

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار  
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگار ان بهترین پشتیبان است  
به پاس قلبهای بزرگشان که فریادس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید  
به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

آنانکه در پناه دستان مهربانشان رشد کردم.

## چکیده

در این پایان‌نامه خواص پاشندگی امواج الکترومغناطیس در حضور پرتو نسبیتی الکترون دوآر با هدایت کانال یونی بررسی شده است. میدان‌های تعادلی همانند میدان الکترواستاتیکی کانال یونی و خود-میدان‌های پرتو نسبیتی الکترون در این فرمول‌بندی در نظر گرفته شده است. نشان داده شده که در حالت اول، امواج قطبیده دایروی راستگرد و چپگرد و در حالت دوم، امواج قطبیده شعاعی در دو ناحیه در اثر جفت‌شدگی با امواج بار-فضای تند ناپایدارند. رفتار این ناپایداری همانند اندازه و گستردگی آن به صورت تابعی از پارامترهای تعادلی بررسی شده است. این ناپایداری می‌تواند در تقویت پالس‌های لیزر با قطبش دایروی و یا شعاعی تا شدت‌های بالا بکار رود.

## واژه‌های کلیدی:

پرتو نسبیتی الکترون دوآر، کانال یونی، قطبش دایروی، قطبش شعاعی و سمتی، پاشندگی، ناپایداری.



دانشگاه مازندران

دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک اتمی و مولکولی

موضوع:

پاشندگی امواج پیرامحوری با هدایت کانال یونی در حضور  
یک پرتو الکترونی دوآر

استاد راهنما:

دکتر سعید میرزانژاد

استاد مشاور:

دکتر فرشاد صحبت زاده

نام دانشجو:

زهرا حیدری

تیرماه ۹۰

## پاسکزاری

حمد و سپاس خداوند مهربان را، آن یگانه معبود، هستی، معبودی که به من توفیق آموختن را عطا فرمود و در این راه هدایت می کرد.

به رسم ادب و خاضعانه سپاس فراوان دارم از؛

استاد علم و اخلاقم، استاد کرامت دارم جناب آقای دکتر میرزا نژاد، که با صبر فراوان راهنا و راهگشای حقیر در این دوران بودند،

استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر صحبت زاده، که در محضر ایشان کسب علم و معرفت نمودم،

پدر و مادر عزیزم که همواره مشوق من بودند و دعای خیرشان، همواره بدرقه‌ی راهم بود.

از جناب آقای دکتر محسن پور، سرکار خانم دکتر علوی و سرکار خانم قاسمی بخاطر راهنمایی‌های ارزنده‌شان کمال تشکر را دارم،

و در نهایت از سایر اعضای خانواده و دوستان عزیزم که همواره همدل و همراهم بودند، ممنون و سپاسگزارم.

از خداوند منان برای یکایک این عزیزان آرزوی سلامتی، توفیق و بهروزی را در تمام مراحل زندگی‌شان دارم.

زهره احدری - تیرماه ۹۰



دانشگاه مازندران

دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد رشته فیزیک اتمی و مولکولی

عنوان:

پاشندگی امواج پیرامحوری با هدایت کانال یونی در حضور  
یک پرتو الکترونی دوآر

استاد راهنما:

دکتر سعید میرزانژاد

استاد مشاور:

دکتر فرشاد صحبت زاده

اساتید مدعو:

دکتر تقی محسن پور

دکتر خدیجه علوی

نام دانشجو:

زهرا حیدری

تیرماه ۹۰

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل اول: مقدمه

- ۱-۱ مقدمه و مفاهیم..... ۱
- ۲-۱ تشکیل کانال یونی..... ۵
- ۳-۱ گسیل خود به خودی و القایی از پرتو نسبی الکترود در کانال یونی..... ۷
- ۴-۱ ناپایداری امواج محیط پلاسما..... ۸
- ۱-۴-۱ تعریف ناپایداری..... ۸
- ۲-۴-۱ طبقه بندی ناپایداری های پلاسما..... ۱۰
- ۳-۴-۱ روشهای بررسی پایداری..... ۱۱
- ۴-۴-۱ ناپایداری های نوسانی و غیر نوسانی..... ۱۲
- ۵-۴-۱ ناپایداری های پلاسما..... ۱۳

### فصل دوم: تئوری قطبش شعاعی و سمتی

- ۱-۲ مقدمه..... ۲۰
- ۲-۲ قطبش..... ۲۱
- ۳-۲ قطبش شعاعی و سمتی..... ۲۵
- ۴-۲ اهمیت و کاربردهای پرتوهای با قطبش شعاعی و سمتی..... ۲۷
- ۵-۲ روش های تولید باریکه های با بردار استوانه ای..... ۲۸
- ۱-۵-۲ روش های داخل کاواک..... ۲۸
- ۲-۵-۲ روش های خارج کاواک..... ۳۲
- ۶-۲ بررسی معادله موج برداری..... ۳۷
- ۱-۶-۲ معادله باریکه هایی با قطبش متقارن محوری..... ۳۷

### فصل سوم: پاشندگی پیرامحوری امواج الکترومغناطیس قطبیده دایروی راستگرد و چپگرد

- ۱-۳ مقدمه..... ۴۱
- ۲-۳ بررسی حالت تعادلی پرتو نسبی الکترود در کانال یونی..... ۴۲

۴۲	.....	۱-۲-۳ معرفی نیروهای شعاعی
۴۴	.....	۲-۲-۳ معادله تعادلی نیروهای شعاعی
۴۶	.....	۳-۳ پاشندگی مدهای الکترومغناطیس
۵۹	.....	۴-۳ پاشندگی پیرامحوری
۶۰	.....	۱-۴-۳ فرکانس قطع
۶۱	.....	۲-۴-۳ کانال یونی چگال
۶۲	.....	۳-۴-۳ کانال یونی غیر چگال
۶۲	.....	۵-۳ حذف خود- میدانهای پرتو الکترونی
۶۳	.....	۶-۳ اثر چرخش فارادی
۶۵	.....	۷-۳ حل عددی معادله پاشندگی
۶۷	.....	۱-۷-۳ پاشندگی امواج در حالت بدون جفت شدگی
۶۹	.....	۲-۷-۳ پاشندگی امواج پیرامحوری در حالت جفت شده

### فصل چهارم: پاشندگی پیرامحوری امواج الکترومغناطیسی قطبیده شعاعی و سمتی

۷۵	.....	۱-۴ مقدمه
۷۶	.....	۲-۴ پاشندگی مدهای الکترومغناطیس
۸۰	.....	۳-۴ پاشندگی پیرامحوری
۸۱	.....	۱-۳-۴ فرکانس قطع
۸۲	.....	۴-۴ حذف خود- میدانهای پرتو الکترونی
۸۲	.....	۵-۴ حل عددی معادله پاشندگی
۸۵	.....	۱-۵-۴ پاشندگی امواج در حالت بدون جفت شدگی
۸۷	.....	۲-۵-۴ پاشندگی امواج پیرامحوری در حالت جفت شده
۹۴	.....	۶-۴ نتیجه گیری و پیشنهاد برای کارهای آتی
۹۶	.....	مراجع



## فهرست شکلها

صفحه

عنوان

### فصل اول: مقدمه

- ۱-۱ کانال یونی..... ۵
- ۲-۱ ساختار شعاعی ناحیه برهم کنش..... ۶
- ۳-۱ شمایی از کانال یونی ایجاد شده توسط پالس لیزر و تابش پرتو X توسط حرکت بتاتونی الکترون‌های پرتو در کانال..... ۷
- ۴-۱ رسم نمودار  $\frac{\omega_{p\alpha}^2}{(\omega - kv_{\alpha})^2} + \frac{\omega_{p\beta}^2}{(\omega - kv_{\beta})^2}$  به صورت تابعی از k..... ۱۷
- ۵-۱ نمودار تابع  $y^2 = x^2 + 1 \pm (4x^2 + 1)^{\frac{1}{2}}$  به صورت تابعی از x..... ۱۹

### فصل دوم: تئوری قطبش شعاعی و سمتی

- ۱-۲ بیضی قطبش با زاویه دوران  $\alpha$  و مشخصه بیضی گون  $\epsilon$ ..... ۲۲
- ۲-۲ حالت‌های مختلف قطبش نور به ازای اختلاف فازهای مختلف با  $A_x = A_y$ ..... ۲۴
- ۳-۲ قطبش بیضوی چپگرد..... ۲۵
- ۴-۲ پرتو قطبیده شعاعی و سمتی..... ۲۶
- ۵-۲ نمایشی از میدان الکتریکی نزدیک نقطه تمرکز در حالت پرتو قطبیده شعاعی و خطی..... ۲۶
- ۶-۲ آینه شیاردار برای فیلتر کردن مدها..... ۳۰
- ۷-۲ برهم‌نهمش همدوس دو مد متعامد  $TEM_{01}$  برای تشکیل پرتو قطبیده شعاعی و سمتی..... ۳۱
- ۸-۲ پیکربندی تشدیدگر لیزر با المان فاز گسسته برای تشکیل پرتو قطبیده سمتی یا شعاعی..... ۳۲
- ۹-۲ توری ریز موج متغیر فضایی به کار برده شده توسط بومزن و همکارانش و عنصر قطبیده فضایی..... ۳۴
- ۱۰-۲ ۸ قطعه تأخیرگر فضایی..... ۳۴
- ۱۱-۲ بازتابنده‌های مخروطی و قطبشگر به کار رفته برای تولید باریکه‌های با بردار استوانه‌ای..... ۳۵
- ۱۲-۲ کریستال مایع مستقر شده با وسایل اپتیکی برای تولید پرتو قطبیده شعاعی..... ۳۵
- ۱۳-۲ استفاده از قطبشگر شعاعی یا سمتی و تیغه فاز ماریپچی برای تولید CVBها..... ۳۶

### فصل سوم: پاشندگی پیرامحوری امواج الکترومغناطیس قطبیده دایروی راستگرد و چپگرد

- ۱-۳ پرتو نسبیتی الکترون دوار با چگالی ثابت  $n_{oe}$ ..... ۴۴

- ۲-۳ جهت حرکت پرتو نسبی الکترون دوار در مختصات استوانه‌ای..... ۴۴
- ۳-۳ منحنی پاشندگی امواج طولی در حالت غیر جفت شده..... ۶۷
- ۴-۳ منحنی پاشندگی امواج قطبیده دایروی راستگرد و چپگرد در حالت غیر جفت شده..... ۶۸
- ۵-۳ منحنی پاشندگی امواج طولی، دایروی راستگرد و چپگرد در حالت جفت شده..... ۶۹
- ۶-۳ منحنی پاشندگی و ناپایداری امواج طولی، دایروی چپگرد و راستگرد سیکلوترونی در حالت جفت شده..... ۷۰
- ۷-۳ وابستگی ناپایداری به نسبت  $n_{oi}/n_{oe}$  ، الف- ناحیه اول، ب- ناحیه دوم..... ۷۱
- ۸-۳ وابستگی ناپایداری به فاکتور نسبی پرتو الکترونی، الف- ناحیه اول، ب- ناحیه دوم..... ۷۲
- ۹-۳ تأثیر خود- میدانهای پرتو روی ناپایداری در دو ناحیه..... ۷۳
- ۱۰-۳ منحنی ناپایداری برای کانال یونی چگال با استفاده از فرمول حدی (۳-۴-۹) و حالت کلی..... ۷۴
- ۱۱-۳ منحنی ناپایداری برای کانال یونی غیر چگال با استفاده از فرمول حدی (۳-۴-۱۰) و حالت کلی..... ۷۴

### فصل چهارم: پاشندگی پیرامحوری امواج الکترومغناطیسی قطبیده شعاعی و سمتی

- ۱-۴ منحنی پاشندگی امواج طولی و امواج الکترومغناطیس قطبیده سمتی در حالت غیر جفت شده..... ۸۵
- ۲-۴ منحنی پاشندگی و ناپایداری امواج قطبیده شعاعی و شعاعی سیکلوترونی در حالت غیر جفت شده..... ۸۶
- ۳-۴ منحنی پاشندگی امواج طولی، شعاعی و سمتی در حالت جفت شده..... ۸۷
- ۴-۴ منحنی پاشندگی و ناپایداری امواج طولی، شعاعی (RA&CR) در حالت جفت شده..... ۸۸
- ۵-۴ وابستگی ناپایداری به فاکتور نسبی پرتو الکترونی، الف- ناحیه اول، ب- ناحیه دوم..... ۸۹
- ۶-۴ وابستگی ناپایداری به نسبت  $n_{oi}/n_{oe}$  ، الف- ناحیه اول، ب- ناحیه دوم..... ۹۰
- ۷-۴ تأثیر خود- میدانهای پرتو روی ناپایداری، الف- ناحیه اول، ب- ناحیه دوم..... ۹۱
- ۸-۴ رفتار ناپایداری برای دو حالت قطبش دایروی و قطبش شعاعی، الف- ناحیه اول، ب- ناحیه دوم..... ۹۳

## فهرست جدولها

صفحه

عنوان

فصل دوم: تئوری قطبش شعاعی و سمتی

۱-۲ نمونه‌ای از قطبش‌های مختلف همراه با شکل دامنه میدان الکتریکی..... ۴۰

## لیست علایم و اختصارات

EM	Electromagnetic waves	امواج الکترومغناطیس
TEM	Transverse Electromagnetic waves	امواج الکترومغناطیس عرضی
CVB	Cylindrical Vector Beams	باریکه‌های با بردار استوانه‌ای
ASP	Axially Symmetrical Polarization	قطبش متقارن محوری
SC	Space Charge waves	امواج بار-فضا
SC <sup>+</sup>	Fast Space Charge waves	امواج بار-فضای تند
SC <sup>-</sup>	Slow Space Charge waves	امواج بار-فضای کند
RCP	Right-handed Circularly Polarized waves	امواج قطبیده دایروی راستگرد
LCP	Left-handed Circularly Polarized waves	امواج قطبیده دایروی چپگرد
CRP	Cyclotron Right-handed Polarized waves	امواج قطبیده دایروی راستگرد سیکلوترونی
CLP	Cyclotron Left-handed Polarized waves	امواج قطبیده دایروی چپگرد سیکلوترونی
AZ	Azimuthally polarized waves	امواج قطبیده سمتی
RA	Radially polarized waves	امواج قطبیده شعاعی
CR	Cyclotron Radially polarized waves	امواج قطبیده شعاعی سیکلوترونی

## مقالات استخراج شده از این پایان نامه:

۱. S. Mirzanejhad, F. Sohbatzadeh, Z. Heidari, " *Instability of electromagnetic waves with radial polarization in a rotating relativistic electron beam guided by ion-channel*", J. Plasma. Physics (2011), (to appear).

۲. مقاله ارائه شده با عنوان "پاشندگی امواج الکترومغناطیسی در حضور پرتو نسبیته الکترون دوآر با هدایت

کانال یونی"، به صورت پوستر در کنفرانس فیزیک ایران، ۲۰ تا ۲۳ شهریور ۸۹ در دانشگاه بوعلی سینا

همدان.

# فصل اول

## مقدمه و مفاهیم

### ۱-۱ مقدمه

در سالهای اخیر مسئله انتشار پرتو نسبیتی الکترون<sup>۱</sup> در پلاسما مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است، تابش القایی از پرتو نسبیتی الکترون کاربردهای فراوانی مخصوصاً در لیزرهای الکترون آزاد<sup>۲</sup> [۱-۲]، و شتابدهنده‌های میدان عقبه پلاسمایی<sup>۳</sup> [۳] دارد. روشهای متفاوتی برای شتاب و هدایت پرتو الکترونی وجود دارد، از جمله، استفاده از میدان مغناطیسی محوری که به باریکه الکترون‌ها حرکت دورانی سیکلوترونی القا می‌کند [۴-۵]. از طرفی، مطالعات تجربی و عملی نشان می‌دهند که فرکانس و بازده چنین سیستم‌هایی در اثر محدودیت‌های ناشی از دسترسی به میدان مغناطیسی قوی و اثرات بار-فضا محدود می‌شوند. در این میان کانال یونی به عنوان یک روش متمرکز کردن پرتو نسبیتی الکترون پیشنهاد شد [۶-۷]، که یک روش جایگزین برای استفاده از میدان‌های

---

<sup>۱</sup>Relativistic Electron Beam

<sup>۲</sup>Free Electron Laser

<sup>۳</sup>Plasma Wake Field Accelerator

مغناطیسی محوری و یا چهار قطبی را فراهم می‌آورد. این روش کاربردهای فراوانی از جمله در شتابدهنده‌های پیشرفته [۸-۹]، منابع پر توان تابش الکترومغناطیس نظیر، لیزرهای الکترون آزاد [۱۰-۱۱]، لیزرهای کانال یونی<sup>۱</sup> [۱۲-۱۳]، میزهای سیکلوترونی الکترون با هدایت کانال یونی<sup>۲</sup> [۱۴]، و تابش سینکروترونی از طریق حرکت بتاترونی [۱۵-۱۷] دارد.

استفاده از کانال یونی ابتدا توسط تاکایاما<sup>۳</sup> و هیروماتسو<sup>۴</sup> برای استفاده در لیزر الکترون آزاد پیشنهاد شد [۶] و اولین بار به طور عملی توسط ازاکي<sup>۵</sup> و همکارانش [۱۸] به کار گرفته شد و توسط یا و همکارانش<sup>۶</sup> [۱۹] و نیز ژا<sup>۷</sup> و ویورل<sup>۸</sup> [۲۰]، از طریق شبیه‌سازی عددی بررسی شد. بررسی‌ها نشان داد که ترکیب تمرکز یونی و شرایط حاکم بر پرتو الکترونی، بهره بالا را در ناحیه اشعه ایکس نرم فراهم می‌کند [۱۹]. آزمایشات اخیر که بر-هم کنش پرتو الکترونی ۲۸/۵ گیگا الکترون ولتی با پلاسما را در مرکز شتابدهنده خطی استنفورد<sup>۹</sup> [۲۱-۲۲] بکار بکار گرفته، نشان داد که کانال یونی می‌تواند به طور موفقیت‌آمیزی برای تولید تابش X با باند پهن بکار رود. علاوه بر این، چگالی بالای یونها در کانال، قدرت ویگلر بیشتری نسبت به ویگلر مغناطیسی متعارف ایجاد می‌کند، که منجر به تولید مؤثر تابش امواج ایکس نسبت به منابع نور معمول می‌گردد و می‌تواند برای توسعه منابع تابش جدید بکار گرفته شود.

پایداری امواج الکترومغناطیس در رژیم تمرکز یونی<sup>۱۰</sup> توسط ویتتم<sup>۱۱</sup> [۲۳]، در یک بعد و با فرکانسی بزرگتر از فرکانس پلاسما مطالعه شد. روحانی و همکارانش ویژه مدهای فرکانس بالای یک موجبر فلزی

<sup>1</sup> Ion-Channel Laser

<sup>2</sup> Ion-Channel Electron Cyclotron Maser

<sup>3</sup> Takayama

<sup>4</sup> Hirumatsu

<sup>5</sup> Ozaky

<sup>6</sup> Ya

<sup>7</sup> Jha

<sup>8</sup> Wurele

<sup>9</sup> Stanford Linear Accelerator Center

<sup>10</sup> Ion - Focusing Regime

<sup>11</sup> Whittum

استوانه‌ای که به طور جزئی توسط پرتو نسبیته الکترون پر شده و از طریق کانال یونی هدایت می‌شود را بررسی کردند [۲۴]. همچنین میرزائزاد و همکارانش پاشندگی امواج الکترومغناطیسی توسط پرتو نسبیته الکترون در کانال یونی را برای قطبش شعاعی و سمتی بررسی کردند [۲۵].

می‌دانیم که ذرات شتابدار امواج الکترومغناطیس تابش می‌کنند [۲۶]، بنابراین الکترون‌ها در کانال یونی تابش الکترومغناطیس با طول موج کوتاه گسیل می‌کنند، در نتیجه پایداری این امواج برای پرتو نسبیته الکترون در کانال یونی مورد توجه قرار دارد. خواص پاشندگی امواج الکترومغناطیس به شرایط اولیه پرتو الکترونی و میدان‌های تعادلی بستگی دارد. در لیزر کانال یونی تکانه عرضی اولیه الکترون‌ها صفر در نظر گرفته شده، بنابراین الکترون تنها می‌تواند یک انرژی نوسانی عرضی کوچکی توسط میدان کانال یونی بدست آورد، که در این حالت، بهره سیستم خیلی پایین است [۲۷]. در میزهای سیکلوترونی الکترون با هدایت کانال یونی که امکان به کارگیری پرتو الکترون دوار در کانال یونی را فراهم کرده، تبادل انرژی الکترون با موج عمدتاً به طور عرضی برای امواج TE<sup>۱</sup> رخ می‌دهد، بنابراین پرتو الکترونی دوار برای عملکرد میز کانال یونی با کارایی بالا مفید است است [۲۸]. پرتو نسبیته الکترون دوار با توان خروجی بالا و قابلیت کاربرد در همجوشی تولید شده است (۱۹۷۰؛ ۱۹۷۴). از دیدگاه گرمایش<sup>۲</sup> پلاسما، پرتو نسبیته الکترون دوار قادر به انتقال انرژی به پلاسما نه تنها از طریق برانگیختن میکرواختلالات است، بلکه از طریق مکانیسم‌های دیگری همانند شتاب الکتروستاتیکی یون از طریق میدان الکتریکی شعاعی تعادلی، برانگیختن امواج مغناطیصوتی و همچنین گرمای ژول است. محاسبات تئوری نشان می‌دهد که علاوه بر جریان محوری معمول، جریان سمتی هنگامی که پرتو الکترون دوار به داخل پلاسما تزریق می‌شود، ایجاد می‌گردد.

---

<sup>1</sup> Transverse Electromagnetic

<sup>2</sup> Heating



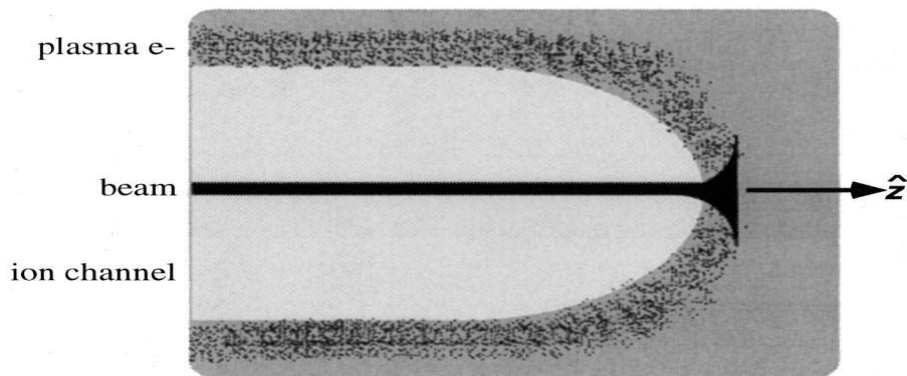
یک شکل تعادلی ممکن برای پرتو الکترون مغناطیده، دوران پرتو برای خنثی کردن اثر واگرایی خود- میدان‌هاست. بررسی‌های عملی پلاسماهای غیرخنثی امکان ایجاد وضعیت تعادل مذکور را در توافق با دیدگاه‌های تجربی نشان می‌دهد. در مرجع [۲۹]، خواص پاشندگی امواج الکتروستاتیکی و الکترومغناطیسی در حضور پرتو نسبی الکترون دوآر مغناطیده که کاملاً موجبر استوانه‌ای را پر کرده، بررسی شده است. همچنین پایداری پرتو نسبی الکترون دوآر مورد مطالعات فراوان قرار گرفته، از جمله در مرجع [۳۰]، پایداری پرتو نسبی الکترون دوآر در موجبر نزدیک تشدید سیکلوترونی در یک میدان مغناطیسی یکنواخت بررسی شده است.

ما در این پایان‌نامه قصد داریم پاشندگی امواج الکترومغناطیسی در حضور پرتو نسبی الکترون دوآر با هدایت کانال یونی را برای امواجی با قطبش دایروی راستگرد و چپگرد، و قطبش‌های شعاعی و سمتی مورد بررسی قرار دهیم.

در ادامه این فصل به طور مختصر به تشکیل کانال یونی، گسیل تابش شده از پرتو الکترونی و ناپایداری امواج در پلاسما خواهیم پرداخت. سپس در فصل دوم به معرفی امواجی با قطبش شعاعی و سمتی، نحوه تولید و کاربردهای آنها اشاره می‌کنیم. در فصل سوم ابتدا به بیان دینامیک پرتو نسبی الکترون دوآر در کانال یونی و سپس به رابطه پاشندگی و ناپایداری امواج راستگرد و چپگرد در کانال یونی خواهیم پرداخت. در انتها در فصل چهارم رابطه پاشندگی و ناپایداری امواج قطبیده شعاعی و سمتی در حضور پرتو نسبی الکترون دوآر با هدایت کانال یونی را بیان خواهیم کرد.

## ۲-۱ تشکیل کانال یونی

برای تشکیل کانال یونی، ابتدا یک کانال پلاسمائی بوسیله عبور یک پرتو لیزر UV<sup>۱</sup>، از میان یک گاز ایجاد می‌شود. در این حال، اگر پرتو الکترونی وارد پلازما با چگالی کمتر از چگالی پرتو شود، الکترون‌های پلازما در سر راه مسیر پرتو، بر اثر نیروی بار-فضا از مسیر پرتو دفع می‌شوند بنابراین یک کانال یونی ایجاد می‌گردد. (شکل (۱-۱)). در یک بررسی دقیقتر، در آغاز که ابتدای پرتو از درون پلازما عبور می‌کند، الکترون‌های پلازما از الکترون‌های پرتو بیشتر هستند، میدان الکتریکی پرتو تنها بخشی از الکترون‌های پلازما را دفع می‌کند، در این حالت چگالی بار خالص تقریباً برابر صفر است و تنها مؤلفه میدان باقیمانده، میدان مغناطیسی ناشی از پرتو است بنابراین پرتو بطور ضعیف توسط خود-میدان مغناطیسی متمرکز می‌شود. همان طور که جریان پرتو بطور پیوسته زیاد می‌شود، چگالی پرتو روی محور افزایش می‌یابد و میدان الکتریکی شعاعی پرتو، الکترون‌های پلازما را از حجم استوانه‌ای خارج می‌کند و کانالی از یونها شکل می‌گیرد که در این حالت بدنه اصلی پرتو به طور الکتروستاتیکی توسط یونهای ساکن متمرکز می‌شود.



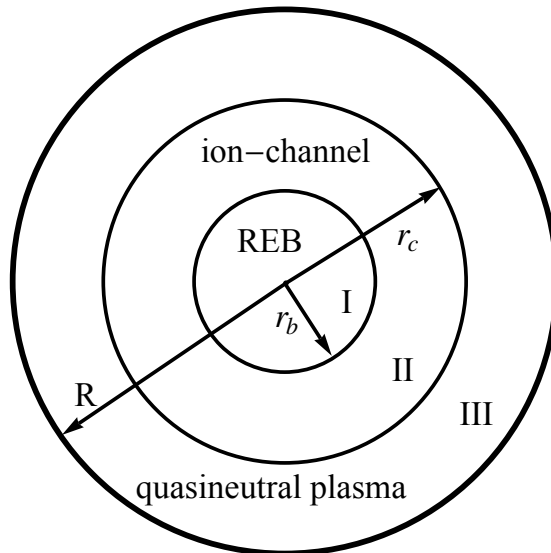
شکل ۱-۱: میدان الکتریکی شعاعی پرتو نسبتی الکترون، الکترون‌های پلازما را از حجم بزرگ یا همان "کانال" دفع می‌کند، سپس الکترون‌های پرتو توسط میدان الکتریکی یون‌های نسبتاً سنگین همگرا می‌شوند.

شعاع کانال یونی،  $I_c$  تقریباً برابر است با [۳۱]:

$$I_c = I_b \sqrt{\frac{n_b}{n_p}} \quad (۱-۲-۱)$$

<sup>۱</sup> Ultraviolet

که شعاع  $r_b$  پرتو،  $n_b$  چگالی پرتو و  $n_p$  چگالی پلاسما است. دیده می‌شود که در ناحیه برهم کنش، سطح می‌تواند به سه ناحیه در راستای شعاع تقسیم شود.



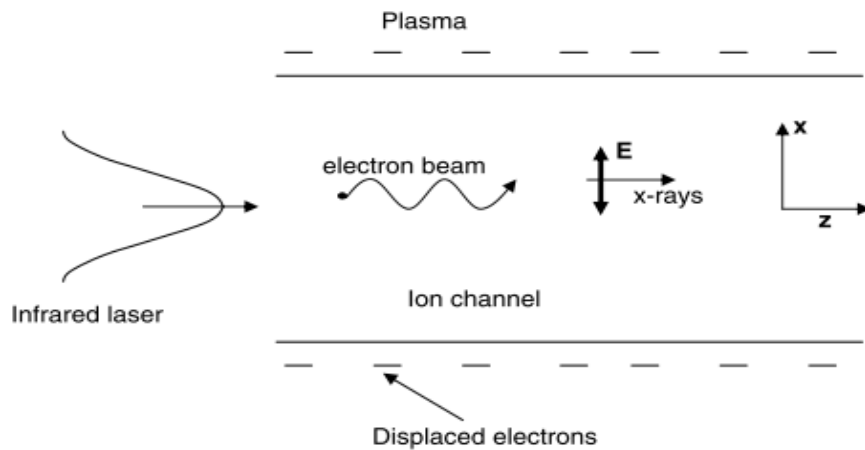
شکل ۱-۲: ساختار شعاعی ناحیه برهم کنش.

همان‌گونه که در شکل (۱-۲) نشان داده شده، در ناحیه اول پرتو الکترونی، ناحیه دوم کانال یونی و در ناحیه سوم پلاسما شبیه خنثی قرار گرفته است. در این پایان‌نامه ما به بررسی امواج در نزدیکی محور (تقریب پیرا محوری)<sup>۱</sup> می‌پردازیم لذا با فرض یکنواخت بودن ناحیه مورد بررسی از اثرات عرضی و محدودیت شعاع پرتو الکترونی صرف‌نظر می‌کنیم.

همان‌گونه که ذکر شد یک کانال یونی در پلاسما می‌تواند توسط یک پرتو الکترونی ایجاد گردد. در این حالت چگالی پلاسما باید کمتر از چگالی پرتو الکترونی باشد. از طرفی، چگالی پرتو الکترونی نمی‌تواند به دلایل تکنولوژی خیلی زیاد باشد. این مسئله می‌تواند منجر به محدودیت‌هایی در بهره‌توان تابشی شود، در این حالت استفاده از یک لیزر با توان بالا می‌تواند بر این محدودیت غلبه کند. پالس لیزر پرتوان می‌تواند الکترون‌های پلاسما را توسط نیروی پاندرموتیو دفع کند و یک کانال یونی در عقب پالس ایجاد نماید [۳۲-۳۴]. چگالی یون در چنین کانالی می‌تواند در حدود  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  باشد [۳۴-۳۵] که ۵ مرتبه بیشتر از چگالی یون در کانال

<sup>1</sup> Paraxial approximation

ایجاد شده در آزمایشات برهم کنش پرتو- پلاسما [۲۱] است. بنابراین استفاده از کانال یونی ایجاد شده توسط پالس لیزر می‌تواند تابشی را تا  $10^{10}$  مرتبه افزایش دهد. شمایی از کانال ایجاد شده توسط پالس لیزر در شکل (۳-۱) نشان داده شده است.



شکل ۳-۱: شمایی از کانال یونی ایجاد شده توسط پالس لیزر و تابش پرتو X توسط حرکت بتاتونی الکترون‌های پرتو در کانال.

### ۳-۱ گسیل خود به خودی و القایی از پرتو نسبیتی الکترون در کانال یونی

در بخش قبل نحوه تولید کانال یونی مورد بررسی قرار گرفت. حال دینامیک و تابش پرتوهای نسبیتی الکترون گذرنده از میان کانال را بررسی خواهیم کرد. در واقع میدان الکتریکی شعاعی کانال یک نیروی همگراکننده را بر این الکترون‌ها وارد می‌کند. این حالت می‌تواند باعث حرکت نوسانی الکترون‌ها حول محور انتشار گردد که به آن حرکت بتاترونی گویند (شکل ۳-۱). الکترون‌هایی که به این ترتیب شتابدار می‌شوند می‌توانند تابش دوقطبی نمایند که به علت نسبیتی بودن آنها این تابش خودبخودی شدیداً متمرکز بوده و به سمت جلو جهت‌گیری می‌شود. با انتخاب پارامترهایی نظیر انرژی پرتو و چگالی کانال می‌توان طول موج تابش خودبخودی را حتی تا ناحیه پرتو X کاهش داد. از طرفی، برهم کنش رزونانسی بین تابش الکترومغناطیس و نوسان پرتو الکترونی در