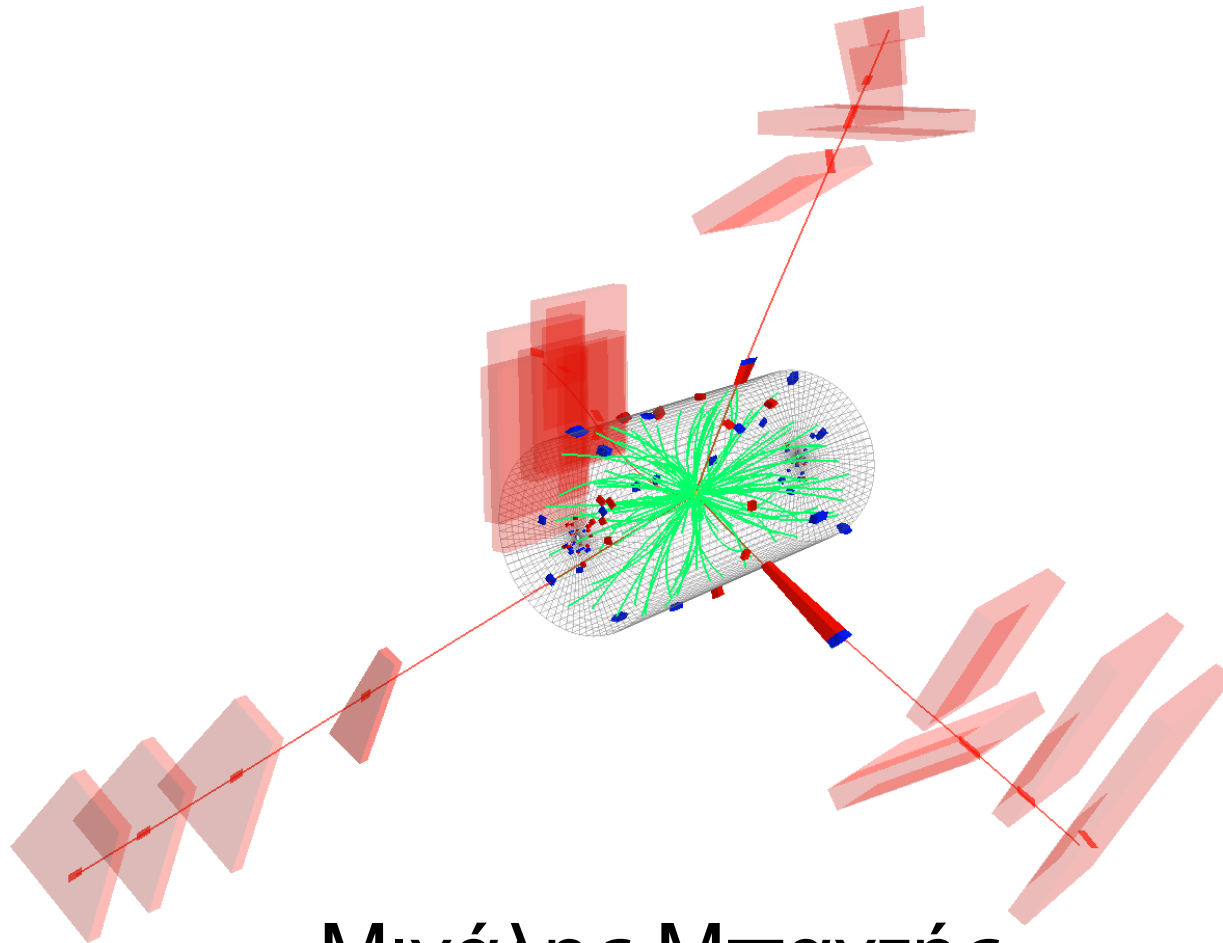


Ανακάλυψη του σωματιδίου του Higgs στο CERN



Μιχάλης Μπαχτής
CERN & University of California, Los Angeles

Ο κόσμος πριν από το Higgs

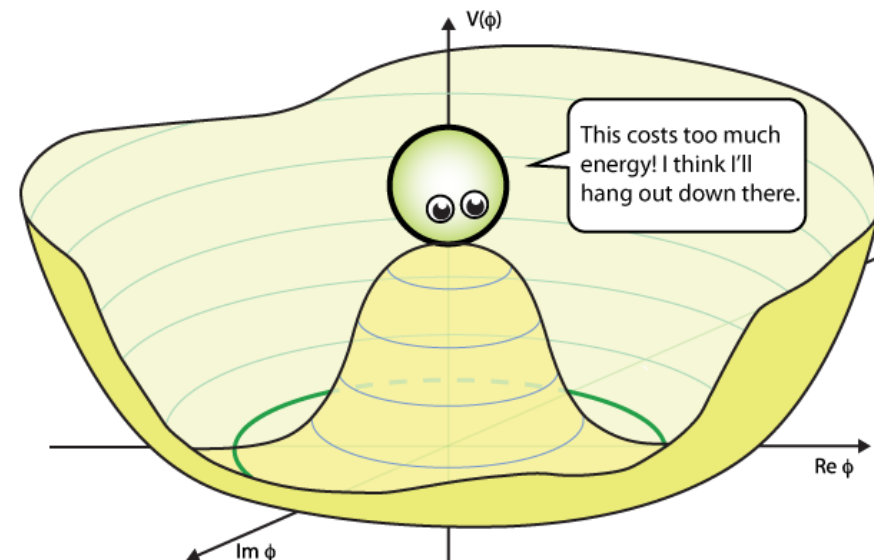
- Υλη: Τρεις γενιές σωματιδίων
 - 6 quarks
 - 6 λεπτόνια
 - 3 φορτισμένα (μ, e, τ)
 - 3 νετρίνα
- Φορείς αλληλεπιδράσεων
 - Φωτόνιο \rightarrow Η/Μ αλληλεπίδραση
 - Μηδενική μάζα
 - 8 γλουόνια \rightarrow Ισχυρή αλληλεπίδραση
 - Μηδενική μάζα
 - $W^\pm, Z \rightarrow$ Ασθενής αλληλεπίδραση
 - Πολύ μεγάλη μάζα. Γιατί?

	I	II	III	
mass \rightarrow	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge \rightarrow	2/3	2/3	2/3	0
spin \rightarrow	1/2	1/2	1/2	1
name \rightarrow	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Quarks				
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z^0 Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	± 1
	1/2	1/2	1/2	1
	e electron	μ muon	τ tau	W^\pm W boson
Leptons				Gauge Bosons

SU(3) \times SU(2)_L \times U(1) symmetries

Ο μηχανισμός Higgs

- Στην $SU(2) \times U(1)$ θεωρία
 - W, Z και φερμιόνια αμαζα
- Τα W, Z παίρνουν μάζα σπάζοντας την $SU(2) \times U(1)$ συμμετρία
 - Εισάγωντας ένα μιγαδικό βαθμωτό πεδίο (διπλέτα)
 - 3 βαθμοί ελευθερίας \rightarrow μάζα W^+, W^-, Z
 - 4ος βαθμός ελευθερίας \rightarrow σωματίδιο Higgs
- Η μάζα των φερμιονίων μπορεί να γραφτεί μαθηματικά μέσω αλληλεπιδράσεων με το Higgs
 - **Με το χερι! Οχι συνέπεια του σπασίματος της συμμετρίας!**



$$\mathcal{L} = |D_\mu \Phi|^2 - \mu^2 \Phi^2 - \lambda \Phi^4$$

$$\text{For } \mu^2 < 0, \text{ minimum } v = \sqrt{-\frac{\mu^2}{2\lambda}}$$

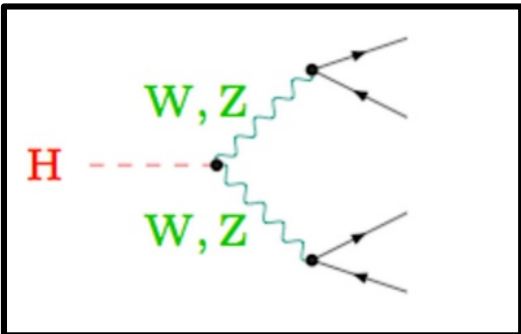
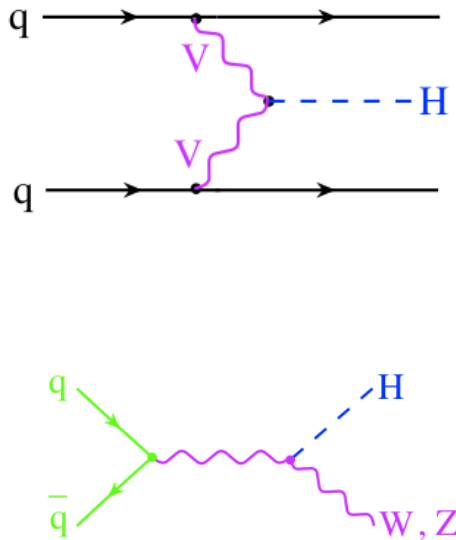
Μεταφέρωντας την Λαγκραντζιανή στο νέο ελάχιστο

$$M_W = \frac{gv}{2}, M_Z = \frac{M_W}{\cos\theta_W} \quad M_H = \sqrt{-2\mu^2}$$

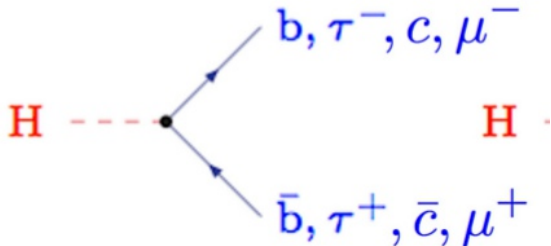
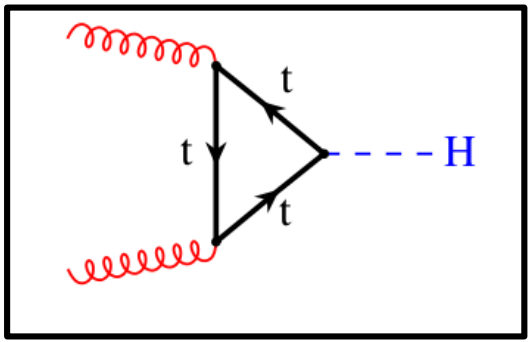
$$g^2 = \frac{8M_W^2 G_F}{\sqrt{2}}$$

Από τις Λαγκραντζιανές στο πείραμα

Αλληλεπιδράσεις με μποζόνια (Symmetry breaking)

$$\approx \frac{M_Z^2}{v} H Z_\mu Z^\mu$$



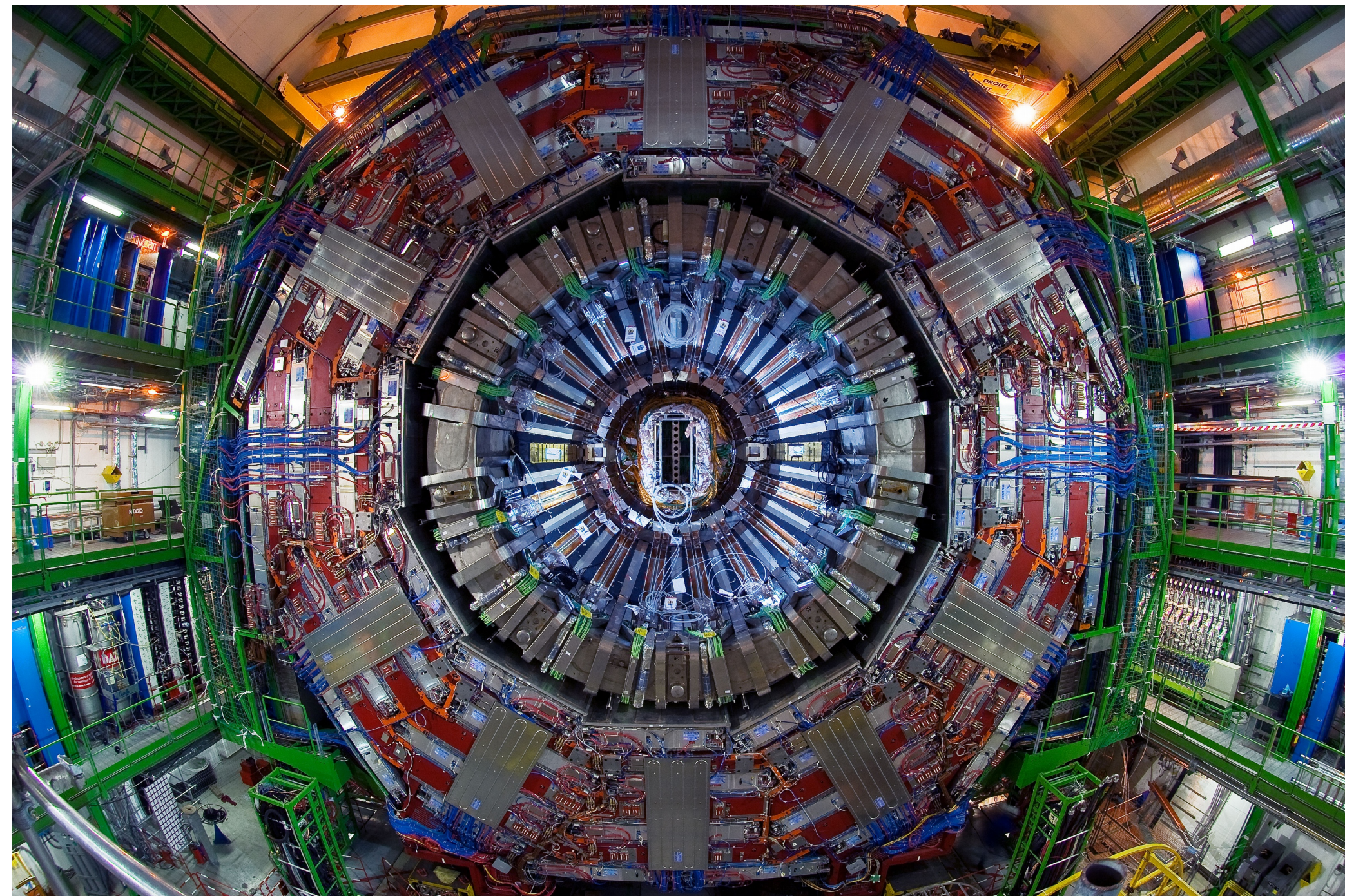
Αλληλεπιδράσεις με φερμιόνια (Yukawa)

$$\approx \frac{m_f}{v} H \bar{f} f$$



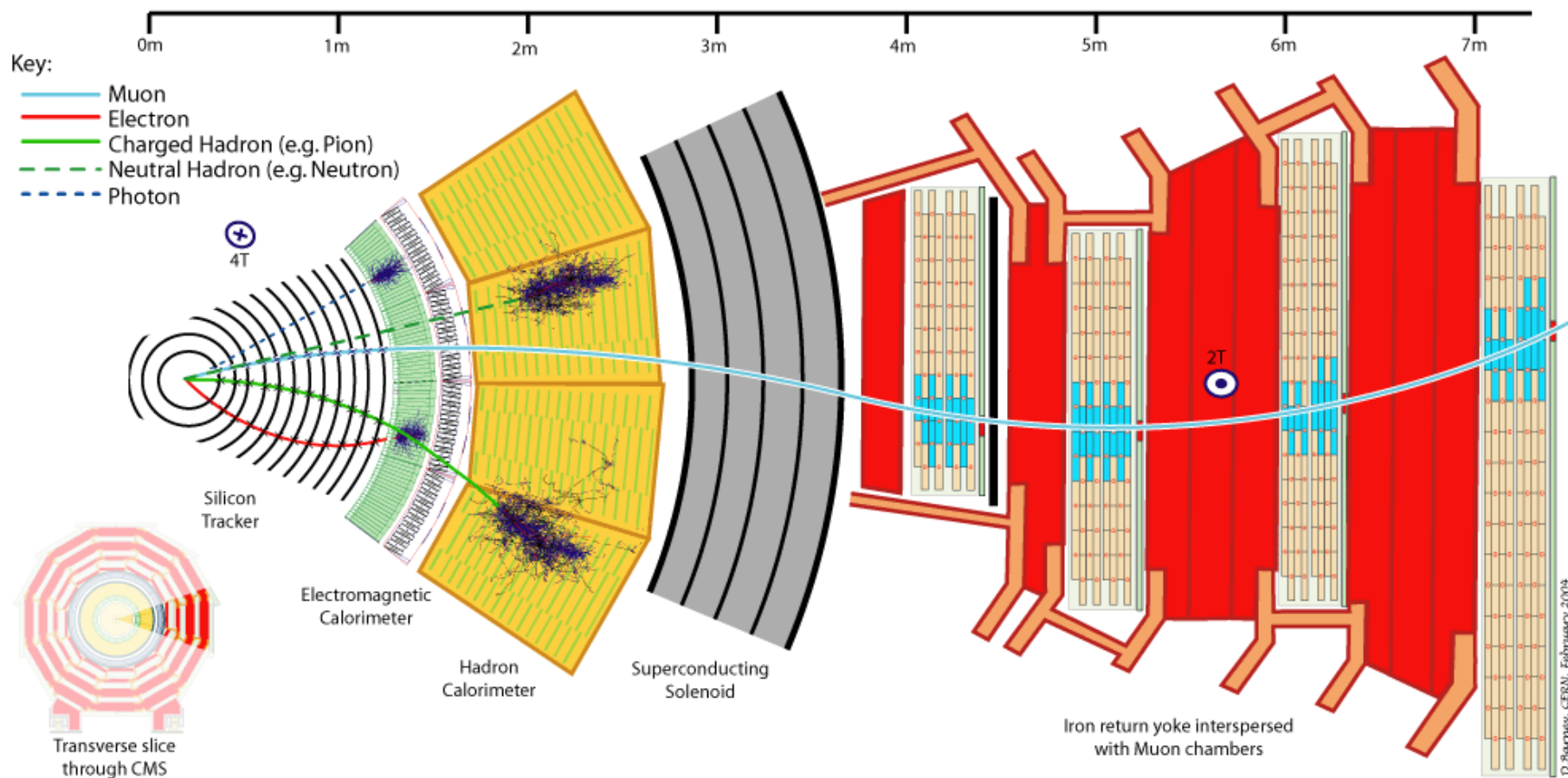
Διάσπαση Higgs σε 4 λεπτόνια

- Εξετάζουμε διασπάσεις του Higgs σε δυο Z μποζόνια που το καθε ενα διασπάται σε 2 ηλεκτρόνια η σε δύο μιονία
 - Πολύ καθαρό σημα ! Δεν υπάρχουν πολλές φυσικές διαδικασίες που να παράγουν αντίστοιχα γεγονότα
 - Αλλα περιμένουμε πολύ λίγα γεγονότα απο το Higgs
 - Περίπου 30 στο Run I
- Χρειαζόμαστε ανιχνευτή με απόδοση κοντά στο 100% για την ανίχνευση και αναγνώριση ηλεκτρονίων και μιονίων

Ο ανιχνευτής CMS



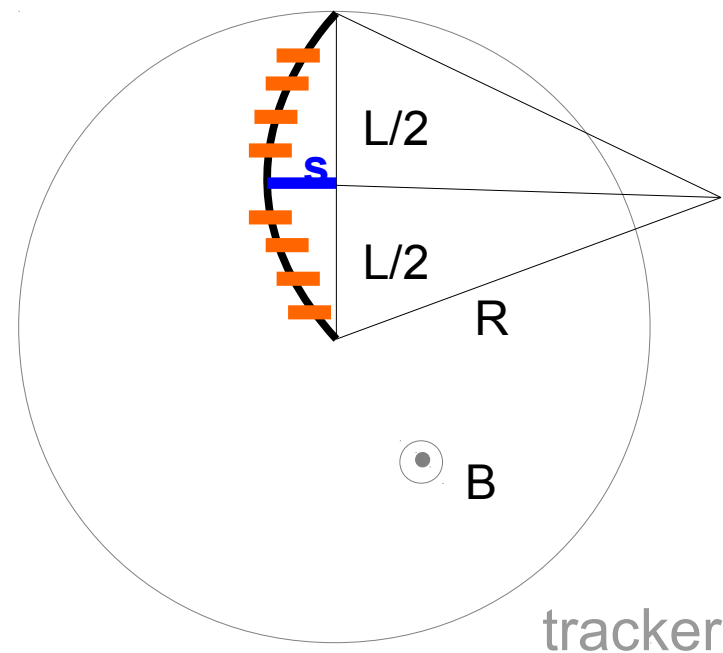
Αναγνώριση σωματιδίων στο CMS



- Φορτισμένα σωματίδια: Σήμα στους ανιχνευτές τροχιών
- Ηλεκτρόνια/Φωτόνια: Ενέργεια στο Η/Μ καλοριμετρο
- Αδρόνια : Ενέργεια στο αδρονικό καλορίμετρο

Ανίχνευση τροχιών

- Μέτρηση τροχιάς φορτισμένων σωματιδίων σε μαγνητικό πεδίο
- Ακρίβεια στη μετρηση ορμής:

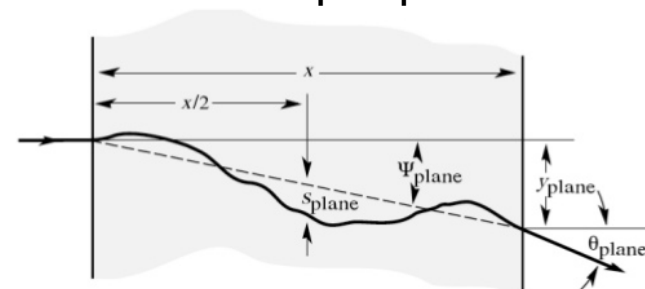


Διακριτική ικανότητα σημείου

$$\frac{\delta p_T}{p_T} = \frac{2\sigma p_T}{0.3BL^2\sqrt{N}}$$

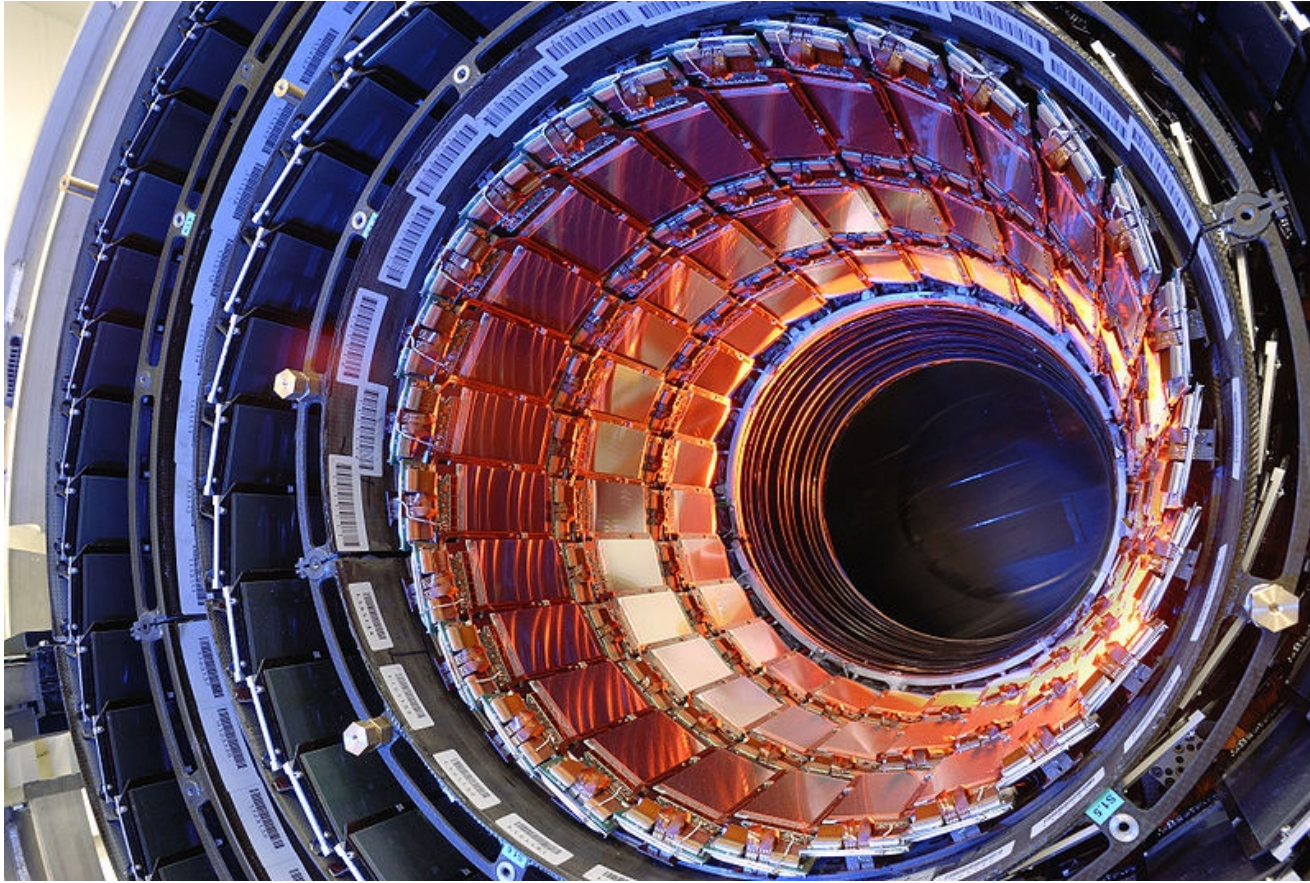
↑ Διακριτική ικανότητα σημείου
 ↓ Μαγνητικό πεδίο
 ↓ Μέγεθος ανιχνευτή
 ↓ Αριθμός σημείων

Σκέδαση Coulomb! Θέλουμε όσο το δυνατόν λιγότερο υλικό

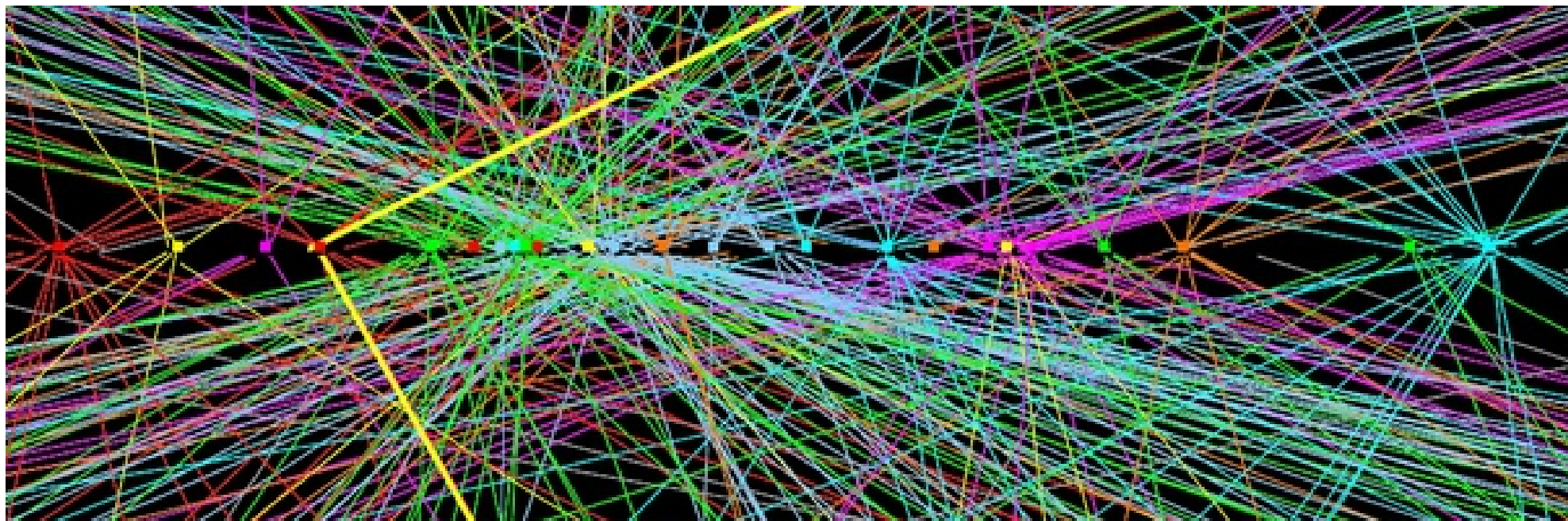


$$\frac{\delta p}{p} = \frac{1}{0.3BL} \frac{0.015 \text{ Mev}}{\beta} \sqrt{\frac{L}{X_{rad}}}$$

Ο ανιχνευτής τροχιών του CMS



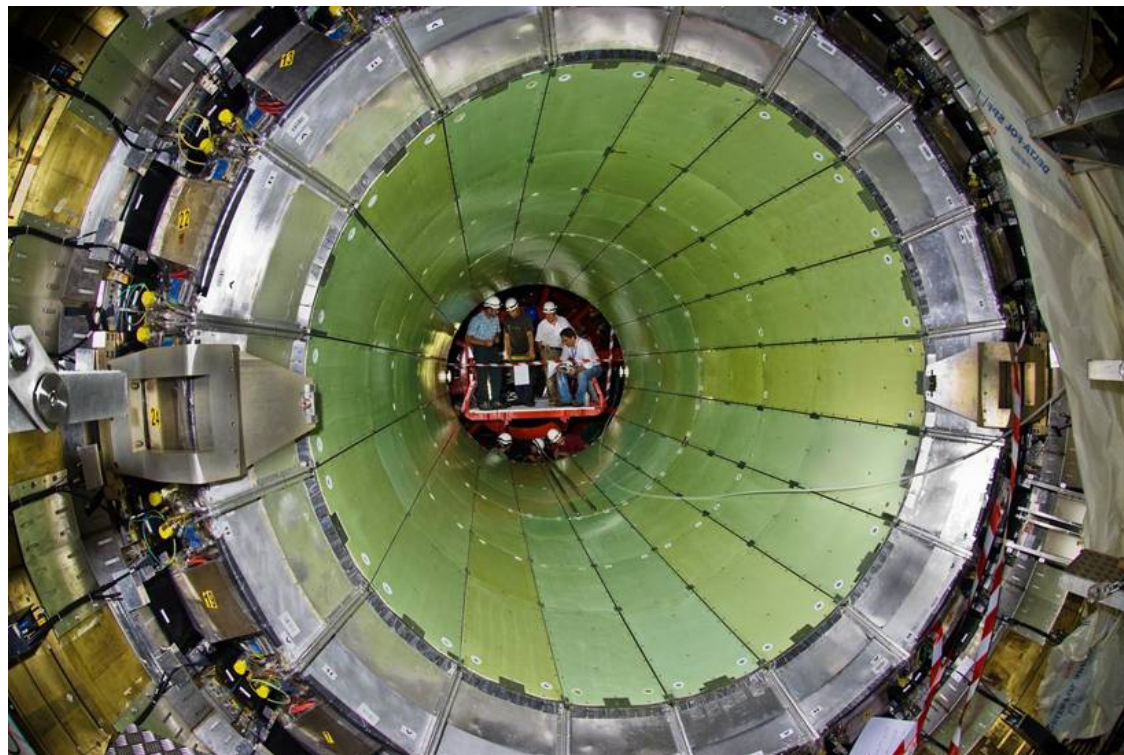
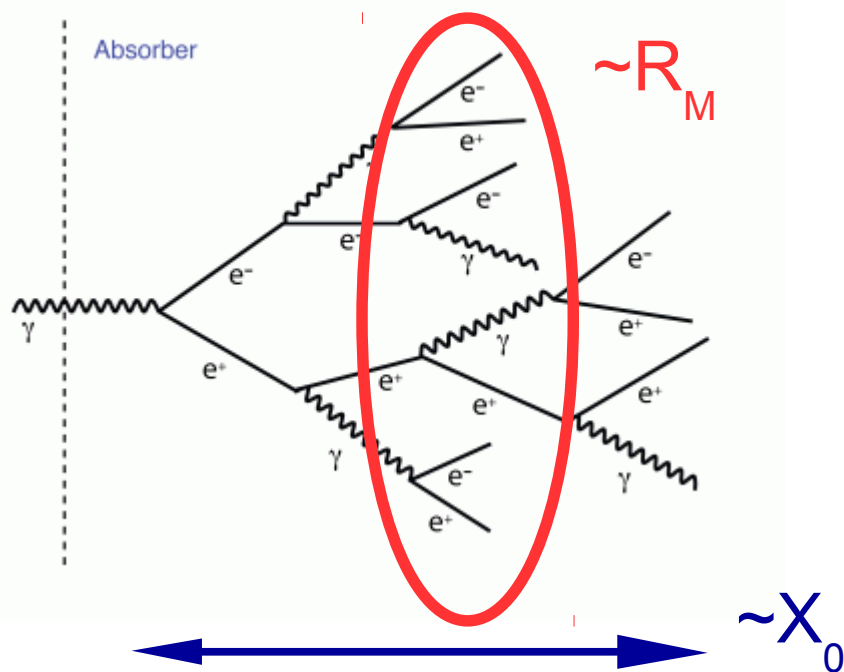
- Ο μεγαλύτερος ανιχνευτής πυριτίου που έχει κατασκευαστεί
 - 207 τμ πυριτίου!
- Διακριτική ικανότητα σημείου ($\sim \mu\text{m}$)



- Συνήθως πολλά ζευγη πρωτονίων συγκρούονται ταυτόχρονα
- Η διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή επιτρέπει να διαχωρίσουμε όλες τις επιμέρους συγκρούσεις
- Χρήση προχωρημένων αλγορίθμων αναγνώρισης προτύπων, μέθοδοι Runge Kutta, Kalman filters

Ηλεκτρομαγνητικό Καλορίμετρο

- Ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις
 - Μήκος ακτινοβολίας(X_0)
 - Ακτίνα Moliere(R_M)



- 76000 κρύσταλλοι lead tungstate ($PbWO_4$)

- $X_0=8.9mm$, $R_M=22mm$

Ακρίβεια στη μέτρηση της ενέργειας

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)^2 = \left(\frac{2.8\%}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{0.12}{E}\right)^2 + (0.30\%)^2$$

Στοχαστικός Όρος

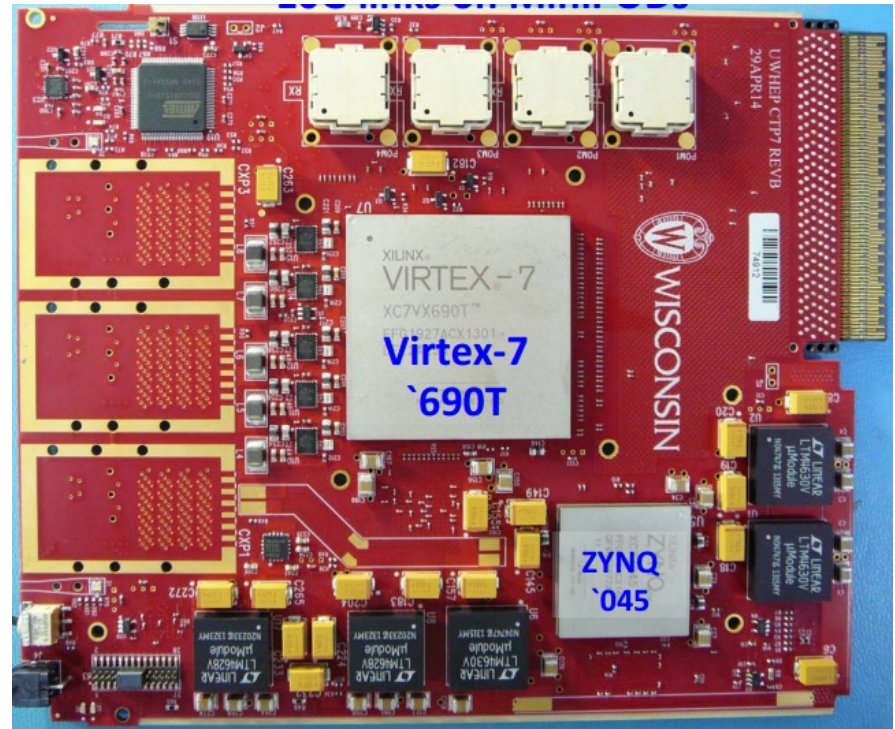
Θόρυβος

Σταθερός Όρος

- Μέτρηση του αριθμού των τελικών φωτονίων με φωτοανιχνευτές

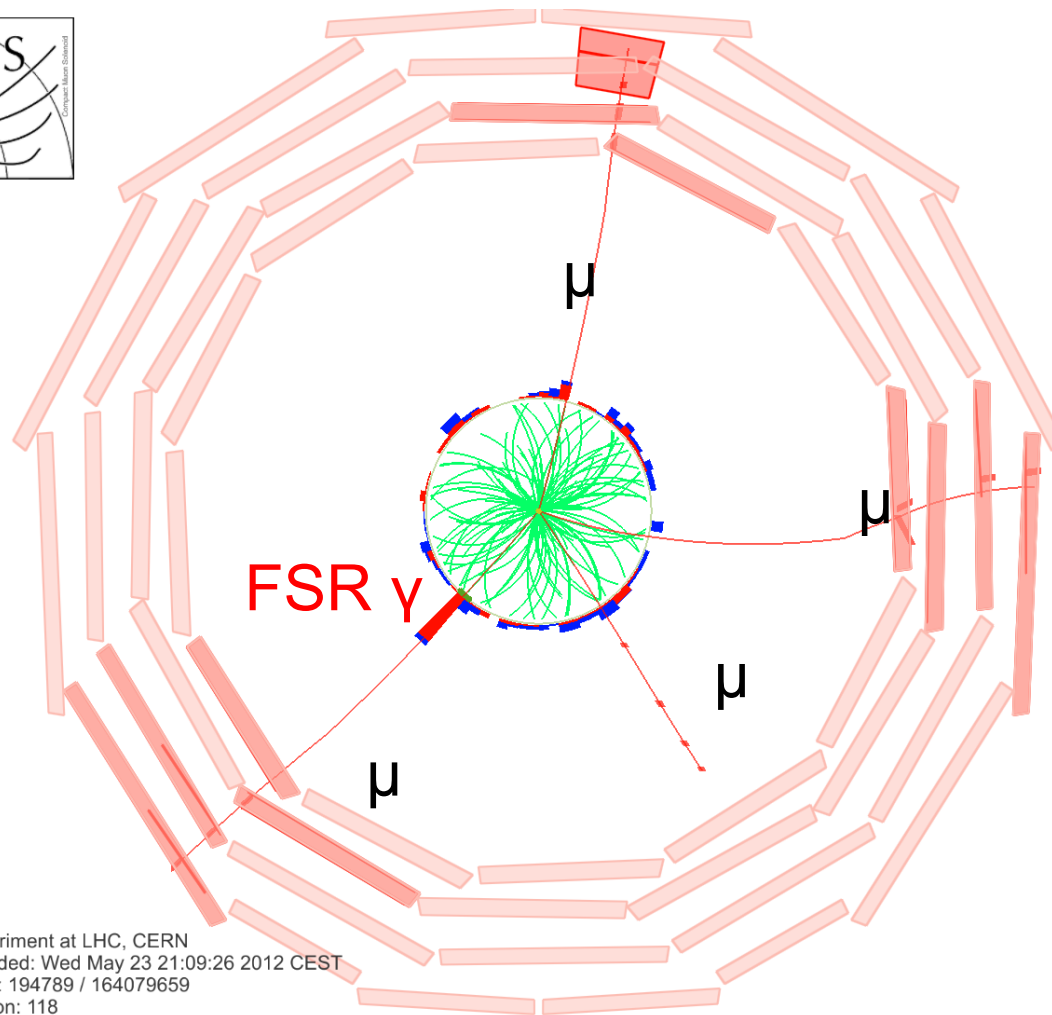
Trigger & Computing

- Συγκρουσεις κάθε 25ns
 - Μέγεθος γεγονότος ~ 1.5 MB
 - Αδύνατον να αποθηκεύσουμε τα πάντα
 - Συστήμα επιλογής ενδιαφέροντων συγκρουσεων σε πραγματικο χρόνο με ηλεκτρονικά υψηλής ταχύτητας (FPGA)
 - Αποθήκευση 300 συγκρούσεων /sec
 - 500MB/sec!



- Computing model
 - Κοινό λογισμικό σε C++/python
 - ~30K classes
 - [github/cmssw](https://github.com/cmssw)

Higgs σε 4 λεπτόνια



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Wed May 23 21:09:26 2012 CEST
Run/Event: 194789 / 164079659
Lumi section: 118

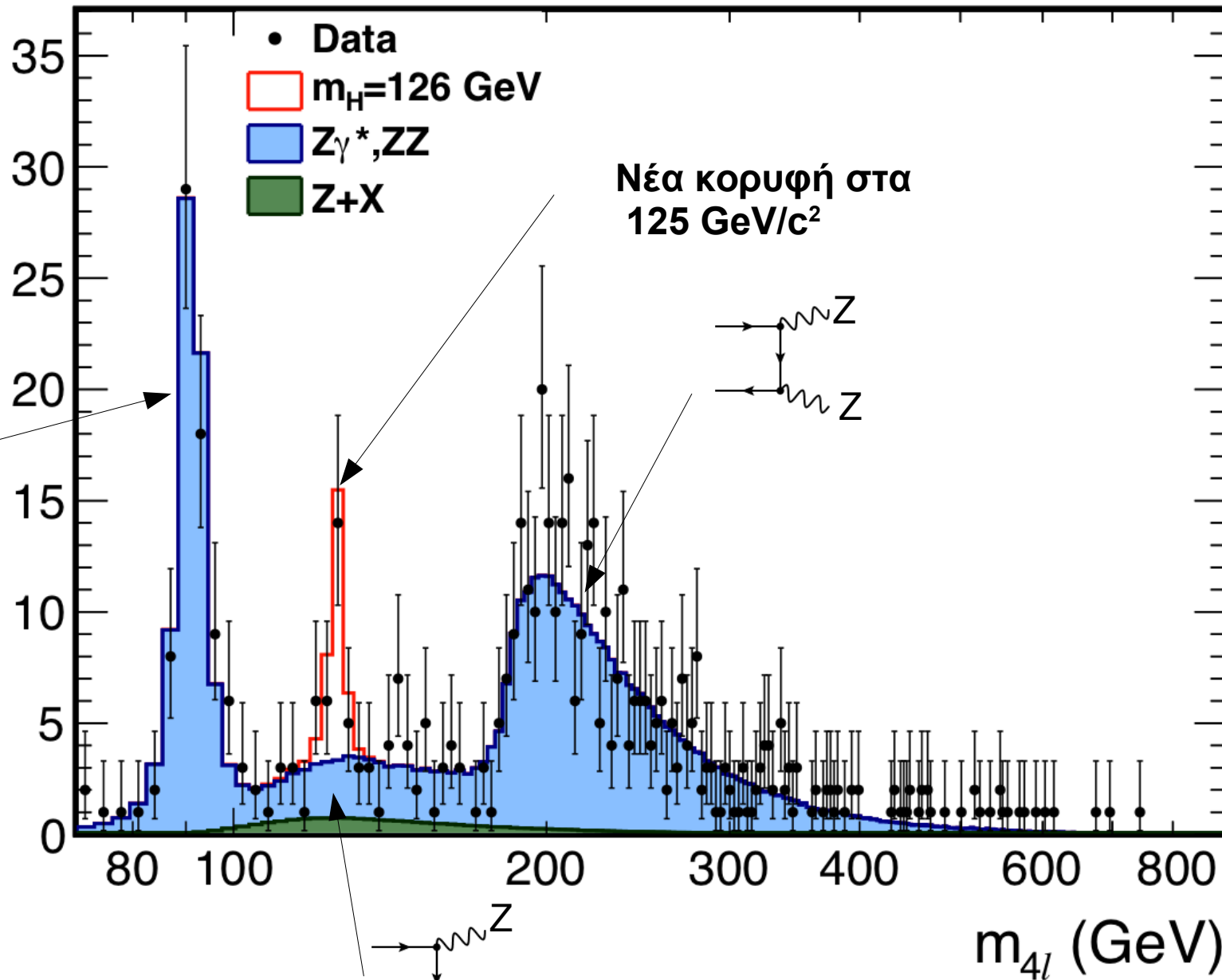
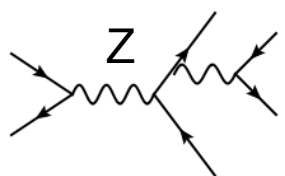
- Επιλογή συγκρούσεων με 4 λεπτόνια
- Υπολογισμός της αναλοίωνης μάζας του συστήματος

Αναλλοίωτη μάζα

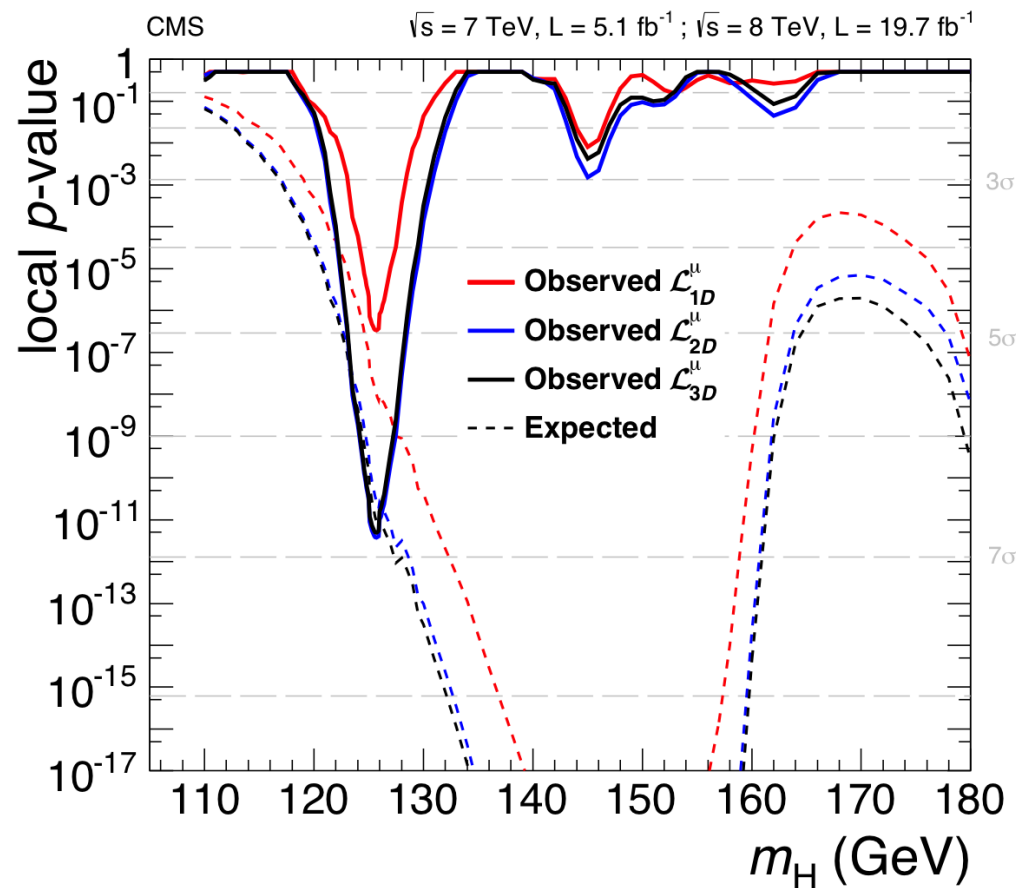
CMS

$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, L = 5.1 \text{ fb}^{-1}$; $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, L = 19.7 \text{ fb}^{-1}$

Events / 3 GeV



Σημαντικότητα της κορυφής



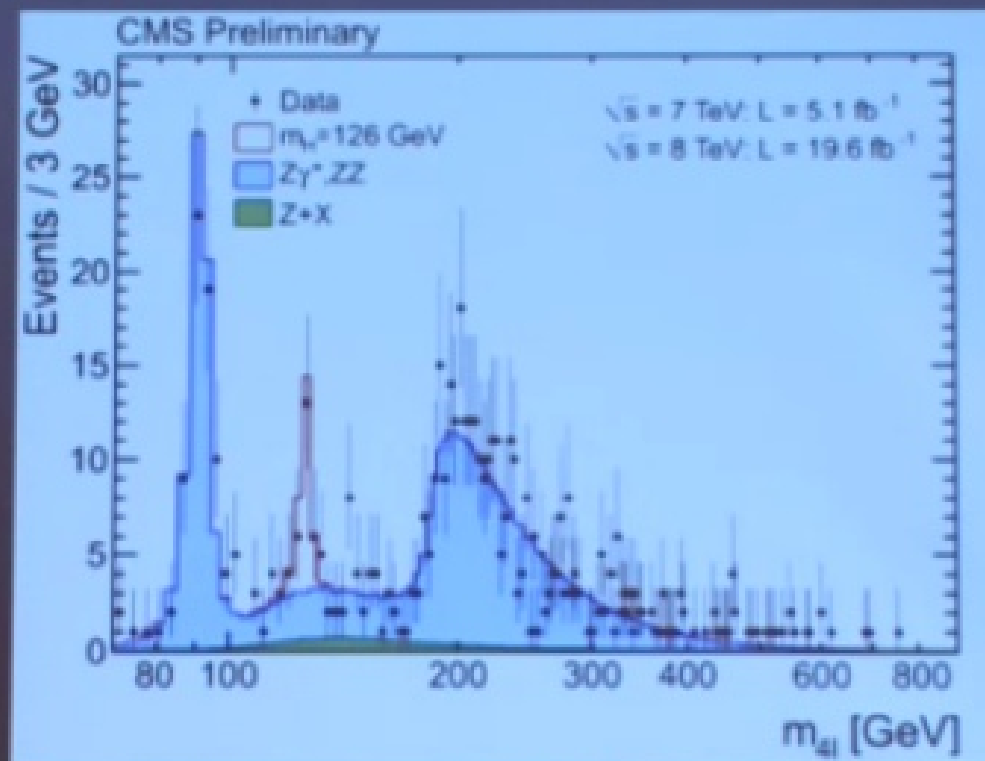
- Ορίζουμε τη πιθανότητα το υπόβαθρο να περιγράψει τα δεδομένα για κάθε υποτιθέμενη τιμή της μάζας του Higgs
- Γυρω στα 125 GeV, αυτή η πιθανότητα είναι 10^{-11}



Nobelpriset 2013

The Nobel Prize 2013

The Nobel Prize in Physics 2013



Evolution of the signal
for the new particle in
2011 and 2012

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/Hig13002TWiki>

- Το σωματιδίο Higgs ήταν μια μεγάλη ανακάλυψη στη φυσική υψηλών ενεργειών
 - Θρίαμβος της κβαντικής θεωρίας πεδίου
- Απο τη πειραματική σκοπιά ήταν απλώς ένα ζέσταμα
 - Το LHC ξεκίνησε πάλι και θα τρεξει για άλλα 15 χρόνια στη μεγαλύτερη ενεργεια που είχαμε ποτέ
 - Σκοπός είναι να ανακαλύψουμε καινούρια φυσική πέρα απο τη καθιερωμένη θεωρία