
BISOL和BRIF的进展

柳卫平

代表串列核物理国家实验室和原子能院北京大学BISOL团队
核探测与核物理国家重点实验室联合年会

中国原子能科学研究院
北京大学

2019年4月22-23日

BISOL和BRIF的进展

柳卫平

代表串列核物理国家实验室和原子能院北京大学BISOL团队
核探测与核物理国家重点实验室联合年会

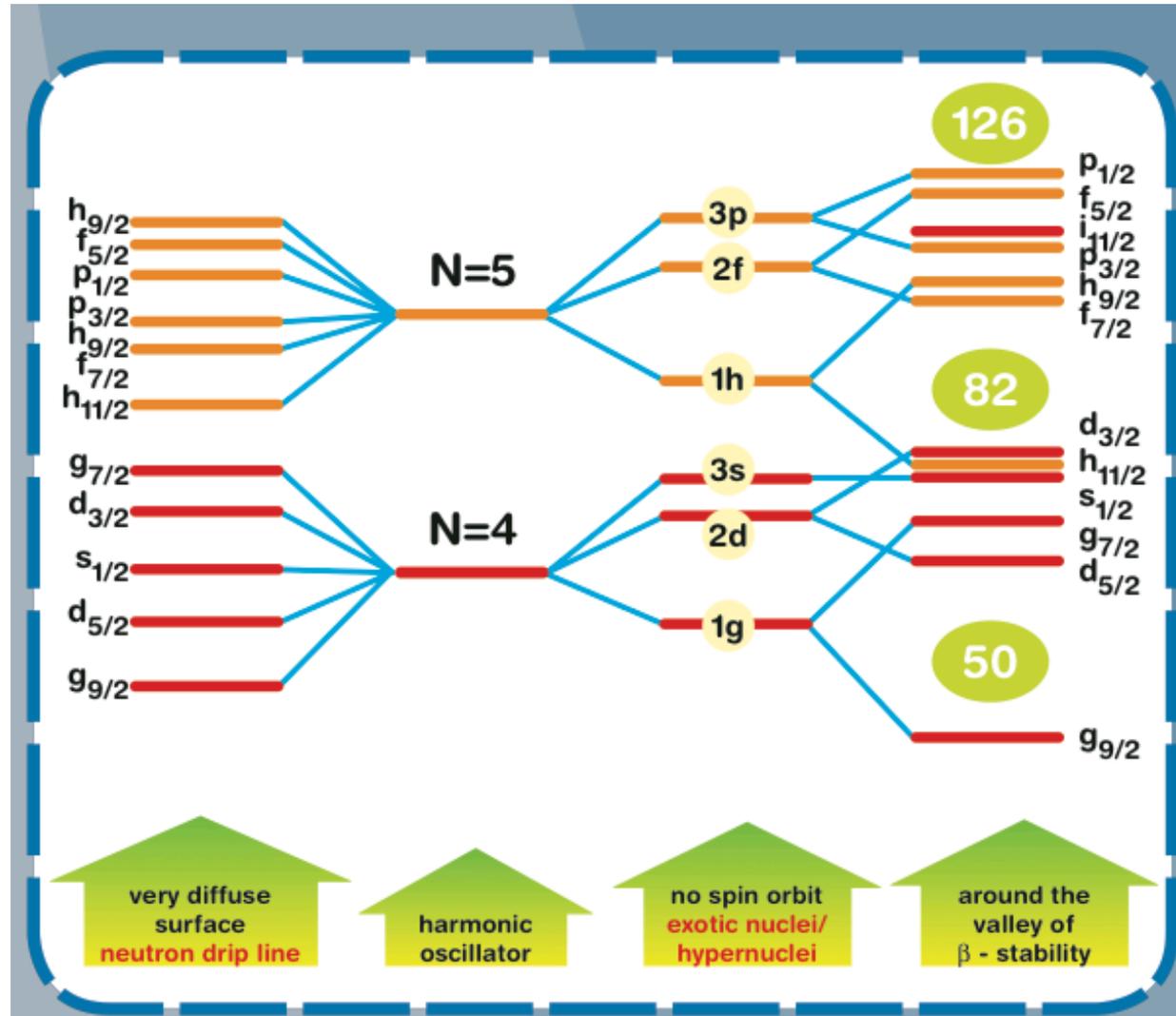
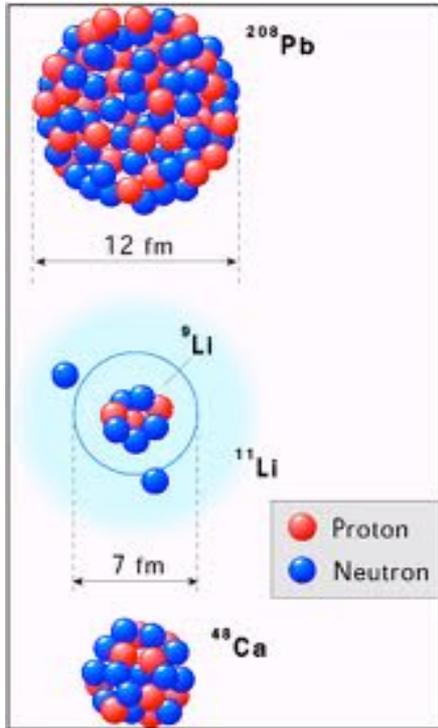
中国原子能科学研究院
北京大学

2019年4月22-23日

报告内容

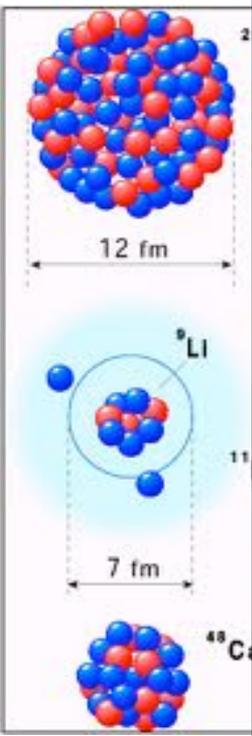
- 科学前沿
- 国内外动向
- BRIF进展
- BISOL进展
- 结论

核物理与天体物理前沿

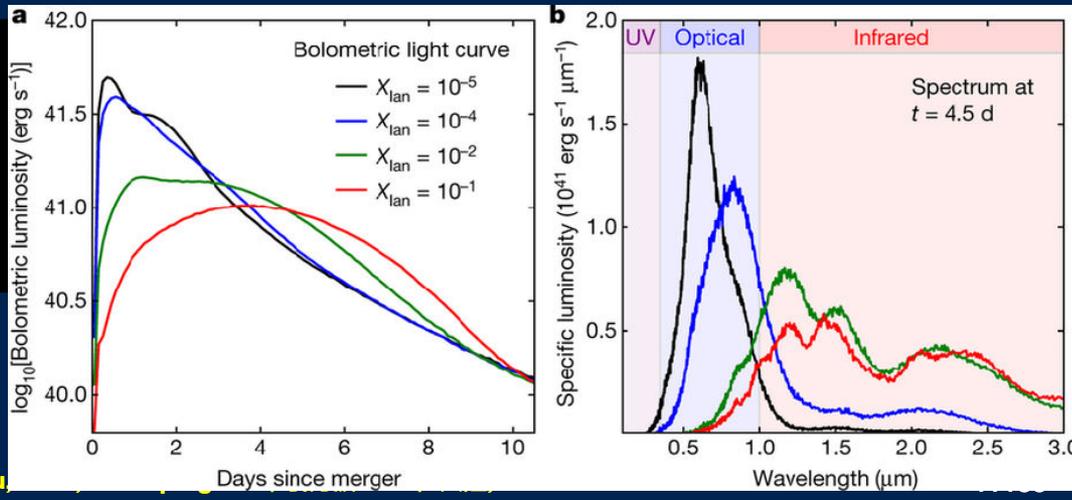


核物理与天体物理前沿

NSM 和 r 过程重元素产生



W. P. Liu



6

- $p_{1/2}$
- $f_{5/2}$
- $i_{11/2}$
- $p_{3/2}$
- $h_{9/2}$
- $f_{7/2}$

2

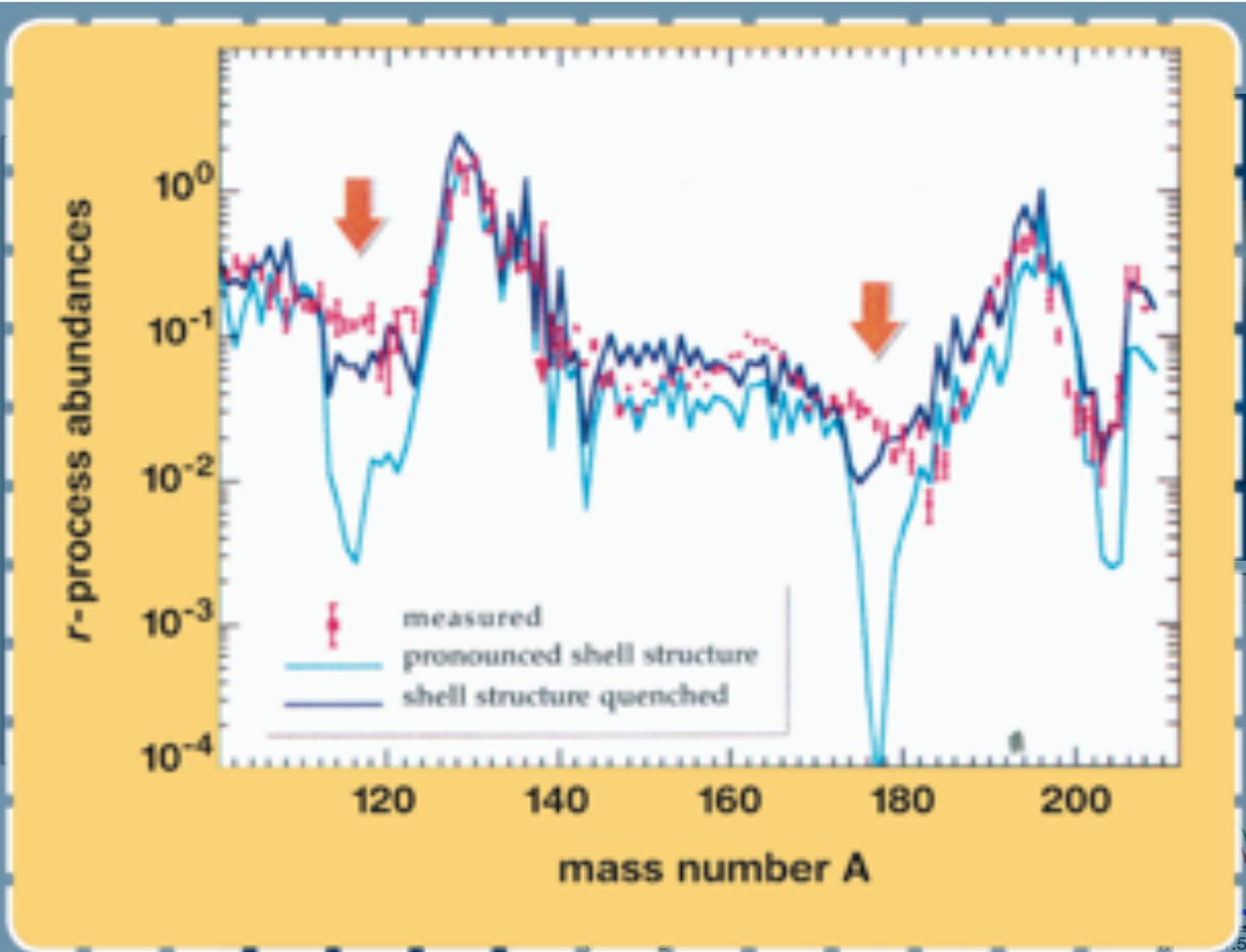
- $d_{3/2}$
- $h_{11/2}$
- $s_{1/2}$
- $g_{7/2}$
- $d_{5/2}$

0

- $g_{9/2}$

and the valley of stability

核物理与天体物理前沿



JUNA

6

- $p_{1/2}$
- $f_{5/2}$
- $i_{1/2}$
- $p_{3/2}$
- $h_{9/2}$
- $f_{7/2}$

2

- $d_{3/2}$
- $h_{11/2}$
- $s_{1/2}$
- $g_{7/2}$
- $d_{5/2}$

0

- $g_{9/2}$

and the valley of stability

Infrared

Spectrum at $t = 4.5$ d

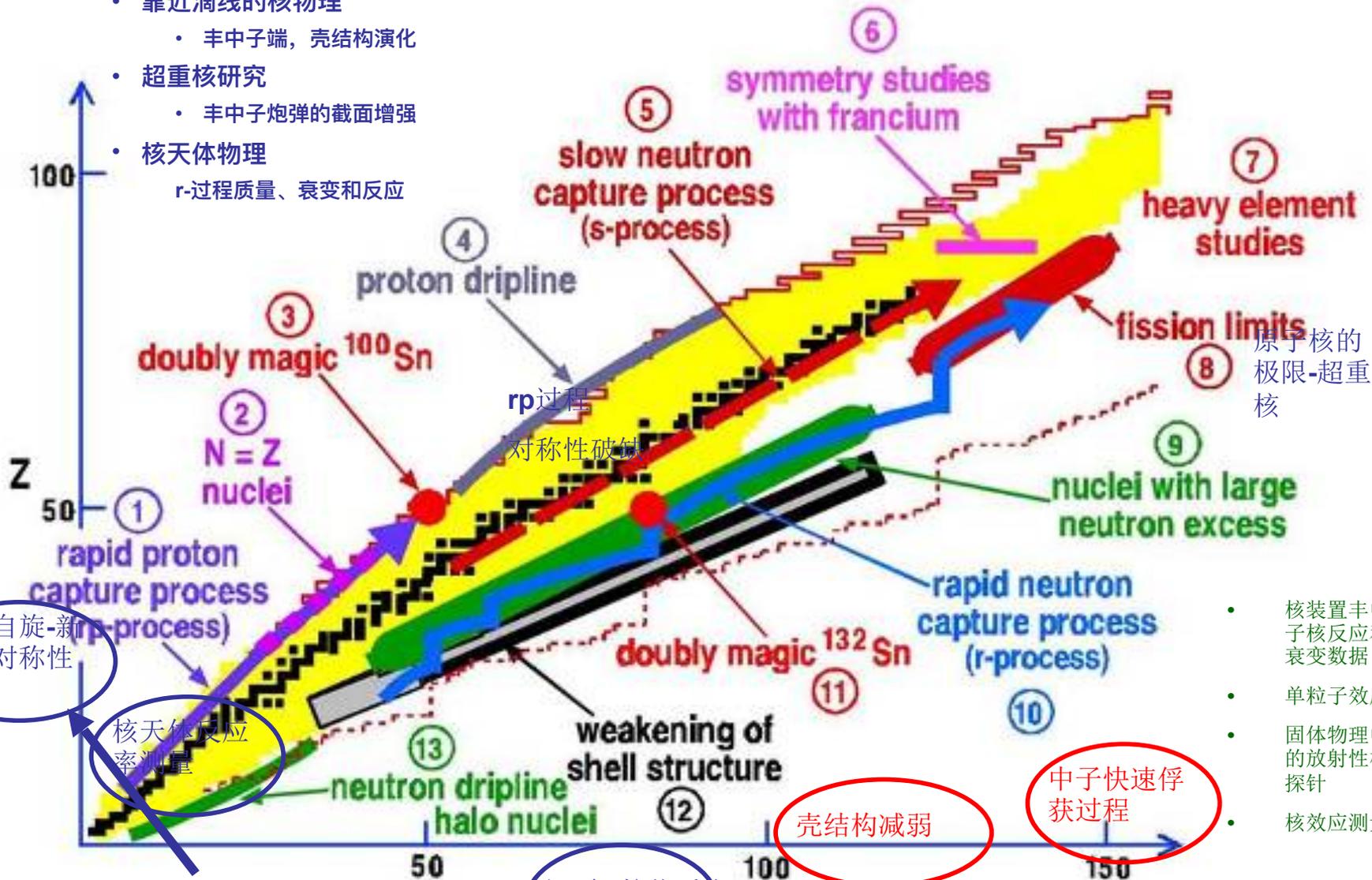
Wavelength (μm)

核科技发展的新阶段

- 核物理处于物质科学前沿，核科学引领新型能源开发。
- 中子和高速带电粒子束流，可驱动产生大量新的核素，并可用于亟需的先进反应堆材料研究和筛选；当今核物理向纵深发展，核技术应用向广度发展，孕育着重大突破，各科技强国均重点部署。
- 极端不稳定核区的核物理研究，将导致原子核存在极限和超重核的发现、回答自然界元素合成的关键问题，产生国际最高水准的科学成果、粒子操控技术和一流人才队伍。
- 建立国际最高水准的核材料辐照手段，将导致新型核能源、核医学和射线应用新方向，使核科技应用在我国达到应有的高度。
- 核能在我国的大发展，促进核基础研究超前部署；核基础研究的前沿探索，将为环境友好且可持续发展的先进核能源提供源头上更有利的解决方案；通过一流院校紧密结合，促进体制创新，为建设创新型国家提供新动力。

核物理研究前沿

- 靠近滴线的核物理
 - 丰中子端, 壳结构演化
- 超重核研究
 - 丰中子炮弹的截面增强
- 核天体物理
 - r-过程质量、衰变和反应



原子核的极限-超重核

- 核装置丰中子核反应和衰变数据
- 单粒子效应
- 固体物理中的放射性核探针
- 核效应测量

高自旋-新的对称性

核天体反应率测量

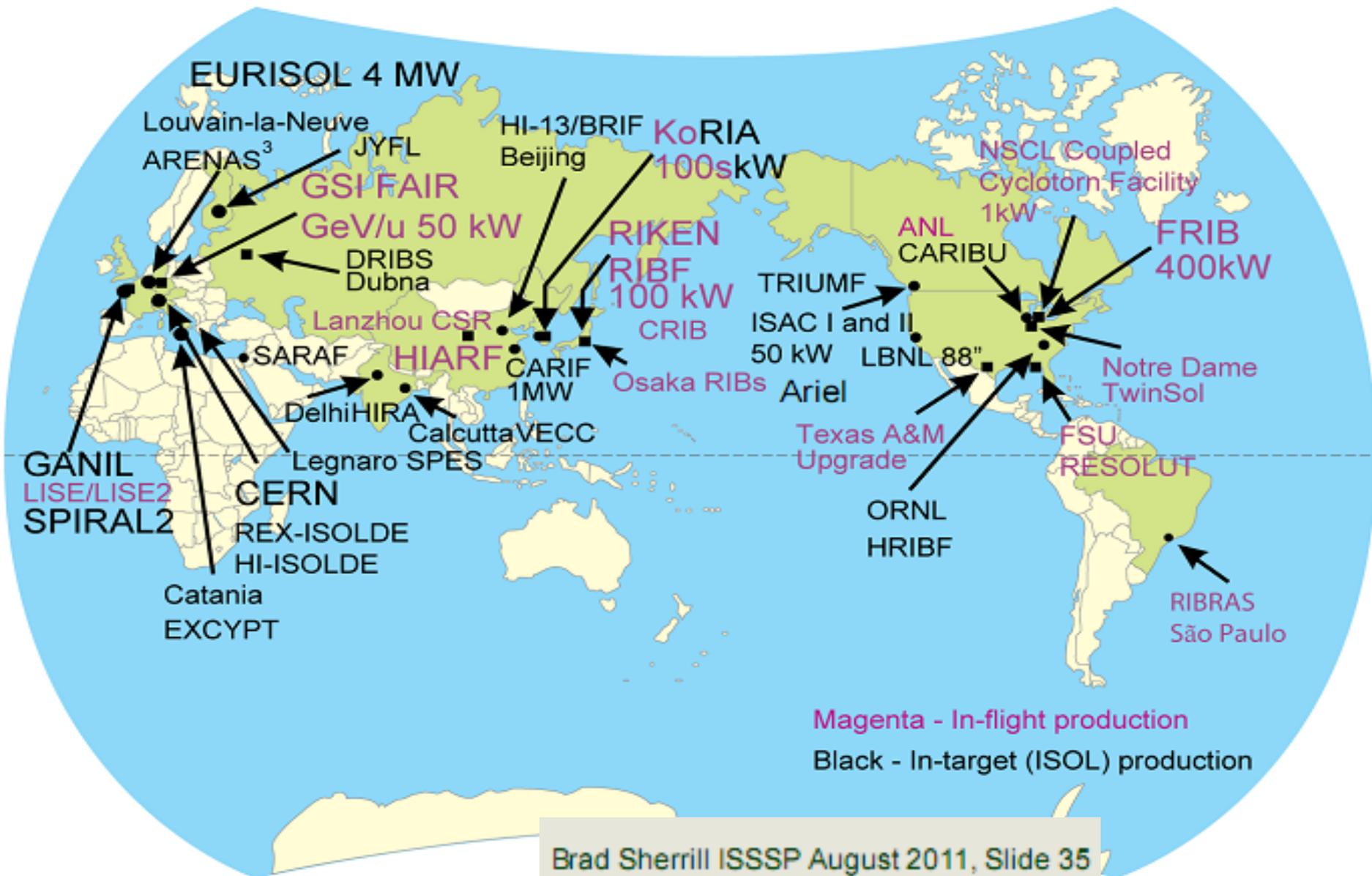
壳结构减弱

中子快速俘获过程

晕现象-核物质奇特分布

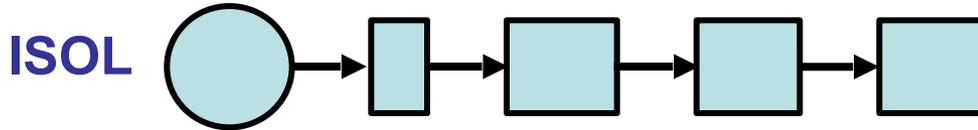
丰中子束流和强流轻粒子是驱动我国核科学基础研究走向国际前沿的引擎!

国际放射性核束装置一览表



地点	驱动加速器	后加速器	装置类型
德国, FIAR	重离子同步1.5 A GeV		PF
欧洲, EURISOL	质子, 1 GeV, 1-5MW	超导直线 100 A MeV	ISOL+PF
韩国, RAON	70 MeV 质子 70 kW 重离子直线, 200 A MeV	80 A MeV	ISOL+PF
中国, HIAF	重离子同步4.4 A GeV		PF
美国, FRIB	重离子直线, 148 A MeV, 400 kW	计划中 15 A MeV	PF

ISOL和PF产生路径



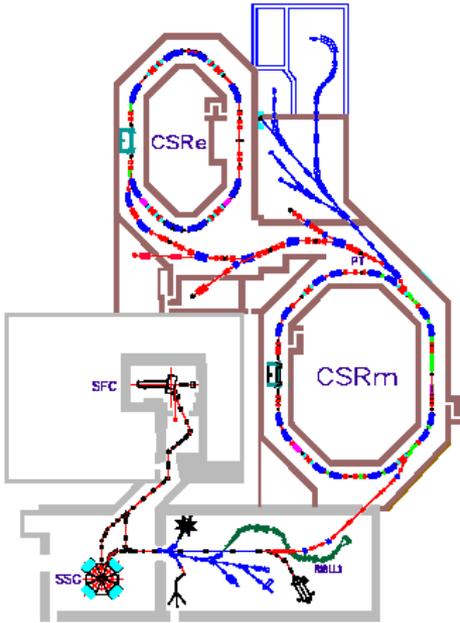
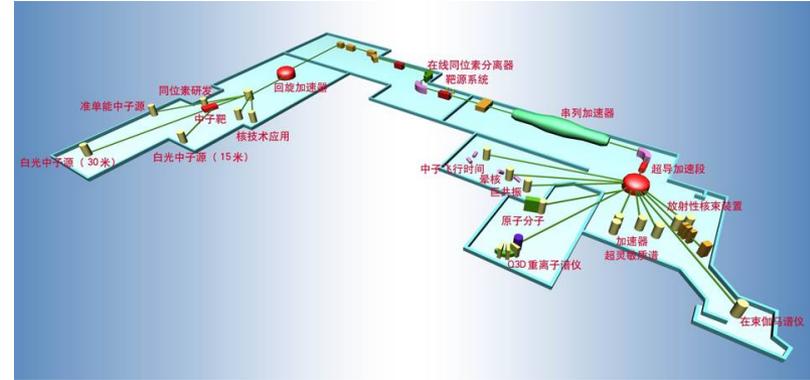
驱动

产生靶

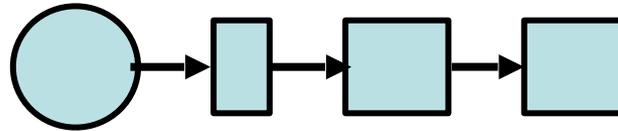
同位素
分离器
ISOL

后加速
器

实验
终端



PF



加速器

产生靶
PF

次级
束流线

实验
终端

- **ISOL**与**In-Flight(PF)** 两种方法具有高度的互补性
- **ISOL**方法局限于产生寿命较长的不稳定核素（大于**1**毫秒），但其束流品质好、能量范围宽（几十**keV**到**100MeV/A**）
- **PF**方法可产生寿命短至几百纳秒的不稳定核素，更加接近中子或质子滴线。其缺点是束流品质差，束流能量与初级束流接近，较多研究需要降能。



- 近期比较多的是**PF**装置，**ISOL**的发展潜力很大
- 束流丰质子较好，丰中子困难
- **^{78}Ni** 的情况
 - **FAIR, RIBF, 10 pps**, 预计, 滴线无法达到
 - **FRIB, 10^2 pps**, 预计, 滴线部分达到
 - 到了 10^2 pps才可开展反应研究
 - 以上是最理想的情况, 也是现有技术的极限
- 需求最为迫切的极端丰中子束流
- 发展趋势是**ISOL**与**PF**的特点结合, **ISOL**产生丰中子次级束后加速再碎裂产生的丰中子束流强度, 比传统的**PF**一步过程要高。



- 放射性束，伯克利**85**，比利时**89**，理研**90**
- 新一代：**Beijing ISOL**（国际报告**Enyo, Moto**）
- 目前： **^{22}C** ，rips 6m cps，bigrips 10 cps
- 理研：**20KW**。 ^{238}U ， 3×10^{11} pps
- **GSI**，2019年，**U**也是 10^{11}
- **MSU2020**，12 MevA，400kw，**U**应到 10^{12} 量级
- **ganil**，2018，200kw，同**MSU**
- **HIAF2021**，强度同**FAIR**
- 总结： 10^{11} 量级：**RIBF, FAIR, HIAF**
- 10^{12} 量级：**FRIB, SPIRAL2**
- 超级装置：**BISOL, EURISOL**，同比到 10^{13} 量级

束流强度与反应截面

核物理实验

$$N = I \sigma \varepsilon$$

事件率
越高研究越精细

不稳定束流强度
越高越好

反应截面
学术价值越高截面
越低

稳定束流强度
受到技术限制

目前不稳定核束流强度

$$I = \phi \sigma \varepsilon$$

10⁻⁵ pps, 可以发现
10⁻² pps, 可以测量半衰期和质量, 目前的最好状态
10² pps, 可以测量核反应
10⁴ pps, 可以对反应和低激发态测量

靠近滴线核
碎裂截面极低

两部法不稳定束流强度

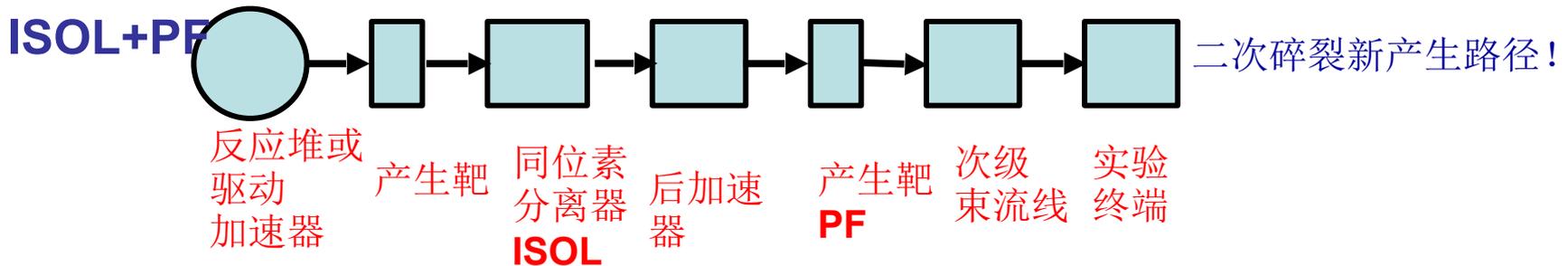
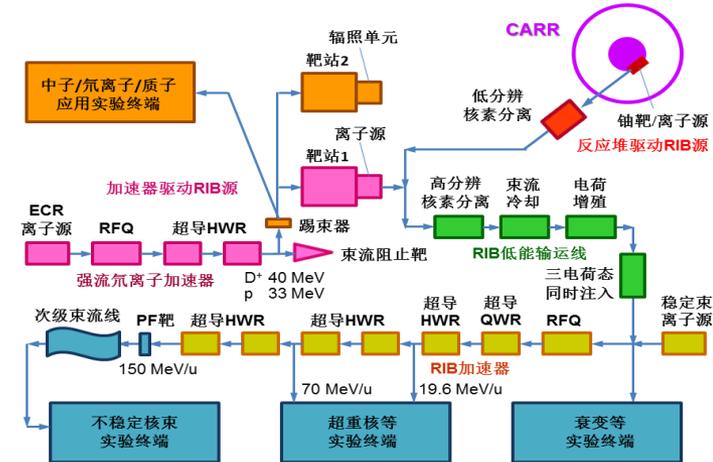
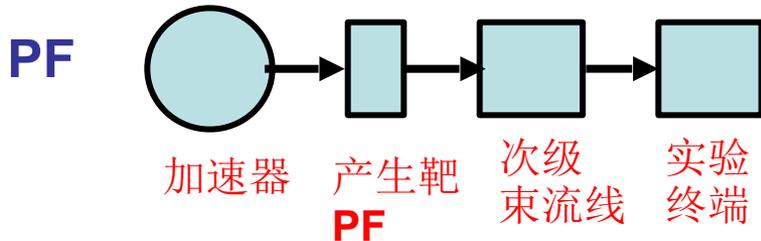
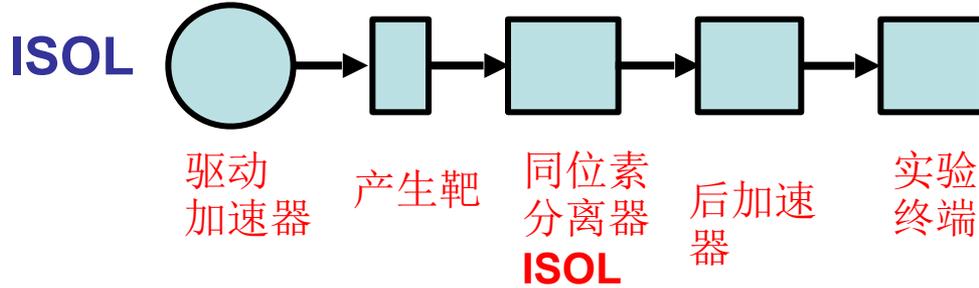
$$I = \phi_n \sigma_{fis} \sigma_{fra} \varepsilon$$

中子束流强度
高

裂变截面很高

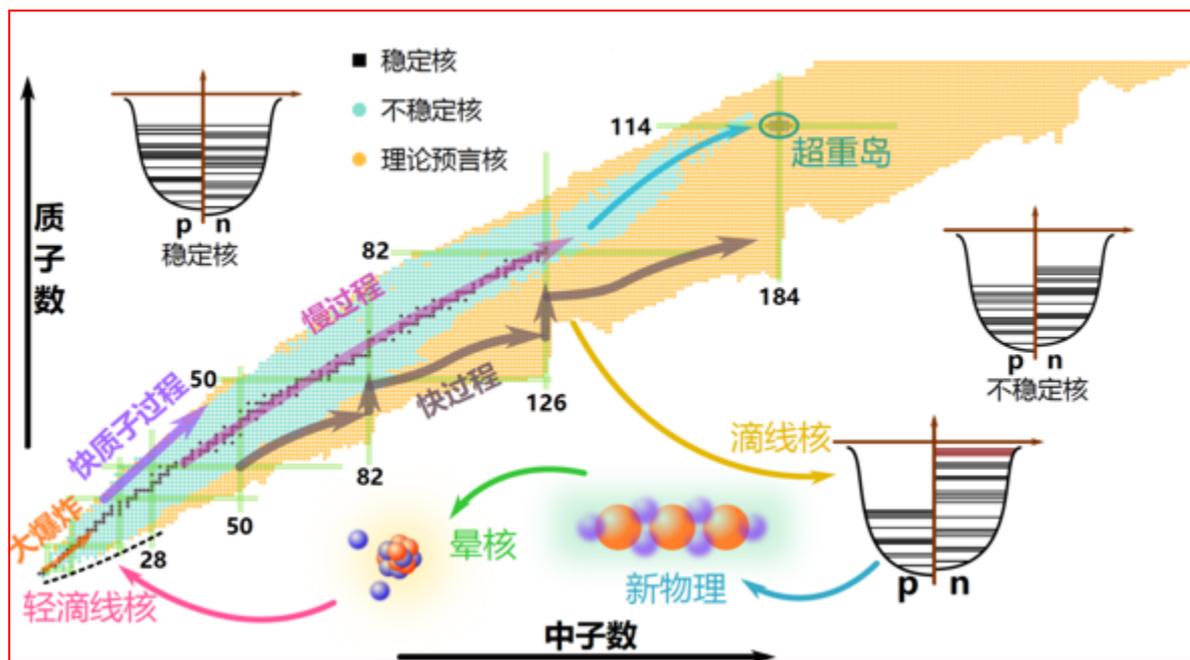
靠近滴线核
丰中子核碎裂截面
提升

产生路径比较



BISOL装置的科学意义

核物理在以下方面孕育重大的原始创新



- 原子核稳定性的边界
- 登上超重元素稳定岛的新途径
- 天体中铁以上元素合成的路径

紧跟

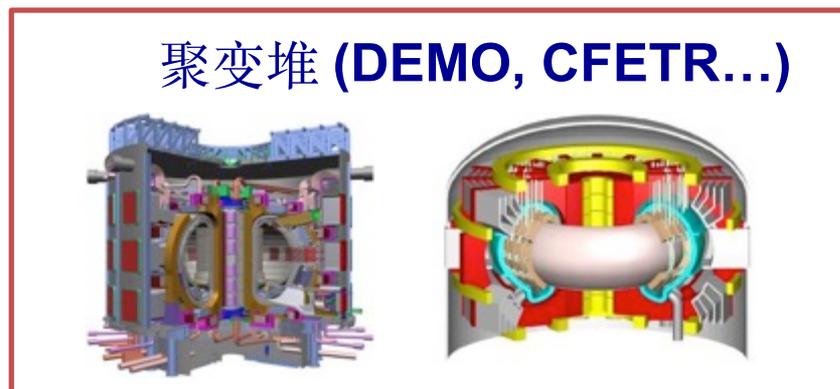
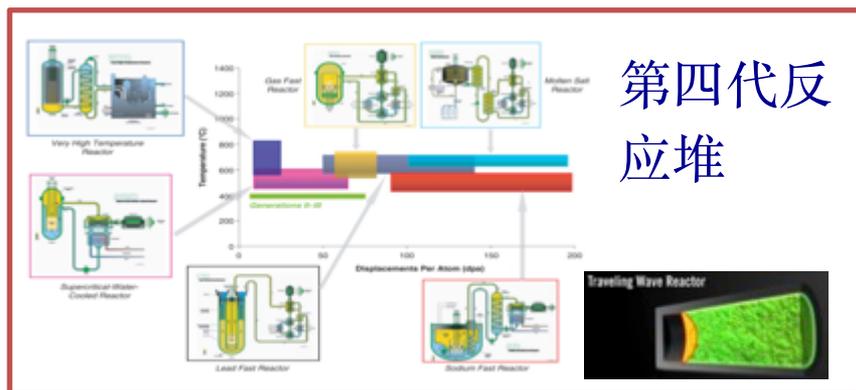


并行

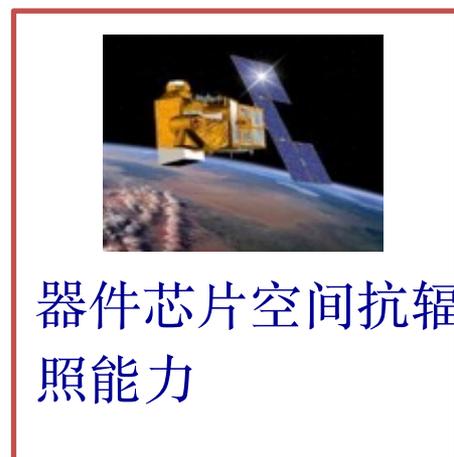
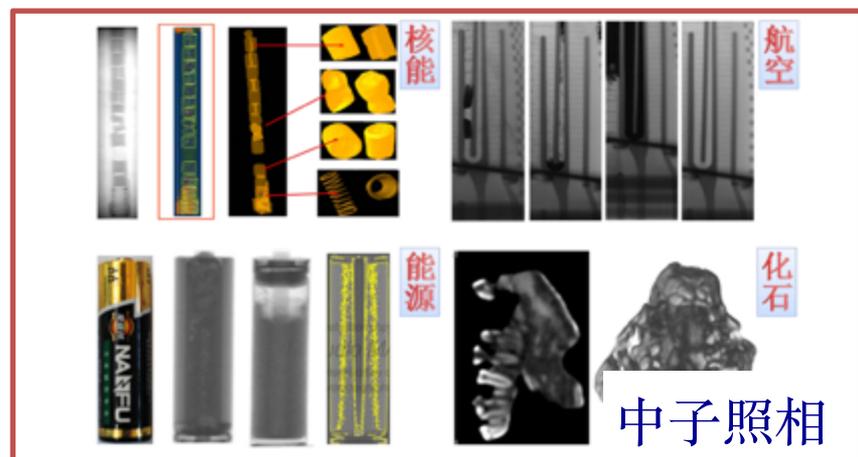


引领

BISOL装置的重大需求分析

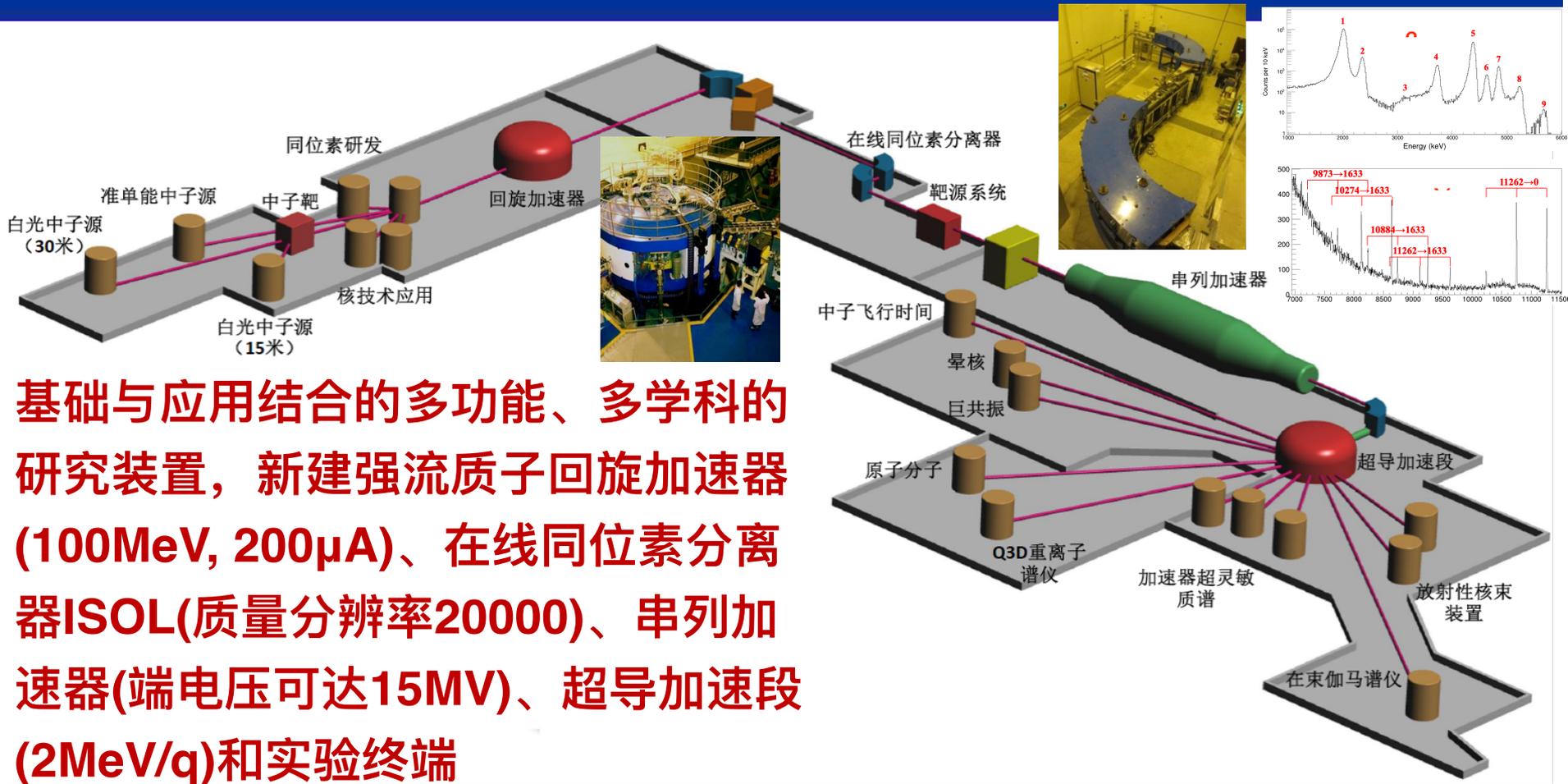


核装置中的主干材料均需要进行中子辐照测评与考验



中子束的多领域需求

完成串列升级工程——北京稀有同位素设施BRIF



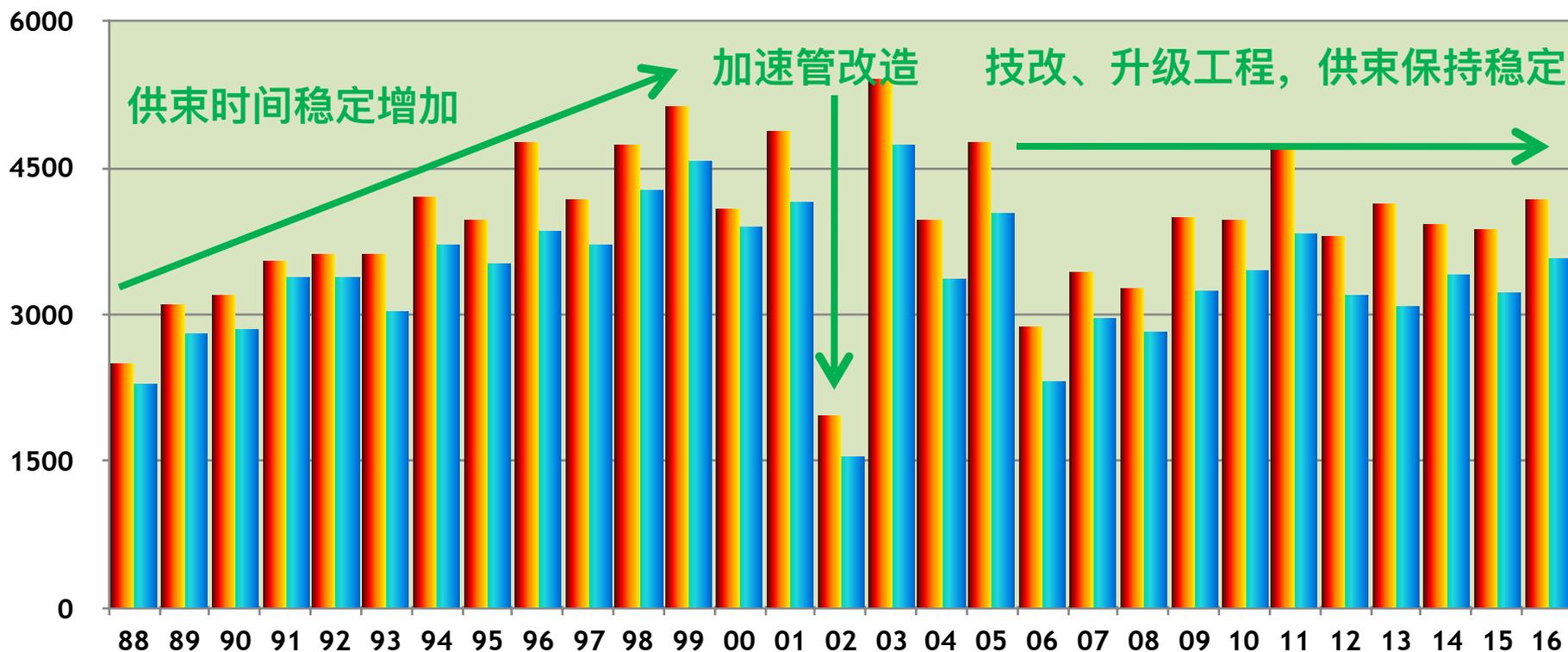
基础与应用结合的多功能、多学科的研究装置，新建强流质子回旋加速器(100MeV, 200 μ A)、在线同位素分离器ISOL(质量分辨率20000)、串列加速器(端电压可达15MV)、超导加速段(2MeV/q)和实验终端

2009年可研报告批准，建设经费3.66亿元人民币；项目2015年竣工，成功产生了 ^{38}K 不稳定束流。2016年完成了回旋加速器质子束首批物理实验，同年工程正式验收；17年正在开展首批不稳定核束物理实验；18年实现放射性束流后加速。

基于串列加速器的核物理基础研究

- **物理：**72年全国核物理会建议，81年物理工作座谈会，86年串列核物理国际讨论会，同年开展了首批核结构物理实验
- **运行：**85年第一次束流评审会；87年课题评审委员会成立；88年串列加速器国家实验室成立，同年课题评审委员会改名学术委员会
- **建设：**78年国家计委批准购买串列加速器，81年开工，87年8月通过国家验收，88年财政部同意解决运行经费，要求实验室对外开放
- **我国有拥有了一个国际水平的精密核物理基础和应用研究**

到17年8月，串列供束达到10万小时



串列加速器历年供束统计(1988-2016)

- 持续的技术创新，输电梯、分压电阻、离子源、束流管线等主要部件国产化
- 有限运行经费保持加速器良好状态，年均为用户提供**3300**小时束流
- 在核物理基础研究、核技术应用、核数据测量和航天器件单粒子效应研究等领域，做出了一批具有国际影响和满足国家重大需求的成果

30年来，国内外核心期刊发表论文2000余篇，获国家自然科学奖1项，国家科技进步奖10项，国防科技奖30项，北京市科技奖5项，何梁何利科技奖2项、香港求是杰出青年奖1项、吴有训物理奖6项、胡济民教育奖7项

实验室为国家培养了一批核科技高水平人才，丁大钊、黄胜年、张焕乔院士是他们之中的杰出代表



丁大钊

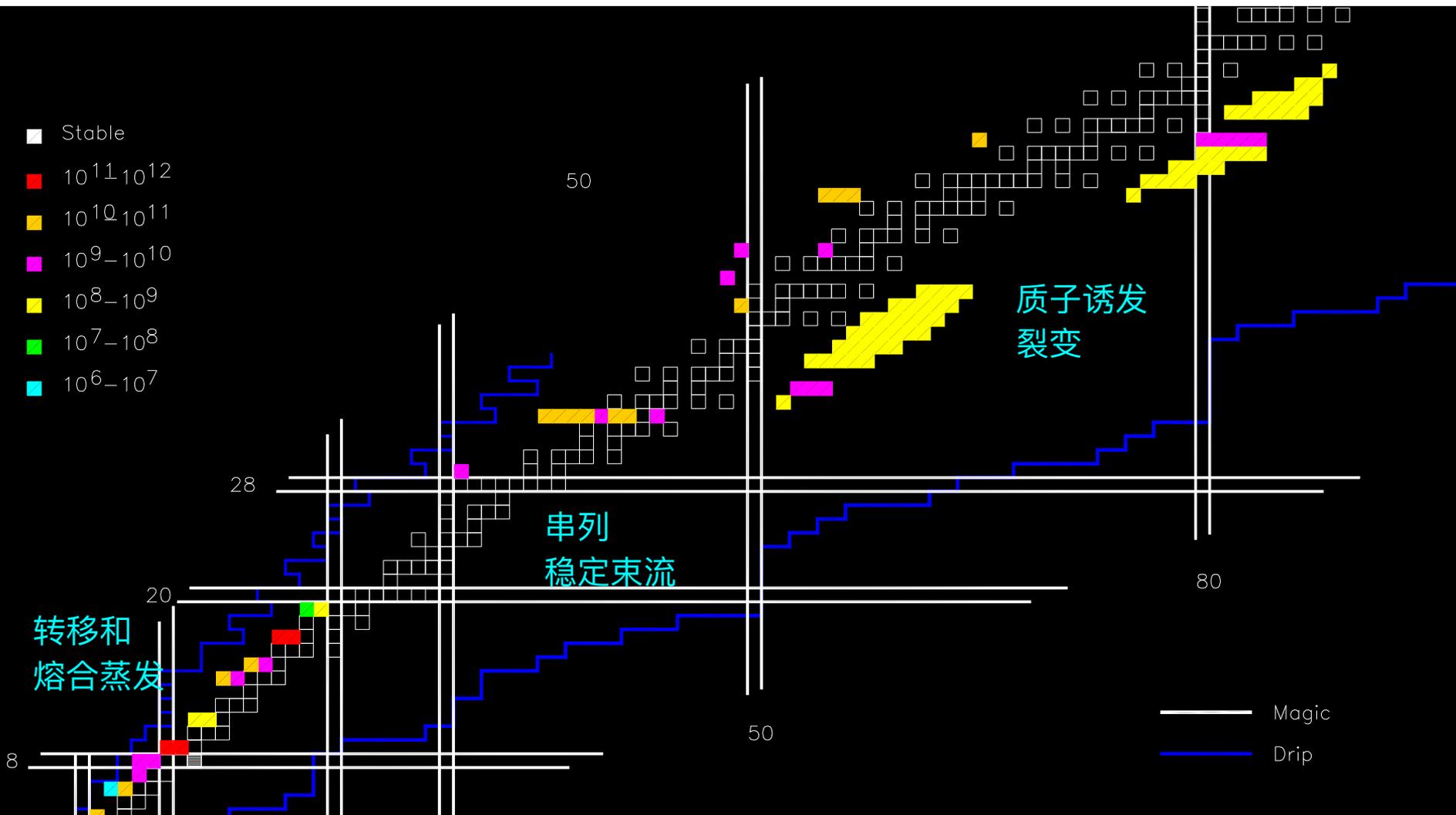


黄胜年

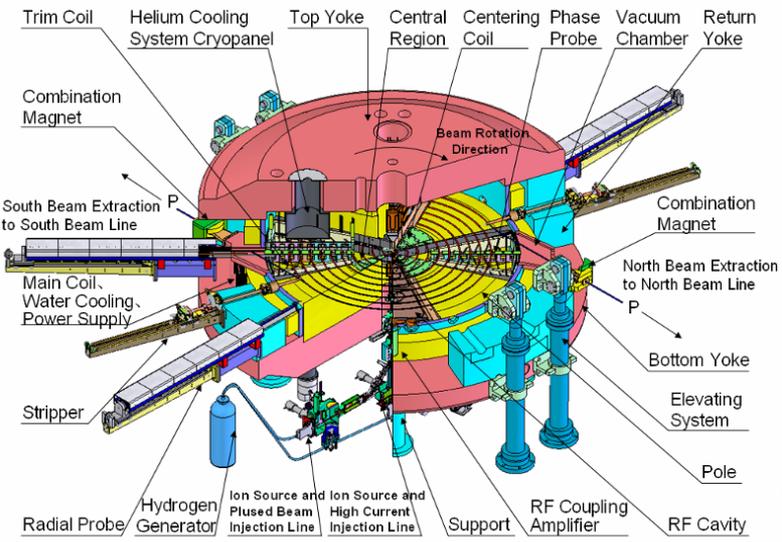


张焕乔

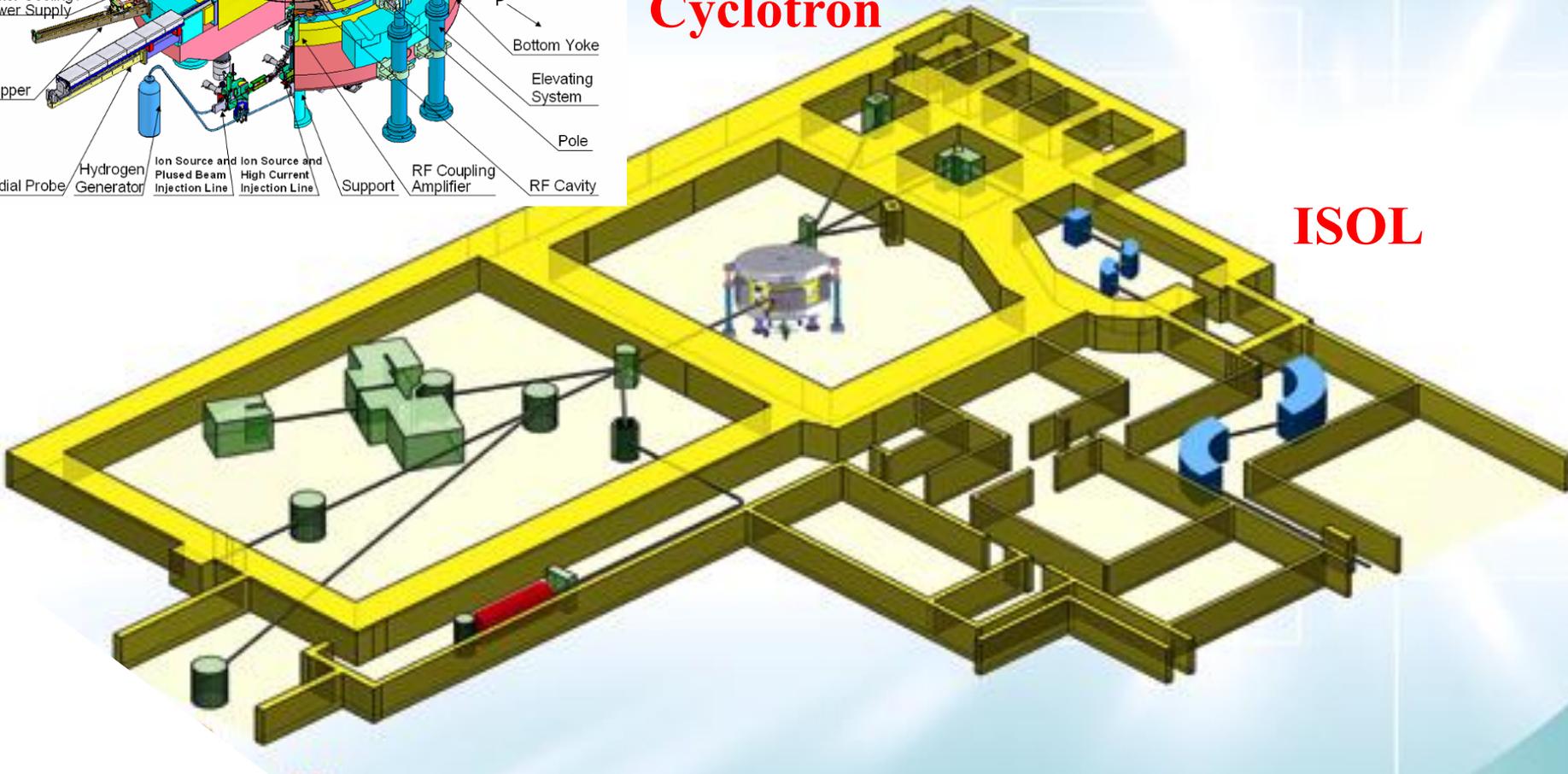
BRIF (Beijing Rare Ion beam Facility) beams



New parts after the Tandem

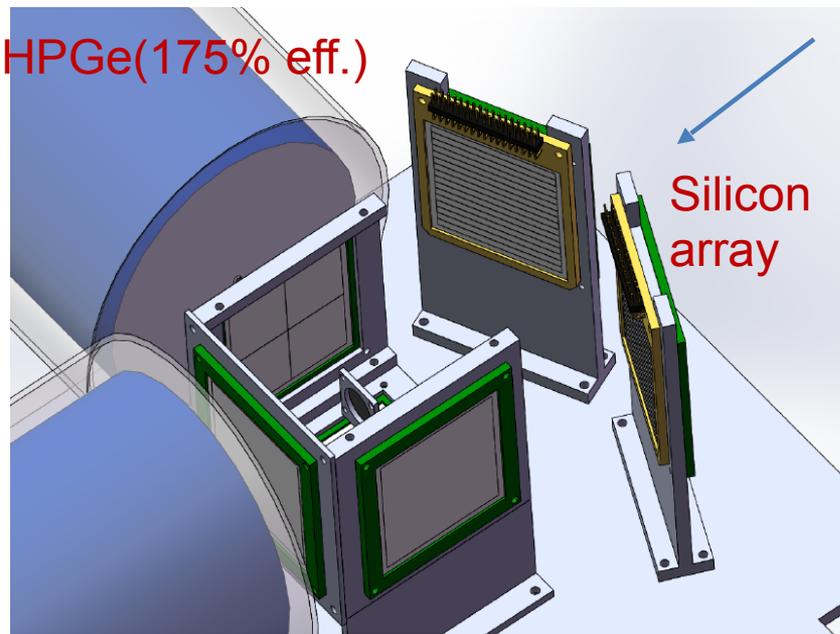


Cyclotron



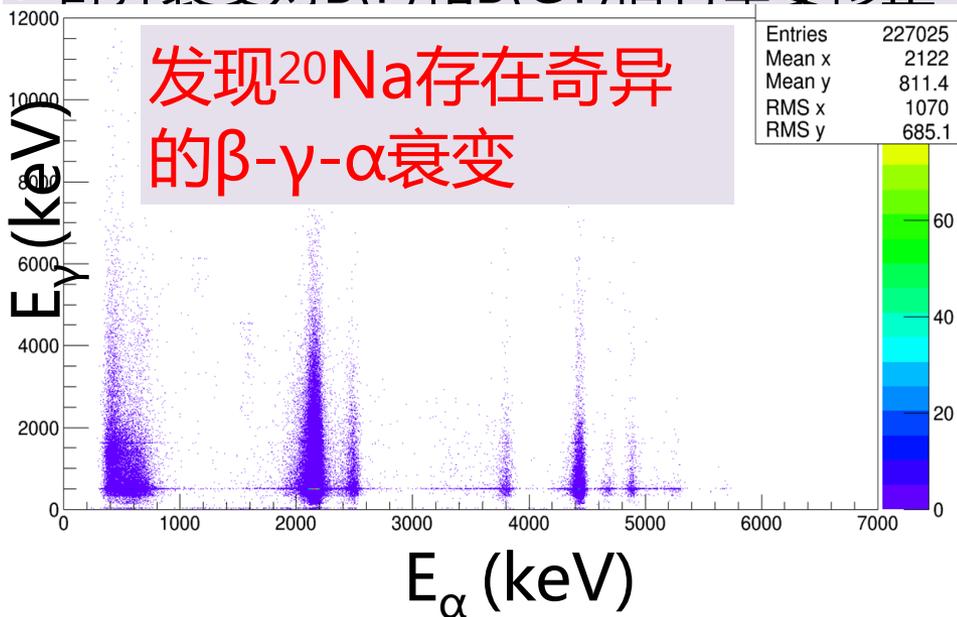
BRIF开展首次放射性核束物理实验

- 2018年1月31日，北京放射性核束装置（BRIF）开展亚秒级(445ms) ^{20}Na 核束产生技术的实验研究，最高流强达到18,600pps，纯度接近100%
- BRIF质量分辨率可达24460；回旋加速器最高实现束流达到200 μA ，并实现双向引出
- 开展了首次放射性核束物理实验，发现 ^{20}Na 存在奇异的 β - γ - α 衰变

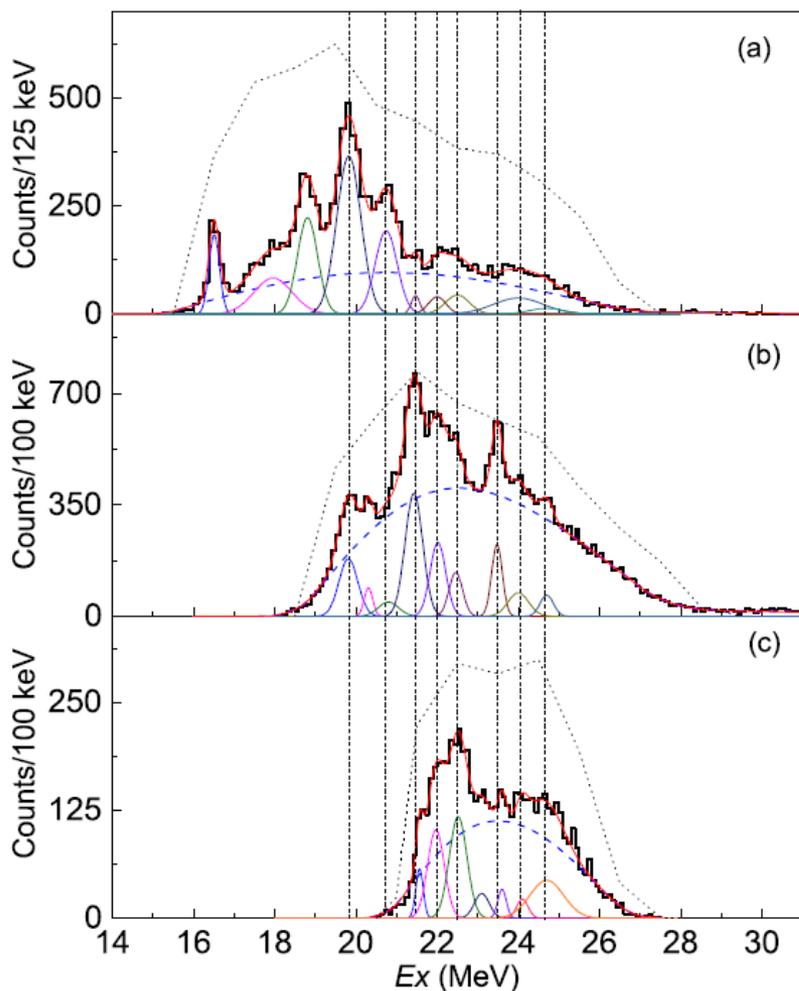


紧凑的实验设置，保证 β - γ - α 的高效率同时测量

- β - γ - α 的分支比小于万分之一
- 反映了同位旋混杂和同位旋禁戒的程度
- 奇异衰变对B(F)和B(GT)值有重要修正



北大实验：发现 ^{14}C 中22.4 MeV激发态具有这种特殊衰变性质，是 σ -bond chain-state的候选者



AMD理论预言： σ 键线性分子态有选择性的衰变路径，至今实验尚未确认这种奇特结构。

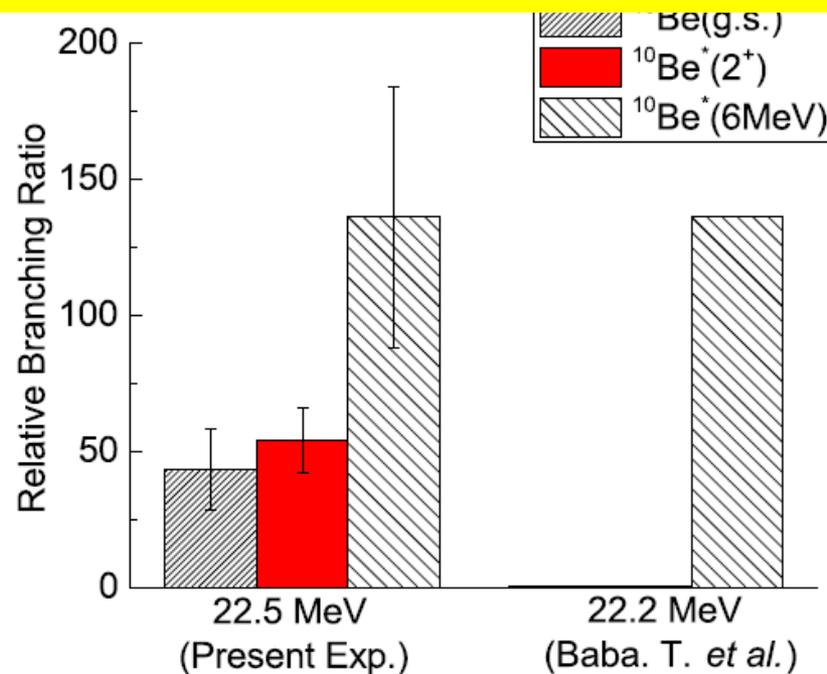
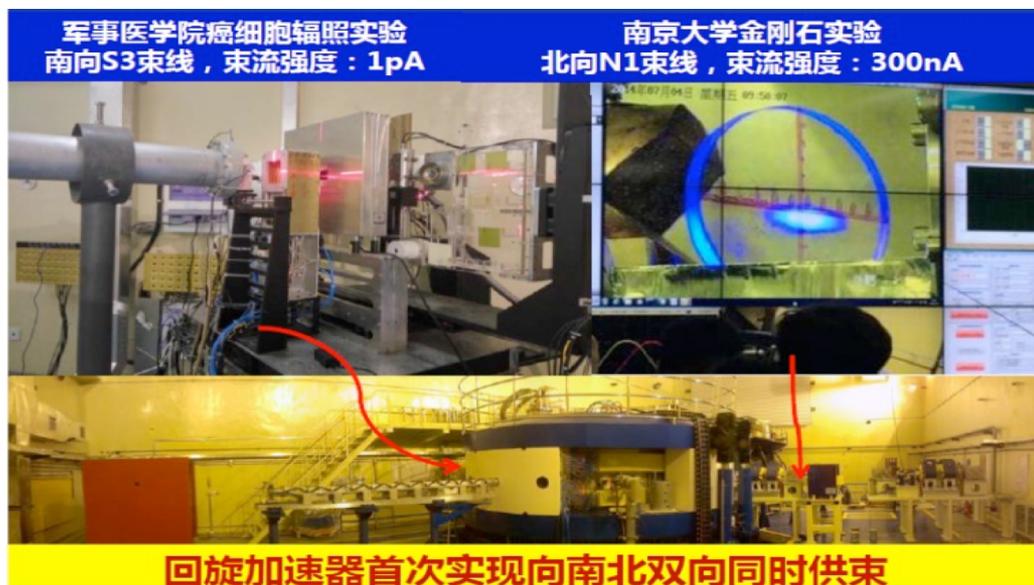


FIG. 4. Comparison of the relative decay branching ratio obtained from the present experiment with the theoretical prediction [10].

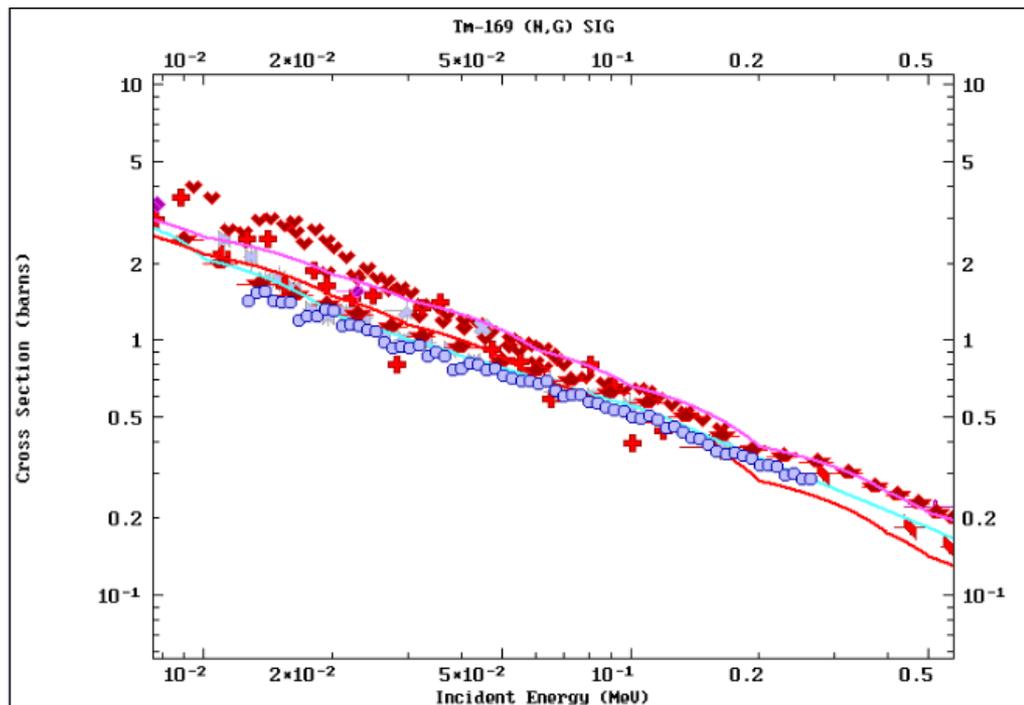
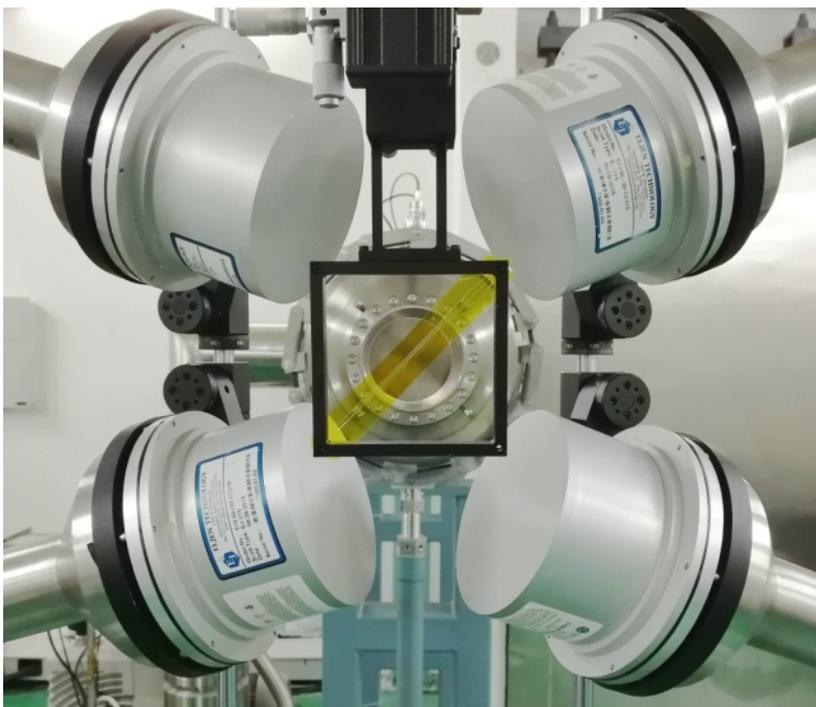
J. Li, Y.L. Ye* et al., Phys. Rev. C 95, 021303R (2017).

- 本年度串列加速器完成开机1900小时，为30多个用户提供1700小时束流时间，加速粒子种类17种
- 回旋加速器开机接近1000小时，为超过6家用户提供束流时间600小时



核数据、建成用于中子俘获截面测量的C6D6探测系统，并完成首个实验

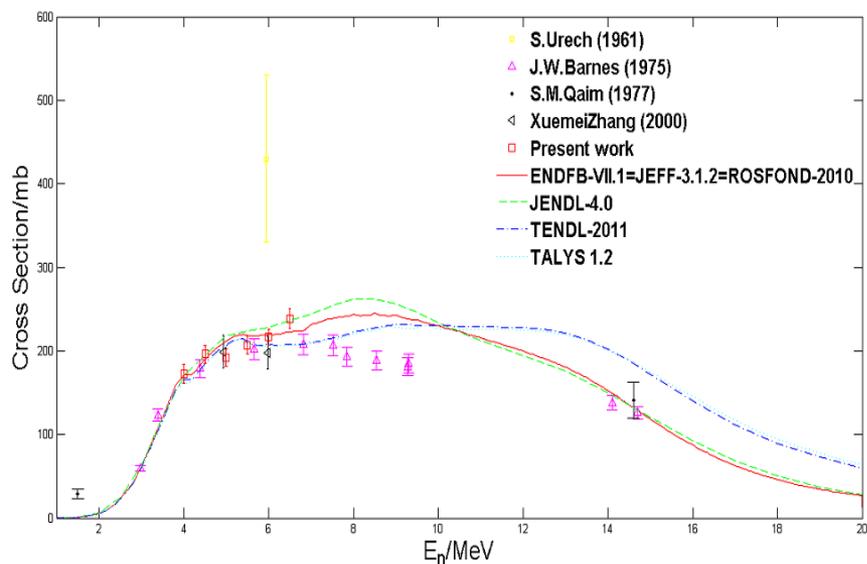
- 实验样品： ^{169}Tm 样品， ^{197}Au 样品，碳（C）样品，无样本底。
- 数据获取：全波形数据采集系统（科大）
- 使用 ^{197}Au 作为标准截面，结合PHWT得到探测系统对不同靶核的效率，初步得到了 ^{169}Tm 的中子俘获截面



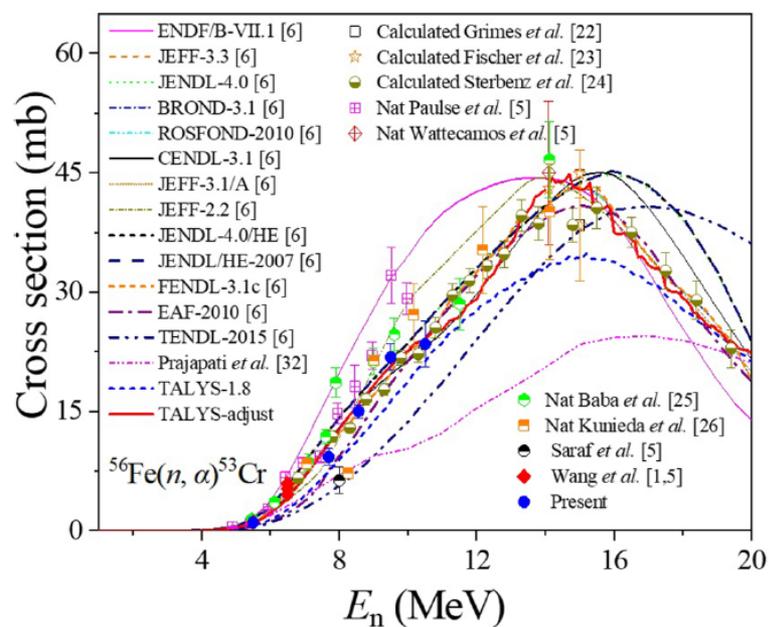
核数据测量

北京大学长期以来是核数据协作网成员，在核数据测量方面，陈金象、唐国有、张国辉教授等一直从事核数据测量，获得了大量的实验数据，为我国的核数据测量做出了重要贡献。

最新合作成果： $^{56}\text{Fe}(n,\alpha)$ 反应截面，分别利用北大的静电加速器（8 MeV以下）和原子能院的串列加速器（8 MeV以上）测量。



利用双屏栅电离室在北大的静电加速器上测得的 $^{40}\text{Ca}(n,\alpha)$ 反应激发函数



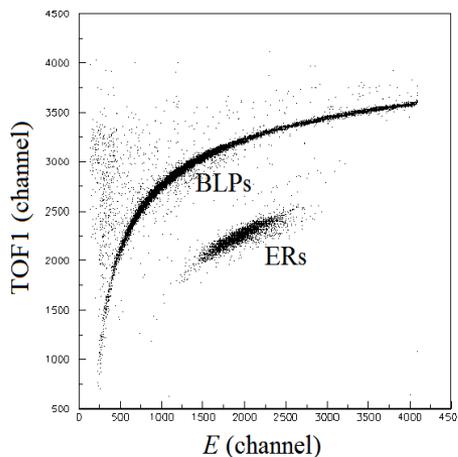
PHYSICAL REVIEW C **99**, 024619 (2019)

核反应融合机制： $^{32,34}\text{S} + ^{112,116,120,124}\text{Sn}$

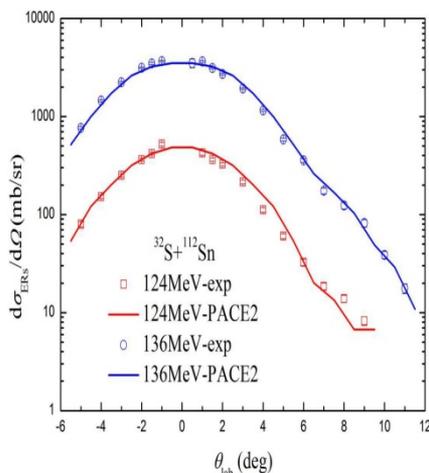
系统性研究正 Q 值中子转移效应对垒下融合的耦合道效应。



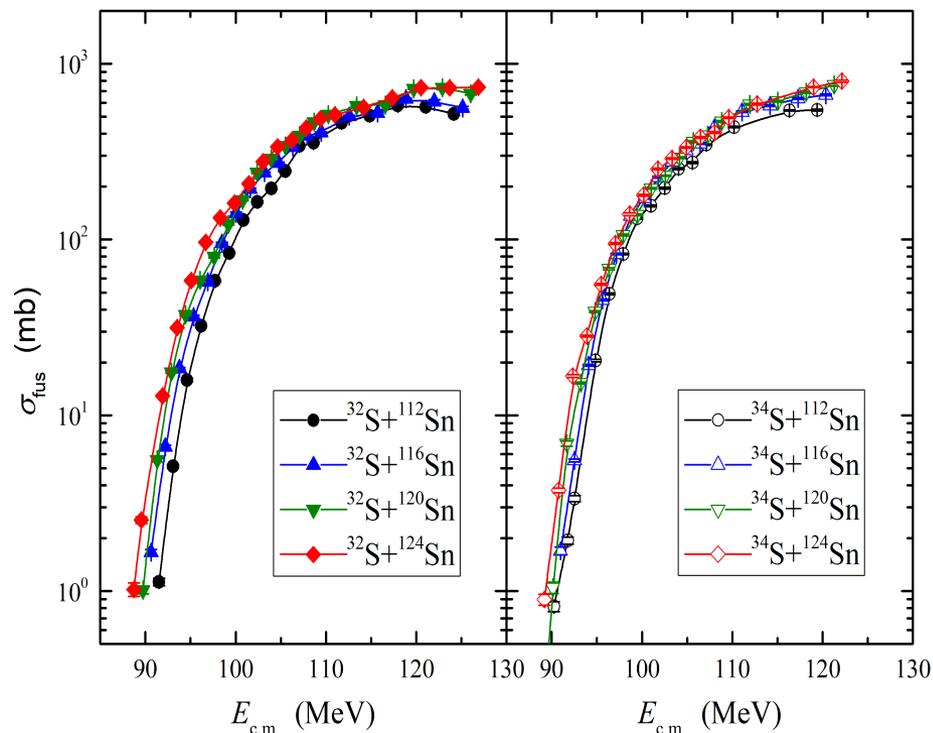
R60管道上的静电偏转板



散射粒子 (BLPs) 和融合蒸发 (ERs) 产物的鉴别



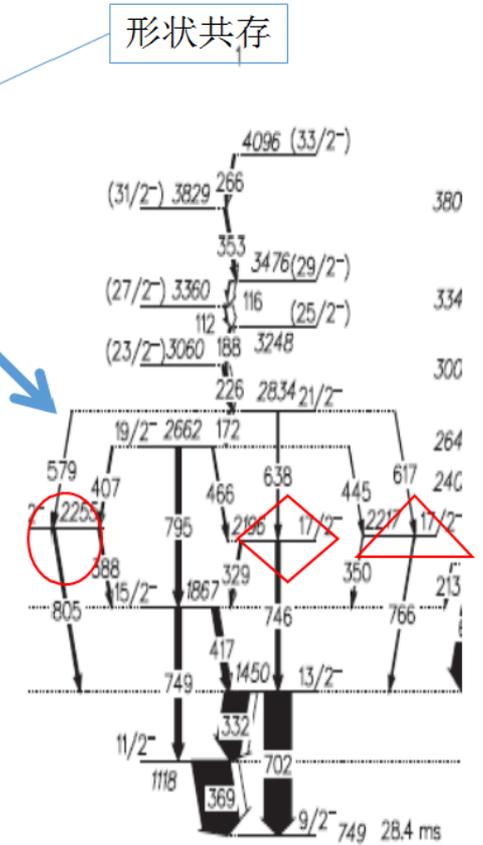
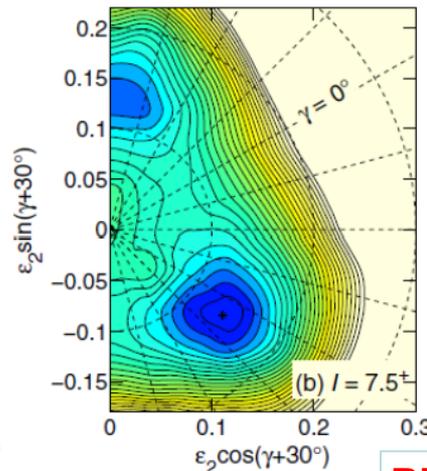
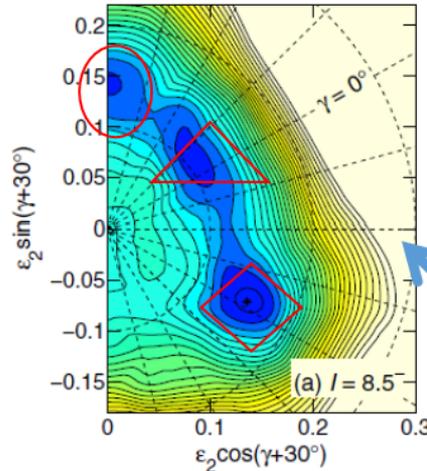
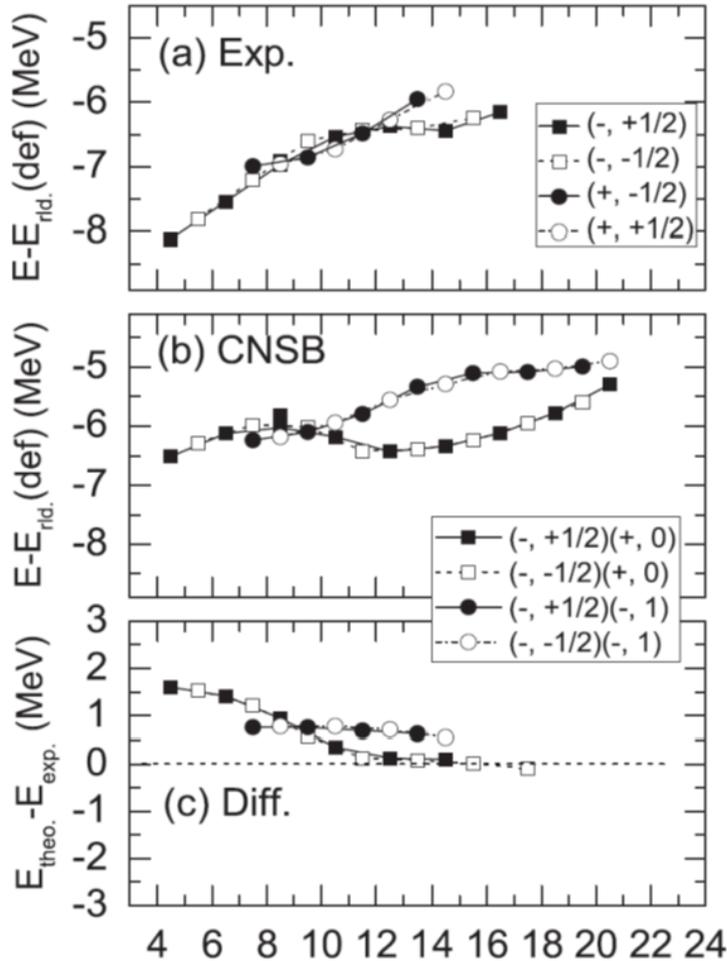
典型的融合蒸发产物的角分布



$^{32,34}\text{S} + ^{112,116,120,124}\text{Sn}$ 体系的融合激发函数

核结构： ^{199}Tl 高自旋态研究

建立了新的 ^{199}Tl 核能级纲图，发现了44个新伽玛跃迁，建立了33个新能级和6个转动带，并对其形状共存等现象进行了研究。



北大工作: structure evolution around $N \sim 42$

$N \sim 42$ 附近的Ge、As和Se原子核处在形状过渡区，有着极为丰富的原子核结构现象。利用串列加速器，开展了对 ^{74}Ge 和 ^{75}As 核的结构研究。研究表明 ^{74}Ge 是这个质量区原子核三轴演化的一个关键核；在 ^{75}As 中发现了一个新颖带结构。

Z	3	76Br	77Br	78Br	79Br	80Br
	5					
	3	75Se	76Se	77Se	78Se	79Se
	4					
	3	74As	75As	76As	77As	78As
3						
3	73Ge	74Ge	75Ge	76Ge	77Ge	
2						
3	72G	73G	74G	75G	76G	
1	a	a	a	a	a	
	41	42	N	44	45	

Physics Letters B 766 (2017) 107–111

Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb

Observation of a novel stapler band in ^{75}As

C.G. Li^a, Q.B. Chen^a, S.Q. Zhang^{a,*}, C. Xu^a, H. Hua^{a,*}, X.Q. Li^a, X.G. Wu^b, S.P. Hu^b, J. Meng^a, F.R. Xu^a, W.Y. Liang^a, Z.H. Li^a, Y.L. Ye^a, D.X. Jiang^a, J.J. Sun^a, R. Han^a, C.Y. Niu^a, X.C. Chen^a, P.J. Li^a, C.G. Wang^a, H.Y. Wu^a, G.S. Li^b, C.Y. He^b, Y. Zheng^b, C.B. Li^b, Q.M. Chen^b, J. Zhong^b, W.K. Zhou^b

Physics Letters B 734 (2014) 308–313

Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb

Spectroscopy of ^{74}Ge : From soft to rigid triaxiality

J.J. Sun^a, Z. Shi^b, X.Q. Li^{a,*}, H. Hua^{a,*}, C. Xu^a, Q.B. Chen^a, S.Q. Zhang^a, C.Y. Song^b, J. Meng^a, X.G. Wu^c, S.P. Hu^c, H.Q. Zhang^c, W.Y. Liang^a, F.R. Xu^a, Z.H. Li^a, G.S. Li^c, C.Y. He^c, Y. Zheng^c, Y.L. Ye^a, D.X. Jiang^a, Y.Y. Cheng^a, C. He^a, R. Han^a, Z.H. Li^a, C.B. Li^c, H.W. Li^c, J.L. Wang^c, J.J. Liu^c, Y.H. Wu^c, P.W. Luo^c, S.H. Yao^c, B.B. Yu^c, X.P. Cao^c, H.B. Sun^d

北大工作: structure evolution around $N \sim 42$

$N \sim 42$ 附近的Ge、As和Se原子核处在形状过渡区，有着极为丰富的原子核结构现象。利用串列加速器，开展了对 ^{74}Ge 和 ^{75}As 核的结构研究。研究表明 ^{74}Ge 是这个质量区原子核三轴演化的一个关键核；在 ^{75}As 中发现了一个新颖带结构。

Z	3	76Br	77Br	78Br	79Br	80Br
	5					
	3	75Se	76Se	77Se	78Se	79Se
	4					
	3	74As	75As	76As	77As	78As
	3					
	3	73Ge	74Ge	75Ge	76Ge	77Ge
	2					
	3	72G	73G	74G	75G	76G
	1	a	a	a	a	a
		41	42	N	44	45

Physics Letters B 766 (2017) 107–111

Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb

ELSEVIER

PHYSICS LETTERS B

Observation of a novel stapler band in ^{75}As

C.G. Li^a, Q.B. Chen^a, S.Q. Zhang^{a,*}, C. Xu^a, H. Hua^{a,*}, X.Q. Li^a, X.G. Wu^b, S.P. Hu^b, J. Meng^a, F.R. Xu^a, W.Y. Liang^a, Z.H. Li^a, Y.L. Ye^a, D.X. Jiang^a, J.J. Sun^a, R. Han^a, C.Y. Niu^a, X.C. Chen^a, P.J. Li^a, C.G. Wang^a, H.Y. Wu^a, G.S. Li^b, C.Y. He^b, Y. Zheng^b, C.B. Li^b, Q.M. Chen^b, J. Zhong^b, W.K. Zhou^b

CrossMark

Physics Letters B 734 (2014) 308–313

Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb

ELSEVIER

PHYSICS LETTERS B

Spectroscopy of ^{74}Ge : From soft to rigid triaxiality

J.J. Sun^a, Z. Shi^b, X.Q. Li^{a,*}, H. Hua^{a,*}, C. Xu^a, Q.B. Chen^a, S.Q. Zhang^a, C.Y. Song^b, J. Meng^a, X.G. Wu^c, S.P. Hu^c, H.Q. Zhang^c, W.Y. Liang^a, F.R. Xu^a, Z.H. Li^a, G.S. Li^c, C.Y. He^c, Y. Zheng^c, Y.L. Ye^a, D.X. Jiang^a, Y.Y. Cheng^a, C. He^a, R. Han^a, Z.H. Li^a, C.B. Li^c, H.W. Li^c, J.L. Wang^c, J.J. Liu^c, Y.H. Wu^c, P.W. Luo^c, S.H. Yao^c, B.B. Yu^c, X.P. Cao^c, H.B. Sun^d

CrossMark

北京核科学中心

- 1999年5月6日，由原子能院核物理所与北京大学重离子物理所筹备的“北京核科学中心”正式成立
- 时任北京大学校长陈佳洱院士、国家自然科学基金委副主任王乃彦院士及国防科工委、教育部领导出席了大会
- 中心宗旨是促进院校联合，实现研究院所和高等学校在设备、人才等方面的优势互补，从而利用有限的设备和人力资源提高成员单位的科研和教学水平，做出高水平的科研成果，培养出高质量的核科学人才
- 多年来，在北京核科学中心框架下，原子能院与北京大学在核物理基础研究、大科学装置、人才培养及科研项目申请等方面开展了广泛合作，取得了重要合作成果

322

原子能科学技术 第33卷

参 考 文 献

- 1 Robertson J. Deposition of Diamond-like Carbon. *Philos Trans R Soc Lond, Ser A*, 1993, 342
- 2 Robertson J. Amorphous Carbon. *Adv Phys*, 1986, 35(4): 317, 277

PREPARATION OF C_xH_{1-x} FILM

Wu Weidong Luo Jiangshan Zhang Zhanwen Huang Yong

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003*)

ABSTRACT

The C_xH_{1-x} film are prepared using low-pressure plasma CVD with trans-2-butene. The Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and XPS spectra of C_xH_{1-x} film prepared at various flow ratio between H_2 and trans-2-butene are studied. The growth mechanism of C_xH_{1-x} film is briefly discussed. The production rate of sp^3 carbon and sp^2 carbon is related with the deposition condition.

Key words Low-pressure plasma C_xH_{1-x} film FT-IR XPS

北京核科学中心成立

由中国原子能科学研究院核物理研究所与北京大学重离子物理研究所共同筹备的“北京核科技中心”5月6日正式成立。北京大学校长陈佳洱院士、国家自然科学基金委员会副主任王乃彦院士及国防科工委、教育部的有关领导出席了大会。该中心的宗旨是促进院校的联合，实现研究院所和高等学校在设备、人才等方面的优势互补，从而利用有限的设备和人力资源提高成员单位的科研和教学水平，作出高水平的科研成果，培养出高质量的核科学人才。

中子散射谱仪

- 高强度粉末中子衍射仪是由北京大学和中国原子能科学研究院共同建设的具有世界先进水平的高端谱仪，是依托我国中国先进研究堆（CARR）建立的大型科学研究平台的谱仪之一。
- 具有在满足较高分辨水平条件下将探测效率显著提高的优势，填补了我国高强度谱仪的空白，为物质结构研究提供技术支持。
- 2013年部件运抵、安装调试，目前已展开室温衍射实验、原位变温中子衍射实验、原位高压中子衍射实验，磁性材料、离子电池电极材料的研究成果已陆续发表。



ChemPubSoc Europe DOI: 10.1002/cssc.201702322 CHEM SUS CHEM Full Papers

Very Important Paper

Improving the Performance of Layered Oxide Cathode Materials with Football-Like Hierarchical Structure for Na-Ion Batteries by Incorporating Mg^{2+} into Vacancies in Na-Ion Layers

Zheng-Yao Li^(a), Huibo Wang^(b), Dongfeng Chen^(a), Kai Sun^(a), Wenyun Yang^(c), Jinbo Yang^(c), Xiangfeng Liu^(a,b) and Songbai Han^(a)

ACI APPLIED MATERIALS & INTERFACES Research Article

Modulating the Electrochemical Performances of Layered Cathode Materials for Sodium Ion Batteries through Tuning Coulombic Repulsion between Negatively Charged TMO_2 Slabs

Zheng-Yao Li^(a), Huibo Wang^(b), Wenyun Yang^(c), Jinbo Yang^(c), Liang Zheng^(b), Dongfeng Chen^(a), Kai Sun^(a), Songbai Han^(a) and Xiangfeng Liu^(a)

Electrochimica Acta

The modulation and performance optimization of $\delta-Mn_{0.75}Fe_{0.25-x}yNi_xCo_yO_2$ through a synergistic substitution of Co for Fe

Zheng-Yao Li^(a,b), Wenyun Yang^(c), Jinbo Yang^(c), Dongfeng Chen^(a), Su^(a), Xiangfeng Liu^(a)

Scripta Materialia

Regular Article

Structural evolution, site ordering and magnetic properties of tetragonal $Mn_{1-y}Ca_{2+y}$ ($0 \leq y \leq 1.64$)

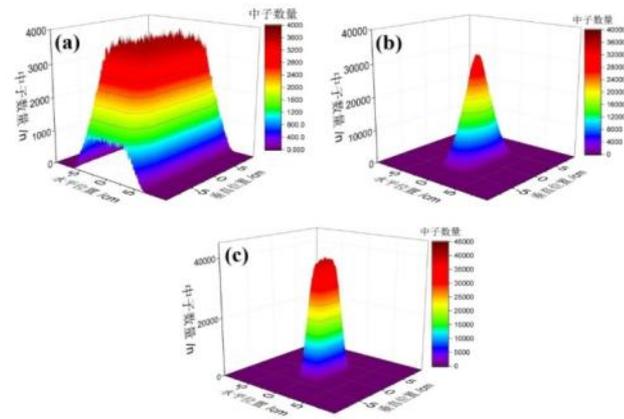
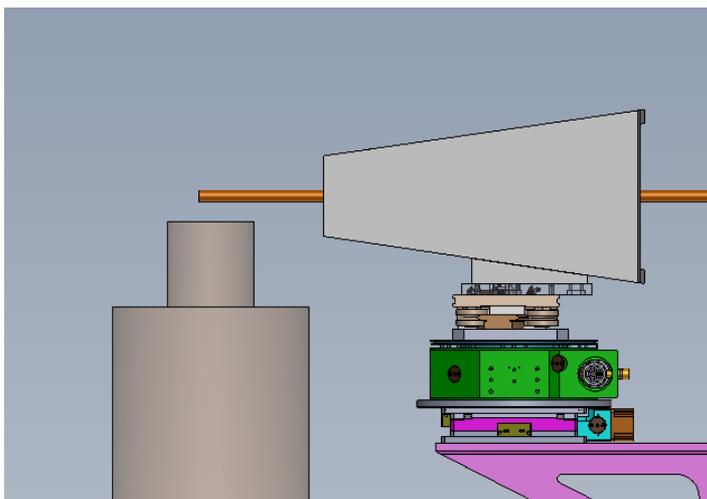
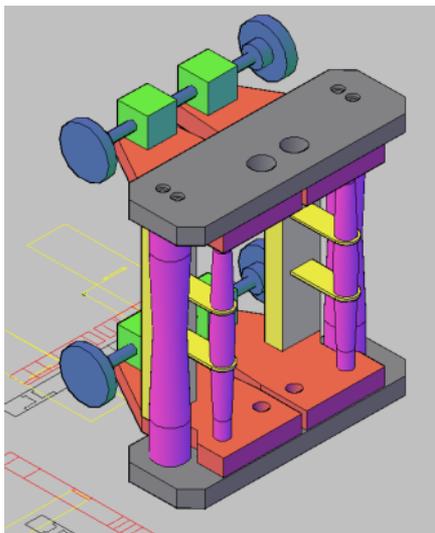
Hui Zhao^(a), Wenyun Yang^(a), Zhuolin Shao^(a), Guang Tian^(a), Dong Zhou^(a,b), Honglin Du^(a), Shunquan Liu^(a), Jingzhi Han^(a), Changsheng Wang^(a), Jing Xu^(a), Dunbo Yu^(a), Yingchang Yang^(a), Jinbo Yang^(a,b)

国家重点研发计划项目（2017YFA0403700）

中子散射关键技术及前沿应用研究

根据我国中子散射科学平台建设、发展和应用需求，集中国内该领域优势力量，开展中子关键部件研制、新技术新方法开发及重点应用领域关键问题攻关。最终建设具有完全自主研发能力、掌握新技术前沿、应用领域深入广泛的国际先进中子科学测试平台，为中子散射在前沿科学及工业领域应用研究提供设备与技术支撑。

中国原子能科学研究院与北京大学合作课题： 中子散射光学关键部件



北京大学为串列实验室发展作出重要贡献

历届实验室学术委员会中来自北大的专家

杨立铭



胡济民



卢希庭



江栋兴

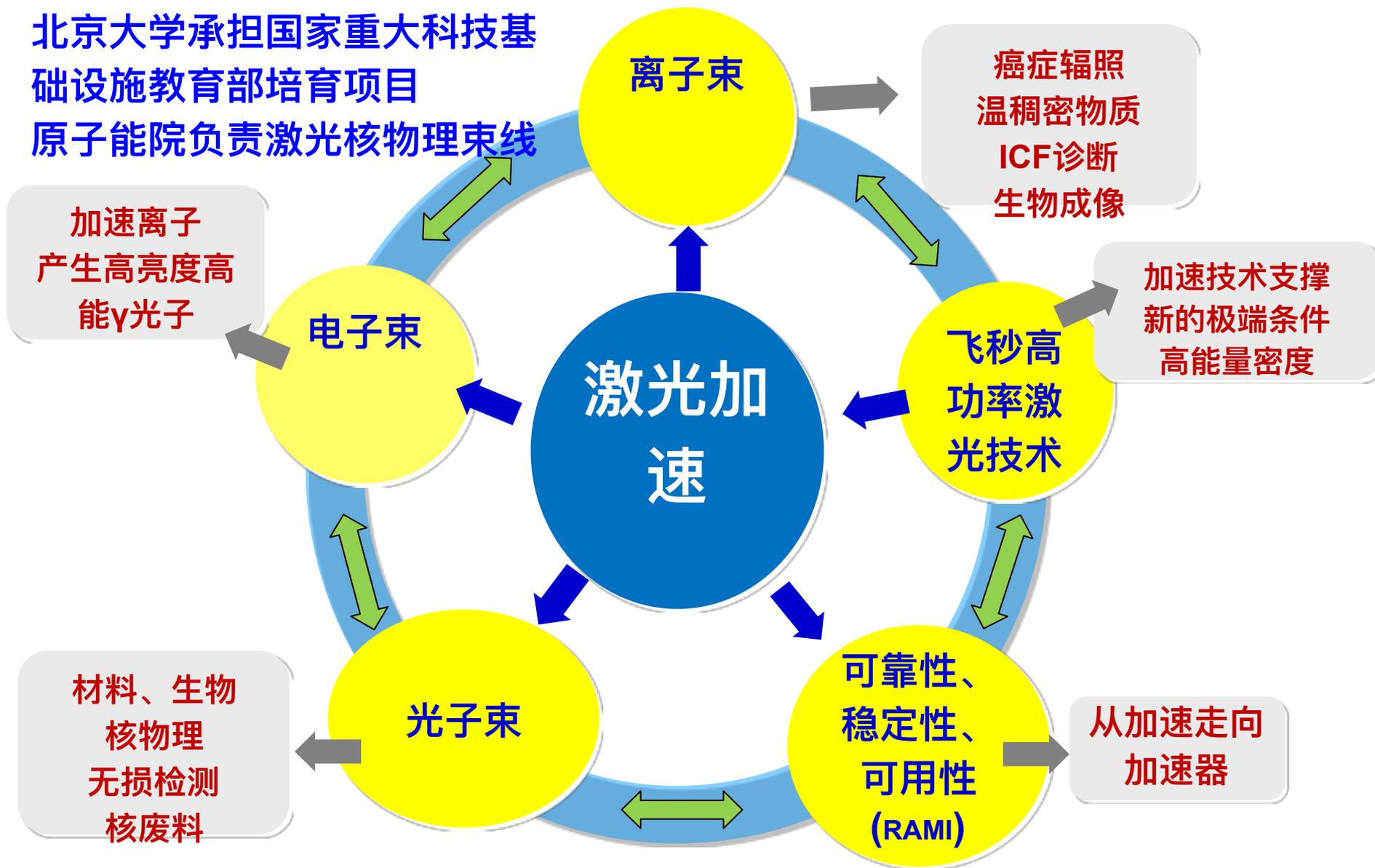


叶沿林



激光加速器及应用前景

- 北京大学承担国家重大科技基础设施教育部培育项目
- 原子能院负责激光核物理束线



人才与研究生培养

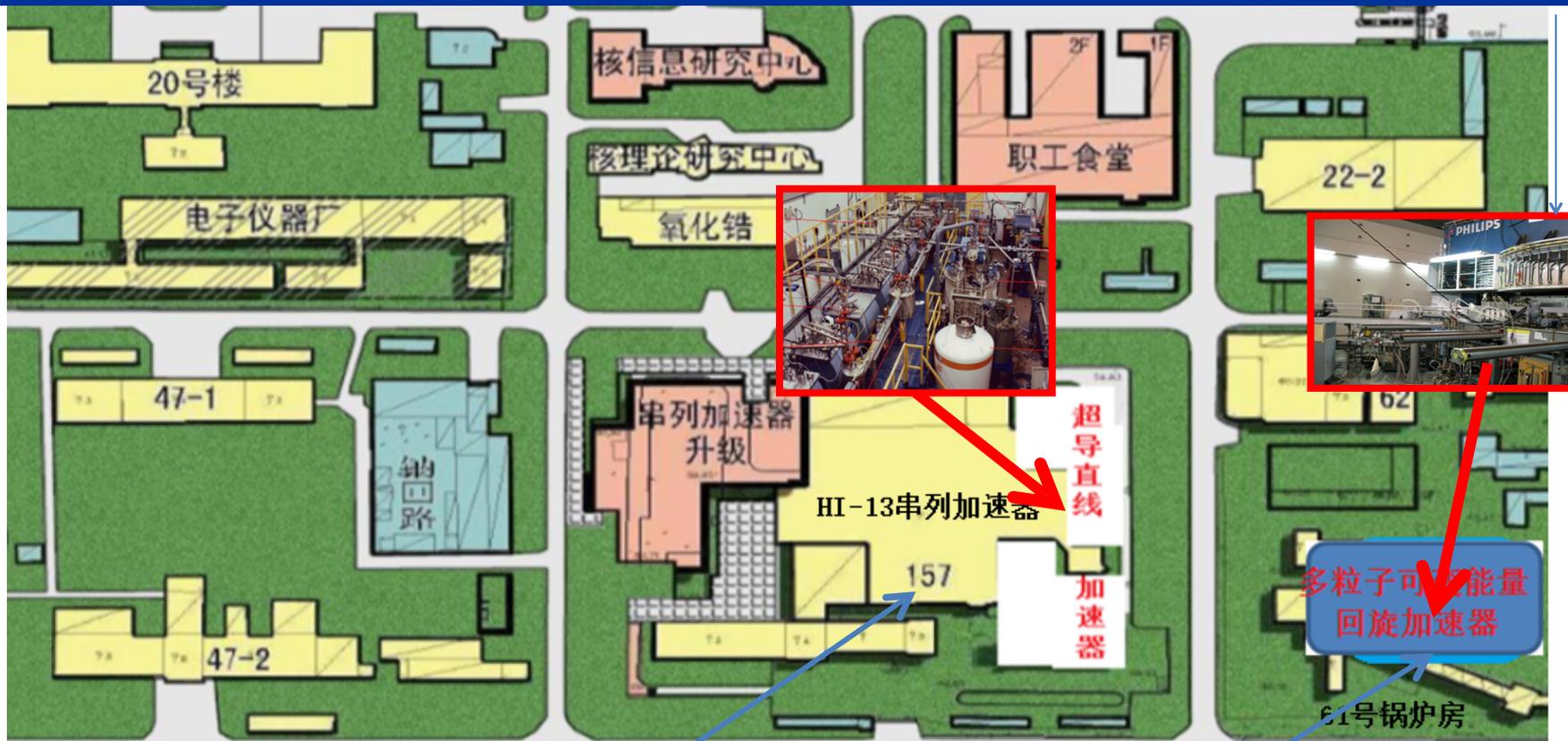
- 多年来，原子能院与北京大学在人才培养方面开展了大量合作。原子能院在加速器、反应堆大型实验设施上开展实验等用户培训和研究生培养方面做出贡献。
- 北京大学向原子能院输送了大量的优秀学生，其中很多人已经在原子能院乃至中核集团的各类岗位发挥着重要作用，包括王乃彦院士、张焕乔院士、万钢党委书记、柳卫平副院长等多位专家。



2018年的运行时间和2019年运行计划总结

	2018	2019
串列开机	1900	·3200
串列供束	1700	批准2800 申请11000
回旋开机	1000	~ 1000
回旋供束	600	600
主任时间	北大核数据20 北师大核反应40 优秀用户20	80（串列） +100（回旋？） 优秀用户20

目前建设：超导重离子直线加速器和重离子回旋加速器（3.23亿，2016-2019）



“十三五”国家重大科技基础设施规划项目

北京在线同位素分离 丰中子束流装置

Beijing Isotope-Separation-On-Line
Neutron-Rich Beam Facility
(北京ISOL, BISOL)

中国原子能科学研究院
北京大学
2018年12月

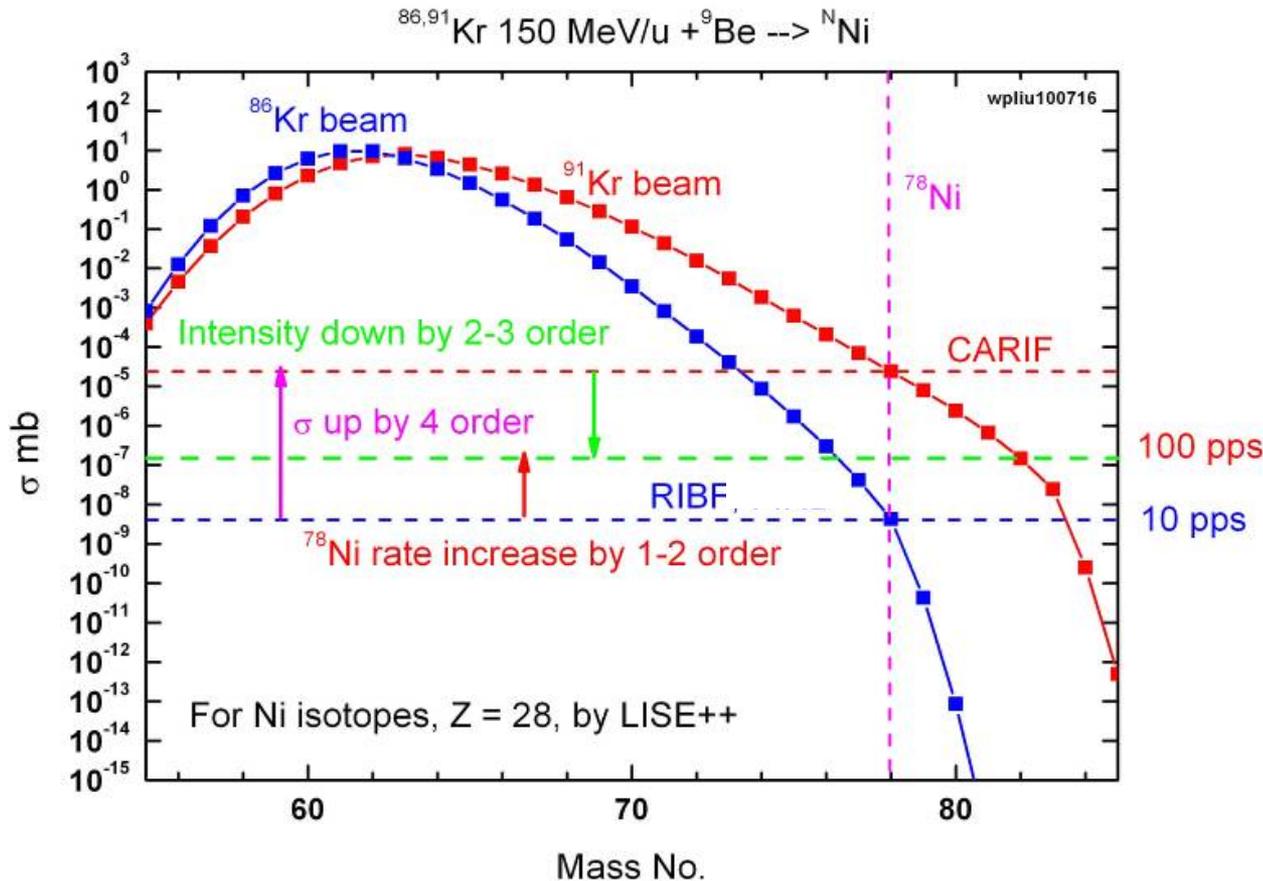
“十三五”国家重大科技基础设施规划项目

北京在线同位素分离 丰中子束流装置

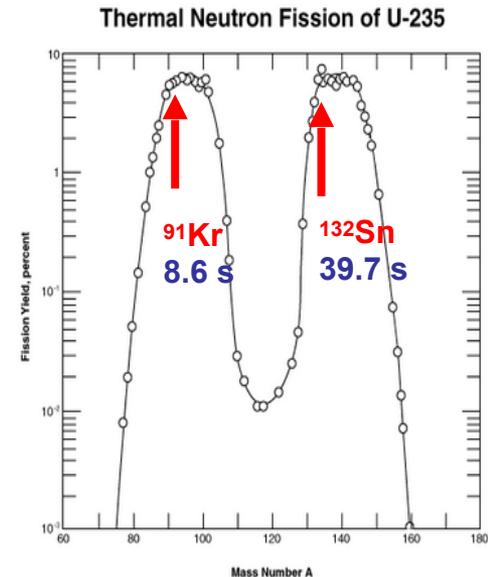
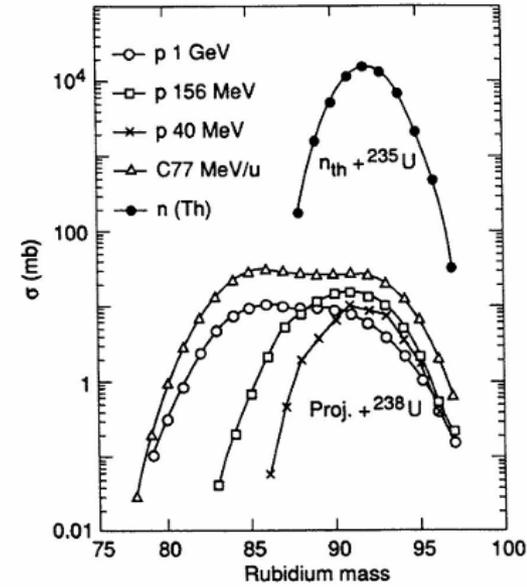
Beijing Isotope-Separation-On-Line
Neutron-Rich Beam Facility
(北京ISOL, BISOL)

中国原子能科学研究院
北京大学
2018年12月

稳定核束和丰中子核束产生Ni同位素的比较



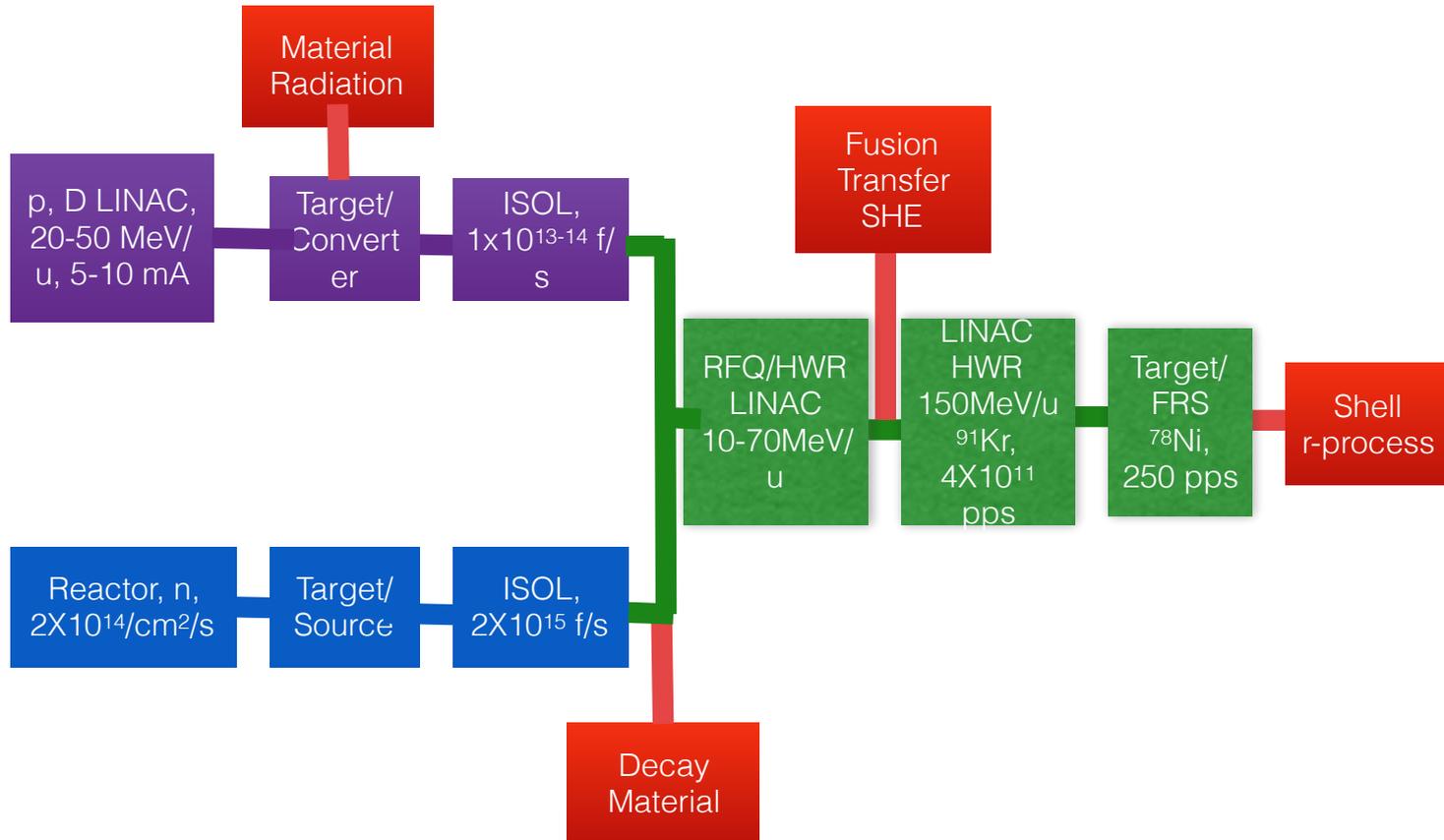
丰中子核束选取原则：
 产额较大
 寿命较长
 易于分离



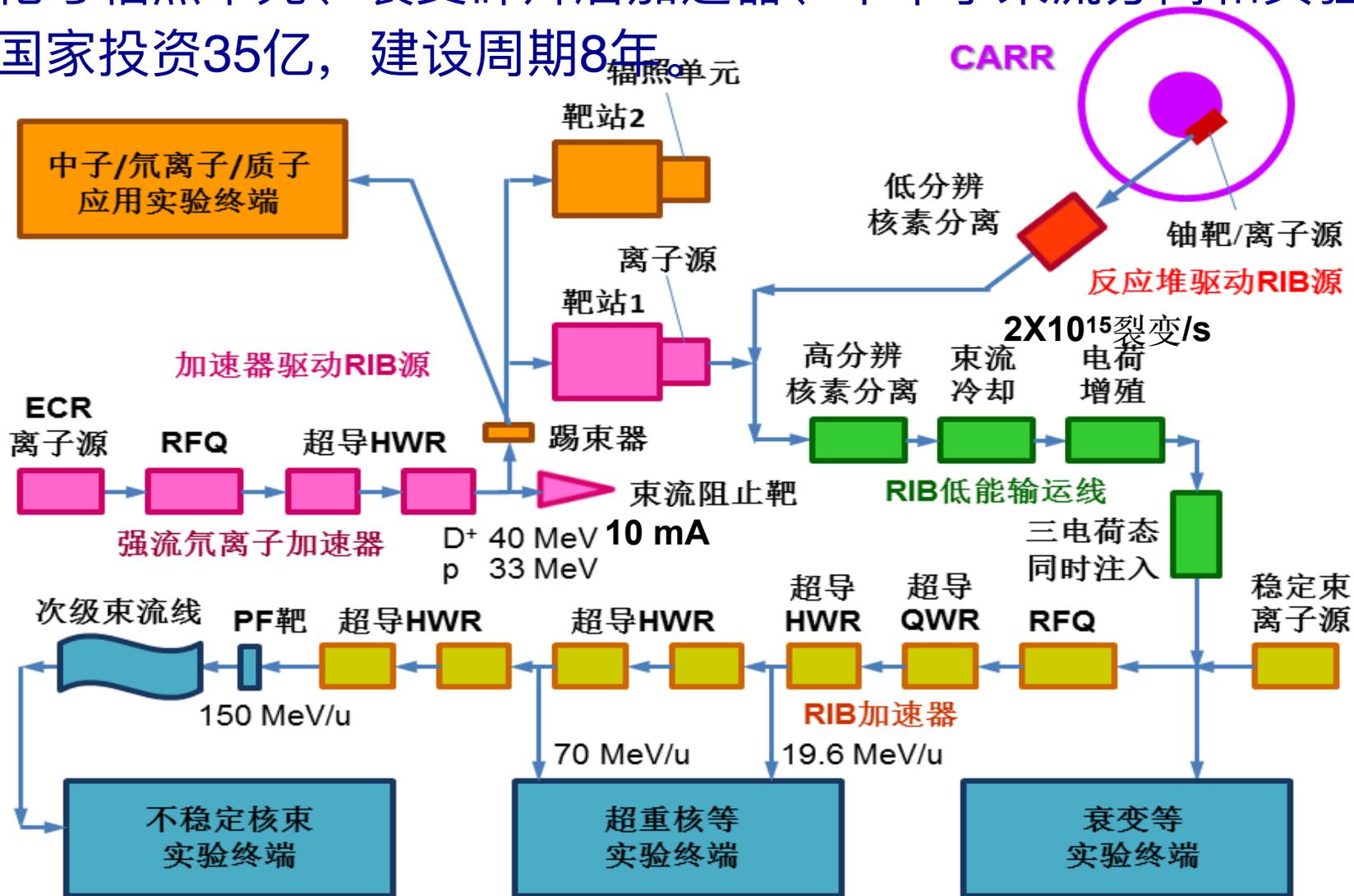
北京ISOL的概念设计



- **先进性。** 双源驱动，堆器耦合，可提供国际一流的束流强度和研究平台
- **多用性。** 通过多束流、多能量和多平台，满足从基础应用的各种需求
- **可行性。** 双源驱动，运行因子高，技术成熟度适中，费效比高
- **互补性。** 与目前和将来的国内外大科学装置在束流、性能和地域互补

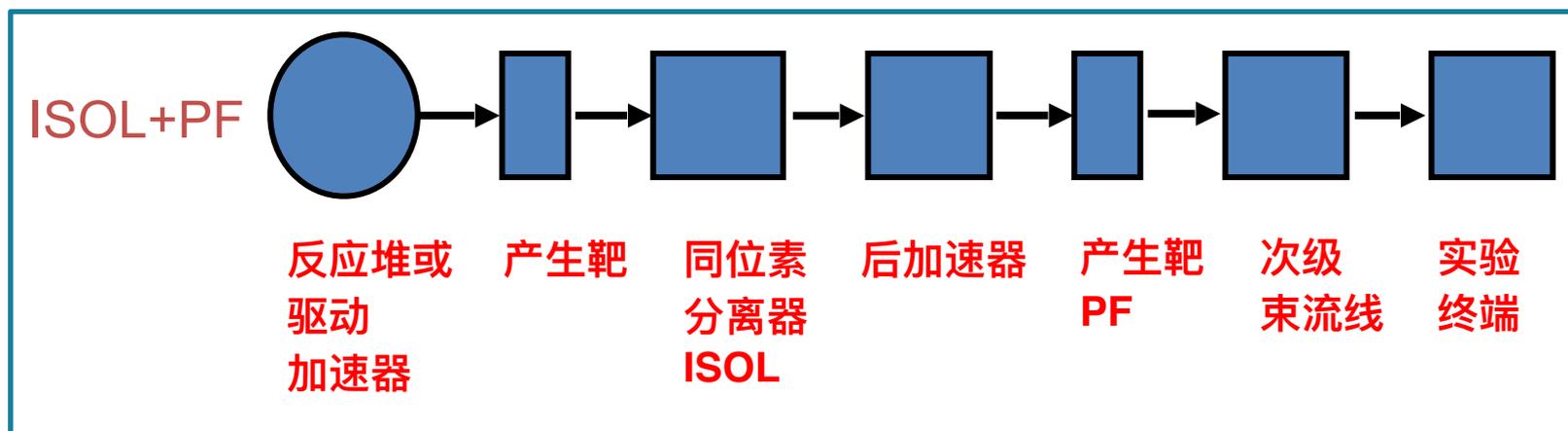


解决方案：建设在线同位素分离丰中子束流装置，主要内容包括：
 反应堆在线靶源及同位素分离器、强流氘离子加速器及高功率中子
 转换靶与辐照单元、裂变碎片后加速器、丰中子束流分离和实验装
 置，国家投资35亿，建设周期8年。



先进性和独特性

- **ISOL+PF的技术路线**：反应堆热中子引发 ^{235}U 裂变，也可强流D束快中子引发 ^{238}U 裂变；通过在线同位素分离（ISOL），裂变碎片后加速后进行碎裂反应（PF）。裂变碎片核的丰中子特性，使PF产生的丰中子束流强度比国际在建装置提高1~2个量级
- **强流D束轰击液态Li靶**：产生类似聚变堆中子能谱的强流中子束，中子通量 $\sim 5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2/\text{s}$ ，国际领先。

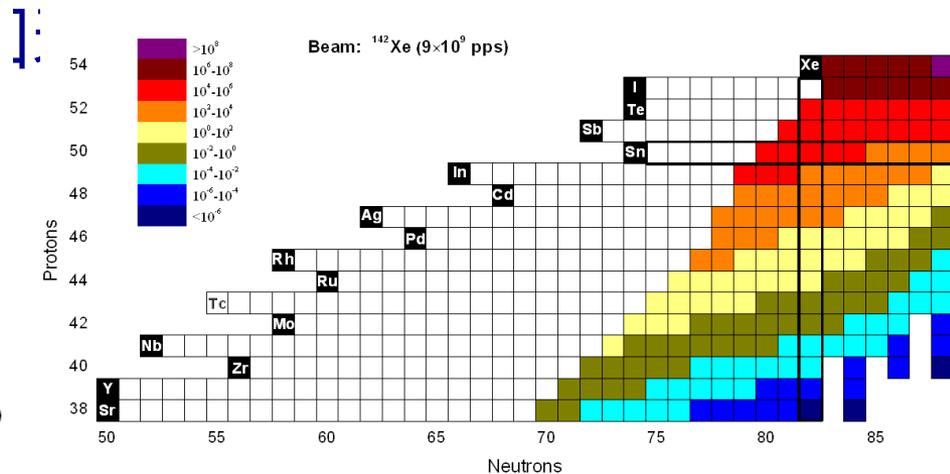
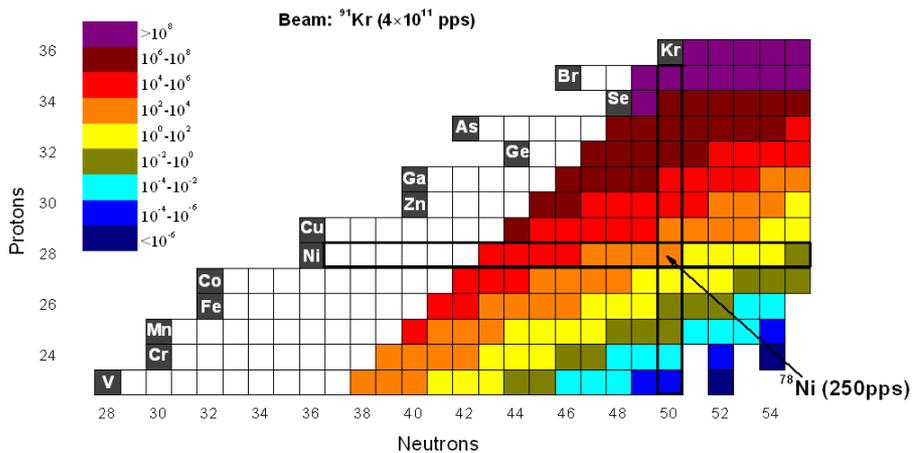


BISOL的建设目标

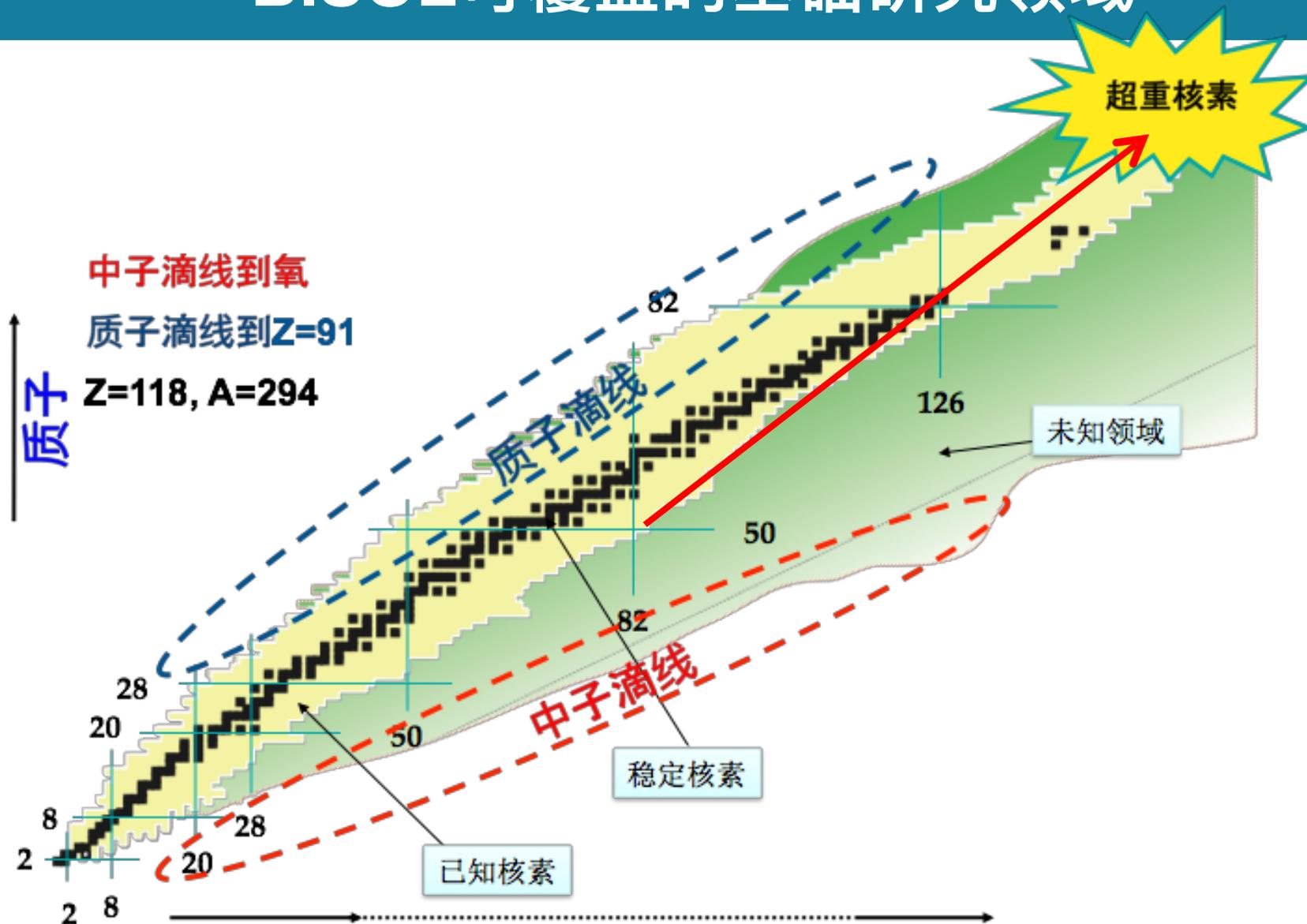
- **双离子源驱动。**
 - 现有**CARR堆**（China Advanced Research Reactor）产生高通量热中子（堆芯通量 8×10^{14} n/cm²/s），诱发²³⁵U裂变；
 - 强流氘离子超导直线加速器（氘束能量**40 MeV**，流强**10 mA**），轰击液锂靶，利用**(d,n)**反应产生高通量快中子（能量**1 ~ 20 MeV**，通量~ 5×10^{14} n/cm²/s），诱发²³⁸U裂变。
- **高分辨ISOL。**
 - 裂变产物注入高分辨在线同位素分离器（ISOL），质量分辨 **$M/\Delta M = 2000 \sim 20000$** ，选择感兴趣的目标核（主要是丰中子裂变核，如¹³²Sn），引至ISOL实验终端开展分离束实验或者注入超导直线进行后加速。
- **超导重离子直线后加速。**
 - 第一段加速至**20 MeV/u**，引至低能区开展核物理研究；
 - 通过剥离靶（固体薄靶）提升电荷态，注入第二段加速
 - 轰击反应靶（液氮冷却气体靶），通过直接反应，如**(d,n)**、**(p,n)**等，产生更奇特的丰中子束流，经分离纯化后引出至低能区开展实验研究
 - 多电荷态（如**5**电荷态）注入，加速至**150 MeV/u**，轰击反应靶（~ **1 mg/cm²** 铍靶或其它金属靶），利用弹核碎裂（PF）法，产生更加丰中子的束流，通过次级束流线分离纯化，引出至中能区开展实验研究。
- **BISOL利用丰中子裂变产物束流再次打靶产生更加远离稳定线的丰中子束流**
 - 在中等质量核区可接近中子滴线，可开展ISOL分离能区（~ **20 keV/q**）、低能区（~ **20 MeV/u**）和中能区（~ **150 MeV/u**）的物理实验
 - 典型裂变丰中子束流有：¹³²Sn, 5×10^{10} pps; ⁹¹Kr, 4×10^{11} pps, ⁸¹Ga, 1×10^9 pps; 典型PF极端丰中子束流

BISOL的科学前沿目标

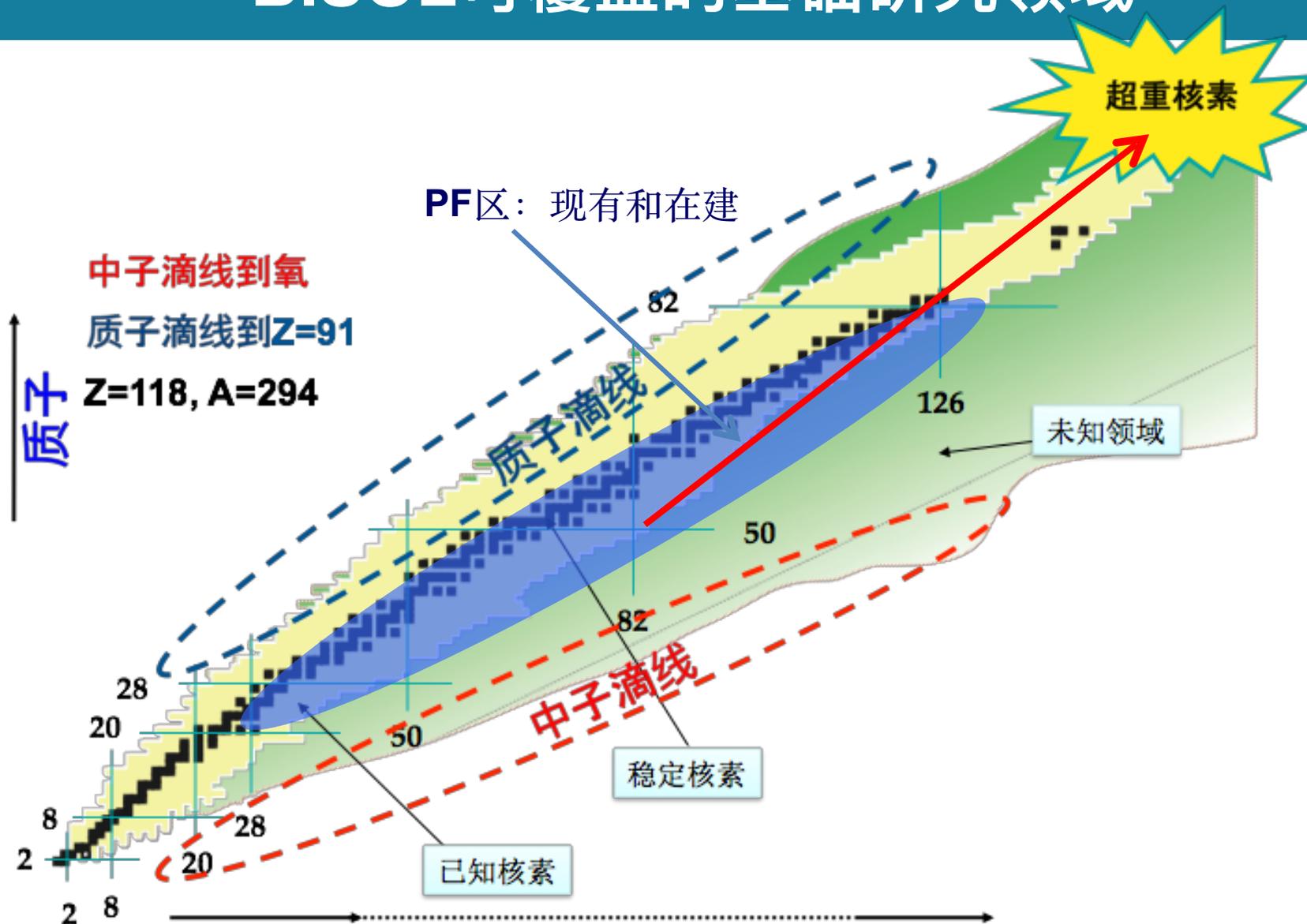
- 原子核稳定边界和新物理：国际上最强的丰中子束流品种，如 ^{78}Ni ， ^{66}Ca 的实验测量
- 合成超重核素新途径探索：高强度的裂变束流品种，如 ^{91}Kr 、 ^{132}Sn 的融合反应
- 天体重元素核合成的新路径确定：合成和研究快过程路



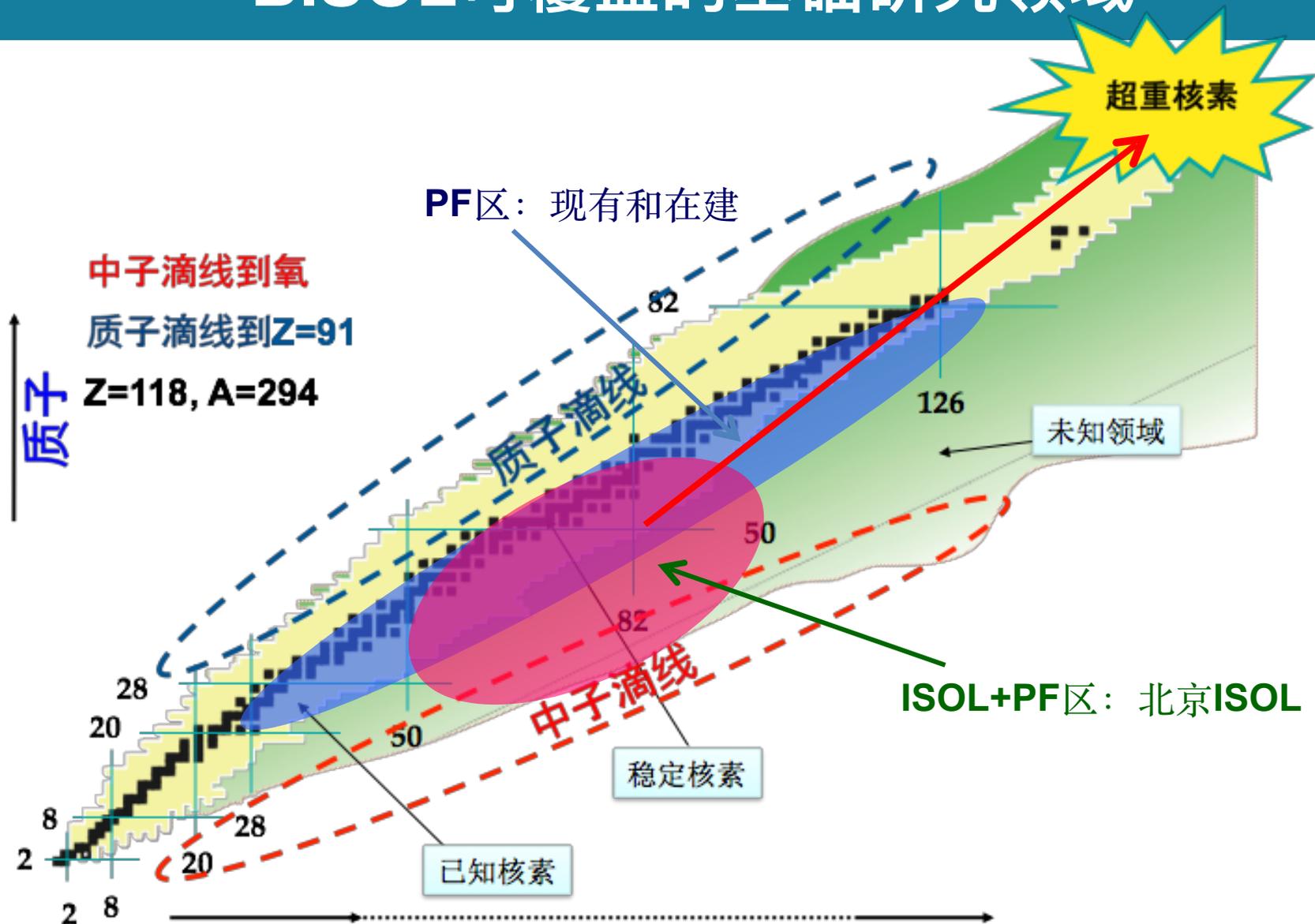
BISOL可覆盖的基础研究领域



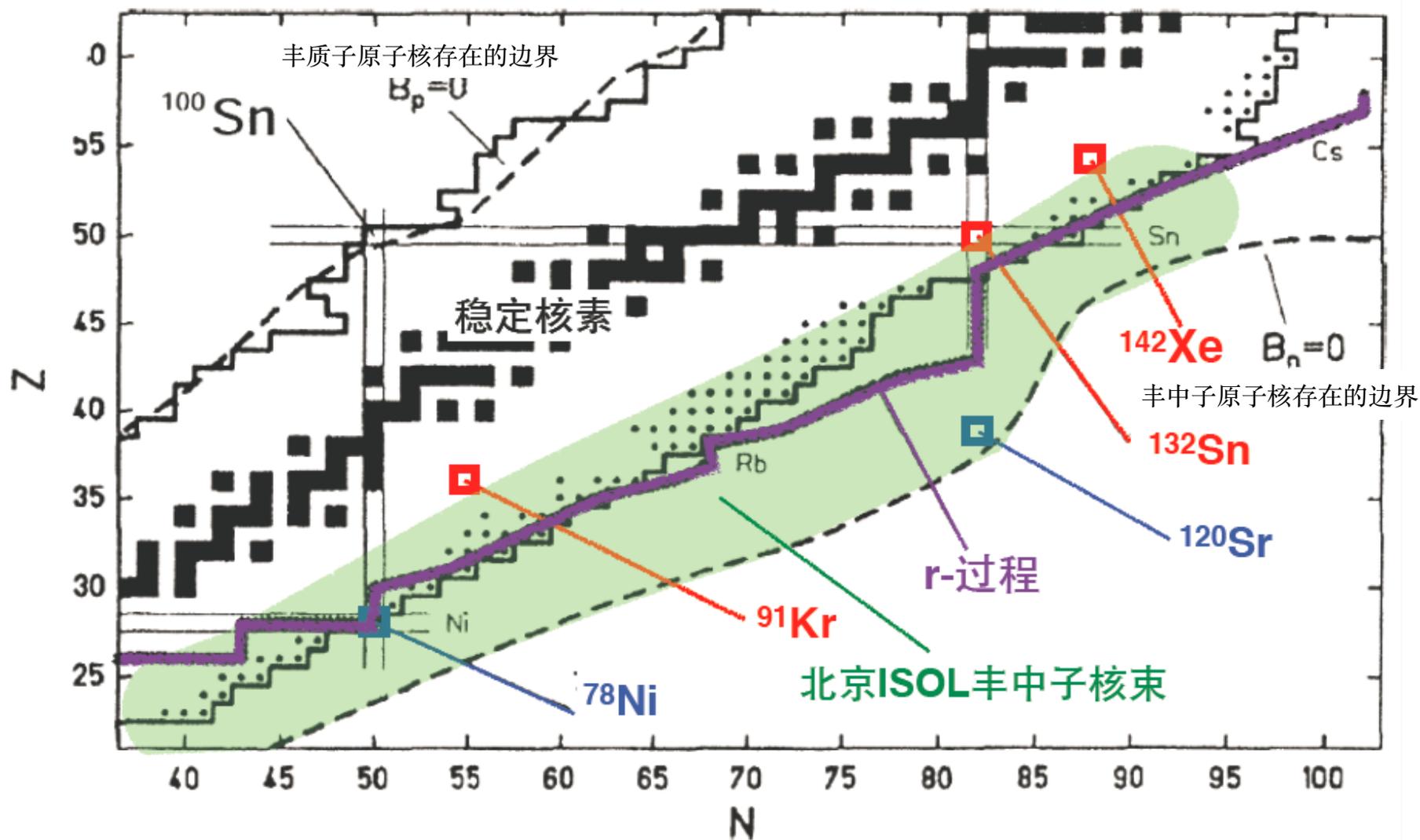
BISOL可覆盖的基础研究领域



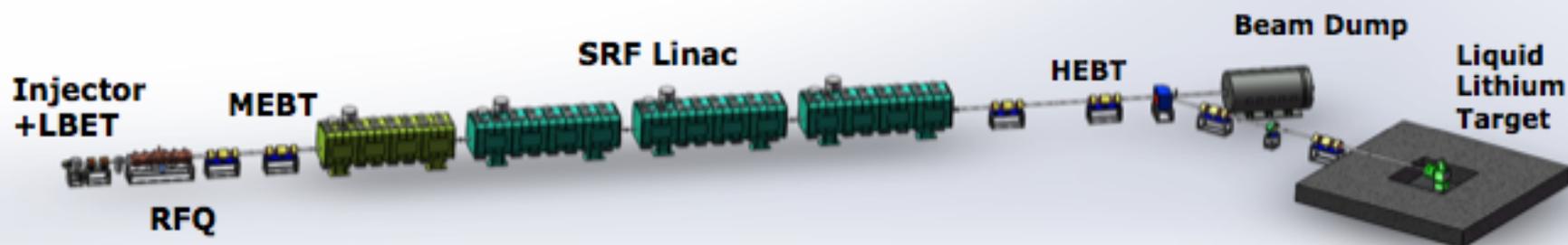
BISOL可覆盖的基础研究领域



为全面开展上述科学和应用前沿工作，采用高通量研究型反应堆和强流加速器、在线同位素分离（ISOL）和弹核碎裂（PF）结合，产生最高强度中等质量核区丰中子核束，用于拓展核素新版图并认识新规律



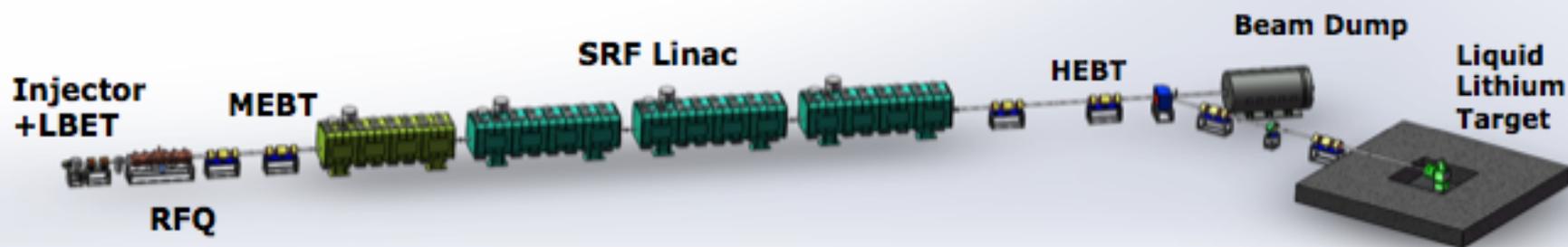
BISOL的重大应用目标



离子：D、p；能量：40 MeV

流强：10mA级（D）；运行方式：CW（连续波）

BISOL的重大应用目标



离子：D、p；能量：40 MeV

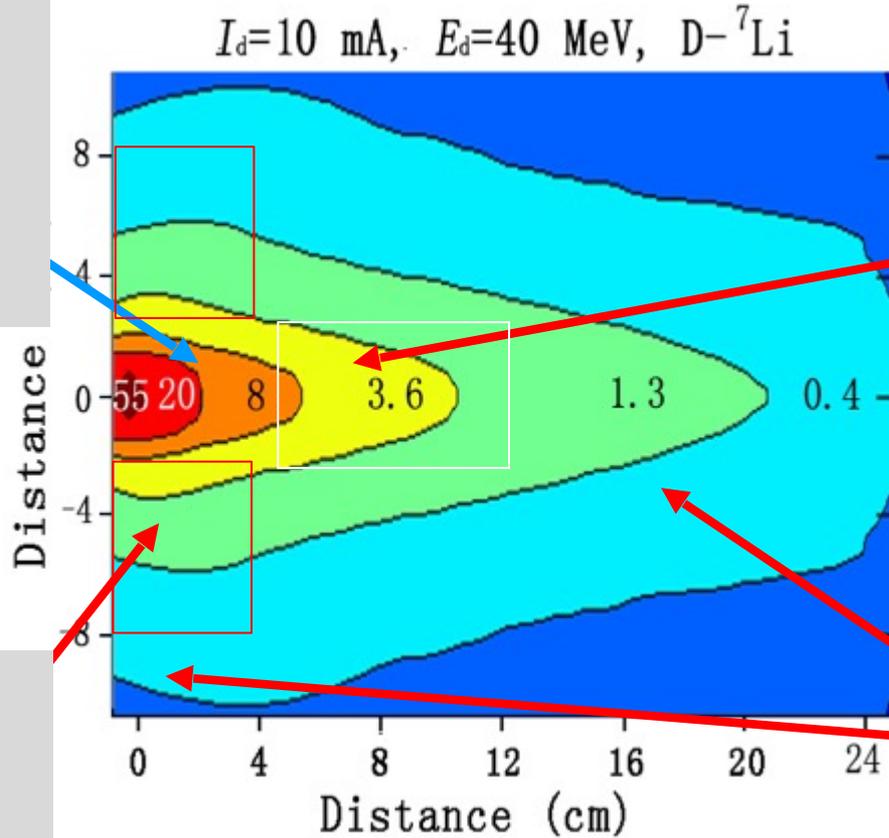
流强：10mA级（D）；运行方式：CW（连续波）

聚变能的发展离不开聚变堆材料的辐照测评和考验，
“国际聚变材料辐照装置(IFMIF)”仍在设想阶段
国际与中国的聚变能发展迫切需要强流聚变中子源

采用强流氘束打靶产生高通量的聚变能区中子，满足先进核能系统、特别是聚变堆材料的辐照测评与考验等急迫需求。

高通量辐照区域：

- ~10-20 cm³
- 8-15 dpa/年
- 聚变堆结构材料



中通量辐照区域：

- ~50 cm³
- > 3 dpa/年
- 在线蠕变、疲劳测量
- 氚增殖与氚释放测试

类快堆中子区域：

- ~100 cm³
- 1-2 dpa/年
- 裂变堆结构材料

低通量中子区域：

- 中子数据
- 探测器标定
- 分析、成像
- 同位素生产
-

中子科学实验区

BISOL辐照中子源设计参数及比较

	能量 (MeV)	离子	流强 (mA)	功率 (MW)	有无中子	靶类型	束斑面积 (cm ²)	中子通量 (n/cm ² .s)	辐照体积 (cm ³)
IFMIF	40	D ⁺	2*125	10	有	液态 Li	~100	1*10 ¹⁵	300-500
LIPAc	9	D ⁺	125	1.125	无				
SARAF	40	D ⁺	5	0.2	有	固态 C		1*10 ¹⁴	
SPIRAL II	40	D ⁺ , p	5	0.2	有	固态 C		1*10 ¹⁴	~10
BISOL	40	D ⁺ , p	10	0.4	有	液态 Li	~4	5*10 ¹⁴	10~20

➤ **IFMIF**：未来聚变材料抗辐照性能考验的必备装置

BISOL：达到IFMIF的中子通量，只是辐照体积较小

➤ 具有与IFMIF相同的中子能谱及通量密度，可提供几十个聚变材料样品的辐照考验，亦可提供上百个裂变材料样品的辐照实验，提供聚变能下一步发展的必须基础。

BISOL装置特色

- 在国内外的同类装置中具有不可替代性
 - 被国际同行列为与未来欧洲装置EURISOL并列的超级装置
 - 在国际上唯一与研究性反应堆耦合，提供了很高的裂变束流强度和性价比
- 挑战性与可靠性兼顾
 - 反应堆驱动有望得到高产额放射性核束
 - 氘核加速器驱动提供了国际水平的聚变中子通量
- 多模式运行，基础研究与需求应用兼顾
 - 更强的丰中子放射性核束满足原子核稳定性极限新物理研究需求
 - 核能材料强流中子辐照测评满足先进核能发展需求
 - 年提供束流时间约8000小时，可提供百余个基础和应用实验，参加实验的骨干人员可达千人以上，将成为国内外开放的大科学平台
- 与国内外大科学装置在基础科学和应用目标、束流性能、地域等方面互补

北京ISOL 拥有较长久的科学寿命，在未来20年中将是国际上最具竞争力的新一代放射性束流装置。

实施条件和技术基础

关键技术

- 反应堆放射性核束产生技术
- 强流D⁺离子源及氦离子RFQ加速器技术
- 射频超导加速器技术
- 高功率靶设计、操作与维护技术
- 放射性核束实验与探测技术
- 核能材料辐照测评装置设计和建造技术

由于以上各单项技术在国内外有了实践经验，通过国内协作和国际合作，不存在不可克服的技术障碍

高流强氘束、高功率靶和离子源技术

- 国际IFMIF装置的氘束设计目标为125mA。通过考虑低能强流离子的空间电荷效应，并经多次束流光学优化设计并基于国内外发展状况，10mA的目标能够达成。
- 高功率液态锂靶有国际运行基础。EVEDA项目中的液态Li靶已稳定运行一年半。国内具有液态金属使用基础。
- 反应堆上离子源产生离子的核心部分与现有加速器上放射性核束离子源相同，二者的效率相近。
- 使用激光电离时，电离部分结构完全相同。
- 我们的引出效率，采用了瑞典Studsvik反应堆内离子源数据。

已有基础

- 中国原子能科学研究所和北京大学在核物理、加速器物理与技术、核技术应用以及相应的科学装置建设方面拥有**高水平的研究和工程技术队伍**。
- 原子能院研究堆运行中心，具有研究型反应堆50年的**运行经验**，可以保证CARR堆的稳定运行。
- 目前原子能院完成建设ISOL型串列升级工程，其中包括超导直线加速段，正在建设重离子超导后加速项目，这为BISOL的直线加速器建造提供了**人才和技术积累**。
- 北京大学团队在强流离子源，强流氦加速器等方面有长期的积累，完成了多项低能加速器装置建设。
- 中科院近物所、高能所等兄弟单位和国际上相关装置的研究团队可以为BISOL的建设提供支持和合作。

中国先进研究堆CARR

- 高通量、多用途
- 轻水冷却，重水反射层
- 功率60MW，最大中子通量 $8 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$
- 2010年5月首次临界
- 2012年3月达到满功率
- 2012年完成反应堆引出裂变碎片原理验证实验
- 2015年开始稳定运行
- 2017年冷中子源调试出束
- 2018年实现连续大功率运行，财政部开始支持燃料经费

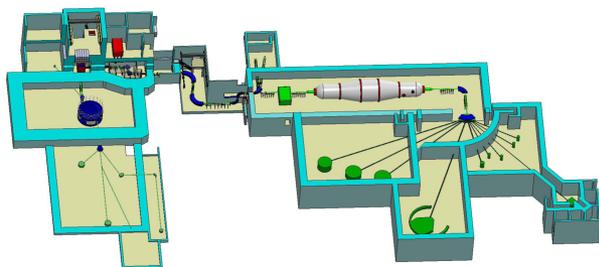


实施条件和技术基础

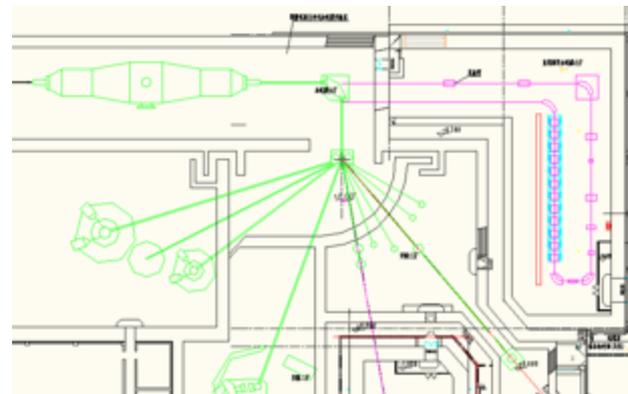
强流加速器研发与建造



PKUNIFTY的全永磁结构
2.45GHz ECR氘离子源



ISOL型装置BRIF



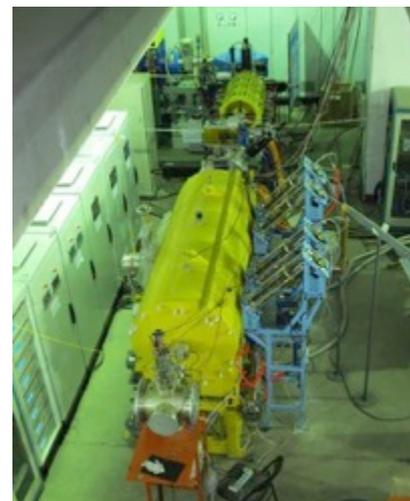
超导后加速器



基于强流D+离子加速器的中子成像装置



2 X 9 单元腔超导加速器

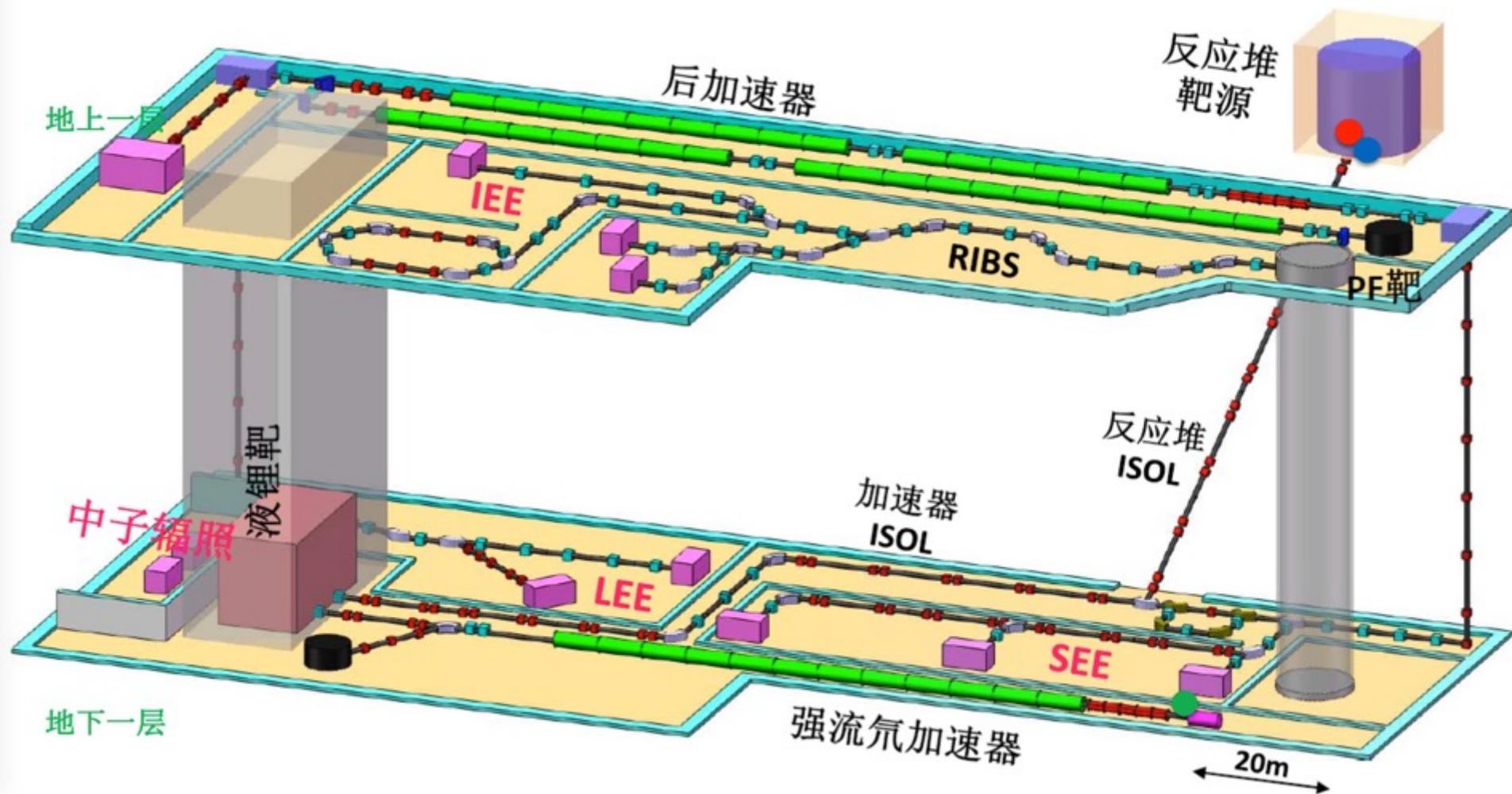


为HIRFL建成的
RFQ直线加速器

选址与建设规划



BISOL布局图



国际同类装置裂变率的比较

	北京ISOL 中国	CARIBU 美国	SPIRAL2 法国	TRIUMF 加拿大	SCRIT 日本
状态	规划中	运行	建设中	建设中	已建成
裂变率 每秒	2×10^{15}	10^9	1×10^{14}	5×10^{13}	2×10^{11}
技术	反应堆中 子, ^{235}U 靶5g	^{252}Cf 自发 裂变	加速器中 子, ^{238}U 靶280g	光致裂变	光致裂变

BISOL的国际竞争力

装置 国家	BISOL 中国	FRIB 美国	RIBF 日本	FAIR 德国	EURISOL
建成年份	2025	2018	2009	2017	2025+
造价(亿美元)	5	13	6	14	
预计 ⁹¹ Kr强度(pps)	4×10^{11}				3×10^{10}
预计 ¹³² Sn强度(pps)	5×10^{10}			1×10^8	9×10^{11}
预计 ⁷⁸ Ni强度(pps)	400	150	10	10	20
滴线核 ⁶⁶ Ca强度(pps)	4×10^{-6}				

	BIGrips $^{70}\text{Zn}+\text{Be}\rightarrow^{60}\text{Ca}$	BISOL $^{80}\text{Zn}+\text{Be}\rightarrow^{66}\text{Ca}$
beam intensity (pps)	1.25×10^{12}	5.5×10^7
beam energy (MeV/u)	345	150
Be thick (atom/cm ²)	1.85×10^{23}	5.70×10^{22}
cross section (mb)	2.0×10^{-13}	$1.0\times 10^{-8\text{c}}$
transport efficiency(%)	12	12
Count rate (pps)	5.5×10^{-6}	3.7×10^{-6}
time (hour)	99	100
Total counts	2	1.3

2012年10月北京ISOL国际咨询会

- ✓ 装置的反应堆与强流氦加速器双源驱动方案，基础科学重大目标与核能材料等需求目标有机结合，如果按设计建成，北京ISOL将在相当一段时间内成为国际最高水准和有独到特点的大科学装置；
- ✓ CARR 反应堆提供了产生不稳定核素的独特机会，将能提供国际上最高的裂变碎片强度，结合后加速后的炮弹碎裂，将可产生国际上最强的丰中子束流。

Shoji Nagamiya	Co-chair	KEK and JAEA	shoji.nagamiya@j-parc.jp
Jia-er Chen	Co-chair	Peking University	chenje@pku.edu.cn
Walter Henning	Nuclear Physics	Argonne National Laboratory and RIKEN Nishina Center	wfhenning@anl.gov

Akito Arima	M
Vincent Chan	F
Steve Zinkle	M
Satoshi Ozaki	A
Tohru Motobayashi	D
Syed Muhammad Qaim	M
Frank von Hippel	M
Hirohiko Tsujii	M
The following three mem	
Robert E. Laxdal	A
Herve Nifenecker	M
Eric Petit	A



项目国际评估的情况

Accelerators for Nuclear Physics in the World

	Beams	Asia	Europe	America	Comments
Hot QCD	A+A	--	LHC (ALICE) FAIR (SIS300) NICA	RHIC	Missing Asian? J-PARC-HI for dense matter?
Cold QCD	hadron	J-PARC+Hdex HIRFL+HIAF	FAIR (SIS100)	--	Missing American?
	e-	Spring8 (LEPS) ELPH	MAMI	JLAB-12GeV	1+many
	collider	BES-III Belle-II	NICA	eRHIC eIC	1 in the world?
Many body Problem (RI Beam)	PF	RIBF+upgrade HIRFL+HIAF	GSI/FAIR	FRIB	Good competitions!!
	Both	RISP			
	ISOL	BRIF RIB-ANURIB HIAF+CiADS?	SPIRAL2 SPES HIE-ISOLDE	ARIEL-II	
	Super ISOL	Beijing- ISOL	EURISOL	--	FRIB upgrade for US?
(High Resolution)	Pol proton	RCNP RC	KVI	Texas A&M	iThemba (South Africa)

亚洲核物理学会主席KEK的Tanaka教授

国内外装置比较和专家评价

2014年8月香山科学会议

√北京ISOL建成以后，能够在Ni 到 Sn的中子滴线区域产生高强度的极丰中子核素，束流强度比当前国际上建成和在建的最先进的三代放射性束装置强度高1-2个量级，这对研究远离稳定线原子核的奇异结构和壳演化、核反应机制与超重元素合成、天体r过程的核合成路径与走向等重大科学问题具有重要的意义。

√核科学平台对我国核能发展将会起到很好支撑作用，应大力发展辐照模拟技术，积极开展相应的材料筛选与测评及辐照机理的研究，研发先进的有自主知识产权的核燃料和抗辐照新材料。

部分专家名单

王乃彦
沈文庆
肖国青
张焕乔
陈佳洱

夏佳文
徐瑚珊
赵红卫
周小红
杜祥琬
彭先觉
李冠兴
陈和生
张闯
安竹

任中洲
陆景彬
肖志刚
赵玉民
赵政国
刘永
邹冰松



国内外装置比较和专家评价

2016年5月北京ISOL科学讨论会

✓ “北京ISOL”将提供极高强度的快中子束流，在较小尺度上率先达到规划中的国际聚变材料辐照装置（IFMIF）的中子辐照强度，将在先进核能系统抗辐照材料考验与评测等方面发挥重要作用。希望尽早开展相关的理论和实验方法研究。“北京ISOL”还可用于快中子核反应数据、抗辐射加固、中子成像和核效应分析等领域的研究，可为我国交叉学科的发展提供必要的基础实验平台。

✓ 放射性核束物理与核天体物理酝酿着科学发现的重大机遇，极强流中子装置也是引领先进核能系统发展必不可少的手段和平台。“北京ISOL”的先进性和独特性，使之在建成后比较长的时期具有很强的竞争

1	王乃彦	院士	中国原子能科学研究院
2	阮可强	院士	中国原子能科学研究院
3	张焕乔	院士	中国原子能科学研究院
4	赵志祥	研究员	中国原子能科学研究院
5	陈佳寅	院士	北京大学
6	戴勇	研究员	Paul Scherrer Institute(瑞士)
7	张闯	研究员	中科院高能物理研究所
8	邹冰松	研究员	中科院理论物理研究所
9	周善贵	研究员	中科院理论物理研究所
10	万发荣	教授	北京科技大学
11	张丰收	教授	北京师范大学
12	肖志刚	教授	清华大学
13	关遐令	研究员	清华大学
14	彭先觉	院士	中国工程物理研究院
15	潘传红	教授	核工业西南物理研究院
16	刘兴	研究员	核工业西南物理研究院
17	朱志远	研究员	中科院上海分院
18	马余刚	研究员	中科院上海应用物理研究所
19	罗广南	研究员	中科院等离子体物理研究所
20	徐珊珊	研究员	中科院近代物理研究所
21	张玉虎	研究员	中科院近代物理研究所
22	周小红	研究员	中科院近代物理研究所
23	何源	研究员	中科院近代物理研究所
24	赵红卫	研究员	中科院近代物理研究所
25	葛昌纯	院士	北京科技大学
26	周辉	教授	北京大学科研部部长

2017年3月北京ISOL物理用户会



- ✓ “北京ISOL” 是国际先进的、有鲜明特色的核物理大科学装置，针对未来二、三十年国际科学发展的热点前沿，是我国核科学研究在若干重要方面走向国际引领的难得机遇。
- ✓ 建成后还能满足先进核能系统、特别是聚变堆材料的辐照测评等国家重大需求，是基础科学前沿和重大国家需求紧密结合的新型装置。
- ✓ 与会学者都建议北京ISOL项目应该尽快在国家推进立项，在国际核科学研究中发挥独到的作用

BISOL的发展历程

- 2008年，项目的前身CARIF项目，在发改委十二五重大基础设施评审中，位列18位
- 2011年10月：原子能院与北京大学签订共同推动建设ISOL型大科学装置的合作协议（CARIF和ImPUF合名为北京ISOL）
- 2012年10月：国际咨询委员会会议，对项目高度评价
- 2013年：列入国家重大科技基础设施中长期规划
- 2013年12月：实现反应堆引出裂变碎片并质量分离原理验证
- 2014年8月：第502次香山科学会议，列入我国核物理大科学装置发展路线图
- 2016年5月6日：北京ISOL科学讨论会，其科学和应用需求和目标得到国内专家的广泛认可
- 2016年5月：国家“十三五”重大科技基础设施发改委领域组评审通过，排名第一
- 2016年6月：国家“十三五”重大科技基础设施发改委总体组评审通过，排名第十一
- 2016年9月：国家“十三五”重大科技基础设施中咨公司规划评审通过
- 2016年12月：列入《国家重大科技基础设施建设“十三五”规划》
- 2017年1月：强流中子源国际咨询会在北京召开
- 2017年3月：北京ISOL物理用户会议在北京大学召开
- 2017年9月：北京市阴和俊副市长视察原子能院，承诺对北京ISOL项目给予配套支持
- 2017年4月：北京ISOL项目建议书通过中核集团评审
- 2018年7月：中核集团通过自主投入项目，对北京ISOL项目给予3408万配套支持
- 2018年11月：向发改委高技术司汇报

北京ISOL项目列入国家十三五重大科技基础设施规划

- 2010年1月：原子能院提出CARIF设想
- 2011年10月：原子能院与北京大学签订合作协议（CARIF改名北京ISOL）
- 2012年10月：国际咨询委员会会议，对项目高度评价
- 2014年8月：第502次香山科学会议，列入我国核物理大科学装置发展路线图
- 2016年5月：国家十三五重大科技基础设施国家发改委领域组评审，排名第1
- 2016年6月：国家十三五重大科技基础设施发改委总体组评审，排名第11
- 2016年12月，BISOL列入国家重大科技基础设施十三五规划
- 2018年6月，BISOL关键技术获中核集团集中研发项目支持

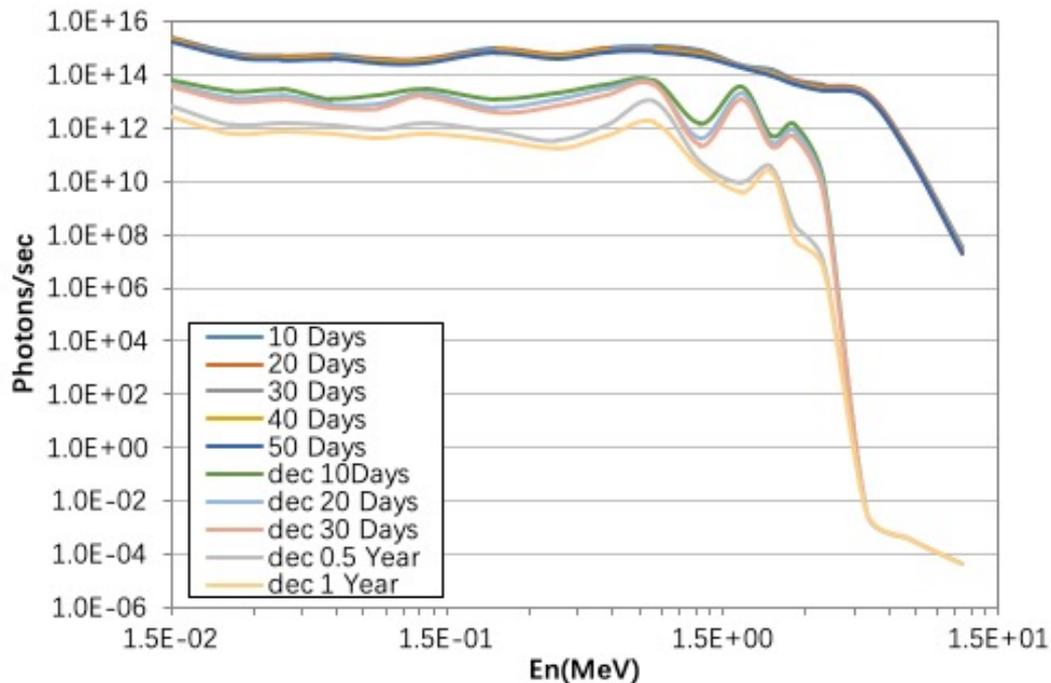


关键技术研发进展-原子能院

- 对BISOL装置建设中所涉及的技术按照成熟度和技术风险进行分类和任务分工，既包括总体方案设计的细化完善，又有关键瓶颈的技术验证，形成四大专题，八个子课题开展研究。
 - BISOL装置的总体设计研究
 - BISOL总体辐射防护方案设计
 - BISOL辅助系统分项设计
 - 基于反应堆的不稳定核束产生和低能传输的设计研究与关键技术验证
 - 堆内离子源技术与实验验证；
 - 束流冷却技术与实验验证；
 - 超导后加速器的设计研究与关键技术验证
 - 超导工艺研究与实验验证；
 - 束流诊断技术研究与实验验证；
 - 丰中子核束实验终端的设计研究与关键技术验证
 - 物理终端设计；
 - 靶技术研究与实验验证；
- 2018年7月BISOL装置关键技术研究获得中核集团集中研发支持。

BISOL装置的总体设计研究进展

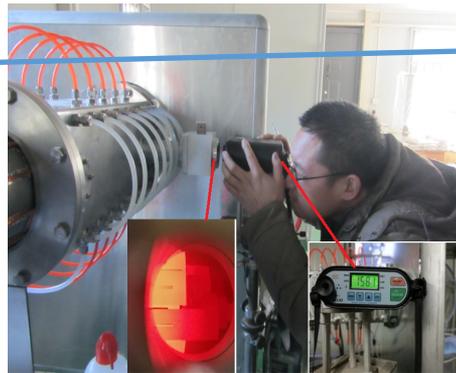
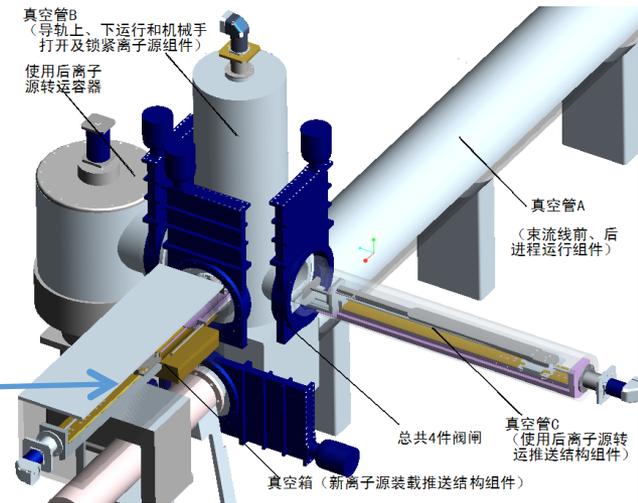
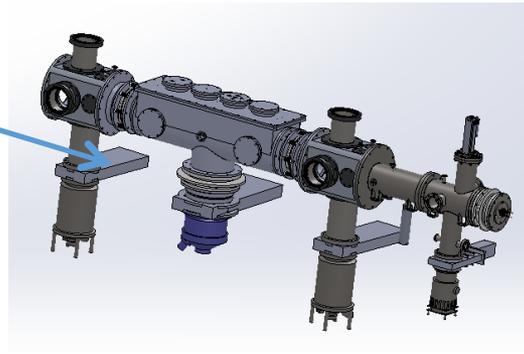
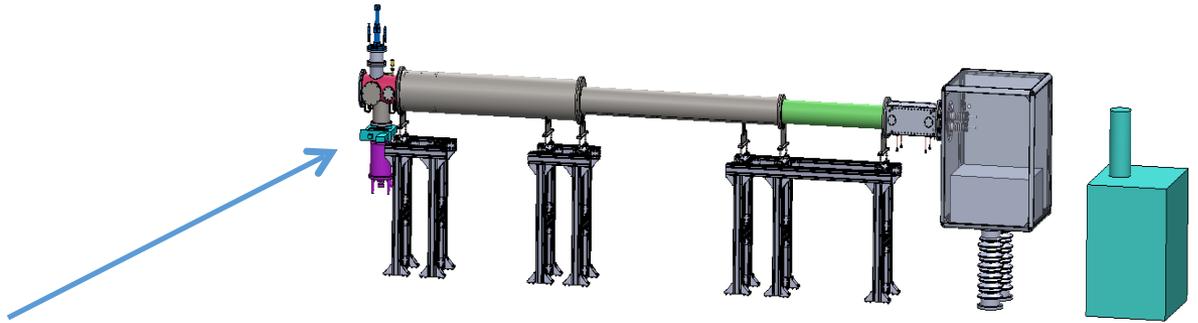
- 完成了堆内离子源U靶辐射源项计算及反应堆大厅辐射防护的初步设计；
- 签订“北京ISOL装置厂址可行性研究及建筑功能设计”合同；
- 与反应堆技术人员讨论BISOL加速器对反应堆安全的影响，完成了反应堆安全分析所需图纸输入源项的准备；
- 开展真空系统、控制系统、配电系统、水冷气动等设计工作；
- 开展了用于气体靶、共线激光、束流冷却器真空设备采购，部分设备已经到货；



铀靶辐照及衰变过程中 γ 能谱的变化

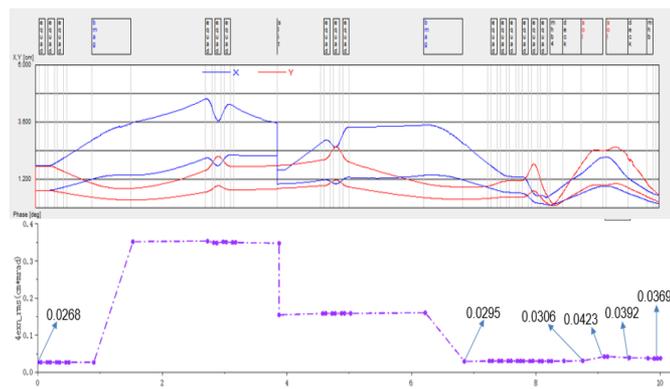
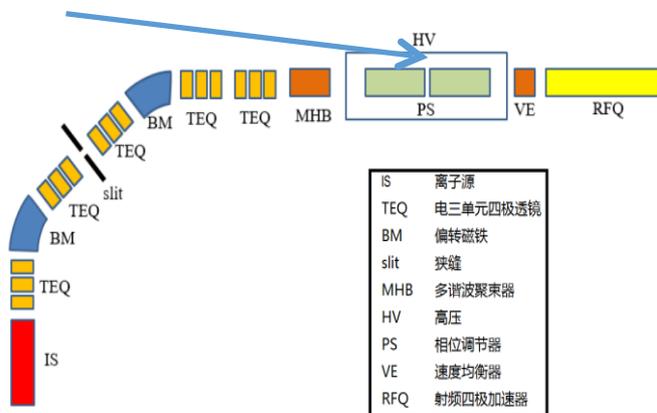
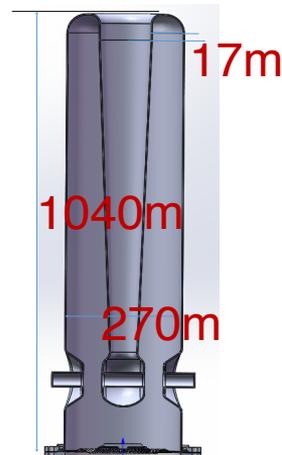
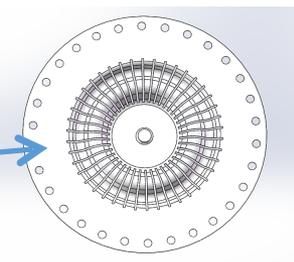
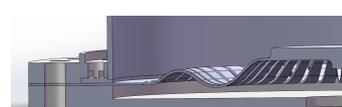
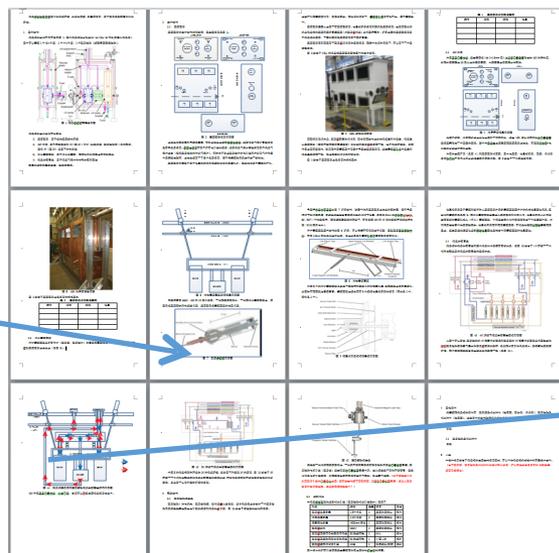
基于反应堆的不稳定核束产生关键技术研究进展

- 完成堆内离子源离线线束线和束流冷却器的设计；
- 开展离子源的加热和高压测试实验，加热功率达到15kW；
- 完成激光器合同签订，6月份到货；
- 确定了铀靶制备的工艺流程和换靶的方案；



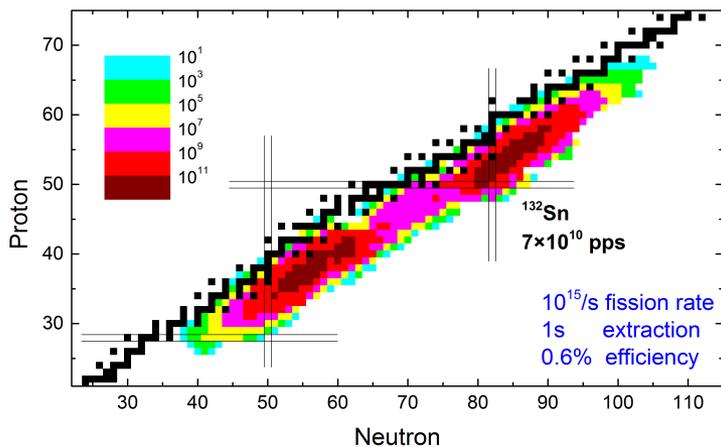
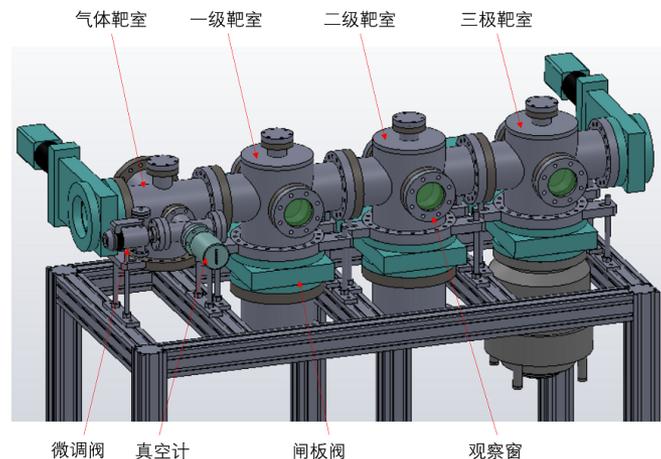
超导后加速器关键技术研究进展

- 验证装置低温柜物理设计基本完成，正在开展机械总体设计；
- 验证装置QWR腔物理设计基本完成，正在联系加工事宜；
- 氦制冷系统已经完成技术交底，正在开展方案设计；
- 后加速LEBT光路完成；



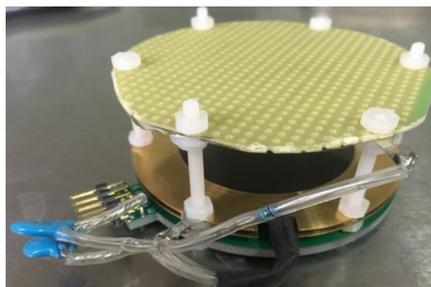
丰中子实验终端关键技术研究进展

- 开展BISOL束流强度的预评估；
- 确定了无窗气体剥离靶的设计方案；
- 完成了直接入射型束测样机的组装；
- 准备共线激光实验室及光学平台；



分离能区引出束流品种及强度

无窗气体剥离靶样机设计方案



直接入射型束测样机



共线激光光学平台及

该设施建设将用于满足国际核物理基础研究和我国核能可持续发展需求，成为面向国内外开放的引领性核科学平台和国际研发中心。



特 急

国家发展和改革委员会
 教育部
 财政部
 中国科学院
 国家自然科学基金委员会
 国家国防科技工业局
 中央军委装备发展部

文件

发改高技〔2016〕2736号

关于印发国家重大科技基础设施建设 “十三五”规划的通知

有关省、自治区、直辖市人民政府，国务院有关部委、直属机构：

根据《国家重大科技基础设施建设中长期规划（2012-2030年）》（国发〔2013〕8号）有关工作部署，为加快推动“十三五”时期国家重大科技基础设施的建设布局，进一步强化国家重大科技基

旋转

探索预研、完善提升四个层面，推动国家重大科技基础设施布局建设和发展，形成循序渐进、滚动实施、动态调整、持续发展的良好局面。统筹布局综合性国家科学中心建设，打造具有世界先进水平的重大科技基础设施群。进一步完善体制机制，形成支持设施持续发展的良好政策环境。

（一）聚力优先项目的启动建设。在我国科技发展急需、具有相对优势和科技突破先兆的领域，根据拟建设施属性、科学目标、技术基础、科研需求和人才队伍等基础条件，优先启动若干建设条件成熟、前期准备工作充分的重大科技基础设施建设项目。“十三五”期间，优先项目包括：空间环境地基监测网（子午工程二期），大型光学红外望远镜，极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施，大型地震工程模拟研究设施，聚变堆主机关键系统综合研究设施，高能同步辐射光源，硬X射线自由电子激光装置，多模态跨尺度生物医学成像设施，超重力离心模拟与实验装置，高精度地基授时系统。

（二）深化后备项目的筹备论证。对科学意义重大、国家需求强烈、抢占科技创新制高点、预先研究较为充分并纳入综合评审的设施，加强对设施属性、建设紧迫性、科学目标、工程目标、技术风险等的深化论证，开展国内外同类设施的对比分析，逐步形成成熟的设施建设方案。按照设施建设紧迫性、方案成熟度和财力保障状况，适时启动若干筹备论证充分的设施建设工作。“十三五”期间，设施筹备论证的后备项目包括：北京在线同位素分离丰中子束流装置，中国陆地生态系统观测实验网络，生物医学大数据基础设施，作物表型组学研究设施，大气环境模拟系统等纳入专家综合评

项目的北京地区创新凝聚

- **BISOL**是怀柔科创区的组成部分，包括数据中心、技术研发中心、国际交流中心。研究队伍（固定+流动）主体在怀柔，原子能院核物理所和北大核研院的主体到怀柔。
- 只有放射性装置平台在原子能院园区，原因在于需要反应堆作为驱动器、需要放射性处理（那里是北京唯一可以建较高强度放射性装置的地方）。
- 主装置平台和研究中心有一定分离是常见的。比如D型超导平台通常远离城市，但研究和数据中心一直在北京。这在当前网络发达的时代不是问题。

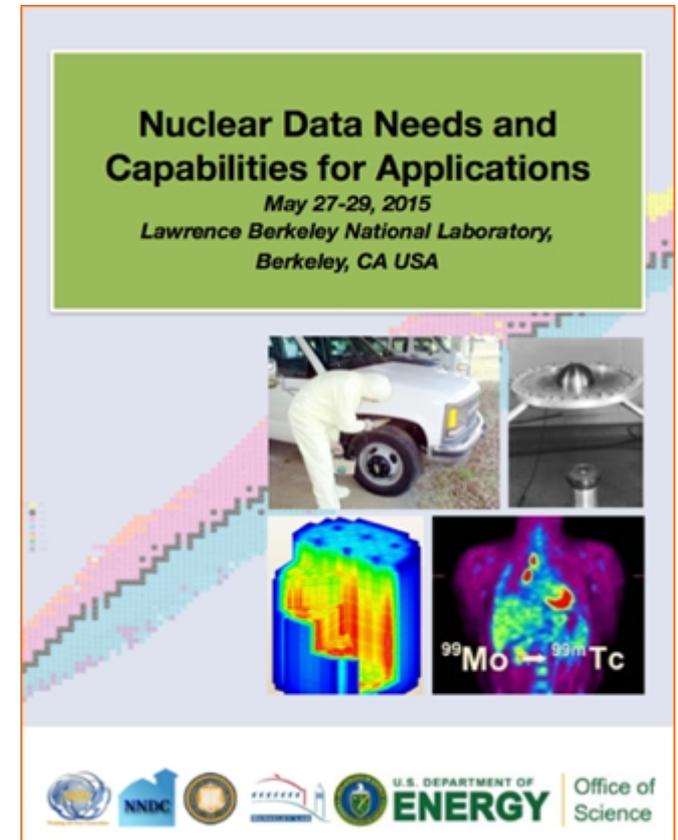
- 北京科创中心重要组成部分
- 国际交流中心，工程中心，研发中心
- 产生重大产出，服务北京发展
- 多学科、产学研交叉融合



项目的国家重大需求意义

面向重大需求，解决部分卡脖子问题。

- 核数据
- 不稳定核数据，先进裂变能源亟需，核废料处置亟需。美国**2015**年计划有详细分析。
- 核材料，特别聚变材料的研究和考验。
- 国家能源安全
 - 三步走计划
 - 聚变材料关键科学问题
 - 关键材料的国际最好的测试平台
- 解决国家聚变工程的科学问题
- 国家装置安全
 - 重要核数据测量
 - 重要核材料考验
 - 提供国家装置重要数据



项目面向国际科技前沿的情况

- 已经在国际上被作为未来不稳定核研究的两台代表性超级装置之一，受到重点关注。
- 与欧洲合作为主，服务于国家战略。欧洲方面有很强的技术和队伍积累。有可能争取到共建。
- 服务国际中心建设
- 探索物质科学极限
- 产出诺奖成果
- 人类科学宝库的中国方案
- 国家高科技和人才培养
- 促进加速器和高端核探测技术发展
- 培养国家核科技领军人才

Accelerators for Nuclear Physics in the World					
	Beams	Asia	Europe	America	Comments
Hot QCD	A+A	--	LHC (ALICE) FAIR (SIS300) NICA	RHIC	Missing Asian? J-PARC-HI for dense matter?
Cold QCD	hadron	J-PARC+Hdex HIRFL+HIAF	FAIR (SIS100)	--	Missing American?
	e-	Spring8 (LEPS) ELPH	MAMI	JLAB-12GeV	1+many
	collider	BES-III Belle-II	NICA	eRHIC eIC	1 in the world?
Many body Problem (RI Beam)	PF	RIBF+upgrade HIRFL+HIAF	GSI/FAIR	FRIB	Good competitions!!
	Both	RISP			
	ISOL	BRIF RIB-ANURIB HIAF+CIADS?	SPIRAL2 SPES HIE-ISOLDE	ARIEL-II	
	Super ISOL	Beijing- ISOL	EURISOL	--	
(High Resolution)	Pol proton	RCNP RC	KVI	Texas A&M	iThemba (South Africa)

项目的重大装置互补情况

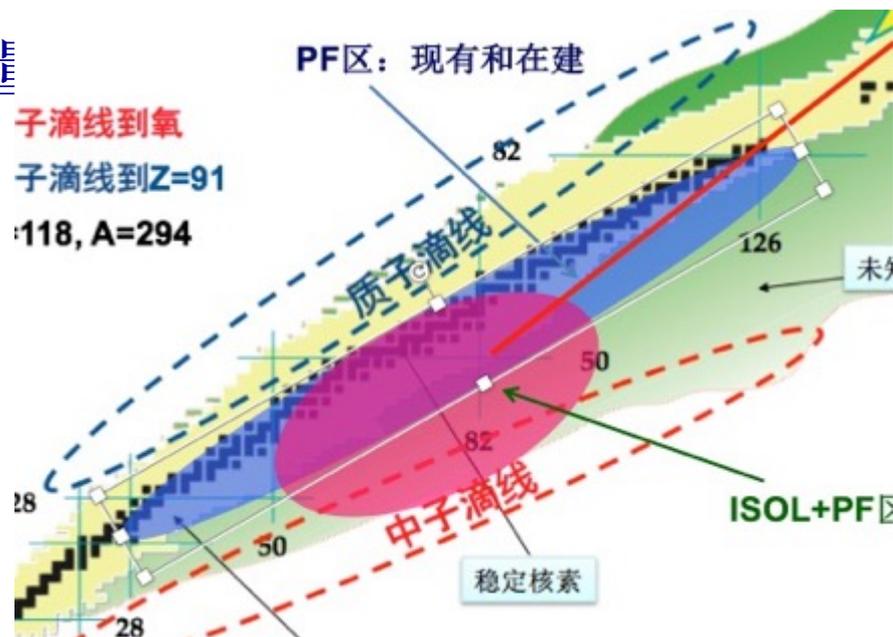
聚焦不同科学问题（核素区域），采用独特的技术路线。

- 国际

- 基础装置中，亮度最高，性价比最好，未来两大超级装置
- 应用装置中，辐照深度最高，达到未来国际装置水平

- 国内

- 与**HIAF**是互补关系，前者全质量数，我们中等核区靠近稳定极限
- 与反应堆辐照平台是互补关系，前者是热中子，我们是超快中子



- 兰州**CSR**工程**2008**年建成，可达比较远离核，但强度受到回旋注入的限制
- 北京**BRIF**工程**2014**建成，**ISOL**装置，到达远离受到反应机制和分离时间限制
- 中科院多用途装置**HIAF**，列入规划，预计**2016**年完成，性能与**FRIB**相近，但强调多用途
- 中科院**ADS**装置，预计**2018**年完成，在高能强流质子方面具有领先地位
- 原子能院质子直线装置，预计**2018**年完成，提供中能强流（**X0**毫安）质子束流
- 总体上说，与应用相关的质子和中子科学装置国内布局比较齐全，而国内外极端丰中子束流需求在未来仍然非常迫切，成为我们大科学工程的很好切入点

向发改汇报的事项

- 十三五规划的前十项已经立项了**9**个，最后一个望远镜项目也评审在即
- 北京**ISOL**项目，由原子能院和北京大学强强联合，具有较好的紧迫性、创新性和可行性
- 明年是十三五的最后一年，列到规划中的项目，成熟后立项是顺理成章
- 北京**ISOL**项目对中核集团原子能院和教育部北京大学来说，是第一个，也是目前唯一的发改委固定资产投资项目；对中核集团意义重大，可以使中核集团拥有核物理国际研发中心和聚变材料国际考验中心，并会得到财政部的运行经费支持，全面对外开放
- 请发改委听取原子能院和北京大学的项目汇报，指导项目建议书评审，支持项目在十三五期间得到立项

我国核物理研究大科学装置发展的路线图：2014年8月：第502次香山科学会议

1986
北京串列加速器 HI-13



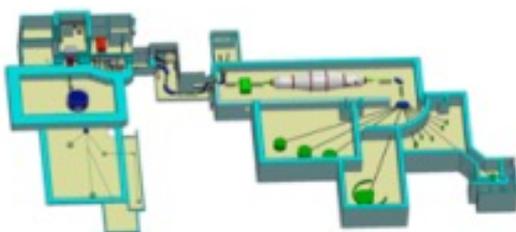
1988
兰州回旋加速器 SSC



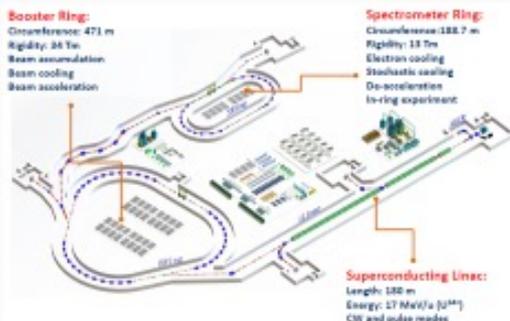
2008
兰州储存环 CSR



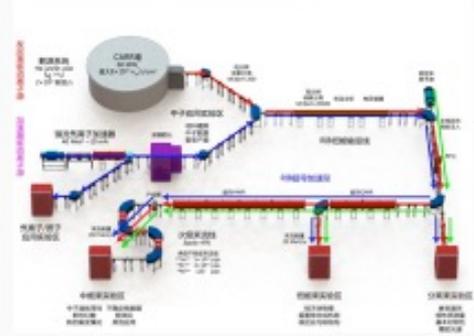
2014
北京串列升级工程 BRIF



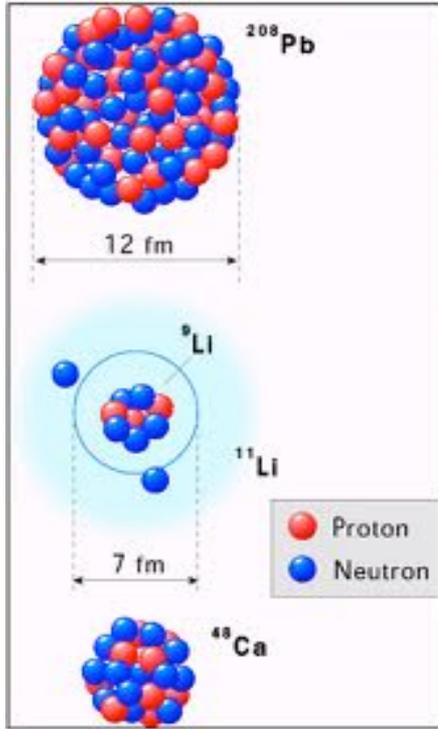
~2021
强流重离子装置 HIAF



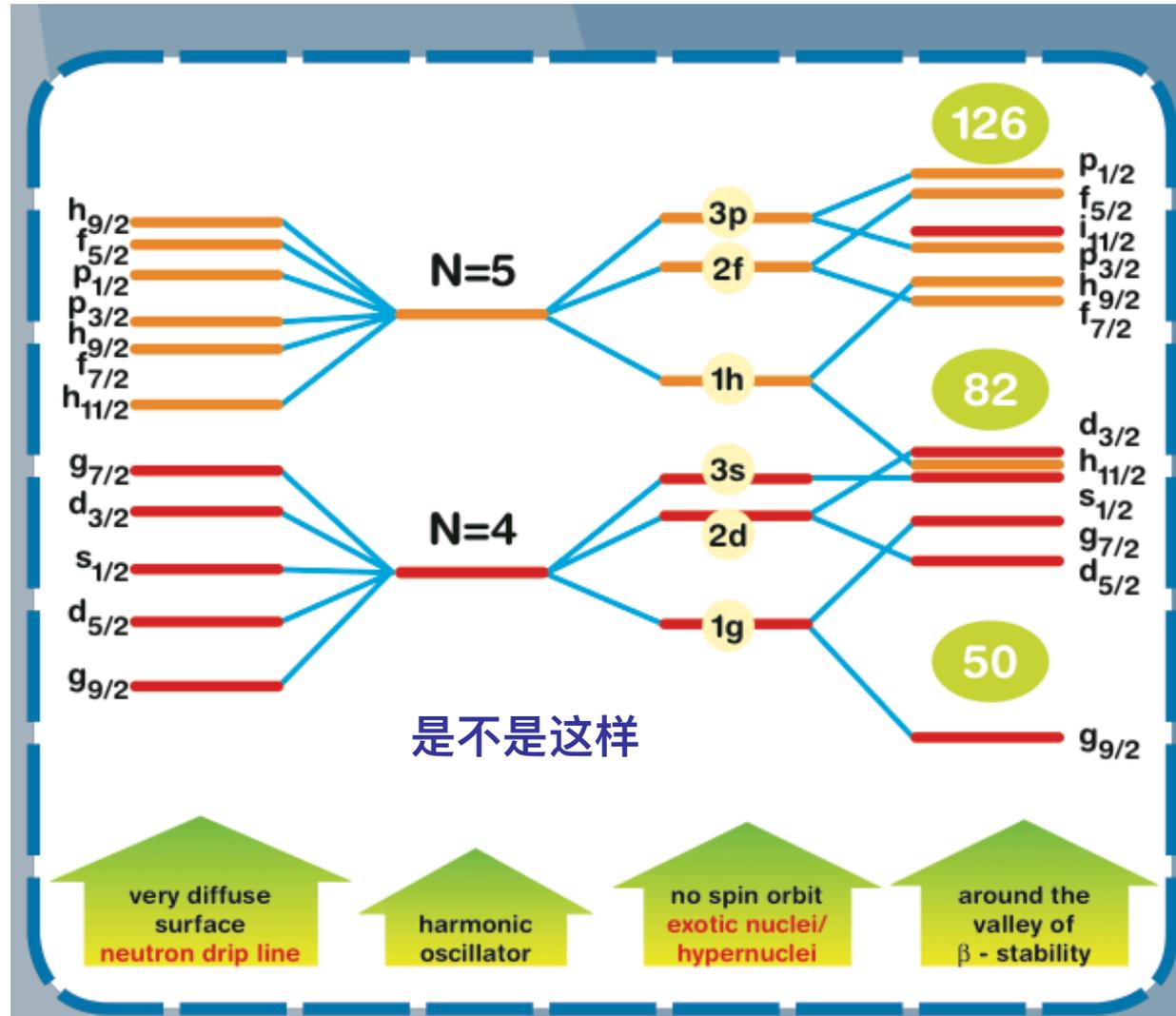
~2026
北京ISOL装置



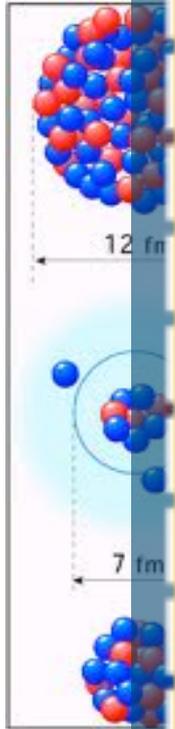
HIAF和BISOL后的核物理



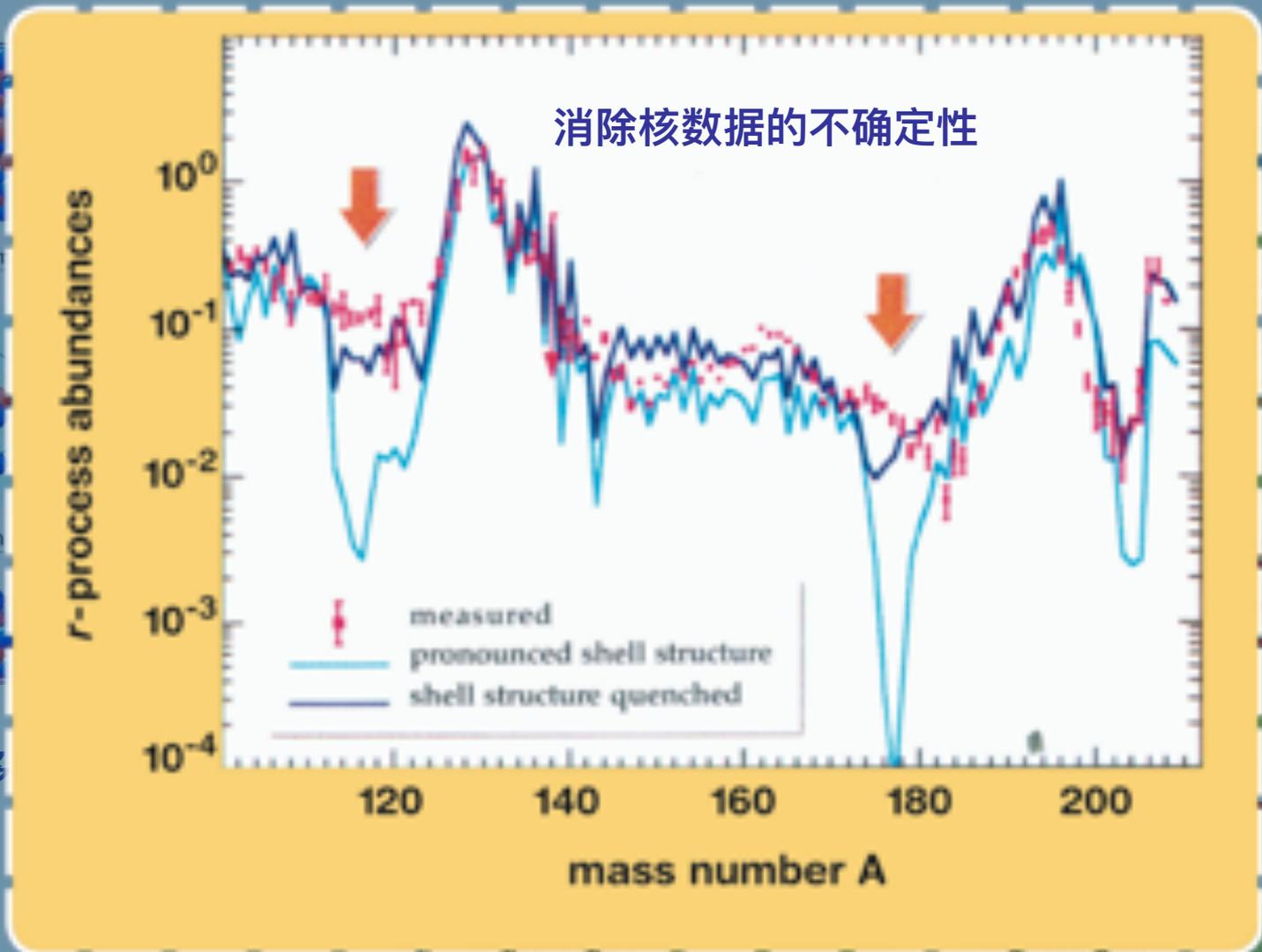
更多的奇异核



HIAF和BISOL后的核物理



更多



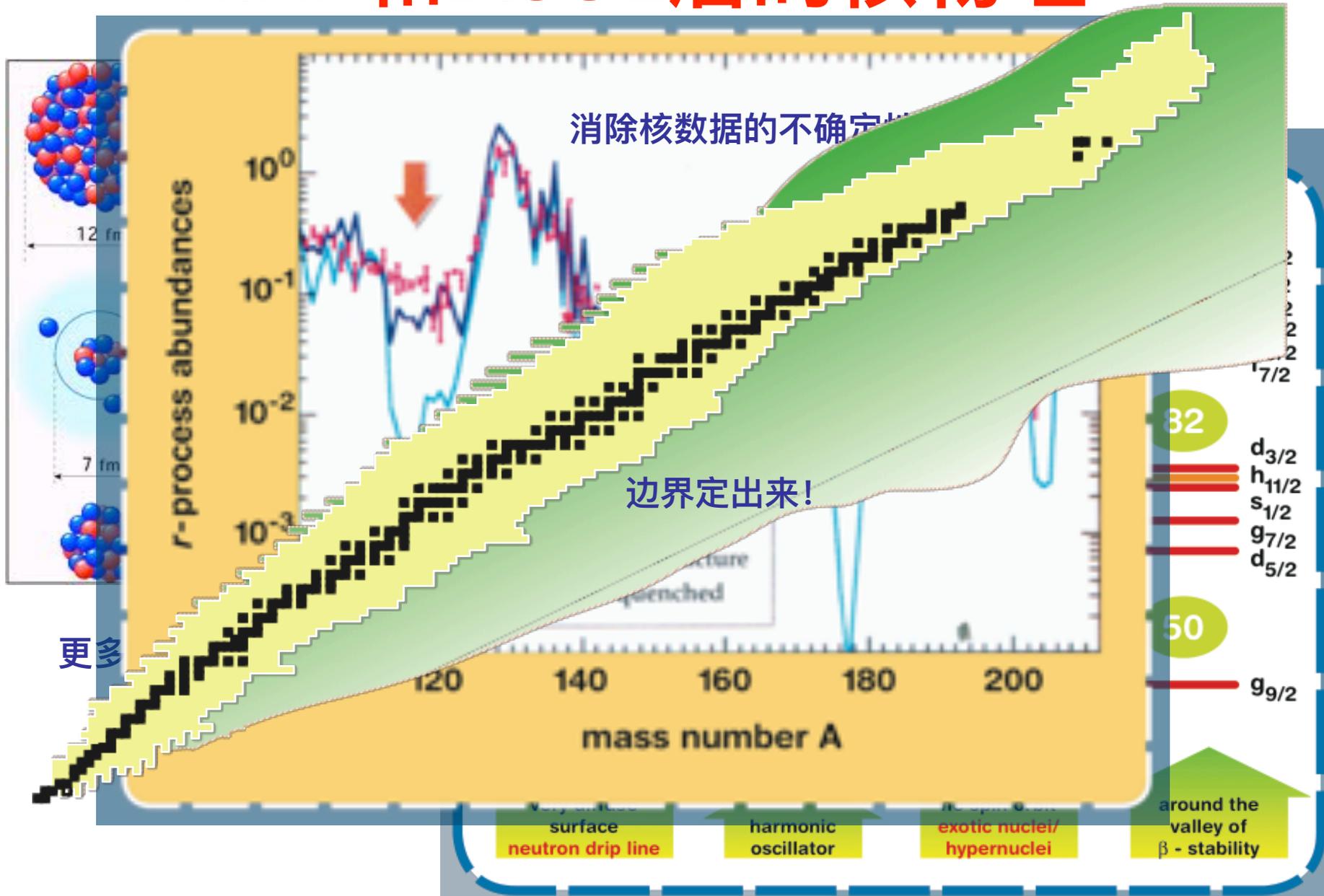
surface
neutron drip line

harmonic
oscillator

exotic nuclei/
hypernuclei

around the
valley of
 β - stability

HIAF和BISOL后的核物理



结论

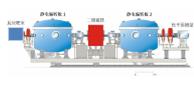
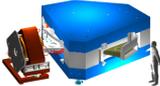
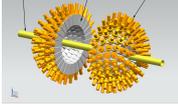
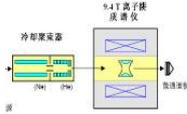
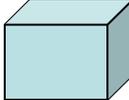
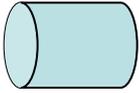
- 针对原子核稳定极限区新物理、超重稳定岛核素合成、铁以上重元素的天体合成等是重大基础前沿问题，以及聚变和先进裂变能发展需要新型材料抗辐照研究和测评；具有紧迫性和创新性
- **BRIF**：北京串列加速器国家实验室是我国两大基础核物理研究平台之一，取得核物理和核技术重要成果；其升级工程BRIF已经开展了RI的衰变研究，正在开展后加速后的反应研究，是国际为数不多的ISOL装置
- **BISOL**：采用高通量研究型反应堆和强流加速器、在线同位素分离（ISOL）和弹核碎裂（PF）结合的独特技术路线，产生最高强度中等质量核区丰中子核束，用于拓展核素新版图并认识新规律，技术路线国际先进
- 采用强流氘束打液态锂靶产生高通量的聚变能区中子，满足先进核能系统、特别是聚变堆材料的辐照测评与考验等急迫国家重大需求
- 主要驱动反应堆中国先进研究堆已经建成运行，工程性价比国际领先；在原子能院反应堆旁建设，用地、基础设施和核设施运行保障条件完备
- 该设施建设将用于满足国际核物理基础研究和我国核能可持续发展需求，成为北京地区面向国内外开放的引领性核科学平台和技术国际研发中心
- 项目列入国家十三五重大基础科学设施建设规划，得到国内外专家的高度评价，正在申请发改委在十三五期间给予支持立项



- 直线加速器，束流品质好，传输率高（**50%**），运行稳定，易于扩充，价格相对较高
- 回旋加速器，束流发射度较大，注入效率较低，运行比较稳定，造价适中
- 同步加速器，适合于提高到高能量（**1GeV/u**），束流是脉冲的，传输率较低，造价较低
- 综合起来，对要求高传输率和适中能量（**100-200 MeV/u**），且为后续扩展打下基础，直线加速器是最佳选择
- 美国在建的**FRIB**和韩国计划的**RAON**，都采取了直线加速器的方案

Beijing ISOL detector map

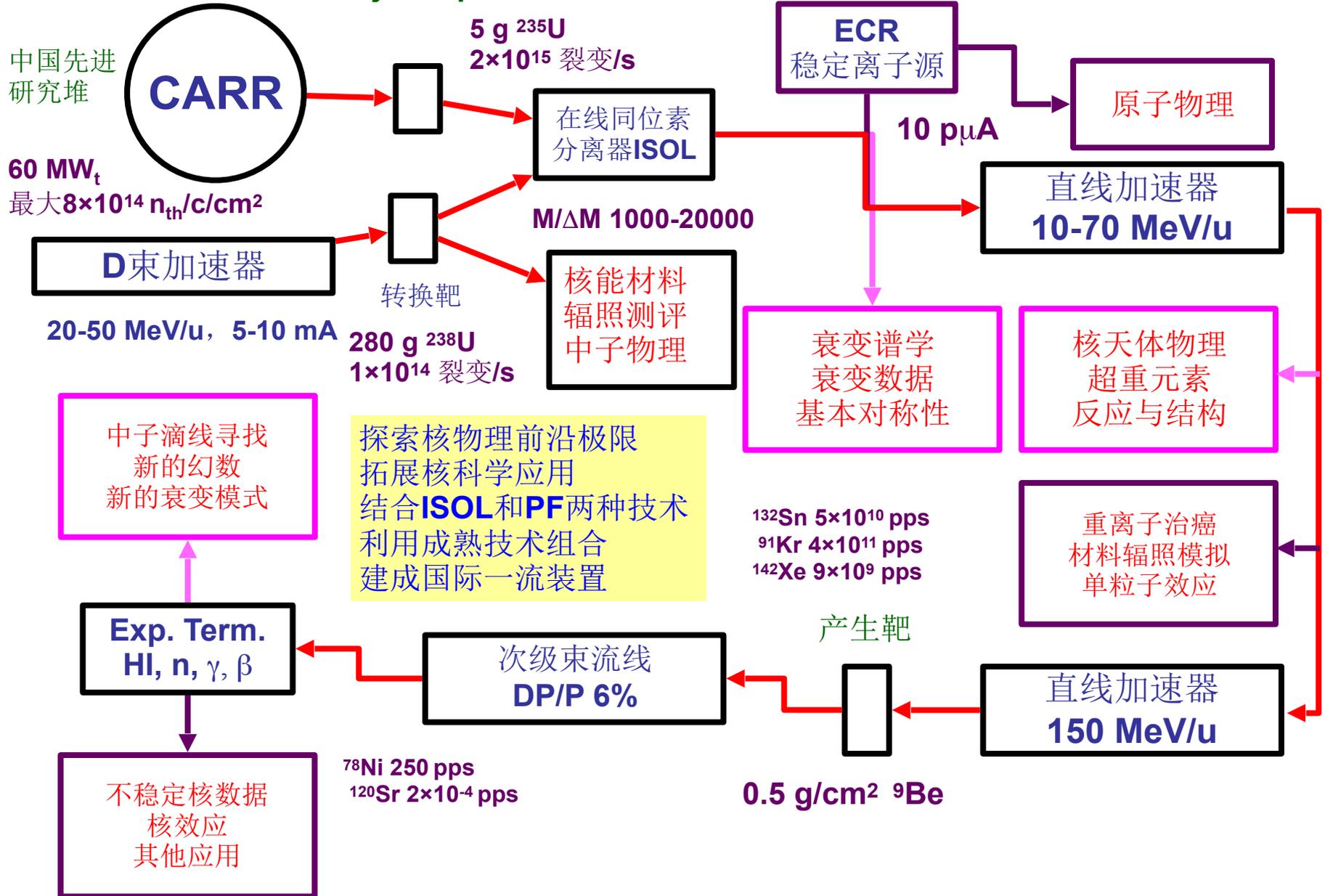


Det	RMS	LSS	BGA	BTP	BDA	BSD	BGD
Fig							
Day-1					√	√	√
ISOL				√	√		
MeV	√	√	√			√	
PF			√		√		√
PF-GS				√			

- 基础研究
 - 我国科研院所和高校的核物理用户
 - 国外核物理用户
- 应用研究
 - 我国国家和工业部门的用户
 - 我国科研院所和高校的核技术用户
- 预计年提供束流时间上万小时（加速器并行运行时），可提供上百个基础和应用实验，参加实验的人员可达数千人
- 按国家实验室的模式来建设和运行
 - 聘请国际一流专家进行工程和运行咨询、评审，召开北京ISOL国际评审会，香山科学会议等，已完成
 - 联合国内优势院校所联合设计、建设和运行，在预研阶段启动
 - 提供全面的用户基础条件和支持，靠国家实验室机制
 - 北京ISOL建成后向国内外开放，配套运行经费

北京ISOL装置

靶源系统
He-jet/In-pile



特 急

国家发展和改革委员会
 教育部
 财政部
 中国科学院
 国家自然科学基金委员会
 工业和信息化部
 中央军委装备发展部
 学 育 术
 教 科 政 科 学
 财 中 国 工 程
 中 国 自 然 科 学 基 金 委 员 会
 国 家 国 防 科 技 工 业 局
 中 央 军 委 装 备 发 展 部

文件

发改高技〔2016〕2736号

关于印发国家重大科技基础设施建设 “十三五”规划的通知

有关省、自治区、直辖市人民政府，国务院有关部委、直属机构：

根据《国家重大科技基础设施建设中长期规划（2012-2030年）》（国发〔2013〕8号）有关工作部署，为加快推动“十三五”时期国家重大科技基础设施的建设布局，进一步强化国家重大科技基

附件

探索预研、完善提升四个层面，推动国家重大科技基础设施布局建设和发展，形成循序渐进、滚动实施、动态调整、持续发展的良好局面。统筹布局综合性国家科学中心建设，打造具有世界先进水平的重大科技基础设施群。进一步完善体制机制，形成支持设施持续发展的良好政策环境。

（一）聚力优先项目的启动建设。在我国科技发展急需、具有相对优势和科技突破先兆的领域，根据拟建设施属性、科学目标、技术基础、科研需求和人才队伍等基础条件，优先启动若干建设条件成熟、前期准备工作充分的重大科技基础设施建设项目。“十三五”期间，优先项目包括：空间环境地基监测网（子午工程二期），大型光学红外望远镜，极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施，大型地震工程模拟研究设施，聚变堆主机关键系统综合研究设施，高能同步辐射光源，硬X射线自由电子激光装置，多模态跨尺度生物医学成像设施，超重力离心模拟与实验装置，高精度地基授时系统。

（二）深化后各项目的筹备论证。对科学意义重大、国家需求强烈、抢占科技创新制高点、预先研究较为充分并纳入综合评审的设施，加强对其设施属性、建设紧迫性、科学目标、工程目标、技术风险等的深化论证，开展国内外同类设施的对比分析，逐步形成成熟的设施建设方案。按照设施建设紧迫性、方案成熟度和财力保障状况，适时启动若干筹备论证充分的设施建设工作。“十三五”期间，设施筹备论证的后各项目包括：北京在线同位素分离丰中子束流装置，中国陆地生态系统观测实验网络，生物医学大数据基础设施，作物表型组学研究设施，大气环境模拟系统等纳入专家综合评

国务院**2008**年批复的对原子能院的定位：**基础性、综合性世界先进水平**的核科技研究基地