

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



۲ / ۵ / ۱۳۸۰

دانشگاه تهران

دانشکده علوم

عنوان:

بررسی پایداری همجوشی دوتریم - تریتم با
استفاده از کاتالیزور موئونی

نگارش:

زهرا قنبری

015175

استاد راهنما:

سرکار خانم دکتر منیژه رهبر

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر هوشنگ روحانی نژاد

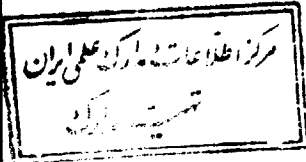
رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در

رشته فیزیک

اسفندماه ۱۳۷۹

۳۱۰۳۴





جمهوری اسلامی ایران

دانشگاه تهران

دوره تحصیلات تکمیلی دانشگاه

احتراماً با اطلاع می‌رساند که جلسه دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد خانم زهرا قنبری

تحت عنوان : " بررسی پایداری سیستم همجوشی دوتریم - تریتیم با کاتالیزر موثونی "

در تاریخ ۸۰/۱/۲۷ در محل دانشکده علوم دانشگاه تهران برگزار گردید.

هیات داوران بر اساس کیفیت پایان نامه ، استماع دفاعیه و نحوه پاسخ به سوالات ، پایانه نامه ایشان را برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک معادل باشی واحد با نمره ۱۶/۵ با درجه مورد تایید قرار دارد.

هیات داوران

امضاء	مرتبه دانشگاهی - دانشگاه	نام و نام خانوادگی	سمت
	استادیار - دانشگاه تهران	خانم دکتر منیژه رهبر	۱. استاد راهنما
	استاد - دانشگاه تهران	آقای دکتر هوشنگ روحانی نژاد	۲. استاد مشاور
	دانشیار - سازمان انرژی اتمی	آقای دکتر محمد لامعی رشتی	۳. استاد داور خارج
	دانشیار - دانشگاه تهران	آقای دکتر مسعود علیمحمدی	۴. استاد داور داخلی

دکتر رسول اخروی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

دکتر عزت اله ارضی

مدیر گروه آموزشی فیزیک

دکتر محمد تقی توسلی

سرپرست تحصیلات تکمیلی فیزیک

چکیده

مونون به عنوان کاتالیزور در همجوشی دوتریم - تریتیم به کار گرفته شده است، تا همجوشی را آسان و اقتصادی سازد. در این شرایط، باتوجه به مصرف کم سوخت در مقایسه با چگالی ذرات، معادلات برای حالت پایا نوشته شده است. پایداری برای مخلوط‌های مختلف D-T با استفاده از روش هورویتز بررسی شده است. نتایج به دست آمده در شرایط پایداری صدق می‌کند که آسانی و اقتصادی بودن روش را نشان می‌دهد.

پیشگفتار

همجوشی هسته‌ای یکی از روش‌های تولید انرژی به شمار می‌آید که در مقایسه با شکافت هسته‌ای از مزیت‌های زیر برخوردار است (۱) انرژی تولید شده به ازای هر نوکلئون بیشتر (۲) آلودگی محیط زیست ناشی از انجام واکنش کمتر (۳) سوخت‌های همجوشی فراوان‌تر و هزینه تولید آنها کمتر است. مانع اصلی برای همجوشی هسته‌ای، نیروی دافعه کولنی بین دو هسته است که اجازه نمی‌دهد دو هسته در فاصله برد هسته‌ای از هم قرار بگیرند و نیروی قوی هسته‌ای باعث همجوشی هسته‌ای شود.

یک روش برای رفع این مشکل و عملی کردن همجوشی بدین ترتیب است که با گرم کردن و بالابردن دمای اتم‌ها، باعث بالارفتن انرژی جنبشی هسته‌ها شویم تا به راحتی به سد پتانسیل کولنی نفوذ کنند در این روش ما با پلاسما سرو کار داریم نکته دیگری که هست با بالارفتن دمای پلاسما، فاصله هسته‌ها از همدیگر زیاد شده و در نتیجه احتمال برخورد هسته‌ها به هم و در نتیجه احتمال انجام واکنش همجوشی کم می‌شود. بنابراین لازم است به روشی، پلاسما را در حجم کوچکی محصور کرده تا چگالی هسته‌ها بالابرد. دو روش برای محصورسازی پلاسما در فصل یک مورد مطالعه قرار گرفته است که البته هر دو روش پردردسر هستند.

از طرفی می‌توان با استفاده از موئون به عنوان کاتالیزور باعث تسریع و انجام واکنش همجوشی در دمای پایین شد. این روش به نام همجوشی با کاتالیزور موئونی (μcf) نامیده می‌شود. در این روش موئون که ذره‌ای هم بار با الکترون و جرم آن برابر با ۲۰۷ برابر جرم الکترون می‌باشد، با جایگزین شدن با الکترون در مدار اتم، اتم‌های موئونی کوچک و خنثی را تشکیل می‌دهد که این اتم‌های موئونی خود به راحتی به هسته‌های دیگر نزدیک شده و در واقع نیروی دافعه کولنی را نمی‌بینند و مولکولهای موئون‌دار تشکیل می‌دهند که در این مولکول‌های کوچک، فاصله بین هسته‌ها خیلی کم است و در حد برد هسته‌ای که نیروهای قوی هسته‌ای غالب است، می‌باشد. بدین ترتیب

واکنش همجوشی هسته‌ای به راحتی قابل انجام است در فصل دوم به بررسی سلسله فرایندهایی که در این چرخه (μcf) صورت می‌گیرد، پرداخته شده است.

در فصل سوم، یک سیستم همجوشی خاص (D_2+T_2) در نظر گرفته شده است و با نوشتن معادله‌های آهنگ‌های تغییر چگالی موجود در سیستم به بررسی پایداری این معادله‌ها می‌پردازیم که خود منجر به پایداری سیستم همجوشی که مورد نظر است، می‌شود.

روش مورد استفاده در این بررسی، روش ریاضی هورویتز برای پایداری دستگاه معادله‌های آهنگ‌ها است. که با نوشتن یک برنامه کامپیوتری به زبان Q.Basic این کار صورت گرفته است. به طور کلی برنامه از دو قسمت اصلی تشکیل شده است.

(۱) قسمت اول برنامه با استفاده از عناصر ماتریس ژاکوبی که خود نماینده تغییرات چگالی ذرات نقاط پایا هستند و برای سیستم خاص (D_2+T_2) ماتریس مربع 6×6 است، ضرایب موجود در معادله ویژه مقادارها را محاسبه می‌کند. معادله ویژه مقادارها به صورت $C_0\lambda^6 + C_1\lambda^5 + C_2\lambda^4 + C_3\lambda^3 + C_4\lambda^2 + C_5\lambda^1 + C_6$ و ضرایب مورد نظر $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ است.

(۲) قسمت دوم برنامه با استفاده از ماتریس‌های هورویتز، دترمینال‌های این ماتریس‌ها محاسبه می‌شود. در سیستم مورد نظر ۶ ماتریس هورویتز وجود دارد و بنابراین ۶ دترمینال نیز محاسبه می‌شود. البته این مراحل برای غلظت‌های مختلفی از دوتریم و تریتم و برای Φ های مختلف مخلوط ($\Phi = \frac{N}{N_0}$) نسبت چگالی مخلوط به چگالی هیدروژن مایع محاسبه می‌شود. در قسمت آخر، دو شرط هورویتز برای منفی بودن λ ها و در نتیجه پایداری سیستم همجوشی بررسی شده است. این دو شرط عبارتند از: (۱) همه ضرایب ویژه مقادارها باید هم علامت باشند؛ (۲) تمام دترمینال‌های هورویتز باید مثبت باشد با برقراری این دو شرط، سیستم پایدار است. در نقاطی که این دو شرط صادق نباشد، می‌گوییم سیستم در آن نقاط ناپایدار است.

تشکر و قدردانی

من لم يشكر المخلوق لم يشكر الخالق

با سپاس به درگاه خداوند بزرگ که توفیق انجام این پژوهش را نصیب این حقیر نمود، به مصداق کلام الهی بر خود لازم می‌دانم که از زحمات کلیه استادان، دوستان و سایر کسانی که به نحوی در تهیه این مجموعه مرا یاری کرده‌اند، تشکر نمایم. به ویژه از زحمات استاد ارجمند سرکار خانم دکتر منیژه رهبر که با راهنماییهای علمی، حمایت‌های معنوی و محبت‌های فراوانشان در طول انجام این پژوهش و نیز در دوران تحصیل یاریگر بنده بوده‌اند، صمیمانه تشکر می‌نمایم.

همچنین از ریاست محترم گروه جناب آقای دکتر روحانی‌نژاد و ریاست محترم تحصیلات تکمیلی جناب آقای دکتر توسلی تشکر می‌نمایم.

از پدر و مادر عزیزم و همسر مهربانم مراتب سپاس و قدردانی خود را بواسطه تشویق‌ها، حمایت‌ها و زحمات فراوانشان در طول تحصیل و بخصوص در طول دوره انجام این پایان‌نامه ابراز می‌دارم. امید است بتوانم گوشه‌ای از محبت‌های ایشان را جبران بنمایم.

و من الله التوفیق

زهرا قنبری

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول - انرژی و راه‌های تولید آن
۱-۱-۱-۱	مقدمه
۳-۱-۲-۱	همجوشی طبیعی
۸-۱-۳-۱	همجوشی مصنوعی
۸-۱-۳-۱	بررسی نظری واکنش همجوشی
۱۲-۲-۳-۱	توان همجوشی و آهنگ واکنش
۱۴-۳-۳-۱	پارامتر سیگما - وی
۱۵-۴-۳-۱	واکنش‌های همجوشی
۱۹-۴-۱	پلازما و خواص آن
۱۹-۱-۴-۱	طول دبی
۲۱-۲-۴-۱	پراکندگی رادرفورد
۲۳-۳-۴-۱	تابش ترمزی
۲۵-۴-۴-۱	تابش سیکلوترون
۲۷-۵-۴-۱	گرم کردن پلازما
۲۸-۶-۴-۱	محصورسازی پلازما به روش مغناطیسی
۳۴-۷-۴-۱	ضریب β سیستم محصورسازی مغناطیسی
۳۵-۸-۴-۱	معیار لاوسون
۳۸-۹-۴-۱	همجوشی از طریق محصورسازی لخت
۴۰-۱۰-۴-۱	پارامتر (رو-آر)
۴۳-۱۱-۴-۱	توازن انرژی در محصورسازی لخت

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۴۵.....	۱-۴-۱۲- انرژی تراکم.....
۴۵-م.....	منابع فصل اول.....
	فصل دوم - همجوشی به روش کاتالیزور موثونی
۴۷.....	۱-۲- تاریخچه تولید همجوشی با کاتالیزور موثونی.....
۵۰.....	۲-۲- زنجیره فرایندهایی که در همجوشی با کاتالیزور موثونی به وقوع می‌پیوندد.....
۵۲.....	۳-۲- تشکیل اتم موثونی.....
	۲-۳-۱- کندشدن موثون‌های تند (سریع).....
۵۴.....	۲-۳-۲- گیراندازی موثون.....
۵۷.....	۴-۲- فرایندهای اتم موثون دار.....
۵۷.....	۲-۴-۱- فرایند وانگیختگی.....
۵۹.....	۲-۴-۲- مبادله ایزوتروپی (انتقال موثون)، ضریب q_{1s}
۶۱.....	۲-۴-۳- گرمایی شدن اتم‌های موثونی.....
۶۳.....	۵-۲- تشکیل مولکول موثونی.....
۶۴.....	۲-۵-۱- سازوکار مستقیم یا سازوکار غیرتشدیدی.....
۶۸.....	۲-۵-۲- سازوکار تشدیدي.....
۷۷.....	۶-۲- محصورسازی به روش شیمیایی.....
۷۸.....	۷-۲- فرایند همجوشی.....
۷۹.....	۸-۲- چسبیدن موثون‌ها و بازفعالسازی آن.....
۸۲.....	۹-۲- بهره همجوشی.....
۸۲-م.....	منابع فصل دوم.....

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل سوم - تحقیق ریاضی پایداری معادله آهنگ‌های مربوط به همجوشی با کاتالیزور موثون در مخلوط دوتریم - تریتیم	
۱-۳-۱- توصیف سینتیک فرایندهای همجوشی باکاتالیزور موثونی در مخلوط D-T.....	۸۴
۳-۱-۱- تشکیل اتم‌های موثونی $d\mu$ و $t\mu$	۸۵
۳-۱-۲- فرایند واپاشی موثون.....	۸۷
۳-۱-۳- فرایند انتقال ایزوتوپی موثون.....	۸۷
۳-۱-۴- تشکیل مولکول‌های موثونی.....	۸۸
۳-۱-۵- سرگذشت مولکول‌های موثون‌دار تشکیل شده.....	۹۱
۳-۲- نوشتن معادله‌های آهنگ همجوشی.....	۹۴
۳-۲-۱- معادله آهنگ چگالی همجوشی.....	۹۴
۳-۲-۲- معادله آهنگ چگالی اتم موثون دار $d\mu$	۹۶
۳-۲-۳- معادله آهنگ چگالی اتم‌های $t\mu$	۹۸
۳-۲-۴- معادله آهنگ چگالی مولکولهای $dt\mu$ ، $dd\mu$ و $tt\mu$	۱۰۰
۳-۳- تحقیق ریاضی پایداری معادله‌های آهنگ چگالی ذرات مربوط به همجوشی با کاتالیزور موثونی در مخلوط D_2-T_2	
نتیجه گیری.....	۱۰۹
منابع فصل سوم.....	۱۰۹-م
پیوست الف.....	۱۱۰
پیوست ب.....	۱۱۸
پیوست ج.....	۱۳۶

فصل اول

انرژی و راه‌های تولید آن

۱-۱ مقدمه

استفاده از انرژی، عامل مهمی در تکامل و آسایش انسان است. با پیشرفت روزافزون صنعت، و زیاد شدن ماشین‌های صنعتی و در نتیجه زیاد شدن مصرف انرژی، نیاز به منابع جدید انرژی بیشتر احساس می‌شود. از جمله منابع انرژی، سوخت‌های سنگواره‌ای مثل زغال‌سنگ، گاز طبیعی، آب هستند که دارای چندین اشکال هستند.

۱. در تمام کشورها وجود ندارند و توزیع ذخایر نفت و زغال‌سنگ چنان است که بسیاری از

کشورهای صنعتی ناچارند که نیازهای سوختی خود را به قیمتی قابل ملاحظه وارد کنند.

۲. از سوختن سوخت‌های سنگواره‌ای به ویژه زغال‌سنگ، اکسیدهای گوگرد، ازت، ذرات

بسیار ریز خاکستر تولید می‌شود که هوا را آلوده می‌کنند.

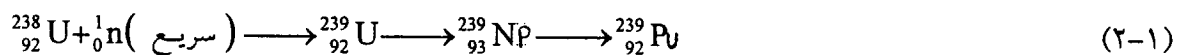
این اشکالات، استفاده از منابع جدید انرژی را اجتناب‌ناپذیر کرده است. از جمله منابع جدید

انرژی، با کارایی بالا، انرژی هسته‌ای است که در صورت تهی شدن منابع سوخت‌های فسیلی می‌توان

از آنها برای تامین انرژی استفاده کرد. [۱]

اینشتین در سال ۱۹۰۵ نشان داد که جرم و انرژی هم‌ارز یکدیگرند. بنابراین در هر فرایندی که با کاهش جرم همراه باشد باید انرژی آزاد شود. با در نظر گرفتن جرم اندازه گرفته شده هسته اتم‌ها، آشکار شده است که دستیابی به انرژی هسته‌ای با استفاده از واکنش‌هایی که با کاهش جرم همراه هستند از دو راه امکان‌پذیر است. یکی به وسیله شکافتن سنگین‌ترین هسته‌ها به هسته‌هایی با جرم متوسط یا «شکافت هسته‌ای» و دیگری با ترکیب سبک‌ترین هسته‌ها یا «همجوشی هسته‌ای» در واقع تحولات هسته‌ای بیشمار دیگری نیز وجود دارند که با آزاد ساختن انرژی همراهند. اما تنها از راه واکنش‌های شکافت و همجوشی هسته‌ای است که می‌توان انرژی بیشتر از آنچه که در جریان واکنش مصرف می‌شود بدست آورد. [۲]

در واکنش شکافت هسته‌ای، نوترون که بدون بار الکتریکی است به آسانی به هسته بزرگ و ناپایدار اورانیم نزدیک می‌شود. اگر نوترون توسط هسته اورانیم جذب شود. هسته ناپایدار خواهد شد و در نتیجه شکافت هسته‌ای به وجود می‌آید. نمونه‌ای از شکافت هسته‌ای اورانیم به صورت زیر است:



در رابطه (۲-۱) خود پلوتونیم در واکنش شکافت هسته‌ای شرکت خواهد کرد. و مانند رابطه (۱-۱) به هسته‌های کوچک‌تر شکافته شده و مقدار زیادی انرژی تولید خواهد کرد.

اورانیم طبیعی شامل دو ایزوتوپ ${}^{235}\text{U}$ و ${}^{238}\text{U}$ است. که البته برای واکنش‌های شکافت هسته‌ای بیشتر ${}^{235}\text{U}$ مورد استفاده قرار می‌گیرد که فقط ۰/۷٪ اورانیم طبیعی را تشکیل می‌دهد.

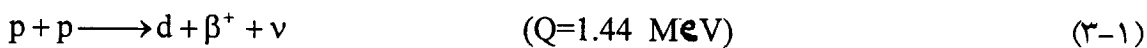
راکتور شکافت هسته‌ای، محصولات شکافتی با رادیواکتیویته بالا تولید می‌کنند. از جمله پلوتونیم که برای بشر بسیار خطرناک است. از طرفی غنی‌سازی اورانیم و جداساختن ${}^{235}\text{U}$ از آن که سوخت اصلی شکافت هسته‌ای بشمار می‌آید، کاری مشکل و پرهزینه است. [۳]

منبع دیگر انرژی، همجوشی هسته‌ای است که در مقایسه با شکافت هسته‌ای منابع سوخت آن فراوان‌تر، آلودگی ناشی از آن کمتر، انرژی تولیدی به ازای هر نوکلئون بیشتر است. در حقیقت

همجوشی هسته‌ای گنجه‌ای است که می‌تواند مسئله انرژی را برطرف نماید. مسئله اصلی در همجوشی هسته‌ای، وجود داشتن مشکلات فنی است و تحقیقات گسترده‌ای را برای عملی نمودن تولید انرژی از همجوشی هسته‌ای نیاز دارد.

۲-۱ همجوشی طبیعی

در حالی که شمار اندکی از واکنش‌های همجوشی، در شرایط زمینی انجام پذیر است، بیشترین فرایندهای همجوشی پایا، در محیط ستاره‌ها روی می‌دهد. ب^۱ در سال ۱۹۳۹ برای تولید انرژی ستاره‌ای نظریه‌ای را تدوین کرد. بنابراین نظریه، پروتون‌ها از طریق واکنش‌های هسته‌ای مناسب به هسته هلیوم تبدیل می‌شوند، و بدین ترتیب انرژی آزاد شده به صورت تابش و انرژی جنبشی ظاهر می‌شود. [۴] در یک رشته واکنش‌های محتمل که گاهی زنجیره پروتون-پروتون نامیده می‌شود و ممکن است که در ستاره‌ها رخ دهد، با واکنش بین دو پروتون و تشکیل دوترون آغاز می‌شود. طبق واکنش زیر:

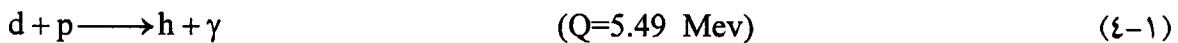


در واکنش‌های بالا p و d به ترتیب هسته‌های ^1_1H و ^2_1H می‌باشند و ν نوترینو و β^+ پوزیترون است. حضور ν در حالت نهایی نشانه یک فرایند برهم کنش ضعیف است که باید طی تبدیل یک پروتون به یک نوترون صورت گرفته باشد. سطح مقطع‌های برهم کنش ضعیف خیلی کوچک است. برای تشکیل دوترون، سطح مقطع محاسبه شده در انرژی‌های حدود kev از مرتبه 10^{-33} b و در انرژی‌های MeV از مرتبه 10^{-23} b است. دمای مرکز خورشید در حدود $15 \times 10^6 \text{ K}$ (متناظر با انرژی 1kev برای متوسط انرژی است) است. با توجه به چگالی بالای قلب خورشید (حدود 125 g/cm^3) آهنگ واکنش تنها در حدود 5×10^{-18} در هر ثانیه و به ازای هر پروتون است.

آنچه خورشید را در حال تابش نگاه می‌دارد، تعداد بسیار زیاد پروتون‌های واکنش‌کننده است که به حدود 10^{56} می‌رسد، به طوری که آهنگ واکنش کل از مرتبه 10^{38} در هر ثانیه است. این مرحله

از چرخه همجوشی خورشید (تشکیل دوترون) را غالباً «گردنه بطری» می‌نامند زیرا کندترین مرحله و دارای کمترین احتمال است.

به دنبال تشکیل دوترون، واکنش زیر با احتمال خیلی زیاد می‌تواند صورت بگیرد.

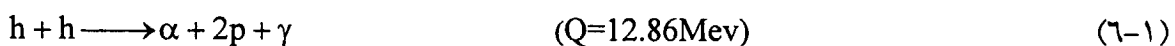


در این رابطه d ، p ، h نماینده هسته‌های ${}^2_1\text{H}$ ، ${}^1_1\text{H}$ و ${}^3_2\text{He}$ می‌باشند در واکنش بالا، γ (اشعه گاما) تولید می‌شود.

لازم به توضیح است که به خاطر تعداد کم دوترون‌ها تحقق واکنش‌های $d-d$ بسیار غیر محتمل است. زیرا تنها به ازای هر 10^{18} پروتون، یک دوترون تشکیل می‌شود و بنابراین در حدود 10^{18} مرتبه احتمال بیشتری وجود دارد که یک دوترون با پروتون واکنش انجام دهد تا با یک دوترون دیگر، بنابراین دوترون‌ها با همان سرعتی که تشکیل می‌شوند به هسته ${}^3_2\text{He}$ تبدیل می‌شوند. واکنش ${}^3\text{He}-p$ امکان‌پذیر نیست.



ایزوتوپ ${}^4\text{Li}$ به صورت سیستم مقید وجود ندارد و به محض تشکیل فوراً شکسته می‌شود. از طرفی غیر محتمل است که h با d واکنش انجام دهد زیرا چگالی d خیلی پایین است و d به سرعت به h تبدیل می‌شود بنابراین واکنش‌های بعدی به صورت زیر است.



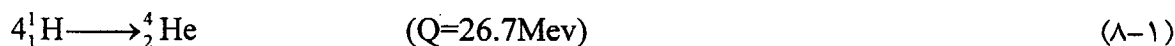
در رابطه بالا، α نماینده هسته ${}^4_2\text{He}$ است.

از جمع روابط (۱-۳)، (۱-۴)، (۱-۵)، (۱-۶) داریم:



رابطه (۱-۷) نشان می‌دهد که چهار هسته پروتون به هسته هلیوم و دو پوزیترون و دو نوترینو تبدیل شده است. در این فرایند حدود 24.7 Mev انرژی از جرم سکون به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. البته پوزیترون‌ها به راحتی الکترون‌هایی پیدا خواهند کرد و با نابودی آنها به پرتوهای گاما

تبدیل می‌شوند و پرتوهای گاما هم انرژی خود را به دیگر ذرات موجود در آن ستاره می‌دهند پس واکنش (۷-۱) را با اضافه کردن چهار الکترون به هر دو رابطه به شکل زیر می‌نویسیم .



به چرخه بالا، چرخه پروتون، پروتون می‌گویند.

سرنوشت دیگر هسته ${}^3\text{He}$ این است که با یک ذره α واکنش می‌دهد.



که با واکنش‌های زیر دنبال می‌شود.



و یا شاید زنجیره زیر تعقیب شود.



واکنش خالص و مقدار Q برای هر سه مسیر یکسان است. این که کدامیک عملاً انتخاب شود به ترکیب ستاره و دمای ستاره بستگی دارد. در مورد خورشید، با مشاهده نوترینوها می‌توان این سه راه را مورد تحقیق قرار داد. در مورد اول، توزیع پیوسته‌ای از نوترینوهای با بیشینه انرژی 0.42Mev به دست می‌آید. در مورد دوم گیراندازی الکترون در ${}^8\text{Be}$ به تولید نوترینوی تک انرژی با انرژی حدود 0.826 Mev منجر می‌شود. در حالی که واپاشی ${}^8\text{B}$ به توزیع نوترینوی پیوسته‌ای با انرژی انتهایی 14 Mev خواهد انجامید.

هرگاه علاوه بر هیدروژن، هلیوم، عناصر سنگین‌تری در داخل یک ستاره موجود باشد، رشته متفاوتی از واکنش‌های همجوشی ممکن است در آن به وقوع بپیوندد. یکی از واکنش‌های ممکن، چرخه کربن یا چرخه CNO است.

