



I perché della Fisica (delle particelle elementari)

di cosa è fatta la materia?
da dove veniamo?
cosa tiene tutto assieme?

- *la scienza non fornisce risposte*
- *la scienza riduce le nostre incertezze*

COSMOLOGY MARCHES ON



Di cosa siamo fatti ?

«We are such stuff
As dreams are made on, and our little life
Is rounded with a sleep. »

William Shakespeare – La Tempesta

« Siamo fatti anche noi della materia di cui son fatti i sogni; e nello
spazio e nel tempo d'un sogno è racchiusa la nostra breve vita. »
(Prospero: atto IV, scena I.)



John William Waterhouse – Miranda and the tempest (1916)



Due concetti base

- Minore è la **massa** di un oggetto, più facile è cambiare il suo movimento.
- La materia interagisce attraverso le **interazioni (forze)**.

$$\text{massa} = \frac{\text{forza}}{\text{accelerazione}} \quad (\vec{F} = m\vec{a})$$



- Applicando una forza a un oggetto questo accelera.



La nostra comprensione della materia

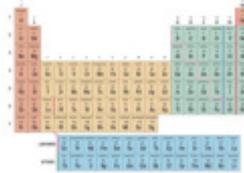
Filosofia



Empedocle

(492-432 A.C.)
4 elementi fondamentali

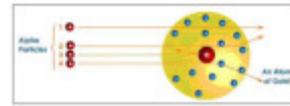
Scienza classica



Mendeleev

19^{mo} Secolo
Tavola Periodica
>100 Elementi

Meccanica quantistica



Bohr, Rutherford

inizio 20^{mo} secolo
2 elementi fondamentali
elettrone - nucleo

Oltre 2000 anni →

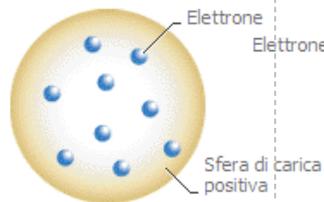


Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

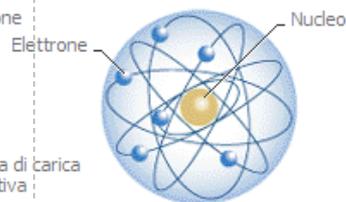
6

Evoluzione del modello atomico

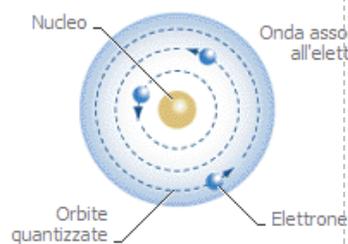
Atomo di Thomson (1899)



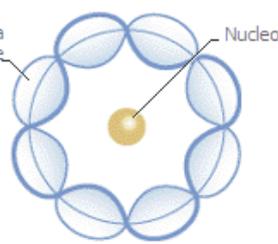
Atomo di Rutherford (1911)



Atomo di Bohr (1913)



Atomo di Schrödinger (1925)

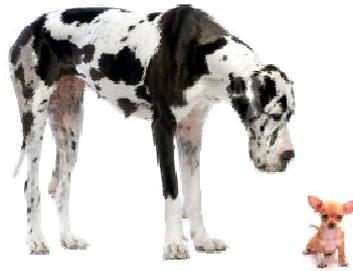


Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

7

L'ordine di grandezza delle cose

Una questione di numeri



Per comprendere le dimensioni

2		2	10		10
2×2	2^2	4	10×10	10^2	100
$2 \times 2 \times 2$	2^3	8	$10 \times 10 \times 10$	10^3	1,000
$2 \times 2 \times 2 \times 2$	2^4	16	$10 \times 10 \times 10 \times 10$	10^4	10,000
$2 \times 2 \times 2 \times 2 \times \dots$	2^n	...	$10 \times 10 \times 10 \times 10 \times \dots$	10^n	1 con n zeri



ipotesi: spessore 0.1 mm



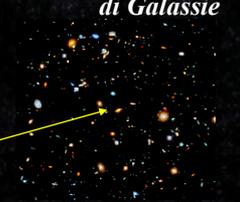
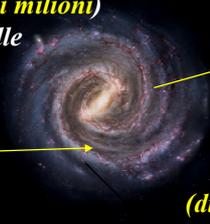
Cosa abbiamo attorno

Una galassia é 100,000,000,000,000
(cento milioni di milioni)
di volte più grande della terra

Nell'Universo ci sono
100,000,000,000
(cento mila milioni)
di Galassie

Una galassia contiene 1,000,000,000,000
(un milione di milioni)
di stelle

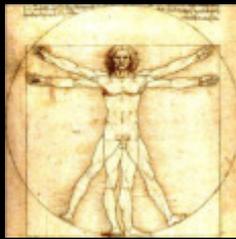
Mercurio
Venere
Terra
Marte
Giove
Saturno
Urano
Nettuno
Plutone
Nibirù (Zecheria Sitchin)



Per un totale di
10,000,000,000,000,000,000,000,000
(diecimila miliardi di miliardi) (10^{22})
stelle

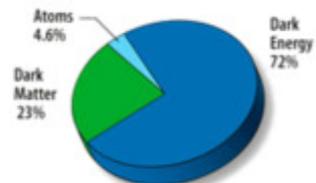
**Tutte fatte degli stessi identici
elementi di materia**

Di cosa siamo fatti?

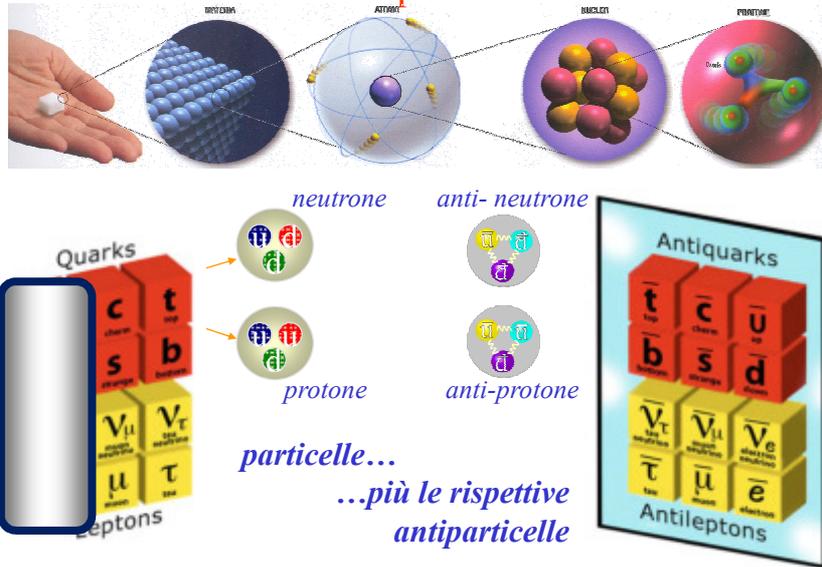


- acqua (62 %)
- proteine (22.5 %)
- lipidi (10.4 %)
- sali minerali (4.4 %)
- glucidi (0.7 %)
- Altro

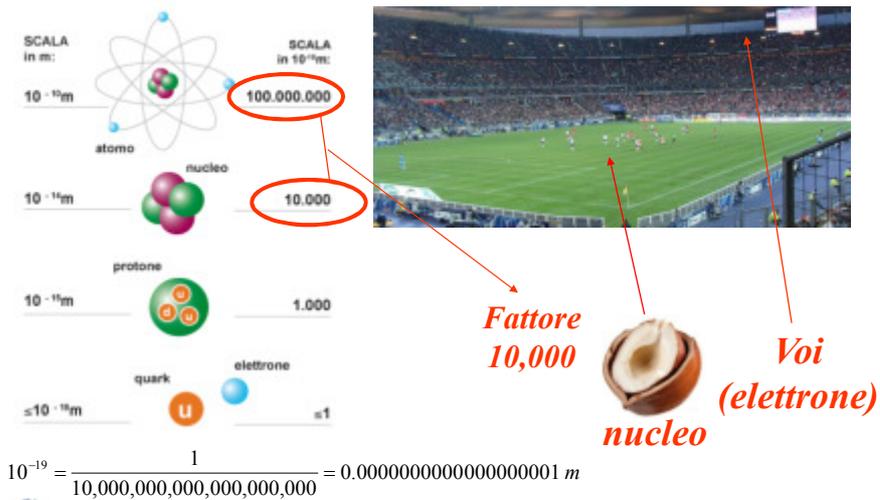
- ferro (32.1 %)
- ossigeno (30.1 %)
- Silicio (13.9 %)
- magnesio (2.9 %)
- zolfo (1.8 %)
- calcio (1.5 %)
- alluminio (1.4 %)
- altri elementi



Particelle & Anti-particelle elementari



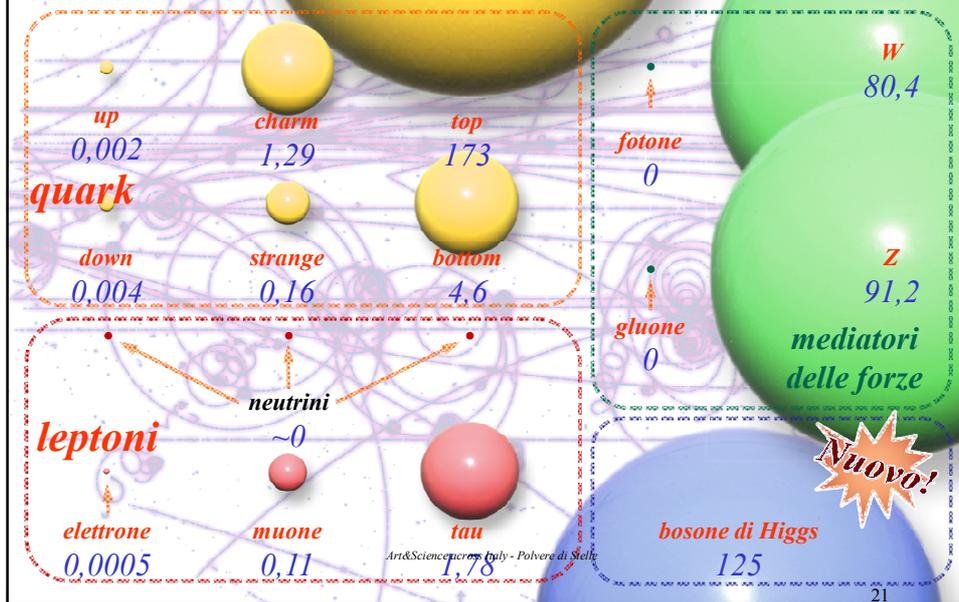
Noi siamo, praticamente, vuoti...



$$10^{-19} = \frac{1}{10,000,000,000,000,000,000} = 0.0000000000000000001 \text{ m}$$



- Le particelle elementari hanno masse molto diverse tra di loro, anche se sono tutte “puntiformi”!



21

Quattro tipi di forze

Gravitazionale

Sommario
Sommaario
Cover
100 pagine

Nucleare forte

Esempi errori IRLS
...

Elettromagnetica

Nucleare debole

Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

22

Interazioni a distanza

	Raggio di azione	Agisce su ...	Portatore
Gravitazionale responsabile dell'attrazione della terra, delle orbite attorno al Sole e nelle galassie	∞	Sulla materia	?
Elettromagnetica responsabile della coesione tra gli elettroni e il nucleo negli atomi	∞	su $\left\{ \begin{array}{l} \text{cariche} \\ \text{correnti} \end{array} \right.$	fotone
Nucleare forte impedisce al nucleo di disintegrarsi	$10^{-15} m$ (raggio del protone)	adroni $\left\{ \begin{array}{l} \text{barioni} \\ \text{mesoni} \end{array} \right.$	gluoni
Nucleare debole responsabile della trasformazione della materia (es. radioattività) e del decadimento di quark e leptoni $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$	$< 10^{-15} m$	leptoni	W^+, W^-, Z^0

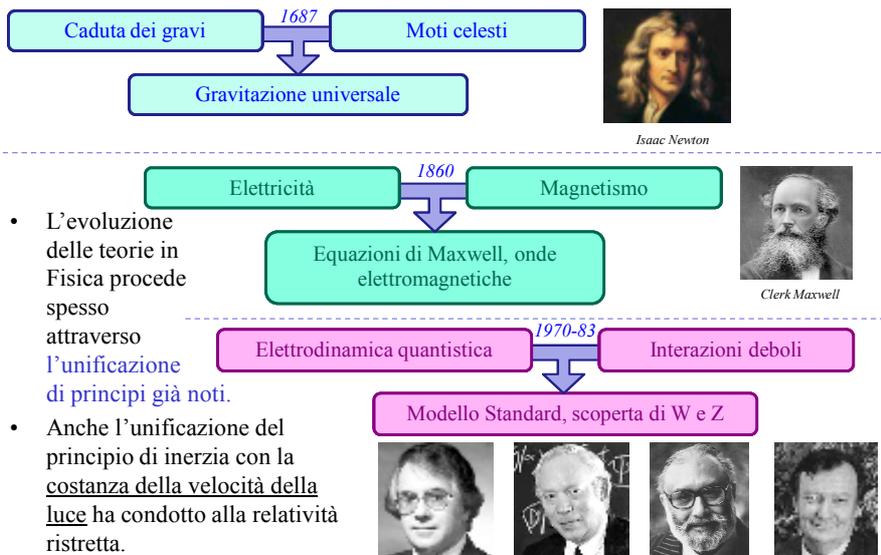


Art&Science across Italy - Polvere di Stelle



23

Unificazione di alcune forze



- L'evoluzione delle teorie in Fisica procede spesso attraverso l'unificazione di principi già noti.
- Anche l'unificazione del principio di inerzia con la costanza della velocità della luce ha condotto alla relatività ristretta.



Isaac Newton



Clerk Maxwell



Sheldon Glashow



Steven Weinberg



Abdus Salam



Carlo Rubbia

Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

24



Problemi aperti

- *Materia oscura*
- *Energia oscura*
- *Violazione di CP*



Jan Vermeer – L'astronomo (1668)

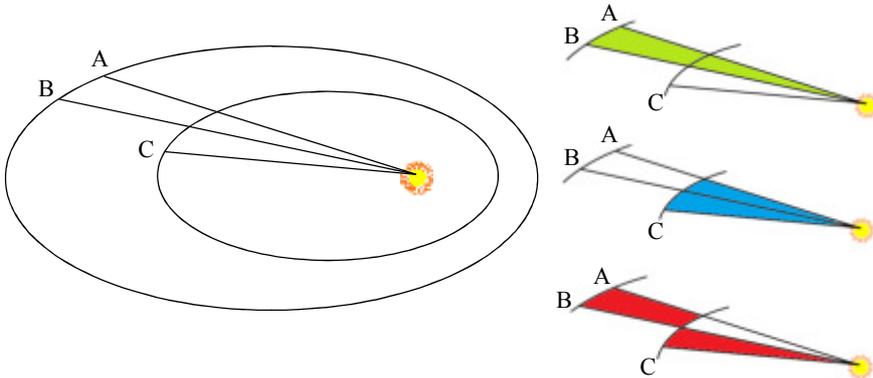


Johannes Kepler (1571–1630)



2^a Legge di Keplero

- Il raggio vettore che congiunge un pianeta al Sole spazza aree uguali in tempi uguali.
- I pianeti non si muovono sulla loro orbita con velocità costante:
 - un pianeta è più veloce quanto più è vicino al Sole (al perielio) e
 - un pianeta è più lento quanto più è lontano dal Sole (all'afelio).

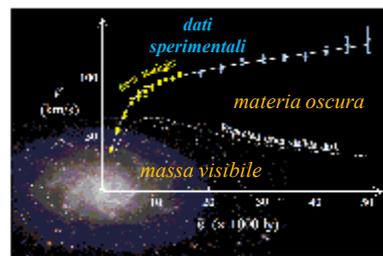


Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

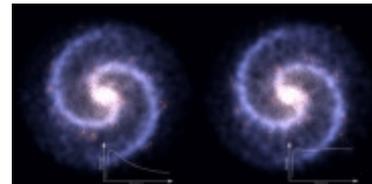
32

Non ci “torna” la massa totale

- Tutti i corpi dotati di massa risentono della forza di gravità dovuta ai corpi circostanti.
- Osservazioni astronomiche hanno dimostrato che la velocità delle stelle nelle galassie lontane è maggiore di quanto dovrebbe.
- La risposta è nella “*massa*” e nella “*gravità*”.



Velocità tangenziale delle stelle attorno al centro della galassia M33 in funzione della distanza dal centro



Sinistra: moto di una galassia senza “dark matter”.
Destra: galassia con una curva di rotazione piana come ci si aspetterebbe in presenza di “dark matter”.

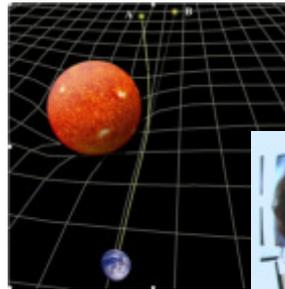
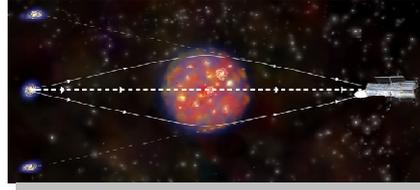


Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

35

Non ci “torna” la massa totale

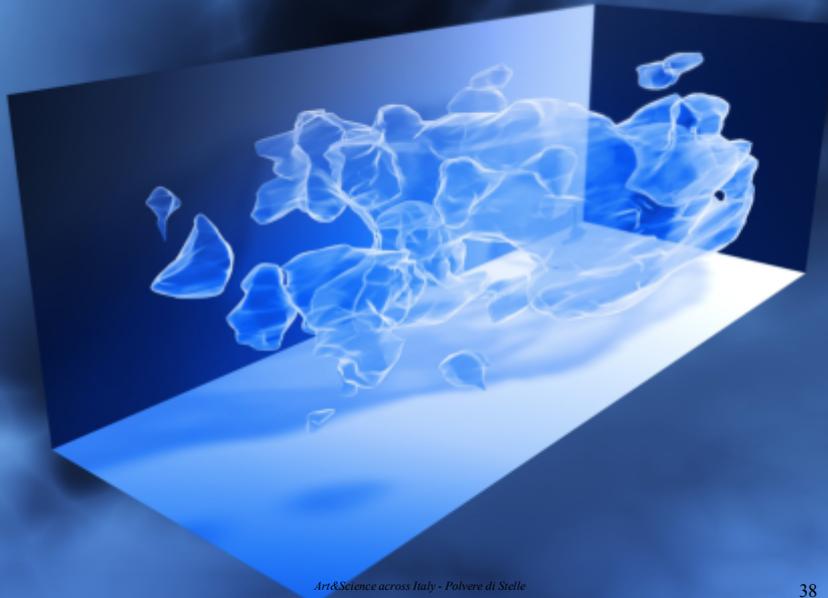
- Più recentemente la materia oscura è stata smascherata attraverso lo spettacolare fenomeno delle lenti gravitazionali.
- Dato che i fotoni, le particelle che compongono la luce, portano un'energia, risentono dell'attrazione gravitazionale dovuta alle altre forme di energia.
- Così, nelle vicinanze di concentrazioni di materia la luce non viaggia in linea retta ma curva, come in una lente.
- Anche qui la risposta è nella “*massa*” e nella “*gravità*”.



Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

37

Distribuzione 3D della materia oscura



Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

38

Energia oscura

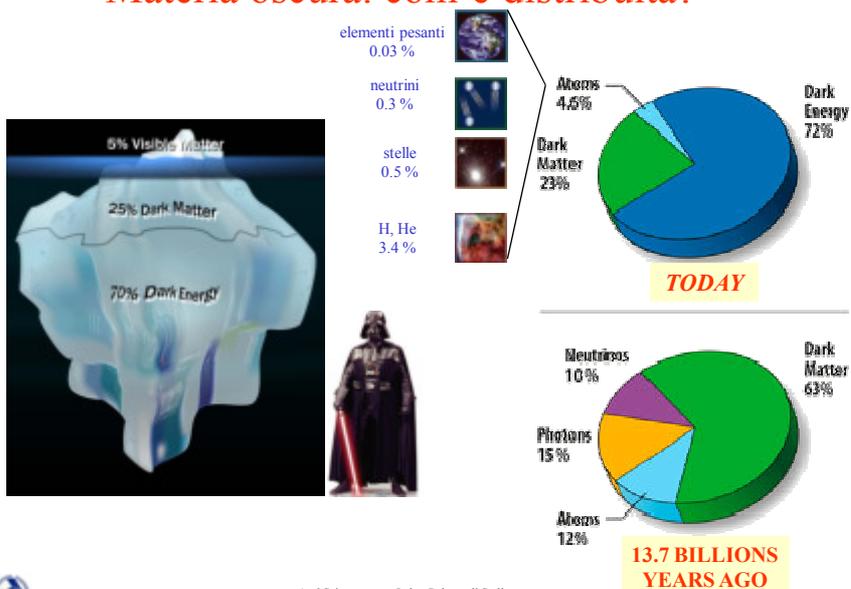
- La **materia normale** più la **materia oscura** costituiscono meno della metà del contenuto dell'universo.

Ma ... la velocità di espansione dell'universo sta aumentando...

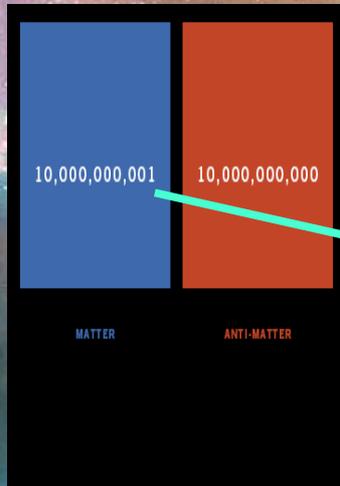
- Il resto è l'**energia oscura** dotata di una "**anti-gravità**" che respinge anziché attrarre.
 - La **gravità** concentra la materia ordinaria ed oscura nelle stelle e nelle galassie,
 - l'**energia oscura** è distribuita tutt'intorno alla materia, permeando lo spazio, ed accelera l'espansione dell'universo.



Materia oscura: com'è distribuita?



Materia ed Anti-materia



- 13.7 miliardi di anni fa, il Big Bang produsse un eguale quantità di materia ed anti-materia.
- Materia ed antimateria avrebbero dovuto annichilare lasciando il “nulla”.
- Invece... Noi Esistiamo!!!

Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

44

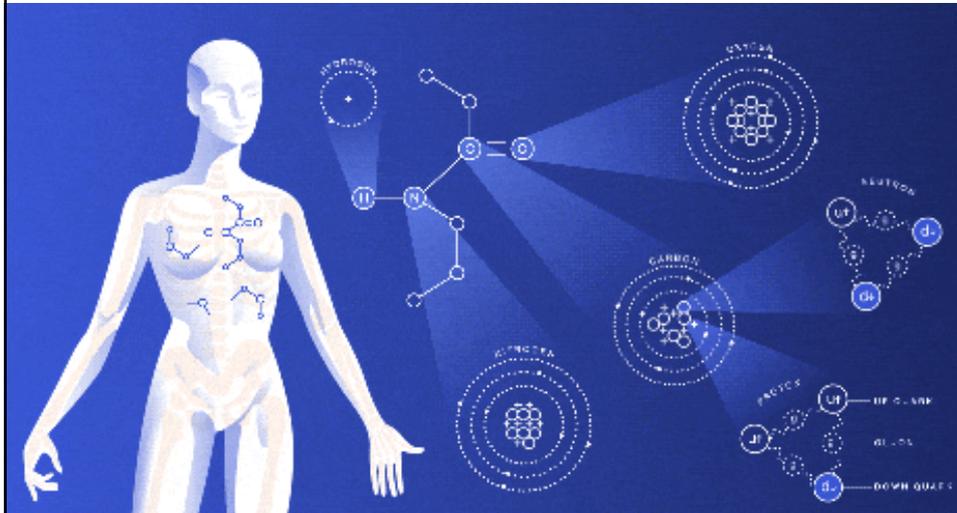
*La fisica delle particelle
che è in noi*



Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

45

Siamo fatti di particelle



Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

46

Siamo fatti degli stessi atomi

In una persona con massa di circa 70 kg sono presenti circa 7×10^{27} atomi
7 seguito da 27 zeri, ovvero: 7.000.000.000.000.000.000.000.000.000 atomi



Se vi appaiono differenti NON chiedetelo alla FISICA...



Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

47

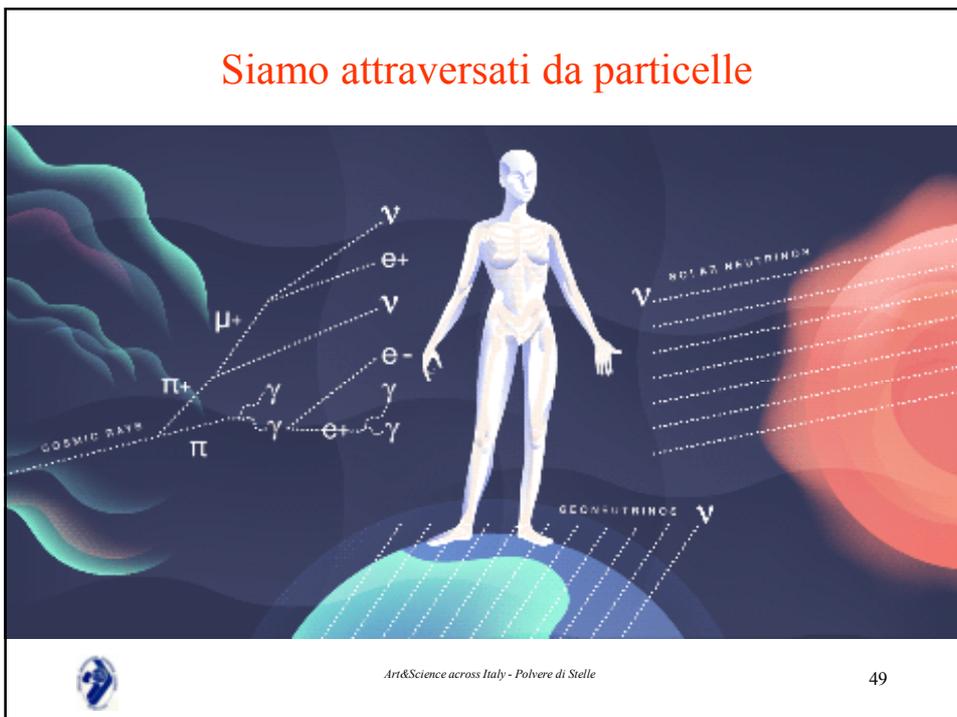
Produciamo particelle



Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

48

Siamo attraversati da particelle



Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

49

Unità di misura: la banana

- Le banane sono molto ricche di potassio: per misurare esposizioni alle radiazioni molto leggere, si usa spesso la “**dose equivalente a una banana**”, ovvero a quante banane corrisponde fare una certa attività.

Fenomeno	Banane equivalenti
→ Un'ora di fondo naturale	3 banane
Un'ora di fondo artificiale	0,5 banane
→ Un'ora su un aereo ad alta quota	50 banane
Radiografia ad un braccio	10 banane
→ Radiografia toracica	1000 banane
TAC a basso dosaggio	150000 banane
Mammografia	4000 banane
Un'ora a Ramsar (Iran)	15 banane
Massimo per un lavoratore*	700 banane all'ora
Un'ora per un "eroe di Chernobyl"	centinaia di milioni di banane



Da dove veniamo?



John Paul Gauguin - *Da dove veniamo? Che siamo? Dove andiamo?*
1897



Due strade divergevano in un bosco

*Two roads diverged in a wood, and I
I took the one less traveled by,
And that has made all the difference.
[Robert Frost]*

Infinitamente grande
(osservazione a ritroso nel tempo)



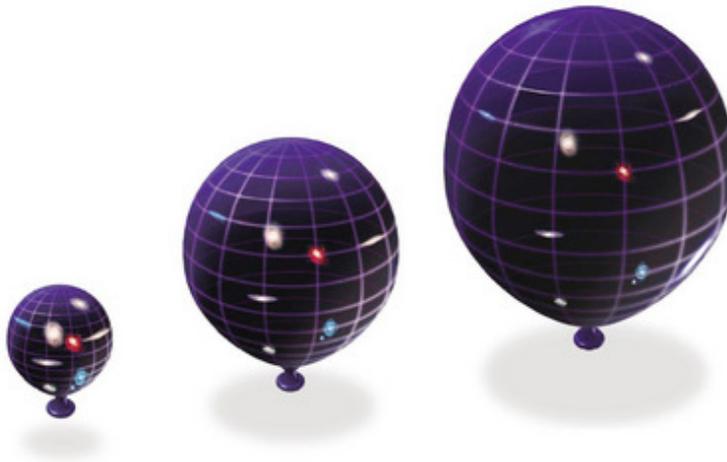
Infinitamente piccolo
(laboratorio sperimentale)



Big Bang

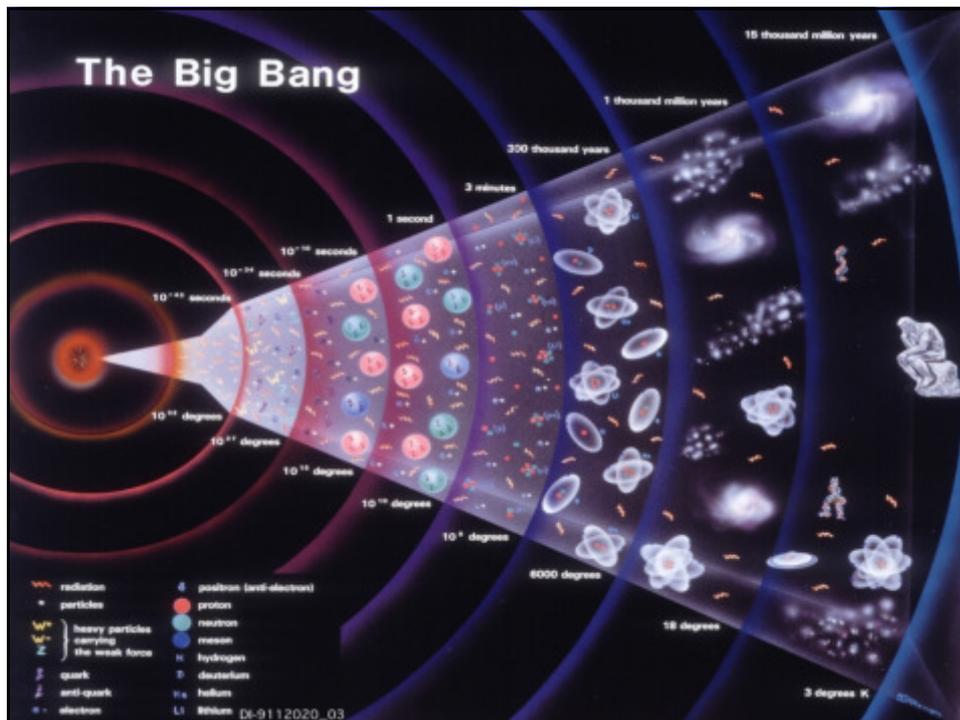


Spazio ed Tempo non esistevano ...

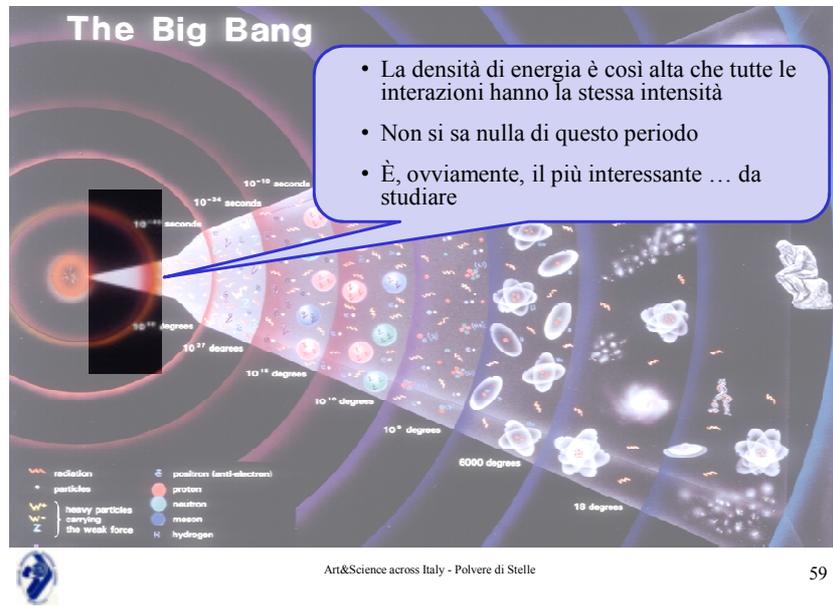


Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

54



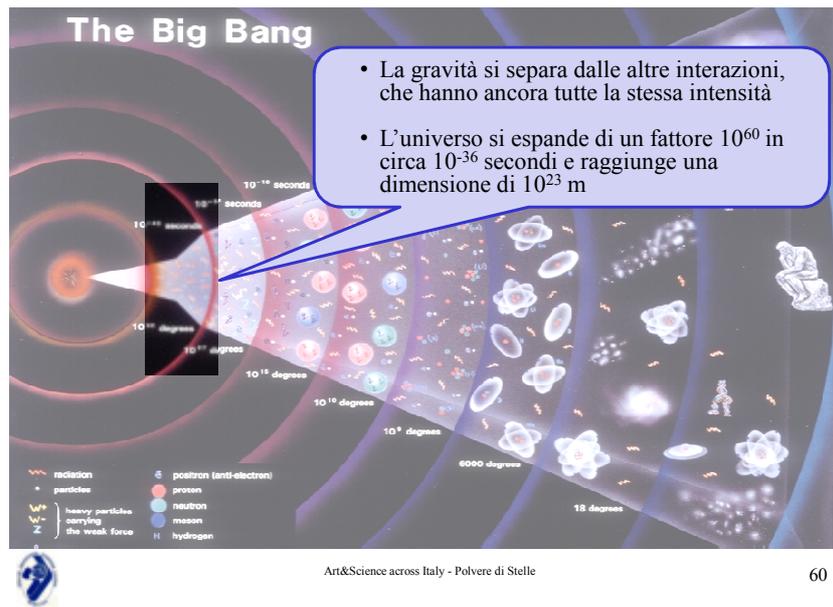
Epoca di Plank ($<10^{-43}$ s)



- La densità di energia è così alta che tutte le interazioni hanno la stessa intensità
- Non si sa nulla di questo periodo
- È, ovviamente, il più interessante ... da studiare

59

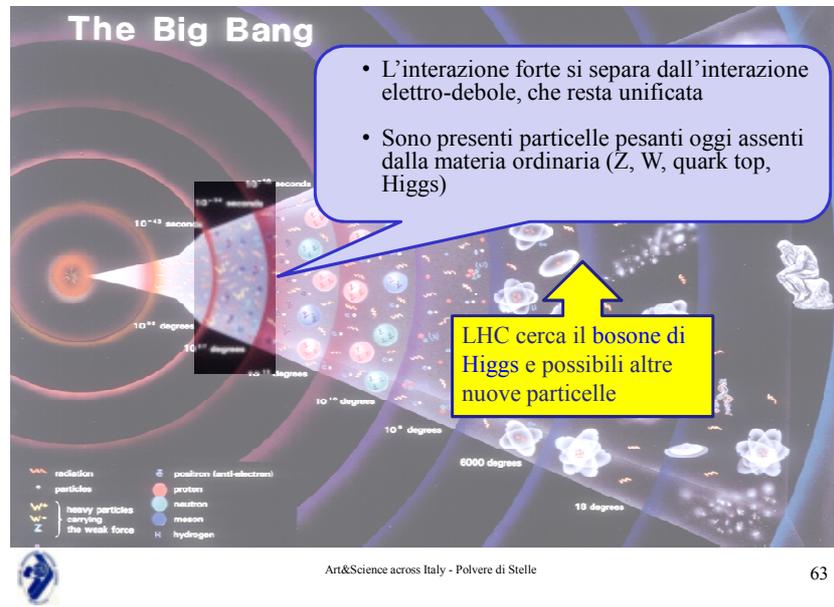
Grande unificazione ($<10^{-36}$ s)



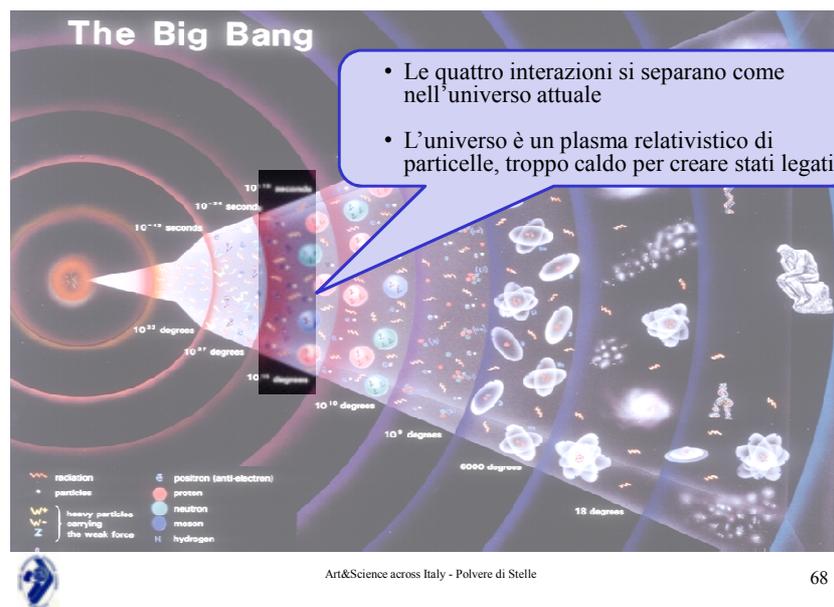
- La gravità si separa dalle altre interazioni, che hanno ancora tutte la stessa intensità
- L'universo si espande di un fattore 10^{60} in circa 10^{-36} secondi e raggiunge una dimensione di 10^{23} m

60

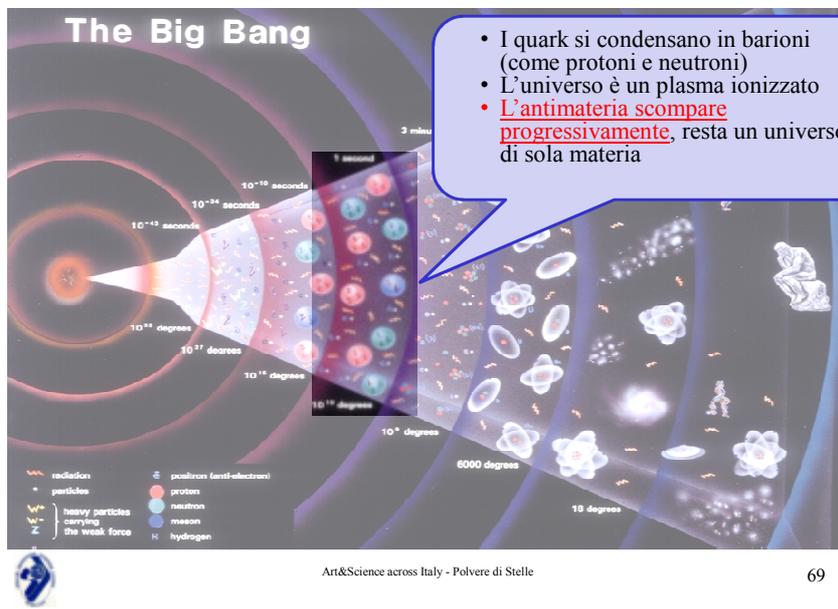
Epoca elettrodebole ($<10^{-12}s$)



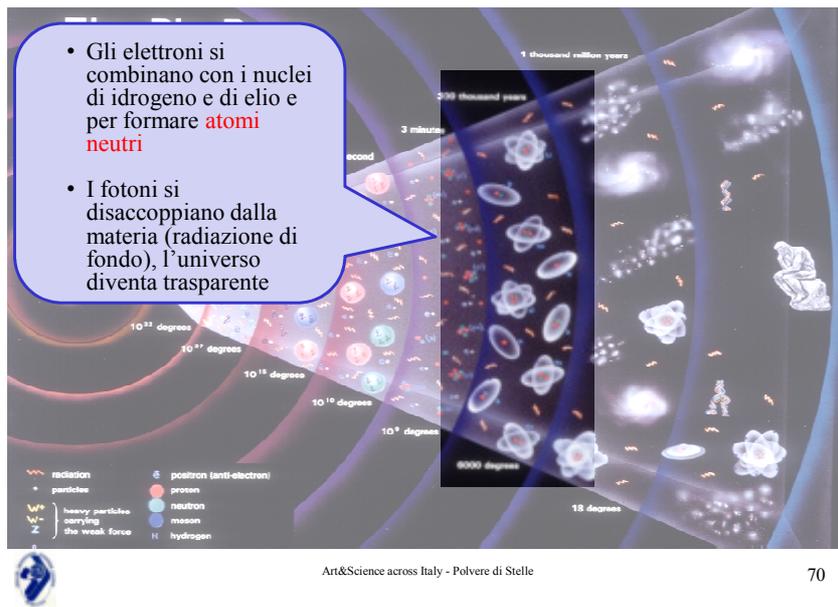
Quark-gluon plasma ($<10^{-6}s$)



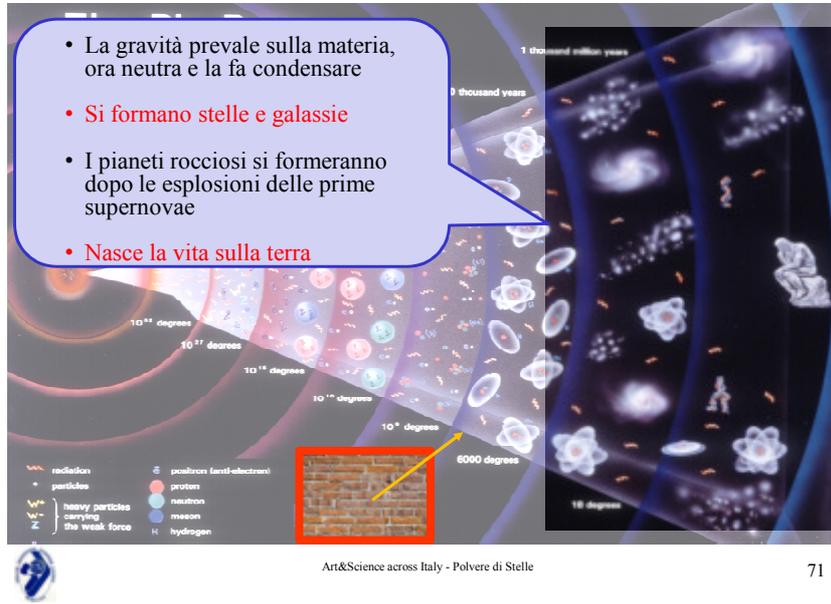
Bariogenesi (<1s)



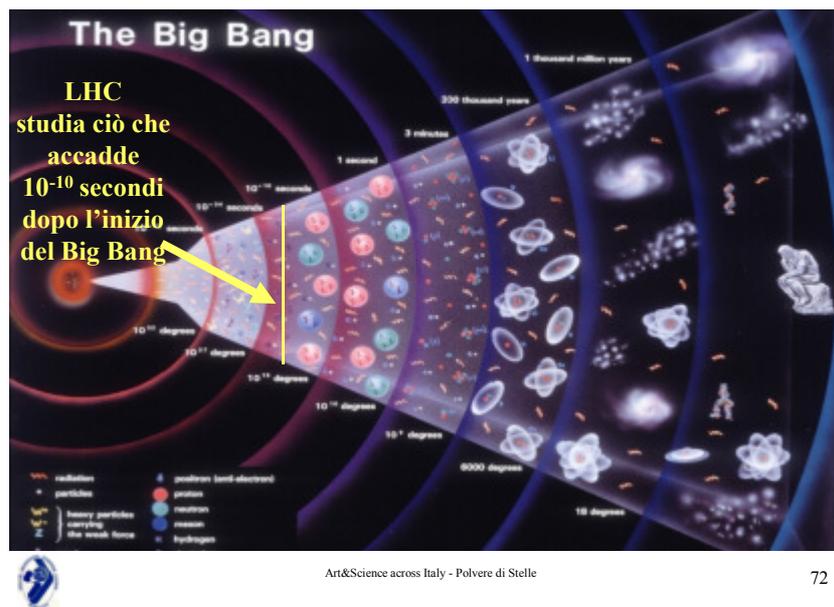
Gli atomi (240,000÷300,000 anni)



Galassie (>10⁶ anni)



LHC (Large Hadron Collider)



Origini del sistema solare



Graphic created by Jennifer Johnson
<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~jjj/nucleo/>

Astronomical Image Credits:
 ESA/NASA/AASNova

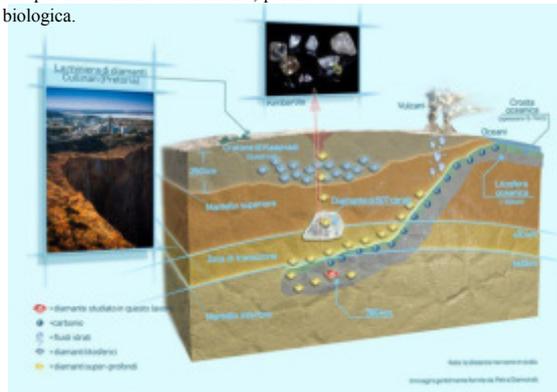


Un diamante non è per sempre



Diamanti

- I diamanti provengono
 - da una profondità tra i 150 e i 225 km (Mantello terrestre)
 - da meteoriti cadute sulla Terra.
- Non è possibile datarli
 - il Metodo del ^{14}C non è efficace per la datazione del diamante, perché si limita al carbonio di origine biologica.



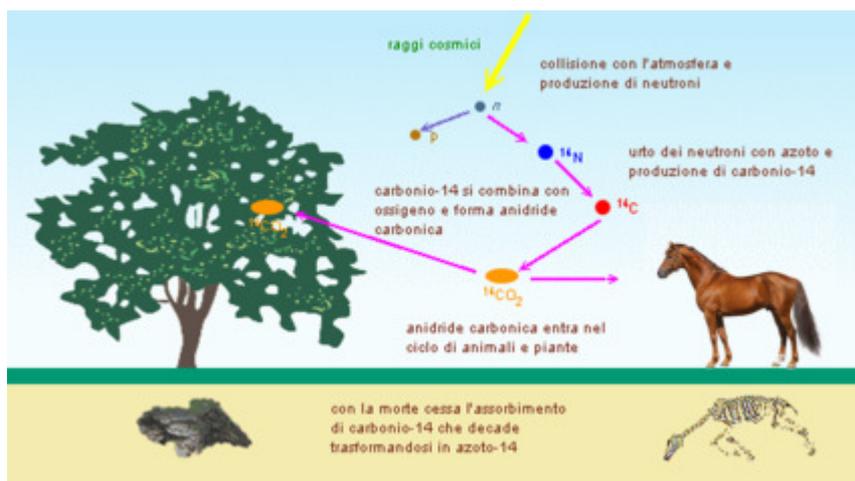
Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

75



- Si ritiene che si siano formati tra circa 1 e 2 miliardi di anni fa.

Metodo del ^{14}C

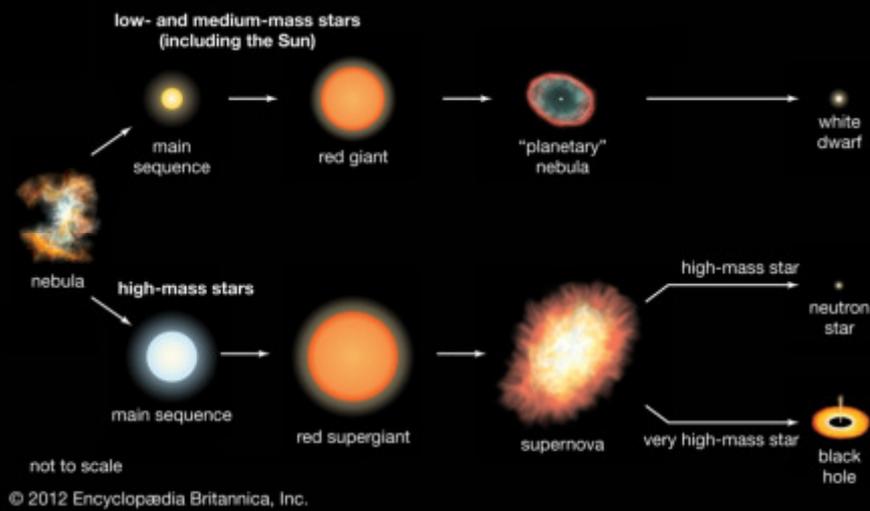


Art&Science across Italy - Polvere di Stelle

77



Evoluzione stellare



Ciclo del Sole



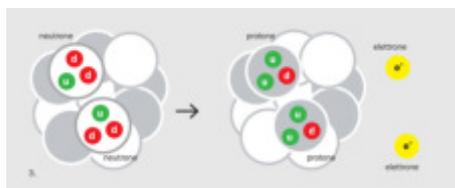
Trasformazioni di particelle



Distruzione di un elettrone (viola la conservazione della carica elettrica)
 Borexino ha escluso questo processo!!!
 Vita media dell'elettrone è infinita

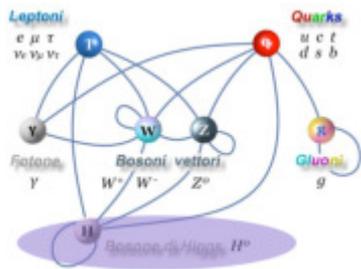


“Decadimento del protone”.
 Vita media del protone $> 8.2 \times 10^{33}$ anni
 (universo 10^{10} anni)



“Doppio decadimento beta”
 Processo di creazione di due elettroni in una transizione nucleare. Creazione di particelle che non segue lo SM.

In corso...



Il Modello Standard

È la teoria fisica che descrive tre delle quattro forze fondamentali note: le interazioni forte, elettromagnetica e debole (le ultime due unificate nell'interazione elettrodebole), e tutte le particelle elementari ad esse collegate



$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2} \partial_\mu g_\nu^\mu \partial_\rho g_\sigma^\nu - \partial_\mu f^{\mu\nu} \partial_\rho g_\sigma^\nu g_\rho^\sigma - \frac{1}{2} g_\mu^\nu f^{\mu\alpha} f^{\nu\beta} g_\rho^\sigma g_\sigma^\rho + \\
 & \frac{1}{2} g_\mu^\nu (g_\rho^\sigma g_\sigma^\rho) (g_\rho^\mu g_\rho^\nu + G^\rho G^\rho + g_\rho^\mu g_\rho^\nu G^\rho G^\rho) - \partial_\mu W_\nu^\mu \partial_\rho W_\sigma^\nu - \\
 & M^2 W_\mu^\nu W_\nu^\mu - \frac{1}{2} \partial_\mu Z_\nu^\mu \partial_\rho Z_\sigma^\nu - \frac{1}{2} M^2 Z_\mu^\nu Z_\nu^\mu - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\rho A_\sigma - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\nu H - \\
 & \frac{1}{2} m_\phi^2 H^2 - \partial_\mu \phi^\dagger \partial_\nu \phi - M^2 \phi^\dagger \phi - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^\dagger \partial_\nu \phi - \frac{1}{2} M^2 \phi^\dagger \phi - \partial_\mu (2\phi^\dagger \partial_\nu \phi - \\
 & 2\phi^\dagger \partial_\nu \phi) + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^\dagger \phi + 2\phi^\dagger \phi) + \frac{2\lambda}{24} \phi^4 - ig_\mu (2\phi^\dagger \partial_\nu W_\mu^\nu - \\
 & W_\mu^\nu \partial_\nu W_\mu^\nu) - Z_\mu^\nu (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) + Z_\mu^\nu (\partial_\mu W_\nu^\mu - \\
 & W_\nu^\mu \partial_\mu W_\nu^\nu) - ig_\mu (2\phi^\dagger \partial_\nu W_\mu^\nu - W_\mu^\nu \partial_\nu W_\mu^\nu) - A_\mu (W_\nu^\mu \partial_\mu W_\nu^\nu - \\
 & W_\nu^\mu \partial_\mu W_\nu^\nu) + A_\mu (W_\nu^\mu \partial_\nu W_\mu^\nu - W_\mu^\nu \partial_\nu W_\mu^\nu) - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^\nu W_\nu^\mu W_\mu^\nu + \\
 & \frac{1}{2} g^2 W_\mu^\nu W_\nu^\mu W_\mu^\nu + g^2 Z_\mu^\nu Z_\nu^\mu Z_\mu^\nu - Z_\mu^\nu Z_\nu^\mu W_\mu^\nu W_\nu^\mu + \\
 & g^2 Z_\mu^\nu (A_\mu W_\nu^\mu - A_\nu W_\mu^\nu) - A_\mu A_\nu W_\mu^\nu W_\nu^\mu + g^2 s_\mu s_\nu (A_\mu Z_\nu^\mu - \\
 & W_\mu^\nu W_\nu^\mu) - 2A_\mu Z_\mu^\nu W_\nu^\mu - g\alpha (H^3 + H \phi^\dagger \phi + 2H \phi^\dagger \phi) - \\
 & \frac{1}{2} g^2 \alpha (H^4 + (\phi^\dagger)^4 + 4(\phi^\dagger)^2 \phi^\dagger \phi + 4H^2 \phi^\dagger \phi + 2(\phi^\dagger)^2 H^2) - \\
 & g M W_\mu^\nu W_\nu^\mu H - \frac{1}{2} g \frac{M^2}{2} Z_\mu^\nu Z_\nu^\mu H - \frac{1}{2} ig (W_\mu^\nu (\partial^\mu \partial_\nu \phi - \phi^\dagger \partial_\nu \phi) - \\
 & W_\nu^\mu (\partial^\mu \partial_\nu \phi - \phi^\dagger \partial_\nu \phi)) + \frac{1}{2} g (W_\mu^\nu (H \partial_\nu \phi - \phi^\dagger \partial_\nu H) - W_\nu^\mu (H \partial_\mu \phi - \\
 & \phi^\dagger \partial_\mu H)) + \frac{1}{2} g \frac{1}{2} (Z_\mu^\nu (H \partial_\nu \phi - \phi^\dagger \partial_\nu H) - ig \frac{M^2}{2} Z_\mu^\nu (W_\nu^\mu \phi - W_\mu^\nu \phi) + \\
 & ig s_\mu A_\nu (W_\mu^\nu \phi - W_\nu^\mu \phi) - ig \frac{2\lambda}{24} \phi^4 (\phi^\dagger \partial_\nu \phi - \phi^\dagger \partial_\nu \phi) + \\
 & ig s_\mu A_\nu (\phi^\dagger \partial_\nu \phi - \phi^\dagger \partial_\nu \phi) - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^\nu W_\nu^\mu (H^2 + (\phi^\dagger)^2 + 2\phi^\dagger \phi) - \\
 & \frac{1}{2} g^2 \frac{1}{24} Z_\mu^\nu Z_\nu^\mu (H^2 + (\phi^\dagger)^2 + 2(2\phi^\dagger - 1)^2 \phi^\dagger \phi) - \frac{1}{2} g^2 \frac{1}{24} Z_\mu^\nu \phi^\dagger (W_\nu^\mu \phi + \\
 & W_\mu^\nu \phi) - \frac{1}{2} ig^2 \frac{1}{24} Z_\mu^\nu H (W_\nu^\mu \phi - W_\mu^\nu \phi) + \frac{1}{2} g^2 s_\mu A_\nu \phi^\dagger (W_\nu^\mu \phi - \\
 & W_\mu^\nu \phi) + \frac{1}{2} ig^2 s_\mu A_\nu H (W_\nu^\mu \phi - W_\mu^\nu \phi) - g^2 s_\mu (2\phi^\dagger - 1) Z_\mu^\nu \phi^\dagger \phi - \\
 & g^2 s_\mu^2 A_\mu \phi^\dagger \phi - \epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} (\gamma_\mu + m_\nu^2) \epsilon^{\nu\alpha} - \epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} (\gamma_\mu + m_\nu^2) \epsilon^{\nu\alpha} - \\
 & \frac{1}{2} (\gamma_\mu + m_\nu^2) \epsilon^{\nu\alpha} + ig s_\mu A_\nu (\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} + \frac{1}{2} (\epsilon_1^{\mu\nu\alpha\beta} + \frac{1}{2} (\epsilon_2^{\mu\nu\alpha\beta}))) + \\
 & \frac{1}{24} Z_\mu^\nu [(\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} (1 + \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta}) + (\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} (4\epsilon_1^{\alpha\beta} - 1 - \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta}) + (\epsilon_1^{\mu\nu\alpha\beta} (\frac{1}{2} \epsilon_2^{\alpha\beta} - \\
 & 1 - \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta}) + (\epsilon_2^{\mu\nu\alpha\beta} (1 - \frac{1}{2} \epsilon_1^{\alpha\beta} - \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta})] + \frac{1}{24} g W_\mu^\nu [(\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} (1 + \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta}) + \\
 & (\epsilon_1^{\mu\nu\alpha\beta} (1 + \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta})] + \frac{1}{24} g W_\mu^\nu [(\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} (1 + \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta}) + (\epsilon_2^{\mu\nu\alpha\beta} \gamma^5 \epsilon^{\alpha\beta}) + \\
 & (\gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta}] + \frac{1}{24} g \frac{M^2}{2} [-\phi^\dagger (\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} (1 + \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta}) + \phi (\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} (1 + \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta}) - \\
 & \frac{1}{24} g [H (\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta}) + i\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} \epsilon^{\alpha\beta}] + \frac{1}{24} g \frac{M^2}{2} \phi^4 [-m_\nu^2 (\epsilon_1^{\mu\nu\alpha\beta} (1 + \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta}) + \\
 & m_\nu^2 (\epsilon_2^{\mu\nu\alpha\beta} (1 + \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta})] + \frac{1}{24} g \frac{M^2}{2} \phi^4 [-m_\nu^2 (\epsilon_1^{\mu\nu\alpha\beta} (1 + \gamma^5) \epsilon^{\alpha\beta}) + \\
 & \gamma^5] \epsilon^{\alpha\beta}] - \frac{1}{24} g H (\epsilon_1^{\mu\nu\alpha\beta}) - \frac{1}{24} g H (\epsilon_2^{\mu\nu\alpha\beta}) + \frac{1}{24} g \phi^4 (\epsilon_1^{\mu\nu\alpha\beta} \epsilon^{\alpha\beta}) - \\
 & \frac{1}{24} g \phi^4 (\epsilon_2^{\mu\nu\alpha\beta} \epsilon^{\alpha\beta}) + \bar{X}^\dagger (\partial^\mu - M^2) X^\dagger + \bar{X} (\partial^\mu - M^2) X + \bar{X}^\dagger (\partial^\mu - \\
 & M^2) X^\dagger + \bar{Y} \partial^\mu Y + ig s_\mu W_\nu^\mu (\partial_\mu X^\dagger X^\dagger - \partial_\nu X^\dagger X^\dagger) + ig s_\mu W_\nu^\mu (\partial_\mu Y X^\dagger - \\
 & \partial_\nu X^\dagger Y) + ig s_\mu W_\nu^\mu (\partial_\mu X^\dagger X^\dagger - \partial_\nu X^\dagger X^\dagger) + ig s_\mu W_\nu^\mu (\partial_\mu X^\dagger Y - \\
 & \partial_\nu Y X^\dagger) + ig s_\mu Z_\nu^\mu (\partial_\mu X^\dagger X^\dagger - \partial_\nu X^\dagger X^\dagger) + ig s_\mu A_\nu (\partial_\mu X^\dagger X^\dagger - \\
 & \partial_\nu X^\dagger X^\dagger) - \frac{1}{2} g M [X^\dagger X^\dagger H + X^\dagger X^\dagger H + \frac{1}{2} 85 X^\dagger H] + \\
 & \frac{1}{24} g^2 ig M [X^\dagger X^\dagger \phi^\dagger - X^\dagger X^\dagger \phi] + \frac{1}{24} ig M [X^\dagger X^\dagger \phi - X^\dagger X^\dagger \phi] + \\
 & ig M s_\mu [X^\dagger X^\dagger \phi^\dagger - X^\dagger X^\dagger \phi] + \frac{1}{24} M [X^\dagger X^\dagger \phi^\dagger - X^\dagger X^\dagger \phi]
 \end{aligned}$$

Consigli per una lettura ulteriore

