



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

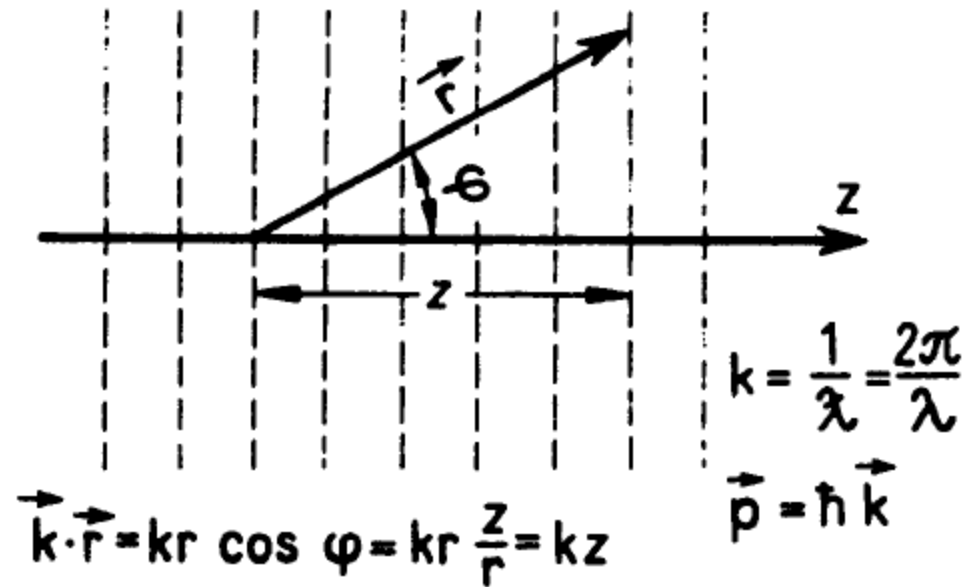
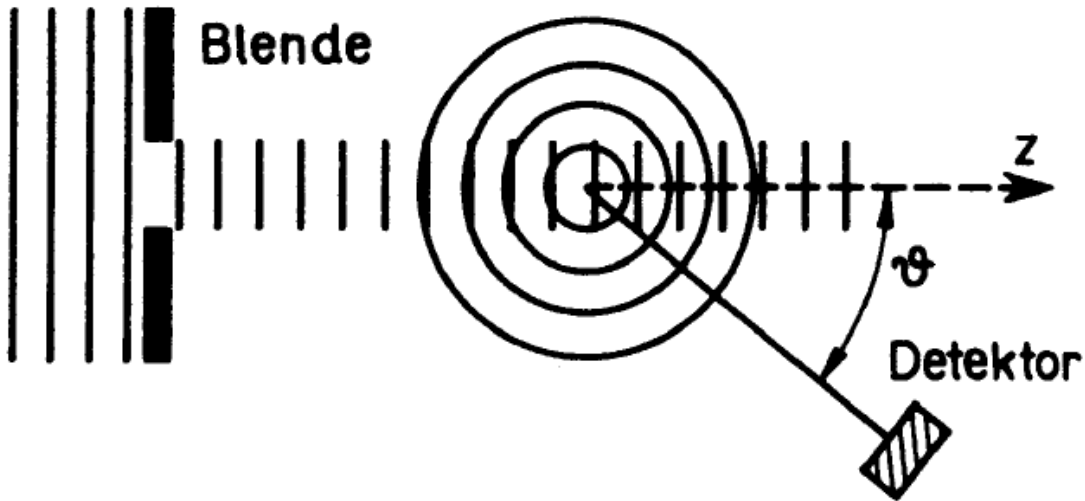
ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Ακαδημαϊκό Έτος 2021-2022
Ευστάθιος Στυλιάρης

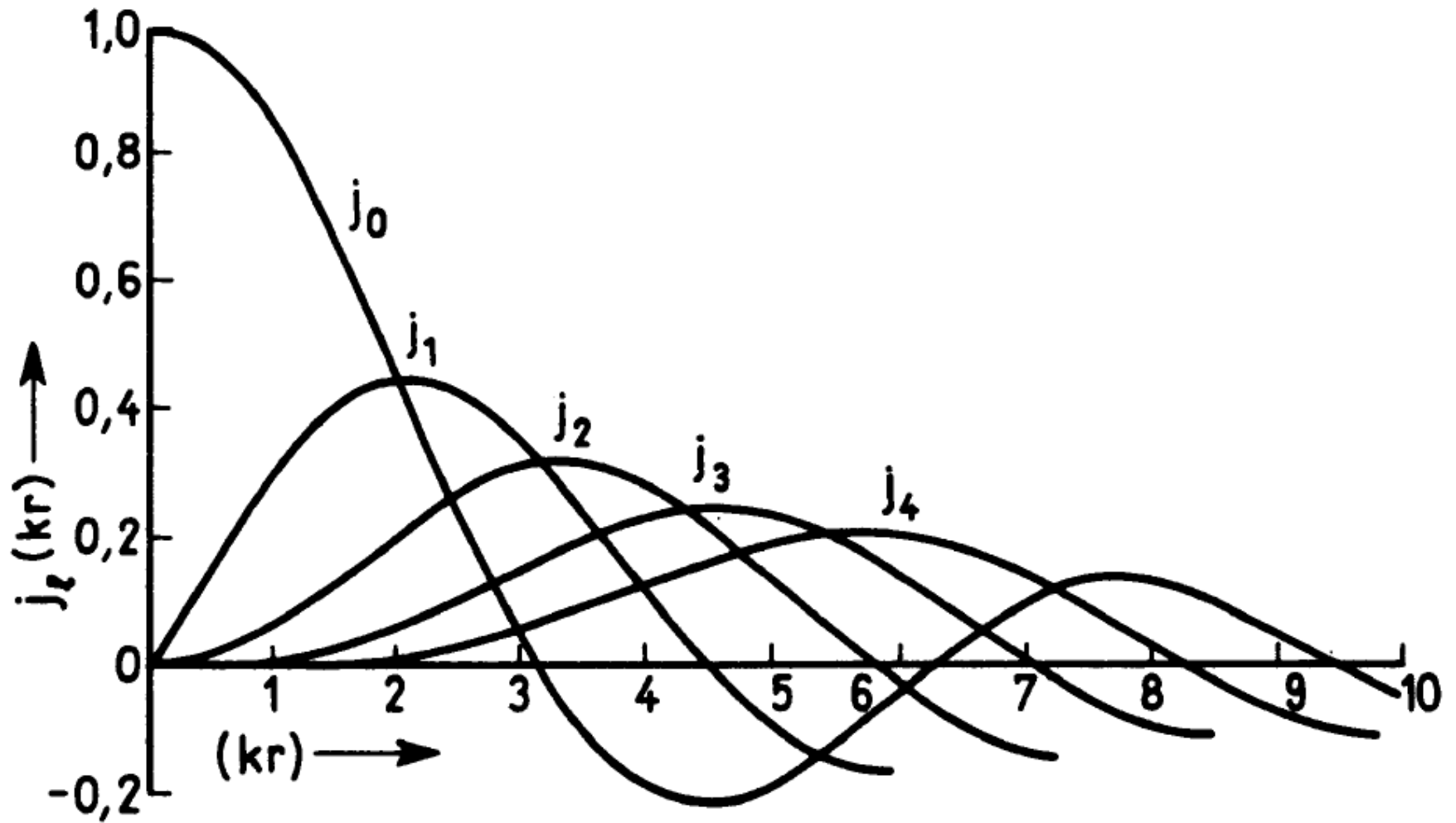
Δευτέρα 14:00-16:00



Πειράματα Σκέδασης

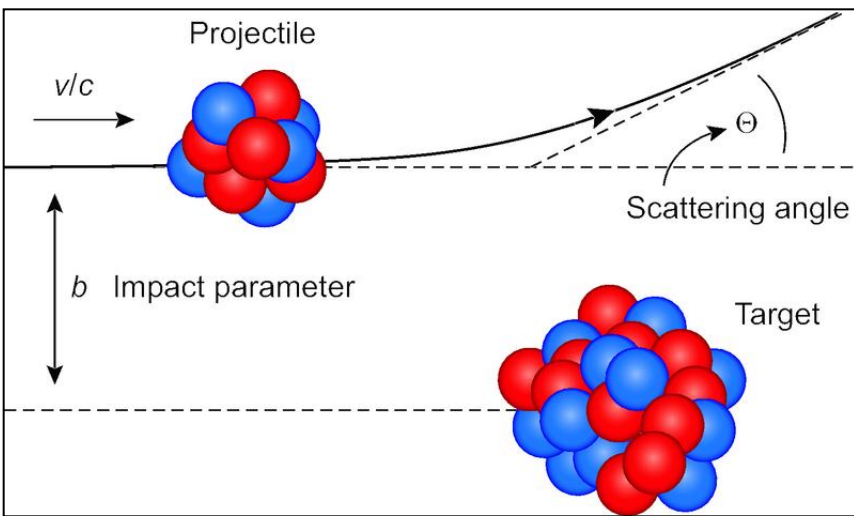


Σφαιρικές Συναρτήσεις Bessel $j_l(kr)$

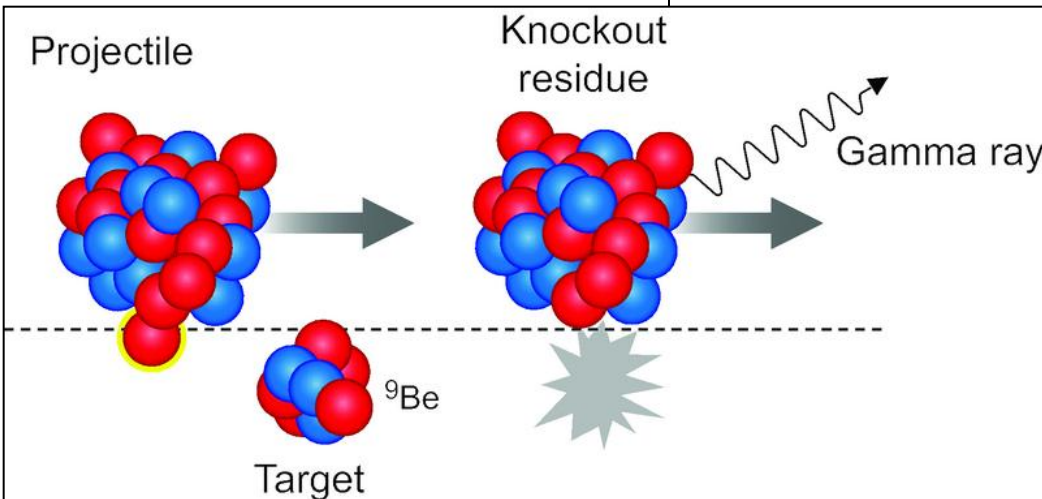
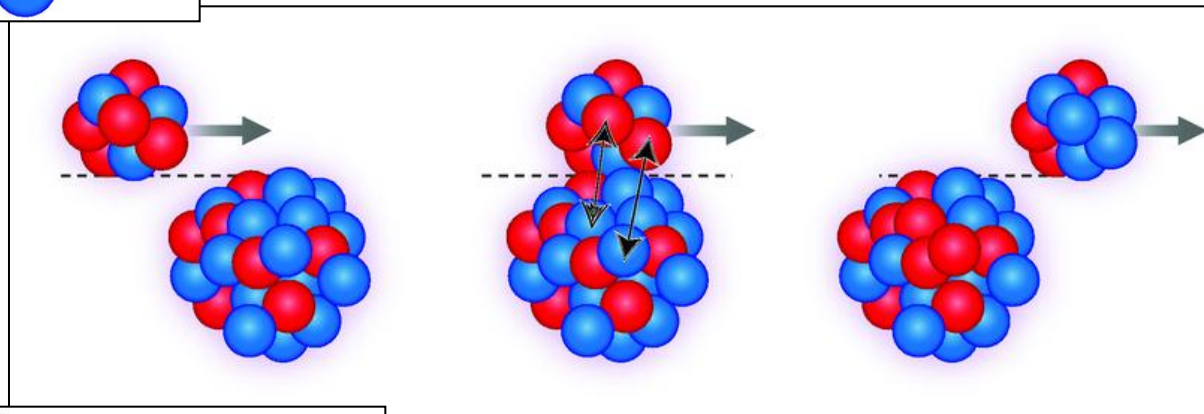


Πυρηνικές Αντιδράσεις

Ελαστική και Ανελαστική Σκέδαση



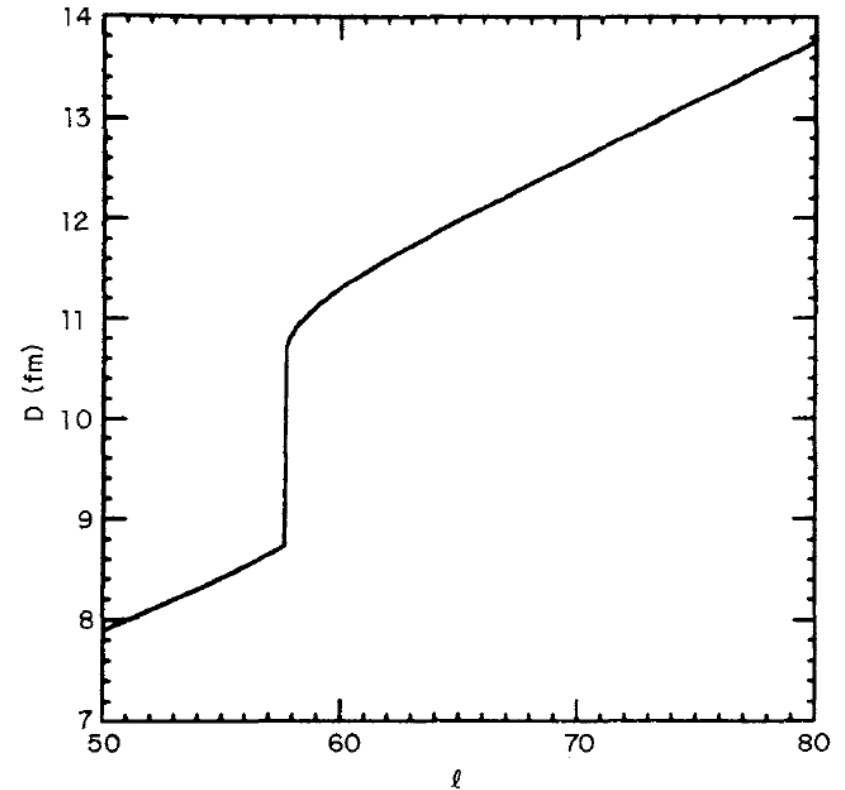
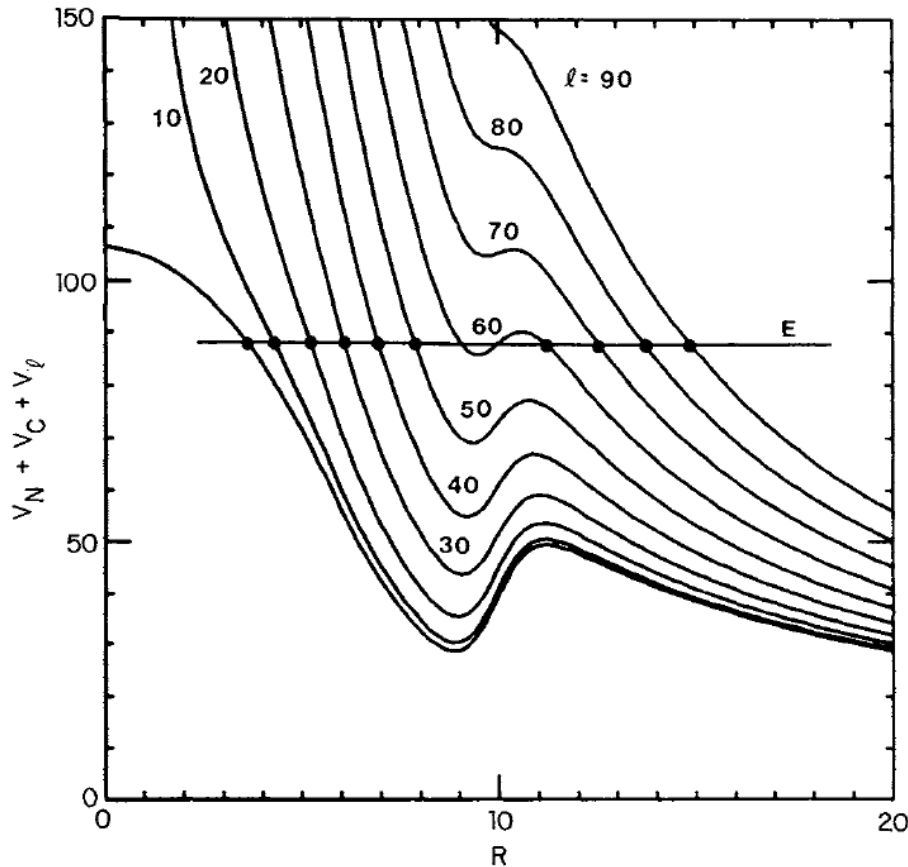
Αντιδράσεις Μεταφοράς (Transfer Reactions)



Αντιδράσεις Σύνθετου Πυρήνα (Compound Nucleus Reactions)

$^{18}\text{O} + ^{120}\text{Sn}$ $E_L = 100$ MeV

Πυρηνικές Αντιδράσεις



$$V_{\text{eff}}(r) = \frac{V_0}{1 + \exp[(r - R)/a]} + \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} + \frac{\ell(\ell + 1)\hbar^2}{2Mr^2}$$

$$L = k_{\text{eff}} R,$$

$$R = r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}),$$

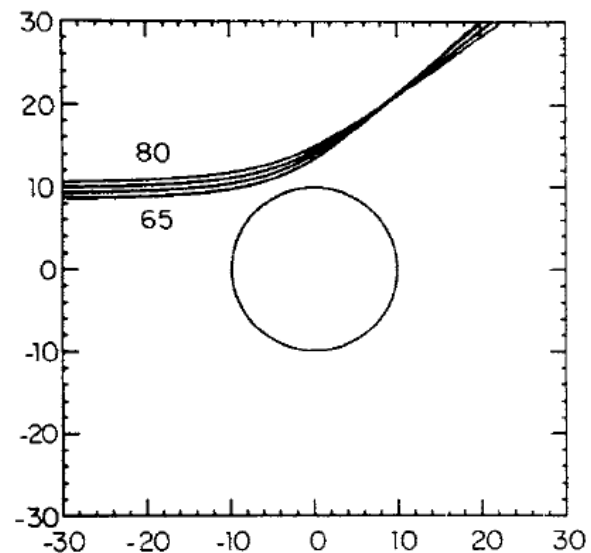
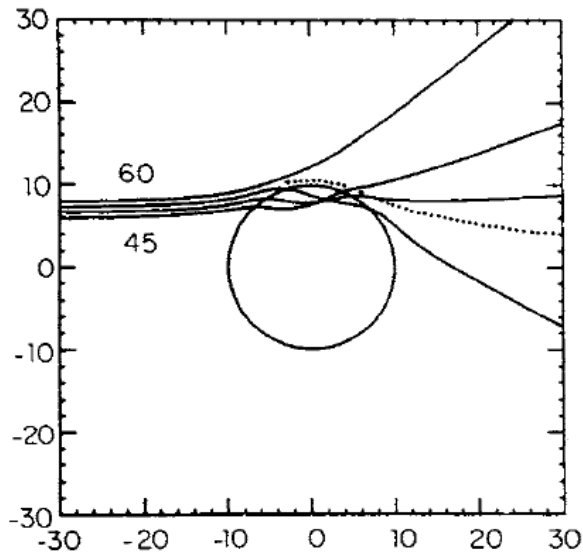
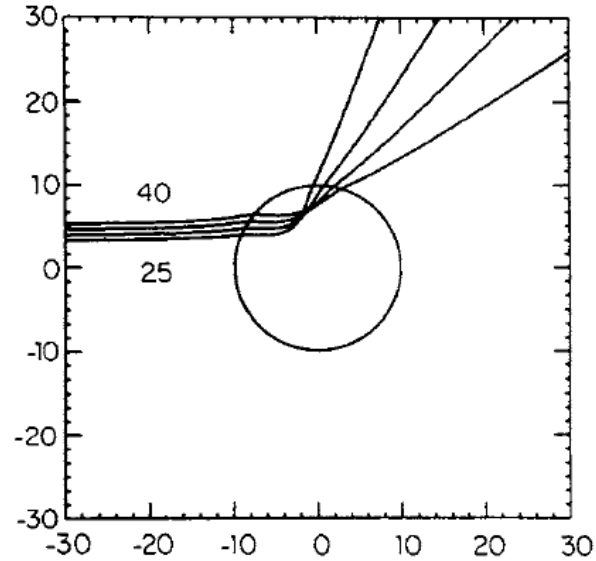
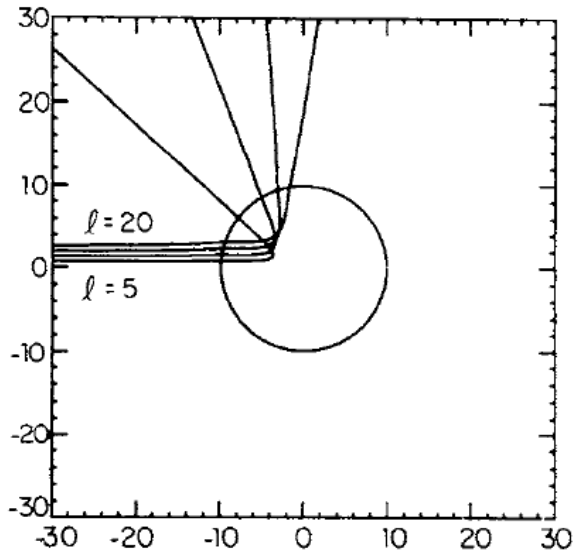
$$B \simeq Z_1 Z_2 e^2 / R,$$

$$k_{\text{eff}} = \sqrt{(2M/\hbar^2)(E - B)}$$

D: Penetration Depth or Distance of Closest Approach
R: Contact Radius

$^{18}\text{O} + ^{120}\text{Sn}$ $E_L=100$ MeV

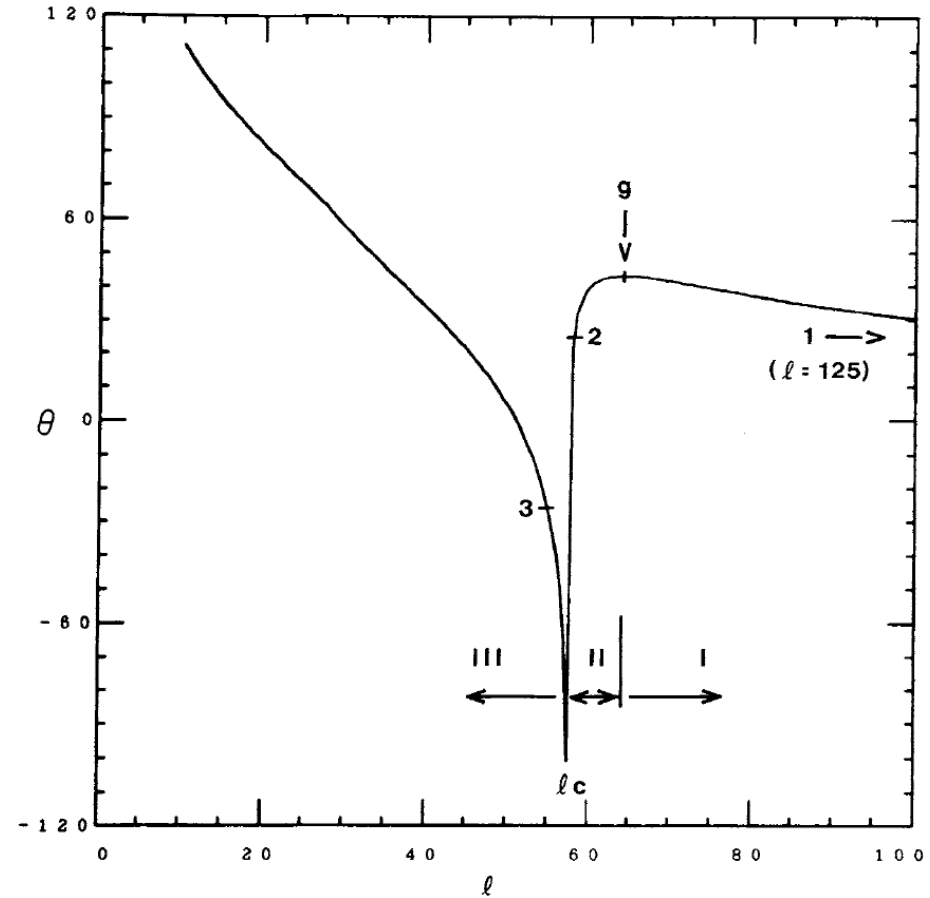
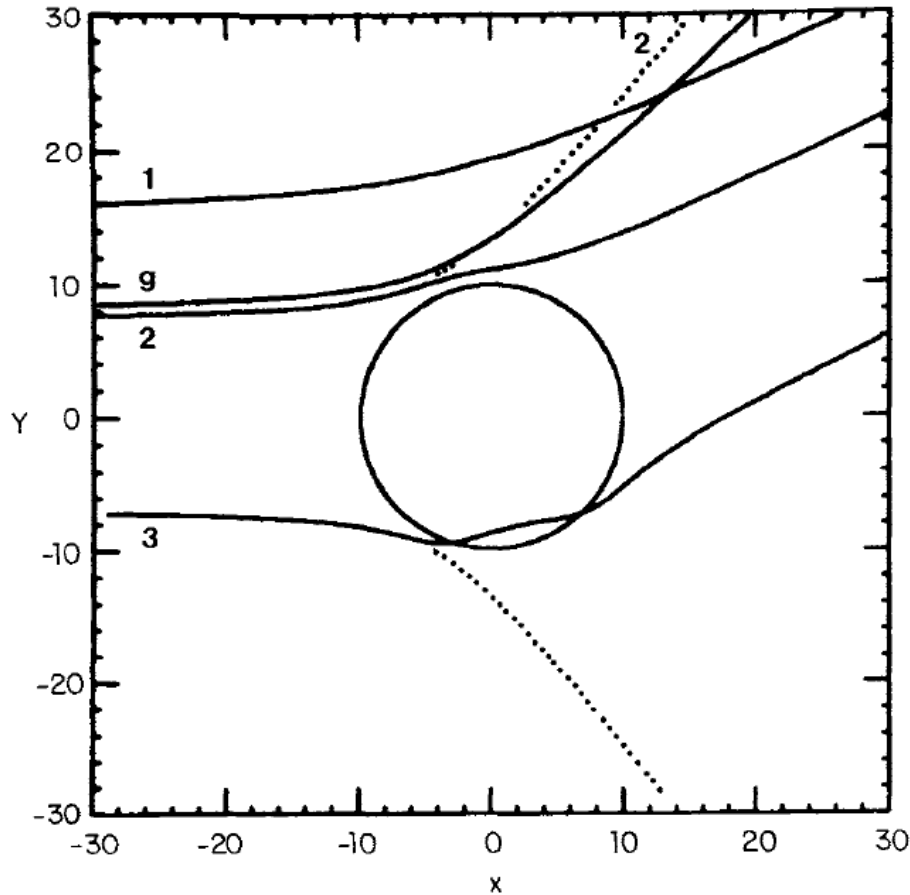
Πυρηνικές Αντιδράσεις



Κλασικές τροχιές του σκεδαζόμενου ^{18}O πυρήνα από στόχο ^{120}Sn σε ενέργεια $E_L=100$ MeV για το προηγούμενο δυναμικό.

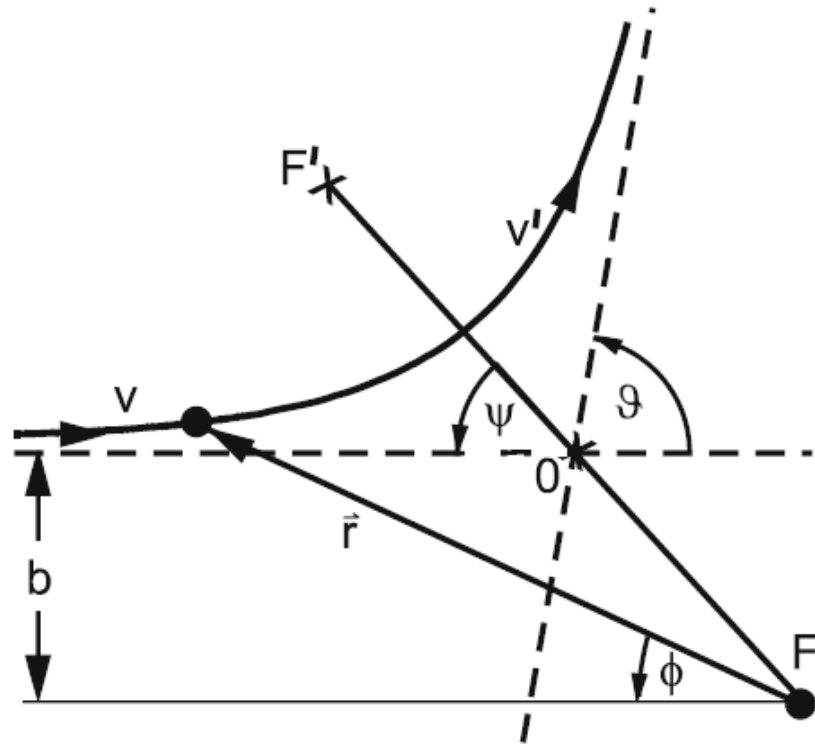
$^{18}\text{O} + ^{120}\text{Sn}$ $E_L=100$ MeV

Πυρηνικές Αντιδράσεις



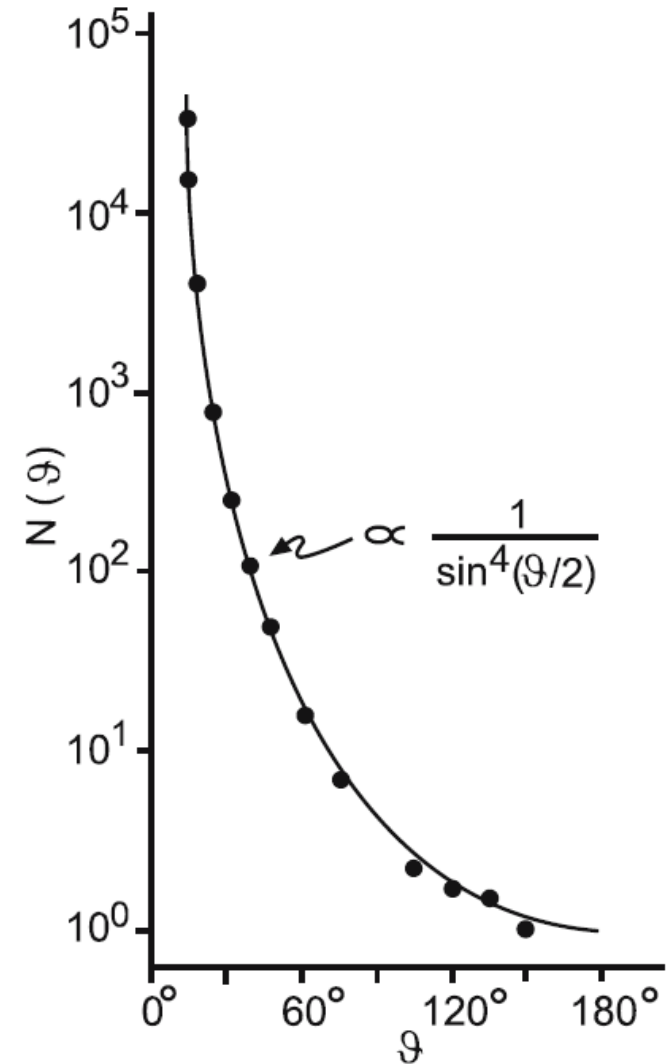
Κλασσικές τροχιές του σκεδαζόμενου πυρήνα με διαφορετικές παραμέτρους κρούσης (**impact parameter**) και η αντίστοιχη συνάρτηση εκτροπής (**deflection function**), η οποία αποδίδει την κλασσική γωνία εκτροπής συναρτήσει της παραμέτρου κρούσης.

Σκέδαση κατά Rutherford



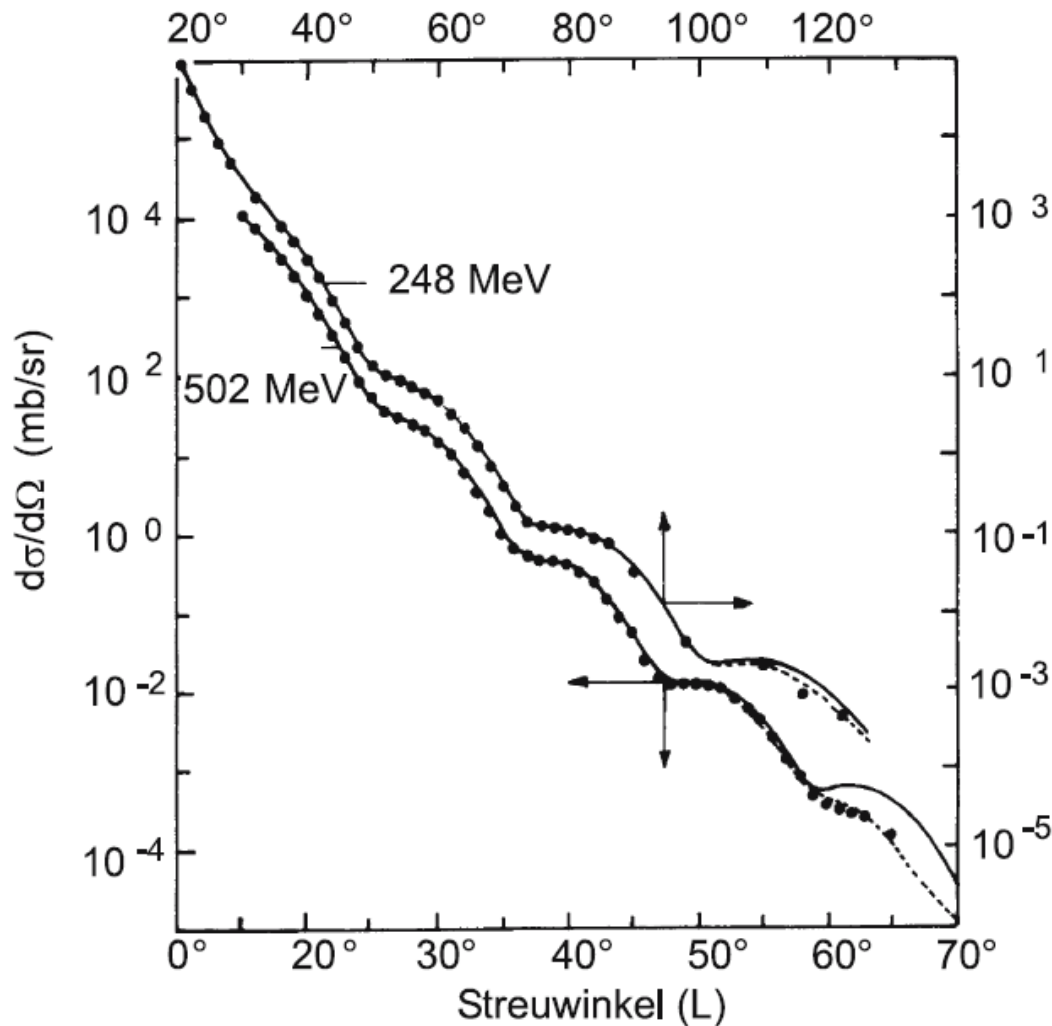
$$\frac{d\sigma(\vartheta)}{d\Omega} = \left(\frac{D}{4}\right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}} = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 4T_\infty}\right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}}$$

Πυρηνικές Αντιδράσεις



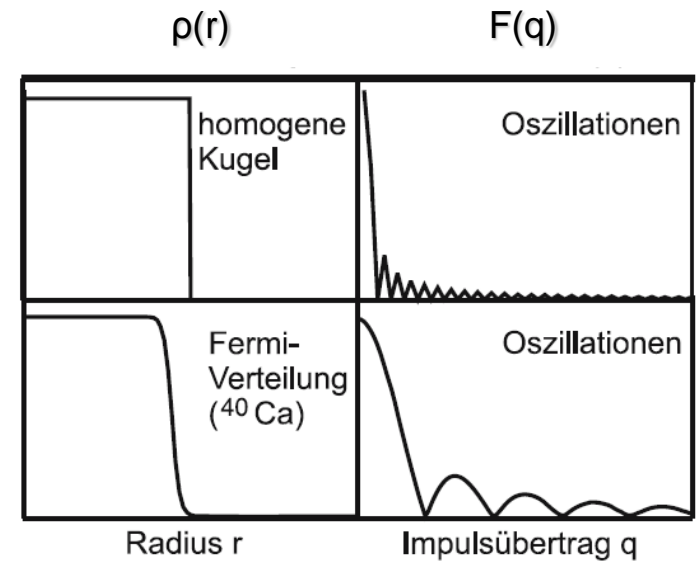
Πυρηνικές Αντιδράσεις

Σκέδαση ηλεκτρονίων από πυρήνες ^{238}U

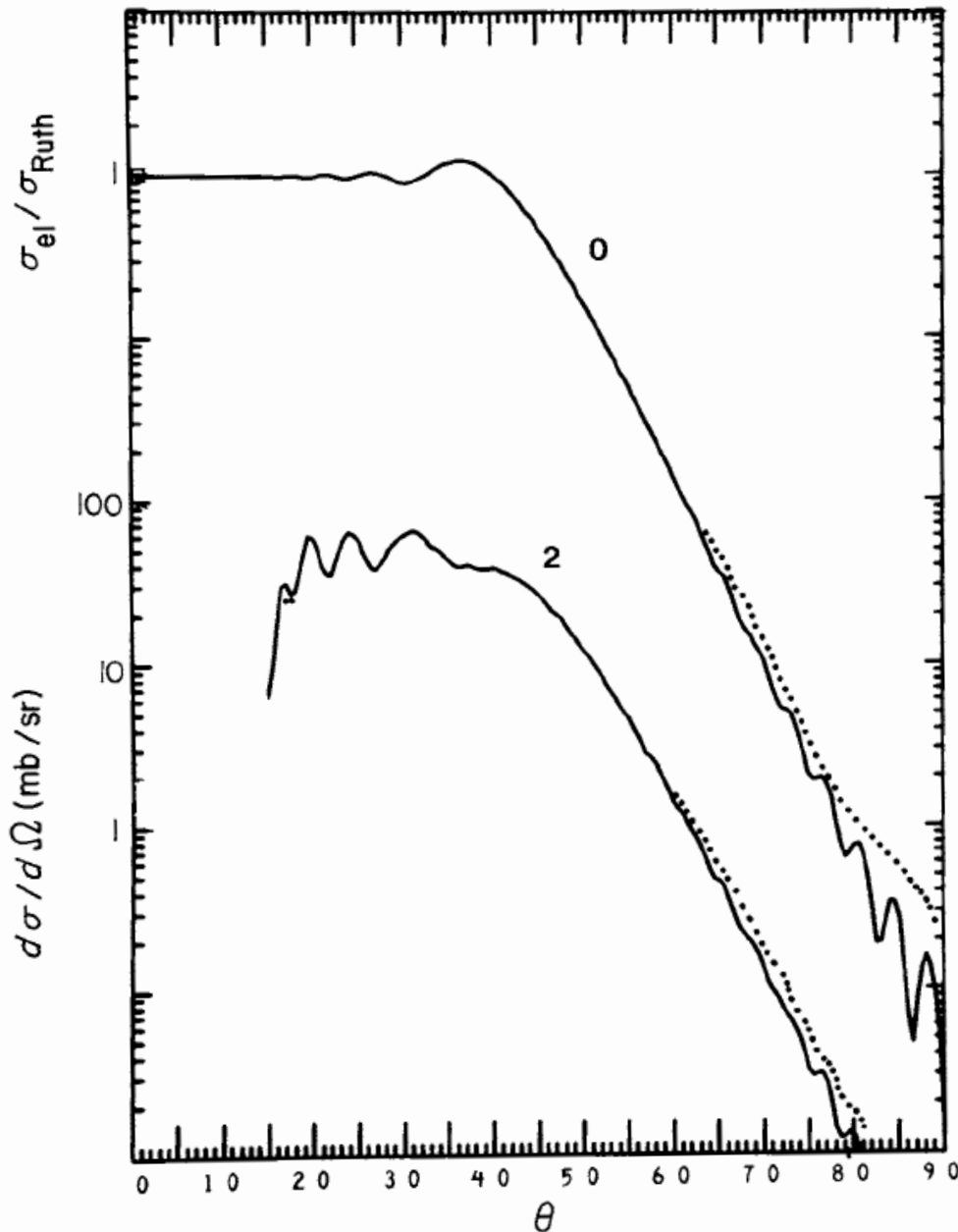


$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{exp.}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} \cdot |F(\mathbf{q})|^2$$

$$F(\mathbf{q}) = \int e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}/\hbar} \rho(r) d^3r$$



$^{18}\text{O} + ^{120}\text{Sn}$ $E_L=100$ MeV



Πυρηνικές Αντιδράσεις

Μετρούμενη ενεργός διατομή της γωνιακής κατανομής για την ελαστική σκέδαση (0^+) και την πρώτη διεγερμένη κατάσταση (2^+) της ημιαστικής σκέδασης.

Πυρηνικές Αντιδράσεις

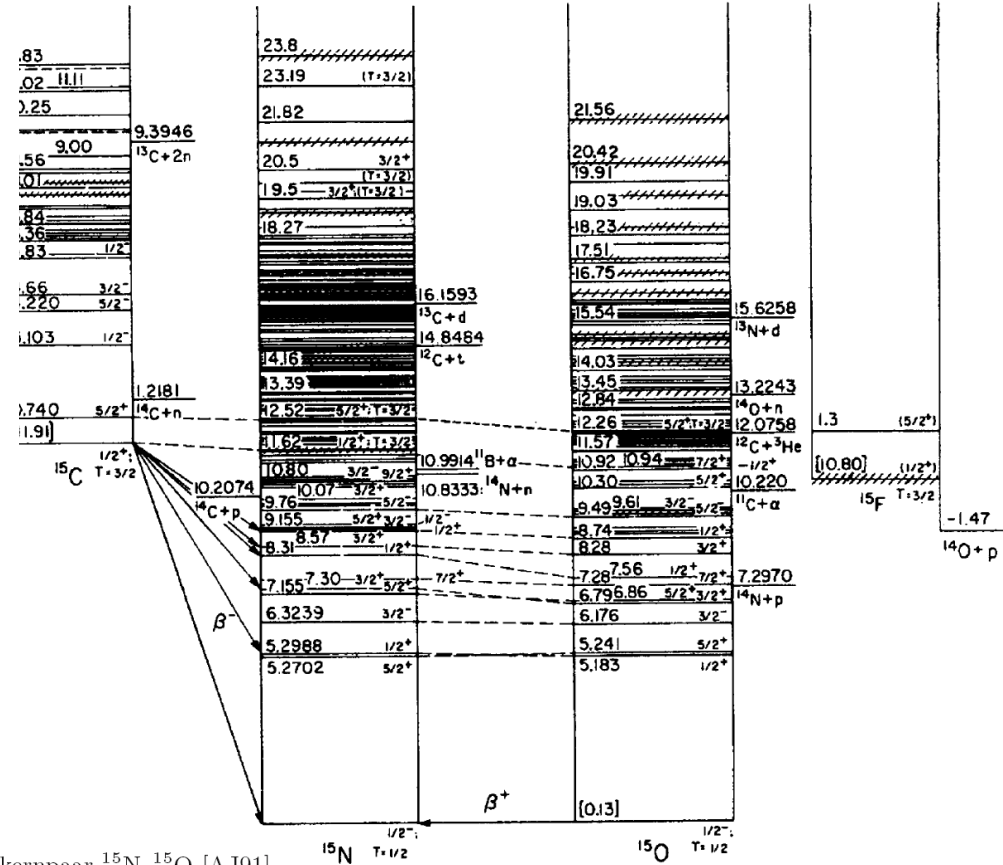
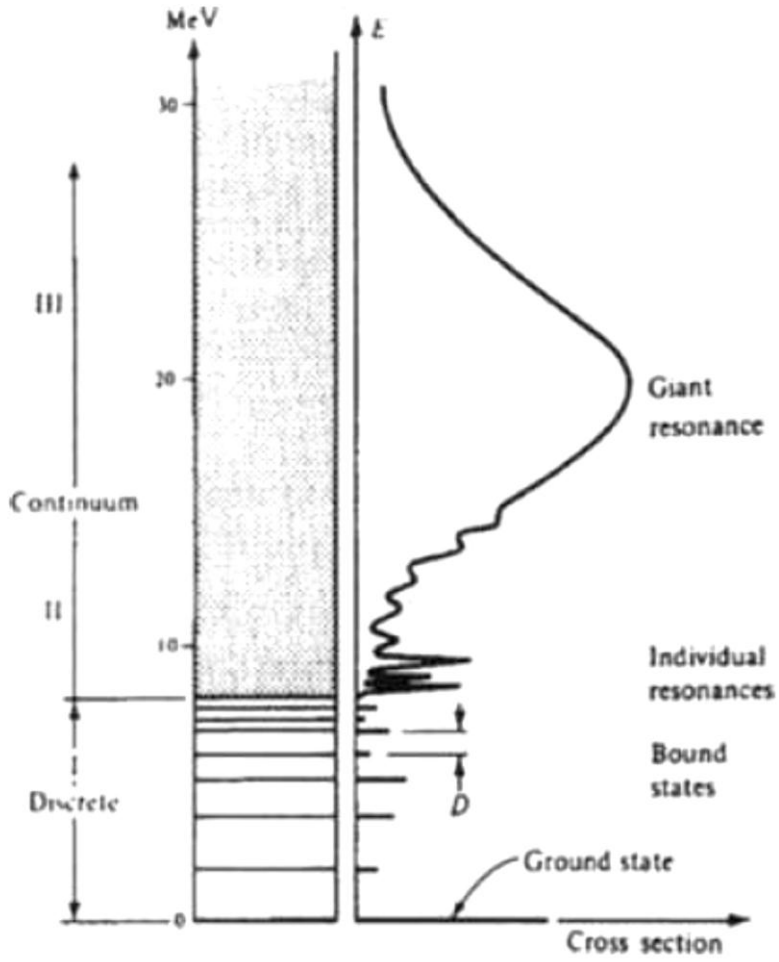
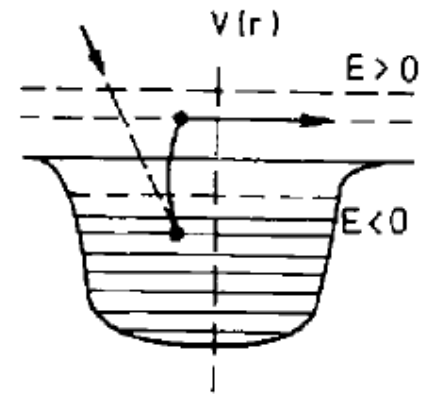
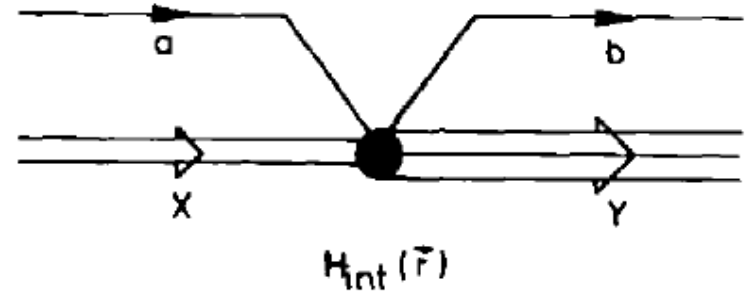
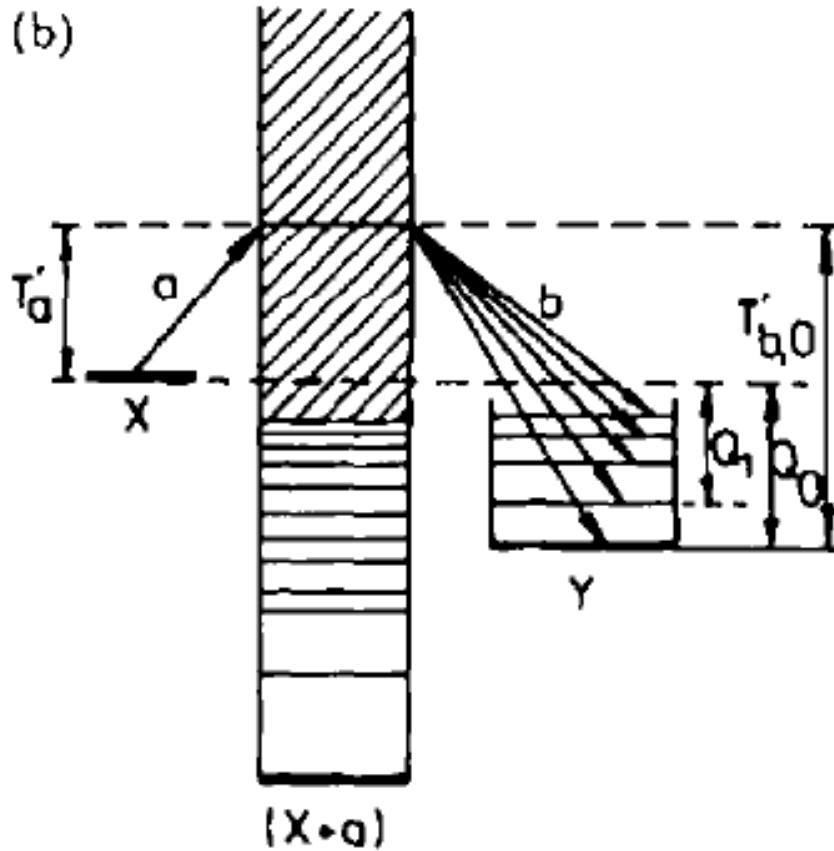
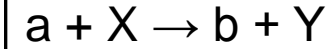


Bild 4.11. Spiegelkernpaar ^{15}N - ^{15}O [AJ91]

Πυρηνικές Αντιδράσεις

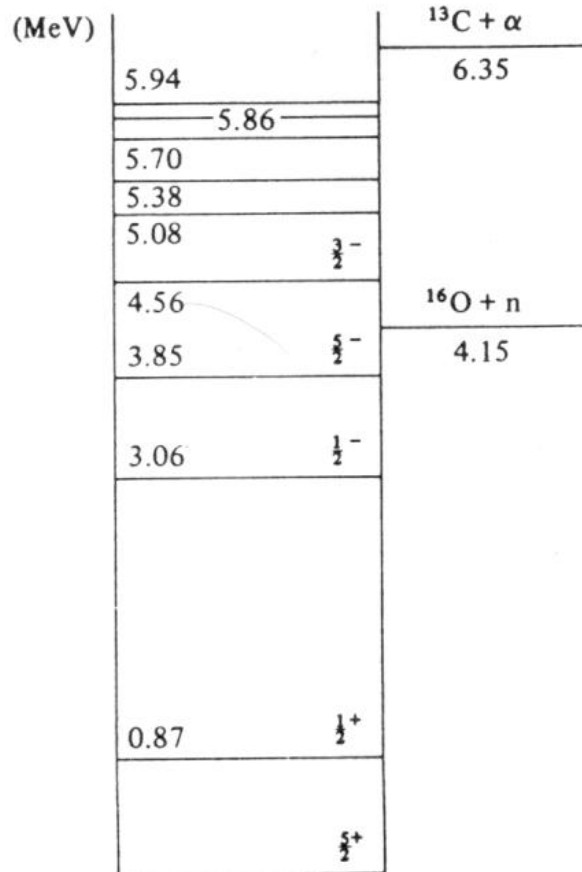
$$-\frac{\hbar^2}{2m_a} \Delta \chi_{a,X} + U_{a,X}(\vec{r}) \chi_{a,X} = E_{a,X} \chi_{a,X}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m_b} \Delta \chi_{b,Y} + U_{b,Y}(\vec{r}) \chi_{b,Y} = E_{b,Y} \chi_{b,Y}$$



Πειραματικός Καθορισμός Διεγερμένων Καταστάσεων

Παράδειγμα: Η αντίδραση μεταφοράς (d,p)

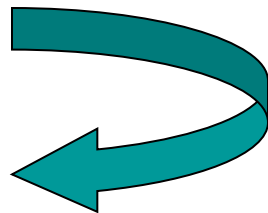


$$E_i = 14.95 \text{ MeV}$$

$$\theta = 19^\circ$$

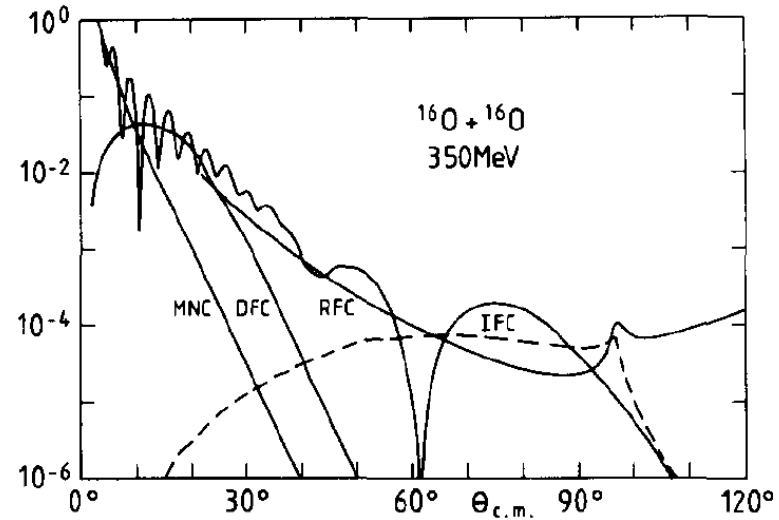
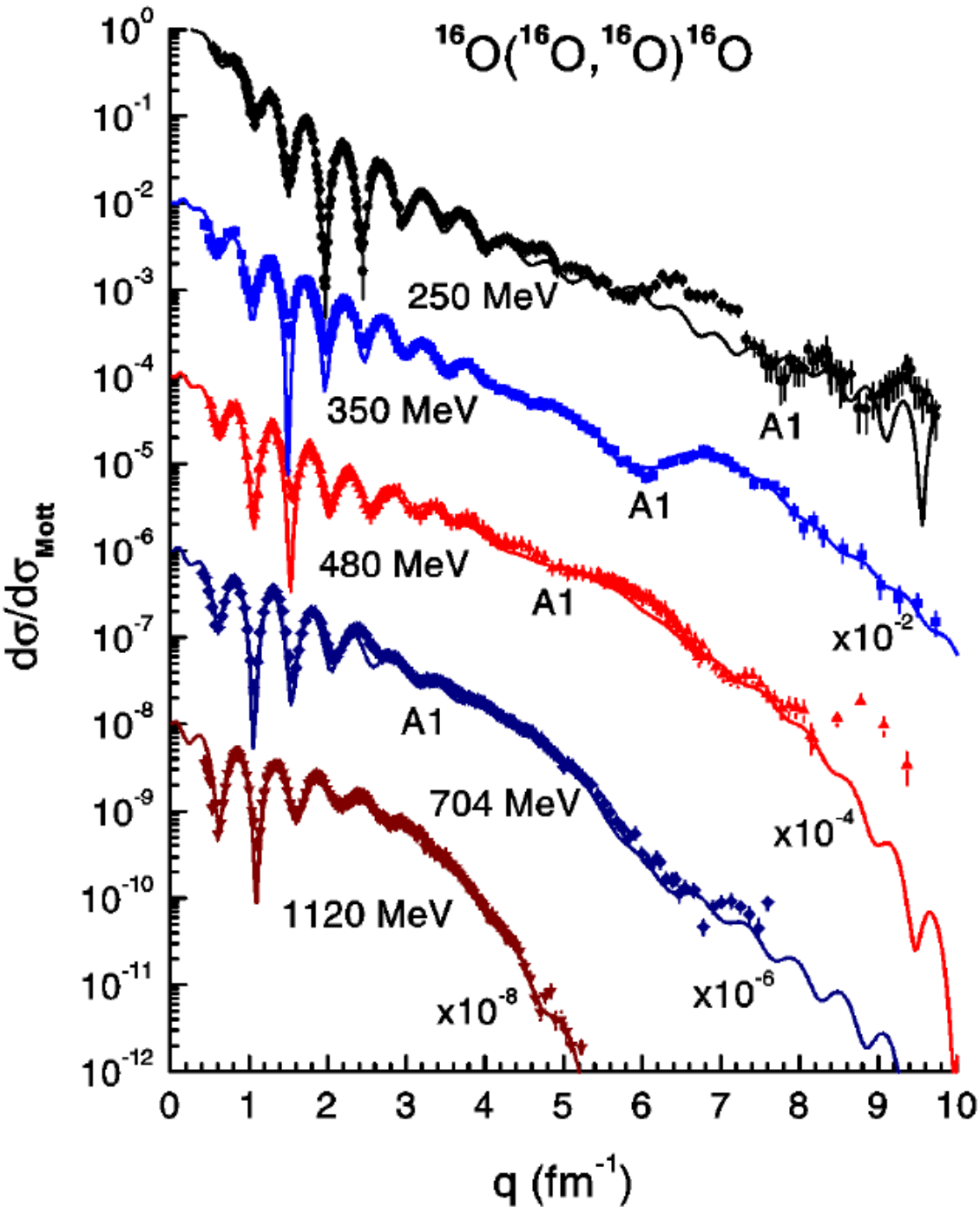
$$E_0 = 1.93 \text{ MeV}$$

E_f (MeV)	11.42	11.97	12.69	13.50	15.74	16.62
E (MeV)	5.08	4.56	3.85	3.06	0.87	0.0

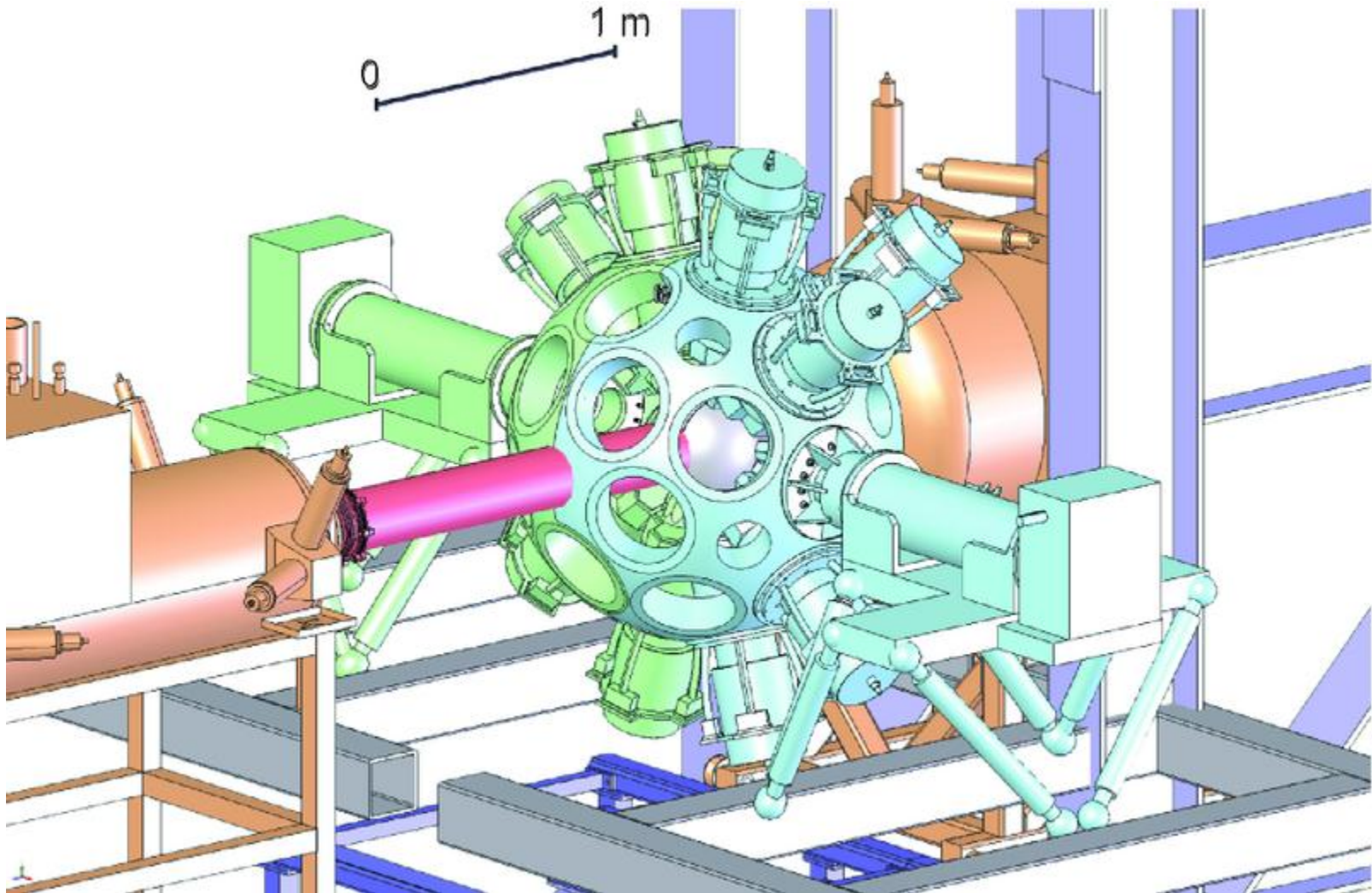


Πυρηνικές Αντιδράσεις

Σύστημα $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$
σε διαφορετικές ενέργειες



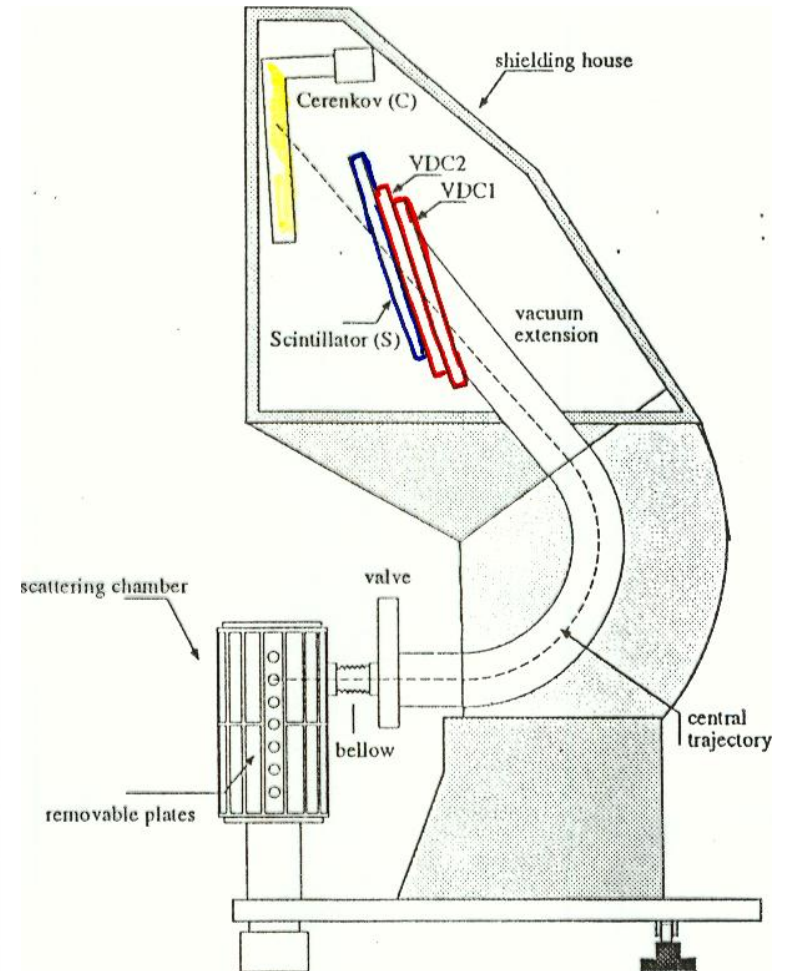
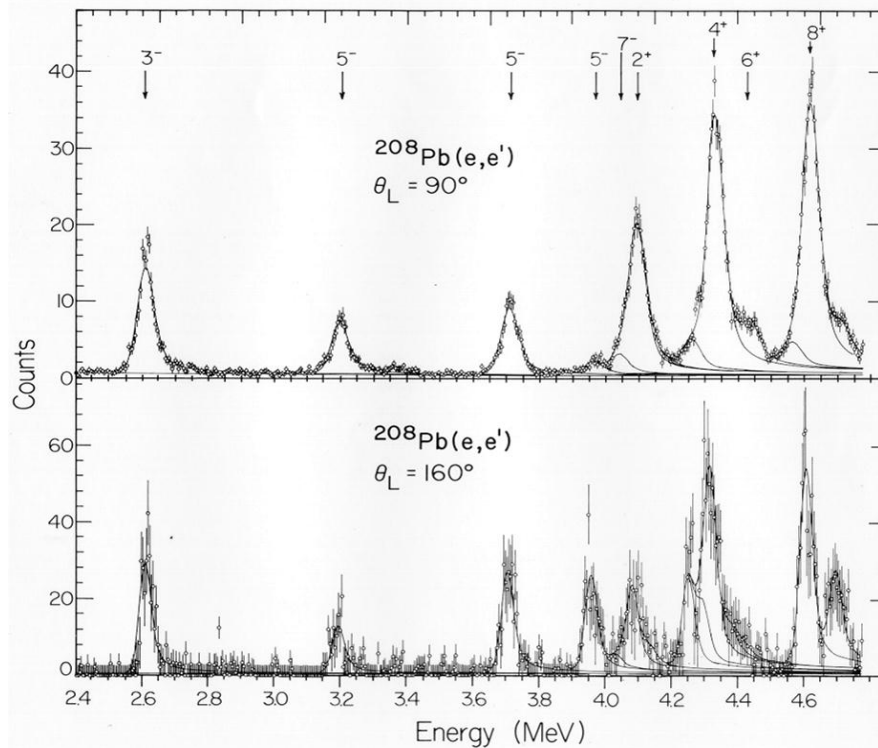
Πυρηνική Φασματοσκοπία: Ακτινοβόληση στόχου και μελέτη της εκπεμπόμενης γ -ακτινοβολίας



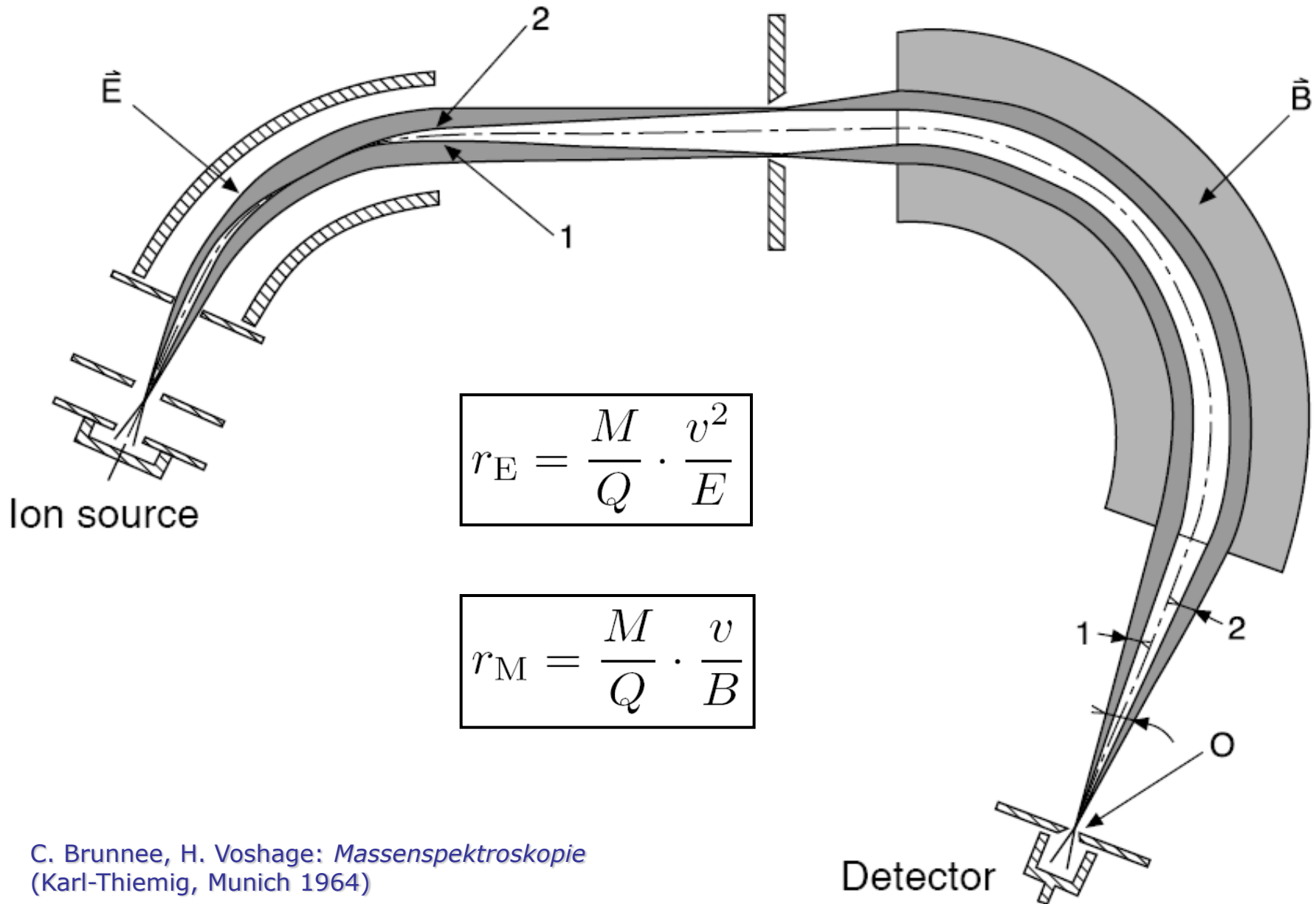
Μαγνητικός Φασματογράφος Σωματίων

Ταυτοποιεί το σκεδαζόμενο σωματίο και προσδιορίζει:

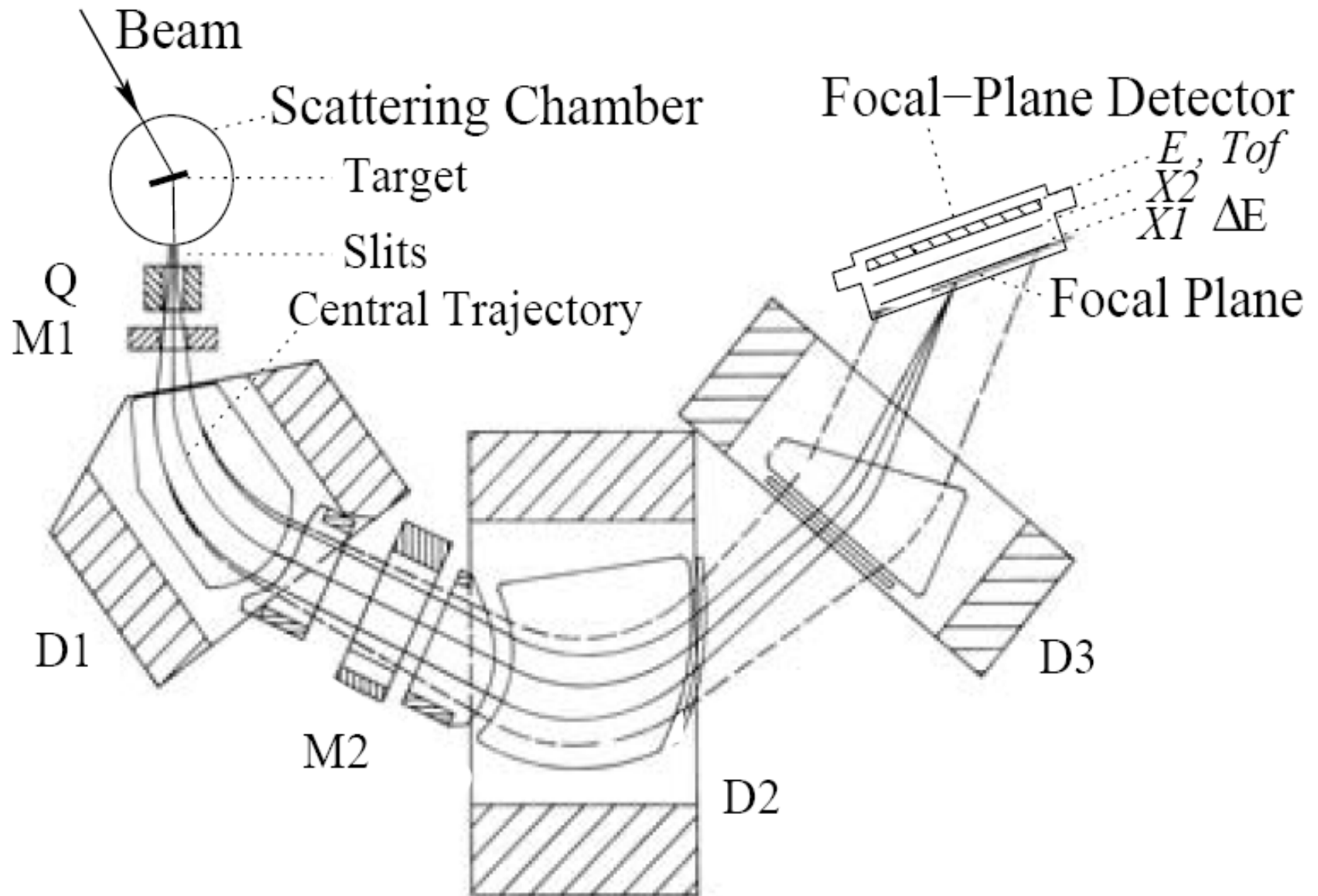
- *Ορμή & Γωνία σκέδασης*
- *Ενεργειακό φάσμα*



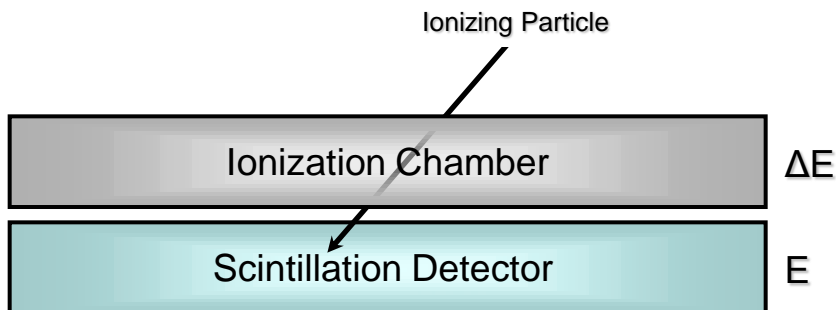
Αρχή λειτουργίας φασματογράφου μάζας



Μαγνητικό Φασματομέτρο (Q3D)

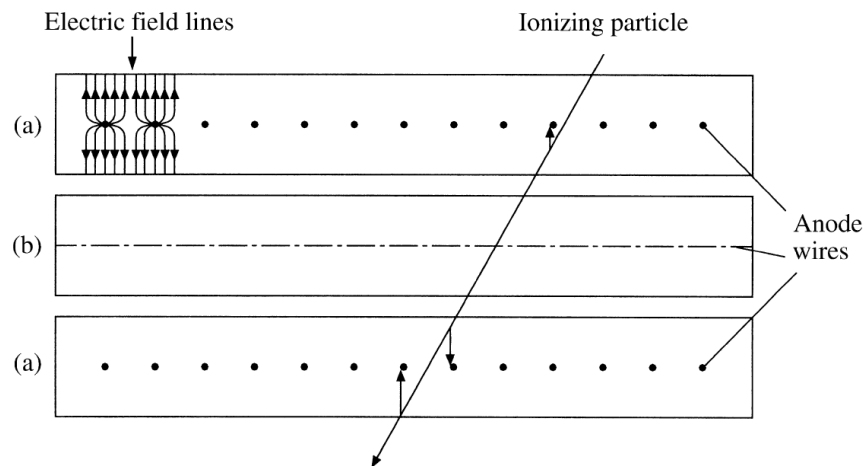


Ταυτοποίηση πυρήνων



$$\left\{ \begin{array}{l} B \cdot \rho = \frac{mv}{q} \\ \Delta E \approx \frac{Z^2}{v^2} \\ E \approx Av^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{E \approx \frac{Z^2 A}{\Delta E}}$$

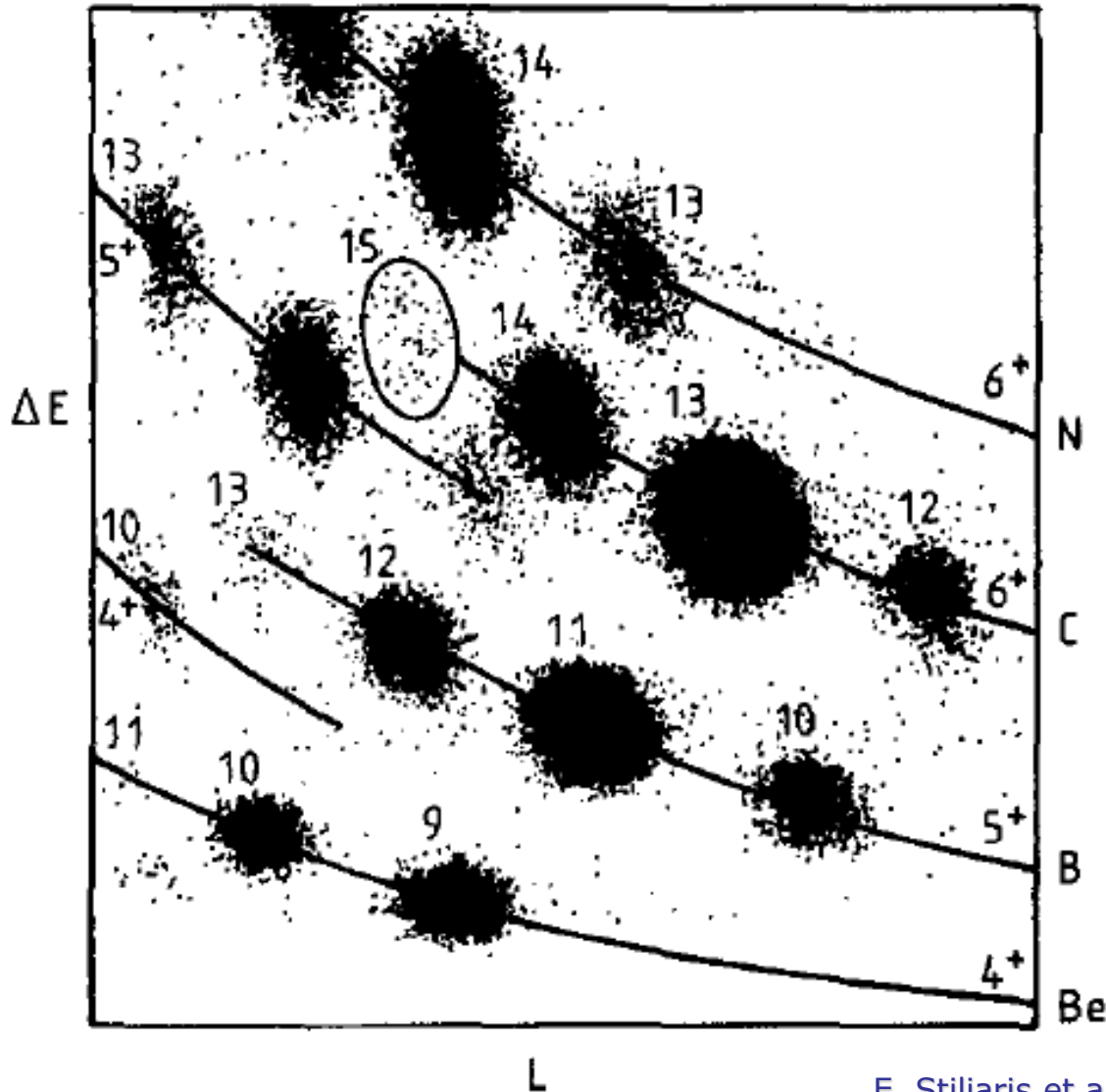
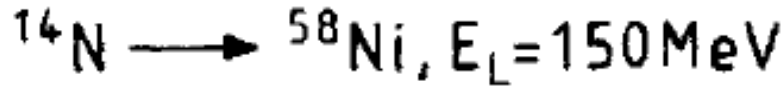
MultiWire Proportional Chamber (MWPC)



Ένας πολυσυρματικός αναλογικός ανιχνευτής αποδίδει πέραν της ενεργειακής πληροφορίας ιονισμού (ΔE) και τη θέση του προσπίπτοντος σωματιδίου.

Συμπέρασμα: Η εξάρτηση των μετρούμενων ενεργειών ιονισμού (ΔE) και συνολικής ενέργειας E του εξερχόμενου από μια πυρηνική αντίδραση προϊόντος, είναι σε θέση να ταυτοποιήσει τον πυρήνα αυτόν (Z, A). Για το λόγο αυτό, το διάγραμμα ΔE - E αποτελεί ένα διάγραμμα ταυτοποίησης των προϊόντων της πυρηνικής αντίδρασης.

Ταυτοποίηση εξερχόμενων πυρήνων

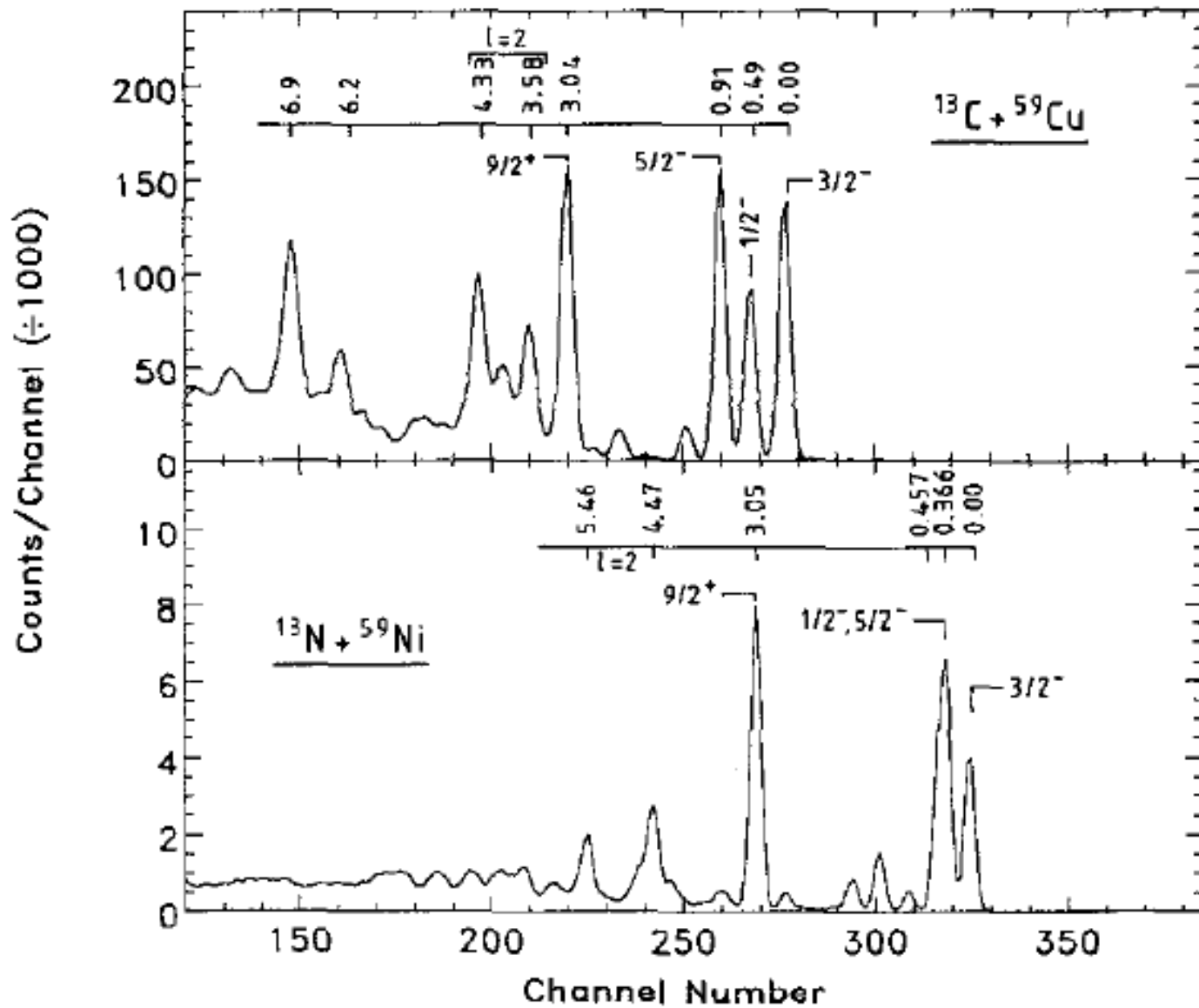


$E_L = 150 \text{ MeV}$

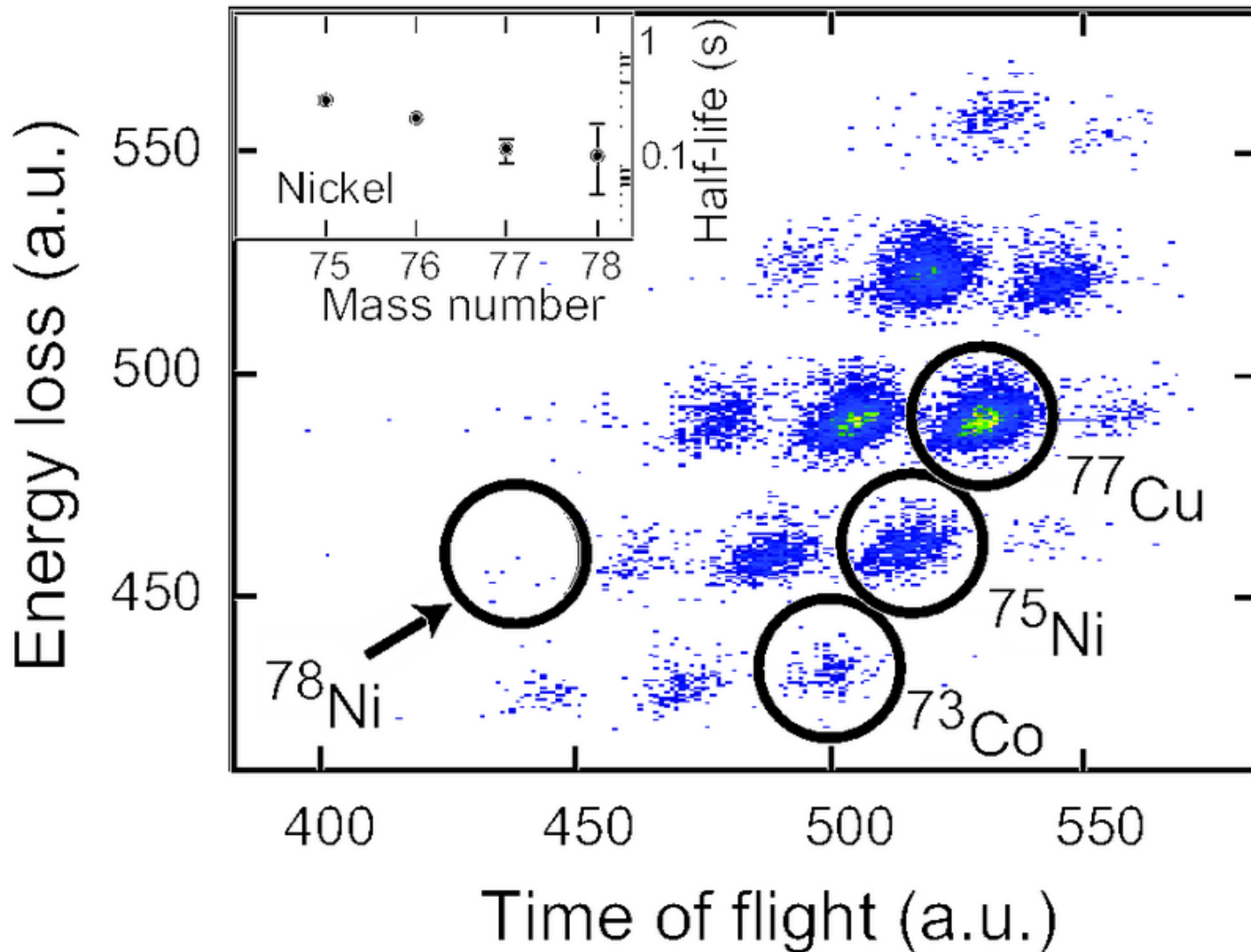
ΔE : Energy Loss

$L \sim E$: Energy from Scintillator

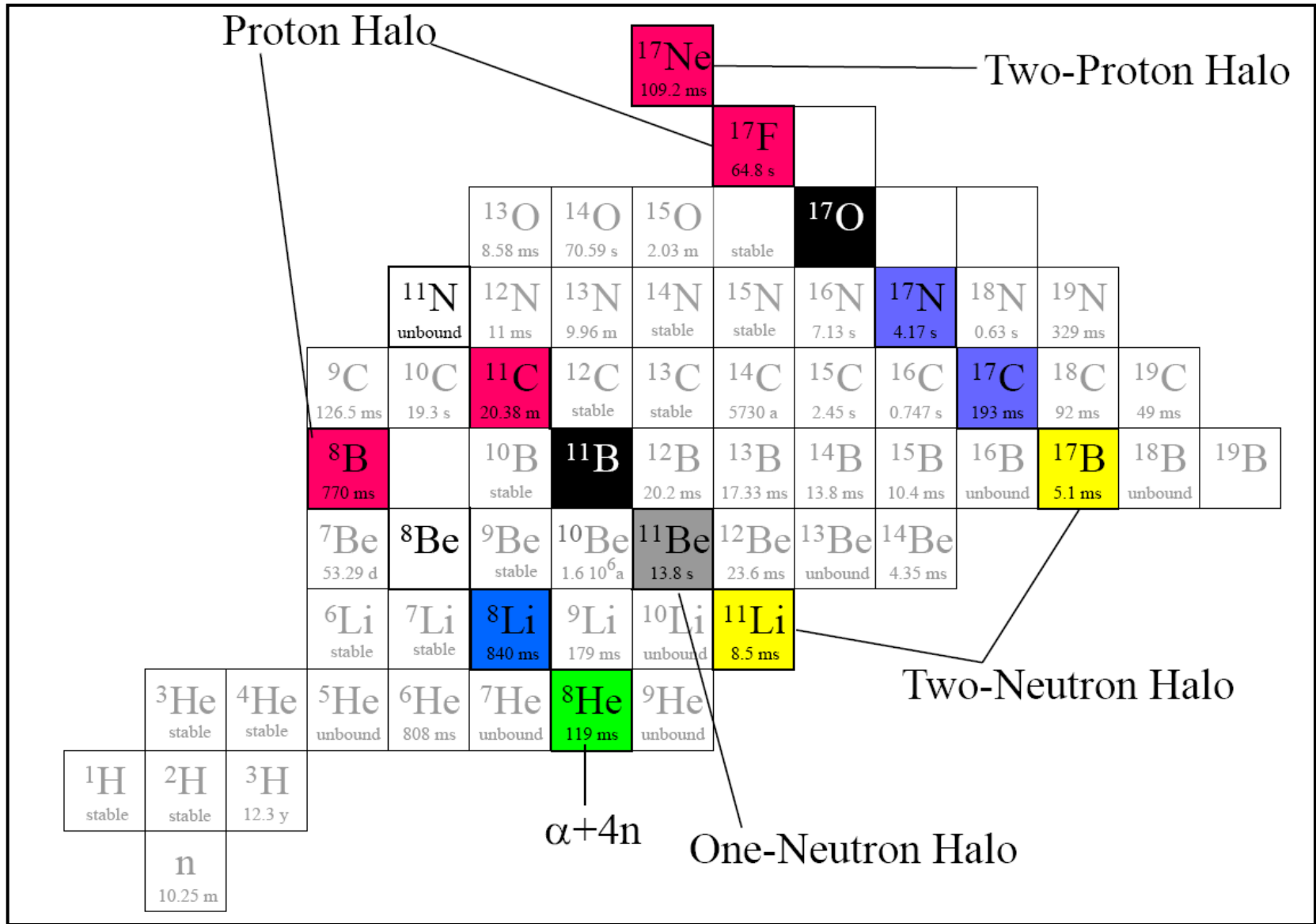
Αντιδράσεις μεταφοράς ενός νουκλεονίου



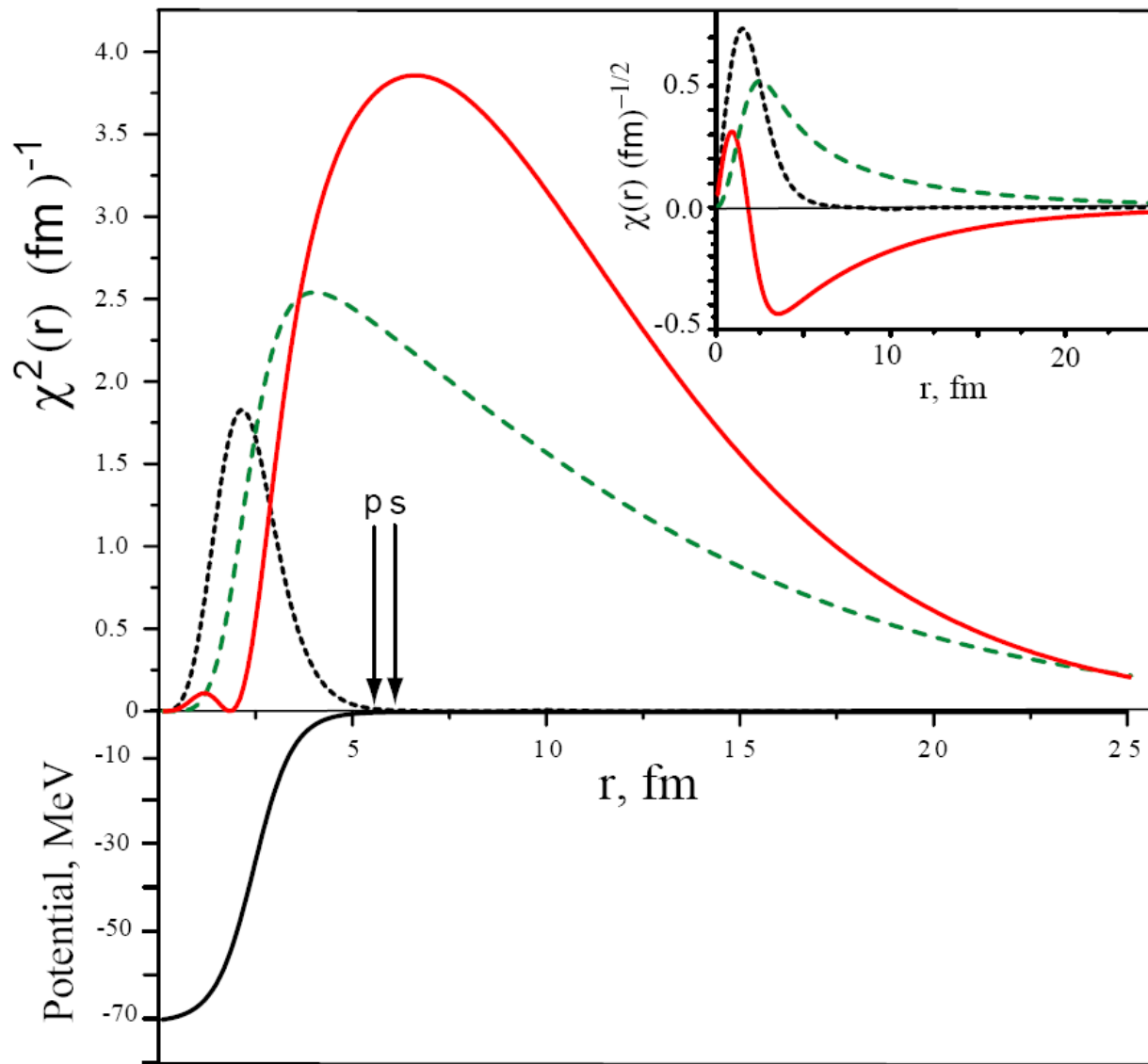
Ταυτοποίηση Πυρήνων
με τη βοήθεια της τεχνικής χρόνου πτήσης
(Time of Flight)



Ελαφρείς πυρήνες στα όρια του χάρτη νουκλιδίων (Drip-Line Nuclei) με ιδιαίτερο ενδιαφέρον

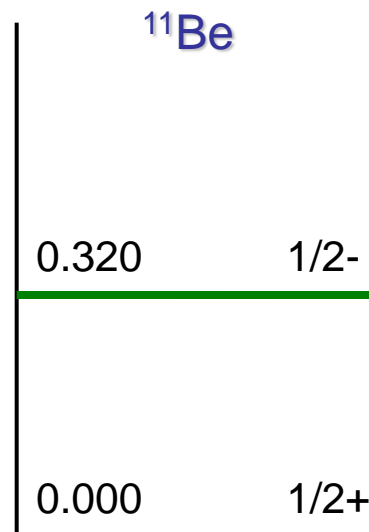


Το φαινόμενο της Εάλω (Halo) στον πυρήνα ^{11}Be

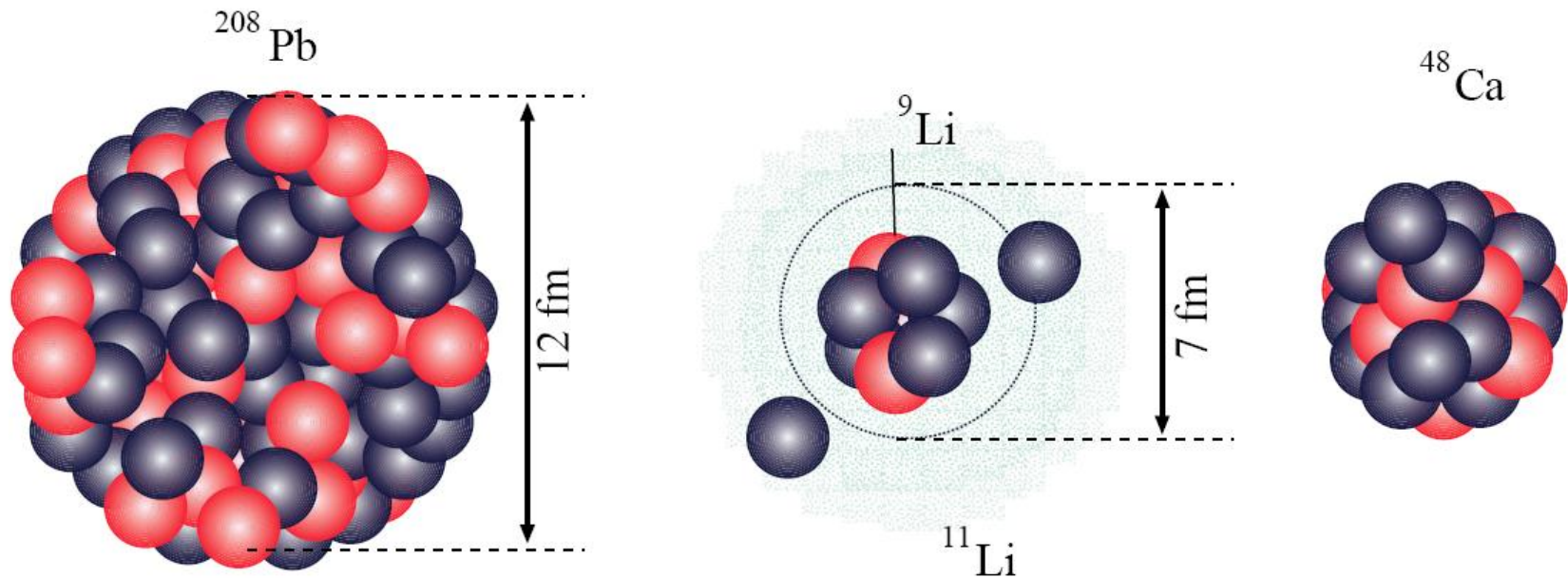


$$\chi(r) = r\psi(r)$$

- 1p1/2
- 2s1/2
- ⋯ 1s1/2

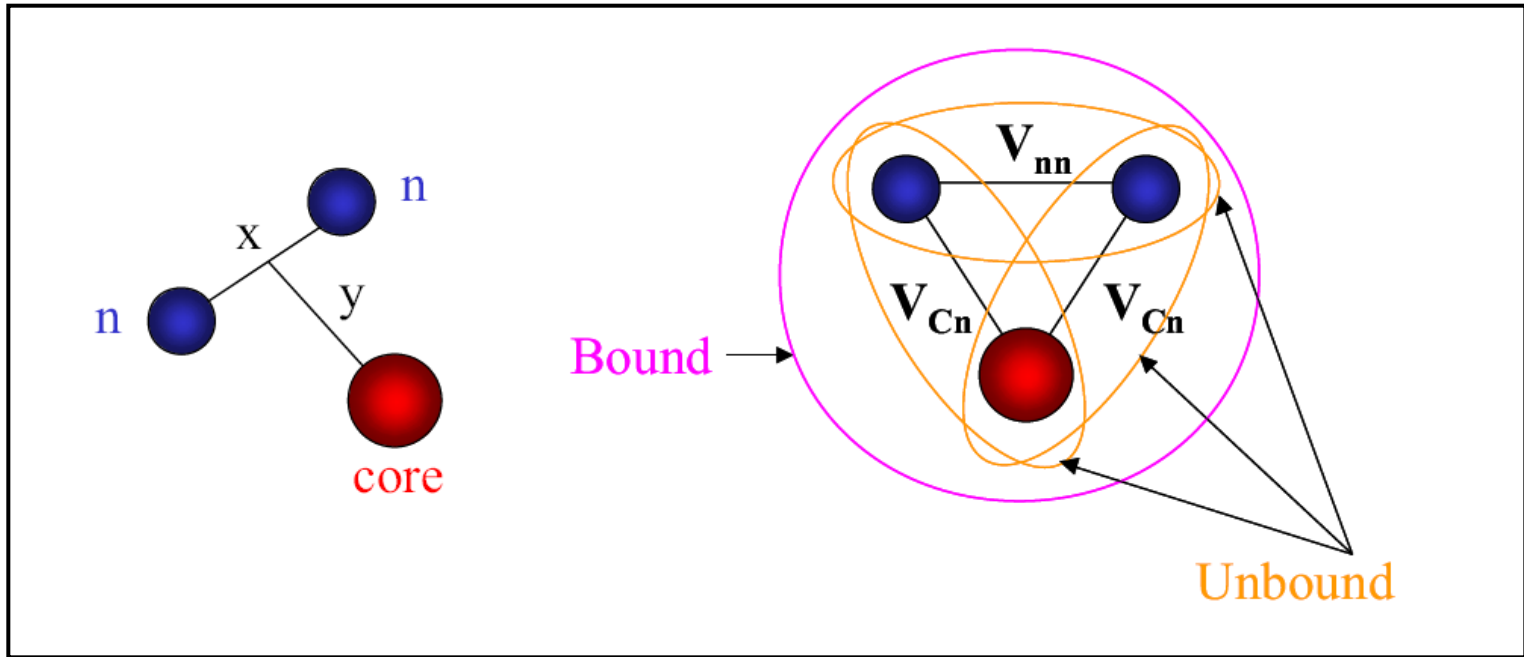


Ο Πυρήνας ^{11}Li (Halo Nucleus)



Η rms ακτίνα του πυρήνα ^{11}Li είναι περίπου ίση με αυτή του ^{48}Ca , ενώ η ακτινική απόσταση των νετρονίων της εάλω πλησιάζουν αυτήν των εξώτατων νετρονίων του πυρήνα μολύβδου ^{208}Pb !

Borromean Nuclei

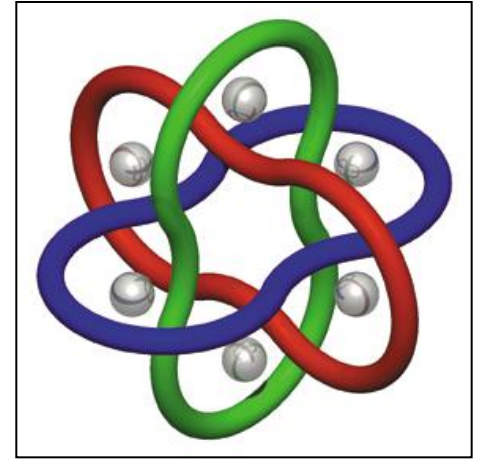
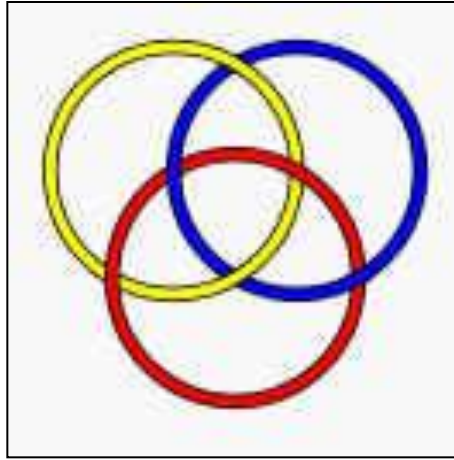
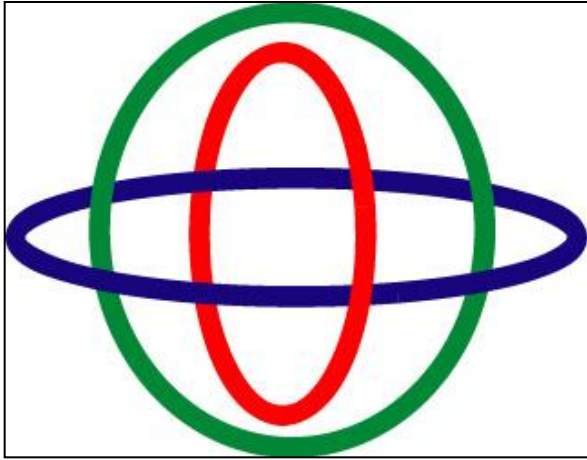


Δέσμια συστήματα τριών σωμάτων (Core + n + n) παρόλο που τα δυναμικά δύο σωμάτων V_{nn} και V_{Cn} **δεν είναι αρκούντως ισχυρά** ώστε να συγκροτήσουν ένα δέσμιο σύστημα.

Παραδείγματα

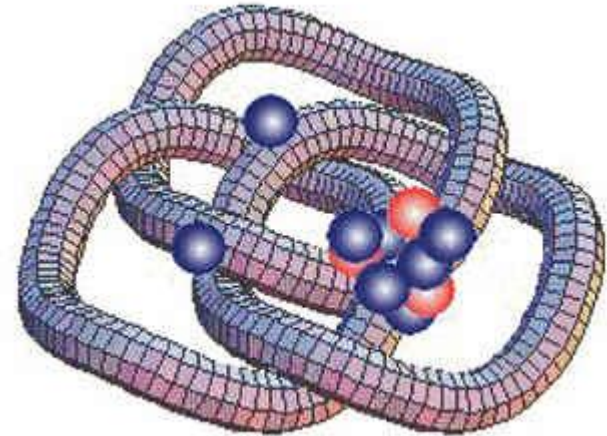


Borromean Rings

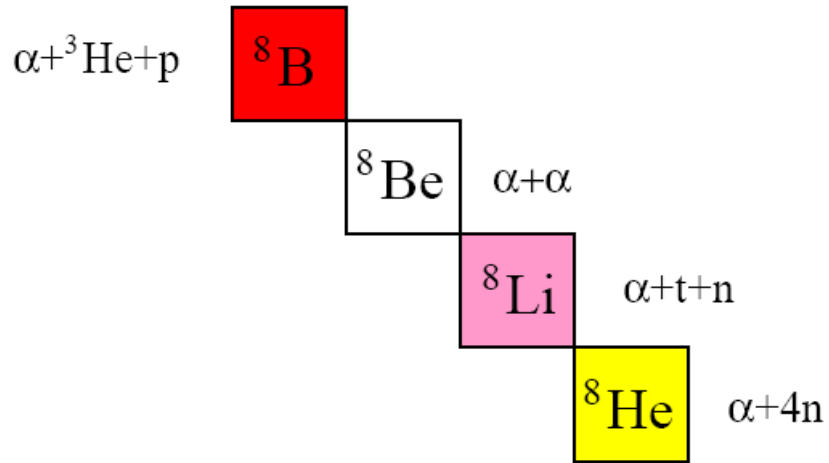


Δέσμια συστήματα τριών δακτυλίων: Η απομάκρυνση ενός εξ αυτών δημιουργεί ένα ασύνδετο σύστημα

(Τοπολογικός Δεσμός Brunnian)



Τα ισοβαρή μέλη της οικογένειας A=8

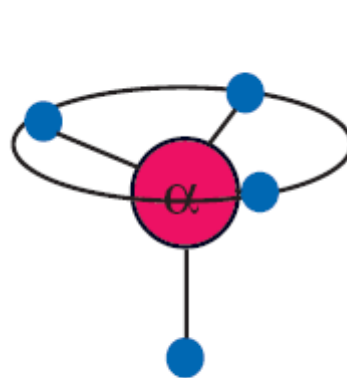


Ο πυρήνας ${}^8\text{He}$

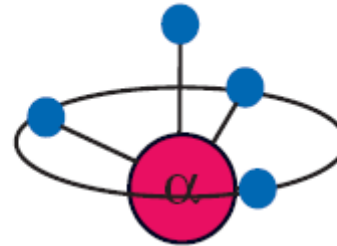
(a) Most symmetrical

(b) 4n configuration

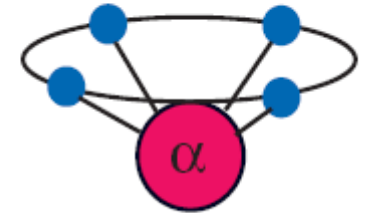
(c) 2 pairs of di-neutrons



(a)

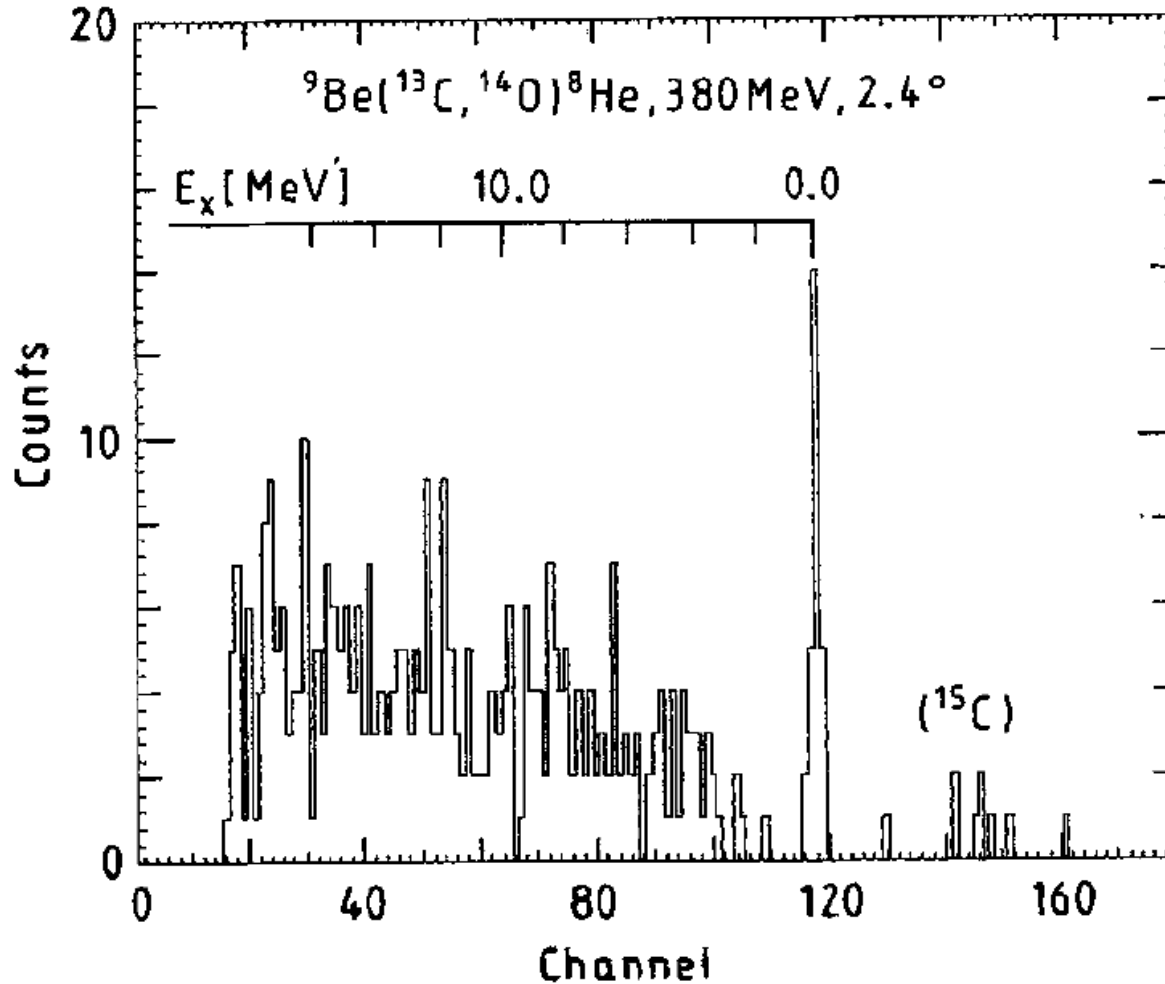
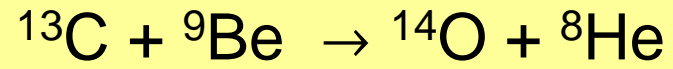


(b)

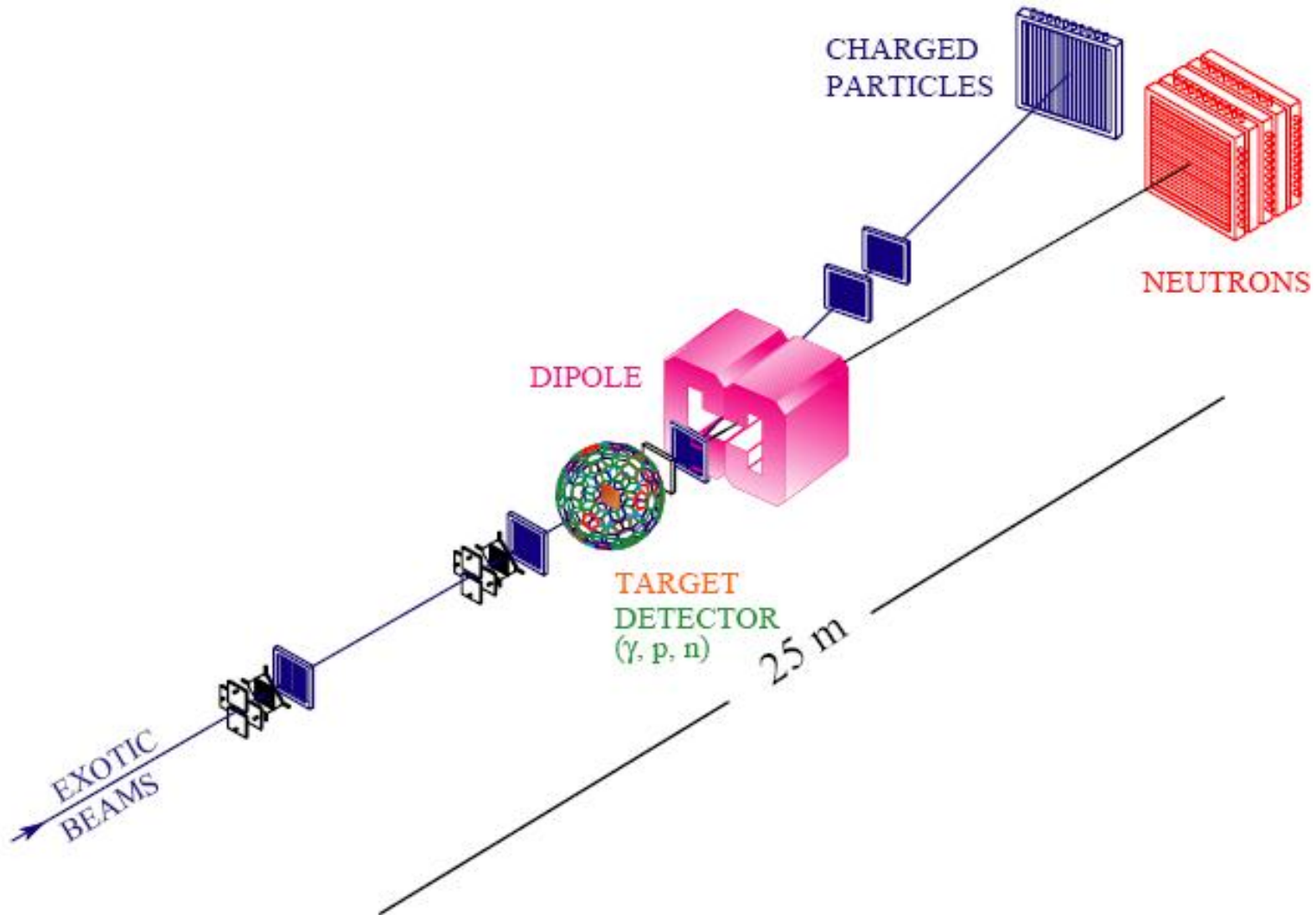


(c)

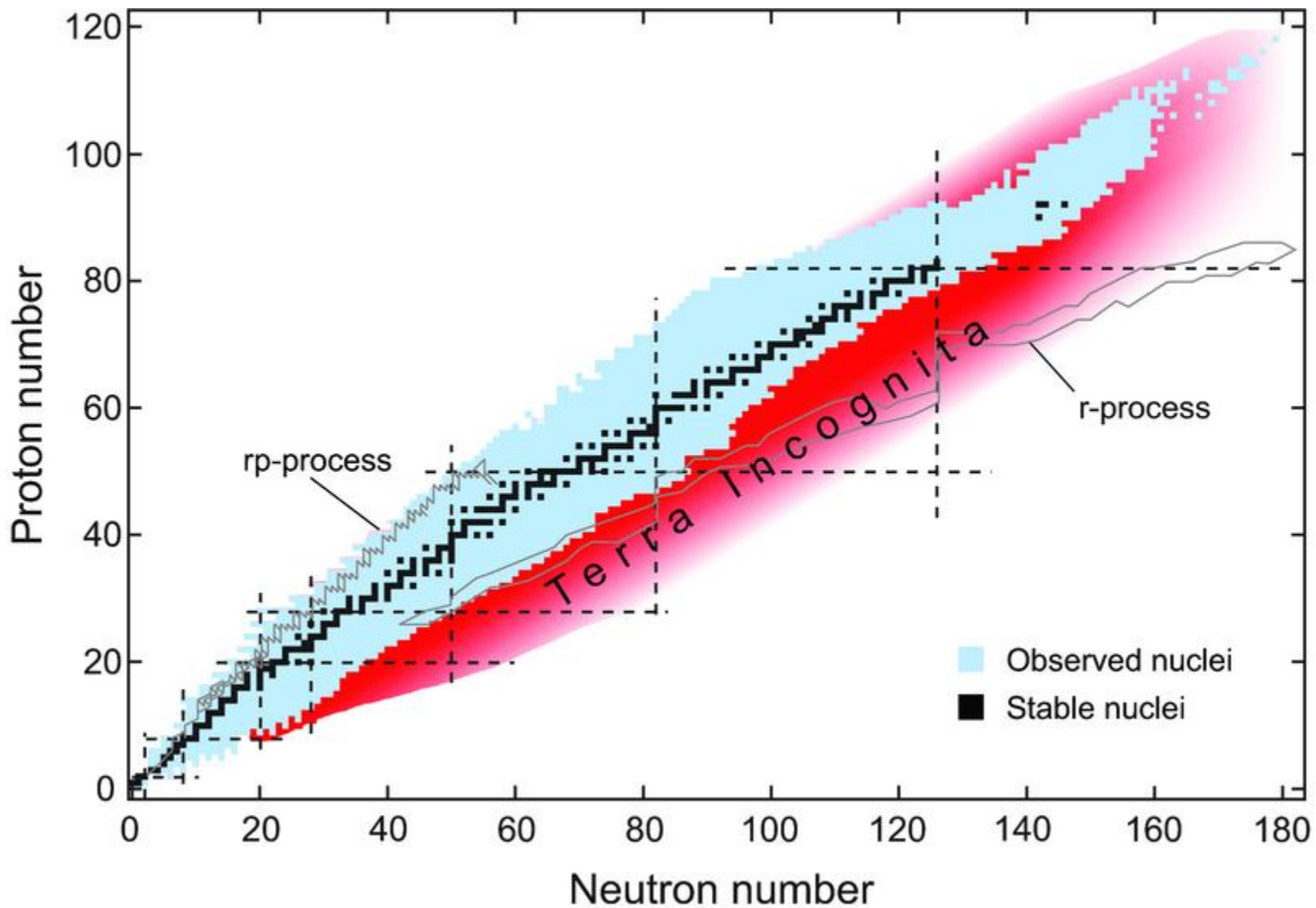
Πειραματικός προσδιορισμός του πυρήνα ^8He



Πειραματική διάταξη μέτρησης εξωτικών πυρήνων με ραδιενεργές δέσμες



Χάρτης Νουκλιδίων



Δημιουργία ραδιενεργών δεσμών για την ανίχνευση νέων ισोटύπων

