

# Determinação do valor experimental do magnetão de Bohr e da relação Linear entre a intensidade do campo magnético e da separação das riscas $\pi$ e $\sigma$ .

João Bernardo Carvalho Correia

A104227

# Conteúdo

<b>Introdução .....</b>	<b>3</b>
Objetivos .....	3
Conceitos Importantes para o entendimento do trabalho .....	3
Mas o que é o Efeito Zeeman afinal? E como pode ser usado? .....	5
Contexto histórico.....	7
Montagem Experimental .....	8
Atividade Laboratorial .....	10
Procedimento experimental .....	10
Tratamento de Dados .....	11
Dificuldades .....	14
Conclusões .....	15
Bibliografia/Webliografia .....	16

# Introdução

## Objetivos

Sendo este o último trabalho da presente unidade curricular, pretende-se demonstrar as capacidades adquiridas no último semestre na UC de Física Moderna, quer no tratamento de dados experimentais, quer na capacidade de obtenção de conhecimentos.

Neste trabalho específico pretende-se calcular através de métodos experimentais o valor do magnetão de Bohr e demonstrar a relação linear entre a intensidade do campo magnético e da separação das riscas  $\pi$  e  $\sigma$ .

## Conceitos Importantes para o entendimento do trabalho

- Campo magnético e a sua interação com o campo elétrico

A experiência de indução eletromagnética de Faraday demonstra a relação entre um campo magnético variável e a geração de uma corrente elétrica induzida.

A experiência consiste num circuito simples, composto por uma bobina de fio condutor enrolada em torno de um núcleo de ferro maciço. Uma extremidade da bobina está conectada a um galvanómetro e a outra extremidade está aberta.

Quando ocorre um movimento relativo entre um íman permanente e a bobina, é gerado um fluxo magnético que é sentido no material condutor constituinte da bobina. Consequentemente, é induzida uma corrente durante o movimento com intensidade proporcional à densidade de linhas de campo do íman que atravessam a bobina. A direção da corrente depende do sentido do movimento relativo. Este processo é descrito pela lei da indução eletromagnética de Faraday.

- Polarização

A polarização de ondas refere-se à orientação da oscilação das ondas eletromagnéticas em relação à direção de propagação. Uma onda eletromagnética é composta por campos elétricos e magnéticos que oscilam perpendicularmente entre si e perpendicularmente à direção de propagação da onda. A direção de polarização de uma onda eletromagnética tem a direção do campo elétrico.

- Magnetão de Bohr

Relação magnetão de Bohr Fig.1

Os átomos por terem elétrons nas orbitais à sua volta, comportam-se como pequenos ímanes, logo têm momentos magnéticos. Tentou-se provar através da seguinte relação que este momento magnético também é quantizado, em que o  $\mu_o$  é o momento magnético, “e” é a carga do elétron, “me” é a massa do elétron e “Lo” é o momento angular do elétron. O que esta relação nos diz é que através de momento angular se gera um momento magnético. É dado em múltiplos inteiros do valor ( $9,274 \times 10^{-24} \text{ J/T}$ ) numa componente qualquer do momento magnético. O magnetão de Bohr é o quanta de momento orbital.

- Níveis e subníveis atômicos

O modelo da nuvem eletrônica, também conhecido como modelo do orbital, é uma descrição moderna do arranjo dos elétrons num átomo. De acordo com o modelo da nuvem eletrônica, os elétrons não são representados como partículas que se movem em órbitas definidas, mas sim como entidades probabilísticas que ocupam regiões específicas do espaço ao redor do núcleo. Estas regiões são chamadas de orbitais.

Uma orbital é uma função matemática que descreve a probabilidade de encontrar um elétron numa determinada posição em torno do núcleo. Os orbitais são agrupados em níveis de energia, também conhecidos como camadas eletrônicas. Os níveis de energia são camadas eletrônicas que representam diferentes níveis de energia onde os elétrons podem ser encontrados. Esses níveis são designados pelo número quântico principal (n) e são numerados a partir de 1. Quanto maior for o valor de n, maior é a energia do nível. Cada nível pode conter um ou mais subníveis.

Os subníveis de energia são subcamadas dentro de um nível e são designados pelo número quântico do momento angular (l). O valor de l está relacionado com a forma do orbital. Existem diferentes tipos de subníveis, cada um com uma forma característica. Os subníveis são representados pelas letras s, p, d e f.

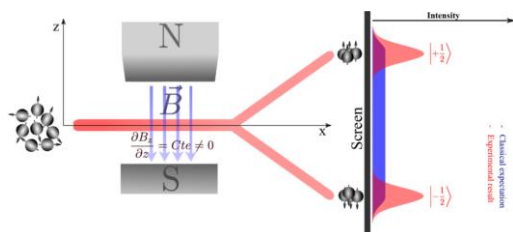
- Riscas  $\pi$  e  $\sigma$

As riscas  $\pi$  são as riscas que têm sentido paralelo à direção do campo magnético. As riscas  $\sigma$  tem sentido perpendicular à direção do campo magnético. As riscas  $\sigma$  são sempre visíveis por terem direção de polarização vertical perpendicular ao campo magnético.

- Spin

A experiência de Stern-Gerlach foi concebido para investigar as propriedades do spin das partículas, fornecendo evidências experimentais diretas para a quantização do spin.

Na experiência de Stern-Gerlach, um feixe de átomos neutros, como prata ou cobre, é direcionado através de um campo magnético não uniforme. Normalmente, o feixe de átomos é preparado de forma que as suas direções de momento angular estejam distribuídas aleatoriamente. Quando os átomos passam pelo campo magnético, o campo exerce uma força magnética no momento magnético associado ao spin dos átomos. Esperava-se que o feixe de átomos se espalhasse e se distribuisse uniformemente numa placa de deteção. No entanto, o que Stern e Gerlach observaram foi uma separação do feixe em duas direções distintas. Em vez de obter uma distribuição contínua de resultados, eles observaram apenas duas faixas discretas de partículas no detetor, uma acima e outra abaixo.



Separação de átomos na experiência de Stern-Gerlach Fig.2

A descoberta de Stern e Gerlach forneceu a primeira evidência experimental direta de que o spin das partículas é quantizado, ou seja, o spin só pode ter valores discretos. A experiência de Stern-Gerlach é considerada um marco na história da física quântica, pois mostrou que as partículas elementares têm um momento angular intrínseco e discreto chamado de spin.

## Mas o que é o Efeito Zeeman afinal? E como pode ser usado?

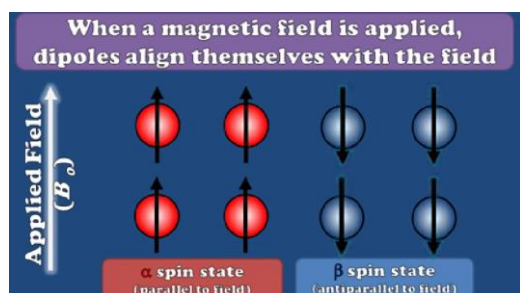
O efeito Zeeman consiste num desdobramento dos subníveis de energia de um átomo na presença de um campo magnético. Este desdobramento ocorre devido à diferença de energia que existe após a aplicação de um campo magnético dados os alinhamentos diferentes dos momentos dipolares dos elementos como demonstra a figura 2.

Podemos observar dois fenómenos diferentes, o efeito Zeeman Normal e o efeito Zeeman anómalo. O efeito Zeeman normal ocorre em átomos em que o spin total é 0,

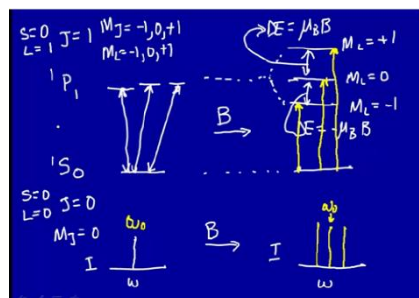
e uma risca do espectro desdobra-se em três, tal como descrito na imagem 3. Já no efeito Zeeman anômalo o spin total dos átomos não é nulo, pelo que o desdobramento ocorre em 4 riscas sendo que a original não fica visível, ao contrário do que se verifica no efeito normal, como se pode ver na figura 4. Este desdobramento pode ser considerado um desdobramento das componentes do vetor do momento angular, de número quântico  $(-l, \dots, 0, \dots, l)$ , sendo assim o número de separações igual a  $2l+1$ . A separação das componentes de  $L$  é demonstrada através da seguinte relação:

$$\Delta E_B = -\vec{\mu}_L \cdot \vec{B} = \frac{e}{2m} \cdot \vec{L} \cdot \vec{B} = \frac{e}{2m} \cdot L_z \cdot B = \frac{e}{2m} \cdot \frac{h}{2\pi} \cdot m_l \cdot B = \mu_B \cdot m_l \cdot B$$

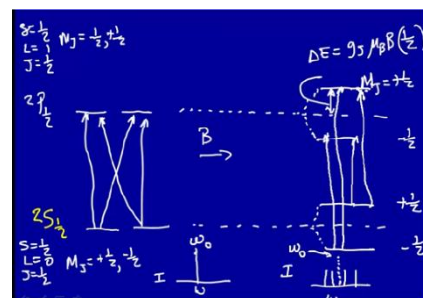
em que  $L_z$ , é a componente do momento angular no eixo da direção de  $B$ , que através do Efeito Zeeman tem direção quantizada e, dependente, do número magnético quântico,  $m_l$ , em que,  $e$  e  $m$ , são, respetivamente, a carga do eletrão e da massa do eletrão, e onde  $\mu_B = \frac{e}{2m} \cdot h \cdot 2\pi$ , designado por magnetão de Bohr, determinar o valor deste parâmetro é um dos objetivos da experiência.



Diferença no alinhamento dos dipolos. Fig3



Efeito Zeeman normal Fig.4



Efeito Zeeman anômalo Fig.5

Este efeito é usado todos os dias em campos como a astrofísica, no estudo das linhas espectrais do sol, pois o campo magnético é irregular e como as ondas luminosas vêm em todas as direções ao analisa-las vemos o desdobramento de algumas e sabemos que naquele sitio, há uma mudança no campo magnético que pode ser calculado e também na temperatura do próprio sol (que é o que causa a irregularidade magnética).

## Contexto histórico

O efeito Zeeman foi teorizado por Hendrik Lorentz e mais tarde observado por Pieter Zeeman pela primeira vez no ano de 1896, valendo-lhes assim o Prémio Nobel de 1902.

Este efeito, é visto hoje em dia como um efeito quântico, porém aquando da sua observação ainda não se tinha descoberto o eletrão (apenas um ano depois em 1897 é que Thomson o viria a descobrir), muito menos se tinha o modelo do átomo com a nuvem eletrónica e as suas transições, não se tinha conhecimento do que era um fóton, e muito menos se tinha formulado a teoria da Mecânica Quântica. Esta descoberta estava muito à frente do seu tempo e foi através da grande perícia de Zeeman que se conseguiu observar o desdobramento que na altura se atribuía à polarização da luz (será explicado com mais detalhe no próximo ponto), que confirmou a teoria de Lorentz, que conseguiu prever que algo ali se passava.

Michael Faraday, em 1845, demonstrou experimentalmente que havia uma ligação entre o magnetismo e a luz, através da rotação do plano de polarização da luz quando colocado em substâncias com um campo magnético. Mais tarde, Faraday tentou ainda observar mudanças na luz emitida por um elemento sob a influência de um campo magnético, mas sem sucesso devido à falta de evolução dos métodos experimentais da altura.

Após isto foi P.G. Tait que tentou observar alguma conexão entre os dois fenómenos, chegando à conclusão, auxiliado pelas teorias disponíveis na altura, que a explicação da teoria da polarização da luz de Faraday, se devia a uma rotação molecular das partículas no meio luminoso. Assim, ele afirmava que o raio polarizado de luz era “partido” em duas componentes polarizadas que giravam em sentidos opostos, uma com o “ether” e outra contra, ambos sobre uma linha paralela ao campo magnético. O espectro de absorção passava a ter duas riscas mais fracas que a original, porque a rotação do meio onde essas componentes da luz estavam inseridas acelerava uma e desacelerava outra, por estas girarem em sentidos opostos. As componentes separadas, ao absorverem energia com uma certa frequência, recebiam-na de maneiras iguais, mas emitiam-na com frequências diferentes, tornando-se assim o espectro de absorção de duas linhas em vez de uma.

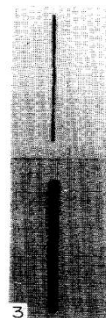
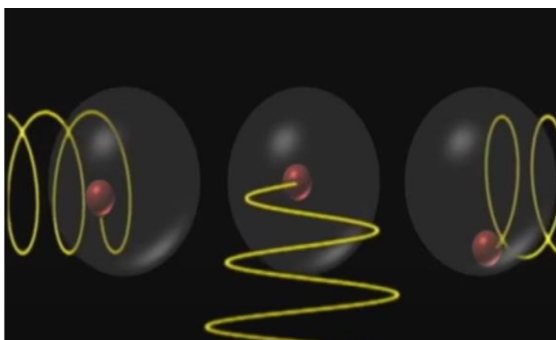


Fig.5 – Rotação em sentidos contrários das partículas de cádmio

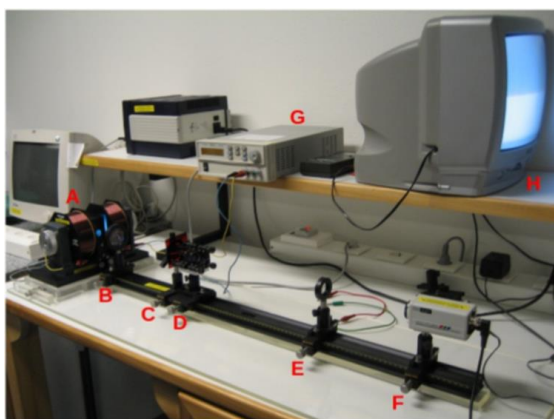
Fig.6 – Risca alargada do espectro

Zeeman, incentivado demonstrar uma correlação entre a luz e um campo magnético, de Faraday, utilizando uma montagem observar que sob a presença de um campo magnético, as linhas do espectro de sódio ficavam 3 ou 4 vezes mais grossas, simetricamente. Repetiu a experiência para o lítio e obteve os mesmos resultados, com ajuda de equipamento mais evoluído do que os seus antecessores.

## Montagem Experimental

Esta montagem, não sendo muito complexa é bem desenhada para o pretendido, substituindo o visor de espectros que Zeeman utilizou na altura, por uma televisão, através de uma camara, o que dificulta um bocadinho a leitura experimental às vezes.

O circuito e os seus componentes estão representado na figura 6 e 7 respetivamente.

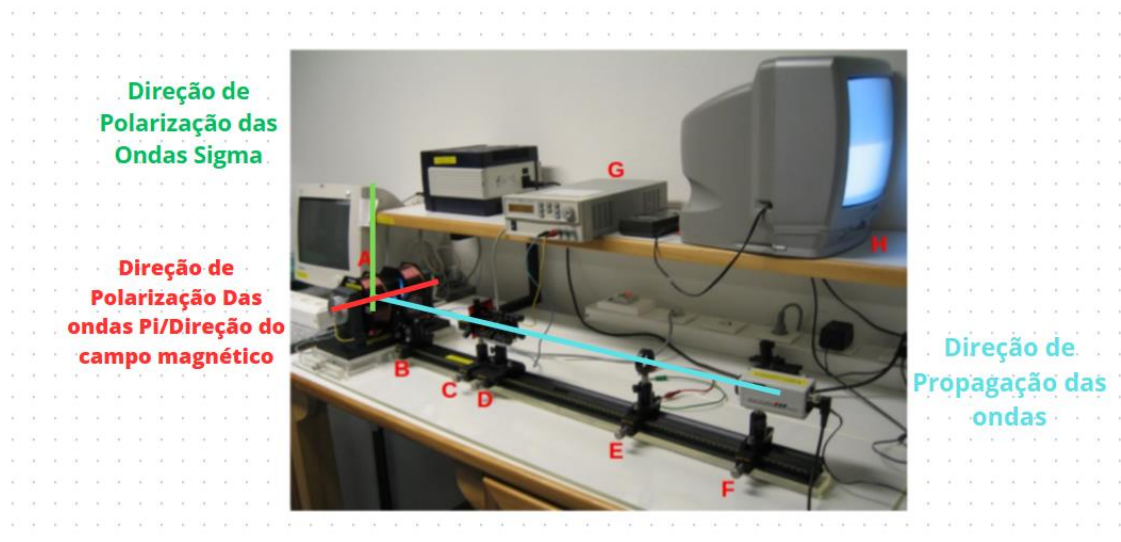


(a)	Legenda									
	A	Lâmpada de cádmio envolta pelas bobines que criam o campo magnético								
	B	Lente colimadora								
	C	Filtro colorido que permite a selecção da riscas vermelha do cádmio								
	D	Interferómetro de Fabri-Perot								
	E	Lente de focagem								
	F	Câmara digital, ligada à televisão								
	G	Fonte de tensão, que gera corrente nas bobines								
	H	Televisão para visualização do padrão de interferência								

Elementos do circuito Fig.8



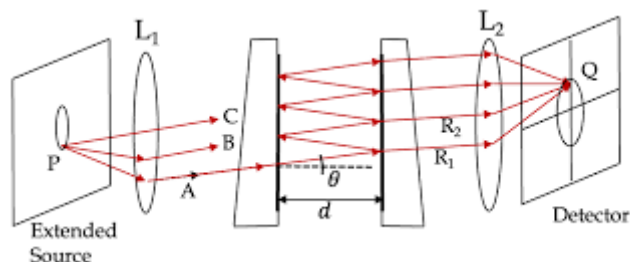
- A- Esta parte do circuito, é uma parte em que muita coisa acontece, estas bobinas ao serem estabelecidas uma diferença de potencial, através da fonte, que faz com que se gere corrente, e consequentemente um campo magnético paralelo ao eixo das bobinas. Podemos saber a direção de polarização das ondas através de uma simples análise, e como demonstrado na figura 2.



Análise da 1ª parte do circuito Fig.9

- B- Uma lente colimadora é um tipo de lente óptica projetada para tornar a luz paralela ou quase paralela. Ela é utilizada principalmente em sistemas ópticos para direcionar raios de luz de forma paralela ou para tornar feixes de luz convergentes em feixes paralelos. A função principal de uma lente colimadora é ajustar o perfil de um feixe de luz para que ele tenha uma direção e um diâmetro uniformes.
- C- É um filtro que só deixa passar radiação vermelha, para ser só um padrão de interferência.
- D- Um interferômetro de Fabry-Perot é um dispositivo ótico utilizado para medir com alta precisão os comprimentos de onda da luz. Foi inventado por Charles Fabry e Alfred Perot no final do século XIX. O interferômetro de Fabry-Perot baseia-se no fenômeno de interferência da luz. O interferômetro de Fabry-Perot consiste em dois espelhos semitransparentes e paralelos chamados espelhos de Fabry-Perot. Estes espelhos estão separados por uma pequena distância, conhecida como comprimento de cavidade. Quando a luz incide no interferômetro, parte dela reflete-se em cada um dos espelhos e parte transmite-se através deles. A luz refletida e transmitida nos espelhos de Fabry-Perot percorre trajetórias óticas diferentes dentro da cavidade. Quando estas trajetórias óticas cumprem certas condições, ocorre interferência construtiva ou destrutiva entre as ondas de luz.

refletidas e transmitidas. Isso resulta num padrão de interferência que é observado na saída do interferômetro.



Interferômetro de Fabry-Perot com lente de focagem Fig 10

- E- Uma lente de focagem é uma lente ótica utilizada para focar a luz num ponto ou numa área específica. Ela é projetada para controlar a trajetória dos raios de luz, permitindo que sejam direcionados para um ponto de convergência ou para uma região focal. Resumindo uma lente de focagem é uma lente ótica que direciona os raios de luz para um ponto focal, permitindo a formação de imagens ou o direcionamento preciso da luz num sistema ótico
- F- Esta camara permite a visualização dos acontecimentos que tomam lugar nas bobines.
- G- É o que estabelece uma diferença de potencial nas bobines para que possa ser estabelecido um campo magnético.
- H- Televisão que serve de amplificador para as ondas da lâmpada de cádmio.

## Atividade Laboratorial

### Procedimento experimental

Este procedimento começa por verificar se o circuito está corretamente ligado, nomeadamente a fonte de tensão ligada às bobines e a câmara à televisão. De seguida é necessário desligar a luz do laboratório, pois esta interfere com a radiação que provém da lâmpada de cádmio. Feito isto, liga-se a lâmpada de cádmio e observam-se as ondas sem efeito do campo magnético. Agora para testar a influência do campo magnético no espectro do átomo de cádmio, fazemos variar a corrente através da fonte de tensão. Temos de fazer isto com cuidado pois temos que medir com precisão a tensão aplicada para cada uma destas frações do espaçamento resultantes do Efeito de Zeeman entre as linhas:  $fB = 1/3$ ,  $fB = 1/2$ ,  $fB = 2/3$  (teríamos também que medir para  $fB = 1$ , mas não a fonte de tensão não consegue fornecer corrente suficiente para se conseguir efetuar a medição). Para se efetuar a medida da corrente temos de medir o valor em que o desdobramento aparece e desaparece, denominados depois no tratamento como **I mínimo** e **I máximo**. Para um melhor entendimento do que é a separação das riscas

$\pi$  e  $\sigma$ , e tendo a direção de polarização de ambas em mente, usou-se uma lente polarizadora para se observarem isoladamente estes dois tipos de riscas.

### Tratamento de Dados

Analisando o protocolo experimental fornecido, podemos constatar que temos dois objetivos, em que dois deles são atingidos a partir do tratamento de dados, a determinação do valor experimental do magnetão de Bohr, e verificar que a separação dos dois tipos de riscas,  $\pi$  e  $\sigma$ , é uma função linear da intensidade do campo magnético.

Para este primeiro é-nos recomendado pelo protocolo que utilizemos a seguinte expressão :

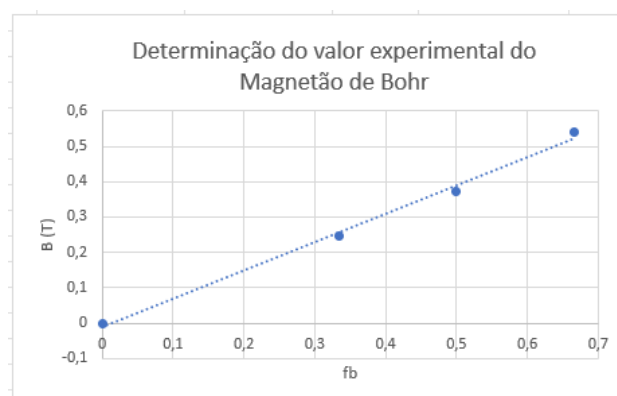
$$B = \frac{hc f_B}{2t \mu_B}$$

Se traçarmos um gráfico de B em função de  $f_B$ , podmeos concluir que o declive e consequentemente o valor do magnetão de Bohr seriam:

$$B = \frac{hc}{2t} \frac{f_B}{\mu_B} \quad (\Rightarrow) \quad \frac{B}{f_B} = \frac{hc}{2t} \times \frac{1}{\mu_B} \quad (\Rightarrow) \quad \boxed{\mu_B = \frac{hc}{2t} \times \frac{1}{\text{declive}}}$$

$$\boxed{\mu_B = \frac{hc}{2tm}}$$

O gráfico e os valores do declive e da sua incerteza foram:



m (declive)		0,797144571	-0,00929	ordenada na origem
incerteza no declive		0,042060756	0,018875	incerteza da ordenada na origem

Como temos uma ordenada na origem diferente de zero que deve ser ignorada para simplificação do cálculo do magnetão, devido à sua incerteza ordem de grandeza maior e que considera 0 como um valor provável para a ordenada.

Mas antes de determinar o valor do magnetão de Bohr precisamos de calcular a sua incerteza, da seguinte forma:

$y = \mu_B$   
 $x = m$   
 $\mu_B = \frac{hc}{2t} \frac{1}{m} \Rightarrow y = Kx^{-1}$   
 $\Delta y = \left| \frac{dy}{dx} \right| \Delta x$   
 $\frac{dy}{dx} = -Kx^{-2}$   
 $\Rightarrow \Delta y = -\frac{K}{x^2} \Delta x$   
 $\Rightarrow \Delta y = \left( -\frac{K}{x^2} \right) \frac{\Delta x}{x}$   
 $\Rightarrow \frac{\Delta y}{y} = \frac{\Delta x}{x}$  Incertezgas Relativas  
 Incertezga no  $\mu_B$ :  
 $\Delta y = \frac{\Delta x}{x} \times y$

O intervalo de valores que representa o valor experimental do magnetão de Bohr será portanto:

$(\hbar^*e)/(2*m)$	$(h*c)/(2tm)$	
$\mu_B$ (teórico) (J*T)	$\mu_B$ (experimental) (J*T)	incerteza $\mu_B$
9,26E-24	9,2E-24	5E-25
8,8E-24	< $\mu_B$ (experimental)<	9,8E-24
	↓	
	$(9,2 \pm 0,5) * 10^{-24}$	

Com o primeiro objetivo concluído, passamos agora para o 2º, onde tentaremos demonstrar da relação entre a intensidade do campo magnético e da separação das riscas  $\pi$  e  $\sigma$ .

Para isso é-nos dado a relação para calcular a  $f$  e o  $\lambda_B$ , sendo que  $f_0$  e  $\lambda_0$  já são fornecidos no protocolo:

$$v_B = \frac{c}{\lambda_B} = c \frac{\frac{2t}{\lambda_0} + f_B}{2t} = v_0 + \frac{c}{2t} f_B \quad \Delta v = v_B - v_0 = \frac{c}{2t} f_B$$

A partir disto, organizamos os valores numa tabela, para que a sua leitura seja facilitada:

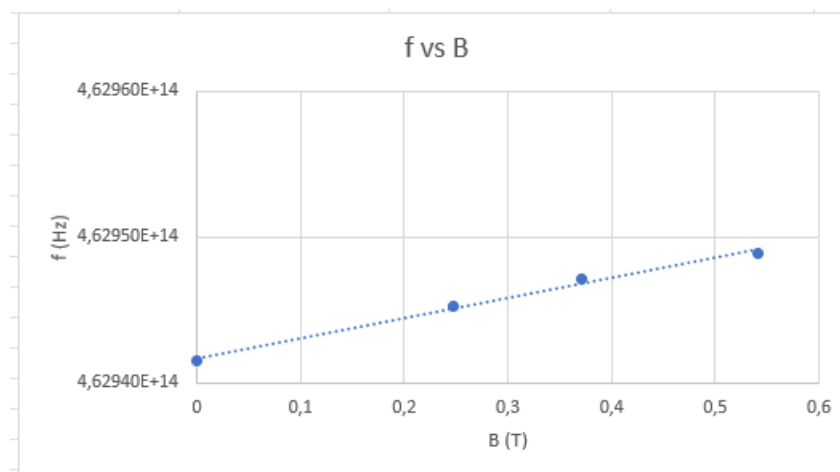
				0,17*I med	c/(2t)*fb	f0+delta f	c/f	λ-λ0
fb	I min (A)	I med (A)	I max (A)	B (T)	Delta f	f (Hz)	λ (m)	Delta λ
0					0	0	4,6294153048E+14	6,480300000E-07
1/3	1,367	1,4535	1,540	0,247095	3,7037E+09	4,6294523419E+14	6,480248156E-07	-5,184438534E-12
1/2	2,095	2,181	2,267	0,37077	5,5556E+09	4,6294708604E+14	6,480222234E-07	-7,776626693E-12
2/3	3,067	3,1805	3,294	0,540685	7,4074E+09	4,6294893789E+14	6,480196312E-07	-1,036879411E-11
				c/2t				
				1,11E+10				

As respetivas incertezas da corrente elétrica e campo magnético são  $\pm 0,005A$  e  $\pm 0,0009T$ . A incerteza da corrente elétrica deve-se à instabilidade do valor de leitura do multímetro, que fazia o valor lido variar num intervalo de  $0,005A$ . Já no campo magnético através da propagação de incertezas descrita na equação :

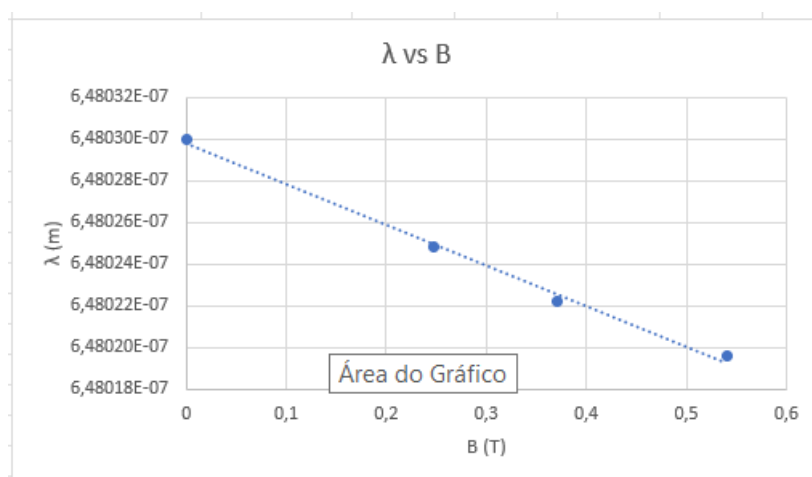
$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_i^2$$

Chegamos rapidamente ao valor de  $0,0009T$ .

Agora e auxiliados pela tabela de cima, é muito fácil traçar os gráficos de frequência e comprimento de onda em função do valor do campo magnético:



Começando pela frequência, podemos constatar que entre duas variáveis não lineares entre si, se observa uma relação de um aumento proporcional devido ao pequeno número de valores utilizado. Este gráfico com um número de valores maior seria uma hipérbole.



Já no comprimento de onda o mesmo acontece, devido ao reduzido número de valores, estas duas variáveis não lineares entre si, aparentam uma relação de decréscimo linear.

## Dificuldades

A fraca qualidade da câmara torna difícil a observação precisa do desdobramento das ondas. Por vezes a luz dos aparelhos digitais que temos inevitavelmente de usar, como os computadores, acrescenta uma dificuldade extra pois não é possível isolar tão bem essa luz.

## Conclusões

Apesar do entendimento total deste efeito ter vindo muito depois destas observações, quer para a comunidade científica quer para mim, pode se dizer que hoje em dia e depois deste trabalho, devido a todos os recursos que temos disponíveis hoje em dia que não estavam disponíveis na altura da 1ª observação.

Os objetivos deste trabalho foram alcançados com sucesso visto que me deu uma nova perspetiva sobre os efeitos que já conhecia, como a propagação de ondas e a interação do campo elétrico e do campo magnético, e serviu também para introduzir e aprofundar conhecimentos sobre outros efeitos quânticos que ainda estudarei no futuro.

Foi determinado com sucesso o valor experimental do magnetão de Bohr e verificou-se que a separação dos dois tipos de riscas,  $\pi$  e  $\sigma$ , é uma função linear da intensidade do campo magnético.

## Bibliografia/Webliografia

Estes foram todos os sites/vídeos/livros usados para a realização deste trabalho:

- Arabatzis, Theodore, “*The discovery of the Zeeman effect: a case study of the interplay between theory and experiment*”, Published by Elsevier Ltd, 1992;
- Arabatzis, Theodore, “*Histories of the electron The Birth of Microphysics*”, The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, 2001;
- <https://youtu.be/aGpFiHcqiH4>
- [https://youtu.be/xTH-ZrZ\\_u9s](https://youtu.be/xTH-ZrZ_u9s)
- [https://youtu.be/\\_fmtBkjPbsY](https://youtu.be/_fmtBkjPbsY)
- <https://youtu.be/zRUrJ5nsQ88>
- <https://youtu.be/6X9pPPY85ys>
- <https://youtu.be/WIZf4aOkNMQ>
- <https://youtu.be/v8DTF2j7SNs>
- <https://youtu.be/hBMzIzUc-Nc>
- <https://youtu.be/X42HsZC3B58>
- [Introducing ChatGPT \(openai.com\)](#)
- [Microsoft Word - protocolos LFM 2022-23.docx \(uminho.pt\)](#)