

中子物理概况

何澤慧·楊 楨 陸祖蔭

原子能的发现和应用是二十世纪科学技术发展的重大事件。1939年发现中子轰击铀原子核可以使原子核分裂，同时释放大量的能量和产生中子，并且形成链式反应。这个现象被发现以后，人们很快就利用它建成各式各样的反应堆，为人类使用蕴藏在物质内部的巨大能量开辟了道路。在原子核反应堆中，中子起着决定性的作用，它维持链式反应，是释放原子能的媒介。所以研究中子的性质和研究中子与物质的相互作用是原子核物理学中最重要的问题之一。它一方面可以提供为设计反应堆各种必要的物理参数，例如各种截面、能谱、材料屏蔽性能，等等；另一方面又可以深入地探索原子核内部运动的基本规律，寻找更多的利用原子能的可能性。由于中子不带电，它与原子核相互作用时不受该核附近电场的排斥，任意能量的中子，甚至非常慢的中子也很容易进入核内引起核反应。使人们能观察到许多用带电粒子所得不到的现象，大大地丰富了人们对原子核反应机制和核结构的认识。

除此以外，中子物理的研究还与其他学科有着密切的联系，如利用冷或热中子束的波动性质进行物质结构的研究(中子衍射)，我们可以确定含有轻重元素的晶体中轻元素原子的位置，以及含有相邻原子序数的原子所组成的合金的结构。根据中子的磁矩和原子的磁矩相干衍射的作用，可以研究磁性物质的磁结构，定出铁磁或反铁磁结构，可以知道磁性原子磁矩的取向和大小，这种方法是目前直接观察微观磁结构的唯一工具。利用中子照射不同物质是目前制备人工放射性同位素最有效的方法。放射性同位素已广泛地应用到国民经济和文教卫生的各个部门，如农业科学、医学、生物学、化学、地质勘探、工业等等。

总之，中子物理在发展原子能事业为国民经济服务中起着重大的作用。也正因为这个原因，中子物理的研究，近年来得到了极其蓬勃的发展。从中子的能量范围讲，从最低能量的冷中子(~ 0.003 电子伏— 0.01 电子伏)起，经过热中子(0.01 电子伏— 1 电子伏)、慢中子(1 电子伏— 1000 电子伏)、中能中子(1 仟电子伏— 100 仟电子伏)一直到快中子和超快中子(100 仟电子伏—几十个亿电子伏)，共约跨 12 个数量级的能量范围。从被研究的元素来讲，几乎对周期表内所有的元素，包括超铀元素和若干种元素分离开的同位素都进行了研究。现在就中子物理几个主要方面的现状，简略地叙述如下。

微观中子物理

中子与物质相互作用时，由于中子不带电，磁矩又很小，与电子的相互作用很微弱，所以实际上只有中子与原子核的相互作用。只有当中子能量小于一个电子伏时，由于中子的波长与分子间的距离大小相类似，同时也发生了中子与分子间或晶格间的相互作用。利用中子衍射来研究固体的结构就是根据这个原理。能量大于 10 兆电子伏的中子与核相互作用时，由于这时中子的波长已小于核半径，我们就得到中子与核内单个或少数核子的直接相互作用。

原子核吸收一个中子，至少可以获得 5—8 兆电子伏的激发能(相当于中子在核内的结合能)，从而引起核的变化。大概说来，小于 0.1 兆电子伏的中子与核作用，除去对某些重核(如 U^{235} 、 Pu^{239} 、 U^{233})引起裂变，以及对某几种轻核的反应[如 B^{10} 、 Li^6 的 (n, α) 反应、 He^3 的 (n, p) 反应等]以外，主要是弹性散射及共振俘获。随着中子能量的增大，非弹性散射， (n, p) ， (n, α)

等反应也逐渐出现。当中子能量大于 10 兆电子伏时, $(n, 2n)$ 等反应逐渐占重要地位。图 1 是中子与物质相互作用随中子能量变化曲线的一个例子——银的全截面随中子能量变化的曲线。

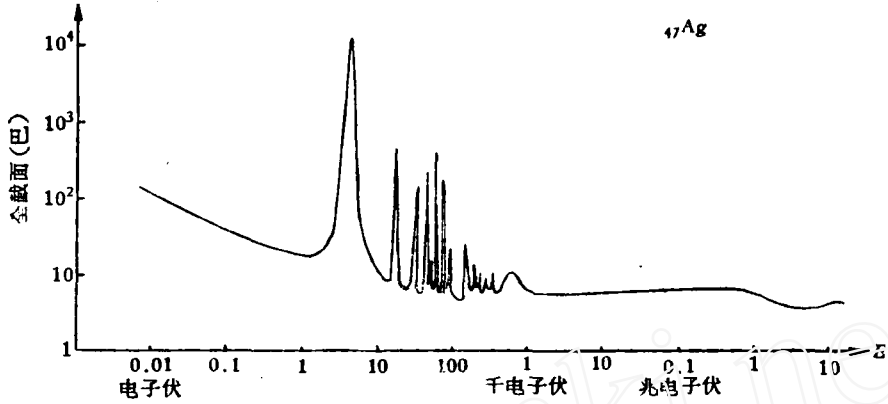


图 1 银的全截面随能量的变化关系

图中清楚地可以看到 $\frac{1}{v}$ 区, 共振区和高能区的波动现象。

从这图可以看出以下的现象:

1. 在热能区的截面比高能区的要大, 这里服从吸收与 $1/\sqrt{E}$ 成正比的规律, 或者叫作 $1/v$ 规律。很多元素都具有这个特性, 某些元素如硼表现得非常明显。
2. 在慢中子区出现一系列共振峰, 这个现象几乎所有的原子核都有, 这一段有共振的能区叫作共振区。共振区的范围、峰的大小、疏密和原子量有一定的关系。

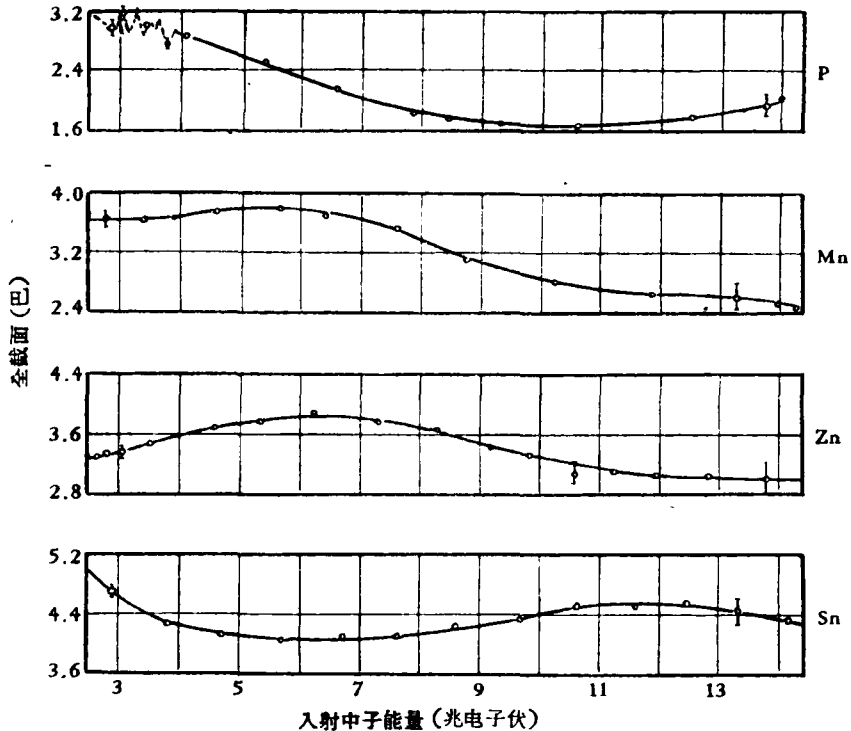


图 2 快中子能量与截面的关系(列出四种元素)

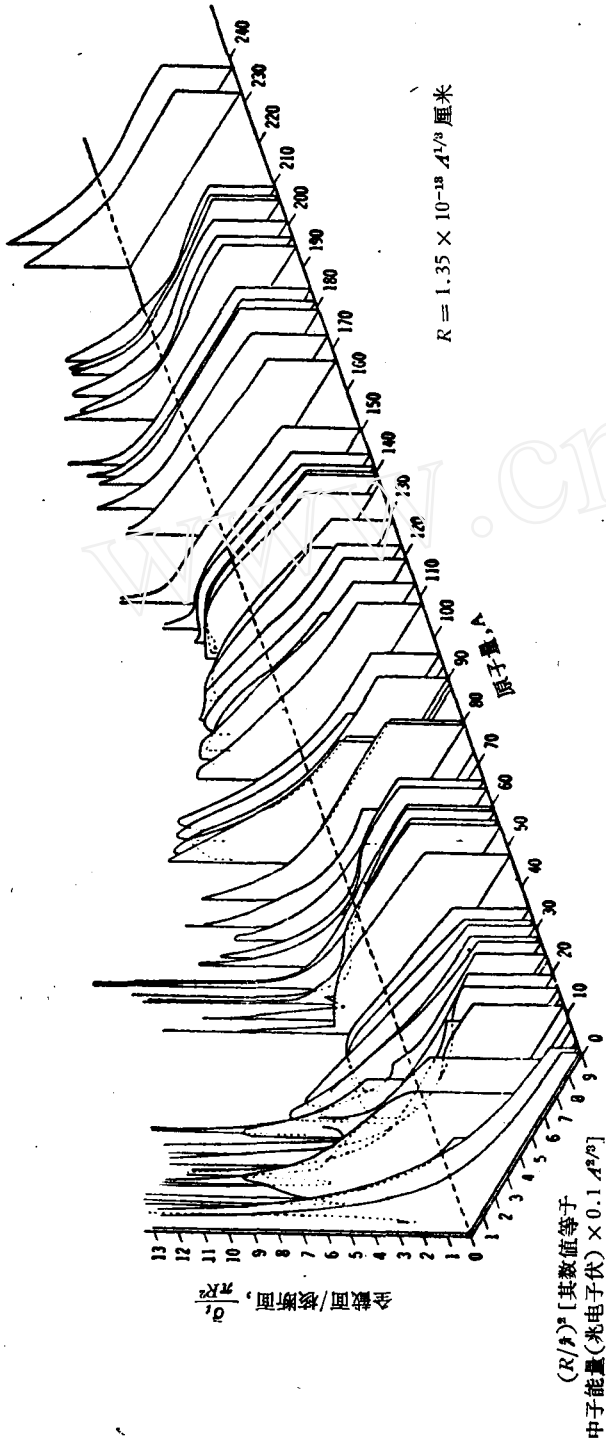


图3 原子量、全截面与快中子能量的关系

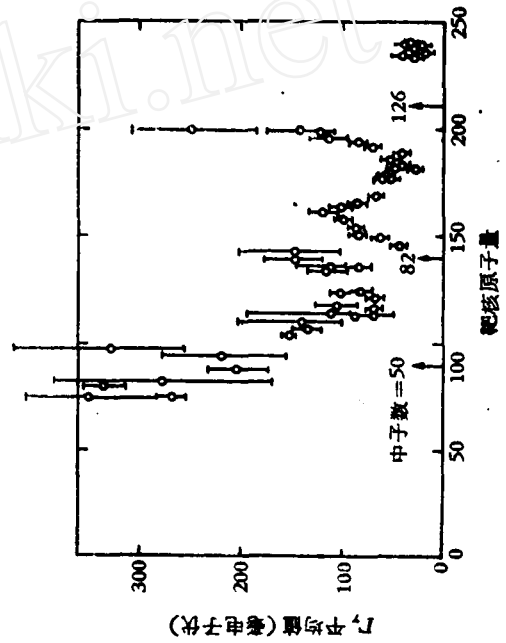


图4 不同核的放射 γ 跃迁几率 Γ_γ 与原子量的关系
图中很清楚地能看到壳层现象。

3. 在共振区以上,测得的截面呈缓慢的起伏,看不出象共振区那样的结构,看来这可能是由于受到仪器分辨率的限制,测不出共振峰而只能量到平均截面。这种现象也是所有元素几乎都有的特点。图2列出了磷、锰、锌、锡四种元素的快中子全截面。可以看出截面起伏随原子量A作有规律的变化。如果把所有元素的快中子全截面乘以适当的核几何参数之后按原子量排起来,就得到图3的形状。曲线的峰和谷的值随原子量的增大而向高能方向迁移。

从最近几年各国的资料看来,在热中子和慢中子能区范围内,全截面的工作做得较多,也比较精确。各种分截面的数据还残缺不全,即使做了一些也不够精确,各种与发展原子能事业有关的材料的吸收截面和散射截面,由于技术上的困难只做了小部分。例如对原子动力学中最重要的 U^{235} 的热中子裂变截面,目前几个做得似乎很仔细的测量给出的数值是555、579及606巴恩,每个测量的精确度自己都估计约1%,这些数据间之矛盾显然说明是有问题的。又如最重要的热中子截面之一——硼的吸收截面,以前大家认为是703巴恩,可是1958年精细测量结果是 755 ± 2 巴恩,1960年的结果是 764 ± 3 巴恩,而且还不能确定地说这个数值是最后肯定的。因此这些最重要的基本标准截面有必要进一步作更精确的测量。

研究热能区和共振区截面的许多现象,如 $1/v$ 规律、共振峰大小、共振能级分布的规律性等等,使我们能够分析它们与核内部结构之间的关系。这方面已开始了一些统计规律的研究,例如发现对同一个核素,所有能级放 γ 射线衰变的几率几乎相同,但随核的原子量的不同而有缓慢的变化,显示出核的壳层结构特性(图4)。对于核反应中放出中子的衰变,则在一个核内不同能级间就有很大的差异,显示了中子波在核表面的波函数对不同能级的差别较大。从参数中还可以算出中子穿出核表面的几率,一般称作“强固函数”或“力函数”,这是一个对光学模型理论很重要的参数。从实验得出的强固函数和由光学模型理论算出数值的比较列在图5。

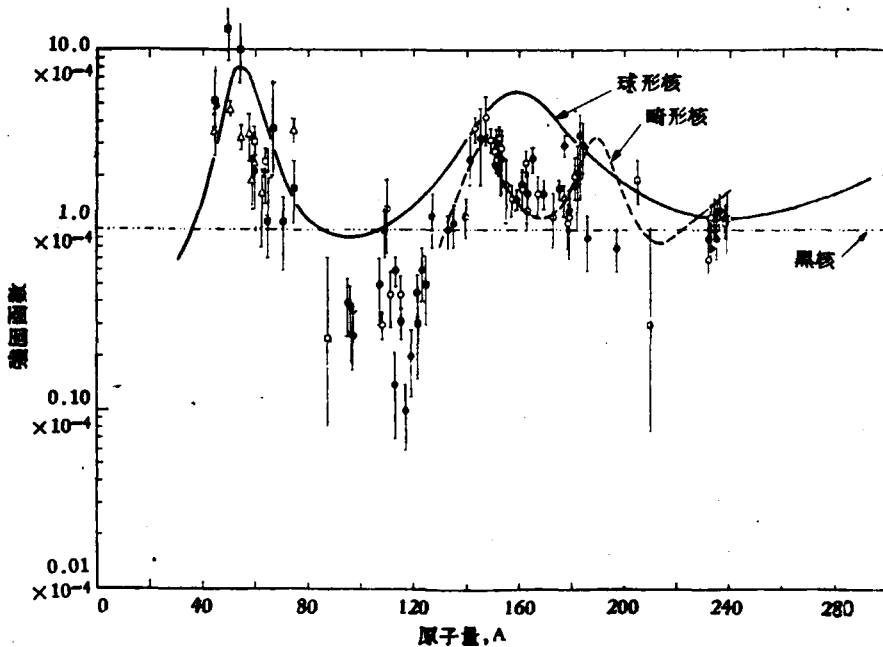


图5 用不同核模型可以计算出核表面可穿透性(强固函数)数值随原子量的变化关系

图中分别列出了黑核——·——·——,球形核——,畸形核---三种假设所得到的曲线,并列出现实验测得的点子,以资比较。

从上面二个图可以看出实验数据的误差还相当大,理论与实验的符合也还是粗略的,因此更仔细的实验才能对核模型的理论提供修正与改进。

研究共振区以上能量范畴全截面呈起伏变化的现象,可以认为中子射入核内后尚有一定逸出的可能,逸出的中子波与入射的中子波相互干涉,从而使截面呈起伏变化,这样计算的结果与实验结果符合得相当好。

在研究快中子与核的相互作用方面,除了全截面外,弹性散射、非弹性散射等反应,由于发展原子能事业的需要,近年来正在大力开展。弹性散射方面,0.1兆电子伏以下的中子引起的弹性散射角分布是各向同性的,高能区有显著的各向异性。目前中子能量范围在0.6—14兆电子伏之间已经测量了几十种元素的微分截面,以14兆电子伏及1兆电子伏左右的数据较多。非弹性散射方面的研究,在1—29兆电子伏左右中子能量范围内已经开展了不少工作,已发表了五十多种元素的非弹性散射的中子能谱和 γ 能谱。分析已有的实验材料,可以得到下面的初步结论:

1. 认为原子核与中子相互作用时,似乎应该把核的模型视为带有模糊边缘的混浊晶体。
2. 发现了一系列的理论假定与实验结果的差异,一方面指出了核的混浊度的不均匀性,另一方面指出了理论计算必需考虑到各种效应如非球形、自旋-轨道相互作用、激发旋转能级以及不同核(即使是相邻的核)的复数阶基本参数的变化等等。

宏观中子物理

宏观中子物理主要是从统计角度研究各种能量的中子在不同的宏观介质中的运动规律。各种能量的中子在介质中主要是与原子核相互作用,例如散射(弹性和非弹性)、吸收或引起裂变等。这些作用的综合效果是:中子由核反应产生,经受各种散射而慢化,由于运动方向的改变而扩散,最后被介质吸收或逸出介质,或者经由裂变或其他反应而增殖。这些性质都是反应堆工程的物理基础,清楚地了解这些现象对发展原子能事业是十分重要的,因此研究中子在介质中的慢化、扩散等现象是中子物理的一个重要方面。对于含有裂变物质的宏观组合体的研究,直接涉及反应堆的设计问题,已经发展成为堆物理这门新的学科,不预备在这里讨论了。

原则上讲,知道了中子与介质中单个原子核间的相互作用后,前面谈到的宏观现象也可以推导出来。迁移理论就是从这个观点出发,用统计的方法来处理中子在介质中的运动规律,用迁移方程式来描述这个过程,但事实上去解这个很复杂的方程式几乎是不可能的,特别是在有限的介质中。目前解决这个困难的办法主要有两个:一个是利用高速计算技术改进计算的精确度。另一个办法是借助于某些由实验决定的参数,采用简化的理论来进行计算,以适应实际的需要。常用的简化理论有扩散理论、年龄理论等,这些理论已广泛地被用来解决反应堆的计算问题。

前面讲的计算中都要引入一些参数,它们叫作宏观参数,例如中子年龄、扩散长度等。这些参数主要依靠实验来测定。在实验技术上,目前主要有两种方法:一种是在稳定的中子源照射下测量介质中各点的中子分布;另一种是用脉冲中子源照射,测量介质中间某一点的中子流随时间变化的情况,然后用扩散理论进行计算,求出扩散长度等数值。两种方法各有特点。前者测量设备比较简单,用普通 Ra-Be 或 Po-Be 中子源和一般的探测器就可以做;后者要用脉冲中子源,时间分析器等比较复杂的设备,但可以获得中子扩散慢化等较细致的数据,并且所需试验材料的数量也较少,例如测量石墨的参数时,所用的材料比第一个方法可能少约 10 倍。

由于原子能事业的发展,宏观中子物理研究的范围也在扩大。就目前看,这方面的理论还是很近似的,实验数据准确度还不够高,对比较复杂的现象,例如中子的慢化过程、中子的增殖

过程等等也都研究得很不够,质量不高,不能满足事业发展的需要。在具体问题上,我们可以例举出以下几个方面:

1. 中子在含氫物质中的慢化显著不同于在其他物质中的慢化。目前理论计算值和实验结果是不符合的。

2. 近来在反应堆中用有机液体作慢化剂和导热剂的,这些介质的有关宏观参数还有待进一步测量。

3. 利用脉冲中子源法对慢化过程的研究,目前还只应用到微秒技术,而有些实验,如水的慢化时间一共也只几个微秒。为了更精确地研究慢化过程,有必要利用更短的脉冲技术。

4. 测定慢化剂和反应堆结构材料、慢化剂和核燃料的组合体的各种参数的工作比测单纯慢化剂的参数更为重要,这方面工作尚待开展。

5. 一些宏观参数随温度有显著的变化,例如水的扩散长度当水由室温增加到 100℃ 时增加约 8%。这对反应堆的计算十分重要,尤其在目前广泛使用高温高压水堆的情况下,这些参数随温度的变化需要进一步仔细的测量。

中子物理实验的基本技术

中子物理实验中最基本的技术是中子的产生和探测、中子能量和中子流强度的测量技术。只有首先建立并掌握了这些技术,才有可能进一步进行各种各样的实验和各种参数的获得,才能进一步利用中子来探讨原子核的运动规律。

中子的产生

由于自由中子存在的寿命不长,因此人们主要依靠核反应来获得中子。从获得的方式来说,可以分为下列三类:

1. “天然”中子源——主要是利用放射性同位素引起的 (α, n) 或 (γ, n) 反应所产生的中子,最常用的是镭铍源、钋铍源及由一些放强 γ 射线的人工放射性同位素与铍或氘制成的光中子源。前者可以提供连续能谱的中子,一直到十几个兆电子伏;后者可以提供单能的,兆电子伏以下的近于中能的中子。这些源的优点是携带使用比较方便,但强度不大,例如 1 居里的钋铍源强度才达 10^6 中子/秒左右,1 居里的 $\text{Na}^{24} + \text{Be}$ 源强度仅为 10^5 中子/秒左右,而且这种光中子源都带有许多对探测器有不利影响的 γ 射线。

2. 利用加速器产生中子。我们知道不论什么加速器都可以用来产生中子,问题是中子能量的单色程度和中子通量的大小。在研究微观中子物理时常常要求有各种能量的单色中子源,目前常用的是利用静电加速器或倍压加速器加速质子或氘核打在不同元素的靶上(如 Li、T、d 等)而产生中子。利用不同单能量的离子或者取与单能量的离子入射方向成一定角度所飞出的中子,可以得到不同能量的单色中子。如在 2.5 兆电子伏的静电加速器上,利用 $p + \text{T}$ 、 $d + d$ 或 $p + \text{Li}$ 等反应,可得几十仟电子伏到 5 个多兆电子伏不同能量的单色中子,利用 $d + \text{T}$ 反应可以获得 12—18 兆电子伏的单能中子。在 200 仟电子伏的倍压加速器上,利用 $d + \text{T}$ 反应可得 14 兆电子伏左右的中子, $d + d$ 反应可得 2.5 兆电子伏的中子。目前比较困难的是获得 6—12 兆电子伏和 5—20 仟电子伏能区的单色中子。前者需要利用较高能量的静电加速器或可变能量的回旋加速器,后者需要加速器加速的离子的能量单一稳定,靶子很薄而均匀。利用脉冲离子源或其他方法配合飞行时间法,我们也可以进行各种参数与中子能量关系的测量,这里就不要求中子能量的单色性,但是存在着分辨率与中子强度的矛盾,1 仟电子伏以下能区的实验主要是用这种方法。最近几年来随着毫微秒技术和快速探测器的发展,快中

子方面也已应用这种方法。利用加速器得到的中子通量较大,一般倍压加速器可得到 10^7 — 10^8 中子/微安离子流。对于有些实验不需要单能的中子源,可用强离子源、厚靶、和 $d + \text{Be}$ 、 $d + \text{Li}$ 等反应或利用强电流电子直线加速器和 (γ, n) 反应,这些都可以得到相当强的连续或脉冲的中子源,中子能量展到十几个到二十多个兆电子伏。对于某些实验,要求中子源的体积小或者移动方便,可以将氘或氚的离子产生器与载有氘或氚的靶安装在一个管子内,利用一个100仟伏左右的脉冲或连续的高压发生器加速离子,使它直接打到靶上,利用这种中子管可以得到脉冲或连续的快中子束,瞬间强度可达 10^{12} — 10^{13} 中子/秒。虽然从加速器产生的中子都是属于快中子的范围,但只需使这种中子经过一层慢化剂,就可以得到比较慢的其他能区的中子。

3. 利用反应堆产生中子。反应堆是目前产生强中子通量最主要的工具,除了快中子堆主要产生快中子外,一般都产生各种能量的中子(快的、慢的和冷的),但主要是热能中子。将这种中子束通过 BeO 或石墨层,我们可以获得冷中子束。利用晶体谱仪或中子单色仪,可以选择出单能的冷中子或热中子。利用机械选择器配合时间分析器,可以获得各种能量的单色中子,但能量大于5个仟电子伏时,分辨率很差,需要转速很快的机械转子和很长的飞行距离;在这种情况下,中子的强度就将大大减弱,这里也存在着分辨率和光强的矛盾。为了克服上面这种困难,最近苏联建设了一种脉冲反应堆,就是在短时期内将反应堆功率升高许多倍,这样将可以大大地增强在实验所必需的短时期内中子的强度。

中子的探测

由于中子不带电,不能直接利用电离的方法来记录,只能间接地利用它和其他物质的原子核相互作用后之产物来记录中子。常用的探测方法有下列几种:

1. 利用中子和含氦或氟物质碰撞出的质子或 α 粒子的电离作用来确定中子的存在。如云雾室、原子核乳胶、含氦或含氟的正比计数管、带有含氟物质散射体的正比计数管、含氦闪烁计数器(晶体、液体或气体)等,都是依靠这个原理来记录中子的。这些探测器的效率以闪烁计数器为最高,如闪烁晶体的效率可达10—20%左右,这种探测器的效率是和中子的能量等有关的,适用于探测中能以上的中子。

2. 利用核反应产物来确定中子的存在。如含 B^{10} 或 He^3 的正比管,电离室,含 B^{10} 或 Li^6 的乳胶或闪烁体,都是利用中子和 B^{10} 、 Li^6 或 He^3 引起核反应所产生的 α 、 p 或 H^3 粒子来确定中子的存在的。由于 B^{10} 、 Li^6 或 He^3 对慢中子的吸收截面都很大,特别是 He^3 ,它的热中子吸收截面达5000巴恩。最近由于低温分离氦同位素技术的发展,已可以获得大量的纯同位素 He^3 ,因此充 He^3 的正比管或电离室是目前效率最高的中能及中能以下中子的探测器。这些方法除了用来记录较慢的中子,也可以用来记录经慢化剂慢化了的快中子。这种利用慢化剂和含 B^{10} 或 He^3 的正比计数管组合成的记录快中子的探测器具有这样的特性:在一定组合条件下,如慢化剂的形状、大小,正比管的大小、位置等等,对0.025—14兆电子伏能量的中子,灵敏度几乎不变,但由于作用时间较长,这种探测器不适用于快中子飞行时间谱仪。

3. 利用中子被稳定的原子核俘获后形成的放射性来指示中子的存在。这种方法一般称为活化法。许多元素吸收中子后变成放射性同位素,测量它们的放射性的强度,还可以作为中子流在照射时强度的度量。对慢中子常用的有镉、金、银、铜等。如果将这些元素用锡片包起来由中子照射,然后测量它们的放射性强度,那末这些放射性主要是由共振能区的中子所引起的,因为锡有强烈的吸收热中子的本领,而对共振中子则吸收很少,这样我们就可以知道中子流中共振中子与热中子强度的比例。对于快中子,我们可以选择某些元素,它吸收中子后所产生的某一种放射性是只由一定能区的吸热反应所形成的,如用 $\text{S}^{32}(n, p)\text{P}^{32}$ 这个反应,它的阈能

约为 0.9 兆电子伏,将硫照射后测量到 P^{32} 的放射性,就可以测定中子流中有大于 0.9 兆电子伏中子的存在。利用这种方法,可以把超过阈能的快中子分别出来。

4. 利用裂变反应来记录中子。含有裂变物质的电离室或计数器,在中子照射时,由碎片所产生的电离造成离子流的脉冲,脉冲的数目与通过电离室中子流的强度成正比。这种探测器使用比较简单,但效率低。

除了上面几种主要探测中子的方法以外,目前由于高效率探测 γ 射线的晶体闪烁计数技术的发展,利用观察非弹性散射 ($n, n'\gamma$) 或俘获中子 (n, γ) 时同时所放出的 γ 射线来记录中子是很有发展前途的。人们尽管已经创造了这么多种类的探测中子的方法,但由于实验要求的发展,还不能满足需要,提高中子的探测效率,特别是对中能中子、作用时间小于毫微秒数量级的探测器的探索、在较强 γ 辐射下分辨中子的问题等等,都有待于进一步的发展。

中子能量的测量

目前主要用下列几种方法:

1. 根据中子引起的反冲粒子的方向和能量来确定中子的能量,如含氦或氙的正比管,原子核乳胶,云雾室,闪烁计数器等。这种方法只适用于大于几百千电子伏的中子。低于这个能量的中子,由于反冲粒子的能量至多也只与中子的能量相同,并且它们的方向也不易很准确的测定,因此分辨率就变坏。这种方法的优点是设备简单,对几个兆电子伏的中子,分辨率并不差于其他方法。

2. 根据中子飞行时间来确定中子的能量。如用反应堆配合机械转子或脉冲宽度为微秒级的脉冲加速器为脉冲中子源,用多道时间分析器记录从一个脉冲同时出来的而能量不同的中子飞越一定距离所需的时间的分布,从而算出其能量的分布。目前 10 千电子伏以下的中子能谱主要是用这种方法测量的。利用毫微秒级的脉冲中子源和时间分析器,这种方法也已用来测量快中子的能量。用这种方法来测量中子能量,速度快而精确,但设备比较复杂。

3. 测量由中子引起核反应产物的能量来确定中子的能量。如 $He^3(n, p)H^3$, 它的反应能为 0.76 兆电子伏,利用含 He^3 的正比计数管,测量这个反应的产物的能量,可以定出引起这个反应的中子的能量。这种方法是对几百千电子伏能量的中子最为合适,分辨率可达百分之十几。

4. 利用活化法,如上面“中子探测器”3 节中所叙述的,我们可以粗略地估计中子的能量范围,这种方法比较简单方便。

5. 根据中子的波动性质,利用中子晶体谱仪来测量中子的能谱,这种方法主要应用于热能区以下的中子,对能量大于几个电子伏的中子,它的分辨率就很坏。

中子流强度的测量

为了测量中子各种参数的绝对值,往往须要知道所用中子流的强度。前面讲的各种探测器,都可以同时直接指示出中子流的相对强度,如利用活化法探测中子,当物质被中子照射时通过的中子流越强,形成的放射性核的数量也就越多,所以被照射的物质的放射性(单位时间内的衰变数)便可以作为中子流在照射时的强度的度量。但是精确测量中子流强度的绝对值是比较困难的问题。为了避免在每一个个别情况下去解决这个问题,我们可以与已知强度的标准中子源作比较。标准中子源(一般用镅-铍源)的强度,可以由另外专门进行的测量来确定,它的精确度可达百分之几。

目前测量中子源强度的方法主要有以下几种:

1. 中子源的中子在含氢物质中慢化后被某些元素如锰、金等吸收, 这些元素变为放射性同位素, 测量这些同位素的放射性, 可以定出中子源每秒钟所放出中子的数目。

2. 对某些中子源如 $T(d, n)He^4$ 、 $T(p, n)He^3$ 、 $D(d, n)He^3$ 、 $D(\gamma, n)H$ 等, 我们可以测量与中子同时产生的带电粒子来定出所产生中子的数目。 伴生粒子法。

3. 测量由于吸收中子 (如 $B^{10}(n, \alpha)Li^7$) 或产生中子 (如 $Be^9(\gamma, n)2He^4$) 同时产生的氦的容量来定中子的数目。

4. 测量中子在含氢物质中弹性散射时产生的反冲核的数目来确定中子源的强度。

中子源强度的精确测量, 在所有上面这些方法中都必須引入許多重要的修正, 要考虑到細小的常常难以控制的效应。因此, 在比較利用不同方法测定标准源中子强度的绝对值时, 常常发现它们的偏离显著地超过各种方法所表示的精确度。

最后談談在进行中子物理实验的工作中, 除了上述基本技术外, 还需要突出地注意本底清除的技术, 或者更精确地说, 是加大探测到的中子讯号及本底比的技术。本底的来源有二, 一是中子本底, 一是 γ 本底。中子本底在通常情况下主要是来自实验中所用的中子源、加速器或反应堆。因为一个实验一般只利用一部分、或一定立体角内的中子, 其它部分射出的中子就会与周围物质 (如空气、墙壁等) 碰撞而被慢化、散射等, 最后也射入探测器内, 造成中子本底。由于中子与物质的相互作用小, 不易屏蔽, 因此本底往往很大, 需要设法大大减少本底才能测出真正所需测量的现象。有的实验甚至要求本底减小到原通量的十万分之一, 才能测到比较满意的结果。有一些重要的中子探测器, 如闪烁计数器等, 对 γ 射线也很灵敏, 而中子源一般都伴有 γ 射线, 中子与周围物质相互作用也产生 γ 射线, 因此 γ 本底的消除也常常成为一个重要的问题, 在最近发展的闪烁计数器中子—— γ 分辨技术就是为了解决这些问题而作的一方面的努力。

中子物理范围很广, 有关中子引起重原子核裂变的研究, 将另文专门叙述。至于中子的基本性质, 如中子的衰变、中子的极化、中子与基本粒子的相互作用等等的研究, 由于篇幅所限, 不一一谈了。