CLASE 21

Mecánica Relativista

La mecánica clásica comenzó a mostrarse inconsistente como teoría (o a mostrar sus límites) luego del desarrollo del electromagnetismo en el S XIX.

Luego de desarrolladas estas dos teorías (Mec. Newt. y el Electromagnetismo de Maxwell) comenzaron a observarse fenomenos que pusieron en jaque a la mecánica. En torno a esta epoca fines del S XIX y principios del tiene lugar una rev. en la física con el "surgimiento" de la física moderna.

Entonces, ¿Qué fue lo que sucedió con la física clásica?

En la mecánica clásica, si bien las posiciones y velocidades son relativas al observador pero no tan así las aceleraciones, directamente vinculadas a las fuerzas debido a la 2da ley de Newton en donde las leyes de la mecánica son las mismas para todos los sist. inerciales.

Aunque desconozcamos el origen de las fuerzas, la 2da de Newton nos dice que (como una consecuencia de ésta) el trabajo neto es igual a la variación de la energía cinética

$$\Delta K = \int \underbrace{\vec{F}_{neta}}_{m\frac{d\vec{v}}{dt}} \cdot d\vec{r} = \frac{m v_f^2}{2} - \frac{m v_0^2}{2}$$

2da ley de Newton

Si bien este resultado parece andar bien a velocidades bajas en relación a la velocidad de la luz, experimentalmente parece haber problemas para velocidades cercanas a la de la luz.

En un experimento realizado acelerando electrones con una diferencia de potencial del orden de decenas de MV (hasta 15 MV), los electrones adquieren una energía cinética de 15 MeV. $\left(\vec{F} = q\vec{E} \Rightarrow W = \int \vec{F}\cdot d\vec{l} = q\underbrace{\int \vec{E}\cdot d\vec{l}}_{-\Delta V} \right)$

$1\,eV \sim 1{,}6 \times 10^{-19}\,J$ $(C \cdot V = J)$.

Si la expresión para la energía cinética fuera $K = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow$ luego de acelerarse por 15 MV esperaríamos una velocidad del electrón de $2{,}3 \times 10^{9}\,m/s \approx 7{,}65\,c$

velocidad de la luz.

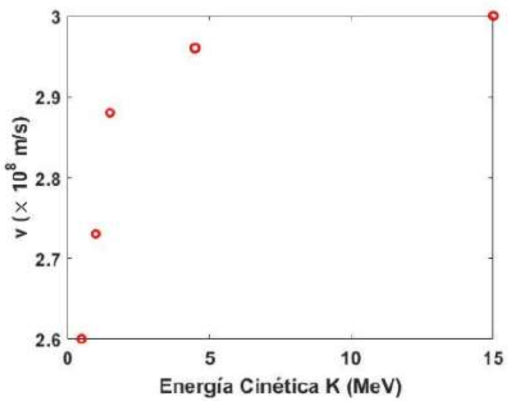
Sin embargo, el experimento arroja los siguientes resultados

K (MeV)	$v \times 10^{-8}$ (m/s)
0,5	2,6
1,0	2,73
1,5	2,88
4,5	2,96
15	3,0

Este experimento se muestra en la película "the ultimate speed" por William Bertozzi

https://www.youtube.com/watch?v=B0BOpiMQXQA&t=133s

K (MeV)	$v \times 10^{8}$ (m/s)
0,5	2,6
1,0	2,73
1,5	2,88
4,5	2,96
15	3,0



Este experimento se muestra en la película "the ultimate speed" por William Bertozzi

https://www.youtube.com/watch?v=BoBOpiMQXQA&t=133s

Claramente esto significa que algo extraño estaba sucediendo y parece indicar que los electrones se acercan a una asíntota en su velocidad $\sim 3 \times 10^{8}$ m/s

Tengan presente que $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} \approx 2{,}997925 \times 10^{8}$ m/s

¿Coincidencia?

Este y otros experimentos ponían en Jaque a la mecánica de Newton, pero además había un problema de conciliar la mecánica y el EM.

Sabemos de mecánica, que las ondas se propagan en medios. El medio en el que "se propagaban" las ondas EM se denominó eter.

Consideremos una onda o pulso EM propagándose en el eter con velocidad $c = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon_0}}$ $\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$. Si esta velocidad, clásicamente, se mirase desde un sist. de referencia moviendose a velocidad v respecto del eter $\Rightarrow$ cabría esperar que la luz desde dicho referencial se propagase con velocidad $c \pm v$ (dependiendo del sentido. y por tanto la velocidad de la luz no sería invariante ante transformaciones de Galileo (cambios entre sist. de referencia inerciales). De hecho, las ecuaciones de Maxwell se ven alteradas al ir de un sist. de ref. a otro. $\Rightarrow$ Si damos por buena la mecánica y el EM $\Rightarrow$ hay un único sist de ref. en que la velocidad de la luz es c, el sist. de ref. del eter.

¿Que opciones hay?

1) si las transf. de Galileo (El principio de relatividad) son válidas para la mecánica, pero no para el electromagnetismo (y las teorías estan bien)
$\Rightarrow$ Existe un S. de ref. preferencial (eter) posible de ser determinado.

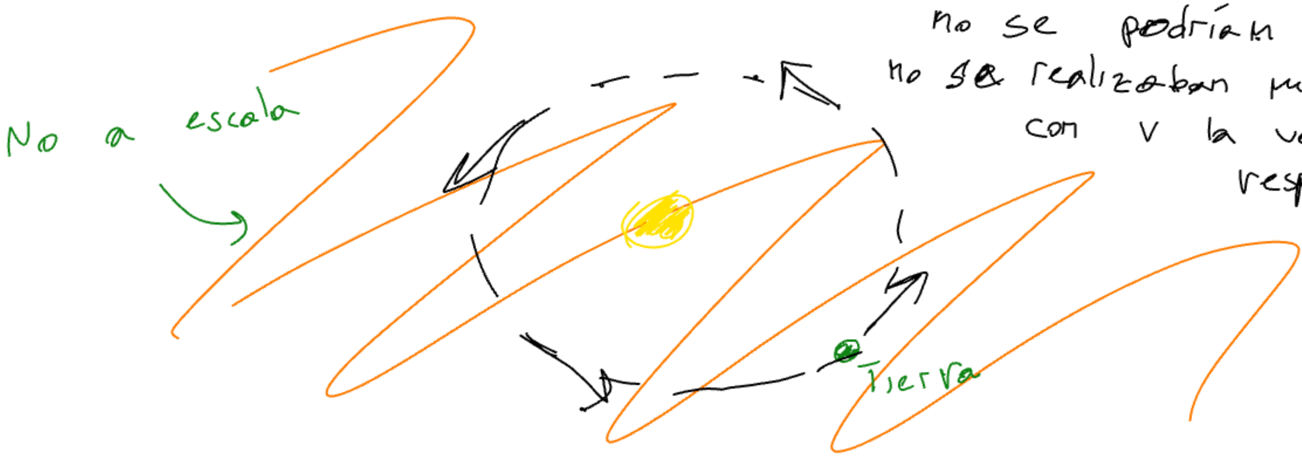
2) Las leyes de Maxwell del EM no son correctas pero el principio de relatividad clásico, sí. Por lo que habría que buscar modificaciones al EM.

3) Las leyes de Newton no son correctas y en este caso las leyes de transf. entre sist. de ref inerciales no serían las de Galileo.

El experimento discutido ya nos da la pauta de que 3) parece ser lo más probable. Veamos algún otro experimento icónico que fue llevado a cabo en la 2da mitad del S XIX con intenciones de medir la presencia del eter o la velocidad relativa de la tierra al eter. Este es el experimento de Albert Abraham Michelson - Edward Williams Morley que fue llevado a cabo en 1881 y en 1887

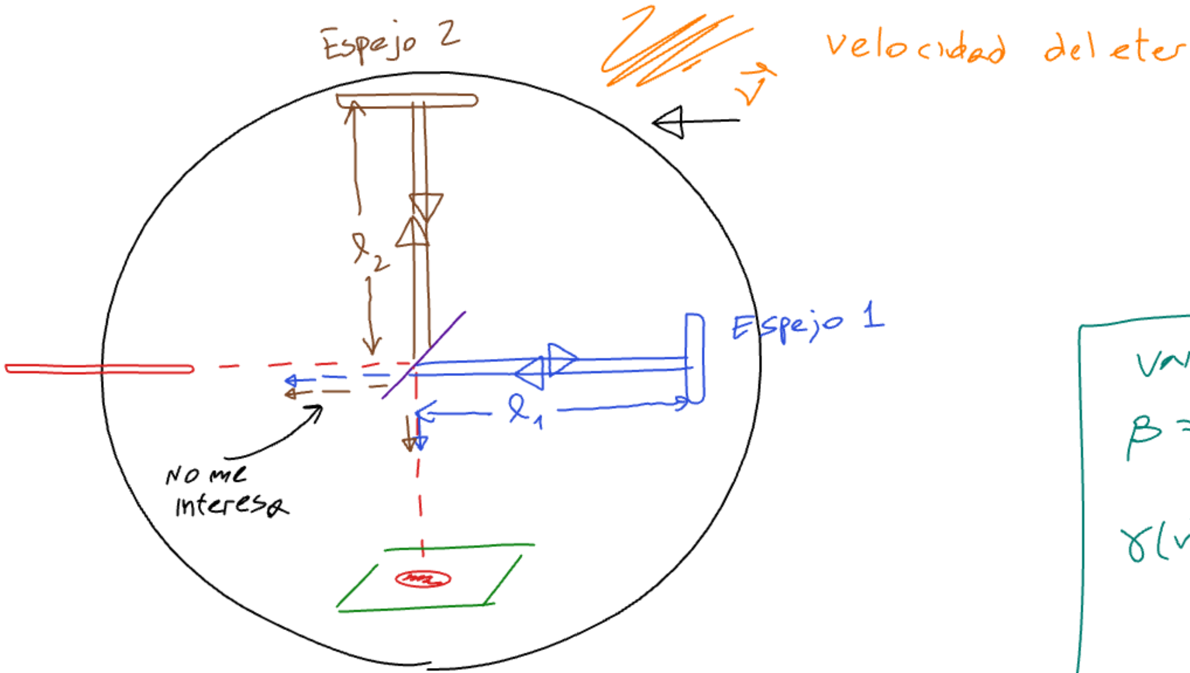
...son – Edward Williams Morley que fue llevado a cabo en 1881 y en 1887

Dada la presición de la óptica de la época, y asumiendo que la velocidad de la tierra relativa al eter es del orden de la velocidad orbital de la tierra en torno al sol, no se podrían medir efectos si no se realizaban mediciones del orden de $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ con v la velocidad de la tierra respecto al eter.



Entonces, este experimento se lleva a cabo con el siguiente sistema/aparato : El interferómetro de Michelson-Morley.

Entonces, este experimento se lleva a cabo con el siguiente sistema/aparato : El interferómetro de Michelson-Morley.



Van a aparecer mucho

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$\gamma(v) = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

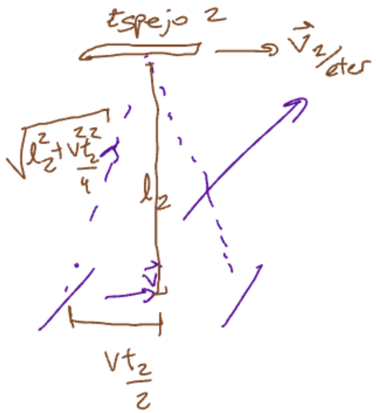
$$t_1 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v} = \frac{2 l_1}{c} \frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

$$t_2 = \frac{1}{c} 2 \sqrt{l_2^2 + \left(\frac{v t_2}{2}\right)^2}$$

$$\Rightarrow t_2 = \frac{2 l_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2}{c}\left[\frac{l_2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - \frac{l_1}{1-\frac{v^2}{c^2}}\right]$$

visto desde el ref del eter

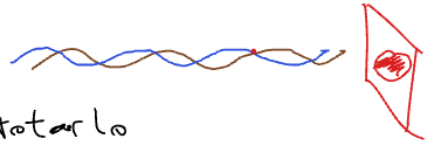


si giro 90° el sistema y mido de nuevo voy a encontrar $\Delta t' = t_2' - t_1' = \frac{2}{c}\left[\frac{l_2}{1-\frac{v^2}{c^2}} - \frac{l_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right]$

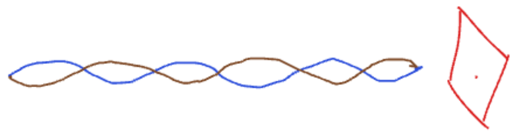
$$\Delta t' - \Delta t = \frac{2}{c}(l_1 + l_2)\left[\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right] \approx \frac{(l_1+l_2)}{c}\frac{v^2}{c^2} + o\left(\frac{v^4}{c^4}\right)$$

Taylor

Si yo por una disposición tenía



al rotarlo variaría la intensidad



podríamos observar un corrimiento en la diferencia de caminos Δd que se traduciría en una variación de la intensidad recibida dada por $\Delta d = (\Delta t' - \Delta t)\, c$ o en unidades de la longitud de onda del laser $\frac{\Delta d}{\lambda} = \left(\frac{l_1 + l_2}{\lambda}\right)\frac{v^2}{c^2} \approx 0,4$

Para el exp de M-M $(l_1 + l_2 \simeq 22m$ $v/c \sim 10^{-4}$ $\lambda = 5,5 \times 10^{-7} m$

El experimento era capaz de observar variaciones $\frac{\Delta d}{\lambda}$ de hasta 10^{-2}.

El sistema se montó sobre una piscina de mercurio para poder rotarlo con facilidad y se midió en distintos momentos del día o estaciones del año y nunca llegó a observarse nada.

A esto siguieron otros intentos de hipótesis como el arrastre del eter (1) o la contracción de Lorentz-Fitzgerald (2)

1) las masas "arrastran" el eter

2) los objetos se contraen en la dirección del movimiento del eter un factor $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

pero que fueron también refutadas.