

放射性核束(RIB)的物理前沿*

刘冠华

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 介绍了世界上主要的放射性核束装置,并对当前放射性核束物理研究的前沿方向作了评述.同时,也展望了放射性核束装置的发展趋势.

关键词 弹核碎裂 放射性核束装置 放射性核束物理

分类号 TL8

1 RIB 的重要意义

多年以来,原子核物理的研究一直局限于核素图上 β 稳定线及其附近的核,主要是通过稳定核与稳定核之间的反应来进行. RIB 的产生为远离 β 稳定线核素的研究提供了可能. RIB 就是具有一定衰变寿命的不稳定核构成的束流,它为在同位旋自由度上研究原子核的结构及性质提供了基本条件,同时也给核科学的应用带来了广阔的前景. 这是核物理研究的又一里程碑.

RIB 为核物理研究的诸多前沿领域提供了新的工具,开拓了广阔的前景. 放射性奇异核的结构及其衰变过程的研究,将检验和发展现有的原子核模型;对 RIB 引起的核反应机制的探索,将给出核反应过程对同位旋自由度的系统变化趋势,以检验和拓广现有的核反应理论. 中子物质的研究是极端条件下核性质和天体物理领域的重要前沿之一,而 RIB 提供了研究中子物质的唯一方法. 中子晕核的 RIB 引起的熔合反应的研究,将可能为超重元素的合成开辟新的途径. 滴线附近的奇异核的 β 延发粒子发射及中高能 RIB 的电磁解离过程的研究,将为宇宙的生成及演化理论提供大量最基本的数据. RIB 物理已成为核物理研究的一个重要的前沿领域,世界各国高度重视性能先进的 RIB 装置的研制,并把其物理列为发展核物理研究最重

要的方向之一.

2 RIB 的发展历史

自 50 年代以来,重离子束开始应用于核物理、原子物理、固体物理、化学、生物和医学等领域. 在核物理领域,重离子开辟了极端条件下原子核研究的新途径,如高激发热核的产生、超铀元素的合成、高自旋态原子核的生成等. 一些新的研究课题,如高电荷态离子的产生、束箔谱学和离子注入等,也成为引人注目的研究方向. 但是很长时间以来,重离子束流都是通过对地球上存在的稳定同位素进行加速而获得的,因而可以利用的重离子束流种类十分有限,基本上是位于核素图上 β 稳定线的核素. 这样,要对核性质随质量、寿命和自旋的变化进行系统的研究是不可能的.

RIB 的应用始于 80 年代中期. 随着加速器技术的发展,70 年代中期可以获得高能重离子束流. 其后不久,发现了弹核碎裂反应中可以产生多种不稳定核,其中某些核素的寿命很短,并且这些产物以接近于束流的速度向前发射. 1985 年,弹核碎裂反应实验首次在 LBL 的 Bevalac 重离子加速器上进行,以产生可被作为次级束流使用的 RIB. 该方法很快就被公认为是产生 RIB 的最简单有效的方法. 此外,世界上许多国家的重离子核物理研究机构也都建造了基于弹核碎裂反应机制的 RIB 装置,如美国 MSU 的 A1200,法

国 GANIL 的 LISE, 德国 GSI 的 FRS, 日本 RIKEN 的 RIPS. 在比利时, 基于同位素分离与后加速的 RIB 装置也已建成. RIB 物理的研究随着这些装置的建造及使用而得到了迅速发展.

3 RIB 的产生方法

产生 RIB 的方法主要有两种: 弹核碎裂 (PF: Projectile Fragmentation) 方法和在线同位素分离 (ISOL: Isotope Separation On-line) 方法. 在 ISOL 方法中, 使用高能量、高强度的轻离子束流轰击厚靶以产生放射性同位素, 这些放射性同位素在靶-离子源中热化后用扩散法引出, 然后电离, 最后被加速到所需的能量. ISOL 方法可以得到较高流强和较低能散的低能 RIB, 但只适用于寿命较长的放射性核素. 在 PF 方法中, 类弹碎片产物通过高能或中能重离子的弹核碎裂反应产生, 以接近于弹核的速度向前发射, 所需的放射性核素经分离后直接传输到实验区域, 作为 RIB 用于进一步的实验研究. PF 方法可以得到寿命很短 ($\sim \mu\text{s}$ 量级) 的放射性核素的核束, 并且不受核素化学性质的影响. 下面, 对这两种产生 RIB 的方法作一比较.

1) ISOL 方法中离子源的离子释放时间通常为 1 秒或更长, 因而它只适用于长寿命的放射性核素; 而 PF 方法则可得到寿命很短的 RIB, 它是提供位于滴线附近核素的有效途径.

2) ISOL 方法所得到的 RIB 的能量依赖于后加速器, 一般在库仑位垒附近, 不高于 10MeV/u ; 而 PF 方法可以获得较高能量 (中、高能区) 的 RIB, 并且可以通过减速来获得低能的 RIB, 以满足某些实验的特殊要求.

3) ISOL 方法可以得到较高流强、较低能散的低能 RIB; 而 PF 方法产生的 RIB 流强较低, 能散较高.

通过比较可以看出, ISOL 和 PF 这两种方法各具特点. PF 方法可产生和研究具有很

短寿命的多种远离稳定线核, 特别是滴线核, 并具有低放射性本底和操作简便可靠的优点, 而 ISOL 方法可以获得较高流强、较低能散的低能 RIB. 在核物理前沿——滴线附近非稳定核的研究中, PF 方法更为优越, 在以同位旋为变量的核反应和核结构研究中, PF 方法独具优势.

4 世界上主要的 RIB 装置

目前世界上主要的 RIB 装置有: 美国 MSU 的 A1200, 法国 GANIL 的 LISE, 德国 GSI 的 FRS 和日本 RIKEN 的 RIPS. 这几台装置采用的都是 PF 方法. 美国 MSU 的 A1200 基于 K1200 回旋加速器, 法国 GANIL 的 LISE 基于 CSS2 回旋加速器, 德国 GSI 的 FRS 基于 SIS 同步辐射加速器, 日本 RIKEN 的 RIPS 基于 RRC 回旋加速器. 在这几台加速器上, 用于 RIB 实验的束流时间占总束流时间的百分比分别为: MSU 为 50%, GANIL 为 25%, GSI 为 30%, RIKEN 为 60%. 下面对这几台 RIB 装置的特点作一评述.

MSU 的 A1200 可以提供多种轻核的 RIB, 它独特的设计使得多个大型探测设备可以在放射性束流线上使用. 这些探测设备包括 4π 带电粒子探测器阵列、92 英寸多用途散射室、 4π 低能阈碎片探测系统、大体积 4π 中子多重性探测器、高分辨超导磁谱仪.

GANIL 的 LISE 可以得到多种轻核同位素的 RIB, 但对于丰中子核素, RIB 的能量受到最大磁刚度的限制. CSS2 回旋加速器的最高能量有限, 因而仅能得到 $A \leq 60$ 的 RIB.

GSI 的装置可以提供高能重离子束流, 并且对很重的离子具有较好的分离本领. 由于能量足够高, 可对所有的离子实现全剥离, 因而对最重元素的同位素也能很好地分离. 但初始束流强度受到 SIS 同步辐射加速器的空间电荷效应的限制仅为 $\sim 6 \times 10^{10}$ pps, 这

也限制了 RIB 的强度. FRS 的接收度有限, 仅适用于高能束流, 而对低中能束流则不能很好地匹配.

RIKEN 的 RIPS 是目前强度最高的 RIB 装置, 但由于受 RRC 回旋加速器能量的限制, 对于 $A < 20$ 的束流能量只达到约 130 MeV/u, 只能产生较轻的 RIB ($A \approx 40$).

目前为止, 大部分 RIB 物理的研究工作都集中于这几台装置上. 为了进一步拓宽 RIB 物理的研究领域, 已分别对这几台装置提出了改进计划, 有些将很快付诸实施.

5 RIB 物理的前沿课题

RIB 给核物理研究带来了新的工具, 也拓宽了核物理研究的范围, 远离稳定线核特别是滴线核的核结构研究已成为核结构研究最引人注目的前沿. 在对轻奇异核的研究中, 已经作出了一些很有意义的工作, 如中子晕的发现等. RIB 物理的研究将主要集中在一些与核的奇异结构相关的核结构与核反应方向上. 下面对这些前沿课题作简要介绍.

5.1 晕核(Halo Nuclei)的发现

在 ${}^{11}\text{Li}$ 引起的反应中, 测量了反应全截面, 由此定出的 ${}^{11}\text{Li}$ 的相互作用半径比稳定线附近具有相同质量的核要大得多. 这说明, ${}^{11}\text{Li}$ 核内核子分布在较大的区域. 在实验测得的 ${}^9\text{Li}$ 碎片的横向动量分布中含有两种不同宽度的贡献, 宽的部分对应的约化动量分布宽度约为 90 MeV/c, 与稳定核相近, 窄的部分宽度则仅为 23 MeV/c, 它对应于 ${}^{11}\text{Li}$ 核内的 ${}^9\text{Li}$ 芯外有着两个松散束缚的中子. 这两个中子的密度分布存在较大的弥散, 象是 ${}^9\text{Li}$ 核芯外的晕(Halo), 因此被称为晕中子, 而 ${}^{11}\text{Li}$ 则被称为晕核. 实验测得 ${}^{11}\text{Li}$ 的晕中子的双中子结合能约为 315 keV. 在 ${}^{11}\text{Be}$ 、 ${}^{14}\text{Be}$ 等丰中子核中, 也发现了中子晕; 在 ${}^6\text{He}$ 、 ${}^8\text{He}$ 等核中, 则发现存在中子皮(NeutronSkin). 最近, 在丰质子核如 ${}^8\text{B}$ 中也观察到了质子晕(ProtonHalo)现象.

5.2 新核素的合成与鉴别

自 RIB 被使用以来, 已合成和鉴别了百余种新核素, 对其中一部分还进行了质量测量和寿命测量. 特别值得一提的是, 最近对双幻核的鉴别很有特色. 在 RIKEN 进行的 ${}^{11}\text{Li}$ 轰击 CD_2 靶的实验中, 发现了 ${}^{10}\text{He}$ 的共振态. ${}^{10}\text{He}$ 是双幻核, 也是迄今为止所发现的具有最大 N/Z 值的核. 在 GSI 和 GANIL, 同时发现了双幻核 ${}^{100}\text{Sn}$, 其半衰期被定为 $T_{1/2} = 0.66^{+0.59}_{-0.22}\text{s}$. 这些核素的发现及其性质的测量, 将对人们已有的核结构的知识给予检验, 并将对理论模型加以修正.

5.3 非稳定核的质量测量及寿命测量

非稳定核的质量测量及寿命测量能提供关于非稳定核的最基本性质的信息. 滴线附近核的质量测量是对核力中对称项和同位旋相关项最灵敏的检验. 丰中子核素的质量测量对于了解超新星的引力塌缩及中子星的内部结构至关重要. 核天体物理中为确定 r 过程的路径, 对有关的核进行寿命和 Q_β 值测量也是必不可少的. 目前这方面的测量已成为热门课题, 研究对象既包括丰中子核素, 也包括丰质子核素.

5.4 超重元素的合成

理论预言, 在 $Z=114$ 和 $N=184$ 的双幻数附近存在一个超重稳定岛, 岛上及附近的一些核可能具有相当大的稳定性, 称为超重核. 超重元素的发现是核物理工作者多年追求的目标, 而 RIB 给这个课题的研究带来新的希望. 对于丰中子晕核, 排斥芯在两核作用初期相距尚远, 熔合反应截面将会提高, 这有利于超重元素的合成. 但另一方面, 由于晕中子处于弱束缚态, 所以反应 Q 值很高, 这将导致末态激发能很高, 不利于熔合的发生. 所以, 与普通核相比, 中子晕核熔合截面的增加与否, 是目前 RIB 物理的一大热门课题.

5.5 中子结团与中子物质

自由中子结团是否存在束缚态, 是人们一直关注的课题. 若存在, 那么测定中子结团的质量将揭示纯中子物质的核结合能, 并可

能导出新的核状态方程. 中子物质仅由中子组成, 在地球上不存遮, 被认为存在于中子星中. 丰中子核素, 尤其是中子晕核的放射性核束, 为实验上研究中子物质提供了很好的机会, 因为在中子晕区域内的中子间的相互作用受质子的影响较小.

5.6 奇异核的 β 延发粒子发射

β 延发粒子发射发生在奇异核的 β 衰变之后, 对 β 衰变、 β 延发的各种粒子及退激过程中发射的 γ 进行测量, 将给非稳定核的结构研究提供重要信息. 同时, β 延发中子的测量将给核天体物理中具有重要意义的快中子俘获 r 过程中的 (n, γ) 反应提供信息. 同样, β 延发质子的测量对于辐射质子俘获 rp 过程中的 (p, γ) 反应的研究具有重要意义. 目前这方面的实验研究主要集中于轻的奇异核上, 如 ^{19}C 、 ^{14}Be 、 ^{20}Mg 等.

5.7 中高能 RIB 的电磁解离

中高能 RIB 的电磁解离 (EMD) 对了解宇宙的形成及演化具有重要意义, 它是一种测量某些关键反应道反应截面的非直接测量方法. 比如, 实验上测得 $^{14}\text{O} \rightarrow ^{13}\text{N} + p$ 的 EMD 截面后, 可以通过细致平衡原理来反推 $^{13}\text{N} + p \rightarrow ^{14}\text{O} + \gamma$ 反应道的截面, 而这一反应道对于研究核天体物理中的 rp 过程极为重要. 利用中高能 RIB 的电磁解离来进行核天体物理的研究的优点在于: (1) 可以使用厚靶; (2) EMD 截面在 高能时占主导地位; (3) 测量的是带电粒子而非 γ .

目前这一方面的研究主要集中于轻丰中子核的电磁解离.

5.8 极化 RIB 的生成及应用

在 RIKEN, 发展了一套可以获得极化 RIB 的方法. 碎片的极化产生于弹核碎裂过程, 极化度依赖于碎片的动量分布. 已用极化 RIB 测量了一些轻丰中子核的磁矩和电四极矩, 一部分实验结果如下:

$$^{14}\text{B}(2^-) \quad \mu = 1.185 \pm 0.007 \text{nm}$$

$$^{15}\text{B}(3/2^-) \quad \mu = 2.657 \pm 0.018 \text{nm}$$

$$^{17}\text{B}(3/2^-) \quad \mu = 2.53 \pm 0.02 \text{nm}$$

$$^{17}\text{N}(1/2^-) \quad \mu = 0.352 \pm 0.001 \text{nm}$$

$$^{21}\text{F}(5/2^+) \quad \mu = 3.931 \pm 0.029 \text{nm}$$

$$^{14}\text{B}(2^-) \quad Q = 29.84 \pm 0.75 \text{mb}$$

$$^{15}\text{B}(3/2^-) \quad Q = 38.01 \pm 1.08 \text{mb}$$

极化 RIB 为奇异核性质的研究提供了新的工具, 它可以测量用其它方法无法测得的奇异核的核数据, 而这些核数据是表征核性质的重要物理量. 比如电四极矩对核内质子的分布十分灵敏, 通过对奇异核电四极矩的测量可以知道核内电荷分布的尺寸及各向异性, 从而了解核内质子的空间分布.

5.9 高自旋同质异能态束流 (HSIB) 的产生及应用

RIKEN 发展了一种利用 HSIB 的新实验技术. 高自旋同质异能态通过逆运动学的熔合蒸发反应生成, 经分离、选择后形成 HSIB. ^{174}Hf 核的 $K^\pi = 8^-$ 的同质异能态束流已被成功地应用于库仑激发实验, 由实验给出的 $E2$ 跃迁强度 $B(E2; 8^- \rightarrow 9^-)$ 为 $2 \pm 1e^2 \text{b}^2$. 可用 HSIB 的库仑激发实验直接测量同质异能态的 $B(E2)$ 值和电四极矩, 这些物理量能帮助人们了解核波函数的形式. 下一步将利用 HSIB 来进行次级熔合反应, 以达到具有更高自旋的激发态, 从而更好地研究核结构及性质.

5.10 新的巨共振模式

丰中子核中中子晕或中子皮的存在导致新的共振模式的出现. 由于质子和中子的分布不同, 它们的激发方式也应不同. 在丰中子核中, 观测到了软巨共振模式和中子模式, 与之对应的激发能比普通的共振激发能要低很多, 它可提供关于较低密度时的核力及中子物质的不可压缩性的信息. 这方面的研究正越来越受到重视.

5.11 RIB 引起的直接反应

RIB 引起的反应中同位旋和反应 Q 值的变化范围较大, 对这些反应进行研究可能会揭示出一些新的物理现象. 弹性散射对研究核相互作用的光学模型很重要, RIB 的弹性散射可以用来研究光学势对同位旋的依赖

关系,也可研究奇异核内的核子密度分布.非弹性散射适合于远离稳定线核的激发态和共振态.单核子转移反应可用来研究同位素单粒子态随中子数的变化,双核子转移反应可用来研究核子间的对关联和多步反应中的反应机制.电荷交换反应可系统地研究同量异位素相似态和 GT 态对中子数目的依赖关系,并可确定相似态在中子晕核中是否存在.

5.12 高能重离子的弹核裂变

高能重离子的弹核裂变最先在 GSI 得到实验认证.碎片的产生来自多种机制的贡献,当入射的相对论重离子为 U 时,裂变的贡献变得重要.实验中 750MeV/u 的 ^{238}U 弹核裂变被用来产生丰中子新核素,观测到了 40 余种由裂变产生的新核素.弹核裂变将成为研究丰中子裂变碎片的有力工具,它为中重质量 RIB 的生成提供了新的途径.

6 RIB 装置的发展趋势

RIB 开辟了崭新的研究领域,人们从中获得了许多新的知识.如丰中子晕核的发现,滴线附近的非稳定核性质的奇异性等.但到目前为止,RIB 物理的研究工作仍集中于轻核区域.为了打破 RIB 种类的限制,许多实验室都提出了对现有装置的改进方案.这里介绍有代表性的几个建议或建设中的 RIB 装置.其中,美国 MSU 的 A1900、德国 GSI 的 BRE NDA、日本 RIKEN 的 RIB Factory、以及俄罗斯 DUBNA 的 COMBAS 均采用 PF 方法产生 RIB,而法国 GANIL 的 SPIRAL 则采用 ISOL 方法,使用的初级束为强流中能重离子束流.

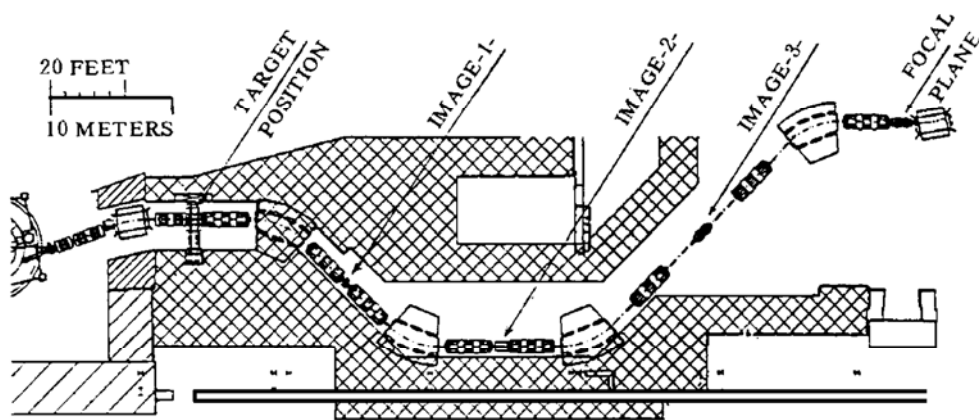


图 1 美国 MSU 建议的 A1900RIB 装置

MSU 计划把现有的 K500 和 K1200 回旋加速器耦合组成 K500 \otimes K1200 系统, K500 对离子进行初步的加速,然后通过有效的单圈引出得到高强度的低电荷态束流.在注入到 K1200 后,进一步剥离束流并得到加速.这样,由加速器引出的稳定核束流的强度将比改进前提高很多.基于新的 K500 \otimes K1200 加速器系统思路,又提出了一个新的 RIB 装置 A1900(见图 1),它的接收度和磁刚度都好于现有的 A1200.预计 A1900 能提供更重的放射性核素的核束,对轻的滴线附

近的非稳定核, A1900 的 RIB 强度将比 A1200 的高出 2~3 个量级.

GANIL 在回旋加速器 CSS2 的出口处增加了一个使用超导线圈透镜的强流次级离子源 SISSI,它的第一个线圈用于对快速移动靶上的束流进行强聚焦,第二个线圈用于增大对反应产物的角度接收范围. SISSI 能较大地提高束流线的传输效率,使 RIB 的强度增加约 50 倍. GANIL 还将建造一台 ISOL 型的 RIB 装置 SPIRAL(见图 2),利用从 He 到 Ar 的强流重离子束轰击厚靶,生成的放

放射性产物传输到一个电子回旋共振离子源 ECRIS. 自 ECRIS 引出的低能 RIB 经选择后注入到 $K=265$ 的小型回旋加速器 CIME.

SPIRAL 和 LISE 将生成从低能到中能的各种 RIB, 可以满足不同的物理实验的需要.

GANIL 的 RIB 装置将从现有的 FRS 改进

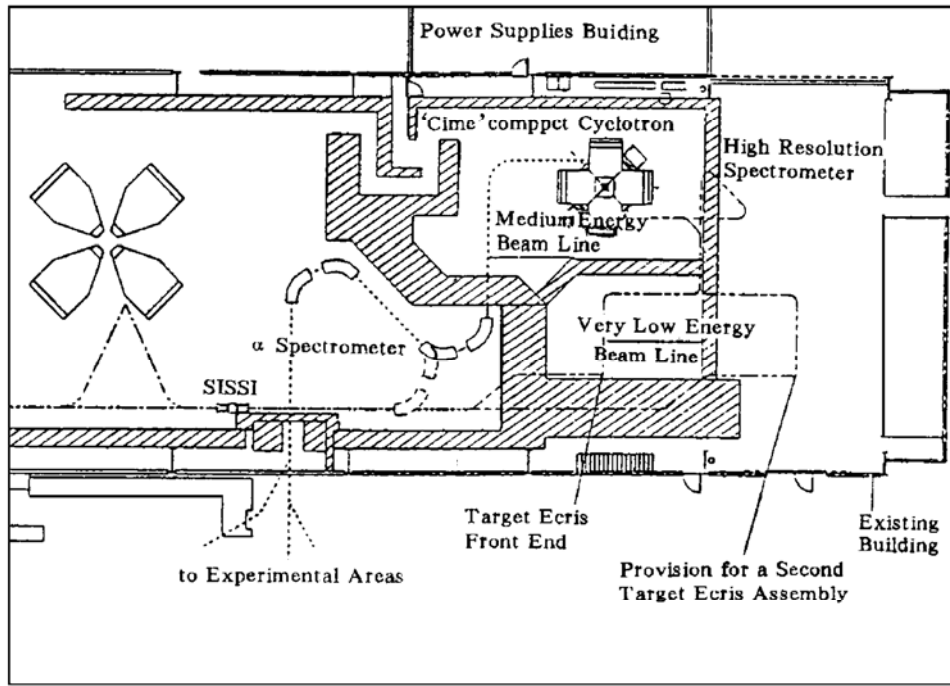


图 2 法国 GANIL 的 ISOL 型 RIB 装置 SPIRAL

为以 FRS 为中心的 BRENDA. BRENDA 将 FRS 和电子冷却存储环 ESR 组合起来, RIB 经 FRS 选择后注入 ESR, 然后引出至各实验设备. 这些设备包括磁谱仪 ALADIN、大型中子探测器 LAND、介子谱仪 KAOS 及生物

物理终端. 另外, 在 FRS 和这些实验设备之间建造直通束流传输线, 由 FRS 得到的 RIB 可以不经 ESR 而直接传输到各实验设备上. BRENDA (见图 3) 将是世界上唯一能提供所有元素的单能全电离 RIB 的装置.

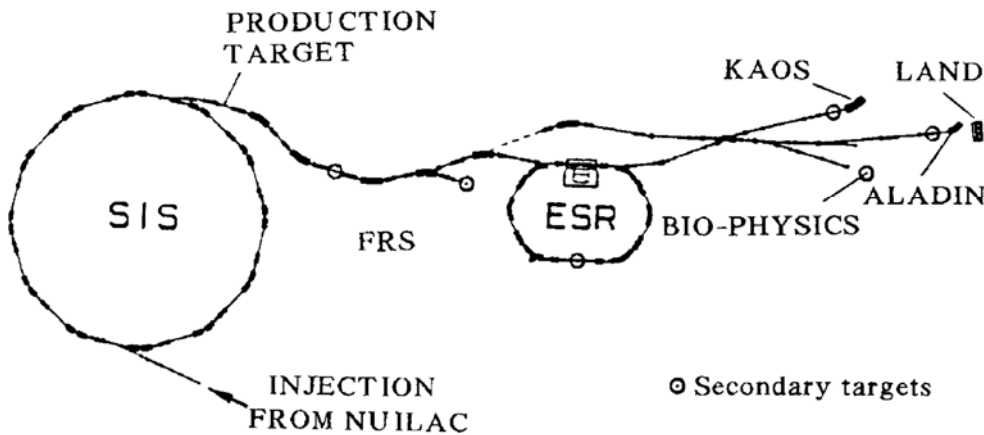


图 3 德国 GSI 的次级束流装置 BRENDA

RIKEN 则提出了一个庞大的改进计划, 称之为 RIB 工厂 (见图 4). 该计划包括在 RRC 的基础上建造一台超导回旋加速器

SRC、一台 RIB 分离装置 RIPSII、一台双存储环 MUSES 及其它实验设施. RRC 与 SRC 组合起来, 可以将最重的核加速到

150MeV/u的能量,因而可以通过 PF 方法产生重核的 RIB. 预计,RIB 工厂能产生 3000 余种 RIB,它对于轻核的 RIB 强度将比现在的 RIPS 高出约两个数量级. MUSES 可存储已被加速的电子束、分子束或结团束,它既可

实现 RIB 之间或 RIB 与这些束流之间的对撞,以提高碰撞系统的质心系能量,又可进行“追击”反应,以实现用高能束流进行低能反应的研究.

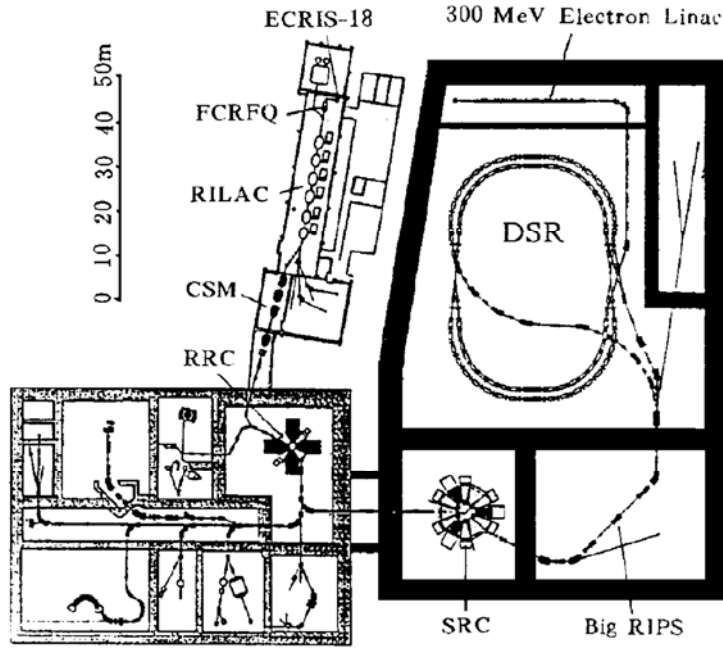


图 4 日本 RIKEN 的大型 RIB 装置 RIB 工厂

DUBNA 计划建造一台 RIB 磁分离装置 COMBAS(见图 5),它基于回旋加速器 U-400 和 U-400M. COMBAS 的立体角接收范围约为 6.4msr,最大动量接收度为 $\pm 10\%$,最大磁刚度 $B\rho=4.5\text{T}\cdot\text{m}$,分辨本领为 $R=4.36\times 10^3$. 整个次级束流线长度约为

14.5m,采用镜对称双消色差结构.其特点是在分散平面处使用微分降能器并不影响焦面的双消色差聚焦,而且束流线的第二部分可作为一个高分辨磁谱仪使用. COMBAS 可以获得高纯度的 RIB,并可进行高精度的次级束实验研究.

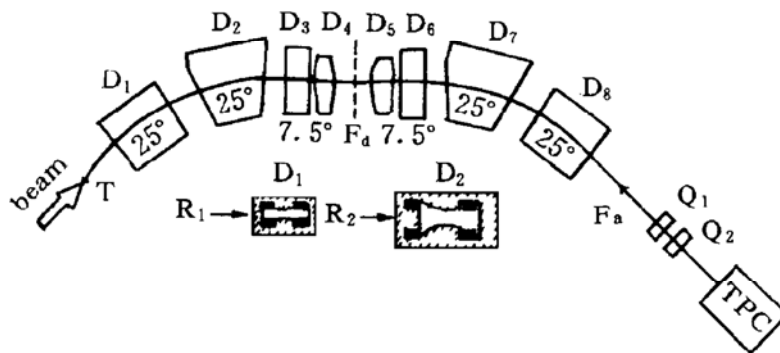


图 5 俄罗斯 DUBNA 的 RIB 装置 COMBAS

中国兰州近代物理所也将建造一台 RIB

装置 RIBLL(见图 6),它由 1 台摇摆磁铁、4

台二极磁铁和 16 台四极磁铁组成,分为反对称的两部分,每一部分均为双消色差结构,全线的总长度约 36m. RIBLL 的二极磁铁的最大磁刚度为 $4.5\text{T}\cdot\text{m}$,设计的动量接收度为 $\pm 5\%$,立体角接收度为 7msr ,分辨本领为 2×10^{-4} ,性能可与 RIPS 相比,并在某些方面

优于 RIPS. RIBLL 的特点是次级束选择性强,可得到比较纯净的次级束,并且后一部分可作为磁谱仪用于对次级反应产物进行精密测量. RIBLL 建成后,将主要提供轻质量区的 RIB,它将为在中国进行 RIB 物理的研究提供良好的条件.

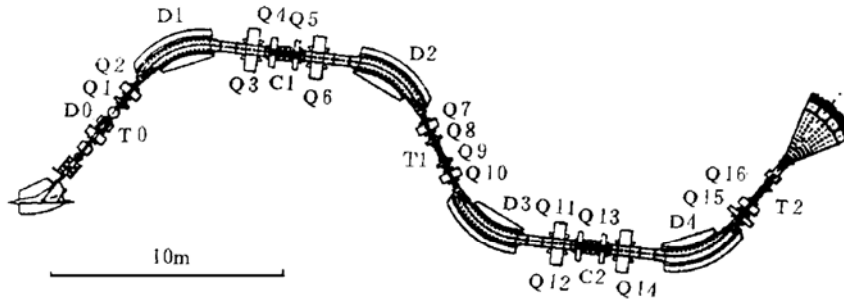


图 6 兰州 RIB 装置 RIBLL

上述这些 RIB 装置的改进或研制均将在本世纪末或下世纪初完成,它们将是下个世纪世界上主要的 RIB 装置. 毋庸置疑,RIB

的使用将拓展到所有元素的放射性核素, RIB 物理将继续是核物理研究的最重要的前沿领域之一.

Frontiers of RIB Physics

LIU Guanhua

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

Abstract Several Radioactive Ion Beam (RIB) lines are briefly introduced in this paper, and the main frontier fields of RIB physics are reviewed. In the last section, the developing trends of RIB setup are prospected.

Key Words projectile fragmentation RIB setup RIB physics