

Ενεργειακή Κατανομή

Σύνθεση.

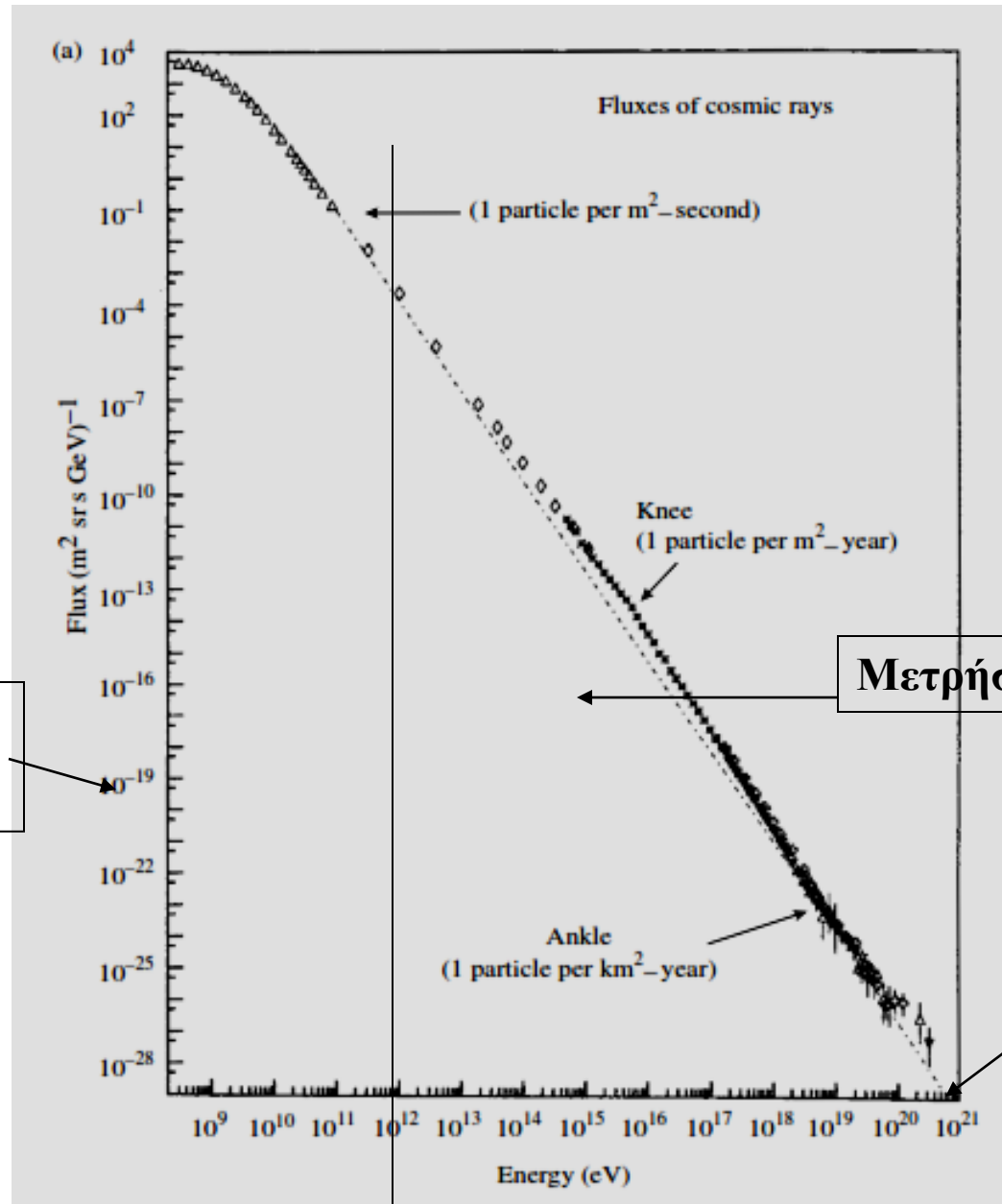
1

Τα σωματίδια που φθάνουν στην ατμόσφαιρα πολλές φορές τα ονομάζουμε πρωτογενή, αν και με τον ακριβή ορισμό πρωτογενή είναι αυτά τα οποία έχουν επιταχυνθεί στα νέφη των υπερκαινοφανών, των πάλσερ και άλλων μηχανισμών επιτάχυνσης και δευτερογενή αυτά τα οποία έχουν παραχθεί με τις αντιδράσεις των πρωτογενών με την ύλη στο διαστρικό χώρο. Τα σωματίδια αυτά φθάνουν στη γη αφού έχουν περιπλανηθεί για εκατομμύρια χρόνια στον γαλαξιακό χώρο και για αυτό πρόκειται για σωματίδια με μεγάλο χρόνο ζωής. Πρόκειται για πρωτόνια, πυρήνες και ηλεκτρόνια. Άλλα σωματίδια όπως νετρίνα ακτίνες γ και επίσης αντιπρωτόνια και ποζιτρόνια, παράγονται από τις αντιδράσεις των πρωτογενών με τη διαστρική ύλη.

Επίσης μεγάλη μεγάλη ροή σωματιδίων παράγεται στον ήλιο κατά τις ηλιακές εκλάμψεις. Ιδανικά η ροή των σωματιδίων θα πρέπει να μετρηθεί έξω από την ατμόσφαιρα. Γίνονται πειράματα σε δορυφόρους, και αερόστατα.

Για τις μεγαλύτερες ενέργειες, γίνονται μεγάλα πειράματα σε μεγάλες επιφάνειες στη γη καθώς και υπόγεια ή υποθαλάσσια πειράματα για τη μέτρηση κοσμικών νετρίνων.

$$I_N(E) \approx 1.8 \times 10^4 (E/1 \text{ GeV})^{-\alpha} \frac{\text{nucleons}}{\text{m}^2 \text{ s sr GeV}},$$



Μετρήσεις ανά
σωματίδιο.

Μετρήσεις καταιονισμών

21 Δεκάδες
Ενέργειας.

$$I_N(E) \approx 1.8 \times 10^4 (E/1 \text{ GeV})^{-\alpha} \frac{\text{nucleons}}{\text{m}^2 \text{ s sr GeV}} ,$$

Μέγιστο ροής , 2 p/m² sr Mev στο 1 GeV.

Η μέση πυκνότητα ενέργειας για K.A. E>1 GeV, είναι 1 eV/cm³ ή 1 MeV/m³ .

Στο προηγούμενο διάγραμμα παριστάνουμε τη ροή σωματιδίων ανά cm^2 και srd και GeV . Η διαφορική ροή $I(E)$ είναι το πλήθος των σωματιδίων dN με ενέργεια από E σε $E+dE$ δηλαδή στο διάστημα dE . Με τη λέξη σωματίδιο εννοούμε πρωτόνιο ή πυρήνα. Η ροή $I(E)$ καλύπτει μια τεράστια κλίμακα και για αυτό χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα στον άξονα X .

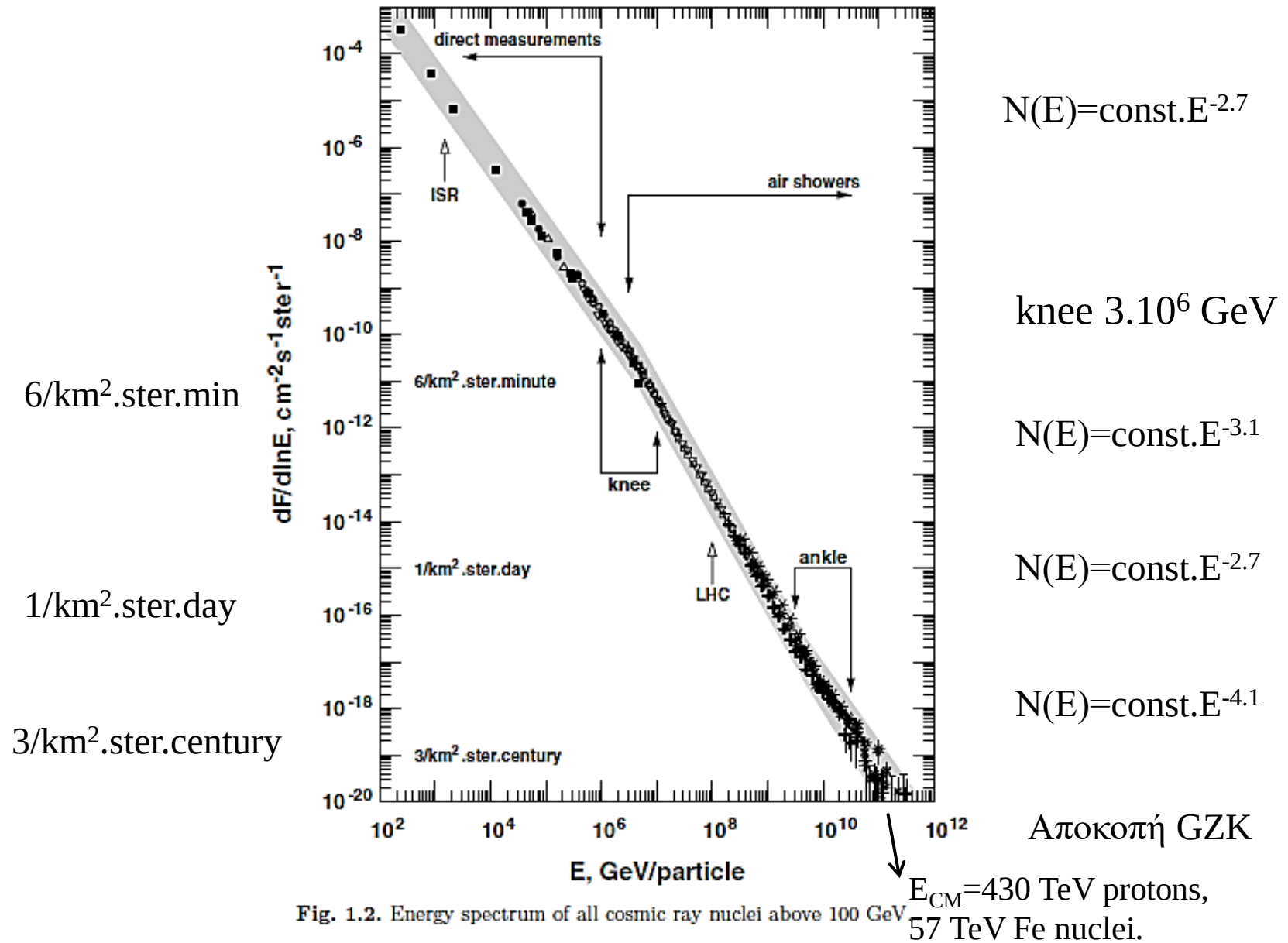
Στις ενέργειες μέχρι 1 TeV όπου γίνεται ταυτοποίηση του πυρήνα, η ενέργεια αναφέρεται ανά νουκλεόνιο στις υψηλότερες αναφέρεται ανά πυρήνα

Στο διάγραμμα βλέπουμε το ενεργειακό φάσμα $I(E)$.

Στις μικρές ενέργειες $E < 10 \text{ GeV}$ η ροή επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο που μεταφέρεται από τον ηλιακό άνεμο. Ελαττώνεται στα μέγιστα της ηλιακής δραστηριότητας. Για μεγαλύτερες ενέργειες η επίδραση είναι πολύ μικρή και η ροή αντιπροσωπεύει την ροή στο διάστημα.

Μετά από τα πρώτα 10 GeV , η κλίση α της καμπύλης στο μεγαλύτερο μέρος είναι -2.7 σε πολύ μεγάλη ενέργεια 10^{16} eV , αλλάζει σε $\alpha = -3$ (knee, γόνατο) Στην περιοχή πάνω από τα 10^6 GeV σταματά η απόδοση του μηχανισμού επιτάχυνσης που αποδίδεται στα υπολείμματα υπερκαινοφανών αστέρων. Η περιοχή αυτή περιέχει περισσότερους πυρήνες Fe . (Ο μηχανισμός επιτάχυνσης, δίνει μέγιστη ενέργεια ανάλογα με το φορτίο. Για την ίδια ακαμψία, η ενέργεια των πυρήνων Fe είναι 26 φορές μεγαλύτερη από του p).

Poή $E > 100 \text{ GeV}$



3

Στον άξονα των Υ βλέπουμε την ποσότητα $dF/d(\ln E)$, $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{ster}^{-1}$. Ο παράγοντας $d(\ln E)$ προκύπτει επειδή οι υποδιαίρεσεις του άξονα Χ είναι λογαριθμικές. Αν τον αναλύσουμε θα έχουμε dE/E . Και η ροή γίνεται $E dF/dE$ όπως τον αναφέρουν πολλοί συγγραφείς, οπότε στις μονάδες εμφανίζεται και όρος GeV^{-1}

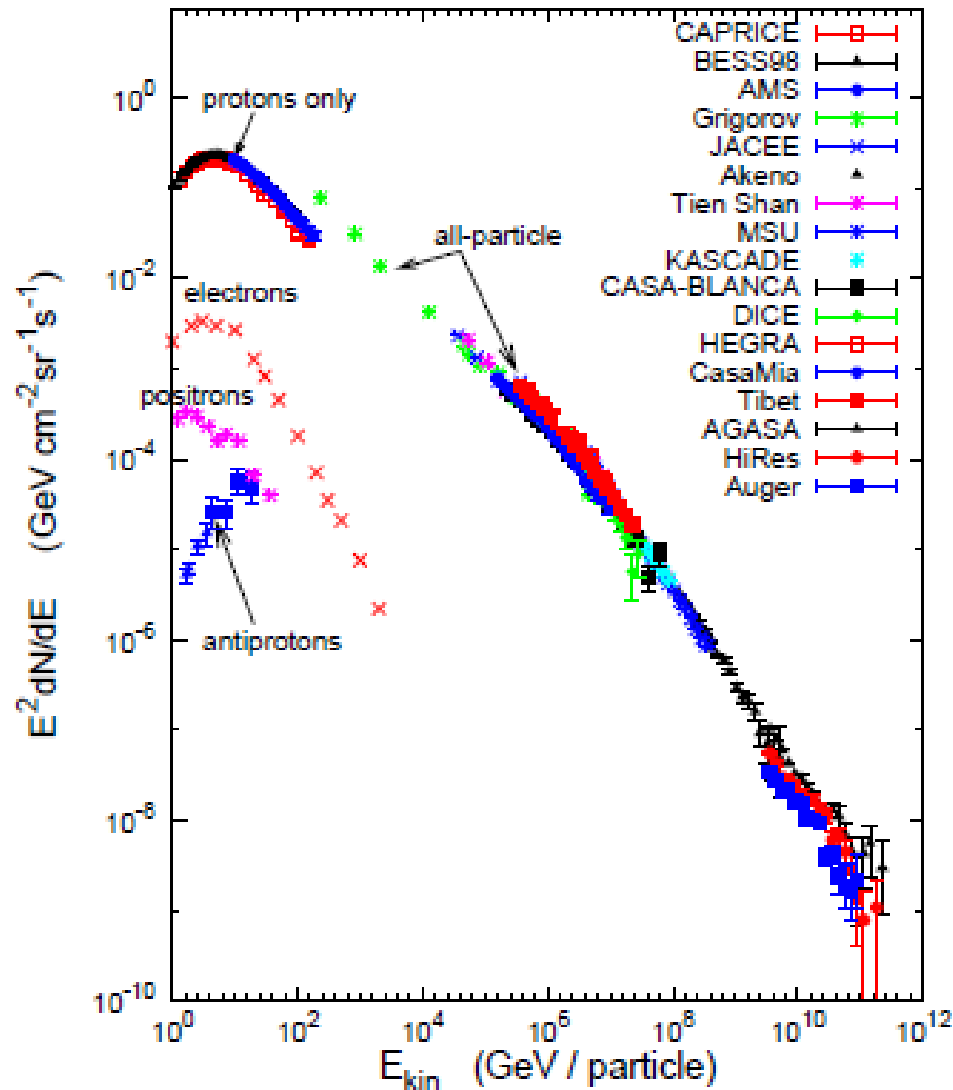
Μετά από τα πρώτα 10 GeV, η κλίση της καμπύλης στο μεγαλύτερο μέρος είναι $E^{-2.7}$ σε πολύ μεγάλη ενέργεια $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ GeV}$, αλλάζει σε E^{-3} (knee, γόνατο) Στην περιοχή πάνω από τα 10^6 GeV σταματά η απόδοση του μηχανισμού επιτάχυνσης που αποδίδεται στα υπολείμματα υπερκαινοφανών αστέρων. Η περιοχή αυτή περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό πυρήνων Fe. (Ο μηχανισμός στηρίζεται στο μαγνητικό πεδίο και δίνει μέγιστη ενέργεια ανάλογα με το φορτίο του σωματιδίου που επιταχύνεται. Για την ίδια ακαμψία, η ενέργεια των πυρήνων Fe είναι 26 φορές μεγαλύτερη από του p).

Ενεργειακό Φάσμα

(T.Gaisser Tasi lectures)

2

Energies and rates of the cosmic-ray particles



Αδρονικοί καταιονισμοί.

π^+, π^-, π^0

π^0

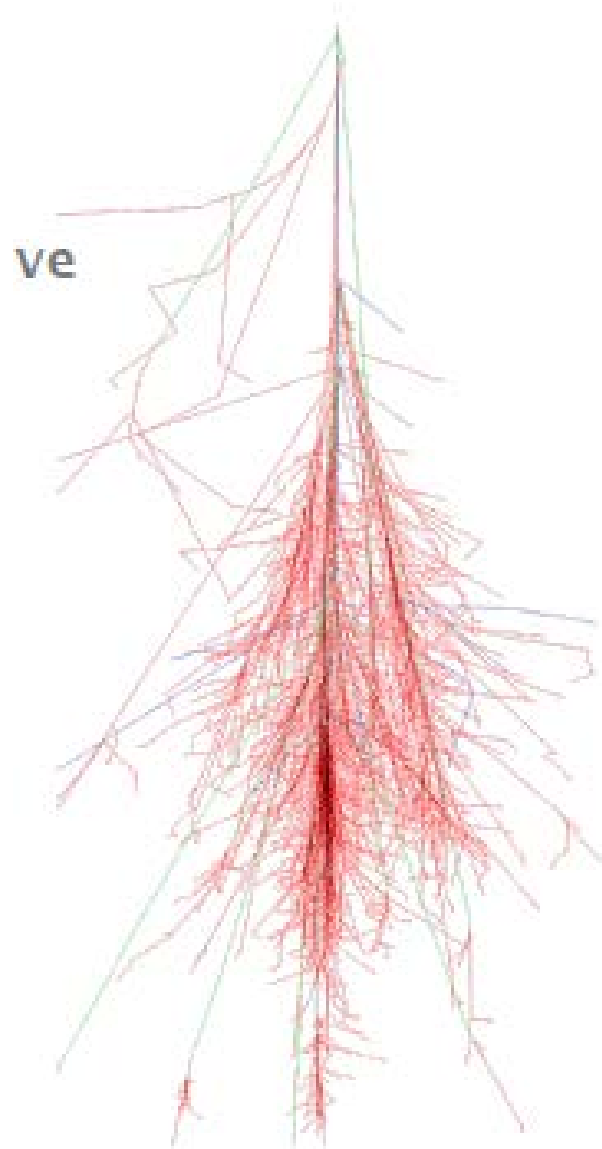
$\tau = 8.4 \times 10^{-17} \text{ s}$,

$l_d = \gamma * 2.51 \times 10^{-7} \text{ cm}$

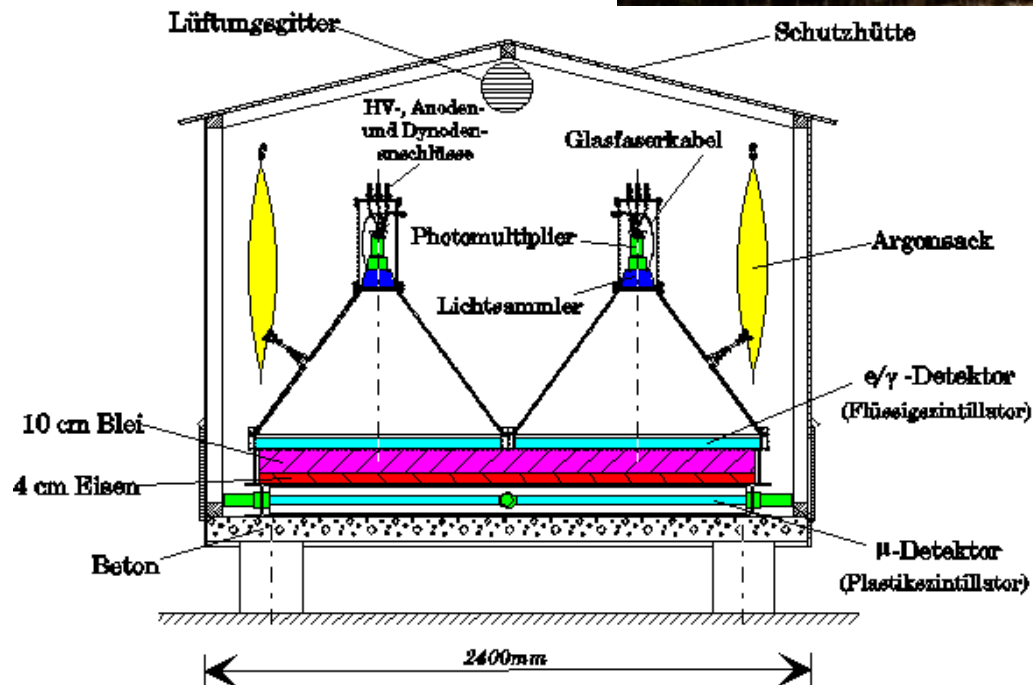
$\pi^\pm$

$\tau = 2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$, $l_d = \gamma \times 780 \text{ cm}$

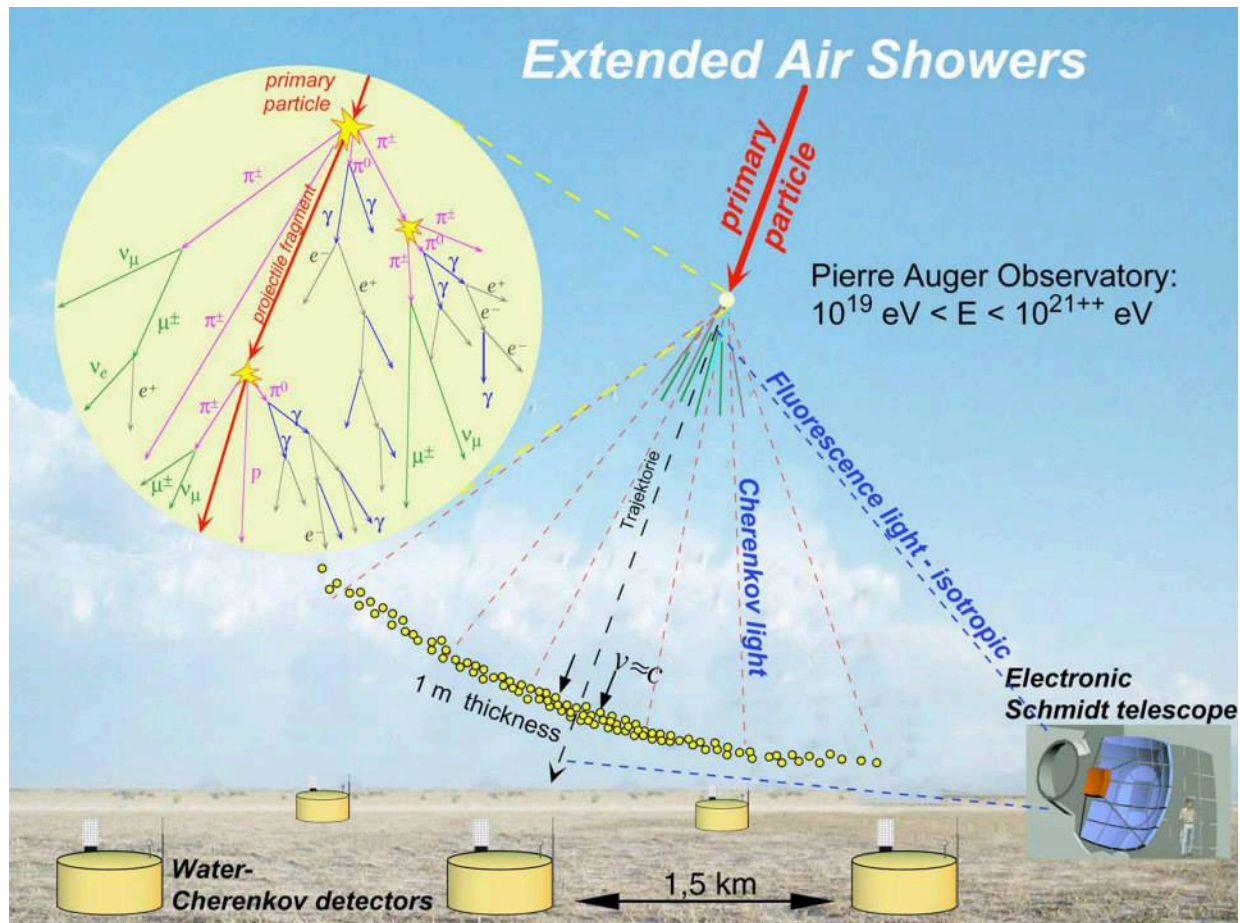
Λόγω της μεγάλης απόστασης μέχρι την επόμενη αντίδραση των $\pi^\pm$, ($\lambda_\pi = 120 \text{ g/cm}^2$) το σχήμα του καταιονισμού είναι ασύμμετρο.



KASCADE Array



Πειράματα Καταιονισμών Υψηλής Ενέργειας



Από τις μικρές ενέργειες και μέχρι τα 100 GeV οι μετρήσεις που γίνονται με καλορίμετρα δίνουν με μεγάλη ακρίβεια την ορμή το φορτίο και το είδος του πυρήνα. Τα μαγνητικοί φασματογράφοι συνεχίζουν μέχρι τα 100 TeV αλλά με περιορισμένη διαριτότητα ενώ για ενέργειες μεγαλύτερες από 1 TeV οι μετρήσεις γίνονται στο έδαφος με ανιχνευτές καταιονισμών όπου δεν μπορεί να γίνει διάκριση των πυρήνων αλλά υπολογίζεται η συνολική ενέργεια. Οι μετρήσεις αυτές έχουν πρόβλημα βαθμονόμησης. Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από το βάθος παραγωγής, και την μέτρηση της κεντρικής περιοχής του καταιονισμού κ.α..

Για τη δημιουργία του γόνατου 3 PeV θεωρούμε τους εξής παράγοντες: Η παραγωγή από τα υπολείμματα S.N. σύμφωνα με τα μοντέλα, περιορίζεται σ' αυτές τις ενέργειες. Η πιθανότητα διαφυγής έξω από τον γαλαξία είναι μεγαλύτερη για τις μεγάλες ενέργειες ή μαγνητικές ακαμψίες. Αλλά και ο τρόπος κατάταξης: μετράμε την ολική ενέργεια. Άρα οι πυρήνες θα έχουν μεγαλύτερη ενέργεια από πρωτόνια της ίδιας ακαμψίας.

6

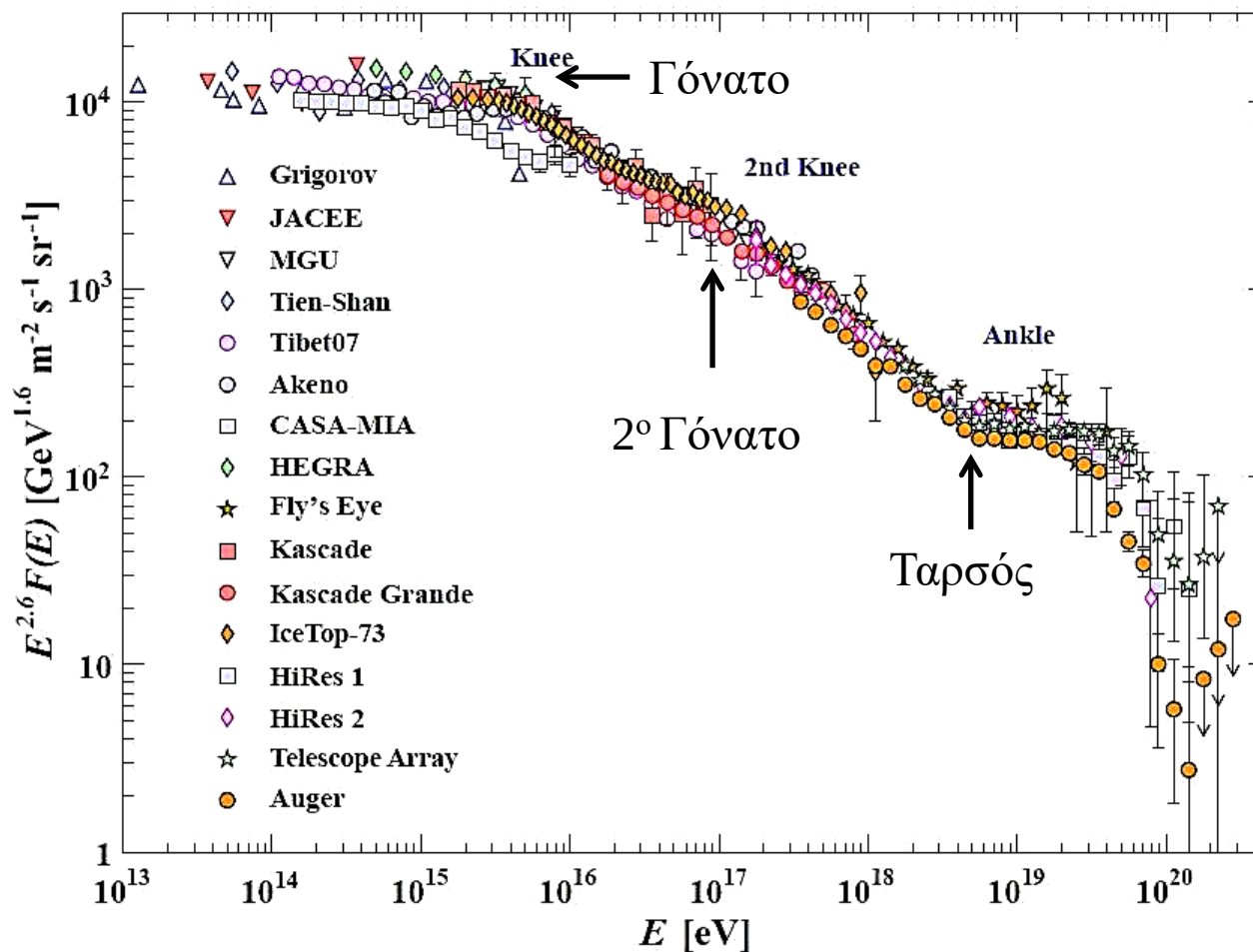
Δορυφορικά πειράματα. Από τις μικρές ενέργειες και μέχρι τα 100 GeV οι μετρήσεις που γίνονται με καλορίμετρα δίνουν με μεγάλη ακρίβεια την ορμή το φορτίο και το είδος του πυρήνα. Οι μαγνητικοί φασματογράφοι, συνεχίζουν μέχρι τα 300 TeV αλλά με περιορισμένη διακριτότητα.

Για ενέργειες μεγαλύτερες από 1 TeV οι μετρήσεις γίνονται στο έδαφος με ανιχνευτές καταιονισμών όπου δεν μπορεί να γίνει διάκριση των πυρήνων αλλά υπολογίζεται η συνολική ενέργεια. Οι μετρήσεις αυτές έχουν προβλημα βαθμονόμησης. Η ακρίβεια των μετρήσεων εξαρτάται από το βάθος παραγωγής, και την μέτρηση της κεντρικής περιοχής του καταιονισμού κ.α..

Για τη δημιουργία του γόνατου 3 PeV θεωρούμε τους εξής παράγοντες. Η παραγωγή από τα υπολείμματα S.N. σύμφωνα με τα μοντέλα, περιορίζεται σ' αυτές τις ενέργειες. Η πιθανότητα διαφυγής έξω από τον γαλαξία είναι μεγαλύτερη για τις μεγάλες ενέργειες ή μαγνητικές ακαμψίες. Αλλά και ο τρόπος κατάταξης: μετράμε την ολική ενέργεια. Άρα οι πυρήνες θα έχουν μεγαλύτερη ενέργεια από πρωτόνια της ίδιας ακαμψίας.

Το όριο του φάσματος

$\chi E^{2.6}$ για να διακρίνονται οι λεπρομέρειες



8

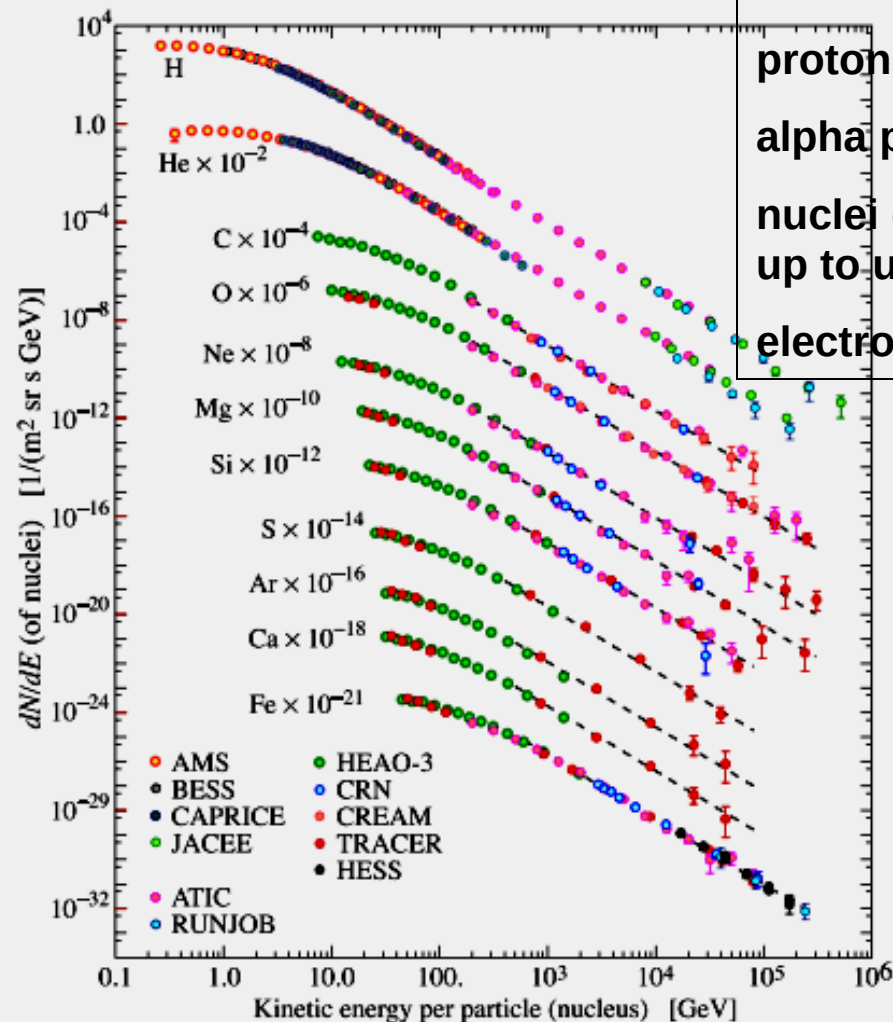
- Σε ακόμη μεγαλύτερη ενέργεια 4×10^{18} , παρατηρούμε αλλαγή στη κλίση (angle, ταρσός) και κατόπιν την αποκοπή GZK στα 4×10^{19} .
- Εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα γεγονότα πάνω από την αποκοπή (GZK) που υποθέτουμε ότι προέρχονται από εξω-γαλαξιακές πηγές συγκεκριμένα από AGN δηλαδή ενεργούς πυρήνες γαλαξιών.
- (GZK = Greisen-Zatsepin-Kusmin) (αντίδραση των σωματιδίων με το κοσμικό μικρο -κυματικό υπόβαθρο)

$$(p + \gamma \rightarrow \text{hadrons})$$

Ατομική Σύσταση

$E \ 10^3\text{-}10^6 \text{ GeV}$

~50% protons
~25% alpha particles
~13% C/N/O nuclei
<1% electrons
<0.1% gammas



Σύνολικά:

protons(86%)

alpha particles (11%)

nuclei of heavier elements
up to uranium (1%)

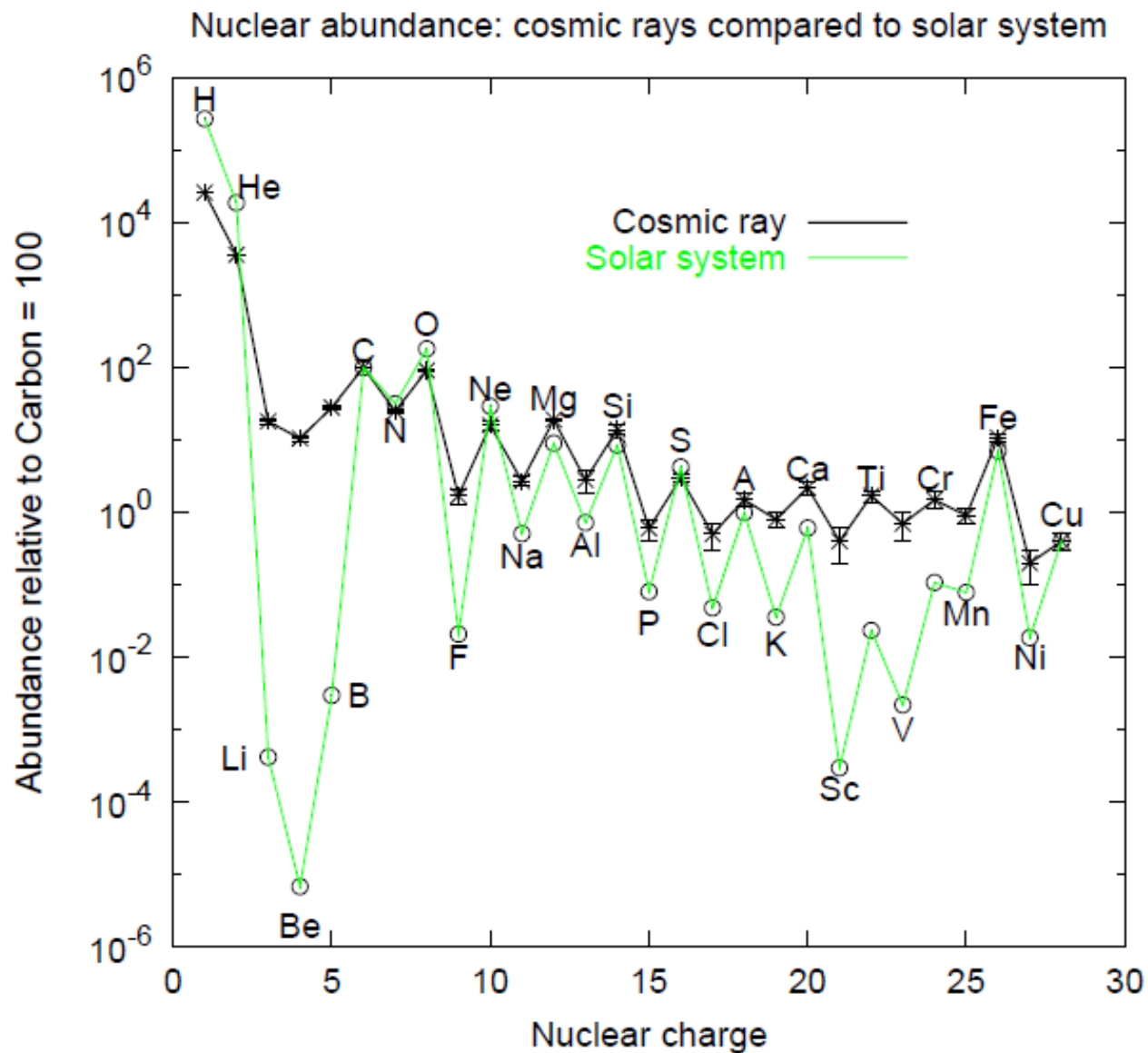
electrons (2%)

Figure 26.1: Fluxes of nuclei of the primary cosmic radiation in particles per energy-per-nucleus are plotted vs energy-per-nucleus using data from Refs. [1–12]. The figure was created by P. Boyle and D. Muller.

10

Στο προηγούμενο διάγραμμα βλέπουμε τις αντίστοιχες καμπύλες για πυρήνες σε σύγκριση με τα πρωτόνια. Παρατηρούμε ότι έχουν την ίδια κλίση. (Για τους πυρήνες που προκύπτουν από το spallation στη διαστρική ύλη το φάσμα είναι ποιο απότομο)

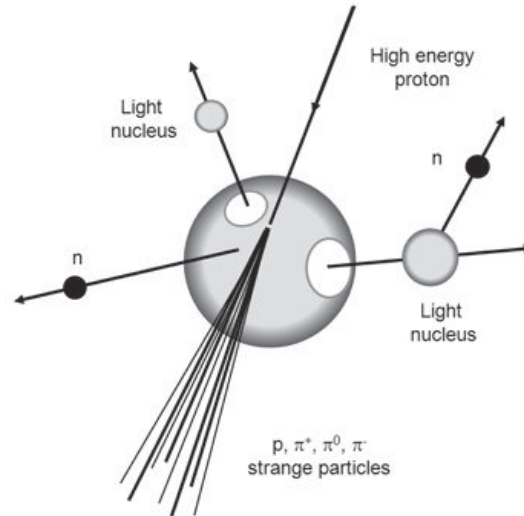
Ποσοστό ισοτόπων σε σχέση με το ηλιακό σύστημα.



Spallation (θρυμματισμός)

Το κοσμικό πρωτόνιο αντιδρά με ένα νουκλεόνιο του πυρήνα και δημιουργεί δευτερογενή σωματίδια, πρωτόνια πιόνια και άλλα. Όταν αφαιρεθεί το νουκλεόνιο, ο πυρήνας μπορεί να είναι ασταθής και στη συνέχεια να διασπαστεί με εκπομπή νετρονίων ή ελαφρών πυρήνων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται spallation

Οι διατομές για το spallation διάφορων πυρήνων είναι γνωστές από πειράματα σε επιταχυντές και τις χρησιμοποιούμε για να υπολογίσουμε την ποσότητα της ύλης που συναντούν οι ακτίνες στην διαδρομή τους.



Στο προηγούμενο διάγραμμα εμφανίζεται το ποσοστό των στοιχείων στις κοσμικές προς το ποσοστό των στοιχείων στον ήλιο. Παρατηρούμε α) μικρότερο ποσοστό H β) τα στοιχεία C, N, O, καθώς και η ομάδα του σιδήρου παρουσιάζονται εξ ίσου στα δύο φάσματα γ) τα στοιχεία Li, Be και B εμφανίζονται αυξημένα στις κοσμικές δ) Τα στοιχεία κάτω από τον σίδηρο αυξημένα.

Το μικρό ποσοστό του H οφείλεται στην μικρότερη αποτελεσματικότητα του μηχανισμού επιτάχυνσης στις πηγές.

Παρατηρούμε ότι τα ποσοστά C, N, O, Fe δεν διαφέρουν σημαντικά άρα υποθέτουμε ότι αρχικά η σύσταση είναι η ίδια με εκείνη των αστέρων

Τα στοιχεία Li, Be, and B είναι λιγότερο σταθερά και καταναλώνονται στην αλυσίδα παραγωγής ενέργειας. Το ποσοστό τους στις κοσμικές οφείλεται στο spallation του C και του O πάνω στα πρωτόνια της διαστρικής ύλης. Παρόμοια τα στοιχεία Sc, Ti, V, and Mn οφείλονται στο spallation των Fe και Ni που βρίσκονται σε αφθονία στην αστρική ύλη.

Τα στοιχεία κάτω από τον σίδηρο και τον άνθρακα είναι θραύσματα πυρήνων των στοιχείων που βρίσκονται σε αφθονία και δημιουργούνται κατά τις κρούσεις (spallation) με την διαστρική ύλη. Εκτιμάται 'η διαδρομή μέσα στον γαλαξία είναι ισοδύναμη με 5 – 10 μήκη αντίδρασης για τα περισσότερα σωματίδια. Η πυκνότητα της διαστρικής ύλης είναι 1 p/cm^3 και άρα αντιστοιχεί σε διαδρομή 1000 kpc. ($1 \text{ psc} = 3,1 \cdot 10^{16} \text{ m}$).

Τα μικρότερα ποσοστά H και He αποδίδονται στο μηχανισμό επιτάχυνσης.

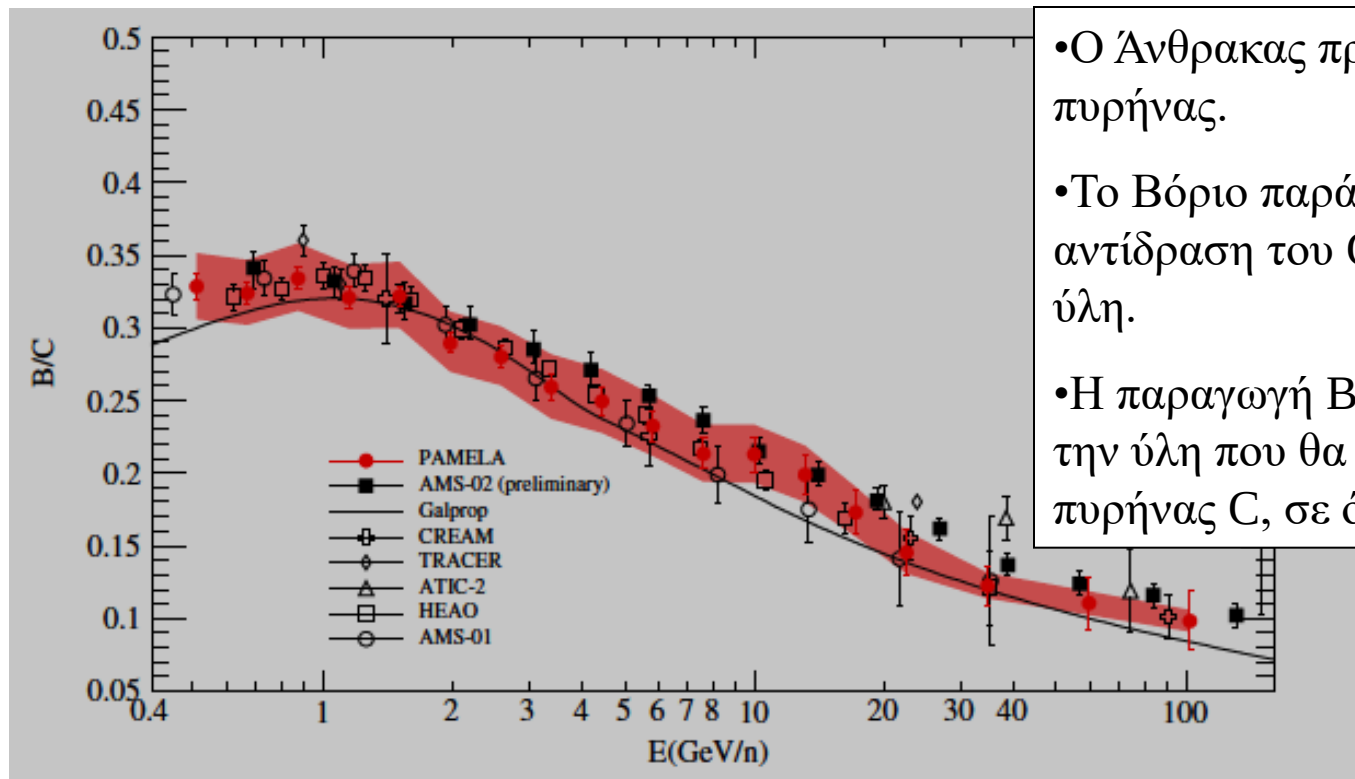
Ενδιαφέρον έχουν και τα ποσοστά των ισοτόπων τους στις ακτίνες σε σχέση τον ήλιο. Τα ισότοπα H^2 το και He^3 παρουσιάζονται στις κοσμικές ακτίνες σε πολύ μεγαλύτερα ποσοστά απ' ό,τι στην αστρική ύλη (πίνακας)

Τα αυξημένα ποσοστά οφείλονται στην παραγωγή τους από βαρύτερους πυρήνες λόγω spalation.

Ερμηνεία

- Παρατηρούμε ότι τα ποσοστά C, N, O, Fe δεν διαφέρουν σημαντικά άρα υποθέτουμε ότι αρχικά η σύσταση είναι η ίδια με εκείνη των αστέρων
- Τα στοιχεία Li, Be, and B είναι λιγότερο σταθερά και καταναλώνονται στην αλυσίδα παραγωγής ενέργειας στους αστέρες. Το ποσοστό τους στις κοσμικές οφείλεται στο spalation του C και του O πάνω στα πρωτόνια της διαστρικής ύλης.
- Παρόμοια τα στοιχεία Sc, Ti, V, και Mn οφείλονται στο spallation των πυρήνων Fe και Ni που βρίσκονται σε αφθονία στην αστρική ύλη.

Λόγος B/C



- Ο Άνθρακας πρωτογενής πυρήνας.
- Το Βόριο παράγεται από την αντίδραση του C με την γαλαξιακή ύλη.
- Η παραγωγή B εξαρτάται από την ύλη που θα συναντήσει ο πυρήνας C, σε όλη τη διαδρομή.

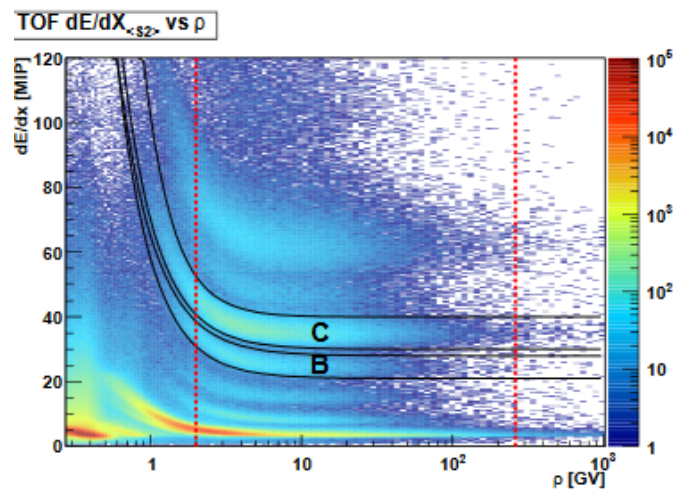
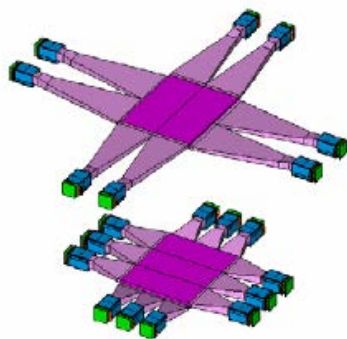
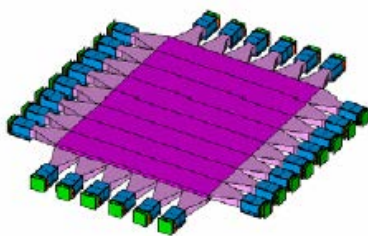
Λόγος πυρήνων Βορίου προς Άνθρακα όπως μετρήθηκε από το Πείραμα PAMELA. $\gamma_B = 3.01 \pm 0.13$ για το Βόριο $\gamma_C = 2.72 \pm 0.06$ για τον Άθρακα.

Στις υψηλές ενέργειες παράγεται μικρότερο ποσοστό Βορίου άρα η διαδρομή είναι μικρότερη.

Πως Διαχώρισαν τους πυρήνες Άνθρακα από τους πυρήνες Βορίου

C 6 στοιχειώδη φορτία B 5 στοιχειώδη φορτία

Μέτρηση ιονισμού από το φως που παράγεται σε σπινθηριστές.



Υπολογισμός χρόνου παραμονής στον γαλαξία

Τα ποσοστά των ισοτόπων μας δίνουν την εκτίμηση της «ηλικίας» των ακτίνων δηλαδή τον χρόνο που παραμένουν στον γαλαξιακό χώρο.

Ειδικότερα ο λόγος Be^{10}/Be . Το Be^{10} έχει χρόνο ζωής $1,6 \cdot 10^6$ y παράγεται στο ίδιο ποσοστό με το σταθερό Be .

Από το μετρούμενο ποσοστό προκύπτει ότι ο χρόνος τ_{esc} είναι 8-30 εκατομμύρια χρόνια και $\lambda_{\text{esc}} = 10 \text{ g/cm}^2$.

Επίσης $\rho_{\text{ist}} = 0,2-0,3 \text{ p/cm}^3$, μικρότερη από την πυκνότητα του γαλαξιακού δίσκου. Συμπεραίνουμε ότι χώρος που κινούνται τα σωματίδια είναι μεγαλύτερος από το πάχος του γαλαξία και επεκτείνεται στην περιοχή της άλω.

Το πάχος της άλω προκύπτει **2,8 parsec** σε σύγκριση με το πάχος του γαλαξιακού δίσκου **0,3 – 0,5 parsec**

Επίδραση Μαγνητικού Πεδίου

Μεταβολή της ροής που οφείλεται στη μεταβολή της ροής του ηλιακού ανέμου.

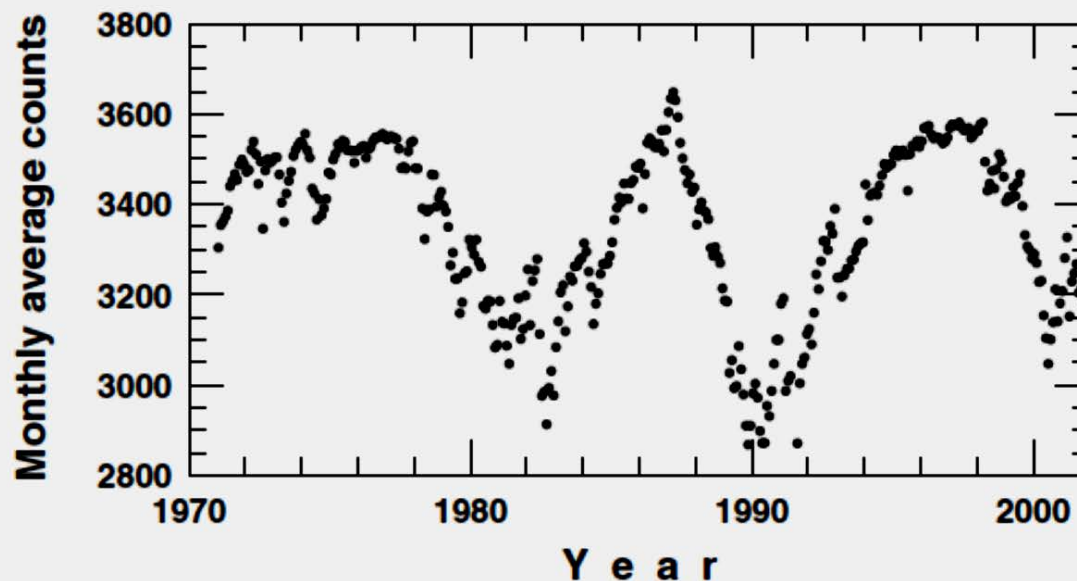


Fig. 5.5. Monthly averages of the counting rate of the Swarthmore/Newark neutron monitor [104]. Note that this is a suppressed zero plot and the variation is of the order of 20%.

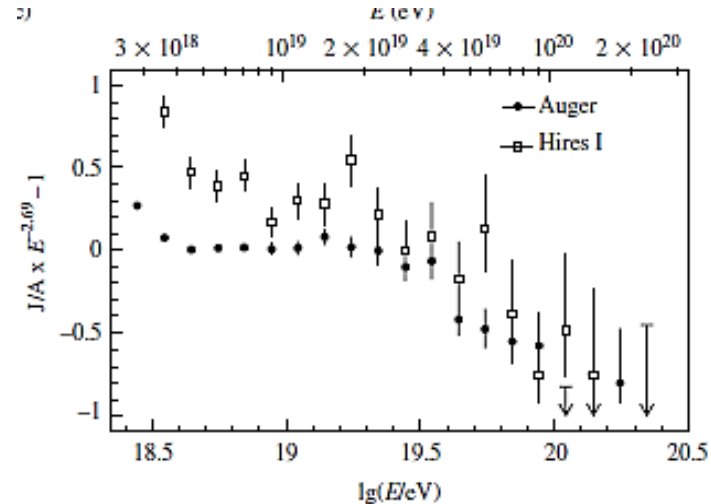
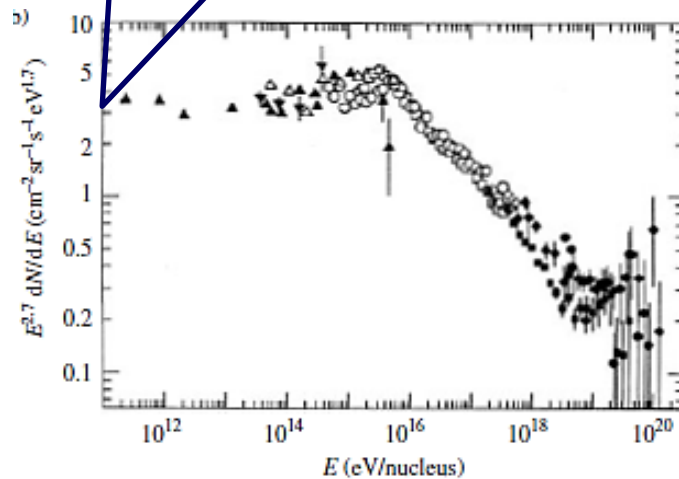
19

Τα σωματίδια αυτά επιταχύνονται στα μαγνητικά πεδία του ηλίου και φθάνουν μέχρι την γη όπου ένα μέρος τους παγιδεύεται στο μαγνητικό πεδίο της γης. Τα ηλιακά σωματίδια έχουν μικρές ταχύτητες 300-500 km/s (φθάνουν στη γη μετά από 48 ώρες) και αντίστοιχα μικρές ενέργειες. Όμως είναι μεγάλος ο αριθμός τους $1.5 \times 10^{12} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Τα κινούμενα φορτία δημιουργούν μαγνητικό πεδίο ($B=5 \times 10^{-9} \text{ T}$, $U=10^{-11} \text{ J/m}^3$) το οποίο κάμπτει τις τροχιές των κοσμικών και ελαττώνεται η ροή που φθάνει στη γη.

Βλέπουμε τη μεταβολή της ροής των κοσμικών να ελαττώνεται κατά τα μέγιστα της ηλιακής δραστηριότητας. Η μεταβολή κυμαίνεται στο 20%.

Το όριο του φάσματος

$\propto E^{-2.7}$ για φανούν
οι λεπτομέρειες:



$$N(E) dE = \text{const} \cdot E^{-2.7} dE \quad E < E_{\text{knee}} = 10^{16} \text{ eV}$$

$$E_{\text{ankle}} \approx 4 \times 10^{18} \text{ eV}$$

$$N(E) dE = \text{const} \cdot E^{-2.69} dE \quad E_{\text{GZK}} > E > E_{\text{ankle}}$$

$$N(E) dE = \text{const} \cdot E^{-4.2} dE \quad E > E_{\text{GZK}} = 4 \times 10^{19} \text{ eV}$$

Λεπτομέρεια της
ανώτατης περιοχής
του φάσματος

Χάρτης Μαγνητικού Πεδίου

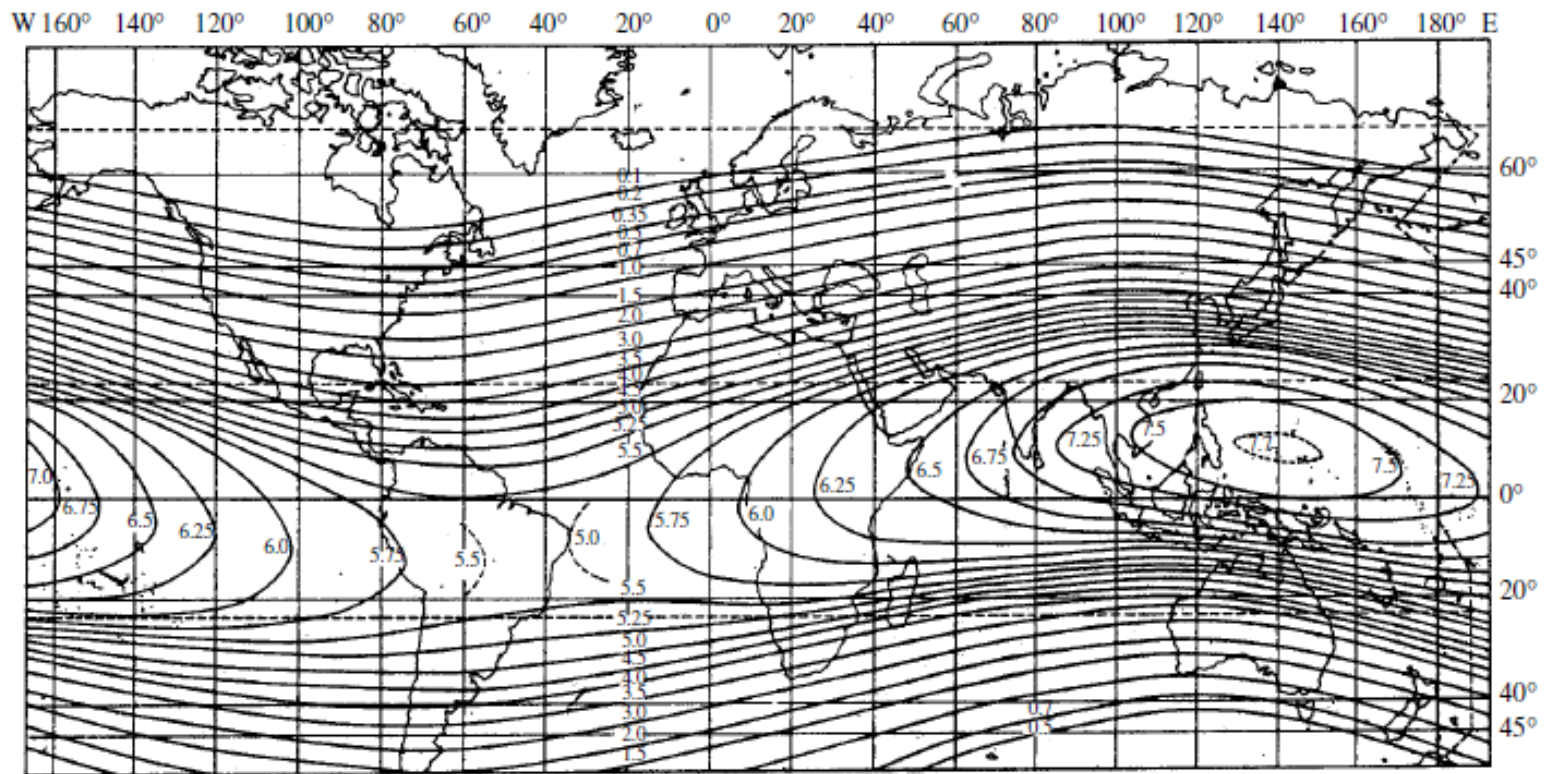


Fig. 9.5 Map of vertical geomagnetic cut-off values, given as kinetic energy in GeV per nucleon, for nuclei with $A = 2Z$. The values were calculated for a displaced dipole field. The maximum cut-off is about 7.7 GeV, or a momentum cut-off of 8.6 GeV/c, per nucleon. For protons the momentum cut-off would then be 17.2 GeV/c, to be compared with the value (9.7) for an undisplaced dipole field (from Webber 1958).