

巧克河的重离子物理现状

郭俊盛

巧克河核子实验室(Chalk River Nuclear Laboratories)是加拿大的一所重点国家实验室,组织机构上属于加拿大原子能公司管辖。是一个综合性实验室,有职工约三千余人,研究工作基本上分为两部分,一是反应堆研究,以及围绕堆工研究的其它有关研究,如堆材料研究,堆的模拟控制研究,废物处理,辐射应用及同位素生产等;另一部份是基础物理及保健物理,包括加速器研究,中子与固体物理,理论物理,一般核物理及重离子核物理以及工业卫生保健等。

巧克河实验室的特点之一是堆工研究,从五十年代开始,它发展了一种CANDU型重水堆,已提供给加拿大几个地方及其它国家作发电用,这种类型的反应堆以能够安全运行著称。另一个特点是发展了加速器技术,它所设计的超导回旋重离子加速器,已首先在美国的密执安大学建成并投入运行,那是仿照目前巧克河正在调试的超导回旋的一个较小型加速器,而巧克河的这台大型加速器于今年初也已出束。他们在过去的十几年里利用一个改造过的端电压为13兆伏的串列静电加速器开展了重离子物理研究,其中以对例外核及例外衰变的研究卓有成效,其它如高激发态及高自旋态的形状跃迁研究也有突出的成绩。

一、重离子装置

巧克河的重离子物理工作始于1970年,当时他们利用原有的一台经过改进的端电压为13MV的串列静电加速器,可以得到从氧到镍等十几种重离子束流。从1978年起,开始建造和安装一台自己设计的超导回旋重离

子加速器,这是将串列静电加速器作为注入器,再经过一个超导回旋加速器的后加速,形成了一个串列静电——超导回旋加速器的联合装置,取名为TASCC(即Tandem—Superconducting Cyclotron)。

新的TASCC装置包括约60米的束流传输线,6个两极磁铁,25个四极透镜以及真空室和束流诊断器件,整个系统由计算机控制。超导回旋加速器的能量常数 $K=520$,束流在回旋加速器中被加速到650mm的半径时被引出。TASCC装置的设计指标可以加速锂和铀之间的全部粒子,能量可达50MeV/核子(对锂)和10MeV/核子(对铀),这正处于传统的过渡能区。下面列出了TASCC装置的主要参数。

串列静电加速器电压	13MV
超导回旋的能量常数K	520MeV·A/g ²
引出束流	
能量范围	例: ¹² C 15到 50Mev/A ²³⁸ U 3到 10MeV/A
能量分辨	$\Delta E/E \leq 10^{-3}$
流强	~100粒子毫 微安

从1982年下半年开始,巧克河的串列静电停机,开始与刚建成的超导回旋进行联接与调试,直到1985年11月份,才首次从超导回旋中引出了束流。从回旋的开始建造到与串列静电进行联合调试并第一次从回旋中引出束流,大约共花去了七、八年的时间。第一次从TASCC引出的束流是¹²⁷I,能量为1.2GeV,但流强极小,约0.5nA,后来经过不断调试,到1986年3月,束流已达到了50nA,并

凡在靶位置进行了检验性的第一次物理实验,用1.2GeV的 ^{127}I 束流轰击了 ^{48}Ca 靶,企图得到 ^{47}Ar 产物。

下面给出TASCC装置的调束的进程:

1985

7月22日 第一次束流从Tandem注入回旋

7月25日 在回旋中观察到了剥离束

9月10日 束流在回旋加速器中加速

9月12日 在引出半径上观察到了束流

11月19日 首次引出束流1.3GeV的 ^{127}I 束

1986

3月3-7日 首次束流到达靶位
1.3GeV的 $^{127}\text{I}^{+23}$, 约
50nA

TASCC装置按原计划应是1983年出束,但实际出束时间拖后了三年,工程进展较慢的主要原因是技术力量不足,特别是对超导回旋的调试与运行的经验不足;经费不足是使工程拖延的另一个原因,巧克河实验室的年度财政预算曾被砍掉一半,直接影响了TASCC的工程进度。

TASCC装置终于引出了束流,这是一个激动人心的事件,它很快将能提供800MeV的氧束直到2.4GeV的铀束,这个过渡能区将给重离子物理研究打开了一个较新的领域。当然在这个能区中它不是唯一的装置,在GSI和密执安大学已经首先开拓了这个领域,并证明几乎每一件事情都值得去做。

二、实验终端与设备

TASCC的束流终端建设分两期工程,第一期工程包括Q3D磁谱仪,在线同位素分离器及多粒子探测系统,目前已经基本完工;

第二期工程包括 $8\pi-\gamma$ 谱仪等十一个靶位,已经开始筹划。下面分别介绍几种主要终端设备的基本特点:

1. Q3D磁谱仪

这台磁谱仪已经成功地运行了十年。它具有一个高分辨($E/\Delta E = 5000$),高色散($12800\Delta P/\text{Pmm}$),大的立体角(15msr)以及宽的量程($E_{\text{max}}/E_{\text{min}} = 1.5$),在最大场强1.6台斯勒下,可适合具有质-能乘积 $AE/q^2 = 148\text{MeV} - \text{amu}$ 的离子,其中A是原子质量,E为能量,q是电荷。

2. 在线同位素分离器

巧克河的在线同位素分离器自1979年与13MV的Tandem联合运行,1982年停机。为了与新的TASCC装置联结,它停机后进行了移位和重新安装与调试,1984年重新恢复了性能并进行了离束运行。这台机器由于采用了非均匀磁铁及 α 和 β 补偿线圈,因此具有非常高的分辨,一般情况下 $M/\Delta M > 7000$,当离子出口直径为0.1mm时, $M/\Delta M$ 为20000,如此高的分辨是目前任何其它同类分离器不能比拟的。同时它具有高的色散($2250\Delta M/\text{Mmm}$),高的电流(约20mA);它可以分析质量在1和300之间的同位素。离子源采用FEBIAD型和BARNAS型,加速电压在30KV和70KV之间可调,离子源对给定元素可达百分之几十的效率;主磁铁磁场稳定性 $< 10^{-5}$;交插污染对 $A = 20$ 小于 10^{-6} ,对 $A = 200$ 小于 10^{-5} 。1982年,曾成功地检验了一个新的He-jet离子源。目前,正同一个大学(Manitoba University)合作,计划在分离器的一个臂上联接一台具有高分辨、高穿透的质谱仪,准备对短寿命低产额的远离 β 稳定线的核进行直接质量测量。

3. $8\pi-\gamma$ 射线谱仪

这是一个由几个单位联合建造的国家级设备,由加拿大原子能公司和Montreal大学及McMaster大学合作共同投资。它由两套系统组成,一套是包括72个锗酸铋(BGO)闪烁探测器的自旋谱仪,另一套是一组20个

康普顿抑制高纯(HP)锗探测器。计划在1986年晚些时候在第二期终端工程的一个靶位上运行。

4. 多粒子探测器系统

它由气体和固体探测器组成,适合于唯一一对反应产物的测量。它曾经以小规模的形式进行了研究,并将要在刚完成的1.75米直径的大散射室中运行,并希望今后在第二期终端工程中更多的探测器组装在更大的散射室中工作。

三、物理工作

总的来说, TASCc的物理工作将主要研究在极端情况下的核,这些极端情况包括核的密度和温度极端,高自旋和高激发极端以及稀有核的组成极端。实际上,在 TASCc的能量上,它完全有可能把这些特性推到最远极端而仍能使核保持完整性。根据上述那些极端情况的研究,可以把 TASCc的研究工作分成三个明确的领域:反应现象、高激发和高角动量的核态以及例外核的研究。第一个与过渡能区核之间的动力学相互作用有关,它的成功取决于 Q3D 谱仪和多粒子探测器系统;第二和第三是应用高能重离子束作为一个唯一工具来产生这些特殊态的核,它们可以用 8π 谱仪或在线同位素分离器来研究。

1. 过渡能区下的重离子反应现象

众所周知,在低能重离子情况下,由于受平均场的作用,核物质的密度和中质比接近平衡并几乎是一常数;而近来,在高得多的能量下($E > 200 \text{ MeV/A}$),借助于相对论重离子碰撞研究核物质,其结果不能由平均场表徵而是由单个的核子—核子相互作用所表徵。但是,从平均场到核子—核子形为变化的能量范围,还远远未被详细研究,而对这个过渡能区的探索,恰恰是 TASCc 所能胜任的。

在核物质中的声速相当于 15 MeV/A ,

而在一个核中核子的费米能大约是 30 MeV/A ,如果超过前者的值,核的密度和温度就开始发生变化,而超过后者,就可引起核态数目的变化,并且出现核对核子的不透明性。因此可以看到,在这个所谓过渡能区中,在新的现象上以及在核的全纬度上将蕴藏着丰富的内容。比如,由密度和温度变化引起的现象,以及其它的核的自由度如角动量,质子—中子对称性等,都可以作为这些新变化的函数来进行研究。

核对入射核子的透明度是作为核温度及入射核子能量的函数而变化的,这就形成了对在 10 MeV/A 和 200 MeV/A 之间能够观察到的或预言的新现象的基础,比如热斑和预平衡发射,粒子喷射,非完全动量转移以及密度变化等。这些依赖于核物质声速及费米能的新现象也许有可能提出一个核物质的态的方程式。在这个领域里,一些可供研究的现象如下:

核的透明度——核子—核子反应截面在约 300 MeV 入射能量下出现了一个明显极小。对于重离子反应截面,一个类似的极小(或透明性)预言出现在更高的能量下,这个截面上的最尖锐的变化应该产生在 TASCc 的能区内。

碎裂——在重离子碎裂研究中,其主要的未解决的问题是,是否当弹和靶的势重叠时出现碎裂,或者,是否在那个时间里,反应对仅仅被激发在两者分离后而伴随着衰变的出现。

热斑——出现在大约炮弹的半速度上的高温运动的局部源,被提出来解释观察到的轻粒子发射谱。这种“热斑”的存在能够用符合实验来证明,并且将建立上面讨论的局部机制的真实性。

喷射——在弹和靶的相对速度上的本征核子费米运动的重叠,能够导致核子从复合系统的势阱中逃逸,这种情况不是直接发生的就是在核子—核子碰撞之后发生的。这种类型的关联核子发射就叫做“喷射”,并且还

没有在TASCC的能区观察到。

丢失动量——从炮弹转移到靶上的动量随束流能量的增加已经可以观察到饱和状态，在各种弹靶组合的这种交换的级别和速度至今仍未解决。局部核子—核子碰撞的事件和随着能量增加的平均场的抑制，能够用某些实验来探索，这些实验就是去观察在符合实验中的丢失动量的结果，它可以包括所有的出射碎片。

熵——在中心重离子碰撞中，发射的单核子对复合粒子的丰度比，可以告诉我们反应中产生的熵。对于液-汽相变的研究以及试图建立核物质的态的方程，都将要求扩展这个比值的测量，其能量范围可以在TASCC的能区内或超过这个能区。

爆发——在过渡能区，一个核的复合系统的总分裂是可能的，并且已被观察到了。这种爆发也许是以前讨论的局部效应的最惊人的表现。如果全部质心能在复合系统中都作为热能而沉积，那么总的分裂就肯定是大有可能的。问题是，在它被大能量粒子的快发射而损失之前，这种激发是如何在整个系统中传布开的。

π 介子——对于产生 π 介子的自由核子阈在质心能量上约为135MeV，在重离子碰撞中，对于所涉及核子的本征费米能的折合也许在实验室能量下低于这个阈，可以低到50MeV/A，但是最近的研究表明了仍然较低的能量下可以产生 π 介子，这就需要有一个“相干”效应来解释，这时，有许多核子都把它们的能量贡献给 π 介子的产生了。目前仅仅完成了少数亚阈 π 介子的产生实验，而且没有剩余核系统的符合研究。

2. 在高激发和高角动量下的核态

TASCC束流引起的重离子碰撞可以导致核的高激发态及高角动量态。伴随着这些反应的核衰变一般是通过长的级联 γ -辐射而退激，因此， γ -射线谱学是对于角动量和它的临界轴排列探测的最重要的实验方法；同时它也提供了一个考察详细能级纲图的最佳

方法，并能告诉我们每个个别态的许多特性如总角动量、磁矩、寿命和它的衰变模式。从这些基本特性中我们可以导出态的结构，也即核的形状以及在独立或集体激发的模式中那些核参加了和总角动量是怎样组成的等细节。所有这些信息都可用理论来证明，这就一方面导致了我们的知识的改进，另一方面指出往哪里去可以得到进一步的改进。

8π 谱仪就是用于测量在重离子反应中达到的高激发态和高角动量态的核的衰变而发射的 γ -辐射。它可以提供对下列参数的有力的测量(i)自旋，(ii)自旋取向，(iii)入射态的总能量，(iv)高分辨谱学，(v)低本底，(vi)高多重性级联的强的加强因子等等。

虽然对围绕质量150的核可以假定到60h的角动量而没有裂变，但详细能级纲图研究是被限制到大约30h。超过这个区域，现有的技术就失败了，因为它们的灵敏度不足于分辨和探测刚刚超过本底的那些非常弱的跃迁。因此在高角动量时用现有的技术只能去研究由许多弱的重叠的跃迁组成的连续辐射。因此不连续区和连续区之间的区分纯粹是由仪器的特性决定的。但用 8π 谱仪，我们可以预期把不连续区谱学的区域扩展到目前叫做连续区域。除此而外， 8π 谱仪也将非常适合连续辐射谱学，它可以直接的或用关于 $E_\nu - E_\nu$ 关联图的新技术来研究，能够研究的内容是(i)有效转动惯量作为转动频率的函数(ii)有锐激发发生的临界转动频率(iii)由粒子激发排列到转动轴所携带的角动量(iv)在接近裂变系统的超大变形的可能的起点。最后，TASCC和 8π 谱仪的结合，可以测量任何类型的 γ -射线谱学。

3. 例外核

如我们所知，自然界共存在263个稳定同位素，它们的中质比的变化非常小。1977年的核素表上包括了1800个同位素，而1981年扩展到2200个，这些核素至少有一个特性被测量过。而理论预言总共应有7000个核

素, 因此已知的核素只占总的很少部份, 大约还有5000个核素目前仍保持未知状态。目前重离子束成为产生远离 β 稳定线新核素的一个很重要的工具, 而巧克河的TASCC装置能够加速任何稳定同位素并同在线同位素分离器连接来分离各种产物。在这方面, 有几个特别感兴趣的领域如下:

例外过程——已知的抛物线质量曲线(对A固定)表明, 随着远离稳定线的距离增加, β 衰变能也增加, 从这里可以得到弱相互作用的新观点以及导致 β 延迟核发射的出现, 这对于大部份接近稳定线的核是一个新现象。过去几年 β 延迟放射性已从简单的质子、中子或 α 发射扩展到了两质子衰变、两中子衰变、三中子衰变以及甚至氘衰变。这些例外衰变的研究导致了或者很快导致很多新的信息, 例如从核质量和能级到激发态寿命(在 10^{-10} 秒范围); 其它的例子如基态质子放射性(三年前发现的)已知已有四个核。但估计将会很快的增加。

例外状态下的核物理——虽然许多例外过程是相当迷人的, 但是研究远离核的更大的价值是去探索我们对核力和核模型的知识, 在以前, 这些都是从接近稳定线核的研究中推导出来的。对知识的任何检验都必须是在不同的状态下, 并且越极端的状态越好。在核谱学中, 8π 谱仪和在线同位素分离器两者都将在这方面很有价值。对于核和天

体物理的一个特别有兴趣的问题是远离核的质量, 在核质量的研究中, 计划将一个质谱仪联结到在线分离器上, 将成为目前世界上一个唯一的设备, 作为对远离核的质量进行直接测量, 它将能够接收任何希望的分离束, 然后再进入需要的特殊设备中进行研究。

用作微观实验室的核——在最重要的方面, 对例外核的研究也强调了这些核作为显微实验室的作用。随着可利的核的数目的增加, 我们就能更多的选择特殊的量子数、跃迁类型或能量释放方式去探索一些特殊的原理, 这个领域可使核物理贡献并继续贡献给我们的基本知识。例如, 在巧克河实验室, 人们对 $0^+ \rightarrow 0^+$ 超允许 β 跃迁的研究, 在不稳定核的广阔范围内对在Kobayashi-Maskawa矩阵中的夸克混杂元得到了精确的测定, ft 值的精确测量, 已经得到了关于守恒矢量假说的证明。这些实验的一个重要方面就是半衰期的确定, 对于这一点, 假定放射源实际上是具有高纯度的。从 $0^+ \rightarrow 0^+$ 测定的矢量耦合常数, 也可以在非 0^+ 核衰变中来测定, 例如 $2^+ \rightarrow 2^+$ 的超允许衰变的 ^{20}Na , 第一次测量了它的矢量耦合常数。这个实验的一个附加的结果就是用延发 α 衰变组作为同 β 粒子符合的能量和角度的函数的能量漂移中, 得到了 β - γ - α 三重关联系数。

上接33页

远大于NRA的, 又能对样品成分核进行鉴别和测定。

高能离子束分析技术已经取得了很大成就, 但从它最近发展的势头来看, 却正是方兴未艾。在许多崭新的乃至边缘学科领域里, 它刚刚锋芒初露。

参考文献

1. Washington, Nucl. Instr. and Meth. 149 (1978)
2. Lund, Nucl. Instr. and Meth. 181 (1984)
3. J. F. Ziegler, New uses of ion accelerators

(Plenum Press, New York, 1975)

4. J. D. Garcia et al., Rev. Mod. Phys. 45 (1973)111
5. G. Amsel. et al., Nucl. Instr. and Meth. 218 (1983) 177
6. Aarhus, Nucl. Instr. and Meth. 168(1981)
7. Sydney, Nucl. Instr. and Meth. 191(1983)
8. Lund, Nucl. Instr. and Meth. 142 (1980)
9. Proceedings of the Namur Conference on Microanalysis Using Charged Particles, Nucl. Instr. and Meth. 197(1982)1—258
10. Tempe, Nucl. Instr. and Meth. 218(1985)