

## ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ

Το αντικείμενο της φυσικής των στοιχειωδών σωματίων είναι η ανακάλυψη των δομικών λίθων της ύλης και των νόμων που τους διέπουν. Δηλαδή στηριζόμενη σε ορισμένους βασικούς νόμους προσπαθεί να εξάγει τις εξισώσεις που διέπουν μια αντίδραση ή μια αλληλεπίδραση μεταξύ στοιχειωδών σωματίων και να προβλέψει τα προϊόντα της αντίδρασης αυτής.

Ένα σημαντικό στοιχείο για τη μελέτη μιας αντίδρασης σωματίων είναι οι λεγόμενοι **κβαντικοί αριθμοί ενός σωματίου** και αποτελούν την ταυτότητα κάθε σωματίου, καθώς περιέχουν τον μικρότερο αριθμό χαρακτηριστικών πληροφοριών που είναι απαραίτητες για τον ακριβή ξεχωρισμό του από τα υπόλοιπα σωματάρια.

Αυτοί οι κβαντικοί αριθμοί είναι το **ηλεκτρικό φορτίο  $Q$** , ο **βαρυονικός αριθμός  $B$**  (τον φέρουν μόνο μερικά σωματάρια που λέγονται βαρυόνια πχ. πρωτόνιο, νετρόνιο και όχι το ηλεκτρόνιο), ο **ηλεκτρονικός λεπτονικός αριθμός  $L_e$**  (τον φέρουν μόνο τέσσερα σωματάρια:  $e^-$ ,  $\nu_e$  και τα αντισωματάρια τους  $e^+$ ,  $\bar{\nu}_e$ ), ο **λεπτονικός αριθμός ταυ  $L_\tau$**  (τον φέρουν μόνο τέσσερα σωματάρια:  $\tau^-$ ,  $\nu_\tau$  και τα αντισωματάρια τους  $\tau^+$ ,  $\bar{\nu}_\tau$ ), ο **μιονικός αριθμός  $L_\mu$**  (τον φέρουν μόνο τέσσερα σωματάρια:  $\mu^-$ ,  $\nu_\mu$  και τα αντισωματάρια τους  $\mu^+$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ ), η **πααραδοξότητα  $S$**  (την φέρουν τα παράδοξα σωματάρια: τα καόνια  $K^-, K^+, K^0$ , τα σίγμα  $\Sigma^-, \Sigma^+, \Sigma^0$ , τα ξι  $\Xi^-, \Xi^0, \Xi^+$  και τα ωμέγα  $\Omega^-, \Omega^+$ ) και η **τρίτη συνιστώσα του ισospίν  $I_3$** .

Συνεπώς για να είναι επιτρεπτή μια αντίδραση στοιχειωδών σωματίων θα πρέπει να ισχύουν οι νόμοι διατήρησης των παραπάνω κβαντικών αριθμών. Αν παραβιάζεται η διατήρηση κάποιου κβαντικού αριθμού τότε η αντίδραση αυτή δεν παρατηρείται στη φύση.

Στον ακόλουθο πίνακα γίνεται μια ταξινόμηση των στοιχειωδών σωματίων με μερικές ιδιότητές τους.



Ταξινόμηση στοιχειωδών σωματίων										
Κατηγορία	Όνομα σωματίου	Σύμβολο	Μάζα ηρεμίας (MeV/c <sup>2</sup> )	Q	B	L <sub>e</sub>	L <sub>τ</sub>	L <sub>μ</sub>	S	I <sub>3</sub>
Φωτόνιο	Φωτόνιο	γ	0	0	0	0	0	0	0	0
Λεπτόνια	Ηλεκτρόνιο	e <sup>-</sup>	0,511	-1	0	+1	0	0	0	-1/2
	Ποζιτρόνιο	e <sup>+</sup>	0,511	+1	0	-1	0	0	0	1/2
	Νεutrίνο η-λεκτρονίου	ν <sub>e</sub>	0	0	0	+1	0	0	0	1/2
	Αντινεutrίνο η-λεκτρονίου	ν̄ <sub>e</sub>	0	0	0	-1	0	0	0	-1/2
	Μιόνιο	μ <sup>-</sup>	105,7	-1	0	0	0	+1	0	-1
	Αντιμιόνιο	μ <sup>+</sup>	105,7	+1	0	0	0	-1	0	+1
	Νεutrίνο μιονίου	ν <sub>μ</sub>	0	0	0	0	0	+1	0	0
	Αντινεutrίνο μιονίου	ν̄ <sub>μ</sub>	0	0	0	0	0	-1	0	0
	Ταυ	τ <sup>-</sup>	1784	-1	0	0	+1	0	0	-1
	Αντιταύ	τ <sup>+</sup>	1784	+1	0	0	-1	0	0	+1
	Νεutrίνο ταυ	ν <sub>τ</sub>	0	0	0	0	+1	0	0	0
Αντινεutrίνο ταυ	ν̄ <sub>τ</sub>	0	0	0	0	-1	0	0	0	
Μεσόνια	Αδρόνια	π <sup>+</sup>	139,6	+1	0	0	0	0	0	1
		π <sup>-</sup>	139,6	-1	0	0	0	0	0	-1
		π <sup>0</sup>	135	0	0	0	0	0	0	0
	Καόνια	K <sup>+</sup>	493,7	+1	0	0	0	0	+1	1/2
		K <sup>-</sup>	493,7	-1	0	0	0	0	1	-1/2



		$K^0$	497,7	0	0	0	0	0	+1	-1/2
		$\bar{K}^0$	497,7	0	0	0	0	0	-1	1/2
<b>Βαρυόνια</b>	Πρωτόνιο	$p$	938,3	+1	+1	0	0	0	0	1/2
	Νετρόνιο	$n$	939,6	0	+1	0	0	0	0	-1/2
	Λάμδα	$\Lambda^0$	1115,7	0	+1	0	0	0	-1	0
	Σίγμα	$\Sigma^+$	1189,4	+1	+1	0	0	0	-1	+1
		$\Sigma^-$	1197,3	-1	+1	0	0	0	-1	-1
		$\Sigma^0$	1192,5	0	+1	0	0	0	-1	0
	$\Xi$	$\Xi^0$	1315	0	+1	0	0	0	-2	1/2
		$\Xi^-$	1321,3	-1	+1	0	0	0	-2	-1/2
		$\Xi^+$	1321,3	+1	+1	0	0	0	-2	3/2
	Ωμέγα	$\Omega^-$	1672,2	-1	+1	0	0	0	-3	0
$\Omega^+$		1672,2	+1	+1	0	0	0	-3	2	

Τα αντιβαρυόνια  $\bar{p}, \bar{n}, \bar{\Lambda}, \bar{\Sigma}, \bar{\Xi}$  και  $\bar{\Omega}$  έχουν βαρυονικό αριθμό  $B=-1$ .

Οι πέντε κβαντικοί αριθμοί  $Q, B, S, L_e$  και  $I_3$  δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, αλλά ικανοποιούν τη σχέση:

$$Q = I_3 + \frac{Y}{2} \quad (\text{σχέση Gell - Mann, Nishijima})$$

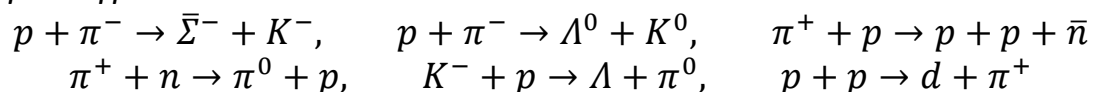
όπου  $Y = B + S - L_e$  λέγεται **υπερφορτίο**.

### ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΗ ΦΥΣΗ

**1) Ισχυρή αλληλεπίδραση:** υπεύθυνη για το σχηματισμό των πυρήνων με τη σύνδεση πρωτονίων - νετρονίων και είναι πολύ μικρής εμβέλειας  $\sim 1 \text{ fm}$  (φορείς τα γλουόνια  $g$ ).

Εμφανίζεται σ' όλες τις διαδικασίες παραγωγής σωματιών.

Παραδείγματα:



**2) Ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση:** υπεύθυνη για το σχηματισμό ατόμων και μορίων και είναι πολύ μεγάλης εμβέλειας μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων (φορείς τα φωτόνια  $\gamma$ ).

Παραδείγματα:

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma, \quad \pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$$

**3) Ασθενής αλληλεπίδραση:** υπεύθυνη για τη διάσπαση των πυρήνων (ραδιενέργεια) και είναι πολύ μικρής εμβέλειας  $\sim 1$  fm (φορείς τα μποζόνια W και Z). Εμφανίζεται σ' όλες τις διασπάσεις σωματιδίων. Επίσης τα νετρίνα εμφανίζονται μόνο στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις.

Παραδείγματα:

$$\begin{aligned} \Sigma^+ &\rightarrow n + \pi^+, & \Lambda^0 &\rightarrow p + \pi^-, & \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \\ p &\rightarrow n + e^+ + \nu_e, & \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, & \Omega^- &\rightarrow \Xi^0 + \pi^- \end{aligned}$$

**4) Βαρυτική αλληλεπίδραση:** υπεύθυνη για την κίνηση των πλανητών, πολύ μεγάλης εμβέλειας και η επίδραση της στα στοιχειώδη σωματίδια είναι αμελητέα καθώς είναι ασθενέστερη από όλες τις θεμελιώδεις δυνάμεις. (φορείς τα γκραβιτόνια ή βαρυτόνια)

Οι νόμοι διατήρησης στους οποίους υπακούουν οι αλληλεπιδράσεις φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Διατηρούμενη ποσότητα	Ισχυρή	Ηλεκτρομαγνητική	Ασθενής
Ενέργεια / Ορμή	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Φορτίο $Q/e$	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Βαρυονικός αριθμός $B$	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Λεπτονικός αριθμός $L$	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ
Παραδοξότητα $S$	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ ( $\Delta S=1$ ή $0$ )

**Προσοχή:** Στις **διασπάσεις σωματιδίων** ελέγχουμε και αν ισχύει η διατήρηση της ενέργειας ( $E_{\text{αντιδρώντων}} > E_{\text{προϊόντων}}$ ) για να αποφανθούμε αν είναι επιτρεπτή ή όχι. Στην περίπτωση όμως που έχουμε **σκέδαση δύο σωματιδίων** υποθέτουμε ότι η αρχική ενέργεια των αντιδρώντων (που περιλαμβάνει την κινητική ενέργεια) μπορεί πάντα να είναι αρκετή για να επιτρέπεται η αντίδραση, οπότε δε θα ελέγχουμε τη διατήρηση της ενέργειας.



**Παράδειγμα:**

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

Φορτίο Q	$+1 = +1 + 0 + 0 \rightarrow 1 = 1$	διατηρείται
Βαρυονικός B	$0 = 0 + 0 + 0 \rightarrow 0 = 0$	διατηρείται
Λεπτονικός $L_e$	$0 = -1 + 1 + 0 \rightarrow 0 = 0$	διατηρείται
Μιονικός $L_\mu$	$-1 = 0 + 0 + (-1) \rightarrow -1 = -1$	διατηρείται
Παραδοξότητα S	$0 = 0 + 0 + 0 \rightarrow 0 = 0$	διατηρείται

Επειδή έχουμε διάσπαση ελέγχουμε αν ισχύει η διατήρηση της ενέργειας.  
 Πρέπει:  $E_{\text{αντιδρώντων}} > E_{\text{προϊόντων}} \Rightarrow m_\mu c^2 > m_e c^2 + m_{\nu_e} c^2 + m_{\nu_\mu} c^2 \Rightarrow$   
 $105.65 \text{ MeV} > 0.511 \text{ MeV}$  **ισχύει**  
 Άρα η διάσπαση είναι **επιτρεπτή!!**

Διάσπαση ηλεκτρονίου:  $e^- \rightarrow \mu^- + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

Φορτίο Q	$-1 = -1 + 0 + 0 \rightarrow -1 = -1$	διατηρείται
Βαρυονικός B	$0 = 0 + 0 + 0 \rightarrow 0 = 0$	διατηρείται
Λεπτονικός $L_e$	$1 = 0 + 1 + 0 \rightarrow 1 = 1$	διατηρείται
Μιονικός $L_\mu$	$0 = 1 + 0 + (-1) \rightarrow 0 = 0$	διατηρείται
Παραδοξότητα S	$0 = 0 + 0 + 0 \rightarrow 0 = 0$	διατηρείται

Επειδή έχουμε διάσπαση ελέγχουμε αν ισχύει η διατήρηση της ενέργειας.  
 Πρέπει:  $E_{\text{αντιδρώντων}} > E_{\text{προϊόντων}} \Rightarrow m_e c^2 > m_\mu c^2 + m_{\nu_e} c^2 + m_{\nu_\mu} c^2 \Rightarrow$   
 $0.511 \text{ MeV} > 105.65 \text{ MeV}$  **άτοπο**  
 Άρα η διάσπαση είναι **μη επιτρεπτή!!**



## Καθιερωμένο πρότυπο (Standard Model)

Το 1963 προτάθηκε από τους Zweig και Gell - Mann η ύπαρξη τριών νέων στοιχειωδών σωματίων που είναι τα συστατικά από τα οποία χτίζονται τα αδρόνια, τα οποία ονόμασαν **quarks**. Η ύπαρξη των τριών καταστάσεων με διαφορετικές ιδιότητες στις οποίες εμφανίζονται τα quarks ονομάζονται **γεύσεις** και είναι τα **u** (up), **d** (down) και **s** (strange). Τα γνωστά αδρόνια σχηματίζονται από συνδυασμούς των quarks.

Συγκεκριμένα τα βαρυόνια αποτελούνται από 3 quarks (βαρυονικός αριθμός 1), ενώ τα μεσόνια από ένα quark και ένα αντιquark (βαρυονικός αριθμός 0).

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται διάφοροι κβαντικοί αριθμοί των τριών quarks.

Σωματίο	Φορτίο (Q)	Βαρυονικός αριθμός (B)	Παραδοξότητα (S)	Τρίτη συνιστώσα ισοσπίν (I <sub>3</sub> )
u (up)	2/3	1/3	0	1/2
d (down)	-1/3	1/3	0	-1/2
s (strange)	-1/3	1/3	-1	0

Τα αντιquarks  $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$  έχουν αντίθετες τιμές στους κβαντικούς αριθμούς Q, B, S και I<sub>3</sub>.

Σύμφωνα με το καθιερωμένο πρότυπο τα στοιχειώδη σωματάρια χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

**A)** Τα **σωματίδια δομής** (φερμιόνια, τα οποία έχουν ημιακέραιο spin) αποτελούνται από τα quarks και τα λεπτόνια.

**B)** Τα **σωματίδια φορείς** (μποζόνια, τα οποία έχουν ακέραιο spin) αποτελούνται από τα **γκλουόνια** υπεύθυνα για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις που συγκρατούν τα πρωτόνια και νετρόνια στον πυρήνα και τα quarks στα πρωτόνια και τα νετρόνια, το **φωτόνιο** είναι υπεύθυνο για τις ηλεκτρομαγνητι-



κές αλληλεπιδράσεις που συγκρατούν τα ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα, τα **μποζόνια  $W^+$ ,  $W^-$  και  $Z^0$**  υπεύθυνα για τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις που προκαλούν τη διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων και το **βαρυτόνιο** υπεύθυνο για τις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις που δεν έχει ακόμα παρατηρηθεί σε κανένα εργαστήριο.

Συνεπώς όλες οι δυνάμεις που εμφανίζονται στη φύση οφείλονται σε ανταλλαγές των παραπάνω σωματιδίων.

**Τα στοιχειώδη σωματίδια του Καθιερωμένου Μοντέλου**

Τα σωματίδια στην αριστερή πλευρά του πίνακα, τα κουάρκ και τα λεπτόνια, είναι συστατικά της ύλης. Στη δεξιά πλευρά βρίσκονται τα μποζόνια, τα οποία είναι φορείς δυνάμεων. Δύο από αυτά, το μποζόνιο Χιγκς και το βαρυτόνιο, δεν έχουν επιβεβαιωθεί πειραματικά.

Κουάρκ			Λεπτόνια	Μποζόνια	Μη επιβεβαιωμένα
<b>u</b> Up	<b>c</b> Charm	<b>t</b> Top		<b>γ</b> Photon	Όνομα Up Μάζα 2,4 MeV Φορτίο 2/3 Ιδιοστροφομή 1/2
<b>d</b> Down	<b>s</b> Strange	<b>b</b> Bottom		<b>g</b> Gluon	
<b><math>\nu_e</math></b> Electron Neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> Muon Neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> Tau Neutrino		<b>Z</b> Ασθενής δύναμη	<b>H</b> Μποζόνιο Higgs
<b>e</b> Electron	<b><math>\mu</math></b> Muon	<b><math>\tau</math></b> Tau		<b>W</b> Ασθενής δύναμη	<b>G</b> Graviton

Σύμφωνα με την Κβαντική Χρωμοδυναμική τα πιο γνωστά βαρυτόνια πρωτόνιο, νετρόνιο και λάμδα αποτελούνται από 3 quarks δύο διαφορετικών γεύσεων. Δηλαδή:

$$p \rightarrow uud: \text{έτσι ώστε το φορτίο είναι } Q = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} + \left(-\frac{1}{3}\right) = \frac{3}{3} = +1$$



$$\mathbf{n} \rightarrow \mathbf{udd}: \quad Q = \frac{2}{3} + \left(-\frac{1}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right) = \frac{2}{3} - \frac{2}{3} = 0$$

$$\mathbf{\Lambda} \rightarrow \mathbf{uds}: \quad Q = \frac{2}{3} + \left(-\frac{1}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right) = \frac{2}{3} - \frac{2}{3} = 0 \quad (\text{φορτίο})$$

$$S = 0 + 0 + (-1) = -1 \quad (\text{παραδοξότητα})$$

### Άσκηση

Θεωρώντας τους γνωστούς νόμους διατήρησης αποφανθείτε κατά πόσο οι πιο κάτω αντιδράσεις επιτρέπονται ή όχι.

$$\alpha) \quad \Sigma^- \rightarrow e^- + \gamma$$

$$\beta) \quad K^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

$$\gamma) \quad \Xi^- \rightarrow \Sigma^- + \gamma$$

$$\delta) \quad p \rightarrow e^+ + \pi^0$$

$$\epsilon) \quad \Sigma^+ \rightarrow \Lambda^0 + e^+ + \nu_e$$

$$\sigma\tau) \quad \Lambda^0 \rightarrow e^- + \pi^+ + \bar{\nu}_e$$

*Συγγραφή – Επιμέλεια: Παναγιώτης Φ. Μοίρας*

