

NOVA **DIDACTA**

Sistemas Didáticos



PHYWE

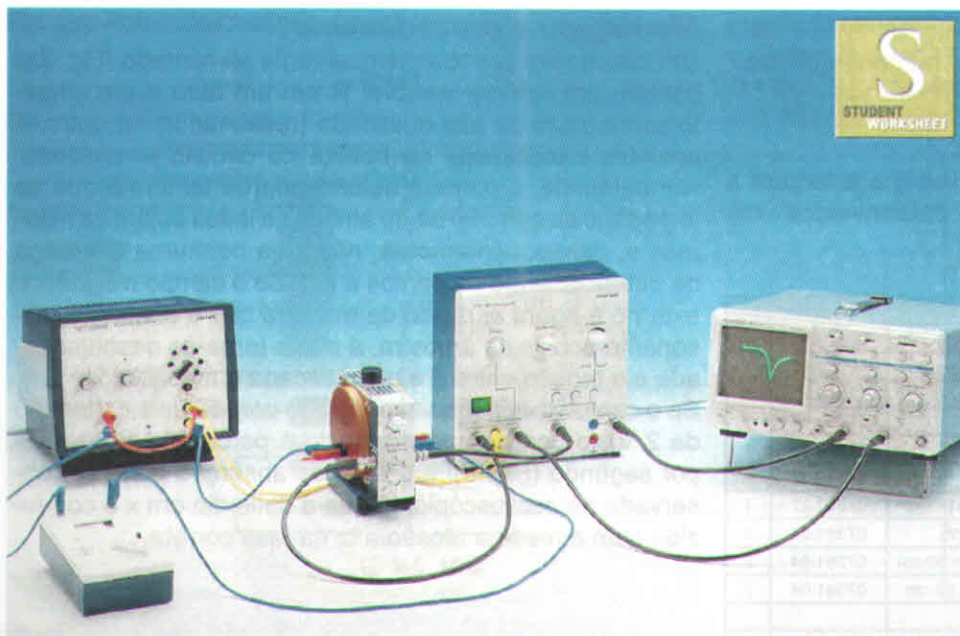
Física do Elétron

Ressonância Eletrônica de Spin

P2511200

MANUAL DO USUÁRIO

Soluções Tecnológicas



O que você pode aprender sobre este assunto...

- Efeito Zeeman
- Quantum de energia
- Número quântico
- Ressonância
- Fator g
- Fator de Landé

Princípio:

O fator g de um DPPH (Difenil-picrilhidrazil) e a largura a meia altura da linha de absorção são determinados utilizando-se o aparato ESR.

O que você necessita:			
Ressonador ESR com espiras de campo	✓	09050.00	1
Alimentação de energia do ESR	✓	09050.93	1
Alimentação de energia, universal	✓	13500.93	1
Osciloscópio 30 MHz, 2 canais	✓	11459.95	1
Multímetro digital	✓	07123.00	1
Cabo blindado, BNC, l = 750 mm	✓	07542.11	4
Adaptador soquete BNC / plugue de 4 mm, par	✓	07542.27	1
Cabo de ligação, conector de 4 mm, 32 A, azul, l = 50 cm	✓	07361.04	3
Cabo de ligação, conector de 4 mm, 32 A, vermelho, l = 50 cm	✓	07361.04	2
Cabo de ligação, conector de 4 mm, 32 A, amarelo, l = 50 cm	✓	07361.04	2
Medidor Tesla, digital	✓	13610.93	1
Sonda Hall, tangencial, capa de proteção	✓	13610.02	1
Conjunto completo do equipamento com manual incluído em um CD-ROM Ressonância eletrônica de Spin P2511200			

Tarefas:

Com o ESR sobre uma amostra de DPPH faz-se a determinação de

1. fator g de um elétron livre, e
2. a largura a meia altura da linha de absorção.

Tópicos relacionados

Efeito Zeeman, quantum de energia, número quântico, ressonância, fator g, fator de Landé.

Princípio

O fator g de um DPPH (Difenilpicrilhidrazil) e a largura a meia altura da linha de absorção são determinados utilizando-se o aparato ESR.

Equipamento		
Ressonador ESR com espiras de campo	09050.00	1
Alimentação de energia do ESR	09050.93	1
Alimentação de energia, universal	13500.93	1
Osciloscópio 30 MHz, 2 canais	11459.95	1
Multímetro digital	07123.00	1
Cabo blindado, BNC, l = 750 mm	07542.11	4
Adaptador soquete BNC / plugue de 4 mm, par	07542.27	1
Cabo de ligação, conector de 4 mm, 32 A, azul, l = 50 cm	07361.04	3
Cabo de ligação, conector de 4 mm, 32 A, vermelho, l = 50 cm	07361.04	2
Cabo de ligação, conector de 4 mm, 32 A, amarelo, l = 50 cm	07361.04	2
Opcionais:		
Medidor Tesla, digital	13610.93	1
Sonda Hall, tangencial, capa de proteção	13610.02	1

Tarefas:

Com o ESR sobre uma amostra de DPPH faz-se a determinação de

1. fator g de um elétron livre, e
2. a largura a meia altura da linha de absorção.

Montagem e procedimento

Um circuito em ponte simetricamente alimentado (Fig. 2a) contém um resistor variável R em um lado e um circuito sintonizado de alta qualidade (ressonador) no outro. A amostra é localizada na bobina do circuito sintonizado. Normalmente, a ponte é balanceada de tal forma que as impedâncias complexas de ambos os lados sejam as mesmas e, conseqüentemente, não haja nenhuma diferença de potencial entre os pontos a e b. Se o campo magnético externo é agora ajustado de maneira que a absorção ressonante ocorra na amostra, a ponte torna-se desbalanceada e a tensão entre a e b é retificada e amplificada. Se o campo magnético é modulado com 50Hz a.c. (tensão de 2 V), o ponto de ressonância é percorrido 100 vezes por segundo (Fig. 3), e o sinal de absorção pode ser observado no osciloscópio, já que a deflexão em x é conduzida com a mesma tensão a.c. na fase correta.

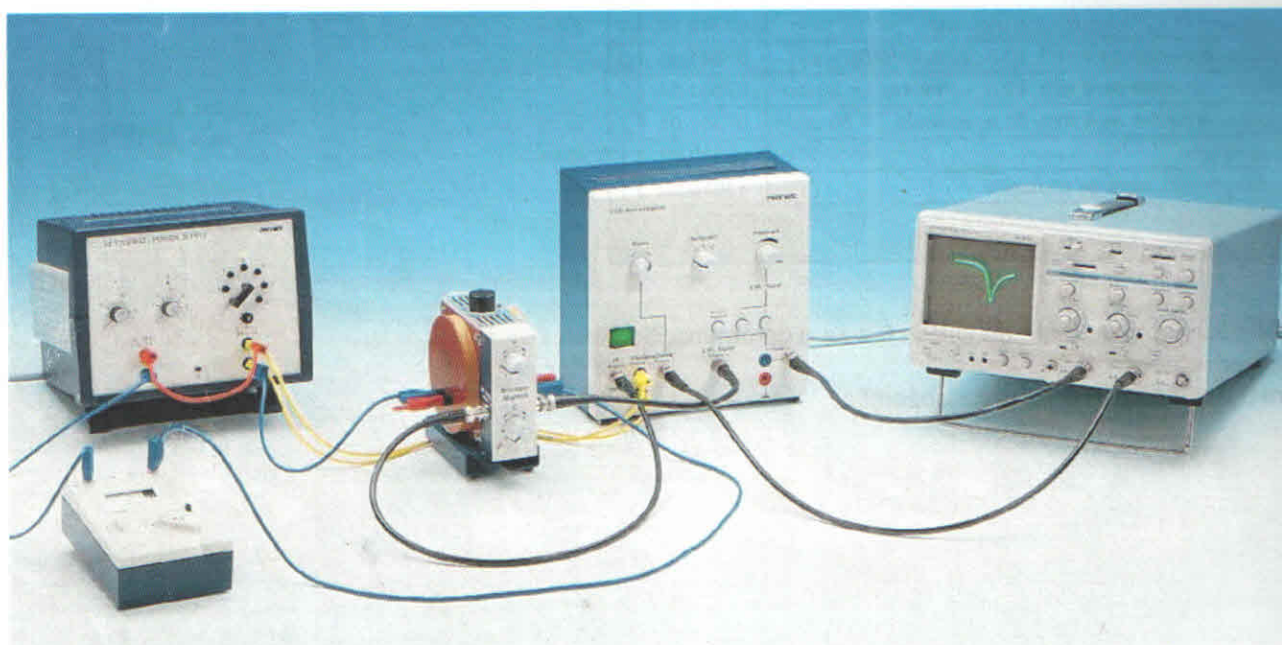


Fig. 1: Montagem experimental para determinação das curvas características.

Fig. 2a: Ponte de medição do aparato ESR.

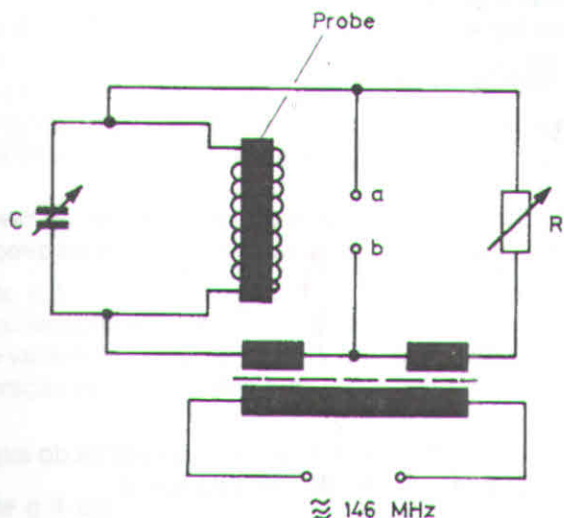


Fig. 2b: Diagrama de ligação.

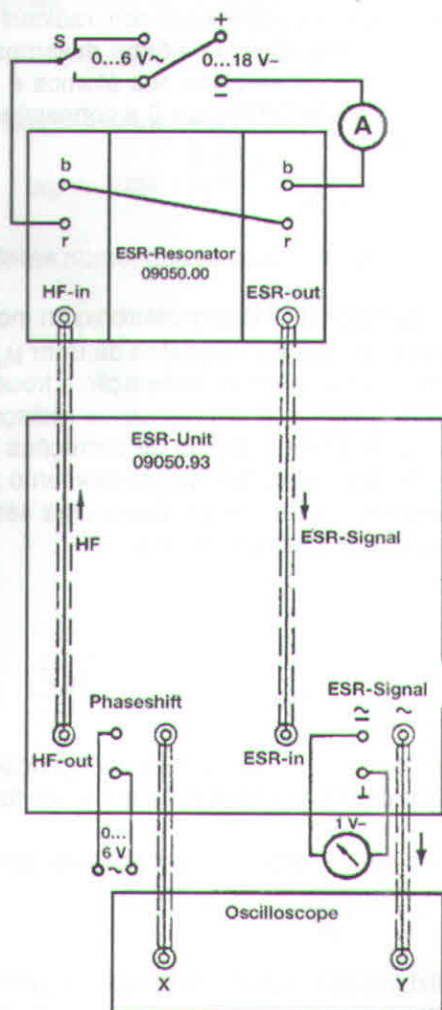
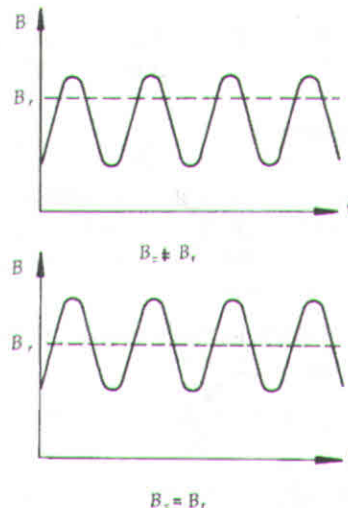


Fig. 3: O campo magnético B é composto por um campo contínuo B_z (d. c.) e um alternado B_1 (a. c.), de forma que $B = B_z + B_1$. Através de I_z , B_z é ajustado de maneira que $B_z = B_r$ (campo ressonante).



Inicialmente, a ponte necessita ser posta em equilíbrio (balanceada). Ao fazer isto (sem um campo magnético externo), "R" no ressonador é trazido para a sua posição central e "C" para o limite à esquerda. Na alimentação de energia do ESR, o botão 8 "bridge balancing" (equilíbrio da ponte) (Leia as instruções de operação) é pressionado, a entrada do osciloscópio é alterado para d.c. e sensibilidade 1 V/cm e a linha é trazida para zero com o botão 12 "Zero" (anteriormente, leve para zero com "Position" (posição) em GND no osciloscópio). Observe a Fig. 2b e as instruções de operação para executar as ligações.

Agora o sinal de absorção pode ser procurado para: a corrente da bobina é ajustada para aproximadamente 1,3 A, o botão 10 "A" é pressionado e a linha zero é novamente trazida para o centro com o botão 12. O sinal agora pode ser procurado com o botão 10 "C", enquanto o zero é continuamente corrigido com o botão 12. Assim que aparecer o sinal, ambas as linhas são levadas a se coincidir com o botão 13 "Phase" (fase). Quanto mais a frequência de ressonância do circuito sintonizado difere da frequência do oscilador, o sinal fica com uma aparência assimétrica ou de uma derivação. O ressonador deve então ser sintonizado com o botão 25 "C" até que um sinal simétrico de absorção de máxima amplitude apareça no osciloscópio. A sensibilidade do osciloscópio é aumentada de forma que o sinal atinja uma altura de 8 a 10 cm. Variando-se a corrente d.c. da bobina, o sinal pode ser trazido para o centro da tela, de forma que o mínimo fique sobre o eixo y (corrija novamente com o botão 13 "Phase" (fase) se necessário). O campo magnético ressonante B_r pode ser calculado a partir da corrente contínua I_{res} que está sendo aplicada no sistema. Se o sinal agora é ajustado de forma que o eixo x fique exatamente na metade da altura do sinal, então, uma vez que a tensão de modulação alternada foi desligada, os dois valores de corrente para os quais o ponto móvel cruza o eixo x podem ser determinados através de variações finas da corrente d.c. da bobina. A meia largura do sinal é calculada a partir da diferença entre estas correntes lidas.

Se o sinal agora é ajustado de forma que o eixo x fique exatamente na metade da altura do sinal, então, uma vez que a tensão de modulação alternada foi desligada, os dois valores de corrente para os quais o ponto móvel cruza o eixo x podem ser determinados através de variações finas da corrente d.c. da bobina. A meia largura do sinal é calculada a partir da diferença entre estas correntes lidas.

Teoria e avaliação

Se um elétron de massa m e carga e está localizado dentro de um campo eletromagnético com potencial vetor \vec{A} e potencial escalar ϕ , então os níveis de energia dos seus auto-estados e suas auto-funções são obtidos pela solução da equação de Dirac.

Se a equação é resolvida para o ψ , componente do spinor de estado, temos:

$$(\vec{\pi}^2 + \mu_B 2 \vec{S} \cdot \vec{B}) \pi_1 = \varepsilon \psi_1 \quad (1)$$

onde

$$\mu_B = \frac{eh}{2mc} \quad (\text{magnéton de Bohr})$$

$$= 9.27 \cdot 10^{-27} \text{ Am}^2$$

$$\vec{\pi} = \vec{p} + e/c \vec{A}$$

onde \vec{p} é o momento, c é a velocidade da luz, \vec{S} é o operador de spin eletrônico, e $\vec{B} = \text{raiz A}$ é o campo magnético. h é a constante de Planck

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js,}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (1 + (E/mc^2))(E - mc^2)$$

corresponde aproximadamente ao excesso de energia sobre a massa de energia residual.

Para um elétron livre dentro de um campo magnético uniforme, o segundo termo (termo de Zeeman) permuta com o primeiro no operador Hamiltoniano de (1), e o nível de energia

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \mu_B 2 S_z B_z,$$

é obtido se o eixo z coincide com a direção do campo magnético.

ε_0 corresponde à energia do elétron sem um campo magnético.

Se a contribuição diamagnética do primeiro termo de (1) é desprezada no caso geral, então para um elétron dentro de um campo magnético uniforme, o operador Hamiltoniano de interação com o campo magnético (efeito de Zeeman) é dado por

$$H_Z = \mu_B \vec{B} \cdot (\vec{L} + 2\vec{S}),$$

onde \vec{L} e \vec{S} são os operadores do momento angular orbital e de spin, respectivamente. Além disso, a interação spin-órbita

$$H_{SO} = \lambda \cdot \vec{S} \cdot \vec{L}$$

deve ser levada em consideração, de forma que somente o momento angular total

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

é um valor de conservação

Neste caso, H_Z (2) pode ser reescrito como

$$H_Z = \mu_B g_j \vec{B} \cdot \vec{J} \quad (3)$$

com o fator de Landé

$$g_j = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (4)$$

Desprezando-se a influência do spin nuclear, os níveis de energia de H_Z , para os campos magnéticos na direção Z, são

$$E_Z = \mu_B g_j B m_j$$

com

$$m_j = j, j-1, \dots, -j.$$

A regra de seleção para transições magnéticas do experimento de ressonância eletrônica de spin é

$$\Delta m_j = \pm 1$$

de forma que a condição de absorção indique

$$\mu_B g_j B = \Delta E = hf.$$

Em muitos casos, especialmente com radicais moleculares, o momento angular L do elétron desemparelhado é extinto pelos campos elétricos dos átomos e moléculas vizinhos. No caso do DPPH, $L = 0$ e conseqüentemente

$$g_j = 2.$$

Em (3),

$$\vec{\mu} = \mu_B \cdot g_j \cdot \vec{J} \quad (5)$$

é o momento magnético de um elétron com momento angular \vec{J} em unidades do magnéton de Bohr μ_B .

Se também for levada em consideração a troca de fótons virtuais entre o elétron e um campo de radiação no limite estático através da inclusão de correções de vértice em ordem crescente, obtém-se um momento magnético anormal modificado de elétron como uma série em termos da constante fina de estrutura α :

$$\alpha = \frac{e^2}{h \cdot c}$$

$$\vec{\mu} = \mu_B \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} - 0.328 \frac{\alpha^2}{\pi^2} + \dots \right) g_j \vec{J} \quad (6)$$

O fator de correção em parêntesis na equação (6) é geralmente levado em consideração em g_j , de forma que $g_j \neq 2$.

Fornecendo-se a energia correspondente, as transições podem ser induzidas entre os níveis:

$$hf = g_j \mu_B H.$$

A probabilidade de transição depende do número de ocupação e dos elementos da matriz de transformação. Os últimos são os mesmos para os processos de absorção e de emissão.

Devido às interações dos spins com a rede ou entre si, os níveis não são definidos de forma exata, e isto leva a uma largura de linha do espectro de absorção e impede a ocorrência da equiparação dos níveis (saturação) devido aos processos de relaxação correspondentes.

Os números de ocupação são fornecidos de acordo com a relação de Boltzmann através de:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{\Delta E}{kT}} = e^{-\frac{g\mu_B B}{kT}},$$

onde k é a constante de Boltzmann. É comum levar em consideração as outras interações dentro da constante g que variem linearmente com B , por exemplo, o contato da interação de Fermi (WW) com o núcleo, isto é

$$g = g_j (1 + WW),$$

onde g é específico para a substância medida e f é pre-determinado para 146 MHz pelo aparato, de forma que B deva ser variado para que a condição de ressonância seja satisfeita.

Para o campo magnético de um arranjo de Helmholtz com $w = 241$ espiras, corrente I e raio $R = 0,048$ m,

$$B = 0.6445 \cdot \mu_0 \cdot \frac{w \cdot I}{R}$$

no eixo de simetria entre as bobinas, onde

$$\mu_0 = 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{T \cdot m}{A}$$

Com os valores numéricos estabelecidos, obtém-se

$$B = 4.0642 \cdot 10^{-3} \cdot i \frac{T}{A},$$

Para o fator g , obtém-se:

$$g = 10.43 \cdot \frac{1}{B_r}; \quad g = ; B_r \text{ em Teslas}$$

ou

$$g = 2.507 \cdot \frac{1}{I_r}; \quad g = ; I_r \text{ em amperes,}$$

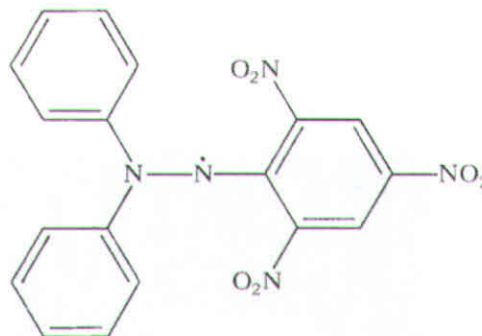
com os valores estabelecidos.

Uma corrente de ressonância de 1,245 A foi medida, correspondendo a um fator g de 2,02, e um valor de meia-largura de $2,7 \cdot 10^{-4} T$.

(Valores de literatura para DPPH: $g = 2.0037$, meia-largura de $2,8 \cdot 10^{-4} T$).

Nota

O corpo de prova analisado DPPH (Difenilpicrilhidrazil) é um material orgânico e paramagnético com um radical estável. O momento magnético da molécula é determinado somente pelo momento de spin de valência na ponte "N".



Ressonância eletrônica de Spin (ESR), experimento modelo

Experimento modelo para ressonância eletrônica de spin para demonstração clara da interação entre o momento magnético do spin do elétron com um campo magnético contínuo ou alternado sobreposto.

Uma esfera com uma haste magnética central, que gira com baixo atrito sobre um filme de ar, funciona como um modelo de elétron. Dois pares de bobinas permitem que se gere um campo magnético contínuo B_0 e um campo magnético alternado B_1 . Os eixos de ambos os campos se interceptam perpendicularmente no centro da esfera.

A mesa é levemente inclinada para dar partida no giroscópio eletrônico com um sopro de ar (efeito de Magnus). Se o campo magnético contínuo B_0 atua na esfera, uma precessão do eixo magnético é observada. A frequência de precessão aumenta com a intensidade do campo B_0 . Com um segundo par de bobinas e uma chave de alternância de pólo (comutador), um campo alternado suplementar B_1 é gerado. Se a mudança de pólos ocorre na fase correta, o ângulo entre o eixo do giroscópio e a direção do campo contínuo é continuamente aumentado, até que o eixo magnético da esfera fique em oposição à direção de campo.

Solicite uma lista completa do equipamento para o experimento número P1298000

Material		
Giroscópio com eixo magnético, modelo ESR	11208.00	1
Bobina com 1200 espiras	06515.01	4
Núcleo de aço, laminado	06500.00	2
Chave comutadora	06034.03	1
Chave liga / desliga	06034.01	1
Soprador	13770.93	1
Tubo de pressão com conector na extremidade 1,5 m	11205.01	1
Transformador variável com retificador 25V~/20V-, 12 A	13531.93	1
Cabo de ligação		8

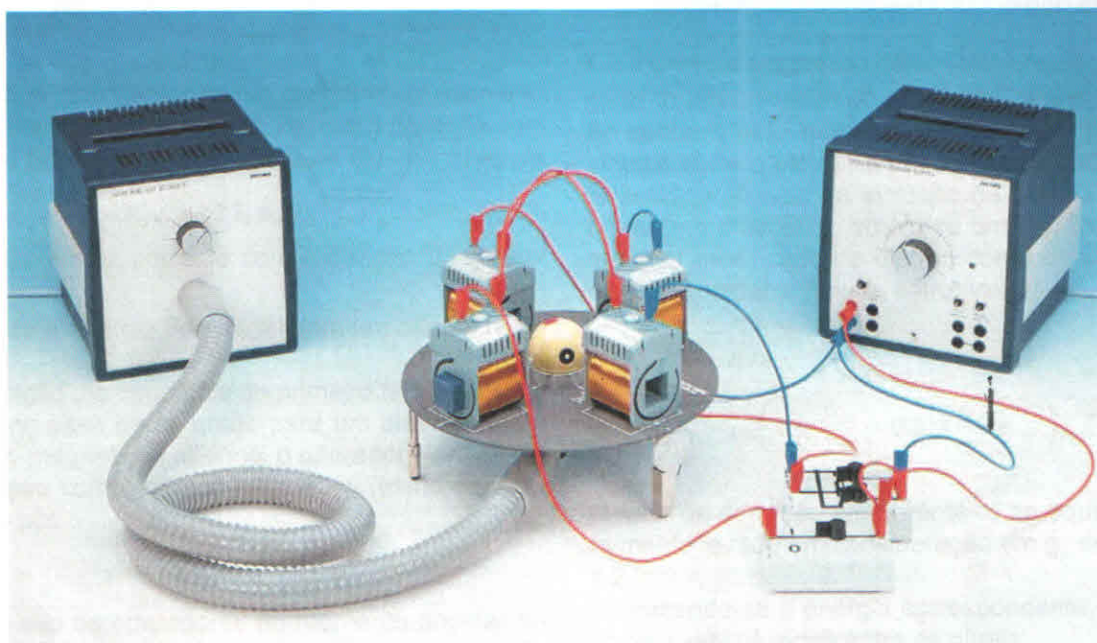


Fig. 4: Ressonância eletrônica de Spin (ESR), experimento modelo.