ΕΙΣΑΓΩΓΗ
ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ
& ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ

Θεόδωρος Μερτζιμέκης

tmertzi@phys.uoa.gr

ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ - Ι

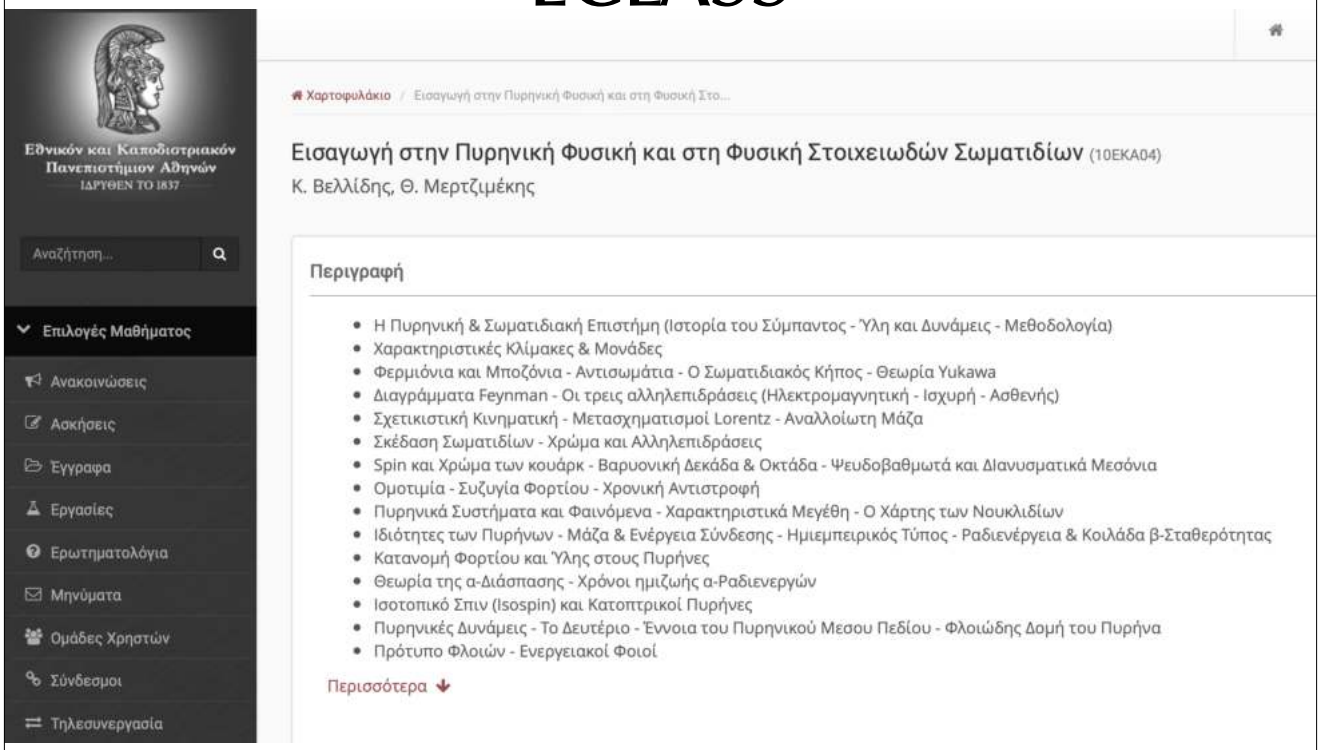
Κ. Βελλίδης - Θ. Μερτζιμέκης

ώρες διδασκαλίας

Δευτέρα 10’00-13’00

Τρίτη 12’00-14’00

ECLASS



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - Ι

- Introductory Nuclear Physics

  Kenneth Krane
- Basic Ideas & Concepts in Nuclear Physics

  Kris Heyde
- Introductory Nuclear Physics

  S.S.M. Wong

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - II

- Nuclear Physics in a Nutshell

  C. Bertulani
- Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική

  W.N. Cottingham & D.A. Greenwood
- Fundamentals of Nuclear Physics

  N.A. Jelley

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - III

- National Nuclear Data Center

  `http://www.nndc.bnl.gov`
- nucleide.org (Laraweb)

  `http://www.nucleide.org/Laraweb`
- IAEA Table of Nuclides

  `http://www-nds.iaea.org/relnsd/vchart/`

ONLINE RESOURCES

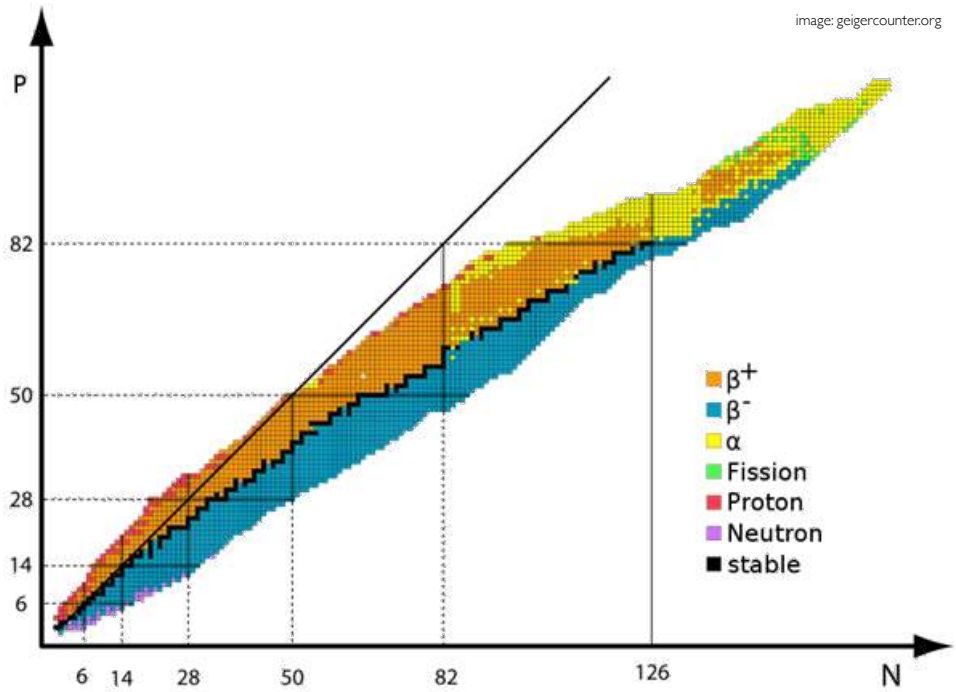
- NuDAT2
- Magnetic Moments
- Adopted B(E2) values
- catkin (XLS for rel. kinematics by Prof. W. Catford)
- LBL Isotopes Project
- ENSDF
- EXFOR
- IBANDL
- XUNDL
- NIST – Proton Stopping Powers in Materials
- NIST – Electron Stopping Powers in Materials
- NIST – Alpha Stopping Powers in Materials
- Stopping Powers (MSTAR)
- Radiation sources
- Q-Value calculator
- X-ray chart
- Chemistry Reference

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

- Εισαγωγικές έννοιες Πυρηνικής Φυσικής
- Εμπέδωση στα μαθήματα Κατεύθυνσης
- Βασική εστίαση στον πυρήνα και τα βασικά του συστατικά, πρωτόνια & νετρόνια

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ

- Διερεύνηση της πυρηνικής αλληλεπίδρασης
- Δομή πυρήνα & Αστάθεια
- Κβαντική περιγραφή & Πρότυπο φλοιών
- Πυρηνική Αστροφυσική
- Εφαρμογές



ΙΣΟΤΟΠΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ

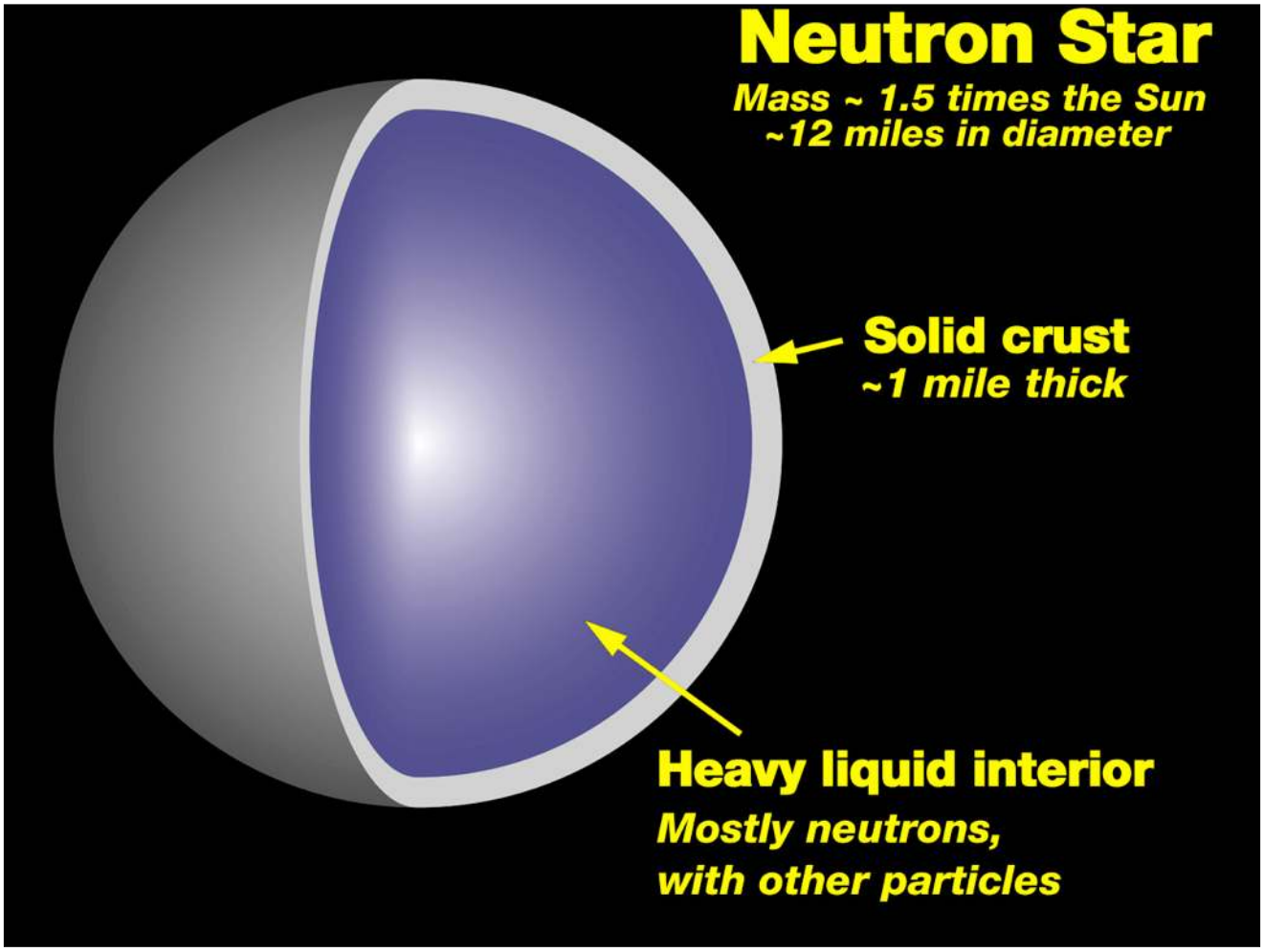
το πεδίο έρευνας της Πυρηνικής Φυσικής

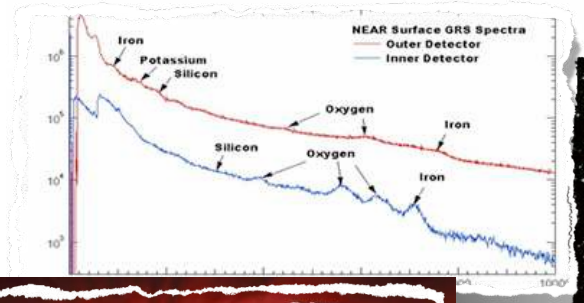
ΕΞΕΤΑΣΗ-ΒΑΘΜΟΛΟΓΙΑ

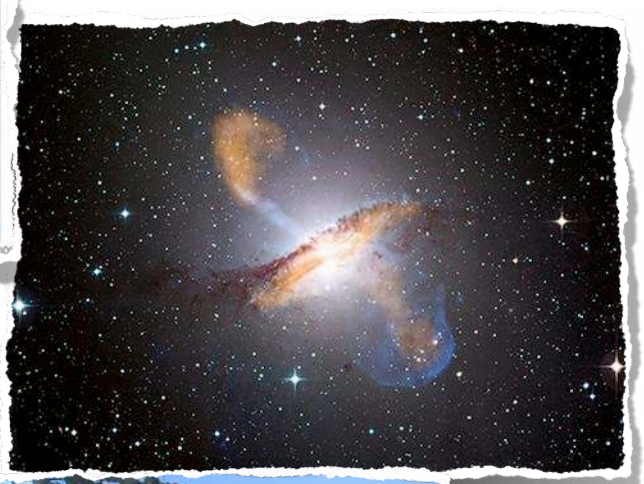
- Μία τελική εξέταση
- ΔΕΝ υπάρχει πρόοδος
- ΔΕΝ υπάρχουν εργασίες ή ασκήσεις
- 50% Πυρηνική + 50% Στοιχειώδη

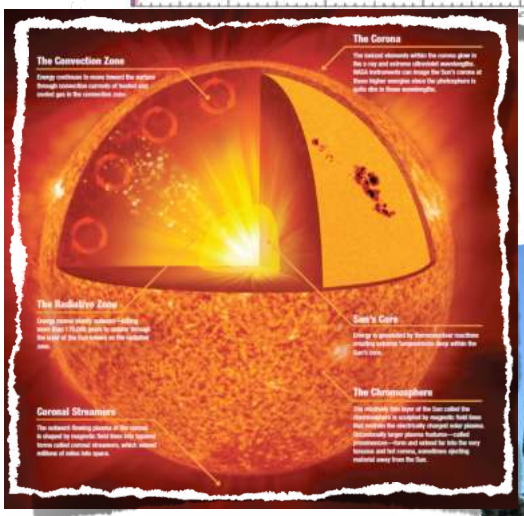
ΣΗΜΑΣΙΑ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ

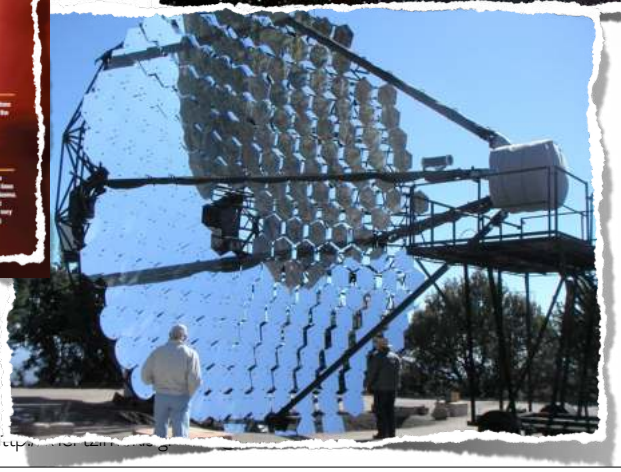
- Καλύπτει μια ευρεία κλίμακα διαστάσεων
- Πρωτογενές αντικείμενο. Σήμερα υπάρχουν πολλά αναπάντητα ερωτήματα
- Τεράστιας σημασίας για την Αστροφυσική
- Πληθώρα καθημερινών εφαρμογών, ιδιαίτερη βαρύτητα στην Ενέργεια και την Ιατρική

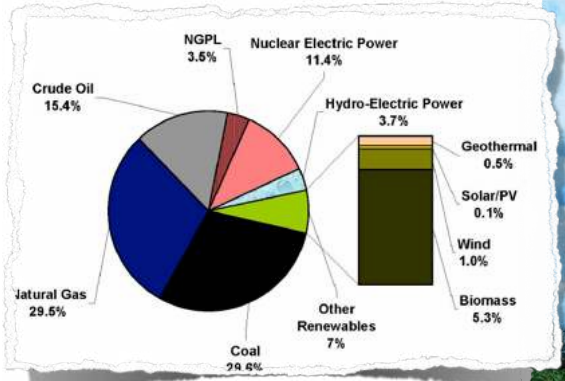

Neutron Star
Mass ~ 1.5 times the Sun
~12 miles in diameter
Solid crust
~1 mile thick
Heavy liquid interior
Mostly neutrons,
with other particles

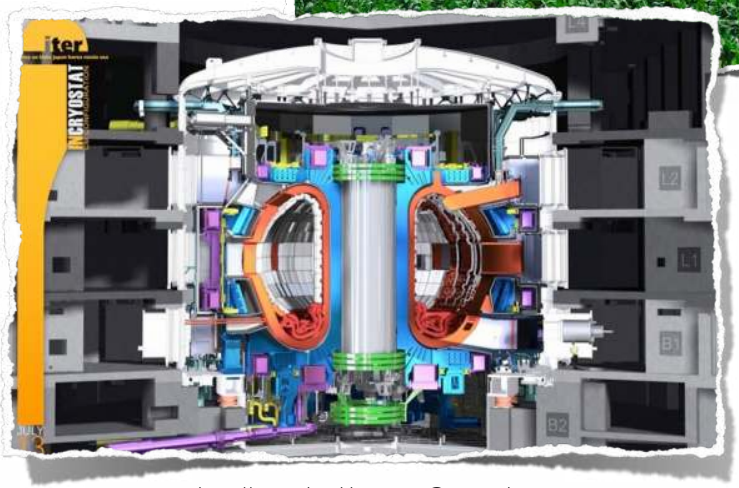

NEAR Surface GRS Spectra
Outer Detector
Inner Detector
Iron
Potassium
Silicon
Oxygen
Iron
Silicon
Oxygen
Iron

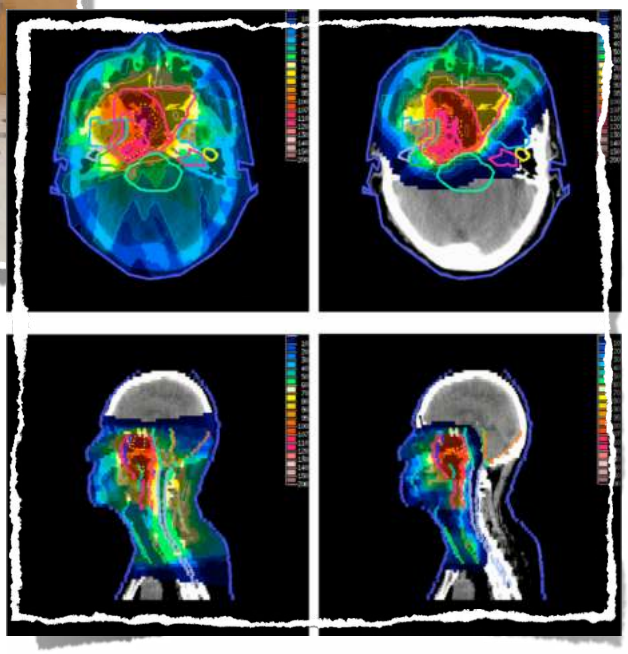



The Convection Zone
The Corona
The Radiative Zone
Sun's Core
Coronal Streamers
The Chromosphere




NGPL
3.5%
Nuclear Electric Power
11.4%
Crude Oil
15.4%
Hydro-Electric Power
3.7%
Geothermal
0.5%
Solar/PV
0.1%
Wind
1.0%
Natural Gas
29.5%
Other
Renewables
7%
Biomass
5.3%
Coal


iter
INCRYDSIA!



ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Ατομικοί φιλόσοφοι

Ραδιενέργεια

Rutherford

πρωτόνια-νετρόνια-πιόνια

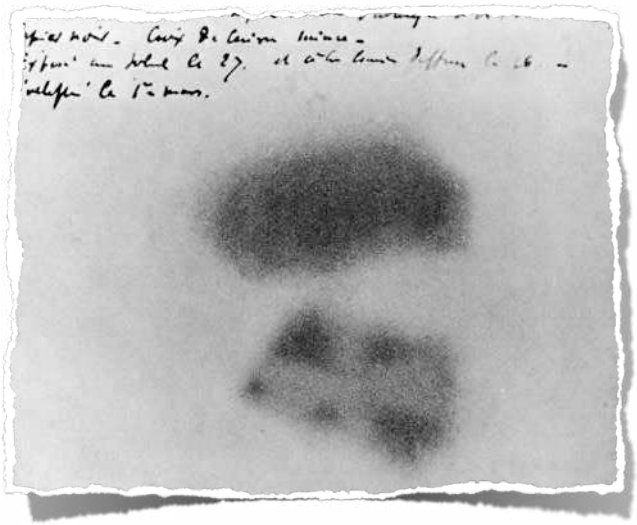
Πρότυπο των φλοιών

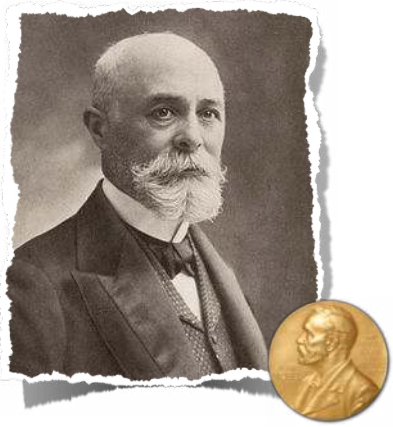
Ραδιενεργές δέσμες
Νέα φαινόμενα

Επόμενος σταθμός

ΕΝΑΣ ΠΑΛΙΟΣ ΓΝΩΡΙΜΟΣ

1896 - ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ





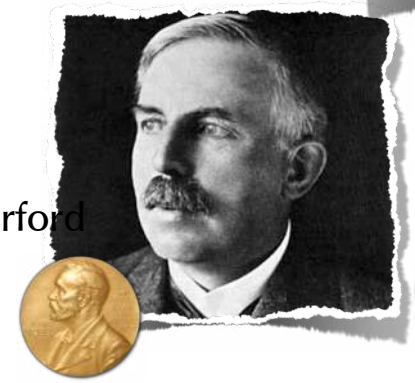
Henri Becquerel
Nobel 1903

ΟΙ ΠΡΩΤΟΙ ΑΛΧΗΜΙΣΤΕΣ

Curie

Wu

Goeppert-Mayer



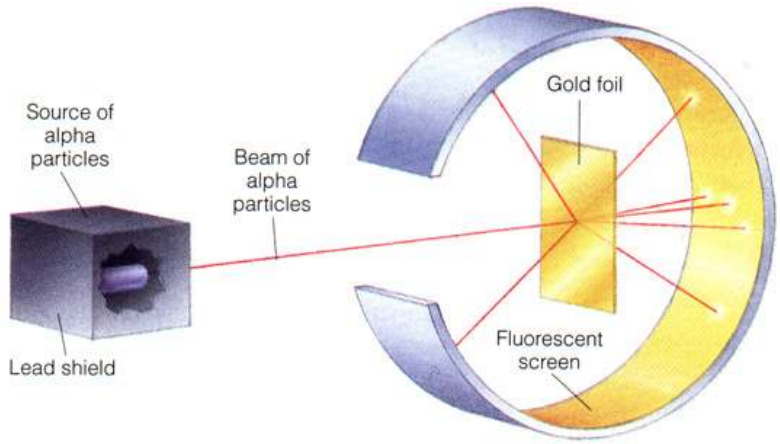
Rutherford

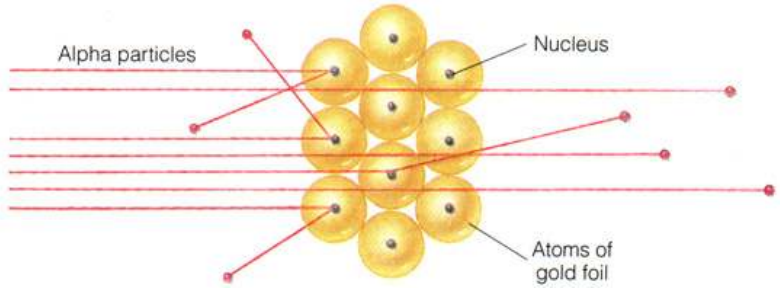
Bohr

Fermi

Η ΥΠΕΡΒΑΣΗ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

- Ο Rutherford σπάει το φράγμα του ατόμου
- Σωμάτια α (πυρήνες ηλίου) πάνω σε φύλλα χρυσού οπισθοσκεδάζονται ισχυρά
- Η κατανομή θετικών/αρνητικών φορτίων δεν είναι -συνεπώς- ομοιόμορφη





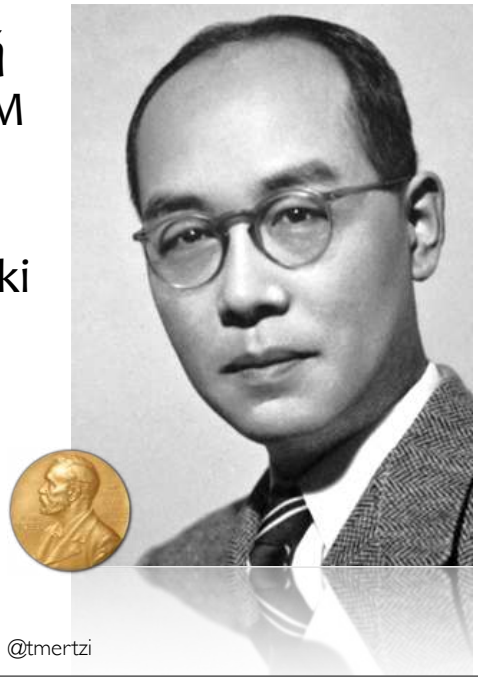
ΜΙΑ ΝΕΑ ΕΠΟΧΗ

- Το θετικό φορτίο δεν είναι ισοκατανεμημένο. Υπάρχουν ισχυρά κέντρα σκέδασης με θετικό φορτίο => πυρήνες
- Οι πυρήνες έχουν το 99.5% της μάζας του ατόμου και 1/100'000 του μεγέθους
- Ο ατομικός χώρος είναι σχεδόν κενός

ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ

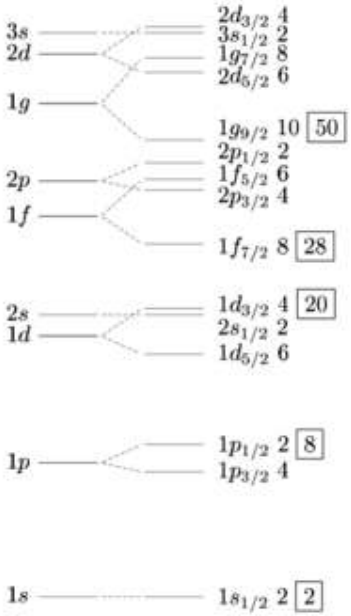
- Ο πυρήνας είναι σταθερός, επομένως υπάρχει μια ελκτική δύναμη ανταγωνιστική της Η/Μ
- Η έννοια του πεδίου στον πυρήνα εισάγεται από το Hideki Yukawa με φορέα της αλληλεπίδρασης το πιόνιο
- Το πείραμα τον δικαιώνει

image: wikipedia

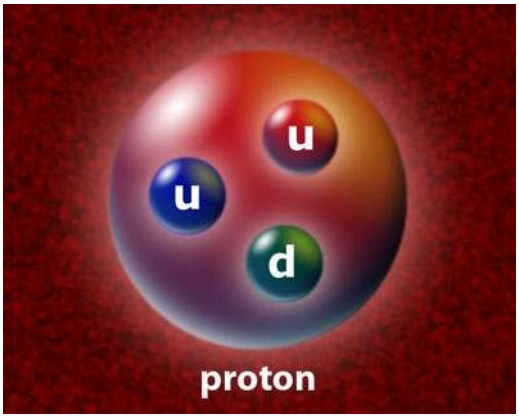


ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΤΩΝ ΦΛΟΙΩΝ

Maria Goeppert-Mayer
Nobel 1963



ΤΟ ΣΧΗΜΑ ΤΩΝ ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΩΝ

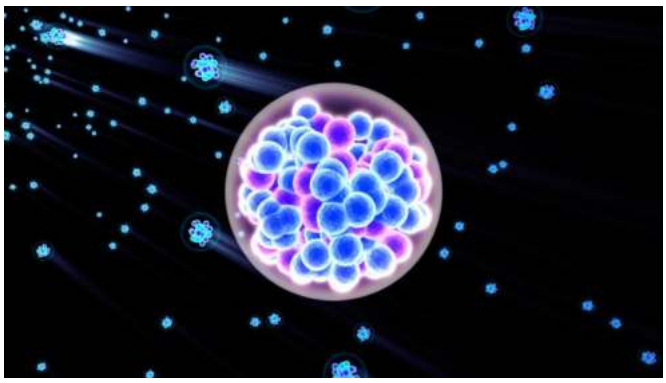


Βαθύτερα στον πυρήνα, τα πρωτόνια και τα νετρόνια εμφανίζουν τη δική τους δομή.

Αποτελούμενα από κουάρκ, τα νουκλεόνια εμφανίζουν κατανομή μάζας και φορτίου, παρεκκλίνοντας από το απόλυτα σφαιρικό σχήμα.

Το πόσο και γιατί είναι ενεργό πεδίο έρευνας της Πυρηνικής Φυσικής.

Ο ΔΡΟΜΟΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

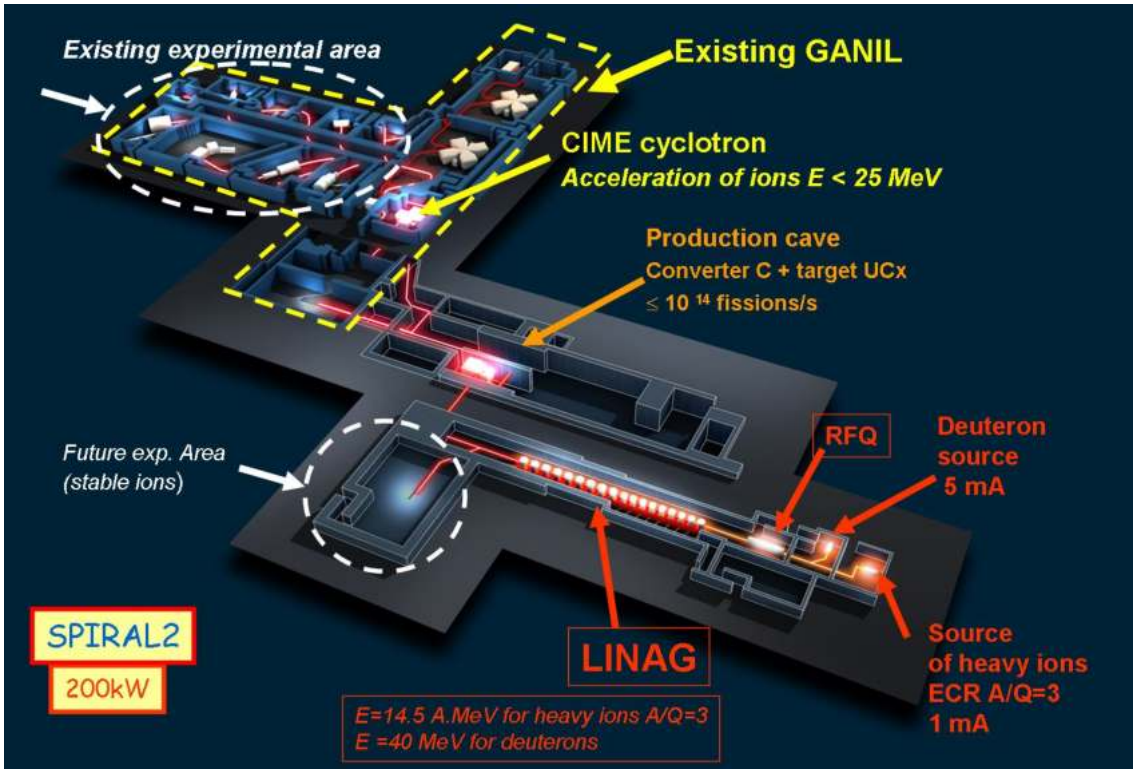


- Ελευση επιταχυντών νέας γενιάς με χρήση ασταθών δεσμών
- Επέκταση του ισοτοπικού πίνακα
- Νέα φαινόμενα, νέοι μαγικοί αριθμοί, νέες θεωρίες

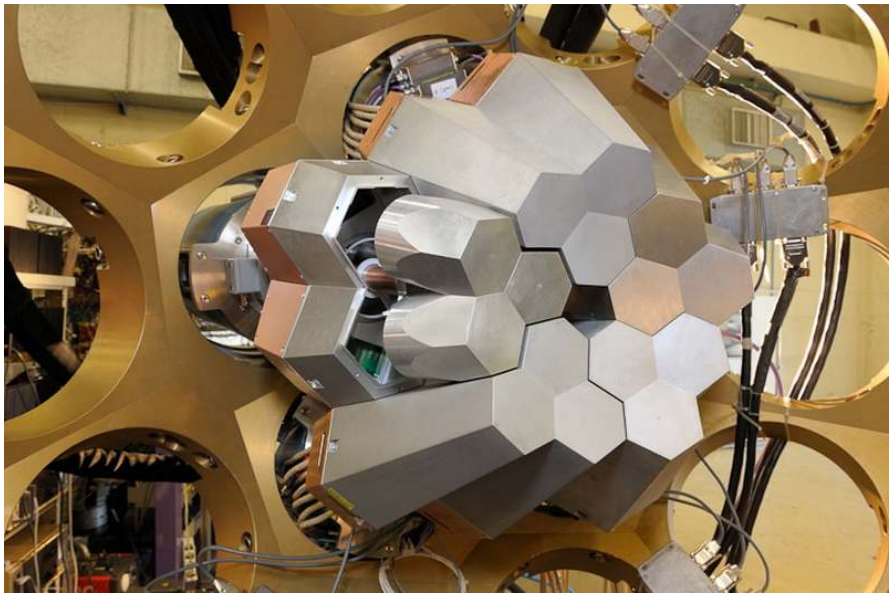
Εικόνα: GSI

FAIR @ GSI

Εικόνα: IRFU/CEA



SPIRAL2



AGATA

ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΗΣ TANDEM VAN DE GRAAFF ΕΚΕΦΕ "ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ"

ΠΡΩΤΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ: ΤΟ ΑΤΟΜΟ

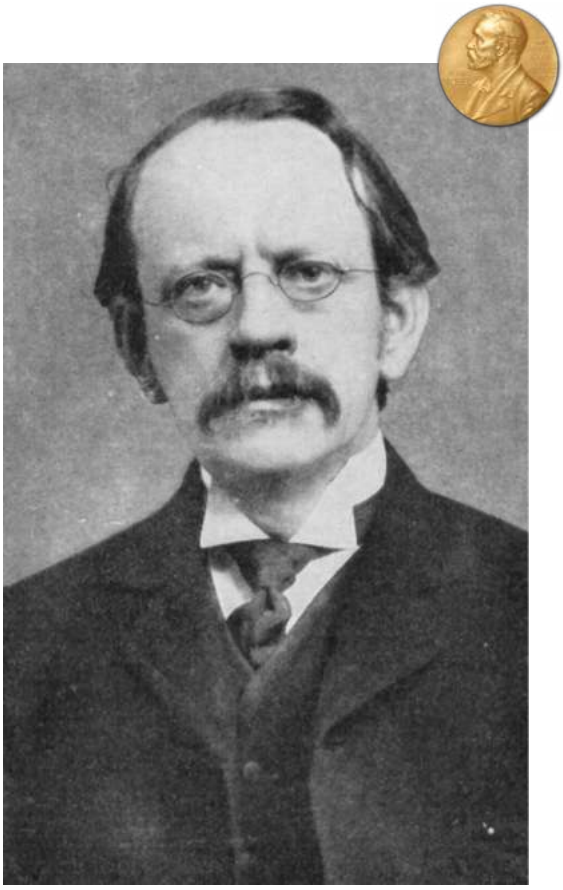
- Η θεώρηση των Ατομικών για τη δομή του κόσμου επανήλθε το 19ο αιώνα.
- Η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου άνοιξε το δρόμο για τη φυσική στοιχειωδών σωματιδίων
- Οι πρώτες ενδείξεις ήρθαν με την ανακάλυψη της ραδιενέργειας και των ακτίνων Χ
- Το ατομικό πρότυπο του Bohr έδωσε το θεωρητικό υπόβαθρο (κβαντική θεώρηση) για την εξήγηση του υποατομικού κόσμου

εικόνα: wikipedia

Wilhelm Roentgen (1845-1923)

Παρατηρεί την εκπομπή ακτινοβολίας στον καθοδικό σωλήνα.
Ανακάλυψη ακτίνων X

Nobel 1901



J.J. Thomson (1856-194)

Ανακάλυψε το ηλεκτρόνιο

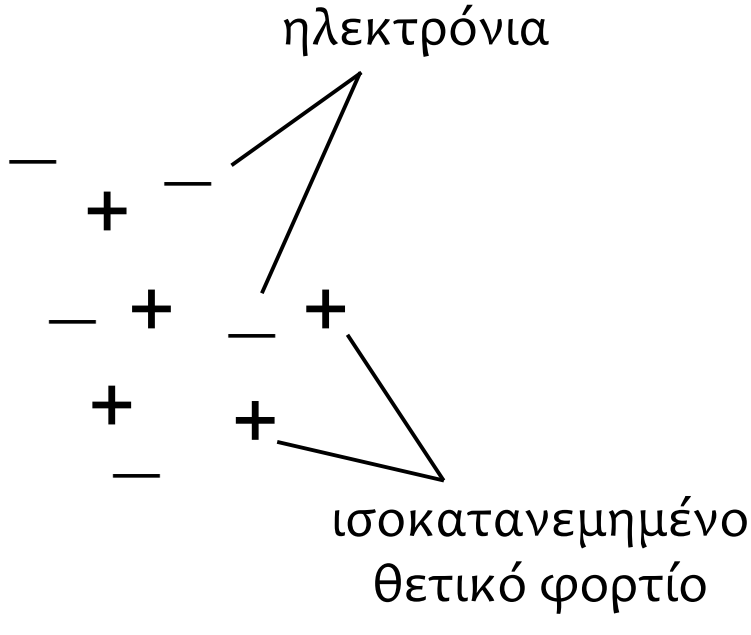
Ατομικό πρότυπο

Φασματογράφος μάζας

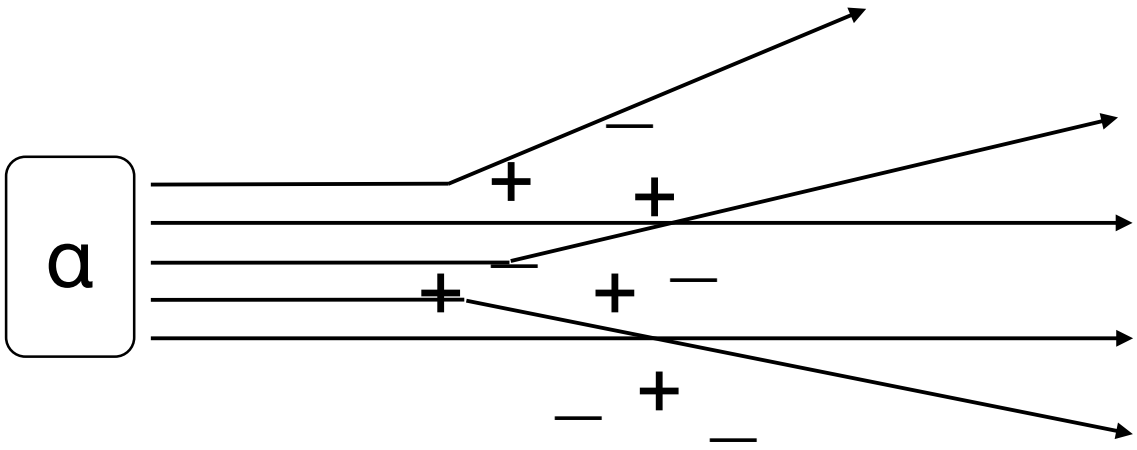
Nobel 1906

εικόνα: wikipedia

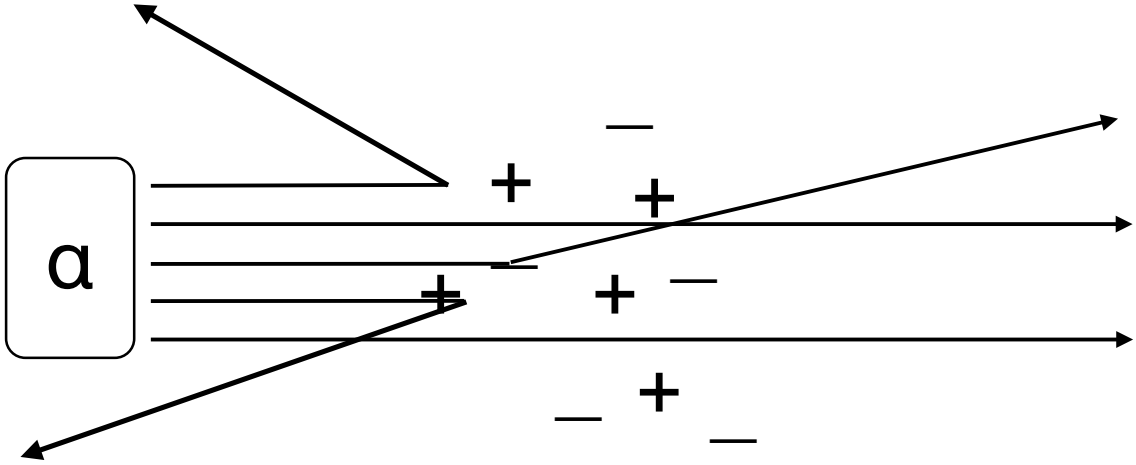
ΤΟ ΑΤΟΜΟ ΤΟΥ THOMSON



ΣΚΕΔΑΣΗ (ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ)



ΣΚΕΔΑΣΗ RUTHERFORD



ισχυρά
οπισθοσκεδαζόμενη

ΣΚΕΔΑΣΗ RUTHERFORD

- Η πειραματική παρατήρηση της ισχυρής οπισθοσκέδασης ήταν ισοδύναμη με κοσμογονία
- Ενας νέος κόσμος άνοιξε προς μελέτη
- Στο κέντρο του ενδιαφέροντος ένας άγνωστος:

Ο ΠΥΡΗΝΑΣ

ERNEST RUTHERFORD

εικόνα: wikipedia

"Ήταν σαν να έριξες ένα βλήμα 15 ιντσών σε ένα φύλλο χαρτιού και αυτό γύρισε και σε χτύπησε."

Ernest Rutherford
Nobel 1908

ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗ

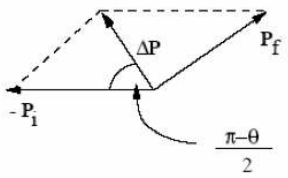
- Ο Rutherford υπολογίζει με αναλυτικό τρόπο την ενεργό διατομή σκέδασης
- Ο υπολογισμός του είναι ακριβής ακόμη και όταν παύει η κλασσική θεώρηση
- Σκέδαση από πεδίο Coulomb

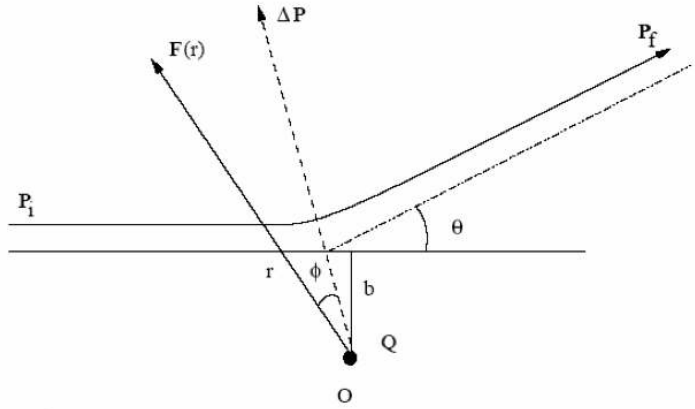
ΣΚΕΔΑΣΗ COULOMB

Αρχή Διατήρησης Ορμής

$$\triangle \vec{P} = \int \vec{F}(r)dt$$

αλλά





$$\frac{\Delta p}{\sin\theta} = \frac{p_2}{\sin \frac{1}{2}(\pi-\theta)} \longrightarrow |\triangle \vec{P}| = 2mv\sin(\theta/2)$$

Παράλληλη συνιστώσα F με ΔP

$$2mv\sin(\theta/2) = \int_0^\infty |\vec{F}(r)|\cos\phi\, dt$$

ΣΚΕΔΑΣΗ

Αρχή διατήρησης στροφορμής $mr^2\omega = mvb$ με $\omega = d\phi/dt$

και $$2mv\sin(\theta/2) = \int_{-(\pi-\theta)/2}^{+(\pi-\theta)/2} |\vec{F}(r)|\cos\phi\,\frac{dt}{d\phi}\,d\phi$$

$$\Rightarrow \quad 2mv^2 b\sin(\theta/2) = \int r^2|\vec{F}(r)|\cos\phi\, d\phi$$

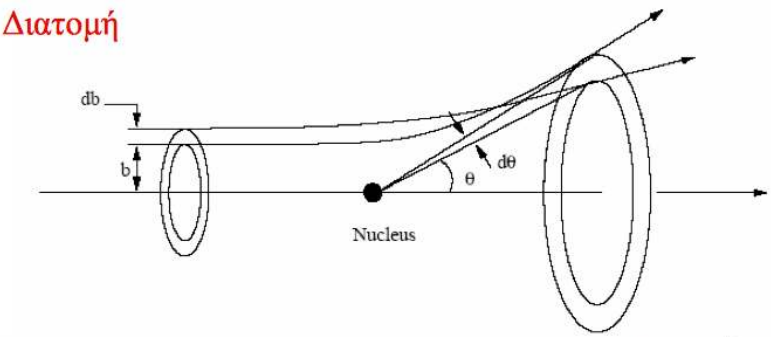
αλλά $$|\vec{F}(r)| = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \rightarrow r^2|\vec{F}(r)| = \frac{qQ}{4\pi\varepsilon_0}$$

οπότε $$b = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{qQ}{mv^2}\cot(\theta/2)$$

> q,Q → > γωνία σκέδασης
> mv² → < γωνία σκέδασης
> b → < γωνία σκέδασης

ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗ

Ενεργός Διατομή



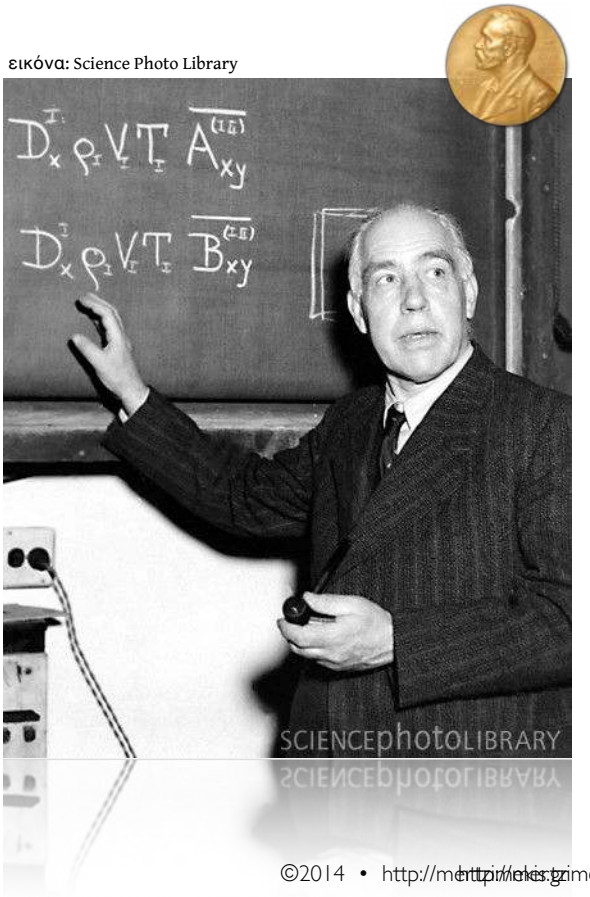
$$d\sigma = 2\pi b|db| = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) d\Omega \quad (d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta) \Rightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{2\pi b|db|}{2\pi \sin\theta d\theta}$$

$$\Rightarrow \frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \left(\frac{qQ}{2mv^2}\right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

ΤΟ ΝΕΟ ΑΤΟΜΟ

- Ο Rutherford διατυπώνει τις πρώτες αρχές για το νέο άτομο με βάση τις παρατηρήσεις του
- Η κλασσική φυσική τον περιορίζει
- Ο Niels Bohr σπεύδει σε βοήθεια, θέτοντας ως βάση την Κβαντομηχανική

εικόνα: Science Photo Library



Niels Bohr (1885-1962)

Θεμελιωτής της Κβαντομηχανικής

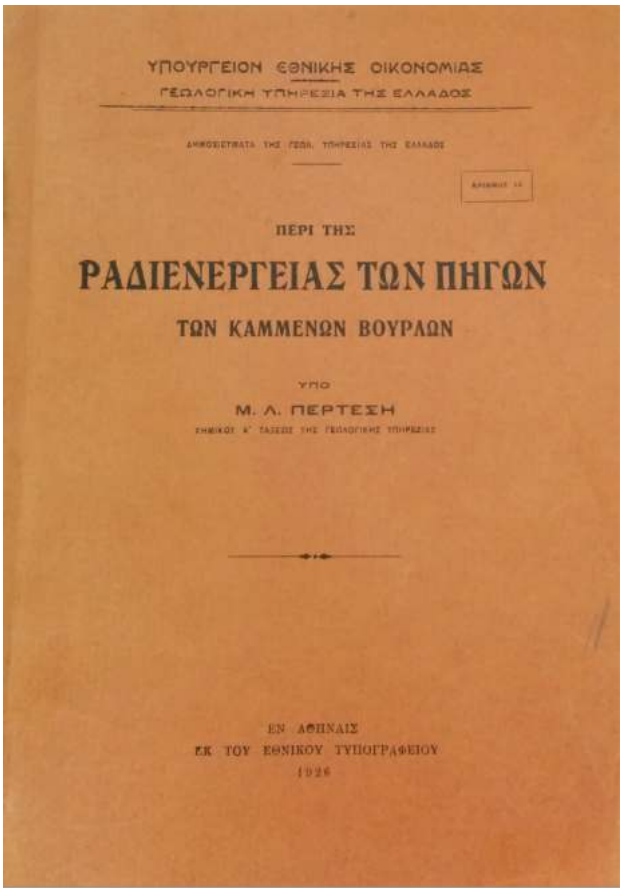
Κβαντισμένες τροχιές

Ατομο Bohr

Nobel 1922

ΤΟ ΝΕΟ ΑΤΟΜΟ

- Ως το 1932, ο πυρήνας "περιέχει" μόνο πρωτόνια
- Το νέο ατομικό πρότυπο δεν εξηγεί πώς τα πρωτόνια παραμένουν στον (σταθερό) πυρήνα
- Από τα ερωτήματα αυτά θεμελιώνονται οι έννοιες της πυρηνικής αλληλεπίδρασης και του νετρονίου


ΥΠΟΥΡΓΕΙΟΝ ΕΘΝΙΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΠΕΡΙ ΤΗΣ

ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΠΗΓΩΝ

ΤΩΝ ΚΑΜΜΕΝΩΝ ΒΟΥΡΛΩΝ

ΥΠΟ

Μ. Λ. ΠΕΡΤΕΣΗ

ΕΝ ΑΘΗΝΑΙΣ

ΕΚ ΤΟΥ ΕΘΝΙΚΟΥ ΤΥΠΟΓΡΑΦΕΙΟΥ

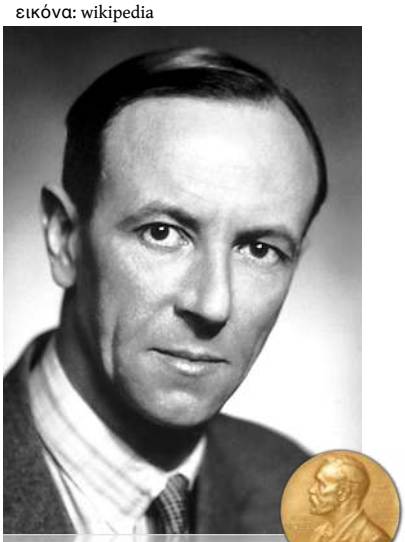
1926

1926 - Ελλάδα

"...ο πυρήν του υδρογόνου φέρει τη μονάδα του θετικού ηλεκτρισμού, το όλον δε άτομον του υδρογόνου αποτελείται εκ του πυρήνος τούτου και ενός αρνητικού ηλεκτρονίου, περί τον πυρήνα αυτόν κινουμένου..."

"...ο πυρήν του ηλίου αποτελείται από τέσσαρας πυρήνας υδρογόνου και δύο αρνητικά ηλεκτρόνια...

εικόνα: wikipedia



James Chadwick (1871-1974)

Ανακαλύπτει πειραματικά το νετρόνιο

Ανοίγει το δρόμο για τα ισότοπα

Nature **129**, 312 (27 February 1932) doi:10.1038/129312a0;

Possible Existence of a Neutron

J. CHADWICK

I have made some experiments using the valve counter to examine the properties of this radiation excited in beryllium. The valve counter consists of a small ionisation chamber connected to an amplifier, and the sudden production of ions by the entry of a particle, such as a proton or a-particle, is recorded by the deflexion of an oscillograph.

Top

Παρέχει τη βάση για μια νέα αλληλεπίδραση

Hideki Yukawa (1907-1981)

Με τα νέα δεδομένα για τον πυρήνα, εφαρμόζει την πεδιακή θεωρία το 1935

Εκφράζει την ισχυρή αλληλεπίδραση ως υπεύθυνη για τη σταθερότητα

Υπολογίζει με σχετική ακρίβεια τη μάζα του φορέα αλληλεπίδρασης, του πιονίου

εικόνα: wikipedia

Η ΙΣΧΥΡΗ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ

- Αποτελεί πρωτοπορία στη φυσική γιατί διαφέρει δραστικά από τις γνωστές δυνάμεις της εποχής
- Περιορισμένης εμβέλειας, υψηλής ισχύος
- Βασικό νέο χαρακτηριστικό: ισοσπίν

ΜΑΓΙΚΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ

ΜΑΓΙΚΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ

- Είναι στα αλήθεια μαγικοί;

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

- Ποια είναι η σημασία τους;
- Υπάρχουν και άλλοι εκτός από αυτούς;

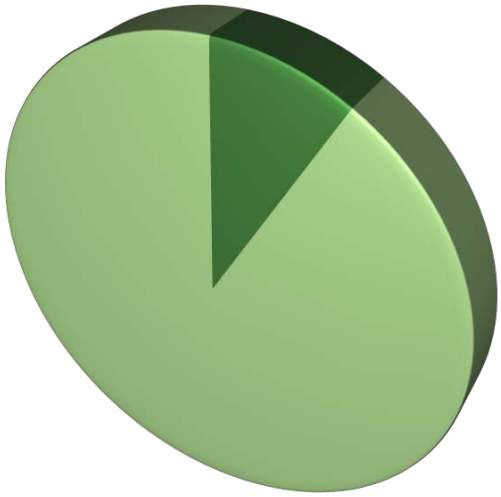
ΒΑΣΙΚΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ

- Ενέργεια: 1 MeV = 1.6 10^{-13} J
- Μάζα πρωτονίου = 938.27 MeV/c^2
- Μάζα νετρονίου = 939.56 MeV/c^2
- Μάζα ηλεκτρονίου = 0.511 MeV/c^2

ΜΟΝΑΔΕΣ & ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

- 1 fm = 10^{-15} m
- e^2 = 1.44 MeV fm
- $\hbar c$ = 197 MeV fm
- 1 amu = 931.49 MeV/c^2

^{12}C



ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΥΜΒΑΣΕΙΣ

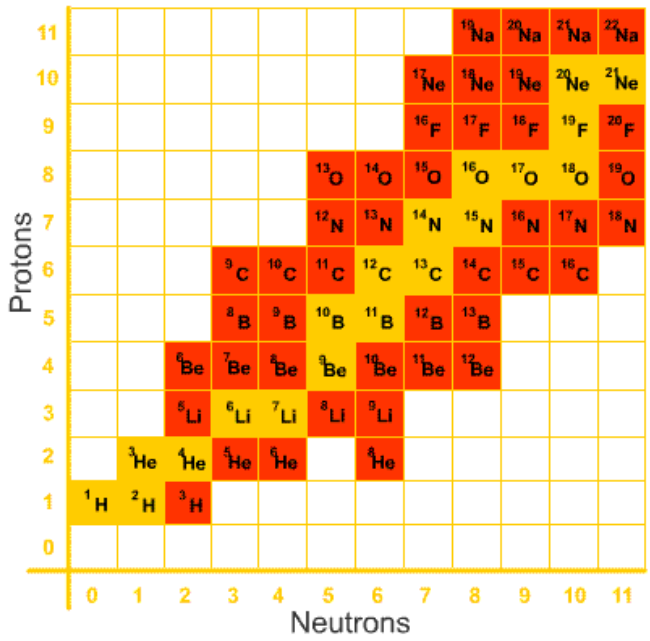
Z	N	A=Z+N
ατομικός αριθμός	αριθμός νετρονίων	μαζικός αριθμός

ΙΣΟΤΟΠΑ & ΑΛΛΑ

- Ισότοποι πυρήνες: έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων, αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων
- Ισοβαρείς: ίδιος μαζικός αριθμός
- Ισότονοι: ίδιος αριθμός νετρονίων
- Κατοπτρικοί πυρήνες: ίδιο A, εναλλαγή Z,N

π.χ. ^{35}S (N=19,Z=16) – ^{35}K (N=16,Z=19)

Ισότονα (N=5)



Ισότοπα (Z=8)

Ισοβαρείς (A=19)

εικόνα: schoolscience.co.uk

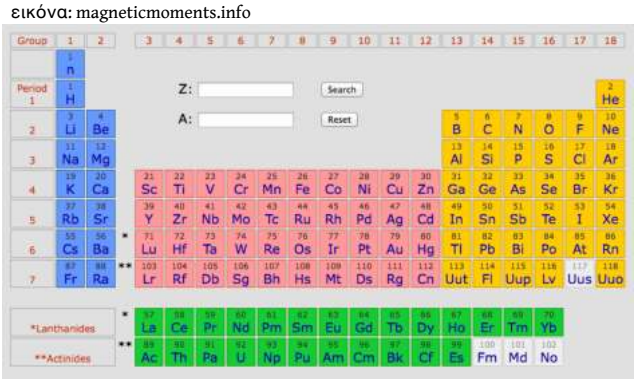
ΙΣΟΤΟΠΑ ΚΑΙ ΑΛΛΑ

- Συμβολισμός ισοτόπου

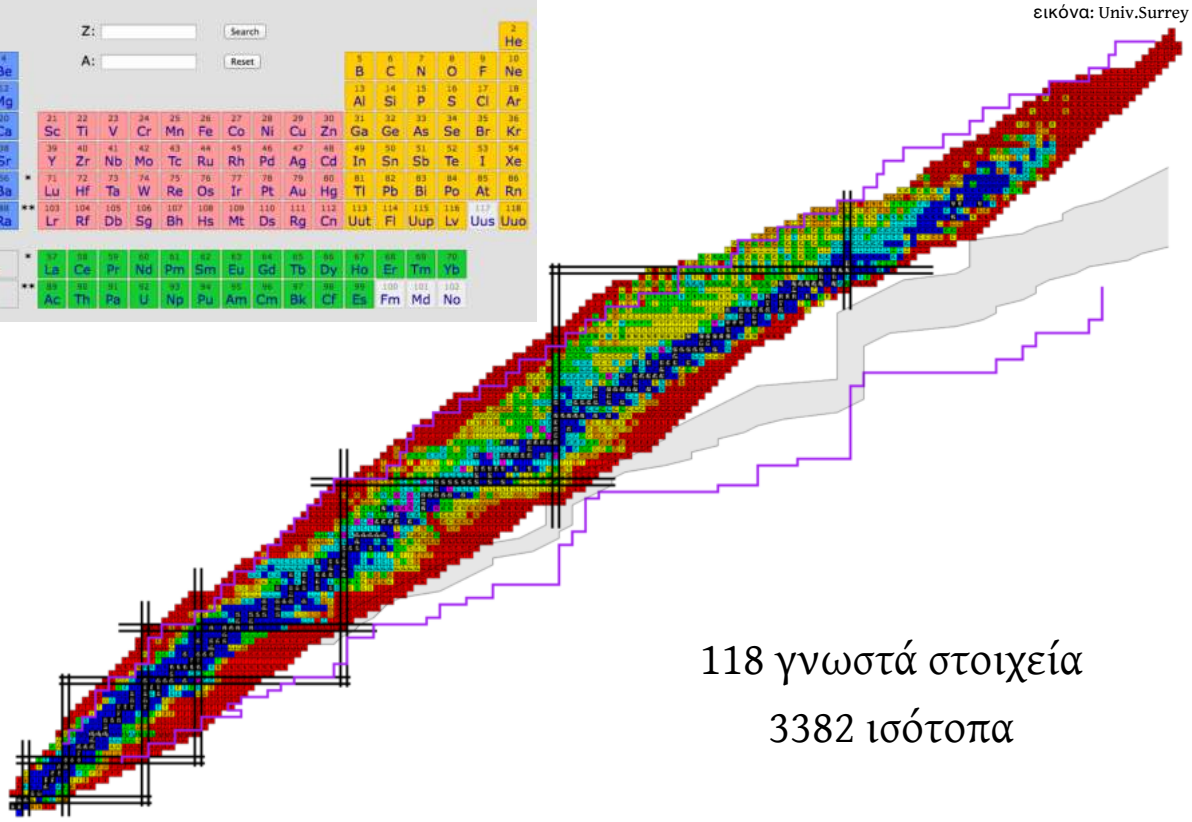
π.χ. $^{40}_{19}\mathrm{K}$, $^{238}_{92}\mathrm{U}$, $^{137}\mathrm{Cs}$

$^{A}_{Z}\mathrm{X}$

εικόνα: magneticmoments.info



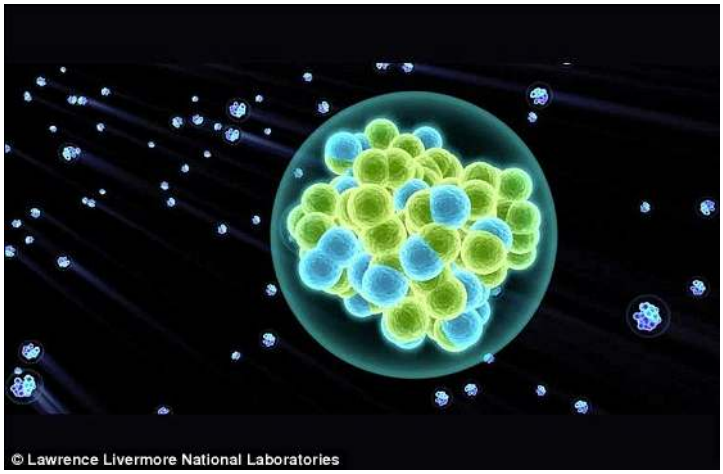
εικόνα: Univ.Surrey



118 γνωστά στοιχεία

3382 ισότοπα

New element set to join the periodic table: Scientists confirm that the super-heavy element 117 DOES exist



ΑΣΤΑΘΕΙΑ-Ι

- Βασικό χαρακτηριστικό των ισοτόπων
- Η ραδιενέργεια εκφράζει την εκπομπή ακτινοβολίας από ασταθή ισότοπα
- Τεράστιας σημασίας για το πώς έχει δημιουργηθεί και εξελιχθεί το Σύμπαν

ΑΣΤΑΘΕΙΑ-ΙΙ

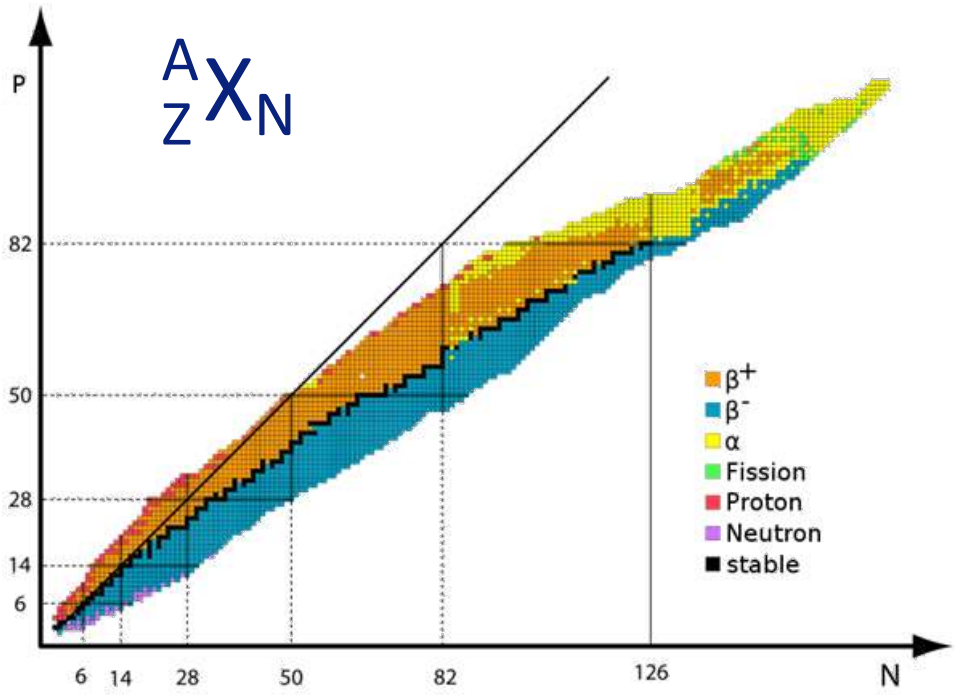
- Η αστάθεια έχει από κοσμολογικές ως καθημερινές προεκτάσεις
- Βασικό μέγεθος που τη χαρακτηρίζει:

  χρόνος ημιζωής, $t_{1/2}$
- Για την κατανόησή της απαιτείται γνώση της πυρηνικής δομής

ΑΣΤΑΘΕΙΑ-ΙΙΙ

- Υπάρχουν περίπου 200 σταθερά ισότοπα στον ισοτοπικό χάρτη
- Το βαρύτερο σταθερό ισότοπο είναι το ^{209}Bi
- Το ελαφρύτερο ασταθές ισότοπο είναι το τρίτιο (^{3}H) με χρόνο ημιζωής 12.32 y

ΙΣΟΤΟΠΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ SEGRÉ



ΣΤΑΘΕΡΑ & ΑΣΤΑΘΗ ΙΣΟΤΟΠΑ

- 118 χημικά στοιχεία
- 3382 ισότοπα
- 254 σταθερά ισότοπα
- 35 ισότοπα με μεγάλους χρόνους ζωής (>80 Ma)
- Το βαρύτερο σταθερό ισότοπο είναι το ^{209}Bi
- Το ελαφρύτερο ασταθές είναι το ^{3}H

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

- Βασική σχέση: $E=mc^2$
- Ο πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια & νετρόνια
- Ομως, $Zm_p + Nm_n \neq m$(πυρήνα)
- Διαφορά μάζας —» Διαφορά ενέργειας

  αυτό εξηγεί και την εκλυόμενη ενέργεια στη σχάση, σύντηξη

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

- Το "πόσο" ασταθές είναι ένα ισότοπο σχετίζεται με την ενέργεια σύνδεσης, BE (Binding Energy)
- BE = (μάζα συστατικών – μάζα πυρήνα)*c^2
- Γιατί δεν είναι ίση με το μηδέν;

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

- $BE = c^2 \cdot [Zm_p + Nm_n - m_N(^AX)]$
- Με μετρήσιμες ποσότητες:
  - $BE = c^2 \cdot \{Zm_p + Nm_n - [m_A(^AX) - Zm_e]\}$
  - $m_p = 938.27\ MeV/c^2$
  - $m_n = 939.56\ MeV/c^2$
  - $m_e = 0.511\ MeV/c^2$

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Για σταθερούς πυρήνες πάντα:

$$BE > 0$$

ΤΙ ΕΠΗΡΕΑΖΕΙ ΤΗ ΒΕ;

Αρχικά:

- δε διερευνούμε τη λεπτομερή φύση της πυρηνικής αλληλεπίδρασης
- η πυρηνική δύναμη παρουσιάζει κορεσμό
- η πυρηνική δύναμη έχει πεπερασμένη εμβέλεια

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ

- Η ενέργεια διαχωρισμού είναι η ενέργεια αφαίρεσης του σωματίου από τον πυρήνα.
- Π.χ. για το νετρόνιο είναι η ενέργεια που απαιτείται για να αφαιρέσω ένα νετρόνιο από τον πυρήνα, S_n.
- Αντίστοιχα για το πρωτόνιο (S_p)
- για το n: $Sn = BE(Z,A) - BE(Z,A-1)$

ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΥΡΗΝΑ

- Εξαρτάται από τον αριθμό νουκλεονίων
- Η ακτίνα του πυρήνα μπορεί να γραφεί χονδρικά ως: $R = R_o A^{1/3}$
- $R_o \approx 1.2$ fm $= 1.2 \times 10^{-15}$ m

ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΤΗΣ ΜΑΖΑΣ

$$M(Z,A) = Zm\,(^1H) + Nm_n - BE(Z,A) / c^2$$

- Γνωρίζοντας την ενέργεια σύνδεσης για Z,A μπορούμε να βρούμε τη μάζα του πυρήνα
- Απλή θεώρηση: πρότυπο της υγρής σταγόνας

ΠΡΟΤΥΠΟ ΤΗΣ ΥΓΡΗΣ ΣΤΑΓΟΝΑΣ

εικόνα: flicker.com

- Ο πυρήνας συμπεριφέρεται ως μια υγρή σταγόνα
- Η ενέργεια σύνδεσης περιέχει πέντε όρους, που συνδέονται με τα χαρακτηριστικά της σταγόνας

ΠΥΡΗΝΑΣ - ΥΓΡΗ ΣΤΑΓΟΝΑ

- Ογκος
- Επιφάνεια
- Coulomb
- Συμμετρία πρωτονίων-νετρονίων
- Σύζευξη

BE & ΜΕΓΕΘΟΣ ΠΥΡΗΝΑ

BE ~ A εξαρτάται από τον όγκο

BE & ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

BE ~ $-A^{2/3}$ εξαρτάται αρνητικά από την επιφάνεια

??

??

BE & COULOMB

$BE \sim -Z^2 / A^{1/3}$ εξαρτάται αρνητικά από τη δύναμη Coulomb

p–p

n–n **p–n**

BE & ΚΑΝΟΝΑΣ PAULI

$BE \sim -(N-Z)^2 / A = -(A-2Z)^2 / A$

Πρωτόνια – νετρόνια : μη αλληλεπιδρόν αέριο Fermi

Ενέργεια Fermi: η τελευταία, "μη κενή" ενεργειακή στάθμη. Διαφορετική για νετρόνια και πρωτόνια

Η ασυμμετρία N–Z αφαιρεί ενέργεια από τη BE

BE & ΣΥΞΕΥΞΗ ΖΕΥΓΟΥΣ

BE ~ δ

Το πείραμα δείχνει ότι οι σταθερότεροι πυρήνες είναι αυτοί με άρτιο–άρτιο αριθμό p, n

δ =	-1	άρτιος–άρτιος
	0	άρτιος–περιττός
	+1	περιττός–περιττός

$$BE(Z,A) = a_V A \quad \text{Όγκος}$$

$$- a_S A^{2/3} \quad \text{Επιφάνεια}$$

$$- a_C Z^2 / A^{1/3} \quad \text{Coulomb}$$

$$- a_{sym} (A-2Z)^2 / A \quad \text{Συμμετρία}$$

$$- \delta a_p / A^{1/2} \quad \text{Ζεύγος}$$

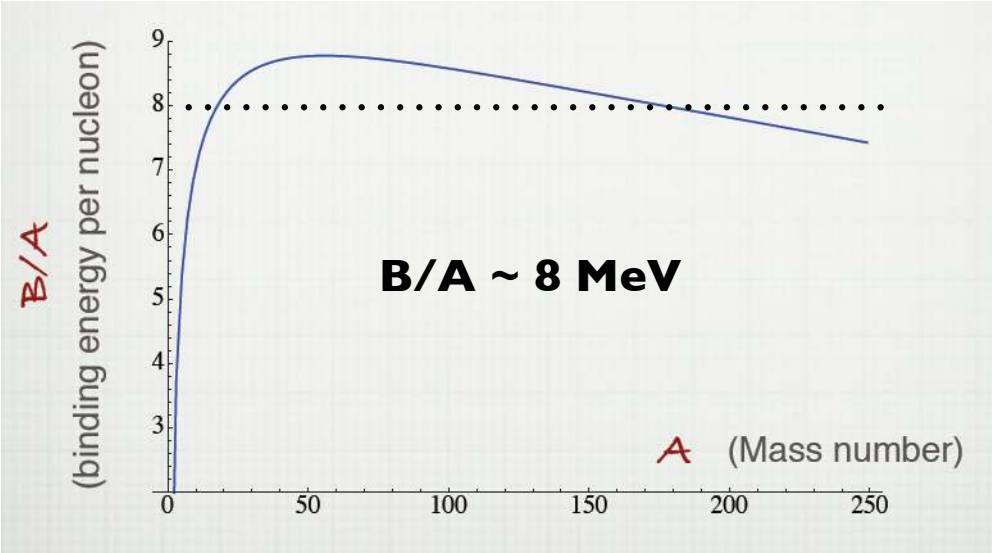
Carl Friedrich von Weiszäcker

εικόνα: wikimedia doi:10.1007/BF01337700

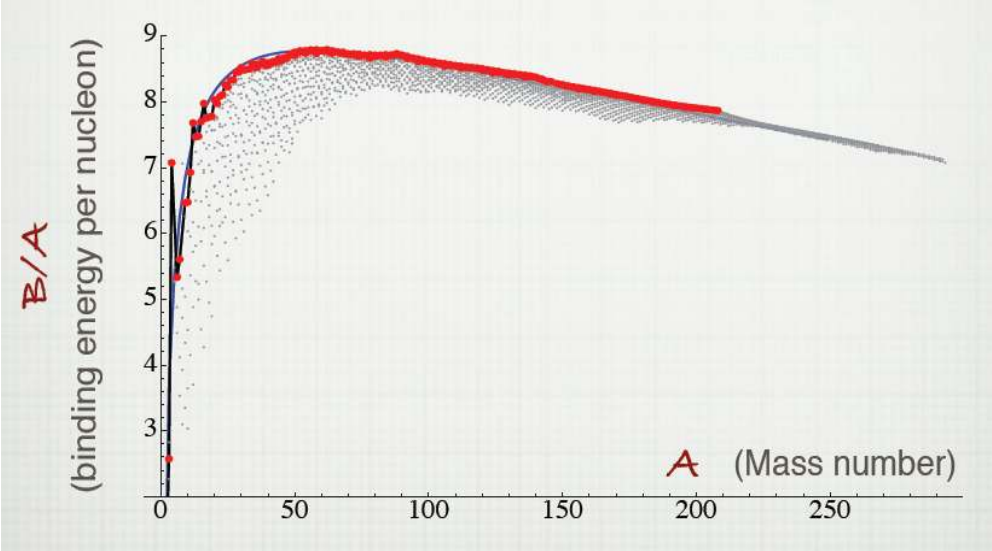
Atomic Mass Evaluation 2022

a_V	15.247 MeV
a_S	16.325 MeV
a_C	0.685 MeV
a_{sym}	22.098 MeV
a_P	10.608 MeV

ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ

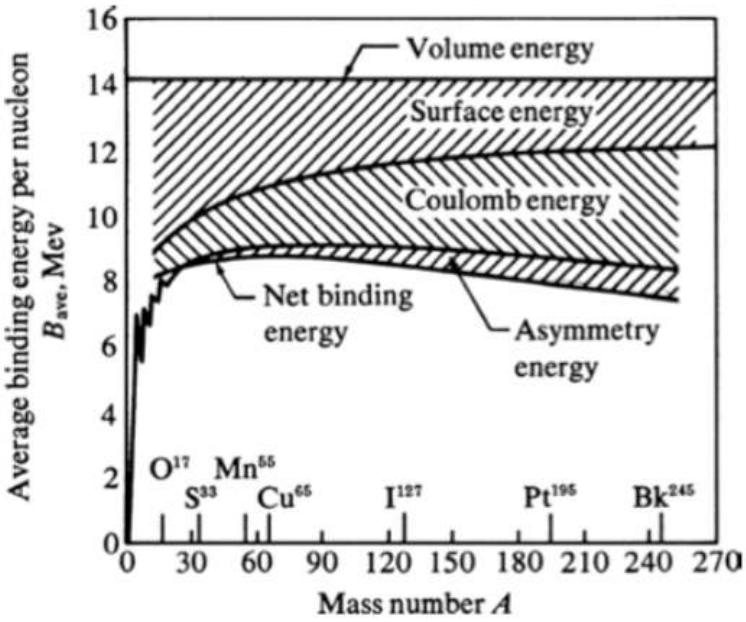


ΗΜΙΕΜΠΕΙΡΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ



Υπάρχουν “άλματα” σε συγκεκριμένα σημεία
(από πειραματικές παρατηρήσεις)

ΣΧΕΤΙΚΕΣ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΕΣ



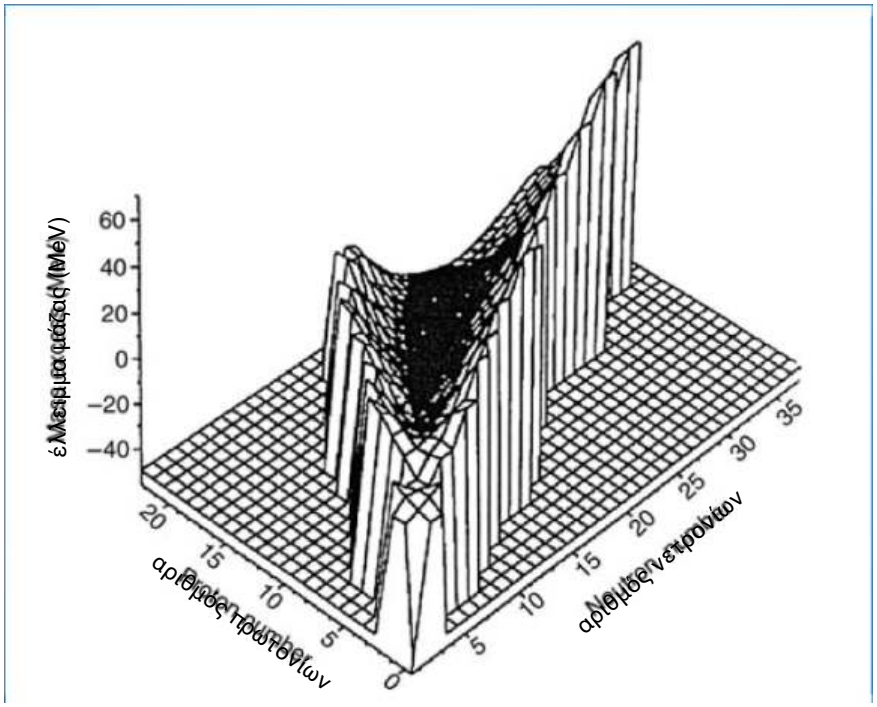
ΠΑΡΑΒΟΛΗ ΙΣΟΒΑΡΩΝ

Αν ο ημιεμπειρικός τύπος εκφραστεί ως συνάρτηση του Z (με N=A-Z), τότε προκύπτει ότι:

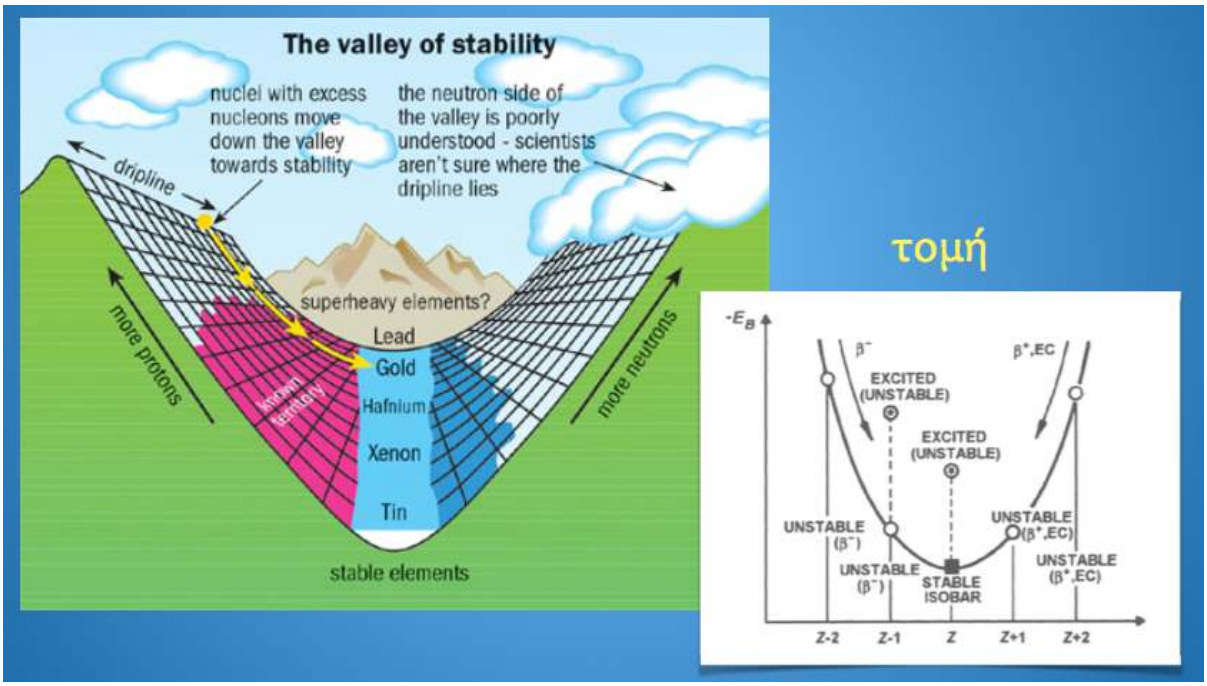
$$BE = aZ^2 + bZ + c \pm dA^{-1/2}$$

Οι σταθερές a,b,c είναι συναρτήσεις του A και για ισοβαρείς πυρήνες η καμπύλη είναι μια παραβολή. Κάθε σύνολο ισοβαρών πυρήνων ανήκει σε μια τέτοια παραβολή.

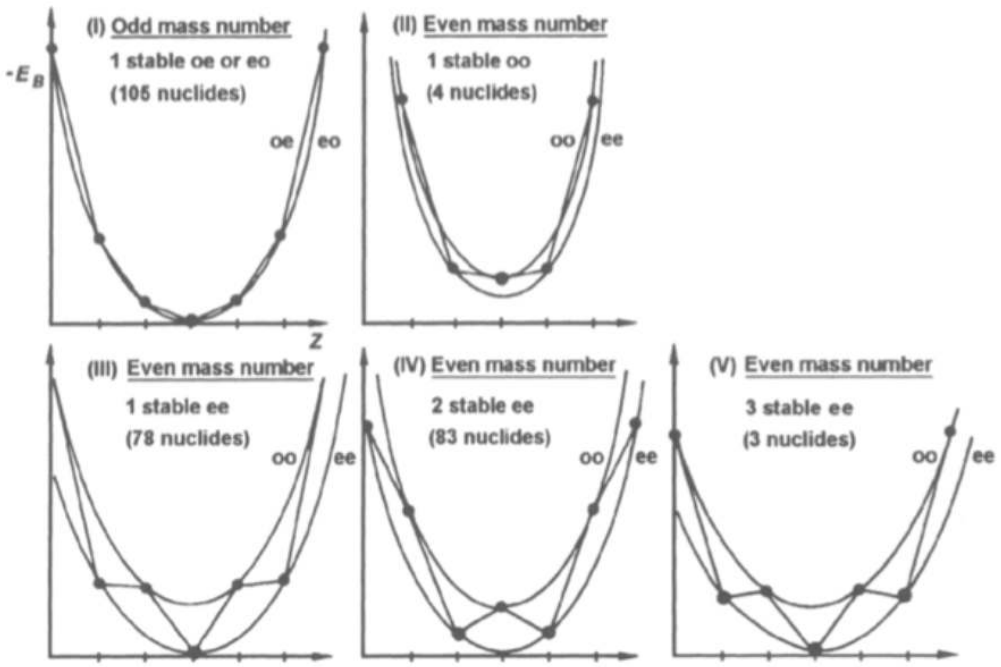
ΚΟΙΛΑΔΑ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ



ΚΟΙΛΑΔΑ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ



ΚΟΙΛΑΔΑ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑΣ



ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΠΑΡΑΒΟΛΗΣ

- Από τον ημιεμπειρικό τύπο, το ελάχιστο ισχύει όταν:

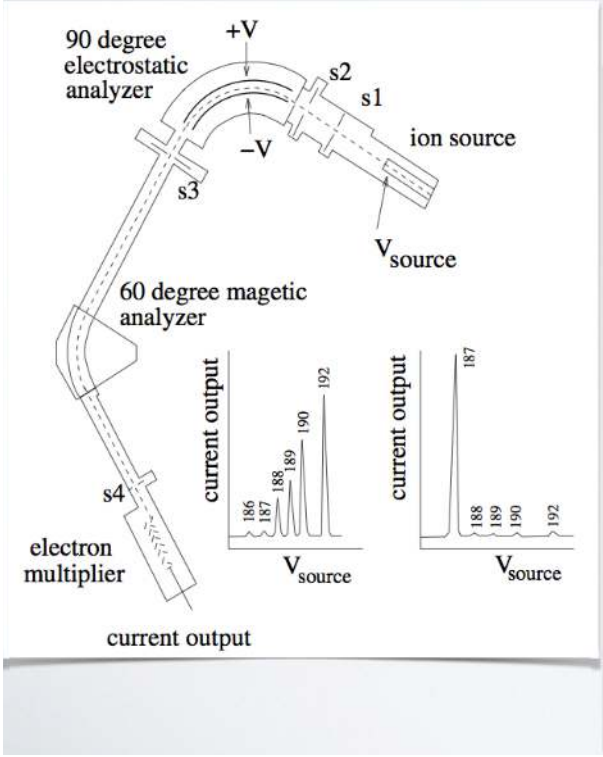
$$Z = \frac{2A}{4 + \left(\frac{a_C}{a_{sym}}\right) A^{2/3}}$$

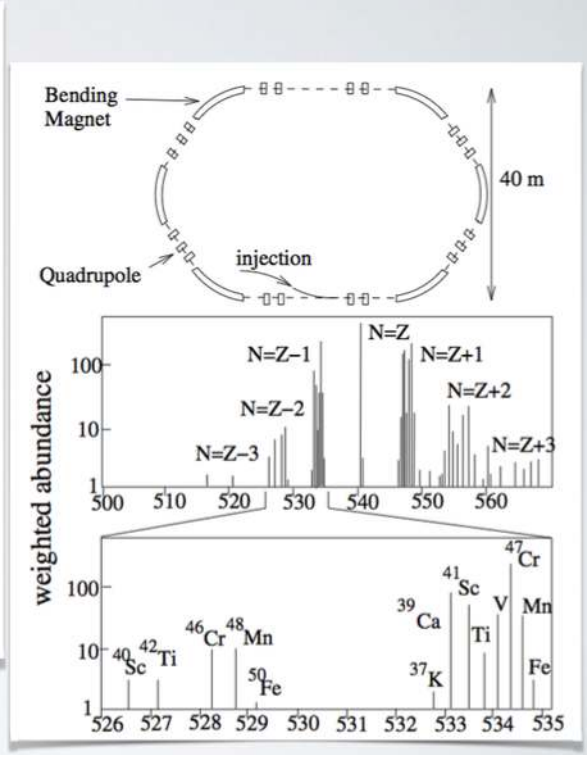
- Για μικρές τιμές A, Z=A/2 ή N=Z

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΑΖΩΝ

- Οι πυρηνικές μάζες μετριούνται με ειδικές τεχνικές και οργανολογία, π.χ. φασματογράφους μάζας, ιοντικές παγίδες
- Οι μάζες μετριούνται με τυπική ακρίβεια 10^{-8}
- Αντίστοιχα, οι ενέργειες σύνδεσης μετριούνται με ακρίβεια της τάξης του 10^{-6}

ΦΑΣΜΑΤΟΓΡΑΦΟΙ ΜΑΖΑΣ





ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΑΖΩΝ

- Φορτίο (q,m) σε μαγνητικό πεδίο B με ενέργεια E=qV διανύει κυκλική τροχιά με ακτίνα R. Η μέτρηση της μάζας γίνεται μέσω μέτρησης της διαφοράς δυναμικού V

$$R = \frac{\sqrt{2Em}}{qB} = \frac{\sqrt{2V}}{B}\sqrt{\frac{m}{q}}$$

- Η κρίσιμη παράμετρος είναι ο λόγος q/m των ιόντων

ΜΑΖΑ ΝΕΤΡΟΝΙΟΥ

$$m_{\mathrm{d}} = m_{\mathrm{p}} + m_{\mathrm{n}} - B(2,1)/c^2$$

- Σύλληψη από πρωτόνιο: n+p—> ^{2}H+γ
- Τα θερμικά νετρόνια έχουν αγνοήσιμη ενέργεια σε σχέση με την ενέργεια σύνδεσης, επομένως:

$$B(2,1) = E_\gamma \left(1 + \frac{E_\gamma}{2m_{\mathrm{d}}c^2}\right)$$

- Η ενέργεια σύνδεσης και άρα η μάζα του νετρονίου καθορίζεται από την ενέργεια των φωτονίων που εκπέμπονται

Πρόβλημα [01]

Να αποδείξετε ότι:

$e^2/4\pi\varepsilon_0 = 1.44$ MeV·fm

$\hbar c = 197$ MeV·fm

Πόσο είναι το πηλίκο των δύο παραπάνω;

Πρόβλημα [02]

Να βρεθεί η ενέργεια σύνδεσης του τελευταίου νετρονίου στο ισότοπο ^{13}C.

Δίνονται

$m[^{12}C] = 12.00000$ u

$m[^{13}C] = 13.00335$ u

$m[n] = 1.00866$ u

Πρόβλημα [03]

Ποια είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν δύο πυρήνες δευτερίου σχηματίζουν έναν πυρήνα ηλίου.

Δίνονται

$B(d)/A = 1.112$ MeV

$B(\alpha)/A = 7.074$ MeV

Πρόβλημα [04]

Η παρακάτω αντίδραση αναπαριστά τη σχάση του ισοτόπου ^{236}U.

$$^{236}U \longrightarrow {}^{140}Xe + {}^{93}Sr + 3n$$

Να υπολογιστεί η συνολική εκλυόμενη ενέργεια όταν:

$B(^{236}U)/A = 7.6$ MeV

$B(^{140}Xe)/A = 8.4$ MeV

$B(^{93}Sr) = 8.7$ MeV

Πρόβλημα [05]

Να υπολογιστεί η ενέργεια διαχωρισμού S_n για τα ισότοπα ^{236}U και ^{239}U

Πρόβλημα [06]

Χρησιμοποιώντας τον τύπο για το ελάχιστο της παραβολής σταθερότητας, να υπολογίσετε τον ατομικό αριθμό που αντιστοιχεί σε A=10, 27, 59, 239. Πώς τα συγκρίνετε με τη βιβλιογραφία;

Πρόβλημα [07]

Να βρεθεί η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για το ισότοπο ^{58}Fe με χρήση του ημιεμπειρικού τύπου της μάζας.

Να υπολογιστούν ξεχωριστά οι όροι που συνεισφέρουν.

ΜΕΣΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ, τ

- Είναι ο μέσος χρόνος ζωής ενός πυρήνα πριν αποδιεγερθεί/μετασχηματισθεί

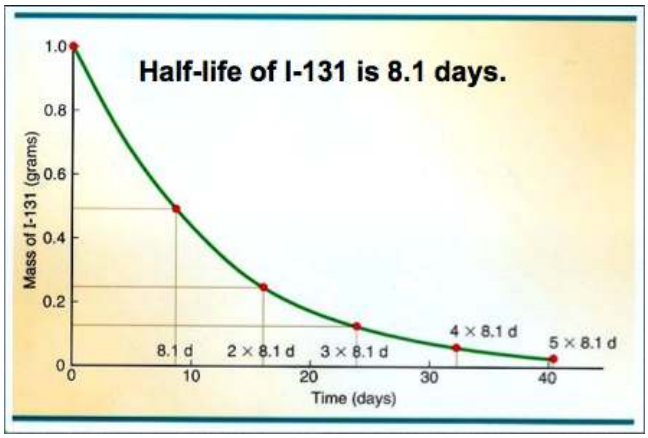
$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N\,, \quad \lambda = \frac{1}{\tau}$$

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow \ln\frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

$$N(t) = N(0)\, e^{-\lambda t}$$

ΧΡΟΝΟΣ ΗΜΙΖΩΗΣ, $t_{1/2}$

- Η αστάθεια χαρακτηρίζεται από το χρόνο ημίσειας ζωής: $t_{1/2}$



- Είναι ο χρόνος στον οποίο μια αρχική ποσότητα ασταθούς ισοτόπου υποδιπλασιάζεται

ΧΡΟΝΟΣ ΗΜΙΖΩΗΣ - ΜΕΣΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΖΩΗΣ

$$N = N_o e^{-\lambda t}$$

$$t_{1/2} = \tau \ln 2$$

$$\tau = 1/\lambda$$

- Ο χρόνος ημιζωής είναι μικρότερος από το μέσο χρόνο ζωής
- Η σταθερά χρόνου έχει μονάδες αντίστροφου χρόνου (συχνότητα διάσπασης)

- Πρακτικά, μια αρχική ποσότητα ασταθών ισοτόπων παύει να είναι σημαντική μετά από περίπου 4-5 μέσους χρόνους ζωής

ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ

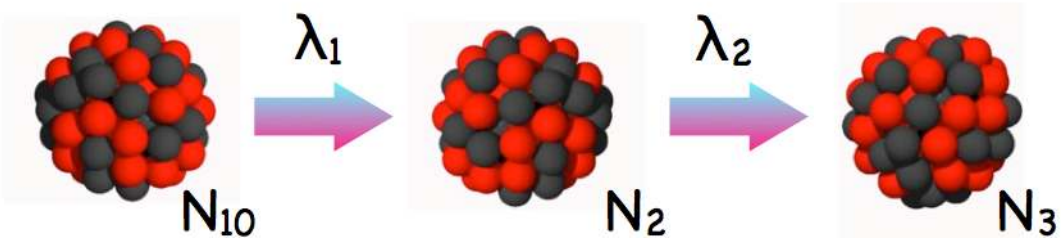
- Ο αριθμός γεγονότων ακτινοβολίας από μια πηγή ορίζεται ως η ενεργότητα της πηγής

$$C = \lambda N = \frac{dN}{dt}$$

- Μονάδες ενεργότητας στο SI είναι το Becquerel (Bq). Χρησιμοποιείται και το Curie (Ci)

1 Curie (Ci) = 3.7×10^{10} Bq

ΑΛΥΣΙΔΕΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ



$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t)$$ ασταθής

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = -\lambda_2 N_2(t) + \lambda_1 N_1(t)$$ ασταθής

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = +\lambda_2 N_2(t)$$ σταθερός

http://mertzimekis.gr • @tmertzi

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΒΑΤΕΜΑΝ

- Γενίκευση για σύστημα n πυρήνων στην αλυσίδα, το οποίο προέρχεται από την ύπαρξη ΜΟΝΟ του πατρικού πυρήνα

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = +\lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t)$$

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = +\lambda_2 N_2(t) - \lambda_3 N_3(t)$$

.....

$$\frac{dN_n(t)}{dt} = +\lambda_{n-1} N_{n-1}(t) - \lambda_n N_n(t)$$

$$N_{10} \neq 0$$

$$N_{20} = N_{30} = \ldots = N_{n0} = 0$$

ΓΕΝΙΚΗ ΛΥΣΗ

$$N_n(t) = \sum_{m=1}^{n} A_m e^{-\lambda_m t}$$

για n≠1

$$A_1 = \frac{\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i}{\prod_{i=2}^{n} (\lambda_i - \lambda_1)} . N_{10}$$

$$A_2 = \frac{\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i}{\prod_{\substack{i=1 \\ i\neq 2}}^{n} (\lambda_i - \lambda_2)} . N_{10}$$

$$\vdots$$

$$A_m = \frac{\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i}{\prod_{\substack{i=1 \\ i\neq m}}^{n} (\lambda_i - \lambda_m)} . N_{10}$$

- π.χ. σύστημα δύο πυρήνων (n=2)

$$N_1(t) = N_1(0) e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) + N_2(0) e^{-\lambda_2 t}$$

$$^{211}\mathrm{Pb} \xrightarrow{\beta} {}^{211}\mathrm{Bi} \xrightarrow{\beta} {}^{211}\mathrm{Po} \xrightarrow{\alpha} {}^{207}\mathrm{Pb}.$$

$$N_{\mathrm{Bi}}(T) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_0 \left(e^{-\lambda_1 T} - e^{\lambda_2 T}\right)$$

$$N_{\mathrm{Po}}(T) = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} N_0 e^{-\lambda_3 T} \left(\frac{1}{\lambda_3 - \lambda_1} \left(e^{(\lambda_3 - \lambda_1) T} - 1\right) - \frac{1}{\lambda_3 - \lambda_2} \left(e^{(\lambda_3 - \lambda_2) T} - 1\right) \right)$$

$$= \lambda_1 \lambda_2 N_0 \left(\frac{e^{-\lambda_1 T}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)} + \left(\frac{e^{-\lambda_2 T}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 T}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right) \right).$$

$$N_{\mathrm{Pb}}(T) = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 N_0 \left(\frac{e^{-\lambda_1 T}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1)(\lambda_4 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 T}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} + \frac{e^{-\lambda_3 T}}{(\lambda_1 - \lambda_3)(\lambda_2 - \lambda_3)} \right).$$

(α) λ1 « λ2

- Ουσιαστικά ο μητρικός είναι μακροβιότερος του θυγατρικού

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) + N_2(0) \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

$$N_2(t) \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t}\left(1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}\right) + N_2(0) \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

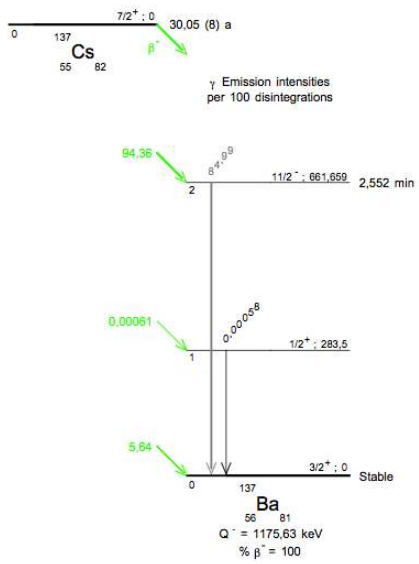
$$t \to \infty: \quad N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot N_1(t)$$

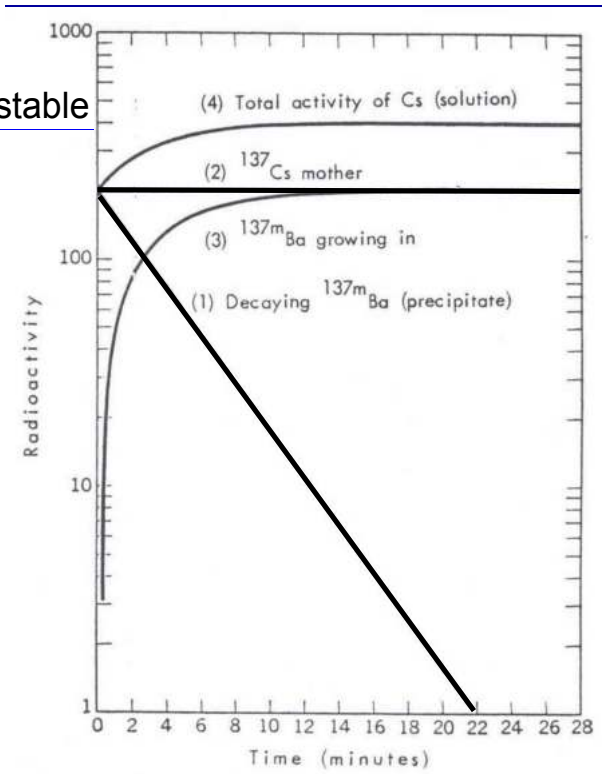
$$\frac{N_2(t)}{N_1(t)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \text{const.}$$ **radioactive equilibrium**

$$A_2(t) = \lambda_2 \cdot N_2(t) = \lambda_1 \cdot N_1(t) = A_1(t)$$

(α) λ1 « λ2

$^{137}Cs \xrightarrow{T_{1/2}=30\ a} {}^{137m}Ba \xrightarrow{T_{1/2}=2{,}6\ min}$ stable





Theo J. Mertzimekis,PhD

(β) λ1 » λ2

- Ουσιαστικά ο θυγατρικός είναι μακροβιότερος του μητρικού

$$N_2(1) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) + N_2(0) \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

$$A_2(t) = \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot A_1(0) \cdot \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) + A_2(0) \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

$$A_2(t) = \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot A_1(0) \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \left(e^{-(\lambda_1 - \lambda_2)t} - 1\right) + A_2(0) \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

$$t \to \infty: \quad \left(e^{-(\lambda_1 - \lambda_2)t} - 1\right) \to -1 \quad \Rightarrow$$

$$A_2(t) = \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \cdot A_1(0) \cdot e^{-\lambda_2 t} + A_2(0) \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

$$A_1(t) = A_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t}$$

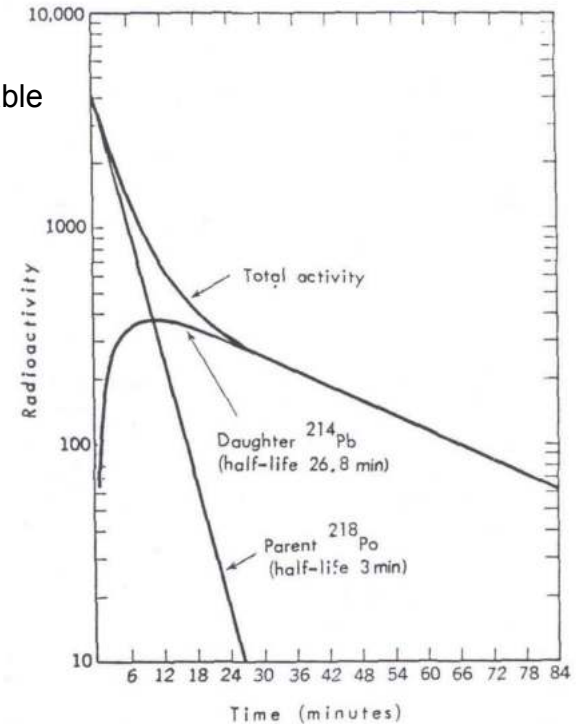
} ανυπαρξία ισορροπίας

equ

(β) λ1 » λ2

$$^{218}\text{Po} \xrightarrow{T_{1/2}=3\text{ min}} {}^{214}\text{Pb} \xrightarrow{T_{1/2}=26{,}8\text{ min}} \text{stable}$$

ανυπαρξία ισορροπίας



(γ) λ1 ≤ λ2

- Ουσιαστικά ο θυγατρικός είναι λίγο μακροβιότερος του μητρικού

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1(0) \cdot \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\right) + N_2(0) \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot N_1(0) \cdot e^{-\lambda_1 t}\left(1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}\right) + N_2(0) \cdot e^{-\lambda_2 t}$$

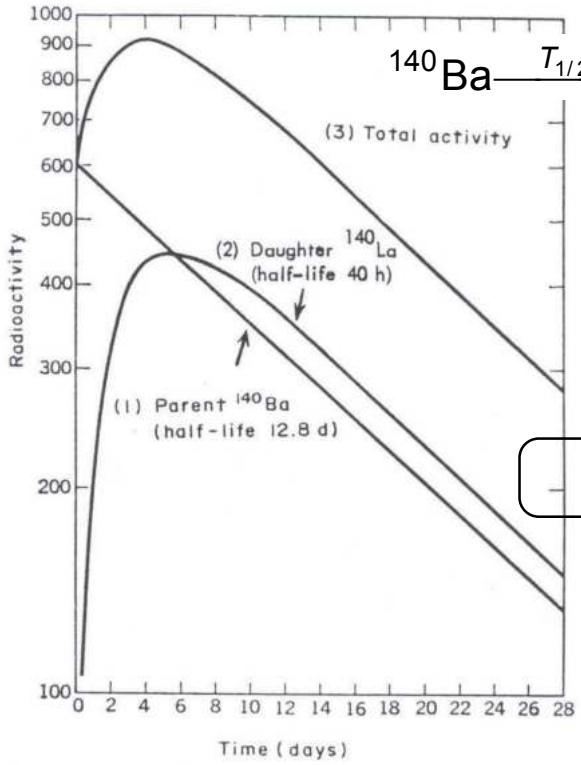
$$t \to \infty: \quad N_2(t) = \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \cdot N_1(t)$$

$$\frac{N_2(t)}{N_1(t)} = \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} = \text{const.}$$

radioactive equilibrium επίτευξη ισορροπίας

$$\frac{A_2(t)}{A_1(t)} = \frac{\lambda_2 \cdot N_2(t)}{\lambda_1 \cdot N_1(t)} = \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)}$$

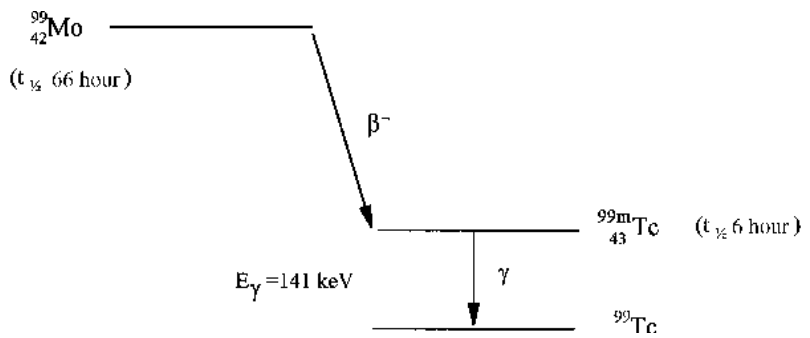
(γ) λ1 ≤ λ2

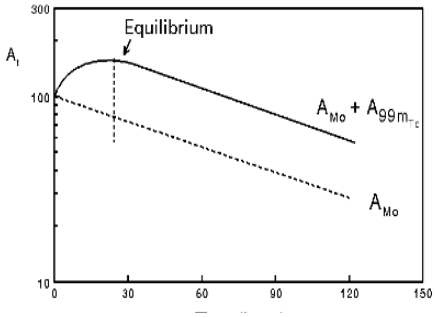


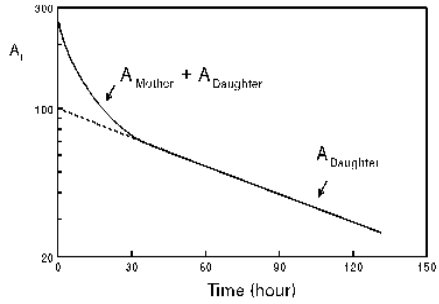
$^{140}Ba \xrightarrow{T_{1/2}=12{,}8\ d} {}^{140}La \xrightarrow{T_{1/2}=40\ h} stable$

επίτευξη ισορροπίας

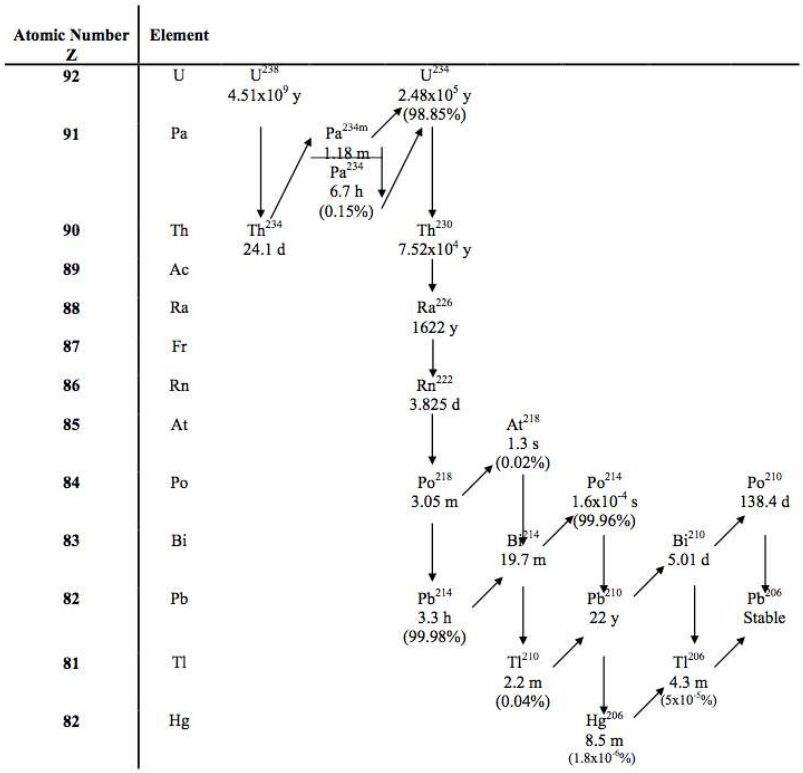
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ $^{99}Mo/^{99m}Tc$







ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ



Πρόβλημα [08]

Δείγμα ^{212}Pb παρουσιάζει ενεργότητα ίση με 10^6 διασπάσεις /min

(α) Ποια η ενεργότητα μετά από 5h

(β) Πόσα άτομα μολύβδου έχουν απομείνει τη στιγμή εκείνη στο δείγμα.

Δίνεται $t_{1/2}$ (^{212}Pb) = 10.64 h

Πρόβλημα [09]

Να σχεδιασθούν στο ίδιο διάγραμμα οι καμπύλες εξέλιξης της ενεργότητας του συστήματος ^{238}U –> ^{234}Th

για χρονικό διάστημα 10 χρόνων ημιζωής του ^{234}Th

Δίνονται

$t_{1/2}$ (^{238}U) = $1.632 \cdot 10^{12}$ d

$t_{1/2}$ (^{234}Th) = 24.10 d

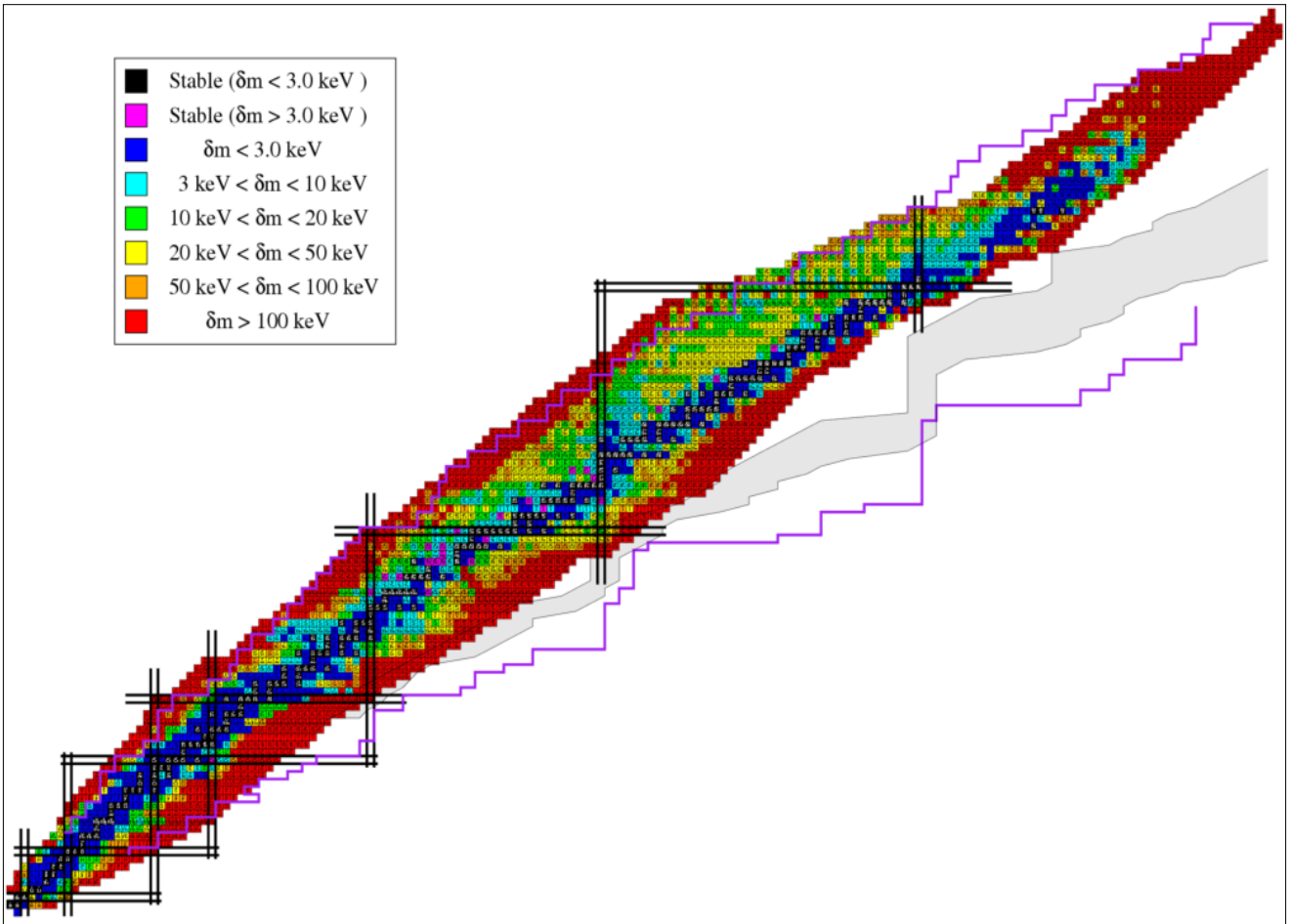
Πρόβλημα [10]

Κατά τη γένεση του ηλιακού συστήματος μπορεί να υποτεθεί ότι δημιουργήθηκαν ποσά ^{238}U και ^{235}U με ίσες ενεργότητες. Δεδομένου ότι το δεύτερο είναι σήμερα το 1/138 του πρώτου, ποια είναι η ηλικία του ηλιακού συστήματος;

Δίνονται

$t_{1/2}$ (^{238}U) = 4.468 Ga

$t_{1/2}$ (^{235}U) = 0.704 Ga



ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

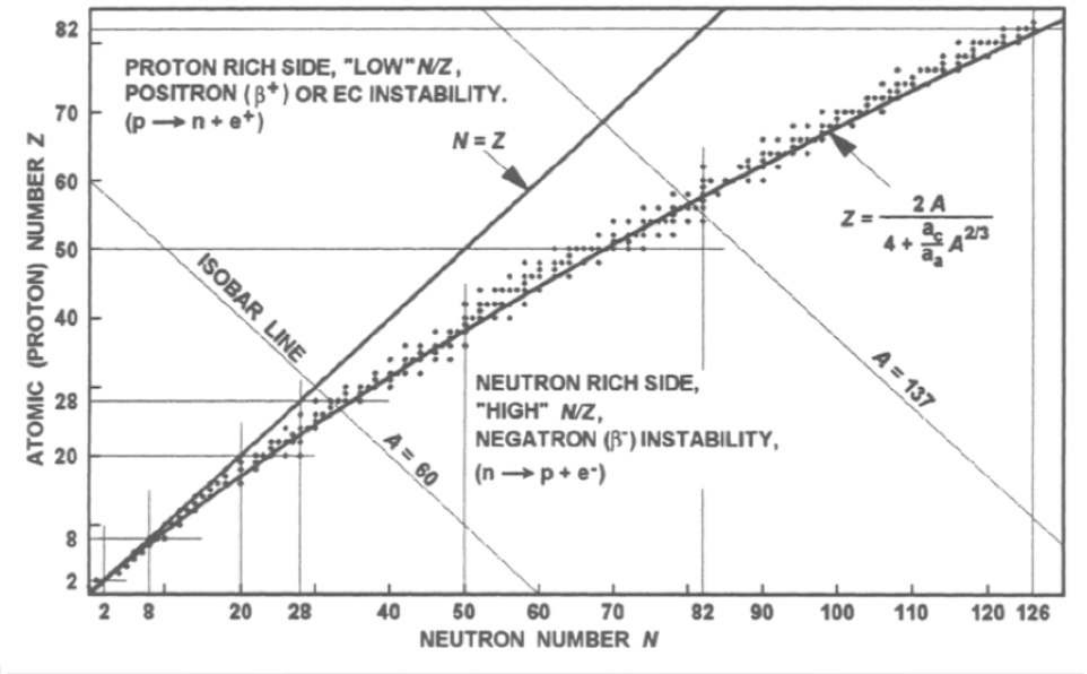
- Υπάρχουν ≈275 ισότοπα χωρίς αστάθεια. Από αυτά:
  - ≈60% είναι ισότοπα με άρτιο Z, άρτιο N (even-even)
  - ≈40% είναι μοιρασμένα σε άρτιο-περιττό (e-o) και περιττό-άρτιο (o-e)
  - ΜΟΝΟ πέντε (5) είναι με περιττό-περιττό (o-o):

$$^{2}H,\ ^{6}Li,\ ^{10}B,\ ^{14}N,\ ^{50}V$$

ΠΟΡΙΣΜΑΤΑ - Ι

- Τα άρτια-άρτια ισότοπα προτιμούν τη σταθερότητα
- Αυτό επιπλέον βεβαιώνεται από το ότι στοιχεία με άρτιο Z έχουν πολλά σταθερά ισότοπα, 3 και άνω
- Αντίθετα, στοιχεία με περιττό Z έχουν ως 2 σταθερά ισότοπα, και αυτά είναι με άρτιο N

ΠΟΡΙΣΜΑΤΑ - II



Z																	
				69Kr	70Kr	71Kr	72Kr	73Kr	74Kr	75Kr	76Kr	77Kr	78Kr	79Kr	80Kr	81Kr	82Kr
			67Br	68Br	69Br	70Br	71Br	72Br	73Br	74Br	75Br	76Br	77Br	78Br	79Br	80Br	81Br
34	64Se	65Se	66Se	67Se	68Se	69Se	70Se	71Se	72Se	73Se	74Se	75Se	76Se	77Se	78Se	79Se	80Se
	63As	64As	65As	66As	67As	68As	69As	70As	71As	72As	73As	74As	75As	76As	77As	78As	79As
32	62Ge	63Ge	64Ge	65Ge	66Ge	67Ge	68Ge	69Ge	70Ge	71Ge	72Ge	73Ge	74Ge	75Ge	76Ge	77Ge	78Ge
	61Ga	62Ga	63Ga	64Ga	65Ga	66Ga	67Ga	68Ga	69Ga	70Ga	71Ga	72Ga	73Ga	74Ga	75Ga	76Ga	77Ga
30	60Zn	61Zn	62Zn	63Zn	64Zn	65Zn	66Zn	67Zn	68Zn	69Zn	70Zn	71Zn	72Zn	73Zn	74Zn	75Zn	76Zn
	59Cu	60Cu	61Cu	62Cu	63Cu	64Cu	65Cu	66Cu	67Cu	68Cu	69Cu	70Cu	71Cu	72Cu	73Cu	74Cu	75Cu
28	58Ni	59Ni	60Ni	61Ni	62Ni	63Ni	64Ni	65Ni	66Ni	67Ni	68Ni	69Ni	70Ni	71Ni	72Ni	73Ni	74Ni
	30		32		34		36		38		40		42		44		N

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΡΜΗΝΕΙΑ

- Η σταθερότητα εκφράζεται από την ύπαρξη ζευγών πρωτονίων - πρωτονίων, νετρονίων - νετρονίων
- Η ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση θα πρέπει να αναζητηθεί και στην εμφάνιση ζεύγους νουκλεονίου-νουκλεονίου
- Η ύπαρξη ζεύγους εξασφαλίζει ενεργειακά συμφέρουσες καταστάσεις, ώστε να ενισχύεται η σταθερότητα

ΟΜΩΣ...

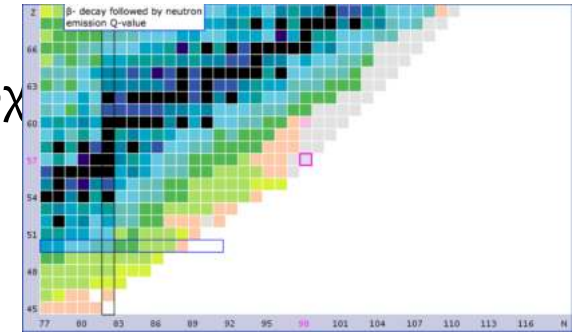
- Η ύπαρξη ζεύγους από μόνη της δεν αρκεί
- Σε χαμηλές μάζες, η σταθερότητα εμφανίζεται σε N/Z ≈1, ενώ αποκλίνει ως και 1.5 στο ^{209}Bi
- Απαιτείται δηλ. και συγκεκριμένη τιμή του N/Z
- Ομως, για ισότοπα βαρύτερα από το ^{209}Bi, ούτε αυτό αρκεί και υπάρχει μόνο αστάθεια

ΙΣΟΤΟΠΑ ΠΛΟΥΣΙΑ ΣΕ ΝΕΤΡΟΝΙΑ

- Αν ο λόγος N/Z είναι πολύ μεγάλος τότε μιλάμε για ισότοπα πλούσια σε νετρόνια (neutron-rich)
- Η αστάθεια σε αυτήν την περιοχή τείνει να μειώσει το N και να αυξήσει το Z
- β- αποδιέγερση π.χ. $^{116}In \longrightarrow {}^{116}Sn + e^{-} + \nu$

ΙΣΟΤΟΠΑ ΠΛΟΥΣΙΑ ΣΕ ΝΕΤΡΟΝΙΑ

- Αν ο λόγος N/Z είναι πολύ μεγάλος (>2) τότε μιλάμε για εξωτικά ισότοπα
- Υπάρχει όριο σταθερότητας για αυτά. Ορίζεται ως η γραμμή απορροής νετρονίων (neutron dripline)
- Υπάρχει εκπομπή n
- Ευρέως ανεξερεύνητη περιοχ

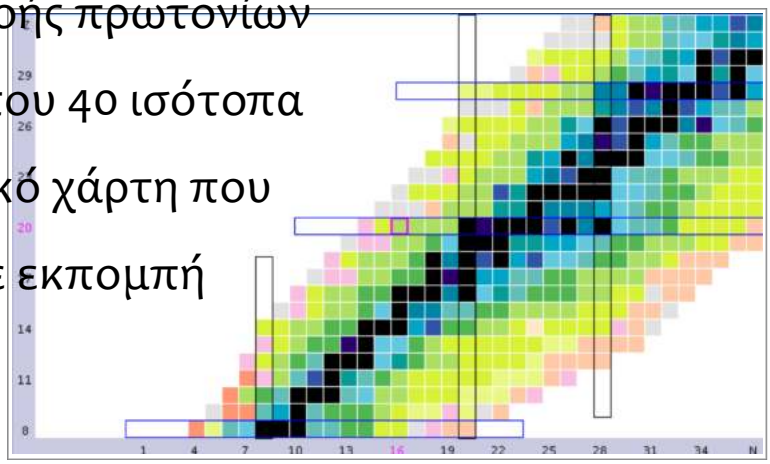


ΙΣΟΤΟΠΑ ΠΤΩΧΑ ΣΕ ΝΕΤΡΟΝΙΑ

- Αν ο λόγος N/Z είναι μικρός τότε μιλάμε για ισότοπα πτωχά σε νετρόνια (neutron-deficient)
- Η αστάθεια στην περιοχή αυτή τείνει να μειώσει το Z και να αυξήσει το N
- β+ αποδιέγερση ή σύλληψη ατομικού ηλεκτρονίου (EC) π.χ. $^{116}Sb \longrightarrow {}^{116}Sn + e^{+} + \nu$

ΙΣΟΤΟΠΑ ΠΤΩΧΑ ΣΕ ΝΕΤΡΟΝΙΑ

- Η EC αυξάνει όσο αυξάνει ο Z, πιο έντονη σε βαρείς πυρήνες
- Αν ο αριθμός N/Z είναι πολύ μικρός αγγίζει τα όρια της γραμμής απορροής πρωτονίων
- Υπάρχουν περίπου 40 ισότοπα "ΒΔ" στον ισοτοπικό χάρτη που αποδιεγείρονται με εκπομπή πρωτονίου



ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ

- Σε κάθε ραδιενεργή διάσπαση, διατηρούνται συγκεκριμένες αρχές
- Οι αρχές διατήρησης θέτουν όρια στα γεγονότα τα οποία μπορούν να συμβούν
- Η γενική περίπτωση είναι για ένα γεγονός της μορφής

$$X1 + X2 \rightarrow X3 + X4$$

ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- Η συνολική ενέργεια του συστήματος πρέπει να διατηρείται.
- Αυτή περιλαμβάνει όλα τις μορφές ενέργειας κινητική, μάζα, ηλεκτρομαγνητική κοκ

$$E1 + E2 \longrightarrow E3 + E4$$

ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΟΡΜΗΣ

- Η ορμή του συστήματος διατηρείται.

$$p1 + p2 \rightarrow p3 + p4$$

- Σχέση ορμής - κινητικής ενέργειας

$$E = p^2 / 2m$$

ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

- Το συνολικό φορτίο διατηρείται

$$Z1 + Z2 \longrightarrow Z3 + Z4$$

- Η μονάδα φορτίου μετριέται σε μονάδες στοιχειώδους φορτίου, e

ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΜΑΖΙΚΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ

- Ο συνολικός αριθμός νουκλεονίων διατηρείται

$$A1 + A2 \longrightarrow A3 + A4$$

- Εκφράζεται η διατήρηση του βαρυονικού αριθμού

ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΣΤΡΟΦΟΡΜΗΣ

- Ο συνολική στροφορμή διατηρείται

$$(PI)1 + (PI)2 \rightarrow (PI)3 + (PI)4$$

- Λόγω της ύπαρξης τροχιακής στροφορμής και σπιν, πρακτικότερο είναι:

$$\Delta I = I3+I4 - I1-I2$$

- Κβαντομηχανικά πρέπει: $\Delta I = 0,1,2,3,\ldots$

ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΑΡΧΕΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ

- Υπάρχουν και άλλες αρχές διατήρησης που εφαρμόζονται στις πυρηνικές αντιδράσεις Θα αναφερθούν αργότερα καθώς είναι πιο ειδικής φύσεως

Προβλημα [1 1]

Να συμπληρωθούν οι παρακάτω αντιδράσεις:

1. $p + {}^{112}Cd \longrightarrow \gamma + \ldots$
2. $\alpha + {}^{12} \longrightarrow {}^{16}O + \ldots$
3. ${}^{236}U \longrightarrow {}^{140}Xe + {}^{93}Sr + \ldots$
4. διάσπαση α του ${}^{230}Th$
5. διάσπαση β- του ${}^{95}Zr$
6. διάσπαση β+ του ${}^{17}F$

ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΟΝ ΠΥΡΗΝΑ

- Τέσσερις γνωστές θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις βαρυτική, ηλεκτρομαγνητική, ισχυρή, ασθενής
- Μόνο τρεις παίζουν ρόλο στον πυρήνα
- Βασική για τη δομή των ισοτόπων: ισχυρή
- Βασικό χαρακτηριστικό όλων:

  Αλληλεπιδράσεις ανταλλαγής

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ

- Αλληλεπίδραση ανταλλαγής: τα "σώματα" αντιδρούν με την ανταλλαγή δυνητικού φορέα

  Ο δυνητικός φορέας δεν μπορεί να ανιχνευθεί πειραματικά
- Εκφράζεται μέσω της ανισότητας Heisenberg

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$$

ΑΝΙΣΟΤΗΤΑ HEISENBERG

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar \qquad \Delta t \approx \hbar / \Delta E$$

- Στο χρόνο Δt μπορούν να παραβιαστούν οι ΑΔΕ και ΑΔΟ ανάμεσα στα παρατηρούμενα σωματίδια
- Για δυνητικό φωτόνιο με ταχύτητα c $R = c\Delta t \approx \hbar c / E_\gamma$
- Για δυνητικό σωμάτιο μάζας m, η εμβέλεια είναι:

$$R = c\Delta t \approx \hbar c / mc^2 = \hbar / mc$$

- Για την ισχυρή αλληλεπίδραση η εμβέλεια είναι ~1.4 fm, η οποία αντιστοιχεί σε μάζα του φορέα ~140 MeV/c^2

Η/Μ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ - ΑΤΟΜΟ

- Στο άτομο, η βασική αλληλεπίδραση είναι η Η/Μ, που έχει (θεωρητικά) άπειρη εμβέλεια
- Παρά την κάποια δυσκολία στα μαθηματική, το σύστημα είναι κβαντομηχανική επιλύσιμο ==> περιγραφή του ατόμου
- Στον πυρήνα δεν υπάρχει τέτοια αντιστοιχία και συνεπώς υπάρχει δυσκολία αυστηρής περιγραφής των πυρηνικών φαινομένων

ΚΒΑΝΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ - ΑΤΟΜΟ

- Βασική ιδιότητα είναι το σπιν του ηλεκτρονίου
- Σε ένα άτομο με πολλά ηλεκτρόνια, τα σπιν τείνουν να ευθυγραμμιστούν
- Υπάρχει ολική τροχιακή στροφορμή L και ολικό σπιν S
- Υπάρχει σύξευξη σπιν-τροχιάς L-S

ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΣΧΥΡΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

- Υπάρχει κορεσμός της ισχυρής αλληλεπίδρασης
- Εχει περιορισμένη εμβέλεια, εμφανίζεται μεταξύ γειτονικών νουκλεονίων ($\approx 10^{-15}$ m ή 1 fm)
- Είναι ισχυρά ελκτική, αλλά μπορεί να εμφανίσει και έντονα απωστικό χαρακτήρα σε πολύ μικρές αποστάσεις (επιβεβαιωμένο από πειράματα σκέδασης). Αυτό σημαίνει ότι ο πυρήνας δεν καταρρέει

ΔΕΥΤΕΡΙΟ, ^2D

- Ισότοπο του χημικού στοιχείου υδρογόνου (Η)
- Είναι το απλούστερο δέσμιο πυρηνικό σύστημα (π-ν)
- Διαθέτει μόνο μία δέσμια κατάσταση
- Παρουσιάζει απόκλιση από το σφαιρικό σχήμα
- Συνεπώς υπάρχει συνδυασμός ενός κεντρικού δυναμικού με κάποιο ασύμμετρο δυναμικό (τανυστικό)

ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΑ ΚΑΙ ΣΠΙΝ

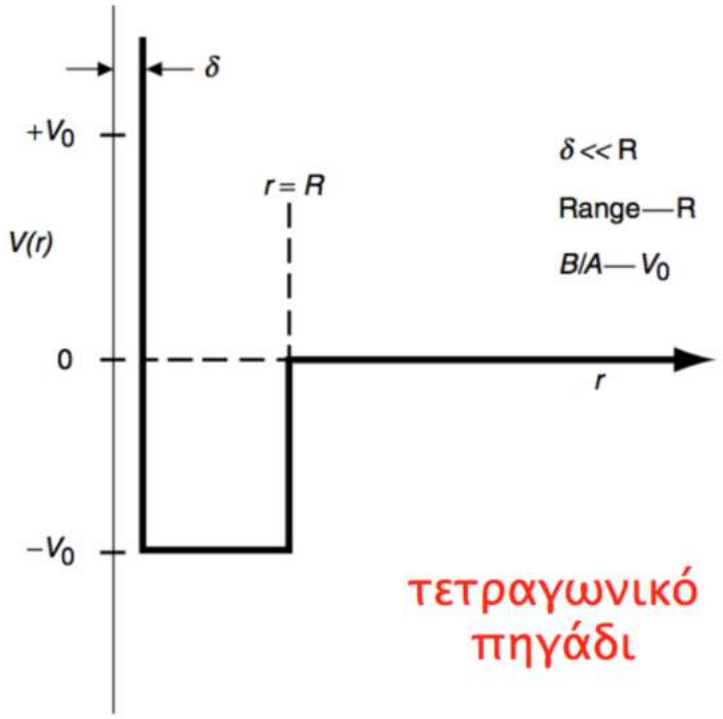
- Τα πρωτόνια και τα νετρόνια είναι φερμιόνια
- Υπάρχει συνολική τροχιακή στροφορμή, συνολικό σπιν
- S(π)=1/2, S(ν)=½
- Αν αυτά συνδυασμού στο δευτέριο, τότε

S(π) + S(ν) = 0 **S(π) + S(ν) = 1**

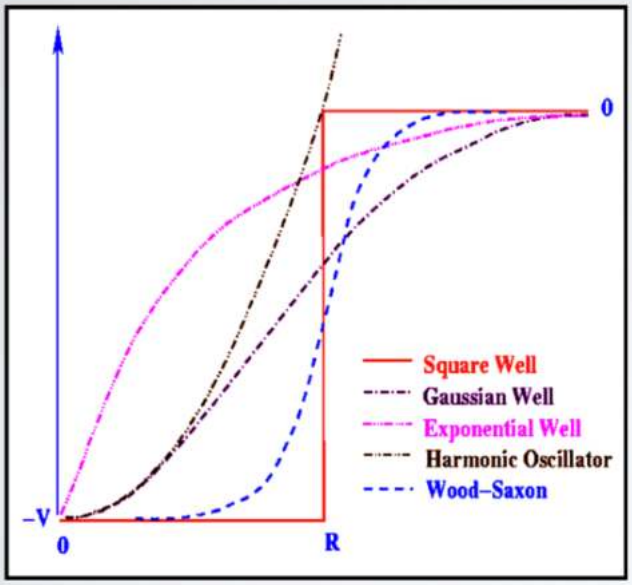
ΔΕΥΤΕΡΙΟ, ^2D

- Στο δευτέριο, η δέσμια κατάσταση έχει ολικό σπιν ίσο με τιμή 1
- Η κατάσταση με ολικό σπιν ο ΔΕΝ είναι δέσμια
- Από την παρατήρηση αυτή συνεπάγεται ότι το η πυρηνική δύναμη εξαρτάται από το σπιν

ΠΥΡΗΝΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ



ΡΕΑΛΙΣΤΙΚΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ



Yukawa

$$V(r) = -V_o \frac{e^{-(r/R)}}{(r/R)}$$

Woods-Saxon

$$V(r) = \frac{V_o}{1 + exp((r-R)/\alpha)}$$

τυπικές τιμές:

- V_o = 30-60 MeV
- R = 1.5-2 fm

Πρόβλημα [12]

Για το δυναμικό Yukawa με V_o=40 MeV και r_o=1.5 fm να υπολογιστεί ο λόγος ανάμεσα στο πυρηνικό δυναμικό και το δυναμικό Coulomb για αποστάσεις r=1,2,4,8 και 16 fm

ΑΝΕΞΑΡΤΗΣΙΑ ΦΟΡΤΙΟΥ

- Η ανεξαρτησία φορτίου της πυρηνικής αλληλεπίδρασης σημαίνει ότι η ασκούμενη δύναμη ανάμεσα στους συνδυασμούς π–π, ν–ν, ν–π είναι ακριβώς η ίδια
- Πειραματικά παρατηρείται στις ενέργειες σύνδεσης ελαφρών κατοπτρικών πυρήνων (εναλλαγή ενός πρωτονίου από ένα νετρόνιο

A	Nucleus	Net Nuclear Binding Energy (MeV)
3	^{3}H	−8.486
	^{3}He	−8.552
13	^{13}C	−104.734
	^{13}N	−104.770
23	^{23}Na	−209.67
	^{23}Na	−209.42
41	^{41}Ca	−416.44
	^{41}Sc	−416.63

ΚΒΑΝΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ - ΠΥΡΗΝΑΣ

- Τα νουκλεόνια υφίστανται ισχυρή σύζευξη
- Καλός κβαντικός αριθμός είναι το ολικό πυρηνικό σπιν, $j = l + s$
- Αρτιοι πυρήνες (A = άρτιο) έχουν άρτιο ολικό σπιν (0,1,2…)
- Περιττοί πυρήνες (A=περιττό) έχουν ημιακέραιο ολικό σπιν (1/2, 3/2, 5/2, …)

ΣΠΙΝ

- Η περιορισμένη εμβέλεια της πυρηνικής αλληλεπίδρασης και η ισχυρή σύζευξη κοντινών νουκλεονίων περιορίζει το μέχρι της ολικής στροφορμής σε βαρείς πυρήνες
- Η πυρηνική αλληλεπίδραση τείνει να βάλει τα νουκλεόνια σε αλληλοαναιρούμενα σπιν

ΟΜΟΤΙΜΙΑ

- Η ομοτιμία (parity) αναφέρεται στη συμμετρία της κυματοσυνάρτησης ενός νουκλεονίου ή ενός συστήματος νουκλεονίων
- $\Psi(r, t) = \pm \Psi(-r, t)$ —> άρτια + / περιττή –
- Για κεντρικό (σφαιρικό) δυναμικό υπάρχει εξάρτηση μόνο από την απόσταση. Από τις ιδιότητες των σφαιρικών αρμονικών, εξάγεται ότι οι ιδιοτιμές της ομοτιμίας είναι $\pi=(-1)^l$

ΙΣΟΣΠΙΝ

- Η ανεξαρτησία φορτίου μπορεί να εκφρασθεί μέσω της παραδοχής ότι τα πρωτόνια και τα νετρόνια είναι εκφάνσεις ενός και μόνο πυρηνικού σωματιδίου
- Το σωμάτιο αυτό το ονομάζουμε νουκλεόνιο
- Σε κβαντικό επίπεδο, η παραδοχή αυτή εκφράζεται μέσω ενός μεγέθους, το οποίο λαμβάνει ξεχωριστές ιδιοτιμές ανάλογα με το αν είναι πρωτόνιο ή νετρόνιο
- Το μέγεθος αυτό είναι το ισοσπίν ή ισοτοπικό σπιν, T

ΙΣΟΣΠΙΝ

- Το ισοσπίν μπορεί να εκφρασθεί μαθηματικά ως στροφορμή. Για τιμή T, υπάρχουν 2T+1 προβολές που αντιστοιχούν σε ιδιοκαταστάσεις
- $T(\pi) = +1/2$, $T(\nu) = -1/2$
- Για πυρήνα (N,Z), $T=(Z-N)/2$
- Βασική ιδιότητα: το ισοσπίν διατηρείται στην ισχυρή πυρηνική αλληλεπίδραση

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΔΟΜΗ

- Με τον όρο πυρηνική δομή εννοούμε όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά του πυρήνα που μας βοηθούν να καταλάβουμε το σχηματισμό του πυρήνα, τα ενεργειακά του επίπεδα, και άλλες ιδιότητες στηριζόμενοι στο συνδυασμό των δυνάμεων μεταξύ των νουκλεονίων

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΔΥΟ ΝΟΥΚΛΕΟΝΙΩΝ

- p-p, p-n, n-n
- Από τους δυνατούς συνδυασμούς μόνο ο p-n (δευτέριο) υπάρχει σε δέσμια κατάσταση => τάση για ίσο αριθμό p,n ακόμη και σε ελαφρείς πυρήνες

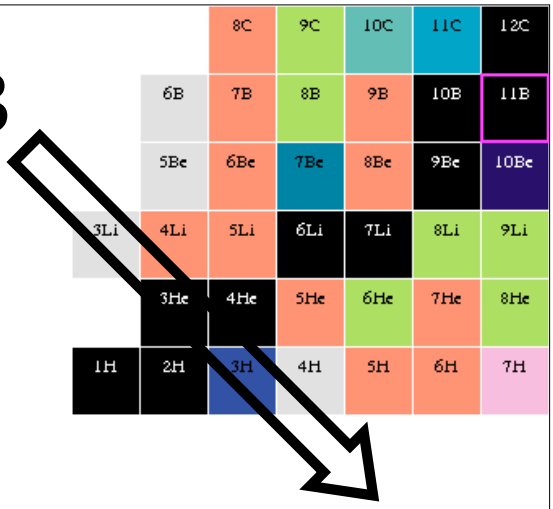
A = 2

- Λόγω αρχής Pauli δύο νετρόνια που συνδέονται (δινετρόνιο!!) δεν μπορούν να είναι σε κατάσταση l=0 ή s=0
- Αναγκαστικά πρέπει l=1 —> επομένως η ενέργεια αυξάνεται και το σύστημα γίνεται ασταθές

ΜΗ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

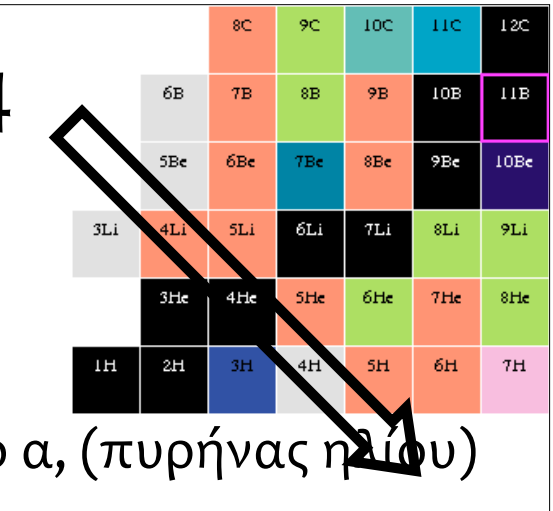
- Η τετραπολική ροπή Q του δευτερίου είναι μη μηδενική —>
  - το σχήμα αποκλίνει από το σφαιρικό
  - μη κεντρικότητα των δυνάμεων
  - τανυστικό δυναμικό

A = 3



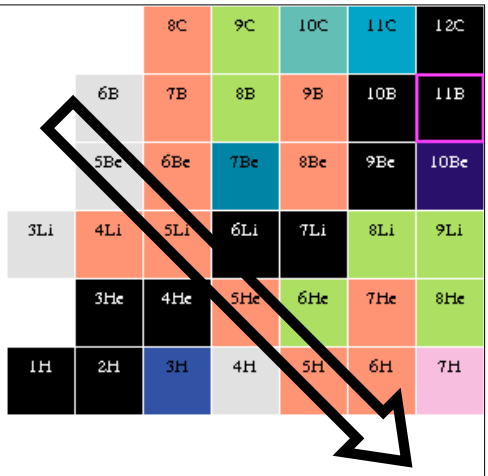
- ^{3}Li, (3p), (3n): ασταθή
- ^{3}He
- ^{3}H
- Ολικό σπιν ½ —> ζεύγος + ασύζευκτο νουκλεόνιο
- Το πλούσιο σε νετρόνια ^{3}H είναι λίγο πιο ασταθές από το κατοπτρικό του και αποδιεγείρεται μέσω αποδιέγερσης β- (χρόνος ημιζωής 12.7 έτη)

A = 4



- Από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς με τέσσερα νουκλεόνια, μόνο το σωμάτιο α, (πυρήνας ηλίου) είναι σταθερό και με μεγάλη ενέργεια σύνδεσης
- Ολικό σπίν S=0
- Στο ^{4}He υπάρχουν 2 ισχυρά συζευγμένα ζεύγη pp,nn

A = 5

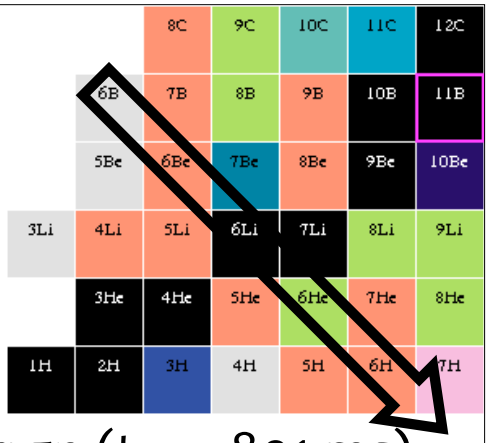


- Ο συνδυασμός

  ^{4}He + ασύζευκτο νουκλεόνιο

  οδηγεί αμέσως σε αστάθεια!
- Αυτό θέτει σημαντικά ερωτήματα για το πώς οικοδομήθηκαν στοιχεία βαρύτερα από το ήλιο στο αρχέγονο σύμπαν μιας και δεν υπάρχουν σταθερά ισότοπα με A=5

A = 6



- ^{6}Li: σταθερό
- ^{6}He: ασταθές αλλά μπορεί

  να βρεθεί σε δεσμική κατάσταση ($t_{1/2}$ = 801 ms)
- ^{6}He: αποδιεγείρεται με β- σε ^{6}Li

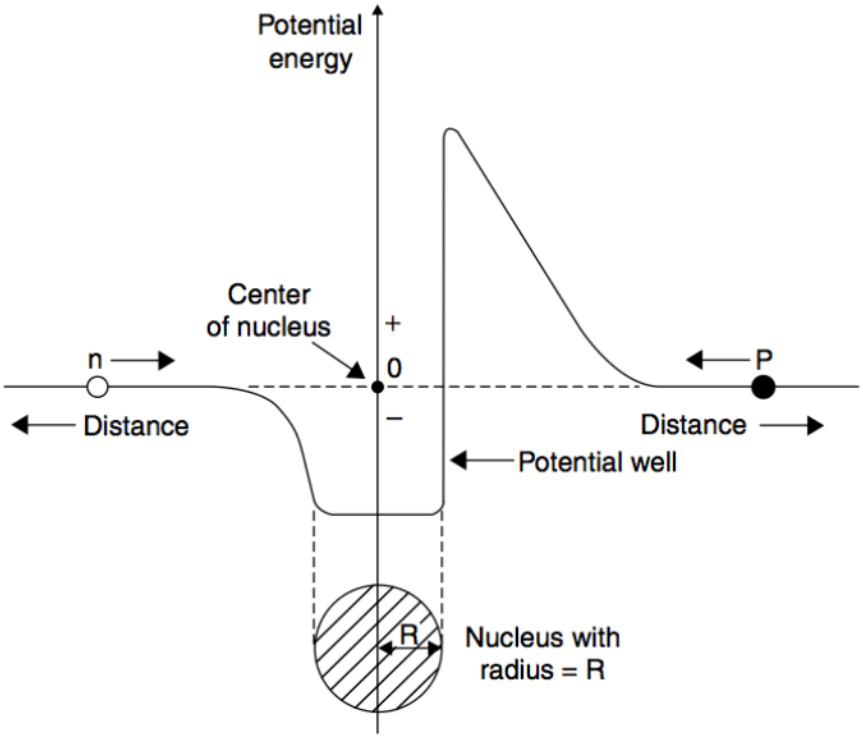
A = 6-209

- Υπάρχει ένα τουλάχιστον δέσμιο ισότοπο για όλα τα ισότοπα μέχρι A=209
- Εξαίρεση είναι οι ισοβαρείς με A=8
- Υπάρχουν το πολύ τρία σταθερά ισοβαρή για κάθε A

ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ

- Το πυρηνικό δυναμικό πρέπει να περιέχει αναγκαστικά τα βασικά χαρακτηριστικά της ισχυρής πυρηνικής αλληλεπίδρασης
- Λόγω της ύπαρξης της αλληλεπίδρασης Coulomb στα πρωτόνια, μπορεί να υποτεθεί ότι αυτά και τα νετρόνια "ζουν" σε διαφορετικά δυναμικά (αν και αλληλοεπικαλύπτονται)

ΓΕΝΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

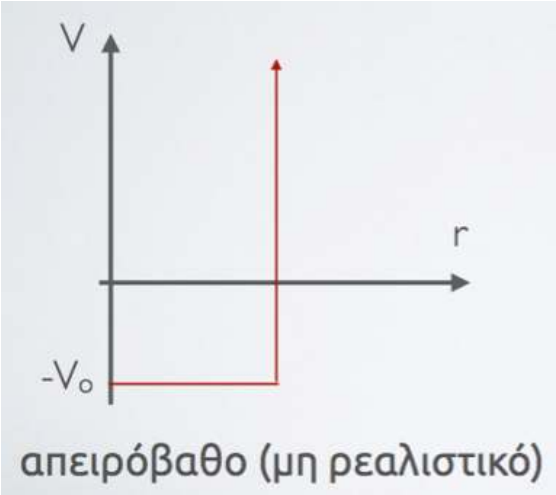


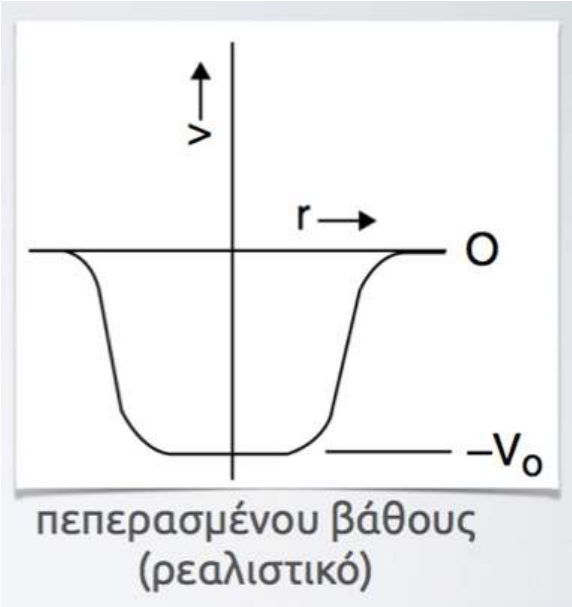
ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΤΩΝ ΦΛΟΙΩΝ

- Κβαντικό πηγάδι —> διακριτά ενεργειακά επίπεδα
- Υπάρχουν δέσμιες καταστάσεις (παρόμοιες με αυτές των ηλεκτρονίων σε ένα άτομο)
- Η εύρεση των σταθμών και των ενεργειών τους πραγματοποιείται με επίλυση της εξίσωσης Schrödinger η οποία περιλαμβάνει το δυναμικό του πυρήνα

ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΣΚΛΗΡΗΣ ΣΦΑΙΡΑΣ

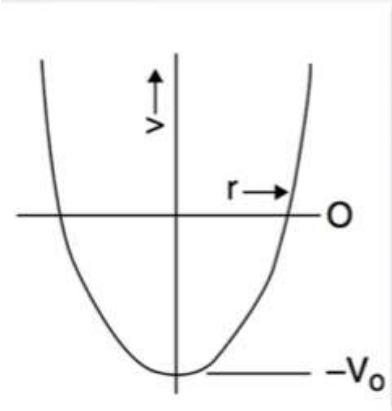
- Πρώτη προσέγγιση: τετραγωνικό πηγάδι





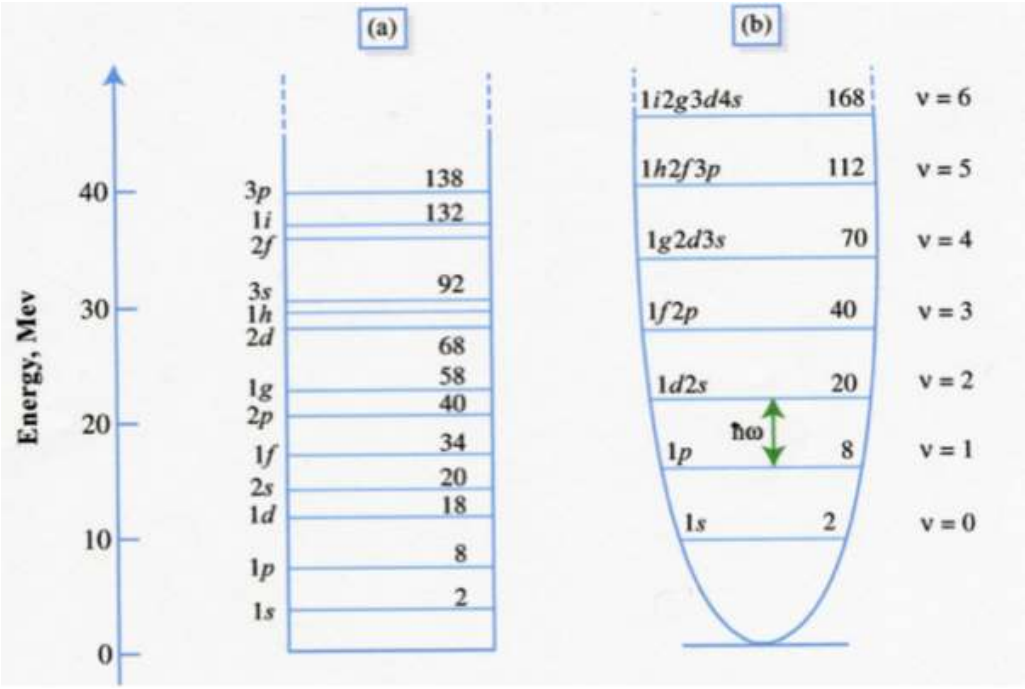
ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥ ΤΑΛΑΝΤΩΤΗ

- Παραβολικό σχήμα
- Απειρόβαθο
- Ρεαλιστικό μόνο για χαμηλές ενέργειες



- Οι ενεργειακές καταστάσεις είναι εκφυλισμένες (2N+1) και ισοδιαχωρίζονται στην ενέργεια
- Ο αριθμός κατάληψης στον ΑΤ είναι 2(2N+1) με N=0,1,2…
- Αριθμός κατάληψης σταθμών 2, 6, 10, …
- Χρήσιμο για ελαφρείς, αποκλίνει σε βαρείς πυρήνες

ΠΡΩΤΕΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ



ΣΥΖΕΥΞΗ ΣΠΙΝ-ΤΡΟΧΙΑΣ

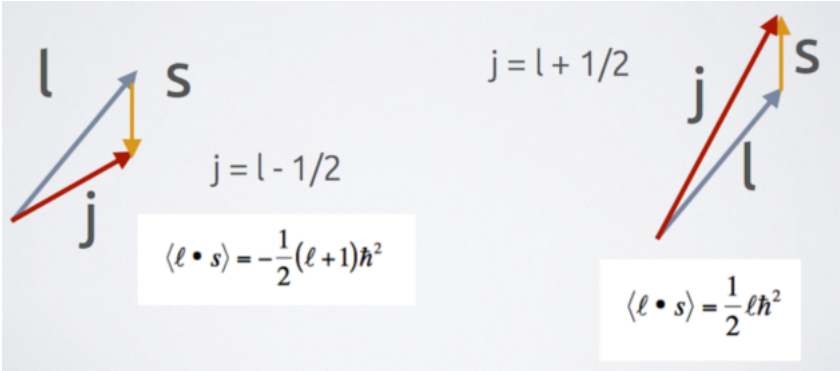
- Σημαίνει την τάση που έχουν σχετικιστικά σωμάτια να ευθυγραμμίζουν την τροχιακή στροφορμή με την ιδιοστροφορμή
- Η προσθήκη ενός όρου σπιν-τροχιάς στο δυναμικό του ΑΤ, άρει τον εκφυλισμό με βάση πλέον την ολική στροφορμή J=L+S
- Προτιμούνται στάθμες με μεγαλύτερη ολική στροφορμή J

ΣΥΖΕΥΞΗ ΣΠΙΝ-ΤΡΟΧΙΑΣ

Για κάθε νουκλεόνιο

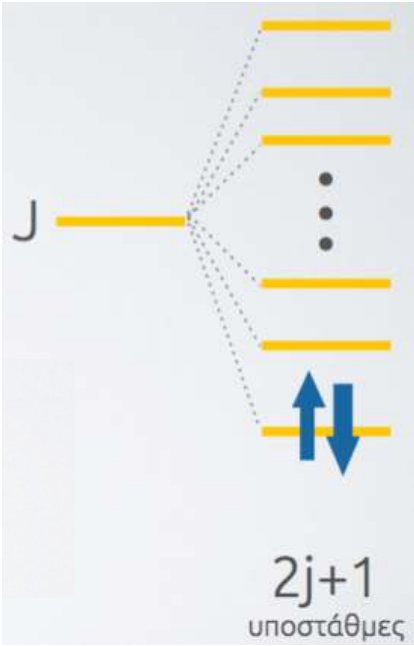
$$j^2 = (l+s)^2 = l^2 + s^2 + 2l \bullet s$$

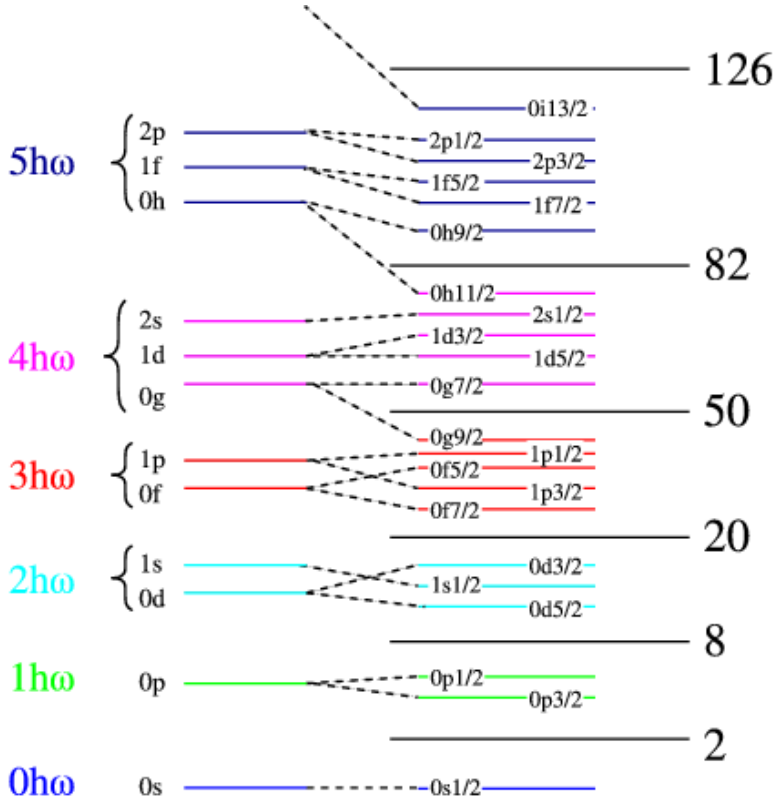
$$\langle l \bullet s \rangle = \frac{1}{2}\left[j(j+1) - \ell(\ell+1) - s(s+1)\right]\hbar^2$$



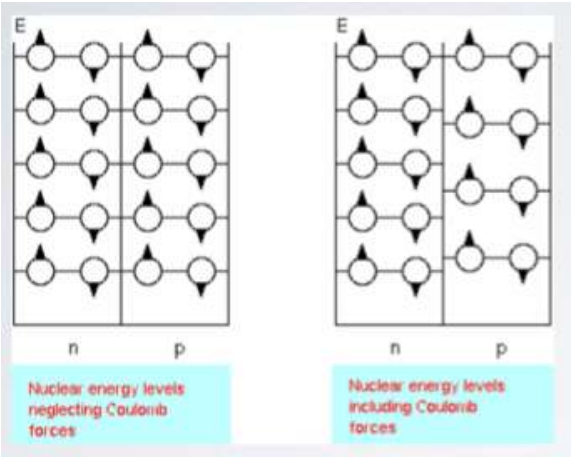
ΣΥΖΕΥΞΗ ΣΠΙΝ-ΤΡΟΧΙΑΣ

- Κάθε στάθμη έχει 2J+1 υποστάθμες
- Υπάρχουν ξεχωριστές στάθμες για πρωτόνια και νετρόνια
- Pauli: το πολύ δύο πρωτόνια ή δύο νετρόνια σε κάθε υποστάθμη



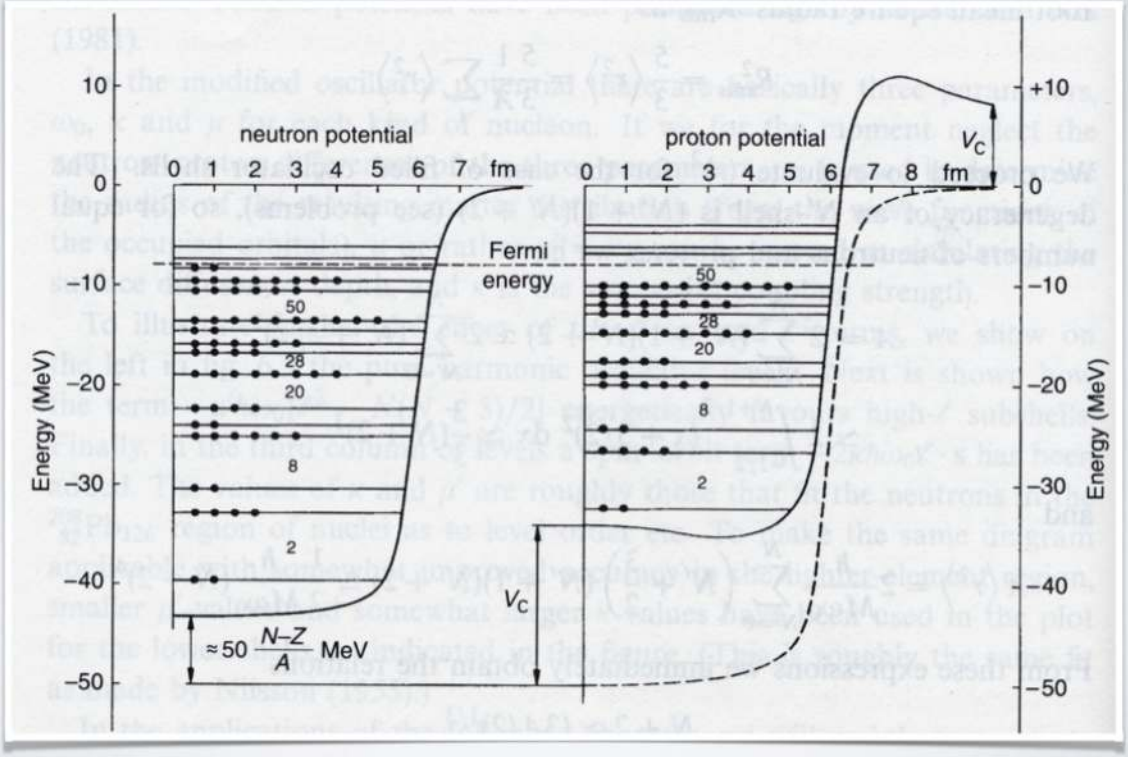


ΕΠΙΔΡΑΣΗ COULOMB

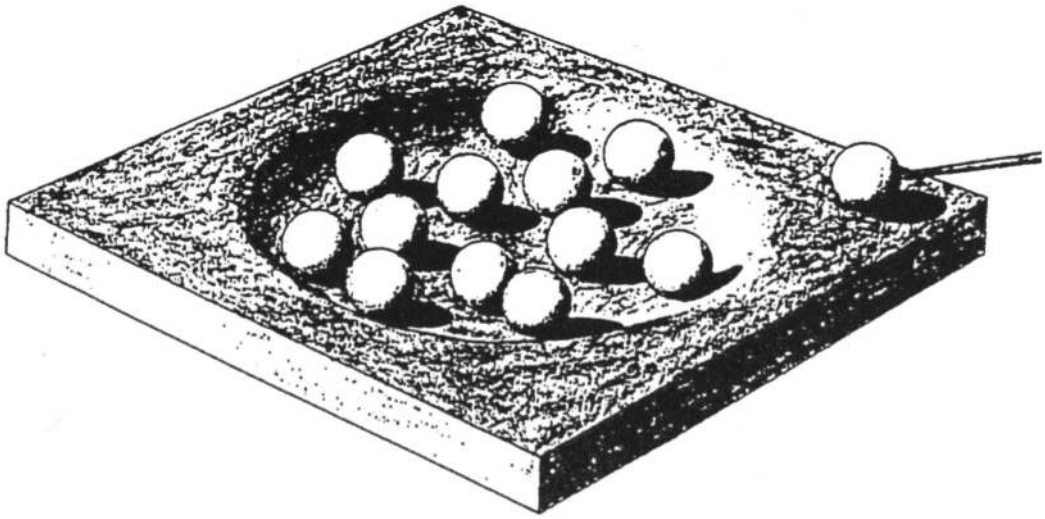


- Η άπωση Coulomb είναι υπεύθυνη για την άνοδο της ενέργειας στα πρωτόνια, άρα αυξάνει την αστάθεια

ΡΕΑΛΙΣΤΙΚΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ



Bohr, 1936



ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ

$1p_{1/2}$

$1p_{3/2}$

$1s_{1/2}$

$1p_{3/2}$

l=0 — s
l=1 — p
l=2 — d
l=3 — f
...
επομένως
p — l=1

j* = *l* + *s
αλλά
s=½
l=1
επομένως
j=3/2

ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΟΣ ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ

ΠΡΟΣΟΧΗ!!!
το άθροισμα είναι διανυσματικό:

j*=*l*+*s

επομένως:

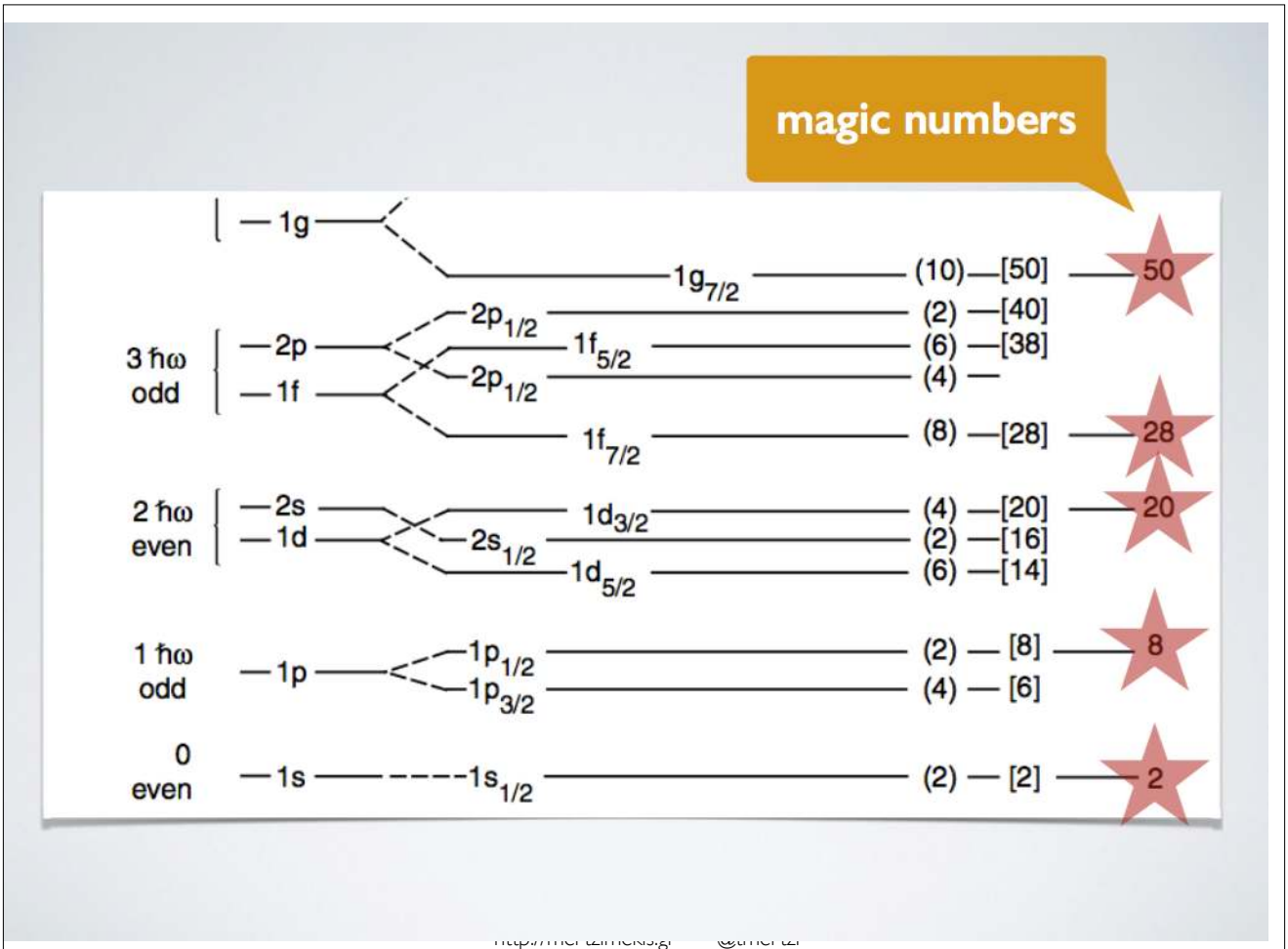
$j = l + s$
ή
$j = l - s$

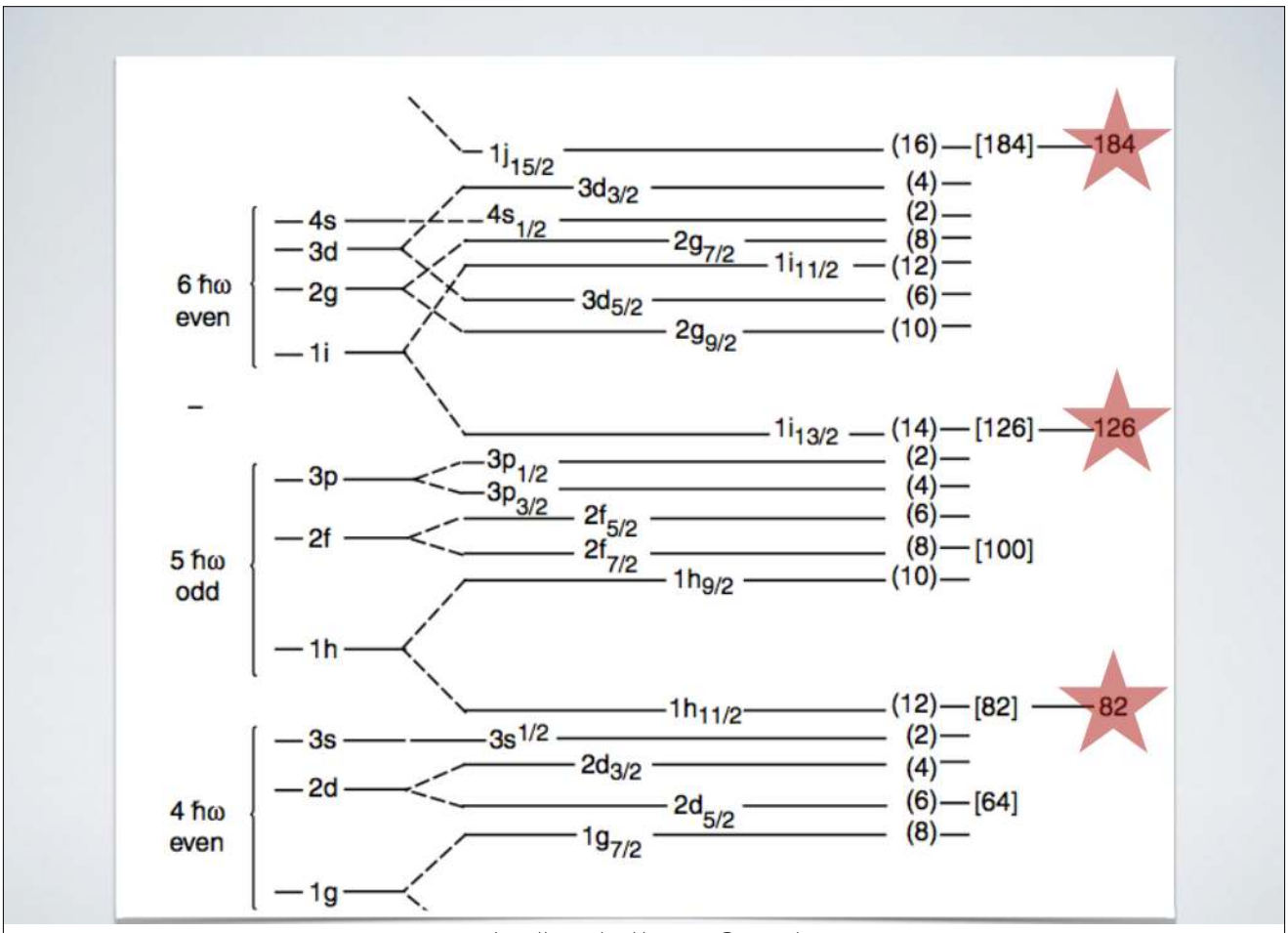
$2f_{5/2}$

l=0 — s
l=1 — p
l=2 — d
l=3 — f
...
επομένως
f — l=3

εδώ *j=l-s*
με
s=½
l=3

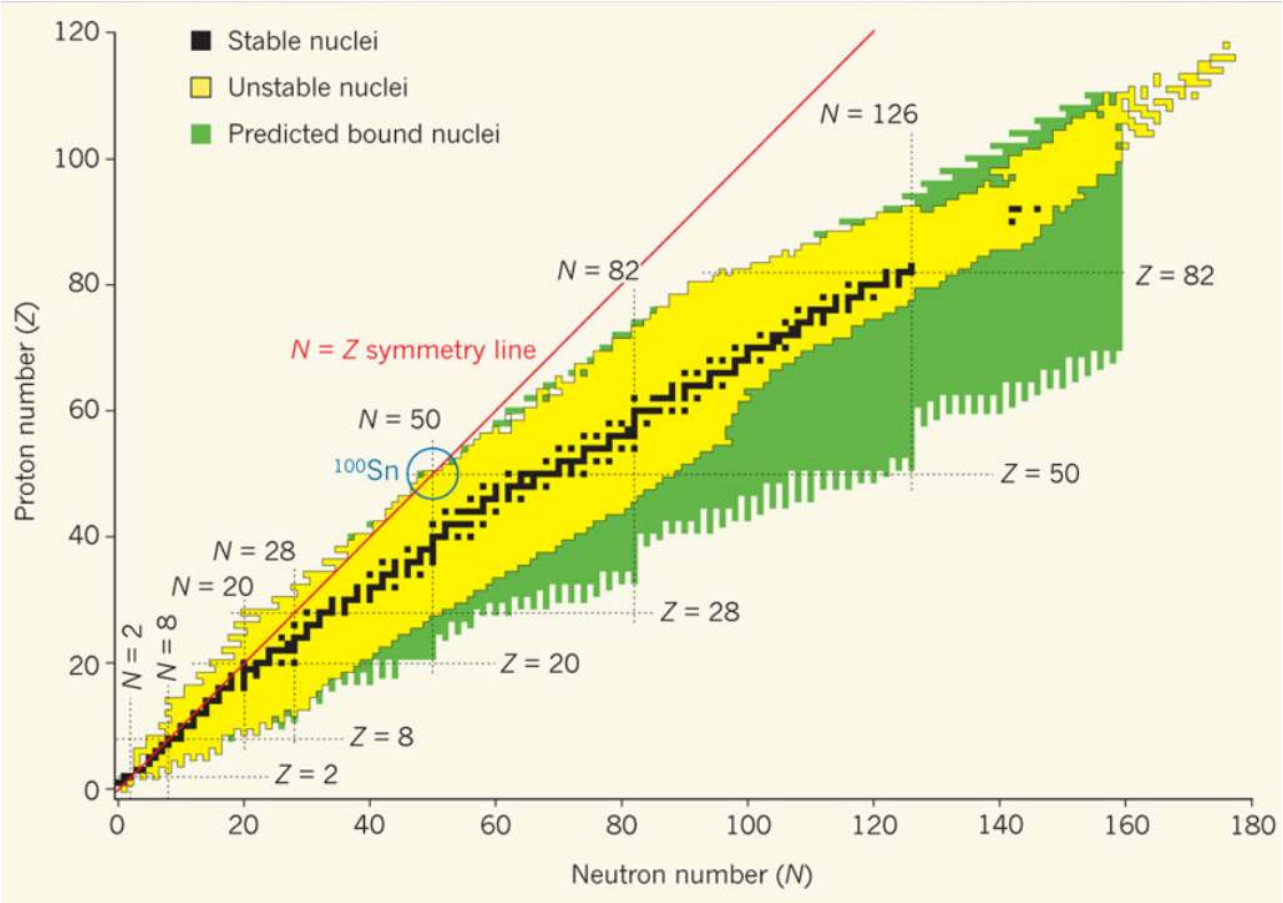
επομένως
j=3-½= 5/2


magic numbers
1g
1g7/2
(10)
[50]
50
2p1/2
(2)
[40]
3 ħω
odd
2p
1f5/2
(6)
[38]
1f
2p1/2
(4)
1f7/2
(8)
[28]
28
2 ħω
even
2s
1d3/2
(4)
[20]
20
1d
2s1/2
(2)
[16]
1d5/2
(6)
[14]
1 ħω
odd
1p
1p1/2
(2)
[8]
8
1p3/2
(4)
[6]
0
even
1s
1s1/2
(2)
[2]
2


1j15/2
(16)
[184]
184
3d3/2
(4)
4s
4s1/2
(2)
3d
2g7/2
(8)
1i11/2
(12)
6 ħω
even
2g
3d5/2
(6)
2g9/2
(10)
1i
1i13/2
(14)
[126]
126
3p
3p1/2
(2)
3p3/2
(4)
2f5/2
(6)
2f
2f7/2
(8)
[100]
5 ħω
odd
1h9/2
(10)
1h
1h11/2
(12)
[82]
82
3s
3s1/2
(2)
2d3/2
(4)
2d
2d5/2
(6)
[64]
4 ħω
even
1g7/2
(8)
1g

ΜΑΓΙΚΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ

- Στο συνδυασμό ΑΤ+ σπιν-τροχιάς υπάρχουν μεγάλα ενεργειακά κενά
- Τα κενά αντιστοιχούν σε συγκεκριμένους αριθμούς Z ή N και συνοδεύονται από πειραματικές παρατηρήσεις μεγάλης σταθερότητας για τα ισότοπα αυτά, πχ ^{4}He (Z=N=2), ^{16}O (Z=N=8) κ.ά.
- Ισότοπα με δύο μαγικούς αριθμούς εμφανίζουν εξαιρετικά μεγάλη σταθερότητα π.χ ^{48}Ca, ^{56}Ni
- Κάποιοι διπλά μαγικοί πυρήνες βρίσκονται εκτός κοιλάδας σταθερότητας πχ ^{56}Ni, ^{100}Sn, ^{132}Sn

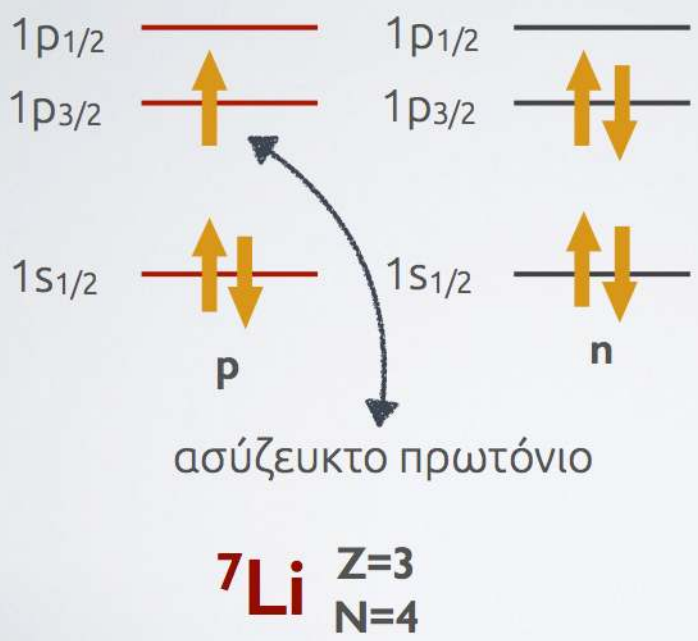


AUFBAU PRINZIP

- Πώς συμπληρώνουμε στάθμες σε γειτονικά ισότοπα;

1. Συμπληρώνουμε τη χαμηλότερη δυνατόν ενεργειακή στάθμη
2. Σχηματίζουμε ζεύγη με σπιν πάνω/σπιν κάτω (κανόνας Katz)
3. Για την εύρεση σπιν/ομοτιμίας του ισοτόπου χρησιμοποιούμε τους εμπειρικούς κανόνες Brennan-Bernstein

Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΛΙΘΙΟΥ-7

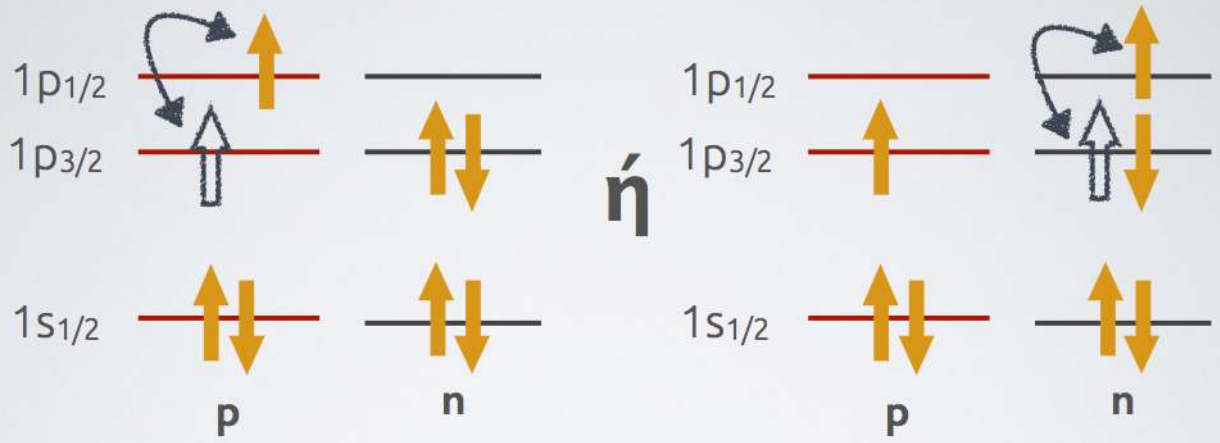


Διαμόρφωση:
p: $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^1$
n: $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^2$

Συνολικό σπιν:
3/2
Ομοτιμία
$(-1)^l = (-1)^1 = -1$
Επομένως:
$J^p = (3/2)-$

^{7}Li Z=3 N=4

ΔΙΕΓΕΡΜΕΝΗ ΣΤΑΘΜΗ

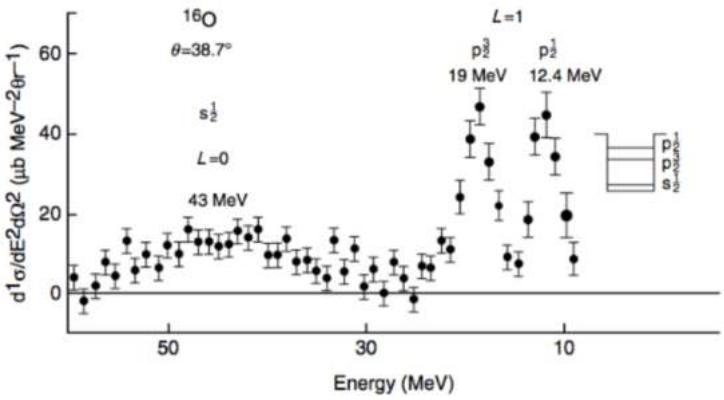


Στη φύση παρατηρείται μόνο μια διεγερμένη στάθμη που αντιστοιχεί στην προώθηση του πρωτονίου στην $1p_{1/2}$

Απαιτείται μεγάλη ενέργεια για να σπάσει το ζεύγος

ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑΘΜΗΣ

- Ο πειραματικός έλεγχος των προηγούμενων γίνεται μέσω αντιδράσεων πρόσληψης ή αφαίρεσης ενός νουκλεονίου
- π.χ. η αντίδραση (p,2p) στοχεύει στη μέτρηση της ενέργειας του φλοιού στον οποίο βρίσκεται το πρωτόνιο



ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - I

- Λόγω ισχυρής σύνδεσης του ζεύγους, τα ισότοπα με άρτιο-άρτιο αριθμό πρωτονίων-νετρονίων έχουν ολικό σπίν 0
- Οι κυματοσυναρτήσεις θα έχουν αντίστοιχα άρτια ομοτιμία (+)
- Ειδικότερα η βασική στάθμη σε άρτιο-άρτιο πυρήνα είναι 0+

ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - II

- Οι πυρήνες με άρτιο-περιττό ή περιττό-άρτιο αριθμό πρωτονίων-νετρονίων έχουν ως ολικό σπιν και ομοτιμία, το σπιν και την ομοτιμία του τελευταίου ασύζευκτου (περιττού) νουκλεονίου
- Ασύζευκτα νουκλεόνια και οπές σε κάποιο φλοιό είναι απολύτως ισοδύναμα μεταξύ τους

ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - III

- Οι πυρήνες με περιττό-περιττό αριθμό πρωτονίων-νετρονίων διαθέτουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα
- Το ολικό σπιν και η ομοτιμία τους καθορίζεται από τους κβαντομηχανικούς κανόνες άθροισης στροφορμών και το συνδυασμό των αντίστοιχων ομοτιμιών.
- Δεν υπάρχει γενικός κανόνας για το πώς αποφασίζουμε
- Βασικό κλειδί για τον τρόπο που καθορίζει το πυρηνικό δυναμικό το τελικό αποτέλεσμα προέρχεται από το δευτέριου (ευθυγραμμισμένες στροφορμές π-ν)

ΚΑΝΟΝΕΣ BRENNAN-BERNSTEIN

- Βάσει συστηματικής, διακρίνουμε τρεις (3) περιπτώσεις
- Αν έχουμε 2 σωμάτια ή 2 οπές σε στάθμες με ολική στροφορμή I1, I2, τότε:
- Κανόνας #1: Αν $I1 = L1 \pm ½$ και $I2 = L2 \mp ½$, $Iολ = |I1 - I2|$
- Κανόνας #2: Αν $I1 = L1 \pm ½$ και $I2 = L2 \pm ½$, $Iολ = |I1 \pm I2|$
- Αν έχουμε σωμάτια με οπές:
- Κανόνας #3: Αν $I1 = L1 \pm ½$ και $I2 = L2 \mp ½$, $Iολ = |I1 + I2 - 1|$

ΑΡΙΘΜΟΣ NORDHEIM

- Εναλλακτικά, μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός Nordheim

$$N = (Ip - Lp) + (In - Ln)$$

- Αν N= 0 —> Κανόνας #1 B-B
- Αν N=±1 —> Κανόνας #2 B-B
- Αν N= περιττός (σωμ/οπή) —> Κανόνας #3 B-B

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

- Να βρεθεί το σπιν και η ομοτιμία της βασικής στάθμης των παρακάτω ισοτόπων:
  - ^{35}Cl
  - ^{26}Al
  - ^{56}Co
  - ^{64}Cu
  - ^{198}Au

Πρόβλημα [14]

Να βρείτε το ολικό σπιν και την ομοτιμία των ^{38}Cl, ^{26}Al, ^{56}Co

^{38}Cl Z=17, N=21

άρα π: $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2(1d_{3/2})^1$
και ν: $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^1$

επομένως η περίπτωση είναι σωμάτιο σε j=l-½ με σωμάτιο σε j=l+½ δηλ. κανόνας #1
J = |3/2-7/2| = 2 με ομοτιμία $P=(-1)^{2+3}=-1$

Άρα η βασική στάθμη έχει 2^-

Ground and isomeric state information for $^{38}_{17}$Cl

E(level) (MeV)	Jπ	Δ(MeV)	$T_{1/2}$	Decay Modes
0.0	2-	-29.7981	37.24 m *5*	β- : 100.00 %
0.6714	5-	-29.1267	715 ms *3*	IT : 100.00 %

Πρόβλημα [14] συνέχεια

Να βρείτε το ολικό σπιν και την ομοτιμία των ^{38}Cl, ^{26}Al, ^{56}Co

^{26}Al Z=13, N=13

άρα π: $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^5$
και ν: $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^5$ οπές

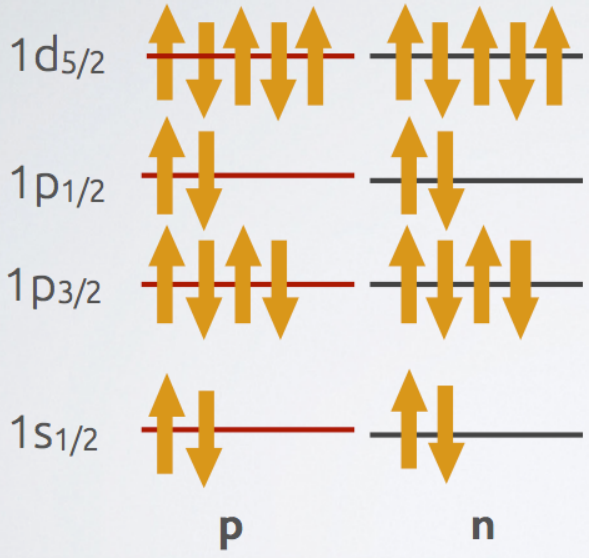
επομένως η περίπτωση είναι οπή σε j=l+½ με οπή σε j=l+½ δηλ. κανόνας #2
J = 5/2+5/2 = 5 με ομοτιμία $P=(-1)^{2+2} = +1$

Άρα η βασική στάθμη έχει 5^+

Ground and isomeric state information for $^{26}_{13}$Al

E(level) (MeV)	Jπ	Δ(MeV)	$T_{1/2}$	Decay Modes
0.0	5+	-12.2101	7.17E+5 y *24*	ε : 100.00 %
0.2283	0+	-11.9818	6.3464 s *7*	ε : 100.00 %

^{26}Al (Z=13, N=13)



p $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^5$

n $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^5$

Ολική διαμόρφωση:

$\pi(1d_{5/2})^{-1} \odot \nu(1d_{5/2})^{-1}$

$j = 5/2 \pm 5/2 = 0$ ή 5

Brennan-Bernstein:

Βασική στάθμη 5^+

Πρόβλημα [14] συνέχεια

Να βρείτε το ολικό σπιν και την ομοτιμία των ^{38}Cl, ^{26}Al, ^{56}Co

^{56}Co Z=27, N=29

άρα π: $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^7$
και ν: $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^8(2p_{3/2})^1$

επομένως η περίπτωση είναι οπή σε j=l+½ με σωμάτιο σε j=l+½ δηλ. κανόνας #3
J = 3/2+7/2-1 = 4 με ομοτιμία $P=(-1)^{3+1}=+1$

Άρα η βασική στάθμη έχει 4^+

Ground and isomeric state information for $^{56}_{27}$Co

E(level) (MeV)	Jπ	Δ(MeV)	$T_{1/2}$	Decay Modes
0.0	4+	-56.0397	77.236 d *26*	ε : 100.00 %

Πρόβλημα [15]

Να βρείτε το ολικό σπιν και την ομοτιμία του ^{64}Cu

Βασική στάθμη στο ^{64}Cu (Z=29, N=35)

περιττό πρωτόνιο στην ($2p_{3/2}$)
π: l=1, j=3/2=l+½

περιττό νετρόνιο στην ($1f_{5/2}$)
ν: l=3, j=5/2=l-½

#1: *αν* $j_1 = l_1 \pm ½$

και $j_2 = l_2 -+ ½$

τότε $J = |j_1 - j_2|$

Επομένως $j = |5/2 - 3/2| = 1$

Ομοτιμία: $P = (-1)^{l1} * (-1)^{l2} = (-1)^3 * (-1)^1 = (-1)*(-1) = +1$

Τελικά η στάθμη έχει 1^+

Πρόβλημα [16]

Να βρείτε το ολικό σπιν και την ομοτιμία του ^{198}Au

- ^{198}Au (Z=79, N=119)

Ολική διαμόρφωση: $\pi(1h_{11/2})^9$, $\nu(1i_{13/2})^7$ σωμάτια ή οπές

$\pi(1h_{11/2}) \odot \nu(1i_{13/2})$

$j = 13/2 \pm 11/2 = 1$ ή 12

Προβλέψεις Brennan-Bernstein:

Βασική στάθμη 1^-

Ισομερής στάθμη 12^-

Ground and isomeric state information for $^{198}_{79}Au$

E(level) (MeV)	Jπ	Δ(MeV)	$T_{1/2}$	Decay Modes
0.0	2-	-29.5819	2.6948 d *12*	β- : 100.00 %
0.8117	(12-)	-28.7702	2.272 d *16*	IT : 100.00 %

BRENNAN-BERNSTEIN

- Οι κανόνες είναι εμπειρικοί και βασίζονται στη συστηματική συμπεριφορά πειραματικών δεδομένων
- Δεν πηγάζουν από κβαντομηχανική αναγκαιότητα
- Δεν έχουν οικουμενική εφαρμογή (20<A<120)

Brennan-Bernstein Rules for Spins of Odd-Odd Nuclei.

Rule	Apply when	Predicted spin(s)[a]	Success[b] No. correct predictions / No. levels applicable
$R1$	Both particle or hole states $j_p = l_n \pm 1/2$ $j_n = l_n \pm 1/2$	$I = \lvert J_p - J_n \rvert$	50/55
$R2$	Both particle or hole states $j_p = l_p \pm 1/2$ $j_n = l_n \pm 1/2$	$I = J_p + J_n$ or $\lvert J_p - J_n \rvert$	92/102
$R3$	Mixed hole-particle states	$I = J_p + J_n - 1$	22/35

[a] The distinction between j and J is as follows: j is the angular momentum of the orbital occupied by the uncoupled particle and J is the total angular momentum of the odd proton or neutron group. Normally $j = J$, but there are anomalous cases in which a peculiar coupling, e.g., $J = j - 1$ is observed. For example, in some odd-A silver isotopes, the proton configuration $g^9/_2^{-1}$ has ground state $J = 7/2$.
[b] Reference (22).

ΔΙΕΓΕΡΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

- Στις διεγερμένες καταστάσεις υπάρχει ανάλογη συλλογιστική όπως και στις θεμελιώδεις
- Στη σύνθετη περίπτωση των π-π πυρήνων I=I1-I2 ή I=I1+I2
- Και οι δύο περιπτώσεις είναι κβαντομηχανικά εφικτές. Μία εκ των δύο έχει χαμηλότερη ενέργεια, η άλλη εμφανίζεται ΠΑΝΤΟΤΕ και έχει συνήθως τη φύση μια ΙΣΟΜΕΡΟΥΣ κατάστασης
- Η ισομερής αποδιεγείρεται προς τη θεμελιώδη, αλλά λόγω μεγάλης διαφοράς στροφορμής, ο χρόνος ημιζωής είναι μεγάλος

ΕΠΙΤΥΧΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΤΩΝ ΦΛΟΙΩΝ

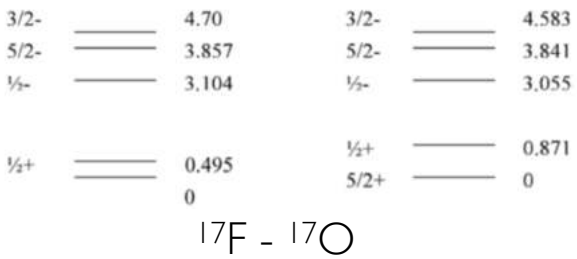
- Προβλέπει το σπιν, την ομοτιμία και άλλα μεγέθη της βασικής στάθμης
- Δίνει πολλές πληροφορίες για διεγερμένες στάθμες και τις ενδιάμεσες αποδιεγέρσεις
- Εξηγεί την ύπαρξη των ισομερών καταστάσεων και εξηγεί δομικά χαρακτηριστικά τους
- Εξηγεί ιδιότητες των κατοπτρικών πυρήνων

ΚΑΤΟΠΤΡΙΚΟΙ ΠΥΡΗΝΕΣ

- Είναι πυρήνες που προκύπτουν από αμοιβαία αλλαγή πρωτονίων - νετρονίων (Z <—> N)
- Η δομή τους αναμένεται να είναι ταυτόσημη αν αγνοηθεί η ενεργειακή διαφορά της Η/Μ άπωσης μεταξύ των πρόσθετων πρωτονίων στον έναν εκ των δύο
- Η ενεργειακή διαφορά σε κατοπτρικό ζεύγος είναι:

$$\Delta E_c = \frac{3}{5}\frac{e^2}{R}\left[Z^2 - (Z-1)^2\right] = \frac{3}{5}\frac{e^2}{R}(2Z-1) \approx \frac{Ze^2}{R}$$

$$E_c = \frac{3}{5}\frac{Ze^2}{R}$$



^{17}F - ^{17}O

ΙΣΟΣΠΙΝ

- Το ισοσπίν είναι καθαρά κβαντομηχανική ιδιότητα
- Ορθότερη ονομασία: ισοβαρικό σπιν, καθώς ενοποιεί μέσω συμμετρίας ισοβαρείς πυρήνες (ίδιου A)
- Διαθέτει αλγεβρικές ιδιότητες στροφορμής
- Διαχωρίζει ισοβαρείς πυρήνες με βάση την 3η προβολή του, γενικά $T_z = (Z-N)/2$

ΙΣΟΣΠΙΝ & ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ

- Η ανεξαρτησία φορτίου της ισχυρής πυρηνικής αλληλεπίδρασης συμφωνεί με το $[T,H_N]=0$
- Οι στάθμες του ισοσπίν είναι εκφυλισμένες, συνολικά έχει 2T+1 στάθμες για μια τιμή T
- Οι διαφορές στις μάζες πρωτονίου-νετρονίου είναι καθαρά λόγω ενέργειας της Η/Μ αλληλεπίδρασης σε επίπεδο κουάρκ (δομή νουκλεονίου)

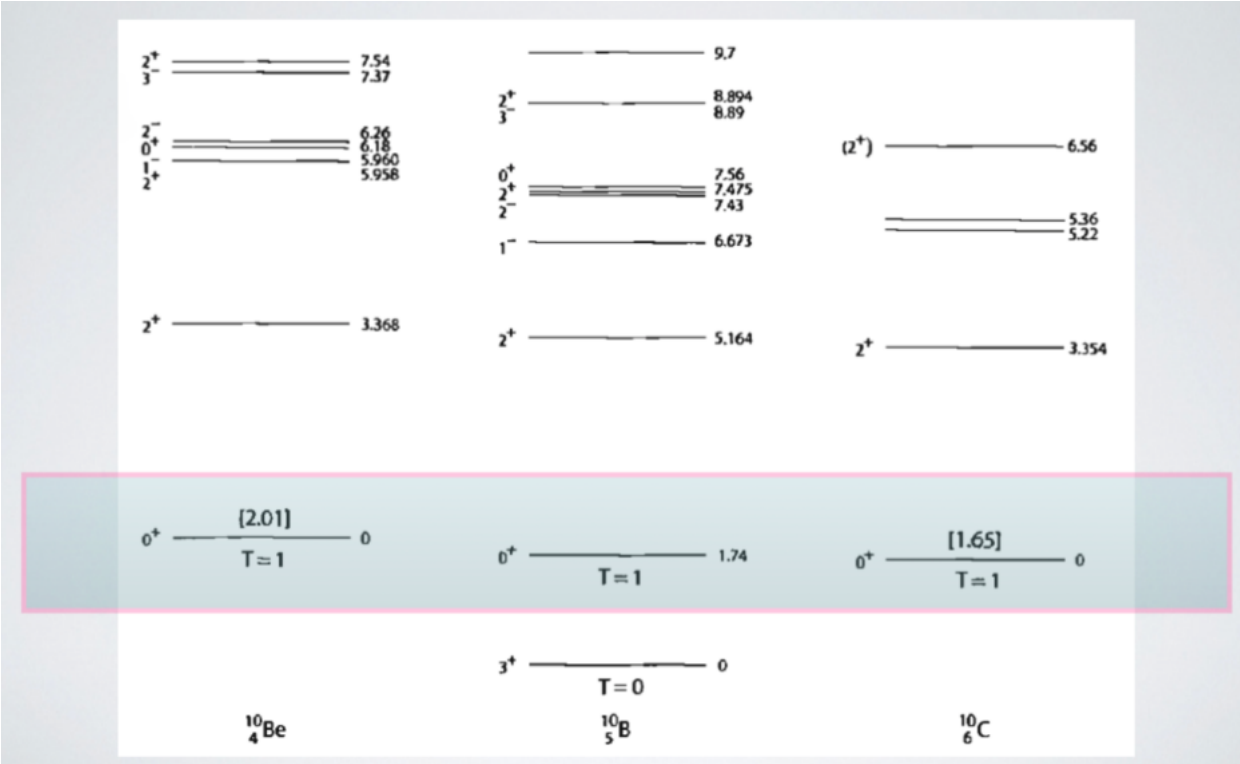
ΙΣΟΒΑΡΕΙΣ ΑΝΑΛΟΓΙΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ

- Αν αγνοηθεί η Η/Μ αλληλεπίδραση εντός του πυρήνας, τότε οι 2Τ+1 εκφυλισμένες στάθμες θα πρέπει να έχουν την ίδια ενέργεια.
- Οι στάθμες αυτές ανήκουν σε διαφορετικούς, ισοβαρείς πυρήνες (ίδιο Α, διαφορετικό Ζ)
- Ονομάζονται ισοβαρείς αναλογικές στάθμες
- Εντοπίζονται μεταξύ $(Z-N)/2 \leq T \leq (Z+N)/2$

ΙΣΟΒΑΡΕΙΣ ΑΝΑΛΟΓΙΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ

- Σε ελαφρείς πυρήνες, αν υπάρχουν Κ νουκλεόνια έξω από το εσωτερικό μόρφωμα με Ζ=Ν, υπάρχει η δυνατότητα να διαμορφωθούν Κ+1 πυρήνες
- το ισοσπίν είναι μεταξύ $|Tz| \leq T \leq (Z+N)/2$
- π.χ. Ζ=Ν-4, Κ=2

A=10 ΑΝΑΛΟΓΙΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ



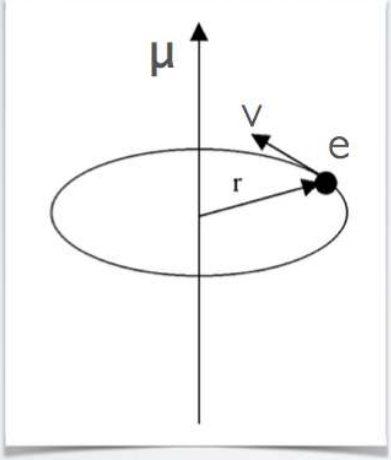
ΑΝΑΛΟΓΙΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΙΟ

- Στο δευτέριο (p-n), οι αναλογικές στάθμες θα πρέπει να υπάρχουν και στο σύστημα p-p, n-n
- Ομως η στάθμη με T=0 στο δευτέριο είναι μη δέσμια κι επομένως, αντίστοιχα είναι μη δέσμιες και στο διπρωτόνιο/δινετρόνιο

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ

- Αναφέρονται κυρίως η μαγνητική διπολική ροπή, μ, και η ηλεκτρική τετραπολική ροπή, Q
- Υπάρχουν κλασσικά ανάλογα, αλλά στον πυρήνα αφορούν κβαντομηχανικές ιδιότητες που εκφράζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, π.χ. σχήμα πυρήνα

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ



Στο κλασσικό όριο:

$$|\mu| = iA = \left(\frac{ev}{2\pi r}\right)(\pi r^2) = \frac{evr}{2}$$

$l = m_o vr$

$$|\mu| = \frac{evr}{2} \times \frac{m_0}{m_0} = \frac{el}{2m_0}$$

Γυρομαγνητικός λόγος, γ:

$$|\mu|/l = e/2m_0$$

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ

Στο κβαντικό όριο: $l = m\hbar$

$$\mu = (e/2m_0)m_l\hbar = m_l\mu_B$$

μαγνητόνη Bohr:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_0} = 5.78 \times 10^{-11}\ MeV \cdot T^{-1}$$

πυρηνική μαγνητόνη:

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 3.15 \times 10^{-14}\ MeV \cdot T^{-1}$$

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ

$$\mu^{proton} = m_l\mu_N$$

Σε σχέση με το γυρομαγνητικό λόγο:

$$\mu = g_l m_l \mu_N$$

τροχιακή στροφορμή

Για πρωτόνια αναμένουμε: $g_l = 1$

Για νετρόνια αναμένουμε: $g_l = 0$

$$\mu = g_s m_s \mu_N$$

σπιν

e: g_s= 2.0023

p: g_s=5.58694713 (46)

n: g_s=-3.82608545 (90)

ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ

- Για ένα σωματίδιο:

$\mu = g_l l + g_s s$

Οπότε για νουκλεόνιο:

$s = ½ \Rightarrow \mu = g_l l + ½ g_s$

p $g_l = l\mu_0 \qquad g_s = 5.5845\mu_0$

$\mu_0 = e\hbar/2m_p c$

n $g_l = 0 \qquad g_s = -3.8263\mu_0$

$j = l + s,$

$$\mu = lg_l + \tfrac{1}{2}g_s$$

$j = l - s,$

$$\mu = (j/j+1)[(l+1)g_l - \tfrac{1}{2}g_s]$$

- Υπό μια εξίσωση:

$$\mu = j\left[g_l \pm \left(\tfrac{1}{2}l + 1\right)(g_s - gl)\right]$$

ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ

περιττό πρωτόνιο

j=l-½ $$\mu = \frac{1}{2}\frac{j}{j+1}\left(2j + 3 - g_s^p\right)\mu_N$$

j=l+½ $$\mu = \frac{1}{2}\left(2j - 1 + g_s^p\right)\mu_N$$

περιττό νετρόνιο

j=l-½ $$\mu = -\frac{1}{2}\frac{j}{j+1}g_s^v\,\mu_N$$

j=l+½ $$\mu = \frac{1}{2}g_s^v\,\mu_N$$

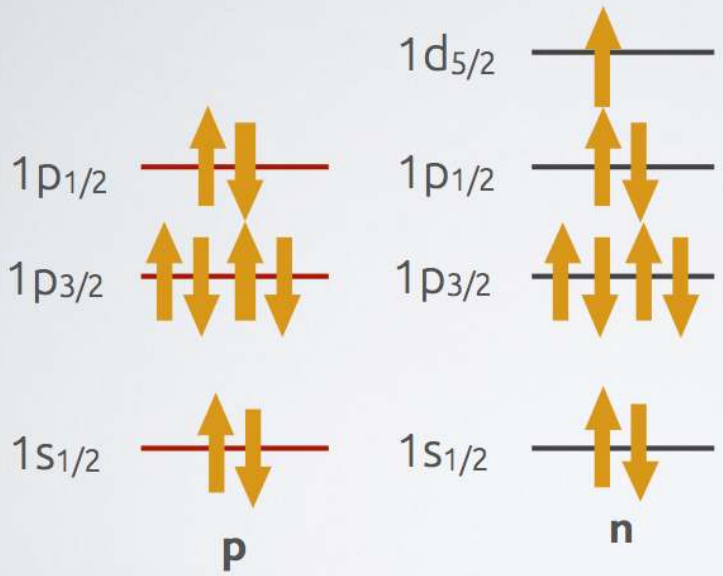
Οι παραπάνω τιμές είναι γνωστές και ως όρια Schmidt

Πρόβλημα [17]

Να βρείτε τη μαγνητική διπολική ροπή του ^{17}O

Βασική στάθμη στο ^{17}O (Z=8, N=9)

περιττό νετρόνιο στην ($1d_{5/2}$)
ν: l=2, j=5/2=l+½



$\mu = (½) * g^{\nu}_{s}\, \mu_N$

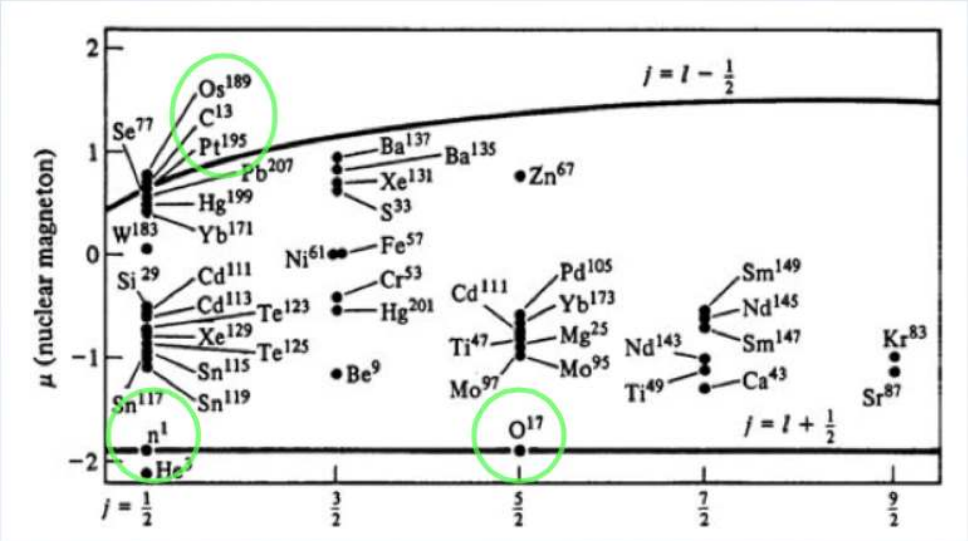
$\mu = (½)*3.826\, \mu_N$

$\mu = -1.913\, \mu_N$

Πειραματική τιμή:
$-1.89379(9)\, \mu_N$

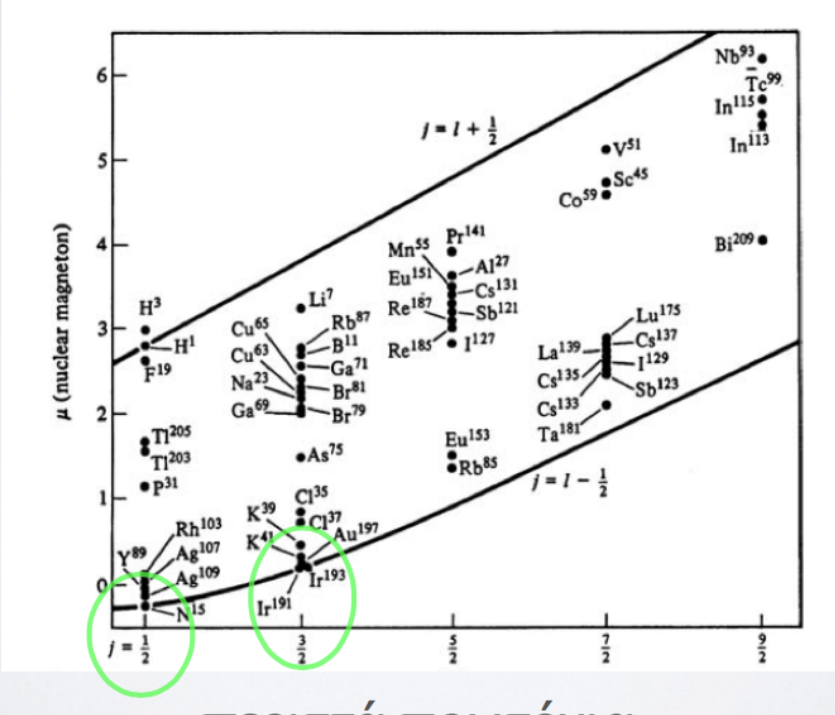
ασύζευκτο νετρόνιο

ΟΡΙΑ SCHMIDT



περιττά νετρόνια

ΟΡΙΑ SCHMIDT



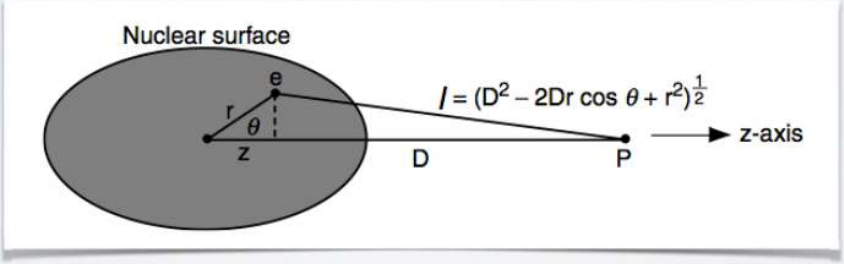
περιττά πρωτόνια

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΟΡΙΑ SCHMIDT

- Ελάχιστες τιμές βρίσκονται ακριβώς στα όρια. Οι περισσότερες τιμές βρίσκονται στο ~60% των ακραίων τιμών
- Αναδεικνύεται η μείξη διαμορφώσεων. Συνεισφέρουν συνήθως περισσότερες από μία δυνατές καταστάσεις στην τελική τιμή
- Υποδεικνύεται επίσης η ΜΗ ΠΛΗΡΗΣ ακύρωση των ζευγών, αλλά και άλλα φαινόμενα.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΕΤΡΑΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ

Αν ο πυρήνας δεν είναι σφαιρικός, τότε υπάρχει κατανομή φορτίου που ακολουθεί το σχήμα του, ρ=ρ(ϑ,φ,r)



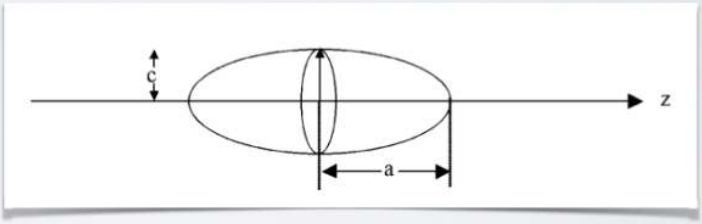
Το δυναμικό σε απόσταση D λόγω της κατανομής μπορεί να υπολογιστεί:

$$d\Phi = \rho\ d\tau/\delta = \rho\ d\tau\,[D^2 + r^2 - 2Dr\cos\theta]^{-1/2}$$

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΕΤΡΑΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ

Η Q είναι μέτρο της **μη** σφαιρικότητας του πυρήνα

$$Q = \tfrac{2}{5}Ze(a^2 - c^2)$$



$$R^2 = \tfrac{1}{2}(a^2 + c^2) = (r_0 A^{1/3})^2$$

Μπορεί να υπολογιστεί μονοσήμαντα το μήκος των αξόνων του ελλειψοειδούς

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΕΤΡΑΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ

Με απαλοιφή της απόστασης D και χρήση πολυωνύμων Legendre:

$$P_1(\cos\theta) = \cos\theta \qquad P_2(\cos\theta) = \tfrac{3}{2}\cos^2\theta - \tfrac{1}{2}$$

$$d\Phi = \frac{\rho\, d\tau}{D}\left[1 + \frac{r}{D}P_1(\cos\theta) + \left(\frac{r}{D}\right)^2 P_2(\cos\theta) + \cdots\right]$$

το δυναμικό μπορεί να γραφεί:

$$V = \frac{1}{D}\left[\int_{\text{volume}} \rho\, d\tau\right] + \frac{1}{D^2}\left[\int_{\text{volume}} \rho r\cos\theta\, d\tau\right] + \frac{1}{D^3}\left[\int_{\text{volume}} \rho r^2\left(\tfrac{3}{2}\cos^2\theta - \tfrac{1}{2}\right) d\tau + \cdots\right]$$

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΕΤΡΑΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ

$$V = \frac{1}{D}\left[\int_{\text{volume}} \rho\, d\tau\right] + \frac{1}{D^2}\left[\int_{\text{volume}} \rho r\cos\theta\, d\tau\right] + \frac{1}{D^3}\left[\int_{\text{volume}} \rho r^2\left(\tfrac{3}{2}\cos^2\theta - \tfrac{1}{2}\right) d\tau + \cdots\right]$$

Μονόπολο
Ze

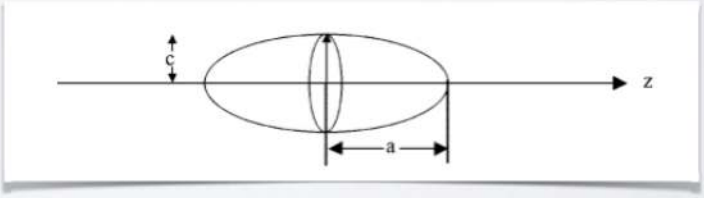
Δίπολο = 0

Τετράπολο

Η τετραπολική κατανομή ΔΕ θα είναι μηδενική αν ο πυρήνας αποκλίνει από το σφαιρικό σχήμα

ΗΛΕΚ. ΤΕΤΡΑΠΟΛΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ

- Για "κανονικούς" πυρήνες $<r^2> \approx (3/5)\, R^2$
- Η τιμή αναμένεται να είναι διαφορετική για πυρήνες με άλω, άρα "μη κανονικές" κατανομές φορτίου στον πυρηνικό όγκο
- Η μονάδα είναι μονάδα εμβαδού, άρα m^2
- Συνήθως είναι το barn = $10^{-28}\ m^2$



αποδεικνύεται ότι $Q=(2/5)Z(a^2-c^2)$

ΟΠΕΣ - ΣΩΜΑΤΙΑ

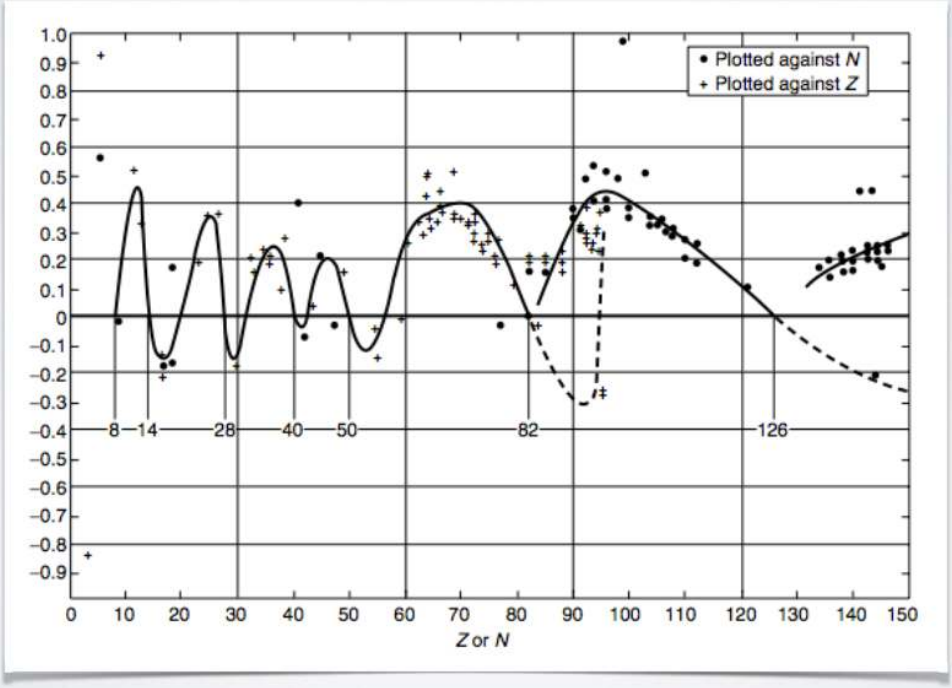
- Αν υποθέσουμε ότι υπάρχει οπή πρωτονίου, τότε λόγω του αντίθετου φορτίου της οπής, αναμένεται $Q_p^{\text{οπής}} = -Q_p$, δηλ. ΘΕΤΙΚΗ
- Εχει βρεθεί ότι η Q εξαρτάται γραμμικά από τον περιττό αριθμό των πρωτονίων.
- Συνεπώς τα όρια των Q κυμαίνονται ανάμεσα στις τιμές της οπής και του σωματίου

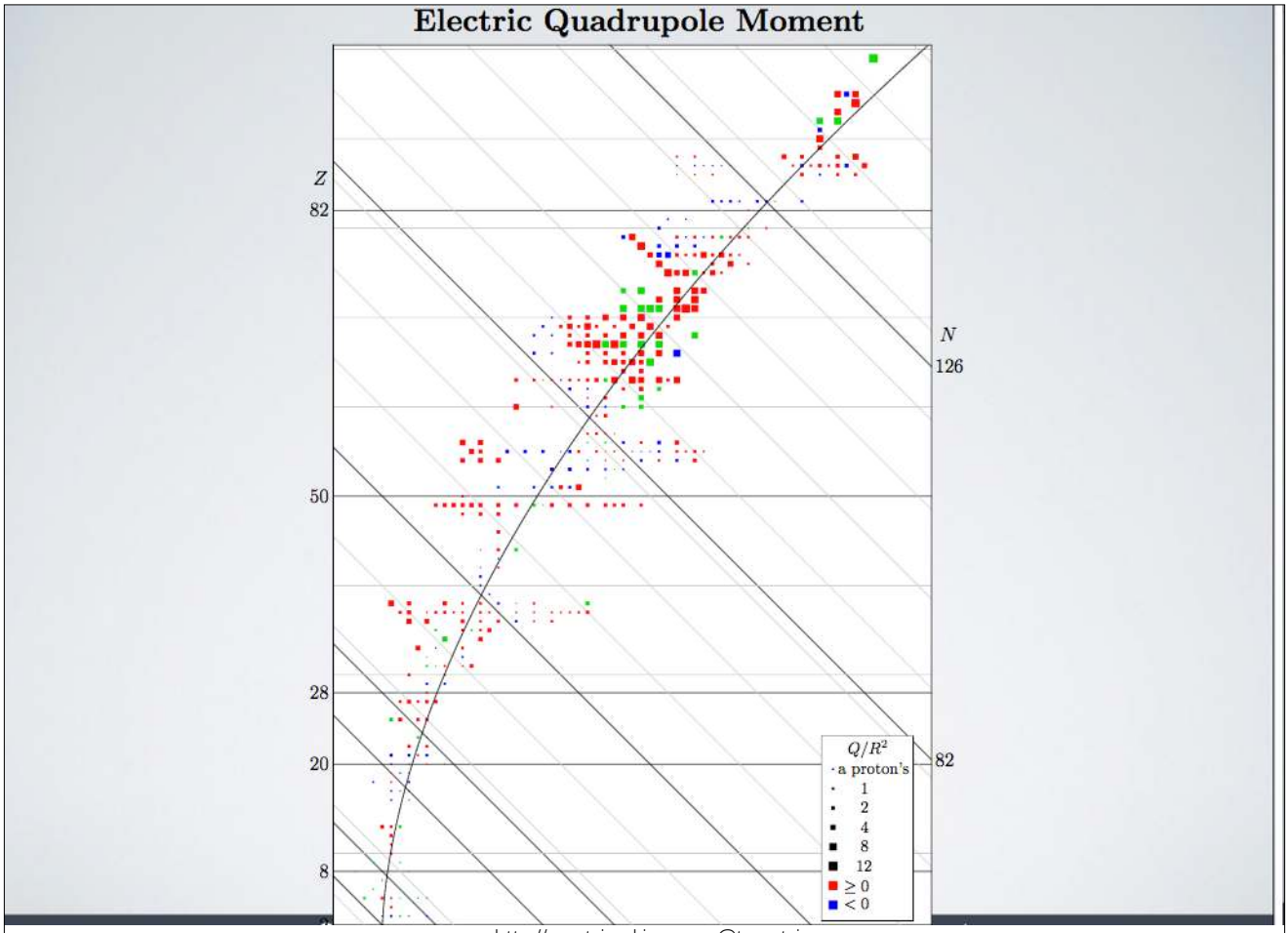
ΝΕΤΡΟΝΙΑ

- Αναμένεται ότι λόγω απουσίας φορτίου, το περιττό νετρόνιο δε διαθέτει ηλεκ. 4-πολική ροπή
- Ομως, το σύστημα νετρονίου-(υπόλοιπου πυρήνα) αποτελεί περιστρεφόμενο σύστημα με φορτίο ==> υπάρχει Q
- Αναμένεται πυρήνες με περιττά νετρόνια να έχουν

  $Qν = (Z/A^2)\ Qp$
- Επομένως για βαρείς πυρήνες, είναι σχεδόν αμελητέα

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΕΤΡΑΠΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ



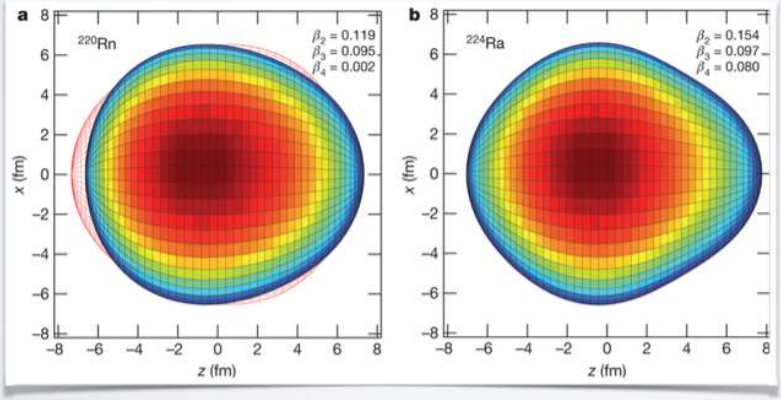


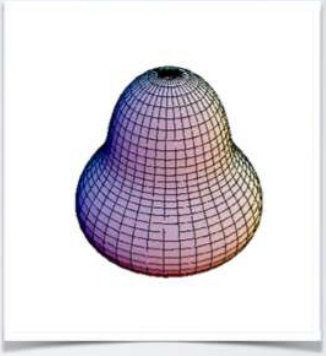
Πρόβλημα [18]

Για το ^{177}Hf Q=+3.0 e-barns. Να υπολογιστεί ο λόγος των ημιαξόνων του πυρήνα

ΡΟΠΕΣ ΑΝΩΤΕΡΗΣ ΤΑΞΗΣ

Σε διεγερμένες καταστάσεις του πυρηνικού συστήματος μπορούν να παρατηρηθούν Η/Μ ροπές ανώτερης τάξης (οκταπολικές κτλ)





Nature **497**, 199 (2013)