

INTRODUZIONE AI PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA FISICA DELLE PARTICELLE

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

Parte 3, 16/2/2011

Visita CERN professori di fisica italiani

Level-1: perche'?

- Perche' 3 famiglie di quarks e leptoni?
- Perche' 4 forze fondamentali? 3 bastavano? Forse 5 ? ... ???!!!
- Perche' alcune particelle hanno massa, altre no?
- Perche' $m(\text{neutrino}) \sim 10^{-7} m(e)$?
- Perche' c'e' un'asimmetria materia-antimateria?
- Perche' $F_{\text{gravity}} \sim 10^{-40} F_{\text{electric}}$?
- sono le particelle veramente puntiformi? Corde?? Membrane?
- Perche' $D=3+1$?
-
- Perche' qualcosa invece che niente?

La profondita' di queste domande e' una misura della maturita' del campo. Possiamo solo porci dei "perche'" quando abbiamo una solida comprensione del "cosa" e del "come"

Esempio: massa

$m = E/c^2 \Rightarrow$ 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'"

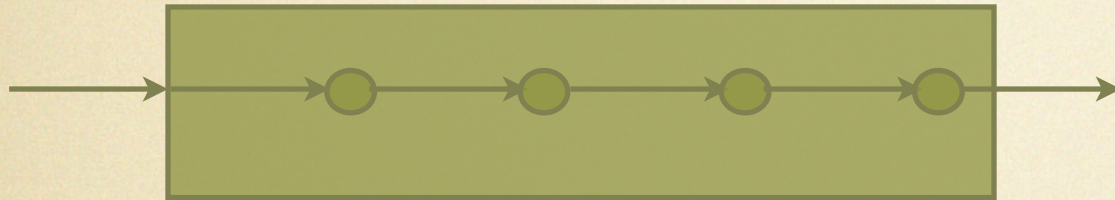
Diverse le cose per particelle elementari: infatti
elementare \Rightarrow nessuna dinamica interna



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

Il bosone di Higgs e la massa delle particelle elementari

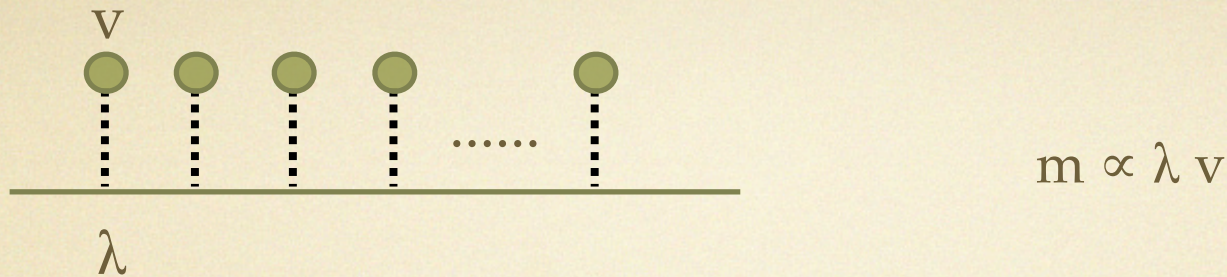
La luce che si propaga in un mezzo “rallenta” a causa delle continue interazioni col mezzo stesso



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

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

La produzione e rivelazione del bosone di Higgs

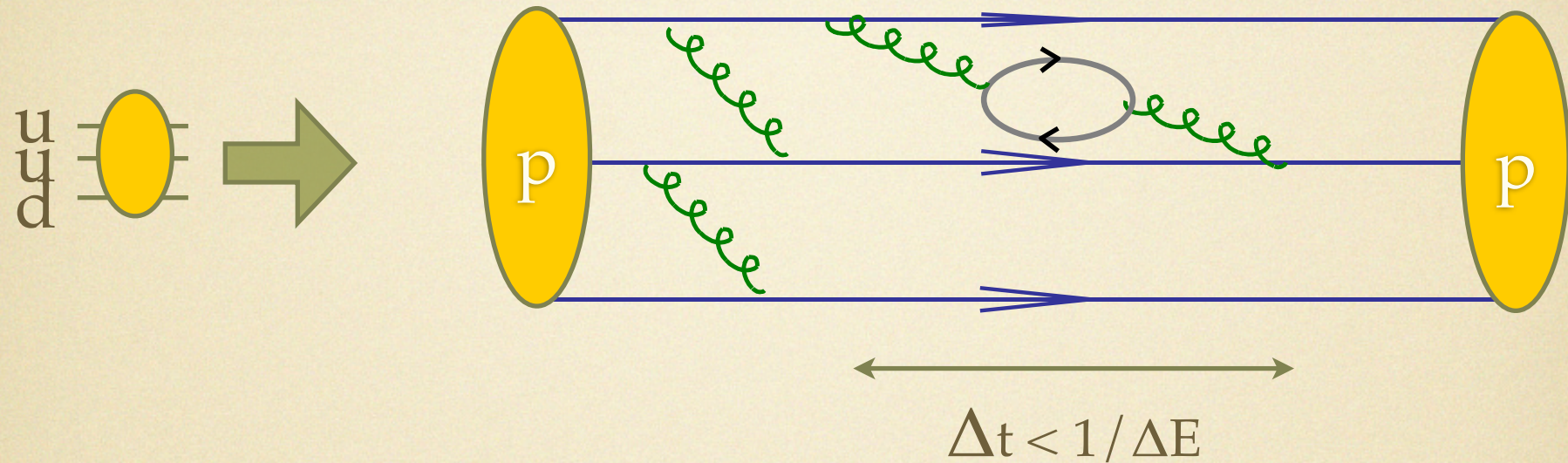
Come ogni altro mezzo continuo, il sottofondo del campo di Higgs può essere perturbato. Come succede quando colpiamo un tavolo con un martello, creando onde sonore, se riusciamo a scuotere il fondo di Higgs possiamo creare “onde di Higgs”. Queste “onde” si manifestano come “particelle”, il bosone di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

**Far ciò richiede concentrare sufficiente energia,
maggiore della massa del bosone di Higgs, in
un piccolo volume ⇒ LHC !!!**

Gli scopi del Large Hadron Collider (LHC)

- 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'

La struttura del protone



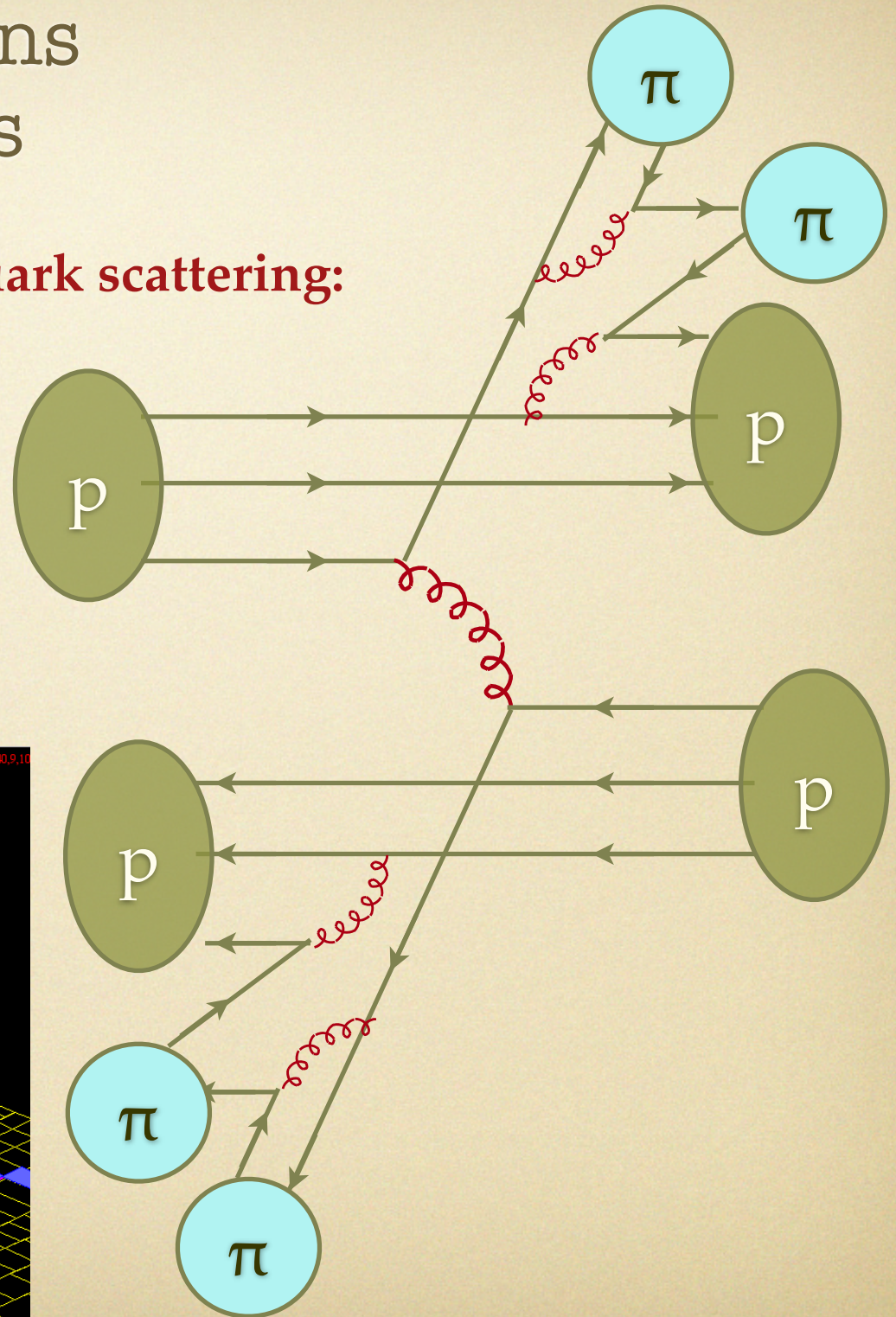
Entro il protone troviamo, oltre ai “quarks costituenti” **uud**, anche **gluoni** e coppie di **quark-antiquark** “virtuali”

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.

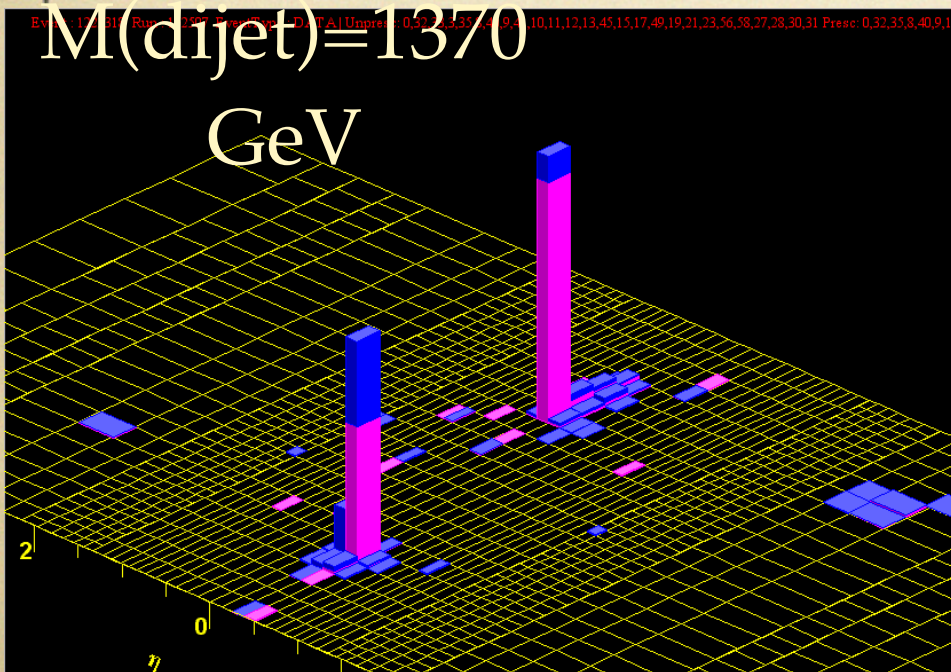
Si noti che, per Δt sufficientemente piccolo, possono apparire anche coppie quark-antiquark di generazioni piu’ pesanti (per es. **s-sbar**, **c-cbar**)!! Il protone puo’ contenere quarks piu’ pesanti di se stesso!!

Examples of reactions in proton collisions

quark-quark scattering:

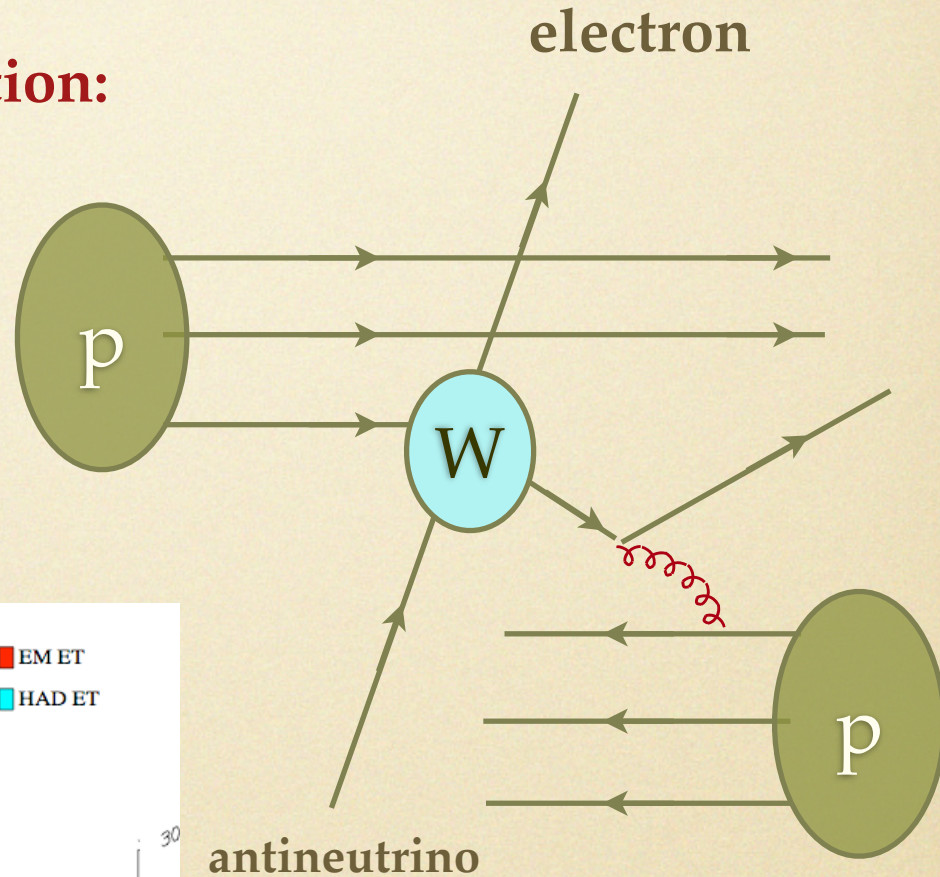


Real-life example from p-pbar collisions at the Tevatron, 1.96 TeV
CM energy:

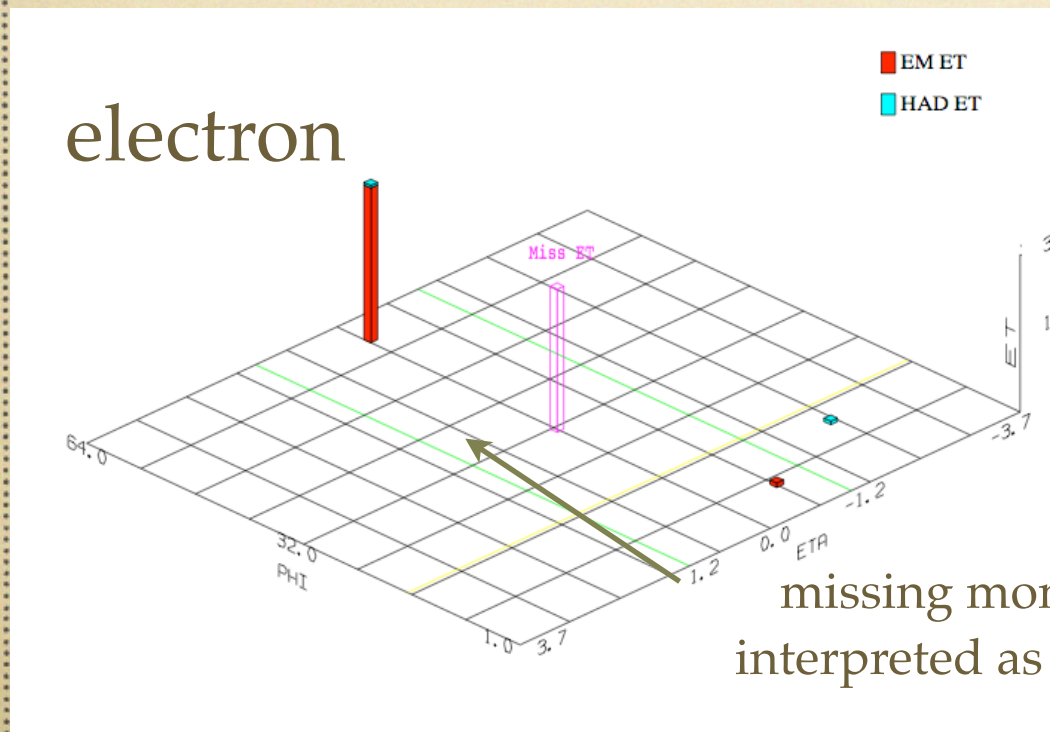


Examples of reactions in proton collisions

quark-antiquark annihilation:
 $u \bar{d} \rightarrow W$



A real-life event from the Tevatron:



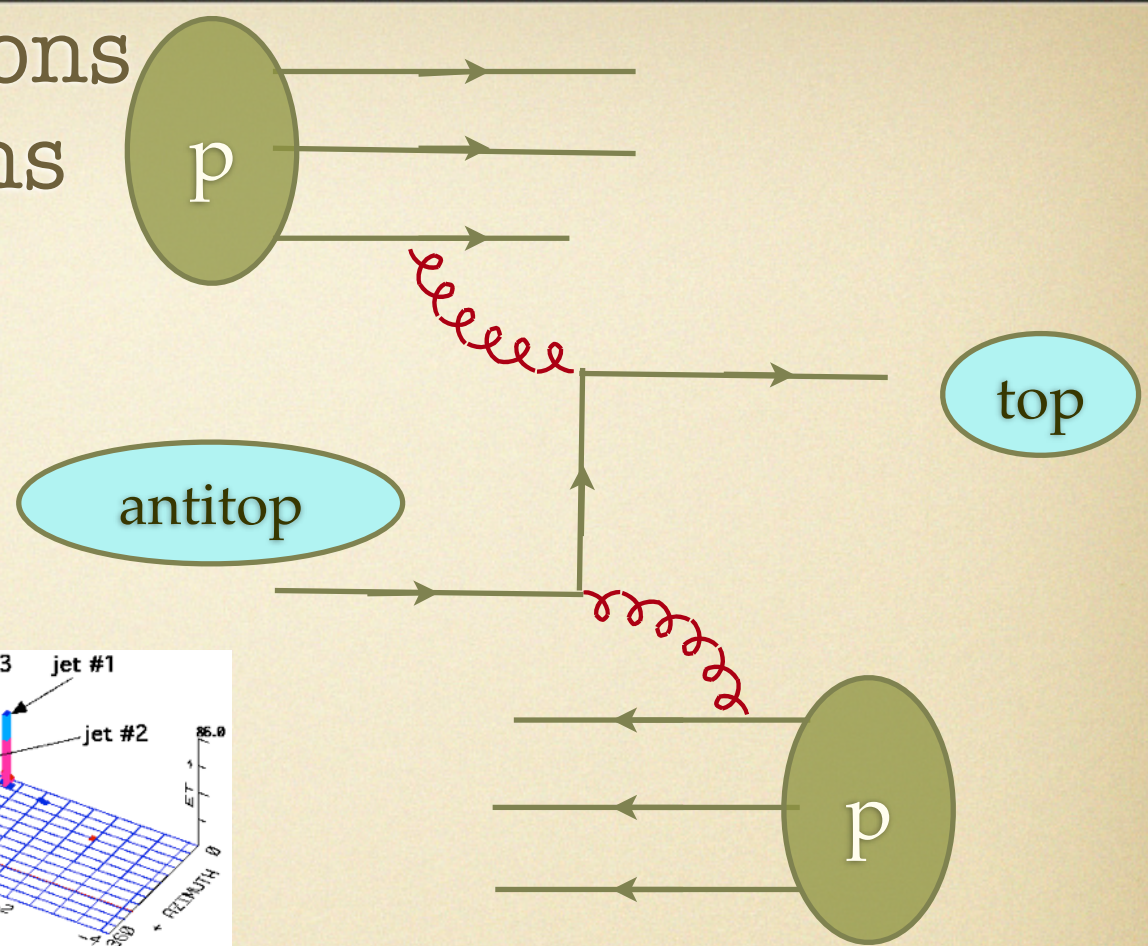
missing momentum,
interpreted as a neutrino

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:

$gg \rightarrow \text{top antitop}$

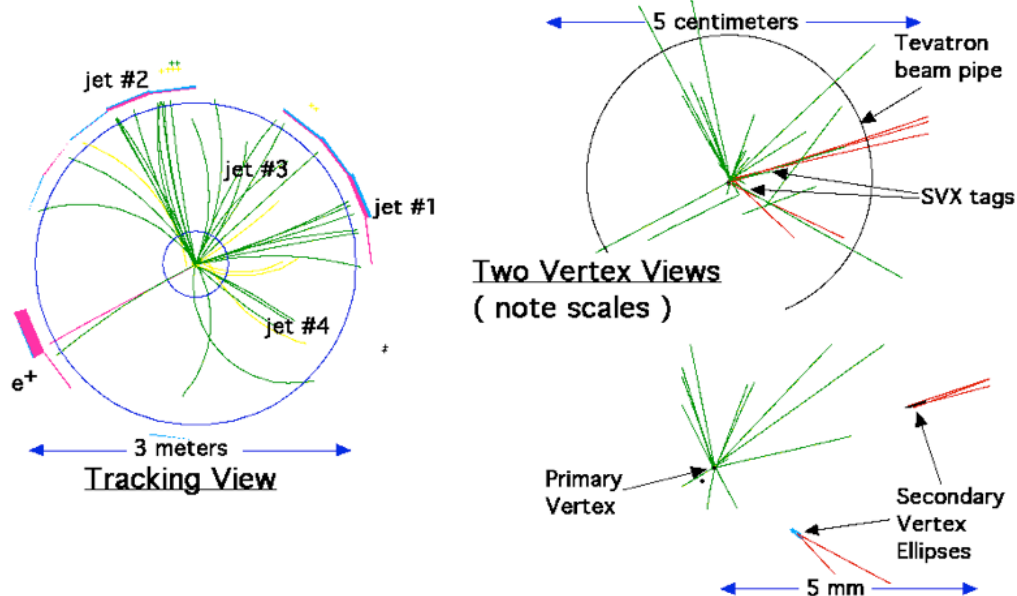
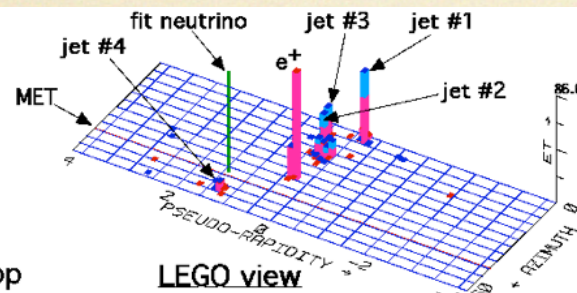


$e + 4 \text{ jet event}$

40758_44414
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX
fit top mass is $170 \pm 10 \text{ GeV}$

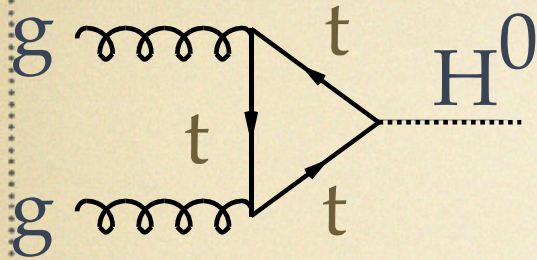
e^+ , Missing E_T , jet #4 from top
jets 1,2,3 from top (2&3 from W)



A top quark event from Fermilab



Four main production mechanisms at the LHC:

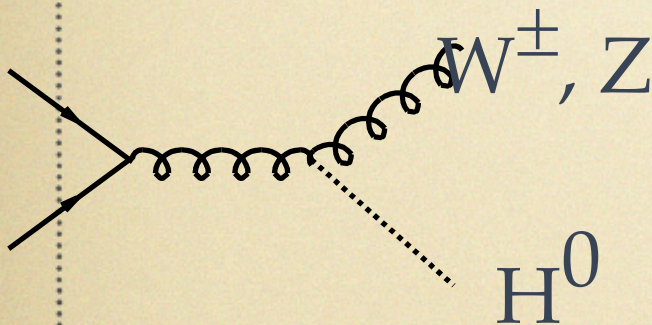
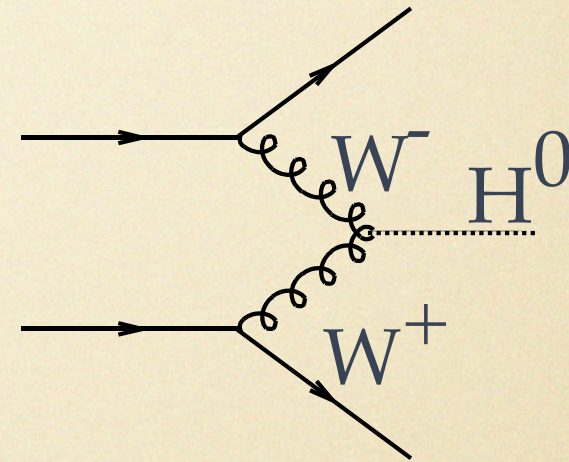


Gluon-gluon fusion (NNLO):

- Largest rate for all $m(H)$.
- Proportional to the top Yukawa coupling, y_t
- gg initial state

Vector-boson (W or Z) fusion (NLO):

- Second largest, and increasing rate at large $m(H)$.
- Proportional to the Higgs EW charge
- mostly ud initial state



W(Z)-strahlung (NNLO):

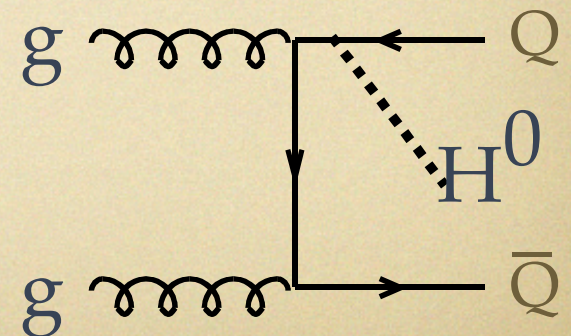
- Same couplings as in VB fusion
- Different partonic luminosity (uniquely $q\bar{q}$ initial state)

$t\bar{t}H/b\bar{b}H$ associate production (NLO):

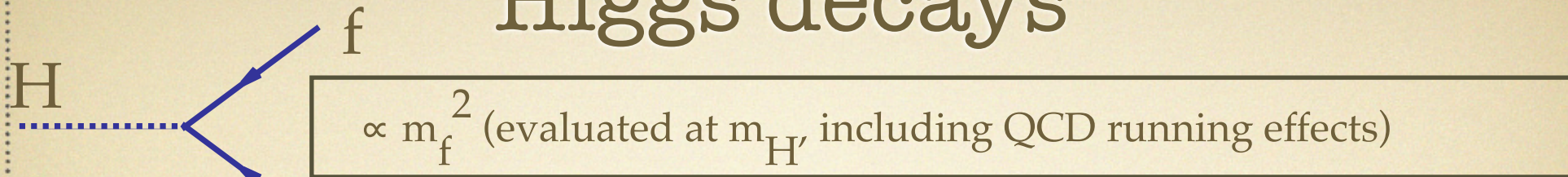
- Proportional to the heavy quark Yukawa coupling, y_Q

dominated by $t\bar{t}H$, except in 2-Higgs models, such as SUSY, where b -coupling enhanced by the ratio of the two Higgs expectations values, $\tan\beta^2$

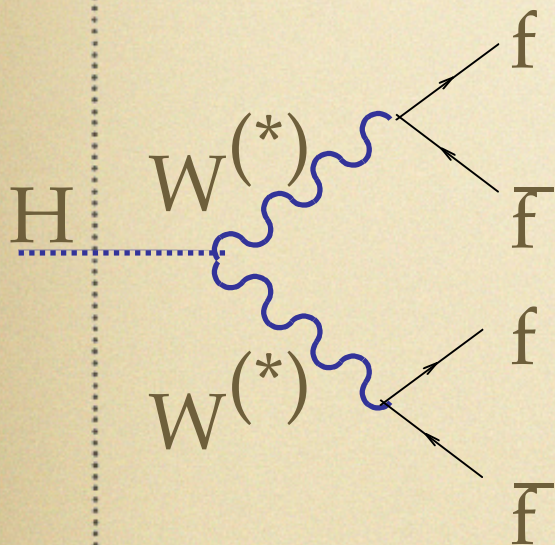
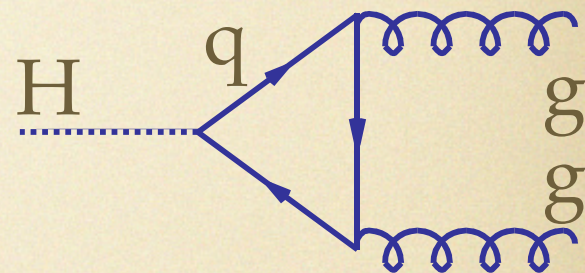
- Same partonic luminosity as in gg -fusion, except for different x -range



Higgs decays

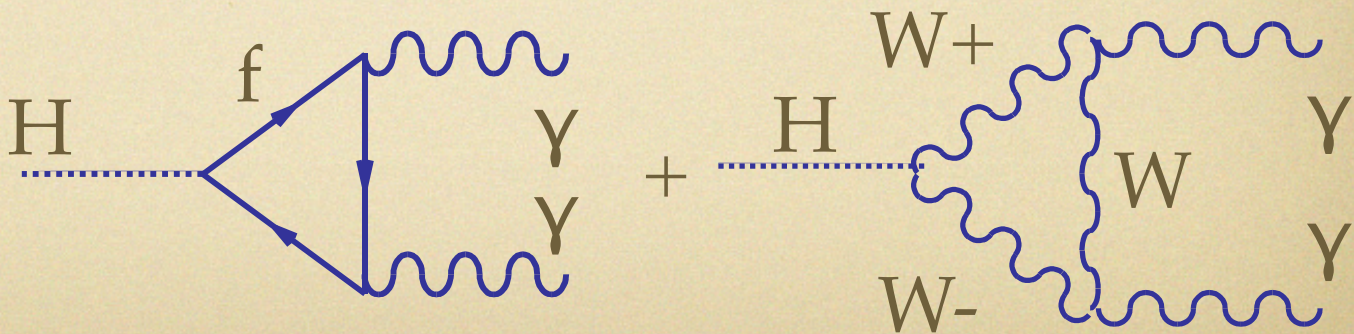


$\propto m_f^2$ (dominated by top-quark loops)



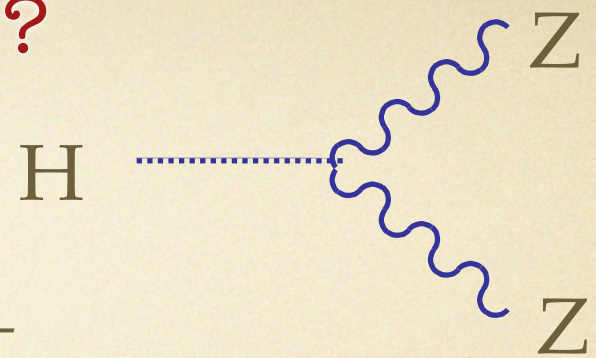
$\propto \alpha_W$ (sharp threshold at $m_H = 2m_W$, but large BR even down to 130 GeV). Similar processes with $W \leftrightarrow Z$.

Dominated by the EW couplings, only minor contribution from top loop
 $m \Rightarrow$ correlated to $H \rightarrow WW$

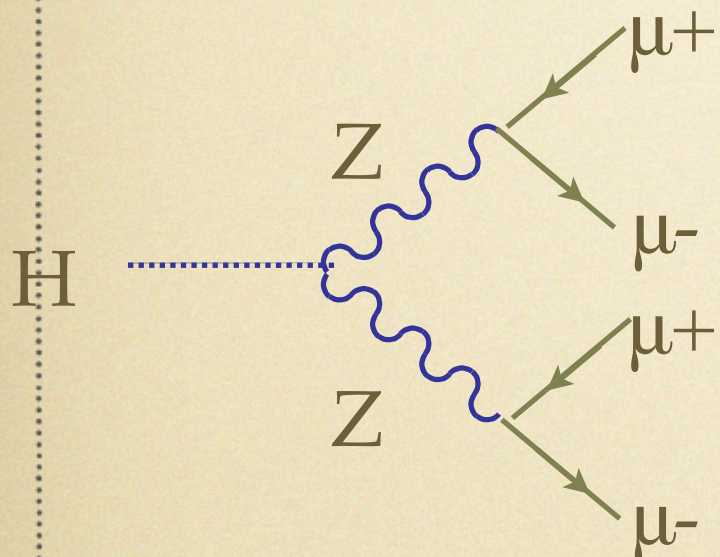


How can we detect the Higgs?

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



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

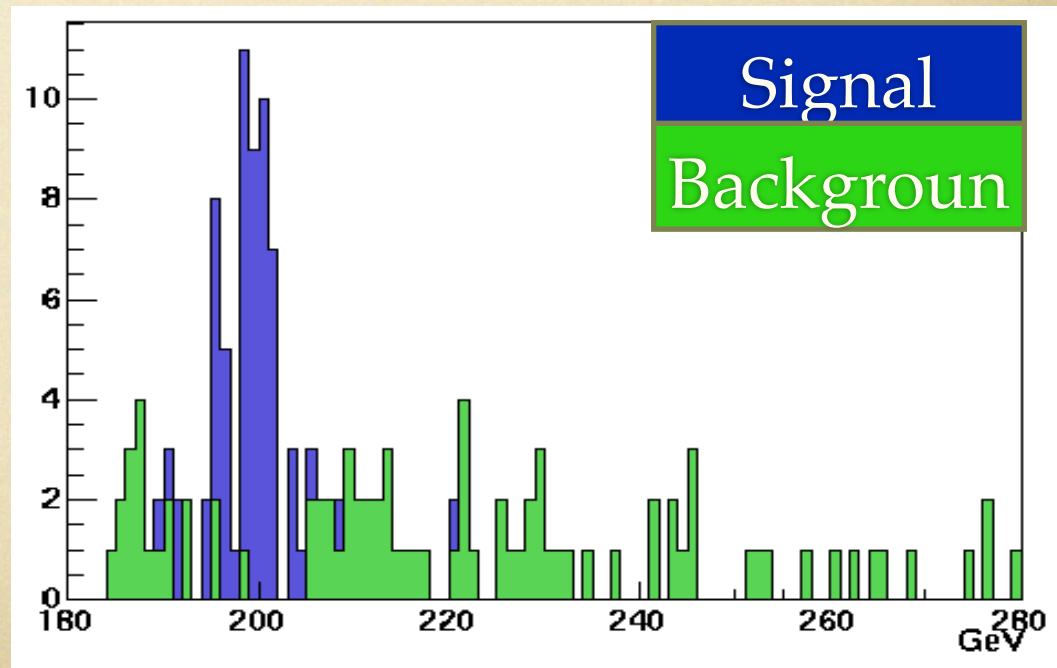


A computer simulation of how the signal will appear, for $m_H = 200$ GeV

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 $m(H)$



Supersimmetria

- Simmetria che connette particelle di spin S e di spin $S+1/2$
 - ➔ spiega l'esistenza di particelle con spin diversi
 - ➔ in alcune versioni, collega particelle ordinarie con il gravitone => spiega la coesistenza della forza di gravita' con le altre forze!
- Per ogni particella nota, deve esistere un "partner supersimmetrico"
- La particella supersimmetrica piu' leggera e' stabile, ed un candidato per la materia oscura
- Se fosse cosi', dovrebbe essere possibile produrla all'LHC!

Summary of LHC physics potential

- **Discover the Higgs boson**
 - Determine to 10-20% the value of several of its couplings
- **Quark substructure:**
 - Push the limits on the “size” of the u/d quarks down by more than one order of magnitude w.r.t. today
- **Weak interactions at TeV scale:**
 - Test existence of **new gauge interactions**, e.g. right-handed W bosons, extra U(1)'s (as present in string theories), etc.
- **Discover Supersymmetry and possibly dark matter**
 - Provide first key measurements of the parameters of Supersymmetry
- **Collect further evidence for a grand unification of the fundamental interactions at a scale of 10^{15} GeV**