



دانشگاه اراک

دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد فیزیک هسته ای

عنوان

بهره اشعه ایکس میونی در دوتریم جامد با ناخالصی هسته های رادیواکتیو

پژوهشگر

طالب صافی نیا

اساتید راهنما

دکتر رضا پورایمانی

عضو هیئت علمی دانشگاه اراک

دکتر روح اله قیصری

عضو هیئت علمی دانشگاه خلیج فارس

بهمن ماه ۹۱

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که همیشه یاور و پشتیبانم هستند.

سپاس‌گزاری

خداوند را سپاس‌گزارم که توفیق اتمام کار این پایان‌نامه را به بنده داد. هر وقت خداوند بخواهد بنده‌ای را تعلیم و تربیت کند او را به دست دوستان دانا و حکیم خویش تعلیم و تربیت می‌کند. خداوند را بی‌نهایت شکر می‌نمایم که تعلیم و تربیت بنده را به دست اساتید فرزانه، جناب آقایان دکتر روح‌اله قیصری، دانشیار محترم دانشگاه خلیج فارس و دکتر رضا پورایمانی، استادیار محترم دانشگاه اراک سپرد. جا دارد که حقاً از زحمات آقای دکتر قیصری به خاطر بیان و شرح تئوری این کار و راهنمایی‌های مستمر ایشان صمیمانه تشکر و سپاس‌گزاری نمایم. بر خویش لازم می‌دانم که از آقای دکتر رضا پورایمانی که با تمام تلاش مرا راهنمایی نمودند و همچنین در جمع‌آوری و برآورد نتایج تجربی کمک کردند تشکر نمایم. امیدوارم بتوانم قدردان این عزیزان باشم و گوشه‌ای از زحمات آن‌ها را جبران نمایم.

چکیده

در دهه‌ی اخیر طیف نگاری پرتو- x اتم میونی، نقش عمده‌ای را در بهبود مدل‌های هسته‌ای ایفا کرده است. در این روش از طریق اندازه‌گیری پرتو- x اتم‌های میونی، مقادیر دقیق شعاع و دیگر خصوصیت‌های هسته‌ها بدست می‌آید. بیم‌های میونی با شدت چندین برابر شدت بیم‌های تولیدی به وسیله‌ی ابزارهای کنونی، امکان مطالعه‌ی خواص زیر اتمی هسته‌های ناپایدار را به وسیله طیف نگاری پرتو- x اتم‌های رادیواکتیو میونی فراهم می‌کند. در اینجا توقف همزمان بیم میونی و بیم اتم‌های رادیواکتیو در فیلم نازک دوتریم، مورد توجه قرار می‌گیرد. میون‌ها طی فرآیند انتقال، از ایزوتوپ‌های هیدروژن به هسته‌ی با عدد اتمی بالاتر منتقل شده و اتم میونی بسیار برانگیخته‌ی μZ^* را تشکیل می‌دهند. میون‌ها طی فرآیند گذار از حالت‌های برانگیخته به حالت‌های پایه، فوتون‌های x گسیل می‌کنند. معادلات توازن ذرات تولیدی در سیستم تک لایه‌ی دوتریمی (به ضخامت یک میلیمتر) با استفاده از روش Ode15s در نرم افزار Matlab حل شده است. بهره‌ی اشعه‌ی ایکس میونی برای ^{87}Sr کاشته شده در لایه‌ی مذکور به ازای 5000 میون فرودی، 210 بدست آمد. با برآورد سطح زیر پیک گذار $2p \rightarrow 1s$ (μSr^*)، در طیف اندازه‌گیری شده توسط گروه استراسر، بهره‌ی تجربی اشعه‌ی ایکس میونی، 226 ± 15 برآورد شد که نشان می‌دهد نتایج محاسبات ما با نتایج تجربی گروه مذکور همخوانی خوبی دارد. خطای نسبی محاسبات ما حدود 7% می‌باشد.

فهرست مطالب

۱	فصل اول: فرآیند های میونی
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ تولید میون
۳	۳-۱ کاربرد میونها
۴	۴-۱ طیف نگاری پرتو ایکس اتم میونی
۴	۵-۱ اتم میونی
۶	۶-۱ تشکیل اتم میونی
۷	۷-۱ بررسی های عملی
۱۰	فصل دوم: کاربرد لایه های نازک هیدروژنی
۱۱	۱-۲ مقدمه
۱۲	۲-۲ تعیین توزیع بار هسته ای
۱۳	۱-۲-۲ اندازه گیری های تجربی
۱۵	۳-۲ طیف سنجی جرمی و مطالعات باستان شناسی
۱۸	۴-۲ مطالعه ی همجوشی کاتالیزور میونی
۱۸	۱-۴-۲ تسخیر میون در تراز های اتمی و تشکیل اتم میونی
۲۰	۲-۴-۲ تشکیل مولکول میون دار
۲۰	۳-۴-۲ همجوشی هسته های سوخت
۲۳	۵-۲ بررسی تجربی طیف نگاری پرتو ایکس اتم های میونی
۲۳	۱-۵-۲ لایه نشانی هیدروژن و تولید فیلم هیدروژنی
۲۴	۲-۵-۲ کاشت یون
۲۵	۳-۵-۲ تولید بیم میونی
۲۶	۴-۵-۲ آشکار سازی و اندازه گیری شدت پرتو ایکس
۲۷	۶-۲ مزیت روش استفاده از فیلم های هیدروژنی

	فصل سوم: بهره اشعه ایکس میونی در دوتریم جامد با ناخالصی هسته‌های
۲۹	رادیواکتیو
۳۰	۱-۳ مقدمه
۳۰	۲-۳ روش استفاده از فیلم‌های هیدروژنی سرد تک لایه ای
۳۱	۳-۳ فیلم‌های هیدروژنی سرد چند لایه ای
۳۳	۴-۳ واکنش‌های موثر در سیستم
۳۴	۵-۳ معادلات توازن سیستم
۳۴	۶-۳ مشخصات هندسی لایه‌ی دوتریم
۳۵	۷-۳ محاسبه‌ی λ_z و غلظت یون‌های c_z
۳۶	فصل چهارم: نتایج و پیشنهادات
۳۷	۱-۴ مقدمه
	۲-۴ حل معادلات توازن ذرات برای لایه هیدروژنی شامل هسته‌های رادیواکتیو
۳۷	^{87}Sr
۴۵	۳-۴ پیشنهادات
۴۷	پیوست‌ها
۴۸	اشعه ایکس میونی حاصله از هسته‌های ناپایدار در لایه‌ی نازک همجوشی
۵۳	مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ تعداد میون‌های جذب شده توسط اتم‌های Sn و Pb نسبت به Cu. ۱۷
- جدول ۱-۴ مقدار کمیت های λ ، ω_{dd} و b_r . ۳۸
- جدول ۲-۴ محاسبه بهره‌ی اشعه ایکس میونی حاصل از محاسبات با نتایج تجربی. ۳۸
- جدول ۳-۴ بهره‌ی اشعه‌ی ایکس میونی برای هسته‌های مختلف. ۴۵
- جدول ۴-۴ بهره‌ی اشعه‌ی ایکس میونی برای فیلم هیدروژنی. ۴۶
- جدول ۵-۴ بهره‌ی اشعه‌ی ایکس میونی برای بیم‌های میونی پر شدت. ۴۶

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱ طرح‌واره‌ای ساده از فرآیند تولید میون‌های مثبت و منفی. ۳
- شکل ۲-۱ فرآیند واانگیختگی اتم میونی و تولید پرتو ایکس. ۶
- شکل ۳-۱ مقایسه‌ی اتم معمولی با اتم و مولکول میونی. ۷
- شکل ۱-۲ طیف انرژی پرتو ایکس میونی برای اتم‌های میونی آرگون. ۱۴
- شکل ۲-۲ طیف انرژی پرتو ایکس میونی برای نمونه‌های مختلف. ۱۶
- شکل ۳-۲ شمایی از شبکه‌ی واکنش برای میون در محیط همگن دوتریم-تریتیم. ۲۳
- شکل ۴-۲ تجهیزات طیف نگاری پرتو ایکس میونی و یون‌های رادیواکتیو. ۲۵
- شکل ۵-۲ شماتیکی از تجهیزات طیف نگاری ایکس میونی در RIKEN-RAL. ۲۶
- شکل ۱-۳ طرح‌واره‌ای از تشکیل اتم میونی در لایه‌ی نازک دوتریمی. ۳۱
- شکل ۲-۳ طرح‌واره‌ای از فیلم‌های سرد چند لایه‌ای. ۳۲
- شکل ۱-۴ طیف انرژی استرانسیوم میون دار. ۳۹
- شکل ۲-۴ تغییرات تعداد میون‌ها بر حسب زمان. ۴۰
- شکل ۳-۴ تغییرات تعداد دوتریم میون دار بر حسب زمان. ۴۱
- شکل ۴-۴ تغییرات تعداد مولکول‌های μdd بر حسب زمان. ۴۲
- شکل ۵-۴ تغییرات تعداد اتم‌های استرانسیوم میون دار. ۴۳
- شکل ۶-۴ تغییرات تعداد فوتون‌های ایکس بر حسب زمان. ۴۴

۱ فصل اول : فرآیندهای میونی

۱-۱ مقدمه

میون نخستین بار در سال‌های ۱۹۳۶-۱۹۳۸ به وسیله‌ی آندرسون^۱ [۱]، نیدر میر^۲ و استیون سان^۳ کشف و مزوترون^۴ [۲] نامیده شد. در سال ۱۹۴۷ پس از کشف برهم‌کنش‌های واپاشی پایون‌ها، مزوترون تغییر نام داده و میون (μ) نامیده شد. این تغییر نام تأکیدی بر این واقعیت بود که بر خلاف پایون‌های اولیه (اصلی) که به طور مستقیم در برهم‌کنش‌های هسته‌ای تولید می‌شوند؛ میون‌ها منشأ ثانویه داشته و طی فرآیند واپاشی پایون‌ها تولید می‌گردند. میون یک ذره‌ی نقطه‌ای و از نوع ذرات دیراک^۵ است [۳].

میون‌ها همانند الکترون‌ها از خانواده‌ی لپتون‌ها هستند؛ که در ذرات بنیادی طبقه‌بندی می‌شود. جرم میون (m_μ) تقریباً یک نهم جرم پروتون و ۲۰۷ برابر جرم الکترون m_e است.

$$m_\mu = (206.76 \pm 0.02)m_e \quad (1-1-1)$$

میون هم بار با الکترون است که اندازه‌ی بار آن، $|e| = 1.6 \times 10^{-19} C$ می‌باشد. میون همانند دیگر ذرات زیر اتمی، پاد ذره دارد [۴].

۲-۱ تولید میون

میون‌ها منشأ ثانویه دارند و طی فرآیند واپاشی پایون‌ها تولید می‌شوند. برای تولید میون‌ها، ابتدا باید پایون‌ها π^\pm تولید شوند. پایون‌ها به طرق مختلفی تولید می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است یکی از راه‌های تولید پایون‌ها، برخورد دادن بیم پروتونی با انرژی $500 MeV$ به هدف‌های کربنی است. پایون‌ها پس از تولید، طبق واکنش‌های زیر واپاشی کرده و میون‌های مثبت و منفی را تولید می‌کنند.

$$\pi^+ \xrightarrow{t_{1/2}=26ns} \mu^+ + \nu_\mu \quad (1-2-1)$$

$$\pi^- \xrightarrow{t_{1/2}=26ns} \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2-2-1)$$

^۱ Anderson

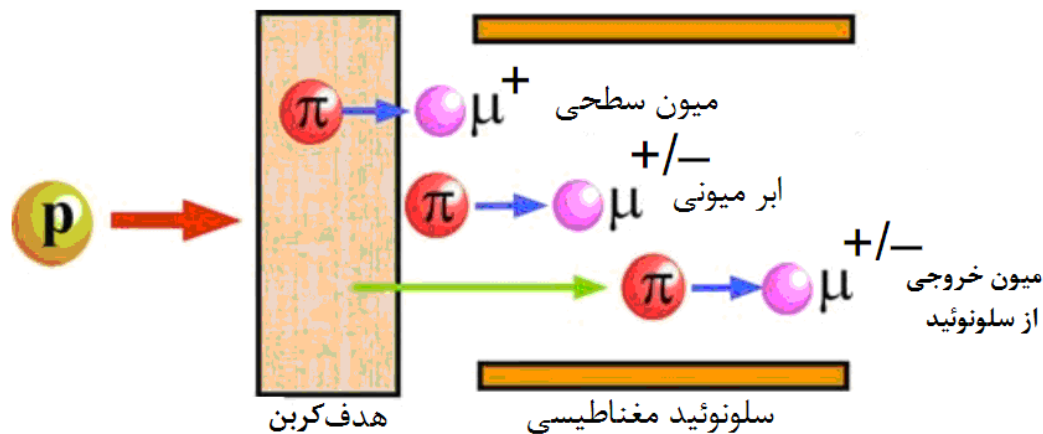
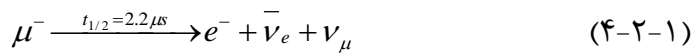
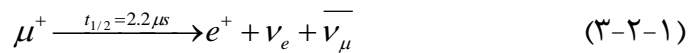
^۲ Nedermeyer

^۳ Stewen Son

^۴ Mesotron

^۵ Point Dirac Particle

عمر این ذرات بسیار کوتاه و طبق واکنش‌های زیر واپاشی می‌کنند:



شکل ۱-۱ پروتون‌های پر انرژی با برخورد به هدف‌های کربنی منجر به تولید پایون‌ها می‌شوند. طی فرآیند واپاشی پایون‌های مثبت و منفی، به ترتیب میون‌های مثبت و منفی تولید می‌شوند [۵].

۳-۱ کاربرد میون‌ها

میون‌ها کاربرد‌های فراوانی دارند. یکی از مهم‌ترین کاربرد‌های میون‌ها که در این پایان‌نامه مورد بحث است طیف‌نگاری پرتو- x اتم‌های میونی می‌باشد. در نیم قرن اخیر از میون‌ها برای مطالعه‌ی تئوری و تجربی خواص زیر اتمی هسته‌ها مانند توزیع بار، شکل هسته‌ها و ... استفاده می‌شود. از دیگر کاربرد‌های مهم این ذرات می‌توان به استفاده از آن‌ها در همجوشی هسته‌ای به شیوه‌ی کاتالیزور میونی^۱ نام برد. در این نوع همجوشی، از میون‌ها به عنوان کاتالیزور برای کاهش دافعه‌ی کولنی هسته‌های هم‌جوش‌کننده استفاده می‌گردد. همچنین از جدیدترین موارد کاربرد‌های این ذره، می‌توان به استفاده از آن‌ها در مطالعات باستان‌شناسی و آنالیز جرمی نام برد.

^۱ Muon Catalyzed Fusion

۴-۱ طیف نگاری پرتو ایکس اتم میونی

سال‌های زیادی است که از طیف نگاری پرتو ایکس (X) اتم میونی^۱ به طور موفقیت آمیزی برای تعیین شعاع بار هسته‌ها استفاده می‌گردد [۷۶ و ۸]. با استفاده از این روش تقریباً شعاع بار تمام هسته‌های پایدار اندازه‌گیری شده است. برخی از جدیدترین نتایج بدست آمده توسط گروه فریک^۲، در مرجع [۹] گزارش شده است. امروزه یکی از موضوعاتی که در فیزیک هسته‌ای مورد توجه بوده و تحقیقات فراوانی روی آن انجام می‌شود تعیین شعاع بار هسته‌های ناپایدار است. پرتو‌های میونی قوی جدید، با شار‌های چندین برابر شارهایی که به وسیله‌ی ابزارهای کنونی تولید می‌شوند، امکان انجام تحقیقات، مطالعات و آزمایش‌های تجربی که تاکنون از لحاظ آماری امکان پذیر نبوده‌اند را فراهم می‌کند. طیف نگاری پرتو ایکس اتم میونی روش جدید منحصر به فردی است که اطلاعات ما را پیرامون ویژگی‌های هسته‌های بسیار ناپایدار افزایش خواهد داد. توزیع بار هسته‌های ناپایدار و خصوصیت‌های ساختاری آنها، برخی از مجهولاتی است که انتظار می‌رود با استفاده از این روش شناخته شوند. با استفاده از این شیوه‌ی طیف نگاری، اطلاعات بدست آمده از پراکندگی الکترون و طیف نگاری لیزری تکمیل خواهد شد. از جمله اینکه اطلاعات و اندازه‌گیری‌های شکافتگی ریز چهارقطبی با استفاده از طیف نگاری پرتو ایکس اتم میونی بهینه می‌شود. اندازه‌گیری‌های دقیق و معقول‌تری از مقادیر مطلق گشتاورهای چهارقطبی هسته‌ای هسته‌هایی که نسبت به انحراف شکل هسته‌ها از تقارن کروی حساس هستند را فراهم می‌آورد [۱۰].

۵-۱ اتم میونی

همان‌گونه که بیان گردید، میون یک لپتون است که ویژگی‌های بسیار مشابه به خصوصیت‌های الکترون را دارا است. بنابراین جایگزین کردن یکی از الکترون‌های اتم با میون و تشکیل یک اتم میونی امکان پذیر است. جرم میون تقریباً ۲۰۷ برابر جرم الکترون است به همین دلیل شعاع‌های مداری میونی اتم، بسیار کوچک‌تر از شعاع‌های مداری الکترون می‌باشد. این پدیده را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

^۱ Muonic Atomic X-Ray Spectroscopy

^۲ Frick

مورد ساده‌ی اتم هیدروژن گونه‌ی ای را در نظر بگیرید که هسته‌ی آن حاوی Z پروتون و یک الکترون حول هسته‌ی آن در حال گردش است. اگر از مدل بور اتم‌های هیدروژن گونه استفاده کنیم شعاع n امین مدار به صورت زیر است:

$$r_n^{e^-} = [4\pi\epsilon_0] \frac{n^2 \hbar^2}{2m_e e^2} = \frac{1}{\alpha \hbar c} \frac{n^2 \hbar^2}{2m_e} \quad (1-5-1)$$

که در این رابطه، m_e جرم الکترون، α ثابت ساختار ریز و ثابت درون براکت، نقش تبدیل واحد شعاع از دستگاه cgs به دستگاه SI را دارا است. برای یک اتم هیدروژنی ($Z=1$)، شعاع در حالت پایه ($n=1$) به صورت زیر است:

$$a_0 = \frac{\hbar}{\alpha m_e} = 5.29 \times 10^{-11} m \quad (2-5-1)$$

برای استخراج این نتایج تنها از پتانسیل الکترواستاتیکی بین هسته باردار مثبت و الکترون منفی استفاده شده و برهم‌کنش الکترون‌ها با میون نادیده گرفته شده است. بنابراین می‌توان با جایگزین کردن جرم الکترون با جرم میون در رابطه‌ی (1-5-1)، شعاع مداری اتم میونی را بدست آورد:

$$r_n^{\mu^-} = \frac{1}{\alpha \hbar c} \frac{n^2 \hbar^2}{Z m_\mu} = a_0 \frac{n^2 m_e}{Z m_\mu} \quad (3-5-1)$$

اگر مشابه یک اتم معمولی عمل کنیم می‌توان ترازهای اتم میونی را طبق رابطه‌ی زیر بدست آورد:

$$E_n = -\frac{m_\mu}{2} \frac{(Z\alpha c)^2}{n^2} \quad (4-5-1)$$

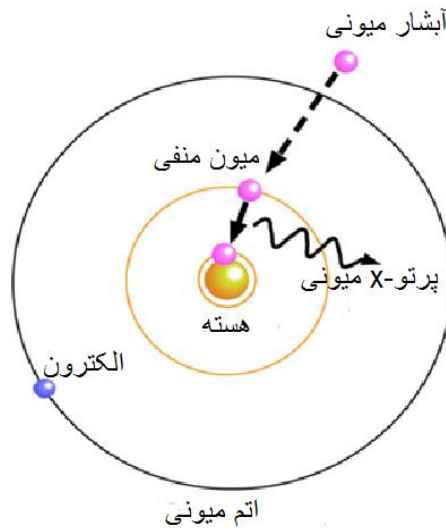
برای استخراج این نتایج، از کتاب‌های دروس اصلی دوره‌ی کارشناسی فیزیک استفاده شده است [۳].

نتایج حاصل از روابط (1-5-3) و (1-5-4) تنها برای اتم‌های هیدروژن گونه صدق می‌کند، یعنی اتم‌هایی که تمام الکترون‌های آن‌ها کنده شده و فقط یک الکترون حول هسته‌ی Z در حال چرخش است. این ساده سازی باعث حذف محاسبات بسیار پیچیده می‌شود و برای چنین اتم‌هایی، اثر هم‌پوشانی الکترون‌های دیگر وجود ندارد. خوشبختانه برای اتم میونی که یکی از الکترون‌های آن با میون جایگزین شده است چنین مشکلی (اثر هم‌پوشانی) وجود ندارد چرا که شعاع مدارهای میونی اتم میونی مورد بحث، بسیار کوچک‌تر از شعاع‌های مداری الکترونی است به طوری که احتمال یافتن یک الکترون بین هسته و میون خیلی ضعیف است. بنابراین اثر هم‌پوشانی الکترون‌ها در اتم‌های میونی را می‌توان نادیده گرفت.

برای هسته‌ی سنگین سرب ^{208}Pb با $Z = 82$ ، شعاع پایین‌ترین مدار میونی

$$r_1^{\mu^-} \approx a_0 \frac{0.511}{82 \times 106} = 3.1 \times 10^{-15} \text{ m} \quad (5-5-1)$$

می‌باشد. به عبارت دیگر برای یک میون به جرم $106 \text{ MeV}/c^2$ شعاع میونی 3.1 fm است. اگر مقدار شعاع سرب از رابطه‌ی $R = r_0 A^{1/3}$ بدست آوریم مقدار آن 7.1 fm می‌باشد. بنابراین شعاع پایین‌ترین مدار میون در اتم میونی از مقدار شعاع هسته‌ی سرب بسیار کوچک‌تر می‌باشد. محاسبات دقیق‌تر نشان می‌دهد که یک میون تقریباً ۵۰٪ از زمان خود را در هسته‌ی سرب به سر می‌برد. بنابراین مشخصات دقیق‌تر مدار میون با آنچه که در روابط (۱-۵-۳) و (۱-۵-۴) داده شد متفاوت است؛ چرا که در استخراج روابط فرض شده است که هسته به صورت یک بار نقطه‌ای است [۴].



شکل ۱-۲ میون طی فرآیند های آبخاری، از تراز های بالاتر به تراز های پایین‌تر گذار انجام می‌دهد، به طوری که فوتون های پرتو x گسیل می‌شود [۵].

۶-۱ تشکیل اتم میونی

به منظور تشکیل اتم میونی μZ ، می‌بایست بیم‌های μ^- و Z^+ به طور هم‌زمان در یک محیط متوقف شوند. پس از آنکه بیم‌های μ^- و Z^+ در محیط متوقف شدند، میون‌ها طی فرآیند های انتقال مستقیم، جذب یون‌های Z^+ می‌شوند و اتم میونی μZ تشکیل می‌گردد.

برای توقف μ^- و Z^+ از فیلم‌های هیدروژنی جامد نازک استفاده می‌شود. چنانچه میون‌ها جذب یک هسته‌ی هیدروژنی شوند و در محیط، هسته‌ی سنگین‌تر Z

وجود داشته باشند، میون‌ها به شدت از هسته‌ی هیدروژنی به هسته‌ی با Z بالا تر منتقل می‌گردند. فرآیند مذکور به طریق واکنش (۱-۶-۱) خواهد بود.

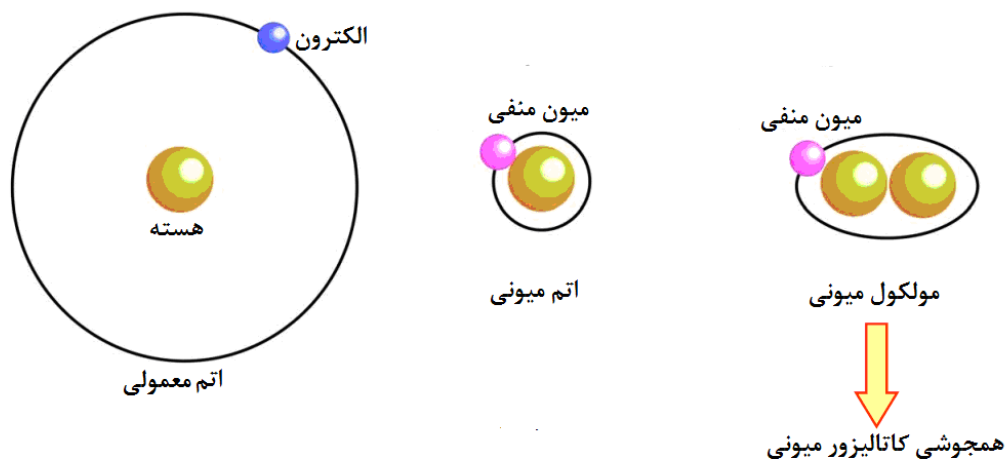


که در آن، A هسته‌ی سبک و B هسته‌ی سنگین‌تر می‌باشد. مثلاً اگر فیلم جامد از جنس هیدروژن و هسته‌ی سنگین دارای عدد اتمی Z باشد، واکنش انتقال میون از هیدروژن به هسته‌ی Z عبارتست از:



واکنش انتقال میون از هسته‌ی با Z کمتر به هسته‌ی با Z بالاتر یک طرفه و برگشت ناپذیر است، چرا که طی انجام واکنش فوق، انرژی بستگی به طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد.

فیلم‌های هیدروژنی ممکن است به صورت تک لایه‌ای یا چند لایه ساخته شوند، که در بخش بعدی به مطالعه و بررسی آن‌ها می‌پردازیم.



$$a_0 = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e e^2 Z} \approx \frac{5.3}{Z} 10^4 \text{ fm} \quad (\text{for } n=1)$$

$$a_\mu = \frac{m_e}{m_\mu} a_0 \approx \frac{1}{207} a_0$$

شکل ۳-۱ مقایسه‌ی اتم معمولی با اتم و مولکول میونی [۵].

۷-۱ بررسی‌های عملی

برای انجام آزمایش‌های روش فیلم‌های هیدروژنی سرد، سه مرحله را باید به خوبی بررسی کرد:

۱. لایه نشانی هیدروژن

۲. کاشت یون

۳. اندازه گیری به وسیله ی بیم‌های میونی

لایه نشانی هیدروژن^۱ فرآیندی است که طی آن در دماهای بسیار پایین، مولکول‌های هیدروژنی لایه نشانی شده و فیلم هیدروژنی سرد تشکیل می‌شود. لایه نشانی هیدروژن و ساخت لایه های نازک هیدروژنی امری ممکن است و تاکنون در کارخانه های تولید مزون ساخته و به کار رفته است، اما سختی کار مربوط به طراحی یک سیستم برودتی با ورقه های فلزی سرد است که توانایی تحمل بار توان و برداشت گرمای اضافی تولید شده به وسیله ی یون‌های کاشته شده و میون‌های فرودی را داشته باشد. در چنین سیستم‌هایی می‌بایست طی انجام آزمایش، دمای مرکز فیلم‌های هیدروژنی سرد کمتر از حدود $4K$ باشد. برای طیف نگاری پرتو- x یون‌های پایدار، کاشت یون و اندازه گیری با استفاده از میون‌ها به طور متوالی انجام می‌شود اما برای یون‌های ناپایدار این دو مرحله می‌بایست همزمان انجام شود [۱۱].

هنگام کاشت یون‌های سنگین در محیط‌های هیدروژنی، انرژی بیم یونی، عمق و ضخامت لایه‌ی (فیلم نازک) کاشت یون را تعیین می‌کند. برای آنکه یون‌ها توانایی نفوذ تا عمق $1mm$ در محیط هیدروژنی را داشته باشند باید انرژی آن‌ها هنگام فرود بر فیلم‌های هیدروژنی، از مرتبه‌ی چند ده MeV/amu باشد؛ در حالی که برای ضخامت حدود $5\mu m$ می‌بایست انرژی یون‌های فرودی حدود $40keV/amu$ باشد. تولید بیم های یونی، که عمق نفوذ آن‌ها، با ضخامت فیلم‌های با ضخامت کم قابل مقایسه باشد امری دشوار است. برای مورد یون‌های پایدار، اگر بیم یون‌های فرودی انرژی کافی را نداشته باشند می‌توان از کاشت یون و لایه نشانی هیدروژن جایگزین برای رسیدن به ضخامت‌های بیشتر کاشت یون استفاده کرد.

هنگام انجام اندازه گیری‌های طیف نگاری پرتو ایکس میونی اثر کندگی^۲ فیلم‌های هیدروژنی جامد را نیز باید در نظر گرفت. این اثر به علت فرسایش جامدات به وسیله ی ذرات باردار ایجاد می‌شود. شدت این پدیده به جرم و انرژی یون‌های فرودی وابسته است. مثلاً در آزمایش بمباران دوتریم جامد به وسیله ی یون‌های هیدروژنی با انرژی $1-10keV/amu$ ، بازده کندگی تقریباً 10^2 مولکول D_2 به ازای

^۱ Hydrogen Deposition

^۲ Sputtering

هر یون هیدروژنی فرودی است [۱۲]. و هنگام بمباران نئون (Ne) جامد به وسیله یون‌های نیتروژنی (N) با انرژی $5-10\text{keV}/amu$ ، بازده ی کندی، $10^4 Ne/N$ می‌باشد [۱۳].

هنگام کاشت یون‌های ناپایدار، اثر کندی و ناپایداری یون‌ها، نقش تعیین کننده‌ای در نتیجه‌ی آزمایش‌ها را دارد، لذا به منظور جبران کاهش فرسایش فیلم‌های جامد هیدروژنی، می‌بایست لایه نشانی و کاشت یون‌ها هم زمان صورت پذیرد. هنگامی که کاشت یون‌های ناپایدار را بررسی می‌نماییم باید اثرهای اضافی مانند انباشتگی هسته‌های دختر و اکتیویته‌ی کل را نیز در نظر بگیریم. محصولات واپاشی به عنوان ناخالصی عمل می‌کنند و بهره‌ی کل^۱ (Y_Z) هسته‌های ناپایدار کاشته شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین با افزایش تعداد هسته‌های دختر، اندازه‌ی Y_Z برای هسته‌های ناپایدار و هسته‌های دختر یکسان می‌گردد. با شروع فرآیند کاشت یون‌های ناپایدار به وسیله‌ی بیم یونی با شدت ϕ ، تعداد هسته‌های ناپایدار در فیلم‌های هیدروژنی افزایش می‌یابد. پس از مدت زمان حدود 1.6 برابر زمان واپاشی τ ، سیستم به حالت پایا می‌رسد و جمعیت یون‌های کاشته شده به حالت اشباع رسیده و تعداد آن‌ها به $N_Z = \phi\tau$ خواهد رسید. در حالی که تعداد هسته‌های دختر به طور خطی متناسب با زمان و به صورت $\phi\tau$ افزایش می‌یابد. پس از حدود ده برابر زمان واپاشی τ ، نسبت تعداد یون‌های کاشته شده به تعداد هسته‌های دختر تقریباً 0.1 خواهد شد. پس از گذشت این زمان می‌بایست فیلم هیدروژنی جامد، تبخیر و جایگزینی با لایه نشانی مجدد صورت پذیرد. برای مطالعه‌ی هسته‌های ناپایدار با طول عمر واپاشی چند دقیقه یا بیشتر، این روش ناکارآمد و محدود می‌باشد. همچنین به دلیل اینکه بیم یون‌های ناپایدار در فیلم‌های هیدروژنی متوقف می‌شوند بنابراین اکتیویته به مقدار بیشینه و شدت آن برابر شدت بیم فرودی می‌گردد. این پدیده منجر به تابش پرتو زمینه با شدت بالا خواهد شد که اندازه گیری پرتو-x میونی فرودی را مشکل خواهد کرد. اما چنانچه از بیم‌های پالسی استفاده شود مقدار نویز های زمینه تا چندین برابر کاهش می‌یابد. همچنین برای کم کردن اکتیویته‌ی زمینه، بسته به مدهای واپاشی هسته‌های ناپایدار می‌بایست یک سیستم آشکارسازی خاص طراحی شود [۱۱].

^۱ Total Transfer Yield

۲ فصل دوم : کاربرد لایه های نازک هیدروژنی

۱-۲ مقدمه

طیف نگاری پرتو- x اتم میونی، ابزار قدرتمندی جهت مطالعه‌ی خواص هسته‌ای هسته‌ها می‌باشد. همان‌گونه که در فصل اول اشاره گردید در ابتدا این روش، برای مطالعه‌ی هسته‌های پایدار استفاده می‌شد. به کمک این روش، اندازه‌گیری‌های بسیار مفیدی از خصوصیات هسته‌ای، همچون شعاع هسته، تغییر شکل هسته و غیره انجام شده است. در سال‌های گذشته به علت عدم پیشرفت در تکنولوژی‌های مرتبط، این روش دارای محدودیت‌های خاصی بوده است. امروزه با رشد و پیشرفت‌های تکنولوژی، حوزه‌ی استفاده از این روش در مطالعات هسته‌ای گسترش یافته است و طیف نگاری پرتو- x اتم میونی به عنوان ابزار قدرتمندی در راستای مطالعه خواص هسته‌ای یون‌های پایدار و ناپایدار است. اگر چه هنوز برخی از محدودیت‌های تجربی، نظیر محدودیت در تولید بیم‌های میونی با شدت بالا، تولید لایه‌های نازک و ... وجود دارد.

مطالعه‌ی هسته‌های ناپایدار با استفاده از طیف نگاری پرتو- x اتم میونی، اطلاعات و دانش ما پیرامون هسته‌های بسیار ناپایدار، را افزایش خواهد داد. به خصوص این روش، ابزار قدرتمندی برای مطالعه‌ی توزیع بار و تغییر شکل هسته‌های ناپایدار است. اطلاع از چگونگی شعاع بار هسته‌ای، برای مطالعه و درک توزیع نوترون و پروتون‌ها ضروری بوده و از اهمیت زیادی برخوردار است. عموماً با استفاده از روش پرتو- x اتم میونی، شعاع‌های rms هسته‌های با $Z \leq 60$ قابل اندازه‌گیری است. به کمک این روش برای هسته‌های سنگین‌تر ($Z \geq 60$) هم شعاع‌های rms و هم ضخامت سطحی^۱ هسته‌ها را می‌توان تعیین کرد [۱۴]. از لحاظ نظری دقت این روش به علت عدم قطعیت کنونی در محاسبات قطبیده‌گی هسته‌ای^۲، دارای محدودیت است [۱۵ و ۱۶]. به علاوه اندازه‌گیری‌های شکافتگی فوق ریز چهارقطبی‌های هسته‌ای انجام شده به وسیله‌ی پرتو- x اتم‌های میونی، مقادیر دقیق و معقولی از اندازه‌ی گشتاورهای چهارقطبی هسته‌ای حساس نسبت به انحراف شکل توزیع بار هسته‌ها از حالت کروی را ارائه می‌دهد [۱۷]. در این فصل برخی از کاربرد های پرتو- x اتم‌های میونی و روش فیلم‌های هیدروژنی سرد را ذکر کرده و به بحث و بررسی پیرامون آن‌ها خواهیم پرداخت.

^۱ Surface Thickness

^۲ Nuclear Polarization

۲-۲ تعیین توزیع بار هسته ای

برخی از خصوصیت‌های قابل تشخیص برای توزیع بار هسته ای به شرح زیر می‌باشند [۴]:

۱. شعاع هسته ای - اندازه‌ی شعاع توزیع بار
۲. شکل شعاعی - تغییرات شعاعی توزیع بار
۳. شکل زاویه ای - شکل هندسی یا تغییرات زاویه ای توزیع بار

مطالعه‌ی توزیع بار هسته ای، مشتمل بر توصیف جزئی هسته‌ی ایزوله، نظیر انحراف توزیع شعاعی از توزیع چگالی ثابت و انحراف تغییرات زاویه ای از تقارن کروی می‌باشد. معمولاً اندازه و شکل هسته‌ها بر حسب ترم‌هایی مانند میانگین وزنی توزیع بار، توصیف می‌گردد. مثلاً می‌توان شعاع rms (جذر میانگین مربعی شعاع) را به جای شعاع بار، گشتاور شعاعی را به جای شکل شعاعی^۱ و یا اینکه گشتاور چهارقطبی را به جای شکل زاویه ای هسته بررسی کرد. هسته‌هایی که Z یا N آن‌ها یکی از اعداد جادویی ۸، ۱۶، ۲۰، ۲۸، ۵۰، ۸۲ و ۱۲۶ می‌باشد دارای توزیع بار هسته ای کروی می‌باشند [۱۸ و ۱۹ و ۲۰]. با افزایش اختلاف تعداد پروتون و یا نوترون‌ها با اعداد سحر آمیز، انحراف شکل هسته از حالت کروی بیشتر می‌شود. بنابراین اطلاع از توزیع بار هسته ای منجر به شناخت بسیاری از خصوصیت‌های هسته مانند شکل، گشتاورهای هسته ای و غیره می‌گردد [۲۱ و ۲۲]. پراکندگی‌های هسته ای و طیف‌نگاری پرتو- x اتم‌های میونی، از مهم‌ترین ابزارها برای مطالعه‌ی توزیع بار هسته ای می‌باشند.

از طریق اندازه گیری پرتو- x اتم‌های میونی، مقادیر دقیقی از شعاع بار هسته ای پایدار حاصل می‌شود. در واقع با محاسبه، تجزیه و تحلیل بهره‌ی اشعه‌ی ایکس پرتو- x اتم‌های میونی، اطلاعات دقیقی از شعاع هسته‌ها بدست می‌آید [۲۳]. هر چه بهره اشعه ایکس بیشتر باشد هسته سنگین‌تر بوده است و از طرفی طبق رابطه

$$E_x = ZeB \times [\langle e^{-\alpha r} r^k \rangle_{2p} - \langle e^{-\alpha r} r^k \rangle_{1s}] \quad (1-2-2)$$

انرژی اشعه (E_x) دارای مقدار بالایی خواهد بود [۲۴]. α و β ثابت‌هایی هستند که تعیین می‌شوند. رابطه‌ی (۱-۲-۲) نشان می‌دهد تغییر انرژی پرتو- x میونی برای یک گذار خاص وابسته به تغییر متناظر در شکل توزیع بار هسته است. از طرفی تفاوت مقادیر چشمداشتی $\langle \exp(-\alpha r) r^k \rangle$ که با متوسط گیری روی تابع توزیع بار هسته

^۱ Radial Shape