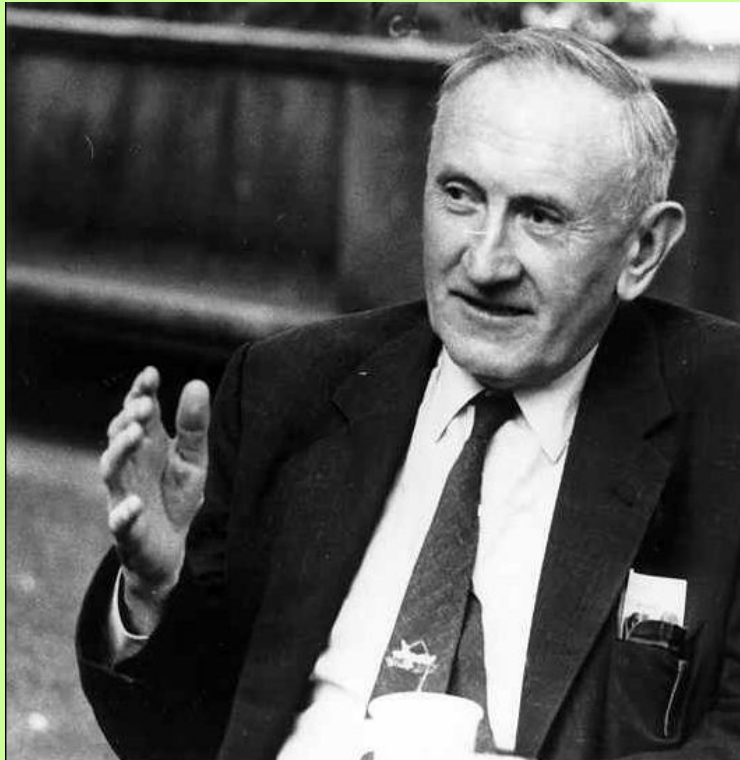


I Mercoledì dell' Accademia

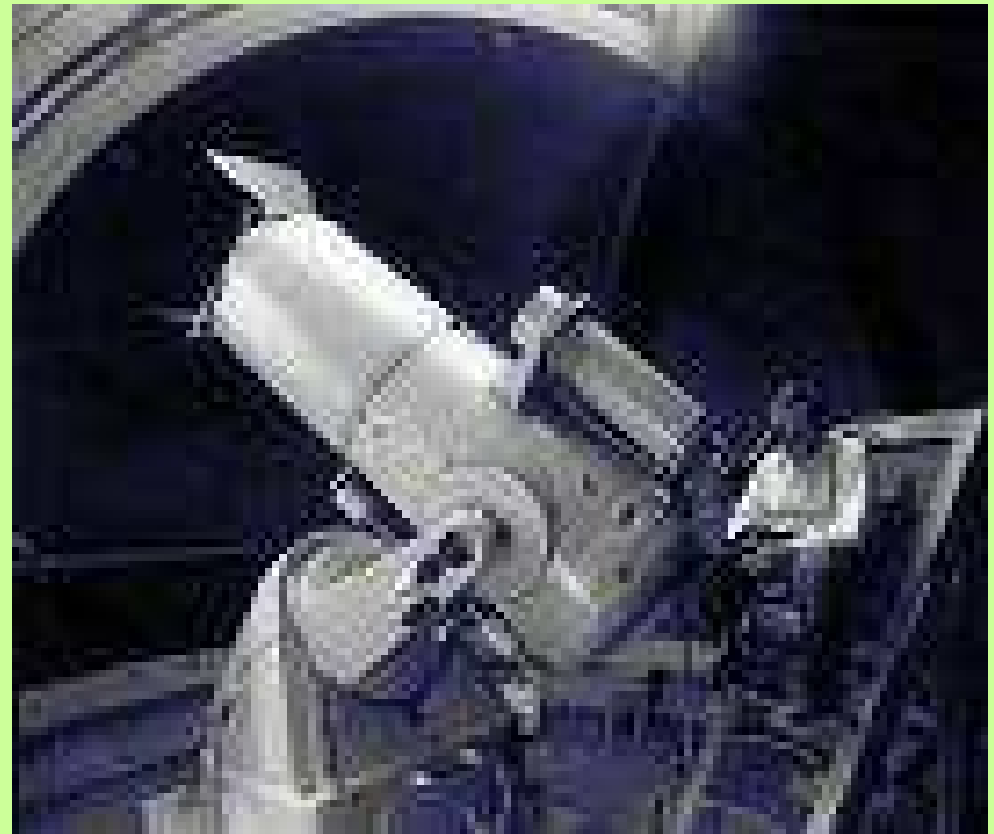
Universo e materia oscura

Circolo dei Lettori – Torino
20 Maggio 2009

Alessandro Bottino / Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Università di Torino



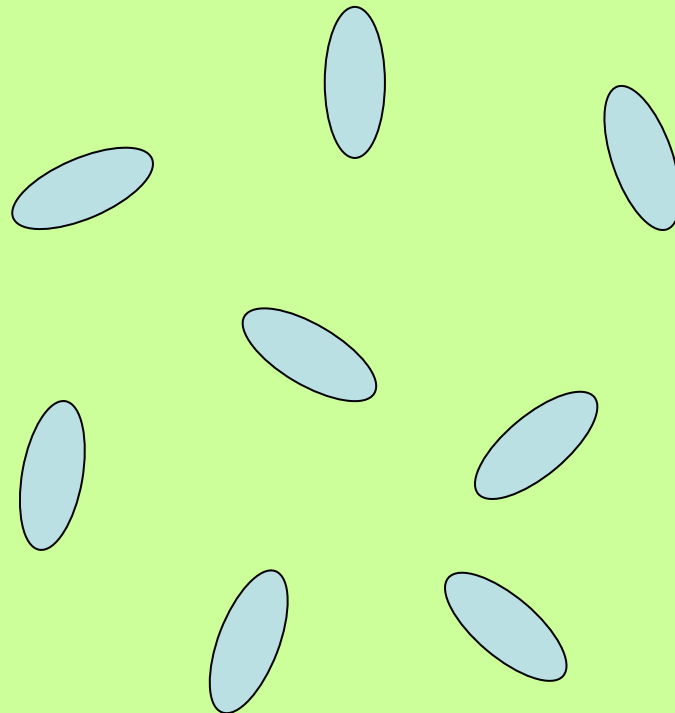
Fritz Zwicky



Ammasso galattico COMA



Ammasso di
galassie

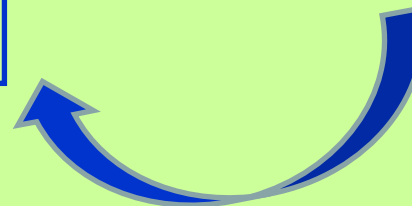


La massa visibile
è **insufficiente** a
spiegare le velocità
osservate

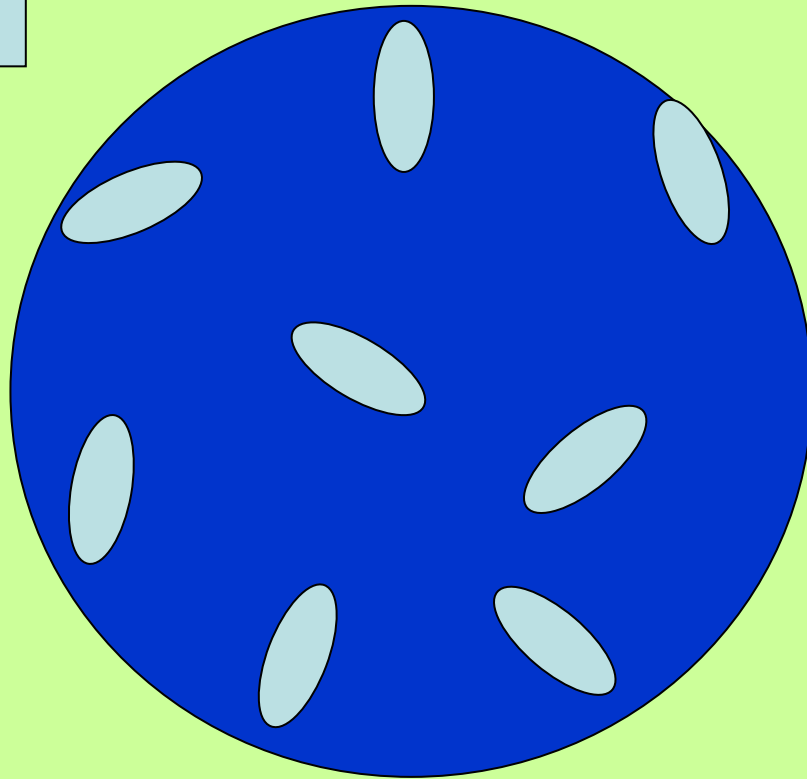
distribuzione di velocità delle galassie → massa totale dell'ammasso -
massa visibile

massa associata alla materia oscura

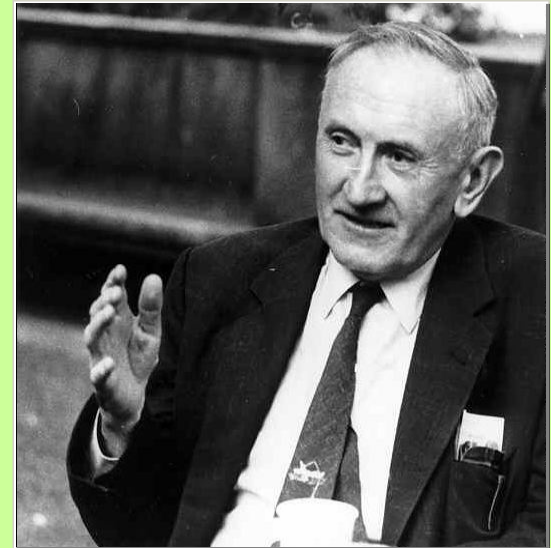
massa mancante



Ammasso di
galassie



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



Fritz Zwicky, 1933

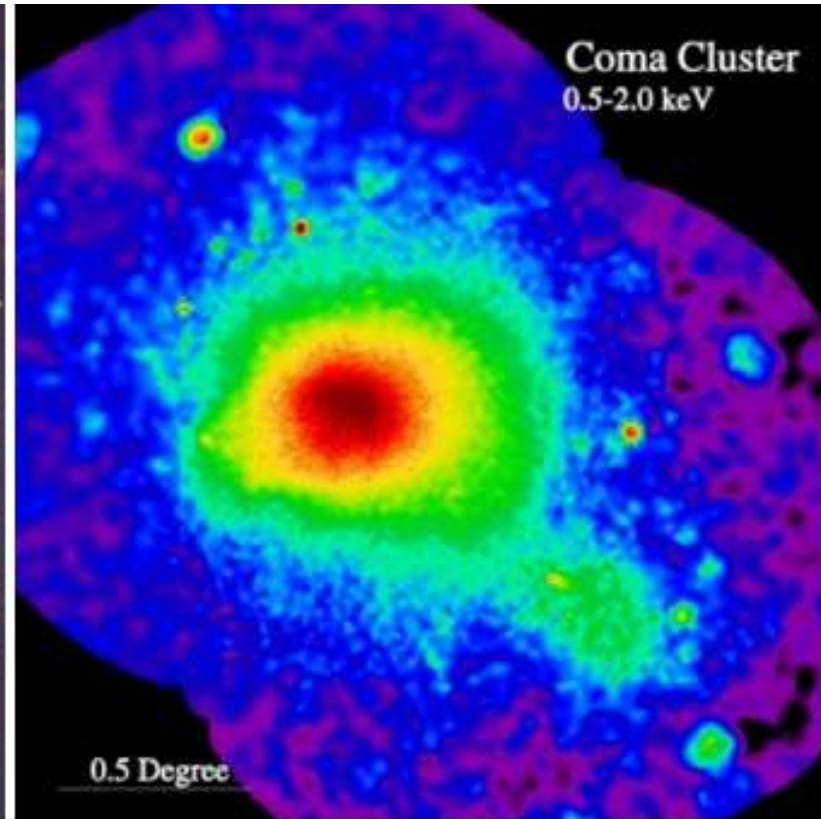
**deve esistere della massa
dovuta a materia oscura**

Ammasso Coma

immagine nell'ottico



immagine a raggi-X
satellite ROSAT



senza la presenza della materia, il gas caldo evaporerebbe

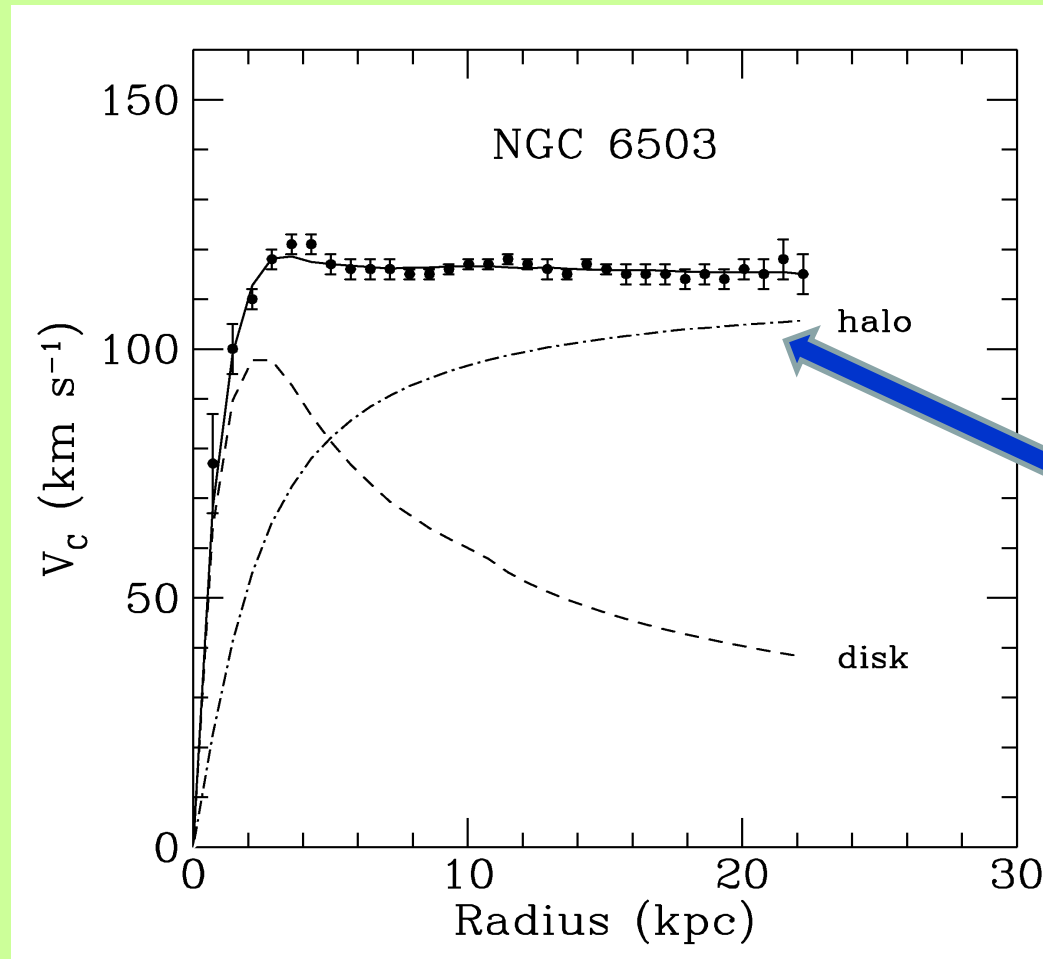
Prima tappa

Le osservazioni astronomiche
della materia oscura

Galassia a spirale M81 (simile alla nostra galassia)



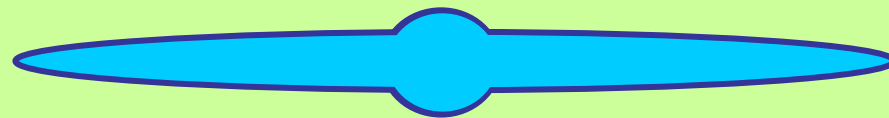
Curve rotazionali delle galassie



Vera Rubin

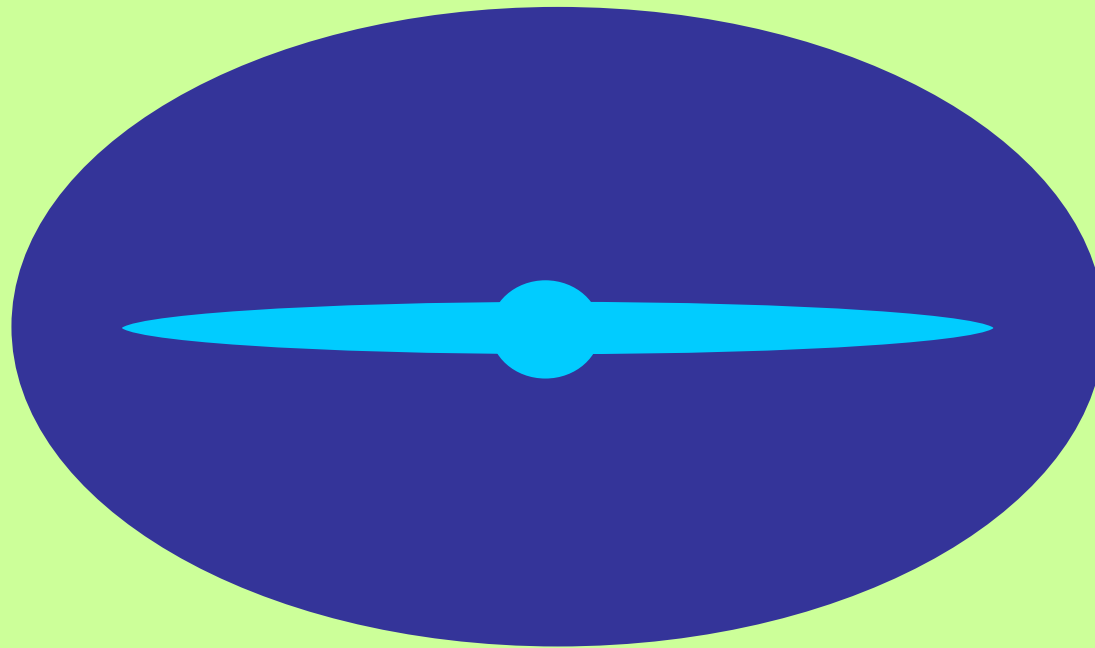
alone di
materia oscura

Curva rotazionale della Galassia NGC 6503

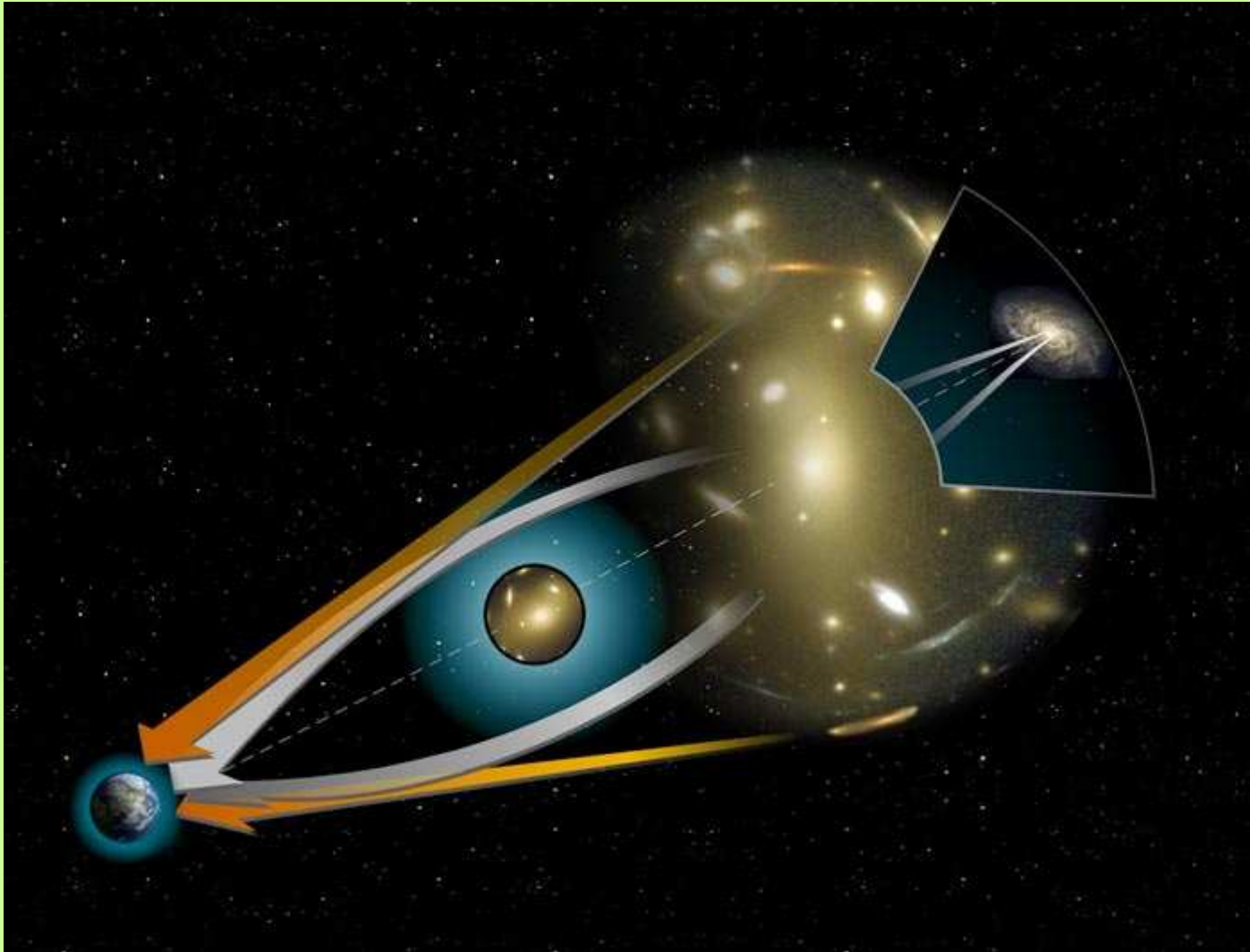


la nostra galassia vista di taglio

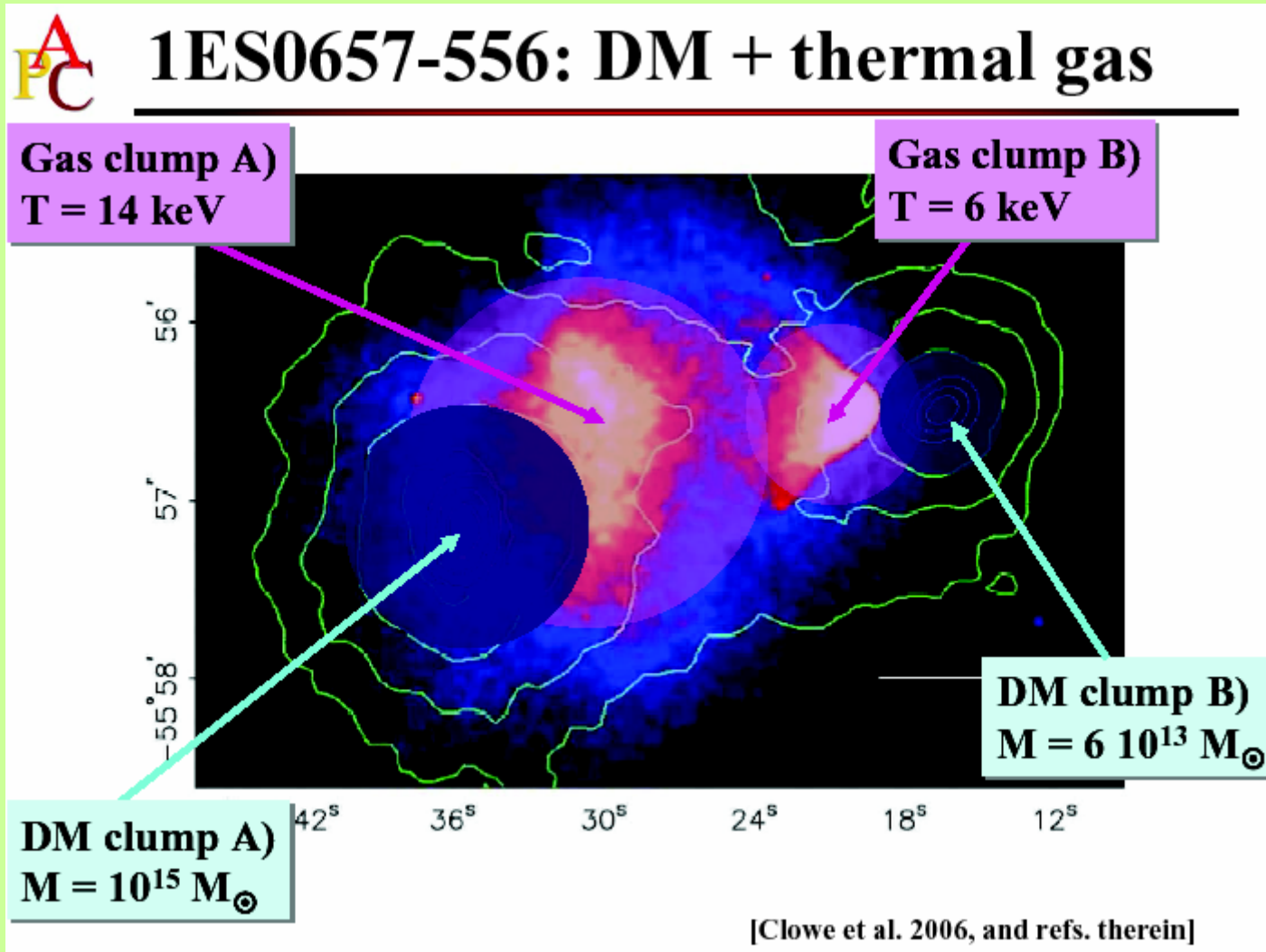
Alone di materia oscura



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

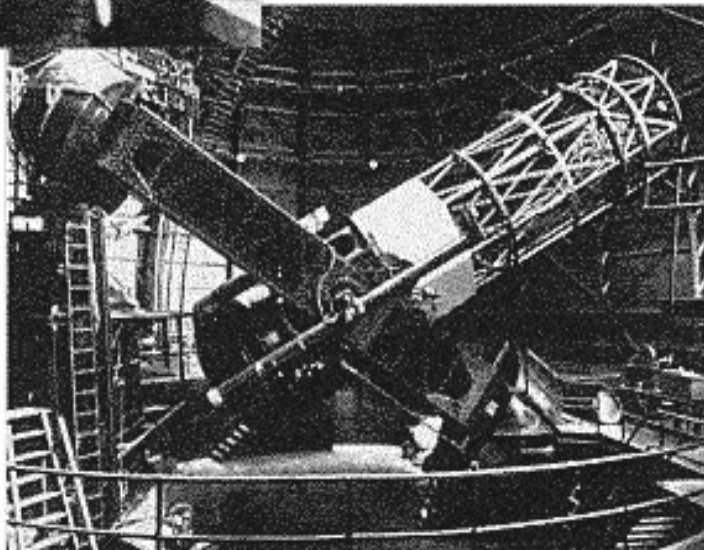
Come si e' generata la materia
oscura ?

Espansione dell'Universo



Edwin Hubble

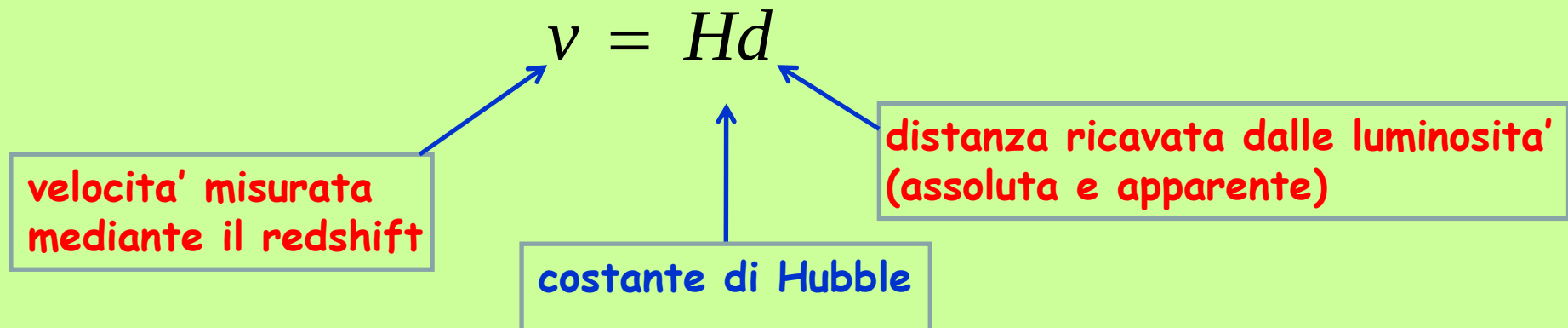
La velocità relativa tra due galassie è proporzionale alla distanza che le separa



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

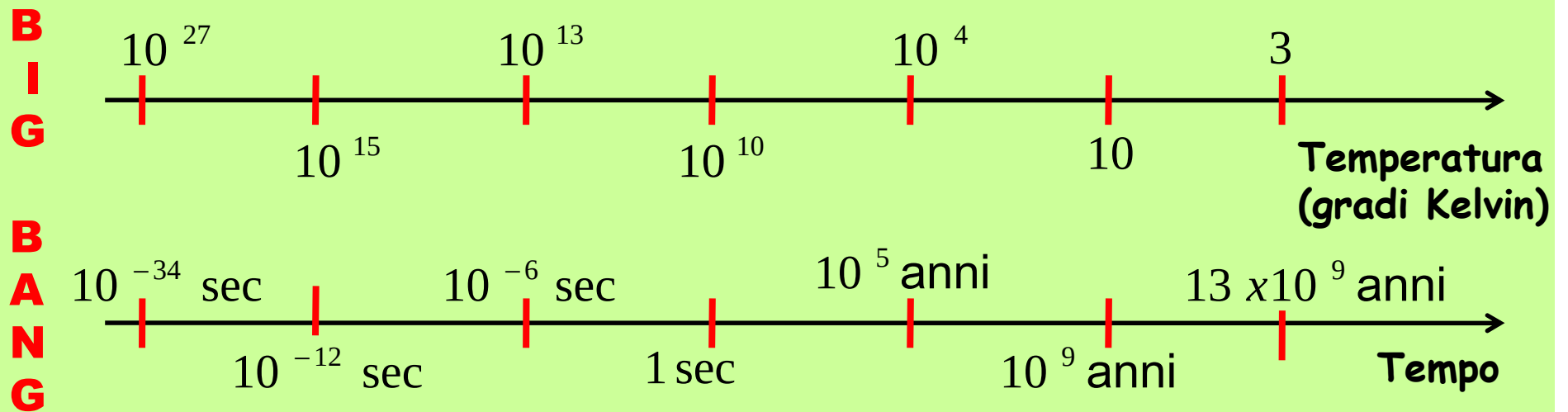


se lo spazio **si espande**, la frequenza della radiazione **diminuisce**:
spostamento delle linee spettroscopiche **verso il rosso (redshift)**



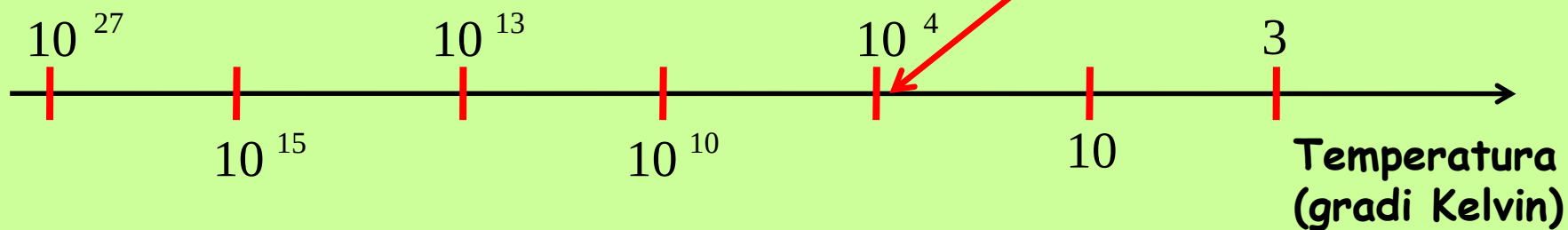
se lo spazio **si contrae**, la frequenza della radiazione **aumenta**:
spostamento delle linee spettroscopiche **verso il blu (blueshift)**

nel corso dell'espansione, l'Universo si raffredda

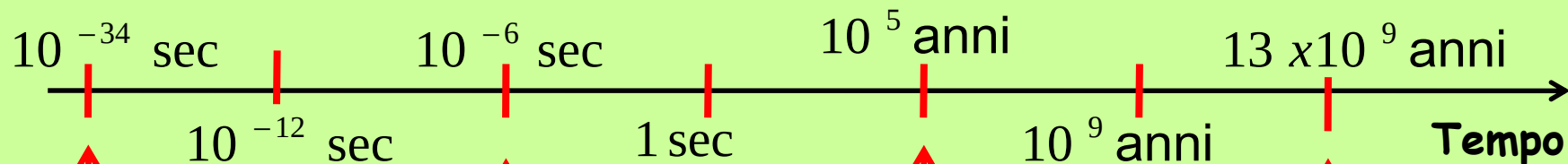


1 GeV $\cong$ energia di riposo del protone $\longleftrightarrow$ 10^{13} gradi Kelvin

**B
I
G**



**B
A
N
G**



fine della grande
unificazione

transizione quark
adroni

inizia la formazione
delle strutture
cosmologiche

ADESSO

fine della unificazione
elettrodebole

nucleosintesi

formazione della
nostra galassia

nucleosintesi primordiale degli elementi leggeri

PERIODIC TABLE
Atomic Properties of the Elements

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

Physics 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 ^{133}Cs

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)
elementary charge e 1.602 176 634 × 10⁻¹⁹ C (exact)
electron mass m_e 9.109 383 56 × 10⁻³¹ kg
 $m_e c^2$ 0.5110 MeV
proton mass m_p 1.672 621 9 × 10⁻²⁷ kg
 α 1/137.036
Rydberg constant R_∞ 10 973 731.77 m⁻¹
 $R_\infty c$ 3.289 842 × 10¹⁵ Hz
 $R_\infty h c$ 13.605 698 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	9	10	11 IB	12 IIB	13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA
1 H 1.00794 1s	2 He 4.002602 1s ²	3 Li 6.941 1s ² 2s ¹	4 Be 9.0122 1s ² 2s ²	5 B 10.81 1s ² 2s ² 2p ¹	6 C 12.0107 1s ² 2s ² 2p ²	7 N 14.0064 1s ² 2s ² 2p ³	8 O 15.9994 1s ² 2s ² 2p ⁴	9 F 18.9984032 1s ² 2s ² 2p ⁵	10 Ne 20.1797 1s ² 2s ² 2p ⁶	11 Na 22.98976928 [Ne]3s ¹	12 Mg 24.304 [Ne]3s ²	13 Al 26.9815385 [Ne]3s ² 3p ¹	14 Si 28.0855 [Ne]3s ² 3p ²	15 P 30.973761998 [Ne]3s ² 3p ³	16 S 32.06 [Ne]3s ² 3p ⁴	17 Cl 35.453 [Ne]3s ² 3p ⁵	18 Ar 39.948 [Ne]3s ² 3p ⁶
19 K 39.0983 [Ar]4s ¹	20 Ca 40.078 [Ar]4s ²	21 Sc 44.955910 [Ar]3d ¹ 4s ²	22 Ti 47.88 [Ar]3d ² 4s ²	23 V 50.9415 [Ar]3d ³ 4s ²	24 Cr 51.9961 [Ar]3d ⁵ 4s ¹	25 Mn 54.938045 [Ar]3d ⁵ 4s ²	26 Fe 55.845 [Ar]3d ⁶ 4s ²	27 Co 58.933200 [Ar]3d ⁷ 4s ²	28 Ni 58.6934 [Ar]3d ⁸ 4s ²	29 Cu 63.546 [Ar]3d ¹⁰ 4s ¹	30 Zn 65.409 [Ar]3d ¹⁰ 4s ²	31 Ga 69.723 [Ar]3d ¹⁰ 4s ¹ 4p ¹	32 Ge 72.64 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	33 As 74.921595 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ³	34 Se 78.96 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴	35 Br 79.904 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	36 Kr 83.798 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶
37 Rb 85.4678 [Kr]5s ¹	38 Sr 87.62 [Kr]5s ²	39 Y 88.90585 [Kr]4d ¹ 5s ²	40 Zr 91.224 [Kr]4d ² 5s ²	41 Nb 92.90638 [Kr]4d ⁴ 5s ¹	42 Mo 95.94 [Kr]4d ⁵ 5s ¹	43 Tc 98.90625 [Kr]4d ⁵ 5s ²	44 Ru 101.07 [Kr]4d ⁷ 5s ¹	45 Rh 102.90550 [Kr]4d ⁸ 5s ¹	46 Pd 106.42 [Kr]4d ¹⁰	47 Ag 107.8682 [Kr]4d ¹⁰ 5s ¹	48 Cd 112.411 [Kr]4d ¹⁰ 5s ²	49 In 114.818 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹	50 Sn 118.710 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ²	51 Sb 121.757 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ³	52 Te 127.60 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴	53 I 126.90547 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵	54 Xe 131.29 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶
55 Cs 132.90545 [Xe]6s ¹	56 Ba 137.327 [Xe]6s ²	57 La 138.9055 [Xe]5d ¹ 6s ²	58 Ce 140.116 [Xe]4f ¹ 5d ¹ 6s ²	59 Pr 140.90768 [Xe]4f ³ 6s ²	60 Nd 144.24 [Xe]4f ⁴ 6s ²	61 Pm 144.9127 [Xe]4f ⁵ 6s ²	62 Sm 150.36 [Xe]4f ⁶ 6s ²	63 Eu 151.964 [Xe]4f ⁷ 6s ²	64 Gd 157.25 [Xe]4f ⁷ 5d ¹ 6s ²	65 Tb 158.92534 [Xe]4f ⁹ 6s ²	66 Dy 162.500 [Xe]4f ¹⁰ 6s ²	67 Ho 164.93032 [Xe]4f ¹¹ 6s ²	68 Er 167.259 [Xe]4f ¹² 6s ²	69 Tm 168.9348 [Xe]4f ¹³ 6s ²	70 Yb 173.054 [Xe]4f ¹⁴ 6s ²	71 Lu 174.967 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ²	72 Hf 178.49 [Xe]4f ¹⁴ 5d ² 6s ²
87 Fr 223 [Rn]7s ¹	88 Ra 226 [Rn]7s ²	89 Ac 227 [Rn]6d ¹ 7s ²	90 Th 232.0377 [Rn]6d ² 7s ²	91 Pa 231.03688 [Rn]5f ² 6d ¹ 7s ²	92 U 238.02891 [Rn]5f ³ 6d ¹ 7s ²	93 Np 237 [Rn]5f ⁴ 6d ¹ 7s ²	94 Pu 239.05216 [Rn]5f ⁶ 7s ²	95 Am 243 [Rn]5f ⁷ 7s ²	96 Cm 247 [Rn]5f ⁷ 7s ²	97 Bk 247 [Rn]5f ⁷ 7s ²	98 Cf 251 [Rn]5f ¹⁰ 7s ²	99 Es 252 [Rn]5f ¹¹ 7s ²	100 Fm 257 [Rn]5f ¹² 7s ²	101 Md 258 [Rn]5f ¹³ 7s ²	102 No 259 [Rn]5f ¹⁴ 7s ²	103 Lr 262 [Rn]5f ¹⁴ 6d ¹ 7s ²	104 Rf 261 [Rn]5f ¹⁴ 6d ² 7s ²
101 Mendelevium (258)	102 Nobelium (259)	103 Lawrencium (260)	104 Rutherfordium (261)	105 Dubnium (262)	106 Seaborgium (263)	107 Bohrium (264)	108 Hassium (265)	109 Meitnerium (266)	110 Ununnilium (267)	111 Ununnilium (268)	112 Unbium (269)	113 Untrium (270)	114 Unquadium (271)	115 Unpentium (272)	116 Unhexium (273)	117 Unseptium (274)	118 Unoctium (275)

☐ Lanthanides
☐ Actinides

Atomic Number Ground-state Level
Symbol Name Atomic Weight Ground-state Configuration Ionization Energy (eV)

58 Ce Cerium 140.116 [Xe]4f¹5d¹6s² 5.5387

[†]Based upon ^{12}C . () indicates the mass number of the most stable isotope.

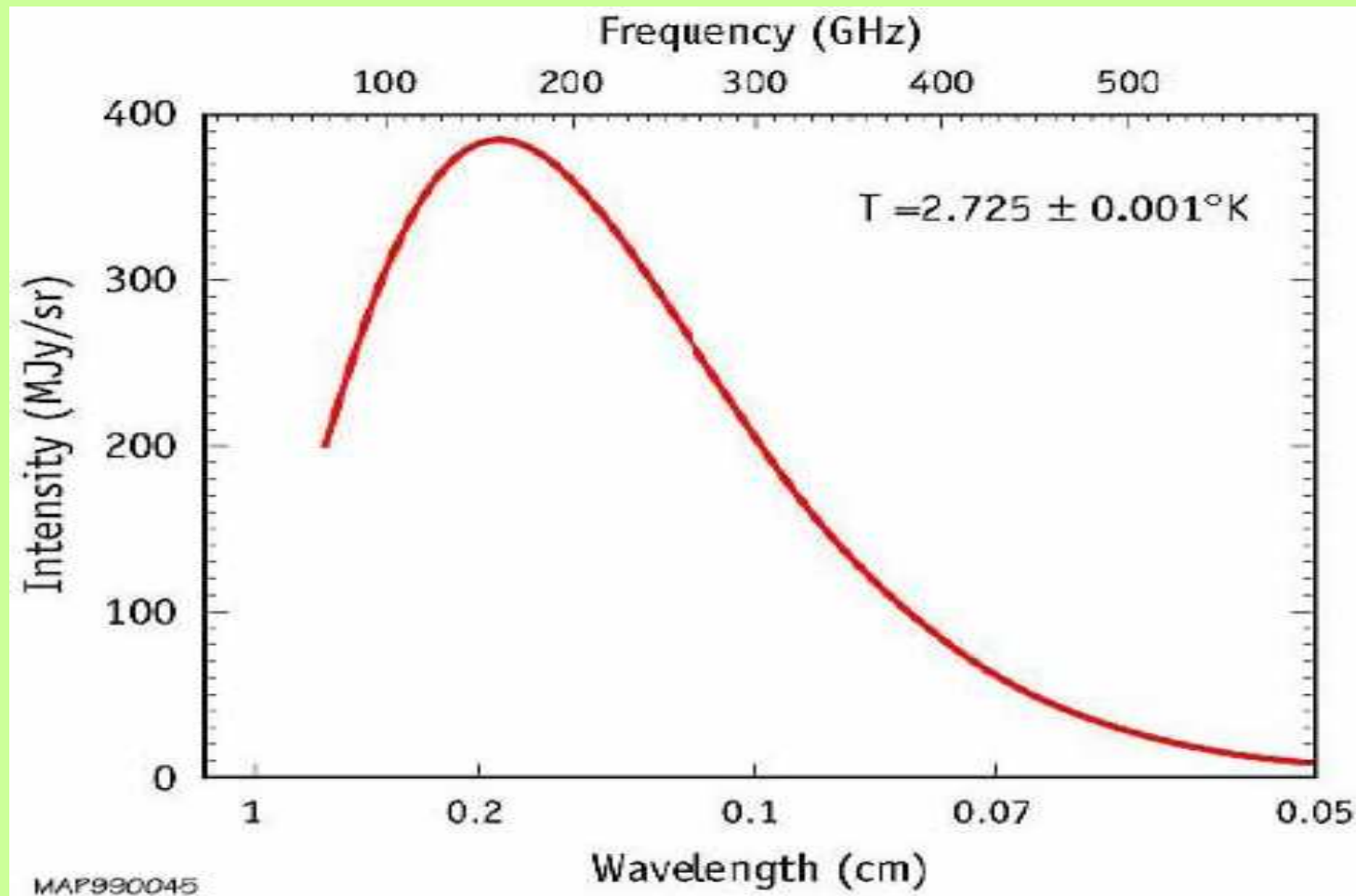
For a description of the data, visit physics.nist.gov/data

NIST

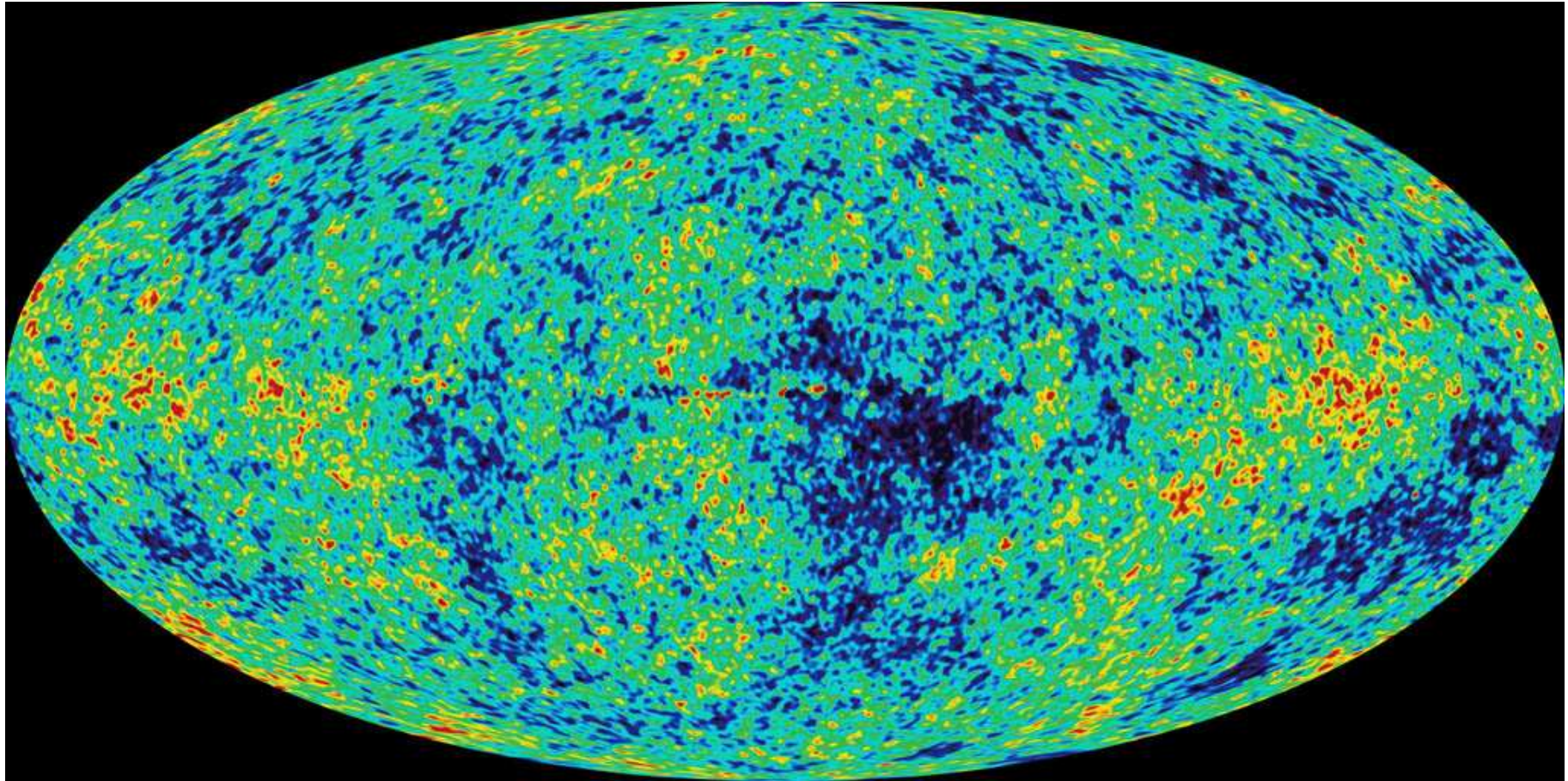


Alpher, Gamow e Herman

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



Lancio del satellite Planck (per studio della CMB)
assieme al satellite Herschel per osservazione
nell'infrarosso

14 maggio 2009



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:

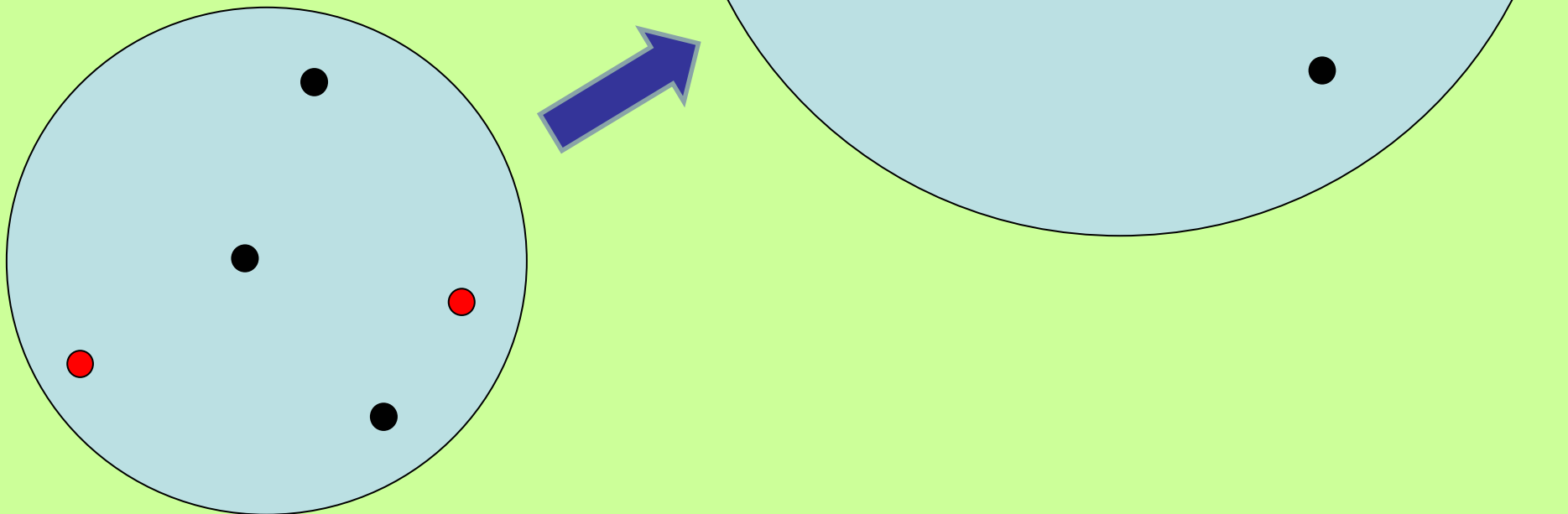
elettroni, protoni e neutroni (strutture nucleari e atomiche)

fotoni del fondo cosmico a microonde a 2.73 gradi Kelvin

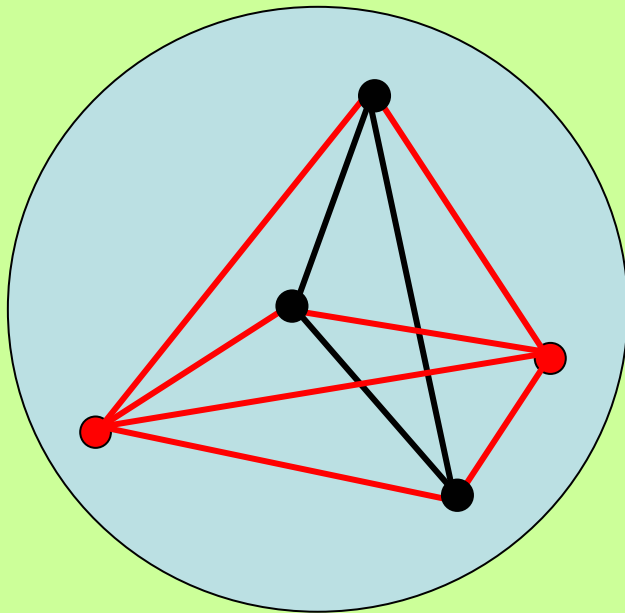
neutrini di 3 tipi in un fondo cosmico a 1.96 gradi Kelvin
(fondo non ancora misurato)

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

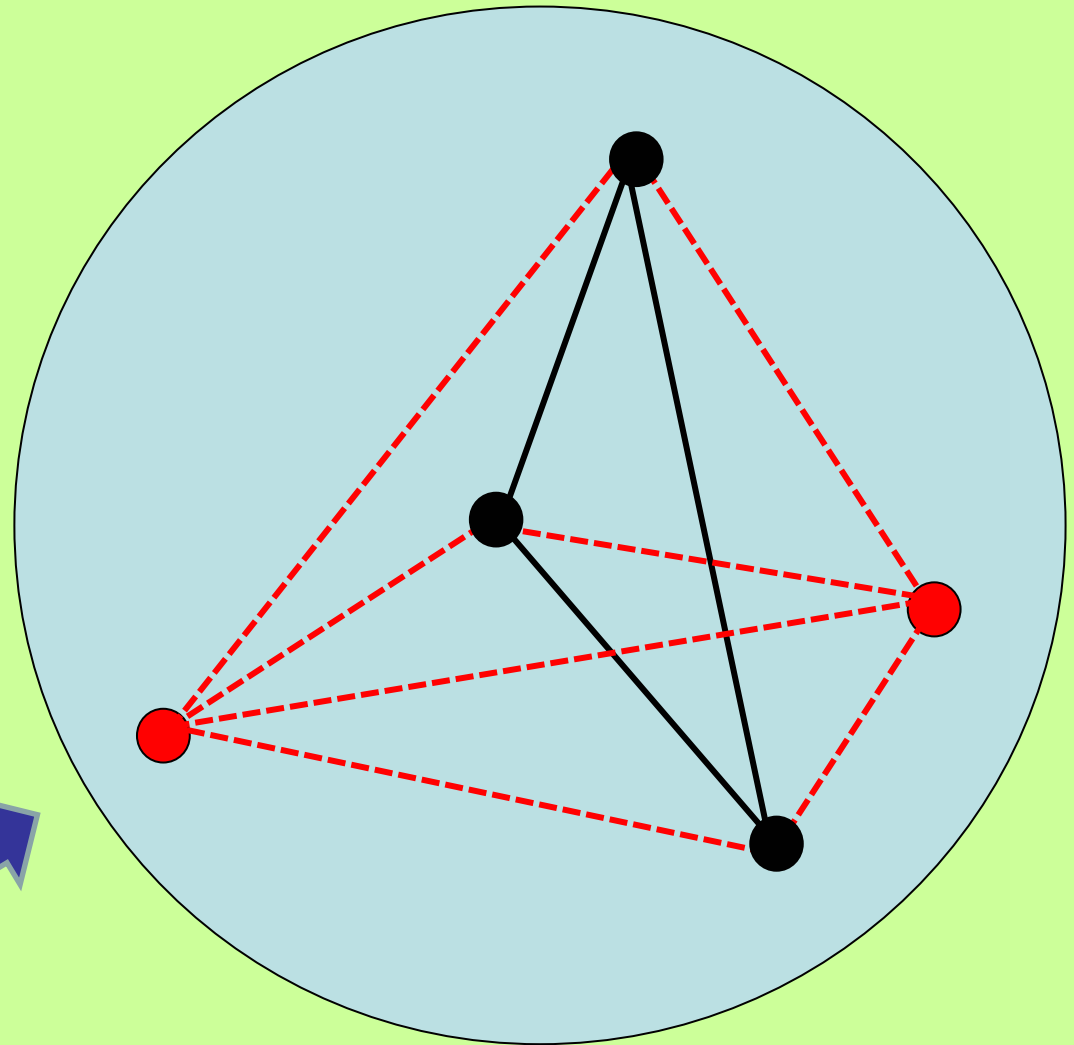
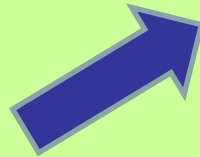
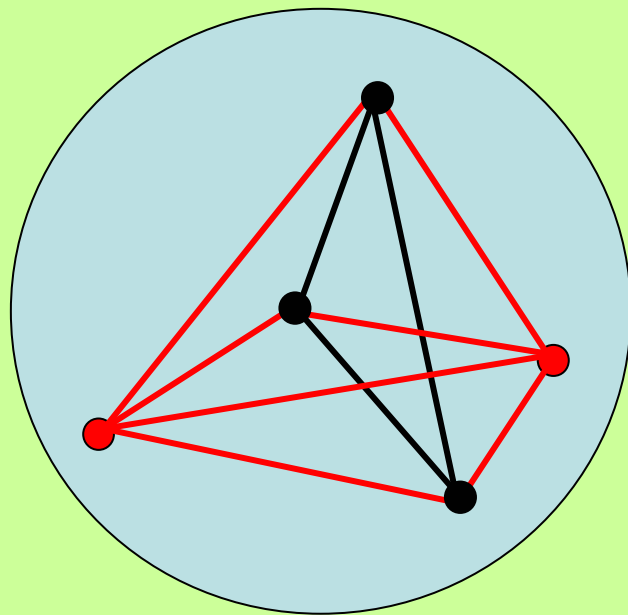
l'Universo si espande:
le distanze relative tra
coppie di particelle
aumentano di uno
stesso fattore



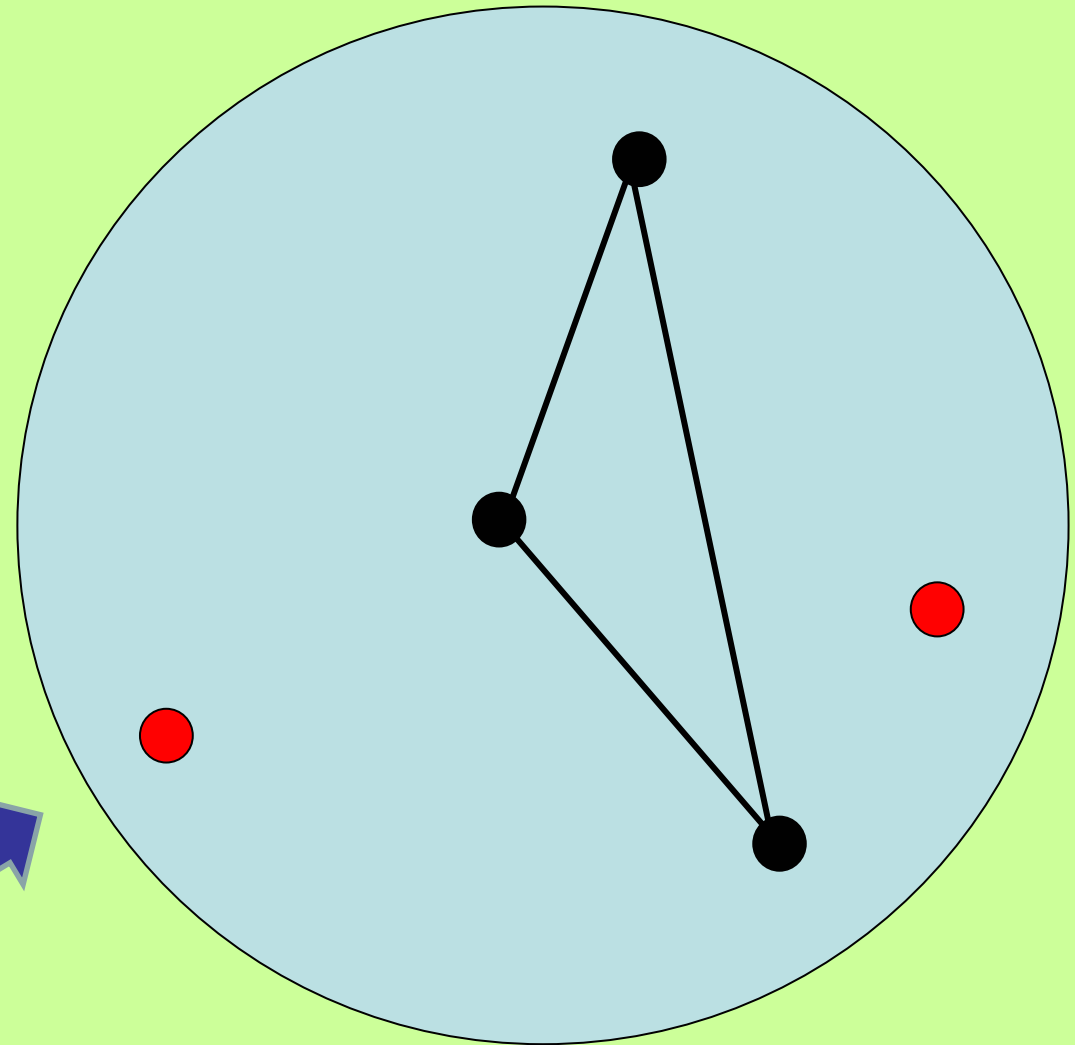
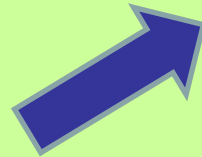
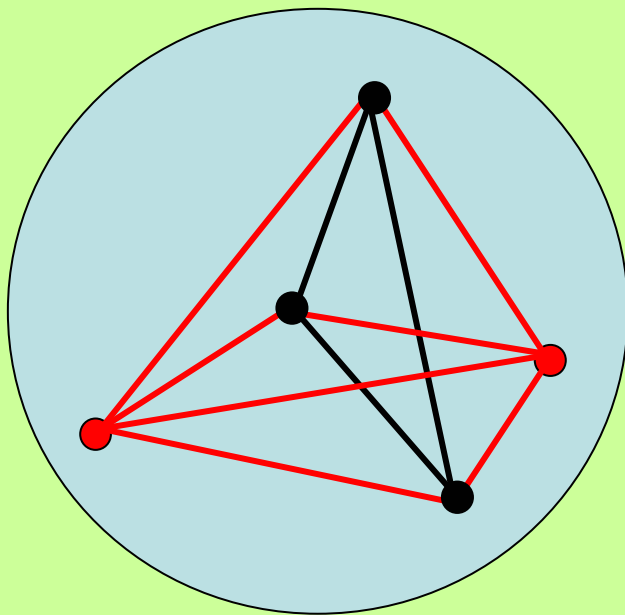
l'equilibrio all'interno del plasma e'
mantenuto dalle **interazioni** tra
le particelle



le interazioni si affievoliscono
nel corso dell'espansione, fino
a che ...



le interazioni si affievoliscono
nel corso dell'espansione, fino
a che alcune particelle si
disaccoppiano dal plasma



le particelle disaccoppiate non partecipano
piu' all'equilibrio del plasma, pur partecipando
all'espansione dell'Universo

le particelle disaccoppiate dal plasma interagiscono tra di loro e con le altre particelle solo tramite la forza gravitazionale:

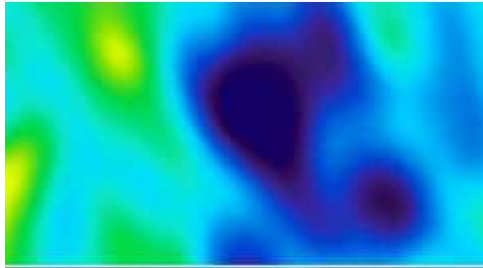
possono quindi costituire la materia oscura

2 categorie:

calde (con velocità prossima alla velocità della luce): neutrini

fredde (con velocità molto minori a quella della luce)

il ruolo delle particelle oscure fredde (cold dark matter) è cruciale per la formazione delle strutture cosmologiche (galassie, ammassi di galassie)



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

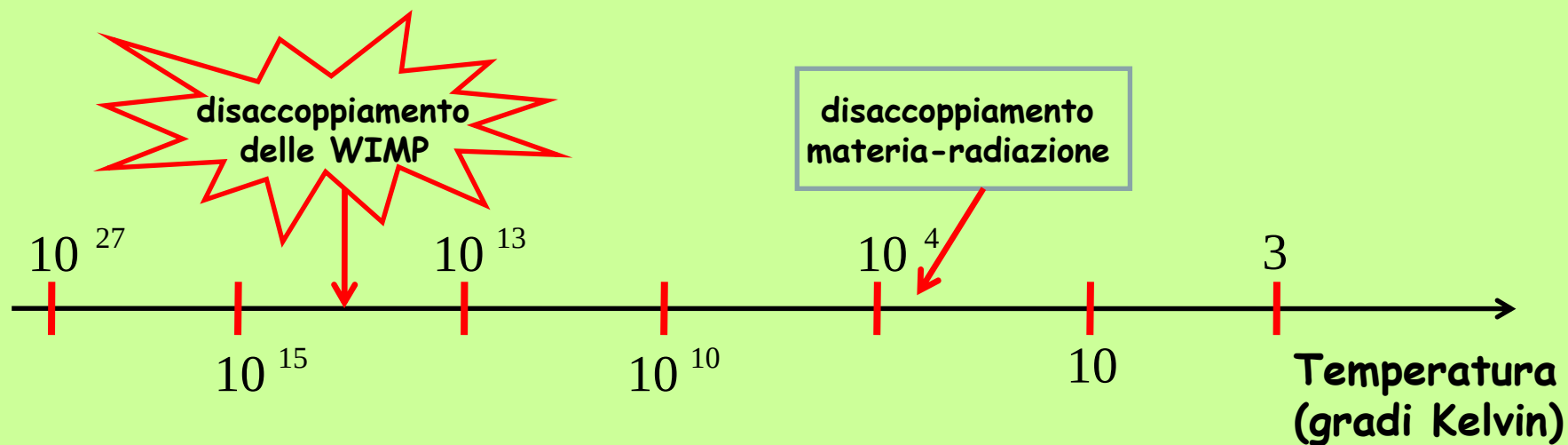
*occorre ipotizzare che la maggior parte della materia
nell'Universo sia oscura*

Identikit per una particella costituente la materia oscura

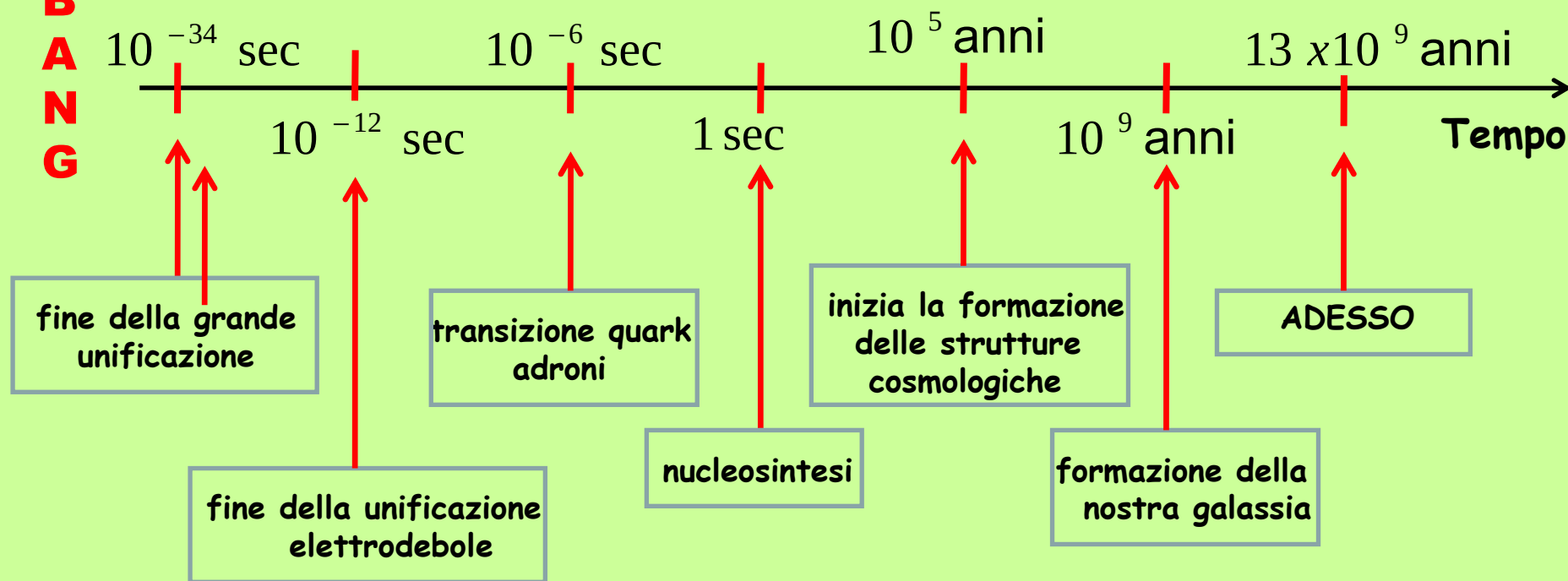
Weakly Interacting Massive Particle

WIMP = particelle pesanti debolmente interagenti

**B
I
G**



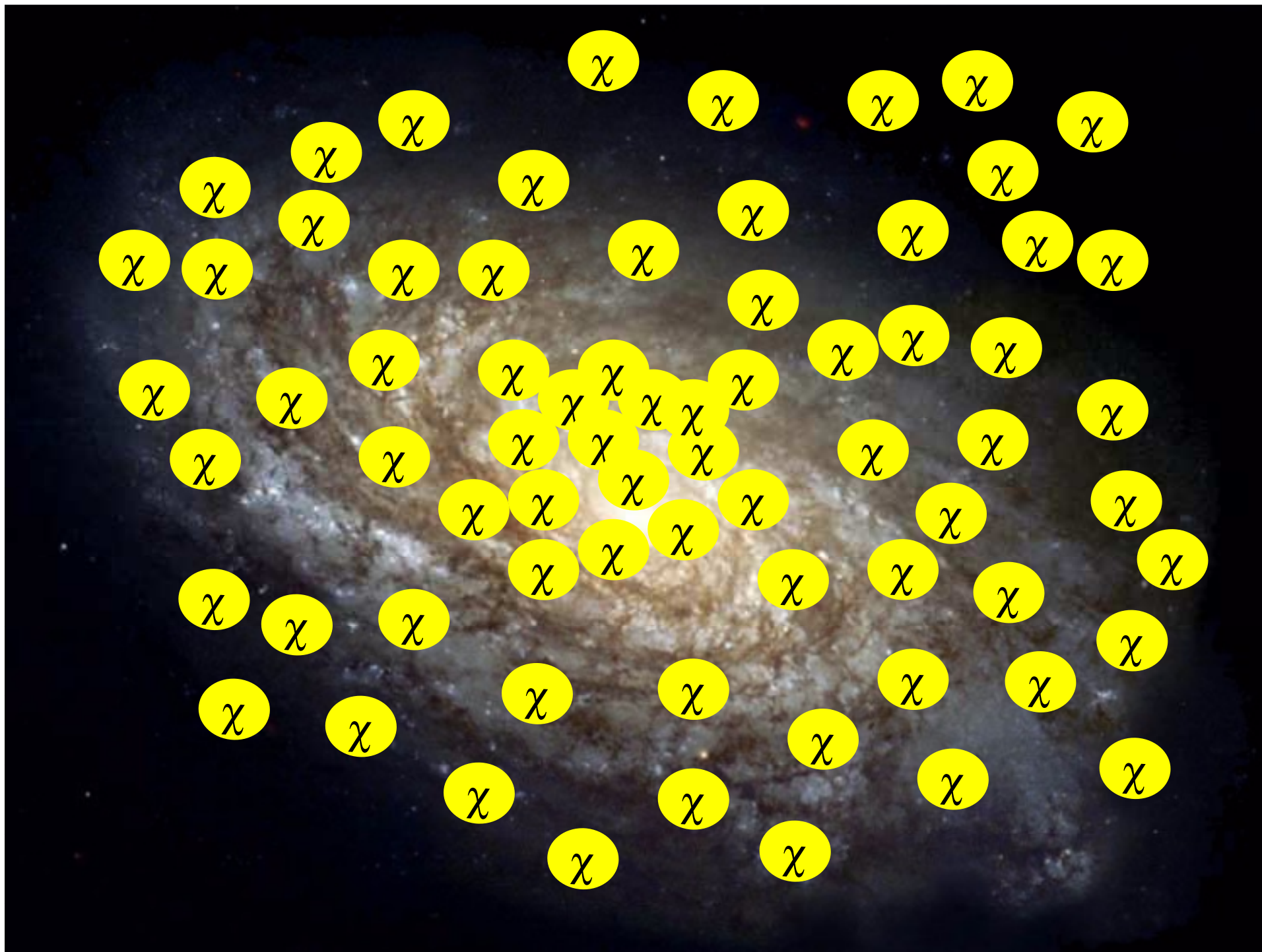
**B
A
N
G**



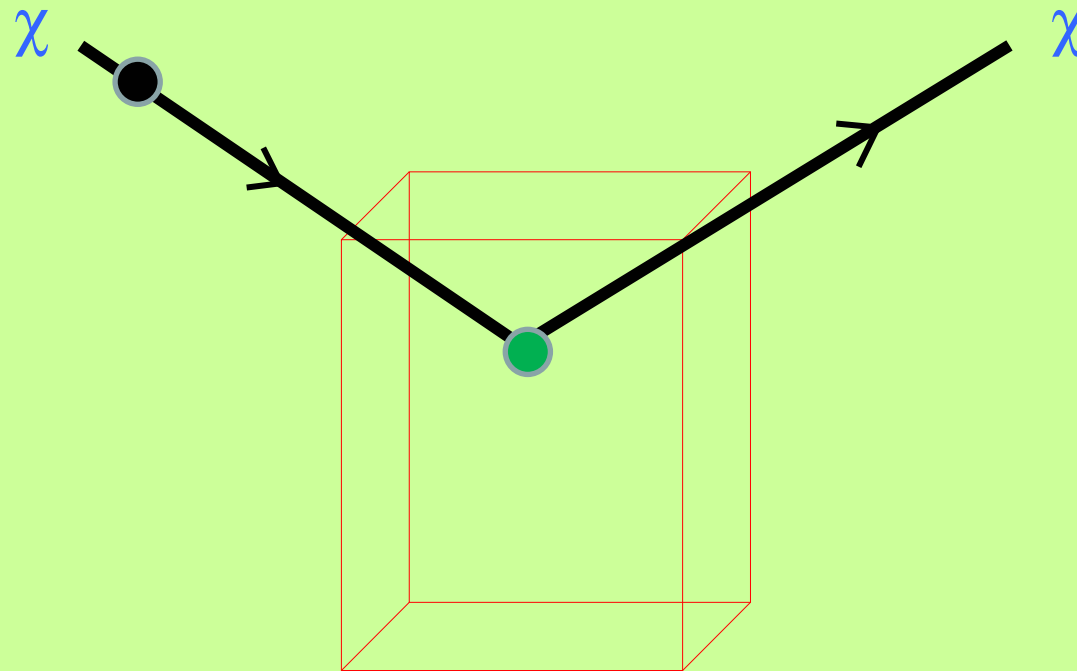
Terza tappa

Come misurare le particelle
oscuire ?



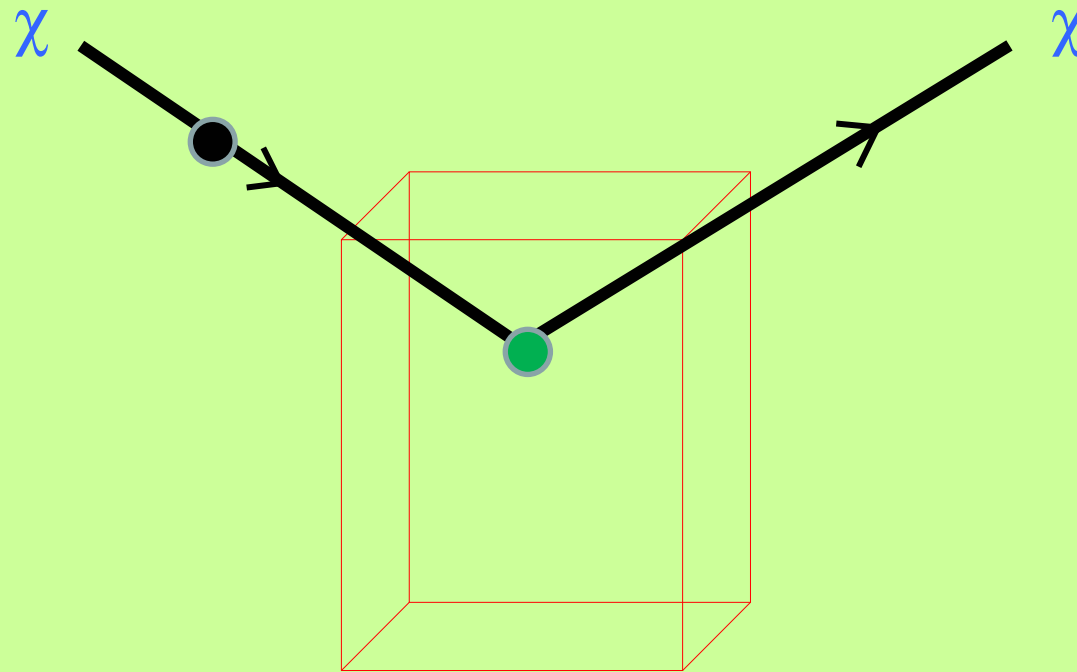


Misure dirette di WIMP



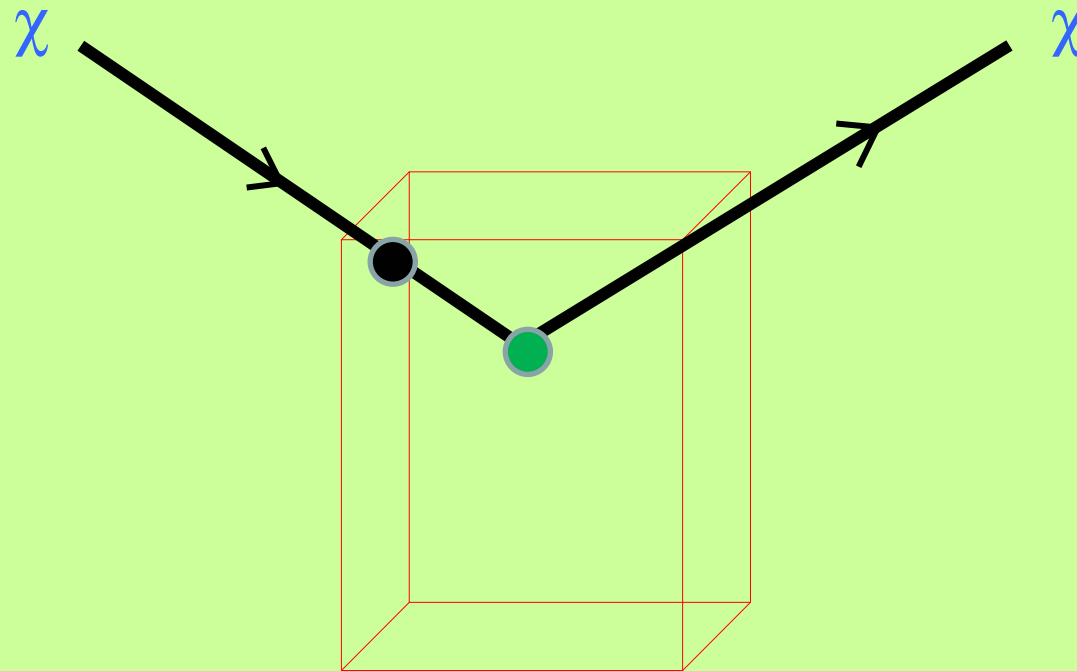
misura di rinculo nucleare

Misure dirette di WIMP



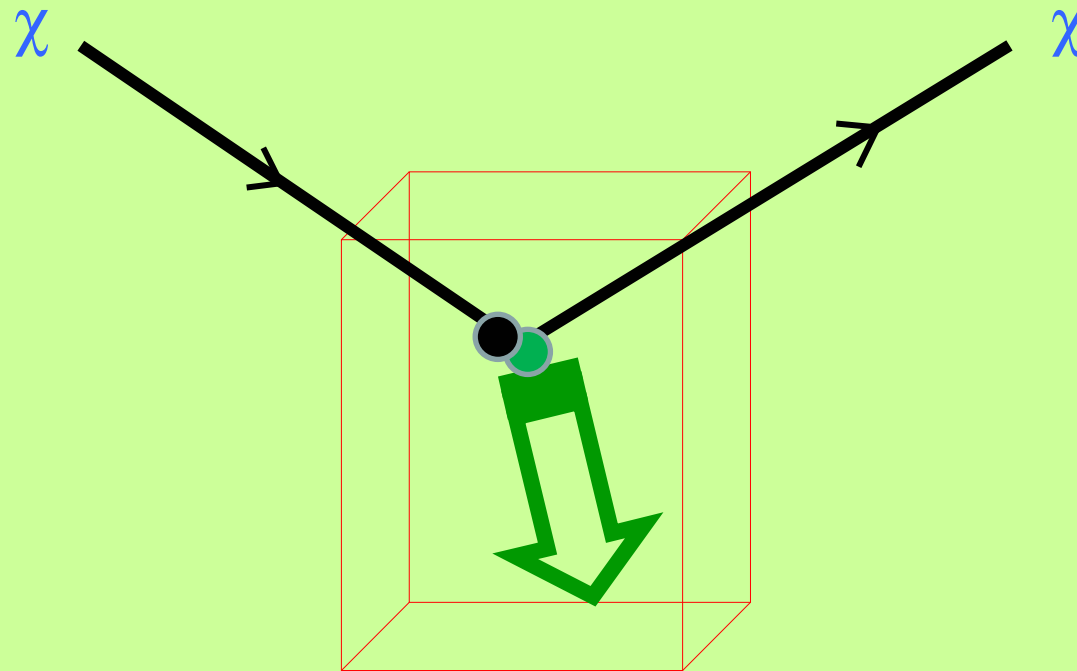
misura di rinculo nucleare

Misure dirette di WIMP



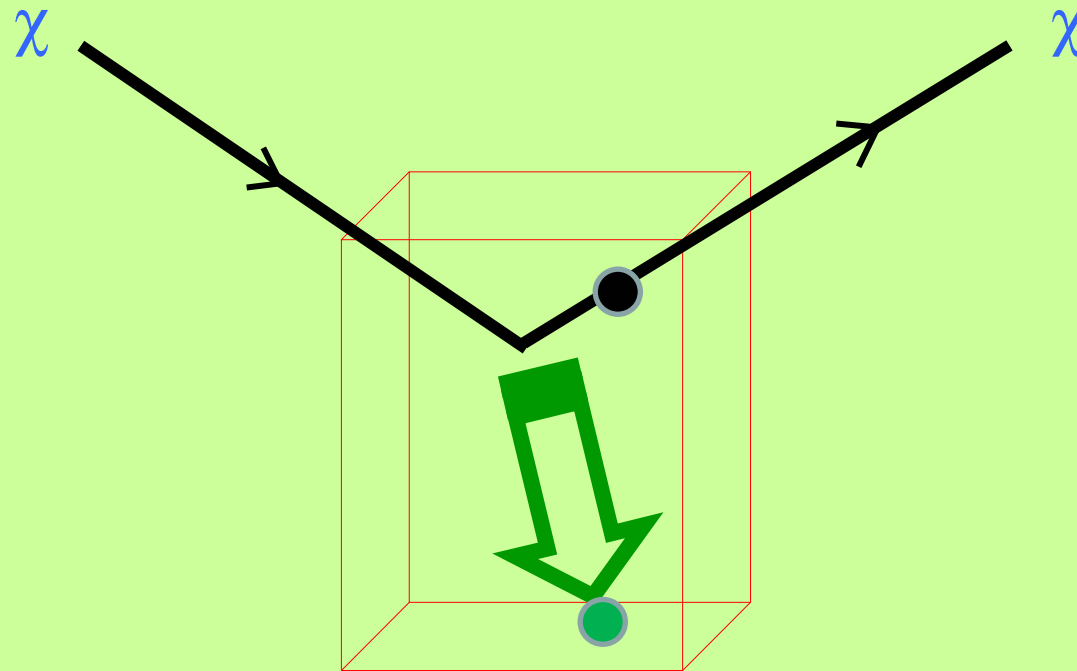
misura di rinculo nucleare

Misure dirette di WIMP



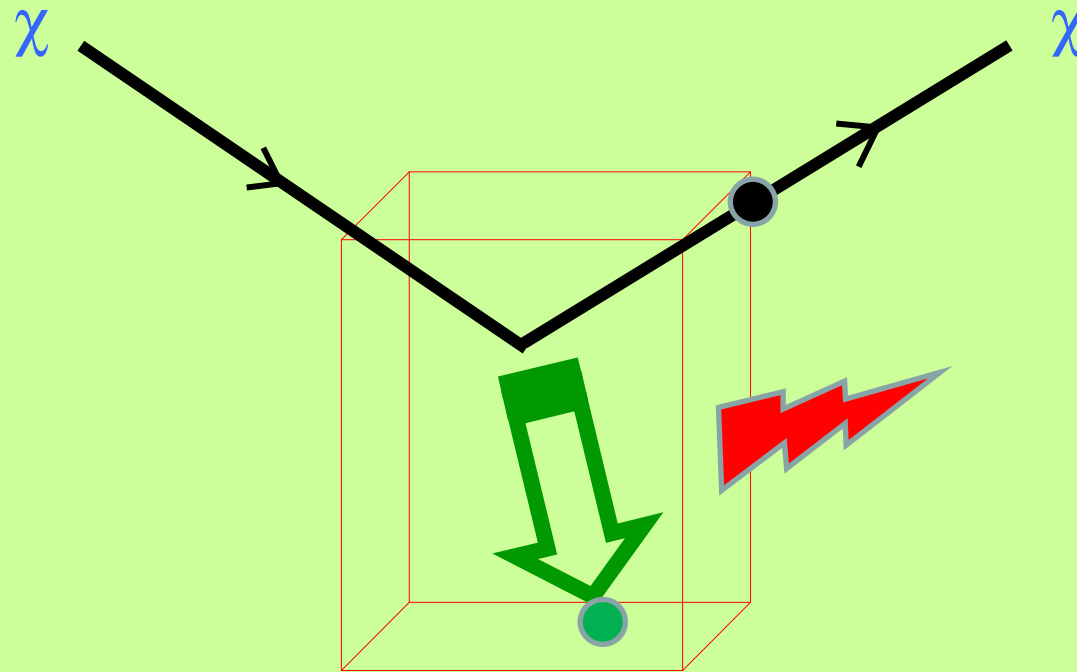
misura di rinculo nucleare

Misure dirette di WIMP



misura di rinculo nucleare

Misure dirette di WIMP

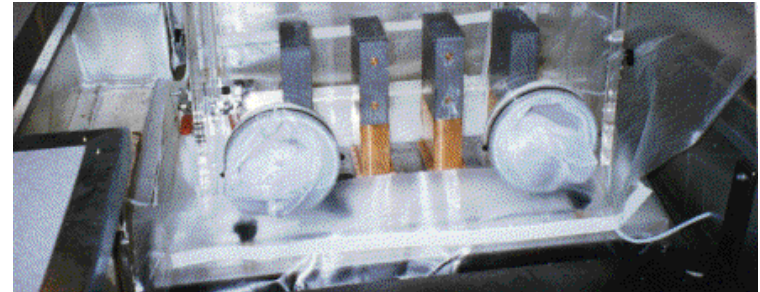


misura di rinculo nucleare

Ricerche in luoghi protetti dalla radiazione cosmica

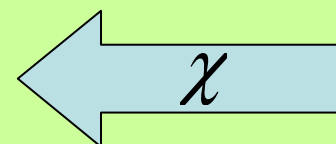
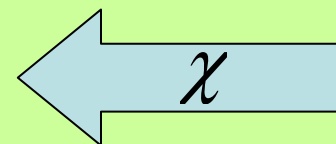
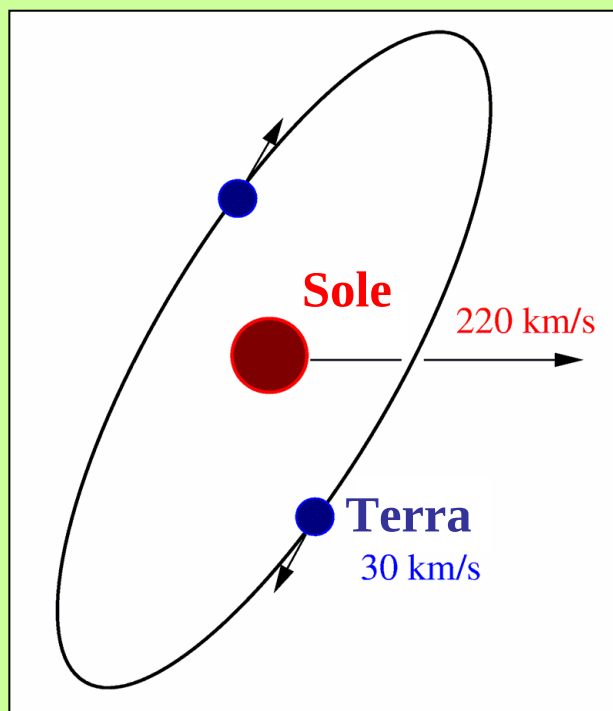


Esperimento DAMA



Laboratori Nazionali del Gran Sasso





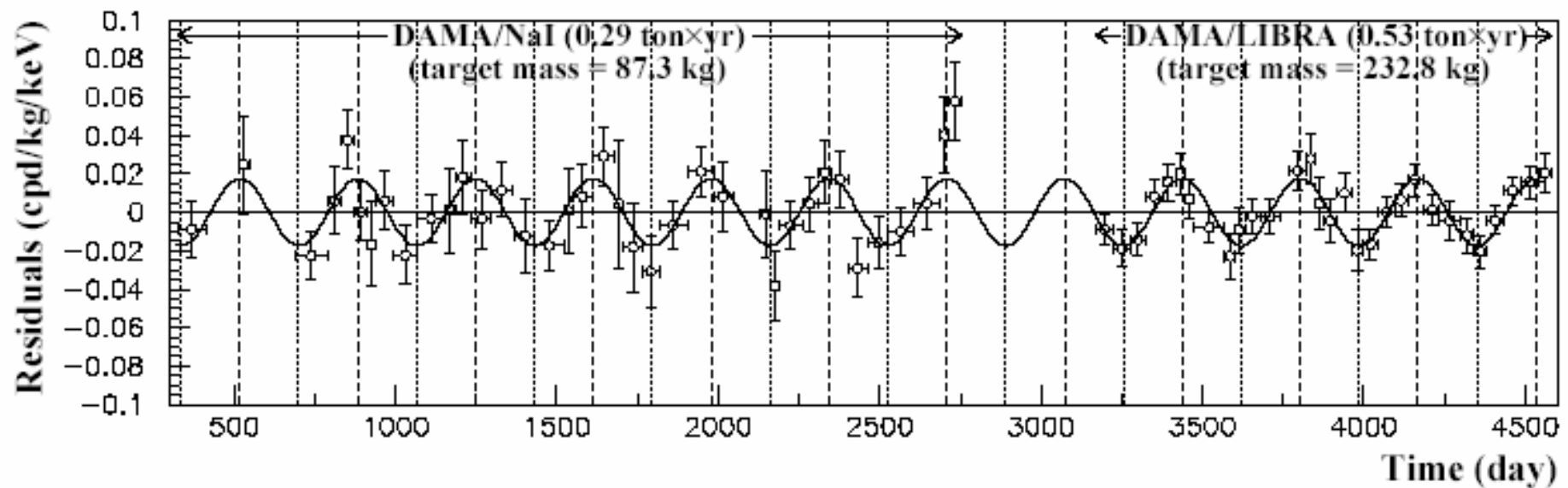
Moto del sistema solare
rispetto alle particelle
dell'alone oscuro

Variazione annuale del segnale



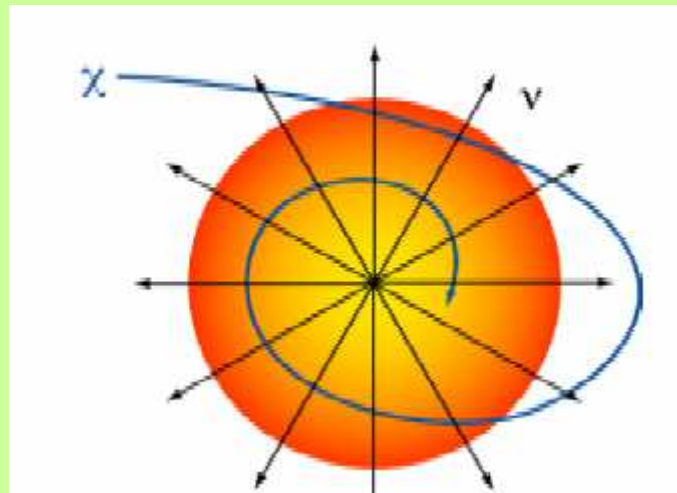
Esperimento DAMA presso il Laboratorio Nazionale del Gran Sasso dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

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



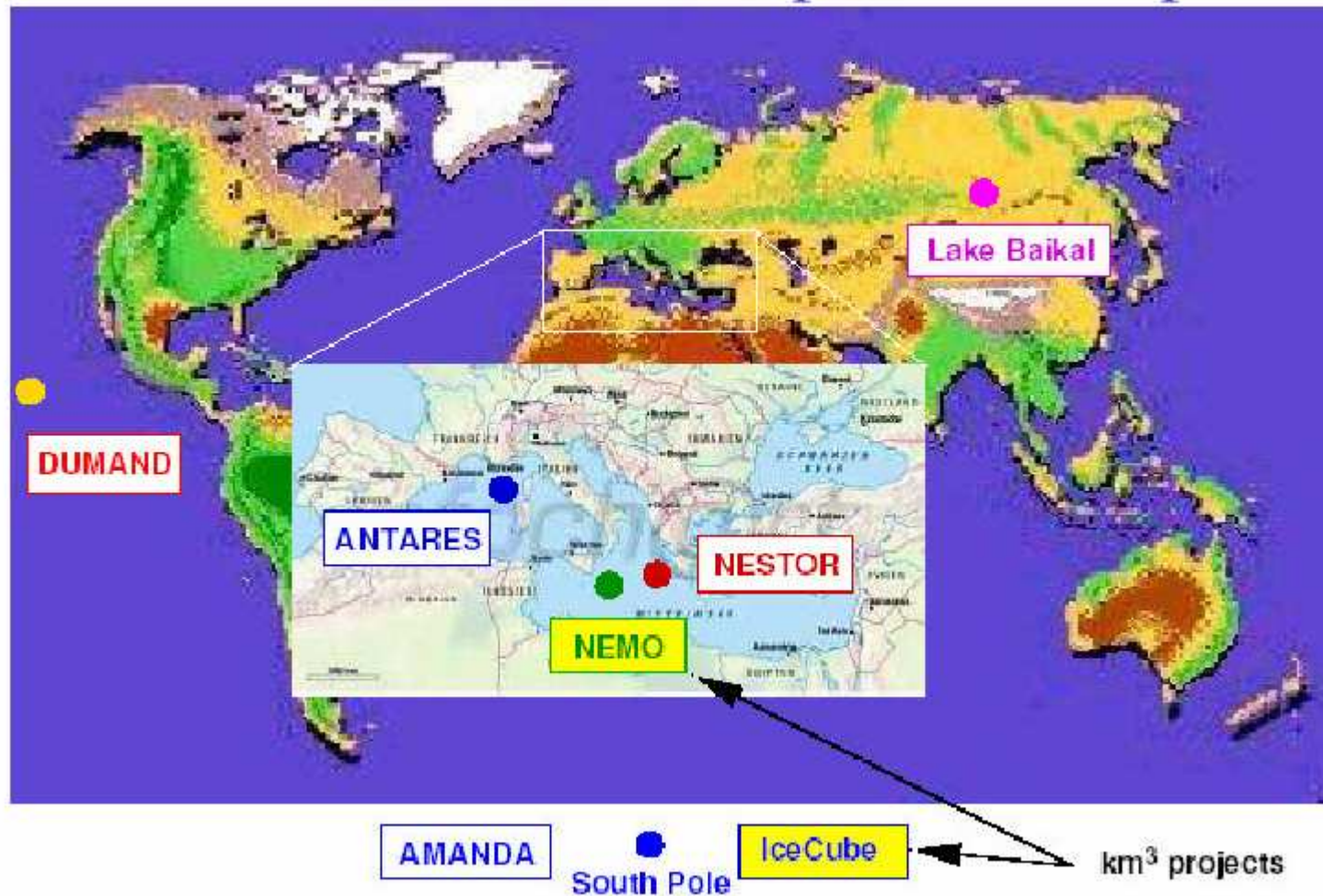
I WIMP possono venire catturati dalla Terra o dal Sole ...

... e quindi accumularsi nel loro centro

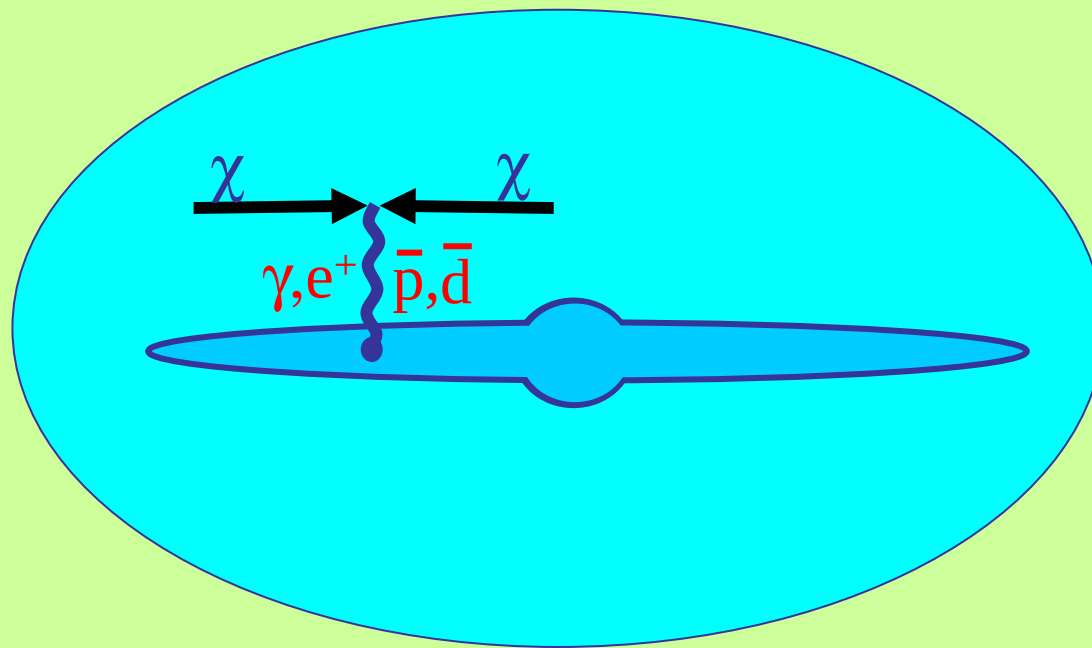


vengono prodotti dei neutrini

The Neutrino Telescope world map

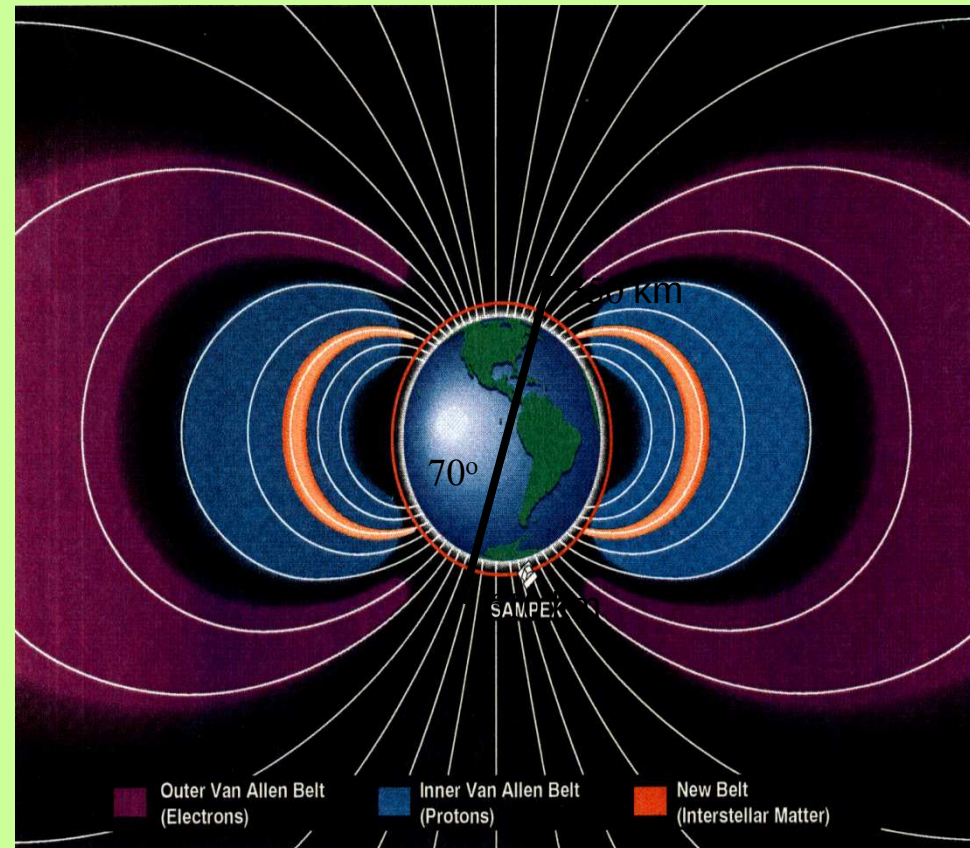
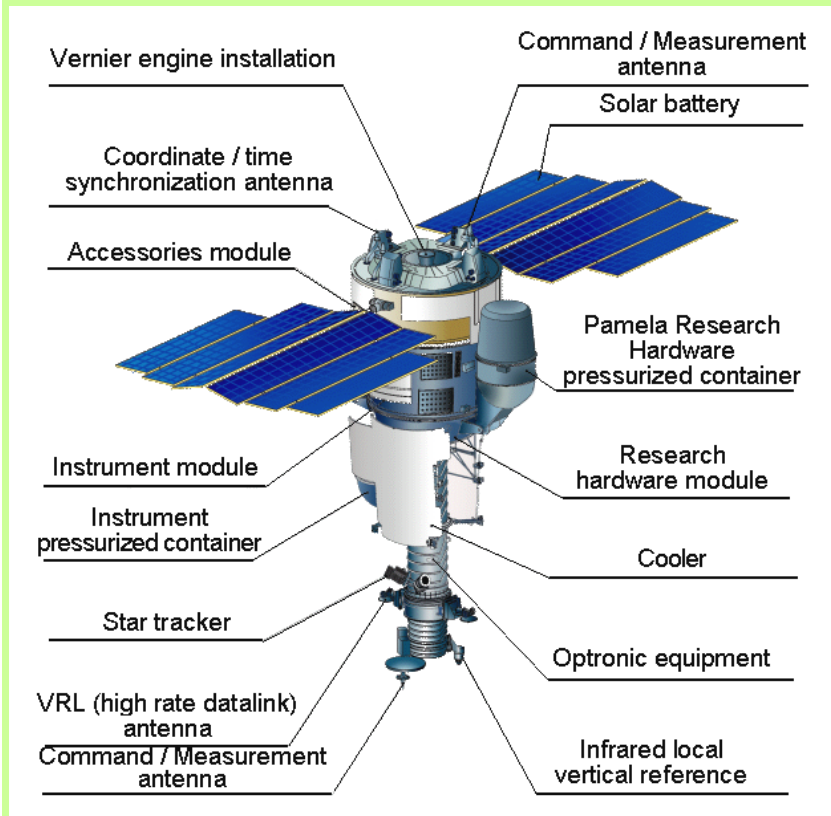


Misure indirette di WIMP

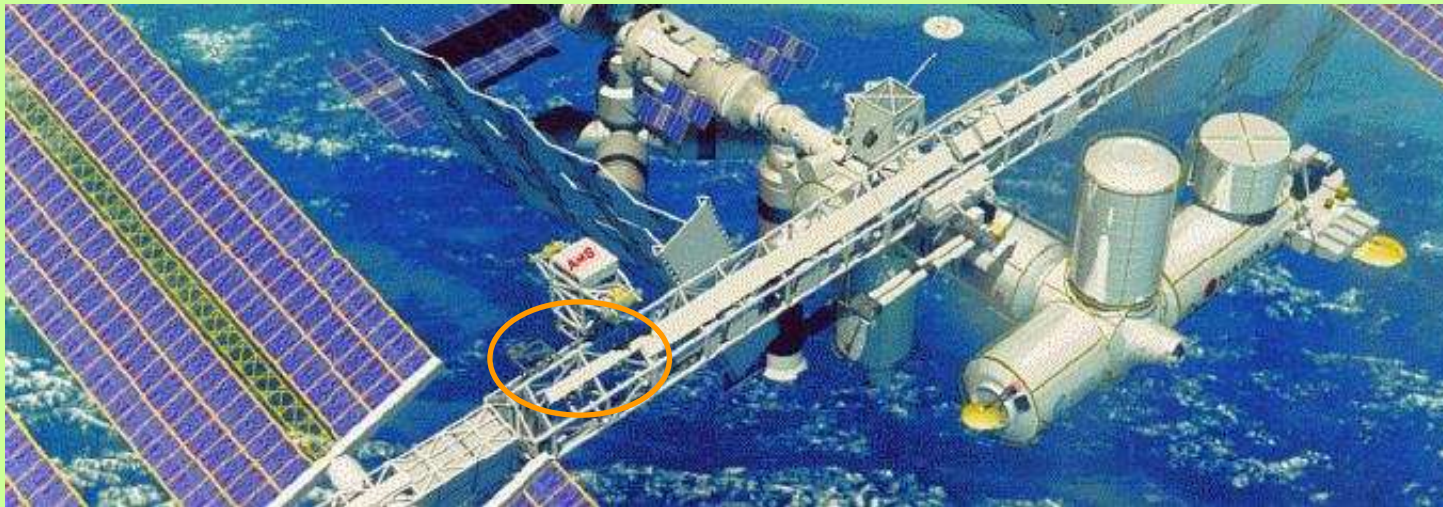


Produzione di particelle rare nei raggi cosmici

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

Quarta tappa

Qual e' la natura delle particelle
oscuire ?

Modello Standard delle particelle

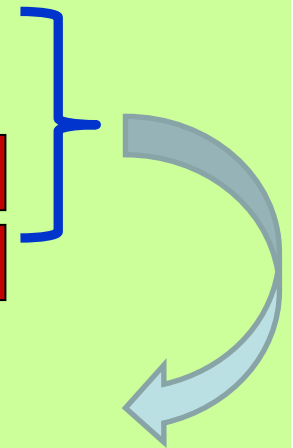
Spin	Particelle del MS
1/2	Leptons (e, ν_e , ...) Quarks (u, d, ...)
1	Gluons $W^\pm$ Z^0 Photon (γ)
0	Higgs
2	Graviton

Modello Standard delle particelle e sua estensione supersimmetrica

Spin	Particelle del MS	Superparticelle	Spin
1/2	Leptons ($e, \nu_e, \dots$) Quarks ($u, d, \dots$)	Sleptons ($\tilde{e}, \tilde{\nu}_e, \dots$) Squarks ($\tilde{u}, \tilde{d}, \dots$)	0
1	Gluons $W^\pm$ Z^0 Photon (γ)	Gluinos Wino Zino Photino ($\tilde{\gamma}$)	1/2
0	Higgs	Higgsino	1/2
2	Graviton	Gravitino	3/2

Modello Standard delle particelle e sua estensione supersimmetrica

Spin	Particelle del MS	Superparticelle	Spin
1/2	Leptons ($e, \nu_e, \dots$) Quarks ($u, d, \dots$)	Sleptons ($\tilde{e}, \tilde{\nu}_e, \dots$) Squarks ($\tilde{u}, \tilde{d}, \dots$)	0
1	Gluons $W^\pm$ Z^0 Photon (γ)	Gluinos Wino Zino Photino ($\tilde{\gamma}$)	1/2
0	Higgs	Higgsino	1/2
2	Graviton	Gravitino	3/2



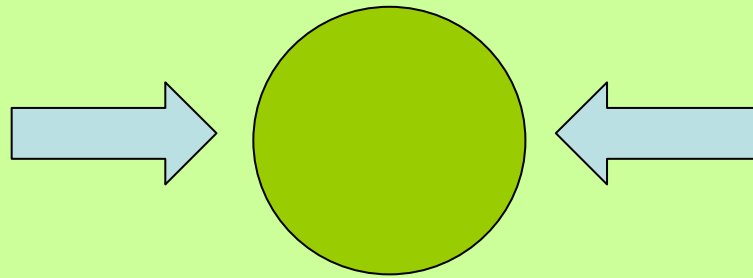
Neutralino: particella supersimmetrica piu' leggera

produzione di una nuova particella in laboratorio



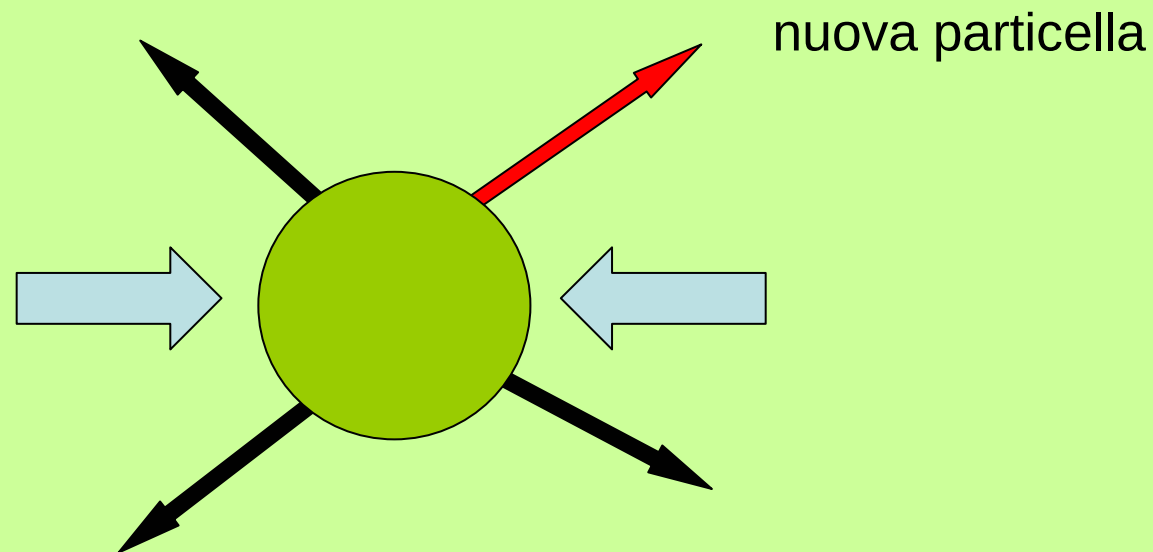
due particelle note vengono fatte collidere

produzione di una nuova particella in laboratorio



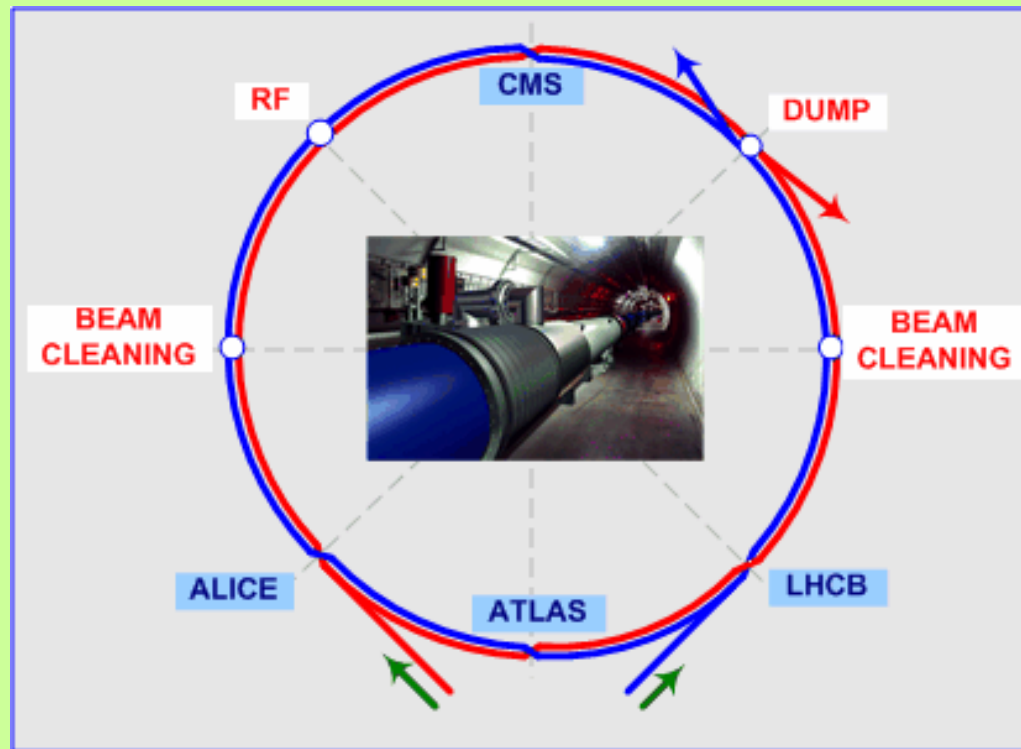
due particelle note vengono fatte collidere

produzione di una nuova particella in laboratorio



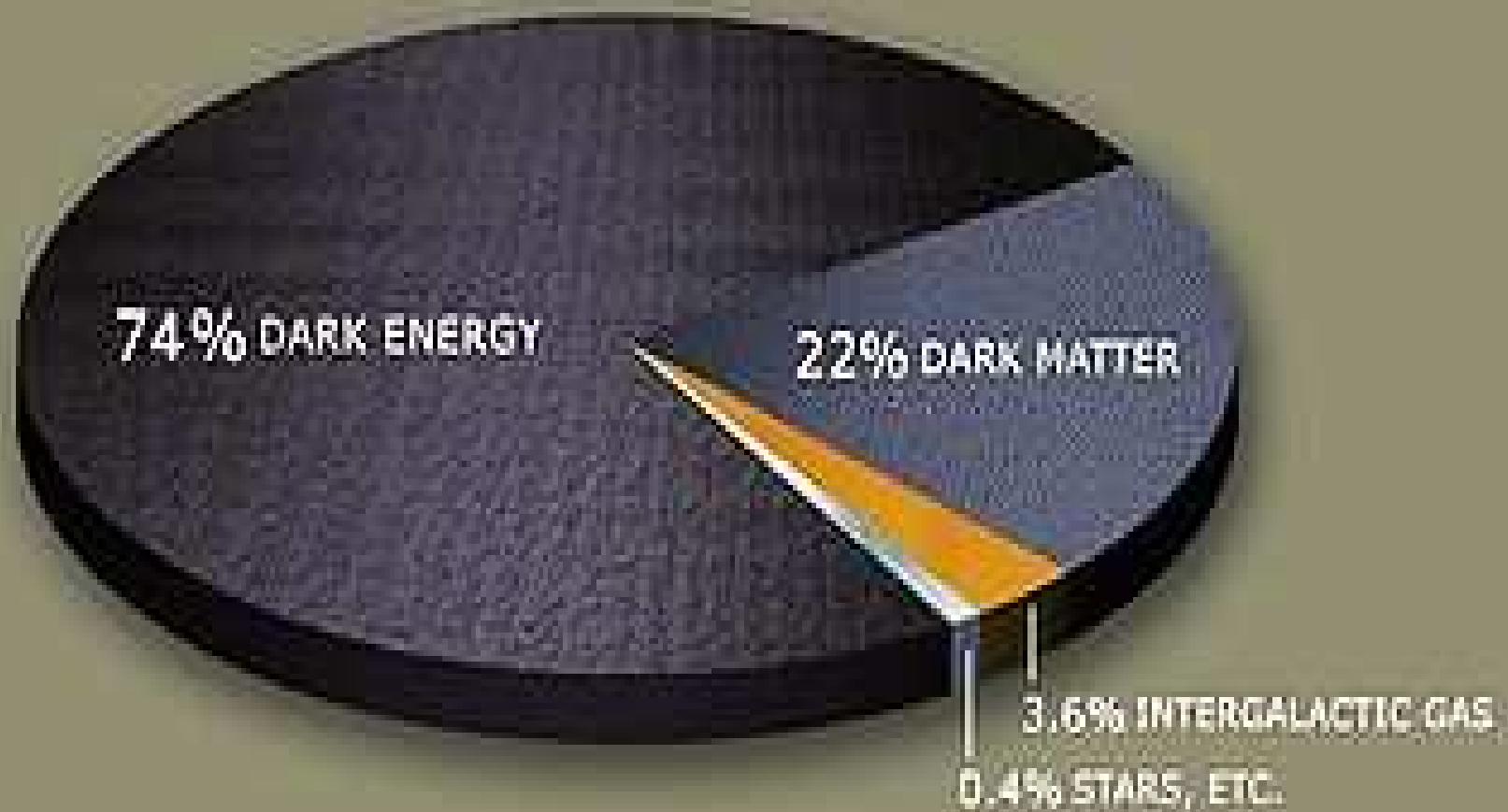
due particelle note vengono fatte collidere

Large Hadron Collider (CERN)



- ★ circonferenza di 27 km - tunnel sotterraneo a 50 - 175 metri di profondità
- ★ 2 fasci di protoni circolanti in verso opposto per provocare collisioni
- ★ ogni protone ha un'energia 7.000 volte più grande della propria energia di riposo

Materia - Energia nell'Universo



Conclusione

Spero di non essere stato
troppo oscuro !