

# Fisica Nucleare e Fisica delle Particelle Elementari

*Fabio Bossi, Laboratori Nazionali di Frascati INFN*



La varietà di oggetti di differente forma e consistenza esistente in natura e' forse il fatto osservativo piu' evidente ai nostri occhi

Anche volendo ridurre tutto alla sola quantita' di sostanze chimiche di base (acidi, zuccheri, sali...) oggi conosciute, tale numero si aggira intorno alle diverse decine di migliaia

E' possibile ricondurre l'intera realta' conosciuta ad un piccolo numero di componenti fondamentali interagenti tra loro attraverso poche leggi note?

*(La vecchia domanda di Anassimene e dei fisiocratici)*

Il primo successo in questa direzione e' stato ottenuto dalla Chimica, grazie alla introduzione della **Tavola Periodica degli Elementi**, dovuta a Mendeleev

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																												
periodi I	gruppi																																													
											III	IV	V	VI	VII	VIII																														
1	H <sup>1</sup>																	He <sup>2</sup>																												
2	Li <sup>3</sup>	Be <sup>4</sup>											B <sup>5</sup>	C <sup>6</sup>	N <sup>7</sup>	O <sup>8</sup>	F <sup>9</sup>	Ne <sup>10</sup>																												
3	Na <sup>11</sup>	Mg <sup>12</sup>	metalli di transizione										Al <sup>13</sup>	Si <sup>14</sup>	P <sup>15</sup>	S <sup>16</sup>	Cl <sup>17</sup>	Ar <sup>18</sup>																												
4	K <sup>19</sup>	Ca <sup>20</sup>	Sc <sup>21</sup>	Ti <sup>22</sup>	V <sup>23</sup>	Cr <sup>24</sup>	Mn <sup>25</sup>	Fe <sup>26</sup>	Co <sup>27</sup>	Ni <sup>28</sup>	Cu <sup>29</sup>	Zn <sup>30</sup>	Ga <sup>31</sup>	Ge <sup>32</sup>	As <sup>33</sup>	Se <sup>34</sup>	Br <sup>35</sup>	Kr <sup>36</sup>																												
5	Rb <sup>37</sup>	Sr <sup>38</sup>	Y <sup>39</sup>	Zr <sup>40</sup>	Nb <sup>41</sup>	Mo <sup>42</sup>	Tc <sup>43</sup>	Ru <sup>44</sup>	Rh <sup>45</sup>	Pd <sup>46</sup>	Ag <sup>47</sup>	Cd <sup>48</sup>	In <sup>49</sup>	Sn <sup>50</sup>	Sb <sup>51</sup>	Te <sup>52</sup>	I <sup>53</sup>	Xe <sup>54</sup>																												
6	Cs <sup>55</sup>	Ba <sup>56</sup>	La <sup>57</sup>	Hf <sup>72</sup>	Ta <sup>73</sup>	W <sup>74</sup>	Re <sup>75</sup>	Os <sup>76</sup>	Ir <sup>77</sup>	Pt <sup>78</sup>	Au <sup>79</sup>	Hg <sup>80</sup>	Tl <sup>81</sup>	Pb <sup>82</sup>	Bi <sup>83</sup>	Po <sup>84</sup>	At <sup>85</sup>	Rn <sup>86</sup>																												
7	Fr <sup>87</sup>	Ra <sup>88</sup>	Ac <sup>89</sup>																																											
	lantanidi		<table border="1"> <tr> <td>Ce<sup>58</sup></td> <td>Pr<sup>59</sup></td> <td>Nd<sup>60</sup></td> <td>Pm<sup>61</sup></td> <td>Sm<sup>62</sup></td> <td>Eu<sup>63</sup></td> <td>Gd<sup>64</sup></td> <td>Tb<sup>65</sup></td> <td>Dy<sup>66</sup></td> <td>Ho<sup>67</sup></td> <td>Er<sup>68</sup></td> <td>Tm<sup>69</sup></td> <td>Yb<sup>70</sup></td> <td>Lu<sup>71</sup></td> </tr> <tr> <td>Th<sup>90</sup></td> <td>Pa<sup>91</sup></td> <td>U<sup>92</sup></td> <td>Np<sup>93</sup></td> <td>Pu<sup>94</sup></td> <td>Am<sup>95</sup></td> <td>Cm<sup>96</sup></td> <td>Bk<sup>97</sup></td> <td>Cf<sup>98</sup></td> <td>Es<sup>99</sup></td> <td>Fm<sup>100</sup></td> <td>Mi<sup>101</sup></td> <td>No<sup>102</sup></td> <td>Lr<sup>103</sup></td> </tr> </table>																Ce <sup>58</sup>	Pr <sup>59</sup>	Nd <sup>60</sup>	Pm <sup>61</sup>	Sm <sup>62</sup>	Eu <sup>63</sup>	Gd <sup>64</sup>	Tb <sup>65</sup>	Dy <sup>66</sup>	Ho <sup>67</sup>	Er <sup>68</sup>	Tm <sup>69</sup>	Yb <sup>70</sup>	Lu <sup>71</sup>	Th <sup>90</sup>	Pa <sup>91</sup>	U <sup>92</sup>	Np <sup>93</sup>	Pu <sup>94</sup>	Am <sup>95</sup>	Cm <sup>96</sup>	Bk <sup>97</sup>	Cf <sup>98</sup>	Es <sup>99</sup>	Fm <sup>100</sup>	Mi <sup>101</sup>	No <sup>102</sup>	Lr <sup>103</sup>
Ce <sup>58</sup>	Pr <sup>59</sup>	Nd <sup>60</sup>	Pm <sup>61</sup>	Sm <sup>62</sup>	Eu <sup>63</sup>	Gd <sup>64</sup>	Tb <sup>65</sup>	Dy <sup>66</sup>	Ho <sup>67</sup>	Er <sup>68</sup>	Tm <sup>69</sup>	Yb <sup>70</sup>	Lu <sup>71</sup>																																	
Th <sup>90</sup>	Pa <sup>91</sup>	U <sup>92</sup>	Np <sup>93</sup>	Pu <sup>94</sup>	Am <sup>95</sup>	Cm <sup>96</sup>	Bk <sup>97</sup>	Cf <sup>98</sup>	Es <sup>99</sup>	Fm <sup>100</sup>	Mi <sup>101</sup>	No <sup>102</sup>	Lr <sup>103</sup>																																	
	attinidi																																													

In essa i **92** elementi di base sono individuati dal numero **Z** (**numero atomico**) ed organizzati con regolarita' determinata dalle loro caratteristiche chimiche. *Tutta la chimica e' riconducibile a questi elementi ed alle loro interazioni*

Ma cosa determina questa regolarità?

Inoltre, sebbene la riduzione a 92 elementi rappresenti una grande semplificazione rispetto alla summenzionata complessità del reale, ancora non sembra una vera riduzione a “pochi” elementi fondamentali

Infine, qual'è la natura intrinseca del legame chimico?

Queste domande trovano risposta nel Modello Atomico degli elementi, sviluppato nei primi due decenni del Novecento

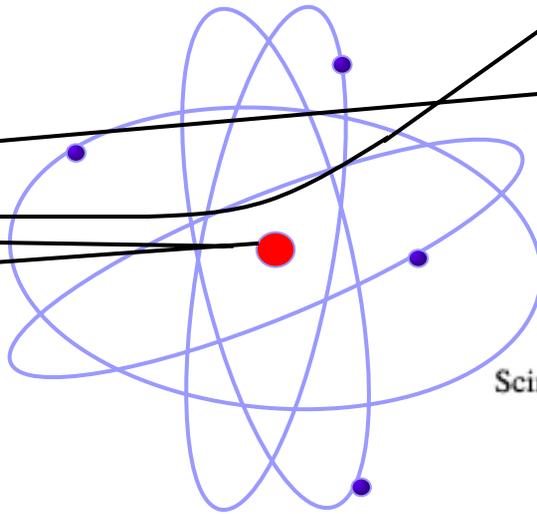
## Il Modello Atomico

Gli elementi sono formati da **atomi**, consistenti di

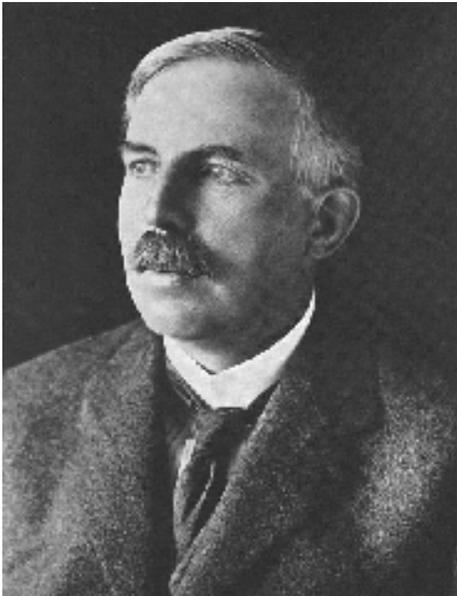
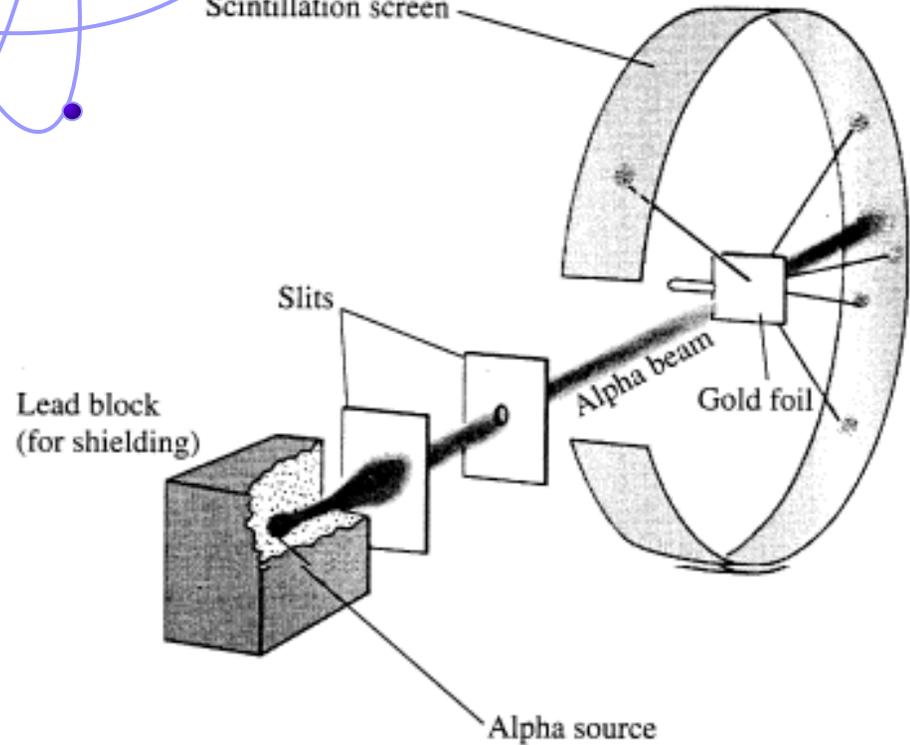
- Un **nucleo** elettricamente carico positivamente, con una quantità di carica elementare esattamente uguale al suo numero atomico (cioè alla sua posizione nella tavola)
- Una **nube elettronica** (carica negativamente) che bilancia la carica nucleare e rende l'atomo elettricamente neutro

*Il legame chimico è determinato dal numero di elettroni negli orbitali esterni dell'atomo. Atomi con orbitali esterni simili hanno proprietà chimiche simili*

# Esperimento di Rutherford

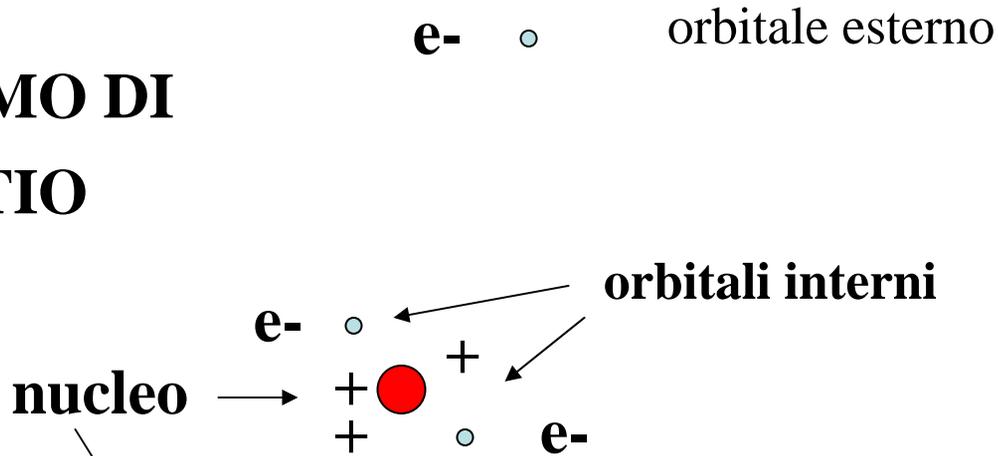


Scintillation screen

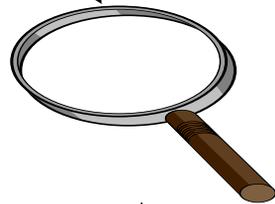


Ernest Rutherford  
1909

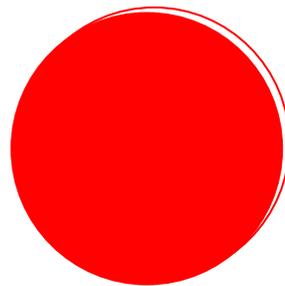
# ATOMO DI LITIO



$\sim 10^{-8}$  cm =  
0.00000001  
cm



Il nucleo e' un oggetto complesso formato da protoni e neutroni



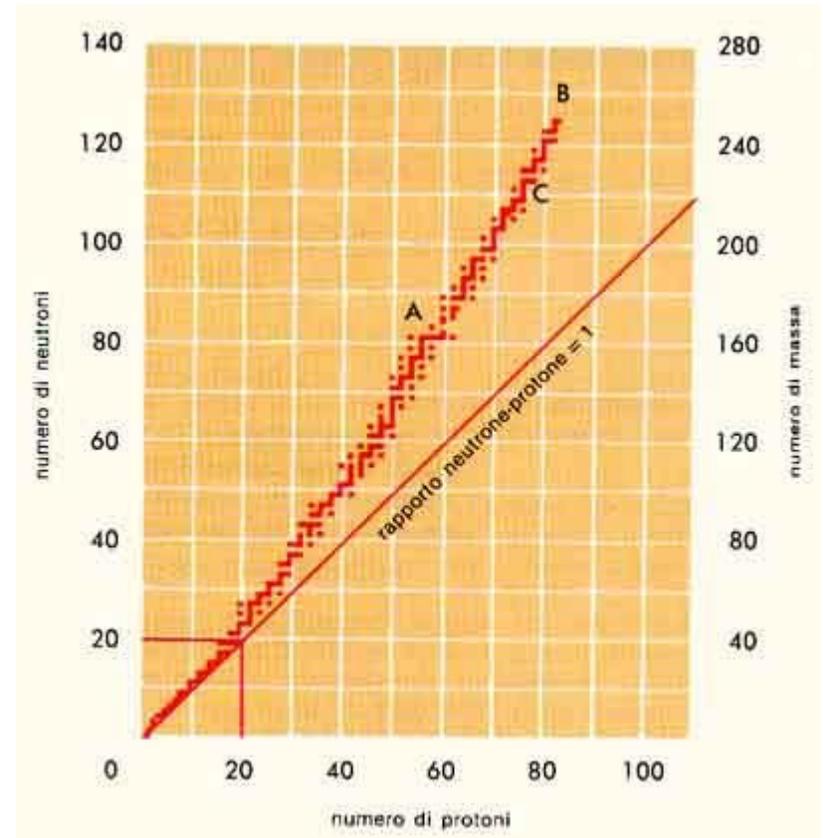
$\sim 10^{-13}$  cm =  
0.000000000  
0001 cm

La presenza di neutroni conferisce stabilita' al nucleo.

Per tutti gli elementi (stesso  $Z$  = stesso numero di protoni) esistono differenti isotopi, caratterizzati da un differente numero di neutroni ( $A$ )

La **curva di stabilita' di nucleare**, determinata sperimentalmente, e' riportata nella figura accanto

Si noti come per  $Z > \sim 20$  si osserva che per nuclei stabili  $A > Z$



In natura si osservano numerosi fenomeni di **radioattività** cioè trasmutazioni di nuclei instabili in nuclei stabili piu' leggeri con emissione di vari tipi di radiazione

- **Transizioni  $\alpha$** : con emissione di nuclei di elio (2 protoni e 2 neutroni)
- **Transizioni  $\beta$** : con emissione di un elettrone ed un neutrino
- **Transizioni  $\gamma$** : con emissione di radiazione elettromagnetica molto energetica (fotoni  $\gamma$ )

Per ogni nuclide radioattivo si definisce un *tempo di dimezzamento*, come il tempo necessario a dimezzarne una qualsiasi quantita' attraverso il decadimento in oggetto

I tempi di dimezzamento possono variare da frazione di secondo a miliardi di anni

E' questo il problema principale delle *centrali nucleari a fissione*, che producono **scorie radioattive** con tempi di dimezzamento di *parecchie centinaia o addirittura migliaia di anni*

**URANIO 238 (U238)  
DECADIMENTO RADIOATTIVO**

tipo di radiazione	nuclide	tempo di dimezzamento
$\alpha$	uranio-238	4.47 miliardi di anni
$\beta$	torio-234	24.1 giorni
$\beta$	protattinio-234m	1.17 minuti
$\alpha$	uranio-234	245000 anni
$\alpha$	torio-230	75200 anni
$\alpha$	radio-226	1600 anni
$\alpha$	<b>radon-222 (*)</b>	3.823 giorni
$\alpha$	polonio-218	3.05 minuti
$\beta$	piombo-214	26.8 minuti
$\beta$	bismuto-214	19.7 minuti
$\alpha$	polonio-214	0.000164 secondi
$\beta$	piombo-210	22.3 anni
$\beta$	bismuto-210	5.01 giorni
$\alpha$	polonio-210	138.4 giorni
	piombo-206	stabile

Le leggi di decadimento radioattivo sono un chiaro esempio della natura probabilistica della realtà atomica e subatomica

Dato un singolo nucleo instabile noi non possiamo mai dire a priori quando esattamente decadrà'. Possiamo dirlo solo in media su un numero consistente di decadimenti

Questo tipo di processi intrinsecamente probabilistici necessitano di una formulazione della fisica differente da quella classica deterministica. Per questo è stata sviluppata la meccanica quantistica

# DECADIMENTO DEL NEUTRONE



**dopo circa 15 minuti**

Il **neutrino** e' una particella di massa molto piccola ed interagisce molto debolmente con la materia.  
*E' dunque difficilissimo da osservare.*

## Cosa tiene acceso il sole?

In tutte le stelle avviene una lunga catena di reazioni nucleari che le tengono accese liberando energia

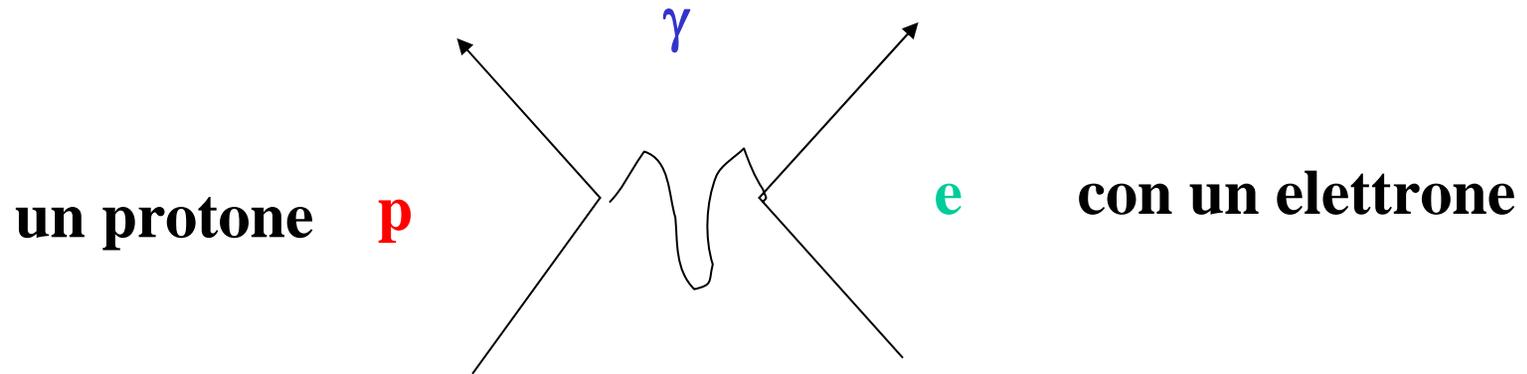
Nel sole il primo passo di questa catena e' costituito da un processo  $\beta^+$  in cui due protoni si **fondono** in un nucleo di deuterio liberando un **positrone** e un **neutrino**



*Ogni secondo noi stessi veniamo attraversati da miliardi di neutrini prodotti dal sole, ma non ce ne accorgiamo!*

# **COSA TIENE INSIEME UN ATOMO?**

**L' INTERAZIONE (FORZA)    ELETTRROMAGNETICA**

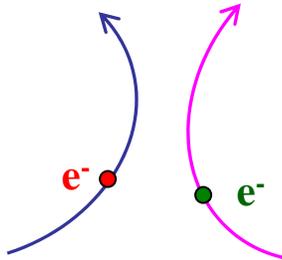


**scambia un fotone**

**ELETTRODINAMICA QUANTISTICA**

**una teoria di grande successo**

## Fisica Classica

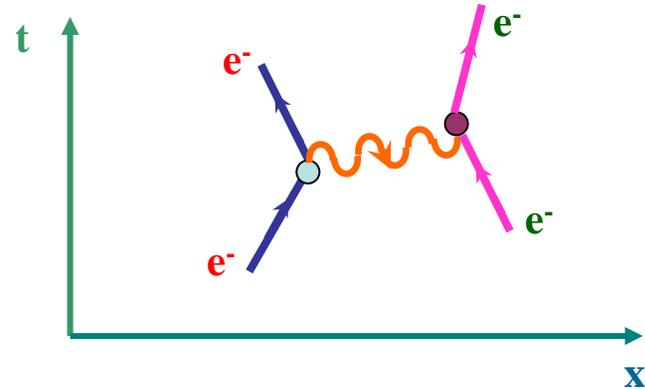


elettroni si avvicinano →  
mutua repulsione →  
rallentati e deviati



Azione a distanza

## Fisica Quantistica



- $e^-$  emette  $\gamma$  → cambia velocità
- $e^-$  assorbe  $\gamma$  → cambia velocità



Interazione = scambio del  $\gamma$

**COSA TIENE INSIEME UN NUCLEO?**

**L' INTERAZIONE (FORZA) NUCLEARE FORTE**

**COSA FA DECADERE IL NEUTRONE?**

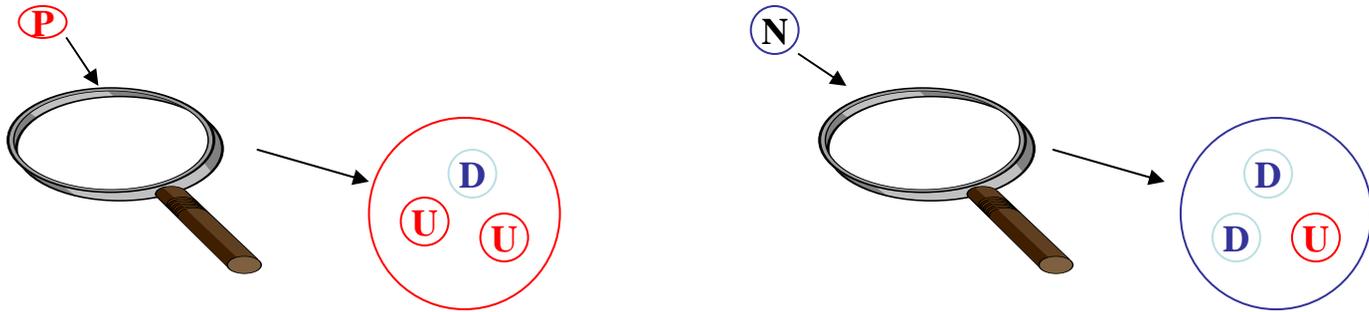
**L' INTERAZIONE (FORZA) NUCLEARE DEBOLE**

**CHI SONO I MEDIATORI DI QUESTE INTERAZIONI?**

A questa domanda risponderemo tra poco

*Perche' nel frattempo le cose si complicano....*

# PROTONE E NEUTRONE NON SONO ELEMENTARI



MA SONO FORMATI DA **QUARK**

**UP** CON CARICA **+2/3**

**DOWN** CON CARICA **-1/3**

# SONO STATE SCOPERTE CENTINAIA DI NUOVE PARTICELLE, PER LO PIU'INSTABILI

$$\mu^{+ -} \longrightarrow e^{+ -} \nu_{\mu} \nu_e \quad \text{in circa } 10^{-6} \text{ s}$$

( INTERAZIONE DEBOLE )

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma \gamma \quad \text{in circa } 10^{-16} \text{ s}$$

( INTERAZIONE ELETTROMAGNETICA )

$$\rho^{+ - 0} \longrightarrow \pi \pi \quad \text{in circa } 10^{-23} \text{ s}$$

( INTERAZIONE FORTE )

Tutte (tranne 6) queste centinaia di nuove particelle sono spiegabili come opportune combinazioni di 6 tipi **quark**

u                  d

s                  c

b                  t

Le 6 particelle rimanenti sono chiamate **leptoni** e sono considerate fondamentali (cioe' non composte)

e                   $\nu_e$

$\mu$                    $\nu_\mu$

$\tau$                    $\nu_\tau$

A due a due queste particelle sono organizzate in "famiglie"

RELATIVITA' + MECCANICA QUANTISTICA =  
**ANTIMATERIA**

**PARTICELLA**

**ANTIPARTICELLA**

**ELETTRONE**

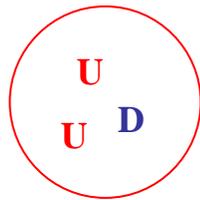
**POSITRONE**

**QUARK**

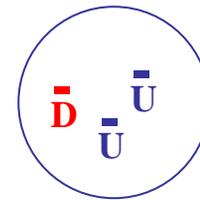
**ANTIQUARK**

**PROTONE**

**ANTIPROTONE**



$$Q = +2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$$



$$Q = -2/3 - 2/3 + 1/3 = -1$$

L'antimateria e' una perfetta trasposizione "speculare" della materia. Ha le sue stesse proprieta' ma le *cariche inverse*

Quando materia ed antimateria si incontrano si annichilano a vicenda liberando energia (*non abbracciate un anti-Bradd Pitt!* )

Esiste una (quasi) perfetta simmetria tra materia ed antimateria in termini di leggi fondamentali. *Ma allora perche' non abbiamo evidenza di anti-stelle, anti-pianeti ecc..?*

E ci sono poi i *mediatori delle interazioni*

Interazione elettromagnetica

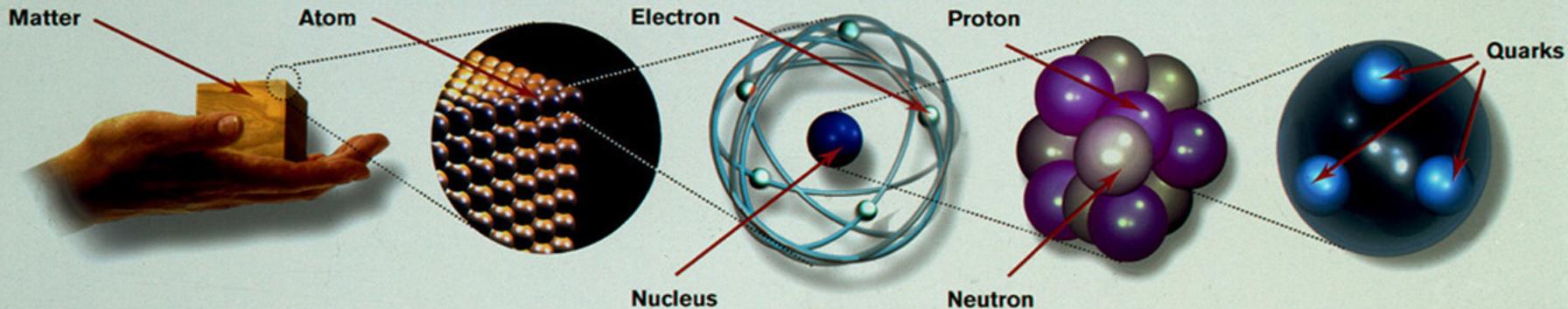
$\gamma$

Interazione nucleare debole

$W^+, W^-, Z_0$

Interazione nucleare forte

gluone (8 tipi)



### Matter particles

All ordinary particles belong to this group

These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators

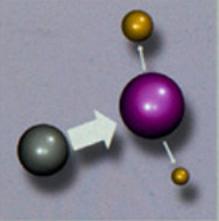
LEPTONS		
FIRST FAMILY	<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1 	<b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second 
SECOND FAMILY	<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second 	<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay 
THIRD FAMILY	<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975 	<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist 

QUARKS		
<b>Up</b> Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one 	<b>Down</b> Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two 	
<b>Charm</b> A heavier relative of the up; found in 1974 	<b>Strange</b> A heavier relative of the down; found in 1964 	
<b>Top</b> Heavier still 	<b>Bottom</b> Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory 	

### Force particles

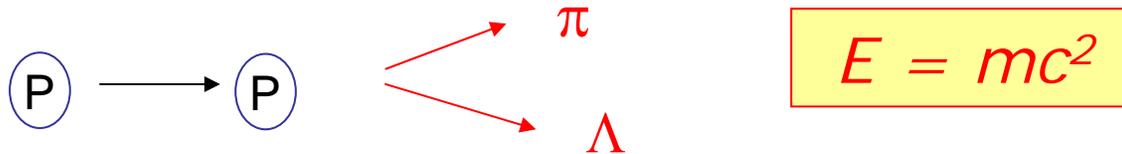
These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

<b>Gluons</b> Carriers of the strong force between quarks  <p>Felt by: quarks</p> <p>The explosive release of nuclear energy is the result of the <b>strong force</b></p>	<b>Photons</b> Particles that make up light; they carry the electromagnetic force  <p>Felt by: quarks and charged leptons</p> <p>Electricity, magnetism and chemistry are all the results of <b>electro-magnetic force</b></p>
--	---

<b>Intermediate vector bosons</b> Carriers of the weak force  <p>Felt by: quarks and leptons</p> <p>Some forms of radio-activity are the result of the <b>weak force</b></p>	<b>Gravitons</b> Carriers of gravity  <p>Felt by: all particles with mass</p> <p>All the weight we experience is the result of the <b>gravitational force</b></p>
---	--

Ma come vengono prodotte queste nuove particelle?

Creando **materia** dalla **energia** di collisione tra particelle già esistenti, per esempio protoni contro protoni



In natura queste collisioni vengono continuamente causate dai **raggi cosmici**, protoni o fotoni provenienti dallo spazio che interagiscono nell'atmosfera terrestre

Piu' praticamente, i fisici le producono in laboratorio grazie agli **acceleratori di particelle**

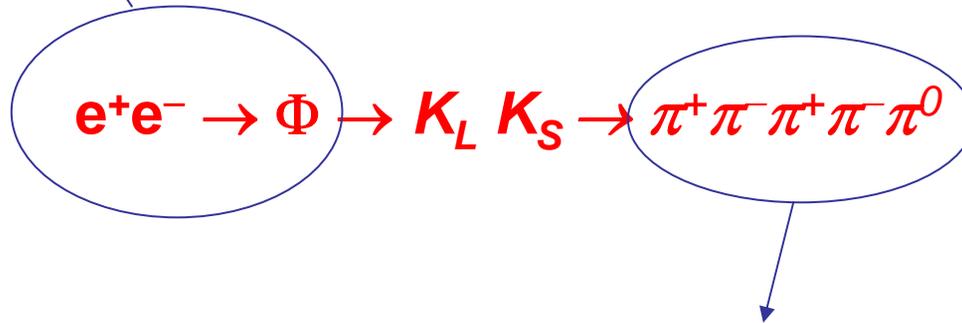
## Come funziona un esperimento di F.d.P.?

Acceleratore: produzione evento

Parametri cinematici noti:

*Energia della reazione*

*Punto di interazione*



Rivelatore: osservazione prodotti di decadimento

Parametri cinematici misurati:

*Energie delle particelle*

*Punti di produzione/decadimento*

Ricercatore: analizza i dati del rivelatore e tenta di ricostruire l'evento per estrarne informazioni sulla fisica che lo governa



Frascati - LNF

KLOE

$e^-$   
510 MeV

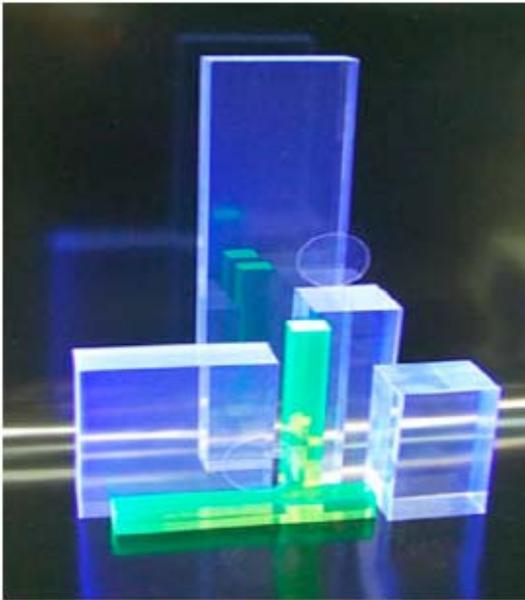
LINAC

$e^+$   
510 MeV

# Il piu' grande acceleratore del mondo: LHC al CERN

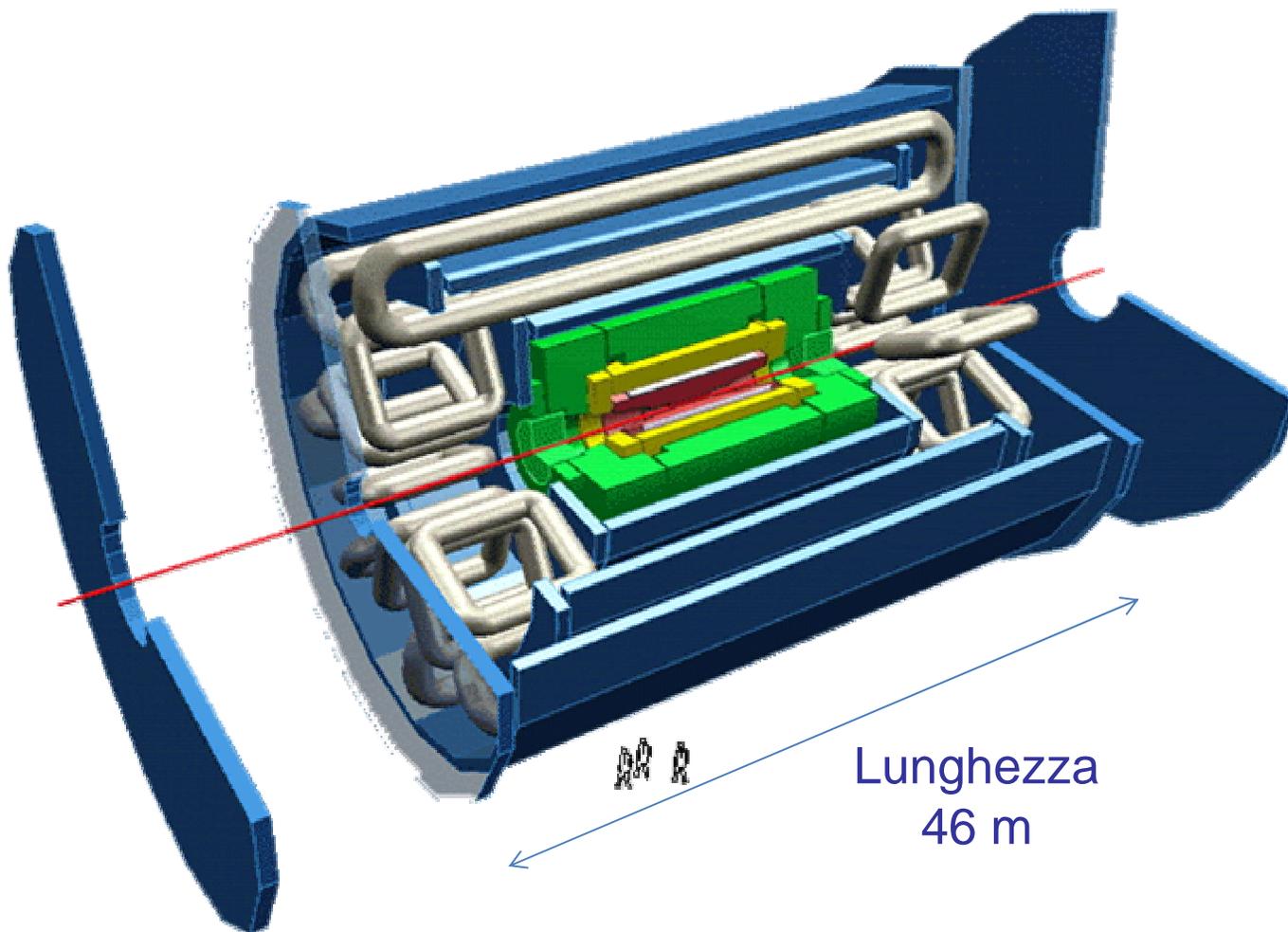


Sono stati sviluppati moltissimi tipi differenti di rivelatori per osservare le particelle prodotte e misurarne le caratteristiche



In un moderno esperimento vengono usati molti di questi rivelatori in combinazione tra loro

# Il rivelatore ATLAS a LHC

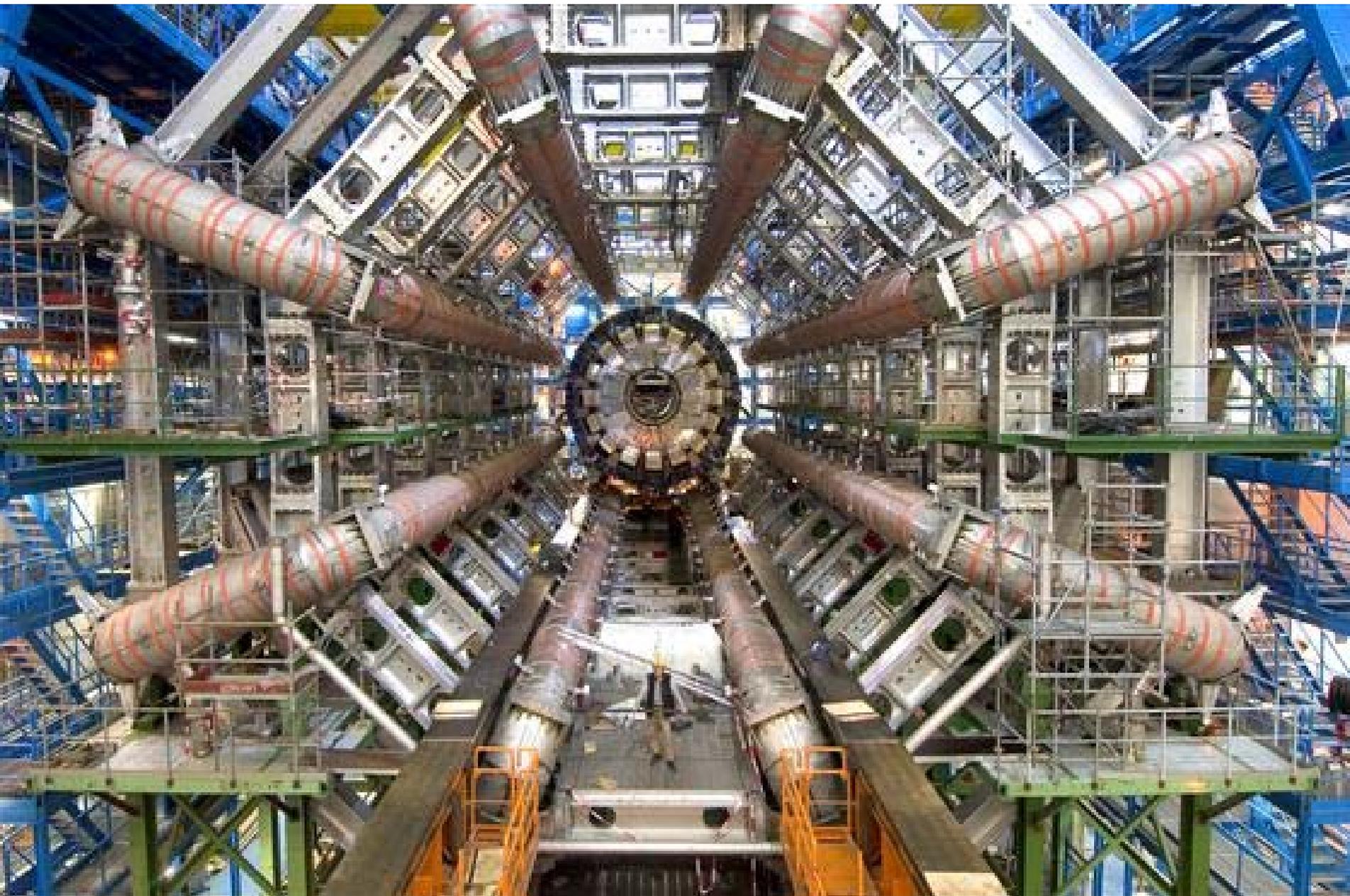


Altezza  
25 m

Lunghezza  
46 m

Peso 7000 ton  
Profondità 80 m  
Superficie  
rivelatori 6000 m<sup>2</sup>



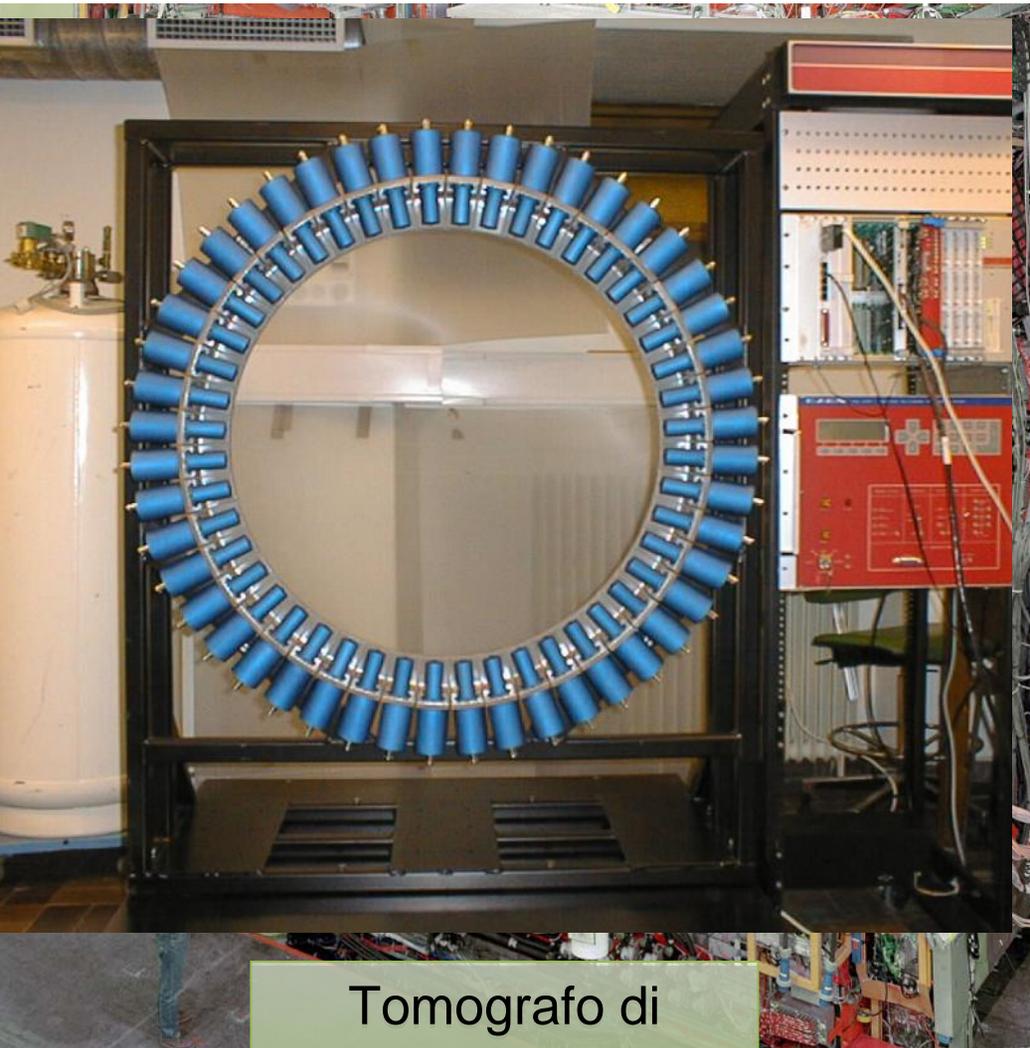


# CMS a LHC

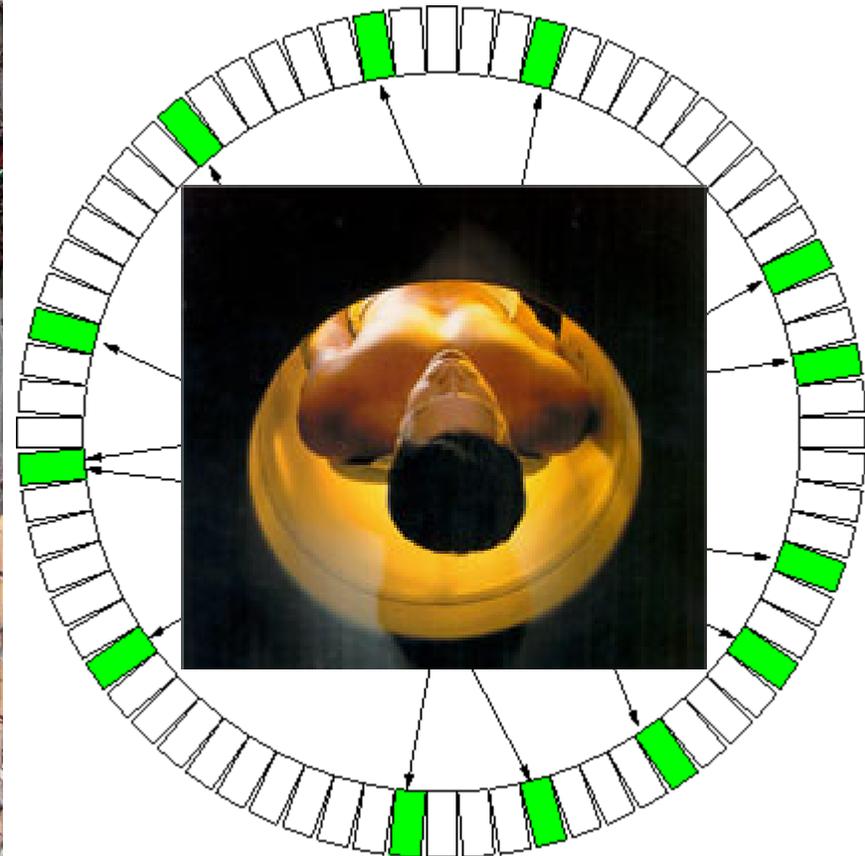


*Esistono applicazioni pratiche a tutto  
questo?*

# PET (Positron Emission Tomography)

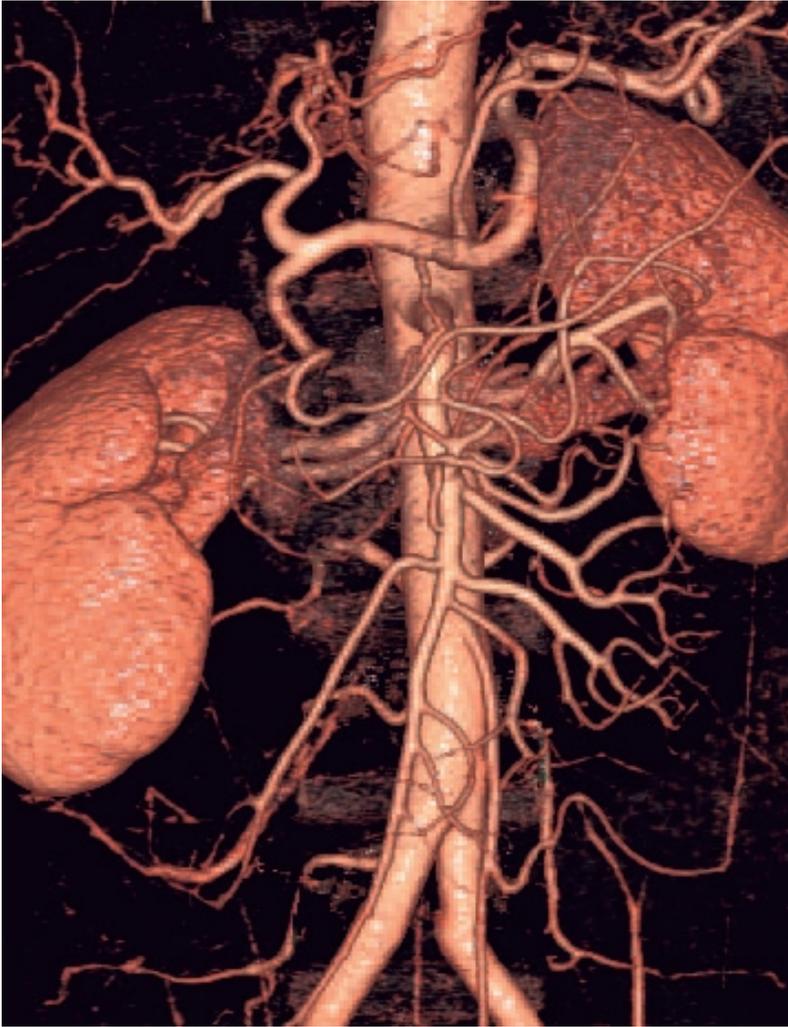


Tomografo di rivelatori

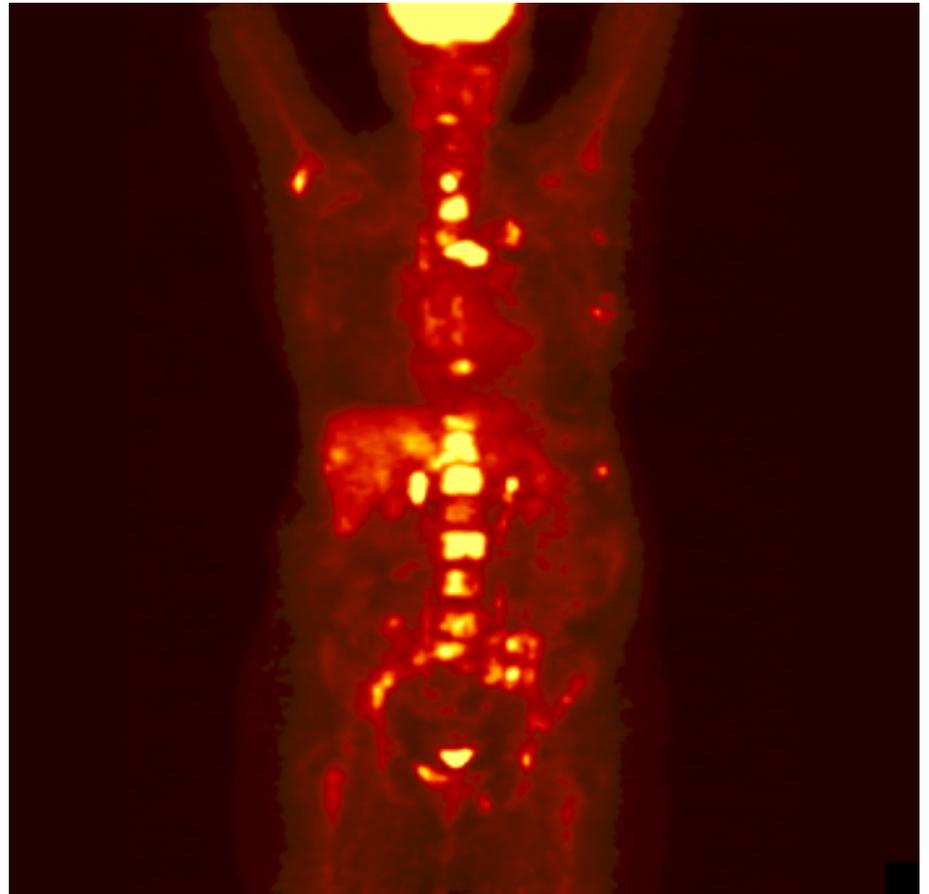


Si inietta un *radiofarmaco* nel corpo del paziente e si rivelano i *fotoni* emessi

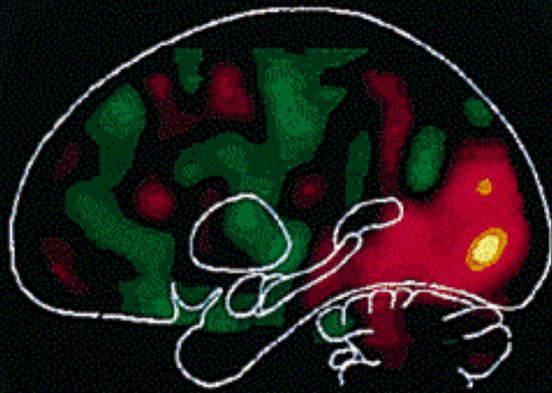
# PET (Positron Emission Tomography)



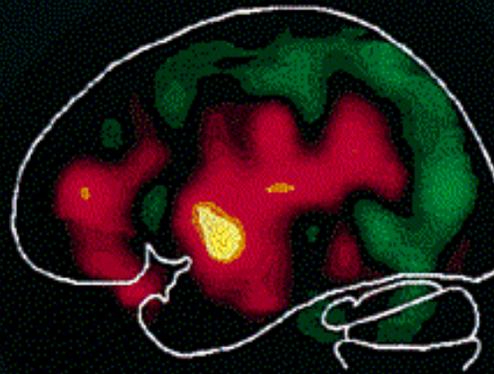
Si ottengono immagini sulla *funzionalità* dell'organismo



# PET (Positron Emission Tomography)



**SEEING  
WORDS**

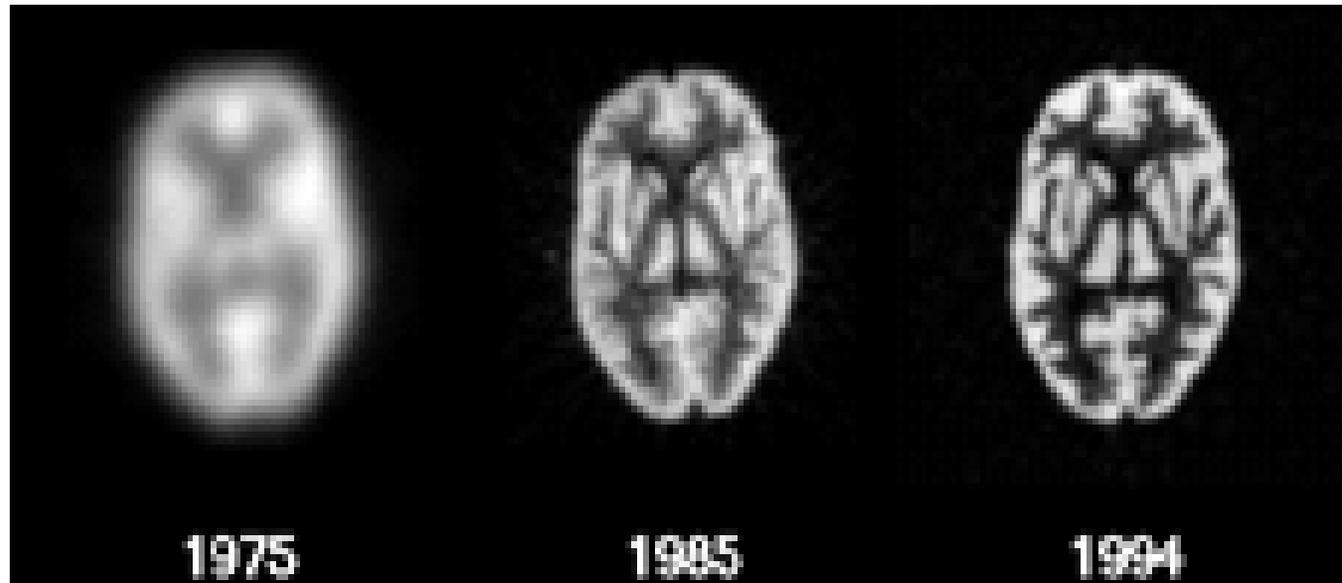


**HEARING  
WORDS**



Zone diverse  
del cervello  
mostrano  
attività quando  
si legge o si  
ascolta

Lo sviluppo sui  
rivelatori ha  
contribuito a  
migliorare la  
risoluzione delle  
immagini



1975

1985

1994

## Adroterapia con acceleratori

Fasci di protoni di energia opportuna sono utilizzati anche per il **trattamento** di particolari tipi di tumore, per esempio alcuni melanomi dell'occhio (**adroterapia**)

I protoni hanno la particolarità di rilasciare quasi tutta la loro energia ad una profondità che dipende quasi esclusivamente dalla loro energia iniziale.

*Possono essere quindi usati per distruggere i melanomi risparmiando i tessuti sani intorno*



# Energia Nucleare

Circa il **16%** dell'energia elettrica mondiale e' prodotta da reazioni di *fissione nucleare*: un nucleo di  $^{235}\text{U}$  si scinde in nuclei piu' leggeri emettendo neutroni (che innescano una *reazione a catena*) e liberando energia

Come detto in precedenza, il grave problema di questo tipo di centrali consiste nella produzione di *scorie radioattive* con tempi di decadimento spesso plurimillenari

La grande sfida tecnologica in questo campo sta nel riuscire a produrre energia da reazioni di *fusione nucleare* controllata, cioe' dal meccanismo che tiene acceso il sole

*Tuttavia....*

*La Fisica e' come il sesso: ha sicuramente alcune  
conseguenze pratiche, ma non e' per questo che lo facciamo*

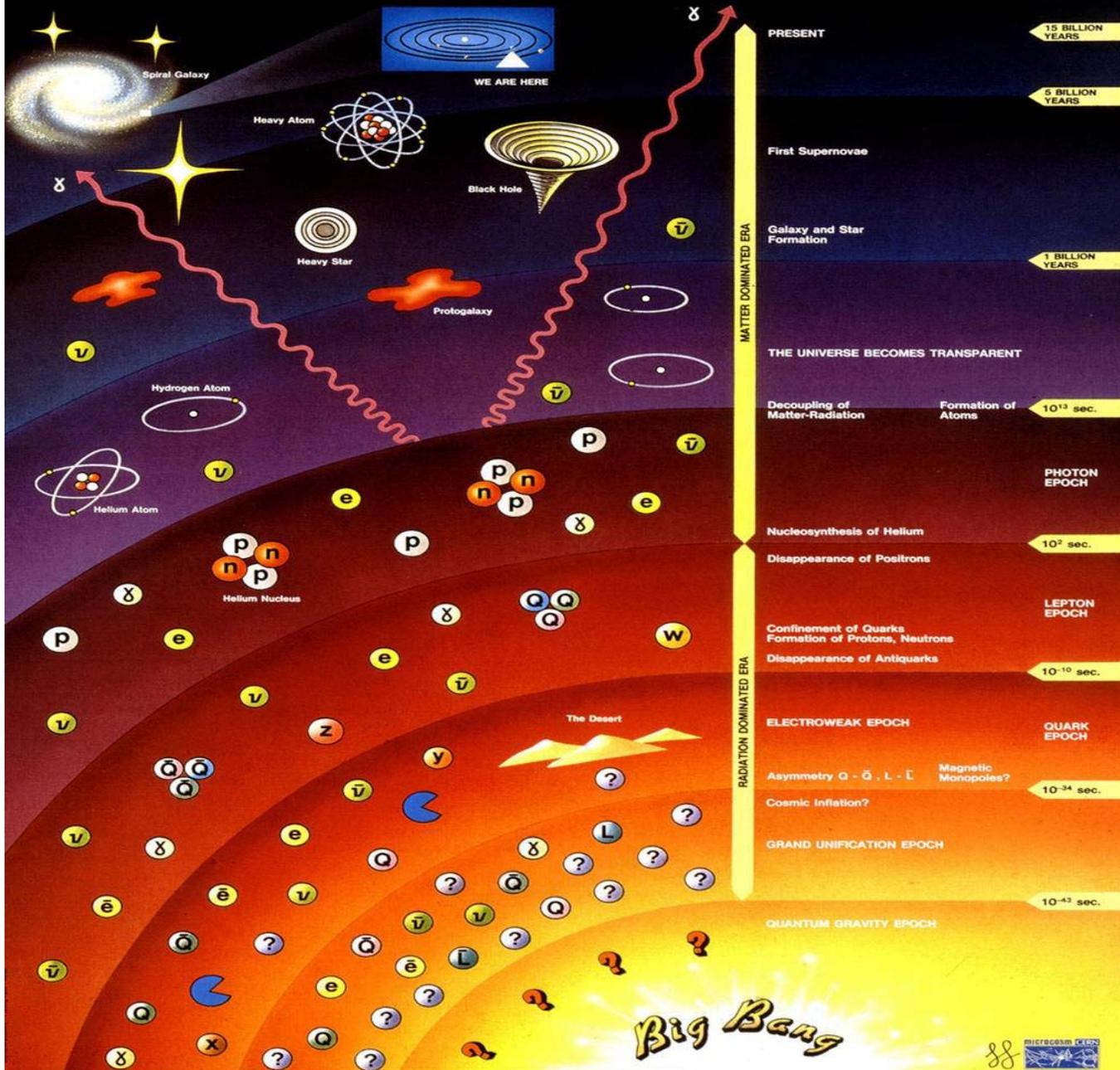
*(Richard Feynman)*

Lo studio della fisica nucleare e subnucleare ci aiuta a comprendere perché il mondo che ci circonda è come noi lo osserviamo (*senza dover ricorrere a miti, superstizioni ecc..*)

Secondo la moderna cosmologia l'Universo si è evoluto nel corso di **15 miliardi** di anni fino a noi. Il corso di questa evoluzione è stato determinato dalla natura delle particelle elementari che lo compongono e dalle interazioni tra di esse

*Anche piccole variazioni di queste proprietà porterebbero ad universi molto diversi dal nostro (e generalmente privi di vita)*

# History of the Universe



Ma esistono ancora molte domande alle quali non siamo ancora in grado di dare una risposta

*Cosa determina lo spettro di massa delle particelle elementari?*

*Perche' il mondo stabile (stelle, pianeti, noi stessi) e' fatto di materia e non di antimateria?*

*Che ruolo gioca la gravita' nel mondo particellare?*

*Che cos'e' la "materia oscura" che sembra costituire la gran parte della materia dell'Universo?*