

Νετρίνα υπερ-υψηλών ενεργειών UHE

Πλεονεκτήματα των μετρήσεων με νετρίνα:

- Διεισδυτικά, μπορούν να διασχίσουν τα κοσμικά νέφη.
- Για ενέργειες $E_\nu > 5 \cdot 10^{14}$ eV, οι ακτίνες γ σκεδάζονται στο CMB, $E_\nu > 10^{13}$ eV στο O/IR και για $E_\nu > 10^{19}$ eV στο RF.
- Απόδειξη ότι οι αντιδράσεις παραγωγής είναι αδρονικές.

Μεονεκτημα:

- Πολύ μικρή ενεργή διατομή 10 τάξεις μεγέθους σε σχέση με την HM, χρειάζονται πολύ μεγάλοι ανιχνευτές.

Διαδικασίες για εξωγαλαξιακές πηγές

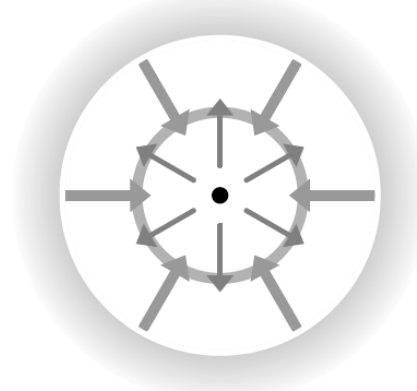
$$p + \gamma \rightarrow \pi^{\pm} + \dots$$

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

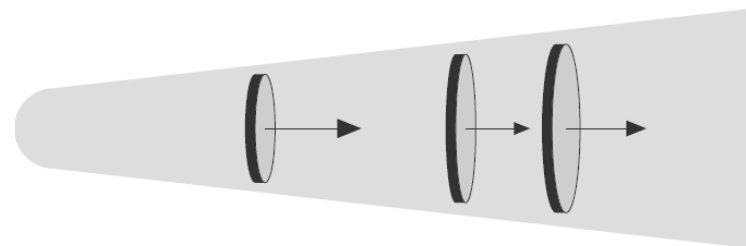
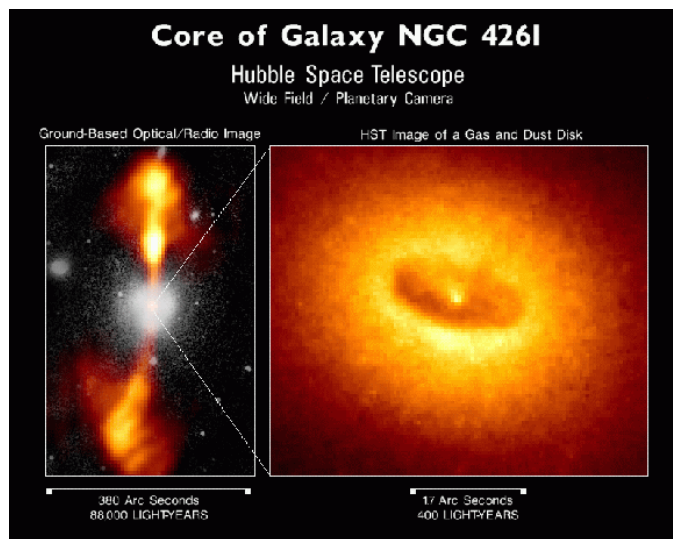
$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

- Ο λόγος $(\nu_e + \bar{\nu}_e) : (\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu})$ είναι κοντα στο 1:4 επειδή η παραγωγή $\bar{\nu}_e$ από μυόνια στις πηγές είναι μικρή
- Μετά από την ταλάντωση $\nu_e : \nu_{\mu} : \nu_{\tau}$ γίνεται 1:1:1
- Το νετρίνο παίρνει περίπου το 1/20 της ενέργειας του αρχικού πρωτονίου.

Ερμηνεία πιθανοί μηχανισμοί.



Παραγωγή κοντά στη Μαύρη Οπή, τα φωτόνια δεν μπορούν να διαφύγουν λόγω της πυκνότητας του νέφους τα πρωτόνια συγκρατούνται από το μαγνητικό πεδίο, μόνον τα νετρίνα διαφεύγουν., Φωτοπαραγωγή πιονίων, διάσπαση ... Μέγιστη ενέργεια νετρίνων 10^{18} eV



Παραγωγή στους λοβούς. Σύμφωνα με τα μοντέλα τα νετρίνα θα έχουν ενέργεια $10^{16} - 10^{18}$ eV. Η εκπομπή γίνεται σε στενό κώνο λόγω ώθησης Lorentz.

Παραγωγή στο ενδογαλαξιακό χώρο.

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

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

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

Ένα πρωτόνιο με ενέργεια 10^{20} eV δίδει περίπου 2,6 $(\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu})$.

Η διάσπαση και η αντίδραση των νετρονίων είναι μικρή στις ενέργειες πάνω από 10^{16} eV και αντίστοιχα η παραγωγή αντι ν_e .

Ενεργός Διατομή Νετρίνων Υψηλής Ενέργειας

Η διατομή εξαρτάται από τις συνατήσεις δομής του νουκλεονίου σε μικρό x_F και μεγάλο Q^2

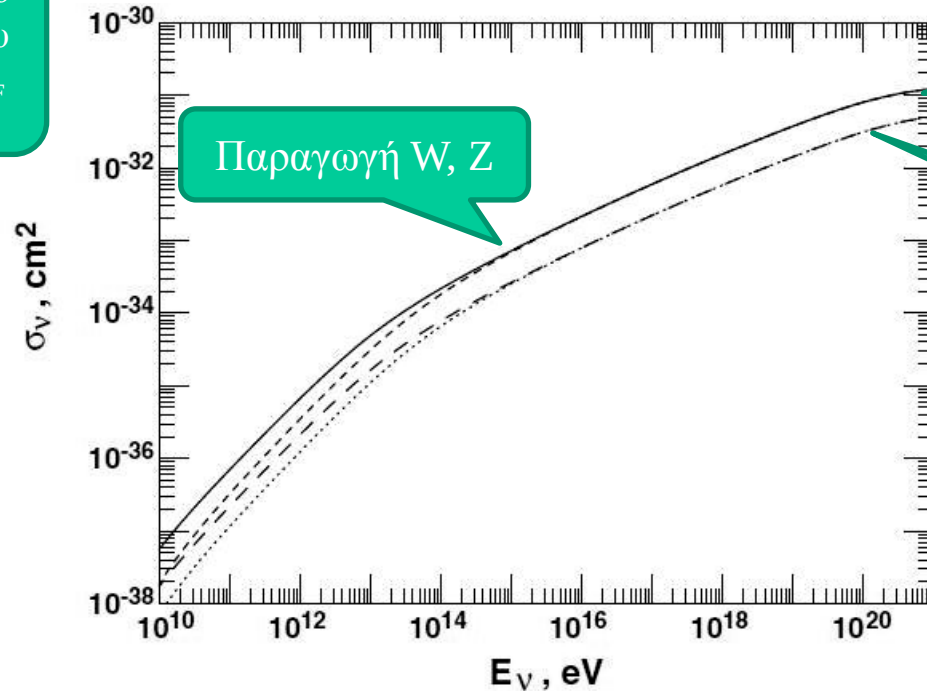
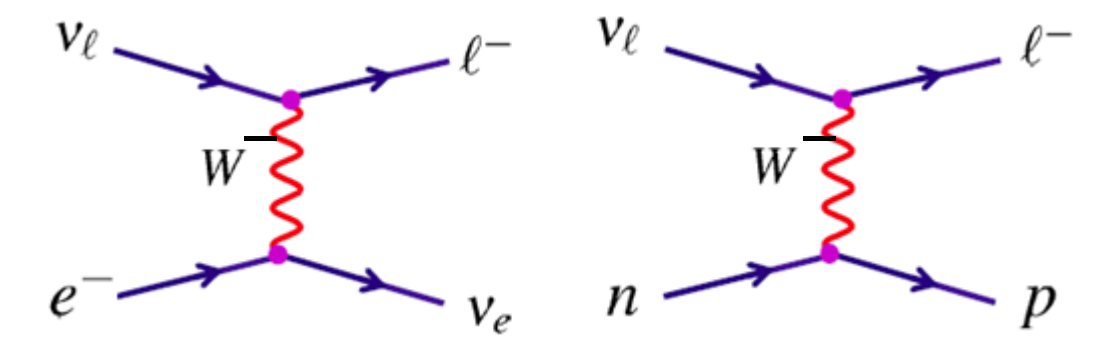


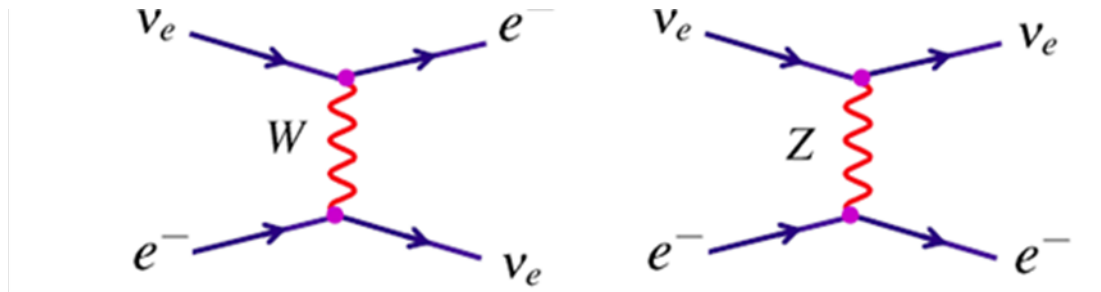
Fig. 10.2. Cross-sections for deep inelastic neutrino scattering. Neutrino CC cross-section is plotted with a solid line, the antineutrino with short dashes. The NC cross-section for neutrinos are plotted with long dashes, and for antineutrinos with a dotted line.

Φορτισμένα Ρεύματα



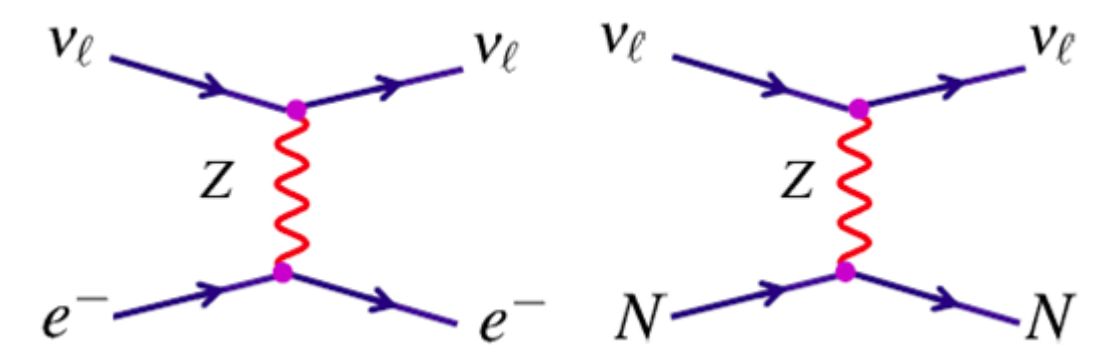
- Το τελικό λεπτόνιο ℓ^- είναι της ίδιας οικογένειας με το αρχικό νεutrino ν_ℓ .
- Το τελικό λεπτόνιο διατηρεί τη διεύθυνση του νεutrину.
- Όταν η αντίδραση γίνεται σε νουκλεόνιο εμφανίζεται αδρονικός καταιονισμός.

Αντίδραση ν_e



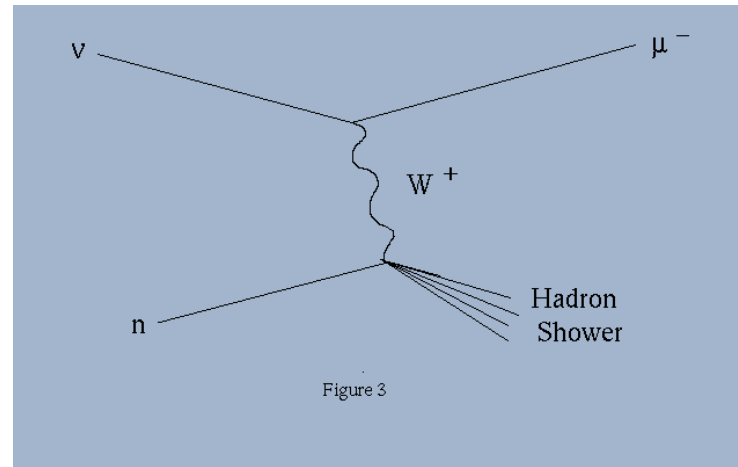
- Όταν το τελικό λεπτόνιο είναι ηλεκτρόνιο τότε δημιουργείται Η.Μ. καταιονισμός και μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια του νετρίνου.
- Αντίδραση ν_e σε νουκλεόνιο παράγει ΗΜ. Και αδρονικό καταιονισμό.
- Όταν είναι μιονίο εμφανίζεται σαν τροχιά.
- Όταν είναι ταυ δημιουργείται αδρονικό καταιονισμός.

Ουδέτερα Ρεύματα

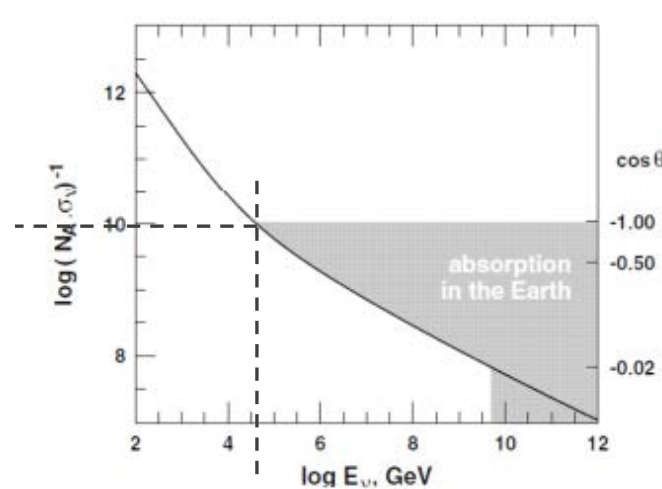


- Η αλληλεπίδραση γίνεται μέσω ενός μποζονίου Z. Το νεutrίνο ν_ℓ εμφανίζεται στη τελική κατάσταση.
- Η αλληλεπίδραση με νουκλεόνιο, δημιουργεί Αδρονικό καταιονισμό.

Παράδειγμα αντίδρασης



Απορρόφηση στη γή

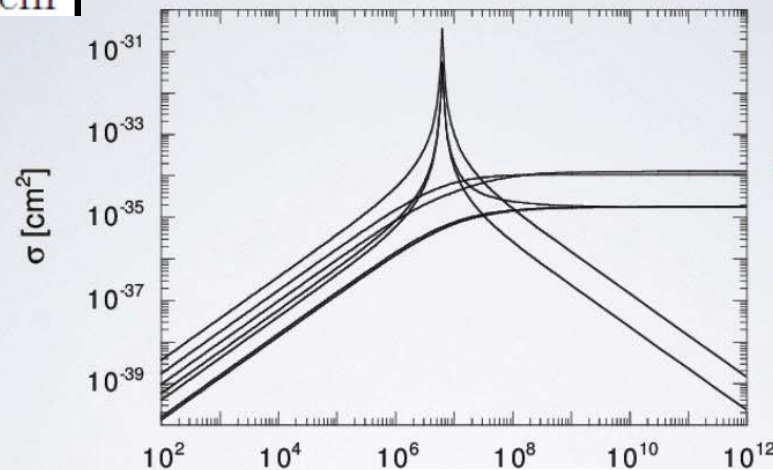


Όταν η ενέργεια γίνει μεγαλύτερη από $5 \cdot 10^4$ GeV η γη δεν είναι πιά διαφανής στα νετρίνα. Για μεγαλύτερη από $5 \cdot 10^9$ όλο το Νότιο ημισφαίριο γίνεται αδιαφανές.

Συντονισμός Glashow

Neutrino Cross-sections at the Glashow Resonance

$$4.7 \times 10^{-31} \text{ cm}^2$$



RG, Quigg, Reno and Sarcevic

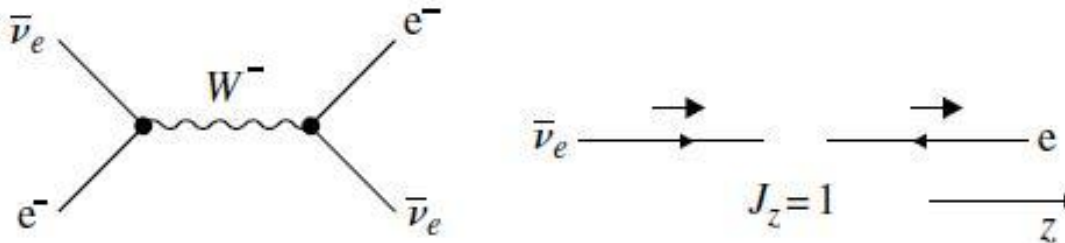
The cross-sections

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

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

Ερμηνεία του συντονισμού 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

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

Η διατομή μεγιστοποιείται όταν η ενέργεια του νετρίνου γίνει ίση με 6.4 PeV δηλαδή μπορεί να παράγει την μάζα του W . Δηλαδή παρουσιάζεται φαινόμενο συντονισμού. Στην ενέργεια συντονισμού, η διατομή, είναι περίπου 300 φορές μεγαλύτερη από το αθροισμα των διατομών όλων των άλλων αντιδράσεων.

Αντιδράσεις νετρίνων σε πολύ υψηλές ενέργειες

Ενεργές Διατομές σε συντονισμό.

Interaction	σ [cm ²]
$\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu}_e e$	5.38×10^{-32}
$\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu}_\mu \mu$	5.38×10^{-32}
$\bar{\nu}_e e \rightarrow \bar{\nu}_\tau \tau$	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}

Table 1: Resonant GR cross-sections for electron anti-neutrino (left panel) and non-resonant (right panel) interactions at $E = 6.3$ PeV.

Η ανίχνευση γίνεται με:

Ανίχνευση της τροχιάς του μιονίου.

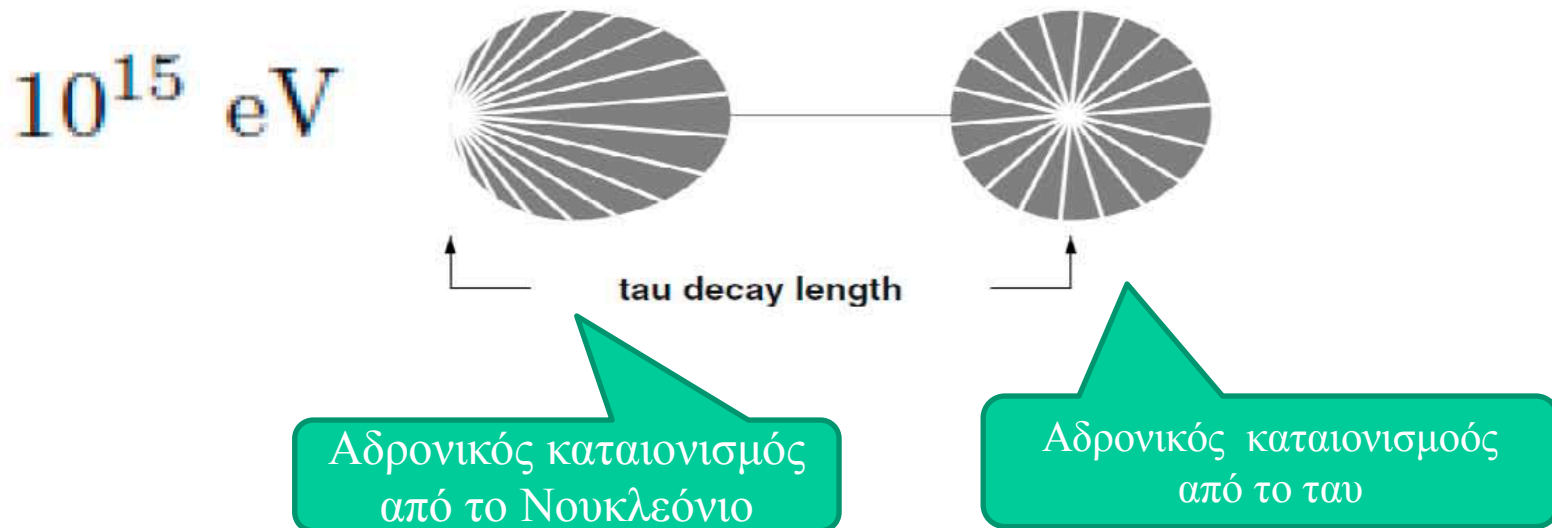
Ανίχνευση H.M. καταιονισμού από το e^- (100% Ενέργειας)

Ανίχνευση Αδρονικού καταιονισμού. (26% Ενέργειας).

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.

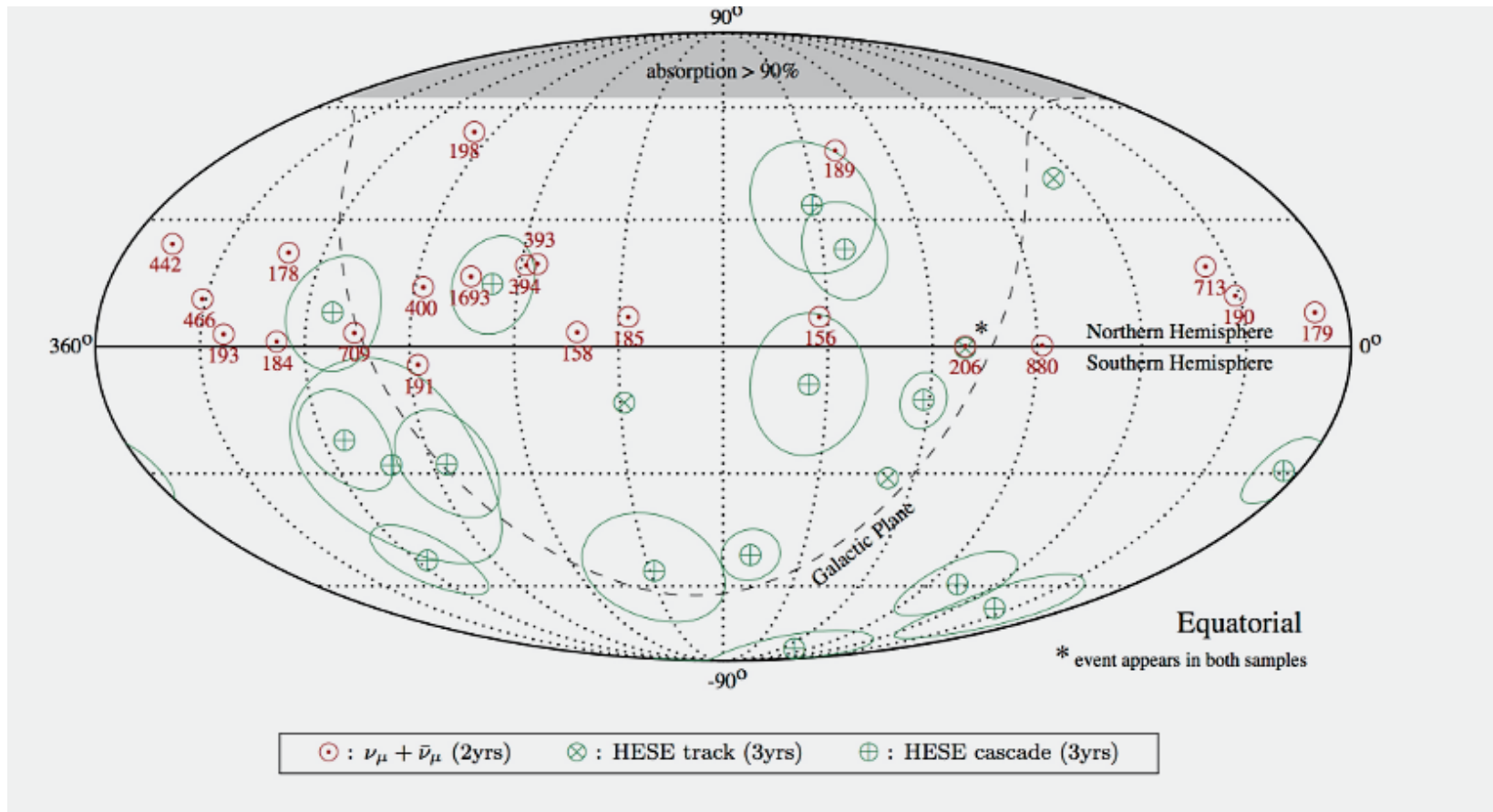


Πειράματα

- Για πειράματα σ' αυτές τις ενέργειες ανιχνεύουμε τα κατερχόμενα νετρίνα.
- Ανίχνευση καταιονισμών που δημιουργούνται από $\bar{\nu}_e e^-$, 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 αδρονικό καταιονισμό.
- Ανίχνευση μιονίων που παράγονται στον ανιχνευτή.

ICE_CUBE

Ice cube results.

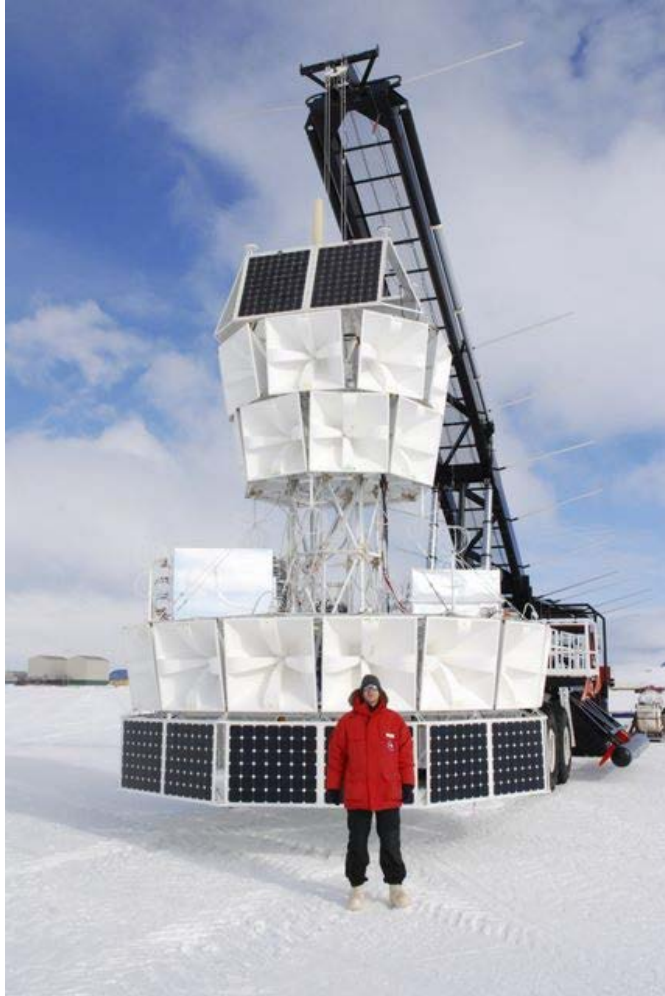


Γεγονότα με τροχία μιονίου. Εκτιμώμενη ενέργεια νευτρίνου σε TeV και διεύθυνση σε ισημερινές συντεταγμένες. Με μπλέ οι πηγές ακτίνων γ με ενέργεια μεγαλύτερη από 60 TeV από το τηλεσκόπιο HESS

Askaryan effect.

- Ραδιοκυματική Ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη διέλευση φορτισμένων σωματιδίων με ασύμμετρη κατανομή μέσα από πυκνό διηλεκτρικό όπως ο πάγος.
- Εκπομπή Cerenkon σε ραδιοκύματα.
- Ο πολικός πάγος συμπεριφέρεται σαν ένα πολύ καλό διηλεκτρικό. Το μήκος εξασθένησης για τον πάγο φθάνει το 1km
- Πειράματα RICE ARIANNA

ANITA



- Μέτρησε 16 γεγονότα με ενέργεια $1,5 * 10^{19}$
- Οι κατ. μεγάλης ενέργειας εκπέμπουν ακτινοβολία σύγχροτρον λόγω της κάμψης των φορτισμένων τροχιών από το μαγνητικό πεδίο της γης.
- Η μέτρηση έγινε χρησιμοποιώντας κεραίες μεγάλης ευαισθησίας

Παραγωγή νετρίνων στις κοσμικές

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

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	

Το νεutrino παίρνει περίπου το 1/20 της ενέργειας του αρχικού πρωτονίου.