



Μάθημα Επιλογής: Αστροσωματιδιακή και Κοσμική Ακτινοβολία

ΙΣΟΤΟΠΙΚΕΣ ΑΦΘΟΝΙΕΣ_ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΙ

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

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)

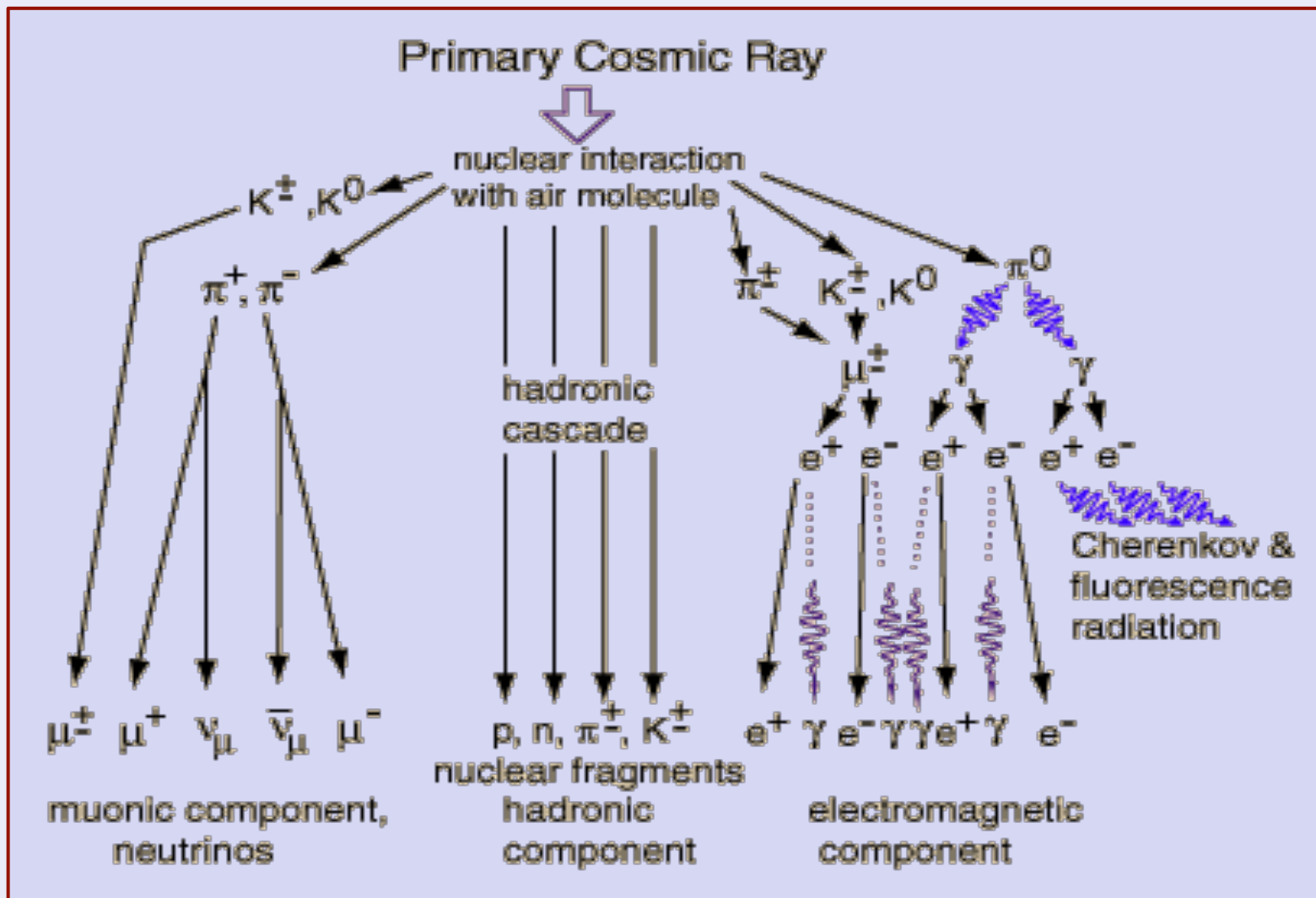
Ο αριθμός των παραγόμενων σωματιδίων τόσο μεγαλύτερος όσο μεγαλύτερη η ενέργεια του προσπίπτοντος.

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

Τα 2γενη είτε συνεχίζουν τη πορεία τους είτε διασπώνται

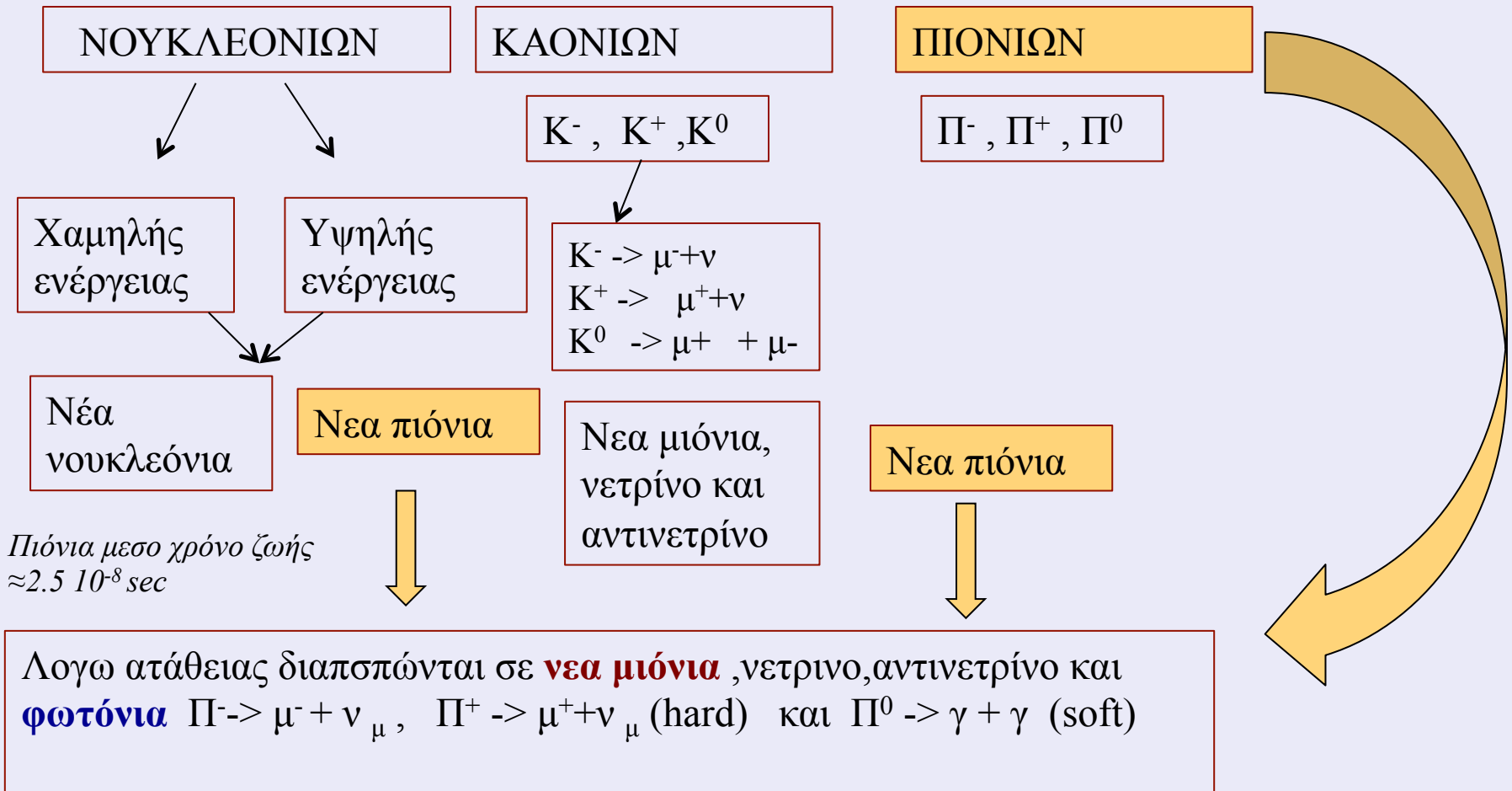
Leading particle 50% της αρχικής ενέργειας.

ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗΣ Κ.Α.



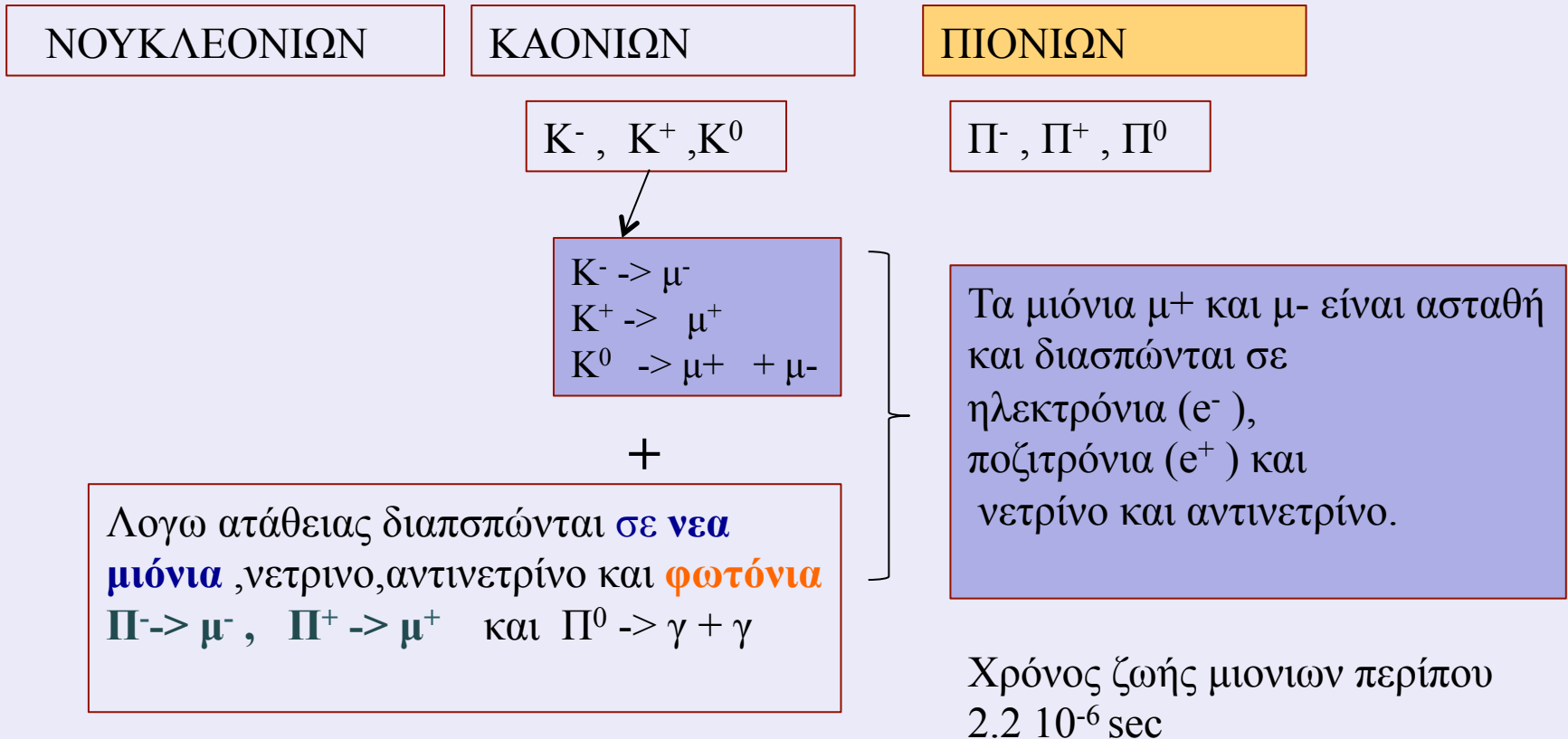
ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΣ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΣ.

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 100GeV

ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΣ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΣ.

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

Λογω ατάθειας διασπώνται σε νέα μίονια, νεutrino, αντινεutrino 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 είναι $1/e$

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

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 καταϊωνσμών: 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**:

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

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

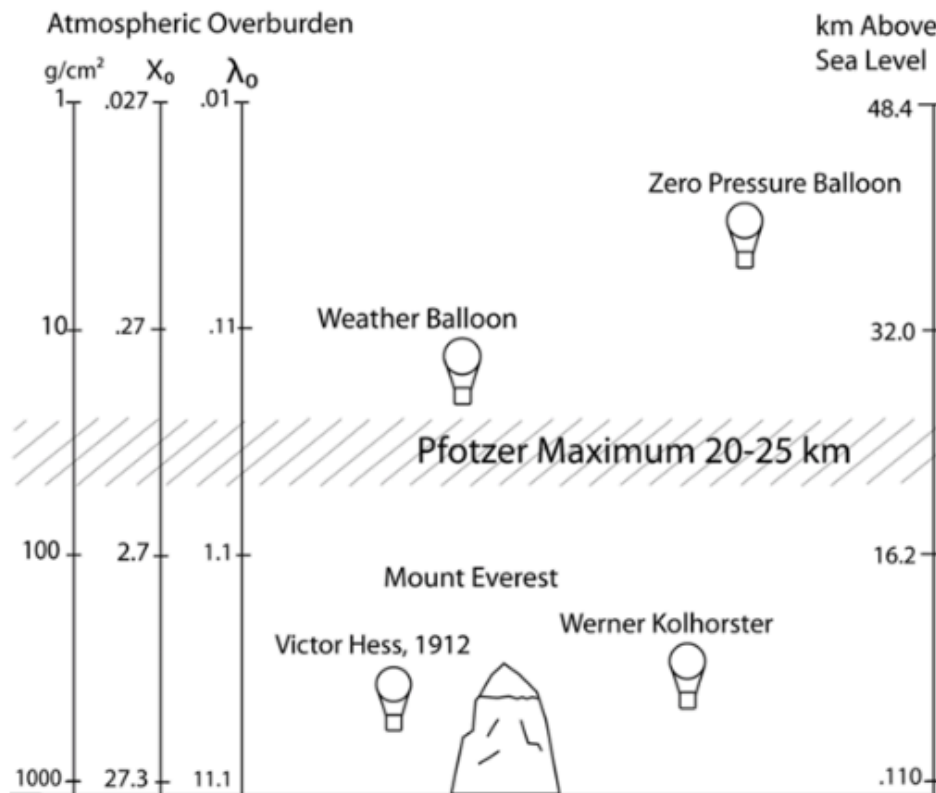


Fig. 1. Float altitude and atmospheric overburden of balloons. Maximum secondary particle production occurs at the “Pfozter maximum” (see also Fig. 3).

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.

Η πρόσπτωση ενός αδρονίου μεγάλης ενέργειας σε κάποιο υλικό, και η αλληλεπίδρασή του με έναν πυρήνα του υλικού μέσω **ισχυρών αλληλεπιδράσεων**, δημιουργεί έναν **αδρονικό καταιγισμό**. Η ισχυρή αλληλεπίδραση συμβαίνει μόνον όταν το προσπίπτον αδρόνιο “χτυπήσει” κάποιον από τους πυρήνες του υλικού, επειδή η εμβέλεια των ισχυρών αλληλεπιδράσεων είναι πολύ μικρή, της ίδιας τάξης μεγέθους με τους πυρήνες.

Η αλληλεπίδραση με τα **νουκλεόνια** παράγει **κυρίως πιόνια**, αλλά και **καόνια**. 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 δευτερογενή σωματίδια μπορούν και αυτά να συγκρουσθούν ισχυρά μέσα στον ίδιο πυρήνα με αποτέλεσμα να παράγεται έτσι ένας εσωτερικός μικρός καταιγισμός.

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.

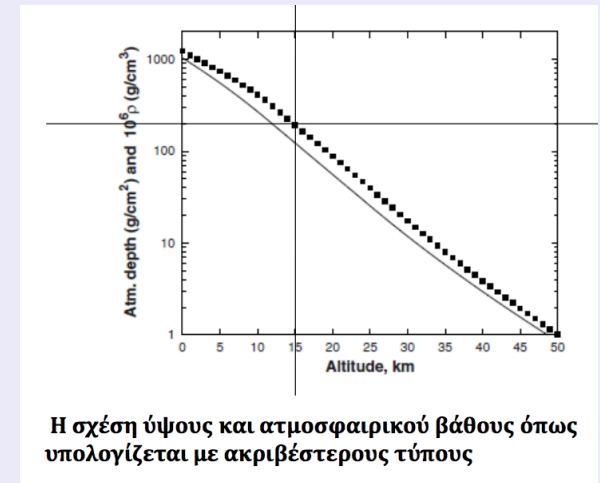
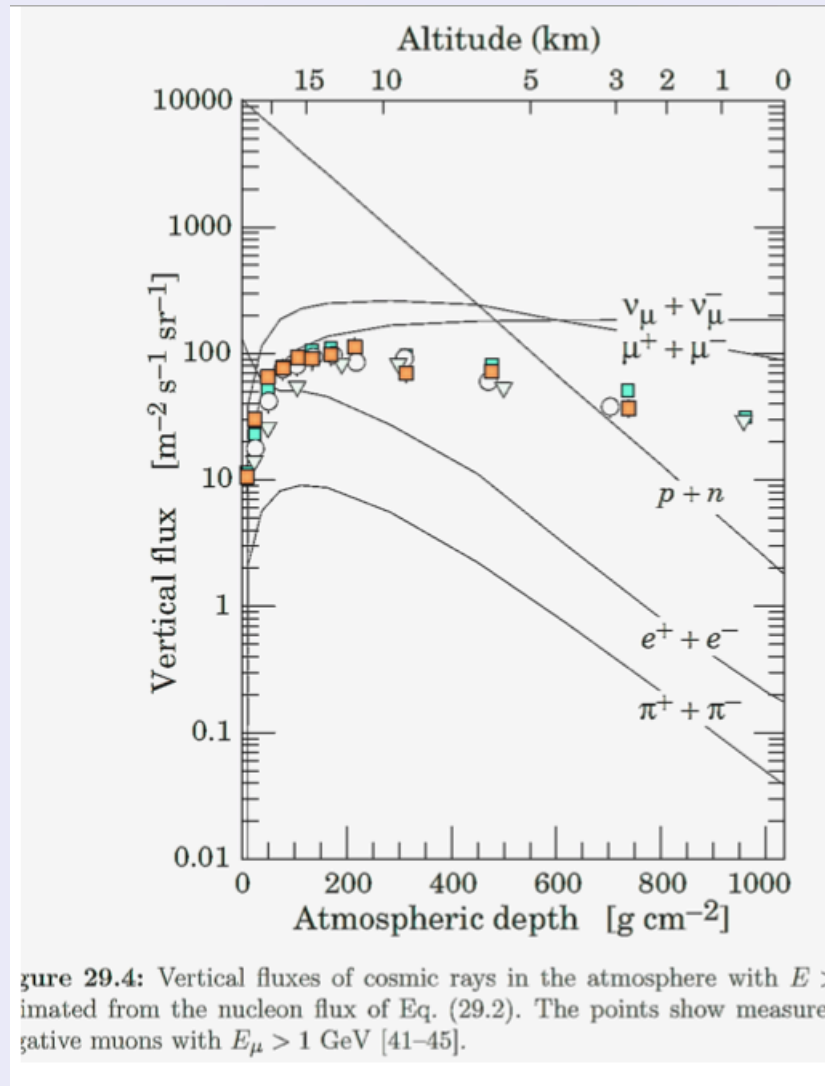
Η απόσταση που διανύεται, κατά μέσο όρο, από ένα αδρόνιο μέχρι να αλληλεπιδράσει ισχυρά με κάποιον πυρήνα, καλείται **μήκος πυρηνικής αλληλεπίδρασης λ** . Το μήκος πυρηνικής αλληλεπίδρασης λ χαρακτηρίζει την κλίμακα της διαμήκους ανάπτυξης των αδρονικών καταιγισμών.

Το λ είναι μεγαλύτερο από το X_0 , ιδιαίτερα στο 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).

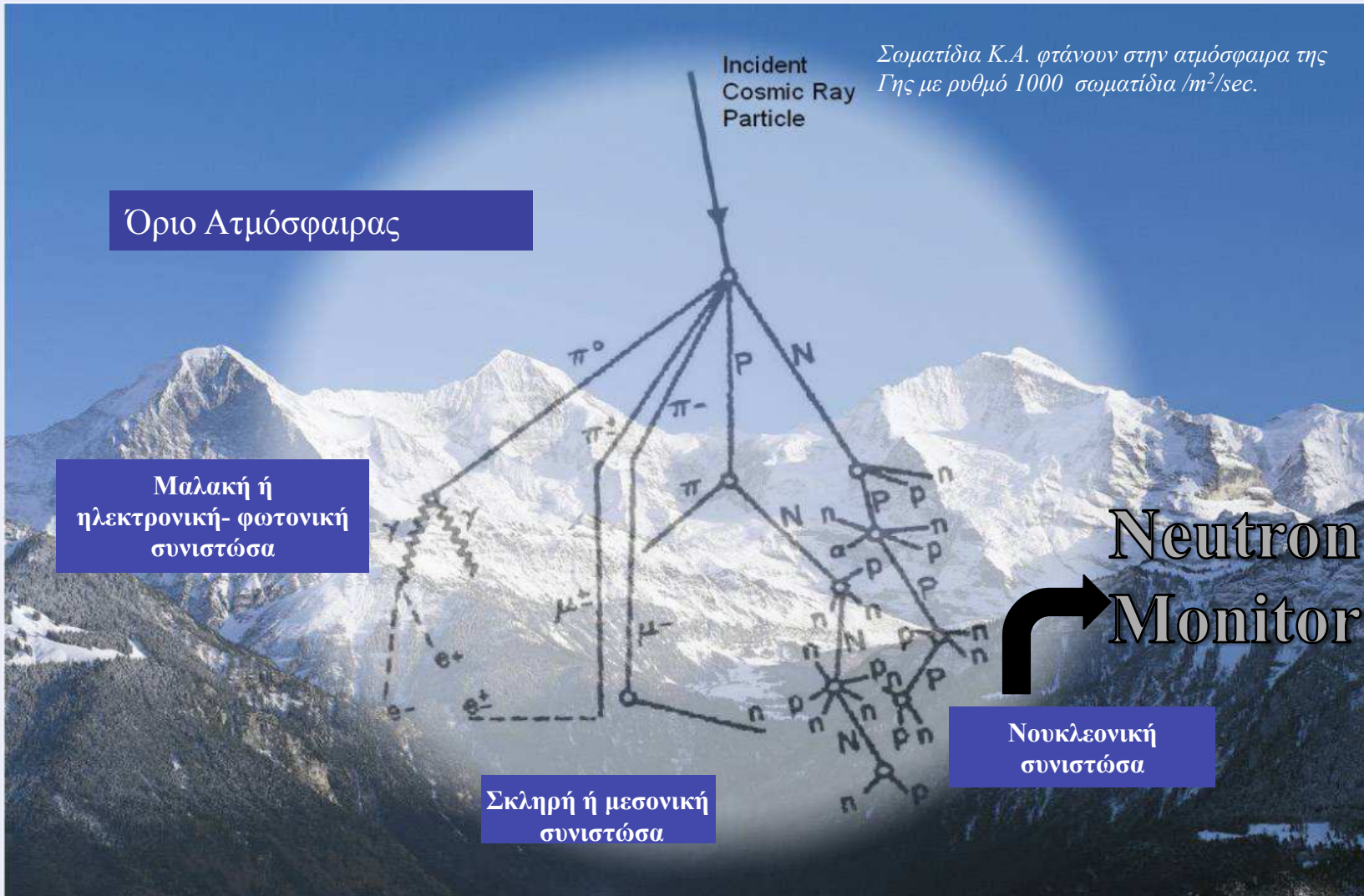
ΑΔΡΟΝΙΚΟΣ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΣ.

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



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)
2. **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.
3. **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*)

Ραδιενεργό πυρήνες στην ατμόσφαιρα

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 τριτίου 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 .

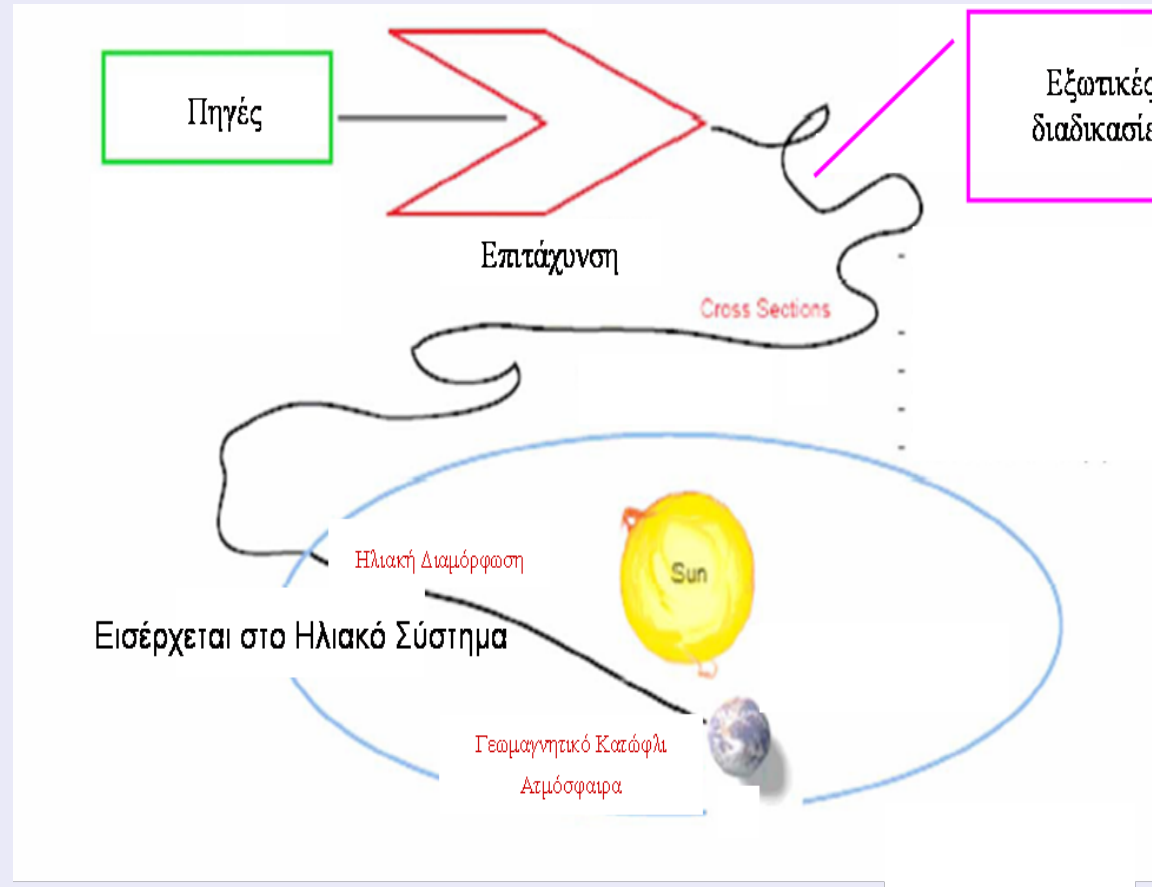
Ραδιενεργοί πυρήνες στην ατμόσφαιρα

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.

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.

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} erg/cm³, όγκος Γαλαξία 10^{67} cm³).