

1. Instituto de Investigación de Ciencias Físicas y Matemáticas (IFCM)

El Instituto de Investigación de Ciencias Físicas y Matemáticas (ECFM) es la unidad de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas (ECFM) que promueve y realiza estudios avanzados en áreas científicas, fundamentales y aplicadas, de las ciencias físicas y matemáticas. El ICFM se proyecta como una plataforma regional de excelencia dedicada a la investigación y difusión del conocimiento en física y matemática. Las principales líneas de trabajo del ICFM son:

- La investigación académica en ciencia básica y aplicada.
- La promoción de la investigación en ciencia básica y aplicada en el ámbito universitario.
- La difusión y divulgación del conocimiento generado por la investigación en ciencias físicas y matemáticas.
- La actualización continua de programas académicos en ciencias físicas y matemáticas.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Aprender y estudiar los fundamentos teóricos y computacionales sobre la física de plasmas.

2.2. Objetivos generales

- Entender la dinámica de partículas cargadas en diferentes composiciones de campos electromagnéticos.
- Describir a un plasma desde la teoría cinética y como un fluido.
- Identificar y clasificar los diferentes tipos de onda que pueden interaccionar con un plasma.
- Comprender el rol de la física de plasmas en el desarrollo de fusión nuclear.
- Aprender los fundamentos básicos en las interacciones laser-plasma.
- Implementar algoritmos de computación para la solución de ecuaciones diferenciales parciales.
- Desarrollar códigos PIC electrostáticos y electromagnéticos en 1D.

3. Descripción del Trabajo de Prácticas

El proyecto consiste en el estudio de plasmas desde los puntos de vista teóricos y computacionales. Describimos los teóricos primero:

3.1. Conceptos y Definiciones Básicas

La definición clásica de un plasmas es que es un gas cuasi neutral de partículas cargadas y neutrones que presenta efectos colectivos. En esta sección se estudiará qué quiere decir la cuasi neutralidad y los efectos colectivos. Para ello, se usará uno de los conceptos mas fundamentales en la física de plasmas, la longitud de Debye. Esta última es la propiedad de un plasma de repeler campos eléctricos externos. Para esta sección se usará el capítulo 1 del libro de Chen [1].

3.2. Movimiento de una Partícula Simple

El rango de densidades en el que puede existir un plasma es bastante amplio. Por esto, la dinámica del movimiento puede variar grandemente. Para plasmas de densidades bajas, los efectos colectivos son usualmente despreciables, por lo que las partículas pueden ser estudiadas de forma individual. Ya que el movimientos de partículas cargadas depende de los campos externos, y las configuraciones de campo \vec{E} y \vec{B} pueden llegar a ser muy variadas (campos constantes, campos variantes en el tiempo, gradientes en el espacio de los campos etc.), se estudiarán diferentes casos. De nuevo, se usará [1] (capítulo 2) y se complementará con [3] (capítulo 8 y 9) para esta parte.

En campos magnéticos dipolares, partículas en movimiento pueden quedar atrapadas, rebotar en los extremos del campo y generar corriente. Uno de los casos mas importantes sobre esto son los anillos de radiación de Van Allen de la magnetosfera. En esta parte se estudiaran la forma del campo y las características de los rebotes en base al capítulo 3 de [6].

3.3. Plasmas como Fluidos

Por otro lado, en algunas aplicaciones la densidad del plasma puede ser suficientemente grande para que las colisiones dominen. En este regimen se puede aproximar el plasma como un fluido. La meta es pues, encontrar las ecuaciones de movimiento que rigen el comportamiento del fluido. Para llegar a estas, se usarán conceptos como la derivada convectiva, la ecuación de continuidad y las ecuaciones de estado. Se usarán de nuevo [1], capítulo 3 y [3] capítulos 10 y 11.

3.4. Ondas en Plasmas

Las partículas de un plasmas pueden oscilar. Estas oscilaciones pueden ser variadas debido a efectos térmicos o por presencia de campos externos. Para estudiar estas oscilaciones, se usa el concepto de frecuencia del plasma ω_p . Esta es la frecuencia de los electrones dentro de un

plasma cuya temperatura es cero ($T = 0$), sin presencia de campos externos y considerando que los iones no se mueven respecto a los electrones. Ondas electromagnéticas pueden viajar o no a través de este medio según sea la frecuencia de plasma. Para estudiarlas, se toma ω_p y se hacen perturbaciones respecto este parámetro según sea el caso que se quiera estudiar (cambio de temperatura, campos electromagnético externo etc.). Las cantidades de configuraciones posibles hacen que el estudio de ondas en plasmas sea muy amplio. Para el estudio de ondas en plasmas se usará [1] (capítulo 4) y se ampliará con [5] (capítulos 2,3 y 4).

3.5. Equilibrio e Inestabilidades

Desde un punto de vista macroscópico, es difícil contener un plasma usando campos magnéticos. Esto pasa porque el plasma es capaz de generar campos internos que afectan el movimiento. Es decir, las condiciones de equilibrio y estabilidad pueden ser bastante complejas. Aun así la comprensión de estas son importantes para diferentes aplicaciones (fusión nuclear, plasmas espaciales etc.). Se hará una revisión de diferentes inestabilidades, como la de "dos corrientes" y la gravitacional. Para estas revisiones, se usará el concepto de β que es la razón entre la presión ejercida por las partículas y la presión generada por campo magnético. Para esta parte se consultará el libro de Chen, capítulo 6 [1].

3.6. Teoría Cinética

Hay problemas en el que considerar un plasma como un fluido no es adecuado. En esos casos, se necesita considerar la distribución de velocidades para cada especie en el plasma. A este tratamiento se le conoce como teoría cinética. Empezando desde la ecuación de Boltzmann (ecuación fundamental para gases), se puede llegar a la ecuación de Vlasov, que es una de las ecuaciones más robustas para describir plasmas. A partir de esta ecuación, se derivará de nuevo la ecuación para fluidos para probar la consistencia de las teorías. Además, se estudiarán otros fenómenos relevantes como el amortiguamiento de Landau. Para todo esto, se usará el capítulo 7 de Chen [1].

3.7. Interacción Lasers-Plasma

Los laser (Luz Amplificada por Emisión estimulada de radiación por sus siglas en inglés), son aparatos que generan y/o amplifican radiación electromagnética. El desarrollo de estos ha sido importante para el avance de diferentes áreas de la ciencia. Respecto a los plasmas, son relevantes ya que el uso de lasers puede generar un plasma. También son ampliamente usados para excitar los plasmas (osea darles energía) dentro de reactores. Finalmente, nueva generación de aceleradores en base a laser generando ondas en el plasma donde las partículas pueden viajar. En base a [7], se estudiarán las principales interacciones entre lasers y plasmas. Esto es, la fuerza ponderomotriz (capítulo 4), la absorción y propagación de lasers en plasmas (capítulo 5), campos eléctricos inducidos por el laser en el plasma (capítulo 7) y campos magnéticos producidos por el laser en el plasma (capítulo 8).

3.8. Física de Fusión

Una de las ramas de aplicación mas grande en la física de plasmas, es el área de fusión. Se estudiarán desde las reacciones nucleares para fusión, hasta el balance de energía y diseño básico de un reactor nuclear. Luego, se verán conceptos de fusión en base a confinamiento magnético, fenomenos de transporte en el reactor y calentamiento y corrientes en el plasma del reactor. Todos estos temas se abordarán en Freidberg [3] en los capítulos 1,2,3,4,5,13,14 y 15.

3.9. MHD

MHD ó Magnetohidrodinámica es una aproximación de un plasma como un fluido simple, es decir, un fluido con una corriente neta. A pesar de su "simpleza" esta teoría es coherente con alrededor del 80 % de los fenomenos observados en plasmas. Sus aplicaciones van desde expulsiones de masa en estrellas o comportamiento de partículas en la magnetosfera terrestre, hasta ser la forma mas usada en la regulación de presión en reactores nucleares de fusión. Para esta parte, se estudiarán las propiedades básicas de del MHD, y las condiciones de equilibrio en esta teoría para una y dos dimensiones. Se usarán los capítulos del 3 al 6 de [2].

Ahora, se describen los temas relacionados a computación:

3.10. Métodos Numéricos para resolución de Ecuaciones Diferenciales Parciales

En física de plasmas, como en cualquier otra área de la ciencia, aparecen ecuaciones que están compuestas por derivadas de diferentes variables, ecuaciones diferenciales parciales. La resolución de éstas es importante para el desarrollo de la teoría, pero por lo general estas ecuaciones son muy difíciles de resolver analíticamente (i.e usando algún procedimiento algebraico). La alternativa es entonces usar métodos para modelar las ecuaciones. Para aprender como resolver estas ecuaciones se usará [9] que es un curso del OpenCourseWare de MIT dedicado a la solución numérica de ecuaciones diferenciales parciales. En especial, se presentan los métodos de *diferencias finitas* para 1D y multidimensional y el de *elementos finitos*. Para ambos casos, el curso proporciona información sobre la implementación de estos métodos para ecuaciones parabólicas, elípticas e hiperbólicas, que son las formas como se clasifican las ecuaciones diferenciales parciales.

3.11. PIC

La simulación de plasmas ha sido un área en expansión desde que se empezó a simular este medio en la decada de los 60's. Los tipos de simulaciones que normalmente se estudian están enfocados para MHD y teoría cinética. Dentro de las simulaciones de teoría cinética se encuentran dos formas de simulación, resolviendo la ecuación de Vlasov usando ecuaciones de Fokker-Plank o usando códigos PIC (partículas en celdas por sus siglas en ingles). Estos últimos códigos son usados debido a que son mas fáciles de resolver que los algoritmos basados en Fokker-Plank.

EL método PIC es uno iterativo donde se calculan los campos, con ellos se mueven las partículas en un tiempo corto(usando leyes de Newton) en base a las nuevas posiciones de las partículas, se vuelven a calcular los campos. Este ciclo se repite el número de veces deseado. Para el cálculo campos se divide la región donde se encuentre un plasma en celdas. De esta forma, en vez de trabajar con las cargas individuales, se trabaja en base a las densidades de carga de cada celda. Una vez calculada la densidad, se calculan los campos (usando ecuaciones de Maxwell) y en base a estos es posible calcular las fuerzas sobre las partículas. Para el estudio de estos algoritmos se usará la primera parte del libro de Birdsall y Langdon, que comprende desde el capítulo 1 hasta el 7. [4]

4. Justificación del Proyecto

El plasma es un estado de la materia estudiado desde la década de los 20's en el siglo XX. Para que este estado exista, es necesaria la combinación adecuada de densidad de iones y electrones, temperatura de ambos y la presión del medio. Y aunque sea un medio exótico en el planeta, tiene una gran cantidad de aplicaciones dentro de la astrofísica, la física de fusión, la física de lasers y la industria en general.

El plasma representa al menos el 90 % (si no más) del universo visible (es decir, sin considerar energía y masa oscura). El universo está repleto de plasma, ya sea el medio interestelar o estrellas, por lo que el estudio de este estado es importante para mejorar nuestro entendimiento del cosmos.

Además, el estudio de los plasmas es necesario para una de las corrientes de investigación mas importante de la actualidad, la física de fusión nuclear. Esta apunta a reproducir las interacciones nucleares básicas que evitan el colapso de estrellas debido a su atracción gravitacional; las reacciones termonucleares. Estas ocurren cuando dos o mas partículas ligeras se combinan para formar una partícula mas grande, liberando una gran cantidad de energía en el proceso. Para que estas reacciones se puedan dar, es necesario que la materia tenga una temperatura del orden de millones de grados o mas, temperatura en la que la mayor cantidad de gases se disocian en sus componentes básicas (iones y electrones). Es decir, las reacciones suceden en un plasma. El éxito de esta forma de obtener energía radica en poder calentar y mantener el plasma el tiempo suficiente como para poder extraer una cantidad de energía significativamente mayor a la necesaria para que las reacciones se sigan dando.

Por último, una de las aplicaciones mas llamativas del uso de lasers basados en plasmas para la aceleración de partículas que en principio, pueden llegar a mejorar el rendimiento de los aceleradores de partículas en tres ordenes de magnitud de distancia.

Esta propuesta de práctica me permitirá aplicar lo que he aprendido en la licenciatura en los temas de teoría electromagnética y mecánica estadística, además de técnicas de linealización y análisis de Fourier. Por otro lado, me permitiría profundizar en otras áreas de la física como lo son la dinámica de fluidos y la física computacional. Finalmente, sería una beneficiosa plataforma para mi futuro trabajo de tesis y en general para estudiar física de plasmas en

un postgrado.

5. Cronograma y Metodología

La siguiente tabla presenta el cronograma de tareas descritas anteriormente. El color gris representa a las tareas teóricas, mientras que el negro aquellas relacionadas a métodos numéricos y simulaciones.

Tarea	Septiembre	Octubre	Noviembre	Enero	Febrero
Tarea 1					
Tarea 2					
Tarea 3					
Tarea 4					
Tarea 5					
Tarea 6					
Tarea 7					
Tarea 8					
Tarea 9					
Tarea 10					
Tarea 11					
Tarea 12					
Tarea 13					

El trabajo de prácticas está fuertemente orientado hacia el desarrollo computacional, dedicando la mitad del tiempo a estas tareas. Para los meses de septiembre, octubre y noviembre, se propone trabajar dos horas al día. Una hora para los temas teóricos, y otra hora en las tareas de computación. Para los meses de enero y febrero, se trabajarán 6 horas al día, diviendo el tiempo de la misma forma para las tareas de los meses anteriores.

Tarea 1 Definiciones y Conceptos básicos

Tarea 2 Dinámica de una partícula simple

Tarea 3 Partículas atrapadas

Tarea 4 Métodos Numéricos para resolución de Ecuaciones Diferenciales Parciales

Tarea 5 Plasmas como fluidos

Tarea 6 Ondas en plasmas

Tarea 7 Equilibrio e Inestabilidades

Tarea 8 Teoría Cinética

Tarea 9 Códigos PIC

Tarea 10 Interacción Lasers-Plasma

Tarea 11 Física de Fusión

Tarea 12 MHD

Tarea 13 Elaboración de Informe Final de Prácticas

Referencias

- [1] F.F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, Springer International Publishing Switzerland, 3th edition, 2016
Este es un libro estandar introductorio a física de plasmas. Desarrolla de forma sencilla y concisa los temas que se deben saber para avanzar hacia temas más específicos.
- [2] J. Freidberg, *Ideal MHD* Cambridge University Press, United Kingdom, 1st Edition, 2014
Tratamiento de la teoría de magnetohidrodinámica de forma extensiva, mayormente enfocada a su uso en fusión nuclear.
- [3] J. Freidberg, *Plasma Physics and Fusion Energy* Cambridge University Press, United Kingdom, 1st Edition, 2007
Este libro senta la bases sobre la física de fusión y desarrolla teoría sobre plasmas enfocada a la generación de energía en reactores nucleares.
- [4] C.K. Birdsall, A.B. Langdon, *Plasma Physics Via Computer Simulation* Taylor & Francis, EEUU, 2005
Pionero de la simulación de plasmas, esta referencia describe los algoritmos básicos usados en esta área. En particular, el libro se desarrolla en base a los programas PIC.
- [5] D.G. Swanson, *Plasma Waves* Institute of Physics Publishing, Philadelphia, 2nd edition, 2003. Tratamiento extensivo sobre ondas en plasmas bajo diversas condiciones.
- [6] W. Baumjohann, R.A. Treumann, *Basic Space Plasma Physics* Imperial College Press, London, UK, 2004
- [7] S. Eliezer *The Interaction of High-Power Lasers with Plasmas* Institute of Physics Publishing, Bristol, 2002 Este libro cubre la física de la interacción entre laser de alta potencia con plasmas. Para ello, presenta la irradiación laser de alta potencia, desde bajas hasta altas intensidades para pulsos entre los ordenes de nanosegundos a femtosegundos. Describe la absorción y propagación laser en un plasma. También el transporte de electrones y un análisis relevante de las ondas en el plasma.
- [8] A.D.M. Walker, *Magnetohydrodynamic Waves in Geospace, The Theory of ULF Waves in their Interaction with Energetic Particles in the Solar-Terrestrial Enviroment*, Institute of Physics Publishing, Bristol, 2005
- [9] <https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-920j-numerical-methods-for-partial-differential-equations-sma-5212-spring-2003/index.htm>
Este curso es una presentación de las técnicas numéricas fundamentales modernas para un amplio rango de ecuaciones diferenciales parciales lineales y no lineales para varias aplicaciones en ciencia e ingeniería. En este, se incluyen formulaciones matemáticas, la discretización de diferencias finitas y volúmenes finitos, discretización de elementos finitos, discretización elementos de frontera y métodos de soluciones directa e iterativa.