بسم الله الرحمن الرحيم

٣٨٠٣٤

۱۳۸۰ /۵/ ۷

دانشگاه تهران

دانشکده علـــوم

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تحویل

عنوان:

بررسی پایداری همجوشی دوتریم - تریتیم با استفاده از کاتالیزور موئونی

نگارش:

زهرا قنبری

015175

استادراهنما:

سرکار خانم دکتر منیژه رهبر

استادمشاور:

جناب آقای دکتر هوشنگ روحانی نژاد

رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در

رشته فیزیک

اسفندماه ۱۳۷۹

۳۸۰۳۴

الف/ ۱

جمهوری اسلامی ایران

دانشگاه تهران

تاریخ : .....

پیوست .....

اداره تحصیلات تکمیلی دانشگاه

احتراماً باطلاع می رساند که جلسه دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد **خانم زهرا قنبری**

تحت عنوان : "**بررسی پایداری سیستم همجوشی دوتریم ـ تریتیم با کاتالیزر موئونی**"

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

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

هیات داوران

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

دکتر محمد تقی توسلی

سرپرست تحصیلات تکمیلی فیزیک

دکتر عزت اله ارضی

مدیر گروه آموزشی فیزیک

دکتر رسول اخروی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

چکیده

موئون 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 بالابرود. 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) درنظر 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 موردنظر 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 مقدارها را محاسبه می‌کند. معادله ویژه مقدارها 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 ٦ ماتریس هورویتز وجود دارد و بنابراین ٦ دترمینال نیز محاسبه می‌شود. البته این مراحل برای غلظت‌های مختلفی از دوتریم و تریتیم و برای Φهای 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 مقدارها 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 یشکر المخلوق لم یشکر 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 می نمایم.

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

و من الله التوفیق

زهرا قنبری

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول – انرژی و راه‌های تولید آن

۱-۱- مقدمه ۱

۱-۲- همجوشی طبیعی ۳

۱-۳- همجوشی مصنوعی ۸

۱-۳-۱- بررسی نظری واکنش همجوشی ۸

۱-۳-۲- توان همجوشی و آهنگ واکنش ۱۲

۱-۳-۳- پارامتر سیگما – وی ۱٤

۱-۳-٤- واکنش‌های همجوشی ۱۵

۱-٤- پلاسما و خواص آن ۱۹

۱-٤-۱- طول دبی ۱۹

۱-٤-۲- پراکندگی رادرفورد ۲۱

۱-٤-۳- تابش ترمزی ۲۳

۱-٤-٤- تابش سیکلوترون ۲۵

۱-٤-۵- گرم کردن پلاسما ۲۷

۱-٤-٦- محصورسازی پلاسما به روش مغناطیسی ۲۸

۱-٤-۷- ضریب β سیستم محصورسازی مغناطیسی ۳٤

۱-٤-۸- معیار لاوسون ۳۵

۱-٤-۹- همجوشی از طریق محصورسازی لخت ۳۸

۱-٤-۱۰- پارامتر (رو-آر) ٤۰

۱-٤-۱۱- توازن انرژی در محصورسازی لخت ٤۳

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۱-٤-۱۲- انرژی تراکم ٤٥

منابع فصل اول ٤٥-م

فصل دوم - همجوشی به روش کاتالیزور موئونی

۲-۱- تاریخچه تولید همجوشی با کاتالیزور موئونی ٤٧

۲-۲- زنجیره فرایندهایی که در همجوشی با کاتالیزور موئونی به وقوع می‌پیوندد ٥٠

۲-۳- تشکیل اتم موئونی ٥٢

۲-۳-۱- کندشدن موئون‌های تند (سریع) .....

۲-۳-۲- گیراندازی موئون ٥٤

۲-٤- فرایندهای اتم موئون دار ٥٧

۲-٤-۱- فرایند وانگیختگی ٥٧

۲-٤-۲- مبادله ایزوتروپی (انتقال موئون)، ضریب q_{1s} ٥٩

۲-٤-۳- گرمایی شدن اتم‌های موئونی ٦١

۲-٥- تشکیل مولکول موئونی ٦٣

۲-٥-۱- سازوکار مستقیم یا سازوکار غیرتشدیدی ٦٤

۲-٥-۲- ساز و کار تشدیدی ٦٨

۲-٦- محصورسازی به روش شیمیایی ٧٧

۲-۷- فرایند همجوشی ٧٨

۲-۸- چسبیدن موئون‌ها و بازفعالسازی آن ٧٩

۲-۹- بهره همجوشی ٨٢

منابع فصل دوم ٨٢-م

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل سوم – تحقیق ریاضی پایداری معادله آهنگ‌های مربوط به همجوشی با کاتالیزور موئون در مخلوط دوتریم – تریتیم

۳-۱- توصیف سینتیک فرایندهای همجوشی باکاتالیزور موئونی در مخلوط D-T..... ۸٤

۳-۱-۱- تشکیل اتم‌های موئونی $d\mu$ و $t\mu$ ۸۵

۳-۱-۲- فرایند واپاشی موئون ۸۷

۳-۱-۳- فرایند انتقال ایزوتوپی موئون ۸۷

۳-۱-٤- تشکیل مولکول‌های موئونی.....۸۸

۳-۱-۵- سرگذشت مولکول‌های موئون‌دار تشکیل شده.....۹۱

۳-۲- نوشتن معادله‌های آهنگ همجوشی..... ۹٤

۳-۲-۱- معادله آهنگ چگالی همجوشی.....۹٤

۳-۲-۲- معادله آهنگ چگالی اتم موئون دار $d\mu$.....۹٦

۳-۲-۳- معادله آهنگ چگالی اتم‌های $t\mu$ ۹۸

۳-۲-٤- 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 موئونی در مخلوط D_2-T_2 .....۱۰۲

نتیجه گیری ۱۰۹

منابع فصل سوم ۱۰۹-م

پیوست الف ۱۱۰

پیوست ب..... ۱۱۸

پیوست ج ۱۳٦

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 قابل‌ملاحظه 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 به‌وجود می‌آید. نمونه‌ای از شکافت هسته‌ای اورانیم به صورت زیر است:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n(\text{کند}) \longrightarrow 2\times ^{118}_{50}Sn + 8\bar{e} + 236Mev \qquad (۱-۱)$$

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n(\text{سریع}) \longrightarrow ^{239}_{92}U \longrightarrow ^{239}_{93}Np \longrightarrow ^{239}_{92}Pu \qquad (۱-۲)$$

در رابطه(۱-۲)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}U و ^{238}U است. که البته برای واکنش‌های شکافت هسته‌ای بیشتر ^{235}U مورد استفاده قرار می‌گیرد که فقط ۰/۷٪ اورانیم طبیعی راتشکیل 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}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 گنجینه‌ای است که می‌تواند مسئله انرژی را برطرف نماید. مسئله اصلی در همجوشی هسته‌ای، وجود داشتن مشکلات فنی است و تحقیقات گسترده‌ای رابرای عملی نمودن تولید انرژی از همجوشی هسته‌ای نیاز دارد.

۱-۲ همجوشی طبیعی

در حالی‌که شمار اندکی از واکنش‌های همجوشی، در شرایط زمینی انجام‌پذیر است، بیشترین فرایندهای همجوشی پایا، در محیط ستاره‌ها روی می‌دهد.بث[1] در سال ۱۹۳۹ برای تولید انرژی ستاره‌ای نظریه‌ای را تدوین کرد. بنابراین نظریه، پروتون‌ها از طریق واکنش‌های هسته‌ای مناسب به هسته هلیم تبدیل می‌شوند، و بدین ترتیب انرژی آزاد شده به‌صورت تابش و انرژی جنبشی ظاهر می‌شود. [٤]

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:

$$p + p \longrightarrow d + \beta^+ + \nu \qquad (Q=1.44\ MeV) \qquad (۳-۱)$$

در واکنش‌های بالا p وd به‌ترتیب هسته‌های ${}_1^1H$ و ${}_1^2H$ می‌باشند و ν نوترینو و β^+ پوزیترون است. حضورν در حالت نهایی نشانه یک فرایند برهم کنش ضعیف است که باید طی تبدیل یک پروتون به یک نوترون صورت گرفته باشد. سطح مقطع‌های برهم‌کنش 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 15×10^6 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، به‌طوری که آهنگ واکنش کل از مرتبه 10^{38} در هر ثانیه است. این مرحله

1) Bethe

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.

$$d + p \longrightarrow h + \gamma \qquad (Q=5.49\ Mev) \qquad (٤-١)$$

در این رابطه d، p، h نماینده هسته‌ای ${}_1^1H$، ${}_1^2H$ و ${}_2^3He$ 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 ${}_2^3He$ تبدیل می‌شوند. واکنش $^3He - p$ امکان‌پذیر نیست.

$$h + p \longrightarrow {}^4Li \longrightarrow p + h \qquad (٥-١)$$

ایزوتوپ ^4Li به‌صورت 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.

$$h + h \longrightarrow \alpha + 2p + \gamma \qquad (Q=12.86Mev) \qquad (٦-١)$$

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

از جمع روابط (١-٣)، (١-٤)، (١-٥)، (١-٦) داریم:

$$4p \longrightarrow \alpha + 2\beta^+ + 2\nu + \gamma \qquad (٧-١)$$

رابطه(١-٧)نشان می‌دهد که چهار هسته پروتون به هسته هلیم و دوپوزیترون و دو نوترینو تبدیل شده است. در این فرایند حدود24.7 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 (۱-۷) را با اضافه کردن چهار الکترون به هر دو رابطه به شکل زیر می‌نویسیم .

$$4_1^1H \longrightarrow {}_2^4He \qquad (Q=26.7Mev) \qquad (۱-۸)$$

به چرخه بالا،چرخه پروتون،پروتون می‌گویند.

سرنوشت دیگر هسته ^3He این است که با یک ذره α واکنش می‌دهد.

$$h+\alpha \longrightarrow {}^7Be+\gamma \qquad (۱-۹)$$

که با واکنش‌های زیر دنبال می‌شود.

$$^7Be+\bar{e} \longrightarrow {}^7Li+\nu \qquad (۱-۱۰)$$

$$^7Li+p \longrightarrow 2\alpha \qquad (۱-۱۱)$$

و یا شاید زنجیره زیر تعقیب شود.

$$^7Be+p \longrightarrow {}^7B+\gamma \qquad (۱-۱۲)$$

$$^8B \longrightarrow {}^8Be+\beta^+ +\nu \qquad (۱-۱۳)$$

$$^8Be \longrightarrow 2\alpha \qquad (۱-۱٤)$$

واکنش خالص و مقدار Q برای هر سه مسیر یکسان است. این‌که 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 نوترنیوهای با بیشینه انرژی 0.42Mev به‌دست می‌آید. در مورد دوم گیراندازی الکترون در ^7Be به‌تولید نوترینوی تک انرژی با انرژی حدود0.826 Mev منجر می‌شود. در حالی‌که واپاشی ^8B به توزیع نوترنیوی پیوسته‌ای با انرژی انتهایی 14 Mev خواهد انجامید.

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

$$^{12}C+p \longrightarrow {}^{13}N+\gamma$$
$$^{13}N \longrightarrow {}^{13}C+\beta^+ +\nu$$