

# 超子与超子束

王少阶

## 一、超子与超子束

### 1. 超子的发现:

从本世纪30年代初到1947年,科学家所发现的基本粒子已从质子、中子、电子和光子等四种增加到十四种,然而,认识真理的长河并未到此结束,从1947年起,基本粒子物理学又迎来了一个新的丰收季节.首先,罗彻斯特和巴特勒在宇宙线研究中发现了两个衰变迹成“V”字形的未知粒子,从而开创了用原子核乳胶来研究宇宙射线的新时期.对大量乳胶照片的分析表明,上述两个未知粒子均不带电;其中一个的质量约500 MeV/c<sup>2</sup>, (现称 $\kappa^0$ 介子),另一个质量约1100 MeV/c<sup>2</sup> (现称 $\Lambda^0$ 粒子).随后,在50年代初期,一些大型加速器先后投入使用,科学家们开始用加速器作高能粒子源进行研究,从而发现了一大批新的粒子,这些粒子大致分为两组:一组是 $\kappa$ 介子(包括 $\kappa^+$ 、 $\kappa^-$ 和 $\kappa^0$ ),质量约500 MeV/c<sup>2</sup>;另一组粒子的质量比核子(质子和中子)更重,故叫做“超子”费米子,如 $\Lambda^0$ (兰姆达)超子、 $\Sigma$ (西格马)超子和 $\Xi$ (克西)超子等.此外,1964年还发现了 $\Omega^-$ (欧米伽)超子.

### 2. 超子的特性:

超子除了质量大于核子外,它们都是奇异粒子.所谓奇异是指下述事实:它们的产生是通过强相互作用进行的,时间仅为 $10^{-23}$ 秒;而其衰变又是通过弱相互作用进行的,时间约为 $10^{-10}$ 秒,可见两者之间相差亿万倍!此外,这些基本粒子总是“成对”产生(亦称“协同”产生),而其衰变又可单个进行.这两个现象最初都使人迷惑不解,故把这些基本粒子叫做奇异粒子.研究发现,奇异粒子应遵守某种新的守恒定律.为此,盖尔曼于1953年首先引入奇异量子数 $S$ ,并认为在强相互作用和电磁相互作用过程中奇异数守恒,而在弱相互作用过程中,奇异数不守恒.这样,

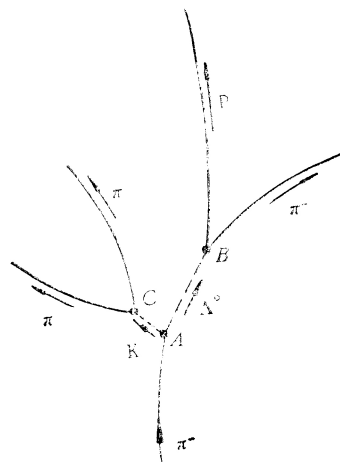


图 1

上述疑难均得到满意的解释.以 $\Lambda^0$ 和 $\kappa^0$ 的产生和衰变为例,这一过程示于图1中(图中虚线表示中性的 $\Lambda^0$ 和 $\kappa^0$ 没有可见迹).用高能 $\pi^-$ 束轰击质子靶,在A点发生下述强作用引起的反应:



$$S: \quad 0 \quad 0 \quad -1 \quad +1$$

在反应式下面,标出了始态粒子和终态粒子的奇异量子数.显然 $S_{\text{始}} = 0 + 0 = 0$ ,  $S_{\text{终}} = -1 + 1 = 0$ ,此即反应前后奇异数守恒.由此可见,初态没有奇异粒子参加的强反应中,终态不会产生单个奇异粒子.

图1中B、C两点分别示出了 $\Lambda^0$ 和 $\kappa^0$ 的衰变.对 $\Lambda^0$ 有:

$$S: \quad -1 \quad 0 \quad 0$$

可见衰变前后奇异数不守恒,这只能是弱相互作用过程,从而进行得很慢.

表1列出了超子的种类及其主要物理特性.应指出,所有超子都有其相应的反粒子.

表1 超子特性

粒子	电荷(e)	奇异数S	自旋J	质量(MeV/c <sup>2</sup> )	寿命(秒)
$\Lambda^0$	0	-1	1/2	1115.60±0.05	$(2.632 \pm 0.020) \times 10^{-10}$
$\Sigma^+$	+1	-1	1/2	1189.37±0.06	$(0.802 \pm 0.005) \times 10^{-10}$
$\Sigma^0$	0	-1	1/2	1192.47±0.08	$(0.58 \pm 0.13) \times 10^{-10}$
$\Sigma^-$	-1	-1	1/2	1197.35±0.06	$(1.483 \pm 0.015) \times 10^{-10}$
$\Xi^0$	0	-2	1/2	1314.9±0.6	$(2.90 \pm 0.10) \times 10^{-10}$
$\Xi^-$	-1	-2	1/2	1321.32±0.13	$(1.654 \pm 0.021) \times 10^{-10}$
$\Omega^-$	-1	-3	3/2	1672.2±0.4	$(0.82 \pm 0.06) \times 10^{-10}$

超子的衰变主要为非轻子衰变(除 $\Sigma^0$ 外),即衰变产物为强子(重子和介子).如 $\Lambda^0$ 和 $\Sigma^\pm$ 衰变为 $\pi$ 介子和核子, $\Xi$ 衰变为 $\pi$ 介子和 $\Lambda^0$ , $\Omega^-$ 则衰变为 $\kappa$ 介子和 $\Lambda^0$ ,或 $\pi$ 介子与 $\Xi$ .此外,超子还有半轻子衰变,即衰变产物为强子加轻子,因产物中有轻子,故可用于弱相互作用的研究.仅 $\Sigma^0$ 衰变为 $\Lambda^0$ 和 $\gamma$ ,这是电磁相互作用.

### 3. 超子束:

超子束是粒子的二次束流,通常用加速器的原始质子束打在金属或难熔的靶上来产生,然后将该束流准直到一合适的小立体角内.超子束除含有用的超子通量外,还有较大的本底.相应于中性及带电的两类超子,也有中性超子束及带电超子束.若束流带负电, $\pi^-$ 是最大的本底;若束流带正电,质子是最大的本底;中性束流中,中子和 $\gamma$ 大大超过有用超子的通量.带

电超子束用磁铁来偏转和聚焦,这与其它带电束流的输送类似。对中性束,则需加特制的准直器来限制中性束并清除带电粒子。束流布局应尽可能紧凑,以减少超子衰变损失,还应尽量减少束流外产生的次级强子的影响,使其远离束流入口端。

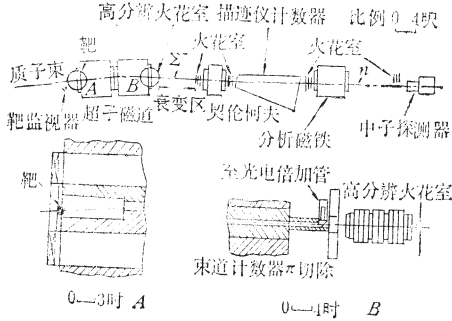


图2 BNL 带电超子束布局

最先引出超子束的是西欧核子中心 (CERN) 的 PS 和美国布鲁克海之国立实验室(BNL)的 AGS, 均为负超子束,其原始质子束的能量约 30GeV,近年在费米实验室及 CERN 相继建成高能超子束,其原始质子束能量在 200GeV 以上。与前者相比,高能超子束有更大的超子通量,还能得到反超子。可供研究的对象更多。

图 2 示出了布局略图,每个脉冲约  $10^{11}$  个高能质子 ( $\sim 29\text{GeV}$ ) 打在大小为  $0.66 \times 0.66 \times 25.4 \text{cm}^3$  的铍靶上,靶的位置见放大图 A,靶后是一长 439.9 厘米的弯形磁道,对放在磁道出口端的探测器(见放大图 B)而言,该长度足以屏蔽在靶上产生的其它强子于本底。对所需的  $\Sigma^-$  和  $\Xi^-$  超子而言,衰变损失甚为有限。在与靶成  $146^\circ$  的方向上,放置闪烁计数望远镜,作为靶监视器。磁道为两半,内壁镀铝并成锥形。若在其内充以大气压强下的氟里昂气体,则它可用作阈切仑柯夫计数器,切仑柯夫光从位于磁道出口端的一个薄膜镜上反射至光电倍增管。此计数器不仅能标记轻粒子为  $\pi^-$ 、 $\kappa^-$  等(它们是最严重的本底),还能抑制它们,其效率达 99.9% 以上。

探测超子是利用它们的衰变。在放大图 B 上可见,磁道出口端有一高分辨本领的大火花室,用来探测超子的位置和方向,由它测得的超子动量精度为  $\pm 1\%$ ,方向准确度达  $\pm 0.5$  毫弧度。这一测量能再现超子的轨迹,并外推到产生靶,以此作为超子产生的证据。

## 二、超子束物理学

### 1. 研究超子产生截面:

在两个带电超子束首次运转以后,最先开展的工作就是测量  $\Sigma^-$  和  $\Xi^-$  的产生截面。例如在 BNL,利用图 2 所示实验安排探测  $\Sigma^- \rightarrow \pi^- \pi^-$  和  $\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 \pi^-$  衰变,从而得到了  $\Sigma^-/\pi^-$  和  $\Xi^-/\pi^-$  的计数比,并对探测损失及超子在磁道中的衰变进行修正,从而外推到超子产

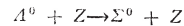
生靶。再利用早先实验已得到的  $\pi^-$  产生截面,从而得到  $\Sigma^-$  和  $\Xi^-$  的产生截面。

### 2. 研究超子的相互作用截面:

由于超子束能提供较高的超子通量,故能方便地对各种相互作用截面进行实际测量,其精度比早先在气泡室实验中得到的结果大为改善。在 BNL 和 CERN 两个带电超子束上都用氢研究了  $\Sigma^-p$  相互作用。在 CERN 还用氦进行了测量,得到了  $\Sigma^-p$ 、 $\Sigma^-d$  的总截面及  $\Sigma^-p$  的弹性散射截面。在 BNL,用液氢靶研究了  $\Sigma^-p$  和  $\Xi^-p$  弹性散射,用塑料闪烁体靶研究了  $\Sigma^-$  和  $\Xi^-$  的相互作用。此外,在中性超子束上还测量了  $\Lambda^0 p$ 、 $\bar{\Lambda}^0 p$  及  $\bar{\Lambda}^0 d$  等的总截面。这些测量得到了有意义的结果,与用层子模型所作的理论计算基本符合。

### 3. $\Sigma^0$ 超子的寿命测量:

$\Sigma^0$  超子的寿命极短,也难以测准,故以前的实验只能给出其寿命  $\tau_{\Sigma^0} < 10^{-14}$  秒。1977 年在 CERN 中性超子束的一次著名实验中测量了  $\Sigma^0$  超子的寿命。根据格拉肖等 1961 年由  $SU(3)$  进行的预言, $\Sigma^0$  的寿命应为:  $\tau_{\Sigma^0} = 0.7 \times 10^{-19}$  秒。相应于每 GeV/c 的动量其飞行距离为  $2 \text{\AA}$ ,或由测不准关系知其质量宽度  $\Delta m = 9.4 \text{keV}$ 。无论是飞行距离还是质量宽度都不能用现有技术测准。然而,可研究下述反应:



间接测定  $\Sigma^0$  的衰变率。式中 Z 为核电荷为 Ze 的库仑场,它为过程:  $\Lambda^0 + \gamma \rightarrow \Sigma^0$  ( $\Sigma^0$  衰变的逆过程) 提供  $\gamma$ 。这一机制在理论上已作过深入研究。

实验中是将一个薄的高 Z 靶(如铀或铯)插入中性超子束中,并寻找  $\Lambda^0 \gamma$  的出口,这是通过探测衰变  $\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$  和探测  $\gamma$  射线而实现的。用多丝正比室测量  $\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$ , $\gamma$  射线的能量和位置用由 84 块铅玻璃砖组成的阵列记录,将所得结果进行作图分析后得到  $\Sigma^0$  的寿命为:  $\tau_{\Sigma^0} = (0.58 \pm 0.13) \times 10^{-19}$  秒,可见与理论预言符合很好。

### 4. 磁矩的测量:

1976 年在费米实验室高能中性超子束上观察到超子的极化效应,即  $\Lambda^0$  粒子的产生角可在垂直面内变化。当  $\Lambda^0$  通过准直器时,会以正比于其磁矩的速率进动,这与陀螺绕其轴旋转的情形类似。这一特性用来精确测量  $\Lambda^0$  的磁矩,此项工作已于 1978 年进行,对速度接近光速的高能超子,其进动角为:  $\phi$  (度) =  $18.3 \mu_{\Lambda^0} \int B dl$ , 式中  $\mu_{\Lambda^0}$  是  $\Lambda^0$  超子的磁矩,以核子磁矩  $\mu_N = e\hbar/2m_p c$  为单位, B 为磁场强度,单位为千高斯,积分对磁场进行,长度单位为米。角度  $\phi$  可由  $\Lambda^0$  粒子动量的横向分量与纵向分量之比求得,将  $\phi$  对积分  $\int B dl$  之值作图,所得直线的斜率即磁矩。

## 5. 研究弱相互作用:

超子的半轻子衰变具有特殊的意义, 因为弱相互作用的理论已很成熟, 可对实验数据作精确解释. 然而这一研究困难很多, 首先是这种衰变的分枝比小; 其次是衰变过程中总包含一个中微子和一个中性重子. 如果母体是  $\Lambda^0$  或子体是中子, 通常只能测量重子的方向, 此外还有本底可能引起错误鉴别的问题. 研究工作之一是测量弱相互作用理论中的某些参数, 并得到了一些重要的结果. 其次是研究稀有型衰变的分枝比. 例如在中性超子束上测量了  $\Xi^0 \rightarrow p\pi^-$  与  $\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0\pi^0$  的分枝比为:  $\Gamma(\Xi^0 \rightarrow p\pi^-) / \Gamma(\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0\pi^0) = 3.6 \times 10^{-5}$ .

综上所述, 超子束物理学在研究超子的产生截面及其与物质的相互作用, 精确测定超子静特性 (如质量、寿命、磁矩等) 和研究弱相互作用等方面都有其独到之处. 理论和实践的结合十分密切, 还有许多新课题有待人们去探索.