



دانشگاه اراک  
دانشکده علوم پایه گروه فیزیک  
کارشناسی ارشد فیزیک گرایش اتمی مولکولی

## مطالعه و بررسی اثر گازهای افزودنی بر تولید نوترون در دستگاه پلاسمای کانونی

پژوهشگر

سمیه رضوانی پور

اساتید راهنما

دکتر بیژن فرخی

دکتر علیرضا بابازاده

زمستان ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

مطالعه و بررسی اثر گازهای افزودنی بر تولید نوترون در دستگاه پلاسمای

کانونی

توسط:

سمیه رضوانی پور

پایان نامه

ارائه شده به مدیریت تحصیلات تکمیلی به عنوان بخشی از فعالیت های تحصیلی لازم برای

اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک

از

دانشگاه اراک

اراک-ایران

ارزیابی و تصویب شده توسط کمیته پایان نامه با درجه: ..... (ع) لبر

دکتر بیژن فرخی (استاد راهنما و رئیس کمیته) ..... دانشیار

دکتر علیرضا بابازاده (استاد راهنما) ..... استادیار

دکتر اکبر زنده نام (دانشگاه اراک) ..... استادیار

دکتر غلامرضا نبیونی (دانشگاه اراک) ..... دانشیار

دی ۱۳۹۰

امام جعفر صادق علیه السلام:

دوست ندارم جوانی از شیعیان را جز در دو حال ببینم،

در حال آموختن علم باشد

یا

عالم شده باشد.

تقدیم با خالصانه ترین قدردانی ها

به دو شمع پرفروغ زندگی ام

به دو فرشته مهربان زندگی ام

به بزرگترین هدایای خدا در زندگی ام

به پدر و مادر بزرگوار و عزیزم

که نه تنها هر لحظه از تحصیل، بلکه تمام زندگی ام آکنده از پر تو مهر و محبت بی دریغ و منت آنهاست.

سپاسگذاری

از اساتید بزرگوارم آقایان دکتر بازاده و دکتر فرخی که در تمام مراحل انجام این پایان نامه همراه بنده بودند و بی شک بدون یاری آنها این کار انجام نمی شد کمال قدر دانی را دارم.

## چکیده

دستگاه پلاسمای کانونی به عنوان یک مولد پالسی اشعه ایکس، نوترون و ذرات باردار سالهاست که در مراکز تحقیقاتی و صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد. تولید اشعه ایکس و نوترون در این دستگاه مستلزم وقوع تنگش در سیستم است. بهترین بهره اشعه ایکس و نوترون زمانی حاصل می شود که علاوه بر هم زمانی رخداد پینچ و بیشینه جریان، پینچی متقارن و تکین در سیستم اتفاق افتد. فقط هنگامی که گاز دوتریم به عنوان گاز کاری استفاده می شود، دستگاه تولید نوترون دارد. با افزودن میزان کمی از گاز دیگر بعنوان گاز ناخالصی تولید نوترون به میزان بالایی افزایش می یابد. هدف اصلی در این کار بررسی تولید نوترون در این دستگاه در شرایط گاز خالص و شرایط گاز ناخالصی به وسیله مدلسازی عملکرد دستگاه می باشد.

با استفاده از نتایج محاسبات عددی، در شرایط گاز خالص اشعه ایکس سخت و نوترون تولیدی با مکانیسم غیر گرمایی نسبت به اشعه ایکس نرم و نوترون تولیدی با مکانیسم گرمایی بسیار بالاتر می باشند. بنابراین در دستگاه پلاسمای کانونی اصلی ترین تابش، تابش اشعه ایکس سخت و مکانیسم غالب در تولید نوترون مکانیسم غیر گرمایی می باشد. با مقایسه نتایج محاسبات عددی و نتایج تجربی، در فشار حدود ۵، تور بیشترین تولید نوترون را داریم.

در این کار از کریپتون به عنوان گاز ناخالصی استفاده می شود. در شرایط گاز ناخالصی، مانند شرایط گاز خالص مکانیسم غیر گرمایی مکانیسم غالب برای تولید نوترون و تابش اشعه ایکس سخت به عنوان تابش اصلی می باشد. با مقایسه نتایج در این دو شرایط، می توان نتیجه گرفت با افزودن میزان کمی ناخالصی، توان تابشی اشعه ایکس سخت در حدود صد برابر و نوترون تولیدی با مکانیسم غیر گرمایی در حدود ۲۰۰ برابر افزایش می یابد. در نتیجه با افزودن درصد پایینی از ناخالصی تولید نوترون و تابش کل به میزان بالایی افزایش می یابند.

## فهرست

عنوان ..... صفحه

### فصل اول: ساختار و دینامیک دستگاه پلاسمای کانونی

۱.۱ معرفی دستگاه ..... ۲

۲.۱ فاز فروشکست ..... ۵

۳.۱ فاز شتاب محوری ..... ۷

۴.۱ فاز شعاعی ..... ۱۰

۱.۴.۱ فاز تراکم ..... ۱۱

۲.۴.۱ فاز خاموشی ..... ۱۳

۳.۴.۱ فاز ناپایداری ..... ۱۴

۴.۴.۱ فاز تنزل ..... ۱۵

### فصل دوم: دینامیک و مدل‌های پلاسمای کانونی

۱۷	..... معرفی ۱.۲
۲۲	..... مدل سازی پلاسمای کانونی ۲.۲
۲۵	..... مدل پلاسمای کانونی تابشی ۳.۲
۲۵	..... توان تابشی انتشار اشعه ایکس از پلاسما ۱.۳.۲
۳۰	..... معادلات پلاسمای ساده شده ۲.۳.۲
۳۲	..... مدل کرنا ۳.۳.۲
.....	..... محاسبه نسبت گرمایی معین از پلاسمای گرم ۴.۳.۲
۴۰	..... محاسبه دما ۵.۳.۲
.....	..... فاز محوری ۴.۲
۴۷	..... فاز شوک داخلی شعاعی ۵.۲
۴۸	..... بررسی حرکت شوک شعاعی و پیستون شعاعی ۱.۵.۲
۵۱	..... اصلاح مدل اسلاگ ۲.۵.۲
۵۳	..... معادلات اصلاح شده بذای فاز شوک داخلی ۳.۵.۲
۵۶	..... فاز شوک انعکاسی ۶.۲
۵۷	..... فاز تراکم آهسته ۷.۲



۵۷ ..... ۸.۲ گاز ناخالصی و تغییر در کمیات اصلی

### فصل سوم: تابش اشعه ایکس و نوترون از دستگاه پلاسمای کانونی

۶۰ ..... ۱.۳ انتشار اشعه ایکس از پلاسمای کانونی

۶۰ ..... ۱.۱.۳ فرآیند انتشار اشعه ایکس در پلاسما

۶۵ ..... ۲.۱.۳ دستگاه پلاسمای کانونی بعنوان منبع اشعه ایکس

۷۰ ..... ۲.۳ انتشار نوترون از پلاسمای کانونی

۷۰ ..... ۱.۲.۳ انتشار نوترون از پلاسمای کانونی در شرایط خالص

۷۶ ..... ۲.۲.۳ انتشار نوترون از پلاسمای کانونی در شرایط ناخالصی

۸۳ ..... ۳.۳ برخی کارهای انجام شده

### فصل چهارم: محاسبات عددی و نتیجه گیری

۸۸ ..... ۱.۴ معرفی محاسبات عددی

۹۰ ..... ۱.۱.۴ فاز محوری

۹۱ ..... ۲.۱.۴ فاز شوک داخلی شعاعی

۹۳ ..... ۳.۱.۴ فاز محوری ستون منبسط شده

۹۳ ..... ۲.۴ تشریح محاسبات عددی

..... ۳.۴ بررسی نتایج محاسبات عددی

۹۵

۹۸ ..... ۱.۳.۴ بررسی نتایج در شرایط خالص

۱۰۷..... ۲.۳.۴ بررسی نتایج در شرایط ناخالصی

۱۱۸..... ۴.۴ نتیجه گیری

..... ۵.۴ آینده نگری و چشم انداز ادامه کار

۱۲۰

۱۲۱ ..... پیوست ۱

۱۳۱ ..... پیوست ۲

۱۴۱..... منابع

جداول ..... صفحه

جدول ۱-۲ تعاریف برخی کمیات.....

۲۸

جدول ۲-۲ کمیات مربوط به تابش ..... ۲۹

جدول ۱-۴ مقدار بهره زمانی برای هر فاز.....

۹۴

جدول ۲-۴ مشخصات هندسی دستگاه و ورودی برنامه ..... ۹۷

جدول ۳-۴ نتایج تجربی و تئوری تولید نوترون در شرایط خالص ..... ۱۰۵

اشکال ..... صفحه

شکل ۱-۱ نمایش دستگاه پلاسمای کانونی.....۲

شکل ۲-۱ نمایش فازهای دستگاه پلاسمای کانونی.....۸

شکل ۴-۱ نمایش جریان و ولتاژنسبت به زمان در دستگاه پلاسمای کانونی.....۱۲

شکل ۱-۲ فاز محوری.....۱۸

شکل ۲-۲ فاز شوک شعاعی داخلی.....۱۹

شکل ۳-۲ فاز شوک انعکاسی شعاعی.....۲۰

شکل ۴-۲ فاز تراکم آهسته.....۲۱

شکل ۵-۲ نمایش فاز محوری و فاز تراکم آهسته.....۲۳

- شکل ۲-۶ یونیزگی، بار موثر و نسبت گرمایی معین نئون بعنوان تابعی از دما ..... ۳۶
- شکل ۲-۷ نمایش مدار در پلاسمای کانونی تابشی ..... ۴۵
- شکل ۳-۱ انتقالهای تراز-تراز، تراز-آزاد، آزاد-آزاد ..... ۶۳
- شکل ۴-۱ توان تابشی اشعه ایکس نرم بر زمان در شرایط خالص ..... ۹۹
- شکل ۴-۲ توان تابشی اشعه ایکس سخت بر زمان در شرایط خالص ..... ۹۹
- شکل ۴-۳ نوترون مکانیسم حرارتی بر زمان در شرایط خالص ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۴ نوترون مکانیسم غیر حرارتی بر زمان در شرایط خالص ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۵ نوترون تولیدی کل بر زمان در شرایط خالص ..... ۱۰۱
- شکل ۴-۶ توان تابشی اشعه ایکس سخت بر فشار در شرایط خالص ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۷ توان تابشی اشعه ایکس نرم بر فشار در شرایط خالص ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۸ توان تابشی اشعه ایکس نرم، سخت و کل بر فشار در شرایط خالص ..... ۱۰۳
- شکل ۴-۹ نوترون تولیدی مکانیسم غیر حرارتی بر فشار در شرایط خالص ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۰ نوترون تولیدی مکانیسم حرارتی بر فشار در شرایط خالص ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۱۱ نوترون تولیدی کل تئوری و تجربی بر فشار در شرایط خالص ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۱۲ توان تابشی اشعه ایکس سخت بر زمان با ۱٪ کریپتون ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۱۳ توان تابشی اشعه ایکس نرم بر زمان با ۱٪ کریپتون ..... ۱۰۹

- شکل ۴-۱۴ نوترون تولیدی مکانیسم حرارتی بر زمان با ۱٪ کریپتون..... ۱۱۰
- شکل ۴-۱۵ نوترون تولیدی مکانیسم غیر حرارتی بر زمان با ۱٪ کریپتون..... ۱۱۱
- شکل ۴-۱۶ نمودار رفتار ۴ تابش مورد بررسی در ۰.۰۲ نانو ثانیه شروع فاز با ۱٪ کریپتون..... ۱۱۲
- شکل ۴-۱۷ توان اشعه ایکس سخت بر فشار با ۱٪ کریپتون..... ۱۱۴
- شکل ۴-۱۸ توان اشعه ایکس نرم بر فشار با ۱٪ کریپتون..... ۱۱۴
- شکل ۴-۱۹ نوترون تولیدی مکانیسم حرارتی بر فشار با ۱٪ کریپتون..... ۱۱۶
- شکل ۴-۲۰ نوترون تولیدی مکانیسم غیر حرارتی بر فشار با ۱٪ کریپتون..... ۱۱۷
- شکل ۴-۲۱ نوترون تولیدی بر درصد کریپتون کریپتون..... ۱۱۷

## ۱.۱ معرفی دستگاه

دستگاه پلاسمای کانونی در سال ۱۹۶۵ بطور جداگانه توسط مدر<sup>۱</sup> در امریکا و فیلیپوف<sup>۲</sup> در روسیه اختراع شد. این دو دستگاه عملکرد یکسان دارند، تفاوت آنها در هندسه و نسبت سطح (نسبت قطر به طول الکتروود) می باشد. در حال حاضر دستگاههای پلاسمای کانونی بسیاری توسط محققین ساخته شده است. البته این دستگاهها تفاوت های زیادی در اندازه فیزیکی داشته و گستره انرژی از یک کیلو الی یک مگا ژول دارند، بطور قراردادی به یکی از این دو نوع تقسیم بندی می شوند.

تا کنون تحقیقات گسترده ای در زمینه های مختلف بر روی این دو دستگاه انجام شده است. در کارهای اولیه، پلاسمای این دستگاه گرمایی در حدود یک کیلو الکترون ولت، چگالی پلاسمای گرم و چگال (تنگش) در حدود  $(\frac{\text{الکترون}}{\text{cm}^3})^{۱۰^{۱۹}}$  و طول عمر ۵۰ نانو ثانیه دارد. در تحقیقات انجام شده با ایجاد تغییراتی در دستگاه این مقادیر بهینه می شود. انرژی ذخیره شده در دستگاه مرتبط با اندازه فیزیکی دستگاه می باشد.

---

<sup>۱</sup>.Mather

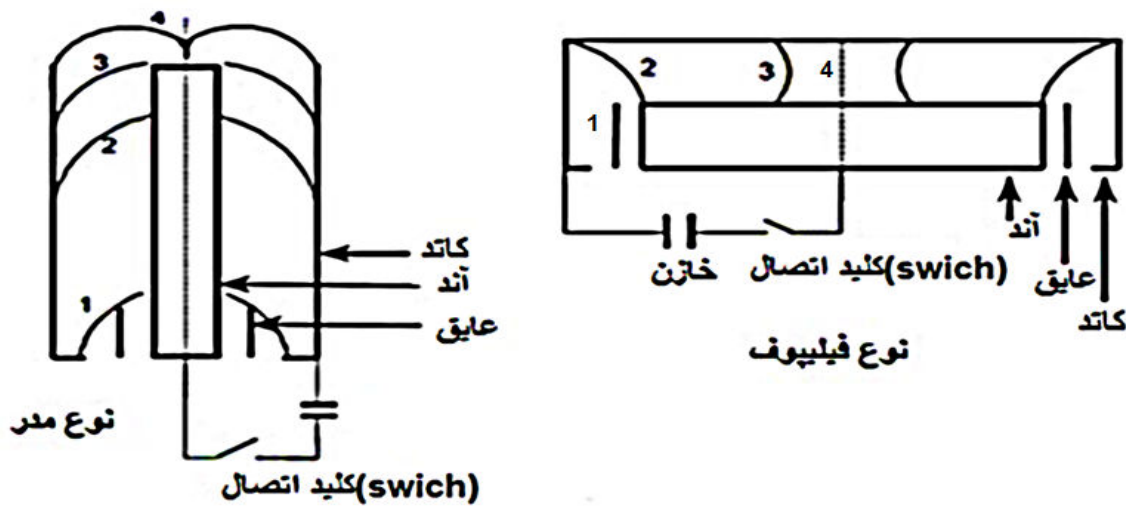
<sup>۲</sup>.Filippov

این دستگاه بعنوان یک منبع پر قدرت برای انواع تابش ها به حساب می آید. این دستگاه  $n\pi$  بسیار بالایی دارد بطوریکه  $n$  چگالی عددی پلاسمای تنگیده و  $\tau$  زمان محدود کردن انرژی می باشد.

تابش سریع نوترون های حاصل از هم جوشی هسته ای وقتی گاز دوتریم در دستگاه بکار می بریم و همچنین انتشار مقدار فراوانی اشعه ایکس وقتی گاز اجرایی عدد اتمی بالا داشته باشد، این دستگاه را مورد توجه دانشمندان قرار داده است.

در واقع این دستگاه یک  $Z$ -تنگش<sup>۳</sup> دو بعدی است که از دو استوانه هم محور تشکیل شده است. جزئیات ساختمانی دستگاههای پلاسمای کانونی نوع مدر و نوع فیلیپوف در شکل (۱-۱) نمایش داده شده است.

دستگاه فیلیپوف نسبت به  $Z$ -تنگش این مزیت را دارا می باشد که ناحیه عایق را از ناحیه تنگش پنهان می کند. این تغییر ساختار مانع برخورد پرتوهای تابش شده از پلاسمای گرم به سطح عایق می باشد، در نتیجه از تابش های غیر مفید جلوگیری می کند. دستگاه مدر، پلاسمای محوری که در فشار بسیار بالا ایجاد می شود را بهینه می کند.



<sup>۳</sup>.Z-Pinch



## شکل (۱-۱) نمایش دو نوع دستگاه پلاسمای کانونی

اگر تمام ناحیه بین این دو نوع دستگاه را بنا بر عملکرد آنها در آزمایشگاه به چهار قسمت اصلی تقسیم کنیم، اساس کار دستگاه پلاسمای کانونی به این صورت است که بوسیله اتصال مدار انرژی الکتریکی ذخیره شده در خازن به الکترودها منتقل می شود. در هر دو هندسه جریان دشارژ اولیه در طول سطح عایق در ناحیه بین دو الکترودهم محور ایجاد می شود. ( ناحیه یک در شکل (۱-۱)) بوسیله عمل نیروی لورنتس غلاف پلاسمای از طریق ناحیه ۲ از ناحیه ۱ به سمت ناحیه ۳ شتاب می گیرد. در ناحیه ۴ غلاف پلاسمایی به محور تقارن دستگاه می رسد. آزمایشات متفاوتی برای بهینه کردن عملکرد این دستگاه انجام می شود. بعنوان مثال تغییر در ابعاد الکترودها ( طول و قطر ) و حتی ساختار الکترودها ( تخت، مخروطی، لوله ای و مشبک ) و نیز تغییرات در فشار گاز اعمال شده بر دستگاه را می توان ذکر کرد.

وقتی لایه یونیزه به محور تقارن می رسد، جریان بیشینه می باشد. در همین لحظه فیلمان تنگش درست در مقابل الکترودها داخلی که در بیشتر موارد آند است، شکل می گیرد. بعد از مدت زمان کوتاه به دلیل ناپایداریها ستون پلاسمای شکسته و از بین می رود. اغلب تابش ها در این موقعیت بدست می آید.

تفاوت اصلی بین دو دستگاه مدر و فیلیپوف در حالت قرار گرفتن الکترودها و نسبت سطح آنها ( نسبت قطر به طول الکترودها ) می باشد. دستگاه فیلیپوف، نسبت سطح بزرگی دارد. این نسبت سطح در این نوع معمولاً بزرگتر از ۵ و با قطر الکترودها داخلی ۵۰ تا ۲۰۰ سانتی متر، در نتیجه در این نوع از دستگاه فاز محوری کمتر از فاز شعاعی است. دستگاه مدر نسبت سطح کوچک، کمتر از ۰.۲۵ و قطر الکترودها داخلی ۲ تا ۲۲ سانتی متر دارد. بنابراین در این نوع از دستگاه فاز محوری بیشتر از فاز شعاعی است.

الکترودها از مس یا فولاد ضد زنگ ساخته می شود. آند را معمولاً به شکل یک استوانه توپری یا یک لوله استوانه ای می سازند به این منظور که از گسیل پرتوایکس سخت که به وسیله بمباران الکترون در سطح آند ایجاد

می شود، جلوگیری شود. کاند به شکل یک قفس سنجابی که بین ۶ تا ۲۴ دور سیم که بصورت غیر مدور اطراف آند قرار گرفته تشکیل می شود. عایق اصولاً از جنس پیرکس، شیشه، آلومینا یا سرامیک می باشد.

این دو دستگاه سه شباهت اصلی دارند :

۱. دینامیک غلاف جریان
  ۲. قوانین مقیاس بندی گسیل نوترون
  ۳. گسیل پرتو یونهای پرانرژی، پرتو الکترونها، پرتوهای اشعه ایکس (نرم و سخت)<sup>۴</sup> و میکرو موجها
- خارج از نوع دستگاه دینامیک پلاسمای کانونی را می توان به سه فاز تقسیم کرد:

۱. فاز فشکست
۲. فاز شتاب محوری
۳. فاز شعاعی ( فاز فروپاشی شعاعی )

## ۲.۱ فاز فرو شکست

دستگاه با یک گاز معین تحت یک فشار مناسب ( معمولاً چند میلی بار هیدروژن، دوتریم، نئون، آرگون یا مخلوطی از آنها ) پر شده است. هنگامی که یک پالس ولتاژ بالا بین الکترودهای دستگاه ایجاد می شود. یک تخلیه الکتریکی متقارن سمتی آغاز می شود. فاز فرو شکست الکتریکی که به وسیله آن پلاسمای اولیه شکل می گیرد، بر تخلیه الکتریکی مقدم می شود و به همین دلیل جریان حاصل از تخلیه الکتریکی می تواند حرکت کند.

بر اساس قانون پاشن<sup>۵</sup>، مقدار ولتاژ فرو شکست ایستایی وقتی ۱ تا ۱۰ میلی بار از گاز دوتریم بکار ببریم، کمتر از یک کیلو ولت برای ولتاژ متناوب است و این به اندازه یک مرتبه از ولتاژ خازنهای معمولی که بین ۱۰ تا ۶۰ کیلو ولت می باشد، کمتر می باشد. می توان نتیجه گرفت پدیده فرو شکست، همیشه یک پدیده با ولتاژ بالا است.

---

<sup>۴</sup>.Soft X-ray، Hard X-ray

ایجاد یک جریان تخلیه الکتریکی بالا به مقدار زیادی به شرایط گاز اولیه، پارامترهای الکتروود، عایق و قطبیدگی بستگی دارد. بهره اولیه ارزش جریان که به مقاومت ظرفیتی خازن و ولتاژ تخلیه مدار بستگی دارد، برای بهتر شدن پدیده تخلیه الکتریکی نقش مهمی دارد.

یک تخلیه لغزشی بر روی طول عایق در شرایط بهینه توسعه می یابد. علاوه بر تخلیه لغزشی اولیه فیلمان شعاعی تخلیه هم اغلب مشاهده می شود، بخصوص وقتی فشار اعمالی بالاتر از فشار بهینه باشد.

پدیده فروشکست را می توان بوسیله اثر ظرفیت سطحی توضیح داد. قبل از آنکه ولتاژ بالا را اعمال کنیم، ذرات باردار آزاد به دلیل نیروهای تصویری علاوه بر آنکه به سمت عایق سوق می یابند به سمت الکتروودها نیز سوق می یابند. عایق، اصولاً ثابت دی الکتریک بزرگتر از یک ( $\epsilon_r > 1$ ) و مقاومت ویژه سطحی بالا دارد. الکتروندهای آزاد در مجاورت عایق یک پتانسیل منفی در سطح عایق ایجاد می کنند.

وقتی ولتاژ بالا در الکتروودها اعمال می کنیم، قبل از آنکه فروشکست در سطح عایق ایجاد شود، در حدود چند ده نانوثانیه زمان تاخیری مشاهده می شود.

در این زمان تاخیری الکتروندهای دیگری از لبه تیز فلزی و یونیزاسیون گاز پیرامون آن ایجاد می شود. این الکترونها در راستای خطوط میدان الکتریکی شعاعی به سمت الکتروود داخلی و سطح عایق یا بالعکس به سمت الکتروود خارجی شتاب می گیرد، این جهت گیری به قطبش ولتاژ اعمال شده بستگی دارد.

ظرفیت سطحی بطور تدریجی افزایش می یابد. میدان الکتریکی در حالت پیش از تخلیه باقی می ماند و به انتشار یونیزاسیون در امتداد عایق کمک می کند. وقتی تخلیه الکتریکی لغزنده به انتهای عایق برسد، با هر دو الکتروود ارتباط پیدا می کند. به دلیل نیروی لورنتس جریان با یک فشردگی حرکت می کند.

بعد از زمانی کوتاه ( حدود ۵۰ تا ۵۰۰ نانو ثانیه ) رسانش تخلیه لغزنده مناسب و تخلیه به یک لایه پلاسمایی تبدیل می شود. این لایه ساختار دو گانه دارد که از یونیزاسیون و پیستون مغناطیسی تشکیل شده است. بعد از این مراحل از این فاز خارج و وارد فاز شتاب محوری می شویم.

زمانیکه فاز فروشکست کامل می شود، بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ نانوثانیه می باشد. در ابتدا یک افزایش در ولتاژ اولیه داریم و بعد از آن کاهش ولتاژ واقع می شود.

بنابر نظریه باستیک<sup>۶</sup> و همکاران اغلب علاوه بر تخلیه الکتریکی لغزنده اولیه تخلیه های شعاعی سیم پیچی نیز مشاهده می شود.

مدر در آزمایشات خود به این نتیجه رسید که وقتی تخلیه الکتریکی غیر متقارن باشد یا چند پره شعاعی در ناحیه بین الکترودها قرار گیرد، نوترون و اشعه ایکس تولید شده در مقایسه با عملکرد معمولی دستگاه ( که اصولاً تخلیه الکتریکی تقارن سمتی دارد ) کمتر است.

دانگس<sup>۷</sup> و همکاران برای فشار اولیه در محفظه پلاسمای کانونی یک محدوده بدست آوردند. بدین صورت که وقتی فشار اولیه بسیار کوچک در محدوده پایین ( کمتر از یک ۰.۱ میلی بار ) باشد، در انتهای باز شتابدهنده و تمام فضای بین الکترودها تخلیه الکتریکی اتفاق می افتد. از طرفی اگر فشار بسیار بالا ( بیش از ۱۰ میلی بار برای دوتریم و ۲۰ میلی بار برای نئون) باشد، یک تخلیه الکتریکی شعاعی سیم پیچی بین الکترودهای هم محور اتفاق می افتد. همچنین در یافتند که اگر از کاتدی با لبه تیز چاقو مانند استفاده شود، شرایط فروشکست بهتر می شود و کار دستگاه قابل قبول و تکرار پذیر می باشد.

پاسیدن<sup>۸</sup> اهمیت بسیار زیاد ماده عایق بر روی اشباع محصول نوترون دستگاه وقتی ولتاژ بیش از صدها کیلو ژول است، را نشان داد. بطوریکه در عایق پیرکس محصول نوترون در ۳۰۰ کیلو ژول شروع به اشباع شدن می کند، در صورتیکه با عایق سرامیک این وضع بطور قابل ملاحظه ای بهبود می یابد.

## ۳.۱ فاز شتاب محوری

---

<sup>۶</sup>. Bostic

<sup>۷</sup>.Donges

<sup>۸</sup>.Poseidon