



宁平治 闵德芬

一座工厂,总要有它的产品,“K介子工厂”的产品就是K介子束流,并用这束流与各种靶粒子或靶核相碰撞来完成预定的物理实验。通常,能够按照所需要的能量和流强提供介子束流的装置加上其他配套设备(如靶室、探测器等)一起就叫作“介子工厂”。早在70年代就诞生了 π 介子工厂,并使 π 核物理学的研究蓬勃开展起来,取得了不少研究成果。近年来,国际上许多大型核物理实验中心又相继提出了建立K介子工厂的计划,以便深入地进行K核物理学的研究。像美国的布鲁克海汶国家实验室(BNL)、欧洲核子中心(CERN)和日本筑波科学城物理实验中心(KEK)都已完成了一批K核物理实验,得到若干富有科学意义的结果。在国内,高能物理研究所、南开大学、广西高校等单位也开展了一些理论研究工作。目前,这方面的实验研究和理论研究工作正在国内外积极开展中。本文着重介绍K介子工厂及K核物理学的研究内容。

为什么要发展K介子工厂

要了解各种原子核的内部结构和性质,通常是用某种粒子流轰击原子核,发生核散射或核反应,实验上观测出射粒子的某种物理量(如截面、极化度等),从而提取出射粒子所携带的原子核内部信息。上述入射粒子流俗称原子核的外部“探针”。已经广泛使用的核探针有电子、质子、 π 介子、氘核、 α 粒子和重离子等等。某一种核探针往往只能探知原子核的某一个方面的信息。例如,利用电子探针只能通过电磁相互作用得到原子核内电荷分布或质子分布的知识,而不能探知中子分布。利用强相互作用探针已经得到许多实验数据,但由于对核力和核反应机制的了解远不如电子散射那样清楚,使得对实验数据的解释存在着种种不确定性。为了尽量减少这种不确定性以及克服每一种核探针在研究核性质方面固有的局限性,人们希望用尽可能多的不同的强子探针在相似的条件下进行实验研究,分析和比较这些实验结果,从而得到较为可靠的强相互作用和核结构的知识。采用K介子作为核探针,

发展K介子工厂,就是在这样的背景下提出的。

K介子的独特性质

为比较起见,首先在表1中给出在强相互作用过程中稳定的几种介子及其一般性质。其中未包括 μ 介子,这是由于 μ 介子不参与强相互作用,人们不能通过各种核反应来大量产生 μ 介子。从表1中可看出,带电 π 介子和带电K介子的平均寿命比其他介子长得多,为 10^{-8} 秒数量级。这个寿命远比粒子穿过原子核所需要的时间长得多。因此在研究 π^\pm 和 K^\pm 介子与原子核的相互作用过程时,可以把这些介子当作相对稳定的粒子来看待。

表 1

介子名称	质量 (MeV/c ²)	电荷 (e)	平均寿命 (秒)	奇异数
π^\pm	139.57	+,-	2.60×10^{-8}	0
π^0	134.96	0	0.84×10^{-16}	0
K^\pm	493.67	+,-	1.24×10^{-8}	+1,-1
K^0	497.67	0	—	+1
η	548.8(±0.6)	0	2.5×10^{-16}	0

除了上述一般性质外,K介子本身还有一些独特的性质。现在已经研究得很清楚: π^+ 和 π^- 介子在强相互作用过程中具有几乎相同的性质,而K介子则不然, K^+ 和 K^- 介子具有彼此极不相同的性质,详见表2。 K^+ 介子射入原子核内可以走较长一段距离(约7fm,1fm=10⁻¹³厘米)而不与核内核子发生相互作用,是原子核的弱吸收体探针。 K^- 介子射入原子核

表 2

名称	夸克组分	核内平均自由程	KN共振态	奇异量子数	超核产生
K^-	(s \bar{u})	~1fm	丰富	s = -1	可以
K^+	($\bar{s}u$)	~7fm	几乎没有	s = +1	不能

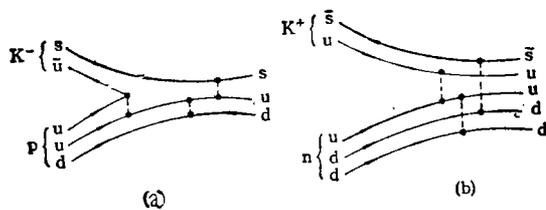


图 1

内很快就与核内核子发生相互作用, 平均自由路程很短, 是原子核的强吸收面探针. K^- 介子与核内核子发生相互作用(常变为其他粒子)一般称为被核吸收. 为什么会有这个区别呢? 这主要是由于 K^+ 和 K^- 介子的夸克组分是不同的. K^- 介子是由 s 夸克(奇异夸克)和 \bar{u} 夸克(反 u 夸克)组成的, K^+ 介子是由反 s 夸克(\bar{s})和 u 夸克组成的. 原子核内所有的质子和中子都是由 u 夸克和 d 夸克组成的. 当 K^- 介子与核内的质子 P 相互作用时(图 1, a), K^- 中的 \bar{u} 夸克很容易与质子 P 中的 u 夸克一起湮灭, 剩下的 s, u, d 构成某种共振态. 而当 K^+ 介子与核内的中子 n 相互作用时(图 1, b), 由于核内不存在 s 夸克, K^+ 中的 \bar{s} 夸克不能与核内夸克一起湮灭, 只能形成能量非常高的 \bar{s} 夸克态(很难形成), 而不能形成像图 1(a) 那样的能量较低的 3 夸克共振态.

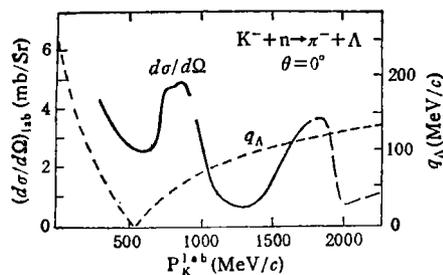


图 2

K^- 介子有一个有趣的性质. 当 K^- 介子与中子 n 相碰时, 由于各种守恒定律的限制, 只能产生 π^- 介子和 Λ 超子: $K^- + n \rightarrow \pi^- + \Lambda$. 所产生的 Λ 超子获得一个反冲动量 q_Λ . 入射 K^- 介子的动量不同, 反冲动量 q_Λ 也不同, 它们之间的关系如图 2 中虚线所示. 图中横坐标表示入射 K^- 介子的实验室动量 p_k^{lab} , 右纵坐标表示 Λ 超子的反冲动量 q_Λ . 我们看到, 当入射 K^- 动量为 $p_k^{lab} = 530 \text{ MeV}/c$ 时, 反冲动量 q_Λ 几乎为零. 当用 K^- 介子轰击原子核时, 上述过程同样在核内发生. 就是说, 只要 K^- 介子的入射动量控制在 $530 \text{ MeV}/c$ 左右(俗称魔幻动量), 新产生的 Λ 超子获得的动量几乎为零, 亦即停留在核内而不飞出核外. 这种含有 Λ 超子的原子核称为 Λ 超核. 所以 K^- 介子是形成各种超核的极好工具, 已经得到广泛使用.

用 K^+ 介子轰击原子核不能形成超核, 这是与 K^- 介子不同的. 原因是它们包含的奇异夸克不同, 使得 K^- 和 K^+ 携带的奇异量子数不同, 分别为 -1 和 $+1$; 而碰撞后产生的 Λ 超子或 Σ 超子的奇异量子数都是 -1 , 碰撞前后奇异量子数守恒要求只有 K^- 介子能引起产生超核的反应.

总之, 在各种常用的原子核外部探针中, K^\pm 介子是唯一携带奇异量子数的核探针, 用它来研究原子核的结构和性质以及基本相互作用的性质可以起到其他核探针起不到的作用. 这就促使世界各地的许多核物理研究中心近年来纷纷制定发展 K 介子工厂的计划, 有的正在实施中.

K 介子工厂的发展计划

由于所有的 K 介子束流都是二次束流, K 介子的寿命较其他常用的人射粒子的寿命短得多, 无法直接加速, 必须利用其他粒子加速器产生的粒子束(一次束流)去轰击靶核, 通过某种核反应产生 K 介子, 收集成 K 介子束流. 为使这种二次束流的能量和流强等指标达到要求, 就必须保证一次束流有高得多的能量和流强. 已经作过 K 核物理实验的一些实验室都是利用原有的高能粒子加速器加上一些附属设备引出二次 K 介子束流的, 因而受到种种限制, 不得不改建或新建 K 介子工厂. 近二、三年来, 已有多家制定计划或正在建设 K 介子工厂以及可产生 K 介子束的装置, 例如美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LAMPF II)、瑞士原子核研究所(SIN II)、美国布鲁克海汶国家实验室(BNL-AGS II)、欧洲强子实验装置(EHF)、日本东京筑波科学城物理实验中心(KEK II)以及加拿大的 TRIUMF II、美国的 CEBAF、苏黎世的 COSY 等.

表 3

加速器名称	能量 (GeV)	流强 (μA)	束流功率 (MW)
LAMPF II	45	34	2.3
TRIUMF II	30	100	3.0
SIN II	30	50	1.5
AGS II	30	10—27	0.3—0.9
AGS (目前)	30	0.8	0.024

在已经或即将执行的 K 介子工厂计划中, 实施的途径主要有以下三类:

(i) 改造现有的高能加速器, 使它的流强增加, 例如 AGS II 和 KEK II;

(ii) 改造现有的高流强加速器, 使粒子束的能量提高, 如 LAMPF II、SIN II 和 TRIUMF II;

(iii) 建立新加速器, 例如欧洲核物理研究计划.

表 3 给出几个适合 K 介子工厂用的高能强流加速器的计划指标, 为比较, 其中也给出了目前正在运行的

AGS (交变梯度迴旋加速器)的指标。从这些计划指标可以看出,新加速器的共同特点是比现有的高能加速器在电流和束流功率方面都有大幅度提高。

上述一次束流加速器通常是质子加速器,这些被加速的质子中的一部分被引导到与某种靶核碰撞后可以产生 κ 介子;这些 κ 介子的飞行方向和能量是杂乱分布的,需要把它们引导到 κ 介子工作区通过各种系统对它们加工成方向性、单色性较好的 κ 束再去完成各种 κ 核物理实验。

K 核物理研究现状与展望

前已提到,带正电荷的 κ^+ 介子和带负电荷的 κ^- 介子具有许多独特的性质,用它们可以进行各种不同类型的核物理实验,通过对实验结果的理论分析可以得到许多用其他方法得不到的核物理知识,或对其他核物理研究提供重要的补充。因而 κ 核物理有着丰富的研究内容。下面仅举几个侧面略加介绍。

κ 核弹性散射是最简单的 κ 核相互作用过程,这时入射到靶核上的 κ 介子与出射的 κ 介子具有相同的能量,靶核的末态与初态相同。对于 κ^+ 核弹性散射,由于 κ^+ 介子的弱吸收性质,它几乎可以自由地穿入原子核的深部。测量到的出射 κ^+ 介子的微分截面随出射角度的变化曲线和截面随入射能量的变化曲线包含着核内物质密度分布的信息,通过理论分析可以将这些信息提取出来。 κ^+ 介子的弱吸收性质使得通常使用的多次散射理论的一级近似很好成立,因而提取的信息较其他过程应更可靠,特别是能够提取核内中子密度分布的信息,这在其他散射过程是很难提取的,甚至是不可能的。到目前为止,这种实验和理论研究已有若干报道,取得一些成果。但是,各家的研究结果表明,理论结果与实验数据总是存在着约10—20%的偏离,这已明显超出实验误差范围。典型的例子是动量为 $800\text{MeV}/c$ 的 $\kappa^+-^{12}\text{C}$ 弹性散射。这种偏离的原因至今不甚清楚。1988年G. E. Brown等人提出一种理论解释,认为核内核子存在着“发胖”效应(与自由核子不同,尺寸变大了)。对 $\kappa^+-^{12}\text{C}$ 过程计及这种效应后所得到的理论结果果真消除了与实验数据的偏离。然而真是如此吗,目前仍是众说纷纭。是理论框架有问题还是实验数据的提取有问题,或许是仅在强子自由度描述强相互作用有局限性,这些都期待进一步的研究。

κ^- 介子入射、 π^- 介子出射的(κ^-, π^-)反应过程(称为奇异性交换反应)一直是产生和研究超核的最重要的手段。在这种情况下, κ^- 介子把自己携带的奇异量子数($s=-1$)交给核内的一个中子,使中子变成 Λ 超子或 Σ 超子(有一定寿命)而形成超核。到目前为止,用这种方法已产生十余种 Λ 超核,例如 $^6_\Lambda\text{Li}$ 、 $^7_\Lambda\text{Li}$ 、 $^8_\Lambda\text{Be}$ 、 $^9_\Lambda\text{C}$ 、 $^{10}_\Lambda\text{C}$ 、 $^{11}_\Lambda\text{O}$ 、 $^{12}_\Lambda\text{Al}$ 、 $^{13}_\Lambda\text{S}$ 、 $^{40}_\Lambda\text{Ca}$ 、 $^{51}_\Lambda\text{V}$ 、 $^{89}_\Lambda\text{Y}$ 、 $^{209}_\Lambda\text{Bi}$

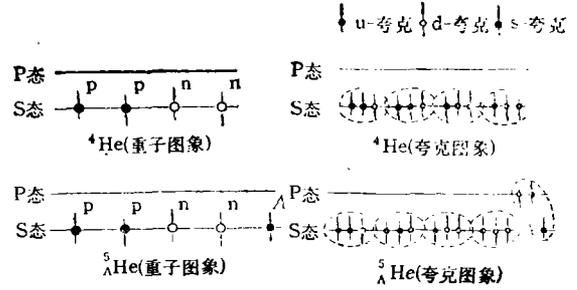


图 3

等。由于 Λ 超子有类似核子的性质,但在核内又是非全同粒子,它可以不受泡利原理的限制,是真正的准粒子。利用这个内部“探针”可以得到用传统方法研究正常核得不到的知识。关于超核研究有着丰富的内容,这里仅举一个简单的例子。图3给出超核 $^5_\Lambda\text{He}$ 的能级图,为比较也给出了正常核 ^4He 的能级图,并且对同一个核分别在重子图象和夸克图象绘出其能级。在这些能级图中能量最低的是S态,较高的是P态。在重子图象,对 ^4He 泡利原理允许其中的两个质子(p)和两个中子(n)都填充在最低的S态(图中箭头表示自旋朝上和朝下),在P态上没有任何粒子;对 $^5_\Lambda\text{He}$ 而言,它只比 ^4He 多了一个非全同粒子—— Λ 超子,泡利原理也允许它填充在最低的S态。由于重子都是由各种夸克粒子组成的,我们也可以在深入一个层次的夸克图象来看上述能级图。这时 ^4He 的能级填充情况与重子图象的 ^4He 能级一样,即没有任何粒子占据较高的P态。但是,在夸克图象里 $^5_\Lambda\text{He}$ 的能级填充却与重子图象不同了。这时包含u-夸克、d-夸克和s-夸克的 Λ 超子中,只有一个s-夸克被泡利原理允许填入最低的S态,另外一个u-夸克和一个d-夸克只能处于较高的P态。这样看来,两种图象对同一个超核 $^5_\Lambda\text{He}$ 竟然给出不同的能级填充,一个P态没有粒子占据,一个P态有粒子占据,它们的状态波函数当然也是不同的,由此计算出的物理量(如分离能)也就有所不同。对超核 $^5_\Lambda\text{He}$,实验测定出的 Λ 超子的分离能为 3.1MeV ,比较接近由夸克图象得到的理论值。这似乎说明,在原子核内,夸克并不是完全被禁闭在质子、中子、超子这些重子内部,但也不是完全“自由”的。上面只是例举了一个最简单的问题。对于更多的较复杂的问题,现在人们在思考,象泡利原理这样一个微观世界最基本的原理,它到底是应该在重子层次上成立还是在夸克层次上成立,或许是某种居间情况。这是当前 κ 核物理研究中遇到的一个严峻而有趣的问题。

由于 κ 介子是唯一携带奇异量子数的可用的核探针,研究 κ^\pm 介子与原子核的相互作用过程和性质似乎成为核物理的新天地之一。越来越多的 κ 核过程正在



内耗与固体缺陷研究



葛庭燧

耗。在振动中产生非弹性应变的原因是应变落后于应力，即应变对于应力有一个位相差。这个位相差越大，

“内耗”这两个字对大家来说并不陌生，但在物理上它的科学涵义是什么，却鲜为人知。让我们先说一说什么叫“内耗”和为什么要进行内耗研究。

物体作机械振动时，即使这物体与外界完全隔绝，它的振动也会渐渐停止，这种由于内部原因而使物体的振动能量逐渐耗散的现象称为内耗。对于高频振动，这种能量耗散也称为超声衰减。

在日常生活中，人们经常会碰到内耗现象。钟声悠扬，余音绕梁三日不绝，说明这铸钟所用的合金材料的内耗是很低的。但是一旦钟上出现裂纹，钟声很快就停止，这说明内耗大大增加。人的脊椎骨的内耗很大，不然的话，脚的振动就很容易传到大脑引起脑振荡。近代技术的发展迫切需要能在各种振动频率和各种温度下使用高阻尼也就是高内耗的材料和低阻尼也就是低内耗的弹性器件和材料。另外，为了消除噪音的污染，必须采取各种措施和选择适当的材料来减小机械部件的振动。这些都需要了解材料中的内耗是怎样产生的，从而研究采取怎样的措施才能得到具有大内耗或小内耗的材料。

我们已经知道，引起振动能量耗散的根本原因是材料在应力的作用下出现了非弹性应变。对于一个完全弹性体，应变对于每个应力水平的响应是线性的，瞬时的，并且应变和应力互为单值函数。在振动当中，应变总是与应力同位相。在这种情形下就不会产生内

内耗越大。

上述这种在机械振动中应变落后于应力的现象，在其它物理振动过程中也有相对应的情况。可以把应力叫做强度量，应变叫做广延量，应力与应变之间的比例系数是弹性模量。在电效应中的强度量是电场强度，广延量是电极化率；在磁效应中的强度量是磁场强度，广延量是磁化强度，比例系数是磁化率。在广延量落后于强度量的情况下都会出现滞后回线。回线所包含的面积就是在力的、电的或磁的振动或周期性变化过程中每振动或变化一周在单位体积的试样内所耗散的能量。这个能量与单位体积的试样内所储存的最大能量之比，就是内耗的最基本量度。我们可以根据所用的振动频率的高低，外加应力的多少，试样的尺度和形状以及内耗的大小来选择测量内耗所用的方法，而各种方法所测得的内耗值，一般是可以互相换算的。

上面说过，在机械振动中产生内耗的原因是应变落后于应力，这是从现象上来说的。从本质上讲，内耗的产生是由于试样内部存在着一些与试样中的短程序或长程序参量有关的内部变量，这些变量与试样中的原子状态、电子分布或磁畴、电畴排列的状态有关。在交变应力的作用下，这些内部变量由一个平衡值过渡到另一个平衡值时就引起了应变，但是这个过渡的过程需要一定的时间即弛豫时间来完成，并且需要越过一定的位垒，即需要一定的激活能。这就导致了应变

被实验家和理论家进行研究，其中包括弹性散射过程(K^- , K^-)和(K^+ , K^+)、非弹性散射过程(K^- , K^-)和(K^+ , K^+)、单奇异性交换反应(K^-, π^-)和(K^-, π^+)、双奇异性交换反应(K^-, K^+)和(K^-, K^0)以及 κ 介子与超子关联产生过程，后者如(π^+, K^+)、(γ, K^+)、(e, e^+K^+)和(p, p^+K^+)等。前述国际上 κ 介子工厂的发展对这些过程的实验和理论研究给予有力的推动。从对这些过程的研究中人们正在和即将得到更多的知识。 K 核物理的进一步研究有助于解决以下问题：

1. 产生新的超核及其能谱，研究各种核结构理论模型的有效性；
2. 研究各种超子与核子相互作用的性质；
3. 研究目前 Σ 超核能谱宽度的实验值和理论值存在的种种矛盾；

4. 通过双奇异性交换反应研究双奇异性超核能谱，进而了解超子-超子相互作用性质；

5. 通过 K^+ 核弹性散射研究核内部物质分布，特别是中子密度分布；

6. 利用 K^+ 核弹性散射研究核子在核内的“发胖”现象；

7. 利用奇异性交换反应产生超核来研究夸克色禁闭是在重子内部还是在整个核内；

8. 通过 K^- 反应谱检验强子的夸克模型波函数；

9. 利用各种 K^- 反应寻找带奇数数的多夸克态；

10. 研究 K 核过程是否是揭示核内夸克-胶子自由度的另一手段。

我们期待 κ 介子工厂提供更多的实验数据，我们期待 K 核物理研究提供更多的理论成果。