بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه الزهرا(س)**
**دانشکده علوم پایه**

**پایان‌نامه**
**جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد**
**رشته‌ی فیزیک اتمی مولکولی گرایش پلاسما**

**عنوان**
# بررسی انتشار امواج سولیتاری در پلاسماهای کوانتومی

**استاد راهنما**
**دکتر محمود رضا روحانی**

**استاد مشاور**
**دکتر حسین حکیمی پژوه**

**دانشجو**
**امینه اکبریان**

**دی‌ماه ۱۳۹۱**

سپاس خدا را که نور شناختش را به قلب ما تابانید و شکرش را بر وجودمان الهام نمود. دروازه‌ی بی پایان دانش به پروردگاریش را بر ما گشود و ما را به وادی پر فیض توحید خالصانه‌اش راهبری نمود.

تقدیری شایسته و تشکری بایسته از همه‌ی بزرگوارانی که در محضرشان زانوی تعلم زده‌ام و به شاگردیشان مفتخر شده‌ام، به ویژه از استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر روحانی که با راهنمایی‌های بسیار ارزنده و عالمانه‌اش علاوه بر آنکه نگارش این مجموعه را راهنمایی و هدایت کردند، بارهنمودهای ارزنده‌ی خود همچنین دقت نظر و توجهات روشنگر راه این پژوهش بوده و همچنین از جناب آقای دکتر حکیمی‌پژوه که در طی این مدت مرا یاری کردند کمال تشکر را دارم.

تقدیم به برترین موهبت های زندگی ام

**پدر و مادرم**

به پاس مهر صادقانه، عشق بی پایان و رنج بی منتهایشان در گشایش و آسایش من

خدایا هرگز نتوانم حق خدمتشان ادا کنم؛ تو خود به فضل خویش عزت و کرامت بر آنها ارزانی دار.

**کلیه دستاوردهای این تحقیق متعلق به دانشگاه الزهرا(س)است.**

# چکیده

هنگامی که طول موج دوبروی مربوط به ذرات، قابل مقایسه با فاصله‌ی میانگین بین ذره‌ای باشد، اثرات کوانتومی قابل ملاحظه‌اند؛ چنین شرایطی معمولاً در چگالی‌های بالا و دماهای پایین ظاهر می‌شوند. در این پایان نامه، انتشار امواج سولیتاری در پلاسمای کوانتومی چهار مؤلفه‌ای شامل الکترون‌ها و پوزیترون‌های کوانتومی و بدون اینرسی، یون‌های سرد و کلاسیکی و ذرات غبار ساکن با بار منفی، مطالعه شده است. در ابتدا با استفاده از معادلات کوانتوم هیدرودینامیک در یک بعد، رابطه‌ی پاشندگی برای امواج خطی غبار یون صوت کوانتومی در این مدل پلاسما، به‌دست آمده و تأثیر پارامتر پراش کوانتومی $H$ و چگالی ذرات غبار $d$ بررسی شده است. سپس به منظور بررسی امواج غبار یون صوت کوانتومی با دامنه‌ی کوچک، معادله‌ی KdV استخراج شده است. با بررسی جواب‌های معادله‌ی KdV ملاحظه می‌شود که پارامترهای $H$ و $d$، نقش مهمی را در جواب‌های معادله‌ی KdV ایفا می‌کنند، به قسمی که در یک مقدار بحرانی $H = H_C$ ضریب جمله‌ی پاشنده در معادله‌ی KdV صفر می‌شود ( یعنی $B = 0$) و جواب‌های سالیتون‌های KdV از بین می‌روند و به ازای $H < H_C$ ، سالیتون با دامنه‌ی مثبت و به‌ازای $H > H_C$ سالیتون با دامنه‌ی منفی وجود دارد، علاوه بر این، به ازای مقادیری از $d$ سالیتون‌های KdV به سالیتون‌های mKdV تغییر می‌کنند. در نهایت امواج سالیتونی غبار یون صوت کوانتومی با دامنه‌ی بزرگ مورد مطالعه قرار گرفته است. در این قسمت به دلیل پیچیده بودن معادلات، پتانسیل ساگدیف فقط به ازای پارامترهای کوچک $H$ بررسی شده است. نشان داده شده در این نوع پلاسما با افزایش چگالی ذرات غبار، ناحیه‌ی وجود جواب‌های سالیتونی زیرصوتی متراکم کاهش می‌یابد و امکان انتشار سالیتون‌های فراصوتی متراکم وجود دارد. همچنین اثر پارامتر پراش کوانتومی و چگالی ذرات غبار بر این

امواج بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده از حل پتانسیل ساگدیف در ناحیه‌ی غیرخطی ضعیف با نتایج معادله‌ی KdV سازگار است.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**

**پیشگفتار.....۱**

**فصل اول: مفاهیم بنیادی**

۱.۱: مقدمات پلاسمای کوانتومی.....۴

۱.۱.۱: مشخصه‌های پلاسمای کوانتومی.....۵

حفاظ در پلاسماهای کلاسیکی و کوانتومی.....۹

فرکانس پلاسماهای کلاسیکی و کوانتومی.....۱۳

پارامتر جفت شدگی انرژی.....۱۶

پارامتر تبهگنی.....۱۸

۲.۱.۱: تاریخچه پلاسمای کوانتومی.....۱۹

۳.۱.۱: مدل‌های ریاضی.....۲۲

تابع توزیع ویگنر.....۲۳

سیستم ویگنر پواسون.....۳۳

سیستم شرودینگر پواسون.....۳۴

مدل کوانتوم هیدرودینامیک (QHD).....۳۶

کاربردهای مدل کوانتوم هیدرودینامیک (QHD).....۴۱

**عنوان** **صفحه**


۲.۱: امواج خطی و غیر خطی در پلاسما..... ۴۲

۱.۲.۱: سیستم‌های خطی..... ۴۲

۲.۲.۱: سیستم‌های غیرخطی..... ۴۳

۱.۲.۲.۱: سالیتون‌ها..... ۴۳

کشف سالیتون..... ۴۵

انواع سالیتون..... ۴۹

کاربرد سالیتون‌ها..... ۵۰

۲.۲.۲.۱: امواج ضربه..... ۵۱


**فصل دوم: پلاسماهای کوانتومی الکترون، پوزیترون و یون**


مقدمه..... ۵۳

۱.۲: امواج یون صوت در پلاسمای کوانتومی سه مؤلفه‌ای..... ۵۴

۱.۱.۲: امواج خطی یون صوت در پلاسمای کوانتومی سه مؤلفه‌ای..... ۵۷

۲.۱.۲: امواج غیرخطی یون صوت در پلاسمای کوانتومی سه مؤلفه‌ای..... ۶۲

۱.۲.۱.۲: سالیتون‌های یون صوت کوانتومی در پلاسمای کوانتومی سه مؤلفه‌ای..... ۶۵

۲.۲.۱.۲: امواج ضربه یون صوت کوانتومی در پلاسمای کوانتومی سه مؤلفه‌ای..... ۶۹

**عنوان** **صفحه**

**فصل سوم: پلاسمای کوانتومی الکترون، پوزیترون، یون و ذرات غبار**


مقدمه.....۷۴

۱.۱.۳: مقدمات پلاسمای غباری.....۷۴

۱.۱.۱.۳: نمونه‌هایی از ذرات غبار و پلاسماهای غباری.....۷۶

۲.۱.۱.۳: مشخصه‌های پلاسمای غباری.....۷۹

خنثایی ماکروسکوپی.....۸۰

حفاظ دبای.....۸۰

فرکانس‌های مشخصه.....۸۲

پارامتر جفت شدگی کولن.....۸۳

۳.۱.۱.۳: فرایند های باردار شدن ذرات غبار.....۸۴

۲.۱.۳: پلاسمای کوانتومی الکترون، پوزیترون، یون و ذرات غبار.....۹۱

۲.۳: امواج غبار یون صوت در پلاسمای کوانتومی چهار مؤلفه‌ای.....۹۲

۱.۲.۳: امواج خطی غبار یون صوت کوانتومی (QDIA) در پلاسمای کوانتومی چهار مؤلفه‌ای.....۹۵

۲.۲.۳: امواج سالیتونی غبار یون صوت کوانتومی با دامنه‌ی کوچک.....۱۰۰

سالیتون‌های KdV.....۱۰۰

سالیتون‌های متراکم و رقیق.....۱۰۴

سالیتون‌های mKdV.....۱۱۰

۳.۲.۳: امواج سالیتونی غبار یون صوت کوانتومی (QDIA) با دامنه‌ی دلخواه.....۱۱۴

پتانسیل ساگدیف.....۱۱۴

**عنوان** **صفحه**

جواب‌های پتانسیل ساگدیف.....۱۱۷

پتانسیل ساگدیف در حد غیزخطی ضعیف.....۱۲۲

**نتیجه گیری.....۱۲۶**

**منابع.....۱۲۹**

# فهرست شکل‌ها

**عنوان** **صفحه**


شکل(۱-۱): وابستگی دمای تابع توزیع فرمی-دیراک برای الکترون‌ها..... ۸

شکل(۱-۲): تصویری از ابزار آزمایش راسل..... ۴۶

شکل(۱-۳): امواج سالیتون..... ۴۸

شکل(۲-۱): نمودار فرکانس بر حسب عدد موج به ازای مقادیر مختلف چگالی پوزیترون و پارامترهای ثابت $\sigma = 1$ ، $H = 0.7$ ..... ۶۱

شکل(۲-۲): نمودار فرکانس برحسب عددموج به ازای مقادیرمختلف پارامترپراش کوانتومی و مقادیرثابت $\sigma = 1$ ، $n_{e0} = 5.9 \times 10^{28} cm^{-3}$ ، $n_{i0} = 5.8 \times 10^{27} cm^{-3}$ و $n_{p0} = 5.32 \times 10^{28} cm^{-3}$ ..... ۶۱

شکل(۲-۳): اثر چگالی پوزیترون‌ها بر امواج سالیتونی یون صوت کوانتومی به ازای مقادیر ثابت $H = 0.5$ ، $u_0 = 0.3$ ، $\sigma = 1$ و $n_{i0} = 5.8 \times 10^{27} cm^{-3}$ ..... ۶۷

شکل(۲-۴): اثر پارامتر پراش کوانتومی بر امواج سالیتونی یون صوت کوانتومی به ازای مقادیر ثابت $u_0 = 0.3$ ، $\sigma = 1$ ، $n_{e0} = 5.9 \times 10^{28} cm^{-3}$ ، $n_{i0} = 5.8 \times 10^{27} cm^{-3}$ و $n_{p0} = 5.32 \times 10^{28} cm^{-3}$ ..... ۶۸

شکل(۲-۵) : تأثیر چگالی پوزیترون‌ها بر امواج ضربه‌ی یکنوای یون صوت کوانتومی ، به ازای مقادیر ثابت $Q = 0.15$ ، $u_0 = 0.3$ ، $\sigma = 1$ و $n_{i0} = 5.8 \times 10^{27} cm^{-3}$ ..... ۷۰

**عنوان** **صفحه**

شکل (۲-۶) : تأثیر چگالی پوزیترون‌ها بر نوسانات موج ضربه‌ی نوسانی یون صوت کوانتومی، به ازای مقادیر ثابت $H=0.5$، $u_0=0.1$، $\sigma=1$، $n_{i0}=5.8\times10^{27}cm^{-3}$ و $\eta_0=0.01$ ..... ۷۲

شکل(۲-۷): اثر پارامتر پراش کوانتومی بر نوسانات موج ضربه‌ی نوسانی یون صوت کوانتومی، به ازای مقادیر ثابت $u_0=0.1$، $\sigma=1$، $\eta_0=0.01$، $n_{e0}=5.9\times10^{28}cm^{-3}$، $n_{i0}=5.8\times10^{27}cm^{-3}$ و $n_{p0}=5.32\times10^{28}cm^{-3}$ ..... ۷۲

شکل(۳-۱-۱): برخوردخراشان بین ذره‌ی پلاسمایی $j$ و یک ذره‌ی غباربارداربا $q_jq_d>0$ ..... ۸۵

شکل(۳-۲-۱): نمودار فرکانس بر حسب عدد موج به ازای مقادیر مختلف ذرات غبارو پارامترهای ثابت $\sigma=1$، $H=0.7$ ..... ۹۹

شکل(۳-۲-۲): نمودار فرکانس بر حسب عدد موج به ازای مقادیر مختلف پارامتر پراش کوانتومی ومقادیرثابت $\sigma=1$، $e=9.17$، $p=9.17$ و $d=1$ ..... ۹۹

شکل(۳-۲-۳): تغییرات $H_C$ برحسب $d$ ($B=0$) به ازای مقادیر ثابت $\sigma=1$ و $p=9.17$ ..... ۱۰۵

شکل(۳-۲-۴): اثر پارامتر پراش کوانتومی بر امواج سالیتونی غبار یون صوت کوانتومی به ازای مقادیر ثابت $d=4$، $|u_0|=0.3$، $\sigma=1$ و $p=9.17$ ..... ۱۰۶

شکل(۳-۲-۵): اثر پارامتر پراش کوانتومی ( $H$ ) بر امواج سالیتونی متراکم غبار یون صوت کوانتومی به ازای مقادیر ثابت $d=4$، $H_C=1.268$، $u_0=0.3$، $\sigma=1$ و $p=9.17$ ..... ۱۰۷

**عنوان** **صفحه**

شکل(۳-۲-۶): اثر پارامتر پراش کوانتومی ( $H$ ) بر امواج سالیتونی رقیق غبار یون صوت کوانتومی به ازای مقادیر ثابت $d=4$، $H_C=1.268$، $u_0=-0.3$، $\sigma=1$ و $p=9.17$ ..... ۱۰۷

شکل(۳-۲-۷): اثر ذرات غبار بر امواج سالیتونی غبار یون صوت کوانتومی به ازای مقادیر ثابت $H=1.3$، $|u_0|=0.3$، $\sigma=1$ و $p=9.17$ ..... ۱۰۸

شکل(۳-۲-۸): اثر ذرات غبار بر سالیتون‌های متراکم غبار یون صوت کوانتومی به ازای مقادیر ثابت $H=0.8$، $u_0=0.3$، $\sigma=1$ و $p=9.17$ ..... ۱۰۹

شکل(۳-۲-۹): اثر ذرات غبار بر سالیتون‌های رقیق غبار یون صوت کوانتومی به ازای مقادیر ثابت $H=1.3$، $u_0=-0.3$، $\sigma=1$ و $p=9.17$ ..... ۱۰۹

شکل(۳-۲-۱۰): بیشینه(منحنی خط‌چین) وکمینه(منحنی خط)عدد ماخ $M$ در سالیتون‌های متراکم غباریون صوت کوانتومی (با دامنه‌ی مثبت) بر حسب چگالی ذرات غبار $d$، به ازای $p=1$ . ..... ۱۲۰

شکل(۳-۲-۱۱): بیشینه(منحنی خط‌چین)و کمینه (منحنی خط) عدد ماخ $M$ در سالیتون‌های رقیق غبار یون صوت کوانتومی (با دامنه‌ی منفی) بر حسب چگالی ذرات غبار $d$، به ازای $p=1$ ..... ۱۲۱

شکل(۳-۲-۱۲): اثر افزایش چگالی ذرات غبار بر الف- پتانسیل و ب- دامنه و پهنای سالیتون‌های غبار یون صوت کوانتومی به ازای p=1، $\sigma=1$ و H=0.3..... ۱۲۳

**عنوان** **صفحه**

شکل(۳-۲-۱۳): اثر افزایش پارامتر پراش کوانتومی بر الف- پتانسیل و ب- دامنه و پهنای سالیتون‌های غبار یون صوت کوانتومی به ازای p=1، $\sigma = 1$و d=0.2 .....۱۲۴

شکل(۳-۲-۱۴): اثر افزایش عدد ماخ $M$ روی الف- پتانسیل و ب- دامنه و پهنای سالیتون‌های غبار یون صوت کوانتومی ، به ازای $p=1$، $d=0.2$ و $H=0.3$ .....۱۲۵

## پیشگفتار

اولین بار در حدود ۸۰ سال پیش (سال ۱۹۲۹) تانکس[1] و لانگمویر[2] لفظ پلاسما را برای توصیف ناحیه‌ی درونی یک گاز یونیزه در حال تابش که به وسیله‌ی تخلیه الکتریکی در یک لامپ تولید شد، به‌کار بردند[۱]. پلاسما بیانگر یک گاز که از لحاظ ماکروسکوپیکی خنثی و شامل تعداد بسیار زیادی ذرات باردار برهم‌کنشی (الکترون و یون) و ذرات خنثی، است. ۹۹٪ ماده‌ی جهان به شکل پلاسماست. این برآورد ممکن است خیلی دقیق نباشد ولی نظر به اینکه درون ستارگان و جو آنها، ابریهای گازی و بیشتر هیدروژن میان ستاره‌ای پلاسما هستند، مسلماً دور از واقعیت نیست. در مجاورت خودمان، همین که جو زمین را ترک می‌کنیم، بی‌درنگ با پلاسمایی مواجه می‌شویم که از کمربندهای تابشی وان آلن و باد خورشیدی تشکیل شده‌است. از طرف دیگر، پلاسما در زندگی روزمره به چند نمونه محدود می‌شود: آذرخش، فروغ ملایم شفق شمالی، گاز داخل لامپ فلوئورسان یا چراغ نئون و یونیدگی مختصری در خروجی موشک[۲].

هرگاز یونیده را نمی‌توان پلاسما نامید؛ البته همواره یونیدگی اندکی در هر گازی وجود دارد. در واقع پلاسما یک سیستم آماری از ذرات باردار است که از خود رفتار جمعی نشان می‌دهند، که این رفتار جمعی ناشی از نیروهای کولنی بلند بردی است که بین این ذرات وجود دارد.

سیستم‌های ذرات باردار با چگالی به اندازه کافی بالا و دمای پایین نیز اثرات پلاسما را نشان می‌دهند، بارزترین مثال؛ گاز الکترون‌های آزاد در فلزات معمولی یا نیمه‌فلزی است.

---

[1] Tankes
[2] Langmure

پلاسمای متراکم در طبیعت نیز یافت می‌شود. پلاسما در داخل سیاره‌ی مشتری (مشتری، زحل)، کوتوله‌های قهوه‌ای و سفید و پوسته‌ی ستاره‌های نوترونی، متراکم است. به عنوان مثال، تراکم در داخل ستاره‌ی نوترونی می‌تواند تا حد $۱۰^{۳۶-}\ cm^{-۳}$ باشد. اما مطالعه‌ی اثرات جمعی در چنین چگالی‌هایی بسیار پیچیده است چون اثرات مکانیک کوانتومی نمی‌تواند نادیده گرفته شود و بسیاری از پدیده‌های غیر معمول مانند تونل‌زنی الکترون، فشار، تراکم و تبلور و غیره نیز می‌تواند مهم باشد. اگرچه درجه حرارت پلاسمای متراکم اخترفیزیک بسیار زیاد است، در عین حال نمی‌توان تأثیرات کوانتومی را به دلیل محدودیت‌های اصل پائولی نادیده گرفت[۳].

در این پایان نامه سعی شده است علاوه بر پلاسمای کوانتومی، اثر ذرات غبار نیز در نظر گرفته شود و امواج سالیتونی به وجود آمده در این محیط را بررسی کنیم.

در فصل اول مفاهیم اساسی پلاسماهای کوانتومی و امواج سالیتونی بیان شده است.

در فصل دوم پلاسمای کوانتومی سه مؤلفه‌ای شامل الکترون، پوزیترون ویون در نظر گرفته و امواج سالیتونی با دامنه‌ی کوچک در این پلاسما بررسی می‌کنیم.

در فصل سوم علاوه بر الکترون، پوزیترون ویون، ذرات غبار نیز را نیز در پلاسمای کوانتومی در نظر گرفتیم. رابطه‌ی پاشندگی به منظور بررسی امواج خطی و معادله‌ی KdV و mKdV به منظور بررسی امواج سالیتون با دامنه‌ی کوچک در پلاسمای کوانتومی چهار مؤلفه‌ای شامل الکترون، پوزیترون، یون و ذرات غبار به دست آورده شده است. سپس پتانسیل ساگدیف در این مدل پلاسما محاسبه شده و امواج سالیتونی با دامنه‌ی دلخواه به دست آمده و نهایتاً اثر ذرات غبار و پارامتر پراش کوانتومی بر این امواج بررسی شده است.

امینه اکبریان

دی ماه ۱۳۹۱

# فصل اول

# مفاهیم بنیادی

## ۱.۱: مقدمات پلاسمای کوانتومی

بیش از چهار دهه‌ی پیش، پاینز [۴] خواص پلاسماهای کوانتومی با چگالی بالا و دمای پایین را بررسی کرد. پلاسماهای کوانتومی برخلاف پلاسماهای کلاسیکی (که دارای دمای بالا و چگالی پایین هستند)، با چگالی تعداد ذرات بالا و درجه حرارت پایین مشخص می‌شوند. پلاسماهای کوانتومی در محیط‌های مختلف رایج هستند ، به عنوان مثال، در اجرام اخترفیزیک چگال (داخل مشتری و کوتوله‌های سفید و ستاره‌های نوترونی)، و در دستگاه‌های الکترونیکی فوق کوچک (در میکروالکترونیک، دستگاه‌های نیمه‌هادی، نقاط کوانتومی، نانوسیم‌ها، نانولوله‌های کربنی، دیود کوانتومی و پلاسماهای فراسرد)[۵].

هنگامی‌که چگالی بسیار بالا باشد، فاصله متوسط بین ذره‌ای $d$ با طول موج دوبروی[۳] ذرات باردار که به صورت زیر تعریف می‌شود، قابل مقایسه است

$$\lambda_B = \frac{\hbar}{mV_F}, \qquad (۱.۱.۱)$$

در اینصورت اثرات تبهگنی را نمی‌توان نادیده گرفت یعنی $1 \le n\lambda_B^3$ ($d = n^{-1/3}$)؛ و اثرات مکانیک کوانتومی همراه با اثرات جمعی همزمان مهم می‌شوند. چنین پلاسماهایی به عنوان پلاسمای کوانتومی نامیده می‌شوند. از نقطه نظر مکانیک کوانتومی، وضعیت یک ذره، به جای استفاده از مسیر در فضای فاز، توسط تابع موج مربوط به ذره مشخص می‌شود، و اصل عدم قطعیت هایزنبرگ منجر به تغییرات اساسی مکانیک آماری کلاسیک است. طول موج دوبروی در پلاسمای کلاسیکی هیچ نقشی ندارد، چون در مقایسه با فاصله‌ی متوسط بین ذره‌ای بیش از حد کوچک است، هیچ همپوشانی تابع موج و در نتیجه اثرات کوانتومی وجود ندارد. بنابراین ذرات پلاسما مانند نقطه در نظر گرفته می‌شوند و کلاسیکی رفتار می‌کنند.

[1] Broglie wavelength

با این حال، در پلاسماهای کوانتومی، همپوشانی توابع موج مربوط به ذرات اتفاق می‌افتد که اثرات کوانتومی جدید را معرفی می‌کند[۶]. از رابطه‌ی (۱.۱.۱) روشن است که طول موج دوبروی به جرم ذره بستگی دارد. به طور عمده، اثرات کوانتومی ذرات به جرم آن‌ها بستگی دارد. جرم‌های بزرگتر، موجب اثرات کوانتومی کوچکتری می‌شوند. به همین دلیل، اثرات کوانتومی مربوط به الکترون‌ها از یون‌ها با توجه به جرم کوچکتر الکترون‌ها ،که الکترون را به عنوان یک ذره‌ی کوانتومی توصیف می‌کند، مهم‌تر هستند. در حال حاضر، رفتار بسیاری از سیستم ذرات اساساً توسط قوانین آماری تعیین می‌شود. ذرات پلاسما با تابع موج متقارن به عنوان ذرات بوز نامیده می‌شوند و ذرات با تابع موج پادمتقارن ذرات فرمی نامیده می‌شوند. ما می‌توانیم پلاسما را به این صورت تقسیم‌بندی کنیم (الف) پلاسماهای کوانتومی (تبهگن) اگر $1< n\ \lambda_B^3$ و (ب) پلاسماهای کلاسیکی (غیرتبهگن) اگر $1> n\lambda_B^3$.

در اینجا به مقایسه‌ی برخی از پارامترهای فیزیکی ضروری در پلاسماهای کلاسیکی و کوانتومی می‌پردازیم.

## ۱.۱.۱ : مشخصه‌های پلاسمای کوانتومی

در پلاسماهای کوانتومی، معمولاً توزیع آمار فرمی-دیراک[۴] به جای توزیع ماکسول-بولتزمن[۵]، که به طور گسترده‌ای در پلاسماهای کلاسیک استفاده می‌شود، به‌کار می‌رود. مقیاس‌های کوانتومی یعنی زمان، طول و سرعت حرارتی ذرات باردار، با پلاسمای کلاسیکی کاملاً متفاوت هستند.

[1] Fermi-Dirac distribution
[2] Boltzmann-Maxwell distribution