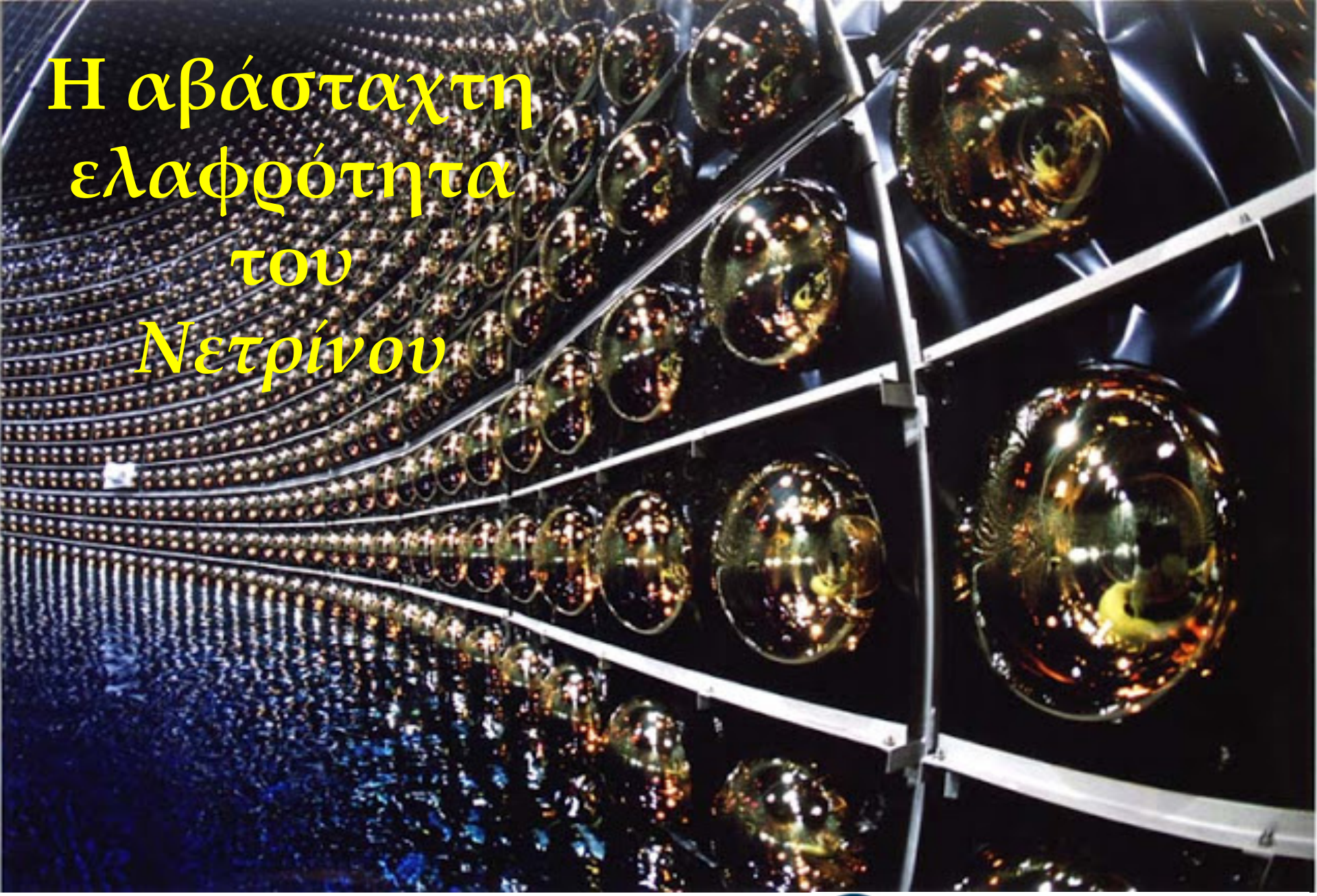
Η αβάσταχτη ελαφρότητα του Νετρίνου



Κώστας Ανδρεόπουλος

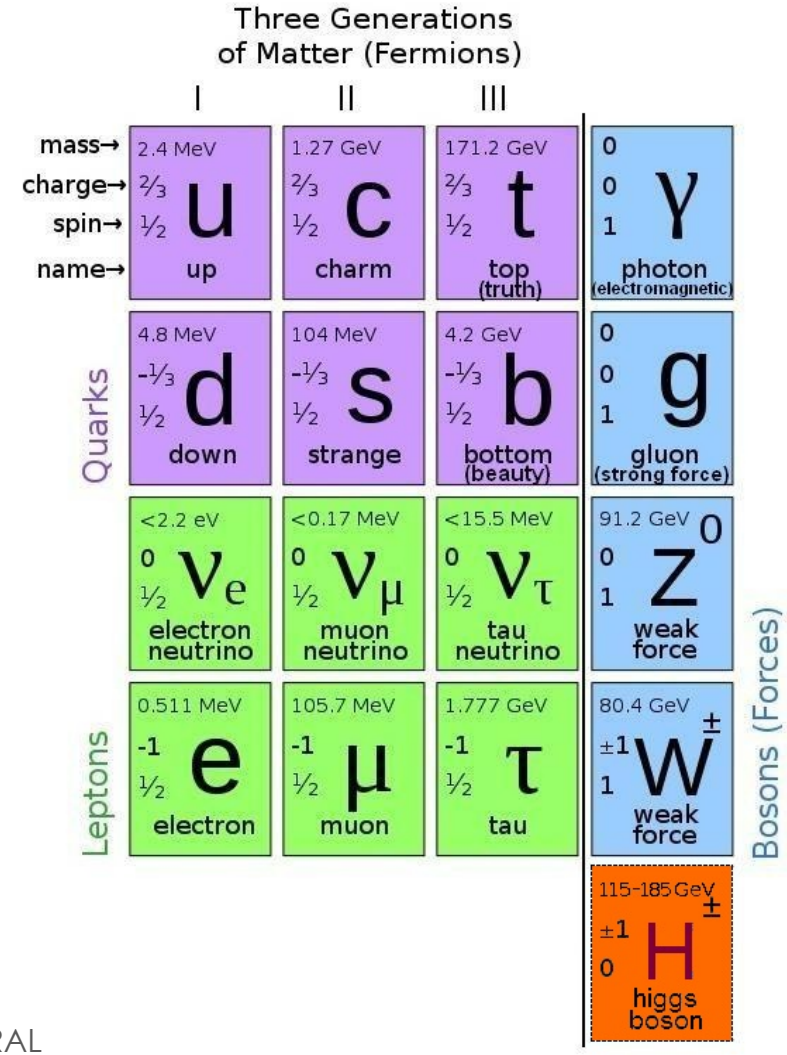
UNIVERSITY OF LIVERPOOL

Science & Technology Facilities Council
Rutherford Appleton Laboratory

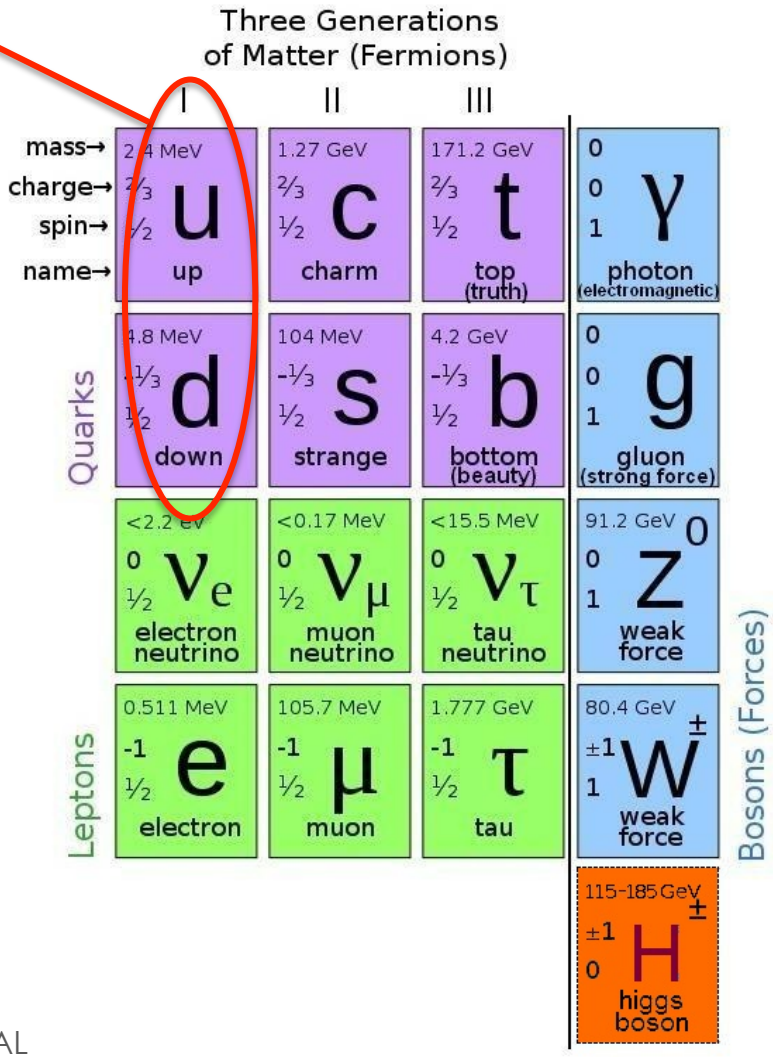
Τα στοιχειώδη σωματίδια

δομικά συστατικά της ύλης και φορείς αλληλεπιδράσεων

Ο **περιοδικός πίνακας** της σύγχρονης Φυσικής

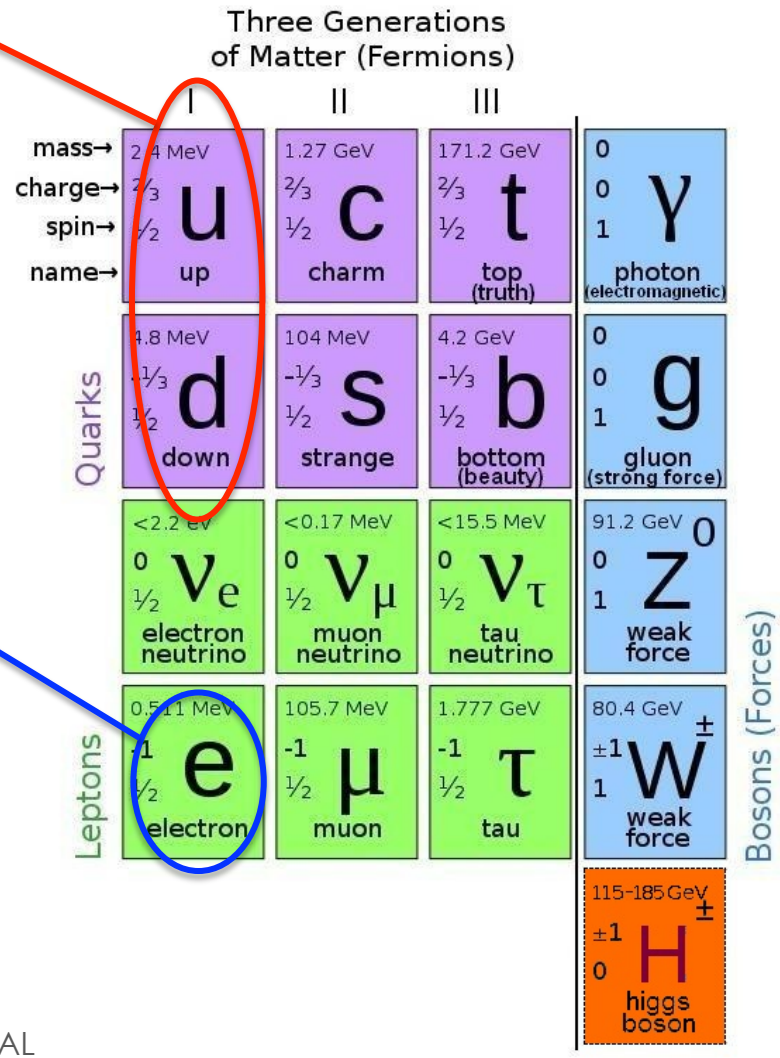


`Πάνω' και `κάτω' quarks.
Φτιάχνουν τα γνωστά μας πρωτόνια και νετρόνια



`Πάνω' και `κάτω' quarks.
Φτιάχνουν τα γνωστά μας πρωτόνια και νετρόνια

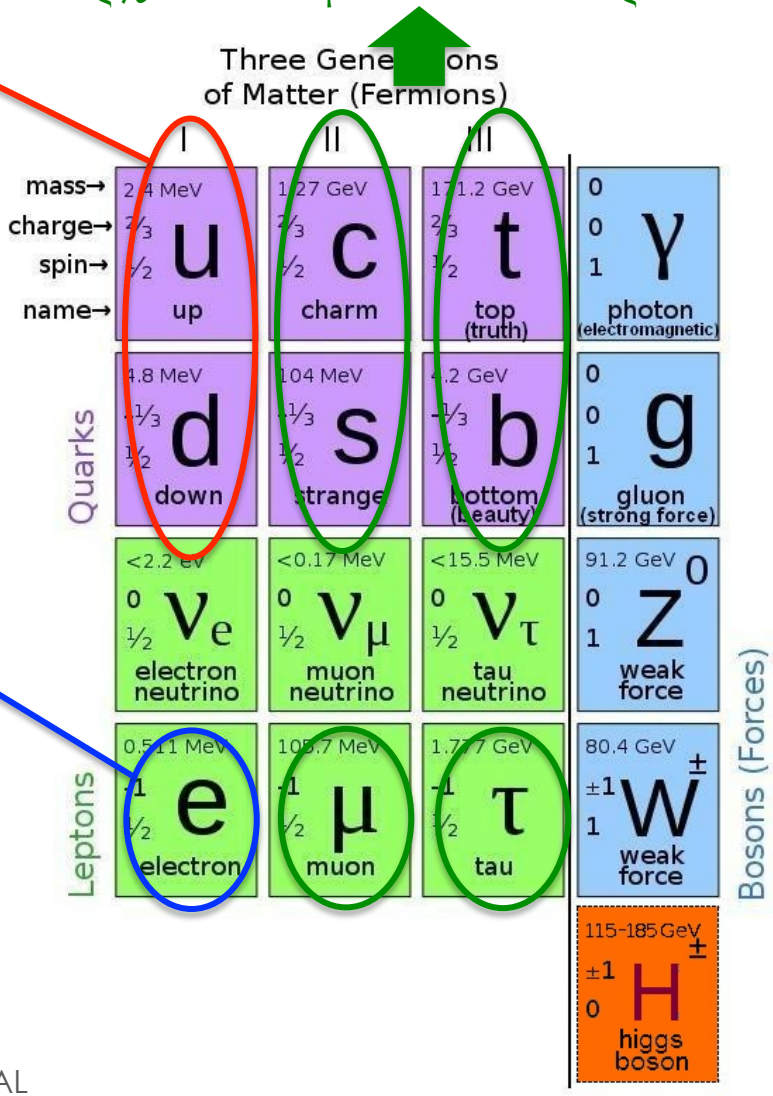
Ηλεκτρόνιο
Μαζί με το πρωτόνιο και το νετρόνιο είναι υπεύθυνα για όλη την Χημεία και φτιάχνουν ότι μπορούμε να δούμε Στο Σύμπαν.



Extra οικογένειες quarks και λεπτονίων (βαρύτερα ηλεκτρόνια)
Δεν γνωρίζουμε γιατί υπάρχουν ή αν υπάρχουν και άλλες οικογένειες ή αν υπάρχουν ακόμα απλούστερα συστατικά

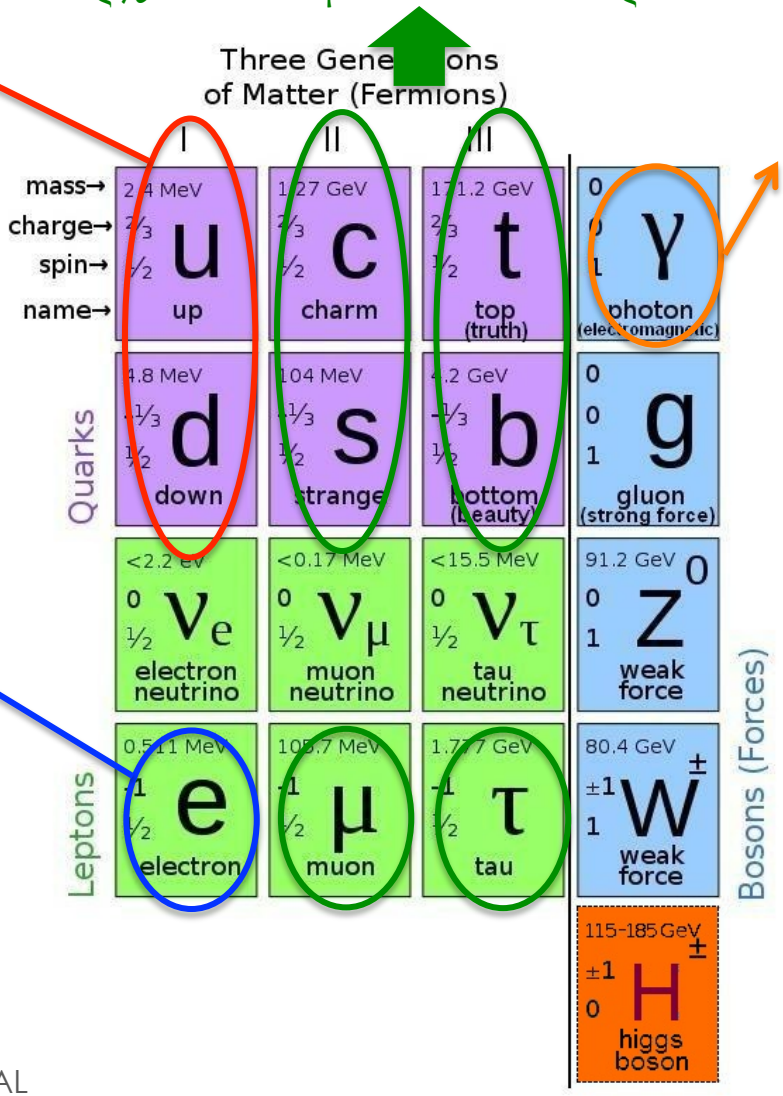
`Πάνω' και `κάτω' quarks.
Φτιάχνουν τα γνωστά μας πρωτόνια και νετρόνια

Ηλεκτρόνιο
Μαζί με το πρωτόνιο και το νετρόνιο είναι υπεύθυνα για όλη την Χημεία και φτιάχνουν ότι μπορούμε να δούμε Στο Σύμπαν.



Extra οικογένειες quarks και λεπτονίων (βαρύτερα ηλεκτρόνια)
Δεν γνωρίζουμε γιατί υπάρχουν ή αν υπάρχουν και άλλες οικογένειες ή αν υπάρχουν ακόμα απλούστερα συστατικά

`Πάνω' και `κάτω' quarks.
Φτιάχνουν τα γνωστά μας πρωτόνια και νετρόνια

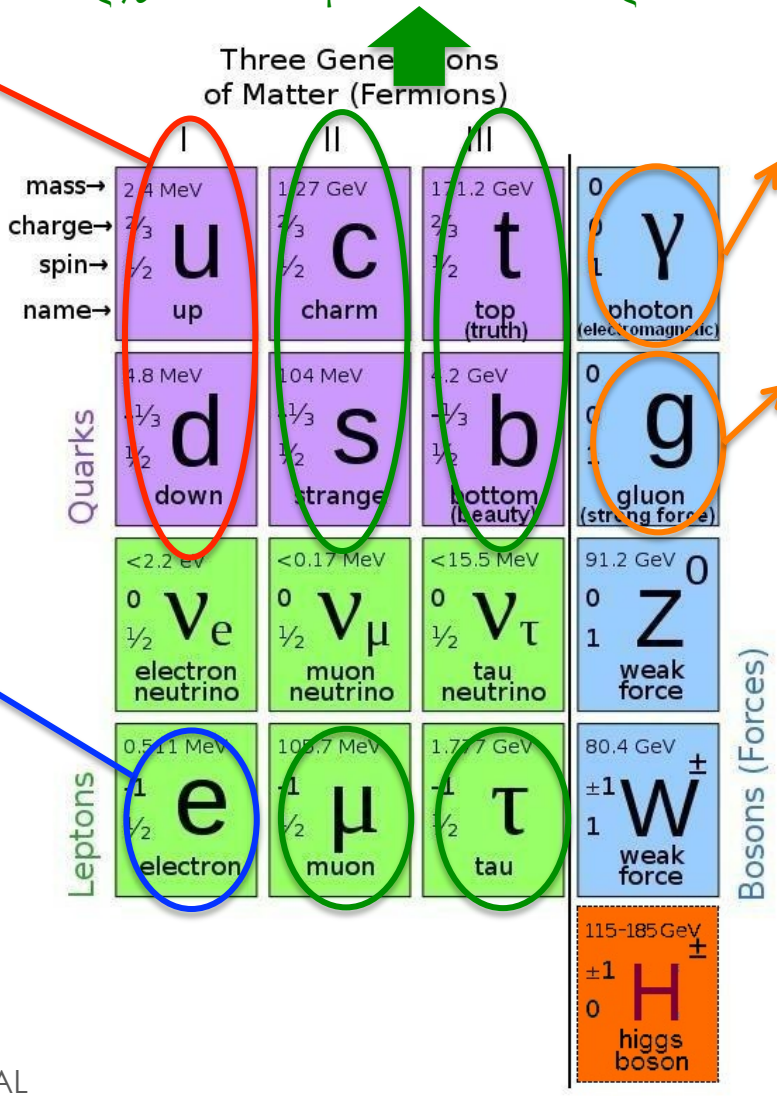


Φωτόνιο
Υπεύθυνο για τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

Ηλεκτρόνιο
Μαζί με το πρωτόνιο και το νετρόνιο είναι υπεύθυνα για όλη την Χημεία και φτιάχνουν ότι μπορούμε να δούμε Στο Σύμπαν.

Extra οικογένειες quarks και λεπτονίων (βαρύτερα ηλεκτρόνια)
Δεν γνωρίζουμε γιατί υπάρχουν ή αν υπάρχουν και άλλες οικογένειες ή αν υπάρχουν ακόμα απλούστερα συστατικά

`Πάνω' και `κάτω' quarks.
Φτιάχνουν τα γνωστά μας πρωτόνια και νετρόνια



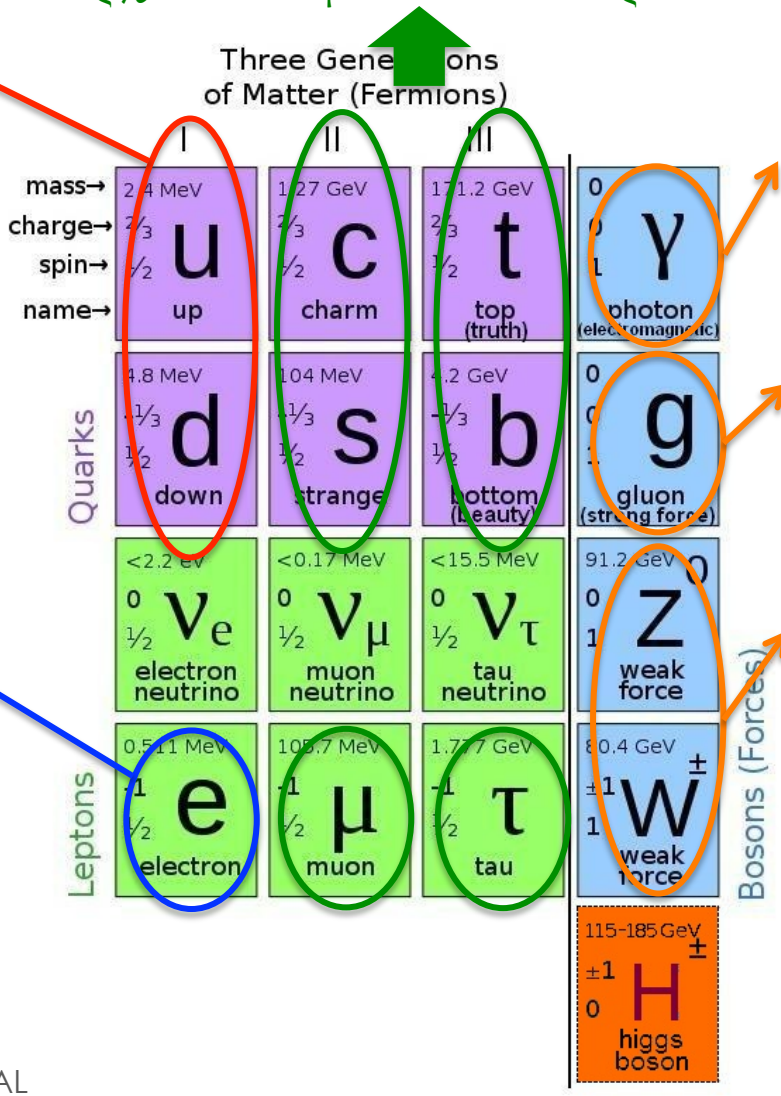
Φωτόνιο
Υπεύθυνο για τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

Γλουόνια
Υπεύθυνα για τις ισχυρές πυρηνικές αλληλεπιδράσεις

Ηλεκτρόνιο
Μαζί με το πρωτόνιο και το νετρόνιο είναι υπεύθυνα για όλη την Χημεία και φτιάχνουν ότι μπορούμε να δούμε Στο Σύμπαν.

Extra οικογένειες quarks και λεπτονίων (βαρύτερα ηλεκτρόνια)
Δεν γνωρίζουμε γιατί υπάρχουν ή αν υπάρχουν και άλλες οικογένειες ή αν υπάρχουν ακόμα απλούστερα συστατικά

`Πάνω' και `κάτω' quarks.
Φτιάχνουν τα γνωστά μας πρωτόνια και νετρόνια



Φωτόνιο
Υπεύθυνο για τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

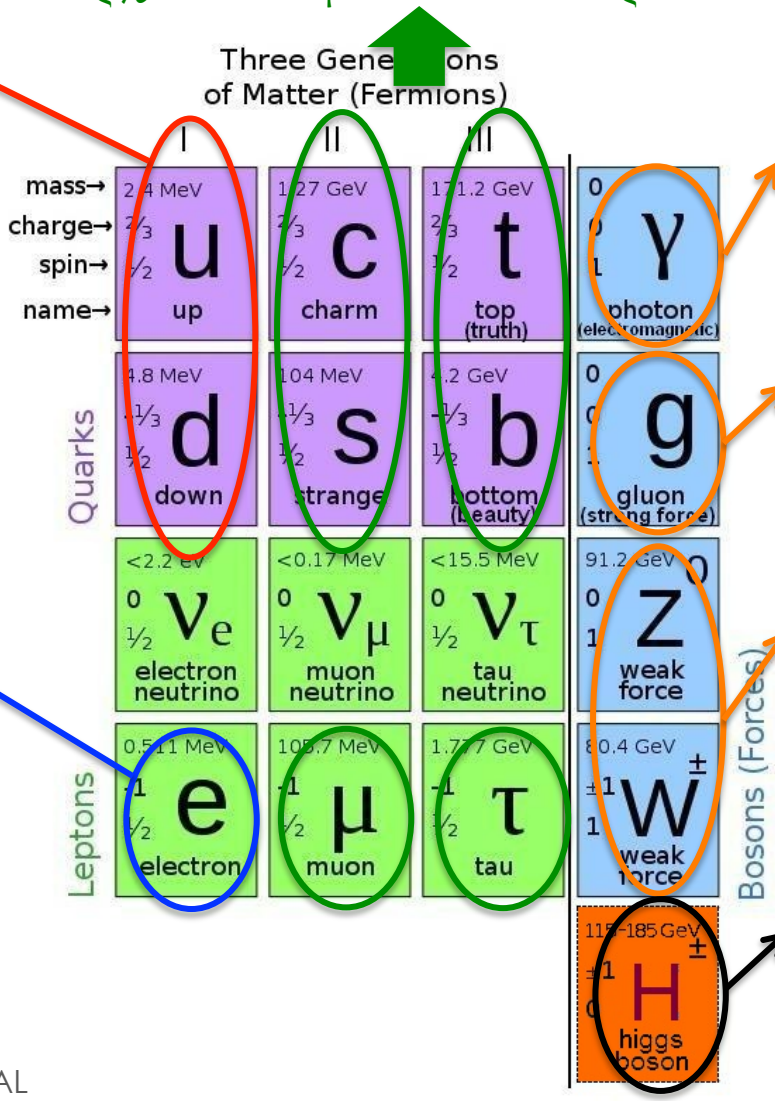
Γλουόνια
Υπεύθυνα για τις ισχυρές πυρηνικές αλληλεπιδράσεις

Διανυσματικά Μποζόνια
Υπεύθυνα για τις ασθενείς πυρηνικές αλληλεπιδράσεις

Ηλεκτρόνιο
Μαζί με το πρωτόνιο και το νετρόνιο είναι υπεύθυνα για όλη την Χημεία και φτιάχνουν ότι μπορούμε να δούμε Στο Σύμπαν.

Extra οικογένειες quarks και λεπτονίων (βαρύτερα ηλεκτρόνια)
Δεν γνωρίζουμε γιατί υπάρχουν ή αν υπάρχουν και άλλες οικογένειες ή αν υπάρχουν ακόμα απλούστερα συστατικά

`Πάνω' και `κάτω' quarks.
Φτιάχνουν τα γνωστά μας πρωτόνια και νετρόνια



Φωτόνιο
Υπεύθυνο για τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

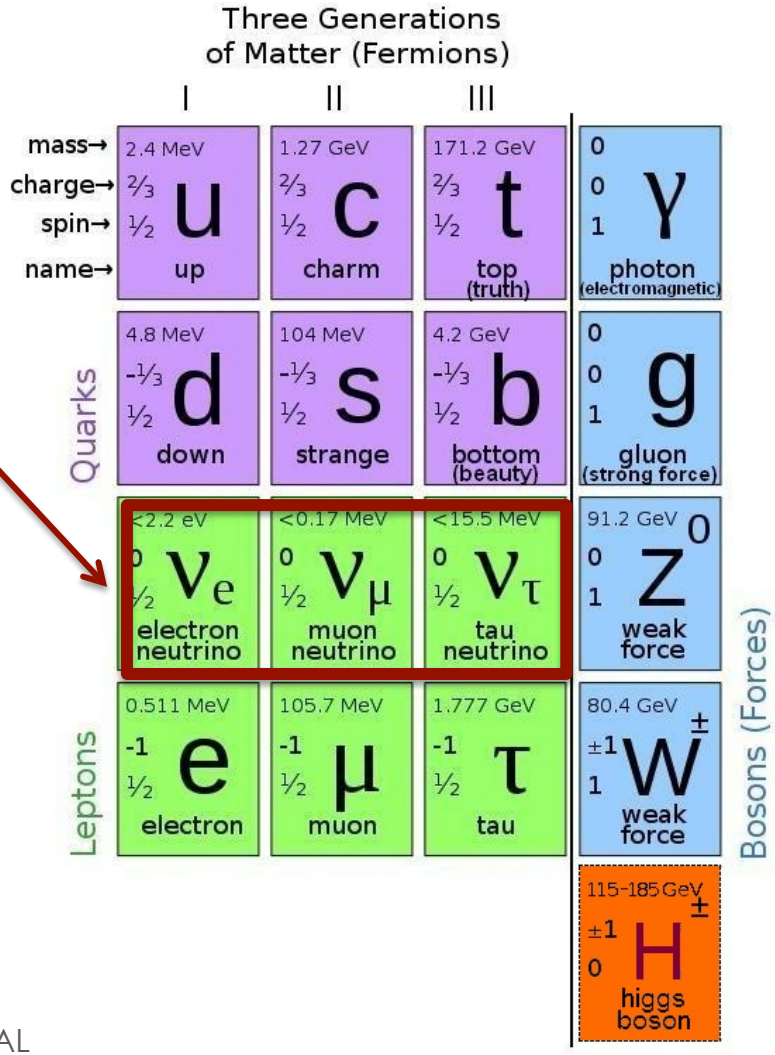
Γλουόνια
Υπεύθυνα για τις ισχυρές πυρηνικές αλληλεπιδράσεις

Διανυσματικά Μποζόνια
Υπεύθυνα για τις ασθενείς πυρηνικές αλληλεπιδράσεις

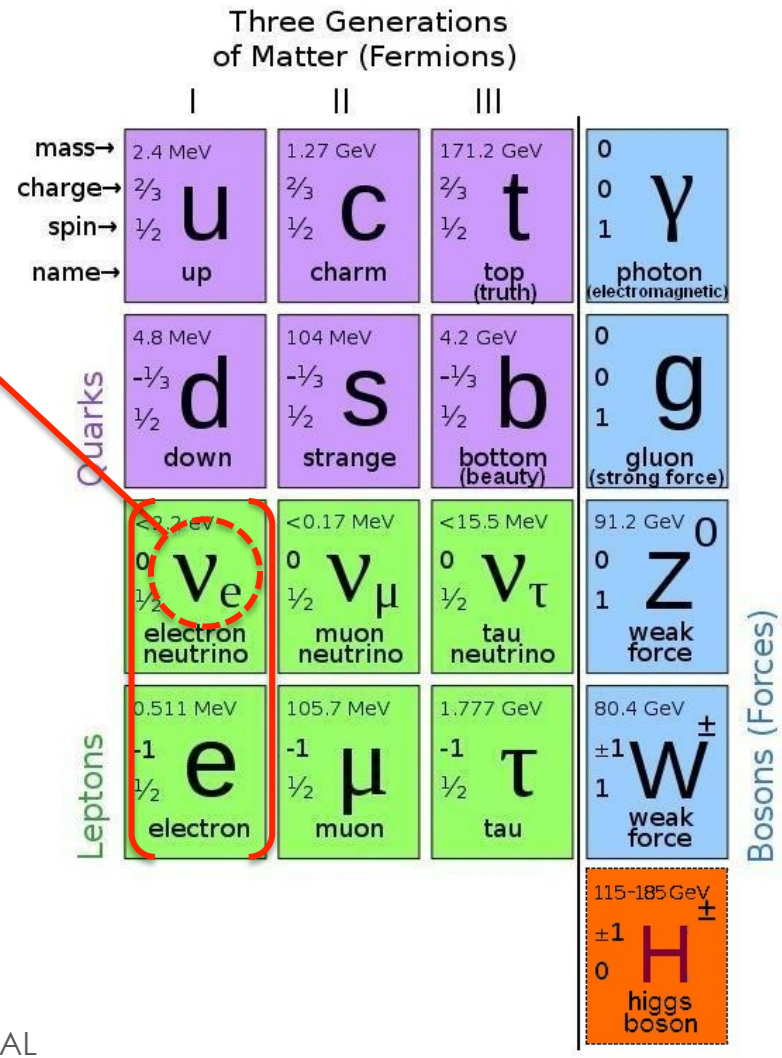
Μποζόνιο Higgs
Υπεύθυνο για την σωματιδιακή μάζα

Ηλεκτρόνιο
Μαζί με το πρωτόνιο και το νετρόνιο είναι υπεύθυνα για όλη την Χημεία και φτιάχνουν ότι μπορούμε να δούμε Στο Σύμπαν.

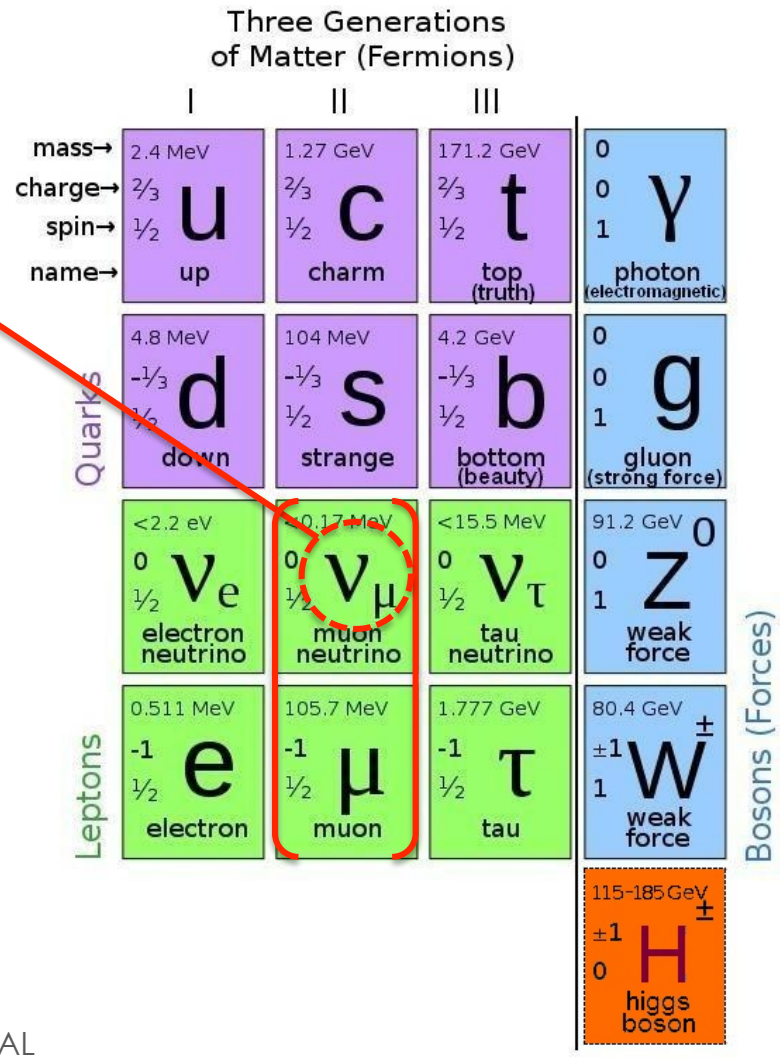
???


Three Generations
of Matter (Fermions)
I
II
III
mass→
charge→
spin→
name→
2.4 MeV
⅔
½
u
up
1.27 GeV
⅔
½
c
charm
171.2 GeV
⅔
½
t
top
(truth)
0
0
1
γ
photon
(electromagnetic)
4.8 MeV
-⅓
½
d
down
104 MeV
-⅓
½
s
strange
4.2 GeV
-⅓
½
b
bottom
(beauty)
0
0
1
g
gluon
(strong force)
<2.2 eV
0
½
νe
electron
neutrino
<0.17 MeV
0
½
νμ
muon
neutrino
<15.5 MeV
0
½
ντ
tau
neutrino
91.2 GeV
0
0
1
Z0
weak
force
0.511 MeV
-1
½
e
electron
105.7 MeV
-1
½
μ
muon
1.777 GeV
-1
½
τ
tau
80.4 GeV
±1
1
W±
weak
force
115-185 GeV
±1
0
H±
higgs
boson
Quarks
Leptons
Bosons (Forces)

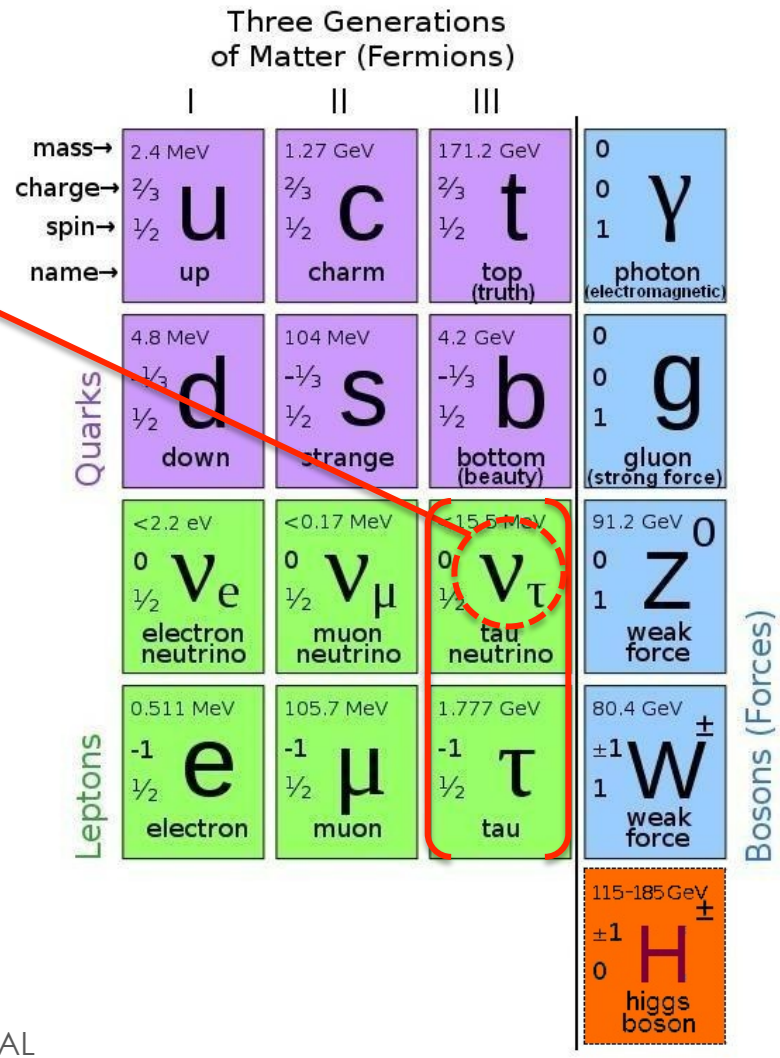
Νετρίνο του ηλεκτρονίου



Νετρίνο του μιονίου

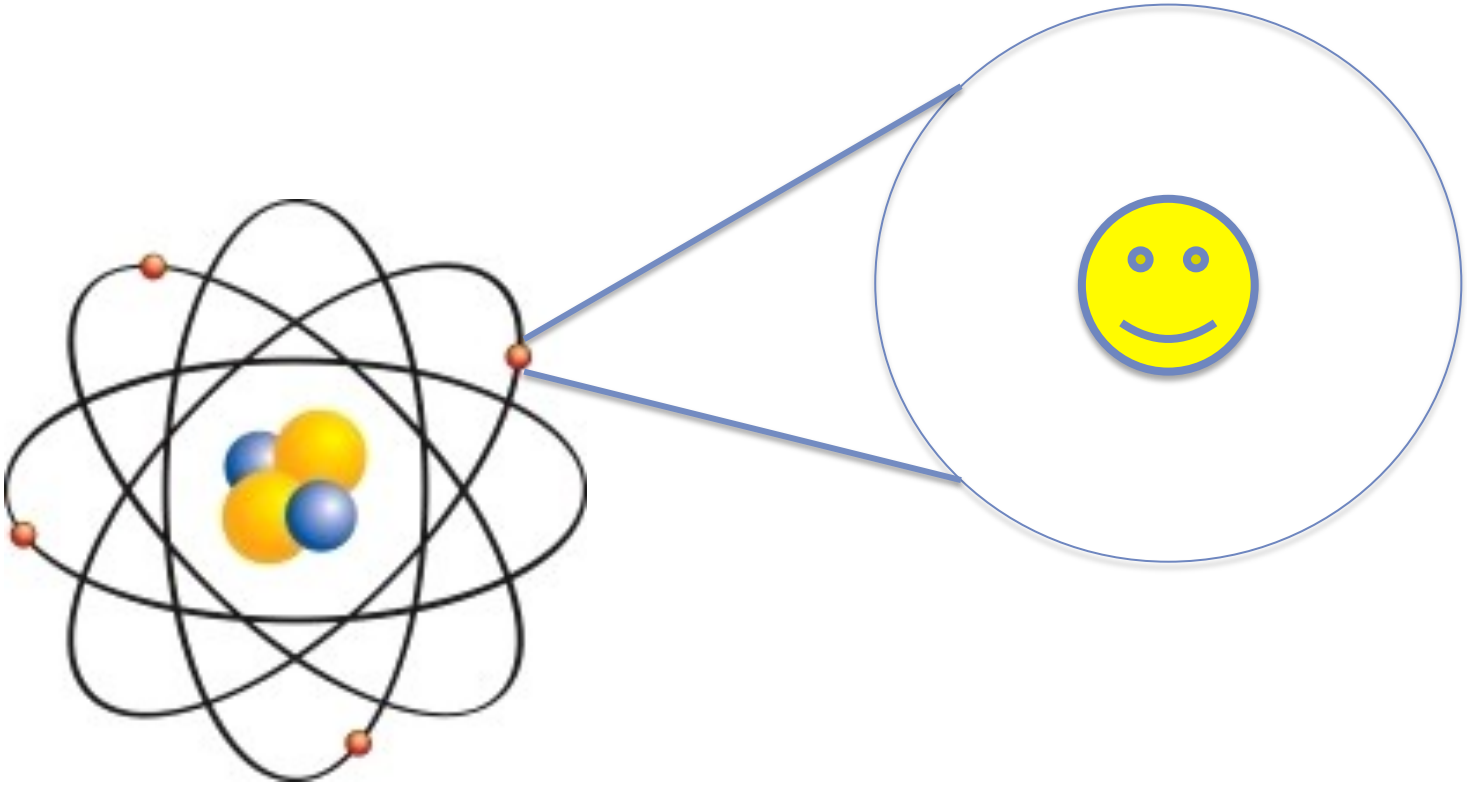


Νετρίνο του τ λεπτονίου



Τι είναι το νετρίνο;

- Πάρε ένα ηλεκτρόνιο



Τι είναι το νετρίνο;

- Πάρε ένα ηλεκτρόνιο
- Αφαίρεσέ του το ηλεκτρικό φορτίο

Τι είναι το νετρίνο;

- Πάρε ένα ηλεκτρόνιο
- Αφαίρεσέ του το ηλεκτρικό φορτίο
- Αφαίρεσέ του και την μάζα

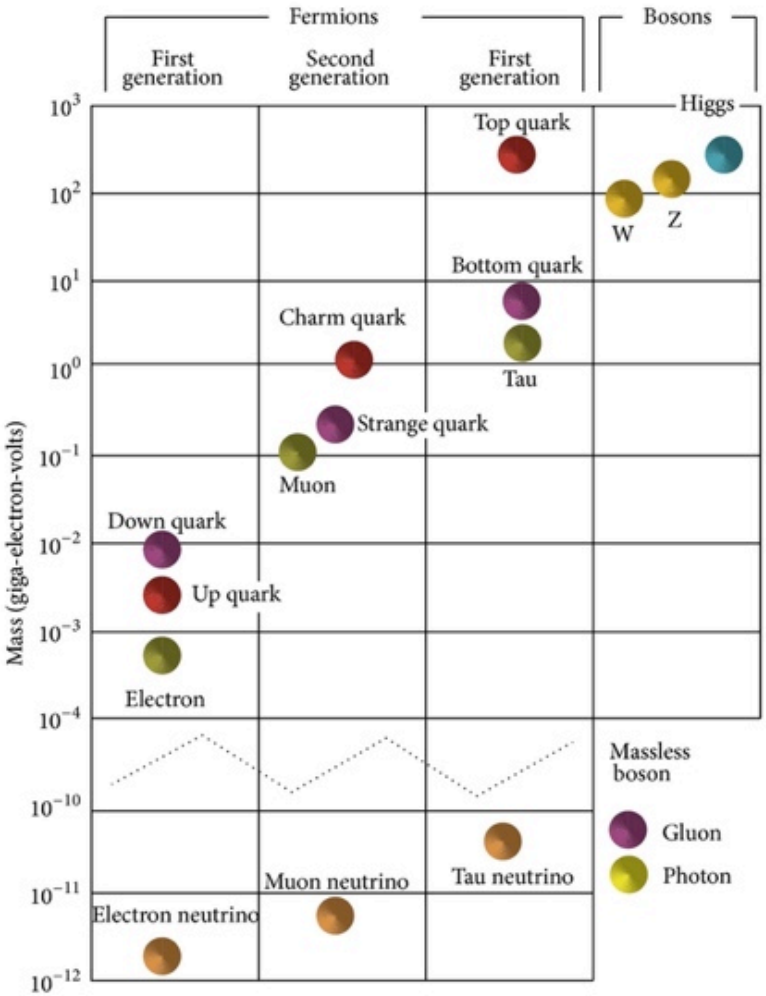
Τι είναι το νετρίνο;

(σχεδόν) τίποτα

Η μάζα του νετρίνου

‘Εχει σχεδόν μηδενική μάζα

Δεν γνωρίζουμε
την ακριβή τιμή της
αλλά είναι τουλάχιστον
1,000,000 φορές
μικρότερη από την μάζα
του αμέσως επόμενου
ελαφρύτερου σωματιδίου
(του ηλεκτρονίου)



Η μάζα του νετρίνου

Αν το νετρίνο ζύγιζε
όσο ένα μυρμήγκι,

Τι είναι το νετρίνο;

το ηλεκτρόνιο θα ζύγιζε όσο μια γάτα και το πρωτόνιο όσο ένας ελέφαντας

Η αλληλεπιδράσεις

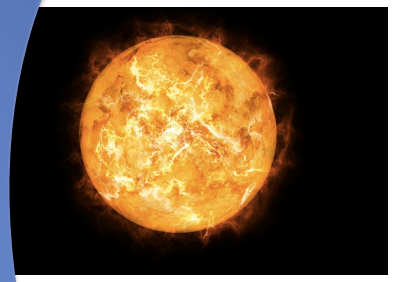
‘Εχει μόνο «ασθενές» φορτίο

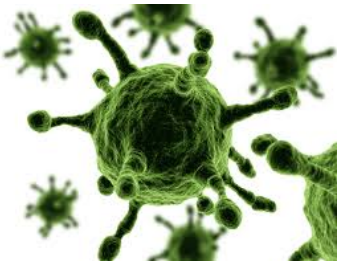
Αυτό σημαίνει οτι συμμετέχει μόνο σε ασθενείς αλληλεπιδράσεις

Τι είναι το νετρίνο;

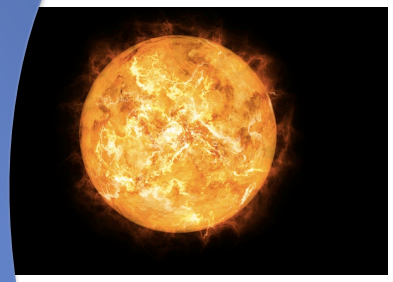
(σχεδόν) τίποτα...

... και ταυτόχρονα ένας από τους
κεντρικούς χαρακτήρες
στην Σύγχρονη Φυσική

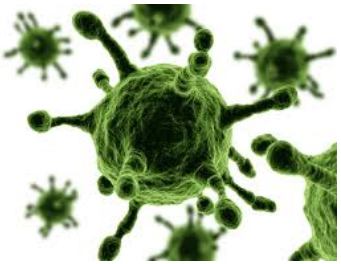


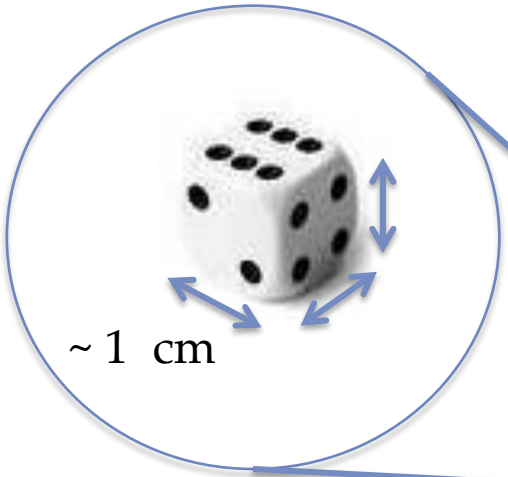


Οτι βλέπουμε γύρω μας (από το μικρότερο ώς το μεγαλύτερο) αποτελείται από **πρωτόνια**, **νετρόνια** και **ηλεκτρόνια.**



Για κάθε πρωτόνιο,
νετρόνιο
ή ηλεκτρόνιο
υπάρχουν
1,000,000,000
νετρίνα

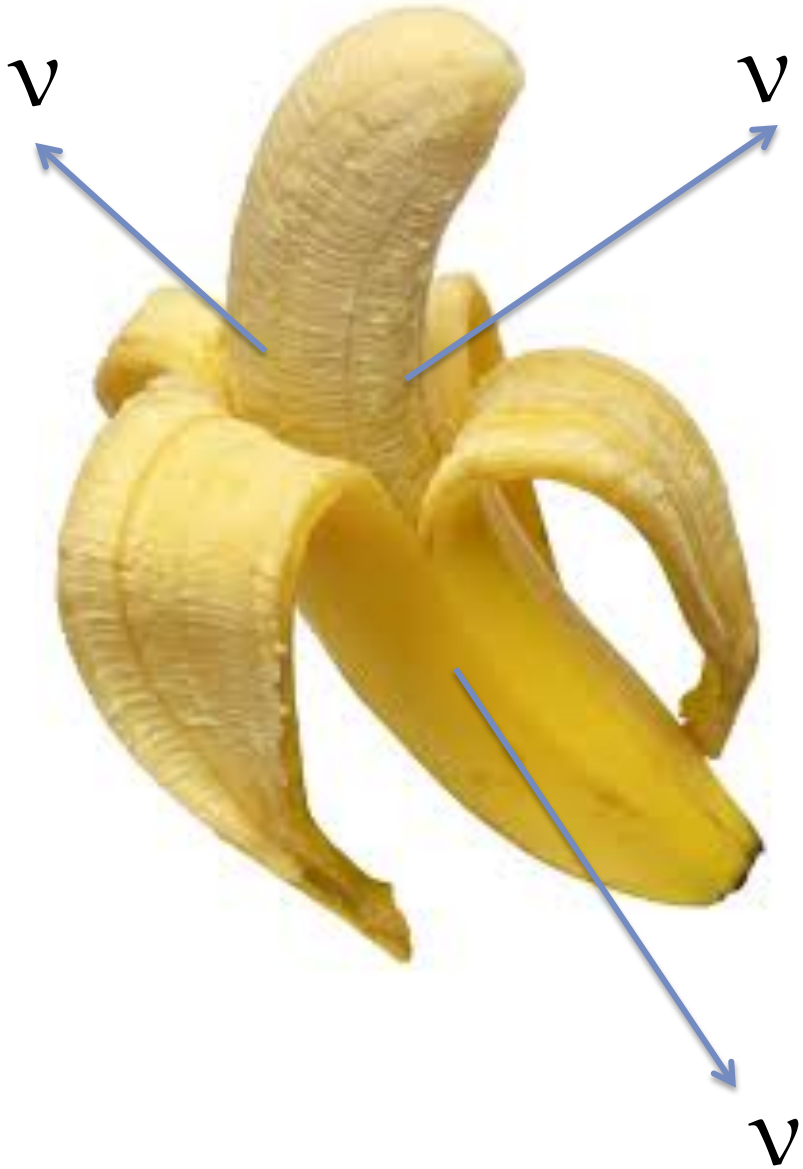




~300 νετρίνα
από το
Big Bang
ανά
κυβικό εκατοστό!

Κάθε στιγμή,
~**30,000,000** νετρίνα
από το
Big Bang
βρίσκονται
μέσα σου!

~100,000,000,000,000
νετρίνα
από τον
Ήλιο
σε διαπερνούν
κάθε
δευτερόλεπτο



Μια μπανάνα εκπέμπει **~1,000,000** νετρίνα την ημέρα λόγω του ραδιενεργού Ποτάσσιου που περιέχει

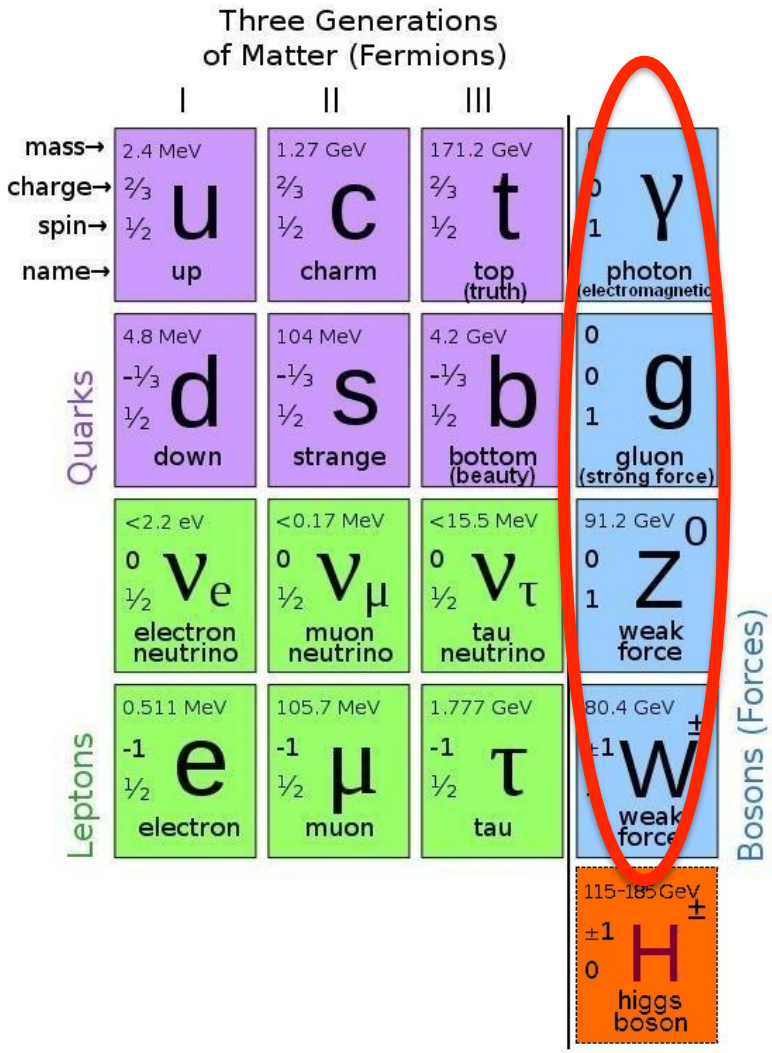
Και αν το τωρα σκέφτεσαι να μην ξαναφάς μπανάνες...

Το ανθρώπινο σώμα περιέχει περίπου 20 mg (ραδιενέργό) Ποτάσσιο 20

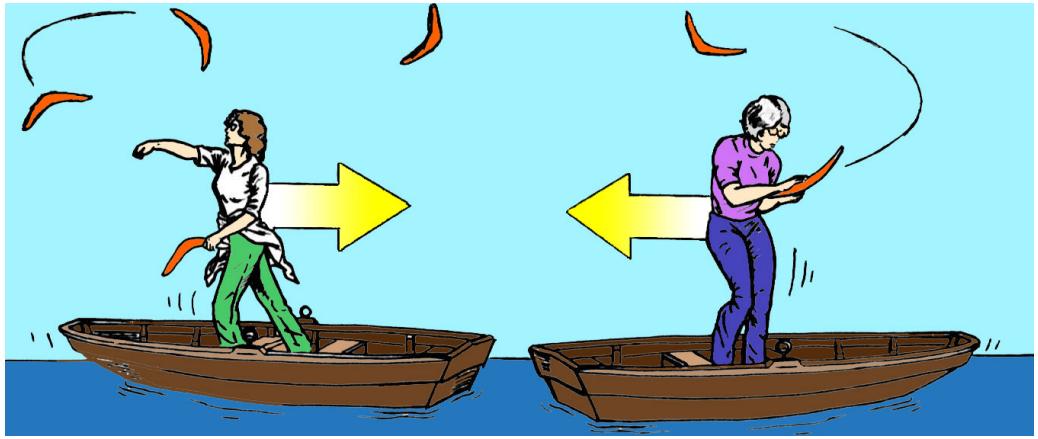
Κάθε μέρα εκπέμπεις (ναι, εσύ) **340,000,000 νετρίνα** και οποία διαφεύγουν και θα ταξιδεύουν για πάντα στο Σύμπαν!

Μα που είναι
όλα αυτά τα νετρίνα;

Αλληλεπιδράσεις

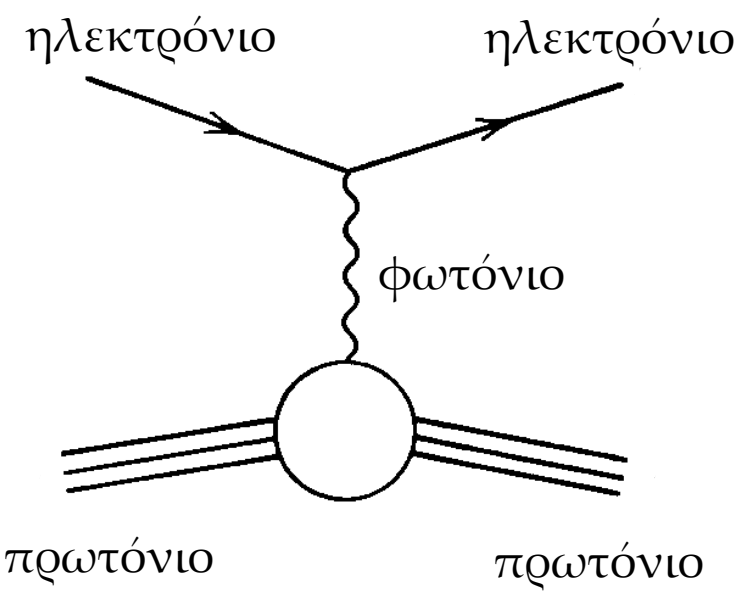


Τα σωματίδια αλληλεπιδρούν ανταλλάσοντας τους «φορείς των δυνάμεων»

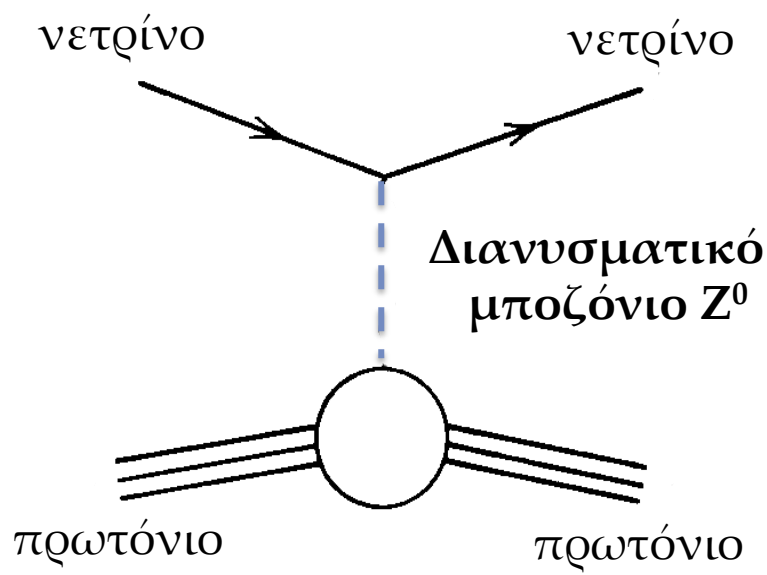


Ασθενείς αλληλεπιδράσεις

Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση



Ασθενής αλληλεπίδραση (ουδετέρου ρεύματος)



Το διανυσματικό μποζόνιο Z^0 ζυγίζει όσο ~100 πρωτόνια

Ασθενείς αλληλεπιδράσεις

Η Ασθενής αλληλεπίδραση είναι όσο «δυνατή» είναι και η γνωστή μας Ηλεκτρομαγνητική αλληπίδραση

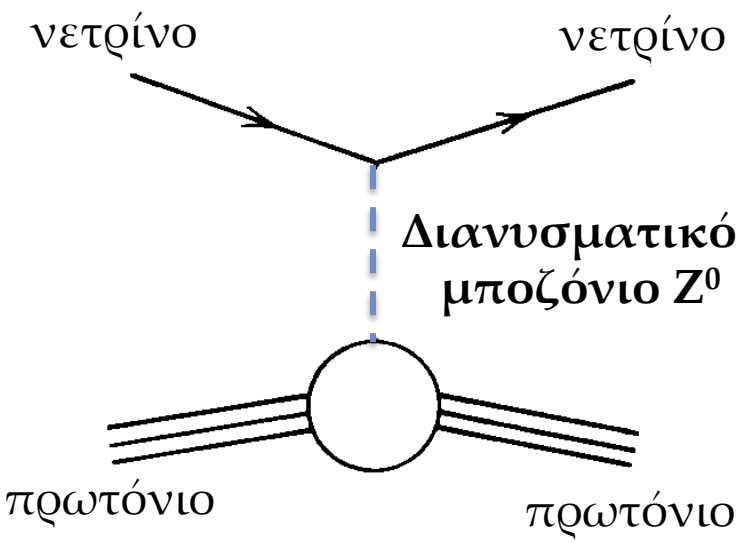
Όμως το νετρίνο, για να αλληλεπιδράσει, πρέπει να ανταλλάξει ένα βαρύ διανυσματικό μποζόνιο.

Σε χαμηλές ενέργειες, αυτό μειώνει την πιθανότητα αλληλεπίδρασης σημαντικά

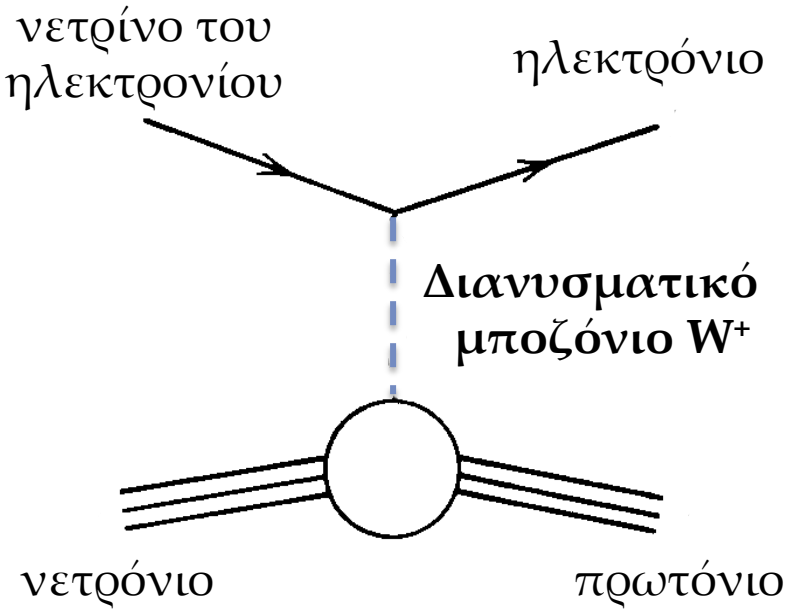
Ασθενείς αλληλεπιδράσεις

Υπάρχουν δύο ειδών ασθενείς αλληλεπιδράσεις

Ασθενής αλληλεπίδραση
(ουδετέρου ρεύματος)



Ασθενής αλληλεπίδραση
(φορτισμένου ρεύματος)



Πόσο ασθενής είναι η ασθενής αλληλεπίδραση;

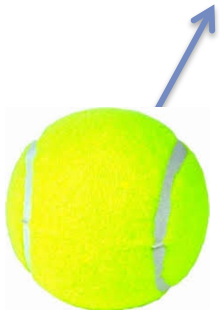
Ενεργός διατομή

Στην κβαντική φυσική
για να εκφράσουμε την
πιθανότητα σκέδασης
χρησιμοποιούμε την έννοια
της **ενεργού διατομής.**

Είναι μια έννοια που έχουμε
δανειστεί από την
Κλασική φυσική.
Πράγματι, αν τα σωματίδια
ήταν `κλασικές' μπίλιες
η ενεργός διατομή θα ήταν
ίση με την γεωμετρική διατομή.

Για ένα σωματίδιο, η ενεργός
διατομή δεν εκφράζει κάποια
πραγματική επιφάνεια.
Είναι μια υποθετική επιφάνεια
που εκφράζει την πιθανότητα
αλληλεπίδρασης

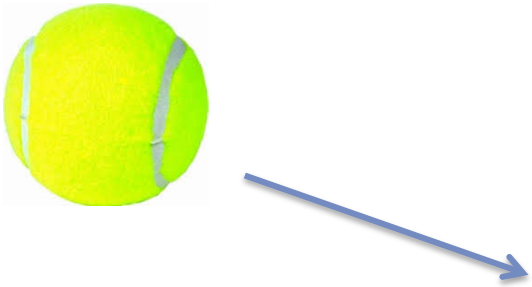
$$\sigma = \pi * R^2$$

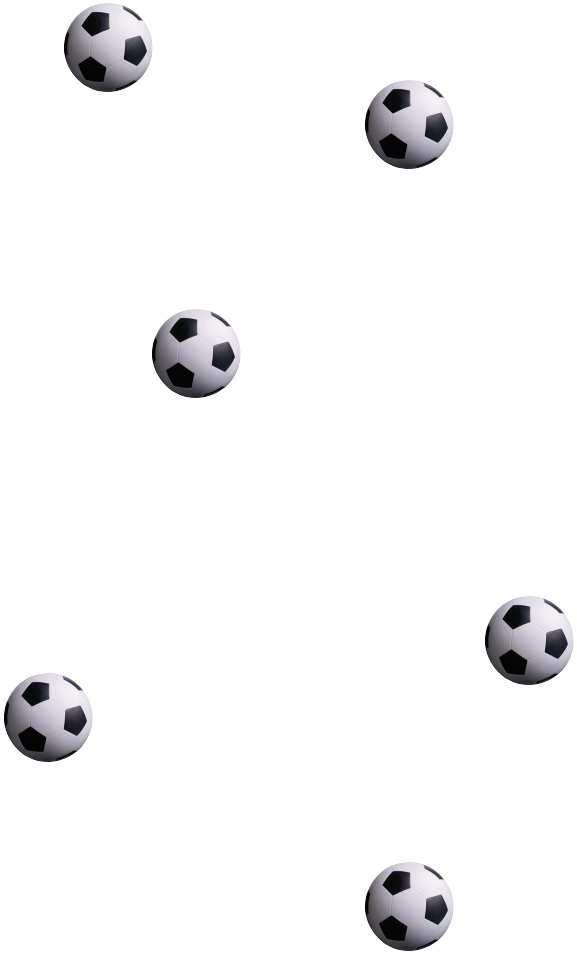


Ενεργός διατομή

Μεγάλη ενεργός διατομή =
Μεγάλη πιθανότητα αλληλεπίδρασης

Ενεργός διατομή





Μικρή ενεργός διατομή =
Μικρή πιθανότητα αλληλεπίδρασης

Ενεργός διατομή για αλληλεπιδράσεις νετρίνων

Η ενεργός διατομή για την αλληλεπίδραση ενός νετρίνου που εκπέμπεται σε μία β-διάσπαση (ενέργεια ~ 1 MeV):

$$\sim 10^{-44}\ \mathrm{cm}^2$$

Για σύκριση, η ενεργός διατομή για την σύλληψη ενός νετρονίου από το δευτέριο ($n + 2H \rightarrow 3H + \gamma$) είναι:

$$\sim 10^{-24}\ \mathrm{cm}^2$$

(20 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη!)

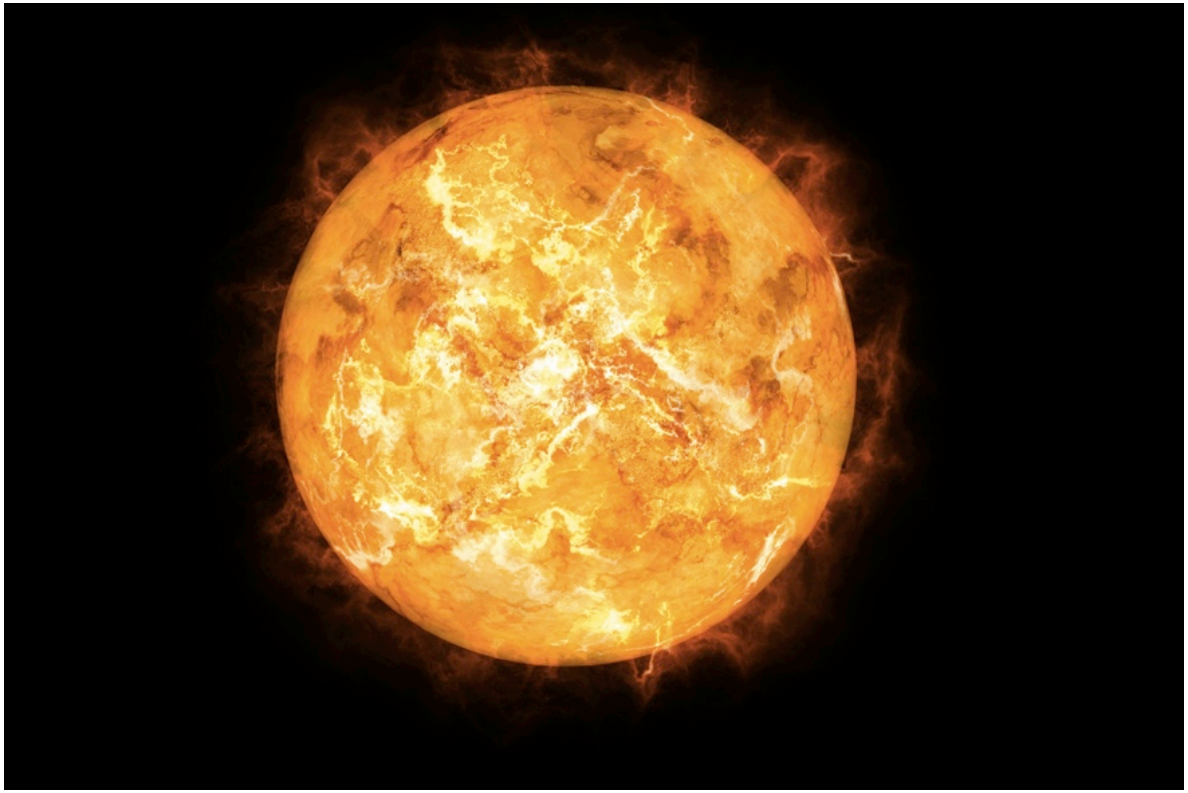
Ένα τυπικό ηλιακό νετρίνο (~1 MeV) χρειάζεται, κατά μέσο όρο, να διαπεράσει **10,000,000,000,000,000,000** ανθρώπους πριν αλληλεπιδράσει

Από την οπτική γωνία του νετρίνου, είσαι ελάχιστα διαφορετικός από το κενό

Έχουν επίπτωση στην ζωή σου;

Χωρίς τα νετρίνα δεν θα ήσουν εδώ

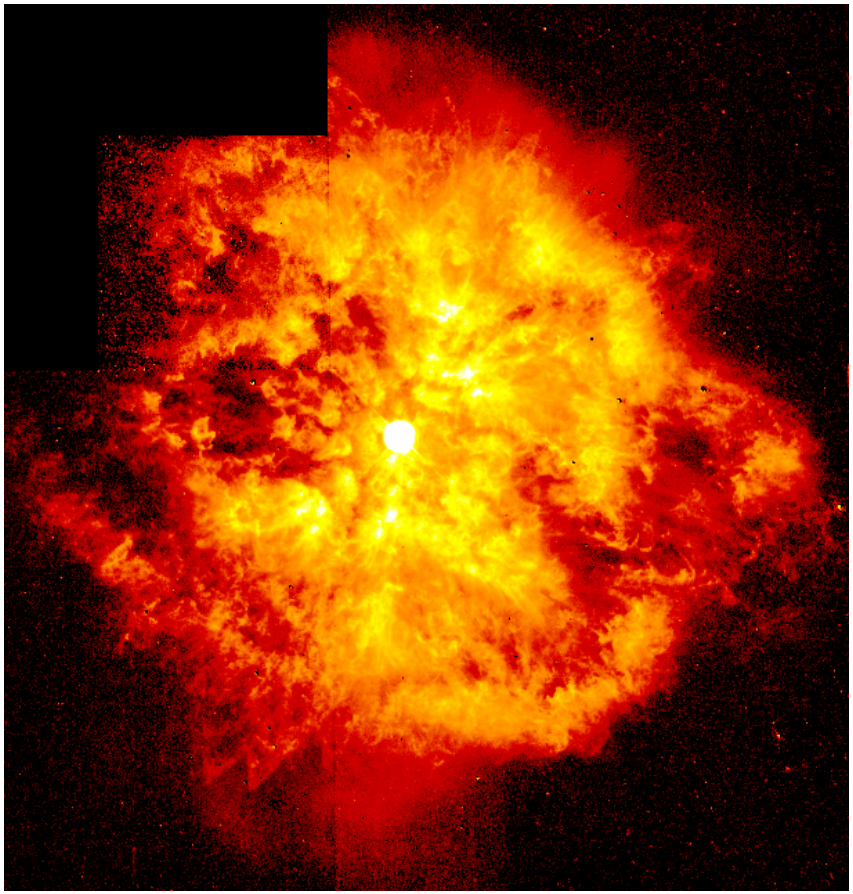
(και δεν εννοώ σε αυτή την διάλεξη)



Αν δεν υπήρχαν Νετρίνα, ο Ήλιος δεν θα έλαμπε.

Δεν θα υπήρχαν άτομα πιο πολύπλοκα από υδρογόνο.

Είμαστε όλοι φτιαγμένοι από `αστροσκονη'.



Όλα τα **βαρύτερα στοιχεία** που **χρειάζονται για την ζωή**, φτιάχνονται κατά τα τελευταία σταδια της ζωής των άστρων και **σκορπίζονται στο διάστημα** με τον θάνατό τους ως **υπερκαινοφανείς**.

Τα νετρίνα παίζουν σημαντικό ρόλο στις τελευταίες στιγμές της ζωής ενός αστεριού.

Αν δεν υπήρχαν νετρίνα, δεν θα υπήρχαν υπερκαινοφανείς αστέρες και τα πολύτιμα για την ζωή στοιχεία δεν θα διασκοπίζονταν στο διάστημα.

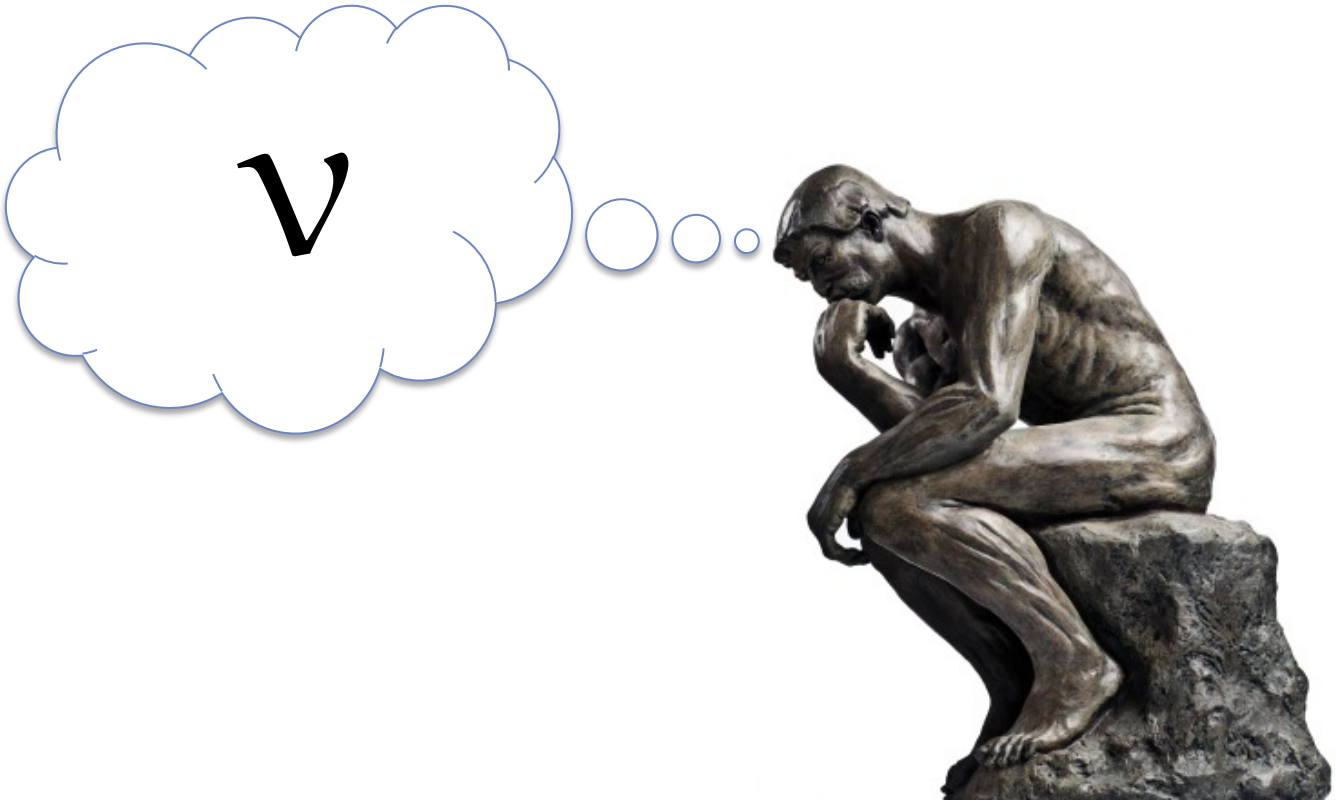
Κατά την δημιουργία του Σύμπαντος δημιουργήθηκαν **ίσες ποσότητες ύλης και αντι-ύλης.**

Που βρίσκεται η αντι-ύλη σήμερα; Δεν υπάρχουν αντι-γαλαξίες ή αντι-αστέρες.

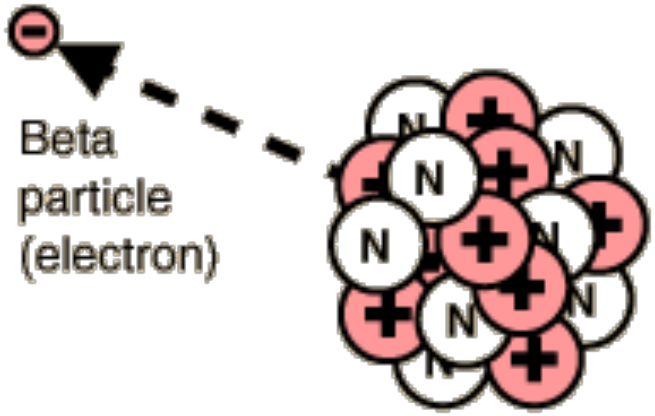
Πιστεύουμε πως όλη η αντι-ύλη εξαϋλώθηκε.
Το γεγονός οτι ένα μικρό μέρος της ύλης περίσσεψε σημαίνει οτι οι φυσικές διαδικασίες δεν είναι ακριβώς οι ίδιες για την ύλη και αντι-ύλη.

Πιστεύουμε οτι τα **νετρίνα** είχαν **πρωταγωνιστικό ρόλο** στην **παρατηρούμενη ασυμμετρία 'υλης και αντι-ύλης.**

Πώς σκεφτήκαμε την ύπαρξη του και πώς παρατηρήσαμε το νετρίνο;



Ακτινοβολία β

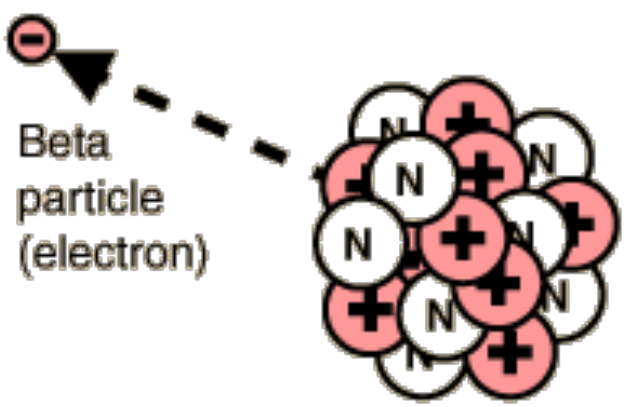


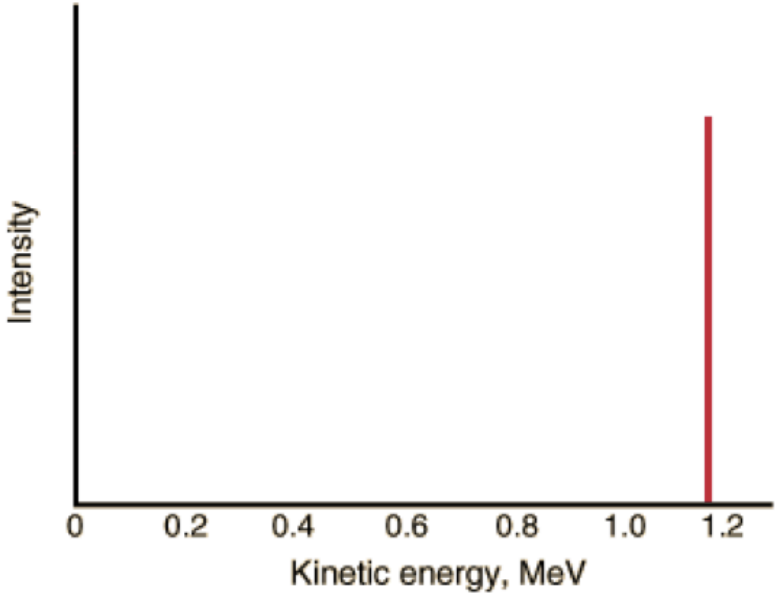
Ένας πυρήνας μετασχηματίζεται σε έναν άλλο εκπέμποντας ένα σωματίδιο β (ηλεκτρόνιο).

Η διαφορά μαζών των δύο πυρήνων καθορίζει την ενέργεια του ηλεκτρονίου

Το φάσμα των ακτίνων β

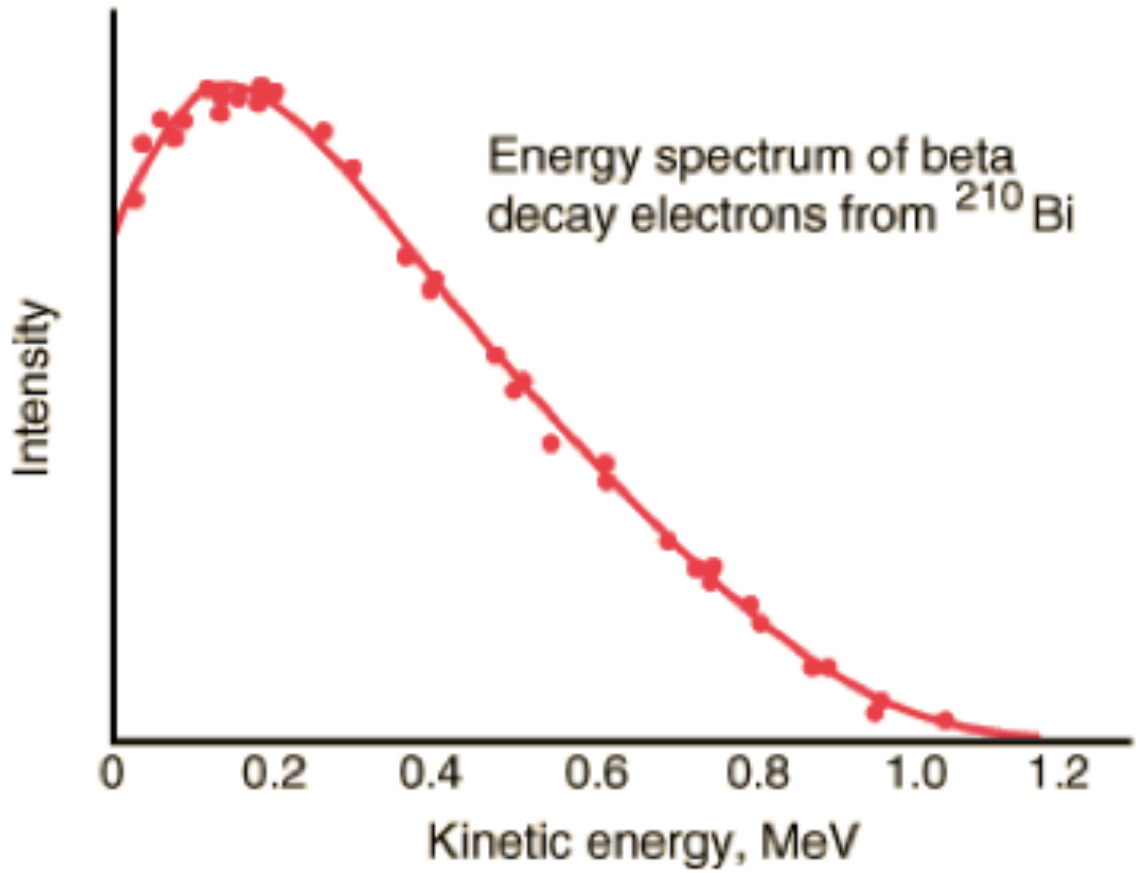
Αναμενόμενο φάσμα:



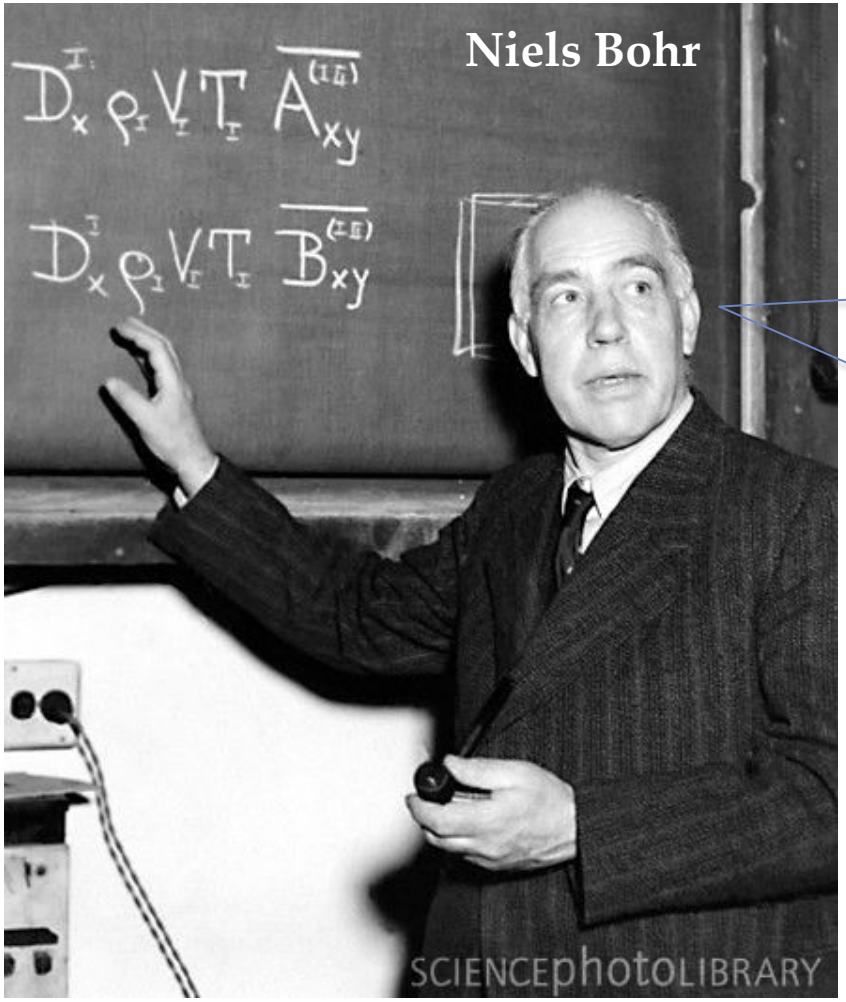


Το φάσμα των ακτίνων β

Όμως οι μετρήσεις έδειξαν οτι το φάσμα είναι συνεχές



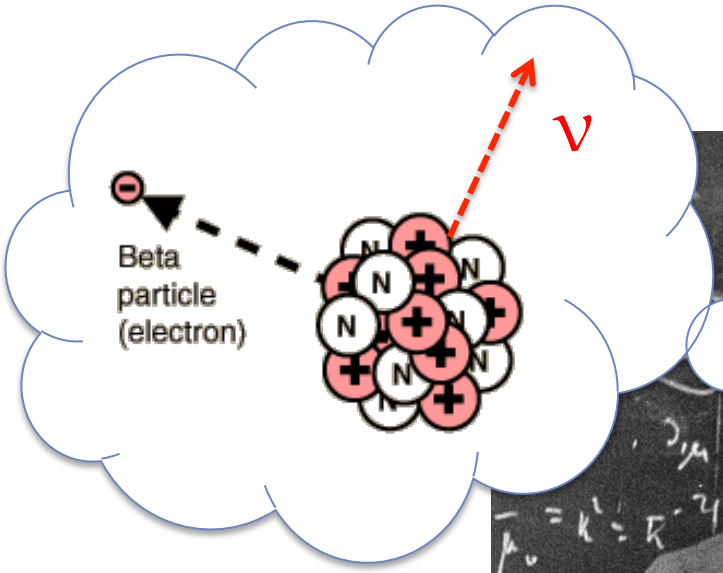
~~Διατήρηση της ενέργειας~~

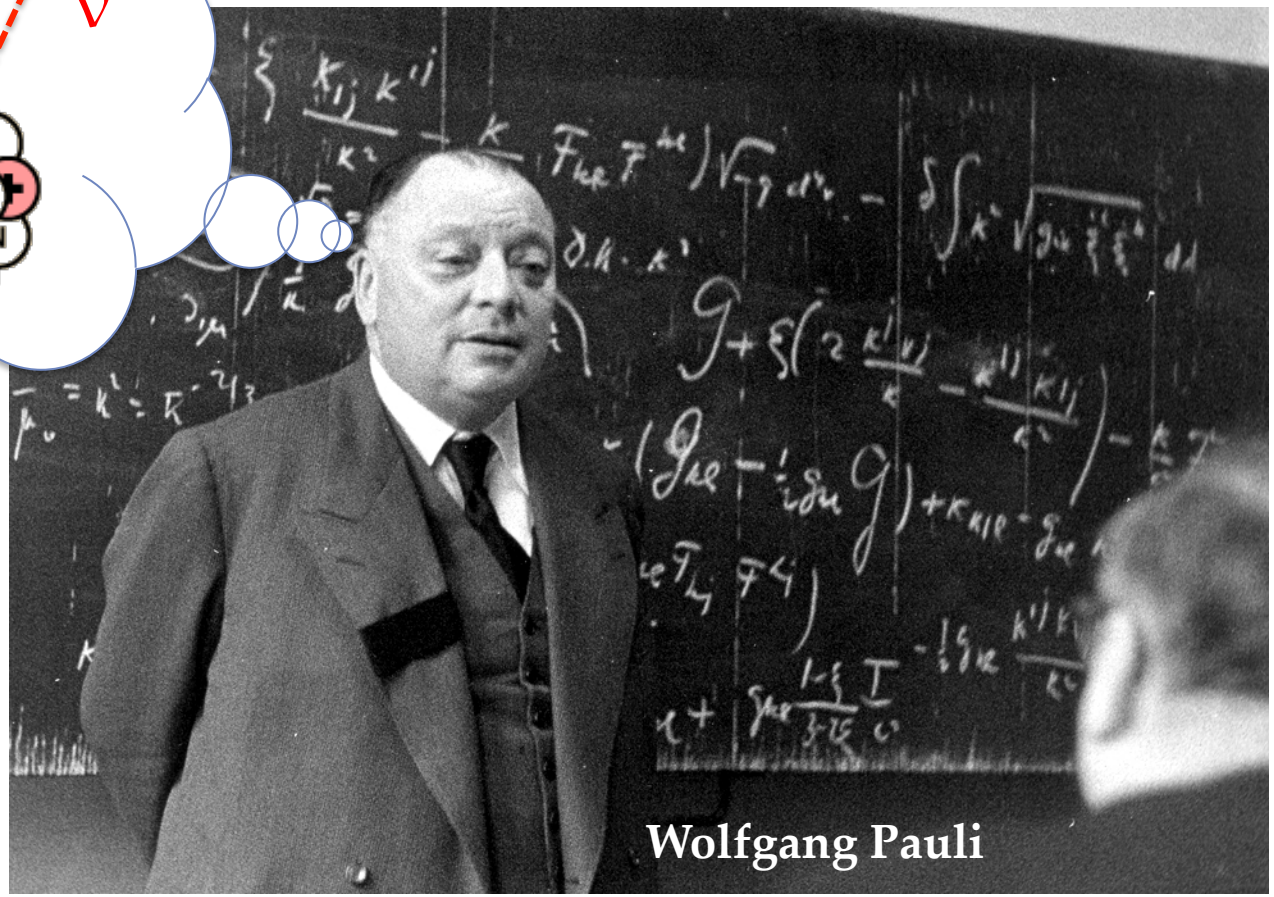


At the present stage of atomic theory, however, we may say that we have no argument, either empirical or theoretical, for upholding the energy principle in the case of β-ray disintegrations

Διατήρηση της ενέργειας

+ **νέο ουδέτερο** σωματίδιο στην β-διάσπαση





Το ηλεκτρόνιο μοιράζεται την διαθέσιμη ενέργεια με αυτό το νέο υποθετικό σωματίδιο. Το άθροισμα των ενεργειών ικανοποιεί την αρχή διατήρησης.

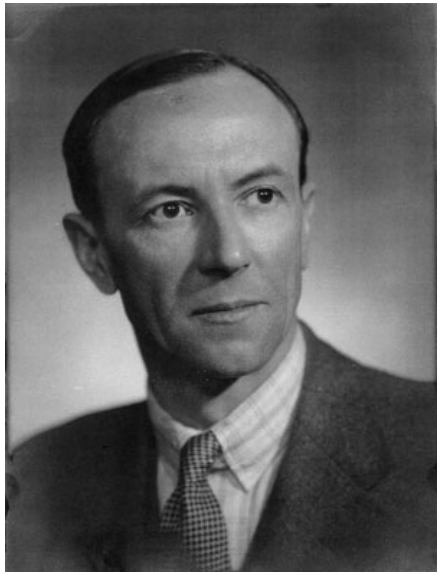
Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, how because of the "wrong" statistics of the N and Li^6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles, that I wish to call neutrons, which have spin 1/2 and obey the exclusion principle and which further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton masses. The continuous beta spectrum would then become understandable by the assumption that in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant...

I agree that my remedy could seem incredible because one should have seen these neutrons much earlier if they really exist. But only the one who dare can win and the difficult situation, due to the continuous structure of the beta spectrum, is lighted by a remark of my honoured predecessor, Mr Debye, who told me recently in Bruxelles: "Oh, It's well better not to think about this at all, like new taxes". From now on, every solution to the issue must be discussed. Thus, dear radioactive people, look and judge.

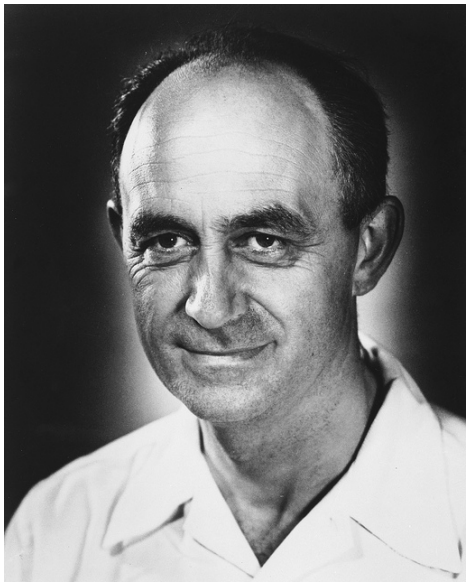
Unfortunately, I cannot appear in Tubingen personally since I am indispensable here in Zurich because of a ball on the night of 6/7 December. With my best regards to you, and also to Mr Back.

Your humble servant,
W. Pauli



Το 1932, ο Chadwick ανιχνεύει το (γνωστό μας) νετρόνιο

Είναι όμως πολύ βαρύ για να είναι το σωματίδιο ύπαρξη του οποίου πρότεινε ο Pauli

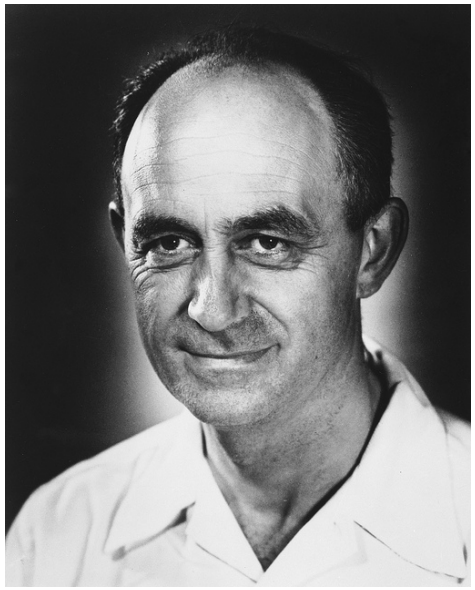


Ο Fermi, μετονομάζει το σωματίδιο του Pauli ως μικρό νετρόνιο (νετρίνο)

Η υπόθεση του νετρίνου ήταν πολύ ελκυστική
γιατί **διέσωζε την αρχή διατήρησης της ενέργειας**
και οι περισσότεροι πίστευαν την ύπαρξή του.

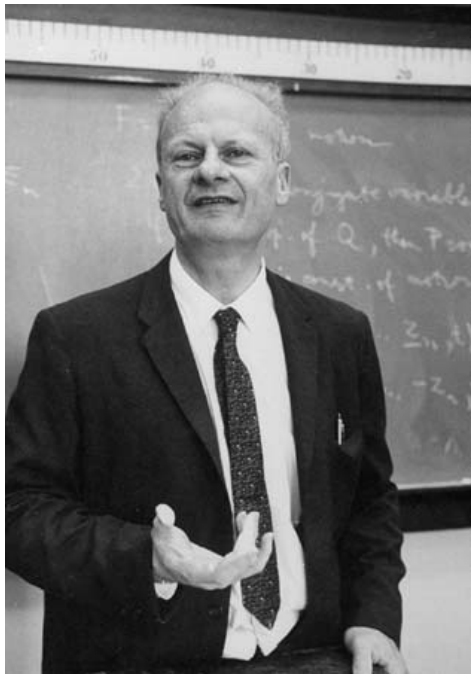
Όμως, δεν υπήρχε καμία πειραματική ένδειξη

ανεξάρτητη από το φάσμα της β-διάσπασης
για την ερμηνεία της οποίας προτάθηκε



Στις αρχές της δεκαετίας του ’30 ο Fermi αναπτύσει την θεωρία της β-διάσπασης και την χρησιμοποιεί για να περιγράψει την διάσπαση του νετρονίου (μέσος χρόνος ζωής ~15 λεπτά)

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



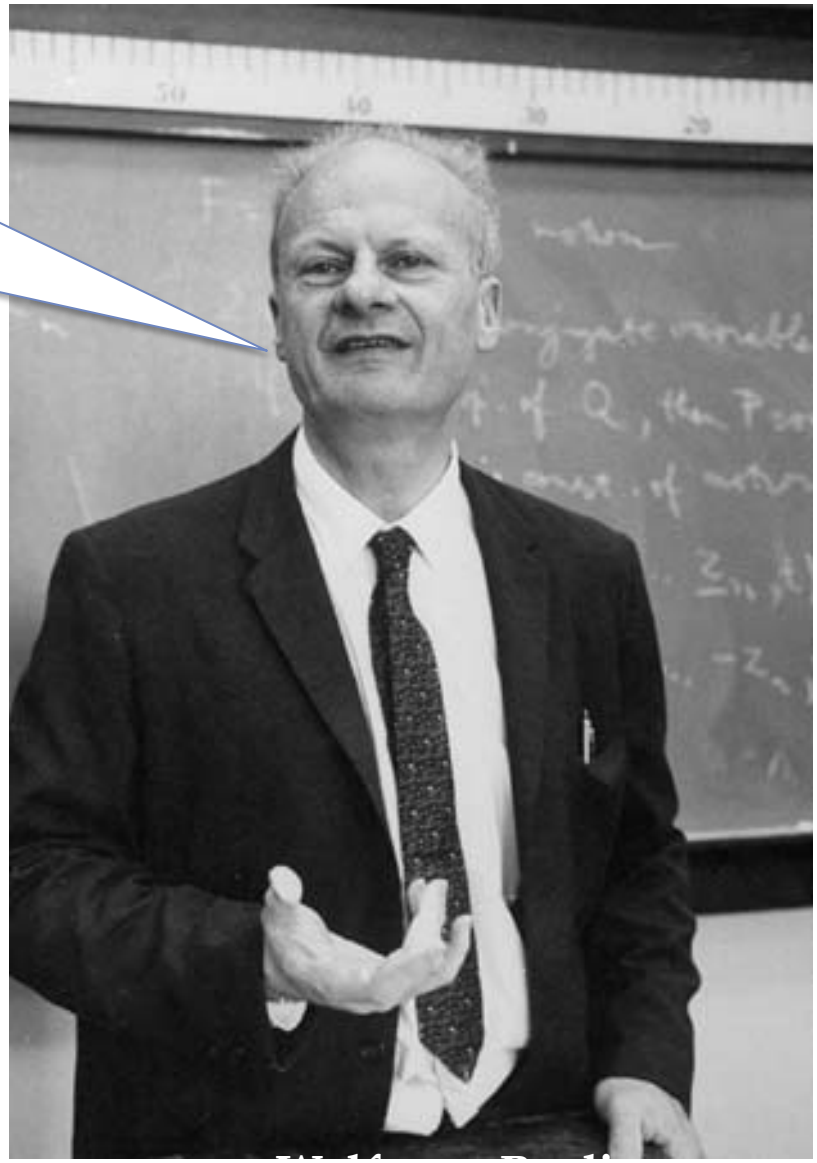
Οι Bethe και Pearls χρησιμοποιούν την θεωρία του Fermi για να υπολογίσουν την ενεργό διατομή για αλληλεπιδρασεις νετρίνων

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

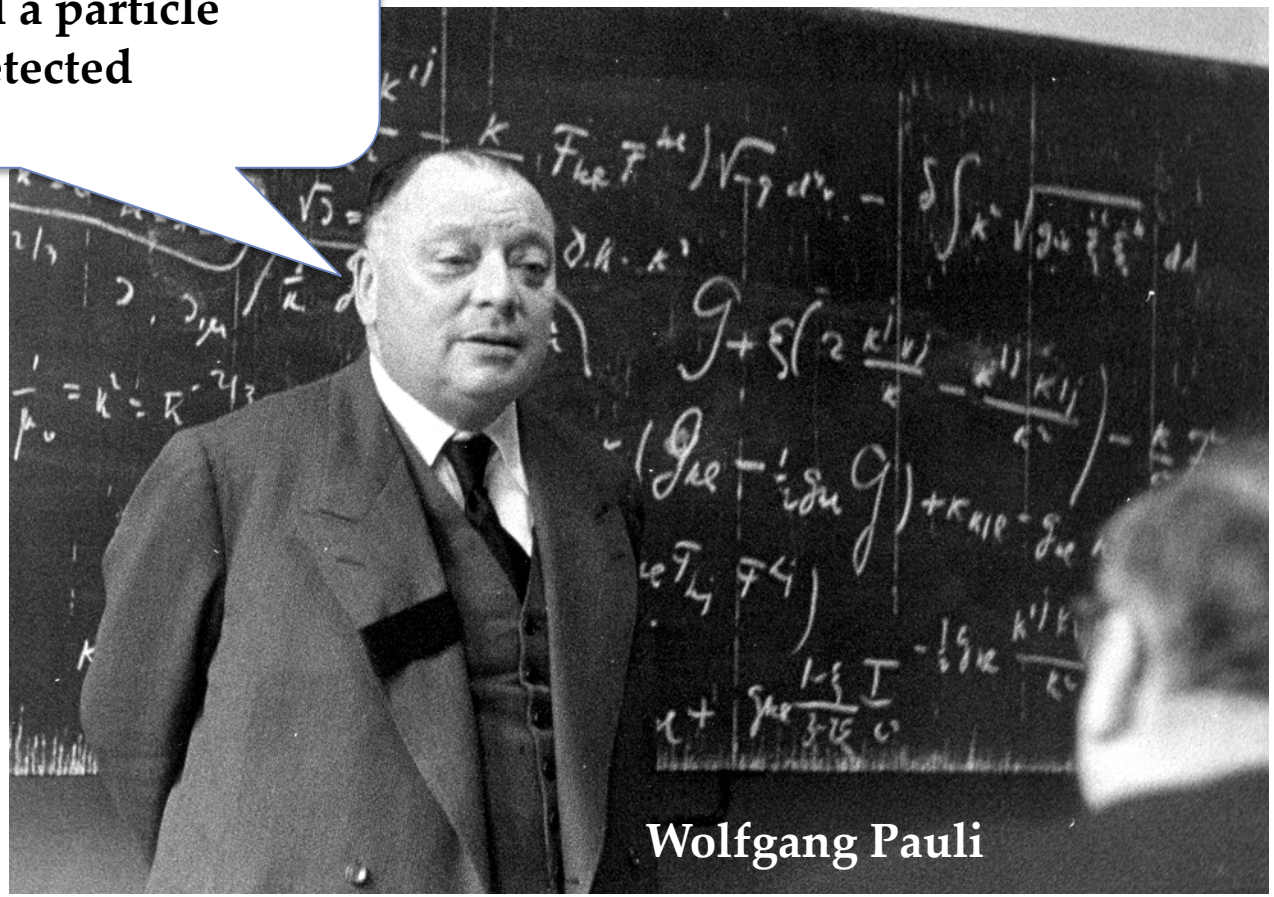
$$\nu + p \rightarrow e + n$$

Για ενέργειες μερικών MeV, υπολογίζουν μια τιμή της τάξης των ~10^{-44} cm^2

There is no practically possible way of observing the neutrino.



I have done a terrible thing,
I have postulated a particle
that cannot be detected



Frederick Reines

Έκείνη την εποχή, πολλοί σπουδαίοι Φυσικοί εργάζονταν στο πρόγραμμα πυρηνικών όπλων στο Los Alamos.

Στις αρχές της δεκαετίας του ’50, ο Reines αποφασίζει να ασχοληθεί με ένα πρόβλημα την βασικής έρευνας και η ανίχνευση του νετρίνου δεν φεύγει από το μυαλό του.

Clyde Cowan

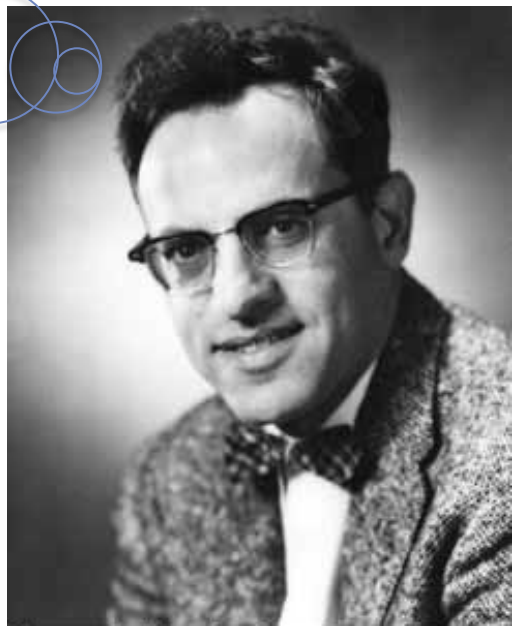
“So why did we want to detect the free neutrino? Because everybody said, you couldn’t do it. Not very sensible, but we were attracted by the challenge.”

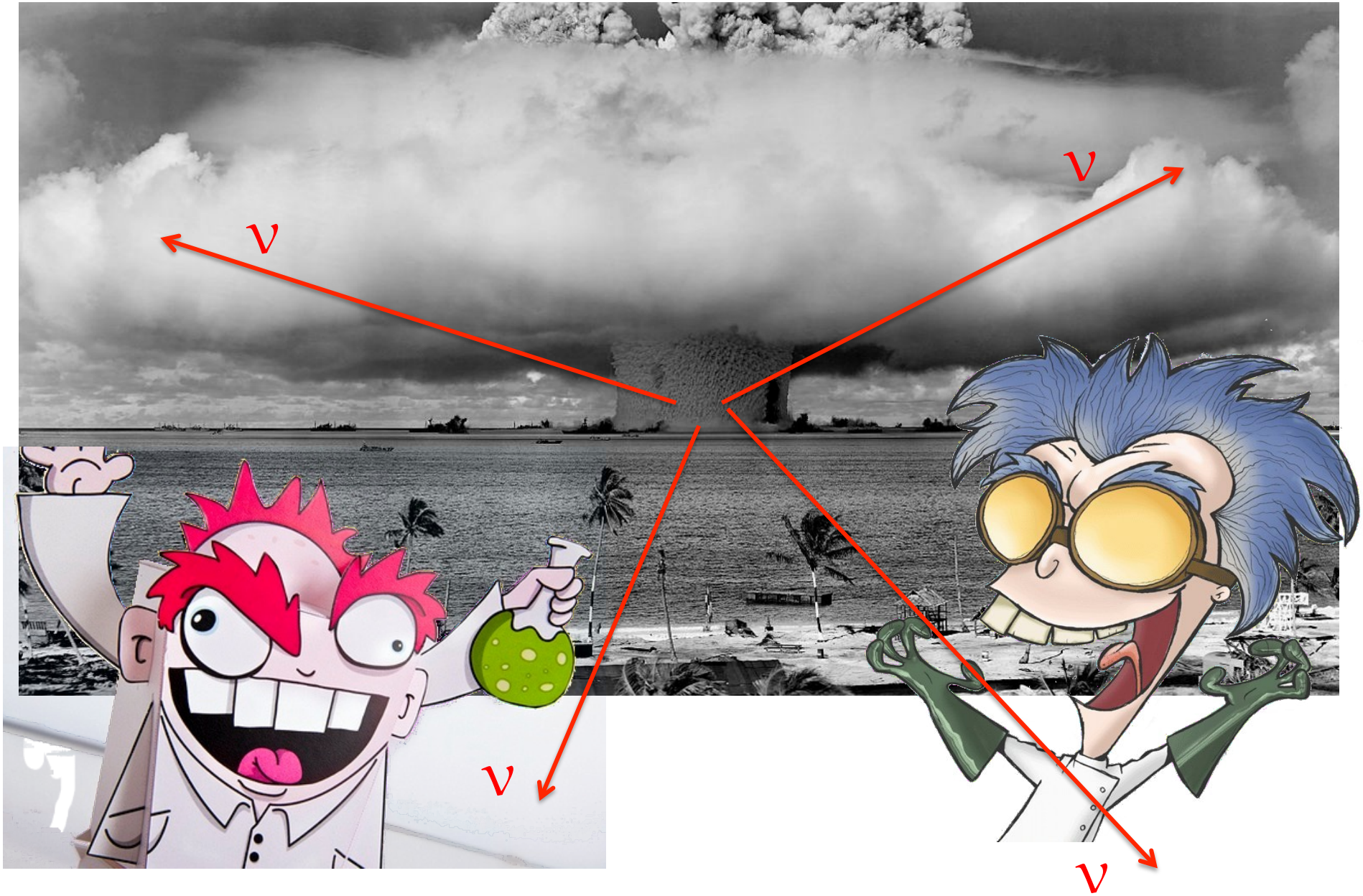
Reines, Nobel lecture, 1995

Η ανίχνευση του νετρίνου

Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης των νετρίνων με την ύλη είναι μηδαμινή... Χρειαζόμαστε έναν τεράστιο αριθμό νετρίνων προκειμένου να ανιχνεύσουμε μερικά

Γνωρίζουμε οτι νετρίνα παράγονται στην β-διάσπαση...Χρειαζόμαστε λοιπόν έναν τεράστιο αριθμό β-διασπάσεων




ν
ν
ν
ν

Η ανίχνευση του νετρίνου

Για την ανίχνευση του νετρίνου θα χρησιμοποιούσαν την αντίδραση της «αντίστροφης β-διάσπασης»

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

και θα ανίχνευαν το ποζιτρόνιο χρησιμοποιώντας οργανικό υγρό σπινθιριστή (liquid scintillator) που μόλις είχε ανακαλυφθεί.

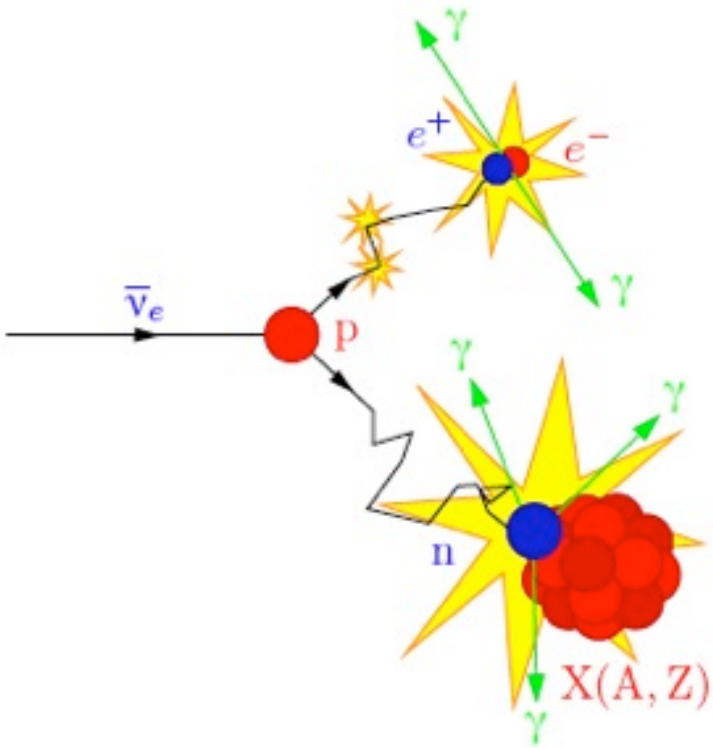
Το πρόβλημα ήταν το υπόβαθρο (άλλες διαδικασίες, οι οποίες δεν σχετίζονται με την αλληλεπίδραση ενός νετρίνου αλλά μπορούν να δώσουν παρόμοια υπογραφή)

Η ανίχνευση του νετρίνου

Για την ανίχνευση του νετρίνου θα χρησιμοποιούσαν την αντίδραση της «αντίστροφης β-διάσπασης»

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

Σύντομα αναγνώρισαν τον ρόλο του νετρονίου:
Το νετρόνιο σύντομα χάνει την κινητική του ενέργεια και στην συνέχεια «συλλαμβάνεται» από έναν πυρήνα ο οποίος διώχνει την ενέργεια δέσμευσης με την μορφή φωτονίων.



Η ανίχνευση του σήματος του ποζιτρονίου **σε σύμπτωση** με ένα καθυστερημένο σήμα από την σύλληψη του νετρονίου είναι τόσο χαρακτηριστική υπογραφή που το υπόβαρο θα μειωνόταν δραστικά!

Η ανίχνευση του νετρίνου

Με την μείωση του υποβάθρου, ήταν πιθανό οτι
το πείραμα των Reines και Cowan μπορούσε να πραγματοποιηθεί
χρησιμοποιώντας **νετρίνα από πυρηνικό αντιδραστήρα**
και όχι από πυρηνική βομβα!

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι πηγές ηλεκτρονικών (αντι)νετρίνων.

Κατά μέσο όρο, 6 νετρίνα εκπέμπονται ανά σχάση,
ακολουθώντας τις β-διασπάσεις των προιόντων της αρχικής σχάσης.

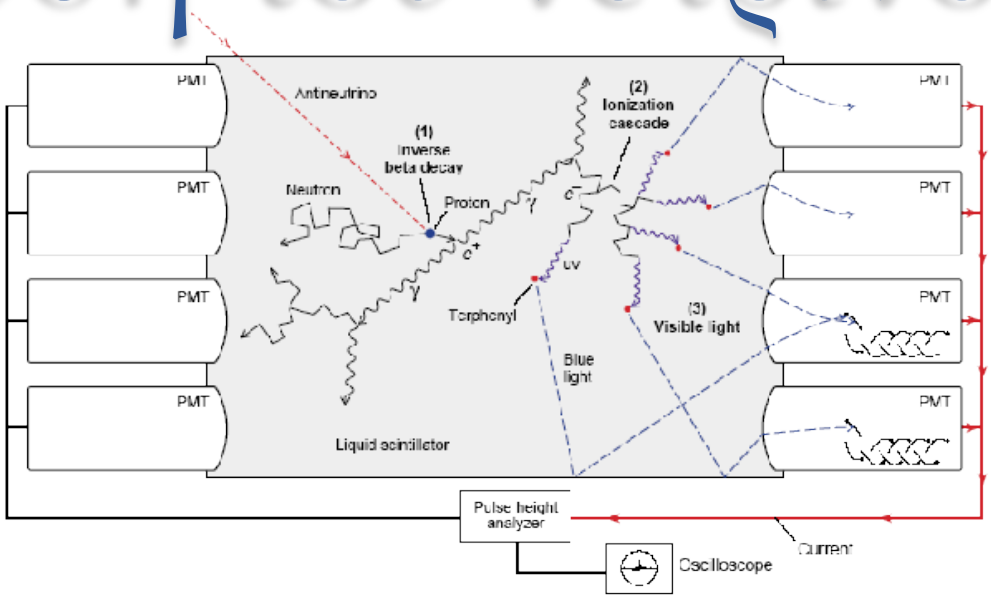
Οι κύριες πηγές νετρίνων είναι το ^{235}U, ^{238}U, ^{239}Pu, ^{241}Pu.

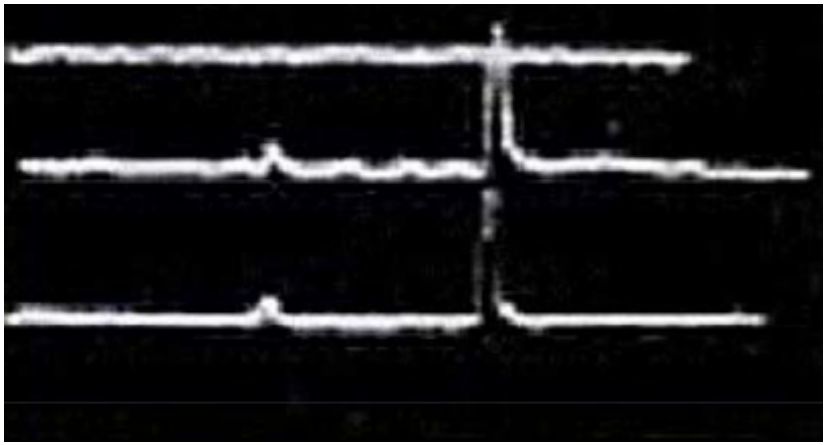
2×10^{20} νετρίνα ανά δευτερόλεπτο εκπέμπονται από έναν
αντιδραστήρα με ισχύ 1 GW

Η ανίχνευση του νετρίνου

Οι Reines και Cowan πραγματοποίησαν το πρώτο τους πείραμα το 1953, στο Hanford Engineering Works, Washington.
Το πείραμα είχε πολύ υψηλό υπόβαθρο (S/N ~ 1/20) και δεν έδωσε σαφή αποτελέσματα.

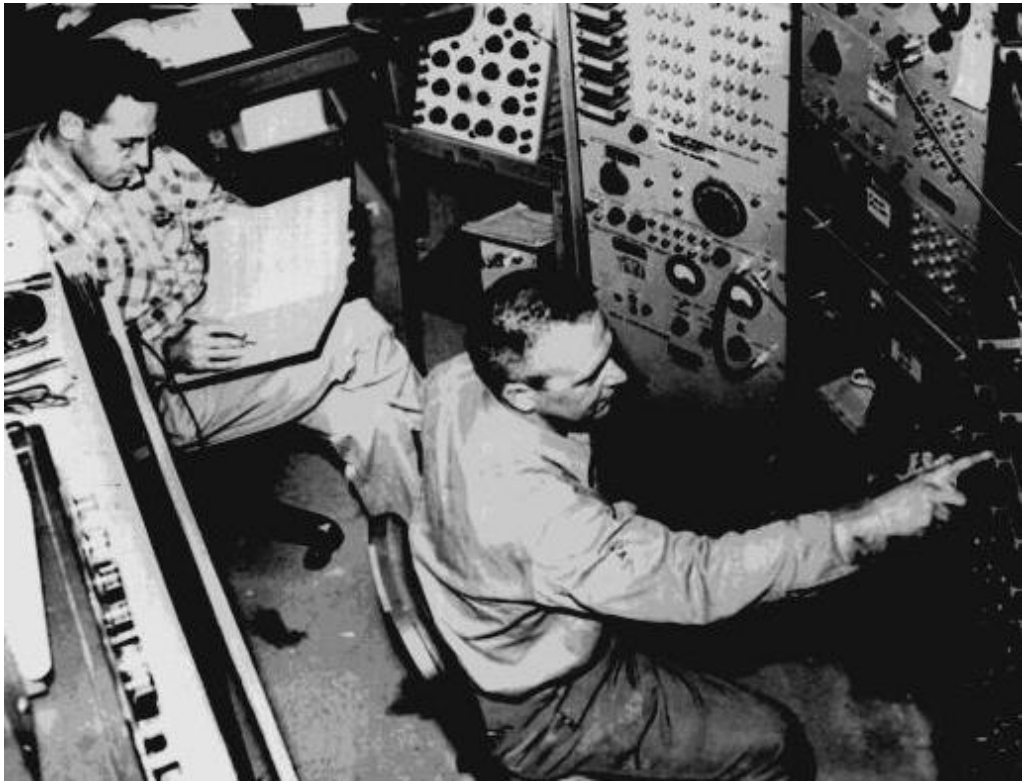
Το 1956 όμως πραγματοποίησαν ένα βελτιωμένο πείραμά στη Savannah River οπότε και παρατήρησαν αλληλεπιδράσεις.

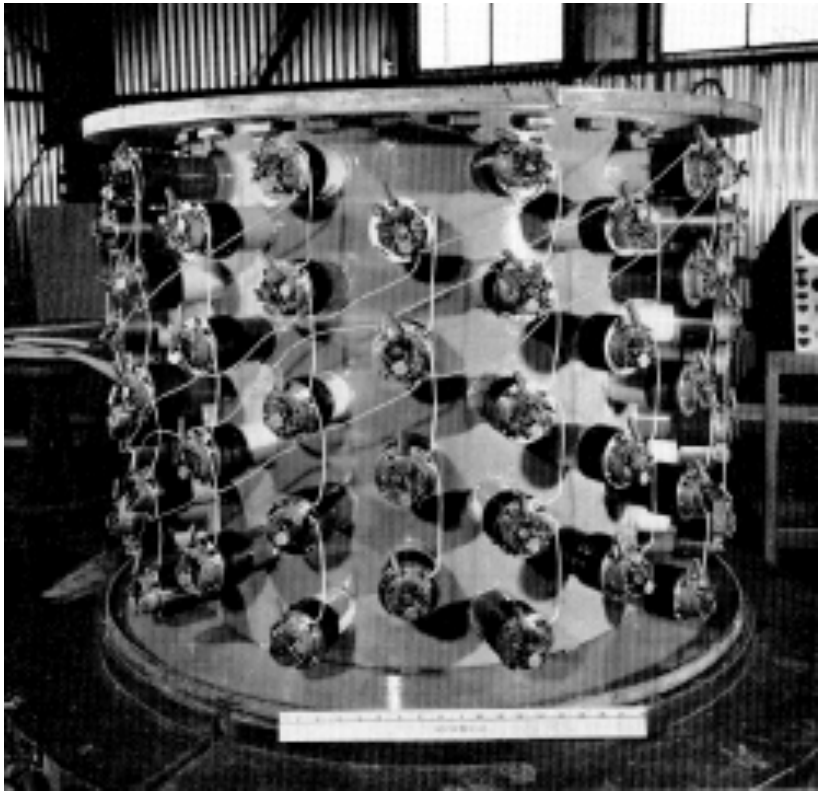




Ίχνος από τον παλμογράφο των Reines και Cowan δείχνει την διπλή σύμπτωση των σημάτων e^+ και n

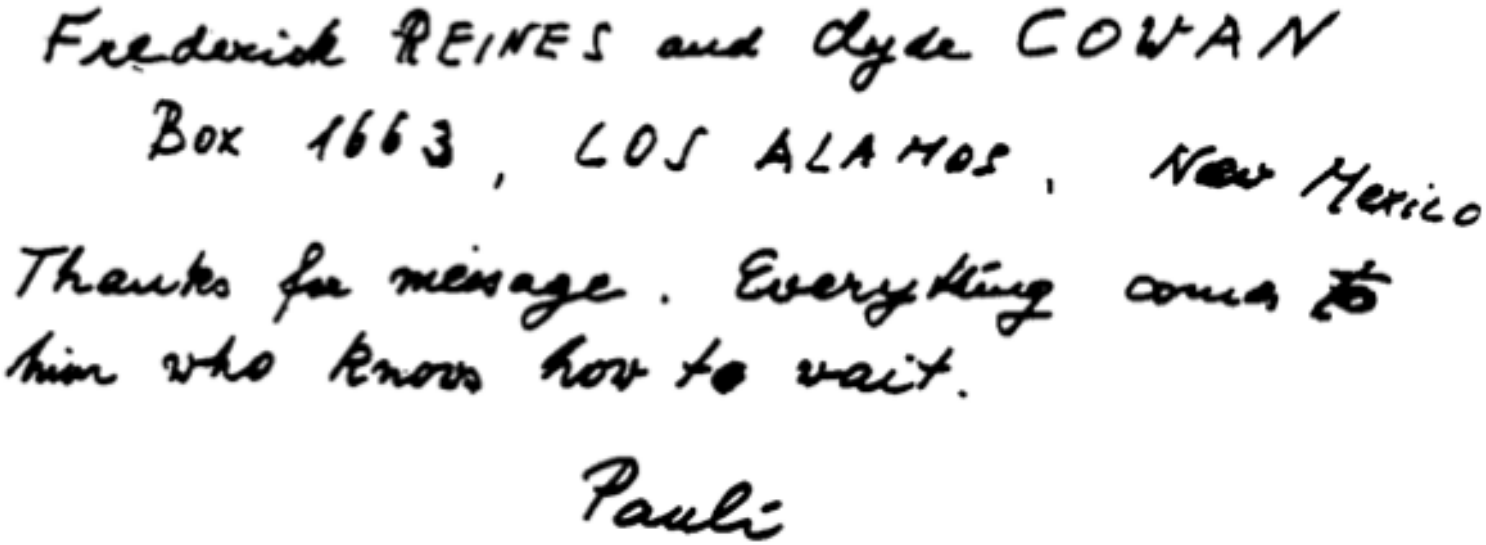
Η ανίχνευση του νετρίνου





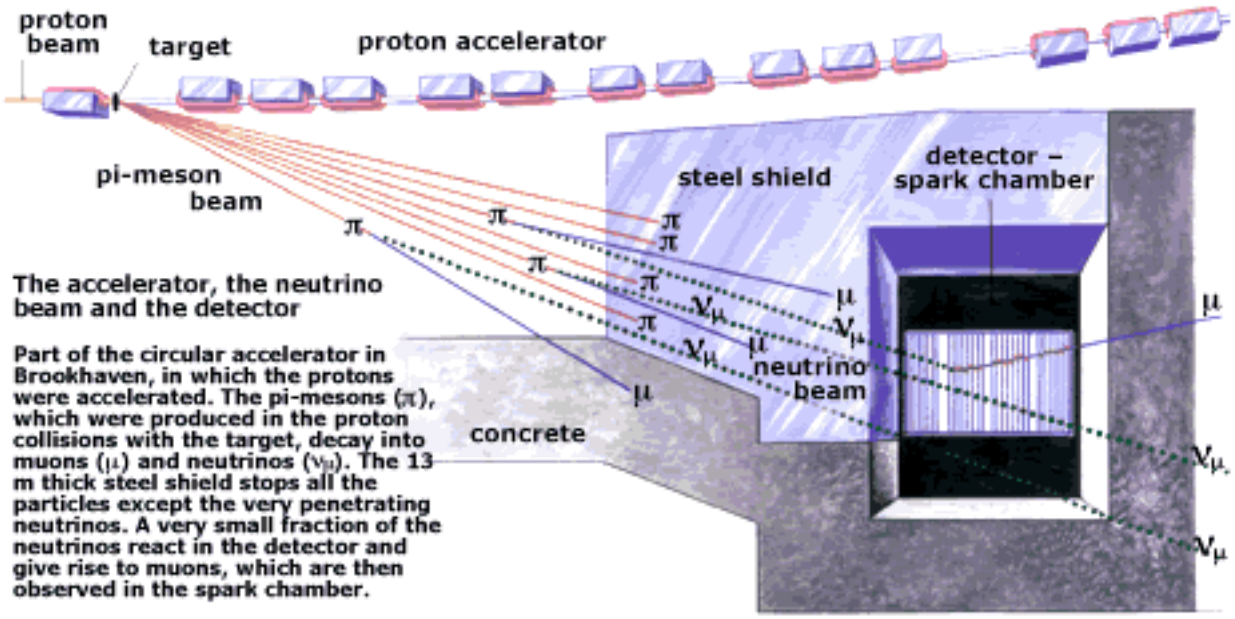
Η ανίχνευση του νετρίνου (1956)
ήρθε περίπου 25 χρόνια μετά το γράμμα του Pauli

Οι Reines και Cowan ειδοποιούν αμέσως τον Pauli, ο οποίος τους απαντά:


Frederick REINES and Clyde COWAN
Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico
Thanks for message. Everything comes to him who knows how to wait.
Pauli

Ο Reines περίμενε 40 χρόνια, αλλά το 1995 πήρε το Nobel Φυσικής
για την παρατήρηση του νετρίνου

ν_μ



The accelerator, the neutrino beam and the detector

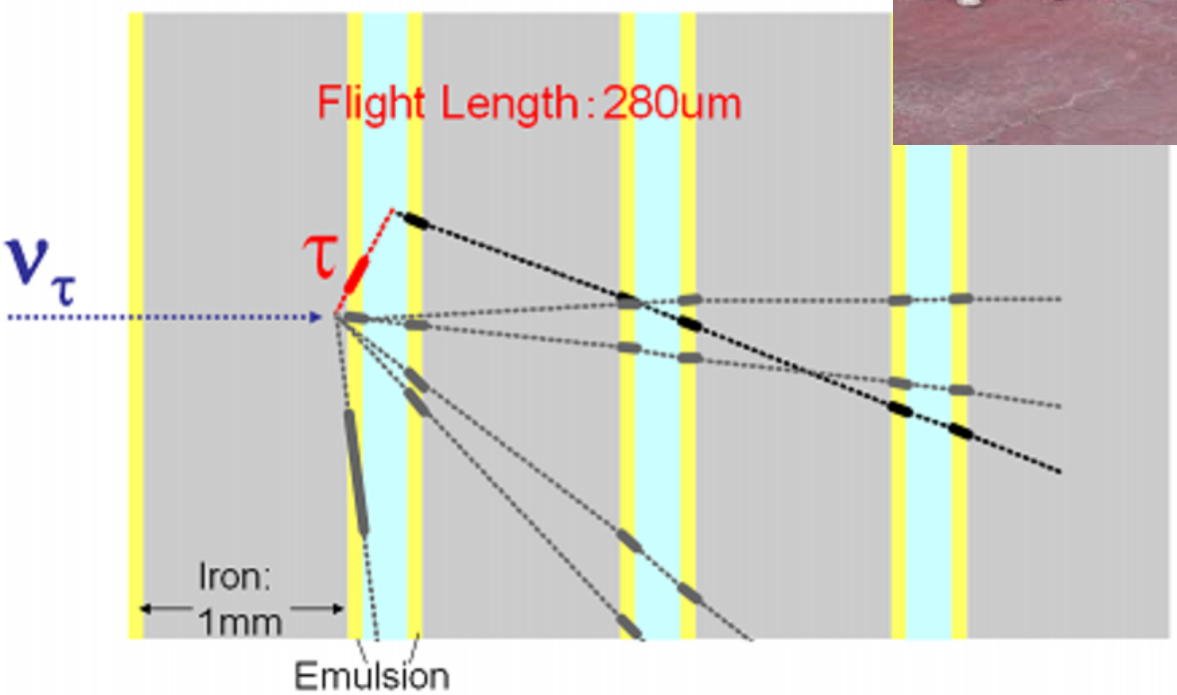
Part of the circular accelerator in Brookhaven, in which the protons were accelerated. The pi-mesons (π), which were produced in the proton collisions with the target, decay into muons (μ) and neutrinos (ν_μ). The 13 m thick steel shield stops all the particles except the very penetrating neutrinos. A very small fraction of the neutrinos react in the detector and give rise to muons, which are then observed in the spark chamber.

Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

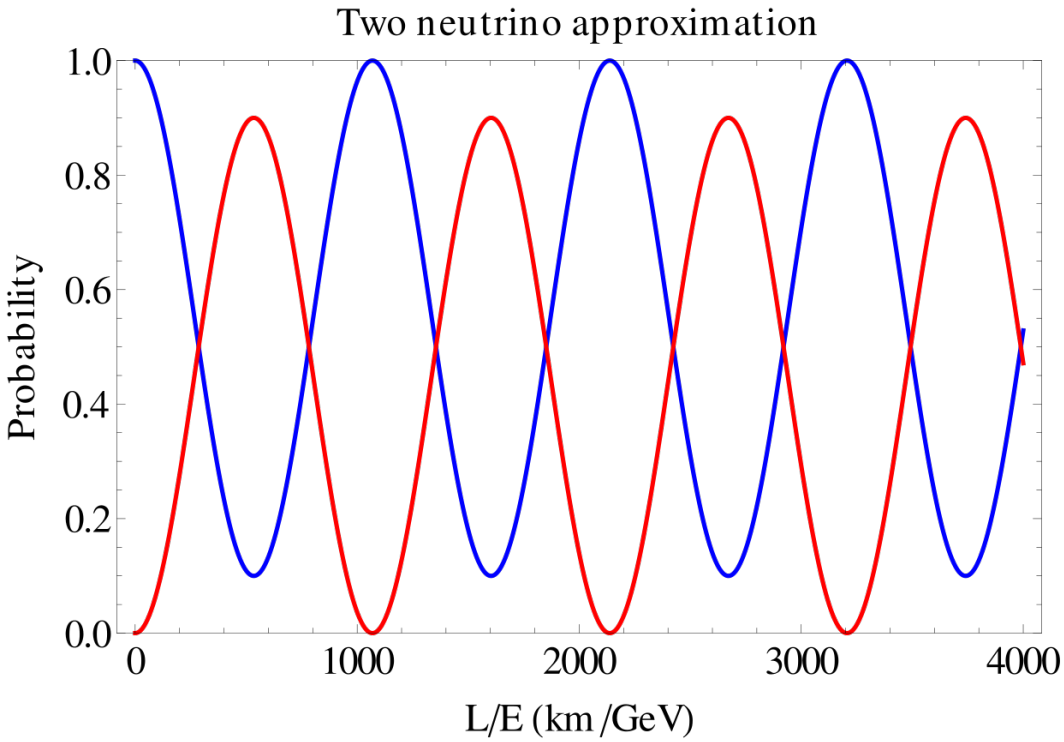
Βραβείο Nobel Φυσικής 1988

ν_τ

ROBERT RATHBUN WILSON HALL


Flight Length: 280um
ν_τ
τ
Iron:
1mm
Emulsion

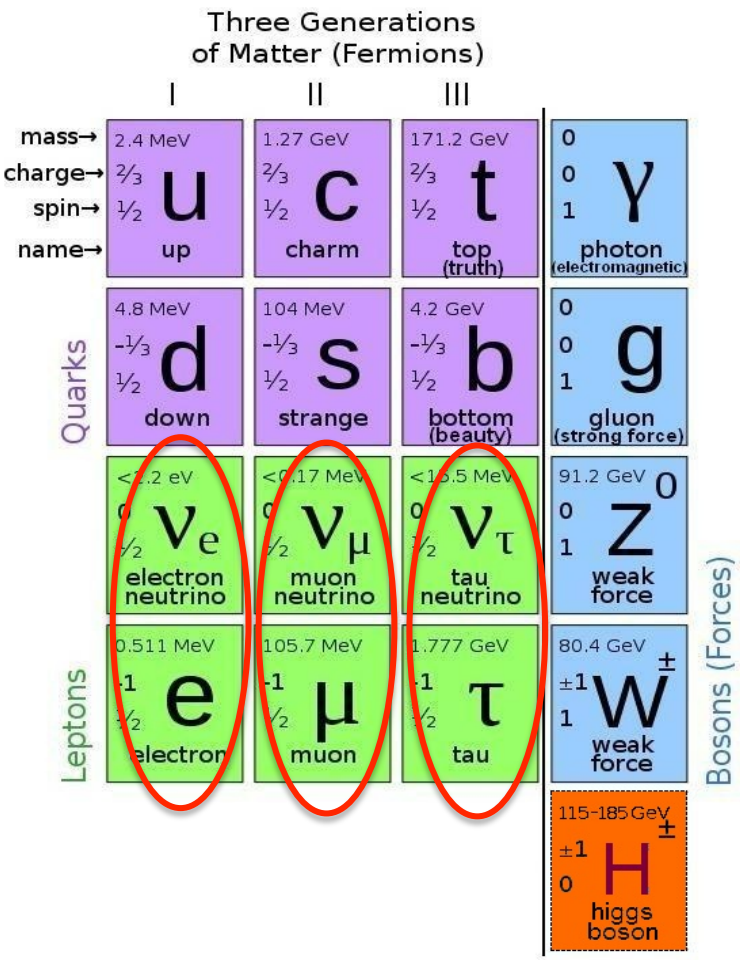
Ταλαντώσεις νετρίνων



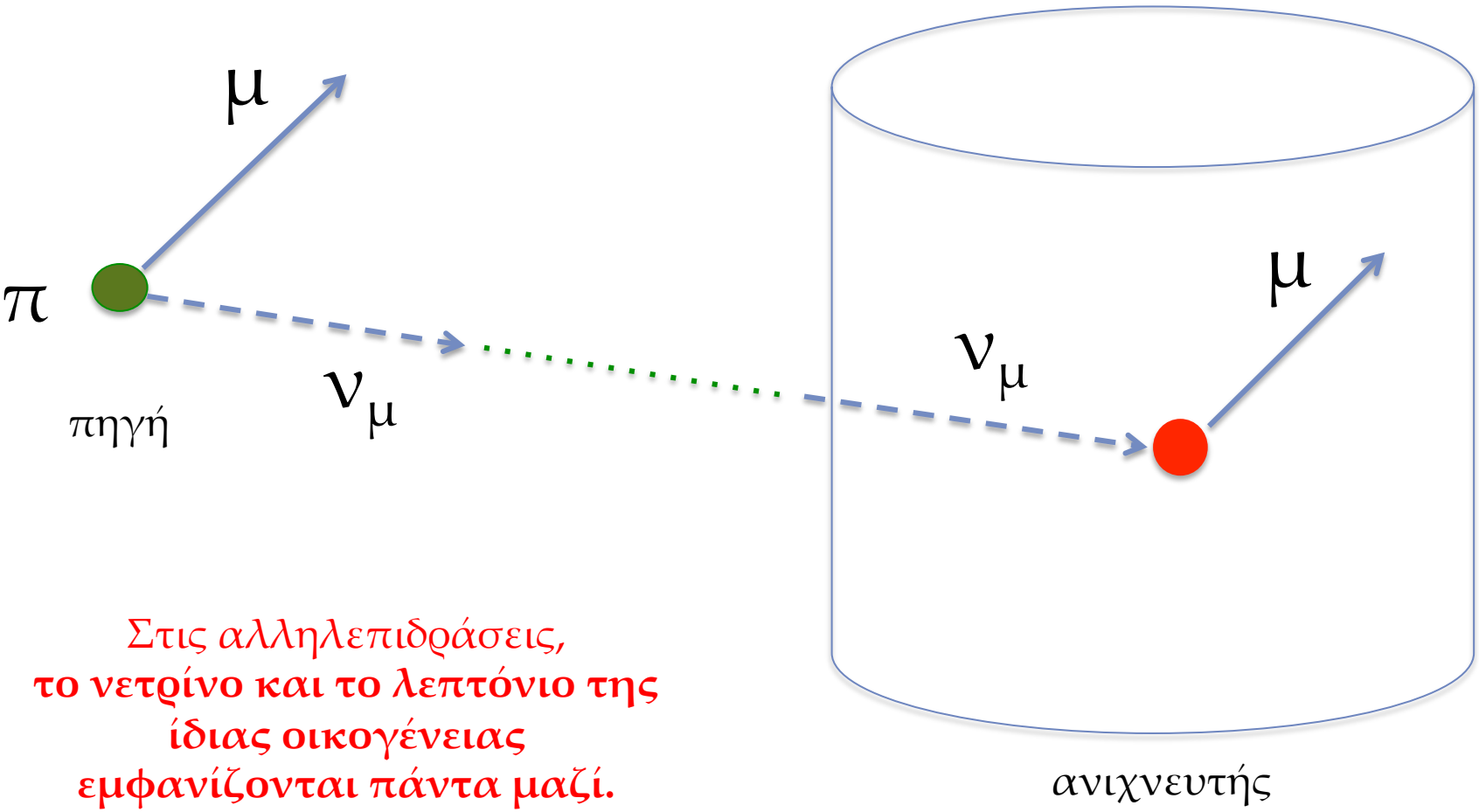
Ταλαντώσεις νετρίνων

Όπως είδαμε νωρίτερα,
τα νετρίνα και τα φορτισμένα
λεπτόνια ανήκουν σε **οικογένειες**

Στις αλληλεπιδράσεις,
το νετρίνο και το λεπτόνιο της ίδιας οικογένειας εμφανίζονται πάντα μαζί.



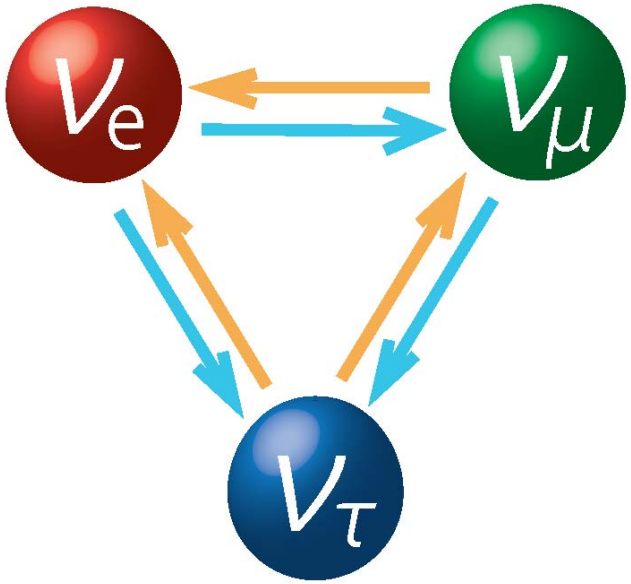
Ταλαντώσεις νετρίνων



Στις αλληλεπιδράσεις,
το νετρίνο και το λεπτόνιο της ίδιας οικογένειας εμφανίζονται πάντα μαζί.

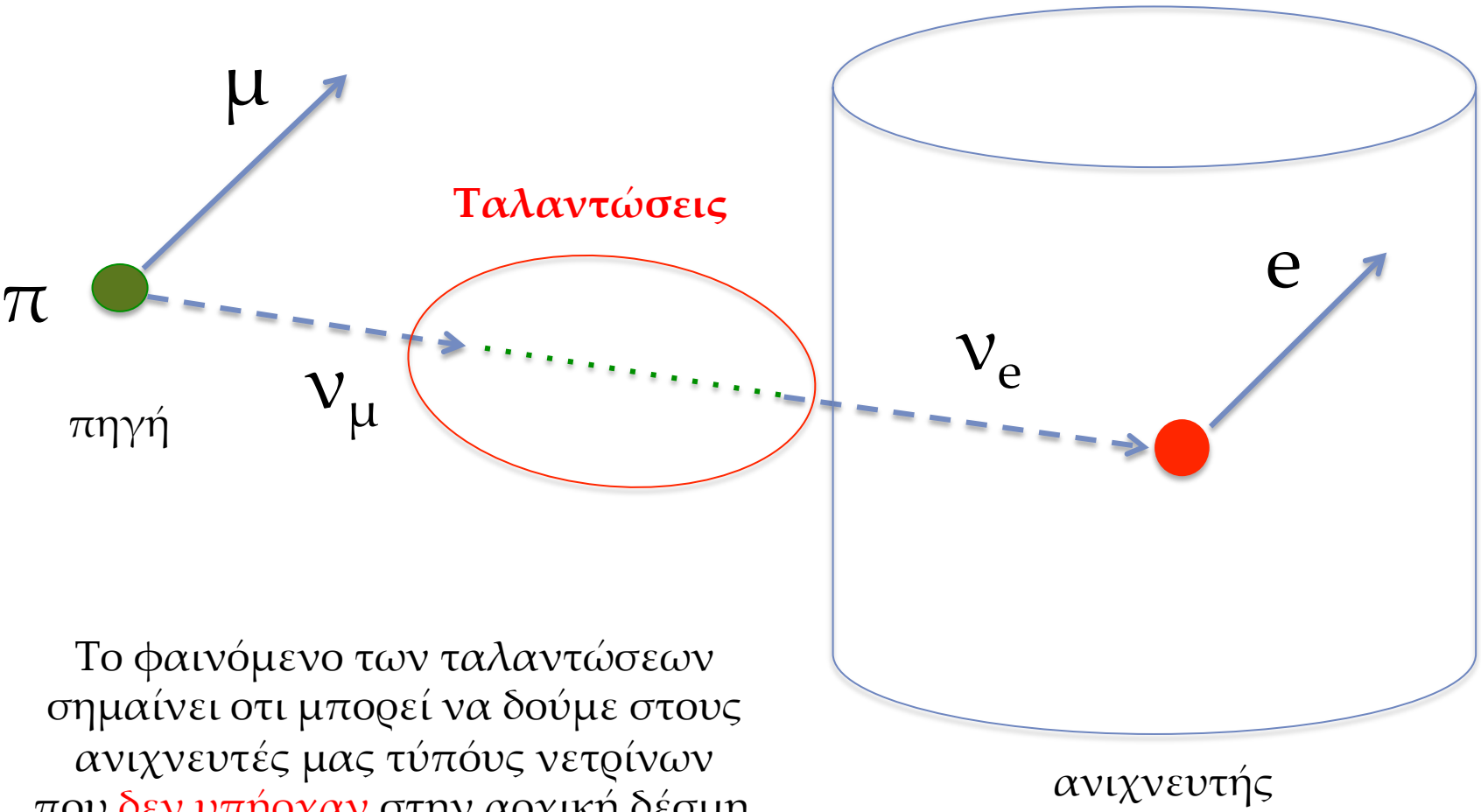
Ταλαντώσεις νετρίνων

Αν όμως τα νετρίνα έχουν μάζα, κάτι εκπληκτικό μπορεί να συμβεί



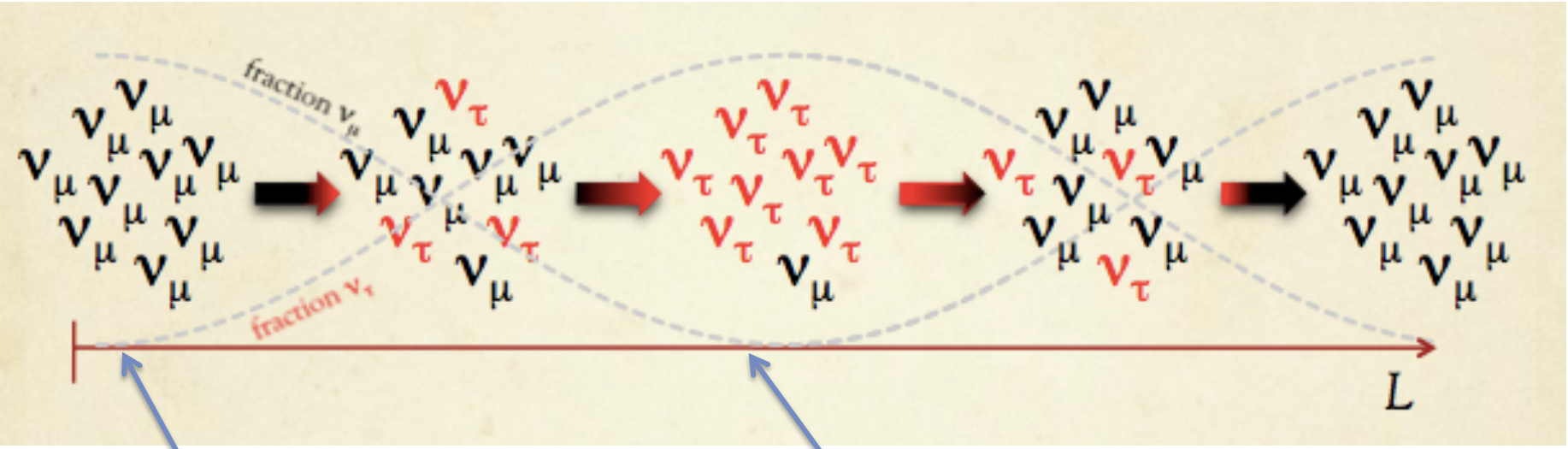
Τα νετρίνα «αναμειγνύονται»

Ταλαντώσεις νετρίνων



Το φαινόμενο των ταλαντώσεων σημαίνει οτι μπορεί να δούμε στους ανιχνευτές μας τύπους νετρίνων που δεν υπήρχαν στην αρχική δέσμη.

Ταλαντώσεις νετρίνων



απόσταση

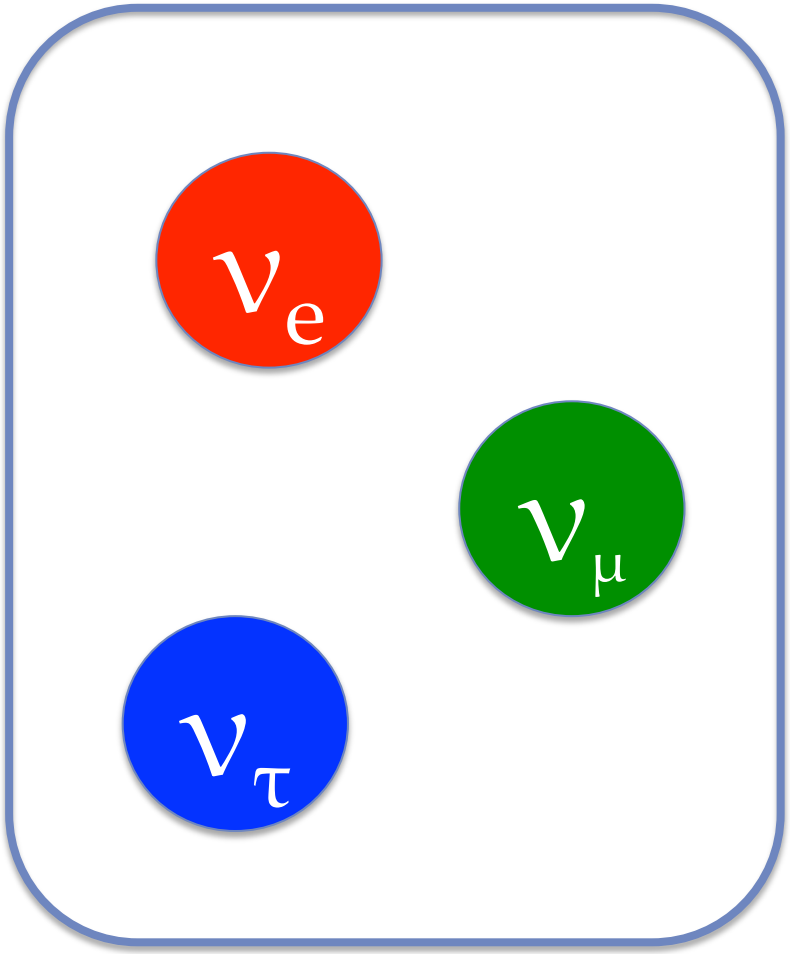
Αν ο ανιχνευτής ήταν εδώ,
θα παρατηρούσα ν_μ

Αν όμως ο ανιχνευτής ήταν εδώ,
θα παρατηρούσα κυριως ν_τ

Νετρίνα ενός τύπου (π.χ. ν_μ) έχουν κάποια πιθανότητα να ανιχνευτούν ως νετρίνα ενός άλλου τύπου (π.χ. ν_τ).
Η πιθανότητα αυτή αυξομειώνεται περιοδικά → ταλαντώσεις νετρίνων

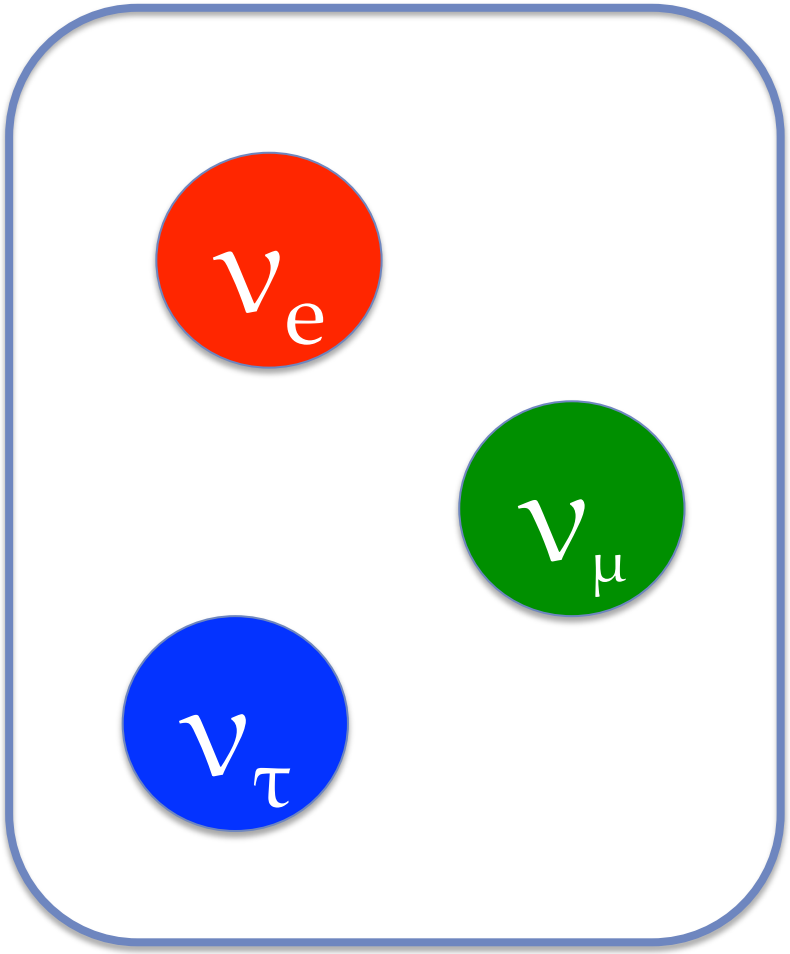
Ταλαντώσεις νετρίνων

Οι καταστάσεις που συμμετέχουν στις αλληλεπιδράσεις

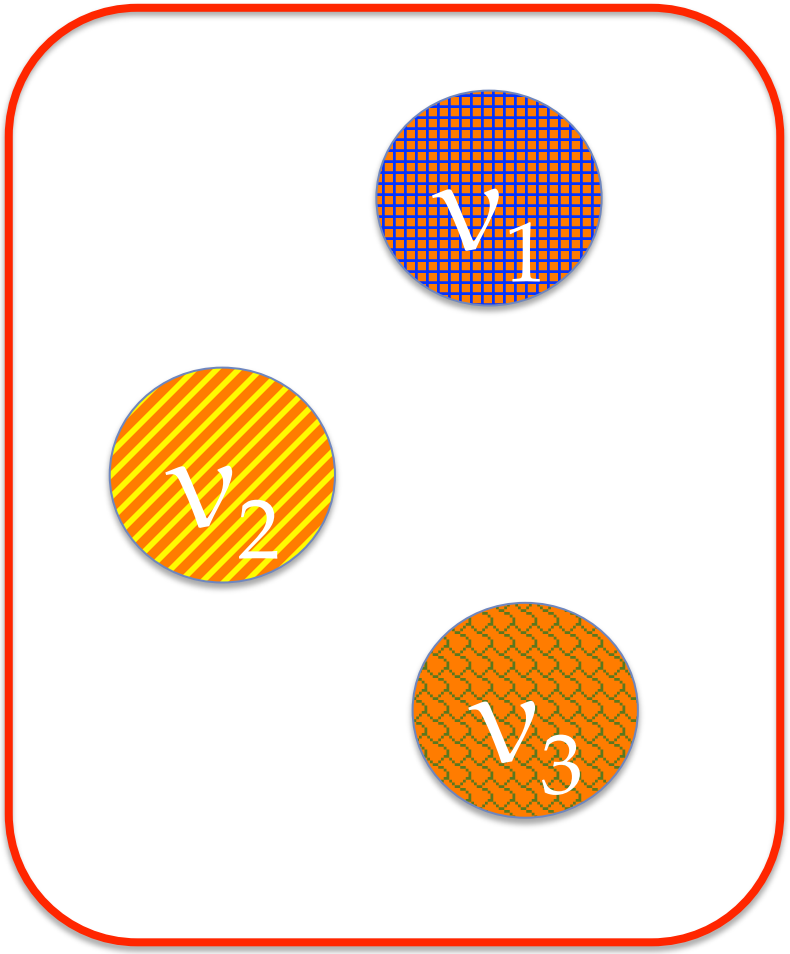


Ταλαντώσεις νετρίνων

Οι καταστάσεις που συμμετέχουν στις αλληλεπιδράσεις



Οι καταστάσεις που έχουν συγκεκριμένη μάζα



Ταλαντώσεις νετρίνων

Οι καταστάσεις που συμμετέχουν στις αλληλεπιδράσεις είναι υπέρθεση καταστάσεων με συγκεκριμένη μάζα (ν_1, ν_2, ν_3).

Καθώς οι καταστάσεις ν_1, ν_2, ν_3 εξελίσονται, αποκτούν μια σχετική διαφορά φάσης που έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλει την αρχική υπέρθεση

$$\nu_e = U_{e1*}\,\nu_1 + U_{e2*}\,\nu_2 + U_{e3*}\,\nu_3$$

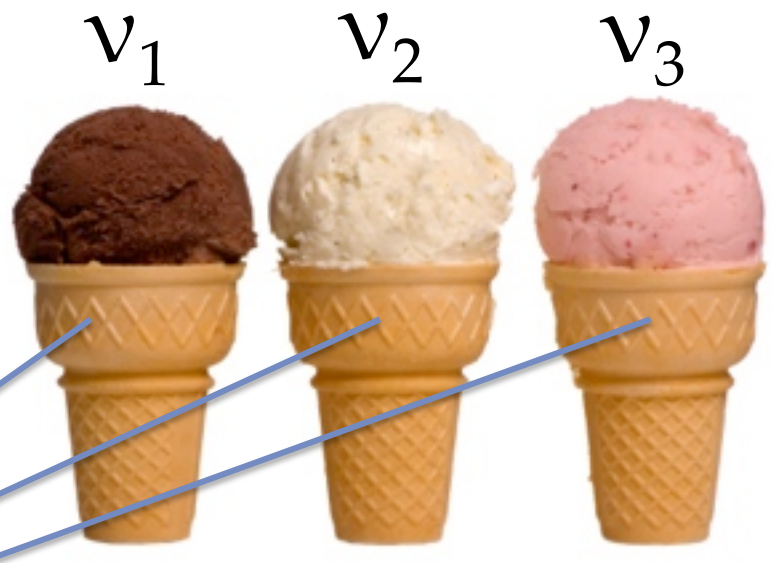
$$\nu_\mu = U_{\mu1*}\,\nu_1 + U_{\mu2*}\,\nu_2 + U_{\mu3*}\,\nu_3$$

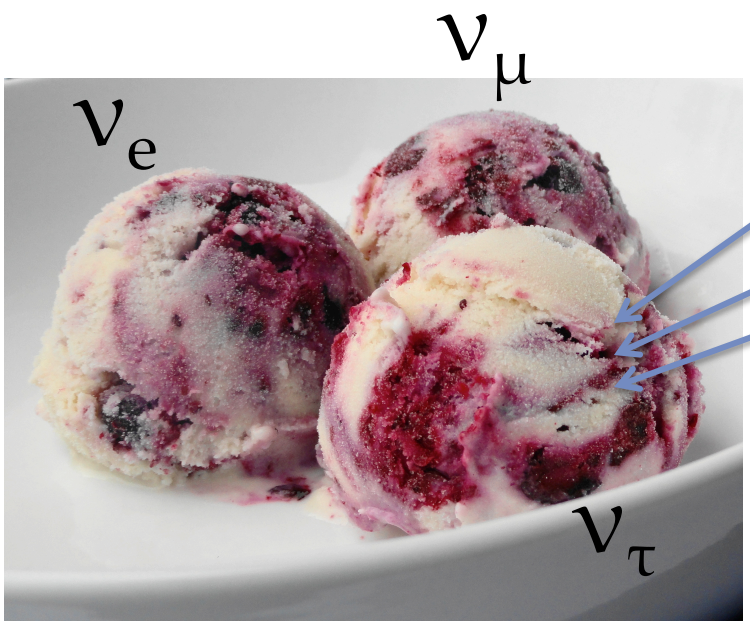
$$\nu_\tau = U_{\tau1*}\,\nu_1 + U_{\tau2*}\,\nu_2 + U_{\tau3*}\,\nu_3$$

Ταλαντώσεις νετρίνων

Είναι πιο εύκολο να το καταλάβουμε με παγωτά..

Συγκεκριμένη γέυση



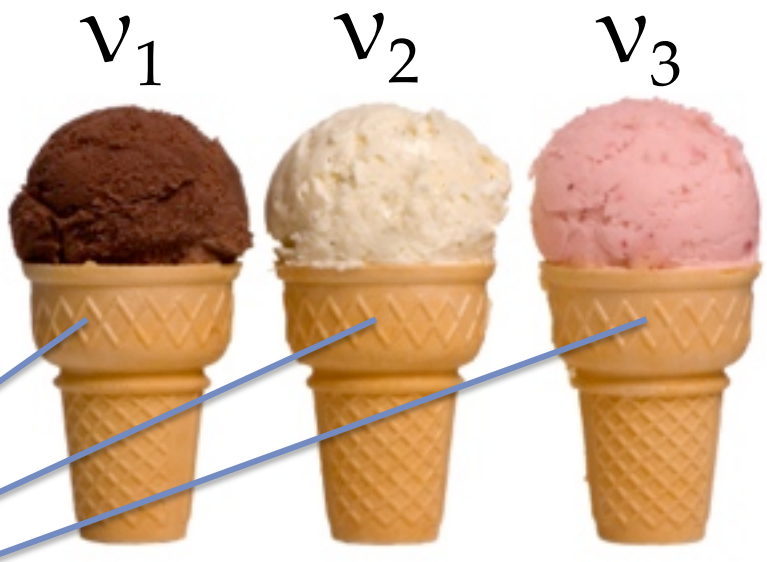


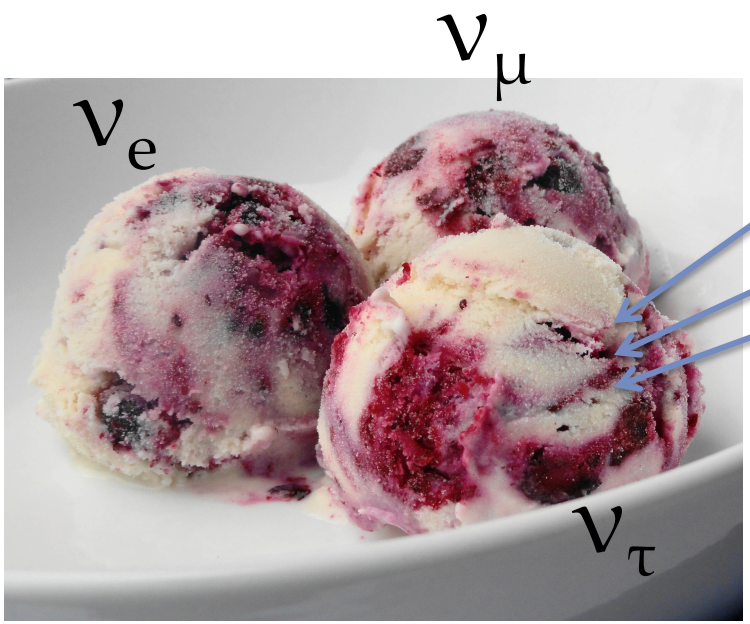
Ανάμικτη γέυση

Ταλαντώσεις νετρίνων

Ας πούμε ότι την χρονική στιγμή t=0, το ν_τ, έχει λιγότερη φράουλα και περισσότερη σοκολάτα από το ν_μ.

Συγκεκριμένη γέυση





Ανάμικτη γέυση

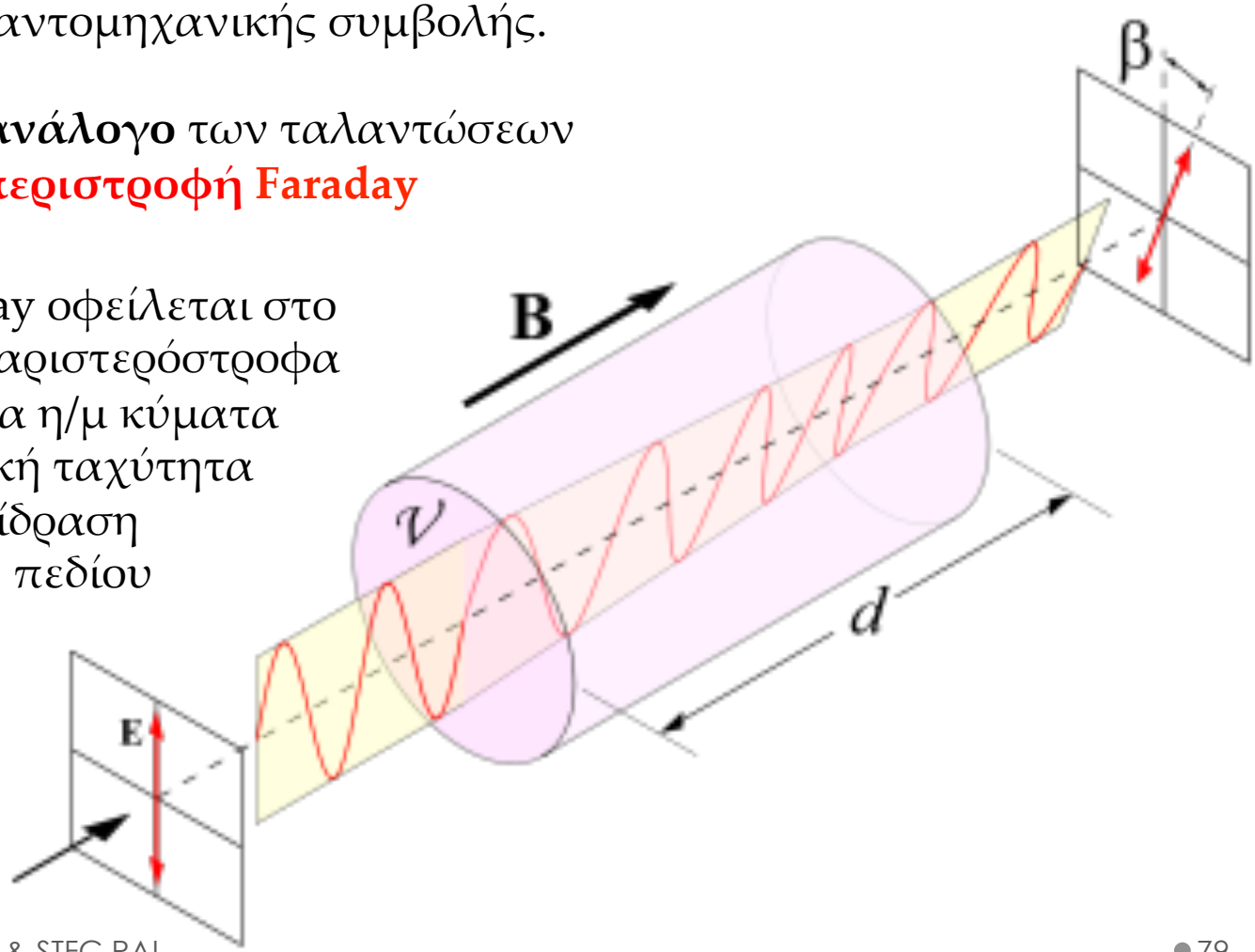
Αν τα συστατικά του ν_τ αρχίσουν να Αλλάζουν (π.χ. γιατί τρώς περίσσοτερο σοκολάτα από φράουλα) το ν_τ μπορεί να μοιάζει περισσότερο με το αρχικό ν_μ.

Περίστροφή Faraday

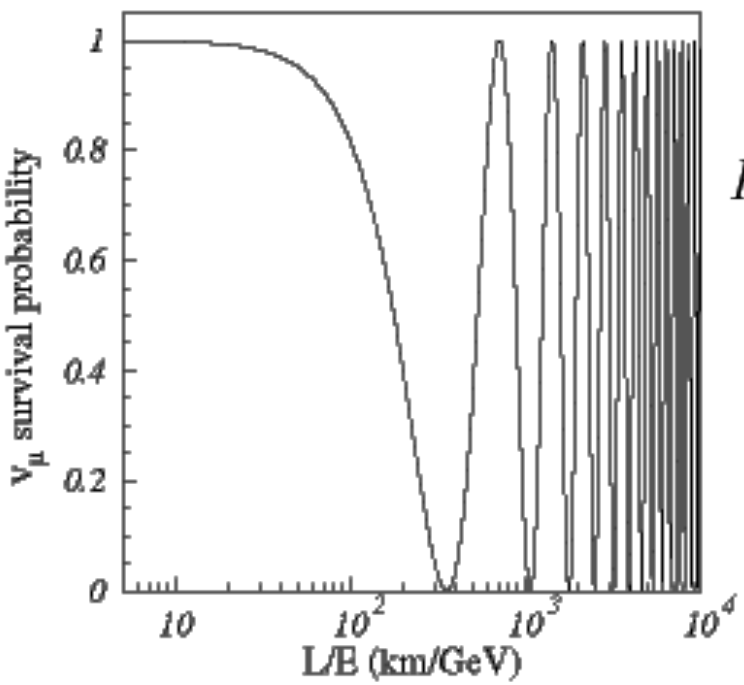
Το φαινόμενο των ταλαντώσεων νετρίνων είναι ένα φαινόμενο Κβαντομηχανικής συμβολής.

Ένα, **κλασικό ανάλογο** των ταλαντώσεων είναι η **περιστροφή Faraday**

Η περιστροφή Faraday οφείλεται στο ότι δεξιόστροφα και αριστερόστροφα κυκλικά πολωμένα η/μ κύματα έχουν διαφορετική ταχύτητα υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου



Ταλαντώσεις νετρίνων



Πιθανότητα ταλάντωσης
α (π.χ. ν_μ) → β (π.χ. ν_e)

απόσταση

$$P_{\alpha\to\beta,\alpha\neq\beta} = \sin^2(2\theta)\,\sin^2\left(1.267\frac{\Delta m^2 L}{E}\frac{\mathrm{GeV}}{\mathrm{eV}^2\,\mathrm{km}}\right)$$

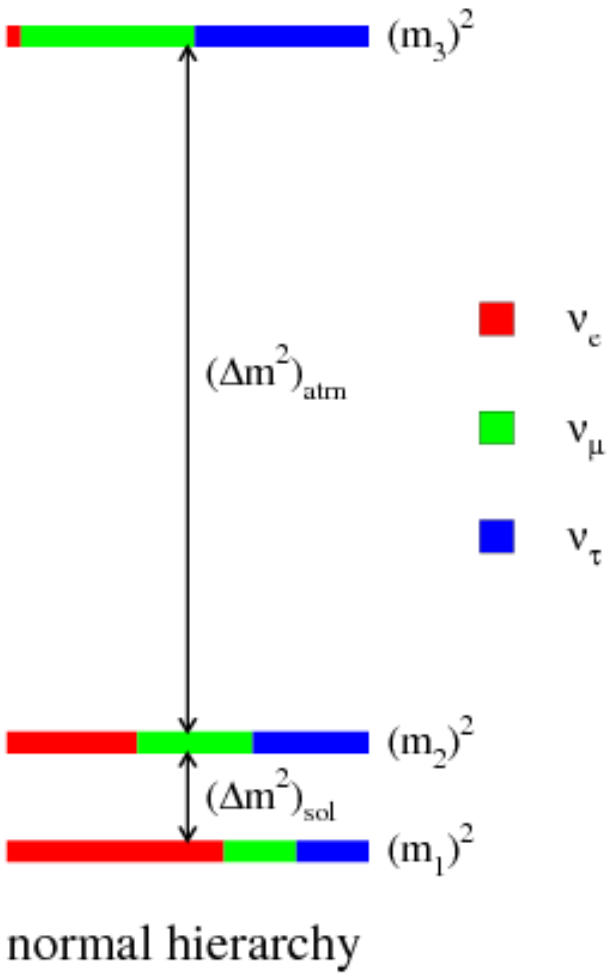
«γωνία» μίξης

Διαφορά τετραγώνων της μάζας των νετρίνων

ενέργεια

Χαρακτηριστικό μήκος ταλάντωσης ~ E / Δm²

Ταλαντώσεις νετρίνων



Οι ταλαντώσεις νετρίνων εξαρτώνται από την διαφορά μάζας Δm^2

Έχουμε 3 νετρίνα,
επομένως 2 διαφορές μάζας

Ταλαντώσεις και στις δύο κλίμακες έχουν παρατηρηθεί και μας έχουν βοηθήσει να κατανοήσουμε:

Το ηλιακό πρόβλημα

και

Το πρόβλημα των ατμοσφαιρικών νετρίνων

Νετρίνα από τον Ήλιο

Ηλιακά Νετρίνα

Η ηλιακή ενέργεια προέρχεται από την σύντηξη
τεσσάρων πυρήνων Υδρογόνου (H) σε έναν πυρήνα Ηλίου (He^4)

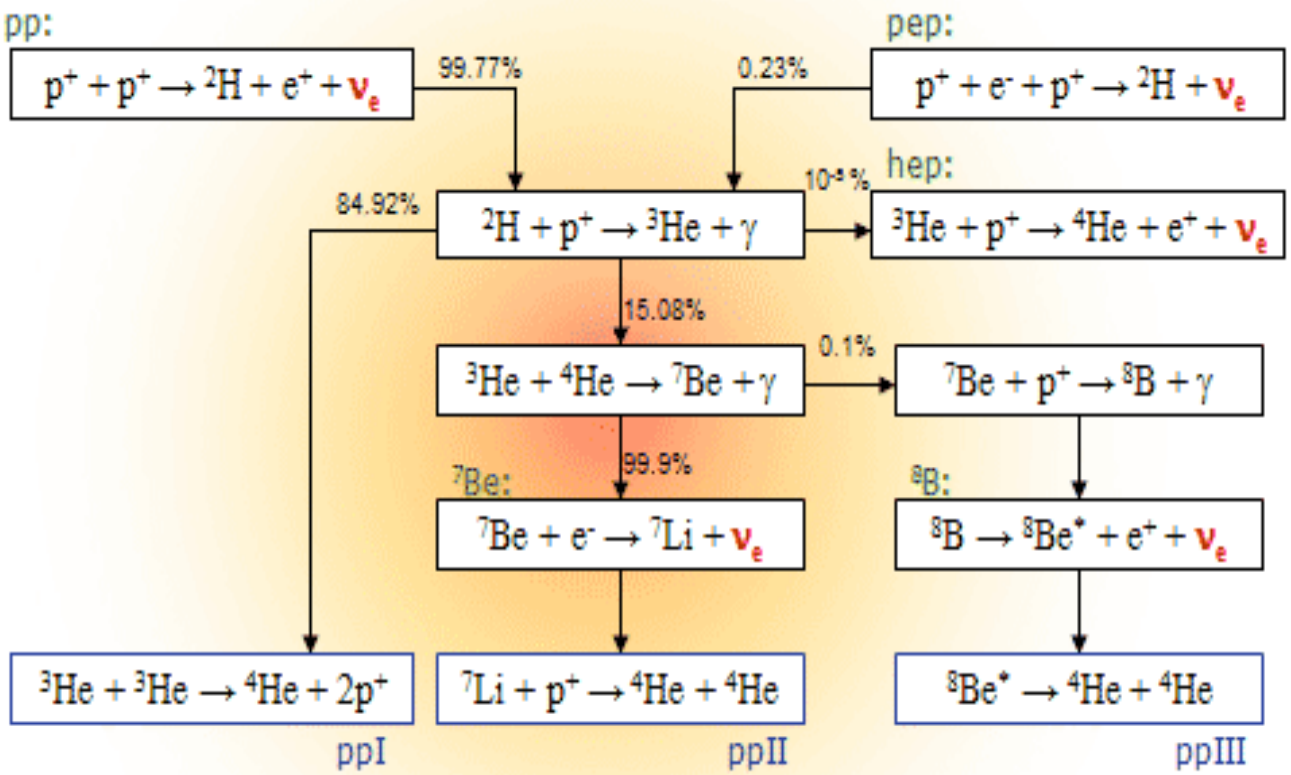
$$4p \rightarrow He + 2e^{+} + 2\nu_e$$

Η παραπάνω αντίδραση παράγει **~27 MeV** ενέργεια.

Τα φωτόνια χρειάζονται ~10,000 χρόνια για να δραπετεύσουν
από τον Ήλιο, ενώ τα νετρίνα διαφεύγουν με την ταχύτητα του φωτός.

Από την ηλιακή φωτεινότητα στην Γή (1370 Watts/m^2) συμπεραίνουμε
οτι η ροή ηλιακών νετρίνων **είναι ~6 x 10^{10} /cm^2 /sec**

Ηλιακά Νετρίνα



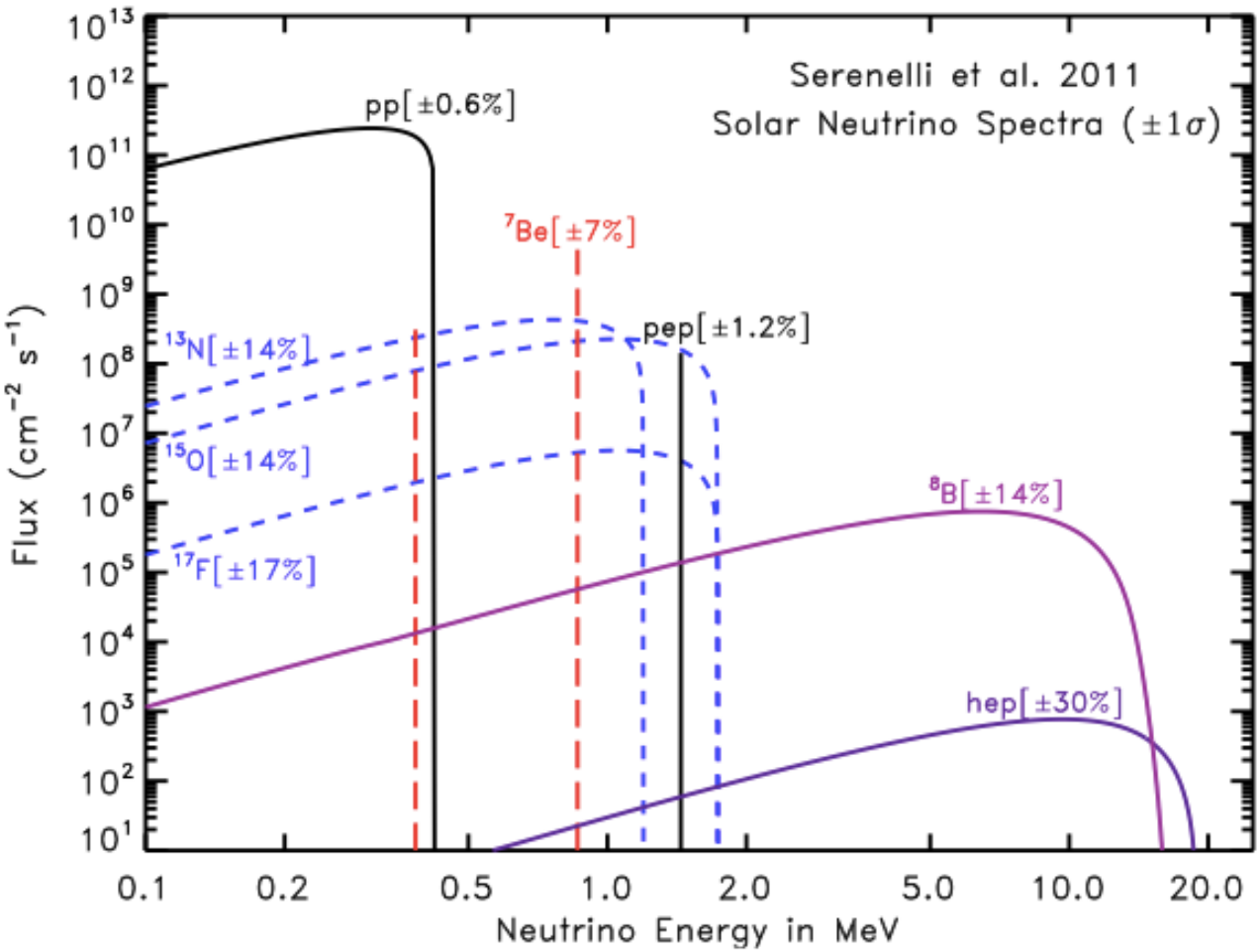
Αυτή η διαδικασία προχωρά μέσω των αντιδράσεων που φαίνονται δίπλα **(αλυσίδα pp).**

Η αλυσίδα pp είναι η κυρίαρχη για αστέρια με την μάζα του Ήλιου.

Σε πιο μαζικά άστρα κυριαρχεί ο **κύκλος CNO.**

Στον Ήλιο, ο κύκλος CNO. συνεισφέρει μόλις το 1% της ενέργειας.

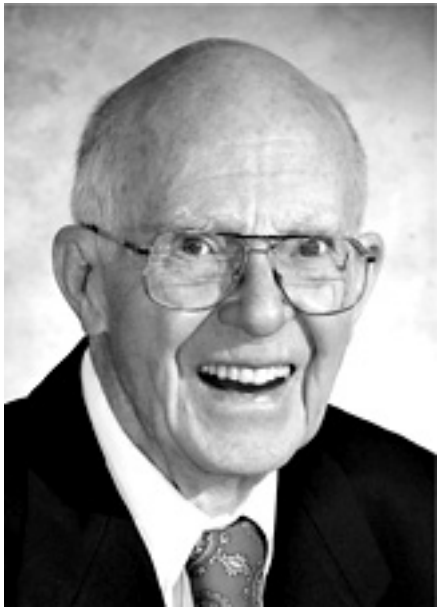
Το φάσμα των Ηλιακών νετρίνων



Πώς μπορούμε να επαληθεύσουμε τον μηχανισμό παραγωγής ενέργειας;

Ανιχνεύοντας τα νετρίνα που εκπέμπονται κατά την ίδια διαδικασία

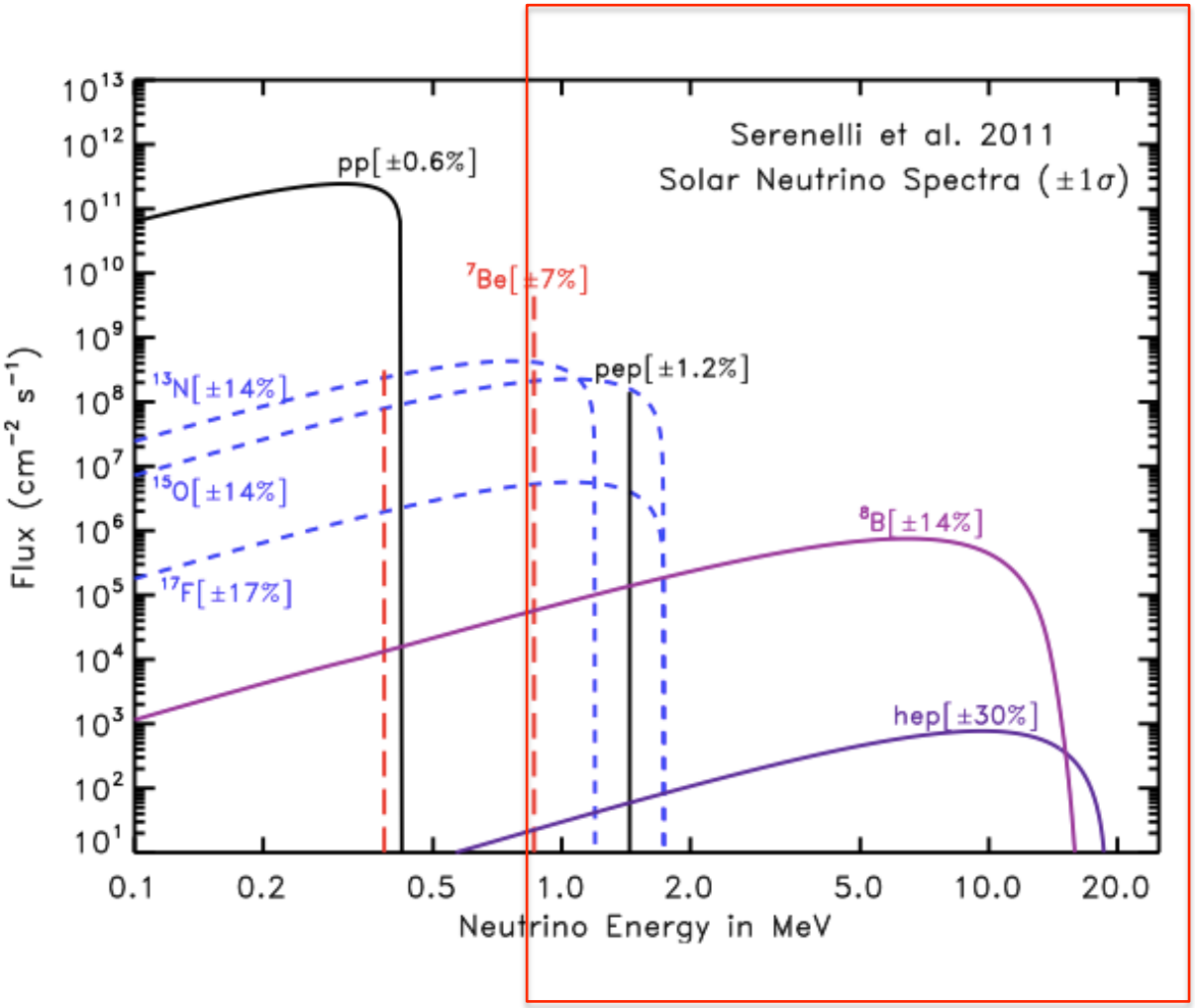
Το ραδιοχημικό πείραμα του R.Davis (Homestake)



600 tonnes of C_2Cl_4

R. Davis Jr., D.S. Harmer, and K.C. Hoffman, PRL 20, 1205 (1968)

Το ραδιοχημικό πείραμα του R.Davis (Homestake)



Ανίχνευση ηλιακών νετρίνων μέσω της αντίδρασης

$$\nu_e + {}^{37}Cl \rightarrow e^- + {}^{37}Ar$$

(ενεργειακό κατώφλι: 814 keV)

Κάθε μήνα, ο Davis και οι συνεργάτες του αφαιρούσαν το ^{37}Ar και μετρούσαν τον αριθμό των ατόμων.

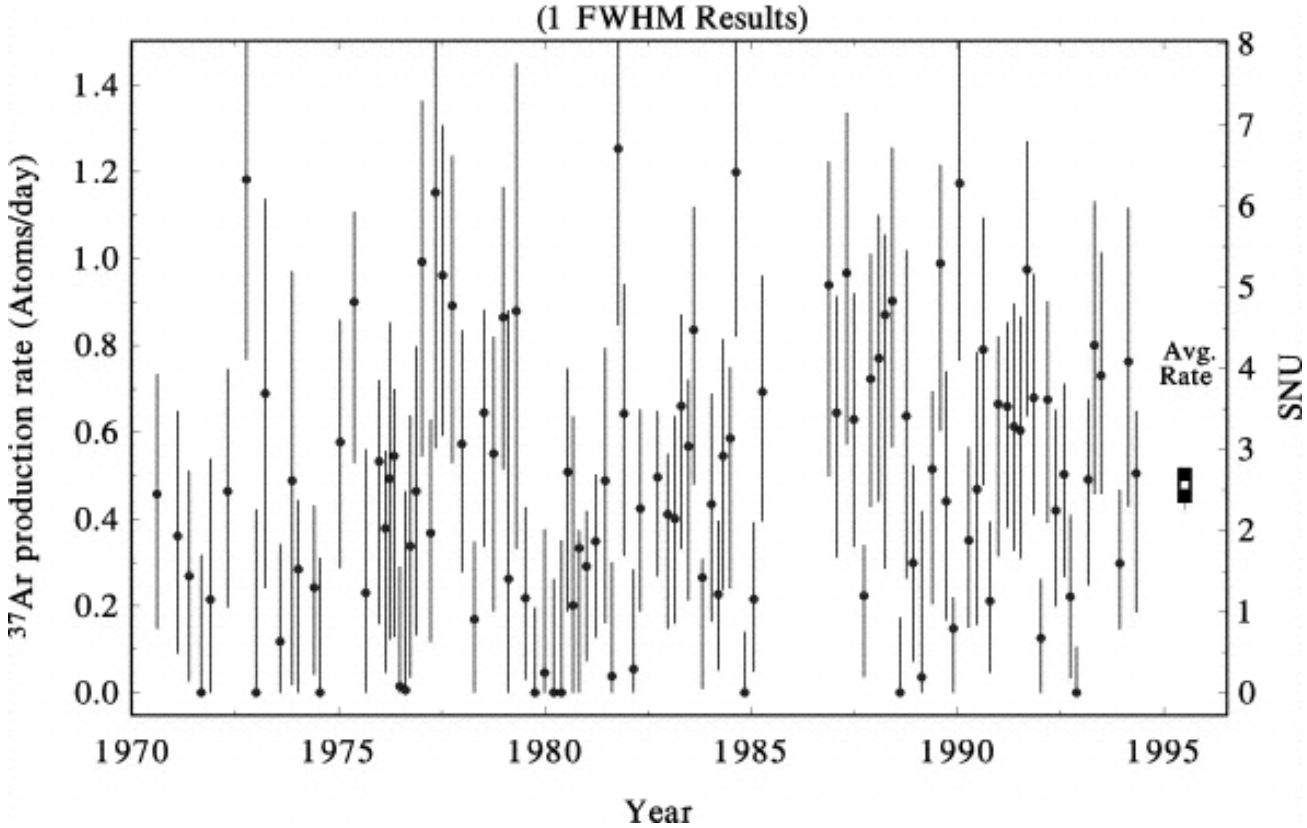
Μέσω της διάσπασης

$${}^{37}Ar + e^- \rightarrow {}^{37}Cl + \nu_e$$

Κατά την οποία εκπέμπεται ηλεκτρόνιο Auger με ενέργεια 2.82 keV.
(Χρόνος ημιζωής: 35 ημέρες)

Το ραδιοχημικό πείραμα του R.Davis (Homestake)

Το ηλιακό μοντέλο προβλέπει για το πείραμα του Davis: **8.15 ± 1.8 SNU (*)**
Ο Davis μετρά **2.56 ± 0.23 SNU**, μόλις το **30%** της προβλεπόμενης τιμής



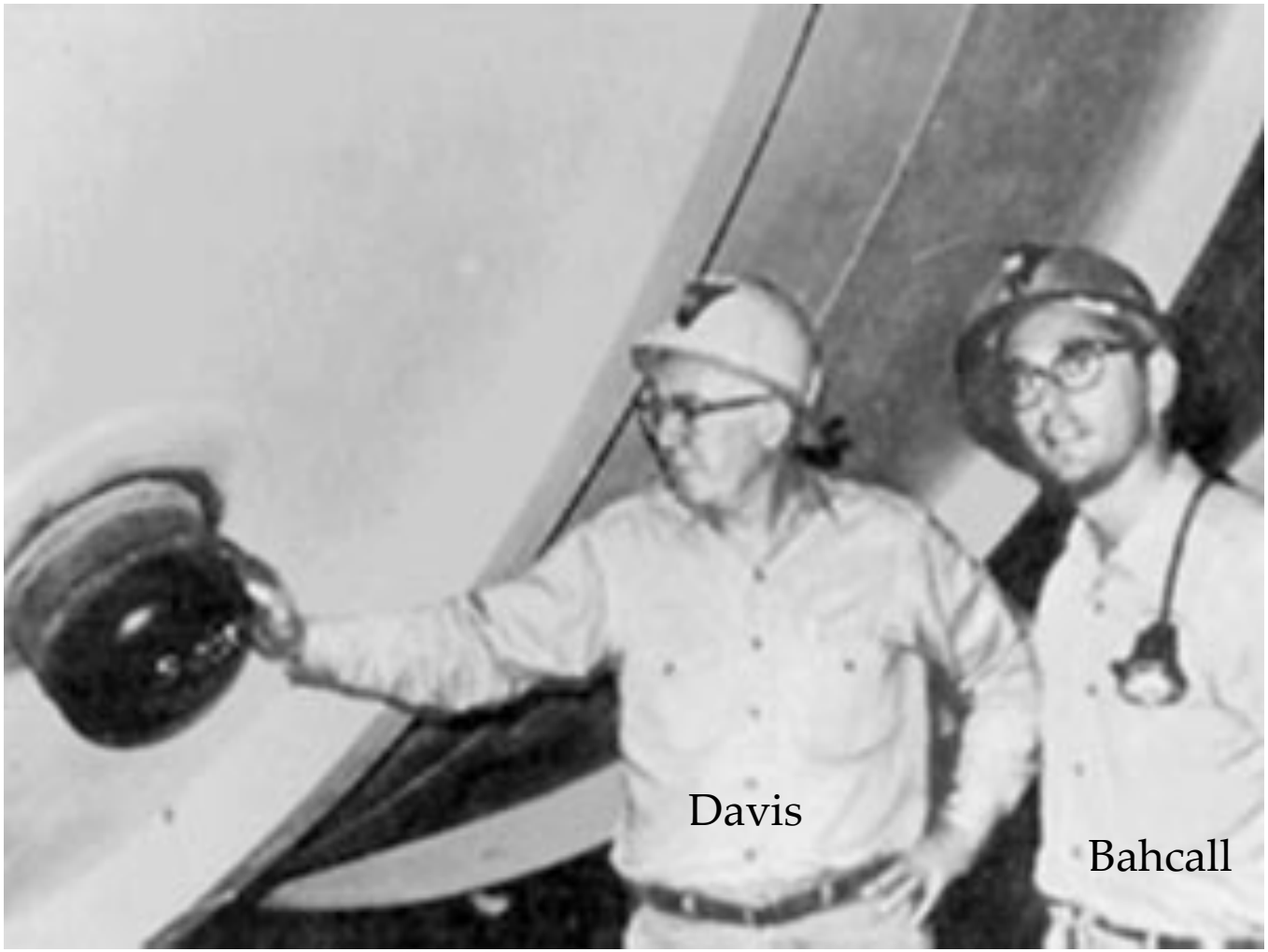
(*) 1 SNU = 10^{-36} αλληλεπιδράσεις ανά άτομο και ανά δευτερόλεπτο

Τι συμβαίνει στα Ηλιακά νετρίνα;

The Infamous "Neutrino-burglar"

Τι συμβαίνει στα Ηλιακά νετρίνα;

- **Το πείραμα πρέπει να είναι λάθος**
  - Μπορούμε να μετρήσουμε ~10 άτομα ^{37}Ar μέσα σε ~600 τόνους C_2Cl_4?
- **Η ηλιακή θεωρία πρέπει να είναι λάθος**
  - Η ροή νετρίνων (Φ) εξαρτάται από την θερμοκρασία (T) του Ήλιου ($\Phi \sim T^m$).
    - Για pp νετρίνα: m = -1.1
    - Όμως, για ^7Be νετρίνα m = +10 και για ^8B νετρίνα m = +24
- **Ή, κάτι περίεργο συμβαίνει με το νετρίνο**

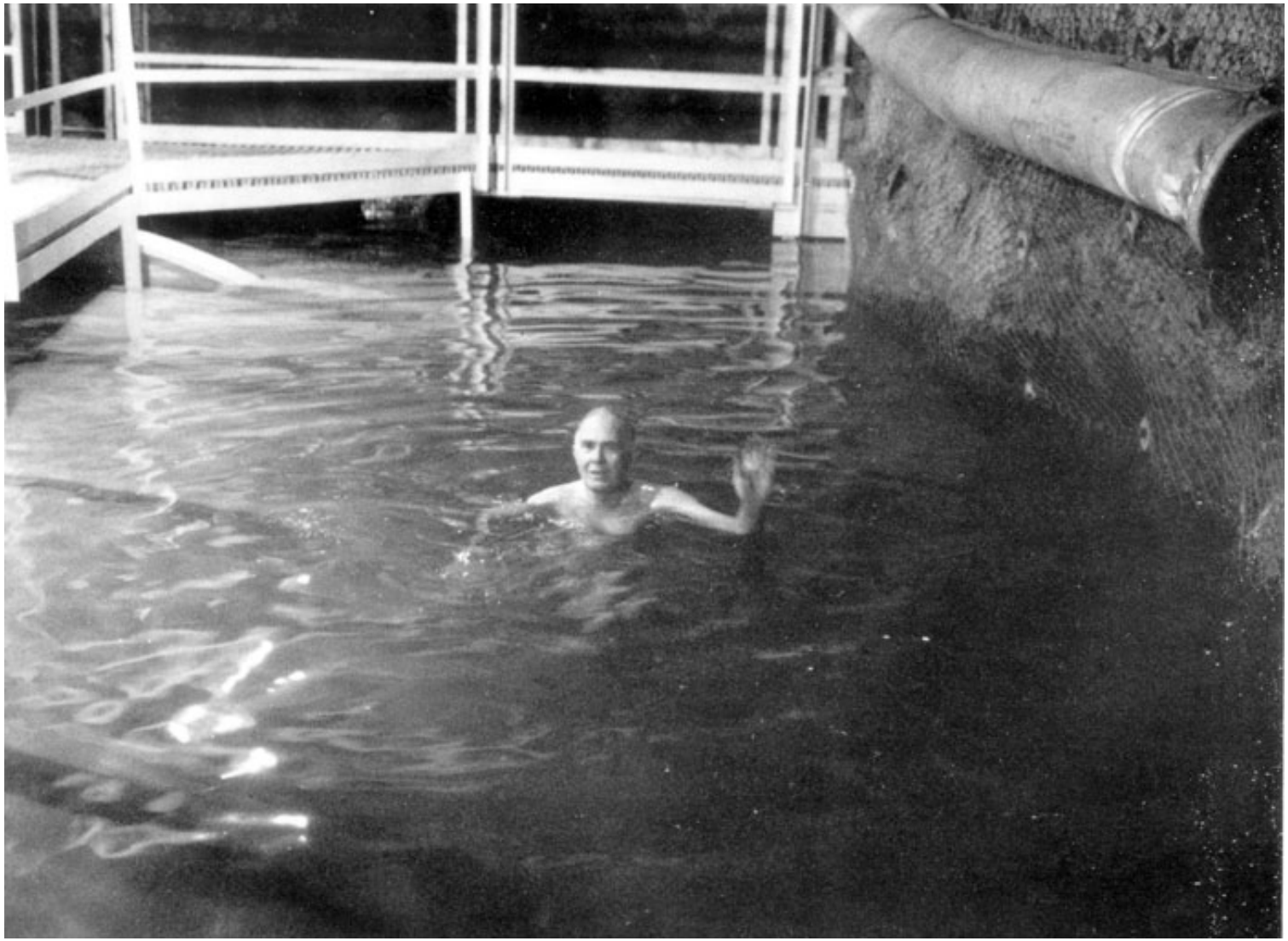


Αρχότερα θα αποδειχθεί ότι
κανένας από τους δύο δεν έκανε λάθος

Αυτό που Ακολούθησε ήταν μια από τις πιο όμορφες ιστορίες στην ιστορία της Φυσικής.

Ο Davis για χρόνια επαναλάμβανε και βελτίωνε το πείραμα.

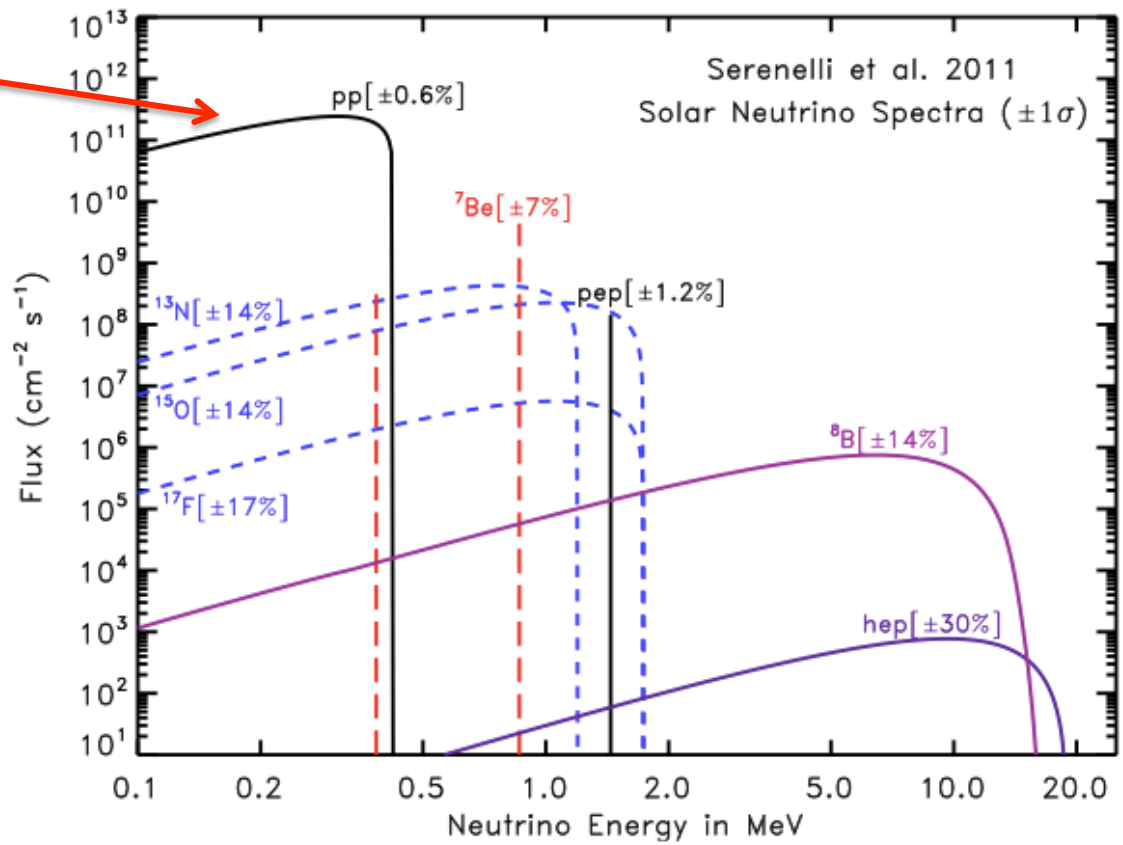
Ο Bahcall επαναλάμβανε και βελτίωνε τους υπολογισμούς του



Πού και που ο Davis έριχνε και καμιά βουτιά
στο νερό που περιέβαλε τον ανιχνευτή του

Μπορούμε να μειώσουμε την εξάρτηση της μέτρησης από το Ηλιακό μοντελο;

Μέτρηση των pp νετρίνων

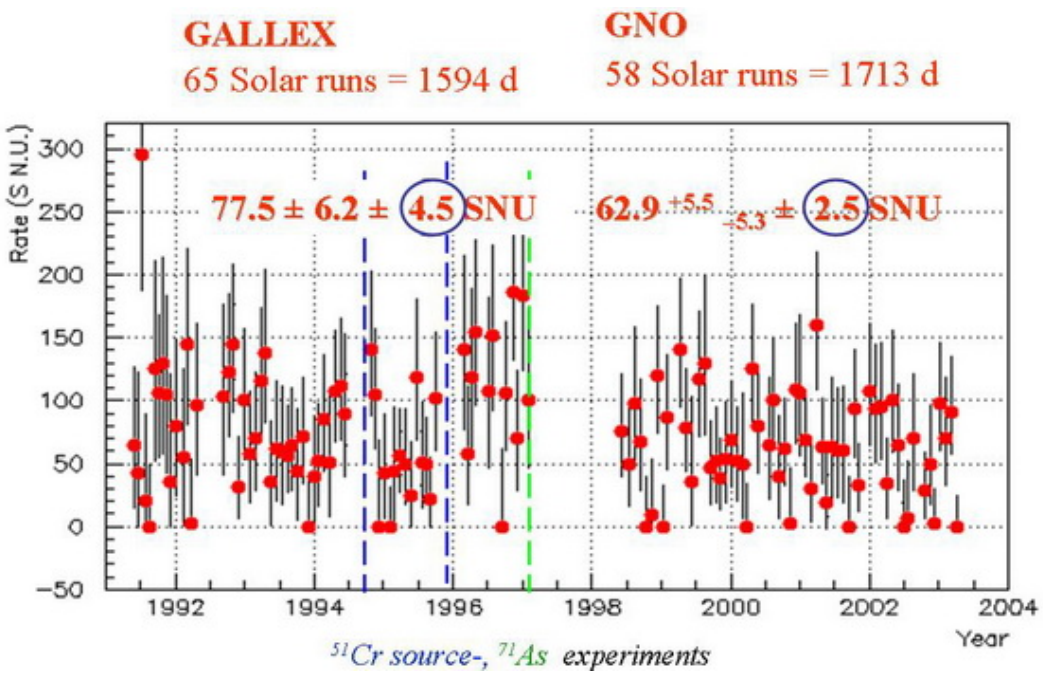


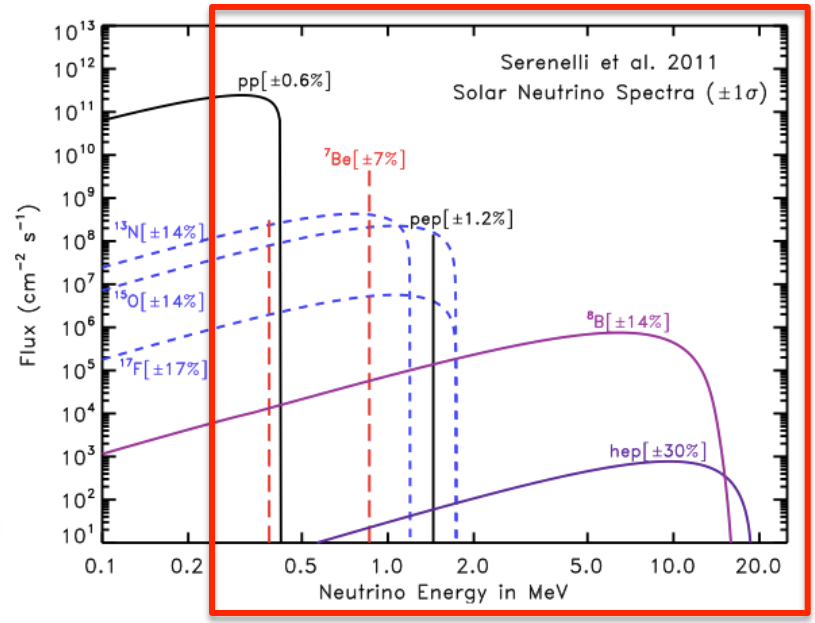
Ραδιοχημικά πειράματα Ga

$$\nu_e + {}^{71}Ga \rightarrow e^- + {}^{71}Ge$$

Ενεργειακό κατώφλι: 233 keV

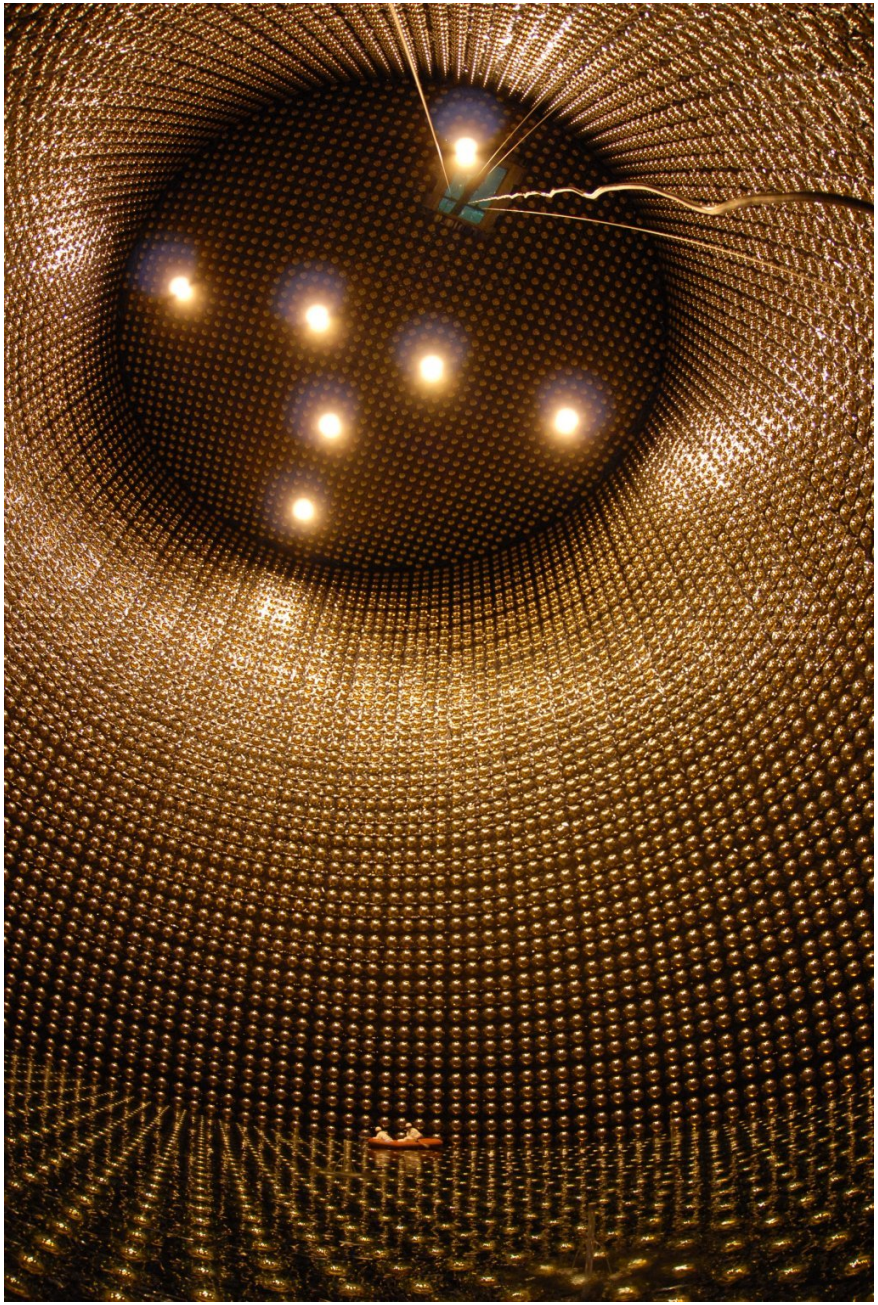
Ευαισθησία στα pp νετρίνα





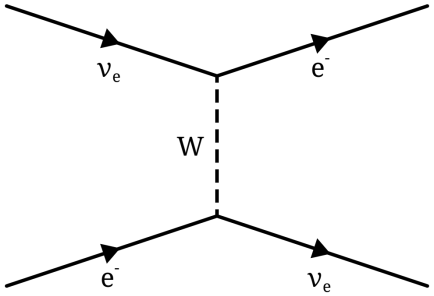
Το ηλιακό μοντέλο προβλέπει 130 ± 12 SNU

Το πείραμα μετρά μόνο το ~50%



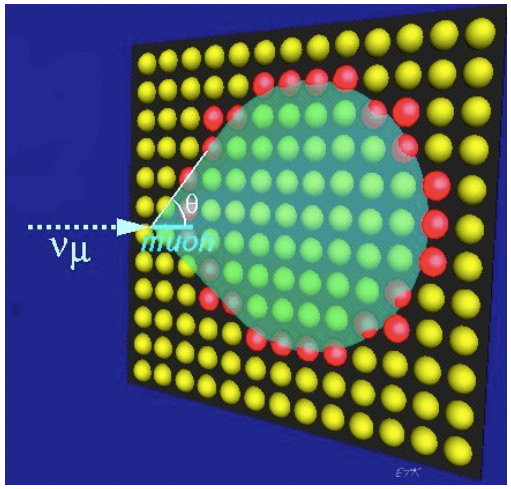
(Super-)Kamiokande

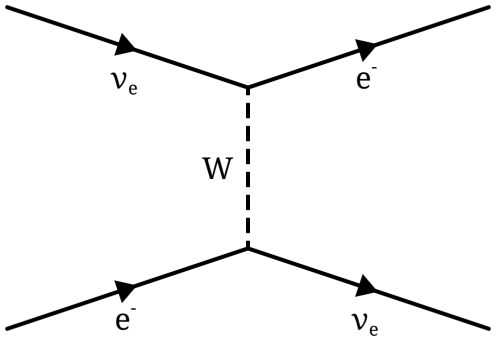
50,000 τόνοι νερού σε ένα κυλινδρικό δοχείο με διάμετρο και ύψος ~40 m. 11,000 20'' φωτοπολλαπλασιαστές είναι εγκατεστημένοι στο εσωτερικό του



ve → ve

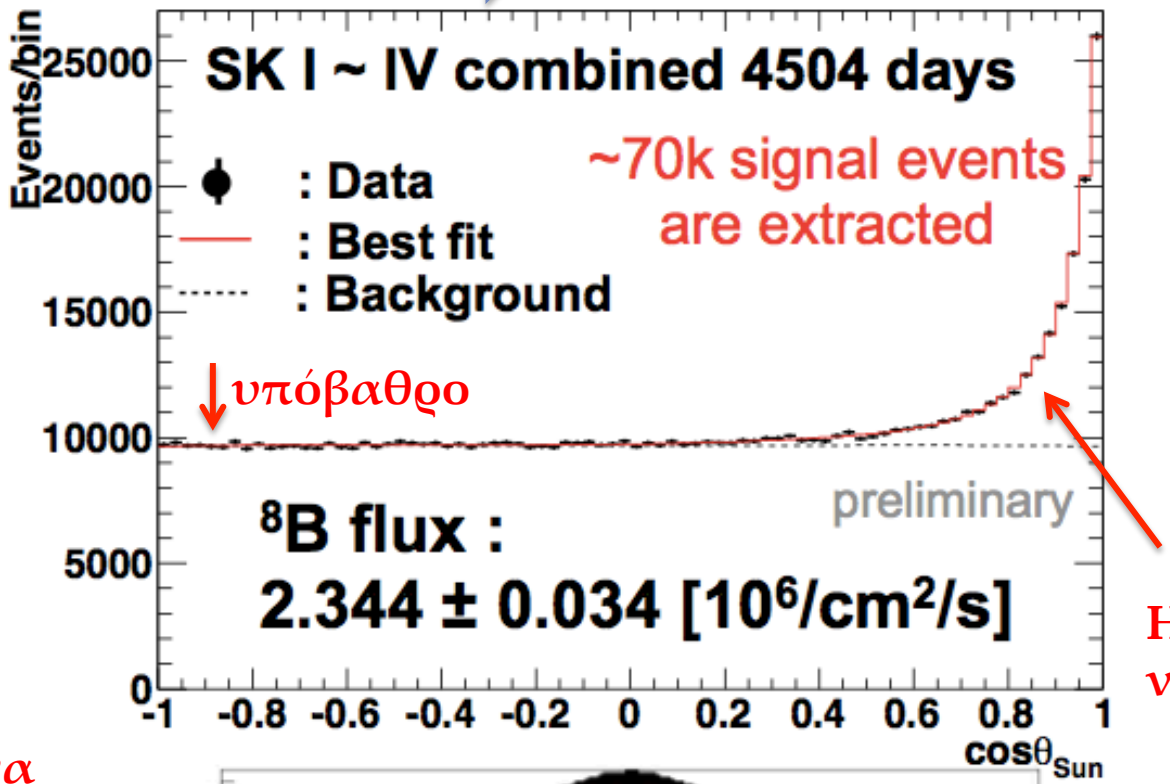
Τα ηλεκτρόνια ανιχνεύοται μέσω ακτινοβολίας Cherenkov





Η κατεύθυνση του ηλεκτρονίου σχετίζεται με την κατεύθυνση του νετρίνου

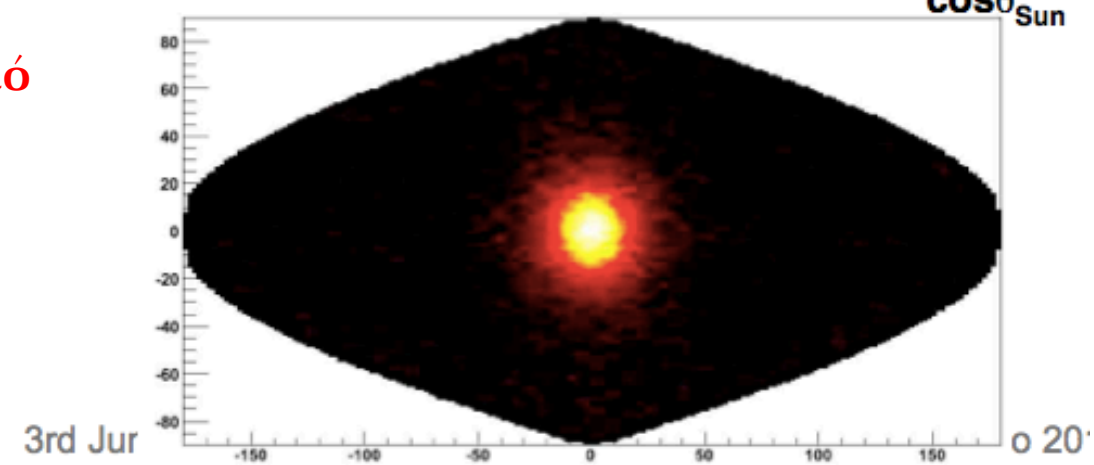
προς την κατεύθυνση Του Ήλιου



Ηλιακά νετρίνα

Επιβεβαίωση:
Τα «ηλιακά» νετρίνα έρχονται πράγματι από τον Ήλιο

Όμως πάλι, ~50% της αναμενόμενης ροής λείπει...



Η επίλυση του προβλήματος των Ηλιακών νετρινων

Με τα όλα τα πειράματα να μετράνε
σημαντικά χαμηλότερη ροή από την αναμενόμενη,
και την επιτυχία του Ηλιακού μοντέλου στην Ηλιοσεισμολογία,
όλοι πίστευαν ότι
η λύση του προβλήματος βρίσκεται στα ίδια τα νετρίνα…

Οι ταλαντώσεις ήταν οι πιο πιθανή εξήγηση

Όμως δεν είχαμε απευθείας απόδειξη

Και πολλά διαφορετικοί «τρόποι» ταλάντωσης μπορούσαν
να ερμηνεύσουν τα δεδομένα.

Τα δεδομένα δεν είχαν την δύναμη να διακρίνουν ποιούς από όλους
τους τρόπους ταλάντωσης ήταν ο πραγματικος.

Η επίλυση του προβλήματος των Ηλιακών νετρινων

Το πρόβλημα ήταν οτι τα πειράματά μας ήταν ευαίσθητα κυρίως στα ν_e

Όμως τα ν_e εξαφανίζονταν

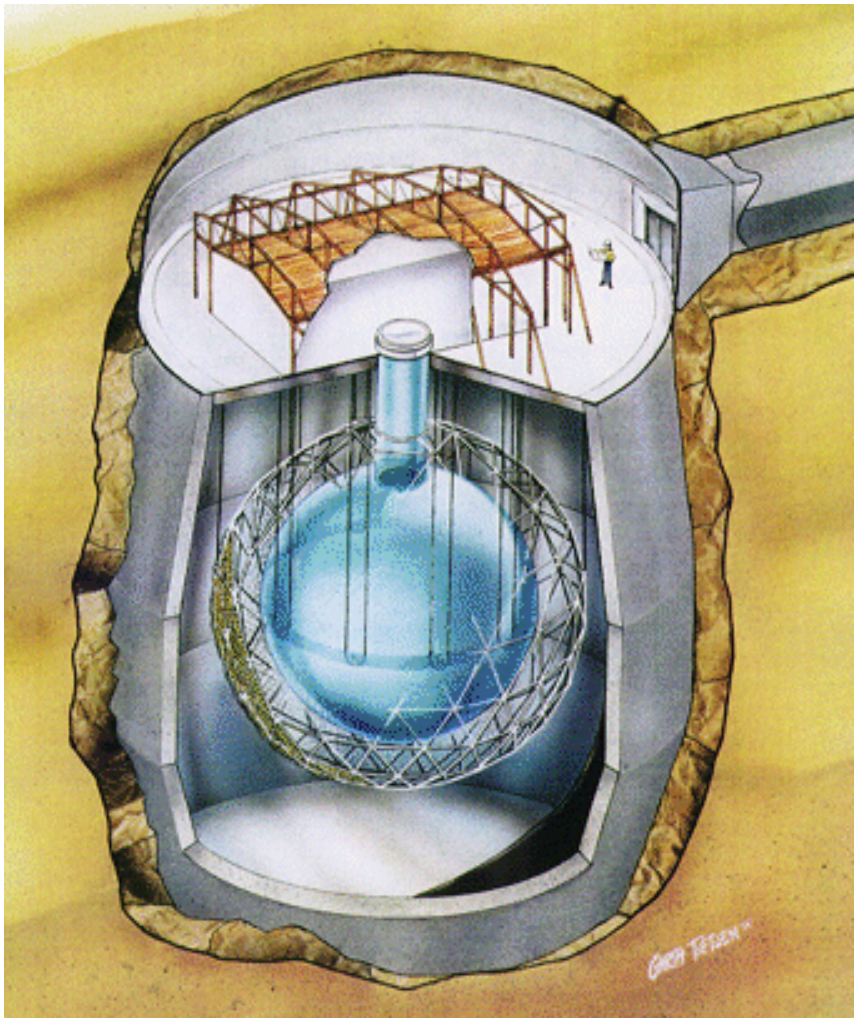
Αν ο λόγος ήταν οτι τα ν_e ταλαντώνονται ($\rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$)
τότε το **άθροισμα της ροής των $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$** πρέπει να είναι σταθερό
(και σε συμφωνία με τη Ηλιακό μοντέλο)

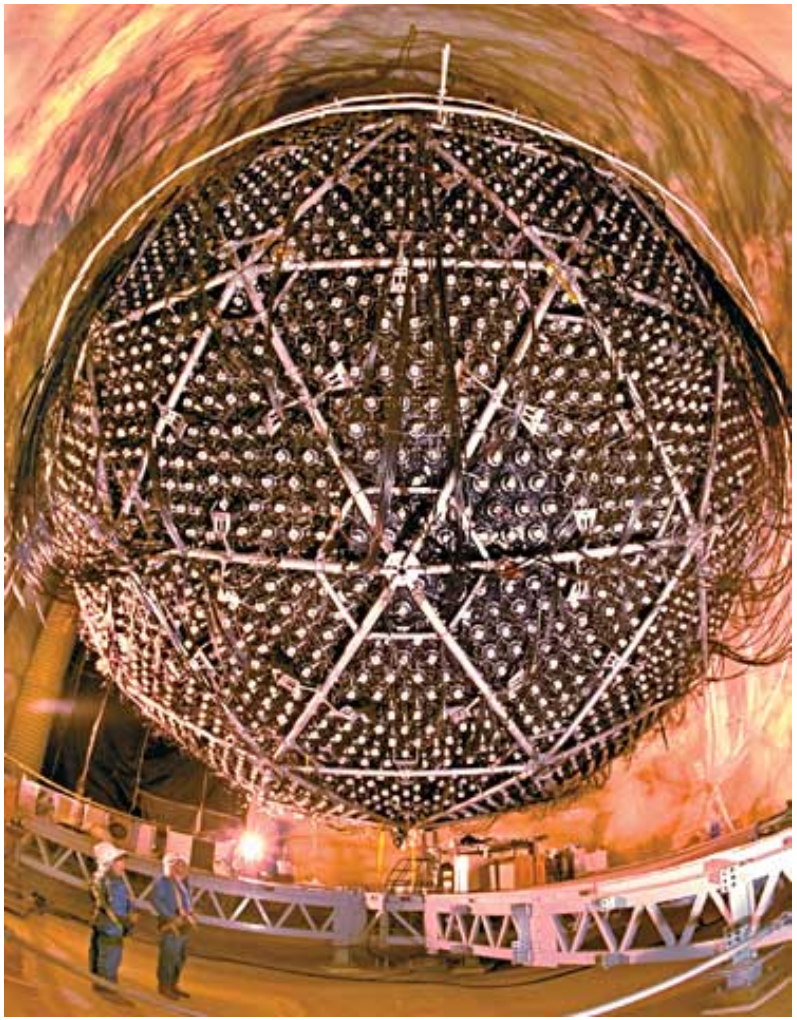
Χρειαζόμασταν ένα πείραμα που να είναι **ευαίσθητο σε όλα τα νετρίνα**

SNO (Sudbury Neutrino Observatory)

Το πείραμα SNO

1,000 τόνοι D_20 σε σφαιρικό δοχείο ακτίνας 6 m. 6,500 τόνοι H_2O εξωτερικά
10,000 φωτοπολλαπλασιαστές





Παρατηρώντας νετρίνα στο πείραμα SNO

Το SNO μπορούσε να παρατηρήσει νετρίνα με διαφορετικούς τρόπους:

Αλληλεπιδράσεις φορτισμένου ρεύματος:

- $\nu_e + {}^2D \rightarrow \mathbf{e^-} + p + p$
- Ευαίσθητες μόνο σε ν_e

Αλληλεπιδράσεις ουδετέρου ρεύματος:

- $\nu + {}^2D \rightarrow \nu + \mathbf{n} + p$
- Ευαίσθητες μόνο σε όλα τα είδη νετρίνων

Ελαστική αλληλεπιδράσεις νετρίνου-ηλεκτρονίου

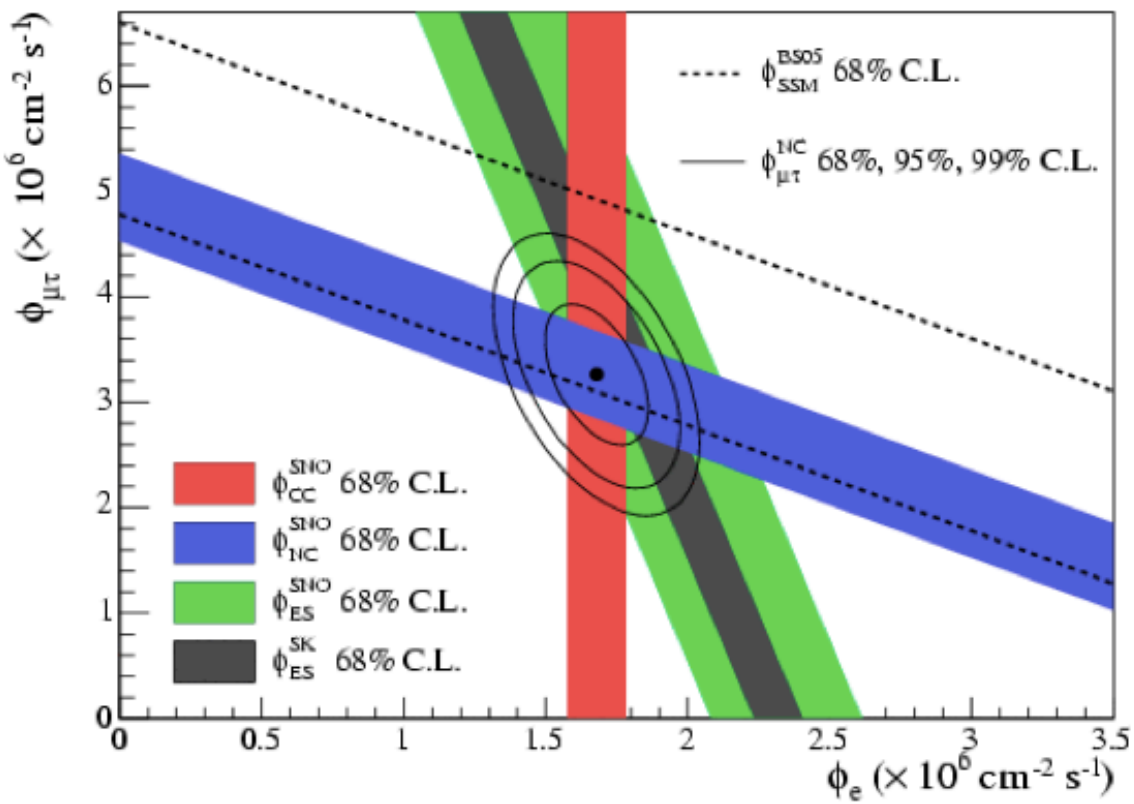
- $\nu + e^- \rightarrow \nu + \mathbf{e^-}$
- **Ευαίσθητες κυρίως σε** ν_e αλλά σε μικρότερο βαθμό και σε ν_μ, ν_τ

Αποτελέσματα του πειράματος SNO

$$\Phi_{SNO}^{CC} = (1.76 \pm 0.06\ (\text{stat}) \pm 0.09\ (\text{syst})) \times 10^6\ \text{cm}^{-2}\ \text{s}^{-1}$$
$$\Phi_{SNO}^{NC} = (5.09 \pm 0.44\ (\text{stat}) \pm 0.46\ (\text{syst})) \times 10^6\ \text{cm}^{-2}\ \text{s}^{-1}$$
$$\Phi_{SNO}^{ES} = (2.39 \pm 0.24\ (\text{stat}) \pm 0.12\ (\text{syst})) \times 10^6\ \text{cm}^{-2}\ \text{s}^{-1}$$

Τα αποτελέσματα του SNO έδειξαν σημαντική ροη $\nu_\mu + \nu_\tau$ (που δεν αναμένονταν από το Ηλιακό μοντέλο)

Παρόλο που η ροή των ν_e είναι μικρότερη από την αναμενόμενη, η ροή των $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ είναι σε συμφωνία με τη Ηλιακό μοντέλο



Επιβεβαίωση με νετρίνα από αντιδραστήρα

Αν ο τρόπος ταλάντωσης που μέτρησαν τα ηλιακά πειράματα είναι ο πραγματικός...

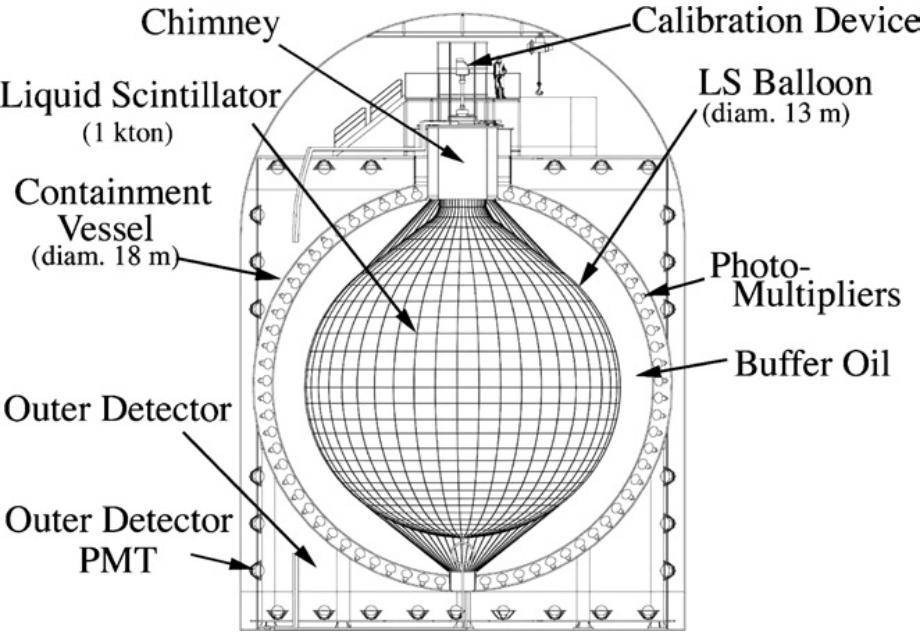
...τότε οι ταλαντώσεις θα μπορούσαν να παρατηρηθούν και με νετρίνα από πυρηνικούς αντιδραστήρες, σε μία απόσταση 100-200 km.

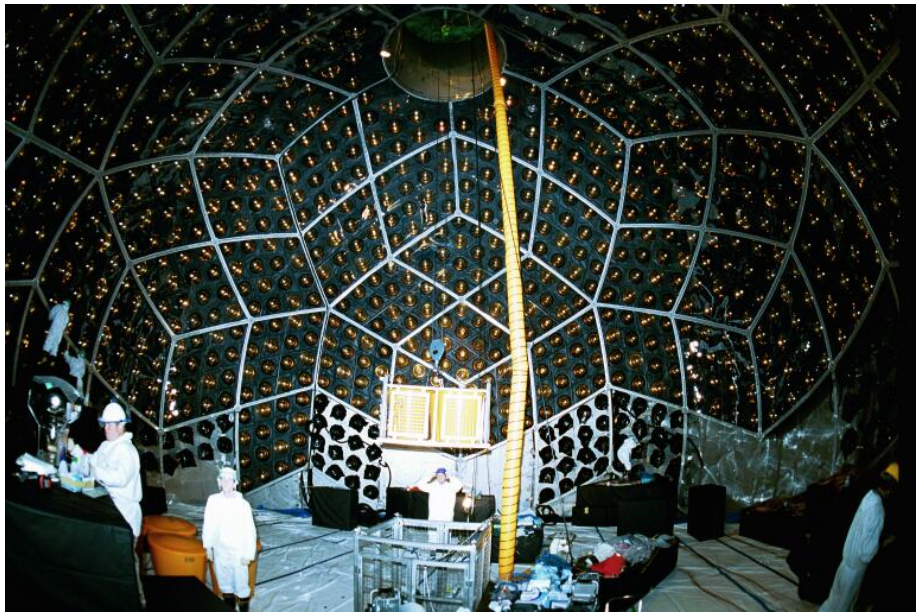
Εκείνη την εποχή, η Ιαπωνία παρήγαγε 68 GW με πυρηνικούς αντιδραστήρες (το 20% της παραγωγής όλου του κόσμου).

Το 80% της ενέργειας παράγονταν σε απόσταση 180 km από το ορυχείο Kamioka.

Το πείραμα KamLAND

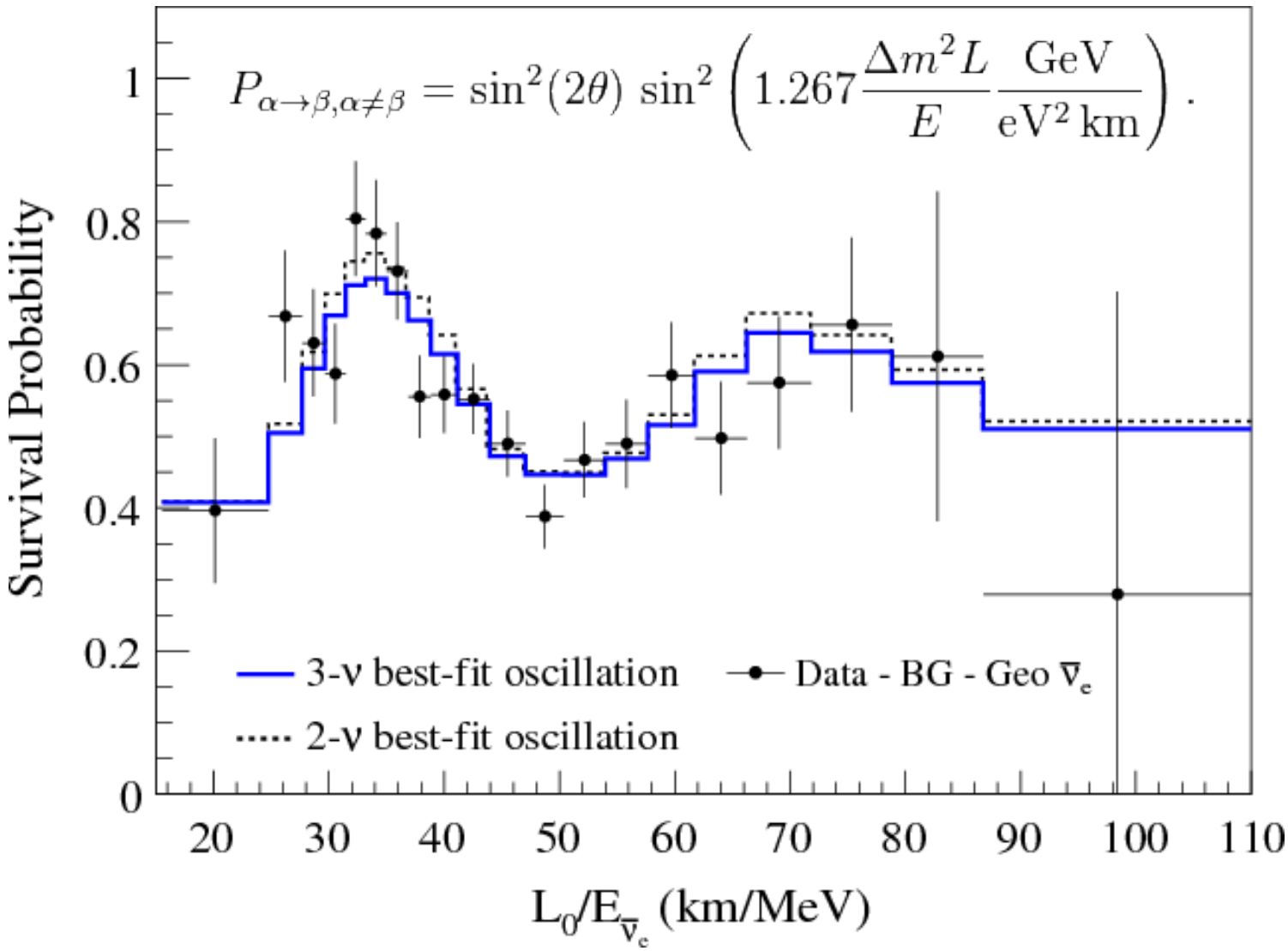
1,000 τόννοι υγρού σπινθηριστή σε ένα νάυλον μπαλόνι διαμέτρου 13 m
που περιβάλλεται από 3,000 φωτοευαίσθητους ανιχνευτές

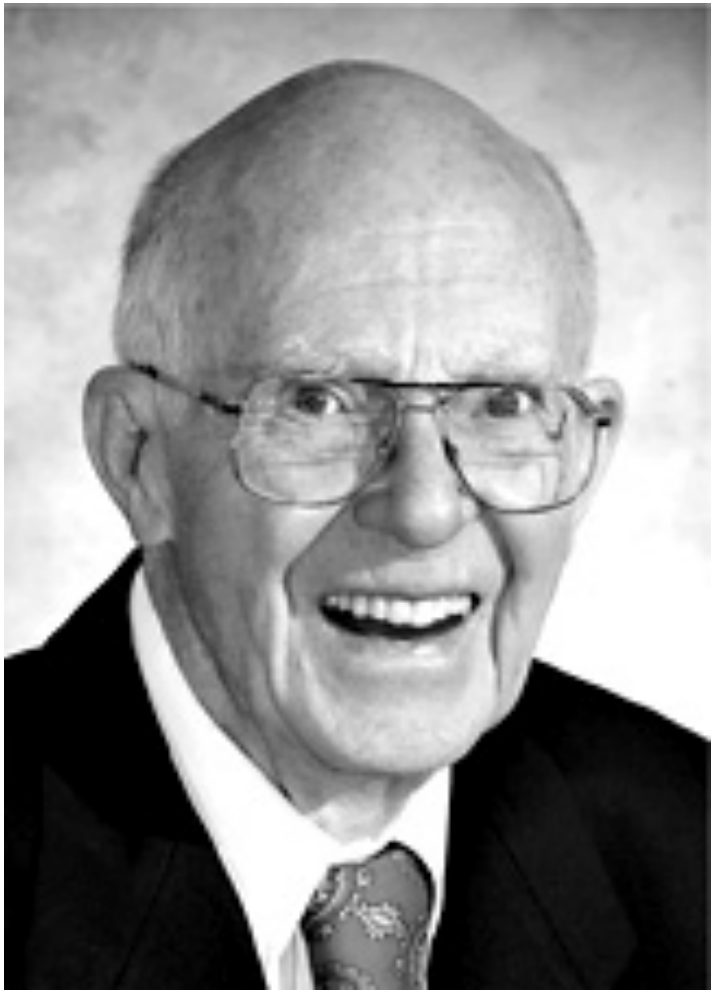




Αποτελέσματα KamLAND

Ταλαντώσεις !!!





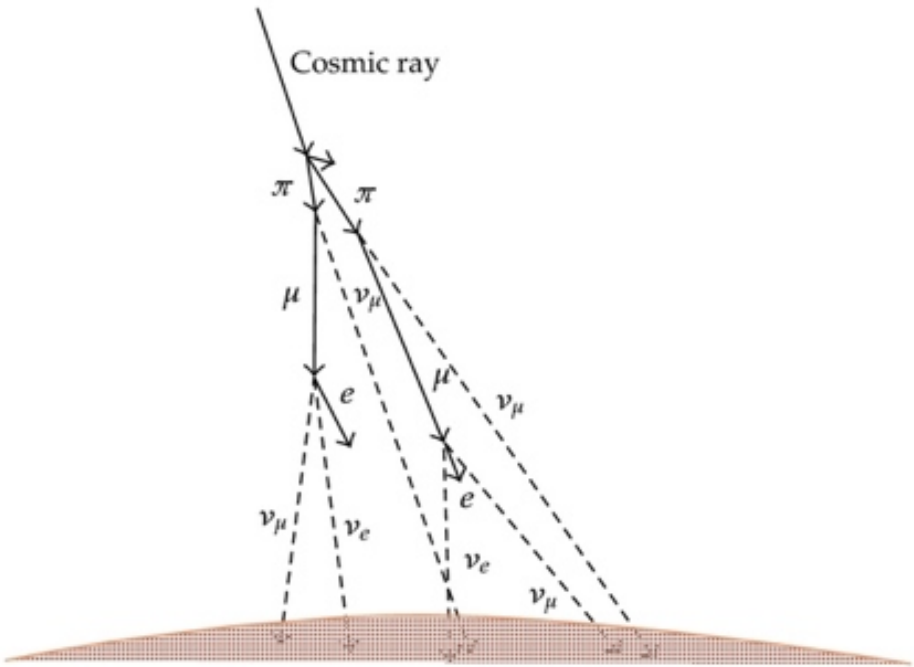
Ray Davis

Masatoshi Koshiba

Νόμπελ Φυσικής 2002

Ατμοσφαιρικά νετρίνα

Ατμοσφαιρικά Νετρίνα



Τα ατμοσφαιρικά νετρίνα προέρχονται από της αλληλεπιδράσεις κοσμικών ακτίνων με την ατμόσφαιρα.

$p + A \rightarrow \pi + \ldots$

$\quad | \rightarrow \mu + \nu_\mu$

$\quad\quad | \rightarrow e + \nu_\mu + \nu_e$

Τα ατμοσφαιρικά νετρίνα έχουν ενέργειες από ~100 MeV ως και πάνω από 100 TeV.

Ατμοσφαιρικά Νετρίνα

Ατμοσφαιρικά νετρίνα είχαν παρατηρηθεί ήδη από την δεκαετία του ’60.

Πειράματα στο ορυχείο East Rand στην Νοτια Αφρική και
στο ορυχείο Kolar Gold Field στην Ινδία.

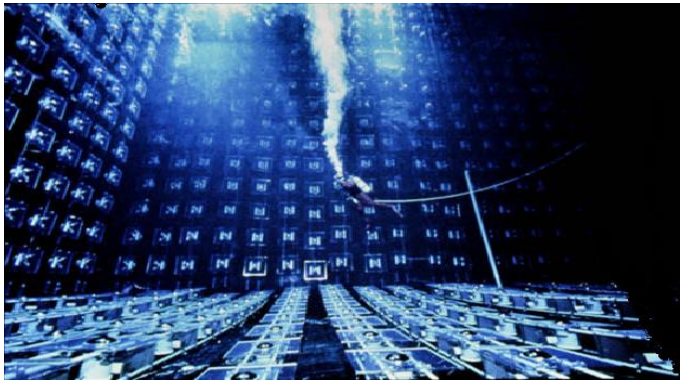
Ο κύριος λόγος για την μελέτη τους ήταν η μελέτη των ασθενών
αλληλεπιδράσεων σε υψηλές ενέργειες.

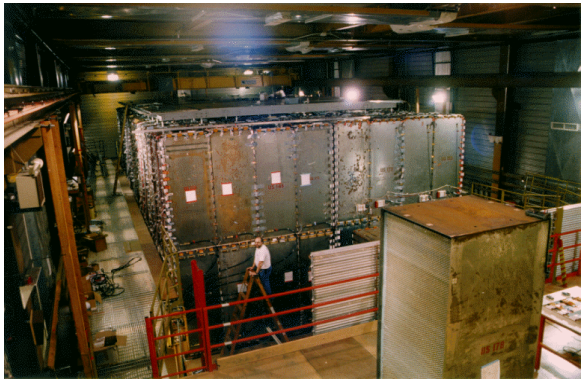
Τα πειράματα μέτρησαν ροή που ήταν μικρότερη από την προβλεπόμενη,
όμως η αβεβαιότητες ήταν σχετικά μεγάλες,
και το αντικείμενο ξεχάστηκε για μερικά χρόνια.

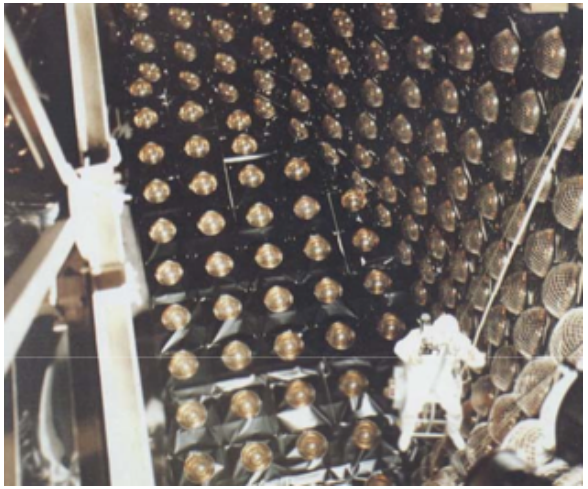
Η διάσπαση του πρωτονίου

Μέχρι την δεκαετία του '80, όταν ενωποιημένες θεωρίες άρχισαν να παράγουν προβλέψεις για την διάσπαση του πρωτονίου με χρόνο ζωής μέσα στις πειραματικες δυνατότητες

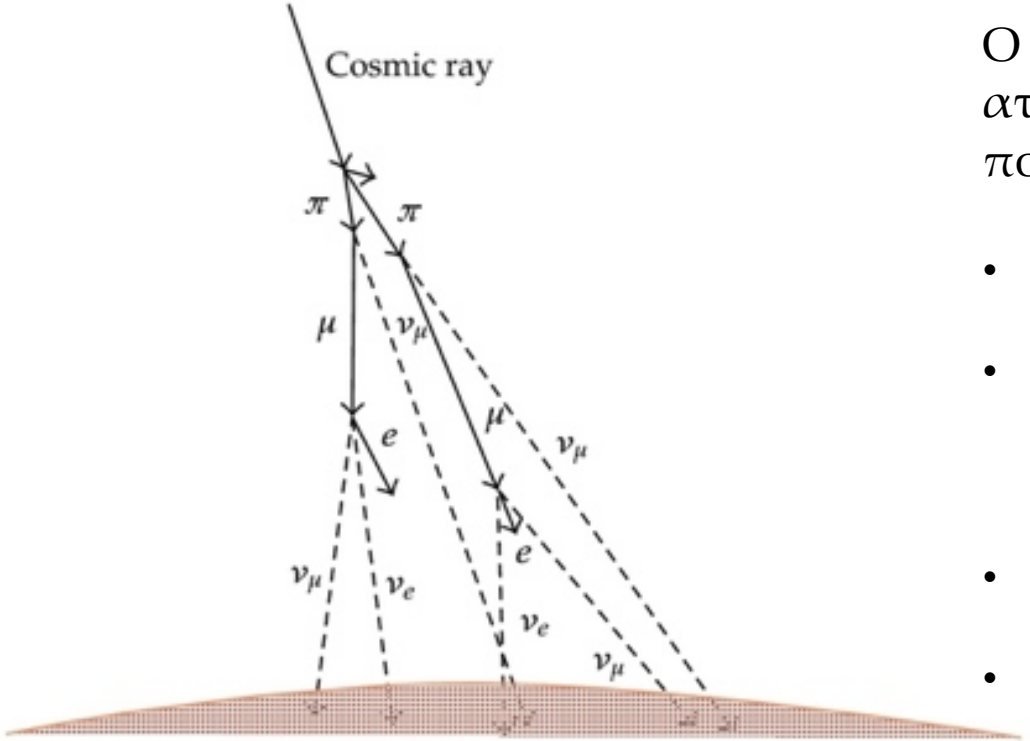
Αρκετά πειράματα κατασκευάστηκαν για να διαπιστώσουν αν το πρωτόνιο διασπάται. Τα ατμοσφαιρικά νετρίνα ήταν το σημαντικότερο υπόβαθρο και έτσι μελετήθηκαν.







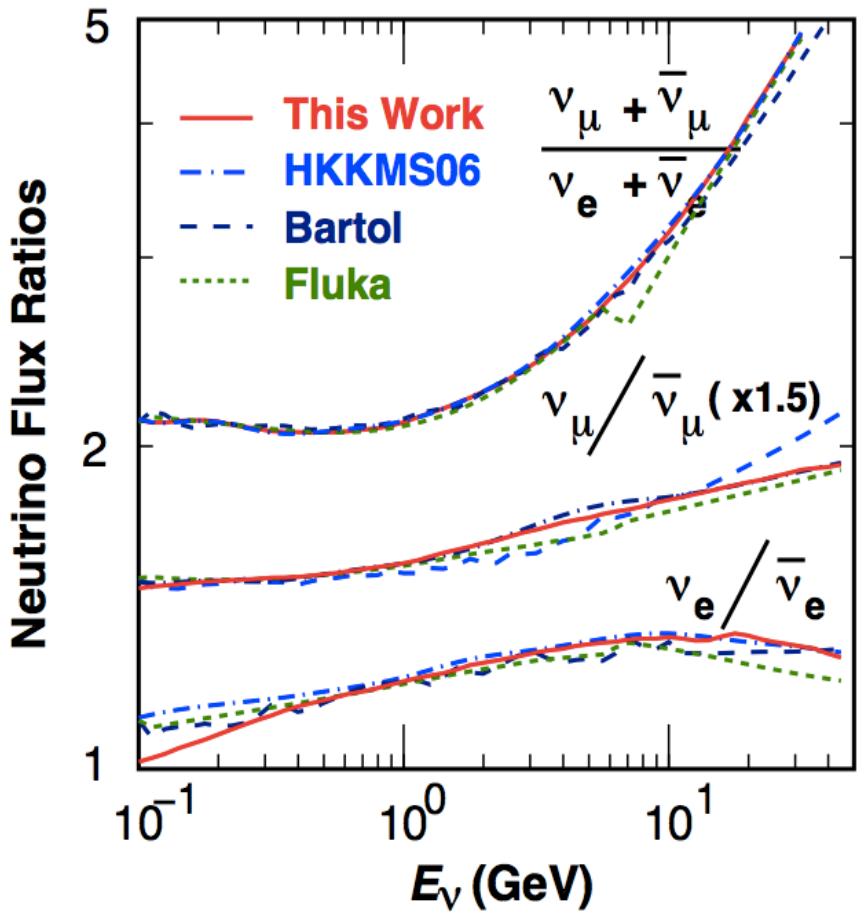
Η ροή των ατμοσφαιρικών νετρίνων



Ο υπολογισμός της ροής των ατμοσφαιρικών νετρίνων είναι πολύπλοκος και εξαρτάται:

- ροή της κοσμικής ακτονοβολίας
- την πιθανότητα (ενεργό διατομή) αλληλεπίδρασης κοσμικών ακτίνων με μόρια της ατμόσφαιρας
- την παραγωγή π,K
- την ηλιακή δραστηριότητα και το γεωμαγνητικό πεδίο

Η ροή των ατμοσφαιρικών νετρίνων



Η ροή των ατμοσφαιρικών νετρίνων δεν είναι καλά γνωστή

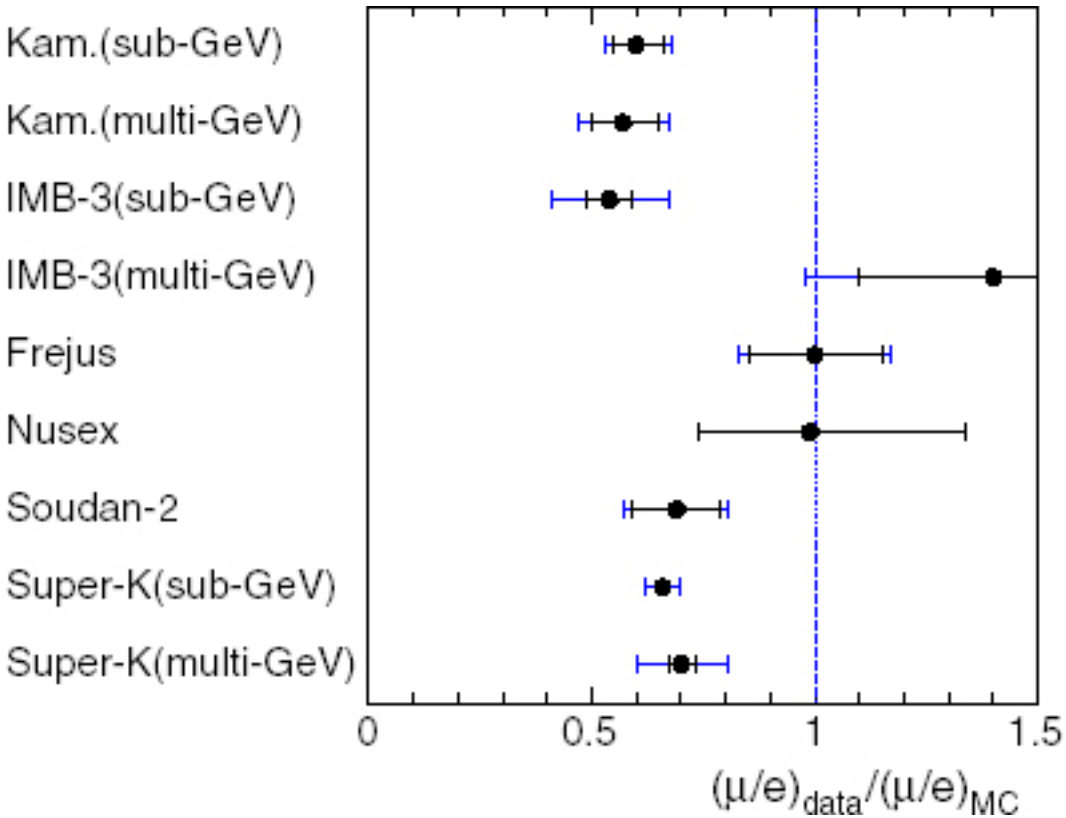
- ~10% < 10 GeV
- Μεγαλύτερη αβεβαιότητα σε υψηλότερες ενέργειες

Ομως:

Ο λόγος της ροής των μιονικων και ηλεκτρονικών νετρίνων είναι καλά γνωστός (3% για ενέργειες κάτω από ~10 GeV)

Η ροή είναι πάνω/κάτω - συμμετρική

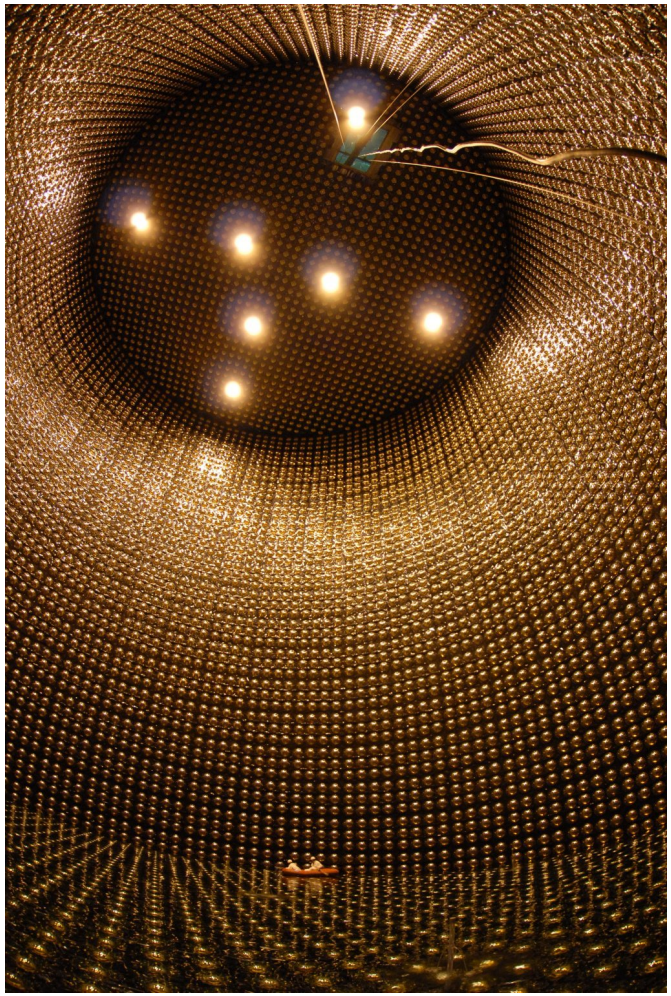
Το πρόβλημα των ατμοσφαιρικών νετρίνων

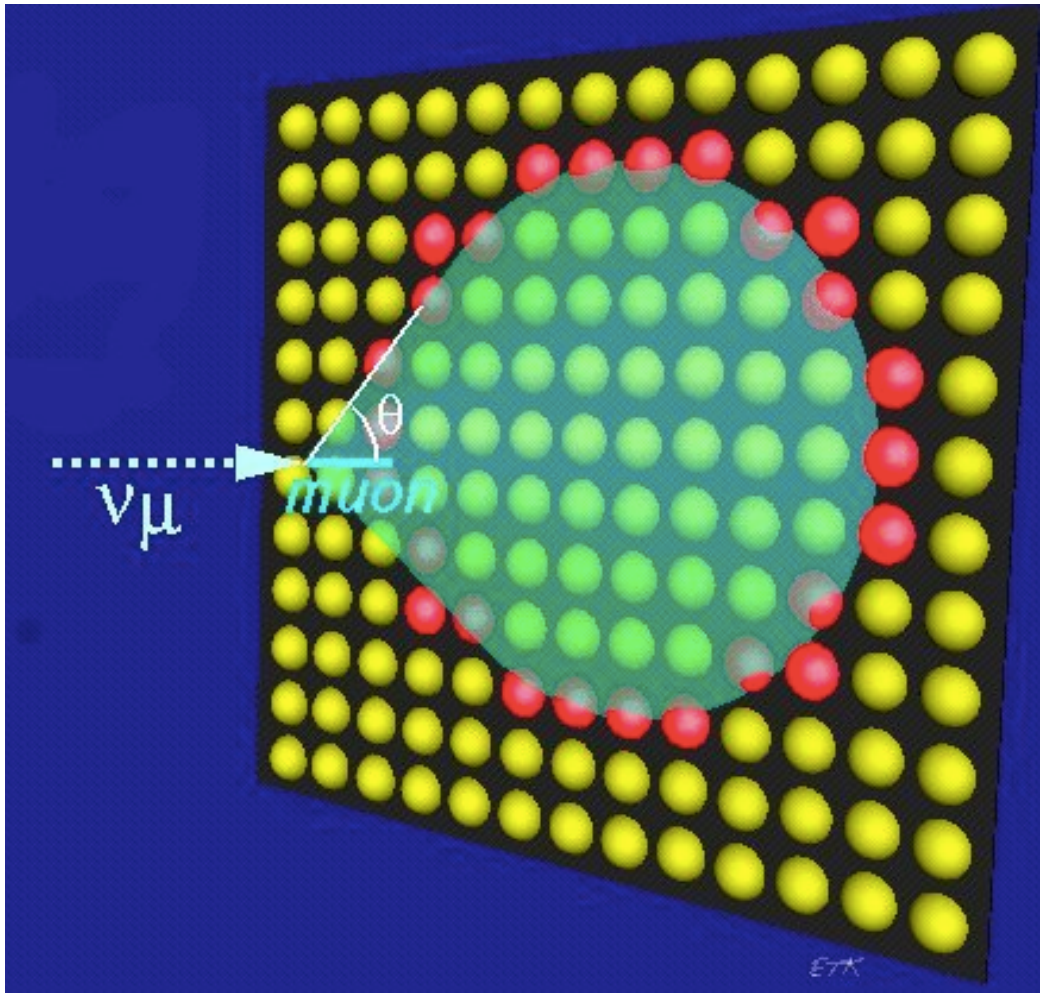


Τα πειράματα μέτρησαν μικρό λόγο ροής των μιονικων και ηλεκτρονικών νετρίνων

Αυτό έγινε γνωστό ώς
το πρόβλημα των
Ατμοσφαιρικών νετρίνων

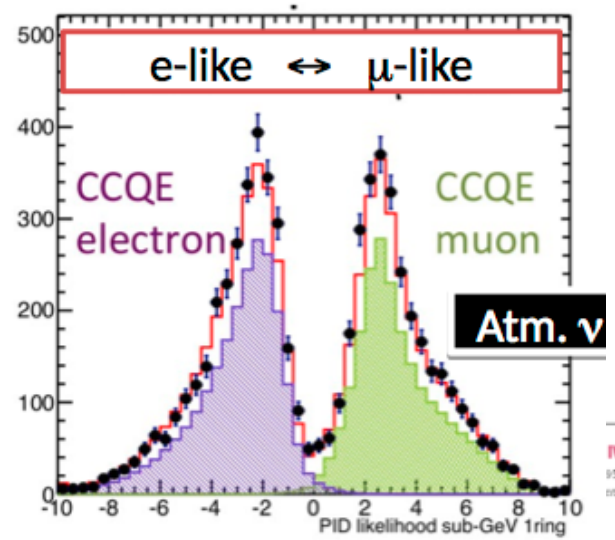
Ατμοσφαιρικά νετρίνα στο Super-Kamiokande



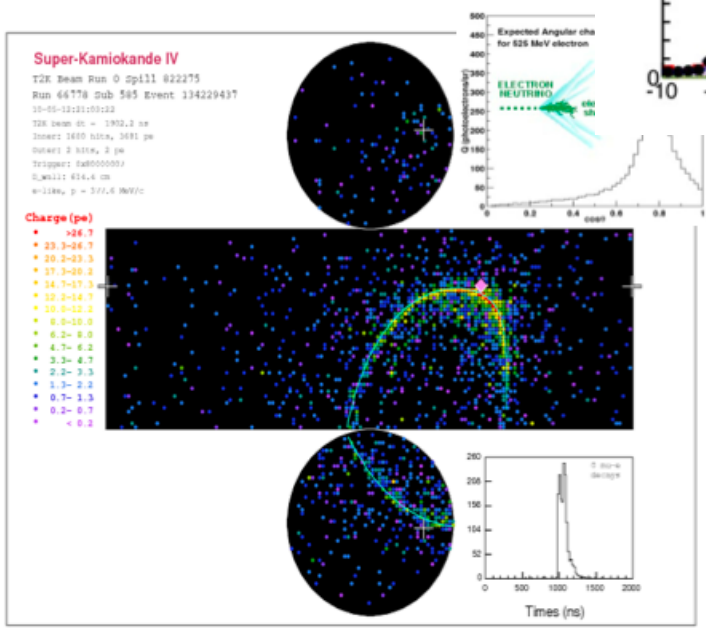


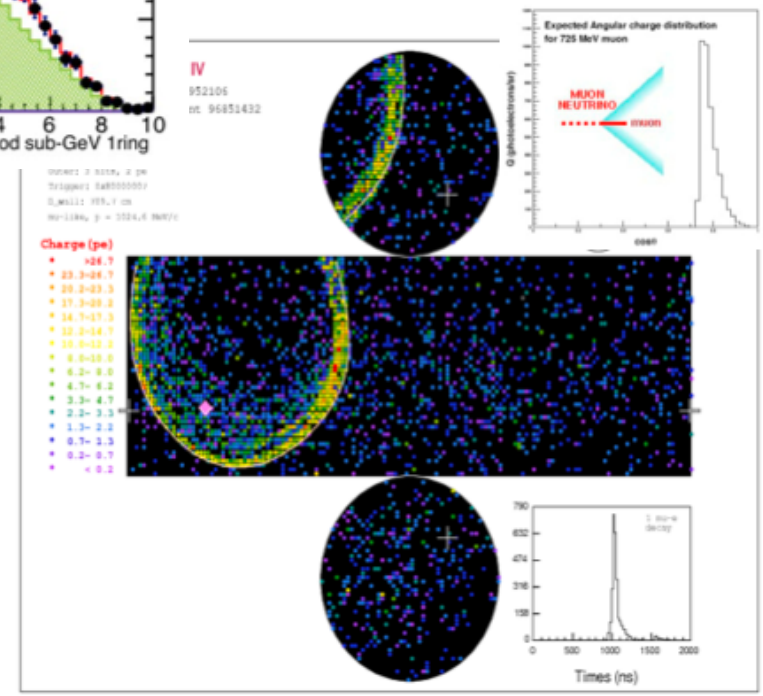
Ηλεκτονικό ή μιονικό νετρίνο;

ν_e

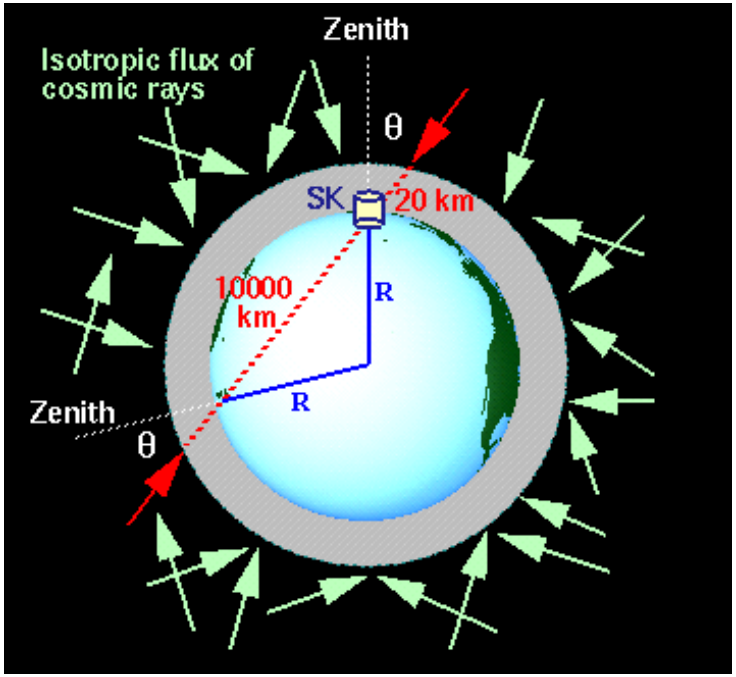


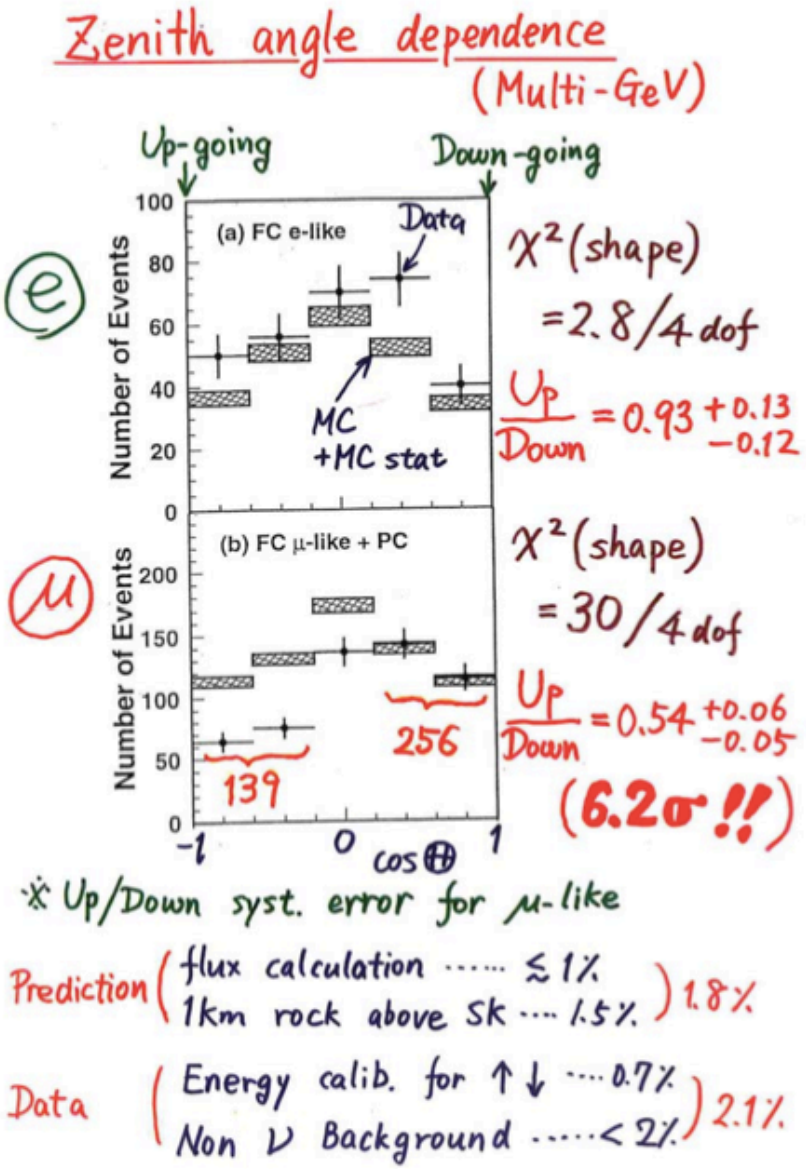
ν_μ



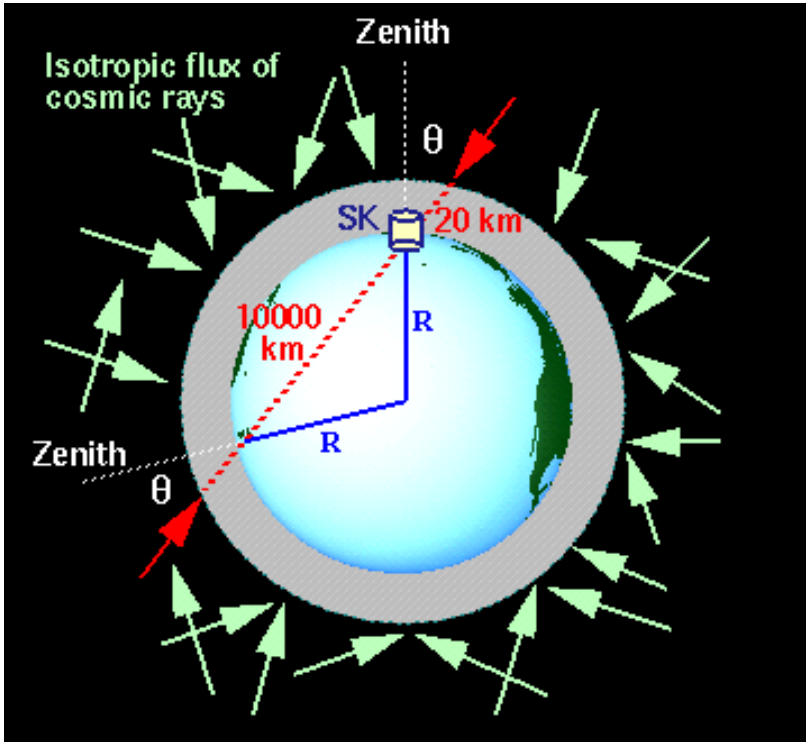


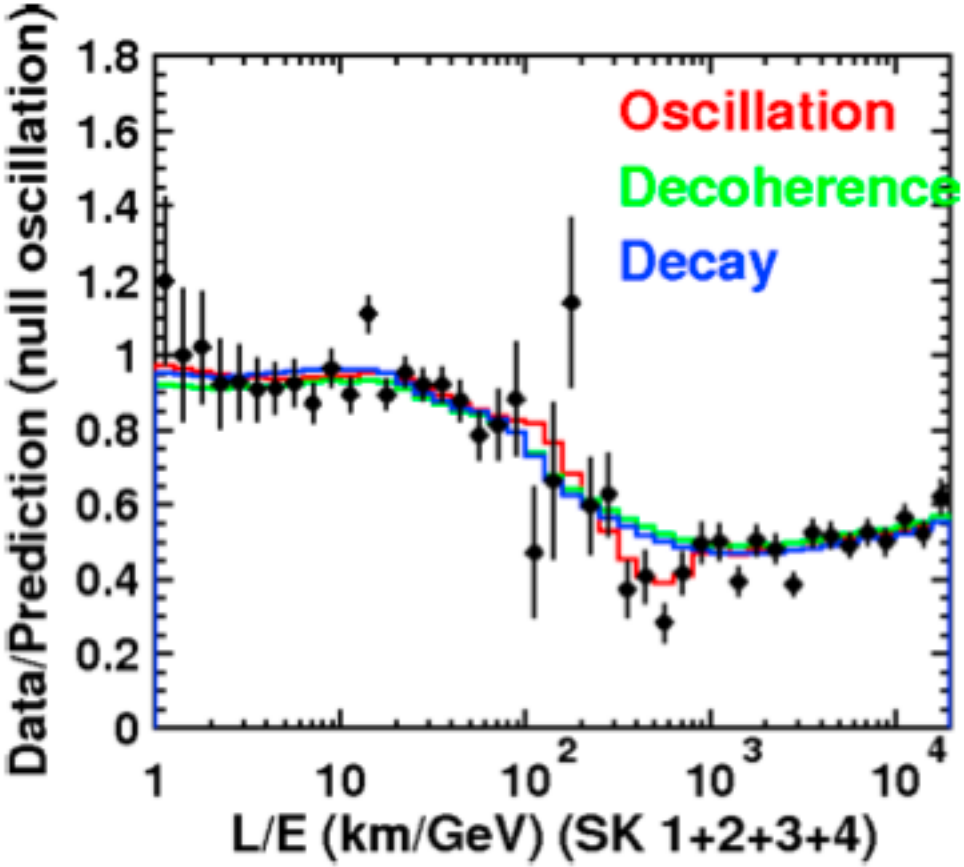
Ταλαντώσεις ;;





Ταλαντώσεις !!!



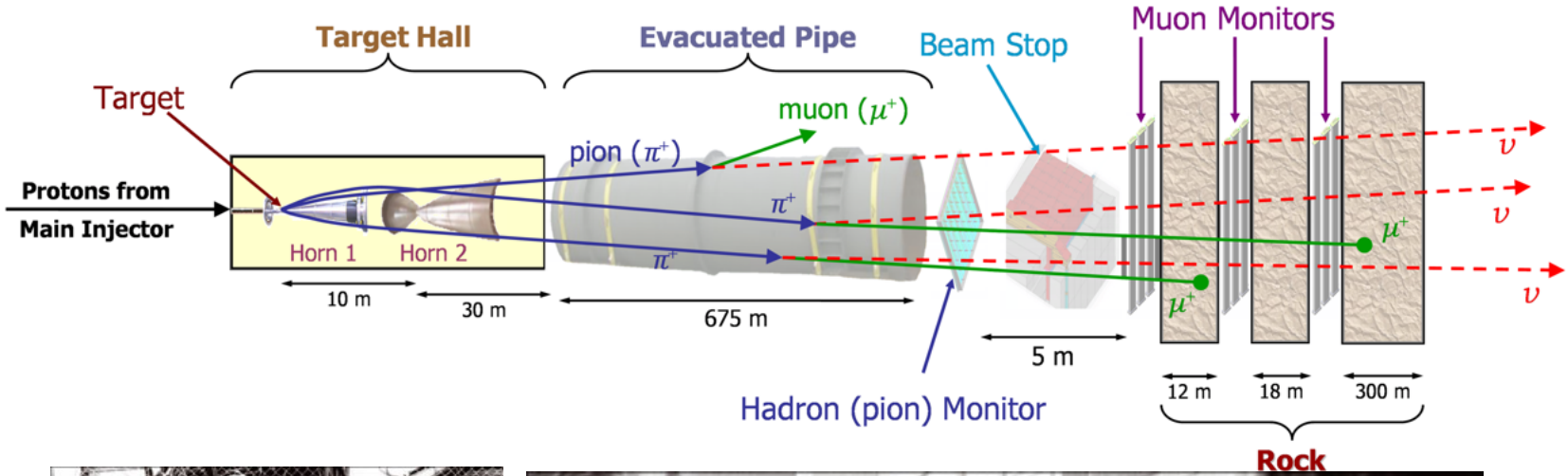


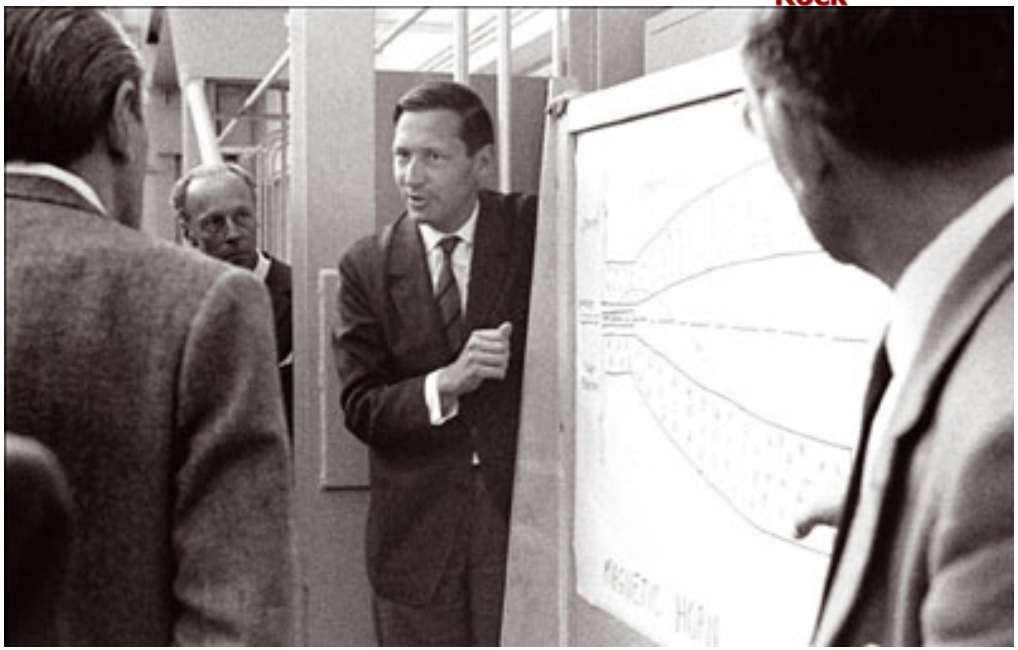
$$P_{\alpha\to\beta,\alpha\neq\beta} = \sin^2(2\theta)\,\sin^2\left(1.267\frac{\Delta m^2 L}{E}\frac{\mathrm{GeV}}{\mathrm{eV}^2\,\mathrm{km}}\right).$$

Ήταν πράγματι ταλαντώσεις η λύση στο πρόβλημα των ατμοσφαιρικών νετρίνων;

Για την επιβεβαίωση και, στη συνέχεια, για την πραγματοποίηση μετρήσεων ακριβείας χρειαζόμασταν πειράματα **με καλά ελεγχόμενες συνθήκες σε τεχνητή πηγή νετρίνων.**

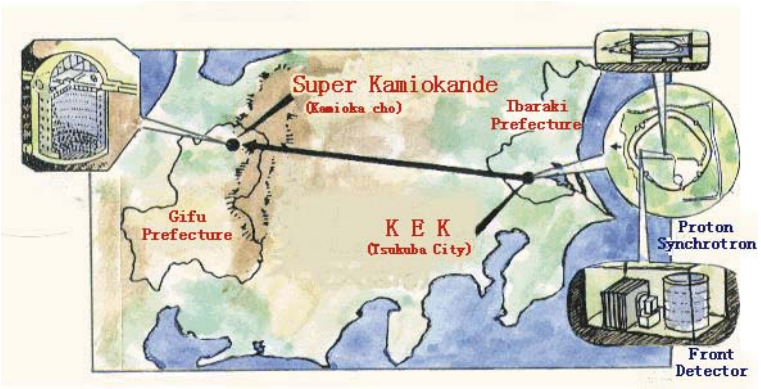
Φτιάχνοντας μια δέσμη νετρίνων





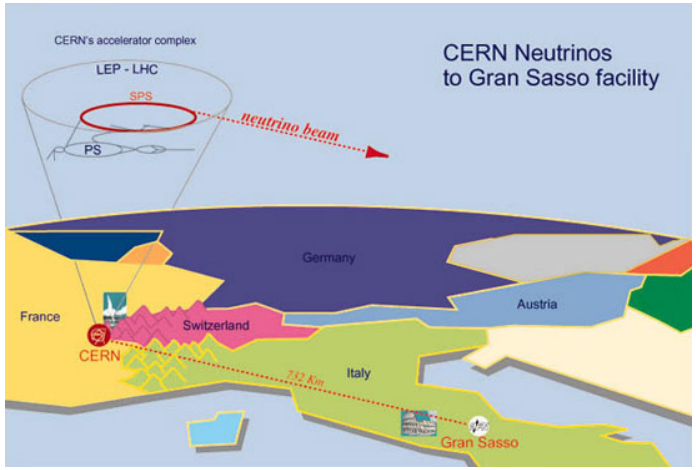
Πειράματα σε δέσμες νετρίνων

KEK to Kamioka (K2K)



Fermilab to Soudan (MINOS)

CERN to Gran Sasso (OPERA, ICARUS)

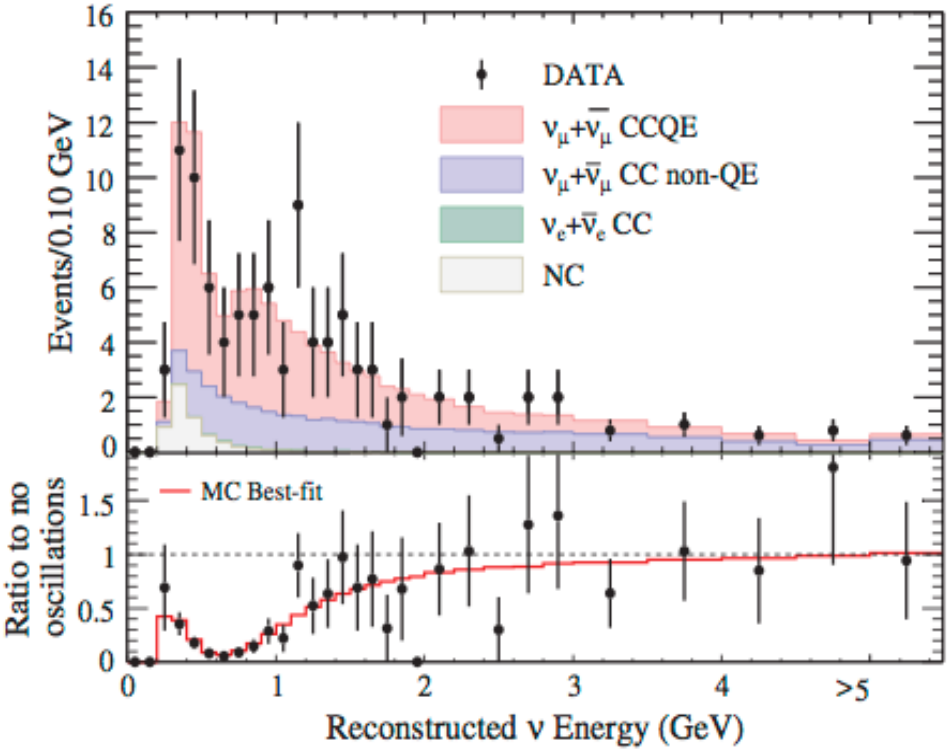


Νέα πειράματα σε δέσμες νετρίνων

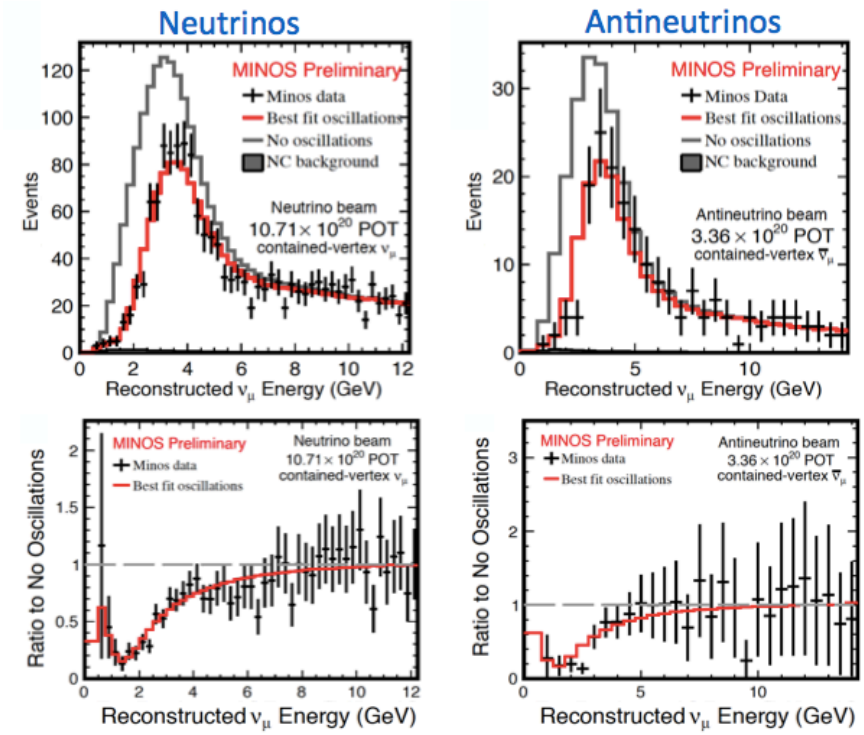
Fermilab to Ash River (Nova)

Tokai to Kamioka (T2K)

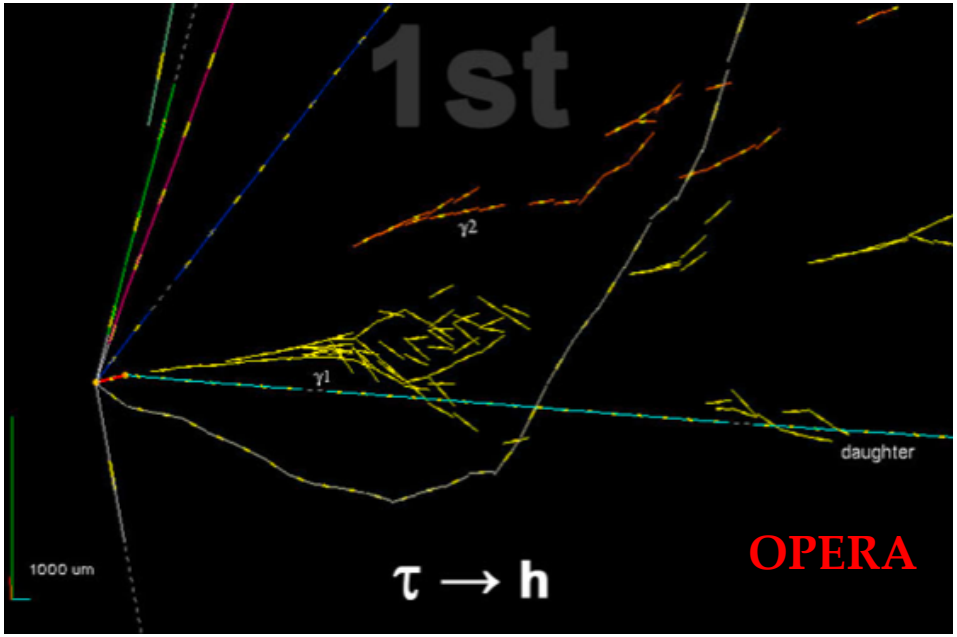
Αυτά τα πειράματα μπόρεσαν να μετρήσουν με ακρίβεια όχι μόνο ότι τα ν_μ εξαφανίζονται



T2K



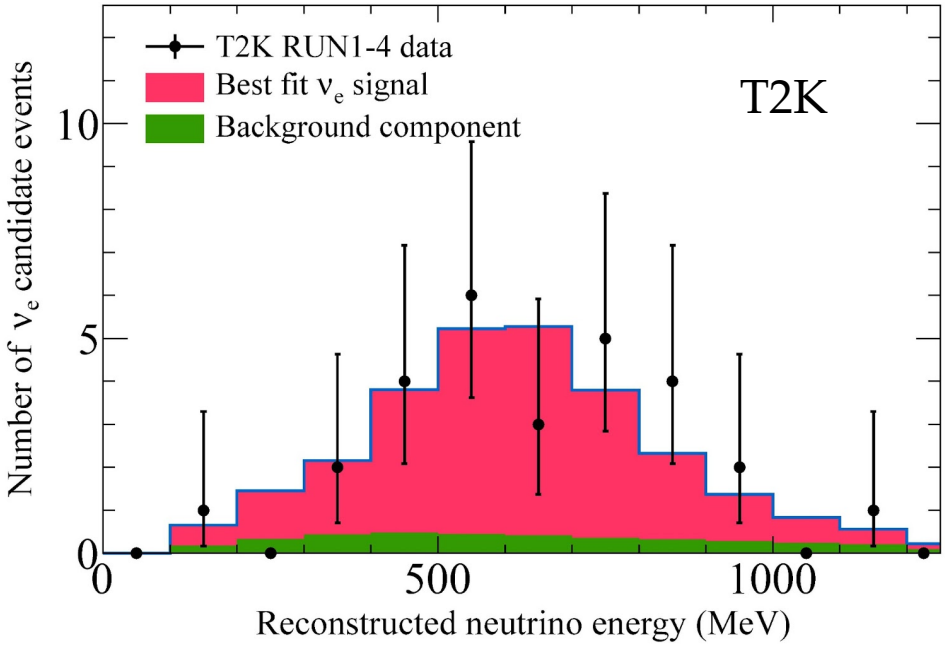
NOvA



αλλά και ότι ν_τ

και ν_e

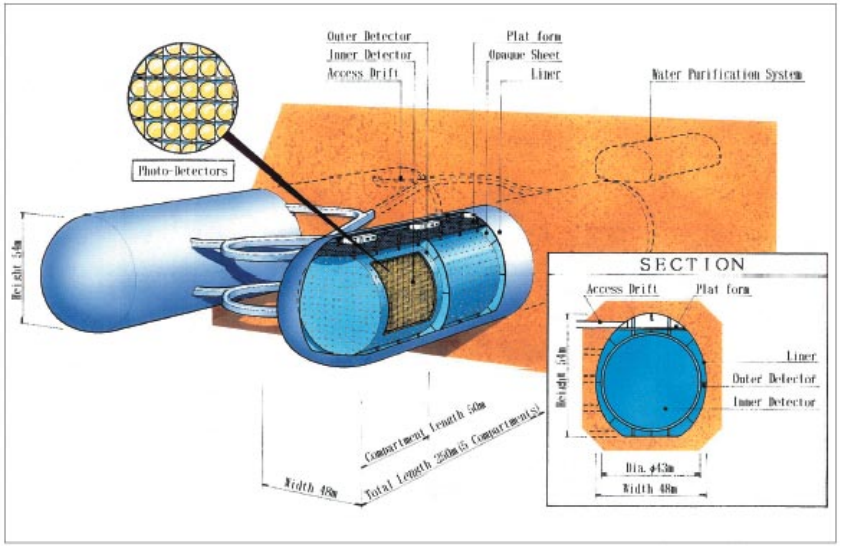
εμφανίζονται στη θέση τους



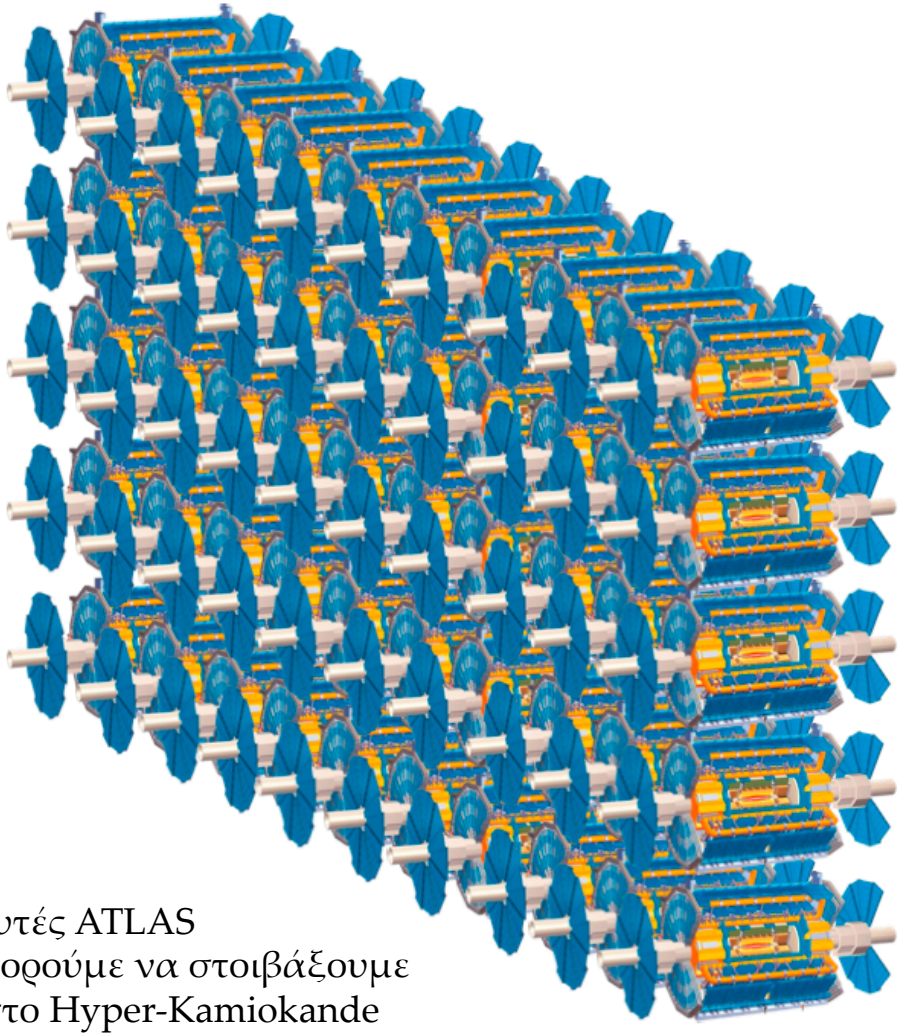
Η εικόνα των ταλαντώσεων νετρίνων
έχει επιβεβαιωθεί σε πλειάδα πειραμάτων
και αποτελεί ένα **πολύτιμο εργαλείο**
για να **κατανοήσουμε τα νετρίνα και τον κόσμο**

Τώρα σχεδιάζουμε μια νέα
μεγαλειώδη σειρά πειραμάτων

Όπως το Hyper-Kamiokande



1 Mega – τόννος
25 x Super-Kamiokande



Ανιχνευτές ATLAS
Που μπορούμε να στοιβάξουμε
Μέσα στο Hyper-Kamiokande

Και θα μας επιτρέψουν να χρησιμοποιήσουμε τις **ταλαντώσεις ώς εργαλείο** για να κατανοήσουμε το προβλημα της

ασυμμετρίας ύλης – αντιύλης Στο Σύμπαν

Θα κλείσω με έναν αριθμό…

10^{20}

100,000,000,000,000,000,000

10^{20}

100,000,000,000,000,000,000

Ο αριθμός των νετρίνων που πέρασαν μέσα από το σώμα σας ενώ παρακολουθούσατε αυτή την διάλεξη

Ευχαριστώ για την προσοχή σας