

从GSI看重离子核反应实验的发展

戴光曦

联邦德国GSI是一个大型重离子研究中心,有一台大型重离子直线加速器,可加速周期表上所有重离子,对铀束单核能可达 ~ 18 Mev/u,对Ar束以下可达 ~ 21 Mev/u。全所共有科学家(博士以上)120人,初研、技术人员、秘书、工人和辅助人员共416人,外国客座科研人员93人。每年到该所工作短期访问的国内外科学家300—400人,并承担德国许多大学的研究生培养任务。该所90%经费来自联邦德国政府,10%由地方黑森州政府供给。

GSI配置两台IBM—3081大型计算机,担负全所及附近大学(如法兰克福大学、达姆施塔得工学院)的计算和信息处理。例如作核反应过程中双中心势的动力学计算,时间依赖哈特利—福克计算,以及核结构理论计算;实验数据的“再构”处理;实验结果的绘图、制表、论文、公文的撰写,图书、情报资料的分编与查询,等等。每个研究组均配置显示操作终端三至四台,各室秘书均配置一台。

1. 近代重离子核反应实验特点

从GSI核反应研究室,反映出重离子核反应实验上的特点与趋向是:测量朝全信息方向扩展,尽可能有效地利用重离子束;数据处理中大力发展蒙特—卡罗模拟方法;探测系统朝双维方向、飞行时间法的方向发展。

这些特点是基于下列的实验进展。(i) GSI的加速器在80—81年增能后,可将整个周

期表元素加速到二倍到三倍的库仑位垒能量。这样核反应从一阶段过程变成二阶段或多阶段过程。例如准弹性散射或深部非弹性碰撞后,出现跟随裂变、跟随劈裂以及跟随轻粒子发射等过程。使得一次核反应事件所产生的碎片、轻粒子等大大增加。从而描述核反应的参数(包括动能、角动量、质量)成倍地增加了。换句话说重离子核反应中给出了更多的信息量。(ii)大面积双维位置灵敏探测器的研制成功和亚毫微秒技术的长足进步,极大地提高了重离子束的利用率和扩大了空间探测效率。这样就改变了过去“点到点”的老式测量方法,而成了“面对面”的关联式的测量方式。利用亚毫微秒技术,用飞行时间法直接测量碎片或粒子的速度,使得信息数据的处理更直接简便。“面对面”方式得到的信息是对应于同一核反应事件的关联信息,而“点到点”方式测到的角分布是对应于“相同的”束流下各次核反应事件的综合;显然,“面对面”的测量精度比后者要高,对束流强度的瞬变不敏感。(iii)大型快速电子计算机的使用,使人们有可能对所记录的多参数(例如高达150个参数)信息,进行处理或称数据再构。也就是说,节省了束流时间,使人们有可能在一个加速器上做出更多的实验题目,但增加了计算机使用时间。随着计算机服务程序的逐步积累和标准程序的研制,将会逐步降低计算机使用时间。应该看到,在这样的条件下,实验核物理学家,呆在实验室中的时间不多,在加速器上做实验的时间更少;大部分时间是在计算机终端上度过的。

而且计算机高级软件服务人员大大增加。

2. 空间三维测量代替二维测量, 多参量关联测量代替单举测量

过去核反应测量是在反应平面中进行的, 因为出射道二体在实验室坐标系中是共面的, 在质心系中是共线的。共面性表示在幅角(φ)空间的均匀性, $\varphi_{lab} = \varphi_{cm}$; 因此只需要在反应平面中测量出射二体中的一个, 即单举实验, 就可以单值地决定整个反应过程。这时将反应平面定为水平面, 散射室具有扁柱形结构。但是上述核反应过程发展成为多步过程, 则出射道由二体变成三体或多体。单举测量不能满足确定整个反应过程的要求, 必须作关联测量。三体反应中出现第二质心系, φ 角空间各向同性已不存在, $\varphi_{cm1} \neq \varphi_{cm2}$; 三体不再共面, 只有测出 $N(\theta_i, \varphi_i, E_i)$, 即在三维空间上的计数, 才可以确定反应过程。这样自然而然地散射室由扁柱形发展成为球形结构了; 同时单个小面积的探测器必须发展成为大面积二维位置灵敏探测器, 才可能应付三维空间的测量要求; 单探头计数发展为多个大面积探测器的符合记录。简言之, 从“点到点”发展为“面对面”的测量方式。

“面对面”所探测的几何空间可以很大, 例如达到 4π 的 30% 左右, 如有必要在全空间测量碎片与粒子也是可能的。对于 γ 射线测量, 采用晶体球, 实际上已达到 4π 探测角。这样就充分利用了重离子束, 减少了获取数据的束流时间。

“面对面”关联测量可以“跟踪”核反应中的多步过程。可以实现带电粒子(碎片及轻粒子)的全信息获取。

3. 复合靶在核反应实验中的应用

重离子核反应中反冲核能量较轻离子核

反应的要大得多, 上面谈到的关联测量自然包括反冲核的测量。这样基于反应运动学, 就可以从关联测量事件中的总质量和总质心动能, 分辨出哪些反应事件来自靶子, 而哪些来自靶子表面的沾污(如靶氧化时的氧元素, 油蒸汽附于靶面上的碳和氧元素等)。这样不仅可以删除沾污元素对于数据的干扰, 而且甚至还可以得到沾污元素的一组核反应数据。例如在 GSI 用 ^{238}U (6.0 MeV/u) + ^{48}CaO 的实验中, 虽然钙靶氧化很少(仅 $4\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 ^{16}O 的厚度), 仍然得到 ^{16}O 靶的一组可用的数据。这个事实给我们一个启示。只要在关联测量中, 有较好的总质量与总动能的分辨, 用一个复合靶, 例如, 由三种同位素(轻、中量核和重核各一种)所构成。这时一次实验, 可以同时获得三种靶子的数据。这是目前已经可以办到的事。将来随着探测器质量与能量分辨的提高, 也许有可能用元素靶而得到各同位素靶的数据。总之复合靶的使用, 在提高束流利用率和不同靶的对比实验中, 将很有价值。

4. 探测几何效率与

蒙特—卡罗模拟

大面积位置灵敏探测器的出现, 和它们之间的关联测量, 提出了探测几何效率的确定问题。在关联的情况下, 探测几何效率并不等于几何探测张角, 它与质量、能量和角度有关。对于二体关联, 由于出射粒子的共面性, 探测几何效率归结于对 φ 角的积分; 又由于事件对 φ 角依赖的均匀性, 所以有探测效率因子 $= \frac{\pi}{\Delta\varphi_{ij}}$ 。其中 $\Delta\varphi_{ij}$ 是二体 i 和 j 所在探测器对应的公共覆盖幅角。

对于三体关联事件, 情况变得复杂起来。这时共面性已不存在, 必须用蒙特—卡罗模拟计算来确定探测几何效率曲线或矩阵。

模拟是以随机取样方式, 通过各种分布函数来把核反应过程中的质量、能量和角分

布等参数化,进行反应中物理过程的模拟。同时将反应运动学方程加到这个计算中去,并且把探测器系统的几何条件代入,还应删除二个碎片打到同一探测器中的“双击”事件;这样就给出实验室系中的各种分布来。将模拟计算所得到的这些实验室系中的分布(包括各个碎片的质量、能量和角分布等)与实验中测到的结果(在实验室系)进行比较后,再返回来改变随机取样分布函数中的参数,再比较;最后使模拟计算结果与实测结果尽可能一致。在这种拟合条件达到后,从数据分析上来说,所选的分布函数就代表了实验结果,同时模拟分布与不存在探测几何限制的分布相除,就得到了各种物理量(质量、能量与角分布)相应的探测几何效率。

用蒙特—卡罗模拟计算,在实验后可以相当简便地给出三体或多体出射道反应的数据“再构”,并可以给出探测几何效率;在实验前则用模拟计算,可以选择放置探测器的最佳方案,同时还可以预测实验的进程,对及早发现实验中一些设备上的故障和尚未预料到的新现象也是很有益的。

目前蒙特—卡罗计算,不仅用于上述核反应实验的数据处理中,而且已经延拓到核理论的研究领域中,可以得出一些无法求解方程式的模拟解。

5. 跟随裂变与快裂变研究

由于蒙特—卡罗模拟计算成功地应用于多体出射道的数据处理和多个双维位置灵敏探测器的关联测量,使得目前已开始进行一些三体或多体的实验课题研究。例如跟随(或相继)裂变或跟随劈裂反应,双跟随裂变反应,重离子反应中关联轻粒子发射过程等。

跟随裂变(或劈裂)过程是两核在碰撞后,一个核裂变,或两个核都裂变的过程。这是反应的二步过程。从裂变物理上看,是重离子碰撞诱发裂变的现象。在入射核低于库仑位垒时,是库仑裂变,例如用 ^{184}W 及 ^{182}Sm

打 ^{238}U ,或用 ^{232}Th 打 ^{248}Cm ,其裂变几率 P_f 与核弹 Z_p^n 成比例, $6 \leq n \leq 8$ 的指数。而入射核能量高于库仑位垒不多时,则对于易裂核 ^{238}U 靶,主要对应的碰撞为准弹性散射。在能量达 7.5MeV/u 时,对不易裂的 ^{208}Pb 靶,跟随裂变主要对应于DIC,而 ^{238}U 是易裂变核,对应的碰撞是DIC与准弹各占一半的几率。能量再升高到 12.5MeV/u 时,中量核系统,如 $^{84}\text{Kr} + ^{168}\text{Er}$ 或 $^{120}\text{Xe} + ^{122}\text{Sn}$ 都会发生跟随劈裂反应;这时对应的碰撞均为DIC。

研究跟随裂变有二个目的。一个是将反应第一步的碰撞过程的测量完整化。过去单举测量或二体关联测量势必丢掉了三体数据,或者只可大致估计跟随裂变的影响。而跟随裂变测量是对应三体事件,可以完全排除弹性散射的干扰,并在数据“再构”中,将它返回到裂变前的二体事件,并加到真正测到的二体事件上去。这就给出了反应第一步过程中的能量、质量、角分布等的完整的数据。同时第一步过程中的效果,如碰撞中的能量分配、角动量转成自旋后在碰撞对之间的分配,也在裂变中的质量分布和角分布中表现出来。这样对碰撞的描述就有了更多的实验信息。第二个目的是研究反应二步过程之间的关系,例如时间关系。碰撞后令有A、B两核,B核接着裂变;则B核裂变若沿AB连线方向发射碎片,则A核对于碎片的库仑作用会减少碎片间的相对速度 v_r ,反之若B核裂变沿垂直于AB连线方向,则会增加碎片间的相对速度 v_r 。这种对于碎片对之间相对速度的调制大小,可以作为一个计时器,来测定碰后分开到裂变发生的时间。由裂变半经验公式可知,从中量核直到重核, v_r 基本上保持一个常数, 2.35cm/ns 。所以在碰后到裂变这段时间相距50个核半径以内,都可以用此法得到裂变时间 t_{s0} 。除时间关系外,还有自旋效应。在 t_{s0} 时间内,B核旋转一定角度,使 v_r 调制的最小值不正在连线方向,而偏一角度。由于库仑作用是清楚的,上述

(下转56页)

(上接3页)

这些过程都可以精确计算，给出有价值的信息来。

当然跟随裂变研究目前还刚开始，许多新的现象和可能的应用尚未完全揭示出来。目前有迹象表明，用它可以测量准弹性散射截面。例如用易裂核（如铀系元素）与中量核碰撞，在能量比库仑位垒高的不多的情况下，只可能产生准弹性散射。而只要在碰撞中使易裂核的内部激发能高于裂变阈能，即可发生裂变。因此这时跟随裂变截面是存在一定裂变阈能下的准弹性散射截面。选用不同裂变阈的核，可以得到准弹性散射截面对能量的依赖关系。并且在准弹性散射的轻微核作用下，还可以通过跟随裂变研究壳效应。

最后谈一下快裂变。近来发现 $^{27}\text{Al} + ^{238}\text{U}$

的熔合反应中，裂变角分布异性很大，表示存在快裂变的成份达到70%。但从其入射能（仅6MeV/u）计算表明，此时转动能并不足以使裂变阈降为零。这种快裂变是否由于在熔合过程中，一部分能量变成了集体振动能，而这种振动使复合系统达到鞍点，从而加快了裂变过程，尚未作出仔细的计算。

目前联邦德国GSI在合成超铀元素，发现许多新核素和奇异衰变（如直接质子发射体）等方面已跃居世界首位。107、109和108号元素的合成，使新元素合成的最有权威的实验室，已从美国贝克莱和苏联杜布纳转移到GSI。普遍认为，低能核物理研究及其前沿重离子物理研究的中心已经从美国转移到西欧。由于这些方面已有许多报导，本文不再赘叙。