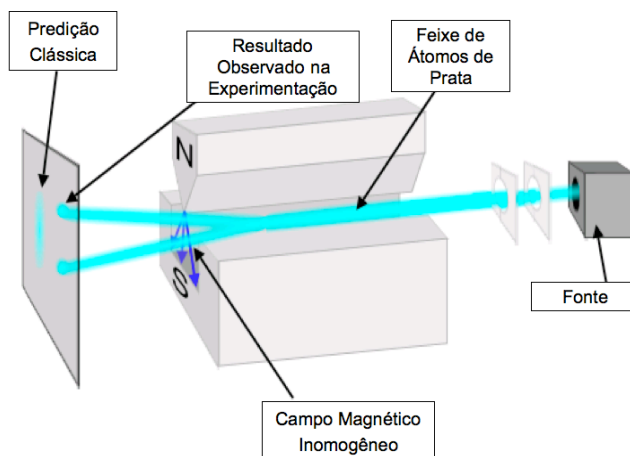


Experimento de Stern-Gerlach. No experimento de Stern-Gerlach (Otto Stern e Walther Gerlach) realizado em 1921, um feixe de átomos de prata, com momentum angular orbital nulo, passava através de um campo magnético inhomogêneo, atingindo uma placa fotográfica coberta com uma emulsão de prata. Foi observado que, quando o campo magnético era aplicado, diferentemente do que era esperado, o feixe de átomos de prata sofria deflexões, como mostrado na figura abaixo



A razão da utilização de um campo magnético inhomogêneo reside no fato que tal campo produz uma força defletora que atua nos vetores momento de dipolo magnético existentes no feixe incidente. Caso utilizássemos um campo magnético homogêneo, este campo produziria apenas um torque que atuaria nos momentos de dipolo magnético existentes no feixe incidente e não uma força defletora. Assim, na presença de um campo magnético inhomogêneo, haverá uma força F_z , tal que

$$F_z = \mu_s \times \cos(\theta) \times (\partial B / \partial z) \quad (1)$$

onde consideramos a direção z paralela à direção Sul-Norte. Nesta expressão, θ representa o ângulo entre os vetores μ_s e \mathbf{B} e $(\partial B / \partial z)$ representa o gradiente do campo magnético inhomogêneo.

Na experiência foi observado então que o feixe, quando atinge a placa fotográfica, apresenta duas subdivisões, contendo cada uma delas o mesmo número de átomos, sendo as separações do feixe situadas em posições simetricamente opostas (acima e abaixo) ao ponto que o feixe atingiria a placa, no caso em que o campo magnético é nulo. Uma vez que os átomos originais têm momenta angulares nulos e, portanto, momenta de dipolo magnético, devido aos momenta angulares orbitais, também nulos, a interação magnética que produz a deflexão deve estar relacionada com algum outro tipo de momento magnético.

Spin do Elétron. Em 1925, S.A. Goudsmit e G.E. Uhlenbeck sugeriram que o elétron possui um momentum angular intrínseco, chamado de spin. O momento magnético μ_s , associado com o momentum angular intrínseco do elétron \mathbf{S} , seria o responsável pela

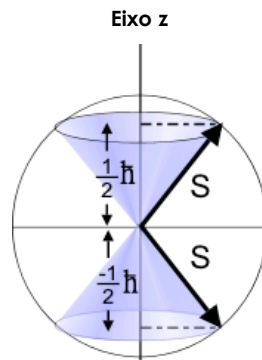
presença de uma deflexão do feixe de átomos de prata incidentes na placa fotográfica e observada no experimento de Stern-Gerlach.

Quantização da Magnitude e da Direção do Momentum Angular Intrínseco do Elétron (Momentum Angular de Spin). Similarmente ao caso do momentum angular orbital, o momentum angular intrínseco do elétron é também quantizado em sua magnitude e em sua direção. As duas linhas igualmente espaçadas observadas no experimento de Stern-Gerlach mostram que o momentum angular de spin do elétron pode assumir somente duas orientações com respeito à direção em que ocorre a impressão na emulsão fotográfica,

$$S_z = \pm \frac{1}{2} \hbar \quad (2)$$

$$S = \hbar \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + 1 \right)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar \quad (3)$$

As duas orientações de spin do elétron com respeito ao eixo z (eixo de quantização) dão origem a um novo número quântico m_s tal que $m_s = \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ de modo que a componente no eixo de quantização do spin do elétron pode ser escrita na forma $S_z = m_s \hbar$. As duas orientações do spin do elétron são usualmente denominadas, na literatura inglesa, *spin up* e *spin down*.



E similarmente ao que ocorre com o momentum angular orbital e o momento de dipolo magnético orbital, o momento de dipolo magnético intrínseco também é proporcional ao momentum angular intrínseco, na forma:

$$\boldsymbol{\mu}_s = -g_s (e/2m) \mathbf{S} \quad (4)$$

onde a constante adimensional g_s é chamada de razão giromagnética; seu valor para o elétron é $g_s = 2,002$, sendo dada, ao compararmos a relação acima com a relação correspondente do momento de dipolo magnético e do momentum angular orbital do elétron, na forma

$$g_s = (|\boldsymbol{\mu}_s| / |\mathbf{S}|) / (|\boldsymbol{\mu}_s| / |\mathbf{L}|) \quad (5)$$

Estes resultados aqui apresentados são característicos de partículas de spin $\frac{1}{2}$ como o elétron, o próton e o nêutron, denominadas de maneira geral pela terminologia *férmions*, pois obedecem a estatística quantum mecânica de Fermi-Dirac.

Problemas

1. Escreva a expressão geral que descreve a energia potencial de um elétron em um campo magnético em termos das componentes x , y e z dos vetores momento de dipolo magnético e campo magnético. Expresse as correspondentes equações que descrevem as componentes da força magnética associada ao campo magnético B , no caso da geometria da experiência de Stern-Gerlach apresentada no texto. Mostre então que $F_z = \mu_s \times \cos(\theta) \times (\partial B / \partial z)$.
2. Determine a separação máxima de um feixe de átomos de H que se movem uma distância de 20cm, com uma velocidade de $2 \times 10^5 \text{ m/s}$, em uma direção perpendicular a um campo magnético cujo gradiente é $2 \times 10^2 \text{ T/m}$. Solução: a) deslocamento para cima ou para baixo: $\Delta z = 5,54 \times 10^{-7} \text{ m}$; b) deslocamento total = $2\Delta z = 1,11 \times 10^{-6} \text{ m}$.
3. Um feixe de átomos de H, emitido por um forno à temperatura de 400° K é enviado através de um imã de Stern-Gerlach de comprimento 1m. Os átomos estão sujeitos a um campo magnético com um gradiente de 10 T/m . Calcule a deflexão transversa de um átomo típico em cada uma das duas componentes do feixe, devido à força exercida sobre seu momento de dipolo magnético de spin, no ponto onde o feixe sai do imã. Solução: $\pm 2,8 \times 10^{-3} \text{ m}$.
4. Determine a diferença de energia entre elétrons que são alinhados e elétrons anti-alinhados com um campo magnético uniforme de $0,8 \text{ T}$ no caso em que um feixe de elétrons se move em direção perpendicular ao vetor campo magnético. Solução: $9,26 \times 10^{-5} \text{ eV}$.
5. A linha de 21 cm é usada em radioastronomia para mapear galáxias. A linha é originada devido à emissão de um fóton quando um elétron em um átomo de H na galáxia sofre uma mudança de orientação de seu spin em comparação ao spin do próton do átomo de hidrogênio (no primeiro caso os spins do elétron e do próton estariam alinhados e no caso seguinte anti-alinhados). Na nomenclatura inglesa se utiliza a palavra *spin flip* para caracterizar este processo. Qual é a intensidade de campo magnético que o elétron experimenta neste processo? Solução: $0,0510 \text{ T}$.
6. Suponha que um dipolo magnético orbital, igual a 1 magnéton de Bohr, está alinhado com um campo magnético de intensidade igual a 1 T . Calcule a energia necessária para girar o dipolo magnético de modo a colocá-lo antiparalelo ao campo. Solução: $1,158 \times 10^{-4} \text{ eV}$.