



Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Φυσικής – Τομέας Πυρηνικής Φυσικής & Στοιχειωδών Σωματιδίων
Σταθμός Κοσμικής Ακτινοβολίας

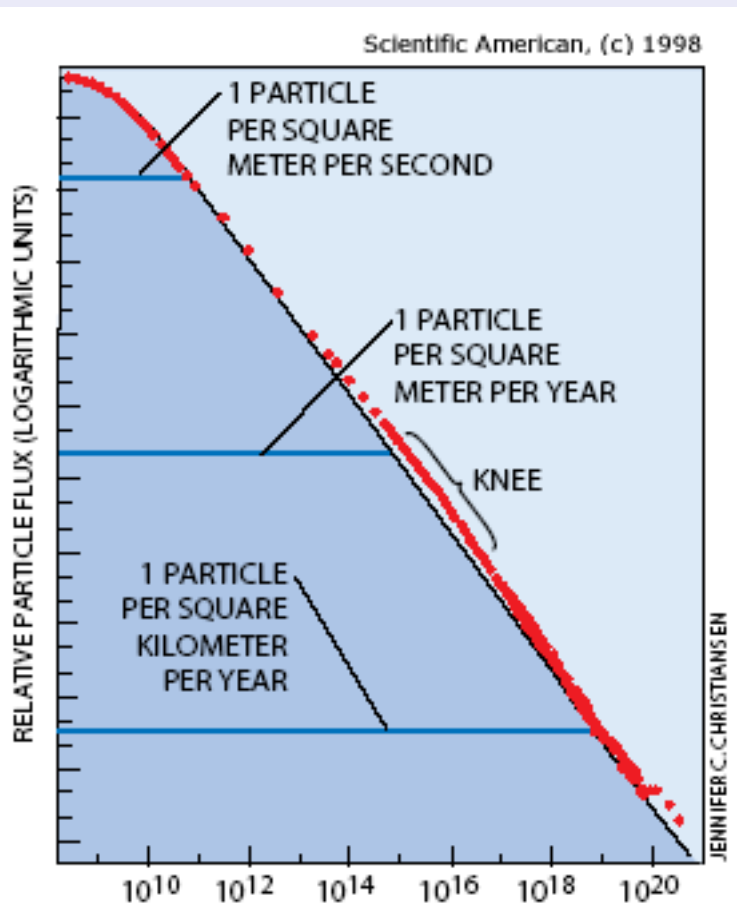


Μάθημα Επιλογής: Αστροσωματιδιακή και Κοσμική Ακτινοβολία

ΙΣΟΤΟΠΙΚΕΣ ΑΦΘΟΝΙΕΣ_ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΙ

<http://cosray.phys.uoa.gr>

Ολοκληρωμένο Ενεργειακό Φάσμα



➤ 14 ταξεις μεγέθους (ενέργειες) -32 ταξεις μεγέθους (ροή)

➤ Γόνατο : $3 \times 10^{15} \text{eV}$

Αστράγαλος: $3 \times 10^{18} \text{eV}$

κατώφλι **GZK**: $E > 4 \times 10^{19} \text{eV}$

} Διαφορετική
τιμή ενεργειακού
εκθέτη γ

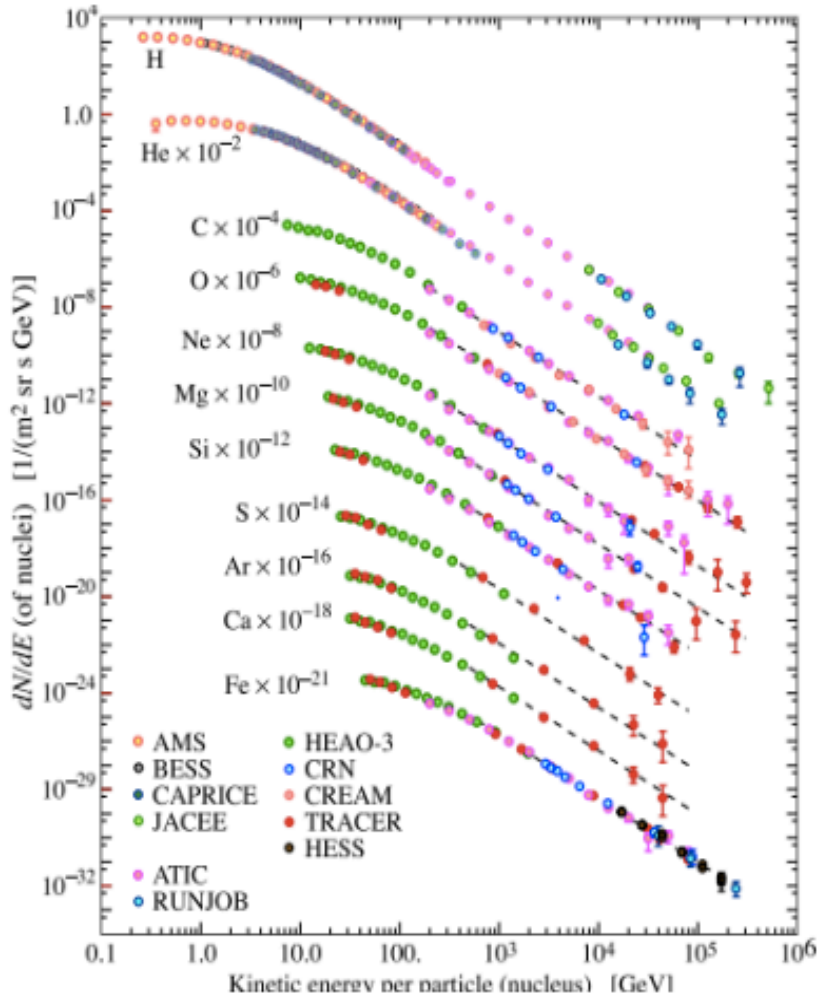
Στις χαμηλές ενέργειες ($E < 1 \text{GeV}$) υπάρχει ένα κατώφλι (cut-off) και το φάσμα αποκλίνει από τη μορφή της κατανομής που έχουμε στις ψηλότερες ενέργειες. Η ενέργεια και το σχήμα του κατωφλίου εξαρτάται από τη φάση του ηλιακού κύκλου

➤ Μέγιστο ροής , $2 \text{ p/m}^2 \text{ sr MeV}$ στο 1 GeV .

Η μέση πυκνότητα ενέργειας Κ.Α. $E > 1 \text{GeV}$, είναι 1 eV/cm^3 ή 1 MeV/m^3 .

Το φάσμα e^- πιο απότομο από των p και πυρήνων λόγω της ακτινοβολίας σύγχροτρον.

Διαφορικό Ενεργειακό Φάσμα



Experimental observations indicate that primary cosmic rays have a power energy spectrum, that is, the number $N(E)$ of particles arriving from space at the boundary of the earth's atmosphere with energies in the range $(E, E + dE)$ is given by a law of the form

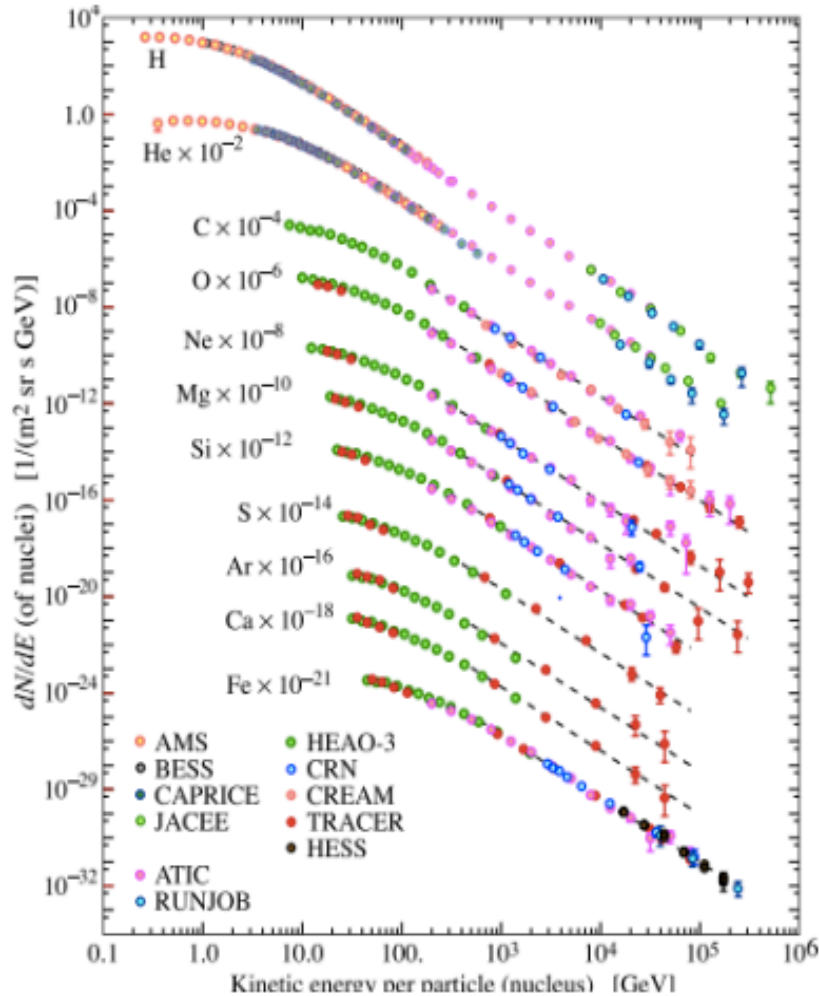
$$N(E) = KE^{-\gamma}dE, \quad (1)$$

where the exponent γ is almost identical for different groups of nuclei.

Σωματίδια με $E_k \leq 1 \text{ GeV}/\mu\text{ρρήνα}$ μπορούν να φθάσουν στη Γη μόνο σε ψηλά γεωμαγνητικά πλάτη.

$$R = \left(\frac{A}{Z} \right) \left(\frac{m_p \gamma v c}{e} \right)$$

Διαφορικό Ενεργειακό Φάσμα



➤ Δευτερογενής πυρήνες = πιο απότομο φάσμα. Αναλογία 1γενής/2γενής ελαττώνεται αυξανόμενης της ενέργειας (τα υψηλοενεργειακά διαχέονται πιο γρήγορα) .

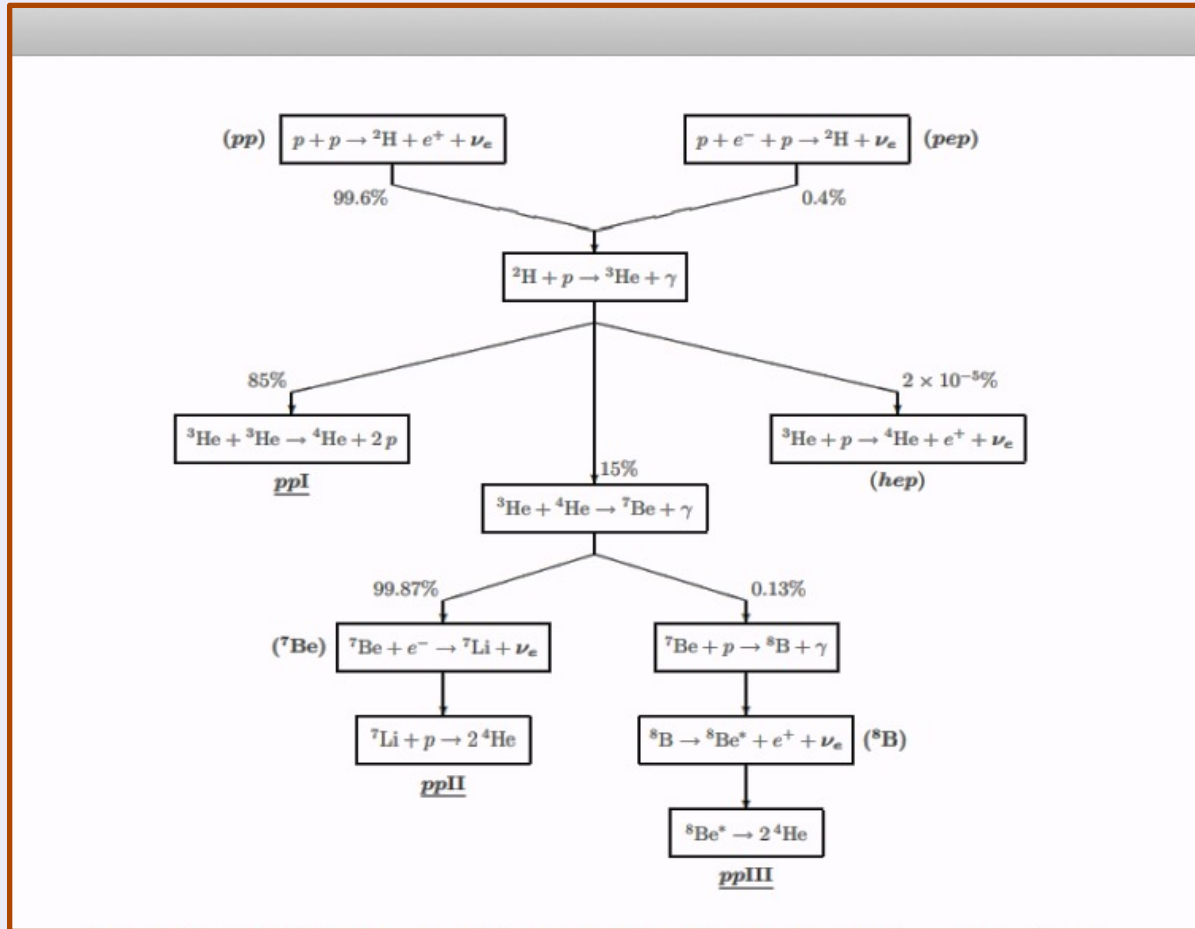
Σωματίδια με διαφορετική μάζα και φορτίο αλλά με την ίδια **δυσκαμψία** έχουν την ίδια συμπεριφορά σε οποιαδήποτε διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου.

ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

Τα ισότοπα του H και He αποτελούν μια σημαντική ομάδα ισοτόπων .

✓ ^1H και ^4He μεγάλες αφθονίες στο Δ.Χ.

^4He παραγωγή (p-p chain)



ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

“Cosmic Ray Clocks”

Τα ποσοστά των ισοτόπων χρησιμοποιούνται για τη εκτίμηση της «ηλικίας» των ακτίνων δηλαδή το χρόνο που παραμένουν στο γαλαξιακό χώρο.

Αν είναι γνωστός ο ρυθμός παραγωγής των διαφορετικών ισοτόπων ενός στοιχείου μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για το χρόνο που χρειάζονται τα δείγματα να φθάσουν στη Γη από τις πηγές τους. Το πιο γνωστό από αυτά τα “cosmic-ray clocks” είναι το ισότοπο ^{10}Be , το οποίο έχει χρόνο ημιζωής $1.5 \cdot 10^6$ χρόνια και είναι έτσι ένας πολύ χρήσιμος διαχωριστής για τον προσδιορισμό των τυπικών χρόνων ζωής των προϊόντων θρυμματισμού στη γειτονιά της Γης.

ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

Ο χρόνος ζωής πολύ σημαντικός γιατί καθορίζει την ενεργεια που απαιτείται για τη διατήρηση της ενεργειακής πυκνότητας των Κ.Α, (e.g., Gaisser, 1990).

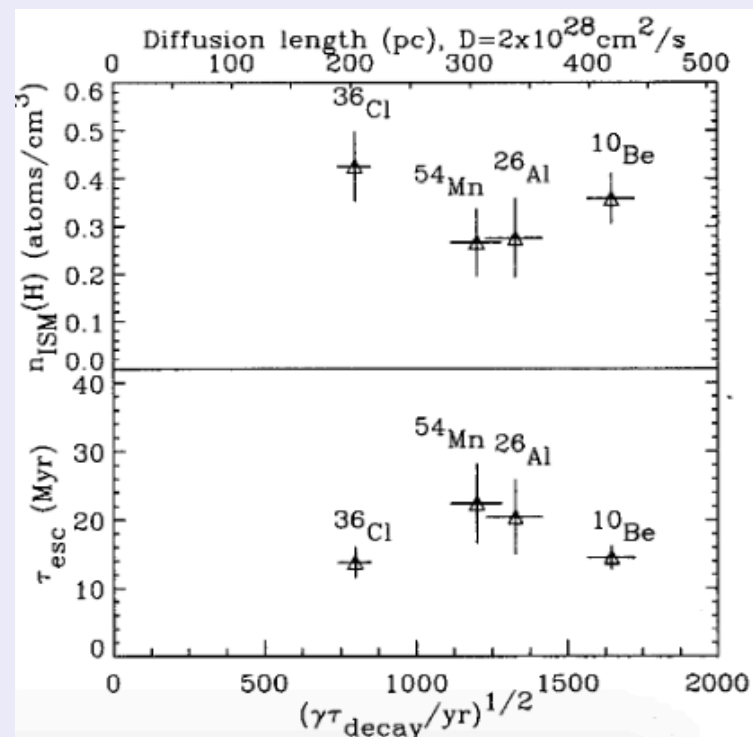
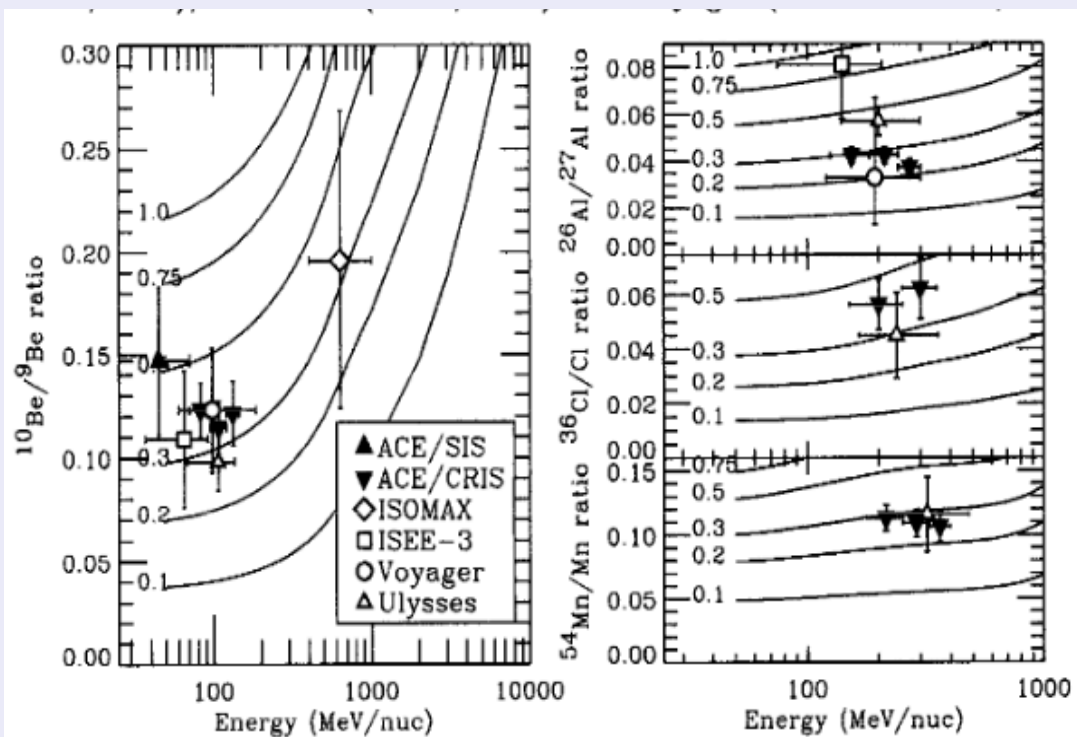
Μετρήσεις αφθονίας ^{10}Be \rightarrow half-life of 1.5 My \rightarrow estimated confinement time of $\tau_{\text{esc}} \approx 10$ to 30 My for cosmic-ray (Simpson and Garcia-Munoz, 1988) \rightarrow μεση πυκνότητα διαπλανητικού μεσου που «κατοικούν» οι Κ.Α. ~ 0.2 to ~ 0.4 H atoms cm^{-3} , σημαντικά μικρότερη απο του γαλαξιακού δίσκου (~ 1 H atom cm^{-3}) \rightarrow Οπότε οδηγούμαστε στο συμπέρασμα οτι βρίσκονται σε χαμηλής πυκνότητας οπως η galactic halo.

Ulysses and ACE missions πιο ακριβής μετρήσεις

ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

Ο λόγος των ισοτόπων χρησιμοποιούνται για τη εκτίμηση της ποσότητας της ύλης από την οποία περνούν οι Κ.Α. κατά τη διαδοσή τους στο γαλαξιακό χώρο.

ΛΟΓΟΣ $\text{Be}^{10} / \text{Be}^9$



Yanasak N.E. et al., Adv.Space.Res.27,2001

Απο τη μετρήσιμη τιμή του λόγου προκύπτει τ_{esc} περίπου 14 Myr

ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ

Κ.Α.

“Cosmic Ray Clocks”

TABLE I
Radioactive clock parameters^a

Isotope	Halflife (My)	Density (H atoms per cubic cm)	Surviving fraction	Confinement time (My)
¹⁰ Be	1.51	0.358 ± .032 ± .058	0.252 ± .018 ± .039	14.5 ± 1.3 ± 2.2
²⁶ Al	0.873	0.276 ± .018 ± .084	0.248 ± .012 ± .056	20.4 ± 1.3 ± 5.7
³⁶ Cl	0.307	0.425 ± .067 ± .077	0.155 ± .021 ± .024	13.8 ± 2.2 ± 2.6
⁵⁴ Mn	0.63 ± .17	0.267 ± .027 ± .084, -.060	0.284 ± .019 ± .022	22.4 ± 2.3 ± 6.1

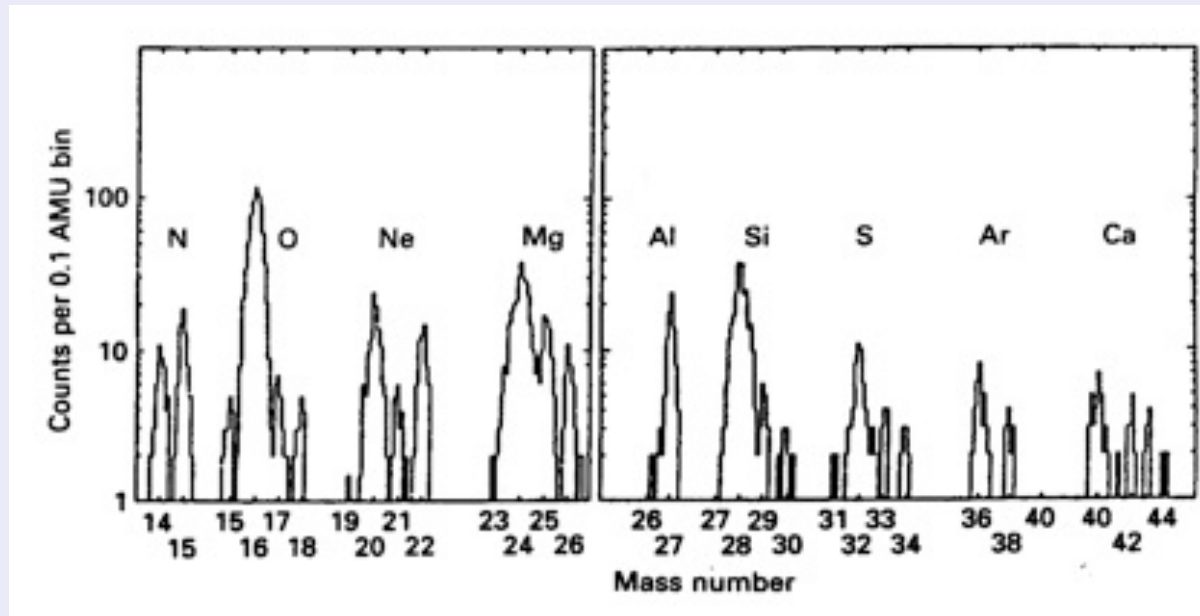
^aUncertainties are shown as (a) statistical only; and (b) systematic uncertainties added in quadrature. These results are from Yanasak *et al.* (2001).

(¹⁰Be, ²⁶Al, ³⁶Cl, and ⁵⁴Mn) with substantially different half-lives. Measurements of these clock isotopes from ACE are shown in Figure 4. A summary of ACE, Ulysses, Voyager, and ISEE-3 measurements is shown in Figure 5. Also shown are calculations for a steady state LBM parameterized by the mean density of matter in the cosmic ray storage region (Yanasak *et al.*, 2000). Note that there is generally good agreement, and that the ACE results for all four clocks are consistent with an average density of 0.36 H atoms cm⁻³. These calculations employ an energy-dependent mean pathlength of a form suggested by Soutoul and Ptuskin (1999),

Mewaldt et al., Space Science Reviews, 2001

ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

Ο λόγος των ισοτόπων κάποιων βαρέων στοιχείων χρησιμοποιούνται στην αναζήτηση των πηγών των Κ.Α.



Φασματική
ανάλυση



$^{22}\text{Ne}/^{20}\text{Ne}$ είναι
τέσσερες φορές
μεγαλύτερη από την
αντίστοιχη τιμή του
Η.Σ.

Παραδείγματα ισοτοπικών αφθονιών στον στοιχείων *N, O, Ne, Mg, Al, Si,*

Ενισχυμένες στις ΚΑ οι αφθονίες των εμπλουτισμένων σε νετρόνια ισοτόπων σε σχέση με τις αντίστοιχες του ηλιακού συστήματος.

ΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΓΑΛΑΞΙΑΚΗΣ Κ.Α.

ΚΑ με $E < 10\text{GeV}$ _ηλιακή διαμόρφωση άρα δεν μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τις διευθύνσεις άφιξης των ΚΑ, στο ηλιακό σύστημα. Μόνο τα υψηλής ενέργειας πρωτόνια και πυρήνες διεισδύουν ως την τροχιά της Γης χωρίς να εκτρέπονται από το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο.

Μέτρο της εκτροπής: λόγος της γυροκτίνας ως προς την κλίμακα του Η.Σ.

Σχετικιστικό πρωτόνιο

$$r_g = 3 \cdot 10^9 \gamma \left(\frac{B}{10^{-9} T} \right) m$$

όπου το B : τοπικό διαπλανητικό πεδίο (Tesla) και $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ είναι ο συντελεστής Lorentz.

ΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΓΑΛΑΞΙΑΚΗΣ Κ.Α.

Σχετικιστικά πρωτόνια με ενέργειες 10^{12}eV ($\gamma=10^3$) και τοπικό μαγνητικό πεδίο στον διαπλανητικό χώρο είναι $B=10^{-9}\text{T}$

$$r_g = 3 \cdot 10^{12} \text{ m}$$

Δηλαδή 20 AU (δηλαδή 20 φορές μεγαλύτερη από την απόσταση Γης-Ηλίου)



Σωματίδια με ενέργειες της τάξης των 10^{12}eV και μεγαλύτερες είναι αυτά που διατηρούν την πληροφορία για τις διευθύνσεις άφιξης στο ηλιακό σύστημα όταν φτάνουν στο όριο της ατμόσφαιρας.

$$1 \text{ AU} = 149,597 \cdot 10^6 \text{ km}$$

ΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΓΑΛΑΞΙΑΚΗΣ Κ.Α.

Συνδυασμένες μετρήσεις (ανιχνευτές μιονίων) για διάφορες ενέργειες → πλάτος ανισοτροπίας (%) στην κατανομή των διευθυνσεων σαν συνάρτηση της ενέργειας.

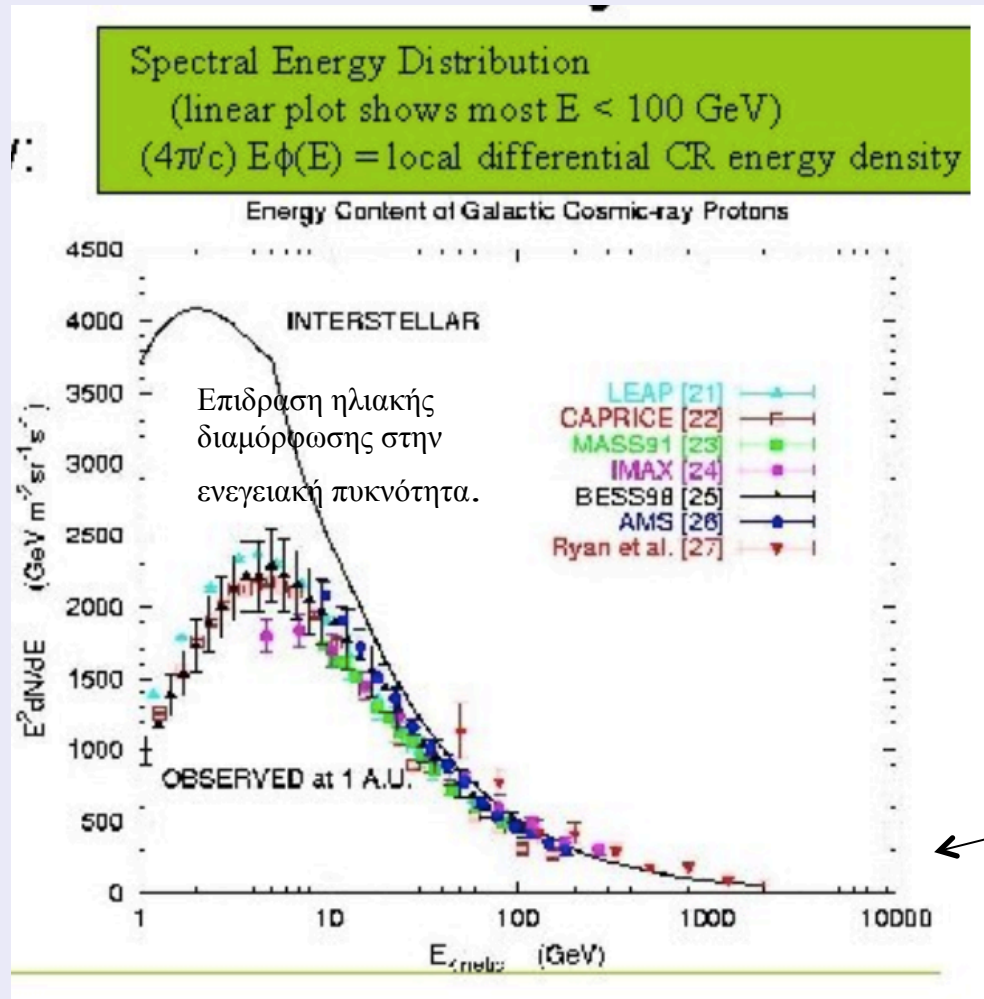
$$\delta = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \leq 2 \times 10^{-4}$$

ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΗ ΡΟΗ Κ.Α

Οι κοσμικές ακτίνες είναι σχεδόν ισοτροπικές στις περισσότερες ενέργειες λόγω της διάχυτης διάδοσης στο γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο. Το Milagro, το IceCube, και το Tibet-III διατάξεις ατμοσφαιρικών καταιγισμών έχουν παρατηρήσει ανισοτροπία στο επίπεδο της τάξης του 10^{-3} για κοσμικές ακτίνες με ενέργεια μερικών TeV.

Ενεργειακή πυκνότητα- Ενεργειακό Φάσμα

Υπόθεση ότι η ροή των σωματιδίων που παρατηρείται στο όριο της ατμόσφαιρας είναι αντιπροσωπευτική αυτής στον ενδοαστρικό χώρο



Gaiser T., 2003

Η σχέση ενεργειακής πυκνότητας και φάσματος προκύπτει από τη σχέση μεταξύ ροής και αριθμητικής πυκνότητας ρ των ΚΑ.

$$Flux \left(\frac{particles}{cm^2 \cdot s \cdot st} \right) = \frac{\rho \cdot \beta c}{4\pi}$$

Οπότε ενεργειακή πυκνότητα ρ_E

$$\rho_E = 4\pi \int E \frac{dN}{dE} \frac{dE}{\beta c} = \int \frac{4\pi E^2 dN}{\beta c dE} d \ln E$$

Ενεργειακή πυκνότητα- Ενεργειακό Φάσμα

Μέγιστο του φάσματος των πρωτονίων είναι 2 πρωτόνια / $m^2 \cdot s \cdot st \cdot MeV$ για ενέργειες της τάξης του 1 GeV.

Οι Wdowczyk και Wolfendale (1989) υπολόγισαν ότι η ολική ενεργειακή πυκνότητα των ΚΑ με $E > 1 GeV$ είναι περίπου $1 MeV/m^3$ ($1 eV/cm^3$).

Πυκνότητα ενέργειας του ενδοαστρικού μαγνητικού πεδίου:

$$\frac{B^2}{2 \cdot \mu} = 0.2 eV / cm^3$$

Τοπική ενεργειακή πυκνότητα του φωτός των αστέρων είναι $0.3 eV/cm^3$

Ενεργειακή πυκνότητα των μικροκυμάτων είναι: $0.3 eV/cm^3$

Συμφωνία_
 ίδια ταξη
 μεγέθους.