

Tema V : FÍSICA MODERNA

1. Introducción a la teoría de la relatividad

La mecánica clásica fue elaborada por Newton y está basada en tres leyes fundamentales y en una cuarta ley, la de gravitación universal. Además hay unos postulados en los que se basan las leyes : el tiempo es absoluto y el espacio relativo.

El tiempo es absoluto dado que el tiempo medido por dos observadores en movimiento relativo es el mismo. El espacio es relativo, aunque Newton no lo creía a pesar de sonsacarse de sus leyes, porque un suceso que ocurre en un punto está situado en puntos diferentes para observadores distintos en movimiento relativo.

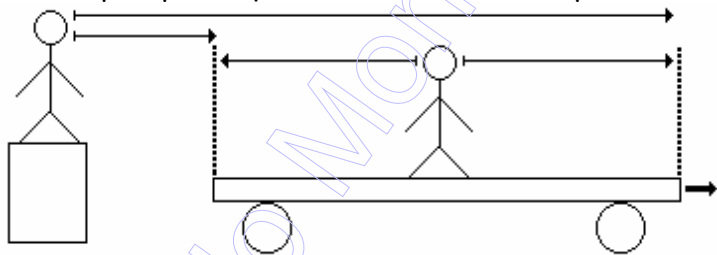
Las propias leyes de Newton son invariantes para observadores en movimiento relativo con velocidad constante.

En el siglo XIX se desarrolla el electromagnetismo, por lo que se van descubriendo muchas leyes. Hacia 1880 Maxwell unifica las leyes de la electricidad y del magnetismo, que hasta entonces permanecían separadas, y llega a una ecuación de la que se deriva la propagación de ondas electromagnéticas.

Mientras las leyes de Newton eran invariantes, las de Maxwell no lo eran, se formulaban de distinta manera para distintos observadores. Este era el problema fundamental de la física en aquel momento, salvar la no-invariancia, por lo que alguna comunidad de científicos ideó un medio llamado éter que estaba en reposo absoluto y era donde había que aplicar con exactitud las leyes de Maxwell, pues se consideraba que las ondas electromagnéticas no podían propagarse en el vacío.

Pero Einstein propuso que las leyes de Maxwell deberían ser iguales para todos los sistemas en movimiento relativo. Como consecuencia, la velocidad de la luz debería ser igual para todos los observadores en movimiento relativo. Para comprobarlo Michelson y Morley realizaron en Chicago un experimento que lo confirmó, por lo que hubo que cambiar todas las leyes pues el tiempo pasaba a ser relativo.

Si el **tiempo es relativo**, observadores que estén en movimiento relativo tienen distinto ritmo de tiempos, por lo que sucesos simultáneos para uno no lo son para otro.



Como ejemplo consideremos un observador viajando en el punto medio de una plataforma móvil emitiendo rayos luminosos hacia ambos extremos. Este observador ve que ambos rayos llegan al extremo de la plataforma a la vez. Un observador desde fuera de la plataforma

verá a un rayo llegar antes que al otro, pues uno se moverá a la par de la velocidad de la plataforma y otro a la contra. Con esto se concluye que el tiempo es relativo. Para esto la velocidad de la plataforma ha de ser muy alta.

Se llama tiempo propio al que mide un reloj que viaja con el observador donde se producen los sucesos. Otro observador tendrá otro tiempo.

- Relación entre el tiempo propio y el medido por otro observador :

$$\Delta t_0 = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Δt = tiempo medido por otro observador

Δt_0 = tiempo propio

Según esta expresión el tiempo propio será siempre menor que el medido por otro observador, y no habrá una velocidad mayor a la de la luz (c).

Dinámica relativista

Las leyes de Newton resultaban invariantes en la dinámica relativista por propia construcción. Con el electromagnetismo no sucedía lo mismo, las leyes no funcionaban igual para distintos sistemas. Con estos nuevos conceptos las leyes de Maxwell resultan ser invariantes, por lo que, al cambiar los conceptos, las leyes de Newton no deben ser ahora invariantes, y hay que modificarlas.

- **Adaptación de la mecánica clásica a la relatividad**

Momento lineal

$$\vec{P} = m \cdot v$$

$$v = \Delta x / \Delta t \quad v_u = \frac{\Delta x}{\Delta t_0} = \frac{\Delta x}{\Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\vec{P} = m_0 \cdot v_u = m_0 \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

v_u = velocidad universal m_0 = masa en reposo

$$m = \text{masa aparente en movimiento} = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Energía

Teorema de las fuerzas vivas : $\Delta W = \Delta E_c$

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v^2 \rightarrow E = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{Si } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow E = m \cdot c^2$$

De estas ecuaciones se deduce que si hay masa hay energía (la interna), mientras que en física clásica energía y masa son independientes (si $v = 0 \rightarrow \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = 0$).

Siempre que se conserve la energía se conserva la masa en movimiento (m). La masa en reposo (m_0) no tiene por qué conservarse (de hecho no se conserva). $\Delta m = \Delta E / c^2$

En las reacciones químicas la variación de masa es inapreciable ya que la energía es pequeña, pero en reacciones nucleares si que es apreciable porque la energía es mucho mayor.

Contracción de longitudes

Dos observadores en movimiento, además de observar diferentes tiempos, también ven distintas

longitudes : $L = L_0 \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}$

Unidades astronómicas

tiempo → año

distancia → años luz

velocidad → c

2. Introducción a la física cuántica

a) Radiación del cuerpo negro

Se denomina cuerpo negro a un medio material capaz de absorber o emitir radiaciones electromagnéticas de todas las frecuencias posibles, desde el infrarrojo hasta los rayos gamma; absorbiendo todas las frecuencias que le llegan sin reflejar ninguna.

Es un concepto ideal, lo más próximo en la naturaleza serían los metales si no reflejaran. Para salvar este inconveniente se considera cuerpo negro a una caja de paredes metálicas con un orificio en una de ellas, con lo que absorbe los rayos que entran al ir reflejándose sucesivamente en su interior.

Se analizó experimentalmente la energía que emite el cuerpo negro en función de la frecuencia y se observó que hay una determinada frecuencia para la que la longitud de onda es máxima, aunque ese máximo varía según la temperatura (a más temperatura menos longitud de onda). Con la física clásica no se pudo explicar este máximo.

Para solucionar esto **Planck** enunció un principio: "Si la radiación electromagnética fuese emitida o absorbida en forma de cuantos y no de forma continua, entonces si se justificaría la gráfica, utilizando la fórmula $E = h \cdot \nu$ "

Históricamente era la primera vez que se admitía la cuantización de alguna variable física. También se tuvo que aplicar la mecánica estadística para demostrarlo.

b) Espectros discontinuos

Espectro: radiación electromagnética capaz de emitir o absorber la materia en sus distintas formas.

La materia en estado gaseoso emite espectros discontinuos, es decir, aparecen únicamente unas frecuencias determinadas que son características de cada átomo.

Con un prisma se consigue un espectro continuo a partir de la luz solar. Se puede identificar el tipo de elemento químico a partir de la luz que emite (aplicaciones para estrellas, etc.).

El primer espectro que se estudió con detalle fue el del hidrógeno (el más sencillo), estudiado por Lyman, Balmer y otros. Se obtuvo de forma empírica una ecuación, la de Rydberg:

$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$ donde $m > n$, ambos positivos y enteros. Esta fórmula sólo se cumple de forma

rigurosa para el hidrógeno, pero se puede modificar para cualquier átomo:

$\frac{1}{\lambda} = R \cdot (Z^*)^2 \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$ donde Z^* es la carga eléctrica del núcleo sobre los electrones más ex-

ternos.

Böhr trató de justificar esta ecuación utilizando la hipótesis de Planck y otras propias, creando un modelo atómico para el átomo de hidrógeno:

• **Primer postulado**

Los electrones que giran alrededor del núcleo no lo hacen en cualquier órbita, sino en las que

cumplen : $L = \frac{nh}{2\pi}$ $L = \text{momento angular}$ En órbitas circulares $L = m \cdot r \cdot v$

Con esto se llega a que la energía mecánica del electrón es : $E = \frac{-C}{n^2}$ $C = \text{cte.}$ $n = 1,$

2, 3...

En definitiva, Böhr cuantiza las órbitas.

• **Segundo postulado**

Un electrón puede saltar de una órbita de menor energía a otra de mayor energía aportándole radiación electromagnética, y de una de mayor energía a otra de menor energía desprendiendo radiación electromagnética.

Supongamos un salto del nivel J al nivel I, siendo J energéticamente mayor que I.

$$E_J = \frac{-C}{J^2} \quad E_I = \frac{-C}{I^2} \quad \Delta E = E_J - E_I = C \left(\frac{1}{I^2} - \frac{1}{J^2} \right)$$

Según Planck, si este incremento de energía se emite en forma de radiación será un cuanto de forma que $\Delta E = h \cdot \nu$

$$h \cdot \nu = C \left(\frac{1}{I^2} - \frac{1}{J^2} \right) \quad \lambda = v/\nu = c/\nu \rightarrow \nu = c/\lambda \quad \frac{hc}{\lambda} = C \left(\frac{1}{I^2} - \frac{1}{J^2} \right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{C}{hc} \left(\frac{1}{I^2} - \frac{1}{J^2} \right) \quad \frac{C}{hc} = R \quad \boxed{\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{I^2} - \frac{1}{J^2} \right)}$$

c) Efecto fotoeléctrico

Consiste en la emisión de electrones por los metales al ser iluminados con luz visible o, mejor, ultravioleta. Este efecto es más acusado para los metales alcalinos, en especial para el cesio, porque son más electropositivos. Características :

- El efecto fotoeléctrico es instantáneo, no hay retraso desde que se ilumina hasta que se observa la emisión.
- Existe una frecuencia mínima o umbral por debajo de ella cual no hay efecto fotoeléctrico que depende de cada metal.
- La energía cinética o la velocidad de los electrones emitidos depende de la frecuencia pero no de la intensidad de la radiación.

Estos resultados experimentales no se pueden demostrar con la teoría clásica, que supone que las radiaciones son únicamente ondulatorias, porque la energía de una onda no está localizada sino extendida en una superficie (frente de onda) ; dado que si no fuera así el electrón tardaría algún tiempo en absorber la poca energía que le aportaría una onda pequeña. Además, según la teoría clásica la energía de una onda depende de la intensidad, pero no de la velocidad, al contrario de lo obtenido experimentalmente.

Para explicar este fenómeno se acude a la ecuación de Planck que nos dice que la radiación electromagnética está dividida en cuantos de $E = h \cdot \nu$. Según esto, un electrón sale de un metal

al chocar con él un cuanto de luz, si le ha aportado la energía necesaria, lo que explica que la emisión sea instantánea. Se llama energía mínima de extracción (W_0) a la energía mínima para arrancar un electrón.

Ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico : $1/2 \cdot m \cdot v^2 = h \cdot \nu - W_0 \quad \nu \geq W_0/h$

$e \cdot V = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ jul. (electrón-voltio)

Hay unos aparatos basados en este principio llamados células fotoeléctricas que consisten en el salto de electrones de un metal al incidir luz, lo que provoca un flujo eléctrico.

d) Hipótesis de Broglie

Las ondas electromagnéticas tienen un doble comportamiento : como ondas cuando se propagan y como corpúsculos cuando interaccionan. Broglie generalizó esta idea a toda la naturaleza y admitió que cualquier partícula se puede comportar también como una onda cuya longitud de onda

cuya longitud de onda sería : $\lambda = \frac{h}{P}$ $P = m \cdot v$

• Deducción a partir de radiación electromagnética

$$\lambda = c/\nu \quad E = h \cdot \nu = m \cdot c^2 \quad P = m \cdot v = m \cdot c \quad h \cdot \nu = P \cdot c \rightarrow \nu = P \cdot c/h$$

$$\lambda = \frac{c}{P \cdot c/h} \rightarrow \lambda = \frac{h}{P}$$

A partir de aquí nos encontramos con que partículas como protones y electrones tienen comportamiento ondulatorio. Esto se ha demostrado con un experimento al aparecer interferencias después de pasar un haz de electrones por la doble rendija, fenómeno no justificable con un comportamiento corpuscular.

En 1926 se sentaron las bases de la física cuántica gracias a **Schrödinger**, que averiguó una ecuación que rige el comportamiento de la función de onda. Poco después, **Heisenberg** enunció el principio de indeterminación : existen variables físicas incompatibles, de modo que si se precisa una, la otra se imprecisa. Esto significa que hay que aplicar la probabilidad a la física cuántica.

3. Física nuclear

a) Estructura y estabilidad del núcleo

El núcleo es una zona central del átomo de tamaño reducido (10^{-13} cm). En esa zona existen unas partículas : protones, con carga positiva y masa ; y neutrones, sin carga y con masa. Hay unos parámetros que caracterizan al núcleo :

$$Z = \text{Número de protones} \quad N = \text{número de neutrones} \quad A = Z + N = \text{número másico} \quad \begin{matrix} Z \\ A \\ Z \end{matrix}$$

El número de protones es lo que caracteriza al átomo ya que hay isótopos con distinto número de neutrones.

¿Cómo es posible que en una zona tan pequeña puedan existir partículas cargadas del mismo signo ?

En el núcleo tiene que haber unas fuerzas atractivas llamadas de interacción fuerte que no distinguen entre protón y neutrón y que son de corto alcance.

Hay un principio básico que dice que cuando se forma un sistema estable se desprende energía. Desde el punto de vista relativista debe haber pérdida de masa.

$$\text{La masa total sería : } Z \cdot m_p + N \cdot m_n$$

La masa del núcleo formado sería menor, por lo que aparece un defecto de masa :

$$\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - M \quad M = \text{masa del núcleo formado}$$

Cuanto más grande sea el incremento de masa más estable será el núcleo.

Defecto de masa relativo : $\frac{\Delta m}{A}$ Se puede representar gráficamente

b) Radiactividad

Emisión de partículas o de radiación electromagnética por algunos núcleos inestables y de forma espontánea. Hay tres tipos de radiactividad :

- **Rayos alfa** (α) : se emiten núcleos de helio (He_2^4)
- **Rayos beta** (β) : se emiten electrones (e_{-1}^0) o positrones (e_{+1}^0)
- **Rayos gamma** (γ) : se emiten fotones de alta intensidad (γ_0^0)

Para detectarlos se utilizan medios como el estudio de sus desviaciones en campos electromagnéticos en la cámara de niebla, la emulsión fotográfica o el contador Geiger.

Hay una ecuación matemática que relaciona el número de núcleos radiactivos en función del tiempo (van disminuyendo) :

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad N_0 = \text{número de núcleos inicial} \quad \lambda = \text{constante de desintegración}$$

Periodo de semidesintegración : tiempo que una muestra de núcleos radiactivos tarda en reducirse a la mitad.

$$N = N_0 / 2 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T} \quad \rightarrow \quad \ln 1/2 = -\lambda \cdot T \quad \rightarrow \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

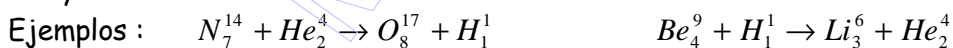
Unidad de desintegración : Becquerel (Bq) 1 Bq = 1 desintegración / seg
1 Curie = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq

c) Reacciones nucleares

Procesos de interacción entre núcleos y/o partículas, con posible formación de núcleos o partículas nuevas. Tipos de reacciones nucleares :

• Transmutaciones

Absorción por parte de un núcleo de una partícula ligera formándose un núcleo diferente y emitiendo otra partícula. Las partículas que intervienen en estas reacciones son las alfa, los protones y los neutrones.



Se deben conservar la suma de los números másicos y la suma de los números atómicos. En una reacción nuclear puede haber diferencia de masa entre productos y reactivos, que se transforma en energía.

$$\Delta m = m_{\text{reac}} - m_{\text{prod}}$$

$$\Delta m > 0 \rightarrow \text{se libera energía : } \Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

$$\Delta m < 0 \rightarrow \text{hay que aportar energía}$$

• Fisión

Hay algunos núcleos que, al ser bombardeados por neutrones, se rompen en dos núcleos más ligeros emitiendo más neutrones de los que se consumen. Los núcleos que se fisionan son pesados, isótopos del uranio y del plutonio : U_{92}^{233} U_{92}^{235} U_{92}^{238} U_{92}^{239} Pu_{94}^{239}

Los de número másico par son más estables (deducción similar a los números cuánticos Spin, ya que las partículas nucleares se asocian en parejas)

Ejemplo : $U_{92}^{235} + n_0^1 \rightarrow Ba_{56}^{141} + Kr_{36}^{92} + 3n_0^1$ $\Delta E = 200 \text{ MeV}$ por núcleo

No se tienen porqué formar estos núcleos. Al liberarse neutrones se puede producir reacción en cadena.

- **Fusión**

Unión de núcleos ligeros (H_1^1 H_1^2 H_1^3) para formar una partícula alfa (He_2^4) y con posibilidad de aparición de neutrones. No se forman partículas pesadas. Para que se inicie la reacción es necesaria mucha energía de activación.

Ejemplos : $H_1^2 + H_1^2 \rightarrow He_2^4$ $H_1^1 + H_1^3 \rightarrow He_2^4$ $H_1^2 + H_1^3 \rightarrow He_2^4 + n_0^1$

Eduardo Montoya Marín