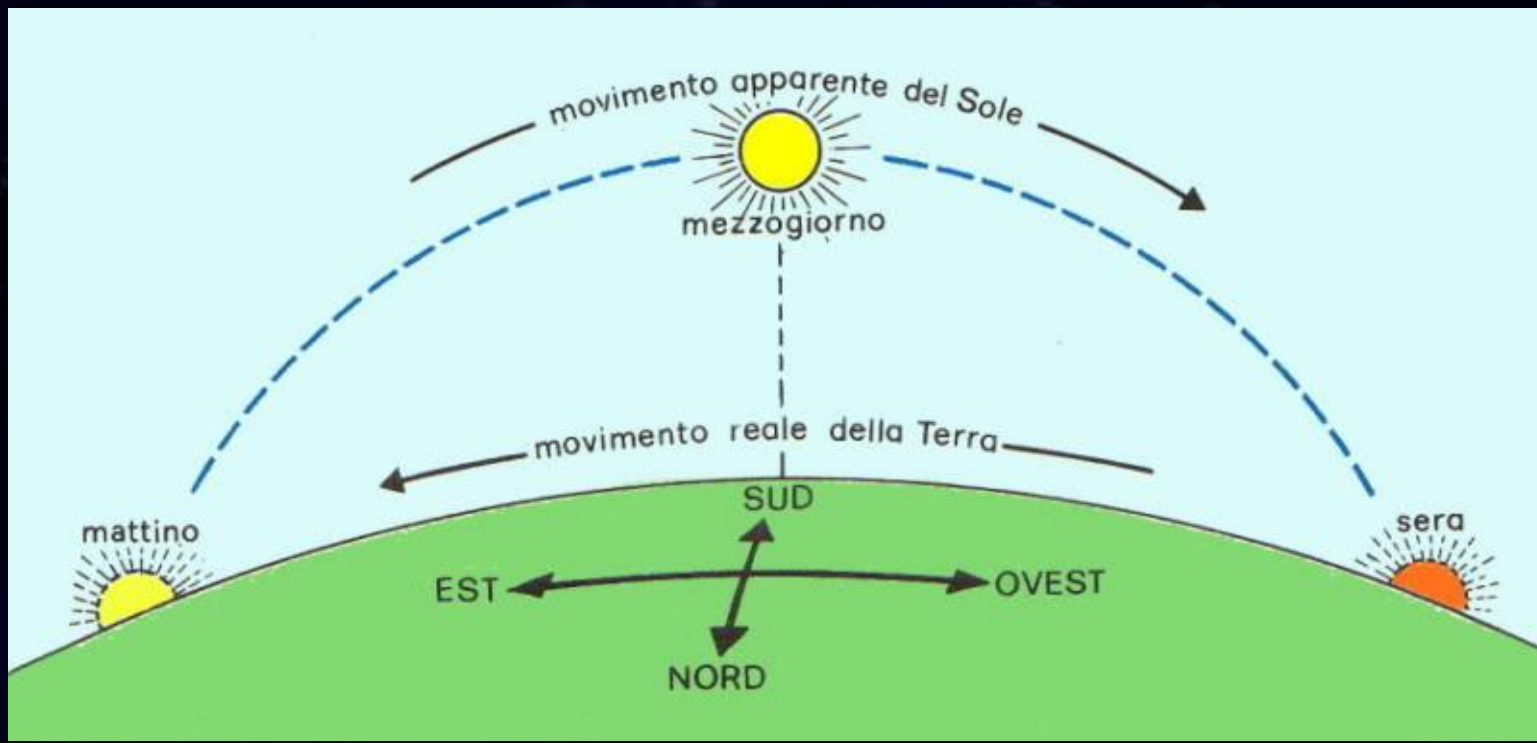


Seminario di cosmologia  
Prof. Sergio Novi

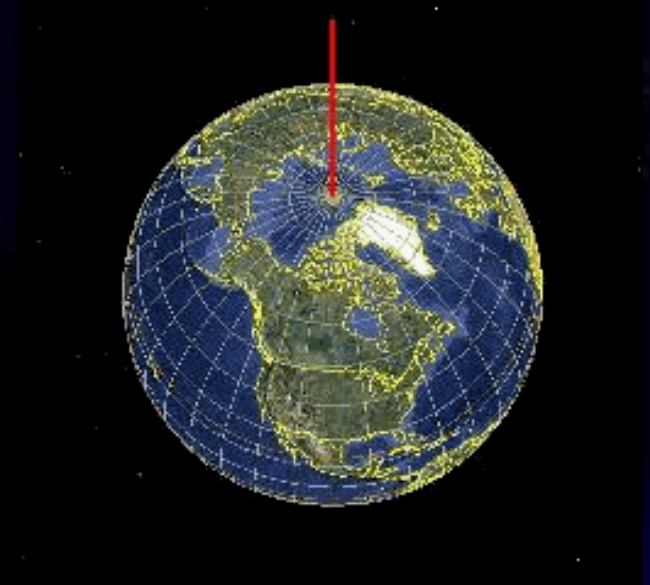
**Evoluzione stellare**  
**Passeggiando nello spazio-tempo tra**  
**stelle e buchi neri**

Ver. 3.0 2018

- Il Firmamento per gli antichi era una cupola solida alla quale stavano “attaccate” le stelle
- Prima di Galileo e Copernico si credeva che la Terra fosse piatta e che il Sole e tutte le stelle le ruotassero intorno.
- In realtà il Sole e le stelle le vediamo muoversi di moto apparente



La Terra ha due moti principali: la rotazione sul proprio asse e il moto di rivoluzione intorno al Sole, oltre a un movimento millenario detto Precessione degli equinozi in cui l'asse terrestre ruota intorno alla verticale a causa delle forze gravitazionali di Luna e Sole e compie un giro completo in circa 26.000 anni.





Anche la nostra Galassia ruota attorno al proprio asse, ed anche il Sole e tutto il Sistema Solare si muovono: compiono un giro completo in circa 250 milioni di anni, alla velocità di 220 chilometri al secondo, circa 800.000 Km/h

•Quante stelle esistono nell'Universo?

•In condizioni di assenza di inquinamento luminoso e senza nuvole ovviamente, sono visibili a occhio nudo circa 9000 stelle nei due emisferi; con un buon binocolo il numero sale a 200.000. Un telescopio di piccole dimensioni può rilevarne fino a 15 milioni.

•Le stelle che vediamo sono quelle della nostra galassia, ma allora quante stelle ci sono nella Via Lattea? La nostra è una **galassia a spirale** di medie dimensioni. Il nostro Sole si trova a circa 27 mila anni luce dal centro galattico, nel braccio di Orione.

•Gli astronomi stimano che la Via Lattea contenga circa **200 miliardi di stelle** di varie dimensioni e luminosità.

Ma allora quante sono le galassie? Ad oggi, gli astronomi concordano nel dire che ci sono, probabilmente, più di 200 miliardi di galassie nell'Universo conosciuto.

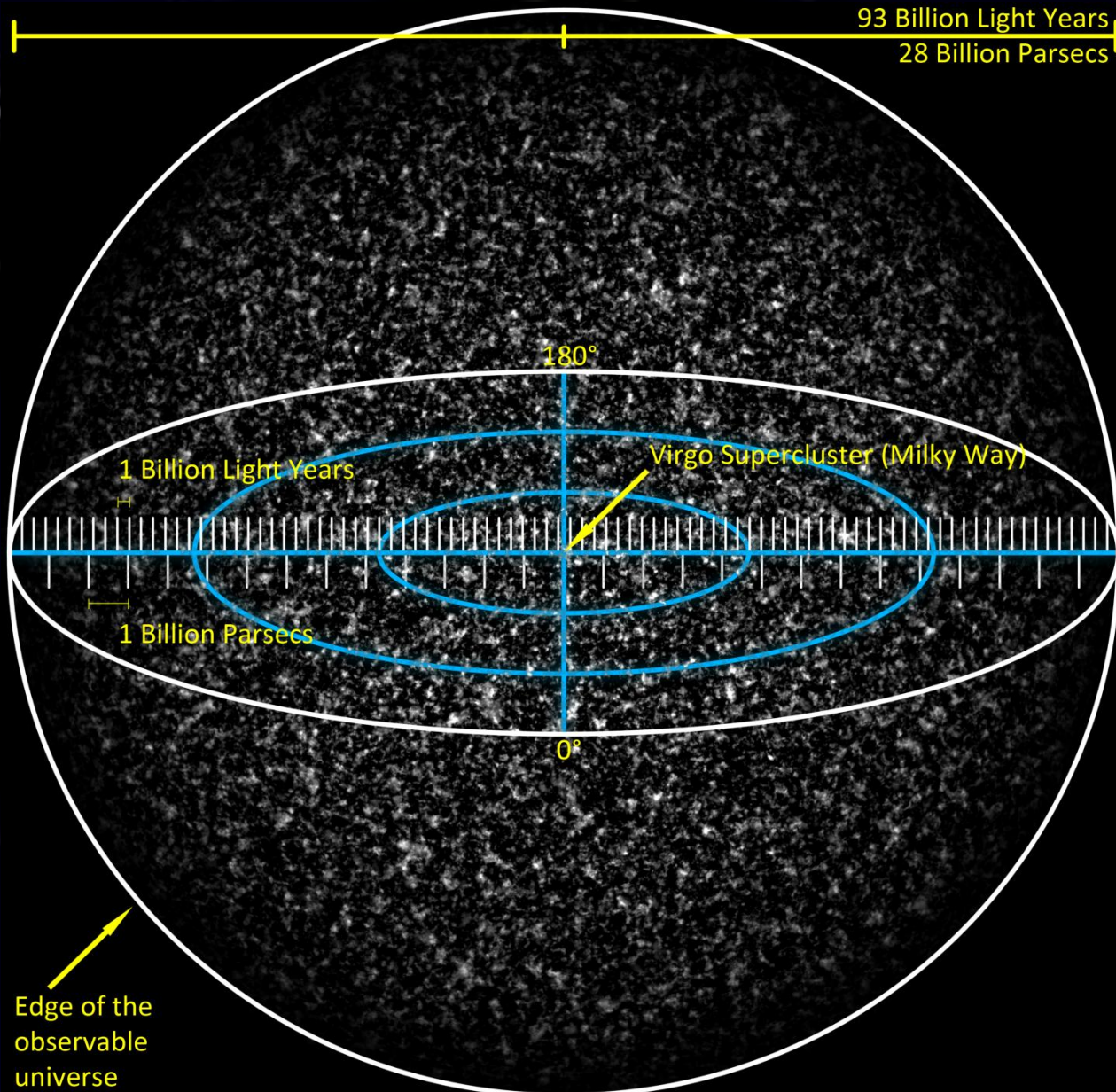
In tal modo, nell'ipotesi che l'Universo sia isotropo, cioè che la materia visibile sia disposta in maniera omogenea dappertutto, se si moltiplica il numero di stelle nella nostra galassia per il numero di galassie nell'Universo, si ottiene un numero approssimato ma molto grande

**$3,5 \times 10^{22}$  ovvero 35.000 miliardi di miliardi di stelle** e questo si riferisce all'universo osservabile attualmente, con la tecnologia a disposizione. Probabilmente l'universo è molto più grande, se non addirittura infinito, quindi come successo fino ad oggi, col passare del tempo scopriremo sempre nuove galassie, sempre più lontane.

# L'UNIVERSO OSSERVABILE E LA SUA ETA' SONO LA STESSA COSA?

- Premettiamo che la luce di una stella che vediamo nel cielo è la luce emessa da quella stella tanti anni fa pari al tempo che la luce ha impiegato per arrivare da noi ovvero se una stella dista da noi 100 a.l., la luce che osserviamo oggi è partita esattamente 100 anni fa. La luce viaggia nel vuoto a una velocità pari a circa 300.000 km/s e in un anno percorre quasi 9.500 mld di km
- Un errore comune è confondere l'età dell'universo con la sua estensione.
- L'Universo ha un'età di 13,8 mld di anni, la sua estensione invece corrisponde ad una sfera con un diametro di quasi 100 mld di anni luce.... Com'è possibile?

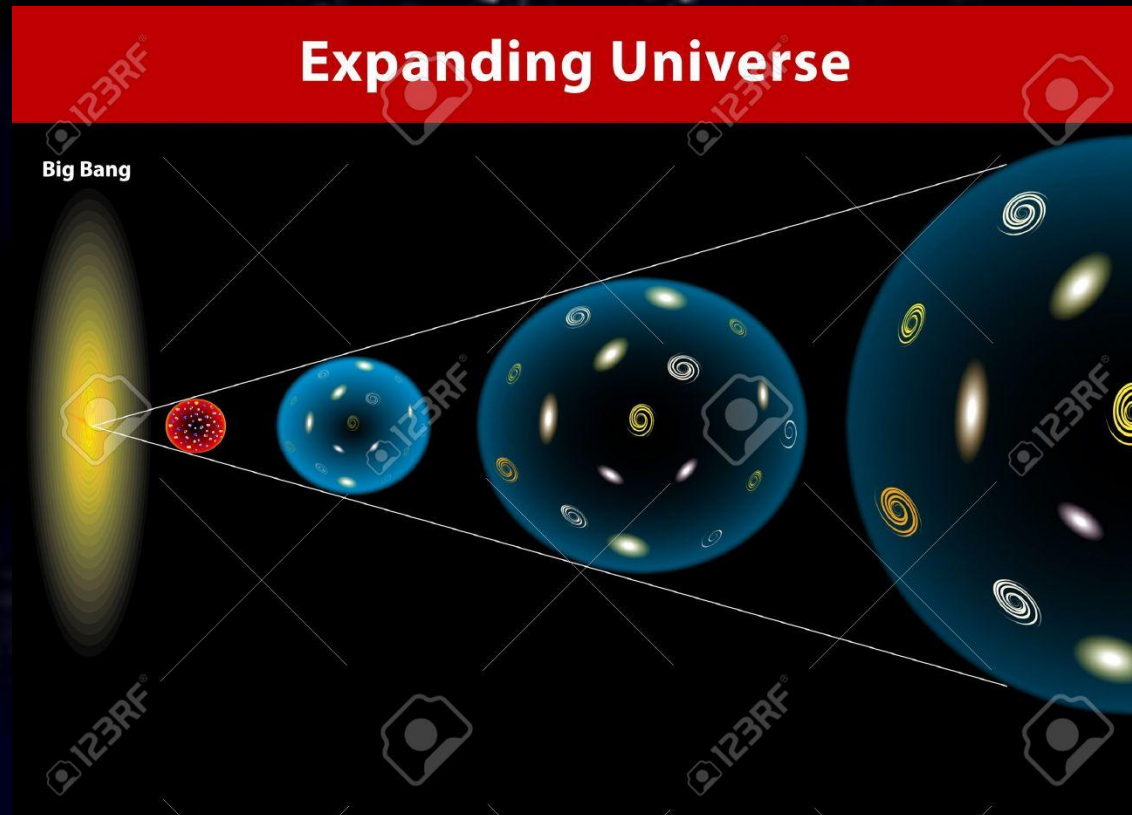
# L'Universo osservabile





# L'UNIVERSO OSSERVABILE E LA SUA ETA' SONO LA STESSA COSA?

- L'universo è in espansione continua e questo succede dal Big Bang ovvero da 13,8 mld di anni fa. Non riusciamo a vedere oltre questo limite e la maggior parte dell'universo ci resterà per sempre ignota....☹️



**Se l'universo non si espandesse, cioè fosse statico, e le galassie fossero ferme, allora avrebbe senso pensare che l'età e le dimensioni dell'universo coincidano.**

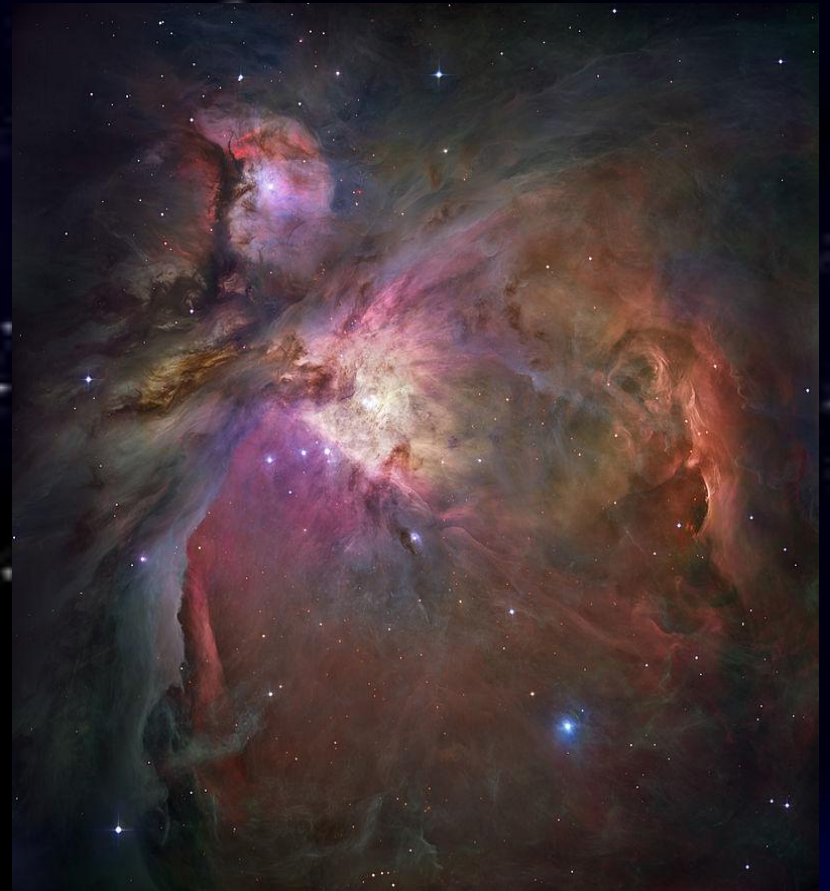
**In realtà non è così.....Immaginiamo un palloncino con dei puntini colorati che rappresentano le galassie.....**



# LE NEBULOSE CULLA E CIMITERO DI STELLE

Ma come nascono e muoiono le stelle? e cosa è una stella? Diciamo innanzitutto che le stelle sono molto precise; lasciano ciò che trovano, nel senso che nascono da enormi ammassi di gas e polveri, le Nebulose, e molte di loro, dopo la loro “morte” lasciano di nuovo un ammasso di gas e polveri cioè di nuovo una nebulosa.

- La nebulosa di Orione, ad esempio, visibile a occhio nudo, è una delle nebulose più diffuse e brillanti del cielo notturno; essa dista da noi poco meno di 1300 anni luce, quindi se stanotte la guardiamo vediamo la luce emessa circa 1300 anni fa. In questa nebulosa, che si estende per 24 anni luce, come in milioni di altre nell'Universo ci sono migliaia di stelle neonate o molto giovani; nell'immagine si possono distinguere stelle azzurre molto calde ma ci sono anche stelle rosse più fredde.



## •IL MOTORE DELLE STELLE

- Abbiamo detto che una stella si forma per contrazione gravitativa di polveri e gas. La materia man mano che si accumula si addensa verso il centro ( protostella) e questo produce oltre ad un aumento della densità un aumento della temperatura che quando raggiunge circa 4-5 milioni di gradi ,
- la materia si “accende” tramite un processo chiamato

## •FUSIONE NUCLEARE



- Mi chiamo Atomino bip-bip (@Disney)
- sono un atomo di Elio (He), e sono molto importante nel processo di fusione nucleare



1	IA	1,0079	1,1
1		H	
2	IIA	6,941	9,0122
3		Li	Be
4		Na	Mg
5		K	Ca
6		Rb	Sr
7		Fr	Ra

- Metalli Alcalini
- Metalli Alcalino-Terrosi
- Lantanidi
- Attinidi
- Elementi di Transizione
- Metalloidi / Non Metalli
- Alogeni
- Gas Nobili

- STATI di AGGREGAZIONE a 20 °C
- SOLIDI
  - LIQUIDI
  - GASSOSI
  - ARTIFICIALI

Gruppo

Periodo

19	39,0983	20	40,08	21	44,9559	22	47,9	23	50,9415	24	51,996	25	54,938	26	55,847	27	58,9332	28	58,7	29	63,546	30	65,38
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
37	85,4678	38	87,62	39	88,9059	40	91,22	41	92,9064	42	95,94	43	(98)	44	101,07	45	102,9055	46	106,4	47	107,868	48	112,41
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
55	132,9054	56	137,33	57	138,9055	72	178,49	73	180,9479	74	183,85	75	186,207	76	190,2	77	192,22	78	195,09	79	196,9665	80	200,59
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
87	(223)	88	226,025	89	227,028	104	(261)	105	(262)	106	(266)	107	(264)	108	(277)	109	(268)	110	(271)	111	(272)		
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg													
Francio	Radio	Attinio	Rutherfordio	Dubnio	Seaborgio	Bohrio	Hassio	Meitnerio	Darmstadtio	Roentgenio													

5	10,81	6	12,011	7	14,0067	8	15,9994	9	18,9984	10	20,179
B	C	N	O	F	Ne						
13	26,9815	14	28,0855	15	30,9738	16	32,06	17	35,453	18	39,948
Al	Si	P	S	Cl	Ar						
31	69,72	32	72,59	33	74,9216	34	78,96	35	79,904	36	83,8
Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
49	114,82	50	118,69	51	121,75	52	127,6	53	126,9045	54	131,3
In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
81	204,37	82	207,2	83	208,9804	84	(209)	85	(210)	86	(222)
Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
113	208,9804	114	209	115	210	116	211	117	212	118	213
Fl	Mc	Lv	Ts	Og							

Numero Atomico: 1

Peso Atomico: 1,0079

Valenza: 1

Densità (g/cm³): 0,00008989

Temp. Fusione (°C): -253

Temp. Ebollizione (°C): -253

Numero di Ossidazione: 1

Simbolo: H

Nome: Idrogeno

58	140,12	59	140,9077	60	144,24	61	(145)	62	150,4	63	151,96	64	157,25	65	158,9254	66	162,5	67	164,9304	68	167,26	69	168,9342	70	173,04	71	174,967
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu														
Cerio	Praseodimio	Neodimio	Promezio	Samario	Europio	Gadolinio	Terbio	Disprosio	Olmio	Erbio	Tulio	Itterbio	Lutezio														
90	232,0381	91	(209)	92	238,029	93	237,048	94	(244)	95	(243)	96	(247)	97	(247)	98	(251)	99	(252)	100	(257)	101	(258)	102	(259)	103	(260)
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr														
Torio	Protoattinio	Uranio	Nettunio	Plutonio	Americio	Curio	Berchelio	Californio	Einsteinio	Fermio	Mendelevio	Nobelio	Laurenzio														

Serie dei Lantanidi

Serie degli Attinidi

## Abbondanza degli elementi chimici

- Idrogeno 74%
- Elio 24%
- Ossigeno 1%
- Carbonio 0,5%
- Neon 0,1%
- Ferro 0,1%
- Azoto < 0,1%
- Silicio <0,1%
- Altri elementi ~ 0,1%

# •L'IDROGENO E I SUOI ISOTOPI

L'Idrogeno (H) è l'elemento più leggero, il primo che si è formato dopo il Big Bang, e il più diffuso nell'Universo, infatti rappresenta circa il 74% di tutta la materia del Cosmo; subito dopo viene l'Elio (He) con il 24% mentre tutti i restanti 90 elementi chimici della tavola periodica formano il restante 2%!

•In realtà l'idrogeno, come tutti gli altri elementi ha dei fratellini che si chiamano ISOTOPI. Gli isotopi di un elemento sono atomi che hanno lo stesso NUMERO ATOMICO (numero di protoni nel nucleo e quindi stesso numero di elettroni) ma diverso numero di NEUTRONI.

•Nel caso dell'idrogeno si conoscono 3 isotopi naturali

•

# • L'IDROGENO E I SUOI ISOTOPI

•il PRÒZIO

1 PROTONE + 1 ELETTRONE

•il DEUTERIO:

1 PROTONE + 1 NEUTRONE +1 ELETTRONE

il TRIZIO:

1 PROTONE + 2 NEUTRONI +1 ELETTRONE



**PRÒZIO (99,985%)**

**DEUTERIO (0,015%)**

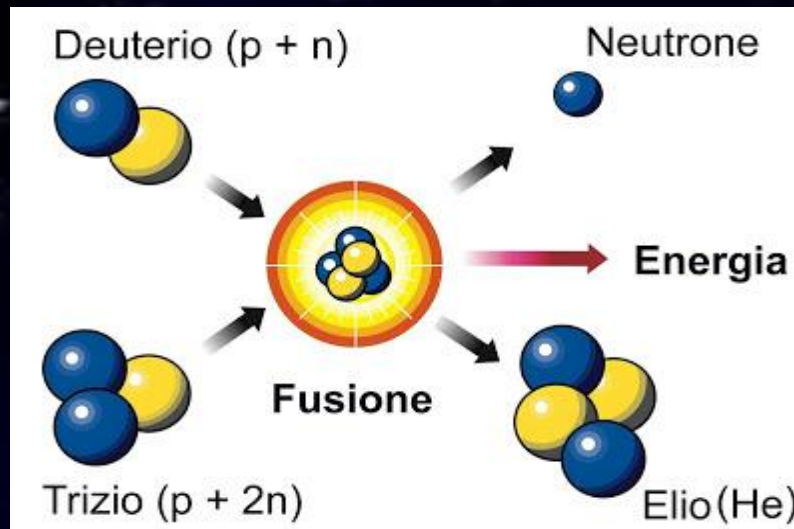
**TRIZIO (tracce)**



- Il motore della stella è la fusione nucleare,
  - il suo carburante l'Idrogeno

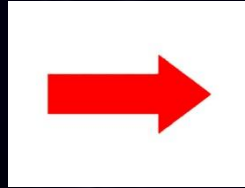
• Vediamo adesso cosa succede nella Fusione nucleare. La proto-stella è formata da grandi quantità di idrogeno e in parte minore da elio, la fusione dell'idrogeno inizia quando la pressione gravitativa e la temperatura raggiungono livelli soglia.

• Gli isotopi Deuterio e Tritio si fondono tra loro per dare un nuovo elemento l'Elio che è il secondo elemento della tavola periodica. Dato che la massa di Elio è inferiore alla massa dei due atomi che si fondono (infatti contiene 2 protoni e 2 neutroni invece di 2 protoni e 3 neutroni), la massa mancante viene trasformata in energia secondo la nota formula  $E = mc^2$ . In un secondo avvengono miliardi di miliardi di queste fusioni e continuano per milioni o miliardi di anni per tutta la vita di una stella.



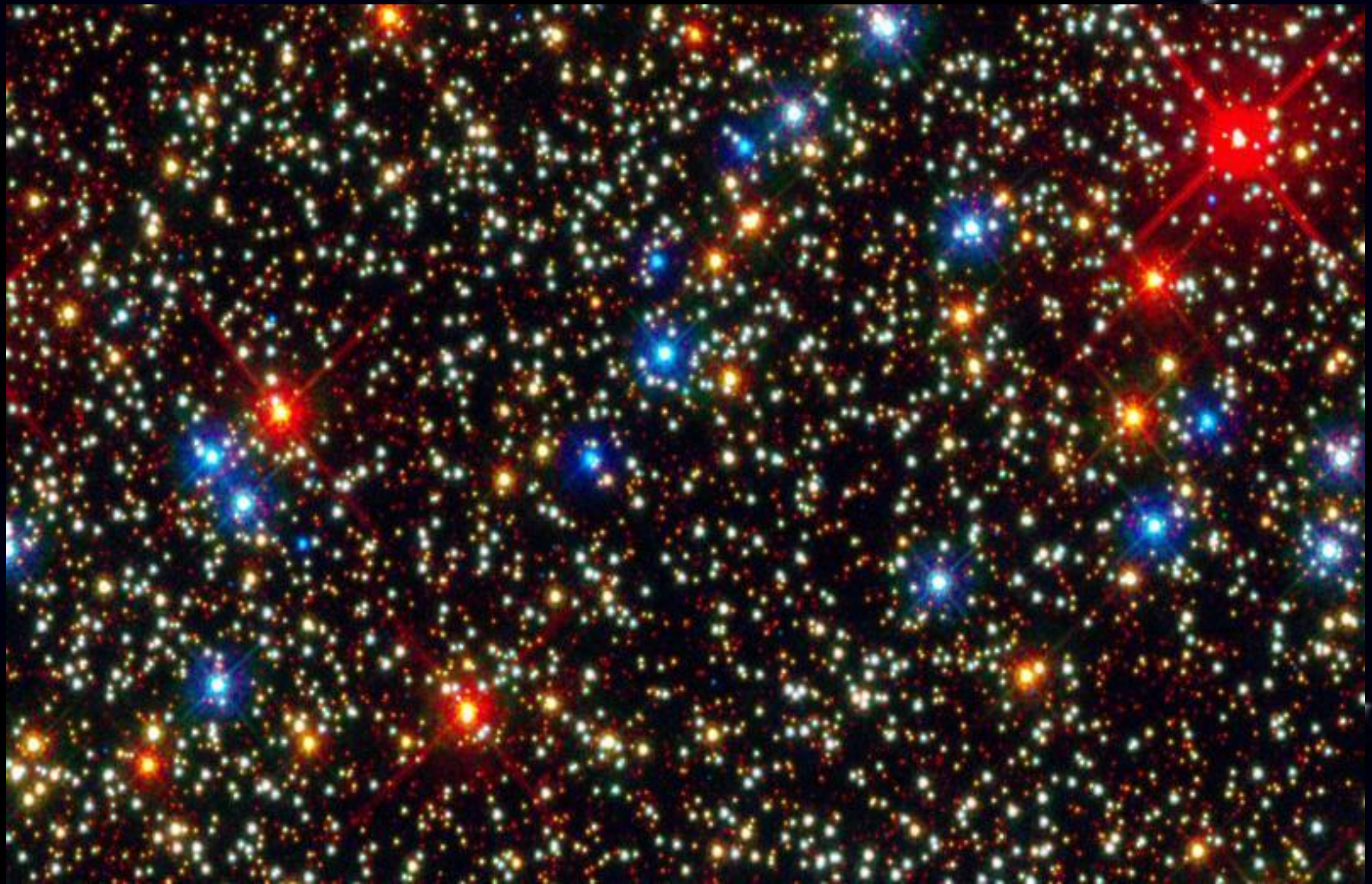


(H) Idrogeno



(He) Elio

•L'atomo di elio che si origina dalla fusione nucleare ha una massa 4 volte superiore a quella dell'idrogeno, ha 2 protoni e 2 neutroni nel nucleo e 2 elettroni\* che orbitano intorno al nucleo. \* ricorda che il numero di elettroni deve essere uguale a quello dei protoni perché l'atomo sia elettricamente neutro



- Le stelle nell'universo sono molto diverse tra loro: hanno colori, temperature e dimensioni diverse e soprattutto un diverso "stile di vita"



•Gliese 1132 ad esempio è una “ nana rossa “ è una stella piccola poco più grande di **Giove** con una temperatura superficiale di appena 3500 K che brucia l’idrogeno molto lentamente e proprio per questo ha una aspettativa di vita di oltre 100 mld di anni; quindi tutte le nane rosse sono ancora degli adolescenti... Le più anziane hanno 13 miliardi di anni... Questo è anche il genere di stella più diffuso nell’Universo.

•Il Sole è un “nana gialla” una stella di dimensioni medio-piccole che ha una massa pari al 99,9% della massa di tutto il Sistema Solare; ha una temperatura superficiale di circa 5800 K; si è formato 5 mld di anni fa e brillerà per altri 5 mld di anni, prima di cambiare la sua attuale struttura



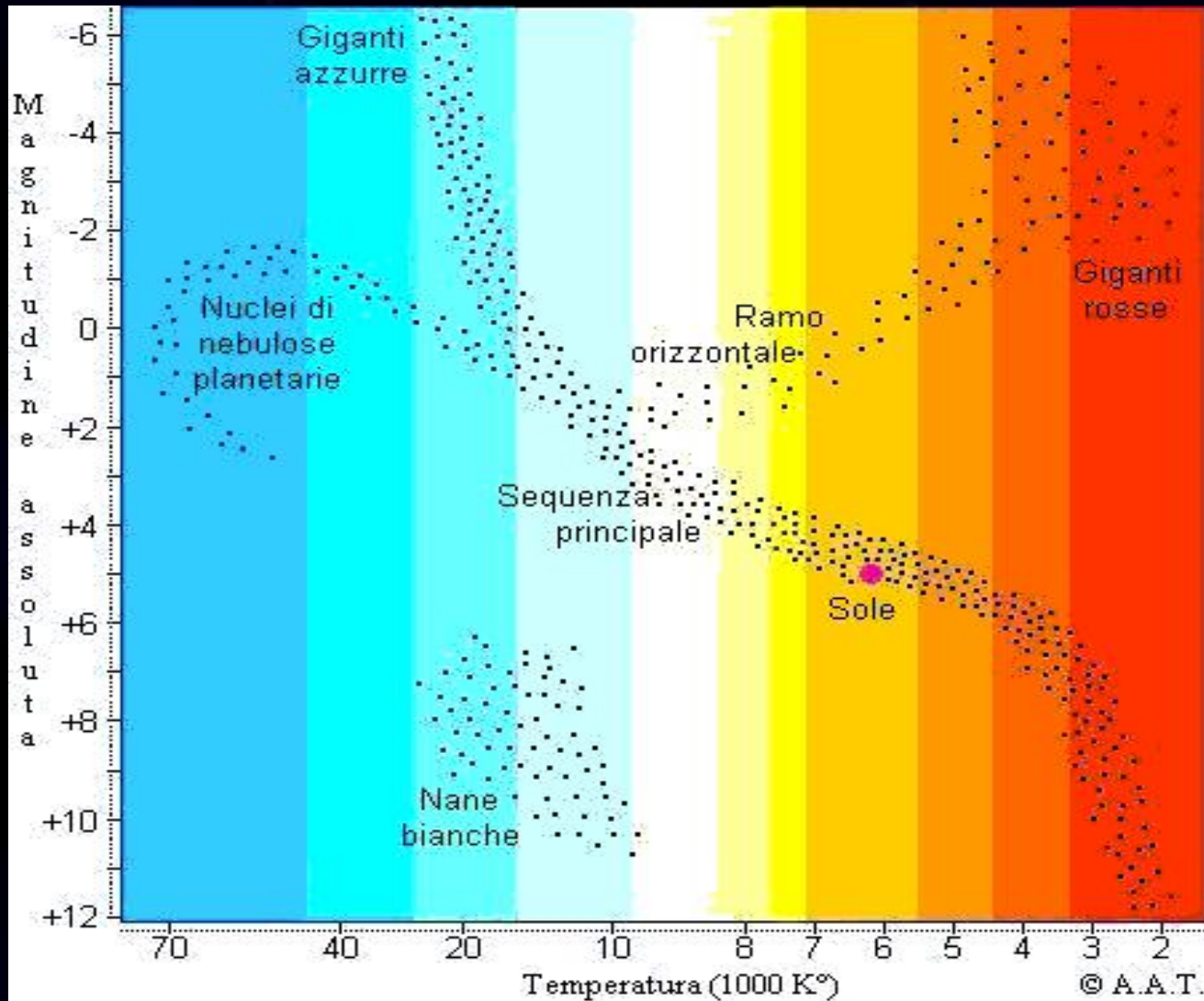
**R136a1** è una stella iper gigante blu, visibile nella costellazione del Dorado. È ad oggi considerata la stella più massiccia conosciuta, con una massa stimata in circa 260 volte la massa del Sole. La stella è inoltre annoverata anche tra le stelle più luminose conosciute, con una luminosità circa 8.700.000 volte maggiore di quella del Sole. Ha una temperatura superficiale di oltre 50.000 K e una vita media di pochi milioni di anni.



# Ma quanto sono grandi le stelle?

- Vediamo adesso un filmato sulle dimensioni dell'Universo
- <https://youtube/wAr3GHnPxhs>

# Il diagramma Hertzsprung-Russell e la Sequenza principale

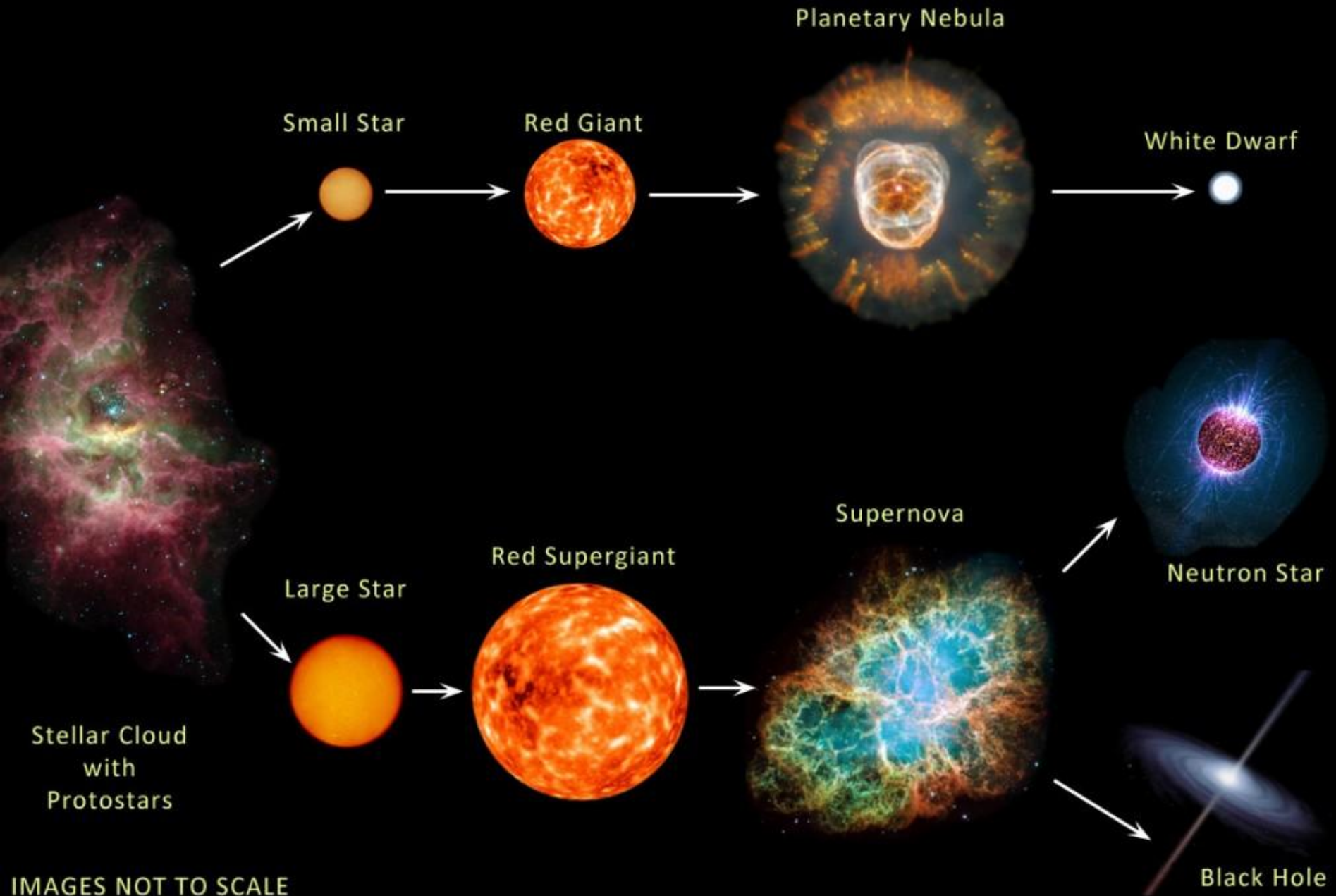




•La Sequenza principale è la fase della vita di una stella in cui l'astro è stabile durante la quale fonde idrogeno in elio. In questa fase c'è un perfetto equilibrio tra la pressione gravitativa verso il nucleo e la pressione dovuta alla fusione nucleare verso l'esterno. Questa fase rappresenta circa il 90% della vita di una stella. Il Sole è in Sequenza principale e vi resterà per altri 4,5-5 miliardi di anni.

Quando una stella esaurisce l'idrogeno esce dalla fase di stabilità (quindi dalla Sequenza principale del diagramma HR) ma la fusione non si arresta. Una stella delle dimensioni simili al nostro Sole comincerà a fondere **Elio in Carbonio**; in questa fase di grande instabilità il nucleo subisce dei collassi gravitazionali e incrementa la sua temperatura, mentre gli strati più esterni grazie alla maggiore energia proveniente dal nucleo si espandono raffreddandosi, la stella divenuta quindi **più grande e meno calda si trasforma in Gigante rossa \*** e quindi in Nebulosa Planetaria. Il Sole ad esempio si espanderà fino circa all'orbita di Giove. Questa fase durerà poche centinaia di milioni di anni; infine quando l'elio sarà quasi esaurito la stella si contrarrà nuovamente aumentando la temperatura a 100 milioni di K e diventando un oggetto piccolo, molto denso, caldissimo e brillante, una **NANA BIANCA**

# EVOLUTION OF STARS



Small Star

Red Giant

Planetary Nebula

White Dwarf

Large Star

Red Supergiant

Supernova

Neutron Star

Stellar Cloud  
with  
Protostars

Black Hole

IMAGES NOT TO SCALE

# LE SUPERNOVE

**Stelle con massa maggiore di almeno 8 volte quella del Sole hanno un'evoluzione differente.**

**Intanto hanno una vita molto più breve ( da centinaia di milioni a pochi milioni di anni, con l'incremento della massa) perché pur avendo più H lo consumano molto più velocemente, poi il loro ciclo segue uno schema di questo tipo**

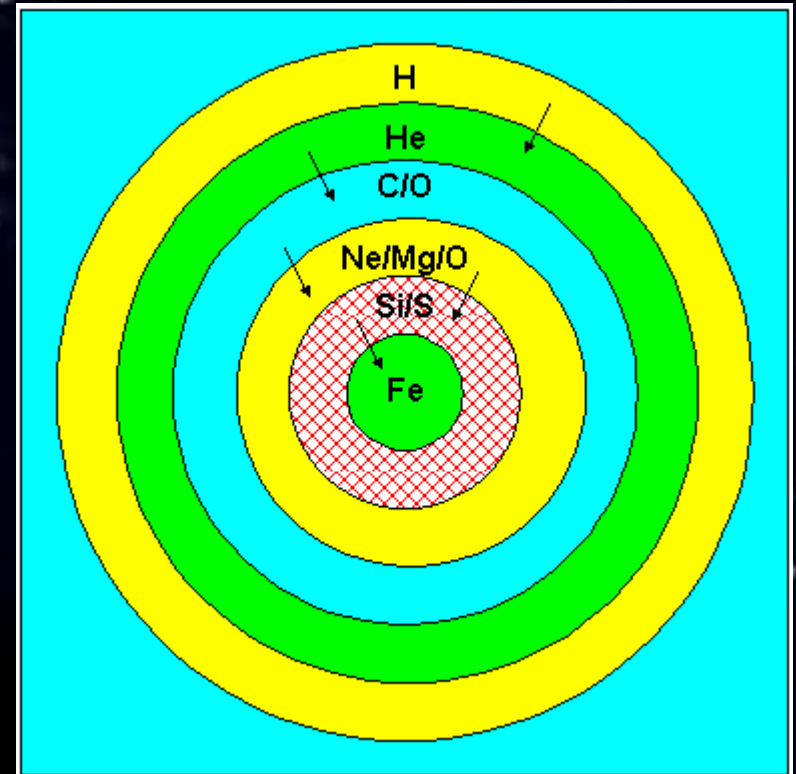
**Fusione di H → He**

**Fusione di He → C**

**Fusione di C → O**

**Fusione di O → Ne/Mg → Si → Fe\***

**Nella fase finale il nucleo della stella è formato da gusci concentrici di vari elementi (strati a cipolla); \* quando si arriva al Ferro la sua fusione anziché produrre energia la assorbe, per cui l'energia nel nucleo diminuisce drasticamente, la pressione della fusione non è più in grado di contrastare la gravità, il nucleo diventa instabile e collassa su se stesso. L'improvviso e violentissimo collasso della materia stellare produce una esplosione violentissima che sparge gli strati più esterni in tutte le direzioni; questo evento si chiama supernova**



# Le stelle piccole vivono più a lungo

Stelle di piccola massa

- Nane rosse, nane gialle

Lunga vita 10-100 mld anni

Stelle grande massa

Vita breve da pochi milioni di anni per le iper giganti a qualche decina di milioni di anni

Le stelle di grande massa sono come una Ferrari che ha un grande serbatoio della benzina, 100 litri (anche il triplo di un utilitaria) ma consuma tantissimo (3-4 km/litro), con 100 litri una Ferrari percorre circa 300 max. 400 km.

Le stelle piccole sono come una Panda che ha un serbatoio di 37 litri, quindi molto più piccolo ma percorre oltre 20 km con un litro quindi con un pieno ha un'autonomia di oltre 700 km



• La supernova ASASSN-15lh, situata a 3,8 mld anni luce, scoperta di recente, ha emesso tanta energia quanta ne potrebbe emettere il Sole nel suo stato attuale nell'arco di 90 miliardi di anni! E' 570 miliardi di volte più luminosa del Sole, 20 volte più luminosa di tutte le stelle della Via Lattea messe insieme



Le supernove sono importanti per due motivi; il primo è che sono la causa dell'arricchimento degli elementi chimici nell'Universo (solo gli elementi più leggeri si sono formati con il Big Bang), il secondo è che la parte di materia stellare espulsa con lo scoppio crea nuove nebulose di gas che a loro volta saranno la “nursery” di nuove stelle. Noi stessi possiamo a ragione affermare di essere “Figli delle Stelle” come recita una famosa canzone.

La nebulosa del Granchio  
resto di una supernova  
esplosa nella costellazione  
del Toro



## LE STELLE SONO TANTE, MILIONI DI MILIONI, LE STELLE DI NEUTRONI... VUOL DIRE GRAVITA'

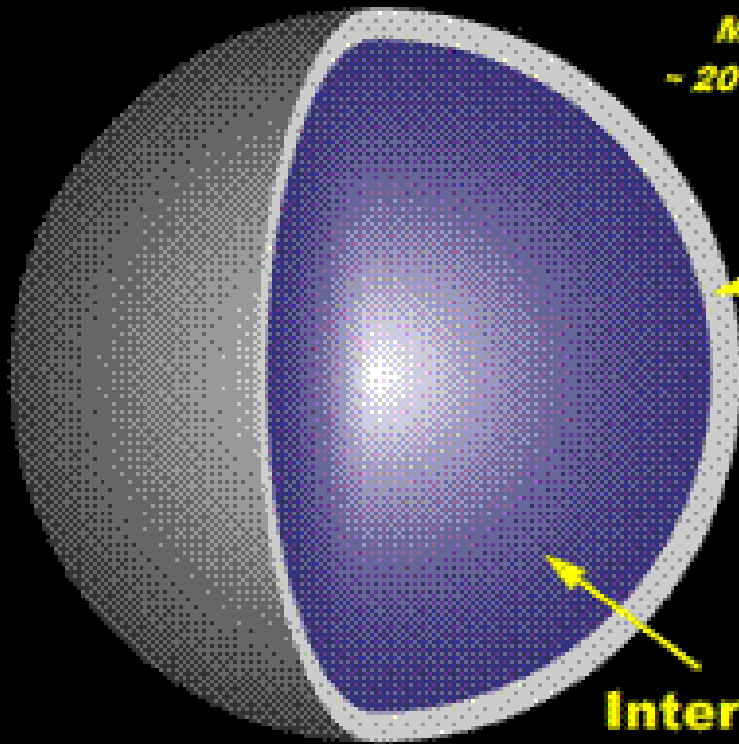
.... In realtà la nota filastrocca di una vecchia pubblicità di salumi recitava un po' diversamente...

- La materia collassata e superdensa del nucleo della supernova (per stelle di almeno 10 volte la massa del Sole) raggiunge densità talmente elevate da essere inimmaginabili. Si possono formare così due oggetti differenti. Per stelle con massa più modesta il nucleo superdenso si è contratto da un diametro originario di centinaia di migliaia o anche in qualche caso di milioni di Km ad un diametro di 20/30 Km con una massa da 1,4 a 3 volte quella del Sole.
  - Riducendosi il volume aumenta drasticamente la densità degli atomi.
  - Si è formata una **Stella di Neutroni**, perché della materia originaria a queste densità sono rimasti praticamente solo neutroni.
- In questi oggetti la densità aumenta in genere di un fattore  **$10^{14}$**  ciò significa che  $\text{cm}^3$  d'acqua (un cucchiaino) peserebbe circa 100 milioni di tonnellate!! O se preferite immaginate di comprimere la nave più grande al mondo alle dimensioni di un granello di sabbia!!!



## Stella di neutroni

*Massa ~ 1,5 volte il Sole  
~ 20 chilometri di diametro*



**Crosta solida**  
*~ 1,5 km di spessore*

**Interno superfluido**

*Principalmente neutroni,  
con altre particelle*

Potrebbe bastare ma la natura non finisce di stupirci. I buchi neri vanno oltre l'immaginabile.....

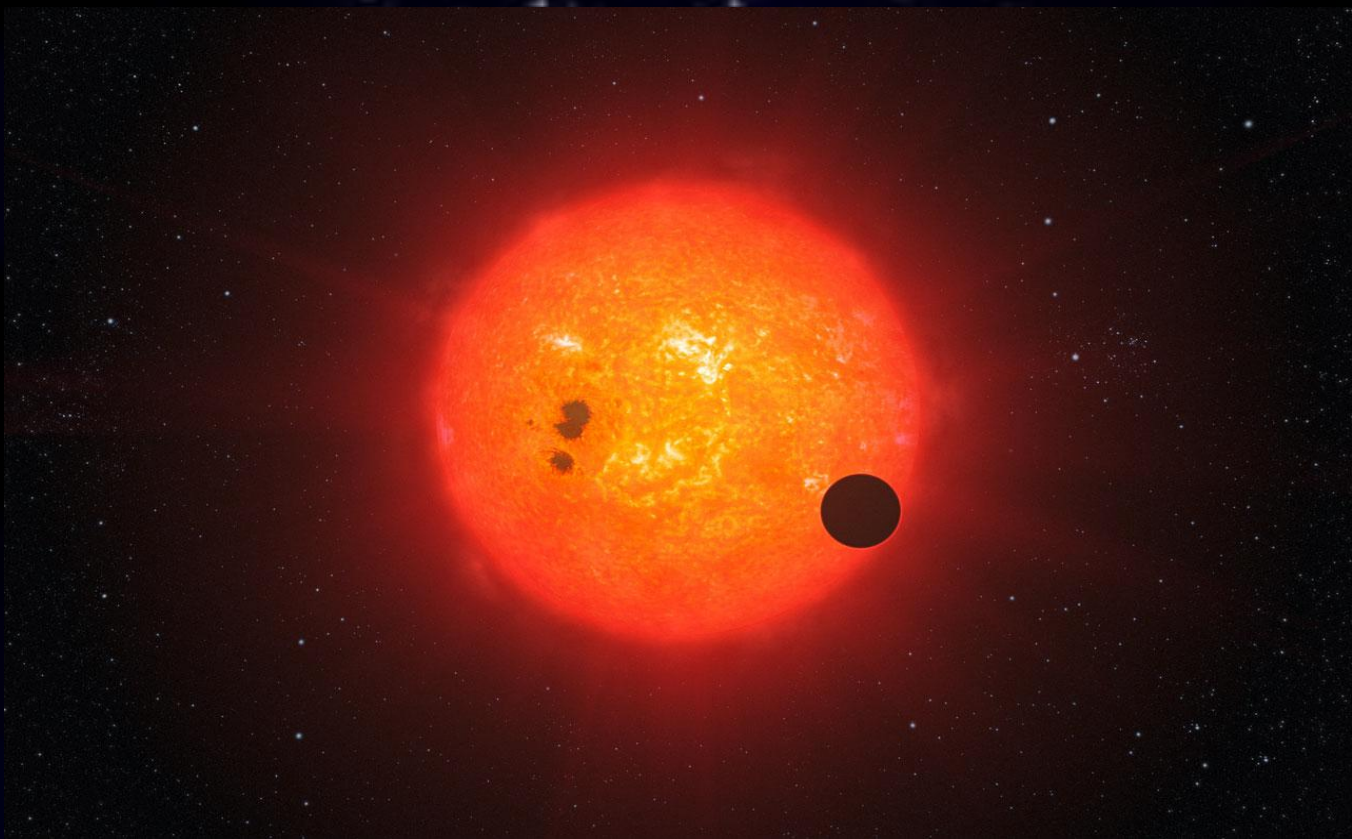
## I Buchi neri stellari

Stelle più massicce ( $>20$  masse solari) dopo la fase di supernova con le stesse modalità formano oggetti ancora più densi e misteriosi, i Buchi Neri.

Previsti nelle equazioni della relatività generale da Albert Einstein un secolo fa, i buchi neri sono oggetti misteriosi con un campo gravitazionale così potente che non lascia sfuggire nemmeno la luce. Un buco nero stellare può avere masse da 10 a 30 masse solari, il tutto però racchiuso in diametri di poche decine di Km o al massimo un centinaio. **Esistono poi i buchi neri super massicci che hanno masse milioni o miliardi di volte la massa del Sole.** Sembra che ogni Galassia, Via Lattea compresa abbiano al loro centro un buco nero di questo tipo.

C'è vita su altri mondi? Dal 1995 Ad oggi sono stati scoperti oltre 4000 pianeti extrasolari nella galassia, il più vicino a 4,5 a.l. da quando sono in orbita potenti telescopi, come Hubble, Kepler, Spitzer, l'astronomia ha avuto un impulso decisivo

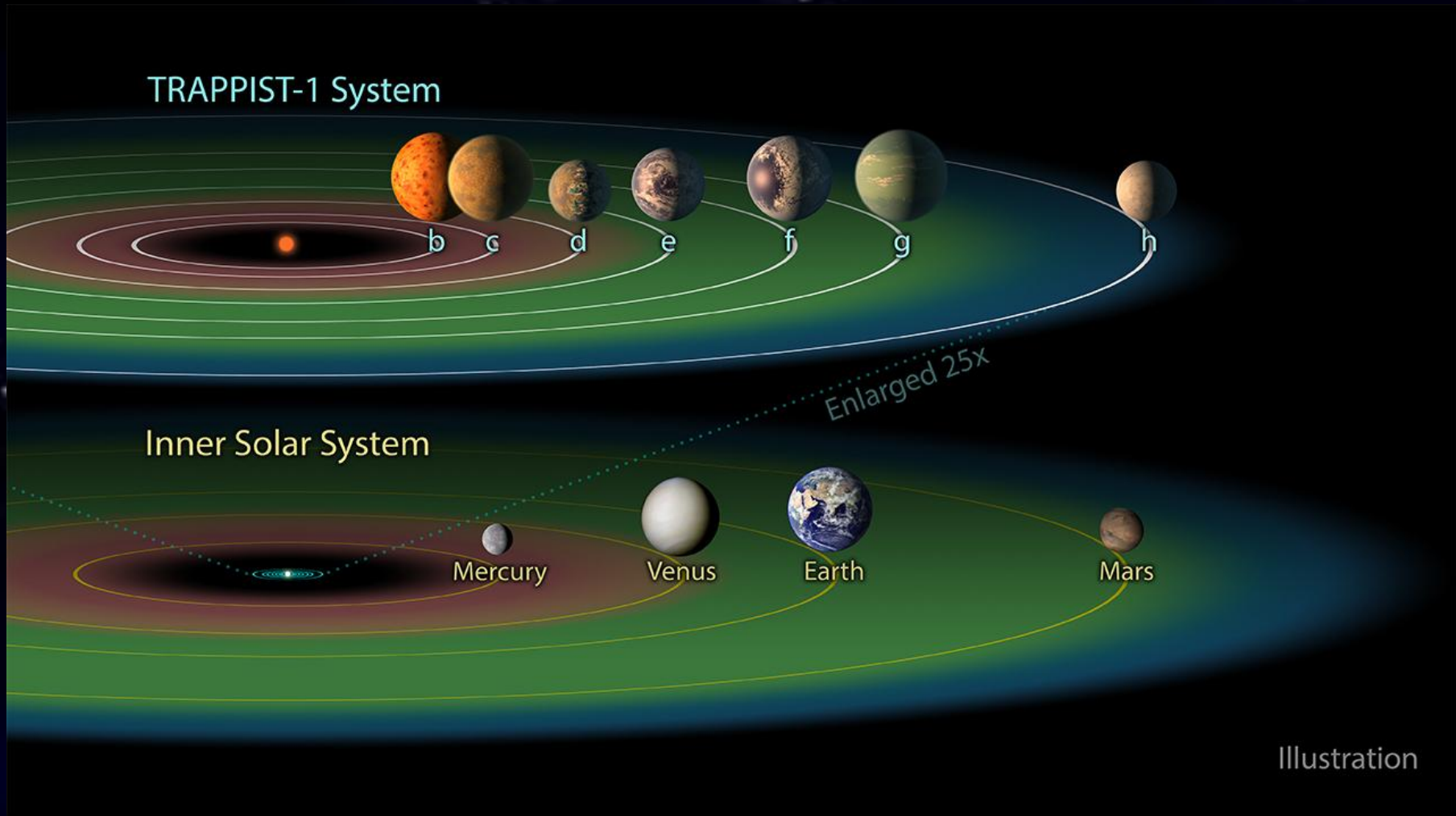
## Il metodo dei transiti



# Gli esopianeti, pianeti extra-solari alla ricerca della vita su altri mondi

Il sistema Trappist 1 la scoperta più recente a 40 anni luce da noi

Link video: <https://youtu.be/oQtsuA8ZPfY>



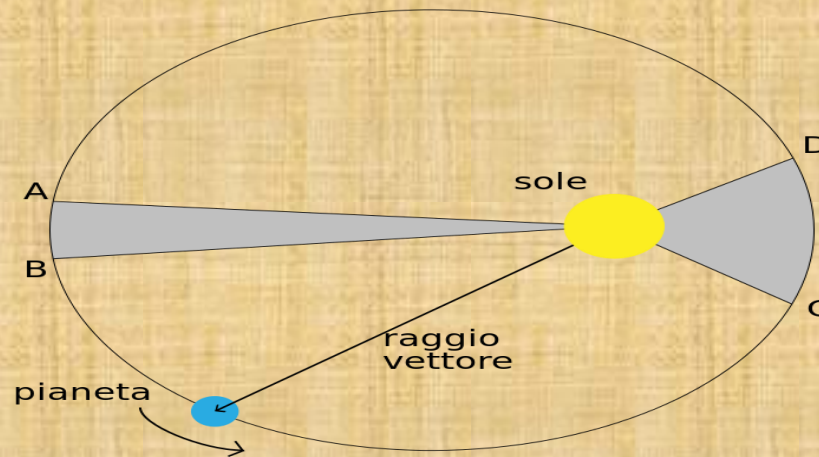


**VIDEO SISTEMA EXTRASOLARE  
TRAPPIST 1**

# Un po' di fisica

## Le tre leggi di Keplero

**Prima legge: I pianeti percorrono orbite ellittiche intorno al Sole che occupa uno dei fuochi dell'ellisse.**

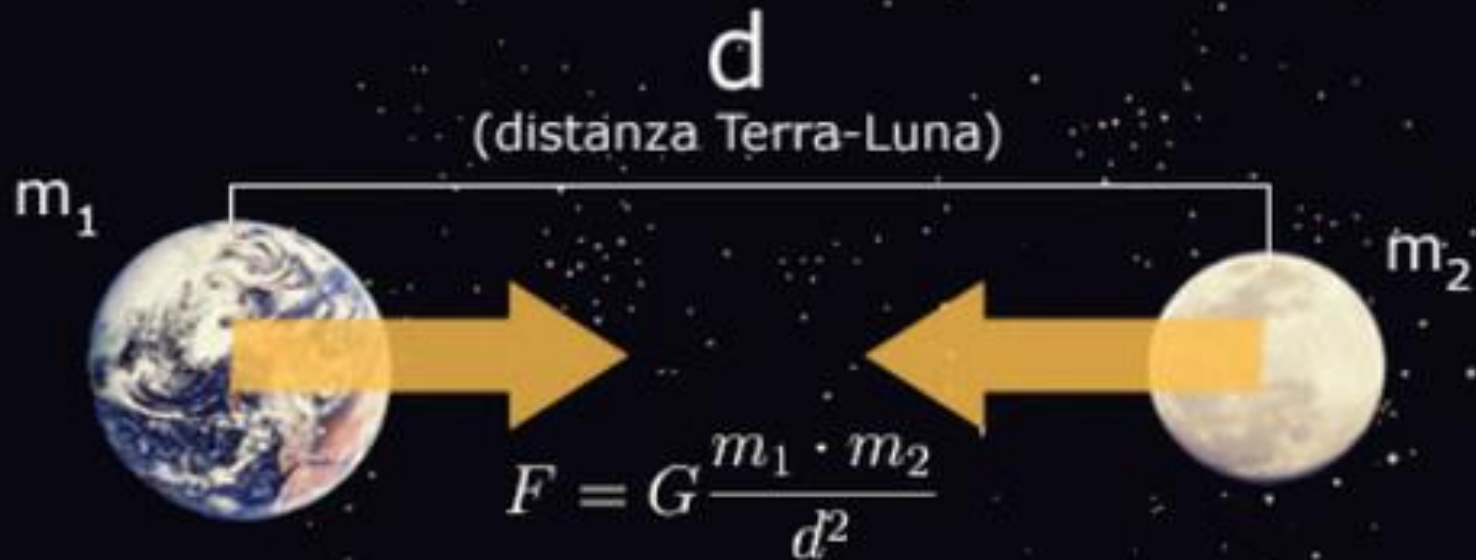


**Seconda legge: il raggio vettore che collega il centro del pianeta con il centro del Sole copre aree uguali in tempi uguali**

**Terza legge: I quadrati del tempo che i pianeti impiegano a percorrere le loro orbite sono proporzionali al cubo delle loro distanze medie dal sole.**

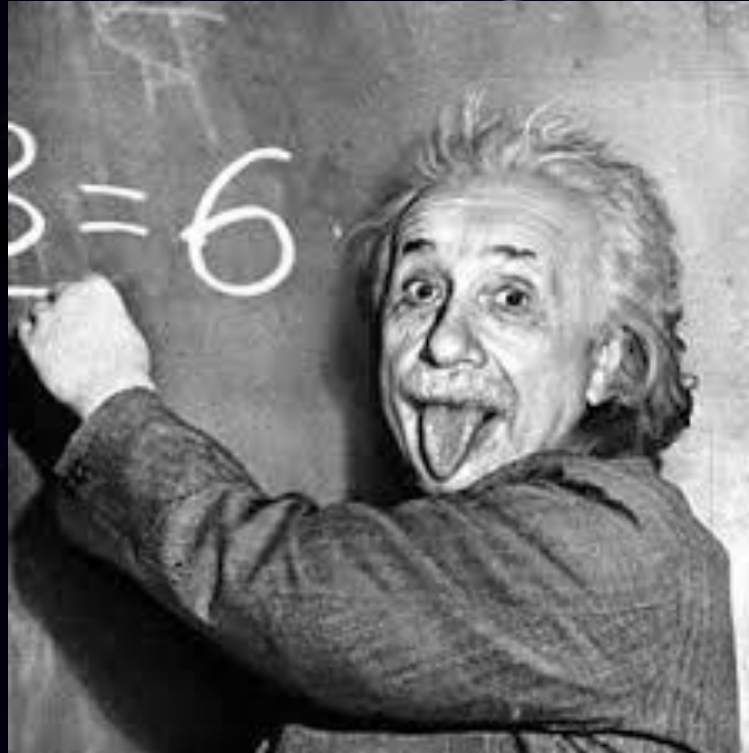
# La legge di gravitazione universale di Newton

## Come i corpi si attraggono



# Il padre della relatività

**Albert Einstein è il Copernico del XX secolo.**



$$E = mc^2$$



La teoria della relatività ha previsto i buchi neri.  
Oggi sappiamo che esistono da osservazioni indirette osservando i movimenti di gas e stelle attorno a un punto che sembra risucchiarle, ma soprattutto è la scoperta recentissima delle onde gravitazionali che ce ne ha dato conferma.

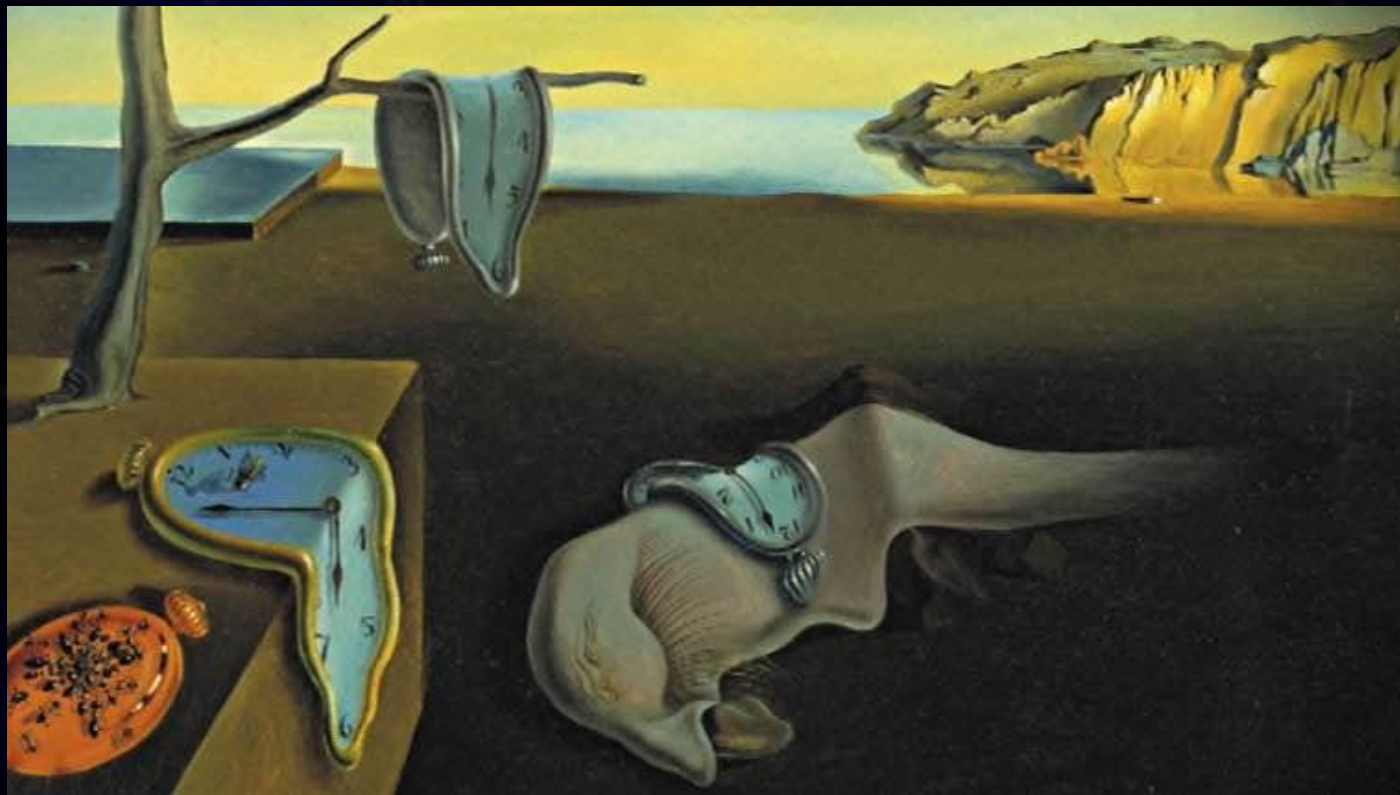


•Cosa succede vicino a un buco nero? Nessuno lo sa con precisione. Le leggi della fisica al suo interno non valgono più. Sappiamo per certo che la gravità è così forte che occorrerebbe una velocità di fuga superiore a quella della luce.

•Il limite invalicabile oltre il quale tutto viene catturato dalla gravità, si chiama **“Orizzonte degli eventi”**

Man mano che ci si avvicina all’orizzonte il tempo rallenta, in accordo con la relatività, fino a fermarsi sopra l’orizzonte



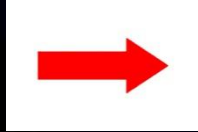


## LO SPAZIO-TEMPO

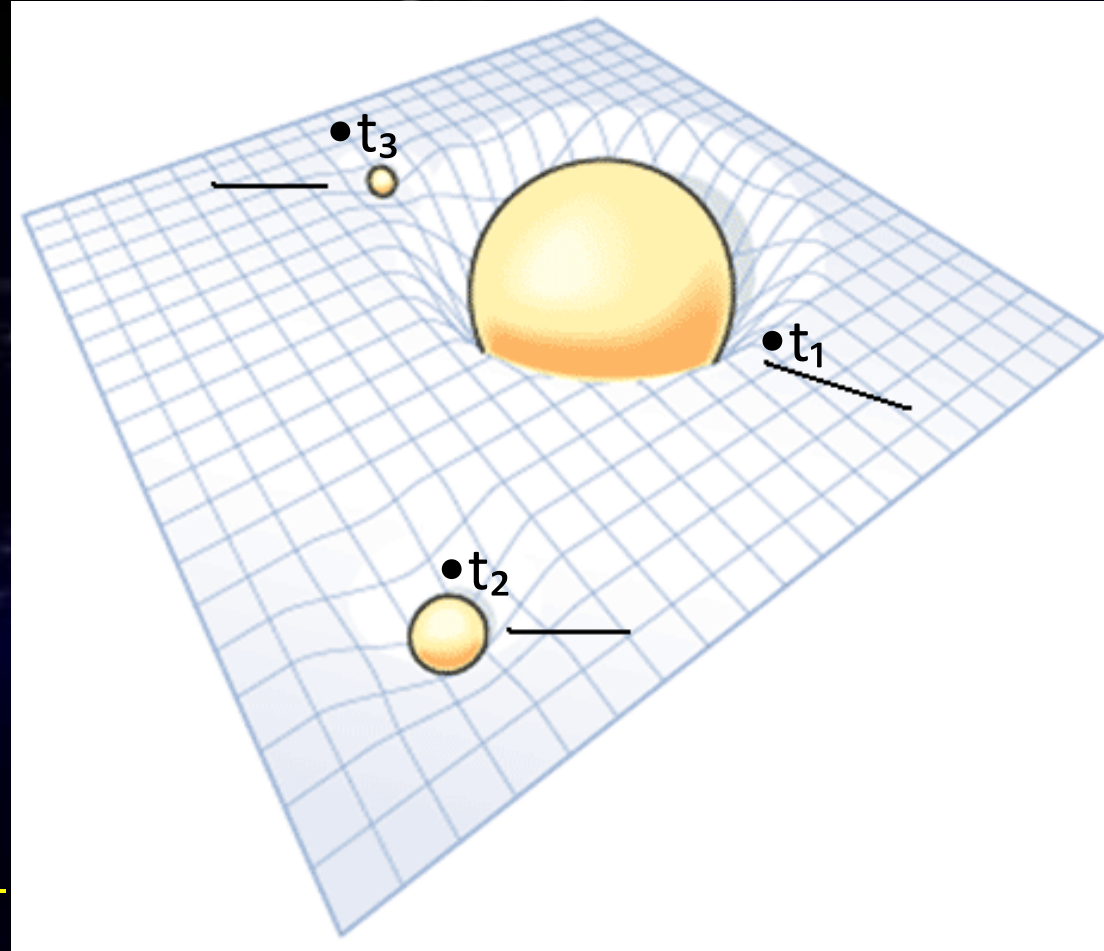
La teoria della relatività ha demolito i concetti assoluti di spazio e di tempo, come previsto dalla fisica classica di derivazione Newtoniana. Con Einstein tutto cambia e ciò che sembrava stabile e fisso muta in continuazione: lo spazio si dilata e si contrae, il tempo rallenta o scorre più velocemente. Lo spazio e il tempo sono indissolubilmente legati tra loro.

• *Da Keplero alla legge di gravitazione di Newton, allo spazio-tempo di Einstein*

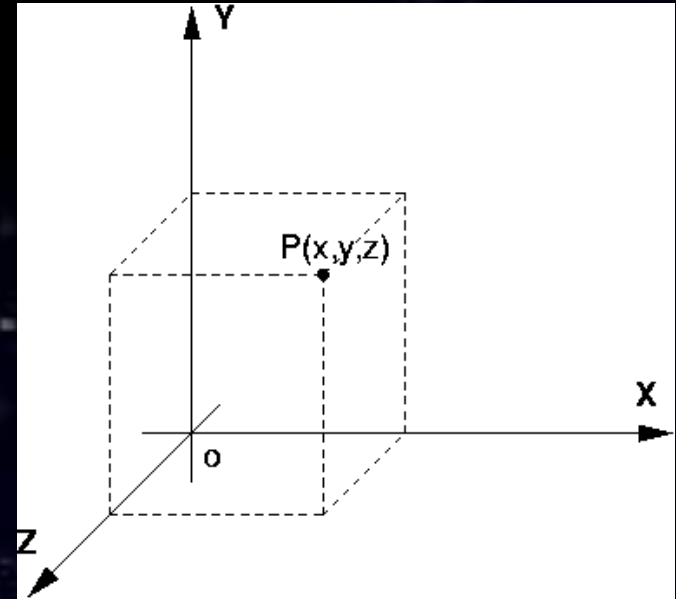
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



• maggiore è la curvatura dello spazio-tempo, maggiore è  $F$ , maggiore è la deflessione della luce, maggiore è il rallentamento del tempo. Quindi grandi masse oltre a deviare il percorso della luce, rallentano lo scorrere del tempo. La curvatura dello spazio-tempo è massima sull'orizzonte degli eventi di un buco nero dove il concetto di tempo perde di significato e la luce viene intrappolata



- **Ma cos'è lo spazio-tempo? pensiamo alla classica rappresentazione in tre dimensioni ortogonali (figura) con le quali possiamo rappresentare qualsiasi oggetto tridimensionale, per spazio-tempo si intende la struttura quadridimensionale dell'universo. Introdotto dalla relatività di Einstein, è composto da quattro dimensioni: le tre dello spazio (lunghezza, larghezza e profondità) e il tempo, e rappresenta il "palcoscenico" nel quale si svolgono i fenomeni fisici**



- **Con questa nuova concezione il tempo non ha più un valore assoluto, cioè non scorre alla stessa maniera dappertutto ed è strettamente dipendente dallo spazio percorso cioè dai movimenti di un oggetto. Così per una persona in movimento il tempo scorre più lentamente per una persona ferma, di quanto? di pochissimo (miliardesimi di secondo) cioè differenze non apprezzabili da noi uomini, ma che diventano importanti in determinate situazioni.**

## Due filmati per capire meglio

- [Stephen Hawking - Teoria dello Spazio Tempo. Buchi Neri - ITA - mp4 \(1200 kbps\).avi](#)
- [L'illusione del tempo \(ritaglio\).mp4](#)

- Le onde gravitazionali
- increspature dello spazio-tempo

•Quando nel cosmo esplose una supernova, si fondono due stelle di neutroni o due buchi neri rotanti, vengono liberate enormi quantità di energia che si propagano nel tessuto dello spazio-tempo come onde che increspano l'acqua quando vi facciamo cadere un sasso.

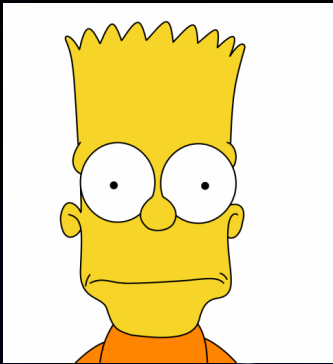


**Le onde gravitazionali sono state rivelate il 14 settembre 2015 all'osservatorio rivelatore di onde gravitazionali (interferometro) LIGO negli USA. Un impianto analogo esiste a due passi da noi, **Virgo** nelle campagne di Cascina, che purtroppo in quel periodo era spento per lavori di aggiornamento e quindi non ha potuto rilevare l'onda gravitazionale.**



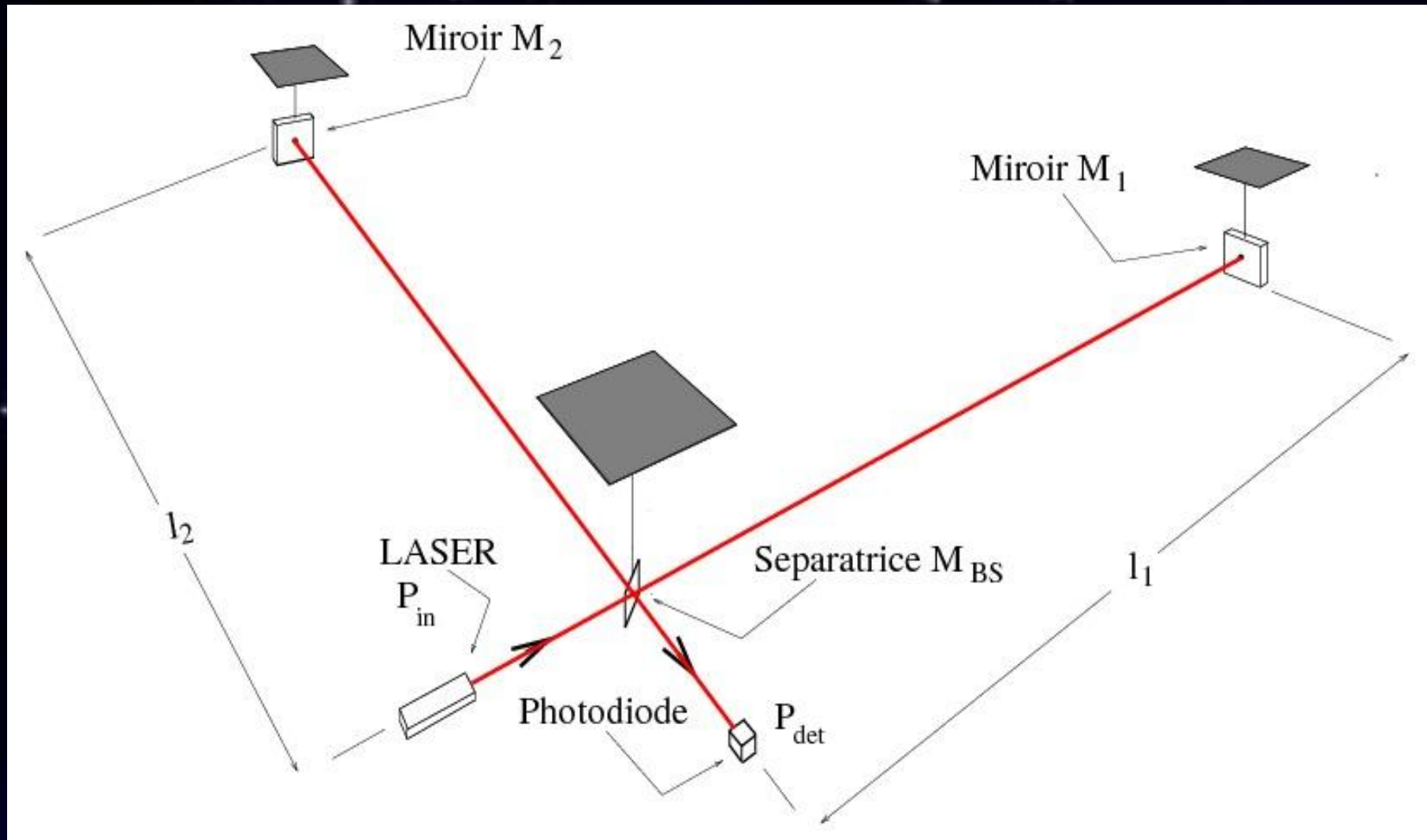


100 anni fa esatti, nel 1916 qualcuno aveva previsto l'esistenza delle onde gravitazionali! Nella sua teoria della relatività Albert Einstein ha previsto i buchi neri, le onde gravitazionali, e lo spazio-tempo come unica dimensione, lo spazio si dilata e si contrae, il tempo rallenta o scorre più velocemente. tutto questo quando circolavano le prime auto col motore a scoppio....



Guardiamo un video sulle onde gravitazionali

# Cos'è un interferometro e come funziona



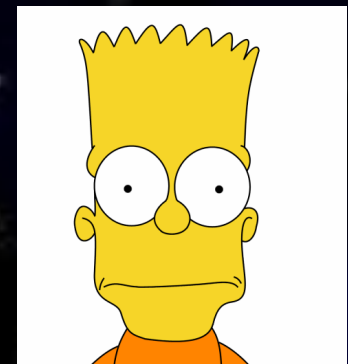
# **Come funziona un interferometro gravitazionale**

- **Video Virgo rivelatore di onde gravitazionali**

Ogni oggetto dotato di massa produce onde gravitazionali ovvero distorsioni nel tessuto dello spazio-tempo e quindi nella materia che è attraversata da queste onde, che sono però così deboli da non essere rilevabili in alcun modo. Anche con una sorgente di così immane potenza come i due buchi neri che si sono fusi le onde gravitazionali prodotte rimangono una manifestazione molto debole a causa dell'enorme distanza per cui ci vogliono apparecchiature estremamente sofisticate e sensibili come appunto gli interferometri

La precisione richiesta è straordinaria. Per rilevare la presenza di un'onda gravitazionale si deve essere in grado di riconoscere modifiche di lunghezze dell'ordine di  $10^{-21}$  m. che equivale a dire **0,000000000000000000000001 metri (un millesimo di miliardesimo di miliardesimo di metro)**. È come se un bastoncino lungo un miliardo di miliardi di chilometri (circa 100.000 anni luce) si accorciasse o si allungasse di 5 millimetri.

(come confronto, un atomo di idrogeno ha un diametro di circa  $5 \times 10^{-11}$  m)



Le onde gravitazionali rivelate sono state prodotte nell'ultima frazione di secondo del processo di fusione di due buchi neri, distanti 1,3 mld A.L. di massa equivalente a circa 29 e 36 masse solari, in un unico buco nero ruotante più massiccio di circa 62 masse solari:



mmhh...qualcosa non torna....

Se la matematica non è un'opinione  $29+36 = 65....$   
Mancano tre masse solari, dove saranno finite?



Sì! le 3 masse solari mancanti al totale della somma equivalgono all'energia emessa durante il processo di fusione dei due buchi neri, energia emessa sotto forma di onde gravitazionali.

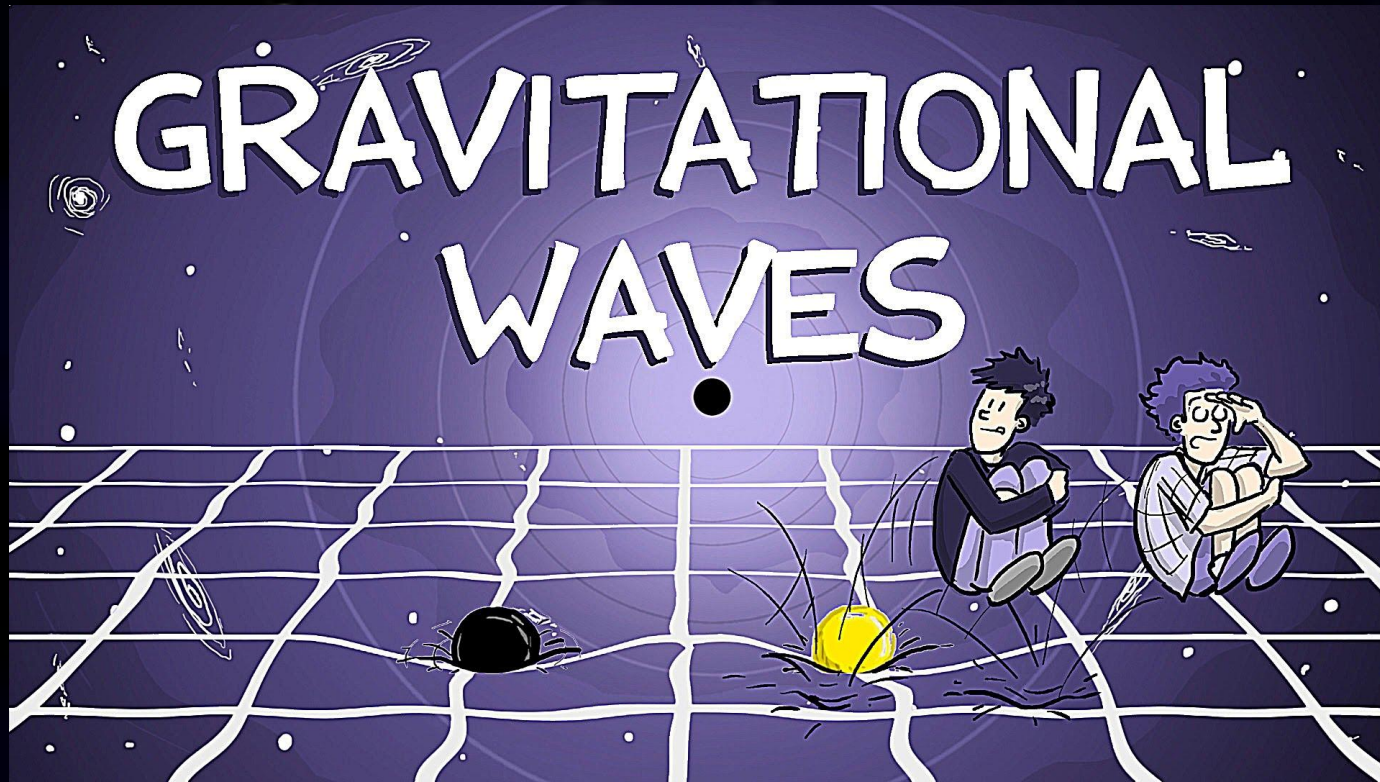
Energia emessa secondo la ben nota formula  $E = mc^2$

I due buchi neri, prima di fondersi, hanno spiraleggiato, per poi scontrarsi a una velocità di circa 150.000 km/s, la metà della velocità della luce!!



# Cosa sono le onde gravitazionali

- [3\) Slide 47 cartoon onde gravitazionali sottotitoli.mp4](#)

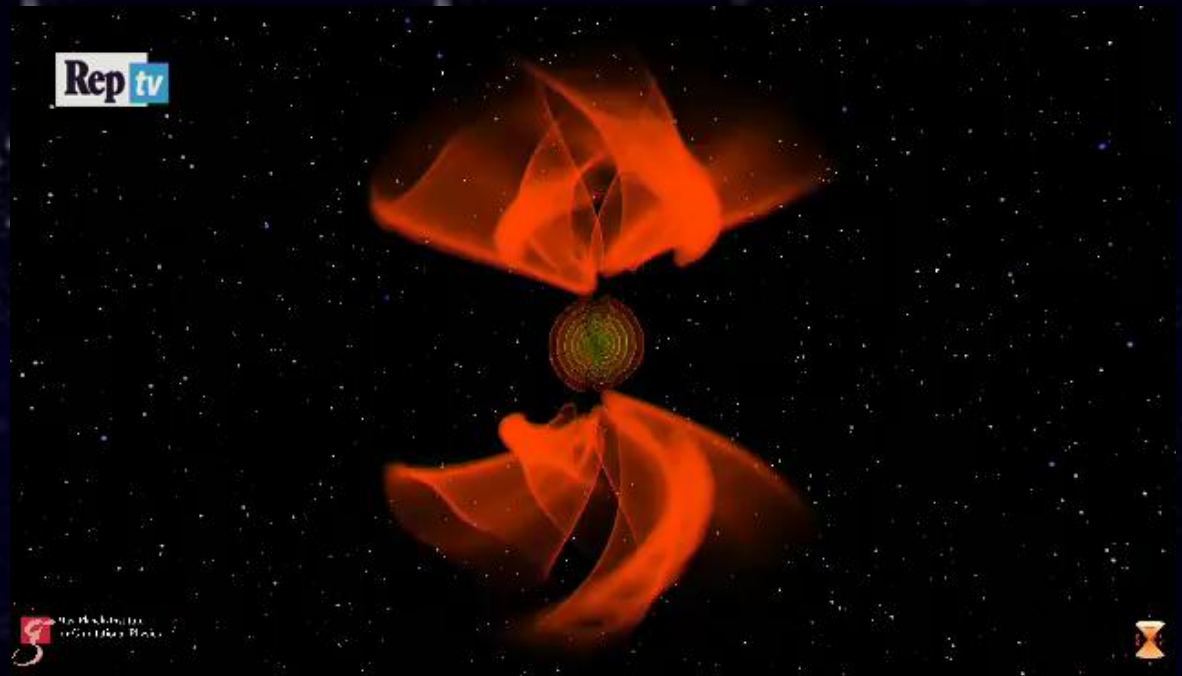




# La danza dei buchi neri

Ecco un'animazione  
computerizzata di quanto  
successo

[Buchi neri rotanti  
video.mp4](#)



# Il canto dei buchi neri

[Ecco il suono delle onde gravitazionali, la scoperta del secolo.avi](#)

- Questa presentazione è possibile scaricarla al seguente indirizzo
- <https://pigrecoerrequadro.jimdo.com/>

• **GRAZIE PER L'ATTENZIONE**