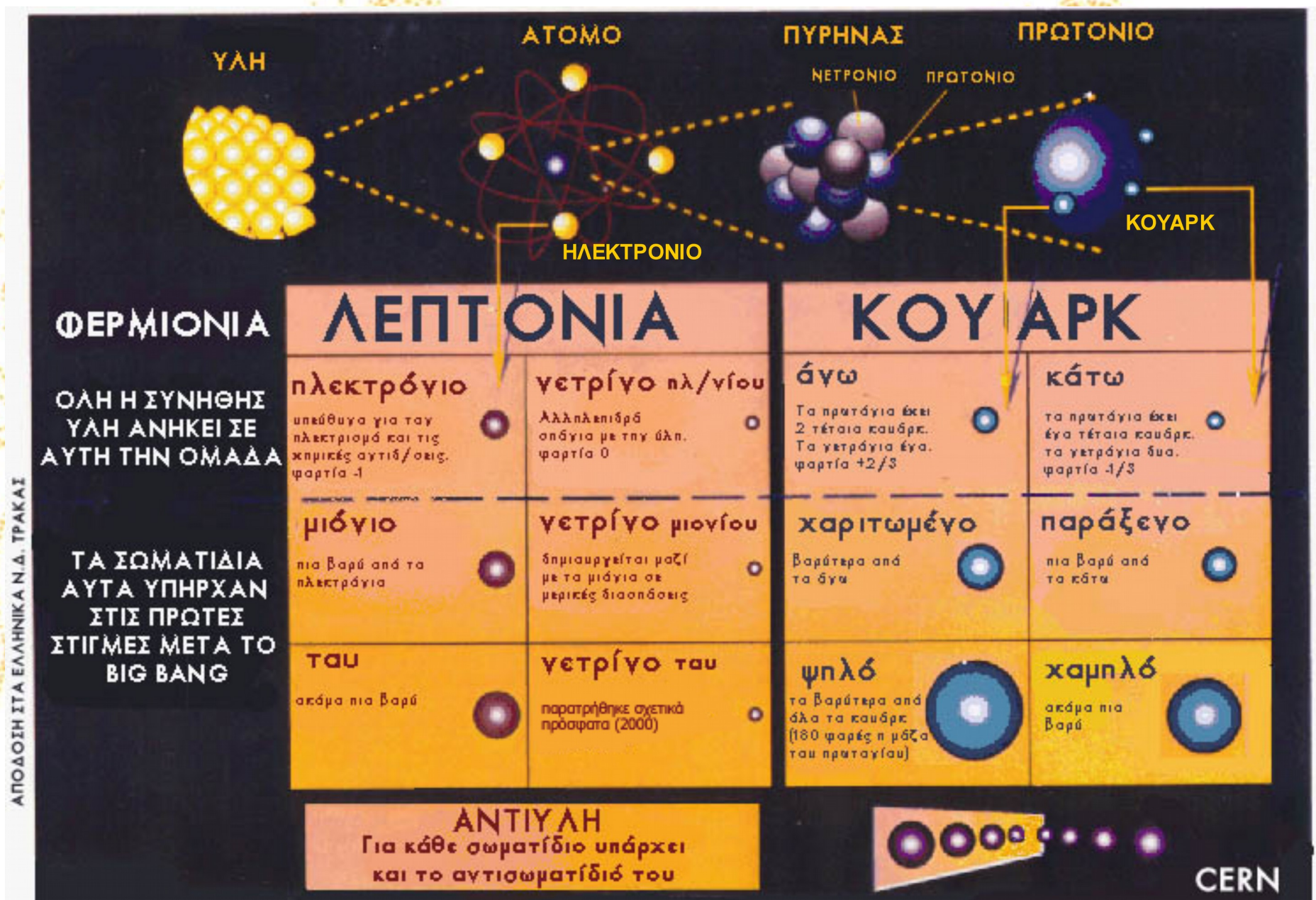


Εισαγωγή στις Θεωρίες των Στοιχειωδών Σωματιδίων

Νίκος Τράκας
Ομότιμος Καθηγητής,
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών
ΕΜΠ

- Τα Στοιχειώδη Σωματίδια
- Οι Αλληλεπιδράσεις τους
- Θεωρίες Βαθμίδας
- Ηλεκτρομαγνητική Αλληλεπίδραση
- Ασθενής Αλληλεπίδραση
- Ισχυρή Αλληλεπίδραση
- Ενοποίηση
- Το Φαινόμενο Higgs
- Το Καθιερωμένο Πρότυπο
- Μεγαλοενοποίηση
- Υπερσυμμετρία
- Χορδές και Μεμβράνες
- Συμπαγοποίηση









ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΤΗΣ ΦΥΣΗΣ

ΕΙΔΟΣ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ	ΣΥΝΔΕΤΙΚΟ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟ (ΚΒΑΝΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ)	ΠΑΡΟΥΣΙΑ
ΙΣΧΥΡΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ (κουάρκ)	~ 1	8 ΓΚΛΟΥΟΝΙΑ (ΑΜΑΖΑ) ●	ΑΤΟΜΙΚΟΥΣ ΠΥΡΗΝΕΣ
ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ (φορτισμένα)	$\sim 10^{-3}$	ΦΩΤΟΝΙΟ (ΑΜΑΖΟ) ●	ΑΤΟΜΙΚΕΣ ΣΤΙΒΑΔΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΑ
ΑΣΘΕΝΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ (κουάρκ, λεπτόνια)	$\sim 10^{-5}$	ΜΠΟΖΟΝΙΑ Z, W^+, W^- (ΜΕΓΑΛΗ ΜΑΖΑ)	ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟ ΔΙΑΣΠΑΣΗ Β
ΒΑΡΥΤΗΤΑ	$\sim 10^{-38}$	ΓΚΡΑΒΙΤΟΝΙΑ (;)	ΟΥΡΑΝΙΑ ΣΩΜΑΤΑ



Η ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΕΙΝΑΙ ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΥΝΑΜΗ

CERN

ΚΑΘΕ ΘΕΩΡΙΑ ΠΟΥ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙ ΝΑ ΠΕΡΙΓΡΑΨΕΙ ΤΗ ΦΥΣΗ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΕΙΝΑΙ...

ΘΕΩΡΙΑ ΒΑΘΜΙΔΑΣ (Gauge Theory)

Αυτόματη παρουσία του ΔΙΑΔΟΤΗ της αλληλεπίδρασης
που περιγράφει η θεωρία βαθμίδας ➡

Ο διαδότης είναι υποχρεωτικά ΑΜΑΖΟΣ και έχει $spin=1$

Το μαθηματικό υπόβαθρο της Θεωρίας Βαθμίδας
περιγράφεται από τη θεωρία ΟΜΑΔΩΝ ➡

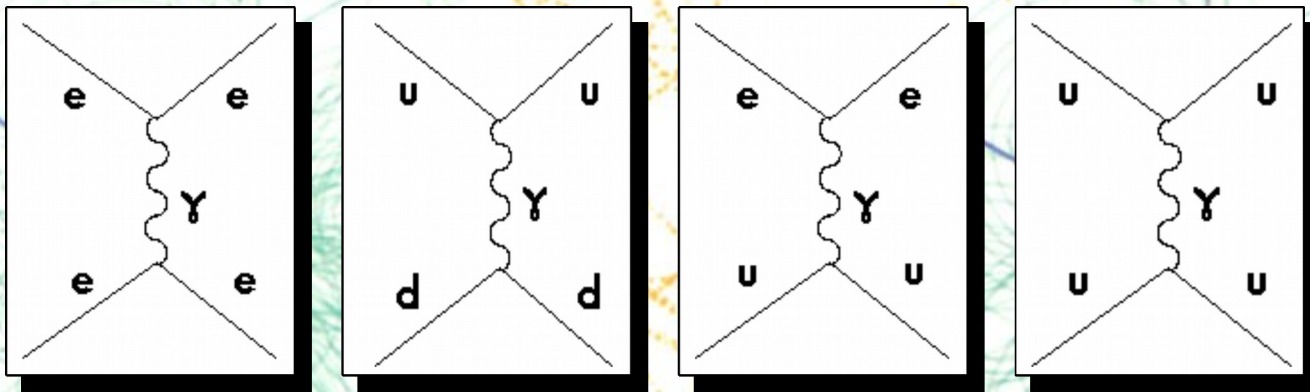
Η ομάδα κατατάσσει
τα σωματίδια σε
«πολλαπλότητες»

Η ομάδα καθορίζει
την πολλαπλότητα
των διαδοτών

Οι εξισώσεις παραμέ-
νουν αναλλοίωτες
σε μετασχηματισμούς
της ομάδας

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ

Ασκείται μεταξύ των σωματιδίων που έχουν ηλεκτρικό φορτίο: e , u , d

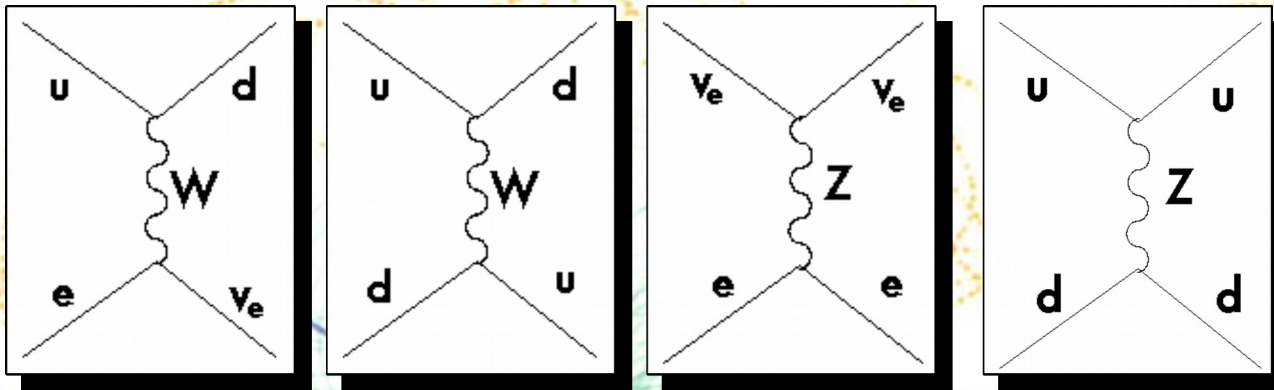


Μαθηματικό υπόβαθρο: Ομάδα $U(1)$

Πολλαπλότητα διαδότη: τετριμμένη, φωτόνιο (γ)

Πολλαπλότητα Σωματιδίων: τετριμμένη u , d , e

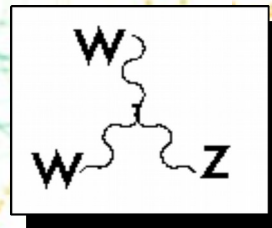
ΑΣΘΕΝΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ



**Πολλαπλότητα
σωματιδίων:
διπλέτα**

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$$

**Μαθηματικό Υπόβαθρο:
Ομάδα SU(2)**



**Πολλαπλότητα διαδότη:
τριπλέτα W^+, W^-, Z^0**

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

ΕΝΝΟΠΟΙΗΣΗ

Προσπάθεια περιγραφής “πολλών”
από όσο το δυνατόν πιο “λίγα”

**Newton: Ενοποίηση “Επίγειας”
και “ Ουράνιας” Μηχανικής**

**Einstein: ενοποίηση Χώρου
και Χρόνου**

**Maxwell: ενοποίηση Φωτός,
Ηλεκτρισμού και Μαγνητισμού**

**Weinberg, Salam, Glashow
Ενοποίηση Ασθενούς
και Ηλεκτρομαγνητικής
αλληλεπίδρασης**

Αλλά ΠΩΣ τις ενοποιούμε όταν:

- 1) Έχουν τόσο διαφορετική ισχύ (1:100)**
- 2) Οι Θεωρίες Βαθμίδας έχουν άμαζους διαδότες ενώ η
Ασθενής αλληλεπίδραση “θέλει” διαδότες με μάζα**

Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ HIGGS

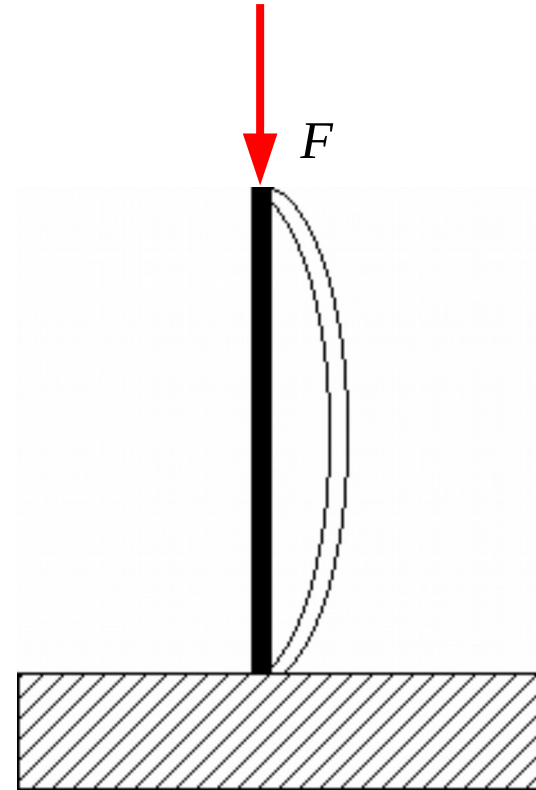
Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη Θεωρία είναι αναλλοίωτες στη Συμμετρία Βαθμίδας, ΑΛΛΑ η κατανομή των πεδίων στην ελάχιστη ενέργεια (“ΚΕΝΟ”) ΔΕΝ είναι.

Η ανάπτυξη της θεωρίας στο ΜΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ κενό, μας “κρύβει” τη συμμετρία μας. Αυτό επιτρέπει εμφάνιση όρων μάζας για τους διαδότες.

Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ

Οι εξισώσεις που περιγράφουν
στη Συμμετρία Βαθμίδας, ΑΛΛΑ
στην ελάχιστη ενέργεια ("ΚΕΝ

Η ανάπτυξη της θεωρίας στο Ν
ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ κενό, μας "κρύβ
συμμετρία μας. Αυτό επιτρέπει
όρων μάζας για τους διαδότες,



Οι εξισώσεις έχουν κυλινδρική συμ-
μετρία. Όταν όμως η δύναμη ξεπεράσει
μια κρίσιμη τιμή, η λύση των εξισώσεων,
δηλαδή το σχήμα που παίρνει η ράβδος
δεν έχει πλέον αυτή τη συμμετρία.

Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ HIGGS

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη Θεωρία είναι αναλλοίωτες στη Συμμετρία Βαθμίδας, ΑΛΛΑ η κατανομή των πεδίων στην ελάχιστη ενέργεια ("ΚΕΝΟ") ΔΕΝ είναι.

Η ανάπτυξη
ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΗΣ
συμμετρία
πόρων μάζας

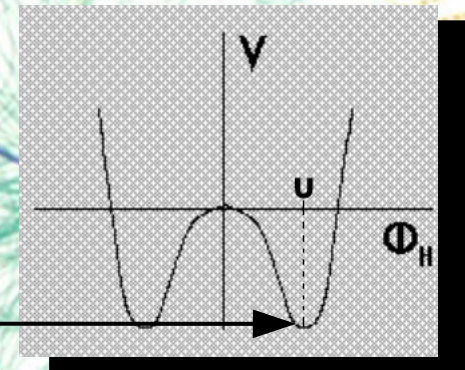
$$\mu^2 \varphi_H \varphi_H^* + \lambda (\varphi_H \varphi_H^*)^2 + \dots + \cancel{m_W^2 WW}$$

$$\mu^2 < 0, \lambda > 0$$

$$\varphi_H' = \varphi_H + v$$

$$g^2 WW \varphi_H \varphi_H^* \rightarrow g^2 v^2 WW + \dots$$

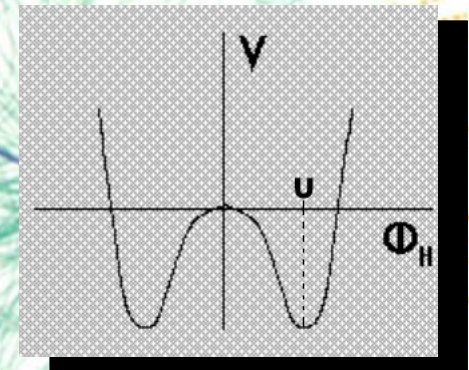
κρίση



Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ HIGGS

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη Θεωρία είναι αναλλοίωτες στη Συμμετρία Βαθμίδας, ΑΛΛΑ η κατανομή των πεδίων στην ελάχιστη ενέργεια (“ΚΕΝΟ”) ΔΕΝ είναι.

Η ανάπτυξη της θεωρίας στο ΜΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟ κενό, μας “κρύβει” τη συμμετρία μας. Αυτό επιτρέπει εμφάνιση όρων μάζας για τους διαδότες.



Η παρουσία του ΜΗ ΣΥΜΜΕΤΡΙΚΟΥ κενού επιτυγχάνεται με την προσθήκη του σωματιδίου higgs με κατάλληλο δυναμικό.

Οι αλληλεπιδράσεις του higgs “επιτρέπουν” μάζα και στα κουάρκ και τα λεπτόνια.

Η ΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΣΘΕΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ

Ξεκινάμε με μια Θεωρία Βαθμίδας με 3+1 ΑΜΑΖΟΥΣ διαδότες και με το φαινόμενο higgs καταλήγουμε σε 3 διαδότες με μάζα και έναν άμαζο.



Οι εντάσεις των δυο αλληλεπιδράσεων: $g \rightarrow SU(2), g' \rightarrow U(1)$

Ηλεκτρομαγνητισμός..... $g \sin(\theta_w)$

Ασθενής Αλληλεπίδραση..... g/M_w

$$\tan(\theta_w) = g'/g \quad \sin^2(\theta_w) \approx 0,22$$

**Αν προσθέσουμε και την Ισχυρή Αλληλεπίδραση,
με τη δική της ομάδα συμμετρίας: $SU(3)$...**

**ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ
(Standard Model)
 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$**

**... που περιγράφει με ΕΚΠΛΗΚΤΙΚΗ ακρίβεια, ΟΛΑ τα έως
τώρα πειραματικά αποτελέσματα.**

Αλλά

1) εισάγουμε πολλές σταθερές “με το χέρι”

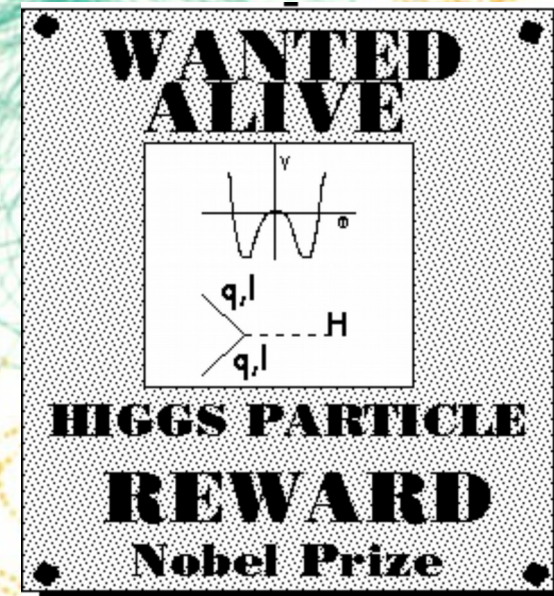
**Αν προσθέσουμε και την Ισχυρή Αλληλεπίδραση,
με τη δική της ομάδα συμμετρίας: $SU(3)$...**

**ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ
(Standard Model)
 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$**

**... που περιγράφει με ΕΚΠΛΗΚΤΙΚΗ ακρίβεια, ΟΛΑ τα έως
τώρα πειραματικά αποτελέσματα.**

Αλλά

- 1) εισάγουμε πολλές σταθερές “με το χέρι”**
- 2) μας “λείπει” το higgs**



**Αν προσθέσουμε και την Ισχυρή Αλληλεπίδραση,
με τη δική της ομάδα συμμετρίας: $SU(3)$...**

**ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ
(Standard Model)
 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$**

**... που περιγράφει με ΕΚΠΛΗΚΤΙΚΗ ακρίβεια, ΟΛΑ τα έως
τώρα πειραματικά αποτελέσματα.**

Αλλά

1) εισάγουμε πολλές σταθερές “με το χέρι”

2) μας “λείπει” το higgs

**παρατηρήθηκε
το 2012**

**Βραβείο Nobel
Φυσικής 2013
F. Englert
P. Higgs**

**Αν προσθέσουμε και την Ισχυρή Αλληλεπίδραση,
με τη δική της ομάδα συμμετρίας: $SU(3)$...**

**ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ
(Standard Model)
 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$**

**... που περιγράφει με ΕΚΠΛΗΚΤΙΚΗ ακρίβεια, ΟΛΑ τα έως
τώρα πειραματικά αποτελέσματα.**

Αλλά

- 1) εισάγουμε πολλές σταθερές “με το χέρι”**
- 2) μας “λείπει” το higgs**
- 3) τα νετρίνο έχουν (;) μάζα**

**παρατηρήθηκε
το 2012**

**Βραβείο Nobel
Φυσικής 2013
F. Englert
P. Higgs**

**Αν προσθέσουμε και την Ισχυρή Αλληλεπίδραση,
με τη δική της ομάδα συμμετρίας: $SU(3)$...**

**ΚΑΘΙΕΡΩΜΕΝΟ ΠΡΟΤΥΠΟ
(Standard Model)
 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$**

**... που περιγράφει με ΕΚΠΛΗΚΤΙΚΗ ακρίβεια, ΟΛΑ τα έως
τώρα πειραματικά αποτελέσματα.**

Αλλά

- 1) εισάγουμε πολλές σταθερές “με το χέρι”**
- 2) μας “λείπει” το higgs**
- 3) τα νετρίνο έχουν (;) μάζα**

**παρατηρήθηκε
το 2012**

**Βραβείο Nobel
Φυσικής 2013
F. Englert
P. Higgs**

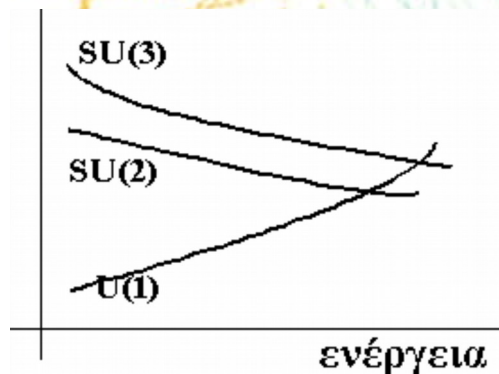
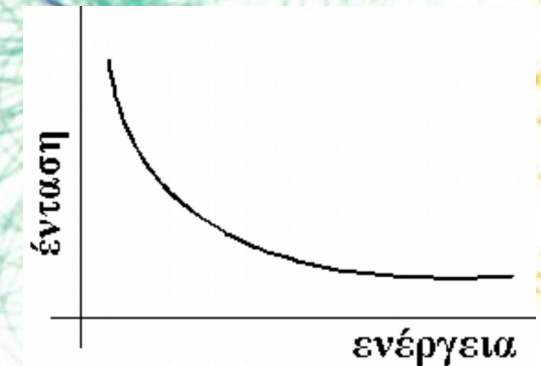
**Θέλουμε να μικρύνουμε τον αριθμό των
ελεύθερων παραμέτρων.**

ΜΕΓΑΛΟΕΝΟΠΟΙΗΣΗ

Η προσπάθεια μείωσης των ελεύθερων παραμέτρων οδηγεί σε θεωρίες βαθμίδας με μεγαλύτερη συμμετρία: $SU(5)$, $SO(10)$

Ξεκινώντας από μια τέτοια ομάδα, με ενιαία ένταση, οδηγούμαστε (με τον μηχανισμό higgs) σε μικρότερες ομάδες και τελικά στο Κ.Π.

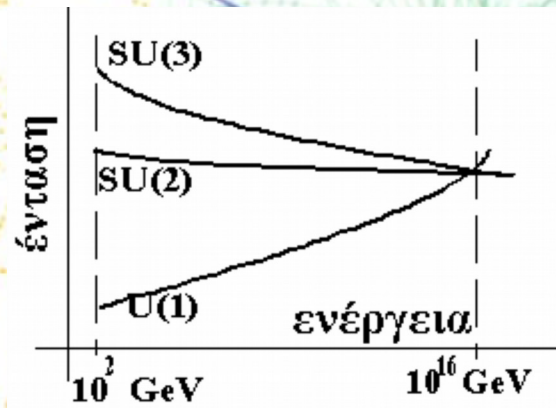
Η ένταση (σταθ. σύζευξης) μιας αλληλεπίδρασης εξαρτάται από την ενέργεια που τη μετράμε (θωράκιση θετική ή αρνητική)



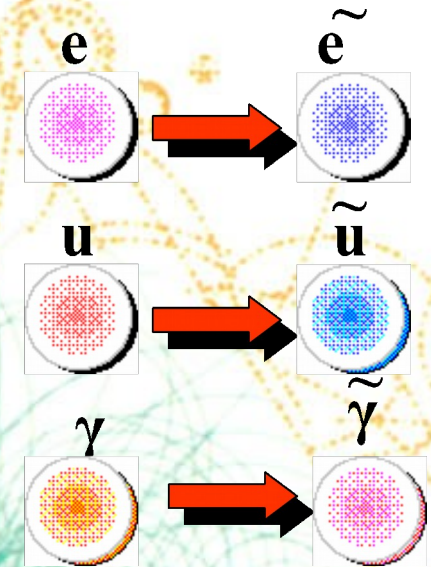
**Οι σταθ. σύζευξης του Κ.Π. ΔΕΝ συναντώνται!
Μπορούμε να μιλάμε για ενοποίηση;**

ΥΠΕΡΣΥΜΜΕΤΡΙΑ

Είναι μια επιπλέον συμμετρία που συνδέει
σωματίδια με διαφορετικό σπιν.
Για κάθε σωματίδιο, εισάγει τον
υπερσυμμετρικό σύντροφό του.



Τα νέα σωματίδια αλλάζουν την
ενεργειακή εξέλιξη των εντάσεων.



Δεν έχει παρατηρηθεί κανένα υπερσυμμετρικό σωματίδιο.
Η Υπερσυμμετρία είναι "κρυμμένη". Τα υπερσυμμετρικά
σωματίδια έχουν μεγάλη μάζα. Αλλά, δεν γνωρίζουμε τρόπο,
αντίστοιχο του higgs, για παραβίαση της υπερσυμμετρίας.

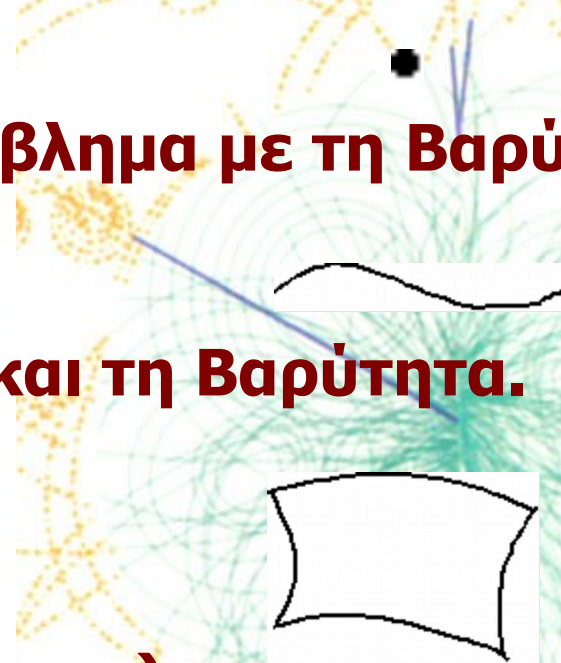
ΧΟΡΔΕΣ ΚΑΙ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ

**Σωματίδια, $D=4=3+1$
Κβαντική Θεωρία Πεδίου. Πρόβλημα με τη Βαρύτητα.**

**Χορδές, $D=10$
Θεωρία Χορδών. Περιγράφει και τη Βαρύτητα.**

**Μεμβράνες, $D=10$
... αλλά και
 d -διάστατες μεμβράνες (d-branes).**

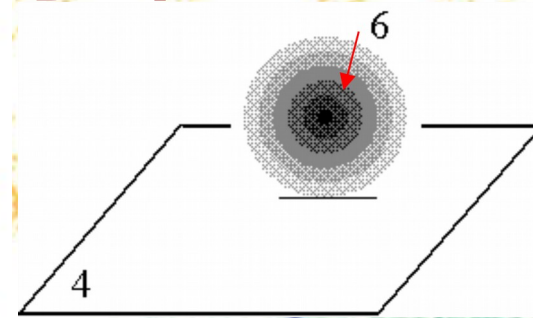
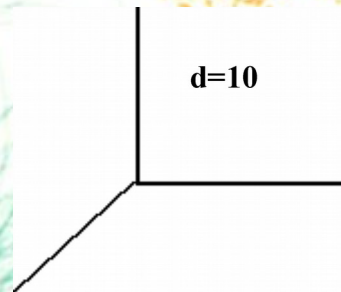
**Η Θεωρία Χορδών περιέχει όχι μόνο χορδές, αλλά και
σωματίδια, μεμβράνες ...**



ΣΥΜΠΑΓΟΠΟΙΗΣΗ

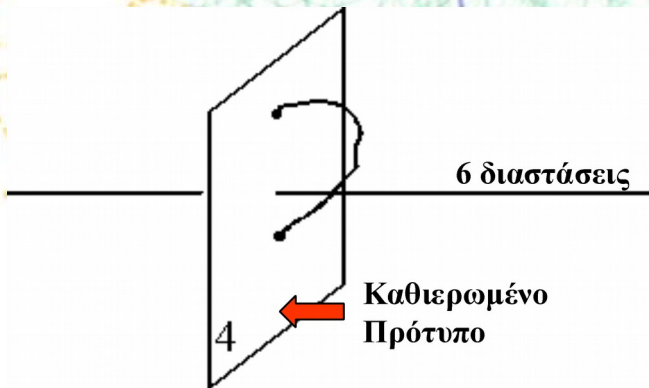
Παλιά εικόνα

$D=10 \longrightarrow D=4$



Οι 6 από τις 10 διαστάσεις
ΣΥΜΠΑΓΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ

Νέα εικόνα



Ο κόσμος μας είναι μια τετραδιά-
στατη επιφάνεια μέσα σ' ένα
δεκαδιάστατο συνεχές.

Και βέβαια, θα μπορούσε κάποιος να υποστηρίξει απλά ότι τα τρανζίστορ ήταν δυνατόν να είχαν ανακαλυφθεί από άτομα που δεν εκπαιδεύτηκαν και δεν προσέφεραν στην κβαντομηχανική και την κβαντική θεωρία των στερεών. Αλλά αυτό που συνέβη είναι ότι αυτοί που τ' ανακάλυψαν είχαν προσφέρει πολλά στην κβαντική θεωρία.

Θα μπορούσε κάποιος να αναρωτηθεί αν τα βασικά κυκλώματα των ηλεκτρονικών υπολογιστών ήταν δυνατόν να έχουν ανακαλυφθεί από τα άτομα που ήθελαν να κατασκευάσουν τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Αλλά, αυτό που συνέβη ήταν ότι ανακαλύφθηκαν από φυσικούς που μετρούσαν πυρηνικά σωματίδια γιατί ενδιαφερόντουσαν για πυρηνική φυσική.

Μπορεί κάποιος να ρωτήσει αν θα υπήρχε πυρηνική ενέργεια επειδή ο άνθρωπος ήθελε νέες πηγές ή αν η τάση για εύρεση νέων μορφών ενέργειας θα οδηγούσε στην ανακάλυψη του πυρήνα. Ισως. Αλλά δεν συνέβη αυτό.

Θα μπορούσε κάποιος να αναρωτηθεί αν η ηλεκτρονική βιομηχανία θα μπορούσε να υπάρξει πριν ο J.J. Thomson και H.A. Lorentz ανακαλύψουν το ηλεκτρόνιο. Και πάλι, αυτό δεν έγινε.

Κάποιος θα μπορούσε να αναρωτηθεί αν τα επαγωγικά πηνία των μηχανών των αυτοκινήτων μπορούσαν να είχαν κατασκευαστεί από τις βιομηχανίες που ασχολούνται με τη συγκοινωνία και να είχαν βρεί και τους κανόνες της επαγωγής. Αλλά αυτά τα ανακάλυψε ο Faraday πολύ πριν.

Ή ακόμα, σε μια προσπάθεια για καλύτερη επικοινωνία, θα μπορούσε κάποιος να είχε ανακαλύψει τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Δεν βρέθηκαν με αυτόν τον τρόπο. Τα βρήκε ο Hertz ο οποίος εκθείασε την ομορφιά της φυσικής και βασίστηκε στις θεωρητικές επεξεργασίες του Maxwell.

Φοβάμαι ότι δεν υπάρχει στον 20ο αιώνα, παράδειγμα καινοτομίας που δεν οφείλει την ύπαρξή της στη βασική έρευνα.

**H. Casimir
(1909-2000)**

Σας ευχαριστώ!

ΘΕΩΡΙΕΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ

Οι εξισώσεις κίνησης (Lagrangian) $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)^* \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right) - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^* \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) - m^2 \varphi^* \varphi$
μένουν αναλλοίωτες στον μετασχηματισμό $\varphi \rightarrow \varphi' = e^{i\alpha\theta} \varphi$

Πράγματι, $\varphi^* \varphi \rightarrow \varphi'^* \varphi' = e^{-i\alpha\theta} e^{i\alpha\theta} \varphi^* \varphi = \varphi^* \varphi$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)^* \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right) \rightarrow \left(\frac{\partial \varphi'}{\partial t}\right)^* \left(\frac{\partial \varphi'}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)^* \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^* \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) \rightarrow \left(\frac{\partial \varphi'}{\partial x}\right)^* \left(\frac{\partial \varphi'}{\partial x}\right) = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^* \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)$$

Αλλά, αν $a = a(t, x)$

Τότε $\varphi^* \varphi \rightarrow \varphi'^* \varphi' = \varphi^* \varphi$, **αλλά**

$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)^* \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right) - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)^* \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)$ **δεν παραμένει αναλλοίωτο**

Αν κάνουμε την αντικατάσταση

$$\partial_t \varphi \rightarrow \partial_t \varphi - igA_0 \varphi \equiv D_t \varphi$$

$$\partial_x \varphi \rightarrow \partial_x \varphi - igA_x \varphi \equiv D_x \varphi$$

τότε η ποσότητα

$$(D_t \varphi)^* (D_t \varphi) - (D_x \varphi)^* (D_x \varphi) - m^2 \varphi^* \varphi$$

παραμένει αναλλοίωτη αν

$$A_0 \rightarrow A_0 - \frac{1}{g} \partial_t a(t, x)$$

$$A_x \rightarrow A_x - \frac{1}{g} \partial_x a(t, x)$$

**Το πεδίο (A_0, A_x) αποτελεί το διαδότη της αλληλεπίδρασης
με σταθερά σύζευξης το g .**



ΘΕΩΡΙΑ ΟΜΑΔΩΝ



$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad a_{ij} \text{ μιγαδικοί}$$

8 (4x2) ανεξάρτητοι παράμετροι

**- 4 σχέσεις $UU^\dagger = 1$, - 1 σχέση $|U| = +1$, = 3 ανεξάρτητοι παράμ.
3 πίνακες (γεννήτορες) αναπαράγουν όλη την ομάδα.**

Σε κάθε γεννήτορα αντιστοιχεί ένας διαδότης.

Η ομάδα SU(3) έχει 8 γεννήτορες.

