionale molto intensa esistente nelle sue vicinanze!]. È come se ci fosse un buco in quella parte dell'Universo e tutto appare come buio assoluto. Il lettore può ora facilmente capire perché le regioni dell'Universo che hanno queste caratteristiche sono state chiamate **buchi neri**.

4.2 Nascita di un Buco Nero

Passiamo ora alla seconda domanda, ovvero:

- **Come nasce un buco nero?**

Nella Sezione 3.3 (Morte di una stella) abbiamo visto cosa accadrà a una stella in fin di vita, quando la sua massa è inferiore a una volta e mezzo ($1\frac{1}{2}$) la massa del Sole. Abbiamo anche visto cosa accadrà a una stella in fin di vita, quando la sua massa è inferiore a due (2) volte la massa del Sole. Ci sono, però, nell'Universo stelle la cui massa è superiore al doppio di quella del nostro Sole e queste appartengono alla categoria che gli astronomi chiamano “**stelle massicce**”. La prossima domanda, pertanto, è:

➤ **Cosa accadrà a una stella massiccia alla fine della sua vita?**

Usando la stessa metodologia usata da Chandrasekhar, Landau, Eddington e altri per spiegare la formazione delle **nane bianche** e **stelle di neutroni**, porterebbe a concludere che una stella massiccia morente dovrebbe ridursi [“collassare” e “collasso catastrofico dovuto alla gravitazione” sono i termini usati dagli astronomi] in un punto minuscolo con densità di massa infinita. Chandrasekhar, Landau, Eddington e persino Einstein, però, trovarono questa ipotesi poco plausibile [vedi Nota 6]. Il lavoro svolto da Oppenheimer e dai suoi assistenti negli anni '40, '50 e '60 del secolo scorso ha dimostrato che la forza di gravità prodotta da una stella massiccia in fin di vita è così forte che, a partire da una certa distanza dal suo centro, neanche i fotoni possono sfuggire alla sua presa [i fotoni sono i portatori di luce]. In altre parole, a partire da una certa distanza dal suo centro, i raggi di luce, emanati dalla stella massiccia morente, vengono piegati in una curva a forma di U e ridiretti all'interno della stella stessa. Qualsiasi cosa (compresa la luce) o qualsiasi oggetto, che si trovi entro questa certa distanza dal centro della stella massiccia morente, viene risucchiato senza alcuna speranza di poter tornare indietro. Secondo la Teoria della Relatività, se la luce non può sfuggire alla presa di una stella massiccia morente, allora nient'altro può sfuggire e, quindi, non abbiamo alcun modo di sapere cosa sta succedendo all'interno della stella stessa. Fu a questo punto (agli inizi degli anni '70), e per questi motivi, che gli astronomi cominciarono a chiamare **Buco Nero** (in inglese, **Black Hole**) l'intera regione da cui nulla può sfuggire (nemmeno la luce!) e tutto ciò che si avvicina al suo confine viene risucchiato senza alcuna speranza di ritorno. Al confine di questa regione è stato dato il nome di **Evento Orizzonte** (in inglese, **Event Horizon**). Dopo la sua nascita, il Buco Nero può continuare a crescere risucchiando materia e altri corpi celesti dall'ambiente circostante. Così facendo vengono a formarsi buchi neri super-massicci, con masse equivalenti a milioni di masse solari. La maggior parte degli scienziati oggi crede che buchi neri super-massicci esistano al centro della maggior parte delle galassie.

Possiamo, pertanto, concludere questa Sezione affermando che un Buco Nero nasce quando muore una stella massiccia. Un Buco Nero è una regione dell'Universo che esibisce una forza gravitazionale così forte (in virtù dell'enorme quantità di materia concentrata al suo interno) che nulla, nemmeno la luce, può sfuggire alla sua presa. Il confine di questa regione si chiama “Event Horizon” e qualsiasi cosa si avvicini a essa sarà risucchiata [dall'enorme forza gravitazionale] senza alcuna speranza di uscirne mai più.

4.3 Scoperta dei Buchi Neri

Passiamo ora alla terza domanda, ovvero:

➤ **Come sono stati scoperti i buchi neri?**

Il lettore attento che ha letto le sezioni precedenti di questo saggio, a questo punto, potrebbe porre la seguente domanda:

- **Se i buchi neri non sono visibili ai telescopi degli osservatori astronomici più avanzati e non lasciano sfuggire alcun oggetto o radiazioni dai loro Event Horizon, come hanno fatto gli astronomi per scoprirli?**

Come abbiamo visto altre volte nella storia delle scienze, talvolta la formulazione teorica di una teoria tramite un'equazione, o altri tipi di modelli matematici, può portare gli scienziati ad anticipare eventi, fenomeni o oggetti che non erano mai stati osservati prima. Questo è esattamente ciò che accadde a Karl Schwarzschild, astrofisico tedesco, quando trovò, per la prima volta, una soluzione all'equazione EFE di Einstein, solo pochi mesi dopo che Einstein aveva pubblicato il suo articolo sulla Relatività Generale. Dopo aver trovato la soluzione all'equazione EFE, Schwarzschild ha poi scoperto che la sua soluzione presentava una singolarità (vedi definizione di singolarità nel saggio “Il Corpo Umano – Parte II”) quando il raggio della stella, che stava collassando, raggiungeva il valore $R_s = 2GM/c^2$. In effetti, la matematica gli diceva che la stella morente era diventata un Buco Nero! Una scoperta di questa portata, probabilmente, sarebbe stata degna di un premio Nobel. Sfortunatamente, Schwarzschild non ha avuto il tempo necessario per analizzare la soluzione della EFE che aveva appena trovato per rendersi conto di ciò che aveva scoperto, perché è morto poche settimane dopo. In effetti, altri scienziati, molti anni dopo la morte di Schwarzschild, si resero conto che la soluzione della EFE trovata da Schwarzschild prevedeva la nascita di un buco nero, quando il raggio della stella morente scendeva al di sotto di R_s . Inoltre, ci è voluto quasi mezzo secolo per trovare prove oggettive dell'esistenza di buchi neri nell'Universo [secondo le regole esistenti, i Premi Nobel sono assegnati solo a scienziati viventi]. Tutti i tributi che sono stati pagati a questo eccezionale scienziato, inclusa la denominazione di R_s (Raggio di Schwarzschild), sono stati postumi.

Anche in questo caso, però, il lettore attento potrebbe sollevare la seguente obiezione:

- **Va bene per uno scienziato anticipare una scoperta interpretando la soluzione di un'equazione matematica. Tuttavia, nelle scienze, una scoperta ottenuta interpretando un'astrazione matematica, da sola, non può essere accettata come prova della scoperta, fino a quando la stessa scoperta non sia confermata da prove oggettive o esperimenti di laboratorio.**

La prova di ciò che Schwarzschild aveva scoperto è arrivata circa 50 anni dopo, quando gli scienziati compresero meglio l'equazione EFE e iniziarono a cercare prove oggettive dell'esistenza e del comportamento dei Buchi Neri. Focalizzandosi sulla Relatività Generale e sulle equazioni EFE, scienziati teorici hanno identificato una serie di potenziali situazioni e potenziali comportamenti dei buchi neri. Alcuni esempi di queste potenziali situazioni sono riportati qui di seguito. La verifica di queste potenziali situazioni, alla fine, ha portato all'identificazione e alla scoperta incontrovertibile dei buchi neri.

Esempio 1. Se un Buco Nero esercitasse una gravità così forte su tutta la materia diffusa che gli orbita attorno, tale materia dovrebbe essere risucchiata all'interno del buco nero con un movimento a spirale. In tal caso, le forze gravitazionali e di attrito dovrebbero comprimere la stessa materia diffusa e aumentarne la temperatura al punto da provocare l'emissione di radiazioni elettromagnetiche (compresa la luce visibile). Certo, una volta che la materia risucchiata va oltre il confine chiamato Event Horizon, tutto ciò che si può vedere è solamente buio assoluto. Tuttavia, prima di attraversare il confine chiamato Event Horizon, le radiazioni provenienti dalla materia compressa in spirale dovrebbero formare un disco di accrescimento (in inglese: **accretion disk**) splendente, che dovrebbe essere ben visibile al telescopio. Se gli astronomi potessero rilevare questi “accretion disk”, questa sarebbe la prova dell'esistenza di un buco nero.

Esempio 2. Le stelle che si avvicinano al confine Event Horizon di un buco nero dovrebbero essere sbriciolate in particelle elementari e queste particelle, in movimento vertiginoso a spirale, dovrebbero brillare molto intensamente prima di essere inghiottite dal buco nero. Alcuni autori fanno riferimento a questo evento come la “**spaghetizzazione**” di una stella. In una situazione del genere, studiando la traiettoria e la luminosità di queste particelle “in streaming”, gli astronomi dovrebbero essere in grado di determinare la posizione e la grandezza del buco nero invisibile.

Esempio 3. Da tempo gli astronomi sono a conoscenza della presenza di stelle binarie (in inglese, **Binary Star**) nell'Universo. Le stelle binarie sono semplicemente due stelle che ruotano l'una intorno all'altra. Bene, potrebbero esserci anche alcune stelle che non sono abbastanza vicine a un buco nero da essere inghiottite, ma stanno semplicemente orbitando attorno al buco nero. In tal caso, studiando i movimenti e le orbite di queste stelle, gli astronomi dovrebbero essere in grado di determinare l'esistenza del buco nero, inclusa la sua massa e posizione.

Indovina un po'? Tutte le situazioni evidenziate nei tre esempi precedenti sono state verificate. Dischi di accrescimento (accretion disk) spendenti sono stati identificati in alcune regioni dell'Universo e, in alcuni casi, il telescopio Hubble della NASA li ha persino fotografati (vedi Figura 3).



Figura 3: Immagine di un buco nero scattata dal telescopio Hubble pubblicata dalla NASA. Gli anelli luminosi sono "dischi di accrescimento" causati dalla materia che si muove a spirale verso il buco nero, mentre viene inesorabilmente risucchiata.

Stelle "spaghetificate", che si avvicinano al confine Event Horizon (ma prima di essere inghiottite dal buco nero) sono state osservate dagli astronomi e la Figura 4 in basso, scattata dalla NASA, mostra il flusso a spirale di particelle di una stella verso il buco nero nel loro viaggio finale.

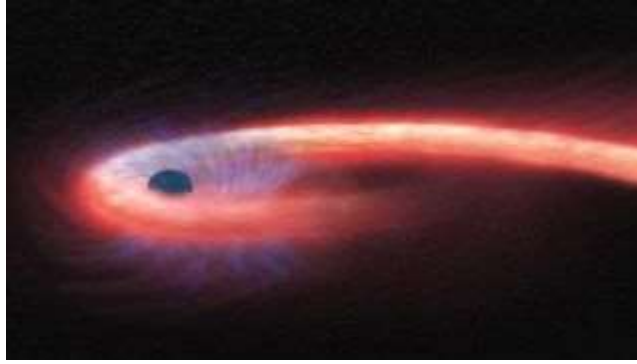


Figura 4: Un buco nero mentre risucchia una stella, lasciandosi dietro una scia di materiale stellare, che poi si avvolge a spirale intorno al buco nero. (Image credit: NASA / CXC / M. Weiss)

Stelle binarie (cioè, due stelle orbitanti l'una intorno all'altra) sono state identificate in alcune regioni dell'Universo, dove è visibile solo una stella, mentre l'altra non è visibile. Ciò indica che la stella visibile è in orbita attorno a un buco nero (o una nana bianca o una stella di neutroni). Il lato sinistro della Figura-5 in basso è l'immagine di una stella binaria, composta da un buco nero e una stella normale, situata nella galassia della Via Lattea a circa 17.000 anni-luce dalla Terra, scattata dalla NASA. Le uniche cose visibili, ovviamente, sono varie immagini della stella normale mentre orbita attorno al buco nero, che è invisibile. Sul lato destro dell'immagine, abbiamo un'illustrazione artistica dell'autore, il signor Weiss, che mostra esplicitamente il buco nero (palla bianca con due getti di gas: uno rivolto verso l'alto e l'altro rivolto verso il basso). La palla arancione è la stella, che ruota intorno al buco nero e, poiché la stella si è avvicinata troppo all'Event Horizon, viene sbriciolata in particelle dall'enorme forza di gravità del buco nero, formando così una lunga scia di materiale stellare (spaghetto), che si avvolge a spirale intorno al buco nero. In effetti, questa era una stella binaria in cui la stella visibile, in orbita attorno al buco nero, si è avvicinata troppo al confine Event Horizon e, pertanto, è condannata, perché viene risucchiata dal buco nero.

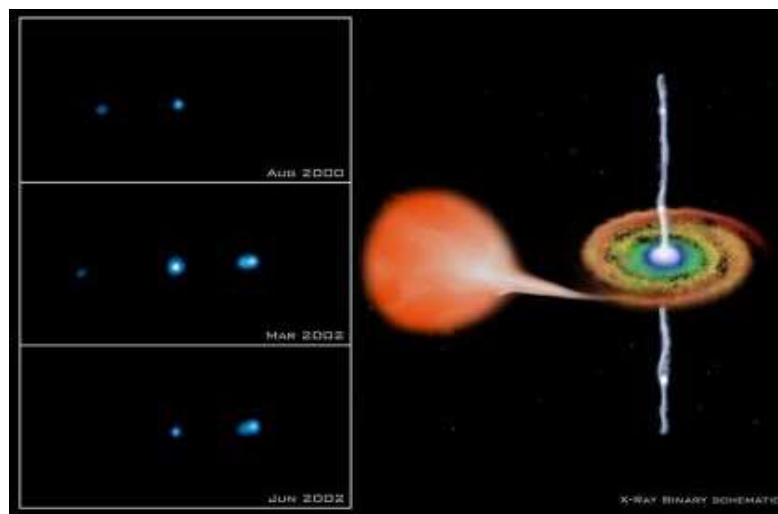


Figura 5: A sinistra diverse immagini di una stella che orbita intorno a un oggetto massiccio invisibile. A destra, un'illustrazione artistica del buco nero mentre sbriciola la stella come nella figura 4.

Credit: Left: X-ray (NASA/CXC); Right: Illustration (CXC/M. Weiss)

Infatti, a partire dal 1971, quando fu identificato e confermato positivamente il primo buco nero, gli astronomi hanno individuato numerosi altri buchi neri, tra cui un buco nero super-massiccio, di massa pari a circa 4,3 milioni della massa del nostro Sole, che si trova al centro della nostra galassia (Via Lattea).

4.4 Caratteristiche e Proprietà dei Buchi Neri

Sia prima che dopo il 1971, quando l'esistenza del primo buco nero è stata confermata positivamente, gli scienziati sono stati incuriositi da come si svolge la vita di un buco nero e cosa succede al suo interno. Naturalmente, poiché nessuna informazione, di qualsiasi tipo, può venir fuori da un buco nero, è molto difficile scoprire cosa succede al suo interno. Tuttavia, i fisici teorici, lavorando con le equazioni EFE, o modelli equivalenti, o semplicemente basandosi su considerazioni teoriche o logiche, sono giunti ad alcune conclusioni che sono enumerate qui di seguito.

1. All'interno di un buco nero tutte le leggi della fisica conosciute sono inapplicabili. Il tempo, addirittura, si ferma all'interno di un buco nero! Questa conclusione si basa principalmente su considerazioni matematiche, perché le equazioni o formule o altri tipi di modelli, utilizzati per investigare un buco nero, mostrano singolarità quando si supera il confine Event Horizon e si entra in un buco nero.
2. La temperatura all'interno di un buco nero è molto, molto bassa. Quanto bassa? Deve essere inferiore a quella dello spazio che circonda l'Event Horizon, che è solo 2,7 gradi K sopra lo zero assoluto. Questa è una conclusione logica e razionale basata sulle seguenti considerazioni: se la temperatura del buco nero fosse superiore a quella dello spazio che circonda l'Event Horizon, allora (secondo i principi della termodinamica) ci sarebbe un deflusso di calore (cioè, radiazioni verso l'esterno) proveniente dal buco nero. Questo, ovviamente, è impossibile perché nulla (nemmeno le radiazioni) può uscire dai buchi neri. Quindi, è ragionevole supporre che la temperatura all'interno dell'Event Horizon debba essere inferiore a 2,7 gradi K.
3. La temperatura di un buco nero, che è già molto, molto bassa, diminuisce ulteriormente all'aumentare della sua massa, cioè, più massiccio è un buco nero, più fredda è la sua temperatura. [vedi Nota 7]. Invitiamo il lettore a leggere la Nota 7 per vedere come Stephen Hawking è stato in grado di determinare che la temperatura di un buco nero deve essere superiore a zero gradi K. Infatti, usando i ben noti principi della termodinamica, Hawking fu persino in grado di calcolare, in modo abbastanza accurato, la temperatura all'interno di un buco nero.
4. Tutta la materia che componeva l'originale stella massiccia prima di morire e tutta l'altra materia successivamente assorbita [presumibilmente scomposta nelle sue componenti elementari] è compattata [schiacciata] con un'enorme densità.
5. Tutte le caratteristiche della materia originale (densità della materia, tipo di gas originale, massa, velocità di rotazione, ecc.) si sono perse. Ciò non dovrebbe sorprendere i nostri giovani lettori

perché, data l'enorme forza gravitazionale esistente all'interno di un buco nero, tutte le particelle inghiottite da un buco nero sono state frantumate nelle loro componenti elementari.

6. Nel 1963 Roy Kerr, lavorando su una soluzione dell'Equazione della Relatività Generale di Einstein, dimostrò che i buchi neri possono ruotare attorno a un asse di simmetria.
7. Poi nel 1967, Werner Israel (uno scienziato canadese che usava le stesse tecniche usate da Kerr), dimostrò che, qualunque sia la loro origine, i buchi neri hanno sempre la forma di una sfera perfetta, se non ruotano; oppure, una sfera che si gonfia intorno all'equatore, se ruotano attorno ad un asse di simmetria (proprio come la Terra) e la loro dimensione dipende solo dalla loro massa.
8. Più recentemente scienziati, come Hawking, Penrose e altri, hanno dimostrato che "**i buchi neri non sono, poi, così neri**", in quanto, una certa quantità di energia, sotto forma di onde gravitazionali e altri tipi di radiazioni, fuoriesce dai buchi neri. Questo, tuttavia, sarà un argomento per un altro saggio.

5.0 Note

Nota 1 Principio di Esclusione di Pauli

Il principio di esclusione di Pauli, formulato per la prima volta nel 1925 dal fisico austriaco Wolfgang Pauli, afferma che *non esistono due elettroni in un atomo che possono trovarsi contemporaneamente nello stesso stato o configurazione*. Il principio di esclusione è stato poi generalizzato per includere un'intera classe di particelle di cui l'elettrone è solo un membro. Quelle particelle che obbediscono al Principio di Esclusione di Pauli sono chiamate **fermioni** (elettroni, protoni, neutroni e tutte le particelle che hanno massa sono fermioni); quelle particelle che non obbediscono a questo Principio sono chiamate **bosoni**. Quando si ha a che fare con un sistema chiuso, come un atomo, gli elettroni sono distribuiti in modo tale che, in un dato stato, non ci può essere più di un solo elettrone. Similmente, in un sistema chiuso, come il nucleo di un atomo, protoni e neutroni sono distribuiti in modo tale che, in un dato stato, non può esserci più di un solo protone o un solo neutrone. In altre parole, ***non possono esserci due elettroni o due protoni o due neutroni nello stesso stato (posto) contemporaneamente***.

Le conseguenze di questo Principio sono sotto i nostri occhi nella vita quotidiana. Abbiamo già accennato al fatto che la materia di cui sono composti gli oggetti che ci circondano è, per la maggior parte, spazio vuoto (vedi Sezione 3.1). Per esempio, oltre il 99% della scrivania, alla quale sono seduto in questo momento, è fatta di spazio vuoto. Eppure, se cerco di infilare il mio dito indice nel tavolo della scrivania con forza, corro il rischio di rompermi il dito.

- **Se più del 99% del tavolo è spazio vuoto, che cosa impedisce al mio dito di penetrare il tavolo della scrivania?**

Risposta: il Principio di Esclusione di Pauli impedisce al mio dito di penetrare nel tavolo. In realtà, quando io sbatto con forza il dito della mia mano contro il tavolo della scrivania, gli elettroni presenti negli atomi del mio dito si scontrano con gli elettroni presenti nella materia di cui è costituita la scrivania. Questi ultimi non sono per niente disposti a cedere il loro posto agli elettroni del mio dito e, pertanto, si oppongono (con forza, se necessario; ed è per questo che io sento dolore). Un altro modo di esprimere lo stesso concetto è il seguente: tutti i posti disponibili per gli elettroni nel legno (la materia di cui è costituita la mia scrivania) sono occupati dagli elettroni degli atomi che formano il legno. Quando io cerco di introdurre gli elettroni del mio dito nello stesso posto, gli elettroni del legno si oppongono e fanno da scudo, quasi volessero dire: "Spiacente, tutti i posti sono occupati; andate via!". Questa è l'essenza del Principio di Esclusione di Pauli.

Nella Sezione 3.1 del saggio, alla domanda di Sophia se si può forzare gli elettroni del legno a cedere il passo, abbiamo risposto che ciò è possibile, ma non sulla nostra Terra. Per costringere gli elettroni di un oggetto a cedere il passo, e far posto agli elettroni invasori, occorre esercitare su di essi una forza molto, molto, molto potente, quale potrebbe essere la forza di gravità esercitata nelle immediate vicinanze di una stella, grande come il nostro Sole, che sta per morire.

In conclusione, usando una terminologia da uomo di strada, possiamo dire che l'atomo di qualsiasi elemento ha due scudi per difendersi dalla possibile invasione di altri elementi:

1. **Il primo scudo.** Il primo scudo è formato dagli elettroni che orbitano intorno ai nuclei degli atomi. Questi formano un guscio sferico intorno a ciascun nucleo ed è questo guscio che funziona da scudo e impedisce agli elettroni di altri elementi di penetrare all'interno dell'atomo. Per abbattere questo scudo (e quindi penetrare nello spazio vuoto) gli invasori dovrebbero esercitare una forza **superiore** alla forza di gravità esercitata da una stella avente massa una volta e mezzo del nostro Sole, se tutta la sua massa fosse concentrata in una sfera avente il diametro della nostra Terra (questo, in effetti, è il risultato dei calcoli effettuati da Chandrasekhar e da Landau). In altre parole, stiamo dicendo che, quando una stella con massa uguale a una volta e mezzo la massa del nostro Sole sta per morire, la forza di gravità esercitata dalla massa comprime gli atomi della materia e li costringe a rimpicciolirsi finché i raggi di questi atomi non diventano molto meno della centesima parte delle loro dimensioni ordinarie. Oltre questo limite la forza di gravità non può andare. Lo scudo formato dagli elettroni, sotto questa forza tremenda, si rimpicciolisce, ma ancora non si è rotto e, pertanto, nessuno degli elettroni invadenti riesce a penetrare negli spazi vuoti all'interno dei vari atomi che costituiscono la materia. In altre parole, le forze di resistenza dovute al Principio di Esclusione, a questo punto, contro-bilanciano esattamente la forza di gravità. Il risultato finale è che la stella, che prima del collasso aveva un raggio di 700-800 mila Km, ora ha un raggio di 6-7 mila Km (cioè, 120-130 volte più piccolo, presso a poco simile alle dimensioni della Terra). Questa stella, stabilizzata, rimpicciolita e non più in grado di brillare, è quella che gli astronomi chiamano **Nana Bianca**.

Vediamo ora cosa succede **se la massa della stella morente è superiore a una volta e mezzo la massa del nostro Sole**. In questo caso, lo scudo formato dagli elettroni che ruotano intorno al nucleo degli atomi, non è in grado di reggere alla forza di gravità della stella morente e si sfascia (si sgretola). Il risultato è che gli elettroni invasori penetrano nello spazio vuoto e si avviano verso i nuclei che sono al centro di ogni atomo. Indovina un po' cosa succede a questo punto? Nei nuclei di ogni atomo sono annidati neutroni e protoni. Questi ultimi (cioè, i protoni), essendo dotati di una carica elettrica positiva, si accoppiano con gli elettroni invasori e si trasformano in neutroni. Il risultato finale è che la materia originale, i cui nuclei erano originalmente formati da neutroni e protoni, ora si è trasformata in una sostanza i cui nuclei contengono (quasi) esclusivamente neutroni. Tutto questo mentre la forza di gravità della stella (che nel frattempo continua a rimpicciolirsi) comprime sempre più fortemente i nuclei contenuti nella stella.

2. **Il secondo scudo.** È a questo punto che entra in azione il secondo scudo. Vediamo cosa succede quando la massa della stella che sta collassando è uguale al doppio della massa del nostro Sole. Abbiamo affermato in precedenza che non solo gli elettroni, ma tutte le particelle che fanno parte della famiglia dei fermioni obbediscono al Principio di Esclusione e tra queste ci sono anche i neutroni. Così come gli elettroni nel caso del primo scudo, questi neutroni non gradiscono che altri neutroni occupino il loro posto e anch'essi creano uno scudo (il secondo scudo) che cerca di difendere il loro spazio. Abbiamo anche affermato che, mentre la stella si rimpicciolisce, il suo raggio decresce mentre la forza di gravità alla sua superficie aumenta. In queste condizioni i nuclei degli atomi (che a questo punto contengono quasi esclusivamente neutroni) si rimpiccioliscono anch'essi finché i loro raggi non diventano meno della millesima parte delle loro dimensioni

ordinarie. Oltre questo limite la forza di gravità non può andare. Lo scudo formato dai neutroni, sotto questa forza tremenda, si rimpicciolisce, ma ancora non si è rotto e, pertanto, più neutroni vanno a occupare lo spazio che, in condizioni normali, era occupato da un solo neutrone. In sostanza, in uno spazio che prima conteneva un solo neutrone, ora troviamo parecchi neutroni che oppongono resistenza alla forza di gravità che continua a comprimere. Il risultato finale è che la stella, che prima del collasso aveva un raggio di quasi un milione di Km, ora ha un raggio di 15-20 Km (cioè, circa 50mila volte più piccolo). Questa stella, stabilizzata, molto rimpicciolita e non più in grado di brillare, è quella che gli astronomi chiamano **Stella di Neutroni**.

3. **Collasso totale e creazione del Buco Nero.** Nelle due sottosezioni precedenti abbiamo visto come le forze create dal Principio di Esclusione di Pauli riescono a contenere il collasso totale di una stella morente. Nel primo caso, lo scudo creato dagli elettroni, per effetto del Principio di Esclusione, riesce a fermare il collasso totale della stella e a stabilizzarla trasformandola in una Nana Bianca, ma solo se la massa iniziale della stella è inferiore a una volta e mezzo la massa del nostro Sole. Nel secondo caso, lo scudo creato dai neutroni, per effetto del Principio di Esclusione, riesce a fermare il collasso totale della stella e a stabilizzarla trasformandola in una Stella di Neutroni, ma solo se la massa iniziale della stella è compresa tra una volta e mezzo e due volte la massa del nostro Sole. Ci resta ancora un ultimo caso da esaminare e cioè:

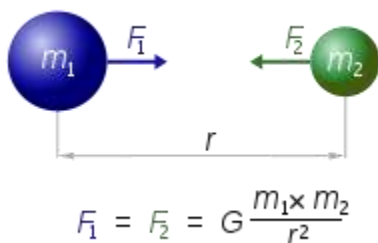
➤ **Che cosa succede se la massa iniziale della stella morente è superiore a due volte la massa del nostro Sole?**

Nel caso di una stella con massa superiore a due volte quella del nostro Sole, la forza di gravità, esercitata alla sua superficie man mano che la stella collassa, è talmente forte che niente in natura può fermare il suo collasso totale e la stella continua a rimpicciolirsi, mentre la forza di gravità continua ad aumentare, fino al punto che la sua presa riesce a fermare perfino la fuoriuscita dei raggi di luce. Il risultato finale è che la stella si trasforma in quello che gli astronomi chiamano un **Buco Nero**.

Finiamo questa Nota 1 facendo notare che i calcoli effettuati da Chandrasekhar, Landau e Schwarzschild sono suffragati dalla scoperta delle Nane Bianche, Stelle di Neutroni e Buchi Neri osservate e/o fotografati dai telescopi di vari osservatori astronomici.

Nota 2 Legge di Gravità di Newton

L'equazione che esprime la Legge di Newton della Gravitazione Universale è:



Source: OpenStax

Dove:

- $F = F_1 = F_2$ è la forza tra le masse;
- G è la costante gravitazionale;
- m_1 è la prima massa;
- m_2 è la seconda massa;
- r è la distanza tra i centri delle due masse.

Nota 3 Newton e l'Incidente della Mela

L'incidente della mela Lo stesso Newton raccontava spesso di essere stato ispirato a formulare la sua Teoria della Gravitazione Universale osservando la caduta di una mela da un albero. Fonti anonime, peraltro apocrife, invece, dicono che la mela ha colpito la testa di Newton mentre stava riposando sotto un albero di mele e questo lo ha portato a indagare su cosa abbia causato la caduta della mela, il che, a sua volta, ha portato alla formulazione della **Teoria e Legge di Gravitazione Universale**.

Nota 4 Definizione di Spazio e Tempo (Space-Time)

Newton riteneva che Spazio e Tempo fossero due entità indipendenti l'una dall'altra. Riteneva, altresì, che queste due entità esistessero indipendentemente dalla materia e/o energia presente nell'Universo. In altre parole, Newton riteneva che queste due entità sarebbero esistite, anche se l'Universo fosse vuoto (cioè, non contenesse materia e/o energia). L'implicazione di quest'affermazione era che la materia (ad es., stelle, galassie) e/o l'energia (ad es., radiazioni) contenute nello Spazio non avessero alcun effetto sullo Spazio stesso o sul Tempo.

Tutto questo, però, era in conflitto con il Secondo Principio della Relatività Speciale di Einstein (cioè, il Principio della costanza della velocità della luce). Infatti, nel saggio intitolato "Teoria della Relatività", abbiamo visto che Spazio e Tempo sono interdipendenti ed entrambi dipendono dalla velocità dell'osservatore. Inoltre, nella sua Teoria della Relatività Generale, Einstein ha dimostrato che la materia contenuta nell'Universo deforma e modella sia lo Spazio, sia il Tempo.

Nel 1908, il matematico tedesco Hermann Minkowski suggerì ad Einstein che, per effettuare i calcoli nella Fisica Relativistica, sarebbe stato preferibile usare la geometria di Riemann al posto della geometria euclidea [vedi Nota 9]. Nella geometria di Riemann Spazio e Tempo non sono considerate entità separate e indipendenti. Invece, viene introdotta l'entità **Spazio-Tempo** che è considerata come un unico tessuto. In effetti, quello che Minkowski ha proposto è un sistema di riferimento a quattro dimensioni composto dalle tre coordinate spaziali (x , y , z) che abbiamo sempre usato, più una coordinata temporale chiamata t . Anche se non c'è nulla di insolito nelle prime tre coordinate, poiché abbiamo sempre saputo che nello spazio possiamo muoverci a sinistra e a destra (asse x), avanti e indietro (asse y) e su e giù (asse z) (questo è ciò che a scuola chiamiamo coordinate cartesiane), la quarta dimensione, t , associata a x , y , z , è un po' insolita perché abbiamo sempre pensato al tempo, t , come qualcosa di totalmente indipendente dallo spazio, come avevamo appreso dalla Fisica Newtoniana. D'altra parte, ricordiamo anche che, nel nostro linguaggio comune, noi facciamo spesso uso di coordinate spazio-temporali. Ad esempio, quando dico a un amico "Ci vediamo all'angolo sud-ovest di Park Ave e 47 Street a Manhattan alle 15:00 del 10 agosto 2017", in effetti, ho dato al mio amico le coordinate spaziali (angolo SW di Park Ave e 47 Street a Manhattan) e la coordinata temporale (15:00 del 10 agosto 2017). Il problema è che, nella Fisica Relativistica, Einstein ha dimostrato che Spazio e Tempo non sono indipendenti l'uno dall'altro, invece sono interdipendenti, quindi, ragionava Minkowski, un quadro di riferimento quadridimensionale servirà meglio come sfondo per i calcoli relativistici. Ciò significava anche che la Geometria Euclidea, che abbiamo sempre usato per descrivere lo spazio e per tracciare il movimento degli oggetti nello spazio nella Fisica Newtoniana, doveva essere abbandonata. A pensarci bene, la stessa Geometria Euclidea si basa sulla premessa che Spazio e Tempo sono indipendenti l'uno dall'altro, quindi, dopo attente considerazioni, non potrebbe essere la cornice migliore per effettuare calcoli in Relatività Speciale. Per questi ed altri motivi Minkowski concluse che la Geometria Euclidea, basata sui cinque famosi postulati (es: le rette parallele non si intersecano mai; la somma degli angoli in un triangolo si somma sempre a 180° , ecc.) enunciata da Euclide circa 2.300 anni prima, doveva essere abbandonata.

Il caso volle che, in modo del tutto autonomo e puramente teorico, il matematico Bernhard Riemann avesse già approfondito i dettagli di questo quadro di riferimento quadridimensionale in quella che allora fu chiamata Geometria Riemanniana. **Visivamente lo Spazio-Tempo, nella Geometria Riemanniana, può essere concepito come una griglia o ragnatela** [vedi Nota 9]. Non a caso, in questo saggio usiamo occasionalmente la parola 'ragnatela' per indicare il tessuto Spazio-Tempo, come mostrato nella Figura 6. Nell'Universo idealistico della Relatività Speciale (cioè, un Universo senza galassie, senza stelle e senza oggetti vari e, quindi, senza Gravità) la ragnatela che rappresenta lo Spazio-Tempo è piatta (vedi Figura 6).

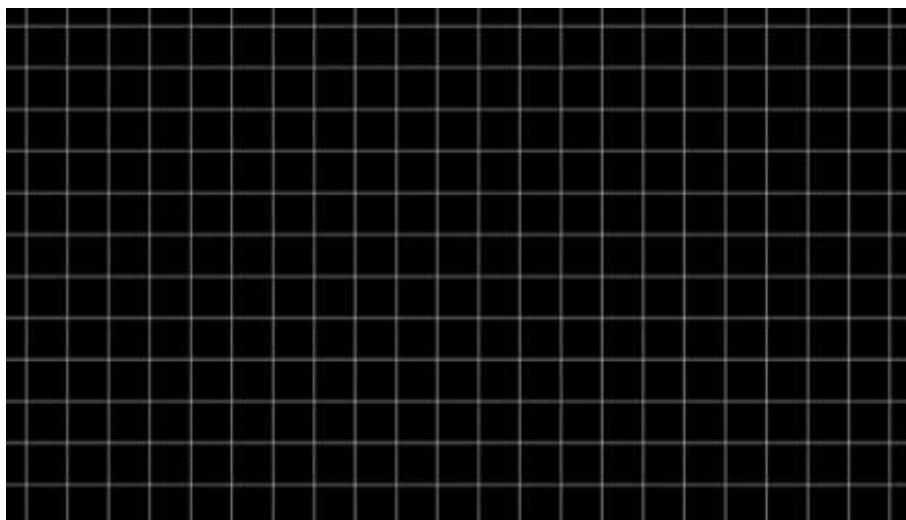


Figura 6: Visualizzazione dello Spazio-Tempo in Relatività Speciale (cioè, un Universo senza gravità) - Ragnatela

Einstein, che secondo alcuni non era molto versato in matematica, inizialmente era riluttante ad abbandonare la geometria euclidea a favore della geometria riemanniana. Quando, però, nel 1906-1907, iniziò ad affrontare le questioni relative alla gravità e agli effetti che la gravità aveva sullo Spazio-Tempo (vedi Figura 7), abbracciò il concetto di **Spazio-Tempo** proposto da Minkowski e sia la sua Relatività Speciale sia la Relatività Generale usano la geometria riemanniana per effettuare i calcoli.

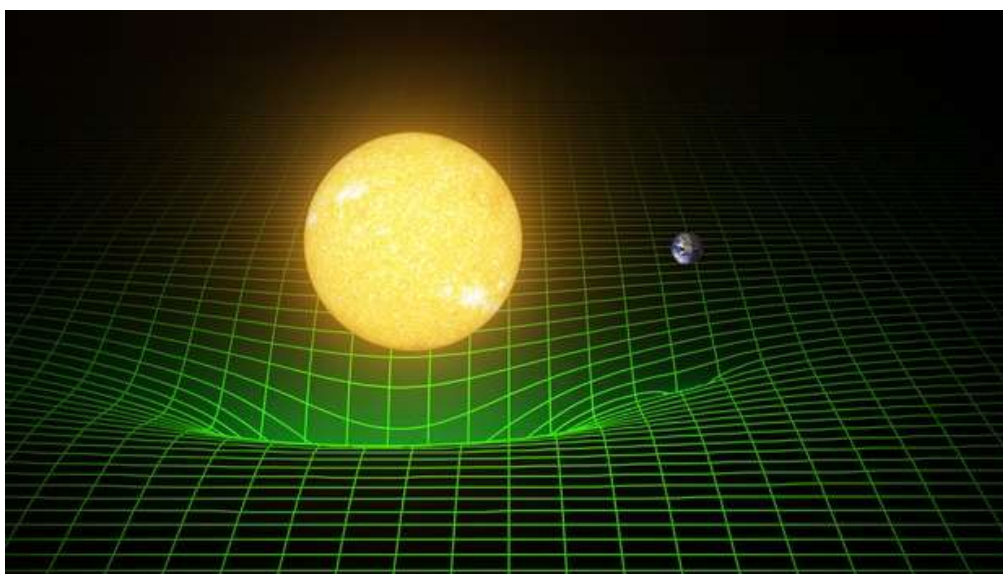


Figura 7: Spazio-Tempo deformato dalla presenza di corpi celesti come il nostro Sole (e la piccolissima Terra)
(Source: T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab)

Come si può vedere dalla Figura 7, un oggetto celeste, come il Sole, deforma profondamente la forma dello Spazio-Tempo. Infatti, più grande è l'oggetto celeste, maggiore è la deformazione del tessuto Spazio-Tempo (ragnatela). Nel contesto della geometria Riemanniana, è la materia/energia che dice allo spazio-tempo come e quanto curvarsi ed è lo spazio-tempo che dice alla materia/energia come muoversi. Lo spazio-tempo curvo crea i percorsi geodetici lungo i quali, in assenza di altre forze, gli oggetti si

muoveranno (questo è un concetto molto lontano dalla convinzione newtoniana che lo Spazio non sia influenzato dalla materia/energia che contiene!) e la Geometria di Riemann sembra perfettamente adatta come sfondo per effettuare calcoli sia in Relatività Speciale che Generale. Inoltre, qualsiasi oggetto che si muova nello spazio-tempo deve seguire le "geodetiche" dello spazio-tempo. Ciò significa che la traiettoria di un oggetto in movimento deve seguire le linee della ragnatela. Nella figura 7 sopra vediamo l'immagine del pianeta Terra, che ruota intorno al Sole, e lo fa seguendo le linee della ragnatela (mentre essa stessa provoca una piccola deformazione della ragnatela). Detto diversamente, nella Relatività Generale è la forma dello Spazio-Tempo che determina il percorso degli oggetti in movimento ed è per questo che la geometria riemanniana è più adatta per effettuare calcoli. Ciò che abbiamo affermato in questa Nota è l'essenza della Relatività Generale [vedi saggio sulla Teoria della Relatività per una discussione più approfondita sull'argomento].

C'è un ultimo punto che desideriamo portare all'attenzione dei nostri giovani lettori. Occasionalmente in questo documento usiamo la parola "evento" per significare qualcosa di diverso dal significato solitamente attribuito a questa parola nel linguaggio comune. Nel linguaggio comune, "evento" è qualcosa di interessante che accade in un dato luogo ad un dato momento. In gergo spazio-temporale, "evento" è un punto della superficie spazio-temporale, cioè un punto definito nello spazio (identificato dalle tre coordinate spaziali x, y, z) in un dato momento (identificato dalla coordinata temporale t). Un punto **A** dello spazio-tempo, identificato in modo univoco dalle sue coordinate, cioè **A** (x, y, z, t), è chiamato evento, anche se lì non sta accadendo nulla di interessante.

Per concludere possiamo dire che **Spazio-Tempo** è un modello matematico che combina le tre dimensioni dello spazio e l'unica dimensione del tempo in un unico quadro di riferimento a quattro dimensioni. Poiché né lo Spazio né il Tempo sono indipendenti dalla gravità, in presenza di oggetti massicci che esercitano gravità, il tessuto dello **Spazio-Tempo** si deforma e i diagrammi spazio-temporali sono utili per vedere gli effetti di questa deformazione. Le figure 8 e 9 sottostanti sono esempi di diagrammi dello Spazio-Tempo, deformato dalla presenza di un grande corpo celeste. Lo spazio-tempo è rappresentato da una griglia, che sembra una ragnatela. Se lo spazio-tempo è vuoto (cioè, non ci sono oggetti aventi massa), la ragnatela è piatta. Se ci sono corpi celesti massicci (come una stella o un pianeta o anche un corpo come la luna), la ragnatela (Spazio-Tempo) viene deformata come mostrato nelle immagini sottostanti.

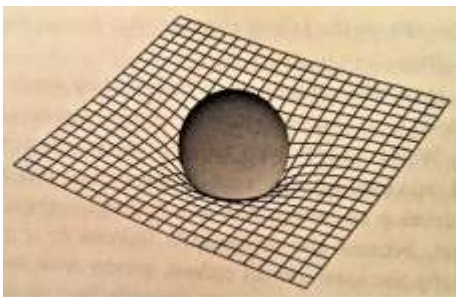


Figura 8 Source: Shutterstock,

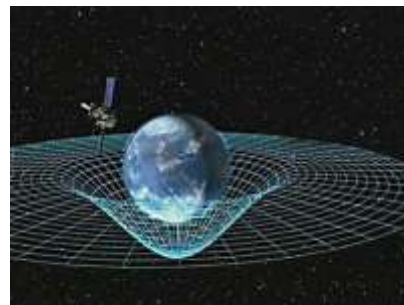


Figura 9 Source: Shutterstock,

Le Figure 8 e 9 mostrano che l'entità della deformazione dello spazio-tempo è proporzionale alla massa del corpo che causa la deformazione. L'immagine 8 mostra la ragnatela spazio-temporale con poca deformazione, perché l'oggetto che causa la deformazione non è molto massiccio. L'immagine 9 mostra la ragnatela spazio-temporale con una deformazione molto più accentuata, perché l'oggetto che causa la deformazione è molto più massiccio. In altre parole, oggetti con massa maggiore causano una deformazione maggiore nel tessuto spazio-temporale.

Nota 5 Definizione di Binary Star

Binary Star Stella binaria è un sistema stellare costituito da due stelle che orbitano l'una intorno all'altra. A volte una stella binaria è composta di una stella normale (che è visibile) e una nana bianca o una stella di neutroni (che non sono visibili o sono poco visibili). Quando ciò accade e guardiamo in alto nel cielo, vediamo solo la stella visibile in orbita, ma non la sua compagna. A volte una delle due stelle binarie (di solito la più piccola) viene risucchiata nella sua compagna, creando così una supernova o un buco nero.

Nota 6 Domande di Sophia Vona

Nel saggio abbiamo visto che Karl Schwarzschild, dopo aver trovato una soluzione all'equazione EFE, si è accorto che, man mano che la stella che stava collassando si rimpiccioliva e il suo raggio diminuiva, a un certo punto, la sua soluzione degenerava in una **singolarità matematica**. In altre parole, quando il raggio della stella massiccia in fase di collasso scendeva al livello di $R_s = 2GM/c^2$ il denominatore della sua soluzione era uguale a zero. Ciò significava che l'intera massa della stella in fase di collasso era concentrata in un unico punto e, in quel punto, la densità della materia diventava infinita (in formula, $\rho = \infty$). Ciò ha portato Sophia Vona a porre la seguente domanda:

- **Può la materia contenuta in una stella massiccia rimpicciolirsi a tal punto da essere concentrata in un unico punto al centro della stella?**

La risposta a questa domanda è: **No**. L'idea che tutta la materia di una stella massiccia possa essere concentrata in un unico punto è venuta anche a Schwarzschild, Chandrasekhar, Landau ed Eddington, quando si sono imbattuti in una singolarità. Un esempio di singolarità in matematica è quando si prova a dividere un numero per zero, ad es.: $5/0 = \infty$. La singolarità matematica nella quale Schwarzschild, Chandrasekhar, Landau ed Eddington si erano imbattuti stava dicendo loro che tutta la massa della stella massiccia doveva essere concentrata in un unico punto con densità infinita. Mentre in matematica questa interpretazione della singolarità è perfettamente legittima, in fisica, però, questa interpretazione è assurda e priva di senso. [Anche Einstein, all'epoca, scrisse un articolo affermando che questa idea non era plausibile]. Pensandoci su: come può tutta la massa di una stella massiccia collassata in un buco nero essere contenuta in un contenitore come un punto? **Un punto**, per definizione, non ha dimensioni (cioè,

non ha altezza, non ha lunghezza e non ha larghezza) e, quindi, non può essere un contenitore e, quindi, non può contenere nulla. Conclusione: tutta la massa della stella massiccia è collassata in un buco nero, ma è ancora lì, cioè, all'interno dell'Event Horizon, (e non è concentrata in un unico punto!), ma non sappiamo esattamente com'è distribuita o come appare. [Sophia, se non ci credi e provi a mettere piede sull'Event Horizon, la forza gravitazionale esercitata da quella materia (che è ancora dentro il buco nero) ti trasformerà in uno spaghetti e ti risucchierà proprio dentro il buco nero!!!]

Sophia ha poi posto una seconda domanda:

- **Se all'interno di un buco nero il tempo si ferma, allora la gente non dovrebbe più invecchiare. Vero, Nonno?**

Poi ha aggiunto: "Se così fosse, mi piacerebbe emigrare e vivere in un buco nero dove potrò vivere eternamente e senza invecchiare". Al che il nonno ha reagito con il seguente ammonimento: Sophia bada a quello che dici! La vita in un buco nero non sarà per niente piacevole se la temperatura si mantiene costantemente vicinissima allo zero assoluto (0 K). E non dimenticare che nell'entrare in un buco nero, il tuo corpo sarà "spaghetizzato" e sbriciolato in particelle elementari costituenti (tipo quarks, etc.).

Nota 7 Temperatura all'Interno di un Buco Nero

Sulla base di quanto abbiamo appreso finora, ci si sarebbe aspettato che la forza gravitazionale all'interno di un buco nero sia così forte che nulla dovrebbe muoversi [cioè, le particelle di materia all'interno di un buco nero dovrebbero avere zero energia cinetica]. E se non ci fosse energia cinetica, allora non dovrebbe esserci temperatura (cioè, la temperatura dovrebbe essere uguale a zero gradi K). Stephen Hawking, tuttavia, ha osservato che, se all'interno di un buco nero nulla si muovesse, allora quando il buco nero divora un corpo celeste, l'Entropia del corpo celeste assorbito [grado di caos delle particelle che lo compongono] dovrebbe diminuire. Ma se così fosse, il Secondo Principio della Termodinamica sarebbe violato. Da queste considerazioni Hawking sviluppò una formula per misurare l'Entropia e da lì derivò una formula per misurare la Temperatura all'interno di un buco nero. Le sue conclusioni furono che un buco nero con una massa paragonabile al nostro Sole avrà una temperatura di soli 60 nano Kelvin (60 milionesimi di 1 grado K). Poiché la temperatura all'esterno dell'Event Horizon è più alta [e cioè, 2,7 gradi K], questo spiega perché il buco nero non emette alcuna radiazione termica.

Nota 8 Eventi che Portarono alla Scoperta dei Buchi Neri

Molto prima dell'avvento di Albert Einstein e della sua Teoria della Relatività Generale, alcuni scienziati, tra cui John Michel e il marchese Pierre Simon de Laplace, avevano considerato la possibile esistenza di oggetti celesti super-massicci in grado di esercitare un'enorme forza gravitazionale sugli oggetti vicini. Tuttavia, le basi teoriche per indagare, e poi scoprire, i buchi neri, furono poste in atto solo nel 1915 con la pubblicazione della Relatività Generale di Albert Einstein. Nonostante ciò, ci vollero altri 56 anni prima che il primo buco nero fosse identificato e verificato in modo definitivo (nel 1971). Per il lettore curioso riportiamo qui di seguito la sequenza degli eventi iniziata nel 1915.

1915 Pubblicazione della Relatività Generale. In questa pubblicazione, sfidando le opinioni della maggior parte degli scienziati della Fisica Classica, compreso Newton, Einstein ha sostanzialmente

affermato che Spazio, Tempo e Gravità sono tre entità non indipendenti l'una dall'altra. Al contrario (!), queste tre entità sono dipendenti l'una dall'altra e la formula (in realtà l'equazione) che regola le loro interazioni è l'equazione conosciuta come Einstein Field Equation (EFE):

$$[EFE] \quad R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

[dove $R_{\mu\nu}$ è il tensore di curvatura di Ricci, R è la curvatura scalare, $g_{\mu\nu}$ è il tensore metrico, G è la costante gravitazionale di Newton, c è la velocità della luce nel vuoto e $T_{\mu\nu}$ è il tensore dell'energia di stress]. Il lato destro dell'equazione ($\rho = 8\pi G T_{\mu\nu}/c^4$) rappresenta la densità di materia/energia nella regione dell'Universo che si vuole studiare. Il lato sinistro dell'equazione rappresenta la curvatura della ragnatela, che Einstein chiamò **spazio-tempo**. In realtà questa ragnatela rappresenta la distribuzione del campo gravitazionale causato dalla materia/energia rappresentata nel lato destro dell'equazione.

1916 Karl Schwarzschild fu il primo scienziato a trovare una soluzione all'equazione EFE.

Il problema che Schwarzschild si proponeva di risolvere era quello di studiare le fasi finali di una stella massiccia mentre sta collassando. Il suo ragionamento era, presso a poco, il seguente: se l'equazione EFE è valida, allora la sua soluzione dovrebbe consentirgli di calcolare, istante per istante, l'evoluzione del campo gravitazionale generato dalla stella morente e, possibilmente, anche la disposizione finale della stella alla fine della sua vita. Desideriamo informare il lettore che Karl Schwarzschild prestava servizio militare nell'esercito tedesco e combatteva in trincea sul fronte russo, durante la Prima guerra mondiale, mentre cercava di trovare una soluzione alla suddetta EFE.

Per raggiungere il suo obiettivo, Schwarzschild ha fatto una serie di assunzioni e semplificazioni che, per semplicità, non enumereremo in questa Nota. Con questi presupposti e semplificazioni, Schwarzschild è andato avanti e ha calcolato la superficie, S , e il volume, V , della stella (assumendo che la forma della stella fosse sferica), usando le formule della Geometria Euclidea (che i bambini imparano al quarto o quinto anno della scuola elementare), ovvero:

$$S = 4\pi R^2 \quad V = 4/3\pi R^3$$

Dove S è l'area della superficie della sfera, V è il suo volume e R il raggio della sfera.

Per concludere, Schwarzschild è stato il primo scienziato che ha trovato una soluzione dell'equazione EFE, che gli ha permesso di definire il campo gravitazionale (cioè, la curvatura dello spazio-tempo), ad ogni istante, mentre la stella stava collassando e il suo raggio stava diventando sempre più piccolo.

Analizzando più da vicino la soluzione all'EFE che aveva appena trovato, Schwarzschild notò anche che, quando il raggio della stella R_s (che andava progressivamente diminuendo) scendeva al valore:

$$R_s = 2GM/c^2$$

(dove G è la costante gravitazionale, M è la massa della stella che collassa e c è la velocità della luce), accade qualcosa di strano: cioè, la soluzione, appena trovata, degenera in una singolarità [vedi Nota sulla definizione di singolarità nel saggio **Il Corpo Umano – Parte II**]. Singolarità, in questo contesto, significava

che la densità di materia/energia tendeva all'infinito ($\rho \rightarrow \infty$) e, di conseguenza, la forza gravitazionale era diventata così forte che anche un raggio di luce, dall'interno della stella morente diretto all'esterno, non poteva sfuggire. In sostanza, la matematica creata da Schwarzschild, con le sue semplificazioni, gli dicevano che la stella morente sarebbe diventata un buco nero! Detto diversamente, una stella massiccia morente durante il processo di collasso, nelle condizioni semplificate imposte da Schwarzschild, a un certo punto, sarebbe diventata un buco nero. Quello che stava succedendo era che il campo gravitazionale, a un certo punto, era diventato molto, molto forte, di conseguenza l'effetto lente [vedi saggio sulla Relatività] era così potente che il percorso di un raggio di luce emanante dalla stella morente era piegato a tal punto da fare un'inversione a U e tornare al luogo di provenienza! Il raggio della sfera, R_s , nel punto in cui tutto questo stava accadendo è ora chiamato **raggio di Schwarzschild** e la superficie della sfera avente raggio uguale a R_s è chiamata **Event Horizon**.

1958 Interpretazione della Soluzione di Schwarzschild da parte di Finkelstein.

Per quasi mezzo secolo le equazioni EFE di Einstein sono state viste quasi come una curiosità matematica e, a parte le considerazioni matematiche di Schwarzschild, non sono state trovate altre prove oggettive dell'esistenza di buchi neri. Fu solo nel 1958 che il fisico David Finkelstein fornì un'interpretazione completa della soluzione alla EFE trovata da Schwarzschild, definendola come una regione dello spazio da cui nulla può sfuggire.

1971 Scoperta del primo Buco Nero.

Finalmente nel 1971 fu identificato positivamente il primo buco nero nella costellazione del Cigno e, successivamente, verificato in modo definitivo da altri scienziati.

Quanto affermato, in poche parole, è la storia degli eventi che hanno portato, per la prima volta, alla scoperta dei buchi neri. Al giorno d'oggi, abbiamo ampie prove e anche immagini fotografiche dell'esistenza dei buchi neri. L'immagine mostrata nella Figura 3 di questo saggio è solo una delle tante fotografie di buchi neri prese dal telescopio spaziale Hubble e altri telescopi satellitari.

Nota 9 La Geometria di Riemann e la Geometria di Euclide

Una descrizione completa della geometria Riemanniana va ben oltre lo scopo di questo saggio. Usando una terminologia semplice, ci limitiamo a evidenziare solo alcune caratteristiche fondamentali della geometria di Riemann e differenze significative tra essa e la geometria euclidea.

La geometria euclidea, in termini semplici e accessibili, è lo studio dello spazio piatto; essa si basa su 5 postulati fondamentali formulati da Euclide, oltre 2000 anni fa:

1. Dati due punti, A e B, su un piano piatto, c'è una e una sola retta che passa per entrambi i punti.
2. Dati due punti, A e B, su un piano piatto, c'è una e una sola linea dritta, chiamata **segmento**, che unisce i punti A e B.
3. Un cerchio può essere descritto con un punto chiamato centro e un segmento chiamato raggio.
4. La somma dei tre angoli all'interno di un triangolo deve sempre essere uguale a 180° .

5. Data una linea retta e un punto al di fuori della linea retta, esiste una e una sola linea parallela alla linea retta che passa per quel punto. [o anche: le linee parallele non si intersecano mai]. [Vedi Figura 10].

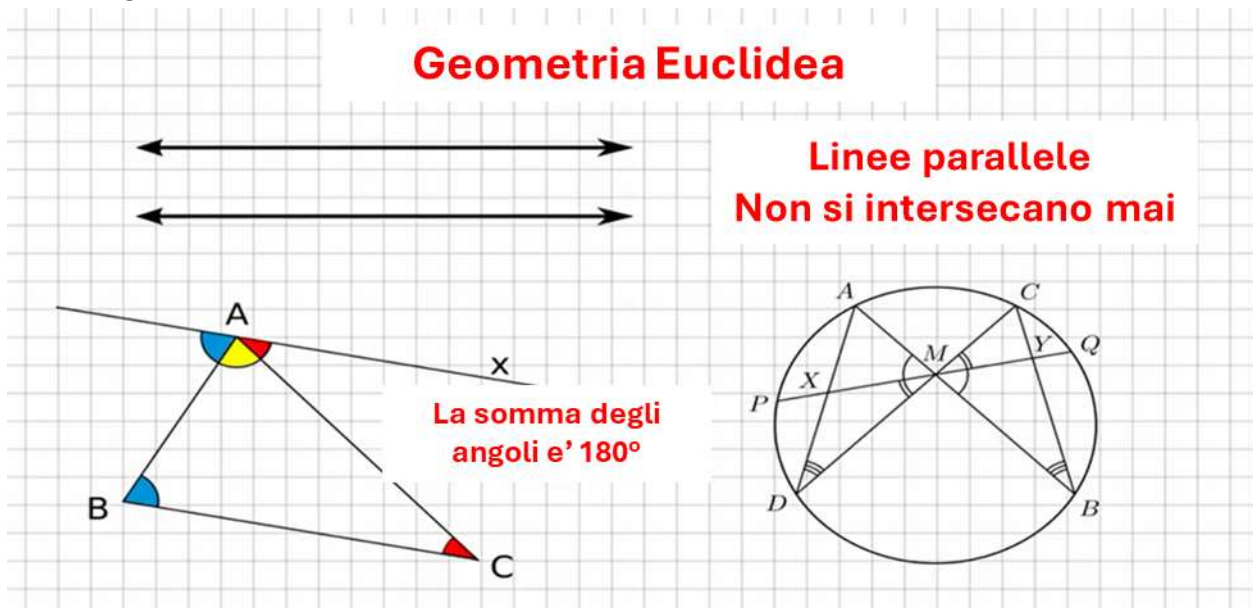
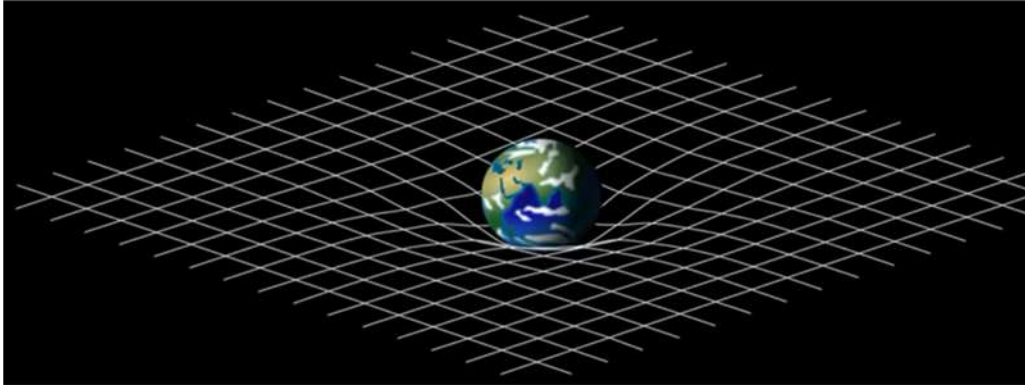


Figura 10: Postulati della geometria euclidea
(Source: Wikipedia)

La geometria Riemanniana, chiamata anche geometria ellittica, si occupa dello studio delle superfici curve. Fondamentalmente, la geometria riemanniana non accetta il quinto postulato euclideo e ne modifica il secondo postulato per affermare che un segmento può essere esteso senza limiti (cioè, trasformato in una linea aperta, in sostanza quasi come la retta euclidea), e possono esserci più segmenti che uniscono i punti A e B. Nella geometria Riemanniana il concetto di geodetica è molto importante: la **geodetica** è il percorso più breve (una curva) tra qualsiasi coppia di punti su una superficie curva [l'equivalente di "geodetica" nella geometria euclidea è il "segmento"]. A differenza della geometria euclidea, la prima cosa che il lettore noterà è che a volte c'è più di una geodetica minima tra due punti. Inoltre, a differenza della geometria euclidea, la geometria riemanniana può essere multidimensionale (il che significa che la geometria riemanniana può essere quadridimensionale, o a 5 dimensioni, o a 6 dimensioni, etc.). [Vedi Figure 11 e 12].

L'Universo e' non Euclideo



Lo Spazio-tempo e' deformato intorno ad oggetti massicci

Figura 11: La ragnatela curvata dalla presenza di un oggetto pesante (come la Terra)
Source: Wikipedia

L'Universo e' non Euclideo

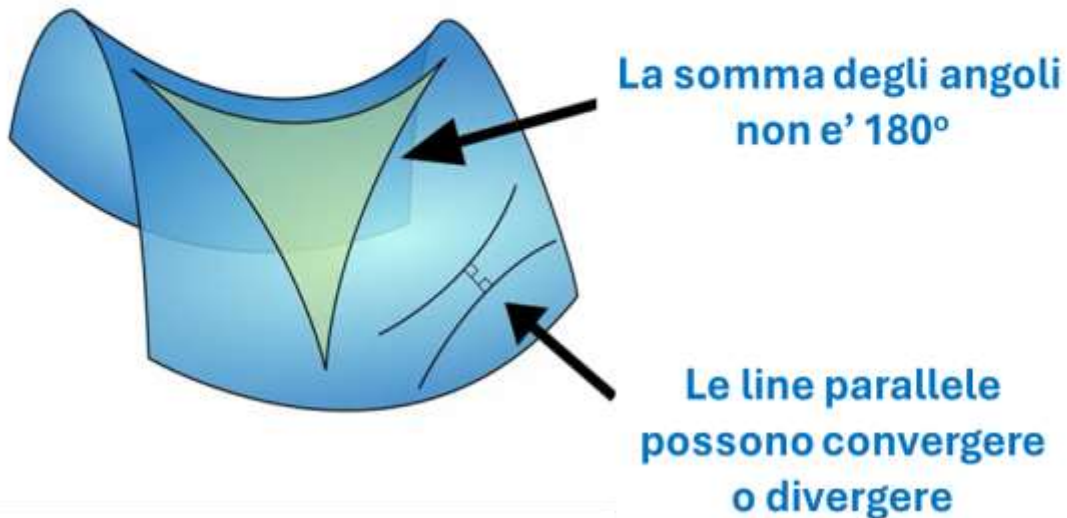


Figura 12: I principi della geometria euclidea non sono applicabili alla relatività speciale
(Source : <https://www.pngegg.com/en/png-brxac>)

La Figura 12 illustra alcune delle maggiori differenze tra la geometria Euclidea e quella Riemanniana. Per esempio, i lati di un triangolo nella geometria Riemanniana sono tre geodetiche (cioè, tre linee curve), mentre nella geometria Euclidea i lati di un triangolo sono tre segmenti (cioè, linee dritte). Un altro

esempio è il fatto che la somma degli angoli in un triangolo della geometria Riemanniana è inferiore a 180° , mentre nella geometria Euclidea la somma degli angoli di un triangolo è sempre uguale a 180° . Un terzo esempio è dato dal fatto che, a differenza della geometria Euclidea, nella geometria Riemanniana due linee parallele possono divergere o convergere.

Sulla base delle suddette caratteristiche e differenze tra le due geometrie, intuitivamente, si può capire perché la geometria Riemanniana sia più adatta per effettuare calcoli relativistici. In primo luogo, poiché la Relatività esclude la possibilità che spazio e tempo siano indipendenti l'uno dall'altro, una geometria quadridimensionale deve essere preferibile a una geometria spaziale tridimensionale, che quindi considera la quarta entità (tempo) come una variabile indipendente, da qui il concetto di spazio-tempo come superficie quadridimensionale. Inoltre, se accettiamo il postulato che la densità materia/energia nell'Universo determina la curvatura dello spazio-tempo, allora una geometria che si occupa di superfici curve deve essere preferibile a una geometria che si occupa solo di superfici piane.

Sulla base di queste premesse, Riemann ha sviluppato parecchi teoremi, proprio come i teoremi che costituiscono la geometria euclidea (ad esempio, il teorema di Pitagora, ecc.). Totalmente indipendente dalla Relatività e da un punto di vista puramente teorico, Riemann, anni prima, aveva sviluppato questa geometria insieme a una serie di teoremi che ne definivano le proprietà. I vantaggi della Geometria di Riemann nell'effettuare i calcoli per la Relatività Speciale e Generale furono evidenziati per la prima volta da Minkowski (ex professore di Matematica di Einstein), che poi convinse Einstein ad adottarla.

Nota 10 Glossario

Entropia. Noi sappiamo che, se un Sistema chiuso (per es. l'acqua contenuta nella caldaia di una locomotiva di un treno) contiene energia termica, parte di questa energia termica può essere estratta per compiere un lavoro utile (per es., mettere il treno in movimento). Diciamo parte di questa energia perché non tutta l'energia termica contenuta nel sistema può essere estratta. Quella parte di energia che rimane, dopo che il sistema ha raggiunto il suo equilibrio, si chiama Entropia. Questo ci porta anche a dire che quella parte di energia che non può essere estratta (dopo che il sistema chiuso ha raggiunto il suo equilibrio) rappresenta la sua Entropia.

Un altro modo di definire l'entropia in un sistema chiuso è dire che essa rappresenta la misura del disordine molecolare del sistema e, cioè, **l'Entropia rappresenta il grado di caos delle particelle che compongono il sistema**. In un sistema isolato lasciato a sé stesso, l'energia cinetica delle sue particelle costitutive tende a far crescere il disordine delle particelle stesse. È questa osservazione che porta alla formulazione del noto **Terzo Principio della Termodinamica: Il grado di caos (entropia) di un sistema isolato, lasciato a sé stesso, tende a crescere.**

Un altro modo per definire l'entropia è dire che l'entropia è un'entità fisica che misura il grado di disordine di un sistema. Secondo questa definizione, un sistema isolato, lasciato a sé stesso, spontaneamente si trasforma ed evolve nel tempo fino a raggiungere uno stato finale di equilibrio nel quale la sua energia

disponibile (cioè, energia che può essere ceduta) è minima, mentre il suo grado di disordine (cioè, l'Entropia) raggiunge il valore massimo.

Evento. Nella geometria Riemanniana, "evento" è un punto della ragnatela, cioè, un punto della superficie spazio-temporale. Un punto **A** dello spazio-tempo, identificato in modo univoco dalle sue coordinate, cioè **A (x, y, z, t)**, è chiamato **evento**.

Galassia. Una galassia è un insieme di stelle, resti stellari [cioè nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri], gas interstellare, polvere e materia oscura tenuti insieme dalle forze gravitazionali. Le dimensioni delle galassie variano da nane, con poche centinaia di milioni di stelle, a giganti con cento trilioni di stelle, ciascuna stella in orbita attorno al centro di massa della sua galassia. A seconda della loro forma visiva, le galassie sono classificate come galassie a spirale, ellittiche o irregolari. Le immagini sotto mostrano esempi di tre diversi tipi di galassie. Si sospetta anche che molte galassie abbiano buchi neri nei loro centri.



Galassia a Spirale (Source: Wikipedia)



Galassia Ellittica (Source: Wikipedia)



Galassia a Cerchi Concentrici (Source: Wikipedia)

La Galassia sulla quale noi viviamo, chiamata Via Lattea, ha anche un buco nero al centro e la massa del suo buco nero è circa quattro milioni di volte maggiore della massa del nostro Sole.

Geodetica. Nella geometria Riemanniana il concetto di geodetica è molto importante: la **geodetica** è il percorso più breve (una curva) tra qualsiasi coppia di punti su una superficie curva [l'equivalente di "geodetica" nella geometria euclidea è il "segmento"]. A differenza della geometria euclidea, il lettore noterà che a volte c'è più di una geodetica minima tra due punti.

Spazio-Tempo. **Spazio-Tempo** è un sistema di riferimento che combina le tre dimensioni dello spazio (x, y, z) e la dimensione temporale (t) in un unico quadro di riferimento a quattro dimensioni. Poiché né lo Spazio né il Tempo sono indipendenti dalla gravità, in presenza di oggetti massicci che esercitano gravità, il tessuto dello **Spazio-Tempo** si deforma e i diagrammi spazio-temporali sono utili per vedere gli effetti di questa deformazione. Visivamente lo spazio-tempo è rappresentato da una griglia, che sembra una ragnatela. Se lo spazio-tempo è vuoto (cioè, non ci sono oggetti aventi massa), la ragnatela è piatta. Se ci sono corpi celesti massicci (come una stella o un pianeta o anche un corpo come la Luna), la ragnatela (Spazio-Tempo) è deformata, come mostrato nelle Figure 8 e Figura 9.

Riconoscimenti e Ringraziamenti

La maggior parte delle immagini di questo saggio sono state riprese da Internet o da libri di testo. In alcuni casi queste immagini sono state adattate al testo dal dott. Carmine Manfredi, al quale vanno i nostri più vivi ringraziamenti. I nostri più vivi ringraziamenti anche alla dottoressa Margherita Pacia per i suoi suggerimenti e contributi alla versione in lingua italiana del saggio.

Bibliografia

Bibliografia: Wikipedia; Encyclopedia Britannica; Warped Passages by L. Randall; A Brief History of Time by Stephen Hawking; Black Holes and Baby Universes by Stephen Hawking; articoli e pubblicazioni di Dennis Overbye, Andrea Amini e altri autori pubblicati su siti Internet; Google IA; ChatGPT; altre piattaforme di IA.