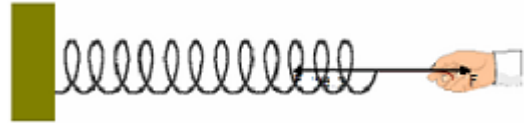


11. Interpretad procesos en los que podría variar la masa (energía propia) de: a) Un muelle. b) Un dipolo eléctrico. c) Un átomo.

a) Considerando el muelle como un sistema de partículas, no es lo mismo que el muelle esté en equilibrio que esté estirado (o contraído), ya que cuando se estira (o se contrae) el muelle, se le aporta energía potencial elástica. Es decir:



$$m_{\text{est}} = m_{\text{eq}} + E_p/c^2 \quad (\text{donde } m_{\text{est}} = \text{masa estirado y } m_{\text{eq}} = \text{masa en equilibrio})$$

En este caso, como $E_p = Kx^2/2 > 0$, se obtiene que:

$$m_{\text{est}} > m_{\text{eq}}$$

La energía que se comunica al muelle estirándolo o contrayéndolo es $Kx^2/2$ y se almacena en el muelle como energía potencial (E_p), donde K es la constante elástica del muelle y x es el alargamiento (o contracción) experimentado¹. Evidentemente, para los valores habituales de " K " y de " x ", el aumento de masa del muelle es realmente insignificante, debido al valor tan elevado de c^2 . Para comprobarlo, se puede realizar el siguiente ejercicio:

Un muelle de constante elástica 5000 N/m se comprime 80 cm. Determinad la variación que se producirá en su masa. Rdo. $\Delta m = 1'78 \cdot 10^{-14}$ kg. (Inapreciable en cualquier balanza).

b) En el caso de un dipolo eléctrico (dos partículas cargadas con cargas de signo opuesto, ligadas y separadas por una pequeña distancia), considerando que las dos cargas permanecen en reposo, tenemos:

$$m_{\text{dip}} = m_{q1} + m_{q2} + E_p/c^2$$

La energía potencial eléctrica se calcula mediante la expresión: $E_p = (K \cdot q_1 \cdot q_2)/r^2$ en la que, como sabemos, K es la constante electrostática del medio y r la distancia entre las cargas que forman el dipolo. En dicha expresión cada carga lleva su signo correspondiente, de modo que al tratarse de dos cargas de distinto signo, dicha energía potencial es negativa. Por tanto, para cualquier separación no infinita entre las partículas tenemos que:

$$m_{\text{dip}} < (m_{q1} + m_{q2})$$

Para afianzar este concepto podemos imaginar que las dos cargas que forman el dipolo eléctrico estuvieran inicialmente separadas por una determinada distancia. Si a partir de esta disposición inicial la fuéramos alejando, deberíamos para ello ejercer una fuerza contraria a la fuerza de atracción eléctrica entre ellas, es decir, deberíamos ir aportando al dipolo una energía positiva. Cuando la energía aportada fuera igual a la energía potencial eléctrica inicial del dipolo (en valor absoluto), las dos cargas, si no adquieren velocidad, tendrían que estar separadas a una distancia infinita y, la suma de sus masas sería entonces igual a la masa del dipolo.

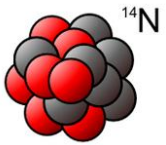
c) Suponiendo que fuera correcto el modelo atómico de Rutherford, la masa de un átomo sería igual a la suma de las masas de sus nucleones (protones y neutrones) y de sus electrones, mas las masas equivalentes a las energías cinéticas de los electrones, las energías potenciales eléctricas de los pares electrón-núcleo y las energías potenciales nucleares de los pares de nucleones.

¹ Atención: La expresión $kx^2/2$ será la E_p elástica del muelle para cualquier sistema que se desplace (respecto de él) con v mucho menor que c . Si v se aproxima a " c " la E_p elástica tiene otra expresión más complicada, cuyo valor sería el mismo para todos los observadores inerciales.

$$m_{\text{átomo}} = \sum m_{\text{núcleo}} + \sum m_{\text{elec.}} + \sum E_{\text{c elec}}/c^2 + \sum E_{\text{p núcleo-elec}}/c^2$$

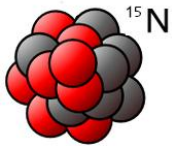
En este caso, la energía cinética de todos los electrones (positiva) es mucho menor que el valor absoluto de la suma de todas las energías potenciales (que es negativa), entre las cuales son particularmente apreciables las energías potenciales nucleares. Por eso, la masa del átomo es inferior a la suma de las masas de sus constituyentes y se trata de un sistema ligado. La diferencia entre la suma de las masas de las partículas que constituyen un átomo y la masa del átomo se denomina **defecto de masa** o **energía de enlace** del átomo y explica su mayor o menor estabilidad. Del mismo modo, la diferencia entre la masa de un núcleo y la suma de las masas de sus constituyentes, explica la estabilidad de dicho núcleo como podemos ver a través del siguiente ejercicio:

Las masas atómicas del ^{14}N y del ^{15}N son $13'99922 \text{ u}$ y $15'000109 \text{ u}$, respectivamente. Determinad la energía de enlace de ambos en MeV y decid cuál es más estable (Datos: masa neutrón = $1'008665 \text{ u}$, masa protón = $1'007276 \text{ u}$, $1 \text{ u} = 931 \text{ MeV}$)



Suma de las masas de los protones: $7 \cdot 1'007276 = 7'050932 \text{ u}$.
 Suma de las masas de los neutrones: $7 \cdot 1'008665 = 7'060655 \text{ u}$.
 Suma de las masas de todos los nucleones: $14'111587 \text{ u}$

masa-energía de enlace del N-14: $13'99922 - 14'111587 = -0'112367 \text{ u} = -104'61 \text{ MeV}$



Suma de las masas de los protones: $7 \cdot 1'007276 = 7'050932 \text{ u}$
 Suma de las masas de los neutrones: $8 \cdot 1'008665 = 8'06932 \text{ u}$
 Suma de las masas de todos los nucleones: $15'120252 \text{ u}$

masa-energía de enlace del N-15: $15'000109 - 15'120252 = -0'120143 \text{ u} = -111'85 \text{ MeV}$

A partir de estos resultados, para evaluar la estabilidad de cada núcleo se ha de tener en cuenta que la energía de enlace de cada uno se emplea en ligar entre sí a todas las partículas que lo componen, de modo que se ha de repartir entre todas ellas. El núcleo más estable será aquel que tenga un valor mayor (absoluto) de la energía de enlace por cada nucleón.

Energía de enlace por nucleón del N-14: $104'61/14 = 7'472 \text{ MeV/nucleón}$

Energía de enlace por nucleón del N-15: $111'85/15 = 7'457 \text{ MeV/nucleón}$

Por tanto, el isótopo N-14 es más estable que el isótopo N-15.

Ampliación

El N-14 y el N-15 son los dos únicos isótopos estables que existen del nitrógeno. El N-14, se produce en el ciclo carbono-nitrógeno de las estrellas. Además de ser el isótopo más estable, es el que se encuentra, con mucha diferencia, en mayor proporción (99'634 %). Por su parte, el nitrógeno-15 se produce también en las estrellas a partir del ^{15}O por desintegración beta. Se han sintetizado otros diez isótopos del nitrógeno. De ellos, uno tiene un periodo de semi-desintegración de nueve minutos (el N-13), y el resto de segundos o menos.