

Simmetrie e Misteri: dall'antimateria alla materia oscura

Guido Martinelli



ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI

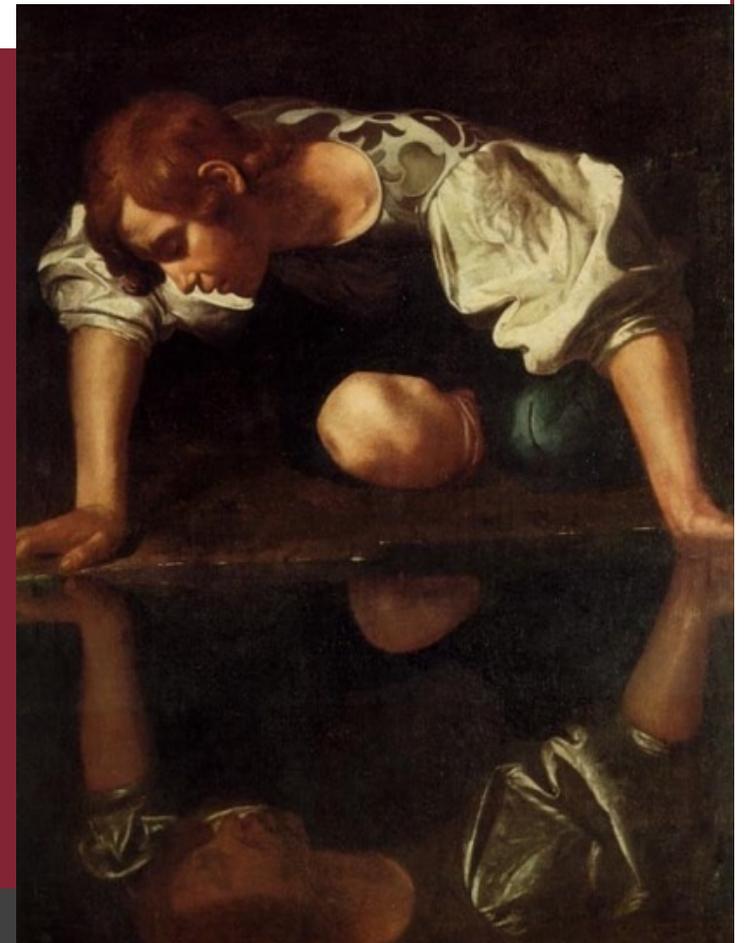


SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Roma 10/02/2022



Narciso di Caravaggio



SIMMETRIA: dal greco συμμετρία



con (συν)

misura (μετρον)

Ordinata distribuzione delle parti di un oggetto di un edificio, di una struttura, di un'opera d'arte, ecc.,... simmetria del corpo umano, di un insetto, armonia, equilibrio fra le varie parti, associata all'**idea estetica di bellezza**

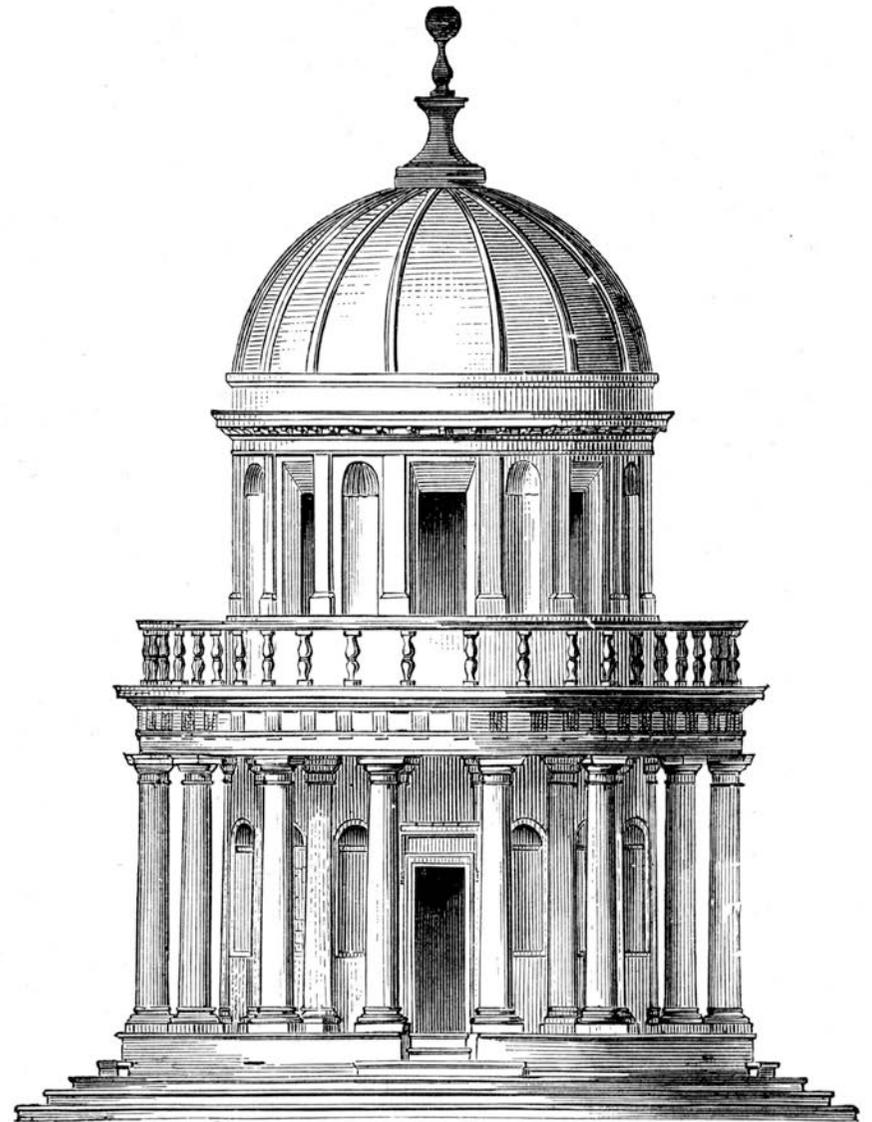
SIMMETRIA E BELLEZZA



IN CERCA DELLA BELLEZZA

(interludio da Tony Zee)

Einstein non prestava alcun interesse alle equazioni che gli sembravano brutte e non capiva come qualcun altro potesse perdersi del tempo. Era convinto che la bellezza fosse il principio ispiratore della Fisica Teorica. Preoccupiamoci anzitutto della bellezza, che la verità si farà strada da sola...



ASIMMETRIA E BELLEZZA

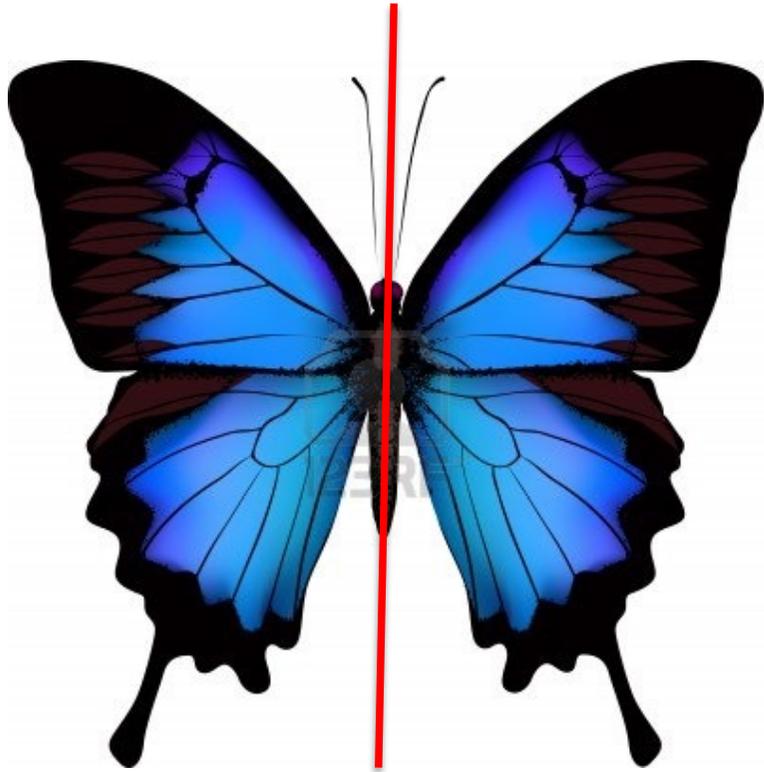
Cattedrale di Chartres

Costruita a partire dal
1194

La torre con la guglia più
semplice è gotica
l'altra, *Clocher Neuf*,
conclusa nel 1513 è una
costruzione più tarda



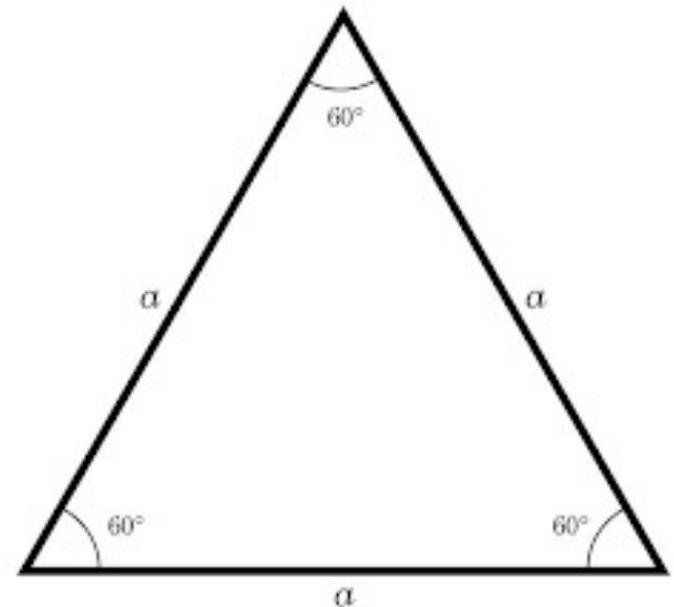
SIMMETRIE DISCRETE



2 sole possibilità: scambio sinistra

3 possibilità: 0, 120 e 240 gradi;

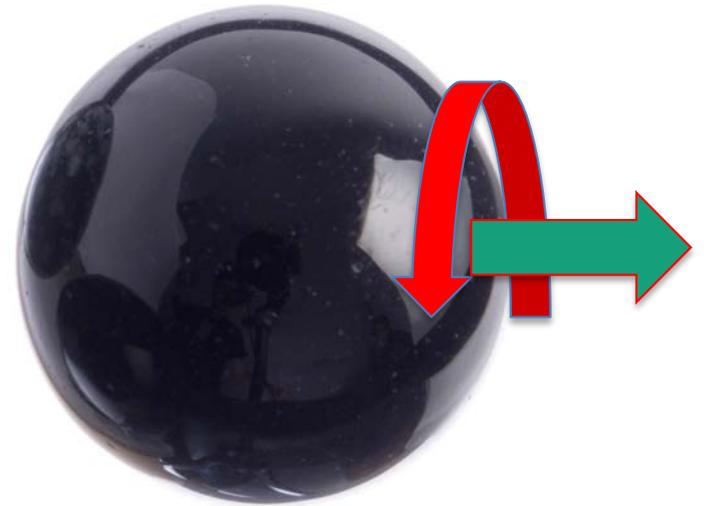
Il quadrato 4 possibilità ecc.



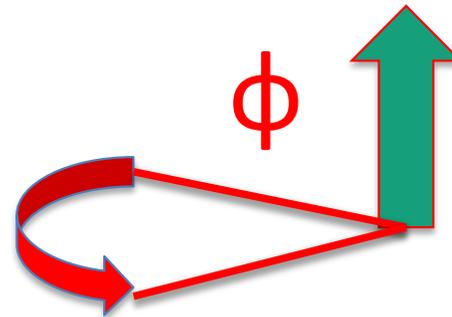


Simmetria cilindrica
(rotazione intorno a
l'asse del cilindro)

Simmetria sferica
(rotazione intorno a
un asse qualunque)



Simmetrie continue
(ecco perché il plurale)



Il Teorema di Amelie Emmy

Noether:

Ad ogni simmetria continua
corrisponde una quantità
conservata, ovvero che non
cambia nel tempo



SPAZIALE

Quantità di moto

ROTAZIONE

Momento Angolare

TEMPORALE

Energia

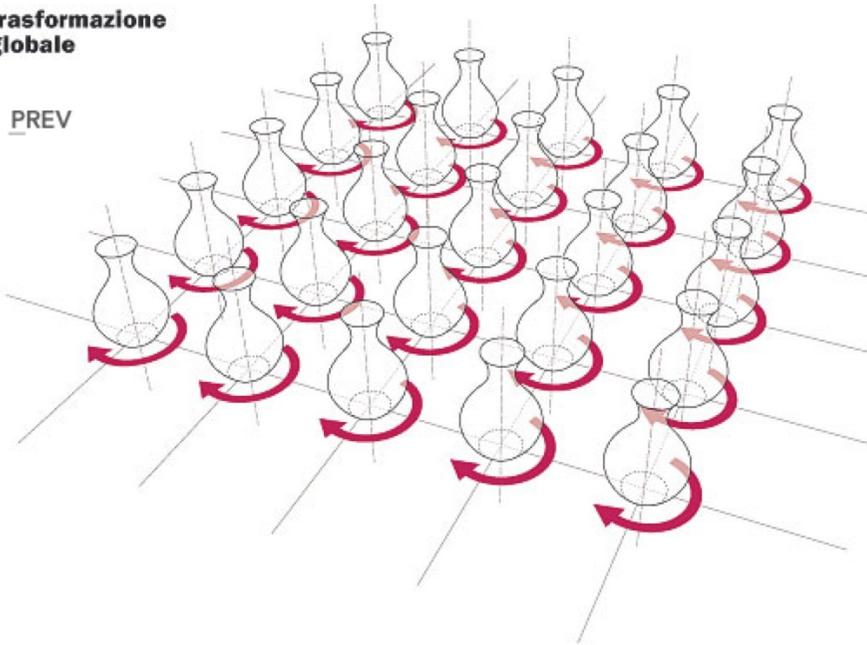
L' energia totale dell' Universo è
conservata !!

SIMMETRIA GLOBALE O LOCALE (GAUGE)

queste simmetrie sono associate a gruppi di trasformazioni dei sistemi fisici [$U(1)$, $SU(3)$, Lorentz,...] non necessariamente associate allo spazio-tempo

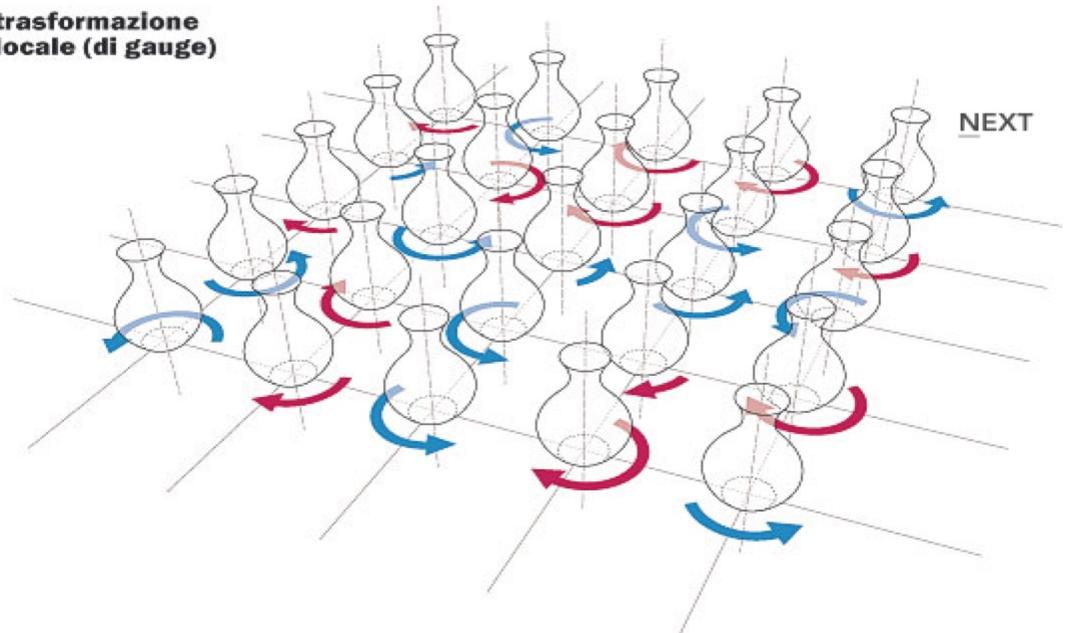
trasformazione globale

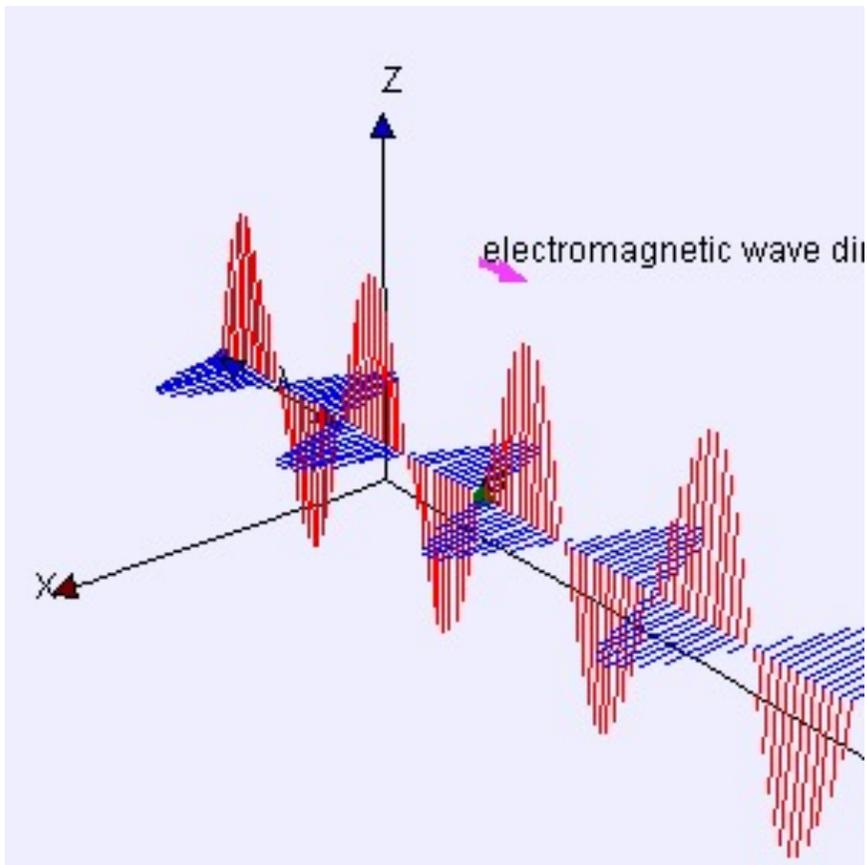
PREV



trasformazione locale (di gauge)

NEXT





U(1) La simmetria più semplice
Le onde elettromagnetiche sono rappresentate come quanti, i **fotoni**, particelle di **massa nulla**, che viaggiano alla velocità della luce e portano energia e quantità di moto, $E=pc$.

La quantità conservata è la **carica elettrica**. Dunque la carica elettrica totale dell'universo è la stessa che all'epoca del **BIG BANG !!**



FORZE E SIMMETRIE

Quanto discusso nel caso elettromagnetico è vero per tutte le simmetrie locali: tutte le forze della natura originano da simmetrie locali nelle equazioni che descrivono i sistemi fisici. A queste simmetrie corrispondono delle cariche conservate.

carica elettrica e

$U(1)$



Forze elettromagnetiche

carica debole g_w e e

$SU(2) \otimes U(1)$



Forze elettromagnetiche e deboli

carica forte g_s

$SU(3)_{\text{colore}}$



Interazioni forti

Forze gravitazionali = Invarianza per riparametrizzazione delle coordinate spazio-temporali

Interazioni e Bosoni Vettoriali

le simmetrie implicano l'esistenza di bosoni vettoriali intermedi, i messaggeri che trasmettono l'interazione

$$U(1) \rightarrow \gamma(\text{fotone})$$

$$SU(2) \otimes U(1) \rightarrow \gamma, W^+, W^-, Z^0$$

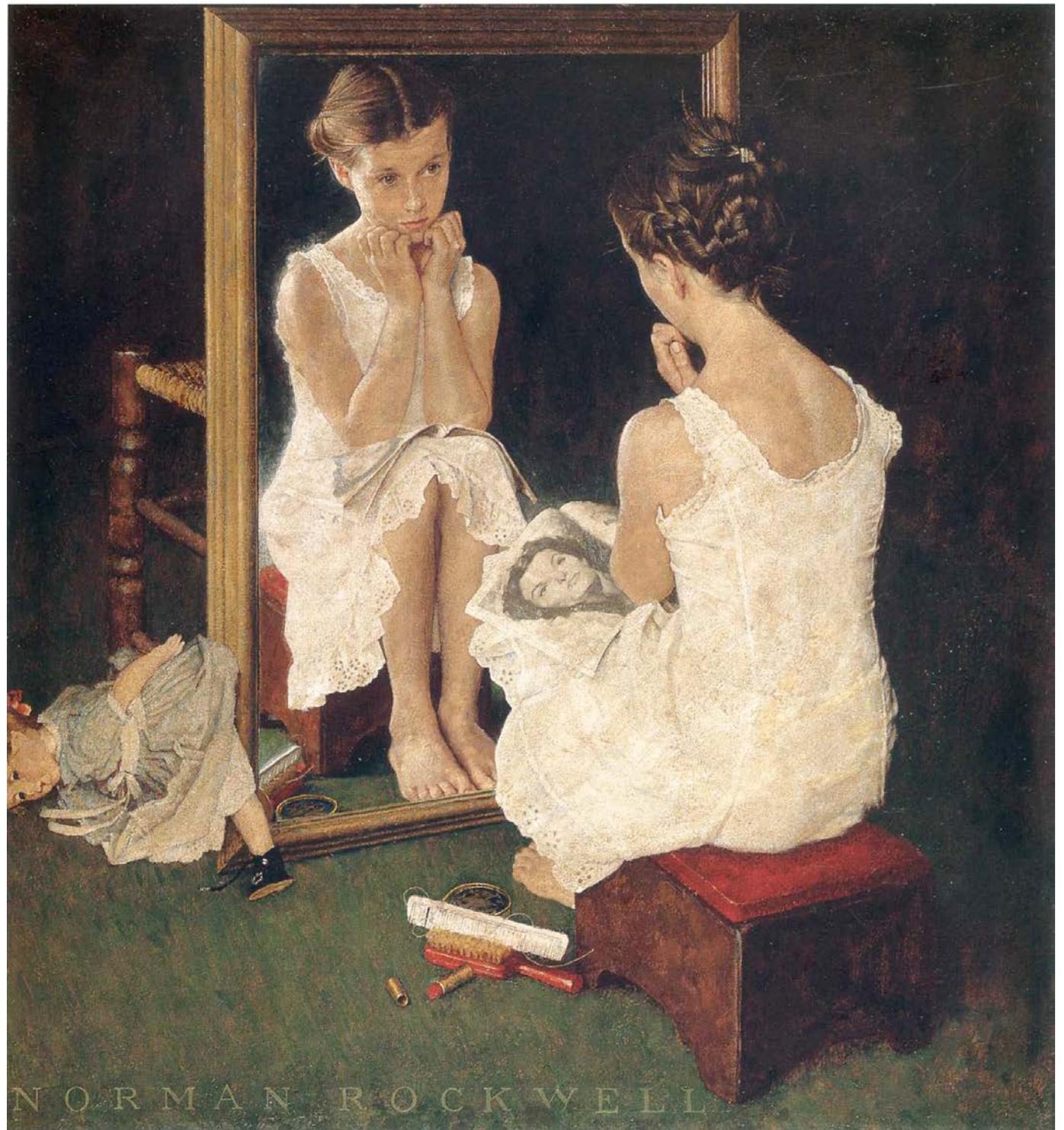
$$SU(3)_{\text{colore}} \rightarrow g^1, g^2, \dots, g^8$$

$$(h_{\mu\nu} \equiv \text{gravitone})$$

SIMMETRIE DISCRETE

PARITÀ: P
simmetria
per
riflessione

Norman Rockwell



SIMMETRIE DISCRETE

CONIUGAZIONE

DI CARICA: **C**

simmetria per lo

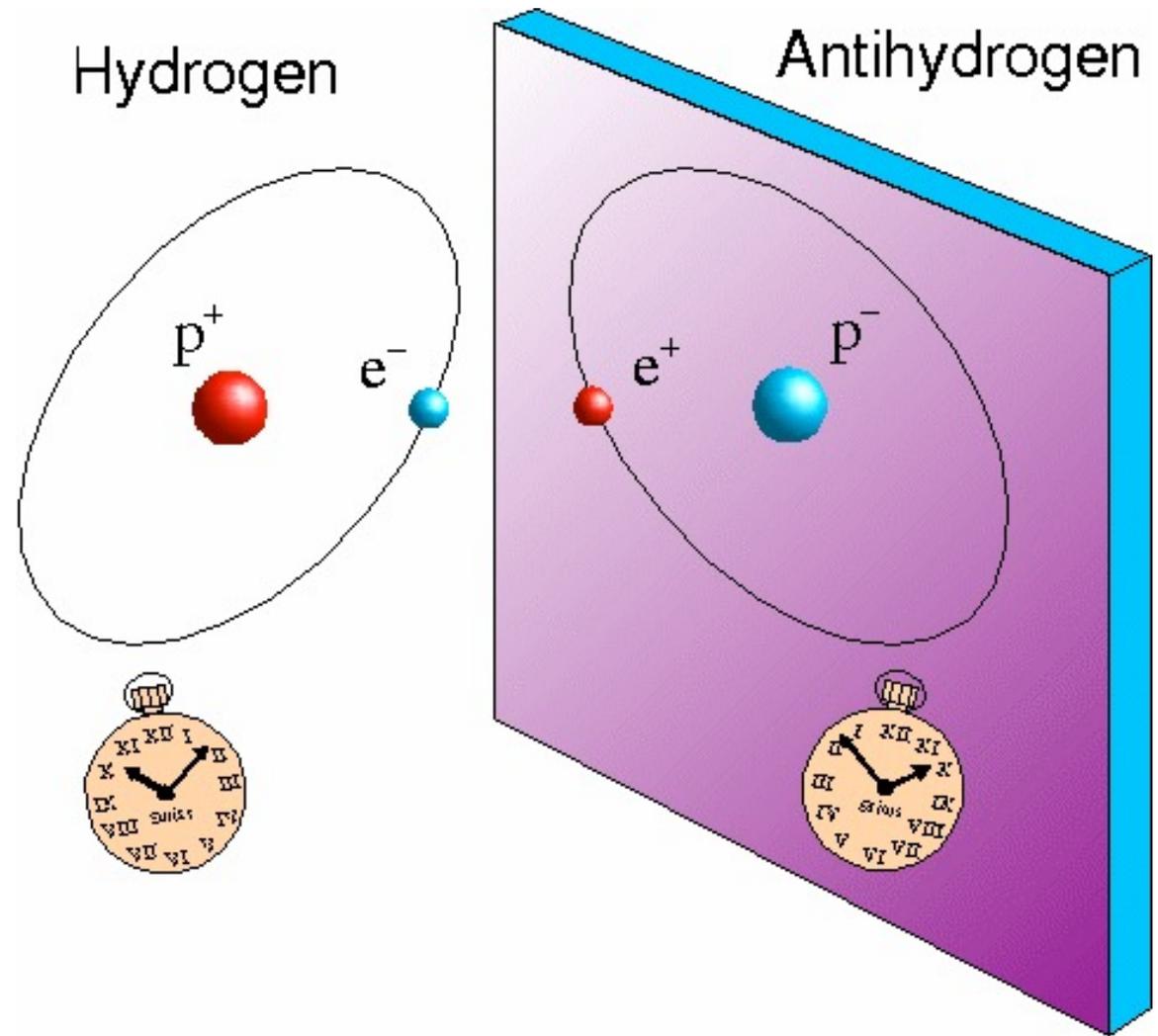
scambio di

particelle e

antiparticelle

(MATERIA E

ANTIMATERIA)



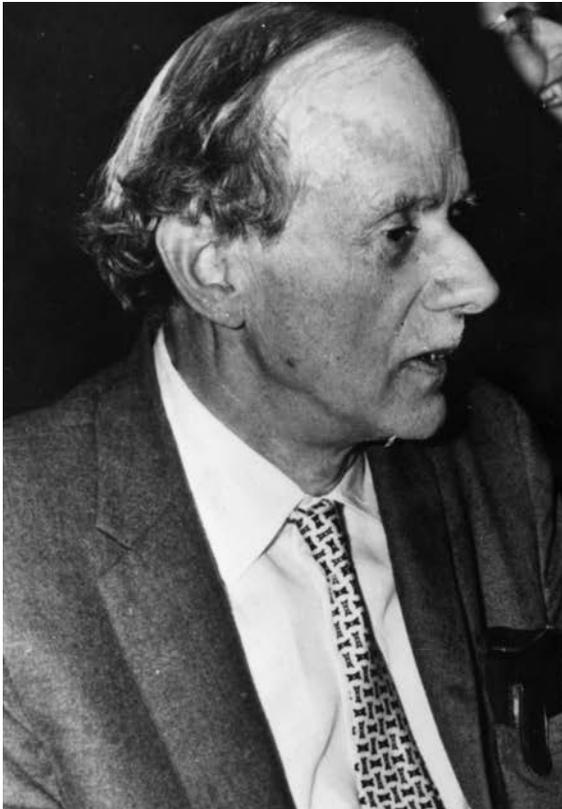
STESSA MASSA E MOMENTO
ANGOLARE INTRINSECO – SPIN –
MA CARICA ELETTRICA OPPOSTA

MATERIA-ANTIMATERIA E LA CONIUGAZIONE DI CARICA

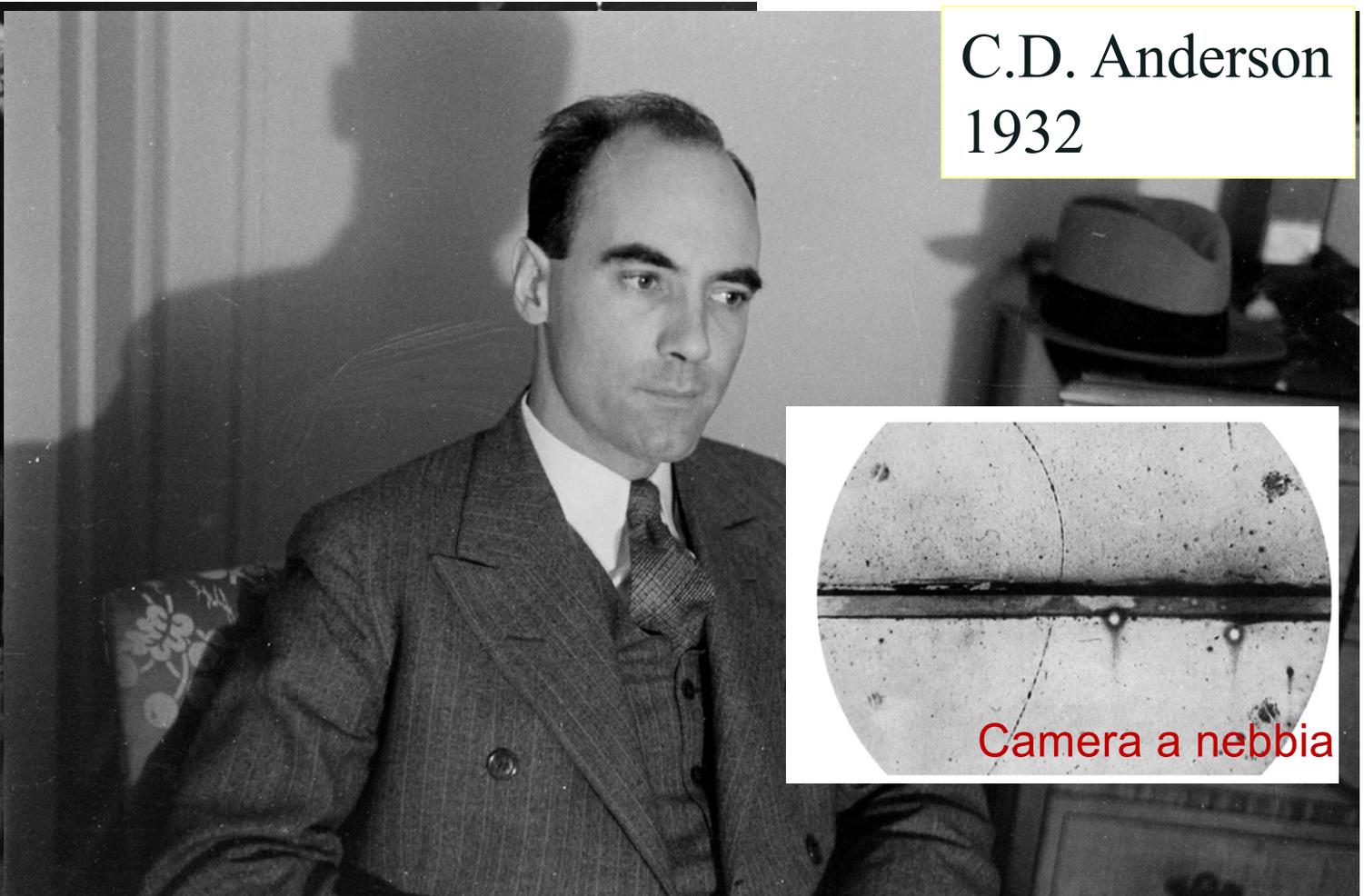
$$(\not{\partial} + m) \psi = 0$$

L'ESISTENZA DELL' ANTIMATERIA È UNA CONSEGUENZA INEVITABILE DELLA MECCANICA QUANTISTICA E DELLA RELATIVITÀ SPECIALE

MATERIA E ANTIMATERIA HANNO PROPRIETÀ SPECULARI (MASSA, CARICA ELETTRICA (INTERAZIONI), SPIN

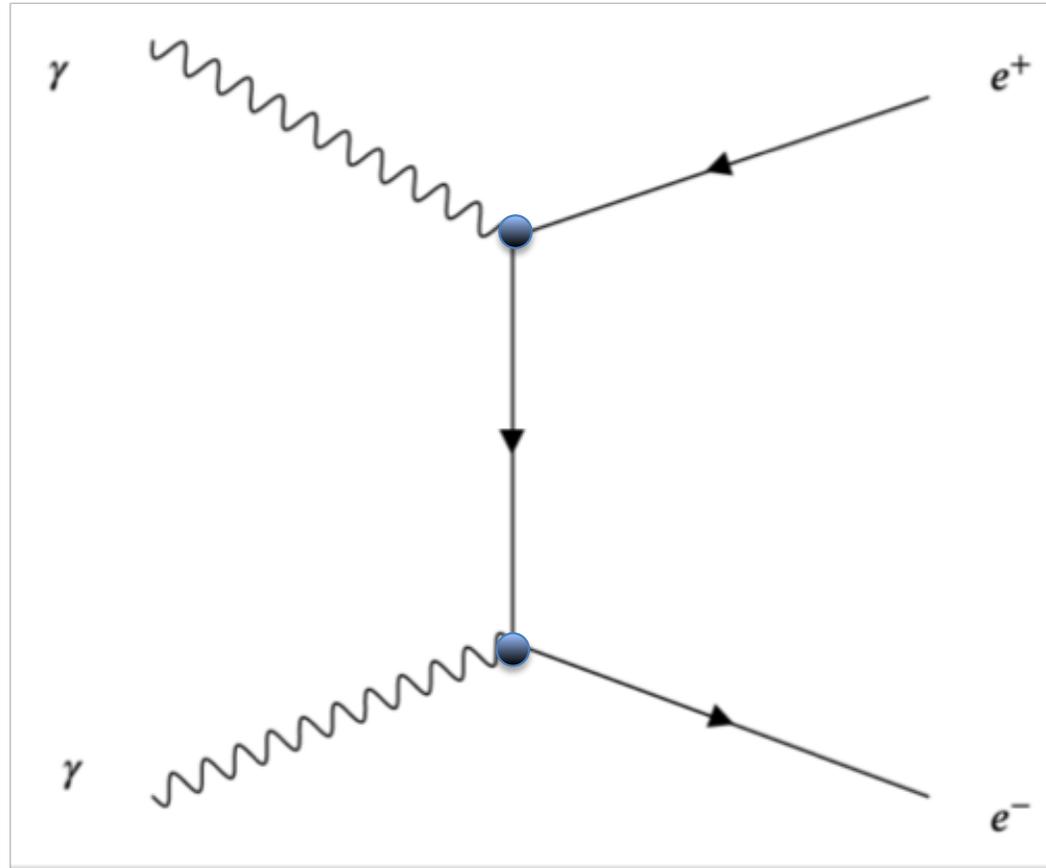


P.A.M. Dirac
1928



C.D. Anderson
1932

Camera a nebbia



Tutta l'antimateria prodotta al CERN nell'arco di 10 anni e` probabilmente dell'ordine di un miliardesimo di grammo !

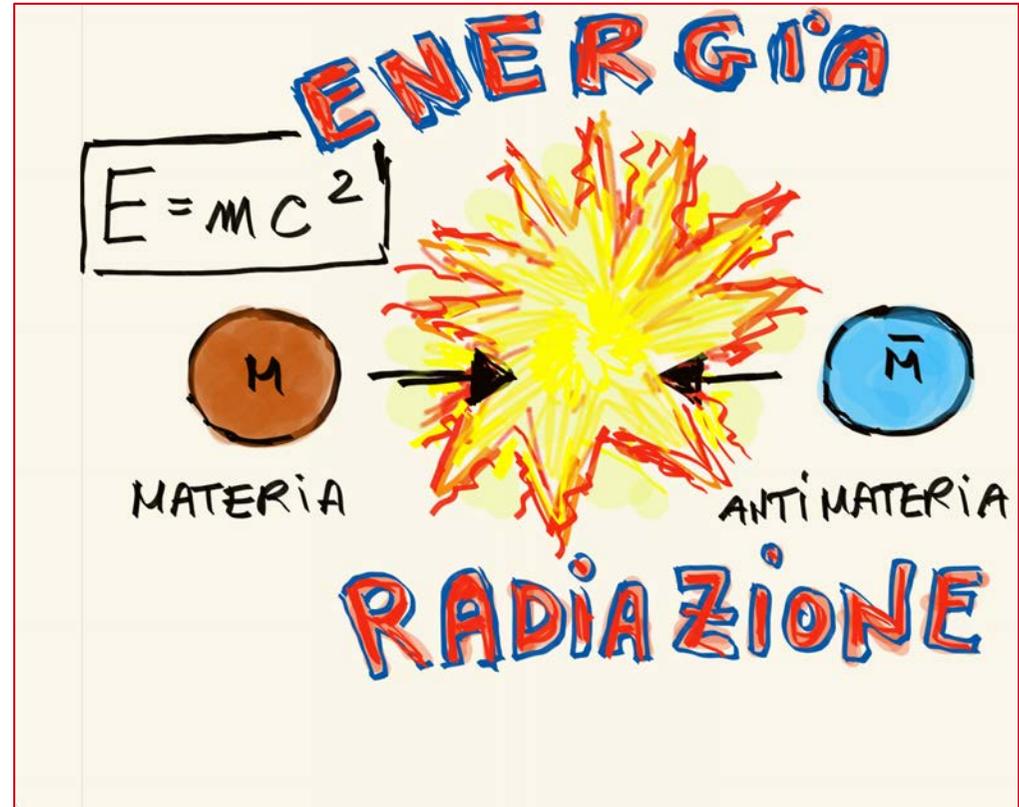
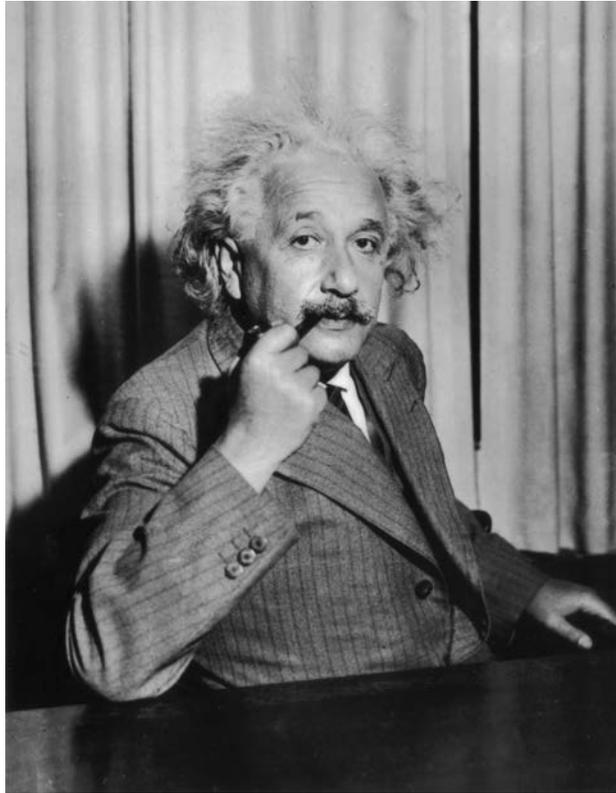
Il secondo passo di Amstrong sulla luna mostra che l'antimateria è trascurabile su scala planetaria

L'ANTIMATERIA DAI
RAGGI COSMICI
CIRCA $1/10^5$
RISPETTO
ALLA MATERIA



NASA 69-HC-684

MATERIA E ANTIMATERIA



L'energia sprigionata è enorme!
da 3.3 Kg di materia e 3.3 Kg di
antimateria si ricaverebbe l'energia totale
consumata da tutta l'Italia in circa un
mese corrispondente a circa
14 ML tonnellate di petrolio

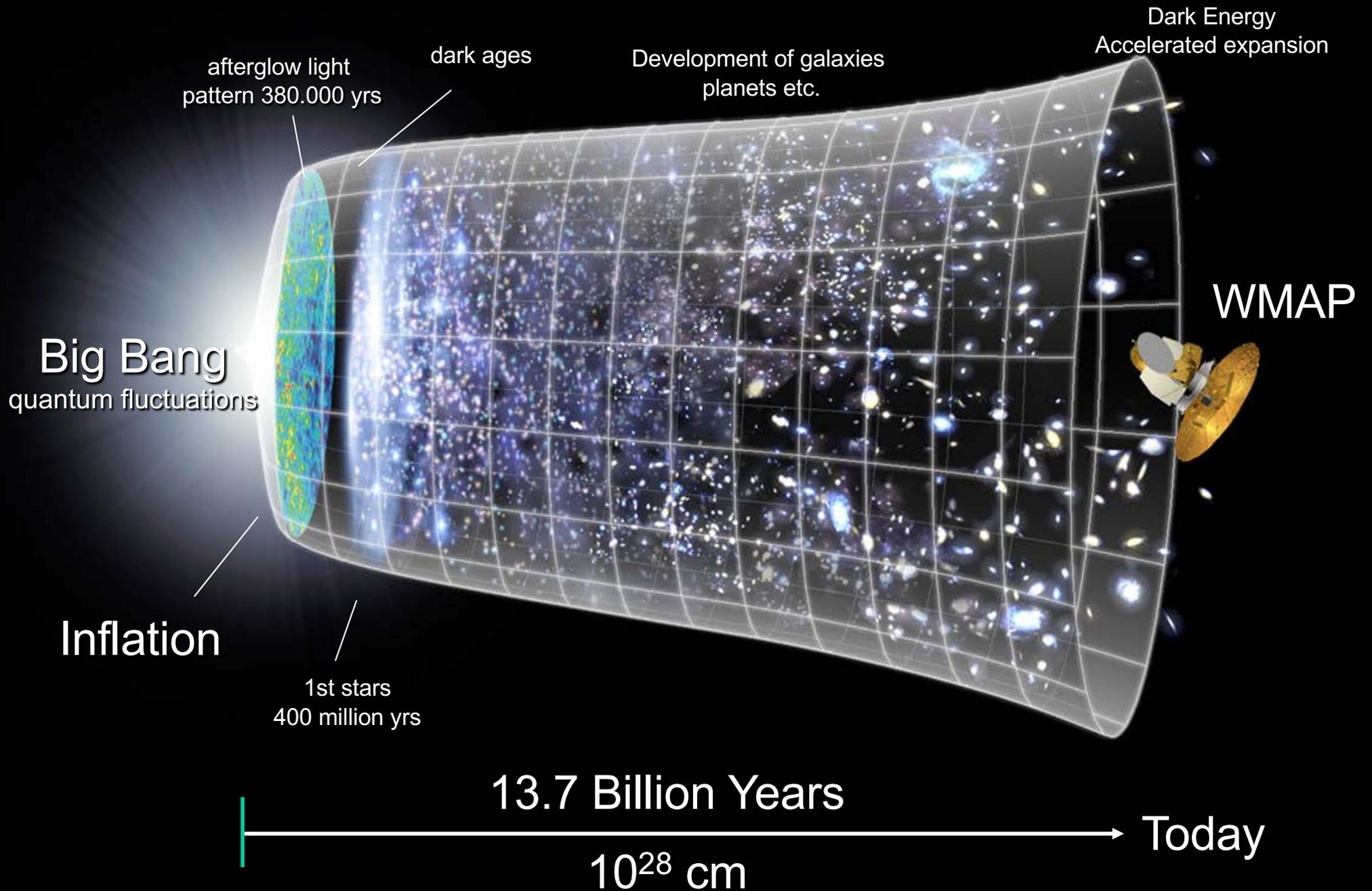
L'ASSENZA DI ESPLOSIONI
VISIBILI NELL'UNIVERSO ESCLUDE
LA PRESENZA DI ANTIMATERIA
FINO A DISTANZE DI O(20
MEGAPARSECS)
(ONE PARSEC ~ 3.26 LIGHT YEARS

$$\beta = \frac{N_B - N_{\bar{B}}}{N_\gamma} = 6 \times 10^{-10}$$
$$N_\gamma = 412 / \text{cm}^3$$



QUANDO e PERCHÈ
L'ANTIMATERIA DELL'UNIVERSO
E SCOMPARSA ??

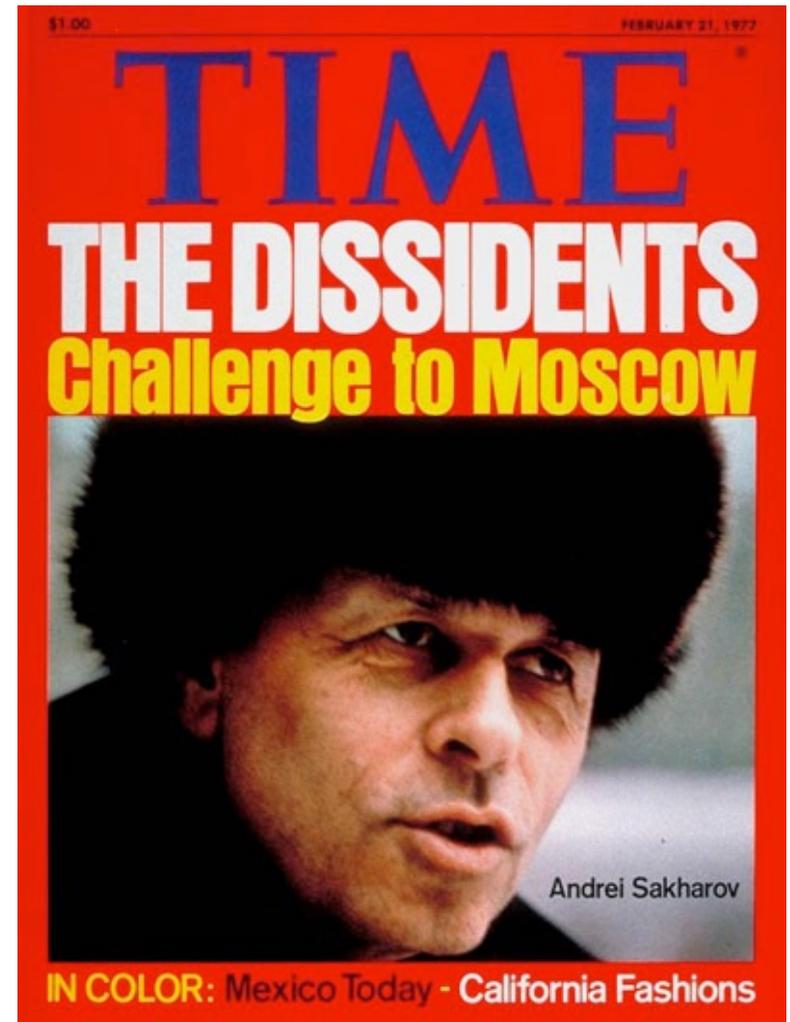
Ingredienti Principali: L'Evoluzione dell'Universo



In 1967 **Andrei Sakharov** definì le quattro condizioni necessarie perché l'universo potesse evolvere da una palla di fuoco iniziale al presente stato asimmetrico tra materia e antimateria

- i) Violazione del numero barionico
- ii) Violazione della simmetria di carica **C**
- iii) Violazione di **CP**
- iv) Disequilibrio termico dell'universo

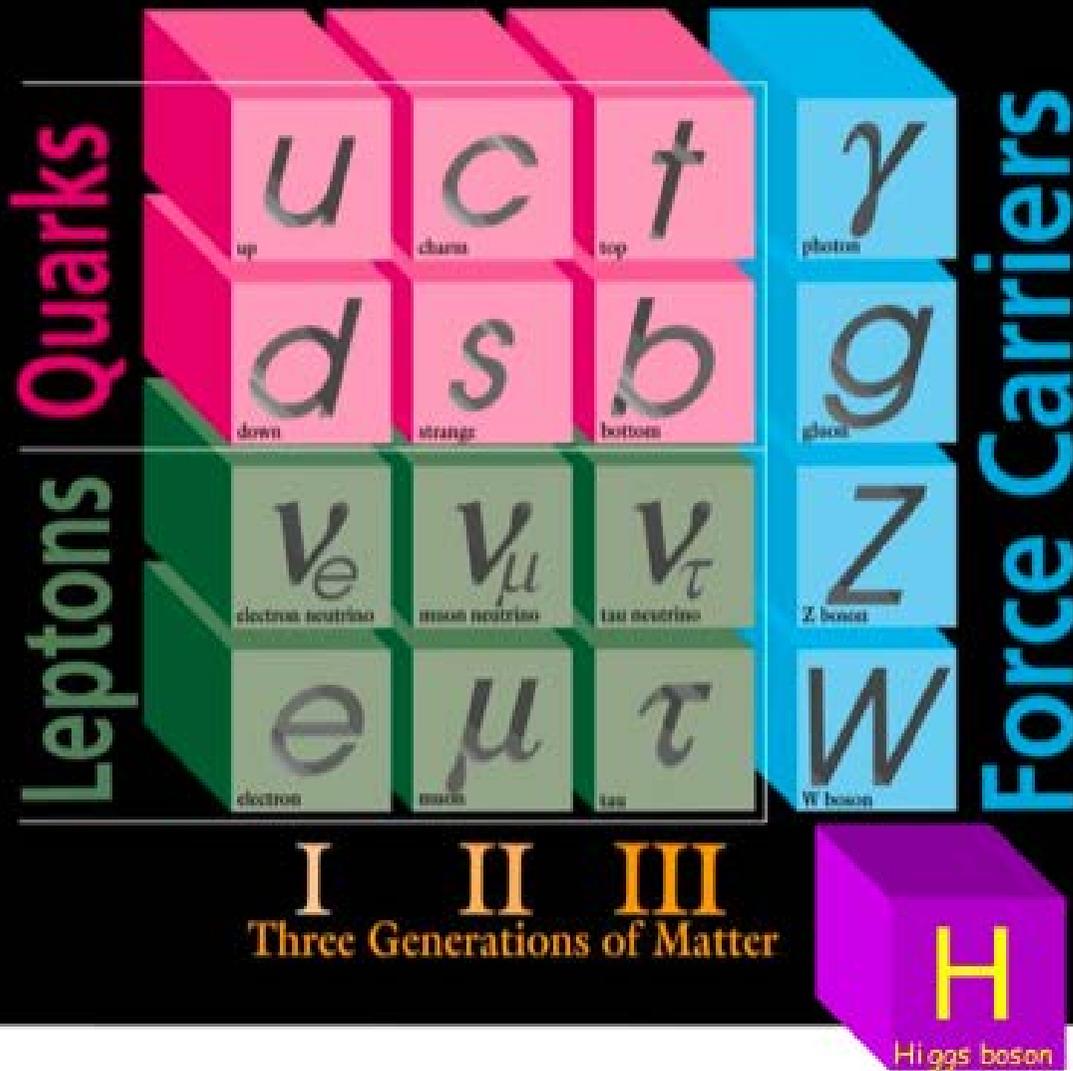
La violazione di CP scoperta nel 1964 tuttavia non è sufficiente a spiegare quantitativamente l'asimmetria osservata in natura.



Mosca, 1921 –1989 fisico sovietico, famoso per il contributo alla messa a punto della bomba all'idrogeno e successivamente per la sua attività in favore dei diritti civili che gli valse il premio Nobel per la pace.

La violazione di CP si studia con la fisica del Sapore
Particelle elementari (anti-particelle) e forze

The Standard Model



e

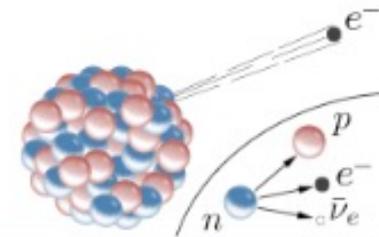
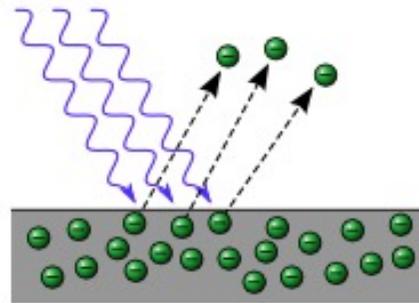
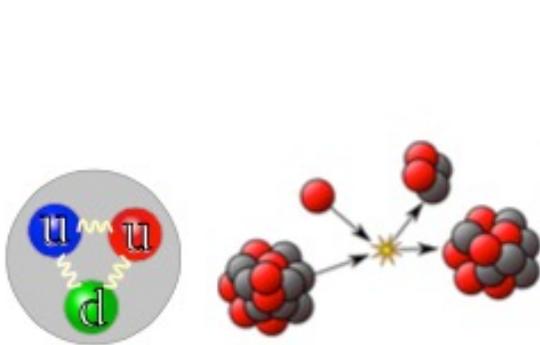
la gravità ?

Il Modello Standard delle Interazioni Fondamentali

forti

elettromagnetiche

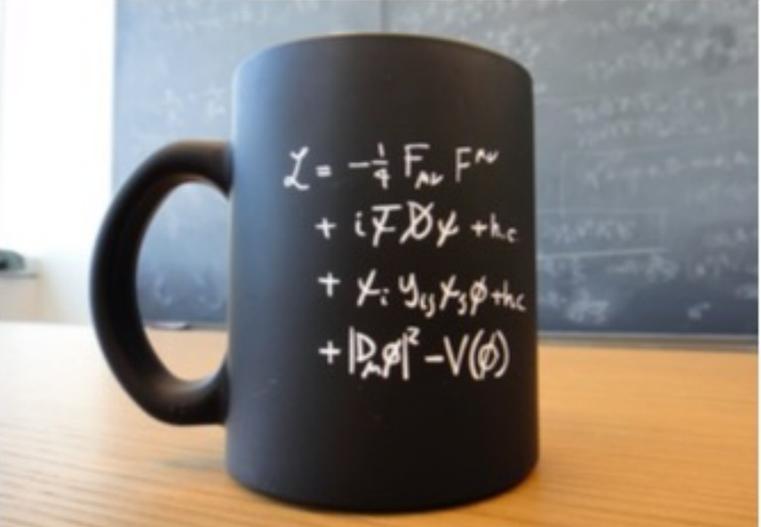
deboli



CP invariante

$$L_{SM} = -\frac{1}{4} \sum_G F_{\mu\nu}^G F_{\mu\nu}^G + i \sum_{f,G} \bar{\psi}_f \gamma_\mu D_\mu^G \psi_f + \sum_f y_f \bar{\psi}_f \Phi \psi_f + |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)$$

fermioni = $u, d, s, c, b, t - e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
 bosoni di gauge = g, W^\pm, Z, γ
 bosone di Higgs = Φ



has many accidental symmetries

CP e la rottura della simmetria elettrodebole sono strettamente correlati

Assenza di FCNC - transizioni tra quark con la stessa carica elettrica - a livello albero (& soppressione GIM @loop)

Sostanzialmente nessuna violazione di CP al livello albero

La fisica del sapore è estremamente sensibile alla nuova fisica

perché i decadimenti rari?

I decadimenti rari sono manifestazioni di simmetrie (accidentali) rotte ovvero di fisica oltre il Modello Standard

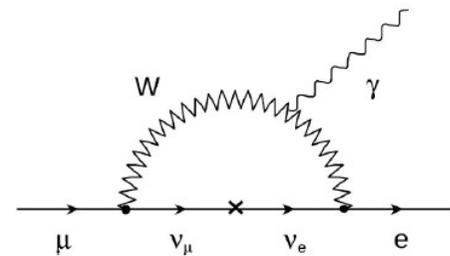
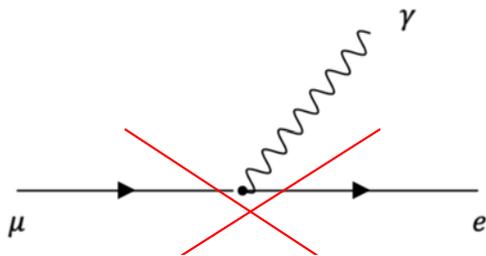
Proton decay

baryon and lepton number conservation

$$\mu \rightarrow e + \gamma$$

lepton flavor number

$$\nu_i \rightarrow \nu_k \text{ found !}$$



$$\mathcal{B}(\mu \rightarrow e\gamma) \sim \alpha \frac{m_\nu^4}{m_W^4} \sim 10^{-52}$$

RARE DECAYS WHICH ARE ALLOWED IN THE STANDARD MODEL

FCNC:

$$q_i \rightarrow q_k + \nu \bar{\nu}$$

$$q_i \rightarrow q_k + l^+ l^-$$

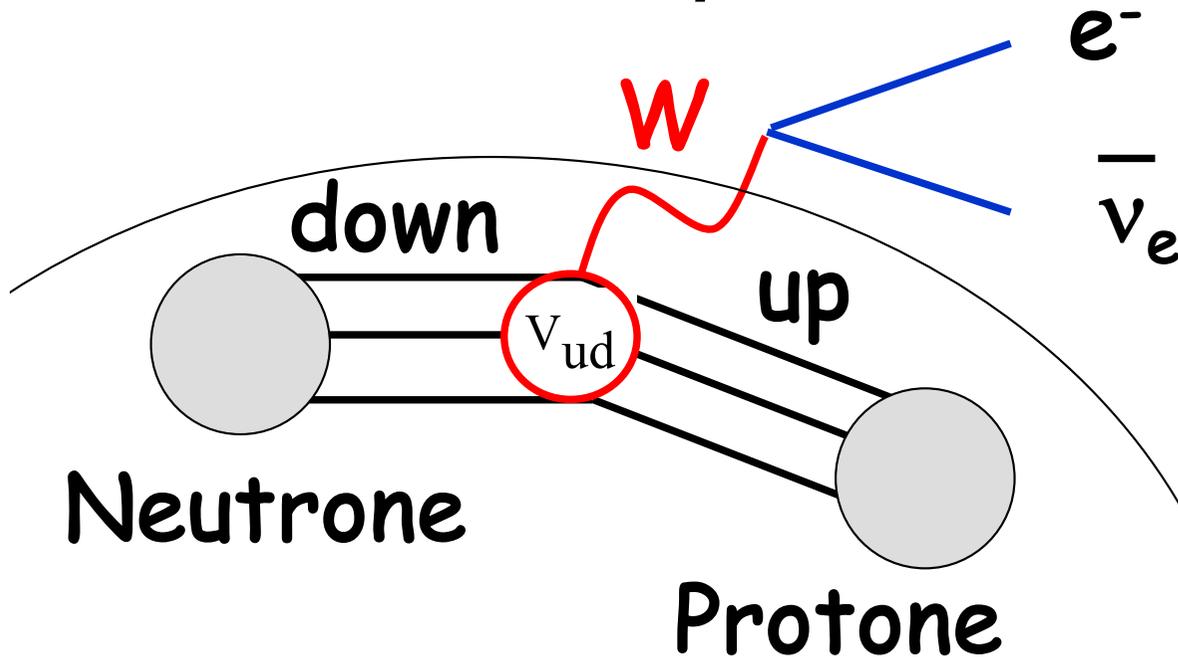
$$q_i \rightarrow q_k + \gamma$$

these decays occur only via loops because of GIM and are suppressed by CKM

**THUS THEY ARE SENSITIVE TO
NEW PHYSICS**

Violazione di CP nel Modello Standard

Decadimenti β



$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



Interazioni Deboli

La Matrice di CKM nel Modello Standard

3 angoli + 1 fase KM

La fase genera degli accoppiamenti complessi che inducono la violazione di CP

6 masse + 3 angoli + 1 fase = 10 parametri

V_{ud}	V_{us}	V_{ub}
V_{cd}	V_{cs}	V_{cb}
V_{td}	V_{ts}	V_{tb}

$$= \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{13}} & c_{23}c_{13} \end{bmatrix}$$

The Wolfenstein Parametrization

$1 - 1/2 \lambda^2$	λ	$A \lambda^3(\rho - i \eta)$
$-\lambda$	$1 - 1/2 \lambda^2$	$A \lambda^2$
$A \lambda^3 \times$ $(1 - \rho - i \eta)$	$-A \lambda^2$	1

V_{ub}

$+ O(\lambda^4)$

V_{td}

$$\lambda \sim 0.2 \quad A \sim 0.8$$

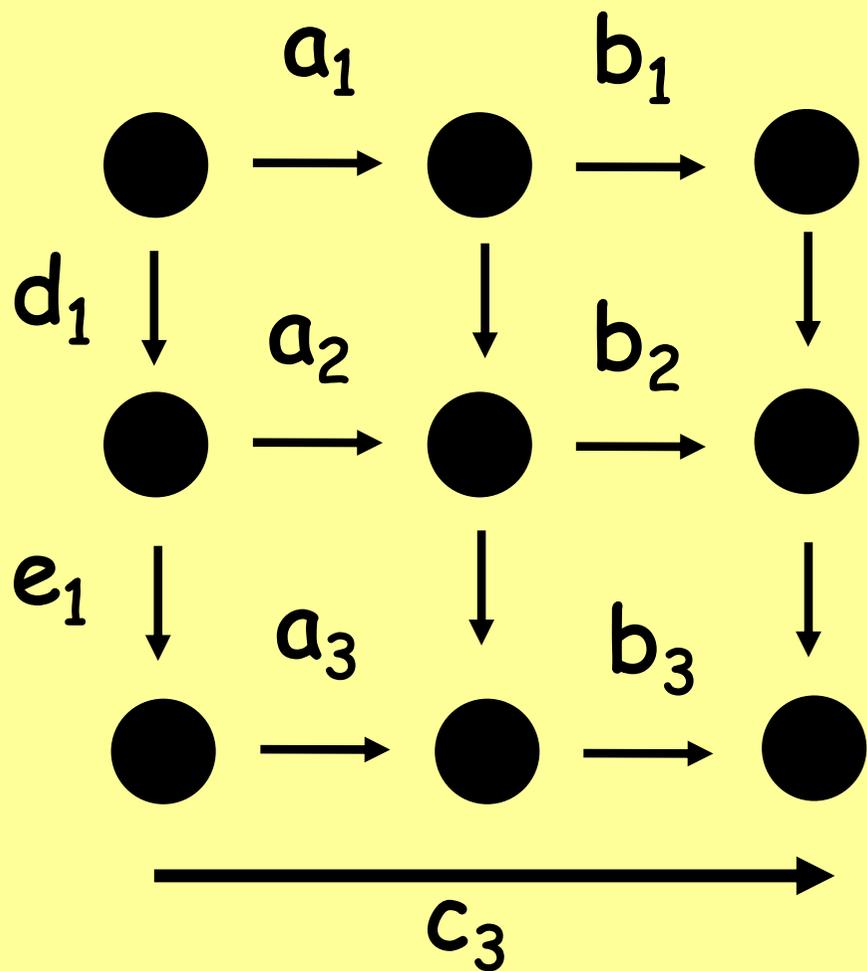
$$\eta \sim 0.2 \quad \rho \sim 0.3$$

$$\sin \theta_{12} = \lambda$$

$$\sin \theta_{23} = A \lambda^2$$

$$\sin \theta_{13} = A \lambda^3(\rho - i \eta)$$

The Bjorken-Jarlskog Unitarity Triangle



$|V_{ij}|$ is invariant under phase rotations

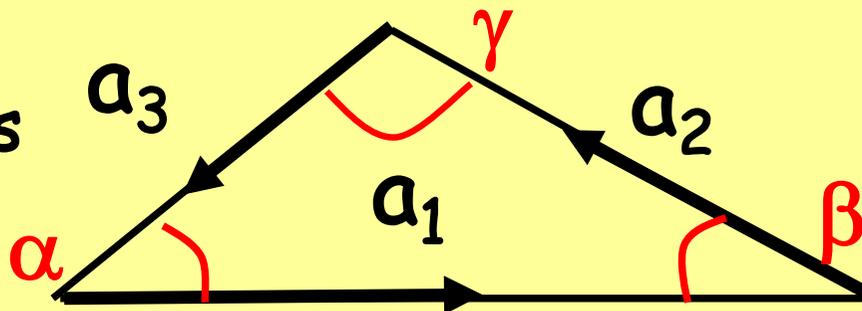
$$a_1 = V_{11} V_{12}^* = V_{ud} V_{us}^*$$

$$a_2 = V_{21} V_{22}^* \quad a_3 = V_{31} V_{32}^*$$

$$a_1 + a_2 + a_3 = 0$$

($b_1 + b_2 + b_3 = 0$ etc.)

Only the orientation depends on the phase convention



STRONG CP VIOLATION

$$\mathcal{L}_\theta = \theta \tilde{G}^{\mu\nu a} G_{\mu\nu}^a \quad \tilde{G}_{\mu\nu}^a = \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} G_{\rho\sigma}^a$$

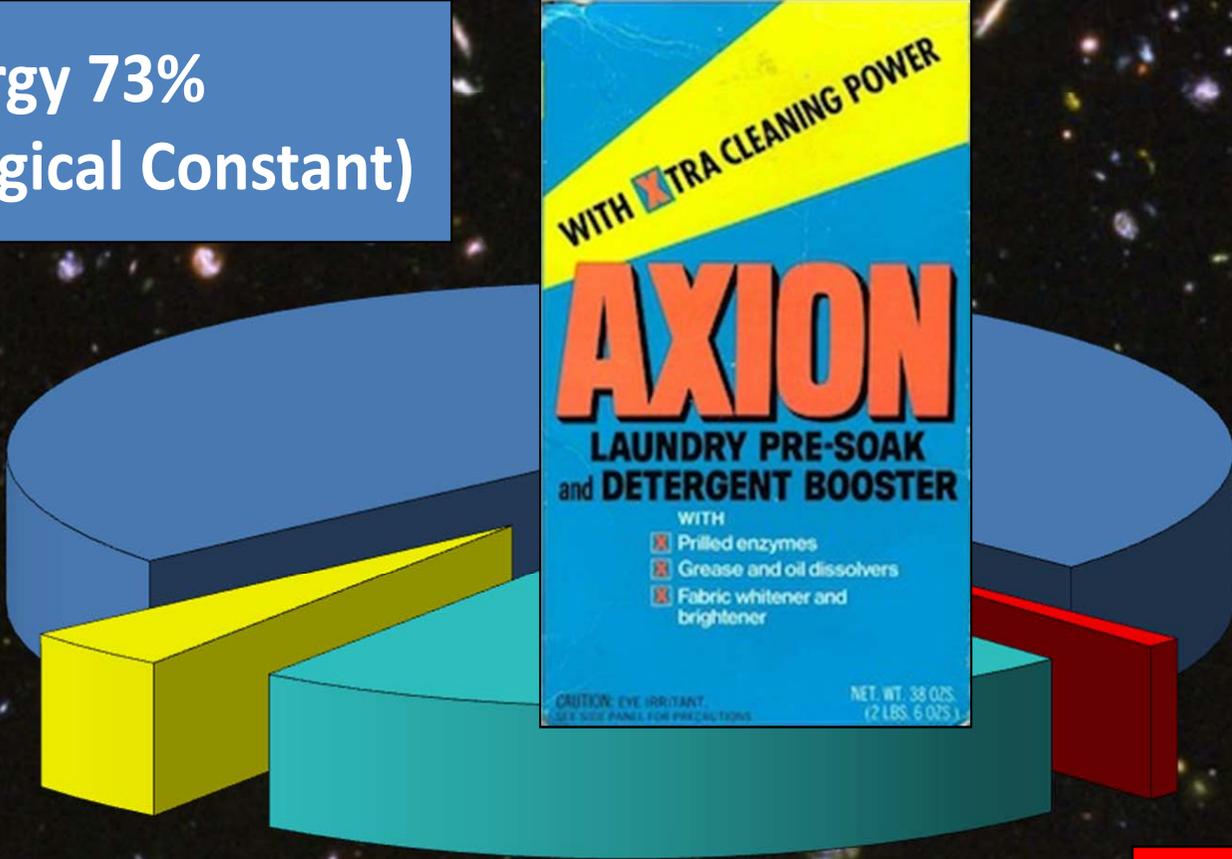
$$\mathcal{L}_\theta \sim \theta \vec{E}^a \cdot \vec{B}^a$$

This term violates CP and gives a contribution to the electric dipole moment of the neutron

$$e_n < 3 \cdot 10^{-26} \text{ e cm}$$

$$\theta < 10^{-10} \quad \text{which is quite unnatural !!}$$

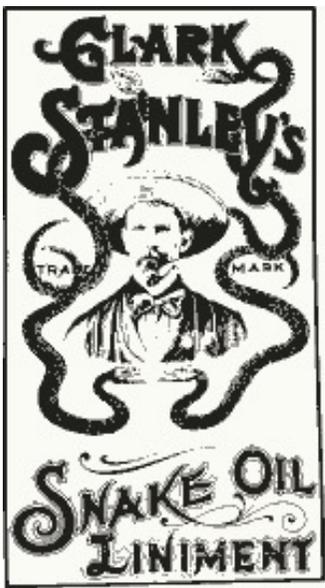
Dark Energy 73%
(Cosmological Constant)



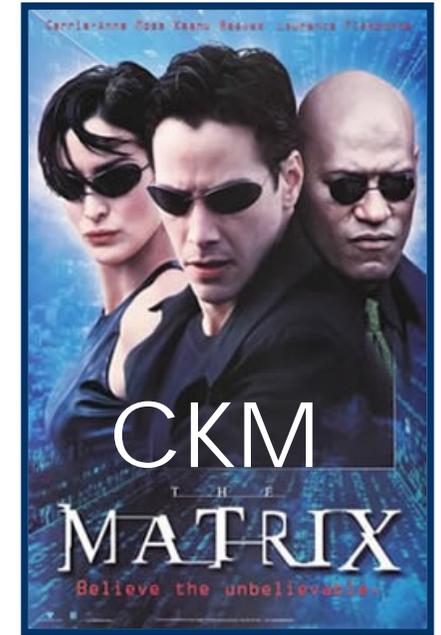
Ordinary Matter 4%
(of this only about 10% luminous)

Dark Matter 23%

Neutrinos 0.1–2%



www.utfit.org



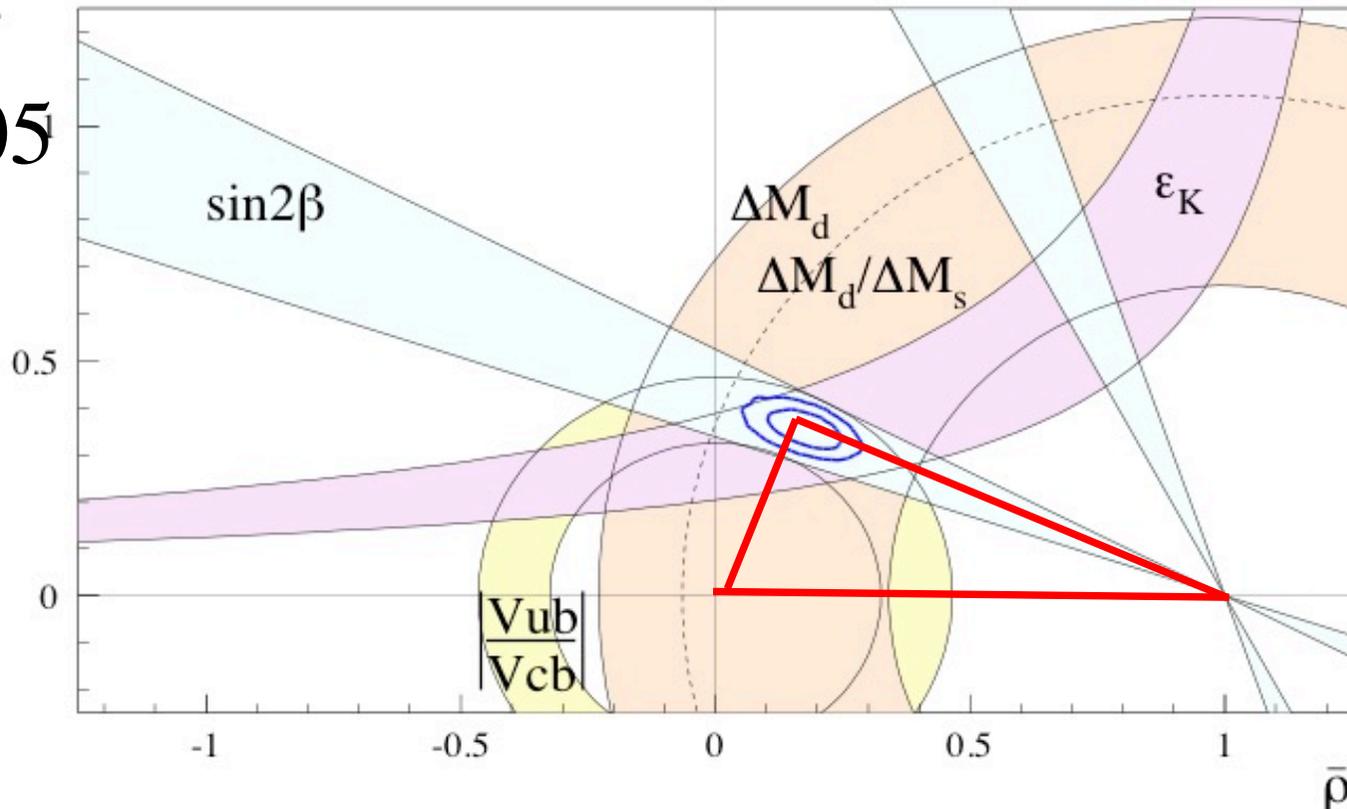
*M. Bona, M. Ciuchini, D. Derkach, F. Ferrari, E. Franco,
V. Lubicz, G. Martinelli, D. Morgante, M. Pierini,
L. Silvestrini, S. Simula, C. Tarantino, V. Vagnoni,
M. Valli, and L. Vittorio*

*Plots and numbers in this talk are
hot-off-the-press for this talk*

Unitary Triangle SM

2005

semileptonic decays



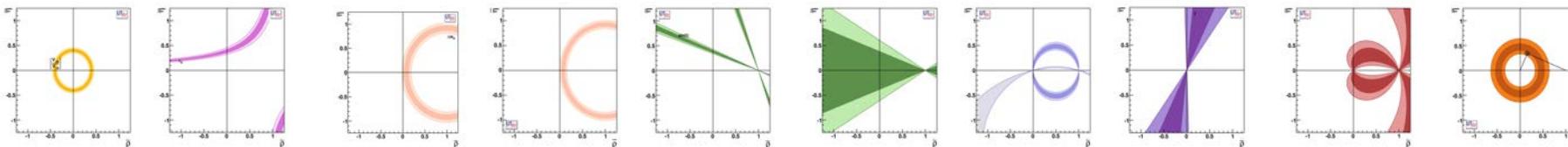
Experimental constraints

Meas.	$V_{CKM} \times \text{other}$	$(\bar{\rho}, \bar{\eta})$
$\frac{b \rightarrow u}{b \rightarrow c}$	$ V_{ub}/V_{cb} ^2$	$\bar{\rho}^2 + \bar{\eta}^2$
Δm_d	$ V_{td} ^2 f_{B_d}^2 B_{B_d}$	$(1 - \bar{\rho})^2 + \bar{\eta}^2$
$\frac{\Delta m_d}{\Delta m_s}$	$\left \frac{V_{td}}{V_{ts}} \right ^2 \xi^2$	$(1 - \bar{\rho})^2 + \bar{\eta}^2$
ϵ_K	$f(A, \bar{\eta}, \bar{\rho}, B_K)$	$\propto \bar{\eta}(1 - \bar{\rho})$
$A(J/\psi K^0)$	$\sin 2\beta$	$\frac{2\bar{\eta}(1 - \bar{\rho})}{\sqrt{\bar{\eta}^2 + (1 - \bar{\rho})^2}}$

$B_{d,s}^0 - \bar{B}_{d,s}^0$ mixing

$K^0 - \bar{K}^0$ mixing

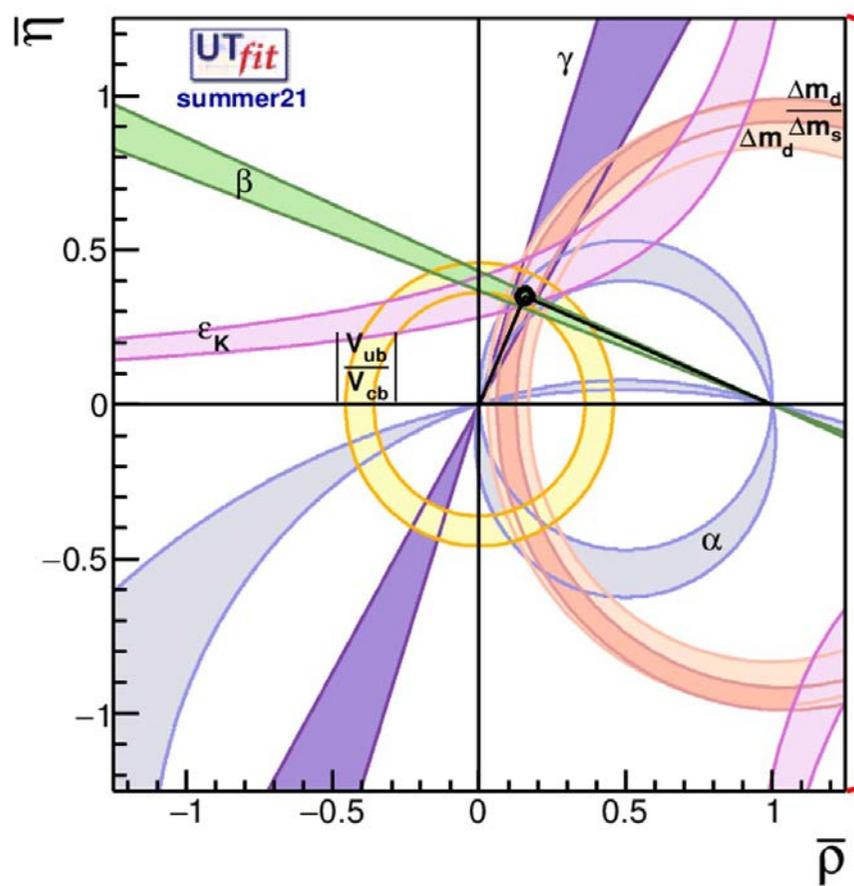
B_d



2021 results

$$\bar{\rho} = 0.156 \pm 0.012 \quad \bar{\eta} = 0.350 \pm 0.010$$

In the hadronic sector, the SM CKM pattern represents the principal part of the flavor structure and of CP violation



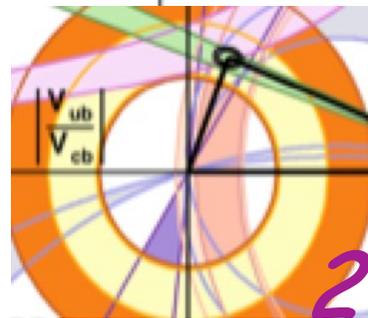
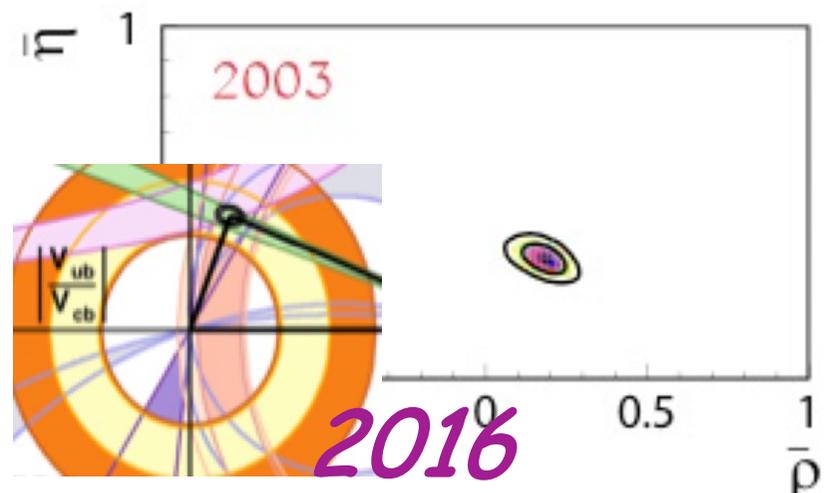
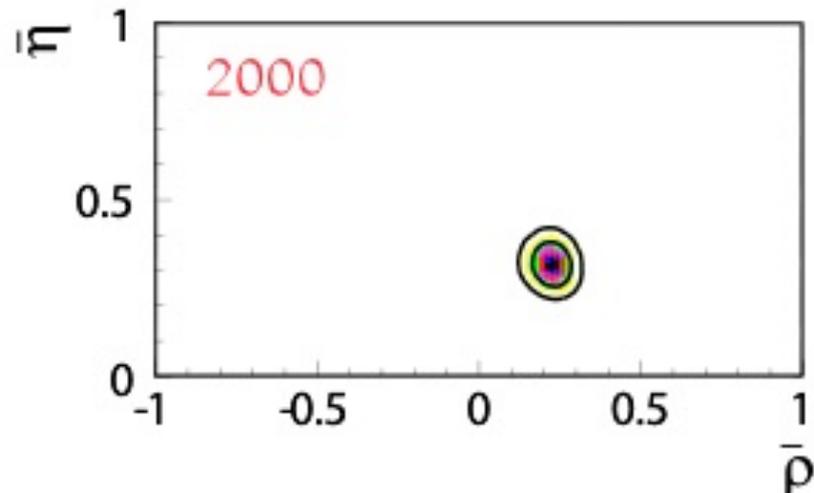
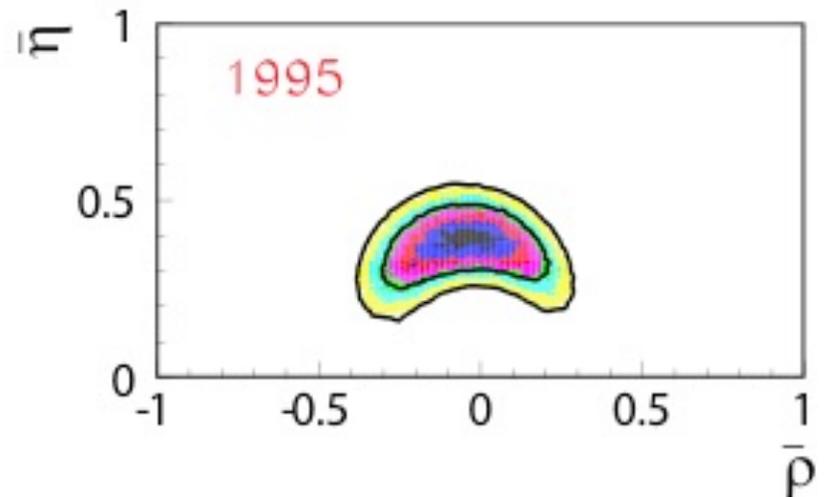
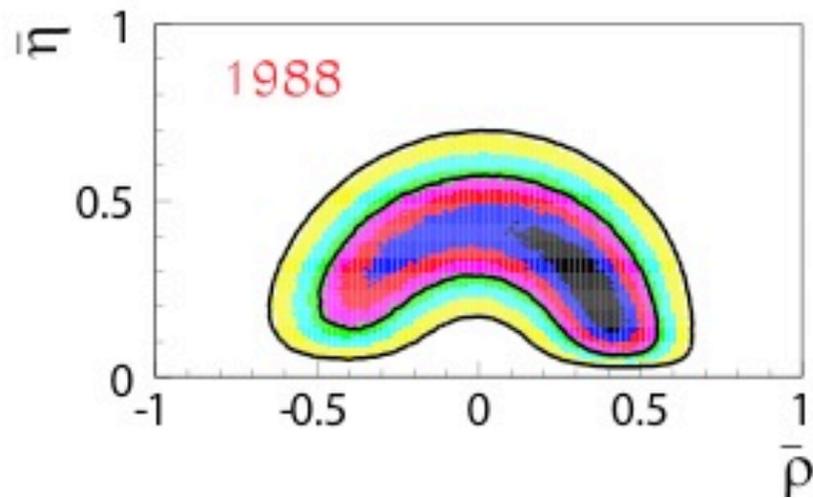
$$\begin{aligned} \alpha &= (90.8 \pm 2.0)^\circ \\ \sin 2\beta &= 0.699 \pm 0.016 \\ \beta &= (22.52 \pm 0.67)^\circ \\ \gamma &= (66.2 \pm 2.1)^\circ \\ A &= 0.826 \pm 0.011 \\ \lambda &= 0.22504 \pm 0.00079 \end{aligned}$$

Consistence on an over constrained fit of the CKM parameters

CKM matrix is the dominant source of flavour mixing and CP violation

PROGRESS SINCE 1988

Experimental progress so impressive that we can fit the hadronic matrix elements (in the SM)



ABBIAMO PARLATO DI SIMMETRIE È ORA DI PARLARE DI (ALTRI) MISTERI



Villa dei Misteri Pompei

- *Dove è andata a finire l' antimateria? Nella galassia? Nello spazio intergalattico?*
- *E' scomparsa a causa delle interazioni? ma quali? Interagendo con i leptoni (elettroni, neutrino, muoni)?*
- *E la Materia Oscura?*
- *E l'Energia Oscura ?*



CHE COS'È LA MATERIA OSCURA ?

(NON TROVIAMO L'ANTIMATERIA CHE SAPPIAMO COSA È
IN COMPENSO L'UNIVERSO È PIENO DI MATERIA OSCURA CHE NON
SAPPIAMO COSA SIA)

GALASSIA ANDROMEDA (M 31)

SKY 90 f4,5, CANON 30D 6' a 1600 ISO,
somma di 8 pose

CHE COSA NON È LA MATERIA OSCURA ?

Stelle

Gas

Raggi Cosmici

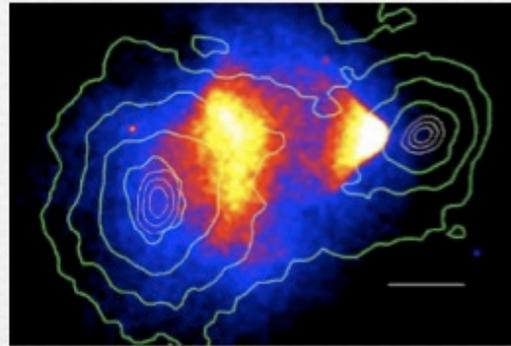
Pianeti ?

L' esistenza di Materia Oscura (fredda) è dimostrata da una pletora di misure sperimentali, con metodi diversi a tutte le scale di distanza

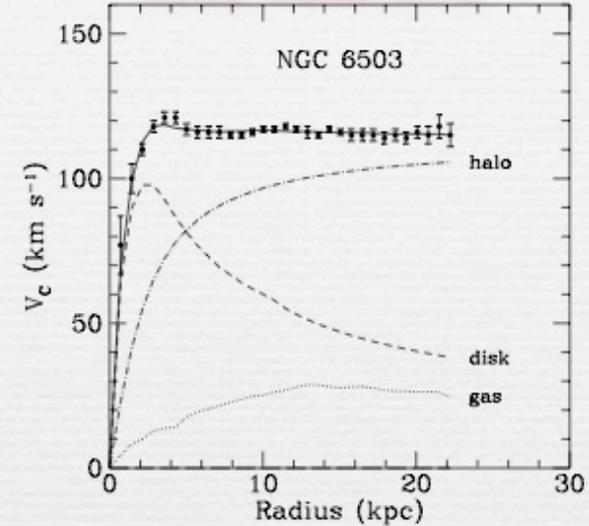
Gravitational lensing



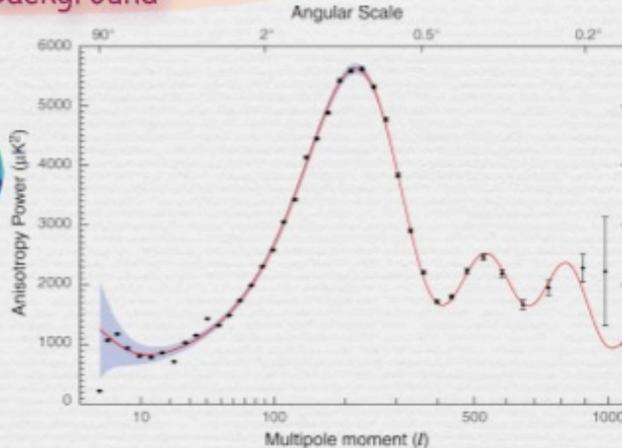
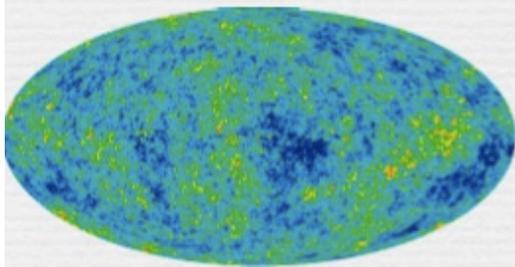
The "Bullet cluster": lensing map versus X-ray image



Galaxy rotation curves



Cosmic Microwave Background



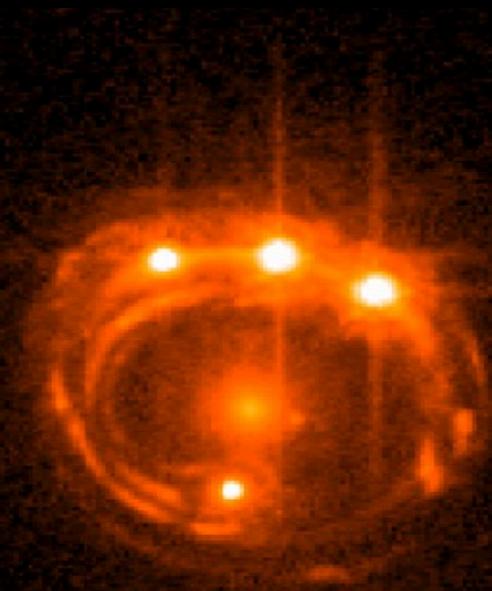
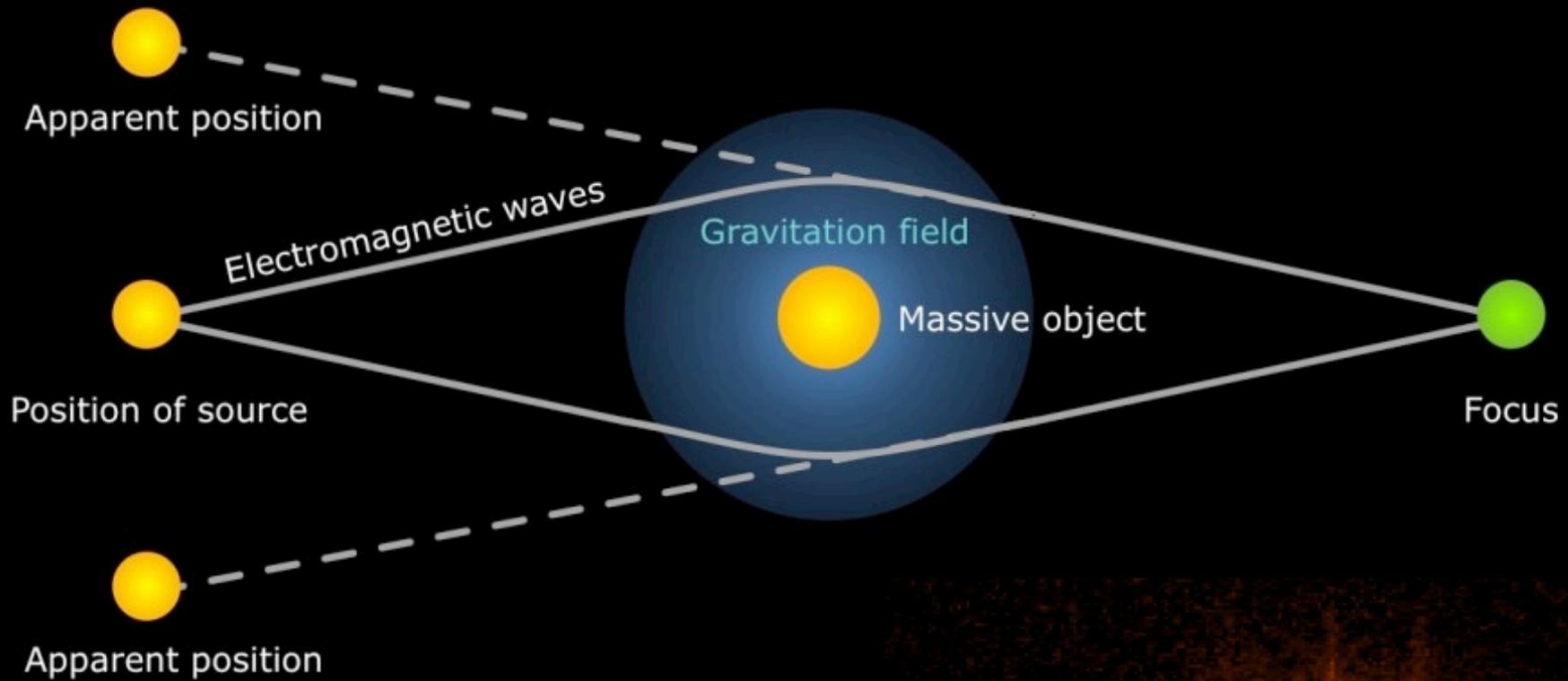
... etc

-> Fraction of the universe's energy density stored in dark matter :

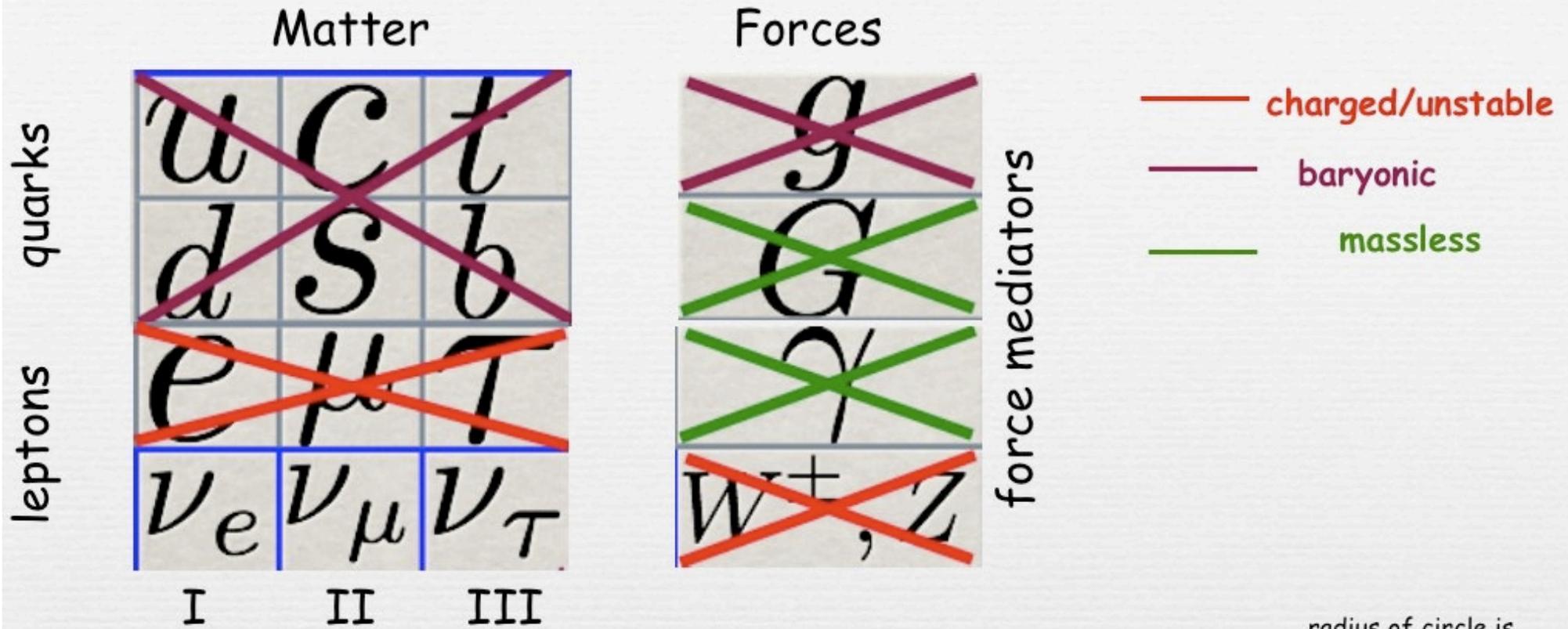
$$\Omega_{\text{DM}} \approx 0.22$$

The picture from astrophysical and cosmological

nella Via Lattea 400 miliardi = $4 \cdot 10^{11}$ stelle - circa $2 \cdot 10^{11}$ galassie
stimati 9 miliardi di pianeti nella nostra galassia dove si potrebbe
essere sviluppata la vita



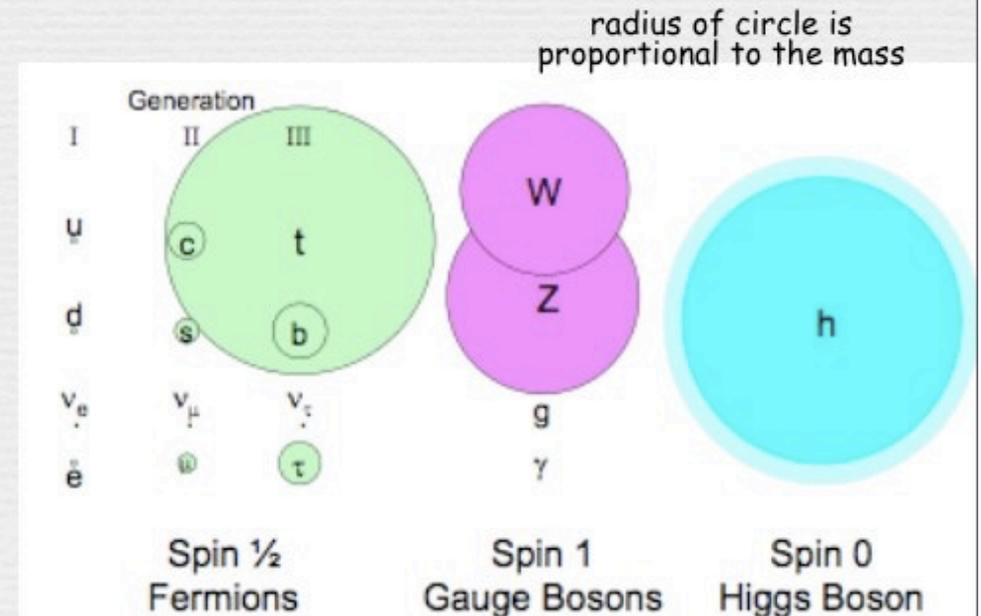
Why can't dark matter be explained by the Standard Model?



I II III
3 families of matter

contribution to the energy budget of the universe

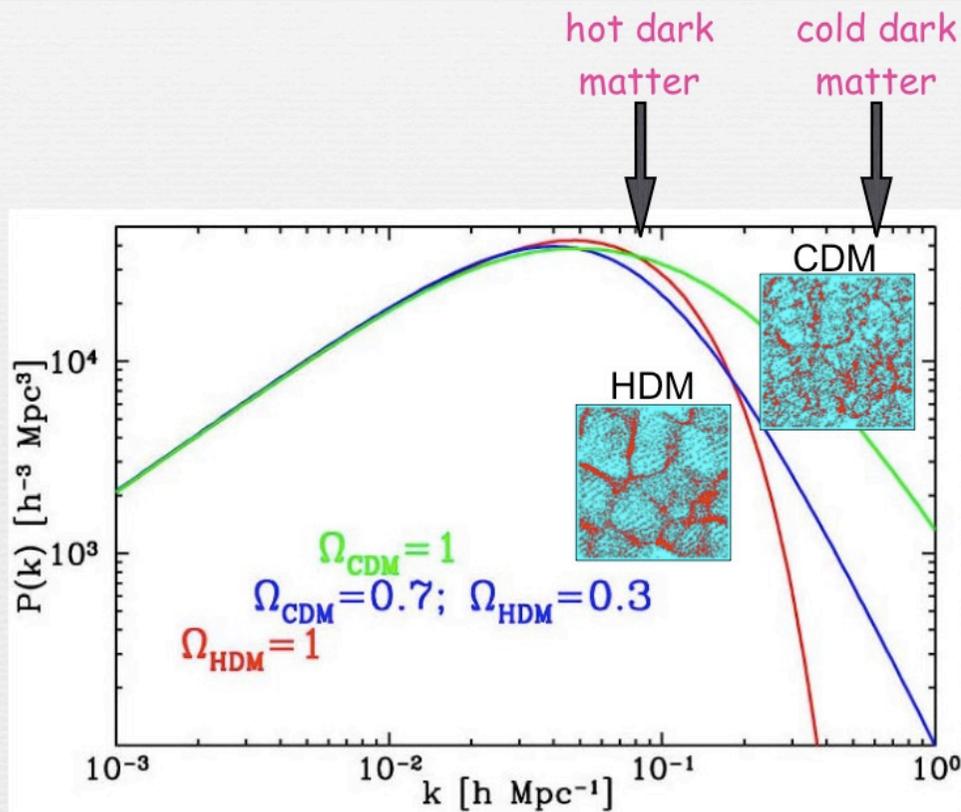
Particle	Ω	type
Baryons	4 - 5 %	cold
Neutrinos	< 2 %	hot
Dark matter	20 - 26 %	cold



G. Fogli et al., Phys. Rev. Phys.Rev.D75:053001,2007.

TABLE II: Input cosmological data sets for seven representative cases considered in this work, together with their 2σ (95% C.L.) constraints on the sum of neutrino masses Σ .

Case	Cosmological data set	Σ bound (2σ)
1	WMAP	< 2.3 eV
2	WMAP + SDSS	< 1.2 eV
3	WMAP + SDSS + SN _{Riess} + HST + BBN	< 0.78 eV
4	CMB + LSS + SN _{Astier}	< 0.75 eV
5	CMB + LSS + SN _{Astier} + BAO	< 0.58 eV
6	CMB + LSS + SN _{Astier} + Ly- α	< 0.21 eV
7	CMB + LSS + SN _{Astier} + BAO + Ly- α	< 0.17 eV



I neutrini massicci sono gli unici candidati possibili per spiegare la DM nello SM

Tuttavia, essendo molto leggeri, e disaccoppiandosi a un'energia di circa 1 MeV, continuano a diffondersi come particelle ultrarelativistiche nell'universo influenzando le fluttuazioni della densita` e limitando la formazione di protostrutture

WIMP (weakly interacting massive particles)

E' questa la soluzione ?

Alcune delle proposte avanzate:

<i>Tipo</i>	<i>Spin</i>	<i>Scala di Massa (appr.)</i>
Assione	0	μeV -meV
Higgs doub. inerte	0	50 GeV
Neutrino Sterile	1/2	keV
Neutralino	1/2	10 GeV- 10TeV
Kaluza-Klein	1	TeV

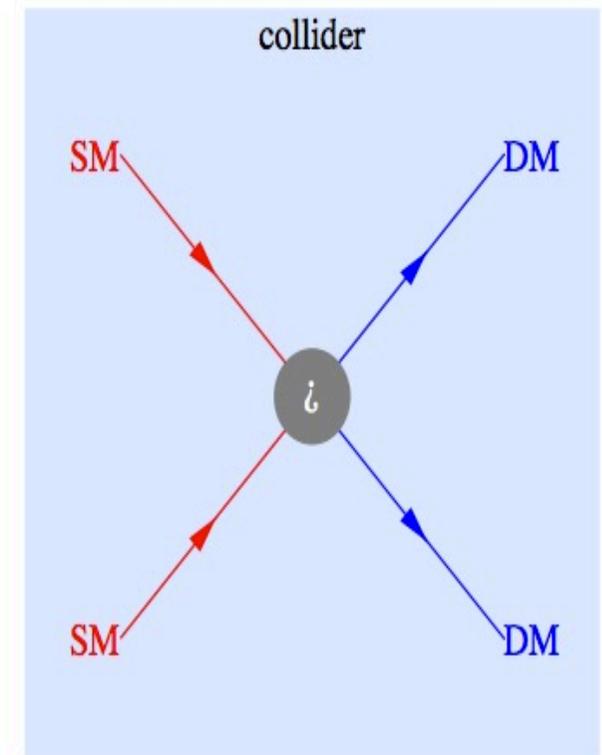
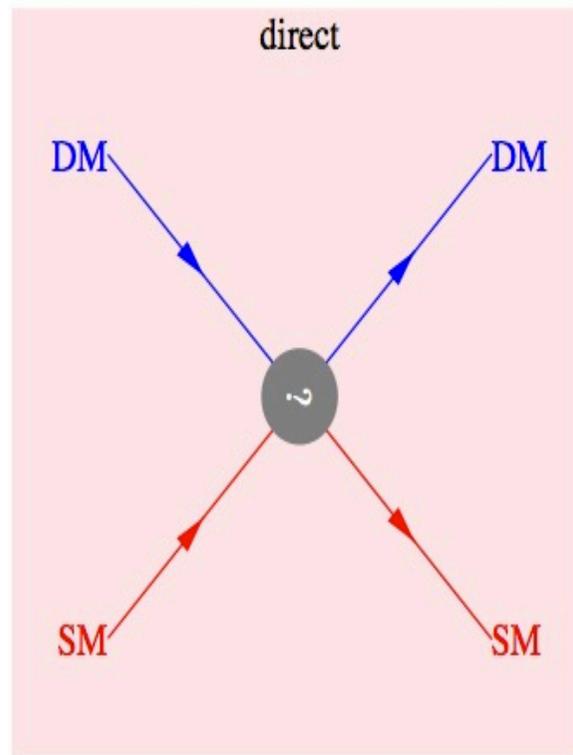
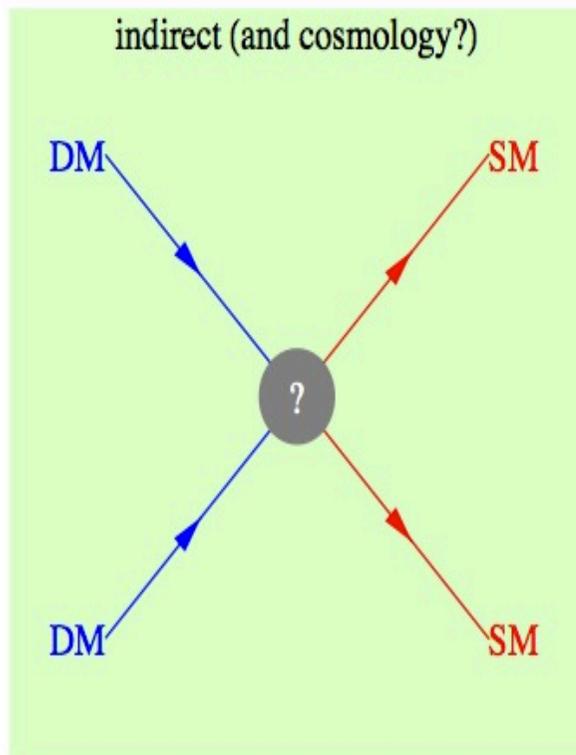
CACCIA ALLA MATERIA OSCURA



dal cielo

dal mondo
sotterraneo

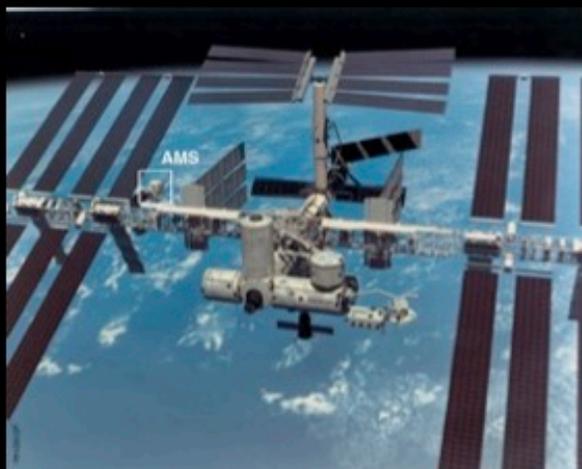
al CERN



SEARCH STRATEGIES

INDIRECT DETECTION

$DM \ DM \rightarrow e^+e^-, \dots$



e^+, \bar{p} AMS-02, Pamela, Fermi, HESS

γ ATIC, Fermi

ν IceCube, Antares, Km3Net

\bar{d} GAPS, AMS-02



COLLIDER

$pp \rightarrow DM + X$

LHC

DIRECT DETECTION

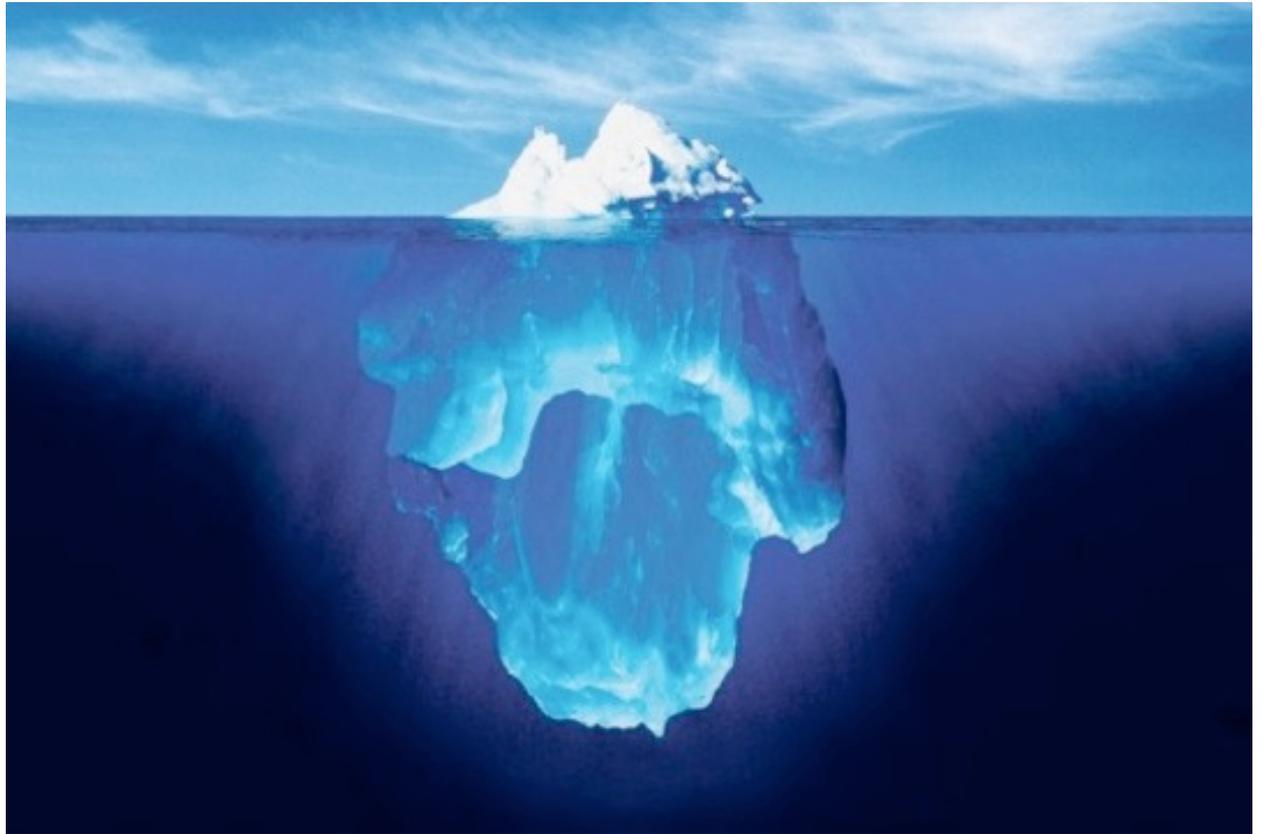
$DM \ \text{Nucleus} \rightarrow DM \ \text{Nucleus}$



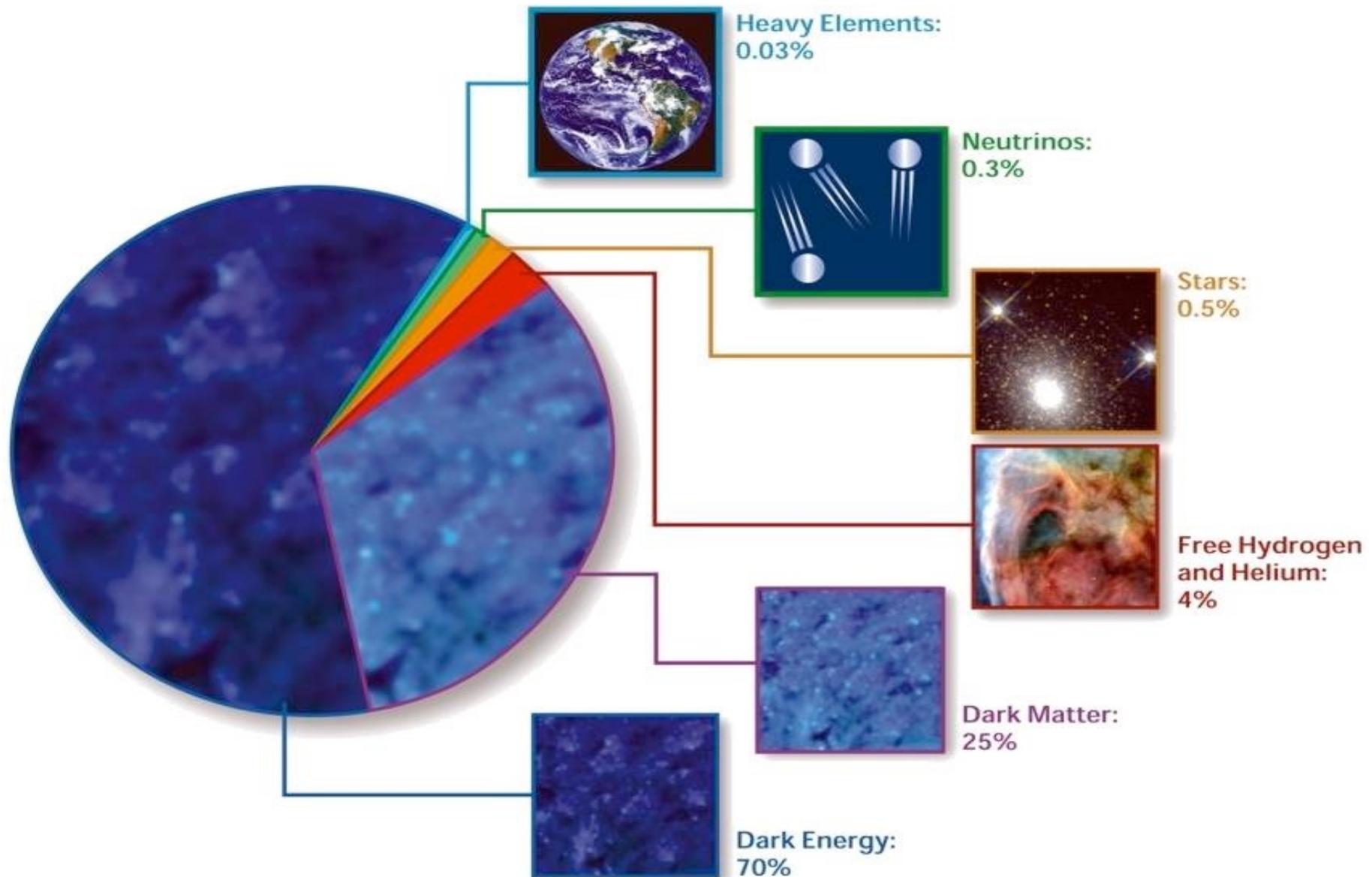
Xenon, CDMS, CRESST,
CoGeNT, Edelweiss...

Materia Normale

Materia Oscura



Se guardiamo all' Energia complessiva, lo straordinario progresso della conoscenza umana dell' Universo ha individuato solo il 5% del suo contenuto !!



The image features a dark blue, starry background. In the center, there is a solid black circle. From this circle, a radial pattern of light rays emanates, creating a sunburst effect. The rays are composed of numerous thin, parallel lines that fan out from the center. The overall appearance is that of a stylized sun or star in a cosmic setting.

grazie per l'attenzione