



Introduzione alla fisica delle particelle



U. De Sanctis,
Dipartimento di Fisica Università' di Roma Tor Vergata &
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare





Cos'è la fisica delle particelle?

- Una scienza moderna che affronta le domande fondamentali della storia del pensiero:

- Come funziona l'Universo?

- Da dove viene?

- Dove va?

- Quali sono i componenti ultimi della materia?

- Come “si muovono”?

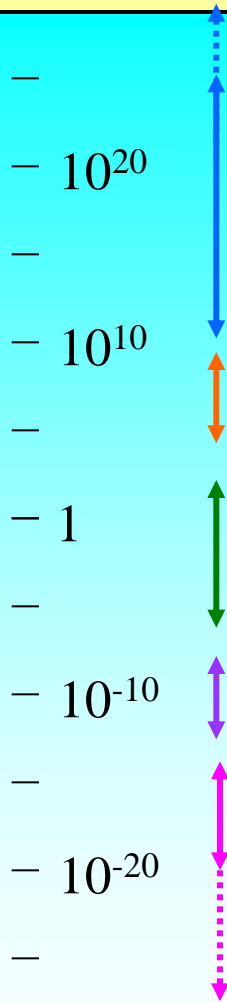
- Che cosa “li muove”?

- *La Fisica delle Particelle non è solo una classificazione “zoologica” delle particelle esistenti in Natura, bensì aspira a comprendere il motivo della loro esistenza e le regole che le governano*

Un confronto dimensionale

Dimensioni (cm)

Dimensioni (cm)



Cosmologia
Astronomia
Astrofisica

Geofisica

♦ **Antropologia, Psicologia**

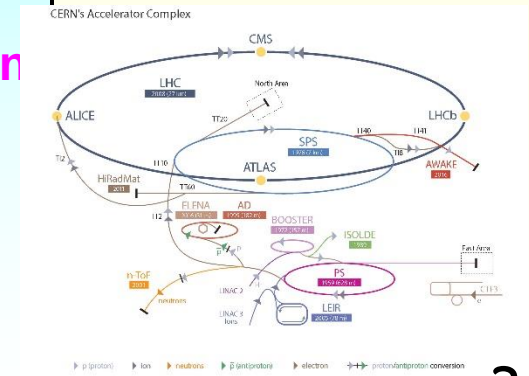
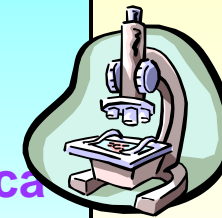
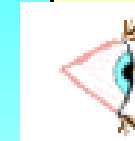
Biologia, fisica dei fluidi,
Solidi, gas

♦ **Chimica**

Fisica molecolare e atomica

♦ **Fisica nucleare**

Fisica delle particelle elementari



Stato della Fisica intorno a fine '800

Periodic Table of the Elements

1																	2	
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Hs	Mt	110	111	112	113						

* Lanthanide Series
58 Ce 59 Pr 60 Nd 61 Pm 62 Sm 63 Eu 64 Gd 65 Tb 66 Dy 67 Ho 68 Er 69 Tm 70 Yb 71 Lu

+ Actinide Series
90 Th 91 Pa 92 U 93 Np 94 Pu 95 Am 96 Cm 97 Bk 98 Cf 99 Es 100 Fm 101 Md 102 No 103 Lr

Tavola periodica

Meccanica Statistica (c 1860)
3 leggi della termodinamica
Teoria Cinetica

Leggi di Conservazione

- Energia
- Impulso
- Momento Angolare

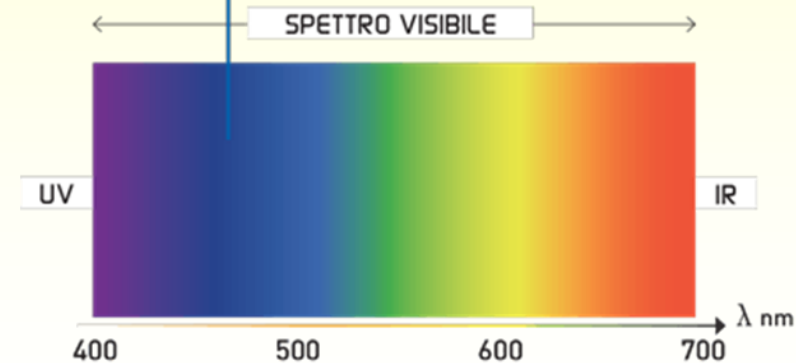
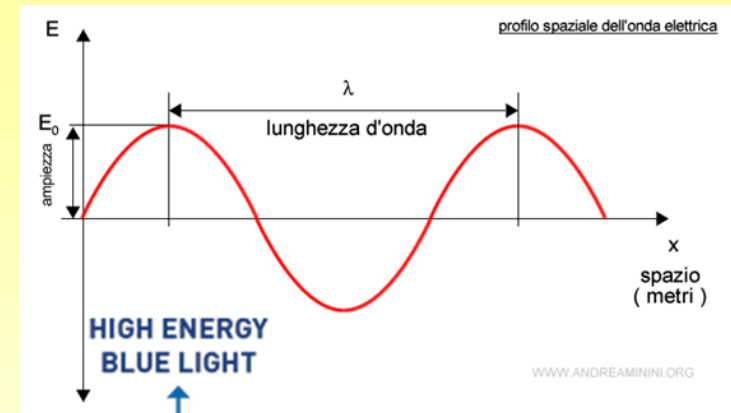
Meccanica (Gravita')
Leggi di Newton (c 1640)
Legge di Inerzia
 $F = m a$
Reazioni uguali ed opposte

Elettricit  e Magnetismo
Equazioni di Maxwell (c1880)
Legge di Gauss
Legge di Faraday
Legge di Ampere
No monopoli magnetici

Tutti abbiamo esperienza pi  o meno diretta di queste cose: ma c'  altro che «non si vede»?
Gli atomi sono davvero le particelle fondamentali della Natura?

Ma come si «vedono» gli atomi?

- La nostra «sonda» è in realtà la luce!
- Essa «rimbalza» contro gli oggetti e noi vediamo questa luce riflessa.
- La luce è un'onda elettromagnetica che è caratterizzata da una grandezza chiamata **lunghezza d'onda**
- **La luce ci consente di «vedere» cose che sono più grandi o all'incirca comparabili con la sua stessa lunghezza d'onda**
- **La luce visibile sta tra 400 e 700 nanometri**
- **... e infatti vediamo cose fino a circa 1 micrometro (cioè 1000 nanometri)...**



Onda su onda...

Per vedere come è fatto un oggetto, è necessario che:

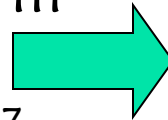
- 1) La nostra “lampada” emetta “luce” con una lunghezza d’onda λ simile o più piccola della grandezza dell’oggetto stesso.
- 2) Il nostro “occhio” sia in grado di “vedere” la luce riflessa.

Visione con una lampada e gli occhi.



Facciamo due conti:

- Grandezze nucleo atomico: 10^{-15} m
- Grandezza atomo: 10^{-10} m
- Lungh. d’onda luce lampada: 10^{-7} m
- Sorgente di raggi X : 10^{-8} – 10^{-12} m



Ci si può “accorgere” della presenza degli atomi, ma serve una sorgente con λ oltre 1000 volte più piccola per indagare un nucleo!!



I 30 anni che sconvolsero la fisica!

1895 Röntgen scopre i raggi X.

1898 Marie e Pierre Curie separano gli elementi radioattivi,
Thomson misura l'elettrone e sviluppa il suo modello atomico

1900 Planck suggerisce che la radiazione sia quantizzata

1905 Einstein descrive il fotone come quanto di luce, che si comporta come una particella. Propone inoltre l'equivalenza tra massa ed energia, la dualità onda-particella, la relatività speciale

1911 Rutherford capisce che l'atomo ha un nucleo interno

1913 Bohr costruisce una teoria atomica basata sulla meccanica quantistica.

1919 Rutherford fornisce la prima evidenza dell'esistenza del protone

Da qui in avanti, nulla sarà più come prima....

L'avvento della Meccanica Quantistica

- Ci stiamo «lanciando» verso dimensioni sempre più piccole...
- ...ma siamo sicuri che il mondo microscopico sia come quello macroscopico?
- La risposta è no! Il mondo microscopico segue «leggi» diverse!
- Tra le tante...

× **Principio di indeterminazione di Heisenberg**: non si possono misurare due quantità **contemporaneamente** con una precisione infinita → fine del determinismo!

× Ogni oggetto microscopico e visibile **sia come una particella che come un'onda** con una certa lunghezza d'onda λ

× **Massa ed energia** sono la stessa cosa

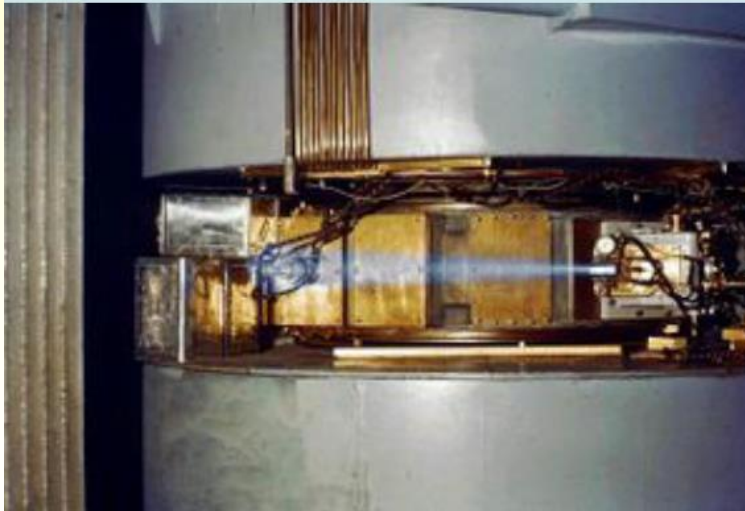
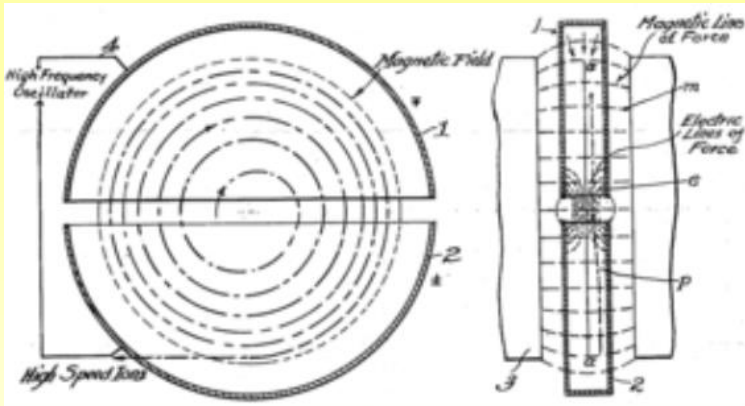
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$E = mc^2$$

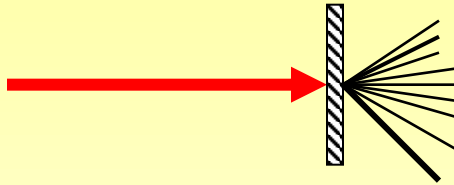
Il ciclotrone (1929)



- E. Lawrence costruisce il primo acceleratore di particelle: il ciclotrone
- Il ciclotrone è un disegno primitivo:
 - Due elettrodi all'interno dei quali le particelle eseguono traiettorie a spirale, accelerati da una differenza di potenziale e tenuti in orbite circolari da un intenso campo magnetico assiale.
- Ora basta «scagliare» queste particelle contro un bersaglio e il gioco è fatto...

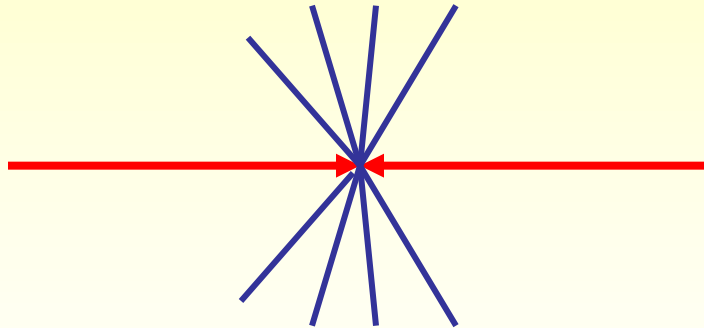
Tipologie di collisioni

TARGHETTA FISSA



Si accelerano particelle e si “sparano” contro un bersaglio fisso

COLLISIONI FASCIO-FASCIO

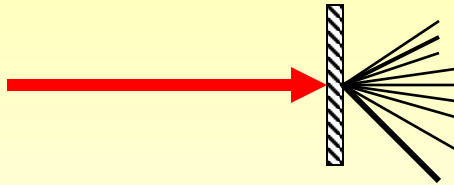


Si accelerano particelle e si fanno scontrare tra di loro in una collisione frontale

- Quale metodologia garantisce di raggiungere la maggiore energia?

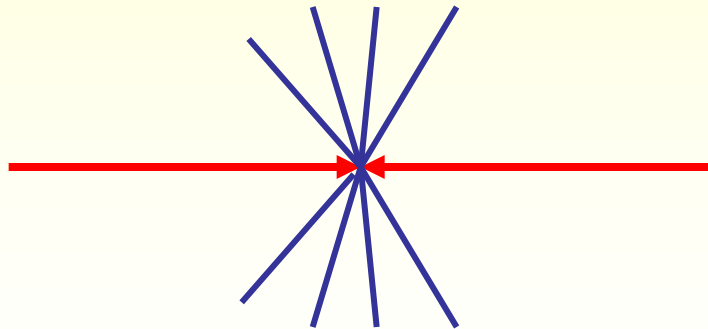
Tipologie di collisioni

TARGHETTA FISSA



Energia a disposizione per produrre nuove particelle: $\sim \sqrt{E_{\text{beam}}}$

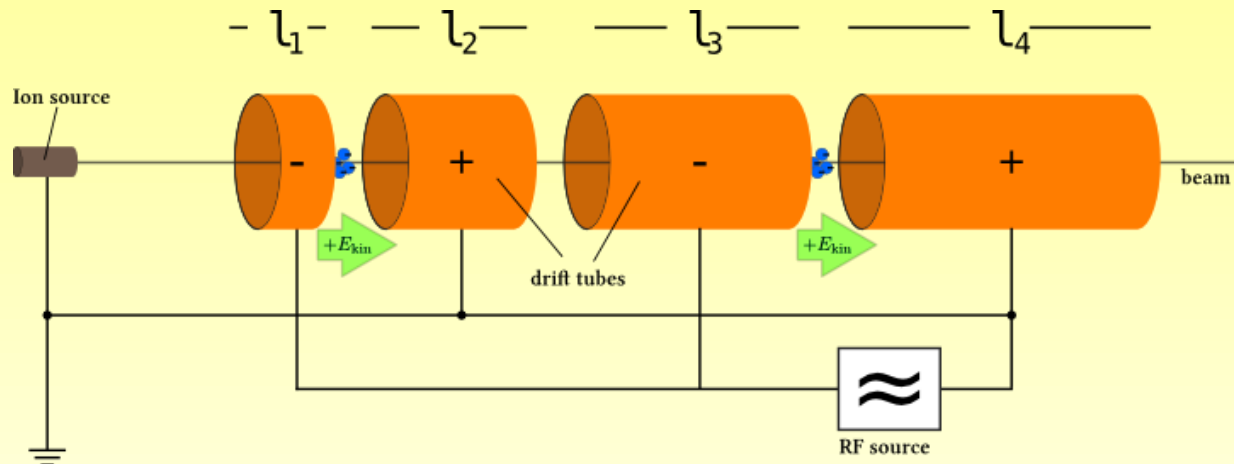
COLLISIONI FASCIO-FASCIO



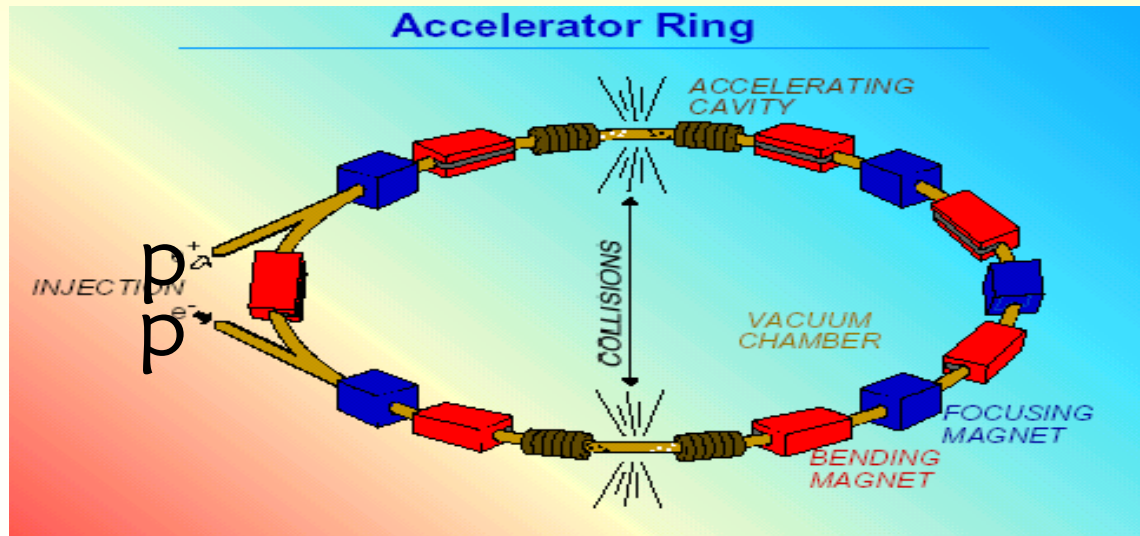
Energia a disposizione per produrre nuove particelle $= 2 * E_{\text{beam}}$

Molto più efficiente!

Tipologie di acceleratori



Lineari



Circolari

- Quale garantisce di raggiungere la maggiore energia?



Rivelatori

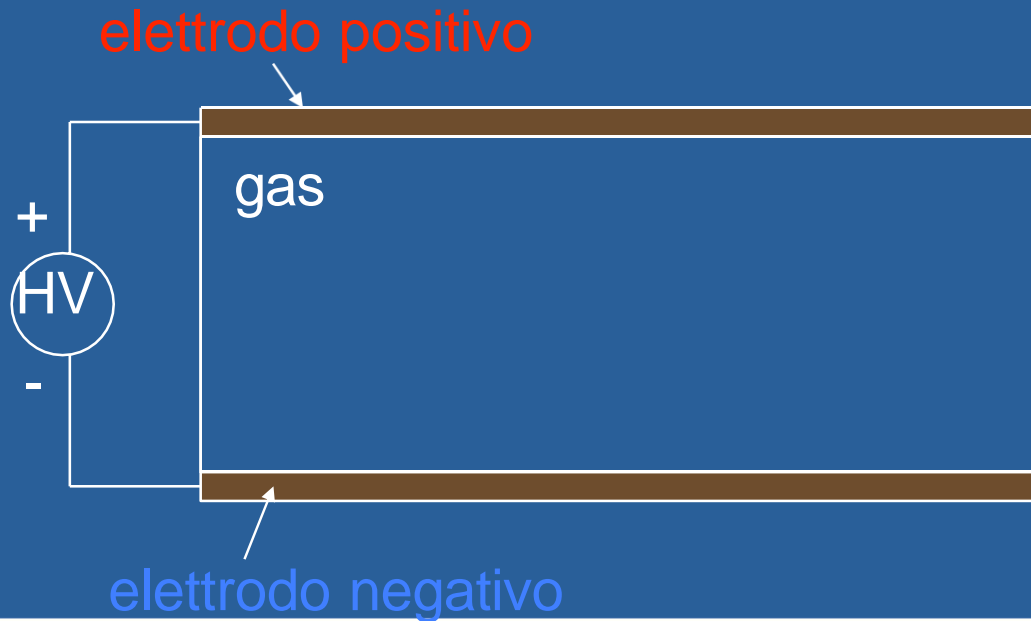
- L'occhio umano o il microscopio non bastano più per rivelare le particelle
- Perciò costruiamo oggetti complessi che siano «sensibili» al passaggio di (determinate) particelle e ci inviino dei segnali elettronici da poter misurare che si chiamano **rivelatori**
- Ogni particella stabile (o con vita media di almeno qualche picosecondo) ha un modo caratteristico di interagire (interazione elettromagnetica, nucleare forte e debole) con la materia (nucleoni, nuclei, atomi ed elettroni che la compongono). In base a questo 'modo' viene identificata.
- Esempi:
 - × Ionizzando un gas
 - × Creando coppie e/h nei rivelatori a stato solido
 - × Eccitando gli atomi del materiale attivo che poi emettono luce

Un esempio di rivelatore a caso...

La **particella carica** (che tipo di particella) passa nel **gas** (materiale sensibile), interagisce **ionizzando** (interazione elettromagnetica con gli elettroni dell'atomo)

L'alta tensione crea un campo elettrico che accelera e/o trasporta elettroni e ioni

La corrente generata viene misurata su un circuito

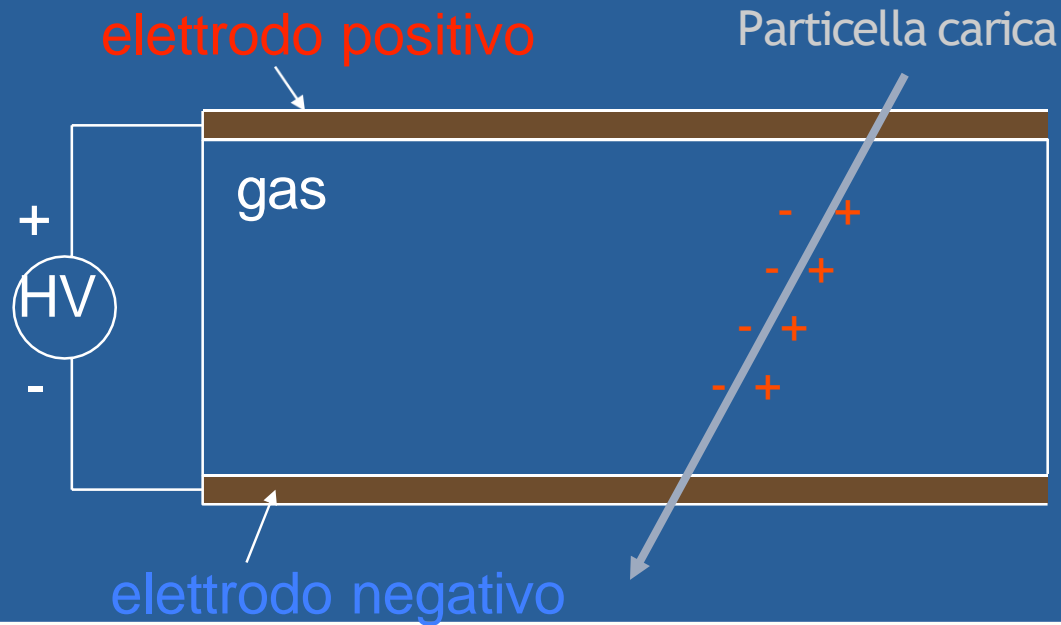


Un esempio di rivelatore a caso...

La **particella carica** (che tipo di particella) passa nel **gas** (materiale sensibile), interagisce **ionizzando** (interazione elettromagnetica con gli elettroni dell'atomo)

L'alta tensione crea un campo elettrico che accelera e/o trasporta elettroni e ioni

La corrente generata viene misurata su un circuito

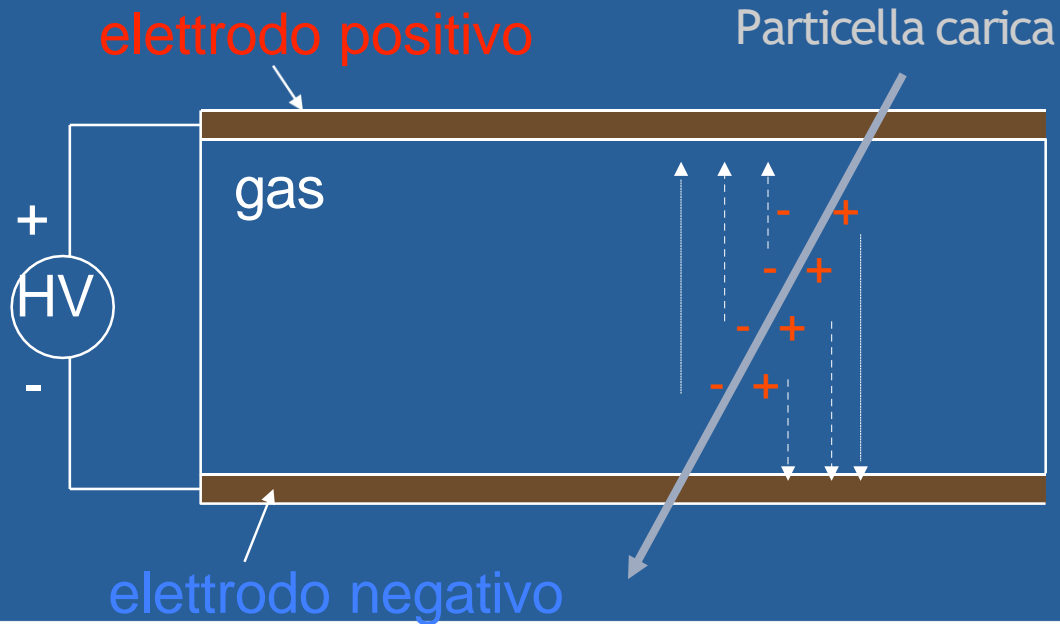


Un esempio di rivelatore a caso...

La particella carica (che tipo di particella) passa nel gas (materiale sensibile), interagisce ionizzando (interazione elettromagnetica con gli elettroni dell'atomo)

L'alta tensione crea un **campo elettrico che accelera e/o trasporta elettroni e ioni**

La corrente generata viene misurata su un circuito

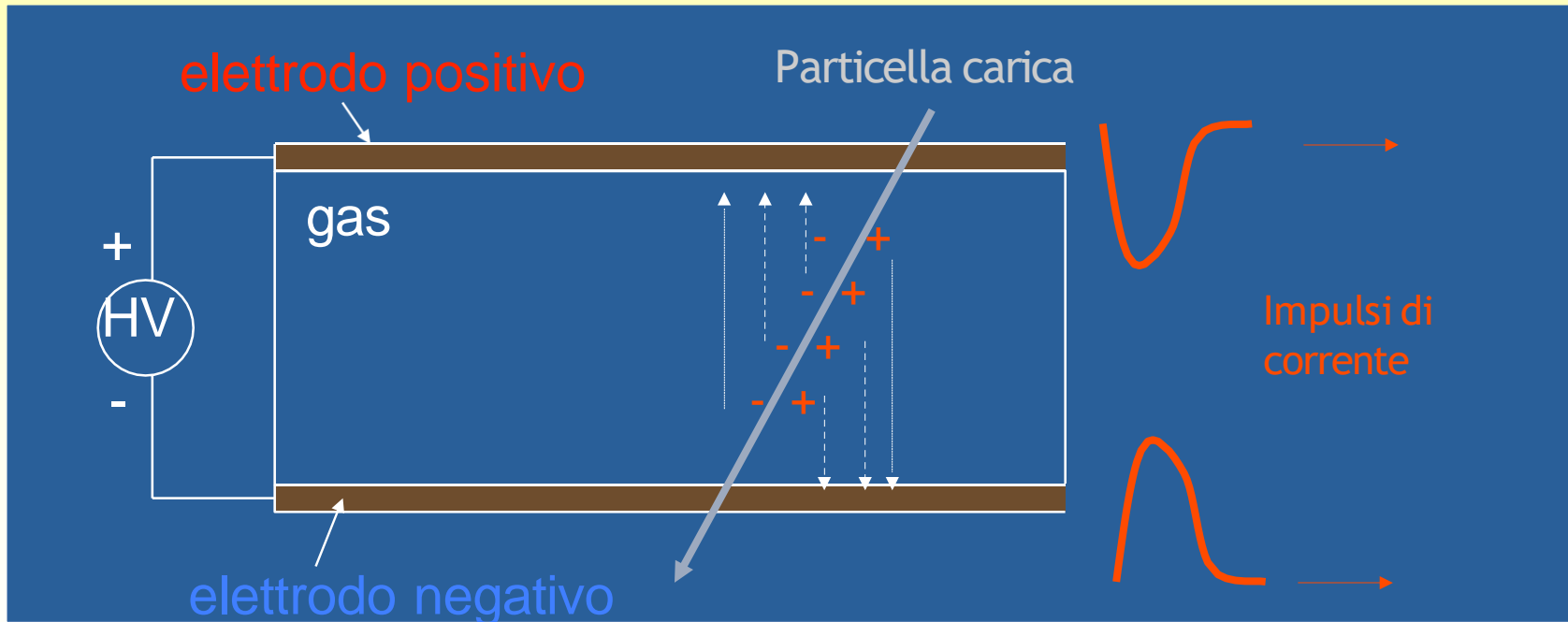


Un esempio di rivelatore a caso...

La particella carica (che tipo di particella) passa nel gas (materiale sensibile), interagisce ionizzando (interazione elettromagnetica con gli elettroni dell'atomo)

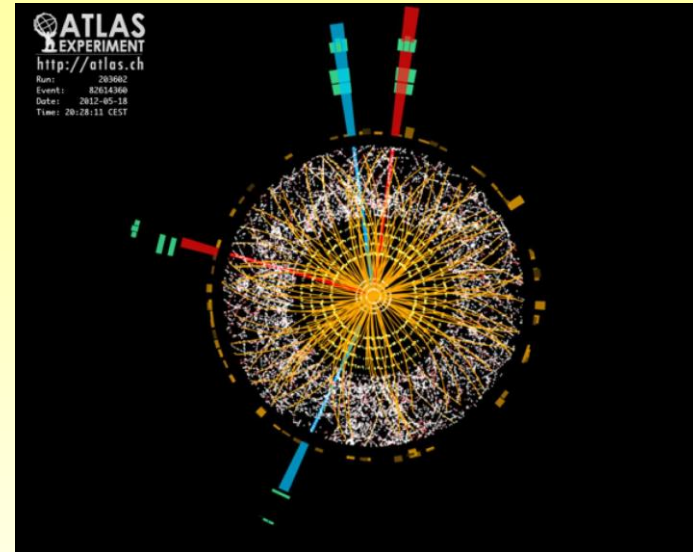
L'alta tensione crea un campo elettrico che accelera e/o trasporta elettroni e ioni

La corrente generata viene misurata su un circuito



I rivelatori moderni ai collisionatori

- Attorno ai 4 punti di collisioni sono stati costruiti dei 4 **rivelatori**: ATLAS, CMS, ALICE e LHCb
- Gigantesche macchine fotografiche che «scattano» 40 M di foto al secondo!
- Sistemi super-complessi fatti di diversi sotto-rivelatori in grado di:
 - ✗ Rivelare ognuno un determinato tipo di particella
 - ✗ Misurarne energia, velocità e traiettoria
 - ✗ Selezionare i dati più «interessanti» e salvarli su disco. → Circa 100 TB di dati al giorno!



Il laboratorio più famoso: il CERN

- Costruito nel 1954 a Ginevra vicino alla frontiera francese



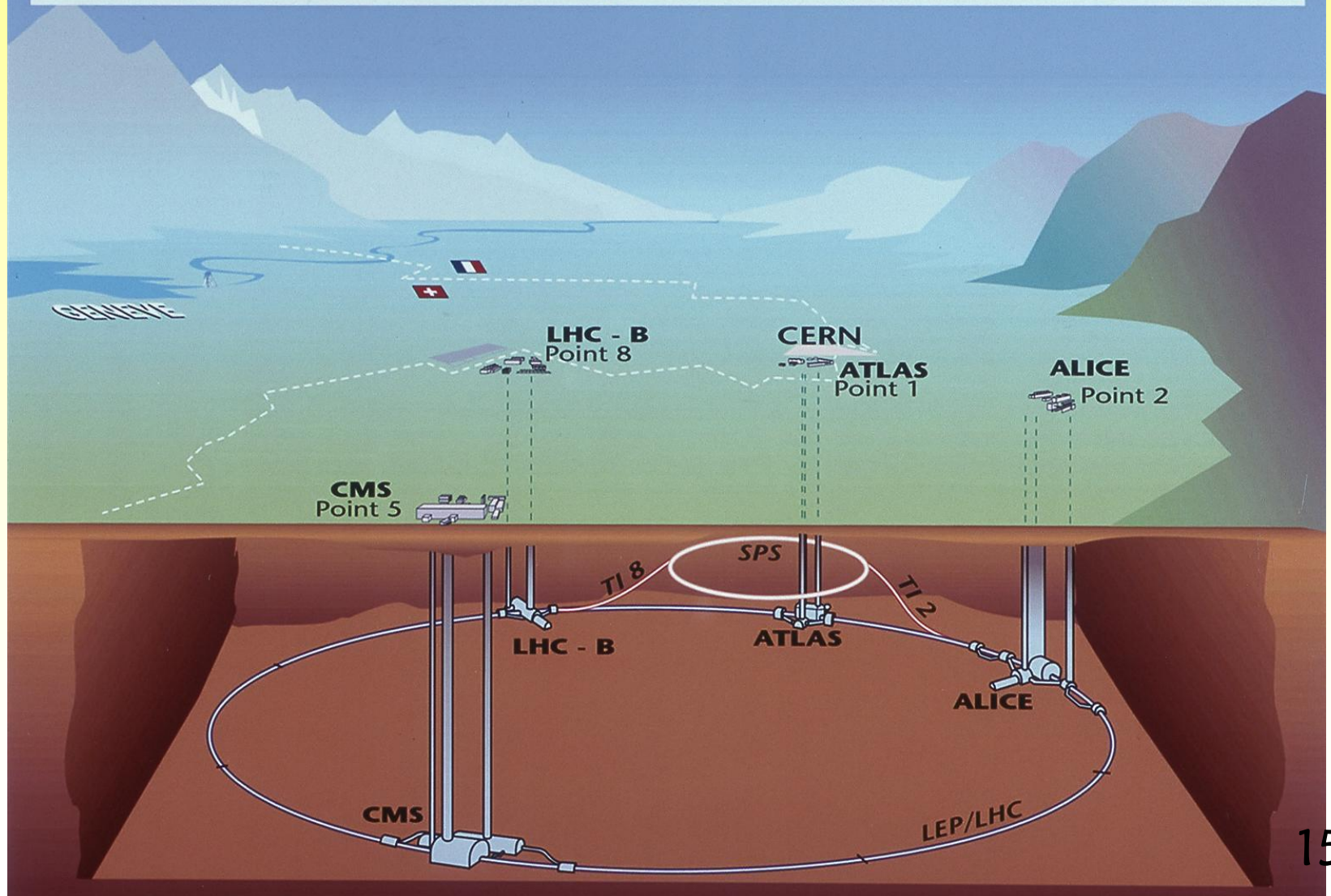
L'acceleratore più famoso: LHC

La macchina più complessa mai realizzata dall'uomo!



100 m sottoterra...

Overall view of the LHC experiments.



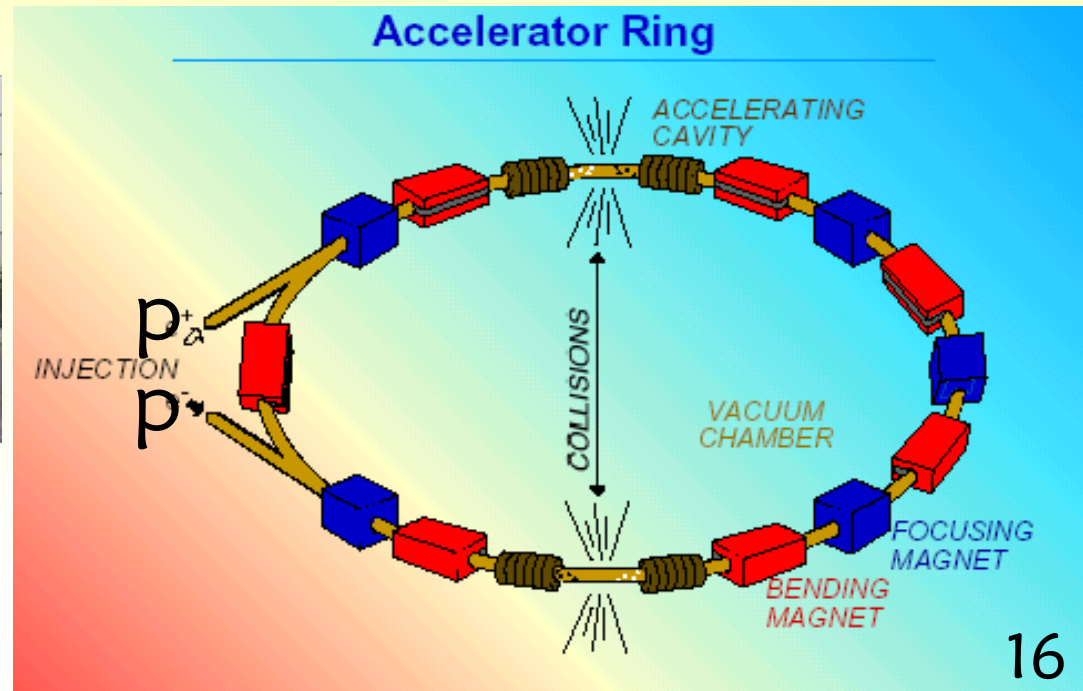
Come funziona LHC?

Tre ingredienti fondamentali per costruire un acceleratore di particelle:

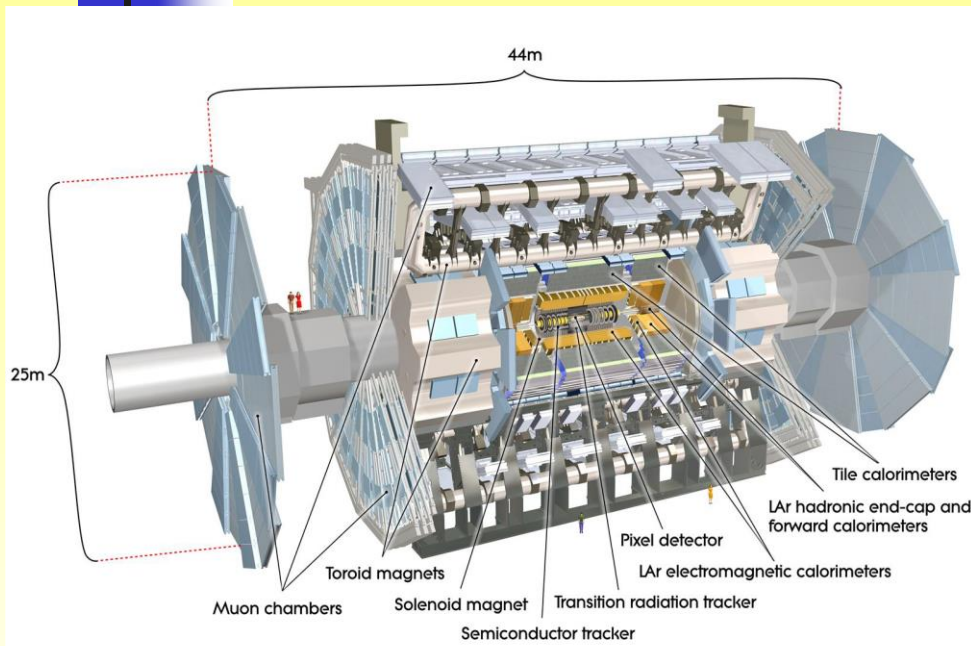
- Le particelle (protoni): 2800 pacchetti da 100 miliardi l'uno!
- Campi elettrici per accelerarle: 12000 A di corrente!
- Campi magnetici per curvarle e farle rimanere su una traiettoria circolare



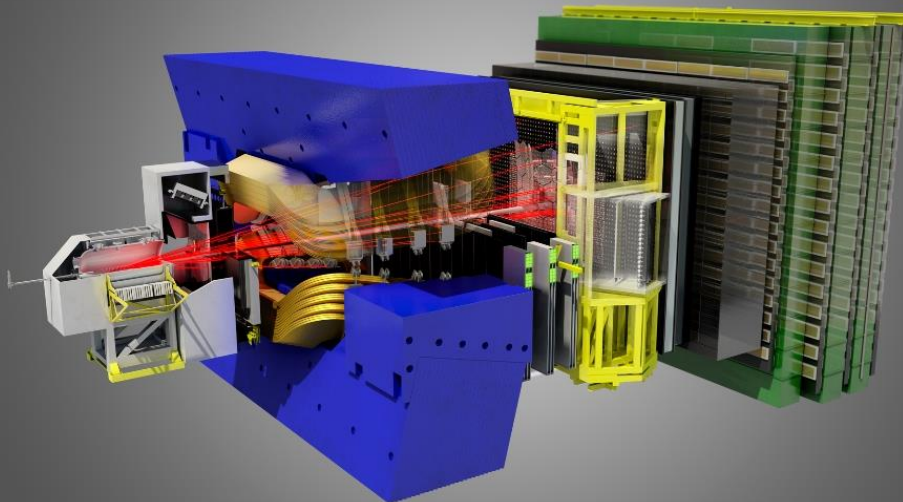
Ma una volta che i protoni si scontrano.... Che ce ne facciamo di tutte queste collisioni?



I rivelatori ad LHC



- ATLAS e CMS → Rivelatori «giganti» ad ampio spettro
- LHCb → Rivelatore per studiare la fisica del sapore (talk dopo!)
- ALICE → Rivelatore per collisioni tra ioni Pb e studio della materia nucleare



Ma non c'è solo LHC e i suoi esperimenti al CERN come vedrete tra poco...



Cos'è davvero «elementare»?

Esperimenti e teorie vanno di pari passo:

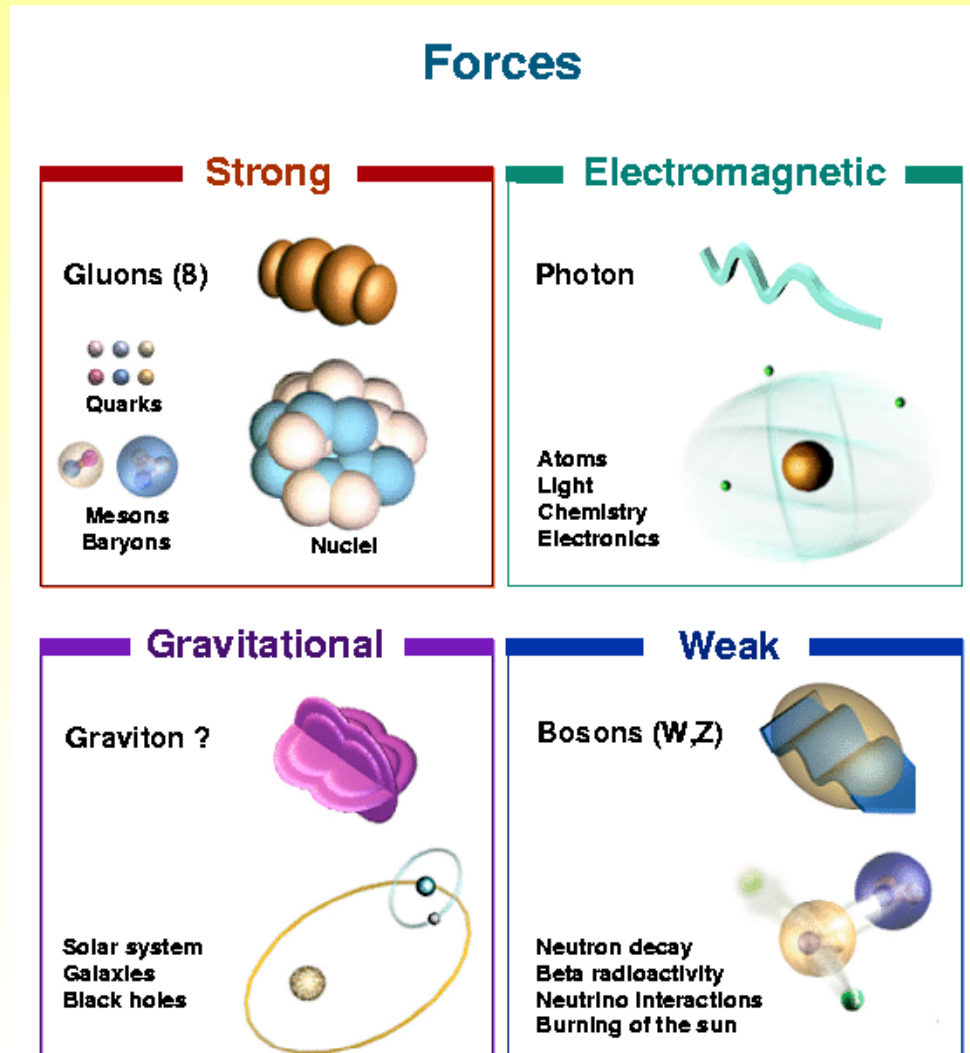
- I fisici teorici propongono teorie o modelli e i fisici sperimentali sviluppano tecnologie per poterli verificare
- I fisici sperimentali vedono “cose strane” e i fisici teorici pensano a teorie e modelli per poterle spiegare.

Nascono così i primi acceleratori di particelle: i “microscopi” per l'infinitamente piccolo

- L'idea è semplice: far “scontrare” particelle stabili facilmente trovabili in Natura (elettroni o protoni) ad altissima velocità.
- Più alte sono le velocità delle particelle che si scontrano e più in profondità si riesce a vedere la materia.
- L'energia si trasforma in materia ($E = mc^2$) dando vita a numerosissime nuove particelle....

Le forze

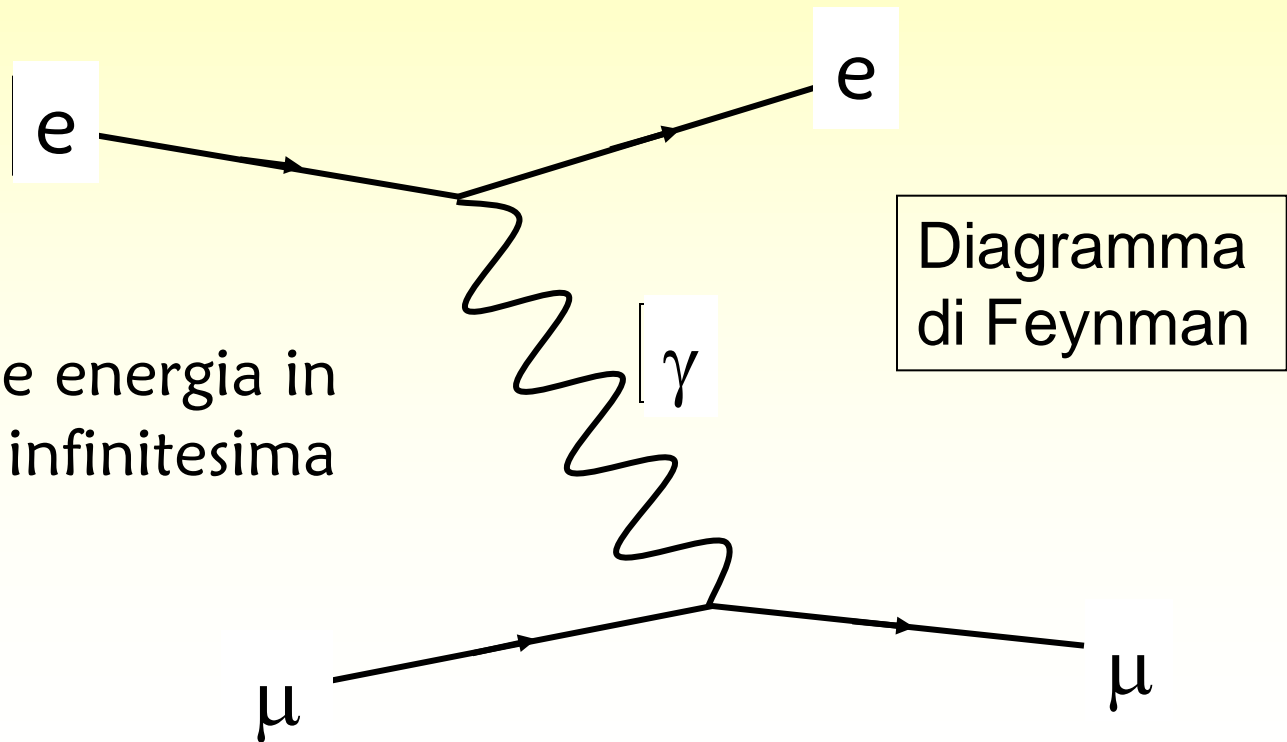
- L'universo che conosciamo esiste perché le particelle fondamentali interagiscono:
 - × decadono
 - × si annichilano
 - × reagiscono a forze legate alla presenza di altre particelle (per esempio nelle collisioni).
- Ci sono quattro interazioni(forze) tra le particelle:
 - × Gravita'
 - × ElettroMagnetica
 - × Forte
 - × Debole



The particle drawings are simple artistic representations

Come interagiscono le particelle?

- Le particelle si attraggono o si respingono mediante particelle “messaggeri” (quanti del campo)
- Quelle che noi chiamiamo comunemente "forze" sono gli **effetti dei mediatori di forza** sulle particelle materiali.



Violazione
conservazione energia in
una quantità infinitesima
di tempo.

Diagramma
di Feynman



Come interagiscono le particelle?

- - Le particelle fondamentali che interagiscono sono chiamate **Fermioni**
- - I “mediatori” delle interazioni (forze) si chiamano **Bosoni**
- - Li differenzia una caratteristica intrinseca chiamata “spin”, una specie di momento angolare intrinseco della particella
 - × - Fermioni hanno spin semintero ($1/2$)
 - × - Bosoni hanno spin intero ($0, 1$)
- × - Questo spin diverso conferisce proprietà diverse alle particelle e richiede una descrizione matematica completamente diversa.

Quel che sappiamo: Il Modello Standard

	Fermioni			Bosoni
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon

E antimateria....



Materia

Quarks

Leptoni



Fotone



W, Z



Glucione



- 3 «copie» della stessa struttura
- I Fermioni interagiscono tra di loro attraverso i Bosoni secondo simmetrie ben precise
- I quarks al contrario dei leptoni non esistono «liberi» in natura ma solo in coppie o terne che formano particelle chiamate **adroni (ad es. protone e neutrone)**.

Quel che sappiamo: Il Modello Standard

	Fermioni			Bosoni	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	

E antimateria....



Materia

Quarks

Leptoni



Fotone



W, Z



Glucione



- 3 «copie» della stessa struttura
- I Fermioni interagiscono tra di loro attraverso i Bosoni secondo simmetrie ben precise

Source: AAAS



Massa

Bosone di Higgs

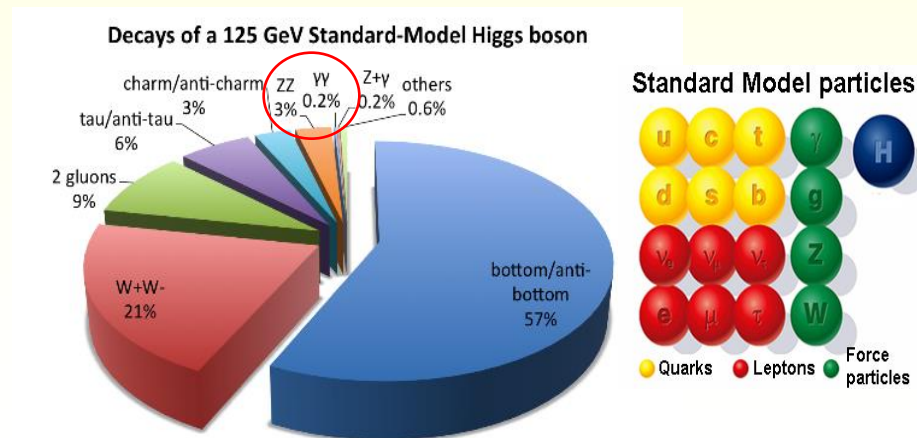
Il bosone di Higgs: il tassello mancante!

- Tutto quello che è stato scoperto è descritto dal Modello Standard → **teoria predittiva di successo!**
- Peccato che, per assicurare alla teoria coerenza matematica, tutte queste particelle dovrebbero essere **senza massa!**
- E come lo risolviamo questo problema?
- Anni '60: Higgs, Brout, Englert suggeriscono che debba esistere un'altra particella responsabile della massa di tutte le altre (e di se stessa)!



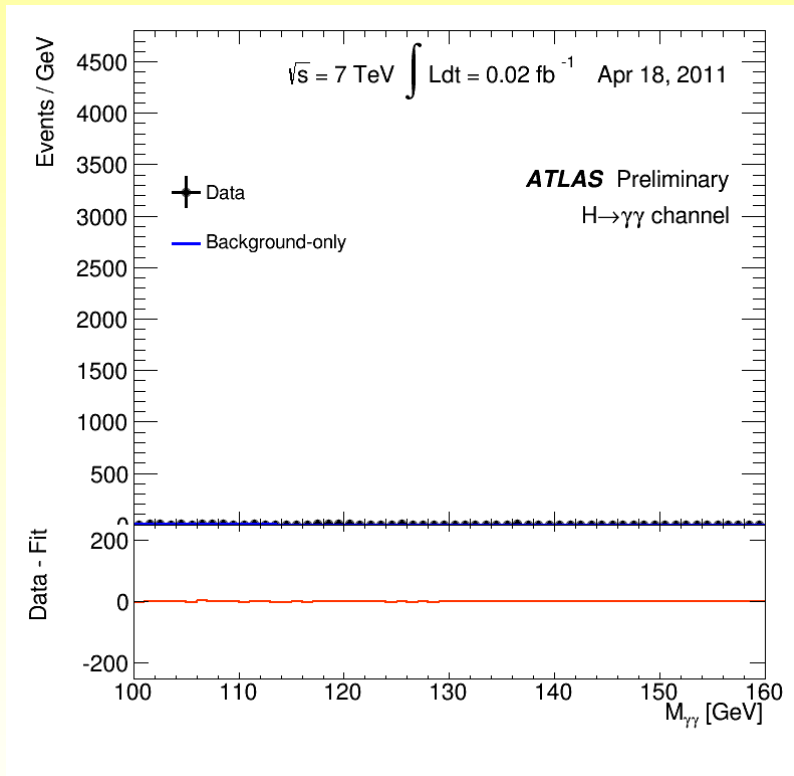
... e come lo abbiamo scoperto!

- Il bosone di Higgs è una particella **instabile**, cioè si «disgrega» quasi istantaneamente in altre particelle stabili (o quasi) → **Decadimento**
- L'unico modo che abbiamo per ricostruire la sua presenza è attraverso queste particelle «figlie»
- Decadimenti «migliori» da ricostruire:
 - × Due fotoni γ
 - × Due bosoni Z che decadono a loro volta in 4 elettroni/muoni o loro coppie

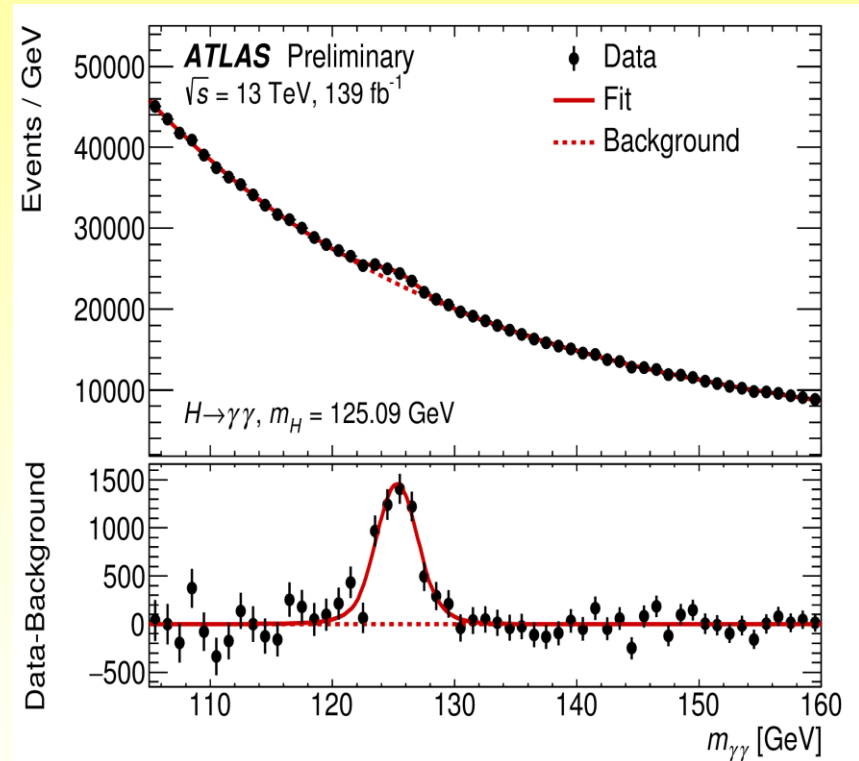


Ci vuole molta pazienza...e abilità!

2011-2012



2011-2022

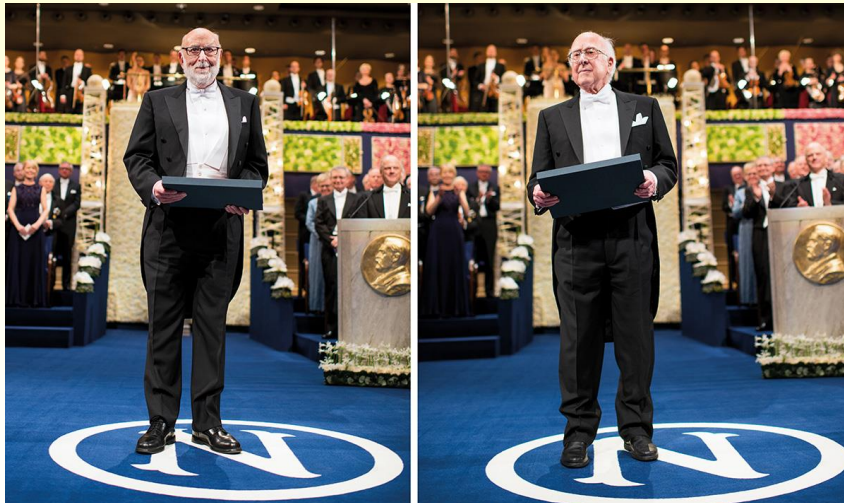
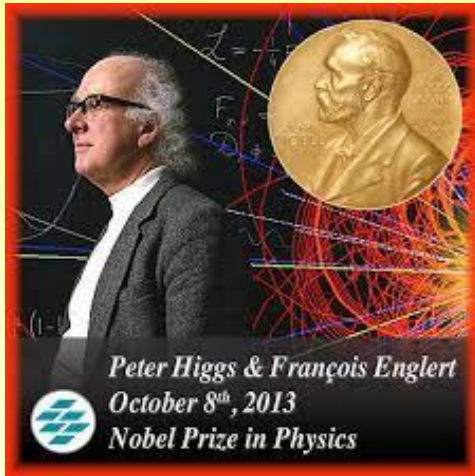


Decadimento in due fotoni

4 luglio 2012.....



... 8 ottobre 2013



Prize motivation: “for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider”

Quel che sappiamo: Il Modello Standard

	Fermioni			Bosoni
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon

E antimateria....



Materia

Quarks

Leptoni



Fotone



W, Z



Glione



- 3 «copie» della stessa struttura
- I Fermioni interagiscono tra di loro attraverso i Bosoni secondo simmetrie ben precise

Source: AAAS

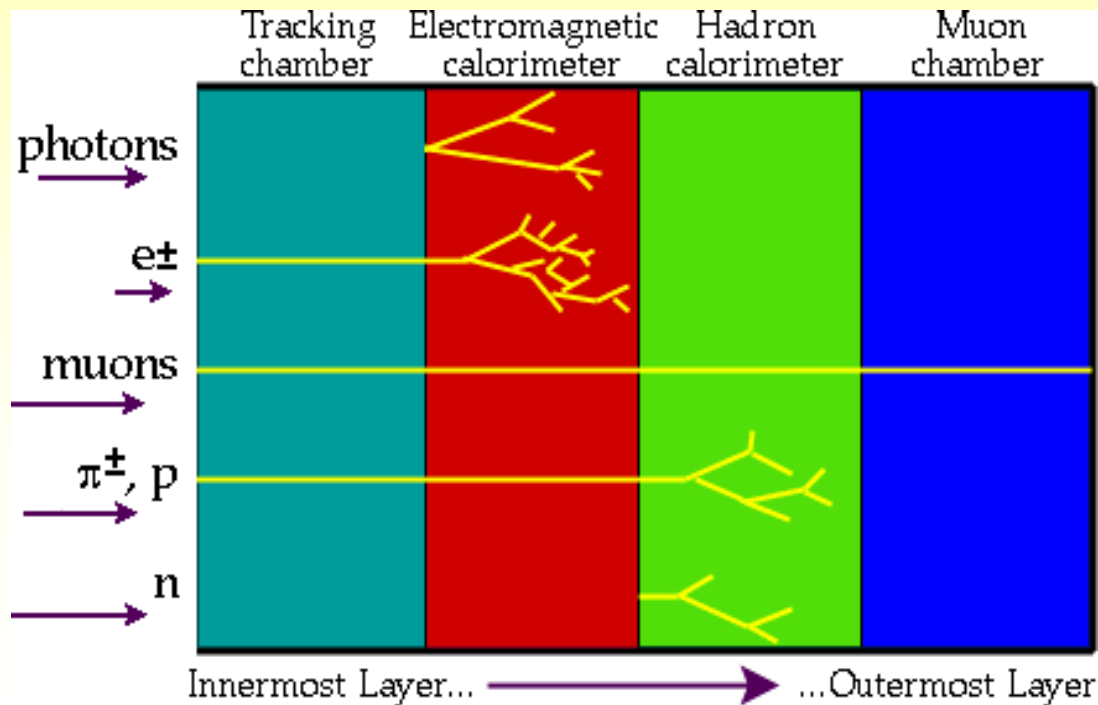


Massa

Bosone di Higgs

Riassuntino...

- Le **particelle cariche** sono rivelate attraverso la loro interazione elettromagnetica con gli elettroni atomici dei mezzi attraversati
- I **fotoni** vengono rivelati indirettamente attraverso gli elettroni che essi producono per effetto fotoelettrico, diffusione Compton o produzione di coppie
- I **neutroni** subiscono interazioni forti coi i nuclei dei materiali producendo particelle secondarie cariche

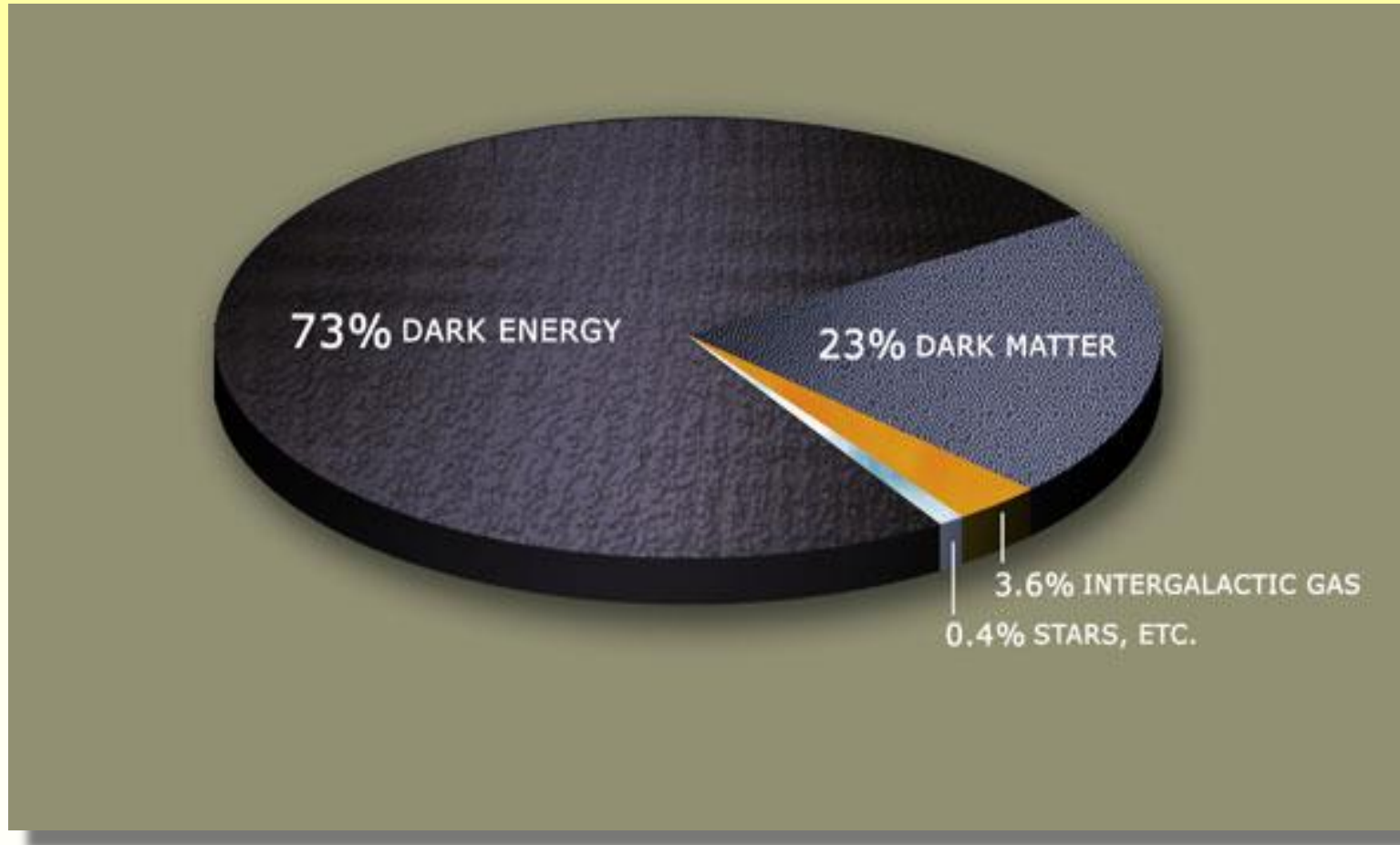


- I **neutrini** che hanno solo interazioni deboli con i nuclei o gli elettroni sfuggono alla rivelazione → Energia mancante
- I **quark** non esistono allo stato libero, a causa dell'interazione forte (confinamento adronico),
Convertono subito la loro energia in fiotti di particelle detti getti (jets)



Quindi abbiamo capito tutto?!!

Quindi abbiamo capito tutto?!!

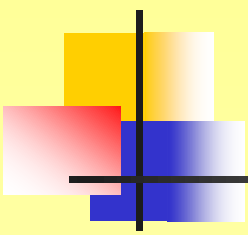


Il 96% del nostro Universo NON è fatto da particelle scoperte!!



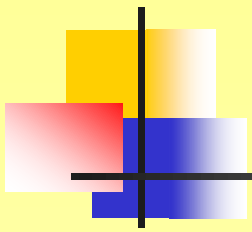
Problemi aperti

- Il Modello Standard ancora non riesce a spiegare qualitativamente o quantitativamente alcuni fenomeni visibili soprattutto su scala cosmologica:
 - × Asimmetria materia/antimateria
 - × Materia Oscura
 - × Energia Oscura
 - × L'oscillazione e la gerarchia di massa dei neutrini
- Inoltre anche dal punto di vista «teorico» ci sono delle cose da chiarire:
 - × Stabilizzazione della massa del bosone di Higgs
 - × Gerarchia di massa dei fermioni del Modello Standard



To be continued...

#177669987



BACKUP SLIDES

Gravita'

- La forza gravitazionale è probabilmente la forza che ci è più familiare:
 - × non è compresa nel Modello Standard perché i suoi effetti sono piccolissimi nei processi tra le particelle



- Anche se la gravità agisce su ogni cosa, è una forza molto debole qualora le masse in gioco siano piccole
- La particella mediatrice di forza per la gravità si chiama gravitone: la sua esistenza è prevista ma non è ancora stata osservata

Elettromagnetica

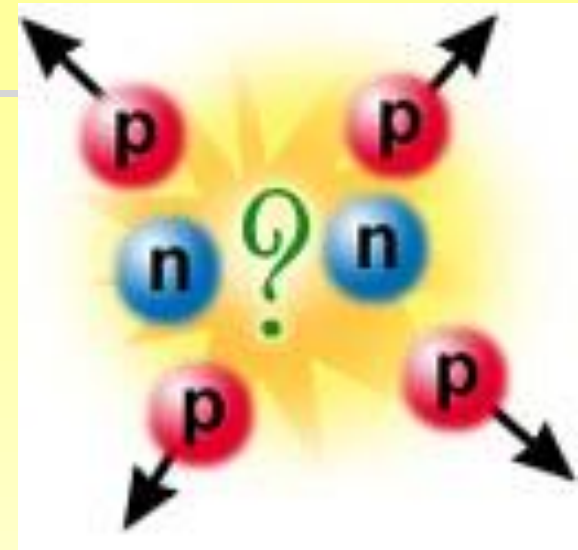
- Molte delle forze che sperimentiamo ogni giorno sono dovute alle interazioni elettromagnetiche nella materia: tengono assieme gli atomi e i materiali solidi
 - × la carica elettrica (positiva/negativa) e il magnetismo (nord/sud) sono diverse facce di una stessa interazione, l'elettromagnetismo.
 - × cariche opposte, per esempio un protone e un elettrone, si attirano, mentre particelle con la stessa carica si respingono.



- La particella mediatrice dell'interazione elettromagnetica si chiama fotone.
 - In base alla loro energia, i fotoni sono distinti come: raggi gamma, luce (visibile), microonde, onde radio, etc.

Interazione Forte

Perche' la repulsione elettromagnetica fra i protoni del nucleo non fa esplodere l'atomo?









- Alcune particelle (i quark e i gluoni) hanno una carica di un nuovo tipo: è stata chiamata **carica di colore**.
 - × Ogni quark puo' avere uno dei tre colori: rosso, blu o verde
- Tra particelle dotate di carica di colore l'interazione è molto forte, tanto da meritarsi il nome di **interazione forte**.
 - × La sua particella mediatrice è stata chiamata **gluone**: perche' "incolla" i quark fra di loro

Il Modello a quark

- 1964 Gell-Mann, Zweig
 - × Ci sono 3 quarks e 3 antiquarks

Quark	Up	Down	Strange
Charge	+2/3	-1/3	-1/3

- × Ogni quark puo' portare uno di 3 colori
- × Gli anti-quark portano un anti-colore

			Color
			Quarks
			Anti-Color
			Anti-Quarks

Il “confinamento” dei quark

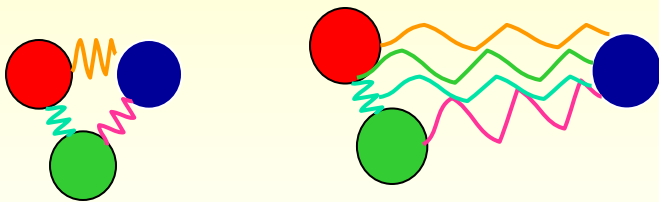
- Le particelle con carica di colore (come i quark) non si possono trovare isolate ma solo in gruppi di colore “neutro” (adroni)
 - × Questo spiega perché sono possibili solo combinazioni di due (“mesoni”) o tre (“barioni”) quark: sono le uniche neutre di colore.
- **La carica di colore si conserva sempre.**
 - × quando un quark emette o assorbe un gluone, il colore del quark deve cambiare, per conservare la carica di colore
 - × *Per esempio, consideriamo un quark rosso che diventa un quark blu ed emette un gluone rosso/anti-blu: il colore “netto” è sempre rosso.*



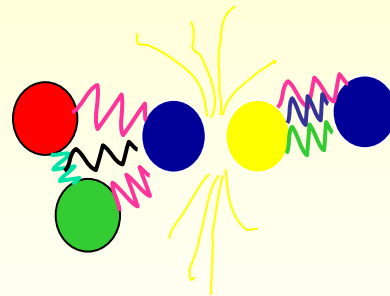
**Il blu e l'anti-blu
si annullano
rimane il rosso**

Mai quark liberi!!!

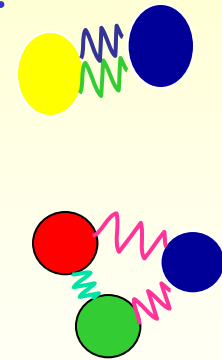
- La forza di colore diminuisce a piccole distanze e cresce al crescere delle distanze
- Cosa succede se si cerca di “spezzare” un adrone?
 - × Se uno dei quark di un adrone viene allontanato dai suoi compagni, il campo di forza di colore "si allunga" per mantenere il legame.
 - × In questa maniera cresce l'energia del campo di forza di colore, e cresce quanto più vengono allontanati i quark tra loro.



Energia del campo di colore cresce...

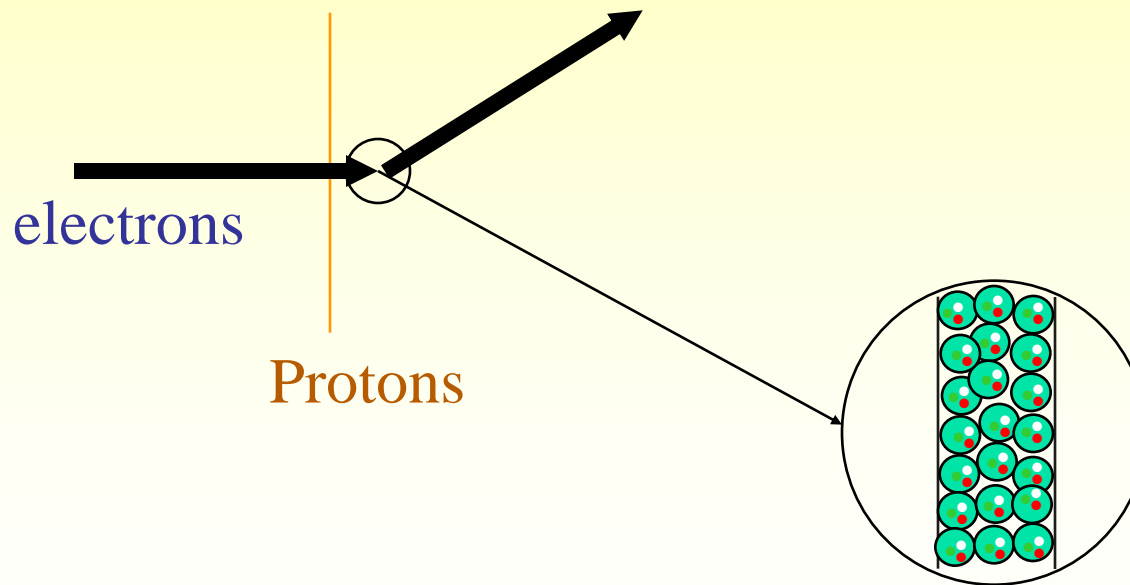


$E=mc^2$ sufficiente per creare un'altra coppia quark-antiquark



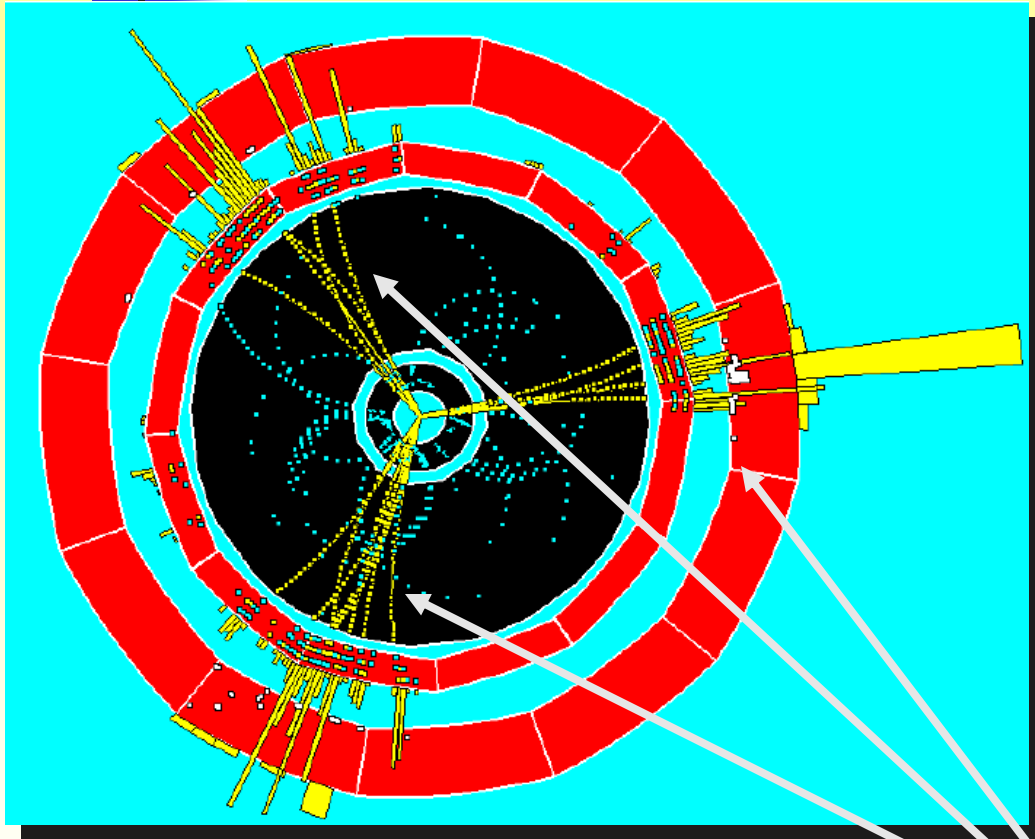
Dove sono i quarks?

- Questa descrizione e' molto interessante, ma i quark per ora sono entita' matematiche...
 - × **L'esperimento confermera' la loro esistenza!!!**
- Proviamo a ripetere l'esperimento di Rutherford ad energie MOLTO piu' alte...



Si dimostra che il protone e' costituito da altri oggetti piu' fondamentali!

Come si “vedono” i quark

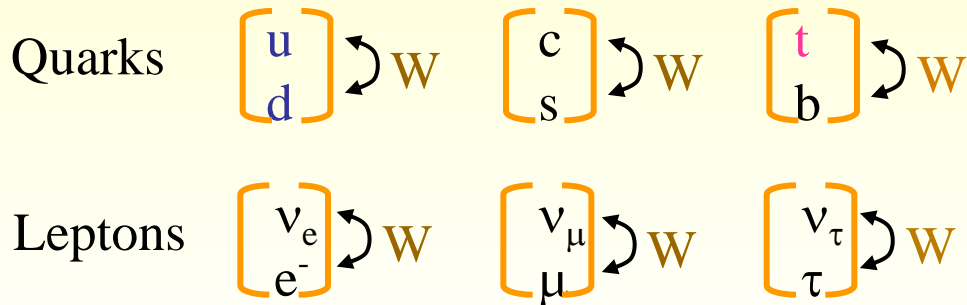
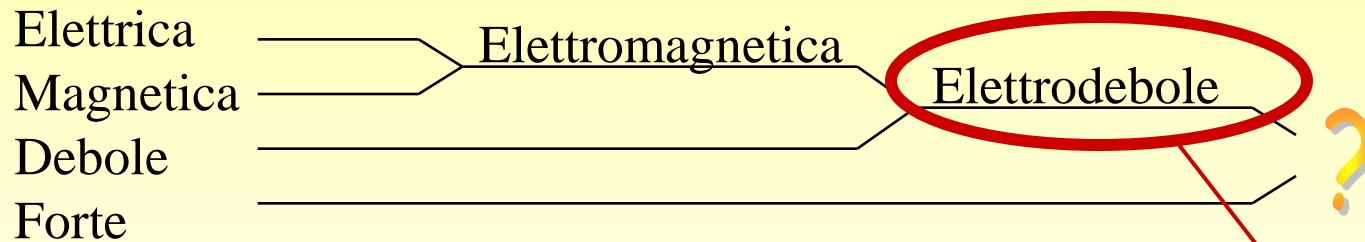


Negli anni '70, nelle collisioni elettrone-positrone ad alta energia, si osservano dei “getti” di energia, associabili alla presenza di gluoni dovuti alla forza nucleare forte che si origina dalle interazioni tra quark. E' la manifestazione piu' spettacolare del “confinamento”

I gluoni e i quark si materializzano in “getti” (inglese: jets) di particelle

Interazione Debole

- L'interazione debole e' responsabile del fatto che tutti i quark o leptoni decadono in particelle di massa minore
- I mediatori dell'interazione debole sono le particelle: W^+ , W^- e Z^0



Nel Modello Standard l'interazione Debole e' unificata con quella Elettromagnetica: a piccole distanze stessa intensita'

Cambiamenti di tipo (detto "sapore") governati dall'interazione debole

Test della Teoria ElettroDebole

- Con l'introduzione della teoria elettrodebole furono necessarie tre nuove particelle: i mediatori dell'interazione W^+ , W^- and Z^0 .
- Le loro masse erano previste dalla teoria stessa:
 - × $M_W c^2 \approx 80 \text{ GeV}$
 - × $M_Z c^2 \approx 90 \text{ GeV}$

Circa la massa del Bromo (z=35) o dello Zirconio (z=40)!!!
...Pesantucce per essere "elementari"...

La W e la Z hanno una vita media brevissima, ma possono essere identificate tramite i loro prodotti di decadimento, anche essi predetti dalla teoria elettrodebole:

Scoperte nel 1983!
..e con la corretta massa

$W \rightarrow$

$e \nu_e$
 $\mu \nu_\mu$
 $u \bar{d}$
 $c \bar{s}$
 $t \bar{b} (?)$

$Z \rightarrow$

$e^+ e^-$
 $\mu^+ \mu^-$
 $\tau^+ \tau^-$
 $q \bar{q}$
 $\nu_x \bar{\nu}_x$

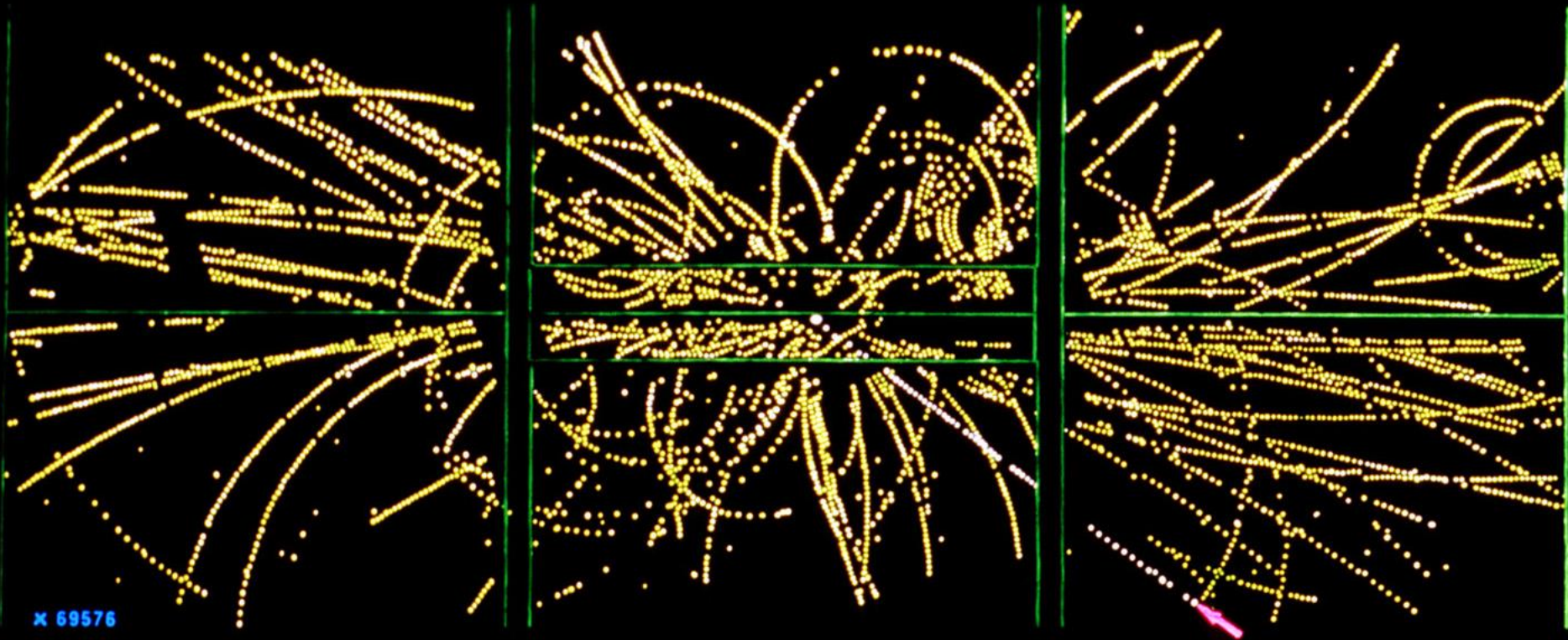


Storia anni '80 – 2002..

- 1983** Scoperta del W^\pm e dello Z^0 al sincrotrone del CERN synchrotron usando la tecnica sviluppata da **Rubbia** e **Van der Meer** per far collidere protoni ed antiprotoni.
- 1989** Gli esperimenti portati avanti a SLAC e al CERN suggeriscono fortemente che vi siano 3 e solo 3 generazioni di particelle fondamentali
- 1995** A Fermilab l'esperimento CDF vede per la prima volta il **quark top**.
- 1998** L'esperimento SuperK identifica oscillazioni di neutrino (I neutrini hanno massa!)
- 2000-1** Viene osservata la violazione di CP usando B-mesons dagli esperimenti BABAR, BELLE
- 2002** “Risolto” il problema dei neutrini Solari.

EVENT 2958. 1279.

W boson, UA1 detector in 1982







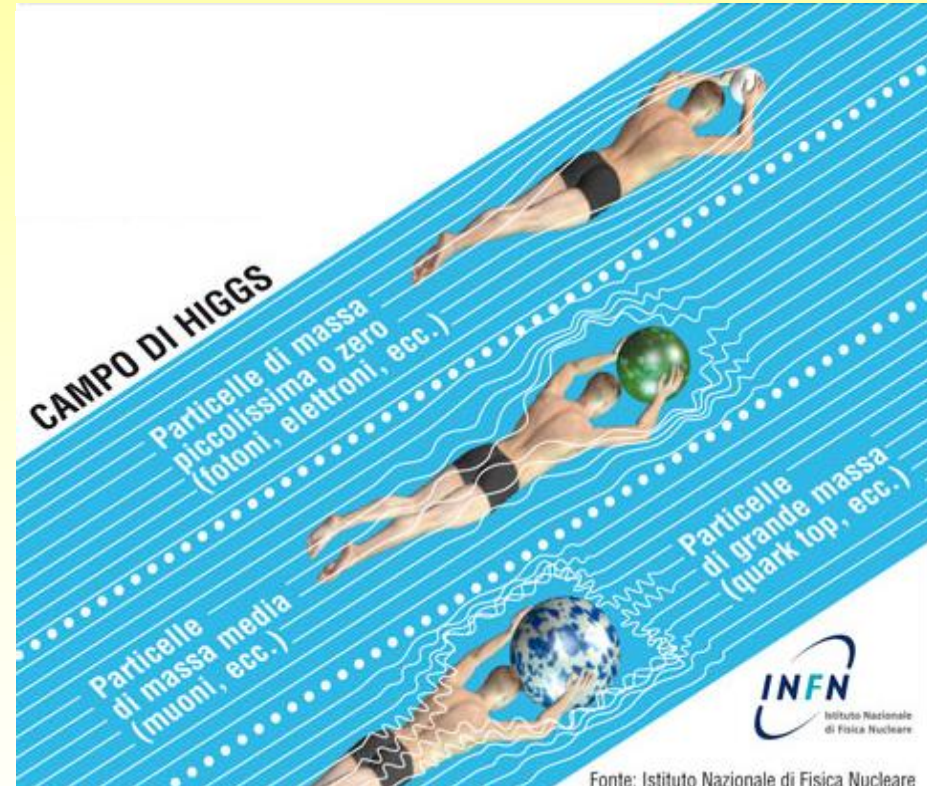
Di cosa e' fatto il mondo?

- Domande:

- Esistono mattoni fondamentali?
 - **Si! Le particelle elementari!**
- Quali sono I mattoni fondamentali?
 - **Leptoni e Quarks**
- Come interagiscono?
 - **Attraverso 4 forze fondamentali: elettromagnetica, nucleare forte, debole e gravitazionale**
- Come determinano le proprieta' dell'Universo?
 - **Secondo le simmetrie dettate dal Modello Standard**

Ma come «funziona» questo Higgs?

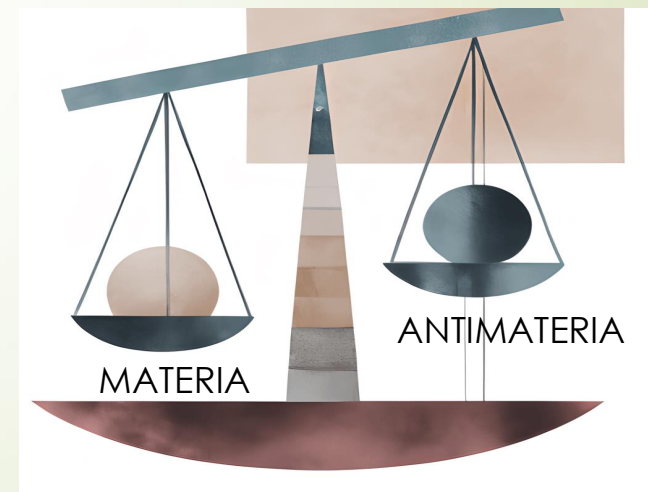
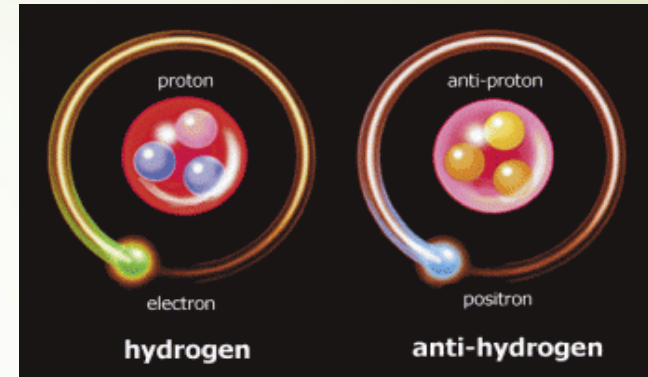
- Un campo (detto *di Higgs*) «permea» tutto l'Universo e le particelle acquistano massa quando vi si muovono dentro
- In base a quanto forte è la «resistenza» all'avanzamento le particelle avranno una massa più o meno grande (o nulla!)
- Il fotone ad esempio ha massa nulla e non a caso infatti si muove alla velocità della luce (relatività!)



Fonte: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

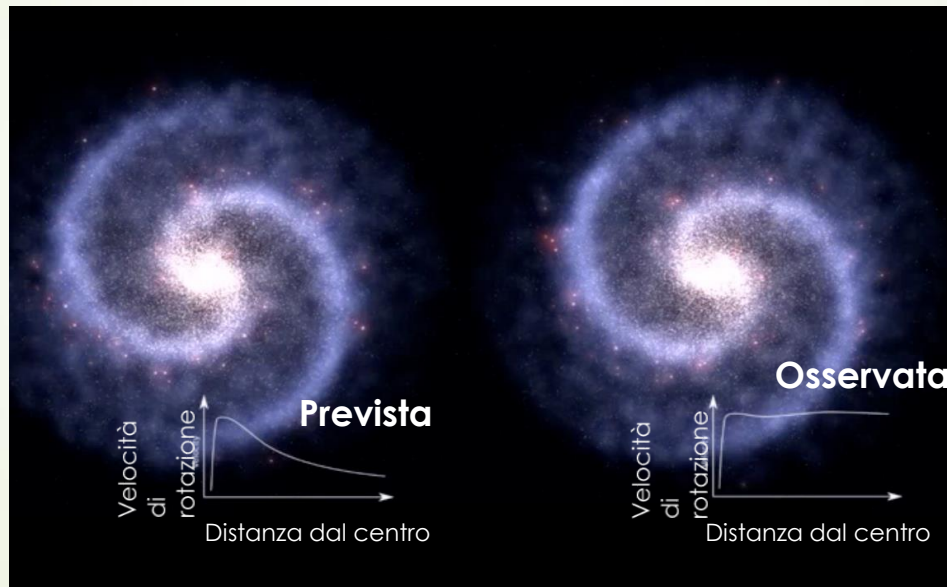
Asimmetria materia/antimateria

- ▶ Perché l'Universo è fatto di materia e non di anti-materia?
- ▶ Al momento del Big Bang esse erano presenti in uguale quantità
- ▶ Ci sono processi che avvengono con diversa probabilità a seconda che coinvolgano particelle di materia o di antimateria → **Differenza di 1 miliardesimo!**
- ▶ Il Modello Standard ne ha trovati diversi ma **non abbastanza** per giustificare tutta la materia presente nell'Universo!



La Materia Oscura

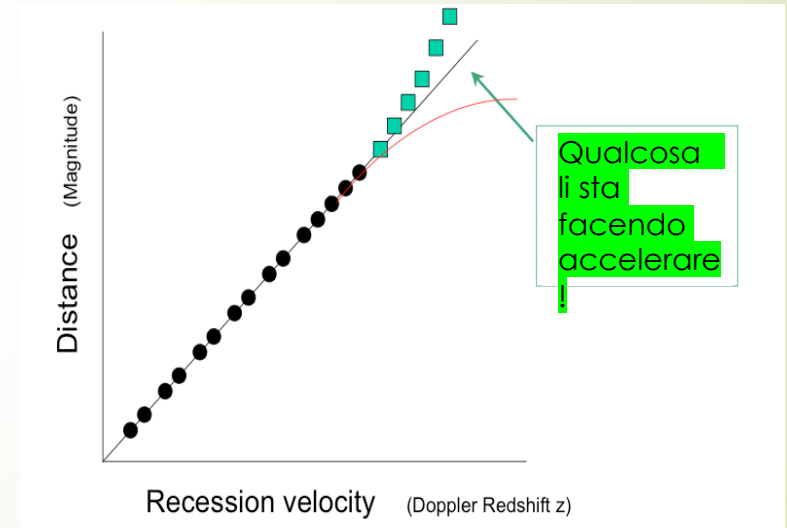
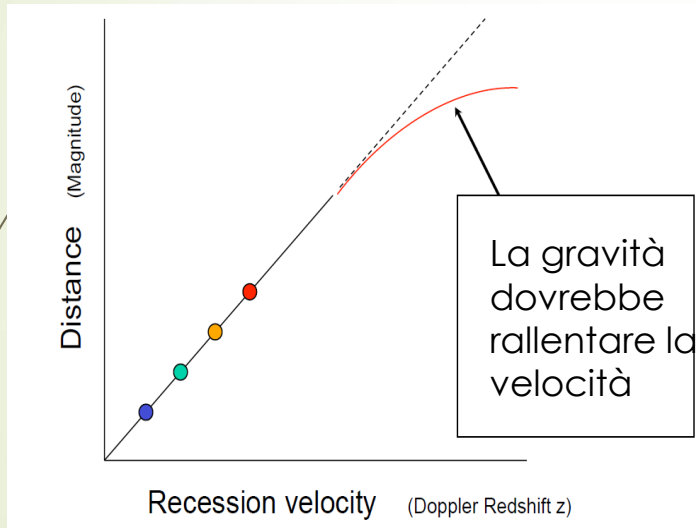
- ▶ Curve di rotazione delle galassie a spirale
- ▶ Misure diverse dalle previsioni della relatività generale



- ▶ C'è della materia «invisibile» che non vediamo ma di cui sentiamo gli effetti gravitazionali: **la Materia Oscura!**

L'Energia Oscura

- L'Universo si espande!
- Misurando la velocità con cui si allontanano gli oggetti cosmologici (galassie, stelle, etc) ci accorgiamo che....



- C'è dell'energia «invisibile» che non vediamo ma di cui sentiamo gli effetti:
l'Energia Oscura!

Lo stato dell'arte....

