

Νετρίνα υπερ-υψηλών ενεργειών UHE

Πηγές γαλαξιακών νετρίνων Υψηλής Ενέργειας.

Έχουμε αναφέρει για τα υπολείμματα σουπερ νόβα σαν μηχανισμούς επιτάχυνσης και πηγές κοσμικών ακτίνων. Τα πρωτόνια υψηλής ενέργειας Είναι πιθανόν ένα πρωτόνιο να αντιδράσει με ένα πρωτόνιο του αερίου και να παραχθούν φορτισμένα και ουδέτερα πιόνια. Δηλαδή μια πηγή που παράγει φωτόνια μπορεί να παράγει και νετρίνα. Στο επόμενο διάγραμμα βλέπουμε τον καταμερισμό της ενέργειας στα δευτερογενή φωτόνια και νετρίνα. Η ενέργεια μοιράζεται εξ ίσου στα παραγόμενα πιόνια, όμως τα νετρίνα παίρνουν μικρότερο ποσοστό από την ενέργεια του πιονίου. Επίσης τα νετρίνα που παράγονται από τη διάσπαση των μιονίων έχουν ακόμη μικρότερο ποσοστό λόγω της διάσπασης σε 3 σώματα. Δηλαδή τα νετρίνα είναι μεν πολυπληθέστερα από τα φωτόνια αλλά με χαμηλότερη ενέργεια.

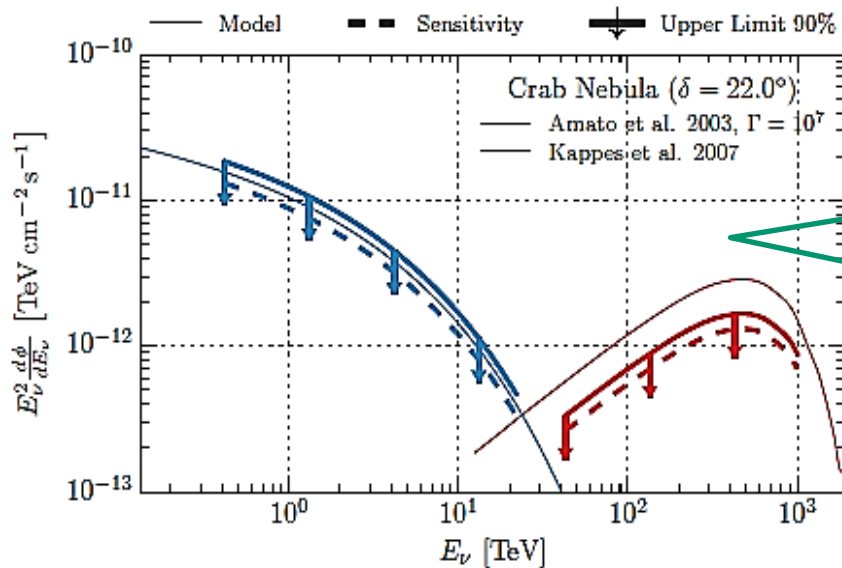
Παραγωγή νετρίνων στις πηγές

$$p + p \rightarrow p(n) + m\pi^0 + 2m\pi^\pm .$$

π^0	π^+				π^-				p
$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6}$				$\frac{1}{6}$				$\frac{1}{2}$
$\gamma \ \gamma$	e^+	ν_e	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	e^-	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	ν_μ	

$$E_\nu \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{4} = \frac{1}{24} E_p$$

Για μέτρια υψηλές ενέργειες, 50% της ενέργειας του αρχικού πρωτονίου πηγαίνει σε πιόνια. Κατά μέσον όρο οι δύο ακτίνες γ μοιράζονται εξ ίσου την ενέργεια του π^0 . Τα τελικά από τα φορτισμένα το ένα τέταρτο της ενέργειας του πιονίου. Έτσι η ενέργεια μοιράζεται εξ ίσου στα ηλεκτρομαγνητικά σωματίδια και τα νετρίνα. Τα φωτόνια έχουν μεγαλύτερη ενέργεια ανά σωματίο από τα νετρίνα λόγω αριθμού.



Παραγωγή νετρίνων, υπολογισμός σύμφωνα με το φάσμα φωτονίων του Crab

Φάσμα φωτονίων του Crab

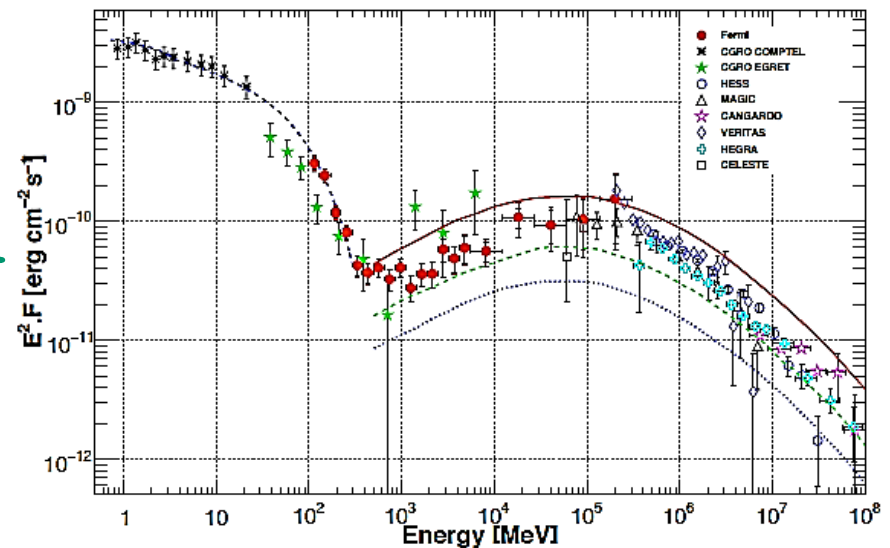


Fig. 4. Broad-band spectral energy distribution (SED) of the Crab Nebula (see for details 1

Πηγές εξωγαλαξιακών νετρίνων

Από μηχανισμούς επιτάχυνσης:

1. Πυρήνες AGN
2. Jet AGN
3. Gamma Ray Bursts

Ενεργειακό φάσμα εξωγαλαξιακών: $E \propto E^{-2}$

Ενεργειακό φάσμα ατμοσφαιρικών : $E \propto E^{-2.7}$

Παραγωγή νετρίνων σε εξωγαλαξιακές πηγές

$$p + \gamma \rightarrow \pi^{\pm} + \dots$$

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu} (\bar{\nu}_{\mu})$$

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

Η Πυκνότητα της ύλης στις περιοχές επιτάχυνσης των AGN είναι μικρή και προφανώς η πιθανότητα για αντίδραση $p+\gamma$.

Η φωτοπαραγωγή είναι δυνατή όταν είναι μεγάλη η πυκνότητα των φωτονίων στην περιοχή επιτάχυνσης.

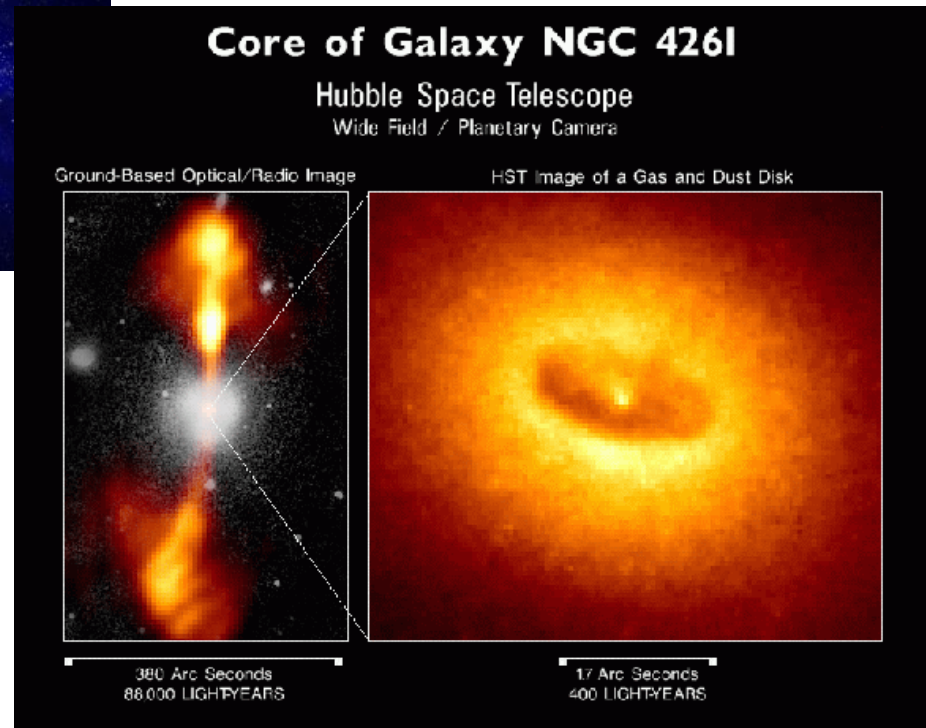
Οι ίδιες πηγές που παράγουν UHE φωτόνια, πρέπει να παράγουν νετρίνα μετά από διάσπαση των φορτισμένων πιονίων.

Πιθανοί μηχανισμοί σε AGN.

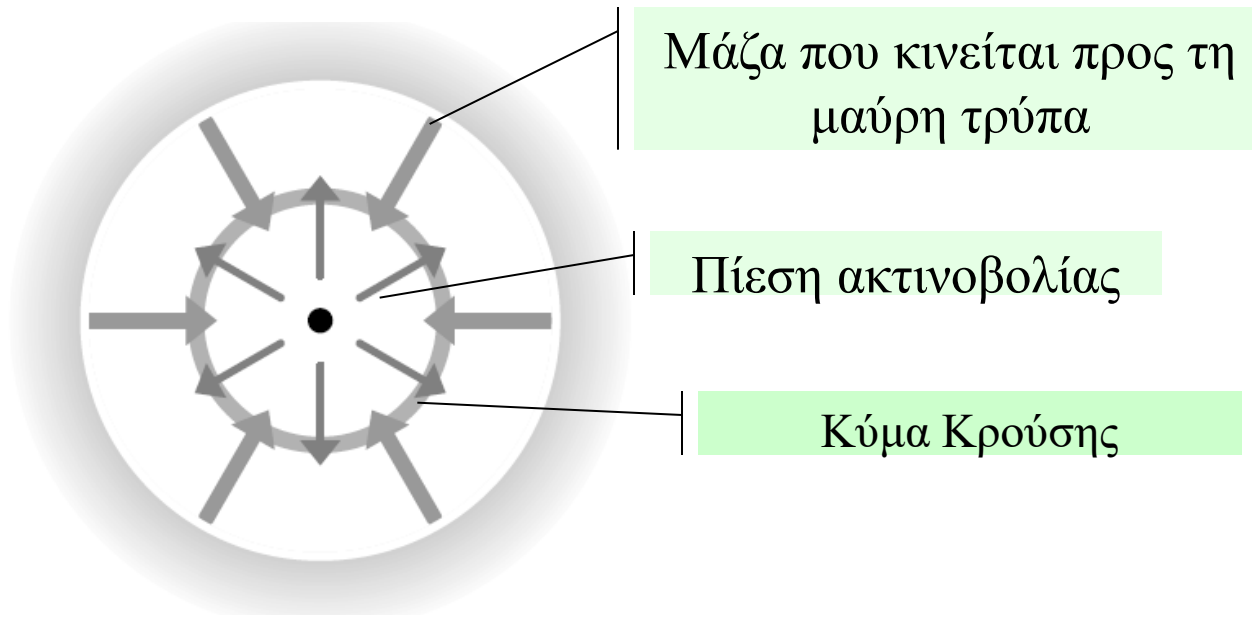
Τα AGN αποτελούν κοσμικούς επιταχυντές πρωτονίων, οποία μπορούν να αντιδράσουν με τα πρωτόνια του αερίου και στη συνέχεια να δώσουν φωτόνια και νετρίνα. Τα νετρίνα όπως και τα φωτόνια, ταξιδεύουν ευθύγραμμα και δείχνουν στην κατεύθυνση της πηγής! Αν η πυκνότητα των φωτονίων στην πηγή είναι μεγάλη, μπορούμε να έχουμε φωτοπαραγωγή πιονίων και στη συνέχεια διάσπαση τους.

Τα πρωτόνια με υπερυψηλές ενέργειες αντιδρούν στη διαδρομή με το μικροκυματικό υπόβαθρο και παράγουν πιόνια κλπ.

Πιθανοί μηχανισμοί σε AGN.

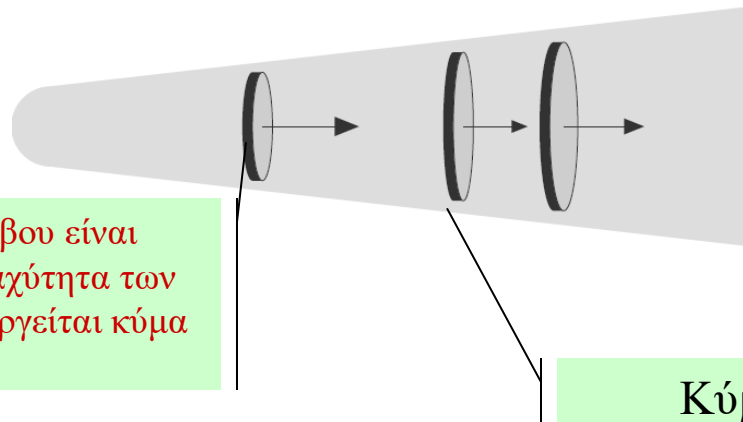


Επιτάχυνση στην περιοχή της συσσώρευσης (Accretion disk)



Τα πρωτόνια παραμένουν δεσμευμένα στο μαγνητικό πεδίο και οι ακτίνες γ αντιδρούν και τελικά καταλήγουν σε θερμικές ενέργειες. Μόνον τα νετρίνα μπορούν να διαφύγουν. Η απόδειξη του μοντέλου απόκειται στην ανίχνευση των νετρίνων.

Επιτάχυνση στα τζετ



Η ταχύτητα του κόμβου είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα των προηγούμενων. Δημιουργείται κύμα κρούσης,

Κύμα Κρούσης

Για παραγωγή ακτίνων με $E=10^{20}$ eV, χρειάζεται μαγνητικό πεδίο περίπου 1 G . Το μήκος των τζετ μπορεί να φθάσει το 0.2 pc.

Τα νετρίνα παράγονται από διάσπαση πιονίων που δημιουργήθηκαν μέσω φωτοπαραγωγής. Τα μοντέλα προβλέπουν ενέργειες νετρίνων από 10^{16} μέχρι 10^{18} eV. Το ενεργειακό φάσμα προβλέπεται με μορφή E^{-2} όπως των ακτίνων γ . Οι παρατηρήσεις ακτίνων γ UHE από AGN ενισχύουν την υπόθεση.

Πιθανοί μηχανισμοί σε AGN.

Τα AGN αποτελούν κοσμικούς επιταχυντές πρωτονίων, οποία μπορούν να αντιδράσουν με τα πρωτόνια του αερίου και στη συνέχεια να δώσουν φωτόνια και νετρίνα. Τα νετρίνα όπως και τα φωτόνια, ταξιδεύουν ευθύγραμμα και δείχνουν στην κατεύθυνση της πηγής! Αν η πυκνότητα των φωτονίων στην πηγή είναι μεγάλη, μπορούμε να έχουμε φωτοπαραγωγή πιονίων και στη συνέχεια διάσπαση τους.

Επίσης μπορούν να διαφύγουν νετρόνια, τα οποία θα διασπαστούν και θα δώσουν ηλεκτρονικά νετρίνα.

Τα πρωτόνια με υπερυψηλές ενέργειες, αντιδρούν στη διαδρομή με το μικροκυματικό υπόβαθρο και παράγουν πιόνια κλπ.

Αντιδράσεις πρωτονίων στο νέφος που περιβάλλει την πηγή.

Κατά την αντίδραση των πρωτονίων με τα φωτόνια της πηγής, παράγονται σε ποσοστό 33%, νετρόνια. Τα νετρόνια διαφεύγουν ευκολότερα από την περιοχή επιτάχυνσης γιατί δεν επηρεάζονται από το μαγνητικό πεδίο. Τα νετρόνια διασπώνται σε :

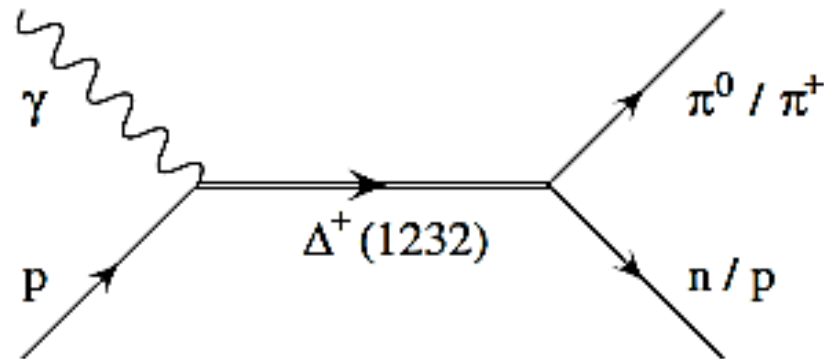
$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$$

Τα ν_e, ν_μ παράγονται με λόγο περίπου $\nu_e : \nu_\mu \rightarrow 1:4$. Η απόσταση είναι πολύ μεγάλη και μετά την ταλάντωση, ο λόγος $\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau \rightarrow 1:1:1$

Τα νετρίνα παίρνουν κατά μέσον όρο, το 1/24 της ενέργειας του αρχικού πρωτονίου.

Από αντιδράσεις πρωτονίων στο μικροκυματικό υπόβαθρο.

Μετά την αντίδραση των πρωτονίων στο μικροκυματικό υπόβαθρο, παράγονται πόνια και νετρόνια, τα οποία στη συνέχεια διασπώνται.



Ενεργός Διατομή Νετρίνων Υψηλής Ενέργειας

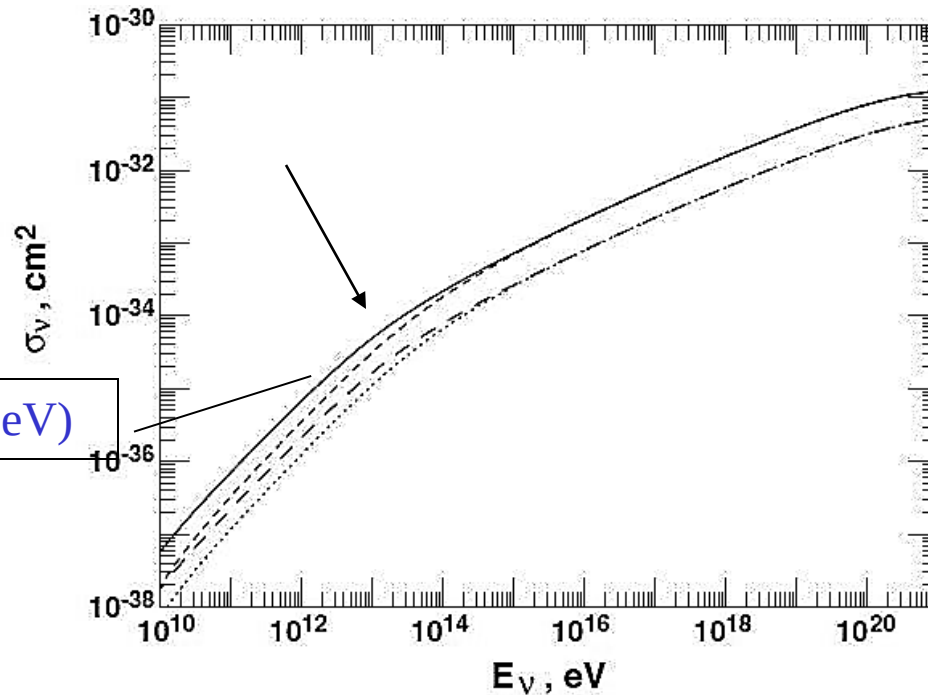


Fig. 10.2. Cross-sections for deep inelastic neutrino scattering. Neutrino CC cross-section is plotted with a solid line, the antineutrino with short dashes. The NC cross-section for neutrinos are plotted with long dashes, and for antineutrinos with a dotted line.

Ανιχνευτές Αστροφυσικών Νετρίνων

Η ροή των αστροφυσικών νετρίνων είναι εξαιρετικά μικρή, άρα ο ανιχνευτής πρέπει να έχει μεγάλη μάζα.

Η ροή των ατμοσφαιρικών νετρίνων είναι 10^6 φορές μεγαλύτερη.

Έτσι σχεδιάστηκαν ανιχνευτές υποθαλάσσιοι και ανιχνευτές στον πάγο.

Για να θωρακιστούν από την ροή των κοσμικών μιονίων πρέπει να κατασκευαστούν σε μεγάλα βάθη .

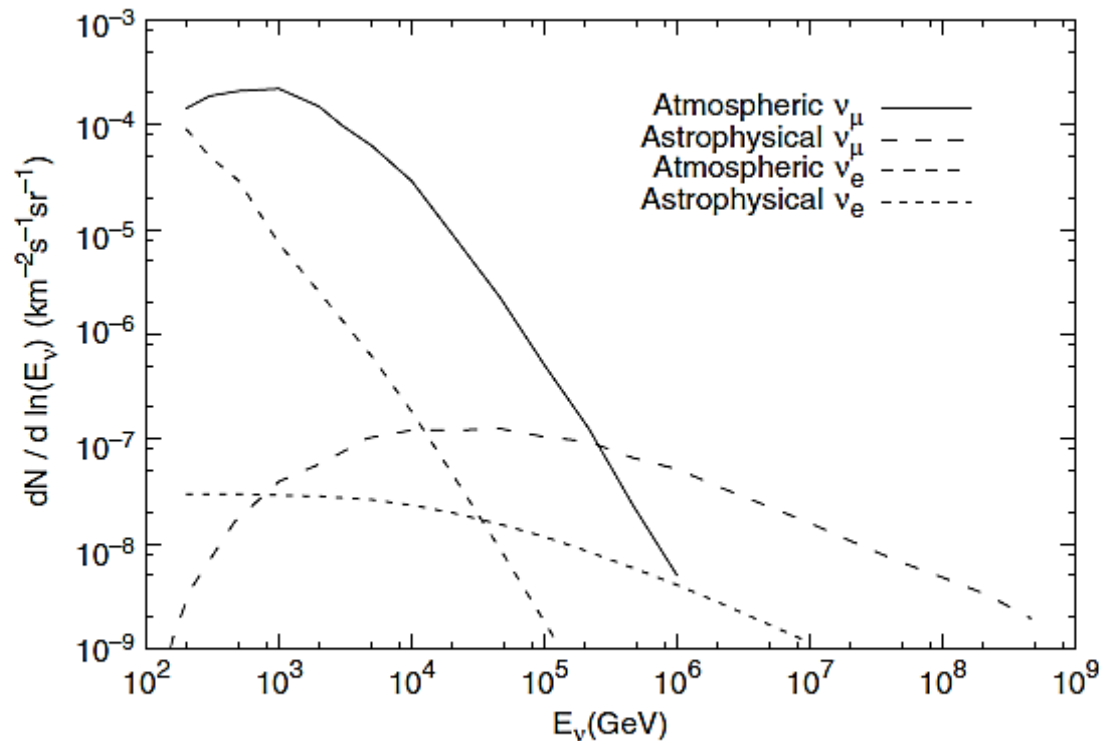
Οι μελέτες για τους υποθαλάσσιους ανιχνευτές ξεκίνησαν από το 1975 (project DUMAND) . Η υλοποίηση του προγράμματος διακόπηκε λόγω τεχνικών δυσκολιών. Αντίστοιχη προσπάθεια έγινε με το πείραμα NESTOR που διακόπηκε λόγω έλλειψης χρηματοδότησης. Το γαλλικό πείραμα ANTARES λειτούργησε για αρκετά χρόνια.

Η προσπάθεια που πέτυχε ήταν το πείραμα ICE CUBE που κατασκευάστηκε στον πάγο του Νότιου Πόλου.

Ρυθμός γεγονότων για 1 km³

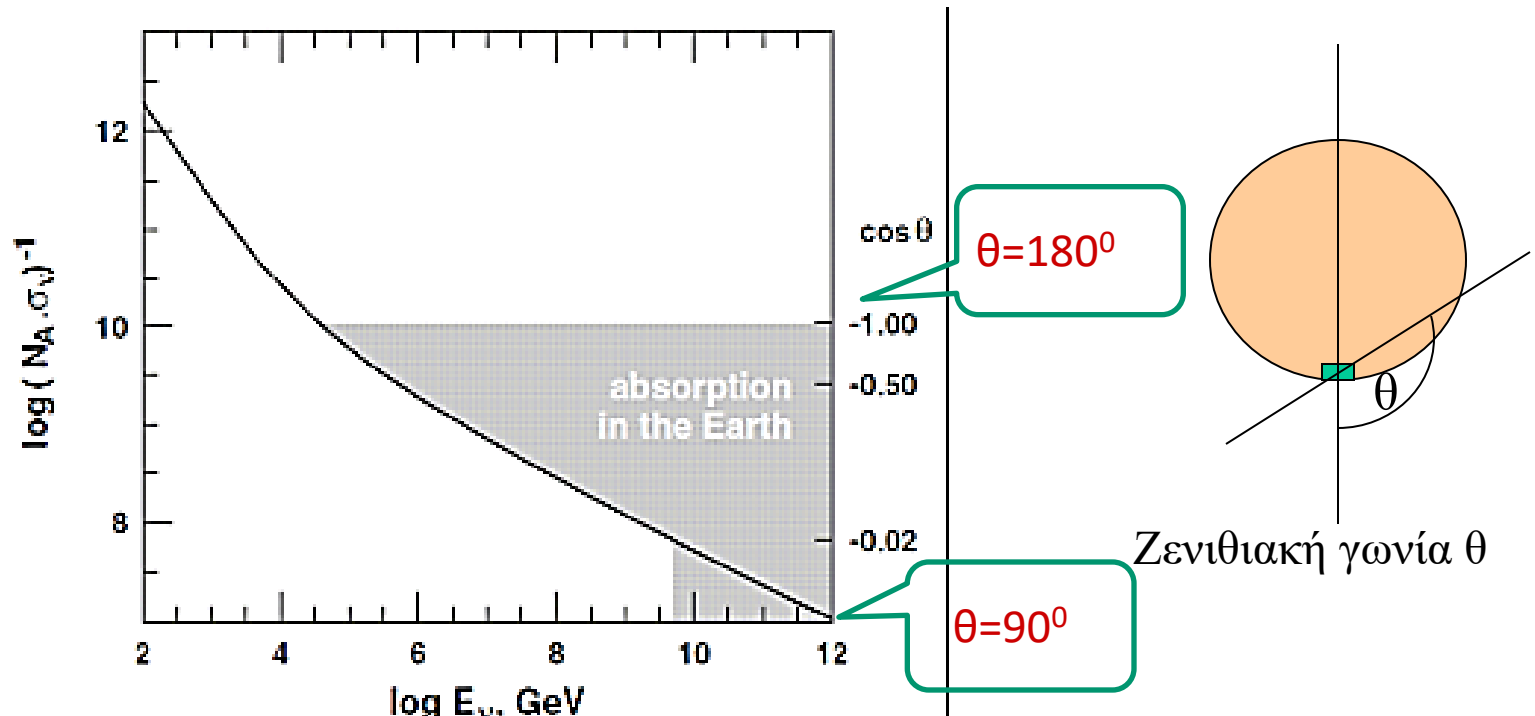
18.3 Signals and backgrounds in a neutrino detector

3



Τα αστροφυσικά νετρίνα έχουν σκληρότερο φάσμα που επεκτείνεται σε υψηλότερες ενέργειες. Πρακτικά πάνω από 10^5 GeV, τα νετρίνα που ανιχνεύονται, προέρχονται από αστροφυσικές πηγές.

Απορρόφηση νετρίνων στη γη



Όταν η Ενέργεια γίνει μεγαλύτερη από $5 \cdot 10^4 \text{ GeV}$ η γη δεν είναι πια διαφανής στα νετρίνα. Για μεγαλύτερη από $5 \cdot 10^9 \text{ GeV}$, όλο το Νότιο ημισφαίριο γίνεται αδιαφανές.

Πειράματα (ICECUBE)

Για να ανιχνεύσουμε τα κατερχόμενα νετρίνα, χρησιμοποιούμε:

- Ανίχνευση καταιονισμών που δημιουργούνται από ν_e , όπου όλη η ενέργεια πηγαίνει στον καταιονισμό.
- Ανίχνευση καταιονισμών που δημιουργούνται από ουδέτερα ρεύματα, όπου μεγάλο μέρος της ενέργειας που δεν πηγαίνει στο νετρίνο καταλήγει στον καταιονισμό.
- Ανίχνευση μιονίων που παράγονται στο χώρο του ανιχνευτή.
- Ανίχνευση μιονίων που παράγονται έξω από τον όγκο του ανιχνευτή

Αντιδράσεις ανίχνευσης νετρίνων

CC φορτισμένου ρεύματος

- a) $\nu_\mu \rightarrow \mu + \text{shower}$
- b) $\nu_\tau \rightarrow \tau + \text{shower} + \nu_\tau$
- c) $\nu_e \rightarrow \text{EM} + \text{hadr shower}$

NC ουδέτερου ρεύματος

- d) $\nu \rightarrow \text{hadr shower}$

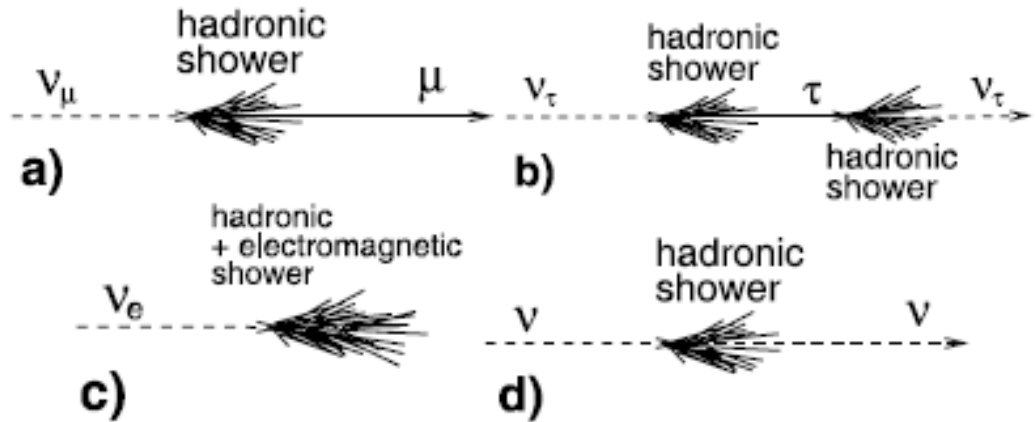


Fig. 11 Some event signature topologies for different neutrino flavors and interactions: (a) CC interaction of a ν_μ produces a muon and a hadronic shower; (b) CC interaction of a ν_τ produces a τ that decays into a ν_τ , tracing the double bang event signature. (c) CC interaction of ν_e produces both an EM and a hadronic shower; (d) a NC interaction produces a hadronic shower. Particles and anti-particles cannot be distinguished in neutrino telescopes. From [165]

Η ανίχνευση γίνεται με:

- *Ανίχνευση της τροχιάς του μιονίου.*
- *Ανίχνευση Η.Μ. καταιονισμού από το e^- (100% Ενέργειας)*
- *Ανίχνευση Αδρονικού καταιονισμού. (26% Ενέργειας).*
- *Στα τηλεσκόπια νετρίνων δεν διαχωρίζονται σωματίδια από αντισωματίδια.*

Αντιδράσεις ανίχνευσης νετρίνων

Αντιδράσεις φορτισμένου ρεύματος CC.

α) Ένα μυονικό νετρίνο δημιουργεί ένα μιονίο και έναν αδρονικό καταιονισμό από το νουκλεόνιο του στόχου.

$$\nu_{\mu} \rightarrow \mu + \text{shower}$$

Μετρούν την ενέργεια του μιονίου και του καταιονισμού.

β) Ένα τάου νετρίνο δημιουργεί ένα τάου και αδρονικό καταιονισμό. Το ταου διασπάται σε αδρόνια, και νετρίνο τάου .

$$\nu_{\tau} \rightarrow \tau + \text{shower} + \nu_{\tau}$$

Επειδή το μήκος διάσπασης του τάου είναι πολύ μικρό οι δύο καταιονισμοί δεν ξεχωρίζουν .

Αν η ενέργεια του νετρίνου είναι πολύ μεγάλη, τότε θα εμφανιστούν δυο διαδοχικοί καταιονισμοί. Παράδειγμα για ενέργια 1 PeV η απόσταση θα είναι περίπου 50 m.

Αντιδράσεις ανίχνευσης νετρίνων

c) Ένα ηλεκτρονικό νεutrίνο θα δημιουργήσει ένα ηλεκτρόνιο το οποίο με τη σειρά του θα δώσει H.M. καταιονισμό. Επίσης δημιουργεί έναν αδρονικό καταιονισμό ο οποίος συμπίπτει και έτσι μετρούν ολική ενέργεια.

$\nu_e \rightarrow \text{EM} + \text{hadr shower}$

d) Στις αντιδράσεις ουδετέρων ρευμάτων δημιουργείται αδρονικός καταιονισμός με ποσοστό ενέργειας 25%, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια πηγαίνει στο νεutrίνο που φεύγει.

$\nu \rightarrow \text{hadr shower}$

e) δεν υπάρχει τρόπος να διαχωριστούν οι αντιδράσεις αντνετρίνων.

Υπολογισμός ενέργειας

Τα φορτισμένα σωματίδια των καταιονισμών παράγουν φως Cerenkov το οποίο ανιχνεύουν οι PMT και υπολογίζουμε την ενέργεια του καταιονισμού.

Τα μίονια δημιουργούν ακτινοβολία πέδης κατά μήκος της τροχιάς τους, από την οποία υπολογίζουν την ενέργεια τους.

Από τα παραπάνω η μετρούμενη ενέργεια αντιστοιχεί στο σύνολο της ενέργειας των νετρίνων στις περιπτώσεις a) και c) ενώ ένα ποσοστό στις

b) και d). Στη πράξη όμως δεν μπορεί να γίνει διάκριση στις περιπτώσεις αδρονικών καταιονισμών και γι' αυτό η ενέργεια που μετριέται, αναφέρεται σαν κατώτερο όριο.

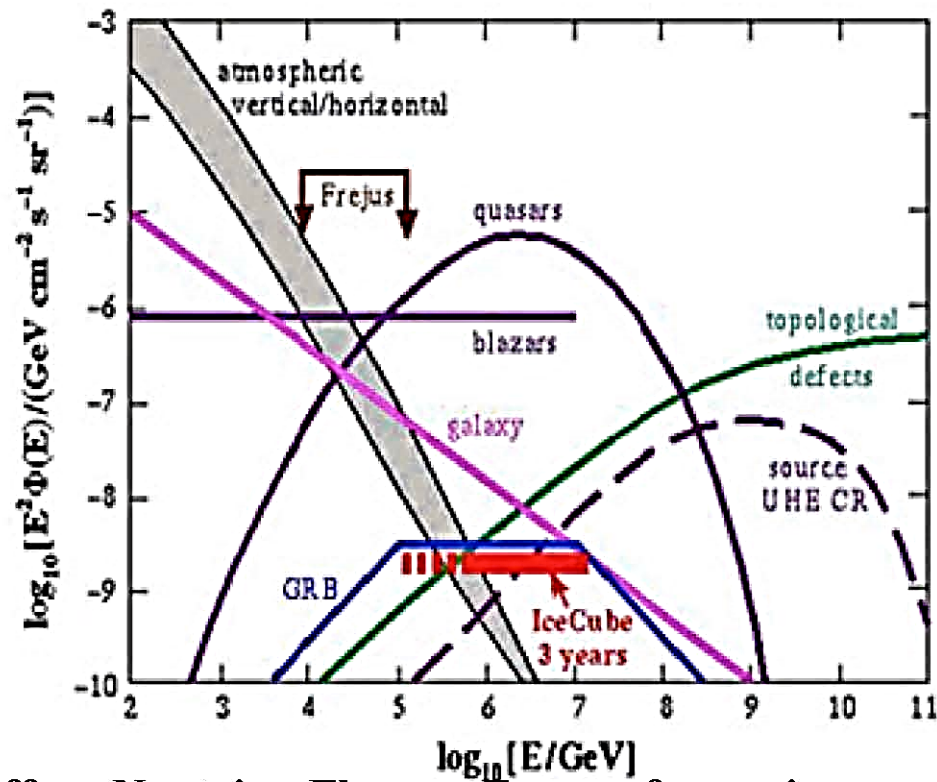
Προσδιορισμός διεύθυνσης νετρίνου.

Στις αντιδράσεις με μόνιο στην τελική κατάσταση, το μόνιο παράγεται στην διεύθυνση του νετρίνου με ακρίβεια $< 1^\circ$.

Στις αντιδράσεις με καταιονισμό στη τελική κατάσταση, το τυπικό μήκος καταιονισμού είναι περίπου 10 m , περίπου ίσο με την απόσταση ανάμεσα στους PMT , και για τον λόγο αυτό, η ακρίβεια στην αρχική διεύθυνση περιορίζεται σε $< 15^\circ$.

Τα μόνια χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των πηγών.

Υπολογισμοί Ροής Νετρίνων σε πολύ Υψηλές Ενέργειες



Παρατηρούμε πρώτα τη ροή των ατμοσφαιρικών νετρίνων, που πέφτει απότομα (γκρίζα ζώνη). Από τα 100 GeV μέχρι τα 10^6 GeV έχει μειωθεί κατά 6 τάξεις μεγέθους! Οι υπόλοιπες καμπύλες προκύπτουν από τα διάφορα θεωρητικά μοντέλα για διάφορες πηγές. Στην περιοχή πάνω από 10^5 GeV τα περισσότερα γεγονότα, πρέπει να προέρχονται από εξωγήινες πηγές.

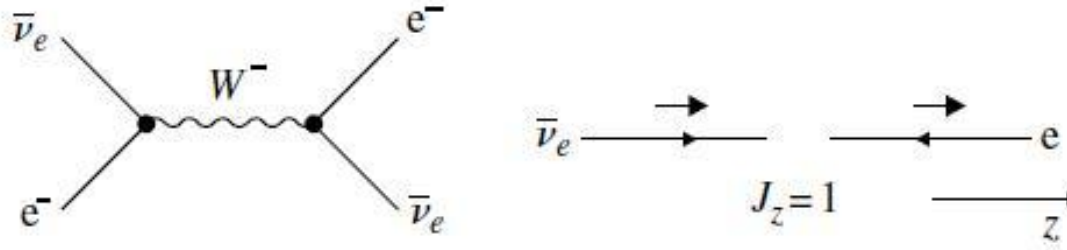
Ενδιαφέροντα φαινόμενα που
περιμένουμε στο ICECUBE.

Αλλά δεν έχουν παρατηρηθεί ακόμη.

Συντονισμός Glashow

S. L. Glashow Phys. Rev 118 (1960) 316-317.

D. Perkins σελ. 68



Η σκέδαση του αντι ν_e σε ηλεκτρόνιο, γίνεται με την μεσολάβηση ενός μποζονίου W . Στον τύπο της ενεργής διατομής εμφανίζεται ο όρος

$$\left(1 - \frac{2m_e E_\nu^2}{m_w^2}\right)^{-2}$$

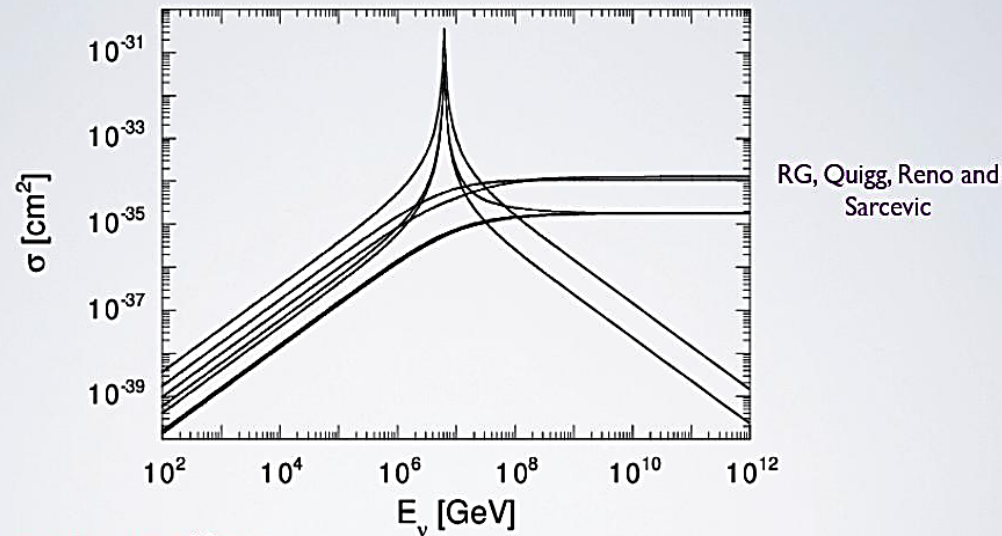
Η διατομή μεγιστοποιείται όταν η ενέργεια του νετρίνου γίνει ίση με :

$E_\nu = s/2m_e = 6.4 \cdot 10^{15} \text{ eV}$, δηλαδή όταν μπορεί να παραχθεί η μάζα του W .

Δηλαδή παρουσιάζεται φαινόμενο συντονισμού. Στην ενέργεια συντονισμού, η διατομή , είναι περίπου 300 φορές μεγαλύτερη από το άθροισμα των διατομών όλων των άλλων αντιδράσεων.

Συντονισμός Glashow

Neutrino Cross-sections at the Glashow Resonance



The cross-sections

$\bar{\nu}_e e \rightarrow \text{hadrons}$, $\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu}_e e$, $\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \mu$, $\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu}_\tau \tau$ are resonant

Ενεργός διατομή σαν συνάρτηση της ενέργειας

$$E_\nu = s/(2m_e) \sim 6.4 \times 10^6 \text{ GeV}$$

Ενεργές διατομές νετρίνων στην περιοχή του συντονισμού

Ενεργές Διατομές σε συντονισμό.

Interaction	σ [cm ²]
$\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu} ee$	5.38×10^{-32}
$\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu} \mu\mu$	5.38×10^{-32}
$\bar{\nu}_e e \rightarrow \text{hadrons}$	3.41×10^{-31}
$\bar{\nu}_e e \rightarrow \text{anything}$	5.02×10^{-31}

Ενεργές διατομές χωρίς συντονισμό

Interaction	σ [cm ²]
$\nu_\mu N \rightarrow \mu + \text{anything}$	1.43×10^{-33}
$\nu_\mu N \rightarrow \nu_\mu + \text{anything}$	6.04×10^{-34}
$\nu_\mu e \rightarrow \nu_e + \mu$	5.42×10^{-35}

Ανίχνευση ν_τ

$$\nu_\tau N \rightarrow \tau X \quad \tau \rightarrow \nu_\tau + X$$

Το 'τ' διασπάται μετά από περίπου 50 m δημιουργώντας έναν ακόμη καταιονισμό.

