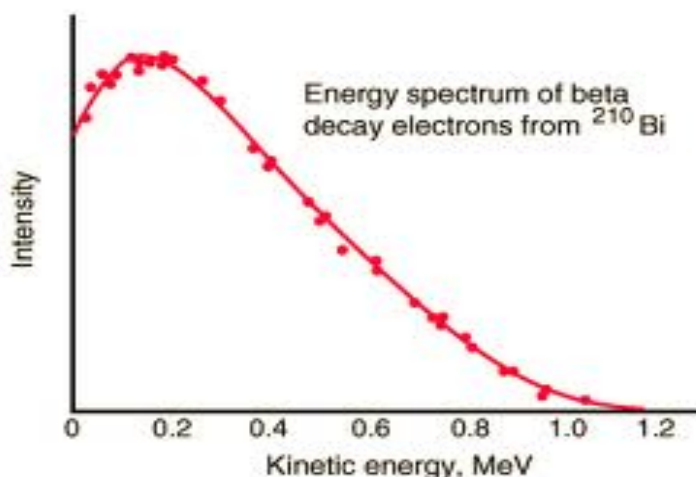


## Διάλεξη 15: Νετρίνα

### Νετρίνα

Τα νετρίνα τα συναντήσαμε αρκετές φορές μέχρι τώρα: Αρχικά στην αποδιέγερση  $\beta$  αλλά και αργότερα κατά την αποδιέγερση των πιονίων και των μιονίων. Τα νετρίνα αξίζει να τα δούμε πάλι για πολλούς λόγους, αλλά το κυριότερο διότι η πορεία προς την εικόνα που σήμερα έχουμε για τα στοιχειώδη σωματίδια είναι εξαιρετικά ενδιαφέρουσα για την περίπτωση των νετρίνων.



Σχήμα 1: Κατανομή των κινητικών ενεργειών ηλεκτρονίων από την αποδιέγερση  $\beta$  του  $^{210}\text{Bi}$

Από την μελέτη του παραπάνω ενεργειακού φάσματος των ηλεκτρονίων κατά την αποδιέγερση  $\beta$  προέκυψε το εξής πρόβλημα.



$$E_e = \left( \frac{m_A^2 - m_B^2 + m_e^2}{2m_A} \right) c^2$$

Από την αποδιέγερση του πυρήνα A προς τον σχηματισμό του πυρήνα B η ενέργεια του ηλεκτρονίου θα έπρεπε να είναι συγκεκριμένη και ίση με την πιο πάνω εξίσωση. Τα πειραματικά αποτελέσματα (βλ. πιο πάνω σχήμα) όμως έδειξαν ένα σχεδόν συνεχές φάσμα ενεργειών των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων. Αυτό φυσικά σημαίνει ότι στα προϊόντα της αποδιέγερσης δεν έχουμε 2 αλλά 3 σωματίδια. Η μόνη λογική εξήγηση για το γεγονός ότι το τρίτο σωματίδιο δεν είναι εύκολα ανιχνεύσιμο είναι το γεγονός ότι δεν διαθέτει φορτίο. Επίσης εξετάζοντας το ενεργειακό φάσμα των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων διαπιστώθηκε ότι η μάζα του νετρίνου αν υπάρχει είναι πάρα πολύ μικρή κατά πολύ μικρότερη της μάζας του ηλεκτρονίου.

Το ίδιο "αόρατο" σωματίδιο φαίνεται να παρουσιάζεται και στις 2 διαδοχικές αποδιεγέρσεις όπου ένα πιόνιο αυτοδιεγείρεται σε ένα μυόνιο.

$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

$$\mu \rightarrow e + 2\nu$$

Στη συνέχεια το μίονιο αποδιεγείρεται σε ένα ηλεκτρόνιο και 2 νετρίνα. Το γεγονός ότι εδώ έχουμε 2 νετρίνα αποδείχθηκε όπως και στην περίπτωση της αποδιέγερσης β, καταγράφοντας δηλαδή το φάσμα των ηλεκτρονίων. Φυσικά, για αρκετά χρόνια κανείς δεν είχε αποδείξει πειραματικά την ύπαρξη του νετρίνου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το **νετρίνο** όπως σήμερα γνωρίζουμε **αλληλεπιδρά αποκλειστικά μέσω των ασθενών αλληλεπιδράσεων** με αποτέλεσμα η ανίχνευση του και ο πειραματικός προσδιορισμός του να είναι εξαιρετικά δύσκολος.

Μόλις το 1950 σε έναν αντιδραστήρα στην νότια Καρολίνα έγινε χρήση της τεράστιας ροής αντινετρίνων ( $5 \times 10^{13} \text{ p/s cm}^2$ ) όπου με ένα κατάλληλο σύστημα ανίχνευσης των παραγόμενων ποζιτρονίων κατάφεραν τότε οι ερευνητές να παρακολουθήσουν την αντίδραση:

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

Η οποία ήταν και η **πρώτη πραγματική απόδειξη της ύπαρξης του νετρίνου**.

Στις προηγούμενες εξισώσεις δεν υπάρχει διαχωρισμός στον συμβολισμό νετρίνου αντινετρίνου γεγονός που σήμερα γνωρίζουμε ότι είναι λάθος. Ο λόγος για το "λάθος" αυτό είναι ακριβώς για να παρουσιαστεί η αλληλουχία των συλλογισμών (θεωρητικών και πειραματικών) που οδήγησαν στην επιβεβαίωση της ύπαρξης του νετρίνου και του αντισωματιδίου του. Από το προηγούμενο πείραμα επιβεβαιώθηκε πειραματικά η αντίδραση:

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

η οποία δεδομένης της συμμετρίας διασταύρωσης μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$\nu + n \rightarrow p + e^-$$

Η παραπάνω αντίδραση μπορεί να συμβεί αν αυτό επιτρέπεται ενεργειακά. Όμως ποτέ δεν παρατηρήθηκε η αντίδραση

$$\bar{\nu} + n \rightarrow p + e^-$$

όπου απλώς το νετρίνο απλώς αντικαταστάθηκε από το αντινετρίνο. Επομένως το νετρίνο και το αντινετρίνο του δεν αποτελούν το ίδιο και το αυτό σωματίδιο αλλά δύο διαφορετικά/διακριτά σωματίδια.

Το επόμενο ερώτημα φυσικά είναι σε τι διαφέρουν τα δυο αυτά σωματίδια. Η απάντηση δόθηκε λίγο αργότερα με την εισαγωγή του **κβαντικού λεπτονικού αριθμού**. Στο **νετρίνο λοιπόν αποδόθηκε ο λεπτονικός αριθμός 1 και στο αντινετρίνο ο λεπτονικός αριθμός -1** ο οποίος θα πρέπει να διατηρείται δεδομένου **ότι το ηλεκτρόνιο έχει**

## λεπτονικό αριθμό 1 και το ποζιτρόνιο -1.

Εν τω μεταξύ υπήρχε και ένα επιπλέον ερώτημα που αφορούσε στα νετρίνα στο οποίο δεν υπήρχε απάντηση. Αυτό ήταν το εξής: Γιατί αφού παρατηρούμε τα δυο παρακάτω σχήματα αποδιέγερσης του μιονίου

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu} \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}\end{aligned}$$

δεν έχει ποτέ παρατηρηθεί η αποδιέγερση μιονίου με την εκπομπή ενός ηλεκτρονίου και ενός φωτονίου εφόσον στις πιο πάνω αποδιεγέρσεις υπάρχει ταυτόχρονα ένα σωματίο και ένα αντισωματίο νετρίνου

$$\mu \rightarrow e^- + \gamma$$

Η μόνη λογική εξήγηση για αυτό είναι ότι το **νετρίνο και το αντινετρίνο στις πιο πάνω εξισώσεις δεν αποτελούν ένα κοινό ζεύγος σωματίου αντισωματίου αλλά ένα είναι αντίστοιχα ένα σωματίο και ένα αντισωματίο δύο διαφορετικών γεύσεων νετρίνου.** Με άλλα λόγια ο λεπτονικός αριθμός που μόλις πριν ορίστηκε θα πρέπει να "σπάσει" σε λεπτονικό αριθμό ηλεκτρονίου και λεπτονικό αριθμό μιονίου. Έτσι οι προηγούμενες εξισώσεις μπορούν τώρα να συμπληρωθούν με τους αντίστοιχους δείκτες ως εξής:

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

Επομένως ένα επιπλέον συμπέρασμα που προκύπτει παρατηρώντας απλώς το πλήθος των σωματιδίων από την διάσπαση του μιονίου είναι ότι έχουμε τουλάχιστον δύο διαφορετικές γεύσεις νετρίνων. Τα νετρίνα ηλεκτρονίου και τα νετρίνα μιονίου.

## Λεπτόνια

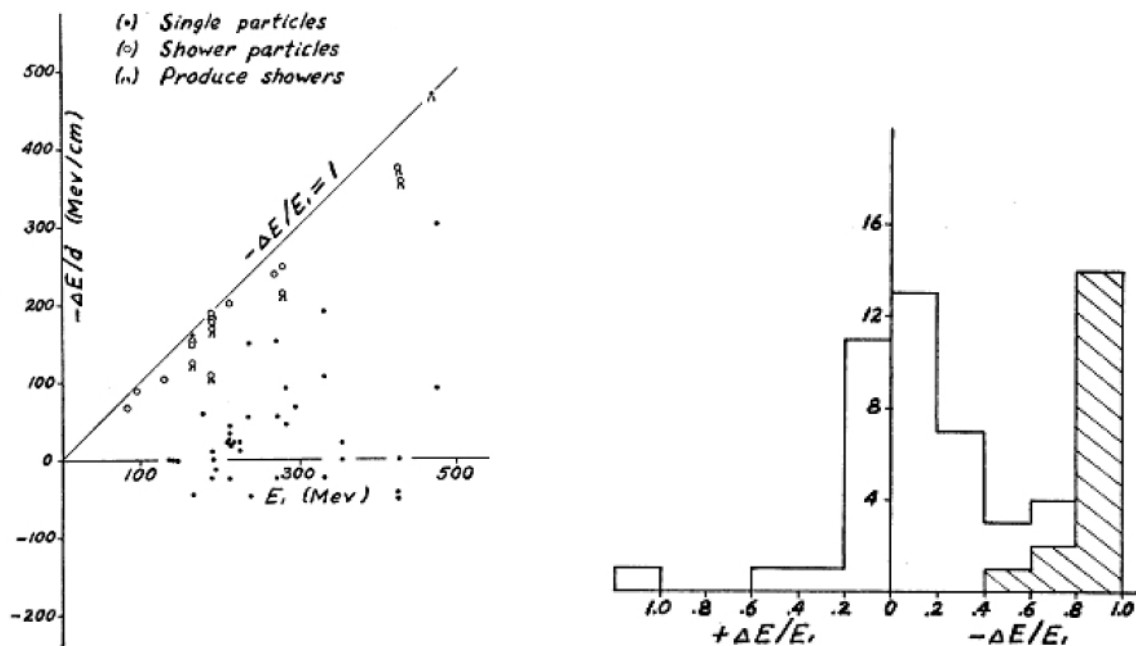
Έτσι συγκεντρώνοντας την πληροφορία την οποία έχουμε από τους συλλογισμούς και τις πειραματικές ενδείξεις που περιγράφηκαν πιο πάνω μπορούμε να σχηματίσουμε το πιο κάτω πίνακα των λεπτονίων.

Δηλαδή τα λεπτόνια τα οποία μέχρι στιγμής συναντήσαμε είναι 4 και άλλα 4 τα αντίστοιχα αντισωματία τους. Όλα έχουν spin 1/2 ενώ οι λεπτονικοί αριθμοί για το κάθε ένα δίνονται στις 2 τελευταίες στήλες. Από ότι είδαμε σε όλες τις περιπτώσεις, ο λεπτονικός αριθμός θα πρέπει να διατηρείται.

	$L_e$	$L_\mu$
<b>Λεπτόνια</b>		
$e^-$	1	0
$\nu_e$	1	0
$\mu^-$	0	1
$\nu_\mu$	0	1
<b>Αντιλεπτόνια</b>		
$e^+$	-1	0
$\nu_e$	-1	0
$\mu^+$	0	-1
$\nu_\mu$	0	-1

### Ανακάλυψη μιονίου

Ως τώρα συναντήσαμε το μιονίο τόσο στην αποδιέγερση του πιονίου όσο και πιο πάνω όπου περιγράφεται η διάσπασή του. Η αρχική παρατήρηση του μιονίου έγινε πάλι από την ομάδα του Anderson και πιο συγκεκριμένα από τον Neddermeyer στο CalTech των ΗΠΑ. Η πειραματική διάταξη ήταν παρόμοια με αυτή της ανακάλυψης του ποζιτρονίου. Δηλαδή, αποτελούταν από έναν θάλαμο νέφωσης σε γνωστό και ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο. Από τις φωτογραφίες των παρατηρούμενων τροχιών και πιο συγκεκριμένα από την καμπυλότητα της τροχιάς των φορτισμένων σωματιδίων μπορούσαν να υπολογίσουν την ορμή τους. Τα σωματίδια κοσμικής ακτινοβολίας αυτή την φορά διέρχονταν από ένα φύλλο πλατίνας πάχους 1cm. Από την ακτίνα της τροχιάς των σωματιδίων πριν και μετά την διέλευση τους από το πλακίδιο της πλατίνας μπορούσαν να υπολογίσουν την απώλεια ενέργειας που υφίστανται κάθε φορά τα σωματίδια αυτά. Για 55 διαφορετικές τροχιές σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας με ενέργειες μικρότερες των 500 MeV έγινε ο υπολογισμός της απώλειας ενέργειας που υφίστανται κατά την διέλευση του από το πλακίδιο πλατίνας. Όπως φαίνεται από το δεξί μέρος του σχήματος 2 παρουσιάζονται δύο ομάδες σωματιδίων με διαφορετικό ρυθμό απώλειας ενέργειας. Η μία από αυτές τις ομάδες (η δεξιότερη κορυφή) παρουσιάζει ποσοστό απώλειας ενέργειας ίδιο με αυτό του ηλεκτρονίου (εκείνη την εποχή μπορούσαν ήδη να την υπολογίσουν). Η κορυφή εκείνη που αντιστοιχεί στο χαμηλότερο ποσοστό απώλειας ενέργειας προφανώς αντιστοιχεί σε κάποιο σωματίδιο το οποίο έχει μάζα μεγαλύτερη από αυτή του ηλεκτρονίου. Πολύ γρήγορα οι ερευνητές κατέληξαν στο γεγονός ότι το σωματίδιο αυτό είναι το μιονίο με μάζα περίπου 200 φορές μεγαλύτερη από αυτή του ηλεκτρονίου και φορτίο ίδιο με αυτό του ηλεκτρονίου.



**Σχήμα 2: Ανακάλυψη μιονίου:** Στο αριστερό σχήμα αποδίδεται η απώλεια ενέργειας των σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας ως συνάρτηση της αρχικής τους ενέργειας. Στο δεξιό σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή της απώλειας ενέργειας ως ποσοστό της αρχικής ενέργειας των σωματιδίων. Από την παρατήρηση του δεξιού ιστογράμματος παρατηρούμε την ύπαρξη δύο κορυφών. Δηλαδή μία συγκέντρωση γεγονότων στην περιοχή 0.8-1.0 και άλλη μία συγκέντρωση γεγονότων για μικρότερο ποσοστό απώλειας ενέργειας, στην περιοχή 0.0-0.2. Αυτή ήταν και η πρώτη παρατήρηση των μιονίων μια και τα σωματίδια με την μεγάλη απώλεια ενέργειας αντιστοιχούσαν στα ήδη γνωστά ηλεκτρόνια τα σωματίδια με το μικρό ποσοστό απώλειας ενέργειας αντιστοιχούν στα μόνια.

## Παράδειγμα

Έχοντας υπόψη την διατήρηση των λεπτονικών αριθμών τώρα μπορούμε να δικαιολογήσουμε το ότι οι παρακάτω αποδιεγέρσεις δεν παρατηρούνται:

α)  $\mu \rightarrow e^- + \gamma$  Αριστερά:  $L_\mu=1, L_e=0$  | Δεξιά:  $L_\mu = 0, L_e = 1$

β)  $\mu \rightarrow e + 2\nu_\mu$  Αριστερά:  $L_\mu=1, L_e=0$  | Δεξιά:  $L_\mu = 2, L_e = 1$