بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و

نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه

متعلق به دانشگاه رازی است.

دانشکده علوم
گروه فیزیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش هسته‌ای

محاسبه‌ی سطح مقطع پراکندگی اتم های میونی در همجوشی از طریق کاتالیزور میونی

استاد راهنما:
دکتر بیتا رضایی

استاد مشاور:
دکتر غلامرضا برون

نگارش :
سونیا جسری

شهریور ۱۳۸۹

برای کسی که آهسته و پیوسته می رود، هیچ راهی دور نیست...

امید درمانی است که شفا نمی دهد، ولی کمک می کند تا درد را تحمل کنیم...

آنچه شما درباره‌ی خود فکر می کنید، مهمتر از اندیشه هایی است که دیگران درباره شما دارند...

اگر هر روز راهت را عوض کنی، هرگز به مقصد نخواهی رسید...

صاحب اراده پیش مرگ زانو می زند و آن هم در تمام عمر، بیش از یک مرتبه نیست...

وقتی شخصی گمان کرد دیگر احتیاجی به پیشرفت ندارد، باید تابوت خود را آماده کند!

کسانی که در انتظار زمان نشسته‌اند، آن را از دست خواهند داد...

آن قدر شکست خوردن را تجربه کنید، تا راه شکست دادن را بیاموزید...

اگر خود را برای آینده آماده نسازید، به زودی متوجه خواهید شد که متعلق به گذشته هستید...

خودتان را به زحمت نیندازید که از معاصران یا پیشینیان بهتر گردید، سعی کنید از خودتان بهتر شوید...

خداوند به هر پرنده ای دانه‌ای می دهد، ولی آن را داخل لانه‌اش نمی اندازد...

درباره‌ی درخت بر اساس میوه هایش قضاوت کنید، نه بر اساس برگ هایش!

ستایش و تشکر

... قسم به قلم و آنچه می نگارد .

خدای بزرگ و مهربانم را سپاسگزارم که همواره در تمامی مراحل زندگیم، سختی های پیش رو را بر من آسان نموده است.

مراتب تقدیر و تشکر از تمامی اساتید گروه فیزیک دانشکده علوم دانشگاه رازی را ابراز می دارم، که در طول شش سال دوره تحصیلم در این دانشکده روز به روز به علم و دانش من در زمینه‌ی فیزیک افزودند و همواره با صبر و حوصله جوابگوی سؤالات من بودند.

از استاد راهنمای عزیزم سرکار خانم دکتر **بیتا رضایی** سپاسگزارم که با راهنمایی های بی دریغشان به من کمک کردند تا در گرایش مورد علاقه‌ام دراین مقطع به تحصیل بپردازم.

از لطف بیکران استاد مشاورم جناب آقای دکتر **غلامرضا برون** ممنون هستم که در طول این دو سال با صبر فراوان جوابگوی سؤالاتم بودند.

از جناب آقای دکتر **کیومرث منصوری**، داور داخل گروه و جناب آقای دکتر **سعید سهیلی**، داور مدعو از دانشگاه بوعلی همدان سپاسگزارم.

از خانواده عزیزم، پدر بزرگوارم، مادر نازنینم، دو خواهر مهربانم، برادر عزیزم و مهندس وریا مرادی شوهر خواهر مهربانم، به خاطر تمامی حمایت ها، محبت ها، تشویق ها و دعاهای سبزشان ممنون و سپاسگزارم. از خداوند منان سلامتی و طول عمر با عزت برای آنها خواستارم.

از دوستان و همدوره های عزیزم خانم ها؛ **مریم صیدی**، **میتراقمبری**، **مریم امیری** ، **سودابه رضایی**، **الهام کرمپور**، **طیبه رمضانی**، **آزاده یونسی**، **مریم علوی**، **مینا ستوده**و **سمانه قیصری** ممنون و سپاسگزارم. امیدوارم در تمامی مراحل زندگی موفق و پیروز باشند.

از دوست عزیزم **ماندانا حیرانی** و همسر مهربانش آقای **افشین سورنی** برای تمامی محبت ها و زحمت هایشان ممنون و سپاسگزارم.

تقدیم به

دل های پاک و دست های پر مهر دو ستاره همیشه فروزان زندگیم

پدر بزرگوارم و مادر نازنینم

چکیده

تشکیل اتم های میونی یکی از مهمترین واکنش ها در فرآیند همجوشی از طریق کاتالیزور میونی می باشد، از اینرو هدف این پایان نامه بررسی و محاسبه‌ی سطح مقطع تشکیل اتم های میونی می باشد. با عنوان کردن نظریه پراکندگی و برخورد، ما بر اساس تقریب بورن در محدوده‌ی انرژی میانی و بالا، فرآیند پراکندگی را همانند فرآیند گذار فرض کرده‌ایم و با بررسی واکنش انتقال (تعویض) بار سه جسمی، با فرض اینکه گذار تنها به یکی از حالت های نهایی صورت می گیرد، برمبنای تقریب دو حالته، که در واقع تصحیحی از تقریب بورن می باشد و سهم نامتعامد بودن توابع موج اولیه و نهایی را به حساب آورده است، ابتدا به محاسبه ی سطح مقطع دیفرانسیلی تشکیل میونیوم پرداخته و سپس بر مبنای همین روش به بررسی سطح مقطع تشکیل اتم های $p\mu$ و $d\mu$ و $t\mu$ پرداخته‌ایم. نتایج بدست آمده برای سطح مقطع پراکندگی رو به جلوی میونیوم بر حسب انرژی میون مثبت، نشان می دهد که در بازه‌ی انرژی $(۱ - ۱۰)KeV$ با افزایش انرژی، سطح مقطع کاهش می یابد و همچنین نتایج سطح مقطع دیفرانسیلی میونیوم بر حسب زاویه‌ی پراکندگی نشان می دهد که در زاویه‌ی صفر، سطح مقطع دارای پیک است و با افزایش زاویه این مقدار رو به کاهش می گذارد. در ناحیه‌ی متوسط انرژی، نتایج تقریب دو حالته با تقریب بورن مقایسه شده است و تفاوت حاصل در مقادیر بدست آمده به علت منظور نکردن سهم نامتعامد بودن توابع موج اولیه و نهایی در تقریب بورن می باشد. نتایج بدست آمده برای سطح مقطع تشکیل اتم های میونی نشان می دهد که با افزایش زاویه‌ی پراکندگی، سطح مقطع کاهش می یابد و همچنین سطح مقطع پراکندگی رو به جلوی این اتم ها در انرژی $۱۳/٦eV$ دارای پیک است که نشان از یک حالت رزونانس گونه می باشد.

در ادامه‌ی همین روش می توان سطح مقطع کل تشکیل میونیوم و اتم میونی را محاسبه نمود.

فهرست مندرجات

۱ مقدمه ای بر همجوشی هسته ای ۱

۱. ۱ انرژی هسته‌ای ۴

۱. ۱.۱ منحنی انرژی بستگی ۴

۱. ۲ شکافت هسته‌ای ٦

۱. ۳ همجوشی هسته‌ای ۷

۱. ۴ همجوشی خورشیدی ۹

۱. ۱.۴ واکنش گرما هسته ای ۱۰

۱. ۲.۴ زنجیره ی پروتون — پروتون ۱۰

۱. ۳.۴ چرخه ی کربن ۱۲

۱. ۵ ساختار همجوشی ۱۳

۱. ۱.۵ شرایط همجوشی هسته ای ۱۴

۱. ٦ آهنگ همجوشی هسته‌ای ۱۵

۱. ۷ روش های همجوشی ۱۷

۱. ۱.۷ همجوشی گرم ۱۷

۱. ۲.۷ همجوشی سرد ۱۷

۱. ۸ محصورسازی مغناطیسی ۱۷
۱. ۱.۸ آیینه‌های مغناطیسی ۱۹
۱. ۲.۸ رآکتورهای همجوشی مغناطیسی ۱۹

۱. ۹ تداوم انرژی (گیرانش) ۲۲
۱. ۱.۹ معیار لاوسون ۲۳

۱. ۱۰ رآکتورهای همجوشی لختی ۲۴

۱. ۱۱ همجوشی توسط کاتالیزور میونی ۲۶

۱. ۱۲ بحث و یادآوری ۲۶

۲ همجوشی از طریق کاتالیزور میونی ۳۰

۲. ۱ میون ۳۴
۲. ۱.۱ ویژگی های میون ۳۴
۲. ۲.۱ تولید میون ۳۴

۲. ۲ کند شدن میون ۳۵

۲. ۳ گیراندازی میون و تشکیل اتم میونی ۳۷
۲. ۱.۳ فرآیند های واانگیختگی ۳۹
۲. ۲.۳ انتقال میون ۴۲
۲. ۳.۳ حرارتی شدن اتم های میونی ۴۳

۲. ۴ تشکیل مولکول میونی ۴۵

۲. ۱.۴ تشکیل غیر رزونانسی ۴۶
۲. ۲.۴ تشکیل رزونانسی ۴۷

۲. ۵ انجام همجوشی ۴۹

۲. ٦ کسر چسبندگی و بازفعالسازی میون ۵۰
۲. ۱.٦ برهنه سازی ۵۰
۲. ۲.٦ محصور سازی ۵۲

۲. ۷ تداوم انرژی ۵۳

۳ نظریه‌ی پراکندگی و برخورد ٦۰

۳. ۱ انواع واکنش ٦۲

۳. ۲ معادله‌ی لیپمن – شوینگر ٦۳

۳. ۳ سطح مقطع دیفرانسیلی $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ٦۸

۳. ۴ دامنه‌ی پراکندگی ۷۱
۳. ۱.۴ تقریب بورن ۷۱
۳. ۲.۴ قضیه‌ی اپتیکی ۷۳
۳. ۳.۴ تحلیل پاره موجی ۷۵

۳. ۵ جابه جایی فاز ۸۳

۳. ٦ پراکندگی کشسان و ناکشسان ۸۵

۴ محاسبه‌ی سطح مقطع تشکیل اتم های میونی ۸۷

۴. ۱ تقریب دو حالته ۸۹

۴. ۲ انجام محاسبات سطح مقطع تشکیل اتم میونیوم ۱۰۱

۴. ۳ انجام محاسبات سطح مقطع تشکیل اتم $p\mu$ ،$d\mu$ و $t\mu$ ۱۱۰

بحث و نتیجه گیری ۱۱۶

پیوست ها ۱۲۶

پیوست ۱ ۱۲۷

پیوست ۲ ۱۳۳

پیوست ۳ ۱۳۹

منابع و مراجع ۱۴۲

فصل ۱

مقدمه ای بر همجوشی هسته ای

مقدمه

ماده و انرژی، مؤلفه های بنیادی دنیای فیزیکی ما هستند. این مؤلفه‌ها، خود را در شرایط فیزیکی مختلف، در انواع گوناگونی نشان می دهند. دیدگاه مشترک آن است که ماده وانرژی به گونه ای بسیار نزدیک به هم مرتبط هستند.

بشر از دیر باز به فکر تأمین انرژی بوده است. دریک نگاه کلی، می توان منابع انرژی را به دو دسته‌ی تجدید پذیر[۱] و تجدید ناپذیر[۲] تقسیم بندی نمود. منابع انرژی تجدید ناپذیر، تنها یکبار قابلیت مصرف دارند ومحدود هستند ، در نتیجه پس از مدتی به اتمام خواهند رسید. سوخت های فسیلی[۳] و سوخت های هسته‌ای[۴] از جمله ی این منابع محسوب می شوند. نفت و گاز طبیعی و زغال سنگ از جمله سوخت های فسیلی هستند که از منابع تأمین انرژی می باشند. در حقیقت انرژی شیمیایی ذخیره شده در آنها، هنگام سوختن اینگونه از مواد آزاد شده و به نور، گرما و انرژی مکانیکی تبدیل می گردد. مهمترین مشکل سوخت های فسیلی، آلوده کردن محیط زیست، ناشی از تولید گازهای گلخانه‌ای[۵] می باشد. در مقابل، منابع انرژی تجدید پذیر به آسانی به اتمام نمی رسند و معمولاً آلودگی به وجود نمی آورند. انرژی خورشیدی، انرژی باد، انرژی امواج دریا وانرژی هیدرولیک (برق آبی) از جمله ی این منابع هستند.

بحران نفت در سال ۱۹۷۳، تنگناهای بزرگی را در اقتصاد کشورهای پیشرفته ایجاد نمود و تا این کشورها خواستند خود را با این بحران سازگار کنند، انقلاب ایران در سال ۱۹۷۸، موجب افزایش دیگری در بهای نفت شد. این عوامل، زنگ خطر انرژی و مسئله ی انرژی را برای مردم دنیا به وجود آورد.

امروزه تأثیر تکنولوژی هسته‌ای در گسترش دانش بشری، تسلط بر طبیعت، تأمین رفاه و پیشرفت زندگی بشر غیر قابل تردید است. بدون شک کشورهای مختلف هر یک بر حسب توان خود به این تکنولوژی روی آورده اند و هر کشور بر اساس مقتضیات زمانی، مکانی و استراتژی، تکنیک خاصی را برای خود بر

---

[۱] Renewable

[۲] Inevitable

[۳] Fossil Fuel

[۴] Nuclear Fuel

[۵] Greenhouse Gases

می گزیند. انرژی هسته‌ای از عمده ترین مباحث علوم و تکنولوژی است و هم اکنون نقش عمده ای را در تأمین انرژی کشورهای مختلف ، خصوصاً کشورهای پیشرفته دارد. اهمیت انرژی ومنابع مختلف تهیه‌ی آن، در حال حاضر جزء رویکرد های اصلی دو لت ها قرار دارد. به عبارت بهتر از مسائل مهم هر کشوری در جهت توسعه‌ی اقتصادی و اجتماعی، بررسی، اصلاح و استفاده بهینه از منابع موجود انرژی در آن کشور است. امروزه بحران های سیاسی و اقتصادی و مسائلی نظیر محدودیت ذخائر فسیلی، نگرانی های زیست محیطی، ازدیاد جمعیت در قرن بیستم، رشد اقتصادی، تغییر در شیوه ی زندگی انسان ها، حتی بهره وری از ساعات فراغت، هر کدام، به گونه‌ای در افزایش مصرف انرژی سرانه که مکمل زندگی نوین و پیشرفته ی بشری است، تأثیر گذاشته است و امروزه دنیا باید اندیشه ی کهن انرژی ارزان وساده از نظر دستیابی را فراموش کرده و با علم به اینکه در آینده ی نه چندان دور، انرژی حادترین مشکل انسان ها خواهد بود، به دنبال جایگزین باشد. ما بر این باوریم که اینگونه منابع انرژی جدید، حتماً بدست می – آیند. اما مسلماً برای دستیابی به این هدف، تکنولوژی بسیار پیچیده‌ای لازم خواهد بود و گروه بسیاری از دانشمندان و مهندسان باید پژوهش گسترده‌ای انجام دهند و این کار نیازمند هزینه‌ی سنگینی خواهد بود.
شایستگی بسزای انرژی هسته ای در آن است که «گازهای گلخانه ای» تولید نمی کند. اگر هشدار جهانی در مورد انتشار گازهای گلخانه ای ادامه یابد، این ویژگی قدرت هسته‌ای می تواند به اهمیت اجباری تبدیل شود و در کشورهای پیشرفته، هیچ حرکت بارزی در استفاده از منابع انرژی غیر فسیلی[۶] مانند هیدروالکتریسیته، انرژی باد و انرژی خورشیدی صورت نگیرد [۱].
حدود سه قرن قبل از میلاد مسیح، دوموکریت[۷]، با مشاهده ی اشیا پیرامونش به این نتیجه رسید که این اجسام با وجود تفاوت های ظاهری از اجزای ریز غیر قابل تجزیه‌ی یکسانی تشکیل شده اند، که اتم نام دارد و در زبان یونانی نشکن[۸] نام گرفت. دو هزار سال بعد ، جان دالتون[۹]، به این نتیجه رسید که اتم هم قابل شکستن است. در سال ۱۹۱۱ ، رادرفورد[۱۰] ، با بمباران ورقه ی طلا توسط ذرات آلفا و مشاهده‌ی پراکندگی ذرات آلفا در حین کار، نظریه‌ی تامسون [۱۱] را که تنها نظریه‌ی قابل قبول در آن زمان بر مبنای مدل کیک کشمشی بود را رد نمود و این امر منجر به کشف هسته شد. در سال ۱۹۲۷، انیشتین[۱۲]، با ارائه‌ی رابطه‌ی $E = mc^2$ نشان داد که: «با شکافته شدن اتم انرژی عظیمی ایجاد می شود.»، پس از

[۶] Non-Fossil Fuel
[۷] Democritus
[۸] Atomos
[۹] John Dulton
[۱۰] Ratherford
[۱۱] Thomson
[۱۲] Anishtain

کشف نوترون توسط چادویک[۱۳]، در سال ۱۹۳۲، هان و اشتراسمن[۱۴]، دانشمندان آلمانی در سال ۱۹۳۹، متوجه شدند که هسته‌ی اورانیوم توسط نوترون قابل شکافتن است. در سال ۱۹۶۷، هانس آلبرخت بیته[۱۵]، دانشمند آلمانی موفق به دریافت جایزه نوبل تئوری تولید انرژی در ستارگان شد. در سال ۱۹۸۶، روسیه و آمریکا طرح ایتر[۱۶] را که اساس آن همجوشی گرم، از طریق اعمال میدان مغناطیسی بود، مطرح نمودند. در سال ۱۹۸۹، تحقیقات ایالات متحده و انگلستان به مطرح شدن طرح همجوشی سرد در دمای اتاق) انجامید[۲] .

۱.۱ انرژی هسته‌ای

انرژی بدست آمده از فعل و انفعالات هسته‌ای را انرژی هسته ای می نامند. این انرژی می تواند از دو منشأ سرچشمه بگیرد، یکی شکافت هسته‌ی اتم های سنگین و دیگری همجوشی یا گداخت هسته‌ی اتم های سبک، که بر اساس منحنی انرژی بستگی متوسط هر نوکلئون قابل توضیح می باشد. انرژی بستگی $\mathbf{B}$ یک هسته عبارت است از اختلاف انرژی بین جرم هسته‌ی ${}^{\mathbf{A}}_{\mathbf{Z}}\mathbf{X}_{\mathbf{N}}$ و جرم کل پروتون ها($\mathbf{Z}$ پروتون) و نوترون های تشکیل دهنده ی آن ($\mathbf{N}$ نوترون)، که به صورت زیر نوشته می شوند:

$$B(Z,N) = (Zm_p + Nm_n - [m({}^{A}X) - Zm_e])\, c^{۲}. \qquad (۱.۱)$$

که در آن، $\mathbf{m_p}$ جرم پروتون، $\mathbf{m_n}$ جرم نوترون، $m({}^{A}X)$ جرم اتم و $\mathbf{A}$ عدد جرمی هسته است. در این رابطه از انرژی بستگی الکترون های اتمی صرف نظر شده است[۲] .

۱.۱.۱ منحنی انرژی بستگی

انرژی بستگی هسته ها کم وبیش به طور خطی بر حسب $\mathbf{A}$ افزایش می یابد، عموماً در عمل، انرژی بستگی متوسط هر نوکلئون، یعنی $\frac{\mathbf{B}}{\mathbf{A}}$ را، به صورت تابعی از $\mathbf{A}$ نشان می دهند. در شکل (۱.۱) تغییرات $\frac{\mathbf{B}}{\mathbf{A}}$ را بر حسب عدد نوکلئونی نشان داده شده است. در این شکل، چند ویژگی مهم مربوط به هسته ها جلب توجه می کند. نخست اینکه منحنی جز در ناحیه هسته‌های بسیار سبک، مقدار نسبتاً ثابتی را نشان می دهد. انرژی بستگی متوسط بسیاری از هسته ها، در حدود $۸\ MeV$ برای هر نوکلئون است. دوم اینکه منحنی در نزدیکی $\mathbf{A} = ۵۶$ یعنی برای هسته‌ی آهن $({}^{۵۶}_{۲۶}Fe)$ قله پهنی دارد و در همین ناحیه است که

---

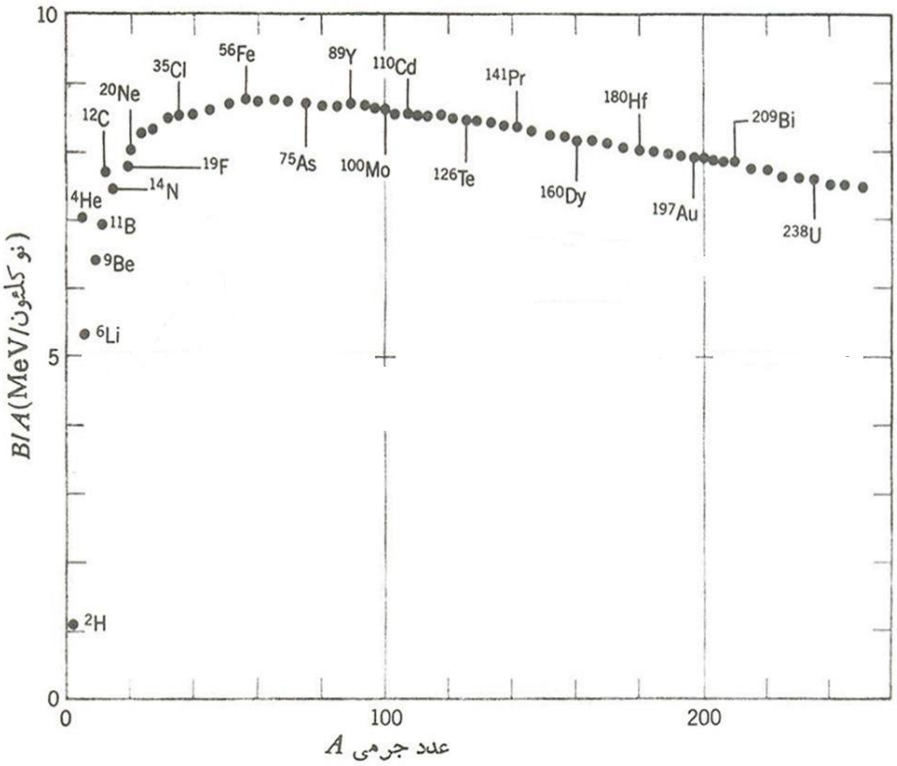
[۱۳] Chadwick

[۱۴] Hahn and strassmann

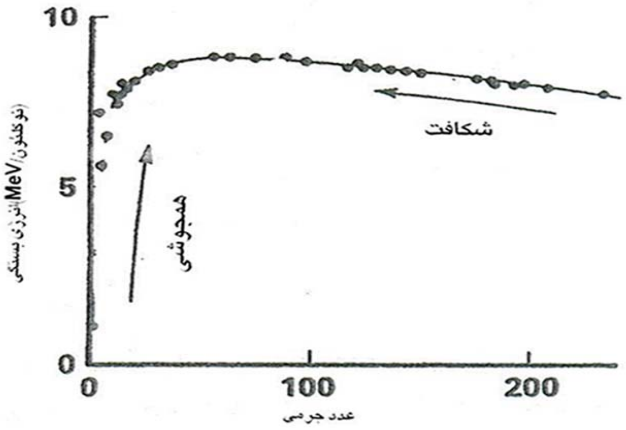
[۱۵] H.A.Bethe

[۱۶] International Thermonuclear Exprimental Reactor(ITER)

بستگی هسته‌ای به حداکثر می رسد. انرژی پتانسیل هسته ای می تواند به صورت انرژی جنبشی در آید و در اثر شکستن هسته های سنگینتر به هسته های سبکتر و یا از طریق ترکیب هسته های سبک و تشکیل هسته های سنگینتر، تولید انرژی کند. در هر دو صورت باید از منحنی انرژی بستگی بالا رفت، که این امر به آزادسازی انرژی هسته ای منجر می شود. در نتیجه برای هسته هایی با عدد جرمی کمتر از ٥٦، همجوشی هسته ای و برای هسته های با عدد جرمی بیشتر از ٥٦، شکافت هسته‌ای رخ می دهد [٢].



شکل (١.١): انرژی بستگی هر نوکلئون در هسته [٢].



شکل (٢.١): منحنی انرژی بستگی [١].

۲.۱ شکافت هسته‌ای

شکافت عمدتاً در اثر رقابت بین نیروهای هسته‌ای و کولنی در هسته‌های سنگین حاصل می شود. انرژی بستگی هسته‌ای کل، تقریباً با عدد جرمی (A) به طور خطی افزایش می یابد، در حالیکه انرژی دافعه کولنی پروتون ها، متناسب با مجذور عدد اتمی (Z^2) افزایش می یابد.

شکافت می تواند خود به خود به عنوان یک فرآیند واپاشی طبیعی روی دهد، یا می تواند از طریق جذب یک ذره‌ی با انرژی نسبتاً کم، نظیر یک فوتون یا نوترون ایجاد شود. این ذرات حالت های برانگیخته یاحالت های هسته‌ای مرکبی[۱۷] را ایجاد می کنند، که از نظر انرژی در حدی هستند که می توانند بر سد کولنی فائق آیند تا با سهولت بیشتری به سد نفوذ کنند [۲].

از نظر انرژی، آمادگی هسته ها به شکافته شدن را می توان فوراً با توجه به انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون درک نمود. یک هسته‌ی سنگین واقع در ناحیه‌ی اورانیوم دارای انرژی بستگی حدود ۷٫۶ MeV به ازای هر نوکلئون است. هرگاه اورانیوم ۲۳۸ ($^{238}_{92}U$) به دو پاره‌ی مساوی با عدد جرمی (۱۱۹) تقسیم شود، انرژی بستگی آنها در حدود ۸٫۵ MeV می شود. حرکت به سوی یک سیستم به شدت مقیدتر بدان معنی است که با آزاد سازی انرژی سروکار داریم. یعنی انرژی از مقدار متناظر به هسته‌ی مقید اورانیوم ($^{238}_{92}U$) که برابر($-۲۳۸\times ۷٫۶ = -۱۸۰۹\ MeV$) است، به مقدارمتناظر به دو هسته‌ی مقید پالادیوم ($^{119}_{46}Pa$)که برابر ($-۲ \times ۱۱۹\times ۸٫۵ = -۲۰۲۳\ MeV$) است، تغییر می کند. برای برقراری پایستگی انرژی، حالت نهایی باید شامل یک انرژی اضافی به میزان (۲۱۴ MeV) باشد که می تواند در شکل های مختلفی ظاهر شود، (گسیل ذرات نوترون ، بتا و گاما از پاره ها)، ولی بخش عمده‌ی آن (تقریباً ۸۰ درصد) به صورت انرژی جنبشی پاره های حاصل از شکافت ظاهر می شود، زیرا دافعه‌ی کولنی آنها را از یکدیگر دور می سازد[۲].

به هر حال، شکافت هسته‌ی سنگین به دو هسته ی سبکتر، با آزادسازی مقادیر زیادی انرژی همراه است و این فرآیند تنها در هسته های سنگینی چون اورانیوم و پلوتونیوم اتفاق می افتد. از میان ایزوتوپ های اورانیوم و پلوتونیوم نیز $^{235}_{92}U$ و $^{239}_{94}Pu$ و $^{241}_{94}Pu$ قابلیت شکافت را دارند و خود شکننده هستند. برای ایجاد شکافت مناسب، باید واکنش هسته‌ای به صورت زنجیروار و پیوسته انجام گیرد وگرنه نتیجه‌ی مطلوب حاصل نخواهد شد.

در یک واکنش زنجیره ای هسته‌ای، ابتدا یک نوترون باانرژی مشخص و سرعت مورد نظر به هسته‌ی شکافت پذیر $^{235}_{92}U$ برخورد می کند. نتیجه‌ی این بر همکنش، نفوذ نوترون به داخل هسته بوده و با برهم خوردن توازن نیروهای جاذبه و دافعه ، هسته‌ی سنگین به دو هسته شکسته شده و همراه آن مقادیر زیادی

[۱۷] Compound Nucleus

انرژی و چندین نوترون سریع آزاد می گردد.
متوسط تعداد نوترون های تولید شده در شکافت $^{235}_{92}U$ حدود ۲/۵ نوترون و در شکافت $^{239}_{94}Pu$ این تعداد حدود ۳ نوترون است.

$$^{235}_{92}U + n \longrightarrow {}^{236}_{92}U^* \longrightarrow {}^{93}_{37}Rb + {}^{141}_{55}Cs + 2n + 181MeV. \qquad (2.1)$$

هر کدام از این نوترون ها با برخورد به هسته های دیگر موجب آزاد شدن انرژی و چندین نوترون دیگر خواهند شد. چنانچه شرایط مهیا باشد، این واکنش به طور زنجیره‌ای ادامه می یابد، تا زمانیکه به عللی از جمله کاهش جرم ماده‌ی شکافت پذیر، واکنش متوقف گردد.
تعداد نوترون های ناشی از واکنش شکافت را اصطلاحاً تحت عنوان «ضریب تکثیر» می شناسند و با K نمایش می دهند. چنانچه $K > 1$ باشد، سیستم فوق بحرانی خواهد بود و تکثیر نوترون ها و آزاد شدن انرژی با سرعتی بیش از حد تصور ادامه می یابد و این همان فرآیندی است که در سلاح های هسته‌ای روی می دهد. چنانچه $K = 1$ باشد، سیستم را بحرانی می نامند. به عبارت بهتر به ازای هر نوترونی که به هر دلیل در سیستم مصرف و یا از آن خارج می گردد، یک نوترون در نتیجه‌ی شکافت تولید می شود. در نهایت اگر $K < 1$ باشد، سیستم را زیر بحرانی می نامند. در این سیستم تولید نوترون ها در مجموع رو به کاهش رفته و نهایتاً فعل و انفعالات هسته‌ای در سیستم متوقف می گردد [۲] .
به طور کلی در مورد نحوه ی آزاد شدن انرژی هسته‌ای باید گفت که، هسته از پروتون با بار مثبت و نوترون بدون بار الکتریکی تشکیل شده است، بنابراین بار الکتریکی هسته مثبت است. اگر بتوان هسته را به طریقی به دو تکه تقسیم کرد، تکه ها در اثر نیروی دافعه‌ی الکتریکی، خیلی سریع از هم فاصله‌گرفته و انرژی جنبشی فوق العاده‌ای بدست می آورند. در کنار این پاره های شکافت، ذرات دیگری مثل نوترون و اشعه‌ی گاما و بتا نیز تولید می شوند. انرژی جنبشی پاره ها و انرژی ذرات و پرتوهای به وجود آمده، در اثر برهمکنش ذرات با مواد اطراف، سرانجام به انرژی گرمایی تبدیل می شود. به طور مثال در واکنش هسته‌ای که طی آن $^{235}_{92}U$ به دو پاره‌ی شکافت تبدیل می شود، انرژی کل معادل با $200MeV$ آزاد می گردد . این مقدار انرژی می تواند در حدود ۲۰ میلیارد کیلوکالری گرما را در ازای هر کیلوگرم سوخت تولید کند. این مقدار گرما ۲۸۰۰ هزار مرتبه بزرگتر از حدود ۷۰۰۰ کیلو کالری گرمایی است که از سوختن یک کیلو گرم زغال سنگ حاصل می شود.

۳.۱ همجوشی هسته‌ای

منحنی انرژی بستگی، روش دیگری از استخراج انرژی هسته‌ای را نشان می دهد، که همجوشی نام دارد. همجوشی یا گداخت هسته‌ای را می توان به عنوان فرآیند عکس شکافت هسته‌ای قلمداد کرد. بدین معنی

که، به جای حرکت از هسته‌های خیلی سنگین مثل مورد شکافت، می توان با شروع از هسته های خیلی سبک از منحنی انرژی بستگی بالا رفت و به طرف هسته‌های پایدار نزدیک شد. به طور کلی همجوشی هسته‌ای، ترکیب دو یا چند هسته‌ی سبک (با عدد جرمی کمتر از ۵۶)، با انرژی بستگی کمتر و تولید هسته‌ای سنگینتر با انرژی بستگی بیشتر است، که این فرآیند با آزاد سازی انرژی همراه است و این انرژی به صورت انرژی جنبشی محصولات حاصل از همجوشی ظاهر می گردد [۲] .

فرآیند همجوشی از نقطه نظر تولید انرژی دارای چند مزیت واضح نسبت به فرآیند شکافت است:

هسته‌های سبک، فراوان و به آسانی قابل حصول هستند و محصولات نهایی همجوشی معمولاً هسته‌های سبک پایدارند. از طرف دیگر، همجوشی هسته‌ای از ایمنی بیشتری نسبت به شکافت هسته‌ای برخوردار است، زیرا مقادیر سوختی که در رآکتور گداخت استفاده می شود، در مقایسه با مقادیر سوخت در رآکتورهای شکافت ناچیز است، به همین دلیل آزاد شدن غیر قابل کنترل انرژی اتفاق نخواهد افتاد. اکثر رآکتورهای گداخت تابش اشعه‌ی کمتری از تابش محیط زندگی روزمره‌ی ما دارند. از همه‌ی موارد فوق مهمتر این است که رآکتورهای گداخت، زباله های هسته‌ای قوی مانند آنچه که در رآکتورهای شکافت وجود دارد، تولید نمی کنند. با این حال، یک اشکال قابل توجه همجوشی آن است که هسته از ذرات ریزی تشکیل شده است که پروتون ها و نوترون ها اجزاء لاینفک آن هستند. نو ترون بدون بار است و پروتون با بار مثبت سایر بارهای مثبت را از خود می راند. در نتیجه هسته‌های سبک قبل از اینکه بتوانند با یکدیگر ترکیب شوند، باید بر دافعه‌ی کولنی متقابل غلبه کنند[۱] .

همجوشی دو هسته $^{20}_{10}Ne$ را برای تشکیل $^{40}_{20}Ca$ در نظر می گیریم. مقدارQ حاصل از واکنش در حدود $20/7\ MeV$ یا حدود $0/5\ MeV$ به ازای هر نوکلئون است، که قابل مقایسه با انرژی آزاد شده در شکافت است، زیرا در یک واکنش شکافت هسته‌ای نوعی به طور متوسط $200\ MeV$ انرژی آزاد می‌شود که در حدود $1MeV$ به ازای هر نوکلئون است. اما قبل از اینکه نیرو های هسته‌ای، دو هسته‌ی $^{20}_{10}Ne$ بتوانند برهمکنش انجام دهند، باید آنها را به قدر کافی به یکدیگر نزدیک کنیم تا توزیع هسته ای آنها شروع به همپوشی کنند. در نقطه‌ای که سطوح هسته ها در تماس با یکدیگر قرار می گیرند، دافعه‌ی کولنی مساوی $21/2\ MeV$ می باشد. اگر می توانست واکنش هسته‌ای را طوری انجام داد که در آن دو هسته‌ی $^{20}_{10}Ne$ با انرژی جنبشی کل $21/2\ MeV$ به یکدیگر نزدیک شوند، انرژی نهایی سیستم مساوی $41/9\ MeV$ می شود که معرف انرژی جنبشی $21/2\ MeV$ اولیه به علاوه‌ی انرژی $20/7\ MeV$ آزاد شده طی واکنش (Q) است. بنابراین بهره‌ی انرژی، ضریب دو است، یعنی با صرف $21\ MeV$ انرژی، $42\ MeV$ انرژی حاصل می شود[۲] .

به طورکلی می توان گفت که طبق قانون کولن، نیروی کولنی به طور مستقیم با حاصل ضرب بارها متناسب است، پس اگر هسته‌های واکنش کننده در فرآیند همجوشی‌سبکتر باشند، سد کولنی آنها کمتر

است و غلبه براین سد آسانتر صورت می گیرد. با این اوصاف هسته ی اتم هیدروژن و ایزوتوپ های هیدروژن، که دارای عدد اتمی واحد هستند، برای انجام همجوشی مناسب تر هستند[۱] .

ایزوتوپ های هیدروژن شامل هیدروژن سبک ${}^{1}_{1}H$ ، دوتریم ${}^{2}_{1}H$ و تریتیوم ${}^{3}_{1}H$ می باشند. هیدروژن سبک، ایزوتوپ هیدروژن است که دارای یک پروتون است و نوترون ندارد. این ایزوتوپ رایج ترین شکل هیدروژن است. دوتریم ایزوتوپ هیدروژن است که دارای یک پروتون و یک نوترون است، که با علامت D نمایش داده می شود. هسته‌ی آن دوترون نام دارد که با علامت d نمایش داده می شود. این عنصر پرتوزا نیست و از آب دریا قابل استخراج است. تریتیوم، ایزوتوپ هیدروژن است که دارای یک پروتون و دو نوترون است، که با علامت اختصاری T نمایش داده می شود. هسته‌ی آن تریتون نام دارد که با علامت t نمایش داده می شود. تریتیوم پرتوزا است و نیمه عمر آن در حدود ۱۲ سال است. این اتم کمتر به شکل طبیعی وجود دارد، به طوریکه موجودی تریتیوم در اقیانوس های جهان و در اتمسفر در حال تعادل نزدیک به ۲۰ کیلوگرم است، اما با بمباران لیتیوم توسط نوترون قابل تولید است:

$$n + {}^{6}_{3}Li \longrightarrow t + \alpha + ۴.۷۸MeV, \quad \text{(حرارتی)} \tag{۳.۱}$$

$$n + {}^{7}_{3}Li \longrightarrow t + \alpha + n - ۲.۴۷MeV, \quad \text{(سریع)} \tag{۴.۱}$$

که وکنش اول گرمازا و واکنش دوم گرماگیر است. ${}^{6}Li$ و ${}^{7}Li$، ایزوتوپ های پایدار لیتیوم در طبیعت هستند که درصد فراوانی آنها به ترتیب ۷/۵ درصد و ۹۲/۵ درصد می باشد. α هسته‌ی اتم هلیم (${}^{4}_{2}He$) است [۱].

از واکنش های رایج همجوشی می توان به موارد زیر اشاره نمود:

$$d + d \longrightarrow \begin{cases} p + t + ۴.۱MeV \\ n + h + ۳.۲MeV \end{cases}, \tag{۵.۱}$$

$$d + h \longrightarrow n + \alpha + ۱۸.۳MeV, \tag{۶.۱}$$

$$d + t \longrightarrow n + \alpha + ۱۷.۶MeV, \tag{۷.۱}$$

که h، هسته‌ی ${}^{3}_{2}He$ است، که دارای دو پروتون و یک نوترون است[۱] .

۱. ۴ همجوشی خورشیدی

نوعی از واکنش های هسته‌ای که در طبیعت شاهد رویداد آن هستیم و سال هاست که متخصصان هسته‌ای را در جهان در گیر خود ساخته است، واکنش های همجوشی هستند و حیات ناشی از اینگونه واکنش های هسته‌ای است که در خورشید و ستارگان به طور طبیعی در حال انجام است. منشاء انرژی