

# 应用飞行时间方法測量快中子散射能譜

顧以藩 凌貴中 江文勉 刘繼才

在 1.2 米迴旋加速器上利用多道毫微秒飞行時間譜儀試測了能量为 4.7 及 2.5 兆电子伏的中子在鉄上的散射能譜,定出了鉄的第一激发能級数值为 0.8 兆电子伏。在能量为 2.5 兆电子伏时,还試測了碳及鈾的散射中子能譜。

## 1. 引言

在兆电子伏能量范围内,中子与物质相互作用的主要形式是弹性散射和非弹性散射。研究散射中子的能譜,对于了解核能級結構以及設計建造原子核反应堆都是重要的。但是,在快中子能譜測量技术方面,长期以来缺乏一种方便而有效的方法。飞行時間技术自从 1954 年开始应用于快中子能譜測量以来,经过几年来的发展,已經証明是极有前途的方法<sup>[1]</sup>。关于方法的原理,在我們較早的工作中曾有过叙述<sup>[2]</sup>。本文发展了前一工作的方法,采用多道毫微秒飞行時間譜儀試測了 4.7 及 2.5 兆电子伏中子在鉄、碳及鈾上散射的中子能譜,得到了比較滿意的初步結果。

## 2. 实验設备

从 1.2 米直径的迴旋加速器上得到的加速质子束,由靜电偏轉板系統引出加速器外,经过一組四极矩聚焦透鏡及偏轉磁鉄,集聚在距离加速器 7 米远处的靶上(图 1)。由于迴旋加速器自然調制的結果,在靶上得到的质子束是持續時間大約 3 毫微秒、重复頻率每秒钟 10.8 兆周的脉冲,平均束流 1—2 微安。

在实验中采用了貼在鎢的衬板上的天然鈾靶,靶厚~300 千电子伏(当质子能量~6.5 兆电子伏时)。用水层流过靶室外壁进行冷却。选择了适当的靶室結構,以尽量减少散射物质。由  $\text{Li}^7(p,n)$  反应产生的中子包括能量相差 0.45 兆电子伏的两組成分。但是已知低能量組只占高能量組強度的 10% 左右(在  $0^\circ$  角时)<sup>[3]</sup>,因此这个源的单色性,对于初步測量來說,可以认为是滿足了要求的。

散射样品包括鉄、碳和鈾三种。鉄用低碳鋼,碳用石墨,各做成直径为 2 厘米、长为 5 厘米的圓柱体;鈾用直径~6 厘米、厚为 0.27 厘米的天然鈾的圓板<sup>1)</sup>。在測量时,样品放在离靶中心~8 厘米的地方。記錄散射中子的探测器是蒽晶体(直径为 3 厘米、厚为 2 厘米)及  $\Phi\text{ЭV}-33$  型光电倍加管組成的閃爍計数器,它放在沿  $90^\circ$  散射角方向离开散射样品 1.2 米的地方。为了屏蔽从源直接入射的以及从房間

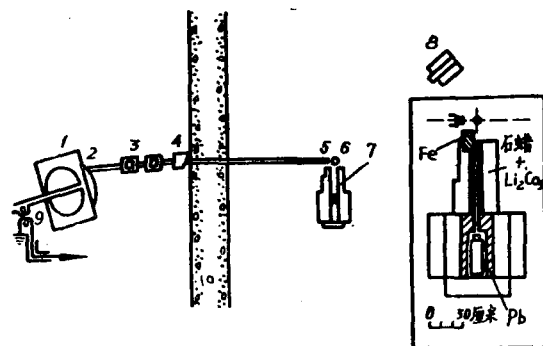


图 1 实验几何条件示意图

1—迴旋加速器真空室; 2—偏轉板; 3—聚焦透鏡; 4—偏轉磁鉄; 5—靶室及靶; 6—散射样品; 7—中子探测器及屏蔽系統; 8—长計数管; 9—D形盒共振綫及耦合引出綫圈; 10—混凝土防护牆。右下角为 5, 6, 7 三部份之放大图,尺寸按图示比例。

1) 鈾样品是現成的。

和空气散射的中子及 $\gamma$ 射线造成的本底,探测器装在一个大的屏蔽系统内,包括铅层和石蜡及碳酸锂(按体积1:1)的混合层;在前方靠靶的部位还采用了铁块,以加强对源直接来的中子的屏蔽(图1)。

从样品散射的中子到达探测器的时间谱是用一个多道时间分析器来测量的。时间分析器

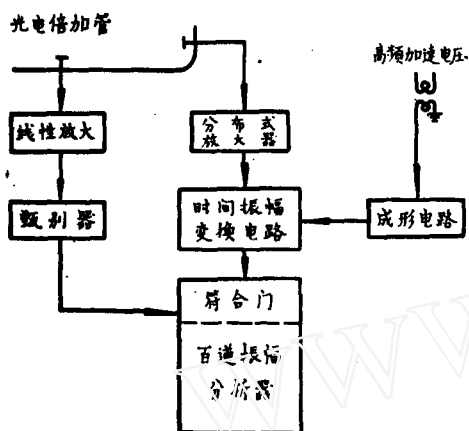


图2 多道时间分析器线路方框图

包括两个主要部分:时间振幅变换电路和百道振幅分析器<sup>1)</sup>(图2)。从回旋加速器D形盒电路的一个共振线圈耦合取出一定幅度的高频电压,然后将此电压成形为在相位上与高频电压同步的“控制脉冲”。从中子探测器光电倍增管的阳极引出毫微秒上升时间的“中子脉冲”,时间振幅变换电路将“中子脉冲”相对于“控制脉冲”的时间间隔变换成为相应的脉冲高度,然后用振幅分析器进行分析。振幅分析器的工作由“选择道脉冲”控制。选择道脉冲是由光电倍增管第八个次极引出的线性脉冲经过放大和振幅选择后得到的。选择道的应用改善了时间分析器的分辨能力,也为中子探测器提供了一个确定的阈。

在测量中,还用了一个标准尺寸的长计数管<sup>[4]</sup>,放在与质子束方向成 $45^\circ$ 角,距靶 $\sim 3$ 米的地方,作为靶上中子产额的监视器。

### 3. 实验步骤

在正式测量之前,我们对时间分析器的线性情况及道宽进行了测定。大约从15道到60道保持有较好的线性(图3),在这个范围内道宽为0.78毫微秒。利用 $\text{Cs}^{137}$  $\gamma$ 源的康普顿电子振幅谱的边界,并根据质子及电子在底晶体中光产额的关系曲线<sup>[5]</sup>,对选择道的阈进行了相应于中子能量的刻度。在测量时选用了 $\sim 1$ 兆电子伏中子的能阈。

我们对整个谱仪的分辨能力进行了了解。不考虑飞行距离的不确定性,谱仪的分辨能力可以由下面的公式定出:

$$\delta(\%) = \frac{2.8\sqrt{E\Delta t}}{L}$$

其中 $E$ 为中子能量,用兆电子伏表示; $L$ 为飞行距离,用米表示; $\Delta t$ 为谱仪的总的分辨时间,用毫微秒表示。为了确定 $\Delta t$ 的数值,我们测量了由加速器自然调制得到的质子束打在铝上产生 $\gamma$ 射线的宽度,得到3毫微秒的结果(图4)。这样的分辨时间达到了现有较好的快中子飞行时间谱仪的水平<sup>[6]</sup>。根据前面的公式,在 $\Delta t = 3$ 毫微秒, $L = 1.2$ 米的情况下,对于4.7兆电子伏的中子, $\delta$ 将为15%;对于2.5兆电子伏的中子, $\delta$ 为11%。

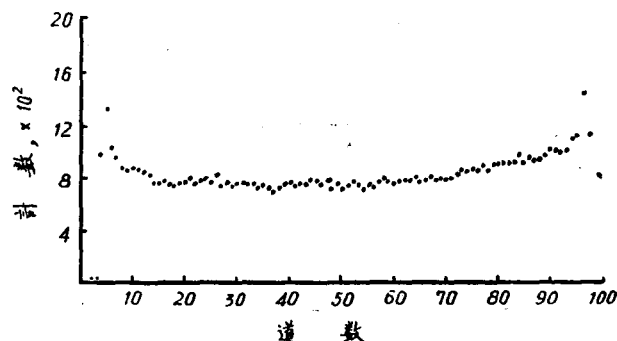


图3 时间分析器线性测试结果  
 $\text{Cs}^{137}$ 放射源的 $\gamma$ 射线按时间的分布情况。大约从15道到60道保持有较好的线性。

1) 将另文描述。

在加速质子束能量分散程度、靶厚等条件确定的情况下,谱仪总的分辨时间决定于回旋加速器束的自然调制宽度、中子探测器以及时间分析器线路的分辨时间。我们测量了光电倍增管脉冲上升时间,得到数值~2毫微秒。考虑到时间分析器的分辨时间很小(<1毫微秒),并扣除光电倍增管上升时间所占的部分,可以从测得的 $\Delta t$ 推知自然调制束宽不大于2.3毫微秒。

我们对测量中的本底情况进行了考察。经过试验,采用目前的屏蔽条件,取得了良好的效果(参看后面的测量结果图6,铁的散射中子峰的最大每道计数与本底每道计数之比约为5:1)。需要指出的是,本底情况还不够稳定。看来这与加速器束的几何情形不稳定有关。因此,还有必要考虑进一步的措施来解决这个问题。

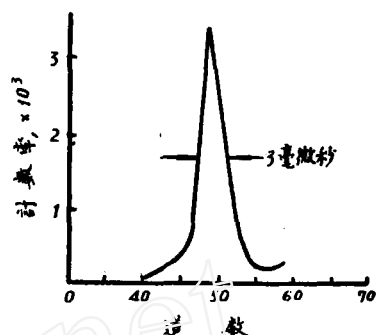


图4 回旋加速器自然调制得到的质子束打在铝上产生的 $\gamma$ 射线的时问分布,半宽度3毫微秒相应于谱仪总的分辨时间 $\Delta t$

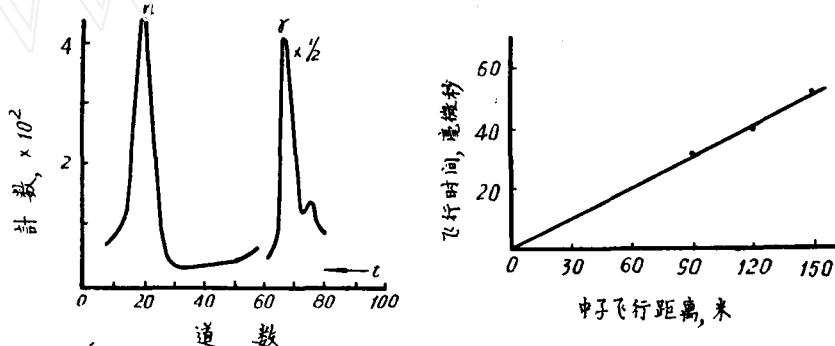


图5  $\text{Li}^7(p, n)$  反应产生的中子能谱

左图为飞行时间谱,飞行距离为1.2米,测量角度 $0^\circ$ ;右图为中子飞行时间与不同距离的线性关系,直线通过原点说明测量飞行时间所用的道宽数值0.78毫微秒是准确的。这样定出的中子能量为4.7兆电子伏。

我们测量了  $\text{Li}(p, n)$  反应的中子能谱,确定了初级中子能量为4.7兆电子伏(图5)。根据已知的反应阈值1881.1千电子伏<sup>[7]</sup>,反推出回旋加速器质子能量为6.5兆电子伏,这个数值比曾经用乳胶方法测得的值  $6.8 \pm 0.1$  兆电子伏要低<sup>[2]</sup>。在测量样品时,我们还采用了较低能量的中子。用直接放在靶前相应厚度的铝箔降低加速质子能量,从而由  $\text{Li}(p, n)$  反应得到能量为2.5兆电子伏的中子。

每个样品的测量包括用样品及不用样品的两组数据,它们的测量时间由长计数管的同一计数控制。不用样品测到的是本底谱,而两组数据的差值则是纯粹由样品给出的效应谱。在测量前后及测量过程中,对时间分析器的线性及选择道的阈进行了反复的校验。

#### 4. 测量结果

图6是入射中子能量为4.7兆电子伏时铁的散射中子能谱。由于能量较高,谱仪的分辨能力不够,铁的弹性散射中子与非弹性散射中子不能很好地区分开来。为了确定铁的第一激发态能量,我们将入射中子能量降至2.5兆电子伏。测量结果见图7。从谱中可以清楚地看到两组分得较好的中子,能量较低的一组相应于铁的第一激发能级散射的中子。中子的能量可以根据谱中第一个 $\gamma$ 射线峰的位置来计算。在两个 $\gamma$ 射线峰中,前面一个相应于中子在铁样品上散射,铁激发后产生的退激发 $\gamma$ 射线,它标志着散射中子飞行的起始时刻;后面一个相

应于靶上 $\gamma$ 射线在铁上散射的结果。我们得到弹性散射中子的能量为 2.5 兆电子伏, 第一激发态非弹性散射中子的能量为 1.7 兆电子伏。因此, 铁的第一激发能级相应为 0.8 兆电子伏, 与已经确定得相当好的前入数据 0.850 兆电子伏<sup>[8]</sup>基本一致。

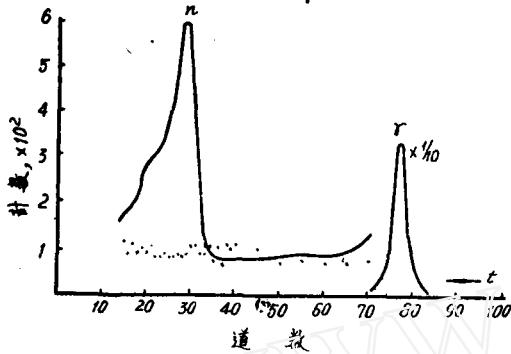


图 6 入射中子能量为 4.7 兆电子伏时铁的  
散射中子能量  
飞行距离为 1.2 米, 散射角为  $90^\circ$ 。图中点数为  
去掉样品后测得的本底数据。

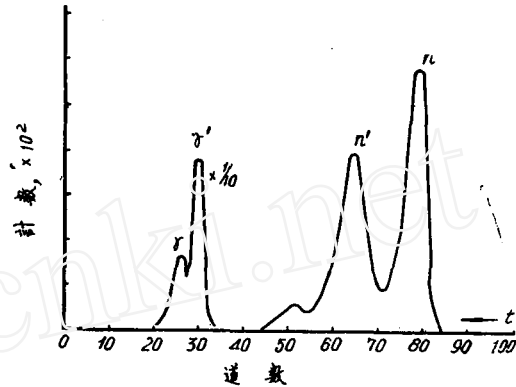


图 7 入射中子能量为 2.5 兆电子伏时  
铁的散射中子能谱  
飞行距离为 1.2 米, 散射角为  $90^\circ$ 。  
相应各道本底已经扣除。

在 2.5 兆电子伏能量下, 我们还试测了碳及铀的散射中子能谱。在碳的谱(图 8)中, 看到一组相应于弹性散射的中子; 此外,  $\gamma$  射线也只是一组, 相应于靶上  $\gamma$  射线在样品上的散射, 这间接地说明了在碳上没有非弹性散射作用。在铀的谱(图 9)中, 弹性散射中子峰迭加在非弹性散射中子及裂变中子的连续谱上, 由于数据的统计性较差, 对于连续谱的形状不能作出任何肯定的结论。

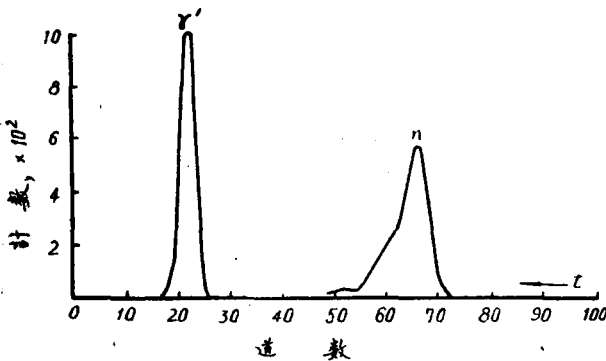


图 8 入射中子能量为 2.5 兆  
电子伏时碳的散射中子能谱  
飞行距离为 1.2 米, 散射角为  $90^\circ$ 。  
相应各道本底已扣除。

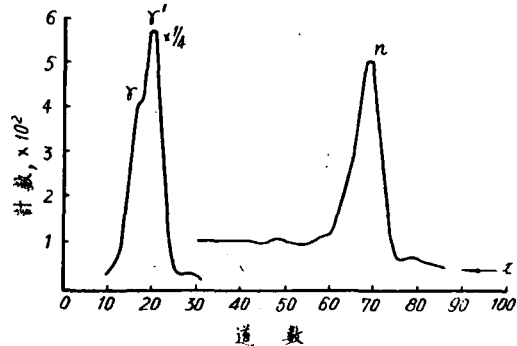


图 9 入射中子能量为 2.5 兆  
电子伏时铀的散射中子能谱  
飞行距离为 1.2 米, 散射角为  $90^\circ$ 。  
相应各道本底已扣除。

## 5. 结 语

应用飞行时间方法测量快中子散射能谱的初步结果是令人满意的。多道飞行时间谱仪的分辨时间达到 3 毫微秒; 在入射中子能量为 2.5 兆电子伏时, 铁的弹性散射中子与第一激发态非弹性散射中子分辨得相当好。

(下转第 126 页)

- [30] E. Lorenz, C. C. Congdon, Proc. 4th Internat. Congr. Internat. Soc. Hematol., 192—211, New York, 1954.
- [31] T. Makinodan, Proc. Soc. Exp. Biol. Med., **92**(1956), 174.
- [32] T. Makinodan, J. of Cell and Comp. Physiol., **50**(1957), 327.
- [33] T. Makinodan et al., J. of Immunology, **77**(1956), 250.
- [34] T. Makinodan et al., J. of Immunology, **79**(1951), 281.
- [35] R. M. Merwin & C. C. Congdon, Fed. Proc. **15**(1956), 129.
- [36] S. S. Myron et al., J. of Immunology, **77**(1956), 266.
- [37] P. C. Nowell et al., Cancer Res., **16**(1956), 258.
- [38] M. L. Randolph, Science, **125**(1957), 1083.
- [39] I. R. Schwartz, J. Appl. Physiol., **11**(1957), 22.
- [40] L. H. Smith et al., Cancer Res., **17**(1957), 367.
- [41] E. L. Simmons et al., Nature, **183**(1959), 556.
- [42] J. J. Trentin, Proc. Soc. Biol. Med., **92**(1956), 688.
- [43] B. Unsgaard, Acta Radiol., **56**(1961), 296.
- [44] I. S. Urso et al., Proc. Soc. Exper. Biol. Med., **100**(1959), 395.
- [45] P. Urso, C. C. Congdon, Blood, **12**(1957), 151.
- [46] H. H. Jr. Vogel et al., U. S. Atomic Energy Commission Unclassified Report, ANL—5597, 61—64, 1956.
- [47] O. Vos et al., Acta Physiol. Et Pharmacol. Neerl., **4**(1956), 482.

(編輯部收稿日期 1962 年 10 月 17 日)

(上接第 90 頁)

值得指出的是,在初步的測量中,我們對入射中子能量的單色性沒有特別要求,而這方面的進一步改善是完全有可能的。採用例如產生  $T(p, n)$  反應的薄氘靶,可以期望得到更好的分辨能力。

從鈾的試測結果可以看到,為了測量截面數值較小的散射樣品,還有必要進一步減小實驗本底,改善測量數據的統計性。

作者感謝迴旋加速器工作人員的密切合作。在電子學綫路方面,呂松生、蔡錫松、陳芳、戴貴亮等同志曾經先後進行了大量工作,我們也向他們致謝。我們還感謝何澤慧先生、陸祖蔭同志對工作的關心與支持。

### 參 考 文 獻

- [1] L. Cranberg, PUAЕ, Vol. 4, P/577, 1955.
- [2] 顧以藩,原子能科學技術,1961,第2期,87.
- [3] J. H. Gibbons and H. W. Newson, Fast Neutron Physics, Part I, p. 168, 1960.
- [4] W. D. Allen, Fast Neutron Physics, Part I, p. 364, 1960.
- [5] Б. В. Рыбаков и В. А. Сидоров, Спектрометрия быстрых нейтронов, стр. 97, 1958. (有中譯本)
- [6] А. А. Курашов и В. А. Сидоров, ИТЭ, 1961, № 6, 69.
- [7] Jones, Douglas, McEllistrem and Richards, Phys. Rev., **94** (1954), 947.
- [8] L. Cranberg and J. S. Levin, Phys. Rev., **100** (1955), 434; **103** (1956), 343.

(編輯部收稿日期 1962 年 10 月 21 日)