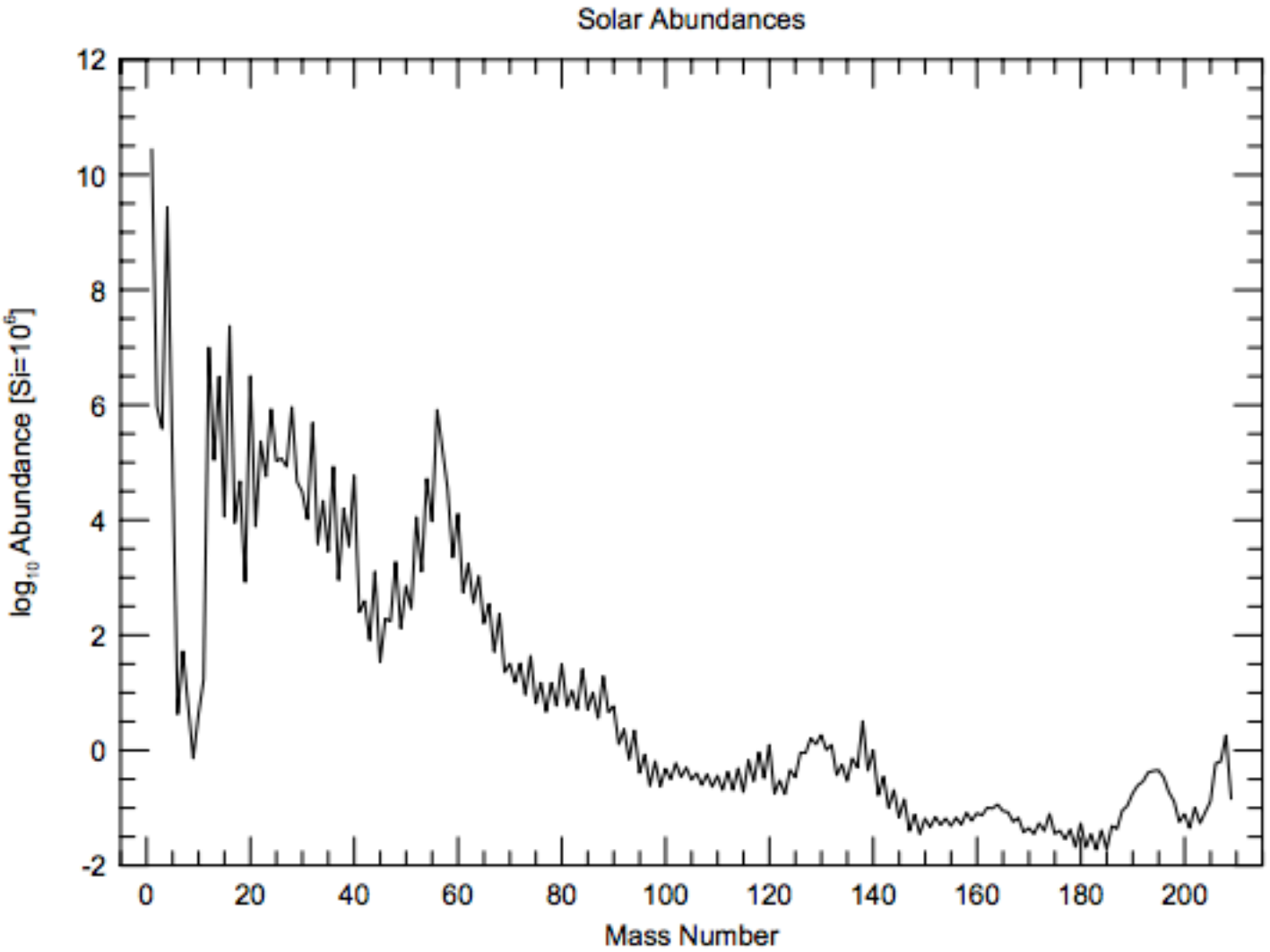
Introduzione all'Astrofisica Nucleare

Testi consigliati

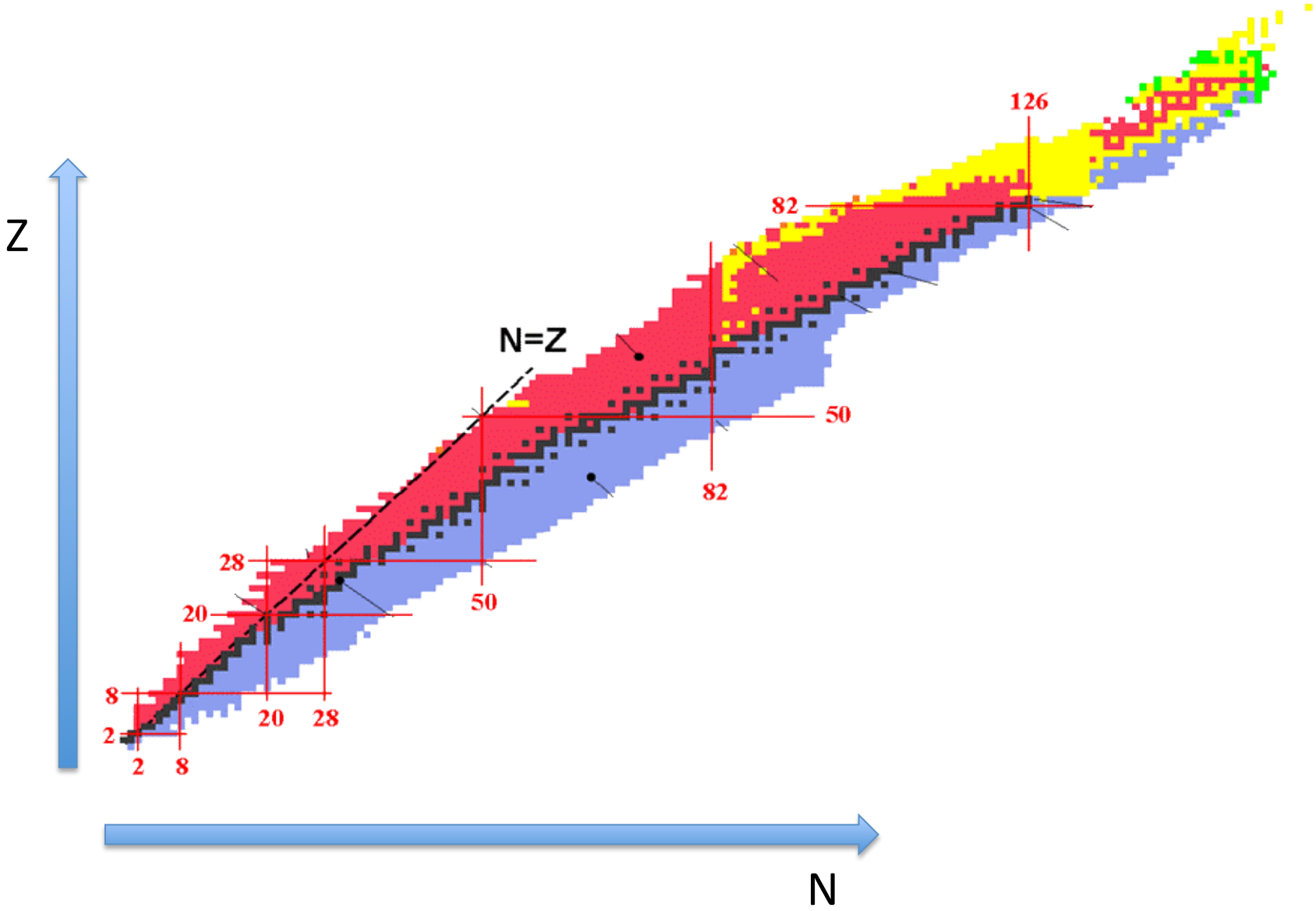
- Astrophysics in a Nutshell. Dan Maoz
- Cauldrons in the Cosmos. C. E. Rolfs, W. S. Rodney
- Nuclear Physics of Stars. C. Illiadis

Astrofisica Nucleare



ASTROnomia + FISICA = ASTROFISICA

Elementi



Nomenclatura

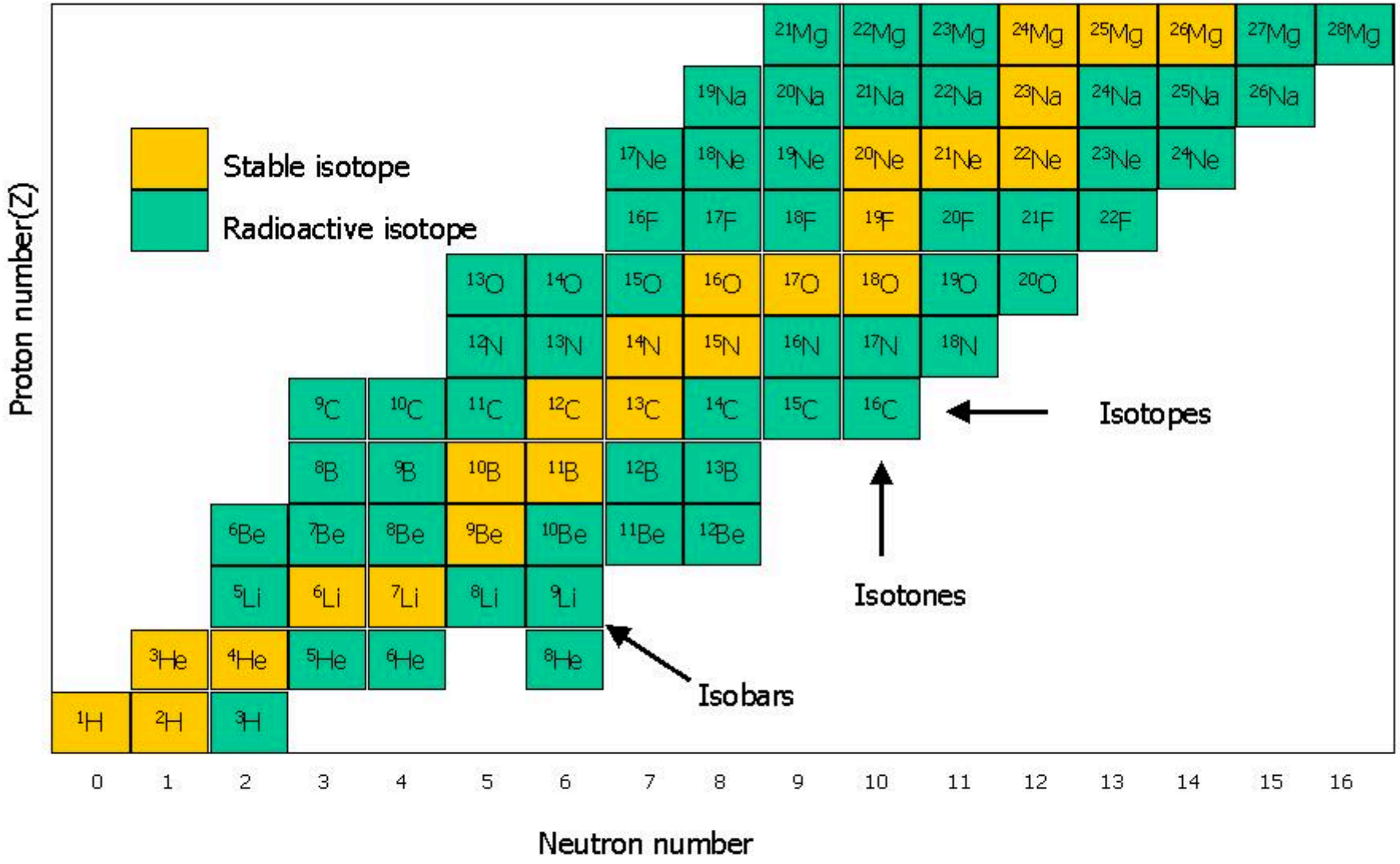
$$^{A}_{Z}X_{N}$$

X simbolo dell'elemento
A numero di massa
Z numero di protoni (numero atomico)
N numero di neutroni

Z + N = A

Isotopi = Nuclei con lo stesso Z ma diverso A (diverso N)
Isobari = Nuclei con lo stesso A ma diverso Z
Isotoni = Nuclei con lo stesso N ma diverso A

Elementi


Stable isotope
Radioactive isotope
Isotopes
Isotones
Isobars
Proton number(Z)
Neutron number
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
21Mg 22Mg 23Mg 24Mg 25Mg 26Mg 27Mg 28Mg
19Na 20Na 21Na 22Na 23Na 24Na 25Na 26Na
17Ne 18Ne 19Ne 20Ne 21Ne 22Ne 23Ne 24Ne
16F 17F 18F 19F 20F 21F 22F
13O 14O 15O 16O 17O 18O 19O 20O
12N 13N 14N 15N 16N 17N 18N
9C 10C 11C 12C 13C 14C 15C 16C
8B 9B 10B 11B 12B 13B
6Be 7Be 8Be 9Be 10Be 11Be 12Be
5Li 6Li 7Li 8Li 9Li
3He 4He 5He 6He 8He
1H 2H 3H

Abbondanze sistema solare

- Come è costituita la materia (barionica), quantità di isotopi stabili
- Formazioni del sistema solare
- Origini degli elementi (La distribuzione delle abbondanze sono un test critico per i modelli di nucleosintesi)

Abbondanze degli elementi: definizioni

- Abbondanza in numero di una specie atomica Z:

$$n_z = N(Z)/N(X)$$

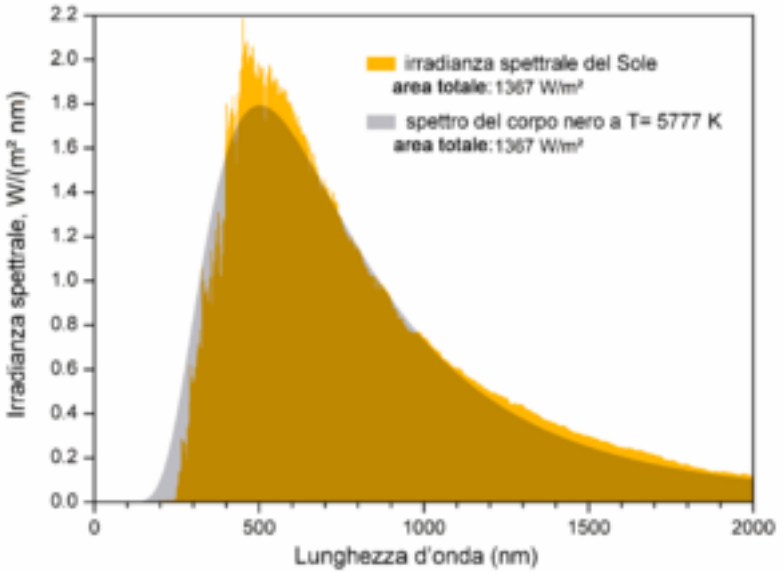
X specie campione (H o Si)

- Abbondanza in massa di una specie atomica Z: (massa dell'elemento contenuta in un campione)

$$a_z = m_z N(Z)/\Sigma m_i N(i)$$

Abbondanze degli elementi nel sistema solare

La fonte principale di informazioni sulle abbondanze del sistema solare proviene dalla fotosfera.

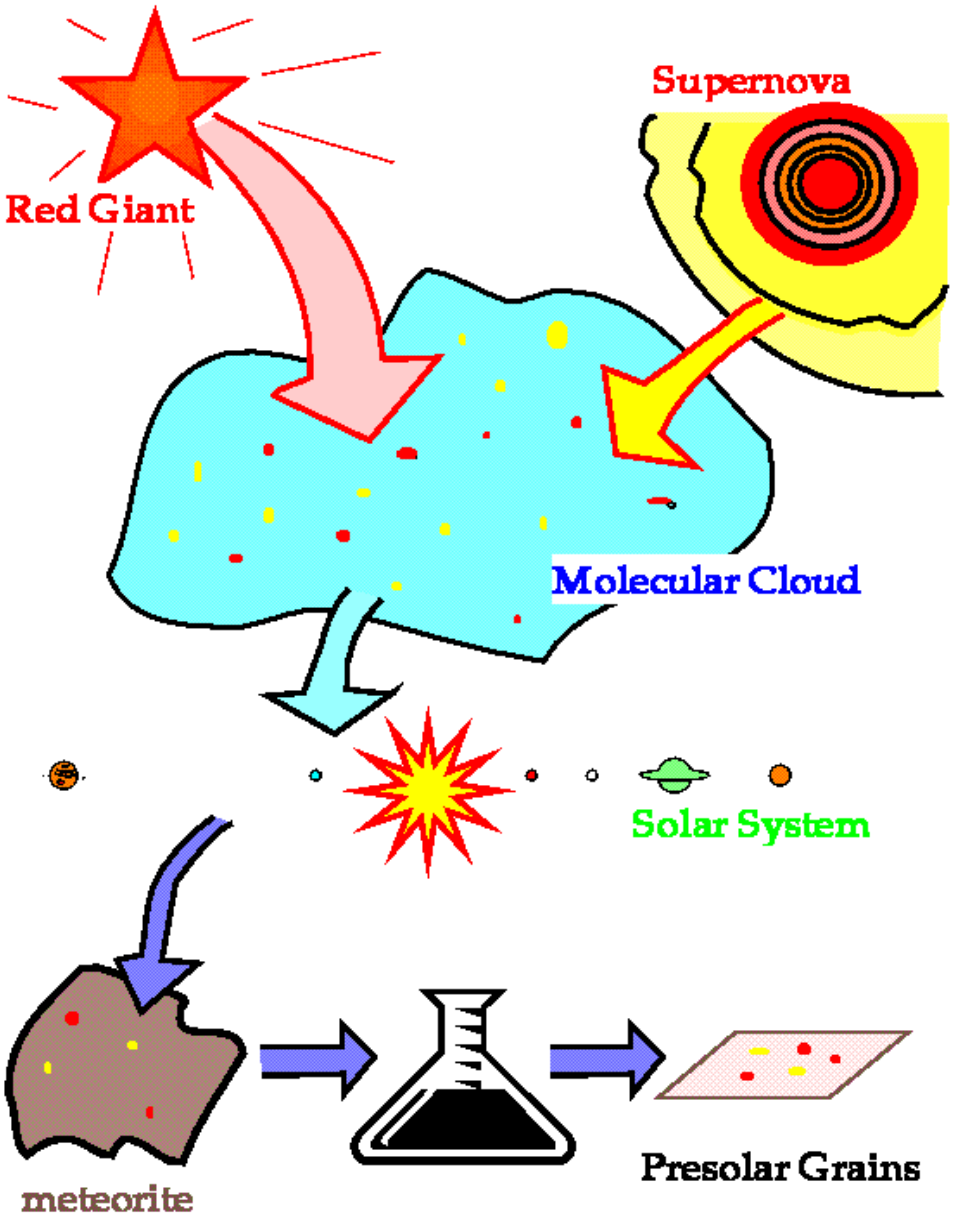


Il sole emette un spettro di corpo nero a una temperatura di circa 5800° K, sul quale sono sovraimposte le righe di assorbimento degli elementi, rispetto all'idroreno

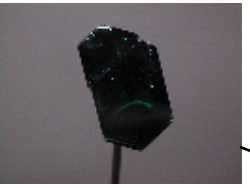
Abbondanze meteoriche: Stardust grains

Grani stellari sono

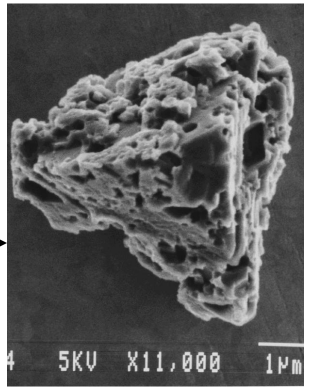
- ✓ nati nelle regioni circumstellari vicino a vecchie stelle
- ✓ espulse nel mezzo interstellare,
- ✓ preservate durante la formazione del sistema solare,
- ✓ intrappolate all'interno delle meteoriti primitive dalle quali sono estratte e analizzate.



Tipi di stellar dust dalle meteoriti

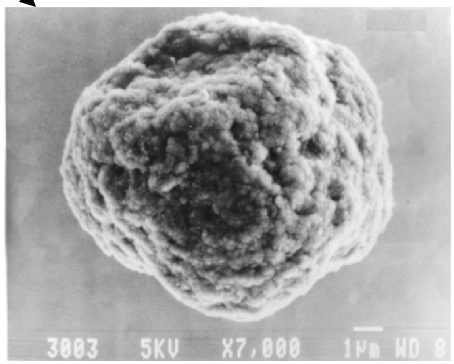


TYPE	ABUNDANCE ppm	SIZE μm
diamond	>750	0.002
silicates	50	0.1 – 0.5
silicon carbide (SiC)	9	0.1 – 20
spinel ($MgAl_2O_4$)	1	0.5
graphite	>2	0.8 – 28
corundum (Al_2O_3)	0.005	0.5 – 4
silicon nitride (Si_3N_4)	>0.002	~ 1



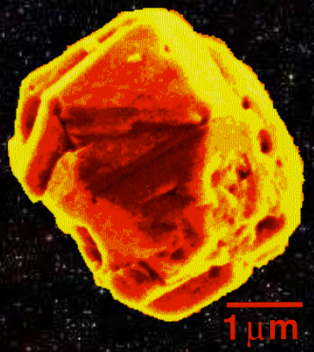
C > O

O > C



Nel sistema solare C/O = 0.4

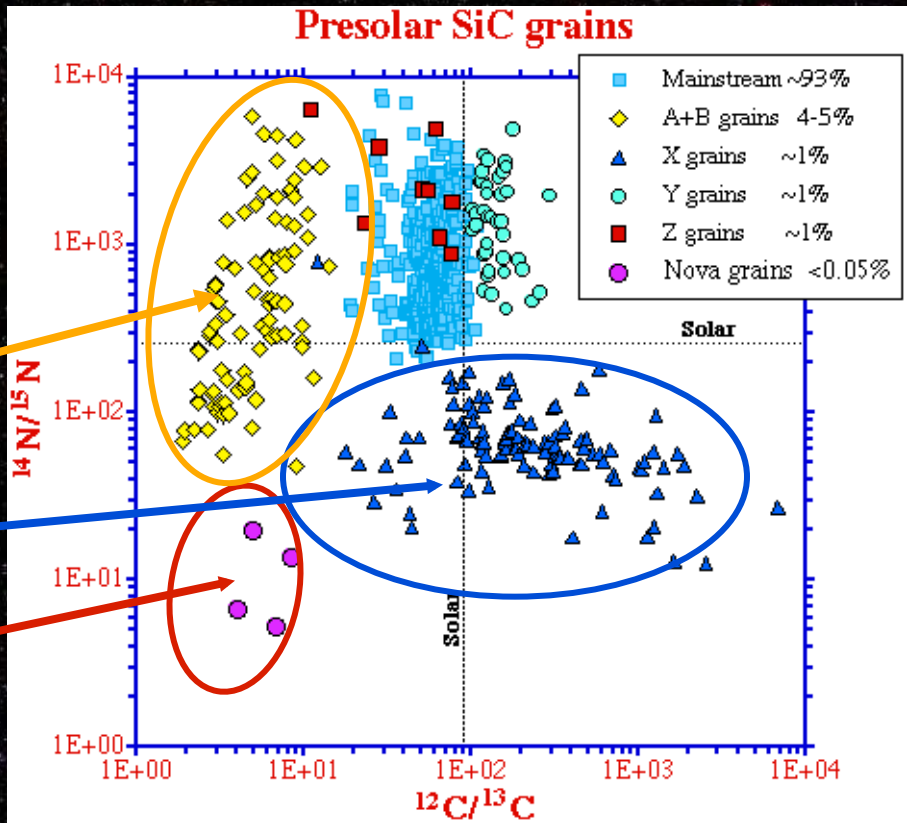
Cosmo-Chemistry of Meteorites



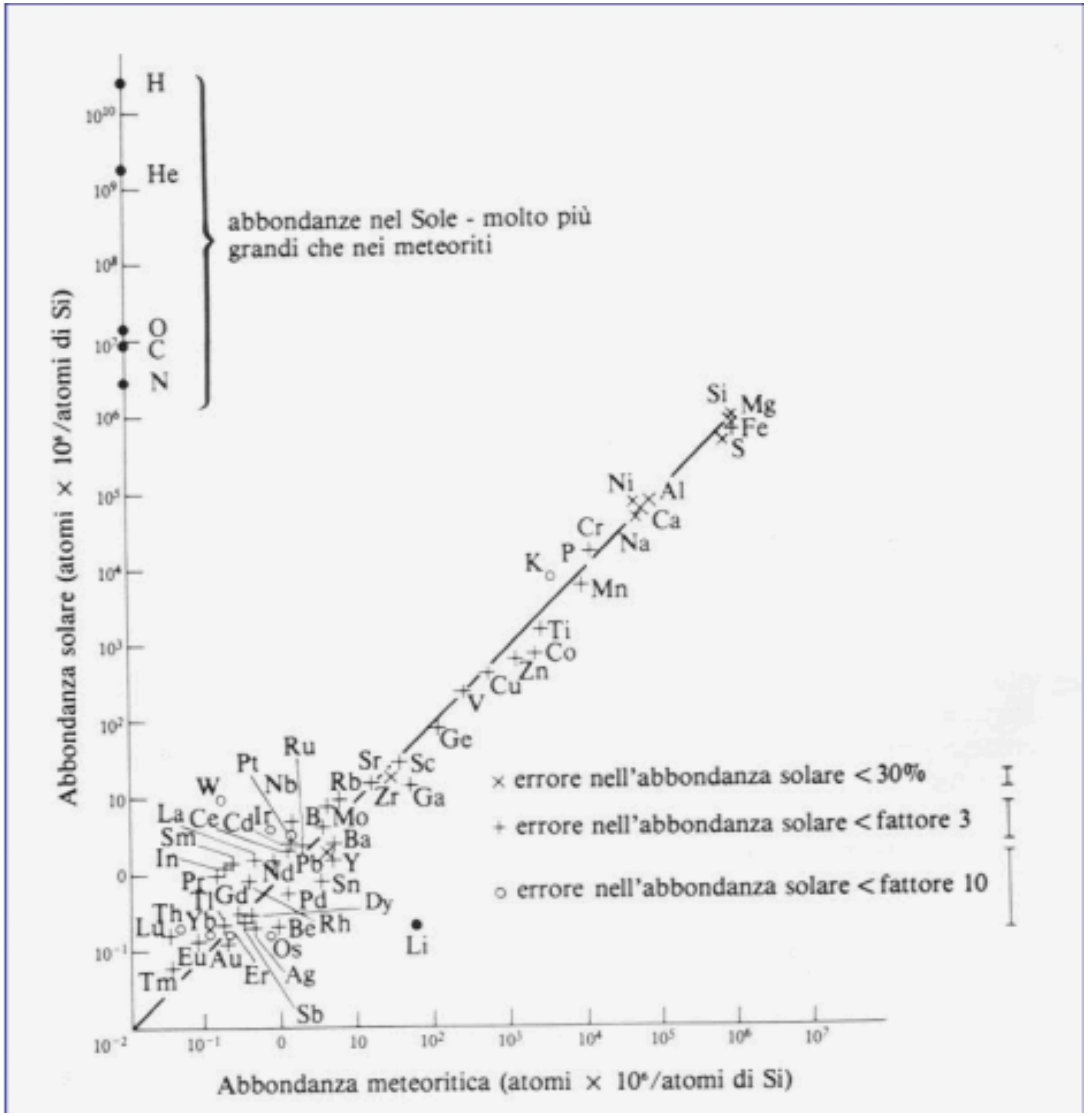
AGB-Stars

Supernovae

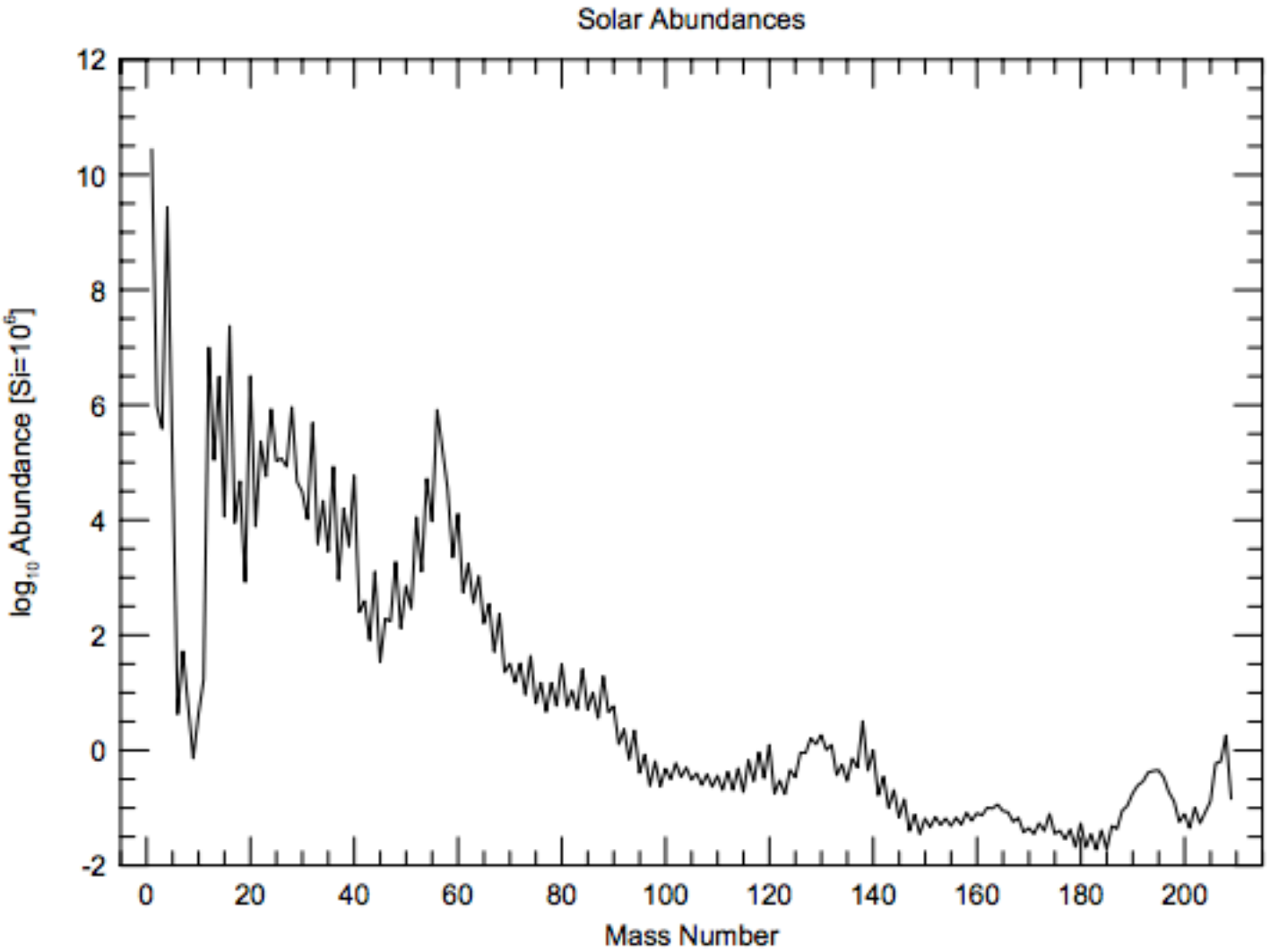
Novae



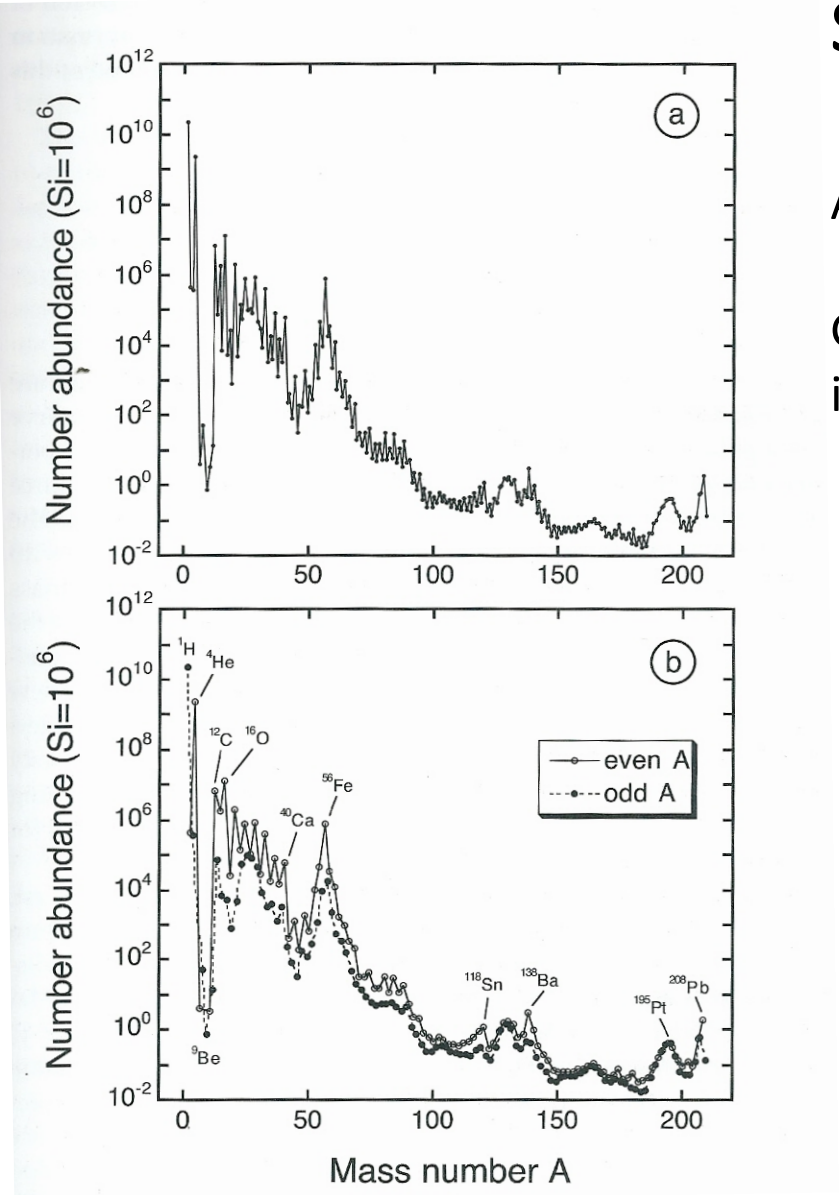
Abbondanze Meteoriche



Nucleosintesi



Abbondanze degli elementi nel sistema solare



Abbondanza in massa: $X=a_H=71.1\%$, $Y=a_{He}=27.4\%$

Gli elementi con Z>2 vengono generalmente indicati come “metalli”: $Z=\Sigma_{z>2}a_z=1.5\%$

Le abbondanze dei metalli sono variabili:
Z=2% stelle di I popolazione
Z=0.01% stelle di II generazione

Non sono state osservate finora stelle prive di metalli (III generazione)

Abbondanze degli elementi

Si possono dividere gli elementi in 5 gruppi:

1. elementi dominanti, H (75%) e He(25%). L'abbondanza di questi elementi è principalmente dovuta ai processi nucleari e deboli avvenuti nei primi minuti dopo il big bang. Per tale motivi queste abbondanze sono un test per i modelli cosmologici.
2. i nuclei più pesanti del He e più leggeri del C sono relativamente rari. Le loro abbondanze relative al H sono più basse di 8-10 ordini di grandezze.
3. elementi α-stabili, C, N, O, Ne, Mg, Si (nuclei per cui (N,Z) è un multiplo del He)
4. elementi intorno al picco del Fe e Ni
5. elementi con A > 60, prodotti via cattura neutronica

Abbondanza He

Domanda: He, 25% per massa, può essere stato generato nei processi stellari in tutta la vita della nostra galassia?

$$4p \rightarrow {}^{4}He + 2e^{+} + 2\nu_{e}$$

La differenza in massa per questa reazione è ≈ 25.7 MeV

l'energia cinetica portata via dai neutroni è ≈ 0.4 MeV.

Quindi vengono rilasciati 25 MeV per ogni 4 protoni.

Come calcolare l'abbondanza di He solare?

Costante solare ≈ 0.033 cal/sec/cm^2

Distanza Sole – Terra ≈ 1.49 × 10^{13} cm

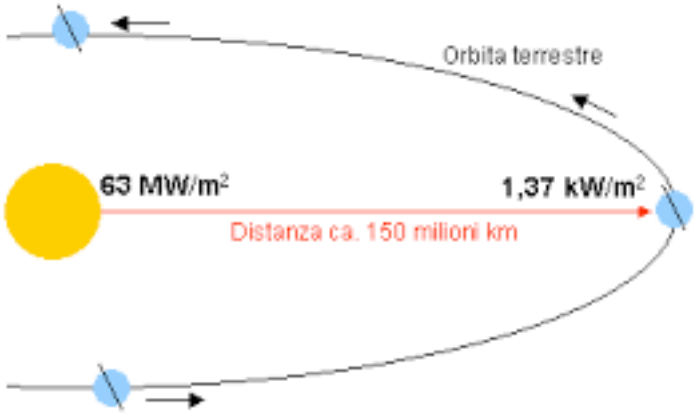


Figura 1 - Schema del sistema Sole – Terra

la potenza d'uscita:
$(4\pi r^2)(0.33 cal/sec/cm^2) \approx 0.92 \times 10^{26}$ cal/sec ≈ 2.4 × 10^{39} MeV/sec

4 protoni sono usati per produrre 25 MeV -> 4 × 10^{38} p/sec sono utilizzati

La massa del Sole equivale a ≈ 1.19 × 10^{57} protoni

Come calcolare l'abbondanza di He solare?

età del sole circa 5 Gy

la stima dei protoni consumati fino ad ora dal sole è data:

$(3.15 \times 10^7 \text{ sec/anno})(5 \times 10^9 \text{ anni})(4 \times 10^{38} \text{ protoni/sec}) \approx 0.63 \times 10^{56} \text{ protoni}$

$\frac{0.63}{11.9} \sim 5.3\%$ della massa solare

Quindi in 5 Gy sono stati utilizzati circa il 5% dei protoni. Di conseguenza l'abbondanza del He non può essere spiegata con le fusione nucleari nelle stelle. D'altra parte le stesse percentuali sono trovate nelle stelle di popolazione II.
Quindi dobbiamo ricorrere alla nucleosiontesi nel big bang

Nucleosintesi primordiale
cenni di cosmologia

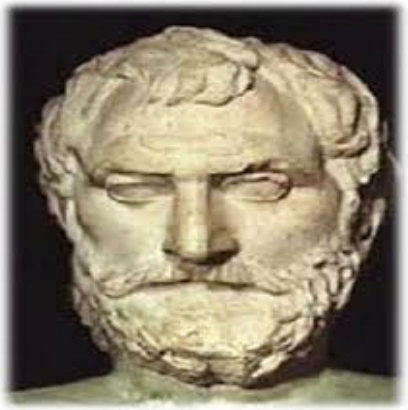
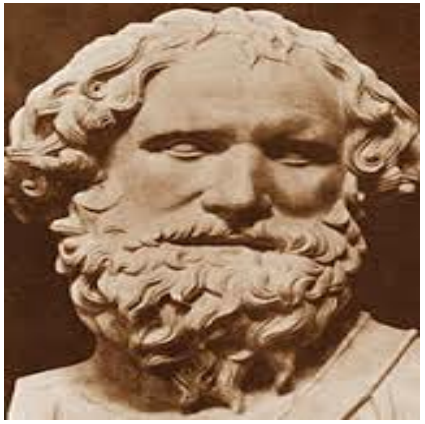
Cosmologia: Scienza del tutto

- Convergenza tra cosmologia e fisica delle alte energie che studia la natura ultima delle forze e tenta di comprendere i meccanismi fondamentali che regolano i fenomeni naturali. Questa convergenza sfrutta il fatto che la cosmologia permette di studiare ambienti cosmici nei quali la materia raggiunge valori dei parametri fisici e termodinamici, quali temperatura, pressione, densità ed energia, assolutamente non ottenibili nei laboratori terrestri. E' in queste condizioni estreme che si ritiene prendano forma le forze fondamentali.

Cosmologia: Scienza del tutto

- la cosmologia si colloca in una posizione alquanto unica anche nei confronti di discipline quali la filosofia, che pure hanno lo scopo di studiare e comprendere la natura, l'origine e l'organizzazione del mondo. La cosmologia si può pertanto considerare come la frontiera delle scienze fisiche. Certamente la frontiera delle scienze astronomiche, anche in considerazione del fatto che essa necessita e sfrutta la strumentazione astrofisica più avanzata.

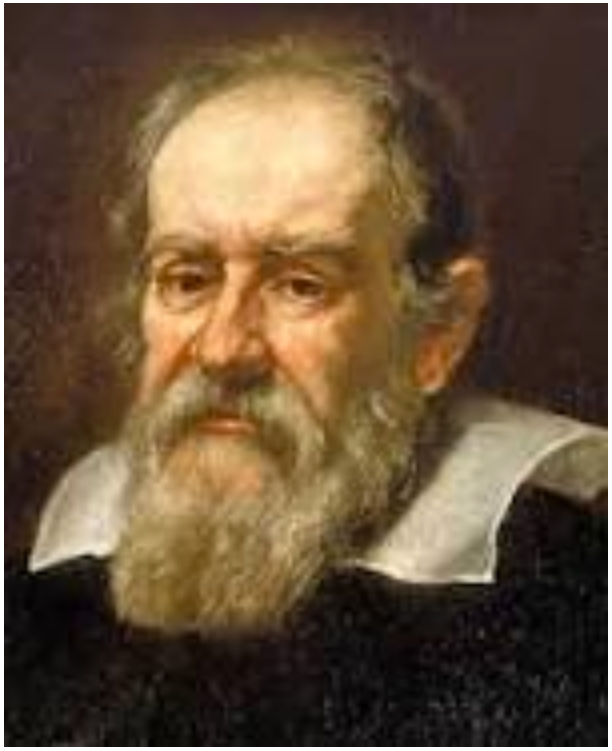
Cosmologia: le Origini

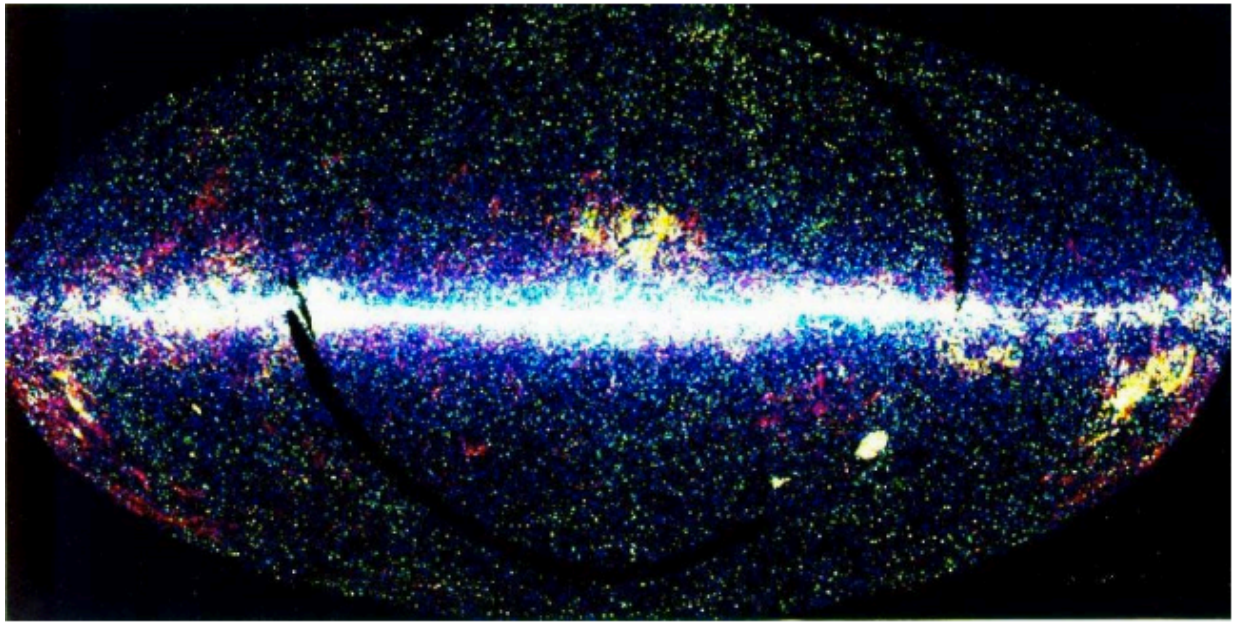
Come infinito è il principio, cosi sono infiniti I mondi che si generano dal principio. E I mondi non sono infiniti solo della successione temporale, nel senso che il mondo morira e rinascera infinite volte.

Anassimandro (586 a.C – 528 a.C.)

Cosmologia: le Origini



Galileo Galilei
1564-1642 d.C.

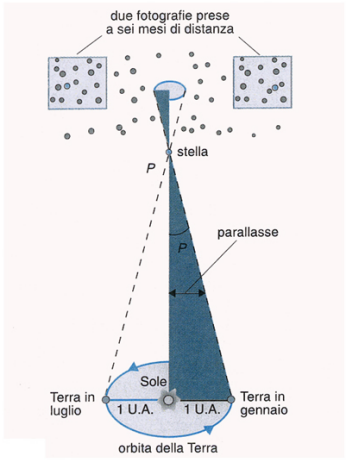


Galielo per primo stabilì, nel 1609, che la Via Lattea non era una struttura gassosa, ma “pulviscolo di stelle”

Cosmologia: moderna

Edwin Hubble 1889-1953

Sino agli anni 1920, la Via Lattea, questo enorme sistema di stelle, apparve racchiudere l'intero universo visibile, le cui dimensioni erano state valutate a oltre 20000 parsec di diametro. Solo con le osservazioni negli anni '20 del fondatore della cosmologia osservativa moderna, Edwin Hubble, si iniziò a comprendere che le vere dimensioni del cosmo erano tutt'altre



parsec (abbreviato in pc) significa "parallasse di un secondo d'arco" ed è definito come la distanza dalla Terra (o dal Sole) di una stella che ha una parallasse annua di 1 secondo d'arco. Il termine fu coniato nel 1913 su suggerimento dell'astronomo britannico Herbert Hall Turner

Un parsec corrisponde a 3,26 anni luce

anno luce = $9{,}461 \times 10^{12}$ Km

Cosmologia: moderna

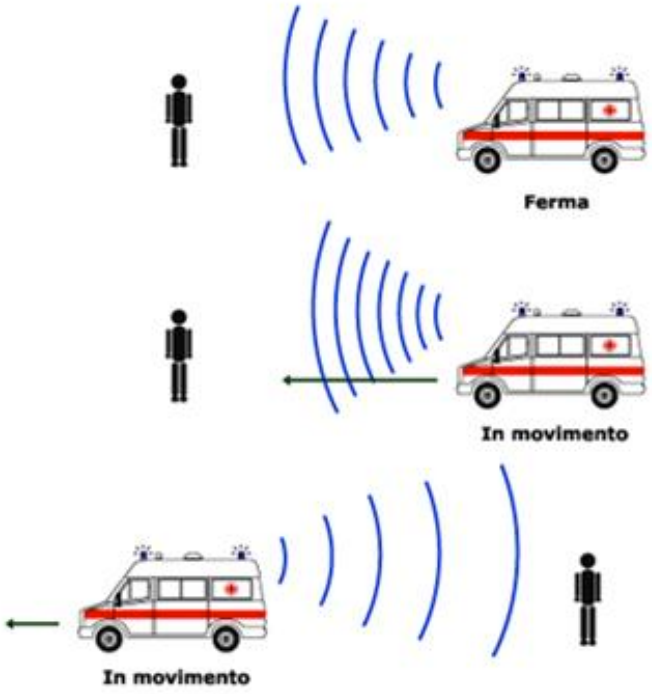
Le osservazioni fondamentale su cui il nostro modello dell'universo è fondato sono:

- Gli spettri delle galassie presentano un redshift che è proporzionale alla distanza delle galassie stesse (legge di Hubble)
- Esiste una radiazione di fondo nelle microonde (Cosmic Microwave Background, CMB) con intensità isotropa e omogenea.

Redshift

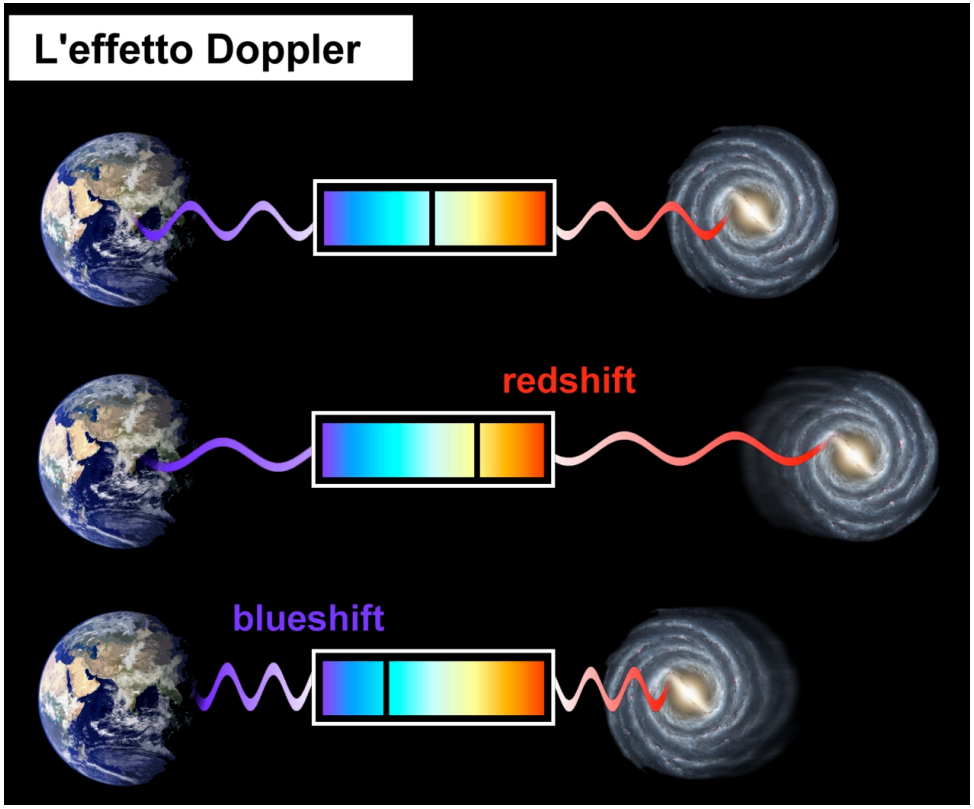
La nostra conoscenza dell'universo si fonda interamente su una proprietà comune di qualsiasi tipo di moto ondulatorio, nota come effetto Doppler (1842)

Christian Doppler 1803 - 1853



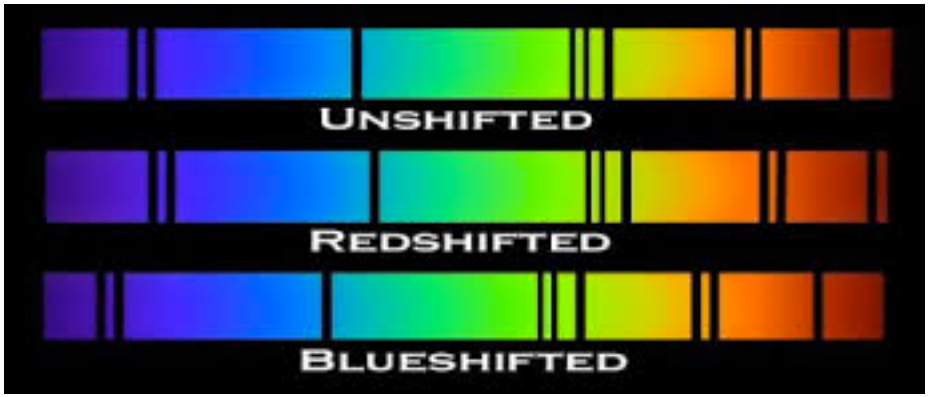
Redshift

L'effetto Doppler cominciò a rivestire un'enorme importanza per l'astronomia nel 1868, quando fu applicato allo studio delle singole righe dello spettro (Huggins)



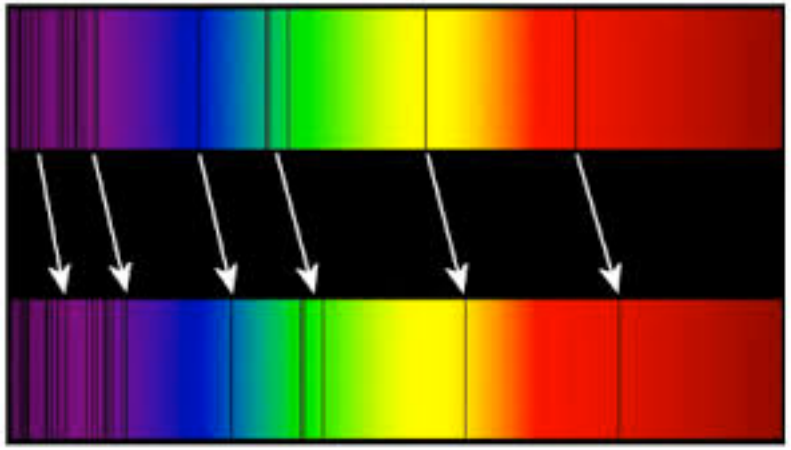
Esempio: una delle righe spettrali più osservate è la riga emessa dal gas di idrogeno a 21 cm (1,4 MHz). Se osservata in galassie distanti, essa viene osservata a una lunghezza d'onda di 21,1 centimetri. Questo spostamento verso il rosso (lunghezze d'onda maggiori) di 0,1 centimetri indica che il gas si sta allontanando dalla Terra a più di 1400 chilometri al secondo.

Redshift



1929 Hubble annunciò che lo spostameto verso il rosso delle galassie (z) aumenta in proporzione della distanza (D) dalla terra (punto d'osservazione)

$$z = \frac{\lambda_{oss} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}} = \alpha D$$



Interpretando il redshift come effetto Doppler, si può ottenere la relazione tra velocità di recessione delle galassie, Vg, e la loro distanza.

$$V_g = cz = (\alpha c)D = H_0 D$$

H_0 costante di Hubble

Principio Cosmologico

Il Principio cosmologico non è propriamente un principio, quanto piuttosto un assunto, una ipotesi di lavoro, che, quando viene applicato, limita fortemente il numero di differenti teorie cosmologiche possibili. Esso concerne l'osservazione dell'universo e afferma che:

L'universo è omogeneo e isotropo, su di una scala opportunamente grande.
In altre parole l'aspetto generale dell'universo non deve dipendere dalla posizione dell'osservatore e dalla direzione di osservazione. In realtà a piccola scala l'universo appare disomogeneo, ma questa disomogeneità tende a scomparire al livello degli ammassi di galassie.

Il principio cosmologico estende a livello cosmico il principio copernicano, secondo cui l'uomo non occupa una posizione privilegiata nel cosmo, in contrasto con la teoria geocentrica e implica, o meglio presuppone, che le leggi della fisica siano le stesse in ogni parte dell'universo.

Universo omogeneo = Non esistono posizioni privilegiate.
Universo isotropo = Non esistono direzioni privilegiate

Principio Cosmologico

Tutto lo spazio e quindi tutte le direzioni si espandono uniformemente nel tempo tali che, considerate due qualsiasi distanze D_i e D_j misurate nei tempi t_1 e t_2 si ha:

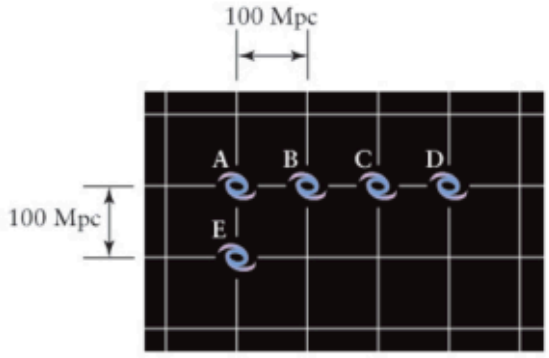
$$\frac{D_i(t_2)}{D_i(t_1)} = \frac{D_j(t_2)}{D_j(t_1)}$$

Espansione uniforme ➔ tutte le distanze variano dello stesso fattore in un dato intervallo di tempo

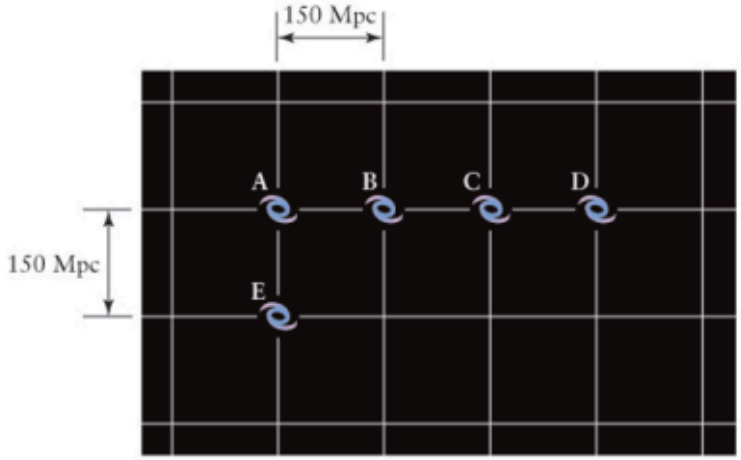
$$\frac{D_i(t_2)}{D_j(t_2)} = \frac{D_i(t_1)}{D_j(t_1)} = a(t)$$

Il rapporto tra due qualsiasi distanze deve rimanere costante nel tempo, questo è una funzione universale del a(t) del tempo, indipendente dalla posizione

Principio Cosmologico



(a) Five galaxies spaced 100 Mpc apart



(b) The expansion of the universe spreads the galaxies apart

Significato della velocità di recessione

Le galassie si mantengono “ferme” nella loro posizione ma l’espansione dello spazio da luogo ad una velocità apparente di allontanamento. Questa velocità di recessione è osservata indifferentemente da tutte le galassie.

Legge di Hubble

$$\vec{x} = a(t)\vec{r}$$

r posizione della galassia al tempo t, per $t = t_0$ si ha $a(t_0) = 1$

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \dot{a}(t)\vec{r}$$

$$\vec{v} = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}\vec{x}(t)$$

$$\vec{v} = H(t)\vec{x}(t)$$

Per $t = t_0$, ponendo $H(t_0) = H_0$ otteniamo la legge di Hubble

$$\vec{v} = H_0\vec{r}$$

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

La velocità di recessione è quindi una velocità apparente dovuta all'espanzione dell'universo, ovvero è una variazione del fattore di variazione di scala a(t)

Modello cosmologico

Universo omogeno e isotropo in espansione omogena, riempito di gas cosmico di densità al tempo t data da $\rho(t)$.
Consideriamo una superfice sferica di raggio r in cordinate comoventi: x(t) = a(t)r

$$M(x) = \frac{4}{3}\pi x(t)^3 \rho(t) = \frac{4}{3}\pi r^3 a(t)^3 \rho(t)$$ Massa racchiusa nella sfera

$$\rho(t) = \rho_0 a(t)^{-3} \quad \rightarrow \quad M(x) = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0$$

$$\ddot{x}(t) = -\frac{GM(x)}{x^2} = -\frac{4\pi G}{3}\frac{\rho_0 r^3}{x^2}$$

$$\ddot{a}(t) = -\frac{4\pi G \rho_0}{3a(t)^2} = -\frac{4\pi G}{3}\rho(t)a(t)$$

Modello cosmologico

Integrando l'equazione precedente si ottiene:

$$\dot{a}(t)^2 = \frac{8\pi G\rho_0}{3a(t)} - Kc^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho(t)a(t)^2 - Kc^2$$

Dove Kc^2 è la costante d'integrazione. Moltiplicando membro a membro per $r^2/2$ e ricordando che x(t) = a(t)r otteniamo:

$$\frac{v(t)^2}{2} - \frac{GM(x)}{x(t)} = -Kc^2\frac{r^2}{2}$$

Questa è l'equazione di conservazione dell'energia. K è proporzionale all'energia totale della particella comovente, per cui ne determina la storia dell'espansione, ovvero il comportamento di a(t)

Modello cosmologico

$$\frac{v(t)^2}{2} - \frac{GM(x)}{x(t)} = -Kc^2\frac{r^2}{2}$$

K < 0 : Il secondo membro è sempre positivo, poiché $H_0 > 0$ ➔ å(t) rimarrà sempre positivo, l'universo si espande sempre

K = 0 : $H_0 > 0$, l'universo di espande sempre ma per t -> ∞ å(t) -> 0

K < 0 : Il secondo membro si annulla per a = $a_{max} = (8\pi G\rho_0)/(3Kc^2)$. Per questo valore si ha å(t) = 0. L'espansione si arresta e in seguito si trasforma in una contrazione per cui l'universo collassa.

Per K = 0, ρ_0 assume un valore particolare detto densità critica

$$\rho_{cr} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 9.2\ x\ 10^{-30} g cm^{-3} \qquad \Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_{cr}}$$

Ω_0 parametro di densità

K > 0 corrisponde a $\Omega_0 > 1$, K = 0 a $\Omega_0 = 0$, K < 0 a $\Omega_0 < 1$

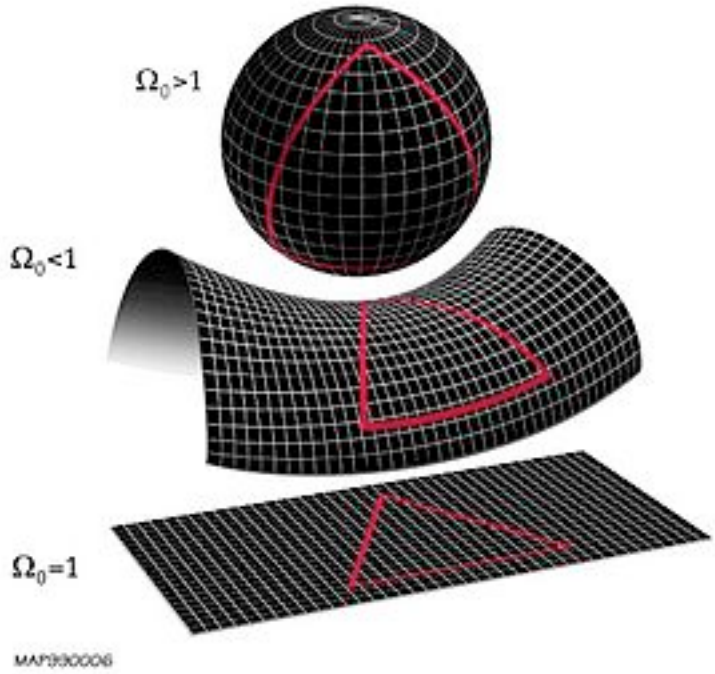
Modello cosmologico: relatività generale

- L'equivalenza tra materia ed energia comporta che non c'è solo la materia a contribuire nell'equazione del moto.

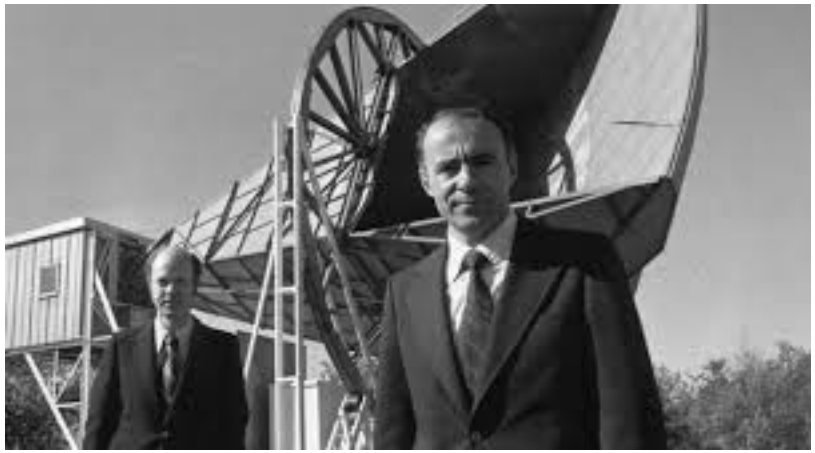
- Einstein credeva all'universo stazionario, introdusse nella sua equazione la costante cosmologica Λ per ottenere una soluzione stazionaria.

- La relatività generale mostra il vero significato dell'espansione dell'universo: si tratta di una vera espansione dello spazio. In particolare il redshift cosmologico non è dovuto all'effetto Doppler ma all'espansione dell'universo

Modello cosmologico



Radiazione di fondo nelle microonde (Cosmic Microwave Background, CMB)



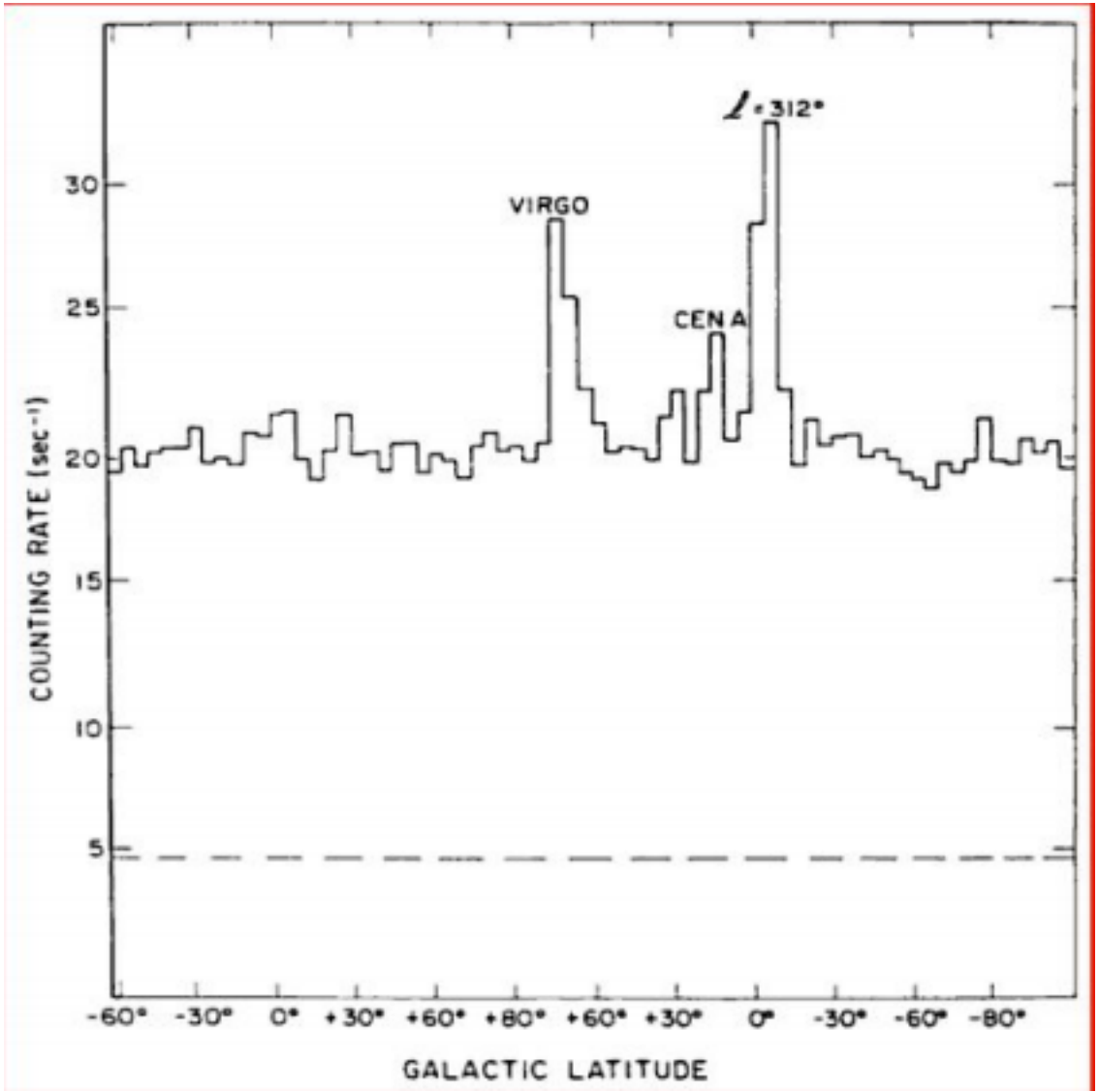
Arno Penzias e Robert Wilson 1964

Fu usata un'antenna della Bell Telphone Laboratory per misurare l'intensità delle onde emesse dalla nostra galassia a elevate latitudini, ossia fuori dal piano della via lattea.
In queste misure avevano rivelato un po' più di rumore di quanto fosse possibile spiegare.
In particolare alla lunghezza d'onda di 7.35 cm captavano una considerevole quantità di rumore indipendente dalla direzione

Qualsiasi tipo di corpo avente una temperatura > dello 0 assoluto emette un rumore radio (prodotto dal moto termico degli elettroni al suo interno). Dentro un corpo cavo con pareti opache l'intensità del rumore a una qualsiasi lunghezza d'onda data dipende solo dalla temperatura delle pareti. E' possibile descrivere l'intensità del rumore radio osservato a una determinata lunghezza d'onda indicandone la "temperatura euivalente": che è la temperatura delle pareti di un corpo cavo all'interno del quale il rumore radio avrebbe l'intensità osservata.

Penzias e Wilson trovarono che la temperatura equivalente del rumore radio osservato era di circa 3.5 °K

CMB



Scansione di una parte del cielo in raggi X dal satellite UHURU. Picchi di segnale in prossimità di alcune sorgenti extragalattiche, in aggiunta a un segnale di fondo diffuso (circa 20 conteggi al sec). Il confronto fra questo rumore con il livello di rumore strumentale (linea tratteggiata) evidenzia una componete diffusa di origine extragalattica

CMB

of the basic plan (1968–70) is much greater. Columbia, Maryland, and Reston, Virginia, already provide a bank of experience in the early phases of planned community development, but they are just beginning to face the growth pains Tapiola has endured. What is the role of public policy in dealing with conflicting pressures within a new town for expansion versus "zero" growth? What problems arise when a "completed" new town matures?

Where the author draws conclusions or offers judgments, the lack of sufficient analysis may fault them. For example, she acclaims the quality of French agriculture but does not evaluate its efficiency. Because France's agricultural system is one of the least efficient in Europe, Common Market resource planners now must analyze the trade-offs between French quality and efficiency; but Strong's judgment appears to be one-sided.

One speculates on the reasons for these deficiencies. In part they may arise from the original criteria for selecting countries to study—"variety, novelty, and achievement." The most important one, perhaps, is missing—*relevance*. The book lacks specific relevance to the U.S. scene. The reader is forced to draw it out for himself by asking "So what?" at the end of each chapter, hoping the linkages will occur to him. Another reason may be the lack of focus in the author's concept of "environmental planning." It seems to touch on planning for natural resources, housing, land use, transportation, and social services, but the reader is not given a systematic framework to interrelate these.

The book will probably be widely used as a basic text and a handy reference, and perhaps it will even influence those in today's classrooms who will formulate urban policy 20 years hence. But for today's policy makers and analysts grappling with problems of national urban growth, welfare, housing, and transportation, it is of marginal value. This is unfortunate, because many key policy makers are desperately searching for sound analysis and advice that can be of use now. If planners like Strong, with their knowledge of both old problems and new ideas, do not provide such specific guidance and analytic support, an unusual opportunity to exert a significant beneficial effect will be lost.

MAHLON APGAR IV

McKinsey and Company, London, England

650

The Universe: Some Facts to Go On

Physical Cosmology. P. J. E. PEEBLES. Princeton University Press, Princeton, N.J., 1971. xvi, 282 pp., illus. Paper, $9. Princeton Series in Physics.

Modern Cosmology. D. W. SCIAMA. Cambridge University Press, New York, 1971. viii, 212 pp., illus. $8.95.

Although great scientists from Newton to Einstein have dabbled in cosmology, it has until recently had a bad name among physicists. The observations were too sparse, the ratio of speculation to fact too great, for cosmology to be called a hard science. These two books try to convince us that a corner has been turned. Recent observational discoveries have yielded solid cosmological information, strongly constraining models.

This change of outlook is largely the result of radio astronomy. When men like Ryle emerged from radar laboratories after the war, they were looking for new fields to conquer. Turning their antennas toward the sky, they found radio waves from the sun, and soon thereafter they found them coming from distant astronomical objects. The second most powerful radio source after the sun proved to be not a nearby star or planet but a galaxy one-fourth as distant as the most distant galaxy observed optically up to that time. Following up Reber's prewar discovery of radio waves from the Milky Way, radio astronomers found a variety of sources both within and beyond the galaxy, all apparently radiating by the same mechanism—synchrotron radiation by relativistic electrons. Overnight, the new capability to observe relativistic particles at vast distances enlarged and challenged the old astronomy, which was based upon thermal radiation from stars and nebulae. The relativistic particles are accelerated in sources which comprise a world unknown to classical astronomers—a world of relativistic explosions, of radio galaxies and quasars, of pulsars and neutron stars.

Hubble's confirmation of Slipher's discovery of the red shifts of galaxies, and his own discovery in 1929 that red shifts are proportional to distance, had earlier shown that we live in a dynamic universe, for which the relativistic gravitational theory of Einstein yields a number of models. But prewar progress on the structure of the cosmos was stymied by the faintness of distant optical galaxies. It proved impossible for equipment then available to push out beyond a red shift $z = \Delta\lambda/\lambda$ (which for small z equals v/c) greater than 20 percent. As v is expected to approach c at the limits of the observable universe according to the relativistic models of Friedmann, such red shifts yield too small a sample of the universe to give us a handle on the global properties of the cosmos.

There things stood until the radio astronomers discovered quasars (QSO's) and their red shifts were determined optically. The largest quasar red shift discovered to date is 2.88 ($v = 0.87c$), and the end is not in sight. The extremely large red shifts of quasars stimulated the hope that they could be used as probes in choosing the correct model of the universe. They are so distant that radiation left them when the expanding universe was much younger and smaller. One should therefore be able to sample conditions at early times, and hence nail down the dynamics. Alas, this hope has been dashed by the fact that quasars have a huge range of luminosities, so that it is not yet possible to obtain an independent determination of their distance from their apparent brightness, as required in order to plot the expansion curve of the universe.

Again the radio astronomers came to the rescue, this time by finding the cosmic microwave background radiation. Discovered by chance in 1965 by Penzias and Wilson, this diffuse background has a spectrum at short radio wavelengths like that of a perfect thermal emitter at 2.7°K and is isotropic about the earth within 0.1 percent. It turned out that this effect had been predicted much earlier by Gamow on the basis of the radiation emitted by the primeval fireball in a hot big-bang universe. (Gamow's collaborators Alpher and Herman predicted $T \sim 5$°K in 1948.) This discovery more than any

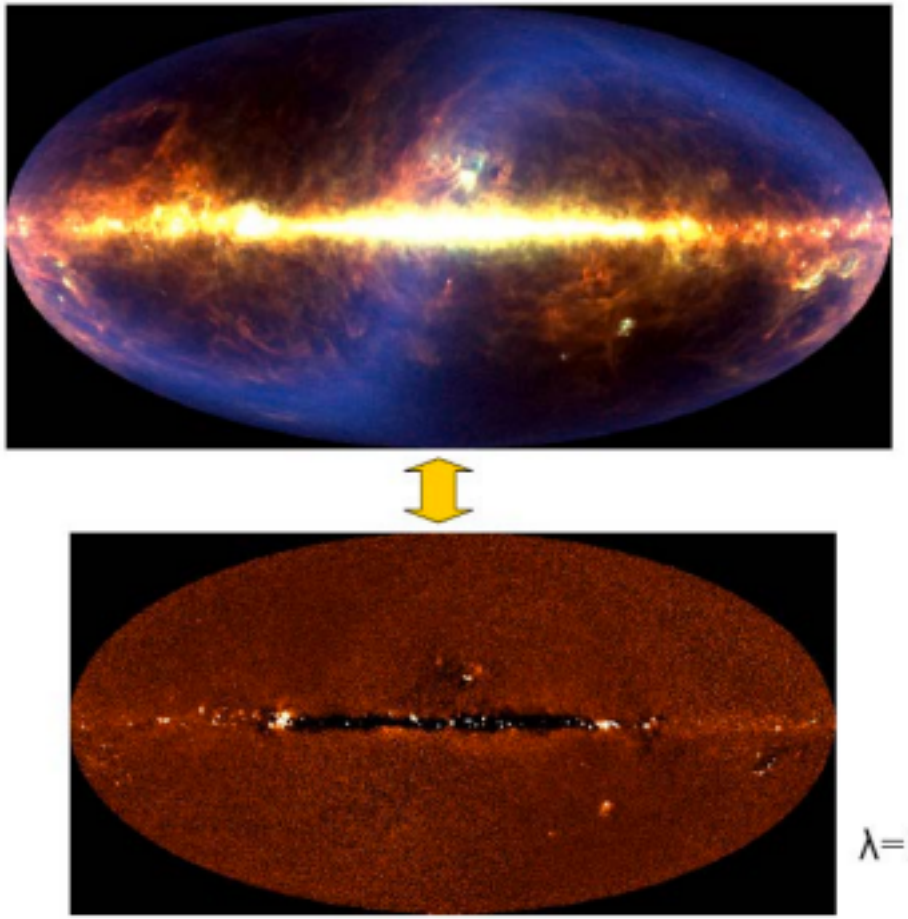
SCIENCE, VOL. 176

Peebles supponeva che se nei primissimi istanti non ci fosse stato un fondo di radiazione, le reazioni nucleari sarebbero procedute cosi rapidamente che una larga frazione dell'idrogeno presente si sarebbe trasformata in elementi più pesanti. Questa rapida evoluzione sarebbe potuto essere impedita solo se l'universo fosse stato pieno di una radiazione avente un'enorme temperatura equivalente (lunghezze d'onda cortissime) in grado di distruggere I nuclei non appena si fossero formati.

Ne consegue che l'universo attuale dovrebbe essere pieno di radiazione, ma, a causa dell'espansione dell'universo, con una temperatura equivalente molto più bassa di quella dei primo attimi.

Peebles ipotizzava una temperatura 10 °K

CMB



Radiazioni di fondo osservate dal satellite COBE

λ=100 μ

Il fondo di radiazione cosmica è un'emissione di corpo nero con una temperatura vicino ai 3 °K

CMB

La CMB fornisce una prova convincente che la radiazione e la materia si trovavano un tempo in uno stato di equilibrio termico.
La temperatura della CBM, 2.7 °K, ci permette di stimare il rapporto fra fotoni e nucleoni (dal corpo nero sappiamo che a ogni data temperatura il numero dei fotoni per unità di volume è inversamente proporzionale al cubo di una lunghezza d'onda tipica, quindi direttamente proporzionale al cubo della temperatura). Ne deriva che il fondo di radiazione di 3 °K contiene circa 55000 fotoni per litro. La densità di nucleoni nell'universo attuale è compresa fra 6 e 0.03 particelle per mille litri

Redshift + CMB

L'universo è in espansione ed è pieno di una radiazione la cui temperatura equivalente è di circa 3 °K. Questa radiazione ci appare come il residuo di un tempo in cui l'universo era in equilibrio termico

Temperatura dell'universo inversamente proporzioale a dimensioni dell'universo.
Es. quando l'universo era 10.000 volte più piccolo, la temperatura era 10.000 più alta

L'energia dei fotoni può essere calcolata, in prima approsimazione, moltiplicando la temperatura per la costante di Boltzman (0,00008617 eV/°K).
Es. Per creare un elettrone o positrone ho bisogno di 0.511 MeV ➔ 6×10^9 °K

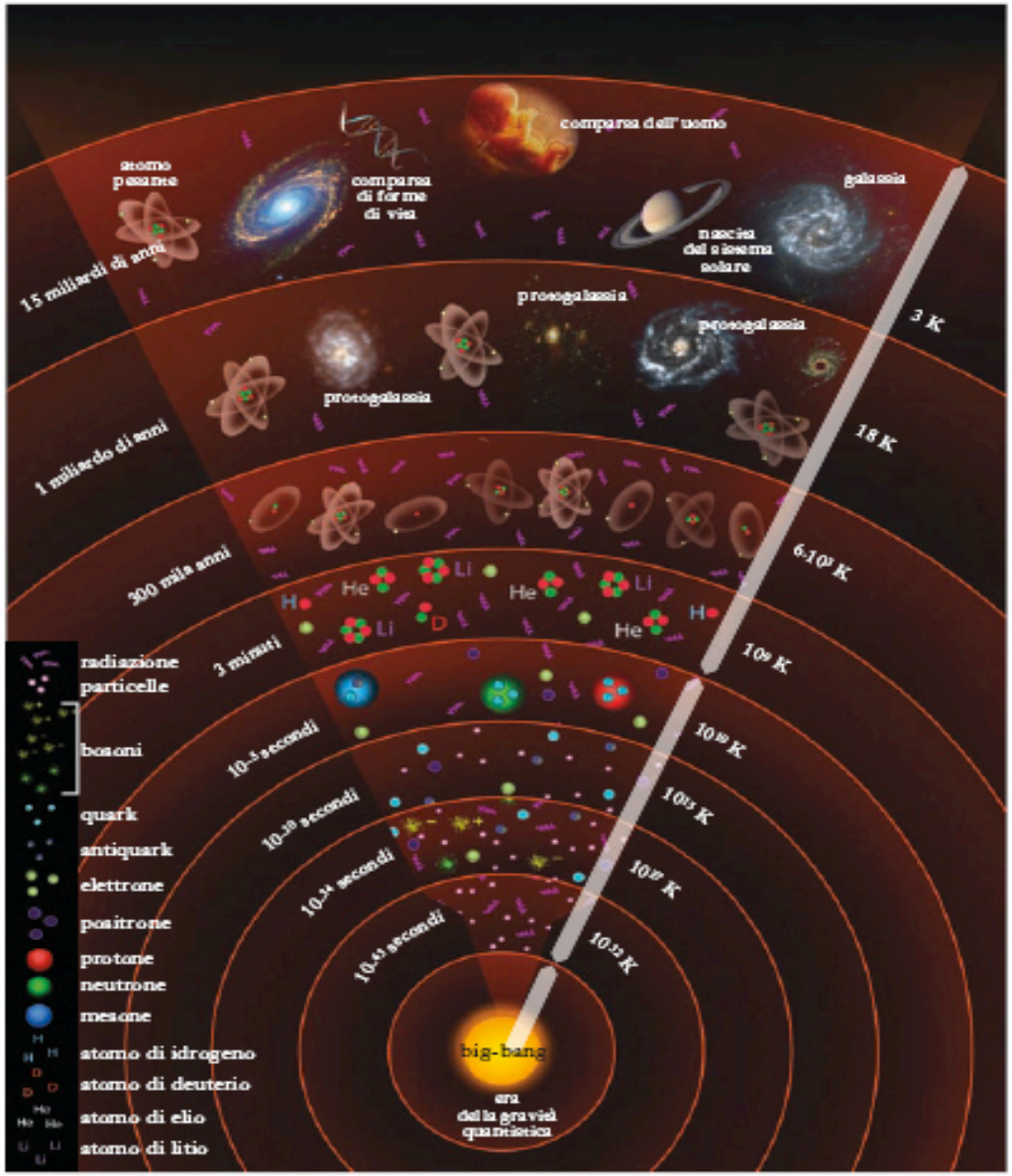
Equilibrio termico: Il numero delle particelle create e uguale a quello di quelle distrutte. Caratteristica importante di un sistema in equilibrio termico è che tutte le sue proprietà sono determinate univocamente una volta specificati i valori delle quantità che si conservano: Carica elettrica, numero leptonico, numero barionico

Relazione tra a, T e t

$$a \sim T^{-1} \sim \sqrt{t}$$

E	T(K)	a/a_0	t(sec)
≈ 10 MeV	10^{11}	1.9×10-11	0.0108
≈ 1 MeV	10^{10}	1.9×10-10	1.103
≈100 keV	10^{9}	2.6×10-9	182
≈ 10 keV	10^{8}	2.7×10-8	19200

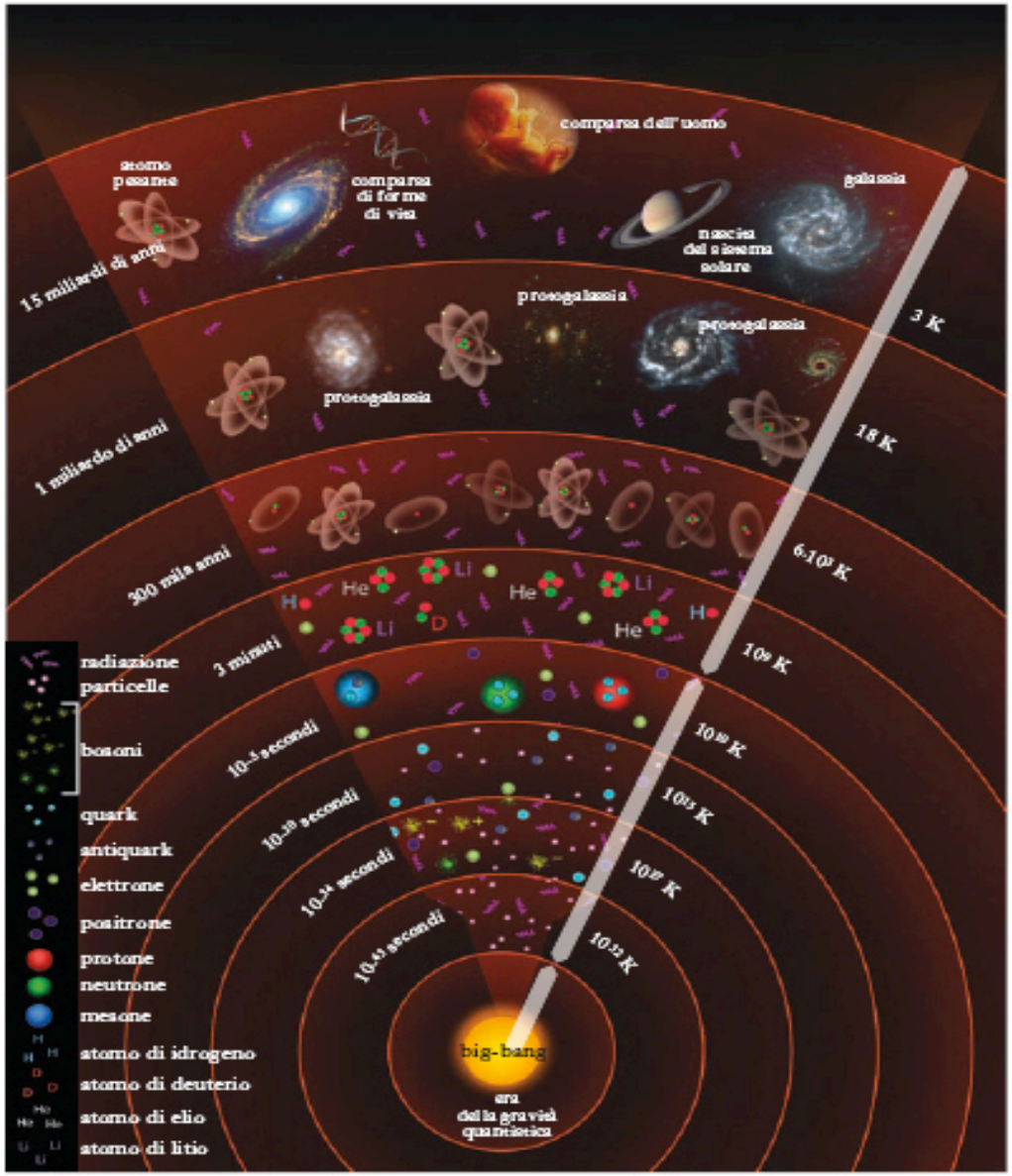
I primi istanti dell'universo



Era di Plank: $t = 10^{-43}$ s, $T \approx 5 \times 10^{31}$ °K
energia media $\approx 6 \times 10^{18} - 10^{19}$ GeV.
Questa può essere considerato la fase in cui vengono create le particelle. Fra il tempo 0 e il tempo dell'era di Planck si dovrebbe essere verificata l'unificazione fra grande unificazione e forza gravitazionale. Fino a quest'istante le onde gravitazionali emesse venivano subito assorbite, da questo momento possono propagarsi .

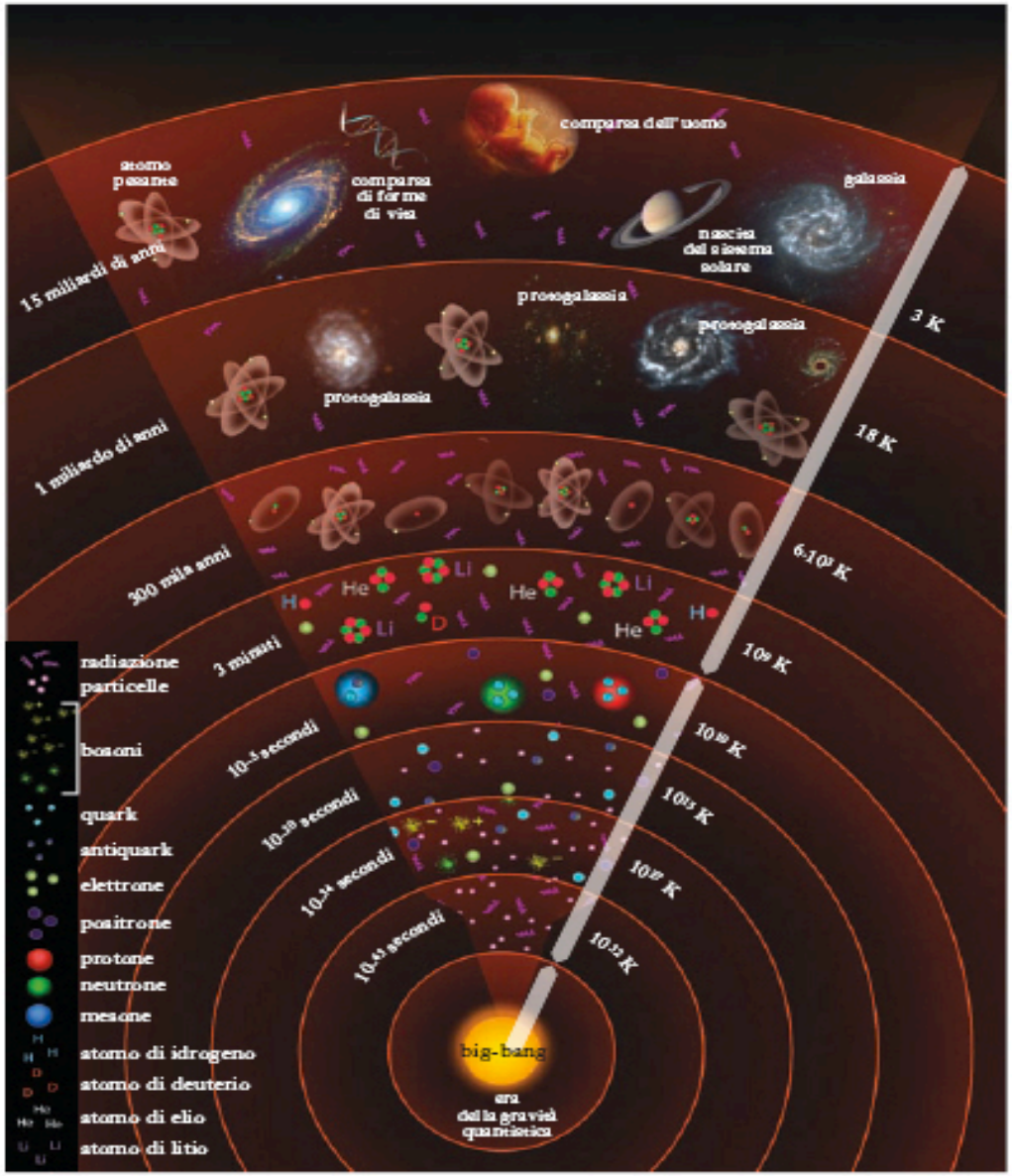
I transizione di fase

I primi istanti dell'universo



$10^{-43} < t < 10^{-35}$ s: L'universo è un gas di quark, leptoni, antiquark, antileptoni e di bosoni X, Y mediatori della forza grande unificazione. I leptoni e i quark si comportano come membri di un'unica famiglia

I primi istanti dell'universo

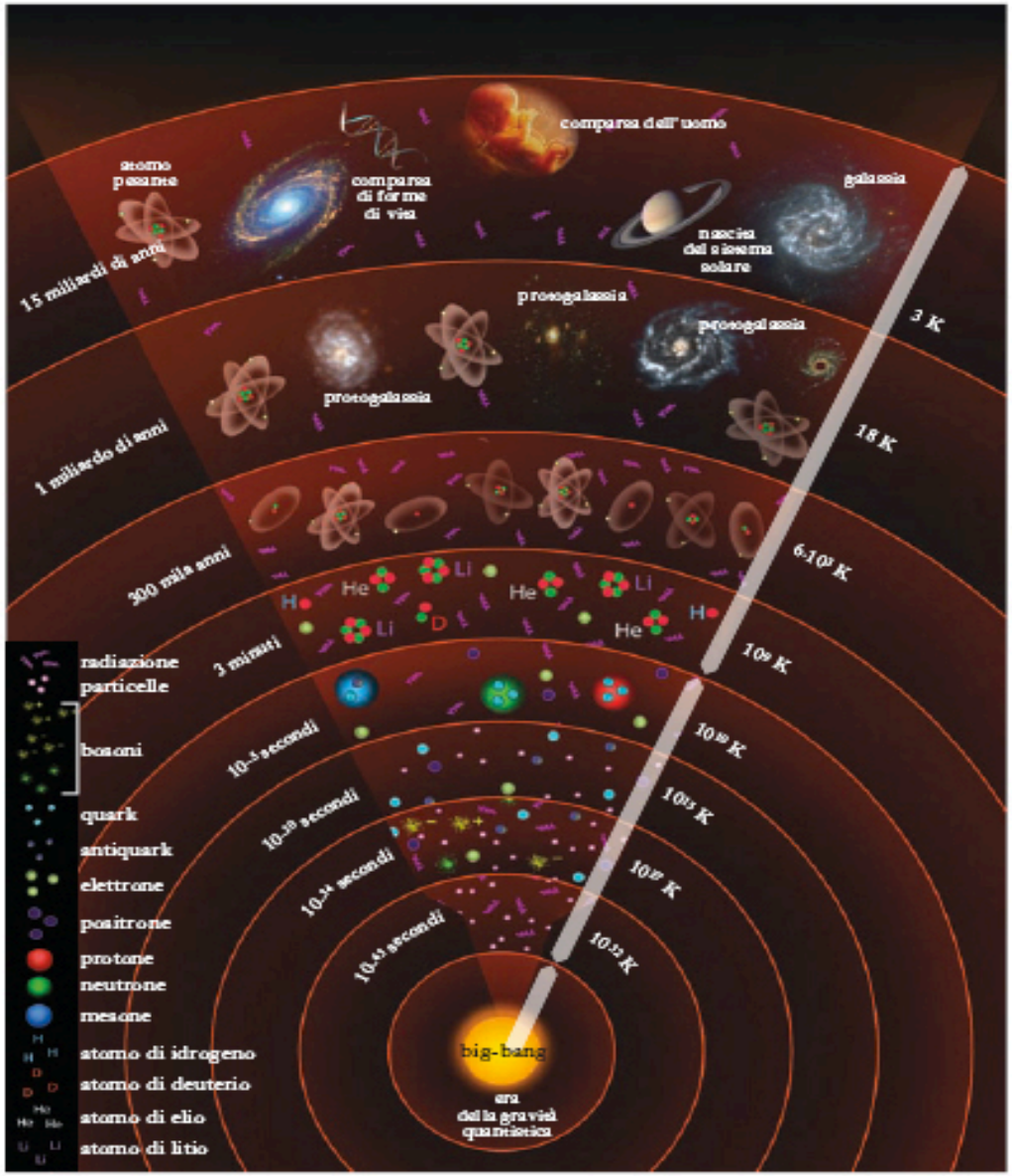


$t \approx 10^{-35}$ s $T \approx 5 \times 10^{27}$ °K energia media delle particelle $6 \times 10^{14} - 10^{15}$ GeV Era dell'Elettrodebole:

Termina l'epoca della grande unificazione (GUT). I quark e leptoni diventano due famiglie diverse. In questa era si è verifica l'inflazione (bosone di Higgs?).

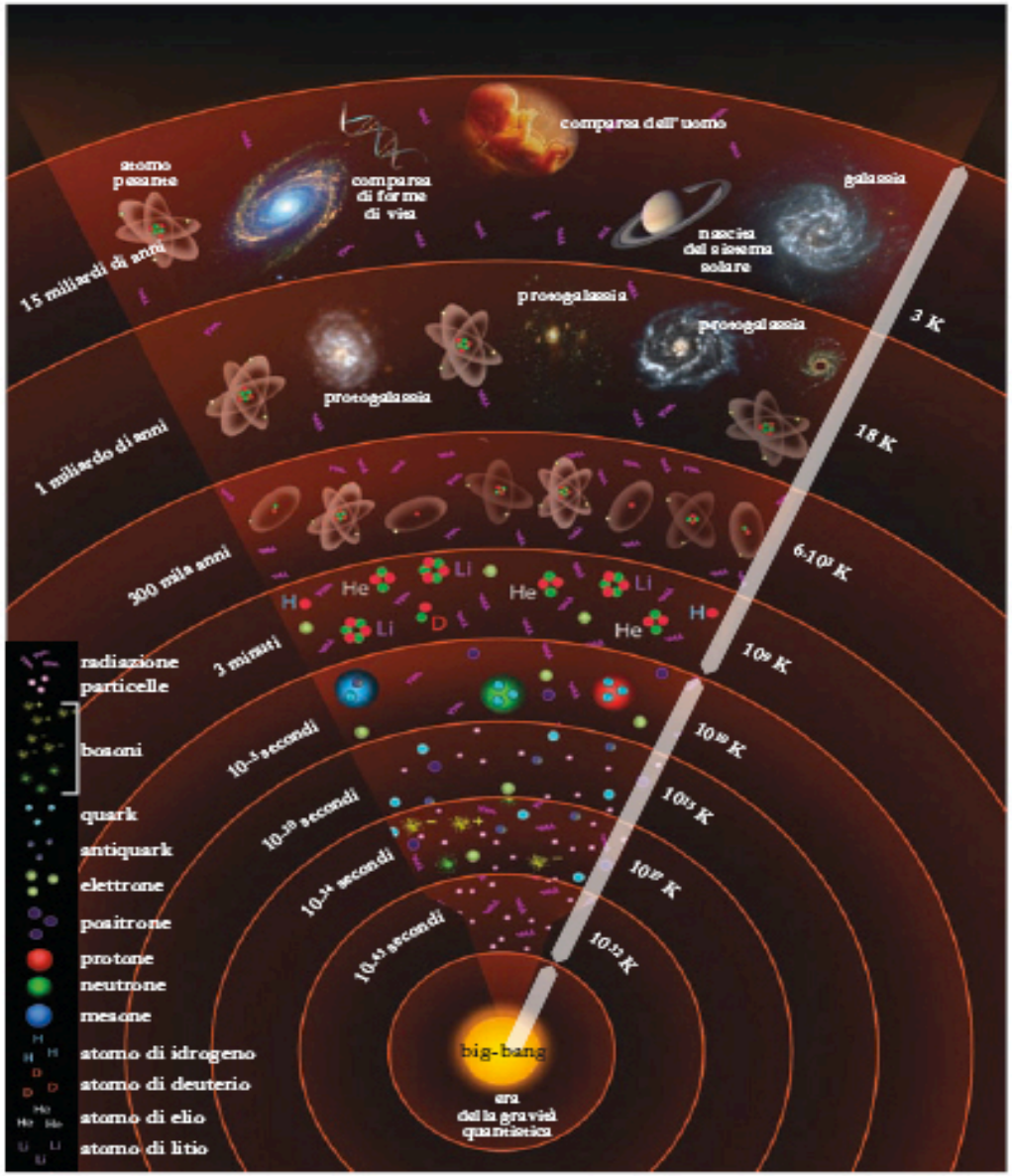
II transizione di fase

I primi istanti dell'universo



$10^{-35} < t < 10^{-10}$ s: La forza forte e quella elettrodebole si dividono, i bosoni X, Y decadono in quark e leptoni. Il loro decadimento porta a una lieve asimmetria tra materia e antimateria.

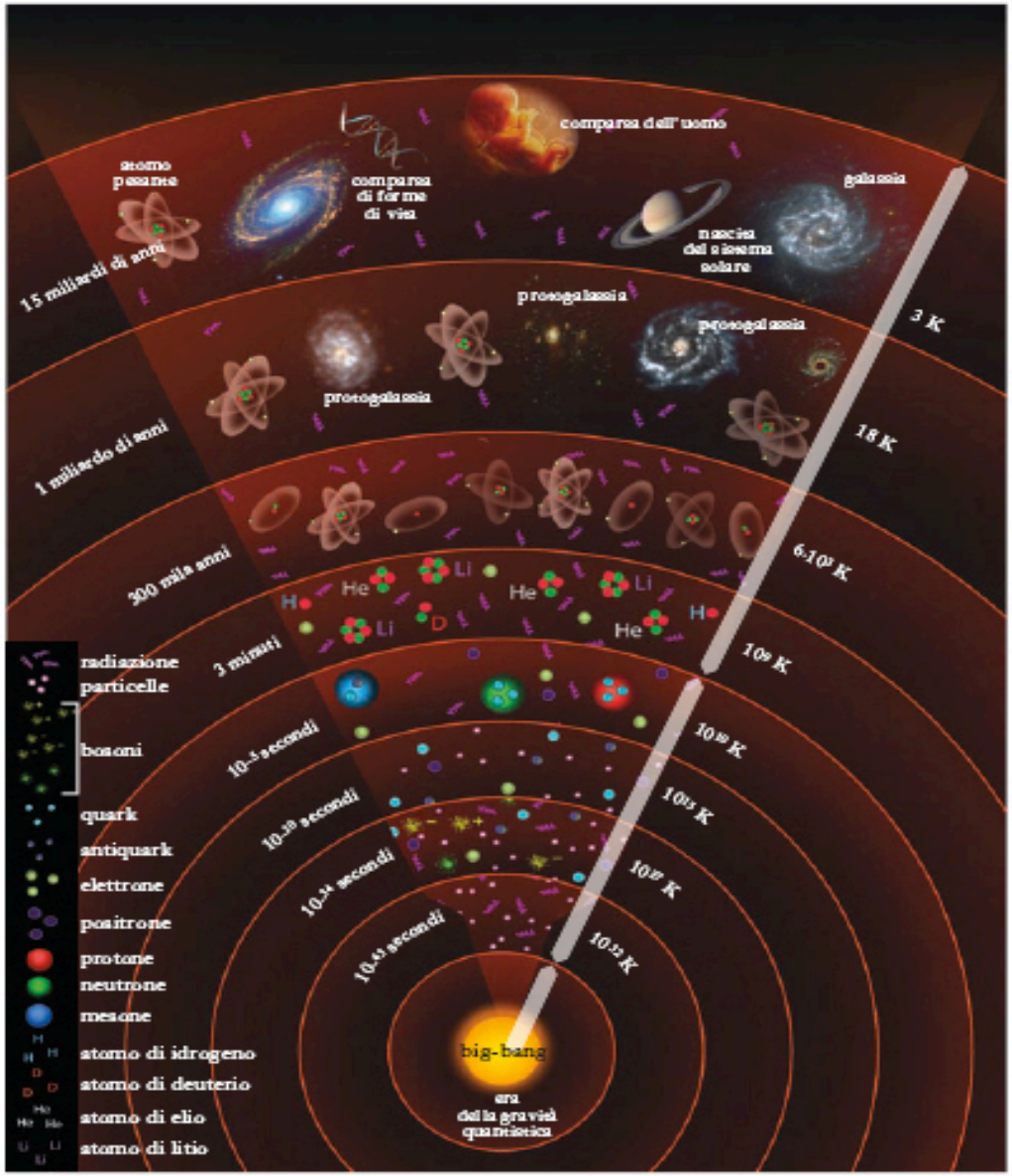
I primi istanti dell'universo



$t \approx 10^{-10}$ s $T \approx 1.5 \times 10^{15}$ °K energia media delle particelle 200 GeV:
Termina l'epoca dell'elettrodebole.

III transizione di fase

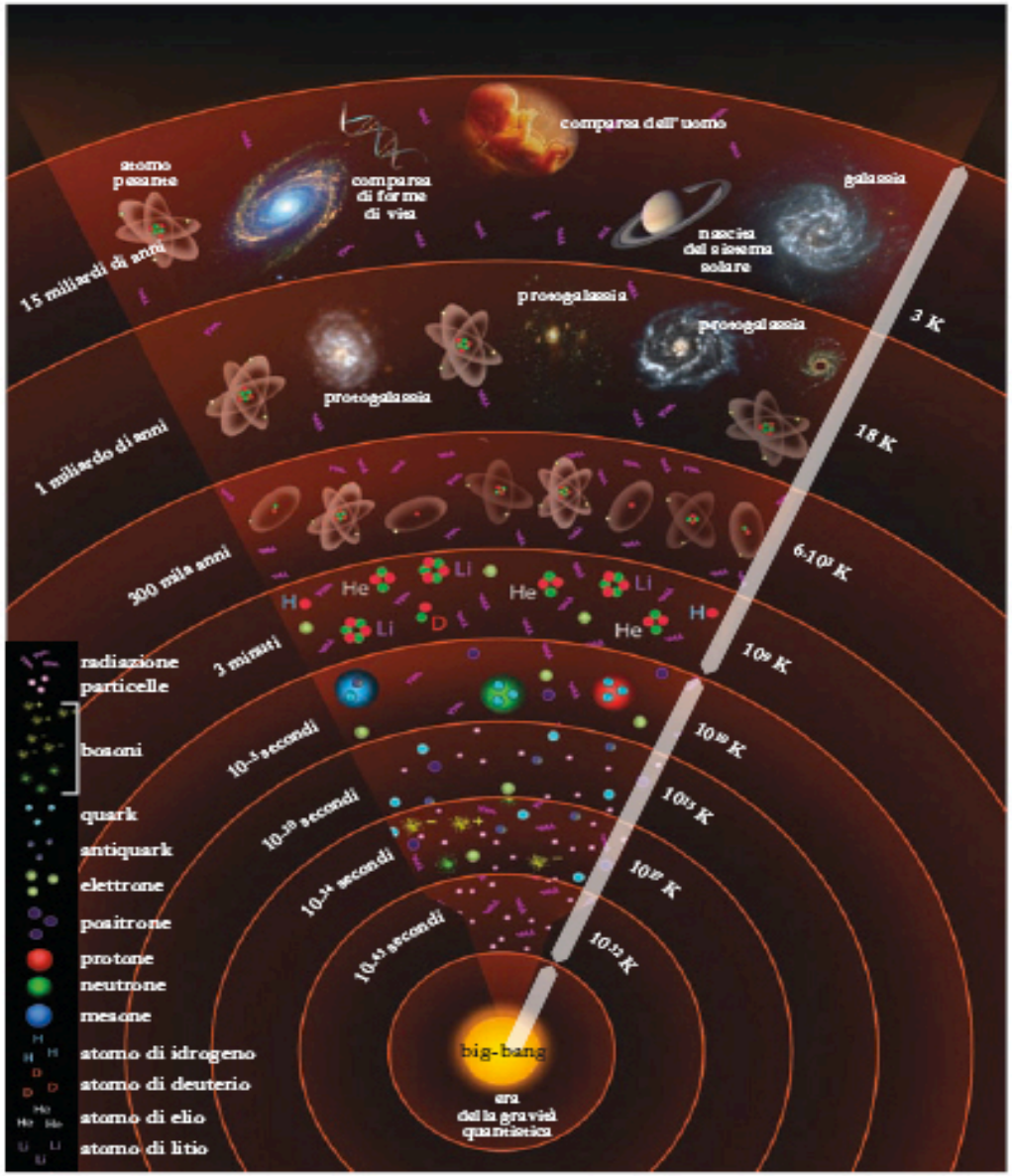
I primi istanti dell'universo



$t = 10^{-6}$ s avviene l'annichilazione quark-antiquark, seguita dall'annichilazione leptone-antileptone. Prima di questa fase si aveva un plasma quark, antiquark, gluoni, da ora in poi si avrà un plasma di quark, gluoni ed elettroni

IV transizione di fase

I primi istanti dell'universo



$t = 10^{-4}$ s $T \approx 1.8 \times 10^{12}$ °K energia media delle particelle 0.2 GeV:
Inizia il confinamento dei quark.

V transizione di fase

Equilibrio termico

t ~ 0.01 sec T ~ 10^{11}K kT~10 MeV $2m_ec^2$

$$p + e \leftrightarrow n + \nu$$

$$\mu_p + \mu_l = \mu_n + \mu_l$$

$$p + \bar{\nu} \leftrightarrow n + e^+$$

$$\mu_p - \mu_l = \mu_n - \mu_l$$

$$n \leftrightarrow p + e + \bar{\nu}$$

$$\mu_n = \mu_p + \mu_l - \mu_l$$

n e p sono considerati due possibili stati in cui può trovarsi il nucleone, m(n)=939,566 MeV, m(p)=938,272 MeV. Dalla probabilita di occupazione ricavo che

$$\frac{n}{p} = \frac{e^{-m_n/KT}}{e^{-m_p/kT}} = e^{-\Delta m/kT} = 0.86$$

Freezing delle interazioni deboli

t ~ 0.1 sec T ~ 3 ·10^{10} K ~ 3 MeV

$$\frac{n}{p} \approx e^{-\Delta m/kT} \approx 0.35$$

Quando la temperatura scende a valori dell'ordine del MeV le interazioni deboli cessano di essere efficaci.

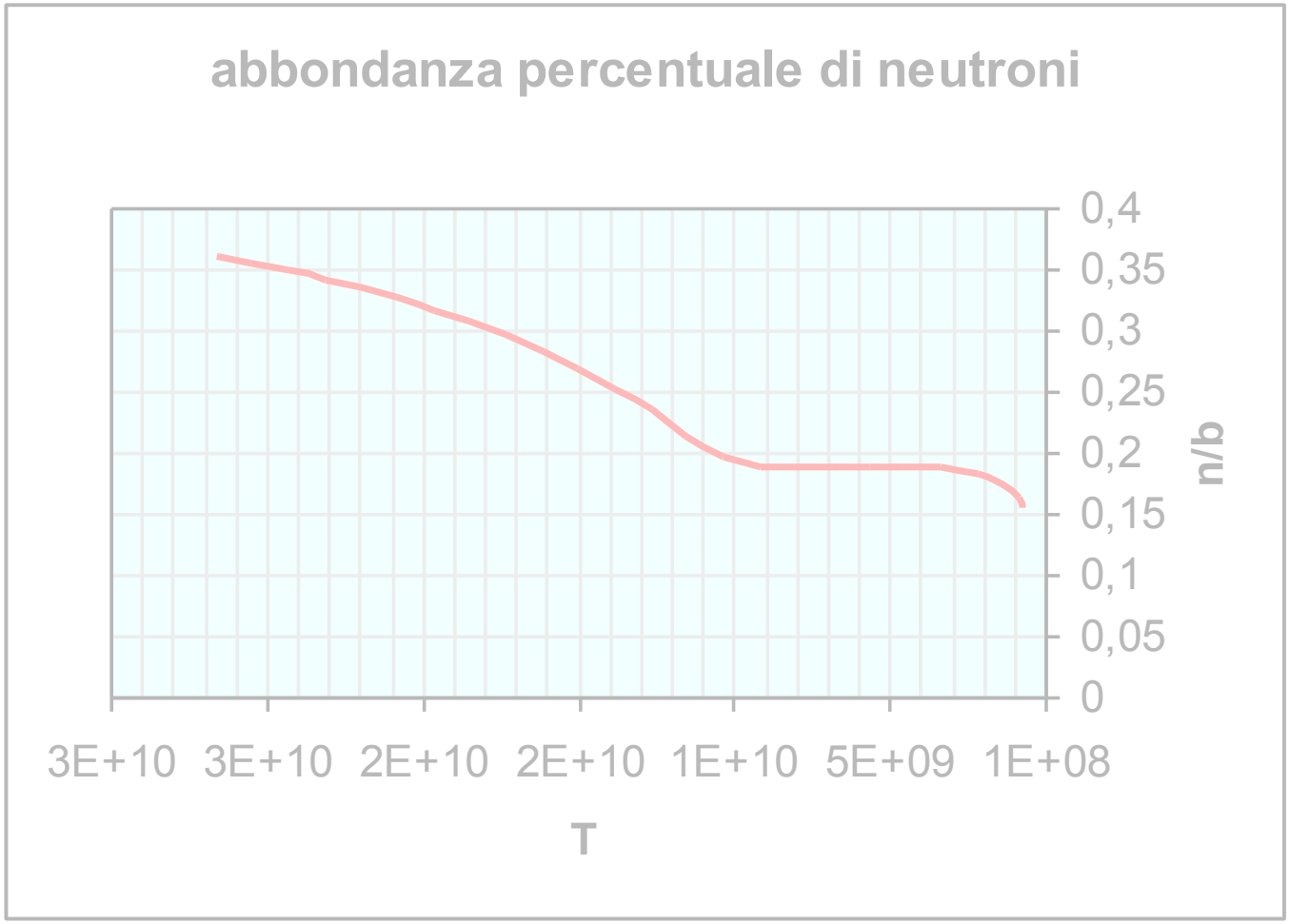
Questo processo ha due conseguenze fondamentali:

- Fuoriuscita di neutroni e protoni dall'equilibrio chimico (del quale sono responsabili le reazioni mediate da correnti deboli cariche)
- Disaccoppiamento dei neutrini, che interagiscono solo per interazioni deboli, oltre che gravitazionali

$$n \leftrightarrow p \qquad\qquad n + \nu_e \leftrightarrow p + e^-$$

Il freezing permette, di fissare il rapporto tra neutroni e protoni al valore $\frac{n}{p} \approx \frac{1}{7}$ questo consente la sintesi del ^{4}He

Abbondanza relativa n-p



Creazione-distruzione deuterio

t ~ 3 min T ~ $1 \cdot 10^9$ K ~ 0.1 MeV

A queste temperature è possibile la produzione di nuclei. Reazioni e.m. e nucleari a molti corpi, a causa della significativa diminuzione della densità barionica, diventano improbabili;

$$p + n \leftrightarrow d + \gamma$$

l'alto numero di fotoni ($\eta << 1$) fa sì che, anche a temperature molto inferiori all'energia di legame del deutone B_{H2} (~ 2.2MeV), esista una "coda" energetica sufficientemente popolata da mantenere il processo in equilibrio con il suo inverso (fotodissociazione del deutone): **Deuterium Bottleneck**

Man mano che scende T sempre meno fotoni sono in grado di dissociare il deuterio

Nucleosintesi nel Big Bang (BBN)

La nuclesintesi primordiale è la fase dell'evoluzione cosmica durante la quale si formano i nuclei di alcuni elementi leggeri, in particolare D, ^{3}He,^{4}He e ^{7}Li.

Particolarmente importanti sono il D e il ^{4}He perché non ci sono processi astrofisici che possano produrre le quantità osservate.

La BBN ha luogo quando l'universo ha qualche minuto di età (da 3 a 20 minuti circa). Questo fa sì che non vengano prodotti elementi più pesanti del berillio e allo stesso tempo sopravvivano elementi molto leggeri (ad es. il deuterio)

I fattori che ne influenzano l'evoluzione sono la densità di barioni e il tasso di espansione (o energia) dell'universo.

Nucleosintesi primordiale

La nucleosintesi primordiale deve avvenire per t ≈ 10 minuti

Se non ci fosse stata la nucleosintesi nei primi 10 minuti di vita dell'universo, oggi non avremmo più I neutroni. I neutroni esistono solo perché quando legati in un nucleo non decadono.
Quindi per tempi minori di 10 min qualche forma di condensazione o "freezeout" dei nuclei deve essere avvenuta nel hot big bang.

Il rapporto n/p (oggi): H 75% e He 25% ➔ per ogni He (4 masse unità) ci sono 12 protoni (12 masse unità). Cosi nella somma ci sono 2 neutroni per 14 protoni, quindi:

$$\frac{n}{p} \sim \frac{1}{7}$$

Sintesi dell'elio

$$\frac{m_{He}}{m_p} = 4 \qquad n_{He} = \frac{n_n}{2}$$

$$Y_p = \frac{M_{He}}{M_{tot\ b}} = \frac{n_{He} m_{He}}{n_b m_b} \approx 0.24$$

Quando si apre il deuterium bottleneck siamo già al di sotto della temperatura di sintesi dell'elio → Nucleosintesi veloce

Abbondanza Elio

$$Y_p = 0.236 \pm 0.003 \pm 0.005$$

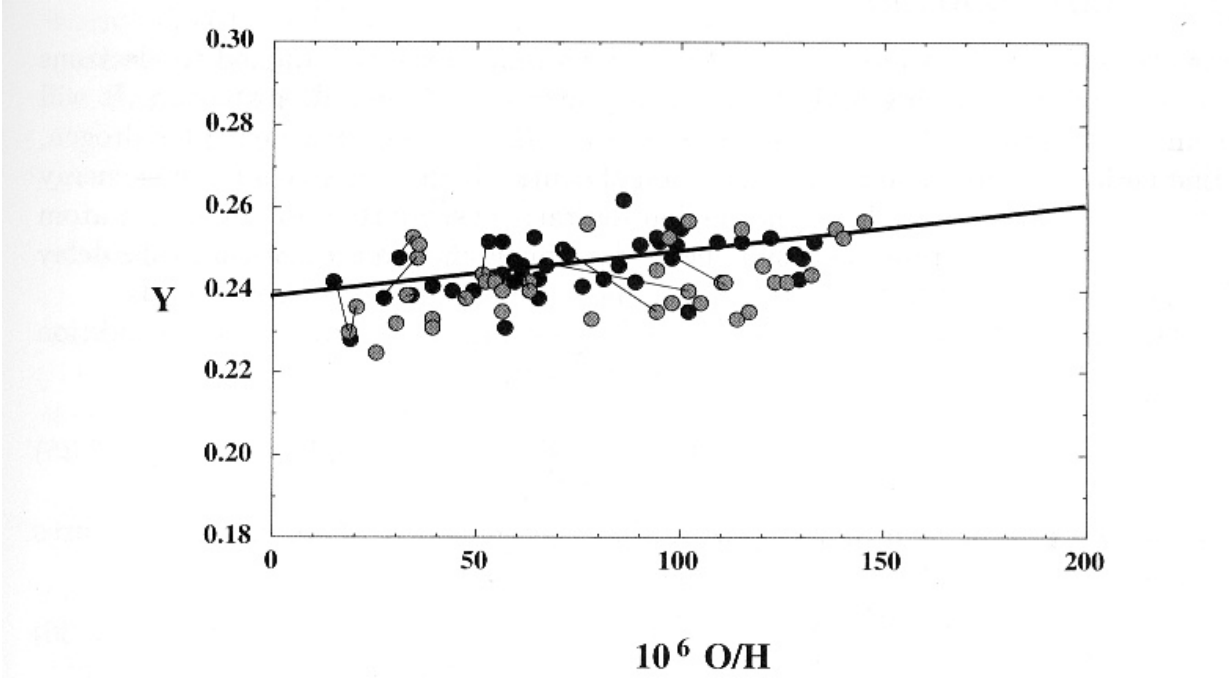
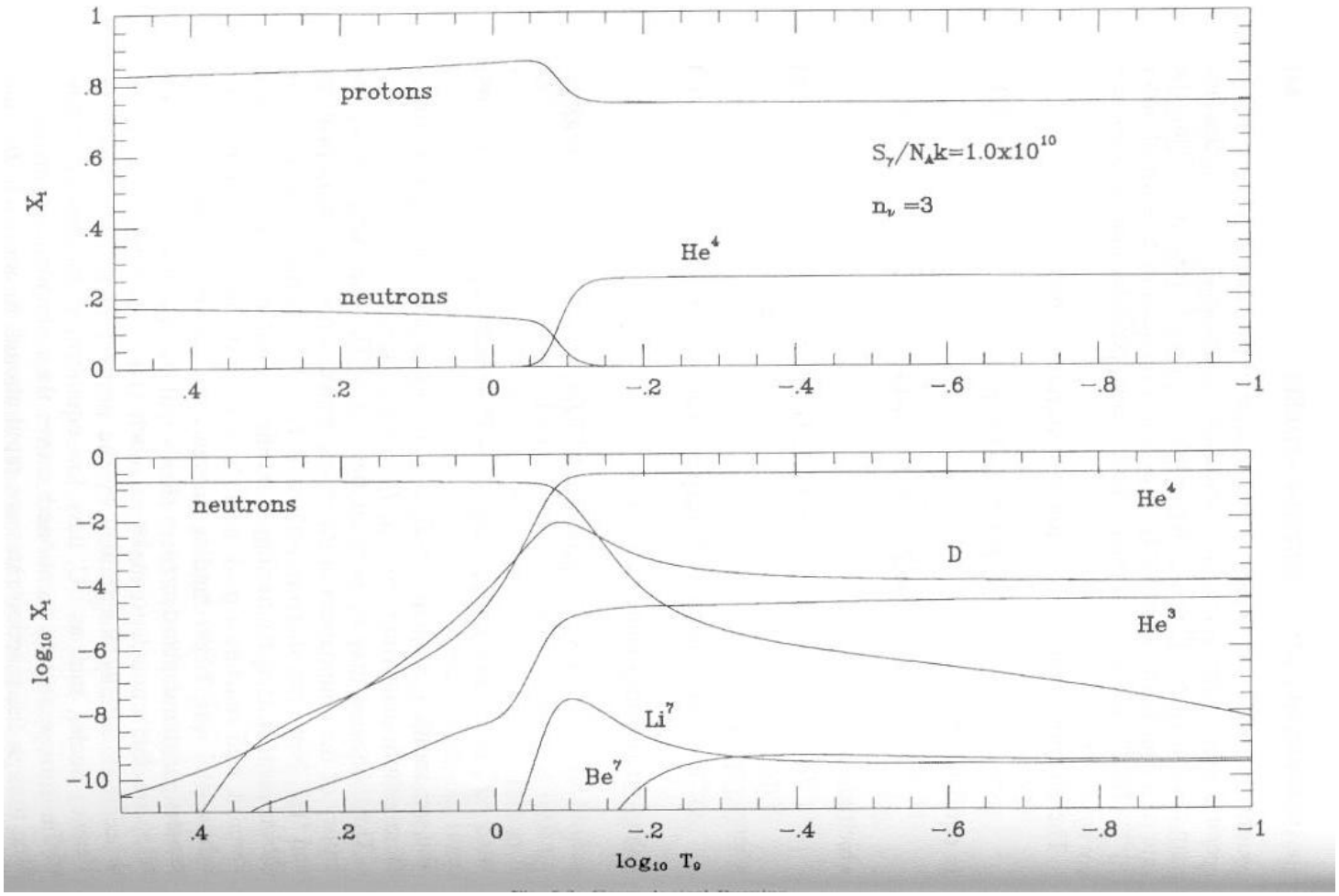


Figure 3.3. Helium abundance ($Y \equiv Y_p$) as a function of oxygen/hydrogen ratio. Lower oxygen systems have undergone less processing, so the helium abundance in those systems is closer to primordial. Line, and extrapolation to $Y_p = 0.238$, from Olive (2000). Data from Pagel *et al.* (1992), Skillman and Kennicutt (1993), Skillman *et al.* (1994), and Izotov and Thuan (1998). Short lines connect the same region observed by different groups.

Formazione elementi leggeri



Elementi pesanti

- Cosmologicamente prodotti solo elementi leggeri ($A \leq 4$) ad eccezione del litio
- problema: non esistono elementi stabili con A=5, 8, difficoltà nel costruire nuclei con $A \geq 11$

→ Nelle stelle si risolve con processo 3α

→ universo primordiale densità troppo bassa per avere reazione a tre corpi!!

Elementi "intermedi"

$6 \leq A < 12$

B^{2}FH: spallation

- raggi cosmici su ^{12}C, ^{16}O
- ^{12}C, ^{16}O accelerati in ambiente H
- Sezioni d'urto non variano molto sopra i 200 MeV
- Calcolando: dell'ordine dell'abbondanza solare

$\bar{\sigma}_{^9Be} = 5 \cdot 10^{27} cm^2$

$target/H = 10^{-3}$

flusso protoni $\approx 5 cm^{-2} s^{-1}$

età galassia $\approx 10^{10} yr$

$Be/H \approx 10^{-11}$

Non-standard nucleosintesi

Variando i parametri:

- Se n_b fosse maggiore: eccesso di ^{7}Li
- Se fosse minore: eccesso di D + ^{3}He
- Se l'espansione + veloce: sarebbero rimasti più neutroni, si produce più elio (stessa T)
- Se l'espansione fosse + lenta: meno elio

Non-standard nucleosintesi

NUCLEOSINTESI NON OMOGENEA

n, p differente distribuzione spaziale

- transizione quark-adroni al primo ordine

  → nucleazione di bolle di adroni nel plasma di quark

  →n possono diffondersi, p legati da e al campo radiativo

  → differenze da zona a zona

  → meno elio, più deuterio, forse compatibile con $\Omega=1$

Conclusioni

- La nucleosintesi standard costituisce un modello semplice in grado di fornire previsioni delle abbondanze degli elementi leggeri confrontabili con le osservazioni
- Le osservazioni danno risultati coerenti tra loro e forniscono limiti stringenti ad alcuni parametri fondamentali della teoria
- Confronto non diretto necessità di migliorare il metodo di osservazione e costruire modelli dettagliati per studiare come l'abbondanza degli elementi si modifichi nel tempo.
- È una teoria falsificabile: se dalle osservazioni future si trovasse un'abbondanza di elio inferiore a 0.235, fissato il numero di famiglie neutriniche, non si avrebbe più accordo con le altre abbondanze.

Bibliografia

- *Modern cosmology*, Scott Dodelson Academic Press 2003 University Press 1996
- *Cosmological Physics*, J.A. Peacock Cambridge University Press 1999
- *Cosmology The origin and evolution of cosmic structure*, P.Coles and F. Lucchin John Wiley & Sons 2002
- *An introduction to cosmology*, J. V. Narlikar Cambridge University Press 2002
- *A different approach to cosmology*, Hoyle, Burbidge & Narlikar Cambridge University Press 2000