

Νουκλεόνια και ισχυρή αλληλεπίδραση

Πρωτόνια και νετρόνια. Το πρότυπο των κουάρκ για
τα νουκλεόνια.

Τάσος Λιόλιος
Μάθημα Πυρηνικής Φυσικής

Κουάρκ: τα δομικά στοιχεία των αδρονίων

Generation	Name	Symbol	Mass (MeV/c ²)	Charge
First	up	u	1.5-4*	$+\frac{2}{3}e$
	down	d	4-8	$-\frac{1}{3}e$
Second	strange	s	80-130	$-\frac{1}{3}e$
	charm	c	$1.15-1.35 \times 10^3$	$+\frac{2}{3}e$
Third	bottom (or beauty)	b	$4.1-4.9 \times 10^3$	$-\frac{1}{3}e$
	top (or truth)	t	$1.7-1.9 \times 10^4$	$+\frac{2}{3}e$

ΑΣΚΗΣΗ Διασπάσεις σωματιδίων

- $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \boxed{\phantom{\text{particle}}}$

- $n^0 \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \boxed{\phantom{\text{particle}}}$

- $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + \boxed{\phantom{\text{particle}}}$

- $\pi^0 \rightarrow \gamma + \boxed{\phantom{\text{particle}}}$

- $\Sigma^0 \rightarrow \gamma + \boxed{\phantom{\text{particle}}}$

- $\pi^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \boxed{\phantom{\text{particle}}}$

- $K_L^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \boxed{\phantom{\text{particle}}}$

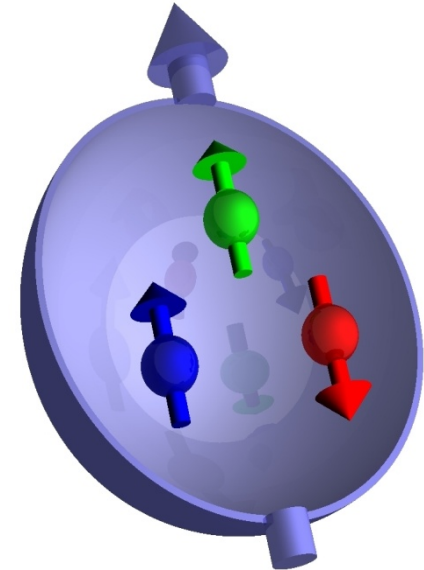
- $\Sigma^- \rightarrow \pi^- + \boxed{\phantom{\text{particle}}}$

ΑΣΚΗΣΗ Διασπάσεις σωματιδίων

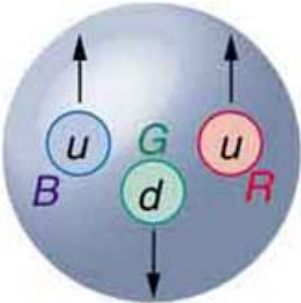
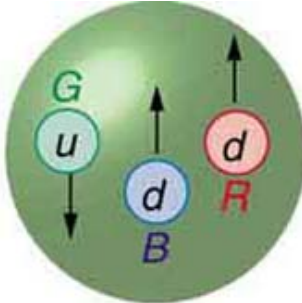
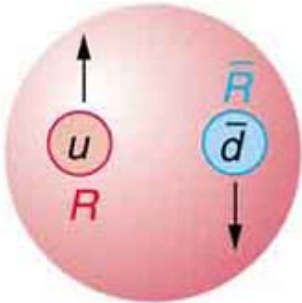
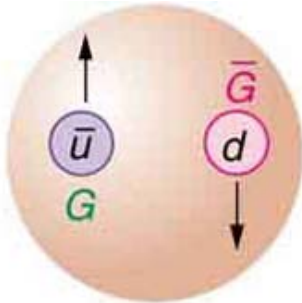
- $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$
- $n^0 \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + p^+$
udd uud
- $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^-$
- $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$
 $\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$
- $\Sigma^0 \rightarrow \gamma + \Lambda^0$
uds uds
- $\pi^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^-$
- $\bar{u}d$
- $K_L^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$
 $\frac{1}{\sqrt{2}}(d\bar{s} + s\bar{d})$
- $\Sigma^- \rightarrow \pi^- + n^0$
dds udd

Σύσταση των πρωτονίων και νετρονίων από κουάρκ

- Τα νουκλεόνια (δηλ. p και n) είναι φερμιόνια με spin $\frac{1}{2}$.
- Αποτελούνται από κουάρκ, τα οποία είναι επίσης φερμιόνια με $s = \frac{1}{2}$.
- Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το κάθε νουκλεόνιο περιέχει περιττό αριθμό φερμιονίων (αλλιώς θα είχε ακέραιο spin). Επειδή δεν μπορούν να περιέχουν μόνο ένα κουάρκ (δεν υπάρχουν ελεύθερα κουάρκ), το απλούστερο είναι να περιέχουν **3 κουάρκ**, κάτι που ταιριάζει και με τα φορτία τους.

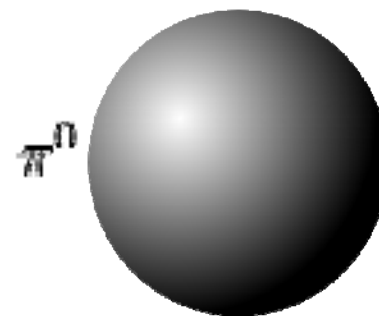


Βαρυόνια και μεσόνια: σύσταση από κουάρκ

				
	Proton	Neutron	π^+	π^-
Spin	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$	$+\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$
Charge	$+\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$	$+\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$	$+\frac{2}{3} + \frac{1}{3} = +1$	$-\frac{2}{3} - \frac{1}{3} = -1$

Τα αδρόνια με 3 κουάρκ λέγονται **βαρυόνια**,
ενώ τα αδρόνια με 1 κουάρκ και 1
αντικουάρκ λέγονται **μεσόνια**.

Όλα τα αδρόνια είναι **άχρωμα** ως προς το
φορτίο χρώματος των ισχυρών
αλληλεπιδράσεων



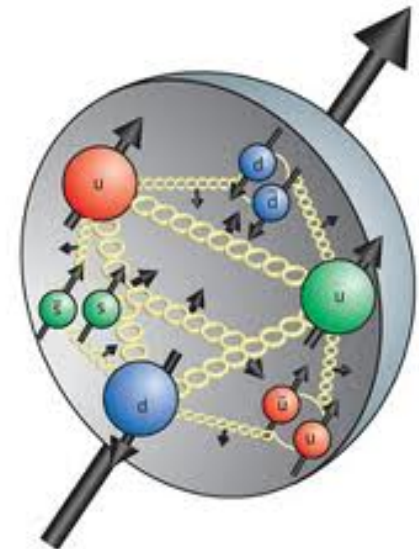
Που οφείλεται το σπιν των νουκλεονίων; (the proton spin crisis)

Η ανάλυση των δεδομένων πολλών σύγχρονων πειραμάτων έδειξε ότι ισχύει μια αρχική ανακάλυψη του πειράματος EMC (European Muon Collaboration) στα τέλη της δεκαετία του 1980, ότι το spin των κουάρκ συνεισφέρει μόνο το 30% του ολικού spin των νουκλεονίων.

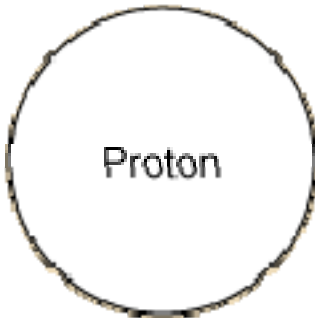
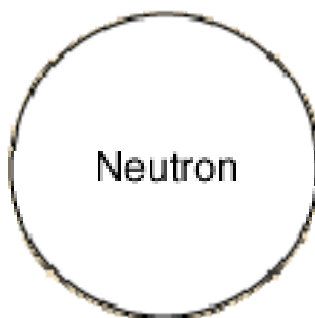
Είναι αντικείμενο έρευνας να βρεθεί πού οφείλεται το υπόλοιπο της στροφορμής που λείπει.

- gluon spin?
- gluon and quark orbital angular momentum?

Η σύγχρονη εικόνα



Μάζα (και φορτίο) των p και n

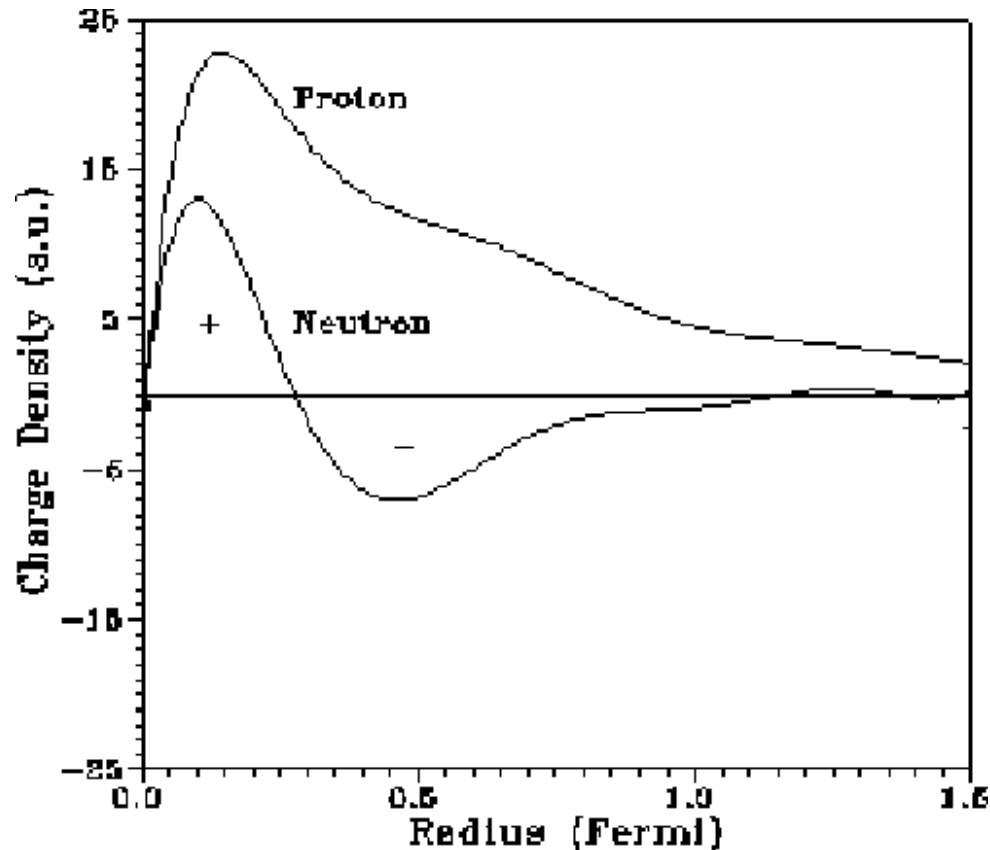
 Electron	$m_e = 9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.000549 \text{ u}$ $e = -1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$
 Proton	$m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1836.15 m_e = 1.00728 \text{ u}$ $e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ $m_p c^2 = 938.272 \text{ MeV}$
 Neutron	$m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1838.68 m_e = 1.00867 \text{ u}$ charge = 0 $m_n c^2 = 939.566 \text{ MeV}$ The atomic mass unit u is defined as 1/12 of the carbon atomic mass.

Η διαφορά μαζών νετρονίου – πρωτονίου είναι $\approx 2m_e$.

Το n είναι βαρύτερο λόγω ενός κουάρκ d στη θέση ενός u (και ας υπάρχει και η μικρή συνεισφορά της επιπλέον ενέργειας της κατανομής φορτίου στο p).

Ηλεκτρικό φορτίο των p και n

- Το ηλεκτρικό φορτίο τους: γιατί είναι: $m_p \approx -m_e$ ακριβώς;
- Κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στο πρωτόνιο (μέση ακτίνα $R_p \approx 0.8$ fm) και στο νετρόνιο.



Ενέργεια λόγω κατανομής
του ηλεκτρικού φορτίου
στο πρωτόνιο:

$$e^2/4\pi\epsilon_0 R_p = 2 \text{ MeV}$$

(θεωρώντας $R_p = 0.8$ fm).

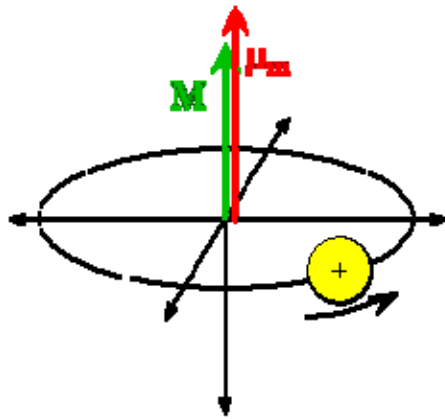
Τα 2 MeV είναι πολύ μικρή
ενέργεια σε σχέση με τις
ενέργειες των ισχυρών
αλληλεπιδράσεων. Σε
αυτές τα p και n είναι
σχεδόν ίδια.

Ισοσπίν ή ισοτοπικό σπιν
(συμμετρία του ισοσπίν).

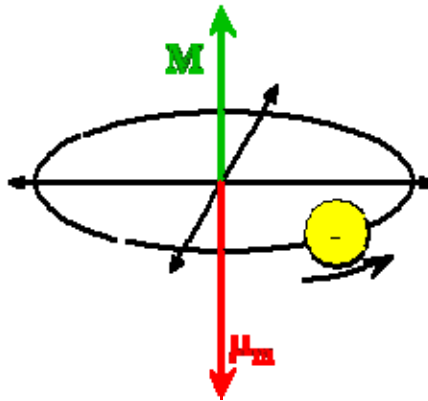
Μαγνητική ροπή των p και n

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια έχουν μαγνητική διπολική ροπή, που είναι συγγραμμική με το spin τους.

a)



b)



Προσανατολισμός της μαγνητικής ροπής μ_m ως προς την στροφορμή M από περιστρεφόμενο φορτίο α) θετικό β) αρνητικό

Μαγνητική ροπή των p και n

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια έχουν μαγνητική διπολική ροπή, που είναι συγγραμμική με το spin τους.

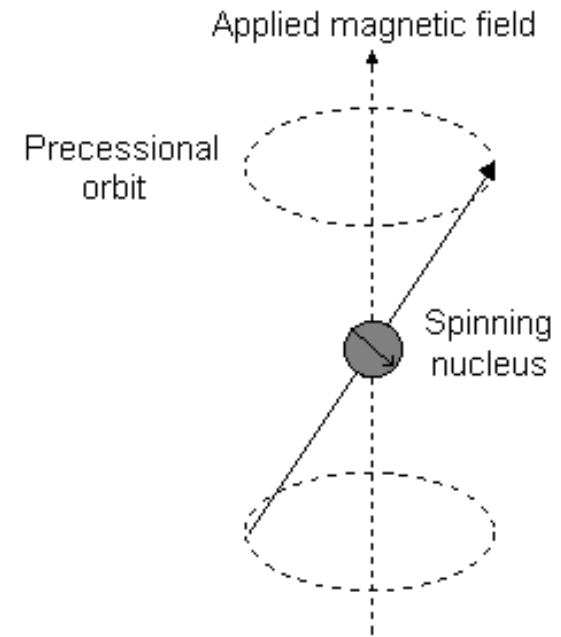
Είναι αξιοσημείωτο ότι τα νετρόνια έχουν μη μηδενική μαγνητική ροπή αν και είναι ηλεκτρικώς ουδέτερα. Αυτό οφείλεται στο ότι είναι σύνθετα σωματίδια με εσωτερική δομή και κατανομή φορτίου.

Σε αναλογία με τη μαγνητόνη Bohr που είναι η μονάδα μαγνητικής διπολικής ροπής στην Ατομική Φυσική, ορίζεται η πυρηνική μαγνητόνη στην Πυρηνική Φυσική:

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

(σύστημα μονάδων SI)

με τιμή: $\mu_N = 3.15245 \times 10^{-8} \text{ eV/Tesla}$

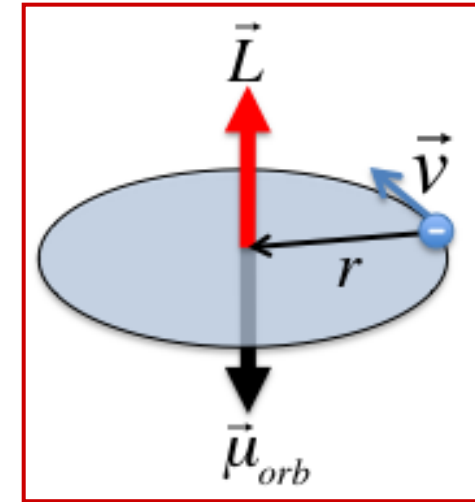


Η τοποθέτηση μαγνητικής ροπής μέσα σε μαγνητικό πεδίο, προκαλεί μεταπτωτική κίνηση και προσδίδει στη μαγνητική ροπή,

$$V_B = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

Μαγνητικές ροπές στα άτομα – μαγνητόνη του Bohr

Τα άτομα ισοδυναμούν με μικροσκοπικούς
μαγνήτες λόγω της κίνησης των φορτίων.
Το διάνυσμα της μαγνητικής ροπής ηλεκτρονίου
συνδέεται με το διάνυσμα της στροφορμής:



$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m} \vec{L} \quad (1)$$

Από την σχέση (1), και την συνήθη μονάδα ατομικών
στροφορμών, $\hbar$, παράγεται η μονάδα ατομικών (και
υποατομικών) μαγνητικών ροπών, η οποία ονομάζεται
μαγνητόνη του Bohr:

$$\mu_B = \frac{e}{2m} \hbar$$

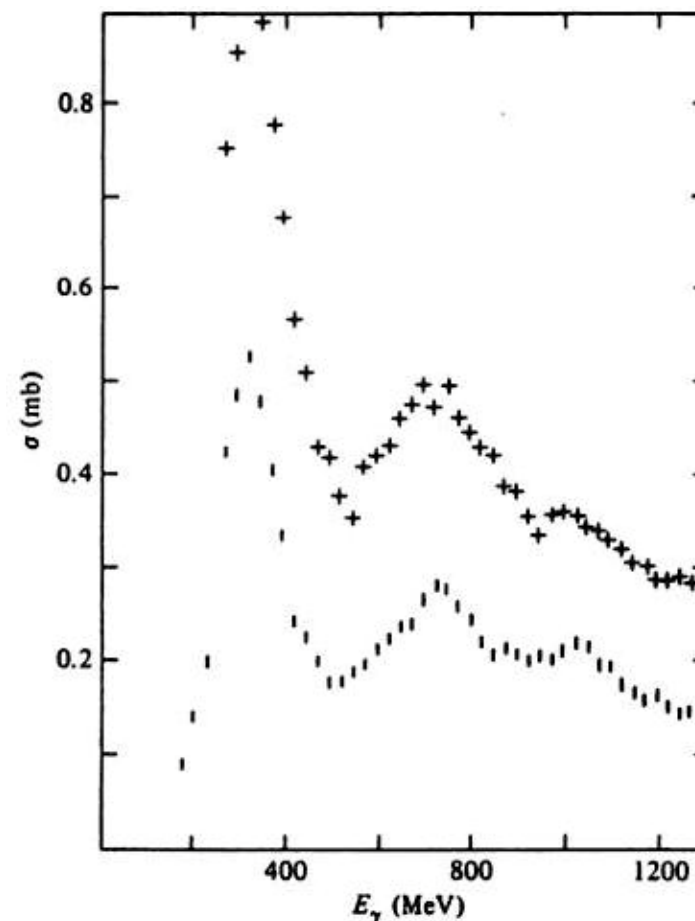
και έχει τιμή: $\mu_B = 5,79 \cdot 10^{-5} \text{ eV/Tesla}$

Η εσωτερική δομή από πειράματα σκέδασης

Η εσωτερική δομή προκύπτει από πειράματα σκέδασης (π.χ. ενεργειακών φωτονίων).

Όπως και στα άτομα, συμβαίνει απορρόφηση φωτονίων συγκεκριμένων ενεργειών και συνεπάγεται **διέγερση των νουκλεονίων**. Πρώτη διεγερμένη κατάσταση στα 294 MeV και σχηματισμός της **κατάστασης Δ^+** (συντονισμός = resonance), με μάζα $938+294 = 1232$ MeV και spin 3/2.

Οι **συντονισμοί Δ** διασπώνται πολύ γρήγορα ($\tau \approx 10^{-24}$ sec), ένα χαρακτηριστικό των διασπάσεων μέσω ισχυρών αλληλεπιδράσεων.



Ολική ενεργός διατομή φωτοπαραγωγής πιονίων από σκέδαση γάμμα σε πρωτόνια (κάτω) και δευτέρια (πάνω). Στην ενέργεια 294 MeV παρατηρείται απότομη αύξηση του σ , λόγω του σχηματισμού Δ^+ (1232).

Περισσότερα για τα βαρυόνια Δέλτα

Τα βαρυόνια **Δέλτα** είναι τα Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^- , όλα με την ίδια μάζα.

Είναι φερμιόνια και αποτελούν μια τετράδα του **ισοσπίν** με τιμή $I=3/2$ και πολλαπλότητα $2 \cdot I + 1 = 4$

Αποτελούνται, όπως και τα p και n , μόνο από τα κουάρκ u και d .

Η σύστασή τους είναι κατά σειρά: uuu , uud , udd , ddd .

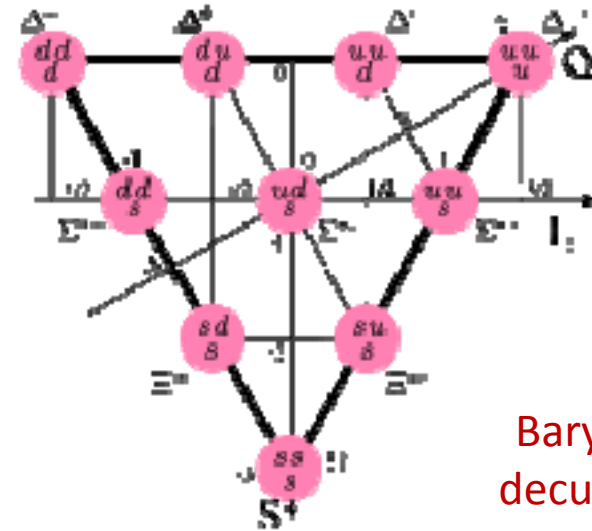
Βαρυόνια και βαρυονικός αριθμός:

Τα βαρυόνια αποτελούνται από 3 κουάρκ. Υπάρχει ο «βαρυονικός αριθμός», ο οποίος έχει τιμή $B = 1/3$ για τα κουάρκ και $B = -1/3$ για τα αντικουάρκ.

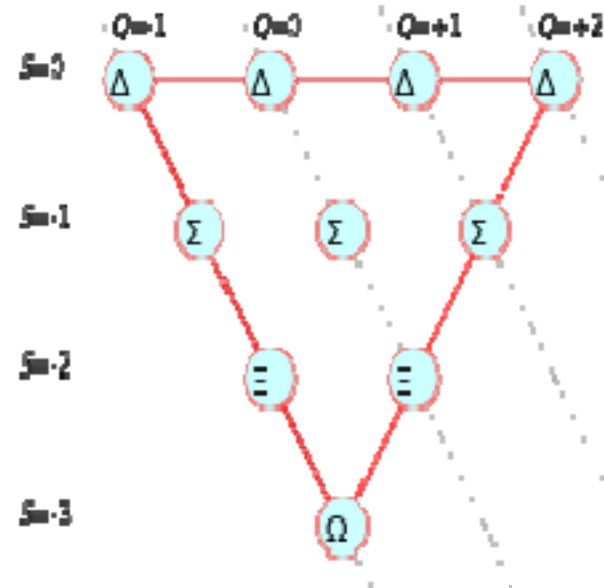
Άρα, τα βαρυόνια αφού είναι *triquarks* έχουν βαρυονικό αριθμό $B = 1/3 + 1/3 + 1/3 = 1$ και τα αντιβαρυόνια έχουν $B = -1$.

s-κουάρκ και παραδοξότητα

Αν ένα από τα 3 κουάρκ είναι το **strange** (παράδοξο), ο συνδυασμός των τριών κουάρκ u, d, s , δίνει τα «παράδοξα βαρυόνια» με **αριθμό παραδοξότητας 1** (strangeness).



Τα βαρυόνια με σπιν $3/2$ σχηματίζουν την «δεκαπλότητα των βαρυονίων» (baryon decuplet). Τα 6 από αυτά που περιέχουν **s-κουάρκ** λέγονται «**υπερόνια**» (hyperons).



Lists of baryons

These lists detail all known and predicted baryons in total angular momentum $J = \frac{1}{2}$ and $J = \frac{3}{2}$ configurations with positive parity.

- Baryons composed of one type of quark (uuu, ddd, ...) can exist in $J = \frac{3}{2}$ configuration, but $J = \frac{1}{2}$ is forbidden by the [Pauli exclusion principle](#).
- Baryons composed of two types of quarks (uud, uus, ...) can exist in both $J = \frac{1}{2}$ and $J = \frac{3}{2}$ configurations
- Baryons composed of three types of quarks (uds, udc, ...) can exist in both $J = \frac{1}{2}$ and $J = \frac{3}{2}$ configurations. Two $J = \frac{1}{2}$ configurations are possible for these baryons.

The symbols encountered in these lists are: I ([isospin](#)), J ([total angular momentum](#)), P ([parity](#)), u ([up quark](#)), d ([down quark](#)), s ([strange quark](#)), c ([charm quark](#)), b ([bottom quark](#)), Q ([charge](#)), B ([baryon number](#)), S ([strangeness](#)), C ([charm](#)), B' ([bottomness](#)), as well as a wide array of subatomic particles ([hover for name](#)). (See the [baryon](#) article for a detailed explanation of these symbols.)

Antiparticles are not listed in the tables; however, they simply would have all quarks changed to antiquarks (and antiquarks changed to quarks), and Q , B , S , C , B' , would be of opposite signs. Particles with † next to their names have been predicted by the [Standard Model](#) but not yet observed. Values in [red](#) have not been firmly established by experiments, but are predicted by the [quark model](#) and are consistent with the measurements

$J^P = \frac{1}{2}^+$ baryons

Particle name	Symbol $\blacklozenge$	Quark content	Rest mass (MeV/c ²) $\blacklozenge$	I $\blacklozenge$	J_P $\blacklozenge$	Q (e) $\blacklozenge$	S $\blacklozenge$	C $\blacklozenge$	B' $\blacklozenge$	Mean lifetime (s) $\blacklozenge$	Commonly decays to
nucleon/proton ^[7]	$p / p^+ / N^+$	uud	938.272046 $\pm$ 0.000021 ^[a]	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	0	0	Stable ^[b]	Unobserved
nucleon/neutron ^[8]	$n / n^0 / N^0$	udd	939.565379 $\pm$ 0.000021 ^[a]	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}^+$	0	0	0	0	$8.800 \pm 0.009 \times 10^{-2}$ ^[c]	$p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
Lambda ^[9]	Λ^0	uds	1,115.683 $\pm$ 0.006	0	$\frac{1}{2}^+$	0	−1	0	0	$2.632 \pm 0.020 \times 10^{-10}$	$p^+ + \pi^-$ or $n^0 + \pi^0$
charmed Lambda ^[10]	Λ_c^+	udc	2,286.46 $\pm$ 0.14	0	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	+1	0	$2.00 \pm 0.06 \times 10^{-13}$	See Λ_c^+ decay modes
bottom Lambda ^[11]	Λ_b^0	udb	5,619.4 $\pm$ 0.6	0	$\frac{1}{2}^+$	0	0	0	−1	$1.429 \pm 0.024 \times 10^{-12}$	See Λ_b^0 decay modes
Sigma ^[12]	Σ^+	uus	1,189.37 $\pm$ 0.07	1	$\frac{1}{2}^+$	+1	−1	0	0	$8.018 \pm 0.026 \times 10^{-11}$	$p^+ + \pi^0$ or $n^0 + \pi^+$
Sigma ^[13]	Σ^0	uds	1,192.642 $\pm$ 0.024	1	$\frac{1}{2}^+$	0	−1	0	0	$7.4 \pm 0.7 \times 10^{-20}$	$\Lambda^0 + \gamma$
Sigma ^[14]	Σ^-	dds	1,197.449 $\pm$ 0.030	1	$\frac{1}{2}^+$	−1	−1	0	0	$1.479 \pm 0.011 \times 10^{-10}$	$n^0 + \pi^-$
charmed Sigma ^[15]	Σ_c^{++}	uuc	2,453.98 $\pm$ 0.16	1	$\frac{1}{2}^+$	+2	0	+1	0	$2.91 \pm 0.36 \times 10^{-22}$ ^[d]	$\Lambda_c^+ + \pi^+$
charmed Sigma ^[15]	Σ_c^+	udc	2,452.9 $\pm$ 0.4	1	$\frac{1}{2}^+$	+1	0	+1	0	$>1.4 \times 10^{-22}$ ^[d]	$\Lambda_c^+ + \pi^0$
charmed Sigma ^[15]	Σ_c^0	ddc	2,453.74 $\pm$ 0.16	1	$\frac{1}{2}^+$	0	0	+1	0	$3.0 \pm 0.4 \times 10^{-22}$ ^[d]	$\Lambda_c^+ + \pi^-$

$J^P = \frac{3}{2}^+$ baryons

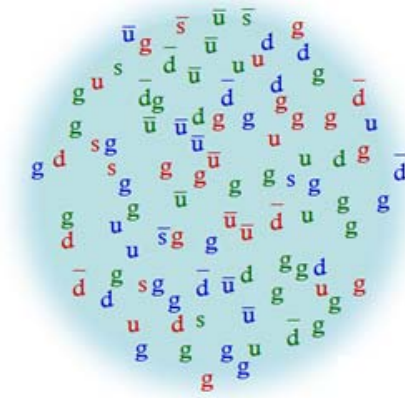
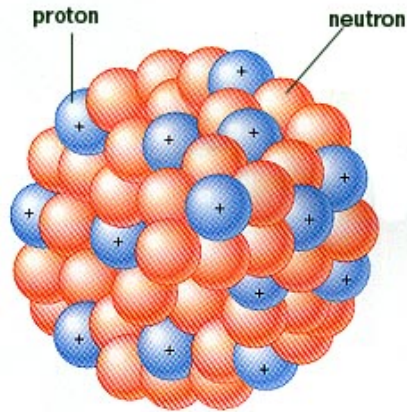
Particle name	Symbol $\blacklozenge$	Quark content	Rest mass (MeV/c ²) $\blacklozenge$	I $\blacklozenge$	J^P $\blacklozenge$	Q (e) $\blacklozenge$	S $\blacklozenge$	C $\blacklozenge$	B^* $\blacklozenge$	Mean lifetime (s) $\blacklozenge$	Commonly decays to
Delta ^[27]	$\Delta^{++}(1232)$	uuu	$1,232 \pm 1$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}^+$	+2	0	0	0	$5.58 \pm 0.09 \times 10^{-24}^{[h]}$	$p^+ + \pi^+$
Delta ^[27]	$\Delta^+(1232)$	uud	$1,232 \pm 1$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}^+$	+1	0	0	0	$5.58 \pm 0.09 \times 10^{-24}^{[h]}$	$\pi^+ + n^0$ or $\pi^0 + p^+$
Delta ^[27]	$\Delta^0(1232)$	udd	$1,232 \pm 1$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}^+$	0	0	0	0	$5.58 \pm 0.09 \times 10^{-24}^{[h]}$	$\pi^0 + n^0$ or $\pi^- + p^+$
Delta ^[27]	$\Delta^-(1232)$	ddd	$1,232 \pm 1$	$\frac{3}{2}$	$\frac{3}{2}^+$	-1	0	0	0	$5.58 \pm 0.09 \times 10^{-24}^{[h]}$	$\pi^- + n^0$
Sigma ^[28]	$\Sigma^{*+}(1385)$	uus	$1,382.8 \pm 0.4$	1	$\frac{3}{2}^+$	+1	-1	0	0	$1.84 \pm 0.04 \times 10^{-23}^{[h]}$	$\Lambda^0 + \pi^+$ or $\Sigma^+ + \pi^0$ or $\Sigma^0 + \pi^+$
Sigma ^[28]	$\Sigma^{*0}(1385)$	uds	$1,383.7 \pm 1.0$	1	$\frac{3}{2}^+$	0	-1	0	0	$1.8 \pm 0.3 \times 10^{-23}^{[h]}$	$\Lambda^0 + \pi^0$ or $\Sigma^+ + \pi^-$ or $\Sigma^0 + \pi^0$
Sigma ^[28]	$\Sigma^{*-}(1385)$	dds	$1,387.2 \pm 0.5$	1	$\frac{3}{2}^+$	-1	-1	0	0	$1.67 \pm 0.09 \times 10^{-23}^{[h]}$	$\Lambda^0 + \pi^-$ or $\Sigma^0 + \pi^-$ or $\Sigma^- + \pi^0$ or
charmed Sigma ^[29]	$\Sigma_c^{*++}(2520)$	uuc	$2,518.4 \pm 0.6$	1	$\frac{3}{2}^+$	+2	0	+1	0	$4.4 \pm 0.6 \times 10^{-23}^{[h]}$	$\Lambda_c^+ + \pi^+$
charmed	$\Sigma_c^{*+}(2520)$	uds	$2,517.5 \pm 2.3$	1	$\frac{3}{2}^+$	+1	0	+1	0	$5.2 \pm 0.4 \times 10^{-23}^{[h]}$	$\Lambda_c^+ + \pi^0$

Baryon resonance particles

Nucleons			Δ particles			Λ particles			Σ particles			Ξ and Ω particles			Charmed particles			Bottomed particles		
p	$1/2^+$	****	$\Delta(1232)$	$3/2^+$	****	Λ	$1/2^+$	****	Σ^+	$1/2^+$	****	Ξ^0	$1/2^+$	****	Λ_c^+	$1/2^+$	****	Λ_b^0	$1/2^+$	***
n	$1/2^+$	****	$\Delta(1600)$	$3/2^+$	***	$\Lambda(1405)$	$1/2^-$	****	Σ^0	$1/2^+$	****	Ξ^-	$1/2^+$	****	$\Lambda_c(2595)^+$	$1/2^-$	***	$\Lambda_b(5912)^0$	$1/2^-$	***
N(1440)	$1/2^+$	****	$\Delta(1620)$	$1/2^-$	****	$\Lambda(1520)$	$3/2^-$	****	Σ^-	$1/2^+$	****	$\Xi(1530)$	$3/2^+$	****	$\Lambda_c(2625)^+$	$3/2^-$	***	$\Lambda_b(5920)^0$	$3/2^-$	***
N(1520)	$3/2^-$	****	$\Delta(1700)$	$3/2^-$	****	$\Lambda(1600)$	$1/2^+$	***	$\Sigma(1385)$	$3/2^+$	****	$\Xi(1620)$		*	$\Lambda_c(2765)^+$		*	Σ_b	$1/2^+$	***
N(1535)	$1/2^-$	****	$\Delta(1750)$	$1/2^+$	*	$\Lambda(1670)$	$1/2^-$	****	$\Sigma(1480)$		*	$\Xi(1690)$		***	$\Lambda_c(2880)^+$	$5/2^+$	***	Σ_b^*	$3/2^+$	***
N(1650)	$1/2^-$	****	$\Delta(1900)$	$1/2^-$	**	$\Lambda(1690)$	$3/2^-$	****	$\Sigma(1560)$		**	$\Xi(1820)$	$3/2^-$	***	$\Lambda_c(2940)^+$		***	Ξ_b^0, Ξ_b^-	$1/2^+$	***
N(1675)	$5/2^-$	****	$\Delta(1905)$	$5/2^+$	****	$\Lambda(1800)$	$1/2^-$	***	$\Sigma(1580)$	$3/2^-$	*	$\Xi(1950)$		***				$\Xi_b(5945)^0$	$3/2^+$	***
N(1680)	$5/2^+$	****	$\Delta(1910)$	$1/2^+$	****	$\Lambda(1810)$	$1/2^+$	***	$\Sigma(1620)$	$1/2^-$	*	$\Xi(2030)$	$\geq \frac{5}{2}?$	***	$\Sigma_c(2455)$	$1/2^+$	****	Ω_b^-	$1/2^+$	***
N(1685)		*	$\Delta(1920)$	$3/2^+$	***	$\Lambda(1820)$	$5/2^+$	****	$\Sigma(1660)$	$1/2^+$	***	$\Xi(2120)$		*	$\Sigma_c(2520)$	$3/2^+$	***			
N(1700)	$3/2^-$	***	$\Delta(1930)$	$5/2^-$	***	$\Lambda(1830)$	$5/2^-$	****	$\Sigma(1670)$	$3/2^-$	****	$\Xi(2250)$		**	$\Sigma_c(2800)$		***			
N(1710)	$1/2^+$	***	$\Delta(1940)$	$3/2^-$	**	$\Lambda(1890)$	$3/2^+$	****	$\Sigma(1690)$		**	$\Xi(2370)$		**						
N(1720)	$3/2^+$	****	$\Delta(1950)$	$7/2^+$	****	$\Lambda(2000)$		*	$\Sigma(1750)$	$1/2^-$	***	$\Xi(2500)$		*	Ξ_c^+	$1/2^+$	***			
N(1860)	$5/2^+$	**	$\Delta(2000)$	$5/2^+$	**	$\Lambda(2020)$	$7/2^+$	*	$\Sigma(1770)$	$1/2^+$	*				Ξ_c^0	$1/2^+$	***			
N(1875)	$3/2^-$	***	$\Delta(2150)$	$1/2^-$	*	$\Lambda(2100)$	$7/2^-$	****	$\Sigma(1775)$	$5/2^-$	****	Ω^-	$3/2^+$	****	Ξ_c^+	$1/2^+$	***			
N(1880)	$1/2^+$	**	$\Delta(2200)$	$7/2^-$	*	$\Lambda(2110)$	$5/2^+$	***	$\Sigma(1840)$	$3/2^+$	*	$\Omega(2250)^-$		***	Ξ_c^0	$1/2^+$	***			
N(1895)	$1/2^-$	**	$\Delta(2300)$	$9/2^+$	**	$\Lambda(2325)$	$3/2^-$	*	$\Sigma(1880)$	$1/2^+$	**	$\Omega(2380)^-$		**	$\Xi_c(2645)$	$3/2^+$	***			
N(1900)	$3/2^+$	***	$\Delta(2350)$	$5/2^-$	*	$\Lambda(2350)$	$9/2^+$	***	$\Sigma(1915)$	$5/2^+$	****	$\Omega(2470)^-$		**	$\Xi_c(2790)$	$1/2^-$	***			
N(1990)	$7/2^+$	**	$\Delta(2390)$	$7/2^+$	*	$\Lambda(2585)$		**	$\Sigma(1940)$	$3/2^-$	***				$\Xi_c(2815)$	$3/2^-$	***			
N(2000)	$5/2^+$	**	$\Delta(2400)$	$9/2^-$	**				$\Sigma(2000)$	$1/2^-$	*				$\Xi_c(2930)$		*			
N(2040)	$3/2^+$	*	$\Delta(2420)$	$11/2^+$	****				$\Sigma(2030)$	$7/2^+$	****				$\Xi_c(2980)$		***			

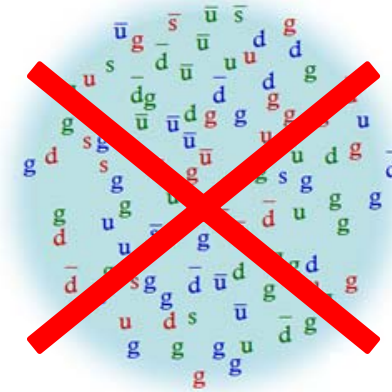
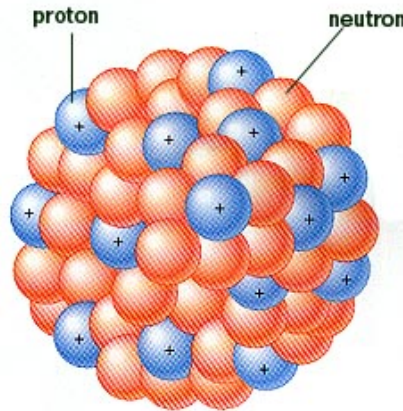
Αλληλεπίδραση νουκλεονίου-νουκλεονίου

Οι πυρήνες αποτελούνται
από νουκλεόνια ; ή από κουάρκ;



Αλληλεπίδραση νουκλεονίου-νουκλεονίου

Οι πυρήνες αποτελούνται
από νουκλεόνια ; ή από κουάρκ;

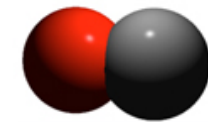


Απάντηση:

από νουκλεόνια, διότι οι ενέργειες (δυναμική, κινητική) των νουκλεονίων στον πυρήνα είναι πολύ μικρότερες από τις ενέργειες διέγερσης των κουάρκ στα νουκλεόνια.

Άρα, **στην μελέτη των πυρήνων θεωρούμε τις αλληλεπιδράσεις νουκλεονίου-νουκλεονίου (χαμηλές ενέργειες) και όχι των κουάρκ.**

Επιλέγουμε ένα κατάλληλο δυναμικό και επιλύουμε την εξίσωση Schrodinger για δύο αλληλεπιδρώντα νουκλεόνια. Η απλούστερη περίπτωση **δέσμιας κατάστασης νουκλεονίων** είναι αυτή του **δευτερονίου** (πυρήνα του δευτερίου).



deuteron

Δευτερόνιο

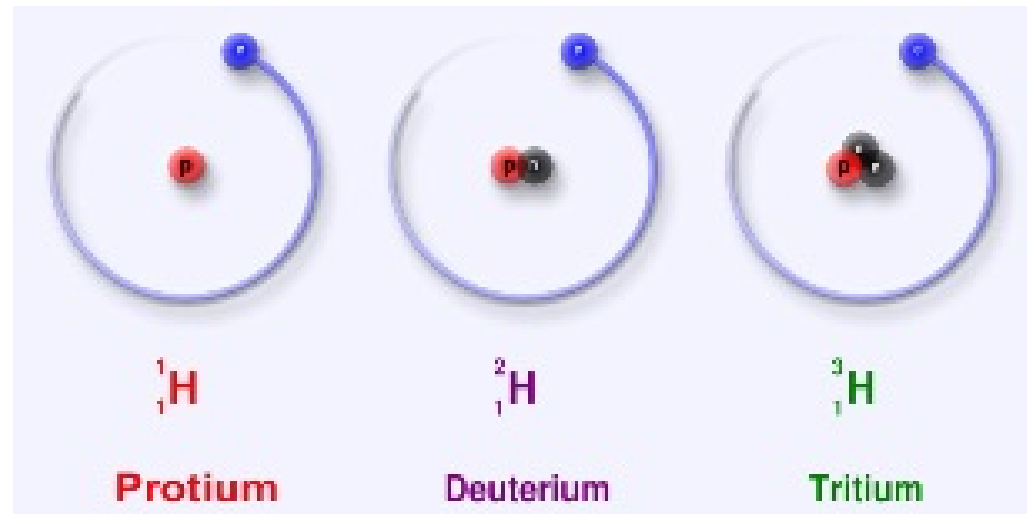
Το δευτερόνιο (deuteron) αποτελείται από ένα **πρωτόνιο** και ένα **νετρόνιο** και επομένως είναι το απλούστερο σύστημα, ο απλούστερος πυρήνας, όπου **δύο νουκλεόνια βρίσκονται σε δέσμια κατάσταση**.



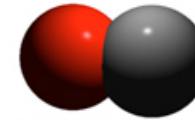
Το δευτερόνιο είναι ένα πυρηνικό σύστημα στο οποίο μπορούμε να εκτιμήσουμε **τις πυρηνικές δυνάμεις** με σχετικά απλές και άμεσες μετρήσεις.

Το δευτερόνιο είναι ο πυρήνας του ατόμου του δευτερίου ^2H .

Το δευτέριο ανιχνεύτηκε για πρώτη φορά το 1931 φασματοσκοπικά, από τον Harold Urey (Columbia University). Ο Urey δημιούργησε τα ονόματα **protium**, **deuterium** και **tritium** για τις 3 μορφές του **υδρογόνου**.



Δευτερόνιο



Η βασική κατάσταση του δευτερονίου (εξ'άλλου δεν υπάρχουν διεγερμένες επειδή είναι ένα ασθενώς δέσμιο σύστημα) χαρακτηρίζεται από τις εξής μετρούμενες ποσότητες:

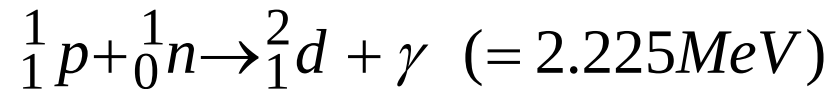
- Μάζα: $2.014102 \text{ amu} = 1875.6 \text{ MeV}$,
($1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931 \text{ MeV}/c^2$)
- Ηλεκτρικό φορτίο: $+1e$
- Ακτίνα (rms) κατανομής ηλ. φορτίου: 2.1 fm
- Ενέργεια σύνδεσης (BE): $2.225 \pm 0.002 \text{ MeV}$
- Πυρηνική στροφορμή και ομοτιμία (parity): $J^\pi = 1^+$
- Μαγνητική διπολική ροπή: $\mu_d = +0.857 \mu_N$
- Ηλεκτρική τετραπολική ροπή: 0.286 fm^2

Η στροφορμή του δευτερονίου είναι το διανυσματικό άθροισμα των spin των δύο νουκλεονίων ($\frac{1}{2}$ και $\frac{1}{2}$) και της τροχιακής στροφορμής τους.

Λόγω της άρτιας πάριτυ, η τροχιακή στροφορμή θα έχει άρτια τιμή, οπότε υπάρχουν δύο μόνο δυνατές τιμές της που να μπορούν να δώσουν ολική στροφορμή στο δευτερόνιο ίση με 1. Αυτές είναι η $L=0$ (σφαιρικά συμμετρική, s-state) που είναι η βασική, και η $L=2$ (d-state).

Σχηματισμός δευτερονίου και ενέργεια σύνδεσής του

- Το δευτερόνιο μπορεί να σχηματισθεί με αντίδραση αρπαγής ενός θερμικού νετρονίου από ελεύθερο πρωτόνιο σύμφωνα με την αντίδραση:



- Η αντίδραση είναι εξώθερμη και έχει σαφές σήμα πραγματοποίησής της την σύγχρονη εκπομπή ενός φωτονίου ακτίνων-γ ενέργειας 2.225 MeV.
- Η ενεργός διατομή σ της αντίδρασης είναι μεγάλη (332 mbarns) και επομένως ο σχηματισμός των δευτερονίων είναι έντονος και εύκολα παρατηρήσιμος μέσω της ανίχνευσης των ακτίνων-γ των 2.225 MeV με σύστημα φασματοσκοπίας γάμμα.
- Επειδή τα νετρόνια είναι θερμικά, σχεδόν μηδενικής κινητικής ενέργειας ($E_n = 0.025 \text{ eV}$), η ενέργεια των φωτονίων των ακτίνων γάμμα της αντίδρασης είναι επίσης η **ενέργεια σύνδεσης BE του δευτερονίου**:

$$BE({}_1^2d) = (m_p + m_n - m_d) \cdot c^2$$

Ενέργεια σύνδεσης (Binding Energy)

Η ολική ενέργεια (μάζα) ενός δέσμιου συστήματος είναι λιγότερη από το άθροισμα των ενεργειών (μαζών) των συστατικών του ξεχωριστά.

Παράδειγμα: deuteron ${}^2\text{D}$ (1 proton + 1 neutron)

$$m_p = 1.007825 \text{ u}$$

$$m_n = 1.008665 \text{ u}$$

$$m_{p+n} = 2.016490 \text{ u}$$

$$m_D = 2.014102 \text{ u}$$

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Το δευτερόνιο είναι 0.002338 u ελαφρύτερο από το άθροισμα των μαζών των p και n . Αυτή η ποσότητα λέγεται **ενέργεια σύνδεσης (Binding Energy)** και είναι η ενέργεια που απαιτείται για να διαλυθεί ο πυρήνας στα εξ'ών συνετέθη (2.225 MeV).