

# 核物质的新形态 (上)

厉光烈 李金

原子核内的物质称为核物质。1932年查德威克发现中子以后，人们一直认为核物质是由中子和质子组成的。近十多年来，由于开展了高能原子核物理的研究，用高能粒子作为炮弹轰击原子核，结果发现：核物质中不仅有中子和质子，还有 $\Delta$ 超子，还可能存在核子共振态和真实的 $\pi$ 介子。另外，还发现了由质子和反质子组成的重子素。这些都是核物质的新形态。它们的发现大大开阔了人们对原子核结构的认识。下面就简单介绍一下这些核物质的新形态。

## 超核

超核就是含有超子的原子核。例如，含有 $\Delta$ 超子的原子核就称为 $\Delta$ 超核。

**$\Delta$ 超核的发现** 图1的核乳胶照片记录了第一个 $\Delta$ 超核的发现。它是波兰科学家达尼茨和普尼夫斯基在1952年从曝露在宇宙线中的核乳胶里得到的。从照片上可以看到，一个高能质子击中了核乳胶里的一个原子核（银或溴的原子核），将其打碎，其中一块碎片经过 $10^{-12}$ 秒的慢化，在静止状态下通过发射一个带电的 $\pi^-$ 介子和一个质子而衰变。由于这种衰变方式与 $\Delta$ 超子的衰变方式完全一样，他们认为有一个 $\Delta$ 超子束缚于这块碎片中。换句话说，这块碎片就是一个 $\Delta$ 超核。

到目前为止，实验上已经发现了20多种 $\Delta$ 超核。甚至还发现了含有二个 $\Delta$ 超子的双 $\Delta$ 超核。但是一直没有观察到含有其他超子（例如 $\Sigma$ 、 $\Xi$ 、 $\Omega$ 等超子）的超核。这是为什么呢？这是因为，这些超子虽然在自由状态下的寿命相差不多，但是在核物质中就不一样了，较重的

$\Xi$ 、 $\Sigma$ 、 $\Omega$ 超子在核物质中可以通过强相互作用转化为 $\Delta$ 超子。所以由它们形成的超核的寿命太短，虽然理论上预言有可能观察到 $\Sigma$ 超核和 $\Xi$ 超核，但实验上一直没有发现。 $\Delta$ 超子是最轻的奇异重子，由于强相互作用要求奇异数守恒和重子数守恒，它在核物质中不能通过强相互作用而衰变，只能做弱相互作用

衰变，所以 $\Delta$ 超核的寿命与 $\Delta$ 超子的寿命几乎一样，都是 $2 \times 10^{-10}$ 秒左右，因而实验上容易被观察到。

虽然第一个超核（以下提到的超核均指 $\Delta$ 超核）是用核乳胶在宇宙线中发现的。但是大家知道，在宇宙线中能观察到的事例是很稀少的，因此无法进行大量的研究。现在一般都是用加速器上引出的 $K^-$ 介子束

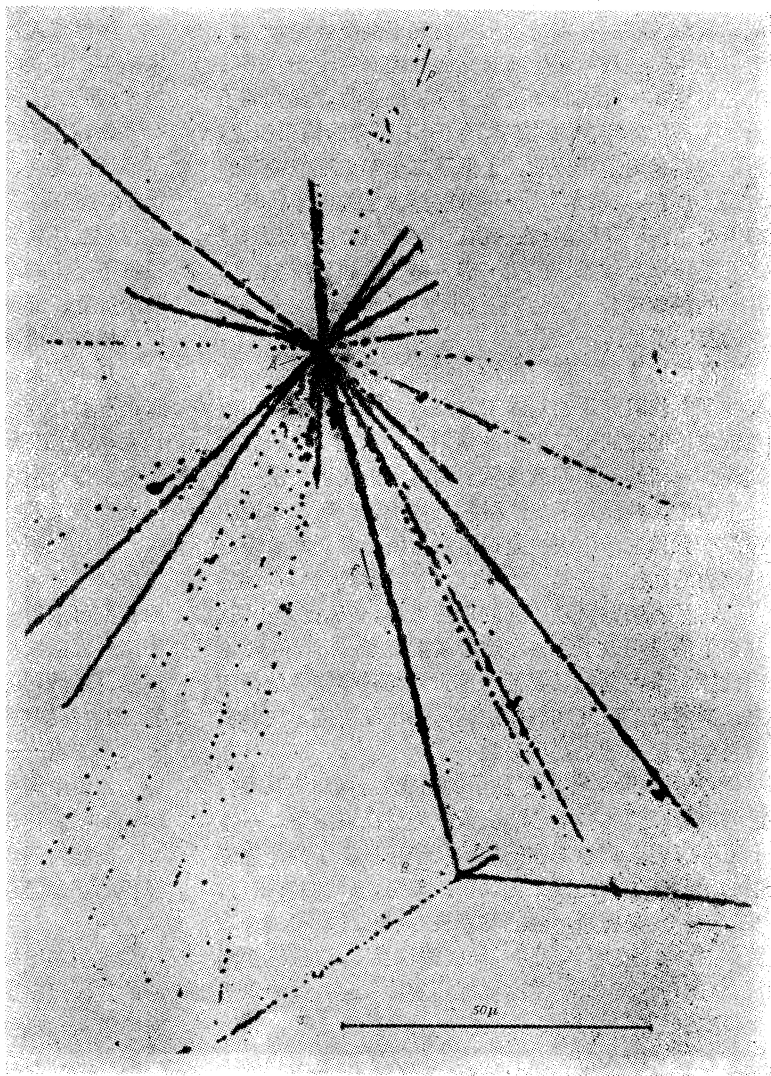
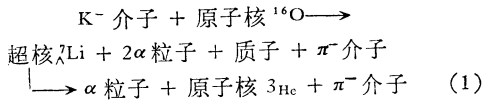


图1 第一个 $\Delta$ 超核的发现

来产生超核。图 2 就是用这种方法来产生超核的一张核乳胶照片的示意图。从图上可以看到



利用能量守恒定律，由超核  ${}^7\text{Li}$  的衰变产物——原子

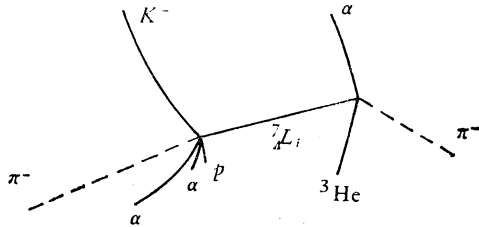


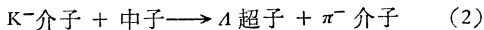
图 2

核  ${}^3\text{He}$ 、 $\alpha$  粒子和  $\pi^-$  介子的静止能量及其动量便可定出超核  ${}^7\text{Li}$  的能量，进而定出  $\Lambda$  超子在超核  ${}^7\text{Li}$  中的结合能。所谓  $\Lambda$  超子在超核中的结合能，就是  $\Lambda$  超子与原子核结合成超核时放出的能量。例如， $\Lambda$  超子在超核  ${}^7\text{Li}$  中的结合能就等于  $\Lambda$  超子的静止能量与原子核  ${}^6\text{Li}$  的能量之和减去超核  ${}^7\text{Li}$  的能量。

$\Lambda$  超子在处于基态的超核中的结合能（以下简称超核基态的结合能）是超核重要的静态性质。它的测定对于了解  $\Lambda$ -N 和  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用、确定超核的激发能量都是很重要的。例如，由双超核  ${}^8\Lambda\Lambda\text{He}$ （或  ${}^{10}\Lambda\Lambda\text{Be}$ ）中二个  $\Lambda$  超子的总结合能减去二倍超核  ${}^8\Lambda\Lambda\text{He}$ （或  ${}^8\Lambda\Lambda\text{Be}$ ）基态的结合能，便可定出  $\Lambda$ - $\Lambda$  相互作用能量约为  $40 \pm 0.5\text{Mev}$ 。

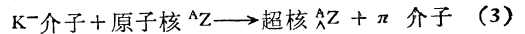
早年研究超核主要是乳胶（也有少量用泡室）来确定超核基态的结合能。由于较重超核的衰变方式太复杂，径迹难以辨认，因此用这种方法目前只测到质量数  $A < 16$  的超核基态的结合能， $A > 16$  的超核基态的结合能只能从理论上估算，对较重的超核，理论上估计出的超核基态结合能的饱和值约为  $25\text{Mev}$ 。

**产生超核的方法** 六十年代初，有人注意到以下反应：



产生的  $\Lambda$  超子反冲动量很小。当入射  $K^-$  介子的动量为  $550\text{Mev}/c$  时，产生的  $\Lambda$  超子的反冲动量差不多是零。因此，在原子核上实现这个反应时，产生的  $\Lambda$  超子

便可留在原子核内，使原子核变成超核，同时放出  $\pi^-$  介子：



这里的  $A$ 、 $Z$  分别是原子核的质量数和电荷数。由于反应中重子和介子之间发生了奇异数交换，所以称此反应为奇异数交换反应。

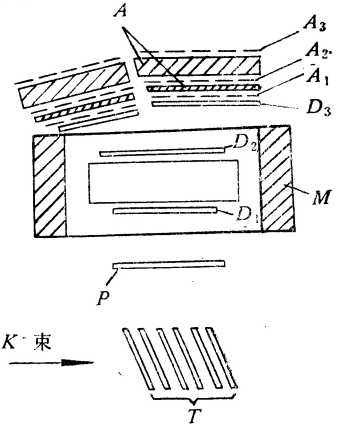
实验上实现奇异数交换反应有二种方法：

### 1. 静止 $K^-$ 实验

加速器上引出的  $K^-$  介子束经过慢化后停止在靶核中，为靶核所吸收，发生奇异数交换反应，产生超核，同时放出  $\pi^-$  介子。这类实验称为静止  $K^-$  实验。图 3 就是这类实验装置的一个例子。靶是六块  $1\text{cm}$  厚的塑料闪烁体，它既可当做靶以形成超核，又可用作计数器来辨别引起反应的  $K^-$  介子是否已经停止了下來。这样就大大减少飞行  $K^-$  的本底。出射的  $\pi^-$  由磁铁、闪烁计数器 ( $A_1$ - $A_3$ ) 和漂移室 ( $D_1$ - $D_3$ ) 来确定其动量，从而得到超核的激发能谱。

图 3 静止  $K^-$  实验  
安排示意图

$D_1$ - $D_3$  漂移室  
 $A_1$ - $A_3$  闪烁计数器  
 $P$  多丝室  
 $M$  磁铁  
 $A$  吸收体  
 $T$  靶



### 2. 飞行 $K^-$ 实验

直接用飞行  $K^-$  介子束来引起奇异数交换反应，这样的实验称为飞行  $K^-$  实验。如图 4 所示，动量为  $300$ — $900\text{Mev}/c$  的  $K^-$  介子束从谱仪的右侧入射，它的能量由偏转磁铁  $BM_1$ ，多丝室 ( $W_1$ - $W_3$ ) 和闪烁计数器  $P_1$  来确定。 $K^-$  介子打到靶  $T$  上产生超核，从零度方向（与入射  $K^-$  方向相同的方向）飞出的  $\pi^-$  介子被谱仪的左半部接收，其动量由磁铁  $BM_2$ 、多丝室  $W_4$ 、 $W_5$  和闪烁计数器  $P_2$  来测量。这样便可得到超核的激发能谱。

除上述的计数器实验外，早期的静止  $K^-$  实验也有用核乳胶来做的。用核乳胶只能观测  $\Lambda$  超子结合能大

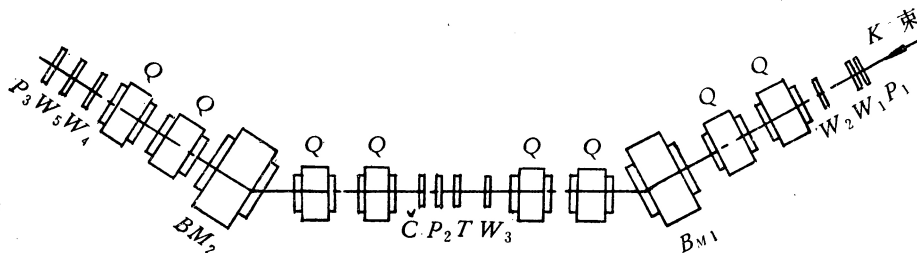
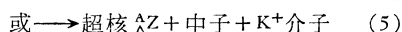
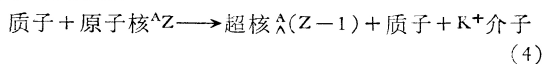


图 4 飞行  $K^-$  实验谱仪  
示意图

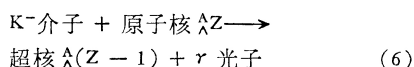
$T$  靶  
 $BM_1, BM_2$  偏转磁铁  
 $W_1$ - $W_5$  多丝室  
 $Q$  四极磁铁  
 $P_1$ - $P_3$  闪烁计数器  
 $\checkmark$  契伦柯夫计数器

于 0 的超核激发态。因此所提供的知识是很有限的。近年来,由于  $K^-$  介子束流强加大,不仅使计数器实验有了可能,而且实验精确度也越来越高。用计数器既能观测  $\Delta$  超子结合能大于 0 的超核激发态(束缚态),也能观测小于 0 的超核激发态(共振态)。最近通过计数器实验,特别是飞行  $K^-$  实验,得到了相当清晰的超核激发能谱,为理论研究创造了极好的条件。

除了奇异交换反应外,理论上还预言可以通过协同产生反应:

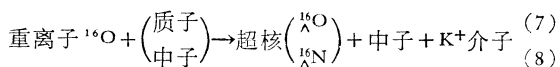


和辐射俘获反应:



来产生超核。不过,目前实验上尚未发现通过这些反应产生的超核。

不久前,有人做了一个这样的实验:他们用高能重离子  $^{16}\text{O}$  的束流轰击聚乙烯靶,结果得到了相对论速度的超核  $^{16}\Lambda\text{O}$  和  $^{16}\Lambda\text{N}$ :



他们分析了 22 个事例,得到这些超核的平均寿命为  $0.86_{-0.26}^{+0.33} \times 10^{-10}$  秒。这个实验很有意义:一方面由于反应(7)和反应(5)除了入射粒子与靶核互换外,实质上是完全一样的反应。所以这个实验的成功表明反应(5)也是有可能实现的。另一方面,由于反应(7)产生的相对论速度的超核,在  $10^{-10}$  秒内可以飞行 2—3 厘米,因此可以比较精确地测量它的寿命。在此以前人们一直没有找到一个测量超核寿命的适当方法,只是从理论上估计重超核的寿命为  $\sim 2 \times 10^{-10}$  秒,即与自由  $\Lambda$  超子一样。这个实验表明,轻超核的寿命要短一些。

上面谈到通过奇异交换反应可以得到超核的激发能谱。大家知道,原子核的激发能谱除了可以通过核反应得到以外,很大一部分是通过原子核的  $\gamma$  跃迁来得到的,即所谓  $\gamma$  能谱。那么超核是否也有  $\gamma$  谱呢?也有。利用简单的分辨率较好的  $\gamma$  能谱仪(例如大的 NaI(TL)晶体谱仪)来观测超核的  $\gamma$  跃迁,便可定出超核的  $\gamma$  谱。图 5 就是测量超核  $\gamma$  谱的实验装置示意图。入射的  $K^-$  介子经过二个契伦柯夫计数器、三个闪烁计数器的选择,在靶上产生了超核。靶子附近的 NaI(TL)晶体测定超核辐射的  $\gamma$  射线能量,从而得到超核的  $\gamma$  谱。用这种方法目前一共只测到二条  $\gamma$  谱。其中 1.09 Mev 线已经确定属于  $^4\text{H}$  的  $1^+ \rightarrow 0^+$ ,另一条 1.42 Mev 线是否属于  $^4\text{He}$  的  $1^+ \rightarrow 0^+$  还有待进一步实验证实。为什么原子核的  $\gamma$  谱很丰富而超核只测

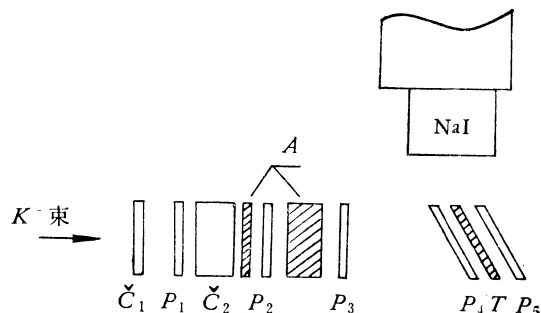
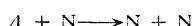


图 5 探测超核  $\gamma$  辐射的实验安排示意图  
 $\check{C}_1, \check{C}_2$  契伦柯夫计数器  $T$  靶  
 $P_1-P_3$  闪烁计数器  $A$  吸收体

到二条  $\gamma$  谱线呢?这是因为  $Z > 2$  的超核主要通过弱相互作用过程



衰变成普通原子核,这时  $Q$  值约为 200 Mev,即可以提供给原子核近 200 Mev 的激发能。因此超核在产生弱相互作用衰变的同时还要发生粒子衰变,超核越重,粒子衰变方式越多,这使  $\gamma$  谱变得十分复杂,实验上很难辨认出哪些  $\gamma$  线是属于超核的辐射跃迁。所以,到目前为止,只测到了最轻超核的二条  $\gamma$  谱线。

**研究超核的意义** 研究超核有三方面的意义:

首先,超核的发现打破了核物质只是由中子和质子组成的旧观念。大家知道,已发现的“基本”粒子有二、三百种,为什么只有中子和质子能够束缚在一起组成原子核呢?!超核的发现告诉人们,除了中子和质子外,其他粒子也有可能束缚在核物质里,这就引导人们去进行新的探索,从而开辟了“核物质的新形态”这一崭新的研究领域。

其次,超核的研究为原子核结构提供了大量新知识:(1)由于  $\Delta$  超子与中子、质子不是同类粒子,它不受泡利原理的限制,可以处在各种单粒子轨道上。因此,用它作探针,可以定出  $\Delta$  超子在核物质平均场中的一系列单粒子能谱,从而检验量子力学中的自洽场方法。并且由  $\Delta-N$  相互作用与  $N-N$  相互作用的关系,也可推算出核子在核物质平均位场中的一系列单粒子能谱。而在普通原子核中,由于泡利原理的限制,我们只能知道价核子的单粒子能谱,无法知道内层核子的单粒子能谱(虽然通过  $(p, 2p)$  反应,  $(e, e'p)$  反应可定出单空穴能谱,进而定出内层核子的单粒子能谱。但因这些反应的机制还不十分清楚,定出的单粒子能谱未必可靠)。另外,在普通原子核中,由于泡利原理的限制,最多只能有四个核子空间全对称。而在超核中可以有五个粒子(包括一个  $\Delta$  粒子)或六个粒子(包括二个  $\Delta$  超子)空间全对称的态,称为超对称态。这是普通原子核所没有的新型激发态。(2)  $\Delta$  超子进入原子核后,对原子核的许多性质都会有很大影响。例如,由于  $\Delta$  超子在核物质中不仅可以和一个核子作用,而

且可以同时和两个核子作用,即存在所谓三体力,所以  $\Delta$  超子进入原子核后可能会影响原子核内核子的对关联效应以及与之有关的超导核的能隙。从而提供有关核结构的许多新知识。

最后,研究超核还可以提供有关  $\Delta$ -N 和  $\Delta$ - $\Delta$  相互作用的知识。大家知道,“基本”粒子物理主要是通过散射和衰变来研究基本相互作用。由于  $\Delta$  超子无法用来作靶,所以不能通过散射来得到有关  $\Delta$ - $\Delta$  相互作用的知识。但是,正如前面谈到的,从双  $\Delta$  超核的结合能却能推知  $\Delta$ - $\Delta$  相互作用强度。另外,由于用低动量极化的  $\Delta$  束流做散射实验很困难,到目前为止,在泡室中做的唯一的低动量  $\Delta$ p 散射实验的精度很低,以致于无法将三态 ( $\Delta$  和 p 自旋同方向) 散射和单态 ( $\Delta$  和 p 自旋反方向) 散射分开。因此,通过散射实验所得到的  $\Delta$ -N 相互作用的知识也是有限的。可是,通过研究  $\Delta$  超核却能得到有关  $\Delta$ -N 相互作用的许多新知识。例如,  $\Delta$ -N 相互作用和 N-N 相互作用一样是吸引力。但后者稍弱。 $\Delta$ -N 相互作用与 N-N 相互作用不同,它与自旋的关系是单态比三态强。并且  $\Delta$ -N 相互作用中包含三体力 and 吸引的电荷对称破缺势等。这些都说明,研究超核为研究基本相互作用提供了新手段。

正因为研究超核有着如此重要的意义,近年来在超核物理方面,无论是理论上,还是实验上,都开展了大量工作,使超核物理已经成为高能原子核物理的一个重要分支。