



中国科学院近代物理研究所
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences

中国先进核物理研究装置

China advanced NUclear physics research Facility, CNUF

—— HIAF和CiADS升级工程

孙志宇

中国科学院近代物理研究所

“十二五” 国家重大科技基础设施

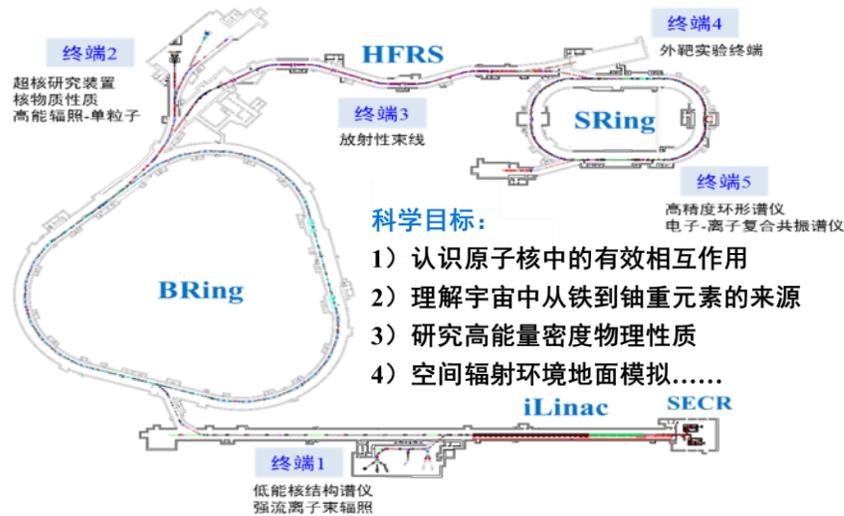


- **地点: 广东省, 惠州市, 黄埠镇**
- 2015年12月获得国家批准
- 项目总投资 ~人民币68亿元
- HIAF建设2018年12月正式启动; CiADS建设2021年7月启动
- 目前建设工作按计划顺利进行, HIAF将在2025年中期具备开展束流实验的条件



强流重离子加速器装置 (HIAF)

国际上脉冲束流强度最高的重离子加速器装置

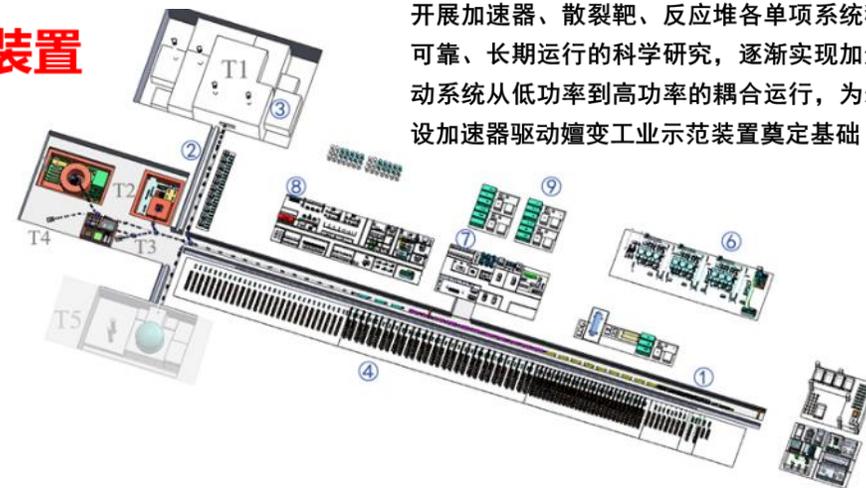


科学目标:

- 1) 认识原子核中的有效相互作用
- 2) 理解宇宙中从铁到铀重元素的来源
- 3) 研究高能量密度物理性质
- 4) 空间辐射环境地面模拟.....

科学目标:

开展加速器、散裂靶、反应堆各单项系统稳定、可靠、长期运行的科学研究, 逐渐实现加速器驱动系统从低功率到高功率的耦合运行, 为未来建设加速器驱动嬗变工业示范装置奠定基础



国际上首个兆瓦级ADS研究装置
加速器驱动嬗变研究装置 (CiADS)



2022.8

- 1、科学目标、科学意义和战略价值
- 2、拟解决关键科学技术问题
- 3、实验设施设计方案与技术指标
- 4、实验设施的扩展功能和溢出效应
- 5、关键技术预研现状，及技术成熟程度
- 6、国际竞争态势
- 7、核心人员队伍、依托单位已有条件及支持
- 8、项目预研和建设预算以及时间进度安排

1、科学目标、科学意义和战略价值



宇宙中的可见物质基本是**核物质** (>99.9%)

探索物质的本质是永恒的科学主题

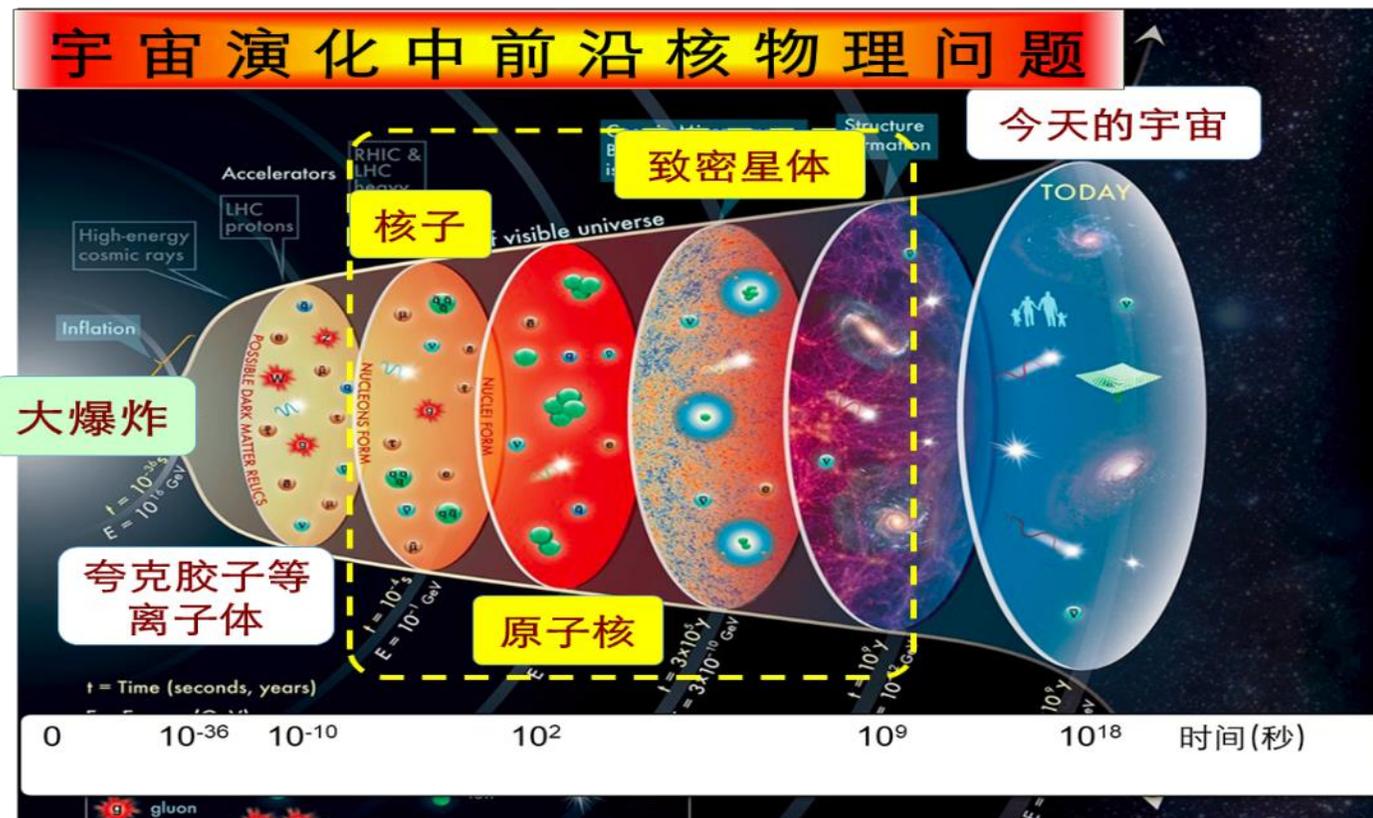
核物质起源、结构、性质和演化的研究是**科学前沿**

已取得重要成果，如产生20余项诺贝尔奖。

仍存在**若干重大前沿问题**：

- **质量的起源是什么？（核子质量）**
- **高温高密下核物质的形态？**
- **宇宙中从铁到铀的元素是如何形成的？**
- **元素周期表有尽头吗？**

一旦突破，将大大深化我们对物质世界的认知



重离子碰撞是实验室产生和研究核物质的最佳手段

基于粒子加速器的重大科技基础设施是研究核物理前沿科学问题不可或缺的重要工具和手段
现代核科学研究越来越多地依赖于粒子加速器重大科技基础设施的支撑

核物理科学前沿的发展，迫切需要设计建设更高流强的先进离子加速器装置

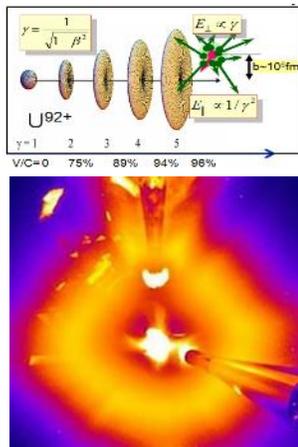
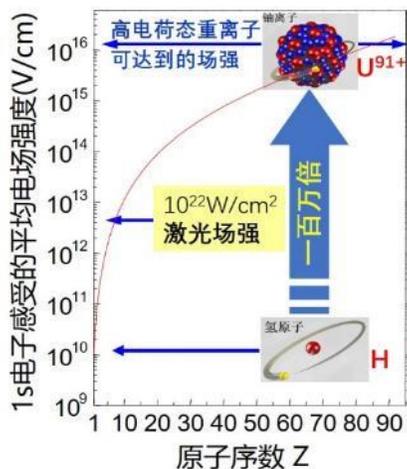
1、科学目标、科学意义和战略价值



基础研究是科技创新的源头，也是解决“卡脖子”技术问题的根基

重离子束创造极端研究条件，开辟交叉研究领域

核物理研究中产生的知识和技术被广泛应用于国家安全和经济社会发展！



- 超强电场** 铀原子1s轨道电场强度 $>10^{16}$ V/cm
- 超快电磁探针** 相对论速度碰撞 $<10^{-18}$ s
- 高能量密度** 温稠密等离子体 >1 Mbar

- 强场到超临界场强的量子电动力学效应？
- 量子力学非局域性原理的本质？
- 温热稠密等离子体的状态方程？

通过极端条件下实验研究，
发现新现象，探索新物理



核科学与技术是综合国力的重要标志，
大国必争的科技战略高地！

建议基于HIAF和CiADS已有的良好基础，设计建设中国先进核物理研究装置（CNUF）！

国际领先的核物理前沿与应用研究装置

1

核物理基础与交叉前沿研究

从核子、原子核、核物质等多个层面开展研究，深化对深层次微观物质结构及其背后物理规律的充分和全面认识。

- ① 探索核素存在极限，揭示核力的基本性质以及管控核子的方式；
- ② 高重子密度核物质相结构，夸克胶子等离子体 (QGP) 态与强子气体态之间的一级相变和临界点；
- ③ 从夸克胶子层面理解核子的内禀性质，如其自旋组成和质量起源；
- ④ 超越施温格极限库仑场强下量子电动力学 (QED) 有效性的检验；
- ⑤ 检验基本对称性，寻找超出标准模型新物理；
- ⑥ ……

2

重离子束应用研究

可能对国家战略需求产生深远影响的前沿领域和关键技术

- ① 能源结构问题和全球气候等问题对推动核聚变应用领域发展，研究高能量密度物质基本性质，深入理解惯性约束热核聚变相关基础物理和技术难题的需求；
- ② 航天装备的整星级单粒子效应检测对高能高通量重离子束的需求；
- ③ 核武器包壳材料无损检测等国防领域对高通量高能缪子、中子等次级粒子成像技术的需求；
- ④ 凝聚态物理、能源材料、化学等研究领域对 μ SR技术的需求；
- ⑤ ……

3

先进离子加速器物理与技术

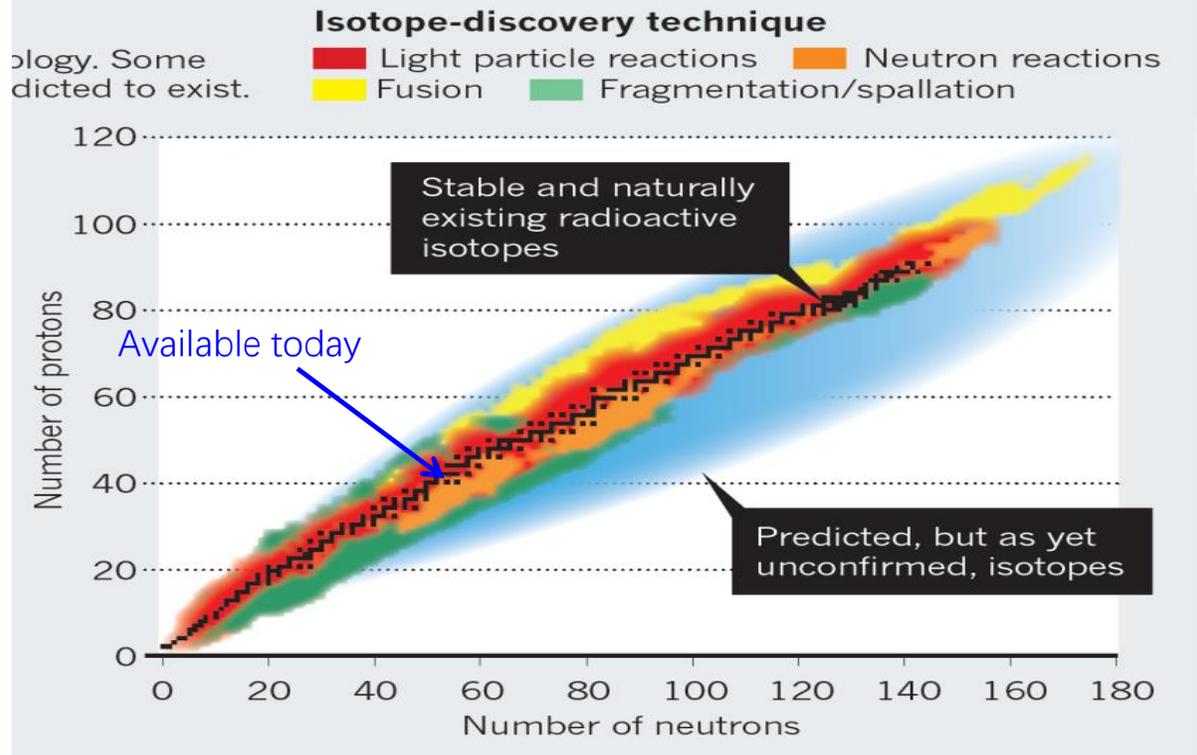
离子束制备与精确操控技术：高流强、高功率、高品质新的束流冷却和快速加速机理及技术，……

科学前沿

重大需求

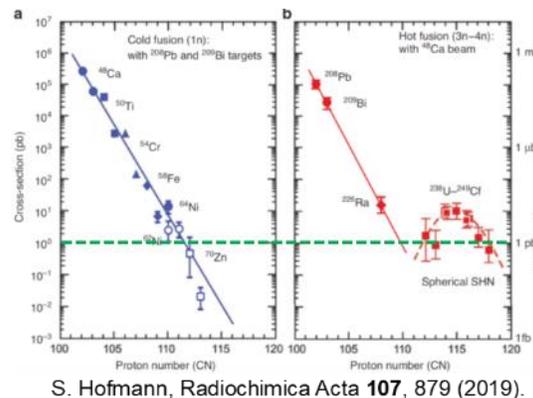
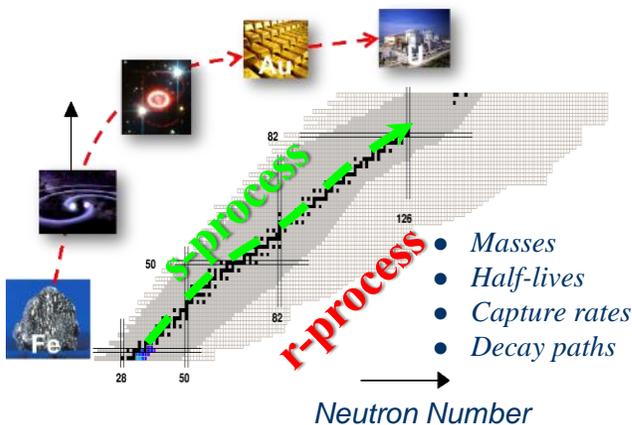
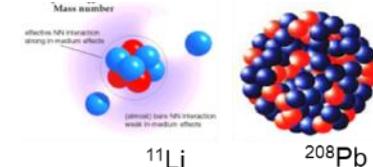
前瞻技术

2、关键科技问题：核力的本质和核素存在极限

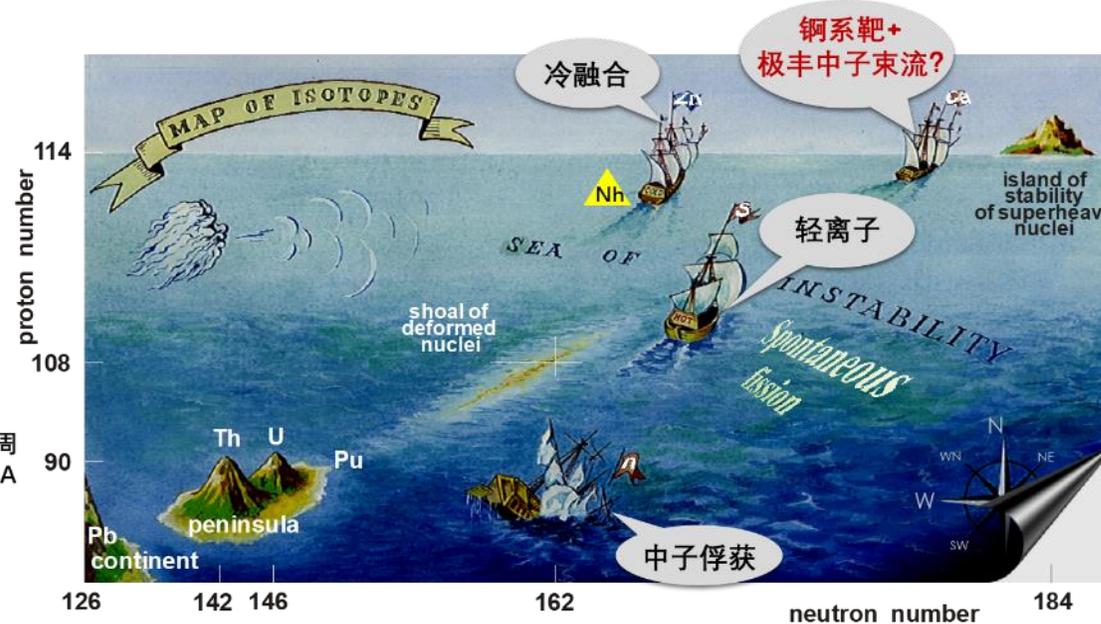


探索核素图上迄今未知的领域，发现新的现象

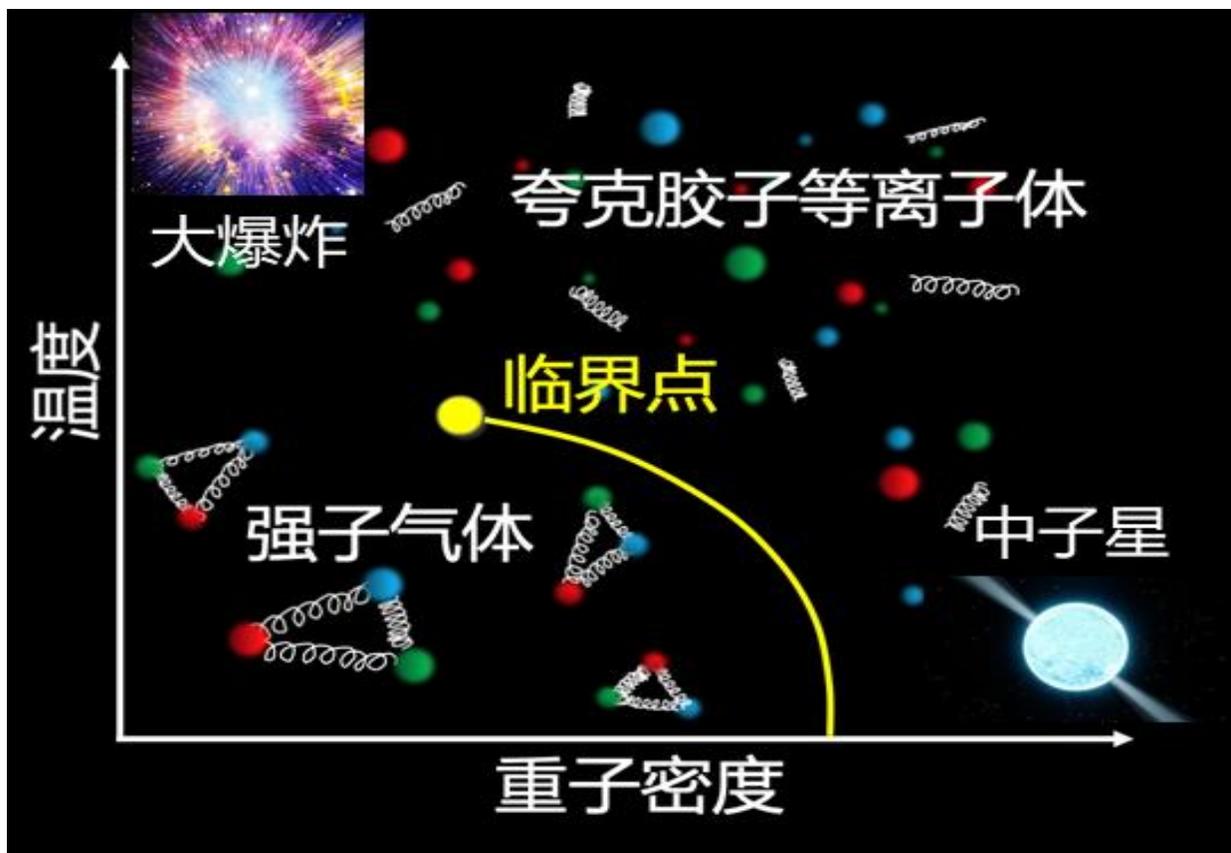
- 核力的本质，原子核的统一描述
- 原子核的存在极限
- 化学元素的起源
-



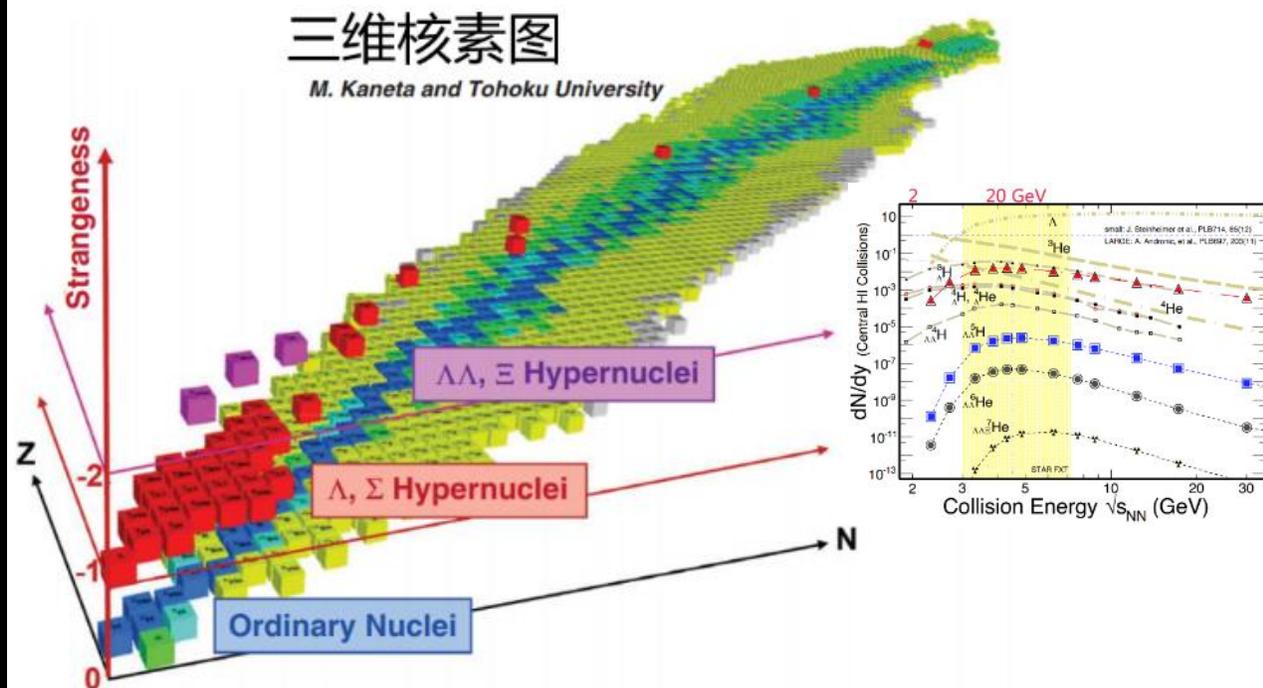
1事例/周 @ 1 pμA



2、关键科技问题：核物质相结构

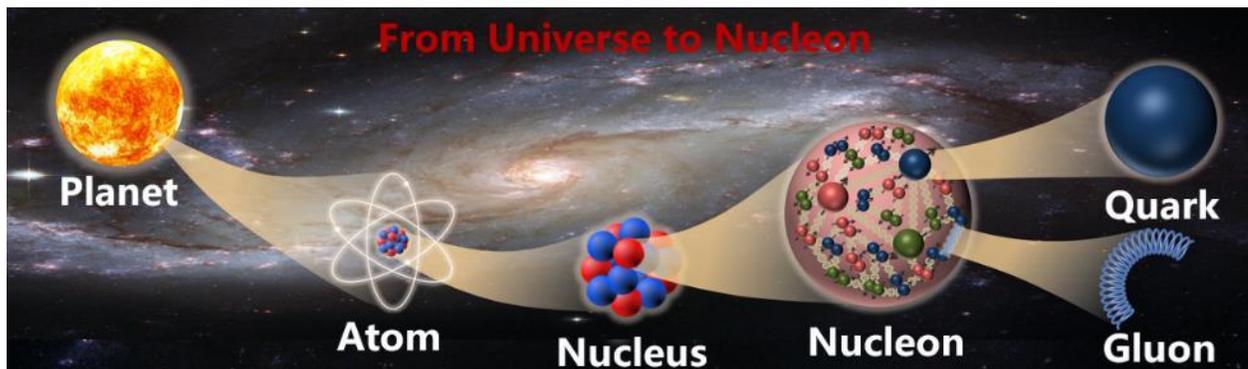


- 低温高密核物质的相结构，QGP与强子气体之间可能存在的一级相变和临界点
- 研究这些新颖的核物质相结构有助于理解早期宇宙的演化

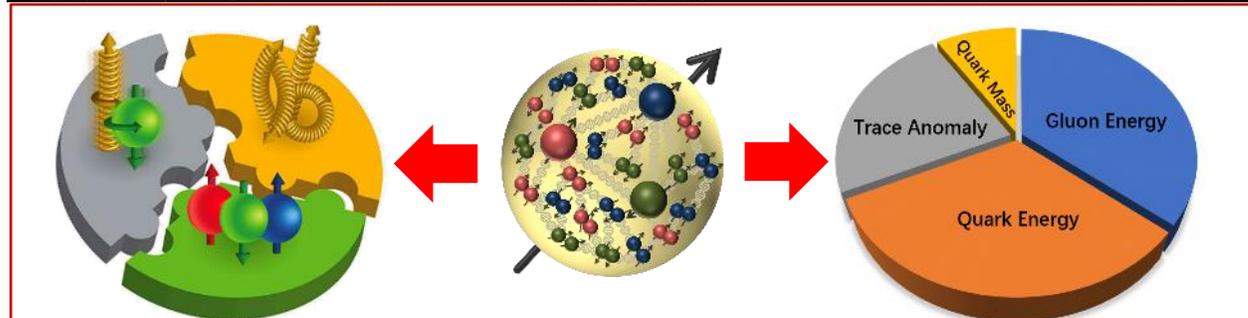


- 研究超核性质以及超子-超子，超子-核子间相互作用，寻找新的超核，特别是双奇异数超核
- 在深入理解强相互作用自身同时，可能揭示中子星内部结构的奥秘

2、关键科技问题：核子的内部结构



- **核子自旋的起源:** 一维和三维部分子分布函数的精确测量
- **核子质量的起源:** 重质量夸克偶素近阈生产的理想覆盖

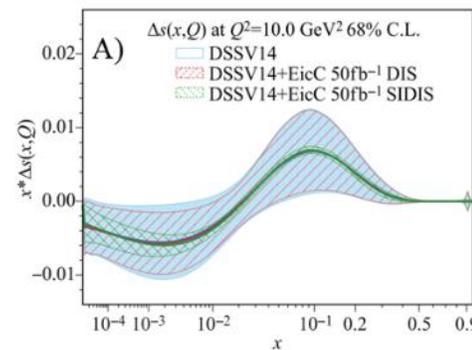
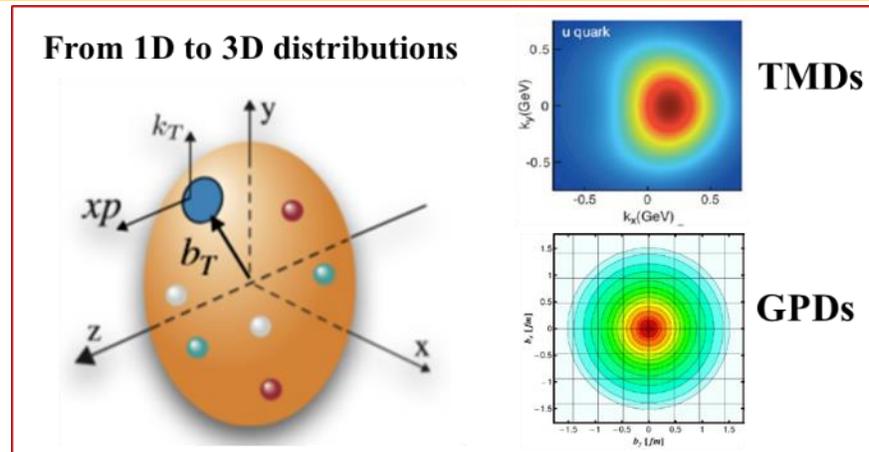


Spin structure

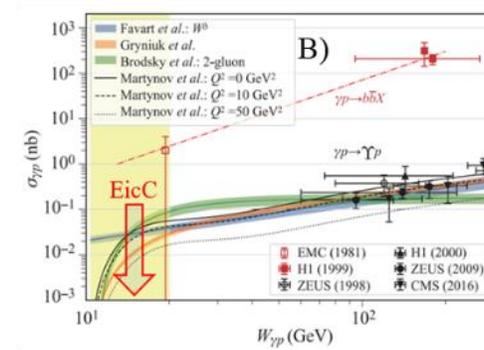
$$S_{tot} = \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta \Sigma + \Delta G + \mathcal{L}_q + \mathcal{L}_g$$

Proton mass

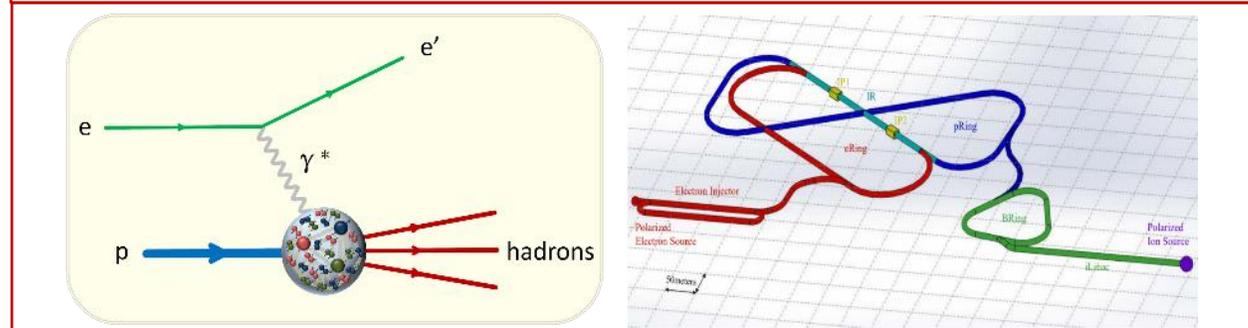
$$M = M_q + M_m + M_g + M_a$$



helicity distribution of s quark:
1-order of magnitude improvement



heavy quarkonium near-threshold production:
currently lack of data



2、关键科技问题：强场中的QED效应



- 量子电动力学 (QED) 当前在弱场情况下已经得到了高精度的验证。
- 然而，弱场下的理论处理方法是否依然适用于强场情况仍然是未知的。
- 高电荷态重离子为在强场下检验QED理论的有效性提供了理想的工具。

探索真空的衰变

Schwinger Critical field strength

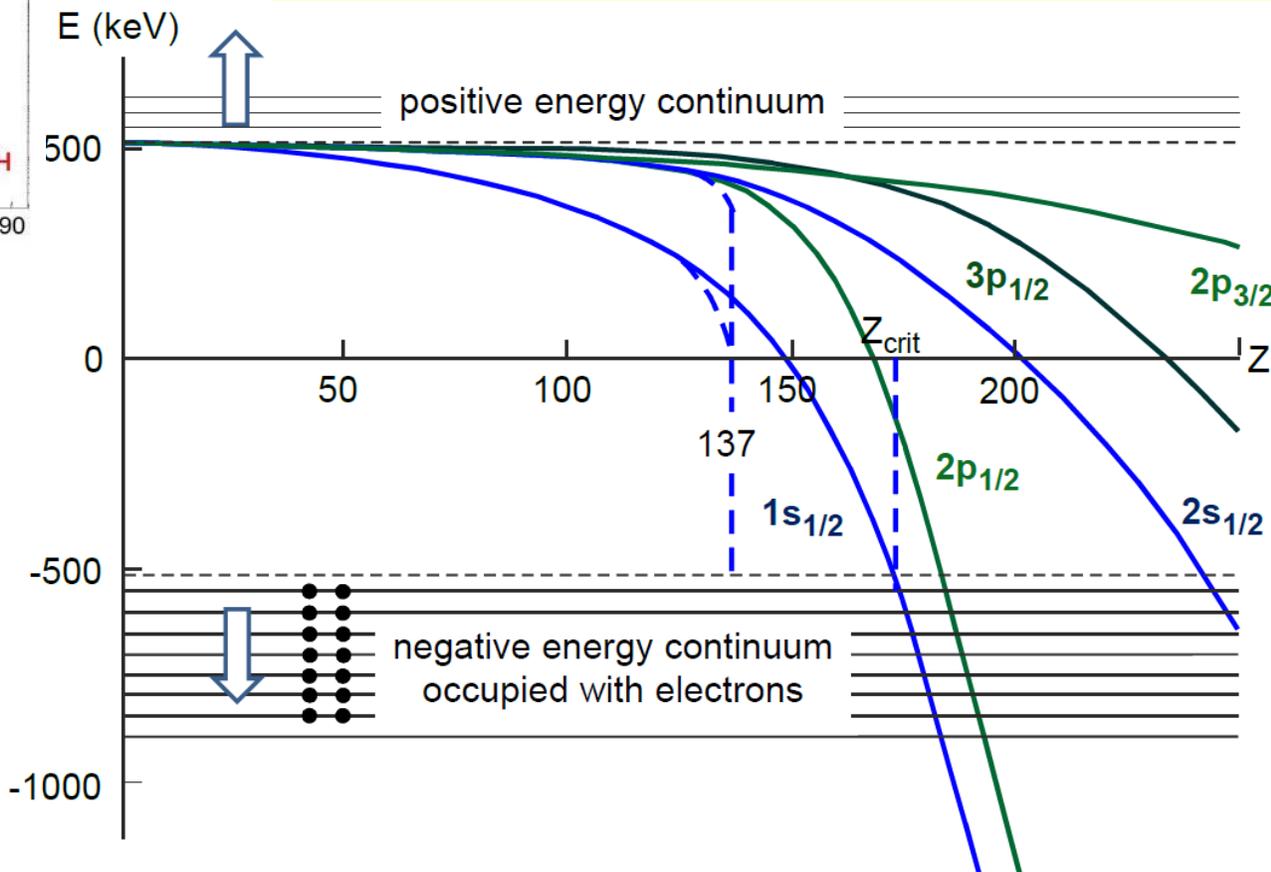
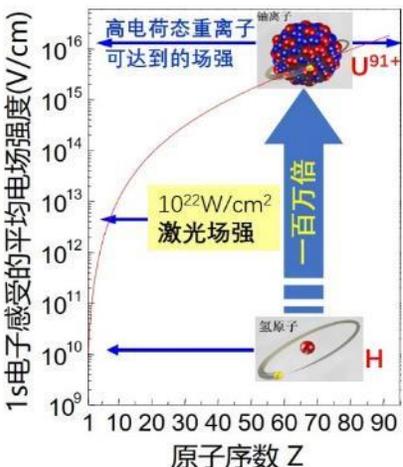
$$E_{cr} = \frac{\pi m^2 c^3}{e\hbar} \approx 1.3 \times 10^{18} \frac{V}{m}$$

当离子电荷态超过临界值

$$Z_{crit} \approx 173,$$

1s 能级将进入负能连续态

物理真空变得不稳定：产生 e⁻e⁺ 对



hydrogen

Z=1
E_b = 13.6 eV
Z·α ≪ 1

uranium ion

Z=92
E_b = 132 keV
Z·α ≈ 1

- What happens when the nuclear charge Z increased?
- If Z is greater than Z_{crit} the ionic levels 1s_{1/2} can “dive” into Dirac’s negative continuum.
- Physical vacuum becomes unstable: creation e⁻e⁺ pairs

2、关键科技问题：基本对称性和超出标准模型的新物理



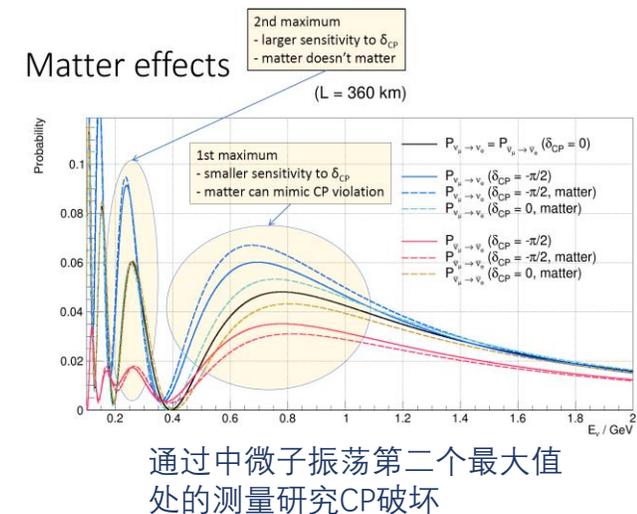
- 寻找和研究超出标准模型的新物理是当前研究热点。
- 高亮度前沿研究是揭示超出标准模型的新物理规律的重要途径，
- 强流离子加速器打靶产生的强次级粒子束流，是开展高亮度前沿研究的必要基础。



通过精确测量 η 、 η' 的衰变和稀有衰变的寻找，研究基本对称性和寻找超出标准模型的新物理

强流离子碰撞产生 π^\pm ，衰变产生强的 μ^\pm 及 ν_μ 、 ν_e 束

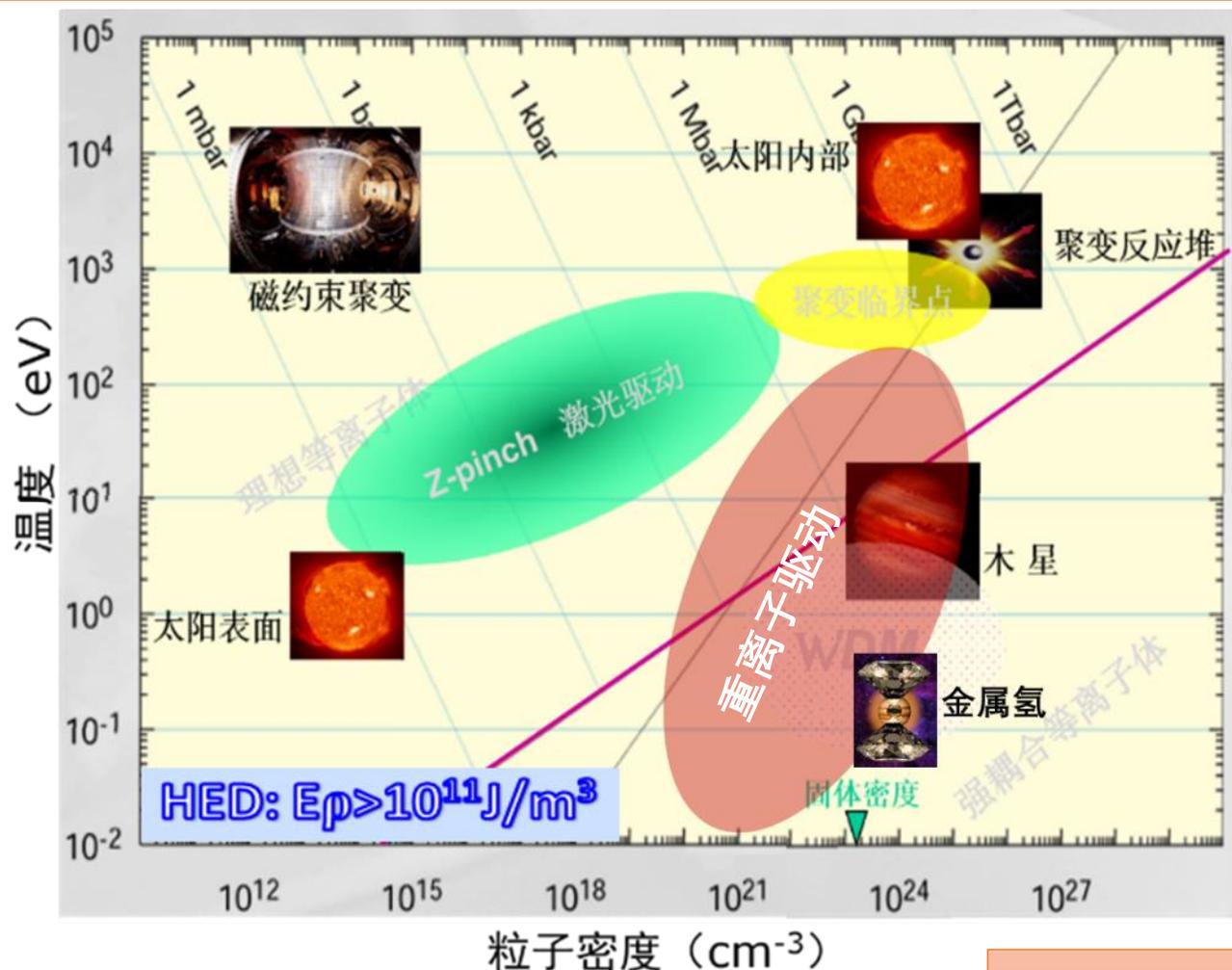
- 缪子带电轻子味破缺 (Charged Lepton Flavor Violation, cLFV, 包括 $\mu \rightarrow e \gamma$, $\mu \rightarrow eee$, 缪子电子转换 ($\mu^- + N \rightarrow e^- + N$) 等)
- 缪子反常磁矩 ($g-2$)
- 电偶极矩 (Electric Dipole Moment, EDM)
- μ -原子 (muonic atom/ion, $\mu^- - AX$) 和 μ 子原子 (Muonium, $\mu + e^-$) 的精密谱学
-



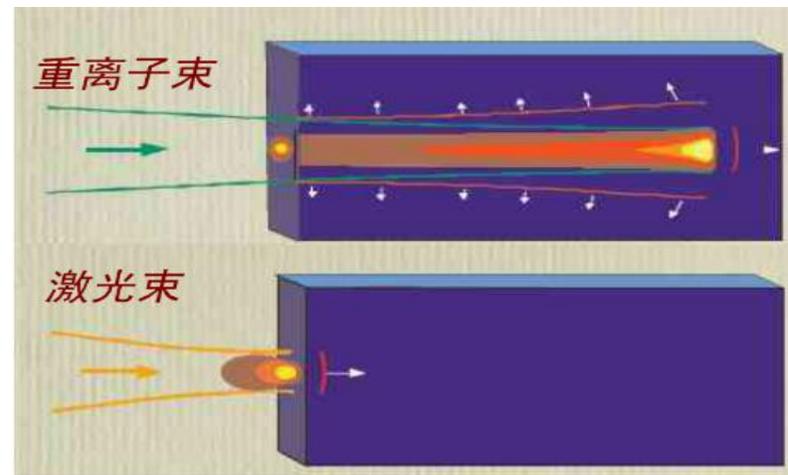
通过中微子振荡第二个最大值处的测量研究CP破坏

精确检验标准模型、寻找新物理的理想反应过程

2、关键科技问题：重离子驱动的高能量密度物质



强流重离子束驱动HEDM不同于强激光点火过程



HIB-HED特点:

- 样品体积大、状态均匀;
- 等容加热任意材料@高密;
- 可精确计算;
- 可操控性好...

$$E_{\rho} = \frac{dE}{dx} \cdot \frac{N}{\pi \cdot r^2}$$

强流重离子束驱动的高能量密度物质特性与演化

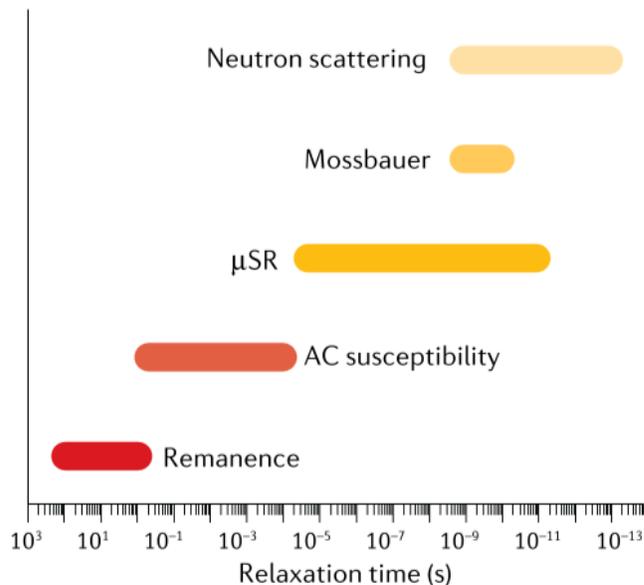
覆盖温稠密物质领域到超强冲击波区域

- 高能量密度物质的状态方程、冲击波物理与流体动力学不稳定性等
- 极端条件下奇异物态和性质，如金属氢、超电离态水等。
- 天体物理学和地球物理学的重要问题
- 探索重离子驱动惯性约束聚变新途径。

2、国家重大需求：高通量缪子束应用



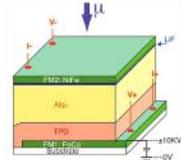
μSR (muon Spin Rotation/Relaxation/Resonance)



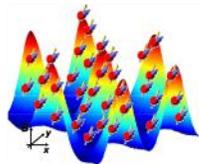
• 超导体



• 半导体



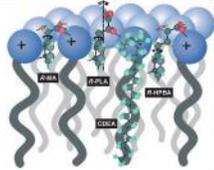
• 磁性材料



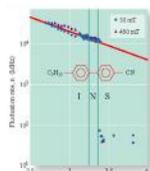
• 自由基化学



• 软物质

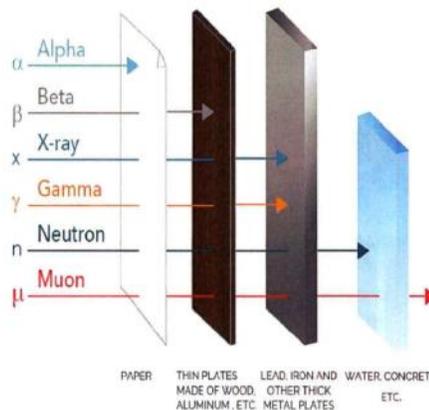


• 分子动力学

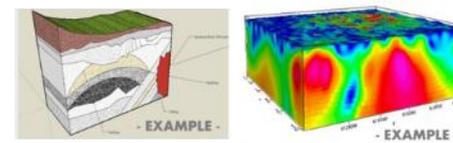


精确研究样品与微观磁性相关的静态或动态过程

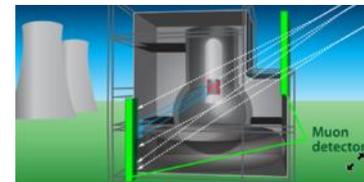
缪子成像



- 缪子成像**
- 优点:
 - 穿透力强
 - 无需防护
 - 来源:
 - 宇宙线
 - 加速器
 - 原理:
 - 透射成像
 - 散射成像



地壳浅层密度结构成像



反应堆堆芯成像



加速器缪子成像:

- 高能量，能量一致性较好
- 高通量，方向单一 宇宙线μ子通量的10⁵倍

- ✓ 特种核材料和大尺寸物件的快速、高位置分辨无损检测
- ✓ 提升核能安全检测及监管

高能高通量缪子源有望为大型战略武器装备的有效性评估提供技术支持

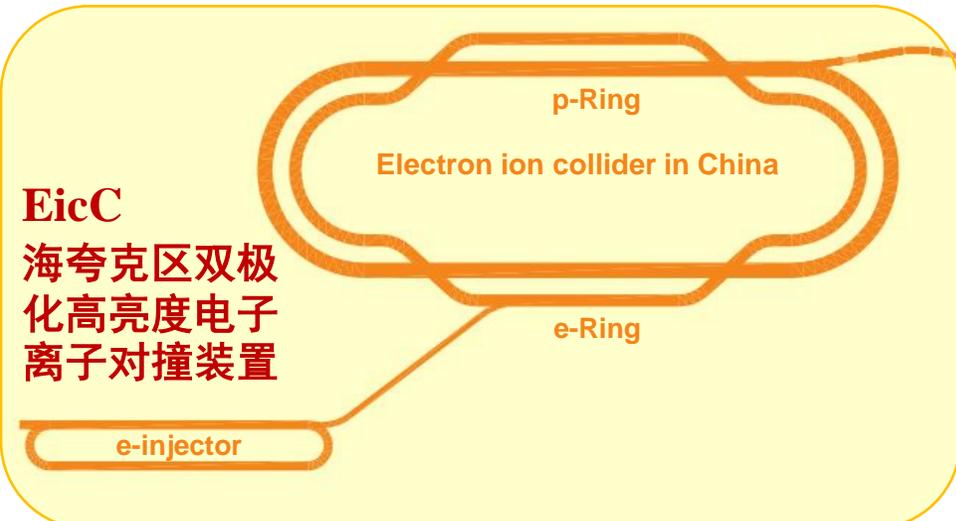


3. 实验设施设计方案与技术指标



中国先进核物理研究装置 (CNUF)

HIAF和CiADS装置的升级项目

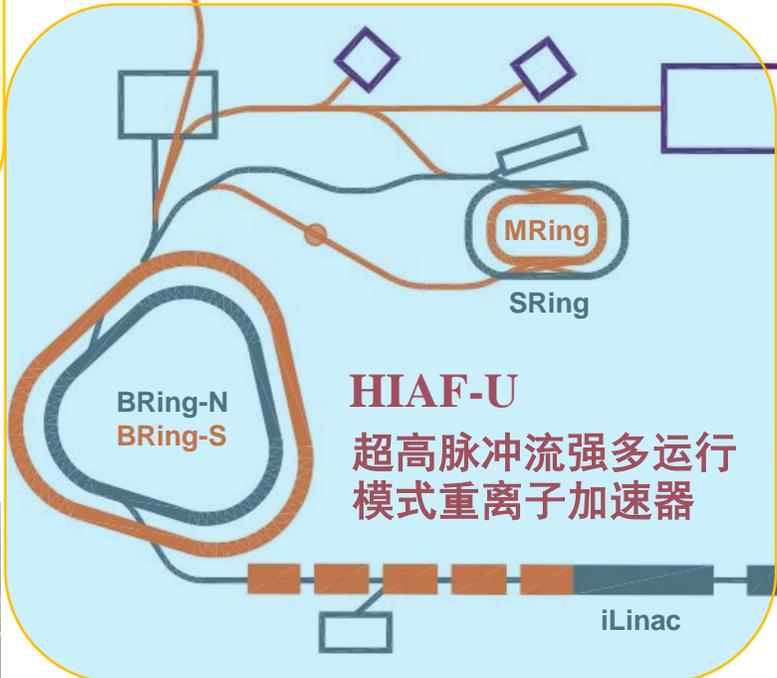


强流重离子加速器装置 (HIAF)

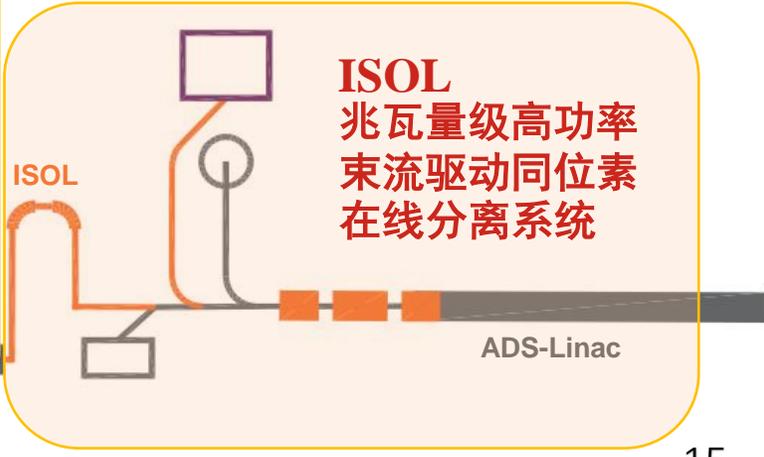
MeV/u重离子连续束和GeV/u重离子脉冲束国际最高流强



国际首台MW级ADS研究装置 加速器驱动嬗变研究装置 (CiADS)



- Planned facility
- Planned experiment hall
- Existed Facility



- “十二五”国家重大科技基础设施项目
- 2018年12月建设工作正式启动
- 总预算~人民币68亿元
- 计划2025年中期首次获得束流



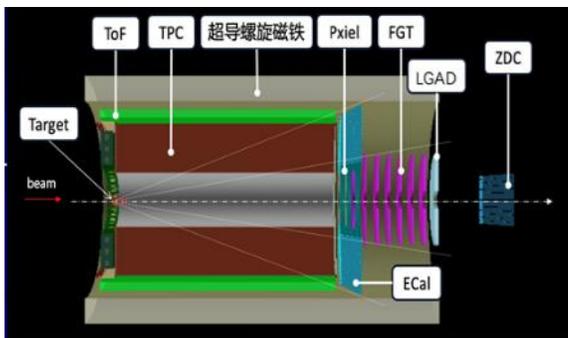
3. 实验设施设计方案与技术指标



HIAF-U: 集多运行模式的超高流强质子、重离子加速器

核物质综合研究平台

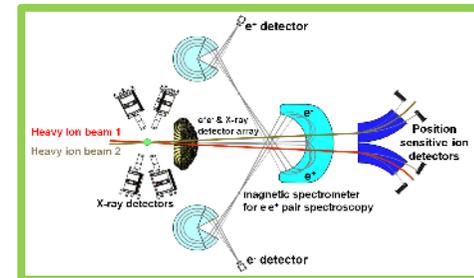
- 模式: BRing-S (慢引出 p-U) + 固定靶
- 超高束流强度、全离子束流条件
- 核物质相变、超核、 η 物理、 Λ 极化等



- π 、K、 p 、轻核等带电粒子鉴别;
- 带电粒子动量分辨率好于5%;
- γ 光子能量分辨率好于5%/ \sqrt{E} 。

缪子物理及应用研究

- ~2GeV
- 10^5 每平方厘米每秒



核物质
超核

高能密度物理

MRing
~270米

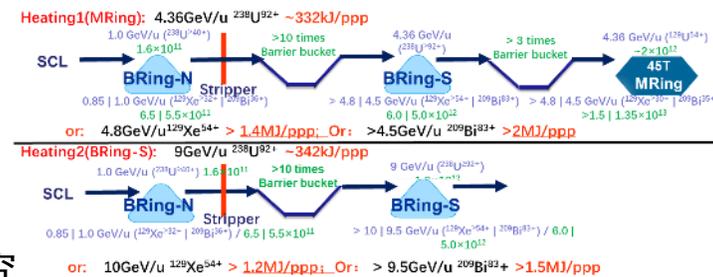
SRing
离子离子
并束

强场QED效应研究平台

- 模式: MRing & SRing 全裸铀束交叉/并束碰撞
- 质心能4-10 MeV/u, 亮度 $>4 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 突破施温格极限 ($1.3 \times 10^{18} \text{ V/m}$) 的超强电磁场, 提供零本底真空电子对产生环境

高能密度物理研究平台

- 模式: BRing-N/S & MRing + 高精度束团操控
- 2MJ、ns量级高功率超短束团
- 双束协同打靶/多束复合打靶
- 强冲击波区高能密度物理研究



BRing-N
BRing-S
~570米

国际领先的高能密度物理研究平台

iLinac
iLinac能量升级到200MeV/u

- 建设超导同步加速器环BRing-S, $B_{p,max} = 86 \text{ Tm}$, 3Hz
- 建设超导储存环MRing, $B_{p,max} = 45 \text{ Tm}$

优化的
多束流
顺序压
缩+快
速点火

新
概念
惯
约
聚
变
探
索

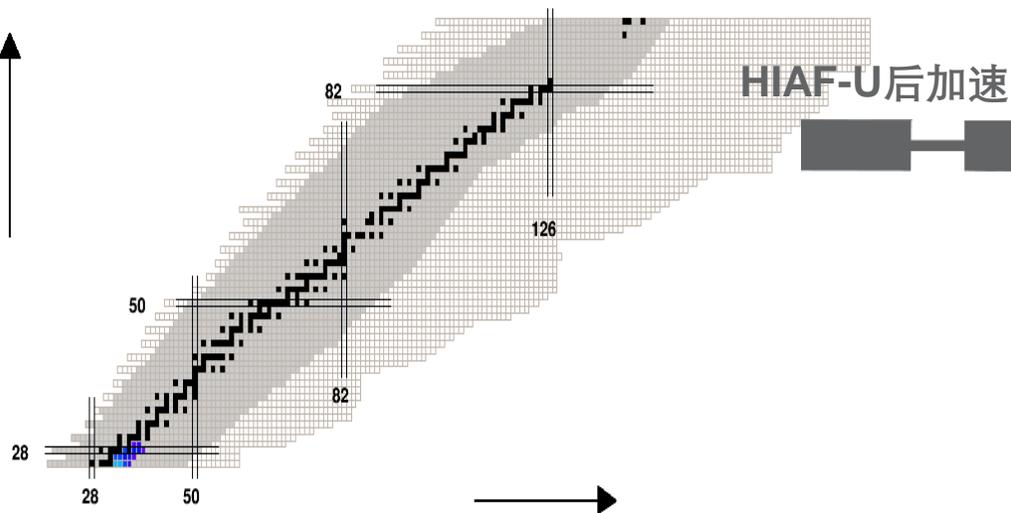
- 单束团能量: 几十kJ
温稠密物质研究
- 单束团能量: 几百kJ
双束打靶模式
- 级联压缩与
快点火探索
- 单束团能量: ~MJ
多束协同打靶模式
- 聚变点火工程探索

装置	典型离子(GeV/u)	束流强度(ppp)
FAIR (德国)	2.7 $^{238}\text{U}^{28+}$	5×10^{11}
NICA (俄罗斯)	4.5 $^{197}\text{Au}^{32+}$	4×10^9
FNAL (美国)	8.0 p	6.8×10^{13}
	3.0 $^{238}\text{U}^{35+}$	2×10^{12}
HIAF-U (中国)	9.1 $^{238}\text{U}^{92+}$	1×10^{12}
	25 p	4×10^{14}

ISOL:兆瓦级高功率束流驱动同位素在线分离系统

丰中子核素研究平台

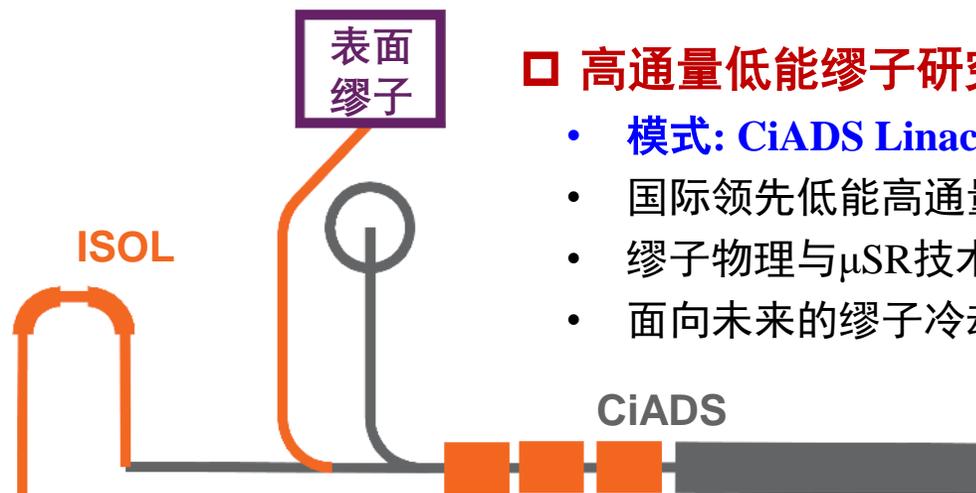
- 模式: ISOL + iLinac + BRing-N (后加速)
- 高产额(极)丰中子核素制备($\sim 10^{16}$ fis./s)
- 特有的百MeV次级核素后加速
- 核素存在极限、超重核稳定岛、宇宙重元素起源等研究



短寿命原子核研究领域国际上最强大的设施之一

高通量低能缪子研究平台

- 模式: CiADS Linac + 高功率靶
- 国际领先低能高通量缪子束 ($\sim 10^{11}$ μ^+ /s)
- 缪子物理与 μ SR技术应用
- 面向未来的缪子冷却与加速研究



➤ CiADS质子直线能量提升到2GeV

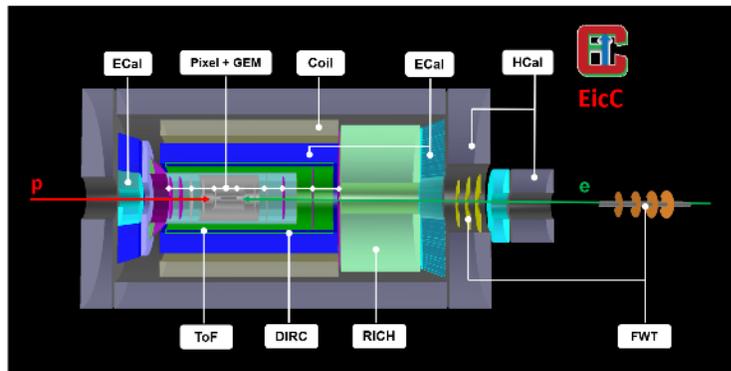
国际领先的高功率质子加速器

	FRIB (美国)	PSI (瑞士)	ESS (欧洲)	CiADS-I (中国)	CiADS-II (中国)
束流	H to U	p	p	p	p
模式	CW	CW	CW	CW	CW
能量 (GeV)	>0.2	0.59	2.5	0.5	2.0
流强 (mA)	-	2.44	2	5	5-10
功率 (MW)	0.4	1.44	5	2.5	10-20

3. 实验设施设计方案与技术指标



EicC: 海夸克能区高亮度极化电子离子对撞机



- 电子: 5 GeV, 4.5×10^{13} ppp, 80%极化率
- 质子: 25GeV, 4.0×10^{14} ppp, 70%极化率
- 重离子: d (极化), ^3He (极化) to U

EicC

核子结构研究

- 模式: 快循环、满能量束团注入与替换
- 质心能=15-20 GeV, 亮度= $(5-6) \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 高能束冷却&自旋操控等先进加速器技术
- 积分亮度150-200 fb^{-1} (美国EIC $<100 \text{ fb}^{-1}$)
- 核子质量和自旋的起源

25GeV 质子

p-Ring

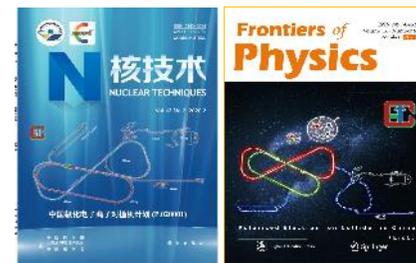
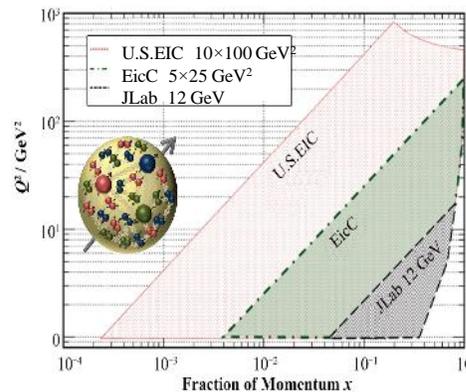
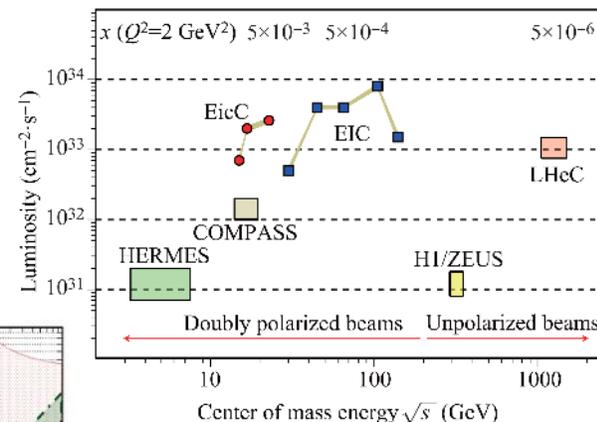
~1200m

p-Ring: 86.5Tm, 500MHz RF

e-Ring: 16.7Tm, 500MHz RF

e-Ring

➤ HIAF-U极化束改造, 作为离子束注入器



EicC 探测谱仪:

- 4π 全立体角覆盖
- 动量分辨: 1%@1GeV
- π/K 分辨可达~15 GeV/c

➤ 基于ERL与电子储存环的高能束团冷却技术

e-injector

5GeV Linac Ring

~300m

➤ 满能量注入与替换: 快循环增强器BRing-S的满能量束团快速替换亮度新模式, 通过p-Ring高品质离子束流持续更新

3. 实验设施设计方案与技术指标



CNUF 总体束流参数

	加速器	磁钢度(Tm)	典型粒子	能量(GeV/u)	束流强度	
HIAF-U	BRing-S	86	$^{238}\text{U}^{35+}$	2.95	2×10^{12} ppp	超导 booster
			$^{238}\text{U}^{76+}$	7.30	1×10^{12} ppp	
			$^{238}\text{U}^{92+}$	9.10	1×10^{12} ppp	
			p	25.0	4×10^{14} ppp	
	MRing	45	$^{238}\text{U}^{92+}$	4.40	2×10^{12} ppp	交叉/并束碰撞
EicC	eRing	16.7	e	50.0	4.5×10^{13} ppp	80%极化
	pRing	86	p	25.0	4.0×10^{14} ppp	70%极化
ISOL	CiADS-II	-	p	2.00	5-10 mA	CW

HIAF/CiADS 总体束流参数

	加速器	磁钢度(Tm)	典型粒子	能量(GeV/u)	束流强度	
HIAF	BRing-N	34	$^{238}\text{U}^{35+}$	0.80	$1-2 \times 10^{11}$ ppp	常温 booster
			$^{238}\text{U}^{76+}$	2.45	$0.5-1 \times 10^{11}$ ppp	
			p	9.30	5×10^{13} ppp	
	SRing	15	$^{238}\text{U}^{92+}$	1.10	$1-5 \times 10^{11}$ ppp	常温储存环 实验谱仪
CiADS	CiADS-I	-	p	0.50	5 mA	CW

4. 实验设施的扩展功能和溢出效应



作为国际最大的离子加速器综合装置之一，整体建成后CNUF将成为国际上独一无二的核科学研究中心并长期保持国际领先地位。预期设施稳定运行不少于**30年**，为全球科学家提供一流的实验设施。

突破重大前沿科学问题：

- 将为一系列核物理领域重大前沿科学问题的回答做出不可替代的贡献；
- 将提供新的重要研究手段，有力推动我国一批交叉学科的发展，提升在这些领域实验和理论方面的国际竞争力；
- 升级潜力大：未来通过升级探测设施，可以扩展到 η 和 η' 介子衰变的高精度测量，基于加速器的中微子研究等众多领域，检验研究QCD基本对称性，寻找超出标准模型的新物理。

满足国家战略需求：

- 提供高能量密度物质物态研究的最佳实验条件，为深入理解惯性约束热核聚变的基础物理和技术问题，推动核聚变应用领域发展，解决能源结构问题和全球气候问题提供有力支撑。
- 实现航天装备的整星级单粒子效应检测（高能重离子）；
- 为大型战略武器装备的有效性评估提供技术支撑（高通量高能缪子束成像研究）；

拉动我国工业领域新工艺和新技术水平提升：

- CNUF的建设和运行将集成大批先进技术，例如高稳定高精度电源、射频功率源和大功率微波器件、大型低温和超导技术、精密制造、自动控制和高精度测量、超高真空、全方位高性能粒子鉴别探测等。
- 这些关键技术研发，将拉动我国工业领域新工艺和新技术的水平，进而服务于能源、医疗、信息等重大战略需求。

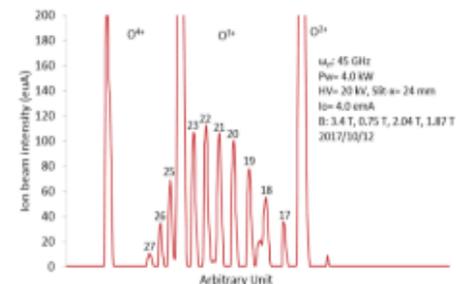
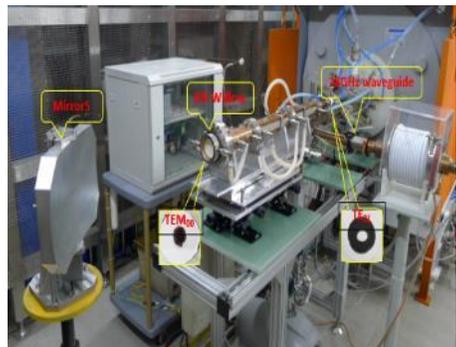
培育创新技术：

- CNUF也将成为未来粒子加速器核心技术研发的优越平台，为解决例如缪子冷却、尾场加速等重大理论和技术问题提供支持，在未来条件成熟后，更可升级扩展为高能多粒子加速器装置，为重大基本科学问题的解决提供实验条件。

5.关键技术预研现状，及技术成熟程度



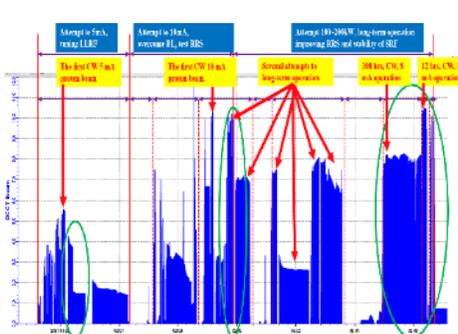
强流离子束产生



Xe beam with 45 GHz

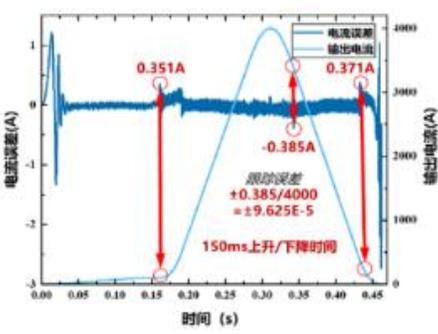
➤ 创造多个高电荷态离子新纪录；成功研制国际首台45Hz全Sn₃Nb超导磁体

高功率离子射频超导技术

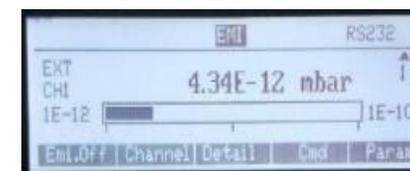
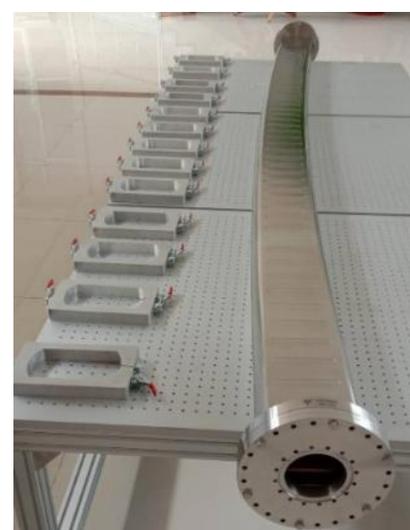


➤ 成功研制了25MeV强流超导质子直线加速器，实现百千瓦百小时&10 mA运行

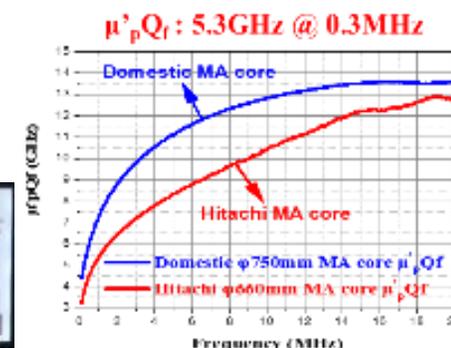
非谐振快循环加速核心技术



➤ 研制世界首台变前励全储能大功率快循环数字电源



➤ 首创瓷环内衬超薄壁极高真空室，实现国际领先真空度指标

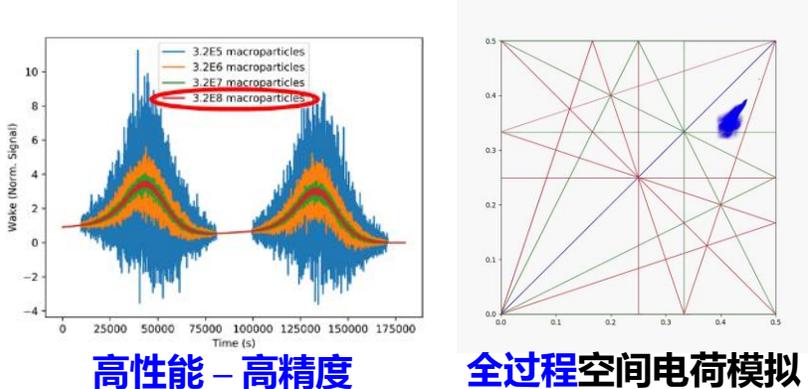


➤ 攻克大尺寸纳米晶磁合金环核心技术，成功研制油冷大功率高梯度磁合金高频系统

5.关键技术预研现状, 及技术成熟程度

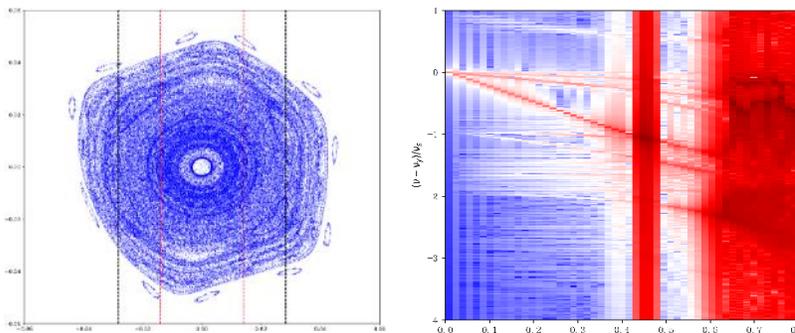


高性能复杂动力学全过程耦合模拟平台



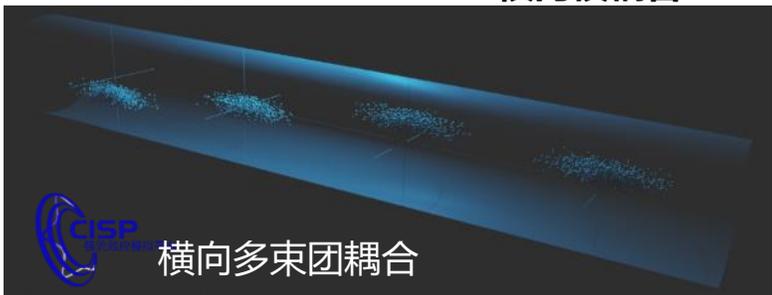
高性能 - 高精度

全过程空间电荷模拟

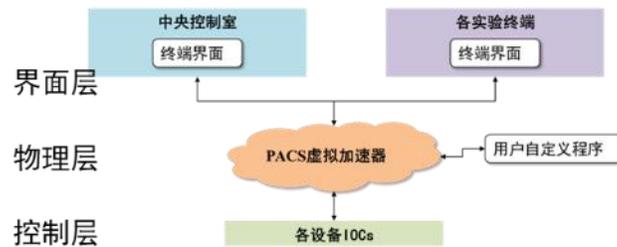


高阶非线性效应

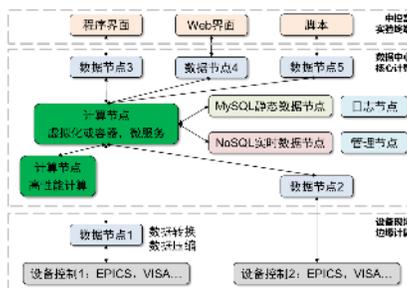
横向模耦合



动力学导向的集成化束流控制软件



全新三层架构, 嵌入14类动力学程序, 实现SESRI注入到终端全过程控制



万物互联

集成任意类型计算资源

EPICS 大数据或慢速数据阻塞

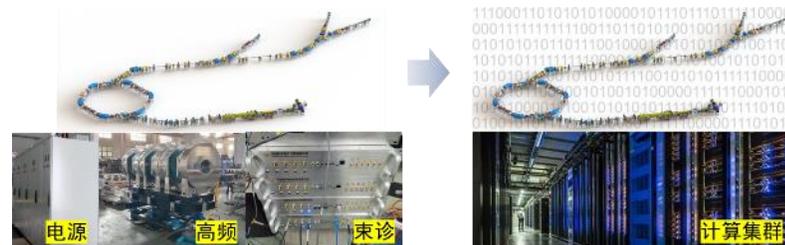
PACS-D

并行处理, 高吞吐, 低延时

自研高速通信协议

数字孪生可视化远程精准操控

一比一全过程SESRI数字孪生装置

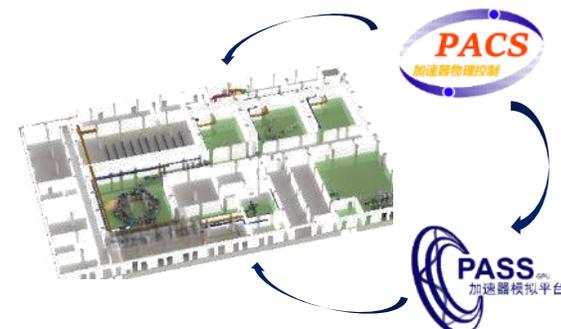


开启加速器装置远程联合调试、运行新模式



哈工大SESRI中控

近物所兰州HIRFL中控



打造未来先进加速器设计、建设、运行的新理念

CNUF的建设没有无法克服的技术困难!

6. 国际竞争态势



基于大型粒子加速器装置的研究平台建设一直是国际最激烈的竞争领域，也是影响国家竞争力和国家安全的关键组成部分。美国、俄罗斯、欧洲和日本从未停止对此领域的持续投入和支持。

CNUF建成后，将成为国际领先的大型离子加速器设施之一 与国际同类装置比较

	国际领先高功率质子加速器					国际领先强流离子加速器					
装置/机构	FRIB (美国)	PSI (瑞士)	ESS (欧洲)	CiADS-I (中国)	CiADS-II (中国)	FAIR (德国)	NICA (俄罗斯)	FNAL (美国)	CNUF (中国)		
典型粒子	H to U	p	p	p	p	$^{238}\text{U}^{28+}$	$^{197}\text{Au}^{32+}$	p	$^{238}\text{U}^{35+}$	$^{238}\text{U}^{92+}$	p
运行模式	CW	CW	CW	CW	CW	Pulse	Pulse	Pulse	Pulse	Pulse	Pulse
能量 (GeV/u)	>0.2	0.59	2.5	0.5	2.0	2.7	4.5	8.0	3.0	9.1	25
流强/功率	- (0.4 MW)	2.44 mA (1.44 MW)	2 mA (5 MW)	5 mA (2.5 MW)	5-10 mA (10-20 MW)	5×10^{11} ppp	4×10^9 ppp	6.8×10^{13} ppp	2×10^{12} ppp	1×10^{12} ppp	4×10^{14} ppp
建成时间	2022	1996	2027	2027	2040	2025	2022	2028	2034		

加速器物理与技术

- 国内在粒子加速器建设和技术研发领域与国际领先水平的差距不断缩小，逐渐进入“并行”状态，具备支撑建设国际领先加速器集群装置的能力，并在部分理论和核心技术领域取得了原创性成果的突破。
- 与国际主要加速器中心比较，国内目前的短板之一是缺乏大型动力学模拟平台建设，对外软件依赖度高。

高密核物质相结构

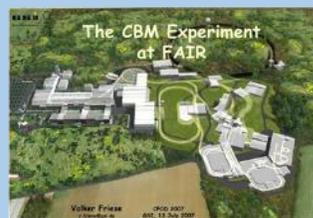
- 当前高能核物理的研究热点，国际竞争激烈。
- RHIC开展了能量扫描实验，但其在低能段事件率较低。
- 德国在建的FAIR-CBM计划2028年开始实验。
- 俄罗斯在建的NICA-MPD计划2023年开始实验。
- CNUF可开展2.2-4.5 GeV质心能量的重离子碰撞实验，与FAIR-CBM(2.7-4.9 GeV)接近，能覆盖比RHIC、NICA-MPD更高的重子密度区域。



美国RHIC-STAR



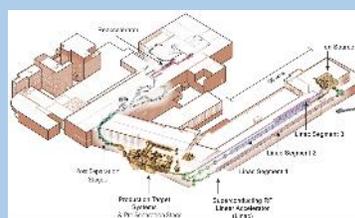
俄罗斯NICA-MPD



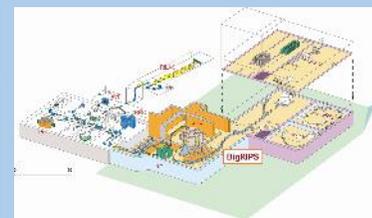
德国FAIR-CBM

核素版图拓展

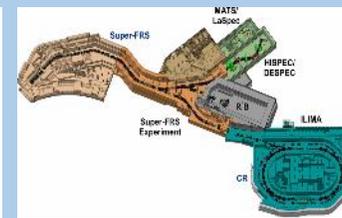
- 放射性核束 (RIB) 产生装置是相关研究的基础。
- 国际上已发展到第三代，美国的FRIB和日本的RIBF已率先投入运行，
- 我国运行中的装置RIBLL和BRIF属于第二代，建设中的HIAF也属第三代，将缩小差距，实现并跑。
- CNUF将是新一代RIB装置，助力我国在该领域取得领先。



美国FRIB



日本RIBF



德国FAIR-NuSTAR

6. 国际竞争态势



核子结构

- 国际上，美国EIC项目已经在BNL启动，计划于2030年后开展高能电子离子对撞。
- CNUF立足于中低能量的海夸克能区，处于高能EIC以及更低能的JLab实验之间的空白区，彼此之间有很好的互补性。
- 优势：CNUF的能区覆盖了重夸克偶素 (J/ψ 、 Y 等) 的产生阈值，可以系统研究重夸克偶素产生机制及质子质量起源等重要物理问题。



美国EIC

η 衰变研究

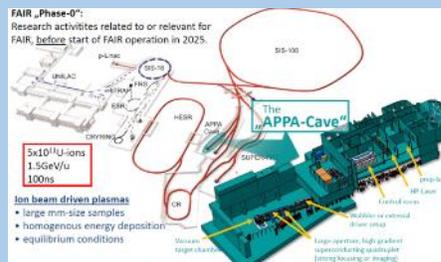
- 国际上当前对于 η 介子衰变的实验研究很大程度上受限于统计量。
- 新一代 η 介子工厂项目中，费米实验室主导的REDTOP已处于提议、预研阶段。
- CNUF能够提供更高的离子束流强，预期一小时就可以产生目前世界上所有 η 和 η' 介子实验数据。



美国REDTOP

高能量密度物理

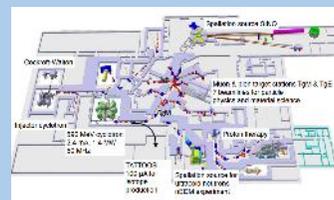
- 高功率重离子束制备的高能量密度物质，相比其它动态加载方式，具有样品尺寸大、状态均匀等突出优势，为系统开展高能量密度物理研究开辟了新的实验途径。
- CNUF可以提供世界最高功率的离子束，配合独特的双束打靶模式，有望将重离子束驱动高能量密度物态拓展到强冲击波区域。



德国FAIR-APPA

缪子物理及应用

- 缪子物理和技术应用在国际上有广泛的研究。
- 国内只有CSNS建设中的EMuS有望满足部分需求。
- CNUF将建设国际最高水平的下一代 μ 子源装置，可以大大促进相关物理及交叉应用学科的发展。



瑞士PSI



美国FNL



日本J-PARC

7.核心人员队伍、依托单位已有条件及支持



- 建议的项目经多年积累，在核物理和离子加速器领域拥有一支结构合理、国内顶尖、国际上有重要影响的高水平人才队伍
- 项目依托单位中国科学院近代物理研究所先后负责建设、运行着包括几代国家重大科技基础设施在内的多台套大型加速器研究装置，积累了丰富的设施建设、运行和管理经验，掌握了设施建设关键技术，并在重离子核物理前沿研究和离子束应用研究方面取得了一系列重要成果
- 作为项目基础的HIAF和CiADS建设按计划顺利进行，为本项目的提出奠定了坚实基础
- 作为我国核科学与技术未来发展的核心项目，近代物理研究所对本项目将从队伍、资源、政策等全方位的全力支持

人才队伍	
院士	6人
杰青	15人
优青	8人
科技创新领军人才	5人
千人计划	9人
百千万人才	6人
....

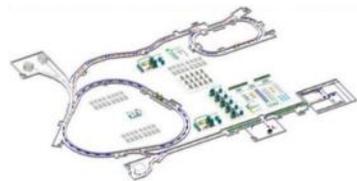
运行



国家重大科技基础设施“兰州重离子加速器(HIRFL)”

现有的国内最大的综合型重离子研究装置

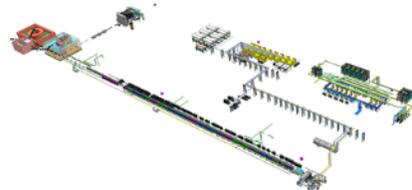
在建



国家重大科技基础设施“强流重离子加速器装置(HIAF)”

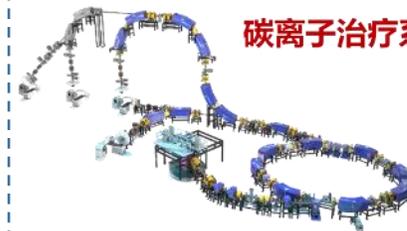
国际上在建的低能连续和高能脉冲束流最强的重离子研究装置

在建



国家重大科技基础设施“加速器驱动嬗变研究装置(CiADS)”

国际在建的首台兆瓦级ADS原理验证装置



碳离子治疗系统

- 入选国家“十三五”科技创新成就展
- 获得2020年度甘肃省科技进步奖特等奖

8. 建设进度计划和经费预算



CNUF的建设工作计划分为两个阶段

阶段一

主要完成HIAF-U部分，从束流强度、能量等方面实现对HIAF性能和功能的全面提升，完善实验研究平台建设，开辟高能密度物理等新研究领域。

预计经费46亿元，建设周期6年

	系统	造价(亿元)	备注
建设项目	iLinac升级	5.5	
	超导快循环增强器BRing-S	12.0	
	超导储存环MRing	5.0	
	高能强流离子束束团压缩及操控系统	2.0	
	终端实验研究分析平台	7.0	
	束线系统	2.5	
	装置土建及配套设施	4.5	
	低温系统	2.5	
	不可预见	5.0	
	小计	小计	46

阶段二

完成EicC和ISOL部分，实现与CiADS的有效融合，升级完善实验探测装置并增建极化电子离子对撞等研究设施，进一步将研究领域拓展到亚核子层次。

预计经费59.5亿元，建设周期7年

	系统	造价(亿元)	备注
建设项目	ISOL放射性束流系统	4.0	
	CiADS超导直线升级	7.0	
	电子注入器	5.0	
	电子对撞环	6.0	
	离子对撞环	8.0	
	终端实验研究分析平台	4.0	
	电子离子对撞谱仪	5.0	
	束线系统	5.0	
	装置土建及配套设施	7.0	
	低温系统	3.0	
不可预见	5.5		
小计	小计	59.5	

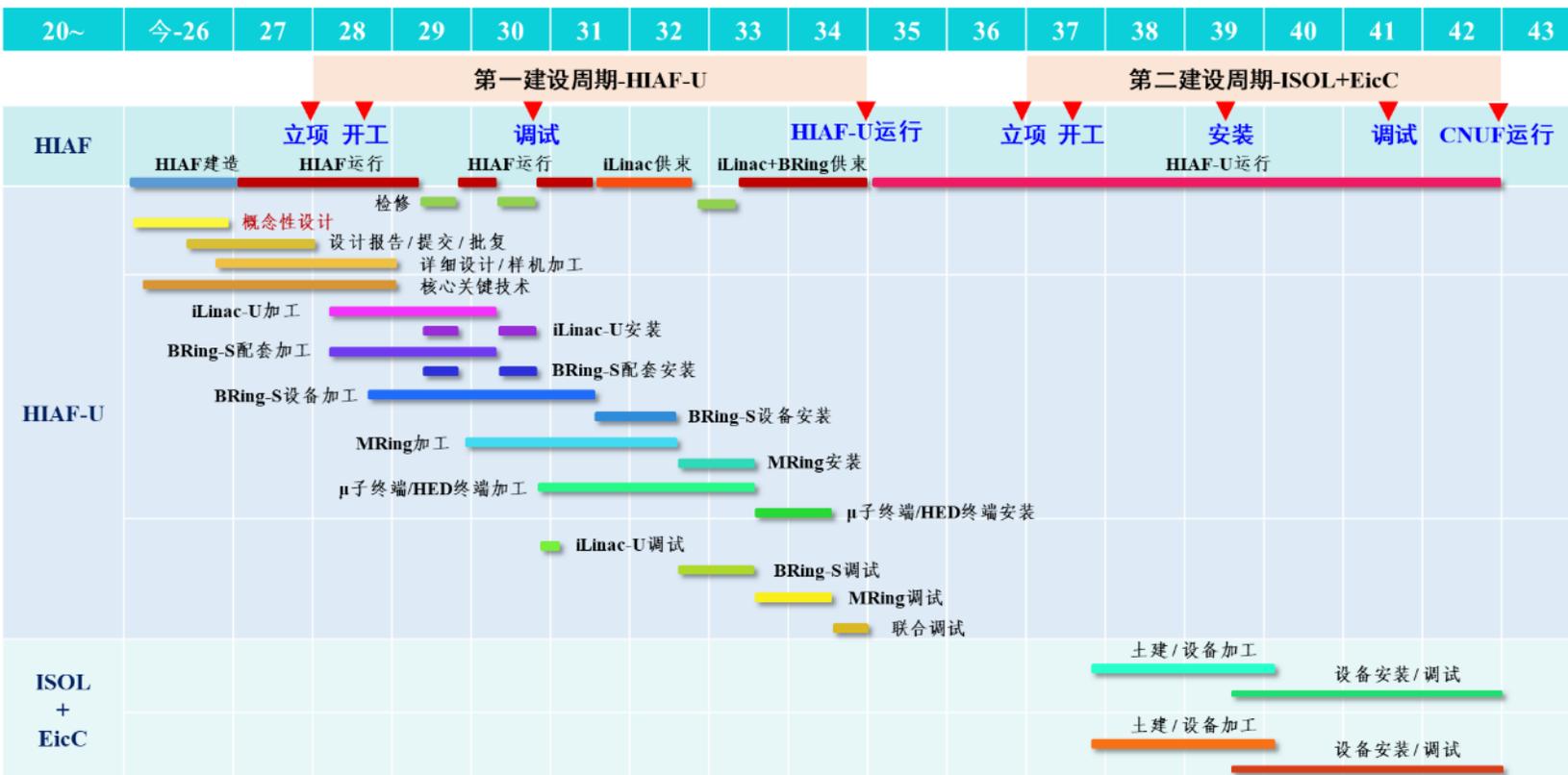
8. 建设进度计划和经费预算



HIAF预期在2027年达到全部设计指标

假设CNUF第一阶段的建设建议在2027年底前获批，则2028年中期可以启动建设工作，2030年底开始部分调试，2034年底运行。

由于CNUF是HIAF和CiADS的更新项目，为尽量减小建设工作对现有设施正常运行的影响：



- 在HIAF施工过程中，已经充分考虑了未来升级在施工空间方面的需求，避免升级过程中土建对HIAF运行的影响。
- 通过分时和分段施工的方式，最大限度减少对HIAF运行影响的同时又能尽早发挥HIAF-U的性能优势。
- 相关关键技术的预研已经逐步展开，计划在2028年底前完成。
- iLinac升级和BRing-S公用设备的安装将利用HIAF2029、2030两年的夏季维护进行。
- BRing-S设备安装计划从2031年下半年到2032年上半年进行，期间HIAF仍可利用iLinac束流开展实验工作。
- MRing设备安装计划在2032年下半年至2033年上半年进行，期间不影响利用iLinac和Bring束流开展实验研究工作。
- 各实验终端的建设不会干扰HIAF的运行，其建设进度将分别推进。
- HIAF-U的联合运行调试计划在2034年底完成。

项目第二阶段在第一阶段完成后展开。假设2036年底获批，则2037年中期开始施工，2039年中期安装，2041年下半年调试，2042年年底投入使用。第二阶段的建设与HIAF-U相关性较弱，施工期间绝大部分时间HIAF-U将正常运行。

- 作为国家重大科技基础设施HIAF和CiADS的升级工程，我们建议建设中国先进核物理研究装置（CNUF）；
- CNUF将是世界上规模最大、性能领先的以核物理研究为主的多学科综合装置，建成后，将为核物理基础研究、交叉学科及应用研究提供一个独特的平台和一流的实验设施，助力解决重大前沿科学问题，服务国家重大需求，培育创新技术；
- 项目依托单位已建立起一支结构合理的高水平项目团队，具备深厚的技术积累以及丰富的加速器大科学装置设计、建设和运维经验，可以确保项目建设的顺利完成；
- CNUF的建设将分两个阶段开展，目前各项关键技术的预研已经逐步开始。

谢谢