Quiebra de la Fisica Clásica

Fernando Barreiro

Universidad Autónoma de Madrid

Fundamentos Fisica III

Fisica a finales del siglo XIX

- Mecánica clásica y ley gravitación universal : Galileo y Newton
- Electromagnetismo : Maxwell $\Rightarrow$ Ondas electromagnéticas (G. Hertz)
- Termodinámica
- Optica geométrica

Multitud de experimentos en acuerdo con este esquema. Sin embargo primer tercio siglo XX experimentos como:

- Michelson y Morley $\Rightarrow \nexists$ éter
- Emisión electrones por láminas delgadas iluminadas con luz
- Emisión radiación objetos incandescentes

no son descritos por la Fisica clásica. En general cuando estudio:

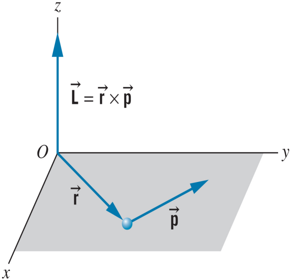
- movimientos de particulas a velocidades próximas a c
- sistemas a escala atómica o subatómica

la Fisica clásica falla estrepitosamente. Fisica moderna

- Relatividad especial y general
- Mecánica cuántica

Sus consecuencias chocan frecuentemente con nuestra intuición.

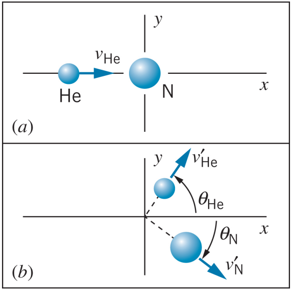
- $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$; $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$; $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \Rightarrow \vec{F} = 0 \Leftrightarrow \vec{p} = cte$
- $\vec{N} = \frac{d\vec{L}}{dt}$; $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$; $\vec{N} = \vec{r} \times \vec{F} \Rightarrow \vec{N} = 0 \Leftrightarrow \vec{L} = cte$



- $W_{1,2} = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_1^2 m \cdot \vec{v} \cdot d\vec{v} = K_2 - K_1$, $K = \frac{1}{2} m v^2$
- Si el campo de fuerzas $\vec{F}$ es conservativo i.e. $\vec{F} = -\vec{\nabla} U(r) \Rightarrow$ la energia total se conserva $K + U = cte$
- Principio relatividad Galileo : tiempo absoluto y $\vec{v}_{AC} = \vec{v}_{AB} + \vec{v}_{BC}$

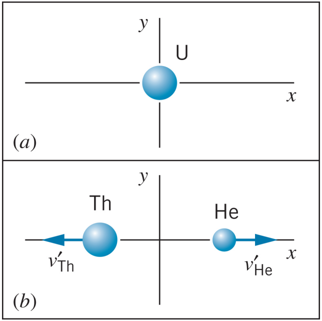
Ej: Un átomo He, $m_{He} = 6.6465 \times 10^{-27} kg$, con velocidad $\vec{v}_{He} = 1.518 \times 10^{6} \vec{i} m/s$ colisiona con uno N en reposo, $m_N = 2.3253 \times 10^{-26} kg$. Después de la colisión el átomo de He se mueve con $v'_{He} = 1.199 \times 10^{6} m/s$ a un ángulo $\theta_{He} = 78.75^{\circ}$. Determinar $\vec{v}_N$. Es la colisión elástica?

- $v'_N cos\theta_N = \frac{m_{He}(v_{He} - v'_{He} cos\theta_{He})}{m_N} = 3.67 \times 10^{5}\ m/s$
- $v'_N sin\theta_N = -\frac{m_{He} v'_{He} sin\theta_{He}}{m_N} = -3.361 \times 10^{5}\ m/s$
- $v'_N = 4.997 \times 10^{5} m/s$ y $\theta_N = -42.48^{\circ}$
- Es elástica porque :$K_{ini} = \frac{1}{2} m_{He} v_{He}^2 = 7.658 \times 10^{-15}\ J = K_{fin}$



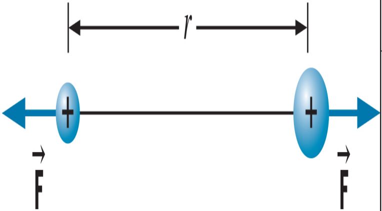
Ej: Un átomo de U, $m_U = 3.9529 \times 10^{-25} kg$, en reposo se desintegra espontáneamente en uno de He, $m_{He} = 6.6465 \times 10^{-27} kg$, y uno de Th, $m_{Th} = 3.8864 \times 10^{-25} kg$. Se observa que el átomo de He se mueve según OX con $v'_{He} = 1.423 \times 10^7 m/s$. Determinar la velocidad del Th. Comparar las energias cinéticas.

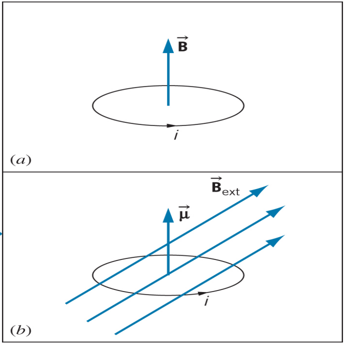
- $v'_{Th} = \frac{-m_{He} \cdot v'_{He}}{m_{Th}} = -2.432 \times 10^5 \ m/s$
- $K_{fin} = \frac{1}{2} m_{He} v_{He}^2 + \frac{1}{2} m_{Th} v_{Th}^2 = 6.844 \times 10^{-13} \ J$
- $K_{in} = 0$



Revisión de la Física Clásica: E.M.

- $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$; $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.988 \cdot 10^9 N \cdot m^2/C^2$
- $U = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r}$
- $\Delta U = q \cdot \Delta V$
- Carga elemental : $e = 1.602 \cdot 10^{-19}\ C \Rightarrow 1\ eV = 1.602 \cdot 10^{-19}\ J$
- $\vec{B} = \mu_0 \frac{I}{2r}; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Ns^2/C^2$
- Momento magnético : $|\vec{\mu}| = I \cdot A$
- Espira en campo magnético externo :$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}_{ext}$; $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}_{ext}$



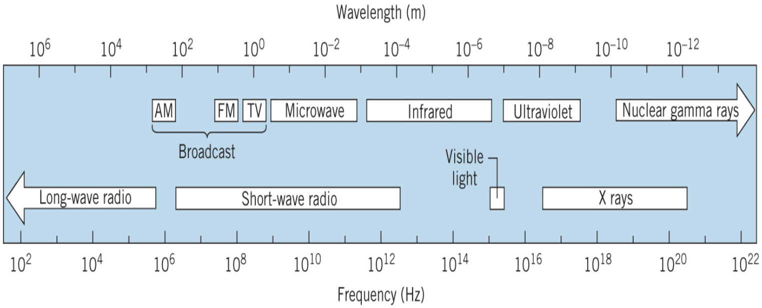


Ej: Calcular la energia potencial electrostática para dos electrones separados a) 1 nm y b) 1 fm

Sol: La energia potencial electrostática de dos cargas separadas una distancia r es $U = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_0 r}$

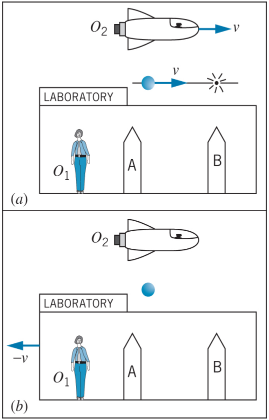
- $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = (8.988 \times 10^9 N \cdot m^2/C^2)(1.602 \times 10^{-19} C)^2 = 2.307 \times 10^{-28} N \cdot m^2 =$
- $2.307 \times 10^{-28} N \cdot m^2 \frac{1}{1.602 \times 10^{-19} J/eV} \frac{10^9 \ nm}{1 \ m} = 1.440 \ eV \cdot nm = 1.440 \ MeV \cdot fm$
- $U = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = 1.44 \ eV$ para la energia potencial entre dos electrones separados 1 nm
- $U = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = 1.44 \ MeV$ para la energia potencial entre dos electrones separados 1 fm

- Ondas e.m. viajan espacio ordinario con velocidad $c = (\epsilon_0 \cdot \mu_0)^{-\frac{1}{2}} = 2.988 \cdot 10^8 m/s$
- Para fotones $E = h\nu$ con $h = 6.626 \times 10^{-34}\ J.s = 4.136 \times 10^{-15}\ eV.s$
- $hc = 1240 eV.nm = 1240 MeV.fm$; $\hbar c = 197\ eV.nm = 197 MeV.fm$
- $c = \lambda\nu$

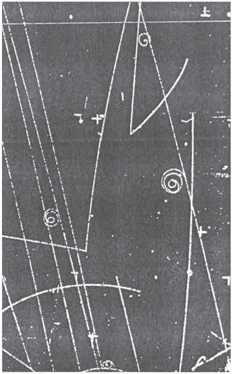


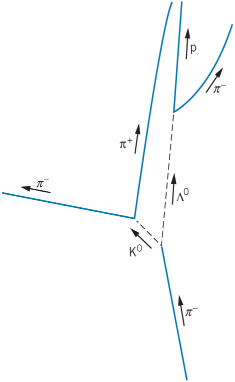
- A altas temperaturas y bajas presiones : $pV = NkT$; $N = no.\ moléculas$; $k = 1.381 \cdot 10^{-23} J/K$
- Alternativamente : $pV = nRT$; $n = no.moles$; $R = 8.315 J/mol/K$
- Un mol de gas contiene $N_A = 6.023 \times 10^{23}$ átomos o moléculas del gas
- $< K >= \frac{3}{2} kT(por\ molécula) = \frac{3}{2} RT(por\ mol)$
- Ejemplo: a temperatura ambiente $\Rightarrow kT \sim 0.025\ eV$
- Ejemplo: a $10^7\ {}^\circ K \Rightarrow kT = 1\ keV$
- Ley gases perfectos permite relacionar cantidades macroscópicas (p,V) con propiedades microscopicas (K)

- Tiempo : $pp \rightarrow pp\pi^+\pi^-$; $\pi^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu$
  - Para $O_1 \Rightarrow \beta = 0.91$: $\tau = 64ns$
  - Para $O_2 \Rightarrow \tau_0 = 26ns$
- Espacio:
  - Para $O_1 \Rightarrow D_1 = 2.737 \cdot 10^8 m/s \cdot 64 \cdot 10^{-9} s = 17.4m$
  - Para $O_2 \Rightarrow D_2 = 2.737 \cdot 10^8 m/s \cdot 26 \cdot 10^{-9} s = 7.1m$

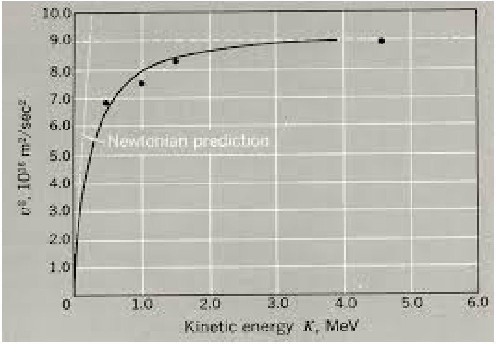


- $\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda^0$; $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$; $\Lambda \rightarrow \pi^- p$
- Desintegraciones particulas extrañas permiten estudiar dilatación de tiempos con mucha precisión



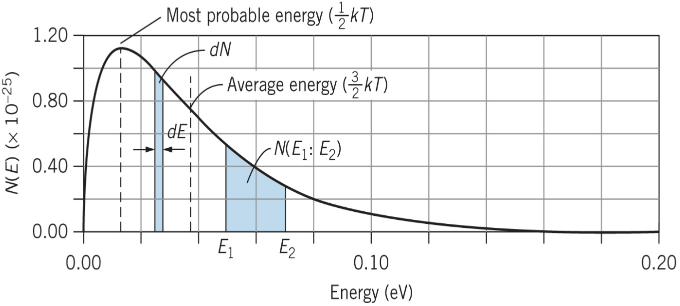


- Clásicamente : $v^2 = 2K/m$
- Acelero electrones y obtengo, véase fig. adjunta, desviaciones de predicciones clásicas



- $m(v) = \frac{m}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \Rightarrow m(v) = m(1+\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}) = m + \frac{1}{2}m\frac{v^2}{c^2}$ si $v/c << 1 L.N.R. \Rightarrow$
- $E = m(v)c^2 = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2$ si $m_0 =$ masa particula en reposo

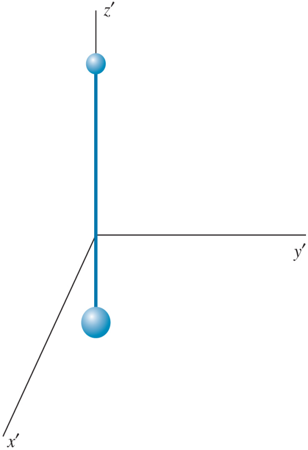
- Ley de Maxwell-Boltzmann : $N(E) = \frac{2N}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{(kT)^{\frac{3}{2}}} E^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E}{kT}}$ determina distribución probabilidad energias moléculas gas equilibrio térmico a temperatura T : $\int_0^\infty dN = \int_0^\infty N(E)dE = N$



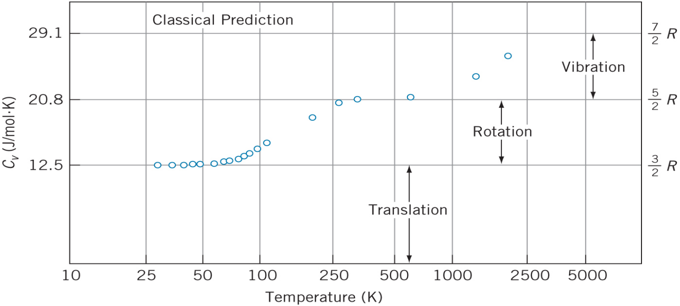
- $dN(E)/dE \propto [\frac{1}{2}E^{-\frac{1}{2}} - \frac{E^{\frac{1}{2}}}{kT}]e^{-E/kT} = 0 \Rightarrow MPE = \frac{1}{2} \cdot kT$
- $< E >= \frac{1}{N}\int_0^\infty E \cdot N(E)dE = \int_0^\infty \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{(kT)^{3/2}} E^{3/2} e^{-E/kT} dE =$
  $= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{(kT)^{3/2}} \Gamma(\frac{3}{2}+1)(kT)^{5/2} = \frac{3}{2} \cdot kT$; $\Gamma(n+1) = n\Gamma(n)$; $\Gamma(\frac{3}{2}+1) = \frac{3}{4}\sqrt{\pi}$

Moléculas poliatómicas y la equipartición de la energia

- Para moléculas monoatómicas :
  $< E >= 0.5m(v_x^2)_{ave} + 0.5m(v_y^2)_{ave} + 0.5m(v_z^2)_{ave} = \frac{3}{2}kT \Rightarrow \frac{1}{2}kT\ p.d.f.$
- Para moléculas diatómicas si consideramos posibilidad de rotación:
  $E_{rot} = \frac{1}{2}I_{x'}\omega_{x'}^2 + \frac{1}{2}I_{y'}\omega_{y'}^2 \Rightarrow\ 2\frac{1}{2}kT \Rightarrow < E >= \frac{5}{2}kT$
- Si además se considera $E_{vib} = \frac{1}{2}kz'^2 + \frac{1}{2}mv_{z'^2} \Rightarrow < E >= \frac{7}{2}kT$



- $E_{int} = N(\frac{3}{2}kT)_{trans} + N(\frac{2}{2}kT)_{rot} + N(\frac{2}{2}kT)_{vib} = (\frac{7}{2}nRT)$
- Definición : $C_V = \frac{\Delta E_{int}}{n\Delta T} \Rightarrow$ *constante i.e. independiente temperatura*
- Experimentalmente dependencia calor especifico H_2 con temperatura exhibe tres 'plateaus' i.e. no es constante
- Este es un efecto mecano cuántico : grados libertad asociados a rotaciones y vibraciones aparecen por encima de energias umbral



- $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.055 \cdot 10^{-34} J.s ==> [\hbar] = \frac{ML^2}{T} ==> \hbar = 1$
- $c = 2.998 \cdot 10^8 m/s ==> [c] = \frac{L}{T} ==> c = 1$

Las energias se miden en GeV. Pero $[E] = \frac{ML^2}{T^2} = \frac{ML^2}{T}/T ==> [T] = GeV^{-1}$
Por tanto como c=1 adimensional, $[L] = [T] = GeV^{-1}$.

Equivalencias:

- $1\ kg = 5.61 \cdot 10^{26}\ GeV$
- $1\ m = 5.07 \cdot 10^{15}\ GeV^{-1}$
- $1\ s = 1.52 \cdot 10^{24}\ GeV^{-1}$
- $1\ fm = 10^{-15} m = 5.07\ GeV^{-1}$

- $sin\alpha + sin\beta = 2sin\frac{\alpha+\beta}{2}cos\frac{\alpha-\beta}{2}$
- $cos\alpha + cos\beta = 2cos\frac{\alpha+\beta}{2}cos\frac{\alpha-\beta}{2}$
- $sinx = x - \frac{x^2}{3!} + \frac{x^5}{5!} + ...$
- $cosx = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!}$
- $\frac{1}{1+x} = 1 - x + x^2 - x^3.....$
- $ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + ...$
- $\sqrt{1+x} = 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + ...$
- $\int_{-\infty}^{\infty} exp(-Ax^2)dx = \sqrt{\frac{\pi}{A}} \equiv I(A)$
- $\int_{-\infty}^{\infty} x^2 \cdot exp(-Ax^2)dx = \frac{dI(A)}{dA} = \frac{\sqrt{\pi}}{2A^{3/2}}$
- $\int_0^{\infty} \frac{x^3}{e^x-1}dx = \frac{\pi^4}{15}$
- $\int_0^{\infty} x^n e^{-cx}dx = \frac{\Gamma(n+1)}{c^{n+1}}$; $\Gamma(n+1) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$ para $n = \frac{1}{2}$
- $\int x^n e^{-cx}dx = -\frac{e^{-cx}}{c}[x^n + \frac{nx^{n-1}}{c} + \frac{n(n-1)x^{n-2}}{c^2} + ... + \frac{n!}{c^n}]$
- $\int xsin^2ax = \frac{x^2}{4} - \frac{xsin2ax}{4a} - \frac{cos2ax}{8a^2}$
- $\int_0^{n\pi} u^2sin^2udu = [\frac{u^3}{6} - (\frac{u^2}{4} - \frac{1}{8})sin2u - \frac{ucos2u}{4}]_0^{n\pi}$