



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΕΙΑ»
ΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΟ ΜΑΘΗΜΑ ΤΗΣ ΜΟΡΙΑΚΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΟΥ ΑΡΘΡΟΥ ΜΕ ΤΙΤΛΟ
«**Measuring the α -particle charge radius with muonic helium-4 ions**»
Julian J. Krauth, Karsten Schuhmann, Marwan Abdou Ahmed et al.

Τζέλιου Χριστίνα-Ελευθερία
Α.Μ. 201908

Υπεύθυνος Καθηγητής: Α. Τσεκούρας

Το σωματίδιο α είναι ο πυρήνας του ατόμου ηλίου-4 (${}^4\text{He}$) και αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, στενά συνδεδεμένα από την ισχυρή πυρηνική δύναμη. Είναι ένας από τους πιο μελετημένους ατομικούς πυρήνες. Το σωματίδιο α είναι ένας ευνοϊκός στόχος για μια ποικιλία μελετών ακρίβειας: το μηδενικό πυρηνικό spin του ($l = 0$) σημαίνει ότι μπορεί να περιγραφεί με μια απλή κατανομή φορτίου, χωρίς κατανομή μαγνητισμού, τετραπολική ή υψηλότερη ροπή. Στην ελαστική σκέδαση ηλεκτρονίων, το σωματίδιο α μπορεί λοιπόν να περιγραφεί με έναν απλό παράγοντα φόρτισης-μονόπολου. Από την ανάλυση των παγκόσμιων δεδομένων διασποράς ηλεκτρονίων, μια ακτίνα φόρτισης μέσης τετραγωνικής ρίζας (r.m.s.) του σωματιδίου α $r_\alpha = 1,681(4)$ fm εξήχθη, όπου η τιμή σε αγκύλες υποδεικνύει την αβεβαιότητα 1σ στο τελευταίο ψηφίο.

Στα ελαφριά άτομα και ιόντα μιονίου, ένα μόνο μόνιο περιστρέφεται σε γυμνό πυρήνα. Λόγω της μεγάλης μάζας του μιονίου $m_\mu \approx 200m_e$, όπου m_e η μάζα του ηλεκτρονίου, η ακτίνα Bohr του μιονίου είναι μικρότερη από την τροχιά Bohr του ηλεκτρονίου στο αντίστοιχο υδρογονοειδές ιόν με συντελεστή περίπου 200. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα περίπου $200^3 \approx 8$ εκατομμύρια φορές αυξημένη αλληλεπικάλυψη της κυματοσυνάρτησης του μιονίου με τον πυρήνα και αντίστοιχα αυξημένη ευαισθησία στις πυρηνικές ιδιότητες, όπως η ακτίνα πυρηνικού φορτίου. Αυτή η πεπερασμένη επέκταση του πυρήνα τροποποιεί το λεγόμενο Lamb shift, που είναι η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των καταστάσεων $2S_{1/2}$ και $2P_{1/2}$.

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται η πρώτη μέτρηση των ενεργειακών διαχωρισμών $2P - 2S$ στο υδρογονοειδές ιόν μιονικού He, ($\mu^4\text{He}$) $^+$.

Η Lamb shift κυριαρχείται από καθαρά κβαντικά ηλεκτροδυναμικά φαινόμενα (QED), συγκεκριμένα, πόλωση κενού, η οποία ενισχύεται σε μεγάλο βαθμό στα άτομα μιονίου, αλλά η επίδραση του πεπερασμένου πυρηνικού μεγέθους ανέρχεται στο 20% του συνόλου διάσπασης ενέργειας.

Ο πειραματικός προσδιορισμός της Lamb shift και της λεπτής δομής του ($\mu^4\text{He}$) $^+$ που αναφέρεται στο συγκεκριμένο άρθρο ακολουθεί την εξής τεχνική: περίπου 500 μόνια ανά δευτερόλεπτο από την πιο έντονη δέσμη αρνητικών μιονίων στον κόσμο σε εξαιρετικά χαμηλή ενέργεια (λίγα keV) σταματούν σε 2 mbar αερίου He σε θερμοκρασία δωματίου. Η επιβράδυνση στο αέριο He συμβαίνει μέσω συγκρούσεων. Στην τελευταία σύγκρουση, το μόνιο εκτοξεύει ένα ηλεκτρόνιο και αιχμαλωτίζεται από ένα άτομο He, σχηματίζοντας ένα άτομο μιονίου σε μια υψηλά διεγερμένη κατάσταση με κύριο κβαντικό αριθμό $n \approx 14$. Για αυτές τις τροχιές υψηλού n , οι εσωτερικοί ρυθμοί Auger είναι πολύ μεγαλύτεροι από τους ρυθμούς μετάβασης ακτινοβολίας, και ως εκ τούτου το εναπομείναν ηλεκτρόνιο εξαγεται γρήγορα. Το προκύπτον υδρογονοειδές ιόν προχωρά εντός περίπου 100 ns προς τη θεμελιώδη $1S$ ή προς τη μετασταθή κατάσταση $2S$ μέσω ακτινοβολικών μεταβάσεων. Περίπου 1% των μιονίων θα συμπληρώσει τη μετασταθή κατάσταση $2S$ του ($\mu^4\text{He}$) $^+$, του οποίου η διάρκεια ζωής των 1.75 μs είναι αποτέλεσμα της αποσύνθεσης των μιονίων και της αποδιέγερσης 2 -φωτονίων $2S \rightarrow 1S$. Στην πραγματικότητα, με τη χαμηλή πίεση αερίου στόχου των μόνο 2 mbar, ο ρυθμός παράπλευρης απόσβεσης $2S \rightarrow 1S$ είναι μικρότερος από 10 kHz και με τον αρκετά καθαρό αέριο στόχο, το ($\mu^4\text{He}$) $^+$ δε θα εξουδετερωθεί.

Ένα παλμικό σύστημα λέιζερ ενεργοποιείται κατά την άφιξη ενός μόνο μιονίου και φωτίζει τον όγκο διακοπής του μιονίου περίπου 1 μs μετά τη διακοπή του μιονίου. Το σύστημα λέιζερ περιλαμβάνει έναν ταλαντωτή τιτανίου-ζαφειρίου (Ti:Sa), ο οποίος αντλείται από λέιζερ λεπτού δίσκου διτλασιασμένης συχνότητας και εγχύεται με λέιζερ συνεχούς κύματος Ti:Sa. Είναι ευρεία ρυθμιζόμενο από 800 έως 1000 nm και αποδίδει παλμούς ενέργειας έως 10 mJ με εύρος ζώνης μικρότερο από 100 MHz. Ωστόσο, οι μετρήσεις εκτελούνται με σταθερή ενέργεια παλμού 3.9 mJ για την αποφυγή ευρείας ισχύος και για την αποφυγή της ζημίας που προκαλείται από λέιζερ στην κοιλότητα πολλαπλών συχνοτήτων που χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της ροής του λέιζερ στον όγκο διακοπής του μιονίου. Κάθε λίγες ώρες, η συχνότητα λέιζερ αλλάζει, αλλάζοντας τη συχνότητα του λέιζερ συνεχούς κύματος. Η ενέργεια που παρέχεται στην κοιλότητα πολλαπλών συχνοτήτων ρυθμίζεται με μια πλάκα μισού κύματος ($\lambda/2$) και έναν πολωτή.

Οι παλμοί λέιζερ σε συντονισμό διεγείρουν τα μιονικά ιόντα He από την κατάσταση 2S στην κατάσταση 2P . Η ακτίνα X Lyman- α στα 8.2 keV που εκπέμπεται από τη γρήγορη αποσύνθεση της κατάστασης 2P στη θεμελιώδη κατάσταση 1S ανιχνεύεται με φωτοδιόδους χιονοστιβάδας μεγάλης περιοχής (LAAPDs). Για την ανάλυση δεδομένων, επιλέγονται γεγονότα που προκαλούνται από λέιζερ στα οποία ένα μόνο μόνιο εισέρχεται στη συσκευή και παρατηρείται μια ακτινογραφία ακτίνων X μιονίου σε σύμπτωση με τον παλμό λέιζερ στην κοιλότητα. Επιπλέον, απαιτείται η ανίχνευση ενός ηλεκτρονίου από αποσύνθεση μιονίου λίγο αργότερα είτε σε ένα LAAPD είτε σε ένα σύνολο πλαστικών σπινθηριστών τοποθετημένων γύρω από το στόχο, το οποίο πιέζει το υποβάθρο με μια επιπλέον τάξη μεγέθους. Για τα LAAPDs, εφαρμόζεται μια ανάλυση κυματομορφής, η οποία βελτιώνει την ανάλυση ενέργειας και χρόνου και

επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ των ακτίνων X και των MeV ηλεκτρονίων από μ-αποσύνθεση.

Πρώτα μετρήθηκε η μετάβαση $2S \rightarrow 2P_{3/2}$ λόγω του μεγαλύτερου στοιχείου μήτρας με $M = 1.7 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ και αντίστοιχα αναμενόταν μεγαλύτερο σήμα. Η μετάβαση $2S \rightarrow 2P_{1/2}$ με $M = 0,8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ στη συνέχεια βρέθηκε αμέσως λόγω της γνωστής λεπτής δομής.

Οι δύο συντονισμοί είναι εξοπλισμένοι με μοντέλο σχήματος-γραμμής, λαμβάνοντας υπόψη τη ροή κορεσμού και τη μετρούμενη ενέργεια παλμού λέιζερ, η οποία διέφερε ελαφρώς κατά την περίοδο λήψης δεδομένων.

Η ληφθείσα ακτίνα φόρτισης αντιστοιχεί σε ένα σημείο αναφοράς για τις θεωρίες λίγων πυρήνων. Ένας πρόσφατος υπολογισμός του συντελεστή μορφής που ελήφθη από δυναμικά που βασίζονται στη χειραλική θεωρία αποτελεσματικού πεδίου (χEFT) αποδίδει μια ακτίνα φόρτισης $r_\alpha = 1,663 (11) \text{ fm}$, σε καλή συμφωνία με την τιμή του άρθρου αυτού από $(\mu^4\text{He})^+$. Αυτό το r_α μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό σταθερών χαμηλής ενέργειας του πυρηνικού δυναμικού, δηλαδή για τη διόρθωση, μαζί με δεδομένα σκέδασης νουκλεονίου-νουκλεονίου και ενέργειες πυρηνικής σύνδεσης, των δυνάμεων δύο πυρήνων και τριών πυρήνων που προέρχονται από ένα πλαίσιο χEFT.

Μέθοδοι: Φασματοσκοπία λέιζερ και ανάλυση δεδομένων

Το σύστημα λέιζερ είναι βελτιστοποιημένο για γρήγορη παροχή παλμών μετά το σήμα ενεργοποίησης που προκαλείται από τη στοχαστική άφιξη μιονίων. Ο σύντομος χρόνος καθυστέρησης του 1 μs λαμβάνεται χρησιμοποιώντας λέιζερ λεπτού δίσκου Yb:YAG, όπου η ενέργεια αποθηκεύεται συνεχώς στο ενεργό μέσο μέσω άντλησης συνεχούς κύματος με εμπορικά λέιζερ διόδων οπτικής ισχύος κιλοβάτ. Το λέιζερ λεπτού δίσκου αποτελείται από έναν ταλαντωτή Q-switched που λειτουργεί σε λειτουργία pro-lasing και ακολουθεί ένας ενισχυτής οκτώ περασμάτων που παρέχει παλμούς ενέργειας 80-mJ και μήκους 20-ps στα 1030 nm. Αυτοί οι παλμοί συσσωρεύονται σε κρύσταλλο τριβορικού λιθίου για την άντληση ενός δακτυλίου Ti:Sa ταλαντωτή που τροφοδοτείται με συντονισμό συνεχούς κύματος και λέιζερ Ti:Sa μίας συχνότητας.

Οι παλμοί φασματοσκοπίας, με ενέργεια περίπου 10 mJ και εύρος ζώνης μικρότερο από 100 MHz, διέρχονται μέσω μιας πλάκας κυμάτων $\lambda/2$ και ενός πολωτή επιτρέποντας τη ρύθμιση της ενέργειας του παλμού. Οι παλμοί μεταφέρονται έπειτα μέσα σε έναν εκκενωμένο σωλήνα από τη laser hut στη γραμμή ακτίνων μιονίου και τελικά συνδέονται στην κοιλότητα πολλαπλών πυλών μέσω μιας οπής διαμέτρου 0.6 mm. Η έγχυση στην κοιλότητα βελτιστοποιείται χρησιμοποιώντας φωτοδιόδους που παρακολουθούν τη διάρκεια ζωής της κοιλότητας και την κατανομή φωτός στην κοιλότητα. Το φως λέιζερ κατανέμεται σε όγκο $7 \times 25 \times 176 \text{ mm}^3$, φωτίζοντας το μεγαλύτερο μέρος του όγκου διακοπής του μιονίου $5 \times 12 \times 200 \text{ mm}^3$. Η συχνότητα λέιζερ δε σαρώνεται συνεχώς, αλλά διατηρείται σταθερή για αρκετές ώρες. Αρχικά, κατά τη διάρκεια της αναζήτησης για τον συντονισμό, ένα τέτοιο μπλοκ μέτρησης είναι συνήθως διάρκειας 5 ωρών για να διαπιστωθεί μια στατιστικά σημαντική περίσσεια συμβάντων που προκαλούνται από λέιζερ σε υποβάθρο. Αφού βρεθεί ο συντονισμός, γίνεται εναλλαγή μεταξύ των δύο πλευρών του κάθε δύο ώρες, συμπλέκοντας με μετρήσεις υποβάθρου.

Κατά τη διάρκεια αυτών των μπλοκ μέτρησης, το λέιζερ Ti:Sa συνεχούς κύματος κλειδώνεται σε κοιλότητα Fabry-Pérot και η συχνότητά του καταγράφεται από έναν μετρητή μήκους κύματος High Finesse WS7, και οι δύο βαθμονομούνται με φασματοσκοπία κορεσμού σε κείσιο και κρυπτό. Μετά τη διέγερση λέιζερ της μετάβασης $2S \rightarrow 2P$, εντοπίζεται η ακτίνα X Lyman- α από την επακόλουθη διάσπαση στη θεμελιώδη κατάσταση μέσω 20 LAAPDs τοποθετημένα πάνω και κάτω από τον όγκο διακοπής, καλύπτοντας ένα κλάσμα περίπου 30% της πλήρους στερεάς γωνίας. Ανιχνεύονται επίσης καθυστερημένα ηλεκτρόνια από την αποσύνθεση των μιονίων με τους LAAPDs και με πλαστικούς σπινθηριστές τοποθετημένους ακτινωτά γύρω από τον όγκο διακοπής του μιονίου, εκτός του στόχου.

Οι LAAPD ανιχνεύουν περίπου 50.000 συμβάντα ανά ώρα, εκ των οποίων υπάρχουν περίπου 8 συμβάντα από την επιτυχή διέγερση έως την κατάσταση 2P, αν το λέιζερ είναι σε συντονισμό. Εξαιρείται το μεγαλύτερο μέρος του υποβάθρου επιλέγοντας μόνο συμβάντα με ενέργεια σε εύρος [7.9, 8.5] keV σε ένα παράθυρο πλάτους περίπου 230 ns που συμπίπτει με τον παλμό λέιζερ στην κοιλότητα ακολουθούμενο από ένα ηλεκτρικό αποσύνθεσης μιονίου. Εφαρμόζεται μια ανάλυση κυματομορφής των ψηφιοποιημένων σημάτων LAAPD, ώστε να αυξηθεί η ενεργειακή ανάλυση και να γίνεται διάκριση μεταξύ ηλεκτρονίων και ακτίνων X. Για να βελτιωθεί η ανίχνευση ηλεκτρονίων, τέσσερις πλαστικοί σπινθηριστές πάχους 5 mm τοποθετούνται ακτινικά γύρω από το στόχο για να ανιχνεύσουν τα ηλεκτρόνια αποσύνθεσης που κυρτώνουν στο

μαγνητικό πεδίο. Επιπλέον, χρησιμοποιείται ο ανιχνευτής εισόδου μιονίου για να απορρίψει τα δεδομένα όταν δύο μίονια βρίσκονται στο στόχο ταυτόχρονα.

Ο αριθμός των επιλεγμένων ακτίνων X Lyman- α κανονικοποιείται στα ταχέα συμβάντα για να ληφθούν υπόψη οι διακυμάνσεις στη δέσμη μιονίων. Αυτός ο λόγος στη συνέχεια απεικονίζεται σε σχέση με τη συχνότητα λέιζερ. Ο ληφθείς συντονισμός είναι εφοδιασμένος με ένα μοντέλο σχήματος-γραμμής που βασίζεται σε ένα προφίλ Lorentz, που αντιστοιχεί στο επίπεδο κορεσμού και τη μετρούμενη ενέργεια παλμού.

Συμπεράσματα

Η ακριβής ακτίνα φόρτισης α -σωματιδίων από την φασματοσκοπία λέιζερ ($\mu^4\text{He}$)⁺ χρησιμεύει ως σημείο αναφοράς για θεωρίες λίγων πυρήνων και για υπολογισμούς κβαντικής χρωμοδυναμικής πλέγματος. Επιπλέον, χρησιμεύει ως σημείο εκκίνησης για μετρήσεις ισοτοπικής μετατόπισης, ανοίγει τον δρόμο για τη δοκιμή συνεισφορών QED υψηλότερης τάξης σε μια πρωτοφανή ευαισθησία όταν συνδυάζεται με μετρήσεις σε He^+ και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της σταθεράς Rydberg ανεξάρτητα από την ακτίνα του υδρογόνου.

Η πρόοδος των θεωριών λίγων νουκλεονίων και των πυρηνικών δυναμικών μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω την ακτίνα φόρτισης α -σωματιδίων και την κατανόησή μας για την πυρηνική δομή, με την τελική δυνατότητα αποκάλυψης λεπτών επιδράσεων, όπως ο περιορισμός νουκλεονίων στους πυρήνες.