

# 拟定中的 RIBLL 实验装置\*

吴和宇

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘 要** 建议在兰州放射性束流线(RIBLL)上建设 3 套装置: 直接反应精细测量装置, 用来对放射性束的粒子的运动轨迹逐一进行跟踪, 以及对粒子的电荷态、核电荷数、质量数和能量进行精确跟踪, 从而得到核反应和核结构的准确信息; 磁谱探测系统, 它是由一个二极磁铁和相关真空室组成, 一方面它是一个谱仪系统, 用来分离原始放射性主束和次级反应产物, 进行粒子种类和能量的测量, 另一方面, 还可以用来研究放射性核的电磁矩和基态组态; 奇异衰变的  $4\pi$  探测装置是由 5 套大面积位置灵敏薄片硅探测器和 CsI(Tl) 组成的望远镜组, 可覆盖整个探测空间的 60% ~ 70%, 外加多个塑料中子探测器或  $\gamma$  探测器, 用来测量奇异核和蒸发余核的关联粒子发射, 寻找和测量奇异的放射性衰变.

**关键词** 放射性束物理 核反应 核结构 同位旋效应

**分类号** O43-33, O571.22

## 1 引言

放射性束是近几年发展起来的核物理研究的新领域, 而且将是未来 10 年、20 年核物理研究的重点和热点. 它把平常用于核物理研究的 300 多个核推广到 4 000 多个核, 给核反应、核结构和天体核物理, 以及新核素、超重元素的合成带来前所未有的机遇. 中子晕和中子皮的发现促进了核物理学家对奇异核性质的研究. 随着远离稳定线, 核的寿命变短, 对核的自旋、宇称、核结构组态和核的激发态性质、核的衰变都不是太清楚. 特别是晕核、皮核的发现, 已成为检验建立在稳定核基础上的核结构、核反应理论的探针. 放射性核的特殊性质, 使其在应用研究上也有广泛前景.

原子核的基态和低激发态性质研究大多是靠核的直接反应测量得到的, 而放射性核是不稳定的, 它只有基态或低激发态, 故直接反应的测量是研究放射性核性质, 检验现有核理论的基本工具. 而类弹核的碎裂反应

是放射性核在碰撞过程中激发到较高能级的一种奇异衰变, 它是奇异核的非束缚态的形成与衰变性质研究的探针.

对极限核状态的热核研究又增加了同位旋这一参数, 热核性质的同位旋效应正在引起热核研究者的注意. 丰中子或丰质子的弹核对热核的产生和衰变性质的研究可望有新的突破. 这一研究要求人们探索: 引起多重碎裂的临界涨落效应与核的几何尺寸、核温度以及同位旋的关系; 核温度、不可压缩系数和核子自由能等核性质与同位旋的关系; 通过实验上测量碎裂的时间延迟, 进一步验证在低激发态时热核的级联衰变到高激发态时瞬发行为的过渡机制; 丰中子核物质与正常核物质激发机制的差异, 以及两者之间的过渡行为等特征<sup>[1]</sup>.

放射性核束使得用核反应的方法研究奇异核性质成为可能, 特别是一些天体核物理感兴趣的核反应在实验室中也能进行, 并精确地测量出有关参数, 这一领域正在迅速发展. 天体核合成过程基本上是非稳定核参与

\* 收稿日期: 1999-06-30.

中国科学院“百人计划”和中国科学院“九五”重点项目共同资助.

的过程,一旦这些非稳定核的数据有一个变更,象宇宙尺度和宇宙年龄等核天体常数和天文数据可能出现数量级的变化.目前,核天体物理学中仍然有许多迷尚未解开,比如众所周知的太阳中微子之迷,都可能用次级束来解开.

重离子核物理在朝高激发(热核)、高同位旋(偏离稳定核)迈进的同时,增加高自旋也是一个有意义的方向.对非稳定核的磁矩和电四极矩这些主要的基本性质,以前是很难测量的.将极化的远离稳定核注入晶体,在非常低的浓度下用 $\beta$ 射线就可测出其核磁共振的频率,从而分析它的磁矩和电四极矩.利用高自旋核束的熔合反应可以产生更高自旋,可望对高自旋下的核性质有进一步的了解.如带的跃迁和超形变等.

用丰中子的次级束流合成新核素和新的超重元素是一个诱人的方向.之所以难以登上核素稳定岛,其根本原因是正常束流(无论是冷熔合还是热熔合)很难合成较丰中子的超重元素.因为在熔合过程中总是不可避免地带有激发能,中子蒸发是一种带走激发能的有利途径,带入更多中子总是有利于较丰中子核素的合成.

## 2 拟研究的内容和方法

(1) 精细测量直接反应、寻找次级束反应机制的奇异性和检验现有核理论.为利用 RIBLL 提供的 ${}^6\text{He}$ 、 ${}^8\text{He}$ 、 ${}^9\text{Li}$ 、 ${}^{11}\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Be}$ 、 ${}^{14}\text{Be}$  和 ${}^8\text{B}$  等次级束可进行直接反应研究,在第一个消色散焦点放置靶,在两个非消色散的焦点用磁谱选择测量出射和入射粒子的能散,并在非焦点测量其相对出射和入射角度,以实现粒子反应前后精确跟踪测量.并用扭曲波玻恩近似理论对其产额和角分布进行分析.

(2) 极端条件下核物质性质的同位旋效应.利用丰中子或丰质子放射性核束进行核反应可以产生非对称性很大的核物质,以用

来探索核物质特性在对称核物质和纯中子物质间的差异.例如,通过改变同位旋自由度探索核物质状态方程和介质内核子-核子碰撞截面的变化、热核形成和衰变机制的变化等.主要研究:引起多重碎裂的临界涨落效应与核的几何尺寸、核温度以及同位旋的关系;核温度、核不可压缩系数、核子自由能等核性质与同位旋的关系;实验上测量碎裂的时间延迟,进一步验证在低激发态时热核的级联衰变到高激发态时的瞬发行为的过渡机制;丰中子核物质与正常核物质激发机制的差异,以及两者之间的过渡行为等特征.

利用我们即将建成的 $4\pi$ 带电粒子谱仪,用放射性核束研究热核性质及其同位旋效应也是可能的.用此装置研究在碰撞过程中的同位旋平衡、测量不同激发程度的热核的比热性质,分析它与同位旋的关系;测量热核的寿命、粒子发射时标和次序、衰变机制的演化与同位旋的关系等.

(3) 核天体物理中关键核反应率的研究拟采用电磁解离或 $\beta$ 衰变测量的方法进行.利用电磁解离方法时,解离后的重产物由磁谱仪来实现鉴别和进行高能量分辨的测量,结合在 Pb 靶附近妥善安排的位置灵敏轻粒子探测系统,就能实现高精度的测量,从而获得更加准确的 $S(E)$ 因子. $\beta$ 衰变测量的方法,拟结合远离 $\beta$ 稳定线核的奇异放射性研究一起进行,相应于天体中主要是 rp 过程中的反应.拟测量的反应主要集中于原生核合成中质量数在 7~ 11 之间的反应过程和恒星爆炸性 H 燃烧(热的 p-p 链和热的 CNO 循环)中 $A < 30$ 核参与的 rp 反应.目前预选的目标反应有: ${}^{25}\text{Al}(p, \gamma) {}^{26}\text{Si}(p, \gamma) {}^{27}\text{P}$ 、 ${}^{19}\text{Ne}(p, \gamma) {}^{20}\text{Na}$ 、 ${}^{14}\text{C}(\alpha, \gamma) {}^{18}\text{O}$ 、 ${}^{15}\text{O}(\alpha, \gamma) {}^{19}\text{Ne}$ 、 ${}^7\text{Be}(p, \gamma) {}^8\text{B}$  和 ${}^7\text{Be}(\alpha, \gamma) {}^{11}\text{C}$  等.

## 3 次级束流的问题

次级束流线的束流与原始束有很大的差别,因为原始束的发散度相对小,实验中可

被近似视为平行束. 为了增加流强, 尽可能增加次级束流线的立体角和动量接受度, 这也就增加了束流的发散度. 束流在初级靶和各焦点的张角为  $\pm 3^\circ$ , 动量接收度为 10%, 即能量分散为 5% 的粒子混在同一种类的束流中, 这样就给精细实验带来很大的不便. 由于探测器的影响, 在测量次级束进入靶之前某物理量的同时, 也破坏了该物理量.

在次级束的测量中, 另外的几个主要问题是: (1) 为了增加次级反应产额, 需要尽可能地使用厚靶, 但这使反应时束流能量分散在一个较大的连续范围内而无法定出. (2) 使用厚靶时, 次级束主束、次级反应产物经过多次散射, 其能量和方向已经失去了原始特征. (3) 无论是薄靶还是厚靶, 要测量次级反应产物或次级束. 探测器的厚度会远大于次级靶, 在注入型测量 ( $0^\circ$  测量) 时, 探测器将成为厚靶而使各种产物相互混合, 增加测量和分析的困难. (4) 现在的 RIBLL 无较大的真空室, 特别是焦点和尾端, 实验的探测设备安装困难. (5) 现有的 RIBLL 真空抽速仅实用于现有的管线, 增加探测设备 (特别是气体类探测器) 和真空空间都必须增加真空设备. (6) 原则上, RIBLL 的后部分可以作为磁谱仪, 由于动量和几何接收度相对于全接收的磁谱仪来说是太小了, 只能选择很小范围的产物, 加上飞行距离很长, 粒子的传输效率很难模拟.

#### 4 RIBLL 的精细测量装置

RIBLL 上的精细测量基础是放射性次级束流线的强的粒子分辨能力. 针对次级束能量分散大和角度分散大等束流品质差的特点, 对必要的部位进行改进: 在  $C_1$ 、 $C_2$  处利用磁刚度精确测量出粒子的动量 (能量). 通常是在色散焦平面用狭缝选取单能粒子 (以牺牲束流强度为代价), 在非焦平面精确地测量出角度信息, 从而对粒子在整个输运线上的轨迹进行跟踪. 从物理上讲, 无论是利用

RIBLL 前部分分离次级束,  $T_1$  为次级靶, 后部分作为磁谱仪分离弹散或转移反应的产物的实验, 还是在  $T_2$  进行次级束的反应研究及结构研究, 大都需要测量入射粒子的能量和方向.

##### 4.1 测量位置的选择

最简单的测量角度方法是寻找靶核附近的自由空间漂移段, 在漂移段的两端进行位置测量而再构方向信息. RIBLL 的输运线如图 1 所示. 在焦点附近只有 30 cm 的自由空间漂移段, 如果用位置分辨为 2 mm 的平行板雪崩室 (PPAC) 探测器, 极限角度分辨可以达到  $0.6^\circ$ , 这对范围为  $\pm 3^\circ$  的测量是不可用的; 如果用分辨为 0.5 mm 的光纤探测器, 极限角度分辨可以达到  $0.1^\circ$ , 但是束流已被阻止; 如果采用分辨为 0.2 mm 的位置灵敏半导体硅探测器 (厚度为  $300 \mu$ ), 极限角度分辨可以达到  $0.06^\circ$ , 但存在下面将讨论的一些问题而无法工作.

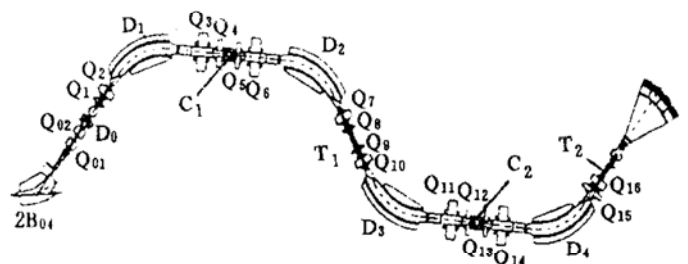


图 1 RIBLL 的结构图

其中  $Q_4$ 、 $Q_5$  之间的焦点  $C_1$  和  $Q_{12}$ 、 $Q_{13}$  之间的焦点  $C_2$  为位置测量点确定粒子动量分散,  $Q_6$ 、 $D_2$  之间和  $D_3$ 、 $Q_{11}$  之间为第二个位置测量点, 确定粒子方向.

我们留心在远离焦点的束流包络,  $\pm 3^\circ$  的束流可以展开到 40 cm 的测量范围, 从而降低对位置分辨的要求. 在  $D_1$ 、 $Q_3$  之间,  $Q_6$ 、 $D_2$  之间,  $D_3$ 、 $Q_{11}$  之间和  $Q_{14}$ 、 $D_4$  之间确实存在容易改造的漂移段, 但它的位置决定于粒子在焦点的角度, 也决定于粒子的动量. 在动量确定时, 角度和测量的位置也是一一对应的, 利用粒子在四极透镜中输运的精确

解析表达式或用刻度的方法是可以精确确定出角度的.

#### 4.2 探测器的选择

气体探测器 PPAC 的位置分辨(2~ 4 mm)比位置灵敏硅的位置分辨(0.2~ 0.6 mm)差,使用也远不如固体探测器方便.但粒子在其中的能量沉积小,能量和方向的歧离也小.因为实验要求在测量靶前、靶后的粒子种类、能量、动量方向时,不能太多地改变它们.

以 50 MeV/u  $^{12}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}$ 、 $^{20}\text{Ne}$  和  $^{40}\text{Ar}$  为例,在固体探测器中能量沉积太多,600  $\mu\text{m}$  硅中沉积能量分别为初始能量的 8%、11%、12.1% 和 23%.如果次级束能量更低,束流能量将丢失更多;气体探测器阻止本领较小,两个 PPAC 只相当于或小于 60  $\mu\text{m}$  的硅,其能量沉积分别为初始能量的 0.8%、1.1%、1.3% 和 2.1%.固体探测器能散歧离大,在 600  $\mu\text{m}$  硅中能量歧离分别为 0.5、0.8、1.2 和 3.2 MeV.使得用磁刚度测得的能量值变得可能无意义(测量精度约 1 MeV),而气体探测器能散歧离较小,分别为 0.14、0.22、0.31 和 0.74 MeV.至于粒子的角度歧离,固体探测器大于气体探测器,在 600  $\mu\text{m}$  硅中角度歧离分别为 0.64°、0.64°、0.63° 和 0.56°,而在气体探测器中,分别为 0.17°、0.17° 和 0.15°.

600  $\mu\text{m}$  的硅对次级束的作用与放置在附近的厚靶相当,很难分出产物是与靶反应还是与硅反应产生的.使用薄靶时,与靶反应的产物反而会淹没在与硅作用产物的本底中.

固体探测器存在强的粒子对晶格的损伤,约 2.5 万元的位置灵敏硅经过两次实验就可能报废,而气体探测器相对来说是非常廉价的.它能经受的粒子流强远高于硅探测器,灵敏面积也可以做得很大,而位置灵敏硅最大仅为 4 cm× 4 cm.以上诸多因素使得我们选择气体探测器 PPAC 或气体多丝正比室.

在  $C_1$ 、 $C_2$  处,计划各用位置分辨为 1 mm 和灵敏面积为 18 cm× 18 cm 的 PPAC,使用现有的真空管线设备.非焦平面的束流管线由图 1 装置代替,其中 PPAC 的灵敏面积为 10 cm× 40 cm,  $x$  方向(40 cm)的分辨为 1 mm,  $y$  方向的分辨为 2 mm.由于要保证输运线的高真空度,拟用两个分子泵作一真空陷阱,以补偿气体探测器的渗气和漏气.PPAC 可灵活的插入和退出束流输运的位置.

取弹性散射  $P(X, X')P'$  为研究特例:

(1) 目标: 测量弹性散射截面  $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, E)$ , 确定核作用势  $V(r) \rightarrow$  核物质分布  $\rho(r)$ .

(2) 次级束流线的前半部分用于选择放射性同位素. PPAC1( $C_1$ ) 确定次级束粒子入射能量, PPAC2 确定粒子入射角  $\theta_1$ 、 $\varphi_1$ .

(3)  $T_2$  处放置次级靶.

(4) 次级束流线的后半部分: 分析次级反应产物, PPAC3 确定粒子散射后出射角  $\theta_2$ 、 $\varphi_2$ , PPAC4( $C_2$ ) 确定粒子出射能量.

(5) 初级束在靶上强聚焦  $\rightarrow$  次级靶斑为点.

(6) 散射角

$$\theta_{\text{scatt}} = \sqrt{(\theta_1 - \theta_2)^2 + (\varphi_1 - \varphi_2)^2},$$

$$\theta_{\text{max}} = \pm 5^\circ (\pm 3^\circ).$$

### 5 磁谱探测系统

从某种角度看, RIBLL 本身就是一个很好的磁谱分析系统,它有很高的粒子分辨能力( $Z/\Delta Z \geq 200$ ,  $A/\Delta A \geq 100$ ),有较长飞行距离.但是它的几何接收度和动量接收度非常有限,可以表示为

$$W = B\rho \frac{Q}{Av} = \text{常数},$$

$B\rho$  为磁刚度,  $Q$  为电荷,  $A$  为质量数,  $v$  为粒子速度.只有满足  $W$  为某一常数(在  $W \pm \delta$  范围内,  $\delta$  为一小量)的粒子才能传输到焦点,即它对荷质比和速度有严格的选择.如

果在输运线上存在降能的设备(降能片和探测器等),不同核的电荷和能量损失就不一样,速度的改变也不一样.经过再一次的选择,束流中只存在一种或少数几种同位素.而广义的磁谱分析装置具有较大的  $W$  动态范围,在消色散的同时能分析各种粒子,有非常大的几何接收度,从而能分析出反应中的许多产物.而 RIBLL 没有这样的动态范围,除弹性散射和非弹性散射、单核子转移反应之外,对碎裂和多核子参与的反应就无能为力了.

放射性次级束都是远离稳定线核,  $\beta$  衰变成为主要的衰变道,核磁共振现象很容易通过  $\beta$  衰变表现出来.近年来,  $\beta$  衰变核磁共振不仅成为研究放射性次级束核本身的工具,而且利用放射性次级束,它还成为研究材料结构性质的工具.这种核磁共振也需要一个强的二极磁铁.后面将着重分析二极磁铁和相关设备的物理用途.

### 5.1 磁谱探测系统的组成

RIBLL 磁谱探测系统(如图 2)由一个二极磁铁和相关真空腔体组成.磁场强度要求达到 0.2~ 1.0 T,磁铁的横截面面积为 70 cm× 70 cm,磁铁两极间距离为 25 cm.配备一个 D 型真空盒.利用磁场和空间漂移分离次级束主束和各种次级反应产物.  $\beta$  衰变核磁共振一类实验仅用二极磁铁,这时次级束

需接收并阻止在磁场中心的吸收片中,这类实验是在大气中进行的.

一台核磁共振仪的高频设备是其最主要的辅助设备,要求高频频率可以调制.

### 5.2 电磁矩的测量

现有的 HIRFL+ RIBLL 的条件,用 100 MeV/u 以下的原始束流来研究  $A < 70$  的许多放射性核的电磁矩是可能的.

采用  $\beta$  衰变核磁共振测量次级束核对高频电磁波的共振吸收时,核方向的改变导致  $\beta$  衰变粒子发射取向的改变,测量对象是  $\beta$  射线,只要次级放射性核数目大于 10 000 个,测量就可以进行.而  $\beta$  衰变核磁共振却需要极化粒子,如果使用极化束将可以突出共振频率峰,使测量更加容易.极化粒子的极化方向与靶和原始束流夹角有关,也与次级束的能量(动量)有关. RIBLL 在初级靶前安装的入射束流方向调制器(Beam swinger)可以方便地产生和选择所需要的几何极化束流.

极化束粒子的  $\beta$  射线由上下两组计数器记录,高频对吸收片中次级束核的电磁扰动使次级束粒子方向改变.极化粒子的  $\beta$  射线的角分布为

$$W_{\beta}(\theta) \cong 1 + AP \cos \theta,$$

$A$  为常数,  $P$  为极化度.上下计数器的计数比为

$$\frac{U}{D} = \frac{1 + AP}{1 - AP} \approx 1 + 2AP.$$

当电磁波的共振频率  $\nu = \nu_1$  时,放射性核的自旋发生反转,即

$$\frac{U}{D} = \frac{1 - AP}{1 + AP} \approx 1 - 2AP.$$

此时,

$$g = \frac{h\nu}{\mu_N B_0},$$

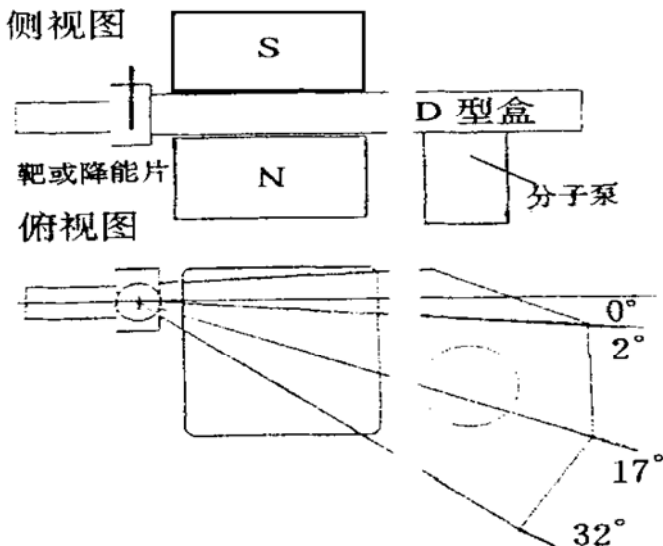


图 2 磁谱系统示意图

其中,  $B_0$  为磁场强度,  $\mu_N$  为核磁矩,  $\omega$  为共振频率,  $g$  为核的  $g$  因子,  $h$  为谱朗克常数.

目前已经测量了一批核的  $g$  因子, 但仍然有更多的核, 特别是丰质子核的研究无人问津. 值得一提的是, 日本人在测量电四极矩时发现, 这种  $\beta$  衰变核磁共振测量频率与衰变核外的电性环境有关, 从而用新材料作成次级束的吸收片, 研究新材料的结构. 他们认为, 这将是与核磁共振、穆斯保尔谱学一样的核技术, 在某些方面比其它核技术更胜一筹.

### 5.3 天体核反应的库仑激发碎裂实验

天体核反应中, 物质合成反应大都在亚位垒或近位垒的能量下进行的, 而且有放射性核参与, 直接测量是非常困难的. 利用细致平衡原理可以研究逆反应截面, 用库仑激发碎裂, 特别是放射性核库仑碎裂对低能融合过程的模拟是非常有效的, 因为库仑激发有很大的截面, 对较弱的次级束流是有效的.

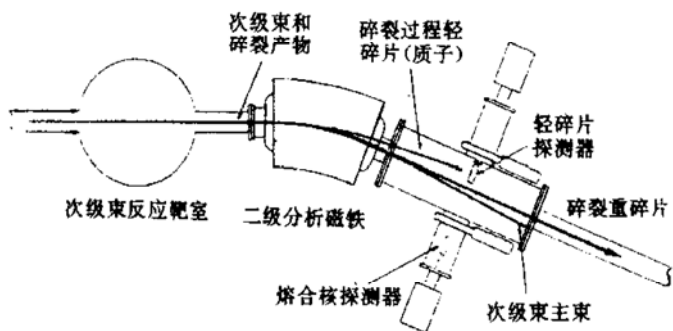


图 3 库仑裂解天体核反应典型实验装置图

碎裂、直接转移反应都可以广泛利用磁谱仪把原始束和各种次级反应产物分开(如图 3), 从而得到精细的实验结果. 也可以利用核作用强度大, 造成对出射核的反冲较大, 在擦边角附近或擦边角以外进行测量. 而库仑作用对测量核的反冲较小, 反应产物仍基本按原始束的方向运动, 这只能利用磁谱把原始束流与反应产物分开. 天体核反应的库仑激发碎裂要求对碎裂激发核的激发谱进行分析, 对碎裂产物进行关联测量, 对出射的相对能量和动量进行精细测量, 这就要求出射产物在空间位置上分开, 同时用不同的探

测器进行分析测量.

## 6 奇异衰变的 $4\pi$ 探测装置

放射性次级束把通常束流推向丰中子或丰质子一侧, 由于远离  $\beta$  稳定线,  $\beta$  放射性衰变成为最可能的一种衰变模式. 一些核的  $\beta$  衰变  $Q$  值特别大,  $\beta$  衰变后的余核处于很高的激发态, 继而发生粒子衰变, 即奇异衰变. 这需要进行  $\beta$  与粒子符合测量, 并要求粒子在出射过程中尽量减少能量损失.

这类产物可以直接在 RIBLL 上用放射性束流去产生并分离, 用带电粒子谱学装置进行测量.

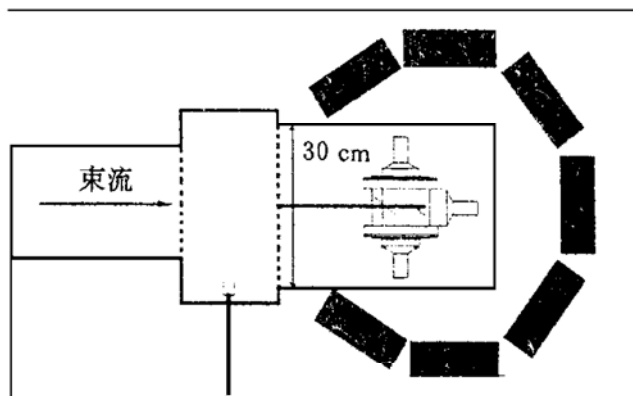


图 4 奇异衰变的  $4\pi$  探测装置

次级束的奇异衰变核或分离的融合产物核的数目非常少, 自然需要全粒子探测, 有必要作一个精巧的  $4\pi$  探测装置(见图 4).

### 6.1 探测系统结构

小型  $4\pi$  探测装置中心部分是由 5 块大面积位置灵敏半导体探测器(厚度  $300 \mu\text{m}$ ) 围成的  $47 \text{ mm} \times 47 \text{ mm} \times 47 \text{ mm}$  的立方体, 在位置灵敏半导体探测器后, 接 5 块 CsI(Tl) 闪烁体探测器, 闪烁体信号由光电倍增管引出. 阻止片由两条  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$  的金属条固定在该装置的中心区.

探测器封装在一个直径为  $30 \text{ cm}$ 、壁厚为  $4 \text{ mm}$  的钢筒中央, 这里采用薄材料是为了减少壁材料对出射中子的能量阻止. 钢筒外面由大量尺寸为  $5 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  的塑料闪烁体探测器围成, 也可以是空间距离

较远的塑料闪烁体围墙. 必要时钢筒外面可以放置多个  $\gamma$  探头.

本装置可用来进行各种符合测量:  $\beta$  延发质子、 $\alpha$  粒子测量(丰质子核);  $\beta$  粒子、带电粒子(质子、 $\alpha$  粒子), 必要时加入  $\gamma$  等多参数符合测量;  $\beta$  延发中子、D、T 粒子发射测量(丰质子核);  $\beta$  粒子、D、T 粒子、中子多参数符合测量; 类熔合余核粒子谱和  $\gamma$  谱测量; 蒸发带电粒子、蒸发中子符合, 或蒸发带电粒子与  $\gamma$  谱测量.

## 6.2 $\beta$ 延发粒子衰变

作为一种共性, 远离  $\beta$  稳定线核(特别是滴线核)的  $\beta$  延发粒子衰变已经成为研究该不稳定核及其子核的组态和能级结构、自旋宇称的好工具. 下面通过  $^{11}\text{Li}$  的  $\beta$  延发中子发射来说明这一类研究的特征<sup>[21]</sup>.  $^{11}\text{Li}$  是一个有中子晕结构的滴线核, 它的  $\beta$  衰变  $Q$  值为 20 MeV, 而子核的分离能( $S_n = 1$  MeV)非常小.  $Q_{\beta} \gg S_n$  说明  $\beta$  延发中子发射是主要的衰变道.  $\beta$  衰变到子核  $^{11}\text{Be}$  的激发态, 中子发射的子核仍可能在  $^{10}\text{Be}$  的激发态,  $^{11}\text{Be}$ 、 $^{10}\text{Be}$  都可能发射  $\gamma$  射线, 进行  $\beta$ -n- $\gamma$  三重关联测量是最有意义的. 实验使用日本 RIPS 的次级束, 一个中子探测阵列( $\epsilon = 20\%$ ,  $\Omega = 10\%$ )测量高能中子( $E_n > 1$  MeV), 另一个中子探测阵列( $\epsilon = 40\%$ ,  $\Omega = 5\%$ )测量低能中子( $30$  keV  $< E_n < 1$  MeV).  $\beta$  探测效率  $\Omega = 40\%$ .  $\gamma$  射线由  $\epsilon = 0.6\%$  的 NaI(Tl) 和  $\epsilon = 0.3\%$  的 Ge 探测器记录. 测量了中子的飞行时间谱, 并用粒子与  $\gamma$  关联确定单能中子发射的初态能级和子核的末态能级, 还确定了各衰变道的分支比.

本装置除了测量丰中子核外, 大量丰质子核的  $\beta$  延发衰变研究已成为我们关注的焦点, 而丰质子核  $\beta$  延发衰变主要出射的是带电粒子, 测量手段要比测量中子容易.

## 6.3 天体核反应共振峰的测量

$\beta$  延发粒子发射是寻找天体核反应共振峰的极佳手段, 利用粒子发射过程研究粒子

被俘获的几率. 粒子是从母核的激发态出射的, 激发态粒子衰变的逆过程对应于合成反应的共振吸收. 现今放射性核的天体核数据是从稳定核和高能反应推到不稳定核和天体核反应的低能, 这种类推对平滑的  $S_{17}$  因子也许有一定的道理, 但对位垒附近的共振反应是绝对不可能的, 因为这种共振反应对应相关核的结构性质, 往往这种性质是不清楚的. 下面列举了天体核反应研究的 3 种方法和被研究的反应与哪些天体核反应有关.

(1) 直接测量  $\sigma(E)$

$^8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B} \Leftrightarrow$  Inhomogenous, Big Bang, Nucleosynthesis.

(2) 两种非直接测量

1) 在粒子发射阈附近寻找共振能级

$^{20}\text{Mg}(\beta) \rightarrow ^{20}\text{Na}^* \rightarrow ^{19}\text{Na} + p$

$^{19}\text{Na}(p, \gamma)^{20}\text{Na} \Leftrightarrow$  Hot CNO cycle, NeNa cycle.

$^{19}\text{C}(\beta) \rightarrow ^{19}\text{N}^* \rightarrow ^{18}\text{N} + n$

$^{18}\text{N}(n, \gamma)^{19}\text{N} \Leftrightarrow$  Inhom., Big bang.

$^{15}\text{C}(d, p)^{16}\text{C}$

$^{15}\text{C}(n, \gamma)^{16}\text{C} \Leftrightarrow$  Inhom., Big bang.

2) 库仑离解  $\Rightarrow$  逆反应截面

$^{14}\text{O} \rightarrow ^{13}\text{N} + p$

$^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O} \Leftrightarrow$  Hot CNO cycle.

$^8\text{B} \rightarrow ^7\text{Be} + p$

$^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B} \Leftrightarrow$  Solar neutrion.

$^{12}\text{N} \rightarrow ^{11}\text{C} + p$

$^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N} \Leftrightarrow$  hot pp-chain.

上面的方法中,  $\beta$  延发粒子发射在天体核反应研究中占有很重要的位置. 虽然粒子发射的激发态可以是由核反应或库仑激发产生, 但发射该粒子的激发态的寿命很短, 激发核往往在运动中就衰变了. 当核反应或库仑激发方式产生的激发核的寿命很长时, 本装置才能使用.

## 6.4 类熔合余核或类弹产物粒子衰变研究

RIBLL 本身是一个较好的磁谱系统, 可以充分利用它把要研究的核分离出来, 并注

入本系统进行粒子衰变谱、 $\gamma$  谱研究. 以前此类研究是用快化学分离、带传输和氦喷嘴等方法分离后进行测量, 其中有不少难于解决的问题. 利用 RIBLL 的粒子选择能力加这套大立体角的探测系统, 相信对核结构研究会有很大帮助.

致谢 本稿的许多细节曾得益于与靳根明研究员的讨论, 这里表示感谢. 也感谢核反应室和“百人计划”小组内各位同仁的协助和有益的讨论.

(本稿详见: <http://why.lzb.ac.cn/~imp/ribll/>)

## 参 考 文 献

- 1 Li B -A, Ko C M, Bauer W. Isospin Physics in Heavy-ion Collision at Intermediate Energies. *International Journal of Modern Physics*, 1998, E7: 147~ 229
- 2 Aoi N, Yoneda K, Miyatake H *et al.*  $\beta$ -spectroscopy of  $^{11}\text{Li}$  and  $^{14}\text{Be}$  -with a beta-n-gamma Triple Coincidence Method. *Nuclear Physics*, 1997, A616: 181C~ 188C

# Proposed Experimental Setups of RIBLL

Wu Heyu

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

**Abstract** Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL) is able to produce hundreds of radioactive ion beams, by mean of projectile fragmentation. A high performance setup for nuclear direct reaction was promoted to track the radioactive ion, and to measure its charge states, nuclear charge, mass, energy. It benefits precise experiment of both nuclear reaction and nuclear structure. An experimental magnet, composing by dipole magnet and vacuum chamber, should be used as magnetic spectrometer to separate the secondary beam and products of secondary reaction, as well as to analyze the particles and their energy. Using the magnetic field and method of  $\beta$ -decay nuclear magnetic resonance, the studies of nuclear magnetic moment, electric quadruple moment and ground state configuration of radioactive nucleus could be performed. A mini- $4\pi$  detection system, consisting of 5 large area position sensitive transmission silicon detectors ( $300\ \mu$ ) backed by CsI(Tl) (2 cm) with detection efficiency of 60%~ 70% of full space, and surrounded by an array of neutron sensitive plastic scintillator ( $5\ \text{cm} \times 15\ \text{cm} \times 15\ \text{cm}$ ) and  $\gamma$  detectors outside the vacuum, was employed to measure  $\beta$ -delayed light particle emission coincidence with  $\gamma$  and neutrons for radioactive nucleus and evaporation residues, to search exotic decay mode, such as two protons decay and  $\beta$ -delayed multi-particle emissions.

**Key words** radioactive ion beam nuclear reaction nuclear structure isospin effect

**Classifying number** 043-33、0571.22