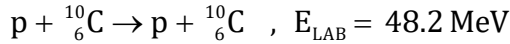


# ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

## ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

### ΑΣΚΗΣΗ ΣΤ

Σύγχρονα πειράματα ελέγχου της χειραλικής θεωρίας (χEFT) σε πυρηνικά συστήματα προσπαθούν να μετρήσουν ενεργές διατομές ελαστικής σκέδασης και πυρηνικών αντιδράσεων σε ακραία συστήματα, όπου υπάρχει περίσσεια πρωτονίων ή νετρονίων. Σε πρόσφατη μέτρηση στο εργαστήριο TRIUMF του Καναδά από τους A. Kumar *et al.* όπως αναφέρεται στην δημοσίευση PRL **118** (2017) 262502, μετρήθηκε η ελαστική σκέδαση του συστήματος



με αντίστροφη κινηματική, όπου δέσμη  ${}^{10}_6\text{C}$  προσπίπτει σε σταθερό (παγωμένο) στόχο υδρογόνου ( $\text{H}_2$ ).

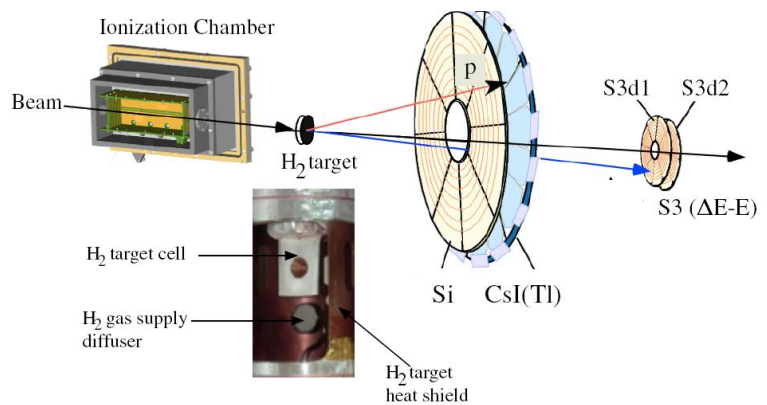
(α) Να υπολογιστεί η ισοδύναμη ενέργεια στο κέντρο μάζας  $E_{\text{CM}}$  για το σύστημα αυτό.

(β) Να συγκριθεί η διαθέσιμη στο κέντρο μάζας ενέργεια με το δυναμικό Coulomb που απαιτείται να υπερνικηθεί ώστε να επιτευχθεί πυρηνική αντίδραση.

(γ) Ποιες οι πιθανότερες αντιδράσεις μεταφοράς ενός νουκλεονίου που μπορούν να λάβουν χώρα στην παραπάνω σκέδαση; Ελέγξτε την δυνατότητα μέτρησής των, γνωρίζοντας πως οι πυρήνες  ${}^9_5\text{B}$  και  ${}^{11}_7\text{N}$  αποτελούν μη δέσμια πυρηνικά συστήματα.

(δ) Στο διπλανό σχήμα απεικονίζεται η πειραματική διάταξη για την μέτρηση της ελαστικής σκέδασης.

Σχολιάστε την γεωμετρία του κύριου ανιχνευτή και εξηγήστε γιατί αυτός είναι διπλός, αποτελείται δηλαδή από δακτυλιοειδείς λεπτούς ανιχνευτές πυριτίου (Si) χωρισμένους σε κυκλικούς τομείς και δεύτερο παχύ στρώμα με ανόργανο ανιχνευτή σπινθηρισμών CsI(Tl).

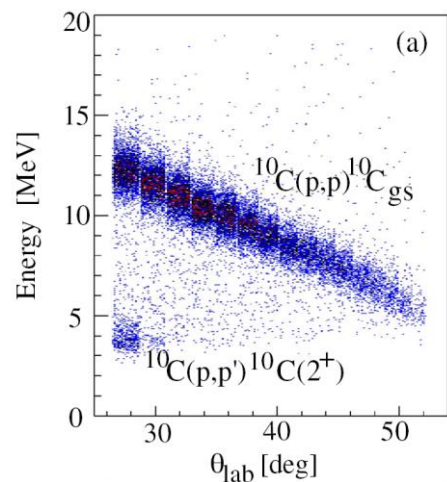


(ε) Ποιο το αναμενόμενο spin και ομοτιμία ( $J^\pi$ ) της βασικής και πρώτης διεγερμένης κατάστασης του στιγμιαία σχηματιζόμενου σύνθετου πυρήνα  ${}^{11}_7\text{N}$ ;

(στ) Στο διπλανό σχήμα ενέργειας-γωνίας φαίνεται η ελαστική σκέδαση όπως καταγράφηκε στο εν λόγω πείραμα.

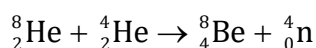
(i) Σε ποια περίπου ενέργεια εμφανίζεται η πρώτη διεγερμένη κατάσταση ( $2^+$ ) του  ${}^{10}_6\text{C}$ ;

(ii) Ποια η αναμενόμενη ενεργός διατομή για την ελαστική σκέδαση  $p + {}^{10}_6\text{C}$  στην προαναφερθείσα ενέργεια δέσμης και πώς αυτή συγκρίνεται με την τιμή των  $\sim 40 \text{ mb/sr}$  που μετρήθηκε στο πείραμα αυτό;



## ΑΣΚΗΣΗ Ζ

Τα τελευταία χρόνια γίνεται συστηματική αναζήτηση σχετικά με τη δομή και τη δεσμιότητα ενός άκρως εξωτικού συσσωματώματος, του **τετρανετρονίου** (**tetraneutron**  ${}^4_0\text{n}$ ). Η πειραματική μελέτη της δεσμιότητάς του μπορεί να δώσει σημαντική πληροφορία στον προσδιορισμό δυναμικών τριών και τεσσάρων σωμάτων. Πρόσφατα, ερευνητές στο RIKEN {*K. Kisamori et al., RRL 116 (2016) 052501*} χρησιμοποιώντας ραδιενεργή δέσμη του δέσμιου πυρήνα  ${}^8_2\text{He}$  σε ακίνητο στόχο υγρού  ${}^4_2\text{He}$  μελέτησαν την πυρηνική αντίδραση:

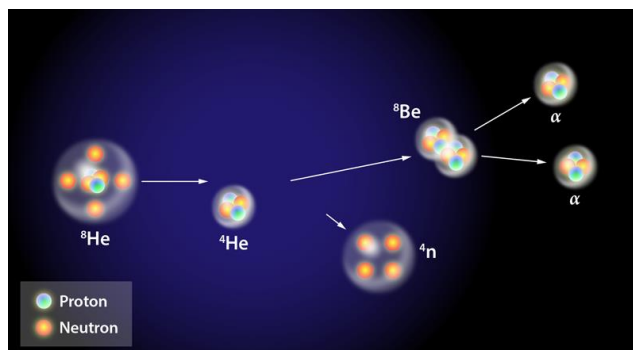


Στην ανάλυσή τους οι ερευνητές στηρίχθηκαν σε δεδομένα του εξερχόμενου ασταθούς πυρήνα  ${}^8_4\text{Be}$  δεχόμενοι το σενάριο ότι το τετρανετρόνιο  ${}^4_0\text{n}$  δεν υφίσταται ανάκρουση.

(α) Να χαρακτηριστεί το είδος της πυρηνικής αντίδρασης που λαμβάνει χώρα. Εάν υπάρχει αρκετή διαθέσιμη ενέργεια, ποια η δυνατότητα να μεταφραστεί η εν λόγω αντίδραση με ανταλλαγή πιονίων; Να εξηγήσετε τον συλλογισμό σας δίνοντας την αντίστοιχη αντίδραση.

(β) Να υπολογισθεί το δυναμικό Coulomb που απαιτείται να υπερνικηθεί ώστε να επιτευχθεί η παραπάνω πυρηνική αντίδραση. Γιατί στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε ενέργεια δέσμης 186 MeV/u, κατά πολύ μεγαλύτερη από το δυναμικό Coulomb?

(γ) Δεδομένου του γεγονότος ότι το  ${}^8_4\text{Be}$  είναι ασταθές και διασπάται σε δύο πυρήνες  $\alpha$  ( ${}^4_2\text{He}$ ), όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα, πώς θα προσδιορίσετε πειραματικά τον ενεργειακό παράγοντα  $Q$  της αντίδρασης αυτής;

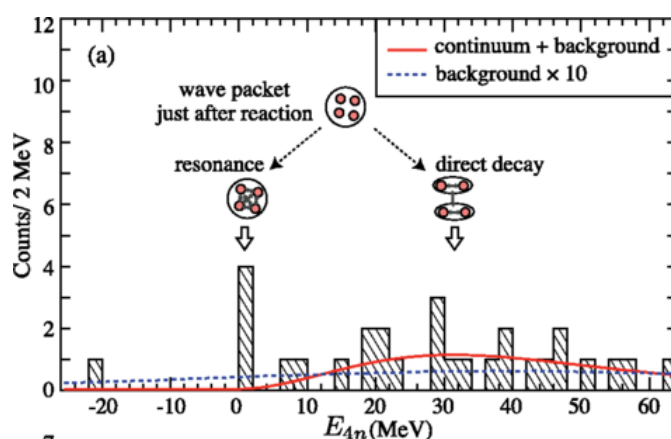


(δ) Να δικαιολογηθεί η τάξη μεγέθους της ενεργού διατομής της αντίδρασης αυτής, η οποία υπολογίστηκε στα **4 nanobarn**. Εάν η ροή της προσπίπτουσας δέσμης είναι  $2 \times 10^6$  σωματίδια/s, να υπολογιστεί ο απαιτούμενος ελάχιστος χρόνος του πειράματος για τη συλλογή γεγονότων με σχετικό σφάλμα μικρότερο του 10%.

(ε) Στο διπλανό σχήμα φαίνεται το ενεργειακό φάσμα που μετρήθηκε και αντιστοιχεί στη δημιουργία του τετρανετρονίου  ${}^4_0\text{n}$ . Εάν η συνεχόμενη γραμμή αντιστοιχεί σε γεγονότα υποβάθρου, τα οποία κατά κύριο λόγο αντιπροσωπεύουν τη δημιουργία ζευγών δινετρονικών  ${}^2_0\text{n}$  συσσωματωμάτων, και εάν η ακριβής θέση της πρώτης παρατηρούμενης κορυφής είναι

$$0.83 \pm 0.65(\text{stat}) \pm 1.25(\text{syst}) \text{ MeV}$$

ποια είναι τα βασικά συμπεράσματά σας για τη δεσμιότητα του τετρανετρονίου;



## ΑΣΚΗΣΗ Η

Σε αστροφυσικές διεργασίες με θερμοπυρηνικές αντιδράσεις και ιδιαίτερα σε καινοφανείς αστέρες, ο ρυθμός παραγωγής στοιχείων μέχρι το ασβέστιο αποτελεί έναν βασικό παράγοντα κατανόησης της πυρηνογένεσης. Σύγχρονα πειράματα επικεντρώνονται σε αντιδράσεις σύλληψης πρωτονίου ( $p, \gamma$ ) και στην μέτρηση των ενεργών διατομών των αντιδράσεων αυτών σε διαφορετικές ενέργειες.

Σε πρόσφατη συνεργασία των εργαστηρίων Texas A&M και TRIUMF μετρήθηκε από τους G. Christian *et al.* όπως αναφέρεται στην δημοσίευση PRC **97** (2018) 025802 η αντίδραση:



με αντίστροφη κινηματική, όπου ραδιενεργή δέσμη  ${}^{38}_{19}\text{K}$  προσπίπτει σε σταθερό (παγωμένο) στόχο υδρογόνου ( $\text{H}_2$ ).

**(α)** Ποια είναι οργανολογικά η καλύτερη μέθοδος για την απομόνωση του παραπάνω καναλιού ( $p, \gamma$ ) στην αντίδραση του  ${}^{38}_{19}\text{K}$  με τον στόχο υδρογόνου; Πώς φασματοσκοπείται ο ανακρουόμενος πυρήνας  ${}^{39}_{20}\text{Ca}$ ;

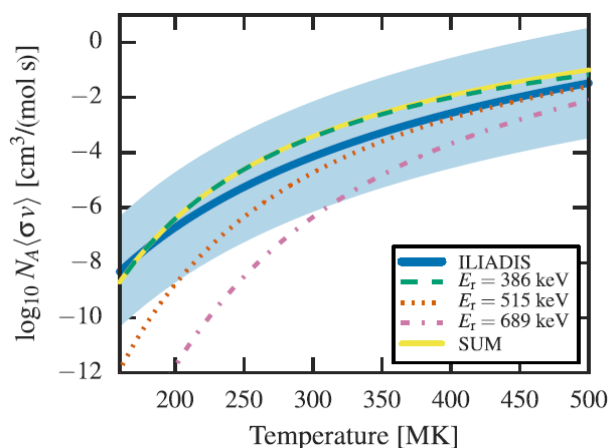
**(β)** Αποδείξτε ότι για ενέργεια δέσμης  $E_{\text{LAB}} = 27.17 \text{ MeV}$  μπορεί να μελετηθεί ο αναμενόμενος συντονισμός του  ${}^{39}_{20}\text{Ca}$  στα 689 keV, εξετάζοντας την ισοδύναμη ενέργεια στο κέντρο μάζας  $E_{\text{CM}}$  για το σύστημα αυτό.

**(γ)** Να συγκριθεί η διαθέσιμη στο κέντρο μάζας ενέργεια με το δυναμικό Coulomb που απαιτείται να υπερνικηθεί ώστε να επιτευχθεί η σύλληψη του πρωτονίου. Ποιός μηχανισμός επιτρέπει την σύλληψη του πρωτονίου παρότι η διαθέσιμη ενέργεια είναι μικρότερη του δυναμικού Coulomb?

**(δ)** Ποιο το αναμενόμενο spin και ομοτιμία ( $J^\pi$ ) της βασικής και πρώτης διεγερμένης κατάστασης του στιγμιαία σχηματιζόμενου πυρήνα  ${}^{39}_{20}\text{Ca}$ ;

**(ε)** Στο διπλανό σχήμα απεικονίζεται η ενεργός διατομή (ρυθμός αντιδράσεων) για τον μηχανισμό ( $p, \gamma$ ) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας του καινοφανούς αστέρα. Εξηγήστε ποιοτικά την ανοδική τάση που επιδεικνύει το στατιστικό μοντέλο (ILIADIS, συνεχόμενη κυανή καμπύλη στο σχήμα).

Σχολιάστε τη συμφωνία με το εν λόγω μοντέλο των μετρηθέντων ενεργών διατομών από το πείραμα για τους τρεις συντονισμούς στις ενέργειες 386 keV, 515 keV και 689 keV.



## ΑΣΚΗΣΗ Θ

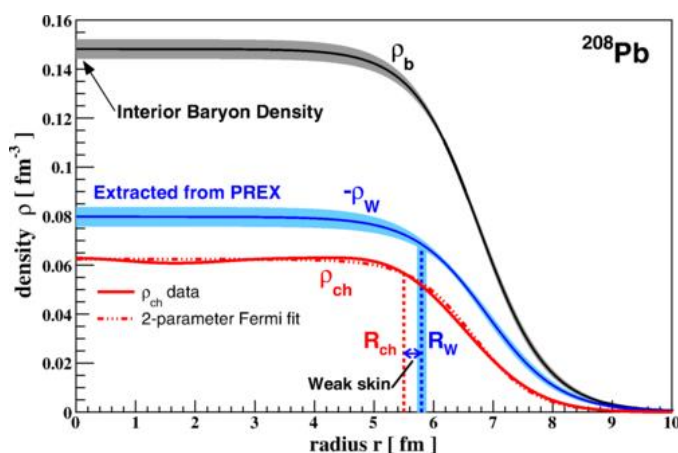
Η μελέτη της κατανομής των νετρονίων σε βαρείς πυρήνες με μετρήσεις ακριβείας έχει άμεσες επιπτώσεις για τον καθορισμό της *Καταστατικής Εξίσωσης* (Equation of State - EOS), η οποία με τη σειρά της εφαρμόζεται για τη μελέτη των ιδιοτήτων των αστέρων νετρονίων. Είναι αξιοσημείωτο ότι η φυσική των συστημάτων που ποικίλλουν σε μέγεθος κατά 18 τάξεις μεγέθους διέπονται από την ίδια Καταστατική Εξίσωση.

Πρόσφατα αποτελέσματα της κοινοπραξίας PREX με μετρήσεις ακριβείας σκέδασης πολωμένων ηλεκτρονίων στο Jefferson Lab, αναφορικά με τον προσδιορισμό της ακτίνας του πυρήνα  $^{208}\text{Pb}$ , έχουν ανακοινωθεί από τους D. Adhikari *et al.* στη δημοσίευση PRL **126** (2021) 172502 με τίτλο “*Accurate Determination of the Neutron Skin Thickness of  $^{208}\text{Pb}$  through Parity-Violation in Electron Scattering*”.

### Ερωτήσεις

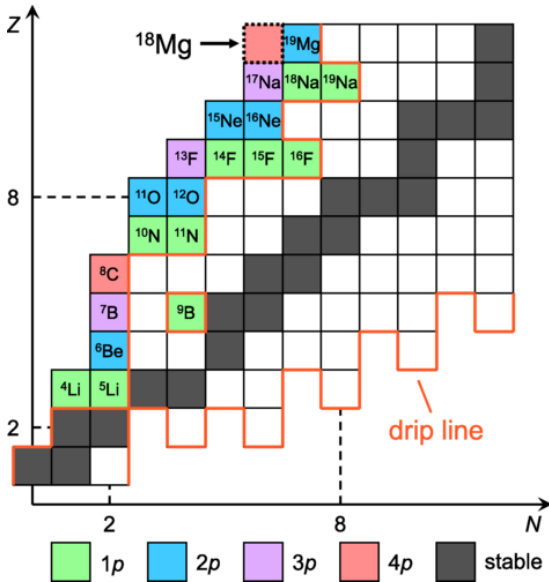
- (α) Ποια είναι η διάταξη και οργάνωση του πειράματος με απλή περιγραφή.
- (β) Πώς προσδιορίζεται πειραματικά το φυσικό μέγεθος της ασυμμετρίας  $A_{PV}$  (Εξίσωση 1) και με ποιες φυσικές ποσότητες συνδέεται; Γιατί υπάρχει αυτή η ασυμμετρία;
- (γ) Γιατί τα συστηματικά σφάλματα σε τέτοιου είδους μετρήσεις παίζουν σημαντικό ρόλο; Ποια είναι η κυρίαρχη πηγή συστηματικών σφαλμάτων στην παρούσα μέτρηση;
- (δ) Η δέσμη των ηλεκτρονίων του πειράματος έχει ενέργεια 953 MeV. Πόση είναι η μεταφερόμενη ορμή στον πυρήνα του  $^{208}\text{Pb}$  εάν γωνία ανίχνευσης του ηλεκτρονίου είναι  $\theta=60^\circ$  στο σύστημα του εργαστηρίου;
- (ε) Σε περίπτωση που υπάρξει διέγερση του πυρήνα  $^{208}\text{Pb}$ , ποιο είναι το αναμενόμενο spin και ομοτιμία ( $J^\pi$ ) της πρώτης διεγερμένης κατάστασης;
- (στ) Στο διπλανό σχήμα απεικονίζεται η βαρυονική πυκνότητα  $\rho_b$ , η πυκνότητα φορτίου  $\rho_{ch}$  καθώς και «ασθενής» πυκνότητα  $\rho_w$  (Σχήμα 4).

- Περιγράψτε κάποια από τις πυκνότητες αυτές με μια απλή συνάρτηση, προσδιορίζοντας τις υπεισερχόμενες παραμέτρους.
- Σχολιάστε τον όρο «επιδερμίδα» στον οποίον επικεντρώνεται η παρούσα μελέτη και εξηγήστε γιατί ο όρος αυτός έχει αστροφυσικές επιπτώσεις.

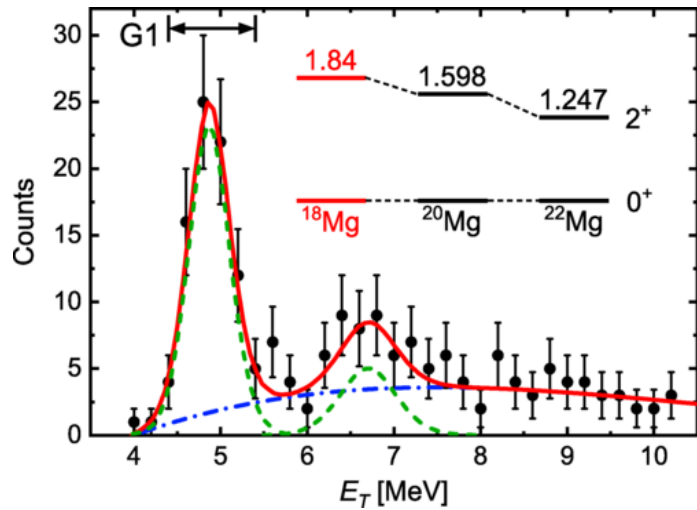


## ΑΣΚΗΣΗ Ι

Πρόσφατα πιστοποιήθηκε πειραματικά η ύπαρξη του εξωτικού πυρήνα  $^{18}\text{Mg}$  ( $Z=12$ ) μέσω της αντίδρασης μεταφοράς δύο νετρονίων δευτερογενούς δέσμης  $^{20}\text{Mg}$  σε στόχο  $^9\text{Be}$  ( $Z=4$ ) [Y. Jin *et al.* Phys. Rev. Lett. 127 (2021) 262502]. Η σχετική θέση των νουκλιδίων αυτών στον ισοτοπικό χάρτη φαίνεται στην Εικόνα-1. Ο παραγόμενος εξωτικός πυρήνας  $^{18}\text{Mg}$ , όπως αναμένεται είναι ασταθής και εκπέμπει δύο ζεύγη πρωτονίων πριν καταλήξει στον πυρήνα  $^{14}\text{O}$ . Το ενεργειακό φάσμα της διάσπασης  $^{14}\text{O}+4p$  απεικονίζεται στην Εικόνα-2.



Εικόνα-1: Ισοτοπικός χάρτης της περιοχής ενδιαφέροντος.



Εικόνα-2: Συνολικό ενεργειακό φάσμα της διάσπασης  $^{18}\text{Mg} \rightarrow ^{14}\text{O} + 4p$

### Ερωτήσεις

- (α) Γράψτε την αντίδραση παραγωγής του εξωτικού πυρήνα  $^{18}\text{Mg}$  από τα δεδομένα της εκφώνησης.
- (β) Υπολογίστε την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια της δέσμης, θεωρώντας πως  $Q = -20\text{MeV}$ .
- (γ) Γράψτε την αντίδραση διάσπασης του  $^{18}\text{Mg}$  και εξηγήστε την απαιτούμενη οργάνολογία για την δημιουργία του φάσματος της Εικόνας-2.
- (δ) Τί φυσικό ενδιαφέρον παρουσιάζει ο εξωτικός πυρήνας  $^{18}\text{Mg}$ ; Ποιά η αναμενόμενη κατανομή των νουκλεονίων του σε τροχιακά και ποιό το αναμενόμενο spin και ομοτιμία ( $J^\pi$ ) της θεμελιακής του κατάστασης;
- (ε) Ποιά επιπλέον πληροφορία εμπεριέχει το ενεργειακό φάσμα της Εικόνας-2;