

核物质的新形态 (下)

李金 厉光烈

原子核中存在核子共振态吗？

实验上发现，核子——核子相互作用在距离为 0.5—1.0 费米时强度高达几百 MeV，而核子共振态的质量例如 $\Delta(1236)$ ，也正好比核子大几百 MeV。因此，当原子核中的核子彼此接近到这样的距离时，便有可能相互激发而转变成核子共振态。当然，这些核子共振态是不稳定的，它们很快又会转变成核子。理论上估计，氦核中的中子和质子每秒钟有 10^{21} 次同时激发成为两个电荷不相同的 $\Delta(1236)$ ： Δ^{++} 和 Δ^- 或者 Δ^+ 和 Δ^0 ，然后在 10^{-23} 秒内又转变回去。也就是说，氦核中除了中子和质子外还包含有 1% 的核子共振态 Δ^{++} 和 Δ^- 或者 Δ^+ 和 Δ^0 。这样的理论估计正确吗？原子核中真的存在核子共振态吗？下面就介绍一些这方面的实验证据。

间接的实验证据——氦核的反常磁矩 实验上测量到的氦核磁矩是 0.8574 核磁子（一个核磁子 = 3.15×10^{-18} MeV/高斯）。如果认为氦核纯粹是由中子和质子组成的，那么理论上算出的氦核磁矩是 0.8797 个核磁子，实验值与理论值不符。但是，若像上面讲的那样，认

为氦核里混有少量的（约 0.5%—3%）核子共振态 Δ^{++} 和 Δ^- 或者 Δ^+ 和 Δ^0 ，氦核的反常磁矩就有可能得到解释。因此氦核的反常磁矩可看做核中可能存在核子共振态的一个间接的实验证据。

不过，氦核的反常磁矩只是人们首先想到的一个间接的实验证据。除此以外，还有高能质子在氦核上的朝后弹性散射，辐射俘获反应 $n p \rightarrow d \gamma$ ，氦核的光分裂过程 $d(r, p)n$ ，以及氦核的电分裂过程 $d(e, e' p)n$ 等，在考虑了氦核中的核子共振态组态以后，都能给出更加符合实验的结果，这里就不一一介绍了。

直接的实验证据——

旁观者的实验 为了弄清原子核内究竟是否存在核子共振态，人们总希望最好能够直接观测到存在于原子核中的核子共振态。为此，美国科学家哥德哈伯在为 1977 年国际原子核物理会议准备报告时想到一个实验，如果氦核中确实包含有 (Δ, Δ) 组态，那么用高能粒子 a 轰击氦核时，就有可能击中其中的一个 Δ ，而另一个则作为旁观者留下来，然后很快衰变成 π 介子和核子（见图 6）。由于作为旁

观者的 Δ ，原先在氦核中差不多是静止的，因此它衰变产生的 π 介子和核子作为一个整体一定会各向同性地飞出的，其质心能量一定与 Δ 的质量差不多。这样，通过测量这些衰变产物便可直接验证氦核中是否包含 (Δ, Δ) 组态。这个实验称之为旁观者实验。后来，他与搞实验的朋友一起讨论这种想法。后者从气泡室照片中居然发现了证实他的这种想法的事例（见图 7）。用入射动量为 15 GeV/c 的 π^+ 介子轰击氦核，结果产生一系列粒子： P_s 、 P 、 π^- 、 π^+ 、 π^0 （其中 P_s 为慢质子）。 (P_s, π^-) 系统的质心系能量约为 1200 MeV，并且是各向同性地飞出的，因此认为它们可能是 Δ^0 的衰变产物。质心系能量略小于 1236 MeV，正好说明 Δ^0 是束缚在氦核里的，这样便证实了氦核基态里确实包含有 (Δ^+, Δ^0) 组态。与此类似，另一些泡室照片还证实了氦核基态里确实包含有 (Δ^{++}, Δ^-) 组态。他们还进一步分析得到氦核基态里 (Δ, Δ)



图 9

组态的成份约为 1%，这与理论上的估计是一致的。

存在的问题 通过以上实验，人们似乎已经直接看到了存在于氦核中的核子共振态 $\Delta(1236)$ 。实际

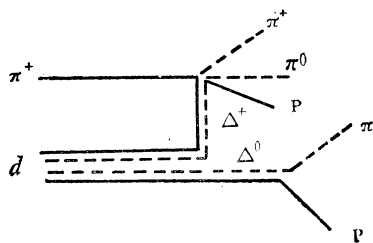


图 6

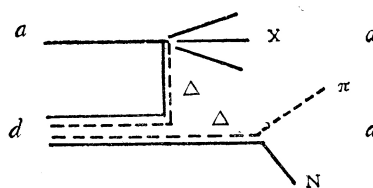


图 7

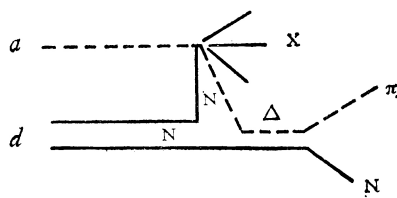


图 8

上,问题并不这样简单,由于上述过程(见图 6、7)与图 8 所示的二次过程难以分开,所以上面的结论是否可靠还很难说。只有消除了这种二次过程引起的本底以后,我们才可能确实弄清楚原子核里究竟是否存在核子共振态。因此,对于原子核中是否存在共振态的认识,可以形象地用图 9 来描绘,核中的核子共振态好像淹没在本底海中的山峰,仅当本底海水位下降时,核子共振态的山峰才会显现出来。

质子和反质子系统——重子素

我们知道,电子和正电子可以结合在一起,并存在一个较短的时间,称为“正子素”。前几年发现的新粒子 J/ψ 被解释为由粲层子和反粲层子组成的系统,称之为“粲子素”。与这些系统相类似,质子和反质子由于它们之间的强相互作用而紧密地束缚在一起,形成类似原子核的系统,则称为“重子素”。在研究质子和反质子相互作用的实验中,发现在 2 GeV 附近有一很窄的共振,就是重子素的一个例子。

从核结构角度来看,重子素像一种特殊的原子核。普通的原子核里面都是核子,而重子素是由核子与反核子组成的。在核子——核子相互作用势与反核子——核子相互作用势之间有一定的关系:例如,对应于核子——核子相互作用势中的短程强排斥力,反核子——核子相互作用势中就有短程强吸引力。因此,研究重子素可以进一步了解核子——核子的相互作用。从“基本”粒子角度来看,重子素是由三个层子和三个反层子组成的系统(称为异类介子)。存在这样的系统对层子模型来说是十分重要的。特别是它的共振宽度为什么这样窄,已成为层子模型研究的课题。因此,继发现 J/ψ 粒子窄共振以后,人们对重子素窄共振的研究又发生了浓厚兴趣。

现在,实验上已经发现了八个

	质量 (GeV)	宽度 (MeV)	实验方法
—————	2.95	<15	产生实验
—————	2.6	<18	
—————	2.2	~16	形成实验
—————	2.02	~24	
—————	1.939	≤4	
閼—————	1.694	<20	γ 谱测量
—————	1.661		
—————	1.457	<35	

这样的窄共振。上图表出它们的质量、宽度和得到共振态的实验方法。

研究重子素的实验方法大致为三类。(一)形成实验。即用反质子入射到液氢靶上,测量反质子和质子的弹性散射截面,产生带电介子的反应截面或总截面等,看看有无共振峰出现。(二)产生实验。在 $P-P$ 散射中,或者 $\pi-P$ 的碰撞中产生了重子素,那么测量重子素衰变产物的不变质量也会找到这种窄共振。像图中的 2020 MeV、2200 MeV 和 2600 MeV 等都是这样观察到的。(三) γ 能谱测量。当反质子慢化后停止在液氢中,由于反质子和质子的电磁作用,可形成原子束缚态;同时,由于它们之间的强相互作用,又可形成重子素窄共振态。这二种状态之间就会发生辐射跃迁。 γ 辐射的能量可达几百兆电子伏。所以实验上测量 γ 辐射能谱也可以观察到窄共振。图中的共振态 1694 MeV、1661 MeV 和 1457 MeV 就是由这种方法找到的。

目前,重子素的研究虽然十分引人注目,但无论是理论上,还是实验上都还是很初步的,都有许多问题待解决。例如理论模型中如何处理湮灭问题,实验上如何提高精度,增加数据,把各共振态的能级位置及其量子数完善地确定下来等等。为此,欧洲核子研究中心准备建造强度高,性能好的 P 束流(即反质子工厂),可以期望,不久的将来,重子素的研究一定会出现崭新的局面。

π 凝聚与中子星

老问题、新发现 自从 1935 年日本物理学家汤川秀树提出核力介

子理论以来,人们常常探讨这样的问题,既然核力是通过交换介子(例如 π 介子)来传递的,那么为什么原子核中不能有 π 介子呢?低能原子核物理一直没有发现存在真实的 π 介子,所以认为传递核力的是虚 π 介子。可是,去年欧洲核子研究中心快报(1977 年 7—8 期)介绍了一个实验:入射的 π^- 介子经过慢化,被靶原子核(铍或碳原子核)所俘获,形成 π 介子原子。然后经过级联跃迁,进入靶原子核里,与 π^+ 介子相遇发生湮灭而放出 γ 光子。核内有无真实的 π 介子, γ 光子的产额是不同的。实验上测到的 γ 光子的产额比理论上不考虑靶原子核内存在真实的 π 介子而计算出来的 γ 产额要高一些,这表明,原子核中可能存在真实的 π 介子。当然,这是一个新的实验,可靠性怎样很难说。

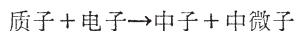
π 凝聚现象 虽然这方面的实验工作做得不多,但是理论上已经进行了大量的研究,大多数理论工作者都认为,原子核内不仅存在真实的 π 介子,而且可能有许多 π 介子。由于 π 介子是玻色子,它们必定都停留在最低能态上,我们称这种现象为 π 凝聚现象。

为什么会出出现 π 凝聚现象?在什么情况下核物质中才会出现 π 凝聚现象?我们知道,在核物质中, π 介子与核子之间的相互作用能量是负的。而且,核子密度越大,相互作用能量越负。因此,当核物质的核子密度大过某个临界值时,相互作用能量就可以抵消 π 介子的固有能量,使 π 介子的总能量变为负值。在这样的核物质中,产生 π 介子并不需要能量,反而会放出能量,使核

物质的总能量降低。于是在核物质中 π 介子会像泉水一般涌现出来,发生 π 凝聚现象。当然,只要一出现大量 π 介子,就会改变核物质内 π 介子与核子之间的相互作用,这种改变是不利于 π 凝聚的。因此, π 介子不会无止境地增加,而是在一定情况下达到平衡。在什么样条件下达到平衡?平衡状态下核物质中真实 π 介子会有多少?这些都是人们正在探讨的问题。

中子星 六十年代,天文学上有四大发现:类星体,脉冲星,星际有机分子和 3°K 微波辐射。其中脉冲星一般认为就是高度旋转的中子星。按照天体演化理论,质量约为4至8倍太阳质量的恒星演化到后期,能源接近枯竭,星体不稳定,在引力坍缩下,外壳就发生猛烈爆炸,

成为超新星爆发。在此同时,引力坍缩使恒星内核部分产生极大的拥挤力,把原子外层的电子“挤到”原子核里去,从而形成一个巨核。在这个巨核里,发生反 β^{-} 衰变:



近来根据一些理论上的报测和计算,超新星爆发可能是大量中微子向外喷射冲击外壳所引起的,而质子大量转变为中子,则使恒星内核坍缩转变为中子星,因为最后剩下质子的含量只占1%左右,星体中99%都是中子。换句话说,这个巨核基本上是由中子组成的,由于电子是费米子,按费米能级排列,能量越来越高。在电子能量大于 π 介子的静止能量(140 MeV)时,电子便可以转变为 π^{-} 介子,并放出中微子,因为 π^{-} 介子是玻色子,可以凝

聚在最低能态,于是也发生 π 凝聚现象。天文学上,在讨论稳定中子星的最大质量,中子星的超导性,及中子星的冷却过程时,都要考虑 π 凝聚现象。因此,可以说中子星是研究 π 凝聚现象的“巨型实验室”。

除了以上介绍的几种核物质新形态外,理论上还预言有其它的核物质新形态。例如,李政道教授提出的不平常核态;含有粲重子的超核等,但实验上还没有发现。

毛主席教导我们,“在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。”随着高能原子核物理的发展,人们对核物质的认识也越来越深入了。我们相信,随着实验技术的提高,一定还会发现更多的核物质新形态。