

LE IDEE FONDAMENTALI DELLA FISICA DELLE PARTICELLE

**Laboratori Nazionali INFN,
Frascati, 25 Ottobre 2013**

Michelangelo Mangano
Physics Department, CERN
michelangelo.mangano@cern.ch
<http://cern.ch/mlm>

**LE QUESTIONI CHE AFFRONTA LA FISICA
DELLE PARTICELLE SONO LE STESSA CHE
HANNO GUIDATO LO SVILUPPO DEL
PENSIERO FILOSOFICO NEL CORSO DEI
MILLENNI**

✦ COME FUNZIONA
L'UNIVERSO?
✦ DA DOVE VIENE?
✦ DOVE VA?



✦ QUALI SONO I
COMPONENTI ULTIMI
DELLA MATERIA?
✦ COME “SI MUOVONO”?
✦ CHE COSA “LI MUOVE”?

**LA PIÚ AMBIZIOSA FRA TUTTE LE
SCIENZE!**

Anche il modo di affrontare il problema usato dai filosofi antichi è simile a quello del fisico moderno:

identificare pochi principi fondamentali, dai quali derivare le proprietà di tutti i fenomeni naturali, sia quelli pertinenti al macro cosmo (il cielo, l'universo), che quelli pertinenti alla scala umana

Ciò che è cambiato nel corso dei secoli è la percezione della vera complessità dei fenomeni, la capacità di eseguire misure quantitative, ed i criteri epistemologici di adeguatezza della loro descrizione

In comune, l'identificazione di due categorie:

(a) I componenti della materia

(b) Le forze che governano i loro comportamenti

Esempio dal passato remoto

Componenti:

aria, acqua fuoco, terra

Forze:

- aria e fuoco spinti verso l'alto
- terra ed acqua spinti verso il basso

Valutazione di correttezza:

come mai un tronco di legno immerso a fondo nell'acqua viene a galla, spinto verso l'alto?

Rivalutazione della teoria (Principio di Archimede):

- tutta la materia viene spinta verso il basso, ma con intensità proporzionale al proprio peso:

Un corpo immerso nell'acqua riceve una spinta verso l'alto pari al peso dell'acqua spostata.

L'aria è più leggera della terra, dunque su di essa galleggia. L'aria calda è più leggera di quella fredda, dunque il fuoco è spinto dall'aria fredda che lo circonda verso l'alto.

Il primo esempio di “unificazione delle forze” ?

Si noti che non esiste garanzia a priori che la natura possa essere descritta da un numero limitato di principi, o che questi valgano ovunque e sempre.

Per es., la conservazione dell'energia su scala microscopica e' stata messa in dubbio dai primi studi quantitativi dei decadimenti beta nucleari, negli anni 20..

Il grande successo della fisica moderna e' nella sua descrizione, incredibilmente accurata, della totale moltitudine dei fenomeni naturali osservati

Cosa? Come?

- Esistono componenti elementari e fondamentali?
- Se si', cosa sono?
- Come interagiscono fra loro?
- Come determinano le proprieta' dell'universo?

MATTER



ATOM



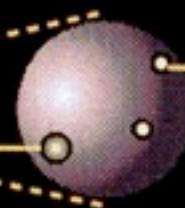
NUCLEUS



PROTON



QUARK



ALL
ORDINARY MATTER
BELONGS
TO THIS GROUP.



LEPTONS

electron

Electric charge -1 .

Responsible for electricity
and chemical reactions

electron neutrino

Electric charge 0 .

Rarely interacts
with other matter.

QUARKS

up

Electric charge $+2/3$.

Protons have 2 up quarks
Neutrons have 1 up quark

down

Electric charge $-1/3$.

... and one down quark.
... and two down quarks.

THESE PARTICLES
EXISTED JUST
AFTER THE
BIG BANG.



NOW THEY ARE
FOUND ONLY
IN COSMIC RAYS
AND ACCELERATORS.

muon

A heavier
relative
of the electron.



muon neutrino

Created with
muons when some
particles decay.



charm

A heavier
relative
of the up.



strange

A heavier
relative
of the down.



tau

Heavier
still.



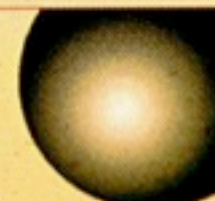
tau neutrino

Not yet observed
directly.



top

Heavier
still,
recently
observed.



bottom

Heavier
still.



ANTIMATTER

Each particle also has an antimatter
counterpart ... sort of a mirror image.



The fundamental building blocks: fermions, $\text{spin} = 1/2 \hbar/2\pi$

	Quarks		Leptons	
	$Q = 2/3 e$	$Q = -1/3 e$	$Q = -e$	$Q = 0$
ordinary matter identical copies (different mass)	up (0.004)	down (0.006)	e (0.0005)	ν_e (very small*)
	charm (1.5)	strange (0.5)	μ (0.1)	ν_μ (very small)
	top (175)	bottom (4.5)	τ (1.8)	ν_τ (very small)

(Mass values in GeV $\sim m_{\text{proton}}$)

* *very small*: less than 10^{-9} , but different from 0

Interazioni (o “forze”)

- Responsabili di:
 - Formazione di **stati legati** ($E < 0$):
 - Terra-sole
 - Elettrone-nucleo
 - Processi di **collisione/diffusione** ($E > 0$):
 - Moto di elettroni in un metallo
 - Propagazione della luce
 - Deflessione di particelle cariche in moto in un campo elettromagnetico per es. i protoni nell' LHC
 - **Transmutazioni**:
 - transizioni atomiche (emissione di radiazione quanto un elettrone cambia orbita)
 - Decadimenti ($n \rightarrow p$ e neutrino, radioattività)

The fundamental interactions:

vector bosons, $\text{spin} = \hbar/2\pi$

FORCE	COUPLES TO:	FORCE CARRIER:
Electromagnetism	electric charge	photon ($m=0$)
“weak” force	“weak” charge	$W^\pm$ ($m=80$) Z^0 ($m=91$)
“strong” force	“colour”	8 gluons ($m=0$)

tensor boson, $\text{spin} = 2 \hbar/2\pi$

gravity	energy	graviton ($m=0$)
---------	--------	--------------------

scalar boson, $\text{spin} = 0$

	mass	Higgs ($m=125 \text{ GeV}$)
--	------	---

I principi fondamentali della fisica, e le particelle elementari

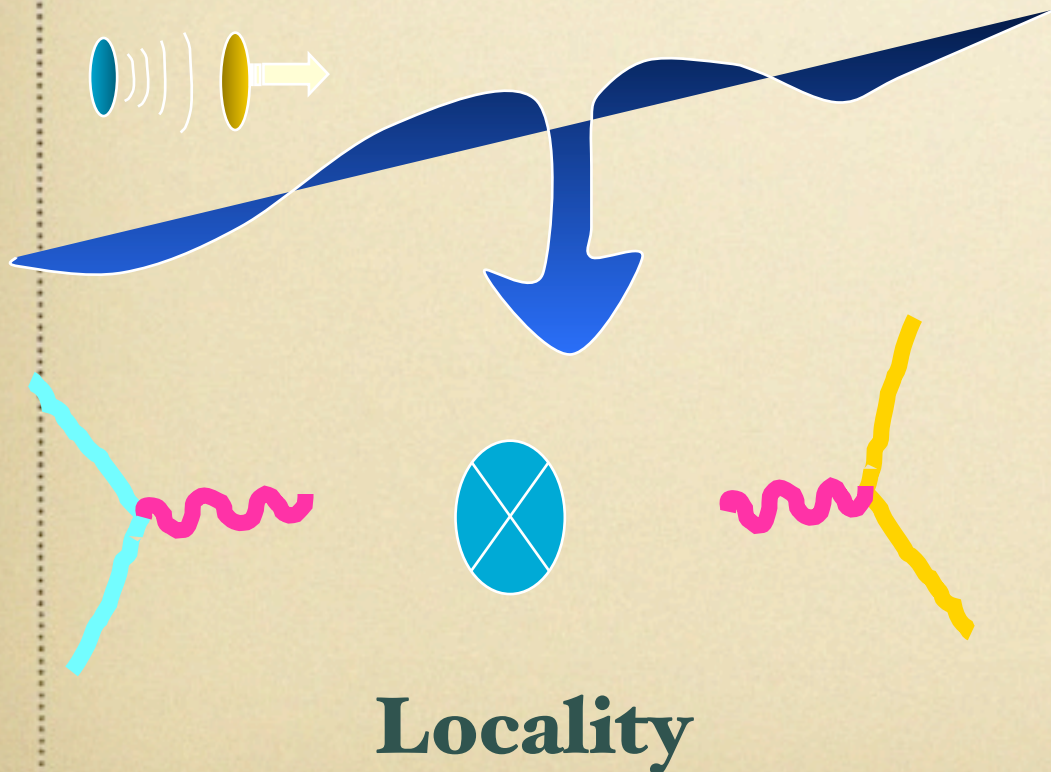
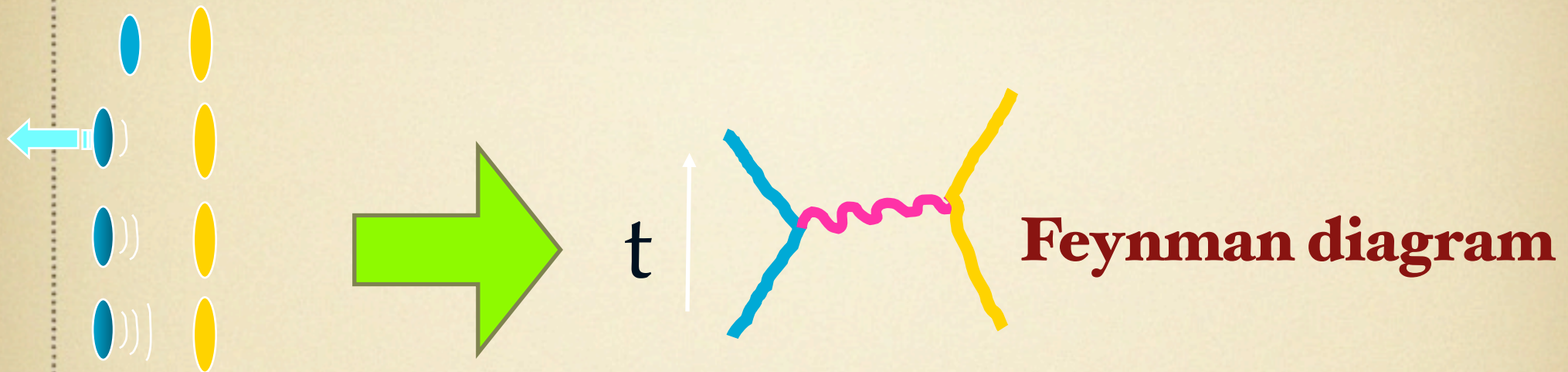
- Le particelle elementari sono soggette agli stessi principi fondamentali della fisica che si imparano a scuola:
 - “ $F=ma$ ”
 - causalita' (la causa precede l'effetto)
 - conservazione dell'energia (E), impulso (p) e momento angolare (L) (invarianza delle leggi fisiche rispetto a traslazioni spaziali e temporali e rotazioni)
 - Principio della relativita' speciale (Einstein)
 - Meccanica quantistica (dualita' onda-particella, principio di indeterminazione, quantizzazione dei livelli energetici, etc.)

Il ruolo della Relativita' Speciale



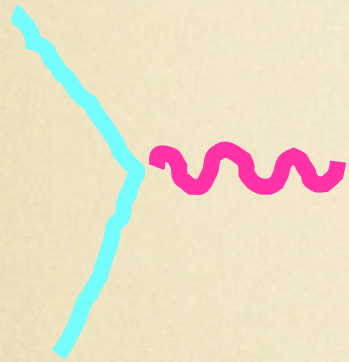
- Le particelle elementari hanno masse piccolissime, e le forze tipiche presenti negli acceleratori e nell'universo le accelerano a velocita' vicine a quella della luce. La descrizione del loro comportamento deve essere consistente con le leggi della Relativita' Speciale (Einstein).
- In particolare, ogni modello delle interazioni fra particelle elementari deve rispettare il principio che le forze non possono essere trasmesse istantaneamente, ma al piu' alla velocita' della luce

La rappresentazione delle interazioni



N.B.: in meccanica quantistica onde e particelle sono rappresentazioni diverse ma equivalenti dello stesso oggetto. Dunque all'onda che trasmette il segnale dell'interazione associamo una particella

Semplice ... ma sottile!



prima: 

dopo:  + 

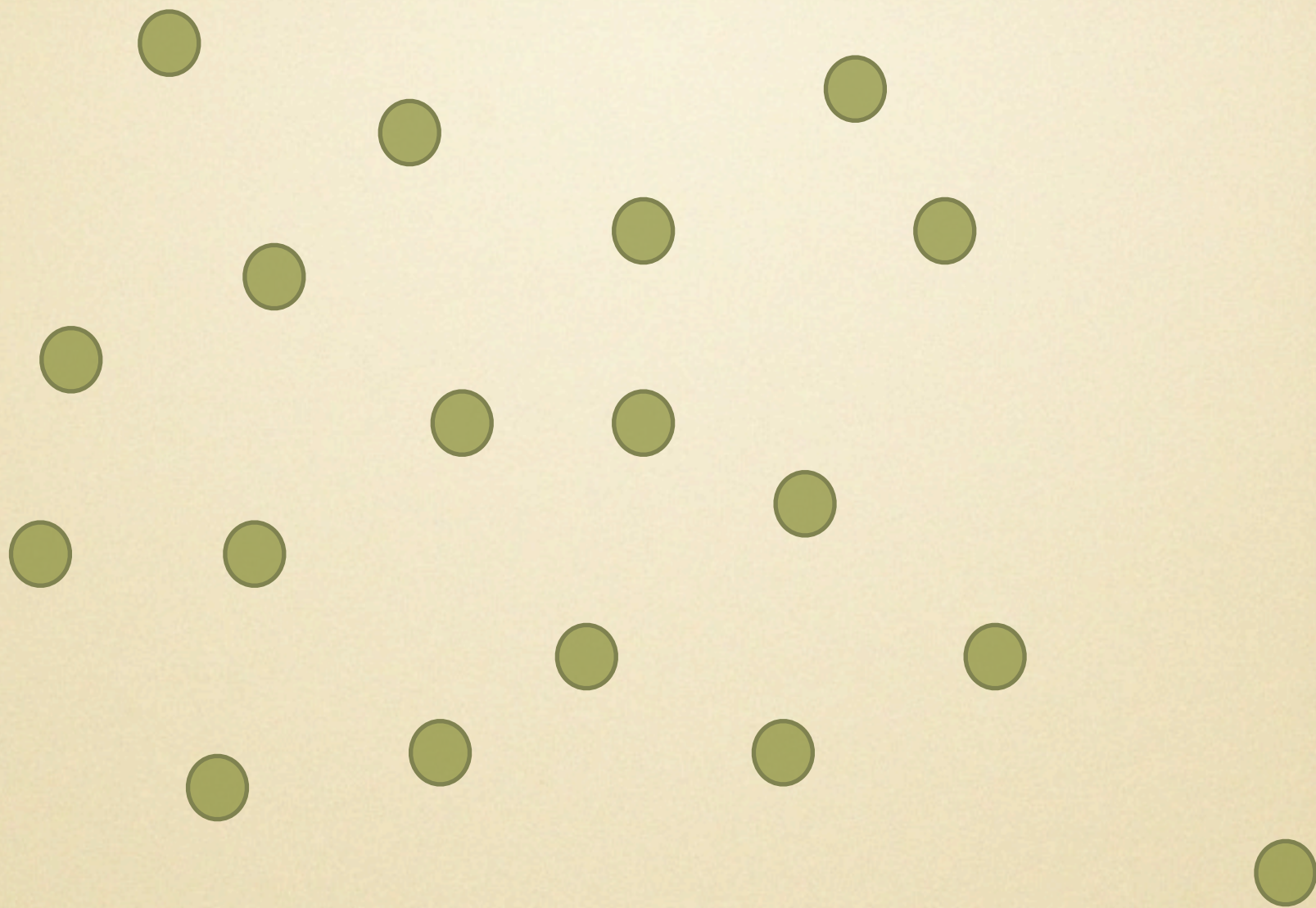


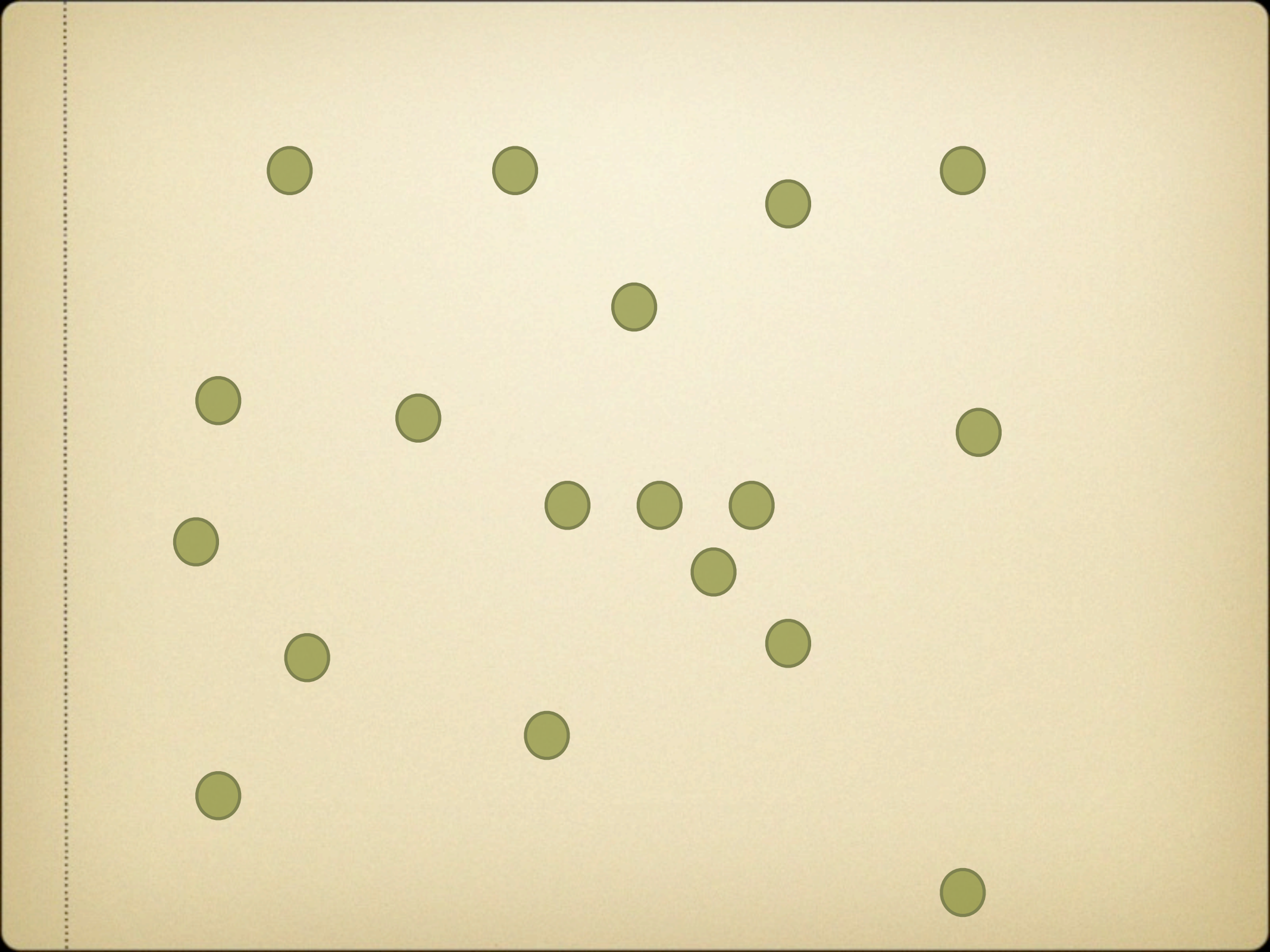
$\text{Energia(dopo)} \neq \text{Energia(prima)}$

**Cosa succede alla
conservazione dell'energia ?!**

Contate veloci!



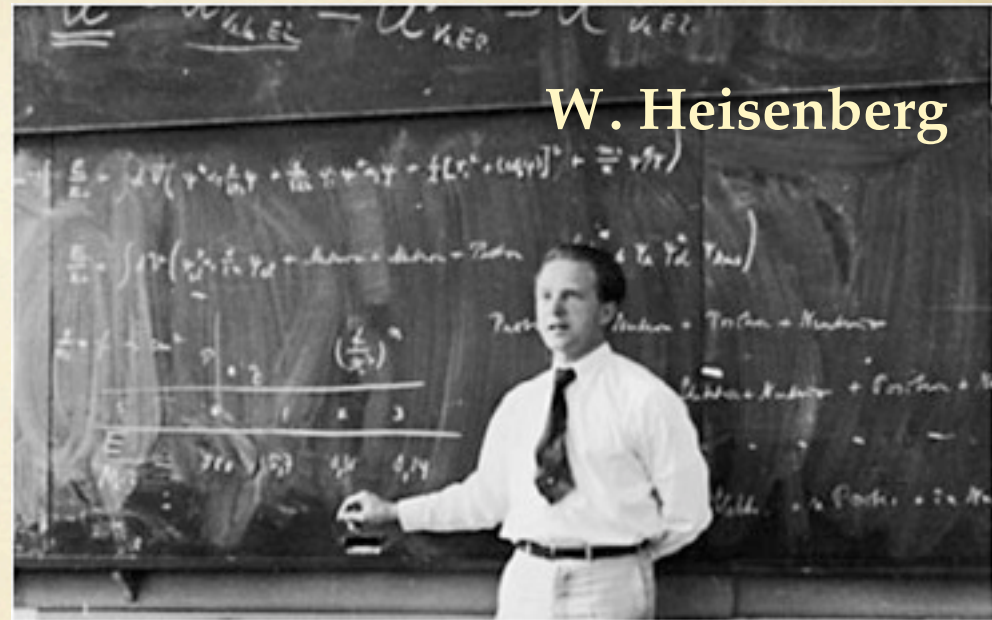




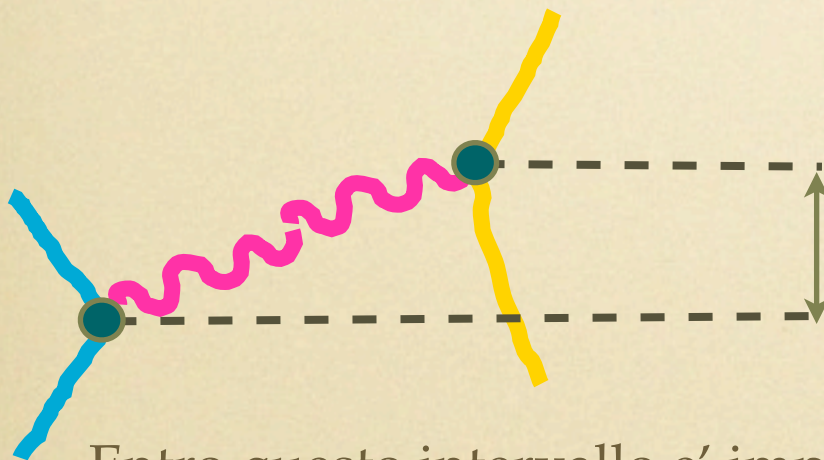
Meccanica quantistica

Principio di indeterminazione di Heisenberg:

una misura di energia eseguita entro un tempo Δt può al più raggiungere una precisione $\Delta E \geq \hbar/\Delta t$



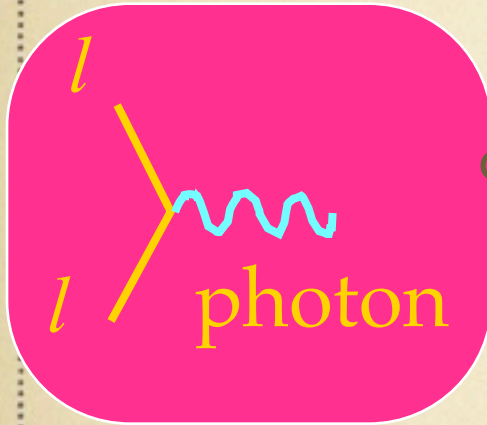
W. Heisenberg



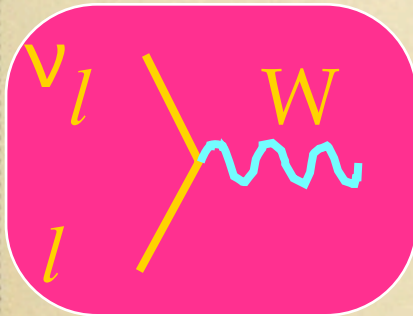
$$\Delta t < \hbar/\Delta E$$

Entro questo intervallo è impossibile determinare se l'energia è conservata o meno, poiché non possiamo misurarla con sufficiente accuratezza! Dunque è possibile "barare" con la natura, e permettere lo scambio di energia fra le due particelle, effettuandolo entro Δt

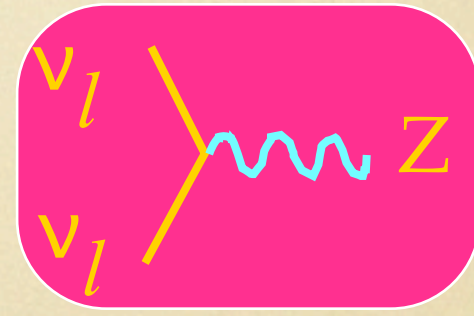
Lepton Interactions ($l=e,\mu,\tau$)



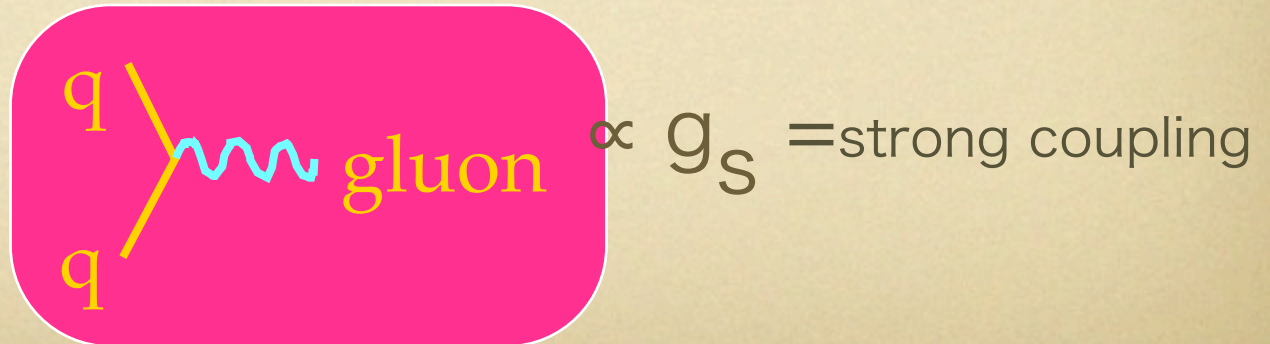
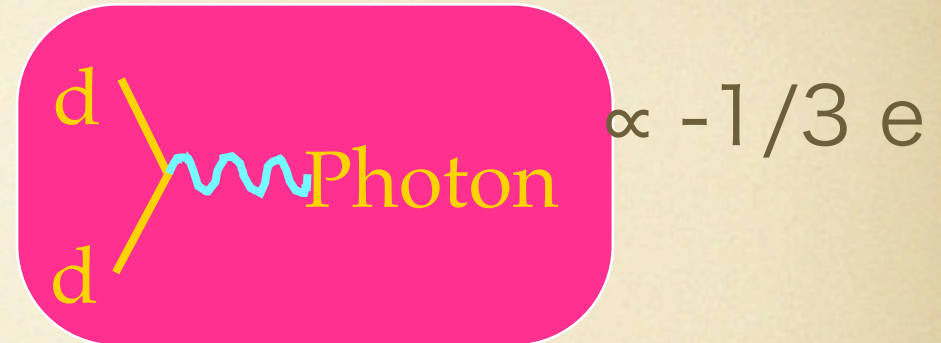
$\propto -e = \text{electric charge}$



$\propto g_W = \text{weak charge}$

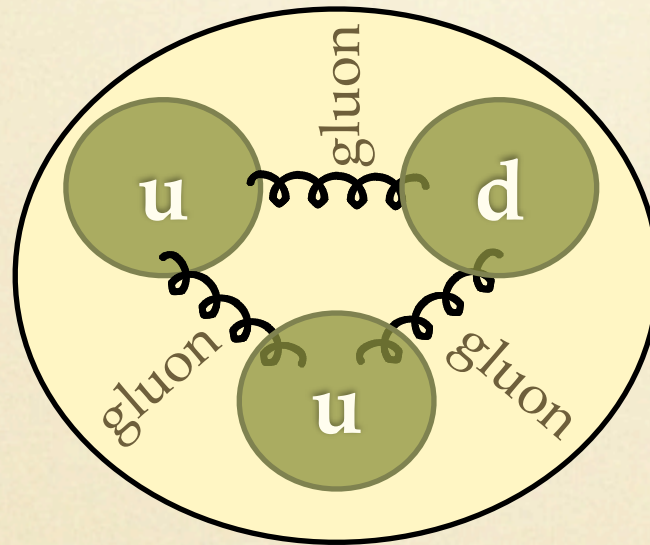


Quark Interactions



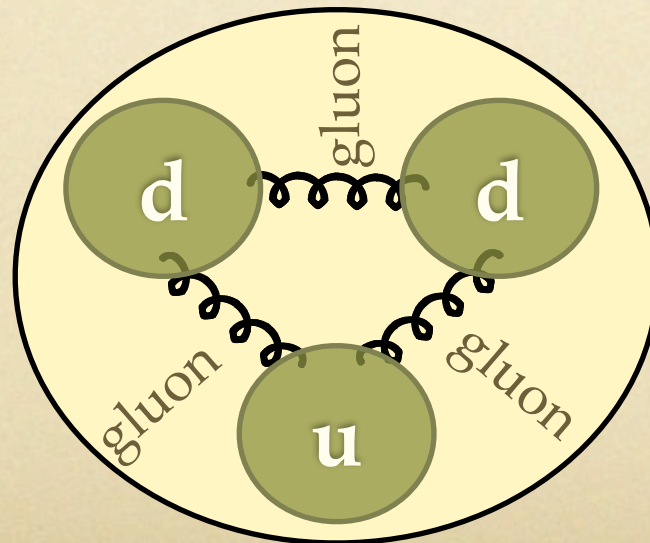
Example

Proton



$$Q = \frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e \\ = e$$

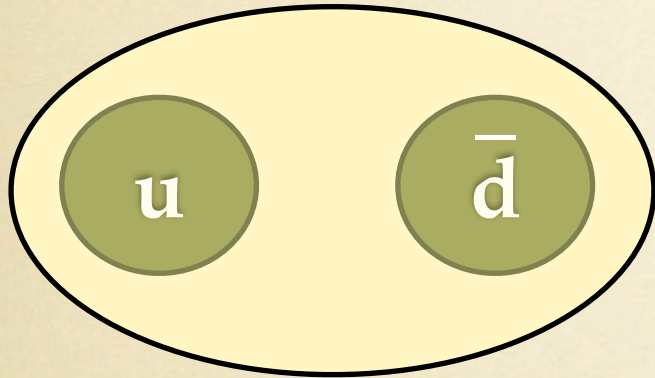
Neutron



$$Q = \frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e - \frac{1}{3}e \\ = 0$$

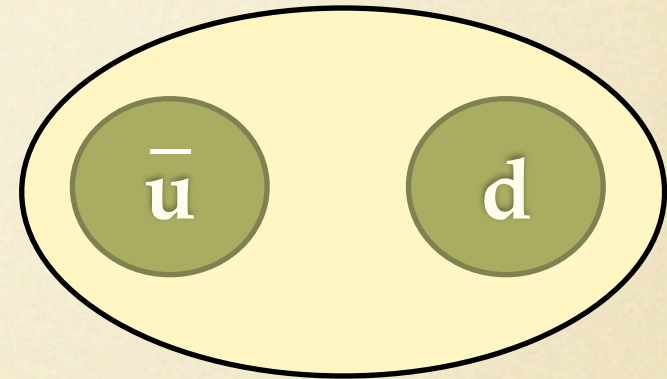
Esempio, i “pioni”

$$\pi^+ = u\bar{d}$$



$$Q = 2/3 e + (-)(-1/3) e = e$$

$$\pi^- = \bar{u}d$$

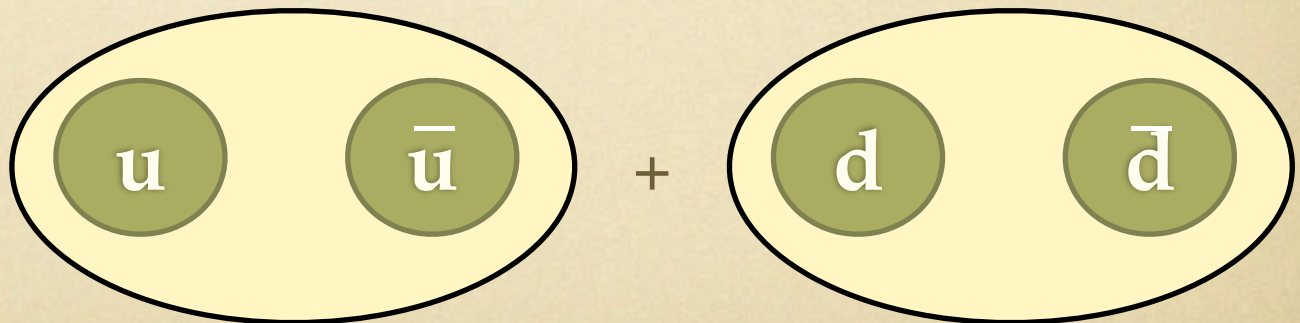


$$Q = -2/3 e + (-1/3) e = -e$$

dove $\bar{q}$ e' l'antiquark del quark q

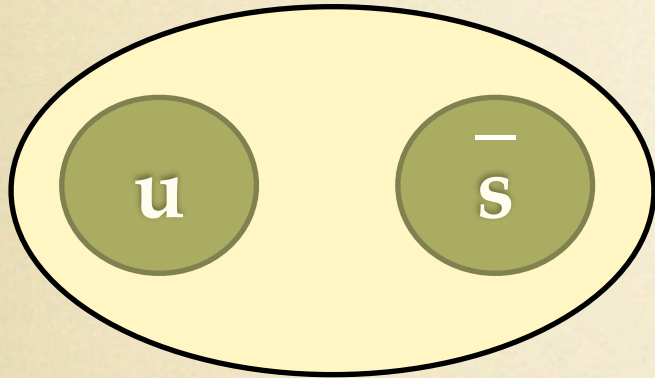
$$\pi^0 = d\bar{d} + u\bar{u}$$

$$Q = 0$$



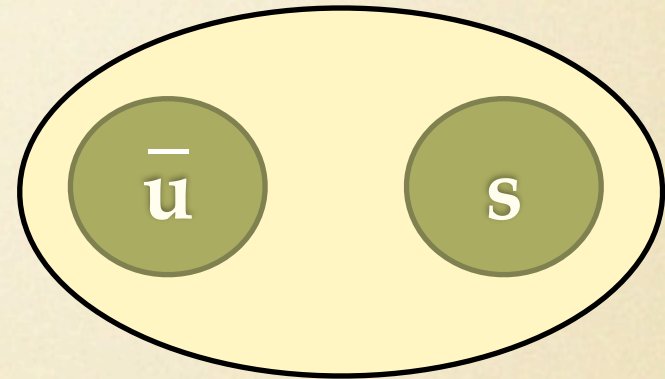
Esempio, i “kaoni”

$$K^+ = u\bar{s}$$



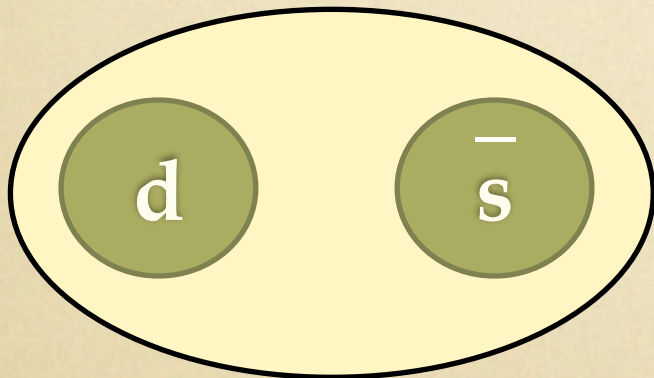
$$Q = 2/3 e + (-)(-1/3) e = e$$

$$K^- = \bar{u}s$$



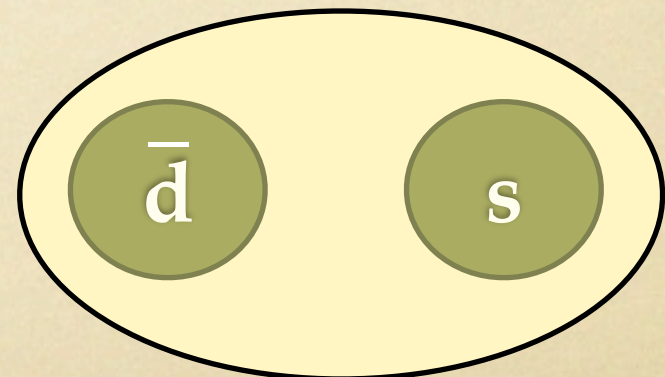
$$Q = -2/3 e + (-1/3) e = -e$$

$$\bar{K}^0 = d\bar{s}$$



$$Q = -1/3 e + (-)(-1/3) e = 0$$

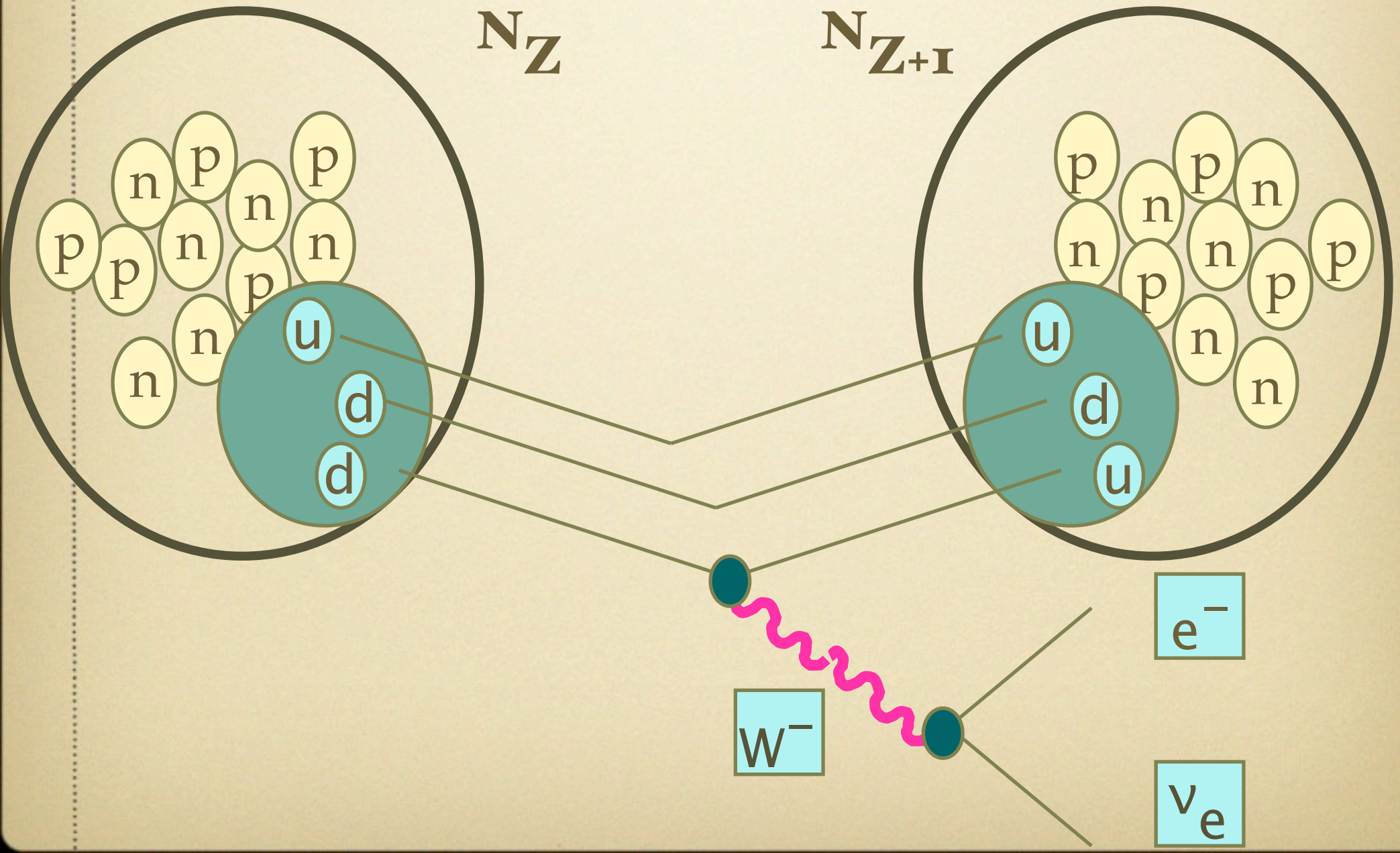
$$K^0 = \bar{d}s$$



$$Q = (-)(-1/3) e + (-1/3) e = 0$$

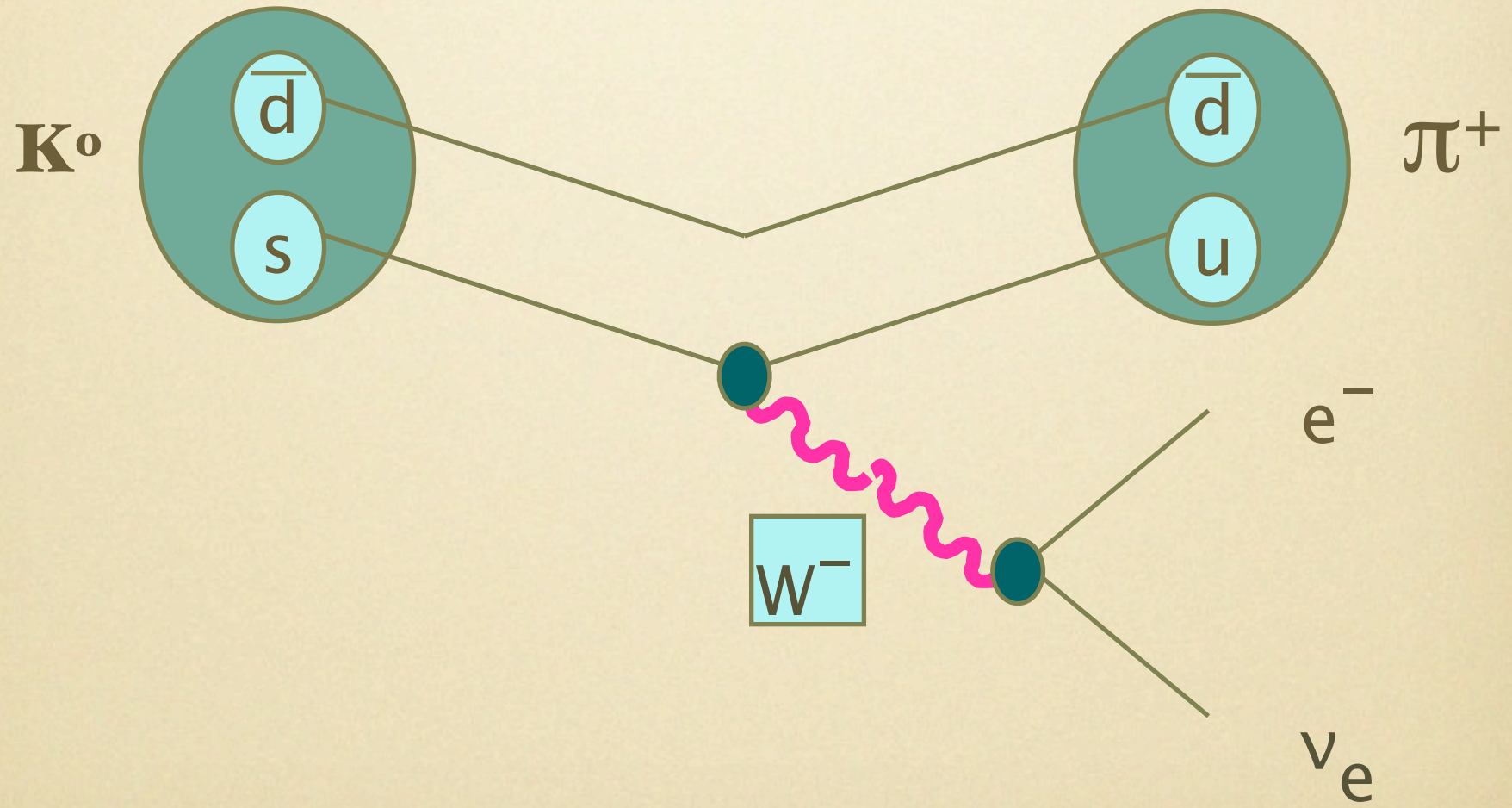
Example: radioactivity

$$N_Z \rightarrow N_{Z+1} e^- \nu$$



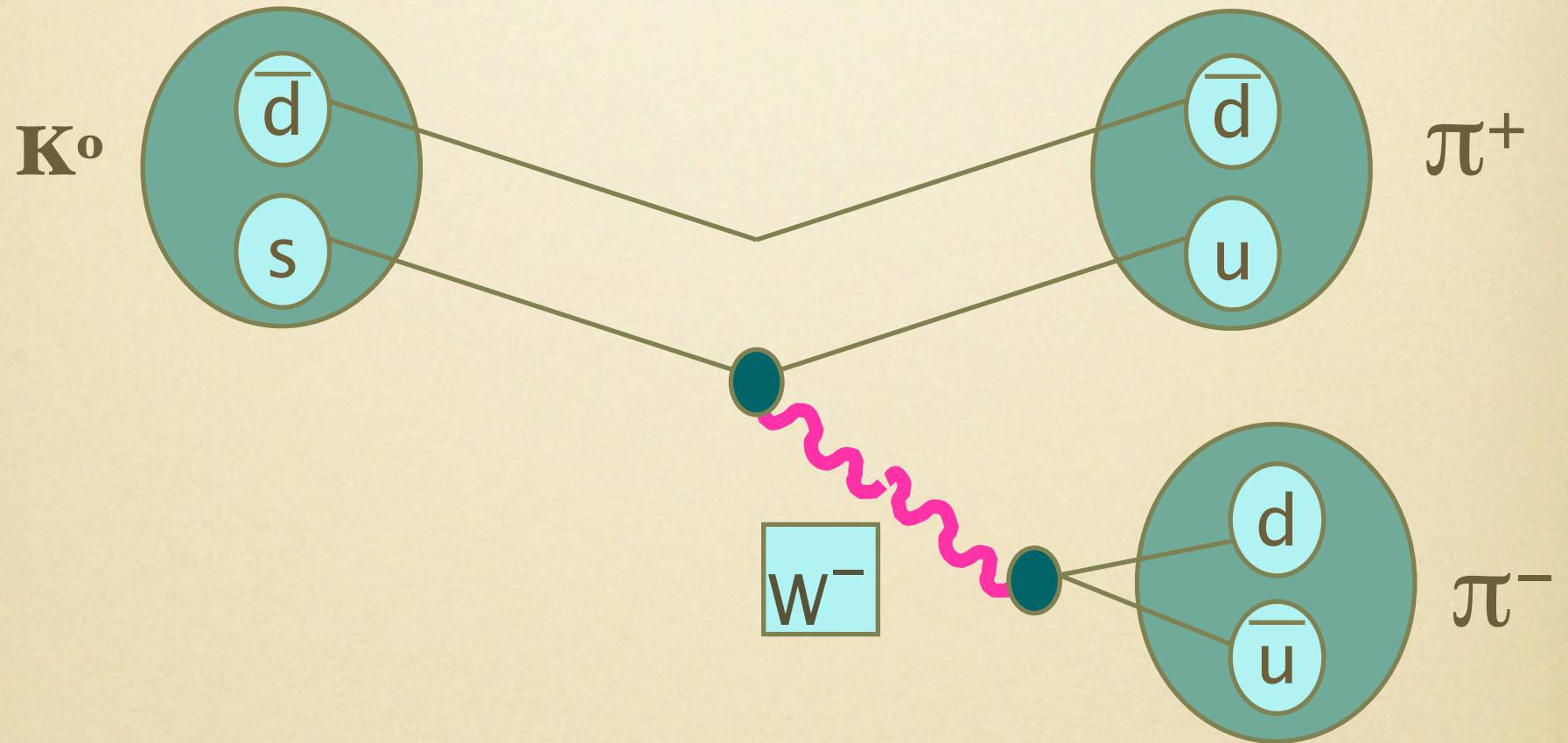
Example: kaon decays

$$K^0 \rightarrow \pi^+ e^- \nu_e$$



Example: kaon decays

$$K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$$



La massa delle particelle elementari

$m=E/c^2 \Rightarrow$ per un sistema composto, la massa e' ottenuta risolvendo le equazioni della dinamica dello stato legato, con

$$E=(\text{energia cinetica}) + (\text{energia potenziale})$$

Dunque $m_p=938 \text{ MeV}$ richiede di capire un "come", non un "perche'"

Diverse le cose per particelle elementari: infatti
elementare $\Rightarrow$ nessuna dinamica interna



Occorre sviluppare una teoria che spieghi cosa sia la massa per particelle elementari, e che ne determini il valore particella per particella

concorso **ScienzaPerTutti**

anno scolastico **2012-2013**



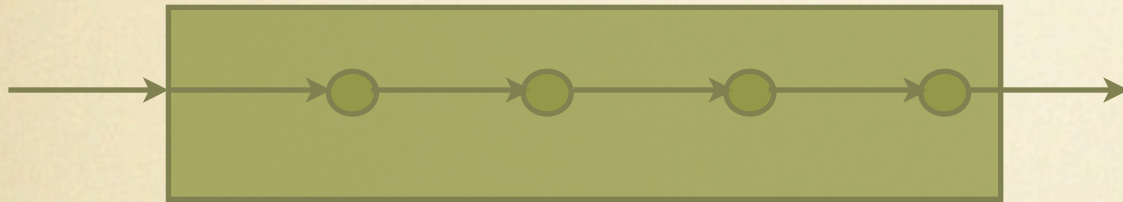
UNA RICERCA CHE SI PROTRAE DA PIU' DI DUEMILA ANNI

Il vuoto o il nulla costituisce uno dei concetti più enigmatici della storia del pensiero. A partire dalle prime teorie dei filosofi greci per arrivare alla fisica moderna, il concetto di vuoto ha sempre giocato un ruolo in uno sfumato confine tra fisica e filosofia. Invitiamo studenti e docenti ad approfondire l'argomento lasciando libertà di affrontarlo secondo modalità e prospettive più stimolanti: fisica, filosofia, arte.

<http://SCIENZAPERTUTTI.LNF.INFN.IT/>

Il bosone di Higgs e la massa delle particelle elementari

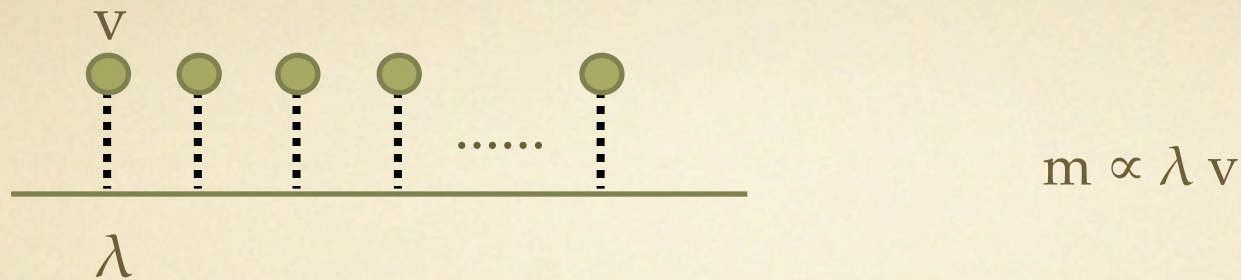
La luce che si propaga in un mezzo “rallenta” a causa delle continue interazioni col mezzo stesso



Il tempo necessario per attraversare il mezzo è maggiore che se la luce attraversasse il vuoto

$$\Rightarrow c_{\text{medium}} < c_{\text{vacuum}}$$

Il campo di Higgs è come un mezzo continuo in cui l'universo è immerso. Le particelle, interagendo con esso, acquistano l'inerzia caratteristica delle particelle con massa.



La quantità “ v ” è una proprietà universale del “background” del campo di Higgs. La quantità “ λ ” è caratteristica della particella.

Grande λ vuol dire grande massa, con $m \propto \lambda v$

Ora la domanda “**perché una certa particella ha massa m ?**” è rimpiazzata da domande di natura dinamica:

- **perché una certa particella si accoppia al campo di Higgs con intensità $\lambda \propto m / v$?**

- **perché il campo di Higgs permea lo spazio?**

Tuttavia almeno ora abbiamo un modello matematico per capire **come** le particelle acquistino massa

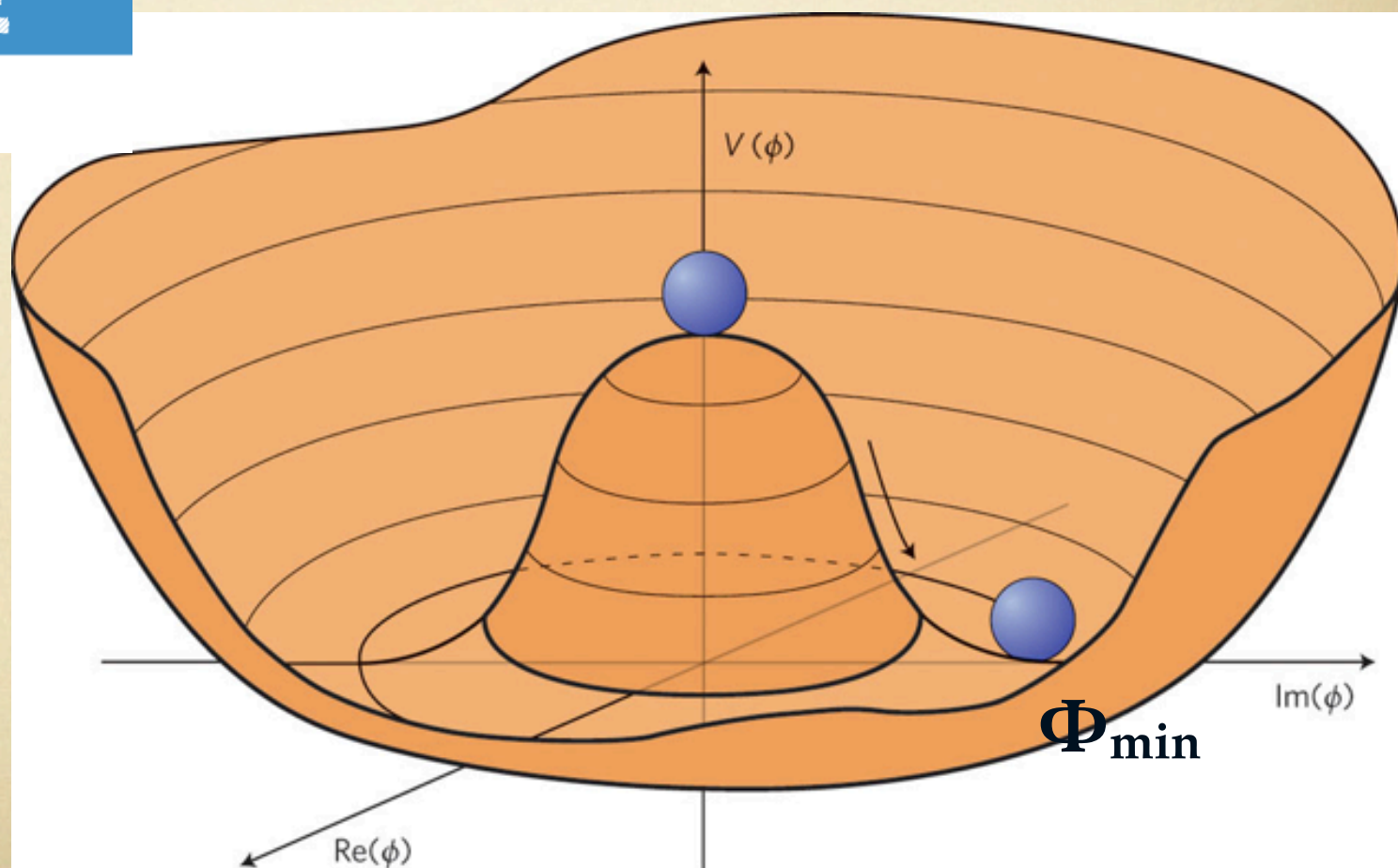


SIMMETRIE INFRAFRANTE

concorso ScienzaPerTutti
anno scolastico 2013-2014

$$V(\Phi) = -\mu^2 \Phi\Phi^* + \lambda(\Phi\Phi^*)^2$$

$$v = \Phi_{\min} = \mu / \sqrt{2\lambda}$$



La produzione e rivelazione del bosone di Higgs

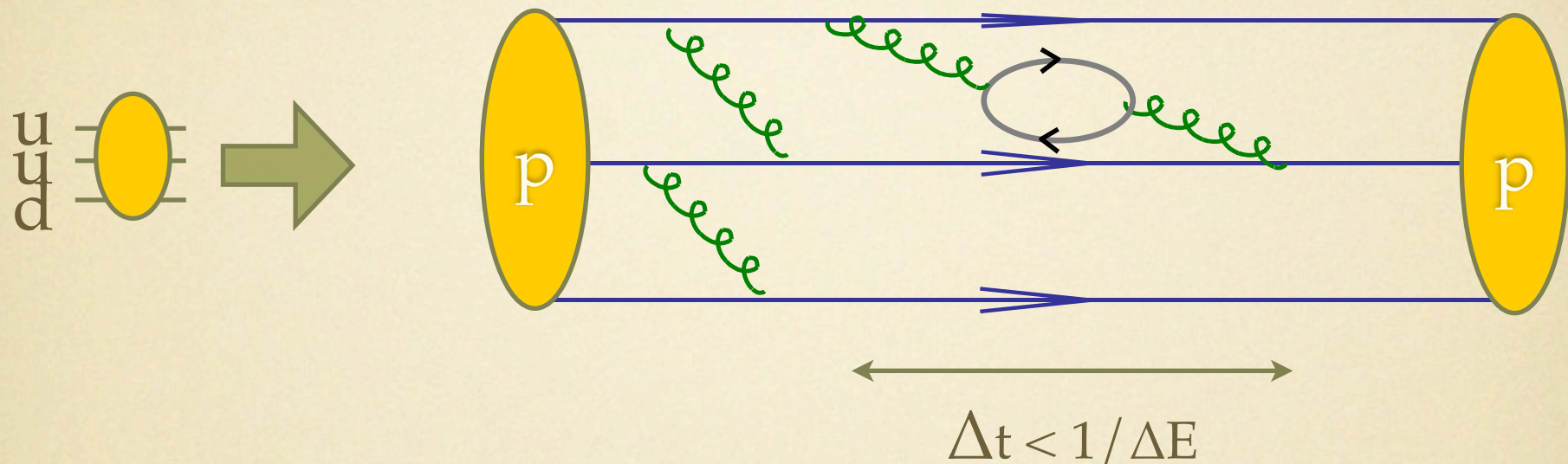
Come ogni altro mezzo continuo, il campo di Higgs può essere perturbato. Come succede quando colpiamo un tavolo con un martello, creando onde sonore, se riusciamo a scuotere il campo di Higgs possiamo creare “onde di Higgs”. Queste “onde” si manifestano come “particelle”, il bosone di Higgs per l'appunto, secondo il solito principio di dualità onda-corpuscolo della meccanica quantistica.

Far ciò richiede concentrare
sufficiente massa in un piccolo
volume $\Rightarrow$ LHC !!!



S.Dalì, The echo of void, 1935

La struttura del protone



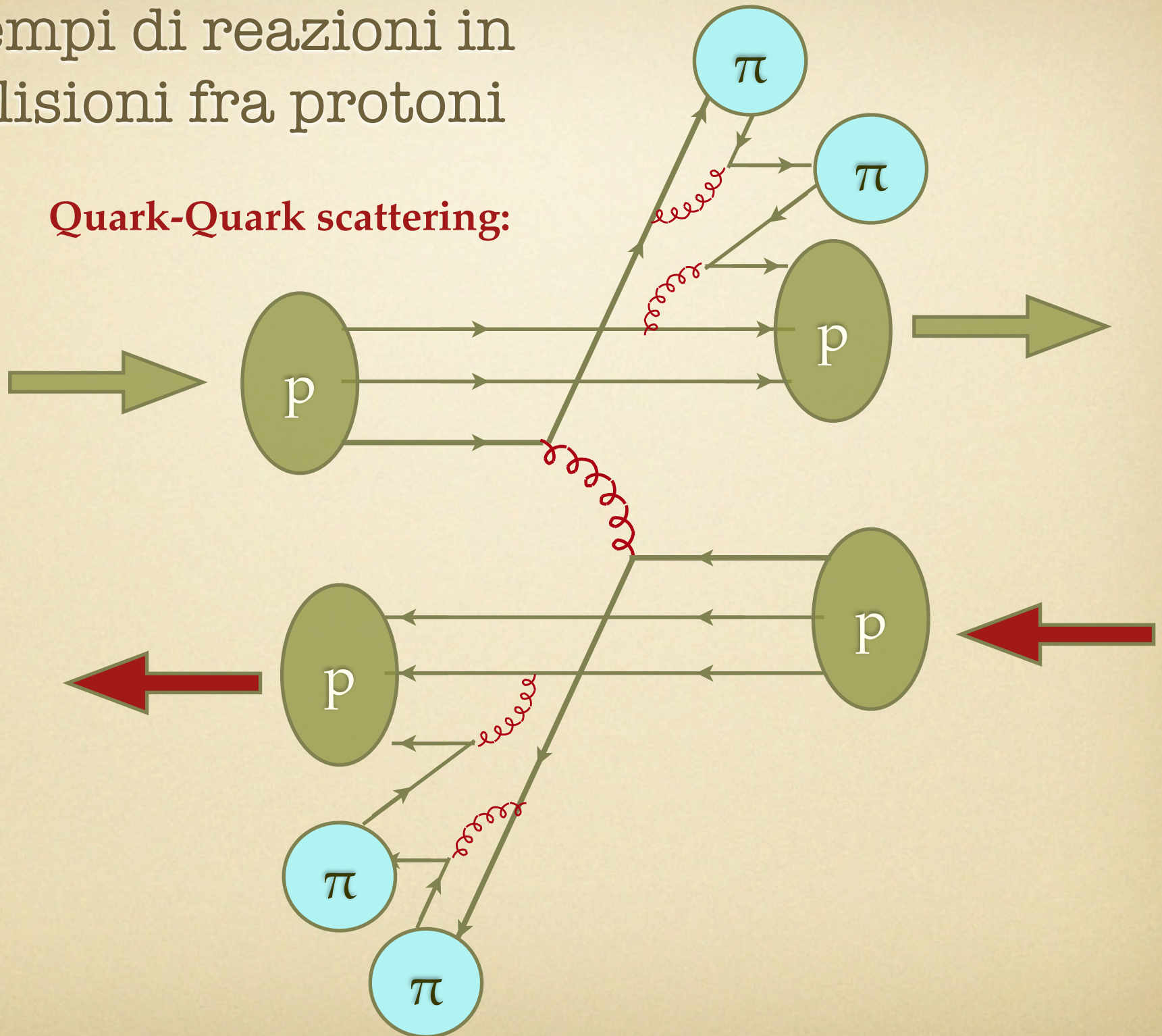
Entro il protone troviamo, oltre ai “quarks costituenti” **uud**, anche **gluoni** e coppie di **quark-antiquark** “virtuali”

Se sondiamo il protone a grandi energie, abbiamo una “foto” del protone ad alta risoluzione temporale, e possiamo rivelare la presenza di queste ulteriori componenti. In particolare, possiamo coinvolgere i gluoni e gli antiquarks nelle reazioni di piu’ alta energia.

Per Δt sufficientemente piccolo, possono apparire anche coppie quark-antiquark pesanti (per es. s -sbar, c -cbar)!! Possiamo trovare dentro il protone **quarks piu’ pesanti dello stesso protone!!**

Esempi di reazioni in collisioni fra protoni

Quark-Quark scattering:

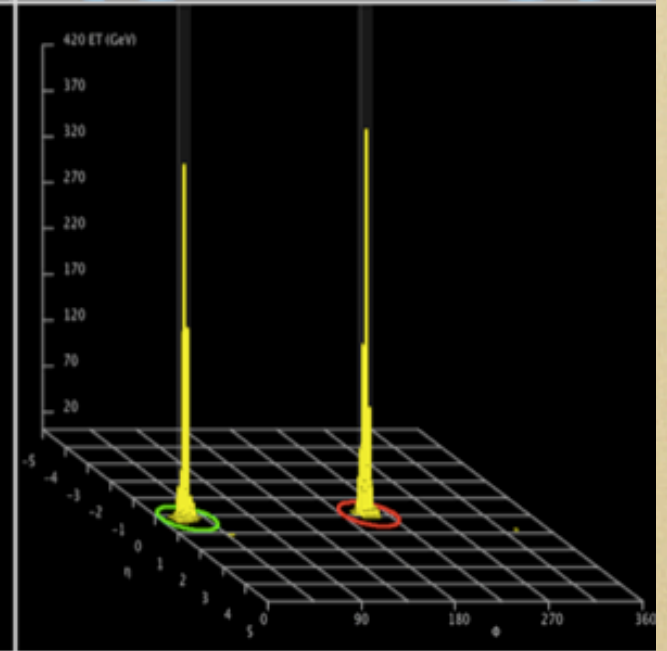
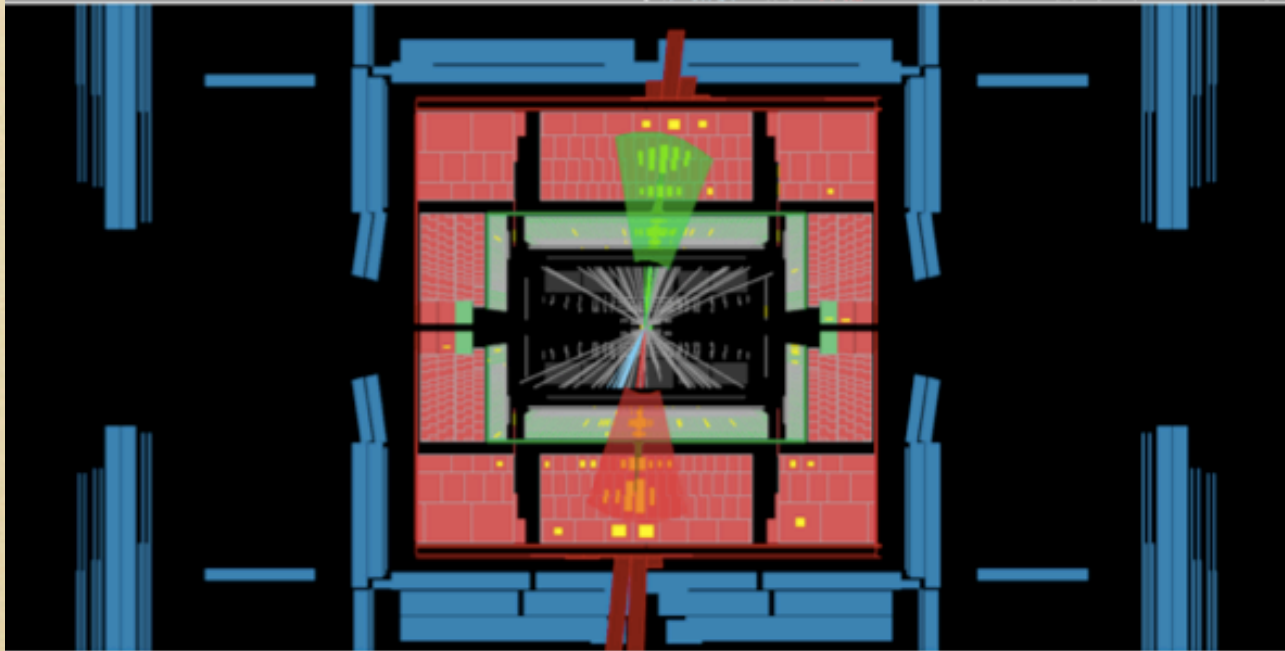
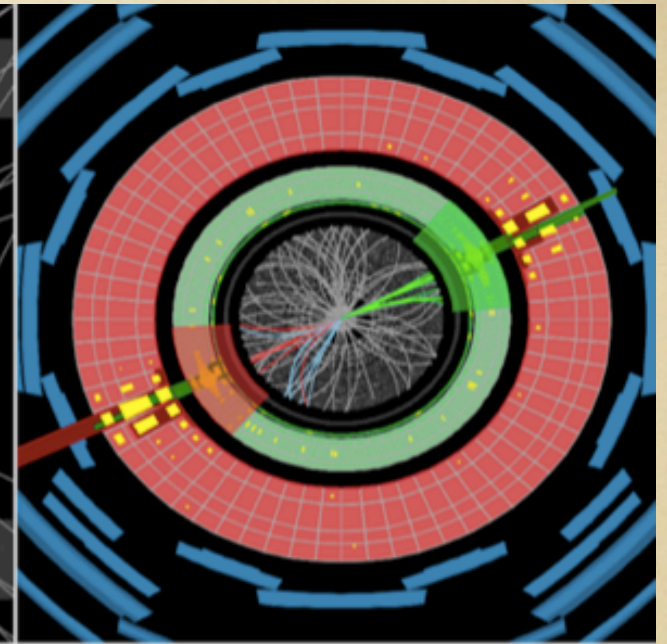
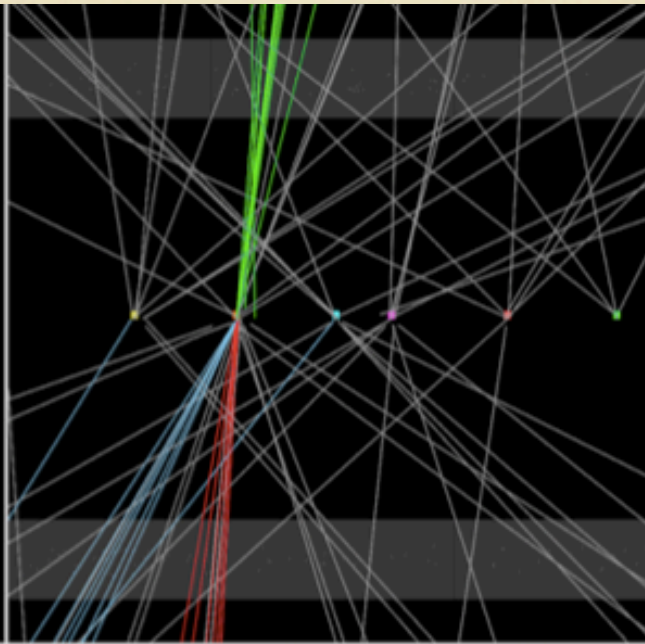




ATLAS EXPERIMENT

Run Number: 201006, Event Number: 55422459

Date: 2012-04-09 14:07:47 UTC



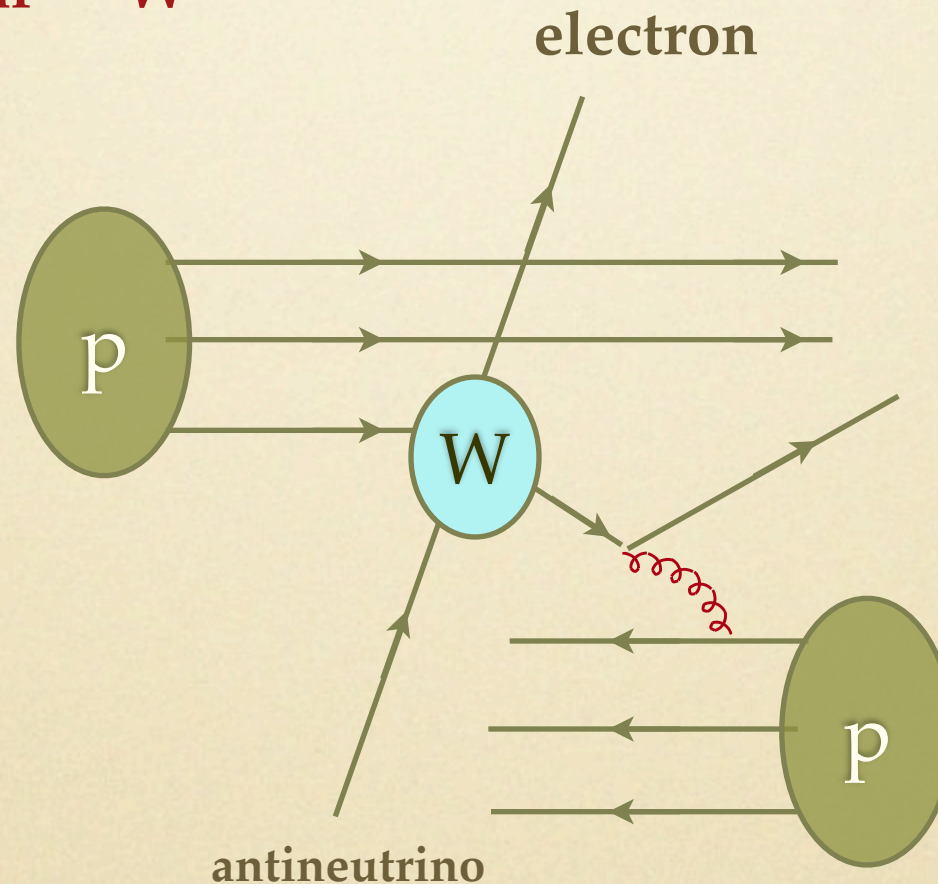
Leading jets 1.96 & 1.65 TeV. Invariant mass 3.81 TeV

Real-life example of jets produced at the LHC

Esempi di reazioni in collisioni fra protoni

Quark-Antiquark annihilation:

$$u \bar{d} \rightarrow W$$

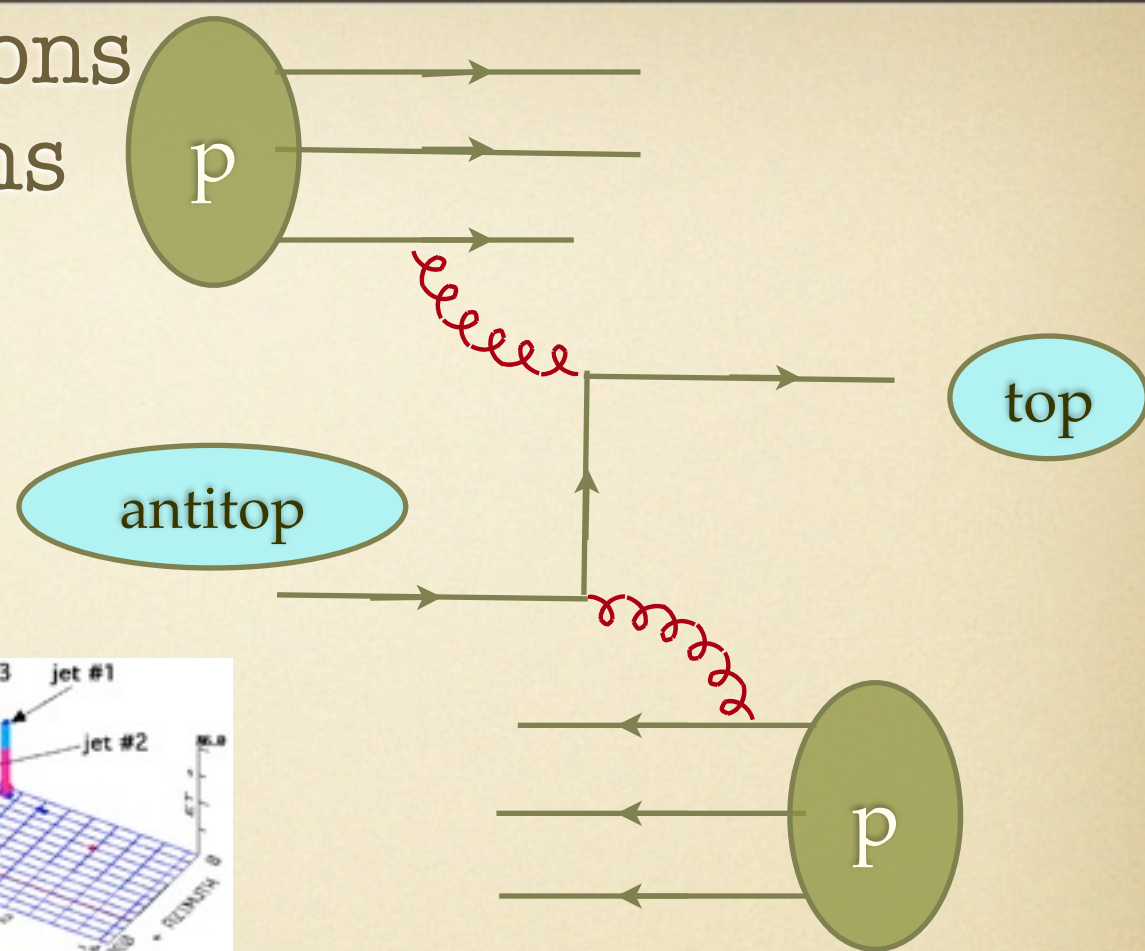


In principle the “force carrier” of new interactions could be created in the same way, provided their mass is not too large

Examples of reactions in proton collisions

gluon-gluon reactions:

$gg \rightarrow \text{top antitop}$



$e + 4 \text{ jet event}$

40758_44414

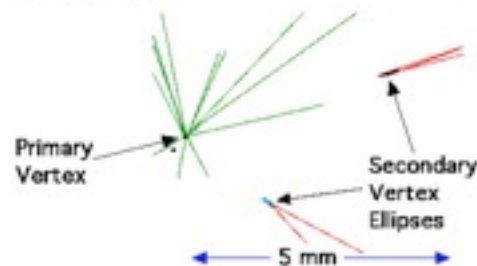
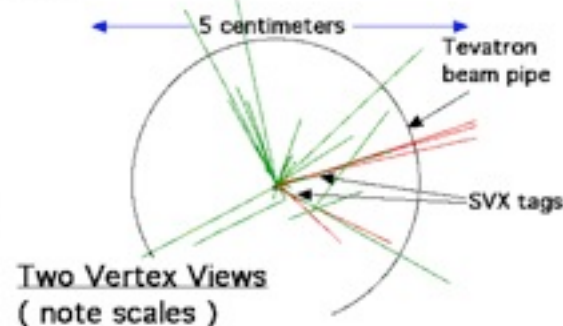
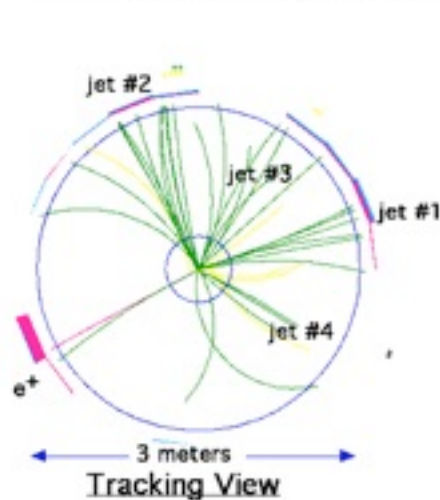
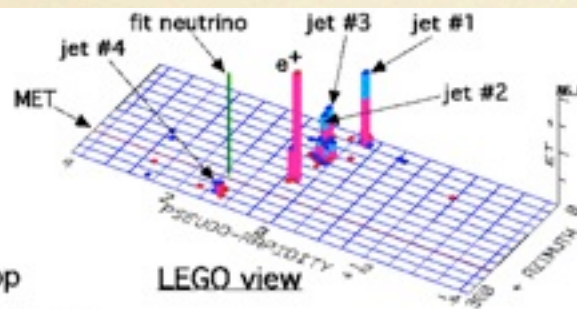
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

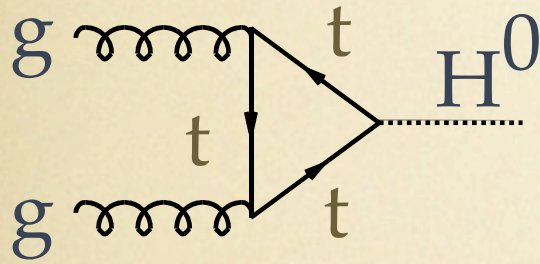
fit top mass is $170 \pm 10 \text{ GeV}$

e^+ , Missing E_T , jet #4 from top

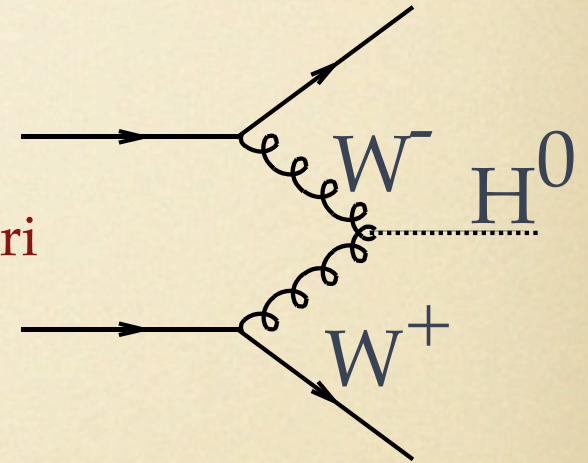
jets 1,2,3 from top (2&3 from W)



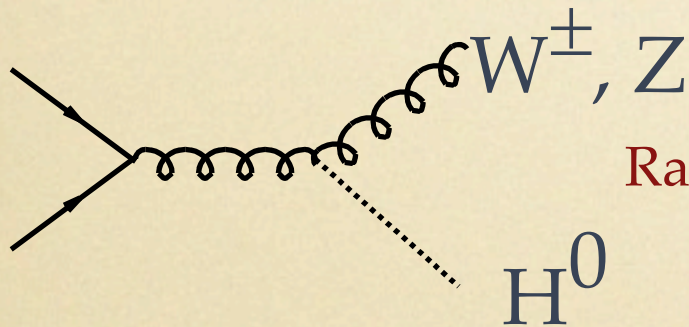
Higgs: Four main production mechanisms



Fusione di gluoni

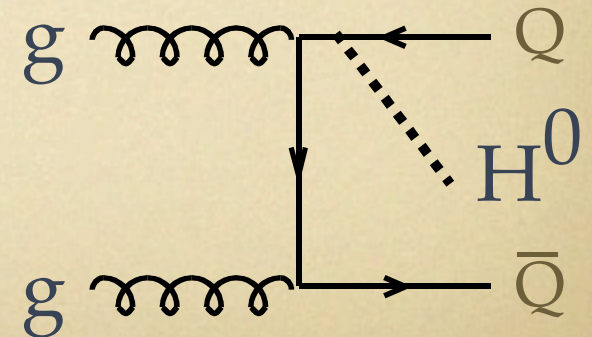


Fusione di bosoni vettori

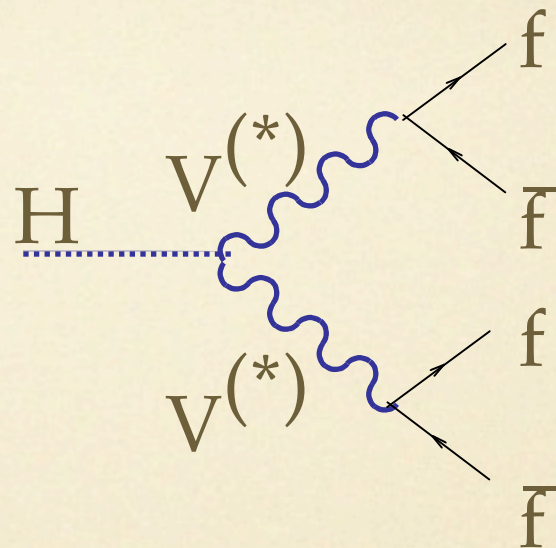
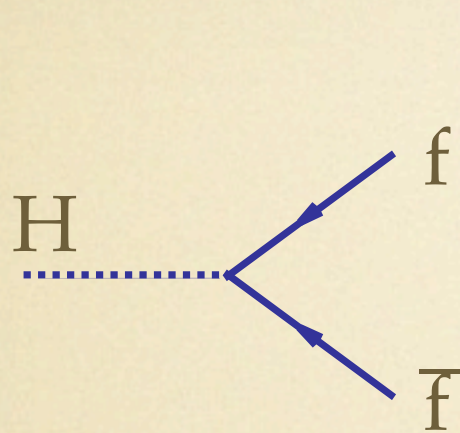


Radiazione da bosoni vettori

Radiazione da quark top

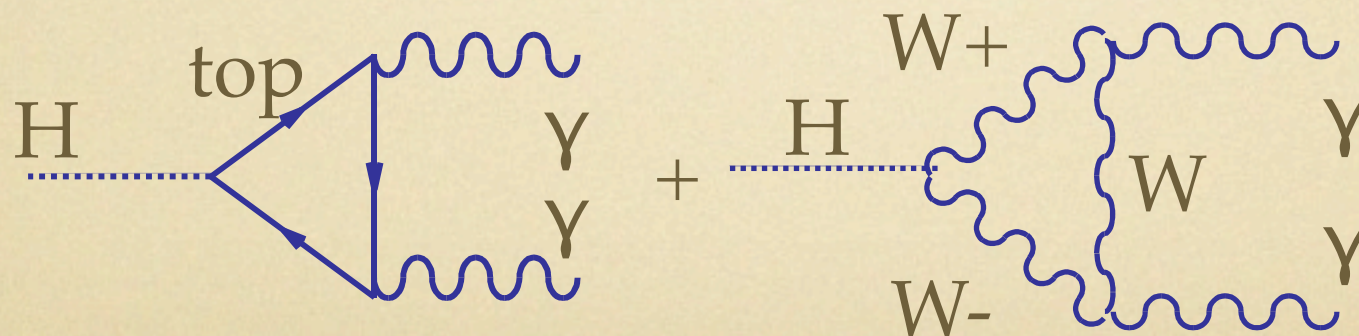


Higgs decays



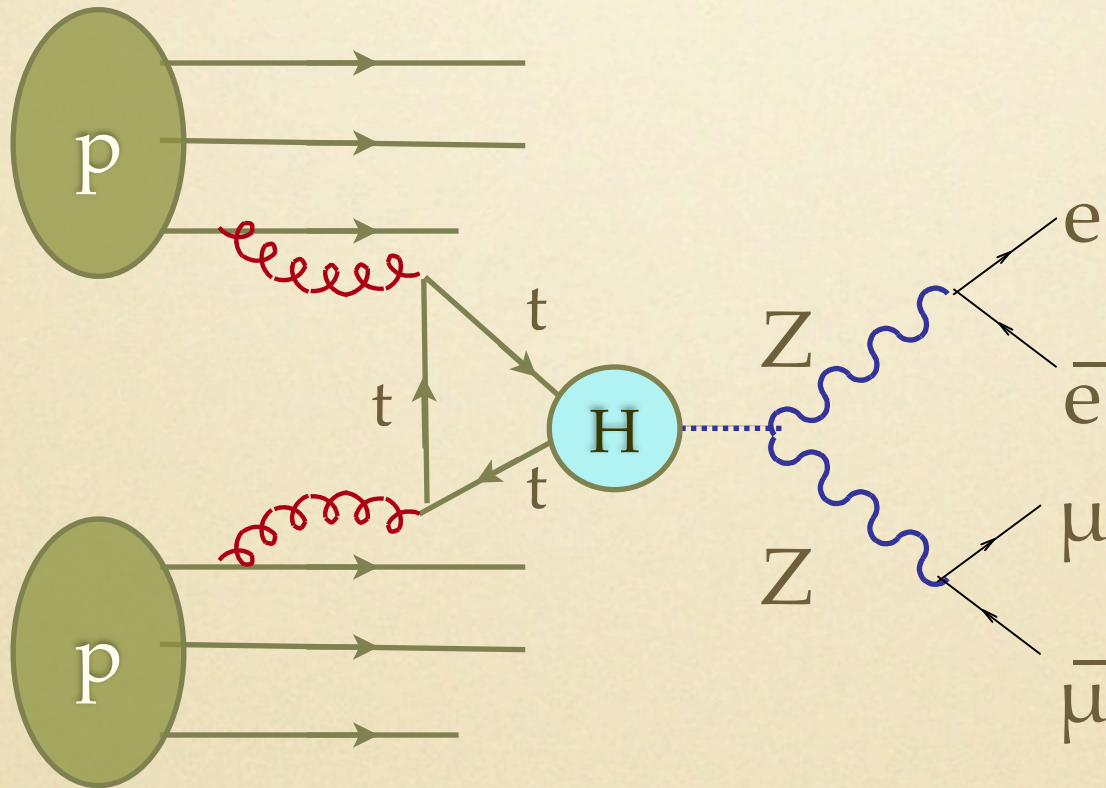
$f = \text{quarks o leptoni}$

$V = W \text{ o } Z$



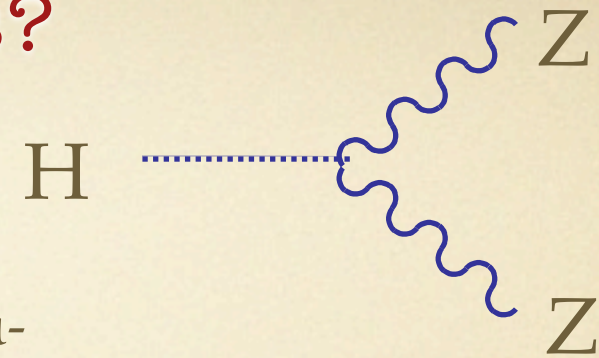
Examples of reactions in proton collisions

Higgs production and decay

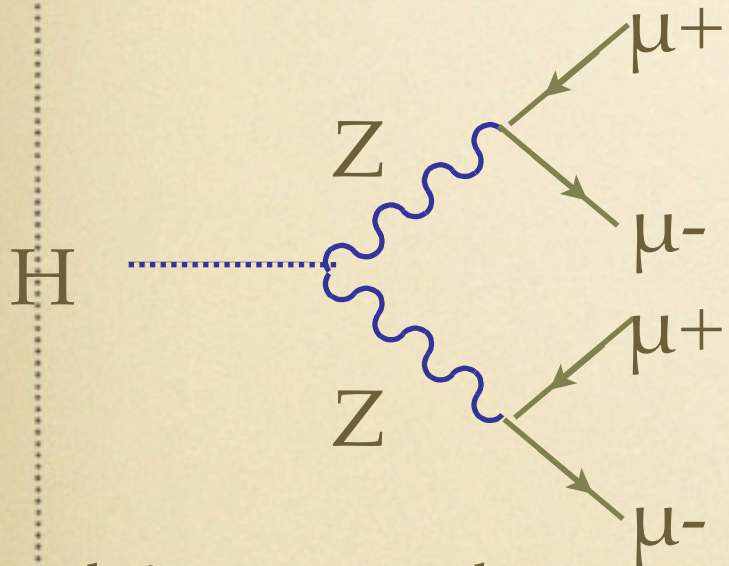


How can we detect the Higgs?

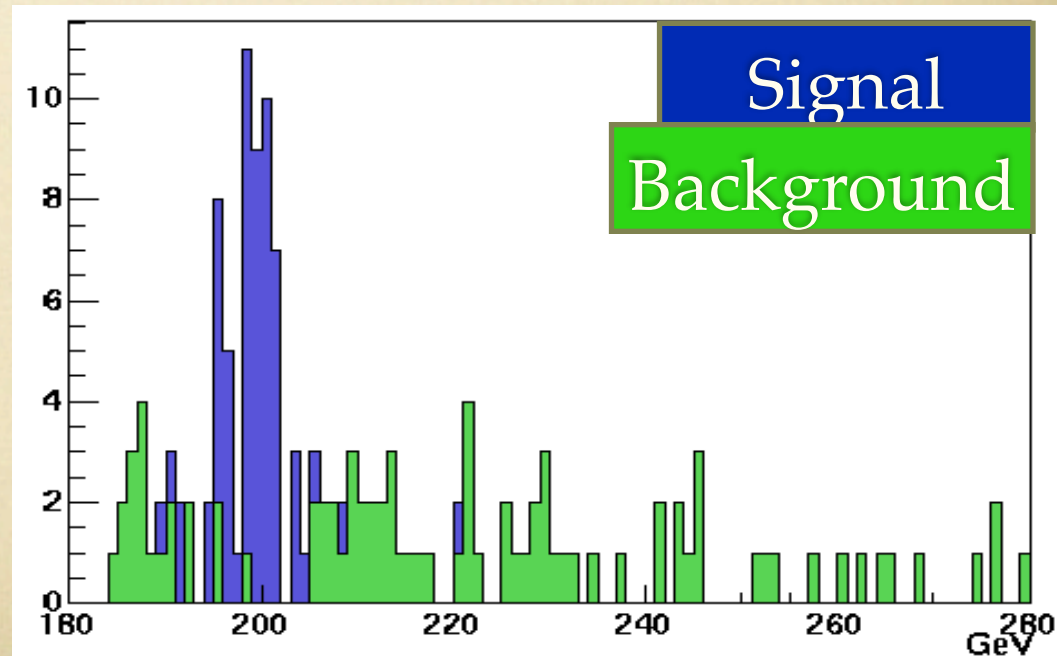
Example: If $m(H) > 2 m(Z) \Rightarrow H \rightarrow ZZ$



Each Z will decay. Assume for example $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$



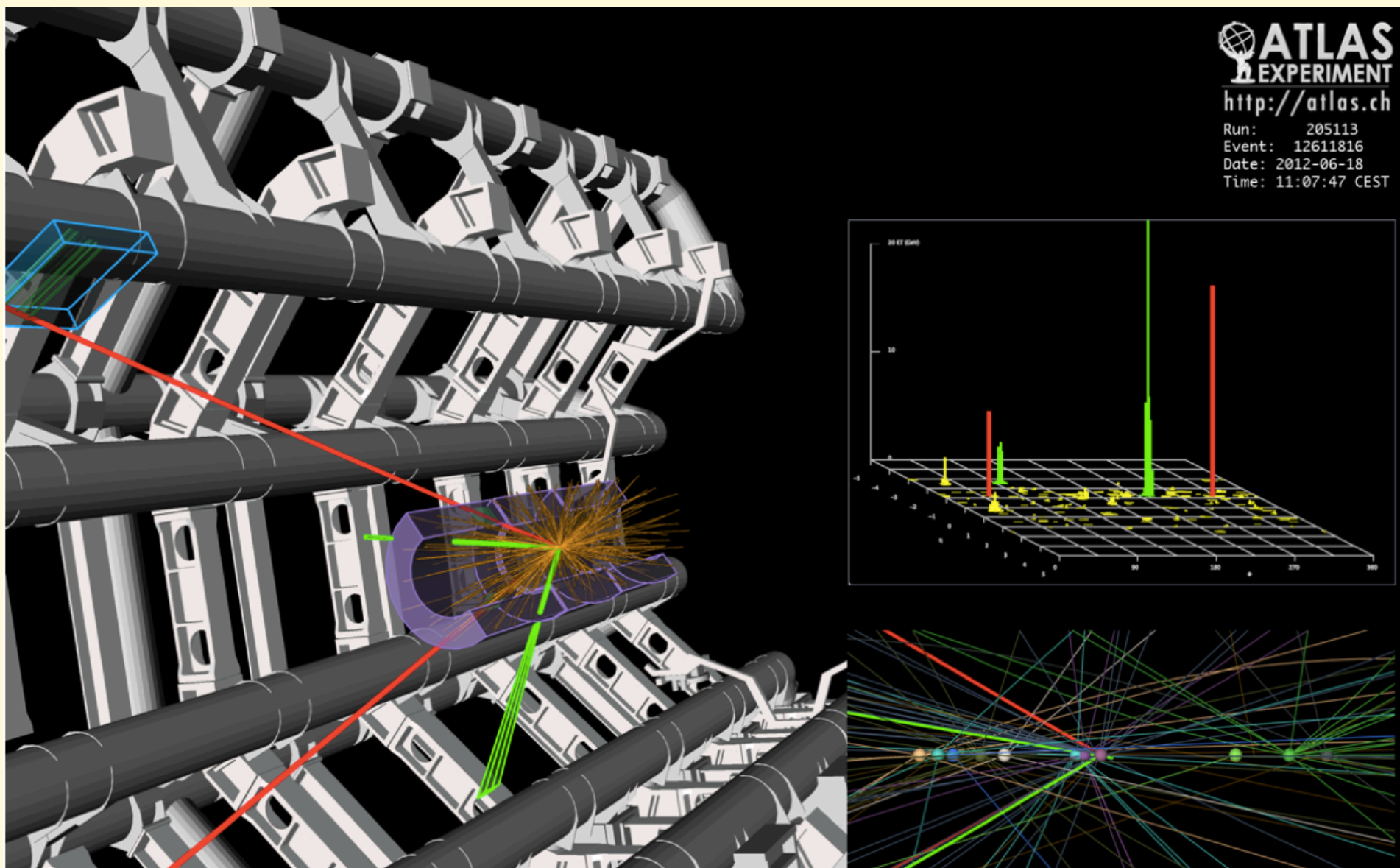
A computer simulation of how the signal will appear, for $m_H = 200$ GeV



Search for events with 4 muons ($\mu^+_1 \mu^-_2 \mu^+_3 \mu^-_4$) subject to the condition that:

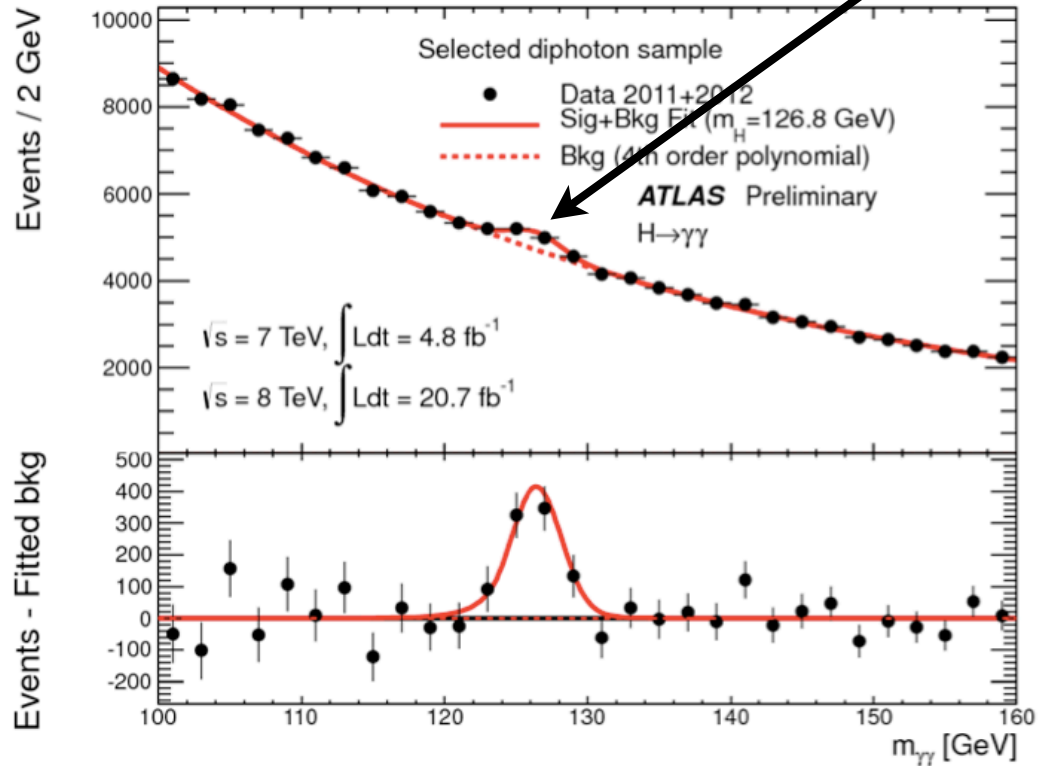
$$m(\mu^+_1 \mu^-_2) = m(\mu^+_3 \mu^-_4) = m(Z)$$

The invariant mass of the 4-muon system will then give $m(H)$

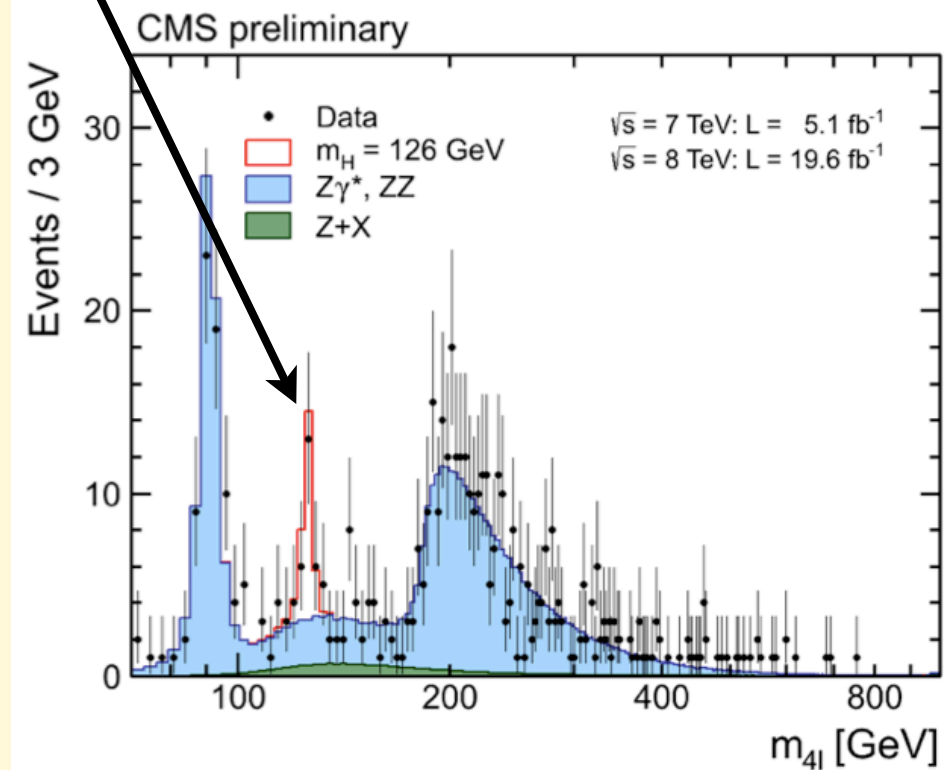


Un evento candidato di Higgs, in ATLAS, con $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$

Higgs peaks



$H \rightarrow 2 \text{ photons}$



$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4 \text{ leptons}$

Gli scopi del Large Hadron Collider (LHC)

✓

Ancora nessuna
evidenza

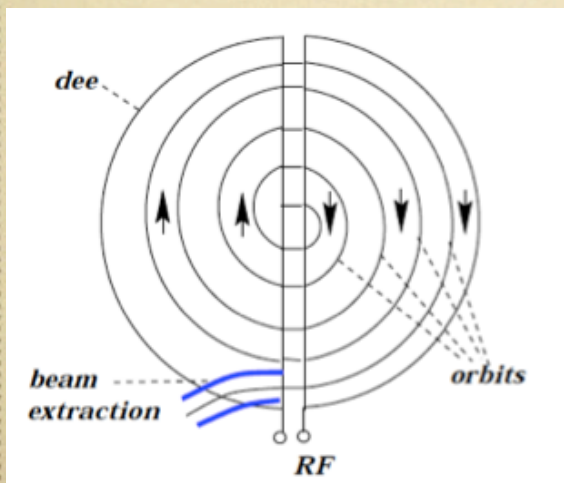
Programma
futuro

- Definire con piu' completezza i "COSA":
 - scoprire il pezzo mancante del Modello Standard, cioe' il **bosone di Higgs**
 - cercare altre possibili **interazioni fondamentali**, troppo deboli per essere state osservate finora
 - cercare possibili **nuove generazioni** di quarks o leptoni
 - confermare / invalidare la **natura elementare** di quarks / leptoni
 - scoprire evidence diretta della particella responsabile per la **Materia oscura** nell' Universo
- Definire meglio i "COME": l'osservazione del bosone di Higgs, e la misura delle sue proprieta', completeranno la comprensione della dinamica del Modello Standard, confermando la nostra presunta comprensione di "**come**" le particelle acquistano massa
- Cercare nuovi elementi che ci aiutino a gettar luce sui piu' difficili PERCHE'

I prossimi passi

- Fino all'11 Febbraio 2013: completamento della presa dati 2010-2012
- 2013-14: manutenzione, miglioramenti: $E=8 \text{ TeV} \rightarrow 13 \text{ TeV}$
- 2015-16: presa dati a 13 TeV, 50-100 fb^{-1} di dati (circa 2-4 volte piu' di quanto disponibile a fine 2012)
- 2017-18: ulteriori miglioramenti per l'intensita' ed i rivelatori
- 2019-20: nuova presa dati, 14 TeV, altri 300 fb^{-1} (**12 volte** quanto disponibile oggi)
- 2021-22: "high-luminosity" upgrade
- 2022- ~2030: raccolta di ~3000 fb^{-1} di dati (**120 volte** quanto disponibile oggi)
- Oltre 2030:
 - $E \rightarrow 33 \text{ TeV}$ (richiede nuovi magneti)
 - $E \rightarrow \sim 80 \text{ TeV}$ (richiede nuovo tunnel)

Un acceleratore van de Graaf da 1 MeV (1931)



E. Lawrence, Premio Nobel 1939 per l'invenzione (1931) del ciclotrone, il primo acceleratore circolare di particelle (80 keV, tenuto da lui in mano qui nella foto)

