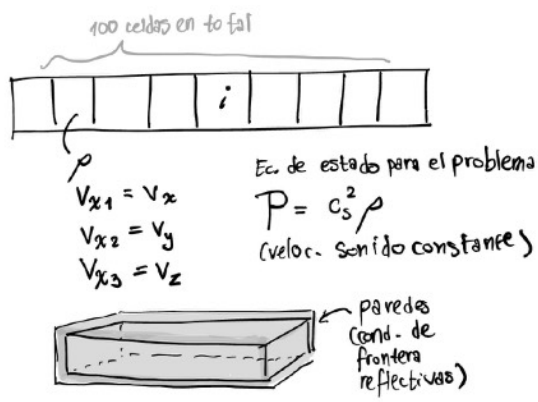
Introducción a la Física Espacial
Tarea programada 1
II-2025

Simulación 1: onda sonora

En el directorio soundwave-data/, usted encontrará los archivos que son el resultado de correr una simulación con PLUTO para simular una onda sonora.

Con PLUTO, se resolvieron numéricamente las ecuaciones de hidrodinámica:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \overrightarrow{\nabla} \cdot (\rho \vec{\mathbf{v}}) = 0 & \text{(a)} \\ \dfrac{\partial \vec{\mathbf{v}}}{\partial t} + (\vec{\mathbf{v}} \cdot \overrightarrow{\nabla})\vec{\mathbf{v}} = -\dfrac{1}{\rho}\overrightarrow{\nabla} P & \text{(b)} \end{cases}$$



en una caja numérica unidimensional como se muestra en la figura de la derecha.

Para resolver la ecuación diferencial, se necesitan condiciones de frontera. Para este problema, elegimos condiciones reflectivas. Conceptualmente, es como si modeláramos el aire de una habitación unidimensional y las fronteras equivalen a las paredes.

Las condiciones iniciales para resolver el problema fueron:

- La densidad inicial era $\rho(x) = \rho_0 + \rho_1(x)$, con ρ_0 una constante y $\rho_1(x)$ es una perturbación que incrementa la densidad en el centro de la caja (sigue una aproximación de la función delta de Dirac). Conceptualmente, es como aplaudir en el centro de la caja.
- La velocidad inicial es cero en todas las componentes.

Se asumió la siguiente relación entre la presión y la densidad: $P = c_s^2 \rho$, con $c_s = 1$. En este problema nos interesa solo el comportamiento cualitativo del fluido, por eso trabajamos sin unidades.

Los datos del directorio contienen diferentes archivos:

```
soundwave-data/
        x1.npy
        rho_00.npy
        rho_01.npy
        ...
        rho_20.npy
        vx1_00.npy .... vx1_20.npy
        vx2_00.npy .... vx2_20.npy
        vx3_00.npy .... vx3_20.npy
```

El primer archivo (x1.npy) contiene un array con las posiciones en x de cada celda (ver dibujo arriba). Los números 00-20 de cada uno de los otros grupos de archivos significan progreso en el tiempo. Por ejemplo, rho_00.npy es la densidad al principio de la simulación (t=0), y rho_20.npy significa la densidad en el tiempo t = 20 (las unidades del tiempo también las vamos a ignorar).

Usted puede leer cada array con la función de python np.load(). Por ejemplo, para obtener el array de posiciones en cada punto de la caja, pruebe el siguiente código (np = numpy)

```
x1 = np.load("soundwave-data/x1.npy")
```

Con esta información, ejecute las siguientes tareas:

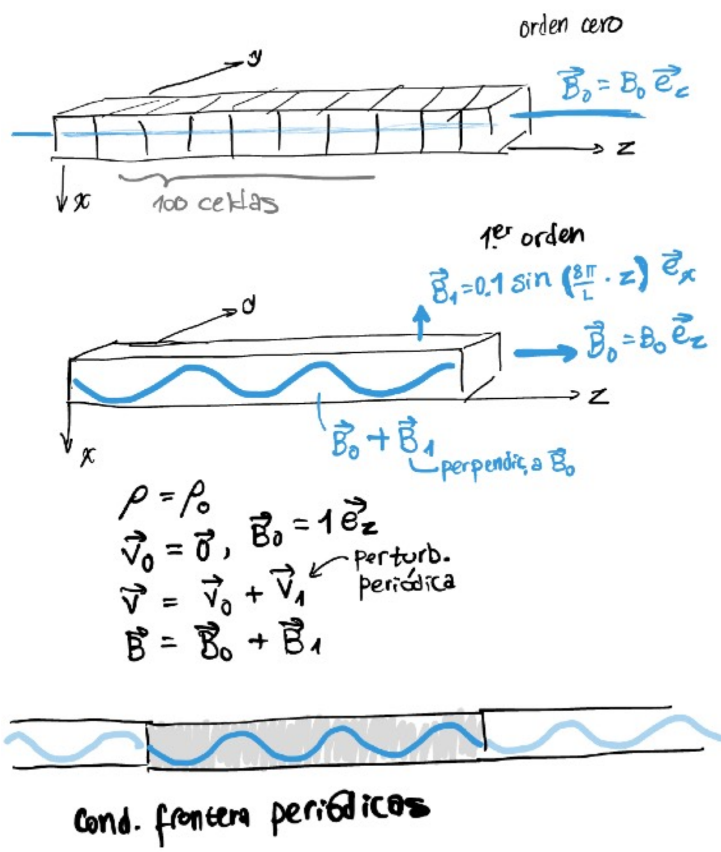
- Grafique $\rho(x)$ para cada uno de los archivos (00-20) y guarde el output como imágenes png. Convierta esas imágenes png en un video (busque en internet cómo hacerlo, p.ej., con el paquete de software ffmpeg) y solo envíeme el video. Sugerencia: elija un rango fijo de y para todas las gráficas (para que podamos comparar la información del eje y en cada fotograma del video).
- Conteste: ¿qué pasa cuando la onda sonora llega a las paredes?
- Imagine que usted está en el centro de la caja unidimensional. ¿Qué escucharía?
- Escoja dos tiempos cualquiera y grafique los tres componentes de las velocidades solo para esos dos tiempos. ¿Hay alguna componente que sea siempre cero? ¿Por qué?
- Calcule y grafique la presión para un tiempo que usted elija.

Escriba sus respuestas en un pdf aparte o en un jupyter notebook exportado a pdf o a html (no me envíe el archivo .ipynb).

Simulación 2: onda de Alfvén

Para esta simulación hemos calculado la propagación de una onda de Alfvén a lo largo del eje z (ver figura a la derecha). Para ello, resolvemos las ecuaciones de **magneto**hidrodinámica. Empezamos con una solución en equilibrio, en el que el campo magnético está alineado con el eje z, y añadimos una perturbación perpendicular a la línea de campo magnético, en este caso en la dirección x. La velocidad no perturbada es cero, y la densidad inicial es constante. Durante la propagación de ondas de Alfvén, la densidad debe permanecer (al menos aproximadamente) constante. Las ondas de Alfvén son ondas en el campo de velocidades y el campo magnético solamente.

A diferencia de la simulación 1, esta perturbación es periódica. Es decir, elegimos una perturbación que siga la función seno a lo largo de nuestro dominio computacional.



Además, en este caso, las condiciones de frontera son diferentes de la simulación 1. Ahora usamos condiciones de frontera periódicas. Conceptualmente, significa que que en cada dirección cuando "se nos acaba" la caja que estamos simulando nos tenemos que imaginar que otra caja vecina idéntica empieza, y así hasta el infinito.

En el directorio alfvenwave-data/, tiene los datos de la simulación y se cargan de la misma manera que en la simulación 1. Note que ahora viene x3.npy y no x1.npy, porque la caja está orientada a lo largo del eje z, así que las coordenadas son ahora z y no x. Además, note que tenemos los datos del campo magnético en las tres direcciones para cada tiempo.

Con esta información, haga las tareas siguientes:

- Grafique B_x, B_z y v_x para cada tiempo. Haga tres videos con las gráficas y solo envíeme el video para cada cantidad. Recuerde poner el rango y fijo (plt.ylim(-1,1) para v_x, B_x, elija uno adecuado para B_z) para que podamos comparar correctamente los ejes verticales en cada fotograma del video.
- Conteste: dijimos en clase que las ondas de Alfvén se propagan a lo largo de la línea de campo magnético pero lo que varía (la perturbación) es exclusivamente en la dirección perpendicular al campo original. ¿Se cumple eso en esta simulación?
- Grafique B_y y v_y para algún tiempo que usted elija. ¿Deberían ser cero estas cantidades? ¿Son cero? ¿Por qué?
- Grafique $\rho(t = 0)$. ¿Cuánto vale ρ_0? Grafique $B_z(t = 0)$ y verifique que sea = 1. Calcule con eso la velocidad de Alfvén como $v_A = B_0/\sqrt{\rho_0}$ (Pluto usa unidades gaussianas pero también absorbe un factor de $1/\sqrt{4\pi}$ dentro de la definición del campo magnético. Por eso hay que modificar la definición de la velocidad de Alfvén).
- Grafique $v_x(t = 0)$. ¿Cuánto mide la amplitud de las perturbaciones periódicas de la velocidad? Con esto, conteste: ¿en cuál régimen nos encontramos: sub-Alfvénico o súper-Alfvénico?

Escriba sus respuestas en un pdf aparte o en un jupyter notebook exportado a pdf o a html (no me envíe el archivo .ipynb).