

# Εισαγωγή στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων

Δήμος Σαμψωνίδης  
(20-12-2016)

Στοιχεία Πυρηνικής Φυσικής & Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων  
5 ο Εξάμηνο

# Τα Λεπτόνια



- Δεν έχουν Ισχυρές Αλληλεπιδράσεις
- Spin 1/2
- Παρατηρούνται ως ελεύθερα σωματίδια
- Είναι σημειακά ( $r < 10^{-17}$  cm)

Η δομή των οικογενειών...

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$$

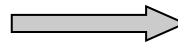
|                                      |                                        |                                          |
|--------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|
| $m_e = 0.5 \text{ MeV}$              | $m_\mu = 106 \text{ MeV}$              | $m_\tau = 1777 \text{ MeV}$              |
| $\tau_e > 4 \cdot 10^{24} \text{ y}$ | $\tau_\mu = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ | $\tau_\tau = 3 \cdot 10^{-13} \text{ s}$ |
| $m_{\nu_e} < 3 \text{ eV}$           | $m_{\nu_\mu} < 0.2 \text{ MeV}$        | $m_{\nu_\tau} < 18 \text{ MeV}$          |

Γιατί 3 οικογένειες?

# Τα Λεπτόνια

Για κάθε λεπτόνιο  
υπάρχει το  
**αντι**λεπτόνιό του

- 1η οικογένεια
- 2η οικογένεια
- 3η οικογένεια



|                                                                                                  |                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>ΑΤΟΜΟ</p> |                                                                                  |
| <b>ΛΕΠΤΟΝΙΑ</b>                                                                                  |                                                                                  |
| <b>ηλεκτρόνιο</b><br>υπεύθυνο για τον ηλεκτρισμό και τις χημικές αντιδράσεις. φορτίο -1          | <b>νεutrίνο ηλ/νίου</b><br>Αλλάζει πολύ σπάνια με την ύλη. φορτίο 0              |
| <b>μυόνιο</b><br>πιο βαρύ από τα ηλεκτρόνια                                                      | <b>νεutrίνο μυονίου</b><br>δημιουργείται μαζί με τα μύονια σε μερικές διασπάσεις |
| <b>ταυ</b><br>ακόμα πιο βαρύ                                                                     | <b>νεutrίνο ταυ</b><br>δεν έχει παρατηρηθεί ακόμα, αλλά πιστεύεται ότι υπάρχει   |

-1|e|

0 |e|

# Λεπτόνια

- ❖ *Έχουν* spin-1/2 φερμιόνια, δε συμμετέχουν στις ισχυρές αλληλεπιδράσεις

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

$$M_e < M_\mu < M_\tau$$

Ηλεκτρόνιο  $e^-$ , μόνιο  $\mu^-$  και ταυ  $\tau^-$  έχουν τα αντίστοιχα νετρίνα  $\nu_e, \nu_\mu$  και  $\nu_\tau$ .

Ηλεκτρόνιο, μόνιο και ταυ έχουν φορτίο  $-e$ . Τα νετρίνα είναι ουδέτερα.

Τα νετρίνα έχουν *πολύ μικρές* μάζες (θεωρούνταν άμαζα).

# Αντι-Λεπτόνια

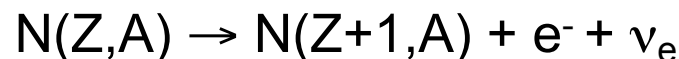
- ❖ Αντιλεπτόνια: positron  $e^+$ , positive muon  $\mu^+$ , positive tau-lepton  $\tau^+$ , and antineutrinos:

$$\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$$

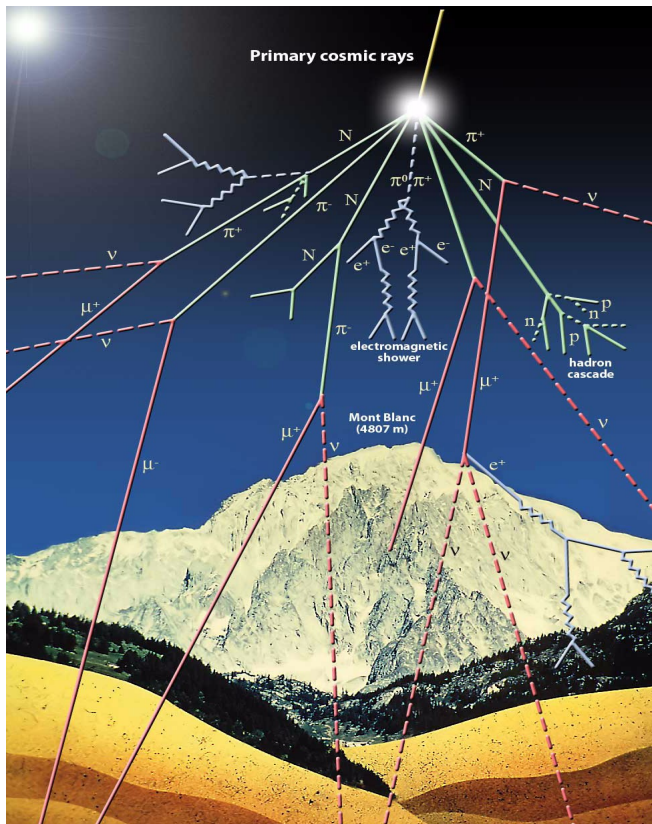
- ❖ Νετρίνα και αντineτρίνα διαφέρουν στο *λεπτονικό αριθμό*. Τα λεπτόνια έχουν λεπτονικούς αριθμούς  $L_\alpha=1$  (όπου  $\alpha$ : e,  $\mu$  ή  $\tau$ ), και τα αντιλεπτόνια έχουν  $L_\alpha=-1$ .
- ❖ *Οι λεπτονικοί αριθμοί διατηρούνται σε όλες τις αλληλεπιδράσεις!*

Τα νετρίνα δεν ανιχνεύονται απ'ευθείας στους ανιχνευτές, αλλά μόνο με έμμεσες μετρήσεις των ιδιοτήτων τους.

- % Πρώτες ενδείξεις της ύπαρξής τους στις  $\beta$ -διασπάσεις των πυρήνων, N:



# Μιόνια



❖ Τα μιόνια παρατηρήθηκαν πρώτη φορά το 1936, στις **κοσμικές ακτίνες**

Οι κοσμικές ακτίνες έχουν δύο “συστατικά”:

1) **Πρωταρχικές**, οι οποίες είναι σωμάτια υψηλών ενεργειών που έρχονται από το εξωτερικό διάστημα, κυρίως πυρήνες υδρογόνου

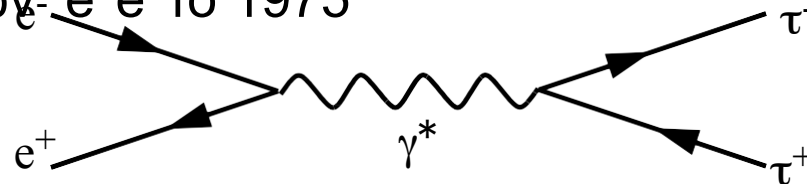
2) **Δευτερογενείς**, τα σωμάτια που παράγονται από τις συγκρούσεις των πρωταρχικών με τους πυρήνες στην ατμόσφαιρα. Τα μιόνια ανήκουν σ’ αυτή την κατηγορία.

# Μιόνια

% Μιόνια: 200 φορές βαρύτερα των ηλεκτρονίων αλλά πολύ δεισδυτικά.

% Ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των μιονίων είναι ταυτόσιμες με αυτές των ηλεκτρονίων (εκτός τη διαφορά μαζών)

❖ Το ταυ είναι το βαρύτερο λεπτόνιο, ανακαλύφθηκε σε πειράματα συγκρούσεως  $e^+e^-$  το 1975



$\tau$  pair production in  $e^+e^-$  annihilation

❖ Το ηλεκτρόνιο είναι σταθερό, ενώ το  $\mu$  και το  $\tau$  έχουν πεπερασμένο χρόνο ζωής:

$$\tau_\mu = 2.2 \times 10^{-6} \text{ s} \text{ and } \tau_\tau = 2.9 \times 10^{-13} \text{ s}$$

Το μιόνιο διασπάτε καθαρά λεπτονικά :  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$

# τ λεπτόνια

Το ταυ έχει αρκετή μάζα να διασπαστεί σε αδρόνια, αλλά έχει και λεπτονικές διασπάσεις :

$$\tau^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu + \nu_\tau$$

❖ Οι λεπτονικοί αριθμοί διατηρούνται

# Τα Ουδέτερα Λεπτόνια - Νεutrίνο

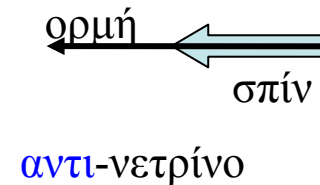
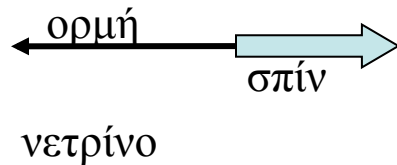
Δεν έχουν φορτίο => Δεν έχουν ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις

Τα νεutrίνα είναι 'αριστερόστροφα' =>

Το σπίν έχει διεύθυνση **αντίθετη** από το διάνυσμα της **ορμής**

Τα **αντι**-νεutrίνα είναι 'δεξιόστροφα' =>

το **σπιν** έχει διεύθυνση **ομόρροπη** με το διάνυσμα της **ορμής**



# Τα Λεπτόνια

## Λεπτονικός Αριθμός

|          | $e^-$ | $\nu_e$ | $\mu^-$ | $\nu_\mu$ | $\tau^-$ | $\nu_\tau$ |
|----------|-------|---------|---------|-----------|----------|------------|
| $L_e$    | +1    | +1      | 0       | 0         | 0        | 0          |
| $L_\mu$  | 0     | 0       | +1      | +1        | 0        | 0          |
| $L_\tau$ | 0     | 0       | 0       | 0         | +1       | +1         |

|          | $e^+$ | $\bar{\nu}_e$ | $\mu^+$ | $\bar{\nu}_\mu$ | $\tau^+$ | $\bar{\nu}_\tau$ |
|----------|-------|---------------|---------|-----------------|----------|------------------|
| $L_e$    | -1    | -1            | 0       | 0               | 0        | 0                |
| $L_\mu$  | 0     | 0             | -1      | -1              | 0        | 0                |
| $L_\tau$ | 0     | 0             | 0       | 0               | -1       | -1               |

- Κάθε 'οικογένεια' λεπτονίων **ΔΙΑΤΗΡΕΙ** τον αντίστοιχο Λεπτονικό Αριθμό
- Ο Λεπτονικός αριθμός **ΔΙΑΤΗΡΕΙΤΑΙ ΠΑΝΤΑ**

# Τα Λεπτόνια

## Διατήρηση Λεπτονικού Αριθμού

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

$$L_e: 0 = (-1) + (+1)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$L_\mu: 0 = (-1) + (+1)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$L_\mu: (-1) = 0 + 0 + (-1)$$

$$L_e: 0 = (-1) + (+1) + 0$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$$

$$L_\mu: (-1) = 0 + 0$$

$$L_e: 0 = (-1) + 0$$

# Διασπάσεις των Λεπτονίων

Χρόνοι ζωής  $\mu$ :  $(2.2 \times 10^{-6}\text{s})$   $\tau$ :  $(2.9 \times 10^{-13}\text{s})$

$$\mu^+ \Rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

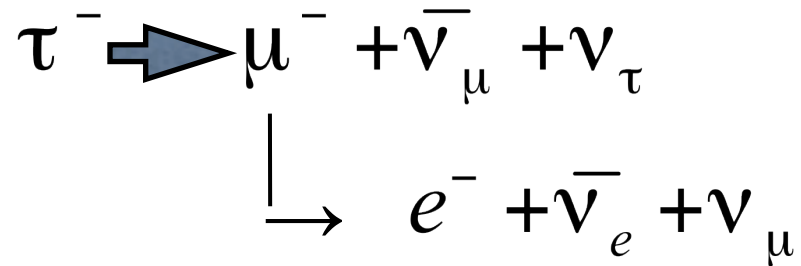
$$\mu^- \Rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\tau^- \Rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$$

$$\tau^- \Rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$$

Για το  $\tau$  υπάρχουν και διασπάσεις με αδρόνια στην τελική κατάσταση.

## Διασπάσεις των Λεπτονίων



- Ξεκινάμε με ένα ταυ λεπτόνιο
- Καταλήγουμε σε ένα ταυ-νεutrino, 2 μ-νεutrino (νεutrino-αντινεutrino) και 1 ηλεκτρόνιο κι ένα αντι-e-νεutrino
- Τίποτα ΔΕΝ παραβιάζεται !

# Σύνοψη: Κουάρκ & Λεπτόνια

- **Ισχυρές** αλληλεπιδράσεις έχουν μόνο τα κουάρκ
- Τα φορτισμένα λεπτόνια συμμετέχουν στις **ηλεκτρομαγνητικές** -λόγω του φορτίου τους- και στις **ασθενείς αλληλεπιδράσεις**
- Τα ουδέτερα λεπτόνια -νεutrino- αλληλεπιδρούν **ΜΟΝΟ** με **ασθενείς αλληλεπιδράσεις**
- Τα κουάρκ συμμετέχουν στις **ισχυρές**, στις **ηλεκτρομαγνητικές** και στις **ασθενείς** αλληλεπιδράσεις  
(δηλ. σε όλες)

# ασκηση

2.6 An electron and a  $\mu^+$  bound by the Coulomb attraction is called *muonium*. Which of the following decays can occur?

(a)  $(\mu^+ e^-) \rightarrow \gamma + \gamma$

(b)  $(\mu^+ e^-) \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

(c)  $(\mu^+ e^-) \rightarrow e^+ + e^- + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$