

利用 $^{11}\text{B}(n, \alpha)^8\text{Li}(\beta^-)^8\text{Be}(2\alpha)$ 反应 测量快中子能谱的乳胶方法

王学智 顾洪坤 孙汉城

本文提出了一个在强 γ 本底条件下测量 8 兆电子伏以上无定向快中子能谱的新方法。利用载硼乳胶中的 $^{11}\text{B}(n, \alpha)^8\text{Li}(\beta^-)^8\text{Be}(2\alpha)$ 反应测量了 9.97, 12.06, 14.10 和 18.12 兆电子伏的单能中子谱以及 14.1 兆电子伏中子经铀球壳后的慢化能谱。

一、引言

对于 14 兆电子伏左右的快中子能谱测量, 利用反冲质子的核乳胶方法是一种能量分辨较好的方法。但由于质子和 γ 射线在乳胶中所产生的潜影较难分辨, 通常只允许 0.5 伦的 γ 剂量本底。我们经过特殊处理, 最大本底也只能在 10 伦 γ 剂量的水平^[1]。如果不用反冲质子而利用在乳胶中载入某些靶核的 (n, α) 反应, 与 γ 本底将容易分辨。问题是要找到合适的反应。我们考虑, $^{11}\text{B}(n, \alpha)^8\text{Li}(\beta^-)^8\text{Be}(2\alpha)$ 反应比较合适。理由是: 硼容易较大量地载入到乳胶中; 此反应产生的径迹具有独特的锤星形状, 易于识别; 此反应的反应道较为简单, ^8Li 核只有处于基态或第一激发态两种可能, 相应的只有 α_0 和 α_1 两群 α 粒子。

国外曾有人^[2,3]用载硼乳胶对 $^{11}\text{B}(n, \alpha)^8\text{Li}(\beta^-)^8\text{Be}(2\alpha)$ 反应的有关行为作过研究, 但研究得不够细致, 更没有将此反应应用到快中子能谱测量上。我们通过几个单能点的刻度以及连续快中子能谱的测量, 建立了利用此反应进行无定向快中子能谱测量的方法。

二、单能中子刻度

1. 中子源 从 1.2 米回旋加速器引出 9 兆电子伏的氘束, 射到气体氘靶上。气体氘靶入射窗是厚 20 微米的铂箔, 靶室长 3 厘米, 内充 2 大气压的氘气。由 $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ 反应在与入射氘束成 25° 和 50° 的方位上分别获得 9.97 和 7.92 兆电子伏的单能中子。用苾晶体飞行时间谱仪作中子通量的相对监视。

由静电加速器引出 2 兆电子伏的氘束, 射到 1.39 毫克/厘米² 的氘-钛靶上。由 $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反应在 0° , 105° 和 175° 的方位上分别获得 18.12, 14.10 和 12.06 兆电子伏的单能中子。用快中子在金硅面垒型半导体探测器中引起的 (n, α) 反应作中子通量相对监视。

从高压倍加器引出 200 千电子伏的氘束, 射到厚为 0.446 毫克/厘米² 的氘-钛靶上。由 $\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反应在 90° 方位上得到 14.1 兆电子伏的单能中子。用金硅面垒型半导体探测器测量伴随粒子作中子通量的绝对监测。

2. 照射和处理 将含¹¹B 为 2.38×10^{21} 原子/厘米³ 的核-1 或核-2 型乳胶 (厚 200 微米) 装在锡盒中, 在中子积分通量为 10^8 — 10^9 厘米⁻² 下进行照射。

用 ID 19 显影液和温度显影法进行处理, 其程序列于表 1。

表 1 200微米厚核-1或核-2型载硼乳胶处理程序

步 骤	溶 液	温 度	时 间
冷 泡	蒸馏水	5°C	30分
冷 显	ID 19(1:1)	5°C	60分
热 显	ID 19(1:5)	19°C	60分
制 止	1%冰醋酸溶液	室 温	10分
定 影	酸性坚膜定影液	室 温	透明后再延长一半时间
水 洗	自来水	室 温	3 小时
初 化	5%甘油	室 温	1 小时
晾 干			

3. 径迹测量 乳胶片处理前后均需测量厚度, 求出收缩因子。

¹¹B(n, α)⁸Li(β⁻)⁸Be(2α) 反应在乳胶中形成锤星径迹, 其显微照片示于图 1。

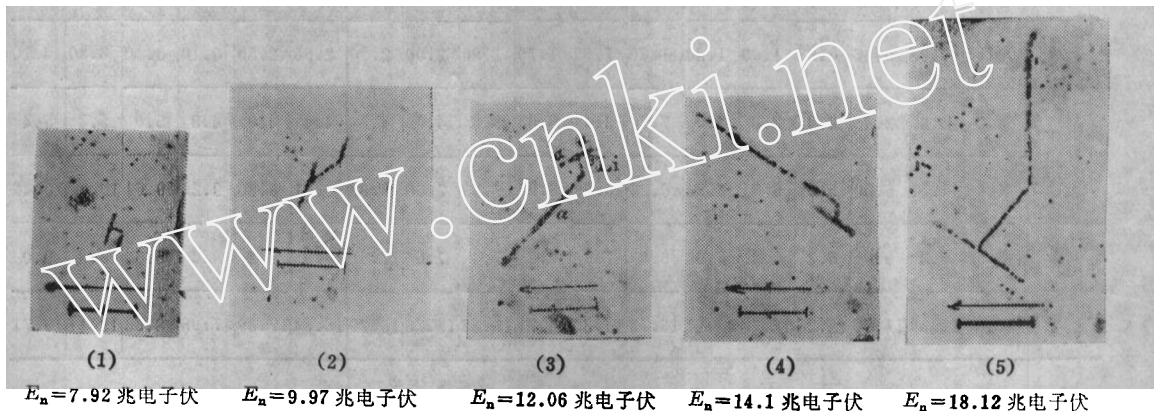


图 1 ¹¹B(n, α)⁸Li(β⁻)⁸Be(2α) 反应在乳胶中产生的锤星径迹

箭头代表中子入射方向; 标尺长度为 10 微米。

对每个锤星事件作六个参数的测量, 即 α 和⁸Li 粒子径迹的水平投影长度 ($l_\alpha, l_{Li(8)}$) 与垂直投影长度 ($H_\alpha, H_{Li(8)}$) 以及 α 和⁸Li 粒子径迹与中子入射方向的水平夹角 ($\psi_\alpha, \psi_{Li(8)}$)。

4. 能量-射程关系刻度 核-1 和核-2 型载硼乳胶的 α 粒子能量-射程关系可由下式给出:

$$R(E_\alpha) = 0.9928 R_p\left(\frac{E_\alpha}{3.971}\right) + 1.3. \quad (1)$$

式中 $R(E_\alpha)$ 是能量为 E_α (兆电子伏) 的 α 粒子的射程, 微米; $R_p\left(\frac{E_\alpha}{3.971}\right)$ 是能量为 $\frac{E_\alpha}{3.971}$ 的质子的射程, 它由文献[4]给出。

实验上对 α 粒子能量-射程关系可按下面的方法校正: 把放射性 α 源, 如铀、钍的硝酸盐溶液 (浓度为 0.1%) 滴到这类载硼乳胶上, 经几天照射后进行显影处理, 测量 α 粒子径迹。结果表明由 (1) 式给出的能量-射程关系是可靠的。

⁸Li 粒子径迹的测量有两个标准: (1) 测量径迹参数的基准点规定为径迹中心线, 长

度由银颗粒中心量起。(2) 测量径迹参数的基准点是以银颗粒外缘作起端。对应于这两个标准, 文献[2]分别给出下列两个 ^8Li 粒子能量-射程关系的经验公式:

$$R(E) = 2.120 + 0.928 E + 0.114 E^2, \quad (2)$$

$$R(E) = 2.578 + 0.955 E + 0.111 E^2. \quad (2')$$

式中 R 是 ^8Li 粒子射程, 微米; E 是 ^8Li 粒子能量, 兆电子伏。

实验上直接测量 ^8Li 粒子能量-射程关系是困难的, 因为不易获得 ^8Li 粒子源。

在载硼乳胶的单能中子刻度实验中, 由测量 $^{11}\text{B}(n, \alpha)^8\text{Li}$ 反应的 ^8Li 粒子射程和反应运动学计算出 ^8Li 粒子能量, 这样便间接地得到 ^8Li 粒子的能量-射程关系。

我们的实验测量是以银颗粒中心作基准点的。结果列于表 2。在 0.2 兆电子伏以上的能区, 我们的实验结果与 (2) 式是相当一致的, 因此我们就采用 (2) 式计算; 在 0.2 兆电子伏以下的能区则有较大的偏离, 故直接用了我们的实验值。

表 2 ^8Li 粒子在核-1或核-2载硼乳胶中的能量-射程关系

$E_{\text{Li}(8)}$, 兆电子伏	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
$R_{\text{Li}(8)}$, 微米	0.35	0.45	0.65	0.85	1.00	1.20	1.40	1.55	1.70	1.80	2.00	2.20	2.50	2.80	3.10	3.40	3.90	4.10
$E_{\text{Li}(8)}$, 兆电子伏	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4
$R_{\text{Li}(8)}$, 微米	4.48	4.71	5.00	5.30	5.61	5.93	6.26	6.58	6.92	7.29	7.66	8.03	8.41	8.80	9.20	9.61	10.03	10.46
$E_{\text{Li}(8)}$, 兆电子伏	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2	7.4	7.6	7.8	8.0	8.2	8.4	8.6	8.8	9.0
$R_{\text{Li}(8)}$, 微米	10.89	11.34	11.79	12.26	12.73	13.21	13.70	14.20	14.71	15.23	15.76	16.29	16.84	17.39	17.96	18.53	19.11	19.71

5. 中子能量的计算与能谱修正 对每个锤星事件的六个测量参数 (经收缩因子修正) 用 803 电子计算机进行计算。

入射中子能量由

$$E_n = E_\alpha + E_{\text{Li}(8)} - Q \quad (3)$$

计算, 式中 E_n , E_α 和 $E_{\text{Li}(8)}$ 分别为中子、 α 粒子和 ^8Li 核的能量, Q 是反应能。 $^{11}\text{B}(n, \alpha)^8\text{Li}$ 反应的 ^8Li 剩余核可能处于基态, 也可能处于第一激发态, 相应的 Q 值就有两个, -6.63 兆电子伏和 -7.61 兆电子伏。因此, 对于同一个锤星事件, (3) 式将给出两个 E_n 值, 故入射中子能量不能唯一确定。

我们用下述方法解决了这个问题。先用已知能量的中子入射, 通过测量求得 E_α 和 $E_{\text{Li}(8)}$ 后, 由 (3) 式唯一地定出 Q 值, 由此定出 ^8Li 核处于基态与第一激发态的几率比——分支比。对于未知能量的中子, 先假设 Q 为 -6.63 兆电子伏, 由 (3) 式算得 E_n , 然后对能谱作分支比修正。

用已知能量的中子求分支比时, 由于有测量误差, 由 (3) 式定出的 Q 值有一个分布, 它是两个高斯分布的叠加。由于分辨率不高, 这两个高斯分布分得不明显。由表 2 我们看到, ^8Li 核处于基态, 还是处于第一激发态, 敏锐地表现在 ^8Li 的射程上。根据 ^8Li 的射程, 可以明确地判断 ^8Li 核处在什么态上。由一系列已知能量单色中子刻度实验得到的分

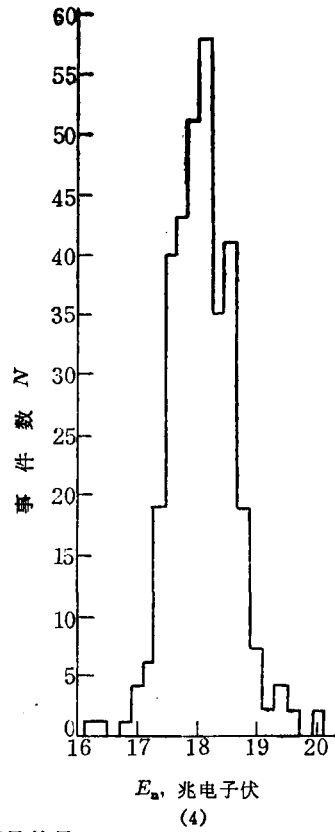
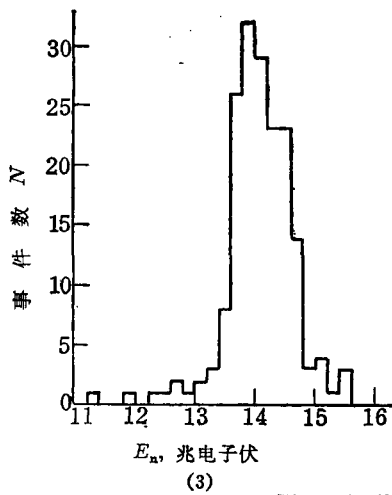
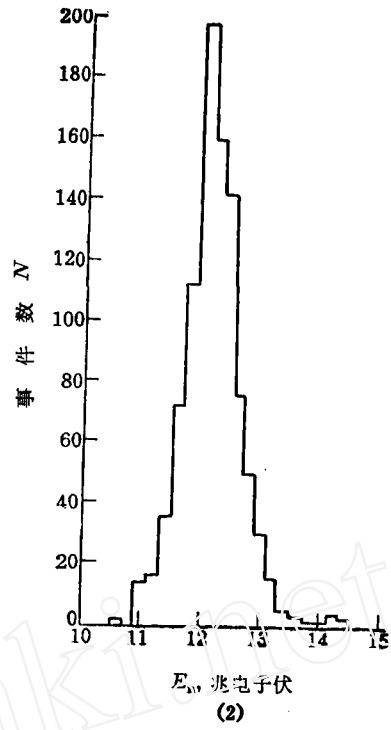
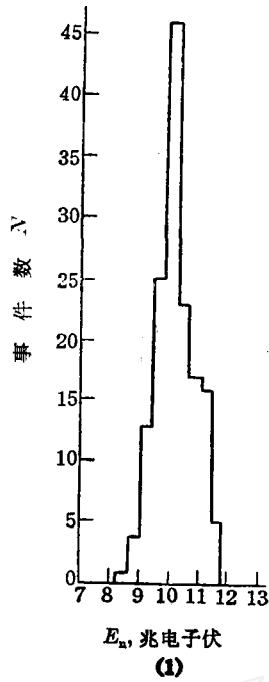


图 2 四种单能中子能谱的测量结果

(1) $E_n=9.97$ 兆电子伏; (2) $E_n=12.06$ 兆电子伏; (3) $E_n=14.1$ 兆电子伏; (4) $E_n=18.12$ 兆电子伏。

支比随中子能量的变化, 我们将另文发表^[6]。

根据 ${}^8\text{Li}$ 射程判定 Q 值后, 由 (3) 式可以算出入射中子能量。由此得到的中子能谱如图 2 所示。

对未知能量的单能中子谱作分支比修正是根据这样一个事实: 当 Q 值取作 -6.63 兆电子伏时, 一个单能中子谱按 (3) 式计算就得到两个高斯分布叠加的谱形。这两个分布的宽度近似相等, 因此它们的峰值比也就是面积比, 即分支比 η 。两峰相距 1 兆电子伏(因 ${}^8\text{Li}$ 基态与第一激发态的能量差为 0.981 兆电子伏), 所以能量为 $E+1$ 兆电子伏的中子所产生的反应事件有 $\frac{1}{\eta}$ 落到能量为 E 的位置上, 即有递推公式

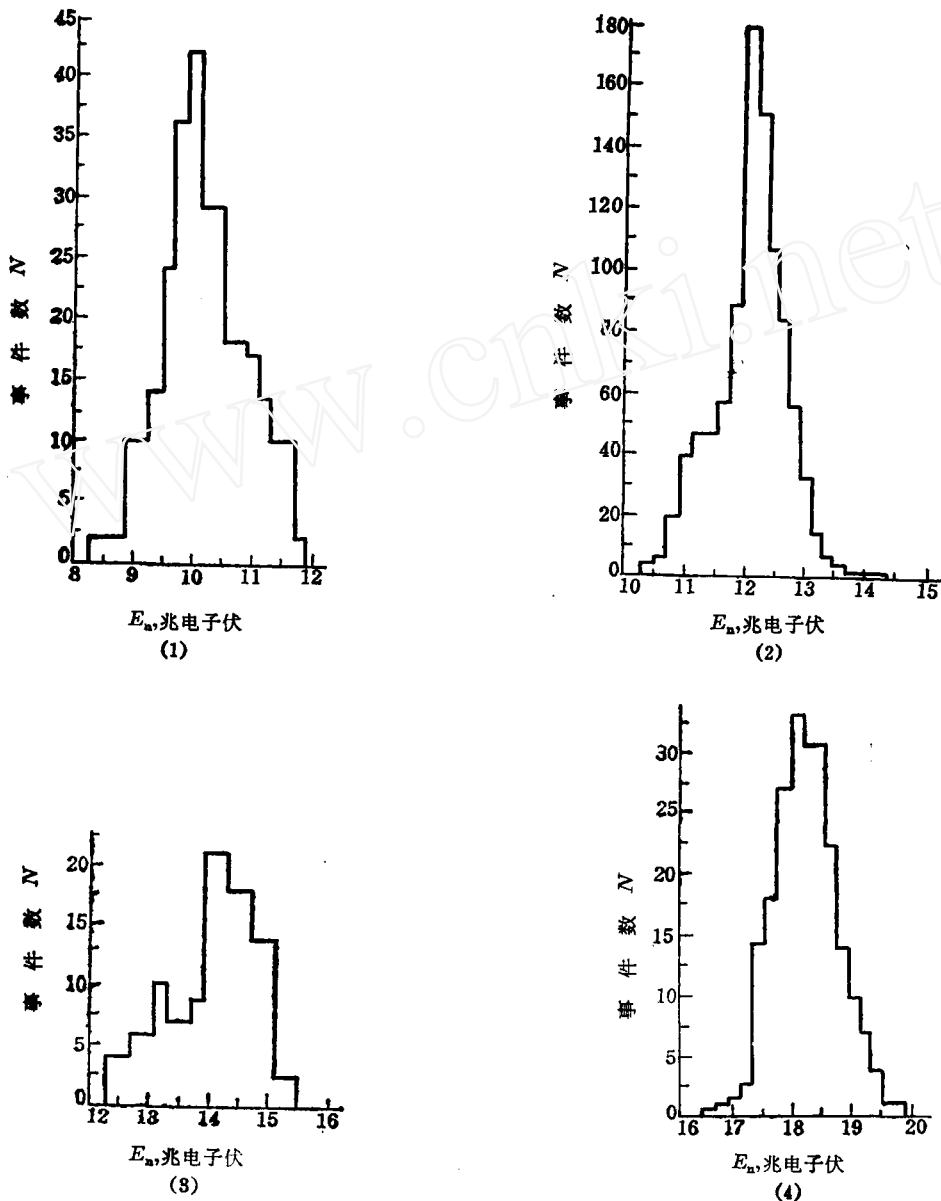


图 3 Q 取 -6.63 兆电子伏时按 (3) 式计算得到的单能中子谱
 (1) $E_n=9.97$ 兆电子伏; (2) $E_n=12.06$ 兆电子伏; (3) $E_n=14.1$ 兆电子伏; (4) $E_n=18.12$ 兆电子伏。

$$N_0(E) = N(E) - \frac{N_0(E+1)}{\eta} \quad (4)$$

式中 $N_0(E)$ 为中子能量为 E 的真正反应事件数, $N(E)$ 为测量值。具体修正时由高能端开始。因高能端 $N_0(E+1)=0$, 所以 $N_0(E)=N(E)$, 而 $N_0(E-1) = N(E-1) - \frac{N_0(E)}{\eta} = N(E-1) - \frac{N(E)}{\eta}$ 。用 (4) 式依次向低能端递推。图 3 是 Q 取作 -6.63 兆电子伏时由 (3) 式计算得到的。将图 3 各谱按 (4) 式修正后, 得到进行了分支比修正的结果, 见图 4。从图 2 与图 4 比较可以看出, 彼此是符合的。因此我们可以用这方法测量未知能量的无定向单能中子谱。

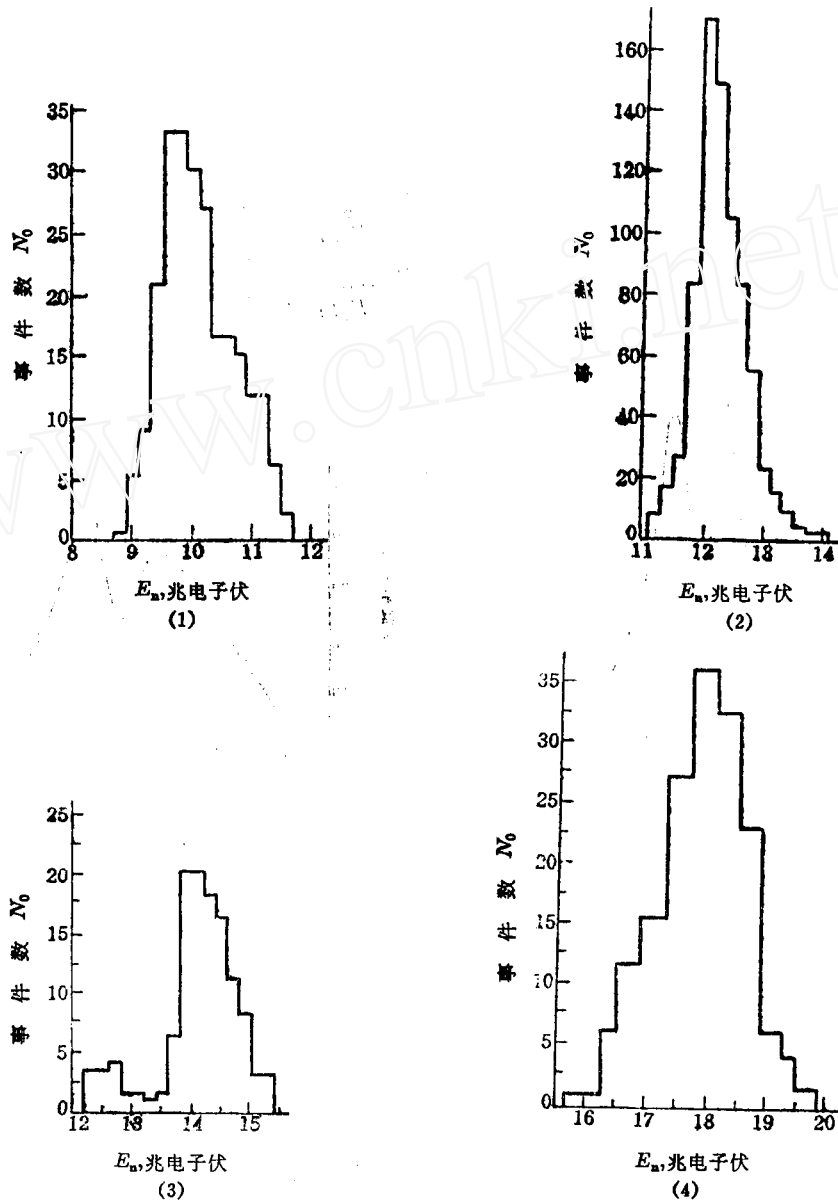


图 4 进行了分支比修正后的单能中子谱
 (1) $E_n=9.97$ 兆电子伏; (2) $E_n=12.06$ 兆电子伏; (3) $E_n=14.1$ 兆电子伏; (4) $E_n=18.12$ 兆电子伏。

6. 能量分辨率 由图 2 和图 4 可以得到用载硼乳胶测量快中子能谱的能量分辨率, 结果列于表 3。

表 3 用载硼乳胶测量快中子能谱的能量分辨率

入射中子能量, 兆电子伏	9.97	12.06	14.1	18.12
半宽度, 兆电子伏	0.8-1.0	0.8	1.0	1.2

7. 中子入射方向的测定 利用 $^{11}\text{B}(n, \alpha)^8\text{Li}$ 反应测谱时不需要已知中子入射方向。当我们需要了解中子入射方向时, 可以由径迹参数定出中子入射方向。

设中子入射方向与乳胶平面的水平夹角为 ψ_n , 倾角为 ϕ_n , 空间夹角为 θ_n 。根据动量守恒得到:

$$\left. \begin{aligned} \tan \psi_n &= \frac{P_{\alpha y} + P_{\text{Li}(8)y}}{P_{\alpha x} + P_{\text{Li}(8)x}}, \\ \sin \phi_n &= \frac{P_{\alpha z} + P_{\text{Li}(8)z}}{(P_{\alpha x}^2 + P_{\alpha y}^2 + P_{\alpha z}^2)^{1/2}}, \\ \cos \theta_n &= \frac{P_{\alpha x} + P_{\text{Li}(8)x}}{(P_{\alpha x}^2 + P_{\alpha y}^2 + P_{\alpha z}^2)^{1/2}}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

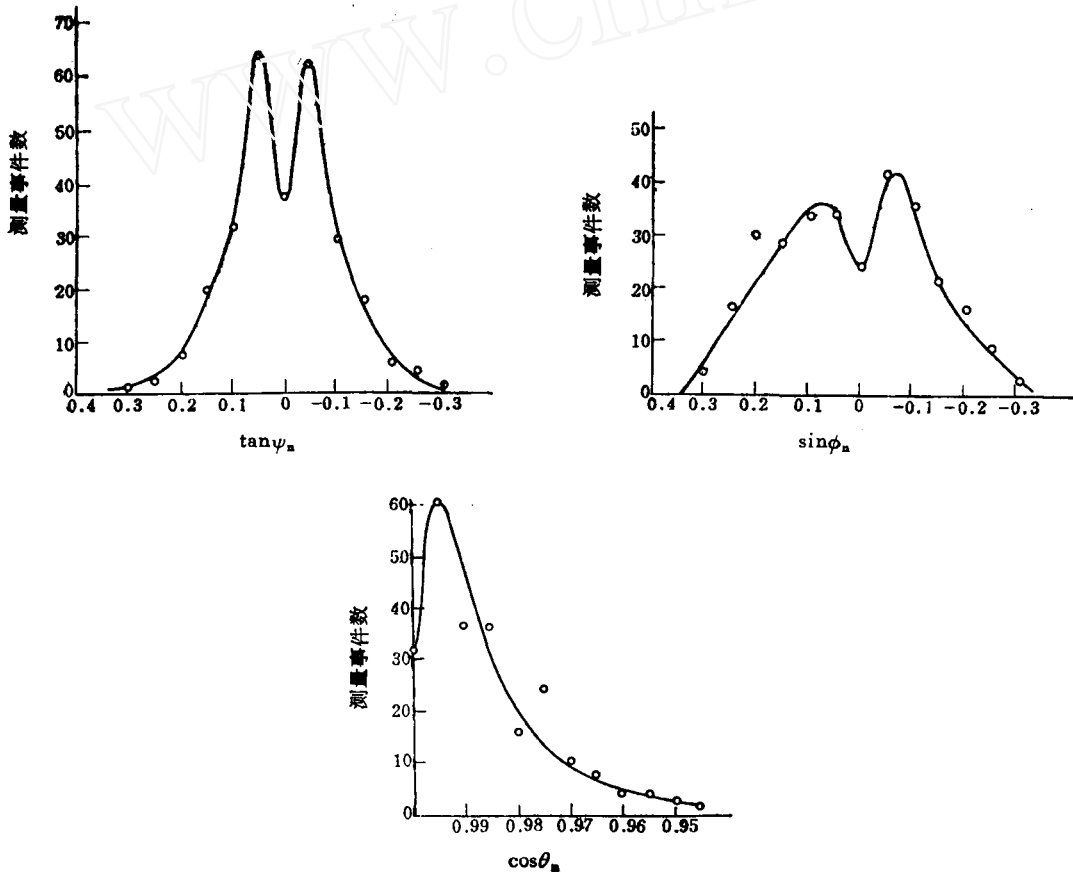


图 5 按(5)式计算的中子入射方向

式中

$$\begin{aligned}
 P_{\alpha x} &= \sqrt{2 m_{\alpha} E_{\alpha}} \cos \phi_{\alpha} \cos \psi_{\alpha}, \\
 P_{\alpha y} &= \sqrt{2 m_{\alpha} E_{\alpha}} \cos \phi_{\alpha} \sin \psi_{\alpha}, \\
 P_{\alpha z} &= \sqrt{2 m_{\alpha} E_{\alpha}} \sin \phi_{\alpha}, \\
 P_{\text{Li}(8)x} &= \sqrt{2 m_{\text{Li}(8)} E_{\text{Li}(8)}} \cos \phi_{\text{Li}(8)} \cos \psi_{\text{Li}(8)}, \\
 P_{\text{Li}(8)y} &= \sqrt{2 m_{\text{Li}(8)} E_{\text{Li}(8)}} \cos \phi_{\text{Li}(8)} \sin \psi_{\text{Li}(8)}, \\
 P_{\text{Li}(8)z} &= \sqrt{2 m_{\text{Li}(8)} E_{\text{Li}(8)}} \sin \phi_{\text{Li}(8)}.
 \end{aligned}$$

这里 m_{α} 和 $m_{\text{Li}(8)}$ 分别为 α 粒子和 ${}^8\text{Li}$ 核的质量。

只要任意规定一个参考方向作为中子入射方向，譬如规定乳胶平面的轴线作为中子入射方向，则 ψ_{α} , ϕ_{α} 和 $\psi_{\text{Li}(8)}$, $\phi_{\text{Li}(8)}$ 就是 α 粒子和 ${}^8\text{Li}$ 核与此轴线的水平夹角和倾角。

作为一个实例，用 ψ_n , ϕ_n 和 θ_n 都等于零的 12.06 兆电子伏中子入射，由测量的有关参数按(5)式计算得到的结果示于图 5。

由于误差传递， ψ_n 与 ϕ_n 的峰值有约 $\pm 3^\circ$ 的偏离， θ_n 的峰值有约 $\pm 5^\circ$ 的偏离。选用 $\tan \psi_n$ 两峰的平均值，可准确地定出 ψ_n ；同样选用 $\sin \phi_n$ 两个峰的平均，可定出 ϕ_n ，这样就定出了中子的入射方向。

三、连续谱测量

中子源是由 14.1 兆电子伏的单能中子经过 4 厘米壁厚的铀球壳慢化得到的，如图 6 所示。

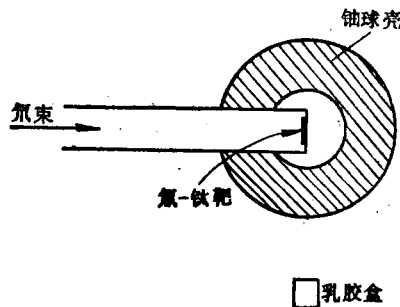


图 6 14.1 兆电子伏中子经铀球壳慢化的实验示意图

按(3)式计算， Q 取 -6.63 兆电子伏，这样得到的中子能谱还需要进行 ${}^{11}\text{B}(n, \alpha){}^8\text{Li}$ 反应分支比和截面修正。每个能量道的分支比 η 和截面 σ_0 的修正值随能量而变化，其取值见文献[5]。于是中子能谱公式由(4)式改写为

$$\Phi_0(E) = \left[N(E) - \frac{N_0(E+1)}{\eta(E)} \right] / \sigma_0(E). \quad (6)$$

式中 $\sigma_0(E)$ 是 ${}^{11}\text{B}(n, \alpha){}^8\text{Li}$ 反应中 ${}^8\text{Li}$ 核处于基态的反应截面，它与此反应的总截面 $\sigma(E)$ 的关系是：

$$\sigma_0(E) = \frac{\eta \sigma(E)}{\eta + 1}. \quad (7)$$

14.1 兆电子伏中子经铀球壳后的能谱如图 7 所示。

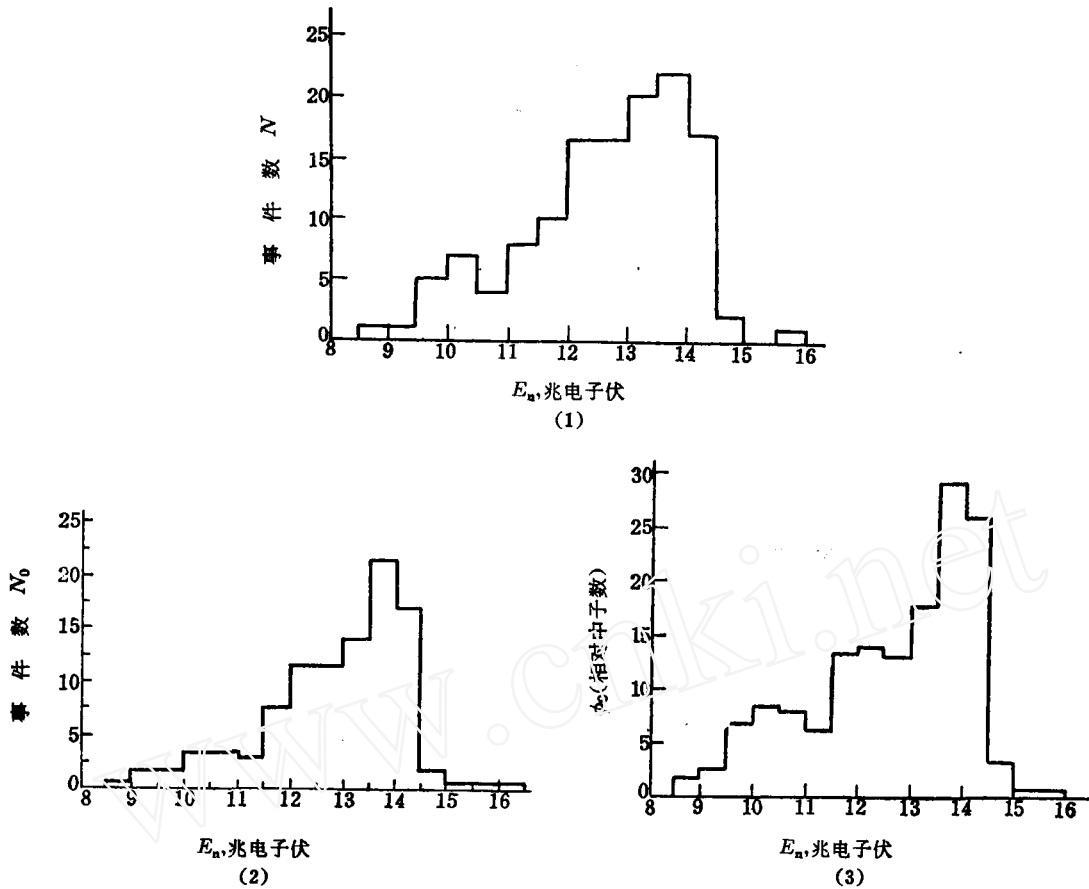


图 7 14.1 兆电子伏中子经铀球壳慢化后的中子能谱
 (1) 未修正; (2) 作了分支比修正; (3) 作了分支比与截面修正。

四、载硼乳胶测量快中子能谱的适用范围

对于核-1 型载硼乳胶经中子照射后再用 ^{60}Co 强 γ 射线照射, 采用 (α, γ) 分辨处理技术, 结果在 500 伦 γ 本底下能清晰地观察到 $^{11}\text{B}(n, \alpha)^8\text{Li}(\beta^-)^8\text{Be}(2\alpha)$ 反应的锤星径迹。如能进一步研究 (α, γ) 分辨处理技术, 有可能进一步提高允许 γ 剂量的水平。

用高通量(积分中子通量 $\leq 10^{10}$ 厘米 $^{-2}$) 14.1 兆电子伏中子照射载硼乳胶, 结果表明, 载硼乳胶测量快中子的量程可在 10^8 — 10^{10} 厘米 $^{-2}$ 范围内, 更高通量时由于反冲质子径迹的干扰, 已难以测量。

在 7.92 兆电子伏中子能量时, 能观察到反应的锤星径迹如图 1(1) 所示, 由于径迹短小, 测量误差较大, 可以认为这个能量已是测量的下限了。

五、讨 论

1. 利用本文提出的方法可以在 500 伦左右的强 γ 本底和 10^8 — 10^{10} 厘米 $^{-2}$ 的中子通量

条件下, 测量 8 兆电子伏以上无定向的快中子能谱。

2. 此方法的能量分辨率约 8%, 比反冲质子法稍差。

3. 用本文的方法可以测定单能中子束的入射方向, 偏差 $<5^\circ$ 。对于连续谱, (5)式所需的数据可由测量给出, 因此仍可定出方向。

本工作进行过程中得到了许多同志的帮助和协作, 卢慧筠同志协助计算, 刘惠长等同志提供了优质的乳胶, 叶静萍、秦新喜、金荣华、肖文明、戴能雄等同志协助照射。

参 考 文 献

- [1] 秦新喜等, 原子能科学技术, 1,91(1976)。
- [2] A. H. Armstrong et al., *Phys. Rev.*, **103**,335(1956)。
- [3] M. Sakisaka, *J. Phys. Soc. Japan*,**14**,554(1959)。
- [4] 张应等, 原子核乳胶中带电粒子能量与射程关系, 原成汇编 2,27(1974)。
- [5] 顾洪坤等, 待发表。

(上接第135页)

本工作进行过程中, 李祝霞、杜冠惠、申本新、韩进琴、曾秋泉等同志参加了部分工作。金星南、卓益忠、陈永寿等同志提出了宝贵的意见。

参 考 文 献

- [1] L. Rosen et al., LA-2643 (1961)。
- [2] К. М. Михайлиха и др., Нейтронная физика, Госатомиздат, 1961, стр. 249。
- [3] B. Antolkovic, *Nucl. Instrum. Methods*, **100**, 211 (1972)。
- [4] B. Antolkovic, Proc. Int. Conf. on few Particle Problems in the Nuclear Interaction, Los Angeles, North-Holland, Amsterdam, 1972, p. 695。
- [5] B. Antolkovic, *Nucl. Phys.*, **A219**, 332 (1974)。
- [6] 刘惠长等, 物理, 2, 8 (1973)。
- [7] 张应等, 原子核乳胶中带电粒子能量与射程关系, 原成汇编, 2, 27 (1974)。
- [8] C. Wong et al., *Nucl. Phys.*, **33**, 680 (1962)。
- [9] D. I. Garber et al., BNL-400, (3rd Ed.), 1970。
- [10] C. A. Levinson et al., *Annales of Physics*, **2**, 471 (1957)。
- [11] J. B. Marion et al., Fast Neutron Physics, Part II, Section V. D, Interscience Publishers, New York-London, 1963。
- [12] D. Miljanic et al., *Nucl. Phys.*, **A215**, 221 (1973)。
- [13] M. Jain et al., *Nucl. Phys.*, **A153**, 49 (1970)。
- [14] G. S. Mani et al., *Nucl. Phys.*, **A172**, 166 (1971)。
- [15] Y. C. Tang et al., *Phys. Rev.*, **123**, 548 (1961)。
- [16] A. K. Jain et al., *Nucl. Phys.*, **A195**, 566 (1972)。
- [17] J. R. Pizzi et al., *Nucl. Phys.*, **A136**, 496 (1969)。
- [18] K. Itonaga et al., *Prog. Theor. Phys. Japan*, **44**, 1232 (1970)。
- [19] P. Kitching, *Phys. Rev.*, **C11**, 420 (1975)。
- [20] J. C. Alder et al., *Phys. Rev.*, **C6**, 18 (1972)。
- [21] D. Bachelier, Ph. D. Thesis No. CNRS 5636, Université de Paris, 1971, p. 53。
- [22] A. K. Jain, *Nucl. Phys.*, **A233**, 145 (1974)。
- [23] P. Gaillard et al., *Phys. Rev. Lett.*, **25**, 593 (1970)。
- [24] R. Hagelberg et al., *Nucl. Phys.*, **A207**, 366 (1973)。
- [25] A. K. Jain, *Nucl. Phys.*, **A216**, 519 (1973)。
- [26] K. Baehr, *Phys. Rev.*, **178**, 1706 (1969)。
- [27] J. R. Pizzi et al., *Phys. Lett.*, **28B**, 32 (1968)。