

用动量为 70 亿电子伏/c 和 80 亿电子伏/c 的 π^- 介子产生 Ξ^- 超子*

王淦昌 王祝翔 H. M. 維辽索夫 丁大钊 金蔭仁

E. H. 克拉特尼茨卡娅 A. A. 庫茲涅佐夫 A. 米呼尔

阮丁賜 A. B. 尼基金 M. И. 索洛維耶夫

提 要

本文研究了用动量为 68 亿电子伏/c 和 80 亿电子伏/c 的 π^- 介子产生 Ξ^- 超子。得到了 π^- 介子的动量为 68 和 80 亿电子伏/c 的 Ξ^- 产生的截面(当 68 亿电子伏/c 时 $\sigma = 3.6^{+3.1}_{-2.1} \mu\text{b}/N$, 当 80 亿电子伏/c 时 $\sigma = 10.6^{+3.4}_{-2.2} \mu\text{b}/N$), Ξ^- 的质量 ($M_{\Xi^-} = 1317.0 \pm 2.2$ 兆电子伏) 和 Ξ^- 的寿命 $\tau_0 = 3.5^{+1.4}_{-1.2} \times 10^{-10}$ 秒。

最早的一些串级超子 Ξ^- 是在宇宙线的实验里得到的, 在工作 [1] 中简述了用宇宙线得到的 16 个 Ξ^- , 后来在加速器上也得到了 Ξ^- : 2 个 Ξ^- 是由动量为 55 亿电子伏/c^[2] 的 π^- 介子所产生的, 16 个 Ξ^- 是由动量为 11.5 亿电子伏/c^[3] 的 K^- 介子所产生的。

在我们的实验里应用了 24 升的丙烷气泡室, 它放在场强为 13700 高斯的常磁场当中。气泡室用动量为 70 亿电子伏/c 和 80 亿电子伏/c 的 π^- 介子束照射。实验装置已经在工作 [4] 中描述了。一共扫描了 27000 张初级 π^- 介子的动量为 68 ± 6 亿电子伏/c 的底片, 75000 张 π^- 的动量为 ~ 80 亿电子伏/c 的底片。底片用立体放大器及投影器扫描 2 次, 而其中一部份扫描了 3 次。在扫描时选择了所有这样的事例, 这些事例从外形看能够列入于串级超子按图画 $A \rightarrow V^0 + B$, $V^0 \rightarrow C + D$ 的衰变里去(见图 1, 图 2)。

为了观察串级超子衰变的本底, 同样也选了所有次级的一根径迹的星, 从这些星里飞出 V^0 粒子。这样共选出了 90 个事例。在测量显微镜 УИМ-21 上利用测量在一对立体底片上相应点的坐标的方法进行了测量。测量的结果送到电子计算机“Урал”计算, 给出点的空间坐标, 粒子的动量和夹角。对于粒子动量的误差, 我们考虑了在测量显微镜上坐标测量的误差, 由于在丙烷中多次散射而引起径迹曲率的误差以及磁场在气泡室的范围内不均匀所引起的误差。

对于 Ξ^- 超子的确定, 应用了下面的标准。

- 1) V^0 应该与 Λ^0 衰变成质子和 π^- 的运动学相符合。
- 2) Λ^0 应该“对准”折弯的点, 也就是折弯的点应该在 Λ^0 衰变的平面里, 同时从 Λ^0 衰变出来的 π^- 和 P 的垂直动量相对于 Λ^0 飞行方向应该平衡。
- 3) Λ^0 衰变的点应该在由粒子 A, B 所组成的平面里。

* 1961 年 3 月 20 日收到。

4) 在折弯的点上 Λ^0 和 B 粒子的垂直动量应该平衡.

5) 事例应该满足 Ξ^- 超子衰变的运动学:

$$\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^- + 65 \text{ 兆电子伏}$$

除此之外, 在有可能的情况下, 还利用了游离的测量. 在进行了分析后去掉了 47 个事例, 因为在这些事例中 ν^0 与“折弯”的点无关系. 14 个事例满足标准 2), 但 ν^0 确是 K^0 . 在 49 个事例中有 29 个满足标准 1) 和 2), 只有 15 个满足标准 3) (我们将称它们为“同平面的事例”), 而其中 4 个事例不满足标准 4) 和 5). 在余下的全部满足 5 个标准的 11 个事例里面, 有三个事例, 其 ν^0 在误差范围内既和 Λ^0 衰变相符, 又与 K^0 衰变符合. 由于在衰变中正粒子能量很大, 用游离测量也不能辨别出 Λ^0 或 K^0 . 但是, 考虑到这三个事例很好地与 Ξ^- 衰变运动学符合, 我们把它列入了 Ξ^- 超子. 在所有的 Ξ^- 里, 一个是在动量为 68 亿电子伏/c 的 π^- 介子束得到的, 而 10 个是在动量为 ~ 80 亿电子伏/c 的 π^- 介子束得到的.

在表 1 中列出了已确定的 Ξ^- 超子的数据. 所有的数据是取了 2—4 次独立无关的在测量显微镜上测量得到的结果的平均值.

表 1 同时列出衰变的能量 Q 和所找到的 Ξ^- 超子在它们自己的坐标系里在衰变前的寿命.

对于 11 个 Ξ^- 超子衰变事例 Q 平均值等于 61.9 ± 2.2 兆电子伏, 也就是 $M_{\Xi^-} = 1317.0 \pm 2.2$ 兆电子伏. Ξ^- 超子的寿命是用最大或然率方法计算得到

$$\tau_0 = 3.5^{+1.4}_{-1.2} \times 10^{-10} \text{ 秒}$$

在确定了 Ξ^- 超子以后也分析了产生这些 Ξ^- 超子的初级星. 除了 2 个事例以外, 所有的 Ξ^- 都在气泡室中产生. 初级星的径迹测量了 2 次, 而且对每个星计算了动量与能量的差异. 其结果列在表 2. 6 个 Ξ^- 是在具有偶数根径迹且总电荷等于 0 的星中产生. 但是, 其中只有 5 个与 $\pi^- p$ 相互作用没有矛盾 (事例 171—218 不可能是 $\pi^- p$ 相互作用, 因为对此事例 $\Delta p > \Delta E$). 因为对 Ξ^- 超子 $S = -2$, 所以应该期待, 和串级超子一起还应产生 2 个具有 $S = +1$ (K^0, K^+) 的 K 介子. 但在我们的实验结果中, 只有在三个事例中能按照衰变运动学确定是 K 介子. 在事例 91—145 中按径迹的停在室内确定有 4 个径迹断定是质子, 因为它们都停在室内而无衰变现象, 有的粒子可很好地以动量和游离确定是 π^+ , K^+ 则按衰变运动学确定. 第 7 个正粒子按照动量与电离不可能是 π^+ , 它或者是 K^+ 或者是质子. 在事例 19—179 中, 除了一个明显的 K^+ 介子以外, 另外不能按动量与游离来确定的那个正粒子可能是 K^+ 介子. 如果这粒子不是 K^+ , 则应该还有一个 K^0 . 由此可见, 以上没有一个是与 Ξ^- 超子同时产生的且很好被确定是 K^+, K^0 介子的事例, 但是也没有一个事例与同时产生的图画矛盾.

表 3 列出了 Ξ^- 超子在 $\pi^- N$ 质心系中的动量 p^* , 垂直动量 $p^\perp$ 和飞出的角度 θ^* (假定 Ξ^- 是在初级 π^- 介子和自由核子碰撞时所产生的).

从表 3 可以看到, 平均垂直动量等于 318 ± 35 兆电子伏. 有趣地注意到, 这个值 $p^\perp_{\Xi^-}$ 是接近于质子^[5] 和 Λ 超子^[6] 的垂直动量.

在质心系中, Ξ^- 超子的飞行基本上向后, 这与质子、 Λ 与 $\Sigma^\pm$ 超子从 68 亿电子伏/c $\pi^- p$ 相互作用中的飞出相似. 应该指出, 在 [2] 中的二个 Ξ^- 也是在质心系向后

飞出。

在表 3 同样指出了以下角度的特性：

θ_1^* — Λ^0 在 Ξ^- 静止系统中从 Ξ^- 衰变中飞出的角度。

θ_p^* — p 在 Λ^0 静止系统中从 Λ^0 衰变中飞出的角度。

$\omega_{\Xi-\Lambda^0}$ 是 Ξ^- 和 Λ^0 衰变平面之间的夹角。

在 θ_1^* 和 $\omega_{\Xi-\Lambda^0}$ 的分布中没有观察到不对称。

在从 Λ^0 衰变来的 p 分布里，向前，向后 (θ_p^*) 和向上向下观察到某些不对称 (7 个向前，3 个向后，1 个 $\sim 90^\circ$ ，8 个向下，3 个向上)。我们看到在 [2] 中从 Λ^0 衰变的 p 在 Λ 静止系统里都向前。上面所给出的角分布的不对称表示了从 Ξ^- 衰变中 Λ^0 极化的性质。 Λ^0 超子在 Ξ^- 衰变中的纵向极化，如果它存在的话，则表明在 Ξ^- 衰变时宇称不守恒。

为了确定 Ξ^- 超子的产生截面，计算了入射 π^- 介子的数目和确定了在泡室内记录 Ξ^- 超子的有效长度 (等于 30 ± 5 厘米)。此外还考虑了如下的校正：

- 1) μ^- 介子的混合 ($5 \pm 2\%$)。
- 2) 由于在室中的相互作用，初级 π^- 介子的部分的损失。
- 3) 在扫描时寻找 Ξ^- 超子的效率 ($80 \sim 90\%$)。
- 4) 室的几何形状校正 (2.0 ± 0.3)。
- 5) 从 Ξ^- 衰变来的 Λ^0 超子的中性衰变。

同时我们得到在室中产生 Ξ^- 超子的 π^- 介子的平均自由路程：当 π^- 动量为 68 亿电子伏/c 时 $l = 2.02^{+0.30}_{-0.29} \times 10^6$ 厘米，当 π^- 动量为 ~ 80 亿电子伏/c 时， $l = 0.68^{+0.30}_{-0.29} \times 10^6$ 厘米。如果取在碳核上产生的截面 $\sim A^{2/3}$ ，则 Ξ^- 超子产生的截面为：

当 68 亿电子伏/c 时 $\sigma = 3.6^{+2.5}_{-2.1} \mu\delta/N$ ，

当 ~ 80 亿电子伏/c 时 $\sigma = 10.6^{+4.1}_{-3.1} \mu\delta/N$ 。

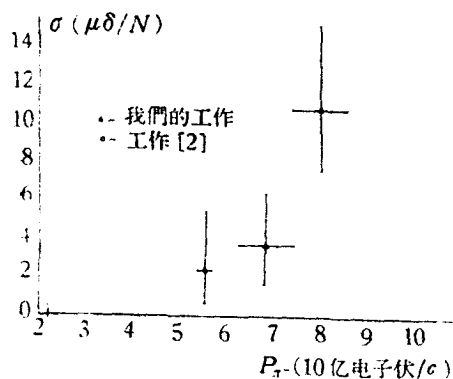


图 3 Ξ^- 超子的产生截面与入射 π^- 介子的能量的关系

在工作 [2] 中得到的由动量为 55 亿电子伏/c 的 π^- 介子产生 Ξ^- 的截面为： $2.3^{+3.1}_{-1.6} \mu\delta/N$ 。在图 3 给出了产生 Ξ^- 截面与入射 π^- 介子的能量的关系。我们知道， π^- 介子按照 $\pi^- + N \rightarrow \Xi^- + K + K$ 反应并且考虑到核子在核中的运动，其产生 Ξ^- 超子的阈能为 $21.9^{+2.1}_{-2.1}$ 亿电子伏 [7]。最后，表 4 列出了似 Ξ^- 的事例，其中有 4 个是同平面的，14 个不同平面的。同平面的事例可很好地用在表 4 上指出的反应来解释。因为对于 $\pi^- + n \rightarrow \Lambda^0 + K^-$ 反应，由于奇异数不守恒而是被禁止的，而次级 K^- 又比 π^+ 少，所以同平面事例大部分是由 π^+ 介子引起的。

不同平面的事例可能是由 π^+ 或是由 π^- ， K^- 所引起。有 7 个相互作用是由 π^+ 介子产生，7 个是由负粒子所产生。事例 150—286，99—68，144—219 可能只是由 K^- 产生的，因为 π^- 的能量在这情况下要比产生 Λ^0 的阈能来得低。

最后，在结果讨论方面，我们对 B. H. 维克斯莱尔，H. B. 契维洛表示感谢，并且

表 1 确定的 Ξ^- 超子的数据

p_{π^-} (10 亿电子伏/c)	事例号码	p_{Ξ^-} (兆电子伏/c)	p_{A^0} (兆电子伏/c)	p_{π^-} (兆电子伏/c)	$\theta_{\Xi^- A^0}$	$\theta_{\Xi^- \pi^-}$	$\Delta p_{\perp}^{(*)}$ (兆电子伏/c)	不同平面的 角度 $\eta^{(***)}$	Q_{Ξ^-} (兆电子伏)	t (10^{-10} 秒)
7	182—42	3517±420	3166±415	374±67	2°54'±30'	18°30'±30'	41±42	9'	63.4±14.4	1.13±0.11
8	91—145	1894±150	1507±150	406±48	4°7'±40'	15°25'±40'	1±25	14'	55.7±15.7	2.53±0.11
8	196—160	1247±185	965±180	317±44	6°45'±30'	23°11'±30'	12±28	18'	69.1±18.5	3.37±0.27
8	19—179	2811±490	2407±490	445±64	4°9'±30'	18°43'±30'	31±46	20'	73.2±16.5	0.93±0.11
8	171—218	1398±235	1181±230	263±29	6°22'±1°20'	31°36'±30'	8±38	47'	64.4±11.0	3.29±0.37
8	6—230	2008±190	1583±185	438±59	2°58'±1°	13°2'±50'	17±29	1°4'	52.5±11.5	>1.9
8	370—252	878±155	753±151	197±39	10°1'±40'	46°20'±30'	11±39	2'	67.5±20.3	>6.4
8	114—290	751±93	625±94	196±19	13°1'±27'	43°27'±27'	6±30	3°55'***	63.4±9.5	2.70±0.41
8	355—298	1812±227	1593±223	253±44	4°58'±1°30'	27°25'±30'	21±51	58'	53.2±17.3	0.61±0.09
8	150—307	2440±307	2098±305	372±45	5°1'±1°	19°42'±40'	58±48	1°26'	56.2±15.3	0.46±0.07
8	186—336	982±115	702±106	315±51	8°35'±30'	24°4'±30'	23±27	24'	86±26	0.77±0.14
平 均 值		1794							61.9±2.2	2.20

*) 由于部分的径迹很短,不是所有的 p_{Ξ^-} 都可以直接从测量中得到, 表上的 p_{Ξ^-} 是按照公式 $p_{\Xi^-} = p_A \cos \theta_{\Xi^- A} + p_{\pi} \cos \theta_{\Xi^- \pi}$ 计算得到。

**) $\Delta p_{\perp} = p_A \sin \theta_{\Xi^- A} - p_{\pi} \sin \theta_{\Xi^- \pi}$ 。

*** η 是一根径迹早的初级粒子与组成 A^0 和次级粒子的平面之间的角度, 确定 η 的误差为 1°30'。

**** η 由于径迹测量给出的误差。

表 2 关于产生 Ξ^- 的初步星的数据

p, π^- (10亿电子伏/c)	事例号	初 级 星	其他确定的 奇异粒子事例	$\sqrt{(\Delta E)^2 - (\Delta p)^2}$ (兆电子伏)	可 能 的 反 应
7	182—42	2根径迹 (1+, 1-)		1826 ± 210	$\pi^- + p \rightarrow \Xi^- + \pi^+ + (K^0 + K^0 + \dots)$
8	91—145	10根径迹 (7+, 2-, 1?)	K^+ 停止后衰变	394 ± 150 -270	$\pi^- + e \rightarrow \Xi^- + K^+ + \pi^+ + \pi^- + p + \dots$
8	196—160	2根径迹 (1+, 1-)		1880 ± 180	$\pi^- + p \rightarrow \Xi^- + \pi^+ + (K^0 + K^0 + \dots)$
8	19—179	6根径迹 (3+, 3-)	K^+ 停止后衰变	185 ± 100 -140	$\pi^- + p \rightarrow \Xi^- + K^+ + \pi^+ + \pi^- + 2\pi^- + \pi^0$
8	171—218	4根径迹 (2+, 2-)		$\Delta p > \Delta E$	$\pi^- + e \rightarrow \Xi^- + \text{其他粒子}$
8	114—290	5根径迹 (4+, 1-)	K^0 衰变	$\Delta p > \Delta E$	$\pi^- + e \rightarrow \Xi^- + \pi^+ + \pi^- + K^0 + 2p + (K^0 + \dots)$ $\Xi^- + K^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+ + \pi^- + 2p + \dots$
8	355—298	3根径迹 (1+, 2-)		1100	$\pi^- + n \rightarrow \Xi^- + \pi^- + \pi^+ + (K^0 + K^0)$ $\Xi^- + \pi^- \rightarrow \pi^- + \pi^- + K^+ + (K^0 + \dots)$
8	150—307	2根径迹 (1+, 1-)		2100	$\pi^- + p \rightarrow \Xi^- + \pi^+ + (K^0 + K^0 + \dots)$ $\Xi^- + K^+ \rightarrow \pi^- + K^+ + (K^0 + \dots)$
8	180—336	2根径迹 (1+, 1-)		1520	$\pi^- + p \rightarrow \Xi^- + \pi^+ + (K^0 + K^0 + \dots)$

*) ΔE 是在假定 π^- 和自由核子作用下计算的。

**) 在括号中是预言的粒子。

表 3

p_{π^-} (10 亿电子伏/c)	事例号	n_{Ξ^-} (在 πN 质心系中) (兆电子伏/c)	p_{Ξ^-} (兆电子伏/c)	$\theta_{\Xi^-}^*$ (在 πN 质心系中) (在 Ξ^- 的系统)	$\theta_{\Lambda^0}^*$ (在 Ξ^- 的系统)	$\varphi_{\Xi^- \Lambda^0}^*$ (在 Ξ^- 的系统)	$\varphi_{\Xi^- \Lambda^0}$ 平面之夹角	p 相对于 Ξ^- 衰变平面飞出 的方向
7	182—42	558 ± 62	375 ± 48	$42^\circ \pm 11^\circ$	71 ± 5	92 ± 5	146 ± 5	向 下
8	91—145	414 ± 47	145 ± 26	$159^\circ \pm 4^\circ$	122 ± 5	42 ± 5	151 ± 4	向 上
8	196—160	1001 ± 99	290 ± 30	$162^\circ \pm 5^\circ$	123 ± 5	67 ± 6	52 ± 3	向 下
8	19—179	294 ± 41	293 ± 41	$94^\circ \pm 11^\circ$	88 ± 10	73 ± 5	161 ± 5	向 下
8	171—218	977 ± 107	410 ± 47	$155^\circ \pm 4^\circ$	64 ± 5	50 ± 7	87 ± 4	向 下
8	6—230				132 ± 8	75 ± 5	100 ± 6	向 上
8	570—252				91 ± 10	130 ± 5	23 ± 5	向 上
8	114—390	1538 ± 110	275 ± 36	$170^\circ \pm 5^\circ$	102 ± 5	105 ± 5	168 ± 6	向 上
8	355—298	1070 ± 102	729 ± 92	$135^\circ \pm 6^\circ$	73 ± 5	35 ± 10	82 ± 4	向 上
8	130—307	140 ± 145 -64	71 ± 31	$149^\circ \pm 22^\circ$ -86°	75 ± 5	70 ± 15	88 ± 6	向 下
8	186—336	1248 ± 10	273 ± 36	$167^\circ \pm 4^\circ$	126 ± 4	102 ± 5	66 ± 4	向 下
平均		804	318 ± 35					

表 4 似 Ξ^- 事例 (Λ^0 确定是 Λ^0 粒子)

No.	事例号码	粒子电荷	不同平面的 角度 η	$\Delta p^\perp$ (兆电子伏/c)	可能的相互作用之一
1	344—314	+	1'	225	$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + K^+$
2	250—35	+	16'	200	$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + K^+$
3	267—233	+	1°19'	48	$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + K^+$
4	150—286	-	22'	126	$K^- + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
5	502—12	+	2°39'	56	$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + K^+$
6	185—91	+	4°56'	58	$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+ + (K^0)$
7	52—246	+	4°57'	16	$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + K^+$
8	189—275	+	5°54'	17	$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + K^+$
9	33—221	+	8°53'	497	$\pi^+ + c \rightarrow \Lambda^0 + p + (K^0) + \dots$
10	273—125	+	10°10'	827	$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + (\pi^+?) + \dots$
11	140—45	+	22°42'	244	$\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+ + (K^0) + \dots^{**})$
12	99—68	-	3°36'	86	$K^- + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
13	179—221	-	4°27'	125	$\pi^- + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^- + \dots^{**})$
14	144—219	-	7°4'	106	$K^- + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^- + \dots$
15	152—188	-	16°40'	59	$\pi^- + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^- + \dots^{**})$
16	64—69	-	17°30'	70	$\pi^- + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^- + \dots^{**})$
17	61—174	-	30°		$\pi^- + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^- + (K^0)$
18	288—193	-	40°	50	$\pi^- + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^- + \dots^{**})$

*) 可能是 $(K^- + n)$ 相互作用。**) 在这个事例里另外产生 Λ^0 的反应也是可能的, 我们指出的比较更可能。

对 Л. П. 齐诺维也夫、Н. И. 巴甫洛夫、К. В. 契赫洛夫, Л. Н. 貝辽也夫及加速器和气泡室值勤的技术員和工程师小組在进行实验方面所給予的帮助表示感謝, 此外, 对进行测量和进行計算的小組表示感謝。

参 考 文 献

- [1] C. Franzinetti and G. Morpurgo, *Suppl. Nuovo Cim.* **6** (1957), 565.
- [2] W. B. Fowler et al. *Nuovo Cim.* **11** (1959), 428.
- [3] L. Alvarez, 在第9届国际高能粒子物理会议上的报告, 基輔, 1959年.
- [4] 王淦昌等, *ЖЭТФ*, **33** (1960), 426.
- [5] Н. Г. Биргер, 王淦昌等, 即将发表.
- [6] 王淦昌等, 即将在 *ЖЭТФ* 上发表.
- [7] Марков "Гипероны и К-мезоны", Госфизматиздат, Москва, 1958.
- [8] Соловьев М. И. 在第10届国际高能粒子物理会议上的报告, 罗切斯特, 1960年.

РОЖДЕНИЕ Ξ^- -ГИПЕРОНОВ π^- -МЕЗОНАМИ С ИМПУЛЬСОМ 7 И 8 БЭВ/с

Ван Ган-чан, Ван Цу-цзю, Н. М. Вирасов, Дин Да-цао,
Ким Хи Ин, Е. Н. Кладницкая, А. А. Кузнецов, А. Михул,
Нгуен Дин Ты, А. В. Никитин, М. И. Соловьев

Резюме

В работе изучалось рождение Ξ^- -гиперонов π^- -мезонами с импульсом 6.8 и 8 Бэв/с. Получены сечения рождения Ξ^- при импульсах π^- -мезонов 6.8 и 8 Бэв/с (при 6.8 Бэв/с $\sigma = 3.6^{+2.5}_{-1.1} \mu\text{б}/N$, при 8 Бэв/с $\sigma = 10.6^{+4.4}_{-3.2} \mu\text{б}/N$), масса Ξ^- -гиперона $M_{\Xi^-} = 1317.0 \pm 2.2$ Мэв, и время жизни Ξ^- -гиперонов $\tau_0 = 3.5^{+1.1}_{-1.2} \times 10^{-10}$ сек.