

La fisica delle particelle e il Large Hadron Collider: recenti sviluppi e questioni aperte

Dr Cristina Lazzeroni
Reader in Particle Physics
STFC Public Engagement Fellow



XIX Secolo: Atomi come costituenti ultimi della materia

ultimi della materia

1 H Hydrogen 1.00794																	2 He Helium 4.003														
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797														
11 Na Sodium 22.989770	12 Mg Magnesium 24.3050											13 Al Aluminum 26.981538	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973761	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948														
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955910	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938049	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933200	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80														
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29														
55 Cs Cesium 132.90545	56 Ba Barium 137.327	57 La Lanthanum 138.9055	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.078	79 Au Gold 196.96655	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98038	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)														
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (263)	107 Bh Bohrium (262)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (266)	110 Ds Darmstadtium (269)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Cn Copernicium (277)	113	114																		
																		58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
																		90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactinium 231.03588	92 U Uranium 238.0289	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

"There is nothing new to be discovered in physics now.
All that remains is more and more precise measurement."
Lord Kelvin, 1900

XIX Secolo: Atomi come costituenti ultimi della materia

1 H Hydrogen 1.00794	
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012
11 Na Sodium 22.989770	12 Mg Magnesium 24.304
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62
55 Cs Cesium 132.90545	56 Ba Barium 137.327
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)

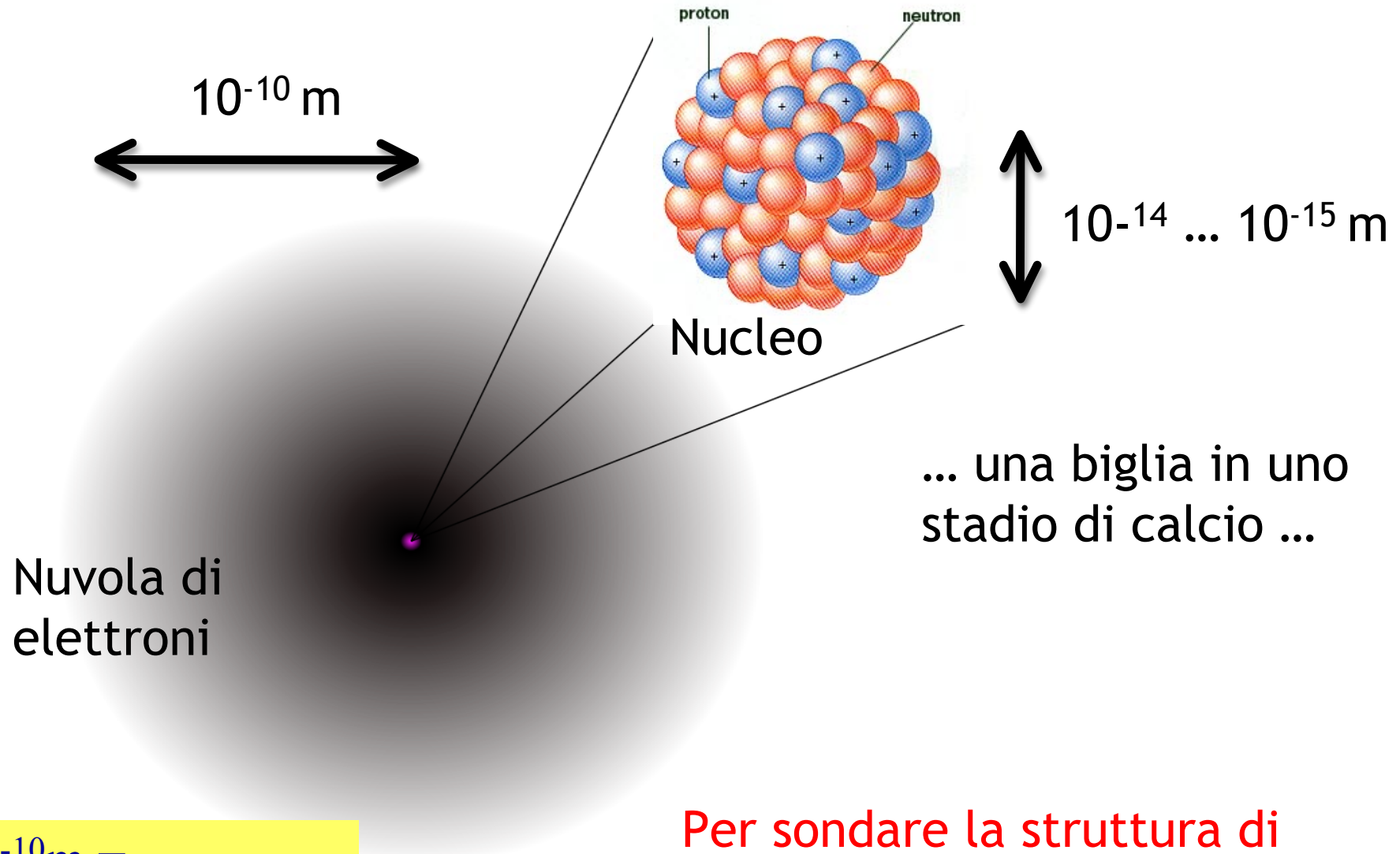


	2 He Helium 4.003
9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797
17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948
35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80
53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29
85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)

70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

Collisioni di particelle ad alta energia hanno rivelato una ulteriore struttura (piu' semplice)

L'Atomo



$10^{-10} \text{ m} =$
 $1/10,000,000,000 \text{ m}$
 0.0000000001 m

Per sondare la struttura di protoni e neutroni, si colpiscono con particelle ad alta energia...

Un semplice acceleratore: la vecchia TV

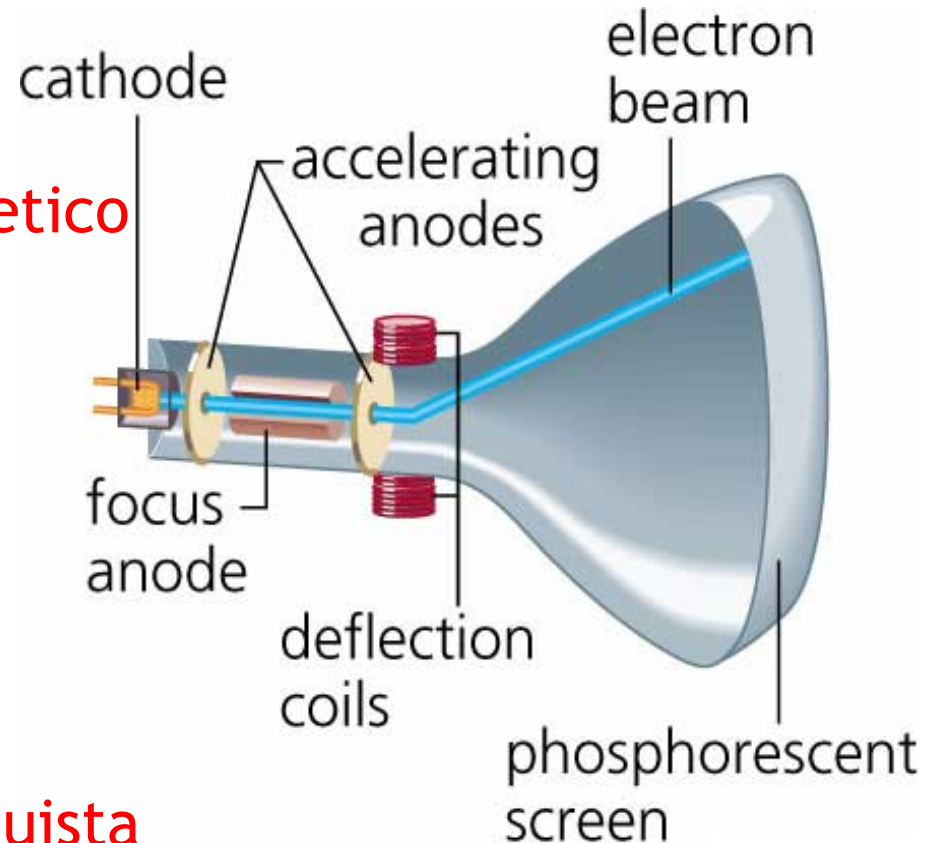
- Accelera elettroni attraverso una differenza di potenziale
- Li deflette con un campo magnetico
- Immagine sullo schermo

Acceleratori di particelle sono tubi catodici giganti!

UNITA' DI MISURA

Particella di carica q accelerata da differenza di potenziale V acquista Energia cinetica $KE=qV$.

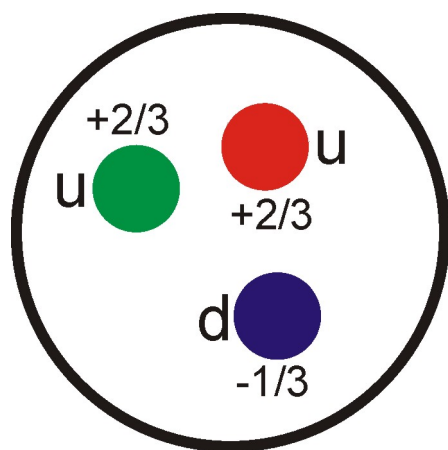
1 volt $\Rightarrow$ 1 elettron-volt (eV)



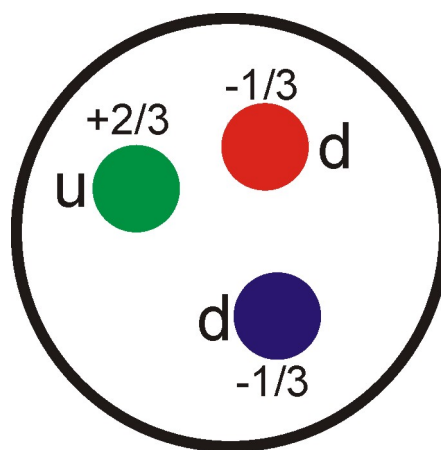
- Una vecchia TV accelera elettroni a $\sim 20,000$ eV
- Il Large Hadron Collider accelera protoni a $7,000,000,000,000$ eV

Protoni e Neutroni

Nel 1969 un esperimento a SLAC, usando un acceleratore di elettroni di 20,000,000,000 eV, mostrò che i protoni hanno struttura interna → i “quarks”



Protone



Neutrone



La famiglia delle Particelle...

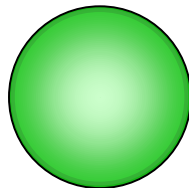
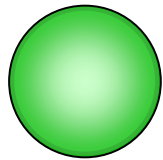


Up quark (u)

Down quark (d)

Electrone (e^-)

Neutrino (ν_e)



Massa ~ 0.003

~ 0.006

~0.0005

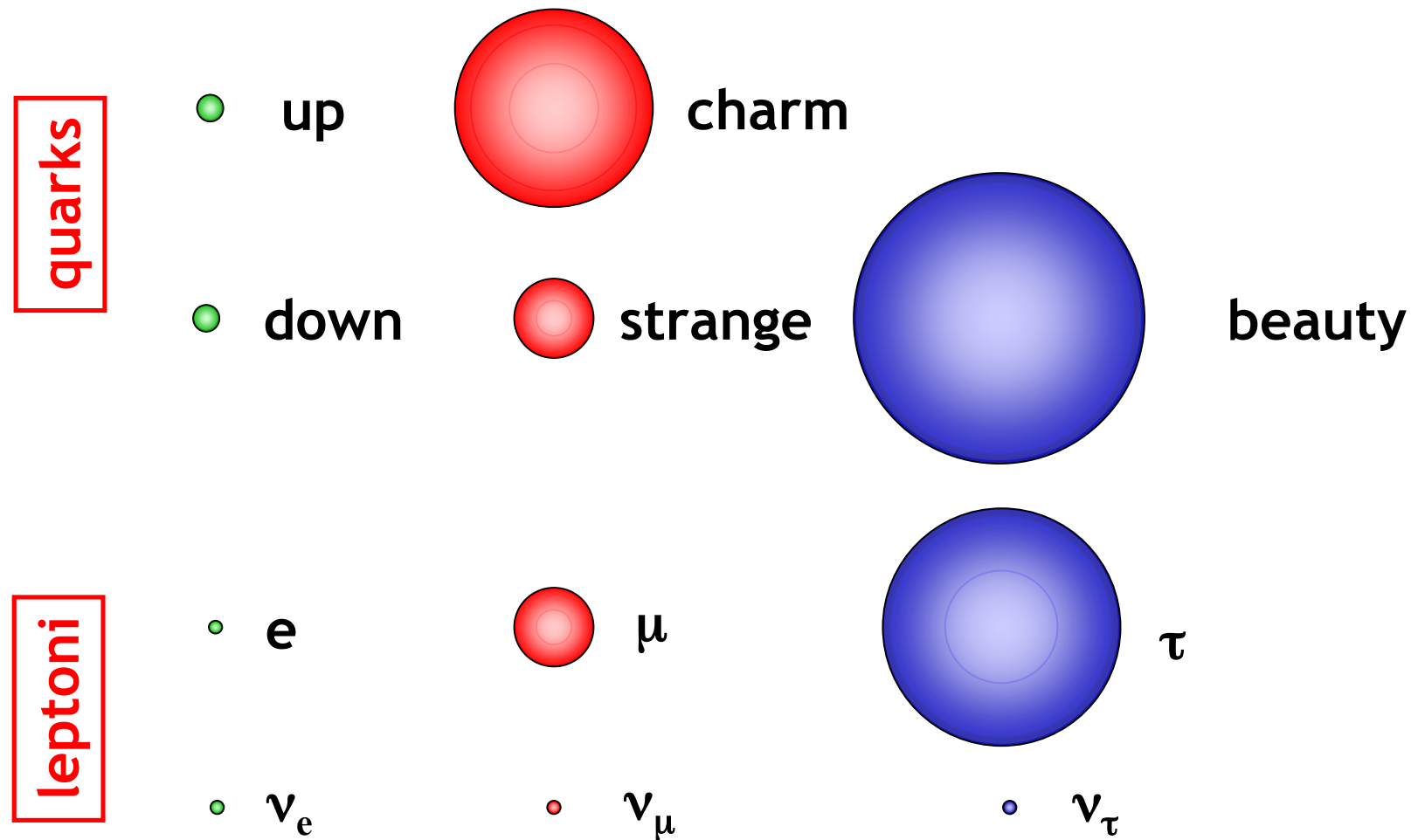
~ 10^{-8} ?

(rispetto alla massa di un singolo protone)

Tutto intorno a noi (l'intera Tavola Periodica) e' fatto di up quarks, down quarks e elettroni.

... ma non e' finita qui ...

La Natura fornisce anche una copia piu' pesante della famiglia
... e un'altra copia ... ancora piu' pesante ...



Il Quark Top

... e qui e'
dove ci fermiamo

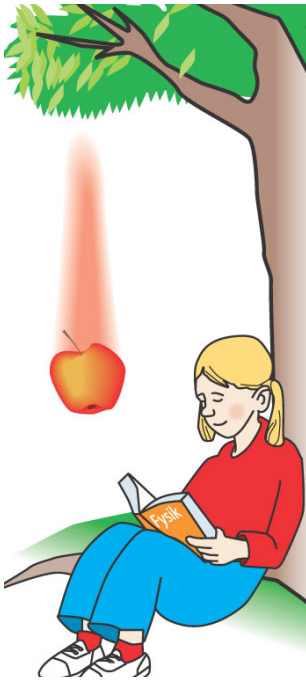
Scoperto nel 1995

Pesa come un nucleo d'oro !!

Forza Gravitazionale



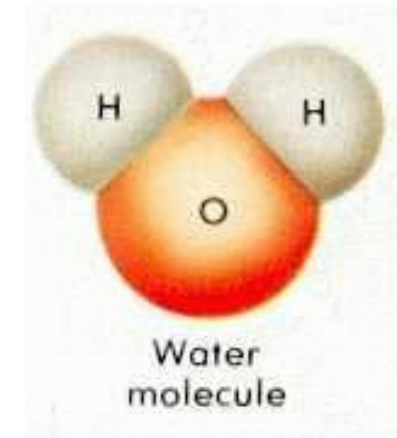
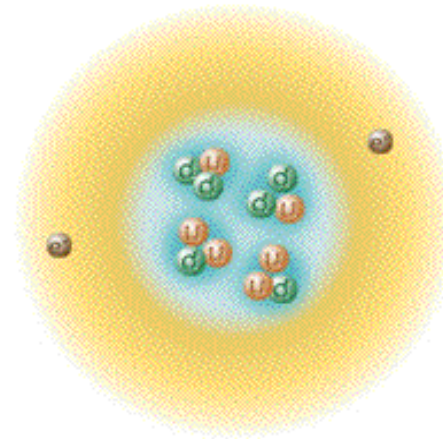
Isaac Newton
(1642 - 1727)



Forza Elettromagnetica



James Clerk Maxwell
(1831 - 1879)



Dimensione degli atomi dipende da intensita' di forza EM

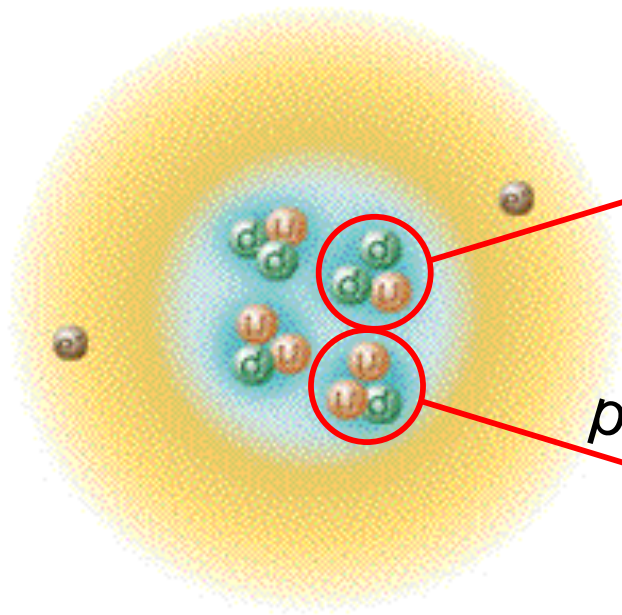
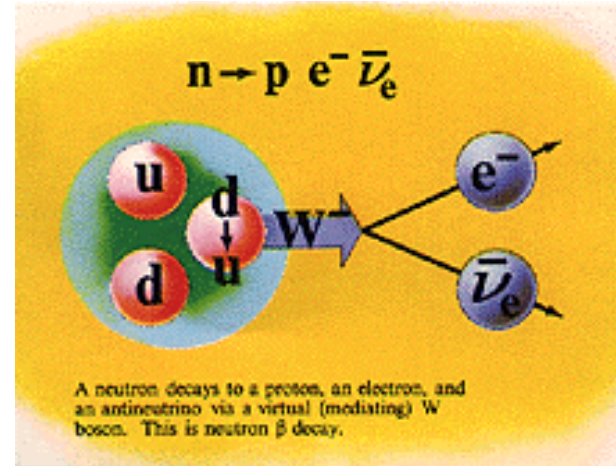
Come le stelle generano energia

Forza Debole



Enrico Fermi
(1901 - 1954)

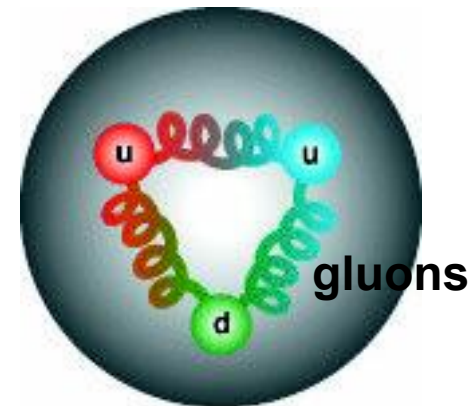
Decadimenti radioattivi



Decadimento
del neutrone

protone, nucleo

Forza Forte



Dimensione dei nuclei dipende da intensita' di forza forte

Molte questioni aperte ...

**Massa e bosone di Higgs,
Quanti bosoni di Higgs ?**

Quante dimensioni ?

Quark liberi ?

4 forze?

12 particelle ?

*Carenza di
antimateria*

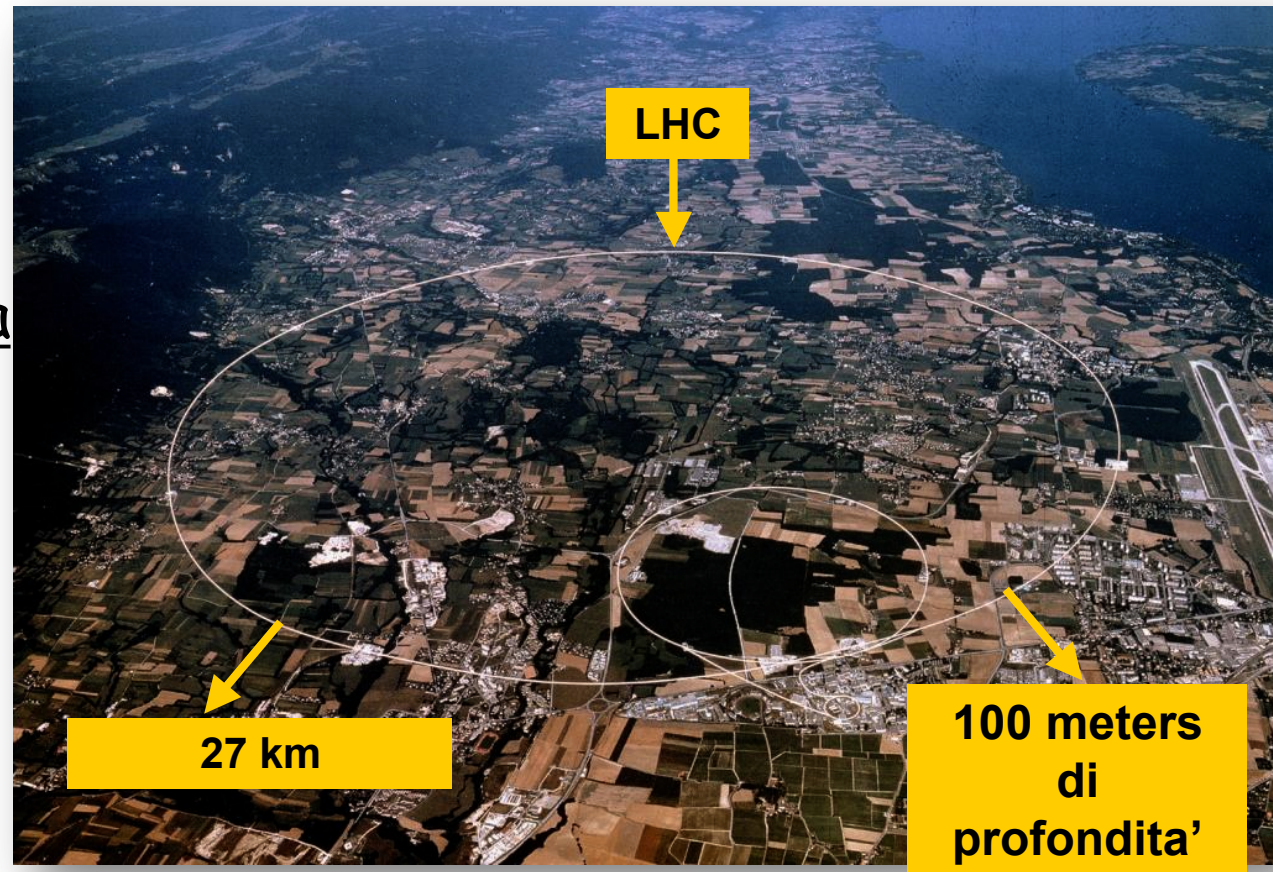
E la gravita' ?

Mini buchi neri?

96% dell'universo e' ignoto

Il Large Hadron Collider (LHC) al CERN

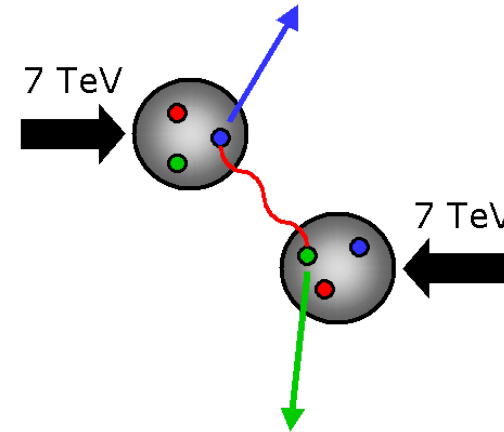
Sulla frontiera
Franco-Svizzera



100m di profondita' ... in tunnel lungo 27km...
... accelera protoni a 0.999999996 volte la velocita' della luce.

Large Hadron Collider

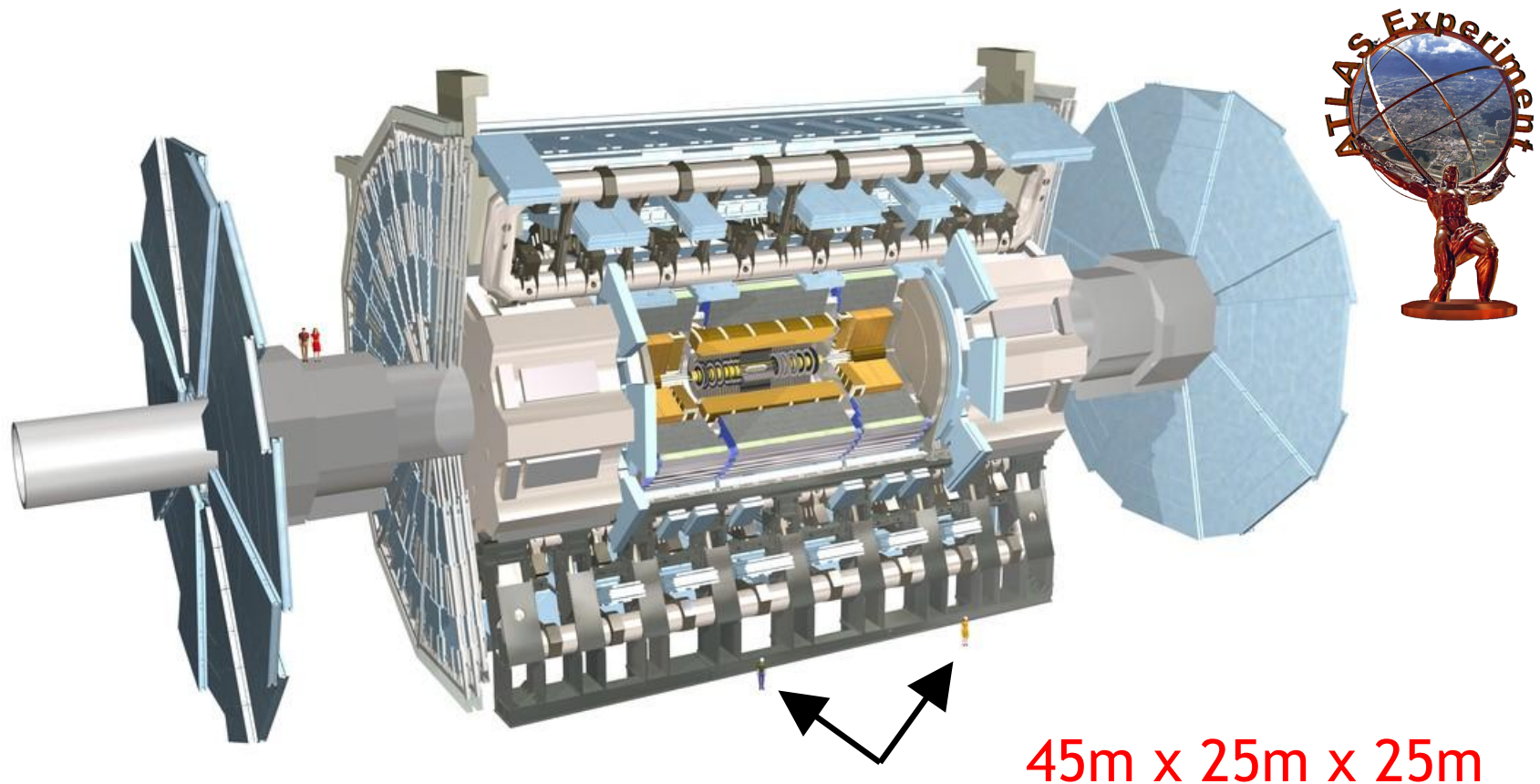
Fa collidere protoni
con 7 TeV ciascuno
($7 \times 10^{12} = 7$ trillioni di
elettronvolt)



- 27 km circonferenza
- Ciascun protone circola nell'anello piu' di 11,000 volte al secondo.
- Protoni collidono in 4 punti, circa 600 milioni di volte al secondo.
- 300 trilioni di protoni nel fascio
- Energia dei protoni e' simile a **un'auto che viaggia a 450 m/s**
- Magneti superconduttori raffreddati a ~ 1.9 K (piu' freddo dello Spazio).
- Vuoto comparabile a quello interplanetario (10^{-13} atm)

Rivelare il risultato delle Collisioni

Protoni o ioni collidono in 4 enormi caverne, creando condizioni e particelle esistite solo una frazione di secondo dopo il big bang.

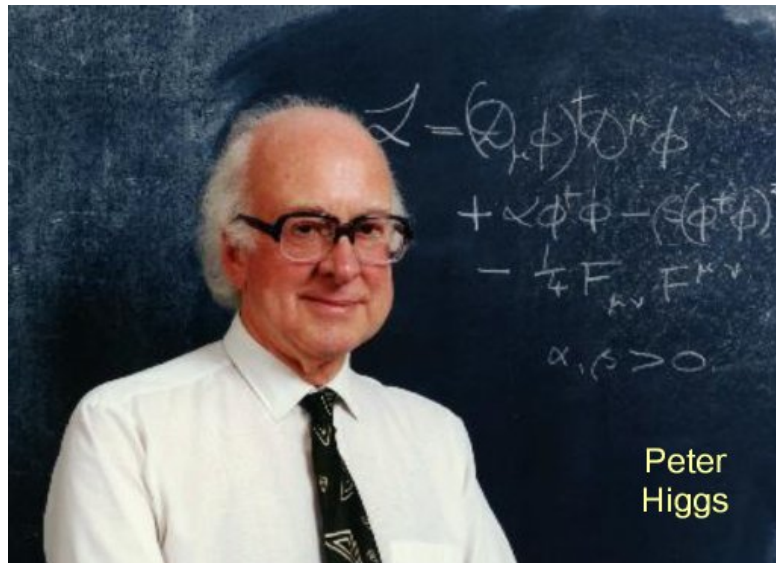


ATLAS Control Room



Il bosone di Higgs

Come fanno le particelle ad avere massa?
Perche' alcune sono piu' pesanti di altre?



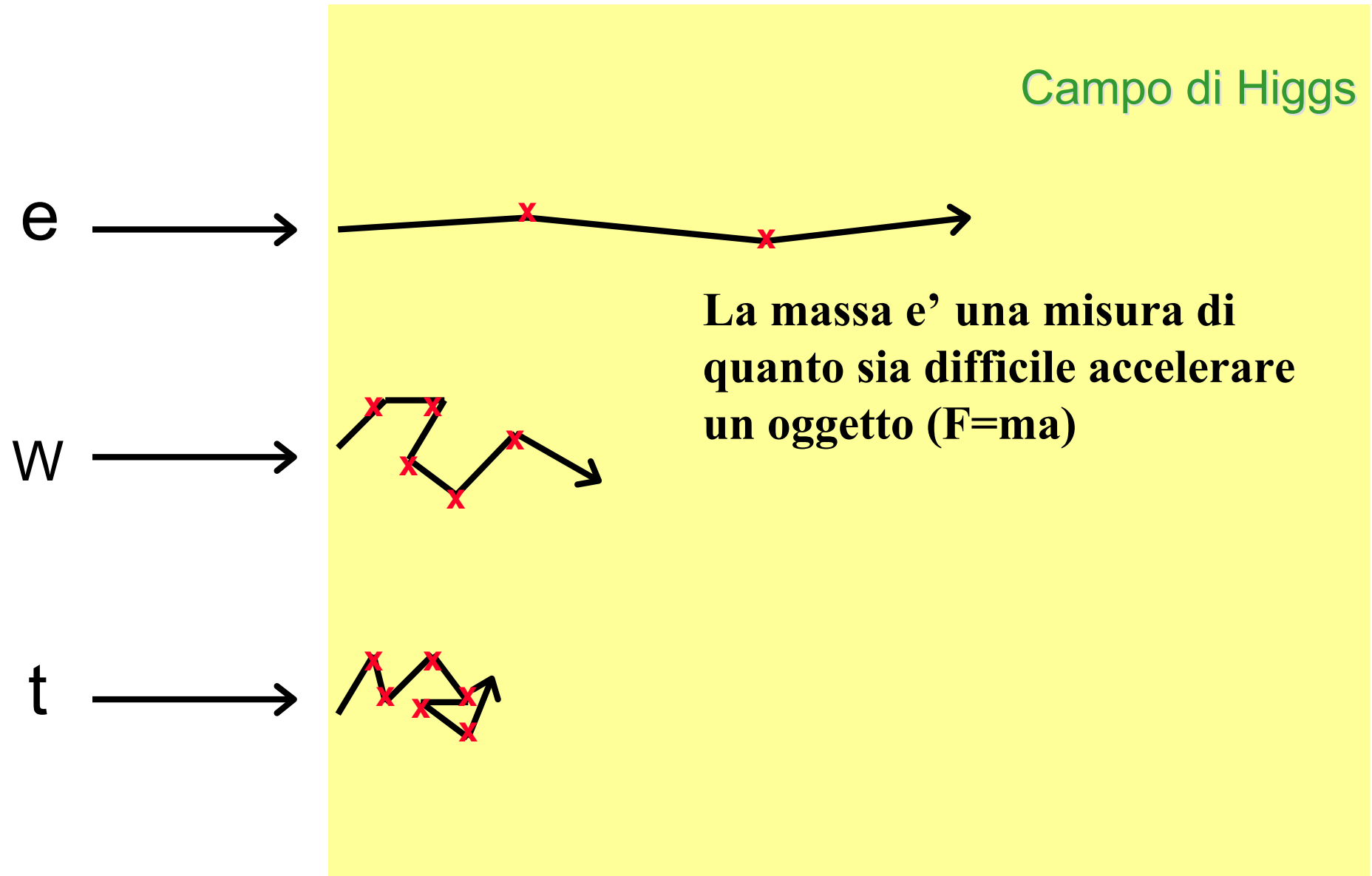
Negli anni '60, il fisico Peter Higgs ideò una teoria

Una nuova particella, il bosone di Higgs, interagisce con le altre particelle e le rallenta

Particelle che 'sentono' il campo del bosone di Higgs acquistano massa; chi lo "sente" meno, resta leggero

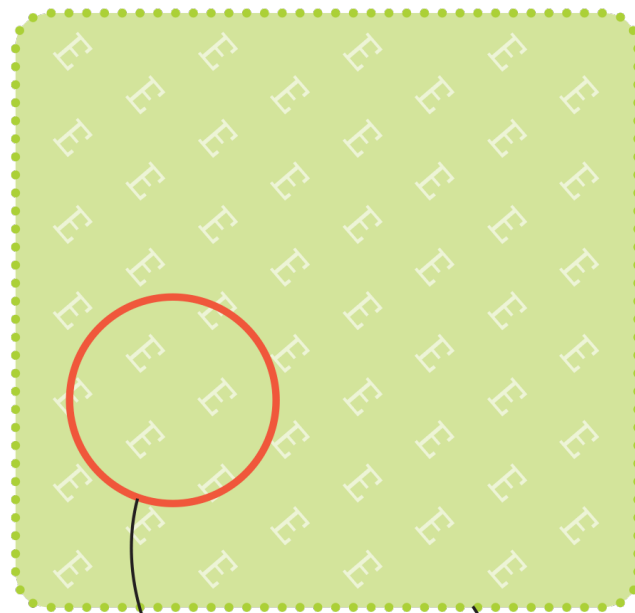
Nuova particella

Che da' massa a tutte le particelle



Il meccanismo di Higgs

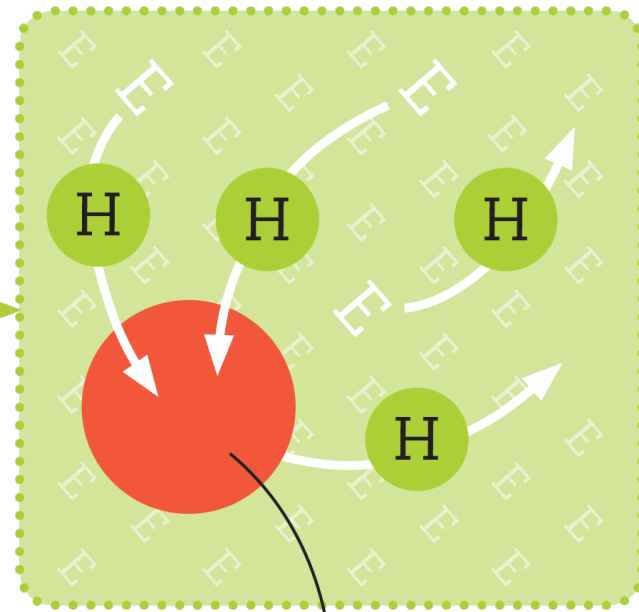
An **energy field**, known as the **Higgs field**, is present everywhere in the Universe



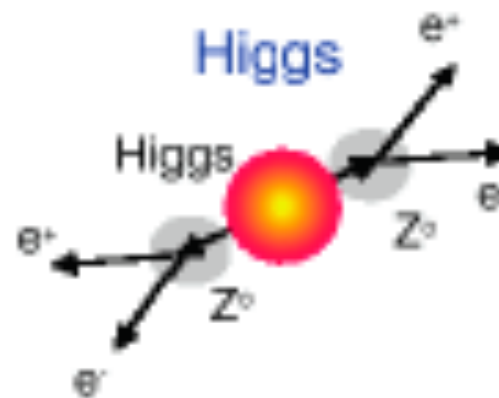
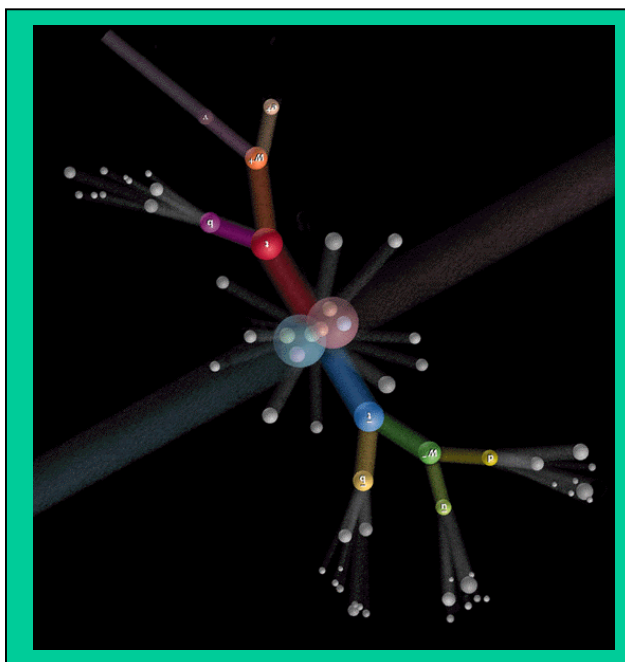
particle with
no mass

Higgs field

The **Higgs boson** is a short-lived particle that **transfers energy** between the Higgs field and other particles: it is an **energy carrier**



The energy that a particle gains from the Higgs field is detected as the particle's **mass**.



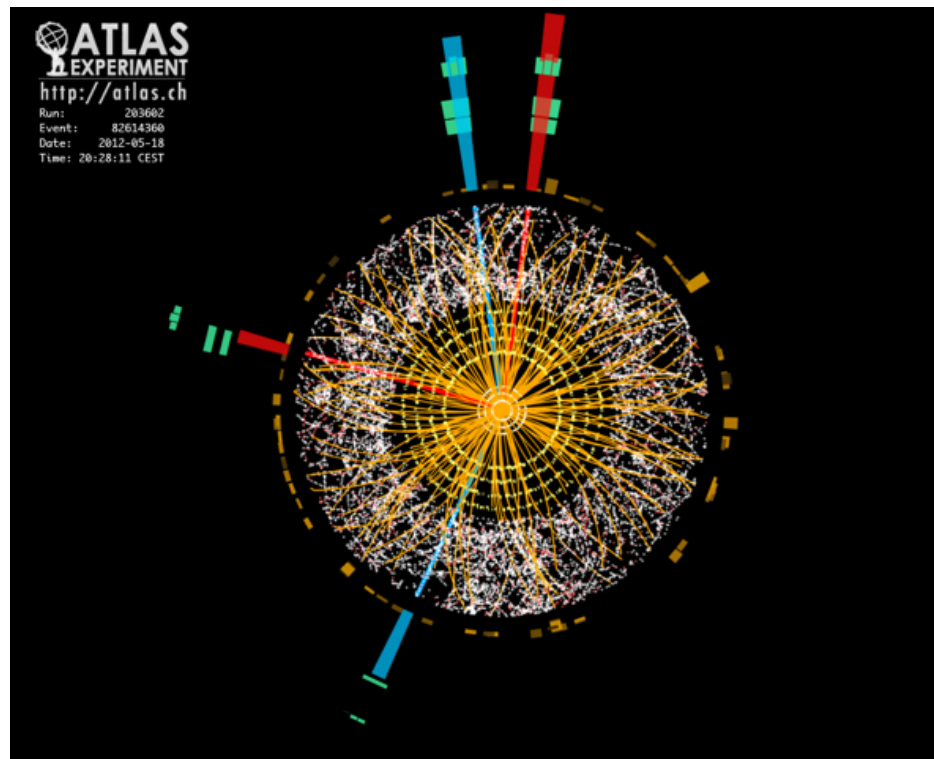
**Gli eventi di interesse sono molto rari:
1 in 100,000,000,000 (1 seguito da 11 zero)**

**Equivalente a cercare un grano di riso in
2.5 milioni di kg di riso !**

E il bosone di Higgs vive solo per $\sim 10^{-22}$ sec

La scoperta

Pubblicato nel luglio 2012 - enorme pubblicita' !



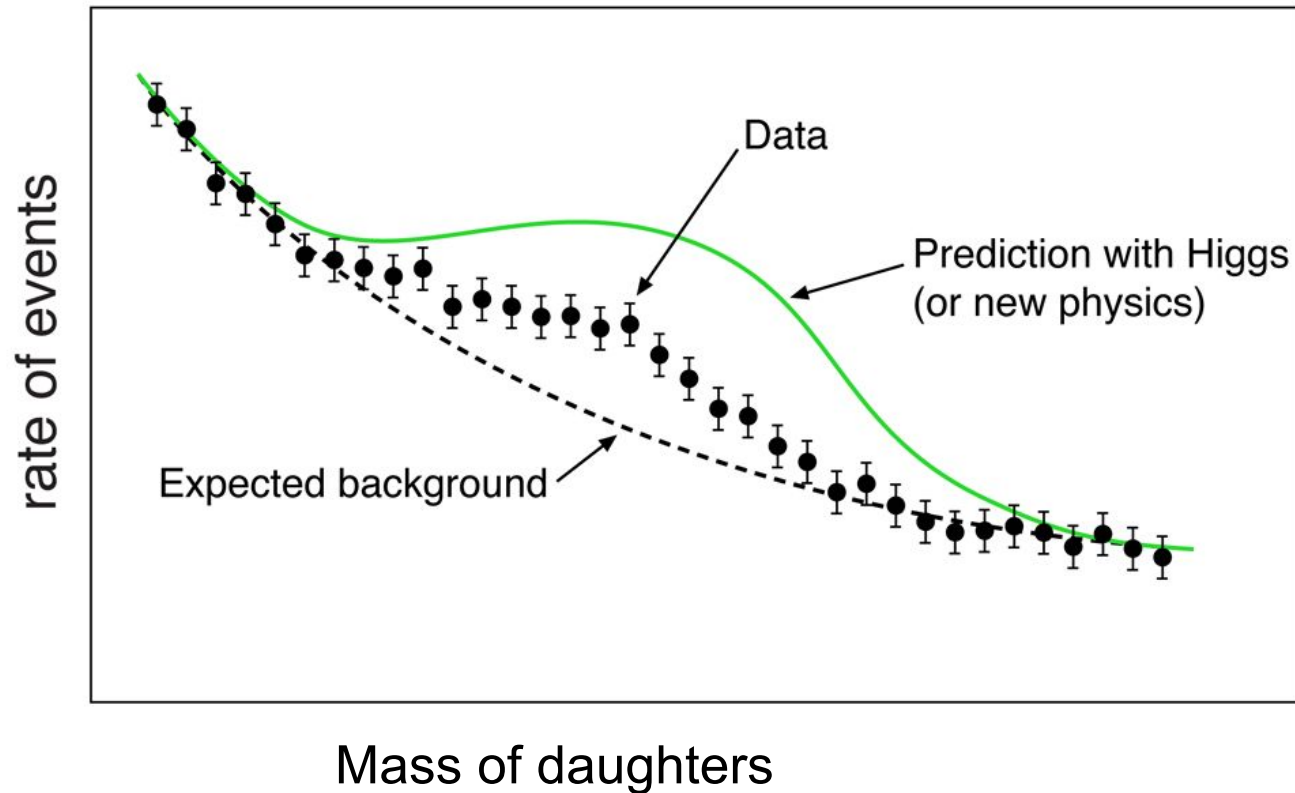
Candidato
Higgs $\rightarrow 4 e$

Nuova Particella
Consistente con
Bosone di Higgs



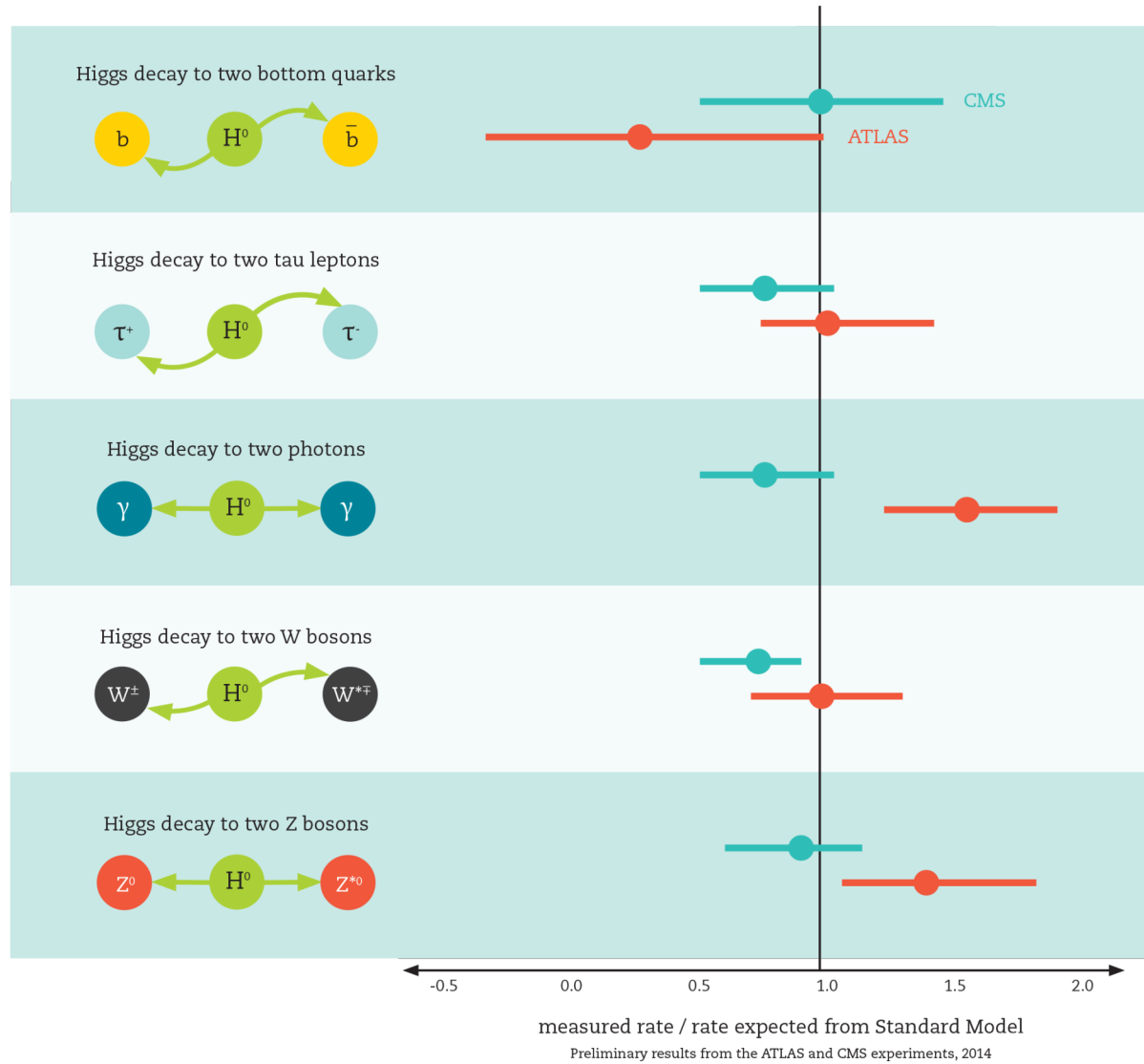
Press Release

Come si osserva....



Bosone di Higgs non e' come l'elefante rosa: osservare eventi con Massa = 126 GeV non significa trovare il bosone - la maggioranza e' fondo. Impossibile dire quali eventi specifici sono segnale. Ricerca di un eccesso di eventi, rispetto al fondo atteso.

Si comporta in accordo con le previsioni ?



L'effetto del bosone di Higgs

Senza il campo di Higgs, l'universo come lo conosciamo non potrebbe esistere, perché gli atomi e le altre strutture non potrebbero formarsi, e le reazioni nelle stelle non potrebbero avvenire

Possibile link all'espansione dell'Universo

Il bosone di Higgs ama interagire con particelle pesanti:
Puo' essere un portale verso l'ignoto

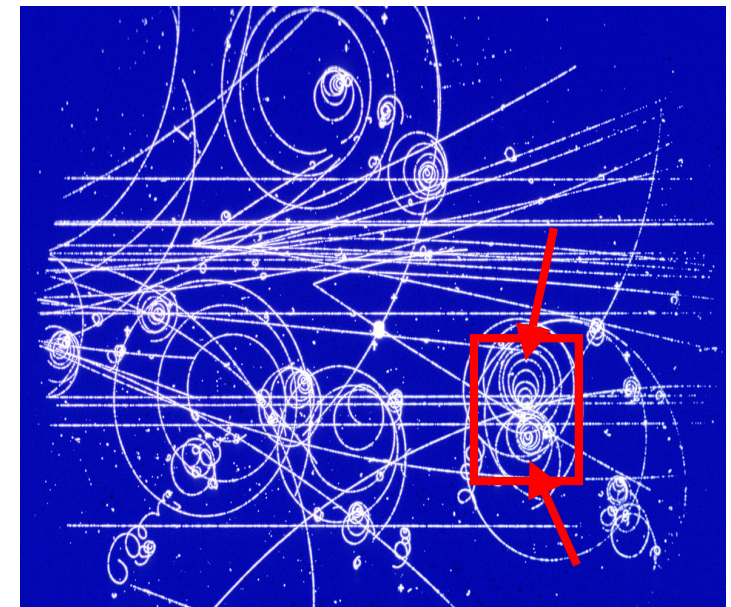
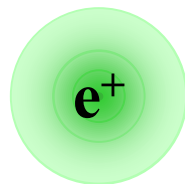
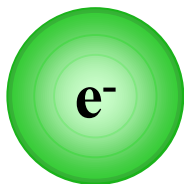
Cosa e' Antimateria?

1928: Paul Dirac formulo' la teoria dell'elettrone unificando meccanica quantistica e relativita'. Ma predisse anche l'esistenza di anti-elettroni ('positroni')

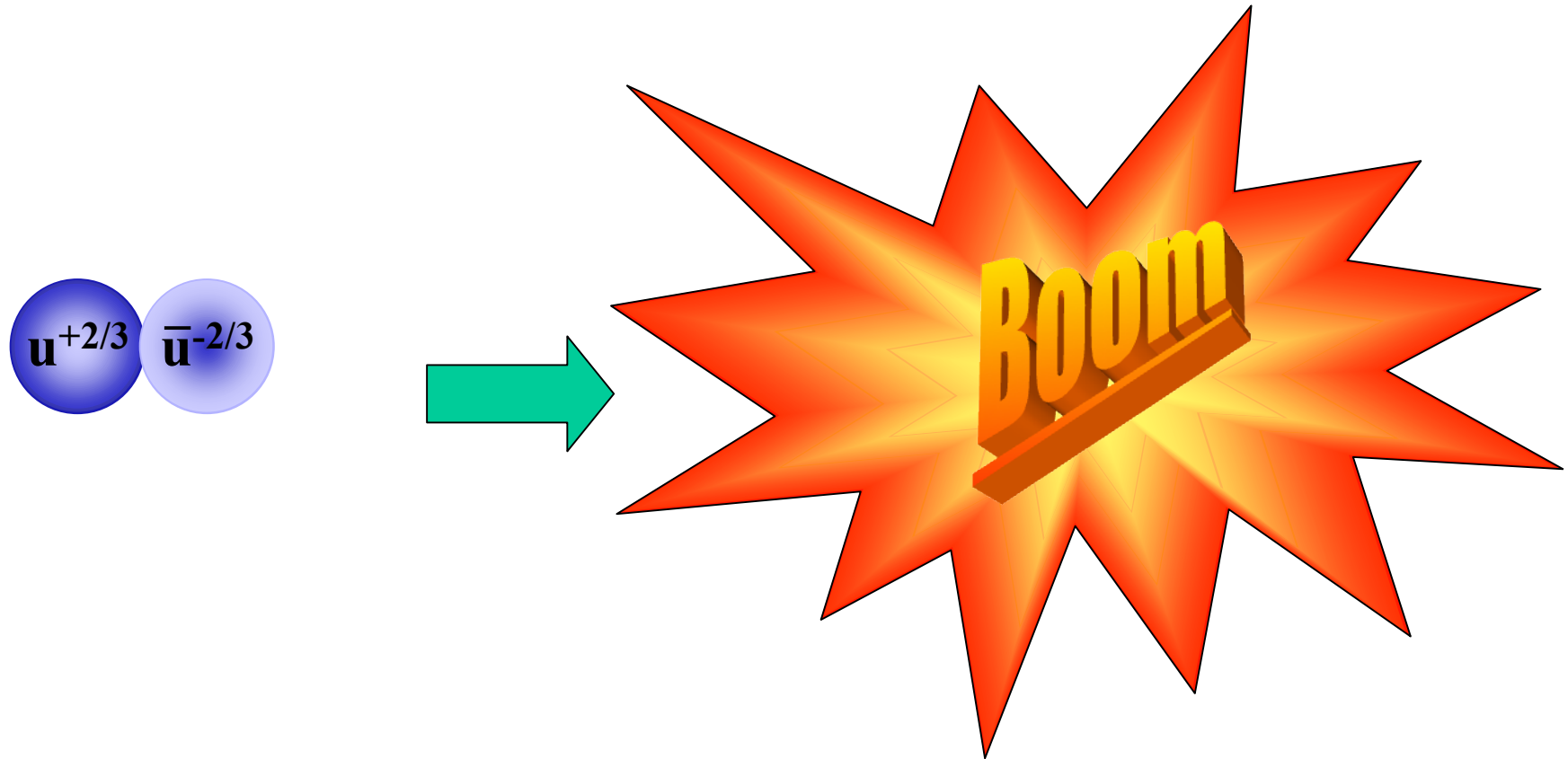
Scoperti da Anderson nel 1933



Ogni particella di 'materia' ha un'antiparticella, con la stessa massa ma carica opposta.



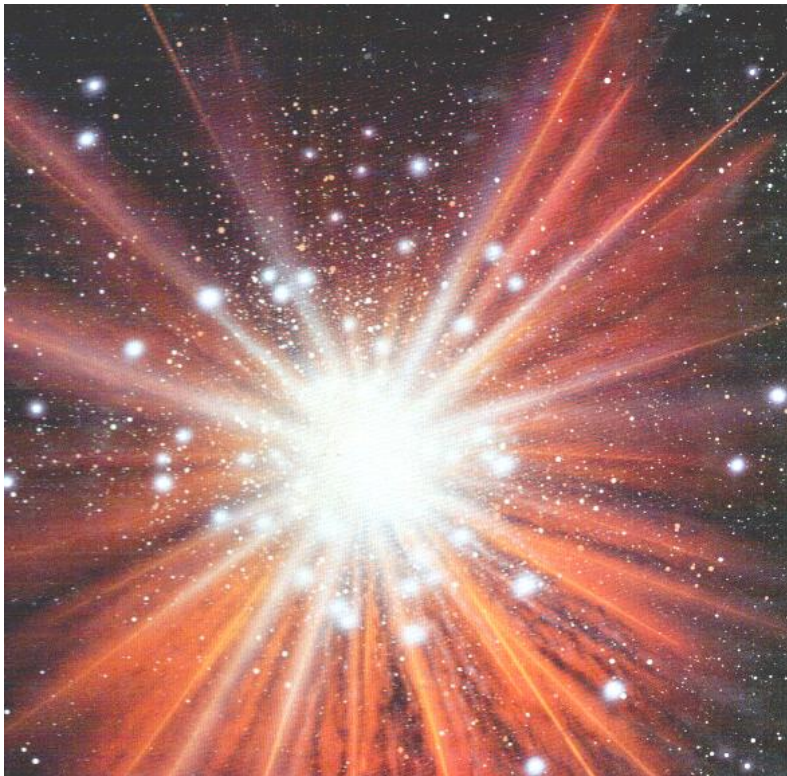
Quando la materia incontra l'antimateria...



Se una particella e una antiparticella, ciascuna di massa m , collidono, si annichilano e producono energia $E = 2mc^2$ sotto forma di radiazione

Il Big Bang

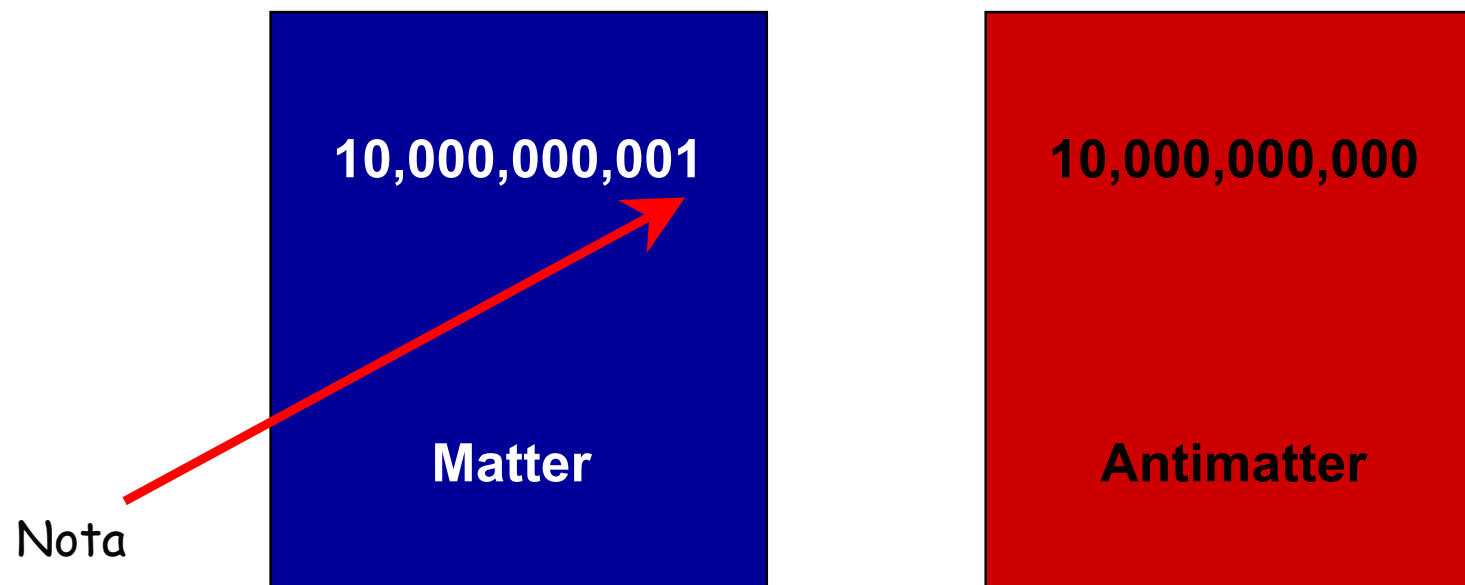
- Finora, tutti gli esperimenti hanno mostrato che **quantita' uguali di materia e antimateria** sono prodotte quando l'energia e' convertita in materia



- **Dunque, quantita' uguali di materia e antimateria sono state create nel Big Bang.**
- **Ma viviamo in un universo fatto di materia.**
- **Dove e' finita tutta l'antimateria ?**

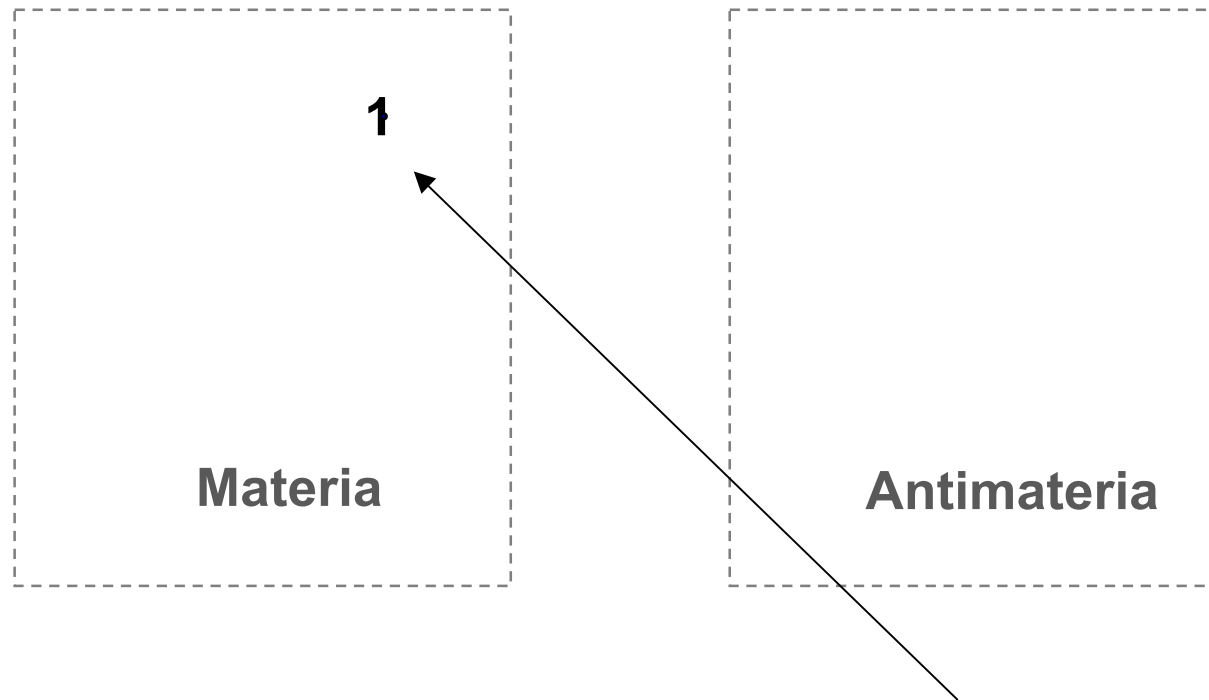
Siamo fortunati perche'...

Immediatamente dopo il Big Bang,
la materia e antimateria NON erano esattamente identiche



.... Poi la Grande Annichilazione !!

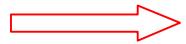
Dopo la Grande Annichilazione...



Dopo che l'antimateria e tutta la materia e' sparita, a parte una minuscola quantita' di materia Tutto si e' formato da quell'1.

Violazione di CP

$P = \text{parita'} (riflessione in uno specchio)$
 $C = \text{coniugazione di carica (scambio particella/antiparticella)}$



CP = azione combinata di C e P

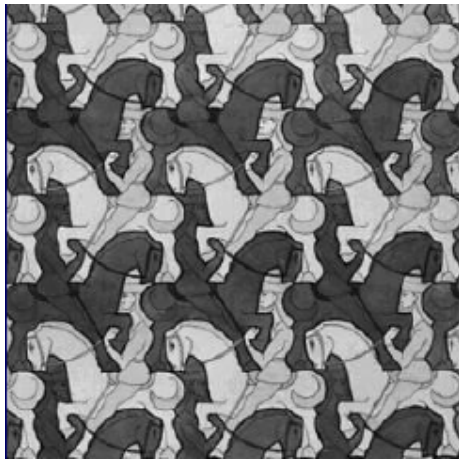
La mia immagine in uno specchio: e' simmetrica destra/sinistra ?

La violazione di CP e' una delle condizioni necessarie per realizzare lo squilibrio materia/antimateria

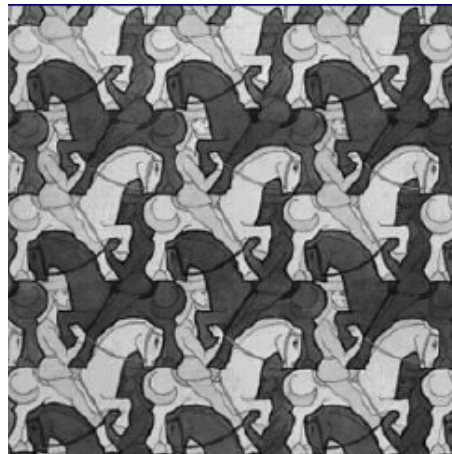
Violazione di CP: analogia

P (parita') =specchio

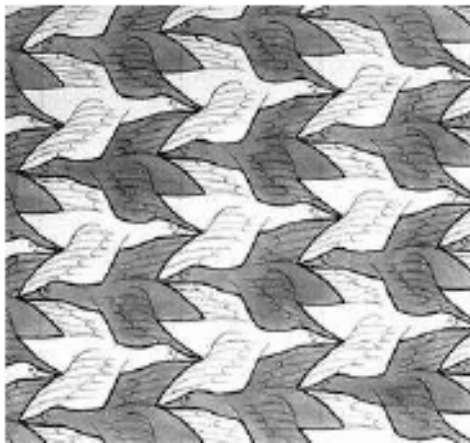
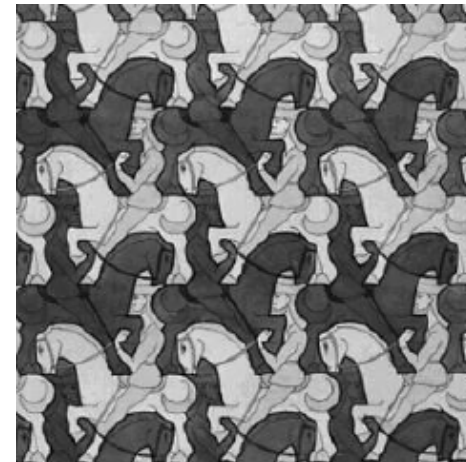
C (coniugazione di carica) =bianco/nera



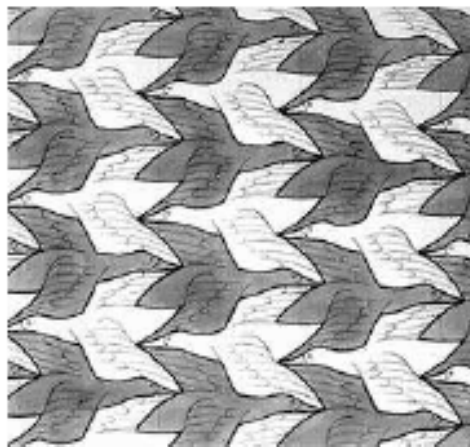
P



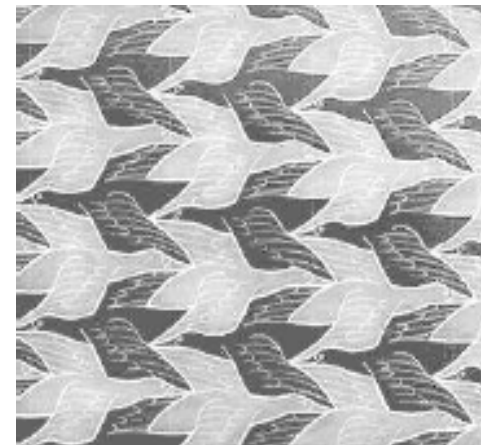
C



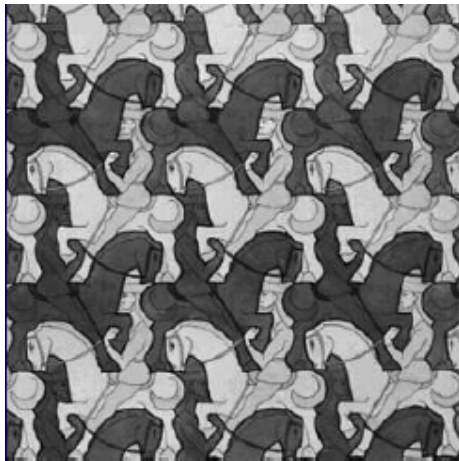
P



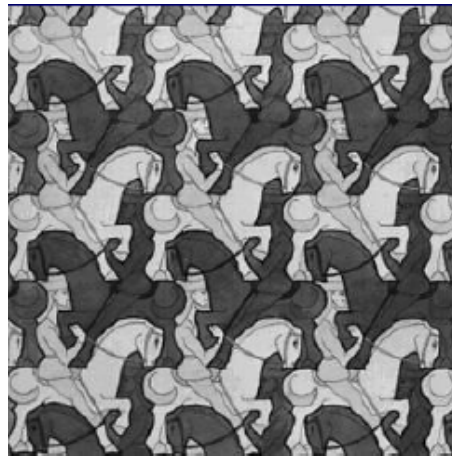
C



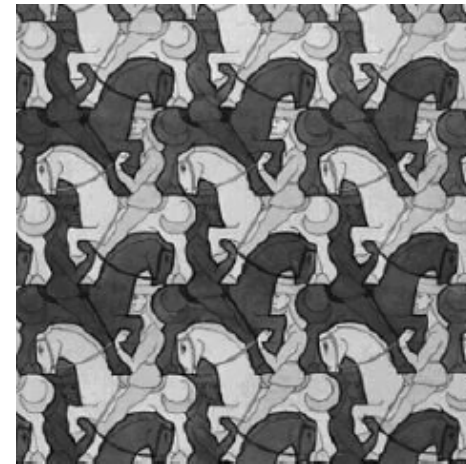
P (parity) = mirror
 C (charge conjugation) = anti-image



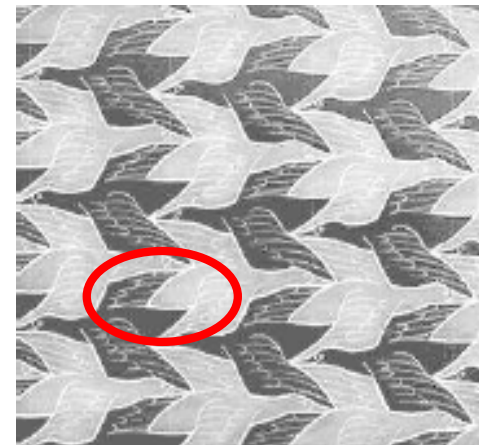
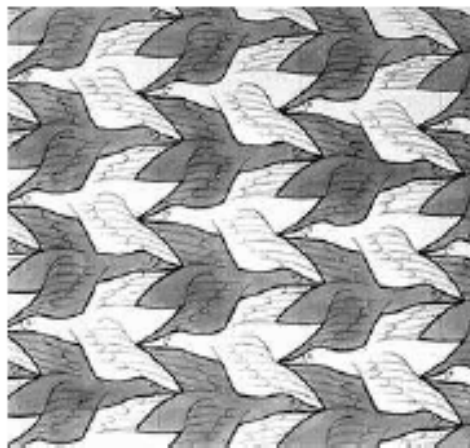
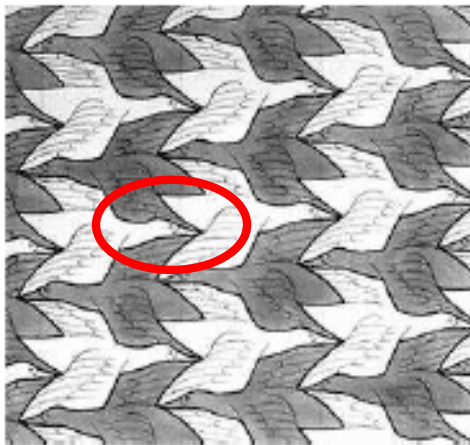
P



C



CPC



CPV

L'Universo nasce con quantità
identiche di materia e antimateria

$t = 0$

violazione di CP :



(violazione di numero
barionico e
transizione di fase)

L'Universo contiene
un poco più di materia che
antimateria

$t \sim 1 \mu \text{sec}$

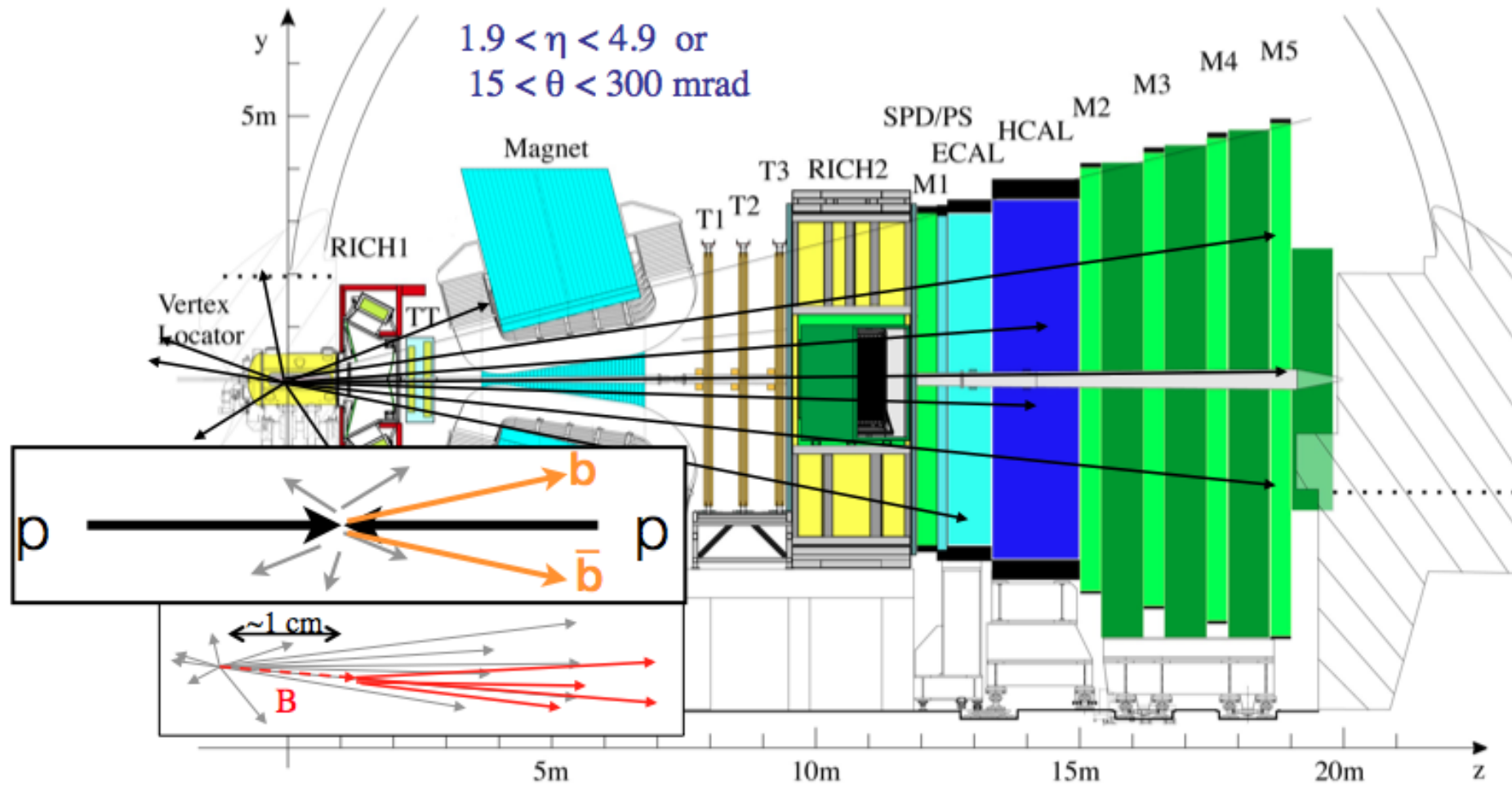
Particelle e anti-particelle si annichilano :



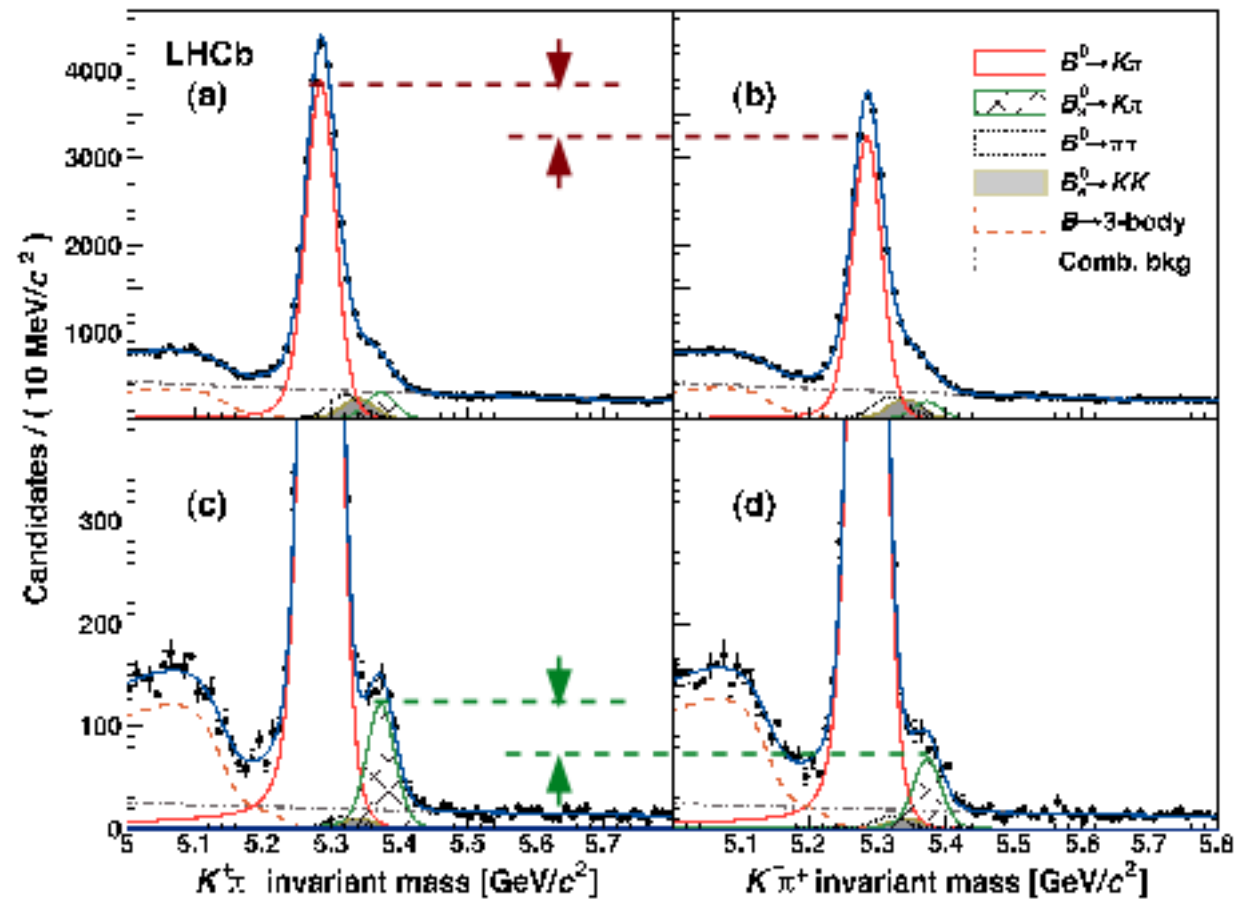
L'Universo contiene solo materia
(e un gran numero di fotoni)

$t \sim 1 \text{sec}$

LHCb: violazione di CP nei mesoni B



Esempio: violazione di CP nei mesoni B



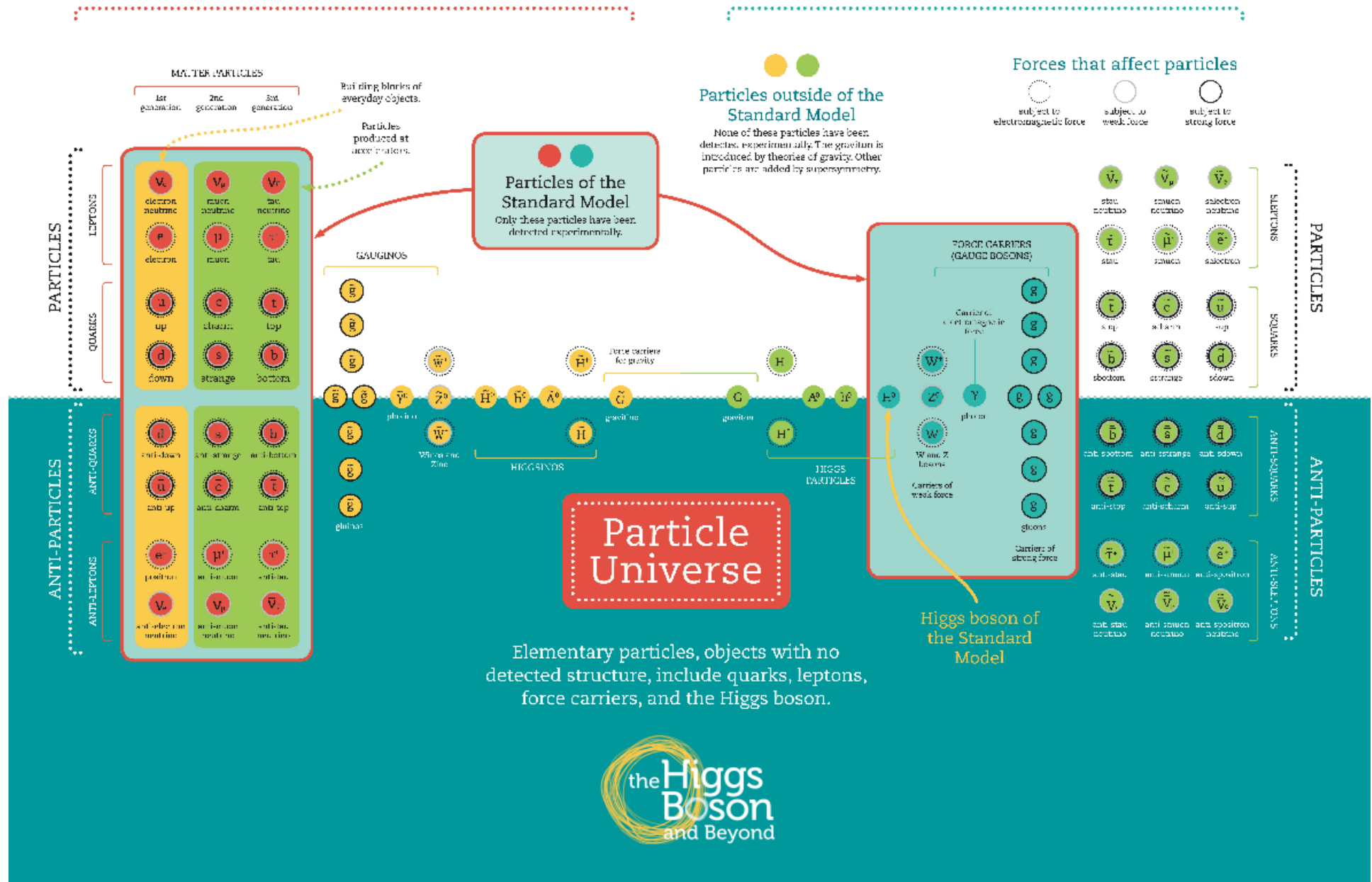
particella

antiparticella

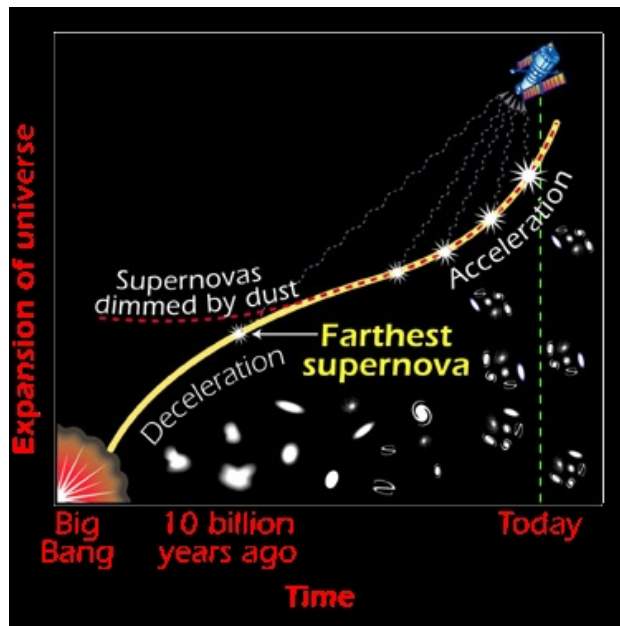
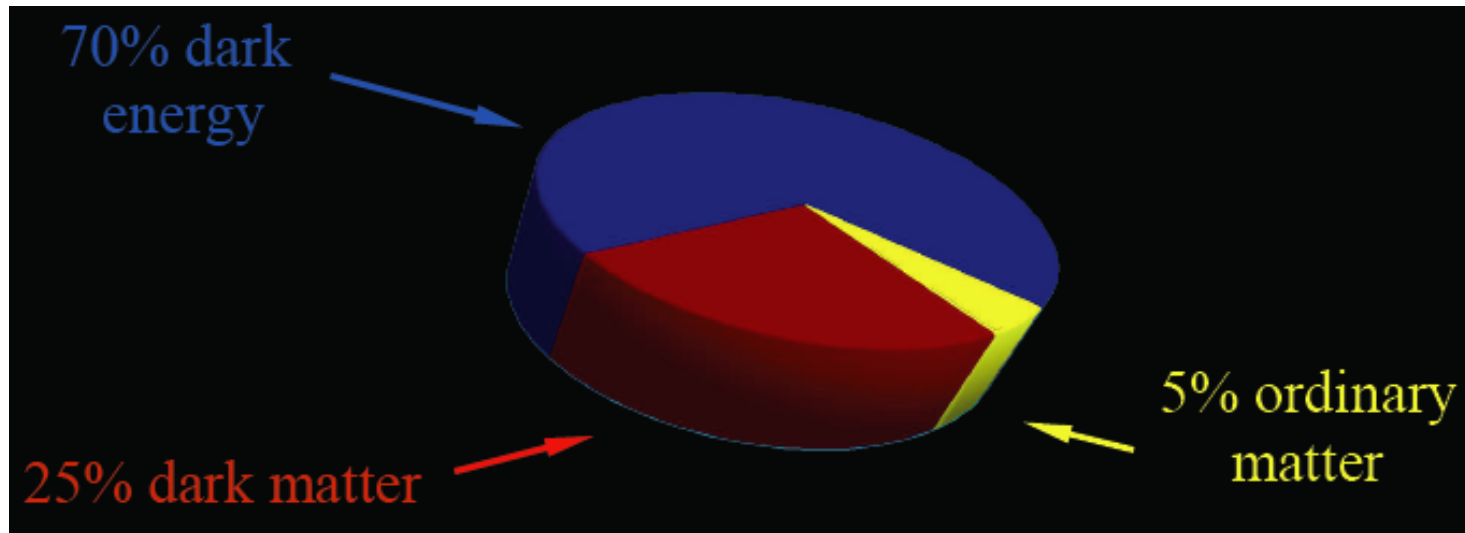
Supersymmetria

FERMIONS

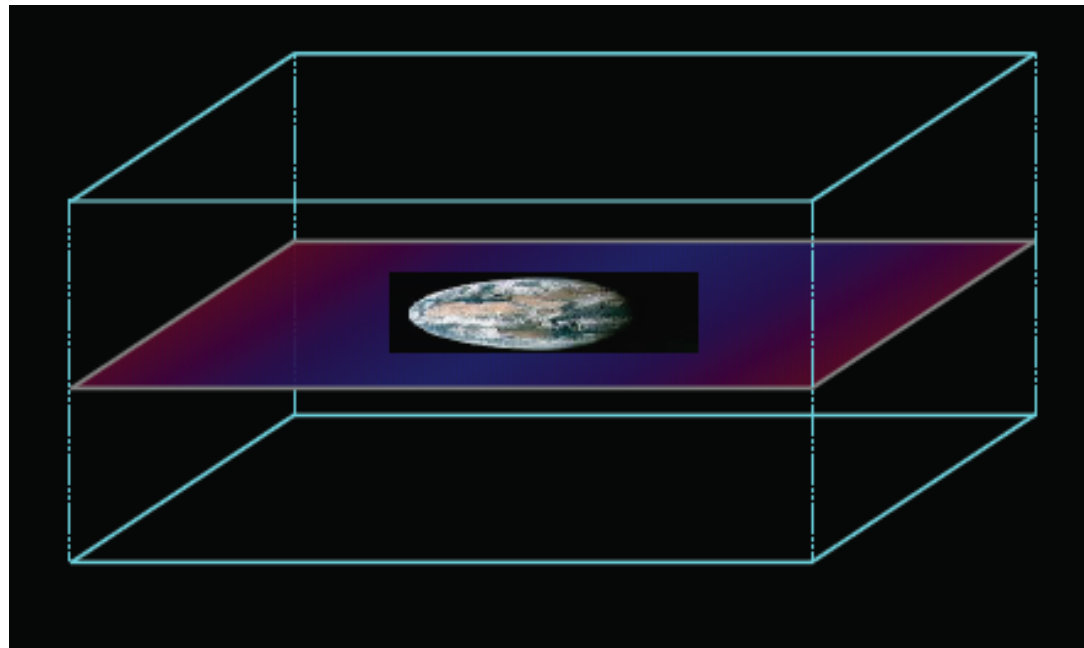
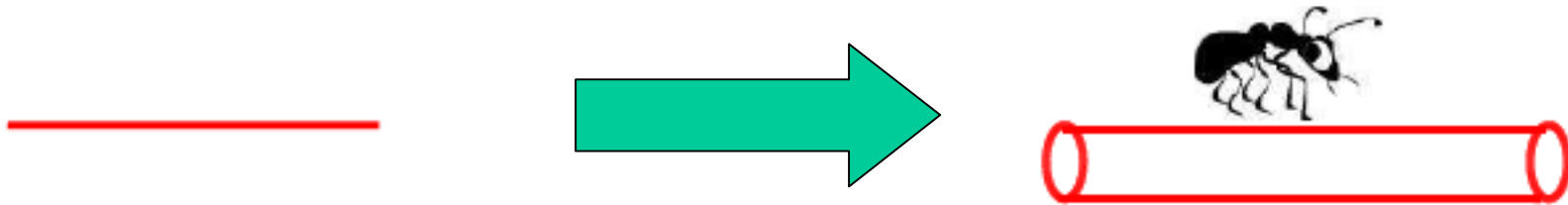
BOSONS



Solo una piccola frazione del totale e' la materia ordinaria che conosciamo !



Quante dimensioni ci sono ?
Non c'e' ragione perche' ce ne siano solo 3 ...
A parte il fatto che ne osserviamo 3 !



Nel futuro....

- Troveremo una struttura interna nei quarks?
- Capiremo perche' ci sono 3 famiglie di quarks?
- Il bosone di Higgs corrisponde al **Modello Standard** ?
- E' **l'unico bosone di Higgs** ?
- Troveremo l'origine della Violazione di CP ?
- Troveremo la Supersimmetria, la Extra Dimensioni, o qualcosa del tutto inaspettato ?
- **LHC ricomincerà a prendere dati nel 2015 e durerà per i prossimi 15-20 anni !**

Grazie per l'ascolto !!

Domande ?