



LA COSTRUZIONE DEL MODELLO STANDARD

Materia, Energia, Particelle : il DNA delle cose

Torino, Marzo 2016

E.Menichetti – Dip. di Fisica e INFN, Torino

Il sistema periodico

Mendeleev: Gli elementi si raggruppano in famiglie i cui membri hanno proprietà chimiche simili, secondo un ordine preciso con evidenti periodicità e ricorrenze

Sistematicità nelle proprietà chimiche degli elementi...

Periodic Table
of the Elements

1	2																	3	4					
1	H																	He	2					
2	3	4																	5	6	7	8	9	10
2	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne
3	11	12											13	14	15	16	17	18						
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar						
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36						
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54						
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
6	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73					
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
7	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105					
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113	114	115	116	117	118						
* Lanthanide Series			58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71								
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu								
+ Actinide Series			90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103								
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr								

...Somiglianze e regolarità nelle proprietà fisiche degli atomi

I costituenti atomici

Ricerca di *evidenze fisiche* che comprovino gli *indizi di origine chimica* sulla struttura composta degli atomi

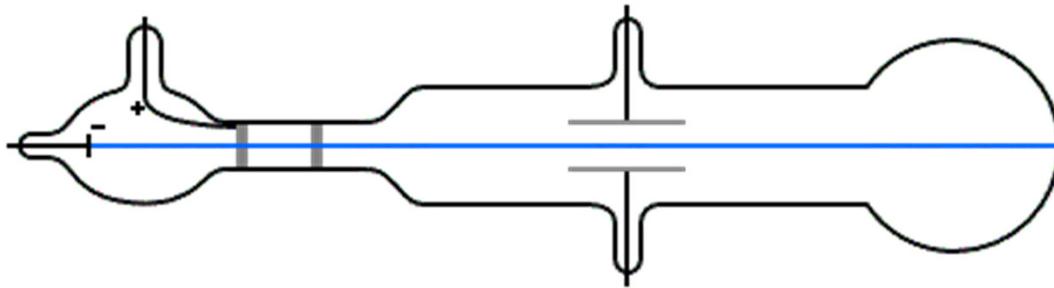
Primi elementi del Modello Standard (fra '800 e '900):

Elettrone: *Thompson*

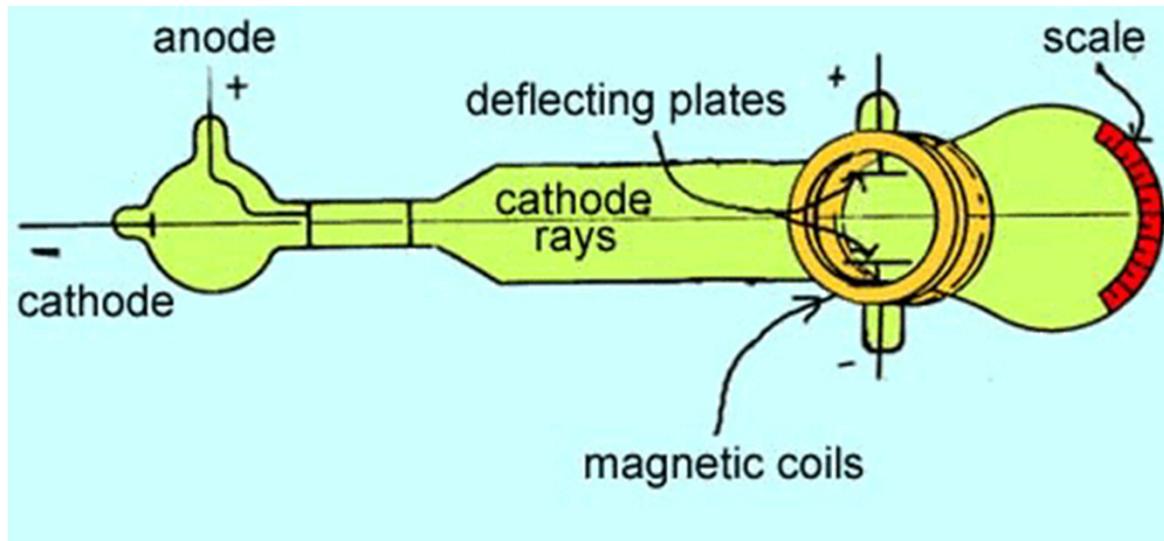
Nucleo: *Rutherford*

La scoperta dell'elettrone

Thomson (Cambridge, 1896 – 1897)



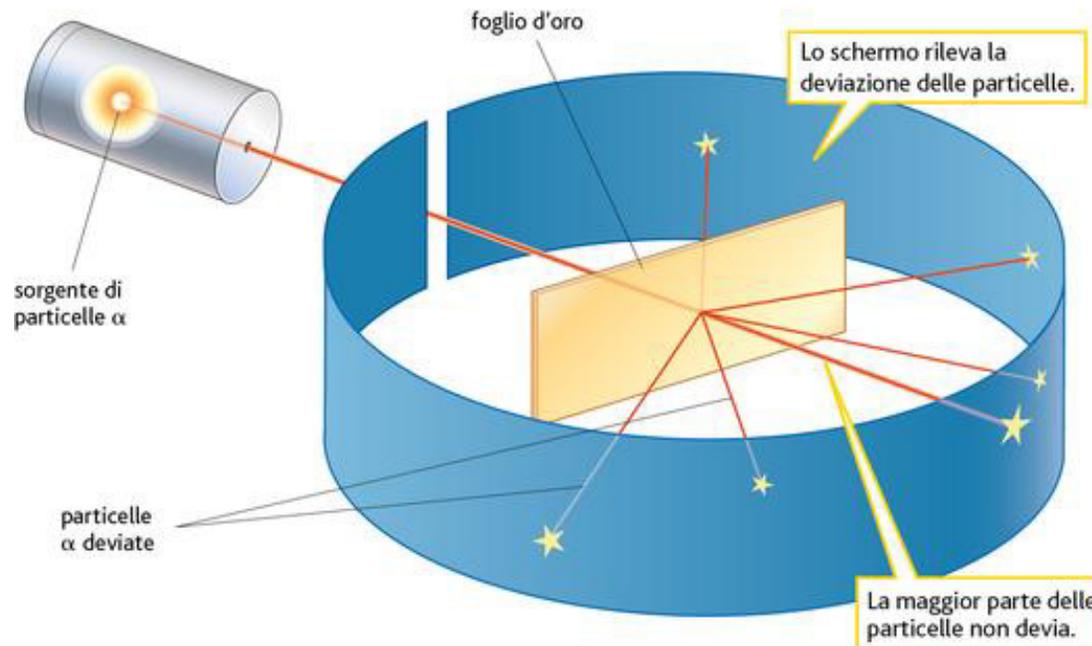
Carica negativa



Massa migliaia
di volte inferiore
a quella degli atomi

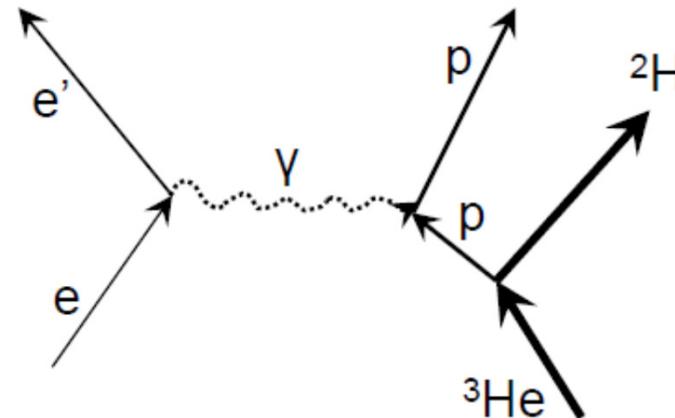
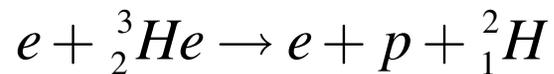
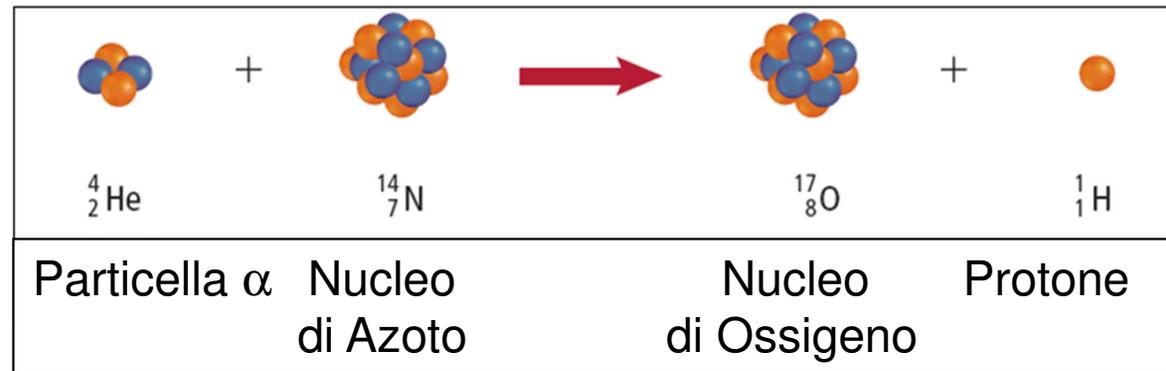
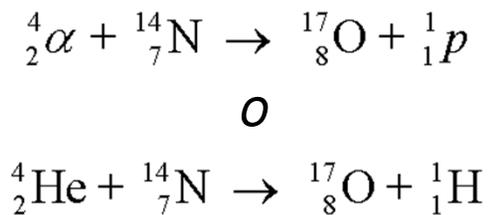
La scoperta del nucleo

Rutherford, Geiger, Marsden (Cambridge, 1911)



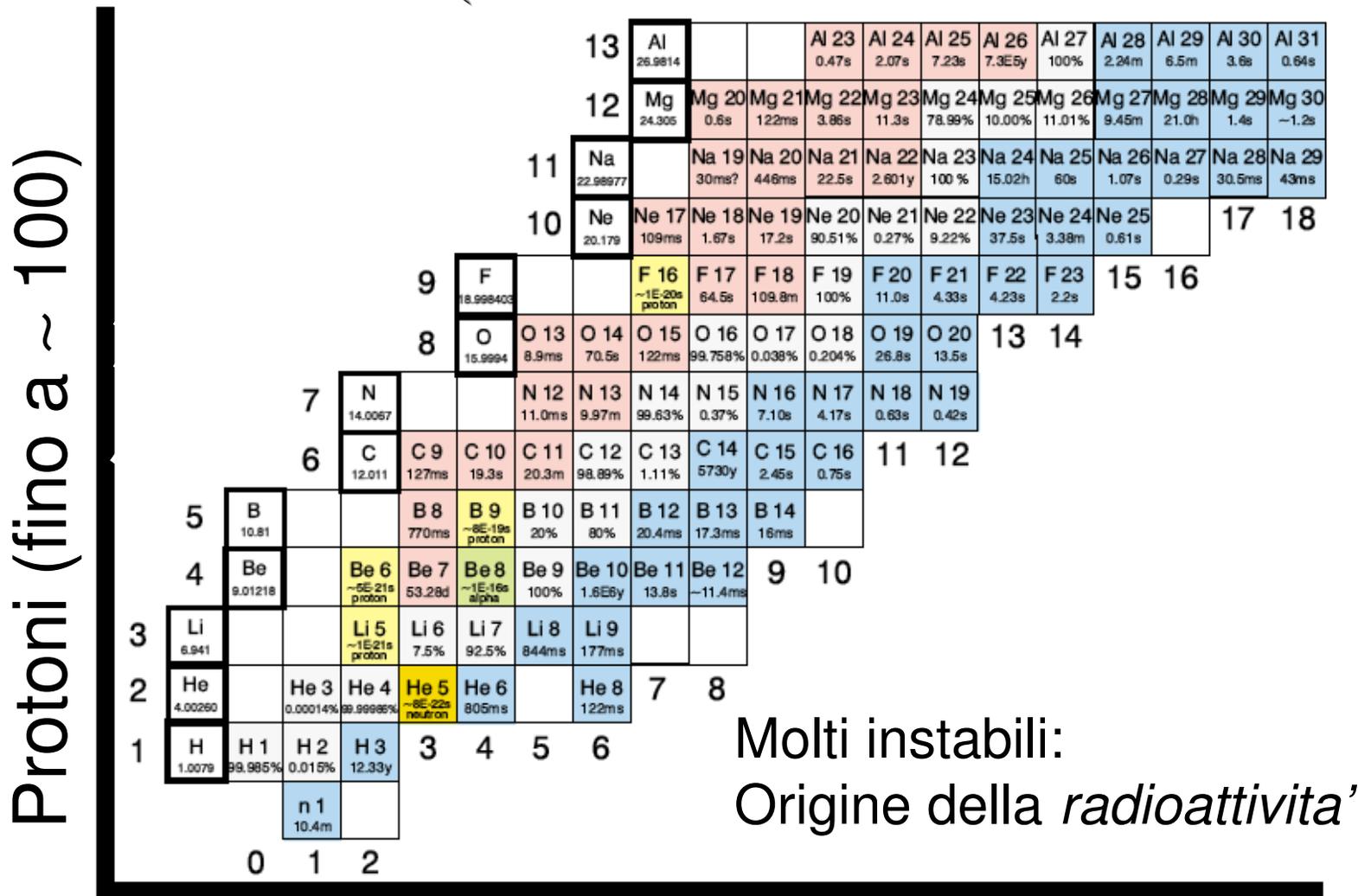
Uso innovativo della radioattività' alfa, scoperta da Rutherford pochi anni prima

Aumentando energia del fascio incidente:
 Estrazione dal nucleo dei costituenti nucleari: Protoni e Neutroni
 Reazioni nucleari



Studio reazioni: Informazioni sulla struttura del nucleo

Tavola 'quasi periodica' dei nuclei



Neutroni (fino a ~ 150)

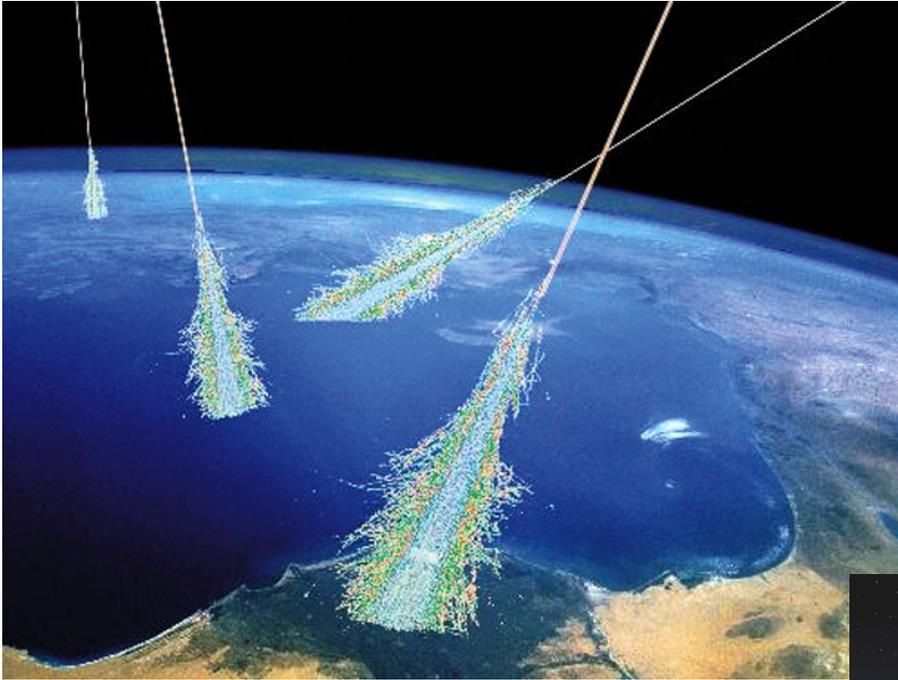
I raggi cosmici

Sviluppo della fisica nucleare: Legato a progressi nelle tecniche di *accelerazione e rivelazione*

Pero': Molte delle prime scoperte in fisica delle particelle sono venute dallo studio della *radiazione cosmica*:

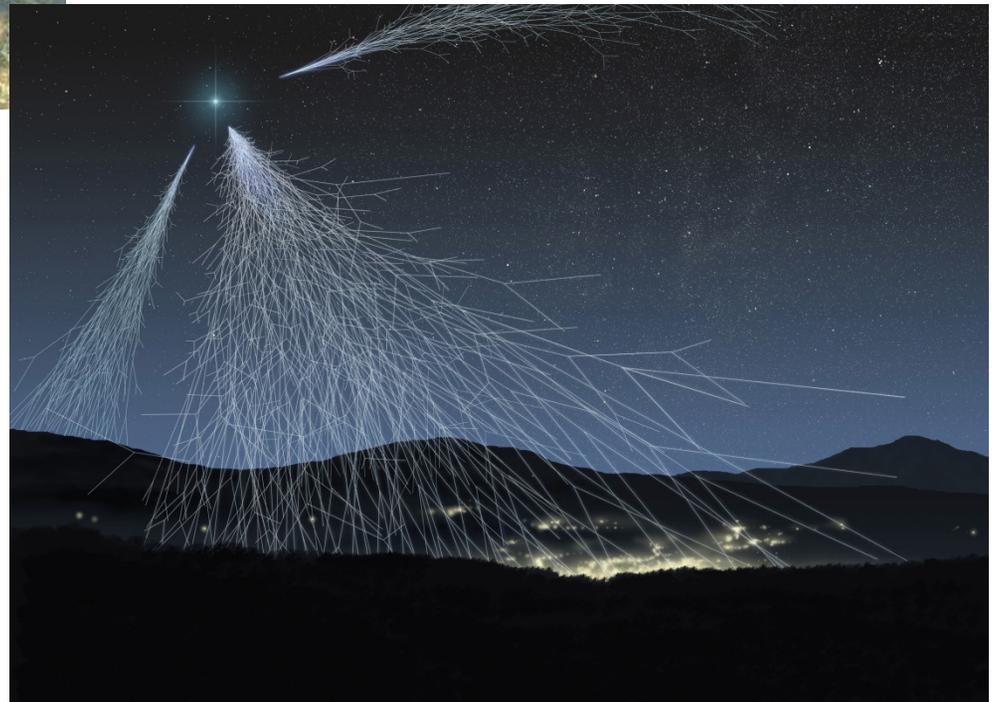
Particelle di energia elevatissima provenienti dallo spazio esterno (Galattiche, Extragalattiche)

Nuclei atomici, prevalentemente p , che urtano con i nuclei di Azoto e Ossigeno nell'atmosfera: reazioni a energia elevatissima



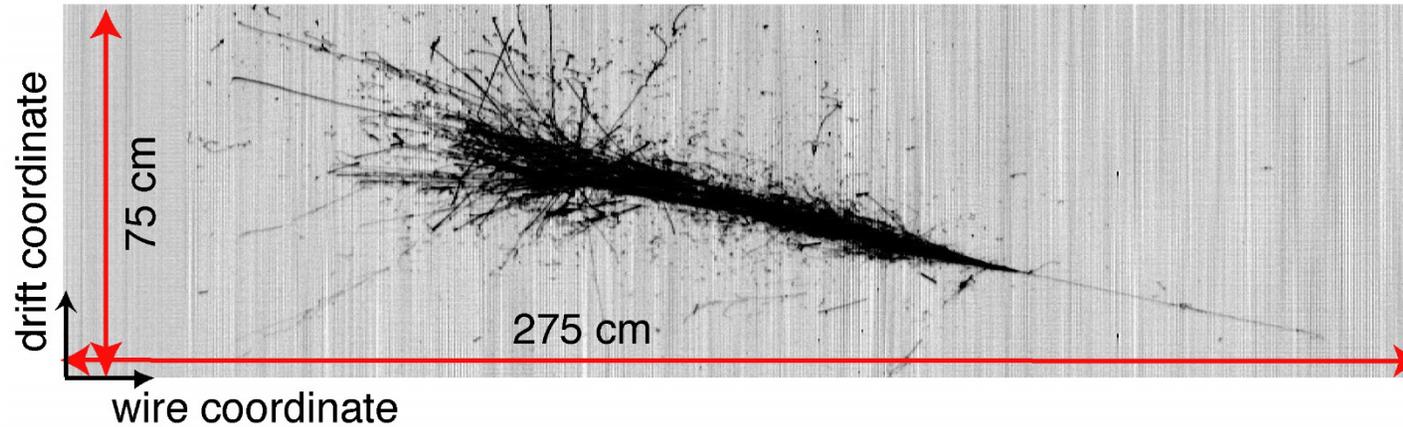
Pioggia di particelle
di alta energia sulla Terra

Sciami atmosferici estesi

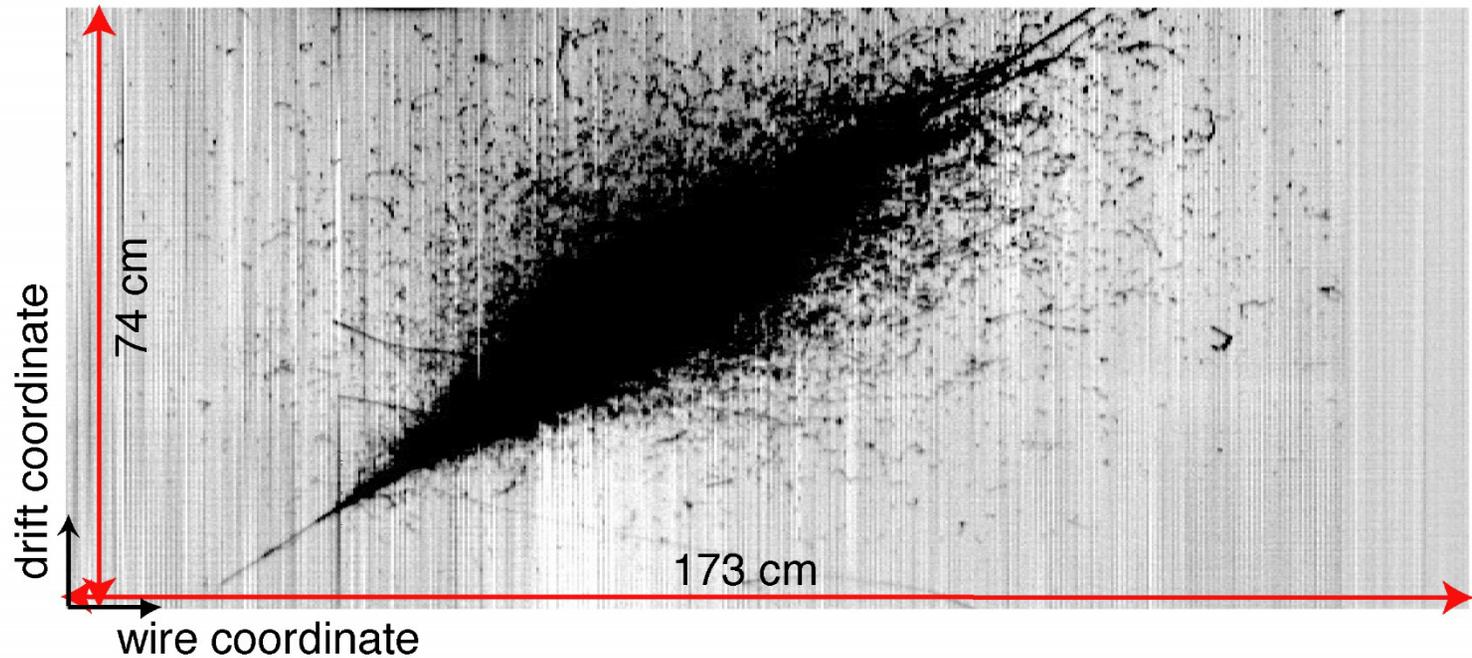


Sciami originati da raggi cosmici – Rivelatore ICARUS

Run 308 Event 7 Collection view



Run 308 Event 332 Collection view



Nuovi membri della famiglia

Fra i prodotti delle collisioni dei raggi cosmici, prime scoperte:

Muone, un fratello pesante dell'elettrone

Pione, un parente di neutrone e protone

Particelle strane, tipi un po' originali, anche loro parenti di protone e neutrone

Presto riprodotti ai primi *acceleratori ad alta energia*
Tecniche di *accelerazione e rivelazione* alla base dello studio del Modello Standard

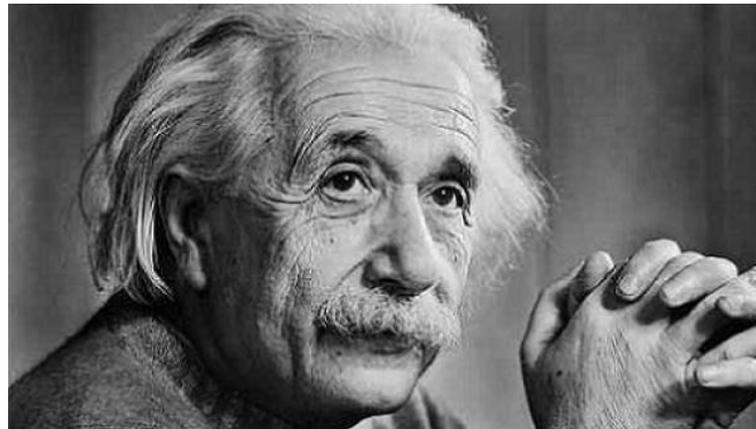
Quadro di riferimento

Per la fisica delle particelle e il Modello Standard:

Teoria della relativita'

Meccanica quantistica

Pilastri che sostengono tutta la fisica del '900



Entrambe originate dal lavoro di diverse personalita', ma dominate dalla figura di Einstein

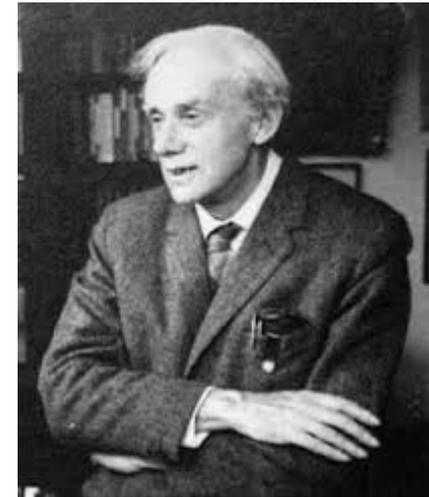
Una scoperta straordinaria

Conseguenza di meccanica quantistica e relativita':

Antimateria

Previsione teorica (Dirac, fine anni '20)

Osservazione sperimentale (Anderson, 1932)



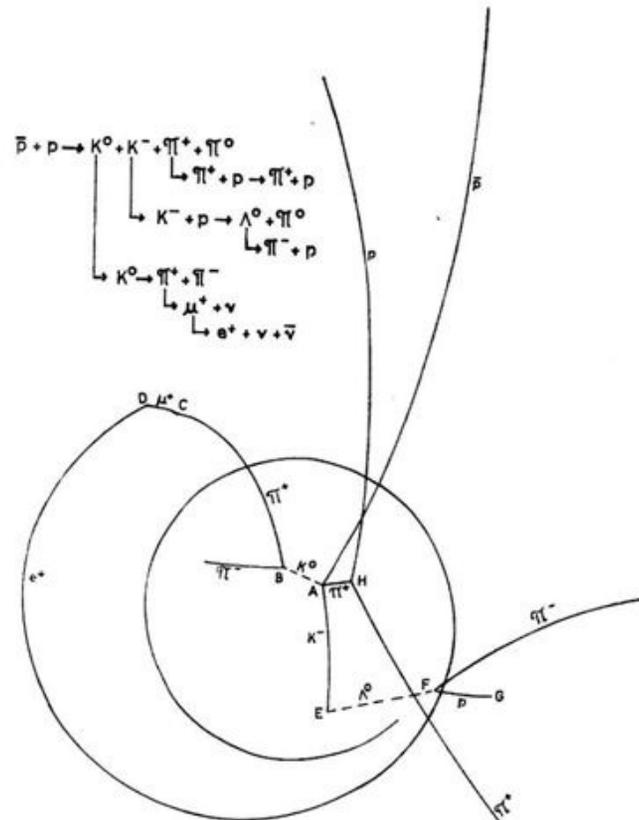
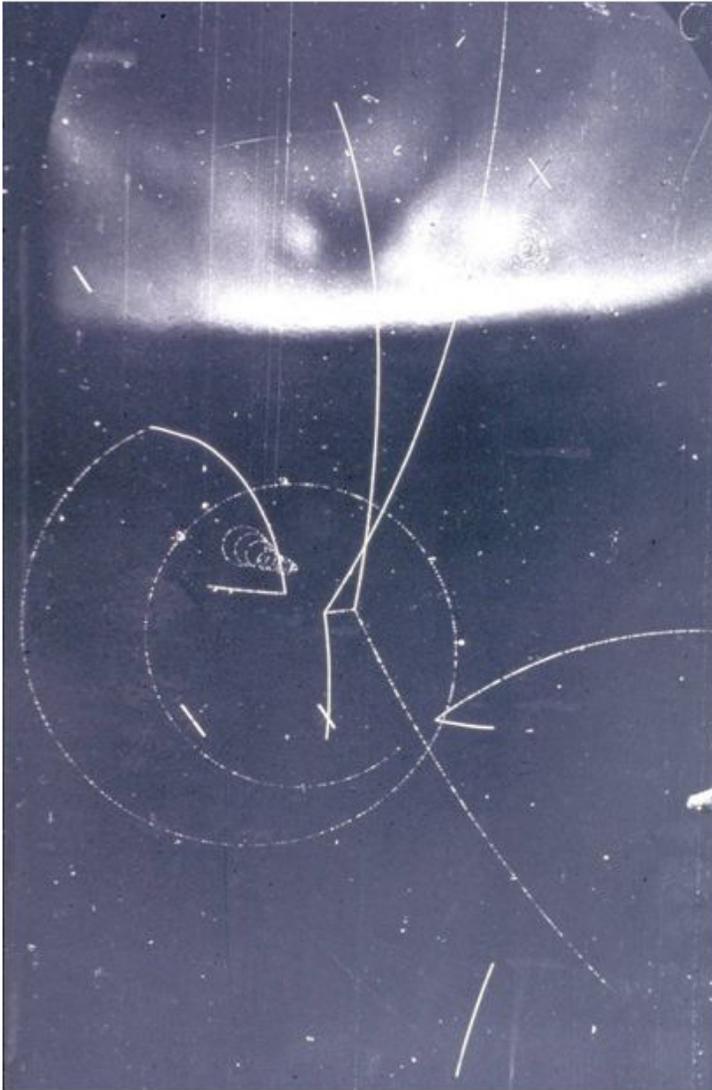
Ogni particella, come l'elettrone o il protone, ha una 'sorella' in tutto simile, ma con carica opposta

$e^- \leftrightarrow e^+$ Elettrone , Positrone

$p \leftrightarrow \bar{p}$ Protone , Antiprotone

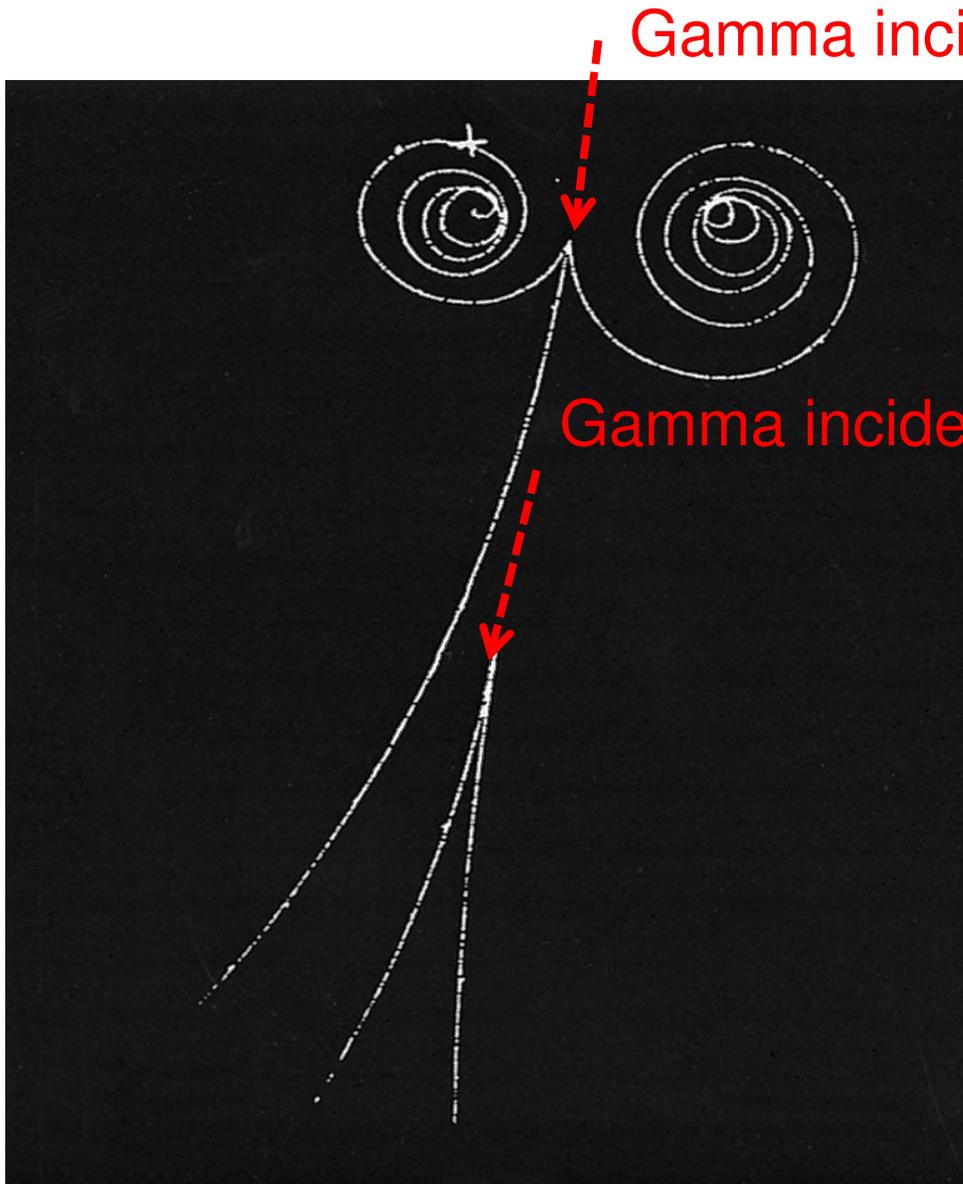
etc

Trasformazione di massa in energia



Annichilazione a riposo di un antiprotone
 Antimateria + Materia scompaiono
 Compaiono altre particelle di alta energia
 Camera a bolle a idrogeno liquido

Trasformazione di energia in massa



Gamma incidente

Produzione di 'tridenti':
Coppia + Elettrone atomico

Gamma incidente

Produzione di coppie:

$$\gamma + \text{nucleo} \rightarrow e^+ + e^- + \text{nucleo}$$

Fotone scompare

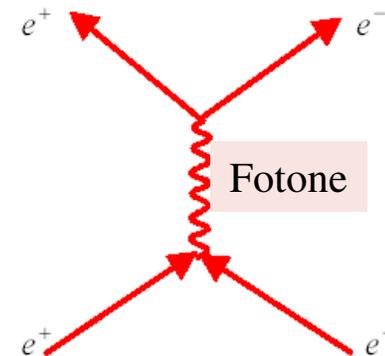
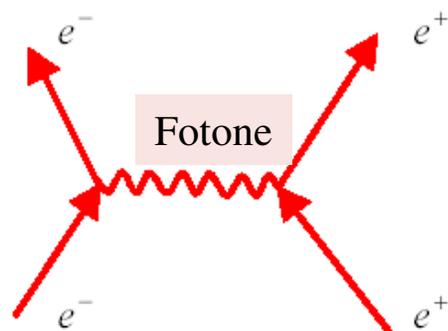
Compaiono $e^+ e^-$

Radiazione \rightarrow Antimateria + Materia

Camera a bolle a propano liquido

QED: Interazione elettromagnetica

Nella visione moderna, le cariche elettriche “si sentono” emettendo e assorbendo continuamente *fotoni*: quanti di luce



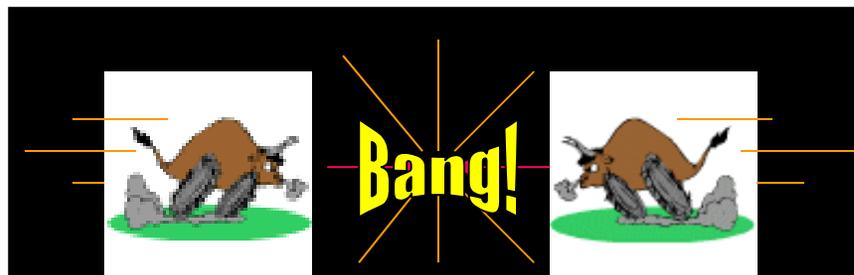
Diversi processi elementari :
collisione, materializzazione, annichilazione,...
alla base dell'Elettrodinamica Quantistica, o QED

Acceleratori

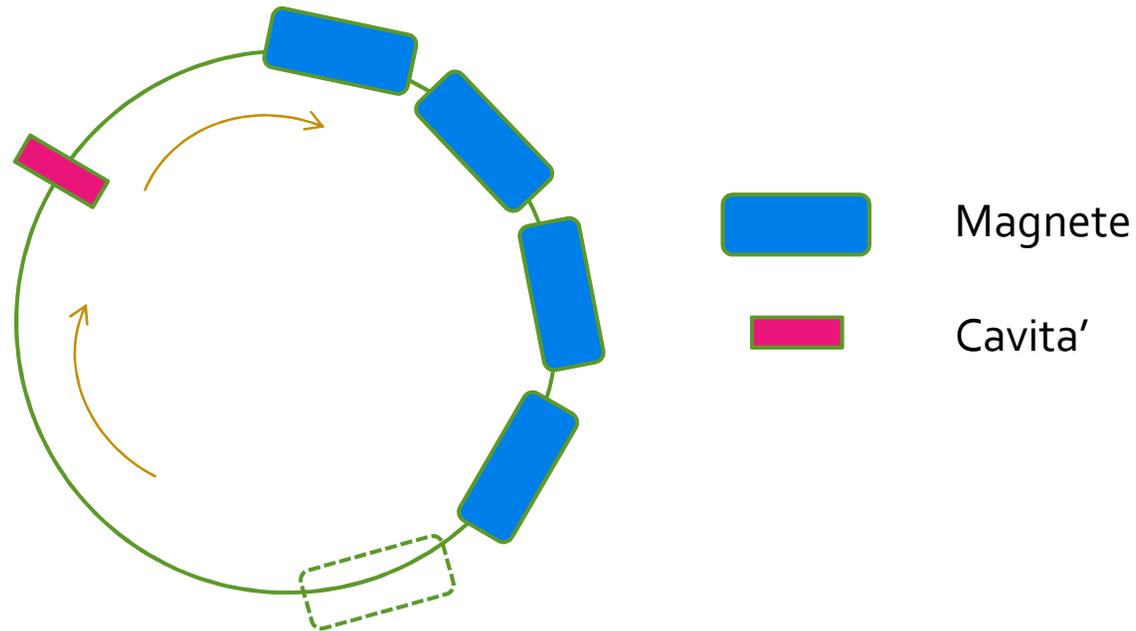
Per studiare la struttura della materia su piccole scale di distanze, occorrono sonde = proiettili energetici

Modo pratico: accelerare proiettili carichi per mezzo di campi elettromagnetici, e spararli su un bersaglio

Condizioni preferite: collisioni *testa a testa* fra coppie di particelle in movimento (piu' energia che puo' trasformarsi in massa)



Come accelerare

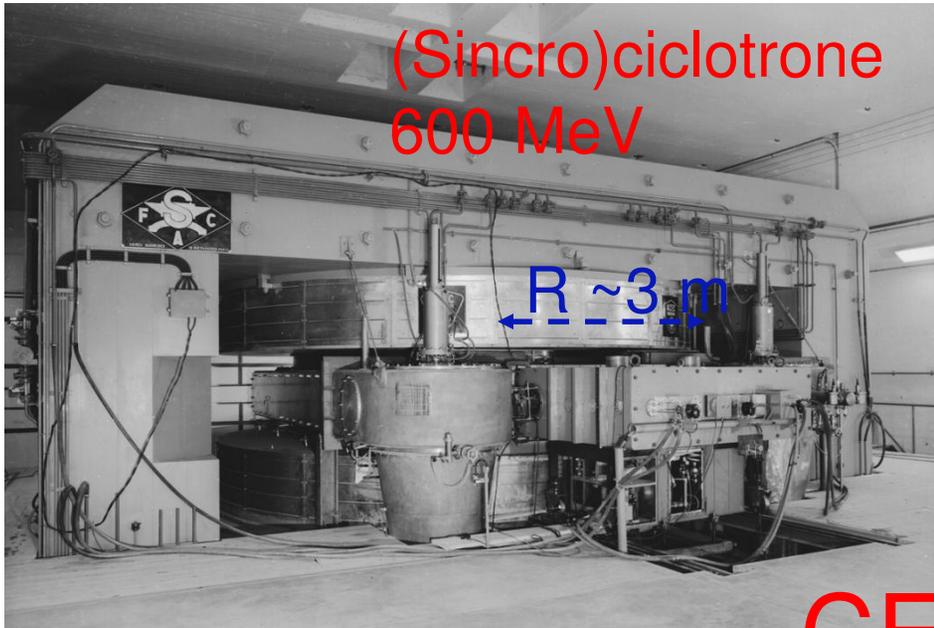


Campi *magnetici*: curvano la traiettoria delle particelle cariche in movimento

→ Orbite chiuse ~ circonferenze

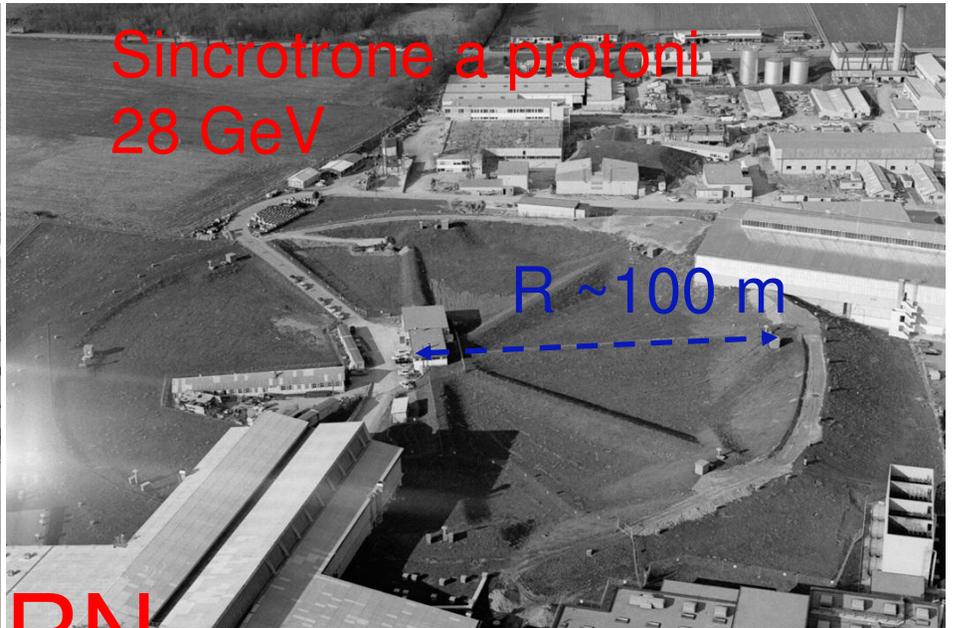
A ogni giro, le particelle ricevono energia da campi *elettrici* oscillanti in apposite cavita' a radiofrequenza

→ La loro energia aumenta



(Sincro)cyclotrone
600 MeV

$R \sim 3 \text{ m}$



Sincrotrone a protoni
28 GeV

$R \sim 100 \text{ m}$

CERN



Superprotosincrotrone
450 GeV

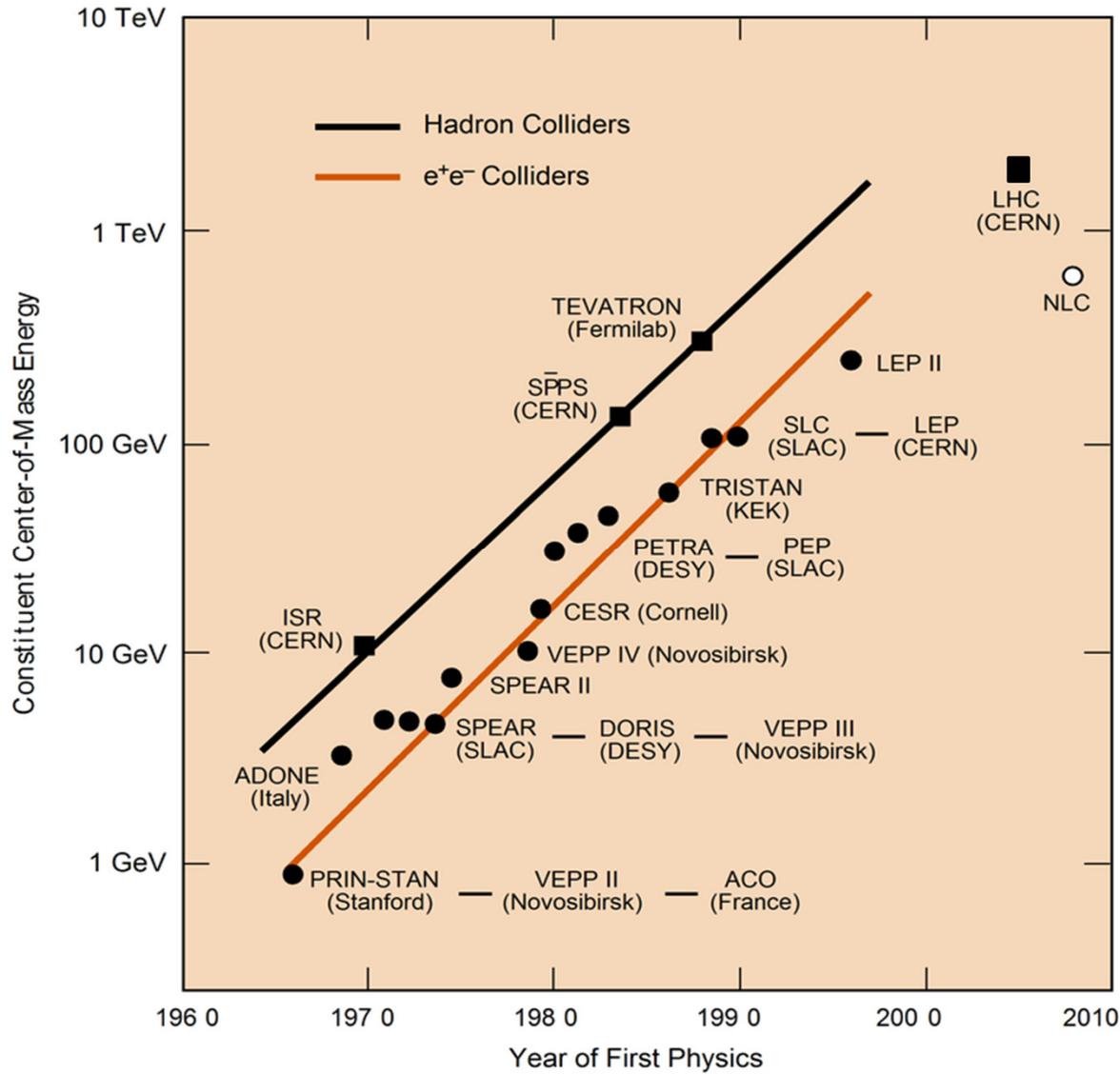
$R \sim 1 \text{ km}$



Large Hadron Collider
13 TeV

$R \sim 4 \text{ km}$

Colliders

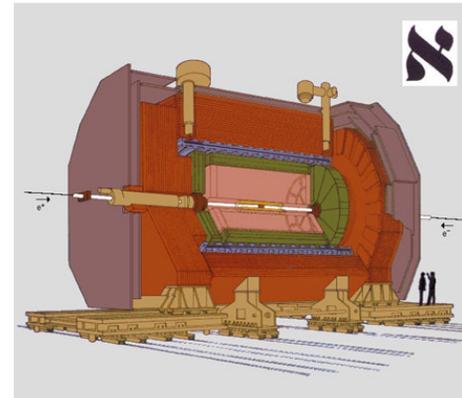


Rivelatori di particelle

I sostituti dell'occhio umano, per radiazioni di energia così alta, sono anche loro sistemi grandi e complessi...

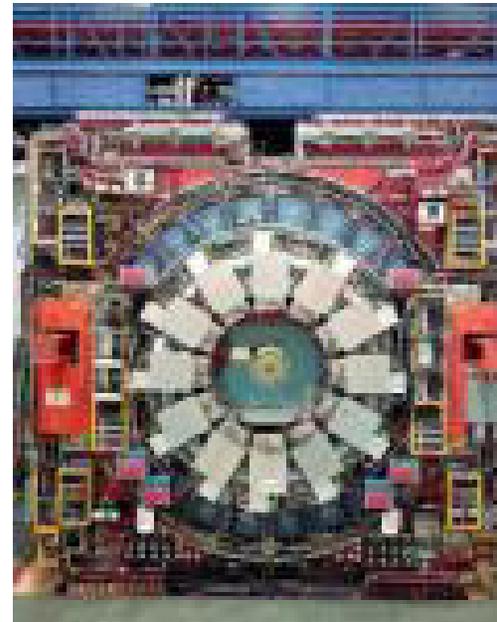
Elettronica, ottica, meccanica di precisione

Migliaia di computer



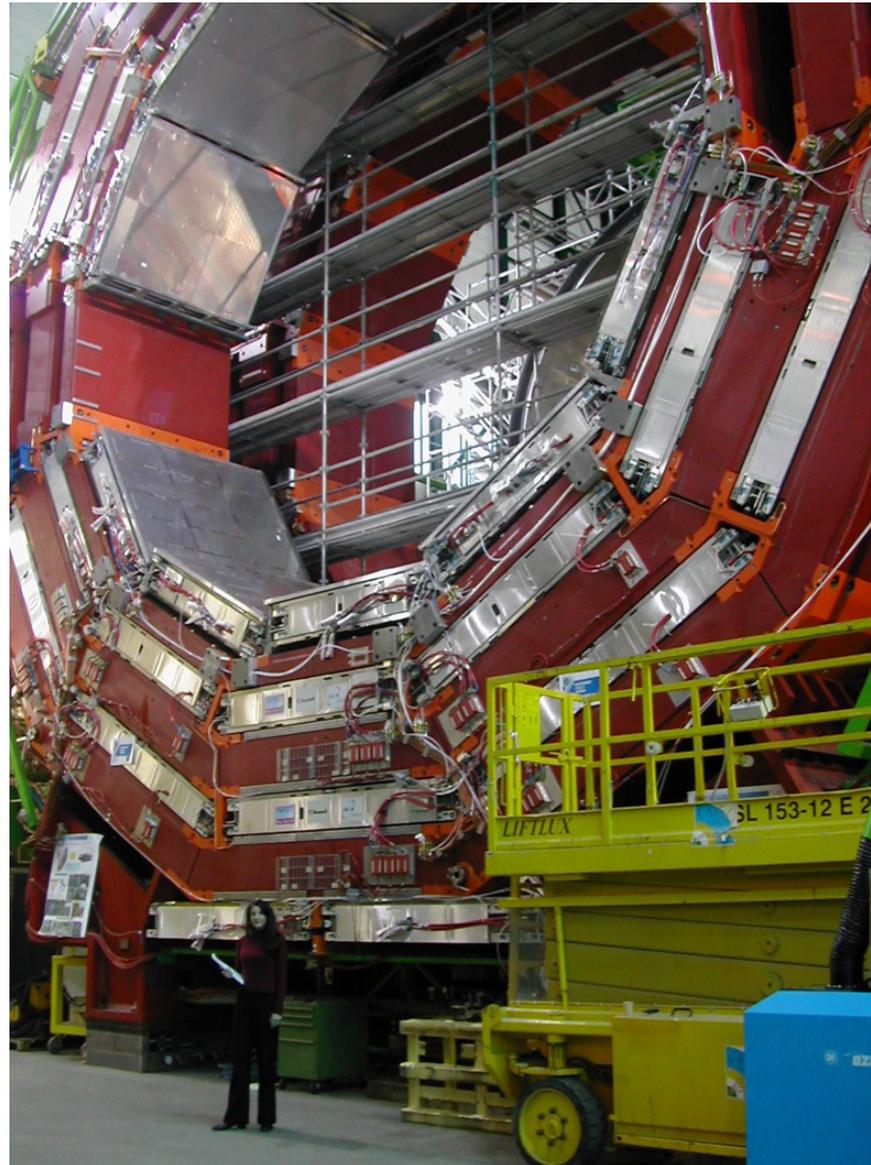
The ALEPH Detector

ALEPH/CERN



CDF/FNAL

...segmento di rivelatore completato (CMS a LHC)



Problema nucleare n.1

I costituenti nucleari sono a carica positiva o nulla. Come fa il nucleo a restare unito, visto che cariche di ugual segno si respingono?

Ipotesi:

I costituenti sono legati dall'interazione forte

Nuovo tipo di forza, molto intensa e a corto raggio

A distanze dell'ordine delle dimensioni dei costituenti nucleari $< 10^{-13}$ cm prevale sulla repulsione elettrica fra i protoni

Uno dei primi risultati della fisica agli acceleratori:

Molti 'parenti' di protone e neutrone, ossia particelle che interagiscono fortemente: chiamate collettivamente *adroni*

Caratteristica tipica dell'interazione forte

Gli adroni vengono classificati in due grandi famiglie:

Barioni - simili a protone e neutrone, piu' pesanti e con svariate proprieta' aggiuntive

Mesoni - nuovi di zecca, non osservati nello studio di atomi e nuclei a bassa energia

Tutti fortemente instabili, si disintegrano in altre particelle piu' leggere e stabili

Specie adroniche piu' leggere: Inizio di una 'Tavola periodica'

Carica elettrica

	$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$
$S = +1$		K^0	K^+
$S = 0$	π^+	π^0, η	π^+
$S = -1$	K^+	K^0	

Mesoni a spin = 0

Stranezza

	$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$
$S = 0$		n	p
$S = -1$	Σ^-	Σ^0, Λ	Σ^+
$S = -2$	Ξ^+	Ξ^0	

Barioni a spin = 1/2

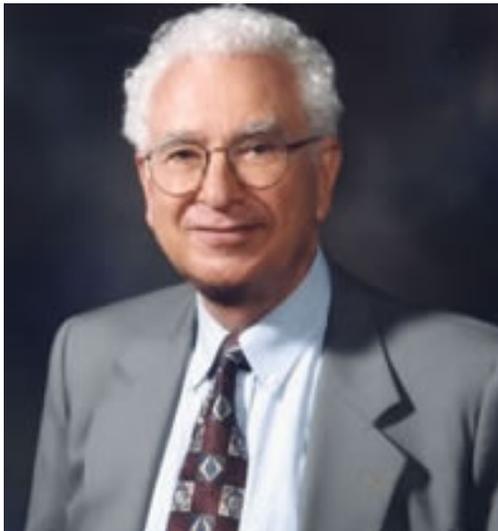
	$Q = -1$	$Q = 0$	$Q = +1$	$Q = +2$
$S = 0$	Δ^-	Δ^0	Δ^+	Δ^{++}
$S = -1$	Σ^{*-}	Σ^{*0}	Σ^{*+}	
$S = -2$	Ξ^{*-}	Ξ^{*0}		
$S = -3$	Ω^-			

Barioni a spin = 3/2

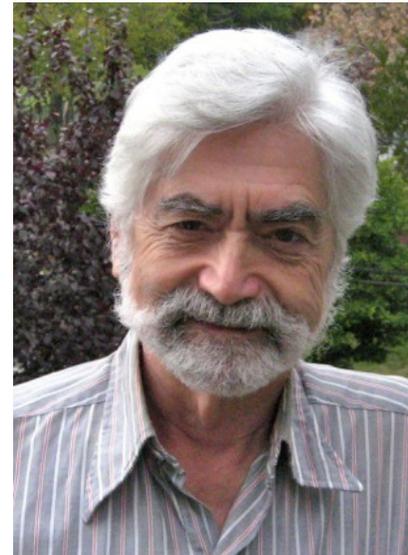
Classificazione secondo nuove proprieta', come lo *Spin* e la *Stranezza*, caratteristiche di sistemi microscopici

Centinaia di specie adroniche osservate in collisioni ad alta energia: situazione simile a quella incontrata per atomi e nuclei
Ipotesi ('64):

*Tutti gli adroni sono composti da particelle piu' semplici, i quark
(dei quali esistono 6 tipi, o sapori)*



M.Gell-Mann



G.Zweig

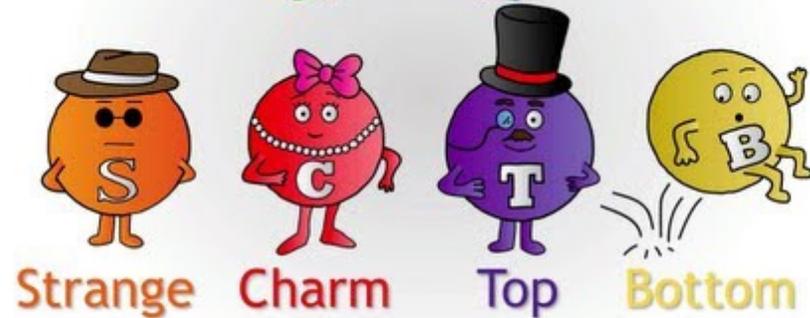
Massa
Carica
Spin
Nome

Quarks	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	u	c	t
	up	charm	top
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
d	s	b	
down	strange	bottom	

I sei quark al lavoro...

+ i corrispondenti antiquark

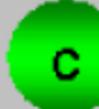
... e in famiglia



I quark interagiscono tramite la loro *carica di colore*, che ha un ruolo simile alla carica elettrica per le interazioni fra particelle cariche.

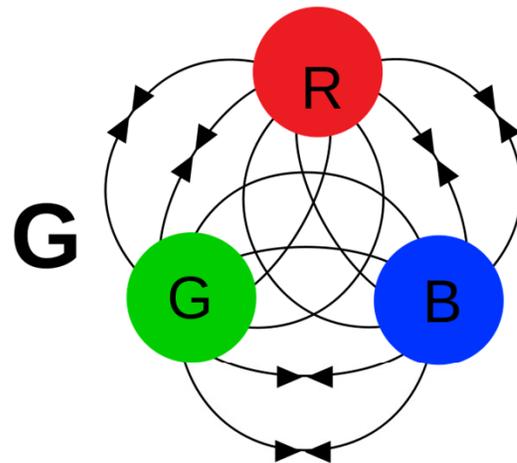
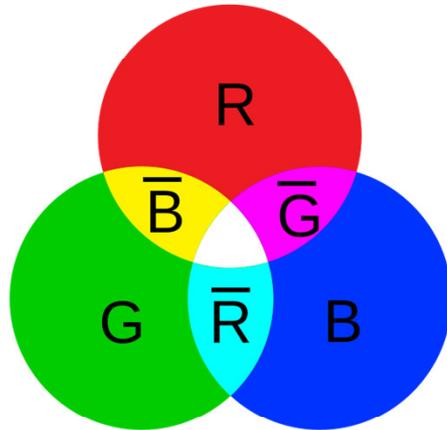
Linguaggio pittoresco ma efficace:

Ogni tipo di quark puo' trovarsi in uno fra tre diversi stati di colore : Rosso, Verde, Blu

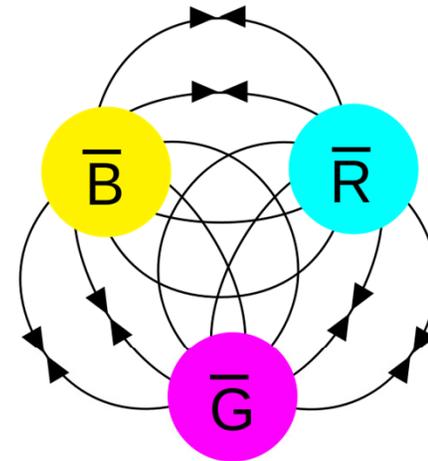
	$+2/3$			$-1/3$		
I						
II						
III						

Adroni: hanno carica totale di colore nulla \rightarrow *Bianchi*

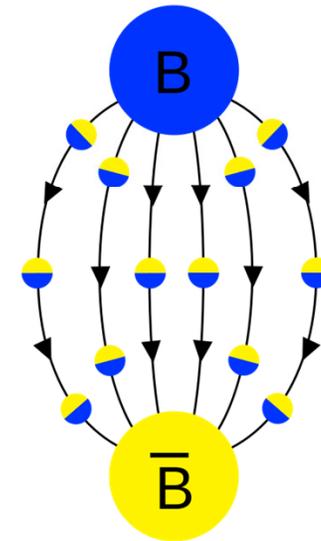
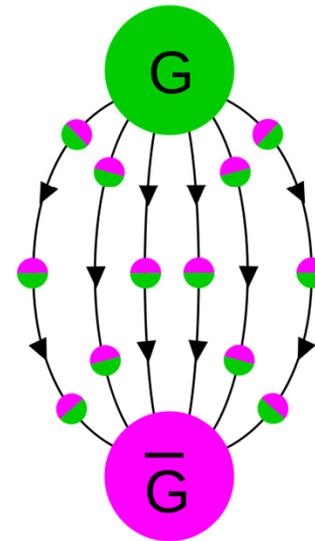
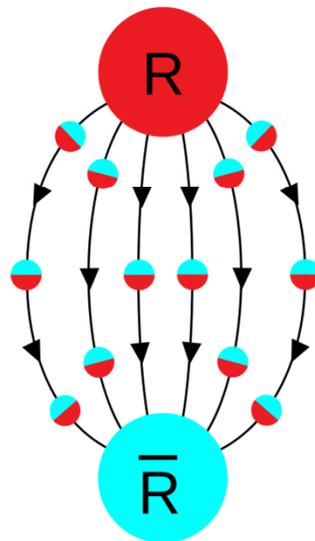
Combinazioni di colori



Barione



Antibarione



Mesoni

Proprietà' peculiari dei quark:

carica elettrica frazionaria

Caratteristica alla base di molte iniziali ricerche sperimentali dei quark

carica di colore

Nome fittizio per una proprietà' che, diversamente dalla carica elettrica, *non* ha un equivalente macroscopico

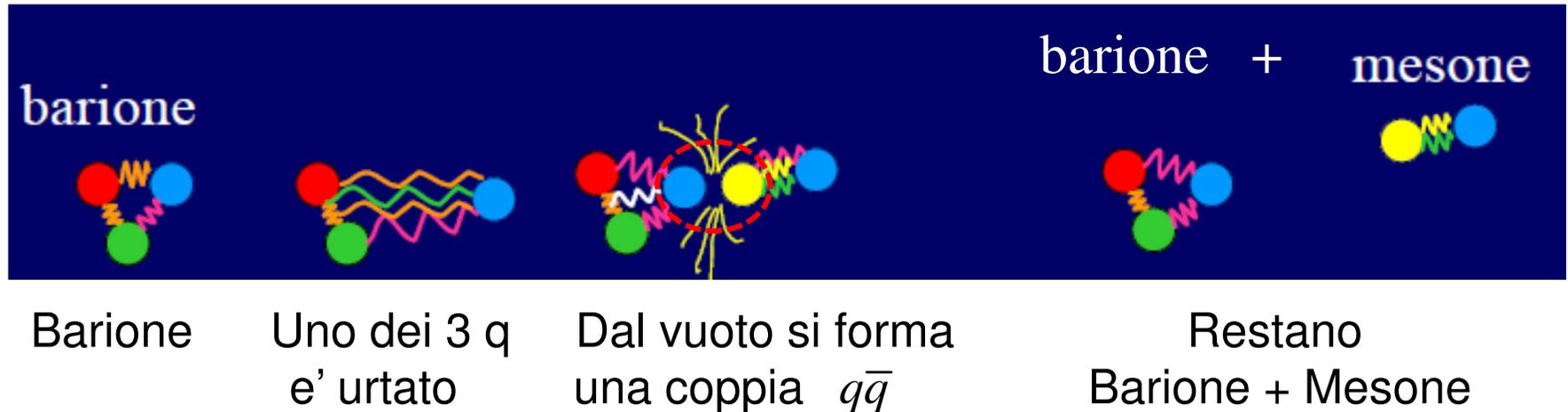
Ricerca 'a tappeto' di evidenze sperimentali per i quark:

Impossibile osservarli liberi, come p e n i costituenti del nucleo

Situazione simile all'urto con i costituenti nucleari
 Differenza fondamentale:

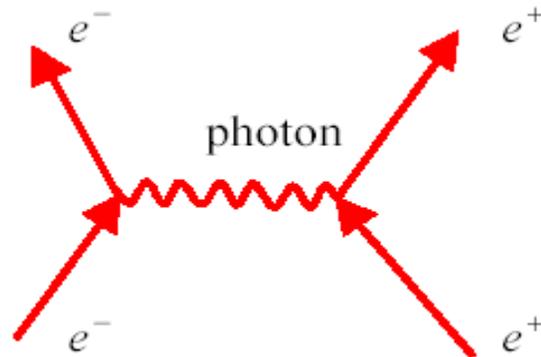
I quark liberi non sono osservabili
La carica di colore e' confinata

Legati negli adroni da *forze di colore*
 E quando si cerca di liberarli?



Interazione elettromagnetica:

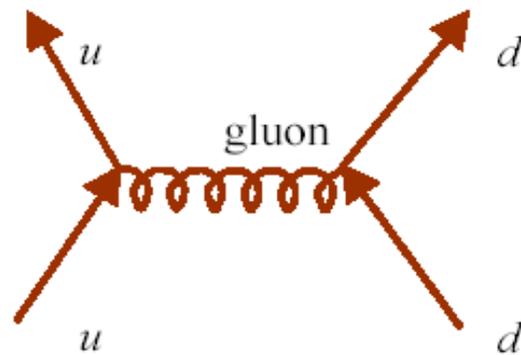
Descritta quantisticamente dallo scambio di fotoni fra particelle cariche



Fotone: privo di massa
→ Sempre con velocità c

Interazione di colore:

Descritta quantisticamente dallo scambio di gluoni fra particelle colorate



Gluone: privo di massa
→ Sempre con velocità c

Ma:

Un solo fotone, privo di carica elettrica

*Otto diversi gluoni, dotati di carica di colore
(un po' diversa da quella dei quark)*

Gluoni: come i quark, sono particelle confinate:

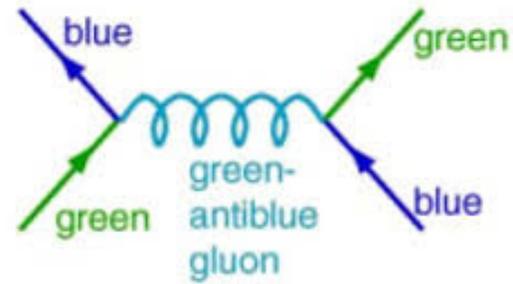
Non sono osservabili come particelle libere

Interazione di colore: fenomeni complessi, simili e diversi da quelli originati dall'interazione elettromagnetica

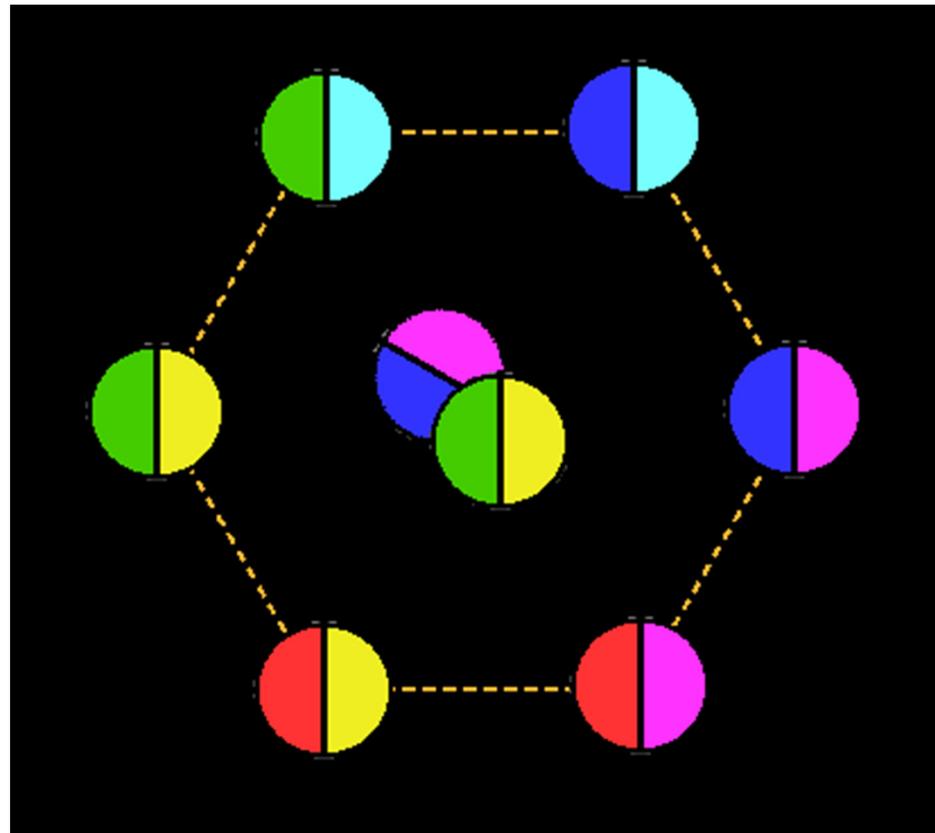
Forze fra adroni: di natura secondaria, come le *forze molecolari* fra atomi/molecole elettricamente neutri

Otto gluoni: ognuno colore+anticolore

Esempio:
Verde-Antiblu



Tutti



Se sono sempre confinati, come si fa a osservare i quark e i gluoni?

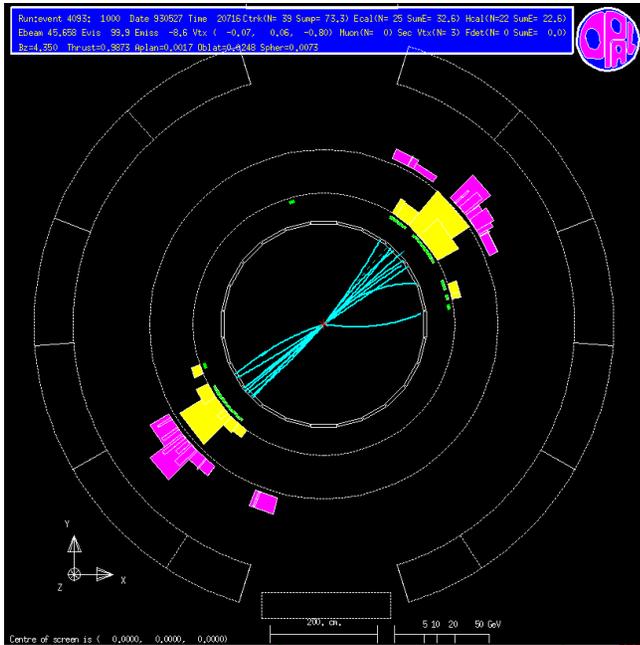
Quark e gluoni sono abbondantemente prodotti nelle collisioni ad alta energia, per esempio ai collisori $e^+ e^-$

In un tempo molto breve $\sim 10^{-26}$ s si 'sgretolano' in adroni ordinari e rivelabili

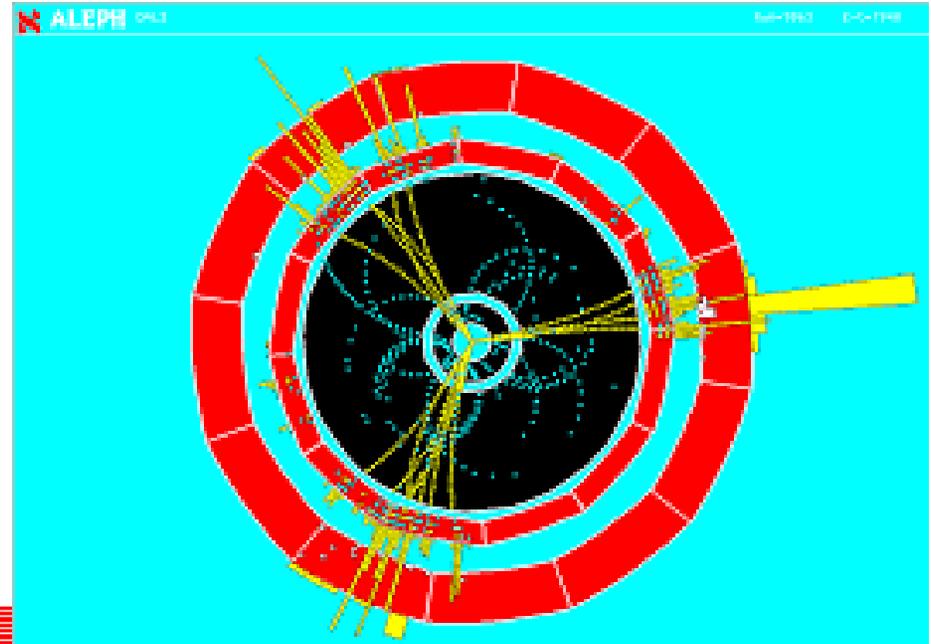
Osservati sotto forma di 'getti' di tracce collimate

→ *Jets*

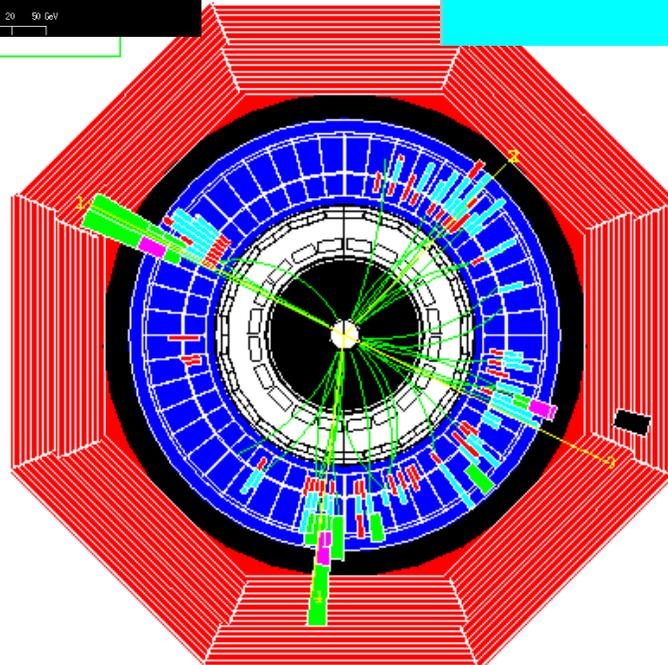
Lo studio dei jets conduce a determinare indirettamente molte proprietà dei quark, gluoni e dell'interazione di colore



2 jets



3 jets



4 jets



Molte prove convincenti e indipendenti della validita' delle ipotesi sull'interazione di colore e sulle sue proprieta'

Restano difficolta' pratiche per calcolare dai principi primi tutte le proprieta' osservate dello zoo degli adroni

Verifiche numeriche, estese e dettagliate, danno risultati positivi

Morale:

L'interazione di colore e' oggi una parte solida e ben verificata del Modello Standard

Problema nucleare n. 2

Perche' molte specie nucleari, e anche molti adroni, sono instabili e si disintegrano spontaneamente?

Diverse modalita' di disintegrazione: la piu' interessante, nota come *decadimento beta*, ha strane caratteristiche

Ipotesi:

*I costituenti nucleari sono soggetti
all'interazione debole*

molto meno intensa dell'interazione elettromagnetica, a energie non troppo elevate

Anch'essa non si manifesta fra corpi macroscopici: raggio d'azione piccolissimo, $< 10^{-16}$ cm!

Ma quali sono i costituenti elementari, a parte quark e gluoni? Alcuni li abbiamo già incontrati:

Elettrone

Muone

Fotone

Tutti sono privi di carica di colore, e quindi

Non sentono l'interazione di colore

Analogia: Una particella priva di carica elettrica non sente l'interazione elettromagnetica

Caratteristica interessante del muone: *Instabilita'*

Si disintegra dopo un tempo breve ($2.2 \cdot 10^{-6}$ s) secondo lo schema

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e, \text{ simile per } \mu^+$$

ν_μ, ν_e : Nuove particelle

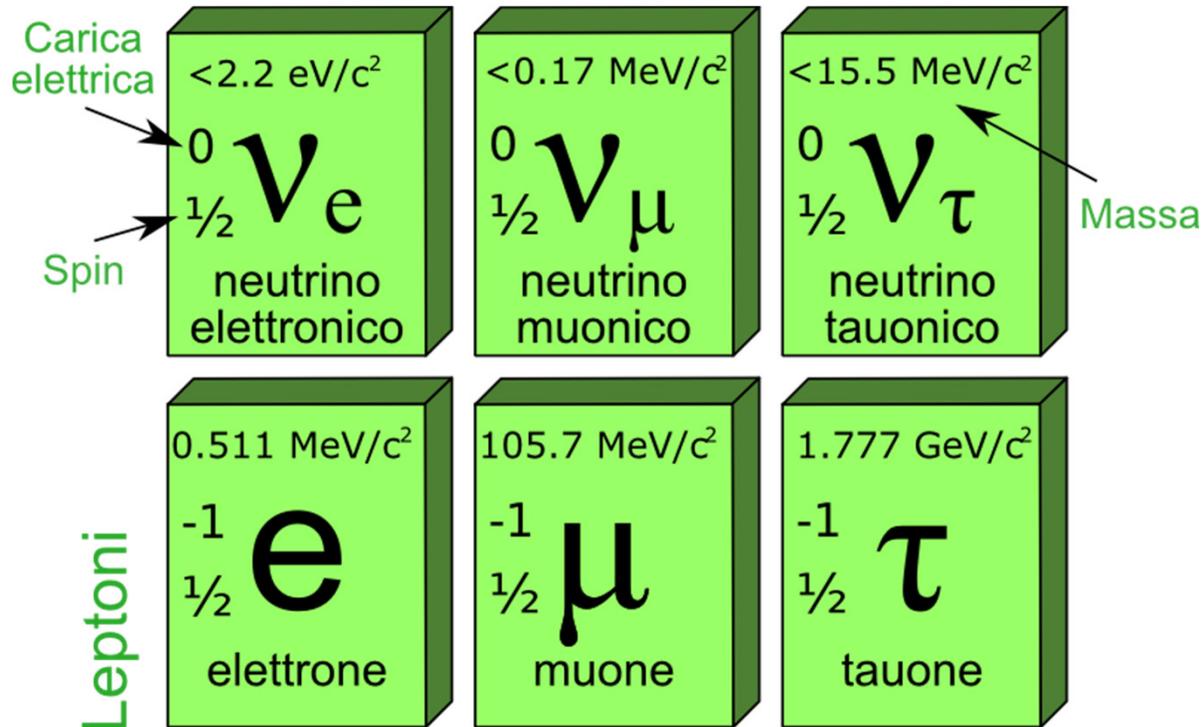
Neutrini

~ privi di massa e di carica

Uno associato all'elettrone, l'altro al muone

Scoperta poi una terza particella instabile, il *tau* e il relativo neutrino: fratello piu' pesante degli altri due - Instabile

Leptoni:



+ i corrispondenti antileptoni

*Tutti sentono l'interazione debole,
quelli carichi anche quella elettromagnetica*

Interazione debole:

Struttura simile a quella elettromagnetica e di colore

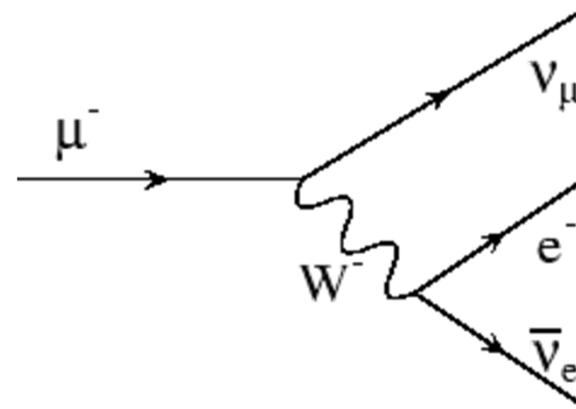
Due modi fondamentali:

Corrente carica

Scambio di una particella

pesante, carica: W^+ , W^-

→ *Il leptone cambia carica*



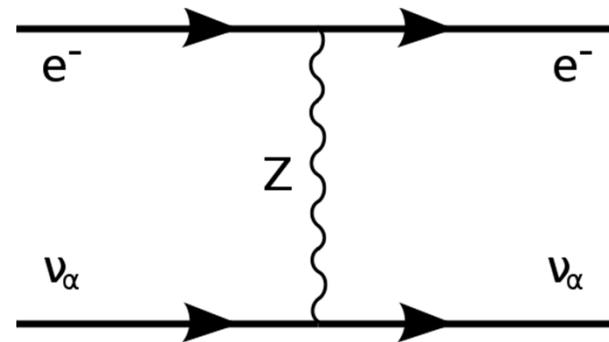
Corrente neutra

Scambio di una particella

pesante, neutra: Z^0

→ *Il leptone non cambia carica*

Come con il fotone



Corrente carica: Anche fra quark

→ I quark possono cambiare carica, e di fatto natura

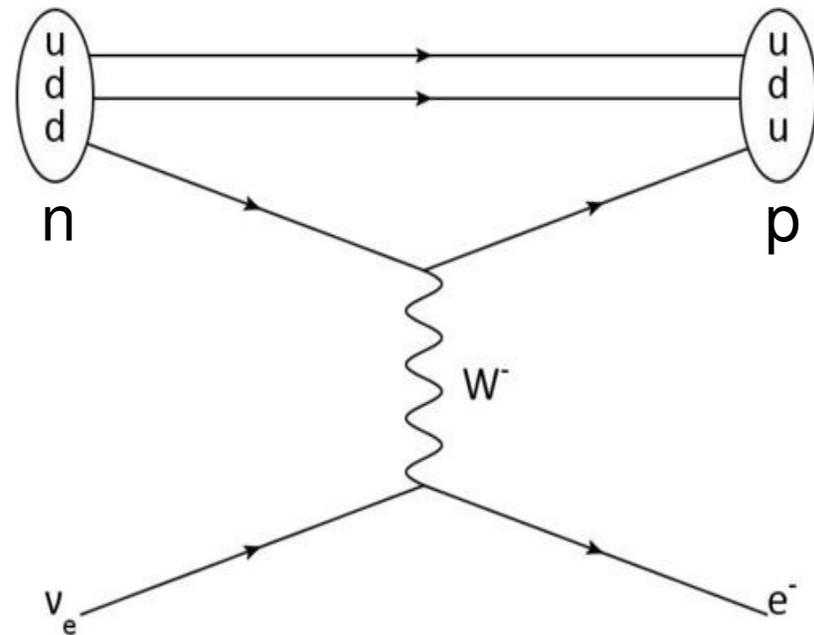
Processi del tutto simili a quelli fra leptoni

Esempio:

Decadimento beta del neutrone

Quark $d \rightarrow$ Quark u

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



Corrente neutra:

Simile (ma non identica!) a corrente elettromagnetica

→Suggerisce la possibilità' che le due siano *parti diverse di una stessa interazione*

Possibilità' effettivamente realizzata in natura:

Unificazione elettrodebole

Unica interazione basata sullo scambio di quattro diversi mediatori:

$$\gamma, W^+, W^-, Z^0$$

fra correnti di leptoni o di quark

CERN, 1978-1983

Trasformazione del SPS in un collider antiprotone-protone

Sviluppo di tecniche innovative per produrre fasci intensi di antiprotoni

Realizzazione dei primi rivelatori di grandi dimensioni con caratteristiche avanzate

Passo cruciale:
Osservazione sperimentale di W e Z

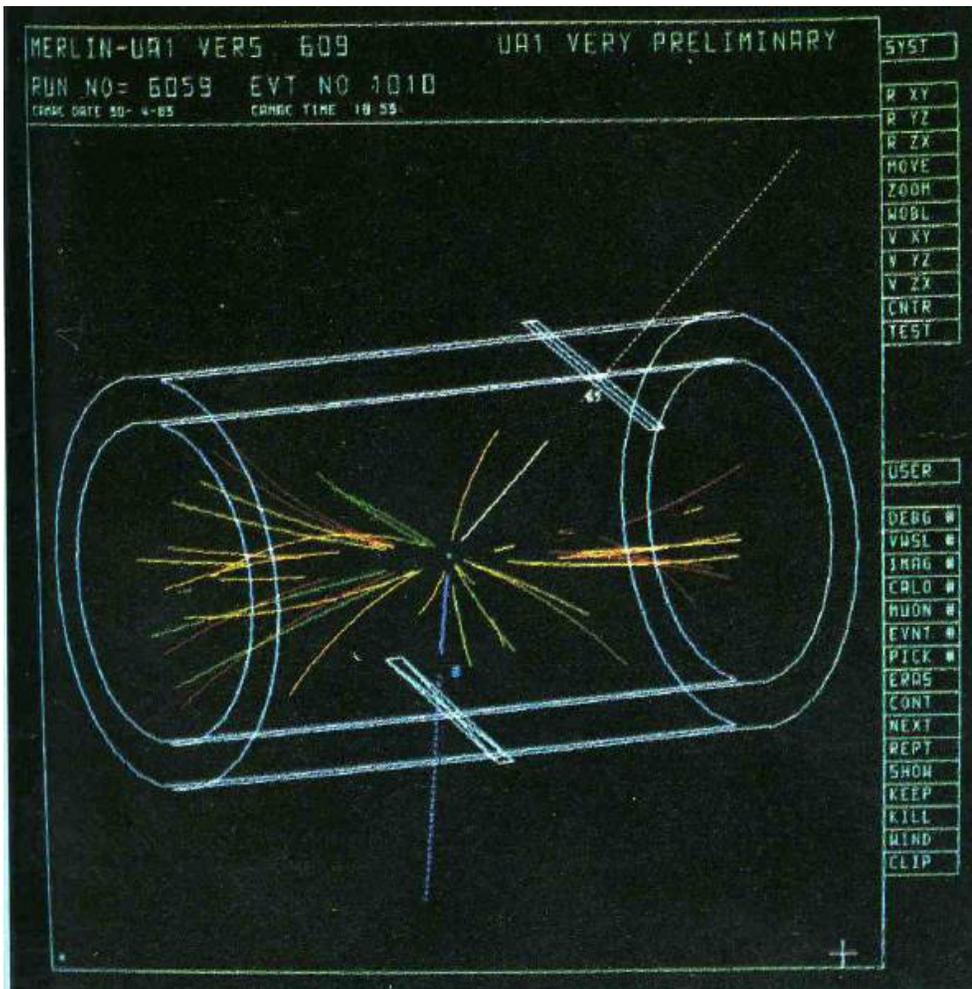


C. Rubbia

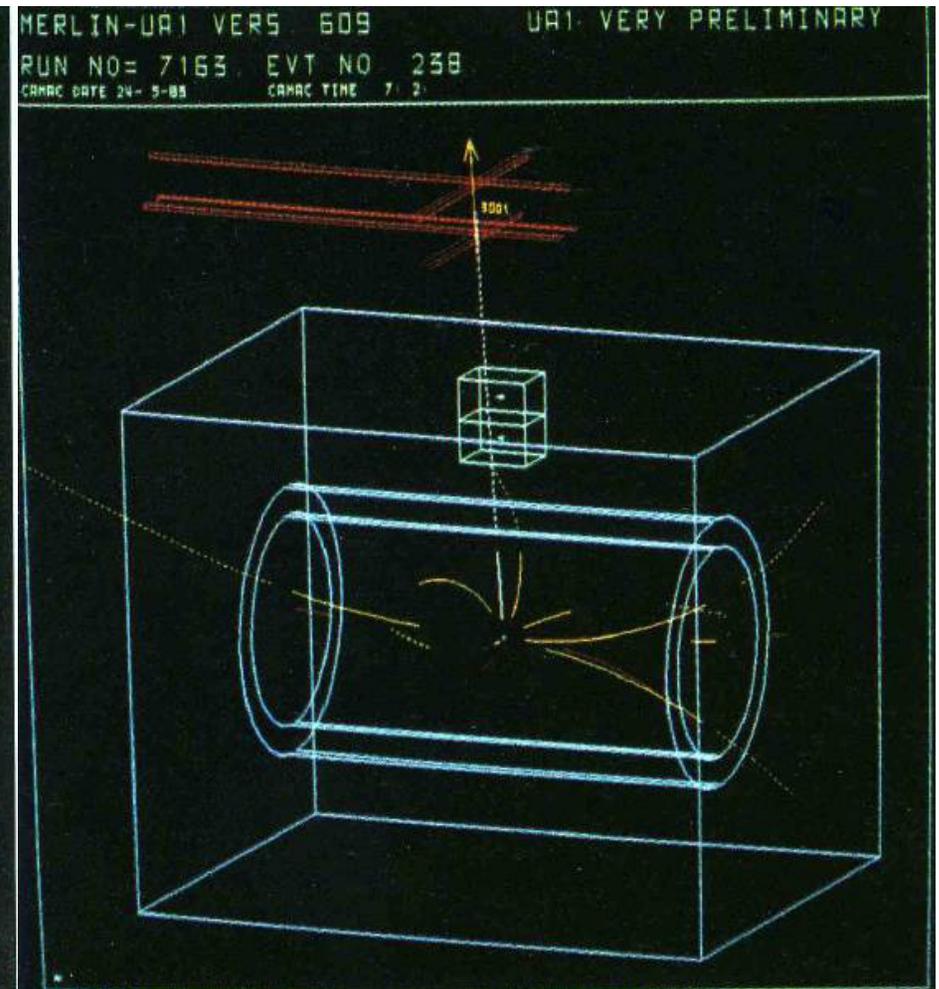


S. Van Der Meer

UA1 1983



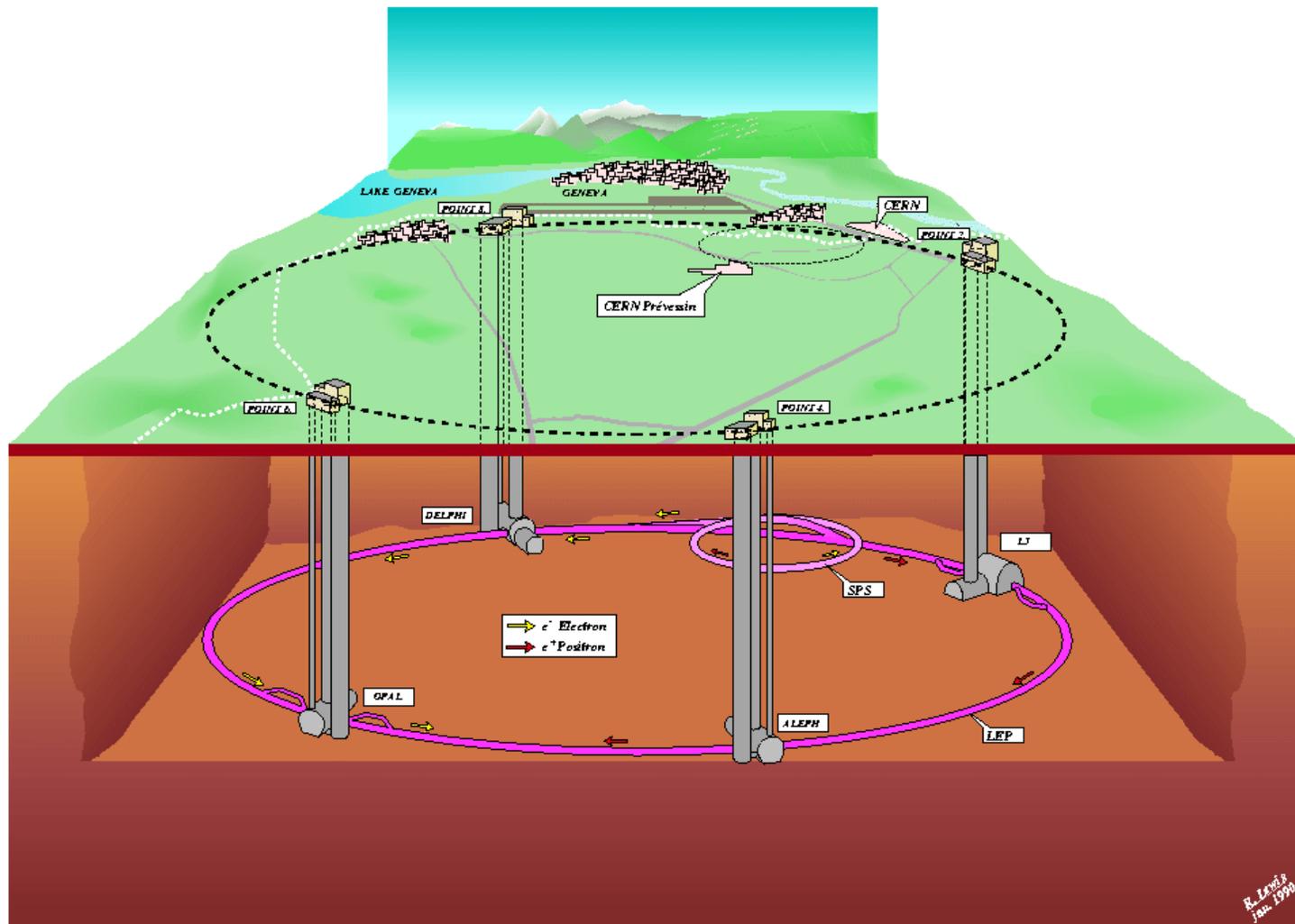
$$Z^0 \rightarrow e^+ e^-$$



$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

LEP: Collisore con energia fino a $100 + 100$ GeV

Costruito negli anni '80, in funzione fino al 2000



CERN anni '90: Fisica a LEP
Large Electron Positron (Collider)

Collisore e^+e^- 90 ÷ 209 GeV

Studio dettagliato di Z^0 e W
Misure di precisione

Convalida accurata ed estesa
dell'unificazione elettrodebole



***L'interazione elettrodebole e' oggi una parte solida
e ben verificata del Modello Standard***

(Quasi) il Modello Standard in una slide

Generazioni di quark e leptoni

	I	II	III	
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nome →	u up	C charm	t top	γ fotone
Quark	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluone
Leptoni	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	Z⁰ forza debole
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e elettrone	μ muone	τ tauone	W[±] forza debole

Particelle mediatrici

Come sono fatte le interazioni fondamentali?

Sconfinando vergognosamente nel prato dei teorici:

Lo scopo e' trovare una codifica matematica che descriva cio' che si osserva in modo

completo, economico, predittivo

Inquadramento unificato della totalita' di cio' che si osserva

Riduzione al minimo possibile delle assunzioni di partenza

Capacita' di predire fenomeni non ancora osservati

Punti di partenza:

Osservazioni sperimentali delimitano il campo delle possibilita'
Principio di relativita' e leggi della meccanica quantistica non devono essere violati (fino a prova contraria)

Le possibilita' tuttavia restano molte

Come guida ulteriore, alcuni

Principi di simmetria

Anzi, dicono i teorici:

*Niente e' calcolabile nel MS se non sono rispettate
alcune leggi di simmetria*

Un piccolo problema:

*Le leggi di simmetria valgono nel Modello Standard solo se
tutte le particelle fondamentali, costituenti e quanti dei campi di
forza, sono prive di massa!*

Negli anni '60, Higgs e alcuni altri mostrarono come si potessero far convivere le belle proprietà di simmetria del MS con la massa non nulla dei costituenti

Dimostrazione non elementare, per la quale sfortunatamente non ci sono vere scorciatoie illustrative...

In estrema sintesi:

Tutto va bene se, accanto agli altri, esiste *un nuovo campo di forza*, appunto il campo di Higgs:

la particella che emerge dalla sua quantizzazione e' stata a volte chiamata, piuttosto irriverentemente, la *particella di Dio*



Quel che conta e' il ruolo del *campo di Higgs*

Presente in tutto lo spazio

Interazione con quasi tutti i costituenti del Modello Standard

Risultato principale dell'interazione:

«Urto» ripetuto dei costituenti in movimento contro il campo di Higgs

→ Non si muovono piu' con velocita' c

→ *Acquistano una massa senza che le simmetrie del MS vengano violate*

Come provare l'esistenza del campo di Higgs?

Come gli altri campi fisici, soggetto a quantizzazione:
Emergenza della *particella di Higgs*, quanto del campo stesso

A volte chiamata 'Bosone di Higgs'

Dovuto a una sua proprietà schiettamente quantistica:

Il suo spin è un multiplo intero ($= 0$) di \hbar

Diverse considerazioni portano a concludere che la particella di Higgs debba essere molto massiva

→ Bisogna trasformare molta energia in massa per produrla e osservarla

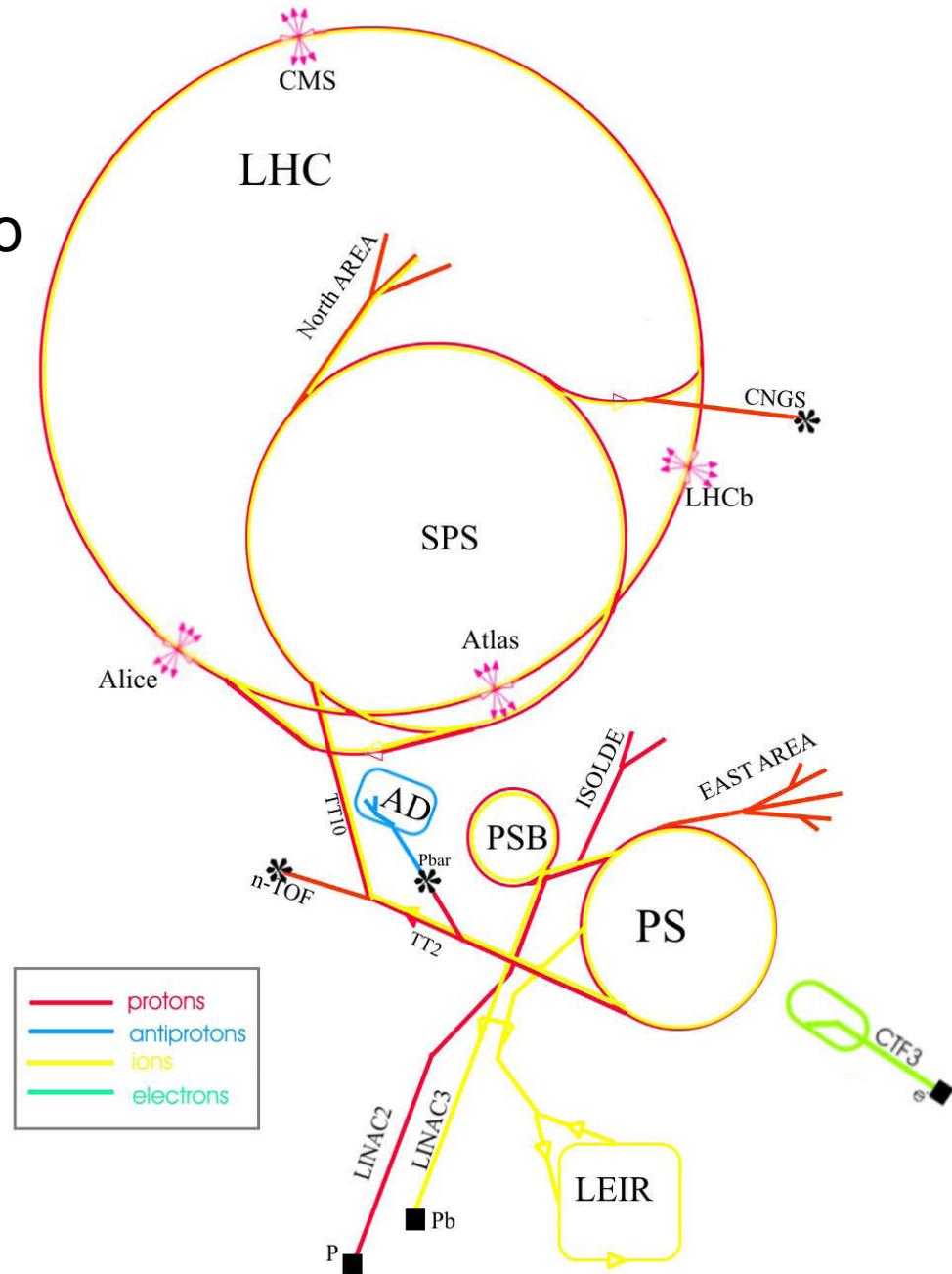
Large Hadron Collider

Nuovo acceleratore costruito
al CERN (2000-2009)

Collider protone-protone
Energia elevatissima:
fino a 13-14 TeV

Molto 'luminoso':
 $\sim 10^9$ collisioni per secondo

27 km circonferenza
4 incroci



II CERN



CERN, Ginevra, Svizzera
Acc. circolari
SPS (7 km), LEP/LHC (27 km)

LHC



Cavita' acceleratrice



Magnete dipolare

Per mantenere le particelle sull'orbita:

~ 1000+ Magneti superconduttori per il campo guida

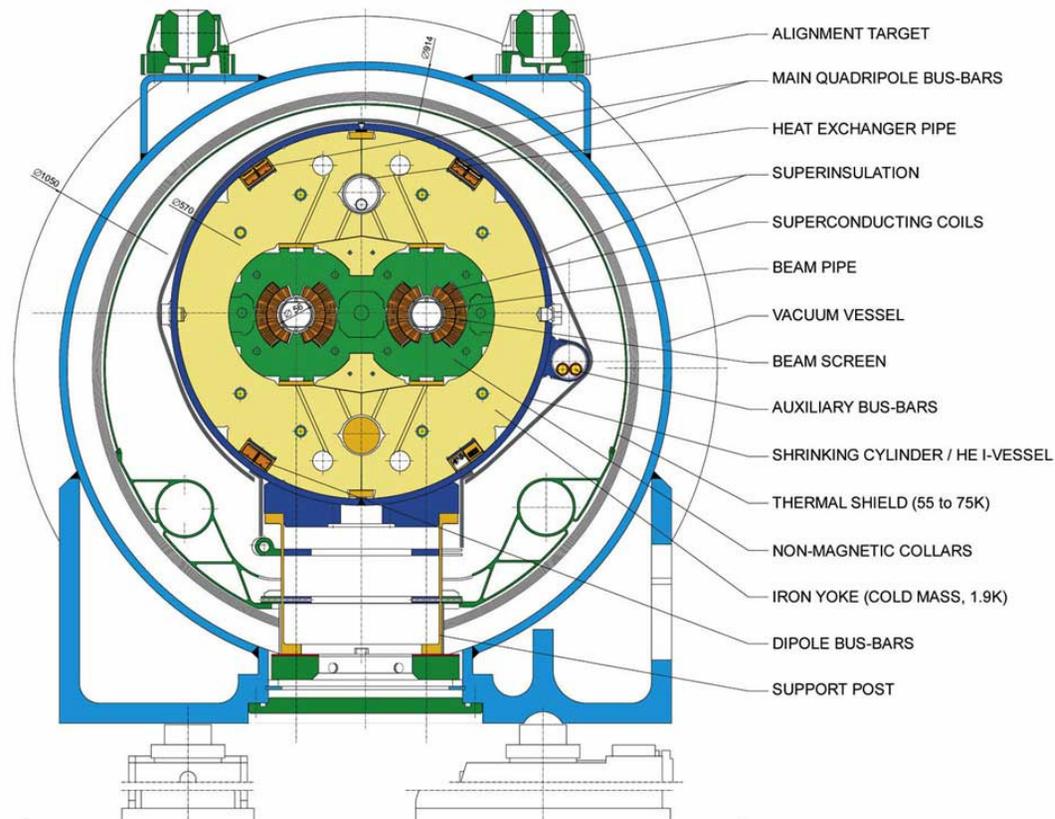
Molti altri elementi magnetici

Campo magnetico guida: 8 Tesla ~ 200000 volte quello terrestre

Temperatura: $-271,25^{\circ}\text{C}$ ~ 1° piu' bassa di quella dello spazio

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN AC/DI/MM - HE107 - 30 04 1999



Al pari di quasi tutte le altre particelle, anche quella di Dio e' altamente instabile

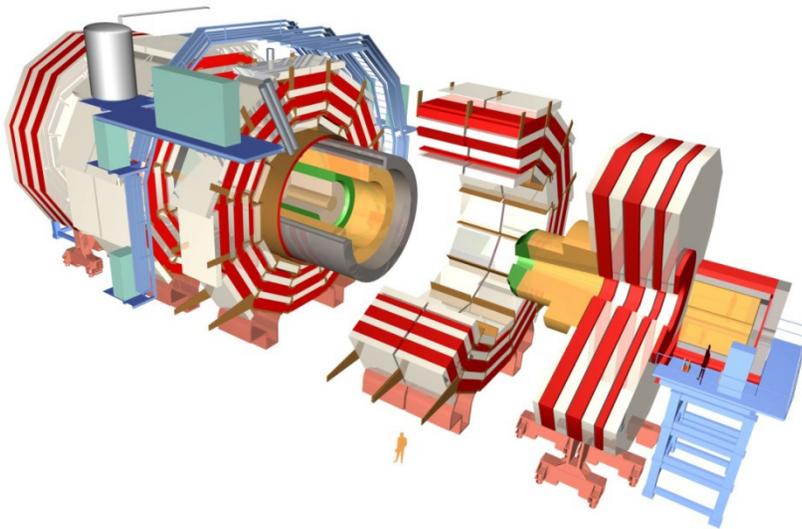
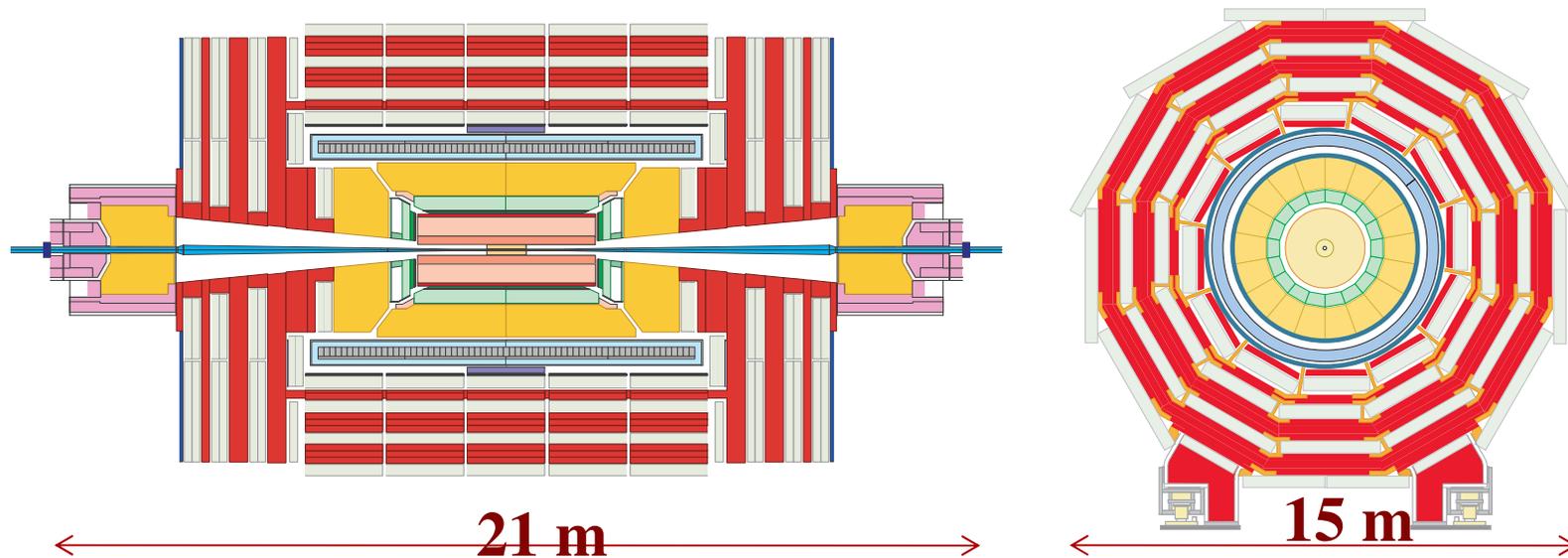
In tempi brevissimi si disintegra in altre particelle piu' stabili, e quindi piu' facili da osservare

I teorici hanno previsto da tempo quali siano i modi di disintegrazione piu' favorevoli, ed e' su quelle previsioni che gli sperimentali hanno disegnato e costruito i rivelatori di LHC. Fra i tanti p es:

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$$

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

Compact Muon Solenoid: Uno dei rivelatori di LHC



14000 T
Campo magnetico 3.8 T
200 m² di silicio
80 milioni di sensori
4000 ricercatori

La particella di Higgs e' stata osservata nel 2012 da due esperimenti a LHC

ATLAS
CMS

ed e' oggi attivamente studiata

Fino ad ora, le sue proprieta' risultano in perfetto accordo con le previsioni del Modello Standard

***Questo completa con successo
la convalida del Modello Standard
(In attesa di novita', sorprese, contraddizioni,...
che nella storia della fisica delle particelle
non sono mai mancate)***

...e per finire: Pubblicita'!

