

**ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΟΡΙΑΚΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΑΡΘΡΟΥ**

**«Η ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΕΡΛΕΠΤΗΣ
ΥΦΗΣ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙ-
ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ»**

$$(\mathbf{i}\hbar\gamma^\mu\nabla_\mu - mc)\psi = 0$$

ΘΟΔΩΡΗΣ ΔΕΠΑΣΤΑΣ

ΑΜ: 201902

Εισαγωγή

Το 1928 ο P.A.M. Dirac συνδύασε την ενέργεια ενός κινούμενου σωματιδίου που προκύπτει από την ειδική θεωρία της σχετικότητας με τον Χαμιλτονιανό φορμαλισμό της κβαντικής μηχανικής και απέδειξε μία σχετικιστική κβαντομηχανική εξίσωση που περιγράφει την κίνηση ενός σωματιδίου με μη μηδενική μάζα και spin 1/2. Η επίλυση της συγκεκριμένης εξίσωσης προβλέπει σωματίδια με αρνητική ενέργεια. Οι Feynman και Stueckelberg θεώρησαν ότι οι λύσεις αρνητικής ενέργειας αντιστοιχούν σε αντισωματίδια που κινούνται αντίστροφα στον χρόνο. Η αντιύλη είναι σύνολο σωματιδίων που χαρακτηρίζονται από αντίθετο φορτίο και φερμιονικούς/βαρυονικούς αριθμούς, ενώ έχουν το ίδιο spin με αντίστοιχα σωματίδια της ύλης. Το 1932 ο C.D. Anderson παρατήρησε πειραματικά την ύπαρξη του ποζιτρονίου, το αντισώματιο του ηλεκτρονίου.

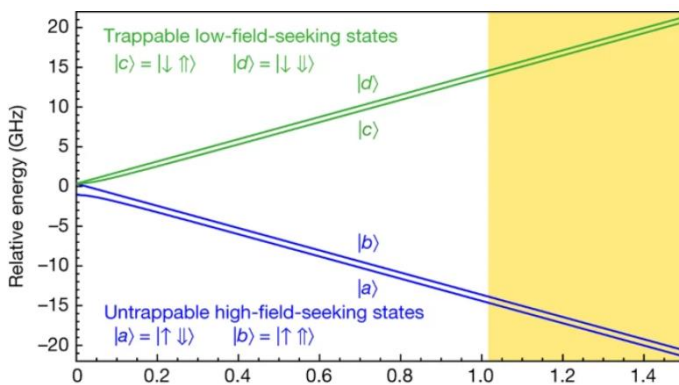
Θεωρητικό Υπόβαθρο

Βάσει της συμμετρίας Φορτίου-Ομοτιμίας-Χρόνου (CPT) της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων ύλης θα πρέπει να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των αντισωματιδίων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των ιδιοτήτων των ατόμων που αποτελούνται από αντισώματα. Το αντι-υδρογόνο είναι ένα αντι-άτομο το οποίο αποτελείται από έναν πυρήνα αντιπρωτονίου και ένα ποζιτρόνιο. Η υπέρλεπτη υφή του φάσματός του μελετήθηκε από τους M. Ahmadi, B.X.R. Alves *et al* στις εγκαταστάσεις του Alpha Επιβραδυντή Αντιπρωτονίων στο CERN. Η υπέρλεπτη υφή του ατομικού φάσματος προκύπτει από την σύζευξη του πυρηνικού spin με το spin του ποζιτρονίου. Στην ασύζευκτη βάση οι καταστάσεις του συστήματος είναι οι

$$|a\rangle = |\uparrow\rangle_p \otimes |\downarrow\rangle_n, |b\rangle = |\uparrow\rangle_p \otimes |\uparrow\rangle_n, |c\rangle = |\downarrow\rangle_p \otimes |\downarrow\rangle_n \text{ και } |d\rangle = |\downarrow\rangle_p \otimes |\uparrow\rangle_n$$

όπου οι καταστάσεις “p” αναφέρονται στο spin του ποζιτρονίου και οι καταστάσεις “n” αναφέρονται στο spin του αντι-πυρήνα. Η ενέργεια των καταστάσεων καθορίζεται κυρίως από την μαγνητική διπολική ροπή του ποζιτρονίου, ενώ η ενέργεια λόγω του πυρηνικού spin έχει διαταρακτικό χαρακτήρα. Τα αντι-άτομα παγιδεύονται με χρήση μαγνητικού πεδίου και η αλληλεπίδραση δίνεται μέσω της σχέσης

$$\Delta E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = \pm g\mu_B m_s B_0$$



Σχήμα 1 Οι ενέργειες των καταστάσεων συναρτήσει του πεδίου. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή αναφέρεται στο πεδίο της διάταξης.

όπου το θετικό πρόσημο αντιστοιχεί στο φορτίο του ποζιτρονίου και το αρνητικό στο φορτίο του αντιπρωτονίου. Ο κβαντικός αριθμός του spin έχει τις συνήθεις τιμές $\pm 1/2$. Οι καταστάσεις $|a\rangle$ και $|b\rangle$ έχουν χαμηλή ενέργεια και απαιτείται υψηλό πεδίο για την σταθεροποίησή τους («καταστάσεις υψηλού πεδίου»), ενώ οι $|c\rangle$ και $|d\rangle$ έχουν υψηλή ενέργεια και απαιτείται χαμηλό πεδίο («καταστάσεις χαμηλού πεδίου»). Στο συγκεκριμένο πείραμα

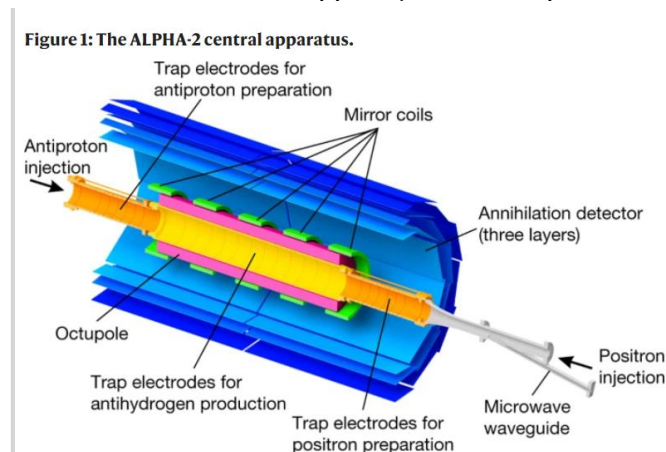
μελετήθηκαν οι μεταπτώσεις του spin του ποζιτρονίου, από τις σταθεροποιημένες καταστάσεις χαμηλού πεδίου στις καταστάσεις υψηλού πεδίου, που δεν δύναται να παγιδευτούν.

$$|d\rangle \rightarrow |a\rangle \text{ και } |c\rangle \rightarrow |b\rangle$$

Οι συγκεκριμένες μεταπτώσεις πραγματοποιούνται με χρήση μικροκυμάτων και η σχετική συχνότητά τους δίνει την υπέρλεπτη υφή του φάσματος. Οι ενέργειες των καταστάσεων συναρτήσει του πεδίου φαίνεται στο σχήμα 1.

Πειραματική Διάταξη

Η μελέτη των ιδιοτήτων της αντιύλης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη καθώς αυτή εξαυλώνεται όταν έρχεται σε επαφή με σωματίδια ύλης. Για τον λόγο αυτό τα άτομα αντι-υδρογόνου πρέπει να συντηθούν από επιβραδυμένα αντιπρωτόνια και ποζιτρόνια. Τα σωματίδια είναι σε κατάσταση πλάσματος και αναμιγνύονται περίπου 90000 αντιπρωτόνια και 1600000 ποζιτρόνια για την παραγωγή 25000 ατόμων αντι-υδρογόνου. Από αυτά μόνο 20 έχουν αρκετά μικρή κινητική ενέργεια ώστε να παγιδευτούν από την μαγνητική παγίδα. Η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.



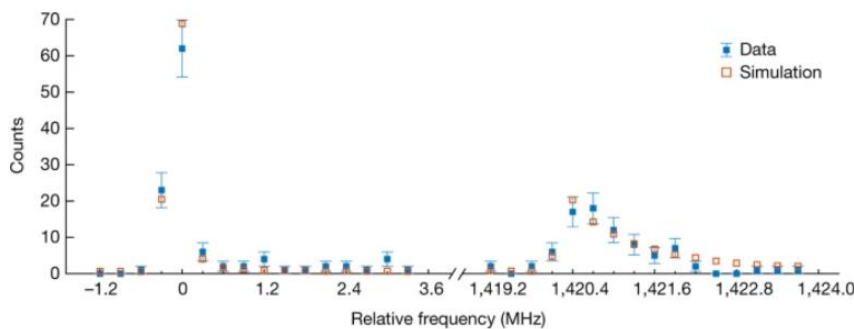
Σχήμα 2 Η πειραματική διάταξη της παγίδας ιόντων, του ανιχνευτή και της παραγωγής αντι-υδρογόνου.

Στα δύο άκρα διάταξης (πορτοκαλί σωληνοειδή) εισέρχονται δέσμες αντιπρωτονίων (αριστερά) και ποζιτρονίων δεξιά και παγιδεύονται. Έπειτα τα αντισώματα εισέρχονται

επιβραδυμένα στην κεντρική μαγνητική παγίδα όπου το πεδίο είναι ελάχιστο (κίτρινο σωληνοειδές). Εκεί παράγεται το αντι-υδρογόνο και σταθεροποιείται από οκταπολικό πεδίο που επιδρά μέσω ηλεκτροδίων (μωβ σωληνοειδή). Οι παγίδες ιόντων της διάταξης είναι τύπου Penning (“Penning Traps”) και χρησιμοποιούν ομοιογενές μαγνητικό πεδίο ισχύος 1 T αξονικής συμμετρίας από ηλεκτρομαγνήτες (μπλε σωληνοειδές) και ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο για την σταθεροποίηση των αντισωματιδίων. Κατά την διαδικασία παράγονται επιπρόσθετα φορτισμένα σωματίδια τα οποία απομακρύνονται με ηλεκτρικούς παλμούς. Τέλος στον όγκο του ελαχίστου πεδίου όπου και παγιδεύονται τα αντι-υδρογόνα εισέρχονται παλμικά μικροκύματα κάθε 4 s. Αυτά σαρώνουν την περιοχή των δύο μεταπτώσεων του spin ποζιτρονίου. Τα αντι-υδρογόνα που συντονίζονται με τα μικροκύματα εξέρχονται από το κέντρο της διάταξης και μεταφέρουν ηλεκτρικό σήμα στον κυλινδρικό ανιχνευτή τριών επιπέδων (κυανό σωληνοειδές). Ο ανιχνευτής καταγράφει συνεχώς τα γεγονότα εξαύλωσης αντισωματιδίων με τα αντίστοιχα σωματίδια ύλης. Ο ανιχνευτής εκτός των γεγονότων του πειράματος καταγράφει και γεγονότα ακτινοβολίας υποβάθρου από κοσμικές ακτίνες. Αυτά διαχωρίζονται από τα πειραματικά δεδομένα βάσει της τοπολογίας τους, με χρήση στατιστικών πολυπαραγοντικών μεθόδων (Multivariate Analysis).

Πειραματικά Αποτελέσματα

Τα φάσμα που προκύπτει από την προαναφερθείσα ανάλυση φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3 Το φάσμα του αντι-υδρογόνου, ως προς την σχετική συχνότητα των μεταπτώσεων. Πειραματικά δεδομένα (μπλε) και προσομοίωση για άτομα ύλης (κόκκινο).

αντιστοιχούν σε πειραματικά δεδομένα και τα κόκκινα σε αποτελέσματα κώδικα προσομοίωσης. Ο κώδικας προσομοιώνει το συντονισμό ατόμων υδρογόνου από σωματίδια ύλης μέσα στην γεωμετρία της παγίδας. Σε αυτόν χρησιμοποιούνται ημικλασικές εξισώσεις κίνησης για τα άτομα. Στο σχήμα φαίνονται επίσης τα διαστήματα των πειραματικών σφαλμάτων. Αυτά προκύπτουν από των συνδυασμό αποτελεσμάτων διαφορετικών ημερών, από την μετατόπιση της αρχής των αξόνων και από μικρές μεταβολές του πεδίου κατά την διάρκεια της σάρωσης. Το κάθε ένα από αυτά συνεισφέρει περίπου 0.3 MHz. Τα αποτελέσματα μπορούν να βελτιωθούν με χρήση μικρότερου διαστήματος βαθμίδωσης του πεδίου κατά την διάρκεια της σάρωσης.

Όπως φαίνεται και από το φάσμα η διάσχιση των κορυφών του αντι-υδρογόνου που οφείλεται στην υπέρλεπτη υφή υπολογίζεται στα 1420.4 ± 0.5 MHz. Η τιμή αυτή βρίσκεται σε συμφωνία με την αντίστοιχη του φάσματος του υδρογόνου. Εκτός του κέντρου του φάσματος όμως, πρέπει και η μορφή του να είναι ίδια με το αντίστοιχο φάσμα των ατόμων ύλης ώστε να ισχύει η CPT συμμετρία. Η περαιτέρω ανάλυση της μορφής του υπέρλεπτου φάσματος του αντι-υδρογόνου είναι ένας από τους βασικούς μελλοντικούς στόχους της ομάδας. Ένας επιπλέον στόχος είναι η ανάλυση της NMR μετάπτωσης $|d\rangle \rightarrow |c\rangle$. Εν κατακλείδι, η ανάλυση της φασματοσκοπίας της αντιύλης παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς δύναται να χαράξει την πορεία για την μελέτη μέχρι άγνωστων περιοχών της φυσικής.

Βιβλιογραφία

Βασική πηγή της εργασίας αποτέλεσε το προς περίληψη άρθρο

Ahmadi, M., Alves, B., Baker, C. *et al.* Observation of the hyperfine spectrum of antihydrogen. *Nature* **548**, 66–69 (2017).

Επιπροσθέτως χρησιμοποιήθηκαν και οι κάτωθι πηγές

- Thomson, M. (2013). *Modern Particle Physics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Griffiths, D., & Schroeter, D. (2018). *Introduction to Quantum Mechanics* (3rd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Pritchard, David E. (1983). "Cooling Neutral Atoms in a Magnetic Trap for Precision Spectroscopy". *Physical Review Letters*. **51**

Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η σχετική συχνότητα των δύο μεταπτώσεων (το 0 αντιστοιχεί στην $|c\rangle \rightarrow |b\rangle$) και στον κάθετο άξονα φαίνεται ο αριθμός των καταγραφόντων γεγονότων μετά από συνδυασμό μετρήσεων από πειράματα διαφορετικών ημερών. Τα κυανά σημεία