

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 Λ 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 π 介子和一个质子而衰变。由

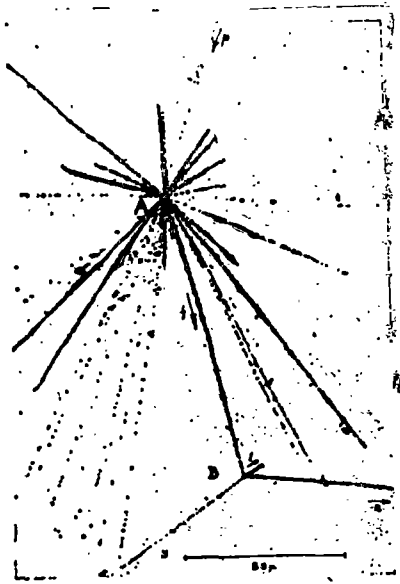


图 1

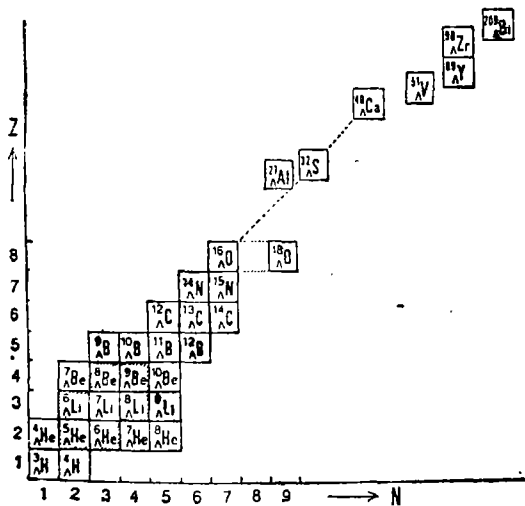


图 2 Λ 超核

于这种衰变方式与 Λ 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 Λ 超子的 Λ 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 Λ 超核(见图2)、两个双 Λ 超核和若干个 Σ 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、 Λ 超核

大家知道,一般原子核由质子和中子组成。新发现的 Λ 超核除包含质子、中子外,还包含一个 Λ 超子,那么 Λ 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. Λ 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。 Λ 超核基态结合能 B_Λ 定义为

$$B_\Lambda = M_C + M_\Lambda - M_H$$

这里 M_C 是 Λ 超核移去 Λ 超子后剩余的质量, M_Λ 和 M_H 分别表示 Λ 超子和 Λ 超核的质量。在 Λ 超核的早期研究中,人们通过分析在核乳胶里 Λ 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 Λ 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 Λ 超核的基态结合能(见表1)。其中 $^6_\Lambda\text{He}$

表 1 Λ 超核的基态结合能

	$B_\Lambda(\text{MeV})$	$B_\Lambda(\text{MeV})$	$B_\Lambda(\text{MeV})$
$^2_\Lambda\text{H}$	0.13 ± 0.05	$^6_\Lambda\text{Li}$	6.80 ± 0.03
$^3_\Lambda\text{H}$	2.04 ± 0.04	$^7_\Lambda\text{Li}$	3.53 ± 0.15
$^4_\Lambda\text{He}$	2.39 ± 0.03	$^8_\Lambda\text{Be}$	5.16 ± 0.03
$^5_\Lambda\text{He}$	3.12 ± 0.02	$^9_\Lambda\text{Be}$	6.34 ± 0.05
$^6_\Lambda\text{He}$	4.18 ± 0.10	$^{10}_\Lambda\text{Be}$	6.71 ± 0.04
$^7_\Lambda\text{He}$	7.16 ± 0.70	$^{11}_\Lambda\text{B}$	9.11 ± 0.22
$^8_\Lambda\text{Li}$	5.58 ± 0.03	$^{12}_\Lambda\text{B}$	7.52 ± 0.15
		$^{13}_\Lambda\text{B}$	8.89 ± 0.12
		$^{14}_\Lambda\text{B}$	10.24 ± 0.05
		$^{15}_\Lambda\text{B}$	11.37 ± 0.06
		$^{16}_\Lambda\text{B}$	10.76 ± 0.19
		$^{17}_\Lambda\text{B}$	11.65 ± 0.12
		$^{18}_\Lambda\text{B}$	12.17 ± 0.33
		$^{19}_\Lambda\text{B}$	13.59 ± 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 Λ 超核的结合能呢?原因是,重 Λ 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 Λ 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 Λ 超核的平均结合能,给出

$$60 < A < 100$$

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

$$B_\Lambda = D_\Lambda - \frac{\pi^2 \hbar^2}{2M_\Lambda r_0^2} \cdot A^{-1/3}$$

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

是 22.7 ± 0.4 MeV, 可得 $D_A \approx 27$ 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. Λ 超核的寿命

Λ 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 Λ 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 Λ 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

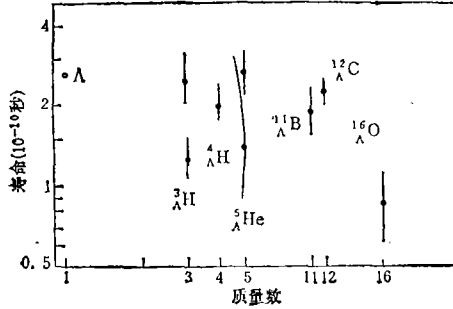


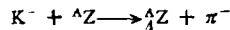
图 3 Λ 超子和 Λ 超核的寿命

的几个 Λ 超核的寿命. 其中 $A \leq 5$ 的轻 Λ 超核的寿命是由泡室实验得到的. ${}^{\Lambda}_{16}\text{O}$ 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 Λ 超核 ${}^{\Lambda}_{16}\text{O}$, 然后根据 ${}^{\Lambda}_{16}\text{O}$ 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 ${}^{\Lambda}_{11}\text{B}$ 和 ${}^{\Lambda}_{12}\text{C}$ 的寿命, 它们分别是 $\tau({}^{\Lambda}_{11}\text{B}) = (1.92 \pm 0.22) \times 10^{-10}$ 秒和 $\tau({}^{\Lambda}_{12}\text{C}) = (2.11 \pm 0.03) \times 10^{-10}$ 秒. 他们的做法是, 通过反应 ${}^{12}\text{C}(K^-, \pi^-){}^{\Lambda}_{12}\text{C}$ 和 ${}^{12}\text{C}(K^-, \pi^- p){}^{\Lambda}_{11}\text{B}$ 产生 Λ 超核 ${}^{\Lambda}_{12}\text{C}$ 和 ${}^{\Lambda}_{11}\text{B}$, 分别测出反应发生时刻和 Λ 超核衰变时刻, 两者之差就是 Λ 超核的寿命.

3. 奇异交换反应与 Λ 超核激发能谱

了解 Λ 超核的激发能谱对研究 Λ 超核结构和 Λ 超子—核子 (Λ -N) 相互作用是十分有益的. 目前实验上测量 Λ 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 Λ 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 Λ 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 Λ 超核激发能谱的方法是: 分别测出入射 K^- 介子和出射 π^- 介子的动量, 然后计算处在激发态上 Λ 超核的质量 M_{Λ}^* 与靶核质量 M_A 之差, 就可得到 Λ 超核的激发能谱.

对 Λ 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 Λ 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 Λ 超子代替了靶核

中的中子. 这个模型能较好地解释 Λ 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 Λ 超核激发态是由处在各种单粒子轨道上的 Λ 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 ${}^{\Lambda}_{12}\text{C}$ 激发能谱给出了较好的解释; 与此平行的还有集团模型, 以 ${}^{\Lambda}_{8}\text{Be}$ 为例, 它认为 ${}^{\Lambda}_{8}\text{Be}$ 是由二个 α 粒子和一个 Λ 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 Λ 超子视为全同粒子, 用 SU(3) 群对 Λ 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 Λ 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 ${}^{\Lambda}_{8}\text{Be}$ 和 ${}^{\Lambda}_{12}\text{C}$ 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. Λ 超核的 γ 谱

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

然而这少数 γ 谱却揭示了许多有关 Λ -N 相互作用的特征. 以图 4 所示的 ${}^{\Lambda}_{11}\text{He}$ 和 ${}^{\Lambda}_{11}\text{H}$ 的 γ 谱为例, 根据

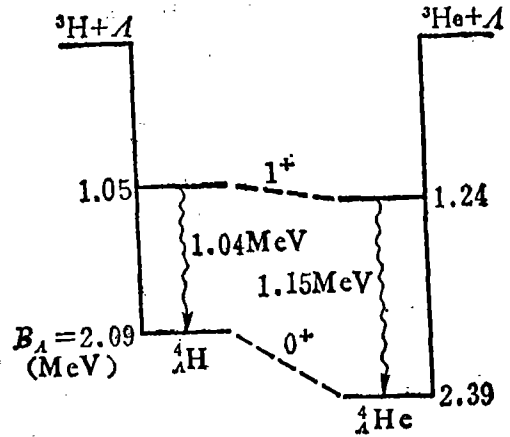


图 4 ${}^{\Lambda}_{11}\text{H}$ 和 ${}^{\Lambda}_{11}\text{He}$ 的 γ 谱

弱耦合模型, ${}^{\Lambda}_{11}\text{He}$ 或 ${}^{\Lambda}_{11}\text{H}$ 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 Λ -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, ${}^{\Lambda}_{11}\text{He}$ 和 ${}^{\Lambda}_{11}\text{H}$ 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 MeV, 这表明在 Λ -N 相互作用中含有破坏电荷对称性的成份.

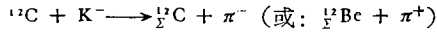
测定 Λ 超核 γ 谱对研究 Λ -N 相互作用十分重要, 是今后超核物理研究的一个重要方面.

二、 Σ 超核及超核家族的其它成员

在超子家族中,除 Λ 超子外,还有许多其它成员。 Λ 超核发现后,人们自然会想:是否存在包含其它超子的超核呢?比如 Σ 超核、 Ξ 超核等。另外前面讨论的 Λ 超核只包含一个 Λ 超子,是否还有包含两个或更多 Λ 超子的超核?

1. Σ 超核

Λ 超核发现后,人们预言可能存在 Σ 超核,并从理论上估计 Σ 超核的激发态能级宽度约为 20 MeV。八十年代初,欧洲核子研究中心 (CERN) 的一个小组在 ^{12}C 靶上作奇异交换反应

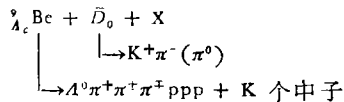


时发现了 Σ 超核。出人意外的是,他们观测到的 Σ 超核激发态的能级宽度只有 5 MeV,比理论预言值要小得多。这一发现向理论研究提出了挑战。围绕这个窄 Σ 超核激发态问题,近几年来人们展开了广泛的讨论,但至今仍未得到一个统一的看法。

Σ 超核的发现,同样向人们揭示了强相互作用的新知识。人们还发现在 Σ -N 相互作用中,自旋-轨道耦合比 N-N 相互作用中的要强。这些知识对研究 Σ -N 相互作用都是十分有用的。值得一提的是,在预言 Σ 超核的同时,人们还预言可能存在 Ξ 超核、 Ω 超核。但实验上至今尚未发现它们存在的迹象。

2. 粲超核及味核物理

继 Λ 、 Σ 超核发现后,有人在用高能质子束轰击乳胶底片实验中发现,其中有一个事件不能用簇射粒子的非弹性散射来解释,但可解释为协同产生了一个轻粲超核 $\frac{1}{2}^{\Lambda_c}\text{Be}$ 和一个反粲介子 \bar{D} 。

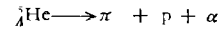
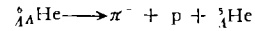
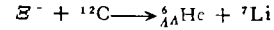


于是他们认为发现了粲超核 $\frac{1}{2}^{\Lambda_c}\text{Be}$ 。但是,由于上述 Λ 超子的衰变未被观察到,特别是至今实验上尚未找到单独的粲超核。所以许多人对上述说法表示怀疑。

不论上述说法正确与否,理论上早已预言可能存在粲超核。因为从夸克层次来说,标志 Λ 超核的重要特征是:它不仅包含上夸克 u 和下夸克 d ,还包含奇异夸克 s 。而夸克有六种味,除 u 、 d 、 s 外,还有粲夸克 c 、底夸克 b 和顶夸克 t 。既然存在包含奇异夸克 s 的 Λ 超核,那么也可能存在包含 c 夸克、 b 夸克、 t 夸克的 c 超核、 b 超核和 t 超核。这些超核我们统称之为味核。尽管粲超核是否已被发现尚未定论,但味核物理已发展成超核物理中的一个分支。

3. 双 Λ 超核与多奇异超核

1963年,达尼茨等人发现了第一个双 Λ 超核 $\frac{1}{2}^{\Lambda\Lambda}\text{Be}$ 。1966年,普劳斯又在 $\Xi^- + ^{12}\text{C}$ 反应中观察到了双 Λ 超核 $\frac{1}{2}^{\Lambda\Lambda}\text{He}$ 。



并且从衰变产物的动力学分析得到它们的结合能

$$B_{\Lambda\Lambda}(\frac{1}{2}^{\Lambda\Lambda}\text{He}) = 10.9 \pm 0.6 \text{ MeV}$$

和 $B_{\Lambda\Lambda}(\frac{1}{2}^{\Lambda\Lambda}\text{Be}) = 17.7 \pm 0.1 \text{ MeV}$ 。

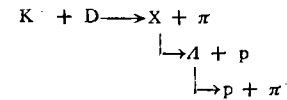
双 Λ 超核发现较早,当时它们并未引起人们的重视,直到近几年人们才对它发生特别的兴趣,原因是,一方面双 Λ 超核可能与下面将要讨论的奇异双重子 H 粒子有关;另一方面双 Λ 超核作为多奇异超核的最简单形式,可能反映出有关新的核多体系统的动力学规律。

多奇异超核是一个由 N 、 Λ 、 Σ ……等强子组成的新体系。探讨这个系统的特征已成为当前超核物理中最活跃的研究领域之一。人们从理论上不断提出许多奇异交换反应,如 $(\Omega^-、\text{K}^+)$ 、 (Ξ^-, K^-) 等,企图找到更多的双 Λ 超核和多于两个 Λ 超子的多奇异超核。然而不幸的是,除 $\frac{1}{2}^{\Lambda\Lambda}\text{Be}$ 和 $\frac{1}{2}^{\Lambda\Lambda}\text{He}$ 外,实验上至今还未发现任何其它的多奇异超核。最近又有人提出用高能重离子碰撞,使 $N + N \longrightarrow Y + \text{K}^+ + N + \dots$ 反应重复发生来产生多奇异超核。希望这个实验能如愿以偿。

4. H 粒子

众所周知,自然界中没有双中子或双质子束缚态,但是否存在双 Λ 束缚态呢?七十年代初,贾非根据口袋模型分析指出:可能存在一个稳定的双 Λ 束缚态的 H 粒子。其量子数是 $S = -2$ 、 $l = 0$ 、 $J^P = 0^+$,质量 $m \approx 2150 \text{ MeV}$ 。贾非的工作发表后,许多人又从势模型和格点规范理论加以验证,得到了同样的结论。

为了验证贾非的预言,实验上立即展开了寻找 H 粒子的工作。遗憾的是十多年过去了,至今还未发现 H 粒子存在的确切证据。最近 BNL 提出一个新的调查方案:



来证实 H 粒子的存在,但由于准自由 Λ 粒子产生的背景太强,致使实验毫无收获。还有人指出双 Λ 超核就是 H 粒子存在的标志,但毕竟只是标志,而不是事实。

由于 H 粒子的存在对口袋模型是有力的支持,所以,尽管寻找 H 粒子的工作屡受挫折,但人们仍在作坚持不懈的努力。

综上所述,研究超核物理有着重大的意义。首先,超核的发现打破了原子核只是由中子和质子组成的传统观念,引导人们去进行新的探索。其次,研究超核物理不仅可以进一步了解原子核的结构,而且还可以获得有关超子——核子和超子——超子相互作用的新知识。因此近年来在超核方面无论是实验上还是理论上都开展了大量的工作,使超核物理已发展成中、高能原子核物理的一个重要分支。