

١٧١١٠٦٥٣٥  
١٧١٢٠٢

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

١١٥٦٩٩

۱۷/۱/۱۰ ۹۵۳۵  
۱۷-۱۲-۹۳



محاسبه‌ی تابع تحریک و توزیع سدی واکنش همجوشی  $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$

سید شمس سجادی

دانشکده‌ی علوم

گروه فیزیک

شهریور ۱۳۸۷

پایان‌نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد

اساتید راهنما:

پروفسور رسول خدابخش      پروفسور صمد سبحانیان

استاد مشاور:

دکتر هادی گودرزی

دفتر خدمات دانشجویی  
شهریور ۱۳۸۷

۱۳۸۷ / ۱۲ / ۱۴

۱۱۰۶۹۹

پایان نامه ... به تاریخ ۸۷/۶/۲۶ شماره ... مورد پذیرش هیات محترم داوران با رتبه عالی  
و نمبر ۱۹ قرار گرفت.

دکتر ~~علی محمد حسن~~ ~~مدد~~

۱- استاد راهنما و رئیس هیئت داوران:

دکتر ~~هادی کردینی~~  
۲- استاد مشاور:

دکتر ~~ابراهیم حسینی~~  
۳- داور خارجی:

دکتر ~~محمد طاهری~~  
۴- داور داخلی:

دکتر ~~عباس استادی~~  
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی:

کتابخانه مرکزی دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران  
شماره ثبت کتاب: ...

ستایش پاک، خدای باعظمت را که همواره در سایه‌ی عنایتش بوده‌ام و هر زمان که او

را خواندم آرمان یافتم.

## تقدیر و تشکر

از خانواده‌ی عزیزم که شرایط پیشرفت و ترقی را برایم آماده کردند و صبورانه مرا تحمل کرده‌اند تشکر و قدردانی می‌کنم.

از اساتید ارجمند، آقایان دکتر رسول خدابخش، دکتر صمد سبحانیان و دکتر هادی گودرزی به خاطر انتخاب پروژه و راهنمایی‌های ارزنده‌شان در حین انجام آن تشکر و قدردانی می‌کنم.

از مدیرگروه محترم فیزیک، جناب آقای دکتر طالبیان سپاسگذاری می‌کنم.

از اساتید بزرگوار آقایان دکتر طالبیان و دکتر جعفری، بخاطر داوری پایان‌نامه قدردانی می‌کنم.

از آقای دکتر استادباشی، نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی دانشکده‌ی علوم تشکر می‌کنم.

از دوستان گرامی آقایان آقایاری، محمد نژاد، افشاری، و خانمها احمدی، فراست و تمامی دوستانی که در طول دوره از مساعدت و همکاری‌شان بهره‌مند بوده‌ام سپاسگذارم

## فهرست مطالب

۱.....چکیده‌ی فارسی

### فصل اول

۲.....مقدمه

### فصل دوم

#### همجوشی و مسئله‌ی انرژی

- ۴.....۱-۲ بررسی تاریخی
- ۷.....۲-۲ اهمیت مطالعه‌ی واکنشهای هسته‌ای
- ۸.....۳-۲ همجوشی در طبیعت و سوختن هیدروژن
- ۹.....۲-۳-۱ روشهای محصورسازی پلاسما
- ۱۳.....۲-۳-۲ سوختن هلیوم و تولید هسته‌های با  $A < 56$
- ۱۵.....۴-۲ تکنیکهای تجربی در اندازه‌گیری سطح مقطع همجوشی
- ۱۶.....۵-۲ همجوشی زیرسردی و تونل‌زنی کوانتوم مکانیکی بس بعدی

۴

### فصل سوم

#### نظریه‌ی برخورد و مسئله‌ی پراکندگی

- ۱۸.....۱-۳ پراکندگی
- ۱۹.....۳-۱-۱ رهیافت کلاسیکی
- ۲۱.....۳-۱-۲ رهیافت موجی
- ۲۳.....۳-۲ تقریب بورن
- ۲۴.....۳-۲-۱ پتانسیل یوکاوا
- ۲۵.....۳-۲-۲ پتانسیل معکوس مورس

۲۵	..... پتانسیل گوسی	۳-۲-۳
۲۵	..... روش پاره‌موجها	۳-۳
۲۸	..... قضیه‌ی اپتیکی	۴-۳
۲۹	..... محاسبه‌ی سطح مقطع واکنش	۵-۳

## فصل چهارم

### ساز و کار فرآیند همجوشی

۳۱	..... مدل BPM	۴-۱
۳۲	..... سد مربعی	۴-۱-۱
۳۴	..... سد اکارت	۴-۱-۲
۳۴	..... سد سهموی	۴-۱-۳
۳۵	..... تقریب WKB	۴-۲
۳۶	..... پتانسیل واقعی بین دو هسته	۴-۳
۳۷	..... رابطه‌ی هیل-ویلر و رابطه‌ی ونگ	۴-۴
۳۸	..... تصحیحاتی در رابطه‌ی ونگ	۴-۴-۱
۳۹	..... بررسی اثرات جفت‌شدگی با استفاده از مدل دو کاناله	۴-۵
۴۲	..... توزیع سدی و اثرات جفت‌شدگی	۴-۶
۴۲	..... مقدار متوسط تکانه‌ی زاویه‌ای هسته‌ی مرکب در واکنشهای همجوشی <sup>۴</sup>	۴-۶-۱
۴۲	..... بررسی نقش جفت‌شدگی ارتعاشات سطحی هسته‌ها در سطح مقطع همجوشی	۴-۷
۴۴	..... حل مسئله بروش عملگری	۴-۷-۱
۴۵	..... محاسبه‌ی تابع پارش سیستم	۴-۷-۲
۴۶	..... محاسبه‌ی تابع توزیع و عدم قطعیت انرژی	۴-۷-۳
۴۷	..... محاسبه‌ی نرخ تونل‌زنی و سطح مقطع همجوشی با استفاده از تابع توزیع انرژی	۴-۸
۴۹	..... محاسبه‌ی تابع توزیع انرژی در حد $\omega \rightarrow 0$	۴-۹

## فصل پنجم

### رهیافت انتگرال مسیر فاینمن

۵۰	۱-۵	تعریف انتگرال مسیر
۵۳	۲-۵	محاسبه‌ی نرخ تونل‌زنی با استفاده از روش انتگرال مسیر
۵۵	۳-۵	محاسبه‌ی تابعی تأثیر
۵۶	۱-۳-۵	جفت شدگی خطی
۵۷	۲-۳-۵	جفت شدگی مربعی
۵۸	۴-۵	حد سریع (سادن)
۵۹	۱-۳-۵	جفت شدگی خطی
۶۰	۲-۳-۵	جفت شدگی مربعی
۶۱	۳-۳-۵	جفت شدگی خطی و مربعی
۶۲	۴-۳-۵	بررسی جفت شدگی با تابعیت دلخواه با استفاده از بسط تیلور
۶۳	۵-۵	محاسبه‌ی تابعی تأثیر و نرخ تونل‌زنی در حد شبه سادن
۶۴	۶-۵	تصویر برهمکنش
۶۶	۷-۵	نتایج رابطه‌ی ونگ و حد سادن برای سطح مقطع همجوشی هسته‌های میان‌وزن
۶۷	۱-۷-۵	واکنش‌های همجوشی $^{40}\text{Ca} + ^{124}\text{Sn}$
۶۹	۲-۷-۵	واکنش همجوشی $^{48}\text{Ca} + ^{90}\text{Zr}$
۷۱	۳-۷-۵	واکنش همجوشی $^{48}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$
۷۳	۴-۷-۵	واکنش‌های همجوشی $^{36}\text{S} + ^{90}\text{Zr}$
۷۵	۵-۷-۵	واکنش همجوشی $^{36}\text{S} + ^{96}\text{Zr}$
۷۷	۸-۵	مقایسه‌ی سطح مقطع واکنش‌های $^{48}\text{Ca} + ^{90,96}\text{Zr}$ و $^{36}\text{S} + ^{90,96}\text{Zr}$ و بررسی اثرات ایزوتوپی زیرکونیوم
۷۸	۹-۵	بحث و نتیجه‌گیری
۸۰		مراجع
۸۳		انتشارات حاصل از پایان‌نامه
۸۴		چکیده‌ی انگلیسی



## فهرست شکلها

### فصل دوم

- شکل (۲-۱): آرایش فضایی ملکول آمونیوم ..... ۵
- شکل (۲-۲): چاه پتانسیل دوگانه متقارن واقعی (سمت راست) و تقریبی (سمت چپ) ملکول آمونیوم ..... ۶
- شکل (۲-۳): مراحل مختلف تبدیل هیدروژن به هلیوم ..... ۹
- شکل (۲-۴): محبوس سازی پلاسما با روش MCF ..... ۱۰
- شکل (۲-۵): نمای داخلی و خارجی راکتور همجوشی توکامک در روش MCF ..... ۱۰
- شکل (۲-۶): بمباران قرص سوختی توسط لیزر در همجوشی به روش ICF ..... ۱۱
- شکل (۲-۷): مراحل مختلف همجوشی به روش ICF ..... ۱۱
- شکل (۲-۸): مراحل مختلف همجوشی به روش  $\mu$ CF ..... ۱۲
- شکل (۲-۹): چرخه CNO و واکنشهای جنبی آن ..... ۱۴
- شکل (۲-۱۰): نمودار تغییرات انرژی بستگی هسته‌ای بر حسب عدد جرمی ..... ۱۵

### فصل سوم

- شکل (۳-۱): برخورد بین دو ذره به جرمهای  $M_1$  و  $M_2 = nM_1$  ..... ۱۹
- شکل (۳-۲): پراکندگی ذره در حضور مرکز پراکنده ..... ۲۲

### فصل چهارم

- شکل (۴-۱): تصور کلاسیک (سمت راست) و تصور کوانتومی (سمت چپ) در رویارویی ذره با سد پتانسیل ..... ۳۱
- شکل (۴-۲): نمایش تونل زنی کوانتومی از سد یکجعدی ..... ۳۲
- شکل (۴-۳): تغییرات پتانسیل بر حسب فاصله ..... ۳۶
- شکل (۴-۴): مقایسه‌ی سطح مقطع همجوشی سیستم  $^{16}O + ^{16}O$  ..... ۳۹
- شکل (۴-۵): اثر جفت‌شدگی بر سد پتانسیل ..... ۴۰
- شکل (۴-۶): تغییرات احتمال عبور و شیب آن بر حسب انرژی ..... ۴۱
- شکل (۴-۷): اثرات جفت‌شدگی در تغییرات احتمال عبور و شیب آن بر حسب انرژی ..... ۴۱
- شکل (۴-۸): توزیع سدی و اثرات جفت‌شدگی ..... ۴۸

شکل (۹-۴): اثرات جفت‌شدگی بر احتمال تونل‌زنی ..... ۴۸  
 شکل (۱۰-۴): سطح مقطع همجوشی  $^{16}O + ^{16}O$  محاسبه شده با رابطه‌ی (۴-۸۵) و مقایسه‌ی آن با رابطه‌ی ونگ . ۴۹

## فصل پنجم

شکل (۱-۵): مقایسه‌ی سطح مقطع همجوشی  $^{40}Ca + ^{124}Sn$  ..... ۶۸  
 شکل (۲-۵): مقایسه‌ی شیب لگاریتمی  $\sigma E$  واکنش همجوشی  $^{40}Ca + ^{124}Sn$  ..... ۶۸  
 شکل (۳-۵): مقایسه‌ی سطح مقطع همجوشی  $^{48}Ca + ^{90}Zr$  ..... ۷۰  
 شکل (۴-۵): مقایسه‌ی شیب لگاریتمی  $\sigma E$  واکنش همجوشی  $^{48}Ca + ^{90}Zr$  ..... ۷۰  
 شکل (۵-۵): مقایسه‌ی سطح مقطع همجوشی  $^{48}Ca + ^{96}Zr$  ..... ۷۲  
 شکل (۶-۵): مقایسه‌ی شیب لگاریتمی  $\sigma E$  واکنش همجوشی  $^{48}Ca + ^{96}Zr$  ..... ۷۲  
 شکل (۷-۵): مقایسه‌ی سطح مقطع همجوشی  $^{36}S + ^{90}Zr$  ..... ۷۴  
 شکل (۸-۵): مقایسه‌ی شیب لگاریتمی  $\sigma E$  واکنش همجوشی  $^{36}S + ^{90}Zr$  ..... ۷۴  
 شکل (۹-۵): مقایسه‌ی سطح مقطع همجوشی  $^{36}S + ^{96}Zr$  ..... ۷۶  
 شکل (۱۰-۵): مقایسه‌ی شیب لگاریتمی  $\sigma E$  واکنش همجوشی  $^{36}S + ^{96}Zr$  ..... ۷۶  
 شکل (۱۱-۵): اثرات ایزوتوپی و مقایسه‌ی سطح مقطع همجوشی  $^{48}Ca + ^{90,96}Zr$  ..... ۷۷

## فهرست جدولها

### فصل دوم

جدول (۲-۱): واکنشهای همجوشی و سطح مقطع اندازه‌گیری شده در انرژی  $100 MeV$ ..... ۱۲

### فصل پنجم

- جدول (۵-۱): نرخ تونل‌زنی برای سد سهموی ..... ۶۲
- جدول (۵-۲): داده‌های نظری محاسبه‌شده برای  $^{40}Ca + ^{124}Sn$  ..... ۶۷
- جدول (۵-۳): داده‌های تجربی سطح مقطع همجوشی برای  $^{40}Ca + ^{124}Sn$  ..... ۶۷
- جدول (۵-۴): داده‌های نظری محاسبه‌شده برای  $^{48}Ca + ^{90}Zr$  ..... ۶۹
- جدول (۵-۵): داده‌های تجربی سطح مقطع همجوشی برای  $^{48}Ca + ^{90}Zr$  ..... ۶۹
- جدول (۵-۶): داده‌های نظری محاسبه‌شده برای  $^{48}Ca + ^{96}Zr$  ..... ۷۱
- جدول (۵-۷): داده‌های تجربی سطح مقطع همجوشی  $^{48}Ca + ^{96}Zr$  ..... ۷۱
- جدول (۵-۸): داده‌های نظری محاسبه‌شده برای  $^{36}S + ^{90}Zr$  ..... ۷۳
- جدول (۵-۹): داده‌های تجربی سطح مقطع همجوشی  $^{36}S + ^{90}Zr$  ..... ۷۳
- جدول (۵-۱۰): داده‌های نظری محاسبه‌شده برای  $^{36}S + ^{96}Zr$  ..... ۷۵
- جدول (۵-۱۱): داده‌های تجربی سطح مقطع همجوشی  $^{36}S + ^{96}Zr$  ..... ۷۵<sup>۴</sup>

## چکیده

در چند دهه‌ی اخیر تونل‌زنی کوانتومی در سیستم‌های با درجات آزادی داخلی بسیار مورد توجه بوده است. یکی از مثال‌های نوعی برای این مد تونل‌زنی، همجوشی زیرسدی هسته‌های میان‌وزن است. در اثر جفت‌شدگی درجات آزادی داخلی سیستم با درجه‌ی آزادی مربوط به مختصه‌ی حرکت نسبی هسته‌ها که دستخوش تونل‌زنی می‌شود، سطح مقطع همجوشی افزایش می‌یابد. ما با استفاده از رهیافت انتگرال مسیر به بررسی نقش ارتعاشات سطحی هسته‌ها در سطح مقطع همجوشی در حد تونل‌زنی سریع (سادن) می‌پردازیم. حد شبه سادن با استفاده از نظریه‌ی اختلال مورد بررسی قرار گرفته و جنبه‌های جدیدی از این ملاحظات بحث شده است. اثر جفت‌شدگی عبارتست از بازتوزیع سدها با عامل وزنی که در حالت عمومی یک توزیع پواسونی است. توزیع سدی نسبت به اثرات جفت‌شدگی بسیار حساس است ولی سطح مقطع‌های همجوشی الگوی نسبتاً مشابهی دارند. عامل وزنی توزیع سدی در حد سادن به یک توزیع گاوسی تبدیل می‌شود. نتایج این بررسی برای چند سیستم همجوشی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

# فصل اول

## مقدمه

در برخورد بین دو هسته‌ی سبک، فرآیندی که سبب ترکیب آنها بصورت یک سیستم مرکب و مجزا می‌شود همجوشی نامیده می‌شود [۱]. ساده‌ترین مدل برای توصیف مکانیزم فرآیند همجوشی بر پایه‌ی تونل‌زنی مکانیک کوانتومی هسته‌های درگیر در واکنش را بصورت کره‌هایی صلب در نظر می‌گیرد که برهمکنش بین هسته‌ها بواسطه‌ی پتانسیل دافعه‌ی کولنی و جاذبه‌ی هسته‌ای است و این پتانسیل‌ها تنها به فاصله‌ی نسبی مراکز جرم دو هسته بستگی دارند. همجوشی در این مدل (مدل<sup>۱</sup> BPM [۱،۲]) بصورت توانایی سیستم برای نفوذ در سد پتانسیل تعریف می‌شود.

اگر چه (BPM) در انرژی‌های بالاتر از سد کولنی توصیف قابل قبولی ارائه می‌دهد، با وجود این باید توجه داشت که این مدل اساساً یک بعدی است و تکانه‌ی زاویه‌ای بطور خودکار صفر در نظر گرفته می‌شود [۲،۳]. علاوه بر این، مقایسه‌ی سطح مقطع تجربی همجوشی برای هسته‌های سنگین و نیمه‌سنگین در گستره‌ی انرژی‌های زیرسدی اختلاف چشمگیری با پیش‌بینی‌های نظری نشان می‌دهد [۴-۱]. در واقع سطح مقطع همجوشی به اندازه‌ی چند مرتبه‌ی مقداری از پیش‌گویی‌های نظری بر اساس (BPM) بیشتر است. افزایش سطح مقطع همجوشی در انرژی‌های زیرسدی از جفت‌شدگی درجات آزادی داخلی سیستم با درجات آزادی انتقالی آن ناشی می‌شود. هم به لحاظ تجربی [۵،۶،۷] و هم به لحاظ نظری [۲،۳] به خوبی معلوم شده است که درجات آزادی مربوط به ارتعاشات سطح هسته‌های کروی، دوران هسته‌های تغییرشکل یافته، و تبادل نوکلئونها بویژه نوترونها [۲،۴] سهم عمده‌ای در افزایش سطح مقطع همجوشی دارند.

رهیافت اصولی برای در نظر گرفتن اثرات جفت‌شدگی حل عددی معادلات کانال‌های جفت شده<sup>۲</sup> با استفاده از کدهای مناسب نظیر CCFULL است [۸]. با وجود این، این کدها با در نظر گرفتن تقریبهایی قادر به

---

<sup>۱</sup>. Barrier Penetration Model  
<sup>۲</sup>. Coupled Channel Equations

حل معادلات هستند و در عمل تعداد محدودی از کانال‌ها را می‌توان در نظر گرفت زیرا با افزایش تعداد کانال‌ها زمان لازم برای حل معادلات جفت‌شده به طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد و در مواردی اثرات جفت‌شدگی کانالها از نظر فیزیکی مبهم است [۹،۱۰]. فرمولبندی دیگری بر اساس مفهوم انتگرال مسیر فاینمن [۲،۱۱] وجود دارد که به سادگی می‌توان اثرات جفت‌شدگی را در حالت‌های حدی با تعریف تابع پتانسیل موثر مورد بررسی قرار داد، به نظر می‌رسد این روش نسبت به سایر روشها مثل روشهای نیمه‌کلاسیکی بسیار قدرتمند باشد [۱،۱۲،۱۳].

در این پروژه ابتدا همجوشی از نظر تاریخی بررسی شده و روشهای تجربی و کاربرد آن در فصل دوم بحث شده است، سپس نظریه برخورد و مسئله‌ی پراکندگی در فصل سوم مورد بررسی قرار گرفته و سطح مقطع پراکندگی کشسان محاسبه شده است. با استفاده از قضیه‌ی اپتیکی سطح مقطع کلی واکنش محاسبه شده و با تقریب سهم واکنشهای همجوشی با فرض اینکه برخوردهای ناکشسان تماماً منجر به همجوشی می‌شود مشخص شده است. در فصل چهارم مدل (BPM) و مفهوم توزیع سدی<sup>۱</sup> بحث شده و سعی شده است با روشهای نیمه کلاسیکی مدل ساده‌ی یک بعدی تا حدی اصلاح شود. ارتعاشات سطحی هسته‌ها بطور خاص مورد بررسی قرار گرفته و نقش آنها در سطح مقطع واکنشهای همجوشی بررسی شده است. در فصل پنجم رهیافت انتگرال مسیر دنبال می‌شود. در حالت‌های حدی و در مواردی که استفاده از تقریب سریع<sup>۲</sup> مجاز است جفت‌شدگی خطی و مربعی برای ارتعاشات سطحی در نظر گرفته شده و با استفاده از تئوری اختلال وابسته به زمان در محدوده‌ی تقریب سریع تصحیحاتی در نرخ تونل‌زنی و سطح مقطع همجوشی انجام شده است. اثرات ایزوتوپی در سطح مقطع همجوشی و توزیع سدی تعدادی از سیستمها بررسی و تحلیل شده است و در پایان نتایج بدست آمده مورد بحث و بررسی قرار گرفته و پیشنهادهایی برای کارهای بهتر و دقیقتر ارائه شده است.

---

<sup>۱</sup> . Barrier Distribution

<sup>۲</sup> . Sudden Approximation

## فصل دوم

### همجوشی و مسئله‌ی انرژی

انرژی یکی از مهمترین مسائل دنیای متمدن امروزی است. با افزایش روزافزون نیاز به مصرف انرژی، بشر به دنبال دستیابی به منابع جدید انرژی و استفاده از آن است. وقتی صحبت از انرژی به میان می‌آید نمونه‌های آشنای آن مثل انرژی گرمایی، نور و یا انرژی مکانیکی و الکتریکی در شهردمان مرور می‌شود. از دیرباز آرزوی بشر دستیابی به منبعی از انرژی بوده که علاوه بر اینکه بتواند مدت مدیدی از آن استفاده کند تولید پسماندهای خطرناک نیز در پی نداشته باشد. اکنون در هزاره‌ی سوم میلادی این آرزوی به ظاهر دست‌نیافتنی کم‌کم به واقعیت می‌پیوندد و بشر خود را آماده می‌کند تا با ساخت نیروگاه‌های گرماسته‌ای آرزوی نیاکان خود را تحقق بخشد. سوختی پاک و ارزان به نام هیدروژن، سرشار از انرژی و پسماندی بسیار پاک به نام هلیوم. امید می‌رود در چند دهه‌ی آینده با حل مسائل مربوط به تکنولوژی استفاده از آن، این منبع عظیم انرژی جایگزین سوخت‌های فسیلی بشود.

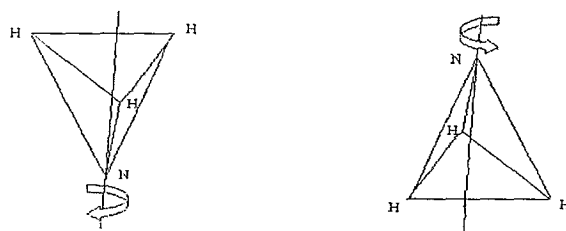
#### ۱-۲ بررسی تاریخی

آستون<sup>۱</sup> در سال ۱۹۲۰ با استفاده از طیف‌سنج جرمی بصورت تجربی دریافت که جرم هسته‌ی هلیوم مقداری کمتر از چهار برابر جرم هسته‌ی هیدروژن است [۱۴]. اگر چه در آن زمان تکنیک‌های تجربی و اسباب‌های اندازه‌گیری زیاد دقیق نبودند ولی اختلاف جرمی به حدی بود که آستون موفق به اندازه‌گیری آن شد. به دنبال آن آدینگتون<sup>۲</sup> پیشنهاد کرد که تبدیل هیدروژن به هلیوم عامل دوام و بقای خورشید است و می‌تواند انرژی هنگفتی تولید کند. منشا این انرژی هنگفت نابودی جرم در واکنش سوختن هیدروژن است و هر تغییر کوچکی در جرم بنا به رابطه‌ی معروف اینشتین<sup>۳</sup> انرژی زیادی را تولید می‌کند. اما همچنان مشکل جدی احساس می‌شد و دمای ستاره-

---

<sup>۱</sup>. Aston  
<sup>۲</sup>. Eddington  
<sup>۳</sup>. Einstein

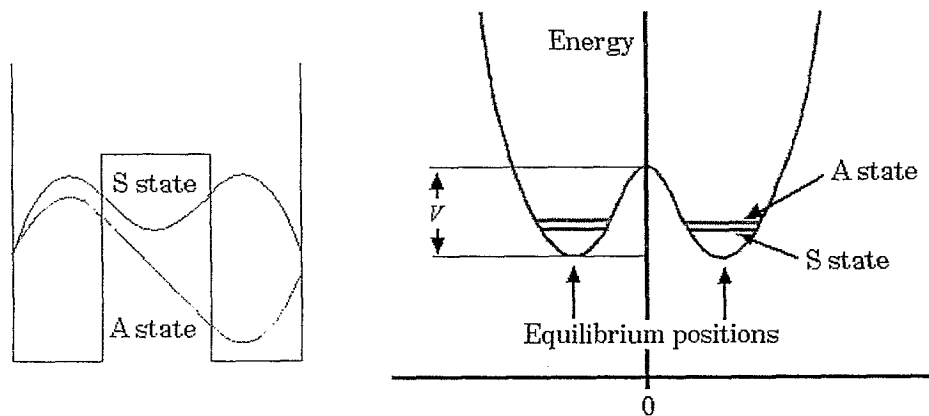
ستاره‌ها که با استفاده از روشهای طیف‌سنجی نوری محاسبه می‌شد خیلی کمتر از دمای لازم برای شروع و ادامه‌ی واکنشهای فوق بود. انرژی جنبشی هر هسته در حال تعادل حرارتی با تابع توزیع بولتزمن<sup>۱</sup> تعیین می‌شود [۱۵،۱۶]. در این صورت با محاسبات سرانگشتی دمای مورد نیاز برای غلبه بر سد کولنی در حدود  $10^{10}$  K (کلوین) برآورد می‌شود که البته وجود چنین دمای زیادی برای خورشید ما بعید به نظر می‌رسد، حال آنکه برای هسته‌های سنگین-تر از هیدروژن دمای مورد نیاز از این مقدار هم بیشتر است. با تولد مکانیک کوانتومی در سال ۱۹۲۰ و به دنبال آن مفهوم تونل‌زنی کوانتوم مکانیکی، امکان توجیه چنین واکنشهایی فراهم شد. از نظر تاریخی تونل‌زنی کوانتومی اولین بار توسط هوند<sup>۲</sup> در سال ۱۹۲۷ برای توصیف بازآرایی<sup>۳</sup> ملکول آمونیوم  $NH_3 \rightleftharpoons H_3N$  استفاده شد [۱۷]. ملکول آمونیوم در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. سه اتم هیدروژن در سه گوشه‌ی یک مثلث متساوی‌الاضلاع قرار دارند و اتم نیتروژن می‌تواند در بالا و یا پایین مثلث قرار گیرد، جهت های بالا و پایین از آن رو قابل تعریف هستند که ملکول حول محوری که در شکل نشان داده شده است دوران کند. بسامد نوسان ملکول آمونیوم به دقت اندازه‌گیری شده است. ( $23.87 \text{ GHz}$ ). با استفاده از چاه پتانسیل دوگانه‌ی متقارن<sup>۴</sup> (شکل ۲-۲) می‌توان رفتار نوسانی ملکول آمونیوم را توجیه کرد. اگر ارتفاع سد میانی واقعاً بینهایت باشد هیچ احتمالی برای نوسان ملکول بین این دو حالت وجود ندارد و اگر ملکول چپگرد و یا راستگرد باشد الزاماً تا ابد در این حالت باقی می‌ماند و البته این خلاف تجربه است [۱۸].



شکل (۱-۲): آرایش فضایی ملکول آمونیوم

<sup>۱</sup>. Boltzmann  
<sup>۲</sup>. Hund  
<sup>۳</sup>. Rearrangement  
<sup>۴</sup>. Symmetrical Double Well





شکل (۲-۲): چاه پتانسیل دوگانه متقارن واقعی (سمت راست) و تقریبی (سمت چپ) ملکول آمونیوم. حالت‌های پادمقارن (متقارن) هستند.

پتانسیل واقعی مسئله‌ی فوق را می‌توان با استفاده از شکل بالا (سمت راست) نشان داد. اگر فرض کنیم ذره‌ای با انرژی  $\epsilon$  در یکی از چاه‌های پتانسیل باشد، و با فرض اینکه ارتفاع سد میانی  $V$  باشد، نسبت زمان تونل-زنی  $\tau$  به دوره تناوب نوسان ذره  $T$  بصورت زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$\frac{\tau}{T} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi \epsilon}{V}} e^{V/\epsilon} \quad (۱-۲)$$

گامو<sup>۱</sup>، [۲۰] گورنی<sup>۲</sup> و کاندن<sup>۳</sup> [۲۱، ۲۲] با استفاده از این نظریه توانستند با موفقیت چشمگیری واپاشی آلفازای هسته‌ها را که تا قبل از کشف تونل‌زنی کوانتومی توجیه علمی درستی نداشت توضیح دهند و نیمه عمرهای هسته‌های رادیواکتیو را بصورت تابعی از انرژی ذره گسیل شده بدست آوردند. فاولر<sup>۴</sup> و نوردهایم<sup>۵</sup> برای توجیه گسیل سرد<sup>۶</sup> الکترون‌ها از فلزات تحت تاثیر میدان الکتریکی شدید از این نظریه استفاده کردند [۲۳]. این تلاش‌های اولیه و مکرر توسط پیشگامان نظریه منجر به پیشرفت و توسعه در فیزیک و تکنولوژی ابررساناها

<sup>۱</sup>. Gamow  
<sup>۲</sup>. Gurney  
<sup>۳</sup>. Condon  
<sup>۴</sup>. Fowler  
<sup>۵</sup>. Nordheim  
<sup>۶</sup>. Cold Emission

شد [۲۴]. اثر جوزفسون<sup>۱</sup> (برقراری جریان بین دو قطعه‌ی ابررسانا که توسط لایه‌ی نازکی از ماده‌ی عایق از هم جدا شده‌اند [۲۴،۲۵]) یکی از نمونه‌های شناخته‌شده از کاربرد تونل‌زنی در علم ابررسانایی و فیزیک حالت جامد است و یکی از پیروزیهای بزرگ مکانیک کوانتومی به شمار می‌رود.

## ۲-۲ اهمیت مطالعه‌ی واکنشهای هسته‌ای

اولین واکنش همجوشی توسط کاکرافت<sup>۲</sup> و والتون<sup>۳</sup> در سال ۱۹۳۲ با بمباران نمونه‌ی لیتیم توسط پروتونهای با انرژی در حدود ۱۰۰ KeV انجام شد، آنها موفق شدند سطح مقطع واکنش را اندازه‌گیری کرده و مقادیر تجربی را بدست آورند. پیشرفت فیزیک هسته‌ای قویاً به پیشرفت و توسعه در تکنولوژی و ساخت شتابدهنده‌های بزرگ وابسته است. در سالهای اخیر حتی امکان مطالعه‌ی واکنشهای همجوشی برای هسته‌های سنگین نیز فراهم شده است. عموماً واژه‌ی هسته‌ی سنگین به تمامی هسته‌های سنگین‌تر از هلیوم ( $A > 4$ ) اطلاق می‌شود. شتابدهنده‌های امروزی قادرند هسته‌های سنگین را به انرژی‌های بالاتر از انرژی سکون خود ذرات برسانند، زمانی که هسته‌ها با چنین انرژی‌های زیادی برخورد می‌کنند امکان مطالعه‌ی برهمکنش بین نوکلئونهای منفرد فراهم می‌شود و عملاً در آزمایشگاه به شرایطی که در مرحله‌ی قبل از انفجار بزرگ<sup>۴</sup> در جهان حاکم بوده است نزدیک می‌شویم [۲۶]. لزوم انجام چنین مطالعاتی از دو جهت ضروری به نظر می‌رسد، نخست اینکه بر مبنای نظریه‌ی شناخته‌شده‌ی امروزی انفجار بزرگ عامل پیدایش جهان هستی‌ای است که ما در آن زندگی می‌کنیم و آن را به شکل کنونی‌اش می‌بینیم و دوم آنکه امیدواریم قوانین فیزیکی پایه و بنیادین حاکم بر عالم و بسیاری از اسرار جهان را با چنین مطالعاتی بشناسیم. احتمالاً و به بیان بهتر یقیناً قوانین فیزیکی وجود دارند که تا به امروز برای ما انسانها پنهان مانده‌اند، قوانین الکترودینامیک کوانتومی که معتقدیم به عنوان بهترین قوانین شناخته شده در فیزیک هستند می‌توانند با مطالعه‌ی برخوردهای بین هسته‌های سنگین و در شرایطی که هرگز با آن روبرو نبوده‌ایم مورد آزمایش و امتحان قرار گیرند و ممکن است بینش جدیدی از فیزیک و الکترودینامیک کوانتومی

---

<sup>۱</sup> . Josephson

<sup>۲</sup> . Cockroft

<sup>۳</sup> . Walton

<sup>۴</sup> . Big Bang

برای ما آشکار شود. هدف دیگر این مطالعات و چالشها تولید و سنتز عناصر<sup>۱</sup> و مواد جدید در آزمایشگاه است [۲،۲۶]. امروزه تولید گونه‌های<sup>۲</sup> هسته‌ای که بصورت ایزوتوپیهای پایدار در طبیعت یافت نمی‌شوند و مطالعه‌ی ساختار و شناخت برهمکنش بین آنها مورد توجه پژوهشگران و متخصصان فیزیک هسته‌ای است. با استفاده از همجوشی سرد<sup>۳</sup> امکان تولید عناصر فرا اورانیوم ۱۱۲، ۱۱۱، ۱۱۰،  $Z = ۱۱۰$  فراهم شده است [۲۶،۲۷]. این هسته‌های ابرسنگین شدیداً تغییر شکل یافته هستند و در واکنشهای زیر تولید می‌شوند. ( ${}^1_0n$  برای نوترون بکار رفته است)



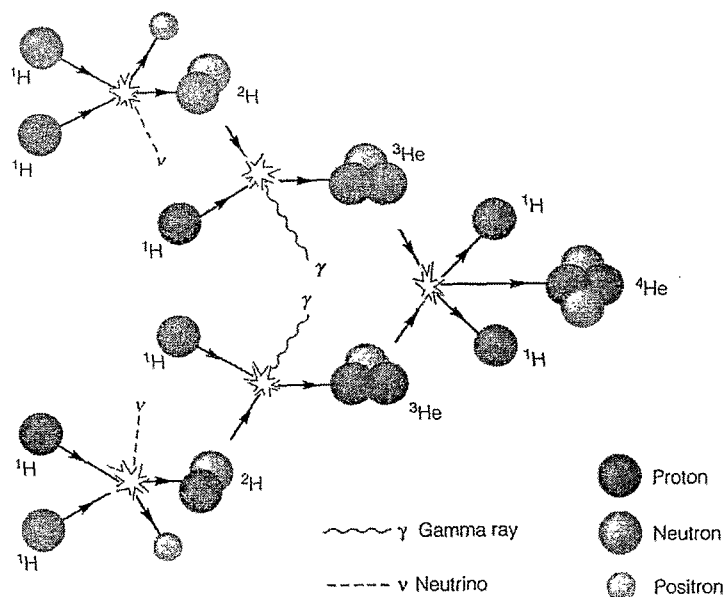
### ۲-۳ همجوشی در طبیعت و سوختن هیدروژن

اولین واکنشهای همجوشی که در یک ستاره‌ی جوان مثلاً خورشید صورت می‌گیرد سوختن هیدروژن است. منظور از سوختن هیدروژن تبدیل پروتونها به هسته‌های هلیوم معمولی (ذرات آلفا) است (شکل (۲-۳)). در تمامی این نوع واکنشها قوانین بقای شناخته شده حفظ می‌شوند. دمای بالا و چگالی بالا دو فاکتور مهم در تعیین نرخ واکنشهای هسته‌ای است [۱۶،۲۸]. حرکت هسته‌ها در چنین محیطی که به علت تحرکات دمایی شدیداً یونیزه است و محیط پلاسما نامیده می‌شود، کاملاً تصادفی بوده و مکانیک آماری قوانین حاکم بر آنها را با تابع توزیع حرارتی بولتزمن توصیف می‌کند. چگالی بالا تضمین می‌کند که هسته‌ها به دفعات با یکدیگر روبرو خواهند شد و دمای بالا مطمئن می‌سازد که برخوردها پرانرژی هستند. در چنین شرایطی احتمال معقولی برای غلبه بر سد کولنی و انجام واکنشهای هسته‌ای وجود خواهد داشت و یک ستاره بطور طبیعی دارای چنین شرایطی است.

<sup>۱</sup>. Element Synthesis

<sup>۲</sup>. Species

<sup>۳</sup>. Cold Fusion



شکل (۲-۳): مراحل مختلف تبدیل هیدروژن به هلیوم

### ۲-۳-۱ روشهای محصورسازی پلاسما

در عمل و در آزمایشگاه با استفاده از تکنیکهایی می توان محیطی با دما و چگالی بالا تولید کرد و امروزه این امر بر عهدهی متخصصان فیزیک پلاسما است. به دلیل دمای فوق العاده زیاد پلاسما، عملاً با هیچ محفظه‌ی مکانیکی نمی توان محیط پلاسما را جدا کرد، زیرا تبادل انرژی بطور همزمان پلاسما را خنک و محفظه را ذوب می کند [۲۸]. برای غلبه بر این مشکل معمولاً از دو روش برای محصورسازی پلاسما استفاده می شود. روش اول محصورسازی مغناطیسی (MCF)<sup>۱</sup> است و از میدانهای مغناطیسی برای حبس پلاسما استفاده می شود [۱۶،۲۸]. روش دوم محصورسازی لختی (ICF)<sup>۲</sup> است که در این روش بمباران قرصهای کوچک سوخت همجوشی توسط تپهای پرشدت لیزر، باعث گرم شدن و متراکم سازی آن تا چگالی های بالا می شود [۱۶،۲۸]. روش دیگری که برای همجوشی استفاده می شود، همجوشی به شیوهی کاتالیزور میونی (μCF)<sup>۳</sup> است و در آن از تزریق میونها برای افزایش نرخ همجوشی استفاده می شود [۱۶]. پیدایش میون (ذره ای با بار الکترون و جرمی تقریباً دویست

<sup>۱</sup> . Magnetic Confinement Fusion

<sup>۲</sup> . Inertial Confinement Fusion

<sup>۳</sup> . Muon Catalyzed Fusion