دانشگاه تبریز

دانشکده فیزیک

گروه اتمی و مولکولی

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک

عنوان

دزیمتری پرتوهای ایکس و نوترون در اطراف پلاسمای کانونی

استادان راهنما

دکتر صمد سبحانیان

دکتر محمد حمزه تفرشی

استاد مشاور

مهندس منصور جعفری زاده

پژوهشگر

مریم گل‌علیخانی

۱۳۸۷ /۲/

خرداد ۱۳۸۶

۹۵۸۴۳

تقدیم به

پدرم، مادرم

و

مبین

و با تشکر از : جناب آقای دکتر محمدی، سرپرست آزمایشگاه پلاسمای کانونی دانشگاه تبریز
سرکار خانم ناظری، سرپرست آزمایشگاه دزیمتری TLDسازمان انرژی اتمی
جناب آقای دکتر ترک زاده، سرپرست آزمایشگاه دزیمتری نوترون سازمان انرژی اتمی

نام خانوادگی دانشجو: گل علیخانی **نام:** مریم

عنوان پایاننامه: دزیمتری پرتوهای ایکس و نوترون در اطراف پلاسمای کانونی

اساتید راهنما: دکتر صمد سبحانیان- دکتر محمد امیرحمزه تفرشی
استاد مشاور: مهندس منصور جعفری زاده

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** فیزیک اتمی و مولکولی گرایش پلاسما **دانشگاه:**تبریز
دانشکده: فیزیک **تاریخ فارغ التحصیلی:**۱۳۸۶/۳/۲۷ **تعداد صفحه:**۱۱۸

کلید واژه ها: پلاسمای کانونی- اشعه ایکس- پرتوهای نوترون- دزیمتری

چکیده:

این پژوهش در محل آزمایشگاههای پلاسمای کانونی دنا و سهند و با استفاده از دزیمترهای TLD و پلی کربنات انجام شد. در این آزمایش ها با بررسی همسانگردی پرتوهای ایکس حاصل از تنگش جریان در پلاسمای کانونی به طور تجربی نشان داده شد که پرتوهای ساطع شده از نظر زاویه ای کاملا همسانگردند. در ادامه با بررسی همسانگردی پرتوهای نوترون حاصل از تنگش یونهای حاصل از گازدوتریوم نشان داده شد که محل تنگش در تخلیه های مختلف در یک محدوده ۵ سانتیمتری متغیر است وتعداد نوترونهای حاصل از پدیده پرتو-هدف بیش از نوترونهایی است که بطور کروی منتشر شده اند و نوترونهای حاصل از پدیده پرتو-هدف با زاویه ای کمتر از ۱۵ درجه منتشر می شوند.

در ادامه موضوع ایمنی پرتوکاران در آزمایشگاه پلاسمای کانونی مورد بررسی قرار گرفت و با اندازه گیریهای انجام شده مشخص شد دز نوترون در محیط پلاسمای کانونی و در محلی که

ادامه چکیده پایان نامه

اپراتور قرار می گیرد زیر میزان زمینه است و نیازی به استفاده از ابزار حفاظتی برای حفاظت پرتوکاران در برابر پرتوهای نوترونی نمی باشد. دیوار آهنی به قطر ۲ میلیمتر که پیرامون دستگاه قراردارد تاثیر زیادی در حفاظت پرتوکاران در برابر پرتوهای ایکس داشته و شار این پرتوها را تا میزان ۰/۴ برابر کاهش می دهد. در مکان پنجره باز که روی حفاظ آهنی قرار دارد و پرتوکار پشت آن قرار می گیرد، لازم است یک شیشه سربی معادل ۲ میلیمتر سرب قرار داده شود. حداکثر دز اندازه گیری شده در ۲ روز انجام شاتهای مکرر در محیط بیرون از محوطه دستگاه مقدار ۰/۶۳ میلی سیورت است که با توجه به میزان فعلی فعالیت آزمایشگاه امکان فراتر رفتن دز از حدود مجاز سالیانه که ۲۰ میلی سیورت است وجود ندارد ولی جهت کاهش میزان پرتوگیری (بهینه نمودن حفاظت در برابر اشعه) با استفاده از یک حفاظ سربی معادل ۲ میلیمتر سرب، دز محیط خارج از محوطه دستگاه به زیر مقدار دز زمینه کاهش می یابد ولی می توان با روش های کم هزینه تر مثل افزایش فاصله پرتوکار تا دستگاه، افزایش تعداد پرتوکاران و ... دز پرتوکاران را کاهش داد.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
فصل ۱- بررسی منابع	۳
۱-۱ – پلاسمای کانونی مدل فیلیپوف و مکانیزم تولید پرتو	۴
۱-۱-۱- معرفی عمومی پلاسمای کانونی مدل فیلیپوف	۴
۱-۱-۲- چگونگی عملکرد پلاسمای کانونی مدل فیلیپوف	۶
۱-۱-۳- مکانیزمهای تولید پرتو	۱۱
۱-۲ – کمیتها و یکاهای دزسنجی و پرتوسنجی	۱۵
۱-۲-۱ -کمیتهای پرتوسنجی	۱۵
۱-۲-۲ - کمیتهای دزسنجی	۱۶
۱-۳ – دزیمترهای پرتوهای ایکس	۱۹
۱-۳-۱ - پدیده ترمولومینسانس	۲۰
۱-۳-۲ -توصیف مدل عمومی لومینسانس	۲۱
۱-۳-۳ - منحنی درخشندگی	۲۷
۱-۳-۴ - پروفایل دمایی	۲۹
۱-۳-۵ - پاکسازی دزیمتر	۳۰
۱-۳-۶ -خواص عمومی مواد ترمولومینسانس	۳۲
۱-۳-۷ - انواع مواد ترمولومینسانس	۳۸
۱-۳-۸ - سیستمهای قرائتگر TLD	۴۰
۱-۳-۹ - کالیبراسیون به روش تعیین ECC	۴۲

۱-۴ – دزیمترهای نوترون ۴۴

۱-۴-۱ -استفاده از مواد ترمولومینسانس در دزیمتری نوترون ۴۴

۱-۴-۲ - دزیمترهای نوترونهای سریع ۵۴

فصل ۲- مواد و روشها ۵۷

۲-۱ – دزیمتری پرتوهای ایکس در اطراف پلاسمای کانونی ۵۸

۲-۱-۱ - بررسی همسانگردی پرتوهای ایکس در اطراف پلاسمای کانونی ۵۸

۲-۱-۲ -محاسبه دز محیط آزمایشگاه پلاسمای کانونی ۷۵

۲-۲ – دزیمتری نوترونهای سریع حاصل از دستگاه پلاسمای کانونی ۹۰

۲-۲-۱ - وسایل و روشها ۹۰

۲-۲-۲ -انجام آزمایش ۹۳

۲-۲-۳ -نتیجه گیری ۹۵

۲-۲-۴- بررسی همسانگردی نوترون ۹۶

۲-۲-۵- اندازه گیری دز نوترون به وسیله دزیمترهای TLD ۹۸

فصل ۳- نتایج و بحث ۱۰۱

۳-۱- اثر پرتوهای ایکس و نوترون حاصل از دنا و سهند بر سلامتی کاربران ۱۰۲

۳-۱-۱- اثرات پرتوهای یونساز ۱۰۲

۳-۱-۲- اصل ALARA ۱۰۳

۳-۱-۳- سیستم حفظات رادیولوژیکی ۱۰۴

۳-۱-۴- حد دز ۱۰۴

۳-۱-۵- شرایط کار ۱۰۵

۳-۱-۶- بررسی ایمنی محیط آزمایشگاه پلاسمای کانونی در برابر پرتو ایکس ۱۰۶

۳-۱-۷- بررسی ایمنی محیط آزمایشگاه پلاسمای کانونی در برابر پرتوهای نوترونی ۱۰۹

نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۰

منابع ۱۱۴

مقدمه

دستگاه پلاسمای کانونی در دهه ۱۹۶۰ توسط فیلیپوف و مدر بطور جداگانه اختراع شد. این دستگاه از آنجایی که منبع تولید پلاسمای پالسی است از اهمیت بالایی در تحقیقات فیزیک پلاسما و همجوشی هسته ای برخوردار است. در دستگاه پلاسمای کانونی با تخلیه الکتریکی در گاز تزریق شده به دستگاه در مدت زمان کوتاهی پلاسمای گرم طول عمر بسیار کوتاه و چگالی بالا ایجاد می شود. طول عمر پلاسما در پلاسمای کانونی حدود چند ده نانو ثانیه، چگالی آن در حدود $۱۰^{۱۹}$ $cm^{-۳}$ و دمای آن در حدود چند کیلو الکترون ولت است. در طول فرآیند تنگش جریان در پلاسمای کانونی ذراتی مانند الکترون، یون و پرتو ایکس نرم و سخت تولید می شوند. چنانچه گاز تزریق شده به دستگاه دوتریوم باشد، محیطی مناسب برای ایجاد همجوشی هسته ای فراهم می شود که منبع تولید نوترون های سریع است. علاوه بر کاربرد تحقیقاتی این دستگاه، اشعه ایکس گسیلی از آن مورد توجه قرار گرفته و کاربردهای صنعتی پیدا کرده است که می توان به لیتو گرافی، میکروسکوپی و کریستالوگرافی اشاره کرد.

با توجه به تولید پرتوهای پر انرژی (یونساز) از سیستم پلاسمای کانونی، یکی از موارد نسبتا اساسی در رابطه با کار اینگونه سیستم ها، وجود پتانسیل خطرات احتمالی برای کاربران می باشد. علیرغم اهمیت زیاد این موضوع که ارتباط نزدیکی نیز با شار، انرژی پرتوها و نیز تعداد تخلیه الکتریکی در سال دارد هنوز بررسی علمی دقیقی از این موضوع صورت نگرفته است. هدف از انجام این بررسی تعیین وضعیت ایمنی کاربران دستگاه های پلاسمای کانونی در برابر پرتوهای ایکس و نوترون ناشی از اینگونه سیستم ها می باشد.

در کاربردهای صنعتی و پزشکی اشعه ایکس گسیلی از دستگاه پلاسمای کانونی لازم است توزیع زاویه ای و شعاعی این پرتوها و همچنین همسانگردی پرتوها در محیط مشخص باشند. در بخش دیگری از این پژوهش موضوع همسانگردی پرتوهای ایکس مورد مطالعه قرار گرفته است.

دزیمتر TLD از نوعLiF: MgCuP برای اندازه گیری دز پرتوهای ایکس مورد استفاده قرار گرفته است. این دزیمتر دارای حساسیت بسیار بالایی است و از طرف دیگر عدد اتمی موثر آن معادل بافت بدن انسان است و در نتیجه دز جذبی آن معادل بدن انسان است. کریستال های TLD دارای ابعاد کوچکی بوده و بنابراین برای دزیمتری نقطه ای مناسبند.

فصل نخست

بررسی منابع

۱-۱- پلاسمای کانونی مدل فیلیپوف و مکانیزم تولید پرتو ایکس و نوترون

دستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش پلاسمای کانونی دنا و سهند نوع فیلیپوف هستند که به ترتیب در سازمان انرژی اتمی گروه پلاسمای کانونی و دانشگاه تبریز دانشکده علوم واقع هستند. در ابتدای پژوهش، مختصری در مورد پلاسمای کانونی نوع فیلیپوف و چگونگی تولید پرتو در این مدل شرح داده می شود

۱-۱-۱- معرفی عمومی پلاسمای کانونی مدل فیلیپوف

سیستم‌های پلاسمای کانونی دستگاههایی جهت ایجاد تنگش با استفاده از تخلیه الکتریکی در گازها می باشند. این سیستم‌ها به عنوان وسیله‌ای که با تکنولوژی نسبتاً ساده توانایی تولید پلاسما و کانونی کردن سریع آن را در یک حجم کوچک با چگالی و دمای بالا و طول عمر نسبتاً کوتاه را دارد، در تحقیقات فیزیک پلاسما و پدیده‌های مرتبط با آن مانند گداخت هسته‌ای، انتشار پرتوهای یونی و الکترونی و همچنین به خاطر کاربردهای صنعتی آن به عنوان مولد کم حجم نوترون و یون‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

سیستم‌های پلاسمای کانونی متشکل هستند از یک آند، یک کاتد، عایق بین آند و کاتد، منبع انرژی (بانک خازن)، سوئیچ سریع (مثل اسپارک گپ)، سیستم های کنترل، و محفظه خلا. بانک انرژی متشکل از تعدادی خازن است که با استفاده از سوئیچ سریع اسپارک گپ، در عرض مدتی کمتر از ۳۰ نانو ثانیه به آند سیستم وصل شده، تا به این ترتیب عمل تخلیهٔ الکتریکی (بین آند و کاتد) صورت پذیرد.

فضای داخل محفظه تا فشاری در حدود میلی‌تور خلاء شده و سپس گاز و یا ترکیبی از گازها وارد محفظهٔ خلاء می‌شود تا فشار به محدودهٔ چند دهم تور برسد. انتخاب نوع گاز با توجه به نوع پرتو

خروجی مورد نیاز انجام می‌شود. به عنوان مثال برای پرتو ایکس نرم می توان از نئون، برای پرتو ایکس سخت از آرگون و برای نوترون از دوتریم استفاده کرد.

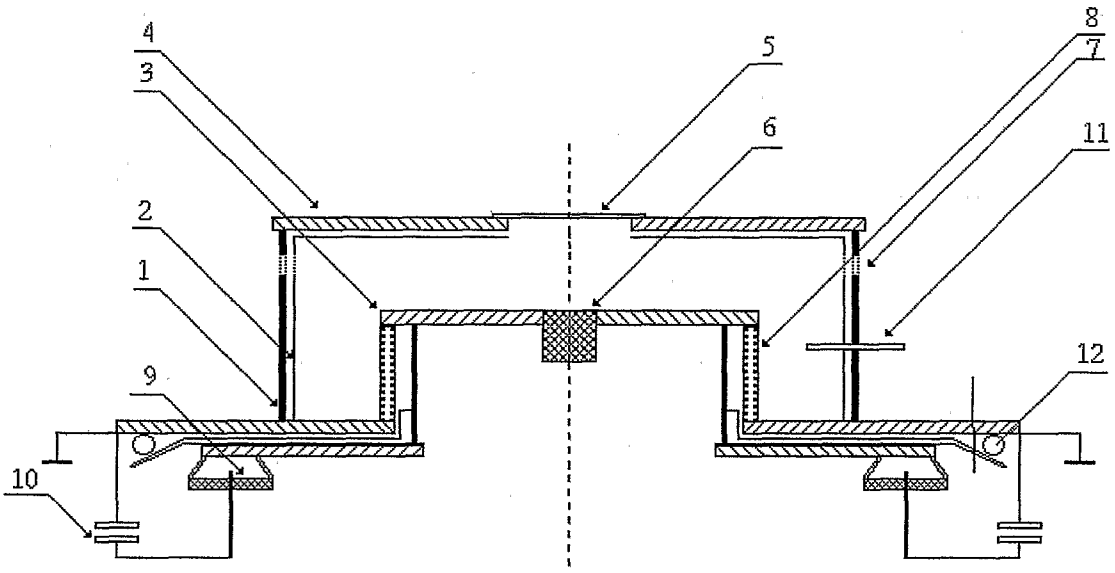
با برقرار شدن اتصال در شکل (۱-۱)، ولتاژ نسبتاً زیادی به آند وصل شده و باعث تخلیهٔ الکتریکی می‌گردد. با شروع تخلیهٔ الکتریکی، اتم‌های گاز یونیزه شده و به این ترتیب لایه‌ای از الکترون‌ها، یا جریانی چتر مانند بین آند و کاتد برقرار می‌شود که به غلاف جریان (current sheath) موسوم است. جاری شدن جریان الکتریکی، باعث پیدایش میدانی مغناطیسی بین لایهٔ جریان و عایق می‌شود.

به علت وجود میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، نیروی لورنتس به الکترون‌ها وارد شده، باعث شتاب گرفتن آنها به طرف بالا و نهایتاً تراکم پلاسما در قسمت فوقانی آند می‌شود. لایهٔ متمرکز شده را اصطلاحاً تنگش (pinch) می‌نامند. فشار زیاد درون تنگش به نوبهٔ خود باعث برانگیخته شدن الکترون‌های گاز شده و به این ترتیب پرتو ایکس نرم تولید می‌شود. از طرف دیگر برخورد الکترون‌های سریع با آند باعث پیدایش پرتو ایکس سخت می‌شود.

در صورت استفاده از گاز مناسب، فشار تنگش به حدی است که می‌تواند باعث انجام گداخت و آزاد شدن نوترون نیز گردد. مدت حیات تنگش در حدود ۱۰۰ نانو ثانیه بوده و طبق بررسی‌های نظری و عملی انجام شده عمده‌ترین علت از بین رفتن آن نیز بروز و تحول ناپایداری $m=0$ در پلاسما می‌باشد. جهت عملکرد بهینهٔ سیستم، ابعاد الکترودها و فشار گاز باید به گونه‌ای انتخاب شوند که در هنگام رسیدن لایهٔ جریان به محور تقارن، جریان الکتریکی مقدار بیشینهٔ خود را داشته باشد.[۱]

شکل(۱-۱) نمای شماتیک، ساده شده، و عمومی دستگاه های پلاسمای کانونی نوع فیلیپوف را نشان می دهد. در این شکل ۱) دیوار جانبی از جنس فولاد ضد زنگ است، ۲) دیواره مسی داخلی جهت هدایت جریان الکتریکی (Liner)، ۳) صفحه آند، ۴) پوشش فوقانی کاتد از جنس دورآلومینیم، ۵) پوشش مرکزی کاتد، ۶) قسمت قابل تعویض آند، ۷) دریچه جهت نصب سیستم های تشخیصی، ۸) عایق چینی، ۹) سوئیچ سریع اسپارک گپ، ۱۰) بانک خازن، ۱۱) پروب مغناطیسی، و ۱۲) پیچهٔ روگوفسکی.

شکل۱-۱- نمای عمومی سیستم های نوع فیلیپوف به صورت شماتیک و ساده شده (جهت اطلاعات بیشتر به متن فوق رجوع شود).



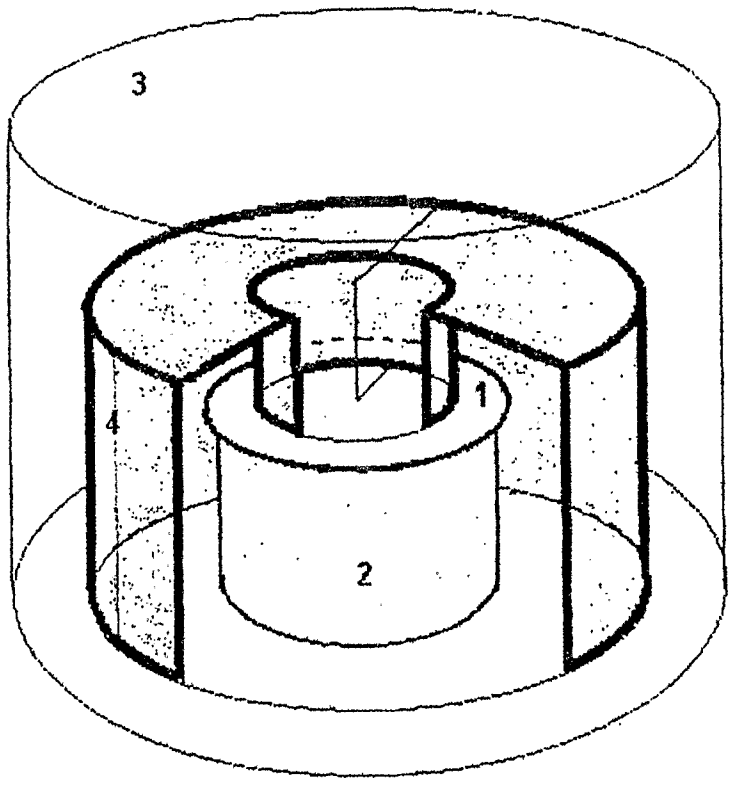
۱-۱-۲- چگونگی عملکرد پلاسمای کانونی مدل فیلیپوف

پلاسمای کانونی متشکل از دو رسانای هم محور می‌باشد که به عنوان الکترود مورد استفاده قرار می‌گیرند. رسانای داخلی آند و خارجی، کاتد می‌باشد. این دو الکترود از انتها توسط یک لایهٔ عایق استوانه‌ای شکل از یکدیگر جدا می‌شوند. فضای بین دو الکترود از گازی با فشاری در حدود ۰,۱ تا ۱ تور پر می‌شود. جنس گاز به کاربرد مورد نیاز بستگی دارد. به عنوان مثال برای تولید نوترون، گاز دوتریوم و یا مخلوطی از دوتریوم و گازهای سنگین دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از یک بانک خازنی با ظرفیت چند میکروفاراد و انرژی یک کیلوژول تا یک مگاژول به عنوان منبع انرژی استفاده می‌شود. این بانک خازنی توسط یک کلید ولتاژ بالای سریع به الکترودها متصل می‌شود. الکترودها معمولاً از جنس مس ساخته می‌شوند و جنس عایق هم ممکن است چینی، شیشه، سرامیک و یا تفلون باشد.

بین آند و کاتد خلاء (در حدود میلی‌تور) ایجاد شده، سپس گاز و یا ترکیبی از گازها وارد محفظهٔ خلاء می‌شود تا فشار به محدودهٔ چند تور برسد. با بسته شدن سوئیچ سریع، یک ولتاژ چند کیلوولتی توسط بانک خازن به الکترودها اعمال می‌شود، در اثر این ولتاژ میدانی الکتریکی در فضای بین الکترودها ایجاد می‌گردد. تحت تأثیر این میدان تخلیه الکتریکی در گاز داخل محفظه شروع شده و لایه جریان در مجاورت سطح عایق تشکیل می‌گردد (شکل ۱-۲) تخمینی از نمای شماتیک لایه جریان را نشان می دهد.

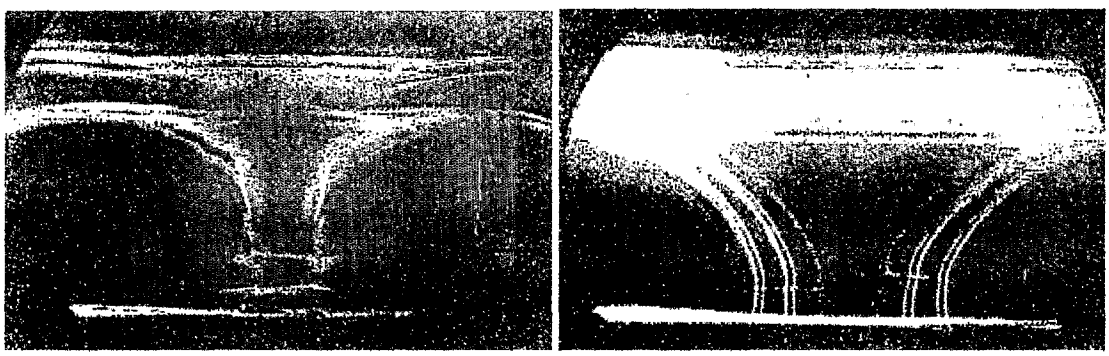
شکل ۱-۲ – نمایی از شکل تقریبی لایه جریان در پلاسما فوکوس نوع فیلیپوف. ۱) آند، ۲) عایق، ۳) کاتد ، و ۴) لایه جریان می باشند.



لایه جریان تولید شده با کامل کردن مدار دستگاه موجب شارش بار شده و در فضای بین لایه جریان و استوانه داخلی، میدان مغناطیسی سمتی B ایجاد می‌شود. این میدان مغناطیسی با اعمال نیروی لورنتس $J \times B$ (J چگالی جریان الکتریکی در لایه می‌باشد) به لایه جریان، موجب حرکت آن می‌شود.

با رسیدن لایه جریان به محور تقارن دستگاه در بالای آند، ستونی از پلاسمای گرم و چگال حول محور تقارن در بالای آند تشکیل می‌شود که در آن پدیده‌های گداخت هسته‌ای و انتشار پرتوهای نوترون، ایکس، یونی و الکترونی رخ میدهد. به هر حال در انتهای این مرحله که بین ۰,۳ تا ۵ میکروثانیه (در دستگاه های مختلف) طول می‌کشد، بسته به قدرت و شرایط کاری دستگاه، چگالی الکترون‌ها در محدودهٔ $10^{24} - 10^{26} m^{-3}$، دمای الکترون‌ها در محدودهٔ ۰,۱ تا ۲ کیلو الکترون ولت و دمای یون ها در محدودهٔ ۰,۳ تا ۱,۵ کیلوالکترون‌ولت می‌باشد و پرتوهای الکترونی، یونی و ایکس تولید می‌شود [۱] شکل (۱-۳) دو تصویر از لایهٔ جریان را قبل از بیشینهٔ تراکم نشان می‌دهد، که به فاصلهٔ ۵ نانوثانیه از یکدیگر گرفته شده اند. .[۲]

شکل۱-۳- دو تصویر از لایهٔ جریان قبل از بیشینهٔ تراکم به فاصلهٔ ۵ نانوثانیهٔ از یکدیگر



ستون پلاسمای متمرکز شده در قسمت فوقانی آند که در آن پدیده‌های گداخت هسته‌ای و انتشار پرتوهای ایکس، یونی و الکترونی روی می‌دهد بعد از مدت زمان کوتاهی در اثر بروز ناپایداری $m=0$ تخریب می‌شود.

نکتهٔ مهمی که در اینجا باید به آن توجه کرد این است که در سیستم‌های پلاسمای کانونی نوع مدر، حرکت لایهٔ جریان از سطح عایق تا محور تقارن دستگاه در دو مرحلهٔ جداگانه صورت می‌گیرد. در مرحلهٔ اول که رانش محوری (Axial Rundown) نامیده می‌شود، لایهٔ جریان فقط یک حرکت طولی در امتداد محور دستگاه خواهد داشت. با رسیدن لایهٔ جریان به لبهٔ آند این مرحله خاتمه یافته و مرحلهٔ دوم که تنگش شعاعی (Radial pinch) نامیده می‌شود آغاز می‌شود. در این مرحله لایهٔ جریان به صورت شعاعی به سمت محور تقارن دستگاه حرکت می‌کند.

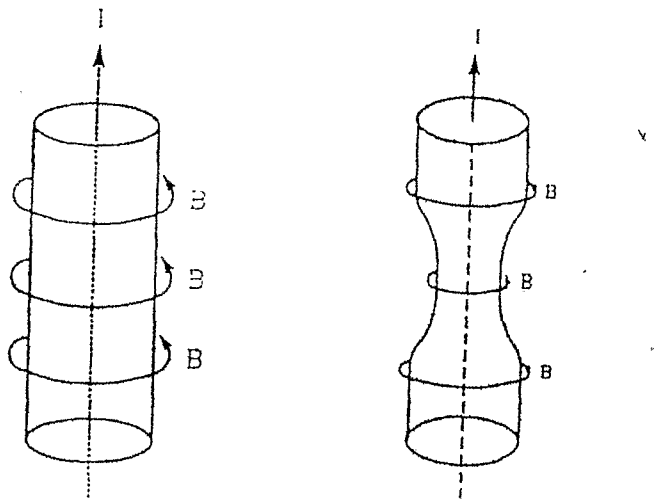
اما در نوع فیلیپوف حرکت شعاعی به سمت محور تقارن از همان ابتدا و بعد از تشکیل لایهٔ جریان در سطح عایق شروع می شود و حرکت لایهٔ جریان در جهت های مختلف به صورت همزمان می‌باشد. به هر حال چه در نوع فیلیپوف و چه در نوع مدر حدود مشخصات پلاسمای کانونی عبارتند از قطر بین ۱ تا ۱۰۰ میلی‌متر، طول ۱۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر، چگالی در حدود $10^{19}m^{-3}$، دما در حدود ۱ کیلوالکترون ولت، طول عمر کمتر از ۱۰۰ نانوثانیه و جریان الکتریکی لایه در حد مگاآمپر می‌باشد. .[۲]

شکل۱-۴- دو حالت موفق (a) و ناموفق (b) در تراکم لایهٔ پلاسما

عامل اصلی کانونی شدن پلاسما، میدان مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی است. با توجه به نیاز شدید به تقارن این میدان، نیاز شدیدی به تقارن لایهٔ جریان وجود دارد. عدم تقارن در این لایه را می‌توان به عنوان آشفتگی در میدان مغناطیسی تعبیر کرد که به نوبهٔ خود باعث کاهش بازدهی محصورسازی و یا عدم کانونی شدن پلاسما می‌گردد، در این حالت حاصل کار چیزی جز یک قوس الکتریکی ساده نخواهد بود. در شکل (۱-۴) دو حالت مختلف نشان داده شده است، حالت موفق (a) که پلاسما بر روی آند متراکم شده و ناموفق (b) که لایهٔ پلاسما به سطح جانبی کاتد برخورد کرده است. [۳]

پلاسمای چگال تولید شده (یا به عبارت دیگرستون پلاسما) با روش فوق پس از زمان کوتاهی (حدود ۱۰۰ns) در اثر بروز ناپایداری سوسیسی (m=۰) تخریب می‌شود. ناپایداری سوسیسی (یا m=۰) که در اثر فشردگی موضعی در ستون پلاسما بوجود آمده، رشد میکند و نهایتا موجب قطع ستون پلاسما می شود (شکل ۱-۵).

شکل ۱-۵- تنگ شدن ستون پلاسما و نهایتا قطعی آن توسط ناپایداری سوسیسی



به هر حال کانونی شدن پلاسما منجر به تولید پرتوهای گوناگونی می شود. مهمترین پرتوهایی که در ۲۰ سال گذشته به عنوان خروجی سیستم‌های پلاسمای کانونی تلقی شده‌اند عبارتند از ایکس سخت، ایکس نرم (انرژی کمتر از ۱۰ کیلوالکترون ولت)، و نوترون های با انرژی حدود ۲/۴ مگا الکترون ولت.

۱-۱-۳- مکانیزم های تولید پرتو

مکانیزم های عمده تولید پرتو X در سیستم های پلاسمای کانونی عبارتند از : تابش ترمزی (ناشی از برخورد الکترون های پرانرژی با سطح آند) و واانگیزش. تابش ترمزی منجر به تابش طیف پیوسته پرتو X ، و واانگیزش باعث تابش خطی پرتو X می‌شود. پرتو ایکس نرم (با انرژی کمتر از ده کیلو الکترون ولت) تولید شده هم شامل طیف پیوسته (ناشی از تابش ترمزی) وهم خطی (ناشی‌از واانگیزش اتم های گاز) می‌باشد، حال‌آنکه پرتو ایکس سخت (با انرژی بیشتر از ده کیلو الکترون ولت) صرفاً شامل طیف پیوسته ناشی از تابش ترمزی می‌باشد.

یکی از موارد عمده اهمیت پلاسمای کانونی به خاطر وقوع پدیده گداخت هسته‌ای در آن میباشد. سیستم های پلاسمای کانونی به عنوان چشمه نوترون های پالسی قادر به تولید حدود $y_n = 10^7 W_0$ نوترون در هر تخلیه میباشد. در این رابطه W_0 انرژی بانک خازن برحسب کیلو ژول می‌باشد. واکنش‌هایی که منجر به تولید نوترون می‌شوند عبارتند از : .[۴]

$$^2_1D+^2_1D\rightarrow^3_2He(0.82Mev)+^1_0n(2.45Mev)$$

$$^2_1D+^2_1D\rightarrow^1_1H(30.2Mev)+^3_1T(1.01Mev)$$

۱-۱-۳-۱- تولید پرتو ایکس

عوامل گوناگونی مثل مشخصات لایهٔ جریان، نوع گاز و فشار آن، جنس الکترودها و انرژی بانک خازن در تولید این پرتو موثر می‌باشند. انرژی این پرتو از چند صد الکترون‌ولت تا چند صد کیلوالکترون-ولت می‌باشد. دو پدیدهٔ اصلی که باعث تولید این پرتو می‌شوند عبارتند از: برخورد الکترون- یون که باعث پیدایش خطوط طیفی گاز می‌شود و برخورد الکترون- اتم (منظور بیشتر آند است) که علاوه بر خطوط طیفی آند، منجر به تابش ترمزی نیز می‌شود.

برای پلاسمایی با عدد اتمی بالا که بسیار یونیزه شده باشد، تابش غالب مربوط به مکانیزم تابش ترمزی است. در تابش ترمزی طول موج وابسته به قلهٔ طیف پیوسته به صورت زیر $\lambda_0 = \frac{6.2}{T_e}$ می‌باشد که T_e دمای الکترون پلاسما بر حسب کیلوالکترون‌ولت و λ_0 طول موج بر حسب آنگستروم می‌باشند. برای ستون متراکم پلاسما که در مرحلهٔ تنگش تولید می‌شود، دمای الکترون در حدود ۱ کیلوالکترون ولت است، بنابراین طول موج حدود ۶,۲ آنگستروم خواهد شد که انرژی معادل آن در حدود ۱۰ کیلوالکترون ولت می‌باشد [۵].

۱-۱-۳-۲- تولید پرتو نوترون

عمده‌ترین منبع این پرتو، رویدادن گداخت هسته‌ای است که باعث آزاد شدن نوترون‌هایی با انرژی در حد مگا الکترون ولت می‌شود. تعداد نوترون‌ها به عوامل متعددی مثل نوع گاز، فشار و مشخصات لایهٔ جریان (که به نوبهٔ خود وابسته به عوامل گوناگونی است) بستگی دارد، ضمن اینکه مقیاس بندی های تجربی‌ای نیز وجود دارند که حدود کار را تعیین می‌کنند. به عنوان مثال رابطهٔ $Y_{approx.} = 10^{-9} I_p^{3.3}$ که در آن I_p جریان پلاسما بر حسب آمپر است، برای ۱ مگاآمپر جریان، حدود 10^{11} نوترون پیش‌بینی می-کند. بد نیست که در اینجا به این نکته نیز اشاره شود که طبق برآوردی که در سال ۱۹۹۰ صورت گرفته،

قیمت نوترون‌های تولید شده در سانتی‌مترمربع توسط سیستم پلاسمای کانونی ۱۰۰ برابر ارزانتر از سایر روش‌ها است [۶].

سیستم‌های پلاسمای کانونی به عنوان چشمهٔ نوترون‌های پالسی قادر به تولید حدود 10^{10} نوترون در هر تخلیه می باشند. انتشار نوترون از سیستم‌های پلاسمای کانونی در دو مرحله روی می‌دهد. در مرحلهٔ ماکزیمم تراکم ستون پلاسما حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد نوترون‌ها تولید می‌شوند ولی بخش دیگر آنها بین ۸۰ تا ۹۰ درصد در مرحلهٔ تخریب ستون پلاسما در اثر ناپایداری m=۰ تولید می‌شوند[۷]. برای تشریح مکانیزم تولید نوترون در سیستم‌های پلاسمای کانونی دو مکانیزم گداخت گرماهسته‌ای و برهمکنش پرتو- هدف پیشنهاد شده‌اند اما هنوز سهم هر یک از این دو مکانیزم به درستی شناخته نشده است.

الف- مکانیزم گداخت گرماهسته‌ای

مطابق مکانیزم گداخت گرماهسته‌ای تعداد نوترون‌های تولیدی در واحد طول تنگش از رابطهٔ زیر بدست می‌آید.[۴]:

$$P = \frac{Nn}{2}\langle\sigma.v\rangle\tau$$

که در آن $\langle\sigma.v\rangle$ میانگین آهنگ واکنش $D-D$ بوده و به دمای پلاسما بستگی دارد. τ طول عمر ستون پلاسمایی است که توسط میدان مغناطیسی محصور شده و $N = \pi R^2 n$ تعداد ذرات در ۱ سانتی-متر از ستون پلاسما است. n و R هم به ترتیب چگالی و شعاع ستون پلاسما می‌باشند. بنابراین تعداد نوترون های تولیدی در ستونی از پلاسما به طول h را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Y = Ph = \frac{Nnh}{2}\langle\sigma.v\rangle\tau$$