



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



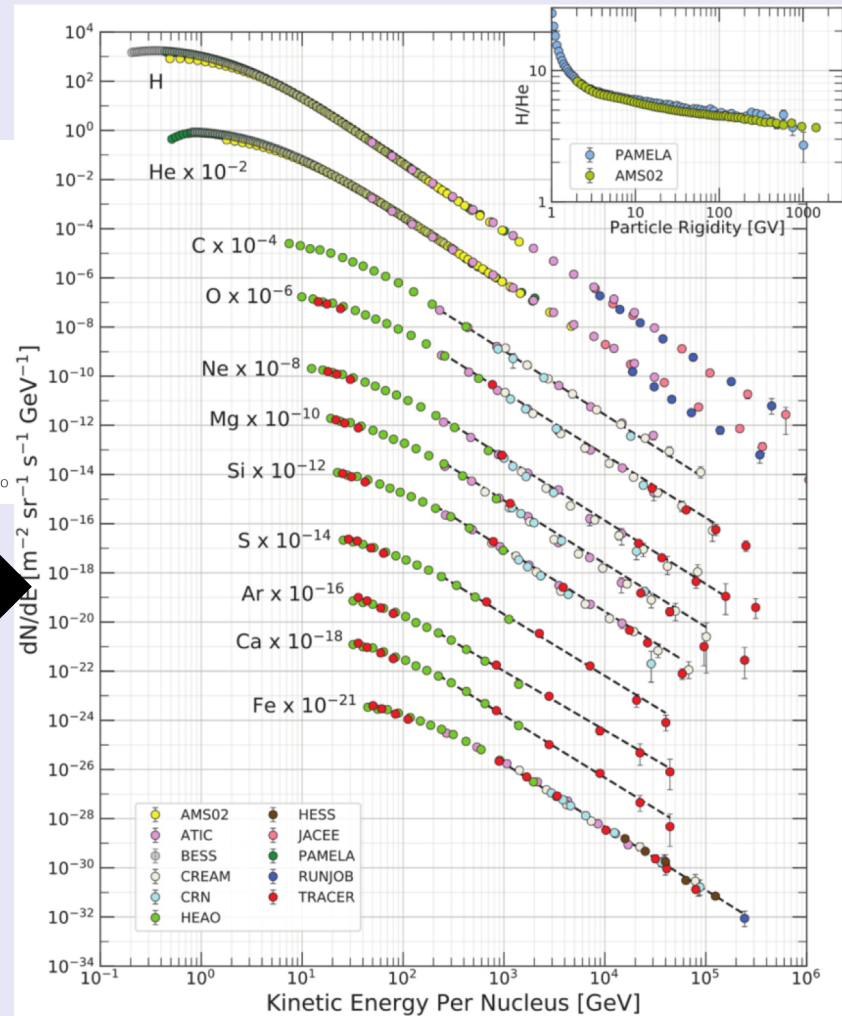
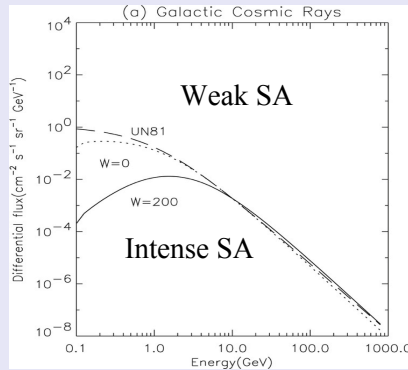
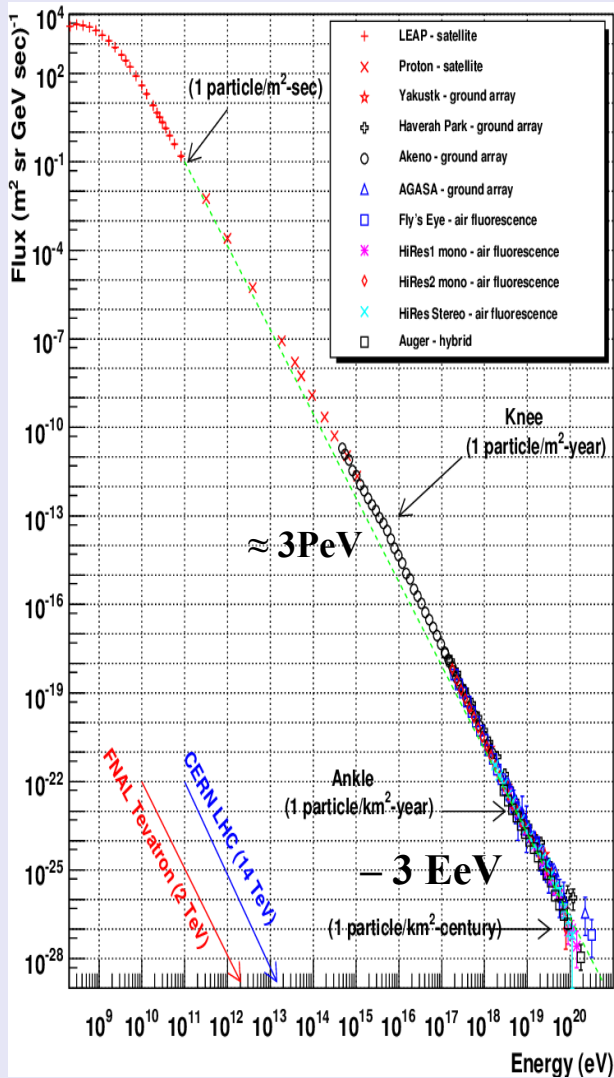
Μάθημα Επιλογής: Αστροσωματιδιακή και Κοσμική Ακτινοβολία

ΙΣΟΤΟΠΙΚΕΣ ΑΦΘΟΝΙΕΣ_ΙΣΟΤΡΟΠΙΑ

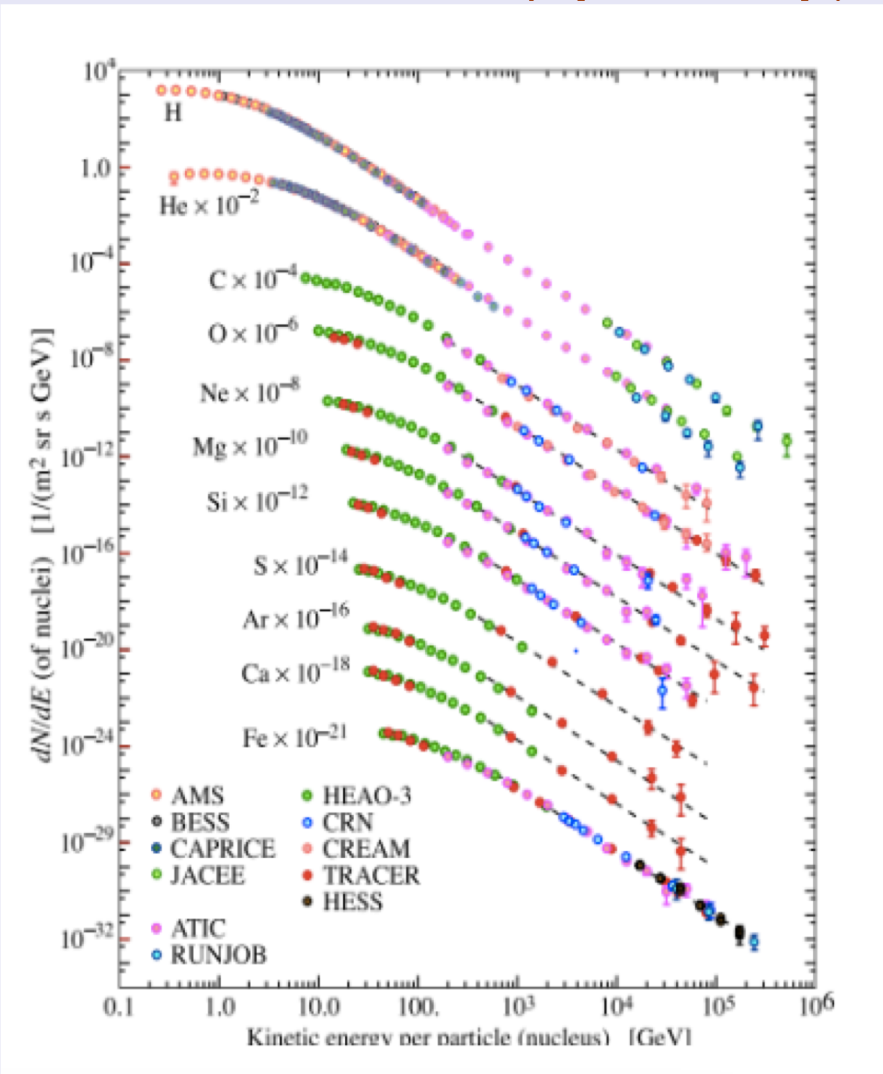
<http://cosray.phys.uoa.gr>

Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ
Χειμερινό Εξάμηνο, 2024-2025

Ολοκληρωμένο → Διαφορικό Ενεργειακό Φάσμα



Διαφορικό Ενεργειακό Φάσμα



Δυναμική φορτισμένου σωματιδίου μέσα σε μαγνητικό πεδίο- μαγνητική δυσκαμψία. Σωματίδια με διαφορετική μάζα και φορτίο αλλά με την ίδια δυσκαμψία έχουν την ίδια συμπεριφορά σε οποιαδήποτε διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου. Αν εκφράσουμε τις ενέργειες των σωματιδίων σαν συνάρτηση της κινητικής τους ενέργειας ανά νουκλεόνιο, τότε η μαγνητική δυσκαμψία δίνεται από την σχέση:

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

Για την ίδια κινητική ενέργεια η μαγνητική δυσκαμψία εξαρτάται από το λόγο A/Z . Ο λόγος αυτός είναι σχεδόν πάντα ίσος με 2 για τα στοιχεία μέχρι το Fe. Έτσι τα στοιχεία αυτά αναμένεται να παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά και συνεπώς το ίδιο ενεργειακό φάσμα

Χαμηλές ενέργειες: αύξηση στο φασμα των πυρηνων He που αναφεραται σαν ανωμαλη συνιστώστα ^4He (H φυση αυτης της συνιστωσας οχι ξεκαθαρη, ροες αυξανονται με την αποσταση απο τον Ηλιο-δεν ακολουθουν κανενα απο τα προτυπα ηλιακής διαμόρφωσης, συνεπως σωματιδια που επιταχύνονται απο την εξωτερική ηλιοσφαιρα.

Ενεργειακή πυκνότητα- Ενεργειακό Φάσμα

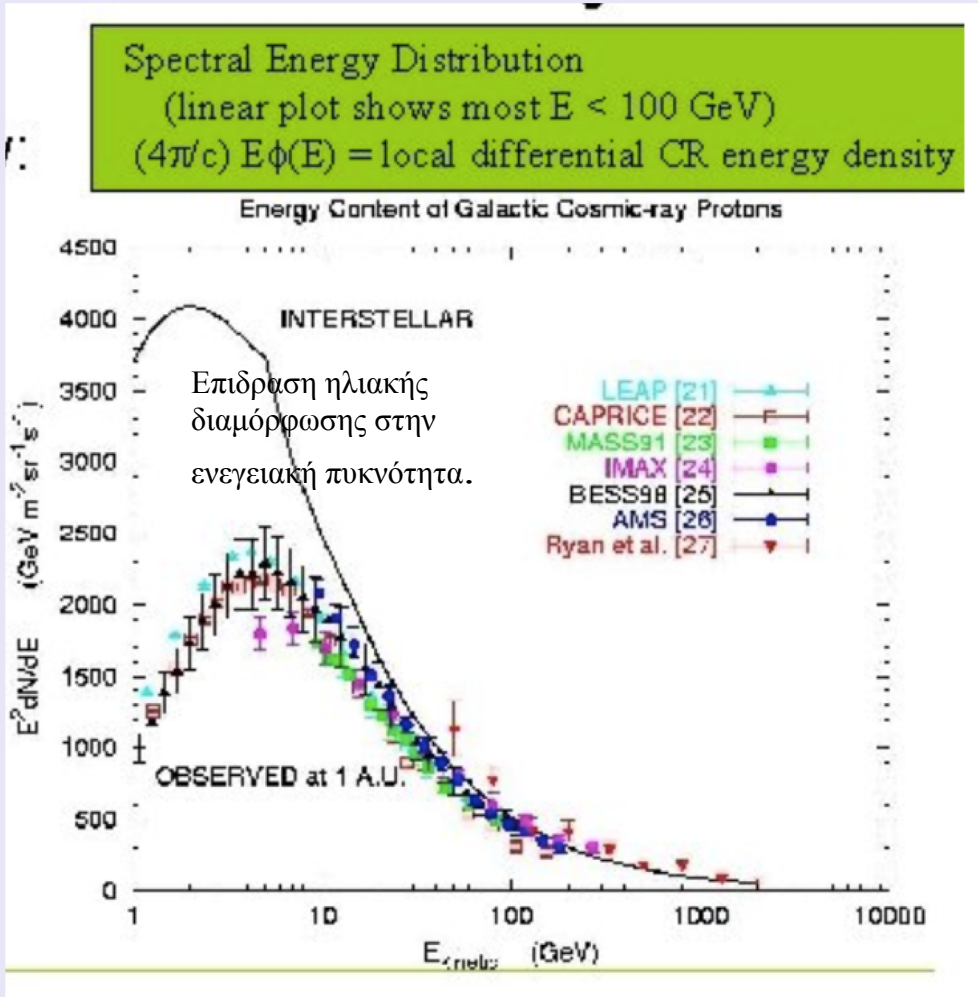
Υπόθεση ότι η ροή των σωματιδίων που παρατηρείται στο όριο της ατμόσφαιρας είναι αντιπροσωπευτική αυτής στον ενδοαστρικό χώρο (κάτω όριο)

- ✓ Αν και το φάσμα των ΚΑ εκτείνεται σε πολύ ψηλές ενέργειες η ολική ενέργεια είναι μικρή εξαιτίας της κλίσης του φάσματος των σωματιδίων (ολική ενεργειακή πυκνότητα των ΚΑ με $E > 1 \text{ GeV}$ είναι περίπου 1 MeV/m^3 ή 1 eV/cm^3 (*Wdowczyk και Wolfendale (1989)*).
- ✓ Πυκνότητα ενέργειας: Ενδοαστρικού μαγνητικού πεδίου: $B^2/2\mu_0 = 0.2 \text{ eV/cm}^3$
Τοπική ενεργειακή πυκνότητα του φωτός των αστέρων 0.3 eV/cm^3
Ενεργειακή πυκνότητα των μικροκυμάτων 0.3 eV/cm^3



Ενεργειακή πυκνότητα Κ.Α ίδια τάξης μεγέθους

Ενεργειακή πυκνότητα- Ενεργειακό Φάσμα



Gaiser T., 2003

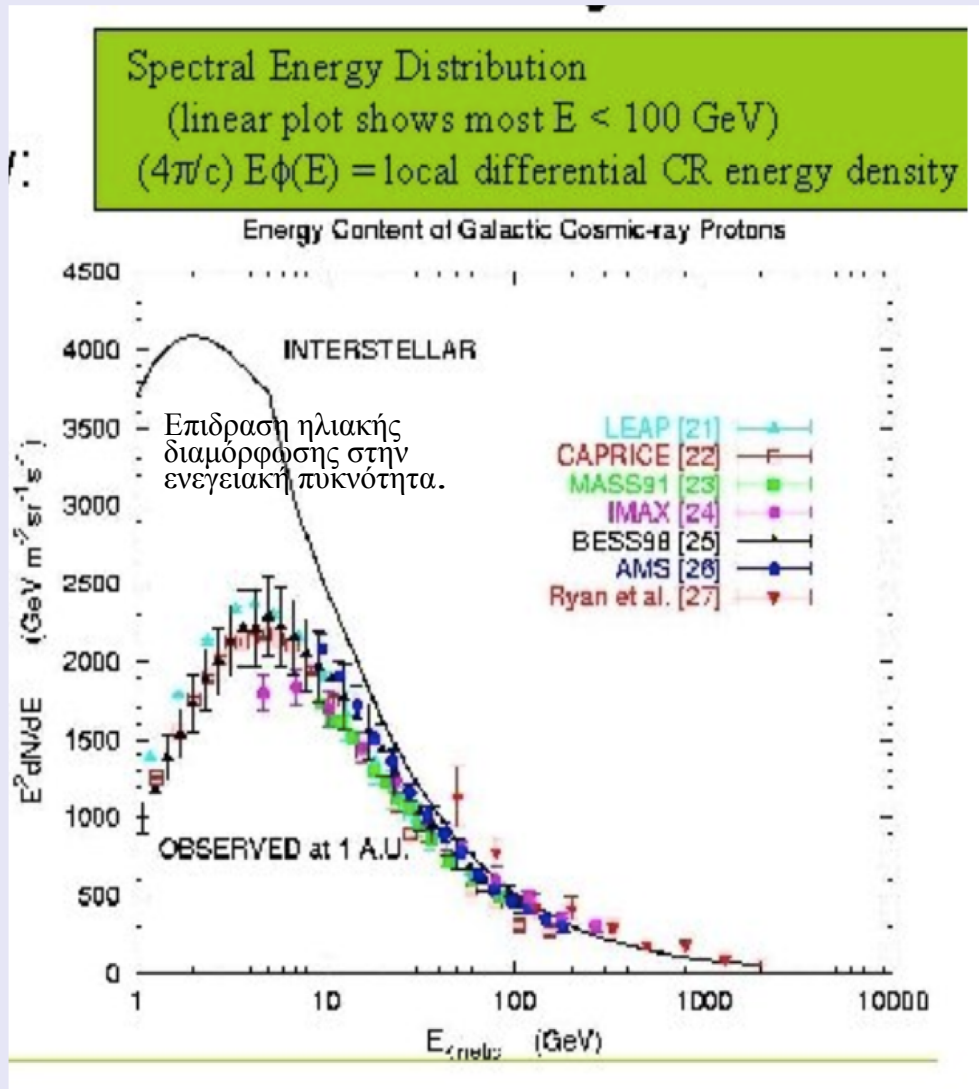
Η σχέση ενεργειακής πυκνότητας και φάσματος προκύπτει από τη σχέση μεταξύ ροής και αριθμητικής πυκνότητας ρ των ΚΑ.

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

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



Η περιοχή κάτω από την Interstellar καμπύλη πρωτονίων δίνει 0.83eV/cm^3 , ενώ το ήλιο και οι βαρύτεροι πυρήνες συνεισφέρουν ακόμα περίπου 0.27eV/cm^3 . Συνολικά για τα σωματίδια της ΚΑ έχουμε 1.1eV/cm^3 , όσο δηλαδή δίνουν και οι Wdowczyk και Wolfedale! Το γεγονός ότι αυτή η τιμή είναι συγκρίσιμη με την ενεργειακή πυκνότητα του ενδοαστρικού μαγνητικού πεδίου δείχνει ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ ΚΑ και μαγνητικών πεδίων στο Γαλαξία ισχυρή. Η διαμόρφωση των πεδίων επηρεάζεται από τις ΚΑ και το αντίστροφο.

Gaiser T., 2003

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: $0.3 eV/cm^3$

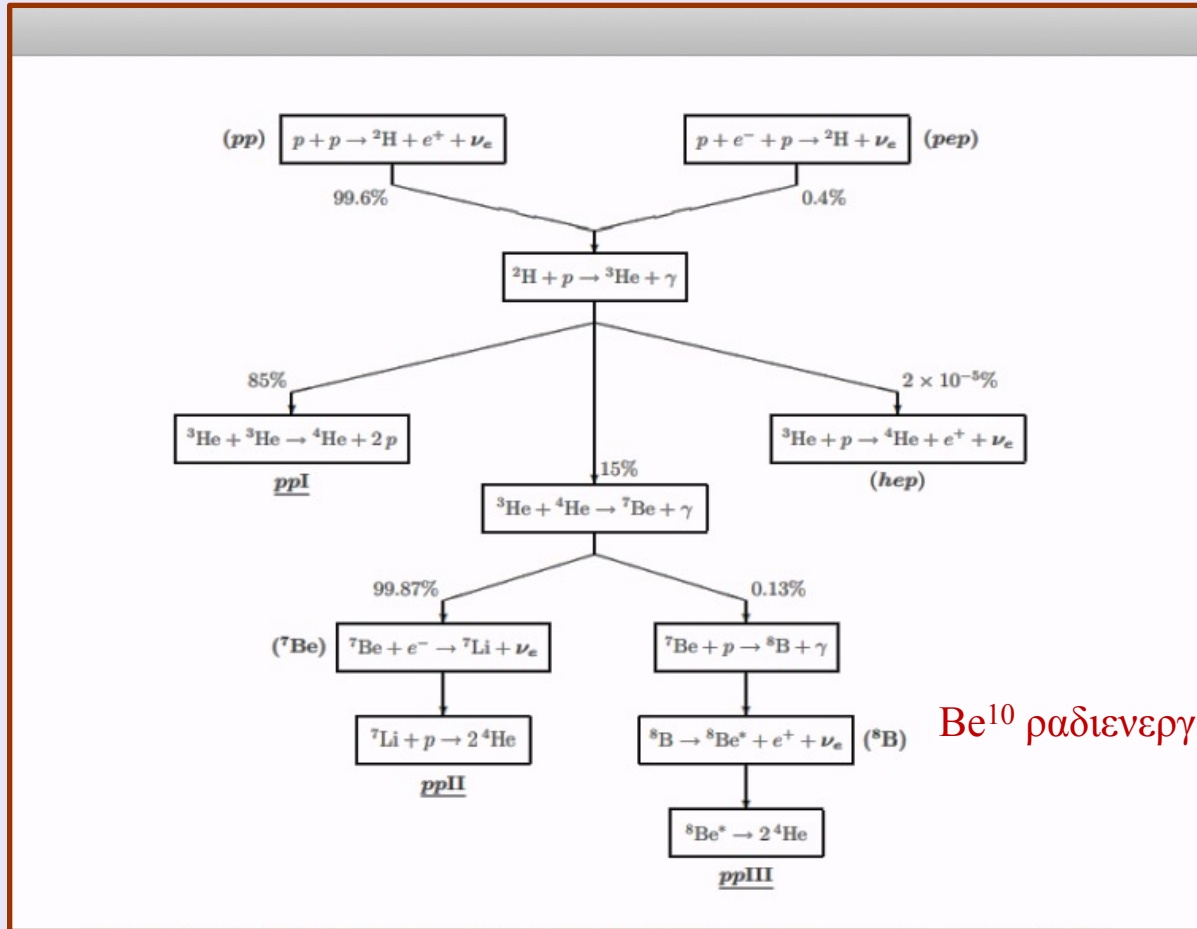
Συμφωνία_
 ίδια ταξη
 μεγέθους.

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.

Ραδιενεργά ισότοπα: Αν είναι γνωστός ο ρυθμός παραγωγής των διαφορετικών ισωτόπων ενός στοιχείου μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για το χρόνο που χρειάζονται τα δείγματα να φθάσουν στη Γη από τις πηγές τους.

“Cosmic Ray Clocks”

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

Το Be παράγεται από θρυμματισμό του C και O .

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.

“Cosmic Ray Clocks”

Γνωρίζοντας το λόγο $^{10}\text{Be}/\text{Be}$
+
παράγεται στο ίδιο ποσοστό με το σταθερό Be
(^{10}Be , το οποίο έχει χρόνο ημιζωής $1.5 \cdot 10^6$ χρόνια)



Από το μετρούμενο ποσοστό προκύπτει ότι ο χρόνος τ_{esc} είναι $8-30 * 10^6 \text{ y}$ (Simpson and Garcia-Munoz, 1988) και $\lambda_{\text{esc}} = 10 \text{ g/cm}^2$. Η μεση πυκνότητα διαπλανητικού μεσου που «κατοικούν» οι Κ.Α. $\rho = 0,2-0,3 \text{ p/cm}^3$, μικρότερη από την πυκνότητα του γαλαξιακού δίσκου ($\sim 1 \text{ H atom cm}^{-3}$). Αυτό υποδεικνύει ότι τα σωματίδια αυτά βρίσκονται σε λιγότερο πυκνές περιοχές του γαλαξία.



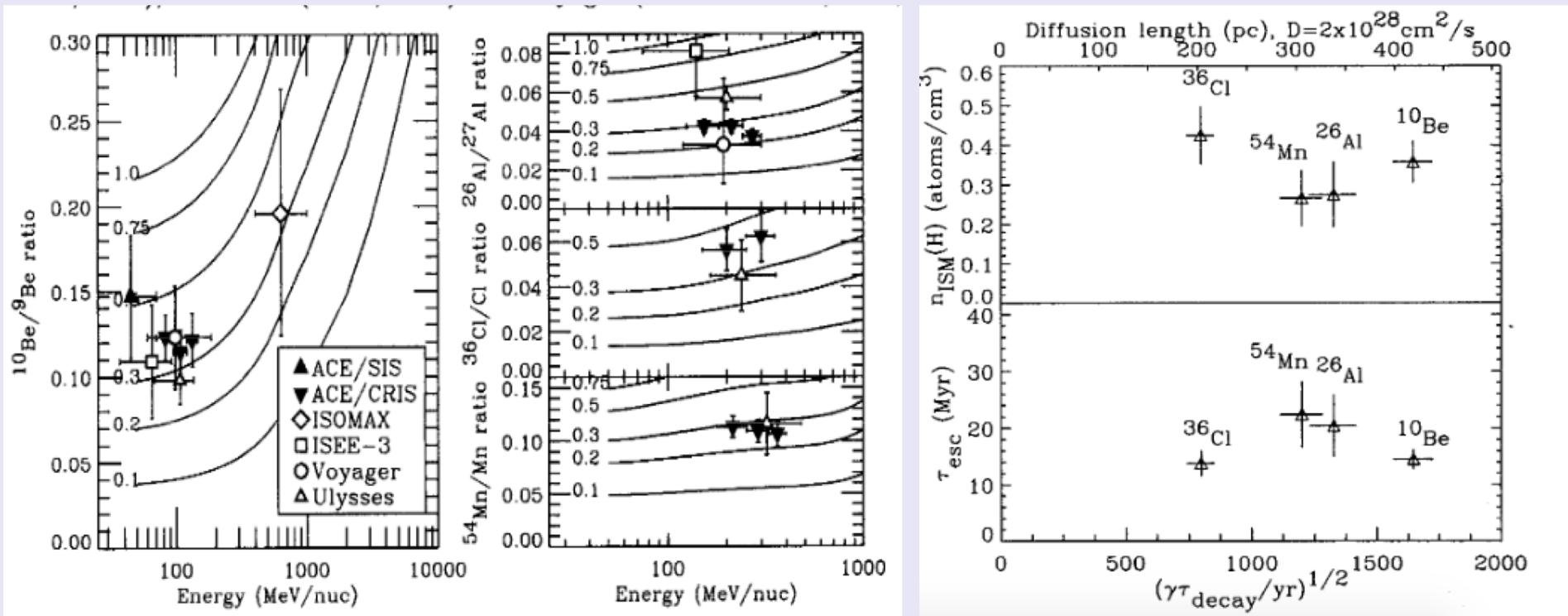
Ο χώρος στον οποίο κινούνται τα σωματίδια είναι μεγαλύτερος από το πάχος του γαλαξία και ότι επεκτείνεται στην περιοχή της άλω (εξωτερική περιοχή ενός γαλαξία, όπου υπάρχουν λιγότερα σωματίδια σε σύγκριση με το δίσκο)

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 12 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

ΕΞΙΣΩΣΗ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

Οπότε στην εξίσωση διάχυσης (diffusion-loss) πρέπει να προσθέσουμε ένα όρο για τη ραδιενεργό διάσπαση του στοιχείου i με σταθερά διάσπασης $1/\tau_i$, δηλ. τον όρο N_i/τ_i

ροή έκχυσης σωματιδίων τύπου i από τις πηγές / μονάδα όγκου

$$\left| \frac{\partial N_i}{\partial t} = D \nabla^2 N_i + \frac{\partial}{\partial E} [b(E) N_i] + Q_i - \frac{N_i}{\tau_i} + \sum \frac{P_{ji}}{\tau_j} N_j \right.$$

όρος διάχυσης

κέρδος και η απώλεια ενέργειας από το ενεργειακό φάσμα

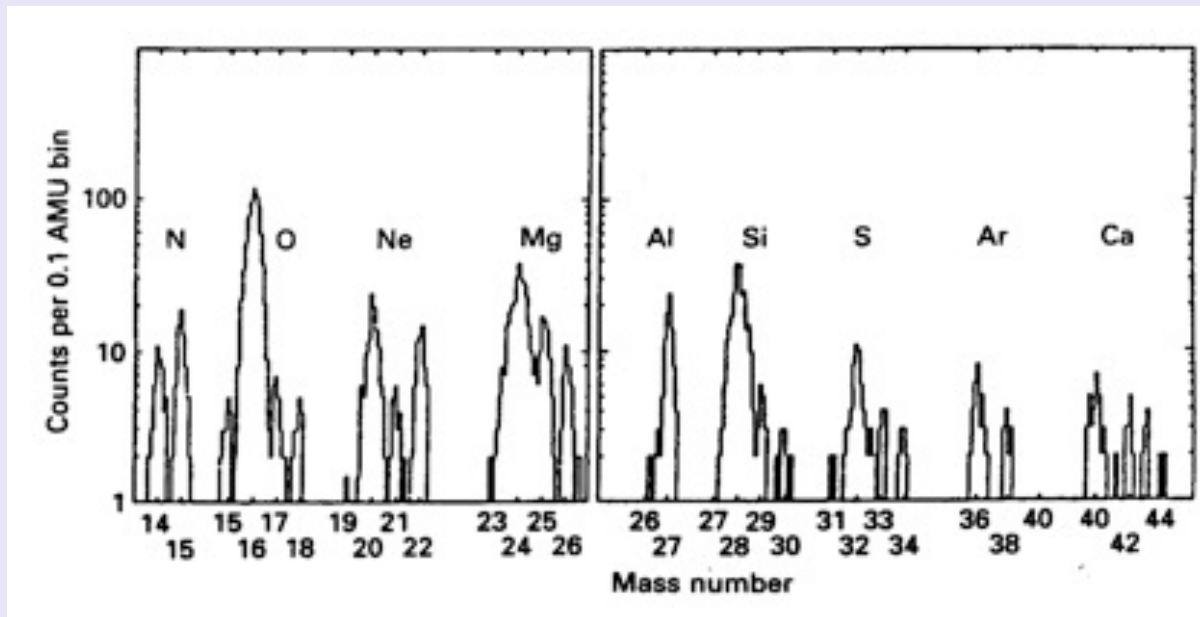
↑

κέρδος και η απώλεια ενέργειας από θρυμματισμό

πιθανότητα ο πυρήνας j να δημιουργήσει στοιχείο i σε μια ανελαστική σύγκρουση.

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. Ο εμπλουτισμός αυτός δίνει στοιχεία για τα σημεία επιτάχυνσης των ΚΑ, αφού τελικά θα πρέπει να αναζητηθεί μια πηγή που να ευνοεί την παραγωγή στοιχείων εμπλουτισμένων σε νετρόνια.

ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΚΑ.

- ❑ Γαλαξιακά Πρότυπα
 - ✓ Γαλαξιακού δίσκου
 - ✓ Γαλαξιακής άλω
- ✓ Περιορισμένος Ογκος
 - ✓ Leaky box model

- ❑ Εξω γαλαξιακά
 - ✓ Εξωγαλαξιακό ομογενές
πρότυπο
 - ✓ Εξωγαλαξιακό τοπικό
πρότυπο

□ Γαλαξιακά Πρότυπα

Τα πρότυπα του δίσκου και της άλως διαφέρουν στον όγκο που καταλαμβάνουν οι κοσμικές ακτίνες. Ο όγκος είναι

$$V_d = 10^{67} \text{cm}^3 \quad \text{και} \quad V_h = 10^{68} \text{cm}^3$$

Αντίστοιχα η ολική ενέργεια των ΚΑ διαφέρει κατά μία τάξη μεγέθους

$$E_d = w V_d = 10^{55} \text{ergs} \quad E_h = w V_h = 10^{56} \text{ergs}$$

όπου w η ενεργειακή πυκνότητα 10^{-12}erg/cm^3 .

Οι παραπάνω ενέργειες δύναται να συντηρήσουν (παγιδεύσουν) τις ΚΑ 10^6 χρόνια στο δίσκο και 10^8 χρόνια στην άλω, το οποίο συνεπάγεται την ευκολότερη δραπέτευσή τους από το δίσκο, αφού η ισχύς είναι 10^{41}erg/sec στο δίσκο και 10^{40}erg/sec στην άλω.

Αν η παροχή της ΚΑ ήταν διακοπτόμενη, η ολική ενέργεια του συστήματος θα μεταβαλλόταν αισθητά. Για να υπάρξει ισορροπία θα πρέπει η ενέργεια της ΚΑ στο γαλαξία να έχει ισχύ τουλάχιστον 10^{40}erg/sec , ενώ η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 10^{24}erg/sec .

Ένα εύλογο πρότυπο για την προέλευση των ΚΑ θα πρέπει να έχει:

$$\text{Ακτίνα} = 3-5 \cdot 10^{22} \text{cm}$$

$$\text{Όγκος} = 10^{68} \text{cm}^3$$

$$\text{Ολική ενέργεια ΚΑ} = 10^{55} \text{erg}$$

$$\text{Χρόνος ζωής} = 3 \cdot 10^8 \text{ χρόνια και Ισχύς των πηγών} = 10^{40} \text{ erg/sec}$$

Περιορισμένος Όγκος

Τα υψηλής ενέργειας σωματίδια τυπικά μπορούν να διανύσουν $50\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ($5\text{gr}/\text{cm}^2$) (path length) της ύλης. Αν διανύσουν περισσότερο, οι αντιδράσεις των συγκρούσεων θα είναι δραστικές ώστε τα πρωτογενή στοιχεία να καταστρέφονται και να διορθώνονται οι σχετικές αφθονίες των κοσμικών πυρήνων που θα παράγονται.

Για να μετατρέψουμε αυτό το μήκος διαδρομής σε χρόνο δραπέτευσης (escape time) τ_e , δεχόμαστε ότι ρ είναι η μέση πυκνότητα της ύλης δια μέσου της οποίας ταξιδεύουν οι κοσμικές ακτίνες, οπότε

$$X = \bar{\rho} \cdot c \cdot \tau_e$$

Μια τυπική τιμή πυκνότητας για τον διαστρικό χώρο είναι $n = 10^6 \text{ m}^{-3}$, οπότε το άνω όριο του χρόνου που οι ΚΑ μπορούν να παραμείνουν μέσα σ' αυτή τη πυκνότητα του αερίου είναι $\tau_e = 3 \cdot 10^6$ χρόνια. Αν παραμείνουν και σε περιοχές μικρότερης πυκνότητας, ο ολικός χρόνος δραπέτευσης θα είναι μεγαλύτερος χωρίς να επηρεάζει τις αφθονίες των κοσμικών στοιχείων.

Επομένως τα σωματίδια ΔΕΝ φύγουν εύκολα από το Γαλαξία.

Αν δεχτούμε μια διάσταση 1-10 kpc για το Γαλαξία μας τα υψηλής ενέργειας σωματίδια χρειάζονται να δραπετεύσουν από το σύστημα $3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$ χρόνια, που είναι μικρότερος από το χρόνο που χρειάζεται για την παραγωγή των προϊόντων του θρυμματισμού. Άρα ακολουθούν ελικοειδείς τροχιές και αναφερόμαστε σε “περιορισμένο όγκο” (confinement volume) όπου οι ΚΑ διαδίδονται πριν φύγουν από το Γαλαξία. Είναι απαραίτητος αυτός ο όγκος ώστε να μετρήσουμε κατ' ευθεία τη χημική σύσταση, τους χρόνους ζωής, τις ιδιότητες των σχετικιστικών ηλεκτρονίων κ.λ.π.

ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

Leaky box model

Τα ενεργητικά σωματίδια ή διαχέονται από τις πηγές τους ή περιορίζονται σε κάποιο όγκο στον γαλαξιακό χώρο.

Η κατανομή των μηκών διαδρομής για την παραγωγή δευτερογενών στοιχείων περιγράφεται από μια εκθετική συνάρτηση (Leaky box model του περιορισμού των ΚΑ). Τα σωματίδια διαχέονται ελεύθερα και ανακλώνται στα όρια του. Υπάρχει μια βεβαία πιθανότητα ότι τα σωματίδια φεύγουν από τον όγκο αυτό σε κάθε συμπλοκή με το όριο και αυτό δίνει την κατανομή

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{N}{\tau_e} = 0$$

$$N = \exp(-t / \tau_e)$$

όπου τ_e χαρακτηριστικός χρόνος δραπετεύσης

Leaky box model

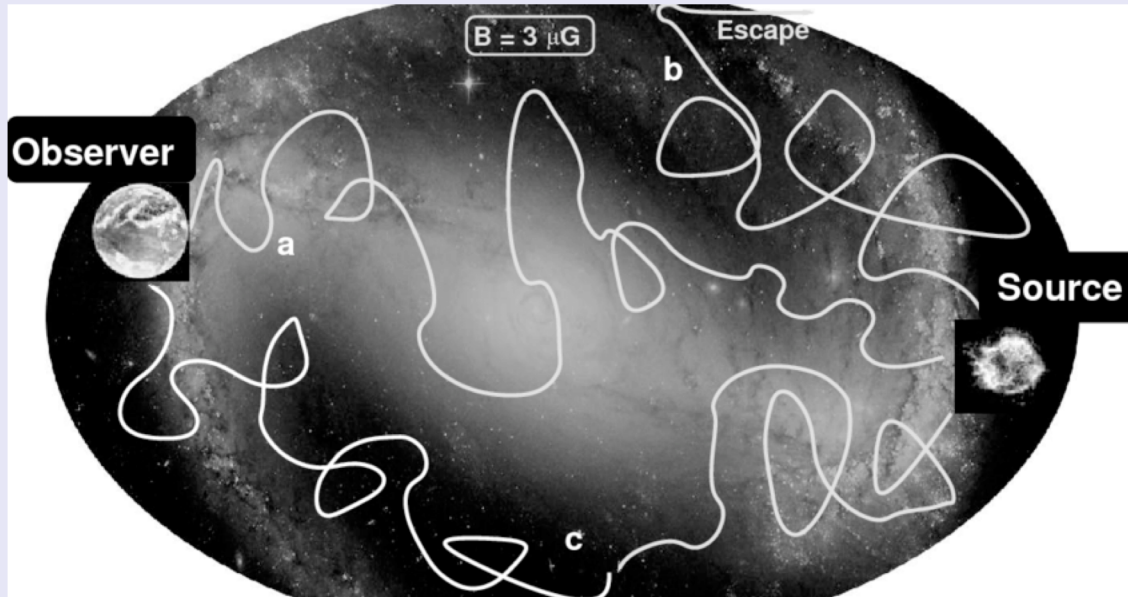


Illustration of a simple Leaky-Box model for Galactic cosmic rays. Sources emit cosmic rays into the Galaxy, which then propagate diffusively in the interstellar magnetic field until they (a) reach the Earth, (b) escape the Galaxy, or (c) spallate into lighter nuclei—as shown for the example of carbon producing boron. (Obermeier, 2001)

Ο όγκος μέσα στον οποίο περιορίζονται τα σωματίδια είναι ο δίσκος του Γαλαξία που είναι πεπλατυσμένος κύλινδρος ακτίνας 10-15 kpc και πάχους 300-500 pc. Αυτός ο όγκος διαδοχικά αναφέρεται και στην άλω του Γαλαξία.

Εξωγαλαξιακό ομογενές πρότυπο

Η ενεργειακή πυκνότητα στο δίσκο του Γαλαξία είναι μεγάλη. Έξω όμως γίνεται πολύ μικρότερη. Το αντίθετο συμβαίνει στο Παγκόσμιο εξωγαλαξιακό πρότυπο, όπου η τοπική ενεργειακή πυκνότητα των ΚΑ είναι ίδια παντού στο Σύμπαν.

Εκτείνεται σε περιοχή διαστάσεων $R=5 \cdot 10^{27}$ cm όπου η ενεργειακή πυκνότητα των ΚΑ 10^{-12}erg/cm^3 (1eV/cm^3) ξεπερνά το ορατό Σύμπαν. Τότε η ολική ενέργεια σχηματισμού των ΚΑ είναι μεγαλύτερη απ' όλους τους τύπους σχηματισμού ενέργειας εκτός από τη μάζα του Σύμπαντος.

Αφού είναι ομοιογενές το πρότυπο έχουμε

$$\epsilon_{\text{CR}} = E_{\text{CR}} \cdot \rho_0$$

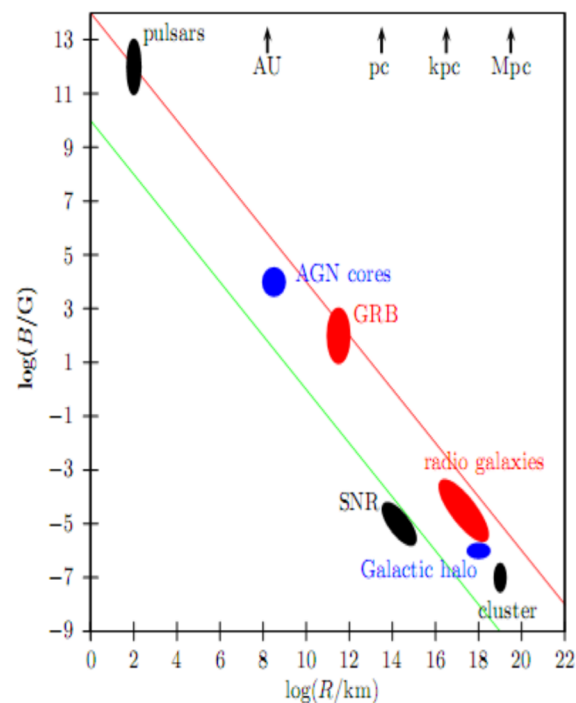
όπου ρ_0 η πυκνότητα των πηγών

Η πυκνότητα των δυνατών ραδιο-γαλαξιών είναι $4 \cdot 10^{78} \text{cm}^{-3}$ ($\sim 10^{-5} \text{Mpc}^{-3}$). Κατά μέσο όρο κάθε ραδιογαλαξίας παράγει ΚΑ με ολική ενέργεια $10^{-12}/4 \cdot 10^{-78} \text{ergs} = 2 \cdot 10^{65} \text{ergs}$.

Εξωγαλαξιακό τοπικό πρότυπο

Περιλαμβάνει περιοχές με διαστάσεις $10^{26}\text{cm} > R > 10^{24}\text{cm}$. Η πλησιέστερη δυναμική πηγή του Κενταύρου Α είναι σε απόσταση $12 \cdot 10^{24}\text{cm}$. Για να γεμίσουμε τον όγκο αυτό (10^{75}cm^3) με πυκνότητα 10^{-12}erg/cm^3 χρειαζόμαστε 10^{63}ergs .

Οι πηγές πάνω από την κόκκινη (επάνω) γραμμή μπορούν να επιταχύνουν πρωτόνια σε ενέργειες έως και 10^{21}eV , ενώ οι πηγές πάνω από την πράσινη (κάτω) γραμμή μπορούν να επιταχύνουν πυρήνες Fe έως και 10^{20}eV .



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.

➤ Στις ενέργειες $10^{11} < E < 10^{14} \text{ eV}$ έχουμε μεγάλη ισοτροπία που είναι συνεπής με τη ροή των ΚΑ από τις πηγές μέσα στο Γαλαξία.

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 ΓΑΛΛΕΙΑΚΗΣ 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.

- Στις πολύ υψηλές ενέργειες $10^{14} < E < 10^{19} \text{eV}$ η ανισοτροπία αυξάνει (τα σωματίδια δραπετεύουν πιο εύκολα από το Γαλαξία με αυξανόμενη ενέργεια)
Αυτό σχετίζεται με την ακτίνα καμπυλότητας στην τροχιά του σωματιδίου

$$|r_g| = \frac{\gamma m_0 v \sin\theta}{Ze B} = \left(\frac{\text{pc}}{Ze} \right) \frac{\sin\theta}{Bc} = \frac{R \sin\theta}{Bc}$$

R η δυσκαμψία του σωματιδίου και
 θ η pitch angle του ανύσματος του σωματιδίου.

Rigidity	r_g
10^{15} GV	<u>0.36 pc</u>
10^{17} GV	36 pc
10^{19} GV	3.6 kpc
10^{21} GV	360 kpc

ΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΓΑΛΑΞΙΑΚΗΣ Κ.Α.

Στο μοντέλο του δίσκου η γυροακτίνα σωματιδίου ενέργειας 10^{18}eV είναι ίση με το πάχος του δίσκου (300pc). Η ακτίνα της άλως είναι $3\text{-}10\text{Kpc}$. Επίσης το φάσμα των ΚΑ πέφτει απότομα πάνω από 10^{15}eV . Οι Ginzburg και Syrovatskii έδειξαν ότι η γυροακτίνα πρωτονίου με 10^{15}eV είναι ίση με την κλίμακα των ανωμαλιών που είναι υπεύθυνες για τη σκέδαση των ΚΑ με $\lambda \approx 0.1\text{pc}$

Η ανισοτροπία των πολύ ψηλών ενεργειών ΚΑ είναι το σπουδαιότερο επιχείρημα για εξωγαλαξιακή συνιστώσα των ΚΑ.

ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ 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.