

100 anos da experiência de Stern-Gerlach

Fernando Nogueira¹, Carlos Fiolhais¹

¹ Departamento de Física, Universidade de Coimbra

Os editores da revista *Zeitschrift für Physik* receberam a 26 de agosto de 1921 um artigo escrito por Otto Stern, assistente de Max Born no Institut für theoretische Physik, da Universidade de Frankfurt am Main, no qual era proposta uma maneira de testar experimentalmente a quantização direcional no campo magnético¹. O artigo sugeria uma montagem experimental para medir o momento magnético de um átomo isolado, acompanhada de uma estimativa dos eventuais resultados da experiência. Embora só Otto Stern assinasse este artigo, uma nota de rodapé indicava que a experiência estava a ser planeada e realizada em conjunto com Walther Gerlach.

A este artigo sucederam-se mais três, todos eles assinados conjuntamente por Stern e Gerlach², recebidos pela revista entre 18 de novembro de 1921 e 1 de abril de 1922, mas publicados apenas em dezembro de 1922. Os resultados da experiência de Stern e Gerlach aparecem nos terceiro e quarto artigos, enviados com um mês de diferença aos editores, mas publicados em páginas consecutivas do volume 9 da revista: um feixe de átomos de prata que percorre uma região onde há um campo magnético não homogêneo é defletido em duas direções distintas, indicando que os átomos de prata possuem dois momentos magnéticos distintos na direção do campo (Figura 1).

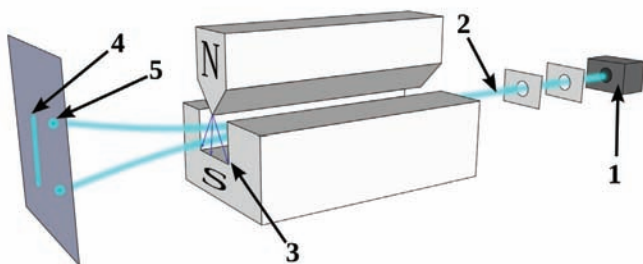


Figura 1 - Esquema da experiência de Stern-Gerlach: um feixe de átomos de prata (2) é produzido no forno (1), atravessando uma região onde há um campo magnético não homogêneo (3) e dividindo-se em vários feixes, de acordo com a teoria de Larmor (4), ou em dois feixes, de acordo com a teoria de Bohr-Sommerfeld (5).

Stern e Gerlach pretendiam provar que Niels Bohr, Arnold Sommerfeld e Peter Debye estavam errados ao propor que os elétrons num átomo se deslocavam em órbitas com um valor bem definido do momento angular. Uma carga numa órbita circular ou elíptica é equivalente a uma corrente numa espira, estando a ela associado um momento magnético proporcional ao momento angular orbital. Colocados num cam-

po magnético, os átomos deveriam interagir com ele de acordo com os valores possíveis para a componente do momento magnético atômico na direção do campo. Sendo o campo magnético não homogêneo, a interação entre este e qualquer momento magnético resulta numa força na direção do campo cujo sentido e intensidade são determinados pelo gradiente do campo e pelo valor da projeção do momento magnético na direção do campo. O feixe atômico deveria por isso dividir-se em tantos feixes quantos os valores possíveis para esta componente do momento magnético.

Caso o momento magnético dos átomos não tivesse qualquer direção preferencial, o resultado seria apenas uma mancha na região central, indicativa de uma distribuição aleatória da componente do momento magnético na direção do campo. Ora, de acordo com a teoria de Bohr-Sommerfeld-Debye, o momento angular orbital, e, portanto, o momento magnético a ele associado, estaria quantizado, isto é, $L = n \hbar$, com n um número inteiro e $\hbar$ a constante de Planck reduzida. Stern e Gerlach pensavam que um átomo de prata deveria estar num estado com $n = 1$. A hipótese de Bohr-Sommerfeld-Debye para a quantização do momento angular implicava que a componente do momento magnético na direção do campo apenas poderia ter um de dois³ valores, gerando por isso duas manchas distintas na chapa fotográfica impressionada pelos feixes emergentes dos magnetes. Esta previsão era fortemente contestada por Stern (que tinha feito em tempos um voto, com Max von Laue, de abandonar a Física caso o modelo de Bohr estivesse correto), e a experiência que imaginou tinha como objetivo provar que Bohr estava errado e que não havia, por isso, quantização espacial ou direcional. Mas a experiência dava, aparentemente, razão a Bohr (Figura 2).

No entanto, os resultados da experiência foram mal interpretados por Stern e Gerlach, que não se aperceberam que tinham descoberto algo novo (o spin do elétron). Na realidade, os átomos de prata encontram-se num estado de momento angular orbital nulo, incompatível com o aparecimento das

¹ Stern, O. Ein Weg zur experimentellen Prüfung der Richtungsquantelung im Magnetfeld. *Z. Physik* 7, 249–253 (1921). <https://doi.org/10.1007/BF01332793>.

² Gerlach, W., Stern, O. Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms. *Z. Physik* 8, 110–111 (1922). <https://doi.org/10.1007/BF01329580>;

Gerlach, W., Stern, O. Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld. *Z. Physik* 9, 349–352 (1922). <https://doi.org/10.1007/BF01326983>;

Gerlach, W., Stern, O. Das magnetische Moment des Silberatoms. *Z. Physik* 9, 353–355 (1922). <https://doi.org/10.1007/BF01326984>.

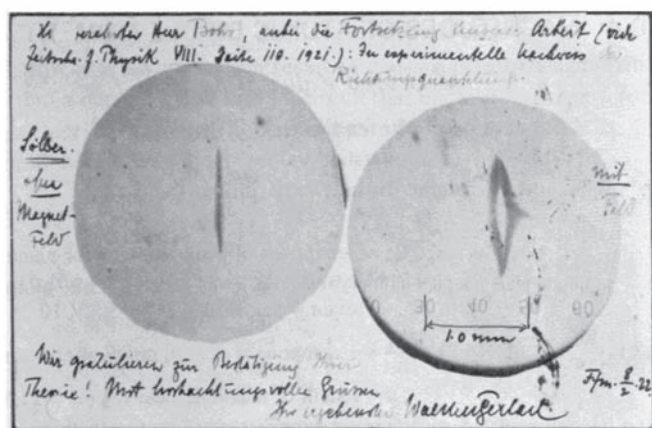


Figura 2 - Postal enviado por Walther Gerlach a Niels Bohr, comunicando o resultado da experiência e dando-lhe os parabéns por esta comprovar a sua teoria.

duas riscas sem a introdução do spin. Este facto só foi reconhecido a partir de meados dos anos de 1930⁴, mais de uma década depois da descoberta do spin por George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit em 1925. A associação do spin ao momento magnético dos átomos no estado 2S , como é o caso dos átomos de prata, já tinha sido feita em 1927 por Ronald Fraser, ao medir a forma do átomo de hidrogénio por dispersão, concluindo que este era esfericamente simétrico⁵, e tendo portanto momento angular orbital nulo. Paralelamente, Thomas Phipps e J. B. Taylor repetiram a experiência de Stern e Gerlach usando átomos de hidrogénio em vez de átomos de prata⁶, tendo obtido a mesma divisão do feixe original em duas componentes. Mas só em 1937 Fraser mencionou explicitamente o spin como sendo a origem dos resultados do artigo de 1922 de Stern e Gerlach.

Como foi então possível conciliar os resultados do modelo de Bohr com os resultados experimentais de Stern e Gerlach? Por uma feliz (ou infeliz?) coincidência de se terem cometido dois erros de sentido contrário: i) Stern e Gerlach supuseram que o momento angular dos átomos de prata tinha origem orbital e era igual a $L = \hbar$, quando, na realidade, o momento angular total dos átomos de prata se deve ao spin do eletrão de valência e é igual a $J = \hbar/2$; ii) a razão giromagnética orbital (a razão entre o momento magnético e o momento angular orbitais) é o dobro da razão giromagnética associada ao spin. Este cancelamento de fatores de 2 levou a que o resultado da experiência concordasse com o previsto pelo modelo de Bohr quer no número de riscas visíveis (descontando o momento angular orbital $m_L = 0$), quer no valor da separação entre elas. Mas impediu que Stern e Gerlach se apercebessem que tinham descoberto o spin.

Otto Stern, que se exilou nos Estados Unidos em 1933, viria a ganhar o prémio Nobel da Física em 1943 «pela sua contribuição para o desenvolvimento do método dos raios moleculares e a sua descoberta do momento magnético do próton», que está hoje na base dos exames de ressonância magnética. O seu trabalho com feixes moleculares não só foi crucial na conceção da experiência de Stern-Gerlach como lhe permitiu ser hoje considerado o pai da Física Atómica Experimental. Walther Gerlach teve um largo percurso na academia alemã, tendo mesmo dirigido a Sociedade Fraunhofer e a *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (o equivalente alemão da Fundação

para a Ciência e a Tecnologia). O mais prestigiado prémio alemão de Física Experimental é a medalha Stern-Gerlach da Sociedade Alemã de Física.

Esta experiência, realizada há um século, é hoje considerada uma das experiências fundamentais da Mecânica Quântica, sendo ensinada e discutida em todos os cursos de Física. Os mistérios da medida em Mecânica Quântica ficam bem patentes quando se consideram experiências sucessivas de Stern-Gerlach sobre o mesmo feixe, com sucessivos campos magnéticos aplicados em direções distintas. Podem, por exemplo, ser usadas para mostrar a violação das desigualdades de Bell, que estão na base dos trabalhos de John F. Clauser, Alain Aspect e Anton Zeilinger premiados com o Prémio Nobel da Física de 2022.

³ Seriam em princípio possíveis três orientações distintas para a componente do momento magnético na direção do campo externo: paralela, anti-paralela e perpendicular. Mas Niels Bohr tinha admitido que a orientação perpendicular não deveria aparecer, visto corresponder a uma situação dinamicamente instável.

⁴ Fraser, Ronald G.J. *Molecular Beams*. Methuen, London, p. 33 (1937).

⁵ Fraser, Ronald G. J. The effective cross section of the oriented hydrogen atom. *Proc. R. Soc. Lond. A* 114, 212-221 (1927). <http://doi.org/10.1098/rspa.1927.0036>.

⁶ Phipps, T.E. and Taylor, J.B. The Magnetic Moment of the Hydrogen Atom. *Phys. Rev.* 29, 309 (1927). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.29.309>.



Fernando Nogueira, é professor Associado de Física da Universidade de Coimbra. É autor de cerca de 40 artigos científicos e editor de 3 volumes da coleção "Lecture Notes in Physics" da editora Springer. O seu trabalho de investigação atual, centra-se na descoberta de novos

materiais por desenho inverso ab-initio ou recorrendo a ferramentas de cálculo de alto rendimento. Foi o responsável pelas Olimpíadas da Física entre 2007 e 2018, tendo acompanhado inúmeras equipas portuguesas às Olimpíadas Internacionais e Ibero-americanas de Física. É actualmente vice-presidente da Sociedade Portuguesa de Física.



Carlos Fiolhais, é Professor de Física aposentado da Universidade de Coimbra. É autor de 150 artigos científicos, um dos quais é o mais citado de sempre de autores em Portugal, e de inúmeros artigos pedagógicos e divulgação (muitos na "Gazeta de Física", que dirigiu).

É autor ou editor de mais de 60 livros científicos, pedagógicos e de divulgação. Recebeu vários prémios e distinções, entre as quais, a Ordem do Infante D. Henrique em 2005, Ano Internacional da Física.