

ΔΙΑΣΠΑΣΗ ΒΗΤΑ (Beta Decay)

η διάσπαση βήτα οφείλεται στην "κρίση μέσης ηλικίας" ενός down quark και σ' ένα "σκιερό" μποζόνιο με τάση για αυτοκαταστροφή.

Η διάσπαση βήτα είναι μία πυρηνική αντίδραση η οποία γίνεται υπό την ασθενή αλληλεπίδραση και κατά την οποία ένας ατομικός πυρήνας μεταστοιχειώνεται σε έναν άλλο διαφορετικό πυρήνα, εκπέμποντας ένα σωματίο β. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια ενός μποζονίου W , το οποίο όντας ασταθές αυτοκαταστρέφεται μέσα σε ελάχιστο χρόνο δίδοντας την απαραίτητη ενέργεια για να πραγματοποιηθεί η αντίδραση. Μια περαιτέρω ανάλυση ακολουθεί στο παρακάτω πλαίσιο κειμένου.

Βαθύτερη ανάλυση της μεταστοιχείωσης του n^0 σε p^+

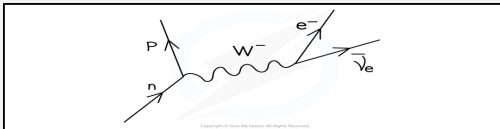
Το σχόλιο αυτό αναφέρεται στη διάσπαση β^- , παρόμοια όμως ισχύουν και στη διάσπαση β^+

Στη σωματιδιακή φυσική, αν μια κατάσταση έχει άρτιο αριθμό φερμιονίων είναι μποζόνιο (ακέραιο σπιν) ενώ αν έχει περιττό αριθμό φερμιονίων είναι φερμιόνιο (ημιακέραιο σπιν). Στη διάσπαση β^- τα νετρόνιο, πρωτόνιο και ηλεκτρόνιο είναι φερμιόνια, γι' αυτό στην αντίδραση $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ είναι απαραίτητη η παρουσία του $\bar{\nu}_e$ στα παραγόμενα σωματίδια,

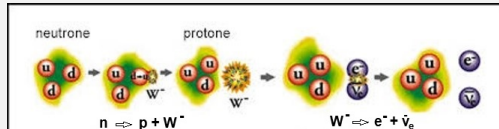
ώστε να μην παραβιάζεται ο αριθμός φερμιονίων και η διατήρηση σπιν.

Η διάσπαση β λαμβάνει χώρα υπό την ασθενή αλληλεπίδραση, η οποία γίνεται, με τη διαμεσολάβηση του μποζονίου W , ουσιαστικά σε δύο στάδια όπως παρακάτω:

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



Εικόνα Πλαισίου(ι): Το διάγραμμα Feynman για τη διάσπαση β^- . Στην αριστερά κορυφή του διαγράμματος φαίνεται η διαμεσολάβηση του μποζονίου W^- το οποίο δίνει ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντινεutrino στη δεξιά κορυφή.



Εικόνα Πλαισίου(ιι): Τα δύο στάδια της διάσπασης β^- . Πρώτα το νετρόνιο μεταστοιχειώνεται σε πρωτόνιο και μποζόνιο W^- και στη συνέχεια το μποζόνιο στην ηλεκτρασθενή αλληλεπίδραση μετατρέπεται σε ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντινεutrino.

Η μετατροπή του νετρονίου σε πρωτόνιο γίνεται καθώς ένα d - quark του νετρονίου μετατρέπεται, με τη βοήθεια της ασθενούς αλληλεπιδράσεως, σε u - quark, στη συνέχεια το μποζόνιο W^- της ασθενούς αλληλεπιδράσεως μεταστοιχειώνεται σε ένα ηλεκτρόνιο e^- και ένα αντινεutrino ηλεκτρονίου $\bar{\nu}_e$.

Υπάρχουν δύο καταστάσεις στις οποίες μπορεί να καταλήξει η διάσπαση βήτα.

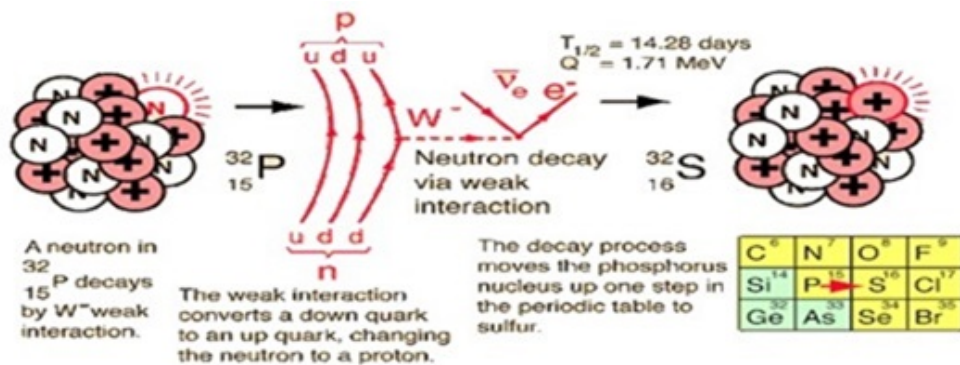
-Η περίπτωση που ο αρχικός ατομικός πυρήνας (π.χ ${}^A_Z\mathbf{X}$) μεταστοιχειωθεί σε πυρήνα με ατομικό αριθμό¹ αυξημένο κατά ένα (δηλαδή ${}^A_{Z+1}\mathbf{X}$), και το σωματίδιο β που εκπέμπεται είναι ηλεκτρόνιο (e^-), ονομάζεται ειδικότερα **διάσπαση β^-**

-Η περίπτωση δε, που ο ατομικός πυρήνας μεταστοιχειώνεται σε πυρήνα με ατομικό αριθμό¹ ελαττωμένο κατά ένα (δηλαδή ${}^A_{Z-1}\mathbf{X}$), και το σωματίδιο β που εκπέμπεται είναι ποζιτρόνιο (e^+) ονομάζεται ειδικότερα **διάσπαση β^+**

-Ως μια ειδική περίπτωση διασπάσεως β θα μπορούσε να θεωρηθεί και η **διπλή βήτα διάσπαση**, κατά την οποία δυο νετρόνια στον πυρήνα μετατρέπονται σε δυο πρωτόνια και ταυτόχρονα παράγονται δυο ηλεκτρόνια και δυο αντινετρίνα του ηλεκτρονίου.

-Τέλος μια ακόμη ειδική περίπτωση, η ονομαζόμενη ως **σύλληψη ηλεκτρονίου**, εξετάζεται μαζί με τις προαναφερθείσες ως διάσπαση β . Εδώ ένα τροχιακό ηλεκτρόνιο που βρίσκεται πολύ κοντά στον πυρήνα συλλαμβάνεται από ένα πρωτόνιο του πυρήνα και έχουμε τη μεταστοιχείωση τους σε νετρόνιο στον πυρήνα.

Σε όλες τις παραπάνω αντιδράσεις ο μαζικός αριθμός του πυρήνα (πρωτόνια + νετρόνια) παραμένει σταθερός.



Εικόνα 1: Μια αναπαράσταση της διάσπασης β^- στον πυρήνα του φωσφόρου (${}^{32}_{15}\text{P}$) του οποίου το ένα από τα νετρόνια μεταστοιχειώνεται σε πρωτόνιο μετατρέποντας τον αρχικό πυρήνα (φωσφόρο) σε πυρήνα θείου (${}^{32}_{16}\text{S}$) εκπέμποντας ταυτόχρονα ένα ηλεκτρόνιο (e^-) και ένα αντινετρίνο ηλεκτρονίου ($\bar{\nu}_e$). Στο τμήμα του περιοδικού πίνακα (κάτω δεξιά) φαίνεται η μετακίνηση του στοιχείου του πυρήνα, κατά μία θέση δεξιά, μετά τη διάσπαση β^-

Διάσπαση β^-

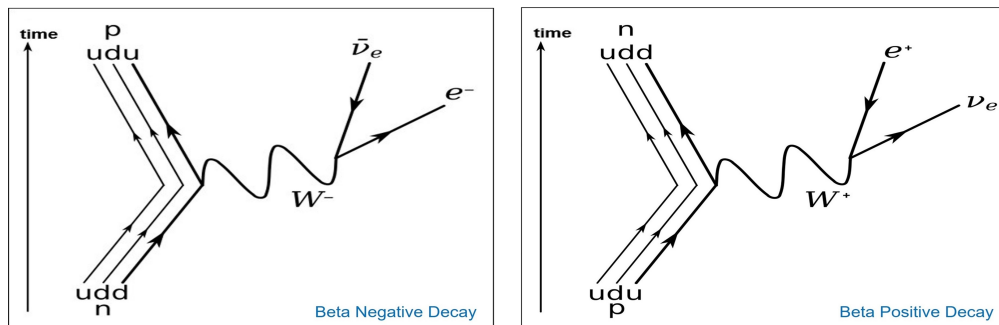
Η πραγματική φύση της διάσπασης β^- είναι στην ουσία η διάσπαση ενός νετρονίου (n^0) σε ένα πρωτόνιο (p^+), ένα ηλεκτρόνιο (e^-) και ένα αντινετρίνο του ηλεκτρονίου ($\bar{\nu}_e$) και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

¹Ατομικός αριθμός ονομάζεται ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα ενός ατόμου. Καθορίζει την ταυτότητά του κάθε χημικού στοιχείου και συμβολίζεται διεθνώς με το γράμμα Z. Εκφράζει επίσης και τον αριθμό των ηλεκτρονίων ενός ουδέτερου ατόμου, καθώς στα ουδέτερα άτομα ο αριθμός των πρωτονίων και των ηλεκτρονίων είναι ίσος. Κατά τον συμβολισμό ενός στοιχείου ή ενός πυρήνα ο ατομικός αριθμός γράφεται συνήθως ως δείκτης στην κάτω αριστερή γωνία του συμβόλου.

Όταν αυτή η αντίδραση λαμβάνει χώρα μέσα στον πυρήνα κάποιου στοιχείου, το γεγονός ότι κατά τη διάσπαση β^- εκπέμπεται ένα (e^-) και ένα ($\bar{\nu}_e$) δε σημαίνει ότι αυτά τα δύο στοιχειώδη σωματίδια υπήρχαν από πριν μέσα στον πυρήνα· τα σωματίδια αυτά προέκυψαν κατά τη μετατροπή του νετρονίου σε πρωτόνιο.

Συγκεκριμένα η αντίδραση λαμβάνει χώρα υπό ασθενή αλληλεπίδραση, και σε επίπεδο *quarks*, δηλαδή εντός του νετρονίου, αυτό έχει να κάνει με την μετατροπή του ενός d (down) quark του νετρονίου σε u (up) quark με ταυτόχρονη εκπομπή ενός δυνητικού μποζονίου W^- που είναι ο φορέας της ασθενούς αλληλεπιδράσεως. (βλέπε Εικόνα 2 Αριστερά)



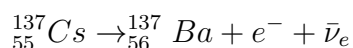
Εικόνα 2: (Αριστερά) Το διάγραμμα *Feynman* για τη διάσπαση β^- . Κατά την αντίδραση αυτή το ένα από τα δύο d – quark του νετρονίου μετατρέπεται σε u – quark και το νετρόνιο γίνεται πρωτόνιο κάτω από την ασθενή αλληλεπίδραση και με την εκπομπή ενός δυνητικού μποζονίου W^- . (Δεξιά) Στη διάσπαση β^+ ένα u – quark του πρωτονίου μετατρέπεται σε d – quark και το πρωτόνιο γίνεται νετρόνιο υπό την ασθενή αλληλεπίδραση και την εκπομπή ενός δυνητικού μποζονίου W^+ .

Παρατηρούμε ότι στην αντίδραση της διάσπασης β^- δεν παραβιάζεται η διατήρηση φορτίου, σπιν και λεπτονικού αριθμού. Πράγματι το νετρόνιο έχει φορτίο 0 όσο και το άθροισμα φορτίου των παραγομένων σωματιδίων $[(+1)+(-1)+0=0]$, επίσης το νετρόνιο έχει σπιν $+\frac{1}{2}$ όσο και το άθροισμα των σπιν των παραγομένων σωματιδίων $+\frac{1}{2}$ του πρωτονίου και του ηλεκτρονίου και $-\frac{1}{2}$ του αντινετρίνο (ως αντισωματιδίου). Ο λεπτονικός αριθμός διατηρείται καθώς από ένα νετρόνιο με λεπτονικό αριθμό μηδέν παράγονται δύο λεπτόνια με αντίθετο λεπτονικό αριθμό (ηλεκτρόνιο και αντινετρίνο).

ΣΗΜΕΙΩΣΗ

Καθώς η μάζα του νετρονίου είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των μαζών του πρωτονίου και του ηλεκτρονίου, δεν απαιτείται ενέργεια για να λάβει χώρα η διάσπαση β^- , οπότε τα ελεύθερα νετρόνια μπορούν διασπώνται αυθόρμητα, που σημαίνει ότι η αντίδραση μπορεί να γίνει μεμονωμένα και εκτός πυρήνα.

Μία χαρακτηριστική περίπτωση διάσπασης β^- είναι η μεταστοιχείωση του πυρήνα του Καισίου ($^{137}_{55}\text{Cs}$) σύμφωνα με την αντίδραση:



Ο μητρικός πυρήνας $^{137}_{55}\text{Cs}$ μεταστοιχειώνεται στον θυγατρικό $^{137}_{56}\text{Ba}$, ο οποίος έχει ένα πρωτόνιο περισσότερο (ο ατομικός αριθμός του είναι $Z = 56 = 55 + 1$ ενώ ο μαζικός του αριθμός² παραμένει ίδιος με εκείνον του πυρήνα του καισίου δηλαδή $A = 137$), εκπέμποντας ένα ηλεκτρόνιο (e^-) και ένα αντινεutrino του ηλεκτρονίου ($\bar{\nu}_e$), τα οποία δεν υπήρχαν από πριν στον πυρήνα αλλά προέκυψαν από τη μετατροπή του νετρονίου σε πρωτόνιο.

Διάσπαση β^+

Παρομοίως η πραγματική φύση της διάσπασης β^+ είναι στην ουσία η μετατροπή ενός πρωτονίου (p^+) σε ένα νετρόνιο (n^0), με την εκπομπή ενός ποζιτρονίου (e^+) και ενός νετρίνιο του ηλεκτρονίου (ν_e) και περιγράφεται από την εξίσωση:

$$p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e$$

Ομοίως κι εδώ δεν θα πρέπει να γίνει παρανόηση ότι το ποζιτρόνιο και το νεutrino ηλεκτρονίου προϋπήρχαν στον πυρήνα, προέκυψαν, όπως και στη διάσπαση β^- , από τη μετατροπή του πρωτονίου σε νετρόνιο.

Η αντίδραση λαμβάνει χώρα υπό την ασθενή αλληλεπίδραση και αυτό που συμβαίνει στο εσωτερικό του πρωτονίου είναι η μετατροπή ενός $u - quark$ σε $d - quark$ με ταυτόχρονη εκπομπή ενός δυνητικού μποζονίου W^+ . (βλέπε Εικόνα 1 Δεξιά)

Χαρακτηριστική περίπτωση διάσπασης β^+ είναι η μεταστοιχείωση του πυρήνα του Νατρίου ($^{22}_{11}\text{Na}$) σύμφωνα με την αντίδραση:



όπου ο μητρικός πυρήνας ($^{22}_{11}\text{Na}$) μεταστοιχειώνεται στον θυγατρικό ($^{22}_{10}\text{Ne}$), ο οποίος έχει ένα πρωτόνιο λιγότερο (ατομικός αριθμός Νέον: $Z = 10 = 11 - 1$) ενώ παρά τη δημιουργία ενός επιπλέον νετρονίου ο μαζικός αριθμός παραμένει σταθερός δηλαδή $A = 22$, λόγω της ταυτόχρονης απώλειας (μεταστοιχείωσης) ενός πρωτονίου. Κατά τη διαδικασία αυτή δημιουργήθηκαν το ποζιτρόνιο και το νεutrino ηλεκτρονίου τα οποία δεν προϋπήρχαν στον πυρήνα αλλά προέκυψαν από τη μετατροπή του πρωτονίου σε νετρόνιο.

Και στη διάσπαση β^+ δεν παραβιάζεται η διατήρηση φορτίου (το πρωτόνιο έχει φορτίο $(+1)$ όσο και το παραγόμενο ποζιτρόνιο ενώ τα παραγόμενα νετρόνιο και νεutrino δεν έχουν φορτίο), ούτε η διατήρηση σπιν (το σπιν του ποζιτρονίου και νετρίνιο ηλεκτρονίου αλληλοεξουδετερώνονται, οπότε το σπιν του πρωτονίου διατηρείται στο παραγόμενο νετρόνιο). Τέλος και ο λεπτονικός αριθμός διατηρείται αφού το ποζιτρόνιο είναι αντιλεπτόνιο και το νεutrino ηλεκτρονίου είναι λεπτόνιο).

²Μαζικός αριθμός ενός στοιχείου είναι το άθροισμα των πρωτονίων και νετρονίων του πυρήνα. Έτσι στην παραπάνω αντίδραση, ενώ ο ατομικός αριθμός του θυγατρικού στοιχείου αυξήθηκε-γί αυτό και το Cs έγινε Ba- ο μαζικός του αριθμός παρέμεινε ίδιος.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ

Η διάσπαση β^+ δεν είναι δυνατόν να λάβει χώρα *αυθόρμητα* λόγω του ότι το νετρόνιο έχει μεγαλύτερη μάζα από το πρωτόνιο. Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί θα πρέπει να της δώσουμε ενέργεια. Καθώς λοιπόν απαιτείται η παρουσία ενέργειας, το πρωτόνιο μπορεί να διασπαστεί προς νετρόνιο μόνο μέσα στον πυρήνα.³

Διπλή Διάσπαση β

Η διπλή διάσπαση β είναι μια δευτεροτάξια ασθενής διαδικασία κατά την οποία δύο πρωτόνια μετατρέπονται ταυτόχρονα σε δύο νετρόνια (ή αντίθετα) μέσα στον ατομικό πυρήνα. Ως αποτέλεσμα της μετατροπής αυτής, ο πυρήνας εκπέμπει δύο ανιχνεύσιμα σωματίδια β τα οποία είναι ποζιτρόνια (ή ηλεκτρόνια).

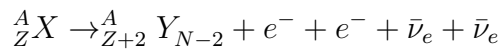
Παρατηρούνται δύο κατηγορίες διπλής β διάσπασης:

- Η συνήθης διπλή β διάσπαση
- Η διπλή διάσπαση χωρίς νετρίνα.

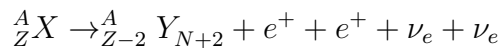
α. Η συνήθης διπλή β διάσπαση (Εικόνα 3α)

Λόγω της ενέργειας ζευγαρώματος των νουκλεονίων οι άρτιοι-άρτιοι⁴ πυρήνες είναι συνδεδεμένοι πιο ισχυρά από ότι οι γειτονικοί τους περιττοί-περιττοί⁴ και δεν μπορούν να δώσουν μια απλή διάσπαση β . Όμως ένας αριθμός τέτοιων άρτιων-άρτιων πυρήνων που δεν μπορούν να δώσουν απλή διάσπαση β (με τις προϋποθέσεις μάζας-ενέργειας που αναφέραμε, δηλαδή του ισχυρού ζευγαρώματος των νουκλεονίων) μπορούν (σπανίως μεν αλλά μπορούν) με αυτές τις ίδιες προϋποθέσεις να διασπαστούν με μια διπλή διάσπαση β .

Η διπλή διάσπαση β είναι αλληλεπίδραση δύο βημάτων και περιγράφεται στην παρακάτω αντίδραση:



όταν πρόκειται για διπλή διάσπαση β^- , και



όταν πρόκειται για διπλή διάσπαση β^+ .

Στην πρώτη αντίδραση δύο νετρόνια του μητρικού πυρήνα A_ZX μεταστοιχειώνονται σε δύο πρωτόνια στον θυγατρικό πυρήνα ${}^A_{Z+2}Y_{N-2}$ (πράγματι ο αριθμός νετρονίων του θυγατρικού είναι μειωμένος κατά 2, ενώ ο ατομικός αριθμός -αριθμός πρωτονίων- του είναι $Z + 2$ αυξημένος κατά 2).

³Η διαφορά των ενεργειών σύνδεσης μεταξύ μητρικού και θυγατρικού πυρήνα ισούται με τη διαφορά μάζας μεταξύ του πρωτονίου και του νετρονίου.

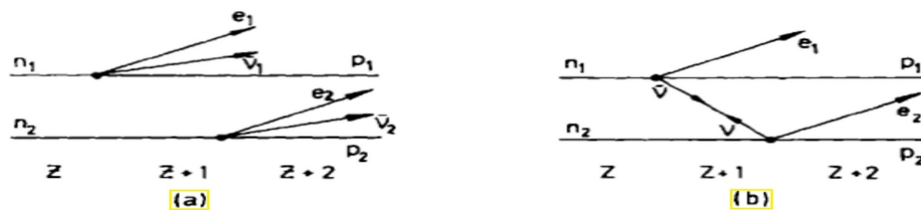
⁴Άρτιοι-άρτιοι ονομάζονται οι πυρήνες των οποίων είναι άρτιος και ο αριθμός των πρωτονίων και ο αριθμός των νετρονίων. Ανάλογα περιττοί-περιττοί ονομάζονται οι πυρήνες των οποίων και ο αριθμός των πρωτονίων και ο αριθμός των νετρονίων είναι περιττός.

Αντίστοιχα στη δεύτερη αντίδραση δύο πρωτόνια του μητρικού πυρήνα A_ZX μετασχηματίζονται σε δύο νετρόνια στον θυγατρικό πυρήνα ${}^A_{Z-2}Y_{N+2}$ (πράγματι εδώ, στον θυγατρικό πυρήνα, έχουμε δύο πρωτόνια λιγότερα $[Z - 2]$ και δύο νετρόνια περισσότερα $[N + 2]$).

Να σημειωθεί ότι και στις δύο αντιδράσεις ο μαζικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα παραμένει ίδιος με εκείνον του μητρικού

$$A_Y = Z + 2 + (N - 2) = Z - 2 + (N + 2) = Z + N = A_X$$

όπως αναμένεται.



Εικόνα 3: (α) Στη συνήθη διπλή β διάσπαση σε δύο διαδοχικά βήματα μετασχηματίζονται δύο νετρόνια σε πρωτόνια και παράγονται δύο ηλεκτρόνια και δύο αντινεutrino ηλεκτρονίων (β) Στη διπλή διάσπαση χωρίς νετρίνα η διαδικασία είναι ίδια με μόνη διαφορά το ότι τα παραγόμενα νετρίνα είναι τύπου *Majorana*, οπότε το ένα μπορεί να θεωρηθεί ως νετρίνο και το δεύτερο ως αντινετρίνο, ώστε αλληλοεξουδετερώνονται και μένουν ως παραγόμενα μόνο δύο πρωτόνια και δύο ηλεκτρόνια.

Επειδή είναι αλληλεπίδραση δύο βημάτων, η διπλή διάσπαση β είναι σπάνιο φαινόμενο. Οι υποψήφιοι πυρήνες για μια τέτοια διάσπαση έχουν χρόνο ημιζωής της τάξεως των 10^{20} χρόνια, έτσι το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πολύ δύσκολα.

β. Η διπλή διάσπαση χωρίς νετρίνα (Εικόνα 3b)

Έχουμε αναφέρει πως κατά τη διάσπαση β διατηρείται το φορτίο, το σπιν και ο λεπτονικός αριθμός.

Ειδικά για την διατήρηση του λεπτονικού αριθμού ισχύει ο κάτωθι συλλογισμός: "Το νετρίνο και το πρωτόνιο είναι αδρόνια. Δεδομένου ότι αν το λεπτόνιο που λέγεται ηλεκτρόνιο έχει λεπτονικό αριθμό $+1$, το αντिलепτόνιο που λέγεται αντινετρίνο θα έχει -1 , με την εκπομπή του ηλεκτρονίου και του αντινετρίνο, ο συνολικός λεπτονικός αριθμός θα είναι 0 όσο και πριν τη διάσπαση β."

Στην περίπτωση όμως που παραβιαστεί ο λεπτονικός αριθμός της αντιδράσεως (αυτό θα μπορούσε να συμβεί με τη συμμετοχή στην αντίδραση *Majorana*⁵ νετρίνων) τότε μπορεί να συμβεί μία διαφορετική εκδοχή της διπλής βήτα διάσπασης κατά την οποία δεν έχουμε εκπομπή νετρίνων.

⁵Τα νετρίνο *Majorana* είναι αυτά που δεν διαφέρουν από τα αντίστοιχα αντινετρίνο τους. Περισσότερα για τα νετρίνο *Majorana* βλέπε στο ακόλουθο πλαίσιο κεκλιμένου.

Αυτό συμβαίνει διότι αφού τα νετρίνο που εκπέμπονται από τη διπλή διάσπαση β είναι *Majorana*, αλληλοεξουδετερώνονται μεταξύ τους.

Πράγματι το αντινετρίνο που εκπέμπεται από το ένα νετρόνιο (κατά τη διάσπασή του) συναντά το αντινετρίνο που εκπέμπεται από το δεύτερο νετρόνιο και που μπορεί (ως *Majorana*) να θεωρηθεί νετρίνο, με αποτέλεσμα την εξάλυσή τους (ύλη-αντιύλη). [Το ίδιο μπορεί να συμβεί και στη διπλή διάσπαση πρωτονίου-διπλή διάσπαση β^+]

Νετρίνο "*Majorana*"

Η θεωρία του *Majorana*^{α'} για τα πανομοιότυπα νετρίνο με τα αντινετρίνο τους, βασίστηκε στην ιδέα του *Feynman* να περιγράφει τα αντισωματίδια (αντιύλη) ως σωματίδια (ύλη) που όμως κινούνται πίσω στο χρόνο. Στα διαγράμματά του ο *Feynman* αναπαριστά το ποζιτρόνιο (αντιηλεκτρόνιο), ως ένα ηλεκτρόνιο με αντίθετη όμως, στην κατεύθυνση του χρόνου, φορά βέλους εκείνης του ηλεκτρονίου.

Ο *Majorana* συλλογίστηκε πως ένα σωματίδιο που είναι φορτισμένο, σαφώς θα πρέπει να διαφέρει από το αντισωματίδιό του, διότι εάν το αναγκάσουμε να κινηθεί προς τα πίσω στον χρόνο, το φορτίο του αντιστρέφεται. Αν όμως, το σωματίδιο είναι ηλεκτρικώς ουδέτερο, ή χωρίς φορτίο – όπως το νετρίνο – τότε δεν θα ήταν απαραίτητο να διακρίνεται από το αντισωματίδιό του (αντινετρίνο του).

Έτσι Ο *Majorana* διατύπωσε τον τολμηρό ισχυρισμό ότι:

"ένα νετρίνο που κινείται προς τα πίσω στον χρόνο είναι ίδιο με ένα νετρίνο που κινείται προς τα εμπρός στον χρόνο."

Σύμφωνα με τον *Majorana*, αυτό που ονομάζουμε νετρίνο είναι ουσιαστικά μια χβαντική υπέρθεση σωματιδίων που κινούνται τόσο προς τα εμπρός όσο και προς τα πίσω στον χρόνο, στον ίδιο βαθμό, ή με ίσες πιθανότητες, έτσι ώστε να μην υπάρχει καμιά ασυμμετρία.

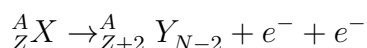
Νετρίνο και αντινετρίνο είναι πανομοιότυπα.

Και αν θεωρείτε ότι η γάτα του *Schrödinger* ήταν "σχιζοφρενική" επειδή δεν είχε αποφασίσει αν είναι νεκρή ή ζωντανή ... το νετρίνο του *Majorana* είναι ακόμα χειρότερο!!!

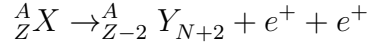
Είναι μια ψυχωτική υπέρθεση αντίθετων βελών του χρόνου που καθίσταται δυνατή χάρη στην χβαντική δυνατότητα της υπέρθεσης αντίθετων καταστάσεων.

^{α'}Ο *Ettore Majorana* (5 Αυγούστου 1906 - ;) ήταν Ιταλός θεωρητικός φυσικός, που μελέτησε τα στοιχειώδη σωματίδια. Στις 25 Μαρτίου 1938 εξαφανίστηκε μυστηριωδώς ενώ ταξίδευε με πλοίο από το Παλέρμο στη Νάπολη. Τα "Σωματίδια *Majorana*" και η "Εξίσωση *Majorana*" ονομάστηκαν έτσι προς τιμή του, όπως και το Βραβείο *Majorana*, που εγκαινιάστηκε το 2006 με αφορμή την εκατονταετία από τη γέννησή του.

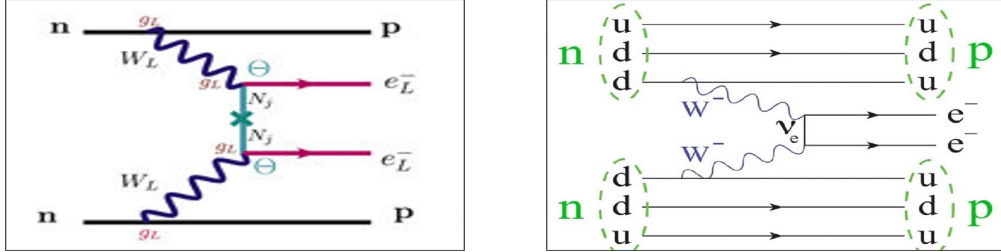
Εάν λοιπόν τα νετρίνο που εκπέμπονται από την διπλή διάσπαση β είναι νετρίνα *Majorana*, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η διπλή βήτα διάσπαση χωρίς νετρίνα. Στην περίπτωση αυτή, στην ουσία, τα 2 νετρίνα εκμηδενίζουν το ένα το άλλο και οδηγούμαστε στην διαδικασία:



όταν πρόκειται για διπλή διάσπαση β^- χωρίς νετρίνα, και



όταν πρόκειται για διπλή διάσπαση β^+ χωρίς νετρίνα. (βλέπε Εικόνα 4)



Εικόνα 4: (Αριστερά) Το διάγραμμα *Feynman* για τη διπλή διάσπαση β^- χωρίς νετρίνα.

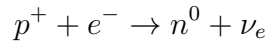
(Δεξιά) Η διπλή διάσπαση β^- χωρίς νετρίνα με τη συμμετοχή των *quarks*, των νετρονίων, στη διαδικασία. Στο διάγραμμα *Feynman*, τα νετρίνα είναι εικονικά σωματίδια (αλληλοεξουδετερώνονται), οπότε έχουμε την ύπαρξη μόνο των δύο ηλεκτρονίων στην τελική κατάσταση.

Σύλληψη ηλεκτρονίου (EC)

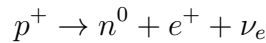
Η κυματική φύση της κίνησης των ηλεκτρονίων σε ένα άτομο, με τη βοήθεια της εξίσωσης *Schrödinger*, με την οποία αξιωματικά θεμελιώνεται η κβαντική μηχανική, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κάποια τροχιακά ηλεκτρόνια του ατόμου είναι πιθανό (με μία μικρή, αλλά σε καμία περίπτωση μηδενική πιθανότητα) να βρεθούν μέσα στον πυρήνα.⁶

Στην εικόνα 5 αριστερά φαίνεται η τομή με ένα επίπεδο της πυκνότητας πιθανότητας (δηλαδή του μέτρου της κυματοσυνάρτησης στο τετράγωνο) του ηλεκτρονίου στη βασική στάθμη του ατόμου του υδρογόνου. Εδώ φυσικά θα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι η σύλληψη ηλεκτρονίου δεν γίνεται στο άτομο του υδρογόνου, για ενεργειακούς λόγους. Αυτή γίνεται συνήθως σε βαρείς πυρήνες, οπότε και η πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο μέσα στον πυρήνα είναι πολύ μεγαλύτερη.

Όταν αυτό συμβεί, τότε τα πρωτόνια συλλαμβάνουν αυτά τα ηλεκτρόνια, τα δεσμεύουν και μεταστοιχειώνονται σε νετρόνια εκπέμποντας ένα νετρίνο του ηλεκτρονίου. (βλέπε Εικόνα 5) Συμβολικά η αντίδραση έχει ως εξής:

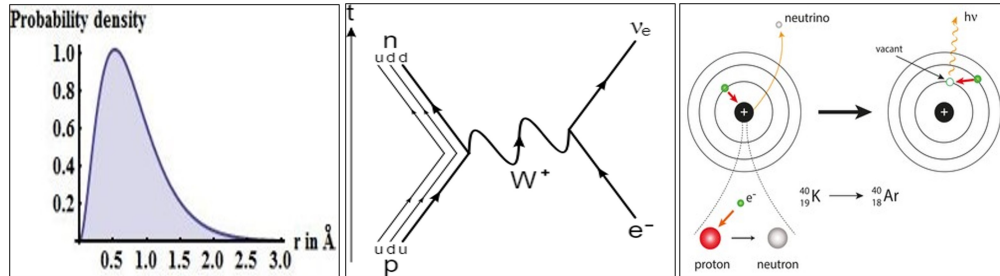


και θα μπορούσε να ισχυριστεί κάποιος ότι δεν διαφέρει από την διάσπαση β^+ που περιγράψαμε παραπάνω ως:



⁶Σύμφωνα με την Κβαντομηχανική, τα ηλεκτρόνια δεν περιγράφονται σύμφωνα με την αντίληψη του μοντέλου *Bohr*, δηλαδή του 'πλανητικού' μοντέλου. Με τη νέα θεωρία η κατανομή του ηλεκτρονίου στα σημεία γύρω από τον πυρήνα αποτελεί ένα νέφος πιθανοτήτων, με κάποιες πιθανότητες (ελάχιστες αλλά όχι μηδενικές) να θέλουν το ηλεκτρόνιο να βρísκεται εντός του πυρήνα.

Η διαφορά της σύλληψης ηλεκτρονίου από την διάσπαση β^+ έχει να κάνει με τις συνθήκες κάτω από τις οποίες λαμβάνει χώρα η καθεμία. Η βασικότερη όμως διαφορά, όπως είπαμε και λίγο πιο πάνω, είναι ότι η σύλληψη του ηλεκτρονίου γίνεται συνήθως σε βαρείς πυρήνες.

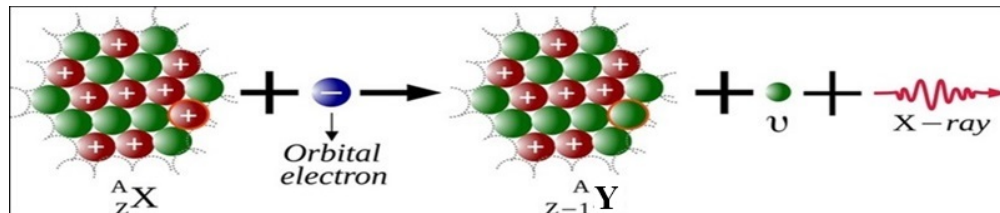


Εικόνα 5: (Αριστερά) Η πυκνότητα πιθανότητας του ηλεκτρονίου στη βασική στάθμη ($1s$) του ατόμου του υδρογόνου. (Κέντρο) Το διάγραμμα Feynman για την σύλληψη ηλεκτρονίου. (Δεξιά) Μια αναπαράσταση της διαδικασίας σύλληψης ηλεκτρονίου στον πυρήνα του Καλίου ($^{40}_{19}\text{K}$).

Η ενεργειακή συνθήκη για να συμβεί σύλληψη ηλεκτρονίου είναι:

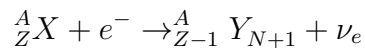
$$M_X - M_Y > W_i$$

όπου M_X και M_Y είναι οι μάζες του μητρικού και θυγατρικού πυρήνα αντίστοιχα και W_i είναι η ενέργεια σύνδεσης του e^- της i -στοιβάδας του μητρικού πυρήνα.



Εικόνα 6: Μια καλλιτεχνική απεικόνιση της σύλληψης ηλεκτρονίου.

Η διαδικασία της σύλληψης ηλεκτρονίου στον πυρήνα περιγράφεται από την αντίδραση:



και μια καλλιτεχνική της απεικόνιση δίδεται στην Εικόνα 6.

Ιωάννης Χρ. Αγαπάκης
Θεσσαλονίκη, 30 Νοεμβρίου 2024

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Feynman R. P. (1949) «The Theory of Positrons Physical Review, vol.76, Issue 6, pp. 749-759

[2] Penco R., Mauro D. (2006) «Perturbation theory via Feynman diagrams in classical mechanics», European Journal of Physics, vol.27, pp.1241–1250

[3] Martinus Veltman (1994) «Diagrammatica: The Path to Feynman Diagrams, Cambridge Lecture Notes in Physics, Series Number 4», Cambridge University Press

[4] Cottingham W.N, Greenwood D.A (2001) «An Introduction to nuclear physics», Cambridge University Press

[5] Heyde K. (1999) «Basic Ideas and Concepts in Nuclear Physics», Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia

[6] Elliott S. R. (2006) «Introduction to the Double-Beta Decay Experimental Program»

[7] Gluza J., Zrafek M.(1992) «Feynman rules for Majorana-neutrino Interactions» Physical Review Vol.45, Nr.5 pp.1693-1700

[8] Vassh N., Grohs E., Balantekin A. B., Fuller G. M (2015) «Majorana Neutrino Magnetic Moment and Neutrino Decoupling in Big Bang Nucleosynthesis»

[9] Recami Erasmo (2017) «Majorana, the Neutron, and the Neutrino Some Elementary Historical Memories» Hadronic Journal, 40, 149

[10] Τραχανάς Στ. (2005) «Κβαντομηχανική Ι», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο

[11] Μάσεν Στ. (2004) «Σημειώσεις Υπολογιστικής Κβαντικής Μηχανικής ΙΙ», Σπουδαστήριο Θεωρητικής Φυσικής ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη

Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

[12] <https://en.wikipedia.org/wiki/Beta-Decay>