

中子

——一个活跃的“基本”粒子

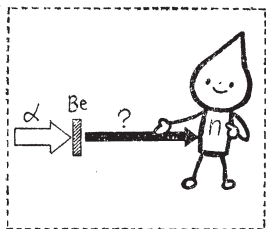
顾以藩

在“基本”粒子家族中，中子称得上是老一辈的成员了。当1932年第一次在实验上证实中子的存在时，已知的“基本”粒子还不超过四、五种；而现在这个家族的成员数目已经增加到三百个以上了。

但是，中子不象其它许多同族成员那样在宇宙线中或是在高能加速器上发现；它是在低能核物理实验室中发现的。它的大部分历史和低能原子核物理联系在一起。围绕着中子的研究，形成了一门具有相当独立性的分支学科——中子物理。这门学科兼有应用学科和基础学科的二重性质。作为应用学科，中子物理为核武器（诸如原子弹、氢弹、中子弹）、反应堆设计（用于动力、发电等）以及原子能的其它应用提供物理依据和基本数据。作为基础学科，中子物理一开始站在核物理的最前沿，长期以来在低能核反应和核结构的研究中发挥了重要作用。近年来这个领域进一步扩展，并且不断渗透到其它学科中去，生长出新的边缘学科来。

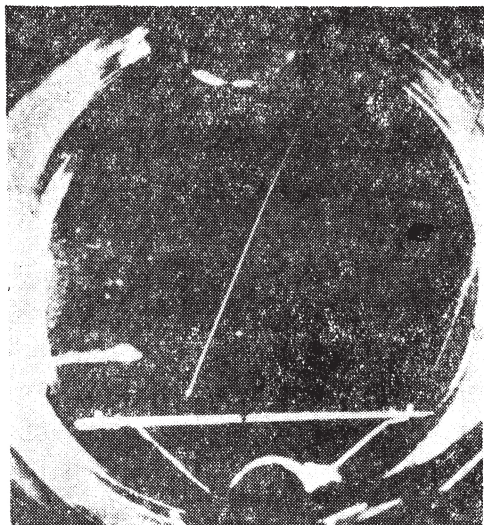
在我们今天的认识里，中子是一个活跃的“基本”粒子。它的活动范围小到微观世界大到宇宙天体。它在跨越十八、九个数量级的广阔能区里与物质积极作用。无论在基础研究中或是在技术应用上，它都施展了出众的才能。它早已不仅仅是实验室和书室里的那种“基本”粒子，而实实在在地进入了我们的生活中间。

下面对中子的历史和现状作若干片断的介绍。



只要自然科学
在思维着……

我们从中子的发现说起。这是一个富有戏剧性的故事，从中可以吸取教益。



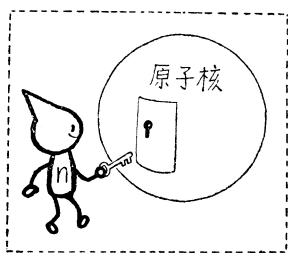
题头图是约里奥·居里夫妇在中子发现之前拍摄到的一张云室照片，发表在1932年初的杂志上。照片清晰地记录下了中子从含氢物质打出反冲质子的径迹。这看来是第一张显示了中子存在的照片。但是，约里奥·居里夫妇当时却把它解释成为 γ 射线在氢核上的康普顿散射。从实验测定的反冲质子射程推算“ γ 射线”的能量，竟有55兆电子伏之多！这真是异乎寻常的现象。

正确的解释很快为海峡对岸的英国人查德威克作出了。他通过细致的实验表明：打出反冲质子的并不是 γ 射线，而是一个质量非常接近于质子的中性的新粒子。查德威克无可争议地成为中子的发现者。他的工作与约里奥·居里夫妇的工作相隔只有一个月多一点的时间。

人们要问：为什么查德威克如此迅速地辨识了中子，而约里奥·居里却错过了发现中子的机会呢？这并不是偶然的。

早在1920年，英国著名物理学家卢瑟福——被人誉为核物理之父，在早期原子核研究的基础上，提出了可能存在一种质量与质子相近的中性粒子的假说（但他认为这种中性粒子是由质子和电子组合而成，后来知道是不对的）。查德威克在卢瑟福的领导下长期从事寻找中子的工作。理论思维帮助他从现象中抓到本质，发现了中子。与此相反，约里奥·居里夫妇始终未曾认真对待过关于中子的假说，他们囿于传统的观念而不能突破。有人在总结这段历史时曾经指出：在约里奥·居里夫妇的研究所里有一种不够重视理论的倾向。这使他们为此付出了代价。

因此，中子的发现是科学预言的胜利。它印证了恩格斯的深刻论断：“只要自然科学在思维着，它的发展形式就是假说”。



打开原子核 奥秘的钥匙

中子的发现促使原子核物理进入一个崭新的阶段。它象一把钥匙，打开了通向原子核奥秘的许多疑

难或者未知的门户。在低能核物理的发展过程中，中子起了重要的历史作用。

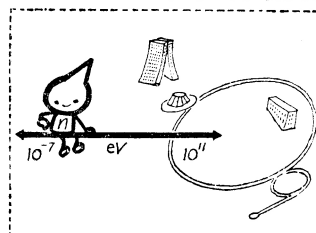
在中子发现的启示下，长期存在的原子核组成问题得到了解决。苏联伊凡宁柯和德国海森堡先后提出了原子核由中子和质子组成的模型。这种模型成功地解释了所有有关的实验事实，成为许多年里原子核图像不容置疑的基本出发点。

既然原子核是由中子和质子组成的，接着就提出了一个问题：是什么样的力使原子核克服了质子之间的库仑斥力(同性电相斥)而结合成一体呢？需要设想一种新型的力——核力。在中子发现以后一年多时间里，海森堡等分别发表了最早的核力理论工作，其中包含的不少基本思想至今并未失去意义。1934年日本汤川秀树又在这些早期工作的基础上提出了核力的介子理论，开辟了核力研究的新方向。与此同时，从1933年起的若干年里，关于核力的实验资料迅速积累起来。中子作为一个不可缺少的研究工具，提供了不少重要的数据结果。例如，热中子在氢核上的俘获以及在正氢和仲氢分子上的散射，揭示了核力与核子系统自旋相关的性质。

利用中子轰击原子核实现核反应的优越性，很快被注意到了：中子是电中性的，因此能够在相当宽的能域内容易地与原子核发生作用而不受到核的库仑斥力的阻碍。1934年意大利费米领导的小组首先开辟了这个实验方向。于是新的发现接踵而来。它们有：中子经过含氢物质的慢化现象，慢中子引起的人工放射性，慢中子俘获截面中的窄共振现象，中子引起的重核裂变现象以及快中子全截面中的巨共振现象。这些新现象的发现导致了核物理中重要概念的建立和理论的发展。例如，慢中子俘获截面中窄共振的发现启发尼·波尔在1936年提出著名的复合核模型；快中子全截面中巨共振的发现则推动了核光学模型的发展。它们都成为今日核物理中牢牢扎根广泛应用的理论基础。

至于说到1938年末核裂变的发现，那么它无疑是中子物理发展史上最辉煌的一页。多亏中子，人们第一次知道了这种崭新的核现象，并且很快认识到了这个发现的重大应用意义。出现了利用核裂变实现自持

链式核反应的思想。这种想法不久就实现了。1942年在费米的主持下在美国芝加哥大学建成了世界上第一个裂变反应堆。从此开始了人类历史上大规模利用原子能的时代。从新的发现到应用之间如此短暂的间隔，在科学技术史上是极为少见的。



“低能基本 粒子物理”

最近一些年来，中子物理的发展出现了一个有趣的动向：当从事“基本”

粒子以及原子核研究的人们正在竭力追求着愈来愈高的能量时，一批中子工作者却把自己的实验能区循着相反方向推到10⁻⁷电子伏这样的低能范围，从事着高能物理提出的某些课题的研究。

这么低能量的中子被称做超冷中子，它相应的有效温度只有0.003°K。对于中子工作来说，过去不知道有10⁻⁴—10⁻⁷电子伏这样的能区。这个空白区完全全是最近十年里开发起来的。由于超冷中子的独特性质，这是一个别具一格的实验领域。

超冷中子最主要的一个特点是在任意入射角度下从介质表面全反射回来。这个特点促使人们产生了将中子贮存在容器中的想法。据说这种想法早在三十年代时就提出来了。但是正式在文献上提出并探讨这种可能性则是在1959年。曾经估计困难会是很大的，因此迟迟没有动手。

问题首先在于怎样得到足够数量比较纯净的超冷中子。在反应堆中的热中子能谱分布是麦克斯韦分布，超冷中子处在这个分布的尾端，仅占热中子通量的1/10¹²。要从这么大量的本底热中子中提取出超冷中子，看起来实在是很难的。

但是真正干起来，倒也不是那样困难。经过人们的努力，超冷中子终于得到了。从热中子通量为5×10¹³/平方厘米·秒的反应堆中得到了每秒大约1000个超冷中子。

接着，贮存超冷中子的设想也实现了。有两种方案：一种是“物质瓶”的方案，把超冷中子引进适当介质做成的瓶中，利用全反射的特点，保存在瓶中。这种瓶的典型容积是1立方米，用无硼玻璃或者冷却到液氮温度的铍做成。另一种称为“磁瓶”或“中子贮存环”方案，利用外加磁场和中子磁矩之间的相互作用，使超冷中子约束在贮存环中。第一个这样的装置去年在西德建成：环的直径为1.2米，采用超导磁铁，其六极磁磁场最大场强为3.5 忒斯拉，最大梯度为1.2 忒斯拉/厘米。

现在，“低能基本粒子物理”工作已经在好几个实验室里开展起来了。中子是一个同时对自然界已知的

四种基本相互作用(强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用、重力相互作用)都灵敏的“基本”粒子,因此利用它来研究这些基本相互作用和物理学基本守恒定律及对称性质等方面的课题,确实是不可多得的,而超冷中子更有其突出的价值。这方面工作的内容相当丰富,足够作为一个专题来讨论。这里只举两个例子。

目前很有兴趣的一个课题是寻找中子的电偶极矩。简单的理论分析指出:中子电偶极矩的存在意味着时间反演不变性的破坏。自从1964年长寿 K^0 介子衰变中发现 CP 不变性破坏,从而推导出时间不变性破坏以来,还没有发现第二个破坏的例证。因此,如果测出不等于零的中子电偶极矩,将是很有意义的事。

从第一个寻找中子电偶极矩的实验算起,已经过去了二十多年。经过持续的努力,测量上限降低了差不多五个数量级。最新的一个结果是1976年报导的: $D = (0.4 \pm 1.1) \times 10^{-24} e \cdot cm$,和理论比较,基本上排除了时间反演不变性的破坏来源于电磁相互作用的可能性。为了进一步弄清时间反演不变性的破坏是否来源于更弱的相互作用,需要进一步提高这类实验的灵敏度,而关键一点在于加大中子通过实验工作区域的时间,减小有效中子速度。于是人们想到让贮存在瓶中的超冷中子来发挥作用。利用它可望将有效中子速度减小四个数量级,中子通过实验工作区域的时间增加三个数量级。估计测量的灵敏度最后就可能提高两个到四个数量级,达到 $10^{-26} - 10^{-18} e \cdot cm$ 。我们可以这样来设想这是怎样高的一种灵敏度:如果把电偶极矩考虑成两个单位电荷 e 相距 D 厘米,那么, $10^{-26} e \cdot cm$ 的电偶极矩,就相当于两个单位电荷之间的距离 D 只是中子本身直径的 10^{13} 分之一,也就是说,要是把中子放大成地球那么大时,这个距离还只有0.0001厘米。目前在几个实验室中都在着手建立采用超冷中子测量中子电偶极矩的实验条件。我们希望不久能够听到这方面重要结果的报导。

另一个课题是研究中子的衰变。为了检验现有的弱相互作用理论——守恒矢量流弱相互作用理论,需要确定基本常数 $|\lambda| = GA/Gv$ (GA 是轴矢量耦合常数; Gv 是矢量耦合常数)。自由中子的 β 衰变是唯一可以用来定出轴矢量耦合常数的已知 β 衰变过程,测量中子寿命要求达到1%的精度。过去都是采用测量热中子束产生的衰变产物的方法。需要两个独立的绝对测量值:一个是衰变数目,由电子或质子探测器测量;一个是在束的工作体积中的中子数,由中子探测器测量。这样,几何因素和探测器绝对效率的误差都会带来不确定性。现有两家自称最精确的中子寿命测量结果之间偏离达到10%之多。如果利用贮存的中子进行实验,就可以象通常的放射性物质那样,作衰变随时间变化的简单的相对测量,因此可以期望在精度上显著提高。西德的中子超导贮存环已被考虑用于这个测量目的。



天上的中子 物理实验室

中子对于其它学科的发展也产生了重要的影响。天体物理就是一个突出的例子。

日益深入的研究表明:中子在宇宙尺度的宏观世界里发挥着不亚于它在微观世界中的作用。在星体的元素形成过程中,中子在原子核上的俘获是主要的机制。正是在中子俘获截面实验资料的启发下,发展了所谓“大爆炸宇宙论”。这种理论包含着不少唯心的东西,但是就中子通过俘获反应积极参与了元素合成过程这一点来说,则是为中子物理实验和天文观测结果的对照及分析所有有力地支持的。

最近十年来,对于中子星的研究,更进一步让我们看到了中子在宇宙间积极活动所展示的瑰丽图景。

关于中子星存在的可能性,在中子发现的当年就从理论上提出来了。1934年进一步推测中子星可能是超新星爆发的产物。1939年建立了中子星的第一个理论模型。但是寻找中子星的努力却一直没有得到结果。

在中子星快被人们所遗忘的时候,英国的射电天文工作者在1968年报导他们发现了一种新型的天体,它以极其精确的时间间隔发射出无线电脉冲,因此被称做脉冲星。随即确认,这种脉冲星正是寻找已久的中子星。脉冲星的发现是六十年代天文学四大发现之一。这是又一次理论预言的胜利:根据预言到天上去寻找地面上本来不存在的东西,并且找到了,这实在是不容易的事。

中子星是一种不同于气态、液态、固态、等离子态的特殊的物态,即物质的第五态——中子态。它为我们提供了一个极不寻常的天上中子物理实验室。请看,为了描写它的物理性质,需要用到怎样的一些创纪录的数字呵!中子星的半径只有10—30公里,密度却高达每立方厘米1亿吨(要是地球也压缩成这样的密度的话,直径将只剩222公尺了);它表面温度是1千万度,中心竟达60亿度(太阳中心是1500万度);它的中心压力是 10^{28} 个大气压(太阳是 3.4×10^{11} 个大气压);辐射能量是太阳的一百万倍;表面磁场是 $1-2 \times 10^{12}$ 高斯!这么一些极端条件对于地面上的实验室来说,简直是不可想象的。

中子天体物理无疑是当前天体物理最前沿课题之一。在这个领域中获得的资料将给予地面上的实验室工作以新的重大的启发。



多种多样的应用

今天，中子的应用领域空前地扩大了，而且前景广阔。

中子作为实验研究的手段正在被广泛引入各个学科领域。在凝聚态物

理和生物物理中，发展了热中子（及冷中子）散射的新的研究领域。在医学科学中正形成新的分支——中子治疗学，中子的引入成为许多学科现代化的一种标志。

中子在工、农业生产和国民经济其它部门中的应用更是多种多样。除了发电、动力、放射性同位素生产以外，中子活化分析、中子测量、中子辐照、中子照相等

技术相继发展起来，愈来愈为各行各业所重视和采用。

也正是由于应用上的日益增长的需要，强中子源技术在最近一些年里发展很快。最新的一代装置是采用强流高能（1 仟兆电子伏左右）质子加速器，通过质子在重金属靶上的散裂反应，可以得到每秒 10^{16} 个中子以上的强度。强中子源的发展将为中子的应用开辟更加广泛的途径。

在结束本文的时候，我们提出这样一点：当我们对物质的认识还停留在原子的层次的时候，原子核外的电子是当时知道的最活跃的一种粒子，从而出现了电子的时代。当我们的认识深入到原子核的层次时，作为原子核组成之一的中子就成为最活跃的一种粒子，从而开启了原子能的时代。我们要问：当我们继续深入到物质的更深层次时，谁又将是最活跃的一些粒子，对未来的科学技术发展作出重大的贡献呢？

这正是我们期待着“基本”粒子物理来作出回答的。

（沈培插图）