

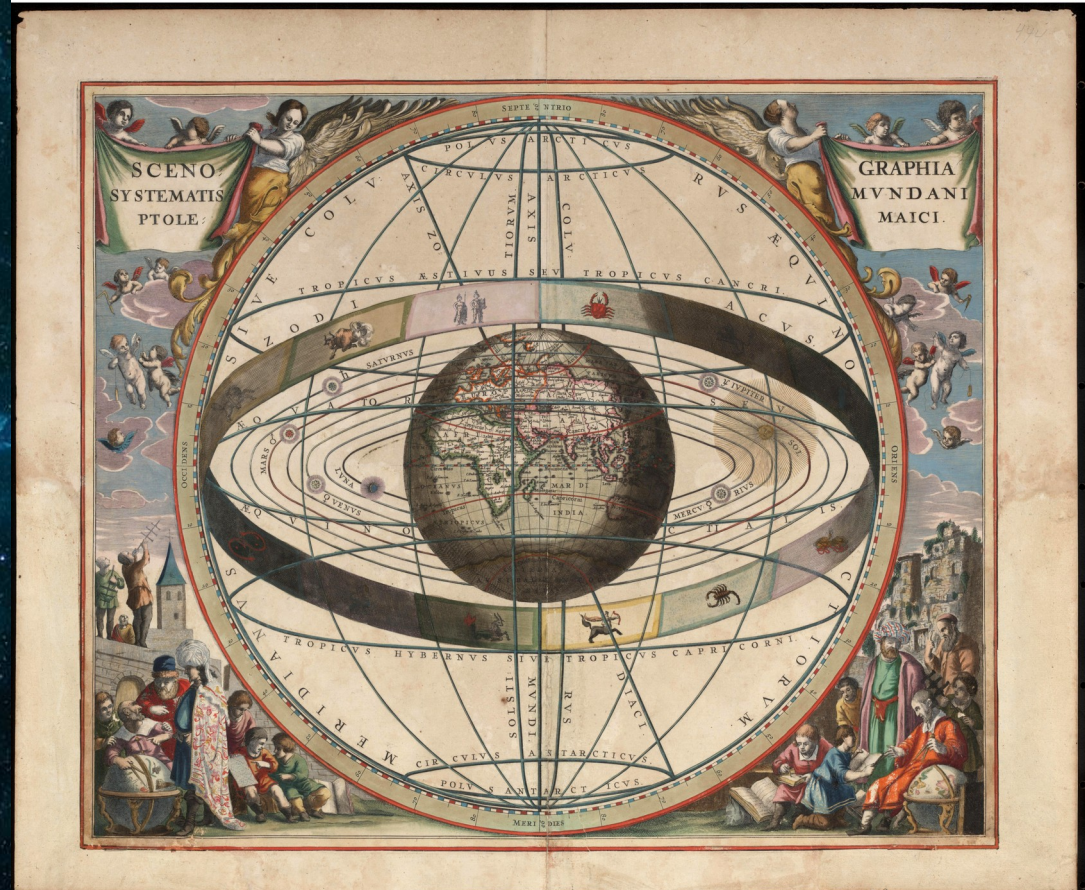


SOLI CHE ESPLODONO

L'ENIGMA DELLE SUPERNOVE

© Francesco Cavallini
Gruppo Astrofili Cinisello Balsamo

Parte I – Il sistema aristotelico



L'universo geocentrico

- Intuitivamente il moto giornaliero che i corpi celesti sembrano compiere in cielo può essere spiegato assumendo che essi ruotino intorno alla terra in senso orario.
- Alcuni oggetti, tuttavia, variano la propria posizione rispetto alla maggior parte delle stelle, che invece appaiono “fisse”. Nell'antichità erano noti sei di questi astri e furono chiamati planeti.
- Per descrivere in modo appropriato il movimento che tutti gli astri, compresi i planeti, parevano seguire nella volta celeste Eudosso di Cnido, nel IV secolo a.C., elaborò un complesso modello di universo geocentrico dove i corpi celesti erano incastonati in 33 sfere di materia cristallina, di diverse dimensioni e variamente combinate tra loro, con al centro la terra.



L'immutabilità del cielo

- Nello stesso secolo Aristotele di Stagira adattò l'universo di Eudosso alla sua concezione filosofica.
- Aristotele riteneva che il cambiamento e il degrado riguardassero esclusivamente il mondo terreno e, in minor misura, la sfera della luna (considerata il pianeta più vicino), il quale era formato dai quattro elementi naturali (terra, acqua, aria, fuoco) e dominato dal moto rettilineo.
- Il mondo celeste, invece, consisteva di una "quintessenza" immutabile ed eterna ed era caratterizzato dalla perfezione del moto circolare. Il vuoto, inoltre, non esiste.
- Nacque così il sistema aristotelico, sul quale l'astronomia tradizionale fece affidamento per oltre due millenni.

MONDO CELESTE

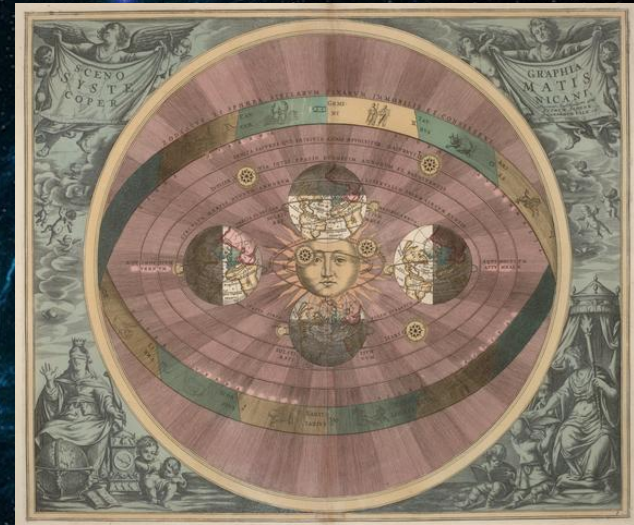
- ✓ *Immutabilità*
- ✓ *Quintessenza*
- ✓ *Moto circolare*

MONDO TERRENO

- ✓ *Cambiamento*
- ✓ *Terra, acqua, aria, fuoco*
- ✓ *Moto rettilineo*

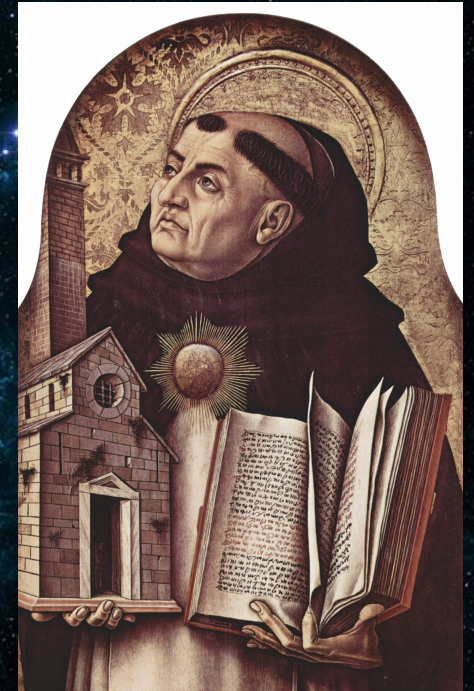
L'universo eliocentrico

- Intorno al 240 a.C. Eratostene di Cirene riuscì a calcolare le dimensioni della terra confrontando la lunghezza delle ombre che oggetti di egual misura proiettavano a mezzogiorno ad Alessandria d'Egitto e nella città di Siene. Stabilì in questo modo che la circonferenza terrestre misura all'incirca 40 000 km e il diametro più o meno 13 000 km.
- Nello stesso secolo Aristarco di Samo elaborò un nuovo modello dell'universo che rendeva ragione molto più semplicemente del movimento dei pianeti. In questa concezione, il sole è al centro e i pianeti vi ruotano intorno, compresa la terra, la quale ruota anche su se stessa ed è orbitata unicamente dalla luna. Questo è l'universo eliocentrico.
- Aristarco riuscì inoltre a stimare la distanza e le dimensioni della luna. Compresero inoltre che il sole doveva essere molto più grande della terra, ragione in più per considerare obsoleta l'idea che ruotasse intorno a quest'ultima.

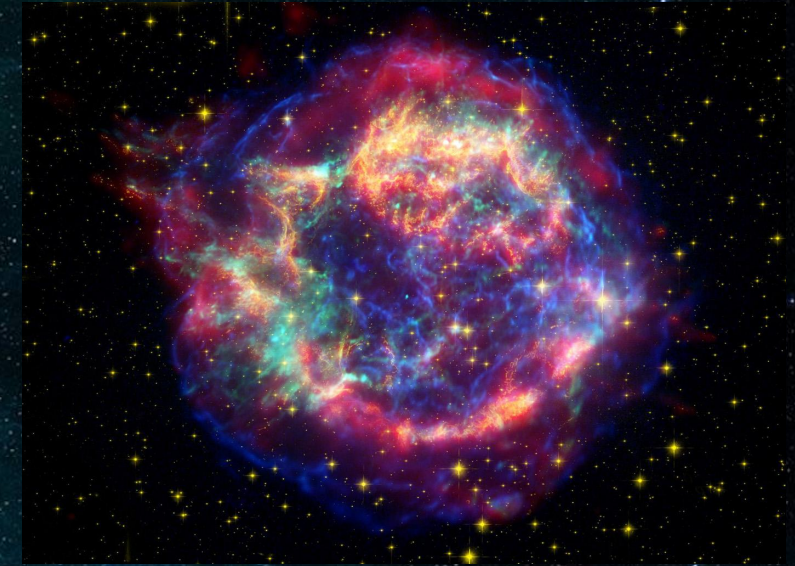


Aristotele e la Chiesa cattolica

- L'universo eliocentrico di Aristarco non prese mai veramente piede nella cultura astronomica del tempo.
- Nel XIII secolo il teologo italiano Tommaso d'Aquino consacrò il sistema aristotelico come quello che più si accordava con le Sacre Scritture, rendendolo così parte della dottrina cattolica.
- Da allora quasi nessuno osò mettere in dubbio il sistema aristotelico, fino alla rivoluzione copernicana.



Parte II – Le novae nella storia



NASA

ESO

Nuove stelle si accendono

- La ferma convinzione che il mondo celeste fosse eterno e immutabile portava gli antichi astronomi a provare un forte disagio quando un qualche fenomeno naturale sembrava palesemente confutare questa teoria.
- L'apparizione di una cometa era uno di questi fenomeni, che però in genere veniva liquidato come un banale evento atmosferico, dunque appartenente al corruttibile e imperfetto mondo terreno.



ESO

Nuove stelle si accendono

- Lo stesso non poteva dirsi quando improvvisamente e in modo totalmente imprevedibile una nuova stella faceva capolino in un punto del firmamento dove prima non era visibile nulla, risplendeva per settimane con una luminosità anche straordinariamente elevata, e poi tornava ad affievolirsi per sparire così com'era apparsa.
- Molte di queste nuove stelle furono registrate da astronomi cinesi e giapponesi, e in alcuni casi anche arabi. Quelli europei pare abbiano trascritto l'osservazione di una sola (le altre è possibile abbiano preferito non notarle o comunque non lasciarne alcuna testimonianza scritta).

ANNO	COSTELLAZIONE	MAGNITUDINE
134 a.C.	Scorpione	?
183 d.C.	Centaurio	> Venere (?)
386 d.C.	Sagittario	?
393 d.C.	Scorpione	< Sirio (?)
1006 d.C.	Lupo	1/10 Luna piena
1054 d.C.	Toro	2-3 Venere
1181 d.C.	Cassiopea	Vega

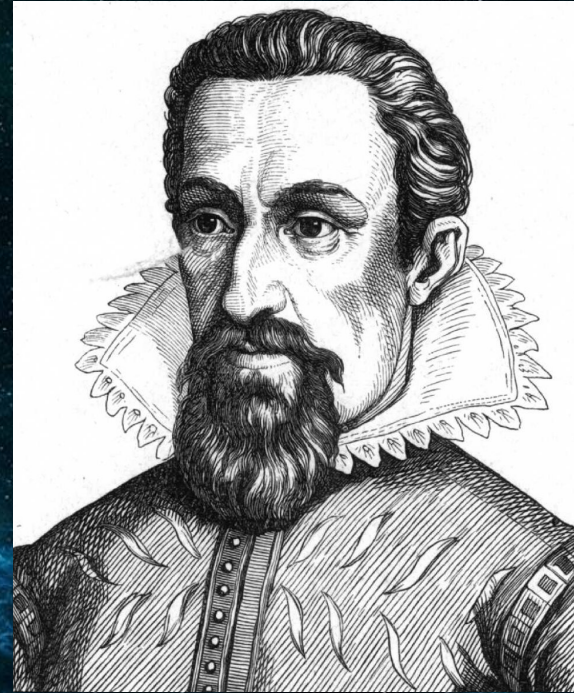
Tycho Brahe, *De nova stella*

- L'11 novembre 1572 l'astronomo danese Tycho Brahe osservò l'apparizione di una nuova stella nella costellazione di Cassiopea.
- Brahe fece ciò che nessun astronomo aveva fatto in precedenza: annotò accuratamente la posizione e l'evoluzione del fenomeno notte dopo notte, per tutti i 485 giorni in cui restò visibile a occhio nudo. Al suo massimo, la stella aveva raggiunto una luminosità molto superiore a quella del pianeta Venere, il che permetteva di scorgerla addirittura nelle ore diurne.
- Brahe pubblicò il resoconto delle sue osservazioni nel trattato *De nova stella* (1573). Dal titolo del trattato di Brahe fu attribuito il termine nova a tutte le nuove stelle che apparvero successivamente, usanza che permane ancora oggi.



Le novae di Fabricius e Keplero

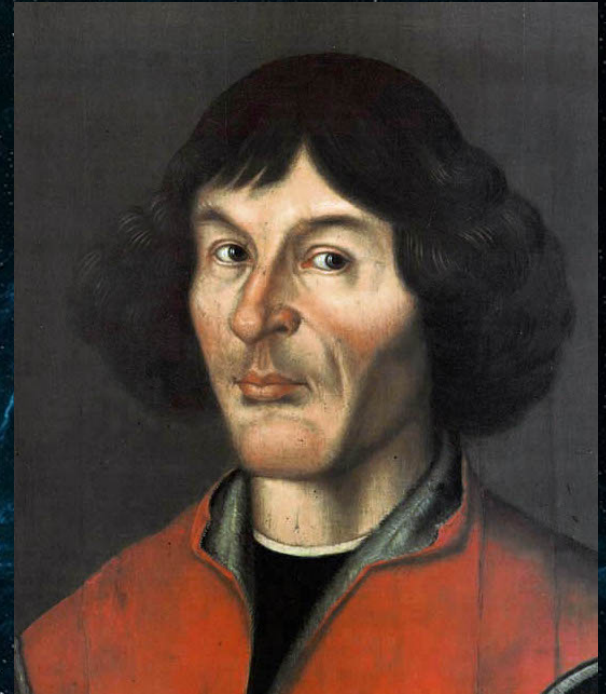
- Nel 1596 l'astronomo tedesco David Fabricius scoprì una nuova stella nella costellazione della Balena, che al massimo raggiunse la magnitudine 3.
- Alcuni anni dopo, nel 1604, un altro astronomo tedesco, Giovanni Keplero osservò un'altra nova, all'apice luminosa almeno quanto Giove, nella costellazione dell'Ofiuco, che rimase visibile a occhio nudo per un intero anno.



La magnitudine misura la luminosità di un corpo celeste secondo la seguente scala: 0 corrisponde alla luminosità (apparente) della stella Vega e 6 alla luminosità (apparente) delle più deboli stelle visibili a occhio nudo. Ne consegue che più un astro è luminoso e minore è la sua magnitudine, e che tra una magnitudine e l'altra c'è una differenza di luminosità pari a circa 2,512. Il sole ha una magnitudine di $-26,8$, Sirio (la stella più luminosa del cielo notturno) di $-1,4$.

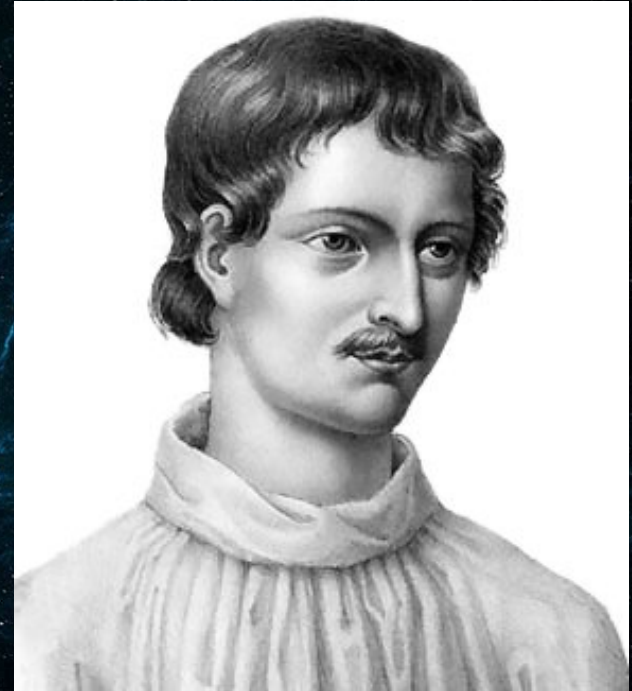
La rivoluzione copernicana

- Nel 1440 l'ecclesiastico tedesco Nicola Cusano avanzò l'opinione secondo cui le stelle visibili nel cielo notturno non siano altro che soli grandi e luminosi quanto il nostro, ognuno circondato dai propri pianeti, alcuni dei quali – forse – popolati da altre forme di vita. Cusano riteneva che lo spazio fosse infinito e così il numero di stelle in esso contenute, la maggior parte delle quali era però troppo lontana perché dalla terra se ne potesse distinguere la luce.
- Nel 1543 un altro religioso, l'astronomo polacco Niccolò Copernico, pubblicò prima di morire il libro *De revolutionibus orbium coelestium*, nel quale riproponeva cautamente la visione eliocentrica dell'universo concepita, molti secoli prima, da Aristarco di Samo.



La rivoluzione copernicana

- Quando si accinse a studiare la nova del 1572, Brahe provò a misurarne la parallasse (ossia lo spostamento apparente rispetto a stelle più lontane) senza riuscirci. La nova doveva quindi trovarsi ben oltre le sfere dei pianeti: il mondo celeste non era immutabile ma soggetto a cambiamenti esattamente come quello terreno.
- Nel 1577 apparve una cometa e Brahe ne analizzò la traiettoria nel cielo, scoprendo che essa si muoveva lungo un'orbita ellittica che intersecava le sfere dei pianeti: perché ciò fosse possibile, le sfere non potevano esistere. La natura, perciò, non aborrisce affatto il vuoto.
- Nello stesso periodo il filosofo italiano Giordano Bruno riaffermò con forza le idee di Nicola Cusano, trovandole in accordo con la sua visione di un Dio infinito. Il suo pensiero, unito al carattere intransigente e provocatore, attirò le ire della Chiesa cattolica (e non solo). Finì per essere messo al rogo in piazza Campo de' Fiori, a Roma, il 17 febbraio 1600.



La rivoluzione copernicana

- Nel 1609, nove anni dopo il martirio di Bruno, l'astronomo italiano Galileo Galilei puntò per la prima volta un telescopio verso il cielo.
- Galileo scoprì le quattro principali lune di Giove, i crateri e le asperità della superficie lunare, le macchie solari, le fasi di Venere e che la Via lattea altro non è che un fitto sciame di innumerevoli stelle, molte delle quali troppo flebili per poter essere distinte a occhio nudo. Le sue osservazioni, unite alle scoperte in campo fisico, aprirono le porte all'astronomia moderna e alla scienza. Per le sue idee, nel 1633, fu costretto ad abiurare dalla santa inquisizione e confinato fino alla morte presso la sua villa ad Arcetri.
- Contemporaneamente alle scoperte di Galileo, Keplero riuscì a dimostrare che i pianeti ruotano intorno al sole su orbite ellittiche delle quali il sole occupa uno dei due fuochi. Il pianeta, inoltre, si muove tanto più velocemente quanto minore è la sua distanza dal sole. Questi fatti sono riassunti nelle tre leggi sul moto dei pianeti che oggi recano il suo nome (leggi di Keplero).



Stelle variabili

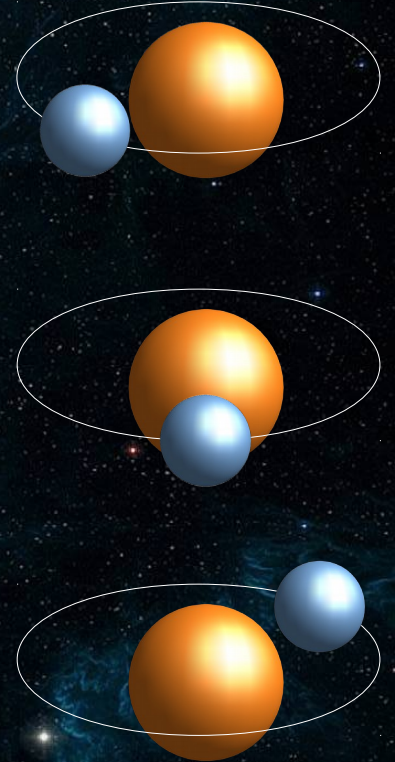
- Se esistono stelle tanto lontane da essere invisibili, non poteva darsi che le novae fossero oggetti del genere che subivano temporaneamente un forte aumento di luminosità, sufficiente da renderle visibili quando, in condizioni normali, non lo erano?
- Nel 1638 l'astronomo olandese Johann Holwarda di Franeker scoprì una stella nella medesima posizione in cui Fabricius, tempo prima, aveva osservato la sua nova. Holwarda notò che essa aumentava e si riduceva di luminosità grosso modo ogni undici mesi, passando periodicamente da un minimo di magnitudine 9 a un massimo di magnitudine 3.
- In seguito l'astronomo tedesco Johannes Hevelius battezzò quella stella Mira (che, in latino, significa "meravigliosa"). La nova di Fabricius non era affatto una nuova stella, ma una stella variabile, la prima ad essere stata scoperta.



SEDS

Stelle variabili

- Nel 1667 l'astronomo italiano Geminiano Montanari scoprì che la stella Algol, nella costellazione di Perseo, variava di luminosità tra un minimo di magnitudine 3,5 e un massimo di magnitudine 2,2.
- La variabilità di Algol potrebbe essere già stata notata dagli arabi. Nella mitologia classica Perseo è rappresentato nell'atto di sollevare la testa recisa di Medusa, una creatura tanto mostruosa che il solo sguardo tramutava gli uomini in pietra. Nella costellazione, Algol rappresenta proprio la testa di Medusa. Il nome stesso, Algol, significa in arabo "demone".
- Nel 1782 il giovanissimo astronomo inglese sordomuto John Goodricke osservò che la luminosità di Algol variava in modo regolarissimo, con un periodo di 69 ore. Egli ipotizzò, a ragione, che Algol fosse in realtà una coppia di stelle legate dalla gravità reciproca, che durante il loro moto orbitale intorno al comune centro di massa finivano periodicamente per eclissarsi, con la componente meno brillante che transitava davanti a quella maggiormente luminosa, producendo così un calo nella luminosità globale del sistema. Algol è la prima variabile a eclisse mai scoperta.



Stelle variabili

- Nel 1784 Goodricke scoprì che una stella nella costellazione di Cefeo, la Delta Cephei, variava la propria luminosità regolarmente ogni 5,5 giorni, passando da un minimo di magnitudine 4,4 a un massimo di magnitudine 3,5. Il modo in cui variava la sua luminosità (curva di luce) non poteva essere spiegato assumendo che si trattasse di una variabile a eclisse.
- Nei successivi 150 anni furono individuate molte altre stelle variabili con curve di luce simili a quella di Delta Cephei e periodi compresi tra 2 e 45 giorni. A questi oggetti fu dato il nome di variabili cefeidi.
- Nel 1912 l'astronoma americana Henrietta Swan Leavitt scoprì una relazione che lega il periodo delle variabili cefeidi alla loro luminosità intrinseca: quanto più lungo è il periodo della variazione, tanto maggiore è la luminosità intrinseca della stella. Questa tecnica permette, una volta misurato il periodo di una variabile cefeide e dedotta la sua luminosità intrinseca, di calcolarne la distanza da noi in base a quanto la sua luce appare indebolita (la sua magnitudine osservata dalla terra, in altre parole).
- Negli anni venti l'astronomo inglese Arthur Stanley Eddington dimostrò che si poteva rendere ragione della variabilità delle cefeidi assumendo che le stelle pulsassero, aumentando e diminuendo periodicamente di dimensioni e temperatura superficiale. Quasi tutte le stelle variabili, tra cui le cefeidi e Mira, sono variabili pulsanti.



Parte III – La natura delle stelle



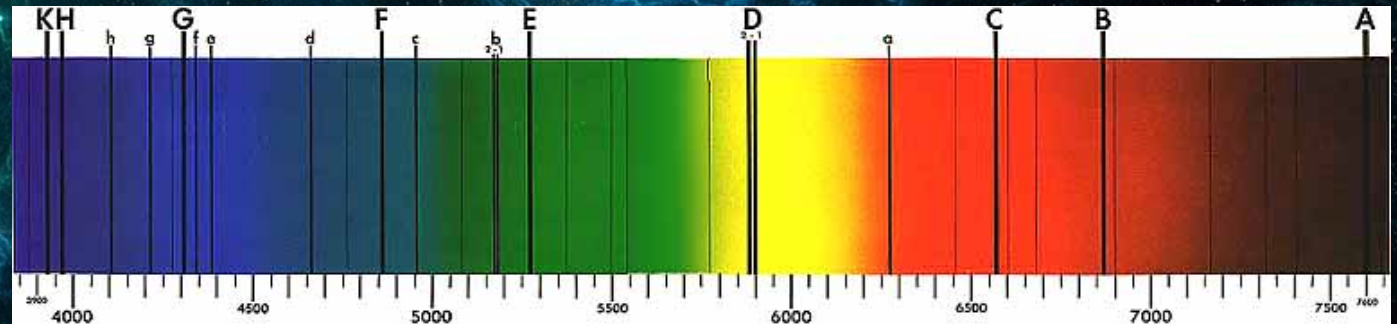
SEDS



ESA

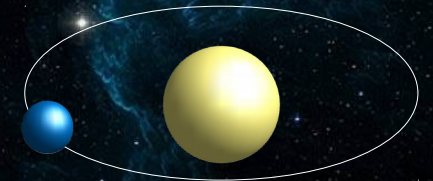
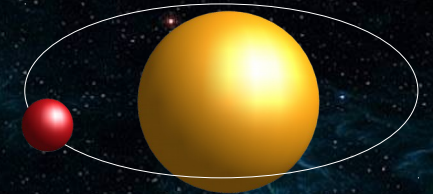
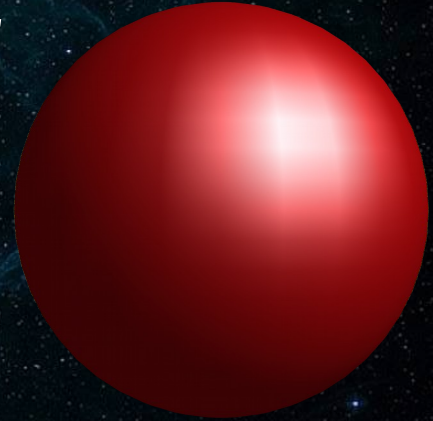
La spettroscopia

- Nel 1814 l'ottico tedesco Joseph von Fraunhofer scompose la luce solare nello spettro dei suoi colori costituenti, ognuno dei quali rappresenta un'onda luminosa di una particolare lunghezza, e vi osservò delle righe scure, zone in cui la luce di quella specifica lunghezza d'onda sembrava mancare (linee spettrali).
- Nel 1859 il fisico tedesco Gustav Robert Kirchhoff provò che le linee spettrali potevano essere causate da materia gassosa relativamente fredda interposta tra la vera sorgente di luce e noi.
- Se le linee spettrali visibili nello spettro del sole erano prodotte dalle sostanze allo stato gassoso presenti nella sua atmosfera, che interferivano con la radiazione proveniente dalle regioni più interne, allora era possibile utilizzarle per dedurre la composizione chimica della nostra stella.



Energia gravitazionale

- Ma qual era la sorgente di energia del sole e, più in generale, delle stelle?
- Il primo a cercare una soluzione ragionevole al problema fu, nel 1854, il fisico tedesco Hermann L.F. von Helmholtz. Egli teorizzò che ogni stelle, compreso il sole, si contraesse lentamente e l'energia gravitazionale così prodotta venisse liberata sotto forma di luce. Helmholtz calcolò che una riduzione nel diametro del sole di appena 1/10 000 gli avrebbe fornito l'energia necessaria per irradiare luce al ritmo attuale per 2000 anni.
- In seguito l'idea fu ripresa dal fisico inglese William Thomson (Lord Kelvin), il quale stabilì che se il sole stesse ottenendo energia dalla contrazione la terra non potrebbe essersi formata più di 50 milioni di anni fa, poiché allora il sole era tanto esteso da includere l'orbita terrestre. Il pianeta, inoltre, avrebbe impiegato almeno altri 20 milioni di anni a raffreddarsi, così che la terra poteva avere l'aspetto attuale da non oltre 30 milioni di anni.



L'ipotesi nebularare

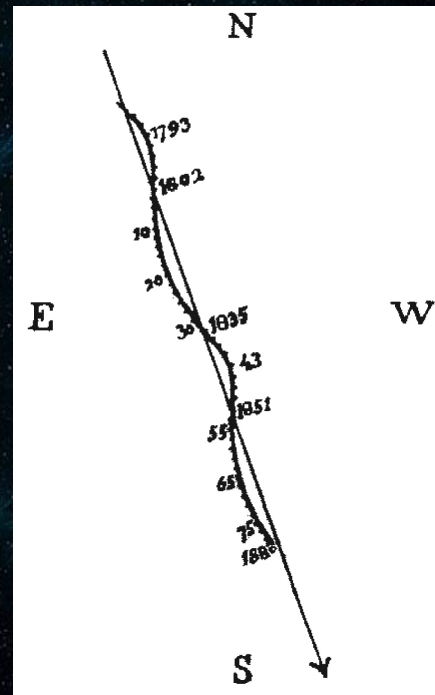
- La teoria di Helmholtz concordava con l'ipotesi avanzata nel 1755 dal filosofo tedesco Immanuel Kant sull'origine del nostro sistema solare. Kant riteneva che il sole e i pianeti si fossero formati a partire da una grande nube di materia rarefatta, che si condensò in una struttura a vortice al cui centro sarebbe nato il sole e dalla materia in rotazione attorno a quest'ultimo avrebbero tratto origine i pianeti.
- L'ipotesi di Kant fu ripresa nel 1798 dal fisico francese Pierre-Simon de Laplace, che ne fornì una descrizione più dettagliata e indicò l'oggetto noto allora come "nebulosa di Andromeda" in qualità di esempio di sistema solare in formazione (allora la si considerava una semplice nube di gas in rotazione).
- Poiché all'origine del sistema solare ci sarebbe stata una nube gassosa e Laplace proponeva come esempio di tale processo la nebulosa di Andromeda, la teoria di Kant e Laplace fu designata col nome di ipotesi nebularare.



D. Berry, STScI

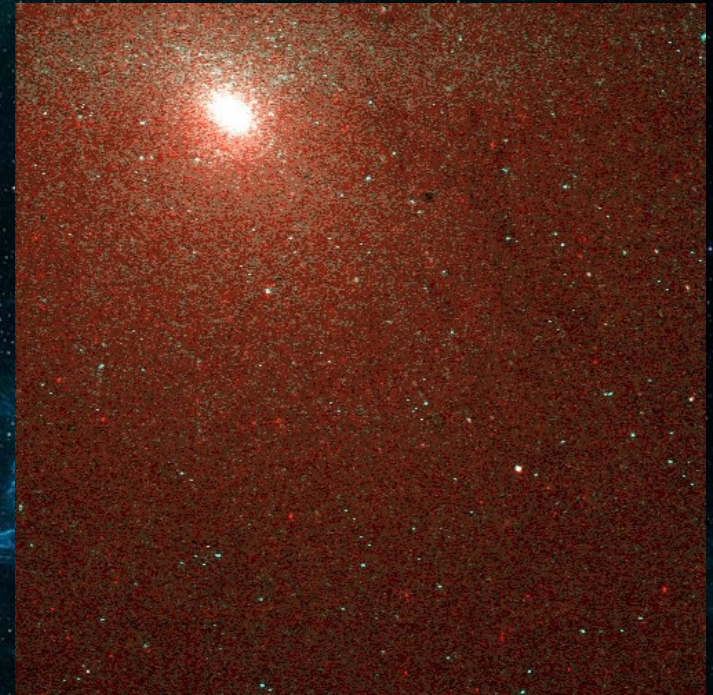
La compagna oscura di Sirio

- Nel 1718 l'astronomo inglese Edmond Halley annunciò di aver scoperto che le stelle non erano "fisse" com'erano state considerate fino a quel momento, ma si muovevano l'una rispetto all'altra come api in uno sciame. Le distanze cosmiche, tuttavia, erano così grandi da far apparire tale movimento impercettibilmente lento e apprezzabile solo su archi temporali di secoli. Halley aveva infatti osservato che le stelle più luminose erano considerevolmente spostate dalle posizioni in cui le avevano indicate gli antichi astronomi greci.
- Nel 1844 l'astronomo tedesco Friedrich Wilhelm Bessel scoprì che la stella Sirio, durante il proprio moto attraverso lo spazio, non procedeva in linea retta ma seguiva una traiettoria curvilinea, come se ondeggiasse. Bessel capì che questo ondeggiare era causato da una stella compagna alla quale Sirio era legata dalla gravità, troppo flebile per poter essere osservata. Tutto quello che ne lasciava presagire l'esistenza era il movimento ondeggiante che la sua gravità induceva sulla compagna luminosa.
- Nel 1862 il costruttore di telescopi americano Alvan Graham Clark individuò casualmente la cosiddetta compagna oscura di Sirio, che si dimostrò essere una debole stellina di magnitudine 8,4 eclissata dalla soverchiante luminosità della vicina. Per apparire tanto fioca a quella distanza la compagna oscura doveva essere intrinsecamente 400 volte meno luminosa del sole. Si pensò quindi che si trattasse di una stella fredda, ormai prossima a esaurirsi, e venne battezzata Sirio B (mentre la componente luminosa del sistema è stata rinominata Sirio A).



S Andromedae

- Il 20 agosto 1885 l'astronomo tedesco Ernst Hartwig osservò una nuova stella apparire nella regione centrale della nebulosa di Andromeda. All'inizio pensò di stare assistendo alla nascita del sole al centro della nebulosa, se quest'ultima era davvero un sistema solare in via di formazione come aveva proposto Laplace. Ma dopo aver raggiunto una magnitudine massima di 7,2, la stella tornò a indebolirsi fino a sparire. Si trattava quindi di una nova, che tempo dopo venne battezzata S Andromedae.
- Ma perché la S Andromedae era una nova tanto flebile (anche al massimo non fu mai visibile a occhio nudo)? E il fatto che fosse apparsa nella nebulosa di Andromeda era soltanto una coincidenza, per cui in realtà si trovava ben al di qua o molto oltre la nebulosa, oppure si trattava veramente di un fenomeno ad essa associato? E qualora il caso fosse quest'ultimo, come poteva essersi originata una nova al centro di un sistema solare in formazione?



SEDS

La radioattività

- Nel 1896 il fisico francese Antoine-Henry Becquerel scoprì che i pesanti atomi di uranio tendono molto lentamente a disintegrarsi, riducendosi in atomi più leggeri.
- Negli anni seguenti la fisica e chimica franco-polacca Marya Skłodowska (poi Marie Curie) isolò altri due atomi che mostravano un simile comportamento (polonio e radio), cui diede il nome di radioattività.
- Nel 1901 il fisico francese Pierre Curie dimostrò che la disintegrazione radioattiva era accompagnata dall'emissione di minuscole quantità di calore.
- Nella terra sono presenti percentuali non trascurabili di atomi radioattivi, la cui lenta disintegrazione avrebbe certamente liberato sufficiente calore da rallentare in modo sostanziale il raffreddamento del pianeta poco dopo la sua formazione. La terra, perciò, non poteva avere poche decine di milioni di anni, ma come minimo molte centinaia di milioni di anni. E questo metteva in crisi la teoria secondo cui il sole otterrebbe energia dalla contrazione.



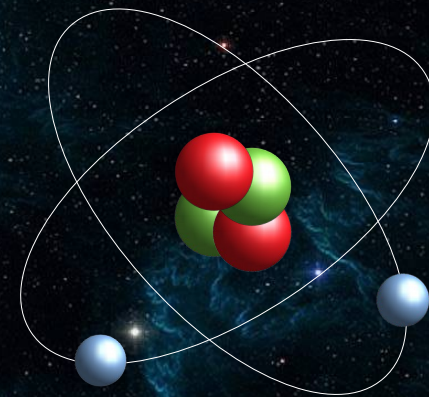
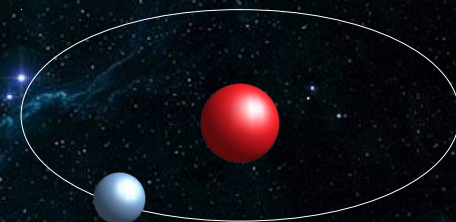
La composizione delle stelle

- Se la radioattività riusciva a produrre calore tanto a lungo, non poteva il sole essere semplicemente un'enorme palla di uranio (o elementi radioattivi simili) resa incandescente dalla disintegrazione radioattiva degli atomi al suo interno?
- Purtroppo questo non era possibile. Negli anni venti l'astronoma americana Cecilia Helena Payne dimostrò, analizzando le linee spettrali, che il sole e tutte le stelle erano costituite principalmente da idrogeno ed elio, i due elementi chimici più semplici e comuni nell'universo. Su 1000 atomi presenti nel sole, 920 sono di idrogeno e 80 di elio; meno di un atomo su mille è di qualche altra specie. Ma allora, cosa poteva alimentare le stelle?



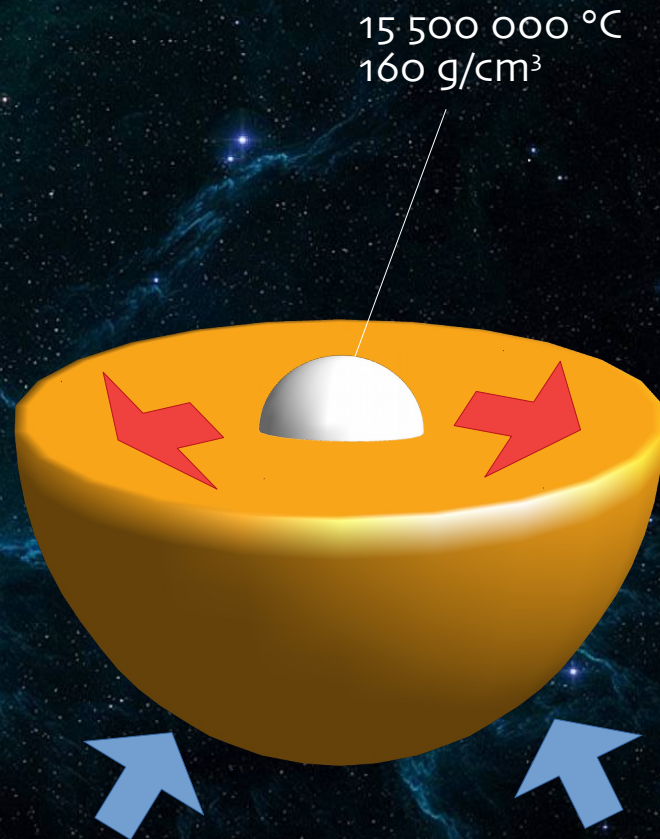
L'energia nucleare

- Nel 1906 il fisico neozelandese Ernest Rutherford dimostrò che l'atomo non è una struttura compatta, ma consta di un piccolissimo nucleo centrale circondato da una rarefatta nuvola di particelle subatomiche dotate di carica elettrica negativa che gli ruotano intorno, chiamate elettroni. In seguito si comprese che il nucleo è formato a sua volta da due tipi di particelle subatomiche: i protoni, carichi positivamente, e i neutroni, privi di carica elettrica. È il numero di protoni presenti nel nucleo che determina la specie atomica: l'idrogeno ha un solo protone nel nucleo ed è il primo elemento chimico, l'elio ne ha due ed è il secondo, e così via.
- Le disintegrazioni radioattive, trasformando una specie atomica in altre, avvengono a livello del nucleo atomico. Per questa ragione si iniziò a parlare di energia nucleare.



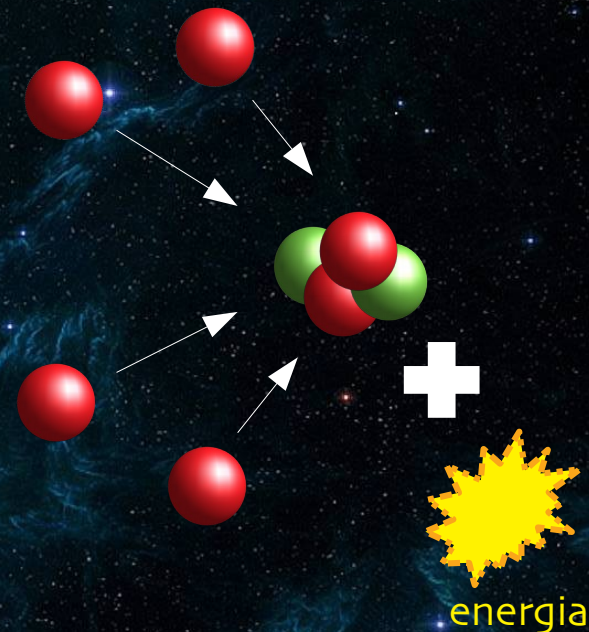
L'energia nucleare

- Nel 1915 il chimico americano William Draper Harkins ipotizzò che il sole e le stelle in generale potessero trarre energia da una reazione nucleare in cui quattro nuclei di idrogeno (con un protone ciascuno) si uniscono per formare un nucleo di elio (con due protoni). Tuttavia, mentre la disintegrazione di nuclei atomici pesanti avviene spontaneamente, questa fusione dell'idrogeno avrebbe richiesto condizioni molto particolari, con temperature e densità elevatissime.
- Nel 1920 Eddington capì che la sola forza che poteva impedire ad una stella di contrarsi per effetto della gravità era la pressione dovuta al calore. Mediante calcoli teorici arrivò a stabilire che al centro del sole la temperatura e la densità dovevano raggiungere valori incredibilmente grandi.



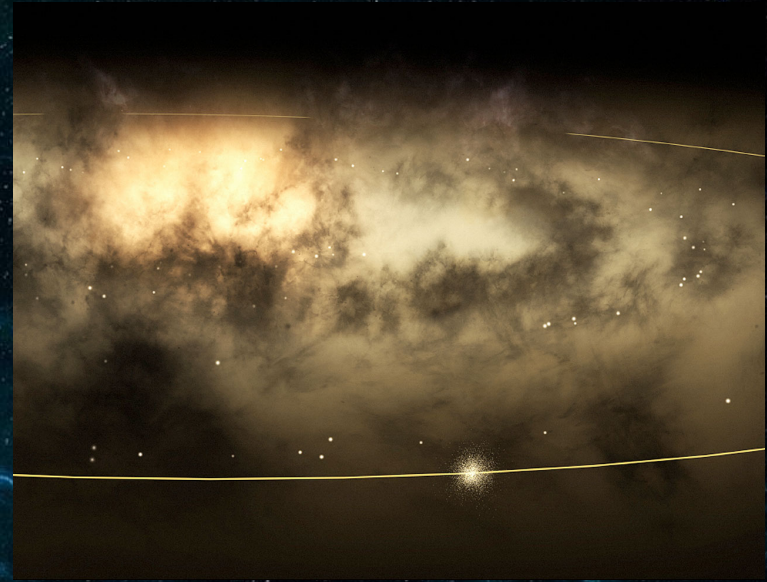
L'energia nucleare

- Secondo Eddington alle condizioni di temperatura e densità vigenti nel nucleo solare gli atomi si sarebbero frantumati, formando un miscuglio di nuclei atomici immersi in una sorta di densissimo "fluido di elettroni". Questo sistema di particelle, che nonostante l'enorme densità continua a comportarsi come un gas, venne definito materia degenerata dal fisico americano Ralph Howard Fowler nel 1926.
- Nella materia degenerata i nuclei dell'idrogeno sono così vicini tra loro e si muovono tanto freneticamente da avere una qualche probabilità, per quanto piccola, di combinarsi nel modo pensato da Harkins.
- I dettagli del processo di fusione dell'idrogeno furono infine descritti nel 1938 dal fisico tedesco-americano Hans Bethe.



La Galassia

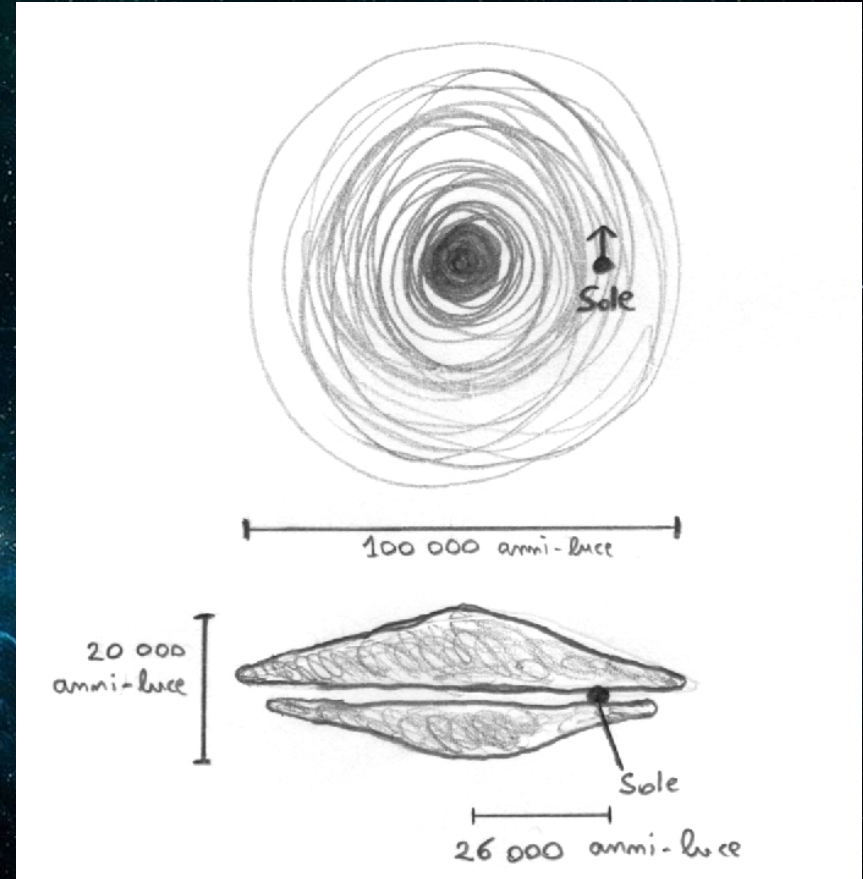
- Fino agli anni venti del secolo scorso si pensava che la sola concentrazione di materia nell'universo fosse la Galassia, che appare nel cielo notturno come la banda di luce biancastra della Via lattea. L'unica eccezione erano due nebulosità osservate dagli europei nel 1520 durante la spedizione di Ferdinando Magellano in Estremo Oriente, visibili nei cieli australi; oggi sono note come le "nubi" di Magellano.
- Nel 1785 l'astronomo inglese di origine tedesca William Herschel provò a mappare la Galassia dedicandosi a un conteggio delle stelle visibili in varie parti di cielo. Ciò che ottenne fu una struttura appiattita dal profilo irregolare, con il sistema solare al centro.
- Nel 1918 l'astronomo americano Harlow Shapley osservò le variabili cefeidi presenti in alcuni ammassi di stelle che avvolgono in un alone il piano della Galassia e, dalla loro distribuzione, dedusse che il sistema solare occupava una posizione decisamente periferica nella struttura a disco della Galassia.



ESO

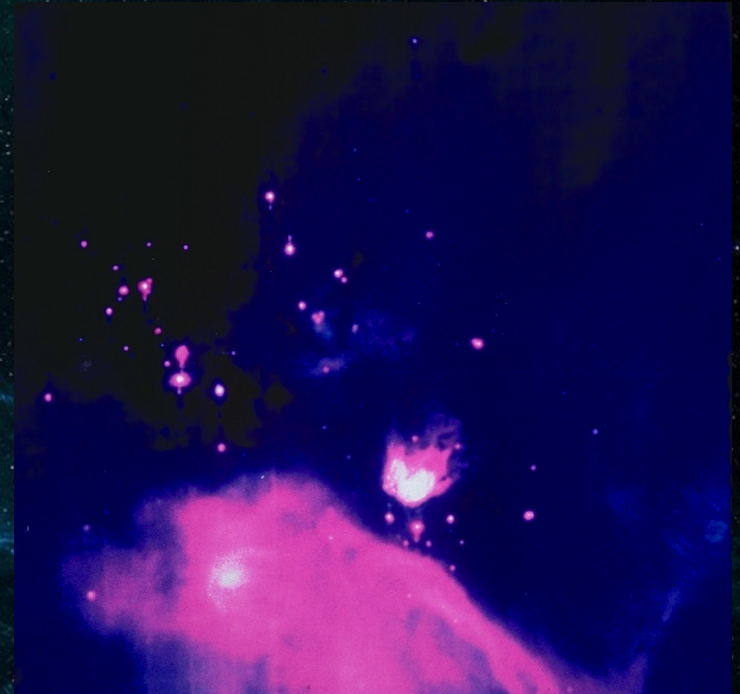
La Galassia

- Shapley tuttavia sovrastimò le dimensioni della Galassia, poiché non sapeva che lo spazio contiene polveri la cui estrema rarefazione non impedisce loro di indebolire la luce di stelle lontane, anche al punto di renderle invisibili. Per questo attribuì la minore luminosità delle cefeidi ad una maggiore distanza, giungendo a un risultato errato.
- Nel 1926 l'astronomo olandese Jan Oort studiò il moto che le stelle vicine al sole seguono intorno al centro della Galassia e riuscì in questo modo a ottenerne le corrette proporzioni. La Galassia ha la forma di un'enorme lente con un diametro di 100 000 anni-luce e uno spessore al centro di 20 000 anni-luce. Il sole dista dal centro 26 000 anni-luce e, nella sua posizione, lo spessore della Galassia si è ridotto a circa 3000 anni-luce.



Le nebulose

- Dal momento in cui furono disponibili telescopi abbastanza potenti, gli astronomi iniziarono a osservare degli oggetti celesti che non erano stelle. Per via del loro aspetto vago e indefinito vennero chiamati nebulose.
- Alcune nebulose si rivelarono poi essere degli ammassi di stelle troppo addensate per poter essere risolte con facilità.
- Altre, come la nebulosa in Orione (M42) scoperta dall'astronomo olandese Christian Huygens nel 1694, non sembravano altro che nubi di gas e polvere illuminate dalla radiazione delle stelle vicine o al loro interno (nebulose luminose). Quando fu possibile analizzarne lo spettro questa intuizione si rivelò esatta.
- Vi erano anche alcune nubi che apparivano come zone buie prive di stelle, descritte da Herschel come "buchi nel cielo". Si comprese in seguito che tali regioni dovevano la loro oscurità ad una concentrazione particolarmente elevata di polveri che occultavano la luce delle stelle retrostanti o in esse contenute (nebulose oscure).



Le nebulose

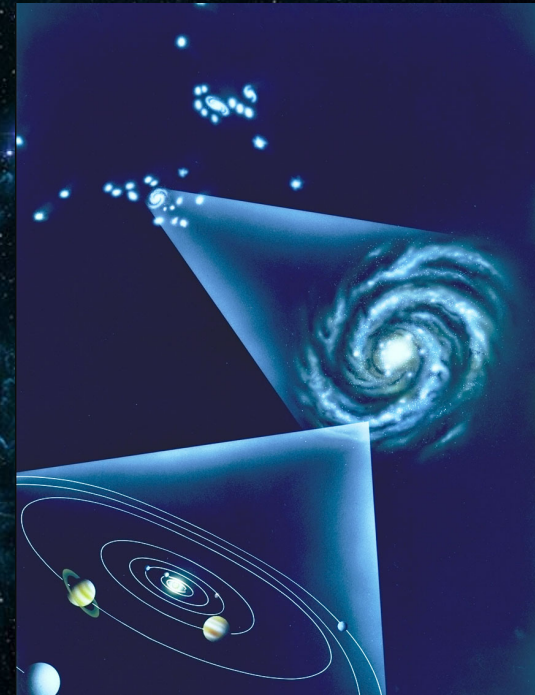
- Nel 1611 l'astronomo tedesco Simon Marius osservò per la prima volta al telescopio una piccola nebulosità nella costellazione di Andromeda. Poi, nel 1781, l'astronomo francese Charles Messier incluse la nebulosa di Andromeda in un catalogo dove inserì decine di oggetti non stellari affinché non potessero venire scambiati per delle comete. La nebulosa in questione era al trentunesimo posto, nel catalogo, e viene per questo chiamata M₃₁.
- Nel 1845 l'astronomo irlandese William Parsons (terzo conte di Rosse) scoprì che alcune nebulose, fra cui la M₃₁, mostravano una struttura a spirale (nebulose spirali). Altre, invece, apparivano di forma tondeggiante (nebulose ellittiche).
- Quando si esaminò lo spettro della M₃₁, nel 1899, emerse che la sua luce assomigliava a quella delle stelle in genere e non aveva le caratteristiche della luce emessa dalle nebulose luminose, come quella in Orione. Poiché mostravano una luce bianca, e non limitata a pochi colori di certe lunghezze d'onda, le nebulose spirali ed ellittiche vennero denominate nebulose bianche.



D. Berry/STScI

Gli universi-isola

- Già a metà del XVIII secolo Kant aveva immaginato l'esistenza, nel cosmo, di immensi agglomerati di stelle, enormemente lontani gli uni dagli altri, e che solo uno di questi contenesse tutte le stelle visibili nel cielo notturno. Kant chiamò questi ammassi di materia col nome di universi-isola.
- Quando Hartwig avvistò la S Andromedae nella M31, la natura delle nebulose bianche iniziò ad essere messa in discussione: si trattava di semplici nubi di gas e polvere della Galassia, o piuttosto di ammassi stellari posti a grandissime distanze da noi come gli universi-isola di Kant?
- Dal 1917 l'astronomo americano Herbert Doust Curtis individuò decine di novae apparentemente associate alla M31. Come potevano tante novae, peraltro insolitamente fioche, essere apparse tutte nella direzione della M31 se quest'ultima altro non era che una nube di gas e polveri relativamente vicina e facente parte della Galassia? Questo bastò a Curtis per convincerlo che le nebulose bianche erano veramente gli universi-isola profetizzati da Kant. Il 26 aprile 1920 Curtis e Shapley (convinto sostenitore dell'unicità della Galassia nell'universo) si confrontarono in un celebre dibattito sull'argomento alla National Academy of Sciences.
- Nel 1924 l'astronomo americano Edwin Powell Hubble scoprì delle variabili cefeidi nella M31. Ciò gli permise di calcolarne la distanza, che risultò molto maggiore rispetto alle dimensioni della Galassia. Fu la prova che le nebulose bianche erano, in realtà, altre galassie.



Disegno di
Michelangelo Miani

Una stella fra molte, una galassia fra molte

- Con la scoperta di Hubble la nostra concezione dell'universo cambiò in modo tanto radicale quanto lo era stato nella rivoluzione copernicana.
- Da allora è diventato di uso comune chiamare la Galassia come il suo aspetto nei nostri cieli notturni: così la nostra galassia è oggi denominata Via lattea.
- Le nebulose bianche furono ribattezzate dapprima con l'espressione "nebulose extragalattiche", e infine con il moderno termine "galassie" (generalizzazione di Galassia).
- Il sole diviene così solo una fra le centinaia di miliardi di stelle della Via lattea, e la Via lattea solo una delle centinaia di miliardi di galassie dell'universo osservabile.



Esplosioni di stelle

- Nel 1731 l'astronomo inglese John Bevis osservò una tenue nebulosità nella costellazione del Toro. Anche Messier l'aveva notata e la inserì al primo posto nel proprio catalogo, così che oggi la conosciamo come M1.
- Nel 1844 Lord Rosse studiò attentamente la M1 col suo telescopio e vi ravvisò le caratteristiche di una nube di gas turbolenti, forse il resto di una grande esplosione. Per il suo aspetto filamentoso, le cui frange gli ricordavano delle chele, la chiamò nebulosa granchio.
- Nel 1921 l'astronomo americano Charles Duncan confrontò una propria fotografia della M1 con una scattata molti anni prima e scoprì che la nebulosa granchio è in espansione.
- Hubble partì dalle osservazioni di Duncan e mise in relazione la M1 con la nova osservata dai cinesi nell'anno 1054. Con un semplice calcolo dimostrò che l'espansione della nube era iniziata circa 900 anni prima, confermando così la propria intuizione.



NASA

Esplosioni di stelle

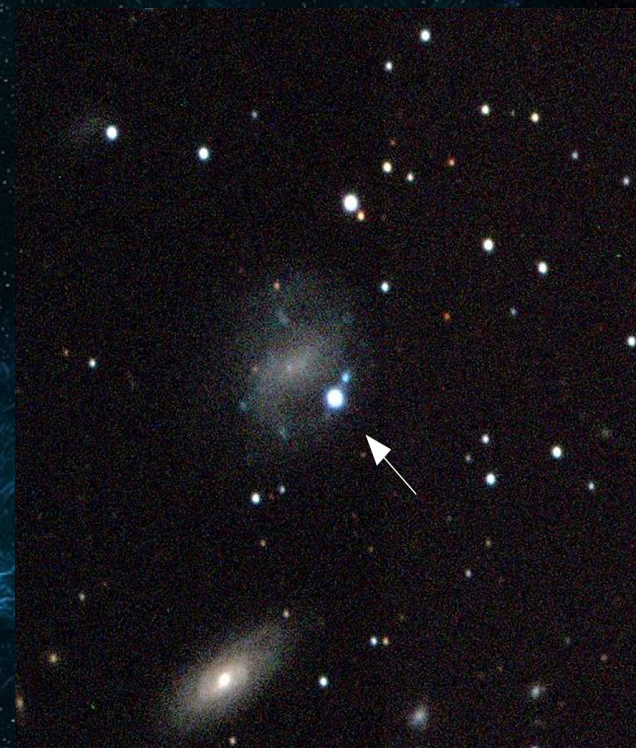
- Nel 1901 apparve una nova alquanto luminosa nella costellazione di Perseo (nova Persei), che all'acme raggiunse una magnitudine di 0,2 (quanto la stella Vega). Un quindicennio dopo, nel 1916, grazie alla fotografia astronomica si scoprì che la nova Persei era circondata da un anello di gas e polvere che si andava espandendo. Era perciò evidente che la stella, e ogni nova in genere, aveva subito una colossale esplosione stellare.
- Nel 1918 un'altra nova di tutto rispetto si accese nella costellazione dell'Aquila (nova Aquilae), raggiungendo una magnitudine massima di $-1,1$ (quasi quanto Sirio). In seguito si scoprì che della stella prima che divenisse una nova (pre-nova) era stato registrato lo spettro. Quest'ultimo rivelava solo che la progenitrice era una stella molto calda, con una temperatura in superficie di $12\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (contro i $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$ del sole), il che aveva una sua logica: gli astronomi, sebbene ignorassero i processi causa dell'esplosione, pensavano fosse più probabile che a esplodere fossero delle stelle calde e non fredde.
- Alcune novae, per di più, si riaccesero a distanza di molti anni, dimostrando che una stella poteva andare soggetta più di una volta al fenomeno (novae ricorrenti).



NASA/HST

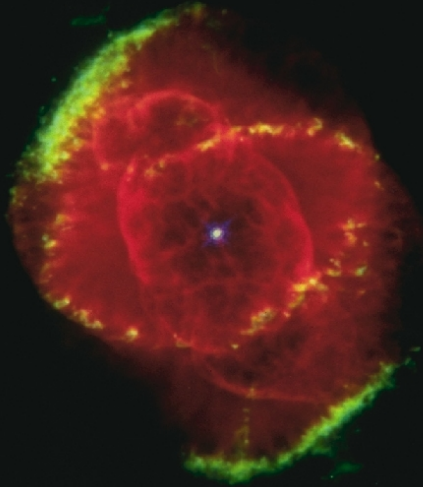
Supernove

- Quando si scoprì quanto distante fosse in realtà la M31, lontana 2,5 milioni di anni-luce, gli astronomi rimasero stupefatti della luminosità che la S Andromedae doveva possedere per poter essere vista dalla terra a una magnitudine di 7,2. Fu facile stabilire, una volta nota la reale distanza da noi della M31, che quella nova aveva emesso una luce fino a 20 miliardi di volte quella del sole.
- Il fisico svizzero Fritz Zwicky, all'inizio degli anni trenta, scoprì molti di questi eventi straordinariamente luminosi in altrettante galassie, notando che essi divenivano, al massimo, più luminosi di tutta la galassia ospite. Zwicky, per definire queste colossali esplosioni stellari, coniò il termine supernova.
- Presto fu chiaro che le novae osservate negli anni 183, 386, 393, 1006, 1054, 1181, 1572 e 1604 erano delle supernove esplose nella Via lattea. Si tratta di eventi rari, dato che in galassie come la nostra se ne verifica mediamente uno ogni 50 anni. Molti, poi, possono venire occultati dalle nubi di polvere che abbondano in direzione del centro galattico, il che spiega perché l'ultima supernova visibile nella Via lattea sia stata quella del 1604.



ESO

Parte IV – L'evoluzione delle stelle



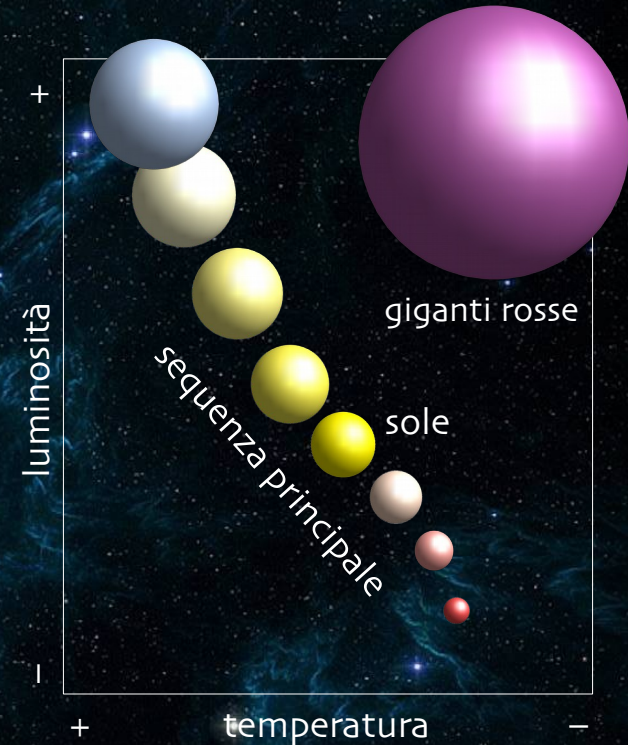
NASA/STScI



ESO/M. Kornmesser

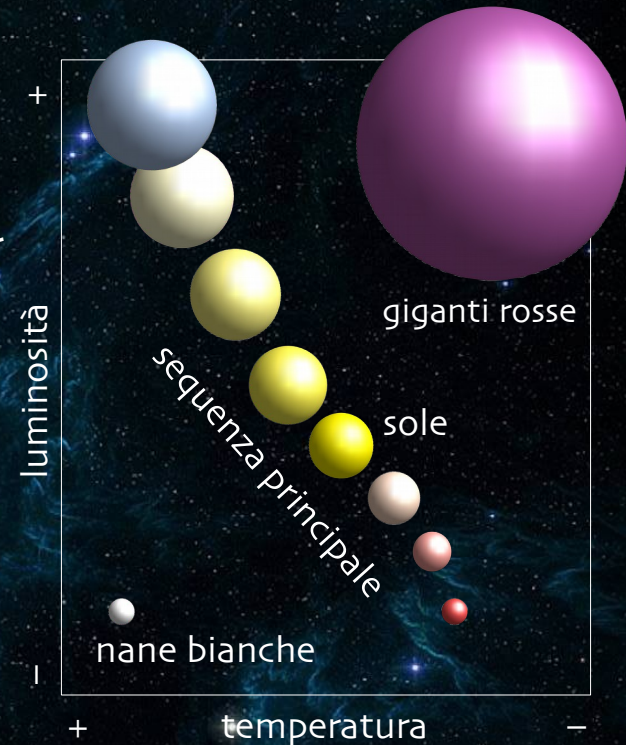
Sequenza principale e giganti rosse

- Nel 1905 l'astronomo danese Ejnar Hertzsprung portò avanti uno studio in cui veniva messa in relazione la luminosità intrinseca delle stelle con la loro temperatura superficiale, e quindi con il loro colore.
- Le stelle più calde brillano di una luce al calor bianco, come il nostro sole, mentre quelle più fredde emettono luce al calor rosso. Le prime hanno temperature superficiali grosso modo comprese fra 5000 e 50 000 °C, le seconde fra 2000 e 4000 °C.
- Hertzsprung scoprì che più del 90% delle stelle era tanto più luminosa quanto maggiore era la sua temperatura in superficie. Le stelle con questa caratteristica furono definite "sequenza principale".
- Ma vi erano anche delle stelle, molto più rare, che nonostante emettessero luce al calor rosso (e dunque fossero relativamente fredde) apparivano molto luminose. Hertzsprung capì che per irradiare tanta luce a dispetto della bassa temperatura quelle stelle dovevano essere grandissime. Per questo motivo furono denominate giganti rosse.



Nane bianche

- Nel 1914 l'astronomo americano Walter Sydney Adams esaminò lo spettro di Sirio B e, inaspettatamente, scoprì che non si trattava di una stella fredda e oscura: la compagna di Sirio aveva una temperatura superficiale di 10 000 °C e brillava di una luce al calor bianco. Ma come poteva una stella tanto calda apparire così flebile? L'unica soluzione era ammettere che fosse incredibilmente piccola, con un diametro non superiore agli 11 100 km. La terra, per contro, ne misura quasi 12 800, quindi Sirio B è una stella di dimensioni perfino inferiori a quelle del nostro pianeta.
- Ma dall'orbita che essa percorreva assieme alla compagna Sirio A, ne derivava che a dispetto della sua piccolezza Sirio B possedeva una massa eguale a quella del sole. Si trattava perciò di un oggetto densissimo, tanto che un cm³ della sua materia, qui sulla terra, peserebbe varie tonnellate. Sirio B doveva essere una stella interamente costituita da materia degenerata e per le sue peculiarità (grande massa e piccolo volume) fu uno dei primi esemplari di stelle collassate mai scoperti.
- Le stelle simili a Sirio B, caldissime ma deboli per le loro ridotte dimensioni, furono battezzate nane bianche.



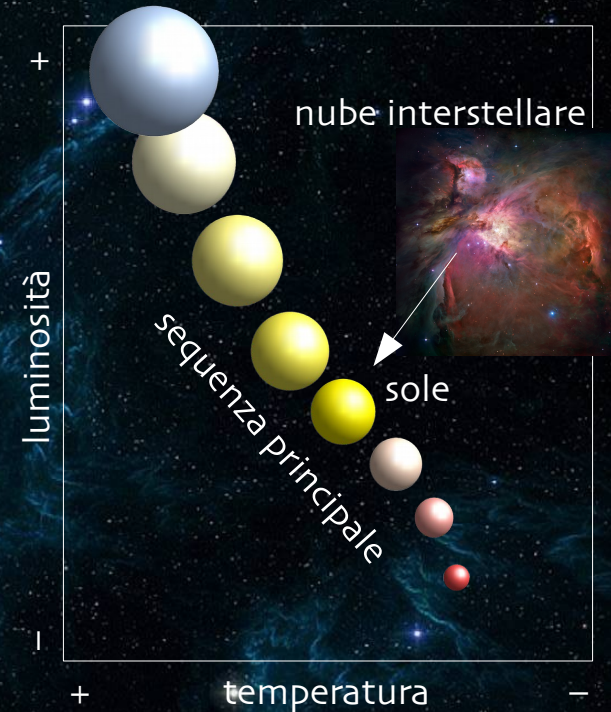
Durata della sequenza principale

- Presto si comprese che le stelle della sequenza principale erano quelle nel cui nucleo avveniva la fusione dell'idrogeno in elio, ad una temperatura compresa fra 10 e 50 milioni di °C.
- La sequenza principale è la fase più lunga e stabile nell'evoluzione di una stella.
- Eddington fece osservare che, paradossalmente, le stelle della sequenza principale di massa maggiore, e quindi con più idrogeno nel nucleo, sono quelle che ne restano prive in tempi minori. Difatti più grande è la massa di una stella e maggiore dev'essere il calore necessario a contrastarne la più forte gravità, calore che la stella ottiene a prezzo di una fusione più rapida del suo idrogeno.



Durata della sequenza principale

- A partire da questo semplice fatto, Eddington derivò una relazione massa-luminosità: più grande e calda è una stella della sequenza principale, e maggiore è la sua luminosità intrinseca.
- Si tratta di una relazione radicale, poiché la luminosità di una stella aumenta secondo la massa elevata alla sesta o alla settima potenza. A titolo esemplificativo, se la massa della stella raddoppia la sua luminosità cresce di circa 90 volte.
- Conoscendo la massa del nostro sole, avendone modellato su basi teoriche la struttura interna e il funzionamento, sappiamo che dalla sua formazione ha davanti a sé almeno dieci miliardi di anni di fusione dell'idrogeno. Le più piccole e pallide stelle della sequenza principale, invece, dispongono con tanta parsimonia del loro scarso idrogeno da poterne usufruire per anche 200 miliardi di anni o più (dieci volte l'età attuale dell'universo). D'altra parte le stelle della sequenza principale più grandi e luminose sperperano così velocemente le vaste riserve di idrogeno che hanno a disposizione da esaurirle in non più di un paio di milioni di anni (un periodo 5000 volte inferiore rispetto al sole).



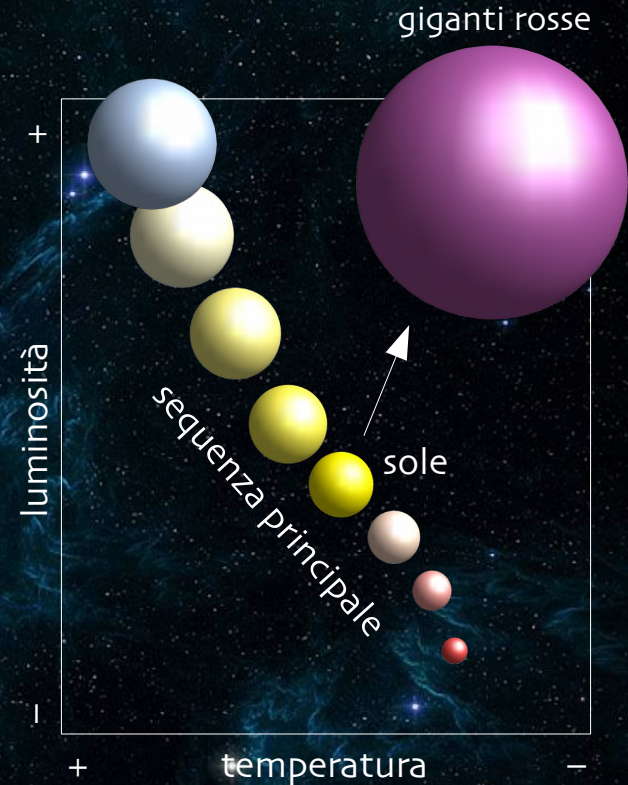
La metamorfosi in gigante rossa

- Ma cosa avviene quando una stella, quale che sia la sua massa, esaurisce l'idrogeno nel nucleo?
- Il primo a trovare una risposta fu un astronomo estone, Ernst Öpik, nel 1938. Senza idrogeno la fusione si interrompe, il nucleo si raffredda e la gravità prevale sulla pressione dovuta al calore. Il nucleo inizia quindi a restringersi. I nuclei di elio entrano in collisione sempre più frequentemente e la temperatura al centro torna ad aumentare. Arriva un momento in cui il nucleo è talmente caldo da innescare la fusione dell'idrogeno negli strati circostanti.
- Queste reazioni più superficiali non bastano ad arrestare la contrazione. Il nucleo seguita a collassare finché la sua temperatura non raggiunge i 100 milioni di °C. A questo punto può avere inizio la fusione dell'elio: i nuclei di elio si uniscono a gruppi di tre formando nuclei di carbonio.



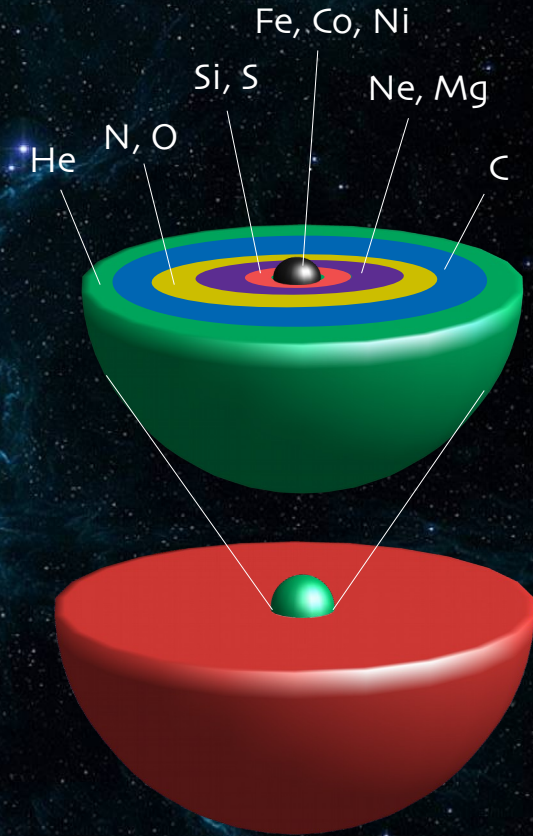
La metamorfosi in gigante rossa

- Ma poiché l'energia nucleare liberata dipende drasticamente dalla temperatura alla quale ha luogo la fusione, la stella deve fronteggiare il problema di una sovrapproduzione di calore.
- Il solo modo che ha la stella di emettere tutta l'energia prodotta al suo interno è quello di aumentare enormemente la propria superficie radiante: la stella si espande a dismisura e l'estensione della sua superficie cresce di oltre 10 000 volte, permettendole di disperdere tutto il calore in eccesso nello spazio. Ma con l'espansione l'energia termica si distribuisce su un'area molto maggiore e di conseguenza la temperatura superficiale diminuisce a un valore di circa 2000-3000 °C.
- La stella si è così trasformata in una gigante rossa.
- Per quanto ci riguarda, non abbiamo nulla di cui preoccuparci in tal senso: il sole non diventerà una gigante rossa prima di 5-8 miliardi di anni.



L'inizio della fine

- Consumato anche l'elio, e rimaste con un nucleo inerte di carbonio, le stelle abbastanza grandi riescono, mediante processi simili a quello descritto precedentemente, a innescare la fusione di elementi ancora più pesanti.
- In queste stelle il carbonio si fonde in azoto e ossigeno, l'ossigeno in neon e magnesio, il magnesio in silicio e zolfo, e infine il silicio in ferro, cobalto e nichel.
- Il ferro, però, rappresenta in ogni caso un capolinea nella serie di processi di fusione che una stella può ospitare: fondere nuclei di ferro, e pure disintegrarli, è una reazione che richiede energia e non ne libera.
- Inoltre, a partire dalla fusione dell'elio, tutte queste reazioni non producono che 1/20 dell'energia che era stata liberata attraverso la fusione dell'idrogeno. Ma la gigante rossa seguita a irradiare energia a livelli insostenibili, con il risultato che in questa fase la stella ha un'esistenza limitata a pochi milioni di anni.
- C'è un momento in cui la stella non genera più calore a sufficienza da poter resistere alla propria forza di gravità e il collasso, allora, diventa inevitabile.



La metamorfosi in nana bianca

- Cosa accade quando una stella si raffredda inesorabilmente restando alla mercé della forza di gravità?
- L'attrazione gravitazionale fra le particelle della stella, non essendo più controbilanciata dal loro movimento caotico dovuto al calore, determina una contrazione centripeta dell'intera struttura stellare.
- Si pensava, inizialmente, che il destino ultimo di qualsiasi stella fosse quello di trasformarsi in una nana bianca. Ma come ciò avvenisse, nei dettagli, non fu del tutto chiaro fino agli anni cinquanta.
- Nel collasso, l'involuppo più esterno della stella, ancora ricco di idrogeno ed elio, viene compresso e riscaldato al punto da innescarvi la fusione. Il lampo di energia conseguente proietta una parte della materia presente negli strati superficiali nello spazio.



NASA

La metamorfosi in nana bianca

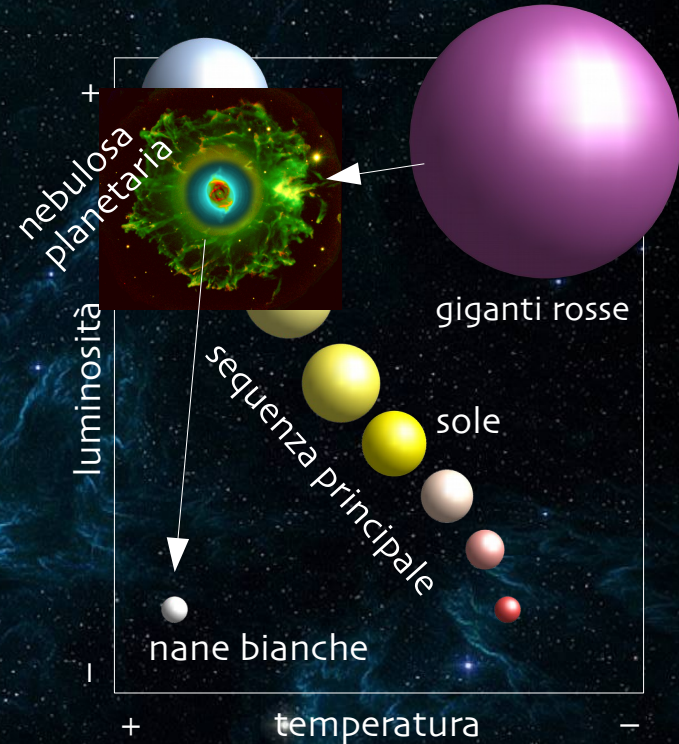
- La radiazione della stella collassata illumina la nube di gas in espansione che l'avvolge, prodotta nell'esplosione, rendendola visibile fin quando, nel giro di circa 100 000 anni, non diviene troppo rarefatta da poter essere distinta. Di queste nubi, tipicamente sferiche, noi vediamo principalmente i margini poiché è qui che la nostra linea visuale incontra un maggior spessore di gas.
- Tali formazioni, con una caldissima e minuscola stella al centro circondata da un "anello di fumo", erano già state osservate da Herschel alla fine del XVIII secolo. Furono chiamate nebulose planetarie, in quanto la stella centrale è avvolta dall'anello di fumo analogamente a un pianeta come Saturno, che è circondato da degli anelli planetari.
- Fu solo nel 1956 che l'astronomo russo Iosif Šklovskij riconobbe nelle nebulose planetarie la fase evolutiva intermedia fra lo stadio di gigante rossa e quello di nana bianca.



ESO

Il *rigor mortis* di una stella ordinaria

- Ultimata la fase di collasso, la stella appare quindi come una nana bianca. Non ospitando più reazioni di fusione, essa risplende debolmente grazie al calore residuale prodotto quando ancora era attiva e nel corso della contrazione.
- Con il passare del tempo la nana bianca irradia la sua energia termica nello spazio e si raffredda al punto da non emettere più luce visibile. Diventa così una nana nera. Ma si tratta di un *rigor mortis* stellare infinitamente lungo, la cui durata è nell'ordine dei miliardi di anni. È dunque possibile che l'universo non sia abbastanza vecchio, con i suoi 14 miliardi di anni, perché già siano potute formarsi molte nane nere, o addirittura potrebbero non essersene formate affatto.



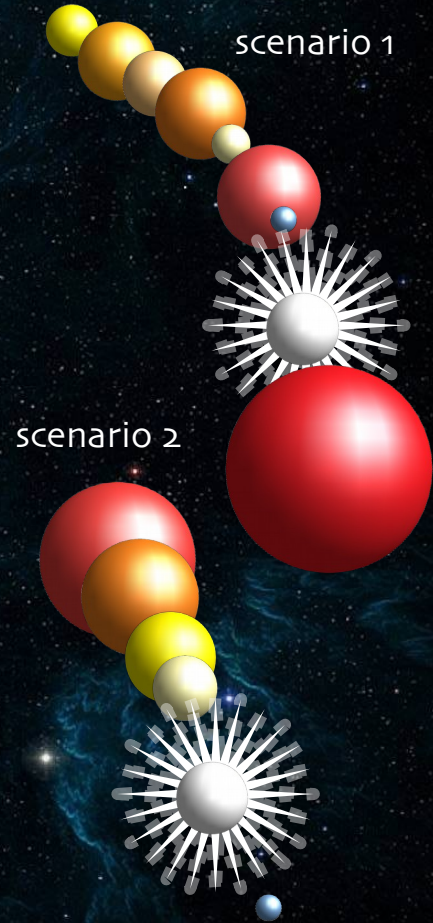
Il limite di Chandrasekhar

- Ma se una nana bianca non produce più alcuna fusione, cosa le impedisce di collassare ulteriormente sotto la spinta della gravità? Verso la fine degli anni venti il giovane astronomo indiano Subrahmanyan Chandrasekhar capì che la nana bianca doveva essere stabilizzata dalla pressione esercitata dai suoi elettroni. Nella materia degenerata, di cui una nana bianca è in larga parte composta, gli elettroni sono già quasi a ridosso dei nuclei atomici. Poiché essi hanno tutti carica elettrica negativa, se posti abbastanza vicini tra loro la reciproca repulsione elettrica può diventare abbastanza forte da contrastare la forza gravitazionale. Perciò dev'essere questa pressione elettronica che mantiene dilatata una nana bianca, nonostante quest'ultima continui a raffreddarsi fino allo stadio finale di nana nera.
- Nel 1931, però, Chandrasekhar stabilì che la pressione degli elettroni non avrebbe potuto sostenere la gravità di una stella fredda con una massa superiore a 1,44 masse solari. Cosa sarebbe avvenuto, quindi, se una gigante rossa fosse collassata riuscendo a mantenere una massa maggiore di questo limite (limite di Chandrasekhar)? Secondo Chandrasekhar nulla avrebbe più potuto ostacolare il collasso gravitazionale, che pertanto sarebbe proseguito indefinitamente. Ma quasi nessuno, nella comunità scientifica, credette allo scenario di una stella che collassa all'infinito.



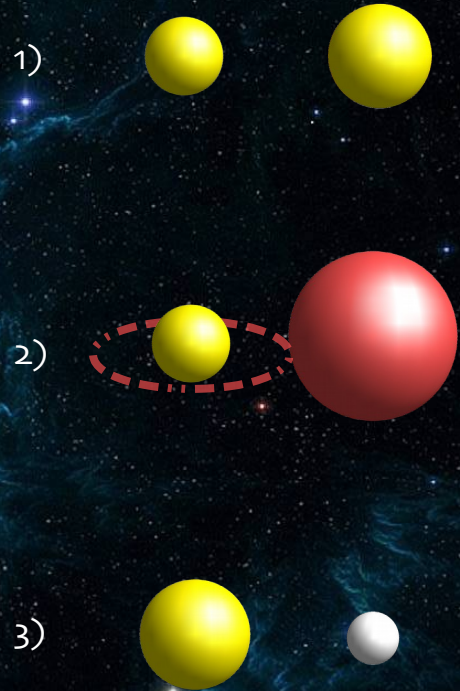
Il sole: una futura nova?

- Ma, prima di continuare, dovremmo chiederci: può l'evoluzione di una stella, com'è stata descritta finora, fornire una spiegazione al fenomeno, se non delle supernove, quanto meno a quello delle novae ordinarie?
- La risposta è sì, naturalmente, e così pensavano gli astronomi già nella prima metà del secolo scorso. Ma come e quando una stella ordinaria, come il sole, può diventare una nova? All'inizio furono valutati due differenti scenari.
- Era possibile che una stella sul punto di esaurire l'idrogeno attraversasse un periodo di instabilità, dovuto al progressivo rallentamento della fusione. La stella avrebbe quindi attraversato fasi alternate di espansione e collasso, divenendo una variabile pulsante come le cefeidi. Nel tempo le pulsazioni sarebbero divenute sempre più pronunciate e rapide, fino a originare vere e proprie esplosioni stellari: le novae. Poi, terminata questa fase esplosiva, la stella si sarebbe trasformata in una gigante rossa. Oppure una nova era semplicemente il lampo di luce prodotto da una gigante rossa che collassa verso lo stato di nana bianca?
- Le osservazioni, tuttavia, confutarono entrambe queste ipotesi: le stelle che producevano una nova non partivano come giganti rosse, né finivano come tali o come nane bianche.



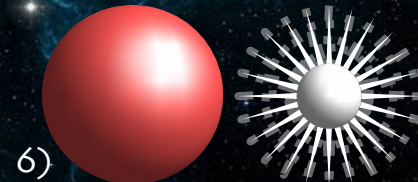
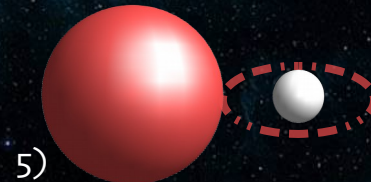
Variabili cataclismiche

- Nel 1954 l'astronomo americano Merle F. Walker scoprì che la stella DQ Herculis, divenuta una nova vent'anni prima, era una variabile a eclisse formata da una coppia di stelle molto vicine tra loro, tanto che se entrambe avessero le dimensioni del sole le loro superfici arriverebbero quasi a sfiorarsi. Studi successivi dimostrarono che tutte le novae corrispondevano a sistemi binari stretti dove una stella della sequenza principale orbita attorno al comune centro di massa con una nana bianca.
- A quel punto si poterono elaborare i modelli evolutivi che attualmente si ritiene siano all'origine delle novae. In partenza si ha un sistema binario stretto con due stelle della sequenza principale simili al sole. La più grande evolve in una gigante rossa e la compagna assorbe materia dalla sua atmosfera, accrescendo la propria massa e riducendo notevolmente la propria aspettativa di vita. La gigante, poi, collassa in una nana bianca.



Variabili cataclismiche

- La compagna, però, è ora una stella molto luminosa e prodiga del proprio idrogeno. Non passa molto che anch'essa inizia a evolvere in una gigante rossa. Stavolta è la nana bianca ad attrarre il gas della sua atmosfera. Quest'ultimo entra in orbita intorno alla nana, formando un disco di accrescimento. L'attrito, nel disco, fa irregolarmente cadere sulla nana dei flussi di idrogeno. Una volta sulla superficie della stella, l'idrogeno viene compresso e riscaldato, fino a provocarne la fusione. Questi eventi si ripetono nel tempo e, quando le condizioni lo permettono, la fusione finisce per interessare anche il disco di accrescimento. Ne consegue una grande esplosione che libera un'energia anche 100 000 volte quella del sole. Ed ecco formata una nova.
- L'esplosione non distrugge né la nana né la compagna in espansione, quindi il processo può ripetersi a distanza di secoli dando una nova ricorrente. A regola, le successive esplosioni sono sempre meno luminose e spettacolari. Compresa la vera natura delle novae, divenne naturale attribuire ai sistemi binari che ne sono l'origine l'espressione scientificamente più accurata di variabili cataclismiche.
- Il sole non è parte di un sistema binario stretto e, probabilmente, di un sistema binario qualsiasi. È una stella solitaria e come tale si estinguerà serenamente nella forma di una nana bianca senza mai diventare una nova.



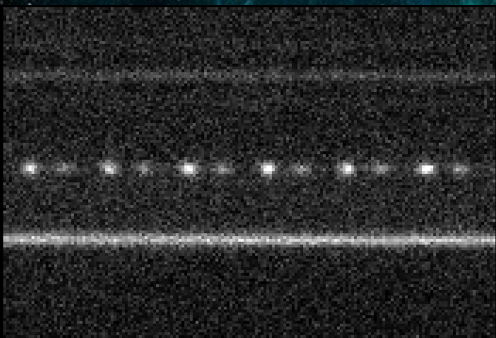
Oltre le nane bianche

- Nel 1934, poco dopo che Chandrasekhar ebbe calcolato la massa limite delle nane bianche, Zwicky si domandò cosa sarebbe accaduto a una stella qualora si fosse contratta oltre la barriera degli elettroni. Egli comprese che, a enormi densità, gli elettroni sarebbero infine entrati in contatto con i nuclei atomici. I protoni ne avrebbero assorbito la carica elettrica e il risultato sarebbe stata una grande massa fatta quasi esclusivamente da neutroni. La stella, a quel punto, sarebbe collassata fino a mettere in contatto reciproco i neutroni e solo allora avrebbe cessato di contrarsi. In questo stadio la nana bianca avrebbe assunto un diametro di soli 15 km e una densità di quasi un miliardo di tonnellate al cm^3 . Zwicky chiamò questo oggetto astronomico ai limiti dell'immaginazione stella di neutroni.
- A quell'epoca nessuno avrebbe potuto convalidare l'ipotesi di Zwicky con delle osservazioni. Quand'anche le stelle di neutroni fossero esistite e fossero state incandescenti come si pensava, avrebbero emesso così poche radiazioni a causa della loro minuscola taglia da non poter essere in alcun modo rivelate.

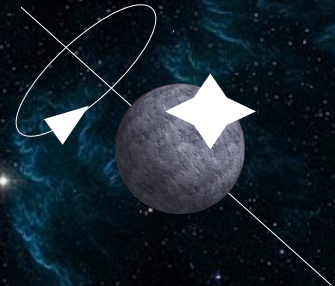
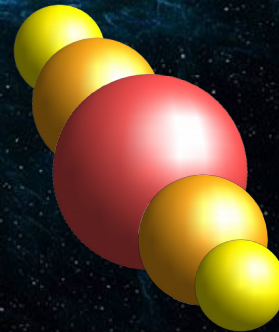
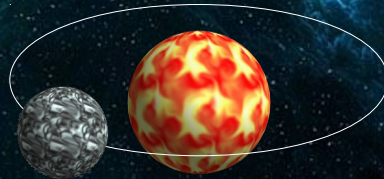


Le pulsar

- Ma nel 1967 una giovane laureata inglese, Susan Jocelyn Bell, scoprì per caso uno strano oggetto che emetteva impulsi di onde radio a intervalli brevi e regolari. In seguito il supervisore di Susan, l'astronomo inglese Anthony Hewish, ne osservò degli altri e li chiamò pulsar (sorgenti radio pulsanti). Per spiegarne l'origine formulò tre ipotesi: una radiostella che veniva periodicamente eclissata da un pianeta in orbita; una variabile pulsante radioemittente; una stella che emetteva onde radio da un punto della sua superficie e che, ruotando su se stessa, finiva per volgerlo regolarmente verso la terra.
- Nessun pianeta in orbita o variabile pulsante poteva tuttavia spiegare la rapidissima pulsazione che mostravano le pulsar. L'unica possibilità era la terza ipotesi di Hewish, ma quale stella avrebbe potuto ruotare tanto velocemente senza frantumarsi? La soluzione erano le stelle di neutroni di Zwicky: solo una stella di neutroni era abbastanza compatta da poter resistere all'effetto centrifugo di una rotazione così rapida.

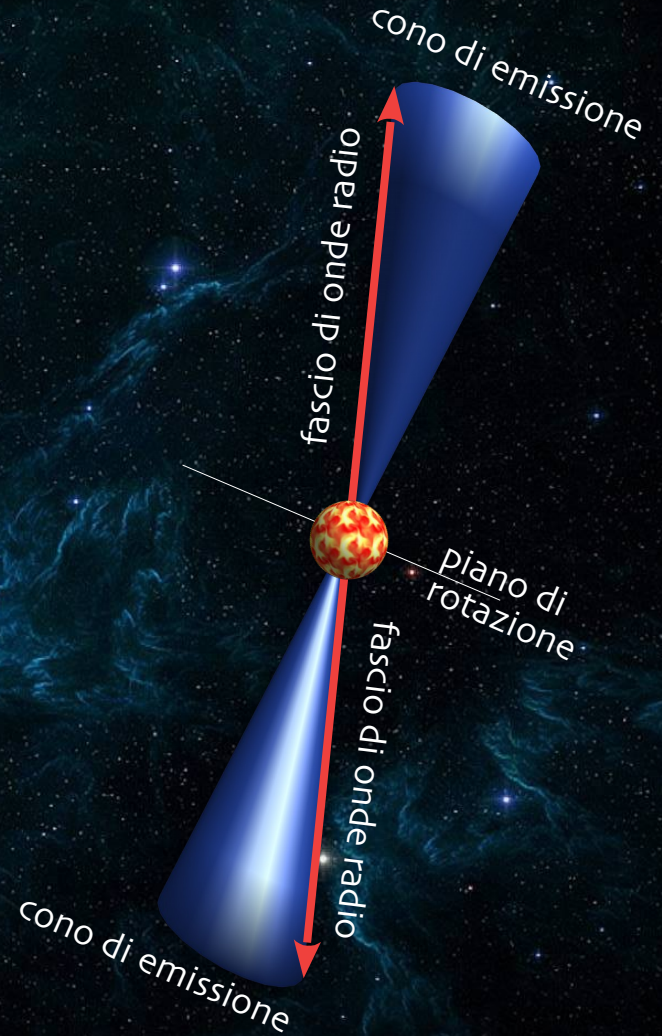


ESO



Le pulsar

- Da giovani, infatti, le stelle di neutroni possiedono forti campi magnetici che espellono elettroni ad alta velocità in due stretti fasci. Questi elettroni, poi, rallentano gradualmente e lasciano posto a emissioni di onde radio. Nella vorticosa rotazione della stella, i fasci vengono fatti oscillare lungo un doppio cono e quando uno di essi finisce per orientarsi verso la terra noi riceviamo regolarmente gli impulsi tipici delle pulsar.
- Nel corso di milioni di anni, i campi magnetici di una pulsar ne rallentano la rotazione e indeboliscono gli impulsi di onde radio. Alla fine, la stella di neutroni ha perso quasi tutta l'energia immagazzinata durante la sua formazione e diviene pressoché invisibile.



Oltre le stelle di neutroni

- Nel 1939 i fisici americani J. Robert Oppenheimer e Hartland S. Snyder scoprirono che nemmeno i neutroni avrebbero potuto bloccare il collasso di una stella fredda, se quest'ultima avesse avuto più di 3 volte la massa del sole. E in tal caso, quale destino avrebbe atteso la stella?
- Per quanto ne sappiamo ancora oggi, nulla potrebbe evitare la contrazione in un simile oggetto: il collasso seguirebbe all'infinito, riducendo la stella di neutroni in una massa puntiforme infinitamente densa. Poiché la forza di gravità di un corpo sferico dipende, oltre che dalla sua massa, dalla distanza tra il centro e la superficie, quando una stella di neutroni riducesse a zero la propria dimensione la gravità all'intorno diverrebbe enorme; così enorme che nulla, nemmeno la luce, potrebbe sfuggirne. La stella, pertanto, formerebbe un buco nero (espressione coniata solo nel 1967 dal fisico americano John Archibald Wheeler).



I buchi neri

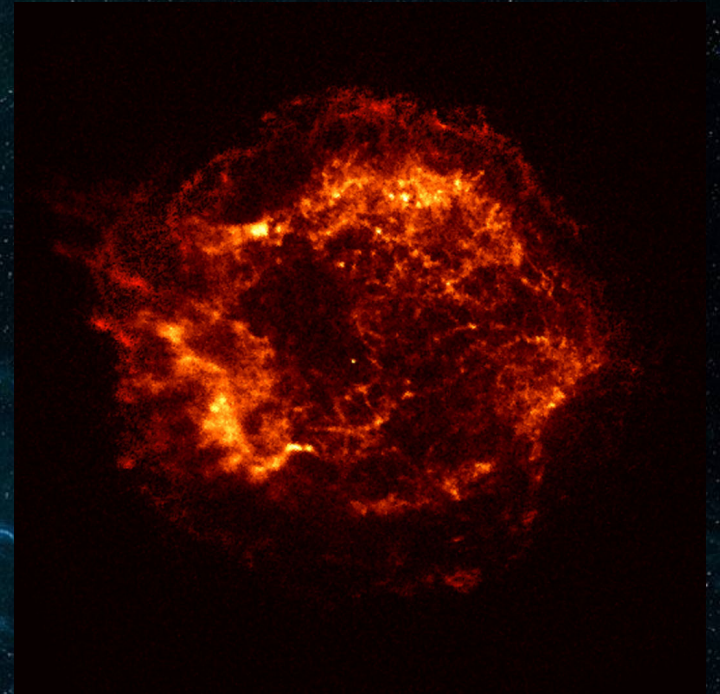
- Si ritiene che pochissime stelle, forse meno di una su un milione, abbiano una qualche probabilità di diventare un buco nero al termine della loro evoluzione. Considerando la massa che può andare persa durante le ultime fasi evolutive, una stella dovrebbe possedere almeno 20-30 volte la massa del sole affinché il suo nucleo, al momento del collasso, possa essere abbastanza grande da originare un buco nero.
- Un buco nero isolato è pressoché impossibile da individuare. L'unica possibilità di rivelarne l'esistenza sta negli effetti secondari che la sua gravità può causare nello spazio circostante. Un buco nero potrebbe, ad esempio, attrarre materiali da una stella vicina, oppure incurvare i raggi luminosi provenienti da oggetti in secondo piano, distorcendone l'immagine agli occhi di un osservatore.
- Il primo probabile buco nero fu scoperto all'inizio degli anni settanta nel sistema binario conosciuto come Cigno X-1.



Helmut Karl Wimmer

L'agonia di un sole gigante

- Quale può essere, allora, l'origine delle supernove?
- Il primo a rispondere a questo quesito, almeno in parte, fu proprio Zwicky. Zwicky intuì che quando il nucleo di una grossa stella si contrae formando una stella di neutroni, il collasso dovrebbe rilasciare moltissima energia. Energia sufficiente a surriscaldare le parti esterne della stella. In questi strati, tuttavia, abbondano ancora i nuclei di atomi la cui fusione libera energia. Ne consegue che all'interno della stella morente si scatenano all'improvviso reazioni di fusione incontrollabili, che in poche decine di minuti producono tutti gli elementi chimici esistenti in natura (inclusi quelli più pesanti del ferro). La sovrapproduzione di energia nucleare è talmente immensa che la stella esplode, scagliando gran parte della propria massa lontano dal nucleo collassato. Ecco spiegata l'esplosione di una supernova.



NASA

L'agonia di un sole gigante

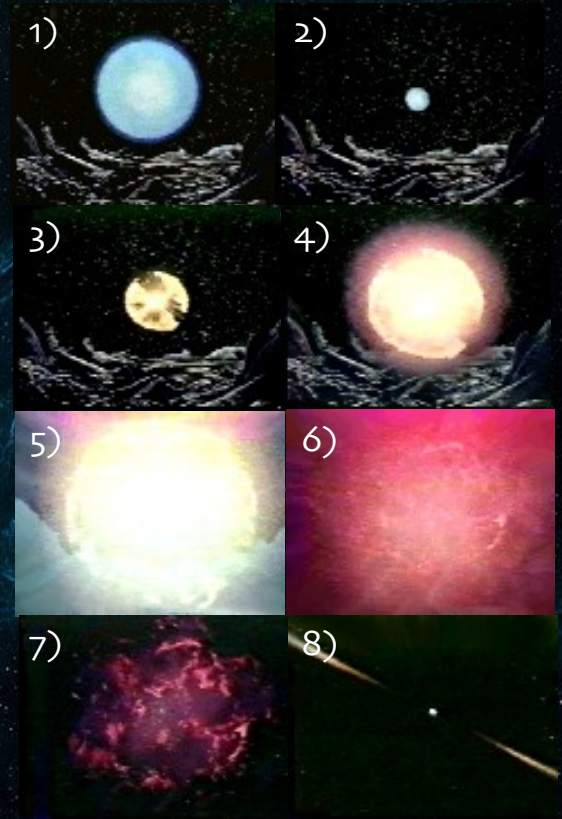
- Zwicky capì inoltre che il collasso interno di una stella abbastanza pesante da esplodere, e quindi con almeno una decina di volte la massa del sole, è talmente violento e improvviso che il nucleo si trasformerebbe in una stella di neutroni quand'anche perdesse abbastanza materia da scendere sotto il limite di Chandrasekhar. Una supernova, perciò, non potrebbe mai lasciare dietro di sé una nana bianca, ma solo una stella di neutroni (o un buco nero).
- Le supernove perciò rappresentano, in linea di massima, l'ultima fase nell'evoluzione di una stella di grande massa, e segnano la formazione di una stella di neutroni o di un buco nero.



Disegno di Michelangelo Miani

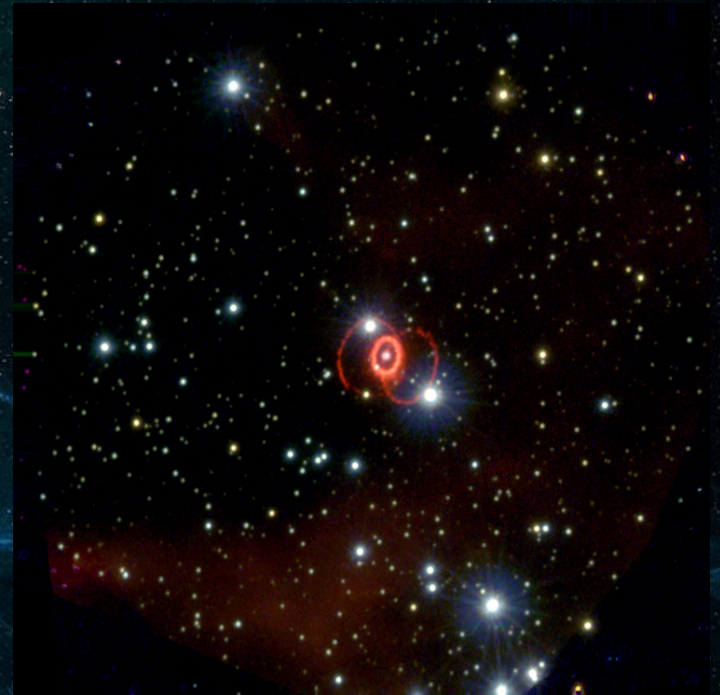
Neutrini

- Ma cosa innesca, esattamente, il violentissimo collasso interno che provoca l'esplosione di una supernova? La risposta si trova in una comune ma misteriosa particella subatomica: il neutrino.
- I neutrini, la cui esistenza era stata prevista fin dal 1931 dal fisico austriaco Wolfgang Ernst Pauli, sono particelle prive di carica elettrica, di massa quasi nulla e con una scarsissima tendenza a interagire con la materia ordinaria: in ogni istante, mille miliardi di neutrini stanno attraversando il nostro corpo a una velocità prossima a quella della luce, senza che ce ne accorgiamo. È molto raro che un neutrino urti contro un atomo, per questo rivellarli è difficilissimo e possibile solo in sofisticati laboratori sotterranei (come il Super-Kamiokande, in Giappone).



Neutrini e supernove

- Le stelle, incluso il sole, emettono continuamente grandi quantità di neutrini a causa delle reazioni di fusione in atto nei loro nuclei.
- Nel 1961 il fisico sino-americano Hong-Yee Chiu teorizzò che l'emissione di neutrini da parte di una stella divenga particolarmente elevata quando essa inizia a fondere elementi pesanti. Chiu calcolò che nel momento in cui la temperatura del nucleo stellare raggiunge un valore di circa 6 miliardi di °C il 99% dell'energia viene irradiata sotto forma di neutrini. A differenza della radiazione, i neutrini sfuggono dalla massa della stella in pochi secondi, portandosi via quasi tutto il calore del nucleo. La stella, quindi, subirebbe nel centro un brusco raffreddamento e una conseguente contrazione. Quest'ultima è ciò che, in seguito, determina l'esplosione della supernova.
- La previsione di Chiu è stata poi verificata nel 1987, quando vennero rivelati i neutrini emessi da una supergigante blu nella grande nube di Magellano, una galassia molto vicina alla Via lattea. Poche ore dopo averne registrato i neutrini, la stella si trasformò nella Supernova 1987-A.



P. Challis/STScI

Tipi di supernove

- A partire da Zwicky, gli astronomi hanno compreso di poter classificare le supernove in base al loro spettro, alla loro ubicazione e, non meno importante, alla loro curva di luce (il grafico che rappresenta il variare della luminosità nel tempo dall'apparizione della supernova fino alla sua scomparsa). Una prima suddivisione distingue due classi di supernove, chiamate semplicemente tipo I e tipo II.
- Le supernove di tipo II hanno spettri che evidenziano la presenza di idrogeno. Interessano esclusivamente le braccia delle galassie spirali e mostrano curve di luce molto diversificate e irregolari.
- Le supernove di tipo I, al contrario, non mostrano traccia di idrogeno nei loro spettri e appaiono nei luoghi più disparati, incluse le galassie ellittiche e gli aloni delle galassie spirali. Inoltre, tutte hanno curve di luce estremamente simili e regolari.

TIPO I

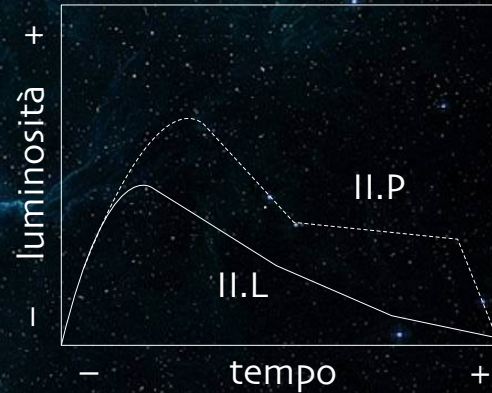
- ✓ *Assenza di idrogeno*
- ✓ *Ubicazione: indifferenziata*
- ✓ *Curva di luce regolare*

TIPO II

- ✓ *Presenza di idrogeno*
- ✓ *Ubicazione: braccia delle galassie spirali*
- ✓ *Curva di luce irregolare*

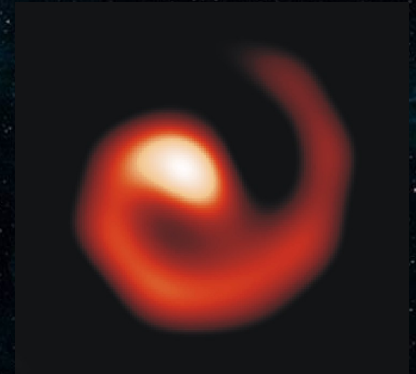
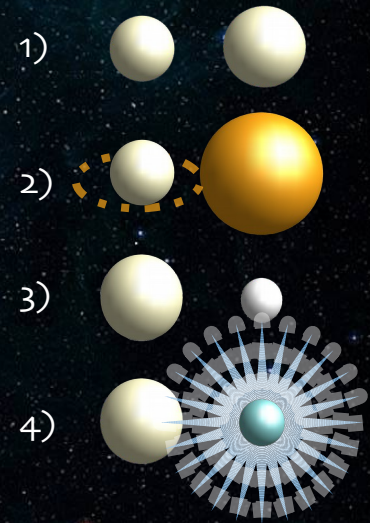
Supernove di tipo II

- Le supernove di tipo II sono il risultato del collasso interno a una stella di grande massa ($>10-11 M_{\odot}$), giunta al termine della propria, breve evoluzione.
- Ciò si evince, particolarmente, dalla loro ubicazione: esplodono nelle braccia delle galassie spirali, in regioni cioè dove è presente una intensa attività di formazione stellare e caratterizzate da una popolazione di stelle molto giovane.
- Al massimo, le supernove di tipo II raggiungono una luminosità da 100 milioni a un miliardo di volte quella del nostro sole, ma poiché la massa delle stelle progenitrici può variare di molto, questo vale anche per lo splendore massimo della supernova.
- Le supernove di tipo II sono a loro volta suddivise in due sottoclassi: il tipo II.L ha una curva di luce che, dopo il picco, decresce linearmente; il tipo II.P mostra invece un rigonfiamento nella curva di luce durante l'affievolimento, in cui la luminosità quasi si stabilizza, per poi tornare a discendere con una nuova pendenza (la "P" sta per *plateau*).



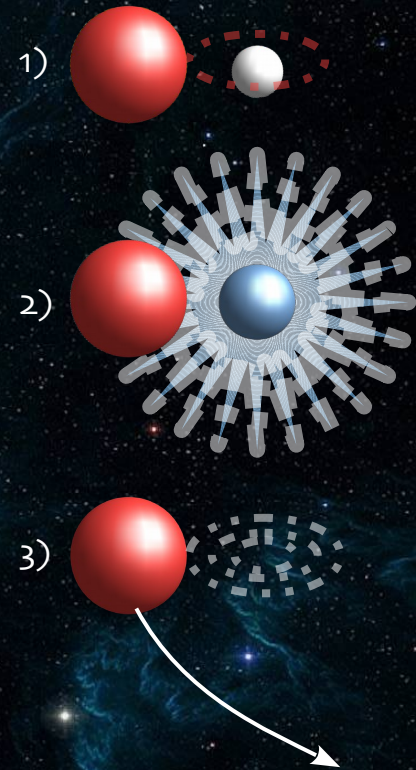
Supernove di tipo Ib e Ic

- Tra le supernove di tipo I viene operata una ulteriore suddivisione in tre tipi: Ia, Ib e Ic.
- Le supernove di tipo Ib non hanno evidenze di idrogeno nello spettro, ma di elio sì. Il tipo Ic, invece, manca anche di queste tracce spettrali. Entrambe queste sottoclassi mostrano la stessa ubicazione esclusiva del tipo II, cioè le braccia delle galassie spirali, in presenza di attività di formazione stellare. Ciò suggerisce che anch'esse derivino dal collasso del nucleo di stelle massicce.
- L'assenza di idrogeno negli spettri (e anche di elio nel caso del tipo Ic) va quindi interpretata nello scenario di una stella che ha perduto buona parte del suo involucro esterno, dove sono concentrati gli elementi più leggeri. Si tratta delle cosiddette stelle di Wolf-Rayet, in genere membri di un sistema binario stretto dove la gravità della compagna le depauperava del loro rivestimento superficiale, così che quando esplodono sono ormai prive degli elementi sopracitati.



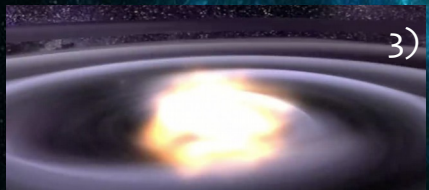
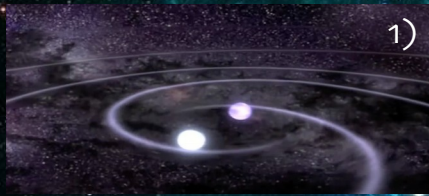
Supernove di tipo Ia

- Le supernove di tipo Ia sono caratterizzate, in primo luogo, dal segnale del silicio nello spettro. Ma il principale indizio sulla loro origine è dato dall'ubicazione: in fatto di ambienti galattici in cui si verificano, sono molto più promiscue rispetto agli altri tipi di supernova, tanto che esplodono anche in galassie ellittiche e negli aloni delle galassie spirali, cioè luoghi notoriamente privi di formazione stellare e popolati soprattutto da stelle di piccola massa in avanzato stadio evolutivo.
- Pare quindi che il tipo Ia derivi dall'esplosione di una nana bianca quando, per un qualche motivo, raggiunge ed eccede il limite di Chandrasekhar ($1,44 M_{\odot}$). Ciò può accadere, ad esempio, in un sistema binario stretto analogo a quelli che generano le novae: una nana bianca che accumula materia da una stella che si espande verso lo stadio di gigante rossa.
- Se la nana bianca, probabilmente perché già alquanto massiva inizialmente (e.g. $1,3 M_{\odot}$), arriva a superare il limite di Chandrasekhar la gravità ne causa il collasso. Gli atomi al suo interno entrano in collisione innescando reazioni di fusione "fuggitive" che ne processano l'intera struttura in elementi pesanti fino al ferro.



Supernove di tipo Ia

- Alcune supernove di tipo Ia potrebbero anche avere origine da sistemi binari stretti di due nane bianche le cui masse, sommate, eccedono il limite di Chandrasekhar. L'orbita del sistema si restringe lentamente a causa dell'emissione di onde gravitazionali finché le stelle entrano in coalescenza, collassano e, infine, esplodono.
- Al massimo, il tipo Ia raggiunge una luminosità da 2,5 a 6 miliardi di volte quella del sole. Ciò che rende queste supernove estremamente importanti per gli astronomi è il fatto che, in base alla curva di luce, è facile ricavare indirettamente il picco di luminosità dell'esplosione e, confrontandolo con lo splendore apparente (dipendente dalla lontananza), dedurre la distanza che ci separa dalla supernova (e dalla galassia che la ospita). Questo rende il tipo Ia una cosiddetta candela standard, utile per misurare le dimensioni dell'universo a grande scala.



NASA

NASA



Esplosioni esotiche

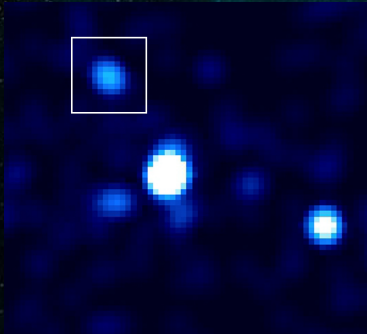
- Esistono fenomeni esplosivi, nell'universo, addirittura più rari delle supernove, sebbene alcuni di questi le sovrastino prepotentemente in energia e violenza.
- Le ipernove, ad esempio, risultano dall'evoluzione di stelle supermassive ($>30 M_{\odot}$) e fortemente instabili. La radiazione prodotta dal nucleo di stelle tanto enormi può diventare abbastanza intensa che, in un qualche momento, la sua pressione prevale sulla forza di gravità. Quando ciò accade, la pressione della radiazione provoca l'esplosione catastrofica della stella. Maggiore è la massa e più alta è l'instabilità della stella dovuta alla pressione di radiazione. Stelle di massa superiore a circa $150 M_{\odot}$ dovrebbero distruggersi quando ancora sono nella loro fase di formazione. Le ipernove sono quasi un milione di volte meno frequenti delle normali supernove, ma possono liberare un'energia anche mille volte maggiore e raggiungere un picco di luminosità dieci volte più grande.
- La prima possibile esplosione di ipernova fu documentata, stando alle ricerche dell'astronomo russo V. P. Urtrobin, nel 1961 all'interno di una galassia visibile nella costellazione di Perseo. Ci mise un intero anno a raggiungere il picco di luminosità e ben nove anni ad affievolirsi del tutto.



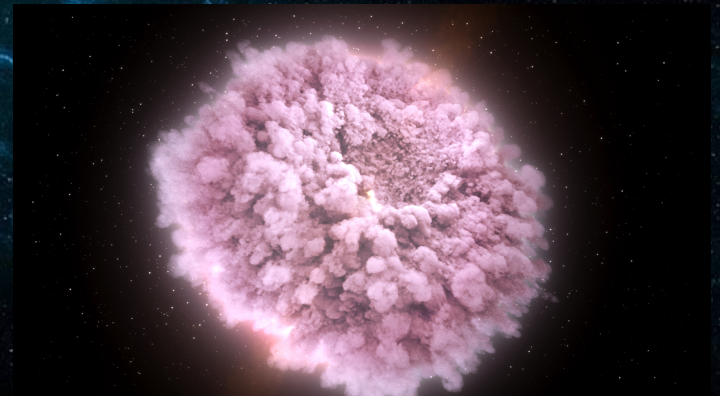
NASA

Esplosioni esotiche

- Un altro evento di altissima energia si verifica quando in un sistema binario formato da stelle di neutroni, a causa della produzione di onde gravitazionali, le componenti convergono fino a entrare in collisione.
- Nella coalescenza fra le due stelle di neutroni ha origine un grande lampo di energia, chiamato kilonova, che lascia dietro di sé un buco nero o una stella di neutroni di massa maggiore.
- Il primo cataclisma di questo tipo a essere identificato lo si poté rivelare grazie all'emissione di onde gravitazionali che accompagnò le ultime fasi dell'avvicinamento fra le stelle di neutroni progenitrici, il 17 agosto 2017. La controparte ottica e ai raggi X corrispondeva a un'esplosione di radiazioni nella galassia NGC 4993, distante 130 milioni di anni-luce e visibile nella costellazione dell'I dra.



NASA



NASA

Parte V – Le supernove: passato, presente e futuro



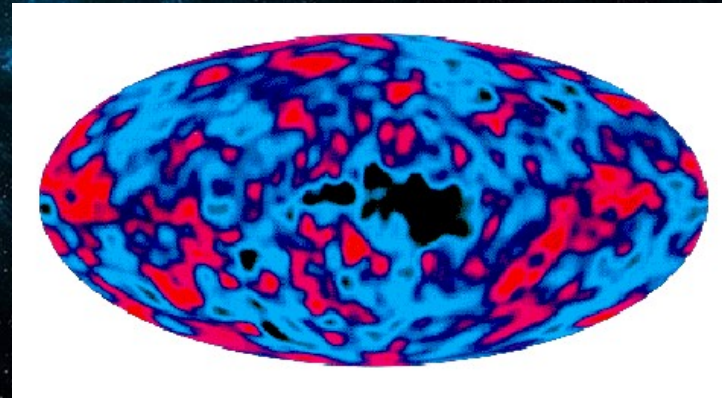
Disegno di Michelangelo Miani

Fucine della natura

- Da quando Hubble osservò la recessione delle galassie, prova del fatto che l'universo è in espansione, diversi studiosi si prodigarono nel descrivere i processi che hanno portato il cosmo ad assumere l'aspetto attuale. Tali ricerche sono infine sfociate nell'odierna teoria del big bang, definitivamente suffragata dalla scoperta della radiazione cosmica di fondo compiuta nel 1964-65 dai fisici americani Arno A. Penzias e Robert W. Wilson. Oggi sappiamo che l'universo, come lo possiamo comprendere, ha avuto origine circa 13,8 miliardi di anni fa.
- Questa radiazione formata da microonde, corrispondente a una temperatura di circa 3 gradi Kelvin ($-270\text{ }^{\circ}\text{C}$), è il residuo dei primi istanti di vita dell'universo, quando da un punto più piccolo di un atomo esplose in una palla di fuoco in rapida espansione, creando lo spazio, il tempo e tutta la materia e l'energia che osserviamo oggi.



NASA/ESA/STScI



COBE/NASA

Fucine della natura

- I calcoli teorici mostrarono che dalla palla di fuoco possono essere emersi solamente idrogeno ed elio, in una proporzione di circa 3:1. Nei primi venti minuti circa di vita dell'universo, infatti, le altissime temperature e densità permisero la fusione di parte dell'idrogeno (che è l'elemento più semplice) in elio e, forse, in piccole quantità di litio e berillio. L'insieme di queste reazioni nucleari che caratterizzarono l'universo neonato è chiamato nucleosintesi primordiale.
- Ma l'universo si espandeva a grandissima velocità e in poche decine di minuti divenne troppo freddo e rarefatto per consentire ulteriori fusioni.
- Se quindi all'origine del cosmo esistevano solo idrogeno ed elio, da dove provengono le altre dozzine di elementi chimici più pesanti che oggi osserviamo e senza i quali neppure potremmo esistere?



Fucine della natura

- La risposta, ovviamente, sono le stelle.
- Poche centinaia di milioni di anni dopo il big bang, quando ormai la palla di fuoco si era dissolta liberando la luce che oggi giorno forma la radiazione cosmica di fondo, la gravità fece condensare le nubi di idrogeno ed elio dando vita alle prime galassie e alle prime stelle.
- Ci sono buoni motivi per pensare che la prima generazione di stelle apparse nel cosmo (popolazione III) fosse caratterizzata da oggetti di massa enorme, mostri stellari con centinaia o addirittura migliaia di masse solari. Quelle stelle primordiali devono aver vissuto rapidamente, al massimo per poche decine di milioni di anni, fondendo l'idrogeno e l'elio nei loro nuclei negli elementi pesanti fino al ferro. Questa è la nucleosintesi stellare.

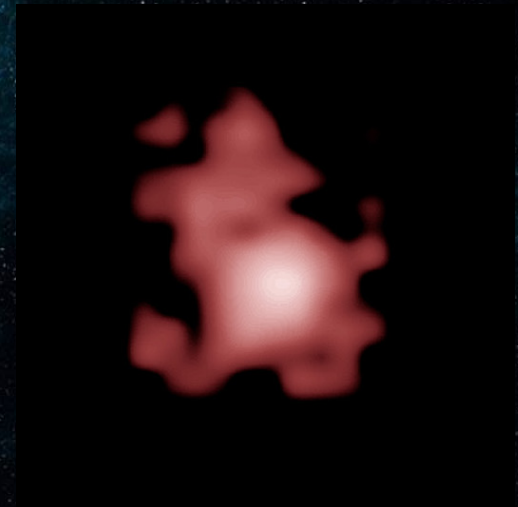
Idrogeno, elio



**NUCLEOSINTESI
STELLARE**



*Idrogeno, elio, carbonio,
azoto, ossigeno, ..., ferro*



NASA

Fucine della natura

- Al termine del loro ciclo evolutivo, le stelle di prima generazione esplosero sotto forma di supernove.
- Come si è visto, nel corso della contrazione che precede l'esplosione di una grossa stella si verifica una serie di reazioni di fusione a catena che portano alla sintesi di tutti gli elementi chimici riscontrabili in natura, compresi quelli più pesanti del ferro. È la cosiddetta nucleosintesi esplosiva.
- La morte spettacolare delle stelle di prima generazione irrorò l'universo dei mattoni fondamentali per la nascita dei primi sistemi planetari e, in seguito, anche della vita. Il processo di arricchimento chimico fu proseguito dalle stelle più grandi della seconda generazione (popolazione II).
- Il sole, la cui formazione è datata 4,5 miliardi di anni fa, è una stella appartenente all'ultima generazione (popolazione I). Ogni atomo complesso nel sistema solare, inclusi quelli che rendono possibile la vita e, quindi, la nostra esistenza, sono stati forgiati in stelle giganti estinte da miliardi di anni. In questo senso, noi e tutto ciò che conosciamo non siamo altro che polvere di stelle.

ESO/M. Kornmesser



Mors tua vita mea

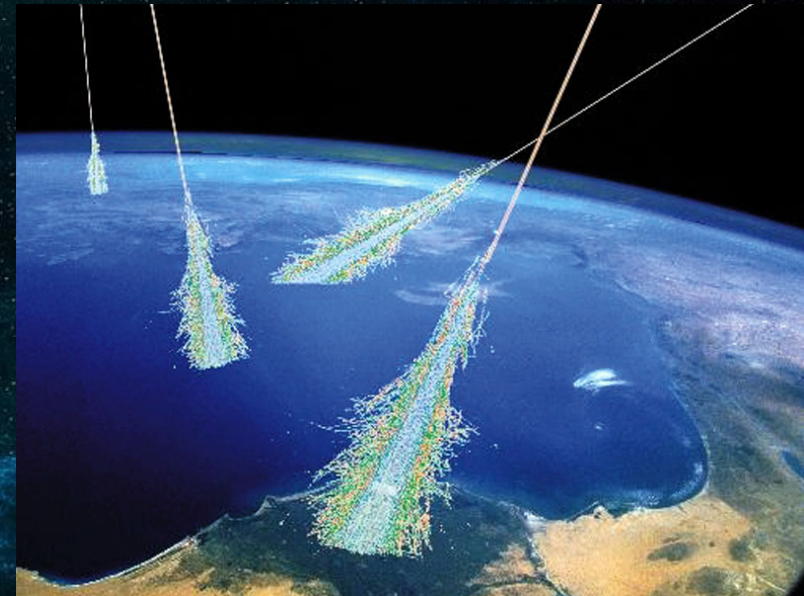
- Ma le esplosioni di supernova non furono indispensabili solo per la produzione degli elementi chimici più pesanti.
- Per quale motivo la materia nell'universo non venne del tutto consumata in un rapido susseguirsi di generazioni stellari agli albori del cosmo? Cos'ha impedito che ciò potesse accadere e ha reso possibile l'esistenza, ancora oggi, di nubi interstellari da cui tuttora si possono originare nuove stelle? È probabile che le stesse supernove abbiano contribuito a mantenere elevata la temperatura della materia interstellare, rallentando così il suo raffreddamento ed evitando che essa si condensasse troppo fuggacemente in stelle per essere completamente sperperata ancor prima che il sistema solare, e la vita, potessero nascere.
- E cosa favorisce, oggi, il processo di formazione stellare nelle galassie? Cosa perturba l'equilibrio delle nebulose, dando inizio ai moti turbolenti che portano alla nascita di nuove stelle e pianeti? Forse fu proprio una supernova l'elemento decisivo che permise il collasso della nebulosa originale da cui presero forma il sole e i suoi pianeti (incluso il nostro).



NASA/ESA/HEIC/STScI/AURA

I raggi cosmici

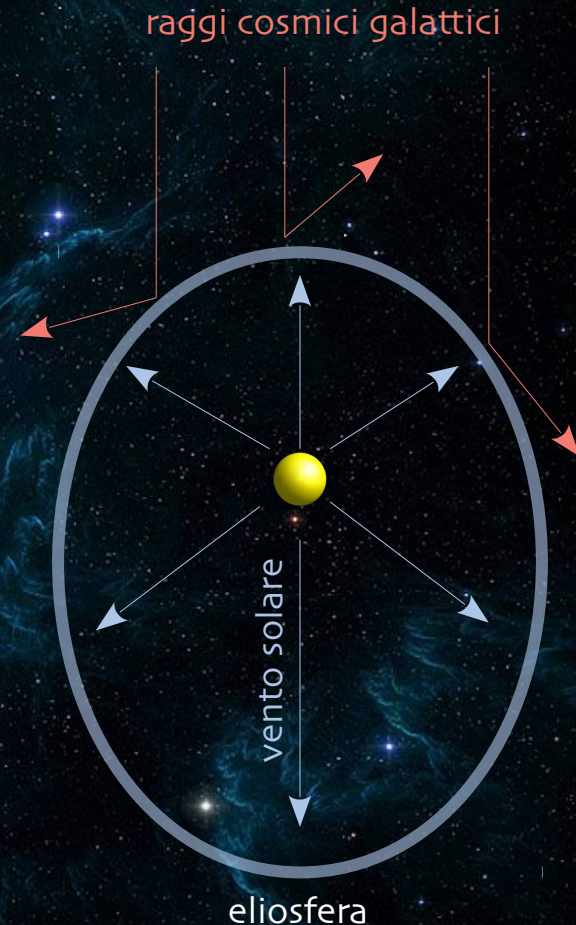
- All'inizio del XX secolo i fisici scoprirono che la radioattività non era presente solo vicino agli atomi di elementi instabili, come il radio o il torio. Essa poteva essere rivelata, in tracce, ovunque sul pianeta. Si pensò inizialmente all'esistenza di un elemento altamente radioattivo ancora sconosciuto, intrappolato nelle rocce della terra.
- Il fisico austriaco Victor Franz Hess effettuò delle misurazioni durante delle ascese in aerostato, scoprendo che, anziché diminuire, la radioattività aumentava con l'altitudine. Indipendentemente, il fisico italiano Domenico Leone Pacini osservò che i livelli di radiazione invece calavano con la profondità nel mare.
- Nel 1912 Hess e Pacini giunsero autonomamente alla medesima conclusione: la radiazione proveniva dallo spazio, e poiché non cambiava di intensità con l'alternarsi del giorno e della notte o durante un'eclissi solare, la causa non poteva essere il sole.
- Il fisico americano Robert Andrews Millikan definì questa forma di radiazione raggi cosmici.



NASA

I raggi cosmici

- I raggi cosmici sono costituiti da particelle subatomiche (protoni, elettroni, nuclei di elio) che si muovono nello spazio a velocità molto prossime a quella della luce. Alcuni di essi hanno un'energia equivalente a quella di un proiettile esploso da un fucile. Per i più energetici ancora oggi non si hanno spiegazioni esaustive.
- Gran parte dei raggi cosmici viene deflessa dall'eliosfera, una sorta di guscio magnetico che avvolge il sistema solare. L'eliosfera è originata dal vento solare, un flusso di particelle elettricamente cariche che il sole irradia continuamente in ogni direzione. Altri raggi cosmici sono invece bloccati dal campo magnetico terrestre e dall'atmosfera del nostro pianeta.
- Il mistero dell'origine di buona parte dei raggi cosmici fu risolto quando Zwicky espose la sua teoria delle supernove. È impossibile risalire all'origine di una particella dei raggi cosmici in base alla traiettoria con cui incide sull'atmosfera terrestre: essendo portatrici di carica elettrica, infatti, le particelle dei raggi cosmici seguono percorsi curvilinei sotto l'influsso dei campi magnetici della galassia. Il risultato è che essi ci arrivano da direzioni del tutto casuali, rendendo inutile cercare di definirne il percorso.



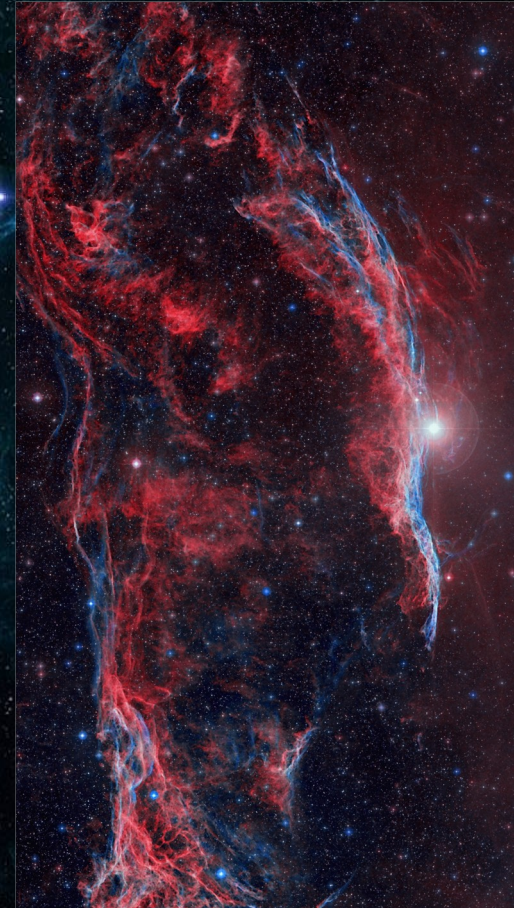
Evoluzione biologica e supernove

- Non tutti i raggi cosmici vengono deviati prima di raggiungere la superficie terrestre. Alcuni penetrano l'atmosfera e collidono con le molecole di gas, originando sciame di particelle secondarie che ripiovono fino alla superficie.
- Le particelle dei raggi cosmici hanno sufficiente energia per causare alterazioni nelle molecole di DNA all'interno delle cellule viventi. Questo basta a rendere più frequenti l'incidenza delle mutazioni e l'aumento del carico genetico. Il più delle volte, le mutazioni risultano innocue o addirittura mortali, ma in rari casi esse apportano alle generazioni di una specie un vantaggio nella lotta alla sopravvivenza. La natura selezionerà di conseguenza gli individui portatori di questa caratteristica, i quali la trasmetteranno ai loro discendenti dando il via all'origine di una nuova specie.
- Oggi si ritiene che in assenza del fattore mutageno dei raggi cosmici l'evoluzione della vita sulla terra sarebbe stata molto più lenta e attualmente, forse, non esisterebbero organismi più complessi di un piccolo invertebrato. Le supernove, quindi, devono aver giocato un ruolo importantissimo anche nel catalizzare il processo di evoluzione biologica scoperto nel 1859 dal naturalista inglese Charles Robert Darwin.



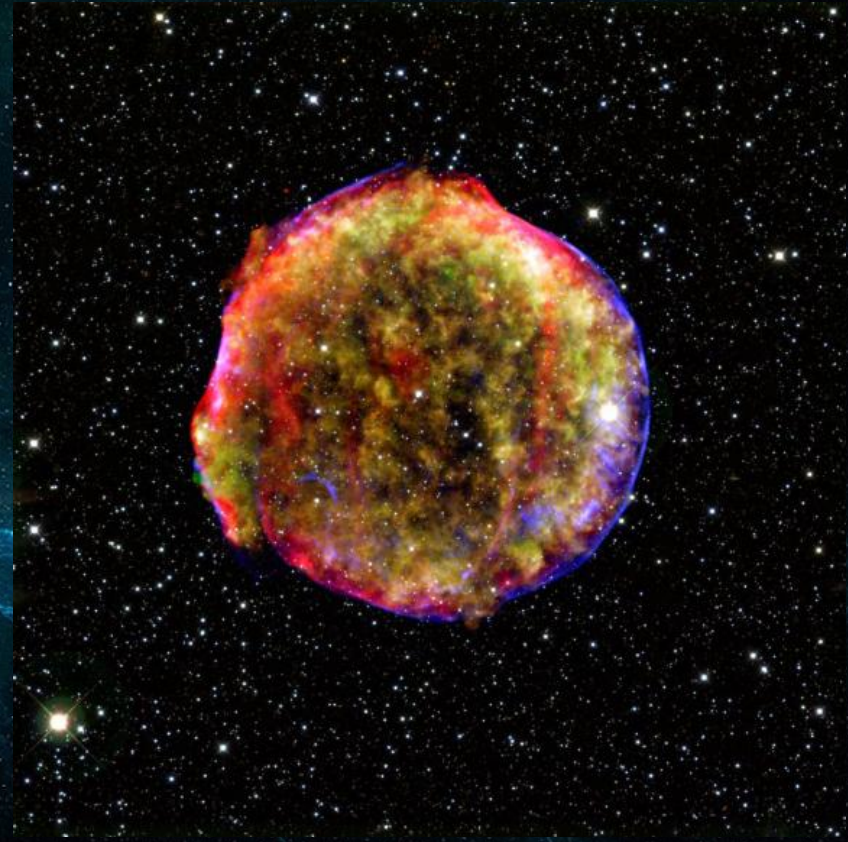
Il pericolo delle supernove

- Indubbiamente le supernove sono state indispensabili affinché il cosmo potesse divenire un luogo idoneo allo sviluppo della vita come la conosciamo. Ma potrebbero in qualche caso rappresentare una minaccia per la vita stessa?
- L'eliosfera varia la propria estensione con l'attività solare: quando il sole è molto attivo e irradia un forte vento solare l'eliosfera si espande, mentre nei periodi di minima attività essa si restringe. Quando poi una supernova esplode non troppo lontano dal sistema solare, la raffica di raggi cosmici sfonda la barriera dell'eliosfera facendola avvicinare al sole. Qualora la terra rimanesse esposta alle emissioni della supernova, potrebbero insorgere mutazioni e aumenti nel carico genetico abbastanza frequenti da provocare l'estinzione di alcune specie viventi.
- Se poi la supernova si verificasse a non più di 30 anni-luce dal sole, la sua radiazione potrebbe bastare a distruggere lo strato di ozono lasciando completamente scoperta la superficie terrestre, con conseguenze ancora più catastrofiche.
- Per nostra fortuna, nessuna stella pericolosamente vicina si trasformerà in una supernova nelle prossime centinaia di milioni di anni.



Il pericolo delle supernove

- Possiamo tuttavia domandarci se mai un evento simile possa essersi verificato nel lontano passato. Ci sono prove, in effetti, che una supernova relativamente vicina abbia interessato la terra circa due milioni di anni fa, a cavallo fra le ere geologiche del Pleistocene e del Pliocene. In quel tempo, inoltre, si registrò l'estinzione di alcune specie marine che qualcuno ha messo in relazione con questo evento.
- Una supernova genera una varietà di ferro radioattivo, detta ferro-60, che nessun processo naturale sulla terra è in grado di produrre. Alcuni ricercatori ne hanno trovato tracce analizzando delle formazioni minerali diffuse sui fondali oceanici, dette noduli di manganese. In un sottilissimo strato sotto la superficie dei noduli hanno rinvenuto i resti fossilizzati di un tipo di batteri, detti "magnetotattici".



Il pericolo delle supernove

- Questi microrganismi utilizzano un composto del ferro, la magnetite, per produrre dei granuli che poi combinano in lunghe catene, servendosene da "bussola naturale" per orientarsi nella direzione del campo magnetico terrestre. I batteri fossili in questione contenevano ferro-60 e dal tasso di crescita dei noduli di manganese gli studiosi hanno potuto datarli.
- Degli astronomi hanno poi effettuato delle simulazioni, riscontrando che all'epoca il sistema solare si trovava a poche centinaia di anni-luce da un agglomerato di giovani stelle, noto come associazione dello Scorpione-Centauro. È probabile che la stella responsabile della supernova facesse parte di questa struttura e che l'esplosione abbia causato la formazione della cosiddetta bolla locale, una regione di materia interstellare calda e rarefatta in cui oggi si trova il sole.



ESO

La prossima supernova galattica

- Abbiamo una qualche idea di quale sarà la prossima stella nella Via lattea a diventare una supernova e quando questo potrà accadere? Sul quando bisogna tuttavia specificare che l'astronomico "fra non molto" equivale al più comune "domani o fra un milione di anni". Ciò detto, esistono in effetti alcune stelle le cui peculiarità fanno ritenere che siano in procinto di esplodere.
- Una delle principali candidate è Eta Carinae, una stella situata nei pressi della grande nebulosa della Carina, a circa 7500 anni-luce di distanza. Osservata per la prima volta da Halley nel 1677, nel 1843 aumentò improvvisamente la propria luminosità divenendo temporaneamente la seconda stella più luminosa del cielo, dopo Sirio. L'astronomo inglese John Herschel (figlio di William) la considerò una semplice nova, mentre oggi sappiamo trattarsi di una stella supermassiva con circa 100 volte la massa del sole, cinque milioni di volte più luminosa e nel pieno di una tremenda instabilità. Eta Carinae è inoltre perturbata dal campo gravitazionale di una gigantesca stella compagna che percorre una stretta orbita intorno ad essa. Oggi il sistema è circondato da una vasta nebulosità, residuo dell'enorme eruzione osservata nell'Ottocento. Questa struttura risulta ricca di azoto, un elemento che abbonda in molti resti di supernova, il che rafforza la tesi che Eta Carinae sia prossima all'esplosione (o potrebbe già essere esplosa, ma la luce della supernova non averci ancora raggiunto).



ESO

La prossima supernova galattica

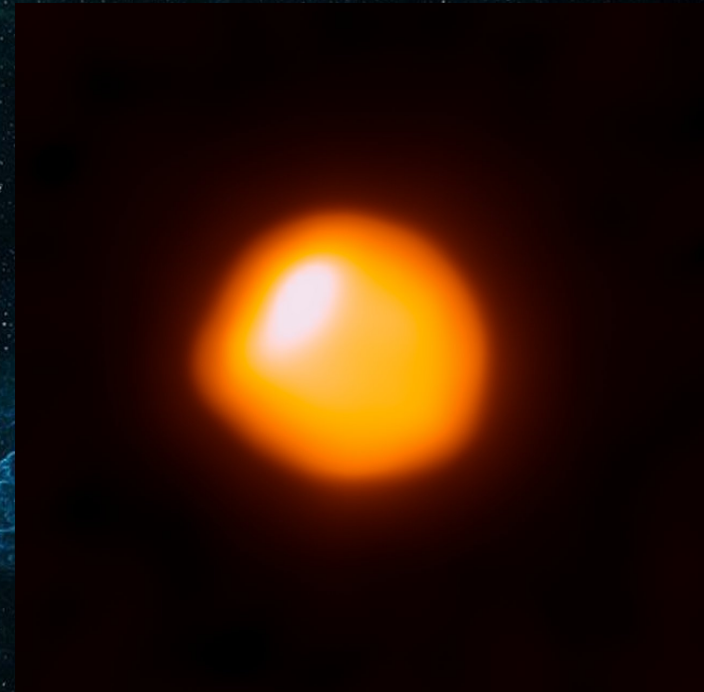
- Anche la stella Rho Cassiopeiae sembra essere una probabile pre-supernova. Distante 10 000 anni-luce e con una massa di circa $40 M_{\odot}$, è fra le poche stelle note ad essere classificate come ipergiganti gialle. Dal 1993 gli astronomi hanno iniziato a registrare periodiche oscillazioni nella temperatura superficiale (dell'ordine del centinaio di gradi), finché nell'estate del 2000 quest'ultima crollò da 7000 a 4000 gradi. Allo stesso tempo, fu rivelato dell'ossido di titanio nell'atmosfera della stella, probabilmente espulso durante una grande eruzione.
- La supergigante rossa Antares, nello Scorpione, dista circa 600 anni-luce, ha una massa 15 volte quella solare e mostra pulsazioni quasi regolari nella sua luminosità. Le sue dimensioni colossali (640 volte il diametro del sole) e le evidenze nello spettro di nichel e cobalto nell'atmosfera della stella sembrano indicare che Antares non dev'essere lontana dal trasformarsi in una supernova. Data la relativa vicinanza, la supernova Antares, quando apparirà, potrebbe raggiungere una luminosità in cielo paragonabile alla luna piena.

ESO/S. Guisard



La prossima supernova galattica

- Ma la candidata più nota, forse, è Betelgeuse, in Orione, anch'essa a una distanza di circa 600 anni-luce. Supergigante rossa con 15-30 $M_{\odot}$ e un diametro 1000 volte quello del sole, Betelgeuse ha tutte le caratteristiche di una pre-supernova. Pulsava in modo irregolare e sprigionava un vento stellare così impetuoso da perdere 1/100 000 $M_{\odot}$ ogni anno, tanto che risulta avvolta in un grande alone di gas rarefatti. Questa nube sembra scarseggiare di carbonio, il che fa pensare che sia invece ricca di azoto, altro indizio di un'imminente esplosione di supernova. Inoltre negli ultimi anni è stata osservata una riduzione del 15% nel diametro della stella, forse preludio di un collasso catastrofico.
- Un caso a parte, ma degno di nota, è quello di KIC 9832227, un sistema binario formato da stelle della sequenza principale. Gli astronomi ritengono che nelle prime settimane del 2022 le componenti del sistema entreranno in coalescenza originando un evento definito nova rossa luminosa. L'esplosione renderà il sistema luminoso in cielo quanto la stella polare per circa un mese e sarebbe la prima previsione tanto accurata che l'astronomia sia riuscita a operare di un fenomeno legato all'evoluzione stellare.

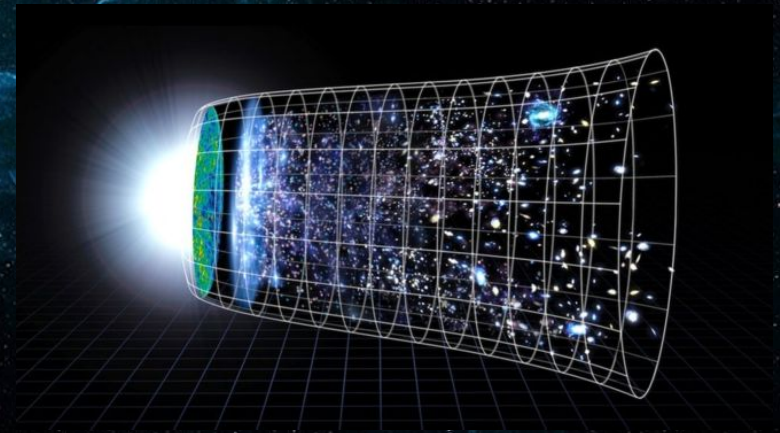


ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/
E. O'Gorman/P. Kervella

L'energia oscura

- A metà degli anni novanta due team di ricercatori, indipendentemente l'uno dall'altro, iniziarono a effettuare misurazioni accurate sulla luminosità delle supernove di tipo Ia in galassie molto lontane, fino al limite dell'universo osservabile. Questo permetteva loro di conoscere la distanza di quelle supernove, essendo il tipo Ia una candela standard con un picco di luminosità ben noto, e di stabilire se le galassie ospiti mostrassero una velocità di recessione decelerata, indice che l'universo starebbe rallentando la propria espansione per effetto della gravità esercitata dalla materia al suo interno.
- Ambedue i team, l'internazionale High-Z Supernova Search Team e il californiano Supernova Cosmology Project, giunsero nel 1998 alla stessa, incredibile scoperta: l'espansione dell'universo, anziché rallentare, è in accelerazione.
- Non sappiamo quale misteriosa forza sia responsabile di questo fenomeno. È come se l'universo fosse pervaso da una strana forma di energia che, a livello cosmologico, contrasta la forza di gravità accelerandone l'espansione. Data la sua natura enigmatica, il cosmologo americano Michael S. Turner battezzò tale invisibile presenza col nome di energia oscura.

NASA



Fine