

# Η ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ

## ΣΤΟ ΑΡΧΕΓΟΝΟ ΣΥΜΠΑΝ

*I. Ηλιόπουλος*

*ENS-Paris*

*Χανιά*

*Αύγουστος 2017*

Τι μας διδάσκει η ανακάλυψη  
ενός καινούργιου σωματιδίου στο CERN  
για την Ιστορία του Κόσμου

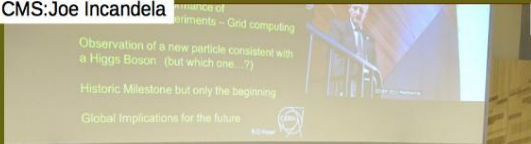


CMS: Joe Incandela

# Journée historique : 4 Juillet 2012



ATLAS: Fabiola Gianotti



Englert,  
Higgs





Presse écrite après l'annonce  
de la découverte du boson de  
Higgs au séminaire du 4  
juillet 2012 au CERN

- ▶ Ξέρουμε ήδη έναν μεγάλο αριθμό από “Στοιχειώδη” Σωματίια.

- ▶ Ξέρουμε ήδη έναν μεγάλο αριθμό από “Στοιχειώδη” Σωματίια.
- ▶ Γιατί όλη αυτή η φασαρία γι’ αυτό το τελευταίο;

- ▶ Ξέρουμε ήδη έναν μεγάλο αριθμό από “Στοιχειώδη” Σωματίια.
- ▶ Γιατί όλη αυτή η φασαρία γι’ αυτό το τελευταίο;
- ▶ Στην ομιλία αυτή θα προσπαθήσω να σας πείσω πως δεν πρόκειται απλώς για ένα καινούργιο σωματίιο, αλλά για το ίχνος ενός από τα πιο περίεργα φαινόμενα που συνέβησαν στο αρχέγονο Σύμπαν.

- ▶ Ξέρουμε ήδη έναν μεγάλο αριθμό από “Στοιχειώδη” Σωματίια.
- ▶ **Γιατί όλη αυτή η φασαρία γι’ αυτό το τελευταίο;**
- ▶ Στην ομιλία αυτή θα προσπαθήσω να σας πείσω πως δεν πρόκειται απλώς για ένα καινούργιο σωματίιο, αλλά για το ίχνος ενός από τα πιο περίεργα φαινόμενα που συνέβησαν στο αρχέγονο Σύμπαν.
- ▶ **Προσοχή!** Τα φαινόμενα του μικρόκοσμου εξηγούνται μόνο με την κβαντική φυσική. Όλα τα κλασικά παραδείγματα είναι κατ’ ανάγκην παραπλανητικά.



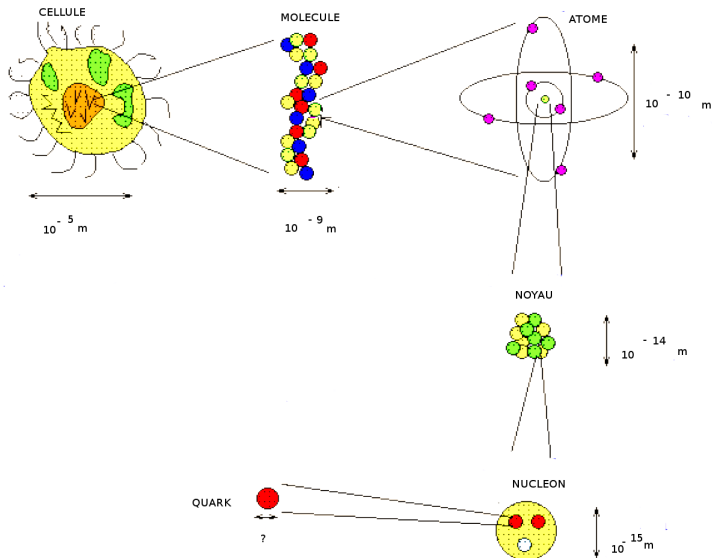
## Μία απροσδόκητη σύνδεση

- ▶ Η δομή της ύλης  $\Rightarrow$  Το απειροστά μικρό  
Οπως το βλέπουμε στο *μικροσκόπιο*

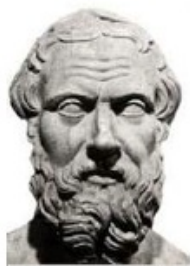
# Μία απροσδόκητη σύνδεση

- ▶ Η δομή της ύλης  $\Rightarrow$  Το απειροστά μικρό  
*Όπως το βλέπουμε στο **μικροσκόπιο***
  
- ▶ Η δομή του Σύμπαντος  $\Rightarrow$  Το απείρως μεγάλο  
*Όπως το βλέπουμε στο **τηλεσκόπιο***

# Η δομή της ύλης



## Οι “Πατέρες” της δομής της ύλης



- Δημόκριτος (460-370 π.Χ.): *Νόμω γαρ χροινή, νόμω γλυκύ, νόμω πικρόν, ετεή δ' άτομα και κενόν*
- Ernest Rutherford, 1st Baron Nelson (1871-1937) Βραβείο Nobel 1908: *Η πρώτη ατομική δομή*
- Murray Gell-Mann (1929-) Βραβείο Nobel 1969: *Τα κουάρκς*

## ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

Γυμνός οφθαλμός	$10^{-4} - 10^{-5}$ m
Οπτικά μικροσκόπια	$10^{-7}$ m
Ηλεκτρονικά μικροσκόπια	$10^{-10}$ m
Ακτίνες Χ	$10^{-11}$ m
Ακτίνες α	$10^{-13}$ m
Επιταχυντές ~ 100 MeV	$10^{-14} - 10^{-15}$ m
Επιταχυντές ~ 10 GeV	$10^{-16} - 10^{-17}$ m
L.E.P., Tevatron	$10^{-18}$ m
LHC	$10^{-19}$ m

# Γιατί χρειαζόμαστε επιταχυντές

Ξέρουμε πως για να «δούμε» κάτι πρέπει να το φωτίσουμε.

Η διακριτική ικανότητα της συσκευής εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιούμε, επομένως αυξάνει με την ενέργεια.

Κατά συνέπεια, για να μελετήσουμε τη δομή της ύλης σε όλο και μικρότερες αποστάσεις χρειαζόμαστε όλο και υψηλότερες ενέργειες.

Στην πράξη δεν μπορούμε να επιταχύνουμε ηλεκτρικά ουδέτερα σωμάτια, όπως τα φωτόνια. Έτσι καταφεύγουμε σε φορτισμένα, ηλεκτρόνια ή πρωτόνια, (ή, ακόμα, ατομικούς πυρήνες).

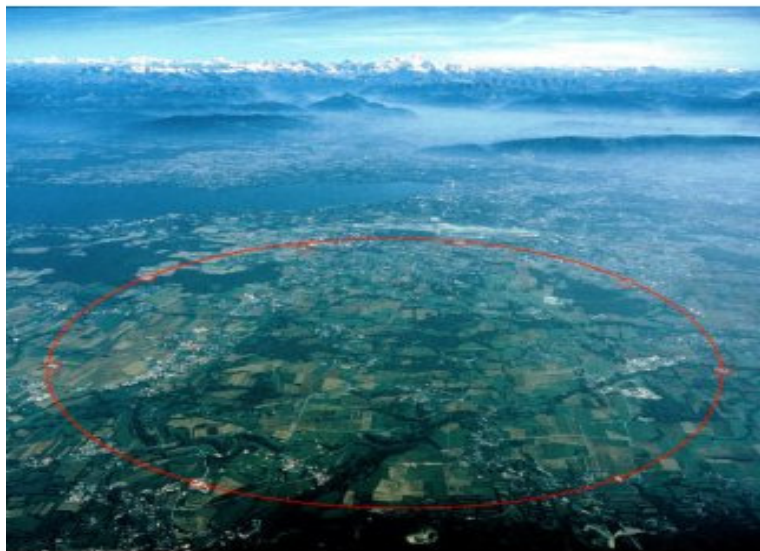
Εδώ και 100 χρόνια επαναλαμβάνουμε το βασικό πείραμα του Rutherford (1911)

Το L.H.C. είναι το ισχυρότερο μικροσκόπιο που κατασκεύασε ποτέ ο άνθρωπος.

Η διακριτική του ικανότητα ξεπερνάει τα  $10^{-19}$  του μέτρου.

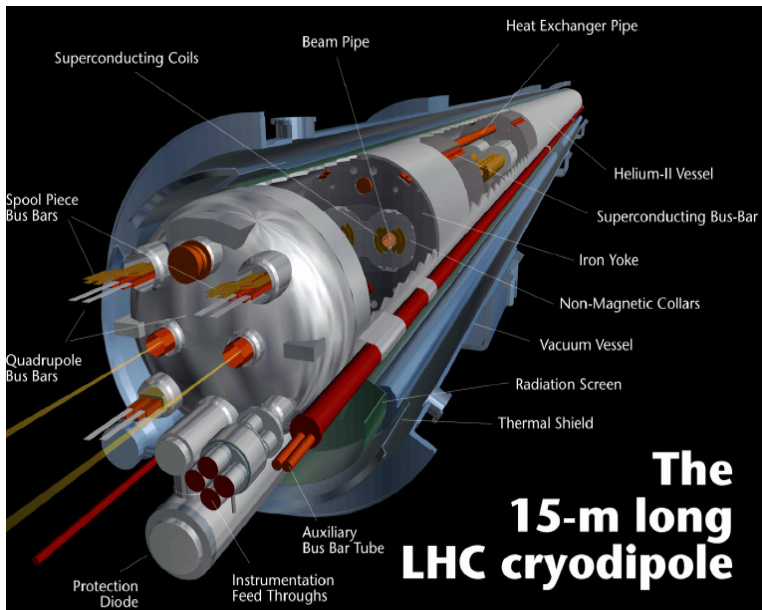
0.0000000000000000001 m, δηλαδή :

ένα δισεκατομμυριοστό του δισεκατομμυριοστού του μέτρου





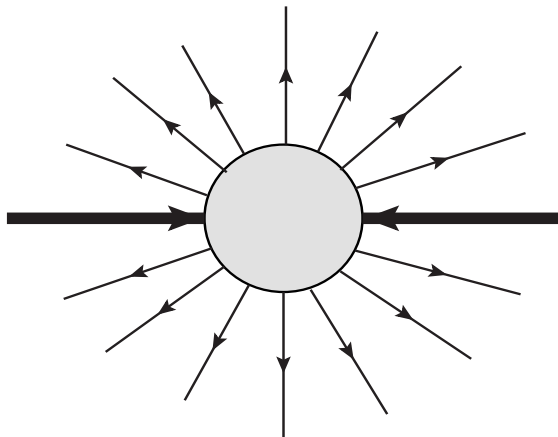




# LHC: Το ισχυρότερο μικροσκόπιο του κόσμου

## Χαρακτηριστικά της Μηχανής

-Περιφέρεια:	26658.883 m
-Ενέργεια ανά δέσμη:	450 GeV - 7000 GeV
-Αρ. πρωτονίων ανά πακέτο:	$1.15 \times 10^{11}$
-Αρ. πακέτων:	2808
-Ενταση ρεύματος ανά δέσμη:	0.582 A
-Ενταση ρεύματος στους μαγνήτες:	13000 A
-Ολική ενέργεια ανά δέσμη:	23.3 MJ - 362 MJ
-Κορυφαία φωτεινότητα:	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

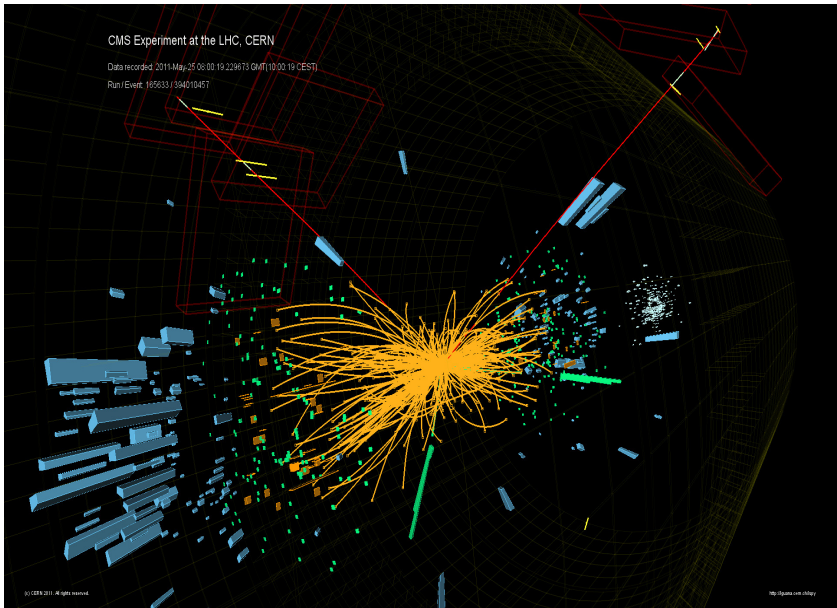


Δύο πρωτόνια συγκρούονται μετωπικά παράγοντας ένα μεγάλο αριθμό σωματιδίων. Ο σκοπός του πειράματος είναι η ανίχνευση και ο προσδιορισμός τους.

CMS Experiment at the LHC, CERN

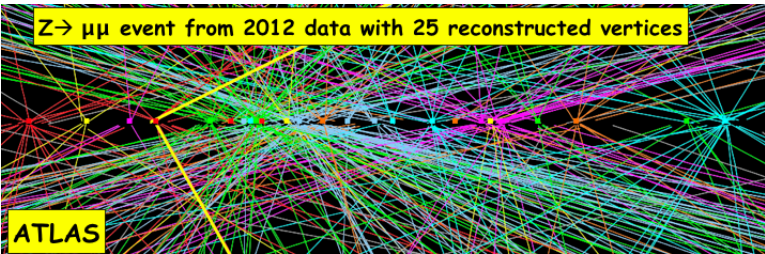
Data recorded: 2011-May-25 08:00:19.229673 GMT(10:00:19 CEST)

Run/Event: 185633/394010457

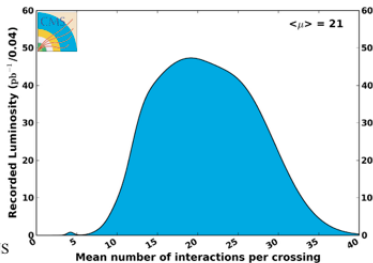


Z → μμ event from 2012 data with 25 reconstructed vertices

ATLAS



CMS Average Pileup, pp, 2012,  $\sqrt{s} = 8$  TeV



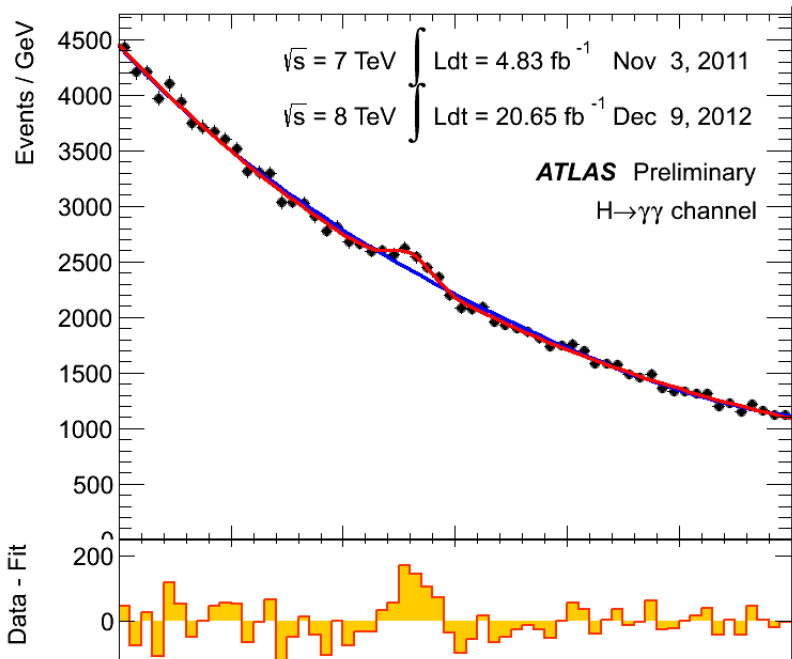
$L =$   
*Luminosity*  
 $=$   
 $0.8 \cdot 10^{34}$   
 $[ \text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} ]$

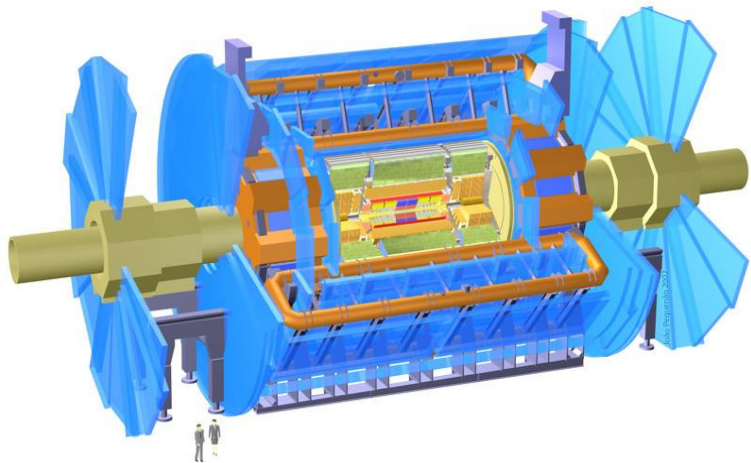
Institut d'Études Scientifiques de Caen

*pile up*  
*will increase*  
*at higher energy*  
→  
*experiments*  
*request*  
*25 ns*  
*(instead of 50 ns)*  
*operation*  
*in 2015*

13

M. Lamont, IPAC'13







# Χαρακτηριστικά του Ανιχνευτού

- Διαστάσεις : 45 x 25 m, Βάρος: 7000 T  
(Περίπου το μισό σε όγκο από την Μητρόπολη Notre Dame του Παρισιού και ζυγίζει όσο ο Πύργος του Eiffel, ή όσο 100 Boeing 747!)
- Data: Αν καταγράφαμε όλα τα δεδομένα θα γεμίζαμε 100000 CD's το δευτερόλεπτο. Η στήλη των CD's θα έφτανε στη σελήνη κάθε τρεις μήνες!  
Στην πράξη καταγράφουμε περίπου 27 CD's το λεπτό. Η επιλογή απαιτεί εξαιρετικά γρήγορα ηλεκτρονικά.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ		
ΣΩΜΑΤΙΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ		
Ισχυρές αλληλεπιδράσεις		Οκτώ γκλουόνια
Ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις		Φωτόνιο ( $\gamma$ )
Ασθενείς αλληλεπιδράσεις		$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$
Βαρυτικές αλληλεπιδράσεις		Βαρυτόνιο ( $;$ )
ΣΩΜΑΤΙΑ ΥΛΗΣ		
	Λεπτόνια	Κουάρκς
1η Οικογένεια	$\nu_e$ , $e^-$	$u_i$ , $d_i$ , $i = 1, 2, 3$
2η Οικογένεια	$\nu_\mu$ , $\mu^-$	$c_i$ , $s_i$ , $i = 1, 2, 3$
3η Οικογένεια	$\nu_\tau$ , $\tau^-$	$t_i$ , $b_i$ , $i = 1, 2, 3$
ΣΩΜΑΤΙΟ HIGGS (BEH)		

Ο Πίνακας αυτός αντικατοπτρίζει τις σημερινές αντιλήψεις μας πάνω στη δομή της ύλης. Τα κουάρκς και τα γκλουόνια δεν εμφανίζονται σαν ελεύθερα σωματίδια και το βαρυτόνιο δεν έχει ανακαλυφθεί.

# ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ

# ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ

- ▶ Σωματjα ύλης : Τα συστατικά της ύλης.

# ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ

- ▶ Σωματjα ύλης : Τα συστατικά της ύλης.
- ▶ Σωματjα ακτινοβολίας: Τα σωματjα που δημιουργούν τις δυνάμεις.

Η ακτίνα δράσης των δυνάμεων εξαρτάται από την μάζα των σωματίων ακτινοβολίας :

μεγάλη ακτίνα δράσεως  $\Rightarrow$  μηδενική μάζα

μικρή ακτίνα δράσεως  $\Rightarrow$  μη μηδενική μάζα

# ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ

- ▶ Σωματjα ύλης : Τα συστατικά της ύλης.
- ▶ Σωματjα ακτινοβολίας: Τα σωματjα που δημιουργούν τις δυνάμεις.

Η ακτίνα δράσης των δυνάμεων εξαρτάται από την μάζα των σωματίων ακτινοβολίας :

μεγάλη ακτίνα δράσεως  $\Rightarrow$  μηδενική μάζα

μικρή ακτίνα δράσεως  $\Rightarrow$  μη μηδενική μάζα

- ▶ Το σωματjο Higgs.

## Η Κοσμολογία και η γέννηση του Σύμπαντος

- ▶ Στην αρχή ήταν ένα σημείο: •

## Η Κοσμολογία και η γέννηση του Σύμπαντος

- ▶ Στην αρχή ήταν ένα σημείο: •
- ▶ Ήταν το μόνο σημείο που υπήρχε



## Η Κοσμολογία και η γέννηση του Σύμπαντος

- ▶ Στην αρχή ήταν ένα σημείο: •
- ▶ Ήταν το μόνο σημείο που υπήρχε
- ▶ Και δεν υπήρχε τίποτα άλλο εκτός από αυτό το σημείο

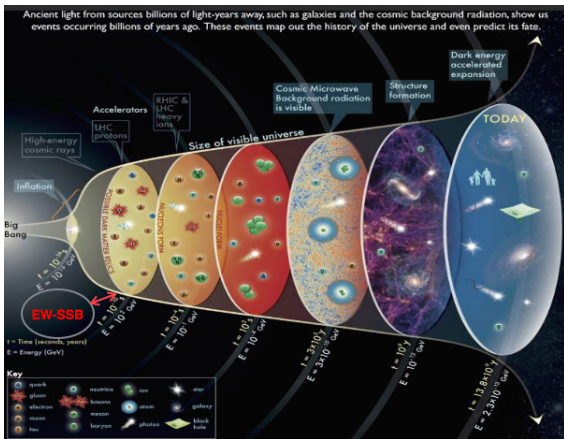
## Η Κοσμολογία και η γέννηση του Σύμπαντος

- ▶ Στην αρχή ήταν ένα σημείο: •
- ▶ Ήταν το μόνο σημείο που υπήρχε
- ▶ Και δεν υπήρχε τίποτα άλλο εκτός από αυτό το σημείο
- ▶ Προσοχή: Μη φαντάζεστε το σημείο *μέσα σε ένα χώρο*. Το σημείο *ήταν όλος ο χώρος*

## Η Κοσμολογία και η γέννηση του Σύμπαντος

- ▶ Στην αρχή ήταν ένα σημείο: •
- ▶ Ήταν το μόνο σημείο που υπήρχε
- ▶ Και δεν υπήρχε τίποτα άλλο εκτός από αυτό το σημείο
- ▶ Προσοχή: Μη φαντάζεστε το σημείο *μέσα σε ένα χώρο*. Το σημείο *ήταν όλος ο χώρος*
- ▶ Και τότε.....

# Η Μεγάλη Εκρηξη (Big Bang)



## Οι “Πατέρες” της Κοσμολογίας



- Albert Einstein (1879-1955) Βραβείο Nobel 1921: *Η θεωρία της σχετικότητας*
- Edwin Powel Hubble (1889-1953): *Η διαστολή του Σύμπαντος*
- Georges Lemaître (1894-1966): *Η θεωρία του Big Bang*

# Οι Συμμετρίες

- ▶ Μία γνωστή, αλλά αφηρημένη έννοια

# Οι Συμμετρίες

- ▶ Μία γνωστή, αλλά αφηρημένη έννοια
- ▶ Στην Φυσική μία *Συμμετρία* σημαίνει οτι κάποια ποσότητα δεν είναι μετρήσιμη.

# Οι Συμμετρίες

- ▶ Μία γνωστή, αλλά αφηρημένη έννοια
- ▶ Στην Φυσική μία *Συμμετρία* σημαίνει οτι κάποια ποσότητα δεν είναι μετρήσιμη.
- ▶ Παράδειγμα: Το πιο “συμμετρικό” στερεό είναι η σφαίρα. Μπορούμε να “ορίσουμε” την σφαίρα σαν το στερεό που φαίνεται το ίδιο ανεξάρτητα από την γωνία κάτω από την οποία το παρατηρούμε.



# Οι Συμμετρίες

- ▶ Μία γνωστή, αλλά αφηρημένη έννοια
- ▶ Στην Φυσική μία *Συμμετρία* σημαίνει οτι κάποια ποσότητα δεν είναι μετρήσιμη.
- ▶ Παράδειγμα: Το πιο “συμμετρικό” στερεό είναι η σφαίρα. Μπορούμε να “ορίσουμε” την σφαίρα σαν το στερεό που φαίνεται το ίδιο ανεξάρτητα από την γωνία κάτω από την οποία το παρατηρούμε.
- ▶ Κατά συνέπεια οι εξισώσεις που ορίζουν την σφαίρα δεν πρέπει να εξαρτώνται από τις γωνίες.

# Οι Συμμετρίες

- ▶ Μία γνωστή, αλλά αφηρημένη έννοια
- ▶ Στην Φυσική μία *Συμμετρία* σημαίνει οτι κάποια ποσότητα δεν είναι μετρήσιμη.
- ▶ Παράδειγμα: Το πιο “συμμετρικό” στερεό είναι η σφαίρα. Μπορούμε να “ορίσουμε” την σφαίρα σαν το στερεό που φαίνεται το ίδιο ανεξάρτητα από την γωνία κάτω από την οποία το παρατηρούμε.
- ▶ Κατά συνέπεια οι εξισώσεις που ορίζουν την σφαίρα δεν πρέπει να εξαρτώνται από τις γωνίες.
- ▶  $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$

## Συμμετρίες και νόμοι διατήρησης



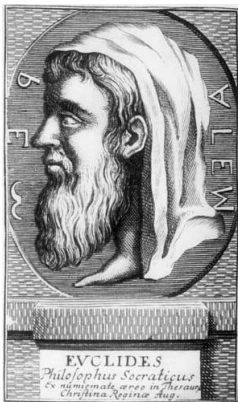
Θεώρημα της Amalie Emmy Noether (1882-1935): Σε κάθε συμμετρία (!) αντιστοιχεί ένα διατηρήσιμο μέγεθος.

Μετατοπίσεις στον χώρο : Ορμή.

Μετατοπίσεις στον χρόνο: Ενέργεια

Στροφές: Στροφορμή

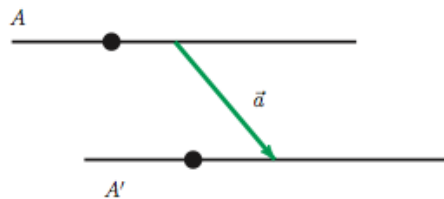
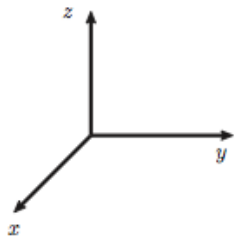
# Συμμετρίες στον Χώρο



Και τα εφαρμόζοντα επ' αλληλα ισα αλληλοις εστιν.

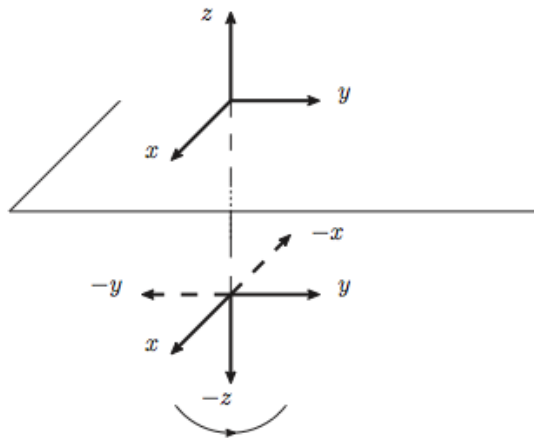
# Μετατοπίσεις στον Χώρο

$$\vec{x}' = \vec{x} + \vec{a}$$



# Αντιστροφή

$$(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$$

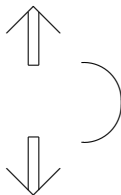


# Η πρώτη αφαίρεση: Εσωτερικές Συμμετρίες

Heisenberg 1932

ηλεκτρόνιο με σπιν

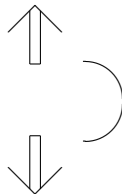
ηλεκτρόνιο με σπιν



στροφή

πρωτόνιο=νουκλεόνιο με ισοσπίν

νετρόνιο=νουκλεόνιο με ισοσπίν



στροφή

στον ισοχώρο

# Εσωτερικές συμμετρίες

- ▶ Για πρώτη φορά στην Φυσική εισάγαμε μετασχηματισμούς που δεν αναφέρονται στο σύστημα συντεταγμένων του χώρου και του χρόνου.



# Εσωτερικές συμμετρίες

- ▶ Για πρώτη φορά στην Φυσική εισάγαμε μετασχηματισμούς που δεν αναφέρονται στο σύστημα συντεταγμένων του χώρου και του χρόνου.
- ▶ Ο χώρος του Heisenberg ήταν τριδιάστατος, ισόμορφος με τον γνωστό μας Ευκλείδιο χώρο.

# Εσωτερικές συμμετρίες

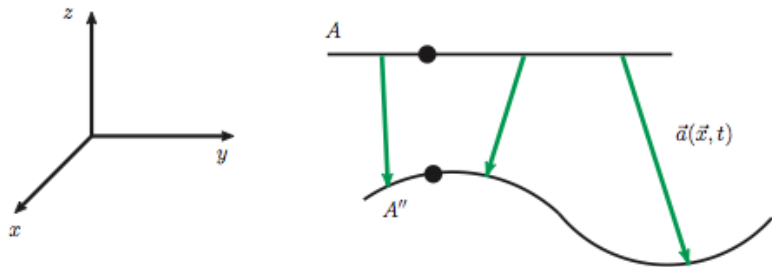
- ▶ Για πρώτη φορά στην Φυσική εισάγαμε μετασχηματισμούς που δεν αναφέρονται στο σύστημα συντεταγμένων του χώρου και του χρόνου.
- ▶ Ο χώρος του Heisenberg ήταν τριδιάστατος, ισόμορφος με τον γνωστό μας Ευκλείδιο χώρο.
- ▶ Σήμερα όμως η ιδέα γενικεύθηκε σε χώρους πολυδιάστατους.

# Εσωτερικές συμμετρίες

- ▶ Για πρώτη φορά στην Φυσική εισάγαμε μετασχηματισμούς που δεν αναφέρονται στο σύστημα συντεταγμένων του χώρου και του χρόνου.
- ▶ Ο χώρος του Heisenberg ήταν τριδιάστατος, ισόμορφος με τον γνωστό μας Ευκλείδιο χώρο.
- ▶ Σήμερα όμως η ιδέα γενικεύθηκε σε χώρους πολυδιάστατους.
- ▶ Ο **Χώρος** της Φυσικής έγινε μιά αφηρημένη μαθηματική πολλαπλότητα, με περίεργες γεωμετρικές και τοπολογικές ιδιότητες, της οποίας μόνο ένα μέρος, ο γνωστός μας χώρος, είναι κατ' ευθείαν αντιληπτός στις αισθήσεις μας.

## Η δεύτερη αφαίρεση: Τοπικές συμμετρίες

$$\vec{x}'' = \vec{x} + \vec{a}(\vec{x}, t)$$



# Τοπικές συμμετρίες

- ▶ Τοπικές Συμμετρίες  $\Rightarrow$  Δυνάμεις.

# Τοπικές συμμετρίες

- ▶ Τοπικές Συμμετρίες  $\Rightarrow$  Δυνάμεις.
- ▶ Μπορούμε να βρούμε αυτές τις δυνάμεις για τις τοπικές μετατοπίσεις;

# Τοπικές συμμετρίες

- ▶ Τοπικές Συμμετρίες  $\Rightarrow$  Δυνάμεις.
- ▶ Μπορούμε να βρούμε αυτές τις δυνάμεις για τις τοπικές μετατοπίσεις;
- ▶ Ερώτηση γεωμετρική, χωρίς προφανή φυσική σημασία.

# Τοπικές συμμετρίες

- ▶ Τοπικές Συμμετρίες  $\Rightarrow$  Δυνάμεις.
- ▶ Μπορούμε να βρούμε αυτές τις δυνάμεις για τις τοπικές μετατοπίσεις;
- ▶ Ερώτηση γεωμετρική, χωρίς προφανή φυσική σημασία.
- ▶ **Εκπληξη: Η δυναμική που προκύπτει είναι η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας. Οι δυνάμεις είναι οι δυνάμεις βαρύτητας.**

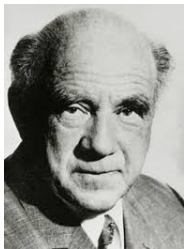


# Τοπικές συμμετρίες

- ▶ Τοπικές Συμμετρίες  $\Rightarrow$  Δυνάμεις.
- ▶ Μπορούμε να βρούμε αυτές τις δυνάμεις για τις τοπικές μετατοπίσεις;
- ▶ Ερώτηση γεωμετρική, χωρίς προφανή φυσική σημασία.
- ▶ **Εκπληξη: Η δυναμική που προκύπτει είναι η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας. Οι δυνάμεις είναι οι δυνάμεις βαρύτητας.**
- ▶ **ΟΛΕΣ ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΗΝ ΦΥΣΗ ΕΧΟΥΝ ΤΕΤΟΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ  
ΦΥΣΙΚΗ=ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ**

# Τοπικές συμμετρίες

- ▶ Τοπικές Συμμετρίες  $\Rightarrow$  Δυνάμεις.
- ▶ Μπορούμε να βρούμε αυτές τις δυνάμεις για τις τοπικές μετατοπίσεις;
- ▶ Ερώτηση γεωμετρική, χωρίς προφανή φυσική σημασία.
- ▶ **Εκπληξη: Η δυναμική που προκύπτει είναι η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας. Οι δυνάμεις είναι οι δυνάμεις βαρύτητας.**
- ▶ ΟΛΕΣ ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΗΝ ΦΥΣΗ ΕΧΟΥΝ ΤΕΤΟΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ  
ΦΥΣΙΚΗ=ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ
- ▶ Πλάτων: Μηδείς αγεωμέτρητος εισίτω την στέγην.



Werner Heisenberg (1901-1976, Βραβείο Nobel 1932), Chen Ning Yang (1922-, Βραβείο Nobel 1957) και Robert Mills (1927-1999).

## Ερώτημα 1. Γιατί πολλά σωματρία έχουν μάζα;

Γιατί ένα μέρος από την ενέργεια του Big Bang μετετράπη σε μάζα και δεν παρέμεινε υπό μορφή ακτινοβολίας;

## Ερώτημα 2. Πότε και πως έγινε αυτή η μετατροπή;

# Περίληψη

## Περίληψη

- ▶ Οι συμμετρίες που αναφέραμε προηγουμένως επιβάλλουν σε όλα τα σωματίνα να έχουν μηδενική μάζα.

# Περίληψη

- ▶ Οι συμμετρίες που αναφέραμε προηγουμένως επιβάλλουν σε όλα τα σωματία να έχουν μηδενική μάζα.
- ▶ Η δημιουργία της μάζας οφείλεται σε μία **αλλαγή φάσεως**. (Φαινόμενο **Brout-Englert-Higgs**).

# Περίληψη

- ▶ Οι συμμετρίες που αναφέραμε προηγουμένως επιβάλλουν σε όλα τα σωματία να έχουν μηδενική μάζα.
- ▶ Η δημιουργία της μάζας οφείλεται σε μία **αλλαγή φάσεως**. (Φαινόμενο **Brout-Englert-Higgs**).
- ▶ Το LHC μπορεί να μας υποδείξει τον φυσικό μηχανισμό που προκάλεσε την μεταβολή των Brout-Englert-Higgs.



# Το φαινόμενο Brout-Englert-Higgs



Οι αλλαγές φάσεως είναι πολύ κοινό φαινόμενο στη Φύση.  
(παράδειγμα: Σε  $T=0$ , το νερό αλλάζει από υγρό σε στερεό.)

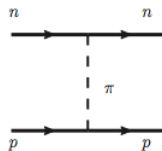
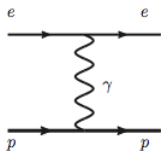
Συνοδεύονται από αλλαγή στην συμμετρία του συστήματος που γίνεται μικρότερη σε χαμηλή θερμοκρασία.

Πιστεύουμε πως για  $T > \sim 10^{15}$  βαθμούς Kelvin,  $t < 10^{-11}$  sec, η συμμετρία ήταν πολύ μεγάλη και όλα τα γνωστά σωματρία είχαν μηδενική μάζα.

Η διαστολή και ταυτόχρονη ψύξη του Σύμπαντος, έφεραν την μεταβολή φάσεως και τα περισσότερα σωματρία απέκτησαν μάζα.

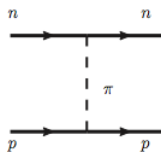
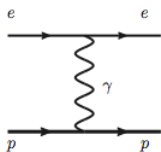
# Ενα πρόβλημα μάζας

- ▶ Η μάζα και η εμβέλεια των δυνάμεων



# Ενα πρόβλημα μάζας

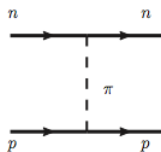
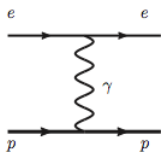
- ▶ Η μάζα και η εμβέλεια των δυνάμεων



- ▶ Το φωτόνιο έχει μηδενική μάζα: οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις έχουν μακράν ακτίνα δράσεως.

# Ενα πρόβλημα μάζας

- ▶ Η μάζα και η εμβέλεια των δυνάμεων



- ▶ Το φωτόνιο έχει μηδενική μάζα: οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις έχουν μακράν ακτίνα δράσεως.
- ▶ Το μεσόνιο  $\pi$  έχει μη μηδενική μάζα: οι πυρηνικές δυνάμεις έχουν μικρή ακτίνα δράσεως.

$$V(r) = \frac{e^{-mr}}{r}$$

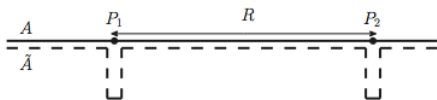


Hideki Yukawa (1907-1981, Βραβείο Nobel 1949)

# Ενα πρόβλημα μάζας

Η μάζα και η εμβέλεια των δυνάμεων

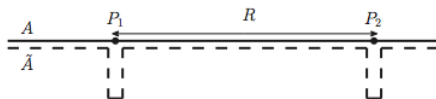
- ▶ Οι τοπικές συμμετρίες επιβάλλουν συσχετίσεις μακράς ακτίνας



# Ενα πρόβλημα μάζας

Η μάζα και η εμβέλεια των δυνάμεων

- ▶ Οι τοπικές συμμετρίες επιβάλλουν συσχετίσεις μακράς ακτίνας



- ▶ Οι τοπικές συμμετρίες επιβάλλουν μηδενική μάζα στα σωμάτια που τις μεταδίδουν.



## Ενα πρόβλημα μάζας

- ▶ Η μάζα των συστατικών της ύλης

## Ενα πρόβλημα μάζας

- ▶ Η μάζα των συστατικών της ύλης

$$s = +1/2 \quad \mathbf{v}$$
A horizontal arrow pointing to the right, representing a spin state with s = +1/2. The label 's = +1/2' is positioned above the arrow, and the letter 'v' is at the right end of the arrow.


$$s = -1/2 \quad \mathbf{v}$$
A horizontal arrow pointing to the left, representing a spin state with s = -1/2. The label 's = -1/2' is positioned above the arrow, and the letter 'v' is at the right end of the arrow.



# Ενα πρόβλημα μάζας

- ▶ Η μάζα των συστατικών της ύλης

$$s = +1/2 \quad \mathbf{v}$$


$$s = -1/2 \quad \mathbf{v}$$


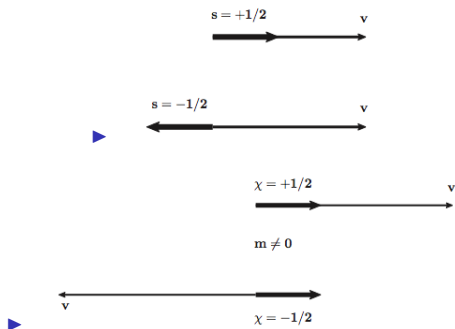
$$\chi = +1/2 \quad \mathbf{v}$$


$$m \neq 0$$

$$\mathbf{v} \quad \chi = -1/2$$


# Ενα πρόβλημα μάζας

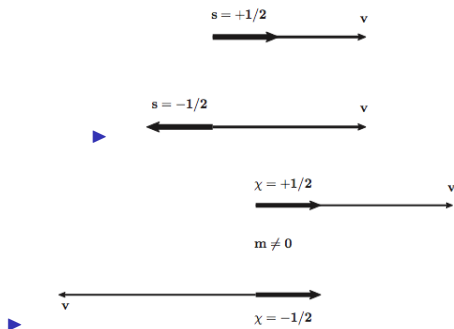
- ▶ Η μάζα των συστατικών της ύλης



- ▶ Υπάρχουν αλληλεπιδράσεις που εμπλέκουν μόνο “αριστερόστροφα” σωματρία

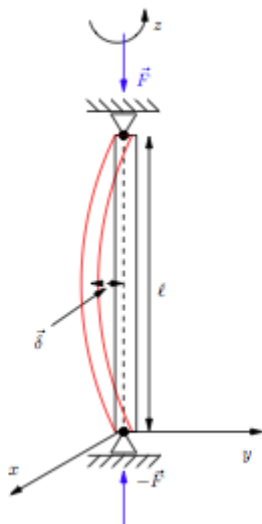
# Ενα πρόβλημα μάζας

- ▶ Η μάζα των συστατικών της ύλης

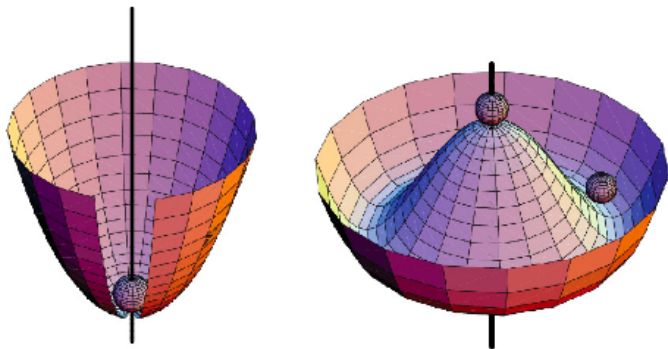


- ▶ Υπάρχουν αλληλεπιδράσεις που εμπλέκουν μόνο “αριστερόστροφα” σωματρία
- ▶ Η συμμετρία επιβάλλει να έχουν μηδενική μάζα.

# Αυτόματο σπάσιμο μιάς συμμετρίας



## Αυτόματο σπάσιμο μιάς συμμετρίας



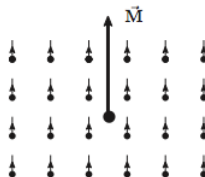
# Αυτόματο σπάσιμο μιάς συμμετρίας

$T > T_c$



(a)

$T < T_c$



(b)





Pierre Curie(1859-1906, Βραβείο Nobel 1903), Yoichiro Nambu (1921-, Βραβείο Nobel 2008) και Jeffrey Goldstone (1933-).

# Αυτόματο σπάσιμο μιάς συμμετρίας

- ▶ Το αυτόματο σπάσιμο μιάς συμμετρίας επιβάλλει συσχετισμούς μακράς ακτίνας.

# Αυτόματο σπάσιμο μιάς συμμετρίας

- ▶ Το αυτόματο σπάσιμο μιάς συμμετρίας επιβάλλει συσχετισμούς μακράς ακτίνας.
- ▶ Οι τοπικές συμμετρίες επιβάλλουν επίσης συσχετισμούς μακράς ακτίνας.

# Αυτόματο σπάσιμο μιάς συμμετρίας

- ▶ Το αυτόματο σπάσιμο μιάς συμμετρίας επιβάλλει συσχετισμούς μακράς ακτίνας.
- ▶ Οι τοπικές συμμετρίες επιβάλλουν επίσης συσχετισμούς μακράς ακτίνας.
- ▶ Είναι εύκολο να καταλάβουμε πως οι δύο μπορεί να μην είναι συμβιβαστοί

## Αυτόματο σπάσιμο μιάς συμμετρίας

- ▶ Το αυτόματο σπάσιμο μιάς συμμετρίας επιβάλλει συσχετισμούς μακράς ακτίνας.
- ▶ Οι τοπικές συμμετρίες επιβάλλουν επίσης συσχετισμούς μακράς ακτίνας.
- ▶ Είναι εύκολο να καταλάβουμε πως οι δύο μπορεί να μην είναι συμβιβαστοί
- ▶ Στην φάση αυτή τα σωματρία θα έχουν **μη μηδενική μάζα**

- ▶ Το σωματίο ΒΕΗ ήταν το επιστέγασμα του θεωρητικού οικοδομήματος που ονομάζεται:

## ΤΟ ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ

- ▶ Το σωματίο ΒΕΗ ήταν το επιστέγασμα του θεωρητικού οικοδομήματος που ονομάζεται:

## ΤΟ ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ

- ▶ Αλλά οι μεγάλες ανακαλύψεις δεν σημαίνουν μόνο το τέλος ενός δρόμου

- ▶ Το σωματίο ΒΕΗ ήταν το επιστέγασμα του θεωρητικού οικοδομήματος που ονομάζεται:

## ΤΟ ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ

- ▶ Αλλά οι μεγάλες ανακαλύψεις δεν σημαίνουν μόνο το τέλος ενός δρόμου
- ▶ Σημειώνουν επίσης την ΑΡΧΗ ενός καινούργιου δρόμου.



- ▶ Το σωματίο ΒΕΗ ήταν το επιστέγασμα του θεωρητικού οικοδομήματος που ονομάζεται:

## ΤΟ ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ

- ▶ Αλλά οι μεγάλες ανακαλύψεις δεν σημαίνουν μόνο το τέλος ενός δρόμου
- ▶ Σημειώνουν επίσης την ΑΡΧΗ ενός καινούργιου δρόμου.
- ▶ Είμαστε σίγουροι πως μας (σας ;) περιμένουν καινούργιες και πιο θαυμαστές ανακαλύψεις

# Μιά ιστορία

# Μιά ιστορία

- ▶ Το παρελθόν είναι πρόλογος

# Μιά ιστορία

- ▶ Το παρελθόν είναι πρόλογος
- ▶ Σημαίνει πως δεν ξέρουμε ακόμα τίποτα