

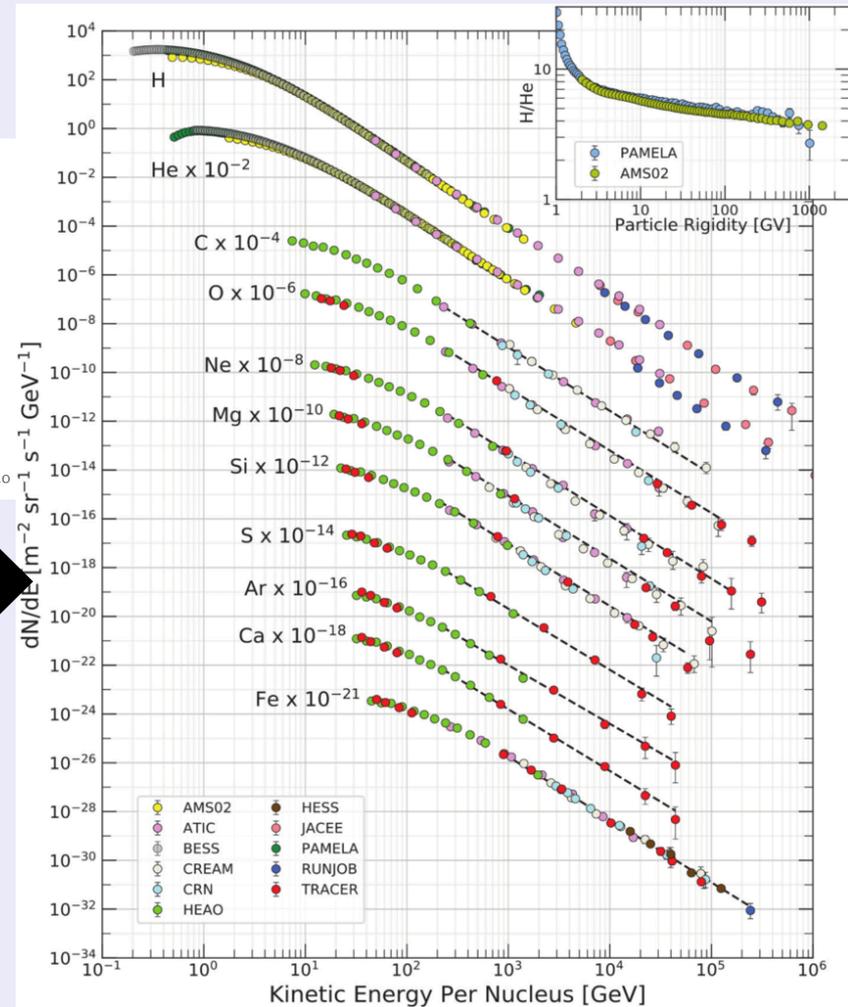
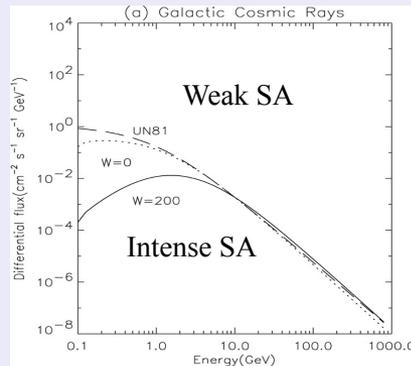
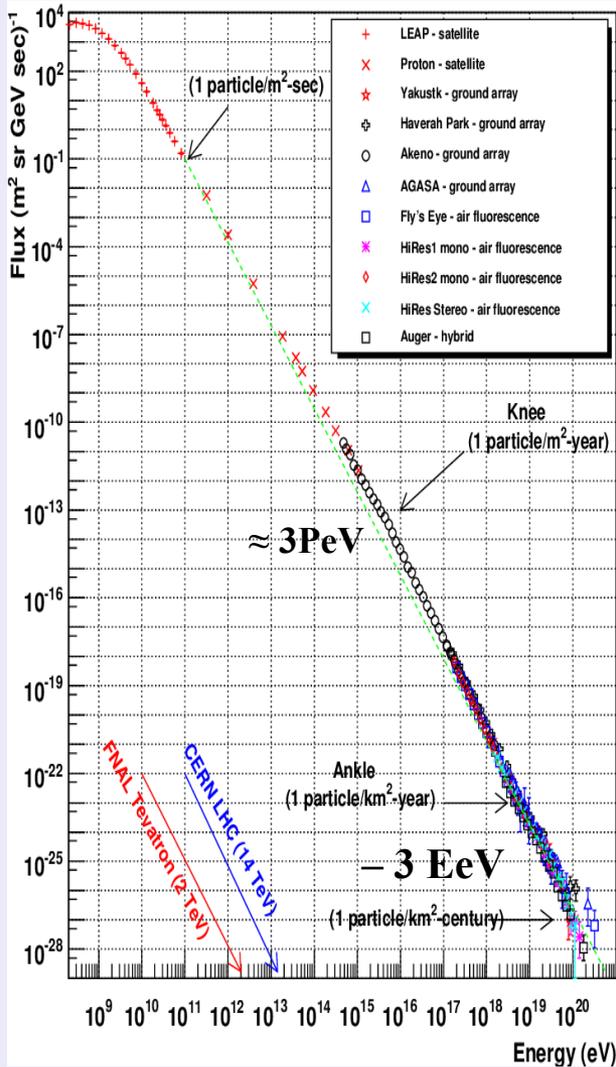


# Μάθημα Επιλογής: Αστροσωματιδιακή και Κοσμική Ακτινοβολία

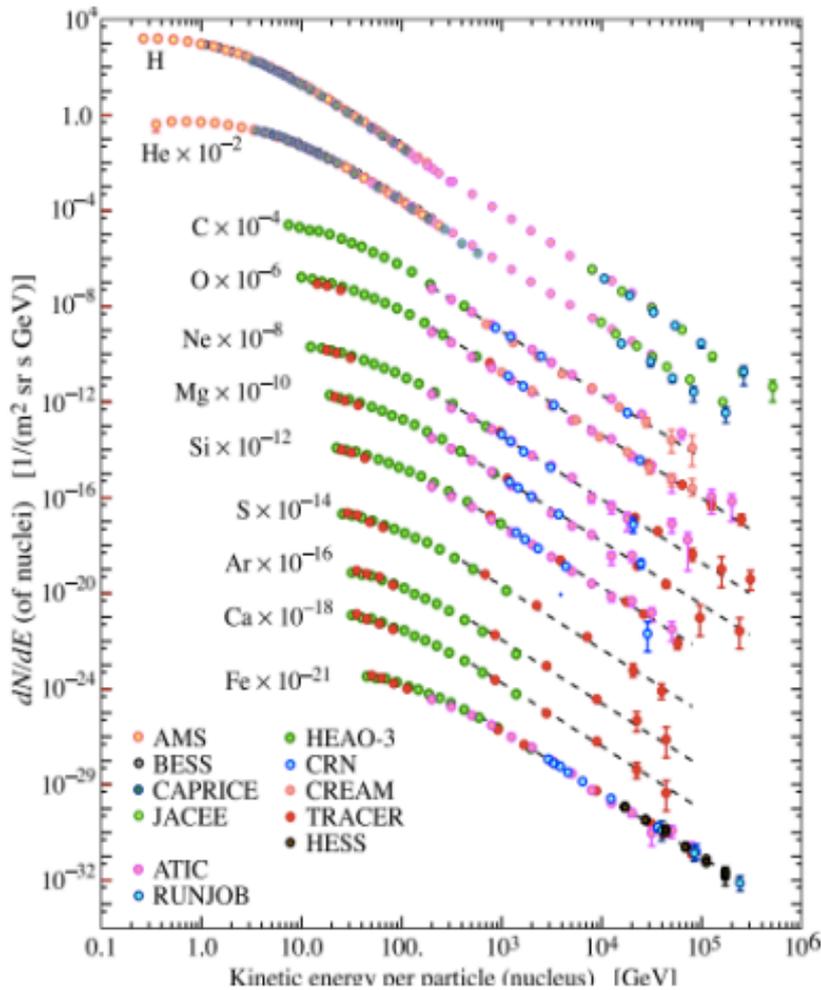
ΙΣΟΤΟΠΙΚΕΣ ΑΦΘΟΝΙΕΣ\_ΙΣΟΤΡΟΠΙΑ

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

# Ολοκληρωμένο → Διαφορικό Ενεργειακό Φάσμα



# Διαφορικό Ενεργειακό Φάσμα



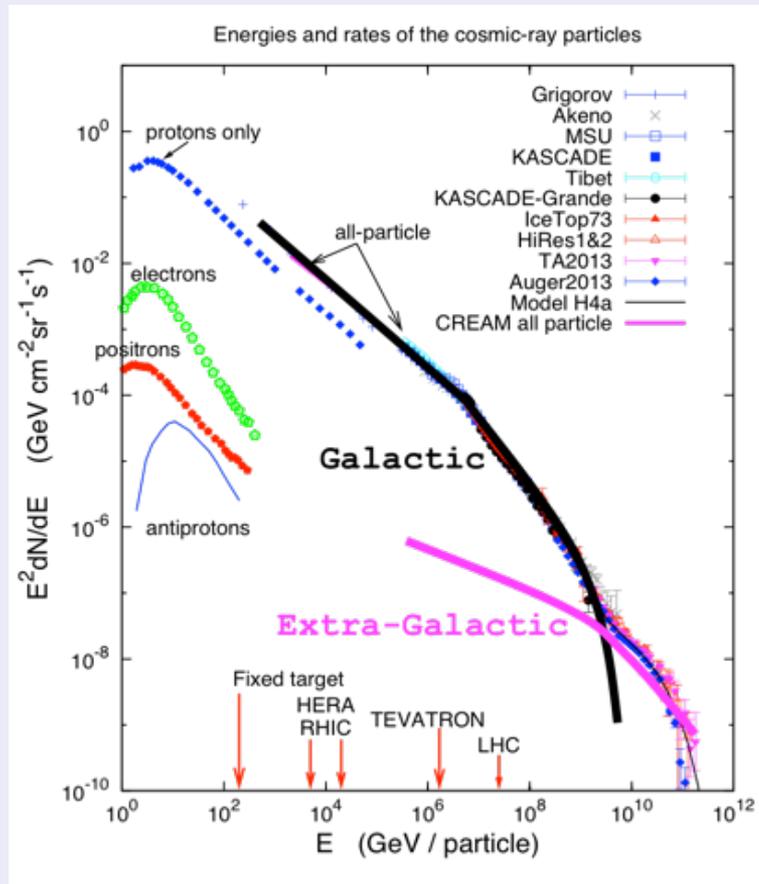
Δυναμική φορτισμένου σωματιδίου μέσα σε μαγνητικό πεδίο- μαγνητική δυσκαμψία. Σωματίδια με διαφορετική μάζα και φορτίο αλλά με την ίδια δυσκαμψία έχουν την ίδια συμπεριφορά σε οποιαδήποτε διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου. Αν εκφράσουμε τις ενέργειες των σωματιδίων σαν συνάρτηση της κινητικής τους ενέργειας 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 φάσμα των πυρηνών He που αναφέρεται σαν ανωμαλία συνιστώσα  $^4\text{He}$  (Η φύση αυτής της συνιστώσας όχι ξεκαθαρή, ροές αυξάνονται με τη απόσταση από τον Ήλιο-δεν ακολουθούν κανένα από τα προτυπα ηλιακής διαμόρφωσης, συνεπώς σωματίδια που επιταχύνονται από την εξωτερική ηλιοσφαιρα.

# Διαφορικό Ενεργειακό Φάσμα



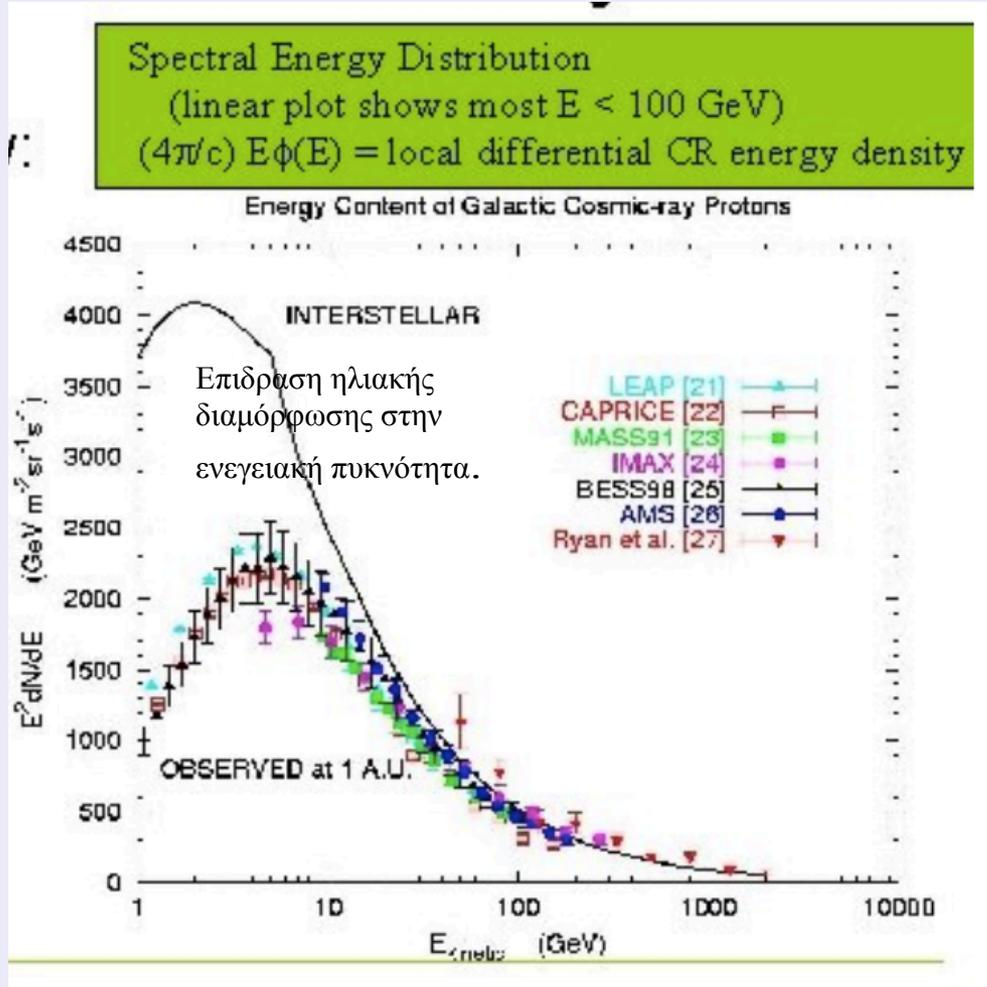
Το φάσμα  $e^-$  πιο απότομο από των  $p$  και πυρήνων λόγω της ακτινοβολίας σύγχροτρον και το αντίστροφη σκεδαση Compton με photons CMB

## Ενεργειακή πυκνότητα- Ενεργειακό Φάσμα

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

- ✓ 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  $1 \text{ MeV/m}^3$  ή  $1 \text{ eV/cm}^3$  (*Wdowczyk και Wolfendale (1989)*).
- ✓ Η πυκνότητα αυτή είναι της αυτής τάξης με την πυκνότητα ενέργειας του ενδοαστρικού μαγνητικού πεδίου ( $B^2/2\mu_0 = 0.2 \text{ eV/cm}^3$ ), την τοπική ενεργειακή πυκνότητα του φωτός των αστέρων ( $0.3 \text{ eV/cm}^3$ ) και με την ενεργειακή πυκνότητα των μικροκυμάτων ( $0.3 \text{ eV/cm}^3$ ). Οι παραπάνω “συμπτώσεις” δεν μπορεί παρά να έχουν φυσική σημασία.

# Ενεργειακή πυκνότητα- Ενεργειακό Φάσμα



Gaiser T., 2003

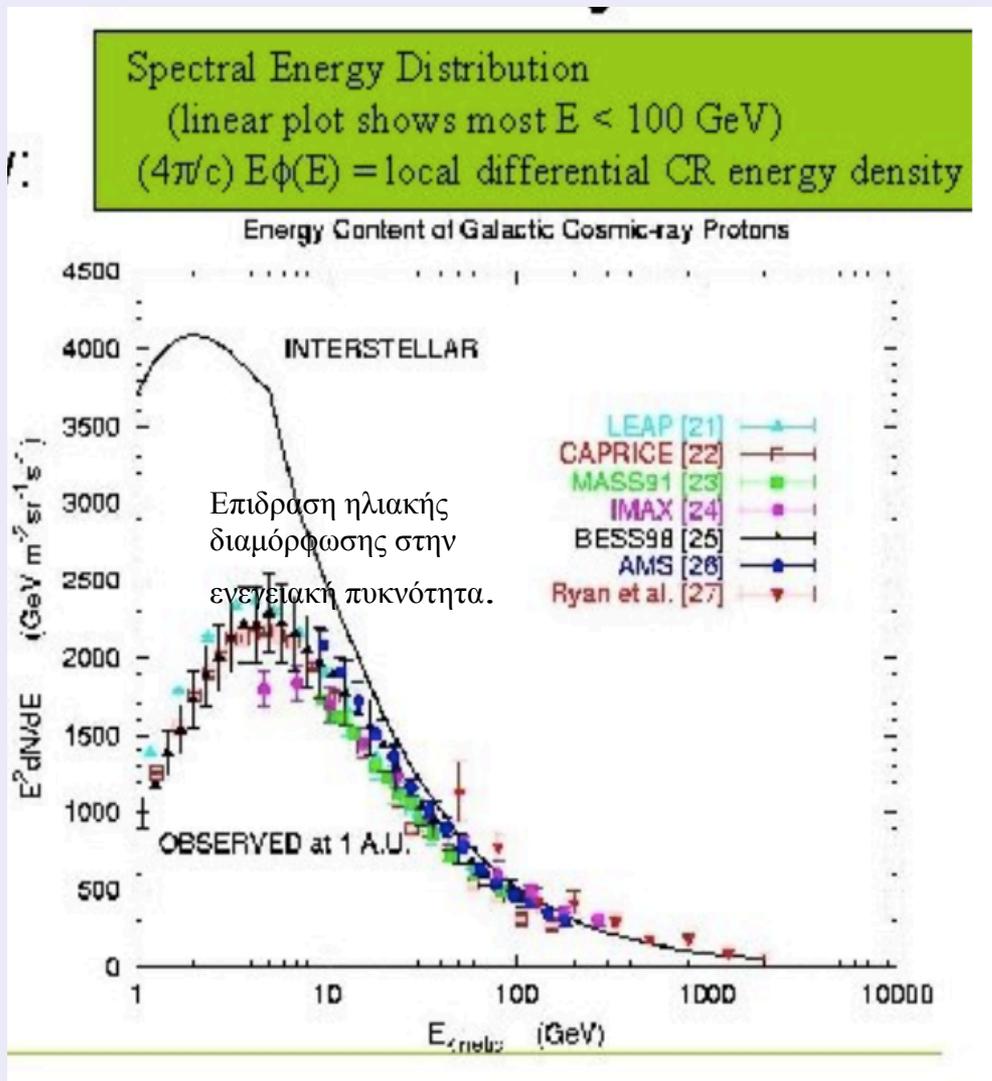
Η σχέση ενεργειακής πυκνότητας και φάσματος προκύπτει από τη σχέση μεταξύ ροής και αριθμητικής πυκνότητας  $\rho$  των ΚΑ.

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

Οπότε ενεργειακή πυκνότητα  $\rho_E$

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

# Ενεργειακή πυκνότητα- Ενεργειακό Φάσμα



Η περιοχή κάτω από την Interstellar καμπύλη πρωτονίων δίνει  $0.83 \text{eV/cm}^3$ , ενώ το ήλιο και οι βαρύτεροι πυρήνες συνεισφέρουν ακόμα περίπου  $0.27 \text{eV/cm}^3$ . Συνολικά για τα σωματίδια της ΚΑ έχουμε  $1.1 \text{eV/cm}^3$ , 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 απο την οποία συμπεραίνω ότι 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:  $0.3 eV/cm^3$

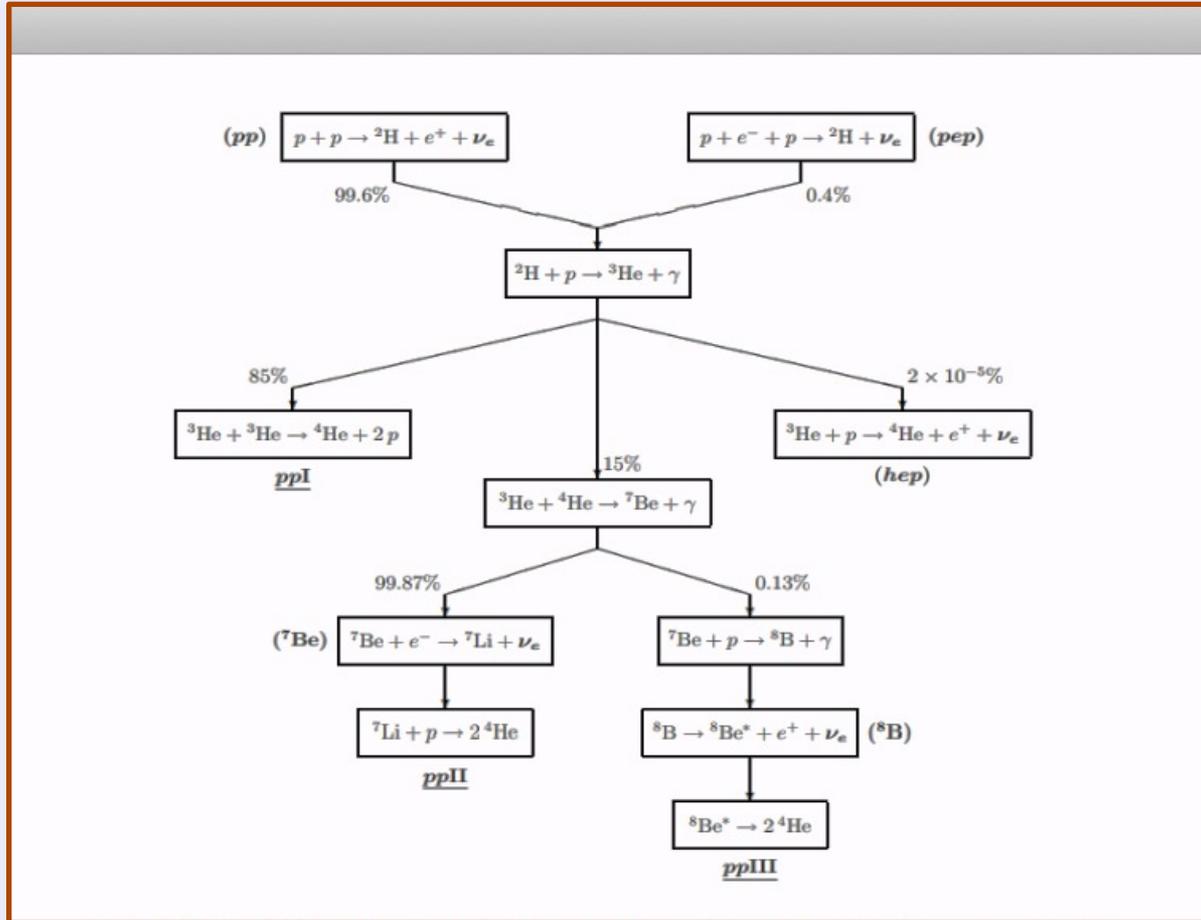
Συμφωνία\_   
 ίδια ταξη   
 μεγέθους.

# ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

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

✓  $^1\text{H}$  και  $^4\text{He}$  μεγάλες αφθονίες στο Δ.Χ.

$^4\text{He}$  παραγωγή ( p-p chain)



# ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

## ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ

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

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

# ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

## ☐ 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  $10^{-12} \text{erg/cm}^3$ .

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  $10^{41} \text{erg/sec}$  στο δίσκο και  $10^{40} \text{erg/sec}$  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  $10^{40} \text{erg/sec}$ , ενώ η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας είναι  $10^{24} \text{erg/sec}$ .

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

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

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

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

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

# ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

## Περιορισμένος Ογκος

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 δραπετεύσης (escape time)  $\tau_e$ , δεχόμαστε ότι  $\rho$  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 δραπετεύσης θα είναι μεγαλύτερος χωρίς να επηρεάζει τις αφθονίες των κοσμικών στοιχείων.

**Επομένως τα σωματίδια δεν μπορούν να φύγουν ανεμπόδιστα 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.

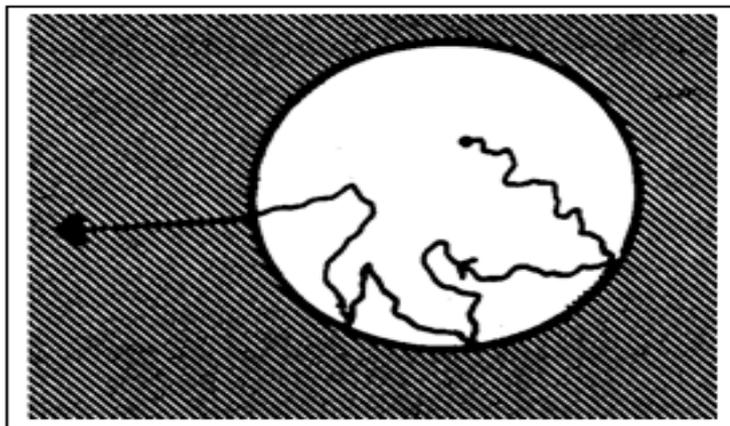
# ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

## 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. 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

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

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

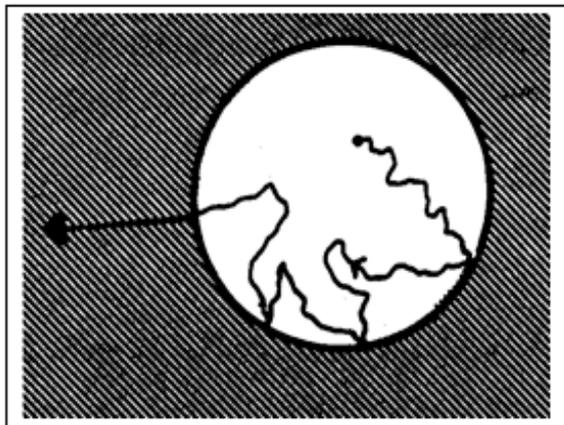


# ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

## Leaky box model

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

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



όπου  $\tau_e$  χαρακτηριστικός χρόνος δραπέτευσης. 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.

# 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  $^{10}\text{Be}$ , 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”

Το Be παράγεται από θρυμματισμό του C και O .

Το  $^{10}\text{Be}$  με β-διάσπαση δίνει  $^{10}\text{B}$  ( $^{10}\text{Be} \rightarrow ^{10}\text{B} + e^-$ ) (ολική ενεργός διατομή για την παραγωγή  $^{10}\text{Be}$  είναι 10% της ολικής ενεργού διατομής για την παραγωγή B).

Οι αφθονίες των ισοτόπων του Be και B μας πληροφορούν για το αν διασπάστηκε το  $^{10}\text{Be}$  και επομένως υπολογίζουν τη μέση ηλικία των ΚΑ στη Γη. Συνδέοντας αυτή την ηλικία με το μήκος διαδρομής (path length) των ΚΑ  $50\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , μπορούμε να βρούμε τη μέση σωματιδιακή πυκνότητα που διασχίζουν οι ΚΑ στο ταξίδι τους μέχρι τη Γη.

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  $N_i/\tau_i$

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

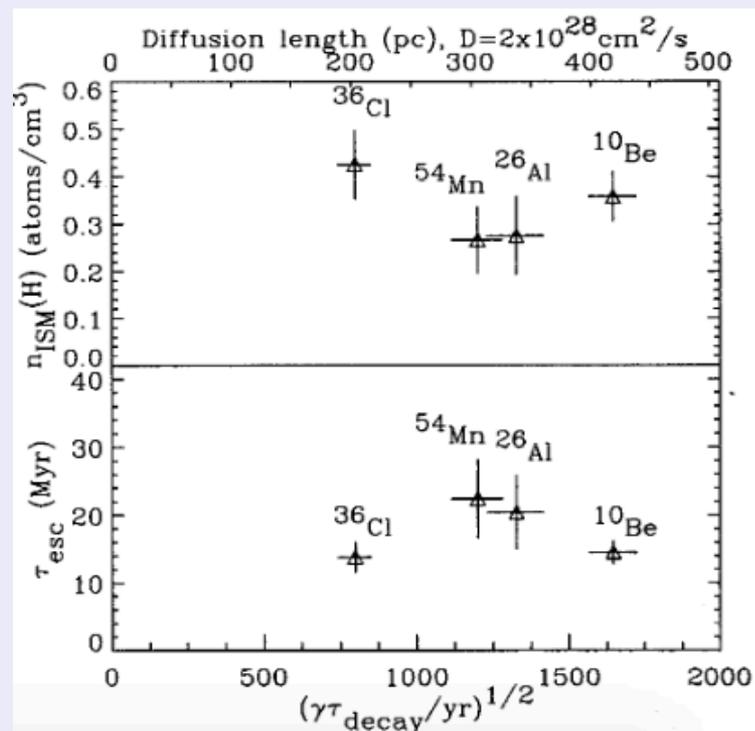
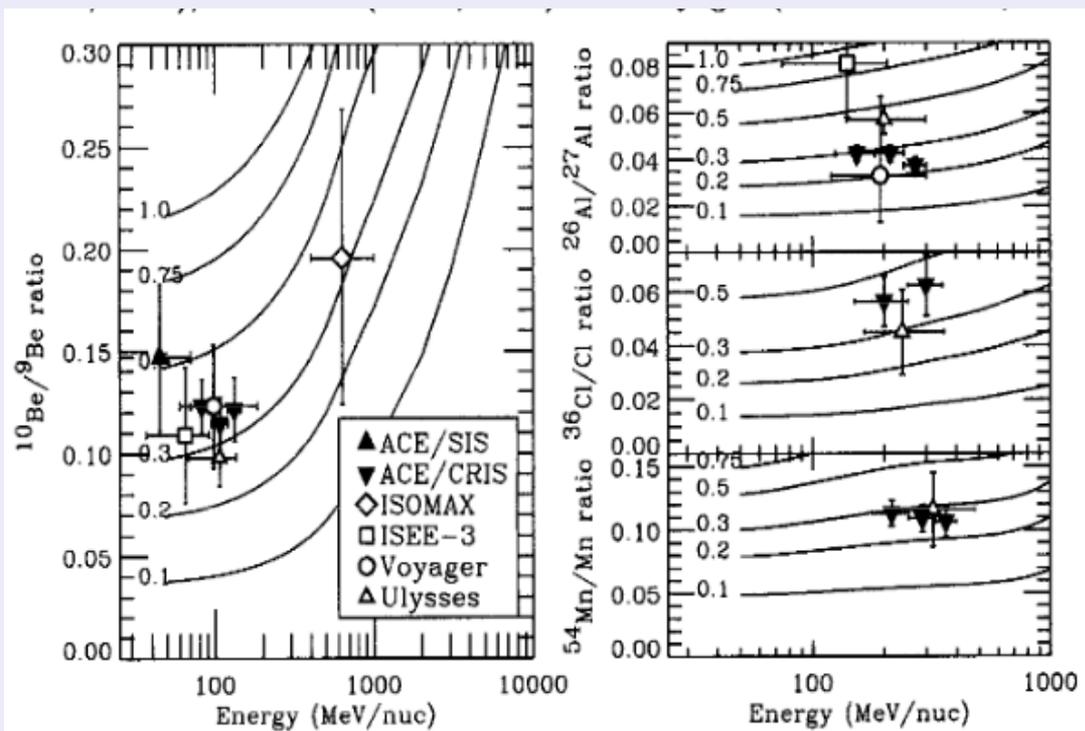
Μετρήσεις αφθονίας  $^{10}\text{Be}$   $\rightarrow$  half-life of 1.5 My  $\rightarrow$  estimated confinement time of  $\tau_{\text{esc}} \approx 10$  to 30 My for cosmic-ray (Simpson and Garcia-Munoz, 1988)  $\rightarrow$  μεση πυκνότητα διαπλανητικού μεσου που «κατοικούν» οι Κ.Α.  $\sim 0.2$  to  $\sim 0.4$  H atoms  $\text{cm}^{-3}$ , σημαντικά μικρότερη απο του γαλαξιακού δίσκου ( $\sim 1$  H atom  $\text{cm}^{-3}$ )  $\rightarrow$  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  $\tau_{\text{esc}}$  περίπου 14 Myr

# ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΙΣΟΤΟΠΩΝ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ

## Κ.Α.

### “Cosmic Ray Clocks”

TABLE I  
Radioactive clock parameters<sup>a</sup>

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

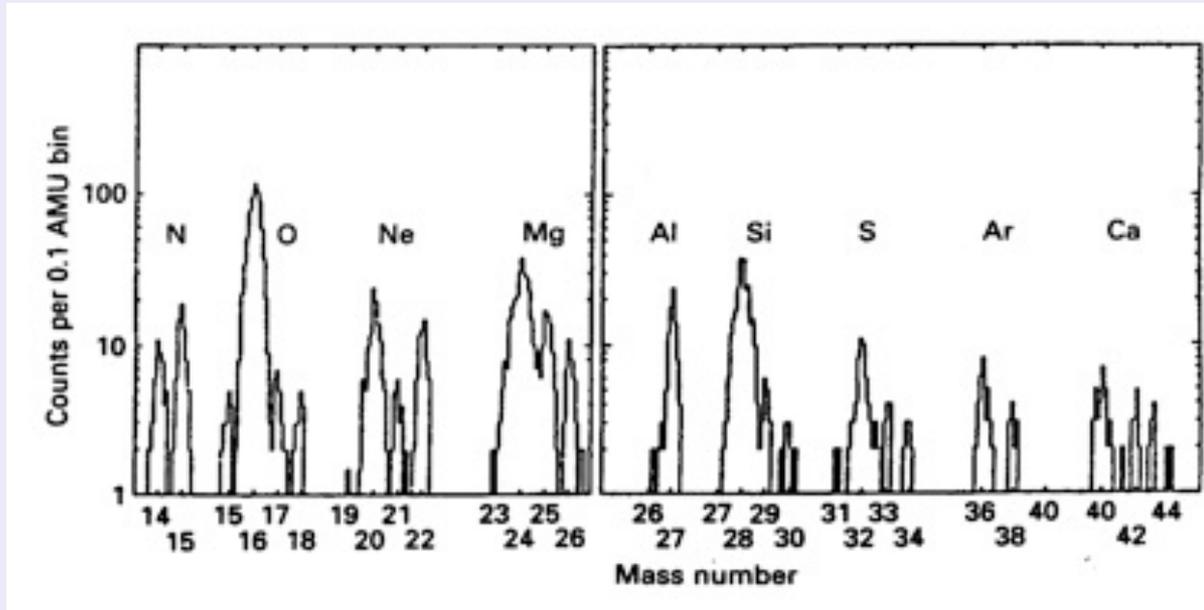
<sup>a</sup>Uncertainties are shown as (a) statistical only; and (b) systematic uncertainties added in quadrature. These results are from Yanasak *et al.* (2001).

(<sup>10</sup>Be, <sup>26</sup>Al, <sup>36</sup>Cl, and <sup>54</sup>Mn) 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<sup>-3</sup>. 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.

➤ 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 ΓΑΛΑΞΙΑΚΗΣ Κ.Α.

Σχετικιστικά πρωτόνια με ενέργειες  $10^{12}\text{eV}$  ( $\gamma=10^3$ ) 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  $10^{12}\text{eV}$  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  
 $\theta$  η pitch angle του ανύσματος του σωματιδίου.

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

# ΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΓΑΛΑΞΙΑΚΗΣ Κ.Α.

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