بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

پایان نامه کارشناسی ارشد

موضوع:

شبیه سازی جنبشی پلاسما در تقریب مغناطو استاتیک

نگارش:
: سید مهدی حسینی جناب

استاد راهنما:
دکتر حسین عباسی

بهمن ۱۳۸۵

بسمه تعالی

شماره:
تاریخ:

فرم اطلاعات پایان نامه
کارشناسی ارشد و دکترا

دانشگاه صنعتی امیر کبیر
(پلی تکنیک تهران)

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگی : سید مهدی حسینی جناب　　دانشجوی آزاد ☒　　بورسیه ☐　　معادل ☐

شماره دانشجوئی :۸۳۱۱۱۱۰۵　　دانشکده : مهندسی هسته ای و فیزیک　　رشته تحصیلی: فیزیک

نام و نام خانوادگی استاد راهنما : دکتر حسین عباسی

عنوان به فارسی : شبیه سازی جنبشی پلاسما در تقریب مغناطواستاتیک

عنوان به انگلیسی: **Kinetic Simulation of Plasma in a magnetostatic approximation**

نوع پروژه : 　　کاربردی ☒　　بنیادی ☒　　توسعه‌ای　　نظری

تاریخ شروع : ۸۴/۷/۱ تاریخ خاتمه : ۸۵/۱۱/۲　　تعداد واحد : ۶ واحد

سازمان تامین کننده اعتبار :

واژگان کلیدی به فارسی : معادله ولاسوف ، شبیه سازی، مغناطواستاتیک ، روش مشخصه.

واژگان کلیدی به انگلیسی: Vlaosv equation, simulation , magnetostatic, trajectory method

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت پژوهشی دانشگاه :

استاد راهنما:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما :　　تاریخ :

نسخه ۱ : معاونت پژوهشی

نسخه ۲: کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تسویه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

تقدیم به

پدر و مادرعزیزم

سپاس و قدردانی

با سپاس و تشکر از آقای دکتر حسین عباسی ، دکتر سهیل حکیمی پزوه و دوستان آقایان مجتبی قدیمی ، رضا شکوهی و خانم نرگس جواهری که مرا در انجام این پروژه یاری رساندند.

چکیده

سیستم معادلات ولاسوف پواسون با استفاده از روش مشخصه ها شبیه سازی شده است. برای حل معادلات مشخصه، روش پرش قورباغه ای–ذوزنقه‌ای به کار برده شده است. روش شبیه‌سازی نقاط فضای فاز را بر روی مسیرهایی که تابع توزیع در آنها ثابت است به پیش می برد. دقت زمانی روش، از مرتبه‌ی دوم ارتقا یافته است و دقت مکانی آن از مرتبه‌ی چهار می‌باشد. پدیده های مشاهده شده نظیر ناپایداری دو جریانی ، میرایی لاندائو و تولید مدهای BGK با نتایج نظری و شبیه سازی های گزارش شده در تطابق خوبی است.

به عنوان اولین گام در بسط روش بدست آمده شبیه‌سازی سیستم معادلات ولاسوف پواسون در تقریب مغناطواستاتیک ارائه شده است. پارادوکس لانداو– برناشتاین مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج به دست آمده تطابق کیفی خوبی با نتایج مورد انتظار دارد.

۱) مقدمه ۹

۲) کلیات ۱۱

۲-۱) کلیات پلاسما ۱۱
۲-۱-۱) تعریف پلاسما ۱۱
۲-۱-۲) پارامترهای پلاسما: ۱۴
۲-۱-۳) پلاسما در طبیعت ۱۴
۲-۱-۴) روشهای مطالعه پلاسما ۱۶

۲-۲) کلیات شبیه سازی ۲۰
۲-۲-۱) مقدمه۰ Error! Bookmark not defined.
۲-۲-۲) خطا در شبیه سازی ۲۱
۲-۲-۳) معیارهای انتخاب روش ۲۲
۲-۲-۴) روشهای شبیه سازی سیستم‌ها ی چند ذره‌ای ۲۵

۲-۳) تاریخچه شبیه سازی معادله ولاسوف ۲۷

۳) توصیف کد شبیه سازی ۳۰

۳-۱) مقدمات تئوری ۳۰
۳-۱-۱) مفاهیم: ۳۰
۳-۱-۲) بی بعدسازی ۳۲
۳-۱-۳) روش مشخصه ۳۲
۳-۱-۴) مدل شبیه سازی : ۳۴

۳-۲) حلقه زمانی ۳۶

۳-۳) زیر برنامه ها ۴۰
۳-۳-۱) شرایط اولیه : ۴۰
۳-۳-۲) حل معادله پواسون: ۴۰
۳-۳-۳) حل معادلات مشخصه: ۴۳

۳-۳-۴) درون يابي و برون يابي: ٤٤

٤) آزمایش های مربوط به درستی کد شبیه سازی ٤٧

۴-۱) آزمون جریان آزاد... ٤٧

۴-۲) آزمون تابع توزیع ماکسولی.. ٥٠

۴-۳) آزمون ناپایداری دو جریانی.. ٥٢

۵) میرایی لانداو و مدهای BGK ٥٥

۵-۱) ملاحظات نظری... ٥٥

۵-۱-۱) میرایی لانداو در تقریب خطی.. ٥٥

۵-۱-۲) آزمايش ميرايي لانداو غير خطي (BGK Modes) :... ٥٦

۵-۲) شبیه سازی میرایی لانداو و مدهای BGK.. ٥٩

۶) تقریب مغناطو استاتیک ٦٣

۶-۱) ملاحظات نظری... ٦٣

۶-۲) شبیه سازی پارادوکس لانداو برناشتاین.. ٦٥

۱) مقدمه

معادله ولاسوف به عنوان یک معادله غیرخطی و کلیترین معادله حاکم بر پلاسما در تقریب جنبشی اهمیت فراوانی در بخش مطالعات محض و همچنین در بخش کاربردهای پلاسما یافته است. شناخت این معادله و جوابهای آن به عنوان یک مسئله جذاب و چالش برانگیز توجه بسیاری را از اولین روزهایی که این معادله توسط ولاسوف معرفی گردید برانگیخته است.

غیرخطی بودن این معادله و عدم وجود جوابهای بدیهی برای آن باعث شده که بسیاری برای فهم این معادله به روشهای عددی و شبیه سازی روی بیاورند. امروزه کدهای معتبری در مراکز تحقیقاتی دنیا برای شبیه سازی این معادله و درحقیقت شبیه سازی پلاسما و فهم مسائل پایه‌ای آن وجود دارد. اما همچنان افراد بسیاری سعی بر آن دارند تا با معرفی کدهای بهتر و روشهای شبیه سازی برتر، مطالعه در این حوزه را تا حد امکان ساده‌تر کرده و با کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت جوابهای حاصل از این کدها سرعت و اطمینان را برای این حوزه به ارمغان بیاورند.

در مطالعه انجام شده کد جدیدی برای شبیه سازی معادله ولاسوف که ایده اولیه آن توسط Kuhn مطرح شده معرفی می‌شود. این کد در سال ۲۰۰۳ توسط کاظمی‌نژاد نوشته شده[۱] و بعضی از آزمایشهای اولیه برای درستی آن انجام شده است. کد ارائه شده توسط کاظمی‌نژاد دچار نقائص و اشتباهاتی بوده که در حین انجام این مطالعه برطرف شده و در حال حاضر کد قابل اطمینانی بدست آمده که توانسته است آزمایشهای فراوانی را در تقریب خطی و غیر خطی به خوبی از سر بگذراند. در

فصل چهار و پنج به این آزمایشها که مهمترین آنها میرایی لانداو در تقریب خطی و غیر خطی می‌باشد خواهیم پرداخت. این بخش در کنفرانس فیزیک محاسباتی[1] سال ۲۰۰٦ در کره جنوبی ارائه شده است.

به عنوان اولین بسط برای کد بدست آمده ، تقریب مغناطواستاتیک مد نظر قرار گرفته است که در فصل ششم به آن پرداخته خواهد شد. مهمترین آزمایش انجام شده توسط کد مغناطواستاتیک بررسی پارادوکس لانداو- برنشتاین می‌باشد. این بخش در دومین کارگاه بین‌المللی دینامیک پلاسما[2] در سال ۲۰۰٦ در مرکز تحقیقات فیزیک نظری و ریاضیات ایران ارائه شده است.

.

[1] Conference on Computational Physics (CCP 2006)

[2] Second IPM International

۲) کلیات

۲–۱) کلیات پلاسما

۲–۱–۱) تعریف پلاسما

امروزه به دلیل فراوانی پلاسما در طبیعت و همچنین کاربردهای گسترده آن دربخشهای مختلف تکنولوژی مدرن، حالت پلاسما به عنوان حالت چهارم ماده در کنار حالتهای گاز، مایع و جامد به خوبی شناخته شده است. عبارت "پلاسما" اولین بار توسط لانگمیور در سال ۱۹۲۳، هنگامی‌که او بر روی پدیده تخلیه گازی مطالعه میکرده ارائه شده است. هر چند که پلاسما از طریق مطالعه بر روی گازهای یونیزه کشف شده اما هر گاز یونیزه را نمی‌توان پلاسما نامید، و از طرف دیگر هر گازی تا حدی یونیزه است. تعریف دقیق از پلاسما عبارت است از:" یک گاز شبه خنثی متشکل از ذرات خنثی و باردار که رفتار جمعی از خود نشان می‌دهند". در ادامه مفاهیم " رفتار جمعی" و " شبیه خنثی‌ای" برای فهم تعریف ارائه شده توضیح داده خواهد شد.

نیروهای وارد بر یک ذره از یک گاز خنثی (مثل یک ملکول از هوا) را در نظر بگیرید. از آنجایی که ملکول خنثی است، نیروی الکترومغناطیسی بر آن اثر نمی‌کند، و نیروی گرانشی هم قابل صرفنظرکردن است. ملکول تا هنگام برخورد با یک ملکول دیگر به مسیر مستقیم خود ادامه می‌دهد

چنین برخوردهای حرکت ملکول مورد نظر را هدایت می‌کند. نیروهای ماکروسکوپیک که به گاز خنثی اعمال می‌شود مانند نیروی حاصل از بلندگوی تولید کننده امواج صوتی ، به وسیله برخوردها به این ملکولها منتقل می‌شود. شرایط در پلاسما به دلیل حضور ذرات باردار کاملا متفاوت است. وقتی این ذرات حرکت می‌کنند، می‌توانند تمرکز منطقه‌ای از ذرات مثبت و منفی ایجاد کنند که منجر به میدانهای الکتریکی در محیط می‌شود. حرکت ذرات باردار باعث تولید جریان در محیط شده و میدانهای مغناطیسی به وجود خواهند آمد. این میدانها حرکت ذرات دیگر در بخشهای بسیار دورتر از محیط را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در حقیقت در پلاسما حرکت یک ذره به دو عامل وابسته است. برخورد که حاصل از ذرات نزدیک به آن ذره می‌باشد و در گازهای غیریونیزه هم مشاهده می‌شود و دیگری نیروهای بلند برد الکترومغناطیسی که حاصل از ذرات بسیار دور از آن ذره بوده و عامل "رفتارهای جمعی" پلاسما می‌باشد. این رفتارهای جمعی باعث حرکتهای مختلف و متنوع در پلاسما شده وموجب پیچیدگی و غنای فیزیک پلاسما می‌شود. در حقیقت، بیشتر نتایج جالب توجه در پلاسما مربوط به پلاسماهای " بی برخورد" می‌باشد که در آنها حرکتهای حاصل از نیروهای بلند برد الکترومغناطیسی در نظر گرفته می‌شود و از حرکتهای حاصل از برخوردها صرفنظر می‌شود. به طور خلاصه می‌توان گفت " رفتار جمعی" به معنای حرکتهای است که به شرایط پلاسما در مناطق دیگر سیستم هم وابسته است

یکی از خصوصیات پایه‌ای رفتار پلاسما توانایی آن برای پوشاندن پتانسیل‌های الکتریکی اعمال شده به آن است. فرض کنید که سعی کرده‌ایم با گذاشتن یک جفت گوی باردار در داخل پلاسما در آن میدان الکتریکی تولید کنیم. گوی‌ها ذرات با بار مخالف خود را جذب خواهند کرد و تقریبا بلافاصله بعد از قرار دادن گوی‌ها در داخل پلاسما، یک ابر یونی حول گوی با بار منفی و یک ابر الکترونی حول

گوی با بار مثبت را خواهد گرفت. اگر پلاسما سرد بوده و ذرات حرکات گرمایی نداشته باشند، اثر گوی ها توسط ذرات باردار پلاسما به صورت کامل خنثی می‌شود و هیچگونه میدان الکتریکی در داخل پلاسما ایجاد نخواهد شد، در این حالت گفته می‌شود که اثر "پوشش" کامل بوده است. از طرف دیگر، اگر دما صفر نبوده و ذرات حرکت گرمایی داشته باشند، ذراتی که در لبه این ابرها قرار گرفته‌اند، انرژی کافی برای غلبه بر چاه پتانیسل میدان الکتریکی را داشته و از آن فرار خواهند کرد، و. "لبه" ابر الکترونی و یا یونی حول هر گوی در فاصله از آن قرار خواهد گرفت که انرژی الکتریکی با انرژی گرمایی تقریبا برابر باشند. در این حالت اثر "پوشش" کامل نبوده و پتانسیل های از مرتبه KT/e به داخل پلاسما نفوذ کرده و باعث ایجاد میدان الکتریکی در داخل پلاسما می‌شود. شعاع این ابر به طول دبای معروف می‌باشد و از رابطه $\lambda_D = (\frac{\varepsilon_0 K T_e}{ne^2})$ به دست می‌آید. اگر ابعاد سیستم و طولهای مشخصه پدیده‌های مورد مطالعه بسیار بزرگتر از طول دبای سیستم باشد ،آنگاه وقتی تمرکز اتفاقی ذرات باردار در سیستم رخ دهد و یا پتانیسل بیرونی به سیستم اعمال شود، این پتانسیل ها پوشش داده شده و در ابعاد بسیار کوچکتر از این ابعاد باعث تغییر و اختلال خواهند شد، به طوری که پلاسما در این مقیاسها خنثی خواهد بود. البته این امر به شرطی امکان‌پذیر است که تعداد ذرات باردار داخل کره دبای (کره به شعاع طول دبای) به اندازه کافی بزرگ باشد. پلاسما "شبه خنثی" است یعنی به اندازه کافی خنثی است که بتوان فرض کرد در مقیاس اندازه سیستم چگالی یونی و الکترونی آن با هم برابر است، اما به دلیل نفوذ میدانهای الکترومغناطیسی از کره دبای به درون پلاسما می‌توان گفت آنقدر خنثی نیست که هیچ نیروهای الکترومغناطیسی در آن وجود نداشته باشد

۲-۱-۲) پارامترهای پلاسما:

در بخش قبلی دو شرط لازم برای پلاسما بودن یک گاز یونیزه بیان شدند، سومین و آخرین شرط که در ارتباط با مفهوم برخورد است در این بخش بیان خواهد شد. گاز یونیزه در پسماند موتورهای جت پلاسما محسوب نمی‌شود ، چون تعداد برخورد ذرات باردار با ذرات خنثی آنقدر زیاد است که حرکت این ذرات تحت اثر نیروهای هیدرودینامیکی معمول میباشد تا تحت اثر نیروهای الکترومغناطیسی. اگر ω فرکانس نوسانات پلاسما بوده و τ زمان میانگین بین برخوردهای ذرات باردار با ذرات خنثی باشد آنگاه بایستی $\omega\tau > 1$ تا گاز یونیزه مانند یک پلاسما رفتار کند و نه مانند یک گاز خنثی.

سه شرط مربوط به تعریف پلاسما را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

الف) $\lambda_D << L$ ، L طولهای مشخصه سیستم مورد مطالعه

ب) $N_D >> 1$ ، N_D تعداد ذرات موجود در کره دبای

ج) $\omega\tau > 1$ ، ωفرکانس نوسانات پلاسما و τ زمان مشخصه برخورد ذرات باردار با ذرات خنثی

۲-۱-۳) پلاسما در طبیعت

هرچند که در زندگی روزمره به جز موارد معدودی مانند شعله آتش با پلاسما روبرو نمی‌شویم. اما به دلیل پلاسما بودن مواد تشکیل دهنده ستاره‌ها و دیگر عناصر بسیار داغ جهان، تقریبا ۹۹٪ ماده جهان در حالت پلاسما قرار دارد، و ما خوشبختانه در بخشی از جهان که سه حالت دیگر ماده بر حالت

پلاسما غلبه دارد زیست می‌کنیم. گداخت بین عناصر سبک در واکنشهای هسته ای در داخل ستاره ها انرژی خروجی بسیار زیادی را ایجاد می‌کند و باعث ایجاد حالت پلاسمایی در ستاره ها می‌شود. امروزه دانشمندان کشورهای مختلف در حال مطالعه بر روی ایجاد گداخت زمینی هستند که می‌تواند منبع بی‌پایان انرژی را برای بشریت به ارمغان بیاورد. رسیدن به این هدف در گرو افزایش دانش ما از پلاسما می‌باشد و این امر نشانگر اهمیت فیزیک پلاسما در دنیای امروز است.

اما پلاسما در طبیعت کره زمین هم یافت می‌شود و از جمله مهمترین مواردآن پلاسمای موجود در لایه‌های بالایی جو (یونسفیر) می‌باشد. در لایه های پایینی جو، در حدود ۱۰۰ کیلومتری زمین تعداد ذرات باردار بسیار کم است، اما در لایه های بالایی این تعداد افزایش یافته وبه مقدارماکزیمم خود در ۳۰۰ تا ۵۰۰ کیلومتری زمین می‌رسد. این لایه از یونسفیر که به لایه F معروف است امکان برقراری ارتباطات رادیویی و انتشار امواج الکترومغناطیس در اطراف کره زمین را به وجود می‌آورد. در ارتفاعات بسیار بالاتر تعداد ذرات باردار کاهش یافته و به پلاسمای بین سیاره ای رقیق منتهی می‌شود.

پلاسما در تکنولوژی مدرن امروزی کاربردهای فراوانی یافته است که از جمله آنها می‌توان به پلاسمای موجود در تخلیه گازی اشاره کرد. مطالعه گسترده در این حوزه درکنار الکترونیک کلاسیک و کوانتومی به دلیل اهمیت وسایل تخلیه گازی در جریان است. توکامکها برای گداخت زمینی و موتورهای پلاسمایی برای موشکها و فضاپیماها از جمله وسایلی هستند که در آنها از پلاسما استفاده می‌شود.

۲-۱-۴) روشهای مطالعه پلاسما

پلاسما را می‌توان براساس سه مدل مختلف بررسی کرد. در اولین مدل رفتار تک ذره ای درات باردار مستقل از رفتار جمعی آنها مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در دومین مدل رفتار جمعی ذرات باردار با تقریب سیالی و در سومین مدل با تقریب جنبیشی در نظر گرفته می‌شود. این سه مدل از یکدیگر مستقل نبوده و دستاوردهای هر کدام در بدست آوردن نگاه عمیقتری نسبت به پلاسما و خواص آن کمک فراوان می‌کند.

در مدل تک ذره‌ای[1] مشهور به رفتار یک تک ذره باردار در انواع مختلف میدانهای الکترومغناطیسی پرداخته می‌شود و با استفاده از قوانین نیوتن و روشهای مرتبط با آن مانند یافتن ثابتهای حرکت و ... حرکتهای چنین ذره‌ای توصیف می‌شود. این مدل یک مدل پایه‌ای است و هر چند با آن نمی‌توان رفتارهای جمعی پلاسما که از اهمیت بالاتری برخوردار هستند را مطالعه کرد، اما می‌توان به بررسی منبع چنان حرکتهای که ریشه در حرکت تک تک ذرات دارد پرداخت. این روش در مورد پلاسماهای رقیق و همچنین حرکت تک ذرات باردار در شتابنده‌ها کاربردهای وسیعی یافته است.

در مدل سیالی[2] با در نظر گرفتن پلاسما به عنوان یک سیال پدیده‌های مختلفی مانند انواع مدهای امواج الکترومغناطیسی در شرایط مختلف مانند وجود میدانهای الکترومغناطیسی خارجی مورد بررسی کنیم. در مورد شاره‌ها فرض مدل سیالی به شرطی برقرار است که برخوردهای فراوان ذرات با

Single Partilce[1]
Fluid Theory[2]

یکدیگر باعث حرکت دسته جمعی ذرات در داخل هر عنصر سیال بشود، اما در پلاسما این شرط به دلایل دیگری برقرار است. پارادوکس لانگمیور[3] و وجود میدانهای مغناطیسی که سبب محدود شدن سرعت ذرات در جهت عمود بر میدان مغناطیسی می‌شود دو دلیل عمده کارایی مدل سیالی در مورد پلاسما می‌باشد. مجموعه معادلاتی که در این تقریب به کار می‌رود عبارت است معادلات ماکسول و معادله سیال و همچنین معادلات مربوط به شرایط پیوستگی جریان وپایستگی بار.

$$mn[\frac{\partial u}{\partial t} + (u.\nabla)u] = qn(E + u \times B) - \nabla p$$ **معادله سیال**

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \nabla.j = 0$$ **معادله پیوستگی جریان و پایستگی بار**

در نظریه جنبشی از مفهوم تابع توزیع و معادله ولاسوف برای تشریح سیستم پلاسمایی استفاده می‌شود. این نظریه که یک نظریه کلیتر نسبت به نظریه سیالی می‌باشد، توانسته است پدیده هایی مانند میرایی لانداو را که مدل سیالی قادر به پیش بینی آنها نبوده را به خوبی تشریح کند. در شبیه سازی انجام شده در این مطالعه از این روش استفاده شده است.

تابع توزیع ، $f = f(\vec{r},\vec{v},t)$ تابعی از هفت پارامتر مستقل است، و به معنای تعداد ذرات موجود در $1m^3$ در مکان $\vec{r}$ و در زمان t با مولفه سرعت بین v_x و $v_x + dv_x$، v_y و $v_y + dv_y$ و v_z و $v_z + dv_z$ می‌باشد.

$$f(x,y,z,v_x,v_y,v_z,t)dv_x dv_y dv_z$$

که اگر این تابع توزیع نرمالیزه شده باشد، دارای شرط زیر خواهد بود:

$$\int f(x,y,z,v_x,v_y,v_z,t)d\vec{v}d\vec{r} = 1$$

Langmuir's Paradox [3]

از معادله بالا می‌توان بعد $\hat{f}(\vec{r},\vec{v},t)$ را بدست آورد که برابر است با $(L/T)^{-3}$، در نتیجه بعد $f(\vec{r},\vec{v},t)$برابر است با $T^3/_{L^6}$. تابع توزیع بسیار مهمی‌که در سیستم های چند ذره ای شناخته شده است، تابع توزیع ماکسولی $\hat{f}(\vec{r},\vec{v},t)=(m/2\pi KT)^{3/2}\exp(-v^2/v_{th}^2)$ میباشد، که در آن $v_{th}\equiv(2KT/m)^2$ و $v\equiv(v_x^2+v_y^2+v_z^2)^{1/2}$ می‌باشد. این تابع توزیع وقتی که یک سیستم در حالت تعادل گرمایی قرار داشته باشد، بر سیستم حاکم است.

معادله اساسی که بر تابع توزیع حاکم است معادله بولتزمن می‌باشد:

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\vec{v}.\nabla f+\frac{\vec{F}}{m}.\frac{\partial f}{\partial \vec{v}}=(\frac{\partial f}{\partial t})_c \quad (۱.۲)$$

که در آن $\vec{F}$ نیروی است که بر ذرات اعمال می‌شود، و $(\partial f/\partial t)_c$ نرخ تغییرات تابع توزیع به دلیل برخوردها میباشد. علامت $\vec{\nabla}$برای گرادیان در فضای مکان به کار رفته است. علامت $(\partial/\partial\vec{v})$نشانگر گرادیان در فضای سرعت می‌باشد.

معادله بولتزمن را می‌توان به سادگی از اصل لیوویل که بر پایستگی ذرات در فضای فاز دلالت می‌کند به دست آورد. یک گروه از ذرات بی‌برخورد در یک عنصر بسیار کوچک از فضای فاز در نقطه A که همگی دارای سرعت v_A و مکان r_A می‌باشند را در نظر می‌گیریم. چگالی ذرات در این نقطه برابر است با $f(\vec{r}_A,\vec{v}_A,t)$. با گذشت زمان، این ذرات تحت اثر نیروهای محیط و سرعت اولیه خود حرکت خواهند کرد. چون نیروها به موقعیت ذرات در فضای فاز (r, V) وابسته اند، بنابراین همه ذرات نیروی یکسانی را در طول حرکت تجربه می‌کنند، و از طرف دیگر چون همگی شرایط اولیه یکسانی (v_A,r_A) داشته‌اند پس از مدت زمان t به یک نقطه یکسان مانند (v_B,r_B) خواهند رسید. از آنجا که همه ذرات با

هم حرکت میکنند چگالی در نقطه B با چگالی در نقطه A یکسان خواهد بود. بنابراین چگالی ذرات با زمان تغییر نخواهد کرد و $\frac{df}{dt}=0$. با باز کردن مشتق داریم:

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\frac{\partial v}{\partial t}.\frac{\partial f}{\partial v}+\frac{\partial x}{\partial t}.\frac{\partial f}{\partial x}=0$$

که با جایگذاری $\frac{\partial v}{\partial t}=\frac{F}{m}$ و $\frac{\partial x}{\partial t}=v$ به معادله زیر خواهیم رسید:

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\vec{v}.\nabla f+\frac{\vec{F}}{m}.\frac{\partial f}{\partial \vec{v}}=0$$

اگر برخورد بین این ذرات در نظر گرفته شود، تعداد ذرات در نظر گرفته شده در یک عنصر از فضای فاز در طول حرکت ثابت باقی نخواهند ماند و داریم $\frac{df}{dt}=(\partial f/\partial t)_c$. به این ترتیب معادله بولتزمن به دست خواهد آمد.

در پلاسماهای گرم ، می‌توان از برخوردها صرفنظر کرد، و اگر نیروی اعمال شده بر ذرات کاملا الکترومغناطیسی باشد معادله بولتزمن به شکل معادله زیر درمی‌آید که به معادله ولاسوف معروف است:

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\vec{v}.\nabla f+\frac{q}{m}(\vec{E}+\vec{v}\times\vec{B}).\frac{\partial f}{\partial \vec{v}}=0 \quad \textbf{(۲.۲)}$$

این معادله است که بیشتر در نظریه جنبشی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲-۲) کلیات شبیه سازی

۲-۲-۱) مقدمه

فیزیکدانها، پس از نیوتن و با استفاده از رهیافتهای او و دیگر بنیانگذاران علم تجربی همچون گالیله قوانین فیزیک را در شاخه‌های مختلف به دست آورده‌اند. اما کاربرد این قوانین در دنیای واقعی که معمولا با مجموعه‌های پر شماری از ذرات در یک سیستم مواجه هستیم، به دلیل تعداد محاسبات بسیار زیاد عملا غیر ممکن می‌باشد. سیستم‌های مانند یک کهکشان پر ستاره، سیال کلاسیک و یا پلاسما از جمله مواردی هستند که حل معادلات آنها مانند معادله ولاسوف و نویر استوکس[۴]، بدون استفاده از کامپیوتر غیر ممکن است

امروزه استفاده از کامپیوتر در مطالعات فیزیک آنچنان اهمیت یافته است که در کنار تحقیقات نظری و مطالعات آزمایشگاهی، به عنوان سومین روش مطالعه جهان مادی مطرح است. فیزیک محاسباتی به دلیل ارزانتر بودن نسبت به کارهای آزمایشگاهی، قبل از انجام آزمایشهای گرانقیمت برای پیش بینی نتایج به کار گرفته می‌شود. از طرف دیگر در حل معادلات بین حل خطی و غیر خطی یک سیستم معادلات تفاوتی وجود ندارد و باعث می‌شود تا فیزیکدانان نظری با کنار قلم و کاغذ به پشت کامپیوترهای پر سرعت منتقل می‌شوند تا بتوانند حل‌های غیر خطی معادلات خود را بیابند.

Navier-Stokes equation[4]