<u>ΠΥΡΗΝΙΚΗ</u>

12 διευκρινήσεις και σημαντικά σημεία

(όχι σ' όλη την ύλη, αλλά <u>τα βασικότερα είναι εδώ</u>)

Κ. Κορδάς

1. Ο αριθμός των πυρήνων που έχω σ' ένα δείγμα μειώνεται εκθετικά με το πέρασμα του χρόνου, με σταθερά διάσπασης $\lambda = 1/\tau$, όπου τ είναι ο μέσος χρόνος ζωής (και $T_{½}$ = ο χρόνος ημίσειας ζωής που είναι λιγότερος από το μέσο χρόνο ζωής, και μάλιστα $T_{½} = \ln(2) * \tau = 0.693 * \tau$):

$$N = N_0 * \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

όπου N = πλήθος πυρήνων τη χρονική στιγμή t, και N_0 = πλήθος πυρήνων τη χρονική στιγμή t=0.
Ακριβως με τον ίδιο εκθετικό νόμο μειώνεται και η νεργότητα του δείγματος με το πέρασμα του χρόνου. Ενεργότητα = αριθμός διασπάσεων ανά μονάδα χρόνου = λ N , οπότε:

$$\lambda N = \lambda N_0 * \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

όπου λN = η ενεργότητα τη χρονική στιγμή t, και λN_0 τη στιγμή t=0.

Διαδοχικές διασπάσεις πυρήνων σε αλυσίδα είναι σαν τα συγκοινωνούντα δοχεία: κάθε δοχείο γεμίζει επειδή το προηγούμενο δοχείο αδειάζει, και ταυτόχρονα αδειάζει γεμίζοντας το επόμενο. Οπότε γράφοντας την εξίσωση για το τι κάνει κάθε "δοχείο" από το ρυθμό διάσπασης των πυρήνων στο παρόν δοχείο και στο δοχείο που τροφοδοτεί το παρόν, έχετε το σύστημα εξισώσεων που θα σας... λύσει όλες σας τις ερωτήσεις!

Ξέροντας την ενεργότητα σε κάποια στιγμή (t_0) ξέρουμε την ενεργότητα οποιαδήποτε στιγμή t (βλ. Σχέση 2 πιό πάνω). Πρακτικά, είναι η μέτρηση της ενεργότητας και το γεγονός ότι πέφτει εκθετικά (βλ. Σχέση 1) που μας επιτρέπει να μετρήσουμε το χρόνο ζωής ενός στοιχείου, και όχι η μέτρηση του ακόμη-αδιάσπαστου αριθμού πυρήνων (βλ. Σχέση 1 πιό πάνω) η οποία δεν είναι πρακτική.

2. Ραδιοχρονολόγηση

α) με C-14 (για μερρικές χιλιάδες χρόνια):
Όσο ένας βιολογικός οργανισμός (π.χ., δέντρο), είναι ζωντανός, αναπληρώνει με την αναπνοή τον αριθμό πυρήνων C-14 που διασπώνται. Από τη στιγμή όμως που πεθαίνει, παύει να το κάνει αυτό κι έτσι ο αριθμός πυρήνων (N) C-14 στο "νεκρό σώμα" μειώνεται εκθετικά, όπως φυσικά και η ενεργότητα (λN) μειώνεται εκθετικά. Μετρώντας πόση ενεργότητα έχουμε σ' ενα νεκρό δέντρο και ξέροντας πόση έχει όσο είναι ζωντανό, μπορούμε να βρούμε πόσος χρόνος πέρασε από το θάνατό του.

β) με πετρώματα (για εκατομμύρια χρόνια):
Γνωρίζονας ότι π.χ, τώρα έχουμε Χ γραμμάρια θορίου και Υ γραμμάρια μολύβδου σ' ένα δείγμα βραχου, και ξέροντας ότι όλος ο μόλυβδος ήρθε από το θόριο, και ξέροντας και το ρυθμό διάσπασης του θορίου προς το μόλυβδο, μπορούμε να βορύμε πόσα χρόνια πέρασαν να δημιουργηθούν τα Υ γραμμάρια μολύβδου από διασπάσεις θορίου.

3. Ατομική και πυρηνική μάζα στοιχείων, ενέργεια σύνδεσης
Για να βρίσκετε τις ατομικές μάζες των στοιχείων που σας χρειάζονται, μπορείτε να χρησιμοποιείτε τα

πυρηνικά δεδομένα για κάθε στοιχείο και τα ισότοπά του που τα έχουμε στο αρχείο

http://skiathos.physics.auth.gr/atlas/Nuclear_Physics/wallarge.pdf

χρησιμοποιώντας:

M(A,Z) = 931.478 * A + Δ (κι έτσι παίρνετε την ατομική μάζα σε MeV),

Όπου το Δ το βρίσκεται στους πίνακες του πιό πάνω αρχείου.

Π.χ: $\Delta(^{66}\mathrm{Ga}) = -63.724$ MeV, $\Delta(^{66}\mathrm{Zn}) = -68.899$ MeV, $\Delta(^{72}\mathrm{As}) = -68.230$ MeV, $\Delta(^{72}\mathrm{Ge}) = -72.586$ MeV

Πανεύκολα βέβαια πάει κάποιος από τις πυρηνικές στις ατομικές μάζες και τούμπαλιν:

$M_{\text{ατόμου}} = m_{\text{πυρήνα}} + Z^*m_e$

(όπου η μάζα ενός ηλεκτρονίου είναι m_e = 511 keV = 0.511 MeV)

Αναλυτικότερα,

για το πως βρίσκουμε τη μάζα και την ενέργεια σύνδεσης ενός στοιχείου.

α) μάζα του ατόμου:

Ένας τρόπος να βρίσκετε την μάζα (M) του ατόμου (=πυρήνας μαζί με τα ηλεκτρόνια γύρω του) είναι:

να πείτε ότι σε πρώτη προσέγγιση, η μάζα του ατόμου ίναι όσο ο μαζικός αριθμός (A) σε amu, δηλαδή

M = A amu

δηλαδή

M = A φορές την ατομική μονάδα μάζας (1 amu= 1/12 της μάζας του ατόμου του άνθρακα-12),

η οποία δίνει σχετικά καλή τιμή, αλλά όχι τη σωστή τιμή. Η δε διαφορά από τη σωστή τιμή μπορεί να είναι πολύ σημαντική!

Η αληθινή τιμή της μάζας αποκλίνει από την απλή πρώτη προσέγγιση κατά Δ :

Δ = M - A amu

Για κάποια στοιχεία το Δ είναι θετικό, για κάποια είναι αρνητικό, δηλαδή η μάζα του ατόμου μπορεί να είναι μεγαλύτερη (Δ>0) ή μικρότερη (Δ<0) από την προσέγγιση ότι M = A, και η αλήθεια είναι:

M = A + Δ , όπου το Δ χρησιμοποιείται με το πρόσημό του .

Βάζοντας το σωστό νούμερο για το Δ

(θετικό/αρνητικό, βλ. Nucear Data: http://kordas.web.cern.ch/kordas/Teaching/FYE40/wallarge.pdf)

θα υπολογίζω τη σωστή μάζα του ατόμου, σε amu πάντα. Αν θέλω να δώσω τη μάζα σε MeV/c^2, αρκεί να χρησιμοποιώ ότι: 1 amu = 931.478 MeV.

β) μάζα πυρήνα και ενέργεια σύνδεσης:

Η μάζα, M, που βρήκαμε παραπάνω είναι η ατομική μάζα (πυρήνας + ηλεκτρόνια):

M(ατόμου) = m(πυρήνα) + Z*m_e , όπου m_e είναι η μάζα του ηλεκτρονίου.

(εδώ έπρεπε να είχαμε αφαιρέσει και την ενέργεια σύνδεσης των ατομικών ηλεκτρονίων με τον πυρήνα, αλλά είναι πάρα πολύ μικρή σε σχέση με τις μάζες των ηλεκτρονίων και φυσικά και του πυρήνα, οπότε την αγνοούμε).

Από αυτό μπορείτε να υπολογίστε φυσικά τη μάζα (m) του πυρήνα:

m(πυρήνα) = M(ατόμου) - Z*m_e

Η μάζα (m) του πυρήνα είναι πάντα μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των συστατικών του (άθροισμα πρωτονίων και νετρονίων). Το πόσο μικρότερη είναι, λέγεται συνήθως "έλλειμμα μάζας" στη βιβλιογραφία, και στις διαφάνειές μου. Η διαφορά αυτή είναι όσο η ενέργεια σύνδεσης (BE = Binding Energy, και γράφεται και σκέτο B πολές φορές) των πρωτονίων και νετρονίων μέσα στον πυρήνα:

m = Z*m(p) + N*m(n) – BE

Οπότε, γνωρίζοντας τις μαες, ξέρουμε πειραματικά την ενέργεια σύνδεσης ενός πυρήνα :

BE = Z*m(p) + N*m(n) – m(purnva)

Το μοντέλο της υγρής σταγόνας είναι ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο που προσπαθεί να εξηγήσει τις ενέργειες σύνδεσης των πυρήνων.

Σημείωση:
το να έχετε στα χέρια σας τη μάζα του ατόμου (M), αντί για τη μάζα του πυρήνα (m) είναι μιά χαρά όταν παίρνω το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ ενέργειας πρίν και μετά τη διάσπαση για να βρώ το Q (ενέργεια που ελευθερώνεται στη διάσπαση): γιατί στις μέν σχάσεις, συντήξεις, αλφα και γάμμα διασπάσεις δεν αλλάζει ο συνολικός αριθμός πρωτονίων πριν και μετά, άρα και ο αριθμός ηλεκτρονίων είναι ίδιος και άρα απαλείφεται στο ενεργειακό ισοζύγιο. Στις δε βήτα διασπάσεις που αλλάζει το αριθμός πρωτονίων και άρα και ηλεκτρονίων θα δούμε αργότερα πώς είναι οι τύποι για να βρίσκουμε το Q της αντίδρασης, όπου στους τύπους έχουμε τις ατομικές μάζες.

4. Ενεργειακή συνθήκη για πραγματοποίηση αντίδρασης

Σε μιά ανάλυση για το αν επιτρέπεται ή όχι μια αντίδραση/διάσπαση: κοιτάμε να έχουμε αρκετή ενέργεια (Q>0).
Το Q της αντίδρασης είναι η ενέργεια που περισσεύει αφ' ότου ο μητρικός έχει ξοδέψει όση ενέργεια χρειάζεται για να φτιάξει τις μάζες των προϊόντων. Οπότε το Q μοιράζεται ως κινητική ενέργεια στα προϊόντα. Το Q της αντίδρασης είναι η διαφορά μαζών μεταξύ των αντιδρώντων και των προϊόντων και μοιράζεται ως κινητική ενέργεια στα προϊόντα.
Σημείωση: Αν ένας πυρήνας δεν είναι στη θεμελιώδη κατάσταση αλλά είναι σε μια διεγερμένη, τότε φυσικά η μάζα του είναι λίγο μεγαλύτερη απ' 'οτι αν ήταν στη θεμελιώδη (μεγαλύτερη κατά όσο παραπάνω ενέργεια έχει η διεγερμένη κατάσταση από τη θεμελιώδη). Τη μάζα στη θεμελιώδη τι βρίσκουμε από τις μάζες των συστατικών πρωτονίων και νετρονίων και την ενέργεια σύνδεσης. Π.χ, αν από τη βασική στάθμη του μητρικού πάμε σε διεγερμένη κατάσταση του θυγατρικού (που έχει ενέργεια ΔΕ πιό ψηλά από τη θεμελιώδη του), τότε το σωστό $m_{θυγατρικού}$ για τον υπολογισμό της διαφοράς ενέργειας είναι: $m_{θυγατρικού}$(στη διεγερμένη κατάσταση ΔΕ) = $m_{θυγατρικού}$(στη βασική κατάσταση) + ΔΕ.
** Αν δεν διευκρινίζεται κάτι, τότε εννοείται ότι ο πυρήνας είναι στη βασική κατάσταση.

5. Σχετικά με τις κινητικές ενέργειες των προϊόντων μιας διάσπασης ή αντίδρασης:

- Το Q της αντίδρασης (διαφορά μαζών μεταξύ των αντιδρώντων και των προϊόντων) μοιράζεται ως κινητική ενέργεια στα προϊόντα
- Έτσι, στην α-διάσπαση που τα προϊόντα είναι μόνο 2, η κινητική ενέργεια μοιράζεται επακριβώς (αν κάνουμε διατήρηση ενέργειας και ορμής, θα δείτε ότι το άλφα παίρνει καθορισμένη τιμή, γύρω στο 98% του Q για πυρήνες με A~200). Άν όμως τα προϊόντα είναι περισσότερα, τότε τότε μοιράζονται το Q, αλλά δεν παίρνει το κάθε προϊόν το ίδιο πάντα ποσοστό του Q. Έτσι, στη β-διάσπαση το ηλεκτρόνιο (ή το ποζιτρόνιο, ανάλογα αν μιλάμε για β- ή για β+, αντίστοιχα) μπορεί να πάρει κινητική ενέργεια T_e από 0 μέχρι όλο το Q. Οπότε η ελάχιστη ενέργεια της ακτινοβολίας βήτα είναι 0 και η μέγιστη κινητική (T_e^{max}) είναι όση το Q της αντίδρασης.

- Στις διασπάσεις με πυρήνες και σωματίδια άλφα που είναι "βαριά" σωματίδια, μπορούμε να πούμε ότι δεν είναι σχετικιστικά, κι έτσι κάνουμε διατήρηση ορμής και ενέργειας με τους κλασσικούς τύπους κινητικής ενέργειες και ορμής.
- Όταν όμως έχουμε ελαφρά σωματίδια (ηλεκτρόνια, νετρίνα, ακόμα και μιόνια), τότε τα σωματίδιά μας είναι σχετικιστικά και δεν μπορούμε να κάνουμε αυτή την προσέγγιση, αλλά πάμε με τη διατήρηση ενέργειας και ορμής χρησιμοποιώντας τις σχετικιστικές εξισώσεις.

- Επίσης: αν έχουμε μόνο δύο προϊόντα, τότε το πόση ορμή και πόση ενέργεια παίρνει ο καθένας από του δυο είναι απόλυτα καθορισμένο, οπότε και 1 εκατομμύριο διασπάσεις να παρατηρήσουμε, θα παίρνουμε πάντα το ίδιο αποτέλεσμα για τις ορμές και κινητικές ενέργειες των προϊόντων.
  - Στην περίπτωση της άλφα διάσπασης είναι $T\alpha = Q * m_{θυγατρικού} / [m_\alpha + m_{θυγατρικού}]$, ενώ $T_{θυγατρικού} = Q * m_\alpha/((m_\alpha + m_{θυγατρικού})$, οπότε αφού στις διασπάσεις άλφα έχουμε ότι ο μητρικός και ο θυγατρικός πυρήνας είναι πάνω από A=210, συνήθως τότε είμαι ΟΚ που λέμε ότι T_α είναι περίπου όλο το Q της διάσπασης (για A=200, βγαίνει $T_\alpha = 98\% * Q$)
- Αν έχουμε όμως τρία προϊόντα, τότε αυτά μοιράζονται τη διαθέσιμη κινητική ενέργεια με διαφορετικό τρόπο κάθε φορά, κι έτσι αν παρατηρήσουμε πολλές διασπάσεις θα δούμε μιά ολόκληρη κατανομή για τις κινητικές ενέργειες του καθενός τους.
  - Έτσι η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων στις β-διασπάσεις παίρνει τιμές από 0 έως το αληθινό Q της διάσπασης. Αν το νετρίνο έχει μάζα m_ν , τότε η κινητική του ηλεκτρονίου φτάνει το πολύ μέχρι Q_o - m_ν , όπου το Q_o είναι το Q που υπολογίζουμε όταν βάζουμε τη μάζα του νετρίνο ίση με μηδέν. Επειδή αυτή είναι η συνηθισμένη πρακτική, ονομάζουμε Q το Qo . Μετά κοιτάμε αν η μέγιστη κινητική του ηλεκτρονίου είναι ίση ή μικρότερη από το Q. Το πόσο μικρότερη είναι, μας δίνει τη μάζα του νετρίνο.

6. Ενέργεια για πραγματοποίηση β-διασπάσεων:

1. Έχουμε τις συνθήκες που το Q>0 (και άρα όταν Q>0, η διάσπαση επιτρέπεται όσον αφορά στην ενέργεια) για β- , β+ και EC (= ε = Electron Capture), χρησιμοποιώντας μάζες των ατόμων.
2. Σημείωση: Υπολογίζουμε το $\Delta M_0 = Mmother_0 – Mdaughter_0$ = από τη βασική κατάσταση του μητρικού στη βασική του θυγατρικού. Αν όμως θέλουμε να πάμε σε διεγερμένη του θυγατρικού, τότε το σωστό Mdaughter είναι = $Mdaughter_0 + \Delta E$, οπότε το σψστό ΔΜ είναι $\Delta M_0 – \Delta E$. Και χρησιμοποιώντας αυτό το ΔΜ κοιτάμε αν το Q είναι θετικό (για να γίνεται η διάσπαση):

1. Q = ΔM >0 για β-
2. Q = ΔM - 2 m_e > 0 για β+ , και
3. Q = ΔM > 0 για EC ,

3. όπου αν επιτρέπεται ενεργειακά και η β+ και η EC, τότε μπορεί να συμβούν και οι δύο, με κάποια πιθανότητα η κάθε περίπτωση.

4. **ΠΡΟΣΟΧΗ λοιπόν στις β-διασπάσεις:** ανάλογα με τον τύπο της διάσπασης έχω ή δεν έχω αφαίρεση του έξτρα όρου 2 m_e από το ΔM για να βρώ το σωστό Q. Επίσης, οι μάζες που μας χρειάζονται στις β διασπάσεις είναι οι ατομικές μάζες.

7. Άλφα διάσπαση

Στην άλφα διάσπαση ένας πυρήνας αποπέμπει ένα σωμάτιο άλφα και μετατρέπεται σ' έναν άλλον με δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια λιγότερα. Η πιθανότητα να γίνει η άλφα διάσπαση μπορεί να γραφεί σαν το γινόμενο δύο επί μέρους πιθανοτήτων:

1. της πιθανότητας να σχηματιστεί το άλφα μέσα στον πυρήνα, και
2. της πιθανότητας να καταφέρει να βγεί έξω απ' τον πυρήνα.

Δηλαδή σκεφτόμαστε την άλφα διάσπαση σαν δύο ξεχωριστές διαδικασίες: α) Δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια από τα πολλά του πυρήνα μπορεί να προτιμήσουν να κάνουν παρέα και να σχηματίσουν ένα σωματίδιο άλφα μέσα στον πυρήνα, και β) από εκεί και πέρα αυτό το άλφα "προσπαθεί να βγεί" από τον πυρήνα, και μπορεί να το καταφέρει αργά ή γρήγορα.
Για να βγεί το άλφα απ' τον πυρήνα πρέπει με την κινητική ενέργεια που έχει να μπορέσει να διαπεράσει το φράγμα δυναμικού που έχει μπροστά του με το κβαντομηχανικό φαινόμενο σήραγγος. Για α-διάσπαση μεγάλων πυρήνων με A ~ 200 , η κινητική ενέργεια του άλφα είναι ~98% του Q, οπότε τότε πρακτικά βάζουμε για κινητκή ενέργεια του α όλο το Q). Η πιθανότητα να βρεθεί το άλφα έξω από το φράγμα, είναι τόσο μικρότερη, όσο μεγαλύτερη σήραγγα έχει να διασχίσει. Επειδή το φράγμα είναι Coulomb (κάποιο άλφα που βρίσκεται απ' έξω βλέπει την ηλεκτρική άπωση του πυρήνα), αυτό πέφτει με το 1/r, όπου r η απόσταση από τον φορτισμένο πυρήνα. Αυτό όμως σημαίνει ότι μικρές διαφορές στο Q κάνουν μεγάλη διαφορά στο μήκος της σήραγγας και άρα μεγάλη διαφορά στην πιθανότητα διέλευσης. Αυτή την πιθανότητα διέλευσης τη γράφουμε ως e^{-G} , όπου το G εξαρτάται από το Q, φυσικά. Αφού η πιθανότητα διέλευσης είναι e^{-G}, το e^{-G} πρέπει να μεγαλώνει όσο μεγαλώνει το Q, και άρα το G πρέπει να μικραίνει όσο μεγαλώνει το Q.

Τώρα, επειδή η πιθανότητα διάσπασης ανά μονάδα χρόνου είναι $\hbar/\tau$, όπου τ είναι ο μέσος χρόνος ζωής ενός πυρήνα που κάνει άλφα διάσπαση, μπορούμε και την πιθανότητα σχηματισμού του άλφα μέσα στον πυρήνα να την γράψουμε σαν $\hbar/\tau_0$, , όπου τ_0 είναι ένας χαρακτηριστικός μέσος χρόνος σχηματισμού του άλφα μέσα στον πυρήνα. Οπότε γράφουμε:

$$\frac{\hbar}{\tau}=\frac{\hbar}{\tau_0}*e^{-G}\rightarrow\frac{1}{\tau}=\frac{1}{\tau_0}*e^{-G}$$

Το τ_0 είναι της τάξης του 10^{-23} sec, χαρακτηριστικού χρόνου των ισχυρών αλληλεπιδράσεων.
Από εδώ με το λογάριθμο κατά μέλη, βγαίνει και log(τ) = log(τ_0) + G. Οπότε όσο το Q αυξάνει, το G μικραίνει και το log(τ) μικραίνει, όπως δείχνει η σχέση Geiger-Nuttal.
Εκεί βλέπουμε επίσης ότι για το ίδιο Q, αν το άλφα πάει να βγεί από έναν πυρήνα με μεγαλύτερο Z, σημαίνει ότι το φράγμα Coulomb είναι ψηλότερο, οπότε η σήραγγα που πρέπει να διασχίσει το άλφα για να βγεί έξω είναι μεγαλύτερη, και άρα η πιθανότητα διέλευσης είναι μικρότερη, και έτσι ο χρόνος ζωής είναι μεγαλύτερος.

8. Ποσοστό για κάθε τρόπο διάσπασης

Το "λόγο διακλάδωσης" (= BR = "branching fraction" ή "branching ratio" = το ποσοστό των διασπάσεων που συμβαίνουν με κάθε συγκεκριμένο τρόπο) μπορούμε να τον υπολογίσουμε αν ξέρουμε το ρυθμό με τον οποίο συμβαίνουν οι διάφοροι τρόποι διάσπασης μιας κατάστασης.

Ας πούμε ότι ξέρω όλους τους πιθανούς τρόπους διάσπασης, και χάριν παραδε;ίγματος ας πούμε ότι αυτοί οι τρόποι είναι μόνο 3 τρόποι. Αν θέλουμε το ποσοστό (BR1) για τον τρόπο1, και ξέρουμε τους ρυθμούς διάσπασης για κάθε τρόπο, έχουμε BR1 = Ρυθμός1 / (Ρυθμός1 + Ρυθμός2 + Ρθυμός3).

Τους ρυθμούς μπορούμε να τους υπολογίσουμε από τους "χρόνους ζωής", τ, για κάθε τρόπο διάσπασης: Ρυθμός = 1/τ .

9. Αποδιεγέρεσεις β

Ένας πυρήνας μπορεί να μετατραπεί σε έναν άλλο, με ένα πρωτόνιο περισσότερο ή ένα λιγότερο, με μια διαδικασία που την ονομάζουμε "βήτα διάσπαση". Οι αποδιεγέρσεις β κατηγοριοποιούνται σε επιτρεπτές ή απαγορευμένες. "Επιτρεπτές" σημαίνει ότι έχουν πολύ μεγαλύτερη πιθανότητα να γίνουν, σε σχέση με άλλες που είναι πιό σπάνιες και λέγονται "απαγορευμένες". Όσο μεγαλύτερου βαθμού "απαγόρευση" έχει μια διάσπαση, τόσο πιό σπάνιο είναι να γίνει.

Γενικά, με διατήρηση του σπίν από την αρχική στην τελική κατάσταση, γράφουμε για τη β-διάσπαση:

$$\vec{J}_i = \vec{J}_f + \vec{S}_{ev} + \vec{l}_{ev}$$

όπου

$\vec{J}_i$ και $\vec{J}_f$ είναι το ολικό σπίν του αρχικού και του τελικού πυρήνα, αντίστοιχα,

$\vec{S}_{ev}$ είναι το ολικό σπίν του συστήματος ηλεκτρονίου-αντινετρίνο πού μπορεί να είναι 0 ή 1 (αφού συνδυάζω το ηλεκτρόνιο και το αντινετρίνο που έχουν σπίν 1/2 το καθένα), και

$\vec{l}_{ev}$ είναι η τροχιακή στροφορμή του συστήματος ηλεκτρονίου-αντινετρίνο σε σχέση με τον θυγατρικό πυρήνα, που το θεωρούμε ότι βρέσκεται στην αρχή των αξόνων.

Στις βήτα διασπάσεις παραβιάζεται η πάριτυ και η πάριτυ της ολικής κυματοσυνάρτησης του τελικού συστήματος "θυγατρικός πυρήνας + ηλετρόνιο + αντινετρίνο" είναι αντίθετη από την πάρτιτυ της κυματοσυνάρτησης του αρχικού συστήματος (δηλαδή του μητρικού πυρήνα). Η πάριτυ του τελικού συστήματος είναι γινόμενο από τις "εσωτερικές" πάριτυ του κάθε ενός από τα τρία σωματίδια και του όρου $(-1)^l$, όπου "l" είναι ο κβαντικός αριθμός της τροχιακής στροφορμής του συστήματος (όπως ξέρουμε από τις σφαιρικές αρμονικές $Y_l^m(\theta,\varphi)$, μια κυματοσυνάρτηση με τροχιακή στροφορμή l έχει πάριτυ $(-1)^l$).

Οπότε:

$$πάριτυ(θυγατρικού) * εσωτερικήπάριτυ(ev) * (-1)^l = -πάριτυ(μητρικού)$$

Οι εσωτερικές πάριτυ του ηλετρονίου και του αντινετρίνο είναι αντίθετες, και άρα το γινόμενό τους δίνει -1, οπότε

$$πάριτυ(θυγατρικού) * (-1)^l = πάριτυ(μητρικού)$$

Αν ο θυγατρικός πυρήνας έχει την ίδια πάριτυ με το μητρικό, θέλουμε άρτιο l για να ικανοποιείται η εξίσωση.
Αν όμως ο θυγατρικός έχει αντίθετη πάριτυ από τον μητρικό, τότε θέλουμε περιττό l για να ικανοποιείται η εξίσωση.

Και πάντα, όσο μικρότερο το $\vec{l}_{ev}$ τόσο "πιό εύκολα" γίνεται η μετάβαση, δηλαδή τόσο μεγαλύτερος ο ρυθμός της διάσπασης.

Για να ελέγξουμε ποιός κβαντικός αριθμός l από τη γκάμα των άρτιων ή των περιττών l ικανοποιεί την διατήρηση της ολικής στροφορμής, γράφουμε $\vec{J}_i - \vec{J}_f = \vec{S}_{ev} + \vec{l}_{ev}$ => $\vec{\Delta J} = \vec{S}_{ev} + \vec{l}_{ev}$ όπου το διάνυσμα $\vec{\Delta} J$ μπορεί να έχει μέτρο ΔJ που μπορεί να είναι οποιαδήποτε τιμή μέσα σ'αυτά τα όρια: $(|J_i - J_f|) \leq \Delta J \leq (|J_i + J_f|)$.
Βρισκουμε λοιπόν τις τιμές του l και του Sev (που παίρνει μόνο τις τιμές 0 ή 1) ώστε να ικανοποιείται η διατήρηση του κβαντικού αριθμού της ολικής στροφορμής.

<u>**Επιτρεπτές**</u> **λέγονται οι μεταπτώσεις που γίνονται με $\vec{l}_{ev} = 0$.** Άν είναι Sev=0 (που έχει μόνο έναν τρόπο να γίνει), η β-διάσπαση/μετάπτωση λέγεται μετάπτωση Fermi . Άν είναι Sev=1 (που έχει τρείς τρόπους να γίνει, έναν με Sz = +1, έναν με Sz = 0, έναν με Sz = -1), τότε η β-διάσπαση/μετάπτωση λέγεται μετάπτωση Gamow-Teller.
Οπότε αφού το σπίν διατηρείται, σύμφωνα με τα παραπάνω, το ΔJ στις επιτρεπτές β-διασπάσεις είναι 0 ή 1, όσο και το Sev (αφού $\vec{\Delta J} = \vec{S}_{ev} + \vec{l}_{ev}$ όπως είδαμε πιό πάνω).
Εκτός από το σπιν, έχουμε να σκεφτούμε και την πάριτυ. Η πάριτυ του συστήματος ηλεκτρονίου-αντινετρίνο είναι $(-1)^{lev}$, που για τις επιτρεπτές μεταπτώσεις δίνει: $(-1)^0 = +1$. Έτσι, οι επιτρεπτές μεταπτώσεις έχουν το μητρικό και το θυγατρικό πυρήνα να έχουν την ίδια πάριτυ.

Όταν δεν έχουμε ΔJ = 0 ή 1 **και** Δπάριτυ = Δπ = +1, τότε η β-διάσπαση είναι **απαγορευμένη**.
Μια απαγορευμένη μετάπτωση (δηλαδή που δεν γίνεται με $\vec{l}_{ev} = 0$ κι έτσι δεν έχει $\Delta J^{\Delta\pi} = 1+$ ή $\Delta J^{\Delta\pi} = 0+$), τι τάξης απαγορευμένη είναι;
Απάντηση: είναι η ελάχιστη τιμή της lev που μας χρειάζεται για να εξηγήσουμε την μετάπτωση που μας γίνεται.
Αυτό το βρίσκετε δοκιμάζοντας ποιό lev χρειάζεται (άρτιο ή περιττό) για να εξηγήσει την Δπάριτυ, και πόσο να είναι αυτό για να κάνει σε συνδυασμό με το Sev = 0 ή 1, όσο το ΔJ.

Μπορούμε να πούμε ότι η τάξη της β-διάπασης είναι το μικρότερο l που εξηγεί **και** την πάριτυ Δπάριτυ = (-1)^l **και** το ΔJ. Π.χ., αν έχουμε το ελάχιστο $\Delta J = \Delta J^{\Delta\pi} = 2+$ έχουμε αναγκαστικά l=άρτιο, κι επίσης, αφού το S μπορεί να γίνει το πολύ S=1 δεν μπορεί να γίνει η μετάβαση με l=0. Άρα δεν είναι επιτρεπτή η μετάβαση γιατί η επόμενη τιμή είναι l=2. Με S=0, δίνουν ΔJ=2. Με S=1, δίνουν από ΔJ = 2-1 =1 μέχρι και 2+1=3, οπότε το l=2, S=1 μπορεί να εξηγήσει το ΔJ=2+ .

Αναλυτικά:

Η β- διασπαση είναι στην ουσία μια διαδικασία όπου μέσα στον πυρήνα γίνεται:

νετρόνιο -> πρωτόνιο + ηλετρόνιο + αντινετρίνο_του_ηλεκτρονίου, δηλ: $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

Η β+ διάσπαση είναι μια διαδικασία όπου μέσα στον πυρήνα γίνεται:
πρωτόνιο -> νετρόνιο + ποζιτρόνιο + νετρίνο_του_ηλεκτρονίου $p \rightarrow n e^+ \nu_e$

Το αντινετρίνο είναι το αντισωματίδιο του νετρίνο,όπως και το ποζιτρόνιο είναι το αντισωματιο του ηλεκτρονίου.

Για να μη γράφω τη μία φορά (β-) ηλεκτρόνιο και αντινετρίνο και την άλλη (β+) ποζιτρόνιο και νετρίνο, γράφω παρακάτω μόνο τα ονόματα των σωματιδίων (ηλεκτόρνιο και νετρίνο), αλλά εσείς καταλαβαίνετε ποιά πάνε μαζί στις πραγματικές εξισώσεις της β- ή της β+ διάσπασης.

Πώς δουλεύουμε:
============

α) Έχουμε πάντα στο νού μας τον γενικό κανόνα ότι η ολική στροφορμή δεν αλλάζει,
και άρα έχουμε τα δύο διανύσματα της ολικής στροφορμής, πρίν και μετά τη διάσπαση να είναι ίσα:
J_μητρικού_πυρήνα= J_πυρήνα_μετά + L_ev + S_ev , (διανυσματικά αθροίσματα)
όπου το L_ev είναι η τροχιακή στροφορμή (διάνυσμα) του συστήματος ηλετρόνιο+ νετρίνο *μαζί*,
και S_ev είναι η ιδιο-στροφορμή (=σπιν, το οποίο είναι επίσης διάνυσμα) του συστήματος ηλετρόνιο+ νετρίνο *μαζί*

Επίσης ξέρουμε ότι όταν προσθέτουμε διανύσματα στροφορμών, επειδή αυτά τα διανύσματα δεν παίρνουν ό,τι προσανατολισμό θέλουν (αλλά οι προβολές τους στον άξονα z παίρνουν μόνο συγκεκριμένες τιμές), έχουμε σαν αποτέλεσμα οι κβαντικοί αριθμοί που χαρκτηρίζουν το άθροισμά τους να ακολουθούν τον εξής κανόνα:
το διαάνυσμα που προκύπτει από το διανυμσατικό άθροισμα των επιμέρους στροφορμών χαρακρητίζεται από έναν κβαντικό αριθμό που μπορεί να πάρει μόνο συγκεκτριμένες τιμές: με βήμα μονάδα, μπορεί να πάρει όλες τις τιμές από την απόλυτη τιμή της διαφοράς μέχρι την απόλυτη τιμή του αθροίσματος των επιμέρους κβαντικών αριθμών:
(--> Δείτε σελ. 14, διαφάνειες μαθήματος 3).

Έτσι:
στην περίπτωση του S_ev που είναι το άθροισμα των σπιν του ηλεκτρονίου και του νετρίνο,
και ξέροντας οτι ο κβαντικός αριθμός του σπιν του ηλεκτρονίου είναι s=1/2 , όπως και του νετρίνο είναι s=1/2, έχουμε ότι ο κβαντικός αρθμός που χαρακτηρίζει το άθροισμά τους (S_ev) παίρνει την ελάχιστη τιμή | 1/2 - 1/2 | = 0, και τη μέγιστή τιμη 1/2 + 1/2 = 1.
Επειδή η μέγιστη από την ελάχιστη απέχει μόνο μία μονάδα, δεν υπάρχει άλλη ενδιάμεση τιμή, κι έτσι ο κβαντικός αριθμός για το διάνυσμα S_ev μπορεί να πάρει μόνο την τιμή 0 ή την τιμή 1.

β) Η ερώτηση είναι τι τιμές μπορεί να πάρει το l (ο κβαντικός αριθμ της τροχιακής στροφορμής L_ev)
Στις ασκήσεις μας δίνεται ποιός κβαντικός αριθμός (J_prin) περιγράφει το σπιν του μητρικού και ποιός το σπιν του θυγατρικού πυρήνα. Και επίσης, ξέρουμε από την παραπάνω ανάλυση ότι ο κβαντικός αριθμός για το S_ev μπορεί να πάρει τις τιμές 0 ή 1.
-> Για βρούμε τα επιτρεπτά l, πρέπει εκτός από τη διατήρηση της ολικής στροφορμής να λάβουμε υπ'

σψιν μας και τη διατήρηση της πάριτυ.
Θα δούμε παρακάτω πώς. Πάντως: Όσο μικρότερη τιμή μπορεί να πάρει το l, τόσο "πιό εύκολα" γίνεται η διάσπαση.
Η πιό εύκολη διάσπαση (δηλαδή αυτή με τη μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβεί) είναι με l=0 και έτσι είναι αυτή που παίρνει το τίτλο "επιτρεπτή" διάσπαση.
Αν η διατήρηση της ολικής στροφορμής και της πάριτυ μας επιβάλουν μεγαλύτερη τιμή για το l, τότε λέμε ότι η διάσπαση είναι "απαγρευμένη τάξης l"
(π.χ, αν απο τη διατήρηση της στροφορμής και της πάριτυ, η πιό μικρή τιμή του l μπορει να είναι l=2, τότε λέμε ότι η διάσπαση είναι "απαγορευμένη τάξης 2" ή "απαγορευμένη 2ης τάξης".)

γ) Ξεκινάμε πρώτα κοιτώντας αν ο πυρήνας άλλαξε πάριτυ ή όχι:

γ1) Αν η πάριτυ του θυγατρικού είναι ίδια με του μητρικού:

-> Τότε γράφουμε ότι Δπ = +
-> Επειδή η πάριτυ στον πυρήνα δεν άλαξε, πρέπει να έχουμε l=άρτιο
(όπου l είναι ο κβαντικός αριθμός που χαρακτηρίζει την ολική τροχιακή στροφορμή του ηλεκτρονίου και του νετρίνο *μαζί* : αντιστοιχεί δηλαδή στο διάνυσμα Lev)

-> Οπότε, δοκιμάζουμε με τη σειρά όλα τα πιθανά άρτια l που μας διατηρούν και την ολική στροφορμή, με πρώτο στη δοκιμή το l=0. Μας κάνει;
Εξαρτάται: μπορεί το l=0, μαζί με τον κβαντικό αριθμό S= 0 μπορούν να μας ικανοποιήσουν τη διατήρηση της στροφορμής (ολική πρίν = ολική μετά); Αν ναι, λέμε ότι έχουμε επιτρεπτή διάσπαση τύπου Fermi (F) : το l=0 μας την ονομάζει "επιτρεπτή", και το S=0 μας την ονομάζει Fermi.
Αν η διατήρηση της ολικής στροφορμής ικανοποιείται με l=1 και με S=1, τότε η διάσπαση ονομάζεται "επιτρεπτή, τύπου Gamow-Teller, GT").
Αν γίνεται και με το συνδυσμό (l=0, S=0) και με τον συνδυασμό (l=0, S=1), τότε λέγεται "επιτρεπτή διάσπαση μικτού τυπου (F+GT)"

<u>Παράδειγμα 1:</u>
J_μητρικός = 5/2 και πάριτυ + (Jπ = 5/2+) , και J_θυγατρικός = 3/2 και πάριτυ + (Jπ = 3/2+)

Τότε:
i) αφού δεν άλλαξε η παριτυ του πυρήνα, έχουμε μόνο τις άρτιες τιμές του l να δοκιμάσουμε.

ii) Αν βάλουμε l=0, και S=0, τότε το άθροισμα "L_ev + S_ev" χαρακτηρίζεται από τον κβαντικό αριθμό 0 ("απο 0-0 έως 0+0 με βήμα μονάδα").
Οπότε και για το άθροισμα “J_θυγατρικός + (L_ev + S_ev)” , ο κβαντικός αριθμός θα είναι από 3/2 - 0 έως 3/2 +0 με βήμα μονάδα, δηλαδή = 3/2 ως μοναδική επιλογή.
--> Άρα, δεν τα καταφέρνει ποτέ να γίνει = 5/2 όπως είναι και η αρχική στρφορμή,
και άρα ΔΕΝ μπορεί να διατηρηθεί η ολική στροφορμή με l=0 και S=0.

iii) Αν βάλουμε όμως l=0 και S=1, τότε το άθροισμα "L_ev + S_ev" χαρακτηρίζεται από τον κβαντικό αριθμό 1 ("απο |0-1| έως 0+1 με βήμα μονάδα").
Οπότε και για το άθροισμα “J_θυγατρικός + (L_ev + S_ev)” , ο κβαντικός
αριθμός θα είναι από 3/2 - 1 έως 3/2 +1 με βήμα μονάδα, δηλαδή = 3/2 ή 5/2.
--> Άρα, υπάρχει περίπτωση οι στροφρομές να καθίσουν έτσι ώστε ο κβαντικός αριθμός του

αθροίσματος να γίνει = 5/2 όπως είναι και η αρχική στρφορμή.
'Αρα μπορεί να διατηρηθεί η ολική στροφορμή με l=0 και S=1, και γι αυτό τη λέμε "επιτρεπτή τύπου Gammow-Teller" = "επιτρεπτή GT" για συντομία.

Παράδειγμα 2:
Μητρικός Jπ = 5/2+ , Θυγατρικός Jπ = 1/2+

Με J_θυγατρικός = 1/2, και l=0 και S=0 δεν γίνεται να φτάσουμε το J = 5/2 του αρχικού.
Ούτε με J_θυγατρικός = 1/2, και l=0 και S=1 δεν γίνεται να φτάσουμε το J = 5/2 του αρχικού.
--> Δεν έχουμε άλλη δυνατότητα για μεγαλύτερο S όμως (αναγακστικά είναι = 0 ή 1 όπως είδαμε πιό πάνω), οπότε ΔΕΝ γίνεται με l=0 ... και άρα είναι "απαγορευμένη"
--> Το επόμενο l που μπορούμε βα δοκιμάσουμε αφού η πάριτυ τνω πυρήνων μητρικού και θυγατρικού είναι ίδιες, είναι το αμέσως μεγαλύτερο άρτιο νούμερο, δηλαδή το l=2.
Με l=2 και S=0 έχουμε κβαντικό αριθμό = 2 για το σύστημα εν ("από |0-2| έως |0+2| με βήμα μονάδα").
Οπότε το 1/2 από τον θυγατρικό πυρήνα και το 2 από το σύστημα εν μπορεί να δώσει ολική στροφορμή με κβαντικό αριθμό από |1/2 - 2| έως |1/2 + 2| , δηλαδή από 3/2 έως 5/2,
και έτσι υπάρχει περίπτωση οι στροφρομές να καθίσουν έτσι ώστε ο κβαντικός αριθμός του αθροίμσατος να γίνει = 5/2 όπως είναι και η αρχική στροφορμή.
'Αρα αφού μπορεί να διατηρηθεί η ολική στροφορμή με l=2, τη λέμε "απαγορευμένη τάξης 2" ή "απαγορευμένη δεύτερης τάξης" (σημείωση: από τη στιγμή που δεν γίνεται με l=0 είναι απαγορευμένη, και απλά ψάχναμε τι τάκης απαγορευμένη ήταν).

Παράδειγμα 3:
Μητρικός Jπ = 5/2+ , Θυγατρικός Jπ = 0/2+

Σ' αυτή την περίπτωση θα μπορούσε πάλι να γίνει με
J_θυγατρικός = 1/2, και l=2 και S=1,
γιατί το εν θα έπαιρνε τιμές από |2 - 1| έως |2+1|, δηλαδή από 1 έως 3, και έτσι ο κβαντικός αριθμός της ολικής στροφορμής για το σύστημα "θυγατρικός + εν" θα έπαιρνε τιμές
i) για εν στροφορμή = 1, θα έπαιρνετιμές από |1/2 -1| έως |1/2 + 1|, δηλαδή από 1/2 ώς 3/2, και άρα δεν έφτανε το 5/2 του μητρικού, ή
ii) για εν στροφορμή = 3, θα έπαιρνε τιμές από |1/2 -3| έως |1/2 + 3|, δηλαδή από 5/2 ώς 7/2, και άρα μπορούσε να γίνει ίση με το 5/2 του μητρικού πυρήνα , και έτσι να ικανοποιηθεί η διατήρηση της ολικής στροφορμής.
-> κι έτσι πάλι το μικρότερο l είναι το l=2, και η διάσπαση πάλι ονομάζεται "απαγορευμένη 2ης ταξης".

γ2) Αν η πάριτυ του θυγατρικού ΔΕΝ είναι ίδια με του μητρικού:

-> Τότε γράφουμε ότι Δπ = -
-> Επειδή η πάριτυ στον πυρήνα άλλαξε, πρέπει να έχουμε l=περιττό
-> Οπότε, δοκιμάζουμε με τη σειρά όλα τα πιθανά περιττά l που μας διατηρούν και την ολική στροφορμή, με πρώτο στη δοκιμή το l=1.

****Αφού δεν γίνεται λοιπόν με l=0, η διάπαση δεν είναι επιτρεπτή, και ονομάζεται απαγορευμένη.
Και τώρα απλά ψάχνουμε να δούμε τι τάξης απαγορευμένη είναι.
Αφού το μικρότερο l μπορεί να είναι το l=1, το καλύτερο που μπορούμε να εέχουμε είναι ότι έχουμε "απαγορευμένη 1ης τάξης".
Αν όμως τα σπιν του μητρικού και το θυγατρικού είναι τέτοια που να θέλουν l=3, τότε θα έχουμε απαγορευμένη 3ης τάξης.
-> Πάντως, η ανάλυση και οι δοκιμές που κάνουμε για τα πιθανά l είναι όπως πιό πάνω, αλλά τώρα δοκιμάζουμε τα περιττά l, και άρα l διάφορα το μηδενός, κι έτσι έχουμε απαγορευμένη διάπαση, και απλά ψάχνουμε να βρούμε τί τάξης απαγορευμένη είναι η διάσπαση.

10. Αποδιεγέρσεις γ

Όταν ένας πυρήνας αποδιεγείρεται από μια υψηλότερη στάθμη σε μιά χαμηλότερη λέμε ότι έχουμε "αποδιέγερση γάμμα" ή "γάμμα διάσπαση". Αυτό γίνεται κατά κύριο λόγο με εκπομπή φωτονίων (γάμμα), δηλαδή με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα φωτόνια αυτά έχουν ενέργεια όση η διαφορά των ενεργειακών σταθμών του πυρήνα, όπως ακριβώς συμβαίνει και στα άτομα.
Η ηλεκτρομαγνητική αυτή ακτινοβολία (γάμμα) μπορεί να είναι δύο τύπων:
 τύπου ηλεκτρικού (Ε) διπόλου, τετραπόλου, κλπ, ή
 τύπου μαγνητικού (Μ) διπόλου, τετραπόλου, κλπ.

* Αν η μεταβολή της πάριτυ του πυρήνα μπορεί να γραφεί σαν $\Delta\pi = (-1)^l$, τόλε λέμε ότι η ακτινοβολία γάμμα είμαι ηλεκτρικού τύπου (Ε), και είναι 2^l πολική (π.χ, αν l=1, τότε $2^1 = 2$ και λέγεται 2-πολική = διπολική, αν l=2, τότε $2^2 =4$, και λέγετε 4-πολική = τετραπολική, αν l=3, τότε $2^3 =8$, και λέγετε 8-πολική = οκταπολική, κ.ο.κ). Οπότε έχουμε ακτινοβολία τύπου Ε1, Ε2, Ε3, κλπ, που ονομάζονται, αντίστοιχα: ηλεκτρικού διπόλου, ηλεκτρικού τετραπόλου, ηλεπκτρικού οκταπόλου, κλπ.
* Αν η μεταβολή της πάριτυ του πυρήνα μπορεί να γραφεί σαν $\Delta\pi = -(-1)^l$, τόλε λέμε ότι η ακτινοβολία γάμμα είναι μαγνητικού τύπου (Μ), και είναι 2^l πολική. Οπότε έχουμε ακτινοβολία τύπου Μ1, Μ2, Μ3 κλπ, που ονομάζονται, αντίστοιχα: μαγνητικού διπόλου, μαγνητικού τετραπόλου, μαγνητικού οκταπόλου, κλπ.

Το l=0 δεν επιτρέπεται για τις γάμμα διασπάσεις γιατί αφού το φωτόνιο έχει σπίν 1, πρέπει να υπάρχει και μεταβολή της τροχιακής l, οπότε τα l που επιτρέπονται είναι 1,2,3, κλπ.. Οπότε το Ε0 δεν γίνεται με εκπομπή φωτονίου. Το Μ0 δεν υπάρχει έτσι κι αλλιώς γιατί δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα (ενώ φυσικά υπάρχουν ηλεκτρικά μονόπολα, που είναι τα απλά μοναχικά φορτία, π.χ, ένα ηλεκτρόνιο).
Ποιά ακριβώς l επιτρέπονται όμως; Απάντηση: από την απόλυτη τιμή της διαφοράς μέχρι την απόλυτη τιμή του αθροίσματος των σπίν του πυρήνα πρίν και μετά την αποδιέγερση: $\left|\left(J_i - J_f\right)\right| \leq l \leq \left|\left(J_i + J_f\right)\right|$

Για το ίδιο l, τα ηλεκτρικά πολύπολα είναι ~100-10000 φορές ισχυρότερα (δηλαδή πιθανότερα) από τα αντίστοιχα μαγνητικά. Επίσης, ο λόγος της ισχύος μεταξύ ενός πολυπόλου και του επόμενου μέσα στον ίδιο τύπο ακτινοβολίας είναι επίσης 100-10000 φορές μεγαλύτερος (π.χ.το Ε1 είναι 100-10000 πιό ισχυρό από το Ε2, κλπ).
Έτσι, χοντρικά το Ε2 με το Μ1 είναι ισοδύναμης ισχύος, το Ε3 είναι ισοδύναμης ισχύος με το Μ2, κλπ.

Γάμμα διάσπαση και ηλεκτρόνια εσωτερικής μετατροπής:

Οι αποδιερέγσεις ενός πυρήνα απο σταθμη με σπιν 0 σε στάθμη με σπιν 0 (0 -> 0)
ΔΕΝ μπορούν να γίνουν με απ' ευθείας εκπομπή ενός φωτονίου, γιατί δεν θα μπορεί να διατηρηθεί το σπιν (αφού το φωτόνιο εχει σπιν 1).
Έτσι, η ενέργεια της αποδιέγερσης δεν εμφανίζεται σαν φωτόνιο, αλλά σαν ένα ηλεκτρόνιο που ονομάζεται ***ηλεκτρόνιο εσωτερικής μετατροπής*** (μπορούμε να σκεφτούμε ότι αυτό είναι ένα από τα ατομικά ηλεκτροόνια, οπότε ένα μέρος της ενέργειας αποδιεέγερσης πήγε για να ελευθερώσει αυτοό το ηλεκτρόνιο).

11. Για το πρότυπο των φλοιών

- Άρτιος αριθμός πρωτονίων δίνει σπιν μηδέν και πάριτυ +, το ίδιο και ο άρτιος αριθμός νετρονίων. Αν λοιπόν ένας πυρήνας έχει και άρτιο αριθμό πρωτονίων και άρτιο αριθμό νετρονίων, τότε ο πυρήνας έχει ολικό σπίν 0 και πάριτυ +, οπότε γράφουμε για τον πυρήνα ότι έχει Jπ = 0 +
- ===> Οπότε, μόνο τα αζευγάρωτα "νουκλεόνια" (νουκλεόνια ονομάζουμε συλλήβδην τα πρωτόνια και τα νετρόνια) είναι αυτά που καθορίζουν το ολικό σπίν (J = άθροισμα των στροφορμών l και σπίν) και την parity (από το $(-1)^{l,}$ όπου l είναι η στροφορμή, συμβολιζόμενη με s,p,d,f... για l=0,1,2,3,... αντίστοιχα). Σημειώστε ότι οι στροφορμή είναι προσθετικός κβαντικός αριθμός: για να βρείτε την ολική στροφορμή κάνετε διανυσματικό άθροιμσα (με τους κανόνες της κβαντικής βέβαια) των επιμέρους στροφορμών. Ενώ, η πάριτυ είναι πολλαπλασιαστικός κβαντικός αριθμός: η ολική πάριτυ του πυρήνα είναι το γινόμενο (πάριτυ όλων των άλλων νουκλεονίων μαζί) * (πάριτυ του αζευγάρωτου νουκλεονίου).
- Κι έτσι κοιτάμε σε ποιά κατάσταση βρίσκεται το "τελευταίο" αζευγάρωτο νουκλεόνιο στο σχήμα 8.5 και βρίσκουμε πανεύκολα το ολικό σπίν και την πάριτυ όλου του πυρήνα.
  - <u>Παράδειγμα 1:</u> έχουμε έναν πυρήνα με 14 πρωτόνια και 13 νετρόνια:
    - Τα 14 πρωτόνια είναι όλα ζευγαρωμένα, οπότε συνεισφέρουν σπίν 0 και πάριτυ +. Τα 12 νετρόνια είναι επίσης ζευγαρωμένα και επίσης συνεισφέρουν Jπ = 0+. Οπότε το σπίν και η πάριτυ του δέκατου τρίτου νετρονίου είναι αυτά που θα καθορίσουν το σπιν και την πάριτυ όλου του πυρήνα. Από το σχ. 8.5 βλέπουμε ότι το δέκατο τρίτο νετρόνιο είναι στην κατάσταση $1d_{5/2}$.
      Το "1" είναι ο κύριος κβαντικός αριθμός, το "d" δηλώνει ότι η τροχιακή στροφορμή ενός νουκλεονίου που βρίσκεται σ' αυτή την κατάσταση ειναι l=2 , και ο δείκτης "5/2" είναι ο κβαντικός αριθμός, j, της ολικής στροφορμής (τροχιακή στροφορή και σπίν μαζί) ενός νουκλεονίου που βρίσκεται σ' αυτή την κατάσταση.
      - Οπότε, ο δείκτης 5/2 εδώ μας δίνει αμέσως ότι ο κβαντικός αριθμός για το ολικό σπιν του δέκατου τρίτου νετρονίου είναι j=5/2, οπότε, αφού όλα τα άλλα νουκλεόνια είναι ηδη ζευγαρωμένα και συνεισφέρουν σπίν 0, "το ολικό σπιν" (δηλαδή ο κβαντικός αριθμός j που περιγράφει το ολικό σπίν) του πυρήνα είναι J = 5/2. Το γράφουμε με J κεφαλαίο, αντί για j μικρό, γιατί μιλάμε για τον πυρήνα που είναι ένα "μεγάλο" σύστημα.
      - Η πάριτυ είναι $(-1)^l$, και αφού l=2, η πάριτυ του δέκατου τρίτου νετρονίου είναι $(-1)^2$ = +1 = + , οπότε, αφού όλα τα άλλα νουκλεόνια είναι ήδη ζευγαρωμένα και συνεισφέρουν πάριτυ +, η ολική πάριτυ του πυρήνα είναι το γινόμενο (πάριτυ όλων των άλλων νουκλεονίων μαζί) * (πάριτυ του δέκατου τρίτου νετρονίου) = + * + = +. Οπότε η ολική πάριτυ του πθρήνα είναι + , και έτσι γράφουμε για το ολικό σπίν και την πάριτυ του πυρήνα ότι Jπ = 5/2 +

- Σημειώστε: ένα νουκλεόνιο είναι φερμιόνιο με σπίν 1/2. Οπότε, αν έχει τροχιακή στροφορμή l=2, τότε ο κβαντικός αριθμός της ολικής του στροφορμής μπορεί να πάρει τιμές από τη διαφορά [δηλ. j = (2-1/2) = 3/2], έως το άθροισμα [δηλ. j = (2+1/2) = 5/2]. Οπότε, οι δυνατές τιμές του κβαντικού αριθμού της ολικής στροφορμής γι αυτό το νουκλεόνιο είναι ή j=3/2 ή j=5/2. *** Γι' αυτό και υπάρχει ανάγκη να δίνεται ως δείκτης ποιά είναι η τιμή του j για τη συγκεκριμένη στάθμη. Βλέπετε πχ., λίγο πιό πάνω ενεργειακά την κατάσταση $1d_{3/2}$, που έχει κι αυτή l=2 (αφου είναι "d"), αλλά έχει j=3/2 ***. Γενικά, το πυρηνικό δυναμικό είναι τέτοιο ώστε για την ίδια τιμή της τροχιακής στροφορμής l, οι καταστάσεις με το μικρότερο j είναι πιό πάνω ενεργειακά, δές σχήμα 8.5, και για μια ιδέα και τις σχέσεις 8.30 και 8.34).
- Παράδειγμα 2: αν έχουμε έναν πυρήνα με 14 πρωτόνια και 15 νετρόνια.
  - Τα 14 πρωτόνια είναι όλα ζευγαρωμένα, οπότε συνεισφέρουν σπίν 0 και πάριτυ +. Τα 14 νετρόνια είναι επίσης ζευγαρωμένα και επίσης συνεισφέρουν Jπ = 0+. Οπότε το σπίν και η πάριτυ του δέκατου τρίτου νετρονίου είναι αυτά που θα καθορίσουν το σπιν και την πάριτυ όλου του πυρήνα. Από το σχ. 8.5 βλέπουμε ότι το δέκατο τρίτο νετρόνιο είναι στην κατάσταση 2s. Το "2" είναι ο κύριος κβαντικός αριθμός, το "s" δηλώνει ότι η τροχιακή στροφορμή ενός νουκλεονίου που βρίσκεται σ' αυτή την κατάσταση ειναι l=0 , και δεν υπάρχει δείκτης για την ολική στροφορμή (τροχιακή στροφορή και σπίν μαζί) ενός νουκλεονίου που βρίσκεται σ' αυτή την κατάσταση. Αυτό γιατί, αφού l=0, και είναι νουκελόνιο, άρα με σπιν 1/2, η ολική στροφορμή μπορεί να πάρει μόνο την τιμή j=1/2 , οπότε αφού δεν υπάρχει καμία άλλη πιθανή τιμή για το j, δεν το γαφει καθόλου. Εμείς ξέρουμε βέβαια ότι το ολικό σπιν (j) του δέκατου τρίτου νετρονίου είναι 1/2, οπότε αφού όλα τα άλλα νουκλεόνια είναι ηδη ζευγαρωμένα και συνεισφέρουν σπίν 0, το ολικό σπιν του πυρήνα είναι J = 1/2.

- Τώρα, μερικές φορές παρατηρούνται εξαιρέσεις στις παραπάνω απλές αρχές, οπότε οι παρατηρήσεις έχουν δώσει και τους εξής επιπλέον κανόνες:
  - αν είναι το νουκλεόνιο αυτό να πάει μόνο του σε μια κατάσταση με μεγάλο l, ενώ λίγο πιό πάνω ενεργειακά ειναι μια κατάσταση με μικρότερο l, τότε πάει σ' αυτή την κατάσταση με το μικρότερο l αντί για την άλλη με το μεγαλύτερο l.
  - αν το νουκλεόνιό μας μπορεί να "συμπληρώσει" μια πολυπλυθή (με μεγάλο l), κατάσταση, τότε προτιμάει να πάει σ'αυτήν παρά να συμπληρώσει μια παραπλήσια ενεργειακά, αλλά με λιγότερο l, κατάσταση.

12. Το ελάχιστο που πρέπει να ξέρετε για τα στοιχειώδη:

- Εξετάζετε μόνο φορτίο, βαρυονικό, λεπτονικούς αριθμους, και ενεργεια (οχι το ισοσπιν για το οποιο δεν μιλησαμε καθόλου). Κάνουνε ένα πινακάκι και ελέγχουμε έναν πρός έναν τη διατήρηση των κβαντικών αριθμών (άθροισμα αντιδρώντων = άθροισμα προϊόντων). Αυτοί οι κβαντικοί αριθμοί διατηρούνται ΠΑΝΤΑ, σε όλα τα είδη αλληλεπιδράσεων.
- Για τη διατήρηση της ενέργειας, σημειώστε ότι πρέπει πάντα η ενέργεια των αντιδρώντων να είναι αρκετή για να δημιουργηθούν τα προϊόντα.
  - αν τα αντιδρώντα είναι δύο, θεωρούμε ότι έχουμε βολή του ενός πάνω στο άλλο, και αφού δεν μας δίνονται οι ενέργειες της σύγκρουσης, θεωρούμε ότι πάντα κάποιος μπορεί να κάνει την ενέργεια σύγκρουσης αρκετή για να δημιουργηθούν τα προϊόντα. Οπότε στις συγκορύσεις λέμε

OK από άποψη ενέργειας.

- αν όμως έχουμε ένα μόνο σωματίδιο ως αντιδρών, τότε αυτό κάνει διάσπαση. Τότε πηγαίνω στο σύστημα ηρεμίας του, όπου αυτό είναι ακίνητο. Αν εκεί δεν του φτάνει η ενέργεια για να δημιουργηθούν τα προϊόντα, τότε δεν του φτάνει η ενέργεια σε κανένα σύστημα αναφράς. Στο σύστημα ηρεμίας του η ενέργειά του είναι η όση η μάζα του. Οπότε, αν η μαζα του είναι μικρότερη από το άθροισμα μαζών των προϊόντων, τότε η διάσπαση ΔΕΝ μπορεί να γίνει (κι ας το επιτρέπει η διατήρηση του φορτίου, βαρυονικού και λεπτονικών αριθμών).

- Αν επιτρέπεται η αντίδραση με τους παραπανω κβαντικούς, και έχει νετρινο: τοτε ειναι σιγουρα ασθενης.
- Αν επιτρέπονται οι παραπάνω κβαντικοί και παραβιάζεται η παραδοξότητα (δηλ ο αριθμός από “strange”/παράδοξα κουάρκ δεν είναι ίδιος στα αντιδρώντα και στα προϊόντα), πάλι αυτό γίνεται μόνο με ασθενείς, είτε υπάρχει νετρίνο στην αντίδραση, είτε όχι:
  - Η παραβίαση της παραδοξότητας δεν είναι κάτι τραγικό: η ασθενής αλληλεπίδραση αυτή τη δουλειά κάνει: αλλάζει κάποιο λεπτόνιο ή κουάρκ σε κάποιο άλλο.
  - Έτσι, ένα s κουάρκ μπορεί να γίνει κάτι άλλο (πχ, u κουρακ) με την επίδραση της αλσθενούς δύναμης, και τότε φυσικά η παραδοξότητα έχει μεταβληθεί.

Κ. Κορδάς, 2016-17