

Διάλεξη 22: Παραβίαση της κατοπτρικής συμμετρίας στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις

Το 1956 ο Lee και ο Yang σε μια εργασία τους θέτουν το ερώτημα αν η πάριτη – δηλαδή η κατοπτρική συμμετρία παραβιάζεται ή όχι στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις. Ένα χρόνο αργότερα η Wu με ένα πρωτοποριακό πείραμα απέδειξε όπως θα δούμε πιο κάτω ότι τελικά **η πάριτη δεν διατηρείται στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις.**

Ο στόχος του πειράματος αυτού ήταν να πολώσουν μέσω ενός μαγνητικού πεδίου B ένα δείγμα β-ασταθών πυρήνων και να παρατηρήσουν την ροή των σωματιδίων β. Αν δηλαδή αυτή εξαρτάται από την πόλωση του πυρήνα ή όχι. Στην περίπτωση που η πάριτη είναι μια ποσότητα που διατηρείται στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις, θα έπρεπε η ροή του σωματιδίων να είναι ανεξάρτητη της κατεύθυνσης του σπιν του πυρήνα.

Στην υλοποίηση του πειράματος αυτού υπήρχε όμως μια σημαντική τεχνική δυσκολία. Η ενέργεια μεταπτώσεως μB μεταξύ των $2j+1$ υποκαταστάσεων του σπιν θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από την θερμική ενέργεια του ατόμου στο υλικό του δείγματος. **Λόγω της μικρής τιμής της πυρηνικής μαγνητικής ροπής η συνθήκη αυτή επιβάλλει τεράστια μαγνητικά πεδία** ($\sim 10^6$ gauss = 100 Tesla!). Τόσο ισχυρό μαγνητικό πεδίο είναι πολύ δύσκολο να δημιουργηθεί. Επιπλέον, η εξαιρετικά μικρή θερμοκρασία που απαιτείται να έχει το δείγμα είναι επίσης δύσκολο να επιτευχθεί. **Τόσο μεγάλα μαγνητικά πεδία προφανώς δεν μπορούν να υπάρξουν σε μακροσκοπικό επίπεδο αλλά ευτυχώς στην γειτονιά των πυρήνων παραμαγνητικών ιόντων τέτοια πεδία μπορούν να υπάρξουν.** Έτσι σε ένα παραμαγνητικό υλικό τα ιόντα (όχι οι πυρήνες!) μπορούν να ευθυγραμμιστούν με ένα μέτριας ισχύος μαγνητικό πεδίο και στη συνέχεια να δημιουργηθεί στην γειτονία τους ένα τόσο ισχυρό πεδίο όσο απαιτείται για την πόλωση των πυρήνων. Έτσι λοιπόν η ομάδα της Wu δημιούργησε ένα δείγμα ^{60}Co υπό την μορφή λεπτού υμενίου πάνω **σε επιφάνεια κρυσταλλικού νιτρικού δημητρίου – μαγνησίου.**

Το δεύτερο θέμα ήταν η ψύξη του δείγματος. Με ειδικό κρυστάτη η θερμοκρασία του δείγματος “κατέβηκε” κοντά στον έναν βαθμό Κέλβιν ($=1\text{ K}$) και **στην συνέχεια με τη μέθοδο του αδιαβατικού απομαγνητισμού το δείγμα ψύχθηκε (έστω και για κάποια λεπτά) στην θερμοκρασία των 0.01 K.** Ένα διάγραμμα της πειραματικής διάταξης της Wu δίνεται στο σχήμα 1.

Η πόλωση των πυρήνων ^{60}Co ελεγχόταν από την ανισοτροπία της επαγόμενης ακτινοβολίας γ της απόδιέγερσης του θυγατρικού πυρήνα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1 η ακτινοβολία γ καταγράφονταν από δύο σπινθηριστές NaI. Ταυτόχρονα καταγράφονταν η ροή των σωματιδίων β μέσω ενός σπινθηριστή ανθρακενίου στο εσωτερικό του κρυστάτη.

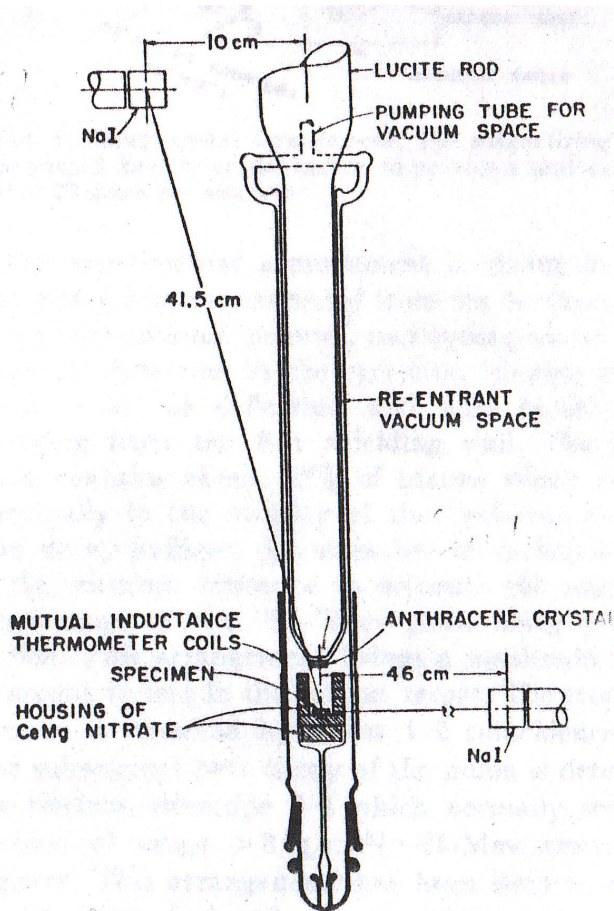


FIG. 1. Schematic drawing of the lower part of the cryo

Σχήμα 1: Η πειραματική διάταξη της Wu και της ομάδας της όπου για πρώτη φορά παρατηρήθηκε πειραματικά η μη διατήρηση της páριτη στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις.

Όπως δείχνει το άνω μέρος του σχήματος 2 που παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται ότι παρά τον πολύ προσεκτικό σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης η πόλωση των πυρήνων ^{60}Co μετά από σύντομο χρονικό διάστημα (μερικά λεπτά) καταστρέφεται. **Για το χρονικό όμως διάστημα αυτό όπου η πόλωση διατηρείται βλέπουμε ασυμμετρία στον ρυθμό γεγονότων ακτινοβολίας β ανάλογα με την φορά του μαγνητικού πεδίου. Αυτή η ασυμμετρία αποτελεί και την πρώτη πειραματική απόδειξη της μη διατήρησης της páριτη στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις.**

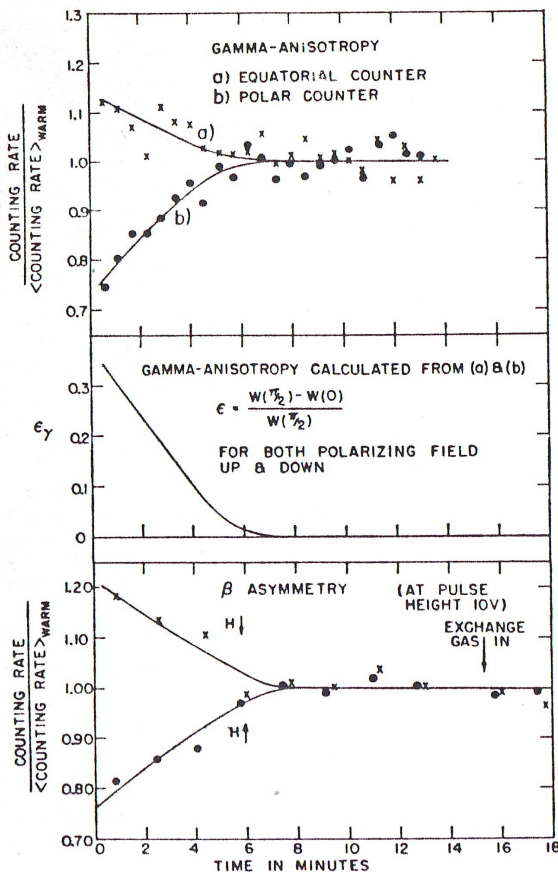
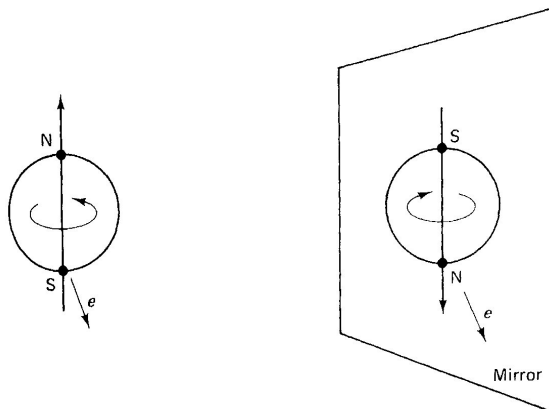


FIG. 2. Gamma anisotropy and beta asymmetry for polarizing field pointing up and pointing down.

Σχήμα 2: Πειραματικά αποτελέσματα της ανισοτροπίας γ (πόλωση των πυρήνων ^{60}Co και προφανώς των θυγατρικών του ^{60}Ni) μαζί με την αντίστοιχη ανισοτροπία της ακτινοβολίας β. Η ανισοτροπία στην ακτινοβολία β εξαφανίζεται όταν σταματά πλέον να έχουμε ανισοτροπία και στην ακτινοβολία γ. Δηλαδή, όταν οι πυρήνες στο δείγμα δεν είναι πλέον πολωμένοι.

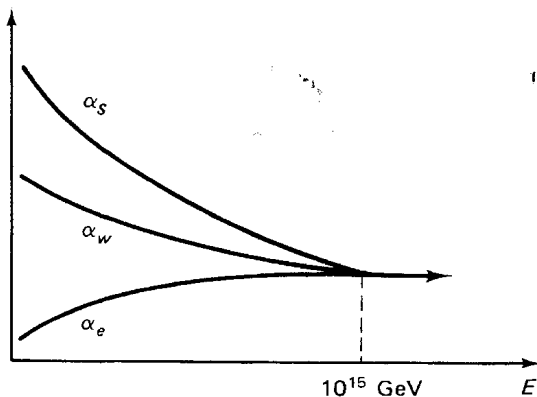


Σχήμα 3: Κατά την αποδιέγερση του ^{60}Co τελικά αποδείχθηκε ότι τα περισσότερα ηλεκτρόνια εκπέμπονται σε διεύθυνση αντίθετη από αυτή του σπιν ενώ στην κατοπτρική εικόνα τα ηλεκτρόνια εκπέμπονται σε κατεύθυνση ίδια με αυτή του σπιν.

Ενοποίηση δυνάμεων & οι πρώτες στιγμές του σύμπαντος

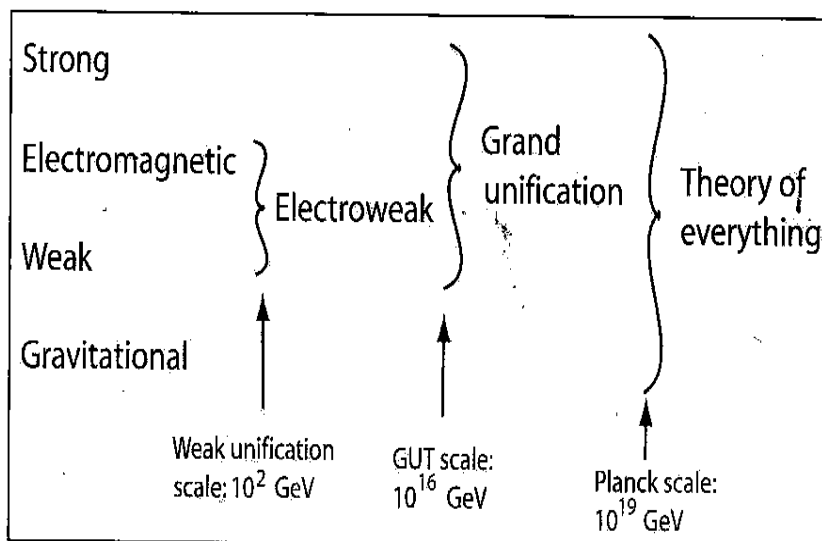
Από πολύ νωρίς στην επιστήμη της φυσικής γεννήθηκε η ανάγκη ομαδοποίησης και κατάταξης των φυσικών φαινομένων. Έτσι και με τις βασικές αλληλεπιδράσεις σχεδόν αμέσως μόλις διαπιστώθηκαν ξεκίνησε και η προσπάθεια της ενοποίησής τους. Η πρώτη και μάλιστα η πιο επιτυχημένη από όλες ήταν αυτή της ενοποίησης των ηλεκτρικών και των μαγνητικών δυνάμεων σε αυτό που σήμερα γνωρίζουμε ως ηλεκτρομαγνητισμό. Η πλήρης θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού παρουσιάστηκε τελικά από τον Maxwell στα μέσα του 19ου αιώνα. Η δεύτερη χρονικά προσπάθεια έγινε από τον Einstein ο οποίος ανέλαβε ένα πράγματι δύσκολο εγχείρημα, αυτό της ενοποίησης της βαρυτικής αλληλεπίδρασης με τον ηλεκτρομαγνητισμό. Ο Einstein τελικά δεν τα κατάφερε αν και αφιέρωσε δεκαετίες μελέτης πάνω σε αυτό το θέμα. Αργότερα οι Glashow, Weinberg και Salam κατάφεραν κάτι άλλο: την ενοποίηση των ασθενών και των η/μ αλληλεπιδράσεων. Χωρίς να μπορούμε σε οποιαδήποτε μορφή λεπτομέρειας αξίζει να αναφερθεί ότι η θεωρία αυτή προβλέπει τέσσερις φορείς αλληλεπιδράσεων χωρίς μάζα όπου όμως στην συνέχεια και σε χαμηλές ενέργειες οι τρεις από αυτούς τους φορείς αποκτούν μάζα μέσω του μηχανισμού Higgs και σχηματίζουν τα μποζόνια βαθμίδας που σήμερα γνωρίζουμε ως φορείς των ασθενών αλληλεπιδράσεων. Μάλιστα το γεγονός ότι η ασθενής αλληλεπίδραση εμφανίζεται πράγματι ασθενέστερη της η/μ οφείλεται ακριβώς στην τεράστια μάζα των φορέων της.

Από τις αρχές της δεκαετίας του '70 αρκετοί επιστήμονες ξεκίνησαν να ασχολούνται με το επόμενο βήμα ενοποίησης - αυτό της ενοποίησης των ηλεκτροασθενών δυνάμεων με την ισχυρή αλληλεπίδραση. Προς αυτή την κατεύθυνση μάλιστα συνηγορεί το γεγονός **ότι η σταθερά ζεύξης των ισχυρών αλληλεπιδράσεων** όπως έχουμε ήδη δει **σε μικρές αποστάσεις μειώνεται** (βλ. σχήμα 4). Το ίδιο αν και με μικρότερο ρυθμό συμβαίνει **στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις: η σταθερά ζεύξης μειώνεται με την απόσταση** ή αλλιώς μειώνεται καθώς η ενέργεια αυξάνει. Το αντίθετο συμβαίνει με την **σταθερά ζεύξης των η/μ αλληλεπιδράσεων** όπου είναι και η μικρότερη των τριών και φαίνεται να **αυξάνει όσο μικραίνει η σχετική απόσταση**. Από την συναρτησιακή αυτή συμπεριφορά κανείς μπορεί να υποθέσει ότι για πολύ μικρές αποστάσεις ή για πολύ μεγάλες ενέργειες οι τρεις σταθερές σύζευξης των τριών αλληλεπιδράσεων ενοποιούνται σύμφωνα με το πιο κάτω σχήμα 3. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό για ενέργειες άνω των 10^{15} GeV ή αντίστοιχα για πολύ μικρές αποστάσεις οι φορείς ζεύξης των τριών αυτών αλληλεπιδράσεων ταυτίζονται. Φυσικά, πειραματικά είναι αδύνατον να πάμε σε τέτοιες ενέργειες. Να θυμηθούμε σε αυτό το σημείο ότι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποδώσει το LHC είναι 14 TeV (7 TeV ανά δέσμη) δηλαδή ~11 τάξεις μεγέθους μικρότερη. Παρόλα αυτά από το LHC στο CERN θα προκύψουν και προκύπτουν (καθημερινά) εξαιρετικής σημαντικότητας συμπεράσματα.



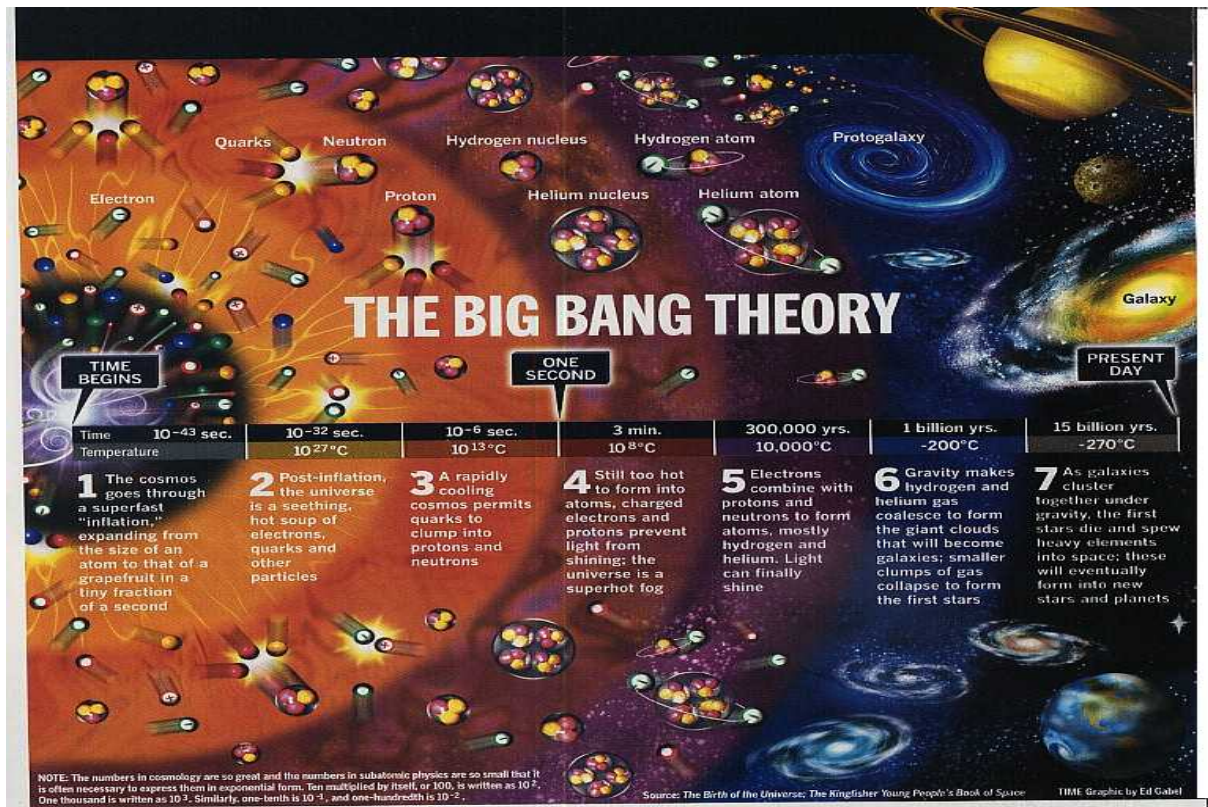
Σχήμα 4: Η μεταβολή των σταθερών αλληλεπίδρασης ως συνάρτηση της ενέργειας για τις ισχυρές, η/μ και ασθενείς αλληλεπιδράσεις.

Πέρα από την ενοποίηση των τριών αλληλεπιδράσεων υπάρχουν θεωρίες που προβλέπουν την ενοποίηση και της βαρυτικής αλληλεπίδρασης με τις υπόλοιπες τρεις σε ακόμα υψηλότερες ενέργειες (βλ. Σχήμα 5)



Σχήμα 5: Οι ενέργειες όπου προβλέπεται η ενοποίηση – ταύτιση των σταθερών αλληλεπίδρασης για την ισχυρή, η/μ, ασθενής και την βαρυτική δύναμη.

Τα τελευταία 30 χρόνια έχει γίνει τεράστια πρόοδος στην θεωρία της **υπερσυμμετρίας (SUSY)**, όπου για κάθε φερμιόνιο υπάρχει το αντιστοιχούν μποζόνιο και αντίστροφα. Ίσως τα ελαφρύτερα από αυτά τα σωματίδια βρεθούν κάποτε στο LHC. Πάντως σύμφωνα με τις μελέτες αυτές στην ενέργεια των 10^{19} GeV η ενοποίηση των δυνάμεων προχωρά ένα βήμα παραπέρα με την ενσωμάτωση σε μια κοινή σταθερά ζεύξης που περιέχει και την βαρυτική αλληλεπίδραση.



Σχήμα 6: Γραφική απεικόνιση για το "χρονικό" του σύμπαντος από τις πρώτες στιγμές μετά την μεγάλη έκρηξη μέχρι και σήμερα.

Πριν κλείσει αυτό το μέρος του μαθήματος θα ήταν καλό να πούμε δυο λόγια για τις πρώτες στιγμές του σύμπαντος. Η συζήτηση σχετίζεται άμεσα με την προηγούμενη μια και η πρώτη αλλά μάλλον και για τελευταία φορά που "είχαμε" τέτοιες ενέργειες διαθέσιμες στην φύση ήταν κατά τις πρώτες στιγμές του σύμπαντος. Πράγματι μόλις 10^{-43} s μετά την μεγάλη έκρηξη οι τέσσερις βασικές αλληλεπιδράσεις ήταν ενωμένες. Αυτή ήταν η **υπέρθερμη εποχή**. Στην συνέχεια το σύμπαν πέρασε στην **θερμή εποχή** όπου σε χρόνο 10^{-32} s και θερμοκρασία 10^{29} K η βαρύτητα αποκόπτεται ενώ οι υπόλοιπες αλληλεπιδράσεις μένουν για λίγο ακόμα ενωμένες μέχρι η θερμοκρασία να πέσει στην ενέργεια των 10^{16} GeV όπου η ισχυρή και η ηλεκτρασθενής αλληλεπίδραση διαχωρίζονται. Στην συνέχεια σε χρόνο 10^{-12} s ακολουθεί και ο διαχωρισμός της ηλεκτρασθενούς σε ασθενή και η/μ αλληλεπίδραση. Εν τω μεταξύ μόλις στο 1 μικροδευτερόλεπτο της ζωής του σύμπαντος τα κουάρκ ψύχθηκαν αρκετά ώστε να σχηματίσουν τα πρώτα πρωτόνια και νετρόνια. Μερικά λεπτά χρειάστηκαν για να πέσει λίγο ακόμα η θερμοκρασία για να σχηματιστούν οι πρώτοι πυρήνες υδρογόνου, ηλίου και μερικοί ακόμα ελαφρείς πυρήνες. Προφανώς για να σχηματιστούν τα πρώτα άτομα έπρεπε να περάσουν τα πρώτα 350 000 χρόνια ώστε η θερμοκρασία να είναι αρκετά χαμηλή για να σχηματιστούν δέσμιες καταστάσεις πυρήνων ηλεκτρονίων.

Παράδειγμα

Να υπολογιστεί το μέγιστο μήκος κύματος των φωτονίων που προκύπτουν από την εξαΰλωση ενός πρωτονίου με ένα αντιπρωτόνιο (όταν αυτά έχουν μηδενική σχετική ενέργεια).

$$p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$$

$$E_\gamma = m_p c^2$$

$$\left. \begin{array}{l} h \cdot f = E_\gamma \\ f \cdot \lambda = c \end{array} \right\} \lambda = \frac{h \cdot c}{E_\gamma} = \frac{197 \text{ MeV fm} \cdot 2\pi}{938 \text{ MeV}} = 1.3 \text{ fm}$$