

## Κοσμική ακτινοβολία.

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  $\gamma$  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.

Τα σωματίδια της κοσμικής αντιδρούν με τους πυρήνες της ατμόσφαιρας και παράγουν δευτερογενή σωματίδια. 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.

### Ενεργειακό Φάσμα.

Στο διάγραμμα παριστάνουμε τη ροή σωματιδίων ανά  $\text{cm}^2$  και  $\text{srd}$  και  $\text{GeV}$ . Το  $dN$  το είναι πλήθος σωματιδίων με ενέργεια από  $E$  μέχρι  $E+dE$ . Η (διαφορική) ένταση  $I(E)$  είναι το πλήθος των σωματιδίων  $dN$  με ενέργεια από  $E$  μέχρι  $E+dE$ . Με τη λέξη σωματίδιο εννοούμε πρωτόνιο ή πυρήνα. Η ένταση  $I(E)$  καλύπτει μια τεράστια κλίμακα και για αυτό χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα στους άξονες.

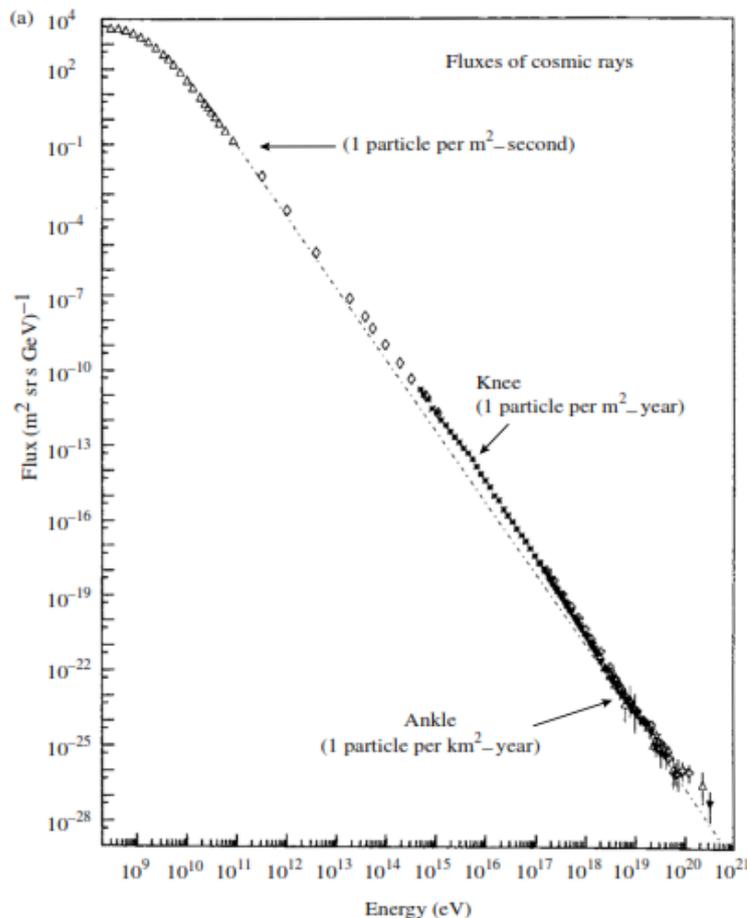
$$I_N(E) \approx 1.8 \times 10^4 (E/1 \text{ GeV})^{-\alpha} \frac{\text{nucleons}}{\text{m}^2 \text{ s sr GeV}},$$

Στις ενέργειες μέχρι  $1 \text{ TeV}$  όπου γίνεται ταυτοποίηση του πυρήνα, η ενέργεια αναφέρεται ανά νουκλεόνιο στις υψηλότερες ενέργειες αναφέρεται ανά πυρήνα

Στο διάγραμμα βλέπουμε το ενεργειακό φάσμα  $I(E)$ . Το ενεργειακό φάσμα έντασης της Κοσμικής ακτινοβολίας, παριστάνει τη ροή των σωματιδίων {αριθμός σωματιδίων / ( $\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{GeV}$ ) } συναρτήσει της ενέργειας ( $\text{GeV}$ ). Η σχέση τους ακολουθεί κατανομή νόμου δύναμης  $J(E) = \text{const } E^{-(\gamma+1)}$ , όπου  $\gamma$  είναι ο φασματικός δείκτης. Επειδή η ένταση  $J(E)$  καλύπτει μια τεράστια περιοχή, χρησιμοποιούμε λογαριθμική κλίμακα στους δύο άξονες.

Στην κλίμακα αυτή, η ροή γράφεται  $E \frac{dN}{dE}$  όπου  $dN$  το πλήθος των σωματιδίων με ενέργεια από  $E$  μέχρι  $E+dE$ . Ο συμβολισμός αυτός χρησιμοποιείται συχνά στη βιβλιογραφία.

Ερμηνεία αν  $N(E)$  είναι η ολοκληρωτική κατανομή δηλαδή ο αριθμός των σωματιδίων με ενέργεια μεγαλύτερη του  $E$ , το ιστόγραμμα  $dN/dE$  είναι η διαφορική κατανομή. Επειδή όμως ο οριζόντιος άξονας είναι ο λογάριθμος της ενέργειας  $\log(E)$ , το διάγραμμα γίνεται  $dN/d(\log E)$  ή  $E dN/dE$ .



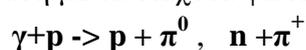
**Εικόνα 1 Ροή Κοσμικών Ακτίνων σαν συνάρτηση της ενέργειας. Η κλίμακα είναι λογαριθμική και στους δύο άξονες.**

Το μέγιστο της ροής είναι  $2 \text{ p}/(\text{m}^2 \text{ sr MeV})$  στο  $1 \text{ GeV}$ . Κοντά στο  $1 \text{ GeV}$  βρίσκεται και η μέση ενέργεια των κοσμικών.

Στις μικρές ενέργειες  $E < 10 \text{ GeV}$  η ροή επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο που μεταφέρεται από τον ηλιακό άνεμο. Η ροή ελαττώνεται στα μέγιστα της ηλιακής δραστηριότητας. Για μεγαλύτερες ενέργειες η επίδραση είναι πολύ μικρή και η ροή αντιπροσωπεύει την ροή στο διάστημα. Από τη ροή των σωματιδίων είναι δυνατόν να υπολογίσουμε την πυκνότητα ενέργειας των σωματιδίων στο διαστρικό χώρο. Προκύπτει  $1 \text{ eV}/\text{cm}^3$ . (0,5). Η ενέργεια είναι συγκρίσιμη με την πυκνότητα ενέργειας μαγνητικού πεδίου περίπου  $0,2 \text{ eV}/\text{cm}^3$  και του οπτικού  $0,3 \text{ eV}/\text{cm}^3$  και του μικροκυματικού υποστρώματος  $0,3 \text{ eV}/\text{cm}^3$ .

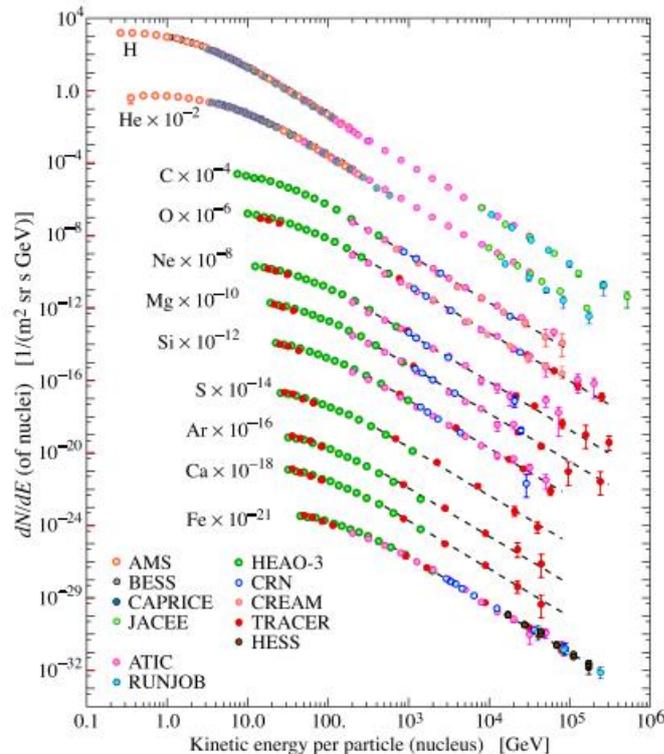
Μετά από τα πρώτα  $10 \text{ GeV}$ , η κλίση της καμπύλης στο μεγαλύτερο μέρος είναι  $E^{-2.7}$ , σε πολύ μεγάλη ενέργεια  $10^{16} \text{ eV}$ , αλλάζει σε  $E^{-3}$  (knee, γόνατο) και σε ακόμη μεγαλύτερη  $4 \times 10^{18}$ , παρατηρούμε αλλαγή στη κλίση (ankle, τارسός) και κατόπιν την αποκοπή GZK στα  $4 \times 10^{19}$ .

(Greisen-Zatsepin-Kusmin) Αντίδραση των πρωτονίων με το κοσμικό μικρο - κυματικό υπόβαθρο δηλαδή με τα διάχυτα φωτόνια.



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 δίνει μέγιστη ενέργεια ανάλογα με το φορτίο άρα η ενέργεια των πυρήνων Fe είναι 24 φορές μεγαλύτερη από του p).

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.



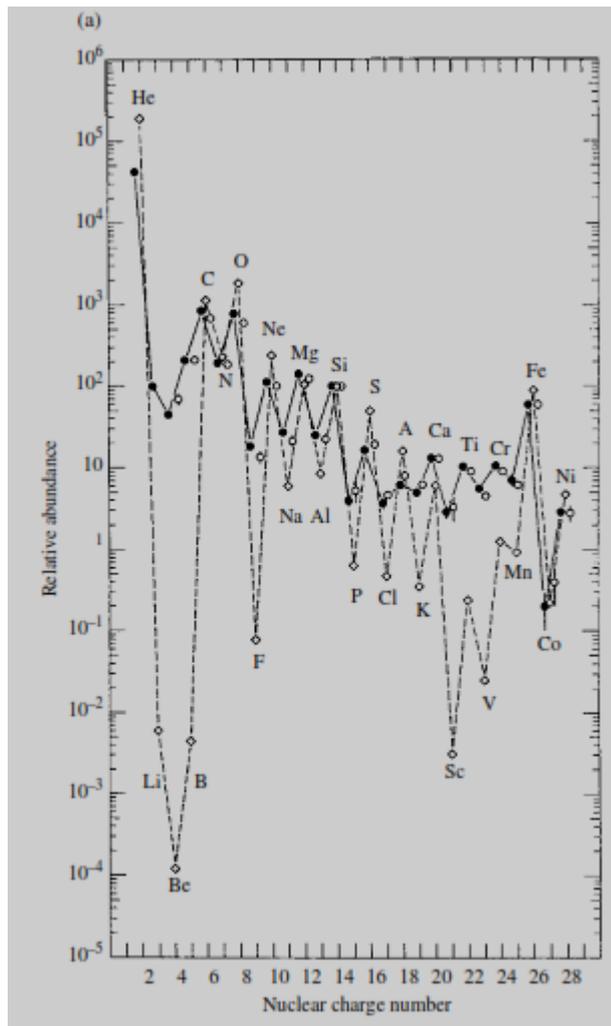
**Figure 26.1:** Fluxes of nuclei of the primary cosmic radiation in particles per energy-per-nucleus are plotted vs energy-per-nucleus using data from Refs. [1–12]. The figure was created by P. Boyle and D. Muller.

**Εικόνα 2 Ροή κοσμικών ακτίνων χωρισμένων κατά είδος πυρήνα, όπως μετρήθηκαν σε διάφορα πειράματα.**

Στο 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)

## Χημική σύνθεση των Κοσμικών Ακτίνων

Στο σχέδιο εμφανίζεται το ποσοστό των στοιχείων στις κοσμικές προς το ποσοστό των στοιχείων στον ήλιο. Παρατηρούμε α) μικρότερο ποσοστό He 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.



Εικόνα 3 Σύγκριση των ποσοστών των στοιχείων στις Κ.Α. (τελείες) και στο η ήλιο (κόκκοι)

Το μικρότερο ποσοστό του Η 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, και 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, και 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  $5 - 10 \text{ g/cm}^2$  για τα περισσότερα σωματίδια. Η πυκνότητα της διαστρικής ύλης είναι  $1 \text{ p/cm}^3$  και άρα αντιστοιχεί σε διαδρομή 1000 kpc. ( $1 \text{ psc} = 3,1 \cdot 10^{16} \text{ m}$ ). Για σύγκριση το μισό πάχος του γαλαξία είναι 100-150 psc

Τα μικρότερα ποσοστά Η και He αποδίδονται στο μηχανισμό επιτάχυνσης. Ενδιαφέρον έχουν και τα ποσοστά των ισοτόπων τους στις ακτίνες σε σχέση τον ήλιο. Τα ισότοπα  $\text{H}^2$  και  $\text{He}^3$  παρουσιάζονται στις ακτίνες σε πολύ μεγαλύτερα ποσοστά

απ ότι στην αστρική ύλη (πίνακας). Τα αυξημένα ποσοστά οφείλονται στην παραγωγή τους από βαρύτερους πυρήνες λόγω spallation.

Τα ποσοστά των ισοτόπων χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της «ηλικίας» των ακτινών 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 και παράγεται στο ίδιο ποσοστό με το σταθερό Be. Από το μετρούμενο ποσοστό προκύπτει ότι ο χρόνος διαφυγής  $\tau_{esc} \approx 8-30$  εκατομμύρια χρόνια και το ισοδύναμο μήκος διαφυγής  $\lambda_{esc} = 10 \text{ g/cm}^2$ . Επίσης η πυκνότητα της διαστρικής ύλης  $\rho_{ist} \approx 0,2-0,3 \text{ gr/cm}^3$  και είναι μικρότερη από την πυκνότητα του γαλαξιακού δίσκου. Άρα οι ακτίνες ταξιδεύουν έξω από το επίπεδο του γαλαξία, στην άλω του γαλαξία. Έτσι το πάχος της άλω προκύπτει 2,8 parsec σε σύγκριση με το πάχος του γαλαξιακού δίσκου που είναι περίπου 0,3 – 0,5 parsec

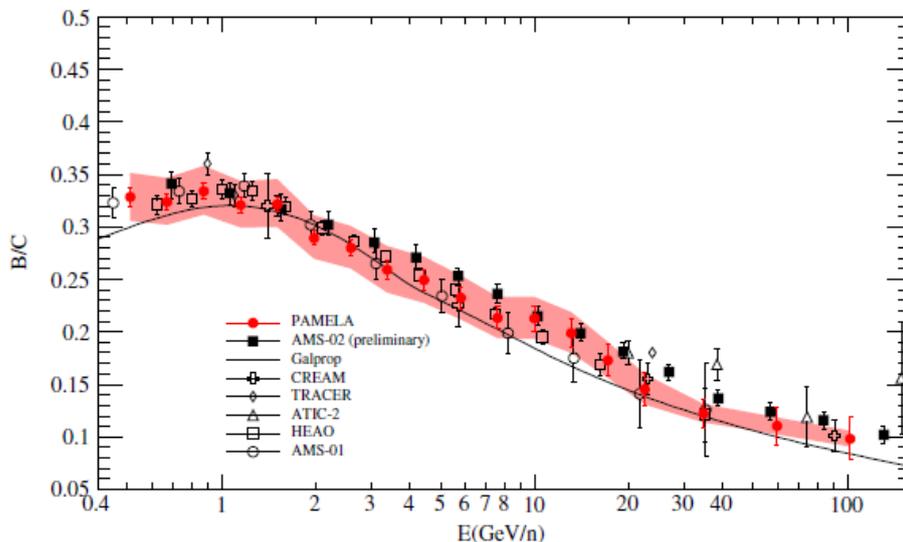
αντίστοιχα από  $Al^{26}/Al$   $\tau_{esc} = 16 \pm 3 \text{ mil y}$  και  $\rho_{ist} = 0,28 \pm 0,5 \text{ gr/cm}^3$

Από  $Cl^{36}/Cl$   $\rho_{ist} = 0,39 \pm 0,4$

μέσος όρος  $\tau_{esc} = 15 \pm 2$  εκατ. χρόνια  $\rho_{ist} = 0,26 \pm 0,3$ . Νεώτερα  $\tau_{esc} = 17 \pm 4$  στην περιοχή κάτω από 1 GeV

Τα φορτισμένα σωματίδια διαγράφουν ελικοειδείς τροχιές διασχίζοντας τον γαλαξιακό δίσκο.

## Νεώτερα αποτελέσματα από το δορυφορικό πείραμα PAMELA.



**Εικόνα 4** Διάγραμμα του λόγου B/C σαν συνάρτηση της ενέργειας. Ο λόγος B/C ελαττώνεται γιατί οι πυρήνες C με μεγάλη ενέργεια διαφεύγουν από τον γαλαξία.

Η παραγωγή Βορίου γίνεται από την αντίδραση των πυρήνων Άνθρακα με πρωτόνια, άρα εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής στον γαλαξία, άρα από τον χρόνο παραμονής. Για ενέργεια μέχρι 10 GeV το ποσοστό είναι περίπου σταθερό. Δηλαδή οι απώλειες εξισορροπούνται από την παραγωγή.

Στις υψηλότερες ενέργειες ο λόγος B/C μικραίνει δηλαδή παράγεται λιγότερο B, άρα ο χρόνος παραμονής των πυρήνων άνθρακα υψηλής ενέργειας είναι μικρότερος.

Από τις παραπάνω μετρήσεις, ο ενεργειακός εκθέτης  $\gamma$  για τον άνθρακα προκύπτει  $-2,72$  και για το Βόριο  $-3,01$ .

## Σύσταση, βοηθητικές εικόνες.

### 1 Overview

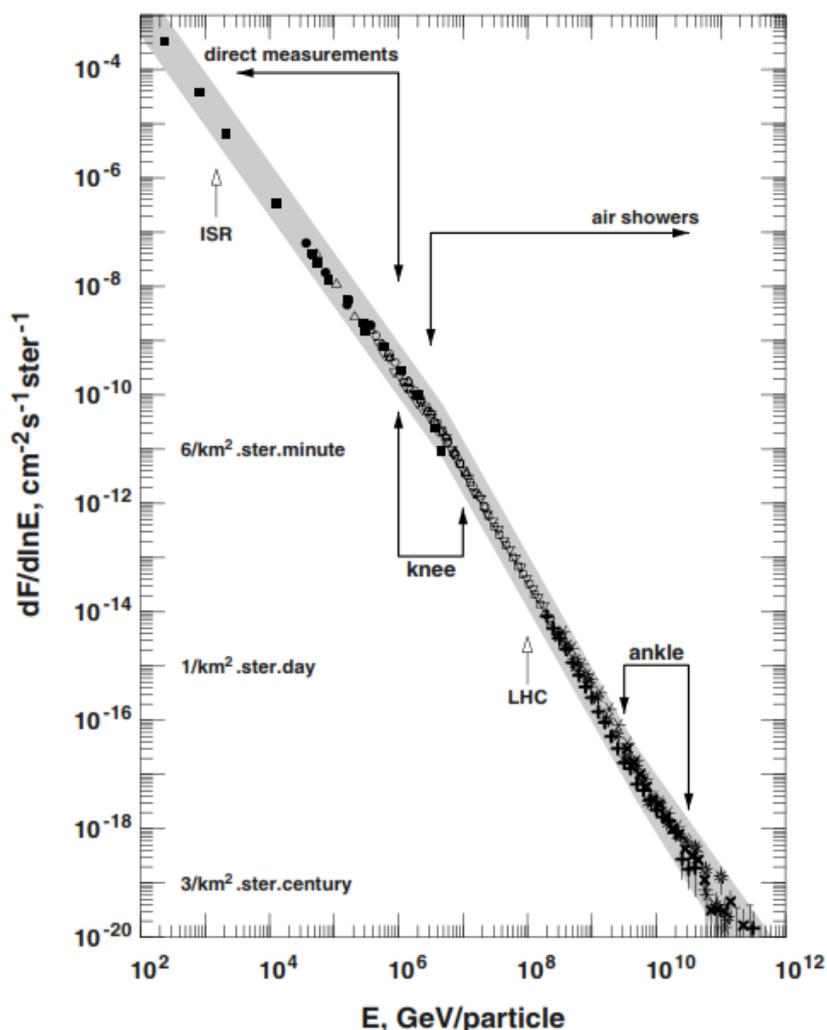


Fig. 1.2. Energy spectrum of all cosmic ray nuclei above 100 GeV.

**Εικόνα 5 Φάσμα για  $E > 100 \text{ GeV}$ , σημειώνονται οι διάφορες περιοχές και η ροή σε διάφορες ενέργειες του φάσματος.**

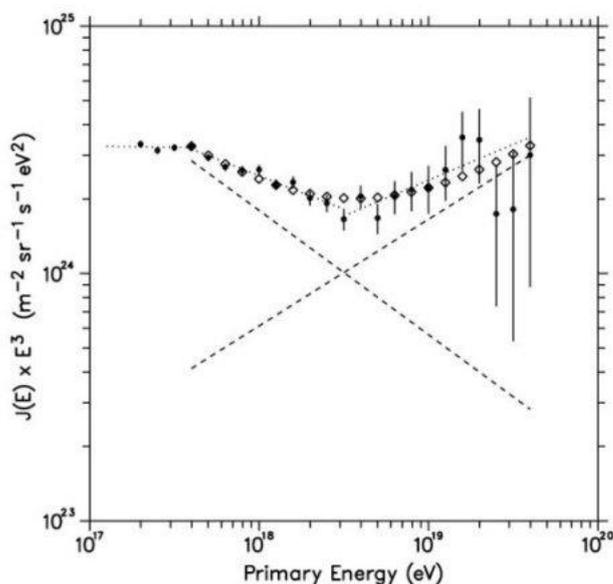
Τα φορτισμένα σωματίδια των πρωτογενών Κ.Α. αποτελούνται κυρίως από πρωτόνια (86%), σωματίδια Άλφα (11%), βαρύτεροι πυρήνες ως το Ουράνιο (1%) και Ηλεκτρόνια (2%). Τα παραπάνω θεωρούνται ότι προέρχονται από πρωτογενείς πηγές αλλά υπάρχει και πολύ μικρό ποσοστό Ποζιτρονίων και Αντιπρωτονίων τα οποία παράγονται δευτερογενώς από τις αντιδράσεις των πρωτογενών με το διαστρικό αέριο.

Τα ποσοστά υπολογίζονται για σωματίδια τα οποία διεισδύουν στην ατμόσφαιρα δηλαδή έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από την ενέργεια αποκοπής που προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο της γης.

Τα ουδέτερα σωματίδια αποτελούνται από Νετρίνα, Αντινετρίνα και ακτίνες Γάμα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, έχει ταυτοποιηθεί η προέλευση τους από σημειακές πηγές όπως νετρίνα από τον ήλιο, και από τον SN1987, ακτίνες  $\gamma$  από το νεφέλωμα του Καρκίνου και του Κύκνου κ.α.

Στην περιοχή από  $10^{12} - 10^{15} \text{ eV}$  ( $E = 10^3 - 10^6 \text{ GeV}$ ) η σύσταση όπως έχει μετρηθεί έξω από την ατμόσφαιρα, είναι κατά προσέγγιση:

- ~50% Πρωτόνια
- ~25% Σωματίδια Άλφα
- ~13% πυρήνες C/N/O
- <1% Ηλεκτρόνια <0.1% ακτίνες Γάμο

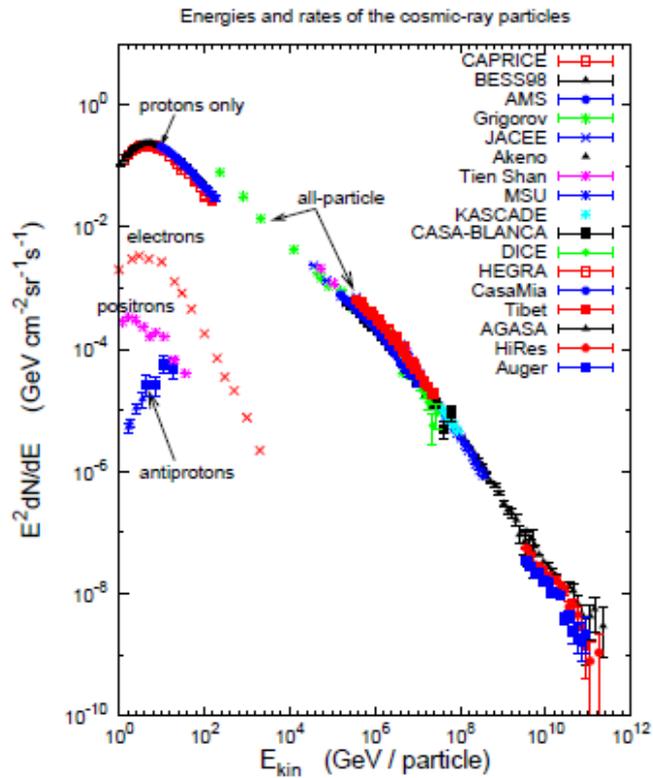


**Εικόνα 6** Το ανώτερο μέρος του φάσματος, πολλαπλασιασμένο με  $E^3$  για να φαίνονται οι λεπτομέρειες. Βλέπουμε την αλλαγή της κλίσης για ενέργειες μεγαλύτερες από  $10^{18}$  eV. Η περιοχή της αποκοπής GZK.

Από τις μικρές ενέργειες και μέχρι τα 100 GeV οι μετρήσεις που γίνονται με καλορίμετρα τα οποία δίνουν με μεγάλη ακρίβεια την ορμή το φορτίο και το είδος του πυρήνα. Τα μαγνητικοί φασματογράφοι συνεχίζουν μέχρι τα 100 TeV αλλά με περιορισμένη διακριτότητα 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 στην ατμόσφαιρα, την μέτρηση της κεντρικής περιοχής του καταιονισμού κ.α..

**Για τη δημιουργία του γόνατου** στα 3 PeV (  $1\text{PeV} = 10^{15}$  eV ή  $10^6$  GeV) θεωρούμε τους εξής παράγοντες:

- i) Η παραγωγή από τα υπολείμματα S.N. σύμφωνα με τα μοντέλα, περιορίζεται σ' αυτές τις ενέργειες.
- ii) Η πιθανότητα διαφυγής έξω από τον γαλαξία είναι μεγαλύτερη για τις μεγάλες ενέργειες ή μαγνητικές ακαμψίες.
- iii) Άλλα και ο τρόπος μέτρησης: μετράμε την ολική ενέργεια. Άρα οι πυρήνες θα έχουν μεγαλύτερη ενέργεια από πρωτόνια της ίδιας ακαμψίας.



**Εικόνα 7** Πρόσφατο διάγραμμα με πολλές μετρήσεις. Ξεχωρίζει η περιοχή που γίνεται η ταυτοποίηση των σωματιδίων και η περιοχή που η ανιχνεύονται μόνον οι καταιονισμοί που παράγονται στην ατμόσφαιρα.

T.Gaisser Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe, University of Tokyo, Kashiwa, Feb 22-24, 2006

M.S. Longair “High Energy Astrophysics”, v1, Cambridge , 2002.

D. Perkins, “Astroparticle Physics”, Oxford, 2009.

Μονάδες.

$$1 \text{ AU} = 1,496 \times 10^{11} \text{ m}$$

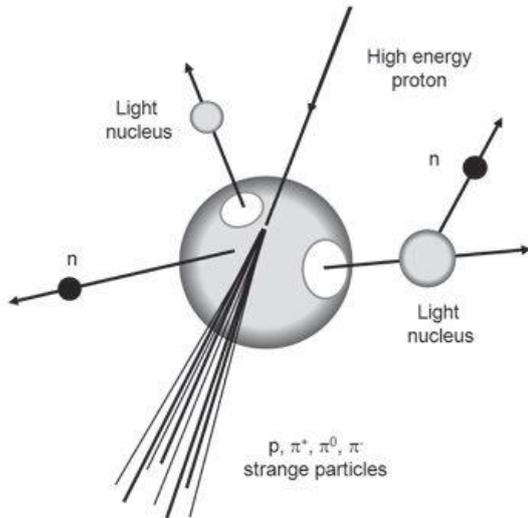
$$1 \text{ pc} = 3,086 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ ly} = 9,465 \times 10^{15} \text{ m}$$

$$1 \text{ ly} = 0,3066 \text{ pc}$$

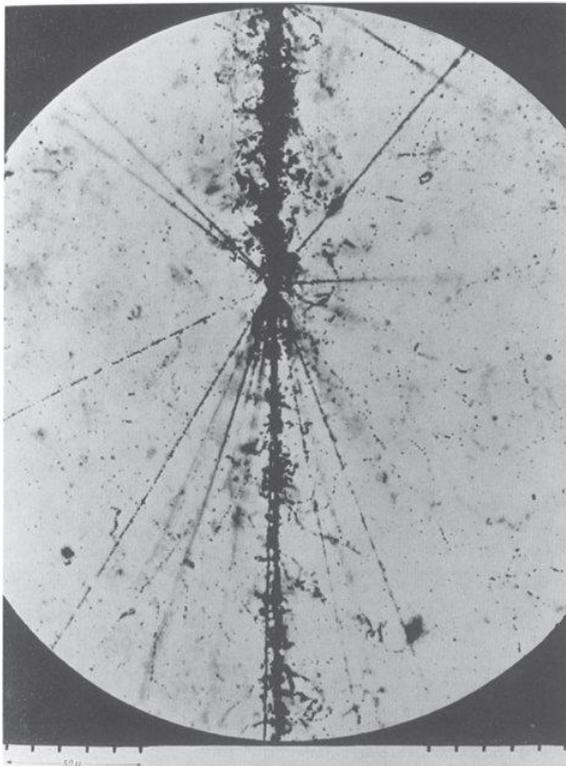
## Αντίδραση κοσμικού πρωτονίου με πυρήνα στην ατμόσφαιρα.

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. Όταν ο πυρήνας είναι ακίνητος τα προϊόντα του spallation εκτοξεύονται ισότροπα με μικρές ταχύτητες.



Εικόνα 8 Διάγραμμα αντίδρασης ενός πρωτονίου υψηλής ενέργειας με πυρήνα.

Στην περίπτωση που ο πυρήνας κινείται με σχετικιστική ταχύτητα, τα προϊόντα εξακολουθούν να κινούνται κατά τη φορά του αρχικού πυρήνα.



The collision of a cosmic ray iron nucleus with a nucleus of a nuclear emulsion (Powell *et al.*, 1959).

Εικόνα 9 Αντίδραση πυρήνα σιδήρου σε φιλμ. Βλέπουμε τον ιονισμό του αρχικού πυρήνα και στη συνέχεια, έναν ελαφρύτερο πυρήνα και φορτισμένες τροχιές. Το φορτίο του πυρήνα προκύπτει από την πυκνότητα του ιονισμού.