



ابتکارات و کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات  
نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه  
متعلق به دانشگاه رازی است.



دانشگاه رازی  
دانشکده علوم  
گروه فیزیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته فیزیک  
گرایش هسته‌ای

**عنوان پایان نامه:**

**بررسی نیمه عمرهای گروه پرتوزا با استفاده از مدل شکافت**

استاد راهنما:

دکتر داریوش نادری

نگارش:

مریم زرگوشی

اسفندماه ۱۳۹۳

## تقدیم به

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام بخش آلام زیننی‌ام است.  
به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پر مهر پدرم و به مادرم، دریای بی‌کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و  
وجودش برایم همه مهر که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگو شدم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانی‌تان را  
پاس نتوانم بگویم.

امروز، مستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما  
ره آوردی کران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم کوزه غبار  
خشکی‌تان را برزاید.

بوسه بردستان پر مهرتان

## به نام خداوند جان و خرد

سپاس خداوندی را سزااست که کسوت هستی را بر اندام موزون آفرینش پوشانید و تجلیات قدرت لایزال را در مظاهر و آثار طبیعت نمایان گردانید.

این رساله نتیجه تحقیق و بررسی های صورت گرفته بر نیمه عمرهای گروه پرتوزا با استفاده از مدل شکافت است که می توانند در زمینه پژوهش های مربوط به پدیده شکافت مورد استفاده قرار بگیرند. در این راستا شایسته است از استاد کرامت‌آورد و محترم جناب آقای دکتر داریوش نادری، شکر و قدردانی کنم. چرا که بی شک بدون نظارت ها و راهنمایی های بی دریغ ایشان تحقق این امر میسر نمی شد. سلامتی و کامیابی ایشان را از خداوند منان آرزو مندم. همچنین از اساتید بزرگوار و محترم، سرکار خانم دکتر میتا رضایی عزیز و جناب آقای دکتر محمد راستی و پس که زحمت داورسی این پایان نامه را به عهده گرفتند و نظرات ارزنده ای در جهت بهبود آن ارائه نمودند کمال شکر و سپاس را دارم.

جاء دارد از اساتید بزرگوار گروه فزیک، جناب آقای پروفسور رستم مرادیان، به این خاطر که حضورم در اینجا را مدیون ایشان هستم و جناب آقای دکتر کیومرث منصور می که افتخار شاگردی ایشان را داشتم شکر کنم. شکر ویژه از جناب آقای پروفسور محمد وحید تلوک که افتخار شاگردی ایشان را داشته ام و همواره با روی گشاده جو ابگوی سوالات بنده بودند و به من پرستگاری را آموختند، این آموخته ها محدود به فزیک نیست چه بسا از این آموخته ها و تذکرات ایشان در تمام مراحل زندگی می توان بهره برد. برای ایشان سلامتی و شادکامی را از خداوند یکتا خواستارم.

شایسته است نهایت سپاس گذاری را از جناب آقای مهندس سعیدی به خاطر کمک ها، راهنمایی های بی دریغ و بی چشم داشت در طول این دو سال داشته باشم، چرا که خدمت گذار بودن را به تمام معنای ایشان آموختم (با وجود مشغله فراوان در جهت رفع مشکل دانشجویان تمام تلاش خود را نموده و از هیچ راهنمایی فروگذار نیستند). سعادت و تندرستی را برای ایشان و

خانواده محترمشان از خداوند مهربان خواستارم. همچنین از مسئولان محترم و کارکنان دانشکده علوم به ویژه گروه فیزیک و اساتید آزمایشگاه فیزیک پایه که افتخار همکاری با ایشان را در آزمایشگاه داشتم نیز قدردانی می‌کنم.

همچنین از کمک‌ها، مهربانی‌ها و سنگینی‌های خانواده عزیزم، بخصوص خواهرم، که در تمام مراحل تحصیل و زندگی با همراهی‌هایش مایه دلگرمی و آرامش من بوده سپاس گزارم از خدای بزرگ شادکامی و سعادت‌مندی را برایشان آرزو مندم.

از دوستان عزیز و هم‌کلاسی‌های خوبم، پروانه سلطانی، الهه خلیلیان، الهه مسلمی، الهام رحمانی، نسیم رضایی، خدیجه قاسمیان، سمیه کوحازاده، مریم جهانی و... که با همراهی صمیمانه و محبت خالصانه‌شان به خصوص در جلسه دفاع مایه دلگرمی من بوده‌اند، پاسکزارم و امیدوارم همواره موفق باشند.

خداوند بزرگ را به خاطر دوستان خوب در این دوره سپاس می‌گویم، هم آنان که آنچه از علم و مهربانی در خود دارند سخاوتمندانه و در نهایت از خودگذشتگی‌شان دیگران می‌کنند و شادند به اینکه بنجد هم نوعانشان را می‌بینند. دوستانی چون خانم‌ها: دکتر زهرا حسوندا، دکتر آرزو اکبری، دکتر فاطمه ایوبی، دکتر سارا محمدی، دکتر ثریا مرادی، مناز موسی زاده، مرضیه فرسنگی، رقیه آقایی و ژاله آهنی.

به امید آنکه این تحقیق ادامه روزهای روشن در پیشرفت دانش و گسترش تفکر علمی در ایران عزیز باشد.

مریم زرگوشی

اسفند ۱۳۹۳

## چکیده

موضوع اصلی این پایان نامه تعیین نیمه عمر برای گسیل خوشه‌های پرتوزا از هسته مادر است. هسته دختر و خوشه‌های پرتوزا را به صورت تغییر شکل یافته در نظر گرفته و تأثیر پارامترهای کشیدگی و ضخامت گردن را بر نیمه عمرهای واپاشی خوشه‌های پرتوزا بررسی خواهیم کرد. در این پایان نامه مدل شکافت را برای تعیین نیمه عمر هسته‌های پرتوزا بکار برده ایم. همچنین در محاسبات از تقریب WKB برای نیمه عمرهای دسته پاره شکافت های سنگین استفاده کرده ایم.

برای مقایسه بهتر در ابتدا هسته دختر و خوشه پرتوزا را به شکل کروی در نظر گرفته و نیمه عمر را به دست آوردیم، سپس بار دیگر هسته‌ها را به صورت تغییر شکل یافته در نظر گرفته و محاسبات را یک بار دیگر انجام داده ایم. تغییر شکل هسته دختر و گروه پرتوزا بر حسب پارامترهای کشیدگی و ضخامت گردن ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که نیمه عمرها، تحت تأثیر این پارامترها قرار داشته اند. این نتایج برای هسته‌هایی که به صورت تغییر شکل یافته فرض می شوند، نسبت به حالت کروی، با داده‌های تجربی سازگاری بهتری دارد. امید است نتایج به دست آمده در این تحقیق در محاسبه نیمه عمر واپاشی‌ها مفید واقع شود.

**کلید واژه:** خوشه‌های پرتوزا، پارامترهای کشیدگی، ضخامت گردن.

**فصل اول: پدیده شکافت**

۲	۱-۱- مقدمه.....
۳	۲-۱- شکافت.....
۴	۳-۱- انرژی حاصل از شکافت.....
۵	۴-۱- جزئیات فرآیند شکافت.....
۸	۵-۱- انواع شکافت.....
۸	۱-۵-۱- شکافت به وسیله اشعه گاما.....
۸	۲-۵-۱- شکافت به وسیله ذرات باردار.....
۸	۳-۵-۱- شکافت به وسیله نوترون.....
۹	۴-۵-۱- شکافت خود به خودی.....
۱۱	۵-۵-۱- شکافت واداشته به وسیله یون های سنگین (همجوشی - شکافت).....
۱۱	۶- نیمه عمرها و واپاشی خود به خودی.....
۱۳	۷-۱- شکافت واداشته (القایی).....
۱۶	۸- توزیع جرم، بار و میانگین انرژی جنبشی کل.....
۱۸	۹-۱- سرد شدن جفت های دختر.....
۲۰	۱۰-۱- شکافت سه گانه و چهار گانه.....
۲۳	۱۱-۱- ایزومرهای شکافت.....
۲۵	۱۲-۱- شکافت سرد.....
۲۶	۱۳-۱- خوشه های پرتوزا.....

**فصل دوم: خوشه های پرتوزا**

۳۰	۱-۲- مقدمه.....
۳۰	۲-۲- شرایط گسیل خوشه.....
۳۴	۳-۲- مدل های بر مبنای نظریه واپاشی آلفای به روش گامو - کاندون - گرنی.....

**فصل سوم: مدل شبه ساکن**

۴۰	۱-۳- مقدمه.....
۴۰	۲-۳- مدل شبه ساکن.....
۴۲	۳-۳- روش تابعی انرژی - چگالی.....
۴۴	۴-۳- مدل خوشه سطحی.....
۵۵	۵-۳- نتیجه گیری.....



## فصل چهارم: محاسبه نیمه عمر خوشه با استفاده از مدل شکافت

۵۷	۱-۴-مقدمه.....
۵۷	۲-۴-شکل هسته.....
۵۸	۳-۴-انرژی پتانسیل.....
۶۱	۴-۴-محاسبه نیمه عمر.....

## فصل پنجم : بحث و نتیجه گیری

۶۴	۱-۵-مقدمه.....
۶۴	۲-۵-نتایج.....
۷۶	۳-۵- بحث و نتیجه گیری.....
۷۸	واژه نامه.....
۸۵	منابع.....

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱-۱- موقعیت اجزاء شکافت نسبت به خط پایداری. برای شکافت هسته مرکب  $^{236}_{92}\text{U}$  ..... ۴
- شکل ۲-۱-۲- روند طرح وار فرآیند شکافت. .... ۶
- شکل ۳-۱-۳- انرژی آزاد شده آنی (محاسبه شده) در شکافت متقارن. .... ۶
- شکل ۴-۱-۴- سد شکافت ..... ۷
- شکل ۵-۱-۵- نمودار  $E_f, E_b$  برای مقادیر مختلف  $A$  ..... ۱۱
- شکل ۶-۱-۶- لگاریتم نیمه عمرهای شکافت خود به خودی برای برخی از ایزوتوپ‌های زوج-زوج ..... ۱۳
- شکل ۷-۱-۷- تصویر مربوط به لگاریتم نیمه عمر شکافت خود به خودی برخی از هسته‌های زوج-زوج ..... ۱۳
- شکل ۸-۱-۸- لگاریتم نیمه عمرهای شکافت خود به خودی برخی ایزوتوپ‌های غیر زوج - زوج ..... ۱۴
- شکل ۹-۱-۹- انرژی‌های جنبشی کل مشاهده شده قبل از گسیل نوترون و شکافت خود به خودی  $^{252}\text{Cf}$  با مقادیر  $Q$  محاسبه شده ..... ۱۴
- شکل ۱۰-۱-۱۰- سطح مقطع مشاهده شده شکافت به صورت تابعی از انرژی نوترون فرودی برای  $^{235}\text{U}$  و  $^{239}\text{Pu}$  ..... ۱۵
- شکل ۱۱-۱-۱۱- رزونانس‌های نوعی مشاهده شده در برهمکنش نوترون‌ها با  $^{235}\text{U}$  در گستره انرژی 0.1 تا 5MeV. سطح مقطع‌های کل شکافت و پراکندگی ..... ۱۶
- شکل ۱۲-۱-۱۲- بهره جرمی مشاهده شده برای شکافت واداشته با نوترون‌های گرمایی در  $^{233}\text{U}$  و  $^{239}\text{Pu}$  به صورت تابعی از عدد اتمی هسته دختر ..... ۱۷
- شکل ۱۳-۱-۱۳- بهره جرمی مشاهده شده برای شکافت القایی با نوترون گرمایی و نوترون 16MeV در  $^{235}\text{U}$  به صورت تابعی از عدد جرمی هسته دختر ..... ۱۸
- شکل ۱۴-۱-۱۴- توزیع جرم گسیلی بعد و قبل نوترون به ترتیب  $N(\mu)$  و  $N(m^*)$  و توزیع‌های انرژی جنبشی کل میانگین متناظر  $E_k(\mu)$  و  $E_k(m^*)$  در دو بخش (b,a)، شکافت القایی  $^{235}\text{U}$  ..... ۱۹
- شکل ۱۵-۱-۱۵- توزیع مشاهده شده در شکافت القایی نوترون گرمایی برای  $^{235}\text{U}$  تصاویر، جرم  $Y(A)$  و بار  $Y(Z)$  ..... ۲۰
- شکل ۱۶-۱-۱۶- توزیع جرمی مشاهده شده در شکافت القایی نوترون گرمایی  $^{233}\text{U}$ ،  $^{235}\text{U}$ ،  $^{239}\text{Pu}$  ..... ۲۱
- شکل ۱۷-۱-۱۷- اشعه گامای نسبی مشاهده شده به صورت تابعی از جرم پاره در شکافت خود به خودی  $^{252}\text{Cf}$  ..... ۲۱
- شکل ۱۸-۱-۱۸- تعداد میانگین اشعه گاماها گسیل شده،  $N\gamma$  و انرژی کل مشاهده شده آن‌ها  $E\gamma$ ، با شکافت القایی نوترون گرمایی  $^{235}\text{U}$  ..... ۲۲
- شکل ۱۹-۱-۱۹- میانگین تعداد نوترون‌های سریع گسیل شده ..... ۲۲
- شکل ۲۰-۱-۲۰- تعداد میانگین نوترون‌های گسیل شده در شکافت خود به خودی  $^{252}\text{Cf}$  و شکافت واداشته با نوترون گرمایی  $^{235}\text{U}$ ،  $^{233}\text{U}$  و  $^{239}\text{Pu}$  ..... ۲۳
- شکل ۲۱-۱-۲۱- مقایسه طیف انرژی مشاهده شده برای نوترون‌های گسیل شده با دو تابع تئوری ..... ۲۳
- شکل ۲۲-۱-۲۲- مقایسه توزیع جرم پاره‌های مشاهده شده در محصولات شکافت سرد با توزیع جرم‌های مشاهده شده در محصولات شکافت نرمال در شکافت القایی نوترون گرمایی  $^{235}\text{U}$  ..... ۲۵

- شکل ۱-۲- مقادیر  $Q$  و  $E_k$  انرژی جنبشی مشاهده شده، برای گسیل خوشه، از هسته‌های مادر زوج - زوج و فرد..... ۳۲
- شکل ۱-۳- تغییرات انرژی پتانسیل بر حسب فاصله، برای گسیل خود به خودی خوشه  $^{14}\text{C}$  از  $^{226}\text{Ra}$ ..... ۴۳
- شکل ۲-۳- سد مربوط به نیمه عمر گسیل خوشه در نمونه خوشه سطحی و رفتار تابع موج سد..... ۴۵
- شکل ۱-۴- پارامترهای به کاررفته برای شکل هسته،  $Z_{cm}^L$  و  $Z_{cm}^R$ ..... ۵۸
- شکل ۱-۵- نمودار فاصله بین مراکز خوشه پرتوزا و هسته دختر به صورت تابعی از پارامتر کشیدگی برای واپاشی  $^{221}\text{Ra} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{207}\text{Pb}$ ..... ۶۴
- شکل ۲-۵- نمودار فاصله بین مرکز جرم، خوشه و هسته دختر به صورت تابعی از ضخامت گردن برای واپاشی  $^{221}\text{Ra} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{207}\text{Pb}$ ..... ۶۵
- شکل ۳-۳- منحنی تغییرات انرژی پتانسیل بر حسب فاصله بین مراکز خوشه و هسته دختر برای واکنش  $^{221}\text{Ra} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{207}\text{Pb}$ ..... ۶۵
- شکل ۴-۵- مقایسه منحنی تغییرات  $\log_{10}P$  مربوط به تابش  $^{24}\text{Ne}$  بر حسب تابعی از عدد جرمی هسته‌های مادر برای هسته‌های کروی و تغییر شکل یافته..... ۶۸
- شکل ۵-۵- مقایسه تغییرات  $\log_{10}P$  مربوط به گسیل  $^{14}\text{C}$  به صورت تابعی از عدد جرمی هسته‌های مادر  $\text{Ra}$  ( $^{221}, ^{222}, ^{223}, ^{224}, ^{226}$ ) برای هسته‌های کروی و تغییر شکل یافته..... ۶۸
- شکل ۶-۵- نمودار تغییرات نیمه عمر خوشه  $^{14}\text{C}$  تابش شده از هسته  $^{221}\text{Ra}$  بر حسب فاصله بین مراکز جرم خوشه و هسته دختر..... ۷۱
- شکل ۷-۵- نمودار تغییرات نیمه عمر خوشه  $^{14}\text{C}$  تابش شده از هسته  $^{221}\text{Ra}$  بر حسب تابعی از ضخامت گردن..... ۷۲
- شکل ۸-۵- مقایسه نمودار مربوط به تغییرات نیمه عمر خوشه  $^{14}\text{C}$  بر حسب عدد جرمی هسته‌های مادر  $\text{Ra}$  ( $^{221}, ^{222}, ^{223}, ^{224}, ^{226}$ )..... ۷۲
- شکل ۹-۵- مقایسه نمودار تغییرات نیمه عمر برای تابش  $^{24}\text{Ne}$  بر حسب عدد جرمی هسته‌های مادر..... ۷۳
- شکل ۱۰-۵- مقایسه نمودار تغییرات نیمه عمر برای تابش ذره آلفا بر حسب تعداد نوترون‌های هسته‌های مادر..... ۷۴
- شکل ۱۱-۵- مقایسه نمودار تغییرات نیمه عمر برای تابش ذره آلفا بر حسب تعداد نوترون‌های هسته‌های مادر  $\text{Te}$ ..... ۷۴
- شکل ۱۲-۵- مقایسه نمودار تغییرات نیمه عمر برای تابش ذره آلفا بر حسب تعداد نوترون‌های هسته‌های مادر  $\text{Xe}$ ..... ۷۵
- شکل ۱۳-۵- مقایسه نمودار تغییرات نیمه عمر برای تابش ذره آلفا بر حسب تعداد نوترون‌های هسته‌های مادر  $\text{Cs}$ ..... ۷۵

## فهرست جداول

جدول	صفحه
جدول ۱-۱- نیمه‌عمرهای شکافت خود به خودی عناصر از $^{230}\text{Th}$ تا $^{259}\text{Fm}$ .....	۱۲
جدول ۲-۱- نیمه‌عمرهای ایزومرهای شکافت.....	۲۴
جدول ۳-۱- مقایسه انرژی جنبشی مشاهده‌شده، مقدار $Q$ و لگاریتم نیمه‌عمر تجربی و مراجع مربوط به مدل‌های واپاشی خوشه‌ای.....	۲۸
جدول ۱-۲- مقایسه $E_k$ ، انرژی‌های جنبشی مشاهده‌شده و مقادیر $Q$ برای چند واکنش.....	۳۰
جدول ۲-۲- مقایسه انرژی‌های جنبشی مشاهده‌شده $E_k$ و مقادیر $Q$ برای هسته‌های مادر با تعداد نوکلئون‌های فرد.....	۳۱
جدول ۳-۲- مقایسه نیمه‌عمرهای محاسبه‌شده گسیل خوشه‌ای، در مدل‌های مختلف با داده‌های تجربی.....	۳۵
جدول ۱-۳- مقایسه لگاریتم نیمه‌عمرهای محاسبه‌شده و تجربی بر حسب ثانیه در مدل خوشه‌سطحی.....	۵۰
جدول ۲-۳- مقایسه لگاریتم نیمه‌عمرهای محاسبه‌شده و تجربی بر حسب ثانیه در مدل خوشه‌سطحی با در نظر گرفتن مقدار انرژی جنبشی به‌جای مقدار $Q$ در محاسبات.....	۵۱
جدول ۳-۳- مشابه جدول ۱-۳، احتمال قبل از تشکیل $10^{-4}$ در نظر گرفته‌شده.....	۵۲
جدول ۴-۳- مشابه جدول ۳-۳، با این تفاوت که $r_0 = 1.01 \text{ fm}$ در نظر گرفته‌شده.....	۵۳
جدول ۵-۳- مقایسه نیمه‌عمرهای، محاسبه‌شده و تجربی بر حسب سال، برای واپاشی آلفای تعدادی از هسته‌های با نوکلئون‌های زوج-زوج.....	۵۴
جدول ۱-۴- مقایسه پارامتر تغییر شکل چهار قطبی خوشه کربن ۱۴ و پارامترهای تغییر شکل چهار قطبی هسته دختر.....	۶۰
جدول ۲-۴- مقایسه پارامترهای تغییر شکل چهار قطبی خوشه‌های مختلف و پارامترهای تغییر شکل چهار قطبی هسته دختر.....	۶۱
جدول ۱-۵- مقایسه احتمال عبور از سد $p$ خوشه‌های پرتوزا $^{14}\text{C}$ .....	۶۶
جدول ۲-۵- مقایسه احتمال عبور از سد $p$ برای دیگر خوشه‌های پرتوزا.....	۶۷
جدول ۳-۵- مقایسه مقادیر تجربی با مقادیر محاسبه‌شده نیمه‌عمر برای خوشه‌های پرتوزای $^{14}\text{C}$ .....	۶۹
جدول ۴-۵- مقایسه مقادیر تجربی با مقادیر محاسبه‌شده نیمه‌عمر برای خوشه‌های پرتوزا مختلف.....	۷۰

# فصل اول

## پدیده شکافت

## ۱-۱- مقدمه

کشف شکافت هسته‌ای به‌عنوان یک عامل کلیدی نقش عمده‌ای در جوامع بشری بعد از جنگ جهانی دوم ایفا کرد. هرچند یک آغاز نامعلوم در آزمایشگاه‌های پاریس و رم داشت. در سال ۱۹۳۴ جولیت و کوری [۱] نوع جدیدی از رادیواکتیویته القاشده توسط ذرات القایی که روی هسته فرود می‌آید را گزارش کردند؛ بلافاصله بعد از آن فرمی و همکارانش رادیواکتیویته القاشده توسط نوترون، روی یکسری از هدف‌ها را گزارش کردند [۲]. جدا کردن عناصر حاصل شده مشکل است بنابراین از آنجا که برای آن‌ها کشف عناصری سنگین تر از اورانیوم اهمیت بیشتری داشت، از احتمال شکافت هسته‌ای چشم‌پوشی کردند. برخلاف این حقیقت که نوداک، در مقاله خود احتمال شکافت هسته‌ای را در آزمایشاتی، که در رم انجام داد افزایش داده است، سرانجام هان و استراسمن [۳] با اکراه نتیجه گرفتند اورانیومی که به‌وسیله نوترون‌ها تابش شده است به پاره‌هایی شکافته می‌شود و پدیده شکافت القاشده توسط ذرات، در هسته بنیان‌گذاری شد. این نتیجه فوراً توسط میت نر و فریش [۴] ثابت شد و شکافت هسته‌ای به‌عنوان یک پدیده مهم، در مطالعه ویژگی‌های فیزیکی هسته، پایه‌گذاری شد. همچنین اهمیت شکافت هسته‌ای در تولید انرژی روشن است.

در شکافت یک هسته اکتینید، به یکی از محتمل‌ترین جفت‌های دخترش، حدود  $180 \text{ MeV}$  انرژی تولید می‌شود. یعنی به ازای هر یک کیلوگرم از اورانیوم، قادر به تولید حدود  $2 \times 10^7$  کیلووات ساعت انرژی هستیم که برای روشن نگه‌داشتن مداوم یک لامپ صد وات برای حدود ۲۵۰۰۰ سال کافی است. از دیدگاه تئوری مفهوم فرآیند حرارتی واپاشی آن‌ها مستلزم آن است که هسته اکتینید باید در یک حالت، کم‌ثبات و ناپایداری، درست شبیه گسیلنده‌های آلفا باشد. در پی آن جامعه فیزیک هسته‌ای، شروع به کاوش در باره این سؤال فتنه‌جویانه کرد که آیا شکافت می‌تواند به‌صورت خود به خودی در همان مدی که گسیل ذرات آلفا از گسیلنده‌های آلفا رخ می‌دهد روی دهد، یا خیر. لیبی به‌شدت به جستجو در مورد شکافت خود به خودی اورانیوم پرداخت، هرچند در نهایت این پیتزرهاک و فلیرو [۵] بودند که کشف کردند، اورانیوم به‌صورت خود به خودی شکافته می‌شود. از آن به بعد تلاش‌های گسترده‌ای در آزمایشگاه‌های مختلف برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی مربوط به شکافت خود به خودی صورت گرفت، به‌طوری که سیگر گزارش داد. در شکافت خود به خودی، هسته به جفت‌های دختر واپاشی می‌کند. به این صورت که هر جفت از این هسته‌های دختر، خیلی سنگین تر از یک ذره آلفا هستند. لازم به ذکر است که هسته به‌طور همزمان به سه ذره

نیز واپاشیده می‌شود، اما احتمال این فرآیند تا چند مرتبه بزرگی کوچک‌تر است. در شکافت القایی، هسته هدف وقتی توسط پرتابه فرودی، بمباران می‌شود به یک سری از جفت هسته‌های دختر واپاشی می‌کند که همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد هر کدام خیلی سنگین‌تر از یک ذره آلفا خواهد بود.

در فرآیند شکافت، برخلاف گسیل ذره به صورت آلفا، ذرات در همان اول به صورت حالت برانگیخته گسیل می‌شوند. پر واضح است که هر دوی این فرآیندها مستلزم یک تغییر خیلی پیچیده در هسته مادر هستند که درک آن نیازمند اندازه‌گیری پدیده‌های مرتبط بسیاری است. مطالعات تجربی گسترده‌ای روی ویژگی‌های فیزیکی مربوط به پدیده شکافت انجام گرفت و در بسیاری از متون به ثبت رسید [۶].

رز و جونز در سال ۱۹۸۴ مشاهده گسیل خود به خودی،  $^{14}\text{C}$  را از  $^{223}\text{Ra}$  گزارش کردند و بلافاصله در تعدادی از مراکز تحقیقاتی در سراسر جهان به اثبات رسید. در حقیقت بسیاری از این آزمایشگاه‌ها، گسیل خوشه‌هایی در محدوده  $^{14}\text{C}$  تا  $^{34}\text{Si}$  را از هسته مادر رادیوم به اورانیوم مشاهده کردند که محدوده نیمه‌عمر آن‌ها از  $10^{11}$  تا  $10^{25}$  ثانیه است.

## ۱-۲- شکافت

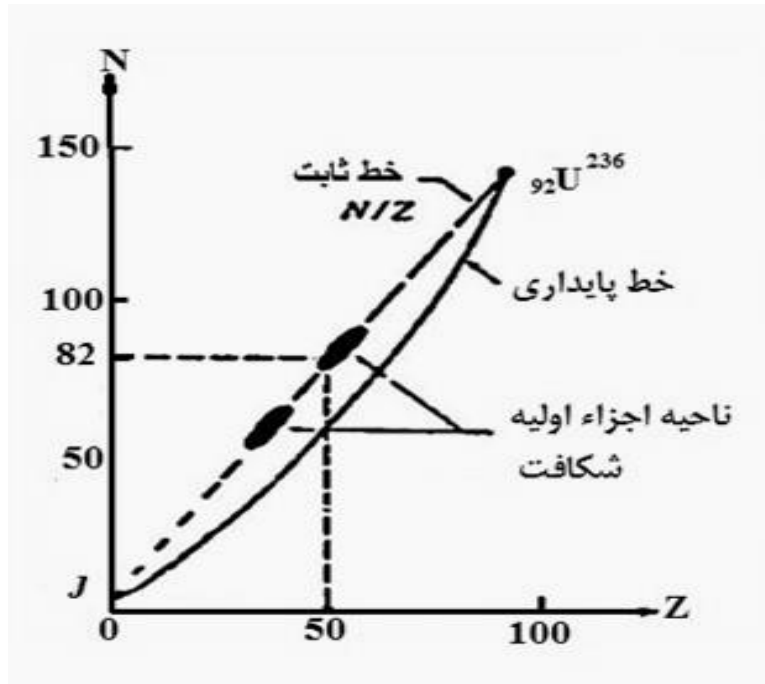
واکنش شکافت  $X(a,b)Y$  را در صورتی واکنش شکافت می‌نامند که جرم‌های  $Y$  و  $b$  حدود یکدیگر باشند. بعضی از هسته‌ها خودبه‌خود شکافته می‌شوند معمولاً شکافت وقتی رخ می‌دهد که انرژی کافی توسط گیراندازی یک نوترون کند فرودی، یا بمباران توسط  $(n, p)$  یا پرتوهای  $(\gamma)$ ، به هسته هدف، داده شود. تا جایی که می‌دانیم، فرآیند شکافت همیشه از طریق یک مرحله هسته مرکب انجام می‌شود. هسته مرکب با گسیل چند نوترون آنی به دو بخش تقسیم می‌شود، دلیل آن را در زیر بیان می‌کنیم.

فرآیند شکافت را، برای اولین دفعه، هان و استراسمن توسط آزمایش‌های «پرتو - شیمیایی» کشف کردند (۱۹۳۹) [۷]. آن‌ها نشان دادند که بمباران اورانیوم توسط نوترون ایجاد عنصری می‌کند که در اواسط جدول تناوبی هستند، نه عناصر سنگین‌تر از اورانیوم که قبلاً پیش‌بینی می‌کردند.<sup>۱</sup>

دو مؤلفه هسته‌ای اصلی، موسوم به پاره‌های شکافت، به علت سینما تیک، دارای جرم‌های مساوی نیستند. احتمالاً دارای اثرات لایه‌ای روی توزیع جرم مؤثرند. شکل (۱-۱) نشان می‌دهد که اجزاء آنی شکافت پایدار نیستند، زیرا در فرآیند شکافت هر دو جزء همان نسبت «نوترون - پروتون» هسته مرکب اولیه را، که نزدیک خط پایداری قرار دارد، حفظ می‌کنند. از این رو اجزاء شکافت دارای نوترون‌های اضافی هستند، و لذا، گسیل نوترون آنی مقدم‌تر از آن است. واپاشی بتای منفی و گاما، نهایتاً فرآورده‌های شکافت را به طرف خط

۱- مادام لیز میتنر (L. n. Meitner) اولین کسی بود که عمیقاً بررسی تجربی شکافت هسته پرداخت ولی در مکاتبات و مقالات و کتابها به زن بودن او تکیه

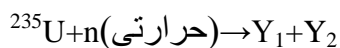
پایداری سوق می‌دهد. در بعضی موارد حالت‌های برانگیخته‌ای که بالاتر از انرژی جدایی نوترون یک هسته قرار دارند، ایجاد می‌شوند، که با واپاشی بتا، باعث گسیل نوترون تأخیری می‌گردند.<sup>۲</sup> با تطبیق خط برای یک هسته نوعی شکافت گر نظیر  ${}_{92}^{236}\text{U}$ ، و منحنی  $N/Z$ ، شکل (۱-۱) ملاحظه می‌شود که این خط از نزدیک هسته  $Z=50$  و  $N=82$  (با اعداد شگفت‌انگیز یا اعداد جادویی دوگانه)، می‌گذرد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که  $A=132$  یک عدد جرمی برجسته در جرم فرآورده‌های نهایی باشد. این به‌خوبی با تجربه سازگار است



شکل ۱-۱- موقعیت اجزاء شکافت نسبت به خط پایداری. مثال نشان داده شده برای شکافت هسته مرکب  ${}_{92}^{236}\text{U}$

### ۱-۳- انرژی حاصل از شکافت

انرژی‌های جنبشی پاره‌های شکافت اولیه را می‌توان از فرمول نیمه تجربی جرم محاسبه کرد. مثلاً فرآیند شکافت زیر را در نظر می‌گیریم:



که در آن  $Y_1$  و  $Y_2$  دارای نسبت  $N/Z$  مساوی با  ${}_{92}^{235}\text{U}$  می‌باشند.

$$Q(\text{انی}) = TY_1 + TY_2 = [M(U^{235}) + M_n - (M_{Y_1} + M_{Y_2})]c^2$$

$$= B_{\text{tot}}(Y_1) + B_{\text{tot}}(Y_2) - B_{\text{tot}}({}^{235}\text{U}) \quad (1-1)$$

<sup>۲</sup> - تأخیر نسبت به رویداد شکافت اولیه می‌باشد. واپاشی نوترون از هر تراز مجازی در فاصله زمانی حدود  $10^{-17}$  ثانیه اتفاق می‌افتد.



انرژی‌های بستگی کل را می‌توان از فرمول:

$$B_{\text{tot}}(A, Z) = a_v A - a_s A^{\frac{2}{3}} - a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{\frac{1}{3}}} - a_a \frac{(N-Z)^2}{A} \pm \delta + \eta$$

محاسبه کرد، نتیجه عبارت است از:

$$Q (\text{آنی}) \approx 170 \text{ MeV}$$

انرژی کل آزاد شده برای فرآورده‌های نهایی شکافت، شامل انرژی آزاد شده توسط پرتوهای بتا، پرتوهای گاما، و پادنوترینوها، و همچنین انرژی حمل شده توسط نوترون‌هاست. پس مقدار  $Q$  در این حال برابر است با:

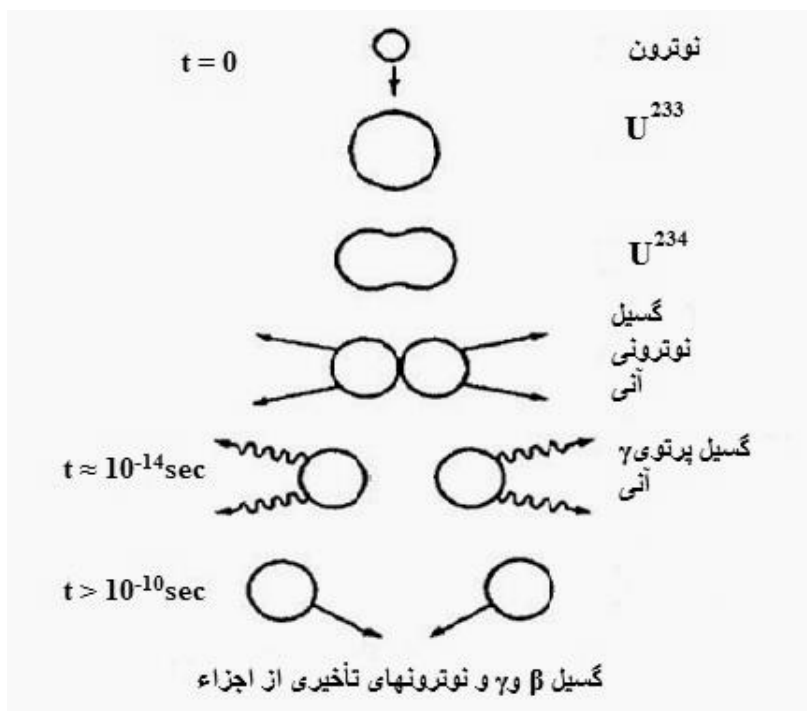
$$Q (\text{کلی}) = B_{\text{tot}}(Y'_1) + B_{\text{tot}}(Y'_2) - B_{\text{tot}}(U^{235}) \quad (2-1)$$

که در آن  $Y'_1$  و  $Y'_2$  فرآورده‌های نهایی شکافت هستند که نزدیک خط پایداری قرار دارند. اگر اعداد جرمی این فرآورده‌ها، به ترتیب ۱۰۰ و ۱۳۲ باشد، و با فرض اینکه ۴ نوترون آزاد شده باشد، مقدار تقریبی زیر را به دست می‌دهد.

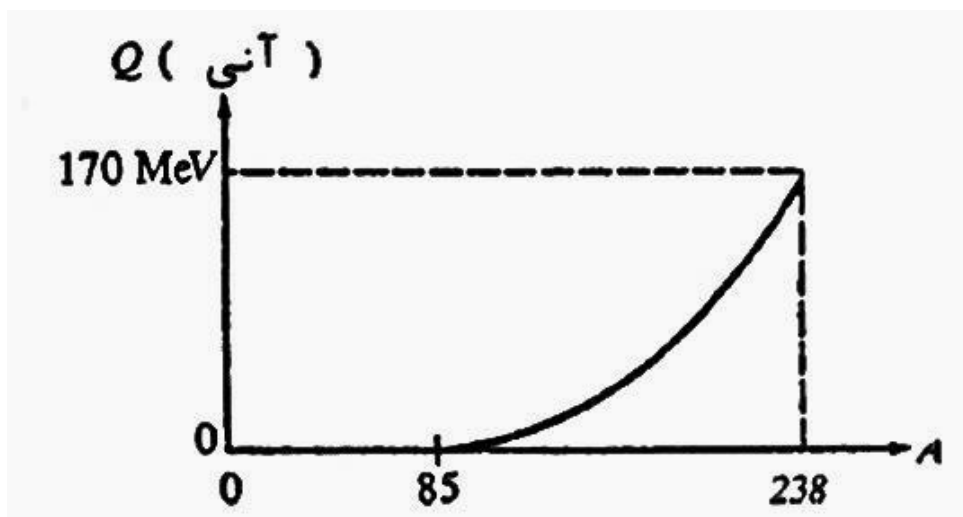
$$Q (\text{کلی}) \approx 132 \times 8.3 + 100 \times 8.5 - 235 \times 7.5 \text{ MeV} \approx 210 \text{ MeV}$$

## ۴-۱- جزئیات فرآیند شکافت

نظریه اصلی فرآیند شکافت توسط بوهر و ویلر (۱۹۳۹)، بر پایه مدل قطره‌ای ارائه شد [۷]. وقوع این فرآیند را اکنون مطابق شکل (۲-۱) تجسم می‌کنند انرژی بستگی نوترون گیر افتاده، هسته مرکب را به ارتعاش‌های شدیدی وامی‌دارد که باعث شکستن هسته می‌شود، و نوترون‌های آنی آزاد می‌گردند. بعضی از پاره‌های شکافت در حالت برانگیخته تشکیل می‌شوند، که با تابش گامای با طول عمرهای نوعی  $10^{-15}$  تا  $10^{-13}$  ثانیه، وامی‌پاشند، و پس از آن اغلب اجزاء شکافت با گسیل بتای منفی به طرف خط پایداری اگر انرژی آزاد شده (۲-۱) را، هنگامی که یک هسته  $(Z, A)$  به دو هسته  $(Z/2, A/2)$  یکسان تبدیل شود، در نظر بگیریم، با یک نوع شکافت متقارن، سروکار داریم. از فرمول نیمه تجربی جرم ملاحظه می‌شود که، (آنی)  $Q$  برای هسته‌های با  $A > 85$  مثبت است شکل (۳-۱). اما چنین هسته‌های سبکی خودبه‌خود شکافت پیدا نمی‌کنند، بنابراین، نتیجه می‌گیریم که یک سد شکافت وجود دارد.



شکل ۱-۲- روند طرح وار فرآیند شکافت، مقایسه زمان فقط از مرتبه بزرگی



شکل ۱-۳- انرژی آزاد شده آنی (محاسبه شده) در شکافت متقارن معادله (۱-۲)

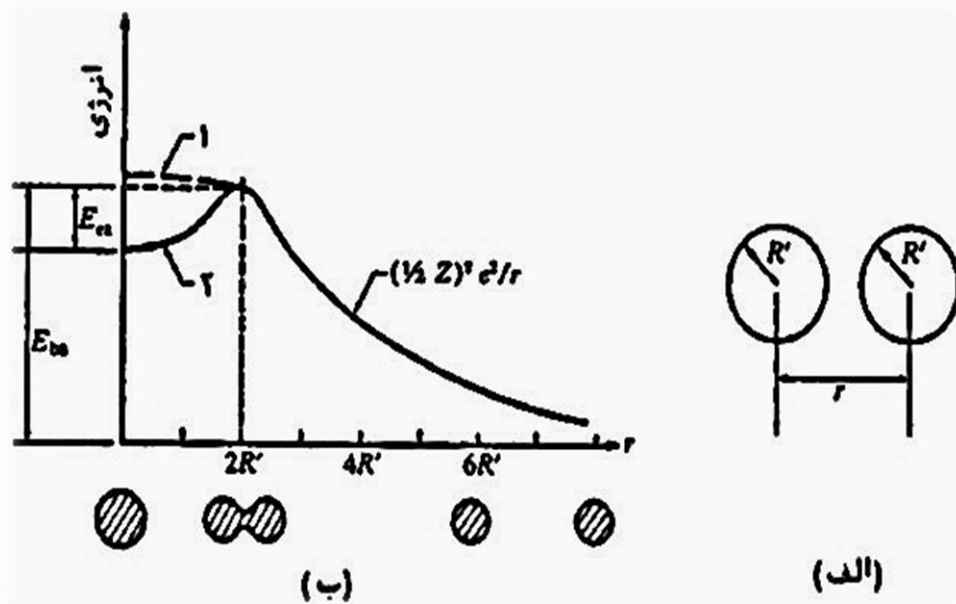
بهترین راه درک پدیده‌ی فوق این است که فرآیند شکافت را وارونه کنیم. فرض کنید که در هسته کروی، هر یک با  $(Z/2, A/2)$  را، مطابق شکل (۱ - ۴ الف)، مجاور هم بیاوریم. انرژی پتانسیل بین کره‌ها برابر  $(1/2Z)^2 e^2/r$  است، که در آن  $r$  فاصله خط‌المرکزین دو کره هست. وقتی کره‌ها مماس با یکدیگرند،

شکل (۱-۴-ب)، نیروهای هسته‌ای وارد عمل شده و کره‌ها در یکدیگر فرو می‌روند.

دو حالت ممکن است پیش آید:

۱. وقتی سیستم به حداقل واپیچش خود، یعنی یک شکل کروی می‌رسد، انرژی پتانسیل هرگز کاهش پیدا نمی‌کند.

۲. وقتی سیستم شکل کروی پیدا می‌کند انرژی پتانسیل کاهش می‌یابد.



شکل ۱-۴-سد شکافت. (الف) پاره‌های شکافت متقارن. (ب) نمودار انرژی پتانسیل متناظر، در زیر محور طول

ترسیم شده شکل تقریبی از سیستم. در حالت (۱)، هسته آن‌ا توسط شکافت خودبه‌خود وامی‌باشد. در حالت (۲)،

مقدار معینی انرژی برانگیختگی  $E_{ex}$  لازم است برای ایجاد شکافت

بر عکس، با شروع از هسته کروی، حالت (۱) به شکافت خود به خودی منتهی می‌شود، و حالت (۲) فقط وقتی به شکافت منجر می‌شود که انرژی برانگیختگی لازم  $E_{ex}$  شکل (۱-۴-ب)، تأمین شود. انرژی آزاد شده، یا (آنی)  $Q$ ، تقریباً برابر ارتفاع سد  $E_{ba}$  است. طبق نظریه بوهر-وی لر، شکل هسته شکافته ابتدا به صورت بیضوی در می‌آید. بر این مبنای می‌توان شکل منحنی پتانسیل را در شکل (۱-۴-ب)، در نزدیکی  $r=0$  حساب کرد، و نشان داد که حالت (۱) فقط به ازای  $Z > 115$  به دست می‌آید. بنابراین، هسته‌های شناخته شده، به عنوان مدل اصلی واپاشی شان دست خوش شکافت خود به خودی نمی‌شوند.

در هسته‌های مثل  $^{235}\text{U}$ ، انرژی برانگیختگی  $E_{ex}$  (5-6 MeV)، توسط انرژی بستگی نوترون گیر افتاده ( $\approx 7\text{MeV}$ )، تأمین می‌شود. از این رو شکافت با نوترون حرارتی رخ خواهد داد. در مورد  $^{238}\text{U}$ ، وقتی یک

نوترون حرارتی گیر می‌افتد فقط 5 MeV انرژی تولید می‌شود که کمتر از  $E_{ex}$  اورانیوم 238 است، و بدین جهت برای شکافت آن نوترون‌های سریع لازم است. اختلاف در انرژی بستگی نوترون‌ها، به علت وجود جمله زوجیت  $\delta$  در معادله مربوط به  $B_{tot}(A, Z)$  که در متن اشاره شد، است. از این رو اغلب هسته‌های شکافت پذیر زوج-زوج دارای آستانه شکافت هستند، در حالی که اغلب هسته‌های با  $A$  فرد، با نوترون‌های حرارتی شکافت پیدا می‌کنند [7].

## ۱-۵- انواع شکافت:

۱-۵-۱- شکافت به وسیله اشعه گاما

۲-۵-۱- شکافت به وسیله ذرات باردار

۳-۵-۱- شکافت به وسیله نوترون

۴-۵-۱- شکافت خود به خودی

۵-۵-۱- شکافت واداشته به وسیله یون‌های سنگین (همجوشی - شکافت)

### ۱-۵-۱- شکافت به وسیله اشعه گاما:

فوتون‌های با انرژی بالا می‌توانند در عناصر سنگین شکافت واداشته ایجاد کنند به عنوان نمونه اشعه گاما با انرژی 5.1 MeV می‌تواند باعث شکافت  $^{238}\text{U}$  شوند.

### ۱-۵-۲- شکافت به وسیله ذرات باردار:

عناصر با  $Z > 90$  فرایند شکافت با پروتون‌ها، دترون‌ها و ذرات آلفا را نشان می‌دهند. ذرات باردار با انرژی بالا می‌توانند در عناصر میانی جدول تناوبی، شکافت واداشته ایجاد کنند.

### ۱-۵-۳- شکافت به وسیله نوترون:

این نوع شکافت به دو صورت انجام می‌گیرد:

۱. شکافت به وسیله نوترون گرمایی:

چون یک نوترون گرمایی انرژی ناچیزی به هسته شکافت پذیر منتقل می‌کند از فرمول نیمه تجربی جرم واضح است که شکافت هسته در جایی که هسته مرکب ساختار زوج - زوج دارد با نوترون‌های