

中子质量精确测量调研报告

中子物理导论第一次大作业

杨哲涵

司书屹

工程物理系

2024-12-28

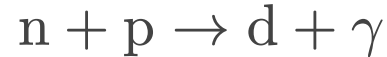
目录

| | |
|------------------------|----|
| 1. 中子质量测量概述 | 2 |
| 2. 基于结合能对中子质量的测量 | 4 |
| 3. 参考文献 | 13 |

1. 中子质量测量概述

中子的发现

- 1930 年,德国物理学家 Walther Bothe 和 Herbert Becker 首次发现了中子辐射. 这种中性辐射被 Chadwick 于 1932 年正确解释为中子
- 由于中子参与了反应能的大多数计算,精确测量中子能量是非常重要的
- 一些早期的中子质量测量[1] 结果有 $(1.008\ 941 \pm 0.000\ 02)\ u$
- 1999 年,新的中子质量测量[2] 结果为 $(1.008\ 664\ 916\ 37 \pm 0.000\ 000\ 000\ 82)\ u$,这一测量基于 ${}^2_1\text{D}$ 的结合能.



- 根据 [CODATA RECOMMENDED VALUES OF THE FUNDAMENTAL PHYSICAL CONSTANTS: 2022](#),当前中子质量的推荐值为 $(1.008\ 664\ 916\ 06 \pm 0.000\ 000\ 000\ 40)\ u$,测量精度与 1999 年的测量结果相当

2. 基于结合能对中子质量的测量

- 1986 年 G. L. Greene, E. G. Kessler, Jr. 以及 R. D. Deslattes 的论文[2] 的测量得到 ${}^2_1\text{D}$ 的结合能为 $B(d) = (2.388\,176\,8 \pm 0.000\,002\,4) \cdot 10^{-3} \text{ u}$, 论文作者利用这一数据得到了中子质量的测量结果为 $(1.008\,664\,919 \pm 0.000\,000\,000\,14) \text{ u}$
- 在 1986 年到 1999 年间, 原子质量测量与 GAMS-4 装置的进步提高了测量精度
 1. 1993, 研究人员开发了一种基于经典分离振荡场技术的改进方法[3], 大幅提高了氢, 氘和中子的质量测量精度, 精确度相比前值提高了约 40 倍
 2. 1994 年发表的研究[4], 通过对 20 对交替捕获离子的回旋频率进行比较, 成功测量了 10 种原子的质量, 准确度达到 $10 \cdot 10^{-10}$, 为中子质量的测量提供了重要参考
 3. GAMS-4 的 0.1MeV 到 6MeV 的 γ 射线测量精度不断地得到改善
 - ▶ 为晶体光谱仪配备精确定位的隔振平台
 - ▶ 改进角度干涉仪(angle interferometers)
 - ▶ 更多几乎完美的硅和锗晶体

- 1999 年, E.G. Kessler, Jr., M.S. Dewey, R.D. Deslattes, A. Henins, H.G. Borner, M. Jentschel, C. Doll 以及 H. Lehmann 又利用更准确的原子质量数据重新计算了中子质量,结果为 $(1.008\ 664\ 916\ 37 \pm 0.000\ 000\ 000\ 82) u$

实验方法

1986 年实验与 1999 年的实验设置是基本一样的,实验均在 GAMS-4(位于法国 Grenoble 的高精度伽马射线计量实验室, 连接到一个反应堆端口)完成.

基本方法是通过 Bragg 衍射测量 γ 射线的能量,然后利用结合能计算中子质量.

γ 射线源 Kapton 塑料($\text{N}_2\text{H}_{10}\text{O}_5\text{C}_{22}$),放置于 Institut Max von Laue-Paul Langevin 的一个高通量反应堆堆芯附近

- 反应堆到 Kapton 塑料上的热中子能量分布近似为 Maxwell 分布,峰值为 56 MeV
- 中子通量 $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

晶体 2.5 mm厚的硅片,晶格间距以米为单位测量,误差为 $5 \cdot 10^{-8}$

干涉仪 经常校准,测量衍射角度的精度可以达到 $1 \cdot 10^{-7}$

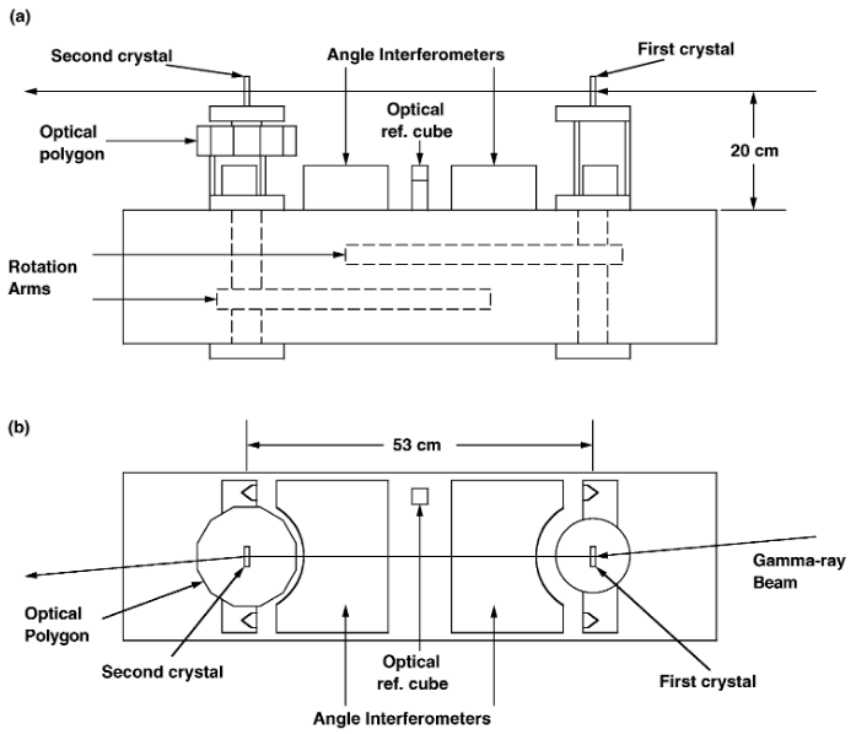


Fig. 4. Schematic views of the GAMS4 two-crystal spectrometer: (a) side view, (b) top view. For illustration purposes, the polygon is drawn with 12 sides. The polygon actually has 24 sides.

图 1 GAMS-4 双晶谱仪 [5]

Bragg 衍射

布拉格衍射(又称 X 射线衍射的布拉格形式),最早由 Sir William Lawrence Bragg 及 Sir William Henry Bragg 于 1913 年提出.

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

模型中晶体为一组各自分离的平行平面,相邻平面间的距离皆为一常数 d

如果各平面反射出来的 X 射线成相长干涉的话,那么入射的 X 射线经晶体反射后会产生尖峰

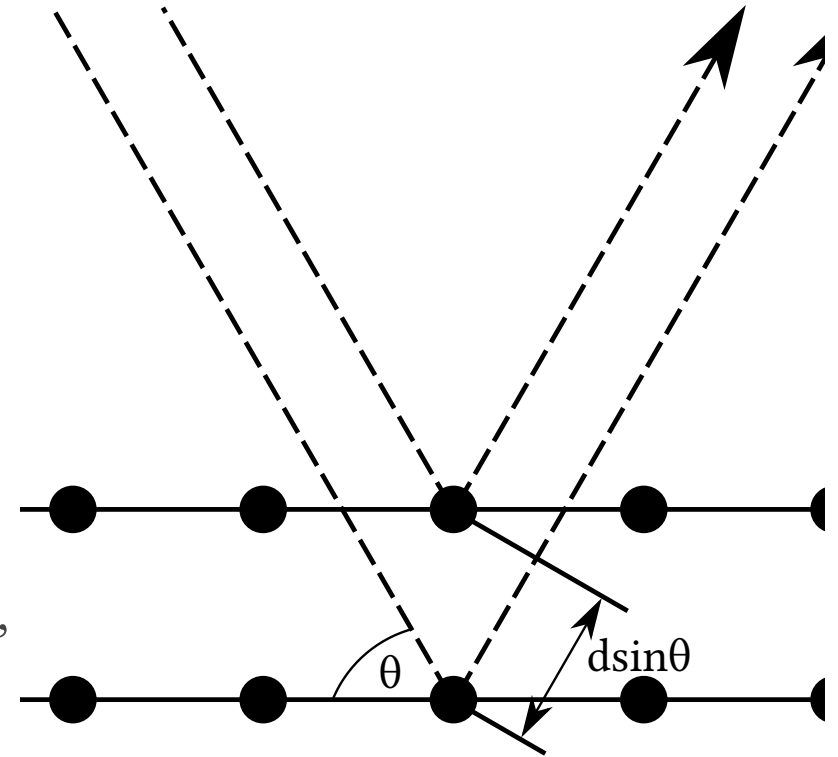


图 2 Bragg 衍射示意图

双晶谱仪测量 γ 射线能量

双晶谱仪是一种用于测量 γ 射线衍射角的仪器,图 3 展示了双晶谱仪的结构和工作状态,它由 3 个准直器和 2 个晶体构成.第 1 个晶体与第 2 个晶体都可以独立调整衍射级别.

其优点在于,第 1 个晶体确保了只有高度准直的,几乎单色的辐射可以落在第二个晶体上

实验中,用 (m, n) 表示第 1,2 两个晶体的衍射级别,共进行了 3 种不同级别的测量,分别为 $(1, 2)$, $(1, -2)$, $(1, 3)$, $(1, -3)$, $(2, 2)$, $(2, -1)$.

2. 基于结合能对中子质量的测量

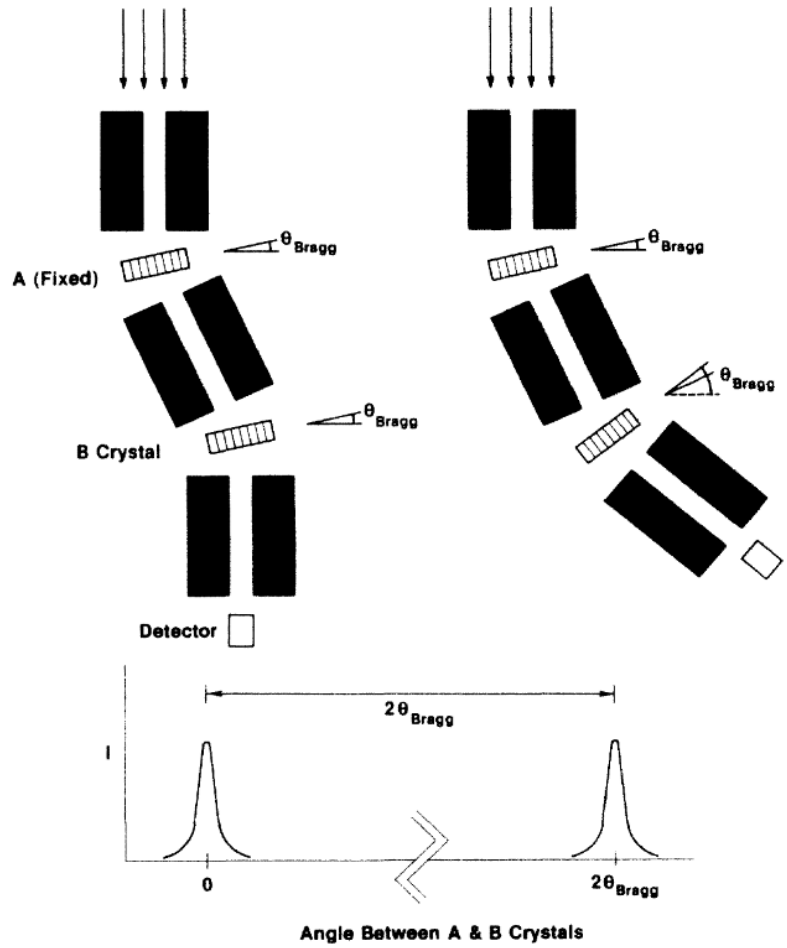


图 3 双晶方法 $(1, -1)$ 及 $(1, 1)$

Table 2

Measured values of the first order Bragg angle for the 2.2 MeV gamma-ray emitted in the reaction $n + p \rightarrow d + \gamma$.

| Date | Configuration | Number of Bragg angle measurements | First order Bragg angle (deg) | First order Bragg angle (deg) |
|---|-----------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Feb. 1995 | (1, - 2); (1,2) | 44 | 0.083202185(11) | |
| Feb. 1995 | (2, - 1); (2,2) | 8 | 0.083202104(40) | |
| Final Feb. 1995 result | | | | 0.083202180(22) |
| March 1998 | (1, - 2); (1,2) | 32 | 0.083202197(12) | |
| March 1998 | (2, - 1); (2,2) | 32 | 0.083202229(22) | |
| March 1998 | (1, - 3); (1,3) | 25 | 0.083202190(12) | |
| final March 1995 result | | | | 0.083202199(12) |
| final Bragg angle | | | | 0.083202194(11) |
| final Bragg angle including uncertainties from systematic effects | | | | 0.083202194(14) |

图 4 论文 [2] 给出的测量结果

经过上述测量后,得到了 $n + p \rightarrow d + \gamma$ 的 2.2MeV γ 射线的对应 Bragg 角度

从结合能得到中子质量

对于中子质量,以相对原子质量单位表达的式子为

$$A_r(\text{d}) = A_r(^2\text{H}) - A_r(^1\text{H}) + \frac{B(\text{d})}{u}$$

1999 年 E.G. Kessler 等人的论文 [2] 使用的数据为

- $B(d) = (2\,224\,566.14 \pm 0.41) \text{ eV}$
- $A_r(^2\text{H}) - A_r(^1\text{H}) = (1.006\,276\,746\,30 \pm 0.000\,000\,000\,71) u$

3. 参考文献

- [1] W. E. Stephens, The Neutron-Hydrogen Mass Difference and the Neutron Mass, *Reviews of Modern Physics* **19**, 19 (1947)
- [2] J. Kessler E. G., M. S. Dewey, R. D. Deslattes, A. Henins, H. G. Börner, M. Jentschel, C. Doll, and H. Lehmann, The deuteron binding energy and the neutron mass, *Physics Letters a* **255**, 221 (1999)
- [3] V. Natarajan, K. R. Boyce, F. DiFilippo, and D. E. Pritchard, Precision Penning trap comparison of nondoublets: Atomic masses of H, D, and the neutron, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1998 (1993)
- [4] F. DiFilippo, V. Natarajan, K. R. Boyce, and D. E. Pritchard, Accurate Atomic Masses for Fundamental Metrology, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 1481 (1994)

- [5] E. G. Kessler, M. S. Dewey, R. D. Deslattes, A. Henins, H. G. Börner, M. Jentschel, and H. Lehmann, The GAMS4 flat crystal facility, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **457**, 187 (2001)