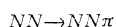


近若干年来,中能和高能重离子碰撞的研究日渐成为居于核物理和粒子物理之间的一个引人注目的前沿领域。我们都知道,低能核反应过程中的能量和动量转移较小,无基本粒子生成。它所涉及的只是基态核物质(温度 ~ 0 , 密度 ~ 0.17 核子 fm^{-3})。而中、高能原子核碰撞过程则要激烈得多,涉及到核物质的新形态即高温高密度核物质及其相变。产生这种奇异核物质的必要条件是碰撞体系的大部分相对运动动能在激烈的能量和动量交换过程中迅速转化为核物质的压缩和热化的内能。

介子的产生为研究这种激烈的核-核碰撞过程提供了理想的探针。因为它们只能从炮弹和靶核的瞄准带即反应区中发射出来,而核子和其它核碎片则不仅从反应区产生,同时还从类弹和类靶旁观体部分产生。

π 介子是生成能阈最低的基本粒子。对于自由核子-核子碰撞(静止靶)产生 π 介子的反应



相对论运动学给出其能阈为

$$E_K^{\text{阈}} = 2m_\pi + m_\pi^2/2m_N$$

式中 m_π 和 m_N 分别为 π 介子和核子的静质量。显然,只有当入射束的实验室动能超过能阈($\pi^0 \sim 280$ MeV, $\pi^\pm \sim 290$ MeV) 时, π 介子才可能产生。

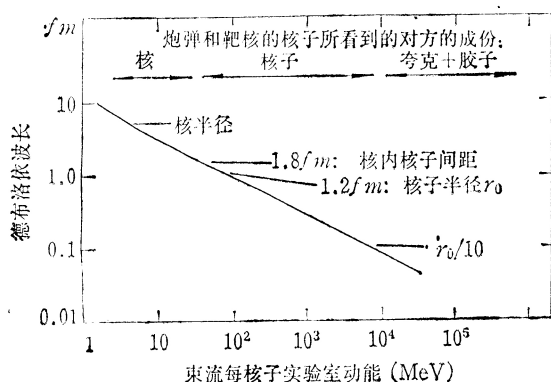


图1 在核子-核子质心系中核子的德布洛依波长与束流能量的关系

另一方面,对重离子反应来说,当入射束动能超过 $\sim 50A$ MeV (A 为炮弹质量数,下同)时,在核子-核子质心系中核子的德布洛依波长已短于核内核子间的典型间距,如图1所示。根据量子力学常识,这意味着核的平均场的作用变弱,进而趋于消失。在初级近似的意义上讲,反应似可看作是炮弹和靶核的各核子间的

π 介子的阈下生成

白希祥

碰撞的非相干迭加,而不再是核-核整体间的碰撞。如果图画是这样简单,那么当入射束每核子的动能低于上述自由核子-核子碰撞产生 π 介子的能阈时,同样是不可能产生 π 介子的。

然而,近几年来在一系列束流能量低于上述能阈的重离子反应中观察到了 π 介子的产生。这一现象称为 π 介子的阈下生成。它立即引起了核物理学家的浓厚兴趣。据不完全统计,以此为专题发表的论文已达二十篇之多。人们试图从测到的 π 介子的生成截面、能谱和角分布及其对束流能量和炮弹及靶核质量数的依赖关系推测可能的反应机制。

实际上,所讨论的问题不仅涉及 π 介子的阈下生成,因为即使在阈上, π 介子的生成截面中核的效应依然是主要的或重要的。进而可推断,重离子碰撞中还将出现其它基本粒子的阈下生成现象。图2给出了自由核子-核子碰撞产生这些基本粒子的能阈。还应指出, π 介子、核子和轻碎块单举谱的尾巴一直延伸到远远超出计及费米运动后的核子-核子碰撞的运动学极限能区的现象在实质上同阈下生成现象是相通的。

从讨论的情况看来,这一现象关系到对核内核子间的局部和整体关联的性质、碰撞过程中能量积聚的机制乃至核的基本组份中可能存在新层次的认识。对这些问题的深入探讨将有助于架起一座连接核物理和粒子物理的桥梁。

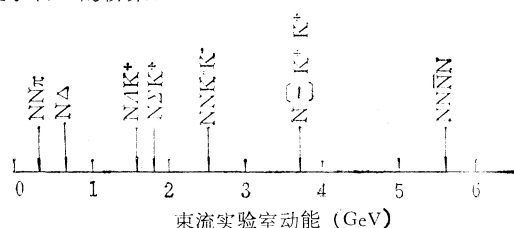


图2 自由核子-核子碰撞产生基本粒子的能阈

1. 实验结果概观

实验上已积累了不少 π 介子阈下生成的数据。束流能量从 35 A MeV 至 250 A MeV, 所用的炮弹为 ^{12}C , ^{14}N , ^{18}O 和 ^{20}Ne , 靶核为 ^6Li , ^7Li , ^{12}C , NaF , ^{27}Al , ^{40}Ca , ^{58}Ni , ^{63}Cu , W , ^{197}Au , ^{208}Pb 和 ^{238}U 。这里只扼要评述一下数据的规律性。

首先看看截面的激发曲线。图3所示是 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow \pi^0 + x$ 反应的激发曲线。从束流能量 35 A MeV 到 180 A MeV, π^0 介子的生成截面从 20 毫微巴增至 1 毫巴, 其变化是很快的。这一反应的绝对运动学下限是

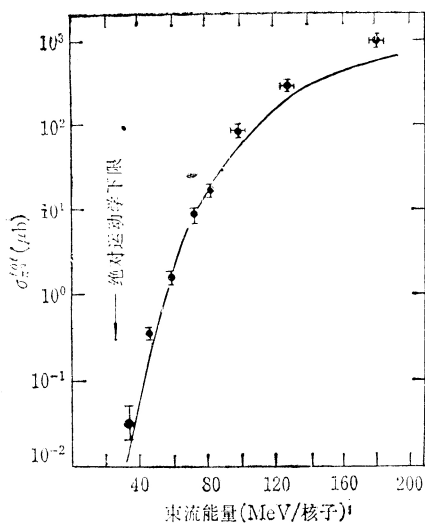


图3 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow \pi^0 + x$ 反应的总截面与束流能量的关系。实线是按多核子合作模型计算的结果

23.3 A MeV, 相应于把炮弹和靶核所有核子的质心系动能都积聚起来, 产生一个质心系动能为零的 π^0 介子。

其次是截面与炮弹和靶核质量数的依赖关系。这种关系近似地服从 $\sigma_{\text{tot}} \propto A^{2/3} \times A_T^{2/3}$ 规律, 即与炮弹和靶核两者表面积的乘积成正比, 同把反应看成是两个作为整体的核之间的碰撞相一致。

π 介子能谱的情况如何? 在质心系, 能谱近似地呈指数形式, 显露出某种热平衡发射的迹象。再一个值得注意的特点是能谱的尾巴拖得很长。例如, 对于 84 A MeV $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow \pi^0 + x$ 反应, 能谱拖至 ~ 175 MeV。如果不考虑核子在核内的费米运动, 为产生一

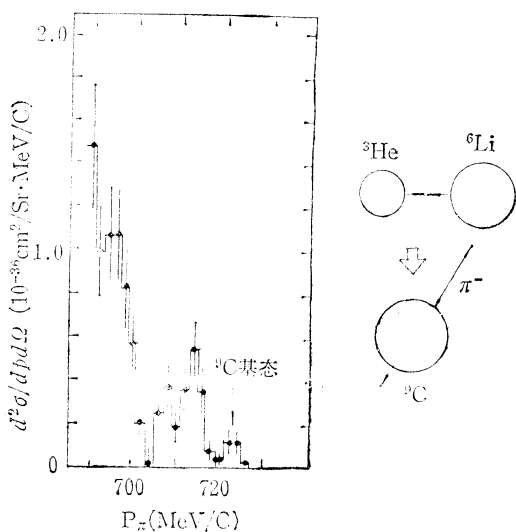


图4 $^3\text{He} + ^6\text{Li} \rightarrow \pi^- + x$ 反应实验室系 0° 方向 π^- 介子的动量谱, 束流能量 303 MeV/核子

个这样能量的 π 介子, 需要炮弹和靶核各贡献出大约 8 个核子的动能。

一个更有趣的例子是 303 A MeV $^3\text{He} + ^6\text{Li} \rightarrow \pi^- + x$ 反应实验室 0° 方向 π^- 介子的动量谱, 如图 4 所示。运动学计算表明, 该谱最右侧的小峰相应于极限情形, 即所有核子的质心系动能全部都集中起来用于产生一个 π 介子, 同时给出反方向形成的基态复合核 ^{12}C 的反冲能。这一现象称为 π 熔合, 它体现了炮弹和靶核所有核子间完美的合作。虽然该实验的束流能量已略高于自由核子-核子碰撞产生 π 介子的能阈, 但 π 熔合现象对洞察阈下生成现象的物理本质无疑是有帮助的。可惜目前还缺乏 π 熔合几率与束流能量和炮弹及靶核质量数依赖关系的数据。

最后提一下角分布的情形。如果按出射 π 介子的能区画出质心系的角分布, 则各向异性随能区升高而加剧, 但始终保持前后对称和 90° 截面最低的特点。

2. 关于反应机制的探讨

为解释 π 介子的阈下生成现象, 人们提出了不少理论模型, 从单次核子-核子碰撞的迭加、多粒子合作效应到集体过程, 真可谓五花八门。

最先被考虑到的因素是反应初态炮弹和靶核内核子内禀费米运动高动量成份的贡献。计算结果表明, 如果反应的动力学图画是单次核子-核子碰撞, 即使把费米运动考虑进去, 仍远不足以解释 π 介子的阈下生成截面和能谱。按经典的在壳碰撞机制, 再加上多次碰撞的考虑也不会有什么改善, 因为只有第一次碰撞能转移较大的能量。

于是又有人转而求助于经典的集体碰撞模型。尽管集体过程的基本观念同本文一开头就讲过的核子德布洛依波长的估计相抵触, 但毕竟有些实验现象, 例如 π 熔合, 强烈地表露出核-核整体碰撞的迹象。

复合核模型是集体机制中的一种。其基本思想是在反应过程中炮弹和靶核的所有核子达到热平衡, 形成一个复合核。它完全按统计规律以可达到的相空间所制约的截面衰变产生 π 介子。只要激发能足够高, 在衰变的各个阶段上都可能蒸发出 π 介子。这个老模型解释束流能量 84 A MeV 以下 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow \pi^0 + x$ 反应的激发曲线和 π^0 介子的角度积分谱是成功的。 π 熔合现象很像是复合核效应。对于很重的质量数不对称的炮弹——靶核系统, 两个核互相穿过的时间 ($\sim 15 \text{ fm/c}$) 超过衰变时间 ($\sim 5 \text{ fm/c}$), 不可能达到完全的热平衡, 只能达到局部的热平衡, 产生所谓热斑, 从中产生 π 介子。这种修改过的复合核模型解释相应的实验数据也大体是成功的。

另一种更为集体性质的机制是所谓 π 介子韧致辐射, 类似于核-核电磁韧致辐射过程。它的基本图景是在碰撞过程中由于强相互作用引起核的急剧减速, 其

结果一方面是核电荷的减速导致电磁韧致辐射——高能 γ 射线的产生，同时也可能导致大部分相对运动动能转化为 π 介子。相比之下，长程库伦场所引起的减速是微不足道的，不可能导致 π 介子的产生。模型中引入了一个描述减速的关键参数——减速长度，计算结果对它是灵敏的。恰当地选择减速长度($\sim 1\text{fm}$)，这一机制可以解释 π 介子的能谱及生成截面激发曲线的趋势。再加上核自旋相干性的考虑后也能复现角分布的特征。用同一减速参数估算相应的电磁韧致辐射 γ 谱的强度，得到了与实验数据基本相符的结果。这似乎是对 π 介子韧致辐射模型的间接印证。

讨论中提出的另一种模型是多核子合作机制。它是基于量子力学的多次离壳碰撞的图画而构思出来的。在这种多次碰撞过程中，核子间能量的分配有更大的伸缩性，容易发生几个核子能量的积聚从而产生 π 介子。具体模型认为炮弹和靶核的所有核子在碰撞期间形成各种可能的动态集团（不意味着反应初态核内就有像 d 和 α 粒子那样的集团），每个集团中都包括若干个炮弹和靶核的核子，这些核子间发生多次碰撞，合作积聚出产生 π 介子所需要的能量。 π 介子的生成截面是所有可能的集团的贡献的非相干迭加。模型中的另一个重要假设是末态自由度的冻结，即在产生 π 介子的同时形成质量数分布很宽的各种核碎块，而不只是核子。这样就释放了更多的结合能，增加了产生 π 介子的机会。显然，束流能量越低冻结越甚，即碎块数目越少，其质量数越大。这种多核子合作模型的计算结果在很宽的束流能量范围内与各种不同炮弹——靶核组合的实验数据基本相符，无需调节任何参数。但在束流能量 35 A MeV 处，计算结果偏低。可能是由于模型中忽略了平均场的集体效应所致。关于末态自由度冻结的假设，可以进一步通过 π 介子与伴随核碎块质量分布的关联实验来检验。

这些推测的机制虽能程度不同地解释实验事实的某些方面，但都没有超脱传统核物理的观念，严格说来，都有些牵强附会。尤其显得不足的是无一涉及反应的微观机制。 π 介子的阈下生成到底是怎么回事？这团迷雾并没有消散，它继续向核物理工作者提出挑战。不能排除现象背后隐匿着传统核物理观念以外的新的物理本质的可能性。不妨联想一下近年来国内外关于 EMC 效应和核内夸克分布的讨论。似乎可以设想二者间存在某种联系。如果核内的束缚态核子有一定几率以多夸克态存在，或核内存在附加的 π 介子，那么基元碰撞的图画将有实质性的改变。在加上这些中间层次的贡献以后，碰撞的运动学限制将大大放宽， π 介子的产生就会容易得多。由此可见，进一步从实验和理论两方面深入研究介子的阈下生成现象，无论对核物理还是粒子物理都是很有意义的。