



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



# Μάθημα Επιλογής: Αστροσωματιδιακή και Κοσμική Ακτινοβολία

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ\_ ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΦΘΟΝΙΕΣ

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

Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ  
Χειμερινό Εξάμηνο, 2024-2025

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

- Οι Κοσμικές ακτίνες δεν είναι 'ακτίνες' αλλά φορτισμένα σωματίδια που ζουν μέσα στο Σύμπαν

Protons (86%)

$\alpha$ -particles (11%)

βαρύτεροι πυρήνες μέχρι το Uranium (1%)

electrons (2%)

Μικρό ποσοστό Positrons and antiprotons (παράγονται από αλληλεπίδρασεις πρωτογενών σωματιδίων με το interstellar gas)

$\gamma$ -rays (Crab Nebula, AGN), neutrinos and antineutrinos (Ηλιος, supernovae)

*(Perkins, 2003)*

# ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

426

The European Physical Journal H

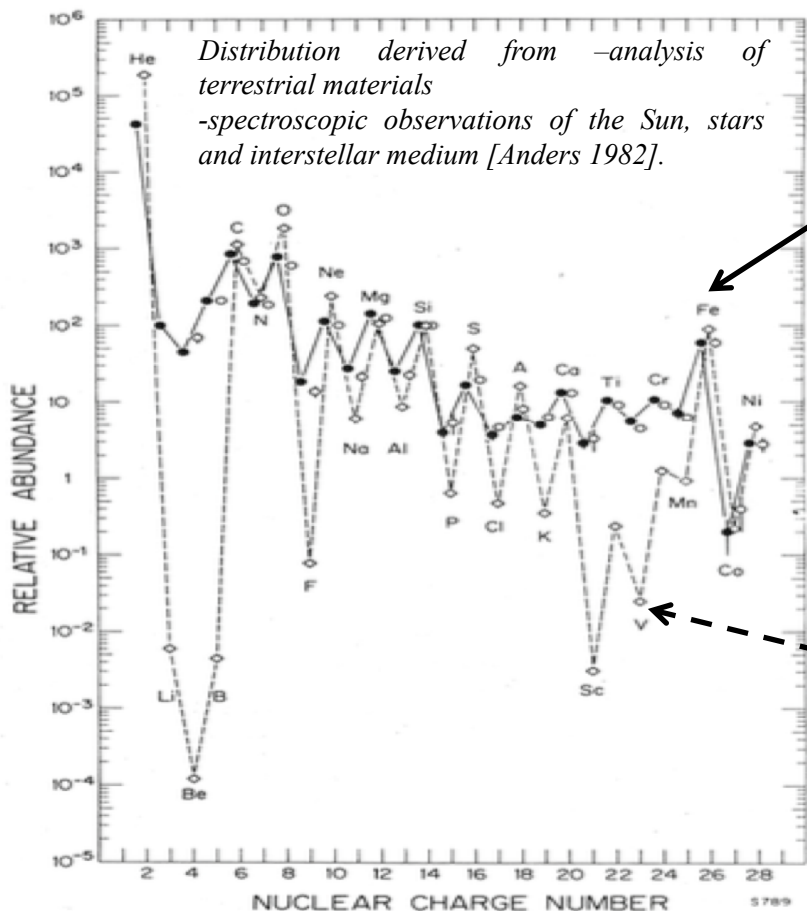


Fig. 11. Elemental abundances of cosmic rays from helium to nickel measured at Earth, compared to the solar system (or universal) abundance scale, all relative to silicon. Solid circles: low energy ( $70-280 \text{ MeV amu}^{-1}$ ); open circles: high energies ( $1000-2000 \text{ MeV amu}^{-1}$ ); open diamonds: solar system abundances (figure from [Simpson 1983]).

Cosmic Ray

Πληροφορίες τόσο για τις πηγές τους όσο και για τους μηχανισμούς διάδοσής τους από τις πηγές τους προς τη Γη

Solar system

Ομοιότητες-Διαφορές

# ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

## ΟΜΟΙΟΤΗΤΕΣ

- Οι κορυφές στα στοιχεία C, N, O και Fe εμφανίζονται τόσο στις αφθονίες της ΚΑ όσο και σ' αυτές του ηλιακού συστήματος.
- Τα ποσοστά C, N, O, Fe δεν διαφέρουν σημαντικά άρα υποθέτουμε ότι αρχικά η σύσταση είναι η ίδια με εκείνη των αστέρων
- Και στις δυο αφθονίες εμφανίζεται το **άρτιο-περιττό** φαινόμενο στις σχετικές σταθερότητες των πυρήνων ως προς τον ατομικό αριθμό, γνωστό για τις αφθονίες του ηλιακού συστήματος, εμφανίζεται και στις αφθονίες των ΚΑ αλλά σε μικρότερο βαθμό.

# ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

## ΔΙΑΦΟΡΕΣ

- Τα στοιχεία με μεγαλύτερη αφθονία στο Ηλιακό σύστημα (και στο σύμπαν) είναι το  $H_2$  και He (p-p chain). Το μικρότερο ποσοστό του He στις ΚΑ οφείλεται στην μικρότερη αποτελεσματικότητα του μηχανισμού επιτάχυνσης στις πηγές.
- Για στοιχεία με  $Z > 1$  σχετικές αφθονίες στις Κ.Α. > από το Ηλιακό σύστημα.

# ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

- 2 Ομάδες στοιχείων που έχουν διαφορές μερικών ταξεων μεγέθους στις σχετικές αφθονίες τους.
- Τα ελαφρά στοιχεία **Li**, **Be** και **B** υπερτερούν στις ΚΑ σχετικά με τις αφθονίες τους στο ηλιακό σύστημα. Το **Li**, **Be**, and **B** είναι end products της αστρικής πυρηνοσύνθεσης, λιγότερο σταθερά και καταναλώνονται στην αλυσίδα παραγωγής ενέργειας. Το ποσοστό τους στις κοσμικές οφείλεται στο spallation του **C**, 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.

# ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.

Διαφορές στη σχετική αφθονία Li, Be, και B

Η αφθονία τέτοιων στοιχείων στα αστέρια είναι πολύ μικρή δεδομένου ότι έχουν χαμηλό φράγμα Coulomb και είναι ελαφρά δεσμευμένα οπότε καταναλώνονται γρήγορα από τις πυρηνικές αντιδράσεις στους αστρικούς πυρήνες. Στην πραγματικότητα, η ποσότητα αυτών των ελαφρών στοιχείων καθορίζει το μέσο πάχος της διαστρικής ύλης που διασχίζει η ακτινοβολία και δείχνει την διάρκεια ζωής των κοσμικών ακτίνων στον γαλαξία σε περίπου 3 εκατομμύρια έτη.

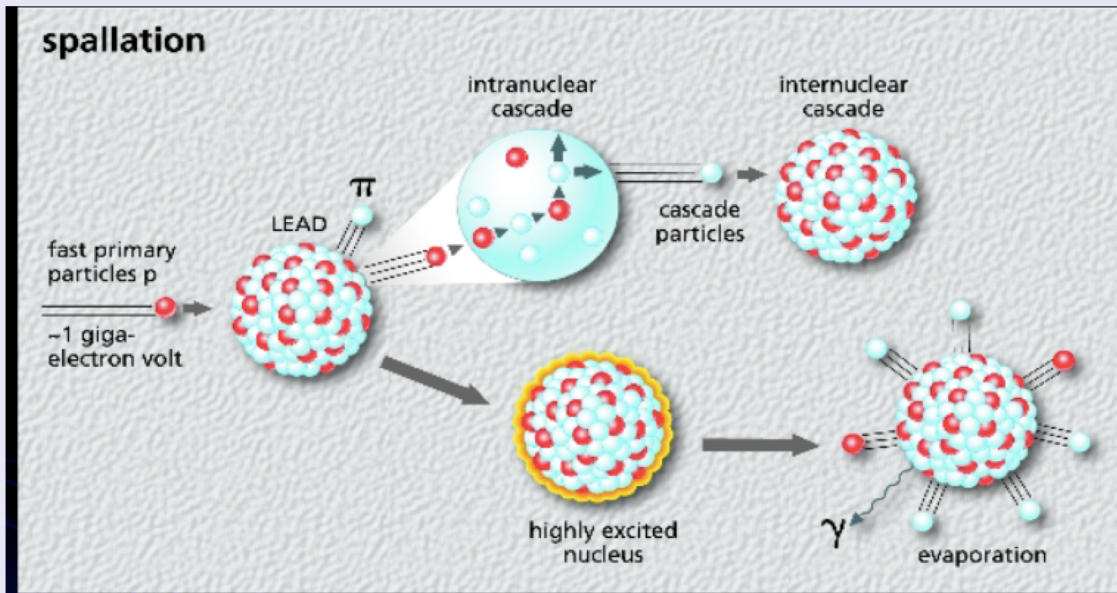
Τα φάσματα ενέργειας των Li, Be και B είναι κάπως πιο απότομα από εκείνα του άνθρακα ή του οξυγόνου, υποδεικνύοντας ότι στους πυρήνες των υψηλότερων ενεργειών δεν υφίστανται τόσο μεγάλος **θρυμματισμός**, προφανώς επειδή διαρρέουν έξω από τον γαλαξία νωρίτερα από αυτούς που έχουν χαμηλότερη ενέργεια.

Με παρόμοιο τρόπο, η αφθονία των Sc, Ti, V και Mn στις κοσμικές ακτίνες οφείλεται στην εξουδετέρωση των άφθονων πυρήνων Fe και Ni (Perkins, 2003).

Οι ομάδες των στοιχείων (Li, Be, B) και (Sc, Ti, V, Cr, Mn) προέρχονται από τις συγκρούσεις των άφθονων πυρήνων C και O και Fe αντίστοιχα.

# Spallation

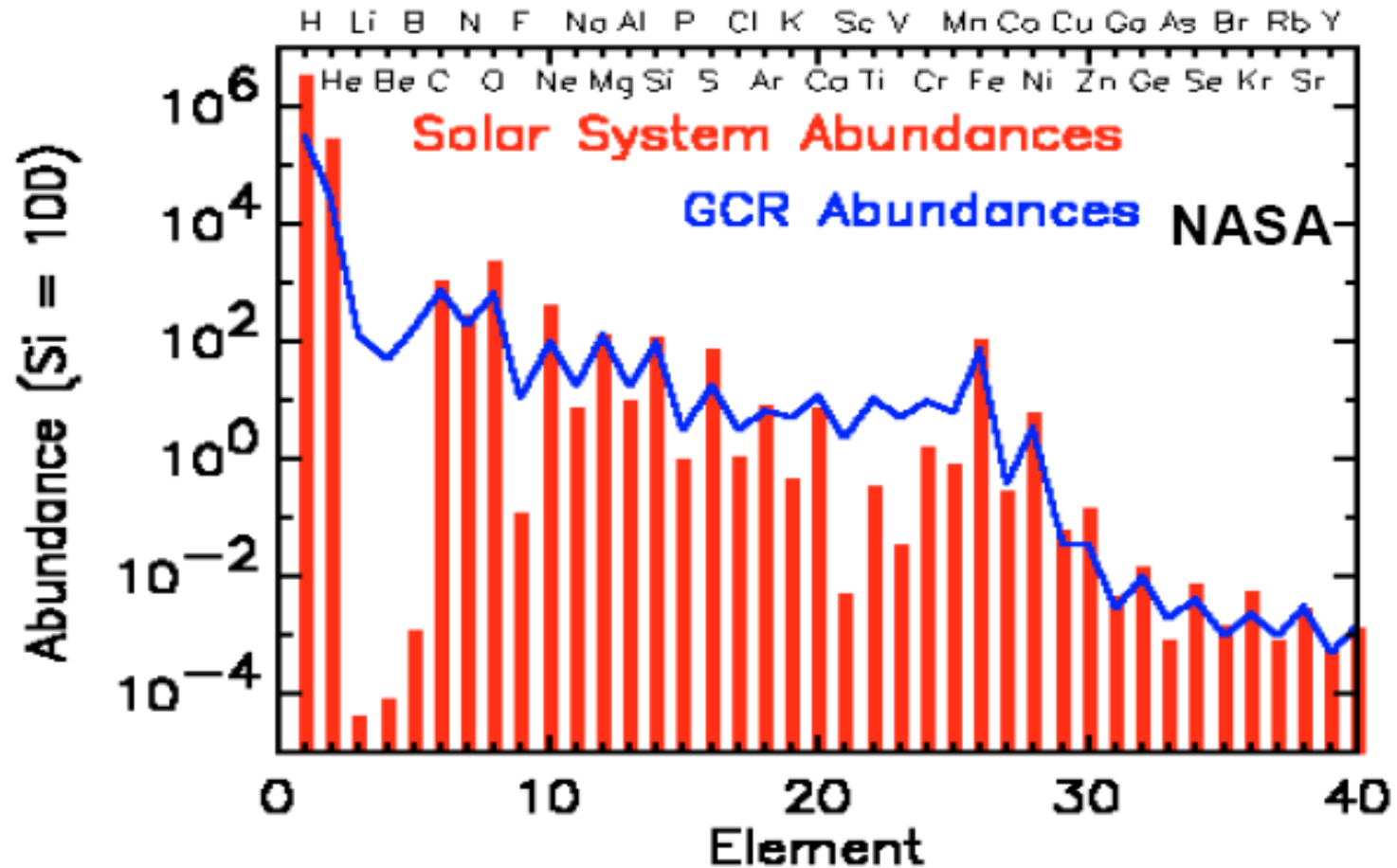
High energy nuclear reaction : ένας πυρήνας στόχος «βομβαρδίζεται» από ένα σωματίδιο ενέργειας ( $> 50 \text{ MeV}$ ) και «εκτοξεύει» πολυάριθμα ελαφρύτερα σωματίδια σχηματίζοντας έτσι ένα πυρήνα ελαφρύτερο από τον αρχικό πυρήνα. Τα σωματίδια που εκτοξεύονται μπορεί να είναι νετρόνια, πρωτόνια ή διάφορα σύνθετα σωματίδια ισοδύναμα με πυρήνες ισοτόπων υδρογόνου, ηλίου ή λιθίου. Ο πυρήνας προϊόντος είναι περιστασιακά πολύ ελαφρύτερος από τον πυρήνα.



Γνωρίζοντας τις τιμές της ενεργούς διατομής διαφόρων πυρήνων για το spallation μπορούμε να υπολογίσουμε την ποσότητα της ύλης που συναντούν τα σωματίδια ΚΑ στην διαδρομή τους.



# ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΦΘΟΝΙΕΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ Κ.Α.



# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

Μεγαλύτερο ποσοστό σωματίων που ανιχνεύεται στη Γη είναι γαλαξιακής προέλευσης. Μικρής ενέργειας απορρόφηση από την ατμόσφαιρα και αποκοπή από το γεωμαγνητικό πεδίου.

Ροή Κ.Α. με  $E > 1 \text{ GeV}$  ελαττώνεται αυξανομένης της  $E$ . Η σχέση που εκφράζει τη μεταβολή της έντασης  $J (>E)$  των κοσμικών ακτίνων, που οι ενέργειές τους υπερβαίνουν ένα ορισμένο κατώτερο όριο ενέργειας  $E$ , συναρτήσει της ενέργειας δίνει το ολοκληρωμένο ενεργειακό φάσμα

$$J (> E) = k E^{-\gamma}$$

$K$ : σταθερά

$\gamma$ : ενεργειακός εκθέτης (διακριτές τιμές)

Η τιμή του  $\gamma$  μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλονται οι ενέργειες των ΚΑ

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

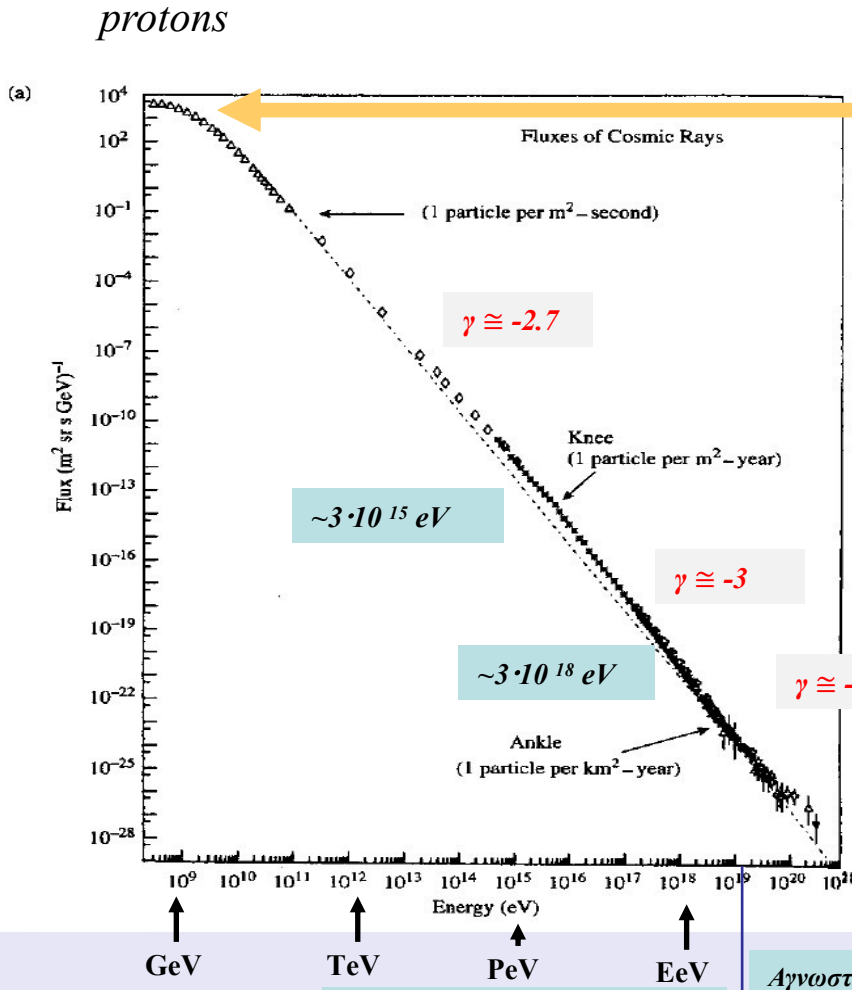
## Ολοκληρωμένο Φάσμα Κ.Α

### ΠΗΓΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ

Γαλαξιακή + έκτακτη ηλιακή ( $\approx 10$  GeV)

Πηγή: Ηλιος

Ηλιακή ΚΑ\_SEP



Knee ( $\approx 3PeV$ ) – 3 EeV  
steeper spectrum  
Πηγές: εκτός Η.Σ, supernova,  
Σύσταση:  $p^+$ , He ( $\approx 10\%$ ),  $Z \gg$   
( $\approx 1\%$ )

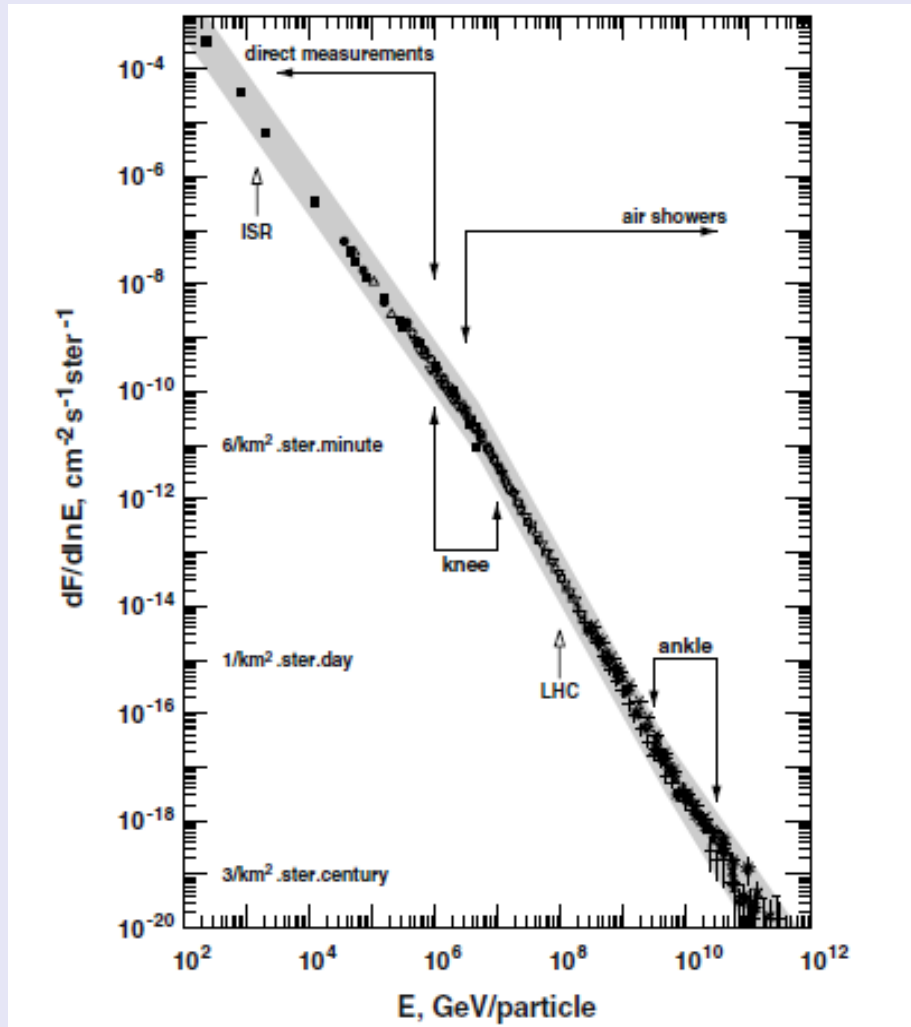
Εξωγαλαξιακή  
ΚΑ\_UHECR,  
EHECR

> Ankle ( $\approx 3EeV$ )  
flatter spectrum  
Πηγές: AGN,  
Quasars, G-rays  
Brusts

(Perkins, 2003).

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

## Ολοκληρωμένο Φάσμα Κ.Α.



Φάσμα  $> 100 \text{ GeV}$  (Stanev, 2010).

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

## Ολοκληρωμένο Φάσμα Κ.Α

Ευρύ ενεργειακό φασμα: 14 ταξεις μεγέθους (ενέργειες) -32 ταξεις μεγέθους (ροή)

Καθε ενεργειακή περιοχή -διαφορετική τεχνική ανίχνευσης και καταγραφής.

Χαμηλές ενέργειες –πειράματα σε δορυφόρους,ballons.

Ενέργειες  $> 1 \text{ GeV}$  – επίγειες μετρήσεις ( μετρητες νετρονίων, τηλεσκόπια μιονίων,κλπ)

Υπερυψηλές HEICR- πειραματα ατμοσφαιρικών καταγισμών ( ανιχνευτές που καλύπτουν εκτεταμένες επιφάνειες πανω στη γη καθώς και υπογειοι και υποθαλάσσιοι κυρίως για νετρινα)

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

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

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

## Ολοκληρωμένο Φάσμα Κ.Α

Η μικρή σημαντική μεταβολή που υπάρχει στην κλίση στην περιοχή  $10^{15}$ - $10^{18}$ eV οφείλεται πιθανότατα στη φύση των ΚΑ. Κατά τον Weeks (1969) η μεταβολή αυτή οφείλεται σε δύο διαφορετικές πηγές των ΚΑ π.χ. μια γαλαξιακή και μία εξωγαλαξιακή, που περνά ή μια μέσα από την άλω και ή άλλη μέσα από το δίσκο του γαλαξία και έχουν διαφορετικά φάσματα.

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

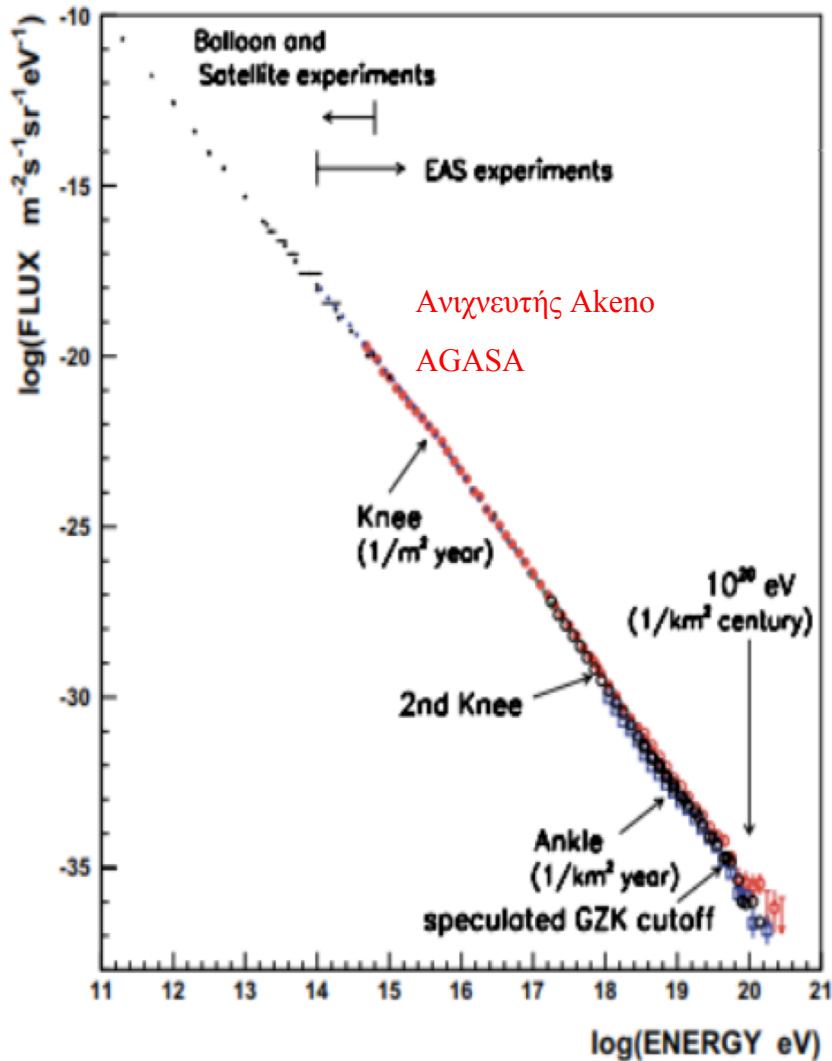
## Ολοκληρωμένο Φάσμα Κ.Α

Για ενέργειες  $> 10^{20}$  eV έχουμε τις κοσμικές ακτίνες εξαιρετικά υψηλών ενεργειών (Extremely High Energy Cosmic Rays – EHECR) (Bhattacharjee & Sigl, 1999). Θεωρητικά, τίθεται ένα όριο στην ενέργεια των κοσμικών ακτίνων στα  $5 \cdot 10^{19}$  eV, όμως τα πειραματικά δεδομένα φαίνεται να εκτείνονται μέχρι ενέργεια  $3 \cdot 10^{20}$  eV.

ΕΞΗΓΗΣΗ; αλλαγές στο μηχανισμό επιτάχυνσης, την προέλευση και τις αλληλεπιδράσεις της κοσμικής ακτινοβολίας. Οι κοσμικές ακτίνες με ενέργειες κάτω από  $10^{15}$  eV πιστεύεται γενικά ότι είναι γαλαξιακής προέλευσης επιταχυνόμενες σε υπολείμματα υπερκαινοφανών. Αν και δεν υπάρχουν παρατηρησιακά δεδομένα για επιτάχυνση πυρήνων οπουδήποτε στο Γαλαξία, οι πυρήνες μπορεί να επιταχύνονται μέχρι και τα  $10^{15}$  eV στα υπολείμματα υπερκαινοφανών (SNRs). Μετρήσεις της σύνθεσης κάτω από το γόνατο δείχνουν ότι είναι παρόντα όλα τα χημικά στοιχεία αλλά στο γόνατο η ροή των ελαφρών πυρήνων πέφτει γρήγορα με τη σύνθεση να κυριαρχείται από βαρείς πυρήνες. Μετά το γόνατο γίνεται η υπόθεση ότι ένα μέρος των κοσμικών ακτίνων επανεπιταχύνεται με κάποιο τρόπο και πάνω από τον αστράγαλο πιστεύεται ότι η αλλαγή στην κλίση μπορεί να οφείλεται σε μετάβαση από γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες σε εξωγαλαξιακές καθώς οι διαστάσεις της γυροακτίνας των σωματιδίων είναι συγκρίσιμες με τις διαστάσεις του Γαλαξία.

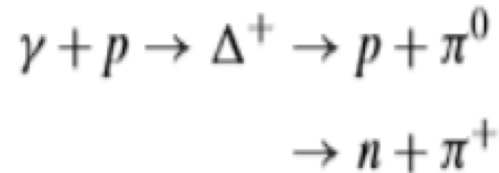
# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

## Ολοκληρωμένο Φάσμα Κ.Α



Γόνατο σε ενέργειες  $3 \times 10^{15} \text{eV}$   
Αστράγαλος σε ενέργειες  $3 \times 10^{18} \text{eV}$

$E > 4 \times 10^{19} \text{eV}$  **επίδραση GZK** (Greisen Zatsepin και Kuzmin) επεσήμαναν ότι το σύμπαν θα μπορούσε να καταστεί αδιαφανές σε τέτοιες ενέργειες μέσω της παραγωγής φωτοπιονίων διεγερμένων από συγκρούσεις πρωτευόντων πρωτονίων με φωτόνια της μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου CMB.



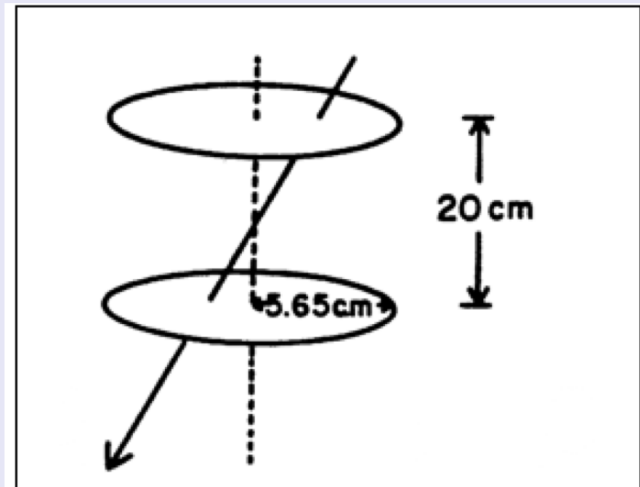
Ανιχνευτής Akeno AGASA Japan :100km<sup>2</sup> 111  
cherenkov and 27muons



# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

Διάφορα είδη ανιχνευτών για τη μελέτη των ΚΑ σε όλο το ενεργειακό φάσμα.

- Στις χαμηλές ενέργειες, όπου η ροή είναι μεγαλύτερη, τα πράγματα είναι πιο εύκολα καθώς στην ενεργειακή περιοχή του 1GeV περίπου 110σωμ./sec περνούν από ένα τηλεσκόπιο που αποτελείται από δύο ανιχνευτές επιφανείας 100cm<sup>2</sup> σε απόσταση 20cm<sup>2</sup> μεταξύ τους. Έτσι ένας μικρός ανιχνευτής στο όριο της ατμόσφαιρας προσαρμοσμένος σε ένα μπαλόνι (balloon) ή ένα διαστημόπλοιο είναι αρκετός για τη λεπτομερειακή μελέτη της σύνθεσης των ΚΑ στην περιοχή του 1GeV.

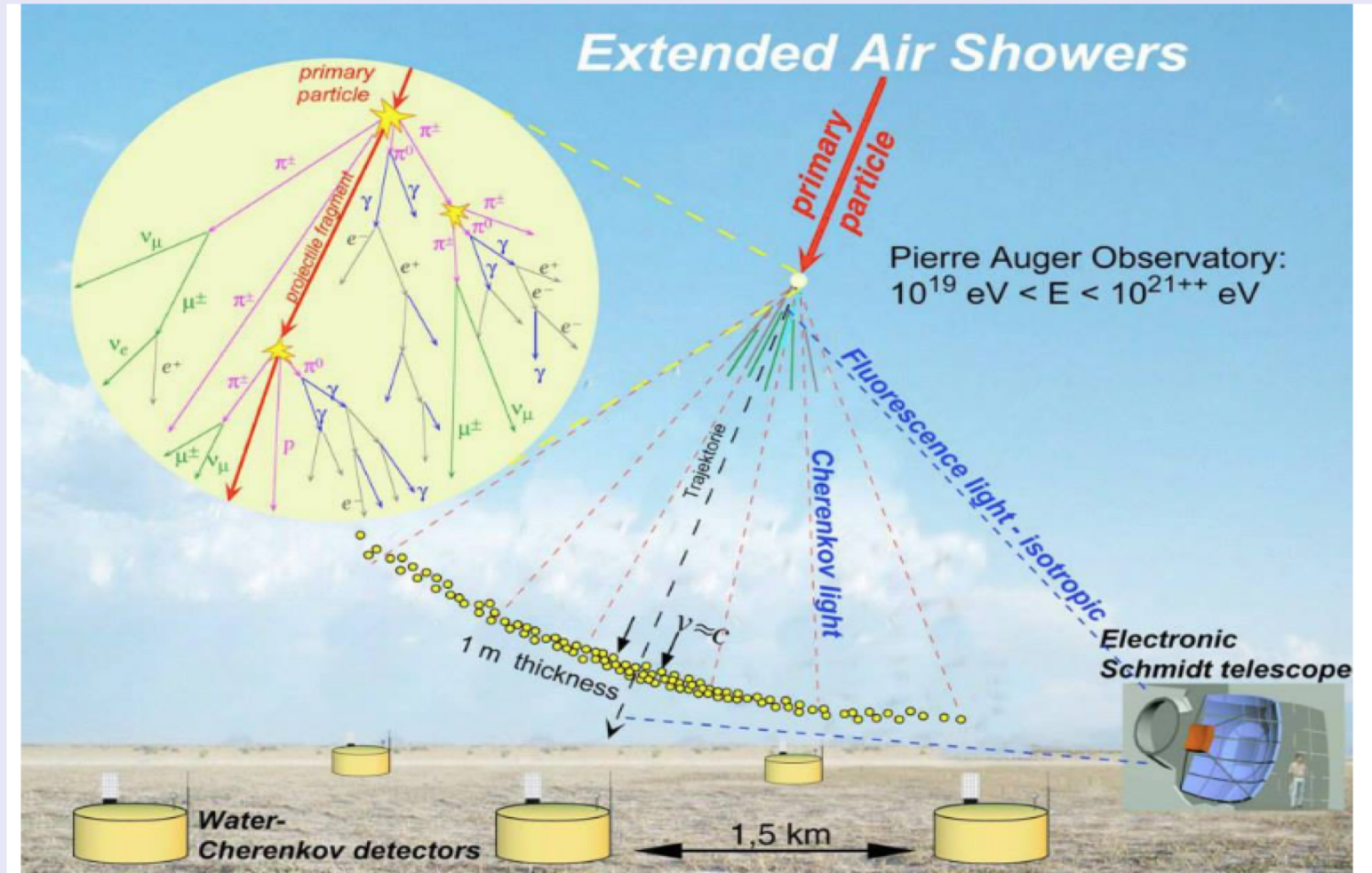


# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

## Ολοκληρωμένο Φάσμα Κ.Α

- Αντίθετα υψηλής ενέργειας από σειρές ανιχνευτών εκτεταμένου καταιγισμού. Οι εκτεταμένοι καταιγισμοί (καταιονισμοί) ανιχνεύονται από διαφορετικά είδη ανιχνευτών σωματιδίων. Οι πιο συνήθεις εξ αυτών είναι οι απαριθμητές σπινθηρισμού (σπινθηριστές) που μας επιτρέπουν να μετρήσουμε τον χρόνο άφιξης με μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον χρησιμοποιούνται διατάξεις όπως απαριθμητές Cherenkov σε νερό, θάλαμοι εκτροπής, σωληνοειδείς ανιχνευτές φωτεινών ακτίνων, και σωληνοειδείς Geiger-Müller ανιχνευτές. Συσκευές που έχουν μεγάλη ευαισθησία στον προσδιορισμό της θέσης μας επιτρέπει να μετρήσουμε την διεύθυνση πρόσπτωσης του σωματιδίου. Για να ανιχνεύσουμε εκτεταμένους καταιγισμούς απαιτείται η σύμπτωση αρκετών ανιχνευτών σωματιδίων που συνθέτουν μια σειρά από δεκάδες ή εκατοντάδες ανιχνευτές και διαχωρίζονται σε απόσταση 10-30 μέτρων. Για τους πολύ μεγάλους καταιγισμούς δισεκατομμυρίων σωματιδίων, οι ανιχνευτές πρέπει να τοποθετηθούν σε ένα δίκτυο του οποίου το μέγεθος του πλέγματος είναι της τάξης του ενός χιλιομέτρου. Κατά συνέπεια, το μέγεθος μιας σειράς ανιχνευτών καταιγισμού ποικίλει από εκατοντάδες μέτρα σε δεκάδες χιλιόμετρα. Τέτοια δίκτυα ανιχνευτών επιτρέπουν την μελέτη πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας με ενέργειες εύρους  $10^{12}$  -  $10^{21}$  eV.

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

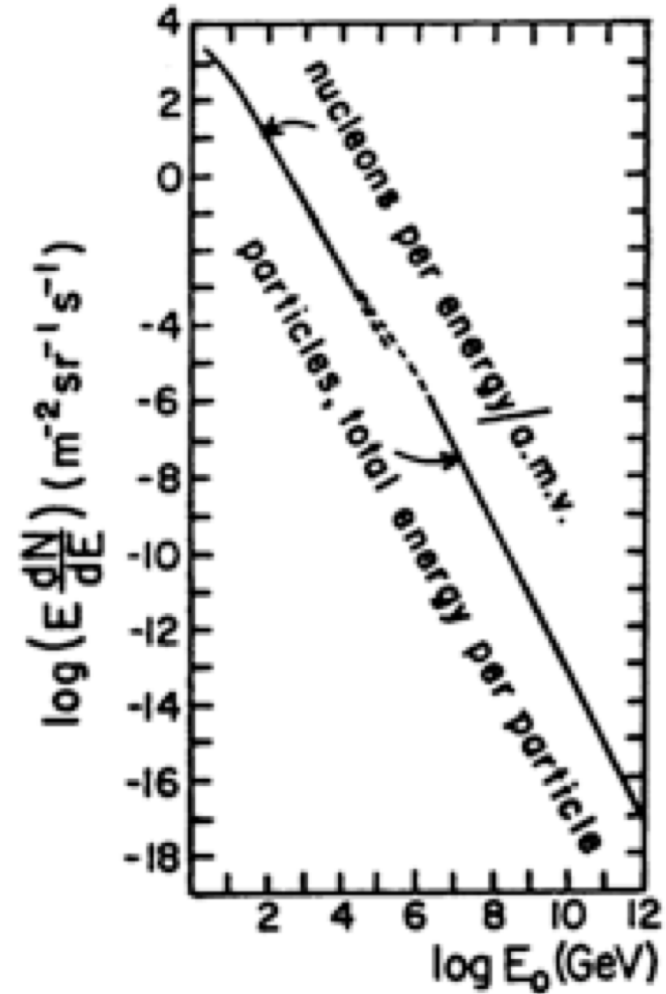


# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

Υψηλές ενέργειες: αριθμό των σωματιδίων ολικής ενέργειας  $E$  ανά πυρήνα ( αφού ο διαχωρισμός του φορτίου σ' αυτές τις ενέργειες είναι δύσκολος οπότε μετράται η ολική ενέργεια)

Χαμηλές ενέργειες: αριθμό των νουκλεονίων σαν συνάρτηση της ενέργειας ανά νουκλεόνιο (μέχρι 1 TeV γίνεται ταυτοποίηση του πυρήνα)

Κατώφλι φάσματος = απουσία σωματιδίων της πρωτογενούς Κ.Α. χαμηλών ενεργειών για ψηλά γεωμαγνητικά πλάτη.



# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

Η εξάρτηση της έντασης των πρωτογενών νουκλεονίων από την ενέργεια που κυμαίνεται από αρκετά GeV έως και πάνω από 100 TeV, υπολογίζεται από τη σχέση:

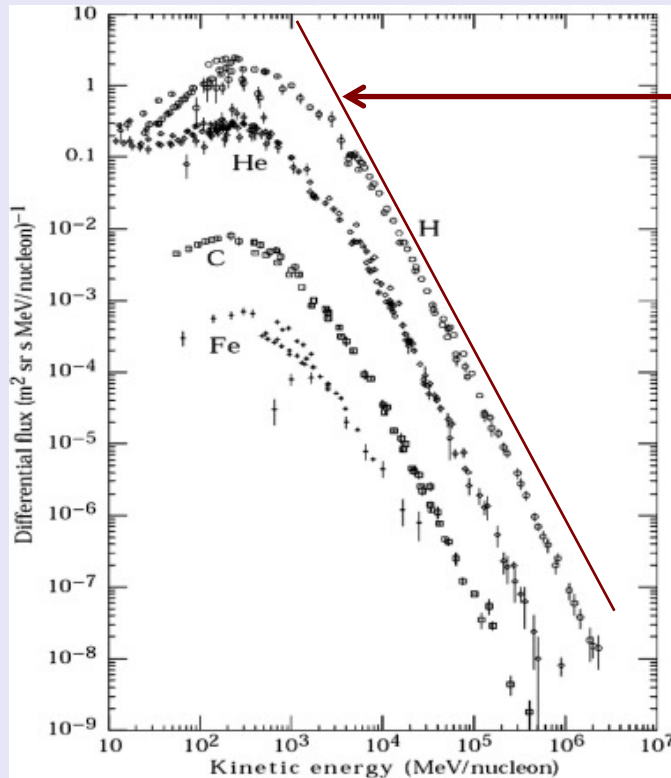
$$I_N(E) \approx 1.8 \times 10^4 \left( \frac{E}{1\text{GeV}} \right)^{-\alpha} \frac{\text{nucleons}}{\text{m}^2\text{s sr GeV}}$$

$E$  η ενέργεια ανά νουκλεόνιο (συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας μάζας ηρεμίας και  $\alpha (\equiv \gamma + 1) = 2.7$  είναι ο διαφορικός φασματικός δείκτης της ροής των κοσμικών ακτίνων και  $\gamma$  είναι ο ολοκληρωμένος φασματικός δείκτης. Περίπου το 79% των πρωτογενών νουκλεονίων είναι ελεύθερα πρωτόνια και περίπου το 70% των υπόλοιπων είναι νουκλεόνια δεσμευμένα σε πυρήνες ηλίου. (Beatty J. & Matthews J., 2009).

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

## Διαφορικό Φάσμα Κ.Α

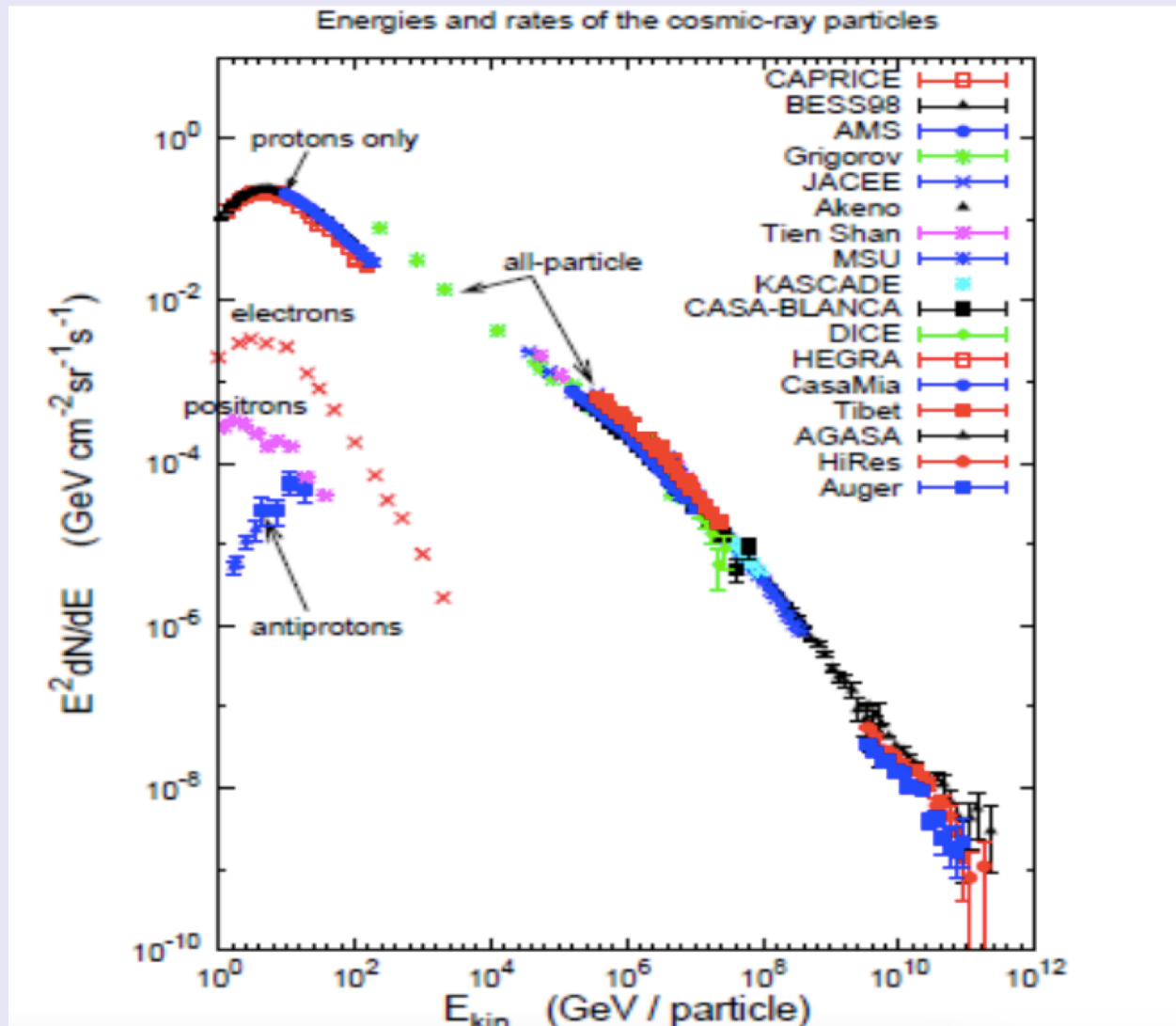
Δείχνει πως μεταβάλλεται η ένταση των σωματίων της ΚΑ σε μια συγκεκριμένη ενεργειακή περιοχή μεταξύ  $E$  και  $E+dE$  με την ενέργεια  $E$ :



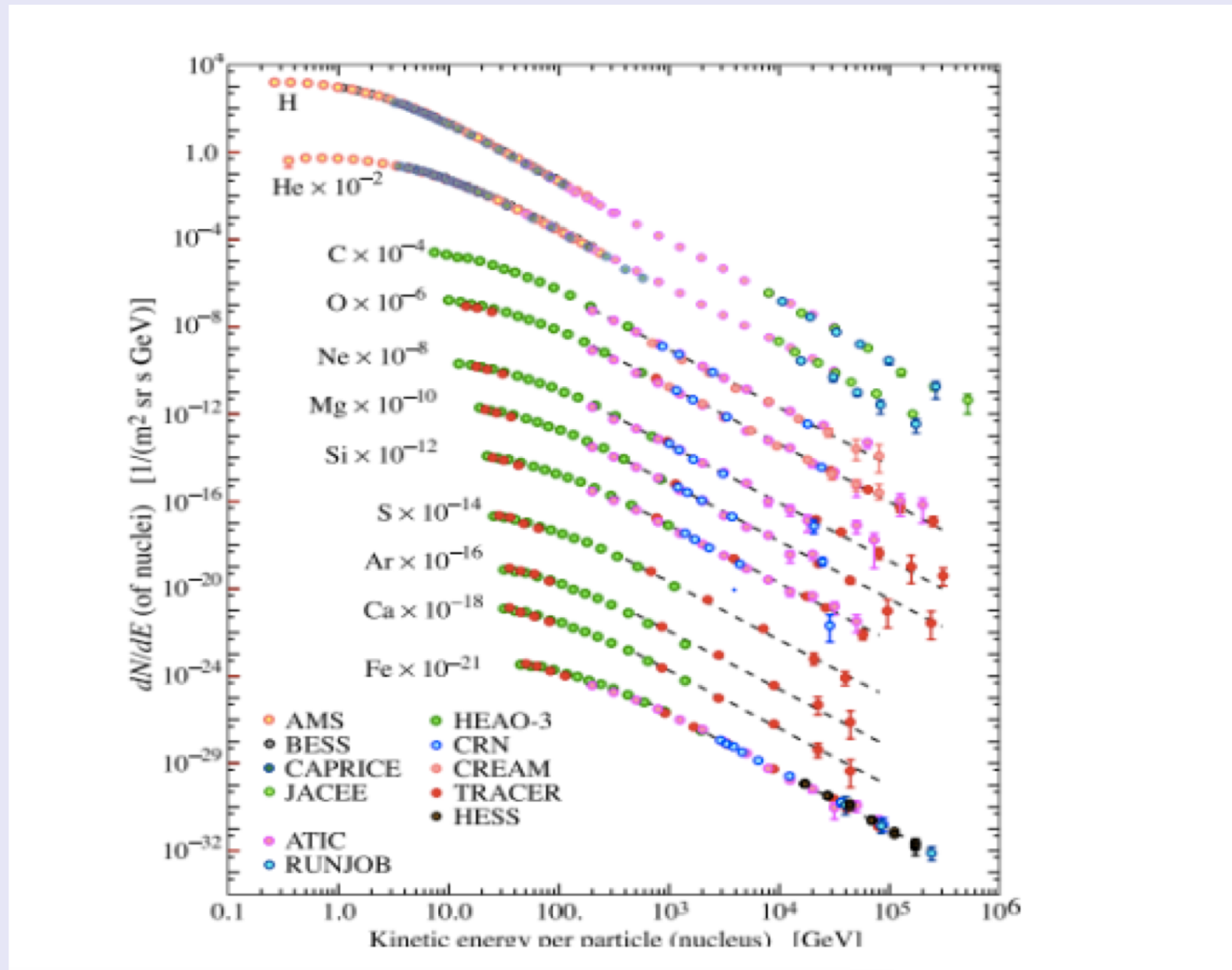
το αδιαμόρφωτο ενεργειακό φάσμα των πρωτονίων χωρίς ηλιακή διαμόρφωση (ενδοαστρικό χώρο)

*Cosmic ray energy spectra for the elements H, He, C, and Fe, (from: Simpson, 1983).*

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.



# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.





# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

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 και μάλιστα παρατηρήθηκε ότι χαμηλές ροές ενεργειακών σωματιδίων χαμηλής ενέργειας έχουμε κατά το μέγιστο της ηλιακής δραστηριότητας, ενώ στην αντίθετη περίπτωση παρουσιάζονται αυξημένες ροές

Όσο πιο έντονη είναι η ηλιακή δραστηριότητα τόσο πιο έντονες είναι οι διαταραχές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου που εμποδίζουν τη διάδοση των σωματιδίων χαμηλών ενεργειών ( $E < 1 \text{ GeV}$ ) ως την επιφάνεια της Γης.

Η δυναμική φορτισμένου σωματιδίου μέσα σε μαγνητικό πεδίο εξαρτάται από ένα μέγεθος που ονομάζεται μαγνητική δυσκαμψία και ορίζεται  $R = pc / Ze$  όπου  $p$  η σχετικιστική ορμή και  $Ze$  το ηλεκτρικό φορτίο του σωματιδίου. Σωματίδια με διαφορετική μάζα και φορτίο αλλά με την ίδια δυσκαμψία έχουν την ίδια συμπεριφορά σε οποιαδήποτε διαμόρφωση μαγνητικού πεδίου.

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

Από την ανάπτυξη των ατμοσφαιρικών καταιονισμών ως συνάρτηση του ατμοσφαιρικού βάθους, είναι γνωστό ότι σε όλο το φάσμα της παραπάνω ενέργειας, τα πρωτεύοντα σωματίδια είναι τόσο πρωτόνια όσο και βαρύτεροι πυρήνες.

Στις ενέργειες  $> 30 \text{ GeV}$ , όπου οι επιδράσεις που οφείλονται στα μαγνητικά πεδία της Γης ή του Ήλιου είναι ασήμαντες, η ακτινοβολία φαίνεται να είναι ισοτροπική, αφού οι γαλαξιακές μαγνητικές περιοχές θα καταστρέψουν οποιαδήποτε αρχική ανισοτροπία εκτός από τις εξαιρετικά υψηλές ενέργειες. Τα δεδομένα από το πείραμα AUGER ανιχνεύουν ανισοτροπίες και δείχνουν στενούς και σημαντικούς συσχετισμούς καταγιγισμών πάνω από  $6 \times 10^{19} \text{ eV}$  με γνωστά AGNs σε απόσταση περίπου 75Mpc από τη Γη (Perkins, 2003).

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

ελαφρά πτώση του φάσματος μεταξύ  $4 \times 10^{18}$  eV και  $4 \times 10^{19}$  eV, μπορεί να υποδεικνύει την παρουσία σωματιδίων που είναι εξωγαλαξιακά (Perkins, 2003).

Η απότομη ελάττωση του φάσματος των κοσμικών ακτίνων πάνω από  $10^{20}$  eV είναι αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων των κοσμικών ακτίνων με τη μικροκυματική ακτινοβολία του κοσμικού υποβάθρου, και αντιστοιχεί σε **Εξαιρετικά Υψηλής Ενέργειας Κοσμικές**

# ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΦΑΣΜΑ Κ.Α.

Αν εκφράσουμε τις ενέργειες των σωματιδίων σαν συνάρτηση της κινητικής τους ενέργειας ανά νουκλεόνιο, τότε η μαγνητική δυσκαμψία δίνεται από την σχέση:

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

όπου  $A$  ο μαζικός και  $Z$  ο ατομικός αριθμός του σωματιδίου

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.