

# Op.155. No.12 磁化率——络合物结构的测定

孙肇远 PB22030708, Dec. 2024

University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, China

## 1. 引言

本实验基于量子力学与电动力学理论, 利用 Gouy 磁天平, 通过不同电流下的天平示数, 得到不同单电子数物质分子在磁场下所受外力, 通过理论公式与标准值得到电流对应的磁场强度, 由此算得不同物质的单电子数.

## 2. 实验

### 2.1. 实验过程

对 Gouy 磁天平调零, 并确保天平位于水平;  
使用空样品管, 使样品管底部正好与磁极中心线齐平, 记录如下操作时的质量示数: 电流由小至大, 分别为 0, 1, 2, 3, 4 A 时, 再调至 4.1 A, 由大至小, 分别为 4, 3, 2, 1, 0 A 时, 再由小至大, 分别为 0, 1, 2, 3, 4 A 时, 再调至 4.1 A, 由大至小, 分别为 4, 3, 2, 1, 0 A 时, 得到 20 组数据;  
将上述样品管装入莫尔盐, 确保高度大于 15 cm, 记录温度, 并重复上述记录数据;  
调零天平, 使用空样品管, 重复上述记录数据;  
将上述样品管装入硫酸亚铁, 确保高度大于 15 cm, 记录温度, 并重复上述记录数据;  
调零天平, 使用空样品管, 重复上述记录数据;  
将上述样品管装入亚铁氰化钾, 确保高度大于 15 cm, 记录温度, 并重复上述记录数据;  
清理台面, 关闭磁天平, 恢复初态.

## 3. 结果与讨论

以下未标明量纲的物理量, 全部默认为 SI units.

### 3.1. 实验数据

本实验中使用莫尔盐标定磁场强度, 得

电流/A	0	1	2	3	4
磁场强度/(A/m)	0	0.1031849	0.2000372	0.2959238	0.3899906

Table 1. 各电流强度对应的磁场强度

随后算得

物质	$\chi_M$	$n$	晶体场理论下的 $n$
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.117436	4.3	4
$\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-0.002145	-0.30	0

Table 2. 实验结果与理论值

### 3.2. 结果讨论

本实验中, 在取最近整数的意义下, 可认为实验值与理论值相符.

然而仍需注意的是, 我们并未考虑轨道磁矩, 通常它是电子自旋磁矩的小量.

P.S. 实验的教学文档上使用大量 Gaussian units, 但是并未说明, 这导致计算时量纲还需要自行考虑, 本文中全部转换为 SI units, 因此公式上会略有差别.

P.P.S. 教学文档上的 Boltzmann 常数  $k_B = 1.386\text{e} - 16 \text{ erg/K}$ , 这显然是不对的, 本文中使用了标准值  $k_B = 1.380649\text{e} - 23$ .

### 3.3. 误差分析讨论

本实验可能误差如下:

- 1° 认为样品上端磁场为 0, 而事实上磁场强度只有在无穷远处才能做到为 0;
- 2° 在不忽略高次项的情况下, 我们发现不同励磁电流下, 物质的摩尔磁化率会发生改变;
- 3° 由于调节电流时存在剩磁现象, 我们虽然采用取平均值的方法来降低影响, 但还是不可避免地会带来误差;
- 4° 硫酸亚铁有较强的还原性, 可以被空气氧化, 因此其极有可能在实验中被氧化为  $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$  存在 5 个单电子, 可能这是导致测量得到的未成对电子数比 4 大的主要原因;
- 5° 实验中样品长度的称量很难保证准确, 也会在后续计算中引入误差;
- 6° 由于仪器精度问题, 实际上每次测定的励磁电流都不能保证非常准确, 即存在 0.1 A 的误差;
- 7° 温度偏差较大, 可实时影响磁矩.

可能可行的改进方式:

- 1° 真空储存或充氮气储存七水合硫酸亚铁, 并使硫酸亚铁在研磨后立即装管测量;
- 2° 打开恒温空调;
- 3° 多组测量样品长度.

### 3.4. 实验体会与认识

通过本次实验, 我们对电动力学与量子力学内容有了更加深刻的认识, 了解并掌握了通过测量质量表征磁场强度, 从而计算磁矩的方法, 增进了对电子自旋学理解, 同时掌握了相关数据需要如何处理, 收获较大.

## 4. 附件

### 4.1. 原始数据处理

#### ■ Notation 1.

我们约定莫尔盐, 硫酸亚铁, 亚铁氰化钾分别记为 1, 2, 3;  
相应空管质量记  $W_0^i$ , 包括样品的质量记  $W^i$ ,  
其都为电流强度的函数, 有时可加括号作为映射.

数据处理默认 SI units,  $g = 9.8$ .

#### 4.1.1. 标定磁场强度

根据关系式

$$\chi_M^i = \frac{2(\Delta W^i - \Delta W_0^i)ghM}{(W^i - W_0^i)H^2}, \quad [1]$$

$$\chi_M = \chi_m M, \quad [2]$$

$$\chi_m^1 = \frac{95}{T+1}, \quad [3]$$

可解得磁场强度

$$H = \sqrt{\frac{2(\Delta W^1 - \Delta W_0^1)gh}{(W^1 - W_0^1) \times \frac{95}{T+1}}}, \quad [4]$$

得到下表

电流/A	0	1	2	3	4
磁场强度/(A/m)	0	0.1031849	0.2000372	0.2959238	0.3899906

Table 3. 各电流强度对应的磁场强度

#### 4.1.2. 硫酸亚铁

代入  $M = 278.032$  g/mol,  $h = 15.89$  cm,

$$\chi_M^i = \frac{2(\Delta W^i - \Delta W_0^i)ghM}{(W^i - W_0^i)H^2}, \quad [5]$$

得

$I$	1	2	3	4
$\chi_M$	0.118133	0.117135	0.117525	0.11695

Table 4.  $\chi_M \sim I$ :  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , SI units

根据关系式

$$n(n+2) = \frac{3k_B T \chi_M}{N_A \beta^2}, \quad [6]$$

$$\beta = \frac{he}{4\pi m_e} \implies \quad [7]$$

$$n(n+2) = 0.79968 T \chi_M, \quad [8]$$

此时  $T = 273.15 + 19 = 292.15$  K,  $\langle \chi_M^2 \rangle = 0.117436$ , 故有  $n^2 = 4.3$ .

#### 4.1.3. 亚铁氰化钾

代入  $M = 422.418$  g/mol,  $h = 15.75$  cm,

$$\chi_M^i = \frac{2(\Delta W^i - \Delta W_0^i)ghM}{(W^i - W_0^i)H^2}, \quad [9]$$

得

$I$	1	2	3	4
$\chi_M$	-0.00227	-0.00261	-0.00181	-0.00189

Table 5.  $\chi_M \sim I$  :  $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ , SI units

根据关系式

$$n(n+2) = 0.79968 T \chi_M, \quad [10]$$

此时  $T = 273.15 + 20.8 = 293.95$  K,  $\langle \chi_M^3 \rangle = -0.002145$ , 故有  $n^3 = -0.30$ .

## 4.2. 原始数据

夏尔达 No. 1

点	点号	点号	点号	点号	T/°C
0	26.3338	3342	3341	3338	g
1	3337	3336	3337	3334	
2	3329	3331	3331	3325	
3	3319	3319	3319	3315	
4	3305	3304	3303	3302	

夏尔达样品 h: 15.30 cm → 15.24 cm

0	37.8721	8718	8718	8718	
1	8846	8851	8844	8850	
2	9199	9209	9208	9218	
3	9789	9803	9795	9805	
4	38.0596	0601	0620	0616	20.5

Fig. 6. 原始数据记录

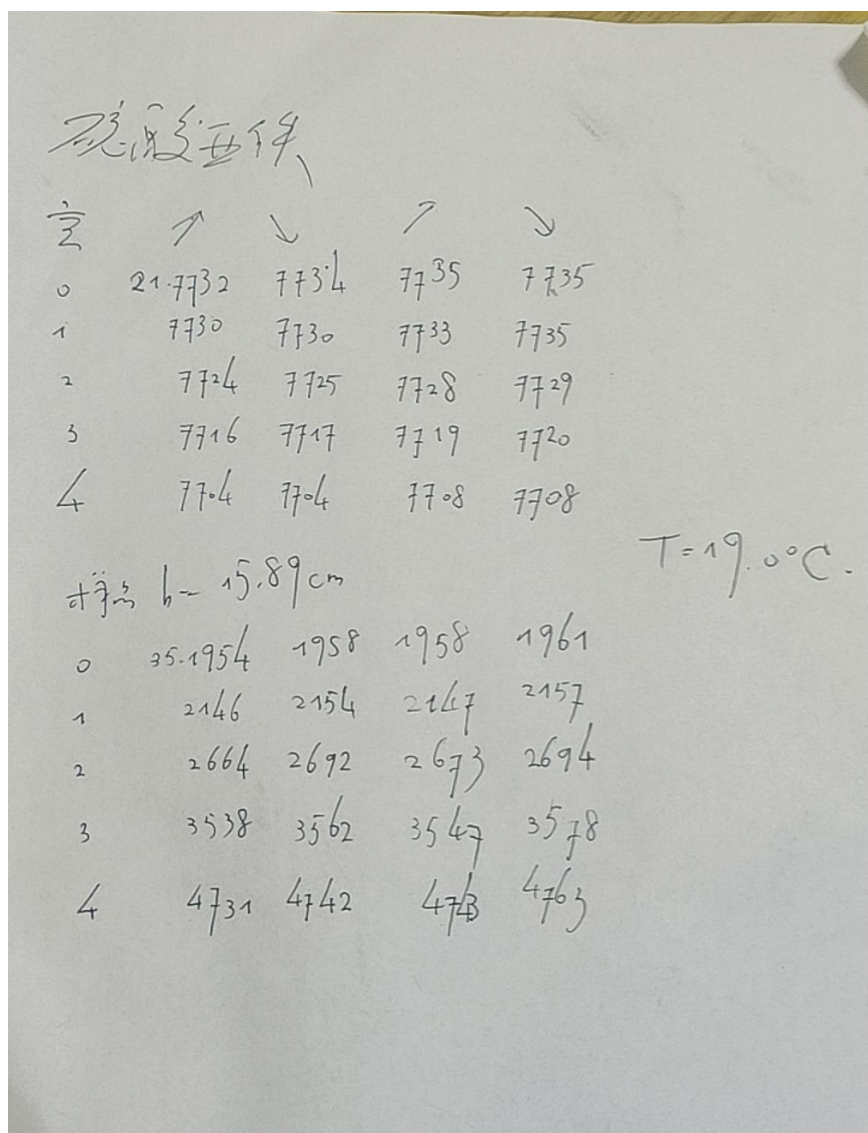


Fig. 7. 原始数据记录

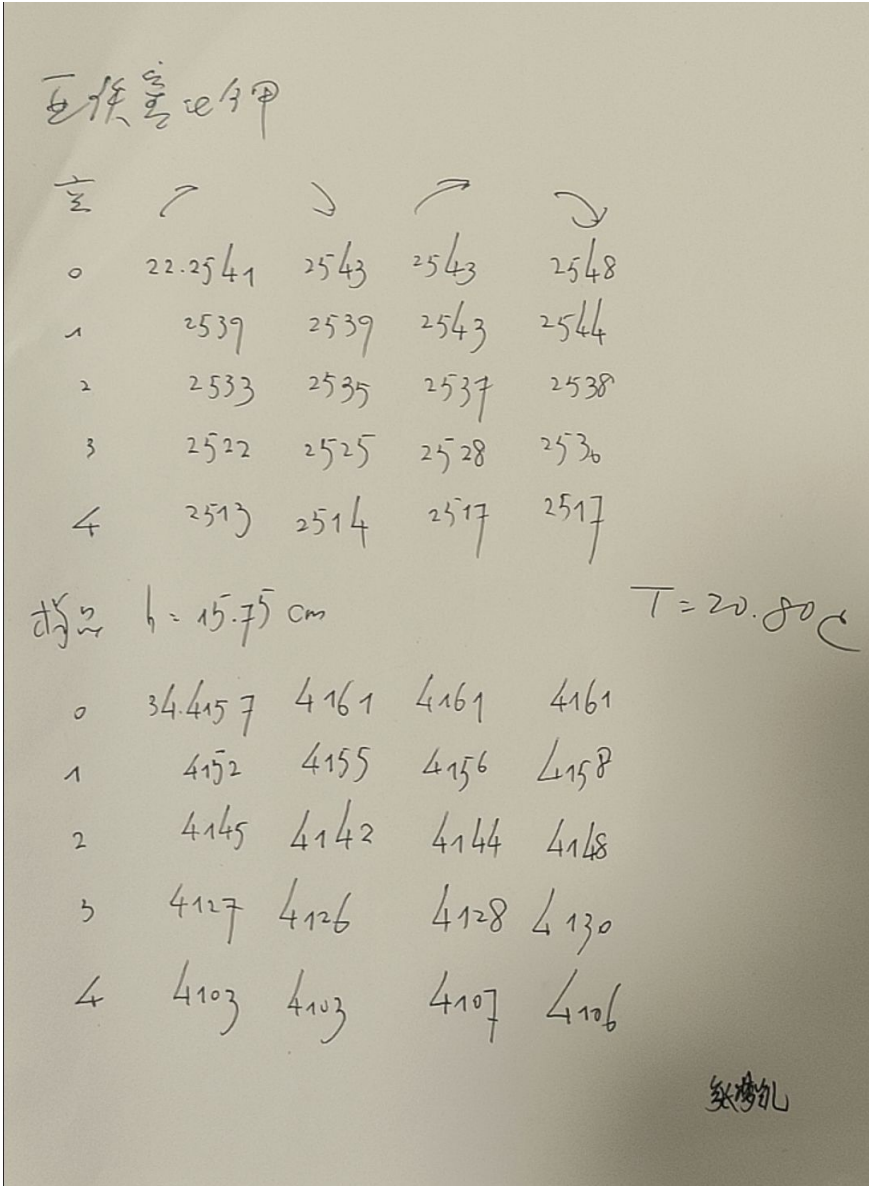


Fig. 8. 原始数据记录

A (X)	B (Y)	C (Y)	D (Y)	E (Y)	F (Y)	G (Y)	H (Y)	I (Y)	J (Y)	K (Y)	L (Y)	M (Y)	N (Y)
										H			
				(A+B+C+D)/40000+22.25					(F+G+H+I)/40000+34.41		E-E1	J-J1	2*(M-L)*9.8
41	43	43	48	22.25438	57	61	61	61	34.416	0	0	0	—
39	39	43	44	22.25413	52	55	56	58	34.41553	0.10318	-2.5E-4	-4.75E-4	-0.00227
33	35	47	38	22.25383	45	42	44	48	34.41448	0.20004	-5.5E-4	-0.00153	-0.00261
22	25	28	30	22.25263	27	26	28	30	34.41278	0.29592	-0.00175	-0.00323	-0.00181
13	14	17	17	22.25153	3	3	7	6	34.41048	0.38999	-0.00285	-0.00552	-0.00189

Fig. 9. 转化为 origin 中的数据节选