تقدیم به روح پرفتوح

استاد شهید دکتر مجید شهریاری

شهید راه عزت و سربلندی ایران

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

دانشگاه دامغان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

مطالعه چرخه‌ی کاتالیزور پایونی در همجوشی هسته‌ای اینرسی در پلاسمای چگال D/T

توسط:

قاسم آقاسیان بهنمیری

استادان راهنما:

دکتر نیما قلعه

دکتر محمد مهدوی

بهمن ماه ۱۳۹۱

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. سلام و درود بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز ....

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، بیشتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین، بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکرالله عزوجل"

از پدر و مادر عزیزم ... این دو معلم بزرگوارم... که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاوری بی‌چشم‌داشت برای من بوده‌اند.

از جناب آقای ابراهیم خراسانی که با راهنمایی های خود باعث آرامش و اطمینان خاطر اینجانب شده است.

از همسرم که با قلبی آکنده از عشق و معرفت محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است.همدلی که با واژه ی نجیب و مغرور تلاش ; آشنایی دارد و مرا در راه رسیدن به اهداف عالی یاری می رساند.

از استاد صبور و باتقوا جناب آقای دکتر محمد مهدوی که زحمت راهنمایی این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید.

از استاد با کمالات و شایسته جناب آقای دکترنیما قلعه که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را برعهده گرفتند.

و از استادان فرزانه و دلسوز جناب آقای دکترسهیل خوشبین‌فر و جناب آقای دکتر حسین توکلی که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

چکیده

مطالعه‌ی چرخه‌ی کاتالیزور پایونی در همجوشی هسته‌ای اینرسی در پلاسمای چگال D/T

به وسیله‌ی:

قاسم آقاسیان بهنمیری

یکی از روشهای تولید انرژی هسته‌ای، همجوشی هسته‌ای ایزوتوپهای هیدروژن به روش فشردگی اینرسی است. در این روش پلاسمای سوخت D/T تحت تابش پالس لیزری پرقدرت متراکم و سپس شرایط اشتعال و سوختن قرص سوخت مهیا می‌شود. در مرحله فشردگی قرص توسط باریکه لیزر پرقدرت، در اثر برخورد باریکه لیزر با سطح قرص، محیط یونیزه شده و الکترونهای نسبیتی تولید می‌شوند و این الکترونهای نسبیتی در فرایند برخورد با یونهای پلاسمای D/T باعث انتقال انرژی از لیزر به یونهای پلاسمای سوخت می‌شوند. در جریان برخورد الکترونهای نسبیتی با یونهای محیط، احتمال تولید ذرات پایون وجود خواهد داشت. پایونهای تولیدی در برخورد با هسته‌های اتم هیدروژن کند شده و در نهایت منجر به تولید اتمهای پایونی خواهد شد. اتمهای پایون تولید شده در مدت زمان بسیار کوتاهی مولکولهای پایونی را بوجود خواهند آورد. در این فرایند، در اثر کاهش نیروی دافعه کولنی بین هسته های اتم توسط پایون، احتمال رخ دادن همجوشی هسته‌ای بین ایزوتوپهای D/T وجود خواهد داشت.

حاصل چنین واکنشی، آزادسازی π با احتمال مشخص خواهد بود. در نتیجه، *π*های آزاد می‌توانند زنجیره واکنش را تا واپاشی و از بین رفتن آن ادامه دهند. با نوشتن معادلات دینامیکی حاکم بر چگالی ذرات چرخه و حل معادلات به کمک روش مونت کارلو و کد LSOD، برای غلظت های بهینه c_t=۰/۴ و c_d=۰/۶ پرداختیم. . محاسبات نشان می‌دهند که چگالی نسبی پایون پس از ورود به چرخه پس از مدت زمان حدود ۴۰ ns به حداقل خود می رسد، یعنی پس از گذشت این زمان پایون به یون‌های پلاسما می‌چسبد و تشکیل اتم پایونی می‌دهد.اتم‌های پایونی پس از گذشت حدود ۱۰ ns یا واپاشی می‌کنند و یا تشکیل مولکول پایونی می‌دهند. مولکول پایونی πdt نیز پس از گذشت حدود ۱۰ ns فرایند همجوشی انجام می‌دهد. همچنین آهنگ چرخه‌ی پایونی پس از گذشت زمانی حدود ۱۶ ns به حداکثر مقدار خود یعنی ۵۲۵/۸۸×۱۰^۵ s^{-1} می‌رسد. با توجه به عمر کوتاه ذرات پایون مشاهده می‌شود تعداد چرخه‌ای که پایون در مدت زمان عمرش کاتالیز می‌کند اگر چه شرایط همجوشی را مهیا می‌کند ولی برای تولید انرژی لازم این تعداد چرخه کافی نمی‌باشد.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ای ذرات بنیادی **۱**

۱-۱ تاریخچه کشف ذرات بنیادی ۱

۱-۲ ذره ها و پادذره ها ۲

۱-۳ لپتون ها ۲

۱-۴ باریون ها ۳

۱-۵ مزون ها ۴

۱-۶ پایون ها ۵

فصل دوم: مکانیزم برهم کنش ذرات باردار با محیط **۸**

۲-۱ مقدمه ۸

۲-۲ انرژی بستگی ۱۰

۲-۳ عوامل موثر در همجوشی هسته ای ۱۱

۲-۴ اتلاف انرژی ۱۲

۲-۵ سطح مقطع همجوشی ۱۷

۲-۶ آهنگ واکنش های همجوش ۱۸

۲-۷ معادلات دینامیکی واکنش های هسته ای ۲۰

۲-۸ مصرف ضربانی$d+t$ ۲۱

فصل سوم: شرایط تولید انرژی **۲۳**

۳-۱ مقدمه ۲۳

۳-۲ منشا تولید انرژی هسته ای ۲۴

۳-۳ واکنش های شکافت ۲۵

۳-۴ همجوشی هسته ای ۲۶

۳-۵ ایده های اصلی در راکتورهای همجوشی ۲۷

۳-۶ همجوشی به روش محصورسازی مغناطیسی(MCF) ۲۸

۳-۷ میدان های توروئیدی ۲۹

۳-۸ همجوشی از طریق محصور کردن اینرسی (ICF) ۳۰

۳-۹ اشتعال مستقیم ۳۱

۳-۱۰ اشتعال غیرمستقیم ۳۲

۳-۱۱ اشتعال سریع ۳۳

۱۲-۳ همجوشی به روش کاتالیزور ۳۵
۱۳-۳ الکترون های نسبیتی ۳۶
۱۴-۳ فرایند های بر هم کنش الکترون های سریع با یون های پلاسما و احتمال تولید پایون ۳۹
۱۵-۳ دیفرانسیل سطح مقطع پراکندگی الکترون های سریع با ذرات باردار پلاسما ۴۱
۱۶-۳ توان توقف الکترون های سریع ۴۲
۱۷-۳ فرکانس برخورد الکترون ها با ذرات پلاسما ۴۴
فصل چهارم: بررسی چرخه کاتالیزور پایونی ۴۶
۱-۴ چرخه کاتالیزور پایونی ۴۷
۲-۴ معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم همجوشی دوتریوم-تریتیوم ۴۸
۳-۴ محاسبه ضریب تکثیر پایونی در مخلوط D/T ۴۹
۴-۴ شرایط اولیه حل معادلات دینامیکی ۵۱
۵-۴ کد کامپیوتری حل معادلات دیفرانسیل ۵۲
۶-۴ بحث و نتیجه گیری ۵۵
مراجع ۵۹

فهرست جدول ها

عنوان و شماره صفحه

جدول (۱-۱): ویژگی لپتون ۳
جدول (۱-۲): ویژگی باریون ها ۴
جدول (۲-۱): سطح مقطع واکنش های همجوشی مختلف در دو دمای ۱۰keV و ۱۰۰keV و بیشینه انرژی ۱۸
جدول (۴-۱): پارامترهای چرخه D/T ۵۲

فهرست شکل ها

عنوان صفحه

شکل (۱-۱): نمودار فاینمن مبادله پایون بین یک پروتون و یک نوترون ۷
شکل (۲-۱): نمای شماتیک از حفاظ دبای ۹
شکل (۲-۲): تغییرات انرژی بستگی نوکلئون بر حسب عدد جرمی ۱۱
شکل (۲-۳): سد کولنی برای انجام همجوشی هسته‌ای ۱۲
شکل (۲-۴): ذره ای به جرم M، بارZe و سرعت V که با الکترونی با جرم M و پارامتر برخورد Z برهم‌کنش می‌کند ۱۳
شکل (۲-۵): سطح مقطع واکنش‌های مختلف همجوشی برحسب انرژی جنبشی ۱۷
شکل (۲-۶): آهنگ انجام واکنش به صورت تابعی از دمای پلاسما ۱۹
شکل (۲-۷): نمایش سه حالت مربوط به راکتور همجوشی d+t که به صورت ضربانی کار می‌کند ۲۲
شکل (۳-۱): شکافت هسته‌ای اورانیوم توسط نوترون‌های حرارتی ۲۶
شکل (۳-۲): همجوشی هسته‌های دوتریوم وتریتیوم ۲۶
شکل (۳-۳): عمل محصورسازی با استفاده از میدانهای مغناطیسی [۱۸] ۲۸
شکل (۳-۴): آینه‌های مغناطیسی در یک سیملوله [۱۹] ۲۹
شکل (۳-۵): استفاده از میدان‌های تورئیدی برای جلوگیری از نشت در پلاسما[۲۰] ۳۰
شکل (۳-۶): اشتعال مستقیم قرص سوخت همجوشی[۲۱] ۳۱
شکل (۳-۷): اشتعال غیرمستقیم قرص سوخت همجوشی[۲۲] ۳۲
شکل (۳-۸): سد کولنی بین هسته‌های دوتریوم و تریتیوم ۳۶
شکل (۳-۹): مقایسه چگالی و دمای سوخت برای اشتعال داخلی و خارجی[۲۴] ۳۷
شکل (۳-۱۰): اشتعال سریع قرص سوخت توسط لیزرهای پرقدرت[۳۱] ۳۸
شکل (۳-۱۱): نمودار فاینمن مبادله‌ی فوتون در برهم‌کنش الکترون‌های سریع با الکترون‌های پلاسما ۳۹
شکل (۳-۱۲): نمودار فاینمن برخورد الکترون‌های سریع با یون D^+ پلاسما و تجزیه الکتریکی آن ۴۰
شکل (۳-۱۳): نمودار فاینمن برخورد الکترون‌های سریع با یون T^+ پلاسما و تجزیه الکتریکی آن ۴۰
شکل (۳-۱۴): نمودار سطح مقطع کل فرآیند سه‌گانه برحسب کمیت بدون واحد $\gamma_b{}^{-3}$. [۳۱] ۴۱
شکل (۴-۱): نمودار چرخه‌ی کاتالیزور پایونی ۴۷
شکل (۴-۲): طرح چرخه‌ی کاتالیزور پایونی در محیط D/T ۵۰
شکل (۴-۳): نمودار چگالی نسبی پایونی نسبت به زمان ۵۴
شکل (۴-۴): نمودار تعداد اتم‌های πt نسبت به زمان ۵۵
شکل (۴-۵): نمودار تعداد اتم‌های πd نسبت به زمان ۵۵
شکل (۴-۶): نمودار تعداد اتم‌های πdt نسبت به زمان ۵۶

شکل (۴-۷): نمودار آهنگ چرخه نسبت به غلظت دوتریوم ۵۷
شکل (۴-۸): نمودار ضریب چسبندگی موثر بر حسب غلظت دوتریوم ۵۷
شکل (۴-۹): نمودار ضریب چرخه پایونی نسبت به زمان ۵۸

فصل اول

مقدمه ای بر ذرات بنیادی

۱-۱) تاریخچه کشف ذرات بنیادی

تاریخچه تحقیق و پژوهش در مورد ذرات بنیادی را می‌توان به سه دوره تقسیم کرد. دوره اول از سال ۱۸۹۷، که تامسون الکترون را کشف و نسبت بار به جرم آن را اندازه‌گیری کرد شروع شد. در سال‌های بین ۱۸۹۷ تا ۱۹۳۲ ذراتی که در اتم و هسته آن یافت می‌شوند کشف شدند. این ذرات عبارتند از الکترون و پروتون که در سال ۱۹۱۱ توسط رادرفورد و نوترون نیز توسط چادویک در سال ۱۹۳۲ کشف شدند. در این دوره، اثر کامپتون و فوتوالکتریک نیز فرمولبندی شدند. در همین سال، دانشمندان بر این عقیده بودند که ماده فقط از چند ذره متمایز تشکیل شده و مسئله اصلی برای آن‌ها آگاهی از چگونگی به‌هم‌جوش‌خوردن پروتون‌ها و نوترون‌ها در هسته بود. البته بعدها دریافتند که این تصور، تصوری گمراه کننده بوده است.

دوره دوم از سال ۱۹۳۲ تا حدود سال ۱۹۶۰ به طول انجامید. در این مدت ذراتی کشف شدند که در ماده معمولی وجود نداشتند و بعد از مدت بسیار کوتاهی بعد از بوجود آمدن، خودبه‌خود به ذرات دیگری تبدیل می‌شدند، بنابراین هر کدام از این ذرات ناپایدار و عمر متوسطی بین $10^{-6}s$ تا $10^{-16}s$ داشتند. این ذرات عمرشان آنقدر طولانی است که می‌توانند قبل از واپاشی، فاصله قابل سنجشی را طی کنند تا بتوان از روی ردهایی که به جای می‌گذارند تشخیص داده شوند. ذراتی که به این طریق کشف شدند شامل میون ها (μ)، مزون‌های π، مزون‌های k، هیپرون‌های لاندا (Λ)، هیپرون‌های سیگما (Σ)، هیپرون‌های کسی (Ξ) می‌شوند. تا سال ۱۹۶۰ در حدود ۳۰ ذره شناخته شده بودند.

دوره سوم از سال ۱۹۶۰ تاکنون می‌باشد. تعداد ذرات بنیادی شناخته شده به سرعت افزایش یافته است. بیشتر ذراتی که در این مدت کشف شده‌اند، از نوعی می‌باشند که به سرعت در مدت کمتر از $10^{-19}s$ به ذرات دیگر واپاشی می‌کنند. ذراتی که با این سرعت

متلاشی می‌شوند نمی‌توانند فاصله قابل سنجشی قبل از واپاشی طی کنند تا بتوان از ردی که برجا می‌گذارند شناسایی شوند، بنابراین وجود آن‌ها از طریق بقای انرژی، اندازه‌حرکت، اندازه‌حرکت زاویه‌ای و بار، خواص مربوط به انرژی ذره فرضی که به این فراورده‌ها واپاشی شده‌اند تعیین می‌گردند.

۱-۲) ذره ها و پادذره ها

در سال ۱۹۳۱ فیزیکدانان دریافتند که برای هر ذره‌ی باردار باید ذره‌ی باردار دیگری با همان جرم و اسپین ولی با بار مخالف وجود داشته باشد. این ذره که بار مخالف دارد، پادذره آن ذره نامیده می‌شود. وجود پادذره‌ها وقتی که در سال بعد کارل اندرسون پوزیترون یا همان پادذره‌ی الکترون را کشف کرد تائید شد. پادذره‌ی اغلب ذرات شناخته شده، ذره‌ی شناخته شده‌ی دیگری است و معمولاً این دو را جلوه‌های متفاوت ساختار واحدی می‌شمارند. البته باید به این نکته توجه کرد که ذراتی چون فوتون که هیچ نوع باری ندارند از پادذراتشان غیرقابل‌تمیزدادن می‌باشند.

۱-۳) لپتون ها

نام لپتون از یک کلمه یونانی به معنی سبک گرفته شده است زیرا برای مدت های طولانی سبک ترین ذرات شناخته شده عبارت بودند از الکترون، پوزیترون و میون‌های منفی و مثبت، که همگی آنها لپتون یا پادلپتون هستند. لپتون‌ها خانواده‌ای مشتمل بر شش عضو می‌باشند که هر کدام از این ذرات دارای پادلپتونی با همان جرم، اسپین و طول عمر، ولی با بار و پاریته ذاتی مخالف است. خانواده لپتون‌ها را همچنین می توان به سه نسل تقسیم کرد: الکترون و نوترینوی الکترونی (ν_e, e)، میون و نوترینوی میونی (ν_μ, μ)، تاو و نوترینوی تاونی (ν_τ, τ).

همگی لپتون ها دارای اسپینی برابر با $\frac{1}{2}\hbar$ هستند و دارای خاصیت باری مانند دیگری هستند که عدد لپتونی نامیده می‌شوند. عدد لپتونی الکترون، میون و دو نوترینوی آنها ۱+ و پاد ذره های آنها ۱- می‌باشد. این دسته از فرمیون ها از نظر کنش‌های متقابل، با همه ذرات دیگر به جز فوتون فرق دارند. این واقعیت که لپتون‌ها و فوتون‌ها از هیچ کدام از واکنش‌های هسته‌ای قوی متاثر نمی‌شوند ممکن است به جرم کم آنها ارتباط داشته باشد. خواص

لپتون‌های باردار، بیشتر از روی واکنش‌های متقابل الکترومغناطیسی آنها با فوتون‌ها بدست می‌آید. همچنین این لپتون‌ها به جز اختلاف جرمشان در همه فرایندهای الکترومغناطیسی و واکنش‌های هسته‌ای ضعیف به طور مشابه عمل می‌کنند.

نوترینوها ذراتی بدون جرم می‌باشند که بار الکتریکی ندارند و از برهم‌کنش‌های هسته‌ای ضعیف متأثر می‌گردند. به همین دلیل مطالعه آنها دشوار است زیرا معمولاً بدون هرگونه برهم‌کنشی از آشکارساز عبور می‌کنند.

جدول (۱-۱): ویژگی لپتون ها [۱]

نام	جرم $(\frac{MeV}{c^2})$	بار (e)	اسپین $(\frac{\hbar}{2})$	نیمه عمر (s)
E	۰/۵۱۱	-۱	۱	پایدار
ν_e	$< ۵/۱ \times ۱۰^{-۶}$	۰	۱	پایدار
μ	۱۰۵/۷	-۱	۱	$۲/۱۹۷ \times ۱۰^{-۶}$
ν_μ	<۰/۲۷	۰	۱	پایدار
τ	$۱۷۷۷/۱ \pm ۰/۵$	-۱	۱	۲/۹۶
ν_τ	<۳۱	۰	۱	پایدار

۱-۴) باریون‌ها

باریون‌ها، فرمیون هستند. کلمه باریون مشتقی از یک کلمه یونانی به معنی سنگین می‌باشد. این ذرات اسپین‌شان مضرب فردی از $\frac{\hbar}{2}$ و جرمشان برابر یا بیشتر از جرم پروتون می‌باشد. یکی از ویژگی‌های مشخص‌کننده باریون‌ها برهم‌کنش های هسته‌ای قوی آنهاست. این برهم‌کنش‌ها موجب می‌شوند که باریون‌ها به سرعت به یکدیگر تبدیل شوند و مبادله اندازه‌حرکت بین آن‌ها صورت گیرد. اگر پروتون‌ها را استثنا بدانیم همه باریون‌ها ناپایدار هستند. حتی نوترون که به همراه پروتون یکی از اجزای تشکیل دهنده هسته‌ها می باشند نمی‌توانند برای همیشه در حالت آزاد وجود داشته باشند. نوترون ها با طول عمری در حدود $۸۸۷ \pm ۲s$ به یک پروتون، یک الکترون و یک پاد نوترینوی الکترونی واپاشی می‌کنند.

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e \qquad (۱-۱)$$

جدول (۱-۲): ویژگی باریون ها [۲]

نام	اسپین $(\frac{\hbar}{۲})$	چندتایی	بارها(e)	نیمه عمر
N	۱	دوتایی	+۱ , ۰	$\geq ۹ \times ۱۰^{-۲}$
Δ	۳	چهارتایی	+۲،+۱،۰،-۱	$< ۱ \times ۱۰^{-۲۳}$
Λ	۰	یگانه	۰	$۲/۶ \times ۱۰^{-۱۰}$
Σ	۲	سه تایی	$+۱,۰,-۱$	$\leq ۱/۵ \times ۱۰^{-۱۰}$
Ξ	۱	دوتایی	$-۱,۰$	$\approx ۲ \times ۱۰^{-۱۰}$
Ω	۰	یگانه	-۱	$۰/۸ \times ۱۰^{-۱۰}$

۱-۵) مزونها

مزونها ذراتی هستند که اسپین آنها مضرب صحیحی از $\frac{\hbar}{۲}$ و جرم‌هایشان در فاصله جرم مزون پی (که فقط اندکی سنگین‌تر از جرم لپتون‌هاست) تا جرم‌های قابل قیاس با باریون‌ها قرار دارند. مزونهایی با اسپین ۰، ۱، ۲ و ۳ و با بارالکتریکی ۰ و ± ۱ شناخته شده‌اند. مزون‌ها به جز بار الکتریکی دارای بار دیگری نیستند تا بقای آن رعایت شود. ولی مزون های K، یعنی سبک‌ترین ذراتی که دارای شگفتی هستند، از طریق بر هم‌کنش‌های متقابل قوی نمی‌توانند واپاشی کنند.

مزونها در برهم‌کنش‌های ضعیف، قوی و الکترومغناطیسی شرکت می‌کنند. این ذرات هم با یکدیگر و هم با باریونها برهم‌کنش قوی دارند. در حقیقت، برهم‌کنش قوی مزون‌ها با باریون‌ها باعث استحکام هسته می‌شود. در اینجا لازم است به بررسی بیشتر یکی از مزون‌هایی که در برخورد الکترون‌های سریع با یونهای پلاسما امکان تولید آن وجود دارد (پایون منفی) بپردازیم.

۱-۶) پایونها

ساختار ماده از دید فیزیکدانان اواسط دهه‌ی ۱۹۳۰ میلادی نسبتاً ساده بود. آنها سنگ بنای ماده را پروتون‌ها، الکترون‌ها و نوترون‌ها درنظر می‌گرفتند. در آن زمان سه ذره دیگر نیز شناخته شده بود: پرتو گاما (فوتون)، نوترینو و پوزیترون.

شش ذره نام برده شده با عنوان ذرات بنیادی تشکیل دهنده ماده در نظر گرفته شده بودند. در این بین یک سوال مهم بدون پاسخ وجود داشت که اگر هسته اتم دارای تعداد زیادی پروتون است و نیروی دافعه میان آنها بسیار قوی است، پس چرا هسته متلاشی نمی‌شود؟

تعدادی از دانشمندان برای جواب به این سوال نیروی مجهولی را درنظر گرفتند و پیشنهاد کردند که این نیرو باید از نیروهای شناخته شده تا آن زمان قویتر باشد. اولین نظریه برای توجیه این نیروی قوی در سال ۱۹۳۵ میلادی توسط دانشمند ژاپنی به نام یوکاوا که جایزه نوبلی هم برای او به همراه داشت ارائه شد. او بیان کرد که می‌دانیم دو اتم با تعویض الکترون‌ها می‌توانند یک پیوند شیمیایی هم‌ظرفیت ایجاد کنند. به این ترتیب از دیدگاه برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی، ذرات باردار از طریق تبادل فوتون‌ها با یکدیگر برهم‌کنش می‌کنند. یوکاوا با استفاده از این ایده فرض کرد ذره‌ی جدید در بین نوکلئون‌های هسته مبادله می‌شود و نیروی قوی‌ای با برد $۱۰^{-۱۵}$ متر (در حدود قطر هسته) را تولید می‌کند. علاوه بر این او ادعا کرد که برد این نیرو با عکس جرم ذره‌ی حاصل جدید متناسب است و پیشگویی نمود که جرم آن باید در حدود ۲۰۰ برابر جرم الکترون باشد. از طرفی چون جرم این ذره جدید در بین جرم الکترون و پروتون است آن را مزون (که در یونانی یعنی میانی) نامید.

فیزیکدان‌ها برای تایید پیشگویی‌های یوکاوا با مطالعه پرتوهای کیهانی که از فضای بین ستاره‌ها وارد جو زمین می‌شوند آزمایش‌هایی را برای جستجوی مزون انجام داده‌اند. کارل اندرسون و همکارانش در سال ۱۹۳۸ میلادی ذره ای با جرم $۱۰۶\mathrm{MeV}$ کشف کردند که جرم آن تقریبا ۲۰۷ برابر جرم الکترون بود. اما آزمایش های بعدی نشان داد که این ذره به طور ضعیف با ماده برهم‌کنش می‌کند، از این رو حاصل این برهم‌کنش نمی‌تواند نیروی قوی موردنظر باشد. با توجه به این وضعیت معماگونه، دانشمندان فرض کردند که باید دو مزون با

اختلاف جرم کم وجود داشته باشد. این ایده با کشف مزون پی (π) یا پایون توسط سیسیل، فرانک پاول و گیسیپ الچیالینی در سال ۱۹۴۷ میلادی تایید شد.

مزون سبکتری که قبلا توسط اندرسون کشف شده بود، میون نامیده شد. این ذره، برهم‌کنش الکترومغناطیسی ضعیفی انجام می‌دهد و هیچ نقشی در برهم‌کنش‌های قوی بازی نمی‌کند. پیون ها با توجه به بارشان سه نوع هستند: یا فاقد بار الکتریکی هستند $(\pi^{\cdot})$ که جرم آن برابر ۱۳۵ $\frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{c}^{۲}}$ یا دارای بار الکتریکی مثبت (π^{+}) و یا دارای بار الکتریکی منفی (π^{-}) که جرم هر دوی این پایون ها تقزیباً برابر با ۱۳۹/۶ $\frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{c}^{۲}}$. پایون های π^{-} و π^{+} ذرات ناپایداری هستند. به عنوان مثال π^{-} با طول عمر $۲/۶ \times ۱۰^{-۸}\mathrm{s}$ ابتدا به یک میون و یک پادنوترینو واپاشی می‌کند، سپس میون منفی با طول عمر تقریبی $۲/۲ \times ۱۰^{-۶}\mathrm{s}$ به یک الکترون، یک نوترینو و یک پادنوترینو تبدیل می شود. این واپاشی ها به صورت زیر می باشد:

$$\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} + \bar{\nu}_{\mu} \qquad (۲-۱)$$

$$\mu^{-} \rightarrow \mathrm{e}^{-} + \nu_{\mu} + \bar{\nu}_{e} \qquad (۳-۱)$$

اشعه‌های کیهانی که به جو زمین می‌رسند ،پروتونهایی با انرژی بالا، ذرات α و تعداد کمی هسته‌های سبک را شامل می‌شوند. پروتون‌های موجود در پرتوهای کیهانی با پروتون‌های موجود در جو برخورد کرده و مطابق با شکل زیر پایون تولید می‌کنند.

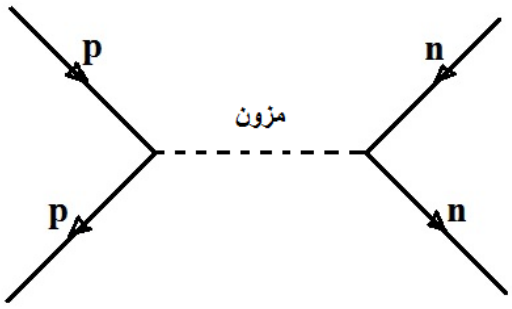
$$\mathrm{p}_{(\text{اشعه کیهانی})} + \mathrm{p}_{(\text{جو})} \rightarrow \mathrm{p} + \mathrm{p} + \text{پایونها} \qquad (۴-۱)$$

پایونها را می‌توان به صورت مصنوعی در اثر وارد کردن پروتون‌های شتاب گرفته در شتابدهنده به داخل هدف گرافیت $(^{۱۲}_{۶}C)$ و برخوردشان با پروتون‌ها و نوترون‌های هسته‌های کربن مطابق با واکنش‌های زیر تولید کرد **[۳]** .

$$\mathrm{p} + \mathrm{p} \rightarrow \begin{cases} \mathrm{p} + \mathrm{p} + \pi^{\cdot} \\ \mathrm{p} + \mathrm{n} + \pi^{+} \end{cases} \qquad (۵-۱)$$

$$\mathrm{p} + \mathrm{n} \rightarrow \begin{cases} \mathrm{p} + \mathrm{p} + \pi^{-} \\ \mathrm{n} + \mathrm{n} + \pi^{+} \\ \mathrm{p} + \mathrm{n} + \pi^{\cdot} \end{cases} \qquad (۶-۱)$$

نمودار فاینمن مبادله پایون بین یک پروتون و یک نوترون در چارچوب برهم‌کنش هسته‌ای قوی به صورت زیر نمایش داده شده است.



شکل (۱-۱): نمودار فاینمن مبادله‌ی پایون بین پروتون و یک نوترون.

با استفاده از رابطه‌ی جرم-انرژی اینیشتن $E = m_\pi c^2$ می‌دانیم که برای تولید یک پایون با جرم m_π مقدار ΔE انرژی موردنیاز است. با استفاده از اصل عدم قطعیت داریم:

$$\Delta E = \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{\hbar}{m_\pi c^2} \qquad (۷-۱)$$

به دلیـل اینکه سرعت پایون از سرعت نـور کمتر است، بیشـترین مسافتی که در مدت Δt مـی‌تواند طی کند برابر با $c\Delta t$ است. داریم:

$$d = c\Delta t \quad \rightarrow \quad d = \frac{\hbar}{m_\pi c} \qquad (۸-۱)$$

از طرفی می‌دانیم که برد نیروی قوی در حدود $۱/۵ \times ۱۰^{-۱۵} m$ است. با قرار دادن این مقدار در رابطه بالا، انرژی سکون پایون بدست می‌آید:

$$m_\pi c^2 = \frac{\hbar c}{d} = \frac{(۱/۰۵ \times ۱۰^{-۳۴})(۳ \times ۱۰^{۸})}{۱/۵ \times ۱۰^{-۱۵}} \qquad (۹-۱)$$
$$= ۲/۱ \times ۱۰^{-۱۱} j \sim ۱۳۰ MeV$$

این مقدار جرم به دست آمده، هم ارز جرم حدود ۲۵۰ الکترون است که با جرم مشاهده شده پایون به خوبی مطابقت دارد.

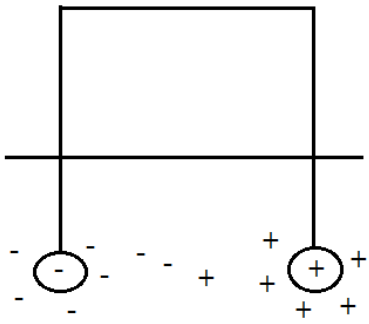
فصل دوم

سازوکار برهم‌کنش ذرات باردار با محیط

۲-۱) مقدمه

اغلب گفته می‌شود ۹۹٪ ماده موجود در طبیعت در حالت پلاسماست، یعنی به شکل گاز الکتریسیته‌داری است که اتم‌هایش به یون‌های مثبت و الکترون‌های منفی تجزیه شده‌اند. این تخمین هر چند ممکن است خیلی دقیق نباشد ولی تخمین معقولی است از این واقعیت که درون ستارگان و جو آنها، ابرهای گازی و اغلب هیدروژن فضای بین ستارگان به صورت پلاسما هستند. در نزدیکی خود ما، وقتی جو زمین را ترک می‌کنیم بلافاصله با پلاسمایی مواجه می‌شویم که شامل کمربندهای تشعشعی وان‌آلن و بادهای خورشیدی است. یک تعریف مفید برای پلاسما عبارتست از اینکه: پلاسما گاز شبه‌خنثی‌ای از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود ارائه می‌دهد. در پلاسمایی که مشتمل بر ذرات باردار است، بارها با حرکت خود می‌توانند توده‌های متمرکزی از بارهای مثبت یا منفی را به طور موضعی به وجود آورند و بدین‌ترتیب سبب پیدایش میدانهای الکتریکی شوند. با حرکت بارها، جریان و در نتیجه میدان مغناطیسی هم تولید می‌شود. این میدانها بر حرکت سایر ذرات باردار که دورتر واقع شده‌اند اثر می‌گذارند. بنابراین اجزای پلاسما حتی در فواصل دور، نیروئی بر همدیگر وارد می‌کنند. همین نیروی کولنی با بردبلند است که به پلاسما، مجموعه وسیعی از انواع حرکات ممکن را عرضه می‌کند. در بعضی از پلاسماها نیروهای الکترومغناطیسی آن قدر از نیروهای ناشی از برخوردهای موضعی عادی بزرگتر هستند که می‌توان کلاً از این نیروهای دسته اخیر، چشم‌پوشی کرد. پلاسما به علت رفتار جمعی که از خود نشان می‌دهد، گرایشی به متأثرشدن در اثر عوامل خارجی ندارد و اغلب طوری عمل می‌کند که گویا دارای رفتار مخصوص به خود است.

یکی از مشخصات اساسی رفتار پلاسما، توانایی آن برای ایجاد حفاظ در مقابل پتانسیل‌های الکتریکی است که به آن اعمال می‌شوند. فرض کنید بخواهیم با وارد کردن دو گلوله بارداری که به یک باتری وصل شده‌اند یک میدان الکتریکی در داخل پلاسما به وجود آوریم. این گلوله‌ها، ذرات با بارهای مخالف خود را جذب می‌کنند و تقریباً بلافاصله، ابری از یونها اطراف گلوله منفی و ابری از الکترونها اطراف گلوله مثبت را فرا می‌گیرند. اگر پلاسما سرد باشد و هیچگونه حرکت حرارتی وجود نداشته باشد، تعداد بار ابر برابر تعداد بار گلوله می‌گردد. در این صورت عمل حفاظ کامل می‌شود و هیچ میدان الکتریکی در حجم پلاسما در خارج از ناحیه ابرها وجود نخواهد داشت. از طرف دیگر، اگر دما معین و محدود باشد، ذراتی که در لبه ابر یعنی جایی که میدان الکتریکی ضعیف است قرار دارند، انرژی حرارتی کافی برای فرار از چاه پتانسیل الکترواستاتیکی پیدا می‌کنند. در این صورت، لبه ابر در شعاعی واقع می‌شود که در آن انرژی پتانسیل تقریبا برابر انرژی حرارتیKT ذرات است و حفاظ کامل نیست [۴].



شکل (۲-۱): نمای شماتیک از حفاظ دبای

چند ویژگی مهم محیط پلاسما به شرح زیر می‌باشد:

۱. طول موج دبای باید خیلی کوچکتر از ابعاد پلاسما باشد $(\lambda_D \ll L)$.
۲. تعداد ذرات موجود در یک کره دبای باید خیلی زیاد باشد.
۳. حاصلضرب فرکانس نوسانات نوعی پلاسما (ω_p)، در زمان متوسط (t) بین برخوردهای انجام شده با اتم‌های خنثی باید بزرگتر از یک باشد$(\omega_p t \gg ۱)$.