

# **INTRODUZIONE AI PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA FISICA DELLE PARTICELLE**

*Michelangelo Mangano*  
Physics Department, CERN  
[michelangelo.mangano@cern.ch](mailto: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'"

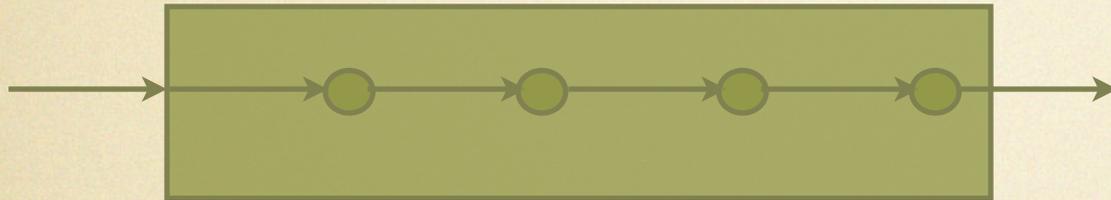
Diverse le cose per particelle elementari: infatti  
**elementare**  $\Rightarrow$  nessuna dinamica interna



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

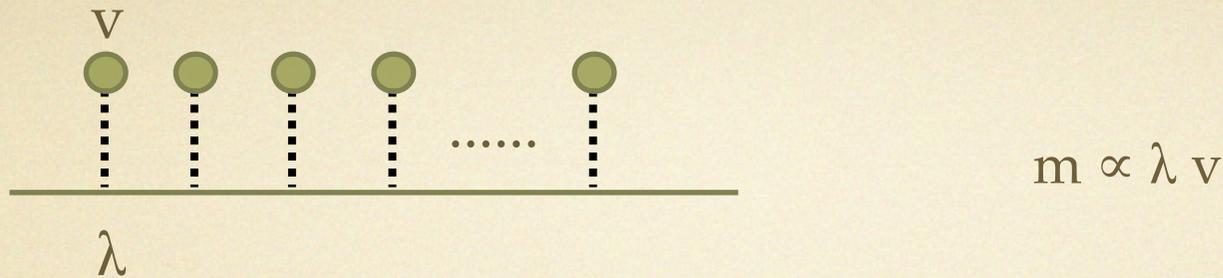
La luce che si propaga in un mezzo “rallenta” a causa delle continue interazioni col mezzo stesso



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 “ $\lambda$ ” è caratteristica della particella.

Grande  $\lambda$  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**

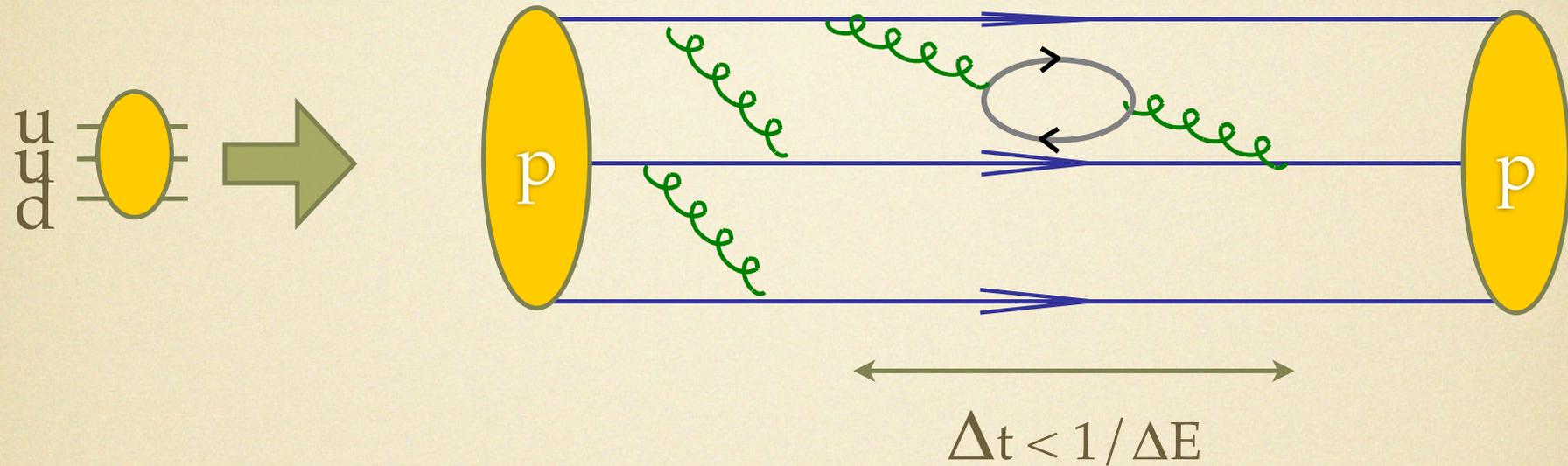
Come ogni altro mezzo continuo, il sottofondo del campo di Higgs può essere perturbato. Come succede quando colpiamo un tavolo con un martello, creando onde sonore, se riusciamo a scuotere il fondo di Higgs possiamo creare “onde di Higgs”. Queste “onde” si manifestano come “particelle”, il bosone di 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



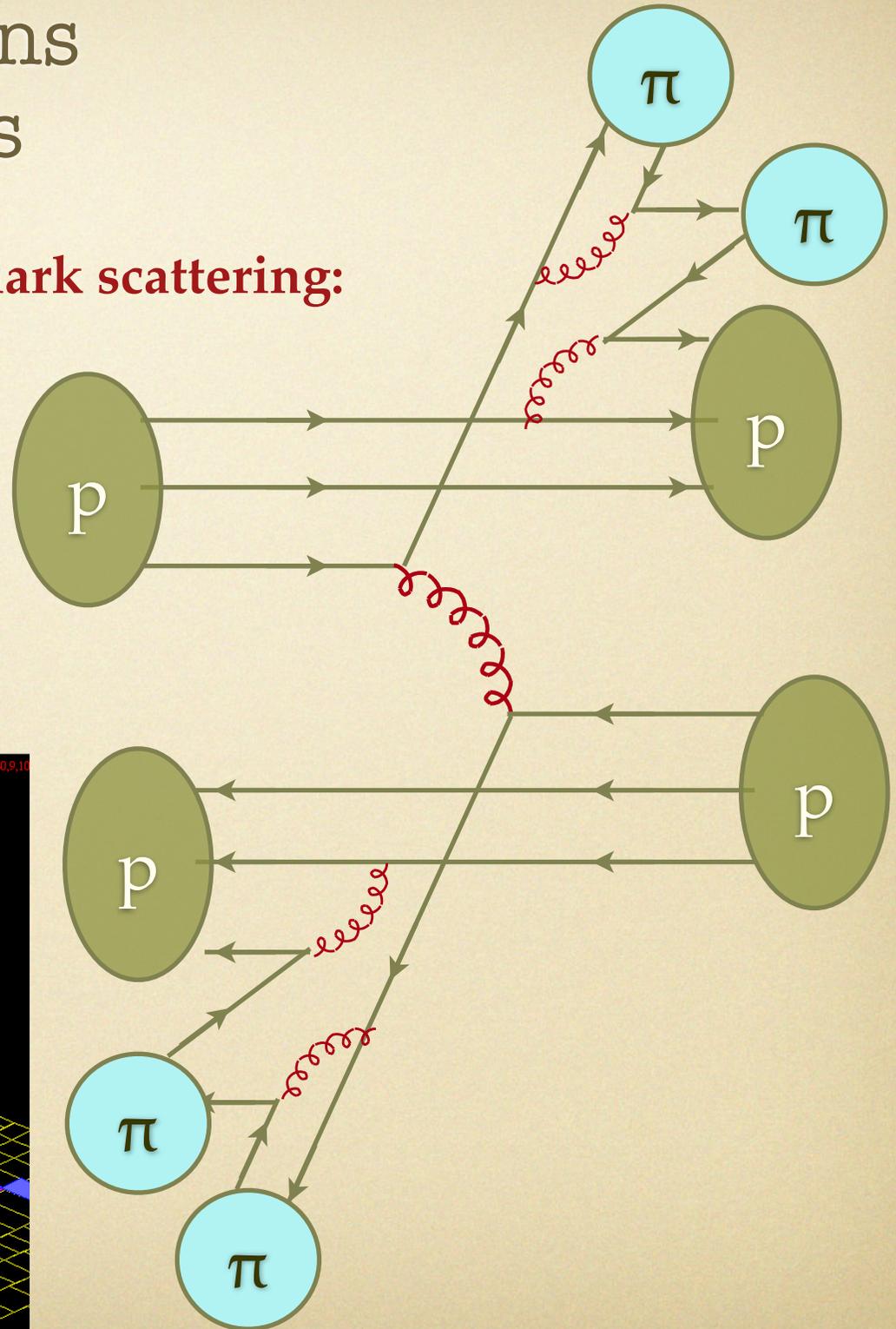
Entro il protone troviamo, oltre ai “quarks costituenti” **uud**, anche **gluoni** e coppie di **quark-antiquark** “virtuali”

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.

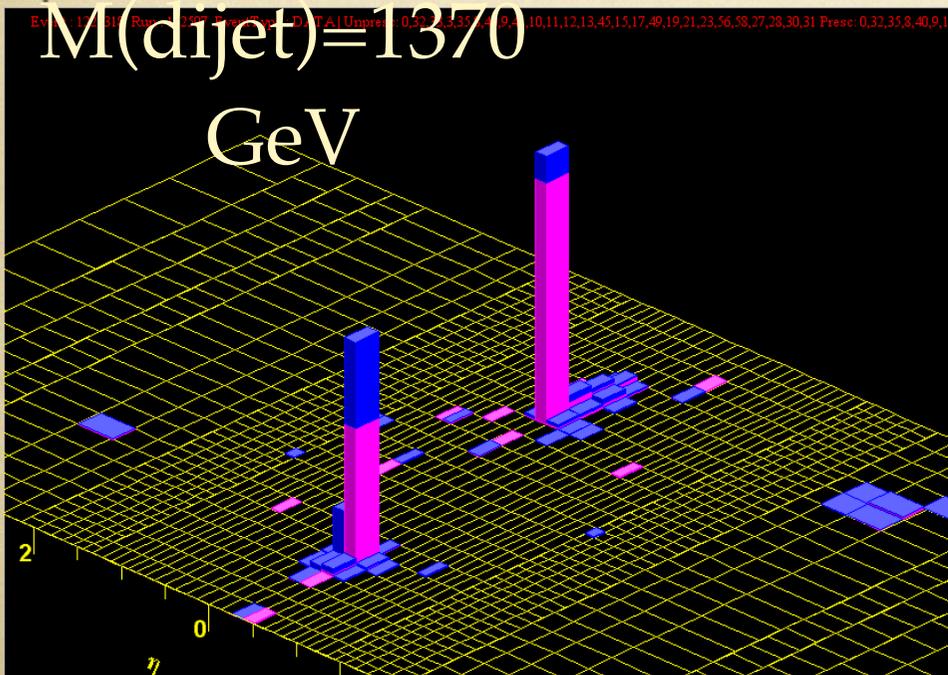
Si noti che, per  $\Delta t$  sufficientemente piccolo, possono apparire anche coppie quark-antiquark di generazioni piu’ pesanti (per es. **s-sbar**, **c-cbar**)!! Il protone puo’ contenere quarks piu’ pesanti di se stesso!!

# Examples of reactions in proton collisions

quark-quark scattering:

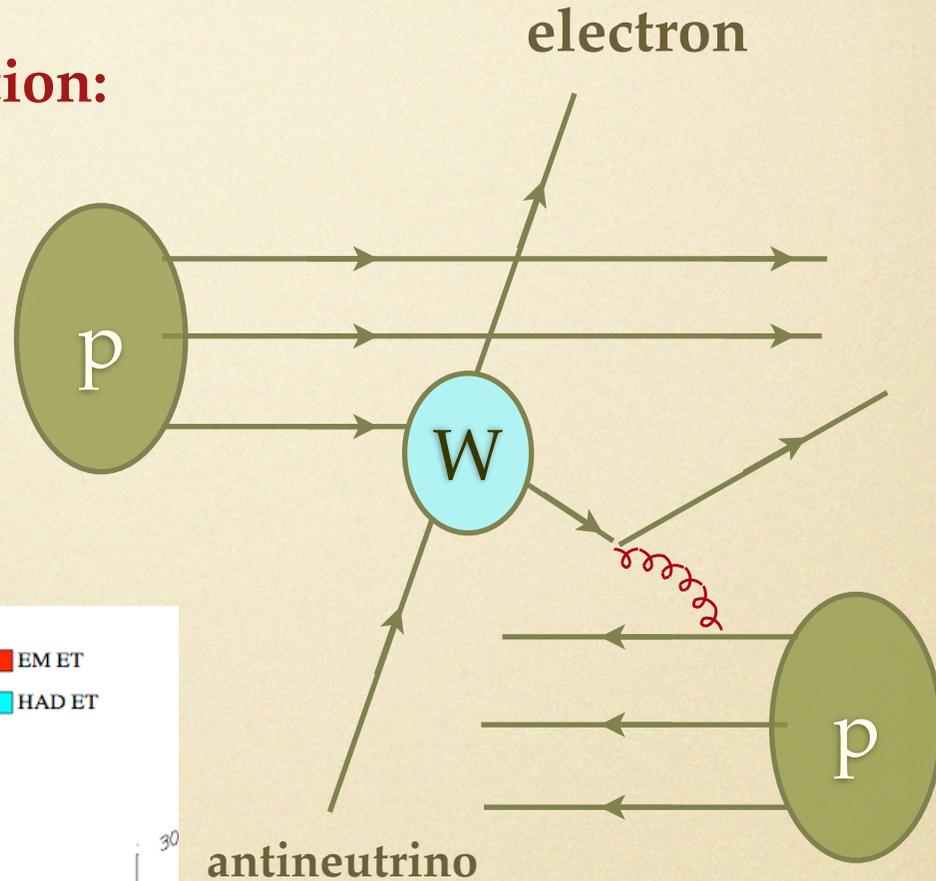


Real-life example from p-pbar collisions at the Tevatron, 1.96 TeV  
CM energy:

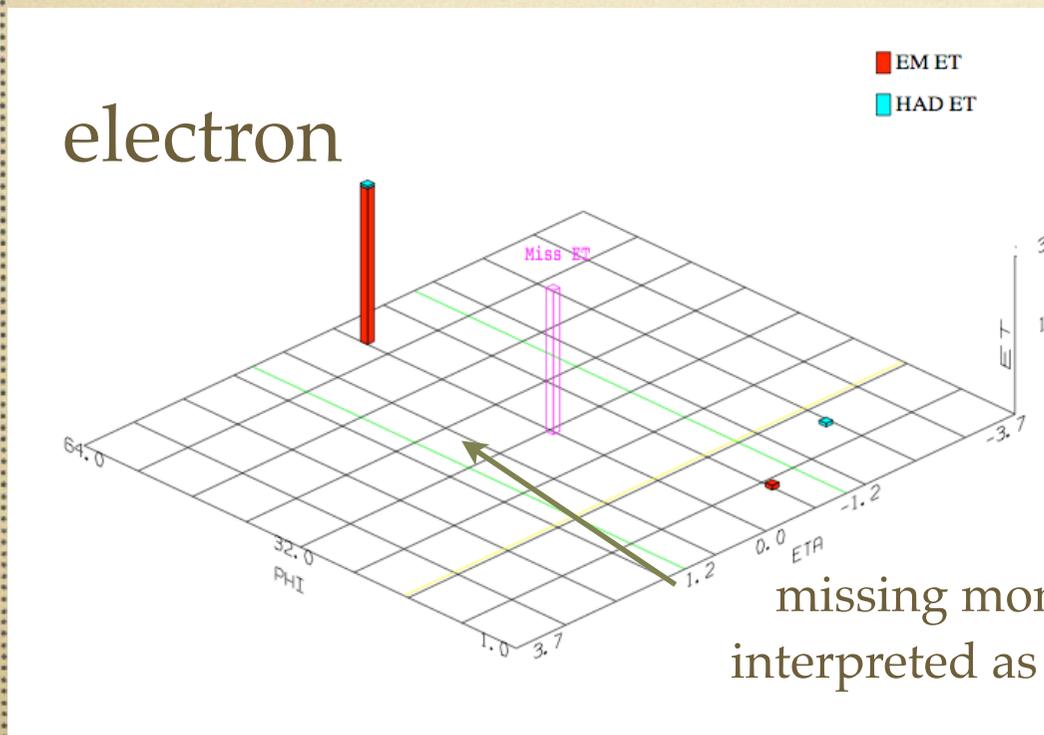


# Examples of reactions in proton collisions

**quark-antiquark annihilation:  
u dbar  $\rightarrow$  W**



A real-life event from the Tevatron:

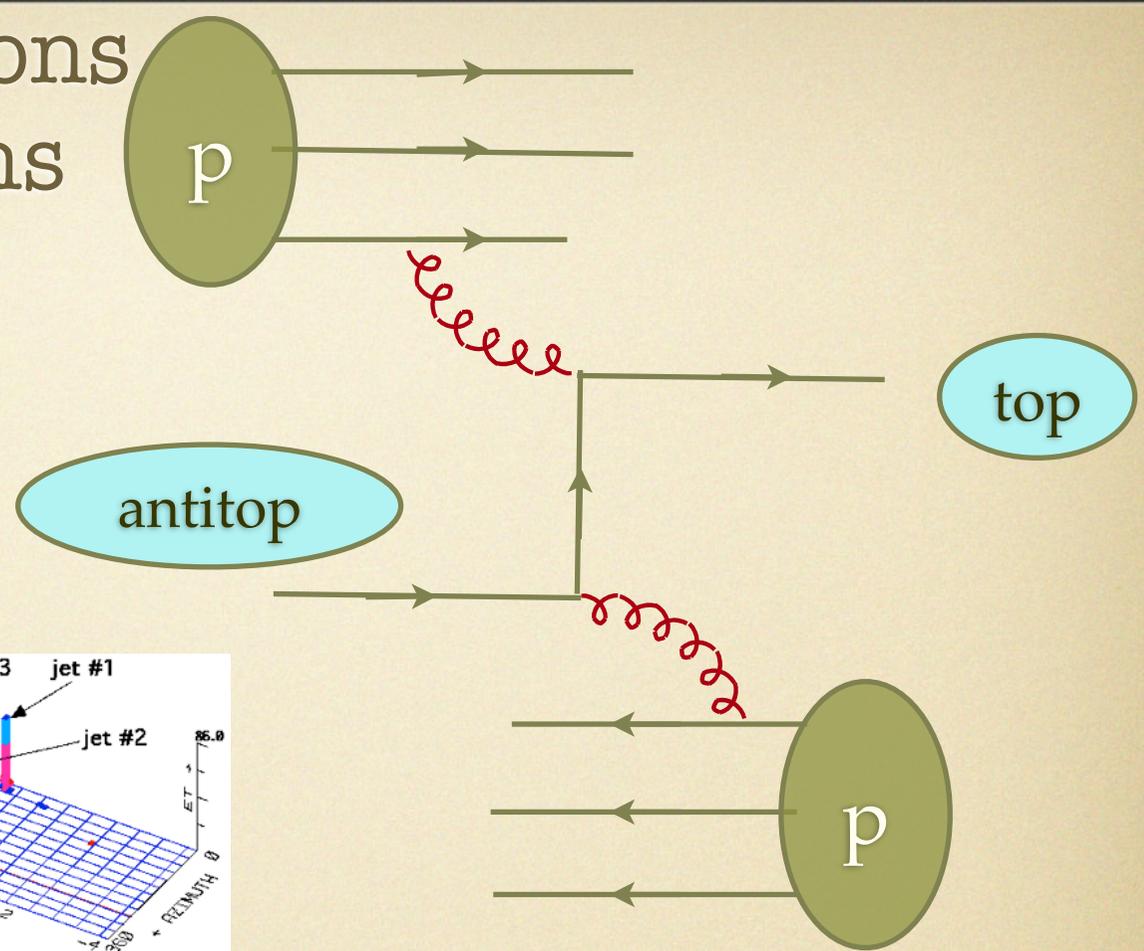


In principle the "force carrier" of new interactions could be created in the same way, provided their mass is not too large

# Examples of reactions in proton collisions

gluon-gluon reactions:

$gg \rightarrow \text{top antitop}$

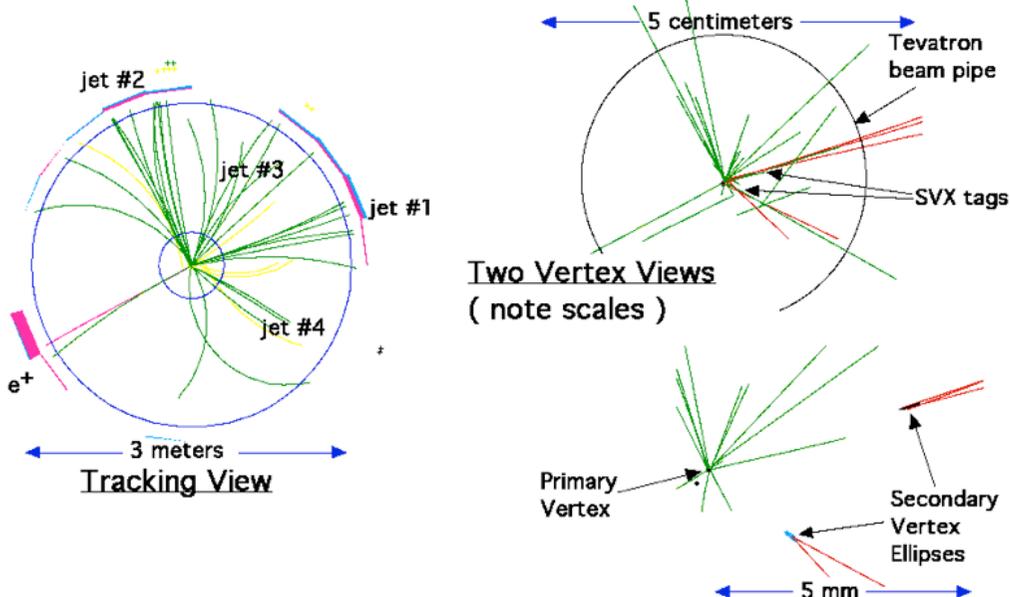
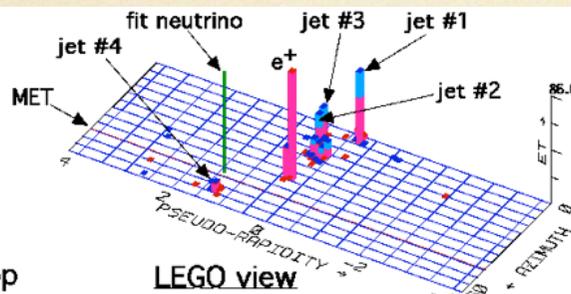


## $e + 4 \text{ jet event}$

40758\_44414  
24-September, 1992

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

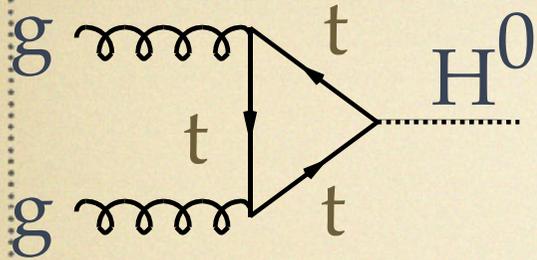
$e^+$ , Missing  $E_T$ , jet #4 from top  
jets 1,2,3 from top ( 2&3 from W )



# A top quark event from Fermilab



# Four main production mechanisms at the LHC:

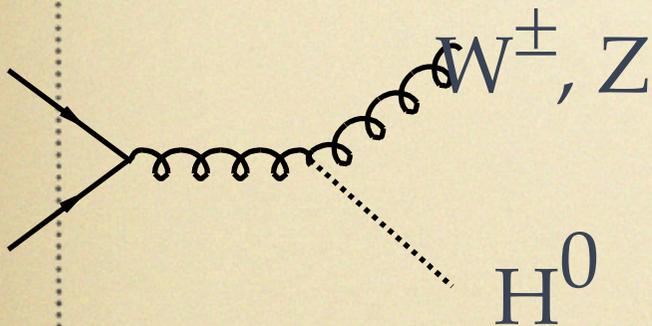
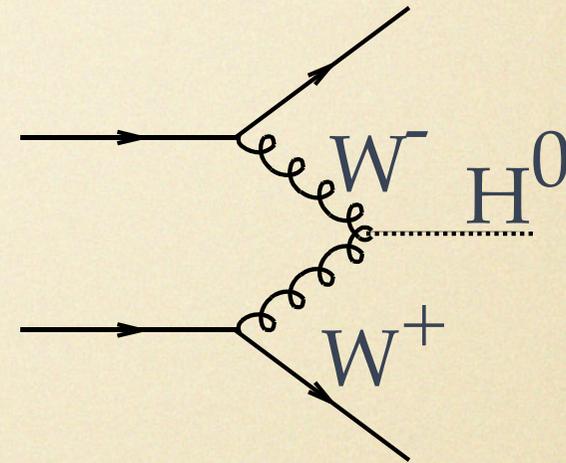


## Gluon-gluon fusion (NNLO):

- 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):

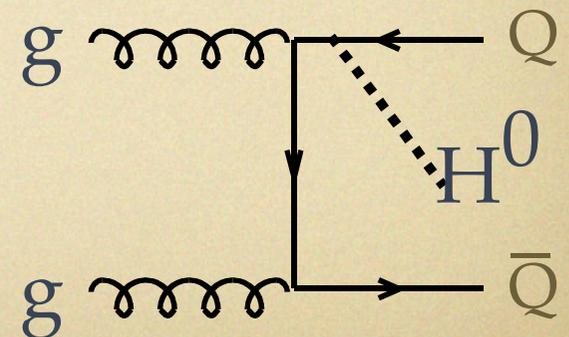
- Same couplings as in VB fusion
- Different partonic luminosity (uniquely  $q\bar{q}$  initial state)

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

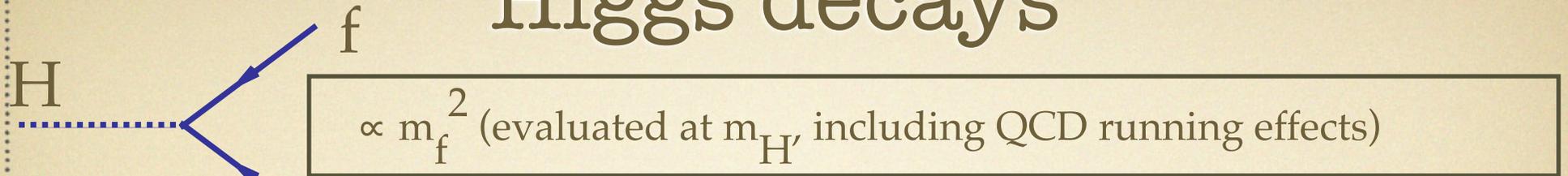
- Proportional to the heavy quark Yukawa coupling,  $y_Q$

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,  $\tan\beta^2$

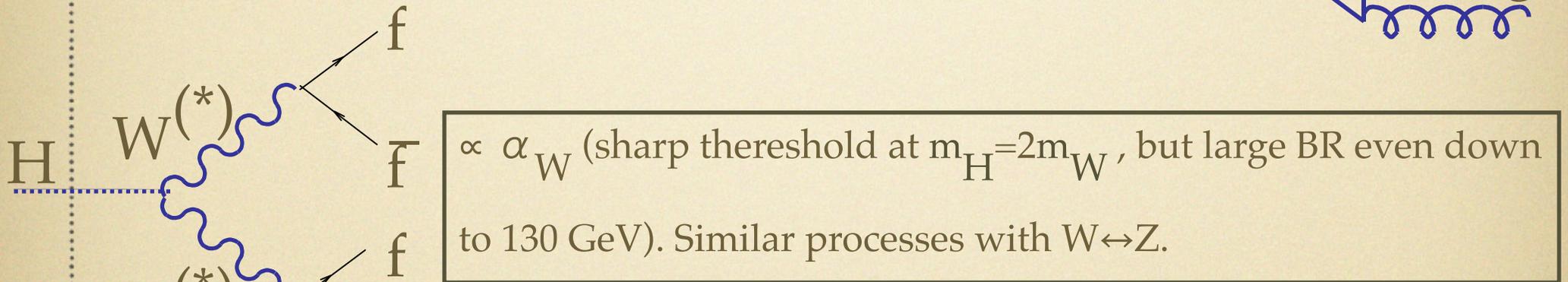
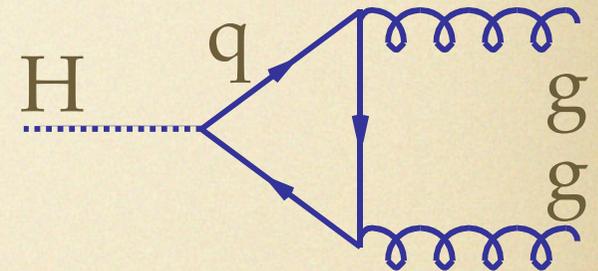
- Same partonic luminosity as in  $gg$ -fusion, except for different  $x$ -range



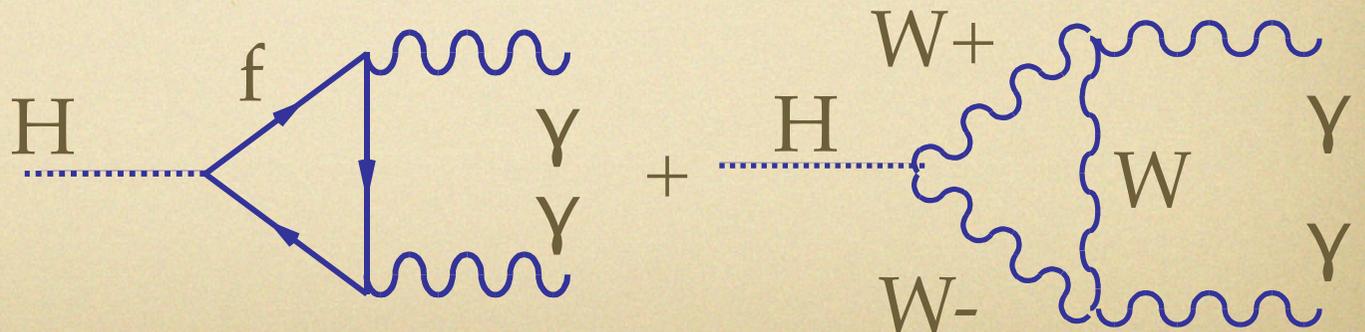
# Higgs decays



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

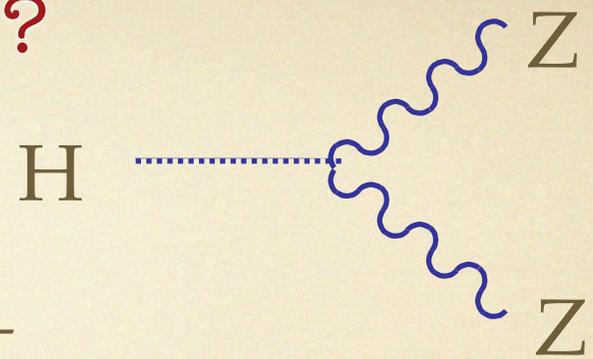


Dominated by the EW couplings, only minor contribution from top loop  
 $m \Rightarrow$  correlated to  $H \rightarrow WW$

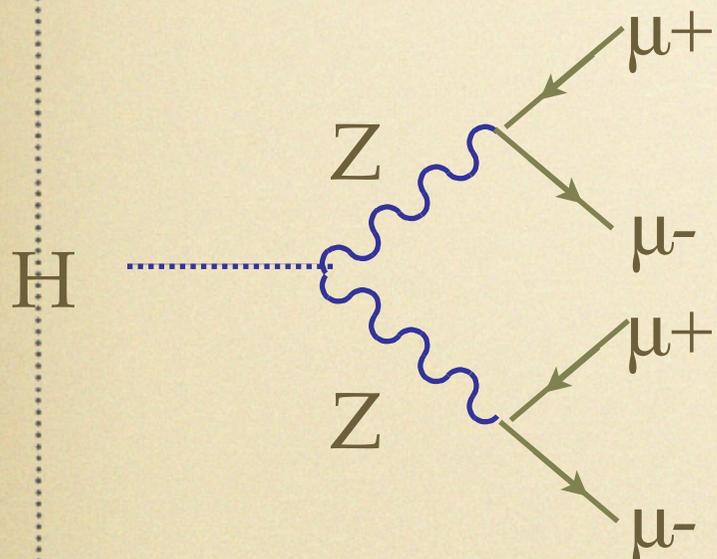


# How can we detect the Higgs?

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



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

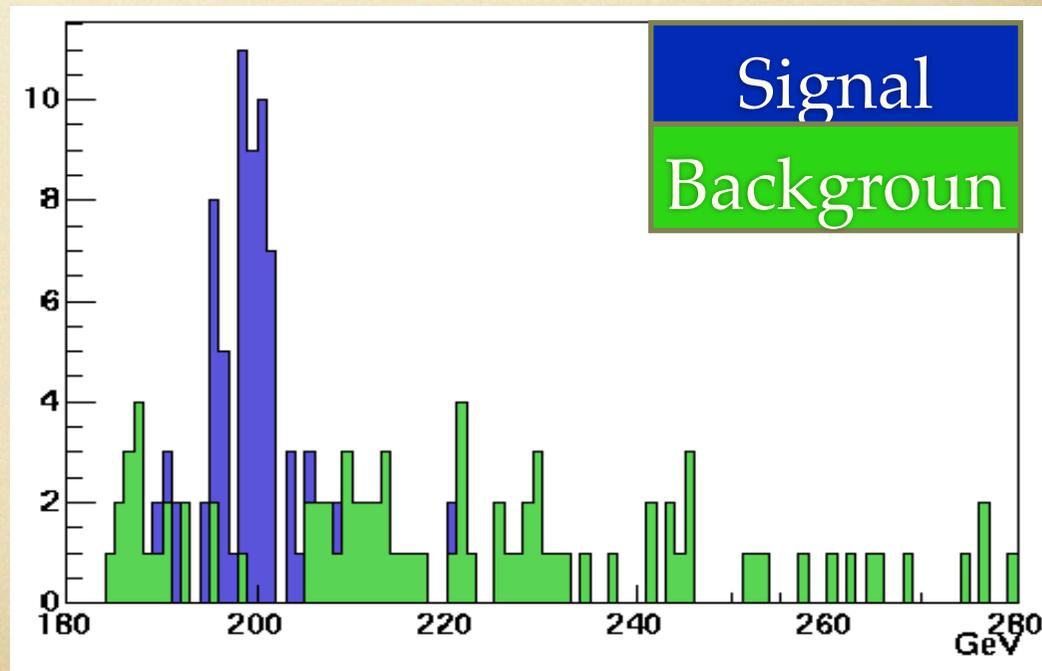


A computer simulation of how the signal will appear, for  $m_H = 200 \text{ GeV}$

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**