

O PROTÃO É, AFINAL, MAIS PEQUENO!

Joaquim Santos

Centro de Instrumentação - Departamento de Física da Universidade de Coimbra, Grupo de Instrumentação Atómica e Nuclear, Rua Larga, 3004 516 Coimbra

jmf@gian.fis.uc.pt

<http://gian.fis.uc.pt/pt/index.html>

Uma equipa internacional de investigadores (<https://muhy.web.psi.ch/wiki/>), da qual faz parte um grupo de investigadores portugueses das universidades de Coimbra e Aveiro, verificou que o protão é, afinal, mais pequeno do que o assumido até agora pela comunidade científica. Este resultado surpreendente foi obtido numa experiência com um nível de precisão sem precedentes e foi publicado em Julho passado na prestigiada revista Nature [1], tendo sido escolhido para capa da referida revista.

O protão, um dos constituintes básicos de toda a matéria, é, na realidade, mais pequeno do que se pensava. O valor obtido nesta experiência para o raio do protão é dez vezes mais preciso mas, surpreendentemente, 4% menor do que o valor assumido até agora. As consequências desta discrepância estão ainda por esclarecer, não se sabendo actualmente qual o alcance das suas implicações na Física, podendo, no limite, vir a questionar a validade de uma das teorias fundamentais mais sólidas ou fazer alterar o valor da constante física fundamental de maior precisão, a constante de Rydberg.

O hidrogénio é o mais simples de todos os átomos, pois consiste num único protão à volta do qual orbita um único electrão. Dada a sua simplicidade, o átomo de hidrogénio é o melhor objecto para a investigação de questões de base da Física Quântica.

A teoria da Electrodinâmica Quântica, que descreve a interacção entre a luz e a matéria, fornece previsões sobre propriedades atómicas com elevada precisão. O conhecimento, com elevada precisão, do tamanho do protão, em especial o seu raio de carga, é o factor limitativo para a comparação entre os valores medidos em experiências de espectroscopia atómica e aquela teoria. Até ao presente, o valor aceite pela comunidade científica para o raio do protão é conhecido com uma precisão de apenas 1%, obtido a partir de experiências de espectroscopia do átomo de hidrogénio.

A presente colaboração tinha como objectivo melhorar dez vezes a precisão do raio de carga do protão, através da implementação de uma experiência de tal modo arrojada tecnicamente. No átomo de hidrogénio, o electrão foi substi-

tuído por uma partícula semelhante mas 200 vezes mais pesada, o muão. Este facto implica que a órbita do muão se encontre 200 vezes mais próxima do protão, incrementando deste modo o efeito do tamanho do protão nos resultados de espectroscopia do hidrogénio muónico.

Desde os anos 70 que investigadores do Paul Scherrer Institute, na Suíça, perseguiram o objectivo de determinar o raio do protão utilizando hidrogénio muónico. No entanto, foram necessários 40 anos para que a concepção dessa ideia pudesse vir a ser materializada, devido ao facto de terem que ser ultrapassados muitos desafios técnicos e experimentais, entre os quais o facto de o muão ser uma partícula instável e sobreviver apenas durante cerca de dois milionésimos de segundo. A concretização deste sonho foi finalmente possível com a agregação de várias equipas em que cada uma contribuiu com a sua especialização nas áreas de Física de Aceleradores, Física Atómica, Física dos Lasers e Física dos Detectores de Radiação.

A equipa portuguesa, coordenada por elementos do Centro de Instrumentação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, foi responsável pelo sistema de detecção de raios-x, um dos sistemas pilares da experiência e teve um papel importante no desenvolvimento do sistema de aquisição e processamento dos sinais desses detectores. No início, foi convidada a participar nesta colaboração para implementar detectores de raios-x de baixa energia, que haviam sido desenvolvidos e estudados em detalhe no Centro de Instrumentação. Estes estudos haviam sido realizados no âmbito dos trabalhos de doutoramento do aluno João Veloso, agora Professor da Universidade de Aveiro. A compactidade, área de detecção elevada e excelente resolução em energia eram bons argumentos para a sua utilização na experiência. Contudo, a partir de 2002, a colaboração acabou por optar pela utilização de detectores

de fotodíodos de avalanche já existentes no mercado e também então em estudo no nosso Centro, no âmbito dos trabalhos de doutoramento do aluno Luís Fernandes, agora Investigador da FCTUC. A maior compactidade e simplicidade de operação dos fotodíodos de avalanche foram os argumentos decisivos para a sua escolha, mesmo sacrificando em parte a área de detecção e a resolução em energia. Desde então foram optimizados vários parâmetros experimentais de modo a obter-se um melhor desempenho deste tipo de detectores. O desempenho do sistema de detecção de raios-x foi notável, o que contribuiu significativamente para o sucesso da experiência.

Em 2002, 2003 e 2007 foram encetadas tentativas infrutíferas. Pensou-se que o sistema laser não era suficientemente rápido e potente. Concluiu-se, a

Cortesia de Macmillan Publishers Ltd.
(Nature, copyright 2010)



posteriori, que se tinha estado a emitir impulsos de laser com a frequência errada, pois tinham por base o valor até então conhecido para o raio do protão. A descoberta deu-se no verão de 2009. Após três meses de montagem intensiva de todo o sistema experimental e três semanas de recolha de dados, 24 horas por dia, na noite de 5 de Julho de 2009 decidiu-se alargar a gama de frequências do laser e finalmente pudemos observar, de forma inequívoca, o sinal há muito procurado.

Depois de uma longa e cuidada análise dos resultados, o valor obtido para o raio do protão, 0,84184 fm (1 fm = 1 femtometro = 10^{-15} m), tem uma precisão dez vezes superior à anterior, mas encontra-se em clara discordância com o valor aceite até então (0,8768 fm). As razões para esta discrepância estão a ser analisadas e discutidas pela comunidade científica. Neste momento tudo se encontra em aberto, desde as medidas anteriores de elevada precisão aos cálculos teóricos complexos e até, possivelmente, à teoria fundamental mais testada, a própria Electrodinâmica Quântica. No entanto, antes de ser questionada a validade desta teoria, têm que ser verificados alguns cálculos teóricos. Uma ajuda para o esclarecimento das dúvidas levantadas poderá ser a próxima experiência, planeada para 2012, onde esta equipa de cientistas irá investigar o hélio muónico, através da mesma técnica, para determinar o seu raio de carga. Os meios técnicos e científicos já existem para o efeito.

Participaram na colaboração 32 cientistas provenientes de três continentes. A experiência foi realizada no Paul Scherrer Institute, Suíça, devido ao facto de possuir o feixe de muões mais intenso do mundo. O sistema laser foi desenvolvido pelas equipas francesa e alemã. Os detectores de raios-x foram da responsabilidade da equipa portuguesa. O sistema electrónico de controlo foi da responsabilidade da equipa suíça. Houve ainda contribuições por parte de elementos dos Estados Unidos e de Taiwan. A equipa portuguesa é composta por oito investigadores, sendo seis investigadores do Centro de Instrumentação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra – Professor Joaquim Santos, Coordenador do CI, Doutor Luís Fernandes, Doutor José Matias (Prof. Adjunto do ISEC), Doutor João Cardoso, Mestre Fernando Amaro e Mestre Cristina Monteiro, membros do CI, e dois investigadores da Universidade de Aveiro – Professor João Veloso e Doutor Daniel Covita. Ambos os grupos portugueses são internacionalmente reconhecidos pelos seus conhecimentos e perícia na área dos detectores de radiação.

Em particular, refira-se que a equipa alemã é liderada pelo Prof. Dr. Theodor W. Hänsch, Prémio Nobel da Física em 2005.

A participação da equipa portuguesa na futura experiência de elevada relevância conta com o financiamento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), Lisboa, através do projecto PTDC/FIS/102110/2008.

Como foi medido o raio do protão

Muões de baixa energia (alguns keV), são enviados num feixe e “parados” num alvo de hidrogénio. O muão passa a ocupar uma órbita “mais interior” no átomo de hidrogénio, “empurrando” para fora o electrão e formando o hidrogénio muónico, μH . Este átomo exótico fica inicialmente num estado excitado ($N \sim 14$) e decai rapidamente (alguns ns) para o estado fundamental, levando à emissão de raios-x de 2 keV da transição 2p-1s. Contudo 1% das vezes o μH acaba no estado metaestável 2s.

Deste modo, quando um muão é parado no alvo de hidrogénio é disparado um impulso laser sobre o alvo, o qual ocupa uma cavidade óptica que é, então, varrida pelo impulso laser. Ao varrer a cavidade, os fotões do laser poderão incidir sobre o átomo de hidrogénio muónico que estiver no estado 2s e promover a transição 2s-2p, se o comprimento de onda do laser estiver em ressonância com a diferença de energias (chamada desvio de Lamb) entre aqueles dois estados. Ao atingir o estado 2p o hidrogénio muónico decai imediatamente para o estado fundamental, emitindo um raio-x com uma energia de 2 keV.

O comprimento de onda do laser é ajustável, na região das microondas. Fazendo coincidências entre o disparo do laser (que chega à cavidade umas largas centenas de ns depois do muão ser “parado” no alvo) e a detecção de raios-x de 2 keV, poderemos obter a curva de ressonância para a transição 2s-2p, medindo o número de raios-x de 2 keV detectados em coincidência com o disparo do laser. Deste modo, obtemos o valor do desvio de Lamb com um erro dado pela largura intrínseca da transição 2s-2p. O desvio de Lamb permite determinar directamente o valor do raio do protão, de acordo com as formulações teóricas desenvolvidas a partir da Electrodinâmica Quântica.

1. Randolph Pohl, Aldo Antognini, François Nez, Fernando D. Amaro, François Biraben, João M. R. Cardoso, Daniel S. Covita, Andreas Dax, Satish Dhawan, Luis M. P. Fernandes, Adolf Giesen, Thomas Graf, Theodor W. Hänsch, Paul Indelicato, Lucile Julien, Cheng-Yang Kao, Paul Knowles, Eric-Olivier Le Bigot, Yi-Wei Liu, José A. M. Lopes, Livia Ludhova, Cristina M. B. Monteiro, Françoise Mulhauser, Tobias Nebel, Paul Rabinowitz, Joaquim M. F. dos Santos, Lukas A. Schaller, Karsten Schuhmann, Catherine Schwob, David Taqqu, João F. C. A. Veloso & Franz Kottmann, “The size of the proton”, *Nature* 466 (7303), pág. 213-216 (2010).
DOI: 10.1038/nature09250