

Materia oscura nell'Universo

Biblioteca Civica Archimede

Settimo Torinese, 10 aprile 2013

Alessandro Bottino

Università di Torino/INFN

Un viaggio in tre tappe nell'Universo

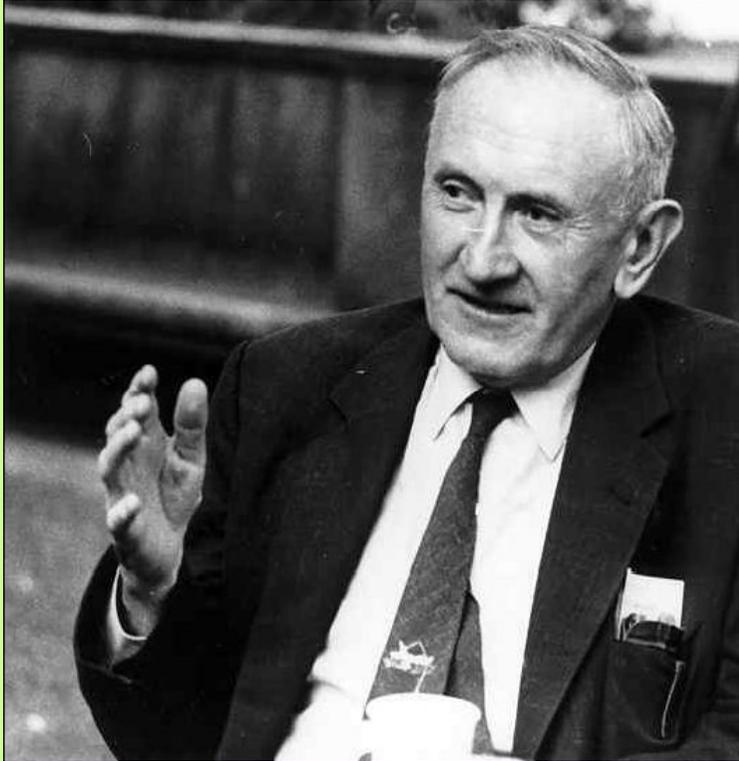
Prima tappa: **Le osservazioni astronomiche della materia oscura**

Seconda tappa: **Come si e' generata la materia oscura?**

Terza tappa: **Come misurare le particelle oscure ?**

Prima tappa

**Le osservazioni astronomiche
della materia oscura**



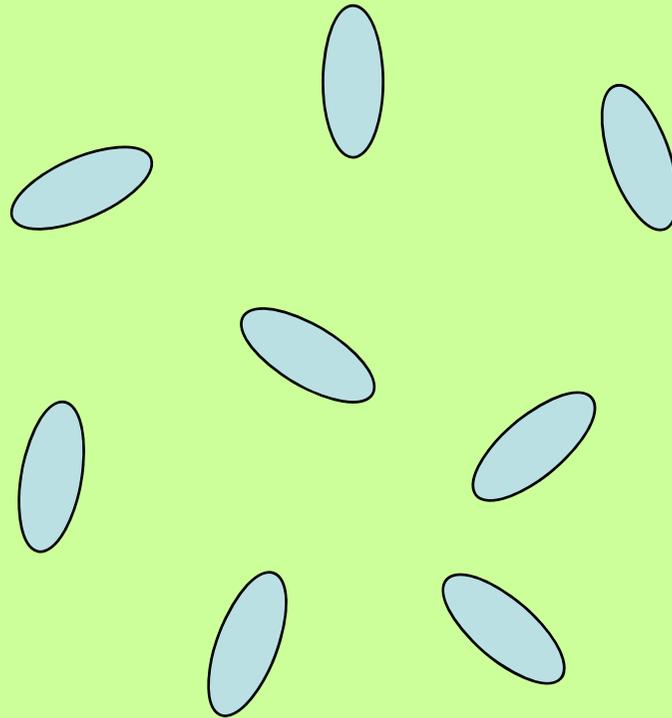
Fritz Zwicky



Ammasso galattico *COMA*

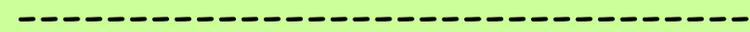


Ammasso di galassie



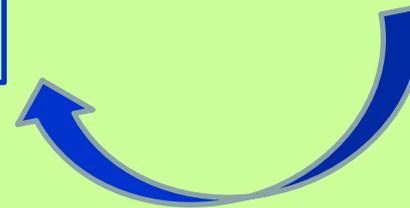
La massa visibile è **insufficiente** a spiegare le velocità osservate

distribuzione di velocità delle galassie  massa totale dell'ammasso - massa visibile

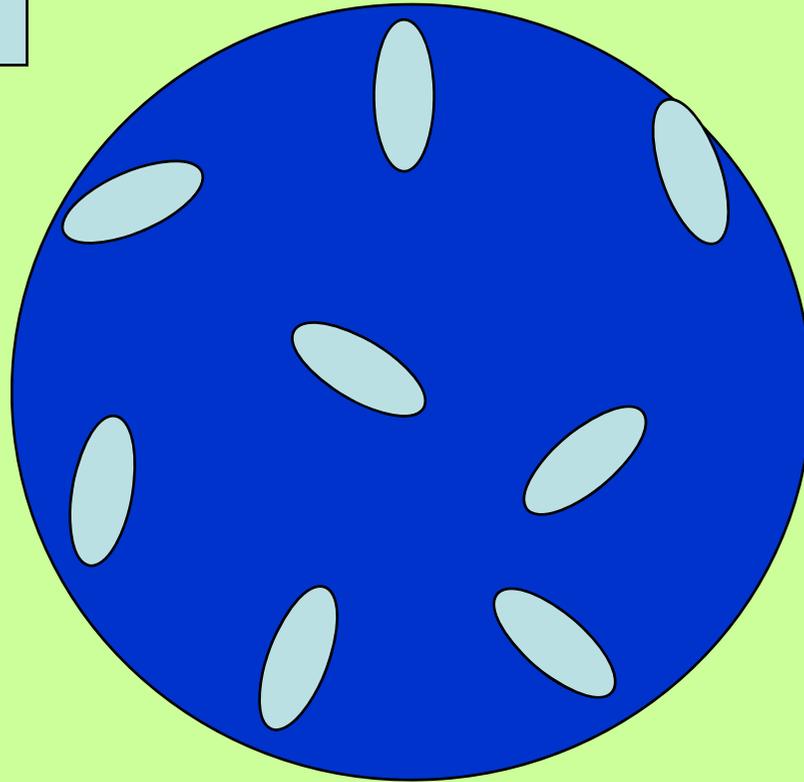


massa associata alla materia oscura

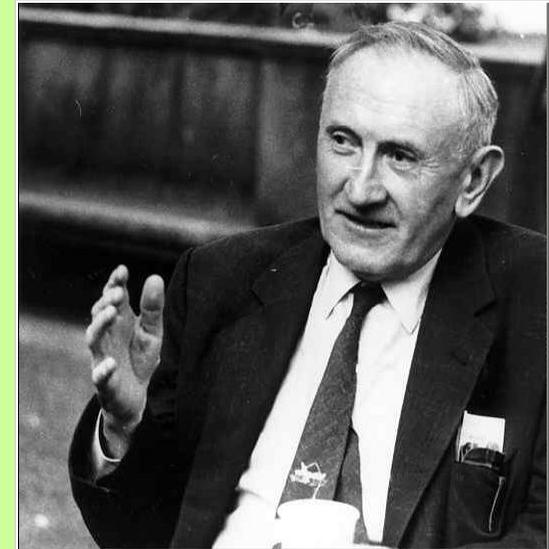
massa mancante



Ammasso di
galassie



La massa visibile
è **insufficiente** a
spiegare le velocità
osservate



Fritz Zwicky, 1933

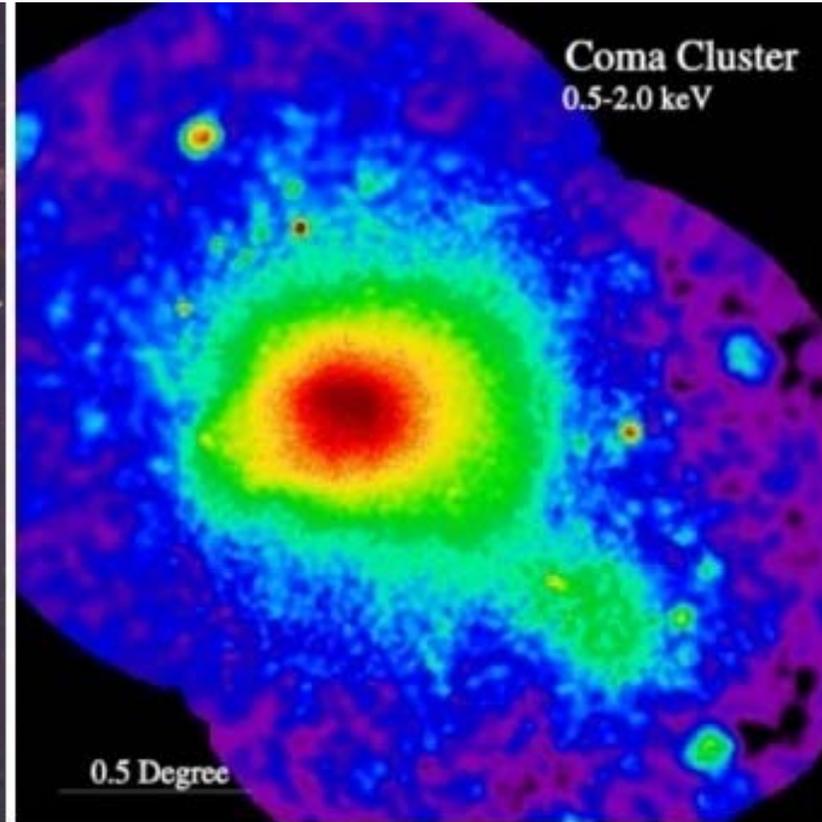
**deve esistere della massa
dovuta a materia oscura**

Ammasso Coma

immagine nell'ottico



immagine a raggi-X
satellite ROSAT

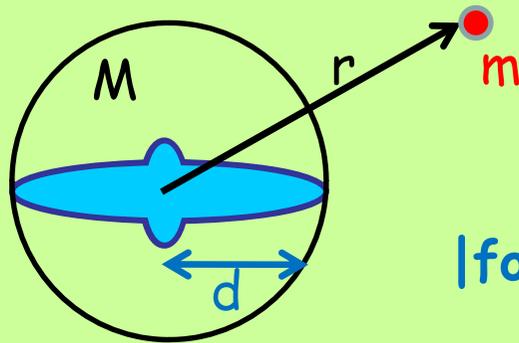


senza la presenza della materia, il gas caldo evaporerebbe

Galassia a spirale M81 (simile alla nostra galassia)



Per una stella in moto circolare
ad una distanza r dal centro della
galassia si ha:



$$\frac{G m M}{r^2} = \frac{m v^2}{r}$$

|forza gravitazionale|

|forza centrifuga|

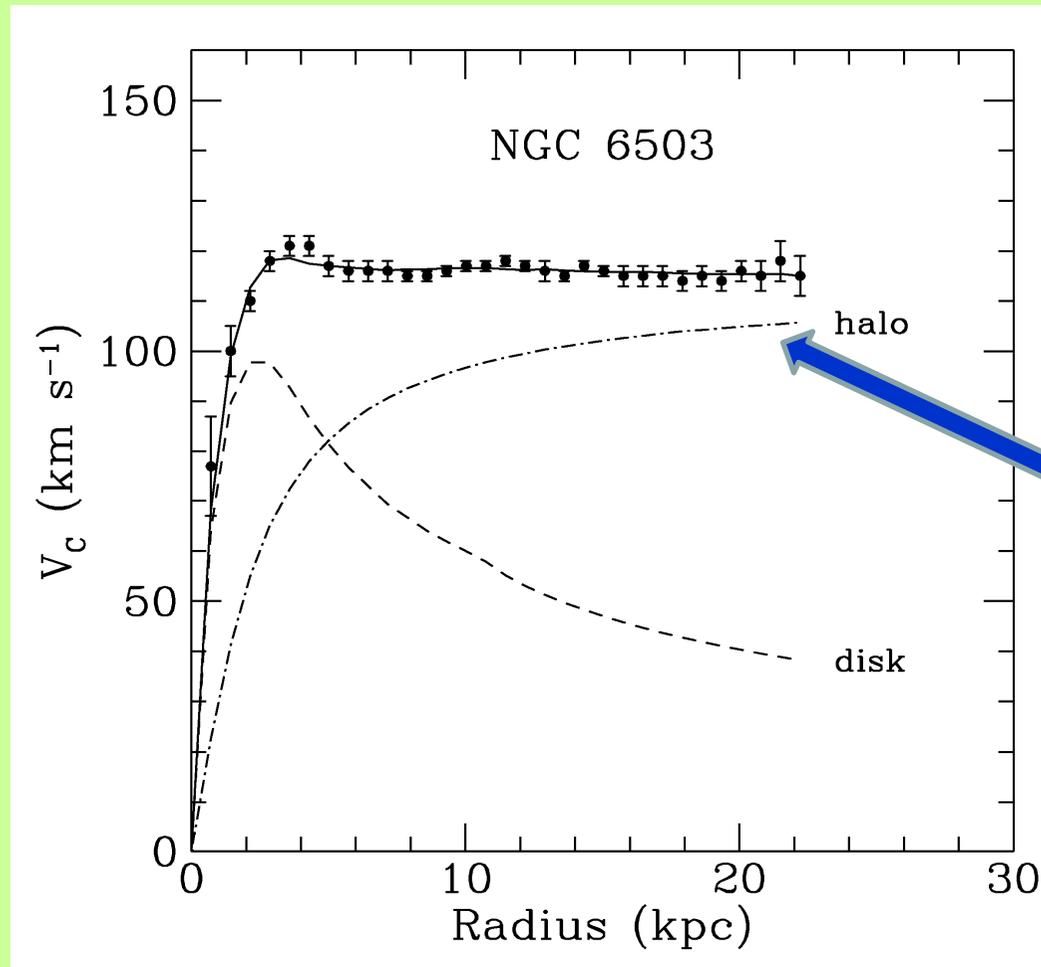
e quindi

$$v = \sqrt{G \frac{M}{r}}$$

Per $r > d$, la velocità v dovrebbe decrescere come $1/\sqrt{r}$

E invece ...

Curve rotazionali delle galassie

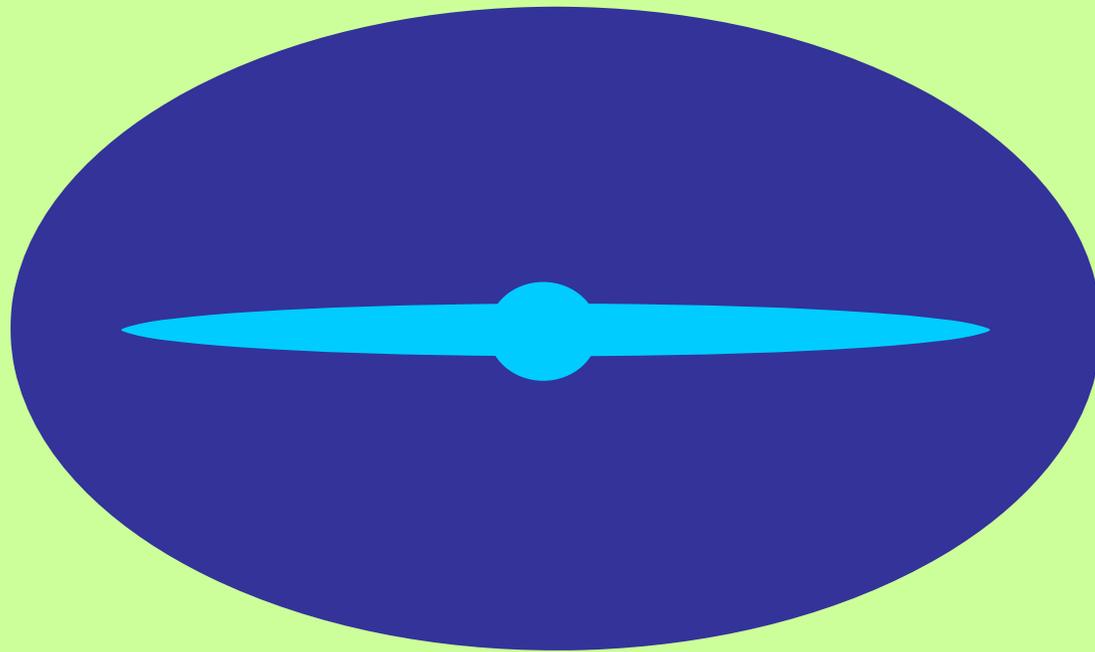


Vera Rubin

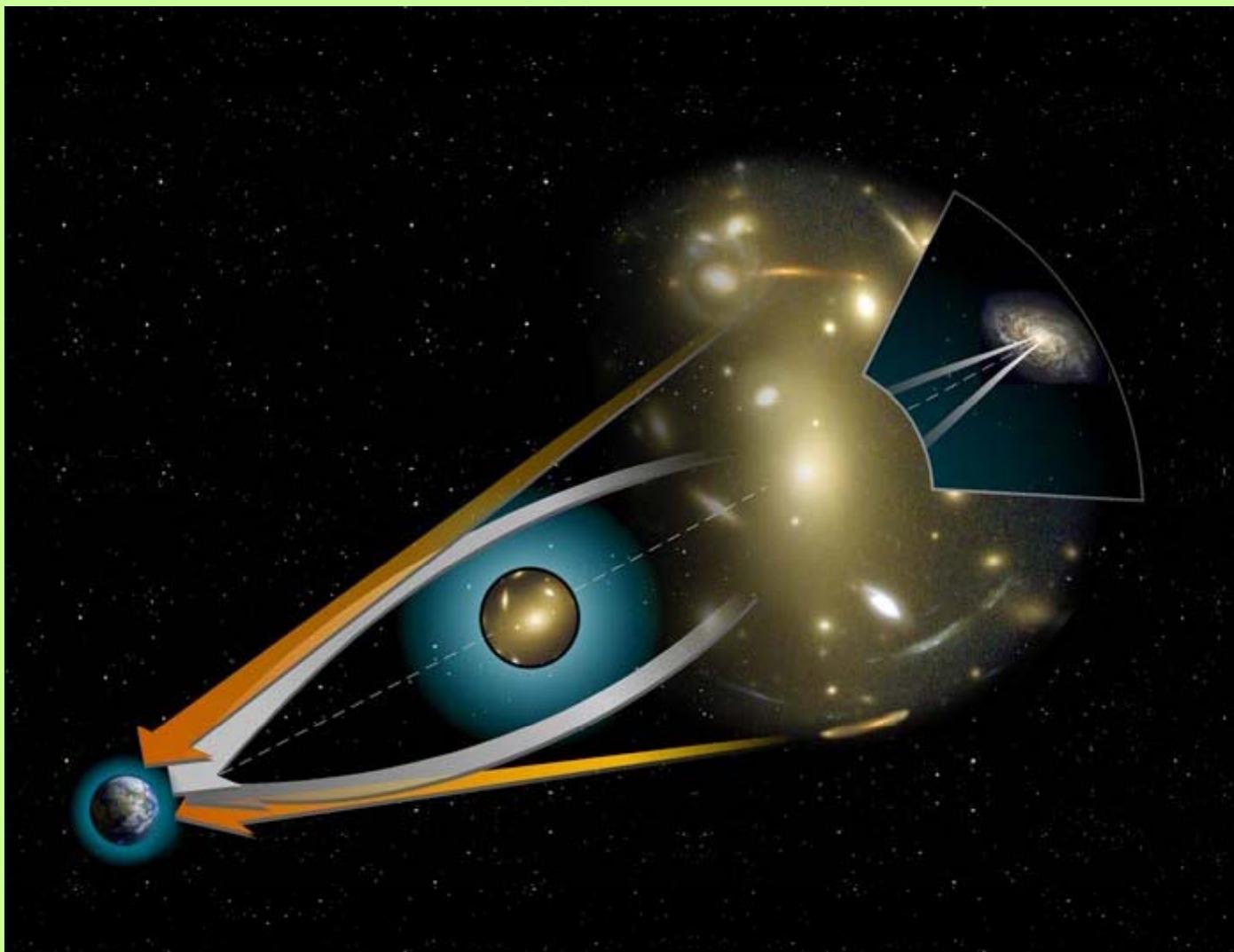
alone di
materia oscura

Curva rotazionale della Galassia NGC 6503

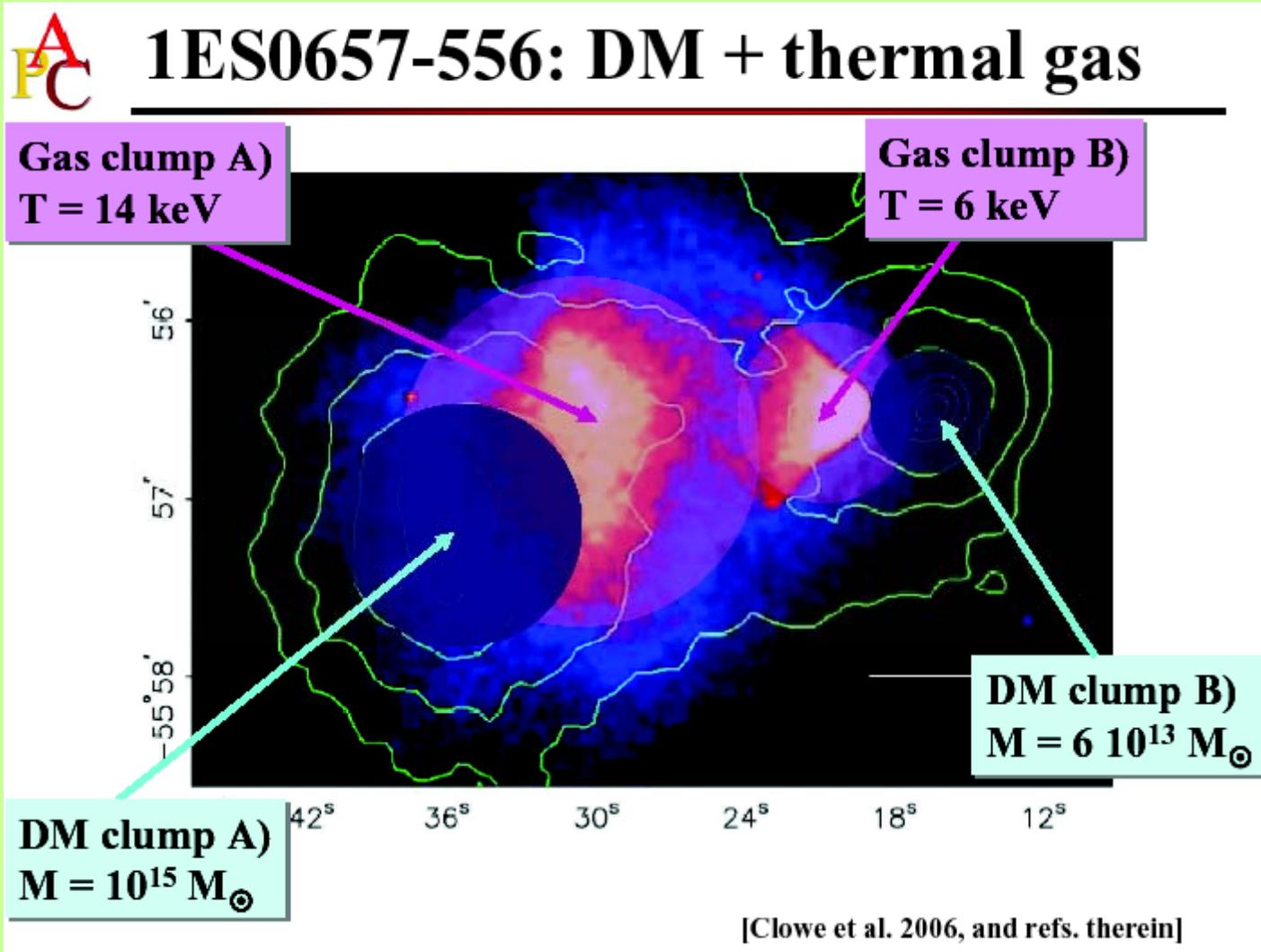
Alone di materia oscura



Lente gravitazionale



Urto di due ammassi galattici avvenuto circa 100 milioni di anni fa.
Bullet cluster



distanza tra i due centri di circa 720.000 parsec
velocita' relativa 4.700 km al secondo

☆ per capire le proprietà osservative della

materia visibile

*occorre ipotizzare che la maggior parte della materia
nell'Universo sia oscura*

✦ *i suoi effetti sono prevalentemente gravitazionali*

✦ *puo' emettere solo radiazioni debolissime*

Seconda tappa

Come si e' generata la materia
oscura ?

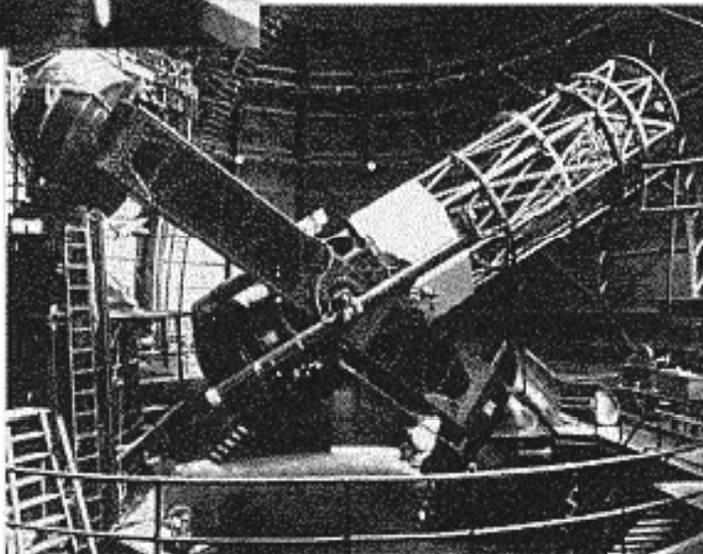
(un po' di storia sull'espansione
dell'Universo)

Espansione dell'Universo



Edwin Hubble

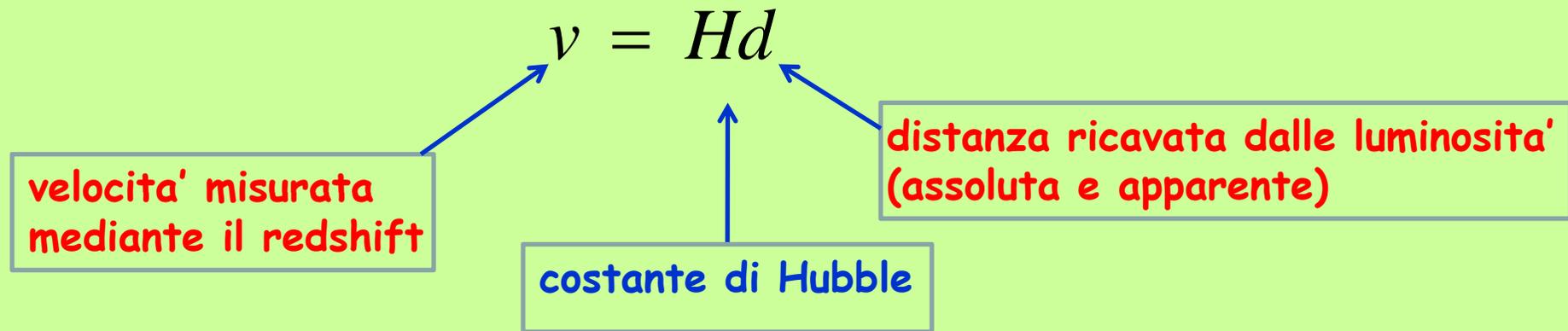
La velocità relativa tra due galassie è proporzionale alla distanza che le separa



Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

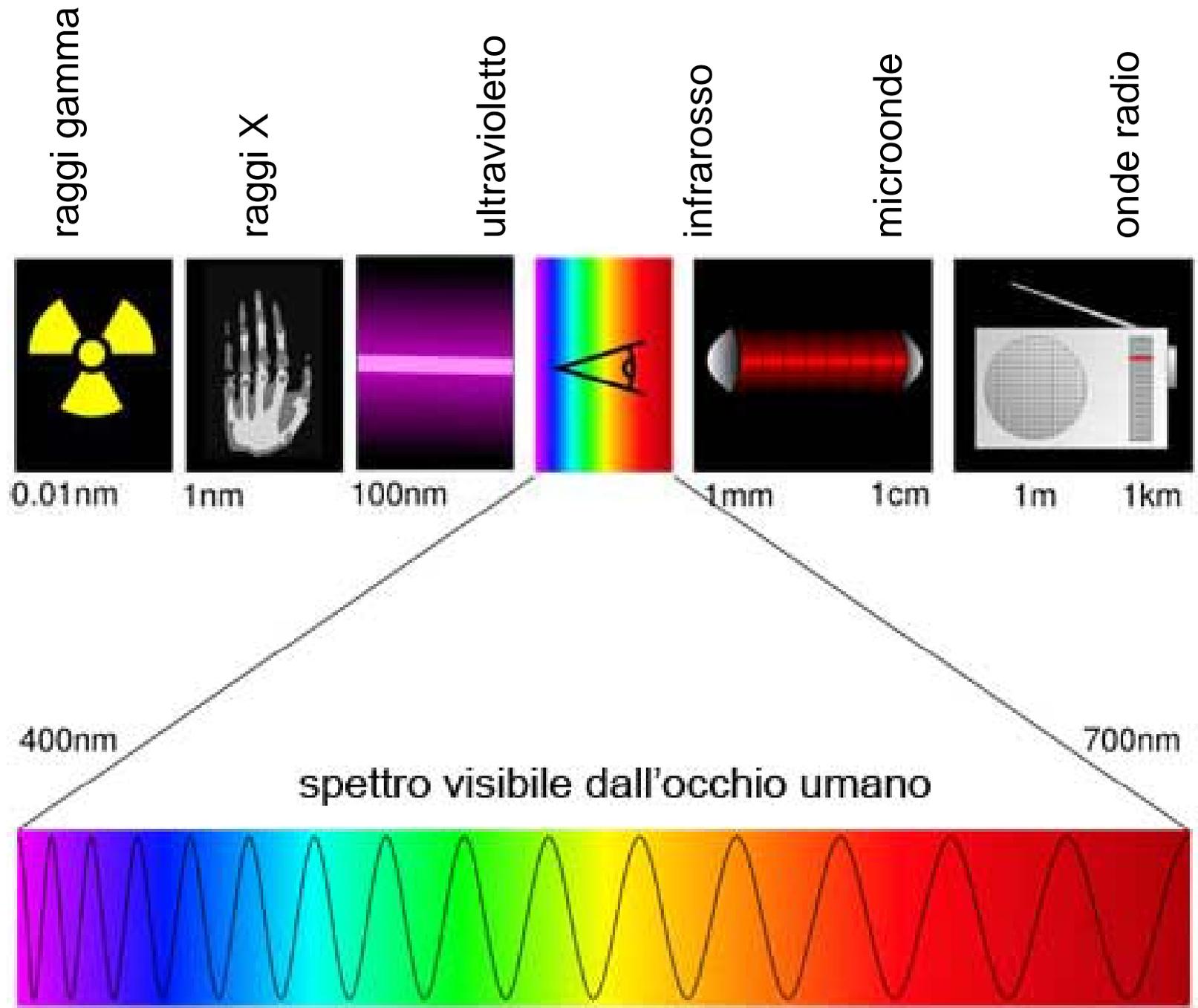
Evidenza osservativa: l'Universo si espande "recessione delle galassie"

per velocità piccole rispetto alla velocità della luce
l'espansione segue la legge di Hubble (1929)



Esempi:

- ★ una galassia che si trova a un milione di parsec da noi recede rispetto a noi con la velocità di circa 70 km al secondo
- ★ l'ammasso galattico Coma che dista circa 90 milioni di parsec recede con la velocità di 6.000 km al secondo



Effetto Doppler cosmologico



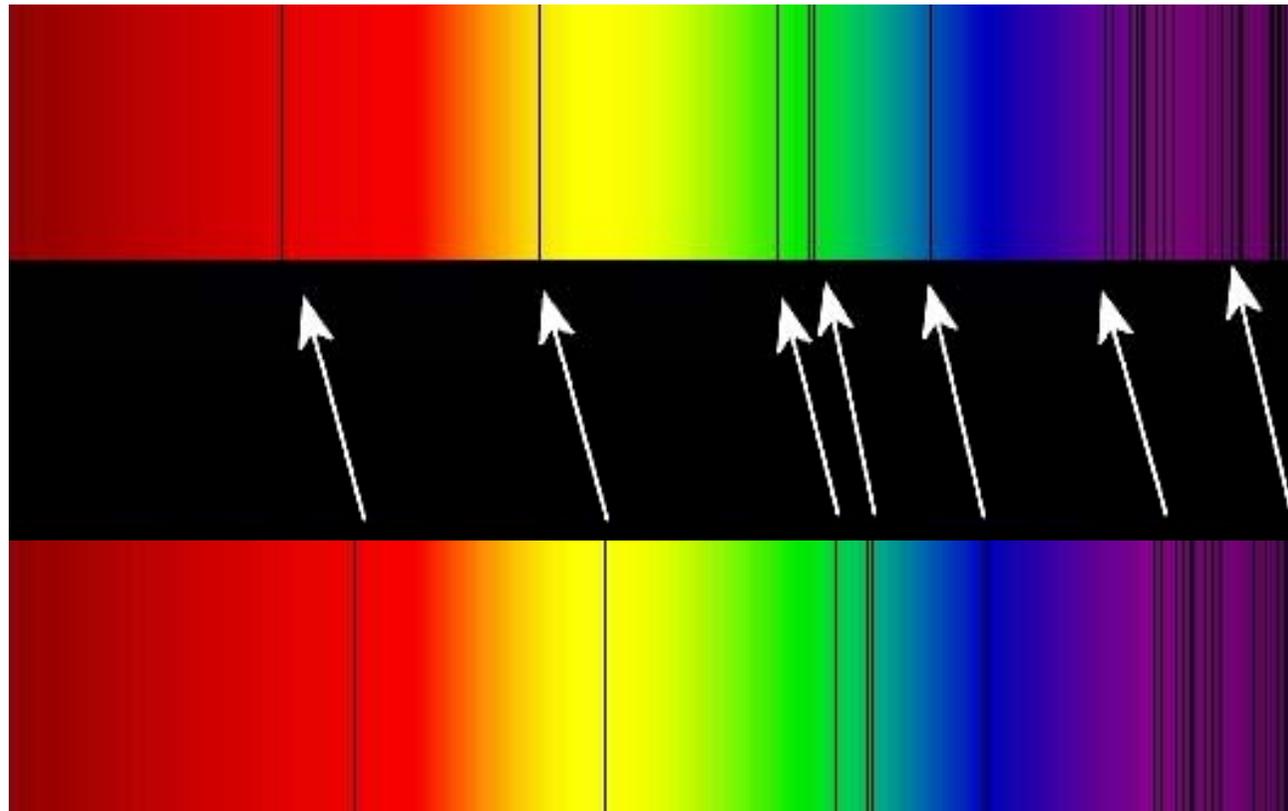
se lo spazio **si espande**, la frequenza della radiazione **diminuisce**:
spostamento delle linee spettroscopiche **verso il rosso (redshift)**



se lo spazio **si contrae**, la frequenza della radiazione **aumenta**:
spostamento delle linee spettroscopiche **verso il blu (blueshift)**

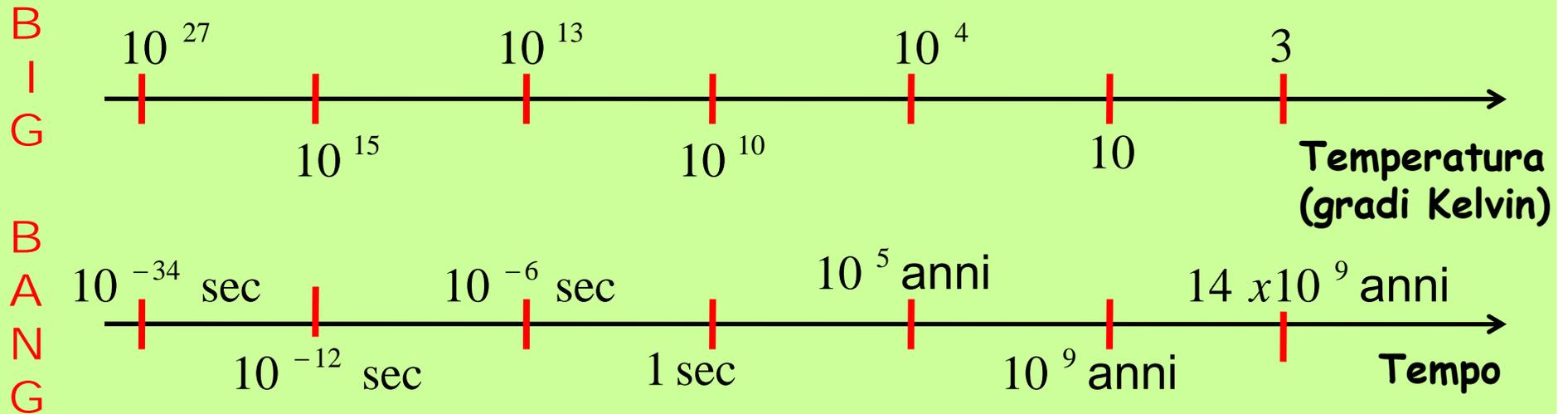
Redshift di linee spettrali dello spettro ottico

emissione da un ammasso galattico distante



emissione dal sole

nel corso dell'espansione, l'Universo si raffredda



1 GeV \cong energia di riposo del protone \longleftrightarrow 10^{13} gradi Kelvin

primi istanti dell'Universo

adesso

plasma iniziale
(contiene tutte le
particelle esistenti
in Natura)

raffreddamento

fondo cosmico di fotoni

fondo cosmico di neutrini

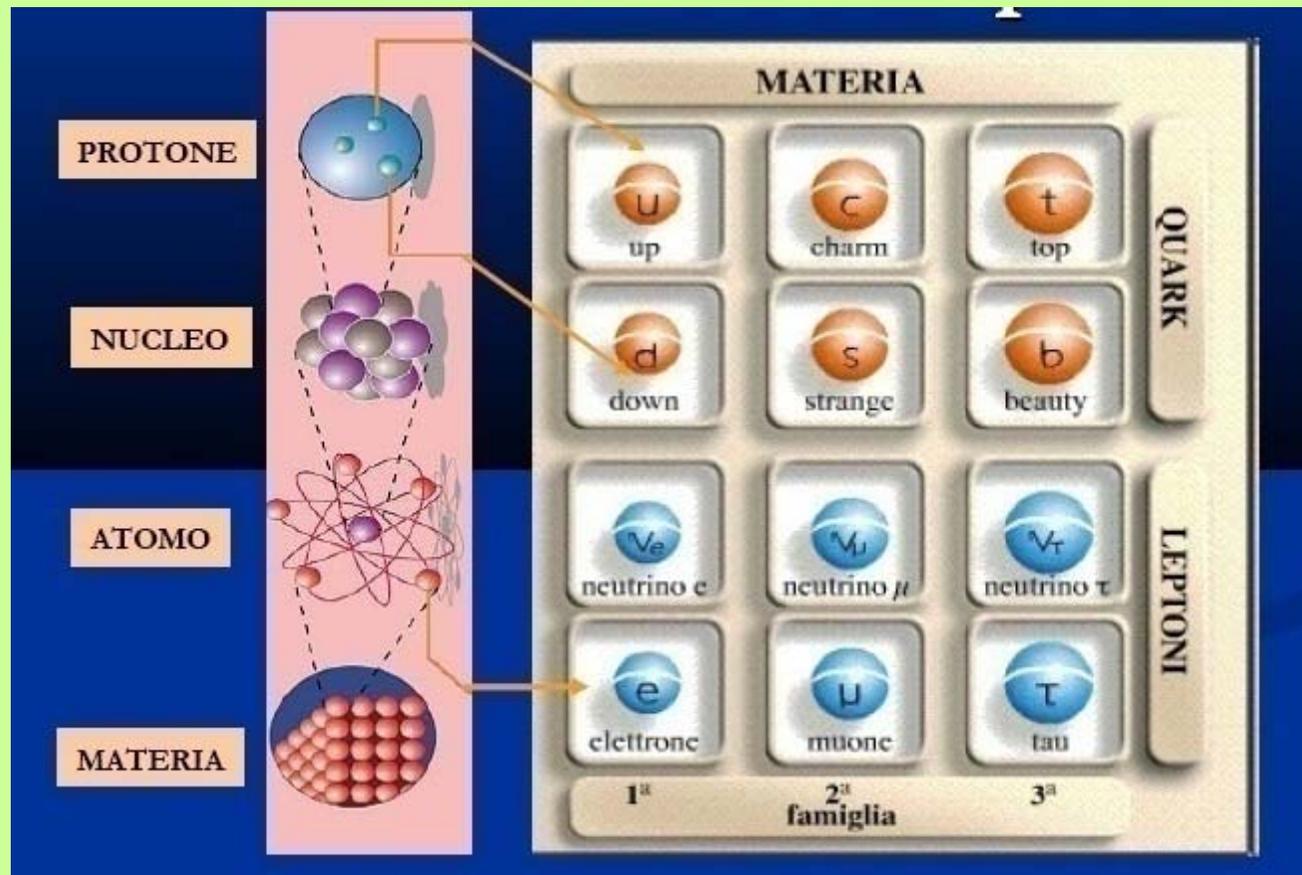
elettroni

neutroni, protoni

} **atomi**

materia oscura

Tutte le particelle che conosciamo sono riconducibili ai seguenti costituenti (**quarks e leptoni**)



e ai corrispondenti anti-quarks e anti-leptoni:

$$q \rightarrow \bar{q}; \quad e^- \rightarrow e^+, \quad \nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e, \quad \dots$$

In un plasma che si raffredda le particelle piu' pesanti scompaiono progressivamente, generando particelle piu' leggere

All'epoca attuale le sole particelle del cosiddetto Modello Standard della fisica delle particelle presenti nell'Universo sono:

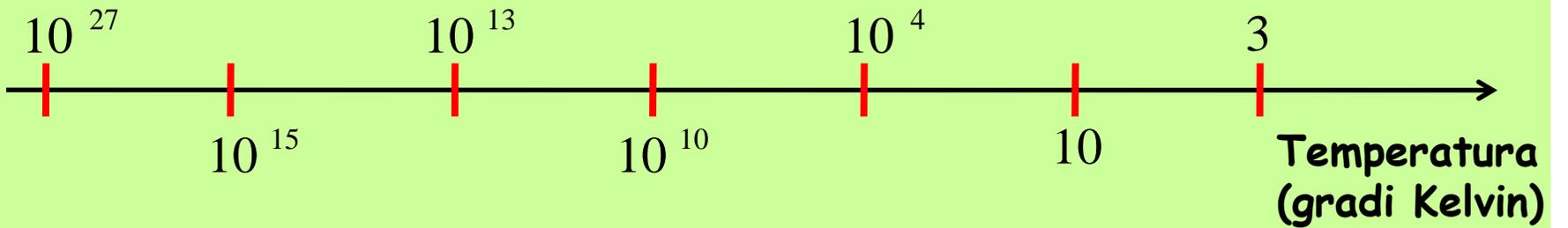
elettroni, protoni e neutroni (strutture nucleari e atomiche)

fotoni del fondo cosmico a microonde a 2.73 gradi Kelvin

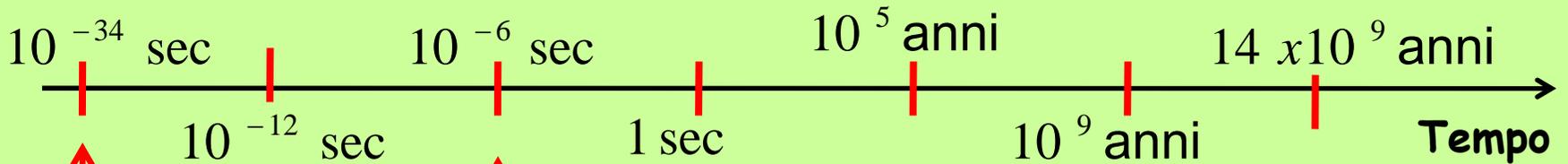
neutrini di 3 tipi in un fondo cosmico a 1.96 gradi Kelvin (fondo non ancora misurato)

Per avere materia oscura costituita da particelle, occorre che queste si siano disaccoppiate dal plasma primordiale; queste particelle devono essere stabili e neutre.

B
I
G



B
A
N
G



fine della grande unificazione

fine della unificazione elettrodebole

transizione quark adroni

nucleosintesi

nucleosintesi primordiale degli elementi leggeri

PERIODIC TABLE
Atomic Properties of the Elements

National Institute of Standards and Technology
Technology Administration, U.S. Department of Commerce

Physicists Laboratory
physics.nist.gov

Standard Reference Data Group
www.nist.gov

Frequently used fundamental physical constants
For the most accurate values of these and other constants, visit physics.nist.gov/constants

1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of ¹³³Cs

speed of light in vacuum c 299 792 458 m s⁻¹ (exact)
Planck constant h 6.626 070 15 × 10⁻³⁴ J s (exact) ($h = h/2\pi$)
elementary charge e 1.602 176 634 × 10⁻¹⁹ C
electron mass m_e 9.109 382 91 × 10⁻³¹ kg
 $m_e c^2$ 0.511 MeV
proton mass m_p 1.672 621 63 × 10⁻²⁷ kg
fine-structure constant α 1/137.036
 R_∞ 10 973 731.25 m⁻¹
 R_H 10 967 758.34 m⁻¹
 $R_{H\alpha}$ 13 6057 eV
Boltzmann constant k 1.380 658 × 10⁻²³ J K⁻¹

■ Solids
■ Liquids
■ Gases
■ Artificially Prepared

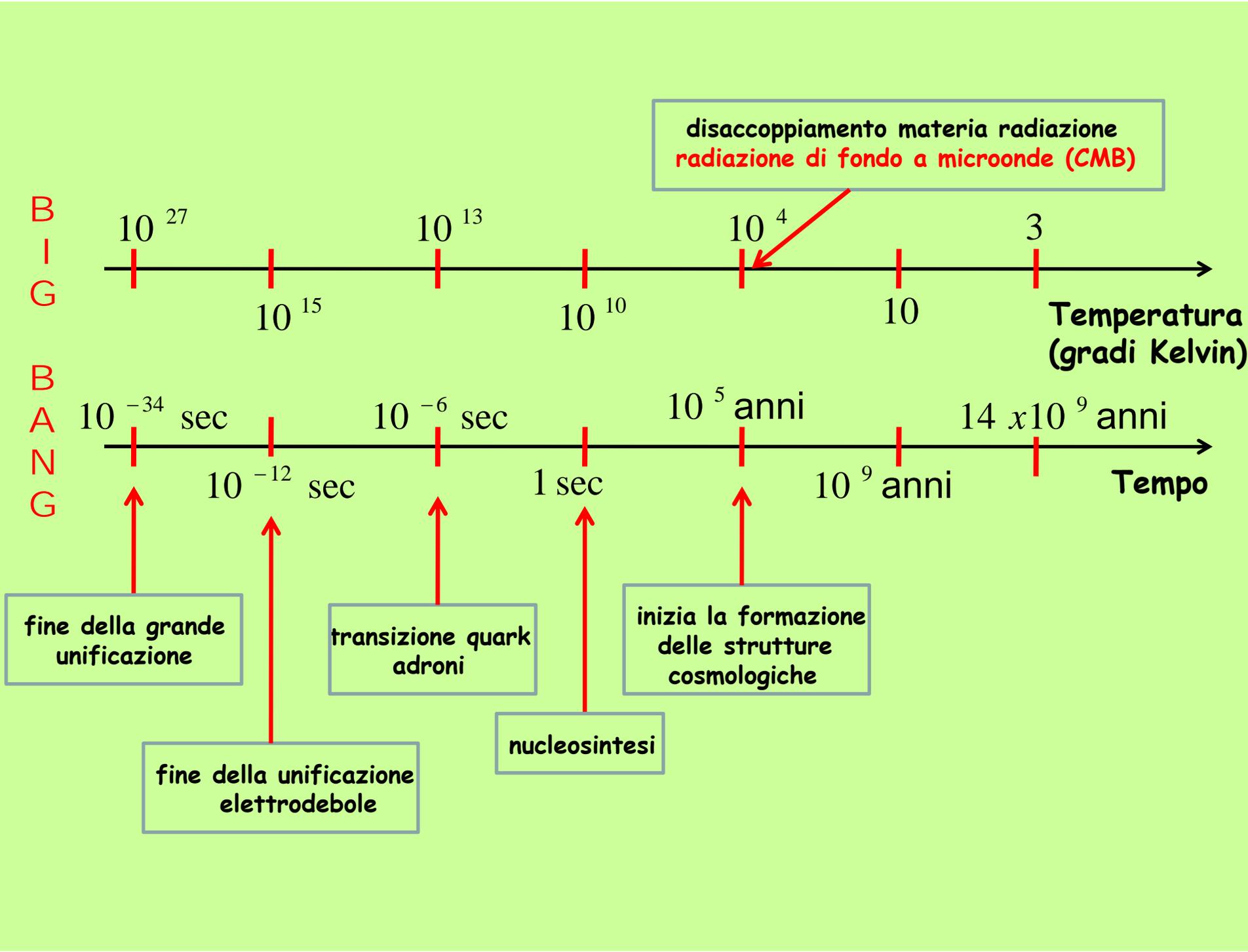
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|--|--|--|--|---|---|---|--|---|--|--|---|---|---|--|---|---|--|---|---|--|--|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Group 1 IA | 2 IIA | 3 IIIB | 4 IVB | 5 VB | 6 VIB | 7 VIIB | 8 VIII | 9 VIII | 10 VIII | 11 IB | 12 IIB | 13 IIIA | 14 IVA | 15 VA | 16 VIA | 17 VIIA | 18 VIIIA | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 H Hydrogen 1.00794 1s | 2 He Helium 4.002602 1s ² | 3 Li Lithium 6.941 2s ¹ | 4 Be Beryllium 9.012 2s ² | 5 B Boron 10.811 2s ² 2p ¹ | 6 C Carbon 12.0107 2s ² 2p ² | 7 N Nitrogen 14.007 2s ² 2p ³ | 8 O Oxygen 15.9994 2s ² 2p ⁴ | 9 F Fluorine 18.9984032 2s ² 2p ⁵ | 10 Ne Neon 20.1797 2s ² 2p ⁶ | 11 Na Sodium 22.989770 3s ¹ | 12 Mg Magnesium 24.3050 3s ² | 13 Al Aluminum 26.981538 3s ² 3p ¹ | 14 Si Silicon 28.0855 3s ² 3p ² | 15 P Phosphorus 30.973761 3s ² 3p ³ | 16 S Sulfur 32.065 3s ² 3p ⁴ | 17 Cl Chlorine 35.453 3s ² 3p ⁵ | 18 Ar Argon 39.948 3s ² 3p ⁶ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 K Potassium 39.0983 4s ¹ | 20 Ca Calcium 40.078 4s ² | 21 Sc Scandium 44.955910 3d ¹ 4s ² | 22 Ti Titanium 47.887 3d ² 4s ² | 23 V Vanadium 50.9415 3d ³ 4s ² | 24 Cr Chromium 51.9961 3d ⁵ 4s ¹ | 25 Mn Manganese 54.938044 3d ⁵ 4s ² | 26 Fe Iron 55.845 3d ⁶ 4s ² | 27 Co Cobalt 58.933200 3d ⁷ 4s ² | 28 Ni Nickel 58.6934 3d ⁸ 4s ² | 29 Cu Copper 63.546 3d ¹⁰ 4s ¹ | 30 Zn Zinc 65.409 3d ¹⁰ 4s ² | 31 Ga Gallium 69.723 4s ² 4p ¹ | 32 Ge Germanium 72.54 4s ² 4p ² | 33 As Arsenic 74.92160 4s ² 4p ³ | 34 Se Selenium 78.96 4s ² 4p ⁴ | 35 Br Bromine 79.904 4s ² 4p ⁵ | 36 Kr Krypton 83.798 4s ² 4p ⁶ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 37 Rb Rubidium 85.4678 5s ¹ | 38 Sr Strontium 87.62 5s ² | 39 Y Yttrium 88.90585 4d ¹ 5s ² | 40 Zr Zirconium 91.224 4d ² 5s ² | 41 Nb Niobium 92.90638 4d ⁴ 5s ¹ | 42 Mo Molybdenum 95.94 4d ⁵ 5s ¹ | 43 Tc Technetium (98) 4d ⁵ 5s ² | 44 Ru Ruthenium 101.07 4d ⁷ 5s ¹ | 45 Rh Rhodium 102.90550 4d ⁸ 5s ¹ | 46 Pd Palladium 106.42 4d ¹⁰ | 47 Ag Silver 107.8682 4d ¹⁰ 5s ¹ | 48 Cd Cadmium 112.411 4d ¹⁰ 5s ² | 49 In Indium 114.818 5s ² 5p ¹ | 50 Sn Tin 118.710 5s ² 5p ² | 51 Sb Antimony 121.760 5s ² 5p ³ | 52 Te Tellurium 127.603 5s ² 5p ⁴ | 53 I Iodine 126.905 5s ² 5p ⁵ | 54 Xe Xenon 131.29 5s ² 5p ⁶ | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 55 Cs Cesium 132.90545 6s ¹ | 56 Ba Barium 137.327 6s ² | 57 La Lanthanum 138.905 5d ¹ 6s ² | 58 Ce Cerium 140.116 5d ¹ 6s ² | 59 Pr Praseodymium 140.90765 5d ¹ 6s ² | 60 Nd Neodymium 144.24 5d ¹ 6s ² | 61 Pm Promethium (145) 5d ¹ 6s ² | 62 Sm Samarium 150.36 5d ¹ 6s ² | 63 Eu Europium 151.964 5d ¹ 6s ² | 64 Gd Gadolinium 157.25 5d ¹ 6s ² | 65 Tb Terbium 158.92534 5d ¹ 6s ² | 66 Dy Dysprosium 162.500 5d ¹ 6s ² | 67 Ho Holmium 164.93032 5d ¹ 6s ² | 68 Er Erbium 167.259 5d ¹ 6s ² | 69 Tm Thulium 168.934 5d ¹ 6s ² | 70 Yb Ytterbium 173.054 5d ¹ 6s ² | 71 Lu Lutetium 174.967 5d ¹ 6s ² | 72 Hf Hafnium 178.49 5d ² 6s ² | 73 Ta Tantalum 180.9479 5d ³ 6s ² | 74 W Tungsten 183.84 5d ⁴ 6s ² | 75 Re Rhenium 186.207 5d ⁵ 6s ² | 76 Os Osmium 190.23 5d ⁶ 6s ² | 77 Ir Iridium 192.222 5d ⁷ 6s ² | 78 Pt Platinum 195.078 5d ⁹ 6s ¹ | 79 Au Gold 196.96655 5d ¹⁰ 6s ¹ | 80 Hg Mercury 200.59 5d ¹⁰ 6s ² | 81 Tl Thallium 204.3833 6s ² 6p ¹ | 82 Pb Lead 207.2 6s ² 6p ² | 83 Bi Bismuth 208.98038 6s ² 6p ³ | 84 Po Polonium (209) 6s ² 6p ⁴ | 85 At Astatine (210) 6s ² 6p ⁵ | 86 Rn Radon (222) 6s ² 6p ⁶ | | |
| 87 Fr Francium (223) 7s ¹ | 88 Ra Radium (226) 7s ² | 89 Ac Actinium (227) 6d ¹ 7s ² | 90 Th Thorium 232.0381 6d ² 7s ² | 91 Pa Protactinium 231.03689 5f ² 6d ¹ 7s ² | 92 U Uranium 238.02891 5f ³ 6d ¹ 7s ² | 93 Np Neptunium (237) 5f ⁴ 6d ¹ 7s ² | 94 Pu Plutonium (244) 5f ⁶ 6d ¹ 7s ² | 95 Am Americium (243) 5f ⁷ 7s ² | 96 Cm Curium (247) 5f ⁷ 6d ¹ 7s ² | 97 Bk Berkelium (247) 5f ⁷ 7s ² | 98 Cf Californium (251) 5f ¹⁰ 7s ² | 99 Es Einsteinium (252) 5f ¹¹ 7s ² | 100 Fm Fermium (257) 5f ¹² 7s ² | 101 Md Mendelevium (258) 5f ¹³ 7s ² | 102 No Nobelium (259) 5f ¹⁴ 7s ² | 103 Lr Lawrencium (260) 5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ² | 104 Rf Rutherfordium (261) 5f ¹⁴ 6d ² 7s ² | 105 Db Dubnium (262) 5f ¹⁴ 6d ³ 7s ² | 106 Sg Seaborgium (266) 5f ¹⁴ 6d ⁴ 7s ² | 107 Bh Bohrium (264) 5f ¹⁴ 6d ⁵ 7s ² | 108 Hs Hassium (277) 5f ¹⁴ 6d ⁶ 7s ² | 109 Mt Meitnerium (268) 5f ¹⁴ 6d ⁷ 7s ² | 110 Uun Ununium (281) 5f ¹⁴ 6d ⁸ 7s ² | 111 Uuu Ununium (272) 5f ¹⁴ 6d ⁹ 7s ² | 112 Uub Ununium (285) 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² | 113 Uut Ununium (288) 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ¹ | 114 Uuq Ununium (289) 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ² | 115 Uuq Ununium (289) 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ³ | 116 Uuq Ununium (289) 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁴ | 117 Uuq Ununium (289) 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁵ | 118 Uuq Ununium (289) 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁶ | 119 Uuq Ununium (289) 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁶ 8s ¹ | 120 Uuq Ununium (289) 5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 7p ⁶ 8s ² |

Atomic Number: 58
 Symbol: Ce
 Name: Cerium
 Atomic Weight: 140.116
 Ground-state Configuration: [Xe]4f¹5d¹6s²
 Ionization Energy (eV): 5.5387

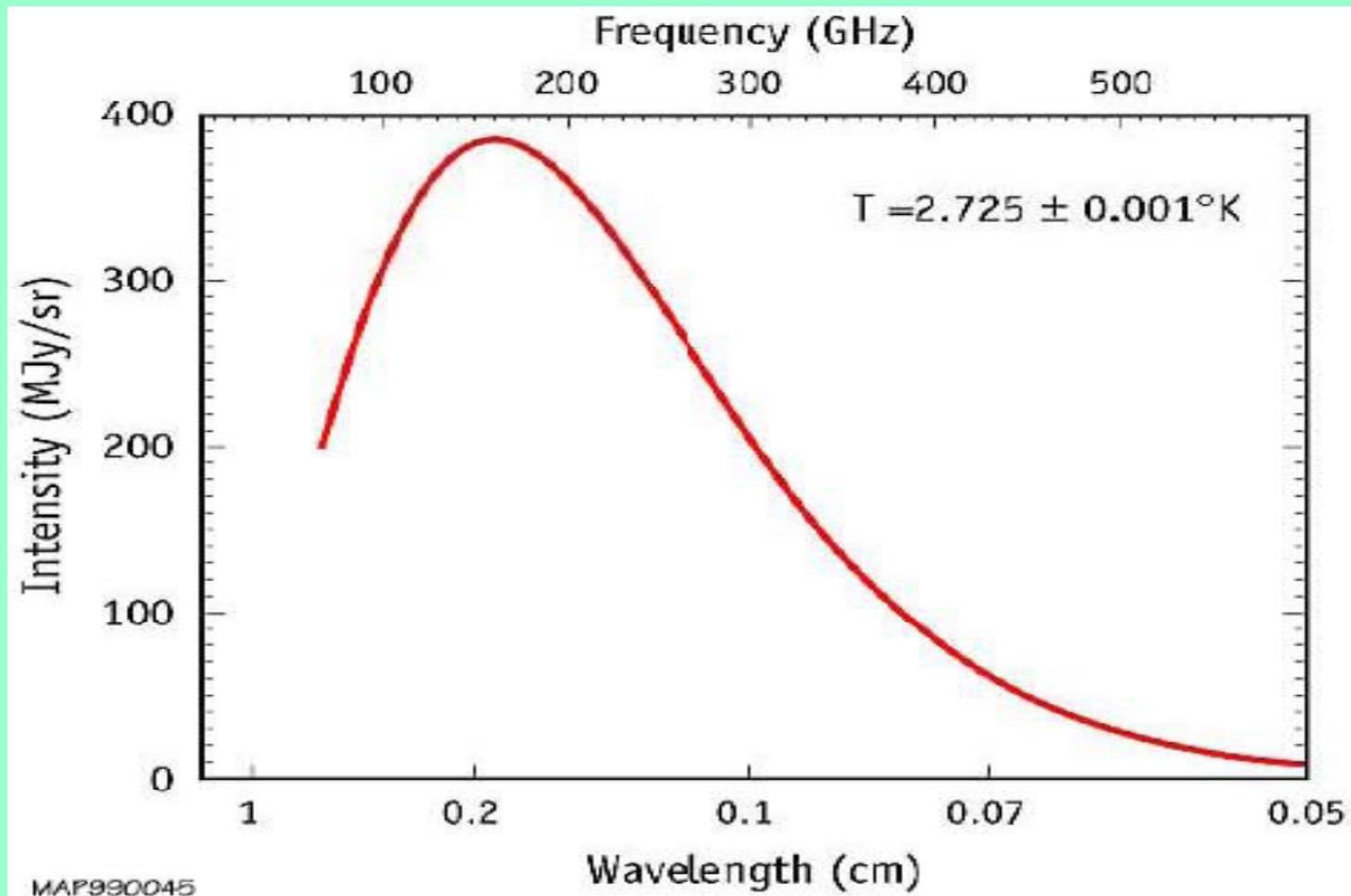
Based upon ¹²C. 0 indicates the mass number of the most stable isotope.
 For a description of the data, visit physics.nist.gov/data



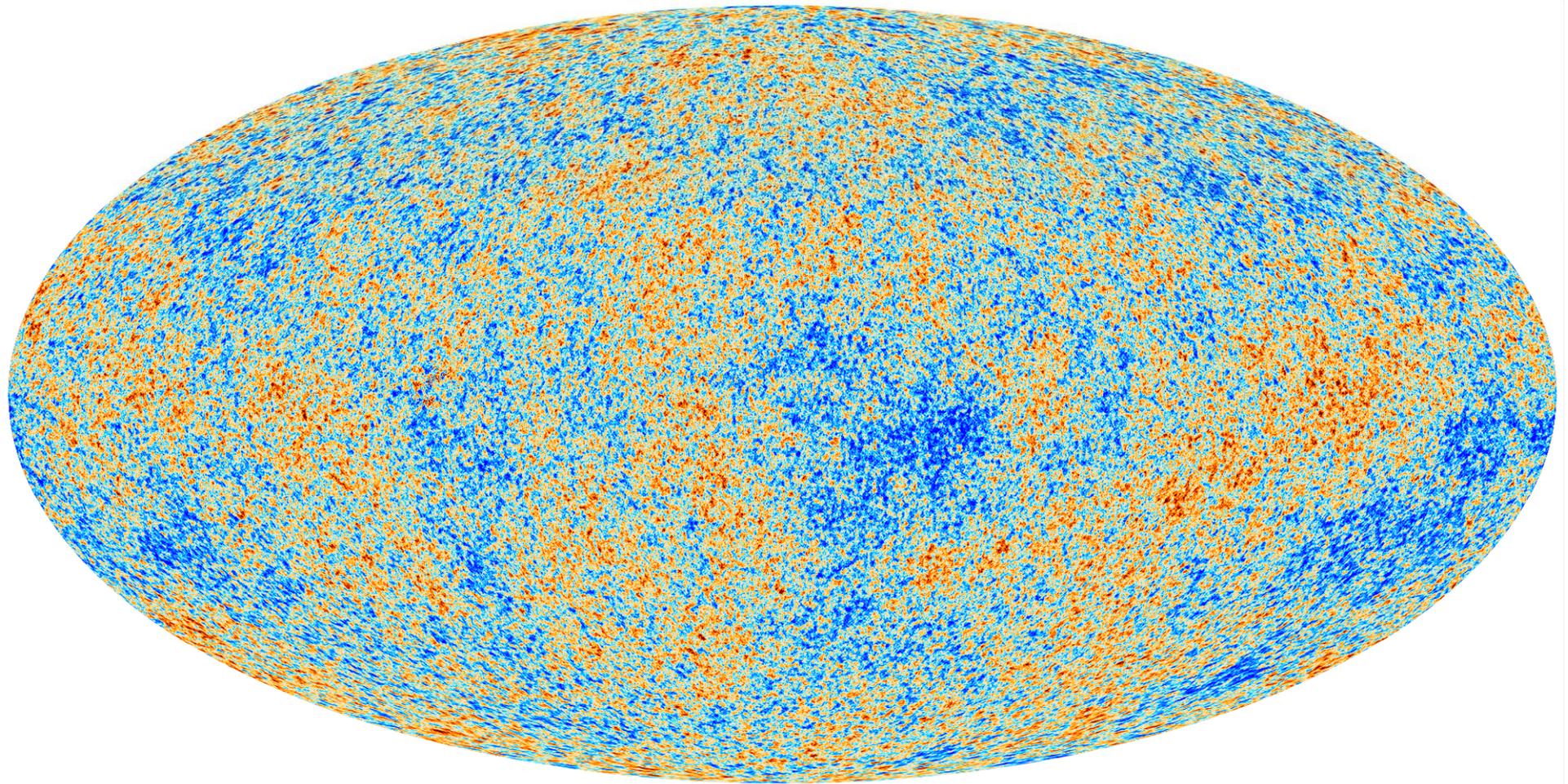
Alpher, Gamow e Herman



La distribuzione in frequenza del fondo cosmico a microonde (CMB) e' quella di un corpo nero alla temperatura di 2.73 gradi Kelvin



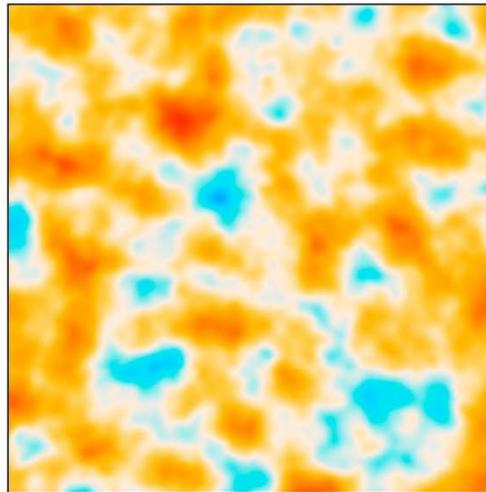
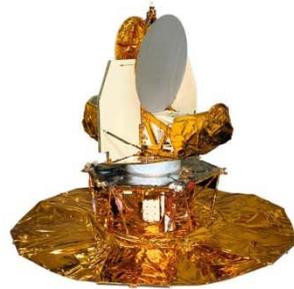
Fondo cosmico a microonde (CMB) a 2.73 gradi Kelvin



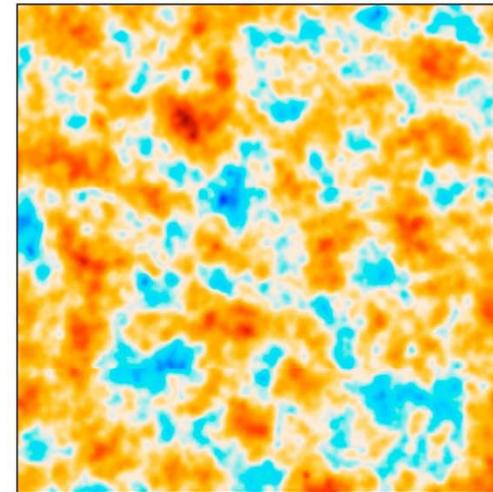
Missioni satellitari successive



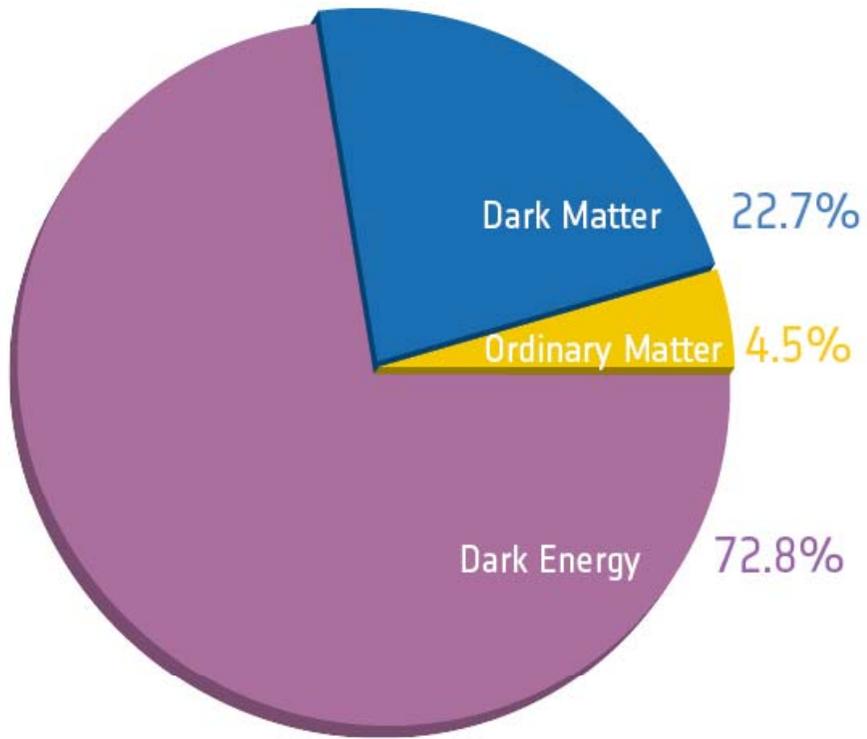
COBE



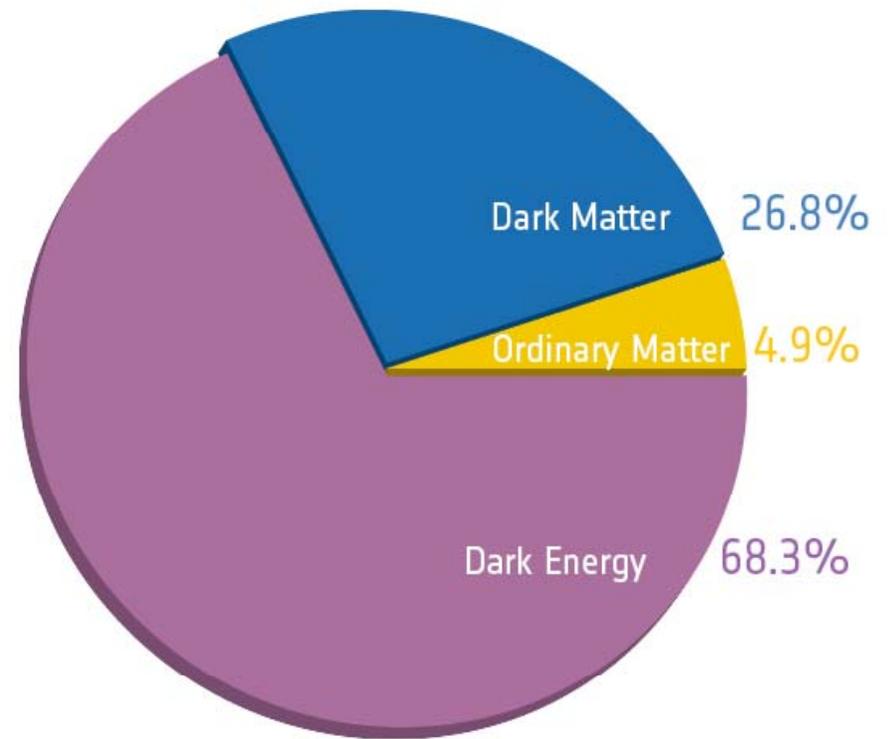
WMAP



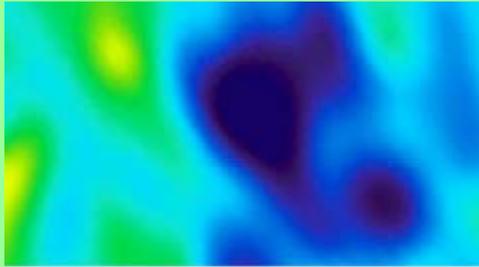
Planck



Before Planck



After Planck



Fluttuazioni primordiali



Crescita delle fluttuazioni per effetto gravitazionale



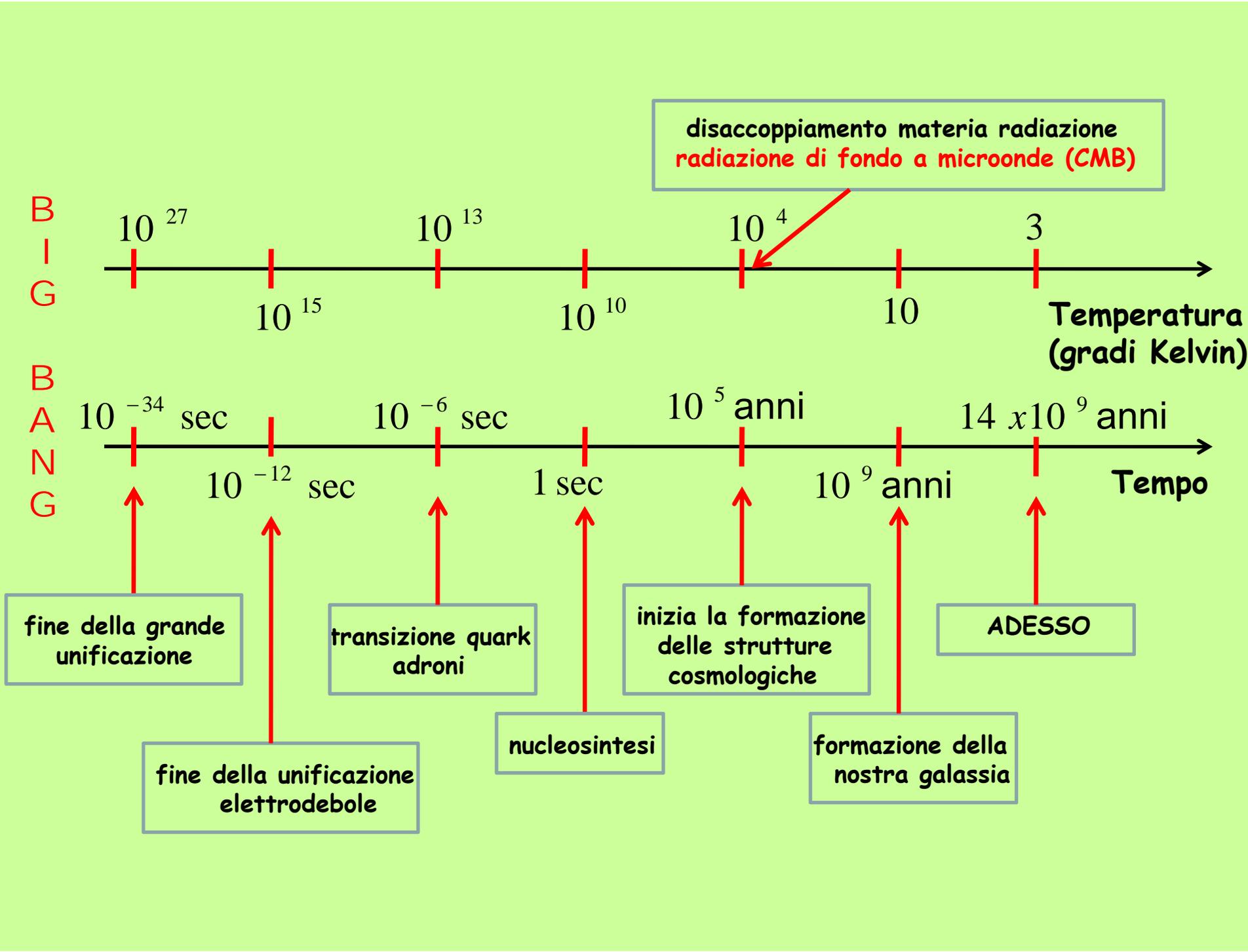
Qui e' fondamentale la
presenza della materia
oscura



Formazione di strutture



(galassie, ammassi di galassie)



★ per capire le proprietà osservative della materia visibile

e anche

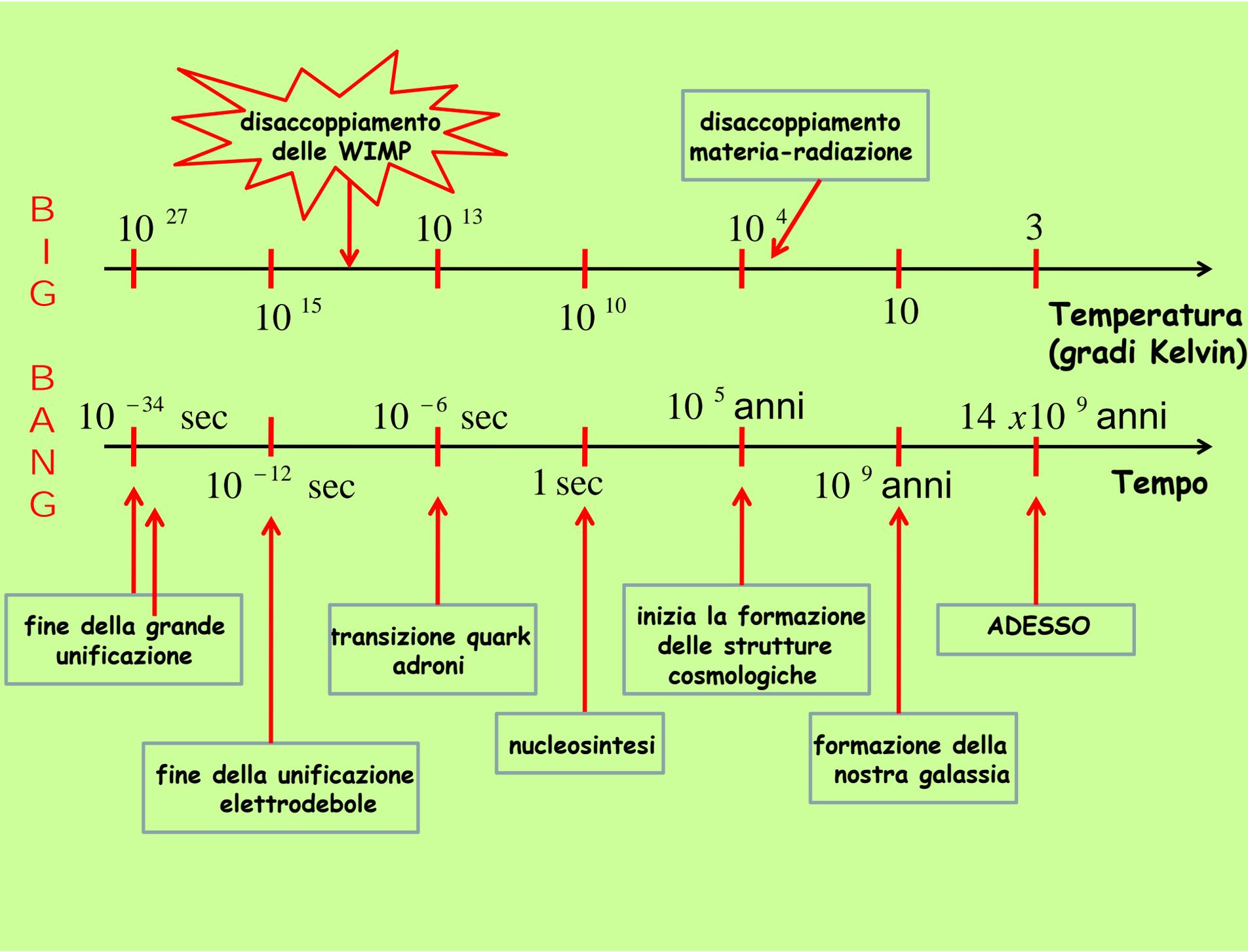
★ per spiegare la formazione delle strutture cosmologiche visibili

*occorre ipotizzare che la maggior parte della materia
nell'Universo sia oscura*

Identikit per una particella costituente la materia oscura

Weakly Interacting Massive Particle

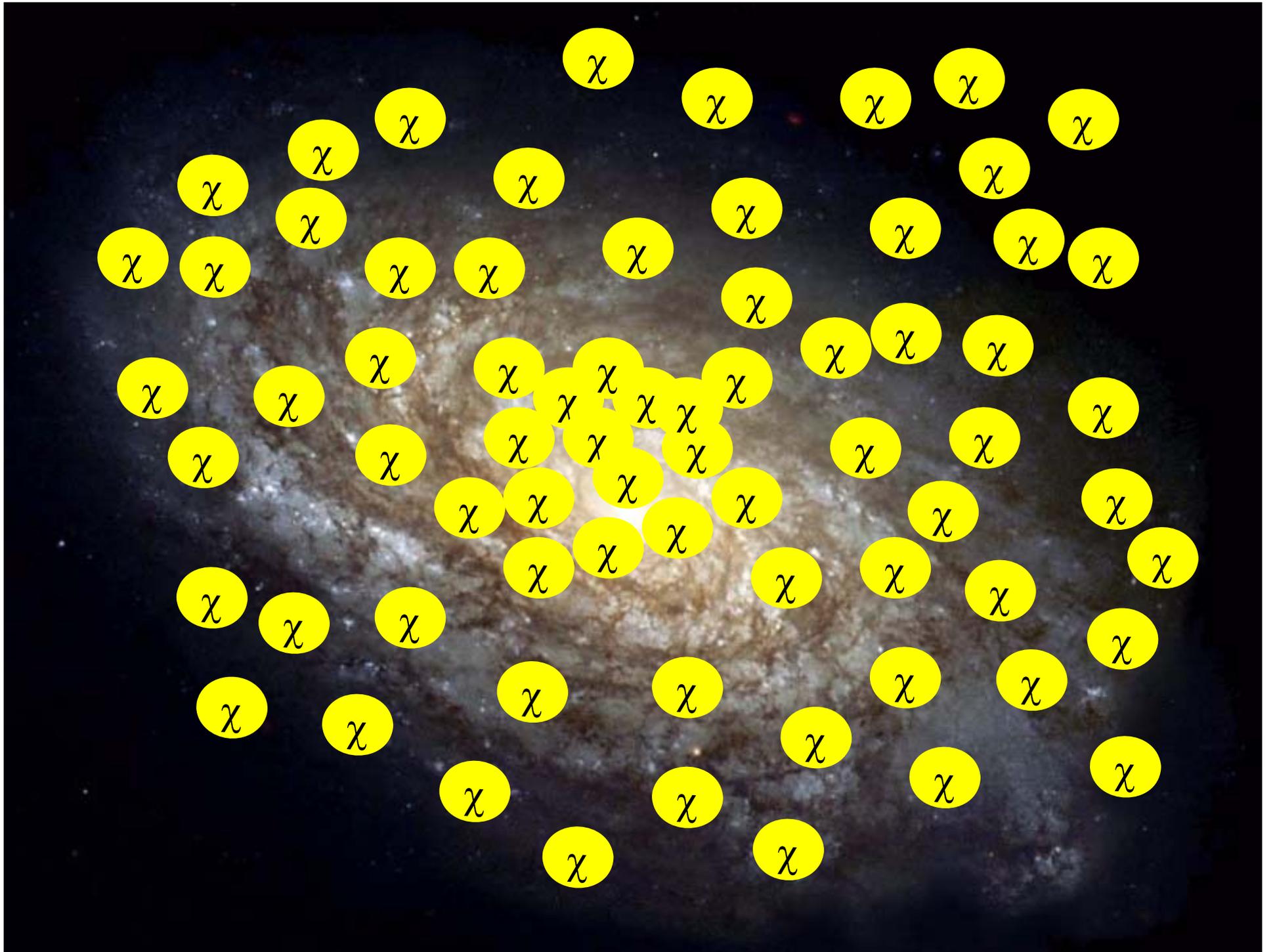
WIMP = particelle pesanti debolmente interagenti



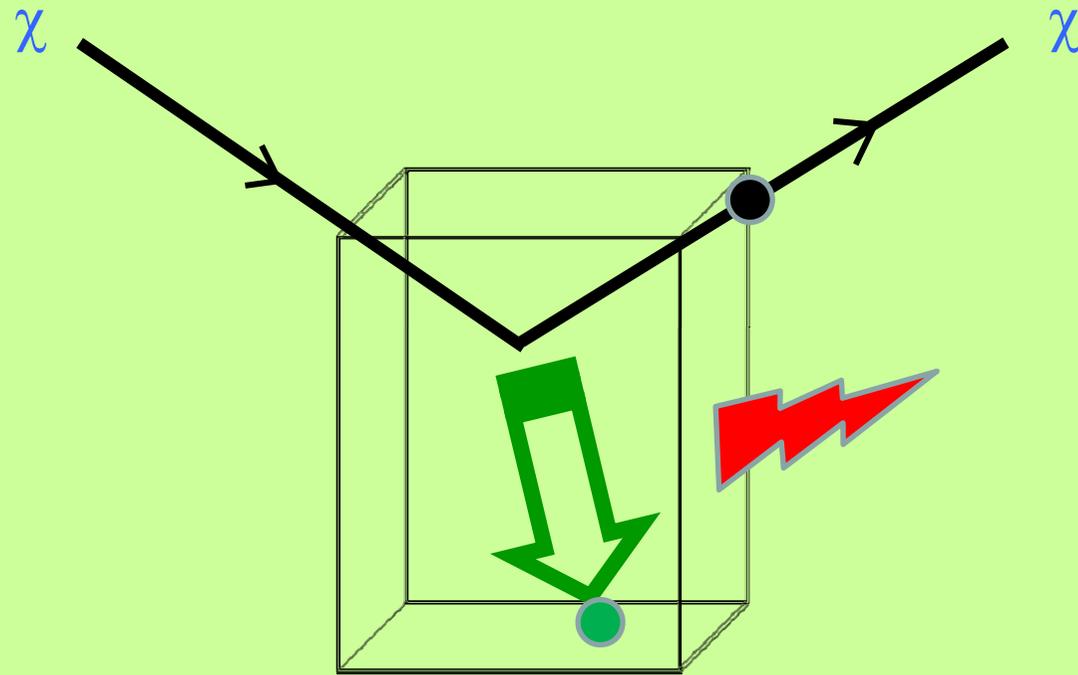
Terza tappa

Come misurare le particelle
oscure ?





Misure dirette di WIMP

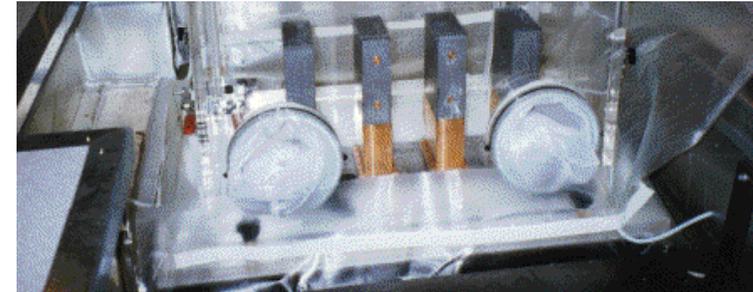


misura di rinculo nucleare

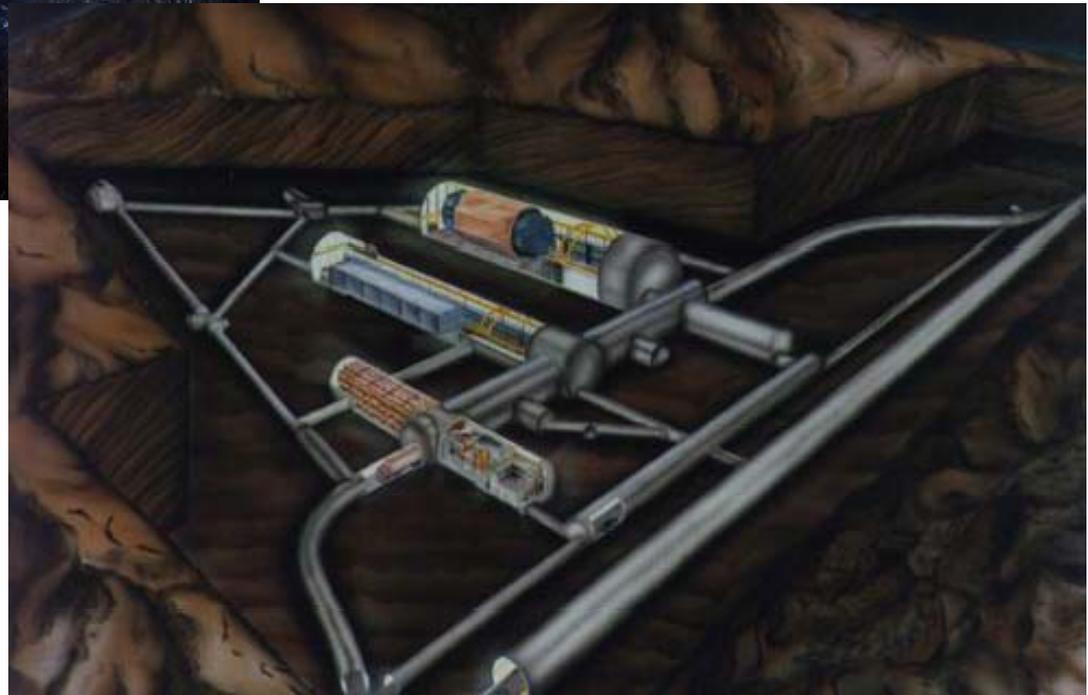
Ricerche in luoghi protetti dalla radiazione cosmica

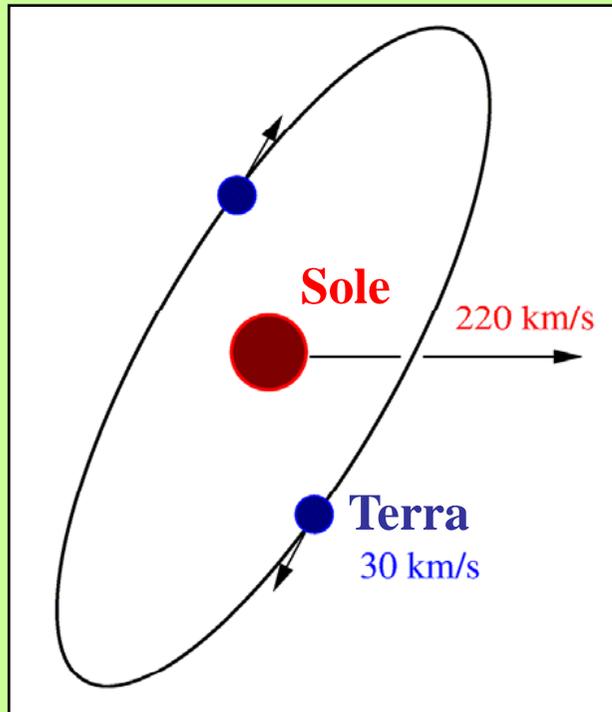


Esperimento DAMA



Laboratori Nazionali del Gran Sasso





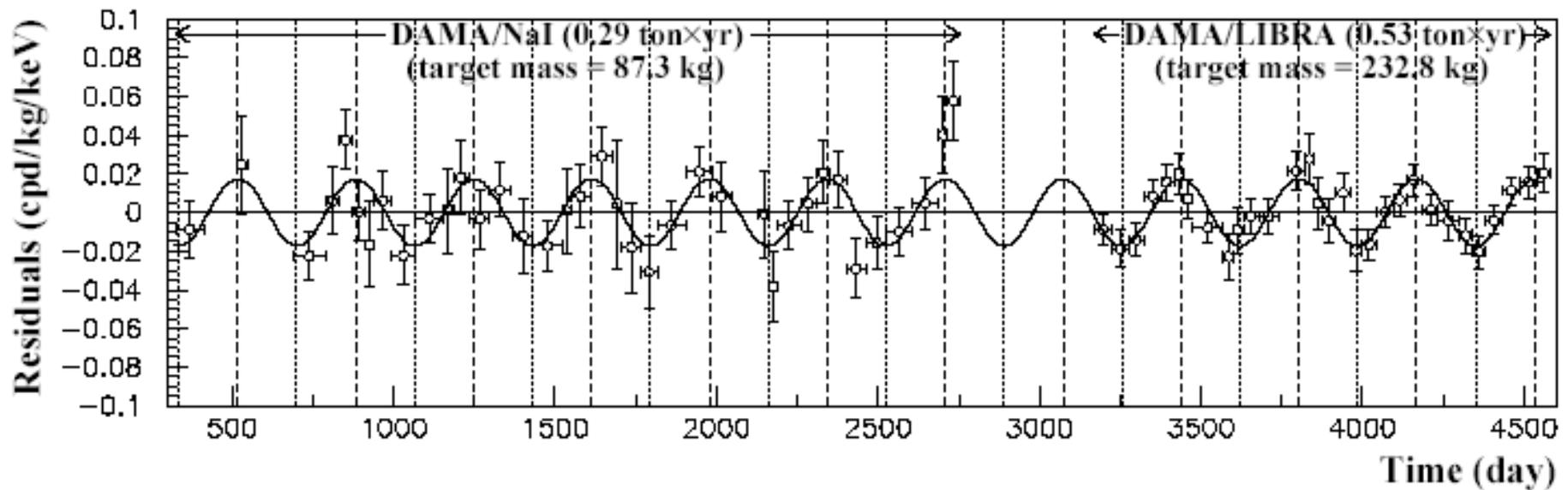
Moto del sistema solare
rispetto alle particelle
dell'alone oscuro

Variazione annuale del segnale



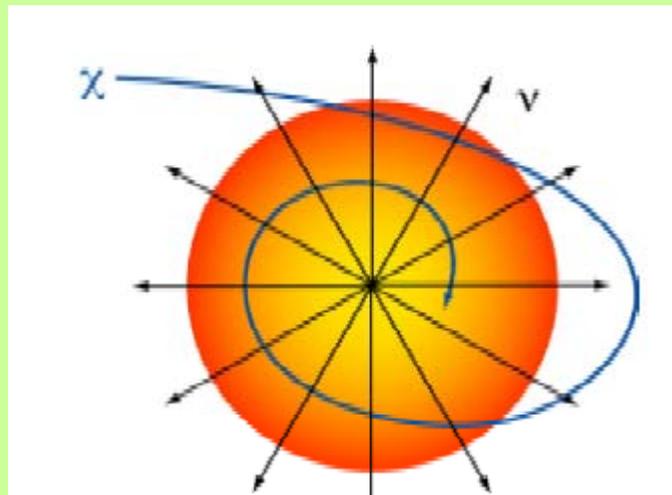
Esperimento DAMA presso il Laboratorio Nazionale del Gran Sasso dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Osservata una variazione annuale del segnale su di un periodo complessivo di 11 anni



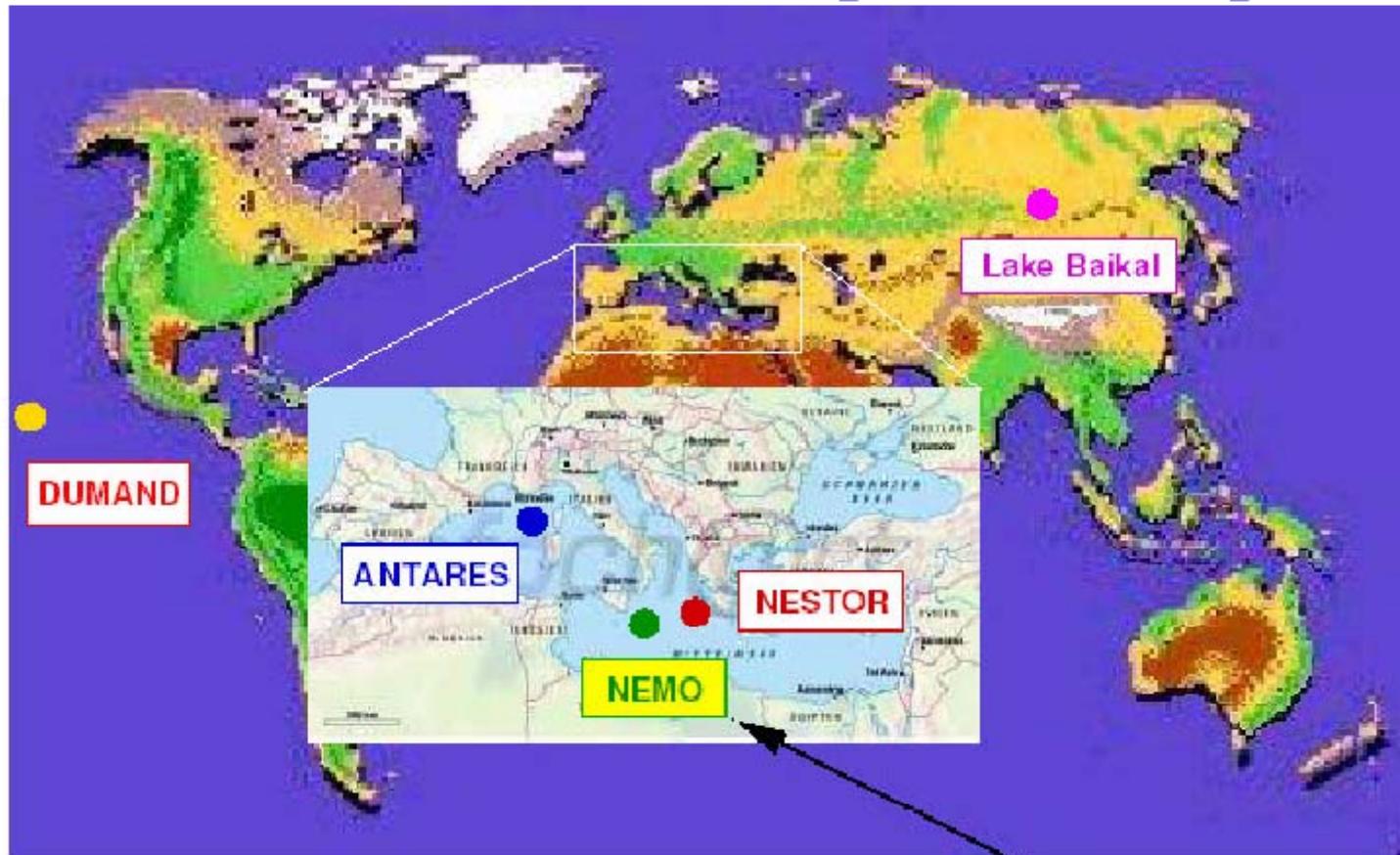
I WIMP possono venire catturati dalla Terra o dal Sole ...

... e quindi accumularsi nel loro centro



vengono prodotti dei neutrini

The Neutrino Telescope world map



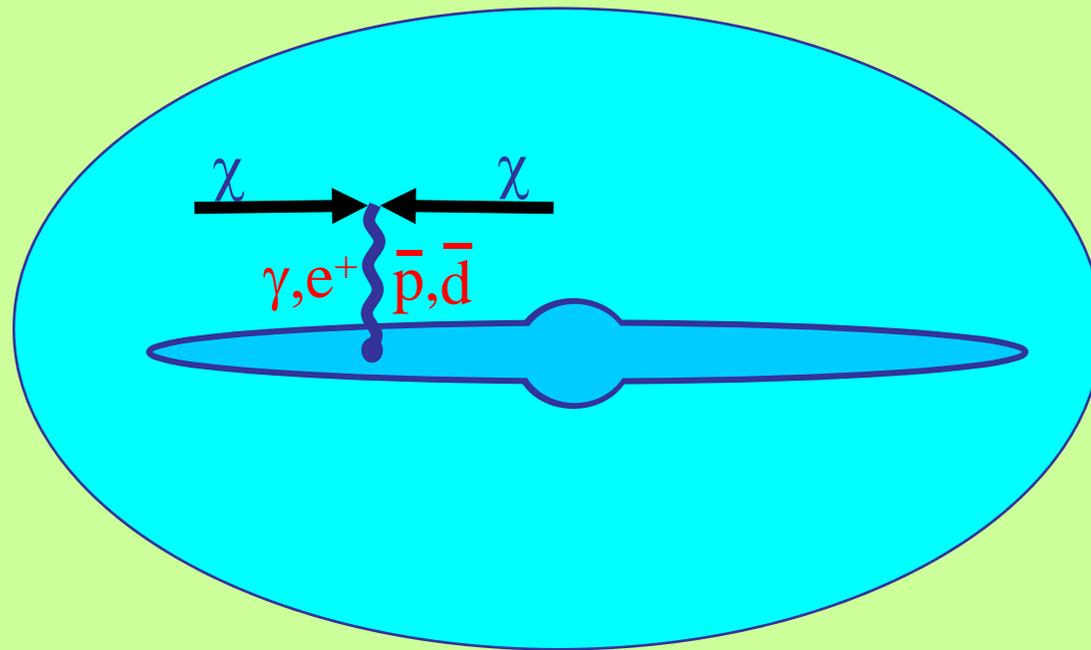
AMANDA

South Pole

IceCube

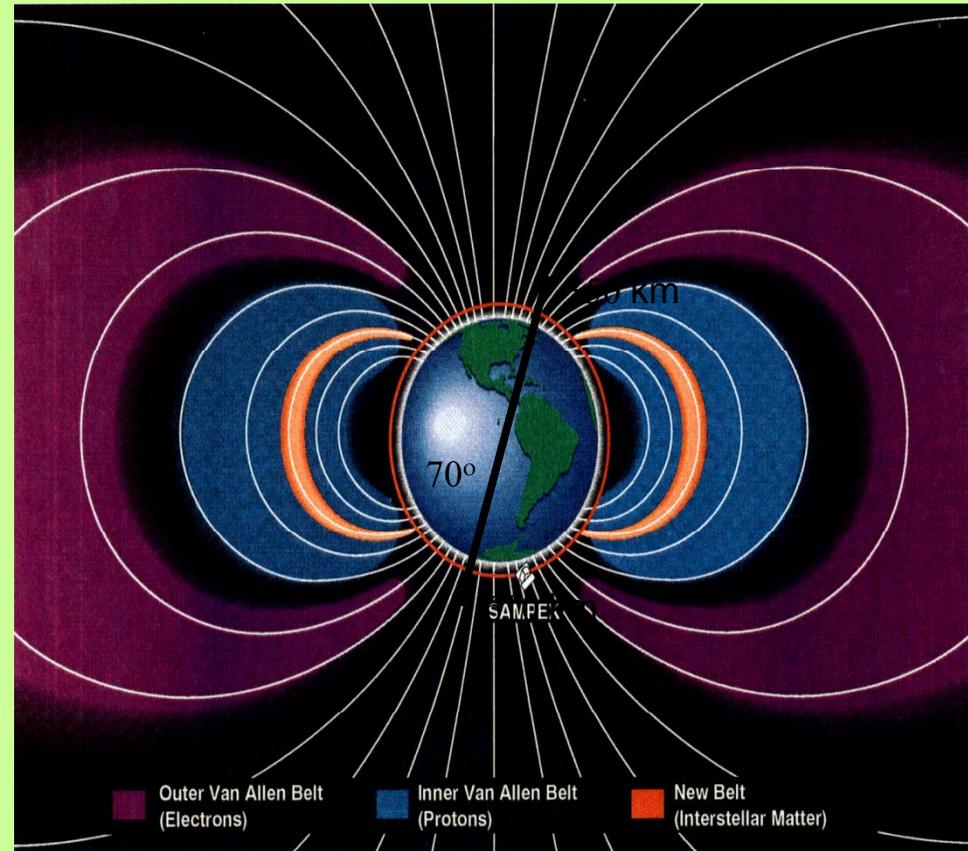
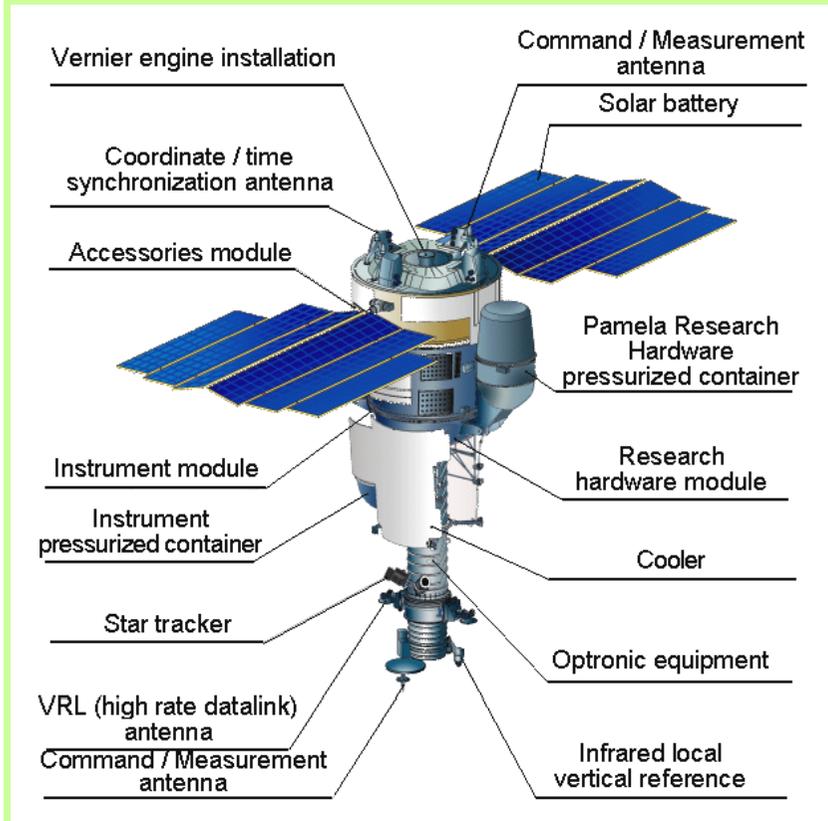
km³ projects

Misure indirette di WIMP

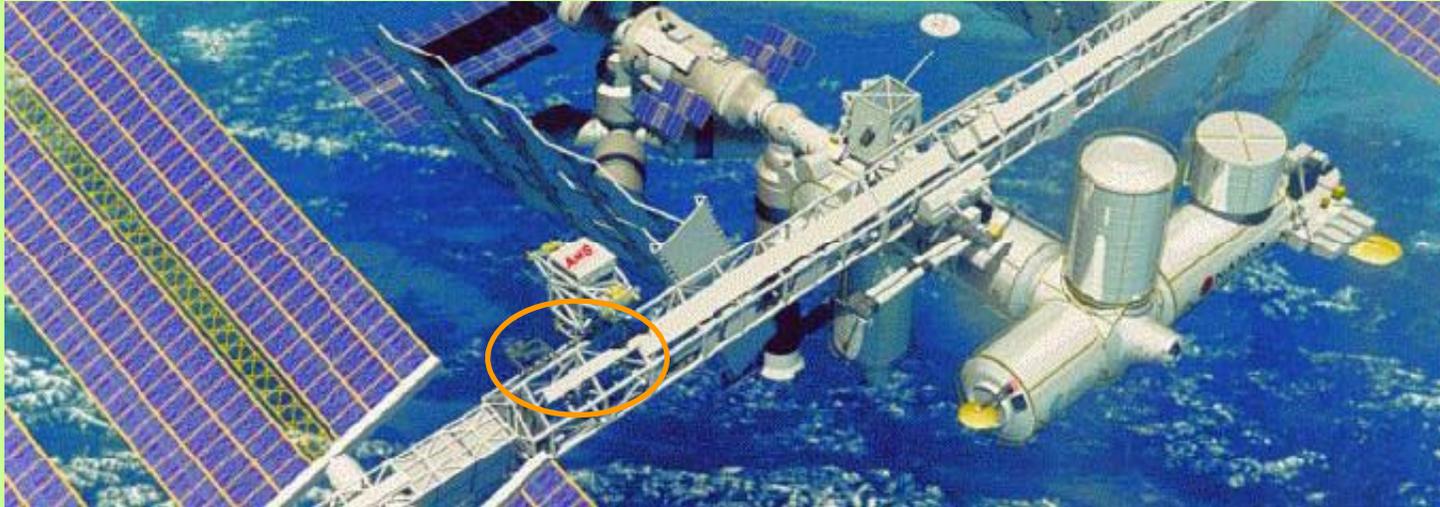


Produzione di particelle rare nei raggi cosmici

Satellite Pamela



- ★ le misure recentemente riportate hanno la loro spiegazione piu' naturale in sorgenti astrofisiche (pulsar, ...)
- ★ meno probabile che siano segnali di materia oscura



AMS



FERMI/GLAST

Conclusione

Spero di non essere stato
troppo oscuro !

Per il file pdf di queste lezioni:

<http://personalpages.to.infn.it/~bottino/archimede>