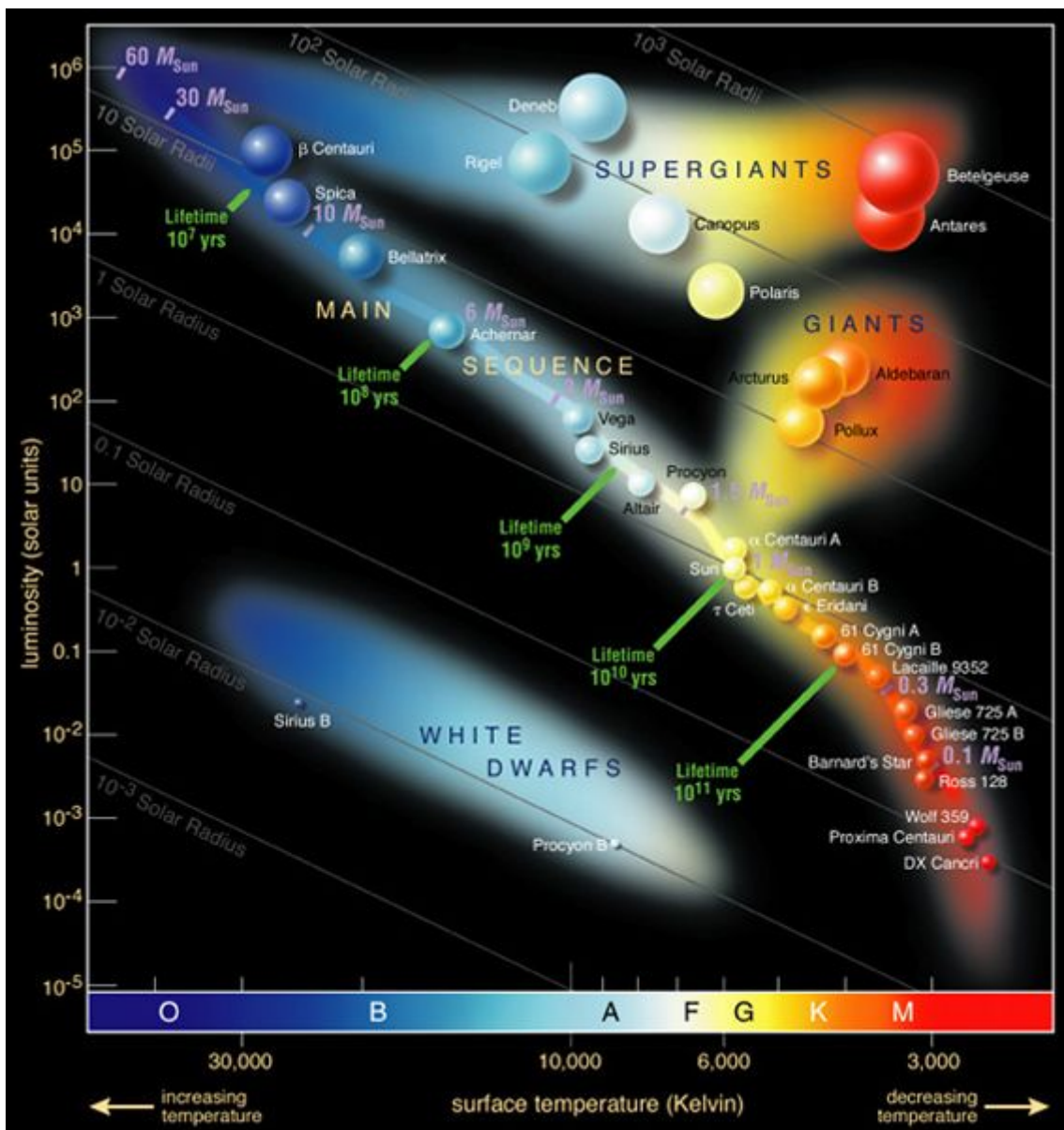


## Relitti stellari: nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri di Ghisellini Gabriele

Ora vedremo quello che succede a ciò che rimane dopo l'esplosione delle stelle; parleremo quindi di nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri.

### Il diagramma di Hertzsprung-Russel

Il diagramma di Hertzsprung-Russel è un diagramma dove la luminosità di una stella è messa in relazione alla sua temperatura superficiale. Hertzsprung e Russel, mettendo insieme i dati che avevano ai loro tempi, hanno visto che in questo diagramma le stelle non si disponevano a caso: la maggior parte formava una sequenza, chiamata sequenza principale. Inoltre c'erano gruppi di stelle che formavano altri raggruppamenti. Con il passare degli anni si è capito che la sequenza principale corrisponde alla fase iniziale di bruciamento interno delle stelle, cioè alla trasformazione di idrogeno in elio; la fase più lunga nella vita di una stella.



Nella fase pre-natale, le stelle si avvicinano alla sequenza principale. In circa 10 milioni di anni le stelle condensano, facendo crescere la temperatura e la densità del loro nucleo, finché si innescano le reazioni termonucleari. Questo determina la sua accensione, in quanto viene prodotta energia sottoforma di luce. Perché questo avvenga, occorre che la temperatura e la densità centrali siano maggiori di un certo valore, necessario per far scontrare i nuclei degli atomi di idrogeno. Per diventare stella, la massa deve essere maggiore di circa 1/100 della massa del Sole. Se è minore rimane un pianeta.

Più le stelle sono piccole, più vivono a lungo; più sono grandi, cioè massive, più sono veloci infatti a produrre energia. Nonostante abbiano più combustibile, le stelle grandi lo consumano molto in fretta e vivono di meno. Il Sole ha una vita di 10 miliardi di anni, mentre una stella di 50-70 masse solari vive solo 1-2 milioni di anni, pur avendo proporzionalmente più combustibile da poter bruciare.

Se si guarda una regione dove le stelle si stanno formando, come si fa a capire se questa è una regione di formazione stellare e quindi è giovane e attiva? Lo possiamo capire se vediamo in questo ammasso anche le stelle blu di grande luminosità. Se ci sono, nonostante la loro vita sia molto breve, vuol dire che l'ammasso è giovane: meno di un paio di milioni di anni. Se guardiamo invece un ammasso globulare, cioè gli agglomerati di stelle più vecchie attorno alla nostra galassia, vediamo che tutta la parte blu non esiste e il diagramma di Hertzsprung-Russel finisce ad un certo punto. Dalla posizione di questo punto possiamo stimare l'età dell'ammasso: gli ammassi globulari della nostra galassia hanno circa dai 10 ai 12 miliardi di anni, sono le stelle più vecchie insieme a quelle nel centro della galassia.

### **Piccole e longeve**

Le stelle di piccola massa, cioè quelle che hanno un 1/10 della massa solare, invece, possono vivere anche un migliaio di volte più a lungo del Sole; dato che il Sole vive 10 miliardi di anni, queste possono vivere tra i 1.000 e i 10.000 miliardi di anni. Queste stelle sono chiamate nane rosse. Come succede spesso in natura, o abbiamo delle cose che hanno una massa tipica e solo quella o, se abbiamo una distribuzione di valori, di solito ci sono tante cose piccole e poche cose grandi. Quindi ci sono tantissime nane rosse: il 60-70% delle stelle della nostra galassia sono nane rosse.

La Terra orbita attorno a una stella media, che vivrà circa 10 miliardi di anni, ma ci sono molte più stelle più piccole del Sole che vivranno più a lungo. Quindi ci si può chiedere: se è vero che la vita è un fenomeno complesso che ha bisogno di molto tempo per svilupparsi, dove è più probabile che si trovi qualche forma di vita? La gente pensa che sia più probabile trovarla intorno a una nana rossa. Però ci sono altri fattori da considerare che sembrerebbero contraddire questa argomentazione. Una nana rossa è una stella che produce poca luminosità. Per ricevere la stessa quantità di energia che riceviamo sulla Terra, che permette all'acqua di rimanere liquida, bisogna che il pianeta le orbiti vicino. Le nane rosse, però, emettono molti raggi ultravioletti e raggi X. Questi raggi sono penetranti e capaci di rompere i legami molecolari, per esempio delle molecole del DNA e quindi possono essere letali per la vita, almeno per la vita simile alla nostra.

### **La fine del Sole**

Quando tutto l'idrogeno del nucleo del Sole si sarà trasformato in elio, la temperatura del suo nucleo non sarà sufficiente per innescare il bruciamento dell'elio per formare idrogeno. La pressione del nucleo diminuirà e la gravità degli strati sovrastanti lo farà comprimere.

La compressione farà sì che il gas del nucleo si scaldi e ci sarà un guscio di idrogeno (non il nucleo) che raggiungerà la temperatura necessaria per innescare le reazioni nucleari. Questo calore extra farà espandere le superfici esterne del Sole fino a che l'involuppo solare ingloberà la Terra e il Sole diventerà una gigante rossa.

In questo periodo di gigante rossa, che durerà circa un miliardo di anni, ci saranno degli improvvisi input di energia, dovuta al bruciamento dell'idrogeno nel guscio appena esterno al nucleo, che soffieranno via gli strati superficiali, formando le cosiddette nebulose planetarie (si chiamano planetarie perché una volta si vedevano non come oggetti puntiformi, ma come dei dischetti sfumati, sembrando dei pianeti. Queste sono tra gli oggetti più belli che possiamo vedere in cielo).

L'energia che il Sole produce ed emette non sarà costante in futuro, ma aumenterà lentamente. Prima della fine della sua vita, che avverrà tra 5 miliardi di anni, ci saranno altri eventi catastrofici: tra un miliardo di anni il Sole emetterà di più e la Terra diventerà inabitabile. Tra 4 miliardi di anni la Via Lattea si scontrerà con la Galassia di Andromeda. Questo evento è il meno pericoloso: le stelle sono così distanti l'una dall'altra che non dobbiamo immaginarci uno scontro fisico. Parti della galassia con maggior gravità si tireranno dietro i pianeti e i sistemi solari, noi potremmo essere sparati via a formare una coda di stelle e di altro materiale.

Tra 5 miliardi di anni il Sole diventerà una nana bianca. Viene chiamata bianca perché la sua superficie è calda. Non ha produzione di energia, ma sta smaltendo il calore interno. Questa fase durerà miliardi di anni, poi il Sole diventerà una bruna e poi nera perché, inevitabilmente, si raffredda. Questi corpi freddi e grandi come la Terra, ma con una massa come il Sole, non si sono ancora formati, perché occorre un tempo maggiore dell'età dell'Universo.

### **Nane Bianche e meccanica quantistica**

Le nane bianche sono grandi 10.000 km, non producono energia e per questo non si crea una pressione. Sono fatte da atomi normali ma ionizzati, cioè protoni ed elettroni non stanno insieme in un atomo e non hanno un elettrone che gira intorno al suo nucleo. Che cosa si oppone in queste stelle alla gravità che tende a farle implodere? E perché si crea un equilibrio a alla dimensione di 10.000 km?

La risposta è nella meccanica quantistica. Nonostante nessuno capisca la meccanica quantistica, questa è la teoria meglio provata e dimostrata che abbiamo. Tanto che alcune previsioni, di cui non capiamo i principi base, sono state dimostrate alla nona cifra decimale. Nessun'altra teoria è stata verificata con maggiore precisione.

La meccanica quantistica nasce nel 1900, quando Planck, grande fisico di quel periodo, tenta di spiegare la radiazione di un corpo nero. Planck fa una ipotesi di lavoro: immagina che gli atomi che emettono possano essere assimilati a degli oscillatori. In natura questi possono avere delle frequenze o dei ritmi di oscillazione grandi a piacere, in maniera continua. Planck ipotizza che queste oscillazioni non siano continue, che ci sia un'unità base, per esempio un ciclo al secondo, poi c'è il doppio, il triplo, il quadruplo e così via, ma niente in mezzo. L'ipotesi di lavoro funziona in modo eccezionale, riesce a spiegare il corpo nero, però risulta ineliminabile, implicando che l'energia degli oscillatori non possa variare in maniera continua, ma faccia dei salti. L'energia si presenta quindi in quanti, in

pacchetti. La luce può essere pensata non più come un'onda, ma come una specie di particella, che oggi chiamiamo fotone.

## Dualismo onda-particella della luce

**Energia proporzionale all'ampiezza**

**Energia del singolo fotone =  $h \nu$**

**Fotoni**

**Energia totale =  $N h \nu$**

### Einstein prova che la luce è fatta da fotoni

Nel 1905 Einstein spiega con questa ipotesi il risultato di un esperimento che nessuno riusciva a capire. L'esperimento era il seguente: illumino una lamina di metallo e vado a vedere quanti elettroni vengono strappati, con strumenti come i contatori geiger che riescono a misurare quanti elettroni vengono prodotti.

La teoria classica prevede che l'energia della luce dipenda dall'ampiezza dell'onda stessa, non dalla sua frequenza. La teoria quantistica, invece, immagina che la luce sia fatta da un insieme di fotoni, con una data frequenza. Nel primo caso se invece di una lampadina ne metto dieci, cioè aumento di 10 volte la forza, dovrei avere un numero di elettroni 10 volte maggiore. Facendo l'esperimento ci si accorge che se anche si usano tante lampadine molto potenti, ma con una frequenza piccola (rossa), di elettroni non ne viene fuori neanche uno. Eppure ho una grande forza dell'onda, se associo la forza al numero di lampadine. Invece se metto una lampadina blu, anche una sola, ho tantissimi elettroni. Se la metto verde ne ho zero, se la metto verde con un pizzico di blu... ecco gli elettroni. Dipende dal colore della luce, quindi non dipende da quanto è forte la lampadina o da quante lampadine ho, ma dipende dal colore della luce, quindi dalla frequenza della luce. Einstein spiega questo effetto dicendo: vi ricordate Planck parlava di fotoni? Ha ragione: la luce è fatta a quanti.

L'energia del fotone è piccolissima, ma riesce a scalzare l'elettrone dal metallo. Quando il fotone interagisce con l'elettrone, gli cede la sua energia: se questa energia è maggiore dell'energia di legame che l'elettrone ha con i nuclei del metallo l'elettrone prende il volo e viene scalzato via. Analogamente se ho 2 fotoni con questa energia avrò 2 elettroni, se ho 3 fotoni avrò 3 elettroni. Se però ho dei fotoni, ognuno con un'energia più bassa di quella che serve, non succede niente.

La luce non è un'onda elettromagnetica continua, la luce è fatta a corpuscoli che hanno un'energia diversa l'uno dall'altro e questa energia è proporzionale al colore della luce, quindi alla frequenza della luce, secondo una costante che di proporzionalità. L'energia del fotone è quindi uguale alla costante di Planck, che è un numero, per la frequenza. C'è un cambio di paradigma totale: prima la luce, con i fenomeni d'interferenza e i fenomeni di rifrazione e diffrazione, era pensata come onda elettromagnetica, un campo elettrico oscillante, finché Einstein afferma che l'onda è una particella. È per questo lavoro sull'effetto fotoelettrico che Einstein prenderà il Nobel, non per la teoria della relatività.

### **Il fotone ha massa?**

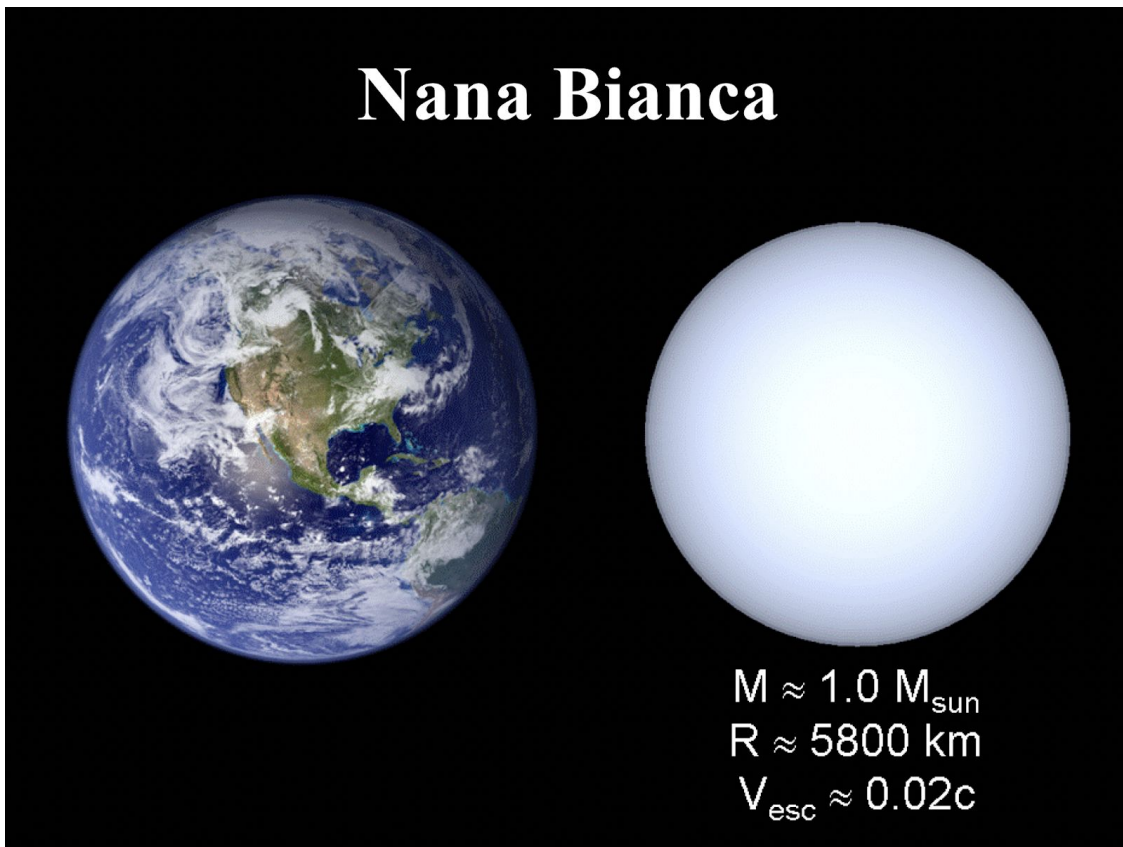
Se il fotone è una particella, ha una massa?

Secondo la fisica classica, il fotone non ha massa. Trasporta però un'energia. L'energia è  $E = mc^2$ , quindi il fotone ha una massa equivalente a  $E$  su  $c^2$ . Dovrebbe essere perciò anche fonte di gravità.

D'altra parte soltanto le cose senza massa possono andare alla velocità della luce, quindi se il fotone avesse massa non potrebbe andare alla velocità della luce. Quindi da questo punto di vista lo dobbiamo pensare come senza massa. Allora chi ha ragione?

Succedono queste cose strane. Non c'è massa, ma c'è massa; è un'onda ma anche una particella. Il nostro cervello dice che una cosa è in un modo, la meccanica quantistica dice invece che una cosa è in un altro, l'elettrone è qui e anche lì, dappertutto. L'interpretazione della meccanica quantistica è un enigma, la spiegazione di queste cose non c'è ancora. Nella fase pionieristica della meccanica quantistica questi erano temi che si dibattevano quotidianamente tra i fisici e tutti erano preoccupati di dare un senso a questa cosa. Col tempo uno si abitua. Ci hanno pensato in tanti e non sono riusciti a capire, ma funziona e si possono fare i conti, perciò facciamo i conti e realizziamo cose utili. Transistor, circuiti integrati, ecc. è tutta meccanica quantistica, la nostra civiltà è retta dalla meccanica quantistica, quindi è retta da una cosa che non si capisce però funziona. Attraverso gli esperimenti vediamo per esempio che se indirizziamo un cannone di elettroni in una certa direzione e lo ripetiamo un miliardo di volte vediamo che non tutti atterrano in quella direzione, ma ci sono elettroni qui, lì e là. Non sappiamo perché non vanno tutti nella stessa direzione, ma la teoria ci permette di predire quanti vanno da una parte e quanti da un'altra.





### Idiosincrasia degli elettroni

Pauli sostiene che succede un'altra cosa strana con la meccanica quantistica: di solito se noi prendiamo due particelle le possiamo avvicinare quanto vogliamo; invece se si prendono due elettroni con la stessa energia che ruotano nello stesso senso, cioè hanno lo stesso spin, e si tenta di metterli il più vicino possibile, si arriverà a una distanza che gli elettroni si rifiutano di oltrepassare. Due particelle uguali di questo tipo - due elettroni - e come vedremo dopo anche due neutroni, non sopportano di essere vicini, non perché abbiano la stessa carica e quindi si respingano. Questo fenomeno si può spiegare con il principio di Pauli, per l'esattezza principio di esclusione di Pauli. Di esclusione perché in un piccolo volume occupato da un elettrone non posso metterne un altro perché, se ha la stessa energia e lo stesso senso di rotazione, si rifiuterà di andarci. Questo volume ha una dimensione che dipende dalla costante di Planck, dalla massa della particella e dalla velocità della luce. Per l'elettrone è una sfera con un raggio di  $2.4 \times 10^{-10}$  cm. In questa sfera quindi non riesco a impacchettare gli elettroni in modo che ci siano due, tre, dieci elettroni, ma ce ne potrà essere uno solo. Questa è una distanza limite. Il principio di esclusione di Pauli determina quindi nelle stelle una forza che non è dovuta al calore alle reazioni termonucleari.

Una stella come il Sole contiene  $10^{57}$  atomi: quanto vicini possono stare questi atomi? Al massimo possiamo avvicinarli di una distanza di  $2.4 \times 10^{-10}$ . Se ci sono  $10^{57}$  atomi, ogni elettrone occupa un volume che è il cubo della distanza minima, cioè un volume di circa  $10^{-30}$  cm<sup>3</sup>, quindi  $10^{57}$  per  $10^{-30}$  è uguale a  $10^{27}$  cm<sup>3</sup>. Facendo la radice cubica di questo volume ottengo il raggio. Il raggio è quindi  $10^9$  cm cioè 10.000 km. Questo è il raggio della nana bianca. Il raggio di una stella come il Sole a fine vita è quindi regolato da un'idiosincrasia degli elettroni di stare insieme agli altri e, quindi, nonostante la gravità tenti di restringere ancora di più il raggio della stella, c'è una resistenza dovuta a questo strano

comportamento degli elettroni. Una nana bianca è molto densa: una massa solare dentro un volume uguale a quello della Terra, è molto calda all'inizio e poi si raffredda.

### **Stelle di neutroni**

Andiamo al passo successivo, alla stella di neutroni. Per avere una stella di neutroni bisogna che la stella, quando nasce e arriva sulla sequenza principale, abbia una massa compresa tra le 8 e le 20 masse solari. Queste stelle prima bruciano l'idrogeno per fare elio. Quando finiscono l'idrogeno, la stella ha abbastanza massa da far sì che la temperatura del nucleo sia grande abbastanza per innescare la reazione successiva che a partire da 3 nuclei di elio forma un nucleo di carbonio. Quando finisce l'elio, tutte le fasi successive sono molto rapide, il carbonio, con un altro nucleo di carbonio, fa il magnesio, l'ossigeno, il neon e così via. Alla fine della sua vita, la stella ha una struttura a cipolla, con ogni guscio che brucia gli elementi via via più pesanti, andando verso l'interno. Al centro troviamo il ferro. Il ferro non brucia, o meglio, tenta di bruciare e fa innescare il disastro totale. Nelle reazioni termonucleari che arrivano fino al ferro ho liberazione di energia, quindi brucio e ottengo calore, ottengo pressione, eccetera; quando si tenta di bruciare il ferro devo invece fornire energia, quindi la pressione che teneva su la stella, immediatamente e in poco tempo, viene persa. Il nucleo, che è praticamente tutto composto da ferro, sottoposto alla gravità di tutti questi strati superficiali, implode in pochi millisecondi formando una stella di neutroni. Gli strati superficiali tentano di collassare su questo nuovo centro, ma rimbalzano e convertono tutta la loro energia in moto, in calore. Si forma un'onda d'urto, che fa esplodere letteralmente la stella con una velocità iniziale di 10.000 km/sec.

### **Supernove**

Nasce una così una supernova. Se scoppiasse nella nostra galassia, come è successo in passato, vedrei una stella nova, super perché è super brillante, da poterla vedere anche di giorno. Il raggio di questa stella di neutroni è circa 10 km, cioè ci sta tutta all'interno del raccordo anulare di Roma. Nonostante la sua compattezza ha una massa che è più di una volta e mezzo quella del Sole, mentre tutto il resto della massa è stato espulso nell'esplosione.

### **Un nucleo atomico di 10 km**

Vi ricordate che la distanza minima a cui potevo mettere gli elettroni dipendeva dalla massa e vi avevo detto che questo fenomeno di idiosincrasia non c'è solo tra un elettrone e l'altro, ma anche tra un neutrone e l'altro? Però, poiché il neutrone pesa 1.836 volte l'elettrone, la distanza minima a cui i neutroni si possono sopportare è 1.800 volte più piccola.

Quindi se questa stella di neutroni è fatta di neutroni, la distanza minima a cui posso immaginare di avere i neutroni uno sull'altro è 1.800 volte più piccola:  $10^{-13}$  cm circa. Quindi il volume è circa  $10^{57/3}$  che fa  $10^{19} \times 10^{-13}$ , cioè  $10^6$  cm che equivale proprio a 10 km. Quindi il raggio della stella di neutroni è dovuto al fatto che i neutroni non stanno più vicini a di questa distanza piccolissima.

Ma perché siamo parlando di neutroni? Nel nucleo della stella c'era il ferro, ma quando la comprimo tutto è molto vicino, gli elettroni che sono liberi si combinano con i protoni: elettrone + protone = neutrone. Quindi tutti i protoni presenti, che sono in numero uguale agli elettroni presenti perché la stella è globalmente neutra, si uniscono agli elettroni

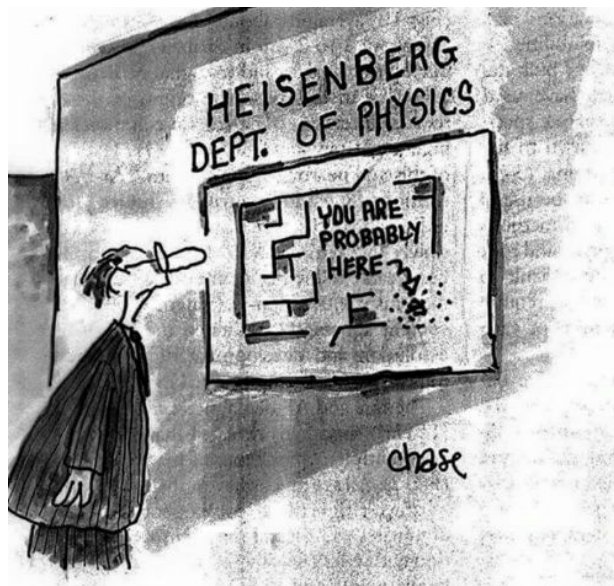
formando neutroni. Si dice che c'è una neutronizzazione della stella. È come se avessi un nucleo atomico fatto da  $10^{57}$  neutroni. Sto parlando dell'interno, non della crosta di pochi metri, dove la gravità dovuta agli strati e al nucleo non è stata abbastanza per comprimere ancora di più la nana bianca, per convincere gli elettroni a entrare dentro ai protoni e trasformarli in neutroni.

All'interno di una stella di neutroni, il neutrone resta sferico?

L'elettrone e qualsiasi particella li immaginiamo come palline, ma non sono palline, sono sfere di influenza. Le particelle elementari sono punti geometrici e il punto geometrico non ha dimensioni. Nella meccanica quantistica c'è una contraddizione dietro l'altra rispetto al nostro modo di pensare. In realtà noi sappiamo che non abbiamo abbastanza teoria per rispondere a queste domande. Dire che qualsiasi cosa è racchiusa in una singolarità, in qualcosa di raggio zero, significa che lì la densità è infinita, la gravità è infinita, e queste cose non sono ancora descrivibili. Bisognerebbe usare la gravità insieme alla meccanica quantistica e non abbiamo una teoria che unisce le due cose. La gravità quantistica è il Sacro Graal di tutti i fisici. Piccolo volume è meccanica quantistica, tanta gravità è relatività generale. Insieme non vanno d'accordo. Anche Einstein sapeva che la sua teoria non poteva essere la teoria ultima perché non dice niente sulla meccanica quantistica, non dice cosa succede in queste situazioni.

### **La realtà è indeterminata: Heisenberg e il suo principio**

Veniamo ora all'altro principio cardine della meccanica quantistica: il Principio di Indeterminazione di Heisenberg. Volete sapere contemporaneamente posizione e velocità di una particella, come se fosse una pallina che si muove? Non potete. Non potete sapere contemporaneamente tutte e due le cose. Volete sapere con esattezza quale sarà la posizione di una pallina? Allora non saprete la sua velocità. Volete sapere la velocità in un certo punto di una pallina? Allora non saprete la sua posizione. Ne consegue anche che non potete sapere quanta energia ha una particella e per quanto tempo ha questa energia, almeno non con la precisione che vorreste, potete saperlo solo in maniera approssimativa. Se volete sapere precisamente l'energia di una cosa, dovete immaginare che questa cosa ha quell'energia lì, per un tempo indefinito, che è tanto più indefinito quanto più precisamente voi volete sapere quell'energia.





### **Il vuoto non è vuoto**

Siamo nel vuoto, siamo schermati dalla radiazione di fondo. Se non c'è niente, ci sarà zero energia, no? No. Non potete sapere che qui e ora c'è zero energia. Non è una mancanza nostra, dei nostri strumenti. È proprio una caratteristica della natura.

Nel vuoto assoluto, lontano da ogni fonte di energia, non c'è lo zero assoluto. Esiste qualcosa nel vuoto che nasce, vive pochissimo e muore. Se nasce con grande energia vive poco, mentre se nasce con poca energia vivrà un po' di più e poi sparirà. Queste si chiamano fluttuazioni quantistiche del vuoto. Fluttuazioni perché è tutto un pullulare: nascono e muoiono, nascono e muoiono. Quantistiche perché il principio di indeterminazione di Heisenberg è il cardine della meccanica quantistica. Del vuoto perché succedono anche nel vuoto. La realtà è così, indeterminata, fluida. Quindi tutti i concetti di palline o traiettorie o cose definite sono sorpassati. Queste migliaia di particelle vanno pensate come dei fantasmini che si muovono e quando c'è qualcuno che le rivela finiscono di essere fantasmini e diventano un puntino sul vostro rivelatore. Questo spiega le dimensioni della nana bianca e della stella di neutroni. Stiamo sfiorando una proprietà intima della realtà, ma in modo scientifico e non filosofico.

Ma torniamo alle nostre stelle di neutroni. Sono molto dense, un centimetro cubo pesa un miliardo di tonnellate, e sono sede di campi magnetici molto grandi, sono le grandi calamite dell'universo, facilmente raggiungono  $10^{12}$  gauss (una calamita ha circa 100 gauss). Il record assoluto in questo campo sono i magnetar con  $10^{15}$  gauss. Questi campi magnetici sono generati dalla crosta. Come fa la stella di neutroni a creare un campo magnetico così grande? La stella non è fatta completamente di neutroni, ha una crosta di circa 100 metri di materia normale e che posta in rotazione crea delle correnti che generano il campo magnetico.

### **Little Green Men**

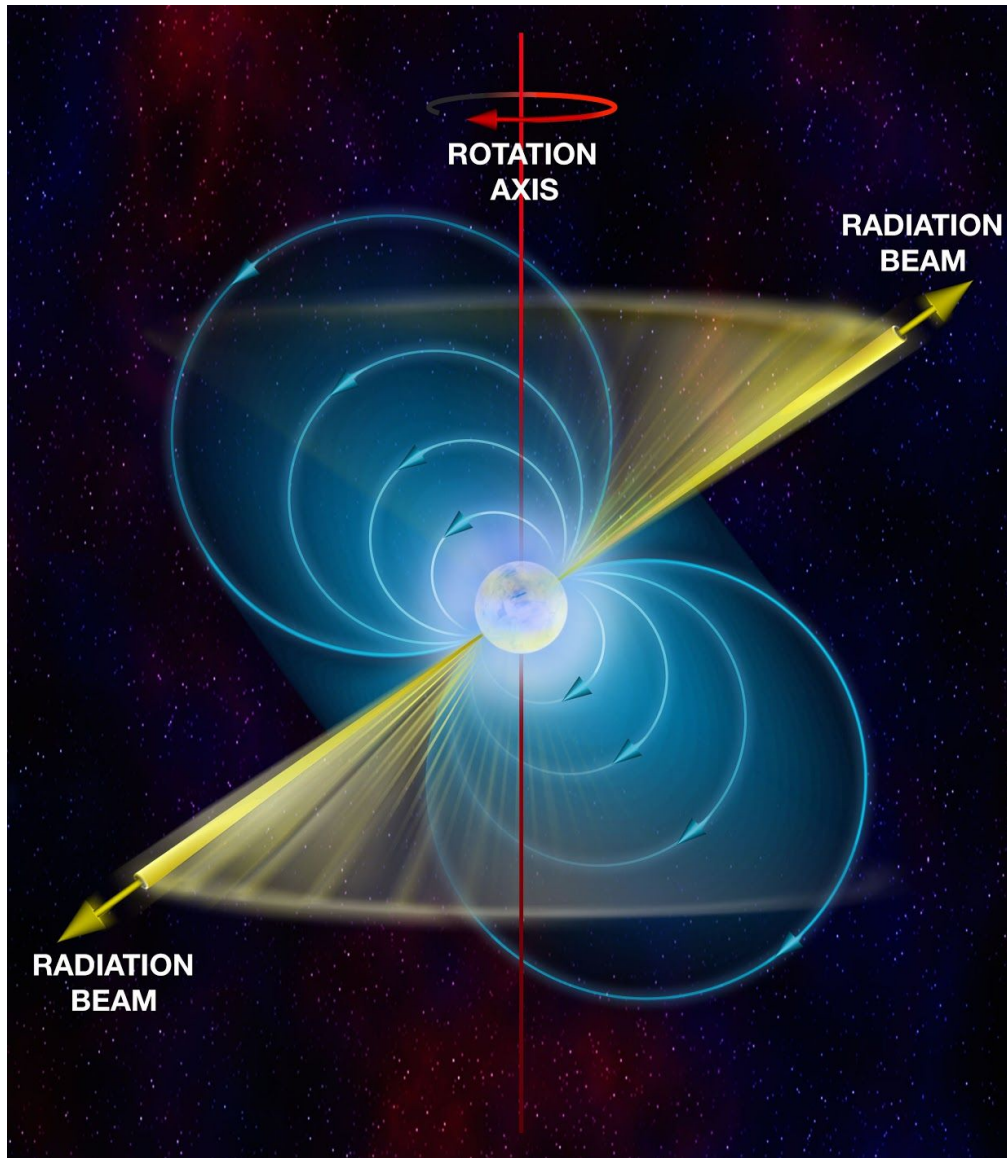
Il 6 Agosto 1967 Jocelyn Bell, ventiquattrenne dottoranda di Cambridge rivela degli strani bip sul tracciato cartaceo dove viene registrato il segnale preso da un radiotelescopio. Questi bip si succedevano con un intervallo temporale estremamente regolare. Per questo inizialmente si pensò che fossero dovuti ad alieni e per la prima settimana furono chiamati LGM (little green man). Poi si pensò che fossero dovuti a un corpo che girava molto velocemente ma che per mantenersi così stabile doveva avere un grande momento di inerzia, ovvero grande massa per essere poco perturbabile. Doveva essere anche piccolo per fare un giro ogni trentesimo di secondo (se fosse un corpo grande la materia viaggerebbe ad una velocità superiore a quella della luce e ciò non sarebbe possibile). Quel giorno è considerato il giorno della scoperta delle stelle di neutroni.

Non sappiamo ancora quale sia il meccanismo che produce i bip, ma immaginiamo che la stella di neutroni si comporti come un faro: produce un fascio di onde radio collimate, in rotazione. Quando il fascio incontra la terra, riveliamo un bip. Per questo abbiamo chiamato queste stelle chiamano pulsar.

### **Pulsar**

Nella nostra galassia ce ne sono circa un miliardo, di cui circa 1000 rilevate. Hanno una massa solare e mezzo, circa 10 km di raggio, ruotano molto velocemente anche con periodo di due o tre millisecondi, quindi circa 500/600 giri al secondo. La maggior parte

girano su se stesse e sono pulsar isolate. Circa una dozzina girano intorno a un'altra stella di neutroni. Girando intorno alla stella di neutroni si crea un moto composto e in un caso particolare si registrano le pulsazioni dell'una e dell'altra stella.



### **Buchi. Neri.**

Abbiamo detto che le stelle di neutroni sono il risultato della fine della vita di stelle che alla nascita avevano tra le 8 e le 20 masse solari. Ora parliamo di cosa succede da 20 masse solari in su. In questo caso la gravità del nucleo è così grande che nemmeno l'idiosincrasia dei neutroni riesce a contrastare la gravità e la stella collassa. Pensiamo che non ci sia nessun meccanismo che possa fermare la stella, la gravità è così forte che nulla può impedire il collasso totale e quindi la materia va in un punto chiamato tecnicamente singolarità, cioè un punto.

Si forma un buco nero. Se questo avesse una massa solare, qualsiasi cosa si avvicini a più di 3 km è obbligata ad entrarvi. In questo caso i 3 km sono il raggio di non ritorno e nemmeno la luce riesce scappare. È il trionfo della gravità.

La legge della gravitazione è stata scoperta da Newton nel 1666, aveva 24 anni e a Londra e Cambridge infuriava la peste. Newton si rifugiò perciò nella sua città natale da sua madre. Lì, da solo, ha scoperto la legge di gravitazione universale, spiegando le orbite dei pianeti. Inoltre ha formulato le tre leggi della dinamica. Per fare ciò gli occorreva una matematica abbastanza sofisticata (limiti, derivate e integrali). Questa matematica non c'era ancora, e così lui la inventò. Un genio assoluto.

### **Il pensiero più felice di Einstein**

Nel 1905 Einstein scopre il moto browniano, l'effetto fotoelettrico, la relatività ristretta. Nel settembre di quell'anno manda un lavoro alla rivista che gli aveva pubblicato l'articolo sulla relatività ristretta, scusandosi di aver dimenticato la dimostrazione secondo cui l'energia è uguale alla massa per la velocità della luce al quadrato. Il tutto mentre lavora all'ufficio brevetti di Berna otto ore al giorno sei giorni alla settimana. Ci lavorerà fino al 1909, quando Planck gli offre una cattedra all'università di Berlino.

In un pomeriggio del novembre 1907 ha il pensiero più felice della sua vita: cosa succede quando cado dal tetto? Questo pensiero all'apparenza così banale e infantile è in realtà l'inizio della relatività generale che spiega in maniera nuova cosa devono essere lo spazio e il tempo.

Supponiamo di essere in una stanza in un punto lontano da ogni massa e ogni energia. Non siamo sottoposti ad alcuna forza e quindi fluttuiamo senza peso. Supponiamo di avere un laser acceso, parallelo al pavimento e il suo raggio si imprime alla stessa altezza dal pavimento. Ora supponiamo di essere in caduta libera verso la Terra. Non ci accorgiamo di essere in caduta libera essendo chiusi in una stanza e accendendo il laser lo vediamo come lo vedevamo prima. Ma cosa vede un osservatore esterno? Mentre il raggio laser viaggia da una parete all'altra della stanza, la stanza sta cadendo. L'osservatore esterno vede quindi che la luce percorre una traiettoria curva.



### **La gravità curva lo spazio**

La luce è il mezzo con cui noi misuriamo la geometria dello spazio. Ne deduciamo quindi che la gravità ha curvato lo spazio. Oggi è sperimentalmente dimostrato, ci sono anche delle foto che ci fanno vedere come le immagini delle galassie sono deformate da un forte campo gravitazionale, che funziona come una lente.

Se c'è un corpo che curva lo spazio, la luce che è obbligata a percorrere questo spazio viene curvata. Questo avviene non solo con la luce, ma anche con i pianeti come Mercurio che ha un perielio anomalo e ha un'orbita a rosetta per questo motivo.

### **La gravità rallenta il tempo**

Abbiamo visto cosa succede allo spazio. Adesso è il turno del tempo. Immaginiamo la stessa stanza in caduta libera, ma invece di mettere il laser orizzontale, mettiamolo in verticale. Se siamo anche noi all'interno della stanza non noteremo niente di particolare. Se il laser ha un certo colore, questo colore rimane lo stesso sia all'uscita della luce dal laser, sia quando arriva al pavimento. Niente di strano, proprio come se fossimo fermi. Ma che cosa vede l'osservatore esterno, che vede noi cadere?

Per semplicità immaginiamo che la stanza abbia il pavimento di vetro e che l'osservatore sia sotto la stanza, sulla Terra, in modo che il laser sia puntato verso di lui. L'osservatore vede il laser muoversi verso di lui, e quindi vedrà una frequenza blu-shiftata. Se invece il laser fosse posto sulla superficie della terra, e l'osservatore in alto, succedrebbe il contrario: l'osservatore vedrebbe i fotoni red-shiftati, come se la loro energia diminuisse lottando contro il campo gravitazionale terrestre. Questo fu sperimentalmente provato nel 1959 da Pound e Rebka che misurarono la frequenza di fotoni prodotti e rivelati a 23 metri di distanza (distanza fra il tetto e la cantina di Harvard). Se la luce era emessa in basso, il rivelatore posto in alto rivelava una frequenza minore (redshift), al contrario se la luce era emessa in alto (verso il basso) e il rivelatore era posto in cantina, rivelava una frequenza più alta (*blushift*).

Ma cos'è la frequenza? È il numero di oscillazioni al secondo. Pensiamo a un pendolo, o a una altalena. Il moto si ripete in modo periodico, con una certa frequenza. Cosa succede se la frequenza di qualcosa (compresa la luce) cambia? Nel campo gravitazionale terrestre, vedendo un pendolo dal basso lo vediamo più veloce, mentre se lo vediamo dall'alto lo vediamo più lento. Quindi lo scorrere del tempo dipende da dove si è.

Frequenza e tempo sono legati. Se c'è una massa gravitante non c'è più lo stesso scorrere del tempo che c'è nel vuoto. Quindi la gravità rallenta il tempo. Oggi bastano due orologi atomici posti a distanza di più di mezzo metro per accorgerci di questo effetto. I piloti di aerei invecchiano più velocemente di qualche frazione di secondo ad ogni volo che fanno. Se ci avvicinassimo ad un buco nero il tempo passerebbe molto più lentamente che sulla terra.

### **“Una ostinata e persistente illusione”**

Terminiamo con una frase di Einstein, che in morte dell'amico Michele Besso, scrive alla famiglia del defunto dicendo “ora Besso è dipartito da questo strano mondo precedendomi di poco, questo non significa nulla, gente come noi che crede nella fisica sa che la distinzione fra passato, presente e futuro non è che un'ostinata e persistente illusione.”