

利用飞行时间方法测量快中子能谱

顧以藩

在直径 1.2 米的迴旋加速器上,建立了应用飞行时间方法的快中子能谱仪。

利用迴旋加速器的自然调制,获得了相位稳定而宽度不大于 5—6 毫微秒的脉冲中子源。中子探测器由有机晶体及作用快的光电倍增管组成,上升时间约为 2—5 毫微秒。测量中子飞行时间的单道时间分析器,是根据延迟符合的原理建立起来的。晶体二极管的并联符合线路,作为最简单的单道时间分析器,存在着下述缺点:它的分辨时间随输入脉冲幅度改变,在测量宽能量范围的中子时,会使中子能谱产生畸变。为了避免上述缺点并改善谱仪分辨能力;根据苏联符拉索夫等于 1957 年创造的差分单道时间分析器的设计原理,我们建成了一台快中子能谱仪。经过实验测试证明,性能达到苏联同类型谱仪的水平。

利用飞行时间方法测量中子能量所根据的基本原理如下:不同能量的中子在飞越长度为 L 的距离时,由于飞行速度不同,飞越的时间也不同。它与能量有下列近似的关系:

$$t(\text{毫微秒}) = \frac{72.3L(\text{米})}{\sqrt{E(\text{兆电子伏})}}$$

因此,测量中子的飞行时间,就可以定出它的能量。

在应用飞行时间方法时,必须解决以下三个问题:(1)飞行距离规定后,要把中子从起点起飞的时刻记录下来;(2)要把中子到达终点的时刻记录下来;(3)要把这两个时刻之间相隔的时间——中子飞行时间测量出来。

中子飞行的终了时刻,是用放在终点的中子探测器来记录的。现在常常利用脉冲中子源技术,来记录中子的起飞时刻。中子源以一定周期脉冲式地放出中子,根据中子脉冲每次产生的时刻,就可以确定中子起飞的时刻。至于中子飞行时间的测量一般是用称为时间分析器的电子学仪器。

飞行时间方法在慢中子能谱测量方面,早已广泛使用,成为经典的方法了;但应用到快中子测量方面,还只有几年的历史。这主要是由于技术上的原因。因为能量在 0.1—15 兆电子伏之间的快中子,飞行一米数量级的路程只需要时间 10—100 毫微秒。所以,为了准确确定中子起飞时刻,要求有毫微秒数量级的脉冲中子源;为了准确确定中子飞行终了时刻,要求有动作快(毫微秒数量级)的中子探测器;最后,要求有测量毫微秒时间的单道时间分析器。所有这些,只有在毫微秒脉冲技术发展之后,也就是说,只有在用有机闪烁体的闪烁计数器、快符合线路及宽频带放大器等一系列技术发展起来以后,才有可能实现。

飞行时间方法用于快中子测量,虽然历史不久,但是发展很快。现在已经在很多方面显示出它是快中子能谱测量极有前途的一种方法。

在迴旋加速器上,我们利用飞行时间方法进行了快中子能谱测量的工作。

实 验 方 法

实验系统总的情况画在图 1 上。在 1.2 米直径的迴旋加速器上,能量为 6.8 ± 0.1 兆电子伏的质子束*从加速器真空室用偏转板引出,经过聚焦系统,并且偏转 13° 角,经过真空管道引

* 根据用原子核乳胶测量的结果。

到离加速器出口大约7米外的靶上。靶和加速器之间隔有二米厚的重混凝土屏蔽墙。在离靶一定距离处,放中子探测器。在测量过程中用长计数管作为快中子监视器。

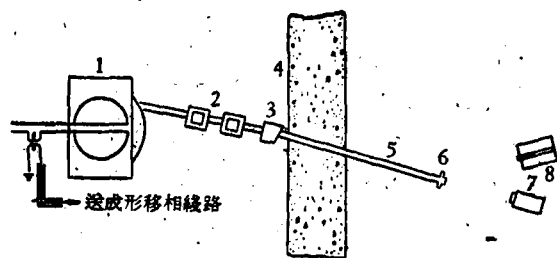


图1 实验系统总图

1. 回旋加速器; 2. 四极矩磁透镜; 3. 偏转磁铁;
4. 重混凝土屏蔽墙; 5. 真空管道; 6. 靶室; 7.
中子探测器; 8. 长计数管监视器。

下面分别叙述实验方法的三个主要部分。

1. 确定中子起飞时刻——脉冲中子源的问题 回旋加速器的加速机制本身决定了加速出来的粒子束不是连续的, 而是一系列具有一定重复频率一定宽度的脉冲。这种机制称为自然调制。自然调制得到的脉冲和高频加速电压相位是同步的, 它的重复频率就等于高频加速电压的频率, 为 10.85 兆赫, 相当

于 92 毫微秒周期; 它的宽度根据我们的测量, 在 5 毫微秒左右, 与文献一般数据是符合的。用这种脉冲离子束轰击靶, 就可以得到适合我们要求的脉冲中子源。中子从源起飞的时刻, 可以根据中子脉冲的产生时刻定出, 间接地可以根据高频加速电压的一定相位来确定。

自然调制得到粒子脉冲的宽度和它相对于高频加速电压的相位, 与加速器的工作情况关系很大。一些参数(例如高频加速电压、偏转板电压)如果改变, 就会引起粒子脉冲相位和宽度的变化。这样, 根据高频电压的一定相位来确定中子起飞时间, 就会引起误差。因此稳定回旋加速器的主要参数, 首先是高频加速电压和偏转板电压的稳定, 十分必要。作为这整套工作中的一项, 建立了加速器谐振电路自然频率的稳定装置和 D 形盒电压的电子学稳定装置[1]。这两套装置结合起来, 保证在所需要的加速器工作条件下, D 形盒电压稳定在 1% 左右。

为了标志中子的起飞时刻, 需要得到一个与高频电压有固定的相位关系的脉冲信号。为此, 我们将一个线圈和加速器 D 形盒电路的一个共振线相耦合, 取出高频电压, 经高频同轴电缆送到一个采用削波放大微分方法的成形线路成形。成形后的脉冲, 我们称之为控制脉冲, 它对应于每个周期高频电压的一定相位, 它的上升时间约 3—5 毫微秒。我们就用它来标志中子的起飞时刻。

2. 确定中子飞行终止时刻——中子探测器的問題 已经说过, 为了准确确定快中子飞行的终止时刻, 要求作用快的中子探测器。我们所用的闪烁计数器(由有机晶体闪烁和光电倍增管 $\Phi 9V33$ 组成)产生中子脉冲的上升时间, 主要是由光电倍增管决定的。光电倍增管各级间的电压分配经过挑选, 大致符合最佳时间分辨条件。上升时间经过测定, 约为 2—5 毫微秒。

光电倍增管的稳定性经过长时间测试, 证明在加上电压后 2—3 小时内, 光电倍增管趋于稳定; 其后的十六小时内, 工作稳定, 误差(包括测试用电子学线路在内)约为 $\pm 1.6\%$ 。

3. 测量中子飞行时间——时间分析器的问题 为了测量中子飞行的时间, 我们建立了毫微秒时间分析器, 采用了最简单而常用的延迟符合方法。这个方法的原理是这样的: 在一个分辨时间为毫微秒数量级的符合线路两臂, 第一臂送进相应于中子起飞时刻的脉冲, 第二臂送进相应于中子飞行终止时刻的脉冲, 延迟第一臂的脉冲 t 时间, 如果得到符合计数 N_t , 这就意味着有 N_t 个中子飞行 t 时间后到达中子探测器。改变延迟时间, 可以得到各种飞行时间的中子计数。

在最初的工作中, 我们试验了最简单的单道时间分析器。它实际上就是一个快符合线路。我们采用了由三个晶体二极管组成的并联快符合线路(图 2)。它的特点是灵敏度大, 光电倍增管产生的脉冲幅度在 0.1 伏左右就能够触发这种线路, 而不需要预先放大。线路的分辨时

間是随輸入脉冲寬度而变的,最小可以达 10^{-10} 秒。綫路的一臂送进光电倍加管阳极产生的脉冲,即探测器记录到的中子脉冲,另外一臂送进控制脉冲。从快符合綫路出来的脉冲经过阴极跟随器、放大器和甄別器。甄別器把符合綫路只有一臂輸入时产生的脉冲去掉,然后送进定标器进行记录。为了改变控制脉冲的延迟,高频电压在送入成形綫路之前还经过一个移相綫路。移相綫路系由 PK-2 高频电纜做成,它保証成形后的控制脉冲能够以每次 1 毫微秒的时间間隔在 110 毫微秒范围内相对于高频加速电压移动。迴旋加速器高频加速电压的工作周期是 92 毫微秒,因此控制脉冲可以移在高频电压周期的任何一个时间。改变延迟时间,可以测出中子脉冲的时间分布情况,也就可以推知中子能谱。

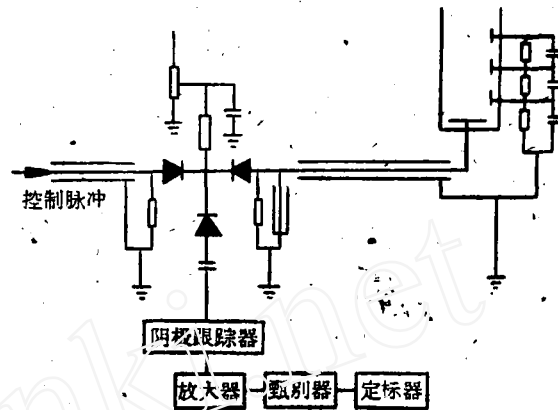


图 2 快符合綫路

但是控制脉冲产生的时刻并不等于中子从源起飞的时刻,而有一个相对延时。中子起飞的绝对时刻可以利用质子打在靶上伴随中子同时产生的 γ 射线在时间谱上的位置加以确定。 γ 射线飞行时间是不随能量而变的(3.3 毫微秒/米)。

利用这个綫路,我們测试了迴旋加速器自然調制的情况;也进行了中子能谱的初步测量;了解了本底对测量影响的程度。

但是,这种简单的綫路的主要缺点是它的分辨时间和輸入脉冲幅度有关,因此在很大程度上受到光电倍加管輸出脉冲振幅的影响。結果,在测量寬能量范围的中子时,使中子能谱产生畸变。在进行中子能谱的研究工作时必須考虑这一点。

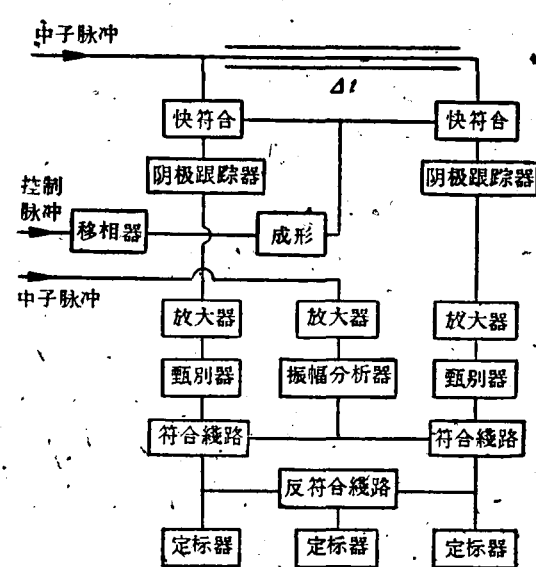


图 3 差分单道时间分析器原理图

时间为 Δt 的道,称为差分道。

在需要精确测定中子能量的时候,还必须考虑另外一个效应:即由于一定能量的中子在探测器中形成的脉冲,在振幅大小上是連續分布而不是单值的,它和控制脉冲符合的时刻相应产

因此,作为进一步的工作,建造了差分单道时间分析器,在原理上采用了苏联原子能研究所符拉索夫等人在一九五七年提出的方案^[2]。这种时间分析器避免了上述的缺点。如图 3 所示:它包括了两个快符合綫路,它們是相同的,輸入的一臂送控制脉冲,另一臂送中子探测器脉冲,唯一差别则是中子脉冲輸入第一个綫路是不經延时的,而送入第二个綫路时,則有 Δt 时间的延迟。因此,符合脉冲在两路中的时间分布情况实际上也是一样的,只是相对有 Δt 时间的延迟。这两个快符合道輸出的脉冲各经过阴极跟随器、放大器、甄別器送到一个反符合綫路。反符合綫路只选择第一路有脉冲第二路沒有脉冲的情况。如果两个快符合道的分辨时间做得足够大,那么恰当地选择延迟时间,我們就可以利用反符合綫路得到固定分辨

生挪动,数值约等于光电倍增管脉冲的上升时间。这个效应将降低谱仪的分辨能力。因此,在线路里还加进了脉冲振幅分析的一路。从中子探测器的光电倍增管的第十一个次极引出脉冲,经过阴极跟随器、放大器,送到振幅分析器。利用两个慢符合线路(分辨时间微秒数量级),可以使通过两快符合道的光电倍增管脉冲幅度限制在振幅分析器选定的窄范围里。利用这种办法,基本消除了上面所说的效应,改善了谱仪的分辨能力。振幅分析器还为中子探测器提供了一个确定的阈,保证了利用谱仪进行中子通量绝对测量的可能性(参阅[3])。

实验结果

1. 我们首先测量了回旋加速器经自然调制得到脉冲质子束的宽度。用质子束打铜靶,测量由 $\text{Cu}(p, \gamma)$ 反应产生的 γ 射线的时间分布,它应当和原来质子束的宽度相当。在实际情况下,由于还要加上测量系统其他部分时间分辨上的误差,测得峰的宽度要比原来质子的脉冲宽一些。图4表示了测量的结果, γ 峰半高处的宽度约为7毫微秒。因此,我们估计自然调制得到脉冲束的宽度大约不大于5—6毫微秒。

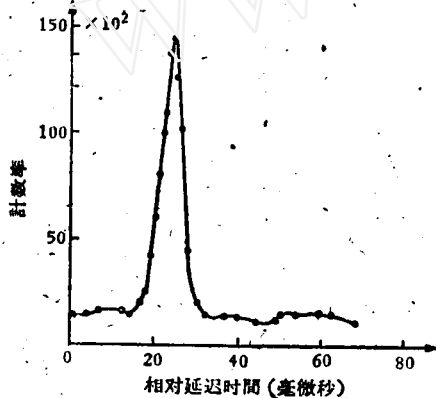


图4 $\text{Cu}(p, \gamma)$ 反应的射线时间分布情况

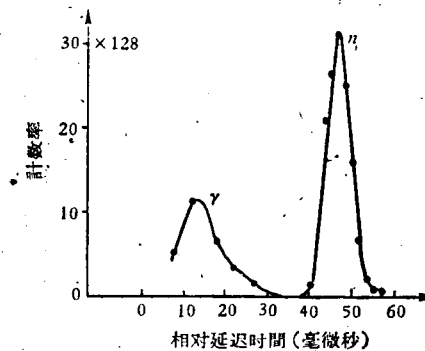


图5 $\text{Li}(p, n)$ 反应的中子能谱

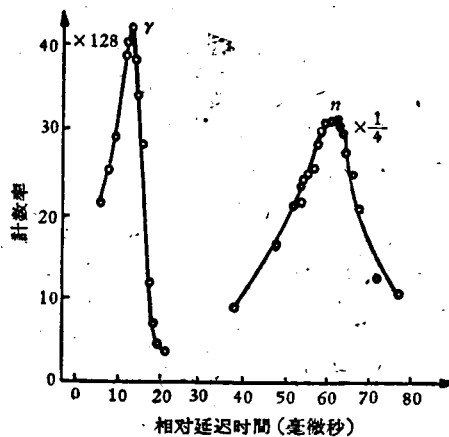


图6 $\text{Co}(p, n)$ 反应的中子能谱

2. 为了检验差分单道时间分析器的性能,我们先用它来测量了中子产额较大的 $\text{Li}(p, n)$ 反应的中子能谱。图5是锂的测量结果,中子探测器与入射质子束成 0° 角,放在距靶一米远的地方。靶用金属锂做成,厚度300微米。图上横坐标表示相对的飞行时间(零点是任意给定的),纵坐标表示计数率。第一个峰是从靶上产生的 γ 峰,它的位置可以看作是中子从靶起飞

的零时间加上 γ 射线飞行一米所需的时间(3毫微秒);第二个峰离第一个峰33毫微秒,相当于4.1兆电子伏。根据计算,它相当于 $\text{Li}(p,n)$ 反应形成核 Be' 的基态及第一激发态的两组中子。这两个能级相距0.4兆电子伏,它们在我们的情况下未能分辨开来。为了证明第二个峰是中子峰,改变了飞行距离,从一米移到一米半,测得 γ 峰位置基本不变,而中子峰移后了大约原来飞行时间的一半。

然后,我们测量了中子产额较小的 $\text{Co}(p,n)$ 反应的中子能谱。钴的纯度为99.8%,厚90微米。探测器放在距靶1.2米的地方,与入射质子束作 0° 角。在离 γ 峰45毫微秒的地方看到了一个很宽的中子峰,这可能是由若干组能量的中子汇成的,相应于平均能量3.3兆电子伏。因此反应的阈值约为3.5兆电子伏。

结 论

1. 在迴旋加速器上,利用自然调制的机制,在加速器参数现有的稳定条件下,可以得到相位基本稳定,宽度不大于5—6毫微秒的脉冲粒子束。

在测量过程中,仍旧发现有相位的飘移,大约为3毫微秒。这是和迴旋加速器工作的稳定情况有关的。目前,在我们用的加速器上,高频加速电压的振幅和频率以及磁场强度已经具备一定的稳定度。看来,还需要进一步考虑偏转板电压的稳定问题。离子源电弧电流如果能够稳定,也是很有好处的。

2. 这台快中子能谱仪,经过一系列的测试,证明工作稳定可靠,分辨时间为7毫微秒,达到苏联同类型谱仪的水平。

在初步测量中,我们没有采用长的飞行距离。当正式研究非连续中子能谱(只有一组或几组能量的中子)时,可以拉长飞行距离,将被研究的各组中子移在下一个周期或下几个周期的空处,从而提高谱仪的分辨能力。由于迴旋加速器的质子束流还可以加强,这样的做法是完全现实的。

最后,感谢迴旋加速器工作同志的大力协助,特别是他们在稳定D形盒电压方面所作的努力。我们还衷心感谢建造差分单道时间分析器的同志,和在工作过程中给予指导帮助以及参加测量的同志。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院原子能研究所,原子能科学技术,6,360,1960.
- [2] Г. Ф. Богданов, Н. А. Власов, С. П. Калинин, Б. В. Рыбаков, В. А. Сидоров: *Атомная энергия*, 3, 204, 1957.
- [3] Б. В. Рыбаков, В. А. Сидоров: *Спектрометрия быстрых нейтронов*, гл. VII, §1, гл. VIII, §2, издательство главного управления по использованию атомной энергии при Совете министров СССР 1958.