

رسالة محمد

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 رشته فیزیک  
گرایش هسته‌ای

**عنوان پایان نامه:**

**بررسی آهنگ چرخه همجوشی هسته‌ای در همجوشی از طریق کانالیزور میونی با  
استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری به روش مونت کارلو**

استاد راهنما:

خانم دکتر بیتا رضایی

نگارش:

جواد کمندی

اسفند ماه ۱۳۹۲



دانشگاه رازی  
دانشکده علوم  
گروه فیزیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک  
گرایش هسته‌ای

نام دانشجو  
جواد کمندی

تحت عنوان

**بررسی آهنگ چرخه همجوشی هسته ای در همجوشی از طریق کاتالیزور میونی با  
استفاده از شبیه سازی کامپیوتری به روش مونت کارلو**

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۲/۱۳ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنما خانم دکتر بیتا رضایی با مرتبه ی علمی دانشیار امضاء

۲- استاد داور داخل گروه فیزیک دکتر غلامرضا برون با مرتبه ی علمی دانشیار امضاء

۳- استاد داور داخل گروه فیزیک دکتر داریوش نادری با مرتبه ی علمی استادیار امضاء

## چکیده

آهنگ همجوشی هسته‌ای یکی از مهمترین فاکتورهای مورد مطالعه در فرایند همجوشی هسته‌ای از طریق کاتالیزور میونی است. از اینرو هدف از نگارش این پایان نامه، شبیه‌سازی کامپیوتری این فرآیند همجوشی با یکی از قابل اعتمادترین روشهای مختلف شبیه‌سازیهای فیزیکی، یعنی روش مونت کارلو متروپلیس، می‌باشد. تا بتوان توصیف صحیحی از این فرایند، از نظر عددی بدست آورد. بعد از بدست آوردن یک چنین اندوخته‌ای از اعداد می‌توان رفتار آهنگ چرخه‌ی همجوشی را در ازای تغییرات المان‌های درگیر در این فرایند را مشاهده کرد. که در این پایان نامه المان کسر غلظت مواد تشکیل دهنده‌ی محیط همجوشی که ترکیبی از دوتریم و تریتیوم است به عنوان متغیر مساله در نظر گرفته شد. سپس کسر غلظتی را که در ازای آن بالاترین نرخ همجوشی را داشتیم انتخاب شد و کد شبیه‌ساز به ازای این مقدار کسر غلظت اجرا شد و آهنگ چرخه‌ی همجوشی گزارش شد. طبق گفته‌های فوق مقدار بهینه برای کسر غلظت تریتیوم  $Ct = 40\%$  بدست آمد که به ازای این مقدار، بازده کاتالیزور میونی عدد ۱۳۸ بدست آمد. در موازات این محاسبات ضریب چسبندگی کل و طیف انرژی حاصل از همجوشی گزارش شده است. لازم به ذکر است که میزان خطای نسبی در هر گام محاسبه و نهایتاً در یک نمودار گزارش شد. در هر یک از مراحل مختلف نحوه‌ی رفتار مجهولات مساله در شکل‌های مجزا به همراه خطای نسبی آنها گزارش شده است.

در ادامه این روش می‌توان بصورت دقیق طیف محصولات حاصل از همجوشی را بدست آورد.

## فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

### فصل اول : همجوشی از طریق کاتالیزور میونی

۱-۱-۱	میون	۵
۱-۱-۱-۱	ویژگی های میون	۵
۲-۱-۱	تولید میون	۶
۲-۱	کند شدن میون	۷
۳-۱	گیراندازی میون و تشکیل اتم میونی	۹
۱-۳-۱	فرآیندهای وا انگیختگی	۱۱
۲-۳-۱	انتقال میون	۱۵
۳-۳-۱	حرارتی شدن اتم میونی	۱۵
۴-۱	تشکیل مولکول میونی	۱۷
۱-۴-۱	تشکیل غیر رزونانسی	۱۸
۲-۴-۱	تشکیل رزونانسی	۱۹
۵-۱	انجام همجوشی	۲۱
۱-۵-۱	کسر چسبندگی و باز فعالسازی میون	۲۲
۲-۵-۱	برهنه سازی	۲۲
۳-۵-۱	محصور سازی	۲۳
۶-۱	تداوم انرژی	۲۵

### فصل دوم : شبیه سازیهای مونت کارلو

۱-۲	مقدمه	۳۲
۲-۲	انتگرال گیری مونت کارلو	۳۶
۱-۲-۲	روش برخورد و خطا	۳۶
۲-۲-۲	انتگرال گیری به روش میانگین نمونه	۳۷
۳-۲	محاسبه ی خواص ترمودینامیکی با استفاده از انتگرال گیری مونت کارلو	۳۹
۱-۳-۲	نمونه برداری ساده	۳۹
۲-۳-۲	نمونه برداری با اهمیت	۴۰
۳-۳-۲	الگوریتم متروپولیس	۴۲

### فصل سوم : شبیه سازی فرآیند همجوشی کاتالیزور میونی به روش مونت کارلو

۱-۳	مقدمه	۴۹
۲-۳	کمی کردن مدل فیزیکی	۴۹
۱-۲-۳	شبیه سازی مولد میونی و محیط همجوشی	۴۹

۴۹.....	۲-۲-۳- شبیه سازی اتم میو.....
۵۲.....	۳-۲-۳- تعیین نوع ذره‌ی هدف .....
۵۲.....	۴-۲-۳- تعیین نوع برهمکنش .....
۵۳.....	۵-۲-۳- فرآخوانی اطلاعات انتخاب شده‌ی خروجی .....
۵۴.....	۳-۳- نمونه‌ی کد شبیه سازی $\mu CF$ .....

### فصل چهارم : پردازش داده و تحلیل فیزیکی آنها

۵۶.....	۱-۴- اجرای برنامه .....
۵۷.....	۲-۴- اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی .....
۵۷.....	۱-۲-۴- اندازه‌گیری آهنگ چرخه .....
۶۲.....	۲-۲-۴- اندازه‌گیری مقدار ضریب چسبندگی کل .....
۶۴.....	۳-۲-۴- تعیین طیف محصولات همجوشی .....
۶۵.....	۳-۴- اجرای برنامه دوم و گزارش مسیر وقایع به ازای نقطه بهینه .....
۶۶.....	۱-۳-۴- بازده کاتالیزور میونی .....
۶۶.....	۴-۴- محاسبه خطاهای اندازه‌گیری .....
۶۶.....	۱-۴-۴- خطای مطلق .....
۶۷.....	۲-۴-۴- خطای نسبی .....
۶۸.....	۳-۴-۴- محاسبه‌ی خطای شبیه سازی .....
۷۰.....	بحث و نتیجه‌گیری .....
۷۲.....	مسیر وقایع .....
۷۴.....	پیوست ها .....
۹۱.....	منابع .....

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۳.....	شکل (۱-۱).....
۴.....	شکل (۲-۱).....
۵.....	شکل (۳-۱).....
۹.....	شکل (۴-۱).....
۱۰.....	شکل (۵-۱).....
۱۳.....	شکل (۶-۱).....
۱۹.....	شکل (۷-۱).....
۲۰.....	شکل (۸-۱).....
۲۰.....	شکل (۹-۱).....
۲۳.....	شکل (۱۰-۱).....
۲۵.....	شکل (۱۱-۱).....
۲۸.....	شکل (۱۲-۱).....
۳۳.....	شکل (۱-۲).....
۳۵.....	شکل (۲-۲).....
۳۶.....	شکل (۳-۲).....
۳۸.....	شکل (۴-۲).....
۴۴.....	شکل (۵-۲).....
۵۹.....	شکل (۱-۴).....
۶۰.....	شکل (۲-۴).....
۶۱.....	شکل (۳-۴).....
۶۳.....	شکل (۴-۴).....
۶۳.....	شکل (۵-۴).....
۶۴.....	شکل (۶-۴).....
۶۵.....	شکل (۷-۴).....
۶۸.....	شکل (۸-۴).....
۶۹.....	شکل (۹-۴).....
۷۶.....	شکل (۱۰-۴).....



## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۸.....	جدول (۱-۱)
۲۴.....	جدول (۲-۱)
۲۹.....	جدول (۳-۱)
۶۶.....	جدول (۱-۴)

# فصل اول

همجوشی از طریق کاتالیزور میونی

## مقدمه

همجوشی از طریق کاتالیزور میونی ( $\mu\text{CF}$ )<sup>۱</sup>، یکی از انواع راه‌های شناخته شده‌ی همجوشی می‌باشد که در دماهای پایین روی می‌دهد و اصطلاحاً همجوشی سرد نامیده می‌شود. همانطور که می‌دانیم نیروی دافعه‌ی کولنی میان هسته‌های ایزوتوپ‌های هیدروژن، از واکنش همجوشی میان آنها، جلوگیری می‌کند. یک پیشنهاد برای غلبه به این نیروی دافعه‌ی کولنی، همجوشی گرما هسته‌ای از راه فشردگی و محصورسازی مغناطیسی و لیزری (لختی) می‌باشد، که این روش‌ها با سه فرآیند پیایی و منظم یونیزاسیون، گرم کردن سوخت و فشردگی همراه هستند و در دماهای فوق العاده بالا نزدیک به  $10^8$  کلوین روی می‌دهند. از این رو در این روش‌ها، مشکلاتی در چیره شدن به موانع بزرگ و جدی متعددی وجود دارد. به علت وجود ناپایداری‌های متعدد، محصورسازی سوخت همجوشی که به حالت پلازما درآمده است بسیار مشکل است. نگهداری همزمان دمای بالا و همچنین فشردگی طولانی سوخت از دشوارترین مراحل اینگونه از روش‌های همجوشی است.

امروزه امکان دسترسی به همجوشی سرد با استفاده از ذره‌ای به نام میون مستند شده است. در این روش میون با بار منفی، نقش کاتالیزور را ایفا می‌کند. به همین دلیل، کاتالیز واکنش‌های هسته‌ای با میون‌های منفی در مخلوط سرد دوتریم \_ تریتوم با عنوان همجوشی از طریق کاتالیزور میونی، شناخته شده است که به اختصار  $\mu\text{CF}$  نامیده می‌شود. این روش از برتری‌های متعددی نسبت به روش‌های همجوشی گرما هسته‌ای برخوردار است. این برتری‌ها را می‌توان در مواردی مانند محصورسازی آسان سوخت حالت پایه، دمای عملکرد پایین در حدود چند درجه‌ی سانتیگراد (دمای اتاق) و چگالی بالای سوخت هیدروژن مایع در حدود  $10^{28} \times$  ۴/۲۲ اتم در متر مکعب خلاصه نمود [۱].

ایده‌ی همجوشی از طریق کاتالیزور میونی، ابتدا در سال ۱۹۴۷، توسط فرانک<sup>۲</sup> پیشنهاد شد. در این راستا، وی سعی داشت تا وجود پرتوهای کیهانی در امولسیون نوری<sup>۳</sup> ظاهر شده در ارتفاع بالا را توضیح دهد. اگر چه توضیح‌های او درست نبود، (زیرا مسیرها و ردها در واقع میون‌های مثبت بودند که از واپاشی پایون‌های در حال سکون تولید شده بودند)، ساخارو<sup>۴</sup> در همان سال به بحث کاتالیز میونی علاقه‌مند شد و مقاله‌ای تحت عنوان «میون‌های کنش پذیر»<sup>۵</sup> منتشر نمود. در آن روزها که همجوشی گرما هسته‌ای مورد توجه قرار داشت،

<sup>1</sup> Muon Catalyzed Fusion

<sup>2</sup> C.Frank

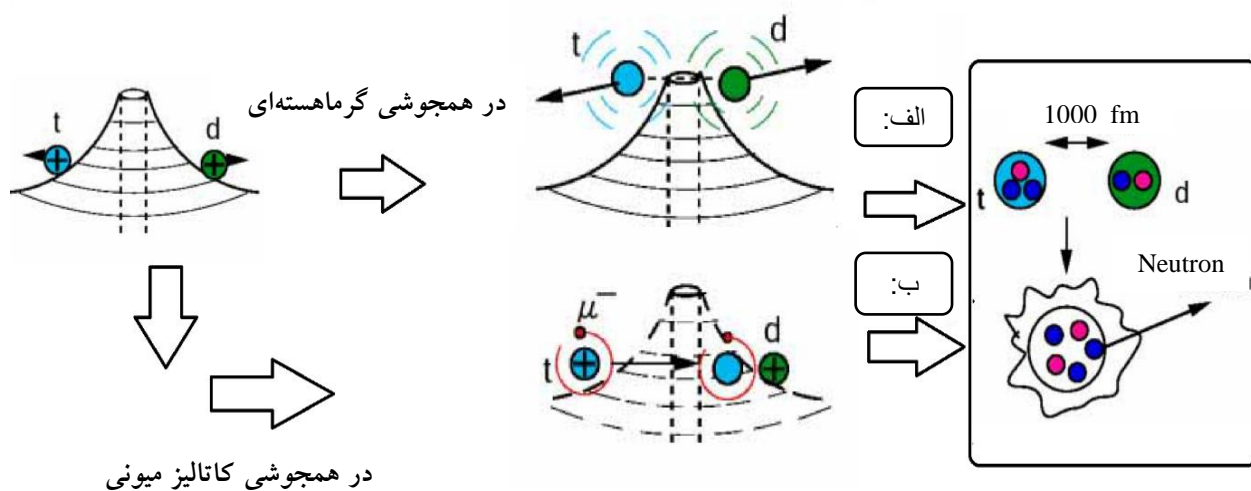
<sup>3</sup> Photoemulsions

<sup>4</sup> A.D.Skharov

<sup>5</sup> Passive Muons

وی رهیافت اساسی کاتالیز میونی را تشخیص داد. ساختار و این هدف اساسی را با عنوان «تشکیل مولکول‌های شدیداً مقید که القاکننده‌ی همجوشی توسط اثر کوانتومی تونل زنی هستند»، ارائه نمود. در شکل (۱-۱) اصول دو راه ممکن همجوشی، بر حسب دیوارهای پتانسیل و سد پتانسیل کولنی، نشان داده شده است:

الف) در حالت همجوشی گرم، به انرژی برخوردی حداقل  $10\text{KeV}$  (معادل با دمایی بیشتر از ۱۰۰ میلیون درجه‌ی کلوین) نیاز است، تا آهنگ همجوشی قابل ملاحظه‌ای در محیط آزمایشگاه در دسترس قرار بگیرد. ب) در حالت همجوشی سرد از طریق کاتالیزور میونی ( $\mu\text{CF}$ )، انرژی‌های خیلی ضعیف در بازه‌ی دمایی نزدیک صفر کلوین تا ۱۰ هزار درجه کلوین لازم است. نکته‌ی اساسی آن است که حالات مقید پایا (مولکول‌های میونی)، با یک میون و دو هسته تشکیل می‌شوند، که با فاصله‌ای در حدود دو برابر شعاع بوهر ( $\sim 500\text{ fm}$ ) جدا شده‌اند [۲].

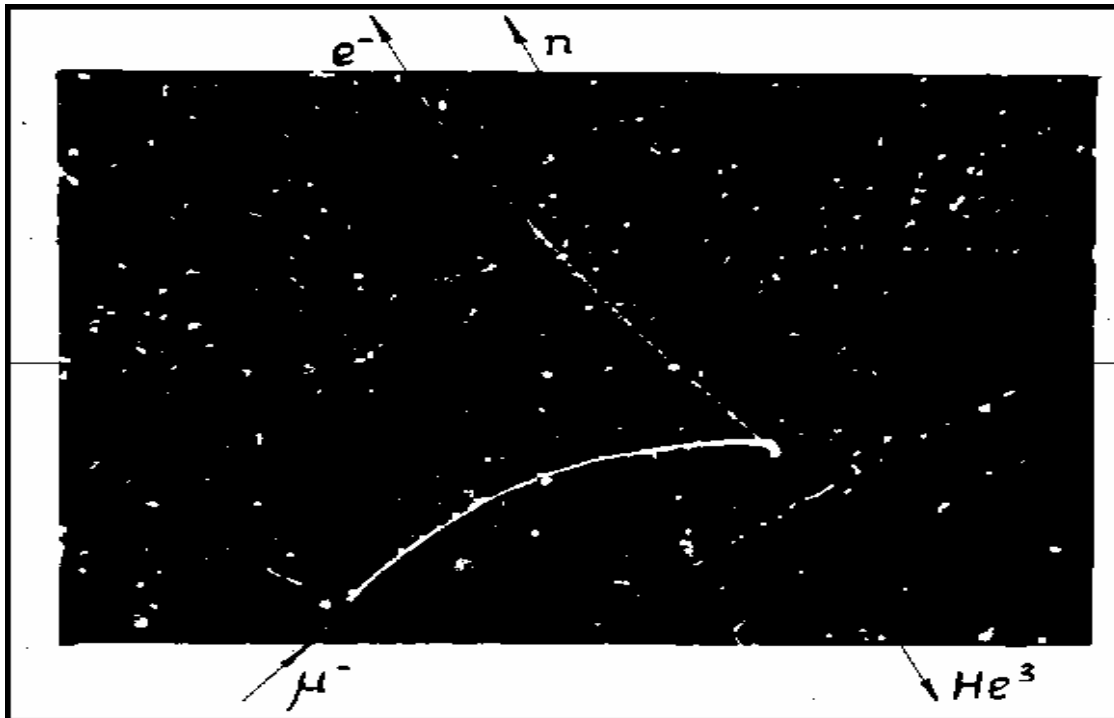


شکل (۱-۱): دو روش همجوشی هسته‌ای توسط نفوذ به سد کولنی.

آلوارز<sup>۱</sup>، در اواخر سال ۱۹۵۶، در برکلی<sup>۲</sup>، با مشاهده‌ی تصاویر اتاقک حباب، به صورت تجربی  $\mu\text{CF}$  را کشف کرد.

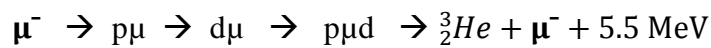
<sup>1</sup> L.W.Alvarez

<sup>2</sup> Berkeley



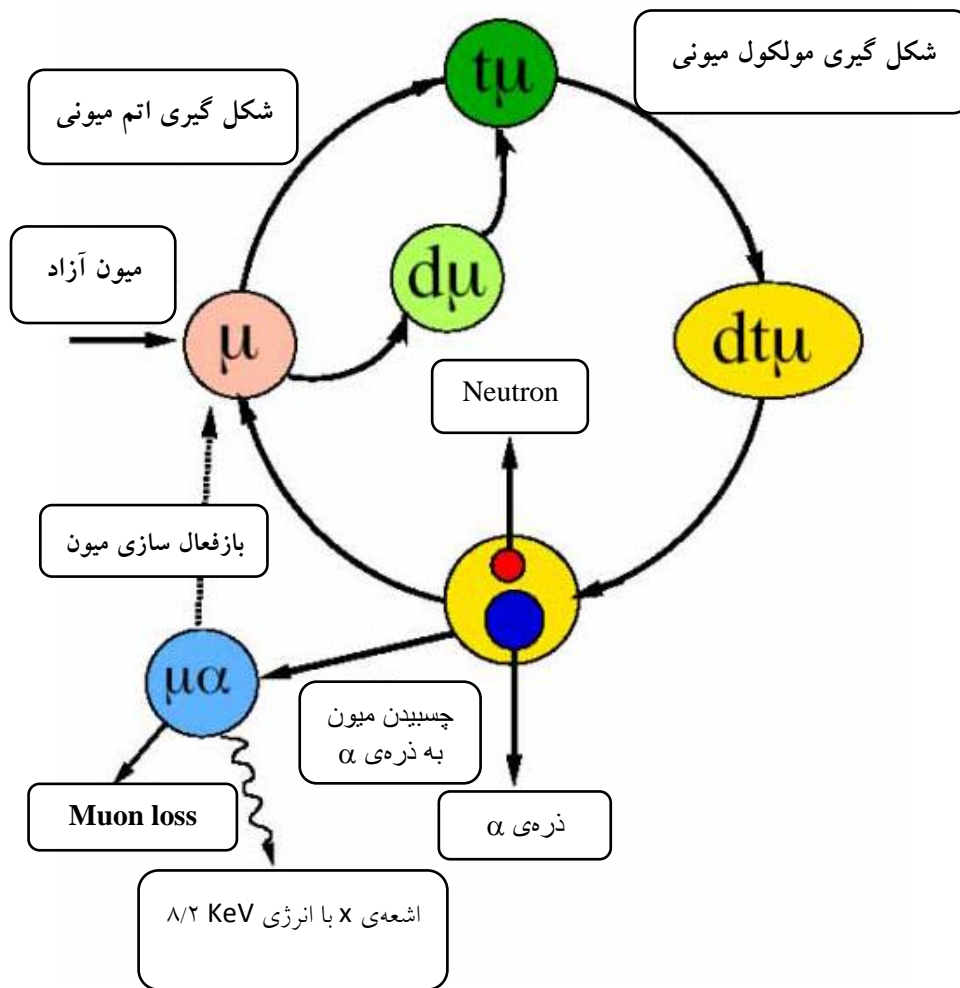
شکل (۱-۲): تصویری از کشف تجربی  $\mu\text{CF}$  توسط آلوارز [۳].

این گروه از دانشمندان زنجیره‌ی واکنش‌های  $\mu\text{CF}$  را به صورت زیر نشان داده‌اند:



که  $p\mu$  و  $d\mu$  مولکول میونی هستند [۳].

از آنجا که هر میون تنها تعداد محدودی از واکنش‌های همجوشی را کاتالیز می‌کند، ناامیدی‌هایی در این روش وجود دارد و به نظر می‌رسد که کاربردهای انرژی  $\mu\text{CF}$  از احتمال ضعیفی برخوردار باشد. تاریخ اخیر توسعه‌ی  $\mu\text{CF}$ ، توجه و تمرکز علاقه‌مندان به همجوشی از طریق کاتالیزور میونی را، به چرخه‌ی مفید مخلوط  $d-t$ ، که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است، نمایان ساخته است [۳].



شکل (۱-۳): چرخه‌ی همجوشی دوتریم-تریتیوم [۴].

در ادامه‌ی این فصل به تفصیل به بررسی چرخه‌ی همجوشی دوتریم - تریتیوم پرداخته شده است.

## ۱-۱- میون

### ۱-۱-۱- ویژگی‌های میون

میون، ذره‌ای بنیادی از خانواده‌ی لپتون است، که از نظر فیزیکی دارای مشخصات الکترون می‌باشد. میون باری به اندازه‌ی بار الکترون (یعنی  $1.6 \times 10^{-19}$  کولن) دارد، و ذره‌ای فرمین با اسپین  $1/2$  می‌باشد. خصوصیات برهمکنش میون مانند الکترون است، تنها جرم آن سنگینتر از الکترون است. میون در حقیقت به میزان  $207$  برابر سنگینتر از الکترون می‌باشد. یکی دیگر از خصوصیات مهم میون این است که، ذره‌ای ناپایدار و نیز دارای خواص رادیواکتیویته است. عمر متوسط میون در حدود  $2.2 \times 10^{-6}$  ثانیه یا  $2.2$  میکروثانیه می‌باشد، که در طول این مدت به الکترون و نوترینوی میون واپاشی می‌کند. میون دارای دو نوع بار است. در حقیقت

میون منفی دارای پاد ذره‌ای به نام پادمیون با بار مثبت است، که به صورت  $\mu^-$  و  $\mu^+$  نمایش داده می‌شوند ([۴] و [۵]).

واپاشی میون به صورت زیر خواهد بود:

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \quad (1-1)$$

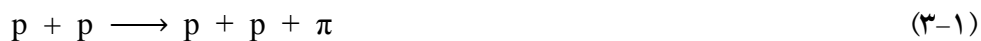
$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e. \quad (2-1)$$

### ۱-۱-۲- تولید میون

میون‌ها به دو روش تولید می‌شوند:

#### ۱. روش طبیعی:

در این روش، پروتون‌های موجود در اشعه‌های کیهانی با پروتون‌های موجود در جو با انرژی‌های بالا برخورد می‌کنند و طی این برهمکنش‌ها، ذره‌ی بنیادی پایون تشکیل می‌گردد:



پایون ( $\pi$ ) ذره‌ای بنیادی می‌باشد که به سه شکل  $\pi^+$ ،  $\pi^0$  و  $\pi^-$  یافت می‌شود. این ذره ناپایدار است و عمر متوسط آن در حدود  $2/6 \times 10^{-8}$  ثانیه می‌باشد. میون‌ها از مد برتر واپاشی پایون‌های منفی به وجود می‌آیند:

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (4-1)$$

$$\mu^+ \longrightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu \quad (5-1)$$

عمر متوسط میون بیشتر از عمر متوسط پایون است. بنابر این باریکه‌ای از پایون‌های منفی به سرعت به باریکه‌ای کامل از میون‌ها تبدیل می‌شود.

#### ۲. روش مصنوعی:

در این روش، ابتدا سعی در تولید پایون می‌شود و سپس از واپاشی پایون منفی، میون‌های تولیدی را برای انجام واکنش همجوشی آشکارسازی می‌کنند.

در روش مصنوعی، مطابق با ساده‌ترین و در عین حال گران‌ترین روش، پروتون‌ها را در شتابدهنده‌ها، شتاب داده تا به صفحات گرافیتی برخورد کنند. این صفحات گرافیتی، دارای میزان کافی نوترون و پروتون هستند، در نتیجه واکنش‌هایی که منجر به تولید پایون‌های باردار می‌گردد، انجام می‌گیرد ([۴] و [۵]):

$$p + n \longrightarrow \begin{cases} p + n + \pi^0 \\ p + p + \pi^- \\ n + n + \pi^+ \end{cases} \quad (6-1)$$

$$p + p \longrightarrow p + p + \pi^0, \quad (7-1)$$

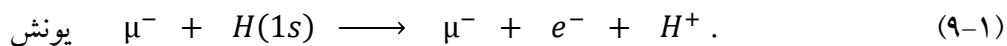
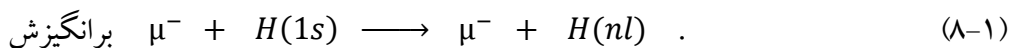
به طور کلی می توان گفت، هنگامی که ذرات (پروتون ها) شتاب گرفته تا در انرژی های بالا با هسته های هدف برهمکنش کنند، پایون ها در واکنش های هسته ای تولید می شوند و از واپاشی پایون های منفی در کمتر از  $10^{-8} \times 2/6$  ثانیه، میون های منفی تولید می شوند.

برآورد می شود که هزینه انرژی تولید میون به این روش در حدود 5 GeV در ازای تولید هر میون باشد. که این میزان انرژی بسیار بیشتر از انرژی سکون میون که در حدود 106 MeV است، می باشد [6].

## ۱-۲- کند شدن میون

انرژی جنبشی اولیه میون به واکنش آغازی که از طریق آن تولید می شود، بستگی دارد، اما نوعاً نزدیک به 20 MeV است. این انرژی خیلی بیشتر از انرژی جنبشی ذرات محیط غلیظ هیدروژنی می باشد. لذا میون باید کند شود تا به سرعت های قابل مقایسه با الکترون های اتمی برسد. میون فرودی بر مخلوط  $D_2$  و  $T_2$ ، به علت باردار بودنش، بیشتر انرژی خود را به سبب برخورد با الکترون های مقید مولکول های  $D_2$  و  $T_2$ ، از دست می دهد. از آنجا که جرم میون خیلی سنگینتر از جرم ذرات سبکی مثل الکترون است، بنابر این سهم تابش ترمزی برای کاهش انرژی و کند شدن آن کمتر است ([4] و [5]).

برای ذرات باردار، سازوکار برتر در اتلاف انرژی، برانگیزش یا یونش اتم ها و یا مولکول های محیط، یعنی برانگیخته شدن الکترون به ترازهای مقید انرژی بالاتر در اتم و یا جدا شدن الکترون به طور کامل از اتم است ([5] و [6]):



در محیط غلیظ هیدروژنی، میون با انرژی بالا، کند شده و در زمان  $10^{-8}$  ثانیه، انرژی آن به 2 KeV می رسد [6].

برای توصیف فیزیک گیراندازی میون و کند شدن آن، بازه ی عریضی از کندسازی انرژی از  $E_\mu$  تا صفر در نظر گرفته می شود. برای میون با سرعت های بیشتر از 1 a.u. (واحد اتمی)، معمولاً تئوری اتلاف انرژی در واحد طول به کار برده می شود، که بر اساس تقریب بورن می باشد. در نتیجه می توان نوشت:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z_1^2 z_2^2 e^4}{m_e v^2} \ln\left(\frac{2m_e v^2}{\bar{I}}\right) \quad (10-1)$$



که  $Z_1$  و  $Z_2$  به ترتیب بارهای هدف و پرتابه هستند.  $\bar{I}$  متوسط پتانسیل محیط هدف،  $n$  چگالی محیط،  $v$  سرعت میون و  $m_e$  جرم الکترون است [۵].

و یا می توان اینگونه نوشت:

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2}{\bar{I}} \right) - \beta^2 \right], \quad (11-1)$$

که  $r_e = 2.817 \times 10^{-13} m$  و  $N_a$  عدد آووگادرو،  $\bar{I}$  متوسط پتانسیل یونیزاسیون و  $Z$  و  $A$  و  $\rho$  به ترتیب بار، عدد اتمی و چگالی محیط جاذب است. همچنین  $\beta = \frac{v}{c}$  و  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$  و  $c$  سرعت نور در خلاء می باشد [۷].

با دانستن  $d\tau = \frac{dx}{v}$ ، زمان کندسازی و مهار میون را می توان بر حسب اتلاف انرژی محاسبه کرد [۵]:

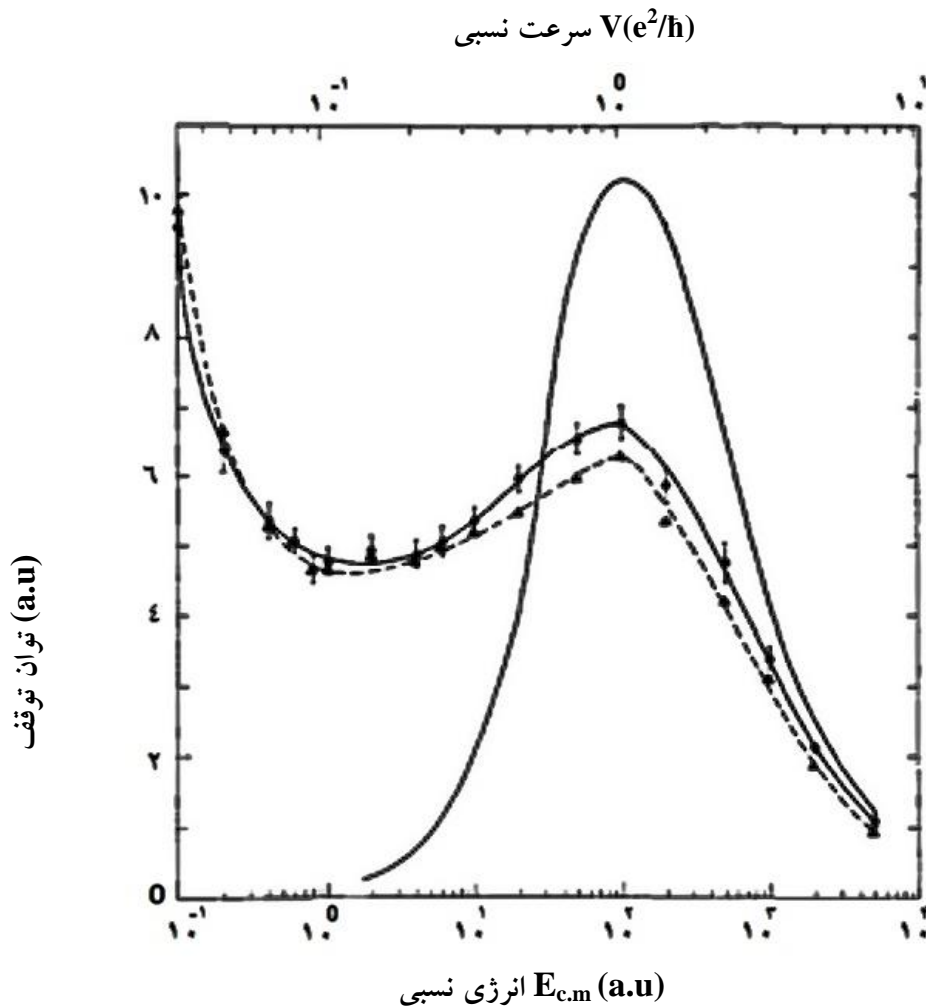
$$\tau_{stop} = \int d\tau = \int \frac{dE}{v \frac{dE}{dx}} .$$

برای سرعت های  $v \approx 1 a.u$  یا کمتر، تقریب بورن معتبر نیست. به علاوه در سرعت های خیلی پایین، افت انرژی ناشی از برخوردهای هسته ای اهمیت می یابد.

توان توقف<sup>۱</sup> یا اتلاف انرژی در سرعت  $1 a.u$  میون متناظر با سرعت الکترون در اولین مدار بوهر، دارای پیک است. زمان کندسازی در چگالی هیدروژن مایع (LHD) از مرتبه  $10^{-13}$  ثانیه می باشد [۵].

---

<sup>1</sup> Stopping Power



شکل (۴-۱): توان توقف برای میون‌ها در هیدروژن اتمی. سه گوشه‌ها و نقطه‌ها، محاسبات مسیر کلاسیکی مونت کارلو<sup>۱</sup> (CTMC) انجام شده توسط کوهن<sup>۲</sup> هستند. خط توپر نشان دهنده‌ی تقریب بورن است [۵] و [۸].

### ۱-۳- گیر اندازی میون و تشکیل اتم میونی

معمولاً میون، پس از کند شدن، جایگزین الکترون‌های مدارهای اتم‌های محیط هیدروژن مایع می‌شود و اتم‌های میونی را تشکیل می‌دهد. شعاع مداری  $r_n$ ، انرژی  $E_n$  و سرعت مداری  $v_n$  میون متحرک در مدار دایره‌وار که با عدد کوانتومی اصلی  $n$  مشخص می‌شوند، به صورت زیر است:

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{\bar{m}_{x\mu} Z e^2} \quad (12-1)$$

$$E_n = -\frac{Z e^2}{2r_n} = -\frac{\bar{m}_{x\mu} Z^2 e^4}{2n^2 \hbar^2} \quad (13-1)$$

$$v_n = \frac{Z e^2}{n \hbar} \quad (14-1)$$

<sup>1</sup> Classical Trajectory Monte Carlo

<sup>2</sup> Cohen

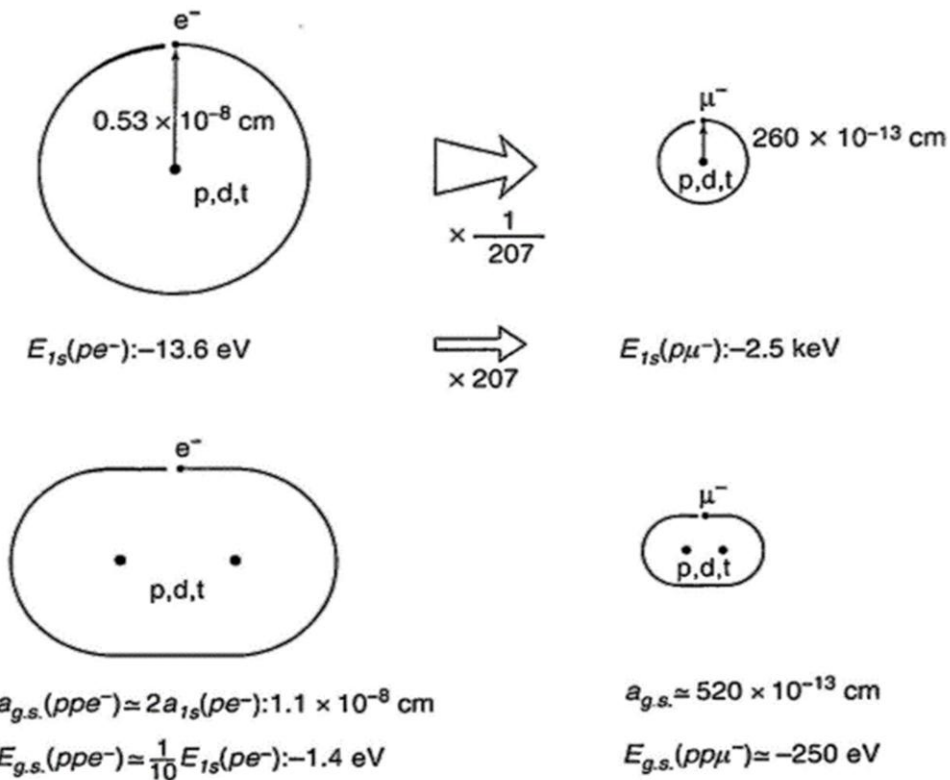
که  $\bar{m}_{x\mu}$  جرم کاهش یافته میون و هسته  $x$  می باشد. هسته  $x$  در محیط هیدروژنی می تواند یکی از ایزوتوپ های پروتونیم، دوتریم یا تریتیوم باشد (x=p,d,t) [۵].

میون نسبت به الکترون چندین مرتبه نزدیکتر به هسته ایتم میونی قرار می گیرد. از آنجا که جرم میون تقریباً ۲۰۷ برابر جرم الکترون است، شعاع بوهر میونی ۲۰۷ برابر کوچکتر خواهد شد ([۴] و [۵]).

شعاع بوهر الکترونی 
$$a_0 = \frac{(4\pi\epsilon_0)\hbar^2}{m_e e^2} = 0.529 \text{ \AA} ,$$

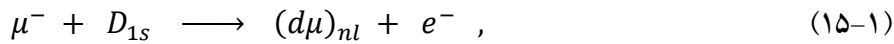
شعاع بوهر میونی 
$$a_\mu = \frac{(4\pi\epsilon_0)\hbar^2}{m_\mu e^2} = 256 \text{ fm} ,$$

در شکل زیر، مقایسه بین اتم میونی و اتم هیدروژن معمولی مشاهده می شود.



شکل (۵-۱): مقایسه ای اتم میونی با اتم هیدروژن معمولی [۷].

گیراندازی میون توسط اتم های ایزوتوپ های هیدروژنی، معمولاً با فرآیند بیرون انداختن الکترون اوژه<sup>۱</sup> همراه است:



میون می تواند در هر مداری گیر بیفتد، بطوریکه انرژی پایسته بماند. برای گیراندازی میون، توزیع اعداد کوانتومی اصلی  $n$ ، در  $n_{peak} = (\bar{m}_{p\mu})^{1/2} \approx 14$  دارای پیک می باشد، بطوری که مدار هیدروژن میونی با انرژی و اندازه مدار یکسان، متناظر با مدار  $n = 1$  در اتم هیدروژن معمولی را توصیف می کند [۵]. مطابق با رابطه ی (۱۳-۱) می توان نوشت:

$$E_{n\mu} = - \frac{\bar{m}_{p\mu} Z^2 e^4}{2n_\mu^2 \hbar^2} ,$$

$$E_{ne} = - \frac{\bar{m}_{pe} Z^2 e^4}{2n_e^2 \hbar^2} ,$$

در اتم هیدروژن  $n = 1$  و  $n_e = 1$  می باشد، حال اگر  $m_e = e = \hbar = 1$  باشد، در نتیجه :

$$\bar{m}_{pe} = \frac{m_p m_e}{m_p + m_e} \approx m_e = 1 ,$$

$$E_{n\mu} = E_e \implies \frac{1}{n_\mu^2} \bar{m}_{p\mu} = 1 \longrightarrow n_\mu = \bar{m}_{p\mu}^{1/2} ,$$

داریم :

$$\bar{m}_{p\mu} = \frac{m_p m_\mu}{m_p + m_\mu} ,$$

$$\implies n_\mu \approx 14 .$$

### ۱-۳-۱- فرآیند های واانگیختگی

همان طور که محاسبات نشان می دهد، میون در حالت برانگیخته ی اتم میونی گیر می افتد، ولی به سرعت توسط فرآیندهای برخوردی<sup>۲</sup> و تابش به حالت پایه ی خود برمی گردد.

در چگالی های بالای مخلوط، فرآیندهای برخوردی اهمیت می یابند. در حالی که در چگالی های پایین، واانگیختگی اغلب از طریق فرآیندهای تابش روی می دهد. از این رو زمان واانگیختگی به طور کلی به

<sup>1</sup> Auger Electron

<sup>2</sup> Collisional Processes