



北京大学
PEKING UNIVERSITY

磁化率的测定

刘松瑞 2100011819

组号：24 组内编号：5

化学与分子工程学院

实验日期：2023 年 12 月 7 日

温度：20.6 °C

大气压强：99.70 kPa

摘要： 本实验采用 Guoy 磁天平法，并以莫尔盐为标准样品，在室温 21.9 °C 下，测得了计算得到硫酸铜的摩尔磁化率 $1.93 \pm 0.04 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，亚铁氰化钾的摩尔磁化率 $-0.1 \pm 0.1 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，样品的比磁化率 $1.75 \pm 0.04 \times 10^{-7} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。计算分析得到硫酸铜的分子磁矩为 $1.89 \mu\text{B}$ ，有一个不成对电子；亚铁氰化钾为反磁性物质，没有不成对电子。实验的主要误差来自于质量变化的测量误差。

关键词： Guoy 磁天平法 硫酸铜 磁化率 亚铁氰化钾

1 引言

1.1 实验目的、原理与方法

1.1.1 实验目的

1. 掌握 Guoy 磁天平法测定磁化率的原理与方法。
2. 利用 Guoy 磁天平测定几种固体物质的磁化率，计算其摩尔磁化率，并估算离子的不成对数。

1.1.2 实验原理与方法

实验原理与方法详见预习报告图 1。^[1]

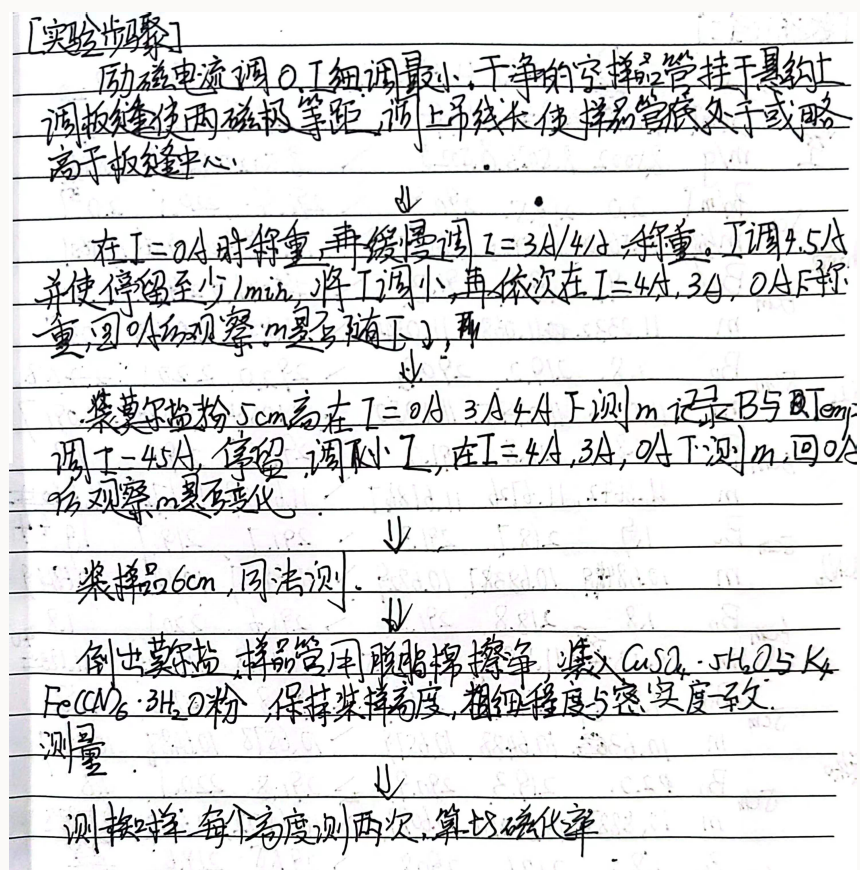


图 1: 实验的目的与原理

2 实验部分

2.1 实验步骤

实验步骤详见预习报告图 2。

[实验原理]

物质于磁场中被磁化

$$B = B_0 + B' = \mu_0 H + \mu_0 K H$$

顺磁化率由此定义为:

$$\chi_m = \frac{KM}{H}$$

物质分为顺磁性、反磁性、铁磁性。

$$\chi_m = \chi_{\text{顺}} + \chi_{\text{反}} \approx \chi_{\text{顺}} = \frac{N_A \mu_B^2 n}{3kT}$$

可得

$$\mu = 797.7 \times \sqrt{\chi_{\text{顺}} \cdot T} \mu_B = \sqrt{n(n+2)} \mu_B$$

故有

$$n = (797.7^2 \cdot \chi_{\text{顺}} \cdot T + 1)^{\frac{1}{2}} - 1$$

Guoy 天平法 $F = (\Delta m_{\text{样}} - \Delta m_{\text{空}})g = -\frac{1}{2}KA(H_1^2 - H_0^2)$

可以测磁化率

$A(H_1^2 - H_0^2)$ 用标准样标定

$$\chi_{m\text{样}} = \chi_{\text{标}} \cdot m_{\text{样}} \frac{\Delta m_{\text{样}} - \Delta m_{\text{空}}}{\Delta m_{\text{标}} - \Delta m_{\text{空}}} \frac{M_{\text{样}}}{m_{\text{样}}}$$

[实验方法]

采用 Guoy 天平法, 以 Mohr 盐为标准样, 测定磁化率。

图 2: 实验的目的与原理

2.2 仪器与药品

1. 试剂

莫尔盐 (AR), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (AR), $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (AR), 未知样;

2. 仪器

磁天平 (配电子天平), 研钵, 试管。

3 实验现象与数据处理

3.1 数据记录

实验温度为 $T = 20.6\text{ }^{\circ}\text{C} = 293.15\text{ K}$ ，实验中物质的质量与磁场强度如表1所示，并计算不同励磁电流下质量变化如表2。

表 1: 实验过程中的磁场强度与各物质的质量

励磁电流/A		0	3	4	4.5	4	3	0	
空管	B_0	1.9	218.8	291.0	/	291.4	220.1	2.0	
	m	8.5037	8.5026	8.5020	/	8.5020	8.5029	8.5037	
莫尔盐	5 cm	B_0	2.0	218.5	290.9	/	291.4	220.1	2.0
		m	10.5620	10.5950	10.6195	/	10.6196	10.5956	10.5631
	6 cm	B_0	1.9	219.0	291.3	/	291.9	219.5	2.0
		m	11.0332	11.0681	11.0944	/	11.0950	11.0683	11.0337
硫酸铜	5 cm	B_0	1.8	219.2	290.8	/	292	220.1	2.0
		m	11.0916	11.0995	11.1050	/	11.1054	11.0995	11.0917
	6 cm	B_0	1.8	218.8	291.0	/	291.8	219.6	1.8
		m	11.6642	11.6726	11.6787	/	11.6789	11.6727	11.6644
亚铁氰化钾	5 cm	B_0	1.9	218.7	291.3	/	291.7	219.7	1.9
		m	10.6849	10.6837	10.6829	/	10.6827	10.6838	10.6849
	6 cm	B_0	1.8	218.8	291.3	/	291.6	220.1	1.8
		m	11.1839	11.1828	11.1815	/	11.1818	11.1826	11.1840
样品	5 cm	B_0	1.8	219.3	291.1	/	291.8	220.0	1.8
		m	10.6367	10.6488	10.6579	/	10.6578	10.6488	10.6367
	5 cm	B_0	2.0	219.3	290.9	/	291.8	220.1	1.8
		m	10.5887	10.6010	10.6099	/	10.6102	10.6012	10.5888
	6 cm	B_0	1.8	218.6	290.8	/	291.5	219.6	2.0
		m	11.1541	11.1675	11.1777	/	11.1778	11.1678	11.1545
	6 cm	B_0	1.8	219.5	292.0	/	292.0	220.0	1.8
		m	11.1658	11.1791	11.1902	/	11.1901	11.1800	11.1660

3.2 磁化率的计算

由公式，

$$\chi_{Mohr} = \frac{4\pi \cdot 9.500 \times 10^{-6}}{T + 1} = 4.584 \times 10^{-7} m^3 \cdot kg^{-1}$$

计算得到，莫尔盐的磁化率为 $4.584 \times 10^{-7} m^3 \cdot kg^{-1}$ ，通过以下公式可以计算比磁

表 2: 不同条件下样品的质量变化

		m/g	$\Delta m_{3A}/g$	$\Delta m_{4A}/g$	$\Delta m_{4A}/g$	$\Delta m_{3A}/g$	$\Delta m_{0A}/g$
空管		8.5037	-0.0011	-0.0017	-0.0017	-0.0008	0.0000
莫尔盐	5 cm	10.5620	0.0330	0.0575	0.0576	0.0336	0.0011
	6 cm	11.0332	0.0349	0.0612	0.0618	0.0351	0.0005
硫酸铜	5 cm	11.0916	0.0079	0.0134	0.0138	0.0079	0.0001
	6 cm	11.6642	0.0084	0.0145	0.0147	0.0085	0.0002
亚铁氰化钾	5 cm	10.6849	-0.0012	-0.0020	-0.0022	-0.0011	0.0000
	6 cm	11.1839	-0.0011	-0.0024	-0.0021	-0.0013	0.0001
样品	5 cm	10.6367	0.0121	0.0212	0.0211	0.0121	0.0000
	5 cm	10.5887	0.0123	0.0212	0.0215	0.0125	0.0001
	6 cm	11.1541	0.0134	0.0236	0.0237	0.0137	0.0004
	6 cm	11.1658	0.0133	0.0244	0.0243	0.0142	0.0002

化率

$$\chi'_{m_{sample}} = \chi_{m_{standard}} \frac{\Delta m_{sample} - \Delta m_{blank}}{\Delta m_{standard} - \Delta m_{blank}} \times \frac{m_{standard}}{m_{sample}}$$

样品的磁化率可以由下计算得到

$$\chi_{m_{sample}} = \chi'_{m_{sample}} \times M_{sample}$$

计算得到硫酸铜、亚铁氰化钾在不同条件下的摩尔磁化率如下表 3 所示，由于不知道样品的摩尔质量，因此只能计算得到比磁化率如下表 4 所示

表 3: 硫酸铜、亚铁氰化钾在不同条件下的摩尔磁化率

样品	样品高度	励磁电流	$\chi/10^{-8} m^3 \cdot mol^{-1}$	
硫酸铜	5 cm	3A	1.90	1.86
		4A	1.90	1.96
	6 cm	3A	1.94	1.95
		4A	1.96	1.97
亚铁氰化钾	5 cm	3A	-0.03	-0.10
		4A	-0.06	-0.10
	6 cm	3A	0.00	-0.16
		4A	-0.13	-0.07

观察各个样品的摩尔磁化率与比磁化率，硫酸铜与未知样的平行度较好，极差均在 $0.1 \times 10^{-8} m^3 \cdot mol^{-1}$ 与 $0.1 \times 10^{-7} m^3 \cdot kg^{-1}$ 以内

表 4: 未知样的比磁化率

	$\chi'_{3A}/10^{-7}\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\chi'_{4A}/10^{-7}\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\chi'_{4A}/10^{-7}\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\chi'_{3A}/10^{-7}\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
5 cm	1.71	1.71	1.70	1.66
5 cm	1.78	1.75	1.77	1.75
6 cm	1.76	1.76	1.75	1.77
6 cm	1.74	1.81	1.78	1.82

由于下行时样品会存在剩磁现象，因此只取硫酸铜与亚铁氰化钾的上行部分求平均值，得：

$$\chi_{\text{CuSO}_4} = 1.93 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\chi_{\text{KFe(CN)}_6} = -0.06 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

同样地我们对样品的比磁化率求平均值，得：

$$\chi'_{\text{sample}} = 1.75 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

3.3 分子磁矩与单电子数的计算

由公式，

$$\mu = 797.7 \times \sqrt{\frac{\chi_p}{\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}} \frac{\text{T}}{\text{K}}} \mu_B$$

由表 3 的数据，可以计算得到硫酸铜的分子磁矩如下表 5。

表 5: 硫酸铜在不同条件下的分子磁矩

	μ_{3A}/μ_B	μ_{4A}/μ_B
5 cm	1.88	1.88
6 cm	1.90	1.91

可以得到硫酸铜的平均磁矩为 $1.89 \mu_B$ 。

若将亚铁氰化钾的数据代入公式中，根号下为负数，没有意义。这是由于亚铁氰化钾是一种反磁性物质，测得的 χ_m 为反磁性的磁矩 χ_d ，因此亚铁氰化钾的分子磁矩是 0，无单电子。

又由于

$$\mu = \sqrt{n(n+2)}$$

可以计算硫酸铜的单电子数如下表 6 所示。

表 6: 硫酸铜在不同条件下的单电子数

	n_{3A}	n_{4A}
5 cm	1.13	1.13
6 cm	1.15	1.16

可以得到硫酸铜的测量的平均单电子数为 1.14，因此硫酸铜分子的单电子数为 1 个，这与硫酸铜的实际分子结构相吻合。

由于未知样的摩尔质量未知，因此无法进行分子磁矩与不成对电子数的计算。

3.4 误差计算

本次实验误差的主要来源为磁场强度的误差，天平称量的误差。查阅^[2]文献，可以得到

$$\chi_{\text{CuSO}_4}^0 = 1.835 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

虽然实验所用的天平较为精准，为万分之一分析天平，但是由于实验中样品在磁场下的质量变化很小，称量误差仍然较大，称量误差为 $\pm 0.1 \text{mg}$ 。

$$\chi_{m_{\text{sample}}} = \chi_{m_{\text{standard}}} \frac{\Delta m_{\text{sample}} - \Delta m_{\text{blank}}}{\Delta m_{\text{standard}} - \Delta m_{\text{blank}}} \times \frac{m_{\text{standard}} M_{\text{sample}}}{m_{\text{sample}}}$$

$$\sigma_{m_{\text{standard}}} = \sqrt{2} \sigma_m = 0.1 \text{mg}$$

$$\sigma_{m_{\text{sample}}} = \sqrt{2} \sigma_m = 0.1 \text{mg}$$

$$\sigma_{\Delta m_{\text{sample}} - \Delta m_{\text{blank}}} = \sigma_{\Delta m_{\text{standard}} - \Delta m_{\text{blank}}} = \sqrt{4} \sigma_m = 0.2 \text{mg}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\chi} &= \chi_{m_{\text{sample}}} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{m_{\text{standard}}}}{m_{\text{standard}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{m_{\text{sample}}}}{m_{\text{sample}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta m_{\text{sample}} - \Delta m_{\text{blank}}}}{\Delta m_{\text{sample}} - \Delta m_{\text{blank}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta m_{\text{standard}} - \Delta m_{\text{blank}}}}{\Delta m_{\text{standard}} - \Delta m_{\text{blank}}}\right)^2} \\ &= 0.04 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \end{aligned}$$

$$\chi_{\text{CuSO}_4} = 1.93 \pm 0.04 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

计算得到硫酸铜的摩尔磁化率 $1.93 \pm 0.04 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，然后同理得到亚铁氰化钾的摩尔磁化率 $-0.1 \pm 0.1 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，样品的比磁化率 $1.75 \pm 0.04 \times 10^{-7} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可以看出，亚铁氰化钾的摩尔磁化率测量误差较大，这是因为亚铁氰化钾的摩尔磁化率很低，测量时质量变化很小，导致质量变化的相对误差很大。

可能的误差来源有：

1. 每次装样的时候都要求粗细紧密程度一致，但实际操作误差很大。
2. 由于磁滞效应，在励磁电流减小的过程中，读数可能会偏大。
3. 电流调至相同值时，磁场强度存在波动。
4. 样品管每次悬挂的高度不一定相同。

4 实验结果与讨论

4.1 结论

本实验采用 Guoy 磁天平法，并以莫尔盐为标准样品，在室温 $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下，测得了计算得到硫酸铜的摩尔磁化率 $1.93 \pm 0.04 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，亚铁氰化钾的摩尔磁化率 $-0.1 \pm 0.1 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，样品的比磁化率 $1.75 \pm 0.04 \times 10^{-7} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。计算分析得到硫酸铜的分子磁矩为 $1.89\text{ }\mu\text{B}$ ，有一个不成对电子；亚铁氰化钾为反磁性物质，没有不成对电子。实验的主要误差来自于质量变化的测量误差。

5 附录

[数据记录]									
空	I/A	0.19	3.218.8	4.291.0	4.5	4	3	0.20	
	B ₀ /mT	2.0	218.6	290.9	291.4	220.1	2.0		
	m/g	8.5002	8.5026	8.5020	8.5020	8.5029	8.5020		
	B ₀ /mT	2.0	218.5	290.9	291.4	220.1	2.0		
MnO ₂	5cm	m/g	10.5620	10.5950	10.6195	10.6196	10.5956	10.5631	
	6cm	B ₀	1.9	219.1	291.3	291.9	219.5	2.0	
	m	11.0332	11.0681	11.0944	11.0950	11.0683	11.0337		
	B ₀	1.8	219.2	290.8	292.0	220.1	2.0	1.8	
CuSO ₄	5cm	m	11.0916	11.0995	11.1050	11.1054	11.0995	11.0917	
	6cm	B ₀	1.8	218.8	291.0	291.8	219.6	1.8	
	m	11.6642	11.6726	11.6786	11.6789	11.6727	11.6627		
	B ₀	1.9	218.7	291.3	291.7	219.7	1.9	4.4	
K ₂ Fe(SO ₄) ₆	5cm	m	10.6348	10.6238	10.6229	10.6227	10.6228	10.6249	
	6cm	B ₀	1.8	218.8	291.3	291.6	220.1	1.8	
	m	11.1324	11.1829	11.1815	11.1818	11.1826	11.1827		
	B ₀	1.8	219.3	291.1	291.8	220.0	1.8		
未知	5cm	m	10.6363	10.6488	10.6519	10.6578	10.6487	10.6267	
	6cm	B ₀	2.0	219.3	290.9	291.8	220.1	1.8	
	m	10.5887	10.6010	10.6099	10.6102	10.6012	10.5888		
	B ₀	1.8	218.6	290.8	291.5	219.6			
未知	6cm	m	11.1541	11.1675	11.1777	11.1778	11.1678	11.1543	
	6cm	B ₀	1.8	219.5	292.0	292.0	220.0	1.8	
	m	11.1658	11.1791	11.1902	11.1901	11.1800	11.1660		
	5cm	B ₀							
avg	m	10.6127	10.6249	10.6339	1.71 × 10 ⁻⁶				
	6cm	avg	m	11.1800	11.1733	11.1840	1.51 × 10 ⁻⁶		

图 3: 数据记录图片

参考文献

- [1] 北京大学化学学院物理化学实验教学组. 物理化学实验[M]. 4 版. 北京: 北京大学出版社, 2002: 5.
- [2] WEAST, ROBERTC. Crc handbook of chemistry and physics[M]. CRC handbook of chemistry and physics, 1988.