

# 反质子与离子研究装置 FAIR 介绍

袁小华 陈金达 靳根明 马新文 袁海博 徐珊珊 袁平

未来几年，在德国将会建成一个新的国际科学装置 FAIR。FAIR 是一个综合性的粒子加速器系统，它是反质子与离子研究装置（Facility for Antiproton and Ion Research）的简称。FAIR 建成后，将能提供任意一种稳定或非稳定化学元素（从氢到铀）离子的高能量和高强度的束流，且束流具有前所未有的高品质。FAIR 还将提供短寿命原子的次级束流和反质子束流。FAIR 涵盖了很广的与离子相关的科学目标，建成后它将为全欧洲乃至全世界的科学

家开展前沿研究提供优良条件。FAIR 项目与在德国汉堡的自由电子激光（XFEL）项目，是欧洲研究装置战略论坛（ESFPI）路线图中规模最大的研究设施。来自 50 多个国家，超过 250 个研究机构的大约 3000 位科学家和工程师将参与 FAIR 项目的建设和实验研究，FAIR 将会成为国际上在重离子和反质子基础和应用物理研究领域，最大和领先的研究中心之一。FAIR 加速器系统的设计保证了在未来几十年间将具有很强竞争力，同时保留

了可以升级的潜力。

FAIR 项目的关键科学目标是探索物质结构和自宇宙大爆炸至今的演化过程。FAIR 加速器装置由 8 个环形加速器和两台直线加速器构成，其中环的最大周长达到了 1100 米，加速器系统的真空管道长达 3.5 千米。如图 1 所示，FAIR 将建造在德国达姆施塔特市，毗连德国重离子研究中心（GSI），GSI 现在运行的加速器系统将作为它的束流注入装置。2010 年 10 月 4 日，首批 9 个国家就 FAIR 的建造签署了国际协定，建立了 FAIR 有限责任公司（FAIR GmbH）以协调装置建造的相关工作。FAIR 装置的总经费预算达 12 亿欧元（约合 100 亿元人民币），其中 75% 的经费由德国政府和黑森州政府支持，另外 25% 由国际合作伙伴承担。2012 年 7 月，德国政府经费已经到位，FAIR 项目的建设正式启动。

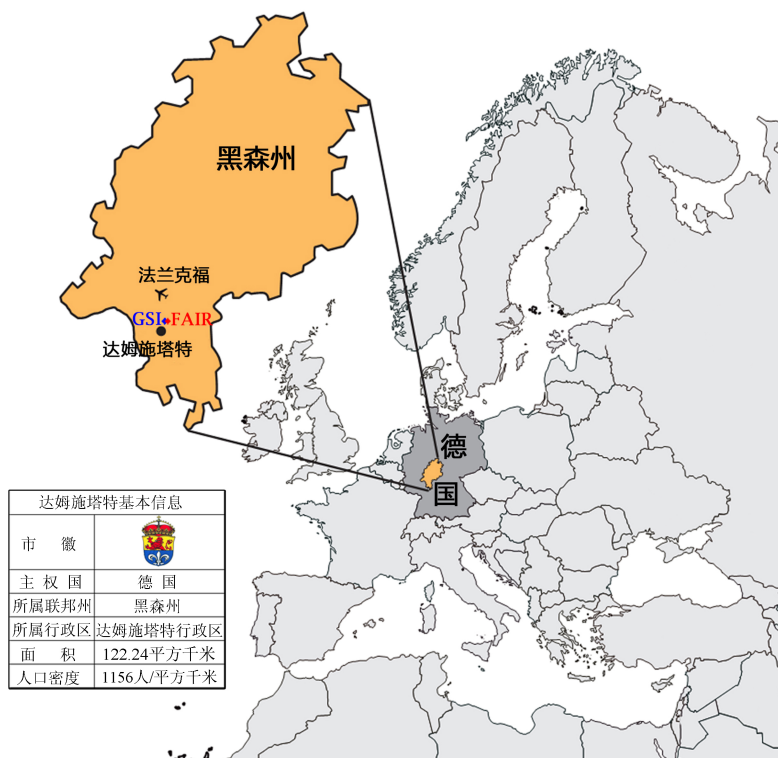


图 1 FAIR 所在的地理位置

## 一、FAIR 装置的科学目标概要

以研究物质结构和宇宙演化为科学目标，相关的工作大致可分为三类，第一类是为了深入理解物质的结构和性质，这就要在

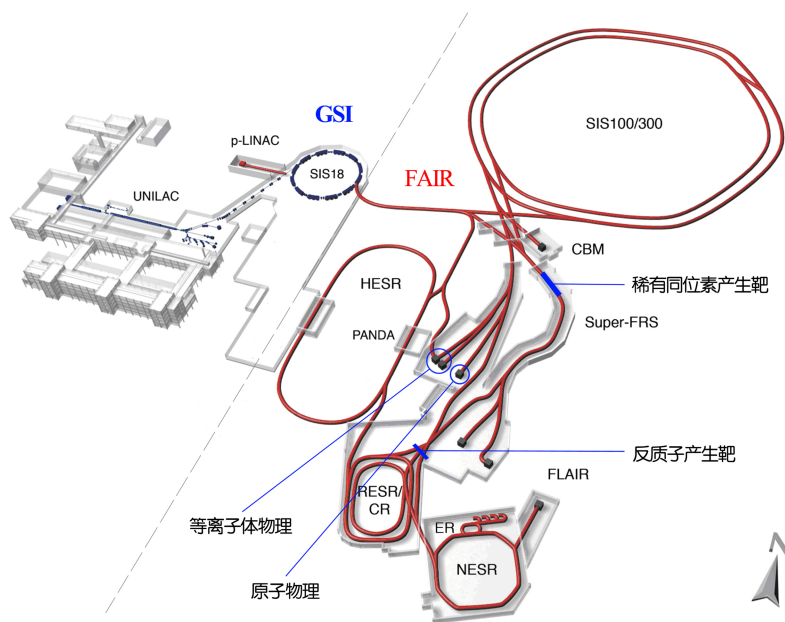


图2 FAIR 装置布局示意图

构成物质最基本的单元层次，研究相应的基本定律、相互作用与对称性；同时，需要理解这些基本组成部分之间的非线性过程和多种关联与相干造成的复杂性。第二类是探索宇宙的演化规律，对物质的结构从微观到宏观层次开展研究，这会直接关系到人类对可见世界的产生以及演化过程的深入认识，理解宇宙中元素是如何产生并具有目前观测到的丰度。第三类研究主要是从基础研究中获得知识，将离子束技术拓展到材料和应用研究领域，促进创新概念和技术发展，回馈社会，为社会经济发展作贡献。FAIR将瞄准以下几个关键领域开展研究。

### 1. 原子核结构物理与核天体物理

强相互作用是自然界四种最基本的相互作用力之一。原子核是强相互作用的一种表象，原子

核内的核子在距离为  $1 \sim 5 \text{ fm}$  时具有较强的吸引力；但当核子之间的距离小于  $0.4 \sim 0.5 \text{ fm}$  时又具有很强排斥力。正是由于核力的这一特性，在正常状态的原子核中，核子类似“坚硬的小球”，每个核子在与其它核子共存的环境中仍可以保持其完整性。同时，弱相互作用、电磁相互作用和引力作用（在中子星中）的影响都可以在核子物质中观察到，这使得核子成为一个独一无二的物理“实验室”。原子核的结构信息既是确定“无限大”核物质性质（即核状态方程）所必须的，也是建立和完善核理论模型的基础，同时还能提供其他应用领域所需的基本核数据。

关于宇宙的演化和元素的起源，简单地说，我们需要回答这样的问题：原子核和粒子在宇宙的演化过程中扮演什么样的角色？对这一问题的探索，不但要

了解化学元素产生的过程及其产生历史，还要利用核物理知识来理解爆炸性天体演化的动力学过程和解释所观测到的天体现象。FAIR 装置将利用强流初级离子束轰击靶物质，由碎片分离器从多种反应产物粒子中选择，从而提供高强度的某种次级（稀有同位素）离子束流，为开展相关实验研究提供独特的条件。

### 2. 强子物理

强子物理试图从夸克间的相互作用出发来了解初始的原子核（the most primitive nucleus）和核子，并回答这样的问题：夸克质量是如何构成核子质量的？核子的自旋是怎样由它的组成物（夸克）确定的？虽然量子色动力学（QCD）作为研究强相互作用基本性质的理论框架已经为人们广泛接受，但是非微扰能区（如能量  $1 \sim 2 \text{ GeV}$  附近），由于夸克禁闭和手征对称性破缺，标准的微扰方法不再适用。这一能区的夸克、胶子之间的相互作用，强子结构以及 QCD 奇异态正是标准模型中仍然面临的几个未知领域，也是当代核物理研究中的最困难、最具挑战性的问题。探索来源于 QCD 的强子结构和动力学、强子谱以及对称性破缺，将有助于人们深入和全面理解强相互作用的基本性质和规律。在 FAIR 装置上，反质子束流将为开展此类研究提供理想的实验条件，PANDA 探测器将能以高精度测量得到那些含有奇异夸克和粲夸克的粒子的质量和寿命。

### 3. 核物质相图

像其他任何形态的物质一样，核物质状态的变化规律也可以总结到一个相图中，它可以揭示当改变温度和密度时核物质性质的变化，从而反映物质在强相互作用下的一些本质特性。强相互作用的基本组成要素是夸克和胶子，它们通常处于“禁闭”结构中。但是，当温度升高而且粒子密度增加到一定程度时，该禁闭将被打破，随后产生一个新的物质态：夸克-胶子等离子体（QGP）。QGP是近年来广受关注的新物质形态，是核物质相图基本结构的一个主要研究对象，它被认为是大爆炸之后一个特定时期所呈现的典型状态。从QGP到强子物质之间的相变过程，是当前核物理研究中的一个前沿领域，确定这一相变的级次和特征，是人们正确认识核物质相结构的一个极为关键问题。FAIR装置提供的强流高能重离子束流为核物质研究创造了极为重要的条件。

### 4. 原子物理与等离子体物理

FAIR将通过提供相对论能量的高电荷态重离子束，对强库仑场中的量子电动力学（QED）、亚阿秒（小于 $10^{-18}$ 秒）碰撞动力学和与原子核耦合的精细原子谱学进行最高精度的实验研究。此外，对于传统物质和反物质的关系，FAIR装置也提供了通过反物质分子开展研究的机遇。强流重离子束驱动的等离子体物理研究，将为离子束惯性约束核聚

变能源概念和技术提供认识 and 解决其中基本物理问题的方法。普通物质在承受极高压力时也会产生一种等离子体（一种自由电子和自由迁移离子的混合），这种等离子体可能存在于类似木星的巨型行星内部，并且可能存在超高压环境下的独特物质结构，如金属氢等。在FAIR装置上，通过强高聚集粒子束流和高功率激光的组合，对此类等离子体状态和性质的研究终将成为可能。

除了物质结构、强子物理、天体核物理过程、极端环境下原子物理和高能量密度物质等基础科学研究外，FAIR装置上也将开展与材料科学和生物科学相关的研究，比如类似于载人航天任务中的辐射生物风险评估应用研究。

针对以上的科学目标，FAIR的研究工作主要基于4个大型的国际合作组展开。具体的合作组与各自围绕的研究内容，请见表1。

## 二、FAIR装置加速器系统及其运行模式

### 1. FAIR装置加速器系统

FAIR装置是一个非常复

杂的加速器系统，包括作为注入器的GSI原有的2台加速器（UNILAC、SIS18），将要新建的8台环形加速器（SIS100和SIS300、CR、RESR、NESR、HESR、ER及FLAIR），质子直线加速器（p-LINAC），超导放射性装置（Super-FRS）及实验设备（参见图2），其中各加速器名称缩写的具体含义说明于下。

UNILAC是原有的直线加速器（Universe Linear Accelerator），于1975年建成，可将离子加速到每个核子15兆电子伏（15 MeV/u），约相当于光速的20%。可提供毫安量级的离子束流，低电荷态铀离子 $U^{28+}$ ；

SIS18是原有的同步加速器，1985年建成，能加速元素周期表中所有元素的原子核，可将离子加速到大约90%的光速。18是这个加速器的磁刚度值，单位为Tm（特斯拉·米，1特斯拉=10000高斯），表示所能加速粒子动量的最高限度。加速器的磁刚度越大，表示它可以将离子加速到更高的动量（能量）；

SIS100是磁刚度为100 Tm的同步加速器，周长1083.6 m，

表1

合作组名称	研究内容	成员人数	成员机构	成员国
NUSTAR (Nuclear Structure, Astrophysics, and Reactions)	原子核结构、核天体物理与基本相互作用和对称性	732	261	109
PANDA (Antiproton Annihilation at Darmstadt)	强子结构与强相互作用力	344	70	13
CBM (Compressed Baryonic Matter)	原子核与夸克物质	357	63	15
APPA (Atomic, Plasma Physics and Applications)	原子物理、等离子体物理与应用物理	571	240	55



可以将电荷态为 28 正的铀 238 离子加速到能量为 690 吉电子伏 (690 GeV,  $1 \text{ GeV}=10^9 \text{ eV}$ ), 将质子加速到 29 GeV。它能够将 5000 亿个铀离子在时间尺度压缩在 60 纳秒之内 (相当于约 80 安培的脉冲电流)。运行时环内的真空度约为大气压的 200 万亿分之一。

SIS300 是磁刚度为 300 Tm 的同步加速器, 周长 1083.6 m, 可以将电荷态为 92 的铀 238 离子加速到能量大于 8000 GeV。

CR 是磁刚度为 13 Tm 的反质子和短寿命放射性核收集环, 周长 212 m, 可对收集的反质子和放射性核进行随机冷却 (降低离子动量分散的方法之一)。

RESR 磁刚度为 13 Tm、周长为 245 m, 是进行反质子实验的冷却存储环。对来自 CR 的反质子进行累积, 对短寿命放射性核进行减速。

NESR 是磁刚度为 13 Tm、周长 222 m 的反质子新实验环。可以对更高能量的放射性核束和反质子束进行电子冷却和减速, 是可以对原子核质量进行高精度测量的谱仪, 也可以进行电子和离子的散射实验, 开展高电荷态原子物理研究。

HESR 磁刚度 50 Tm, 周长 574 m。可以对能量高达 14 GeV 的反质子束流进行随机冷却, 对 9 GeV 的反质子束进行电子冷却。环内安装有喷射气体靶或者小丸固体靶, 开展强子物理研究和核反应研究。

p-LINAC 是质子直线加速器, 能够每秒钟提供 5 次强度为 70 mA, 脉冲宽度为 40  $\mu\text{s}$ , 能量为 70 MeV 的质子束流, 它提供的强流质子束将注入 SIS18 加速器。

ER 是一个电子存储环, 电子束能量高达 50 MeV, 开展与 NESR 中的离子束进行电子-原子核碰撞实验, 研究核子结构。

Super-FRS 是一个短寿命放射性核的产生和分离装置。利用非常高能量的稳定原子核束流轰击靶, 产生的放射性核也具有非常高的能量, 该装置对这些放射性原子核具有很强的分离选择本领, 从而提供纯的放射性核素束流, 用于核物理研究。

SIS100 作为 FAIR 的核心加速器, 将为相对论重离子碰撞研究提供高能、强流的离子束流, 产生强流的各种次级离子束流, 为在 FAIR 系统的其他冷却储存环如 HESR、CBM 和 PANDA 等实验终端上开展的原子核结构物理, 反物质物理, 极端条件下的核物质物理, 等离子体物理, 高电荷态原子谱学, 以及与之相关的各种应用学科研究提供反质子与奇异核束流。

## 2. 直线加速器和环形加速器

FAIR 的建设基于 GSI 的已有装置, 把现有的直线加速器 UNILAC 升级后同新建的 p-LINAC 一起作为注入器, 为新系统提供重离子和质子束流的第一级加速。FAIR 装置中的重离

子同步加速器 SIS100/SIS300, 周长为 1100 米, 为离子束提供第二级加速。FAIR 装置结构虽然非常复杂, 但就加速器的种类来说, 可分为两种, 一是直线加速器, 二是环形加速器 (FAIR 主要加速器类型)。

直线加速器就是沿着一条直线加速带电离子, 直到加速器的末端离子得到最高加速能量。对于高能直线加速器, 它使用了在一条直线上排列的电极腔组合来提供加速电场。当带电粒子在穿越电极腔组合间隙时, 电极上的电场会加速带电粒子。当带电粒子到达下一组电极腔组合间隙时, 电极上的电场方向会及时改变, 能够继续加速带电粒子。所以在直线加速器中, 必须使用高频电场, 保持离子运动位置与加速腔电压极性的相位相匹配, 让每一个带电离子可以持续得到加速。

环形加速器是用磁场将被加速的带电离子约束在确定的轨道上进行加速, 直到离子束被加速到合适的能量后引出为止。环形加速器分为回旋加速器和同步加速器。传统回旋加速器有一对半圆形 (D 形) 的中空盒子和一组磁偶极提供磁场使运动粒子转弯, 在加速缝隙处以固定频率变换电场, 用以加速带电粒子。通常, 带电粒子从盒子的圆心附近开始被加速, 然后随着离子能量的增大, 依螺旋状轨迹运动至盒子边缘。在同步加速器中, 由二级磁铁提供的磁场将离子约束在



固定轨道，约束离子的磁场随着离子的速度变化而同步变化，使得离子的运动轨道保持不变。同步加速器可以将离子加速到接近光速的速度。

### 3. FAIR 的运行模式

为了实现预定的物理研究目标，FAIR 设计了如下几种的运行模式：

由 UNILAC、SIS18 与 SIS100 甚至 SIS300 联合运行，提供高能强流重离子束流进行高能物理实验研究，或者用来轰击靶产生放射性核束流，经过 CR 和 RESR 的积累、冷却和减速，再进入 NESR 处理进行奇特核的结构和性质研究；

由 UNILAC、SIS18 与 SIS100 联合运行，将重离子加速到最高能量，并将束团压缩到 50 纳秒，以进行高密高温等离子体物理研究；

由质子直线加速器与 SIS18、SIS100 联合运行，提供

能量为 29 GeV（相当于超过  $10^{13}$  K 的高温）的强流质子束。质子束轰击靶物质核，反应产生反质子，通过磁场进行分离，反质子在 CR 环将内收集和预冷却，之后引入 NESR 做进一步冷却和减速，以进行低能反质子物理研究；或者直接由 CR 引出高能强流反质子束注入 HESR 进一步加速，以进行高能反质子物理实验研究；

并行运行模式是 FAIR 装置的一个重要特征，具有多达 4 种运行模式同时进行工作（参见图 3）：SIS100 加速质子（橘黄色实线）供轰击靶产生反质子（橘黄色虚线），在 CR/RESR 组合中收集和冷却，然后送到 HESR 或 NESR 做实验；这时 SIS100 加速质子以产生反质子的一个周期完成，不需要再加速质子，就可以注入重离子束（蓝色线）进行加速，并通过慢引出到 Super-FRS 产生放射性核束（蓝色虚

线）供直接实验（也可在 CR 和 RESR 当中没有反质子束时，将放射性核束注入）；另外每 10 ~ 100 秒在 SIS100 和 SIS300 中加速高能重离子束（红线），并通过慢引出进行核碰撞实验；此外，每几分钟可提供一次强流离子束脉冲（绿线）进行实验，提出这类实验要求的束流重复频率非常低。或者在反质子产生的间隙，SIS100 也有可能提供束流（紫色线）进行高电荷态原子物理实验。

### 4. FAIR 的特点和技术挑战

由于 FAIR 是多个加速器的组合系统，具有了许多特点：

可以加速从质子到最重的稳定元素铀的所有质量（电荷）的离子：即全离子加速，特别是还可以通过高能离子轰击靶以产生放射性核，并形成放射性核束流。

提供最高强度的束流：对比原 UNILAC 和 SIS18 组成的系统，FAIR 系统的稳定核束流的强度提高 100 倍，放射性核束流强度提高 10000 倍。这为许多新的研究前沿领域提供了前所未有的条件。

可提供“精细”的束流：即通过随机冷却和电子冷却的方法大大降低各种离子束流（包括放射性束流和反质子束流）的动量分散，从而能使 FAIR 进入新的精细研究领域。

选用环形加速器组合成该系统有许多优点。存储环的一个特点是可以将离子加速到非常高的

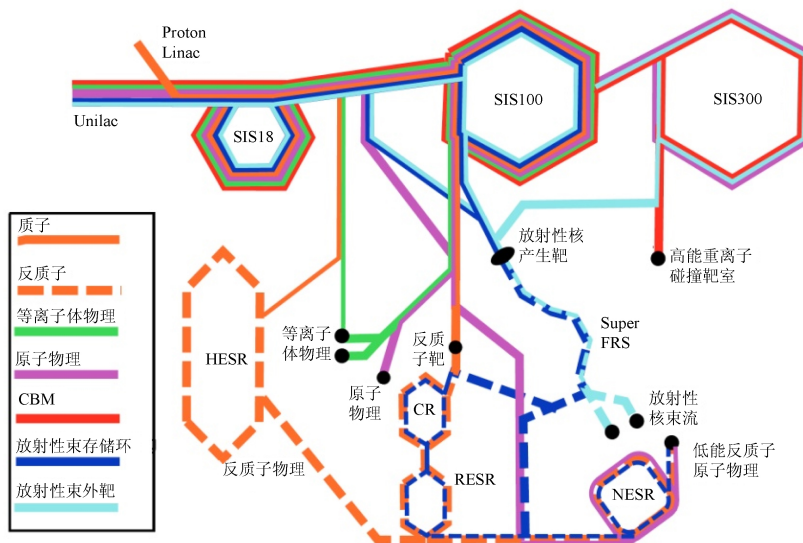


图 3 FAIR 并行运行模式示意图

能量；第二点是在环内对束流进行存储和冷却，使束流的品质得到很大的提高；第三个特点是可以较长时间地将离子存储在环中，通过慢引出一点一点地将环中存储的束流引出，在外靶进行实验，也可以在环内做实验，即内靶实验（靶子在束流轨道上，束流每转一圈打靶一次）。这样存储环中存满束流后，可以利用较长时间，提高束流使用效率。同时，选择环形加速器很容易与原有的系统进行匹配。从以上这些特点可以看出，这种选择具有很好的经济性。

归纳起来，FAIR 在技术上面临以下几个方面挑战：

**动态超高真空的实现：**同步加速器环内的气压都在大气压的 200 万亿分之一，极少的束流损失轰击管壁都会产生大量的气体分子，从而大大降低环内的真空度，严重影响束流的品质。因此，极高真空度的有效保持是有待解决的难题之一。

**高亮度、高流强：**同步加速器运行在极高的束流强度下，达到了空间电荷效应的极限。如何稳定运行，减少束流损失是其关键之二。

**放射性核次级束流的冷却：**目前，只实现了几百千电子伏电子束冷却离子束的实验。在 HESR 中，为满足实验对放射性核束流及反质子束流强度与品质的要求，必须利用高达 4.5 兆电

子伏的高能电子束对它们进行冷却。这是其难题之三。

**高射频电压梯度：**为了更快的加速并压缩束流团，需要更大的高频电压幅度变化，这是其难题之四。

**高磁刚度和快速变化磁刚度：**必须使用超导磁铁，如 SIS100 的二级铁的磁场为 2 特斯拉，运行时其变化速率为每秒 4 特斯拉，SIS300 的磁场强度 6 特斯拉，变化速率为每秒 1 特斯拉。磁铁的体积都很大，要实现这些指标，是其难点之五。

目前，FAIR 工程已经启动，超过 50 个国家的 3000 多位科学家正在国际合作的框架下开展工作，为这个大科学工程项目作贡献。中国的研究所和大学在相关的加速器和实验探测装置研制开发工作中担任着重要的工作。同时，中国科学院近代物理研究所的新一代强流加速器装置 HIAF (High Intensity Heavy-Ion Accelerator Facility) 也在规划建设，装置的科学目标是：精确测量短寿命原子核质量，探索核内新的有效相互作用形式和宇宙中重元素的起源；逼近质子滴线，进入极丰中子核区，研究弱束缚核奇异结构和特性；产生温稠密物质，研究其状态方程，探索新物态；模拟空间离子辐射环境，为抗辐照元器件检测和国产化，宇航员的辐射损伤评价和安全预测预警提供技术支撑；开展核能

装置结构材料辐照损伤的实验模拟，建立核能材料快速评价与筛选的新方法。建设目标是研制一台全离子（从质子到铀）、宽能区（重离子：5 MeV/u ~ 3.5 GeV/u，质子：5 MeV ~ 12 GeV）、高流强（重离子：每个脉冲约  $5 \times 10^{11}$  个粒子）的加速器装置。建设内容包括强流离子源、超导直线加速器、大接收度放射性束流线、能量回收型电子环冷却的同步加速器，以及放射性核束物理等多个实验线站和配套设施。中国科学家在为 FAIR 工程作出贡献的同时，也积极为 HIAF 项目的规划建设创造条件。

本文的撰写与中国参加 FAIR 项目的国际合作研究工作得到科技部 973 计划项目“自由电子激光与反质子加速器等重大基础研究”的支持，在此表示感谢。

（中国科学院近代物理研究所 730000）

