

# 超核

厉光烈 钟崨生

1952年,波兰物理学家达尼茨和普尼夫斯基从暴露在宇宙线中的核乳胶里发现了第一个 $\Delta$ 超核(见图1)。从图一的照片上可以看到,一个高能质子击碎了核乳胶里一个银原子,其中一块碎片经过慢化,在静止状态下通过发射一个带电 $\pi$ 介子和一个质子而衰变。由

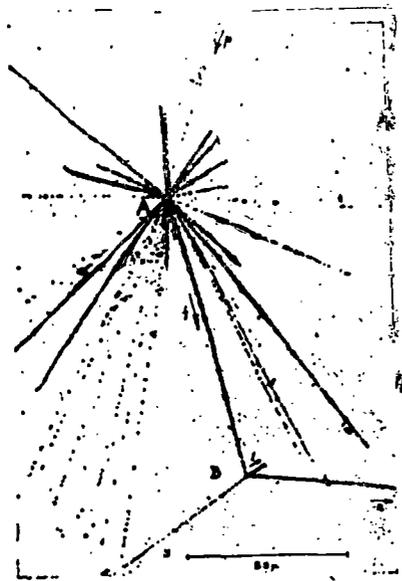


图 1

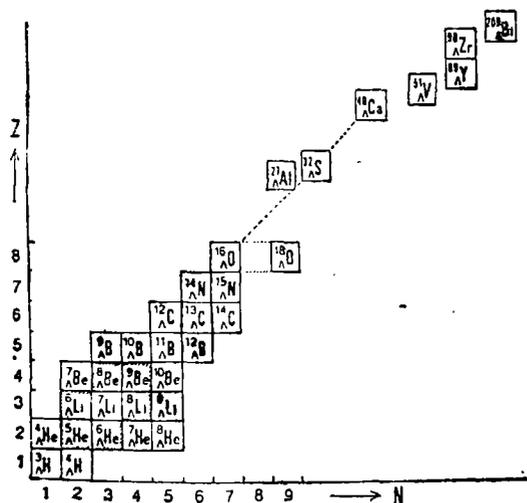


图 2  $\Delta$ 超核

于这种衰变方式与 $\Delta$ 超子衰变方式完全一样,因此他们认为这块碎片就是一个包含 $\Delta$ 超子的 $\Delta$ 超核。这一发现打破了原子核仅是由中子和质子组成的传统观念,为原子核物理开辟了一个新的研究领域——超核物理。

三十多年来,特别是近十多年来,人们通过各种途径已经找到了三十多个 $\Delta$ 超核(见图2)、两个双 $\Delta$ 超核和若干个 $\Sigma$ 超核,并由此获得了许多有关原子核结构和强相互作用的新知识。下面我们将向读者介绍这个领域的研究概况。

## 一、 $\Delta$ 超核

大家知道,一般原子核由质子和中子组成。新发现的 $\Delta$ 超核除包含质子、中子外,还包含一个 $\Delta$ 超子,那么 $\Delta$ 超核在结构上与一般原子核有什么不同呢?它具有哪些特征呢?这显然是人们最感兴趣的问题。

### 1. $\Delta$ 超核的基态结合能

结合能在原子核物理研究中是一个十分重要的物理量。 $\Delta$ 超核基态结合能 $B_A$ 定义为

$$B_A = M_C + M_A - M_H$$

这里 $M_C$ 是 $\Delta$ 超核移去 $\Delta$ 超子后剩余的质量, $M_A$ 和 $M_H$ 分别表示 $\Delta$ 超子和 $\Delta$ 超核的质量。在 $\Delta$ 超核的早期研究中,人们通过分析在核乳胶里 $\Delta$ 超核衰变产物的能动能量关系,应用能动能量守恒定律,得到了 $\Delta$ 超核的基态结合能。到目前为止,人们利用这一方法已测到了二十多个 $\Delta$ 超核的基态结合能(见表1)。其中 ${}^6_{\Delta}\text{He}$

表 1  $\Delta$ 超核的基态结合能

	$B_A(\text{MeV})$	$B_A(\text{MeV})$	$B_A(\text{MeV})$
${}^2_{\Delta}\text{H}$	$0.13 \pm 0.05$	${}^4_{\Delta}\text{Li}$	$6.80 \pm 0.03$
${}^2_{\Delta}\text{H}$	$2.04 \pm 0.04$	${}^4_{\Delta}\text{Li}$	$3.53 \pm 0.15$
${}^6_{\Delta}\text{He}$	$2.39 \pm 0.03$	${}^7_{\Delta}\text{Be}$	$5.16 \pm 0.03$
${}^6_{\Delta}\text{He}$	$3.12 \pm 0.02$	${}^7_{\Delta}\text{Be}$	$6.34 \pm 0.05$
${}^6_{\Delta}\text{He}$	$4.18 \pm 0.10$	${}^8_{\Delta}\text{Be}$	$6.71 \pm 0.04$
${}^6_{\Delta}\text{He}$	$7.16 \pm 0.70$	${}^{10}_{\Delta}\text{B}$	$9.11 \pm 0.22$
${}^7_{\Delta}\text{Li}$	$5.58 \pm 0.03$	${}^8_{\Delta}\text{B}$	$7.52 \pm 0.15$
		${}^{10}_{\Delta}\text{B}$	$8.89 \pm 0.12$
		${}^{11}_{\Delta}\text{B}$	$10.24 \pm 0.05$
		${}^{11}_{\Delta}\text{B}$	$11.37 \pm 0.06$
		${}^{12}_{\Delta}\text{C}$	$10.76 \pm 0.19$
		${}^{13}_{\Delta}\text{C}$	$11.65 \pm 0.12$
		${}^{14}_{\Delta}\text{C}$	$12.17 \pm 0.33$
		${}^{14}_{\Delta}\text{N}$	$13.59 \pm 0.15$

的基态结合能特别引起人们的兴趣,因为理论计算值(约6 MeV)比实验值(约3.12 MeV)大得多,即出现了“束缚过紧”现象。这个问题至今尚未解决。

细心的读者也许会问表一中怎么未列出一个重 $\Delta$ 超核的结合能呢?原因是,重 $\Delta$ 超核衰变方式十分复杂,在实验中难以辨认不同衰变产物的径迹。目前,重 $\Delta$ 超核基态结合能一般只能从理论上估算。有人分析了在核乳胶中产生的各种 $\Delta$ 超核的平均结合能,给出

$$60 < A < 100$$

的重 $\Delta$ 超核基态结合能的上限为 $22.7 \pm 0.4$  MeV。利用这个值可以定出 $\Delta$ 超子在核中单粒子位阱深度 $D_A$ 。对于重 $\Delta$ 超核, $B_A$ 与 $D_A$ 有以下关系:

$$B_A = D_A - \frac{\pi^2 \hbar^2}{2M_A r_0^2} \cdot A^{-1/3}$$

取 $r_0 = 1.45 \text{ fm}$ ,并考虑到重 $\Delta$ 超核基态结合能上限

是  $22.7 \pm 0.4 \text{ MeV}$ , 可得  $D_A \approx 27 \text{ MeV}$ , 它约为核子在核内单粒子位阱深度的一半. 这是个很有用的结果.

### 2. $\Lambda$ 超核的寿命

$\Lambda$  超子是最轻的奇异重子. 由于强相互作用要求奇异数守恒, 故  $\Lambda$  超子在原子核中只能通过破坏奇异数守恒的弱作用而发生衰变, 因此  $\Lambda$  超核具有弱作用的特征寿命 ( $\sim 10^{-10}$  秒). 图 3 给出了实验上已测到

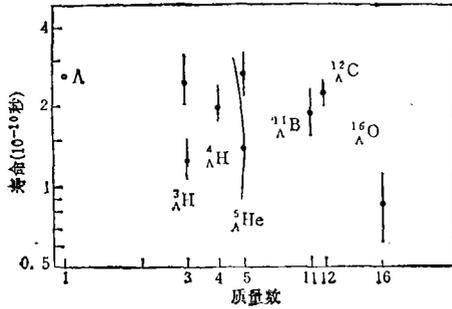


图 3  $\Lambda$  超子和  $\Lambda$  超核的寿命

的几个  $\Lambda$  超核的寿命. 其中  $A \leq 5$  的轻  $\Lambda$  超核的寿命是由泡室实验得到的.  ${}^4_{\Lambda}\text{O}$  的寿命是由相对论重离子束实验得到的, 即用高能重离子  ${}^{16}\text{O}$  去轰击聚乙烯靶, 产生相对论速度的  $\Lambda$  超核  ${}^4_{\Lambda}\text{O}$ , 然后根据  ${}^4_{\Lambda}\text{O}$  的空间飞行距离测出其寿命约为  $(0.86 \pm 0.33) \times 10^{-10}$  秒. 上述两种方法, 由于测量时本底太强, 故精度不高. 最近有人用时间延迟符合法准确地测出了  ${}^4_{\Lambda}\text{B}$  和  ${}^4_{\Lambda}\text{C}$  的寿命, 它们分别是  $\tau({}^4_{\Lambda}\text{B}) = (1.92 \pm 0.22) \times 10^{-10}$  秒和  $\tau({}^4_{\Lambda}\text{C}) = (2.11 \pm 0.03) \times 10^{-10}$  秒. 他们的做法是, 通过反应  ${}^{12}\text{C}(K^-, \pi^-){}^4_{\Lambda}\text{C}$  和  ${}^{12}\text{C}(K^-, \pi^-p){}^4_{\Lambda}\text{B}$  产生  $\Lambda$  超核  ${}^4_{\Lambda}\text{C}$  和  ${}^4_{\Lambda}\text{B}$ , 分别测出反应发生时刻和  $\Lambda$  超核衰变时刻, 两者之差就是  $\Lambda$  超核的寿命.

### 3. 奇异交换反应与 $\Lambda$ 超核激发能谱

了解  $\Lambda$  超核的激发能谱对研究  $\Lambda$  超核结构和  $\Lambda$  超子—核子 ( $\Lambda$ -N) 相互作用是十分有益的. 目前实验上测量  $\Lambda$  超核激发能谱大都是利用奇异交换反应.

六十年代初, 有人注意到反应  $K^- + n \rightarrow \Lambda + \pi^-$  所产生的  $\Lambda$  超子的反冲动量很小, 于是人们设想如果在原子核内实现这一过程.



那么就可得到几乎静止的  $\Lambda$  超核. 由于这个反应中重子和介子发生了奇异数交换, 故称为奇异交换反应.

用奇异交换反应测量  $\Lambda$  超核激发能谱的方法是: 分别测出入射  $K^-$  介子和出射  $\pi^-$  介子的动量, 然后计算处在激发态上  $\Lambda$  超核的质量  $M_{\Lambda}^*$  与靶核质量  $M_A$  之差, 就可得到  $\Lambda$  超核的激发能谱.

对  $\Lambda$  超核激发态的理论解释, 目前有以下几种: 一是奇异相似态模型, 它认为由奇异交换反应产生的  $\Lambda$  超核激发态是与靶核有相同的自旋-轨道波函数的相似态. 它与靶核基态的区别仅在于  $\Lambda$  超子代替了靶核

中的中子. 这个模型能较好地解释  $\Lambda$  超核激发能谱中峰值的系统性; 其次是弱耦合壳模型, 它认为  $\Lambda$  超核激发态是由处在各种单粒子轨道上的  $\Lambda$  超子耦合到单中子空穴激发的核心激发态上构成的. 这个模型对  ${}^{12}\text{C}$  激发能谱给出了较好的解释; 与此平行的还有集团模型, 以  ${}^4_{\Lambda}\text{Be}$  为例. 它认为  ${}^4_{\Lambda}\text{Be}$  是由二个  $\alpha$  粒子和一个  $\Lambda$  超子组成的三体系统; 再就是  $SU(3)$  群分类模型. 它的基本思想是把质子、中子和  $\Lambda$  超子视为全同粒子, 用  $SU(3)$  群对  $\Lambda$  超核激发态进行分类. 结果发现可能存在 5 个粒子 (包括一个  $\Lambda$  超子) 空间全对称态-超对称态. 这是一般原子核所没有的新激发态. 后来在  ${}^4_{\Lambda}\text{Be}$  和  ${}^4_{\Lambda}\text{C}$  的激发能谱中找到了这样的态. 这表明  $SU(3)$  群分类也有一定道理. 然而, 究竟哪种模型更为合理? 还有待实验进一步检验.

### 4. $\Lambda$ 超核的 $\gamma$ 谱

测定  $\Lambda$  超核的  $\gamma$  谱一直是超核物理中最困难的问题之一. 原因是由于  $\Lambda$  超核发射出的  $\gamma$  谱线常常伴随着强烈的由一般原子核发射出来的  $\gamma$  谱线背景, 致使实验上很难辨认哪些  $\gamma$  谱线是属于  $\Lambda$  超核的. 因此到目前为止, 实验上只测到极少数几个  $\Lambda$  超核的  $\gamma$  谱.

然而这少数  $\gamma$  谱却揭示了许多有关  $\Lambda$ -N 相互作用的特征. 以图 4 所示的  ${}^4_{\Lambda}\text{He}$  和  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  的  $\gamma$  谱为例, 根据

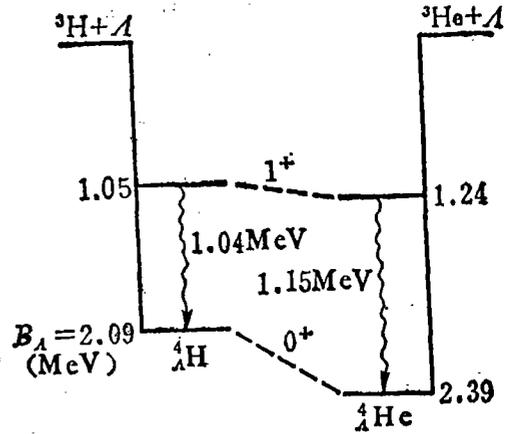


图 4  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  和  ${}^4_{\Lambda}\text{He}$  的  $\gamma$  谱

弱耦合模型,  ${}^4_{\Lambda}\text{He}$  或  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  的  $0^+$  态和  $1^+$  态是粒子-空穴激发的自旋双重态. 从图上可见它们不是退化的. 这表明  $\Lambda$ -N 相互作用是自旋相关的. 而且自旋单态 ( $0^+$  态) 比自旋三态 ( $1^+$  态) 具有稍强的吸引力. 这与 N-N 相互作用的情况刚好相反. 另外,  ${}^4_{\Lambda}\text{He}$  和  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  的  $0^+$  态或  $1^+$  态是同位旋双重态, 它们也是不退化的. 在考虑库仑能移的修正后, 这两组同位旋双重态的能级劈裂为  $0.3 \text{ MeV}$ , 这表明在  $\Lambda$ -N 相互作用中含有破坏电荷对称性的成份.

测定  $\Lambda$  超核  $\gamma$  谱对研究  $\Lambda$ -N 相互作用十分重要, 是今后超核物理研究的一个重要方面.

