



## 高能多重产生

**一、什么是多重产生** 提起多重产生,顾名思义,人们立刻就会想到这样一幅图画,那就是高能粒子打在靶上,产生出一大群粒子,这些反应后产生的粒子,叫做末态粒子。反应前,碰撞粒子系统的动能愈高,总能量  $E$  也愈大,由于碰撞前后总能量守恒,从爱因斯坦质能关系  $E = mc^2$  可以知道,碰撞后的总质量也愈大,于是相应的产生粒子也愈多。实验上看到这些末态粒子大多是  $\pi$  介子,也有少量的  $K$  介子和别的粒子,这种多  $\pi$  产生的现象,我们叫做多重产生。

既然是谈物理史话,就让我们追溯其源。早在 1939 年,著名物理学家海森伯就预言:高能核子与核子碰撞时,多  $\pi$  产生现象将会起重要作用。1951 年费米进一步引伸海森伯的论断,提出所谓核子-核子碰撞时多  $\pi$  介子产生的统计理论。至于最初的实验上对多重产生的观测,则应归功于宇宙线工作者。四十年代末五十年代初,在用云室观察到的簇射中看到了多粒子产生现象。在乳胶中也曾观察到所谓  $R$  “星”,  $S$  “星”,  $T$  “星”现象,这些都是高能碰撞下产生了很多粒子的现象,产生的这些粒子在乳胶中留下的径迹像星光四射,因而得名“星”。

五十年代后期到六十年代初期,随着高能粒子加速器的出现,用高能粒子研究多重产生的工作日益受到注意。从这个时期起,这种研究向两个方面深入,1961 年美国的爱尔温 (Erwin) 和阿耳夫 (Allf) 等,在布鲁克海汶实验室 (BNL),用气泡室观察了入射动量为  $1.6-1.9\text{GeV}/c$  的  $\pi$  的  $\pi^+p \rightarrow \pi^0 + \pi^0 + p$  和  $\pi^+p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- + p$  反应,他们对多重产生的末态  $\pi$  粒子分组进行分析、计算,发现了新共振态粒子  $\omega, \rho$ 。这些就逐步形成了介子谱学。另一方面则着重从反应机制角度出发研究多重产生的实验和理论。

**二、奇怪的现象** 多重产生有什么规律性,反应机制怎样?二十年来一直是高能物理学家关心的问题,它是强相互作用的一个重要研究领域。

在六十年代,人们从实验上已经注意到,随着入射

粒子能量的增加,产生  $\pi$  的数目也增加。例如,当入射能量接近  $10\text{GeV}$  时, $\pi$  介子和氢靶作用产生 4 个  $\pi$  以上的反应已占总反应的 80% 之多。但奇怪的是,按爱因斯坦质能关系估算的末态粒子的数目却远比实验得到的大。实验事实说明,末态粒子平均数(以下用平均多重数  $\langle n \rangle$  表示)随能量的增加是很缓慢的。1972 年 Morrison 总结了不同能区所得带电粒子平均多重数  $\langle n \rangle$  与入射粒子动量  $P_L$  (实验室系) 或质心系总能量  $\sqrt{s}$  的关系,如图 1 所示,总的看来  $\langle n \rangle \propto a + b \log s$ 。

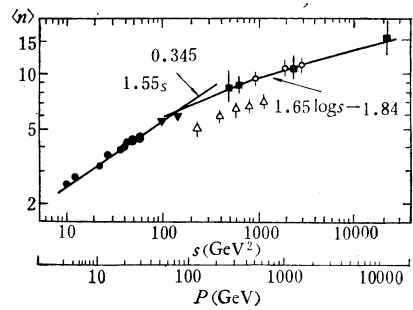


图 1

▲ 泡室 ● 泡室 ○ 西欧中心交叉储存环  
△ Edrolake ■ 别的宇宙射线

末态粒子飞出的动量总可分解成垂直于入射束流方向的分量和平行于入射束流方向的分量,前者叫横动量  $P_T$ ,后者叫纵动量  $P_L$ ,如图 2 所示。实验上发现的另一个明显的现象是,所有末态粒子的横动量  $P_T$ ,大都分布在一较窄的区域,如图 2 中的  $n(P_T)$  分布,它的平均值约为  $0.35\text{GeV}/c$ 。大量实验表明,这一现象对任何入射束流粒子和任何入射动量都是一样的。这

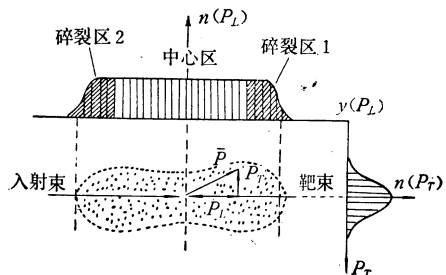


图 2

些奇怪的现象促使理论物理学家建立了关于高能碰撞多重产生的许多模型,尤以 1968 年到 1972 年间更多;实验数据也如雨后春笋般大量发表。

**三、快度和快度谱** 研究多粒子产生首先碰到的是自由度问题。比方说有  $n$  个微观粒子,那就应该有  $3n-4$  个自由度,其中 4 是四个能量动量守恒的条件,因此,研究起来很复杂。1969 年 L. Van Hove 考虑到,既然在所有高能粒子中,末态粒子横动量  $P_T$  都几乎是一样的 ( $\sim 0.35 \text{ GeV}/c$ ),那就可以只用纵动量  $P_L$  来描写末态粒子,这样,自由度就少了许多。他引入了纵相空间图 (LPS),用它可以使复杂的数学处理简化。1969 年费曼在研究高能碰撞时,又引入了约化纵动量  $x$ ,

$$x = P_L/P_{L\max} \quad \text{而} \quad P_{L\max} = \sqrt{s}/2$$

其中  $P_{L\max}$  是纵动量的最大可能值。但是与实验规律联系最明朗的还是快度  $y$  这个物理量,是 1971 年 de Tar 引入的,它的定义是

$$y = 1/2 [\ln(E_i + P_{Li})/(E_i - P_{Li})]$$

其中  $E_i$  是  $i$  个末态粒子的总能量

$P_{Li}$  是  $i$  个末态粒子的纵动量

快度有两个明显的特点: 第一,当粒子速度很低时快度  $y$  就变成了速度,快度这个名称就是这样得来的;第二,沿入射粒子方向,作速度为  $v$  的洛伦兹变换后,快度只改变一常数  $\frac{1}{2} \log \left( \frac{1+v}{1-v} \right)$ 。因此,质心系和实验室系快度分布形式都一样,只是沿  $y$  坐标平移而已。

典型的多重产生末态粒子快度分布如图 2 中  $n \rightarrow y$  关系图所示。我们来观察单举反应  $1+2 \rightarrow 3+X$ ,单举是指观察许多末态粒子中的一个粒子,在这里就是粒子 3。双举就是只观察两个粒子。如图 3 所示,粒子 3 可以是与入射粒子 1 相联系的碎片,或与靶粒子 2 相联系的碎片,或落入与 1, 2 都没有关系的中心区内。

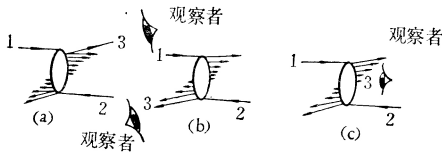


图 3

测量粒子快度分布的实验在七十年代初已经比较多,典型的实验之一是 1972 年 H. J. 米克 (Mück) 等人在西欧中心质子同步加速器 (PS) 上用 2 米氢气泡室做的,他们观测了  $17 \text{ GeV}/c$  和  $24 \text{ GeV}/c$  质子束轰击氢靶的  $pp$  单举反应,测量到的中心区和碎裂区  $\pi^-$  和  $\pi^+$  介子快度分布也和示意图 (2) 中给的差不多。

**四、衍射碎裂和多重边缘模型** 对大部分反应,快度分布曲线存在平坦的中心区(快度均匀分布),如图 4(d)、(e)所示。另一类高能碰撞,实验结果如图 4(a)、

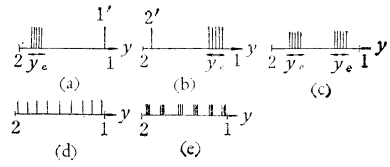


图 4

(b)、(c) 所示,即快度分布集中在两侧。这些重要的实验结果使各种理论模型相应地发展起来。下面分别介绍一下:

先说衍射碎裂模型,当两个粒子碰撞时,发生弹性散射的朝前分布形式很像光学中的衍射,这种图像我们叫做衍射散射。在弹性散射后,粒子还是原来的两个粒子(保持各自原来的量子数如电荷  $Q$ , 同位旋  $I$ , 奇异数  $S$ , 重子数  $B$  等),只是方向变化了(角动量,宇称有变化)。两个高能粒子碰撞时(图 5),衍射碎裂模型认为: 在多数情况下,它们会各自转化为一个激发的集团,也可能一个转化为激发的集团,另一个不转化。这一个或两个集团又分别衰变成为许多  $\pi$  和  $K$  等强子。最重要的特点是这两个集团分别与原来所对应的粒子的电荷  $Q$ , 同位旋  $I$ , 奇异数  $S$ , 重子数  $B$  相同,而且基本上保持原先粒子的方向,和衍射散射非常相似,只是原先的粒子变成了不稳定的集团,碎裂成许多强子而已。衍射碎裂模型的名称就是这样来的,实验事实和这个模型预言基本上是一致的(见图 5)。

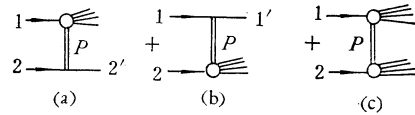


图 5

解释快度均匀分布的最重要的模型称多重边缘模型。我们可以看一看图 6,在这里,碰撞时交换的粒子叫做玻米子,而且是好多个玻米子 ( $P_1, P_2, P_3, \dots$ )。每个玻米子所携带的转移动量  $t_1, t_2, t_3, \dots$  都较小,就好像小球与小球碰撞时从边缘上擦过。由于产生了多个小球(粒子),能量动量的交换是通过一个一个小球擦边传递过去的,因此叫做多重边缘模型。这个模型给出的粒子  $1', 2', \dots, n'$  的快度谱就有一

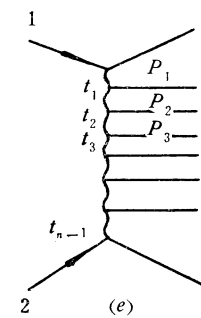


图 6

均匀分布的形式。大量的实验支持这一模型。实验上看到: 带电粒子平均多重数  $\langle n \rangle$  与  $\log s$  成正比,高能时总截面与  $s$  无关,产生  $n$  个粒子的截面(称为拓扑截面)  $\sigma_n$  为泊松分布等等,都是这个模型自然的结果,因此是很成功的。这个模型的雏型是 1962 年提出的

ABFST 模型,到 1971 年由 de Tar 完善. 衍射模型则早在 1960 年就曾由古特 (Good) 和沃尔克 (Walker) 提出, 其进一步发展则是 1968 年到 1972 年提出的好几种模型, 如阿戴尔 (Adair) 1968 年提出的衍射分解模型; 1969 年杨振宁等人提出的极限碎裂模型; 华家照等人同年提出的衍射激发模型; 1971 年雅可布 (Jacob) 等人提出的火球模型或新星 (Nova) 模型等. 各种命名或者强调了处理方法的特点, 或者强调机制的图象, 这里就不细说了.

**五、关联** 关联的测量和分析也是多重产生中的一个重要课题. 以  $1+2 \rightarrow 3+4+X$  双举反应为例, 两个末态粒子 3 和 4 的动量间的相互联系就是一种关联. 我们可以引入关联函数  $C(\mathbf{P}_3, \mathbf{P}_4)$  来表示具有动量  $\mathbf{P}_3$  的一个粒子与具有动量  $\mathbf{P}_4$  的另一个粒子同时出现的几率 (关联函数是与几率有关的一个物理量). 因为动量是向量, 可以分解成角分布和快度分布, 所以关联也可以分解成角关联和快度关联. 角关联即是一个末态粒子相对于另一个末态粒子的角分布. 早在 1959 年哥尔德哈伯 (G. Goldhaber) 等人在美国洛伦兹辐射实验室用  $1.05 \text{ GeV}/c$  的反质子打在 30 英寸丙烷气泡室的氢靶上, 第一次观测到 2 个末态  $\pi$  介子之间存在角关联效应. 当时实验发现, 相同的  $\pi$  之间的角关联与不同电荷  $\pi$  之间的角关联有明显不同. 后来在  $3 \text{ GeV}/c \bar{p}p$  湮没中,  $8 \text{ GeV}/c \pi^+ p$ ,  $9 \text{ GeV}/c \pi^-$  与氙气泡室内的氙核作用中, 都相继观察到了上述现象.

近年来快度关联测量受到人们的注意, 因为它与反应机制和中间态有密切关系. 仍以双举反应  $1+2 \rightarrow 3+4+X$  为例, 如果 3, 4 粒子主要是通过共振态衰变产生, 即  $1+2 \rightarrow r+X, r \rightarrow 3+4$ , 那么这

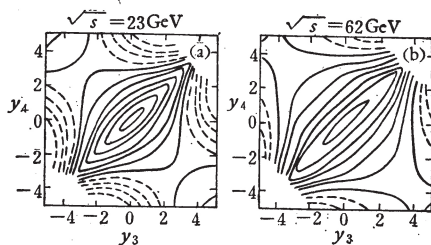


图 7

两个粒子的动量就必定有关, 这种情况我们可以用上述关联函数来描写, 假若  $C$  等于零, 则 3, 4 粒子没有关联, 若  $C$  不等于零, 则有关联. 图 7 为 1974 年札列夫斯基 (Zalewski) 等人在西欧中心交叉储存环 (CERN, ISR) 上做的双举快度关联图. 乍看起来, 它很像花脸, 无怪乎有些人称它花脸图. 实际上, 我们可按地图的等高线表示法来理解它. 地图中的等高线在这里就表示关联函数值. 由图 7 可见,  $y_3 = y_4 = 0$  时出现的几率最大, 相当于正当中那个圈即  $C = 1$  的那个圈, 就象这里是山顶一样. 另外, 在  $y_3 = y_4$  的斜线上,  $y_3, y_4$  的绝对值愈大, 关联愈小, 相当于  $C$  从 1, 0.6, ……减小到零. 双举快度关联的实验结果有力地支持了火球模型的预言. 火球模型认为, 粒子产生时先是产生火球, 火球随后衰变成为各个终态粒子.

可以预料, 随着加速器能量的不断提高, 高能, 特别是超高能多重产生实验将会给人们带来许多意想不到的新奇现象. 高能多重产生的理论和实验也将会更加受到物理学家们的注意.

谢一冈 韩纆