

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

2025-08-16

中子质量测量概述 2

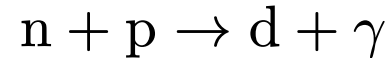
基于结合能对中子质量的测量 4

参考文献 13

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 $(1.008\,941 \pm 0.000\,02) \text{ u}$
- 1999 年,新的中子质量测量[2] 结果为 $(1.008\,664\,916\,37 \pm 0.000\,000\,000\,82) \text{ u}$,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 $(1.008\,664\,916\,06 \pm 0.000\,000\,000\,40) \text{ u}$,测量精度与 1999 年的测量结果相当

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. Börner, 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 $(1.008\,664\,916\,37 \pm 0.000\,000\,000\,82) \text{ u}$

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 $1 \cdot 10^{-7}$

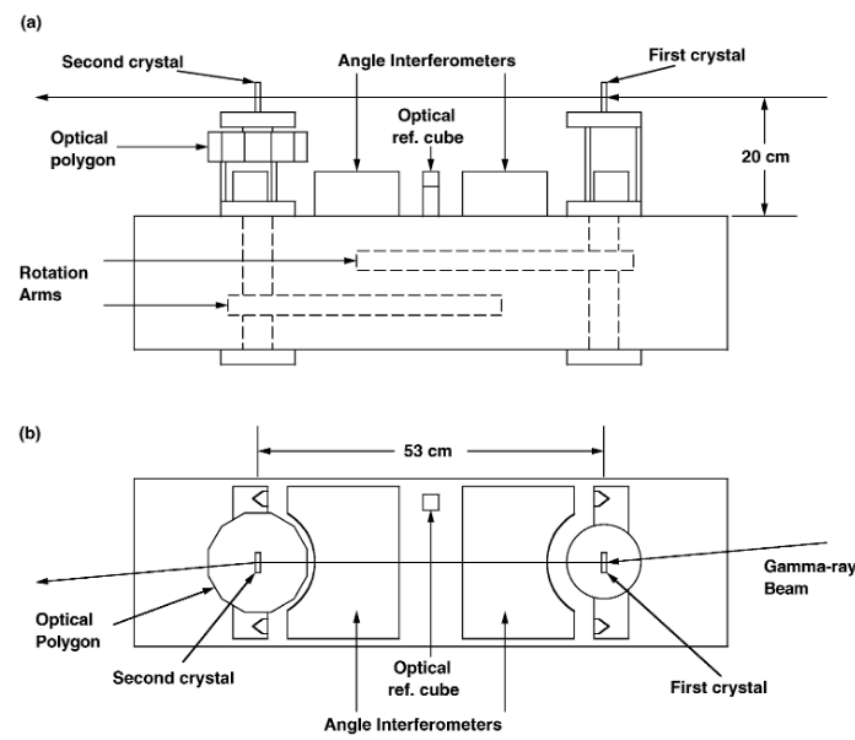


Fig. 4. Schematic views of the GAMS4 two-crystal spectrometer: (a) side view, (b) top view. For illustration purposes, the polygon is drawn with 12 sides. The polygon actually has 24 sides.

Figure 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

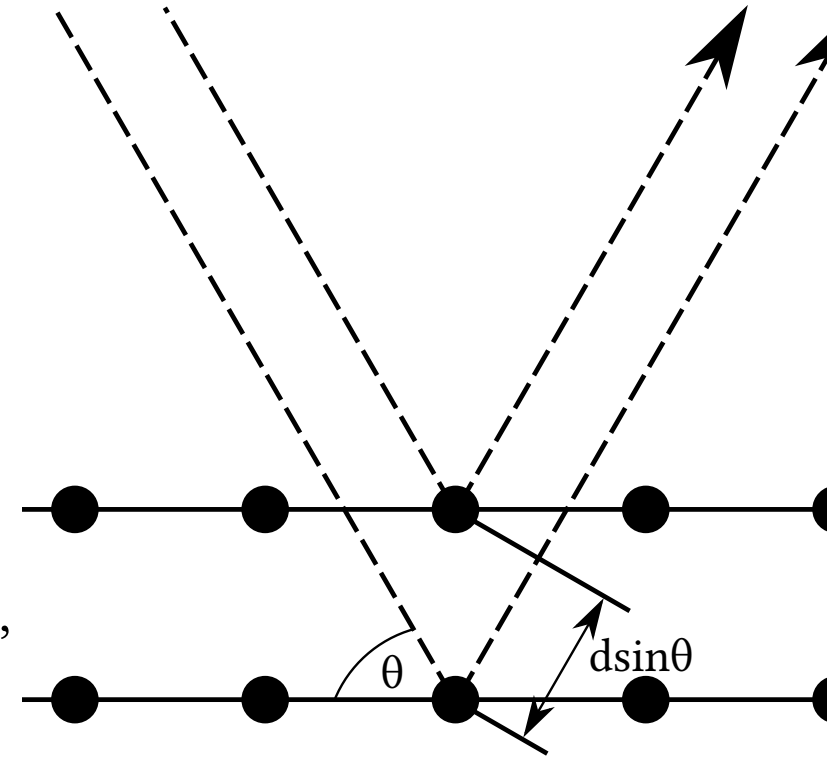


Figure 2: Bragg 衍射示意图

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, Figure 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 $(1, 2)$, $(1, -2)$, $(1, 3)$, $(1, -3)$, $(2, 2)$, $(2, -1)$.

基于结合能对中子质量的测量

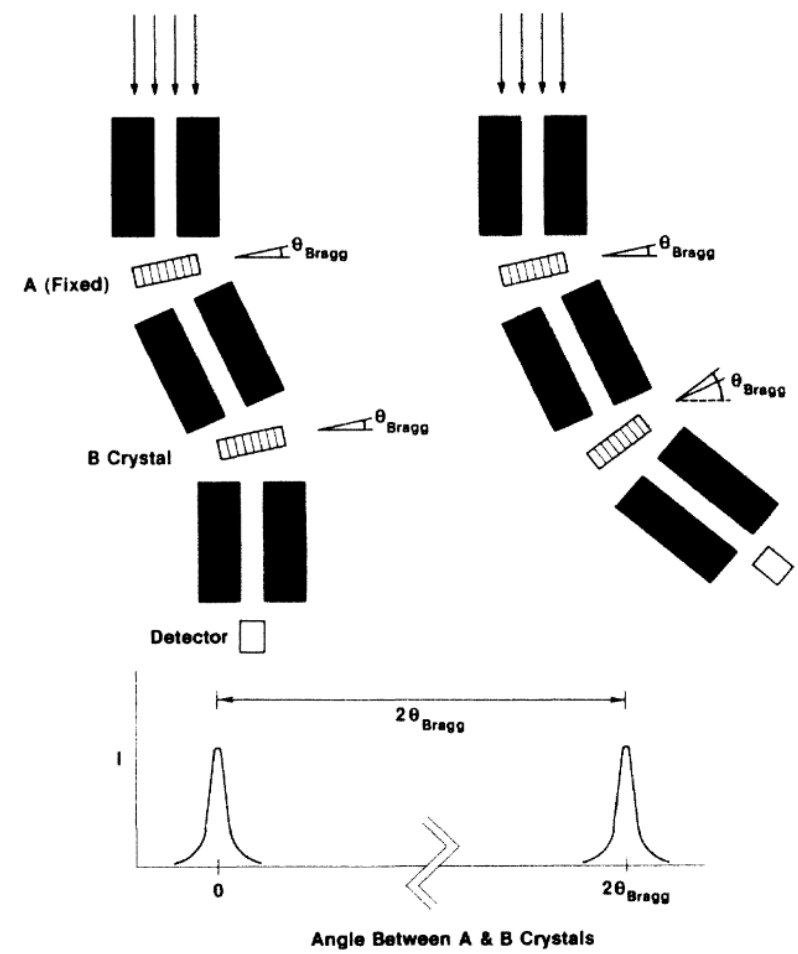


Figure 3: 双晶方法 $(1, -1)$ 及 $(1, 1)$

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)

Figure 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

对于中子质量,以相对原子质量单位表达的式子为

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

1999 年 E.G. Kessler 等人的论文 [2] 使用的数据为

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

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).