

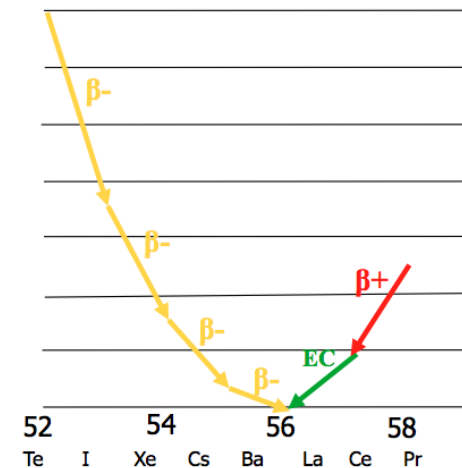
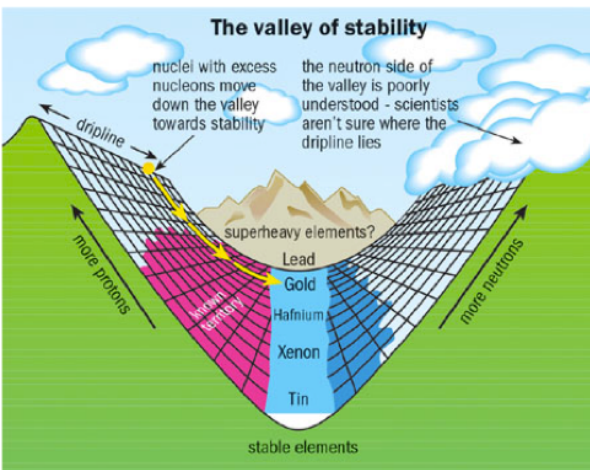
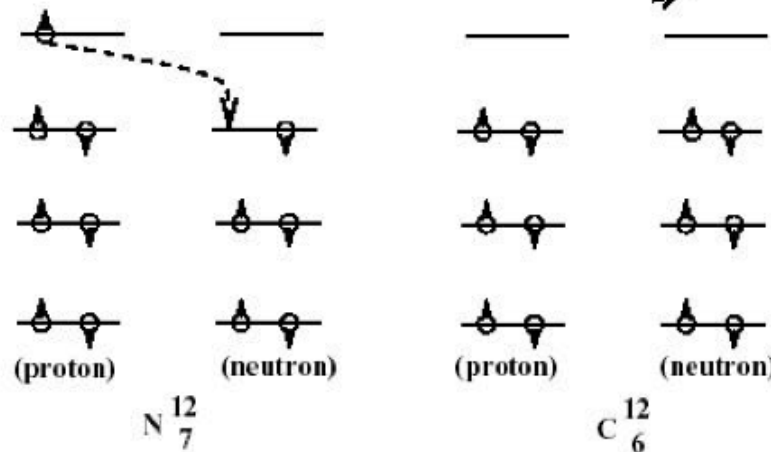
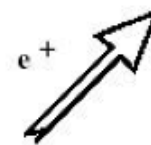
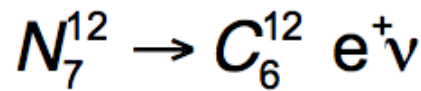
β - διάσπαση

Δήμος Σαμψωνίδης

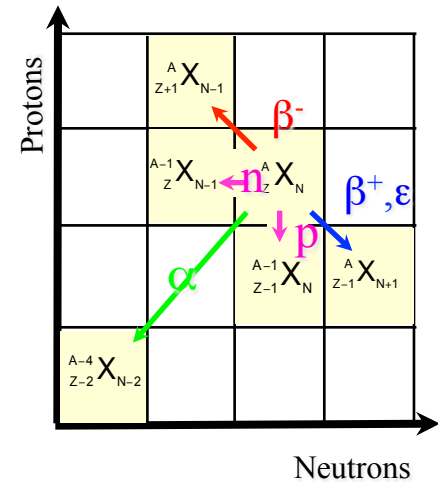
(27-11-2018)

β - διάσπαση

Βήτα διάσπαση (εκπομπή e^- ή e^+) είναι ένας μηχανισμός αποκατάστασης της συμμετρίας πρωτονίων-νετρονίων (και πυρηνικής μάζας) με τη μετατροπή ενός πρωτονίου σε νετρόνιο (και τούμπαλιν)



β - διάσπαση



β⁻-decay

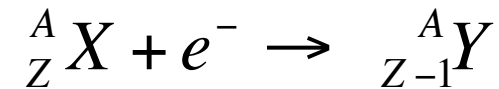
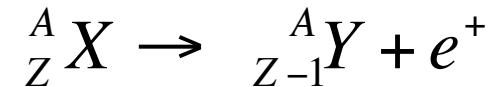
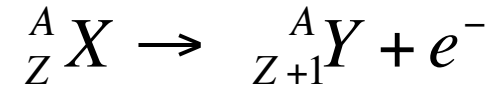
- εκπομπή ενός e⁻ και ν̄
- Z → Z+1
- N → N-1
- A=σταθ.

β⁺-decay

- εκπομπή ενός e⁺ και ν
- Z → Z-1
- N → N+1
- A=σταθ.

Electron Capture (EC)

- απορρόφηση ενός e⁻ and εκπ. ν
- Z → Z-1
- N → N+1
- A=σταθ.



$$|\Delta Z|=1 \text{ \& } \Delta A=0$$

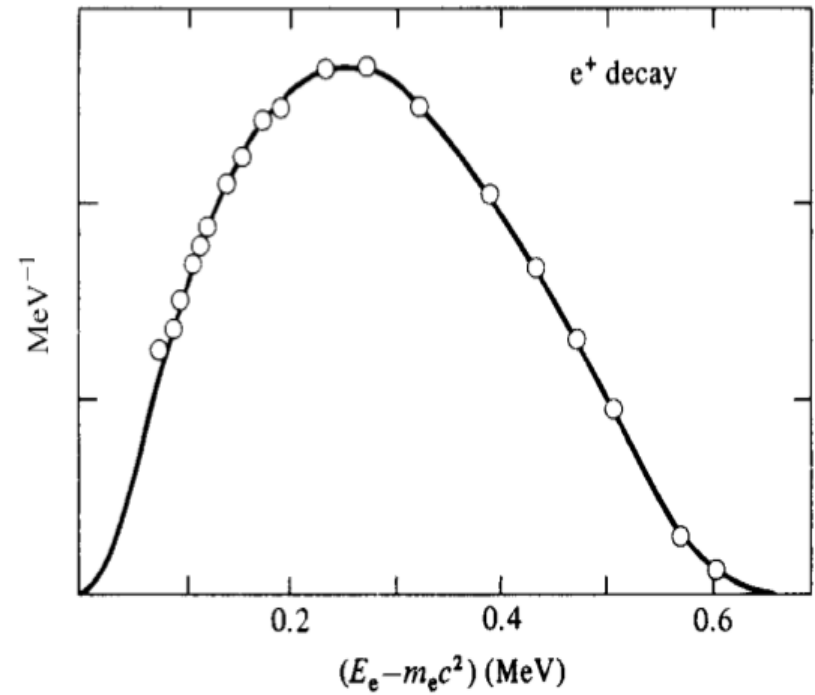
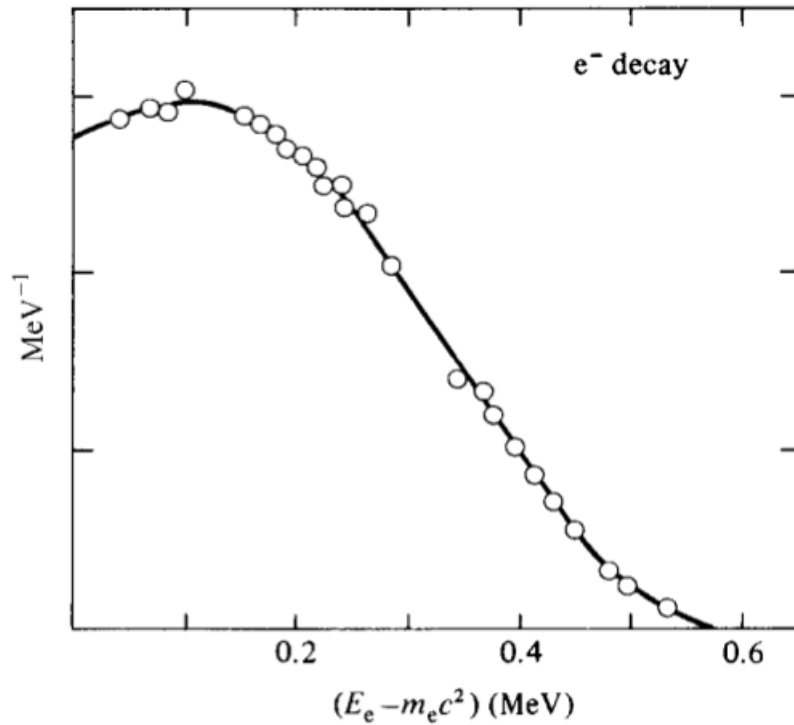
β⁻ : ηλεκτρόνια

β⁺: ποζιτρόνια (1932, Anderson)

Αρπαγή (1937, Alvarez)

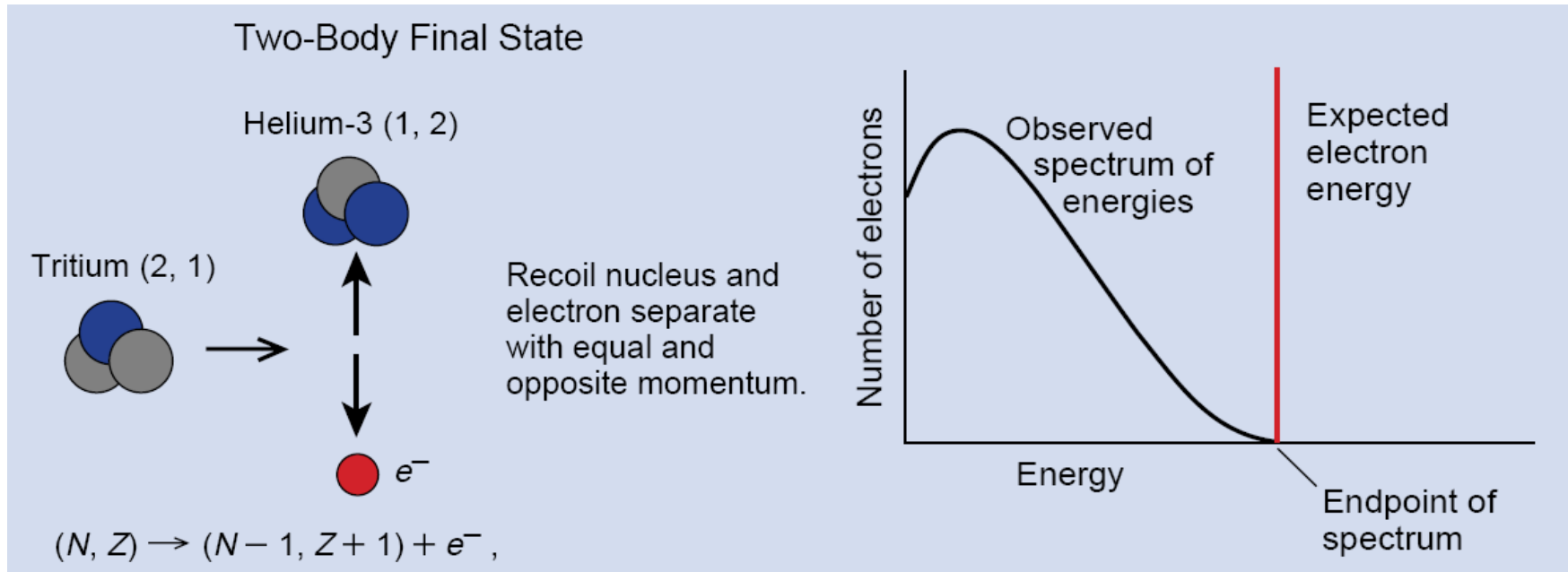
Διατήρηση φορτίου : OK

β - διάσπαση



Ενεργειακά φάσματα ηλεκτρονίου και ποζιτρονίου κατά τη β -διάσπαση ^{64}Cu

β-διάσπαση



$$E_e = \Delta M = M(Z, A) - M(Z+1, A)$$

? Διατήρηση ενέργειας

? Τα e δεν υπάρχουν στον πυρήνα ($\Delta x \Delta p \geq \hbar$), από πού προέρχονται

? Διατήρηση στροφορμής ($\Delta A = 0$, $spin(n, p \text{ \& } e) = \hbar/2$)

Ηλεκτρόνια στον πυρήνα

- Αν τα ηλεκτρόνια υπήρχαν μέσα στον πυρήνα και απλά προσπαθούν να βγουν:

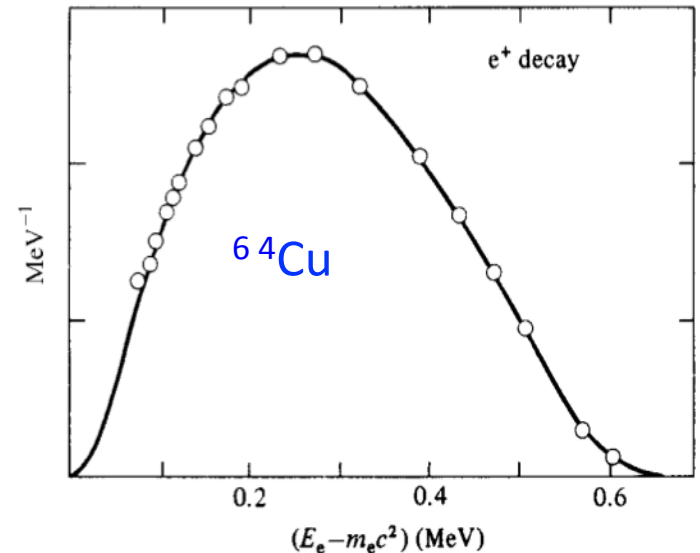
- Η ορμή τους θα είχε μιά αβεβαιότητα Δp της τάξης $\Delta x \Delta p \geq \hbar \rightarrow \Delta p \geq \hbar / \Delta x$

όπου Δx = οι διαστάσεις του πυρήνα $\sim R$
($R = 1.1 \text{ fm} \cdot A^{1/3} = 4.4 \text{ fm}$, για ^{64}Cu)

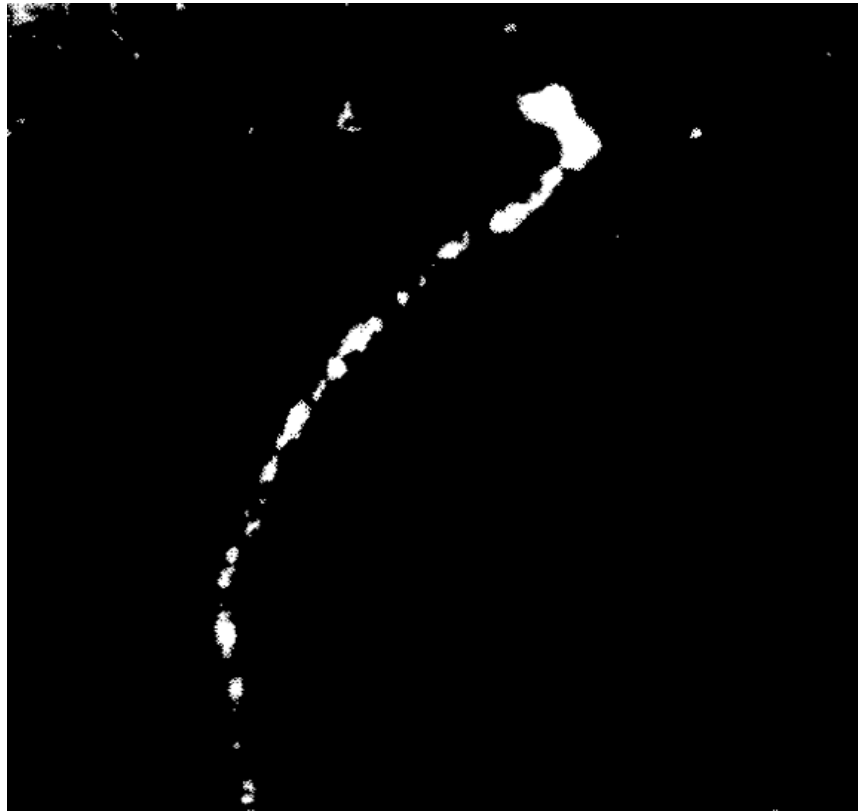
$$\Delta p \geq \frac{\hbar}{R} = \frac{\hbar c}{Rc} = \frac{197 \text{ MeV fm}}{4.4 \text{ fm} c} \simeq 45 \text{ MeV} / c$$

→ Άρα, η ορμή (και η κινητική ενέργεια) τέτοιων ηλεκτρονίων θα έπρεπε να “παίζει” κατά $\pm 45 \text{ MeV}$.

- Οπότε κάποια από αυτά θα είχαν κινητικές ενέργειες πολύ μεγαλύτερες από το $\sim 1 \text{ MeV}$ μέγιστο που βλέπουμε...
→ άρα η αρχική υπόθεση ότι τα ηλεκτρόνια υπήρχαν μέσα στον πυρήνα ΔΕΝ είναι καλή → “κβαντομηχανική άρνηση”
- Από πού προέρχονται λοιπόν τα ηλεκτρόνια της β -διάσπασης;



β - διάσπαση



Φωτογραφία –β διάσπασης του ${}^6\text{He}$ απο θάλαμο ιχνών.
Τα ιχνη αντιστοιχούν στο ηλεκτρόνιο της διάσπασης και στον ανακρουόμενο πυρήνα (δεν είναι back to back).

β-διάσπαση

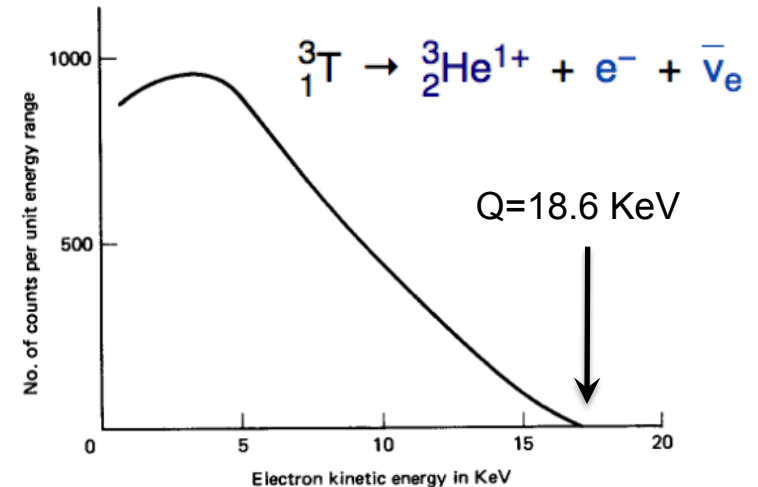
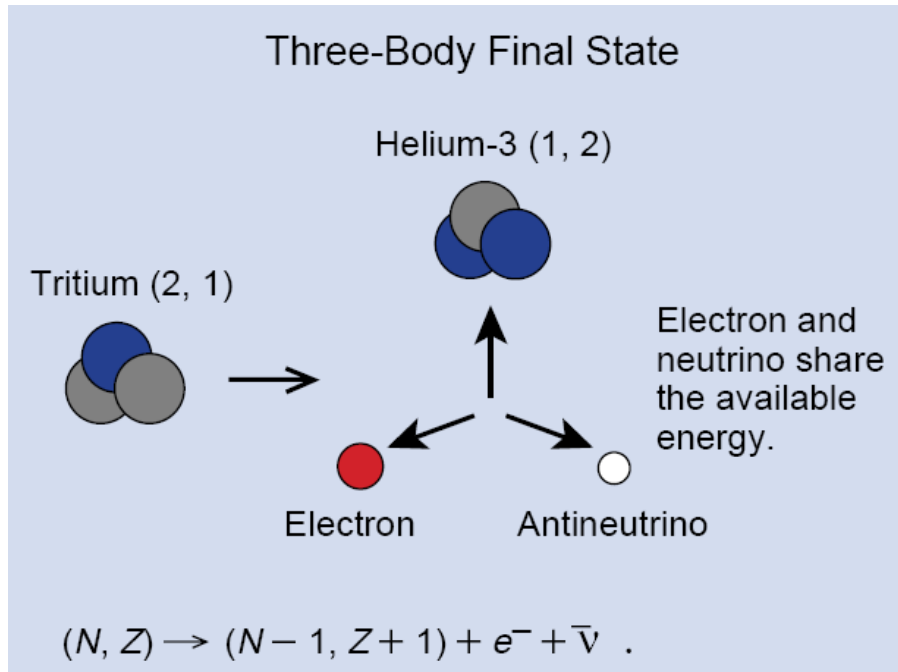


Figure 1.6 The beta decay spectrum of tritium (${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$). (Source: G. M. Lewis, *Neutrinos* (London: Wykeham, 1970), p. 30.)

Αν υπάρχει νετρίνο $m_e \leq E_e \leq \Delta M - m_{\nu e}$

$m_{\nu} \approx 0$

$\text{spin} = \hbar/2$

$q=0$

μικρή αλληλεπίδραση

➔ επιβεβαίωση ύπαρξης ν
πείραμα Reines – Cowan

ν_e (Pauli 1930)

Στην προσπάθεια να εξηγηθεί η β-διάσπαση

$$(Z,A) \rightarrow (Z+1, A) + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$(Z',A') \rightarrow (Z'-1, A') + e^+ + \nu_e$$

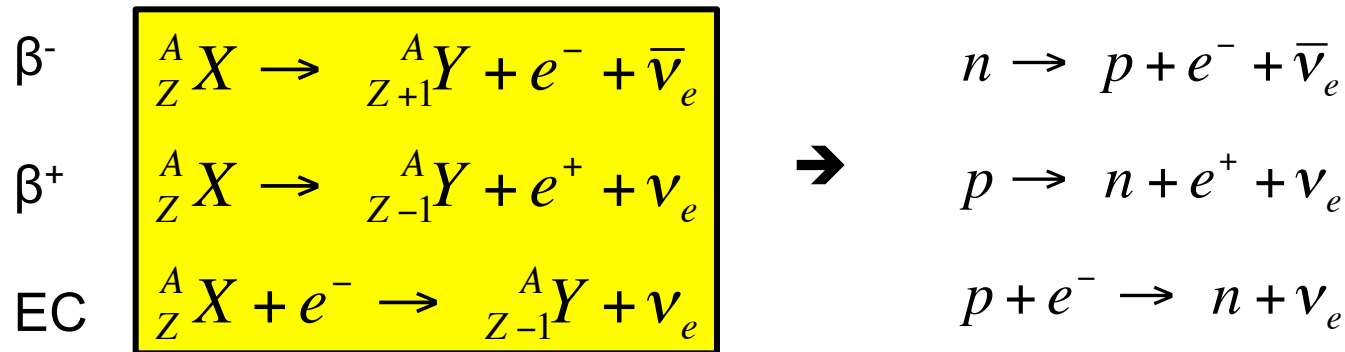
Είναι η διάσπαση δέσμιων στον πυρήνα p και n

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

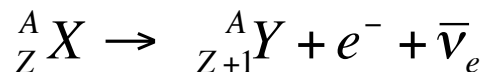
$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

Μόνο το ελεύθερο n μπορεί να διασπαστεί $m_n > (m_p + m_e)$,
mean life $\tau = 885.7 \pm 0.8 \text{ s} \sim 15 \text{ min}$

νεutrino - αντινεutrino



Ενεργειακή συνθήκη β^-



$$M_P c^2 = T_D + M_D c^2 + T_{e^-} + m_e c^2 + T_{\bar{\nu}} + m_{\nu} c^2$$

$$\begin{aligned} T_D + T_{e^-} + T_{\bar{\nu}} &= (M_P - M_D - m_e - m_{\nu}) c^2 \\ &= \Delta M c^2 = Q, \end{aligned}$$

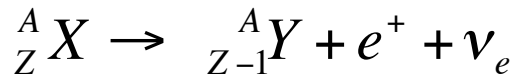
Θα πρέπει $Q > 0$

$$\begin{aligned} Q &= (M(A, Z) - M(A, Z + 1) - m_{\nu}) c^2 \\ &\approx (M(A, Z) - M(A, Z + 1)) c^2 \geq 0, \end{aligned}$$

Όπου $M(A, Z)$ οι ατομικές μάζες

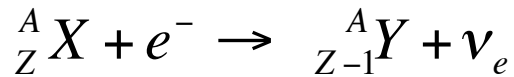
νεutrino - αντινεutrino

Ενεργειακή συνθήκη β^+



$$\begin{aligned} Q &= (M_P - M_D - m_e - m_\nu)c^2 \\ &= (M(A, Z) - M(A, Z-1) - 2m_e - m_\nu)c^2 \\ &\approx (M(A, Z) - M(A, Z-1) - 2m_e)c^2 \end{aligned}$$

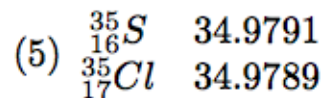
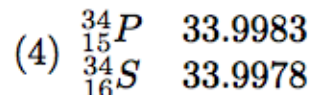
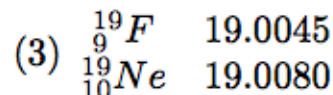
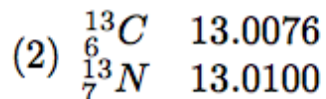
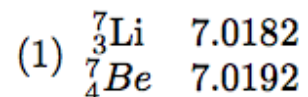
Ενεργειακή συνθήκη EC



$$\begin{aligned} Q &= (M_P + m_e - M_D - m_\nu)c^2 \\ &= (M(A, Z) - M(A, Z-1) - m_\nu)c^2 \\ &\approx (M(A, Z) - M(A, Z-1))c^2 \geq 0. \end{aligned}$$

Άσκηση

Δίνονται οι ατομικές μάζες (σε amu). Με δεδομένο ότι η μάζα του ηλεκτρονίου είναι 0.00055 amu, δείξτε ποιο νουκλίδιο σε κάθε ζεύγος είναι ασταθές, με ποιό τρόπο διασπάται και η ενέργεια που ελευθερώνεται στη διάσπαση.



- Το βαρύτερο νουκλίδιο διασπάται, άρα είναι το ποιο ασταθές.
- Όλες οι περιπτώσεις έχουν $\Delta A = 0$ (δεν δίνουν α -διάσπαση) και $\Delta Z \neq 0$ (δεν δίνουν γ -διάσπαση)

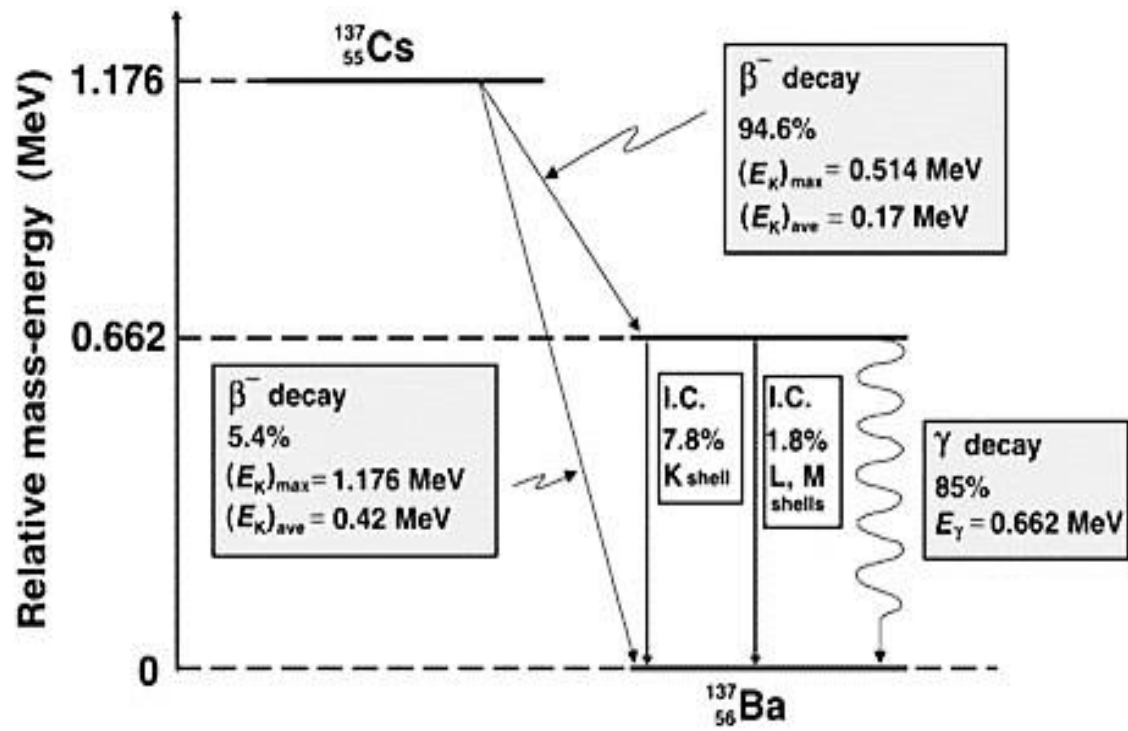
1. $\Delta M = 0.001 \text{ amu} < 0.0011 \text{ amu}$, Be είναι ραδιενεργό σύλληψης ηλεκτρονίου

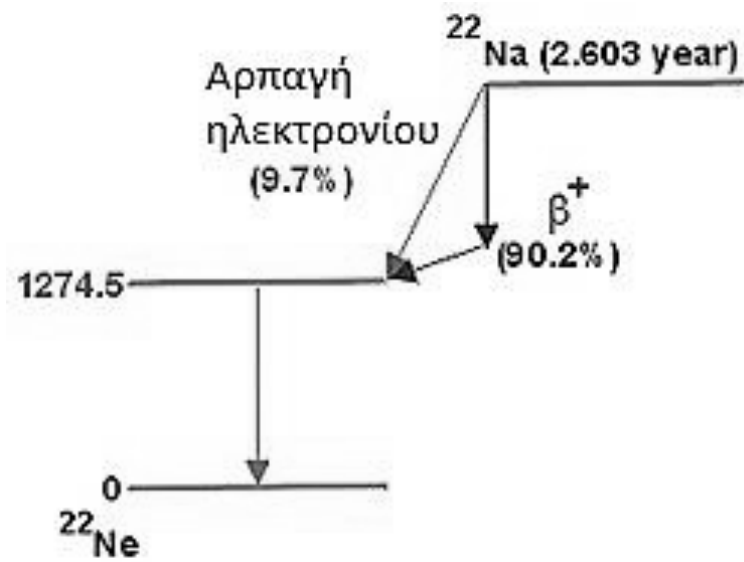
2. $\Delta M = 0.0024 > 0.0011$ το N είναι β^+ και σύλληψης ηλεκτρονίου

3. $\Delta M = 0.0035 > 0.0011$ το Ne είναι β^+ και σύλληψης ηλεκτρονίου

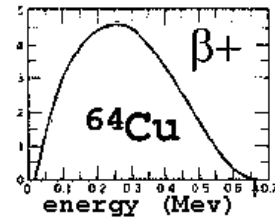
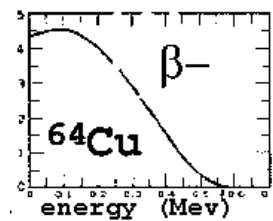
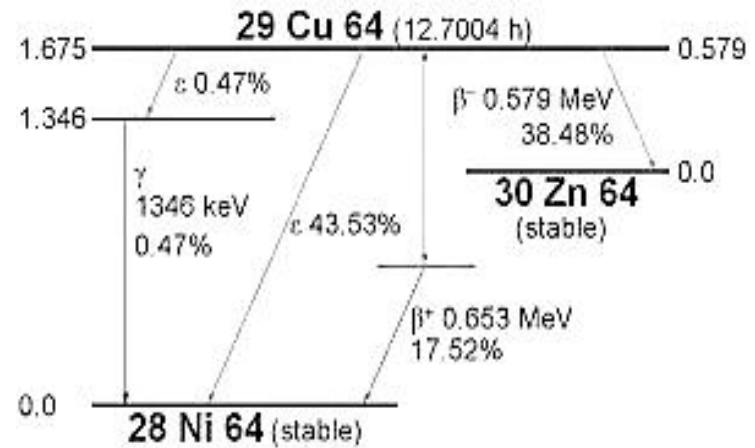
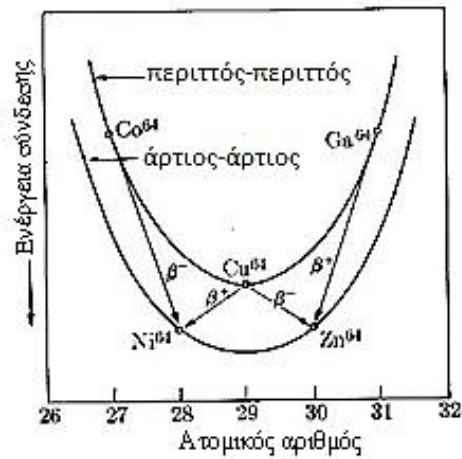
4. $\Delta M = 0.0005$ ο P είναι β^-

5. $\Delta M = 0.0002$ το S είναι β^-





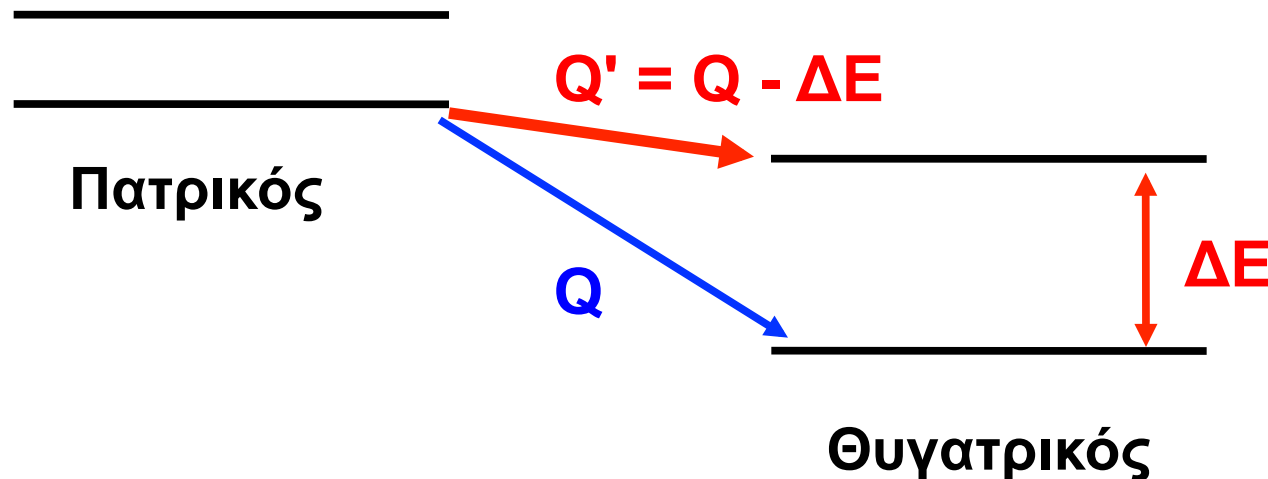
Cu



ΠΡΟΣΟΧΗ #1

αν όχι από βασική σε βασική κατάσταση:

- Οι τιμές του Q που δίνονται στα προηγούμενα είναι για β -διασπάσεις από
 - Τη βασική στάθμη του πατρικού πυρήνα
 - Στη βασική σταθμη του θυγατρικού πυρήνα
- Αν πάμε σε *διεγερμένη κατάσταση του θυγατρικού* (με ενέργεια ΔE πάνω από τη βασική του), τότε *το Q είναι μικρότερο κατά ΔE* . Αυτό το Q' είναι που μοιράζονται ως κινητική ενέργεια τα προϊόντα.



ΠΡΟΣΟΧΗ #2) Σχετικά με τις κινητικές ενέργειες των προϊόντων μιας διάσπασης:

- Το Q της αντίδρασης (διαφορά μαζών μεταξύ των αντιδρώντων και προϊόντων) μοιράζεται ως κινητική ενέργεια στα προϊόντα
- 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 ενέργειας και ορμής.
- Όταν όμως έχουμε ελαφρά σωματίδια (ηλεκτρόνια, νετρίνα, ακόμα και μίονια), τότε τα σωματίδιά μας είναι σχετικιστικά και δεν μπορούμε να κάνουμε αυτή την προσέγγιση, αλλά πάμε κανονικά 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 τους είναι απόλυτα καθορισμένο, οπότε και 1 εκατομύριο διασπάσεις να παρατηρήσουμε, θα παίρνουμε πάντα το ίδιο αποτέλεσμα για τις ορμές και κινητικές ενέργειες των προϊόντων.

ΠΡΟΣΟΧΗ #2

Σχετικά με τις κινητικές ενέργειες των προϊόντων

- Στην περίπτωση της αλφα διάσπασης είναι

$$T_\alpha = Q * M_{\text{θυγατρικού}} / (M_\alpha + M_{\text{θυγατρικού}}), \text{ ενώ}$$

$$T_{\text{θυγατρικού}} = Q * M_\alpha / (M_\alpha + M_{\text{θυγατρικού}}),$$

οπότε αφού στις διασπάσεις αλφα έχουμε ότι ο μητρικός και ο θυγατρικός πυρήνας είναι πάνω από 210+ συνήθως τότε είναι ΟΚ που λέμε ότι **το T_α είναι περίπου όλο το Q της αντίδρασης/διάσπασης.**

- **Αν έχουμε όμως τρία προϊόντα, τότε αυτά μοιράζονται τη διαθέσιμη ενέργεια με διαφορετικό τρόπο κάθε φορά, κι έτσι αν παρατηρήσουμε πολλές διασπάσεις, τότε θα δούμε μία ολόκληρη κατανομή για τις κινητικές τους ενέργειες.**

Έτσι η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων στις β-διασπάσεις παίρνει τιμές **από 0 έως Q .** (Αν το νεutrίνο έχει μάζα m_ν , η κινητική του ηλεκτρονίου φτάνει μέχρι $Q - m_\nu$, το πολύ).

Άσκηση 1

Το ισότοπο του άνθρακα $^{14}_6\text{C}$ παράγεται από πυρηνικές αντιδράσεις των κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα. Διασπάται δίνοντας $^{14}_7\text{N}$.

α) Τί είδους διάσπαση είναι; Δώστε την αντίδραση της διάσπασης.

β) Αν οι ατομικές μάζες ^{14}C και ^{14}N είναι $13044,00 \text{ MeV}/c^2$ και $13043,85 \text{ MeV}/c^2$ αντίστοιχα, πόση είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την αντίδραση;

γ) Σχεδιάστε το ενεργειακό φάσμα των ηλεκτρονίων.

Δίνονται οι μάζες:

$$M(n) = 939.6 \text{ MeV}/c^2, M(p) = 938,3 \text{ MeV}/c^2, M(e) = 0,511 \text{ MeV}/c^2$$

Υπόθεση τρίτου σωματιδίου στη β-διάσπαση

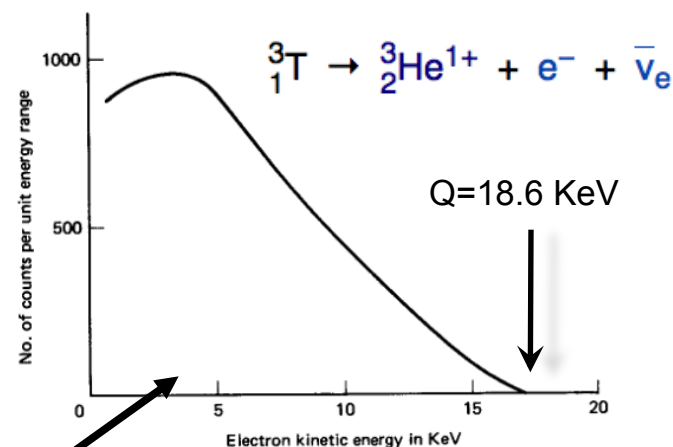
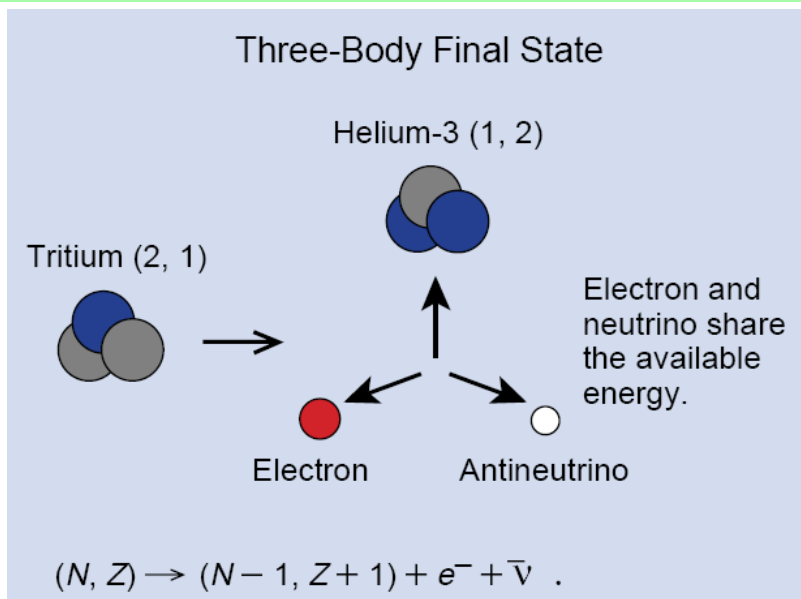


Figure 1.6 The beta decay spectrum of tritium (${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He}$). (Source: G. M. Lewis, *Neutrinos* (London: Wykeham, 1970), p. 30.)

Αν υπάρχει νεutrίνο: $0 \leq T_e \leq \Delta M - m_{\nu_e}$

$m_{\nu} \approx 0$

spin = $\hbar/2$

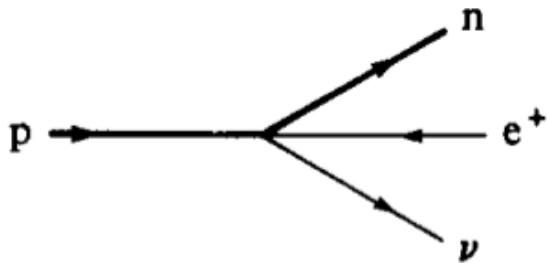
Υπόθεση ν_e : *Pauli 1930*

* Επιβεβαίωση ύπαρξης ν_e : Reines – Cowan, με αντineutrίνα από πυρηνικό αντιδραστήρα.

* Επιβεβαίωση ότι $\nu_e \neq \bar{\nu}_e$: πείραμα Davis, αντίδραση που γίνεται με νεutrίνα, δεν γίνεται με αντineutrίνα

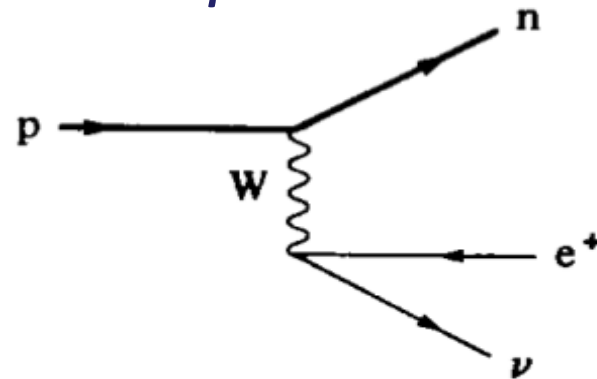
β-διάσπαση: καλή προσέγγιση ως αλληλεπίδραση επαφής - αλληλεπίδραση ανταλλαγής W

Enrico Fermi: πρώτη θεωρία της β-διάσπασης. Θεωρεί ότι τα σωματίδια που αλληλεπιδρούν βρίσκονται στο ίδιο σημείο



Αλληλεπίδραση επαφής

Σύγχρονη εικόνα: Η β-διάσπαση προκαλείται από την **ασθενή δύναμη**, που σημαίνει αλληλεπίδραση μέσω ανταλλαγής ενός σωματιδίου W



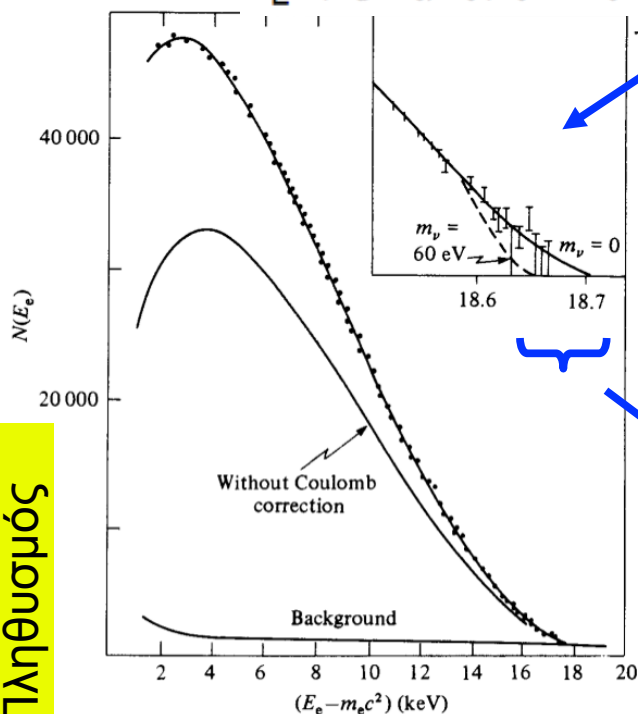
Αλληλεπίδραση με ανταλλαγή W.

→ στα Στοιχειώδη θα δείτε ότι είναι ένα από τα συστατικά “κουάρκ” του νουκλεονίου που αλλάζει εκπέμποντας ένα W, και το W εκπέμπει e⁺ και νετρίνο

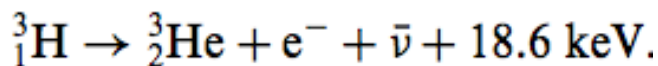
Μάζα του νετρίνο;

- Εξετάζουμε το διάγραμμα πληθυσμού σαν συνάρτηση της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων στην περιοχή της μέγιστης κινητικής. Κάνοντας έναν μετασχηματισμό ως προς τη μεταβλητή στον άξονα γ, έχουμε γραμμική σχέση για $m_\nu = 0$: **διάγραμμα Fermi-Kurie**.

$$\left[\frac{dR/dE_e}{F(Z_d, E_e) E_e (E_e^2 - m_e^2 c^4)^{1/2}} \right]^{1/2} = (\text{constant}) (E_0 - E_e)^{1/2} [(E_0 - E_e)^2 - m_\nu^2 c^4]^{1/4}.$$



Όπου: $E_0 = Q$ της διάσπασης



Από τέτοια πειράματα γνωρίζουμε ότι η μάζα του νετρίνο είναι τόσο μικρή που μπορούμε να

$m_\nu < 4.35 \text{ eV}$ τη θεωρούμε μηδέν

(Belesev, A. I. et al. (1995), *Phys. Lett. B* **350**, 263)

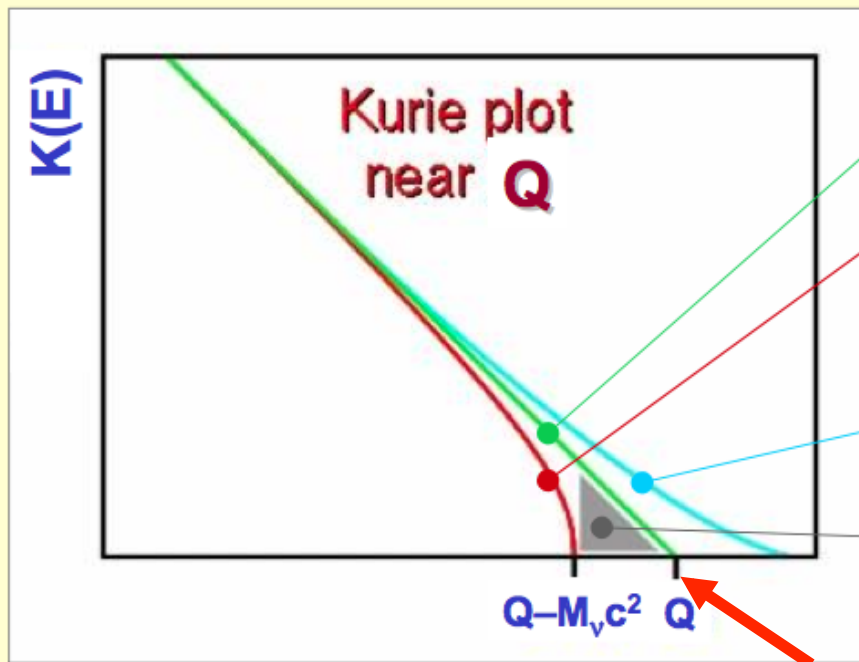
Πληθυσμός

Κινητική Ενέργεια (e)

Fermi-Kurie plot: μετασχηματισμός μεταβλητών ώστε να έχουμε γραμμική σχέση με το Q

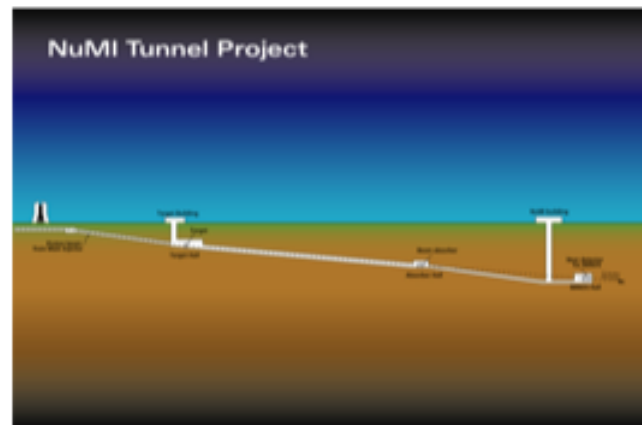
The Kurie plot $K(E_e)$ is a convenient **linearization** of the beta spectrum

$$K(E) \equiv \left[\frac{\frac{dN}{dE}}{G_F |M_{if}|^2 F(Z, E_e) S(E_e) [1 + \delta_R(Z, E_e)] (E_e + m_e c^2)} \right]^{1/2} \propto \left[(Q - E_e) \sqrt{(Q - E_e)^2 - M_\nu^2 c^4} \right]^{1/2}$$



Η απόκλιση του μετρούμενου Q από το Q που περιμένουμε για μάζα νετρίνο = 0, μας δίνει τη μάζα του νετρίνο

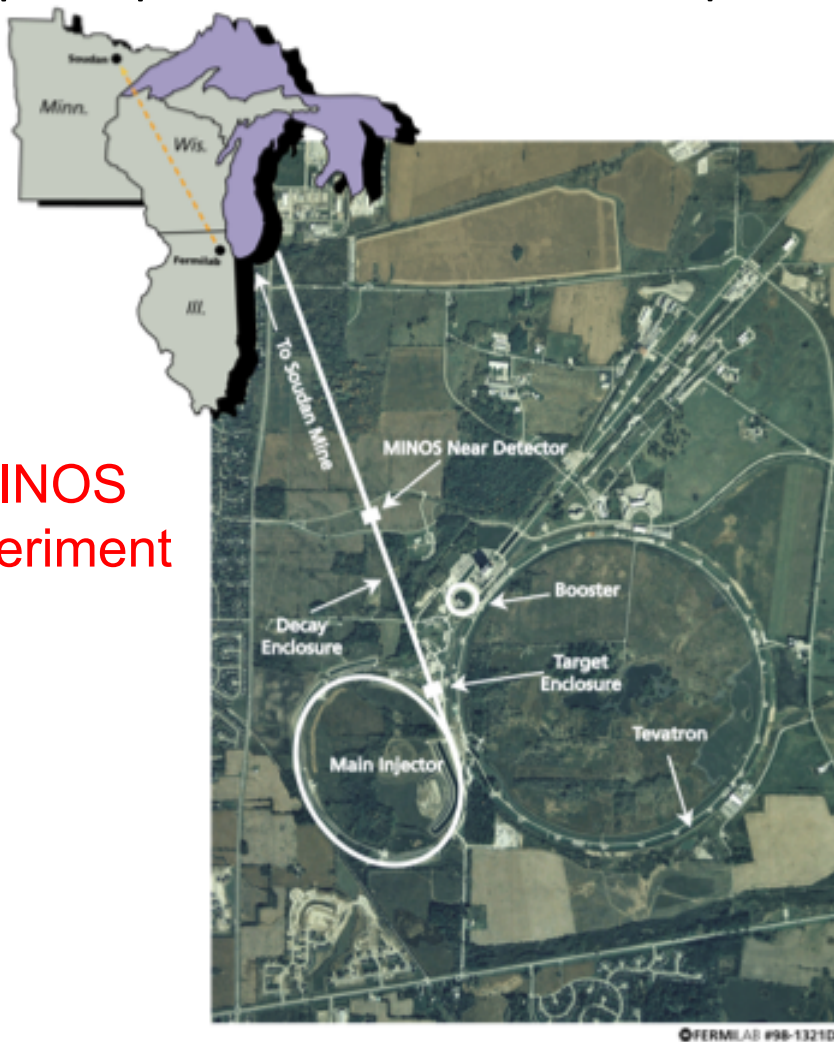
Στα πειράματα παρατηρήσαμε “ταλαντώσεις” ν : ένα είδος νετρίνο μετατρέπεται σε ένα άλλο -> γίνεται μόνο αν τα νετρίνα έχουν μάζα: άρα



This is the most precise measurement of Δm^2 .
The results are: $\Delta m^2_{23} = 2.43^{+0.13}_{-0.13} \text{ eV}^2/c^4$
(90% confidence limit) and
 $\sin^2(2\theta_{23}) > 0.90$ (90% confidence limit)

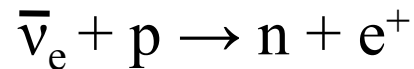
! ..αλλά η μάζα τους είναι τόσο μικρή που μπορούμε πολύ άνετα να τη θεωρούμε 0 στις πυρηνικές αντιδράσεις

MINOS
experiment

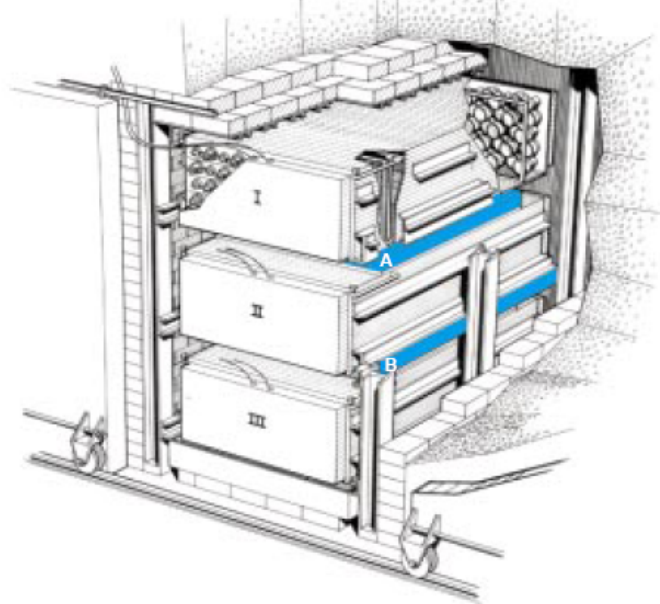


Πείραμα Reines – Cowan

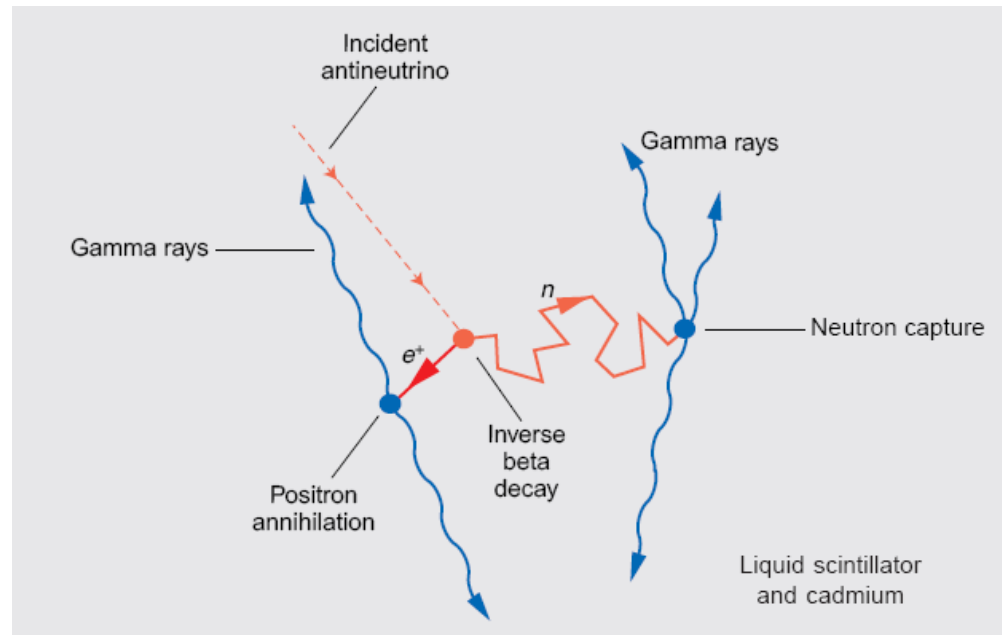
νετρίνα και αντίνητρίνα μπορούν να ανιχνευτούν μέσω των αντίστροφων β-διασπάσεων



Διάταξη Reines – Cowan

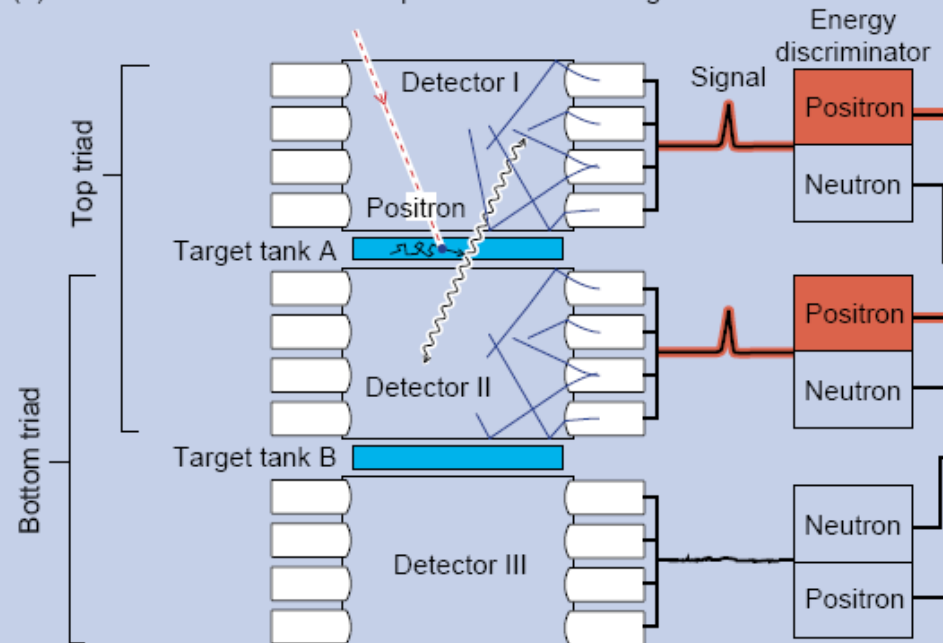


Εξαύλωση ποζιτρονίου $\rightarrow 2\gamma$, 511KeV, 180°
Σύλληψη θερμικού $n \rightarrow$ μετα από 3-5 μ s
 γ ($\Sigma E=9.1$ MeV)

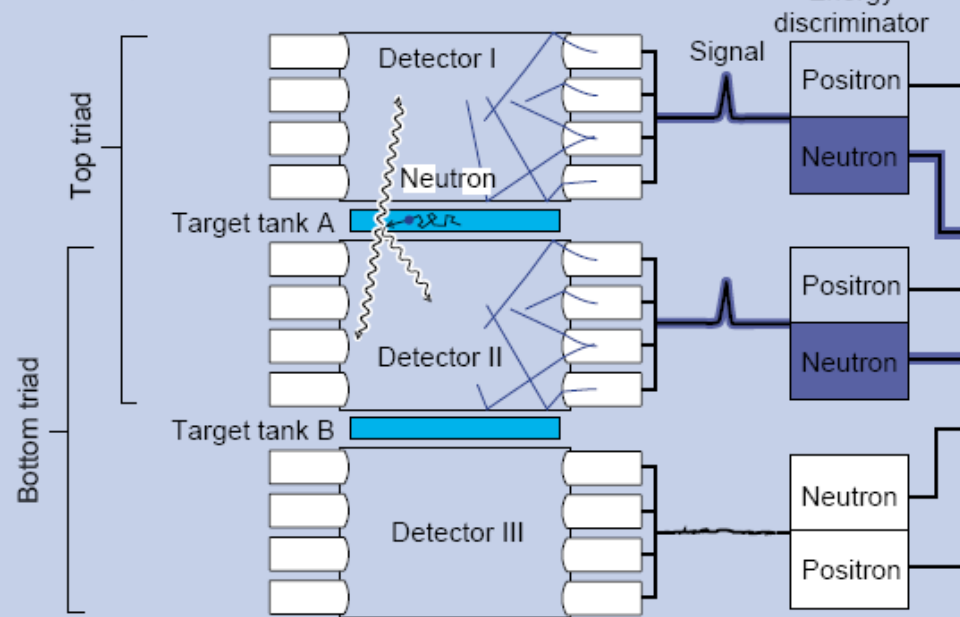


Πείραμα Reines – Cowan

(a) $T = 0$ Positron annihilation produces electron signal.



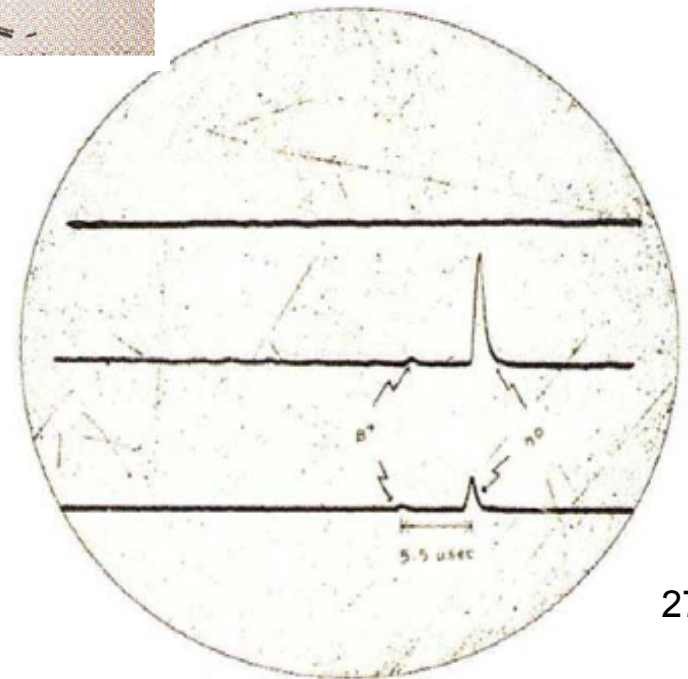
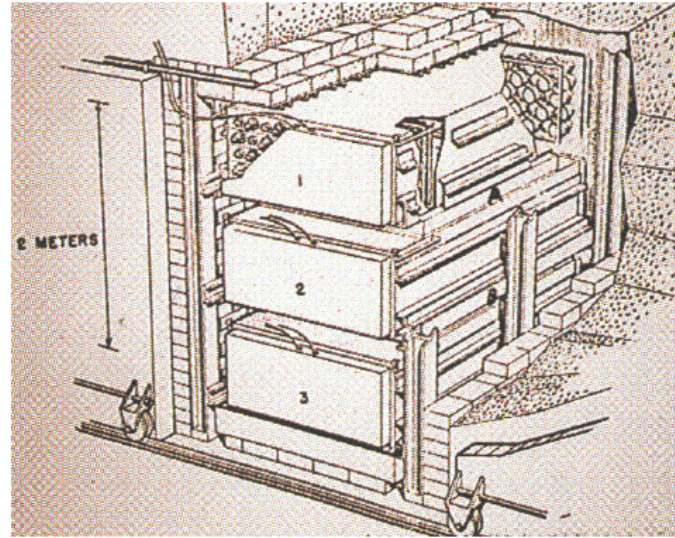
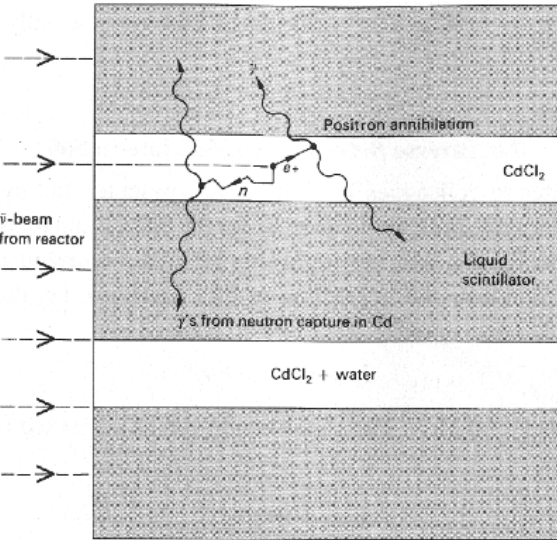
(b) $T = 3 \mu s$ Neutron capture produces neutron signal.



Αρχικά στο Hanford Site, αλλά μετά μεταφέρθηκε στο Savannah River Plant στη South Carolina όπου είχε καλύτερη θωράκιση για τις κοσμικές ακτίνες. Τοποθετήθηκε 11 m από τον αντιδραστήρα και 12 m κάτω από τη γή.

Δύο δοχεία με περίπου 200 lit νερό με περίπου 40 kg $CdCl_2$. Τα δοχεία νερού ήταν ανάμεσα σε τρεις σπινθηριστές οι οποίοι περιείχαν 110 (127 mm) φωτοπολλαπλασιαστές.

Πείραμα Reines – Cowan



Reines – Cowan

•Αποτελέσματα

- Μετά από συλλογή δεδομένων μηνών, συγκέντρωσαν δεδομένα από περίπου 3 νετρίνα/ώρα στον ανιχνευτή.
- Για να είναι βέβαιοι ότι έβλεπαν γεγονότα νετρίνων σύμφωνα με το σχεδιασμό του πειράματος έκλειναν τον αντιδραστήρα για να δείξουν ότι υπήρχε διαφορά στον αριθμό των μετρούμενων γεγονότων.
- Προέβλεψαν ενεργό διατομή για την αντίδραση $6 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ και την μέτρησαν $6.3 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$.
- Ο Reines πήρε το Nobel Prize το 1995.

Πείραμα Davis

Διαφοροποίηση μεταξύ $\nu \neq \bar{\nu}$



1000 γαλόνια Cl_4C κοντά (μέσα) σε αντιδραστήρα, όπου παράγονται αντνετρίνα όχι όμως νετρίνα.

Αν παράγεται Ar, μπορεί να μετρηθεί.

Μετρήσεις με τον αντιδραστήρα σε λειτουργία και χωρίς.

Αποτέλεσμα ΑΡΝΗΤΙΚΟ .

Αρα

$$\nu \neq \bar{\nu}$$

Και σε τί διαφέρουν?



Τα ουδέτερα λεπτόνια - νευτρίνα

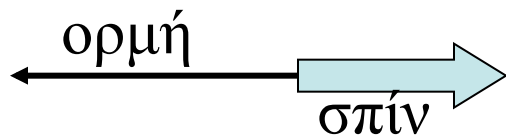
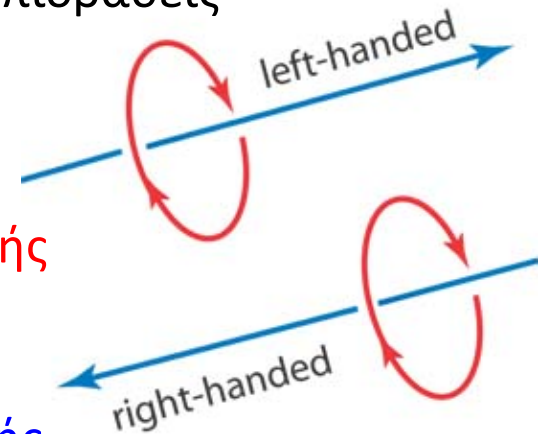
Δεν έχουν φορτίο => Δεν έχουν ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

Τα νευτρίνα είναι 'αριστερόστροφα' =>

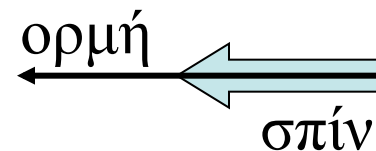
Το **σπίν** έχει διεύθυνση **αντίθετη** από το διάνυσμα της **ορμής**

Τα **αντι**-νευτρίνα είναι 'δεξιόστροφα' =>

το **σπιν** έχει διεύθυνση **ομόρροπη** με το διάνυσμα της **ορμής**



νευτρίνο

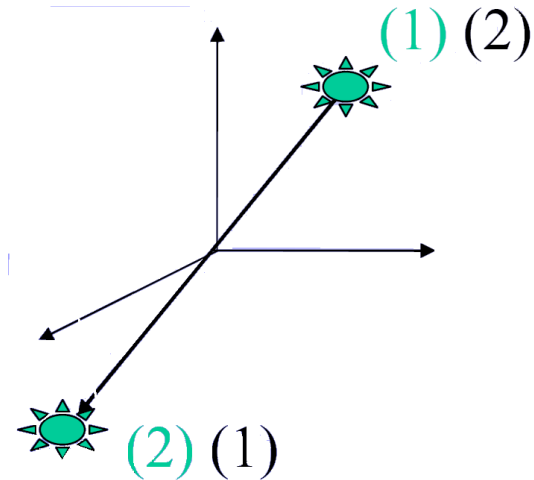


αντι-νευτρίνο

Ομοτιμία (parity)

Μετασχηματισμός Parity

$$P : \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \mapsto \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix}$$



Η β-διάσπαση, έχοντας είτε νετρίνα, είτε αντινετρίνα, παραβιάζει τη συμμετρία της Parity, (διαφορετική συμπεριφορά του νετρίνου και αντινετρίνου)

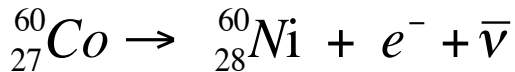
Σε αντιστροφή του χώρου, το νετρίνο γίνεται αντινετρίνο, αλλά το σπίν δεν αλλάζει φορά. Έτσι, η αντιστροφή του χώρου δημιουργεί δεξιόστροφα νετρίνα και αριστερόστροφα αντινετρίνα. Δεν παρατηρείται, οπότε όσον αφορά τις β-διασπάσεις η Parity “παραβιάζεται”



πείραμα Wu (1957)

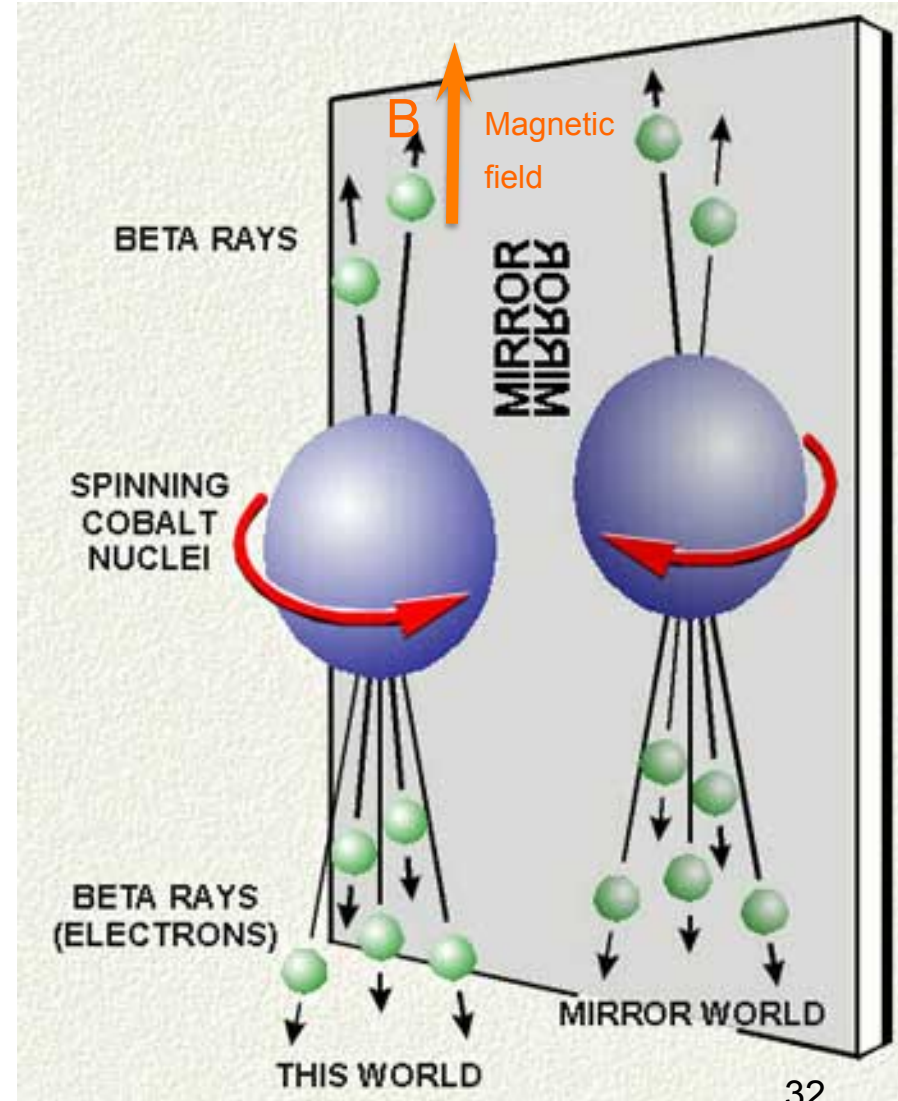
Παραβίαση της κατοπτρικής συμμετρίας (ομοτιμίας)

Μέτρηση της γωνιακής κατανομής των ηλεκτρονίων της β^- του ^{60}Co .



Spin του ^{60}Co $5\hbar$, πόλωση σε μαγνητικό πεδίο
Τα e^- έχουν προτιμητέα φορά διάσπασης, αντίθετη του spin του ^{60}Co .

Στην κατοπτρική εικόνα τα e^- εκπέμπονται παράλληλα με το spin του ^{60}Co , κάτι που **ΔΕΝ** παρατηρείται στο πείραμα.



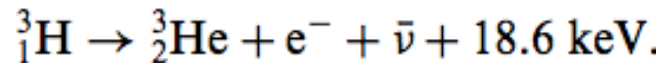
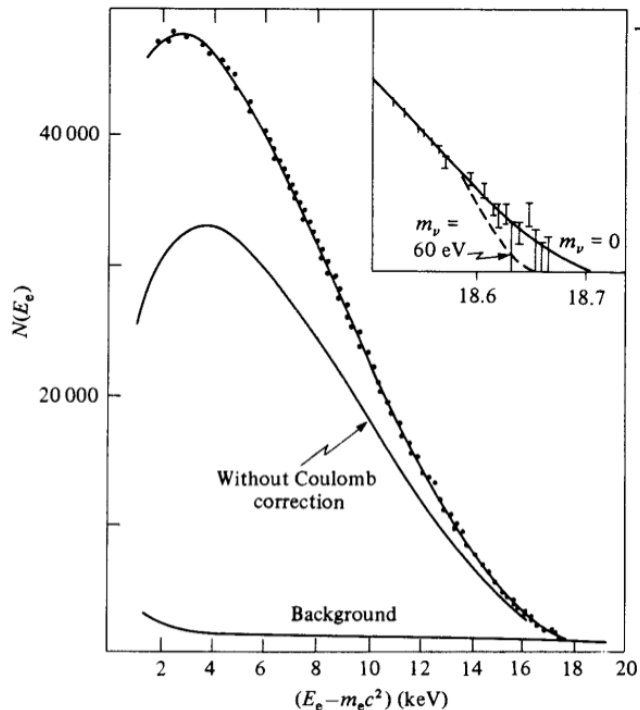
Fermi-Kurie plot (μάζα ν)

Διάγραμμα της ρίζας του αριθμού των σωματίων β με ορμή (ή ενέργεια) μέσα σε μια στενή περιοχή, διά μιας συνάρτησης Fermi ως συνάρτηση της ενέργειας των β.

Είναι ευθεία για επιτρεπτές μεταπτώσεις (και για μερικές απαγορευμένες).

Με fitting των σημείων μπορεί να βρεθεί η $E_{\max}$ των β-σωματιδίων

$$\left[\frac{dR/dE_e}{F(Z_d, E_e)E_e(E_e^2 - m_e^2 c^4)^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{1}{2}} = (\text{constant})(E_0 - E_e)^{\frac{1}{2}}[(E_0 - E_e)^2 - m_\nu^2 c^4]^{\frac{1}{4}}.$$



$$m_\nu < 4.35 \text{ eV}$$

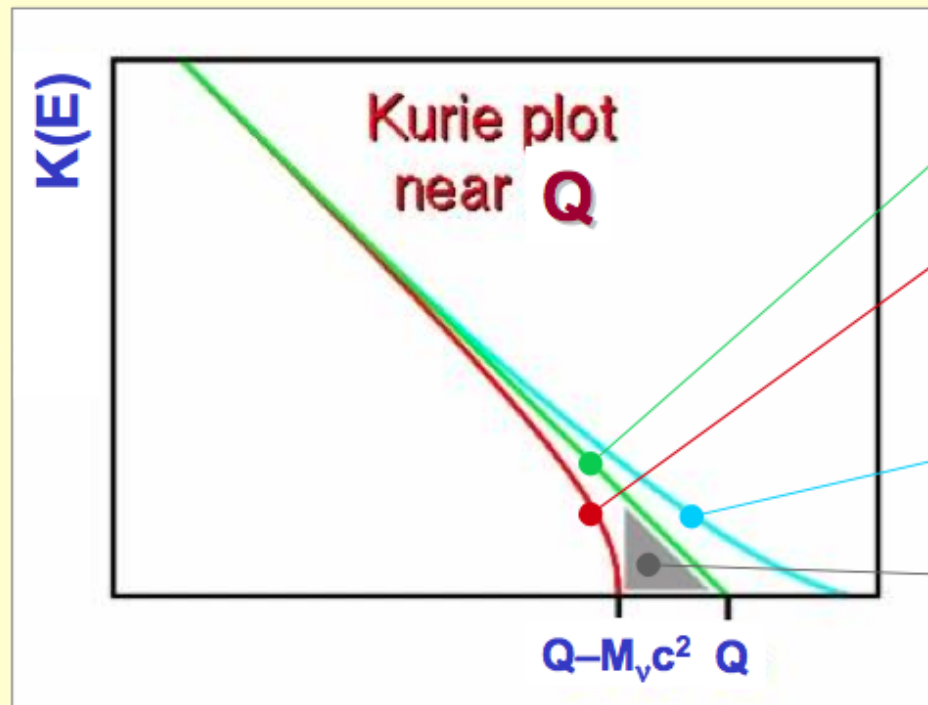
(Belesev, A. I. *et al.* (1995), *Phys. Lett. B* **350**, 263)

Fermi-Kurie plot

Effects of a finite neutrino mass on the Kurie plot

The Kurie plot $K(E_e)$ is a convenient linearization of the beta spectrum

$$K(E) \equiv \left[\frac{\frac{dN}{dE}}{G_F |M_{if}|^2 F(Z, E_e) S(E_e) [1 + \delta_R(Z, E_e)] (E_e + m_e c^2)} \right]^{1/2} \propto \left[(Q - E_e) \sqrt{(Q - E_e)^2 - M_\nu^2 c^4} \right]^{1/2}$$



zero neutrino mass

finite neutrino mass

effect of:

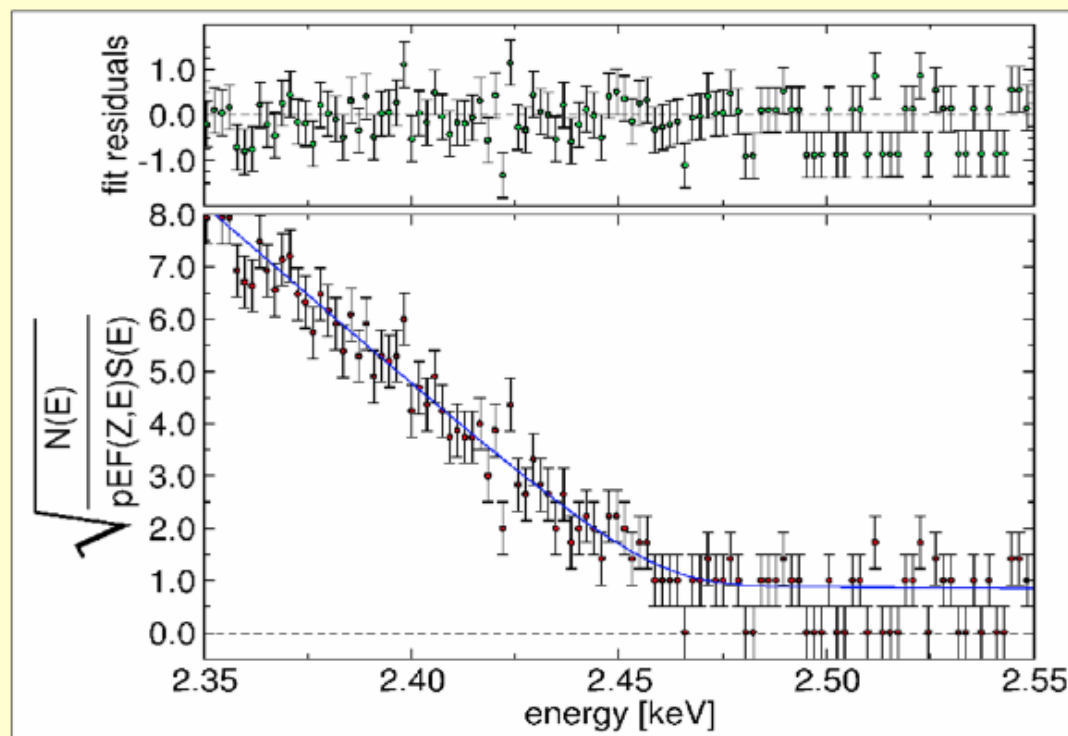
- background
- energy resolution
- excited final states

$$\int_{Q-\delta E}^Q (dN/dE) dE \cong 2(\delta E/Q)^3$$

MIBETA experiment: the neutrino mass

$$M_\nu^2 = -141 \pm 211_{\text{stat}} \pm 90_{\text{sys}} \text{ eV}^2$$

$$M_\nu < 15.6 \text{ eV} \text{ (90\% c.l.)}$$



Fit parameters

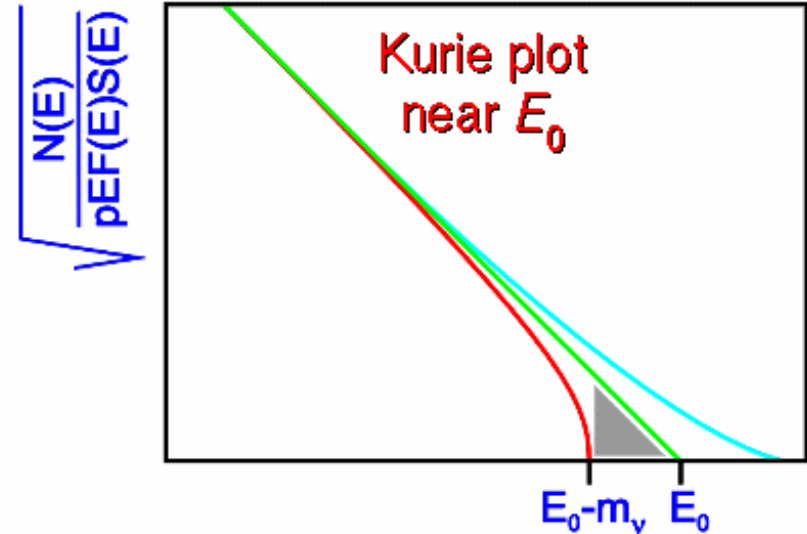
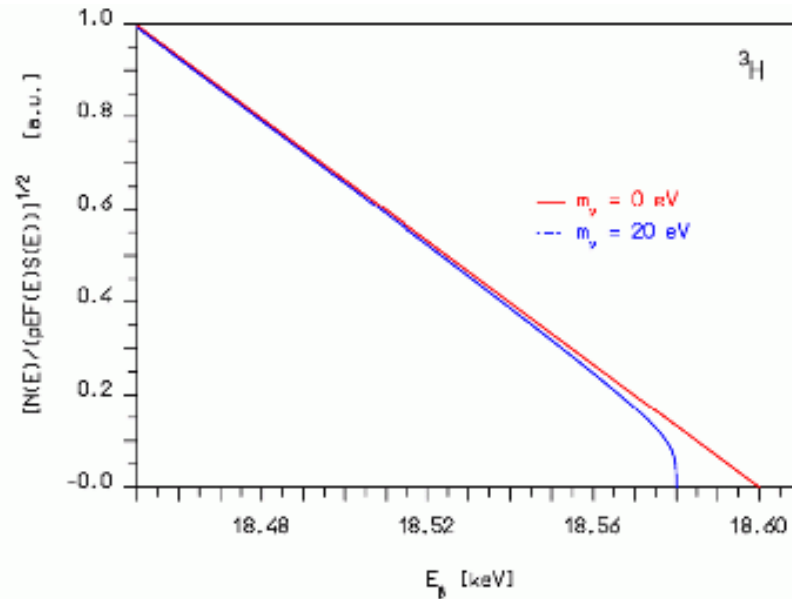
single gaussian:
 $\Delta E_{\text{FWHM}} = 27.8 \text{ eV}$

fitting interval:
0.8 – 3.5 keV

free constant background:
 $6 \times 10^{-3} \text{ c/keV/h}$

free pile-up fraction:
 1.7×10^{-4}

Fermi-Kurie plot



If the neutrino mass is non-zero, then the ideal Kurie spectrum should turn down to the axis as is shown in Fig. 20-6.

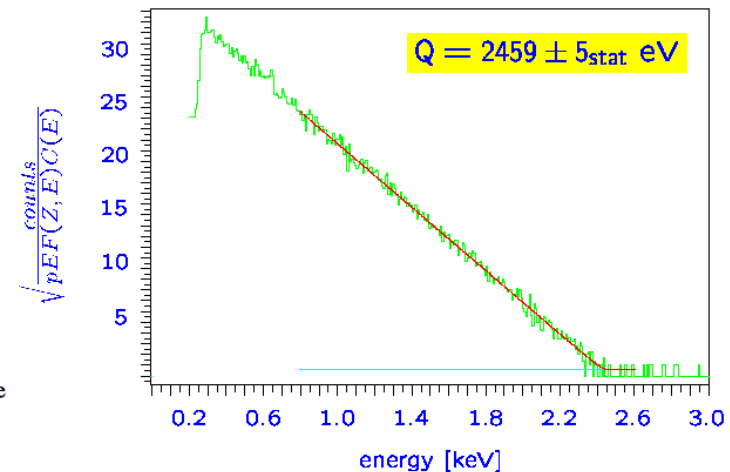
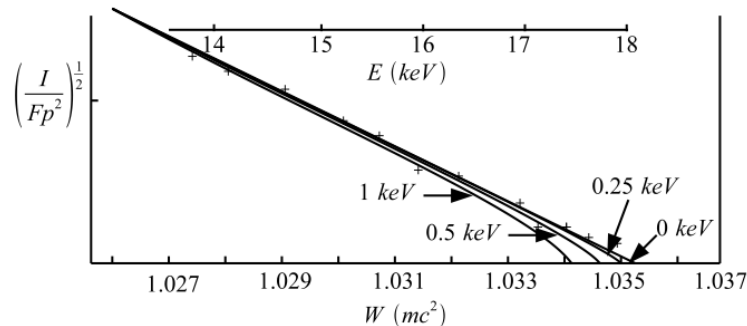


Fig. 20-6 Expanded Kurie plot of the tritium spectrum in the region near the end point. The curves are the theoretical plots expected for the indicated rest mass (in keV) of the neutrino.

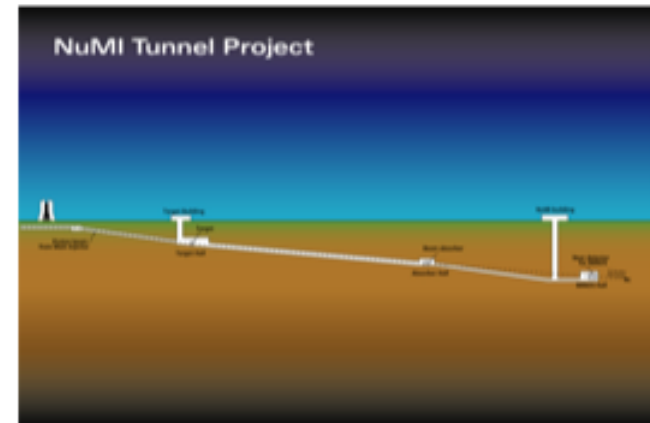
Μάζα ν (ταλαντώσεις ν)

Μάζα ν $\neq 0$

(παρατηρήσαμε “ταλαντώσεις” ν) : ένα είδος νετρίνο μετατρέπεται σε ένα άλλο $\rightarrow$ γίνεται μόνο αν τα νετρίνα έχουν μάζα: άρα έχουν μάζα...



MINOS experiment



This is the most precise measurement of Δm^2 .
The results are: $\Delta m^2_{23} = 2.43^{+0.13}_{-0.13} \text{ eV}^2/c^4$
(90% confidence limit) and
 $\sin^2(2\theta_{23}) > 0.90$ (90% confidence limit)