

# 兰州重离子加速器冷却储存环

罗亦孝

(中国科学院近代物理研究所  
兰州重离子加速器国家实验室)

## 一、兰州重离子加速器和 重离子物理实验及应用研究

兰州重离子加速器(HIRFL)由用作注入器的扇聚焦回旋加速器(SFC)和分离扇回旋加速器(主加速器 SSC)组成,是加速中、低能重离子束流的回旋加速器系统。图1是 HIRFL 总体示意图,HIRFL 的建成使我国回旋加速器技术的发展进入一个新的阶段。近年来,HIRFL 一系列成功的改造和发展进一步提高了加速器的运行水平,从而为重离子物理基础和应用前沿领域的研究提供了良好的实验条件,取得了一批重要成果。

### 1. 兰州重离子加速器的发展

HIRFL 自 1989 年投入运行以来,进行了一系列卓有成效的改造和发展。具有高电荷态、高流强、高可靠性和长期稳定运行等优点的 ECR 离子源的研制和改进,显著提高了束流强度,10GHz ECR 源的新的运行模式使近物所 10GHz 离子源达到世界最高水平,一台具有先进技术指标的 14.5GHz 新型 ECR 离子源正在调试之中,即将投入使用;旁路束运线的建造,使各实验探测站既可以得到 SFC+SSC 提供的直到  $100\text{MeV}/u$  的中能重离子束,又可得到直接由 SFC 提供的  $5\sim 10\text{MeV}/u$  的低能重离子束;新研制的电控矢量移相器具有连续可调、寿命长和体积小的优点;SFC 高频过渡环的改造使 SFC 频率由  $13.5\text{MHz}$  提高到  $16\text{MHz}$ ;直接成形锯齿波聚束器成形好,频带宽;ECR 源束线的改造改善了分析能力,减小了空间电荷

效应的影响,并使用两聚束器以对应 SFC 两种加速模式;此外,已实施的技术改造还包括加速器计算机分布式控制的实现,真空系统的改造,包括一级制冷机制冷和 SFC 真空度的提高,两种螺旋注入器的使用等。

HIRFL 的上述技术改造成功地提高了 HIRFL 的运行水平,其运行效率已接近国际上同类装置的平均水平。

HIRFL 上最重要的发展是放射性束流线(RIBLL)的研制,RIBLL1 和 RIBLL 都是弹核碎裂(PF)型的放射性束流线。

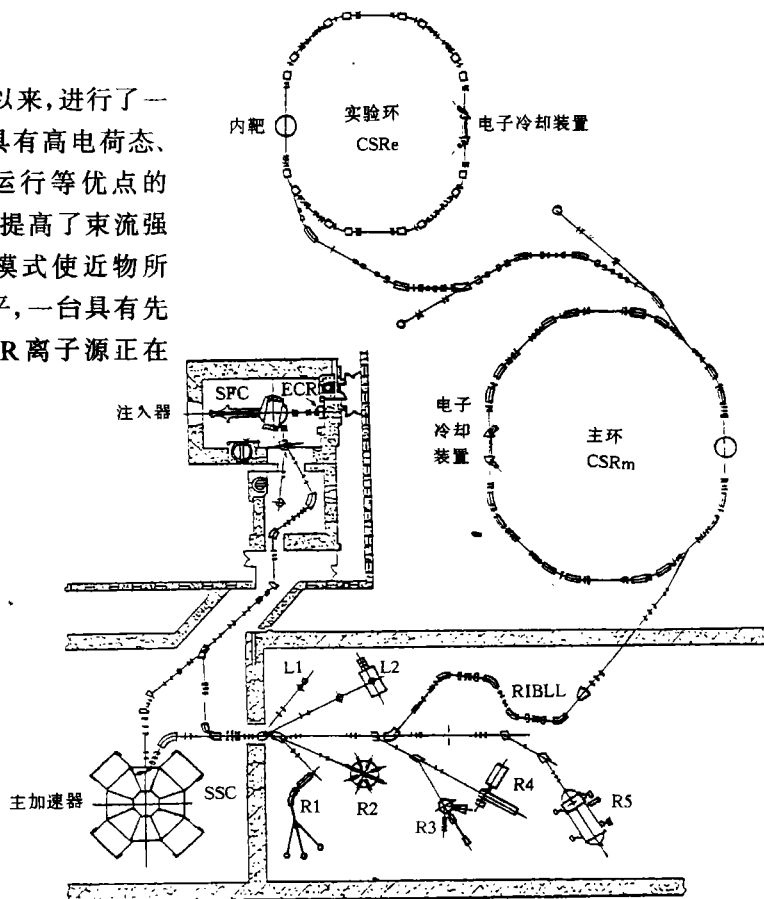


图 1 兰州重离子加速器总体示意图

RIBLL1 是一条双消色差束流线, 在 RIBLL1 上已获得了 $^{30}\text{Mg}$ ,  $^{15}\text{C}$ ,  $^{16}\text{C}$ ,  $^9\text{Li}$  和  $^6\text{He}$  等 30 余种放射性束. 最近建成的 RIBLL 全长 35 米, 由两段双消色差束流线组成 (参见图 2). RIBLL 大大增加了立体角接收度、动量接收度和  $B_p$  值, 具有先进的技术指标, 并能提供极化的

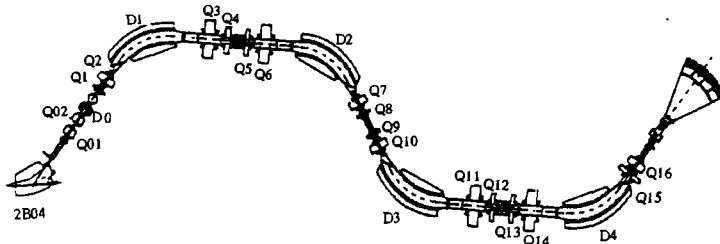


图 2 最近建成的兰州放射性束流线 (RIBLL)

放射性束流.

RIBLL 的两段双消色差束流线提高了粒子分离能力, 从而显著提高了放射性束的纯度.

此外, 第一段双消色差束流线也可以灵活地作为产生和分离放射性束的束流线独立使用, 而将第二段双消色差束流线用作具有大立体角接收度的零度谱仪, 它是远离核特别是短寿命滴线核研究的强有力的实验装置.

## 2. 重离子物理实验和应用研究的成果

在 HIRFL 和其他实验装置上开展的重离子物理和应用研究涉及三个前沿领域: 远离稳定线原子核的合成和研究; 中、低能重离子碰撞和热核性质研究; 中、低能重离子束应用研究. 上述三个前沿领域所取得的重要进展是近代物理研究所近年来主要的学科积累, 为兰州重离子加速器新的发展和重离子物理前沿实现新的突破提供了必不可少的条件.

### ① 远离稳定线原子核的合成和研究

远离稳定线原子核合成和研究正在不断取得令人瞩目的进展. 在更加远离稳定线的未知区域, 特别是滴线核区的进

一步探索已成为原子核物理最重要的前沿之一.

近物所在 HIRFL 和其他实验装置上首次合成和研究了 9 种新核素; 研究了一系列重要核素的奇异衰变性质和核结构, 建立了衰变纲图. 图 3 表示近物所远离核研究的重要进展:

在具有重要物理意义和较大技术难度的  $A > 170$  重质量丰中子区实现突破并形成了特色; 在缺中子轻质量和中重质量部分核区逼近了质子滴线; 核衰变和低位能级结构研究实现了创新;  $A \sim 130$  和  $A \sim 190$  区高自旋核结构研究也取得了一批重要成果. 具体研究

研究成果为: 在  $A > 170$  区成功地合成和研究了 6 种新核素:  $^{175}\text{Er}$ ,  $^{185}\text{Hf}$ ,  $^{186}\text{Hf}$ ,  $^{208}\text{Hg}$ ,  $^{237}\text{Th}$  和  $^{239}\text{Pa}$ . 并对它们的衰变寿命和理论计算进行了比较和分析; 在超铀缺中子区合成和研究了新核素  $^{235}\text{Am}$ ; 在缺中子稀土区  $Z = 0.743N + 11.6$  附近, 首次合成了新核素—— $\beta$  缓发质子先驱核  $^{135}\text{Gd}$  和  $^{121}\text{Ce}$ ; 在轻质量缺中子区质子滴线附近  $A = 4n + 1$ ,  $T_z = -3/2$  核系列的探索中, 成功地鉴别出新核素  $^{65}\text{Se}$  (使用在 LBL 获得的数据), 并在 HIRFL 上首次观察到人们期望已久的滴线核  $^{69}\text{Kr}$  的  $\beta$  缓发质子衰变; 在  $^{153}\text{Er}$ ,  $^{157}\text{Yb}$ ,  $^{209}\text{Fr}$ ,  $^{229}\text{Ra}$ ,  $^{129,130}\text{Ce}$  等核的衰变性质研究中, 获得

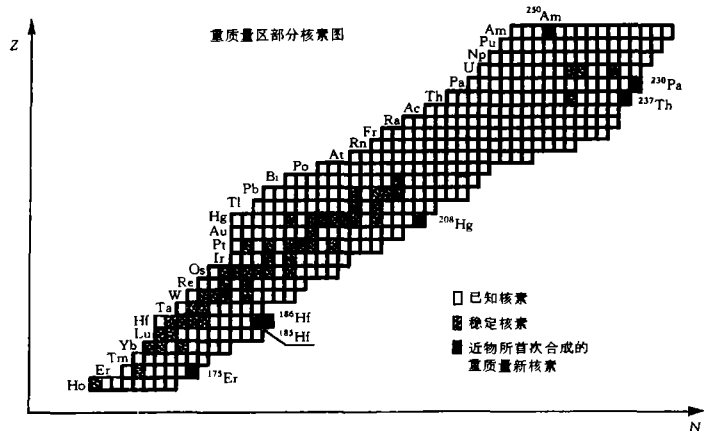


图 3 近物所在重质量区新核素合成中的重要进展

了一批关于上述远离核衰变性质和低位能级结构的重要成果.

## ②中、低能重离子物理和热核性质研究

近物所发现了轻系统中存在深部非弹性碰撞反应的实验证据,并在 $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$ 中发现大质量转移反应机制,之后,还首次发现了非完全深部非弹性碰撞这一新的反应机制。

此后,又在中能重离子碰撞复杂碎片发射,轻粒子和复杂碎片发射时标,发射源时空演化,热核限制性温度,靶余核质量产额分布等研究中取得一批重要成果。

## ③中、低能重离子束应用研究

在材料科学、生命科学及原子物理研究中取得了重要进展,包括:电子能损阈值;临界辐照剂量;等效生物材料径迹结构和能量沉积;重离子束治癌机制;辐照育种;高剥离态原子物理和在束穆斯堡尔谱学等项研究。

与此同时,原子核理论研究在高自旋核结构、重离子反应机制、热核多重碎裂、输运理论、奇异核结构、混沌产生判定等项研究中获重要进展。

## 二、重离子物理学科前沿

### 和重离子加速器发展趋势

#### 1. 原子核物理学科前沿

作为自然科学基础性研究重要的分支学科之一的原子核物理学涉及到物质结构研究的重要层次,近年来,继续获得极为迅速的发展。多次国际学术会议和有关的核科学组织的研究一致指出,在本世纪末到下一个世纪初的未来二三十年间,核物理特别是重离子物理研究的前沿将是极端条件下原子核的研究。原子核物理将沿能量、同位旋和自旋三个维度和非核自由度得到更广泛、深入的发展。

●能量(或温度、或密度)维度——高温高密条件下核物质性质的研究,包括液-气相变、介质效应以及更高能区的夸克-胶子等离子体的研究。

●同位旋 $(N-Z)/A$ 维度——多年来,传统核物理研究对象主要是稳定线和稳定线附近的原子核,使用的束流是稳定核束。引入同位旋自由度即是将核物理研究对象向远离稳

定线两边拓广,以达到最引人注目的滴线区;并在核相互作用及核物质性质研究中引入放射性束流同位旋维度(使用多种类丰中子或丰质子束流)。

●自旋维度——高自旋核结构特别是高自旋超形变和巨超形变核的研究,使用多 $\gamma$ 探头阵列以提高探测灵敏度,使用极化束和高自旋同质异能态束是重要的技术条件。

人们并一致强调原子核物理与原子物理(特别是高剥离态重离子的研究)、原子核物理与天体物理的交叉是原子核物理相关交叉学科的主要发展方向。

90年代初,美国能源部和国家自然科学基金委员会组织美国核科学顾问委员会提出了“90年代核科学”的发展规划;1996年又提出了核科学的“长远发展计划”,从更广的意义上指出了当代原子核物理研究的四个主要方向:

●核结构和动力学的研究——极端条件下的探索(自旋、温度和核稳定性新的前沿领域的研究);

●物质夸克结构的研究——建立QCD和原子核及核力的强子描述之间的桥梁;

●核物质相的研究——在中能重离子碰撞中研究液-气相变和超高能重离子碰撞,研究热密核物质-夸克胶子等离子体相变;

●基本对称性和核天体物理的研究——低、中、高能精细实验以探索标准模型(QCD和电弱相互作用)的极限。

#### 2. 重离子加速器发展趋势

与近年来原子核物理,特别是重离子物理前沿领域的研究相适应,重离子加速器技术沿三个方向发展:

①中、高能直至相对论和超高能区的重离子加速器——向更高能量的发展。除日本RIKEN、美国MSU、法国GANIL、俄罗斯DUBNA、意大利LNS和兰州的中能重离子加速器以外,德国GSI的SIS达到相对论能区,而美国BNL的RHIC则是超高能区的重离子对撞机。

②放射性束装置——多种类宽能量范围放射性束的产生和使用。放射性束装置分为两

大类别:中、高能弹核碎裂(PF)型,和在线同位素分离(ISOL)型.已建成PF型放射性束装置的有:美国LBL,MSU,法国GANIL的LISE,德国GSI的FRS,日本RIKEN的RIPS,俄罗斯DUBNA,和中国兰州IMP的RIBLL.已经或计划研制ISOL型放射性束装置的有:美国Oak Ridge,日本东大INS,法国GANIL,意大利LNS,日本KEK,欧洲中心的ISOLDE,加拿大TRIUMF,和中国原子能研究院等.

③重离子冷却储存环——高品质(低能量分散和低发射度)和高有效流强重离子束的产生和作用.德国GSI已建成第一代重离子冷却储存环,主要用于高剥离态原子物理研究,现正在改造中.日本RIKEN计划建造RIB Factory,是PF型的放射性束+储存环+对撞机结构.PF型放射性束与冷却环结合是PF型放射性束和冷却环的一种重要发展方向,可以产生高有效流强和高品质的PF型放射性束,弥补PF型的不足,而保留其优点.

### 三、兰州重离子加速器冷却储存环的设计思想和技术抉择

根据原子核物理、特别是重离子物理前沿和重离子加速器发展趋势的分析,考虑到已有的学科积累和基础,并依据未来一二十年近物所重离子物理和相关交叉学科主要物理目标的选择,经过四年认真研讨和反复论证,近物所和兰州重离子加速器国家实验室提出了建造兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)的重大科学工程计划.

#### 1. 设计思想

① 多功能和多用途——应以优异的性能价格比,兼顾并满足直到下一个世纪初的未来一二十年内我国重离子物理和相关交叉学科前沿对束流种类、能量和品质的需求;

② 同国际同类型装置相比,部分技术指标和设计特色应该具有创新性和先进性;

③ 造价和技术条件应该具有可行性.

考虑到下一个世纪重点发展放射性束物理、高剥离态重离子物理、核天体物理及相关领域应用研究的需要,HIRFL的发展计划

HIRFL-CSR将放射性束与高品质束相结合,高剥离态重离子与高品质束相结合,并适当提高束流能量.即:提供具有高品质、高有效流强和宽能量范围的多种重离子束,包括放射性束和高剥离态重离子束.

#### 2. HIRFL-CSR初步设计中的三个选择

① 使用弹核碎裂(PF)方法产生放射性束如前所述,放射性束装置可分为两大类:

##### ●中、高能弹核碎裂(PF)型放射性束装置

使用中、高能(30~100MeV/u)重离子束作为初级束打初级靶,通过周边反应,将弹核碎裂产生的远离稳定线的类弹产物经分离而获得放射性束(如图4a).类弹碎片以与弹核相近的速度在朝前方向小角度内高速前冲.重的弹核裂变具有相同特点,可用以产生裂变丰中子核束.

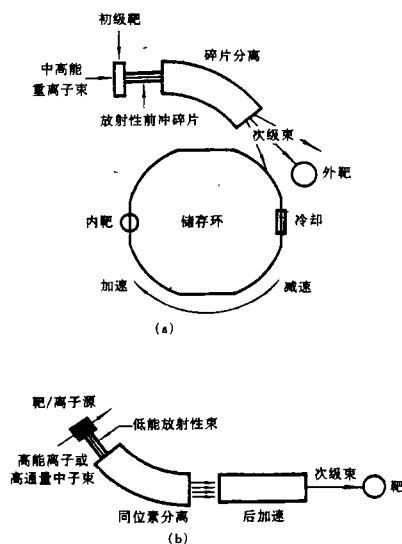


图4 产生放射性束的两种方法

(a) 弹核碎裂方法(PF)

(b) 在线同位素分离法(ISOL)

具有大的动量接收度和立体角接收度及大的磁刚度的零度谱仪(如GANIL的LISE,RIKEN的RIPS和兰州的RIBLL)接收和分离上述弹核碎裂中产生的放射性束,并根据其飞行时间 $t_{\text{TOF}}$ ,磁刚度 $B_p$ , $\Delta E$ 和 $E$ 的测量,按下式进行(A,Z)指定:

$$A/Q \sim B_{p0} \times (1 \pm \delta_p) t_{\text{TOF}}$$

$$Q \sim E \times t_{\text{TOF}} / B_{p0} (1 \pm \delta_p)$$

$$Z \sim \sqrt{\Delta E} \times t_{\text{TOF}}$$

弹核碎裂的产生和分离是在飞行中实现的,是微秒量级的快速过程,因而可以产生、分离和研究具有重要物理意义的多种丰中子和丰质子远离稳定线原子核,特别是滴线附近的短寿命原子核,还可以产生高自旋同质异能态束和极化束。PF型放射性束具有使用简便、适用于短寿命远离核的研究,以及放射性本底低等优点,已在中、高能区放射性束物理研究中发挥重要作用。其缺点是束流品质较差,入射能较低时束流流强较弱。

●在线同位素分离(ISOL)型放射性束装置使用高流强中、高能(30~1000MeV/u)轻粒子(质子或中子)或轻重离子作为初级束轰击重靶,通过重靶散裂、碎裂、裂变或(P, xnyp)等反应,产生放射性产物,这些产物经在线分离(电离和分离),并进行后加速以产生放射性核束(见图4b)。其反应产额由下式给出:

$$Y = \sigma \times \phi \times N$$

其中, $\sigma$ 为反应截面, $\phi$ 是流强, $N$ 为靶核子数。在各种初级束产生的ISOL型放射性束中,高通量中子初级束可获得最高的放射性束生成截面;对于质子初级束,能量越高,放射性束同位素分布越宽,但截面低于中子情形;轻重离子作为初级束可获得最宽的同位素分布。

ISOL型放射性束主要优点是流强、品质和纯度较高,其提供的低能放射性束在核天体物理、高自旋核结构研究等领域可有重要应用。从能区和外靶流强上说和PF型放射性束互补。然而,由于在线分离和后加速需要数十毫秒以上的时间,因而不能产生、分离和研究远离稳定线的、特别是滴线附近短寿命核素,即只能提供低同位旋束流;此外,放射性本底较高;由于分离核素的化学和物理性质的差异,靶离子源技术较为繁复。

基于HIRFL现有条件、发展可能性和未来物理目标,HIRFL-CSR选择弹核碎裂(PF)方法产生放射性束。由于HIRFL-CSR将PF型放射性束与冷却环相结合,弥补了PF型放射性束流强度较弱,品质较差的缺点,保留了适用于短寿

命远离核的产生、分离和研究等优点,即能提供高品质和高有效流强的高同位旋束流,将为未来放射性束物理前沿的研究提供优越的实验条件。

## ② HIRFL-CSR能区选择

HIRFL-CSR的能区是根据放射性束的相对产额、高剥离态重离子生成和高温高密核包括非核自由度的研究几个方面的需要,和尽可能降低造价的考虑而选定的。

PF放射性束的生成截面随初级束入射能增加而增大,大约在200MeV/u后,PF截面达反应系统的几何截面而基本保持不变,当入射能量增加到约200~300MeV/u后,PF产额只随靶厚增加而缓慢递增。因此,从有效而经济地产生放射性束考虑,重核初级束最高能量取为约300MeV/u是合理的。

要获得直至U的高剥离态重离子,必须使用多级剥离。图5表示在HIRFL的注入器SFC和主加速器SSC及CSR的主环CSRm后三次剥离以获得 $^{238}\text{U}^{90+}$ (类氦U离子)的多级剥离过程和相应的能量。经HIRFL的两级剥离后,主环CSRm将 $^{238}\text{U}$ 离子加速到250MeV/u,再经第三次剥离可获得 $^{238}\text{U}^{90+}$ 。在该能量下可获得 $^{12}\text{C}$ 到 $^{181}\text{Ta}$ 的全剥离态离子。

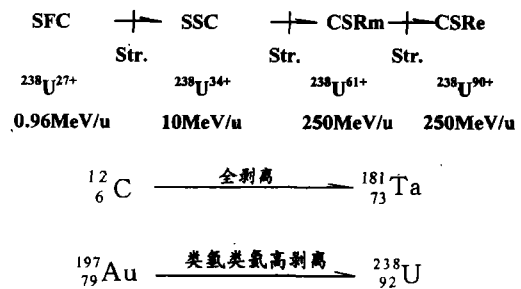


图5 在HIRFL-CSR上经多级剥离产生类氦U离子

而高温高密核及非核自由度的研究需要足够高的入射能量,核核碰撞中介子产生几率强烈依赖于入射能。但能量的增加却受到造价的限制。

综合考虑以上诸因素,将HIRFL-CSR的最高能量定为400MeV/u( $^{238}\text{U}^{72+}$ ),此时主环磁刚度为 $G = 10.64\text{T}\cdot\text{m}$ ,可获得 $Z/A = 1/2$

的离子束能量至  $900\text{MeV}/u$ ，而实验环最大磁刚度为  $G = 6.44\text{T}\cdot\text{m}$ ，可以接收  $400\text{MeV}/u$  ( $Z/A = 1/2$ ) 的离子束和  $250\text{MeV}/u$  的  $U^{90+}$  束。

③应用电子冷却以实现束流冷却、堆积和保持内靶实验中束流品质

传统的重离子加速器提供低品质重离子束流，其发射度一般高达  $10 \sim 20\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ，动量分散高达  $10^{-3}$ ，而弹核碎裂产生的放射性束品质还更差一些。HIRFL-CSR拟采用束流冷却技术冷却低品质束流，以获得动量分散和发射度大大减小的高品质束流。

除了获得高品质束流外，HIRFL-CSR进行束流冷却还有另外两个目的：一是压缩束流相空间，以实现束流堆积；二是在内靶实验中抑制束流的发射度增长，保持束流品质，减少束流损失，从而可使用循环束获得高的有效流强。

离子束流冷却是指束流六维相空间的冷却，即减小发射度和动量分散，减小束团中非理想粒子相对于理想粒子的纵向与横向偏离。

束流的冷却方法有三种：

#### ●同步辐射

由于束流作圆周运动要产生同步辐射，同步辐射会自然地冷却束流的相空间。这种方法叫自冷，适用于电子储存环或正负电子对撞机。而不适用于离子束，原因是离子束(质子，轻重离子，重离子)的同步辐射效应很微弱。

#### ●电子冷却

俄国人 Budker 于 1966 年提出的电子冷却方法适用于重离子束的冷却。其工作原理是：

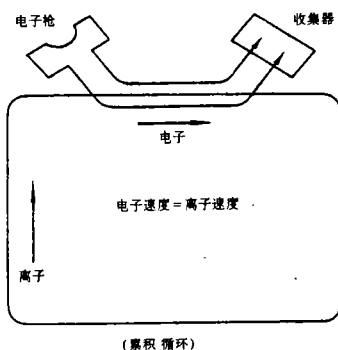


图 6 电子冷却原理示意图

电子枪将一束单色性和平行度极佳(温度低于  $0.3\text{eV}$ )的电子束注入储存环直线段，其速度与离子速度相等且同向运动，如图 6 所示。由于二者相对静止，通过离子与电子的库仑作用(弹性碰撞)，非理想离子的横向和纵向能量偏离就会被电子吸收而带走，从而达到束流相空间的冷却。这个物理过程可用热力学的观点来解释。由于非理想离子在纵向和横向的温度都远高于电子的温度，二者达到热平衡时，高温离子束就被电子束所冷却。

电子冷却要求电子束速度与离子束速度相等，但由于受到电子枪功率的限制，电子冷却方法就不适合于高能量的离子束冷却。目前冷却所用的电子枪产生的电子束能量范围为  $20 \sim 300\text{keV}$ 。因此，冷却的离子束能量范围在  $50 \sim 500\text{MeV}$  左右。

#### ●随机冷却

由法国人 Van der Moer 于 1972 年提出的随机冷却是利用一个电子学反馈系统来校正束流中单个离子的动量偏差和振荡。由于离子环的磁聚焦系统是一个超周期结构，对于入射的非理想离子(相对于中心轨道有一个位置偏离)都要围绕环的中心轨道作周期性的振荡( $\beta$ 振荡)。当离子通过拾取器，电极就对离子的位置偏离感应出一个与位置偏离量成正比的电讯号，该信号由一宽带放大器放大后，就在以下  $(1/4 + k/2)$  个  $\beta$  振荡波长  $\lambda_\beta$  的弹踢器上产生一个相应的电场，电场作用于离子产生一个反向的角向偏转。这样就可以减小振荡的振幅而削弱离子在环中的振荡。

对于一个束团，拾取器探测到的只是束团的整体偏离量——束团截面重心的偏移量(相对于中心轨道)。因此，作用到束团上的电场只是对束团中大多数离子起轨道偏离的校正作用，而对于少数离子不但没起校正作用，还有可能使其偏离更大。但总的效果还是使束流振荡减弱。这一作用反映到束流相空间上，就是使束流所占的相空间收缩，即达到相空间冷却的目的。对于某个特定的离子，电子学系统对它的作用是随机的，即有可能起校正作用，也有可

能是起偏离作用。因此,这种冷却方法被称之为随机冷却。

另外,随机冷却还校正离子的动量偏离。具有动量偏差的离子经过环中的色散元件(如偏转磁铁等)要发生色散,即产生横向偏离。这样,纵向的动量偏离就耦合成横向位置偏离,而位置偏离就可被感应而在弹踢器中得到一个角度校正。这个角度校正再耦合到纵向,即成了动量偏离的校正。这样,束流在纵向的相空间也得到了冷却。同样,动量校正对某个特定的离子也是随机的。

电子冷却和随机冷却互为补充。前者适用于细冷,而后者适用于粗冷。前者冷却速率与离子数关联微弱,而与离子能量关联很强,而后者正好相反。

考虑到 HIRFL-CSR 的能区和目前国内技术条件,选用电子冷却技术冷却束流,并拟在将来使用随机冷却。

### 3. HIRFL-CSR 的总体方案、设计特色和创新性

#### ① HIRFL-CSR 总体方案

如图 1 所示,HIRFL-CSR 由一个主环(CSRm)和一个实验环(CSRe)构成。两个电子冷却器分别位于 CSRm 和 CSRe 的直线段,使用电子冷却以冷却束流。并分别装有 RF 腔体在 CSRm 中进一步加速离子,并在 CSRe 中补偿循环束流的能量损失。为了接收 PF 型放射性束,CSRe 设计了足够大的接收度。

由现有兰州重离子加速器 HIRFL 提供的初级束流(能量  $10 \sim 100 \text{ MeV} / u$ ,流强为  $10^9 \sim 10^{12} \text{ pps}$ )注入主环,并进行射频堆积和电子冷却以进行束流累积,全环存贮的离子数可达  $10^6 \sim 10^8$  个。然后对累积的束流进一步加速达到预定能量,整个过程大约需要 7 秒钟。然后,束流由主环引出,轰击一个初级靶或穿过剥离膜,通过弹核碎裂产生放射性束或通过剥离产生高剥离态重离子束。放射性束或高剥离态重离子束被注入实验环,在实验环中进行内靶实验,或进行高精度、高灵敏度质量测量。主环引出的束流也可用于外靶实

验。

当实验环中的循环束流轰击内靶或进行质量测量时,每 7 秒钟由主环引出束流,产生放射性束或高剥离态重离子束并注入实验环,从而周期性地弥补了实验环中循环束流的损失,获得准连续束。这种运行模式可使用更厚的内靶,从而获得高达  $10^{29-25} \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$  的亮度。

#### ② HIRFL-CSR 物理实验装置

该装置由两个外靶和一个内靶、兰州谱仪、核反应谱仪和应用核科学终端组成。

##### ●兰州谱仪

兰州谱仪是在实验环上由肖特基谱仪、激光和 GAMMA 探测系统,及储存环高精度分析装置和带电粒子探测器构成的内靶实验装置。主要用于远离核核结构及精细结构研究、高离化态原子物理研究和储存环上的高精度实验研究。

##### ●核反应研究谱仪

核反应研究谱仪是由覆盖  $2\pi$  立体角的低能 ( $< 150 \text{ MeV}$ )  $\pi^+ / \pi^-$  探测器、中子探测器和  $Z < 30$  的带电粒子探测器构成的外靶实验装置。主要用于放射性束和稳定束流引起的核反应和核结构研究以及核天体物理研究。

##### ●应用核科学研究终端

应用核科学研究终端是稳定束和放射性束的外靶实验终端,由辐照、Mössbauer 系统、激光系统、剂量检测系统和射线探测器等构成。主要用于  $\mu\text{s}$  量级的快速过程研究、深度为  $0.1 \sim 100 \text{ mm}$  的固体结构研究、辐照、定位等及生命科学和癌症的治疗诊断研究。

#### ③ 主环和实验环束流储存寿命内靶实验亮度

主环 CSRm 束流的储存寿命主要取决于离子与残余气体分子、冷却电子之间的相互作用,其中包括三个因素:

- 与残余气体分子造成的单次和多次库仑散射;

- 与残余气体分子之间的电荷交换(电子俘获和电子剥离);

- 电子冷却装置中的辐射电子俘获。

计算结果表明,对于注入到 CSR 主环中的

典型的轻重离子 C - Ar, 其储存寿命主要取决于冷却装置中的辐射电子俘获过程; 对于更重的离子 Kr-U, 其寿命则取决于与残余气体分子之间的电荷交换和辐射电子俘获两者的共同作用. 在  $2 \times 10^{-11}$  torr 的真空条件下, 束流在 CSR 主环的注入能量上的储存寿命比束流累积所需要的时间 ( $\sim 7$ sec) 和电子冷却时间 ( $\sim 1$ sec) 要长得多, 这将有利于主环获得高的累积流强.

实验环 CSRe 内束流总的储存寿命  $\tau$  主要取决于放射性束本身的核衰变, 放射性束与内靶原子之间的电荷交换 (电子俘获), 内靶散射 (引起束流横向发射度和纵向动量散度的增加) 和冷却装置中的辐射电子俘获四种机制.  $\tau$  与靶厚  $D$  相关联.

计算结果表明, 对半衰期为 11ms 的  $^{12}\text{N}^{7+}$  束, CSRe 内靶上的平均亮度可达  $10^{26} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  量级; 而对于重的  $^{226}\text{U}^{92+}$  束, 则达到  $10^{25} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 最高平均亮度可以达到  $10^{28} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (对  $^{11}\text{C}^{6+}$ ). 据此可以判定, 在 CSR 准连续束的内靶实验模式中, 最重的放射性束可到 U, 放射性束的最短寿命可到约 10ms.

#### ④ CSRe 内靶实验的束流品质

在作内靶实验的情况下, 离子束的品质取决于电子冷却和内靶散射、束内散射 (IBS) 之间的平衡. 内靶实验中束流的平衡发射度达到约  $1 \pi \text{mm.mrad}$ , 动量分散则可达到  $10^{-5} \sim 10^{-4}$  量级.

综上所述, HIRFL-CSR 具有如下设计特色和创新性:

●双环结构 由于采用双环结构, 可在实验环 CSRe 上获得准连续束, 从而可以使用较厚的内靶, 得到高的实验亮度. 并可用于高分辨质量测量.

●大接收度 实验环足够大的接收度保证了适用于短寿命滴线核 (具有高的同位旋) 的研究, 是研究远离核特别是滴线核强有力的实验装置.

●多种类 (全离子加速,  $A < 220$  的放射性束)、宽能量范围 (低、中、高能区)、高有效流强的高品质重离子束及高剥离态重离子束, 还可提供高自旋同质异能态束和极化束.

## 四、HIRFL-CSR 的科学目标

根据国际重离子物理和相关交叉学科前沿的发展趋势和我国重离子物理及其应用研究的基础, 确定 HIRFL-CSR 的科学目标是: 三个目标, 一个探索, 以及交叉学科和应用.

1. 第一个目标: 放射性束物理在国际先进行列占有一席之地

### ① 远离稳定线新核素合成和研究

人工合成和鉴别的核素已达 2 200 多种, 而理论预言约有 8 000 种核素存在束缚基态. 宽广的高同位旋未知区域特别是滴线区新核素的合成和研究具有重要的物理意义和潜在的应用前景. HIRFL-CSR 提供的多种类、宽能量范围和高同位旋的放射性束, 及高分辨高灵敏度质量测量方法为研究工作提供了良好的实验条件.

●  $A > 170$  重质量丰中子区新核素的合成和研究

在  $A > 170$  重丰中子区开展工作既具有重要物理意义又具有很大技术难度, 我们已在该核区取得突破. 在 HIRFL-CSR 上合成一批重丰中子新核素, 有可能达到理论预言的缓发中子先驱核岛和缓发裂变岛.

●探索  $A < 140$  质子滴线和向更丰中子区的拓广

人们已成功地使用中、高能弹核碎裂 (PF) 和 PF 型放射性束流线, 在  $Z \leq 10$  区达到了质子和中子滴线, 中子晕、质子晕、中子皮奇异结构的发现最为引人注目. 探索更重质量区质子 (中子) 的滴线对于研究原子核性质 (质量、衰变模式、衰变寿命、电磁极矩、形状等) 随同位旋的变化和原子核的稳定性极限具有重要意义. 在 HIRFL-CSR 物理目标中, 直接双质子发射的研究具有重要的地位.

HIRFL-CSR 将为“高剥离重离子衰变谱学”的新领域创造良好实验条件.

② 中子物质研究——中子集团 ( $^2\text{N}, ^4\text{N}$ ) 的产生及其质量测定的探索

$^3\text{He}$  的确定增加了自由中子集团 ( $^2\text{N}, ^4\text{N}$ ) 存在束缚基态的可能性. 测定中子集团质量



将揭示纯中子物质的核结合能,由此可能导出新的核状态方程。 $^{10}\text{He}$ 的发现为探索中子星的奥秘提供了一种前所未有的条件.是否存在自由态的中子物质,是中子物质研究的焦点.

合理地组合 HIRFL-CSR 的运行,产生和制备有一定强度、低本底的放射性丰中子奇异核(如 $^{11}\text{Li}$ , $^8\text{He}$ ),进行 CSR 环内薄靶的弹核碎裂反应,测量其反应产物,可由其反应运动学确定中子集团( $^2\text{N}$ , $^4\text{N}$ )的存在并导出其质量.由于 CSR 内的放射性奇异核束流的能量单色性好并可进行能量调整,这种组合能以非常独特的手段鉴别中子集团( $^2\text{N}$ , $^4\text{N}$ )并测定其质量.

### ③ 研究中子、质子集团在核物质内的作用

核物质表面的“晕”是滴线附近放射性丰中子(丰质子)奇异核的新现象,可探索“晕”本身的集团结构(松的结合、 $\beta$ 衰变等);“晕”和“皮”的演变;原子核内核心与外表的集团相互作用;也可以研究介于自由核子和通常核物质之间的第三种物质形态,由此探索核的相互作用和物质形态演变(类似于 EMC 效应).在 CSR 上,可详细研究放射性丰中子奇异核(如 $^8\text{He}$ , $^{11}\text{Li}$ )的轨道中子性质,也可研究镜象核(如 $^9\text{Li}$ , $^9\text{C}$ )结构.这类研究也可采用高自旋、核反应和核干涉学方法进行.

### ④ 高精度测量远离核质量

实验环 CSR<sub>e</sub> 可以用作高分辨谱仪,使用 Shottky 方法或飞行时间法可对注入的远离核进行高分辨高灵敏度质量测量.质量分辨达  $10^{-6}$ .

## 2. 第二个目标:高温高密条件下核物质性质研究

HIRFL-CSR 提供的能量高达  $900\text{MeV}/u \sim 400\text{MeV}/u$  的中、高能重离子碰撞可获得高温、高密核物质,将是世界上为数不多的人工高温高密核物质实验室之一.此外,多种类的放射性束流为沿同位旋自由度开展该领域一系列前沿课题的研究开辟了广阔前景.

使用 HIRFL-CSR 提供的中、高能稳定核束和放射性束流,在引入同位旋自由度的条件

下,通过对对称核物质向纯中子物质过渡的研究探索:

### ① 液-气相变

在高速重离子碰撞中由于核子的相对运动速度大于核物质中的声速,从而产生了核物质的堆积和压缩.随后碰撞系统在强大压力作用下迅速膨胀,核物质密度迅速下降到常规核物质密度之下,在膨胀过程中产生了核物质密度涨落,呈现出以大量中等质量碎片发射为主要特征的多重碎裂过程,也可能产生液-气相变.这种多重碎裂过程和液-气相变就成为当前中能重离子核物理领域中的热点课题,其中急待研究的物理问题涉及热核形成、衰变包括多重碎裂、热核巨共振等.

### ② 集体流

在中高能重离子碰撞中,由于强烈的纵向压缩从而产生了在垂直于压力方向上发射的粒子流和碎片流——统称为集体流.这种集体流直接与核物质被加热和被压缩的程度紧密相关,故集体流直接携带着热密核物质被加热被压缩初期阶段的信息.同时深受入射道效应和有关动力学因素;如有效相互作用性质、介质中核子-核子碰撞截面、泡里原理等因素的影响和控制.所以集体流就成为研究热核性质的灵敏探针.

系统地测量和研究在不同入射条件下在反应平面和出反应平面集体流的大小及其随不同物理条件的演化规律,可从中提取有关热密核形成和衰变的信息,同时为建立状态方程提供知识:

### ③ 阈下 $K^+$ 介子产生

阈下  $K^+$  介子产生是中高能重离子碰撞中研究热密核性质的另一个重要探针. $K^+$  介子产生的阈能在  $1.6\text{GeV}$  以上.但在中高能重离子碰撞中核物质内部由于受到强烈压缩和加热,从而产生了密度和能量的涨落.故核物质在高温和高压条件下,通过多步过程能量可能集中到少数核子自由度上以至超过产生  $K^+$  介子阈能并发射  $K^+$  介子.故  $K^+$  介子产生与核物质被加热和被压缩性质紧密相关.且  $K^+$  介

子一旦产生,由于它的奇异性,与核物质中其它强子的作用和被吸收几率很小,直接携带热密核性质的信息飞出碰撞系统.所以对 $K^+$ 介子的测量和研究可以提取热核性质的信息.

#### ④核状态方程

建立核状态方程是高温高密核物质研究的最重要目标之一.

3. 第三个目标:高剥离态极重离子(U和Ta以下)原子物理研究

在离化态原子物理研究中已有的数据主要集中于低 $Z$ 、低剥离态区域.高剥离态高 $Z$ 极重离子的研究不仅可以补充原子物理谱学数据,而且预期可以发现和研究裸原子核强库仑场中可能出现的新物理现象——与库仑定律的偏离.

高剥离态原子,特别是类氢、类氦离子是最简单、最基本的原子系统,对这些基本原子系统的细致研究,不仅可以深入地理解原子核库仑场中量子电动力学(QED)的规律,而且也能进一步了解和探讨原子核与原子壳层、离子—电子(包括自由电子和束缚电子)、离子—光子以及离子—电子—光子的相互作用规律,为人们深入认识这些相互作用提供可靠的信息,因而成为当今原子物理、等离子体物理和天体物理等最为引人注目的前沿之一.

上述前沿领域的研究在激光、分子生物学和生命科学方面也具有广阔的应用前景.

重离子冷却储存环是原子物理学研究的一个极为有力的工具,它所提供的多种高品质束流、内靶实验条件和共线电子束和激光束,极大地拓展了原子物理学的研究领域,并提供了前所未有的低本底、高分辨的测量条件.

拟在HIRFL-CSR上开展的研究课题有:

①兰姆位移研究高剥离态重离子精细结构——兰姆位移的发现促进了量子电动力学的发展.兰姆位移由电子和辐射场相互作用而引起.

$$S_n = \frac{\alpha}{\pi} \frac{(za)^4}{n^3} F(Z\alpha) mc^2$$

式中 $\alpha$ 是精细结构常数, $m$ 是电子质量, $F$ 是慢

变化函数, $Z$ 为原子系数, $n$ 是主量子数.可见兰姆位移随 $Z$ 增大而急剧增加,高 $Z$ 类氢原子对研究兰姆位移具有重要意义.其中,研究 $1s_{1/2}$ 位移将是重点,而Ta以上极重离子是主要研究对象.

#### ②离子—电子相互作用

辐射重组(光电离逆过程)和双电子重组(俄歇过程的时间反演)及三体重组将是主要研究方向.

#### ③离子—光子相互作用

使用直线段上的共线可调谐激光以开展该课题研究.

#### 4. 一个探索:超重核合成

理论预言在核素图上跨过不稳定海洋,在 $Z = 114, N = 184$ 附近将存在一个长寿命超重元素稳定岛.作为重离子物理的出发点之一,人们已为之进行了长期不懈的探索,并已成功合成了 $Z = 112$ 号元素,在认识其重要性、长期性和复杂性的同时,积累了相当的实验和理论经验.

HIRFL-CSR上探索合成超重核的主要物理和技术思想是:

①超重核的生成——利用具有与超重元素相近的 $N/Z$ 值的人射束,通过位垒下熔合和转移反应机制,有可能生成超重核.

②超重核的指定——既然超重核很可能是长寿命的,因而采用跟踪放射性衰变的方法来鉴别超重核可能不再适用.CSRe上的高精度谱仪可以直接测定核素的 $(A, Z)$ 值,这有可能为超重核的指定提供有利条件.

#### 5. 交叉学科和应用

##### ①核天体物理学

已有的研究表明,天体能量来源、核合成过程、质量丰度分布和宇宙年龄的确定等均与“关键原子核”的衰变和“关键核反应”率有直接关系.冷CNO循环、热CNO循环、氢燃烧、快中子过程等重要课题的研究都依赖于一系列关键原子核的衰变研究和关键核反应率的测定.

##### ●研究一系列关键原子核衰变

HIRFL-CSR的多种放射性束和高精度测量条件为研究上述关键原子核的衰变( $\beta$ 衰变寿命, 缓发粒子几率,  $Q_{\beta}$ 值等)提供了优越的实验条件。

### ●一系列关键原子核反应率的测定

这些关键核反应都是很低能量下的核反应, 实验上直接测量存在不少技术上的困难。而 HIRFL-CSR提供的中、高能放射性束利用逆反应(库仑裂解), 使在中、高能情况下测定这些低能反应(辐射俘获反应)成为可能。由于反应截面提高几个量级, 加之中、高能情况下探测效率大大增加, 从而显著提高了测量灵敏度。

用  $100\text{MeV} / \text{u} \ ^{14}\text{O} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{13}\text{N} + \text{p} + ^{208}\text{Pb}$  来测定  $^{13}\text{N}(\text{p}, \gamma) \ ^{14}\text{O}$  这一冷 CNO 循环到热 CNO 循环关键核反应率是一个很好的例子。利用这种逆反应, 还可以对热 CNO 循环, NeNa-MgAl 循环和  $rp$  过程中的一些关键核反应  $^{15}\text{O}(\alpha, \gamma) \ ^{19}\text{Ne}$ ,  $^{19}\text{Ne}(\text{p}, \gamma) \ ^{20}\text{Na}$ ,  $^{39}\text{Ca}(\text{p}, \gamma) \ ^{40}\text{Sc}$  和  $^{26}\text{mAl}(\text{p}, \gamma) \ ^{27}\text{Si}$  等的反应率进行有效的测量和研究。

### ●宇宙年龄的测定

丰中子裸离子的束缚态 $\beta$ 衰变( $\beta_b$ )和缺中子裸离子的电子俘获(EC)衰变与中性原子核的衰变半寿命有极大的差别。缺中子 $^{54}\text{Mn}$ 的 $\beta^+$ 衰变半寿命为312天, 而缺中子裸 $^{54}\text{Mn}$ 的电子俘获半寿命则长达 $2 \times 10^6$ 年。丰中子裸离子 $^{187}_{75}\text{Re}^{75+}$ 经 $\beta_b$ 衰变到 $^{187}_{75}\text{Os}^{75+}$ 的寿命为10年, 而中性 $^{187}\text{Re}$  $\beta$ 衰变半寿命为 $4 \times 10^{10}$ 年, 即在天体演变过程中产生的裸 $^{187}\text{Re}^{75+}$ 的 $\beta_b$ 衰变将显著改变 $^{187}\text{Re}$ 的衰变寿命。将 $^{187}\text{Re}$ 与 $^{187}\text{Os}$ 相对丰度作为宇宙时钟使用时, 必须考虑 $\beta_b$ 对有效衰变寿命的影响。

HIRFL-CSR将为 $\beta_b$ 衰变半寿命的测定提供十分方便的条件。裸离子经 $\beta_b$ 衰变后将成类氢离子, 在冷却环上使用气体靶将该电子剥离, 这时产生的裸离子电荷态变化, 从而磁刚度发生改变, 在二极磁铁上与原离子束分开, 可被一个位置灵敏探测器方便地探测到。

## ②HIRFL-CSR上的放射性束的应用

HIRFL-CSR提供的放射性束有如下特点: 容易选择任一种同位素; 容易选择不同能量从而高精度地控制和测量辐照位置和深度; 测量注入的放射性束的放射性可达到很高的探测效率; 可选择不同寿命的放射性束; 可使用极化束。因而, 除了用于辐照效应的研究外, 还具有定位和测量的功能, 可广泛用于材料科学和生命科学研究。利用极化的放射性束可测定物质材料内部电磁场; 短寿命放射性束对于各种物体内部快速流动或扩散过程是一种实时、无损的示踪方法。此外, 可使用放射性束的辐照和定位功能研究辐照生物效应; 由于重离子束在机体内沉积能量正比于 $Z^2 / v^2$ , 即具有 Bragg 峰, 其沉积能量集中于射程末端, 从而可以在对健康组织损害最小的前提下有效地治疗癌肿, 是一种优越的治癌方法。

### ③冷却环可能的应用前景

#### ●自由离子激光

冷却环可提供自由离子激光需要的高度准直的高分辨的重离子束。由于辐射强度/粒子比值正比于 $Z^2$ , 高品质重离子束可产生很高强度的自由离子激光。

#### ●重离子惯性约束聚变的前景

由于重离子惯性约束聚变具有高的驱动效率和高的重复频率, 已被一些专家看好为新一代能源的有希望的方法之一。

将  $D-T$  混合物数毫克, 约束于 10 毫米直径内, 在数 ns 内点火, 点火温度为  $5 \sim 10\text{KeV}$ , 在约 10ns 内需要能量  $5 \sim 10\text{MJ}$ , 在靶上产生  $10^{16} \sim 10^{17}\text{W} / \text{g}$  的能量淀积, 相应于峰值脉冲功率  $500 \sim 1000\text{TW}$ 。脉冲功率 = 束流能量  $\times$  束流电流, 如果使用  $50\text{MeV} / \text{u}$  的重离子束, 束流电流须达  $50 \sim 100\text{kA}$ 。束流电流是现有加速器面临的主要难题之一, 多级强流离子源可能是解决此难题的方向之一。

#### ●分子离子和团簇离子的研究

包括分子离子、团簇离子、负原子和负分子离子的研究。