

Física Atómica y Materia Condensada.

Primer Trabajo: Espectroscopía de muonio y el radio del protón.

Tomás Ricardo Basile Álvarez
316617194

April 30, 2022

Introducción

En este trabajo investigaremos los experimentos y resultados sobre la medición de la longitud del radio del protón y en particular hablaremos del método de espectroscopía del muonio para encontrar dicho radio. Algo interesante de la medición del radio del protón es que distintos métodos han dado distintos resultados e intentar explicar esta diferencia es lo que se conoce como el “problema del radio del protón”. En particular, antes de 2010, se medía el radio del protón con dos métodos independientes que describiremos más adelante (espectroscopía del hidrógeno y dispersión nuclear) y ambos daban como resultado un valor de alrededor de $0.877 \pm 0.069 fm$. Sin embargo, en 2010 se realizó un nuevo método (espectroscopía de muonio) con el cual se obtuvo un resultado significativamente menor al aceptado anteriormente, de $0.842 \pm 0.001 fm$ y fue entonces que surgió el problema del radio del protón [1].

Empezaremos el trabajo describiendo a grandes rasgos los dos métodos de medición del radio del protón originales y posteriormente estudiaremos a más detalle el de hidrógeno muónico. Finalmente, concluiremos sobre el estado actual del problema del radio del protón y su posible resolución.

Métodos de medición originales

Describimos ahora los métodos que se utilizaban antes de 2010 para medir el radio del protón, que como se mencionó antes, coincidían en un resultado de aproximadamente $0.877 fm$.

- **Dispersión de un núcleo:** A grandes rasgos, el experimento de dispersión consiste en lanzar un haz de electrones hacia un blanco de protones. Luego, se mide la distribución de electrones desviados por el protón a distintos ángulos. A partir de esta distribución como función del ángulo, se puede inferir el radio del protón [2]. Por ejemplo, en el artículo [3] se realizó este experimento y los resultados obtenidos por son de $0.8775 \pm 0.0005 fm$.
- **Espectroscopía del Hidrógeno:** En este método, se mide la energía emitida en la transición entre dos estados de un átomo de hidrógeno y se compara con el valor teórico de esta energía. Para el valor teórico, se considera que la energía de un átomo de Hidrógeno en el estado con números cuánticos n, j, l es [4]:

$$E_{njl} = -\frac{hcR_\infty}{1 + \frac{m_e}{m_p}} \left[\frac{1}{n^2} + F_{njl} \left(\alpha, \frac{m_e}{m_p} \right) - \delta_{l0} \frac{C_{NS}}{n^3} r_p^2 \right], \quad (1)$$

donde R_∞ es la constante de Rydberg como la vimos en clase, α es la constante de estructura fina, F_{njl} una función conocida que depende de α y m_e/m_p , $C_{NS} = \frac{4}{3}(4\pi)^2 R_\infty^2 (1 + \frac{m_e}{m_p})^{-2} \alpha^{-2}$ y r_p es el radio del protón. Luego, la energía emitida en una transición debe de ser igual a la diferencia de energías entre el estado final e inicial calculadas con esta ecuación.

Lo importante es que en la ecuación (1) el último término depende de r_p (este término aparece solamente cuando $l = 0$, ya que son los estados en los que el electrón se acerca y puede traslaparse con el protón, por lo que su radio electrónico entra en juego) [5]. Entonces, comparando la energía de transición experimental con la teórica, se puede deducir el valor de r_p .

Como ya se mencionó, estos dos métodos de medición daban resultados muy similares, con un promedio de $0.877 fm$.

Espectroscopía del hidrógeno muónico

En 2010 se publicó un artículo que utilizaba un tercer método para medir el radio del protón [6]. El experimento consiste en hacer espectroscopía, similarmente al método descrito antes, pero ahora con un hidrógeno muónico. El hidrógeno muónico consiste en un átomo de hidrógeno en el que se intercambia el electrón por un muón (una partícula de la misma carga que el electrón pero 200 veces más pesada).

La ventaja de un átomo muónico es que al tener el muón una masa mucho mayor a la del electrón, las órbitas tienen radios mucho menores que para hidrógeno común. Esto hace que las energías de los estados dependan más fuertemente en el radio del protón que para hidrógeno común. En particular, el experimento [6] mide la diferencia de energía entre los estados $2S_{1/2}^{F=1}$ y $2P_{3/2}^{F=2}$, que se debe al corrimiento de Lamb tal como vimos en clase. Teóricamente, dicha diferencia está dada por [6]:

$$\Delta E = 209.9779(49) - 5.2262r_p^2 + 0.0347r_p^3 \text{ meV}. \quad (2)$$

Entonces, una vez obtenido el valor experimental de esta diferencia de energías ΔE , se puede deducir r_p con esta ecuación.

A grandes rasgos, en el experimento se incidió un haz de muones sobre gas H_2 para crear así hidrógenos muónicos en estados muy excitados. La mayoría decaen al estado $1S$ pero algunos decaen al estado metaestable $2S$. Luego, se inducen transiciones $2S \rightarrow 2P$ en resonancia usando un láser con la energía adecuada. Se puede confirmar que efectivamente se realizó esta transición, porque en caso de haberse logrado, el estado $2P$ (que no es metaestable) decae al estado base y produce rayos X con energía bien definida de $1.9 KeV$ (ver figura 1).

De esta forma, notando cual fue la frecuencia del láser que causó la transición entre los estados $2S$ y $2P$, se puede obtener la diferencia de energía entre ellos y con ello encontrar r_p con la ecuación (2). El resultado que obtuvieron fue $0.842 \pm 0.001 fm$, lo cual está más de 5 desviaciones estándar por debajo del radio calculado con los métodos anteriores.

Esta diferencia dio lugar a lo que se conoce como el “problema del radio del protón”. No se supo por qué se apreciaba la diferencia en las mediciones y se propuso por ejemplo que esto se debía a diferencias en la interacción protón-muón y la protón-electrón. Sin embargo, nuevos experimentos de espectroscopía del hidrógeno en 2019 [5] y de dispersión también en 2019 [7] coinciden con el resultado del hidrógeno muónico de $\simeq 0.84 fm$. Por esto, el consenso general es que el problema está resuelto y el radio es verdaderamente $\simeq 0.84 fm$ [8].

Conclusiones

El problema del radio del protón es un ejemplo muy interesante de mediciones que se creían bien establecidas pero que resultaron no serlo al realizar nuevos experimentos y muestra la importancia de utilizar varios métodos distintos para resolver un mismo problema. Además, es un buen ejemplo de experimentos que se pueden entender con el conocimiento que hemos desarrollado en la clase, tal como el corrimiento Lamb y las transiciones entre estados de un átomo.

Referencias

- [1] Krauth, J. J.; Schuhmann, K.; Abdou Ahmed, M.; Amaro, F. D.; Amaro, P.; et al. (2 June 2017). The proton radius puzzle (19 March 2017).
- [2] Povh, B. *Particles and Nuclei: An Introduction to the Physical Concepts*. Springer, 2015.
- [3] Bernauer, J. C. et al. High-precision determination of the electric and magnetic form factors of the proton. *Phys. Rev. Lett.* 105, 242001 (2010).
- [4] Thomas, Simon, et al. “High-Resolution Hydrogen Spectroscopy and the Proton Radius Puzzle.” *Annalen Der Physik*, vol. 531, no. 5, 2019, <https://doi.org/10.1002/andp.201800363>.
- [5] Bezginov, N., et al. “A Measurement of the Atomic Hydrogen Lamb Shift and the Proton Charge Radius.” *Science*, vol. 365, no. 6457, 2019, pp. 1007–1012., <https://doi.org/10.1126/science.aau7807>.
- [6] Pohl, Randolph, et al. “The Size of the Proton.” *Nature*, vol. 466, no. 7303, 2010, pp. 213–216., <https://doi.org/10.1038/nature09250>.
- [7] Xiong, W., et al. “A Small Proton Charge Radius from an Electron–Proton Scattering Experiment.” *Nature*, vol. 575, no. 7781, 2019, pp. 147–150., <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1721-2>.
- [8] Hammer, Hans-Werner, and Ulf-G. Meißner. “The Proton Radius: From a Puzzle to Precision.” *Science Bulletin*, vol. 65, no. 4, 2020, pp. 257–258., <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.12.012>.

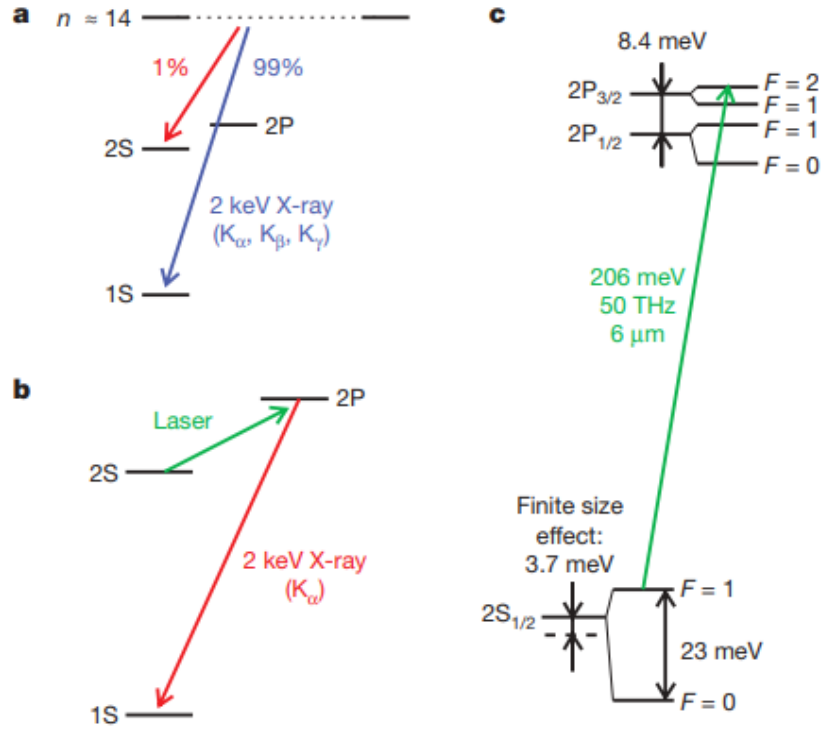


Figure 1 | Energy levels, cascade and experimental principle in muonic hydrogen. **a**, About 99% of the muons proceed directly to the 1S ground state during the muonic cascade, emitting ‘prompt’ K-series X-rays (blue). 1% remain in the metastable 2S state (red). **b**, The $\mu p(2S)$ atoms are illuminated by a laser pulse (green) at ‘delayed’ times. If the laser is on resonance, delayed K_α X-rays are observed (red). **c**, Vacuum polarization dominates the Lamb shift in μp . The proton’s finite size effect on the 2S state is large. The green arrow indicates the observed laser transition at $\lambda = 6 \mu\text{m}$.

Figure 1: Figura 1