

IL MONDO DELLE PARTICELLE ELEMENTARI E I RAGGI COSMICI

Paola Giacconi

December 7, 2009

**Le questioni che
affronta il fisico
moderno sono le stesse
che hanno guidato lo
sviluppo del pensiero
filosofico nel corso dei
millenni**

- **Come funziona
l'universo ?**

- **Da dove viene ?**

- **Dove va ?**

.....ed ancora.....

- Quali sono i componenti ultimi della materia?
- Come si muovono ?
- Cosa li muove?

.....per fare ciò
DOBBIAMO.....

identificare

POCHI PRINCIPI

**fondamentali dai quali
derivare le proprietà di**

TUTTI

I FENOMENI

NATURALI

- **MACROCOSMO**

$$d > 10^8 \text{ m}$$

- **UOMO**

$$10^{-8} < d < 10^8 \text{ m}$$

- **MICROCOSMO**

$$d < 10^{-8} \text{ m}$$

DOBBIAMO IDENTIFICARE

**1. I COSTITUENTI
ELEMENTARI**

**2. le forze che governano
il loro comportamento**

**INTERAZIONI
FONDAMENTALI**

Empedocle (446-444 a.C)

1. componenti: *aria,
acqua, terra, fuoco*

2. forze: *aria e fuoco spinte
verso l'alto,
terra e acqua spinte
verso il basso*

..... età ellenistica

Democrito (460-427 a.C.),

Aristotele (384-322 a.C.),

Archimede (287-212 a.C.),

Eratostene (276-196 a.C.),

Ipparco di Nicea

(190-120 a.C.),

Aristarco di Samo

(310-250 a.C.)

*(primo sostenitore di una
teoria eliocentrica!!!)*

.....**DOPO 1600 anni.....**

Galileo (1564-1642),
Newton (1642-1727),
Maxwell (1831-1879),
Planck (1858-1947),
Einstein (1879-1955),
Schrödinger (1887-1961)
Pauli (1900-1958),
Heisenberg (1901-1976),
Fermi (1901-1954),
Dirac (1902-1984),
Feynman (1918-1988),
Hawking (1942,....)

.....voi conoscete: *atomi...*

● atomo $d \sim 10^{-8} \text{cm}$

● nucleo $d \sim 10^{-12} \text{cm}$

● protone $d \sim 10^{-13} \text{cm}$

● elettrone $d \sim 10^{-16} \text{cm}$

● $d_a = 10^8 d_e$!

SE

$$d_{nucleo} \sim 5\text{cm}$$

ALLORA

$$r_{I-e} \sim 2\text{km}$$

Polveri Sottili

$$1 < \text{PM}_{10} < 10\mu\text{m}$$

$$\text{PM}_{10} \sim 10^3 d_a$$

- $m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
 . $= 938 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

- $m_n = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
 . $= 939 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

- $m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
 . $= 0.510 \frac{\text{MeV}}{c^2}$

$1\text{eV}/c^2 = 1.78266181(15) \times 10^{-36} \text{ kg}$

..... **c'è molto di piú.....**

..la piú grande rivoluzione..

RELATIVITÁ

$$E = mc^2$$

$$c = 299\,792\,458 \text{ ms}^{-1}$$

MECCANICA QUANTISTICA

$$\Delta q \Delta p > \hbar$$

$$\hbar = 1,05457168(18) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$(i\partial - m) \psi = 0$$

4(3) INTERAZIONI

1. **Gravitá** p-p 10^{-38}

2. **Forza debole** 10^{-5}

3. **Elettromagnetismo** 10^{-3}

4. **Forza nucleare forte** 1

GRAVITÁ

Newton Einstein

$$\vec{F} = G \frac{M_1 M_2}{r^2} \hat{r}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$G = 6,6742(10) \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

ELETTRO MAGNETISMO

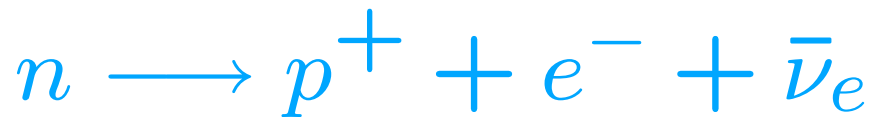
Maxwell

$$\partial_{\mu} F^{\mu\nu} = \frac{4\pi}{c} j^{\nu}$$

$$\epsilon_{\rho\alpha\mu\nu} \partial_{\alpha} F^{\mu\nu} = 0$$

**FORZA
DEBOLE**

Fermi



**FORZA
ELETTRO
DEBOLE**

*Glashow, Weinberg,
Salam, Rubbia*

FORZA NUCLEARE FORTE

*Fermi, Yukawa,
Gross-Politzer-Wilczek*

- **basse energie** $E \sim 1 \text{ KeV}$

$$V(r) = g \frac{e^{(-r/r_0)}}{r}$$

- **alte energie** $E \sim 100 \text{ GeV}$

e^- *molto veloci* **contro** $p-n$

26 ? ? COSTITUENTI ELEMENTARI

- 6 Leptoni
- 6 Quarks
- 12+1 (?) Bosoni intermedi
- 1 Bosone scalare ?

6 LEPTONI

1. e $m_e \sim 5 \times 10^{-4} \text{ GeV}$
 ν_e $0 < m_{\nu_e} < 10^{-9} \text{ GeV}$

2. μ $m_\mu \sim 0,1 \text{ GeV}$
 ν_μ $0 < m_{\nu_\mu} < 10^{-9} \text{ GeV}$

3. τ $m_\tau \sim 1,8 \text{ GeV}$
 ν_τ $0 < m_{\nu_\tau} < 10^{-9} \text{ GeV}$

$$\bullet Q_e = Q_\mu = Q_\tau = -e$$

$$\bullet Q_{\nu_e} = Q_{\nu_\mu} = Q_{\nu_\tau} = 0$$

$$\bullet L_e = L_{\nu_e} = 1$$

$$\bullet L_{e^+} = L_{\bar{\nu}_e} = -1$$

$$\bullet L_\mu = L_{\nu_\mu} = 1 \quad \dots\dots\dots$$

6 QUARKS *sapori*

1. up $m_u \sim 4 \times 10^{-3} \text{GeV}$

down $m_d \sim 6 \times 10^{-3} \text{GeV}$

2. charm $m_c \sim 1.5 \text{GeV}$

strange $m_s \sim 0.5 \text{GeV}$

3. top $m_t \sim 175 \text{GeV}$

bottom $m_b \sim 4.5 \text{GeV}$

- $Q_u = Q_c = Q_t = \frac{2}{3}e$

- $Q_d = Q_s = Q_b = -\frac{1}{3}e$

- \forall *sapore* **3 colori:**

rosso blu verde

- \forall *sapore* **un antisapore**

3 anticolori: antirosso

antiblu antiverde

ADRONI

sono composti da
quarks

MA

NON hanno colore

- *barioni* 3 quarks

p(uud) n(udd)

- *mesoni* 2 quarks $q\bar{q}$

la massa degli adroni
NON é interamente
dovuta alle masse dei
quarks che li
compongono
gran parte della massa
é fornita dall'energia
d'interazione che tiene
insieme l'adrone

$$m_p \sim 100 \times (2m_u + m_d)$$

12+1 ? BOSONI INTERMEDI

1) fotone γ neutro

- mediatore int e.m.

- $m_\gamma \equiv 0$

- $0 < r_{int} = \frac{\hbar}{m_\gamma c} < \infty$

2) ? gravitone g neutro
non sono state rivelate
ancora neppure le onde
gravitazionali !

- mediatore della gravità

- $m_g \equiv 0$

- $0 < r_{int} = \frac{\hbar}{m_g c} < \infty$

3) W^\pm Z_0

- mediatore int debole

- $m_W = (80.425 \pm 0.038) \text{ GeV}$

- $m_Z = (91.187 \pm 0.002) \text{ GeV}$

- $0 < r_{int} = \frac{\hbar}{cm_{W^\pm}} < 10^{-18} \text{ m}$

4) 8 gluoni con carica di colore **Q C D**

- mediatori int forte

$$m_{gl} \equiv 0$$

- $0 < r_{int} = \frac{\hbar}{cm_{gl}} < \infty$ **!!??**

- confinamento ?
libertá asintotica !

? **BOSONE SCALARE**

?

LHC ~ 8TeV....??

- **bosone scalare**
neutro di Higgs H^0
- **Per dare massa ai bosoni**
intermedi $W^\pm Z^0$
- **$80 < m_{H^0} < 200 \text{GeV}$**

BOSONI

*seguono la statistica di
Bose-Einstein*

hanno **spin** intero

$$S_\gamma = 1 \quad S_g = 2$$

$$S_{W^\pm} = S_{Z^0} = 1 \quad S_{H^0} = 0$$

**LE INTERAZIONI
SONO MEDIATE
DAI BOSONI**

**NON vale il principio di
esclusione di PAULI**

LEPTONI e QUARKS

sono

FERMIONI

seguono la statistica di

Fermi-Dirac

hanno spin semiintero

$$S = \frac{1}{2}$$

LA MATERIA É

FATTA

DI FERMIONI

vale il principio di

esclusione di PAULI

QUARKS hanno
TUTTI i tipi di
interazione

LEPTONI NON hanno
l'interazione **FORTE**

LEPTONI NEUTRI
hanno solo interazione
DEBOLE
e gravitazionale

fine prima puntata.....

.....*seconda puntata*

Alcune domande per voi....

- 1. A quali interazioni sono soggetti i neutrini?**
- 2. Quale interazione ha mediatori di grande massa?**

- 3. Quali interazioni agiscono sui protoni dentro di te?**

- 4. Quali mediatori di forza non possono essere isolati? E perché?**

- 5. Quali mediatori di forza non sono ancora stati osservati?**

Perché molte particelle

*” non sono di questo
mondo ” ?*

**Il mondo che ci
circonda é composto
dai tipi MENO massivi
di particelle in quanto le
particelle di grande
massa DECADONO in
quelle di massa minore
a causa delle
interazioni deboli!**

- *Dove* possiamo vedere tutti gli altri costituenti elementari oltre ai p, n, e ?
- *Come* possiamo sperimentare le interazioni forti e deboli?

**ACCELERATORI
RAGGI COSMICI !!!**
*prima fonte di nuove
particelle μ, π, K, \dots*

I RAGGI COSMICI PERCHE' STUDIARLI

- 1. Possono essere, come in passato, messaggeri di **nuova fisica** o di particelle ancora sconosciute.**

2. E_{RC} fino ed oltre 10^{20} eV

I RC di altissima

energia **EEE** sono la

prova dell' esistenza di

potenti acceleratori di

natura astrofisica come

supernovae,

nuclei galattici attivi

e possono essere usati

per lo studio degli

ANG , supernove....

**3. RC si propagano
attraverso l' Universo
e pertanto possono dare
informazioni sulle
proprietá dei siti
astrofisici coinvolti:
campi magnetici,
densitá di materia,
ammassi stellari.....**

4. La loro composizione chimica, modulata dalla loro propagazione, riflette i processi di nucleosintesi che si verificano alle sorgenti

5. Utili per verificare le leggi della fisica in condizioni estreme: **violazione dell'invarianza di Lorentz ?**

? Origine e natura dei raggi cosmici di altissima energia ?

Questioni importanti

1. Sono sempre *esistiti*?
2. Di cosa sono composti?
3. Da dove vengono?
4. Come possiamo *vederli*?

(1) Sono sempre *esistiti*?

da "sempre" un flusso

CONTINUO ed

ISOTROPO di circa

1000 particelle/m²s

sulla sommitá

dell'atmosfera

accelerate probabilmente

da campi magnetici

intergalattici e da onde

d'urto dovute ad

esplosioni di supernove

- **1912 Victor Hess** ne fu lo scopritore Nobel per la fisica nel 1936
- **1925 Millikan** dá loro il nome *raggi cosmici* ma pensava fossero raggi γ
- **1929 Bothe Kohlhörster** ne comprende la natura corpuscolare

- **1933 Blackett ed Occhialini rivelarono il primo *sciame***

- **1938 Auger e Maze usando piú contatori Geiger rivelarono particelle secondarie appartenenti ad uno stesso raggio primario**

da allora non si é piú smesso

Ordini di grandezza

- **fino** $E \sim 5 \times 10^{21}$ eV
- **Flusso** = 1/(km²secolo)
- **Densità di particelle a terra** $\sim 10^{10}$ particelle/m²
a 1.5km dall'asse dello sciame

- **Dimensione dello sciame a terra $\sim 20 \text{ km}^2$**
- **Spessore del fronte dello sciame: da $0.2 \mu\text{s}$ a $1.0 \mu\text{s}$ ad 1km dall'asse dello sciame**

(2) Loro composizione

?

Raggio primario

($10 < E < 100 \text{ GeV}$)

- $\sim 92\%$ protoni ($\forall E !!$)
- $\sim 6\%$ particelle α (np)
- $\sim 2\%$ γ , ν , e
nuclei pesanti Fe (EEE)

(3) Da dove vengono ?

questione aperta...

$$10 < E < 10^{18} \text{ MeV !!}$$

? $E = 3 \times 10^{20} \text{ eV} \sim 50 \text{ J}$

un corpo di 1 kg

che cade da

5 m di altezza....!! ?

- **SE** $10 < E < 100 \text{ MeV}$
probabilmente
protoni solari
- $T_{in} \sim 14 \times 10^6 \text{ K}$
- $E_{in} = kT \sim 10^3 \text{ eV}$
- $E_{ion} \text{ gas} \sim 1 - 10 \text{ eV}$

$$E_{in} \gg E_{ion}(H_2)$$



**Escono dal SOLE
protoni LIBERI che
accelerati da campi
magnetici attraversano
l'atmosfera ed arrivano
a terra**

TRASFORMATI

- **SE** $10^5 < E < 10^{15}$ eV

probabilmente

sorgente nella galassia

- **SE** $10^{15} < E < 10^{19}$ eV

probabilmente

sorgente extra galattica

- **SE** $10^{17} < E < 10^{21}$ eV

UHECR-EEE

Lab. Pierre Auger 2008

**individuata una possibile
sorgente entro 71Mpc**

Nuclei Galattici Attivi

ANG

1particella / (km^2 sr secolo)

apparato di $3000km^2$

30 eventi/anno

accordo con il limite

GKZ

LIMITE GKZ

$$p + \gamma_{CBR} \rightarrow \Delta_+ \rightarrow p + \pi^0$$
$$p + \gamma_{CBR} \rightarrow \Delta_+ \rightarrow n + \pi^+$$

la soglia per la produzione di una Δ_+ in quiete sará

$$c^2 (P^\mu + K^\mu)^2 \geq c^4 M_{\Delta_+}^2$$

con:

$$g_{\mu\nu} = \text{diag}(+, -, -, -)$$

$$P^\mu = (P^0, \vec{P})$$

4 - impulso p

$$K^\mu = (K^0, \vec{K})$$

4 - impulso γ_{CBR}

$$K^\mu K_\mu = 0$$

$$c^2 \vec{K}^2 = K_0^2 = (\hbar\omega)^2$$

$$m \equiv m_{\text{nucleone}}$$

$$M \equiv M_{\Delta+}$$

si ha:

$$\begin{aligned} & c^2 (P^\mu + K^\mu)^2 \\ &= (E_p + \hbar\omega)^2 - c^2 (\vec{P} + \vec{K})^2 \\ &= E_p^2 + 2E_p\hbar\omega + (\hbar\omega)^2 - \\ &\quad - c^2 \vec{P}^2 - c^2 \vec{K}^2 - 2cPK \cos \theta \\ &= E_p^2 + 2E_p\hbar\omega - c^2 \vec{P}^2 \\ &\quad - 2cPK \cos \theta \\ &= m^2 c^4 + 2E_p\hbar\omega \\ &\quad - 2cP\hbar\omega \cos \theta = \\ & 2\hbar\omega(E_p - cP \cos \theta) + m^2 c^4 \end{aligned}$$

**Se scegliamo il riferimento
solidale con la risonanza**

Δ_+ si ha $\theta = \pi$ da cui:

$$\left(c^2 P^2 + m^2 c^4\right)^{1/2} + cP \geq \frac{M^2 - m^2}{2\hbar\omega} c^4$$

protoni ultrarelativistici:

$$P^2 \gg m^2 c^2$$

quindi:

$$2cP \sim 2E_p \geq \frac{M^2 - m^2}{2\hbar\omega} c^4$$

inoltre

$$M \sim m + m_{\pi}$$

$$E_p \geq \frac{m_{\pi}^2 + 2m_{\pi}m}{4\hbar\omega} c^4$$
$$\sim \frac{m_{\pi}m}{2\hbar\omega} c^4$$

essendo $T_{\gamma CBR} \sim 2,726^{\circ}K$

ENERGIA di SOGLIA

$$E_p \sim \frac{m_{\pi}m}{2kT_{\gamma CBR}} c^4$$
$$\sim 3 \times 10^{20} \text{eV}$$

inoltre se indichiamo con:

- $\sigma \sim (1 \div 10) \mu\text{b}$

sezione d'urto e.m.

del p UHECR con γ_{CBB}

- $n \equiv \frac{N}{V} = \frac{\zeta(3)}{\pi^2} \left(\frac{kT}{\hbar c}\right)^3 \sim 400 \text{cm}^3$

densità di γ_{CBB}

- λ **libero cammino medio**

del p UHECR

si ha:

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} \sim 100 \text{Mpc}$$

Ricordiamo

$$\begin{aligned} 1\text{pc} &= 3.08 \times 10^{16}\text{m} \\ &= 3.26 \text{ anni luce} \end{aligned}$$

$$d_{\odot} \sim 10^{-4}\text{pc}$$

$$R_G \sim 25\text{Kpc}$$

$$D_{GP} \sim 700\text{Kpc}$$

...noi cosa vediamo..?

le particelle cariche **N**
nella *materia* perdono
energia per

- **irraggiamento:** *cariche accelerate irraggiano energia*
$$d\mathcal{E} = \frac{2e^2}{3c^3} a^2 dt$$
- **90% ionizzazione:** *urti di alta energia con atomi e nuclei dell'atmosfera*

Urti

- $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$ *forte*
- $p + p \rightarrow \pi^+ + \pi^+$ *forte*
- $p + n \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ *forte*

Decadimenti

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

- $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$ *e.m.*

- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ *debole*

- $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ *debole*

Vita media

- $\tau_n = (885.7 \pm 0.8)s$
 $\sim 15'$

- $\tau_\pi = (2.6033 \pm 0.0005)$
 $\times 10^{-8}s$

- $\tau_\mu = (2.19703 \pm 0.00004)$
 $\times 10^{-6}s$

- $\tau_p > 10^{30}$ anni

- $\tau_U \equiv \frac{1}{H_0}$
 $= (13.7 \pm 0.8) \times 10^9$ anni

per vedere le particelle si
usano i rivelatori
la particella lascia la sua
traccia attraversando il
rivelatore
dalla traccia si
determina energia
e provenienza anche
del N primario e T
della sorgente

questioni aperte per UHECR-EEE

- loro composizione
- spettro per $E > 10^{19}$ eV
e limite GKZ
Greisen Kuzmin Zatsepin
- anisotropia

- **interazioni adroniche per**
 $E \sim 10^{19} \text{eV} \gg E_{LHC}$

- **misura di campi
magnetici galattici
ed extra galattici**

alcuni esperimenti

- **Volcano Ranch**
New Mexico, 1962
- **Haverah Park**
UK, 1970 -1980
- **Yakutsk**
Siberia, 1989

- **Fly's Eye**
Utah, 1991

- **AGASA**
Japan, 1993-2004

- *Osservatorio Pierre Auger*
Mendoza Argentina
osservatorio di 3000km²
in funzione

.....e.....

- **PROGETTO EEE**
rivelatori **MRPC**
dislocati su *tutto* il
territorio nazionale....
buon lavoro.....!