



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



Μάθημα Επιλογής: Αστροσωματιδιακή και Κοσμική Ακτινοβολία

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΙ

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

Τμήμα Φυσικής ΕΚΠΑ
Χειμερινό Εξάμηνο, 2023-2024

ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ Κ.Α.

Τα πρωτογενή σωματίδια παραγουν 2γενη διασχίζοντας την ατμόσφαιρα, η οποία παίζει το ίδιο ρόλο με το στοχο σε μια δέσμη επιταχυντη (Perkins, 2003)

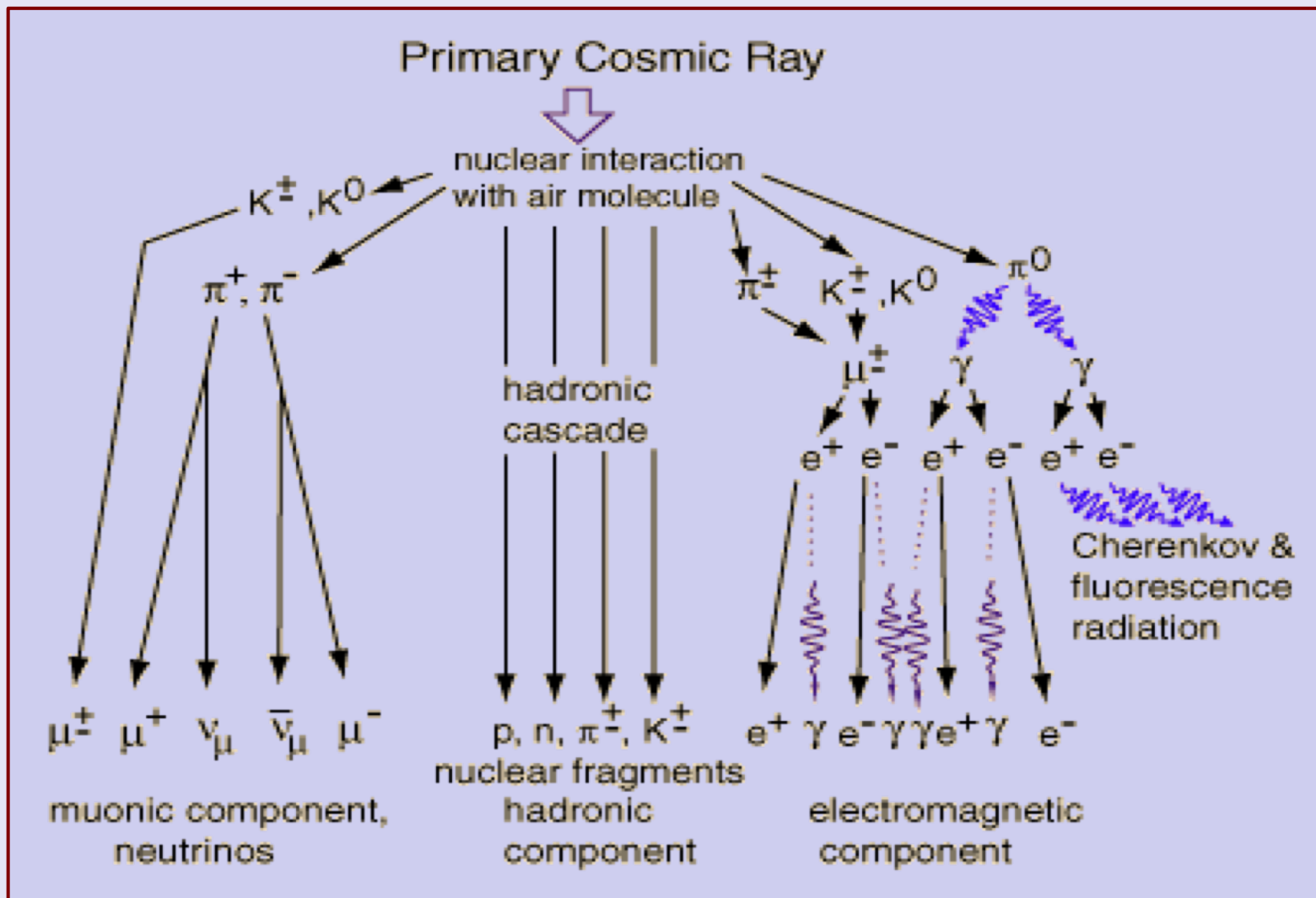
Ο αριθμός των παραγόμενων σωματιδίων τόσο μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερη η ενέργεια του προσπίπτοντος.

Τα συνηθέστερα παραγόμενα είναι πιόνια (Π^0 , Π^+ , Π^-) (δημιουργούνται κυρίως στην στρατόσφαιρα)

Τα 2γενη είτε συνεχίζουν τη πορεία τους είτε διασπώνται

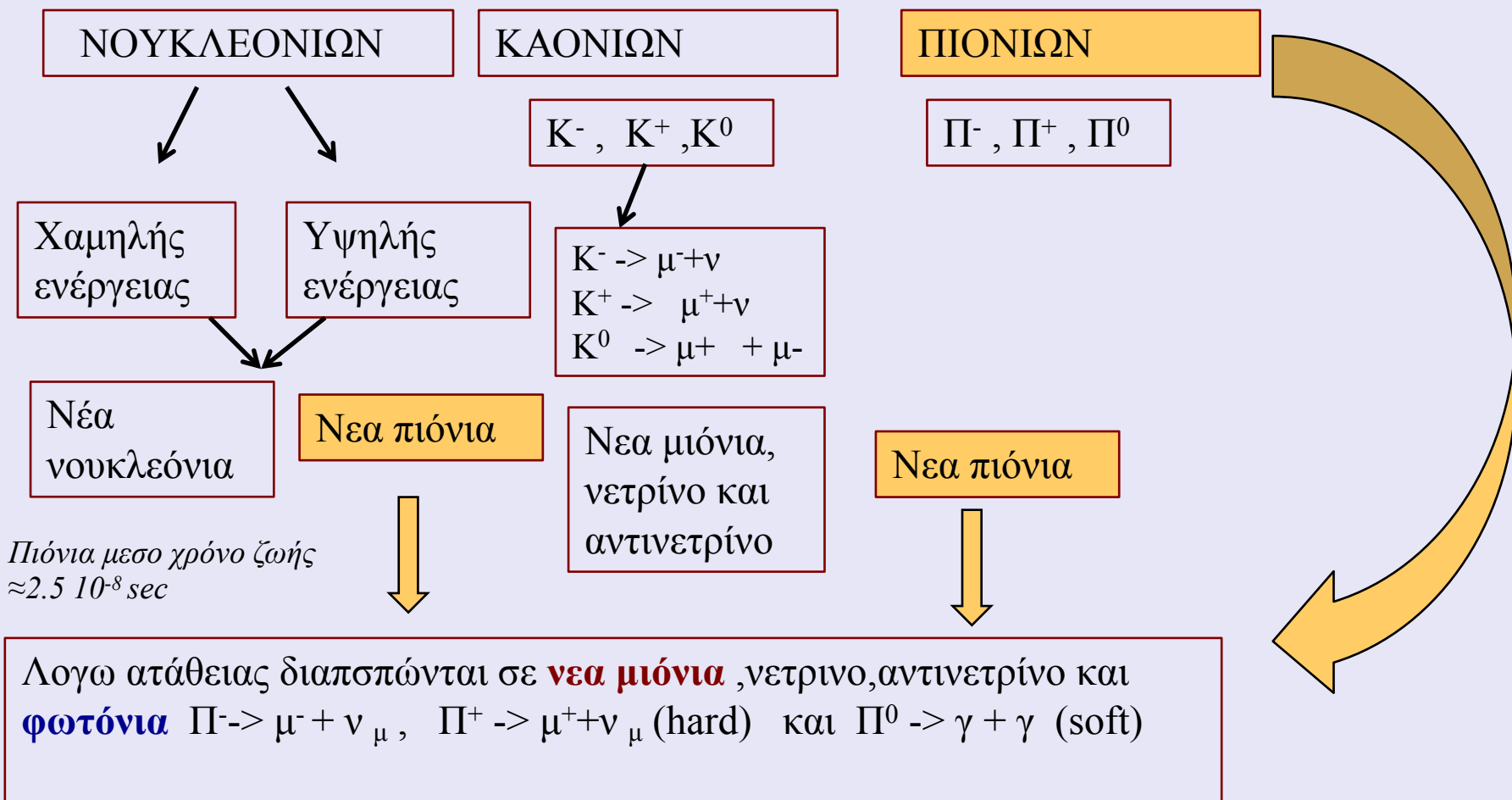
Leading particle 50% της αρχικής ενέργειας.

ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ Κ.Α.



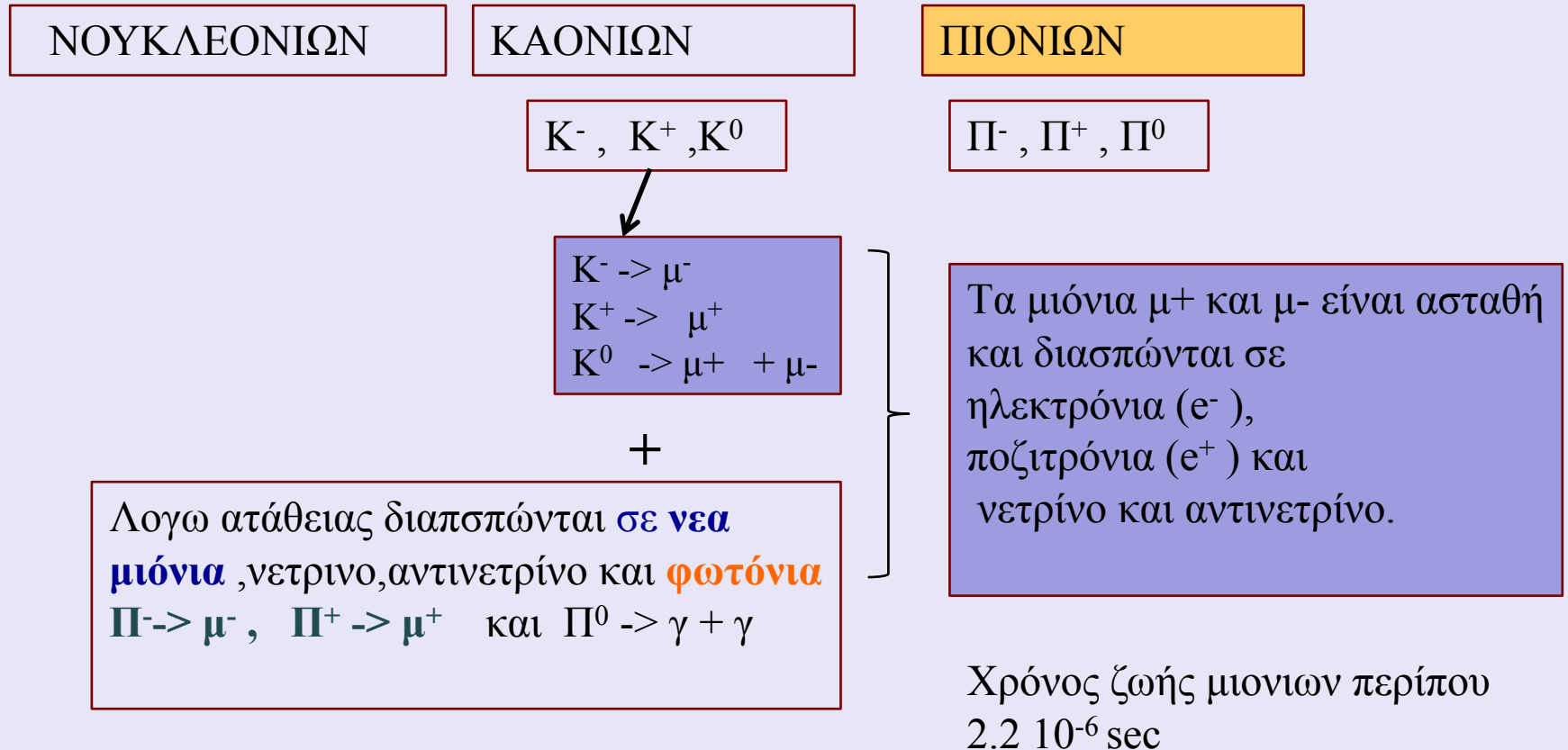
ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΣ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΣ.

Οι κύριες πυρηνικές αλληλεπιδράσεις των πρωτογενών σωματιδίων με την ατμόσφαιρα της γης οδηγούν στο σχηματισμό:



ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΣ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΣ.

Οι κύριες πυρηνικές αλληλεπιδράσεις των πρωτογενών σωματιδίων με την ατμόσφαιρα της γης οδηγούν στο σχηματισμό:



Η συνεισφορά των καονίων είναι 5% στις χαμηλές ενέργειες μιονίων, 8% στα 100 GeV

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΣ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΣ.

Οι κύριες πυρηνικές αλληλεπιδράσεις των πρωτογενών σωματιδίων με την ατμόσφαιρα της γης οδηγούν στο σχηματισμό:

Λογω ατάθειας διασπώνται σε νέα μίονια, νετρίνο, αντινετρίνο και φωτόνια
 $\Pi^- \rightarrow \mu^-$, $\Pi^+ \rightarrow \mu^+$ και $\Pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

Τα δημιουργούμενα ποζιτρόνια μπορεί να υποστούν πρόσθετες αλληλεπιδράσεις εξαύλωσης, δημιουργώντας νέα ζεύγη φωτονίων. Μερικά φωτόνια αλληλεπιδρούν και μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου, που οδηγεί στην παραγωγή νέων ηλεκτρονίων και χαρακτηριστικών φωτονίων (fluorescence radiation).

Μερικά από τα ποζιτρόνια και ηλεκτρόνια διδύμου γένεσης και ορισμένα ηλεκτρόνια σκέδασης Compton έχουν αρκετά υψηλή ενέργεια, ώστε να μπορούν να δημιουργήσουν ακτινοβολία Cherenkov.

- ✓ Διδυμη γένεση / δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου,
- ✓ σκέδαση Compton / δημιουργία ηλεκτρονίου και νέου φωτονίου.

ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ Κ.Α.

Μήκος αντίδρασης λ_{int} : το πάχος του μέσου που όταν το περνά δέσμη σωματιδίων το ποσοστό που δεν έχουν αλληλεπιδράσει (εξέρχονται) είναι $1/e$

$$N = N_0 \cdot e^{-\frac{x}{\lambda_{\text{int}}}}$$

x : μονάδες επιφανειακής πυκνότητας ώστε να έχουμε περιγραφή ανεξάρτητη από την πυκνότητα του εκάστοτε υλικού.

Μήκος διάσπασης d σωματιδίου με χρόνο ημιζωής τ_0

$$d = \gamma(\tau_0 \cdot c)$$

Ένα ασταθές σωματίδιο αντιδρά ή διασπάται ανάλογα με την τιμή του λ και του d .

Κρίσιμη ενέργεια η τιμή όπου το $\lambda_i = d_i$

Για $E > E_{\text{cr}}$ επικρατεί η αντίδραση και $E < E_{\text{cr}}$ επικρατεί η διάσπαση.

ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ Κ.Α.

Περιγραφή των καταιονσμών: εξισώσεις παραγωγής σωματιδίων.

Εξίσωση παραγωγής νουκλεονίων (Greisen)

$$\frac{dN(E, X)}{dX} = -\frac{N(E, X)}{\lambda_N(E)} + \int_E^\infty \frac{N(E', X)}{\lambda_N(E')} F_{NN}(E, E') \frac{dE'}{E}.$$

Ελάττωση λόγω αντίδρασης

Νεα νουκλεόνια που παράχθηκαν

$N(E, X)$: ροή σωματιδίων ενέργειας E στο βάθος X

$N(E', X)$ είναι η ροή νουκλεονίων με $E' > E$, και τα οποία αντιδρούν και δίνουν νέα νουκλεόνια.

Ο παράγοντας F_{NN} λέγεται inclusive cross-section και δίνει την πιθανότητα να παραχθεί ένα σωματίδιο με ενέργεια E από ένα σωματίδιο με ενέργεια E' και λ_N το μήκος αντίδρασης για το νουκλεόνιο στην ατμόσφαιρα.

ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ Κ.Α.

Η αρχική συνθήκη, είναι το διαφορικό ενεργειακό φάσμα νουκλεονίων, στην κορυφή της ατμόσφαιρας.

$$N(E, 0) = N_0(E) = \frac{dN}{dE} \approx 1.8 E^{-2.7} \frac{\text{nucleons}}{\text{cm}^2 \text{ sr s GeV}/A}$$

Νουκλεόνια έχουμε ελάττωση ΜΟΝΟ λόγω αντίδρασης και ΟΧΙ διασπασης αφού είναι σταθερα.

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ : Αμελητέες τις απώλειες λόγω ιονισμού.

Το μήκος αντίδρασης ανεξάρτητο από την ενέργεια.

ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ Κ.Α.

Η απώλεια της ενέργειας μέσω ιονισμών και διεγέρσεων ενός φορτισμένου σωματιδίου ανά μονάδα διαδρομής του, δίνεται από τον τύπο **Bethe-Bloch**:

$$-\left. \frac{dE}{dx} \right|_{ion} = N_A \frac{Z}{A} \frac{4\pi a^2 \left(\frac{\hbar c}{m_e c^2} \right)^2}{m_e c^2} \frac{Z_i^2}{\beta^2} \left(\ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right)$$

Όπου E = η κινητική ενέργεια του σωματιδίου,

$\beta = v/c$ η ταχύτητα του σωματιδίου,

$\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2} = E/m_0 c^2$ ο παράγοντας Lorentz του σωματιδίου,

$\alpha = 1/137$ η σταθερά της λεπτής υφής,

Z_i^2 = το φορτίο του σωματιδίου,

m_e = η μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου,

I = η μέση ενέργεια ιονισμού (ίση με $\sim 10 \cdot Z$ eV, για τον αέρα $I = 34$ eV),

Z = ο ατομικός αριθμός του υλικού,

A = η ατομική μάζα του υλικού (g/mole),

δ = διορθωτικός όρος σχετικός με την πυκνότητα του υλικού^[2].

ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ Κ.Α.

414

The European Physical Journal H

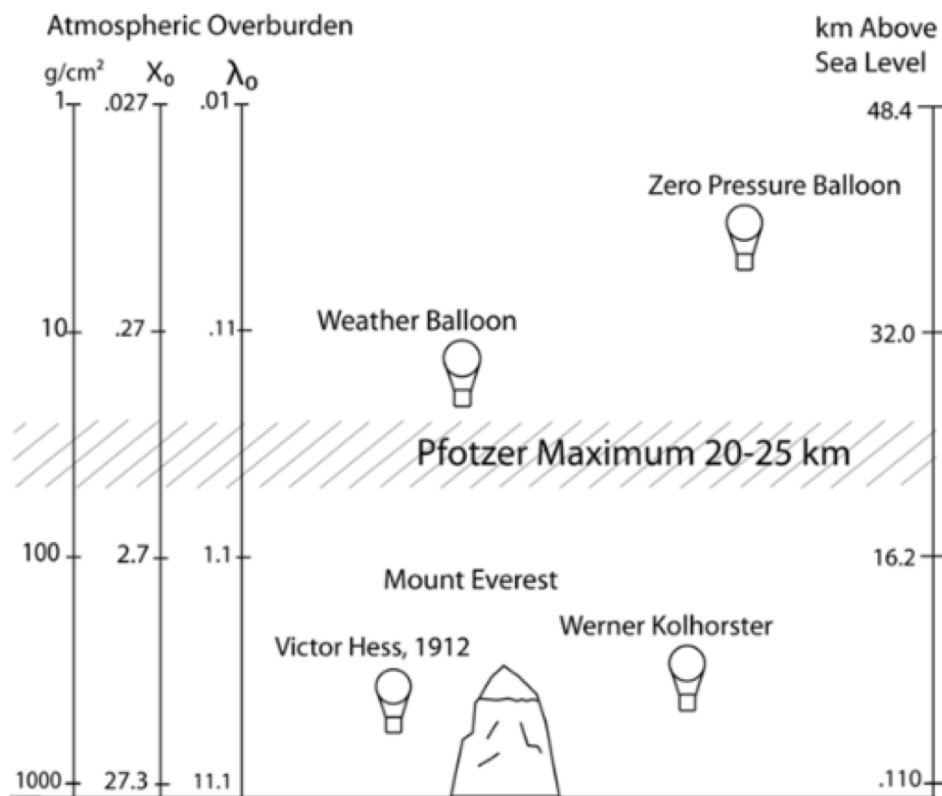


Fig. 1. Float altitude and atmospheric overburden of balloons. Maximum secondary particle production occurs at the “Pftotzer maximum” (see also Fig. 3).

ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ Κ.Α.

Isotopes formed by the action of cosmic rays on the air

Isotope	Mode of formation
^3H (tritium)	^{14}N (n, ^{12}C) ^3H
^7Be	Spallation (N and O)
^{10}Be	Spallation (N and O)
^{11}C	Spallation (N and O)
^{14}C	^{14}N (n, p) ^{14}C
^{18}F	^{18}O (p, n) ^{18}F and Spallation (Ar)
^{22}Na	Spallation (Ar)
^{24}Na	Spallation (Ar)
^{28}Mg	Spallation (Ar)
^{31}Si	Spallation (Ar)
^{32}Si	Spallation (Ar)
^{32}P	Spallation (Ar)
$^{34\text{m}}\text{Cl}$	Spallation (Ar)
^{35}S	Spallation (Ar)
^{36}Cl	^{35}Cl (n, γ) ^{36}Cl
^{37}Ar	^{37}Cl (p, n) ^{37}Ar
^{38}Cl	Spallation (Ar)
^{39}Ar	^{38}Ar (n, γ) ^{39}Ar
^{39}Cl	^{40}Ar (n, np) ^{39}Cl & spallation (Ar)
^{41}Ar	^{40}Ar (n, γ) ^{41}Ar
^{81}Kr	^{80}Kr (n, γ) ^{81}Kr

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΣ

Απλοποιημένο μοντέλο ηλεκτρομαγνητικού καταιγισμού:

Σωματίδιο γ υψηλής αρχικής ενέργειας. E_0 . παράγει με δίδυμη γένεση ένα e^+ και ένα e^- , τα οποία, εφ'όσον έχουν υψηλή ενέργεια, παράγουν με πέδηση νέα γ .

Αυτά και πάλι με δίδυμη γένεση παράγουν νέα e^+ και ένα e^- και έτσι η παραγωγή νέων σωματιδίων γ , e^+ και e^- , συνεχίζεται δημιουργώντας έναν ηλεκτρομαγνητικό καταιγισμό.

Εστω X_0 το μήκος ακτινοβολίας μέσα στο οποίο γίνεται η παραγωγή μιας γενιάς ηλεκτρονίων από φωτόνια ή μιας γενιάς φωτονίων από ηλεκτρόνια. Στον ηλεκτρομαγνητικό καταιγισμό το μήκος ακτινοβολίας X_0 μπορεί να θεωρηθεί ως το μήκος γενιάς.

Σε κάθε γενιά, ο αριθμός των σωματιδίων διπλασιάζεται. Έτσι, στην γενιά t ο αριθμός των σωματιδίων θα έχει γίνει:

$$n(t) = 2^t$$

με ενέργεια ανά σωματίδιο (κατά μέσο όρο):

$$E(t) = \frac{E_0}{n(t)} = \frac{E_0}{2^t}$$

Η συνεχής μείωση της ενέργειας και η αύξηση του αριθμού των σωματιδίων σταματά πρακτικά, σε κάποια γενιά $t = t_{\max}$, όταν η ενέργεια ανά σωματίδιο γίνει περίπου ίση με την κρίσιμη ενέργεια $E_{(t_{\max})} = E_{\text{crit}}$, δηλαδή στον αέρα περίπου 100 MeV.

Άρα στην τελευταία γενιά έχουμε:

$$E(t_{\max}) = \frac{E_0}{2^{t_{\max}}} = E_{\text{crit}} \cong 100 \text{ MeV} \Rightarrow t_{\max} = \frac{1}{\ln 2} \cdot \ln \frac{E_0}{E_{\text{crit}}}$$

- Για αρχική ενέργεια $E_0 = 10 \text{ GeV}$ παράγονται μετά από $t_{\max} = \ln 100 / \ln 2 \approx 6.6$ γενιές, $n = 2^{6.6} \approx \mathbf{100}$ σωματίδια με μέση ενέργεια ανα σωματίδιο $E \approx E_0 / 100 = \mathbf{100 \text{ MeV}}$ (αναμενόμενο)
- Για αρχική ενέργεια $E_0 = \mathbf{10^5 \text{ GeV}}$ παράγονται μετά από $t_{\max} = \ln 10^6 / \ln 2 \approx \mathbf{20}$ γενιές, $n = 2^{20} = \mathbf{10^6}$ σωματίδια.

Τα ηλεκτρόνια της τελευταίας γενιάς στον αέρα έχουν λοιπόν μέση ενέργεια $E_{\text{crit}} \approx 100 \text{ MeV}$, την οποία χάνουν τελικά με ιονισμούς και διεγέρσεις. Τα εναπομένοντα φωτόνια, μετά το μέγιστο του καταιγισμού, απορροφούνται με τον εκθετικό νόμο της απορρόφησης.

ΑΔΡΟΝΙΚΟΣ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΣ.

Ο αδρονικός καταίγισμός υπακούει στην ισχυρή αλληλεπίδραση.

Η πρόσπτωση ενός αδρονίου μεγάλης ενέργειας σε κάποιο υλικό, και η αλληλεπίδρασή του με έναν πυρήνα του υλικού μέσω **ισχυρών αλληλεπιδράσεων**, δημιουργούν 2γενη σωματιδία (κυρίως πιόνια / >καόνια) τα οποία προκαλούν με τη σειρά τους αδρονικές αλληλεπιδράσεις μεχρις ότου η ενέργεια να πεσει κάτω από το κατώφλι ενέργειας παραγωγής πιονίων περίπου 1 GeV (Putze,2006).

Τα πιόνια εμφανίζονται με πολύ μεγάλες ενέργειες και διεύθυνση σχεδόν παράλληλη προς αυτήν του προσπίπτοντος σωματιδίου (η κάθετη ορμή τους p_T είναι μικρή, της τάξης των 100 - 200 MeV/c). Τα φορτισμένα πιόνια έχουν μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής από τα ουδέτερα (διασπώνται σε γ) οπότε και διαδίδονται περισσότερο πριν διασπαστούν και μπορούν είτε να αποσυντεθούν είτε να αλληλεπιδράσουν ξανά. Αυτός ο ανταγωνισμός αλληλεπίδρασης-διάσπασης όλων των φορτισμένων μεσονίων καθορίζει τις λεπτομέρειες της ανάπτυξης των αδρονικών καταιονισμών (Stanev, 2010).

ΑΔΡΟΝΙΚΟΣ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΣ.

Ένα άλλο ενδεχόμενο είναι η αποβολή από τον πυρήνα "προϊόντων θρυμματισμού" (spallation fragments) δηλαδή αποβολή συσσωματωμάτων νουκλεονίων. Αυτά είναι ουσία ελαφρείς πυρήνες, ασταθείς ή σταθεροί, πυρήνες οι οποίοι εκπέμπονται σχεδόν ισότροπα από τον αρχικό πυρήνα.

Η απόσταση που διανύεται, κατά μέσο όρο, από ένα αδρόνιο μέχρι να αλληλεπιδράσει ισχυρά με κάποιον πυρήνα, καλείται **μήκος πυρηνικής αλληλεπίδρασης λ** . Το μήκος πυρηνικής αλληλεπίδρασης λ χαρακτηρίζει την κλίμακα της διαμήκους ανάπτυξης των αδρονικών καταιγισμών.

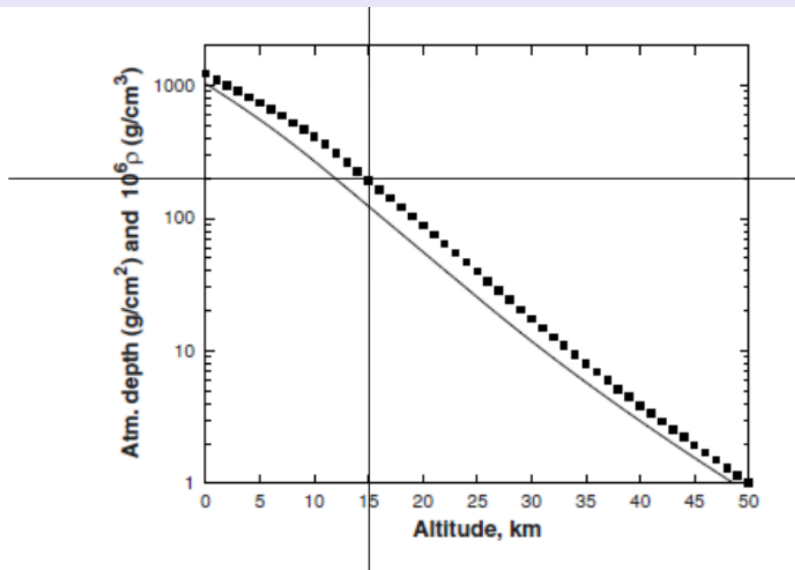
Το λ είναι μεγαλύτερο από το X_0 , ιδιαίτερα στα βαριά στοιχεία, γεγονός που οφείλεται στο ότι η εμβέλεια των πυρηνικών δυνάμεων είναι πολύ μικρότερη από των ηλεκτρομαγνητικών και στο ότι το μέγεθος των πυρήνων αυξάνεται με το $A^{1/3}$ (ενώ η μάζα τους με το A).

ΑΔΡΟΝΙΚΟΣ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΣ.

Ενώ στους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς το κύριο μέρος της ενέργειας δίνεται σε ιονισμούς, στους αδρονικούς καταιγισμούς μόνο το ένα τρίτο περίπου της ενέργειας δίνεται στο θρυμματισμό των πυρήνων, την εκπομπή νετρονίων-πρωτονίων και σε πυρηνικές διεγέρσεις. Η υπόλοιπη ενέργεια εμφανίζεται ως πιόνια, τα οποία δίνουν το έναυσμα σε αδρονικούς και ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς. Η παραγωγή πιονίων συνεχίζεται μέχρι η ενέργεια των αδρονίων να πέσει κάτω από $\sim 1 \text{ GeV}$.

ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΡΟΗ Κ.Α ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Stanev, 2016



Η σχέση ύψους και ατμοσφαιρικού βάθους όπως υπολογίζεται με ακριβέστερους τύπους

Η ευθεία είναι η 1η προσέγγιση, όπου η πυκνότητα εξαρτάται από το βάρος της στήλης αέρα. Τα σημεία που φαίνονται στο διάγραμμα είναι πειραματικά σημεία. Έτσι, αντιδράσεις που είναι πιθανές σε κάποιο ύψος μπορούν πλέον να αντιστοιχούνται με αντίστοιχες επιφανειακές πυκνότητες. Οι μονάδες επιφανειακής πυκνότητας μας δίνουν την ευχέρεια της ανεξαρτησίας από τις ιδιότητες του υλικού μέσου, αφού είναι ίδια για την εκάστοτε αντίδραση που μελετάμε.

Ορίζουμε το ατμοσφαιρικό βάθος X . Για μια αντίδραση που γίνεται σε κάποιο σημείο της ατμόσφαιρας, ένα σωματίδιο θα διανύσει κάποιο βάθος σε αυτή, μέχρι να αντιδράσει με κάποιο σωματίδιο. Το μήκος το οποίο διανύει το σωματίδιο μέχρι να αντιδράσει αντιστοιχείται στη μάζα της ατμόσφαιρας που συναντά το σωματίδιο μέχρι να αντιδράσει. Σε μια πρώτη προσέγγιση (με την υπόθεση ότι η πυκνότητα της ατμόσφαιρας μεταβάλλεται ομαλά) μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει ο νόμος:

$$X = X_0 e^{-\frac{h}{h_0}}$$

όπου $X_0 = 1030 \text{ g/cm}^2$ το ατμοσφαιρικό βάθος στο επίπεδο της θάλασσας και h_0 είναι η κλίμακα ύψους της ατμόσφαιρας (Perkins, 2019; Stanev, 2016). Σε δεύτερη προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της θερμοκρασίας, παίρνουμε ένα $h_0 \sim 8 \text{ km}$ για κάτω από τα 5km και ένα $h_0 \sim 6.4 \text{ km}$ πάνω από την τροπόσφαιρα (Stanev, 2016). Στα παραπάνω έχουμε θεωρήσει ότι το σωματίδιο εισέρχεται κάθετα στην ατμόσφαιρα. Επομένως θα υπάρχει μια εξάρτηση από τη ζενιθιακή γωνία, η οποία τελικά παίζει σημαντικό ρόλο στο ατμοσφαιρικό βάθος. Ποσοτικά, το

οριζόντιο ατμοσφαιρικό βάθος υπολογίζεται να είναι $X_{90} = 36000 \text{ g/cm}^2$ (Stanev, 2016) και συγκρίνοντας με το $X_0 = 1030 \text{ g/cm}^2$ της κατακόρυφης διεύθυνσης φαίνεται η μεγάλη διαφορά. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι με την αύξηση της ζενιθιακής γωνίας έχουμε και αύξηση των απορροφόμενων σωματιδίων από την ατμόσφαιρα. Επομένως η μετρούμενη ροή σωματιδίων εξαρτάται από τη ζενιθιακή γωνία, με το μέγιστο να εμφανίζεται για την κατακόρυφη διεύθυνση και το ελάχιστο για την οριζόντια διεύθυνση.

ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΡΟΗ Κ.Α ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

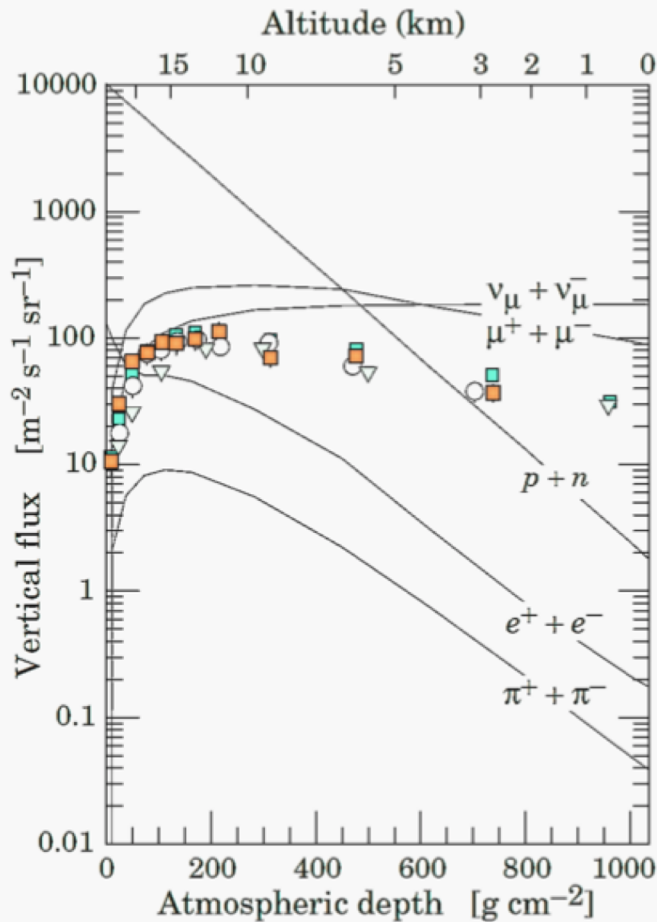


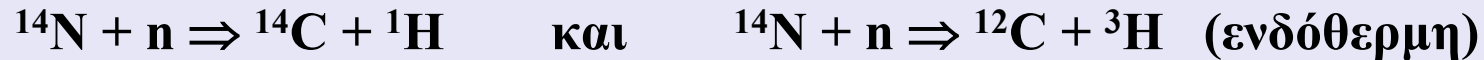
Figure 29.4: Vertical fluxes of cosmic rays in the atmosphere with $E > 100 \text{ GeV}$ estimated from the nucleon flux of Eq. (29.2). The points show measurements of negative muons with $E_\mu > 1 \text{ GeV}$ [41–45].

- Το μέγιστο της παραγωγής για τα μόνια σε ατμοσφαιρικό βάθος κοντά στα 200 g/cm^2 που αντιστοιχεί σε υψόμετρο κοντά στα 15 km .
- Σε μικρά ατμοσφαιρικά βάθη (δηλ. μεγάλα ύψη) η ύλη δεν είναι αρκετά πυκνή ώστε να γίνουν πολλές αντιδράσεις.
- Σε μεγαλύτερα ατμοσφαιρικά βάθη έχουμε περισσότερες αντιδράσεις των πρωτογενών, επομένως ο αριθμός τους μειώνεται.
- πολύ λίγα πόνια μπορούν να φτάσουν μέχρι και το έδαφος. Σε μεγάλες ενέργειες τα πόνια δεν προλαβαίνουν να διασπαστούν και έτσι μπορεί κανείς με μια πρώτη ματιά να πιστέψει ότι φτάνουν στο έδαφος. Όμως για μεγάλες ενέργειες τα πόνια έχουν και μεγάλη πιθανότητα αλληλεπίδρασης και έτσι δημιουργούν δευτερογενείς καταιονισμούς. Για το λόγο αυτό τα πόνια που φτάνουν στο έδαφος είναι πολύ λίγα.
- Τα μόνια είναι τα πολυπληθέστερα φορτισμένα σωματίδια στο επίπεδο της θάλασσας. Τα περισσότερα μόνια παράγονται σε μεγάλα υψόμετρα (τυπικά στα 15 km) και χάνουν περίπου 2 GeV λόγω ιονισμού μέχρι να φτάσουν στο έδαφος. Τόσο η ενεργειακή όσο και η γωνιακή κατανομή τους, αντικατοπτρίζει μία σύζευξη μεταξύ της παραγωγής τους, της απώλειας ενέργειας στην ατμόσφαιρα και της διάσπασής τους. Για παράδειγμα ένα μόνιο ενέργειας 2.4 GeV έχει ένα μήκος διάσπασης $\lambda = 15 \text{ km}$, το οποίο μειώνεται λόγω απωλειών ενέργειας στα $\lambda = 8.7 \text{ km}$ (PDG, 2019).

Ραδιενεργά ισότοπα στην ατμόσφαιρα

Αναμεσα στα προϊόντα των αντιδράσεων των πρωτογενών ΚΑ είναι και ραδιενεργά ισότοπα.

Τα περισσότερα νετρόνια απορροφούνται από πυρήνες ^{14}N διαμέσου των αντιδράσεων:



5% των νετρονίων με $E_n > 4\text{MeV}$.

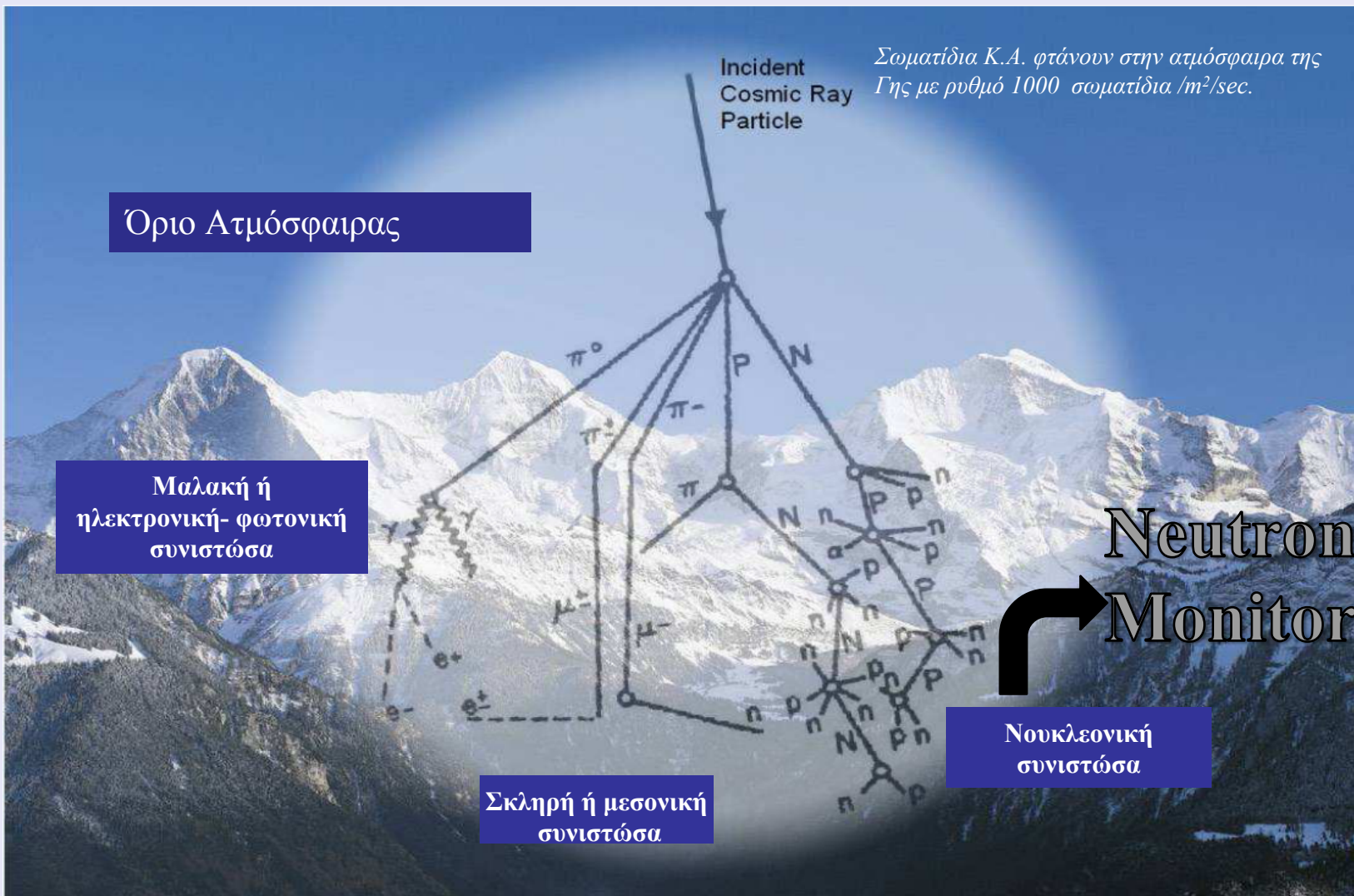
Ο ολικός ρυθμός σχηματισμού του ^{14}C στην ατμόσφαιρα είναι $\sim 2.23 \cdot 10^4 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ και του ^3H $2 \cdot 10^3 \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (συμπεριλαμβανομένου και του τρίτιου που σχηματίζεται απ' ευθείας σαν προϊόν θρυμματισμού). Αυτά τα ραδιενεργά προϊόντα σχηματίζονται ψηλά στην ατμόσφαιρα. Στη συνέχεια οξειδώνονται σε $^{14}\text{CO}_2$, και ^3HOH και διαχέονται στην ατμόσφαιρα με το CO_2 και το H_2O .

Ραδιενεργοί πυρήνες στην ατμόσφαιρα

Οι χρόνοι ημίσειας ζωής των ^{14}C και ^3H είναι 5568 και 12.46 χρόνια αντίστοιχα. Ο χρόνος παραμονής στην ατμόσφαιρα είναι μόνο 25 χρόνια πριν απορροφηθούν από οργανικά υλικά ή πέσουν σαν βροχή στο έδαφος και στη θάλασσα.

Οι αφθονίες των ^{14}C και ^3H μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη χρονολόγηση αγροτικών προϊόντων. Ο ^{14}C χρησιμοποιείται σε αρχαιολογικές μελέτες και είναι η βάση της χρονολόγησης του ραδιοάνθρακα.

ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ Κ.Α. κοντά στην επιφάνεια της γης



ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ Κ.Α.

κοντά στην επιφάνεια της Γης

1. **ΣΚΛΗΡΗ** ή **μεσονική συνιστώσα** που αποτελείται από μίονια και νετρίνα και είναι πολύ δεισδυτική. Χαρακτηριστικό είναι ότι μόλυβδος πάχους ενός μέτρου ελαττώνει την έντασή της μόνο στο μισό. (προϊόντα θρυμματισμού και μεταστοιχειώσεις)
1. **Μαλακή** ή **ηλεκτρονική-φωτονική** συνιστώσα που αποτελείται από ηλεκτρόνια, φωτόνια και ποζιτρόνια η οποία απορροφάται σχεδόν τελείως από μόλυβδο πάχους 10 cm. Τα ηλεκτρόνια παράγονται στους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς μαζί με τα φωτόνια.
1. **Νουκλεονική συνιστώσα**, που αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια. Λόγω της ποικιλίας των αντιδράσεων μπορεί να προσδιορισθεί δύσκολα, αλλά είναι η πιο σταθερή συνιστώσα

Η δευτερογενής ΚΑ στην επιφάνεια της θάλασσας αποτελείται από μίονια (80%), ηλεκτρόνια (18%) και πρωτόνια και νετρόνια (1-2%) (*Simpson, 1953*)

⇒ Τη **νουκλεονική** συνιστώσα, που αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια,
 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

⇒ Τη **σκληρή** ή **μεσονική** συνιστώσα, που αποτελείται από μίονια και είναι πολύ διεισδυτική

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

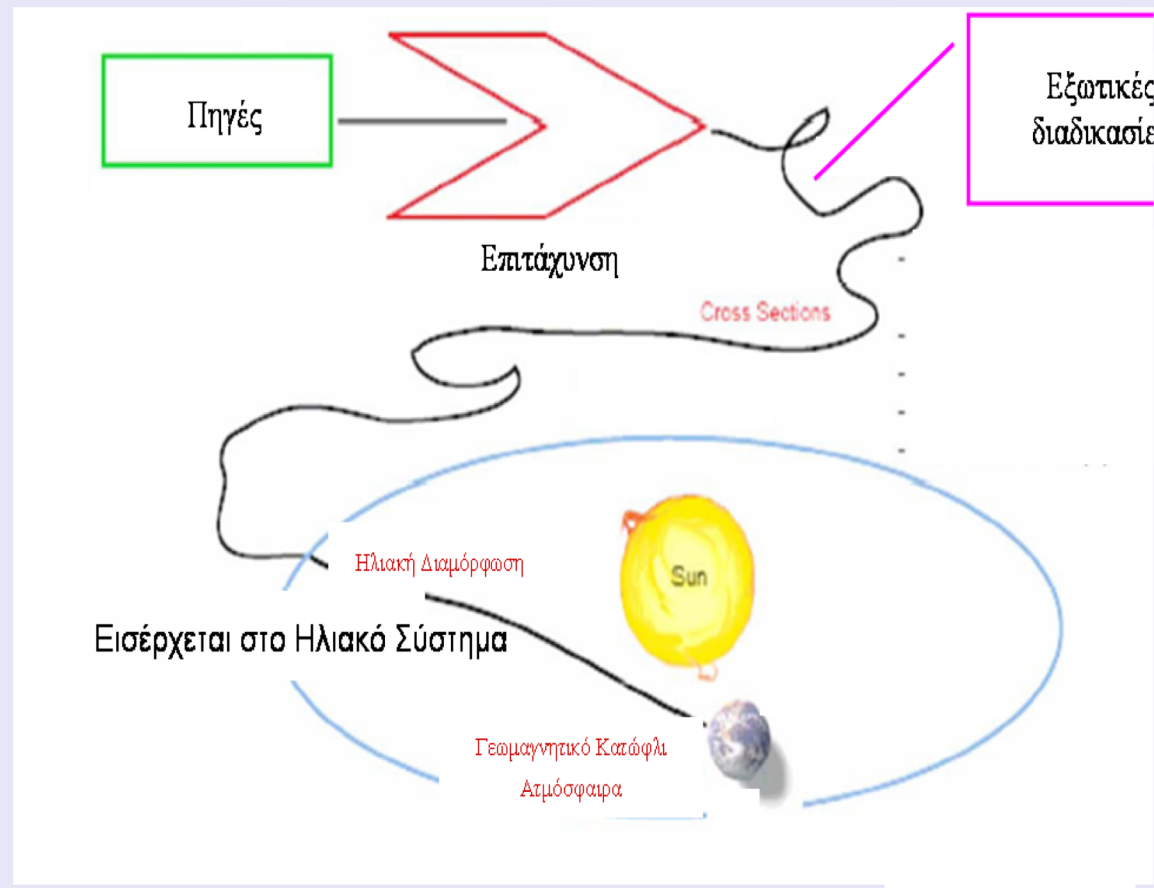
⇒ Τη **μαλακή** ή **ηλεκτρονική-φωτονική** συνιστώσα, που αποτελείται από ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια.

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad \gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

Σωματίο	Αλληλεπίδραση			Μάζα (MeV)	Χρόνος ζωής	Ατμοσφαιρικό μήκος απορρόφησης (g cm ⁻²)
	Ηλεκτρομαγνητική ή	Ισχυρή πυρηνική	Ασθενής πυρηνική			
Πιόνιο	X	X		134	26ns	115
Μίονιο	X		X	106	2μs	260
Νετρόνιο		X		932	12min	140
Πρωτόνιο	X	X		938	σταθ.	110
Ηλεκτρόνιο	X			0.511	σταθ.	100
Φωτόνιο	X					

Σχηματική απεικόνιση της ζωής των κοσμικών ακτίνων

- *Γέννηση*
- *Διαφυγή*
- *Επιτάχυνση*
- *Κίνηση μέσα στο Γαλαξία*
- *Αλληλεπίδραση με τον Ηλιακό άνεμο*
- *Αλληλεπίδραση με τη μαγνητόσφαιρα της Γης*
- *Αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα της Γης*
- *Θάνατος (π.χ. σε έναν ανιχνευτή)*



ΑΣΚΗΣΗ 1

Να βρεθεί η ενεργειακή πυκνότητα των κοσμικών ακτίνων με μέση ενέργεια $E = 3 \cdot 10^9$ eV. Συγκρίνετε με την πυκνότητα της ενέργειας του φωτός των αστέρων (μικροκύματα) ή την ενέργεια των μαγνητικών πεδίων στο διάστημα. ($N_p = 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$)

ΑΣΚΗΣΗ 2

Πόση είναι η απαραίτητη μέση ισχύς που απαιτείται για να συντηρήσει την κοσμική ακτινοβολία στο Γαλαξιακό χώρο; Συγκρίνετε με την μέση ισχύ που παίρνουμε από τις εκρήξεις καινοφανών και υπερκαινοφανών αστέρων (Μέση ενεργειακή πυκνότητα ΚΑ $10^{-12} \text{ erg/cm}^3$, όγκος Γαλαξία 10^{67} cm^3).