

O enigma do raio do próton

Luis M. P. Fernandes

Dep. Física, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Rua Larga, 3004-516 Coimbra

pancho@gian.fis.uc.pt

Resumo

Um artigo recentemente publicado na revista *Science* veio reforçar a controvérsia em torno do valor do raio do próton. O enigma foi gerado em 2010 quando a colaboração CREMA publicou na revista *Nature* os resultados da experiência de espectroscopia laser do hidrogénio muónico. Através da medição do desvio de Lamb, foi estimado um novo valor para o raio do próton, muito desfasado do valor previamente conhecido. Este valor foi recalculado, após uma exaustiva análise de dados. O novo valor obtido confirma a grande discrepância em relação ao valor recomendado anteriormente.

Introdução

Qual o valor do raio do próton, a partícula de carga positiva que encontramos no núcleo dos átomos? O valor estabelecido internacionalmente aponta para 0,8768(69) femtômetros ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$), cerca de 30 mil vezes mais pequeno que o raio do átomo de hidrogénio. Mas numa experiência internacional realizada em 2009, com significativa participação portuguesa, chegou-se ao valor 0,84184 fm, cerca de 4 % mais pequeno, resultado este publicado na revista *Nature* em 2010¹. A comunidade científica foi surpreendida por esta discrepância: apesar de pequena, a ser verdade teria implicações problemáticas para a Electrodinâmica Quântica (QED), uma das principais teorias da física moderna. Três anos depois, a mesma equipa veio confirmar o resultado das medições originais, através de nova publicação, agora na revista *Science*.

A técnica utilizada para medir o raio do próton nestas experiências recorre a uma variante do átomo de hidrogénio (H), o hidrogénio muónico (μp), que é constituído por um próton e um muão negativo. O muão tem uma massa 207 vezes maior que a do eletrão, e o seu raio orbital no átomo de μp é 186 vezes menor que o do eletrão no átomo de hidrogénio. Por esse motivo, a sobreposição entre a função de onda² do muão e o próton é cerca de 10^7 vezes superior ao caso do hidrogénio eletrónico. Os níveis energéticos nos átomos de μp são assim muito mais influenciados pela

estrutura do núcleo. Em particular, o raio do próton contribui em cerca de 2 % para a diferença de energia entre os estados 2S e 2P, o chamado desvio de Lamb. Este desvio energético é devido ao momento magnético do eletrão e foi descoberto em 1947 por Willis E. Lamb e R. Retherford [1]. Usando espectroscopia de alta precisão no átomo de hidrogénio, aqueles autores mostraram que a descrição teórica do átomo de hidrogénio existente (teoria de Dirac) era incompleta, pois previa a mesma energia para os dois estados 2S e 2P do átomo H, vindo a dar origem à nova teoria QED.

Esta teoria descreve a interação da radiação eletromagnética com a matéria, sendo uma das teorias mais precisas da Física. Nas últimas décadas, têm sido realizadas medidas precisas das transições electrónicas no átomo de hidrogénio por espectroscopia laser. Contudo, não tem havido avanço significativo na precisão das experiências de espectroscopia nem na teoria (QED) uma vez que a comparação entre teoria e experiência é comprometida pelo conhecimento reduzido da estrutura do próton. Esta estrutura é importante porque um eletrão no estado 2S tem uma probabilidade de estar dentro do próton, o que faz reduzir a força de atração entre ambos. Esta é a razão pela qual as transições entre estados dependem do tamanho do próton.

A espectroscopia laser no hidrogénio muónico possibilita determinar o desvio de Lamb ΔE neste átomo, e estimar o raio de carga do próton através da seguinte relação da teoria QED [2], expresso em meV:

$$\Delta E_{2S-2P} = 206,0573(45) - 5,2262 r_p^2 + 0,0347 r_p^3 \quad (1)$$

¹ Ver *Gazeta de Física* 33(2), 24 (2010)

² Medida da probabilidade de encontrar, em determinada posição espacial, uma partícula num dado sistema.

Na equação (1), r_p representa o valor quadrático médio³ (rms) do raio da distribuição de carga do próton, em unidades fm. A incerteza de 0,0045 meV deve-se às várias contribuições da teoria QED calculadas por diversos autores para o desvio de Lamb no hidrogénio muónico. Esta incerteza é dominada pela polarizabilidade do próton.

A experiência

A experiência de espectroscopia laser do hidrogénio muónico foi realizada pela colaboração CREMA no acelerador de prótons do Instituto Paul Scherrer (PSI, Suíça). O objetivo da experiência era medir o desvio de Lamb no hidrogénio muónico com uma precisão de 30 ppm e melhorar a incerteza no raio do próton. Durante décadas, esta medida foi considerada uma experiência fundamental em espectroscopia atómica, mas só o recente progresso na tecnologia de feixes de muões e de lasers tornou possível a sua realização.

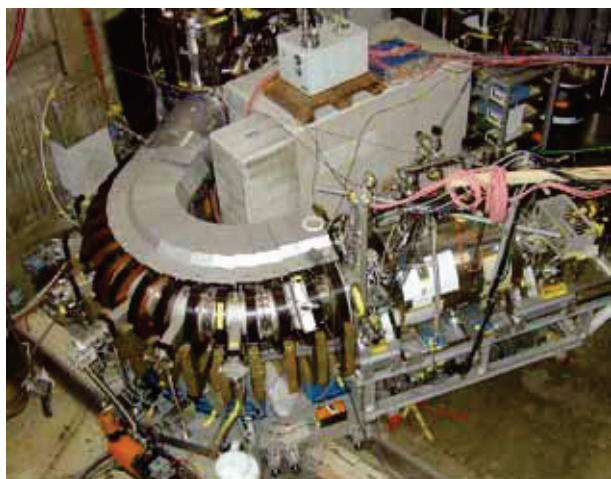


Fig. 1 - Sistema experimental usado na espectroscopia laser do hidrogénio muónico.

A realização da experiência foi possível devido ao cumprimento de vários requisitos do sistema experimental (ver Figura 1): um acelerador de prótons incorporado com um dispositivo para produção e detecção de muões de baixa energia, um alvo gasoso com hidrogénio a baixa pressão (1 mbar) no interior de um solenóide a operar sob um campo magnético de 5 teslas, um sistema laser capaz de

A colaboração CREMA (Charge Radius Experiments with Muonic Atoms)

- Paul Scherrer Institute (PSI, Suíça)
- Max Plank Institut für Quantenoptik (MPQ, Alemanha)
- Lab. Kastler Brossel (LKB, Universidade Pierre et Marie Curie, Paris, França)
- Institut für Strahlwerkzeuge (Universidade de Estugarda, Alemanha)
- Centro de Instrumentação (Departamento de Física, Universidade de Coimbra, Portugal)

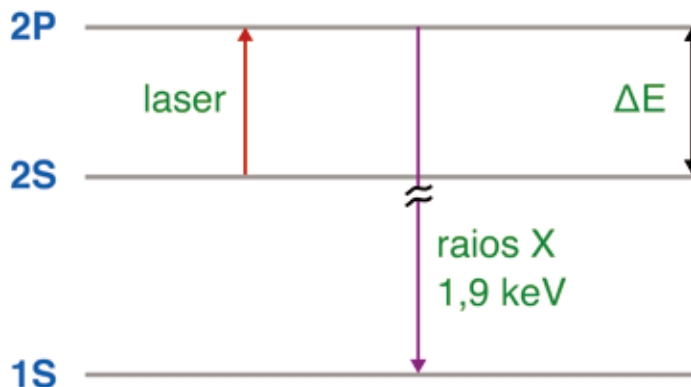


Fig. 2 - Princípio da experiência de espectroscopia laser do hidrogénio muónico.

produzir um feixe intenso de luz com comprimento de onda ajustável à volta de $6 \mu\text{m}$, uma cavidade ótica para concentrar a luz em todo o volume gasoso, e detetores de raios x de 1,9 keV com resposta temporal rápida e resolução em energia adequada à experiência.

O princípio da experiência está esquematizado na Figura 2. Muões negativos produzidos na área πE5 do PSI são feitos parar num alvo de hidrogénio, produzindo átomos de μp altamente excitados. A maioria destes átomos decai imediatamente para o estado fundamental 1S, mas cerca de 1 % atinge o estado metastável 2S (com tempo de vida de $1 \mu\text{s}$). Cada muão que entra no alvo faz disparar o sistema laser de tal forma que impulsos de luz com comprimento de onda à volta de $6 \mu\text{m}$ iluminam os átomos de μp . A transição 2S-2P é induzida se o laser estiver em ressonância. Raios x de 1,9 keV são emitidos em resultado da desexcitação 2P-1S. O número de coincidências entre os raios x detetados e os impulsos laser é determinado para cada frequência do laser, originando uma curva de ressonância a partir da qual o desvio de Lamb é determinado.

Resultados da experiência

A experiência original foi realizada em 2009. Analisando os espectros de tempo ao efetuar um varrimento da frequência do laser, verificou-se que o número de raios X detetados em coincidência com o laser distinguia-se do fundo dos espectros para uma estreita gama de frequências. Após uma primeira análise dos dados, foi obtida uma curva de ressonância com a forma de uma função Lorentziana sobreposta a um fundo plano. A curva foi publicada na revista *Nature* [2] e está representada na Figura 3.

Para além da incerteza estatística de 700 MHz associado ao centroide da curva da Fig. 3, foi adicionada uma incerteza de 300 MHz associada à calibração do comprimento de onda do laser, resultando um centroide de $(49881,88 \pm 0,76) \text{ GHz}$. Este valor corresponde a um desvio de Lamb $\Delta E = (206,2949 \pm 0,0032) \text{ meV}$, que apresenta uma precisão relativa de 15 ppm.

Por fim, a partir da equação (1), obteve-se o valor rms para o raio do próton: $0,84091(68) \text{ fm}$. Este valor é dez vezes

³ Root mean square, um valor médio aqui usado porque a distribuição de carga não é uniforme.

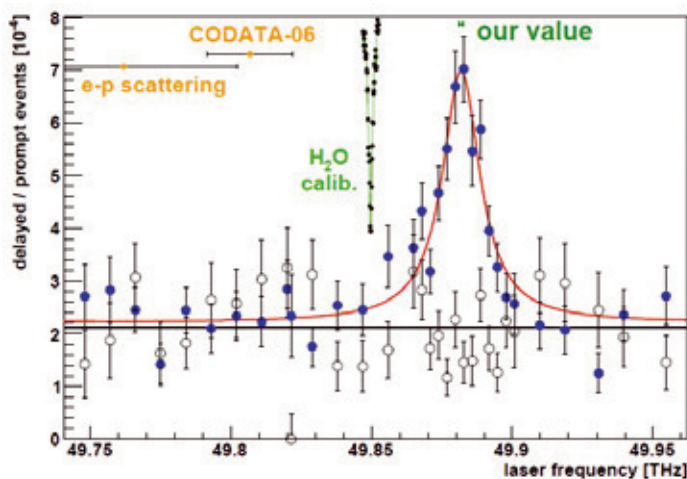


Fig. 3 - Curva de ressonância obtida na experiência de espectroscopia laser do hidrogênio muônico, de onde se obtém o desvio de Lamb no hidrogênio muônico em unidades de frequência, $\Delta f = (49881,88 \pm 0,70)$ GHz [2].

mais preciso e cinco desvios padrão afastado (4 % mais pequeno) do valor anteriormente aceite, 0,8768(69) fm, recomendado pelo Committee on Data for Science and Technology (CODATA, 2006). A origem da grande discrepância entre os dois valores não é ainda conhecida, tendo gerado grande controvérsia na comunidade científica.

A transição entre os estados 2S e 2P do hidrogênio muônico que permitiu deduzir o raio do protão foi $2S_{1/2}(F=1) \rightarrow 2P_{3/2}(F=2)$. Para além desta transição foi medida uma outra transição, $2S_{1/2}(F=0) \rightarrow 2P_{3/2}(F=1)$, ajustando o comprimento de onda do laser à volta de 5,5 μm . O valor obtido, $\Delta f = (54611,16 \pm 1,05)$ GHz, permitiu estimar do raio magnético do protão. O valor assim obtido, 0,87(6) fm, está em boa concordância com os valores anteriormente conhecidos, apesar da precisão não ter melhorado. No futuro, a espectroscopia laser do hidrogênio muônico tem potencial para melhorar significativamente a precisão destas medições.

Ao mesmo tempo, foi reavaliada a primeira transição, resultando $\Delta f = (49881,35 \pm 0,65)$ GHz. O novo valor estimado para o raio de carga do protão [0,84087(39) fm] é mais preciso mas está sete desvios padrão afastado do valor recomendado por CODATA 2010 [0,8775(51) fm] baseado em experiências de espectroscopia do átomo de hidrogênio e de dispersão elétron-protão. Estes resultados foram recentemente publicados na revista *Science* [3], reforçando o enigma à volta do raio do protão.

O enigma do raio do protão

A discrepância entre o valor do raio do protão determinada pela colaboração CREMA e os valores anteriormente aceites (CODATA) gerou grande controvérsia científica desde a sua publicação em 2010. A experiência realizada no PSI fornece um teste rigoroso à teoria QED. Apesar desta teoria ter fornecido as mais precisas previsões numéricas de qualquer teoria física, este novo resultado experimental pode indiciar nova física não prevista na teoria. A medida efetuada pela colaboração CREMA usa um novo método mais sensível do que os métodos anteriores, mas origina um resultado muito discrepante, pondo em dúvida os cálculos de QED subja-

centes a ambos os métodos.

A origem da discrepância não é ainda conhecida. O método de dispersão eletrónica é em princípio mais direto, mas a interpretação dos dados é duvidosa. Em ambos os casos, H e μp , são necessários cálculos detalhados de QED para deduzir o raio do protão a partir dos dados experimentais. Outras questões que têm sido abordadas tendo em vista a solução deste enigma são a estrutura do protão, a constante de Rydberg e a possibilidade de nova Física.

Vários estudos confirmaram a teoria do desvio de Lamb no hidrogênio muônico, em particular as contribuições da estrutura do protão. O efeito da forma da distribuição de carga foi posto de lado uma vez que o efeito é muito pequeno relativamente à discrepância obtida. Por outro lado, sendo a constante de Rydberg necessária para deduzir o raio do protão a partir da transição 1S-2S no átomo H, tem havido um esforço intenso para melhorar a determinação daquela constante de modo a verificar os desvios sistemáticos observados nas medidas anteriores.

Foram realizadas novas medições de dispersão eletrónica no átomo de hidrogênio, originando valores do raio do protão em discordância com o valor obtido com hidrogênio muônico [4,5]. Novas medições espectroscópicas no átomo de hidrogênio estão igualmente em curso em vários centros de investigação. Do lado teórico, tem havido muita atividade na tentativa de explicar a discrepância. Uma das hipóteses mais frequentes sugere que a interação muão-protão é diferente da interação elétron-protão, portanto nova Física para além do Modelo Padrão. Esta hipótese mantém-se contudo pouco provável devido à multiplicidade de experiências de baixa energia já realizadas com diversas partículas [6]. Contudo, foram propostos modelos usando novos transportadores de força entre o muão e o protão, podendo explicar o enigma sem criar conflito com as observações experimentais [6,7].

Uma experiência de dispersão de muões no hidrogênio está a ser planeada no PSI, com potencialidade para esclarecer a hipótese anterior. E a espectroscopia de átomos muônicos prossegue, estando em curso a montagem da experiência de espectroscopia laser no hélio muônico, pela mesma equipa de investigação (colaboração CREMA), onde se pretende medir o desvio de Lamb no hélio muônico até final do corrente ano.



Luis M. P. Fernandes

Licenciado em Engenharia Física em 1999 e Doutorado em Física, especialidade de Física Tecnológica, desde 2005, é atualmente investigador auxiliar no Centro de Instrumentação da Universidade de Coimbra.

A sua atividade de investigação está relacionada com o desenvolvimento de detectores gasosos e de estado sólido para detecção de radiação. Desde o início do seu doutoramento dedicou muito tempo à colaboração CREMA, que concluiu com êxito em 2009 a medida do desvio de Lamb no hidrogénio muónico, experiência que vinha a ser preparada há dez anos. Foi o investigador responsável por dois projetos financiados pelo FEDER e pela FCT no âmbito da colaboração CREMA, sendo atualmente o investigador responsável pelo novo projeto para a espectroscopia laser no hélio muónico.

Referências

1. W.E. Lamb Jr. e R.C. Retherford, "Fine structure of the hydrogen atom by a microwave method", *Phys. Rev.* 72, 241-243 (1947).
2. R. Pohl *et al.*, "The size of the proton", *Nature* 466, 213-216 (2010).
3. A. Antognini *et al.*, "Proton structure from the measurement of 2S-2P transition frequencies of muonic hydrogen", *Science* 39, 417-420 (2013).
4. J.C. Bernauer *et al.*, "High-precision determination of the electric and magnetic form factors of the proton", *Phys. Rev. Lett.* 105, 242001 (2010).
5. X. Zhan *et al.*, "High-precision measurement of the proton elastic form factor ratio $\mu p_{GE}/GM$ at low Q^2 ", *Phys. Lett. B* 705, 59-64 (2011).
6. C.E. Carlson e B.C. Rislow, "New physics and the proton radius problem", *Phys. Rev. D* 86, 035013 (2012).
7. B. Batell, D. McKeen e M. Pospelov, "New parity-violating muonic forces and the proton charge radius", *Phys. Rev. Lett.* 107, 011803 (2011).