

文章编号: 1007-4627(2016)04-0428-05

基于 HIAF SRing 的并束实验设计及研究

申国栋^{1,2}, 杨建成¹, 吴波^{1,2}, 王科栋^{1,2}, 夏佳文¹, 冒立军¹, 柴伟平¹, 石健¹, 殷达钰¹, 盛丽娜¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 超重核的真空衰变对于验证量子电动力学至关重要, 由于过去的固定靶实验中, 核外电子干扰正负电子对的测量, 国际上尚未观测到该现象。提出基于 HIAF SRing 的并束实验方案, 通过 $^{238}\text{U}^{92+}$ 在自由空间碰撞, 排除了核外电子的影响。根据亮度理论, 结合对交叉角度、Laslett 频移和束束相互作用的分析, 优化得到 $1.9 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的峰值亮度, 基本满足了实验需求。

关键词: 并束; 正负电子对; HIAF; SRing

中图分类号: O572.21+1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.04.428

1 引言

为了探索原子核存在极限和奇特结构、宇宙中从铁到铀元素的来源、高能量密度物质性质等重大前沿科学问题, 解决我国空间探索和核能开发领域中与粒子辐射相关的关键技术难题, 中国科学院近代物理研究所提出建造重大科技基础设施—强流重离子加

速器装置 (High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)^[1]。HIAF 由强流超导离子源 SECR、强流超导离子直线加速器 iLinac、磁刚度为 34 Tm 的增强器 BRing、次级束分离线、磁刚度为 13 Tm 的高精度环形谱仪 SRing、低能核结构谱仪、低能放射性束流线、外靶终端以及相关配套设施构成, 如图 1 所示。



图 1 (在线彩图) HIAF 装置示意图

收稿日期: 2016-01-14; 修改日期: 2016-03-09

基金项目: 中国科学院新型交叉与前沿学科试点项目(Y213150YQ0)

作者简介: 申国栋(1988-), 男, 河南安阳人, 在读博士, 从事加速器物理研究; E-mail: shenguodong@impcas.ac.cn

通信作者: 杨建成, E-mail: yangjch@impcas.ac.cn.

超重原子核的壳层结构一直是原子物理学家极力探索的问题, 量子电动力学预测, 超重核 ($Z \geq 173$) 激发出的极强库仑场可以激发产生正负电子对^[2]。然而超重核的半衰期非常短, 自然界中并不存在, 只有依靠核核碰撞, 使原子核靠近到非常小的距离(对于 $^{238}\text{U}+^{238}\text{U}$, 这个距离需要小于 30 fm), 才可以达到超重核的条件^[3]。在 TRUNFU 等实验室已经开展过相关固定靶散射实验, 试图寻找真空电子对发射现象, 但是均没有成功。原因有两点:

(1) 这些散射实验采用部分剥离的离子和固定靶的对撞模式, 生成的超重核周围有壳层电子, 泡利阻塞效应妨碍真空电子对的生成;

(2) 由于轨道电子的屏蔽, 共振 $1s\sigma$ 态不能深入到负连续态能量区。

对撞机中存储的裸核, 具有寿命长、流强度高、可重复利用的特点。真空电子对的产生不再受核外电子的干扰, 产生几率相比于固定靶散射实验可以高出一个量级。双环同向小交叉角碰撞最早应用于日本 RIKEN 实验室的 MUSES 项目, 开展核融合研究^[4]。HIAF 中的实验装置如图 2 所示, SRing-A 和 SRing-B 两个储存环的结构基本一致, 存储着相同能量的 $^{238}\text{U}^{92+}$ 离子, 分别以顺时针和逆时针旋转。在两环的交叉点, 束团以 6.6° 的交叉角碰撞, 跨越库仑势垒, 产生超重核。激发的正负电子对被碰撞点周围的探测器俘获。

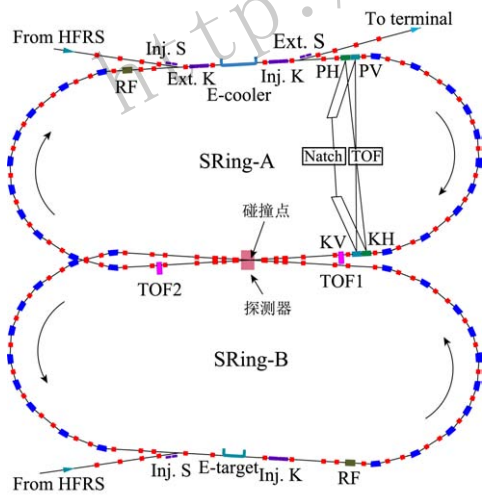


图 2 并束装置示意图

2 交叉角度

能量高的束流更利于并束实验的开展, 因为: (1) 离子与储存环中的残余气体发生大角度库仑散射, 引起束流损失, 其散射截面随能量升高而降低; (2) 空间电荷效应和离子 $\beta^2\gamma^3$ 成正比, 提高束流能量

可以提高累积离子数的上限。SRing-A 和 SRing-B 最大磁刚度为 13 Tm, 对于 $^{238}\text{U}^{92+}$ 离子, 能量最高为 840 MeV/u。并束实验需要的质心能非常小, $6 \sim 8$ MeV/u 就可以跨越库仑势垒。通过在两个束团之间引入一个夹角, 以微小的相对速度产生所需的碰撞能量, 如图 3 所示。

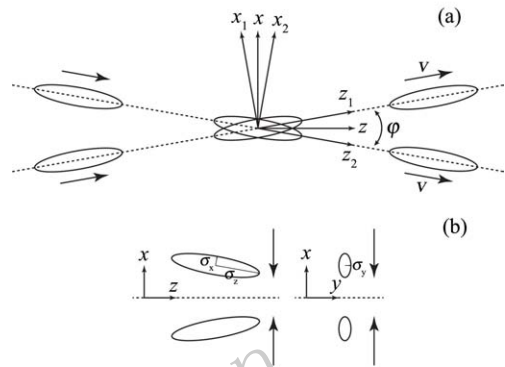


图 3 交叉碰撞示意图
其中(a)为实验室参考系, (b)为质心系。

夹角和质心能之间的关系如式 1 所示:

$$E_{CM} = m_{amu}c^2 \sqrt{\frac{1 - \beta^2 \cos^2 \frac{\varphi}{2}}{1 - \beta^2}} - 1, \quad (1)$$

其中: β 为离子相对论因子; φ 为离子碰撞交叉角; m_{amu} 为单核子质量。不同的夹角对应不同的碰撞能量能量范围, 如图 4 所示。

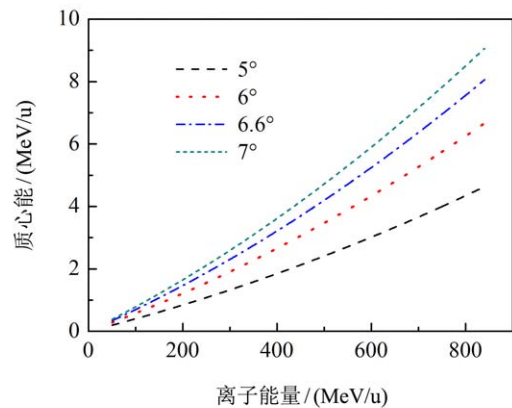


图 4 不同夹角对应的质心能范围

考虑到可变碰撞交叉角带来的碰撞区光学、机械加工等方面的难度, 目前方案采用固定交叉角的设计。根据所需质心能的范围, 交叉角选择 6.6° 。

3 亮度

SRing-A 和 SRing-B 的束流参数完全一致, 亮度可以表示为^[5]

$$L = \frac{N^2 f_c}{4\pi\sigma_y\sigma_z \cos \frac{\varphi}{2}} \sqrt{\frac{1 - \beta^2 \cos^2 \frac{\varphi}{2}}{1 + 2 \tan^2 \frac{\varphi}{2} \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_z}\right)^2}} H \quad (2)$$

其中: N 为单束团离子数; f_c 为碰撞频率; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为束团 x, y, z 方向的均方根束团尺寸; φ 为两个束团的夹角; β 为离子的相对论因子; H 为沙漏因子, 描述的是由于垂直包络函数在远离碰撞点时急剧增大, 粒子密度降低引起的亮度下降。

并束的亮度主要由束团 y 和 z 方向的尺寸决定, 而一般的对撞机主要由束团 x 和 y 方向的尺寸决定, 由于束团 z 方向的尺寸要远远大于 x 方向的尺寸, 因此并束实验的亮度较一般对撞机低几个量级。式(2)根号下的分子是两个束团质心系相对论因子的倒数, 表示碰撞截面的相对论效应。

4 Laslett 频移

在低能对撞机中, 束团空间电荷效应是影响亮度的决定性因素。束团中离子自身电荷产生空间电场, 反作用于束团中的离子, 干扰离子的运动。由于非线性电场中存在四极场分量, 离子 x 和 y 方向的工作点均会向下漂移, 其中束团中心的四极场分量最大, 该处小幅度 betatron 振荡的离子频移最大, 作为空间电荷效应的一个标示, 这个最大值被称为 Laslett 频移^[6]。基于 Laslett 频移效应, 单个束团中储存的离子数上限可以表示为^[7]

$$N_i = \frac{-\pi\Delta Q_y \beta^2 \gamma^3 B_f \varepsilon_y \sqrt{2\pi}\sigma_z}{2G_f r_i C} \left(1 + \sqrt{\frac{\varepsilon_x Q_y}{\varepsilon_y Q_x}}\right)^2, \quad (3)$$

其中 ΔQ_y 为 Laslett 频移, 为了避免束流不稳定, 根据国际上对撞机运行经验, ΔQ_y 频移取 -0.1 ^[8], C 为环周长, G_f 为形状因子, 是离子横向分布的函数, 对于高斯分布 $G_f = 2$, $r_i = Z_i^2 e^2 / (4\pi\varepsilon_0 A_i m_{amu} c^2)$ 为离子经典半径, Q_x, Q_y 分别为水平和垂直方向工作点。

5 束束相互作用

束束相互作用指的是对撞机中对撞的两个束团在对穿的过程中, 对向束团空间电荷场和磁场对本束团中粒子的运动产生的影响。在 SRing 并束实验中, 由于束团尺寸对撞过程中变化很小, 在下面的推导中假设束流尺

寸不变, 并且假设束流为圆形, 离子在横向及纵向均匀分布, 如图 5 所示。

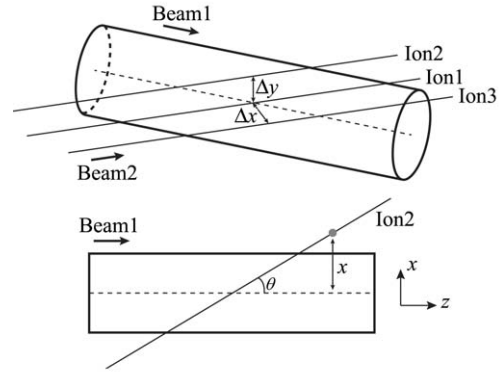


图 5 并束实验束束相互作用示意图

Beam 2 束流中心的 Ion 1 以及在水平方向偏移 Δx 的 Ion 3 穿过 Beam 1 的过程中, 受到的电场力和磁场力关于 Beam 1 束流中心轴反向对称, 作用相互抵消, 即 Ion 1 和 Ion 3 不受束束相互作用影响。

垂直方向偏移 Δy 的 Ion 2 受到的电场力包含水平和垂直两个方向的分量, 其中水平分量由于在 Beam 1 轴两侧反对称而作用相互抵消, 垂直方向分量为

$$F_E(\Delta y, x) = \begin{cases} \frac{ZeI\Delta y}{2\pi R^2 v \varepsilon_0}, \sqrt{x^2 + \Delta y^2} \leq R \\ \frac{ZeI\Delta y}{2\pi(x^2 + \Delta y^2)v \varepsilon_0}, \sqrt{x^2 + \Delta y^2} > R \end{cases}, \quad (4)$$

其中: Z 为离子电荷数; I 为 Beam 1 的电流; R 为 Beam 1 半径; v 为离子速度; ε_0 为真空介电常数; x 为离子到 Beam 1 中心轴的水平距离。

Ion 2 受到的洛伦兹力同样包含水平和垂直两个方向的分量, 其中水平分量由于在 Beam 1 轴两侧反对称而作用相互抵消, 垂直方向分量为

$$F_B(\Delta y, x) = \begin{cases} -\frac{ZeI\mu_0 v \Delta y \cos \theta}{2\pi R^2}, \sqrt{x^2 + \Delta y^2} \leq R \\ -\frac{ZeI\mu_0 v \Delta y \cos \theta}{2\pi(x^2 + \Delta y^2)}, \sqrt{x^2 + \Delta y^2} > R \end{cases}, \quad (5)$$

将电场力和洛伦兹力叠加得到:

$$F(\Delta y, x) = \begin{cases} \frac{ZeI(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)\Delta y}{2\pi R^2 v \varepsilon_0}, \sqrt{x^2 + \Delta y^2} \leq R \\ \frac{ZeI(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)\Delta y}{2\pi(x^2 + \Delta y^2)v \varepsilon_0}, \sqrt{x^2 + \Delta y^2} > R \end{cases}, \quad (6)$$

作为对比, Beam 1 自身边缘的离子受到 Beam 1 的电磁场力最强, 方向垂直向上, 该力对 Laslett 频移有贡献:

$$F(R) = \frac{ZeI(1 - \beta^2)}{2\pi R v \varepsilon_0}. \quad (7)$$

结合式6, 可得两种情况下的四极分量比:

$$\frac{F(\Delta y, x)/\Delta y}{F(R)/R} = \begin{cases} \frac{(1-\beta^2 \cos^2 \theta)}{(1-\beta^2)}, \sqrt{x^2 + \Delta y^2} \leq R \\ \frac{(1-\beta^2 \cos^2 \theta)R^2}{(1-\beta^2)(x^2 + \Delta y^2)}, \sqrt{x^2 + \Delta y^2} > R \end{cases} \quad (8)$$

由于并束实验 $\theta \ll 1$, $\cos \theta \approx 1$, 那么式(8)可以简化为

$$\frac{F(\Delta y, x)/\Delta y}{F(R)/R} \approx \begin{cases} 1, \sqrt{x^2 + \Delta y^2} \leq R \\ \frac{R^2}{(x^2 + \Delta y^2)} < 1, \sqrt{x^2 + \Delta y^2} > R \end{cases} \quad (9)$$

束束相互作用力的四极分量小于束内离子自作用四极分量, 那么束束相互作用引起的频移也会比碰撞点处相同距离 Laslett 频移贡献要小。考虑碰撞点束内离子自作用四极分量对环工作点的影响, 假设 x 方向和 y 方向 beta 函数相等, 则有

$$\Delta\nu \propto \frac{F(R)\Delta l}{R} \frac{\beta_0}{4\pi} \propto \frac{\Delta l}{\sqrt{\varepsilon\beta_0}} \frac{\beta_0}{4\pi} \propto \Delta l \sqrt{\beta_0}, \quad (10)$$

其中 β_0 为四极分量位置beta函数, Δl 为四极分量长度。由于束内离子自作用四极分量沿全环分布, 而碰撞点处 beta 函数很小, 因此碰撞点处束内离子自作用对 Laslett 频移贡献很小, 小于环周长平均值。而碰撞点处束束相互作用力的四极分量小于束内离子自作用四极分量, 碰撞有效作用距离小于毫米量级, 那么束束相互作用产生的频移小于 10^{-6} 量级, 可以忽略不计。

6 亮度的分析和优化

下面结合储存环实际参数对并束实验亮度进行分析和优化。

(1) 假设束团长度和 Laslett 频移固定, 那么由式(3)得

$$N_i \propto \left(\sqrt{\varepsilon_y} + \sqrt{\frac{\varepsilon_x Q_y}{Q_x}} \right)^2, \quad (11)$$

由式(2)可以看出, x 方向对亮度的影响很小, 那么有

$$L \propto \frac{N^2}{\sqrt{\varepsilon_y}} \propto N^{1.5}. \quad (12)$$

从式(11)和(12)可以看出单束团离子数越多, 亮度越高。由于单束团离子数又和发射度线性相关, 亮度越高, 需要的 x, y 发射度越大。横向发射度的选取主要基于磁铁孔径和磁场的非线性作用, SRing-A 和 SRing-B

的接收度为 $10 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad} \times 10 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$, 按照 10σ (σ 为束流 RMS 尺寸) 束流清晰区的要求, 并束实验 $\varepsilon_{x,\text{rms}} = \varepsilon_{y,\text{rms}} = 1 \pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。

(2) 假设单束团粒子数恒定不变, 那么由式(2)和(3)得

$$N_i \propto \varepsilon_y \sigma_z \\ L \propto \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_y \sigma_z}} \propto \frac{\sqrt{\varepsilon_y}}{N_i}, \quad (13)$$

从这里可以看出 σ_z 越小越好, ε_y 越大越好。这是因为 x, y 方向的发射度相同, 而 x 方向发射度增大对亮度影响很小, 但是束团长度减小可以减小束团碰撞截面。

(3) SRing 中的束流来自 BRing, 通过多次注入累积, 得到高流强的连续束。然后开启高频腔, 将连续束聚成束团, 用于碰撞, 因此 SRing 中的总流强是固定的。即

$$N_i f_c \propto I, \quad (14)$$

结合式(2)可得

$$L \propto \frac{N^2 f_c}{\sqrt{\varepsilon_y \sigma_z}} \propto I \sqrt{\varepsilon_y} \propto \frac{I^{1.5}}{\sqrt{f_c \sigma_z}}. \quad (15)$$

亮度和高频频率没有关系, 不过有

$$V_{RF} \propto \frac{1}{f_c \sigma_z^2} \propto f_c L^4, \quad (16)$$

频率越高, 需要的高频电压越高。

由上面的分析结合 SRing 具体参数, 优化出的参数如表 1 所列。

表 1 并束参数

参数	数值
离子	238U^{92+}
能量/(MeV/u)	668(835)
碰撞频率/MHz	48.8(51.0)
谐波数	50
夹角/(°)	6.6
质心能/(MeV/u)	6(8)
单束团离子数	$4.6(6.8) \times 10^8$
$\varepsilon_{x,\text{rms}}/(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})$	1
$\varepsilon_{y,\text{rms}}/(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})$	1
β_x^*/m	0.06
β_y^*/m	0.006
动量分散	2×10^{-4}
束团长度/m	0.6
高频电压/kV	32(23)
Laslett 频移	-0.1
亮度/ $(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$0.92(1.9) \times 10^{24}$

表 1 右侧 1 列括号内为高能量下的参数, 由于 Laslett 频移允许的单束团离子数的增加, 亮度明显提高。

7 结论

本文设计了 HIAF SRing 的并束方案, 通过优化得到了质心能为 $6 \sim 8 \text{ MeV/u}$ 、碰撞角度 6.6° 、峰值亮度 $1.9 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 为 HIAF 进行并束实验打下了基础。

文中采用固定交叉角, 通过改变束流能量以调节碰撞质心能。但是调节能量会影响亮度, 将来考虑保持束流能量不变, 在对撞区引入局部凸轨, 通过调节碰撞点闭轨角度改变质心能。

由于两团束流几乎同向, 束束相互作用引起的频移小于 10^{-6} , 可以忽略不计, Laslett 频移成为限制亮度的主要因素, 将来考虑引入 Laslett 频移补偿手段, 进一步提高亮度。

参考文献:

- [1] YANG J C, XIA J W, XIAO G Q, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2013, **317**: 263.
- [2] WANG Yu. Electron-positron pair creation by two nucleus Coulomb and laser fields[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
(王玉. 双核子库仑场和激光场中正负电子对产生[D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2008.)
- [3] TER-AKOPIAN G M, GREINER W, MESHKOV I N, *et al.* Int J Mod Phys E, 2015, **24**(3): 1550016.
- [4] KATAYAMA T, SUDA T, TANIHATA I. Physica Scripta, 2003, **T104**: 129.
- [5] YURI K. BATYGIN, TAKESHI KATAYAMA. MERGING BEAM-BEAM INTERACTION. Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference[C], New York, Joint Accelerator Conferences Website, 1999: 99.
- [6] LASLETT L J. On Intensity Limitations Imposed by Transverse Space-charge Effects in Circular Particle Accelerators[C]. Summer Study on Storage Rings, BNL Report 7534, 325.
- [7] HOFMANN A. Tune Shifts From Self Fields and Images[C]. CERN **94**: 329.
- [8] ABEYRATNE S, ACCARDI A, AHMED S, *et al.* Science Requirements and Conceptual Design for a Polarized Medium Energy Electron-Ion Collider at Jefferson Lab[EB/OL], arXiv:1209.0757.

Design and Research of Merging Experiment Based on HIAF SRing

SHEN Guodong^{1,2}, YANG Jiancheng¹, WU Bo^{1,2}, WANG Kedong^{1,2}, XIA Jiawen¹, MAO Lijun¹, CHAI Weiping¹, SHI Jian¹, YIN Dayu¹, SHENG Lina¹

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Vacuum decay phenomenon of superheavy nucleus is a problem of fundamental interest to verify quantum electrodynamics. As the shell electrons interfere the detection of electron-positron pairs in the fixed target experiments in the past, it's still not corroborated. A new merging experiment scheme is proposed in this paper. The interference of shell electrons is eliminated by collisions of $^{238}\text{U}^{92+}$ in free space. According to the luminosity theory and the analyses of crossing angle, Laslett tune shift and beam-beam interaction, an optimized peak luminosity of $1.9 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ is achieved. It meets the requirements of merging experiment essentially.

Key words: merging; electron-positron pairs; HIAF; SRing

Received date: 14 Jan. 2016; Revised date: 9 Mar. 2016

Foundation item: New Interdisciplinary and Advanced Pilot Fund of Chinese Academy of Sciences(Y213150YQ0)

Corresponding author: YANG Jiancheng, E-mail: yangjch@impcas.ac.cn.