

Πυρηνική Φυσική και Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (5ου εξαμήνου, χειμερινό 2017-18)

Τμήμα Τ2: Κ. Κορδάς & Δ. Σαμψωνίδης

Μάθημα 1γ

Μια ματιά στα Στοιχειώδη Σωματίδια και
τους κβαντικούς αριθμούς τους

Κώστας Κορδάς

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Πυρηνική & Στοιχειώδη, Αριστοτέλειο Παν. Θ/νίκης, 3 Οκτ. 2017

Όλα μαζί – η θεωρία μας για τα δομικά/βασικά συστατικά της ύλης και πώς αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους:

“Το Καθιερωμένο Πρότυπο”

Φερμιόνια

Σωματίδια ύλης

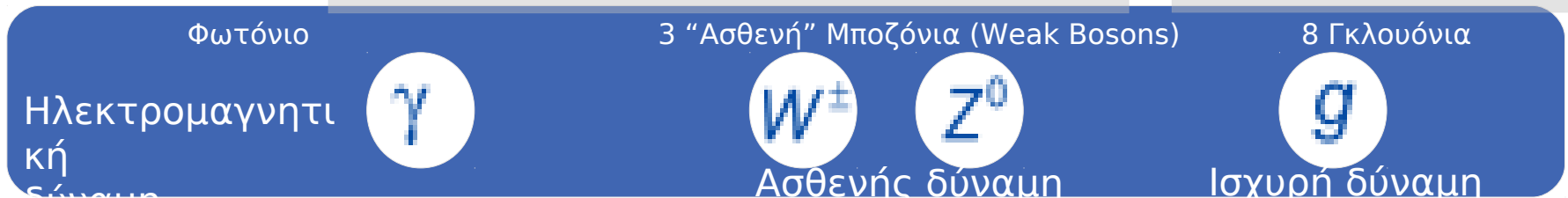
Κάθε κατηγορία σε 3 οικογένειες



Μποζόνια

Διαδότες/φορείς των δυνάμεων

3 δυνάμεις



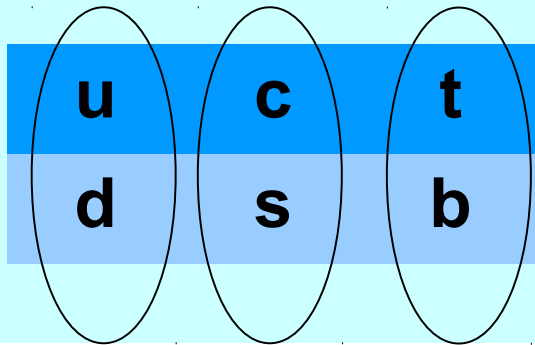
Μποζόνιο Higgs (BEH)



“Σπάει” την Ηλεκτρασθενή Συμμετρία
Δίνει μάζα στα **στοιχειώδη σωματίδια**

Κουάρκ & γεύσεις (quarks & flavors)

Κουάρκ



Φορτίο (Q)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Αντίστοιχος Αριθμός “γεύσης” (ίδιο πρόσημο με το φορτίο)
+2/3	+1/3	+1
-1/3	+1/3	-1

- * Η δεύτερη οικογένεια (c, s) είναι αντίγραφο της πρώτης (u, d), αλλά με πιο βαριά κουάρκ
 - * Και η τρίτη οικογένεια (t, b) είναι επίσης αντίγραφο της πρώτης με ακόμα βαρύτερα κουάρκ
- c=charm quark=“γοητευτικό” κουάρκ
s=strange quark=“παράξενο” κουάρκ
t= top quark , b = bottom quark

- Λέω ότι τα κουάρκ έρχονται σε 6 “γεύσεις”: up, down, strange, κλπ.
- * Αντί να λέω ότι έχω ένα charm κουάρκ μπορώ να λέω ότι έχω ένα κουάρκ με “γεύση charm” και “charmness” = +1
 - * Αντί να λέω ότι έχω ένα strange κουάρκ μπορώ να λέω ότι έχω ένα κουάρκ με “γεύση strange” και “strangeness” = -1

Κουάρκ & κβαντικοί αριθμοί τους

Μπορούν να συμμετέχουν σε όλες τις αλληλεπιδράσεις
(Ισχυρές, Ασθενείς και ΗλεκτροΜαγνητικές)

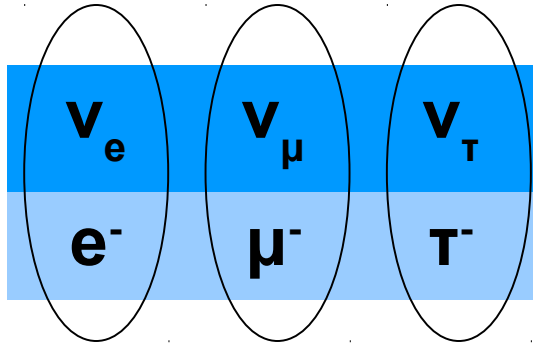
Κβαντικοί
Αριθμοί
των **κουάρκ**
και
των
αντικουάρκ
(αντίθετες
τιμές στους
κβαντικούς
αριθμούς τους)

	B	Q	S	C	B	T
u	+1/3	+2/3	0	0	0	0
d	+1/3	-1/3	0	0	0	0
s	+1/3	-1/3	-1	0	0	0
c	+1/3	+2/3	0	+1	0	0
b	+1/3	-1/3	0	0	-1	0
t	+1/3	+2/3	0	0	0	+1

	B	Q	S	C	B	T
$\bar{u}$	-1/3	-2/3	0	0	0	0
$\bar{d}$	-1/3	+1/3	0	0	0	0
$\bar{s}$	-1/3	+1/3	+1	0	0	0
$\bar{c}$	-1/3	-2/3	0	-1	0	0
$\bar{b}$	-1/3	+1/3	0	0	+1	0
$\bar{t}$	-1/3	-2/3	0	0	0	-1

Λεπτόνια: έχουν λεπτονικούς κβαντικούς αριθμούς (δεν έχουν “βαρυονικό” αριθμό)

Λεπτόνια



Φορτίο (Q)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Αντίστοιχος Λεπτονικός Αριθμός
0	0	+1
-1	0	+1

Λεπτόνια: Κάθε οικογένεια (ηλεκτρονίου, μιονίου, και ταυ) έχει δικό της Λεπτονικό αριθμό, που διατηρείται ανεξάρτητα από τους άλλους:

- λεπτονικός αριθμός του ηλεκτρονίου (**e, ν_e**) = **L_e**
- λεπτονικός αριθμός του μιονίου (**μ, ν_μ**) = **L_μ**
- λεπτονικός αριθμός του ταυ (**τ, ν_τ**) = **L_τ**

- Επίσης φυσικά πάντα διτηρείται το φορτίο = **Q**

Κάθε λεπτόνιο έχει αντίστοιχο λεπτονικό αριθμό = 1

Τα αντι-λεπτόνια έχουν λεπτονικό αριθμό = -1 ← ΠΡΟΣΟΧΗ

Λεπτόνια

ΔΕΝ συμμετέχουν στις Ισχυρές αλληλεπιδράσεις
("αισθάνονται" μόνο τις Ασθενείς και ΗλεκτροΜαγνητικές)

Λεπτονικός Αριθμός

	e^-	ν_e	μ^-	ν_μ	τ^-	ν_τ
L_e	+1	+1	0	0	0	0
L_μ	0	0	+1	+1	0	0
L_τ	0	0	0	0	+1	+1

	e^+	$\bar{\nu}_e$	μ^+	$\bar{\nu}_\mu$	τ^+	$\bar{\nu}_\tau$
L_e	-1	-1	0	0	0	0
L_μ	0	0	-1	-1	0	0
L_τ	0	0	0	0	-1	-1

• Κάθε ‘οικογένεια’ λεπτονίων **ΔΙΑΤΗΡΕΙ** τον αντίστοιχο Λεπτονικό Αριθμό

• Ο Λεπτονικός αριθμός **ΔΙΑΤΗΡΕΙΤΑΙ ΠΑΝΤΑ**

Κουάρκ και Λεπτόνια

Κουάρκ

u	c	t
d	s	b

Φορτίο (Q)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Αντίστοιχος Αριθμός "γεύσης"
+2/3	+1/3	+1
-1/3	+1/3	-1

Λεπτονικός Αριθμός = 0 για όλα τα κουάρκ

Λεπτόνια

ν_e	ν_μ	ν_τ
e^-	μ^-	τ^-

Βαρυονικός Αριθμός = 0 για όλα τα λεπτόνια

Φορτίο (Q)	Βαρυονικός Αριθμός (B)	Αντίστοιχος Λεπτονικός Αριθμός
0	0	+1
-1	0	+1

Σωματίδια που παρατηρούμε στη φύση

• Λεπτόνια

- σημειακά – δεν έχουν δομή
 - Κάθε οικογένεια έχει τον δικό της Λεπτονικό αριθμό

• Αδρόνια

- Φτιαγμένα από κουάρκ (τα κουάρκ δεν τα βλέπουμε ελεύθερα – μόνο μέσα σε αδρόνια)
 - Βαρυόνια – **συνδυασμοί 3 κουάρκ**
 - π.χ, $p=uud$, $n=udd$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=1$
 - Μεσόνια – **συνδυασμοί κουάρκ με αντι-κουάρκ**
 - π.χ. $\pi^+=u\bar{d}$, $D^-=cd$, $\pi^0 = u\bar{u}$ και $d\bar{d}$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=0$

Οι νέοι κβαντικοί αριθμοί και οι νέοι νόμοι διατήρησης ανακαλύφθηκαν από παρατηρήσεις

• Λεπτόνια

- σημειακά - δεν έχουν δομή
 - Κάθε οικογένεια έχει τον δικό της Λεπτονικό αριθμό (λεπτονικός αριθμός ηλεκτρονίου, λεπτονικός αριθμός μιονίου, λεπτονικός αριθμός ταυ).
 - **π.χ., διάσπαση μιονίου σε ηλεκτρόνιο, ένα αντινετρίνο ηλεκτρονίου και ένα νετρομιονίου**

• Αδρόνια

- Φτιαγμένα από κουάρκ (τα κουάρκ δεν τα βλέπουμε ελεύθερα - μόνο μέσα σε αδρόνια)
 - Βαρυόνια - **συνδυασμοί 3 κουάρκ**
 - π.χ, $p=uud$, $n=udd$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=1$
 - **π.χ διάσπαση νετρονίου σε πρωτόνιο με εκπομπή ηλεκτρονίου και αντινετρίνο του ηλεκτρονίου**

Ό,τι έχουμε παρατηρήσει, σέβεται και αυτούς τους νέους νόμους διατήρησης

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Λεπτονικοί αριθμοί (1)

Λεπτόνια: Κάθε οικογένεια (ηλεκτρονίου, μιονίου, και ταυ) έχει δικό της Λεπτονικό αριθμό, που διατηρείται ανεξάρτητα από τους άλλους:

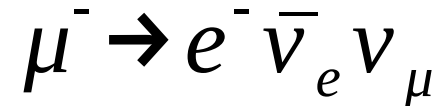
- λεπτονικός αριθμός του ηλεκτρονίου (e, ν_e) = L_e
- λεπτονικός αριθμός του μιονίου (μ, ν_μ) = L_μ
- λεπτονικός αριθμός του ταυ (τ, ν_τ) = L_τ

- Επίσης φυσικά πάντα διτηρείται το φορτίο = Q

Κάθε λεπτόνιο έχει αντίστοιχο λεπτονικό αριθμό = 1

Τα αντι-λεπτόνια έχουν λεπτονικό αριθμό = -1 ← ΠΡΟΣΟΧΗ

Π.χ, βλέπουμε ότι η ακόλουθη “διάσπαση” του μιονίου γίνεται:



Κβαντικός αριθμός	μιόνιο	→	ηλεκτρόνιο	Αντινεutrino του ηλεκτρονίου	Νεutrino του μιονίου
Q	-1	=	-1	0	0
L_e	0	=	1	-1	0
L_μ	1	=	0	0	1
L_τ	0	=	0	0	0

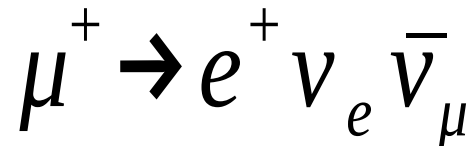
Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Λεπτονικοί αριθμοί (2)

Λεπτόνια: Κάθε οικογένεια (ηλεκτρονίου, μιονίου, και ταυ) έχει δικό της Λεπτονικό αριθμό, που διατηρείται ανεξάρτητα από τους άλλους:

Κάθε λεπτόνιο έχει αντίστοιχο λεπτονικό αριθμό =1,

Τα αντι-λεπτόνια έχουν λεπτονικό αριθμό = -1 ← ΠΡΟΣΟΧΗ

Π.χ, βλέπουμε ότι η ακόλουθη “διάσπαση” του αντι-μιονίου γίνεται:

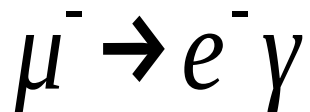


Κβαντικός αριθμός	Θετικό μιονίο (=”αντι-μιονίο”)	→	Ποζιτρώνιο (=”αντιηλεκτρόνιο”)	Νετρίνο του ηλεκτρονίου	Αντινετρίνιο του μιονίου
Q	+1	=	+1	0	0
Le	0	=	-1	1	0
Lμ	-1	=	0	0	-1
Lτ	0	=	0	0	0

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Λεπτονικοί αριθμοί (3)

Αν η αντίδρασή μας σέβεται ΟΛΟΥΣ τους νόμους διατήρησης , τότε γίνεται
Αν όμως παραβιάζει έστω και έναν, δεν μπορεί να γίνει!

Π.χ : βλέπουμε ότι η ακόλουθη “διάσπαση” του μιονίου ΔΕΝ γίνεται:



Κβαντικός αριθμός	μiónιο	→	ηλεκτρόνιο	Φωτόνιο	Αποτέλεσμα
Q	-1	=	-1	0	Διατηρείται: OK
Le	0	=	1	0	ΔΕΝ Διατηρείται: X
Lμ	1	=	0	0	ΔΕΝ Διατηρείται: X
Lτ	0	=	0	0	Διατηρείται: OK

Η παραπάνω αντίδραση ΔΕΝ διατηρεί ούτε τον λεπτονικό αριθμό του ηλεκτρονίου, ούτε τον λεπτονικό αριθμό του μιονίου: οπότε ΔΕΝ γίνεται
Και **όντως ΔΕΝ την έχουμε παρατηρήσει στη φύση.**

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Βαρυονικός αριθμός (1)

• Αδρόνια:

- Βαρυόνια – **συνδυασμοί 3 κουάρκ** . π.χ: $p=uud$, $n=udd$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=1$
- Κάθε κουάρκ λέμε ότι έχει βαρυονικό αριθμό $B = + 1/3$
- Κάθε αντι-κουάρκ έχει τον αντίθετο, δηλαδή: $B = - 1/3$
- Τα λεπτόνια δεν έχουν βαρυονικό αριθμό, όπως και τα κουάρκ δεν έχουν λεπτονικό αριθμό
- π.χ $d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$

Κβαντικός αριθμός	d κουάρκ	→	u κουάρκ	ηλεκτρόνιο	αντινεutrino του ηλεκτρονίου
Q	0	=	+1	-1	0
Le	0	=	0	1	-1
Lμ	0	=	0	0	0
Lτ	0	=	0	0	0
B	1/3	=	1/3	0	0

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Βαρυονικός αριθμός (2)

• Αδρόνια:

- Βαρυόνια – **συνδυασμοί 3 κουάρκ** . π.χ: $p=uud$, $n=udd$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=1$
- Κάθε κουάρκ λέμε ότι έχει βαρυονικό αριθμό $B = + 1/3$
- Κάθε αντι-κουάρκ έχει τον αντίθετο, δηλαδή: $B = - 1/3$
- Τα λεπτόνια δεν έχουν βαρυονικό αριθμό, όπως και τα κουάρκ δεν έχουν λεπτονικό αριθμό

• π.χ $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$

$$p=uud \quad n=udd$$

Κβαντικός αριθμός	νετρόνι 0	→	πρωτόνι 0	ηλεκτρόνιο	ανινετρίνο του ηλεκτρονίου
Q	0	=	+1	-1	0
Le	0	=	0	1	-1
Lμ	0	=	0	0	0
Lτ	0	=	0	0	0
B	1	=	1	0	0

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Βαρυονικός αριθμός (3)

• Αδρόνια:

- **Βαρυόνια** : συνδυασμοί 3 κουάρκ . π.χ: $p=uud$, $n=udd$
 - Έχουν Βαρυονικό αριθμό $B=1$
- Κάθε κουάρκ λέμε ότι έχει βαρυονικό αριθμό $B = + 1/3$
- Κάθε αντι-κουάρκ έχει τον αντίθετο, δηλαδή: $B = - 1/3$
- **Αντιβαρυόνια** : συνδυασμοί 3 αντικουάρκ, π.χ. $\bar{p}=\bar{u}\bar{u}\bar{d}$, $\bar{n}=\bar{u}\bar{d}\bar{d}$
- π.χ $\bar{n} \rightarrow \bar{p} e^+ \nu_e$

Κβαντικός αριθμός	Αντι-νετρόνιο	→	Αντι-πρωτόνιο	ποζιτρόνιο	νεutrino του ηλεκτρονίου
Q	0	=	-1	1	0
Le	0	=	0	-1	1
Lμ	0	=	0	0	0
Lτ	0	=	0	0	0
B	-1	=	-1	0	0

Νέοι κβαντικοί αριθμοί και νόμοι διατήρησης : Βαρυονικός αριθμός (4)

Αν η αντίδρασή μας σέβεται ΟΛΟΥΣ τους νόμους διατήρησης , τότε γίνεται
Αν όμως παραβιάζει έστω και έναν, δεν μπορεί να γίνει!

Π.χ : βλέπουμε ότι η ακόλουθη “διάσπαση” του νετρονίου ΔΕΝ γίνεται:



Κβαντικός αριθμός	νετρόνιο	→	ποζιτρόνιο	ηλεκτρόνιο	Αποτέλεσμα
Q	0	=	+1	-1	Διατηρείται: OK
Le	0	=	-1	1	Διατηρείται: OK
Lμ	0	=	0	0	Διατηρείται: OK
Lτ	0	=	0	0	Διατηρείται: OK
B	1	=	0	0	ΔΕΝ διατηρείται: X

Η παραπάνω αντίδραση ΔΕΝ διατηρεί το βαρυονικό αριθμό, οπότε ΔΕΝ γίνεται
Και **όντως ΔΕΝ** την έχουμε παρατηρήσει στη φύση.

Αυτά φτάνουν για το κομμάτι της Πυρηνικής

Θα τα δούμε πάλι και εκτενέστερα στα πρώτα μαθήματα για τα Στοιχειώδη Σωματίια.

Όπως και να έχει, στις επόμενες διαφάνειες σας δίνουμε κάποιες ασκήσεις για πρακτική, που βασικά θα τις δούμε στα Στοιχειώδη

Ασκηση 1

Ποιά είναι τα συστατικά κουάρκ των παρακάτω αδρονίων?

Αν το αδρόνιο είναι συνδυασμός περισσότερων του ενός ζεύγους $q \bar{q}$ να δωθούν όλα τα ζεύγη

BARYONS	Strangenes s	Charm
n	0	0
p	0	0
Δ^{++}	0	0
Λ^0	-1	0
Ω^-	-3	0
MESONS		
π^+	0	0
π^0	0	0
ρ^0	0	0
η'^0	0	0
K^+	+1	0
K^-	-1	0
$\bar{K}^0$	-1	0
D^+	0	+1

} Συνδυασμοί u και d
(εννοείται και των
αντι-κουάρκ τους)
← Συνδυασμοί u , d και s

Ασκηση 1 - Λύση

Ποιά είναι τα συστατικά κουάρκ των παρακάτω αδρονίων?

Αν το αδρόνιο είναι συνδυασμός περισσότερων του ενός ζεύγους $q \bar{q}$ να δωθούν όλα τα ζεύγη

BARYONS	Strangeness	Charm
n	0	0
p	0	0
Δ^{++}	0	0
Λ^0	-1	0
Ω^-	-3	0
MESONS		
π^+	0	0
π^0	0	0
ρ^0	0	0
η'^0	0	0
K^+	+1	0
K^-	-1	0
$\bar{K}^0$	-1	0
D^+	0	+1

Σημείωση: οι κβαντικοί αριθμοί “strangeness/παραξενιά” και “charmness/χάρη” έχουν το πρόσημο του φορτίου του αντίστοιχου κουάρκ.

Π.χ., το s έχει φορτίο $-1/3$, άρα: strangeness=-1
το c έχει φορτίο $+2/3$, άρα: charmness=+1

$$n = udd, p = uud, \Delta^{++} = uuu$$

$$\Lambda^0 = sdu, \Omega^- = sss$$

$$\pi^+ = u\bar{d}$$

$$\pi^0 = \text{γραμμικός συνδυασμός των } u\bar{u} \text{ και } d\bar{d} \text{ (Σημείωση: εμφανίζεται είτε ως } u\bar{u} \text{ είτε ως } d\bar{d})$$

$$\rho^0 = \{u\bar{u}, d\bar{d}\} \text{ (αλλιώτικος γραμ. συνδ.)}$$

$$\eta' = \{u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}\} \text{ (γραμμικός συνδυασμός)}$$

$$K^+ = u\bar{s}, K^- = \bar{u}s, K^0 = \bar{s}d, \bar{K}^0 = s\bar{d}, D^+ = c\bar{d}$$

Άσκηση 2

Ποιές από τις παρακάτω αντιδράσεις/διασπάσεις γίνονται?
Αυτές που δεν γίνονται, ποιόν νόμο διατήρησης παραβιάζουν?

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

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

$$p + p \rightarrow p + \Sigma^+ + K^-$$

$$p \rightarrow e^+ + \nu_e$$

$$p \rightarrow e^+ + n + \nu_e$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

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

Δίνονται οι μάζες των σωματιδίων

$$M(\gamma) = 0$$

$$M(\nu_e) = M(\nu_\mu) = 0$$

$$M(e^+) = M(e^-) = 0.511 \text{ MeV}$$

$$M(\pi^+) = M(\pi^-) = 139.6 \text{ MeV}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ MeV}$$

$$M(\mu^+) = M(\mu^-) = 105.7 \text{ MeV}$$

$$M(p) = 938.3 \text{ MeV}$$

$$M(n) = 939.6 \text{ MeV}$$

$$M(\Sigma^+) = 1189.4 \text{ MeV}$$

$$M(K^+) = M(K^-) = 493.7 \text{ MeV}$$

Δίνονται:

$$\Sigma^+ = u u s, K^- = \bar{u} s$$

Σημείωση:

- Στη διάσπαση ενός σωματιδίου ελέγχουμε τη διατήρηση της ενέργειας
- Όταν όμως έχουμε σκέδαση δύο σωματιδίων υποθέτουμε ότι η αρχική ενέργεια (που περιλαμβάνει την κινητική ενέργεια) μπορεί πάντα να γίνει είναι αρκετή για να επιτρέπεται η αντίδραση

Άσκηση 2 - λύση

Ποιές από τις παρακάτω αντιδράσεις/διασπάσεις γίνονται?
Αυτές που δεν γίνονται, ποιόν νόμο διατήρησης παραβιάζουν?

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

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

$$p + p \rightarrow p + \Sigma^+ + K^-$$

$$p \rightarrow e^+ + \nu_e$$

$$p \rightarrow e^+ + n + \nu_e$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

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

1. Διατήρηση λεπτονικού αριθμού

2. Διατήρηση φορτίου

3. Διατήρηση φορτίου

4. Διατήρηση βαρυονικού αριθμού

5. Διατήρηση ενέργειας

6. Επιτρέπεται

7. Επιτρέπεται

Βάζω σε πίνακα τις ποσότητες / κβαντικούς αριθμούς που διατηρούνται πάντα, σε όλες τις αλληλεπιδράσεις. Πρώτα βάζω τα πιο εύκολα να ελγχθούν και σταματάω με το πρώτο που παραβιάζεται!

	Φορτίο	Βαρυονικός	Λεπτονικός	Ενέργεια
1	OK	OK	X	
2	X			
3	X			
4	OK	X		
5	OK	OK	OK	X

Άσκηση 3

Οι παρακάτω διασπάσεις δεν γίνονται. Γιατί? (ποιόν νόμο διατήρησης παραβιάζουν?)

$$n \rightarrow p + e^{-}$$

$$n \rightarrow \pi^{+} + e^{-}$$

$$n \rightarrow p + \pi^{-}$$

$$n \rightarrow p + \gamma$$

Δίνονται οι μάζες των σωματιδίων

$$M(\gamma) = 0$$

$$M(\nu_e) = M(\nu_\mu) = 0$$

$$M(e^{+}) = M(e^{-}) = 0.511 \text{ MeV}$$

$$M(\pi^{+}) = M(\pi^{-}) = 139.6 \text{ MeV}$$

$$M(\pi^0) = 135 \text{ MeV}$$

$$M(\mu^{+}) = M(\mu^{-}) = 105.7 \text{ MeV}$$

$$M(p) = 938.3 \text{ MeV}$$

$$M(n) = 939.6 \text{ MeV}$$

$$M(\Sigma^{+}) = 1189.4 \text{ MeV}$$

$$M(K^{+}) = M(K^{-}) = 493.7 \text{ MeV}$$

Άσκηση 3 - λύση

Οι παρακάτω διασπάσεις δεν γίνονται. Γιατί? (ποιόν νόμο διατήρησης παραβιάζουν?)

$$n \rightarrow p + e^-$$

1. Διατήρηση λεπτονικού αριθμού και στροφορμής

$$n \rightarrow \pi^+ + e^-$$

2. Διατήρηση βαρυονικού και λεπτονικού αριθμού

$$n \rightarrow p + \pi^-$$

3. Διατήρηση ενέργειας

$$n \rightarrow p + \gamma$$

4. Διατήρηση φορτίου

Βάζω σε πίνακα τις ποσότητες / κβαντικούς αριθμούς που διατηρούνται πάντα, σε όλες τις αλληλεπιδράσεις. Πρώτα βάζω τα πιό εύκολα να ελγχθούν και σταματάω με το πρώτο που παραβιάζεται!

	Φορτίο	Βαρυονικός	Λεπτονικός	Ενέργεια
1	OK	OK	X	
2	OK	X	X	
3	OK	OK	OK	X
4	X			