基于RIBLL2及HFRS的高能放射性束物理研究

王世陶
中国科学院近代物理研究所

2022. 07

提纲

一 高能放射性束特点

二 RIBLL2及其物理研究

三 HFRS及可开展的物理研究

四 总结

提纲

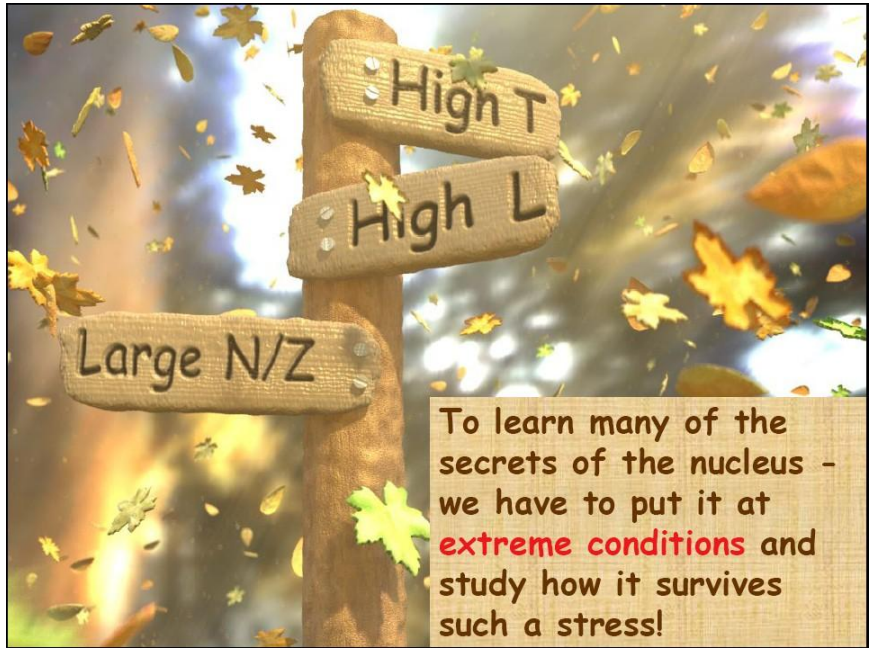
一 高能放射性束特点

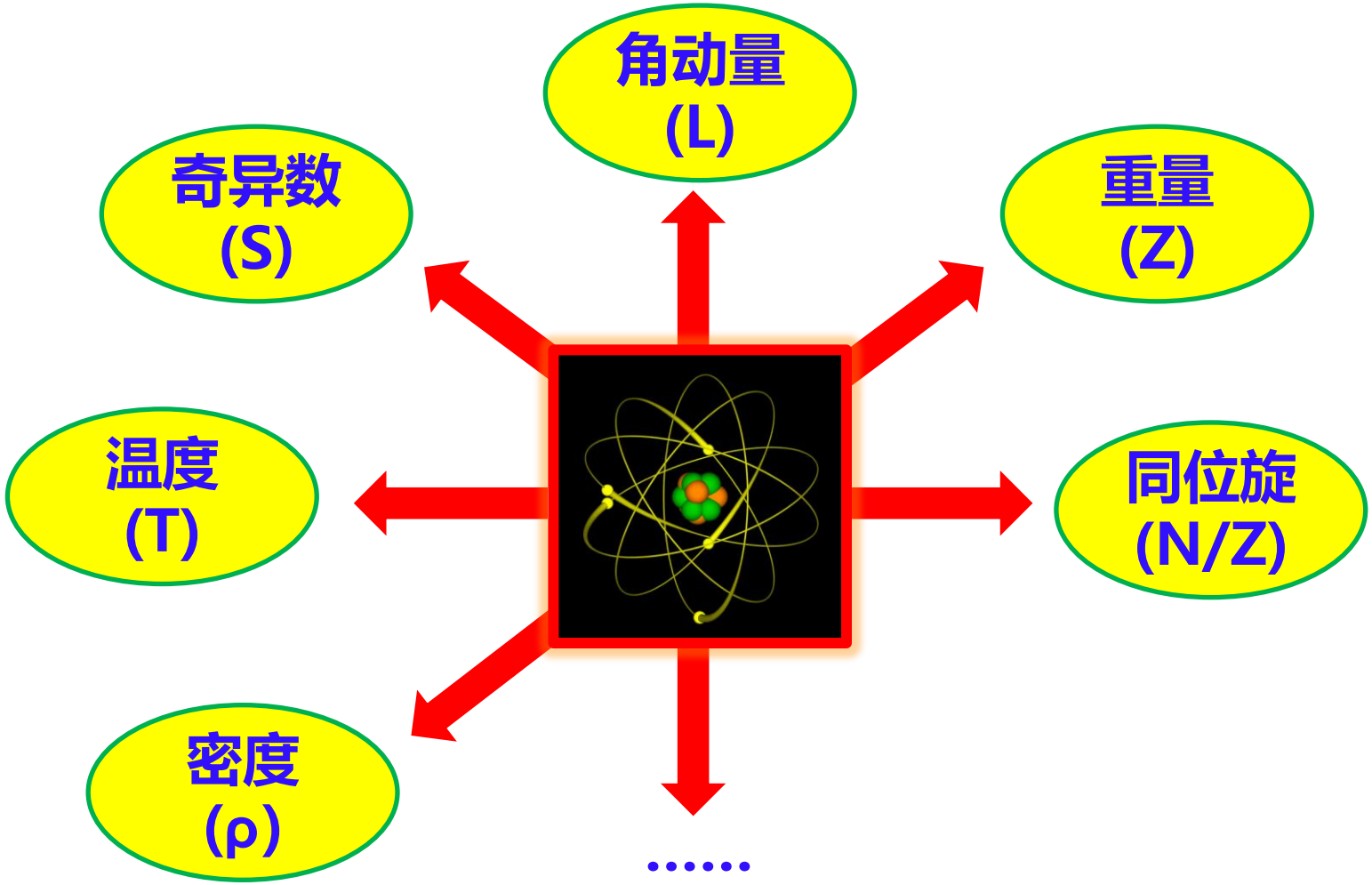
二 RIBLL2及其物理研究

三 HFRS及可开展的物理研究

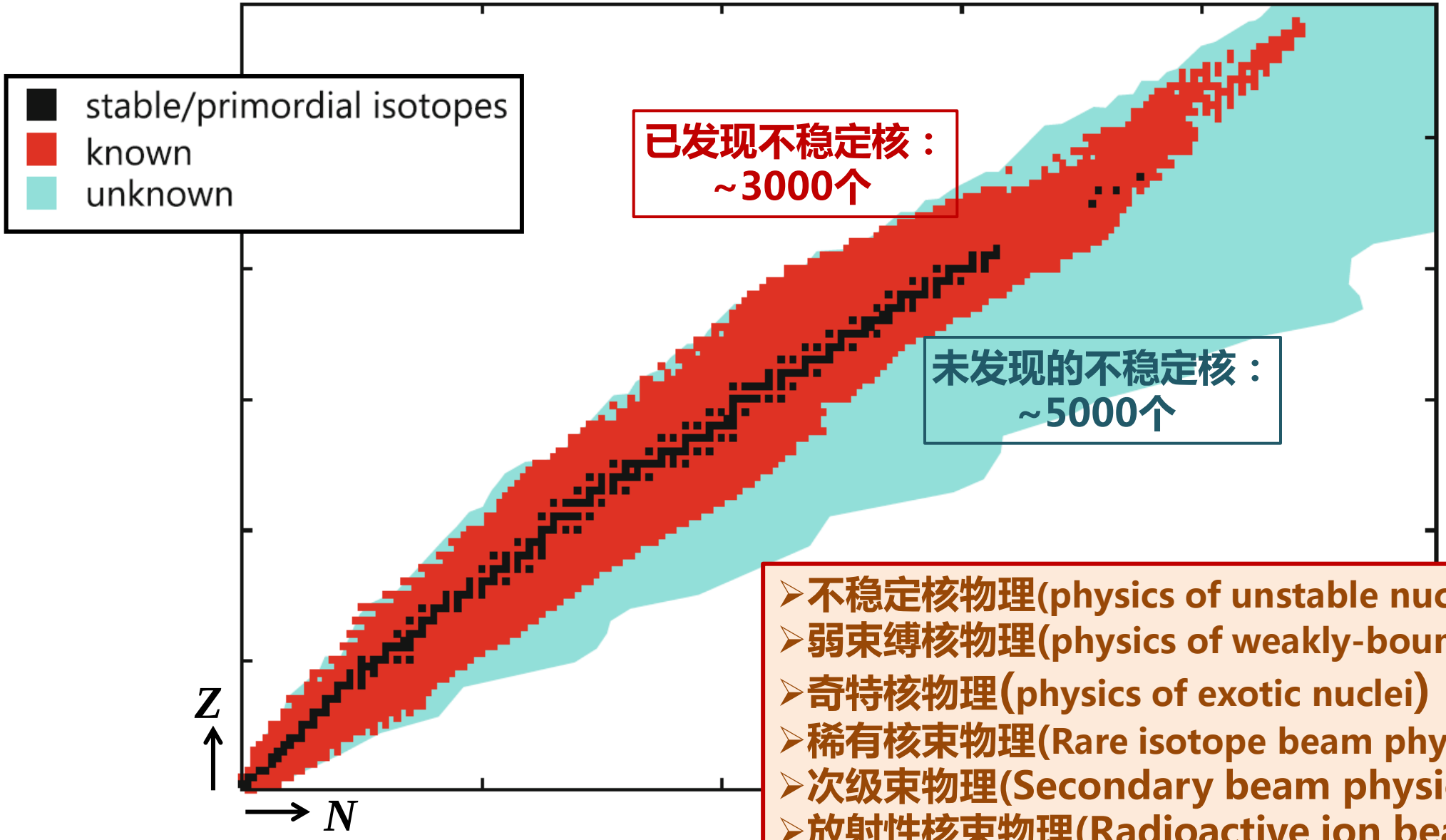
四 总结

核物理前沿—极限条件下的核物理





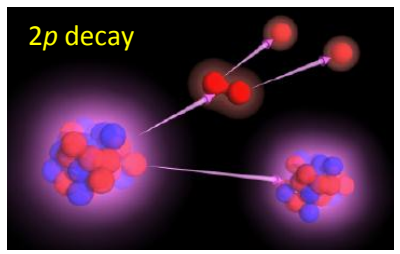
极限同位旋条件→放射性核束物理



- 不稳定核物理(physics of unstable nuclei)
- 弱束缚核物理(physics of weakly-bound nuclei)
- 奇特核物理(physics of exotic nuclei)
- 稀有核束物理(Rare isotope beam physics)
- 次级束物理(Secondary beam physics)
- 放射性核束物理(Radioactive ion beam physics)

极限同位旋条件→放射性核束物理

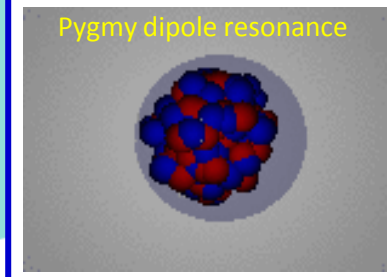
放射性束物理是核物理新领域，它研究的对象是已经或即将产生的**数千个不稳定**的核素，**发现了众多新的现象和新的规律，极大地改变了人们对原子核的认识。**



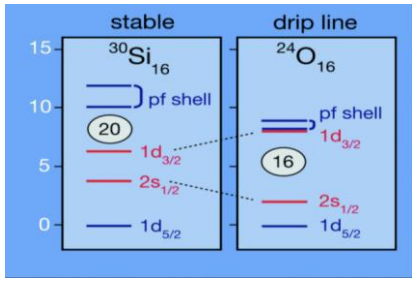
奇特衰变模式

已发现不稳定核：
~3000个

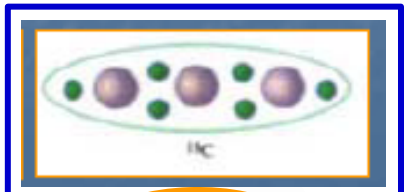
未发现的不稳定核：
~5000个



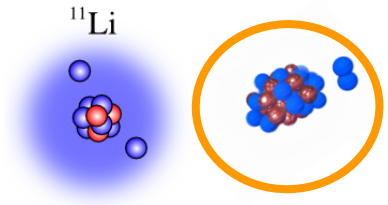
新激发模式



幻数的演化



集团结构

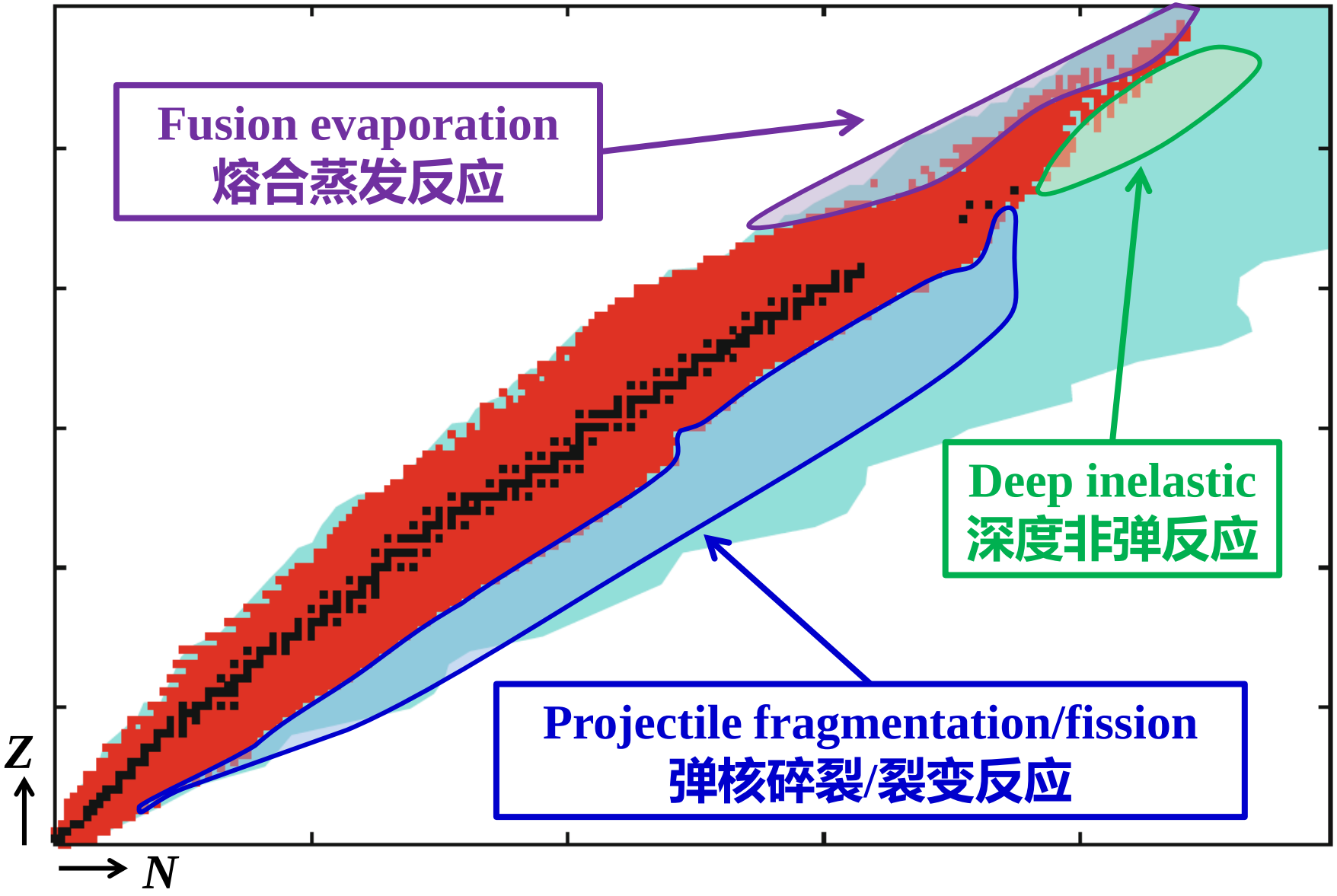


晕结构

Z

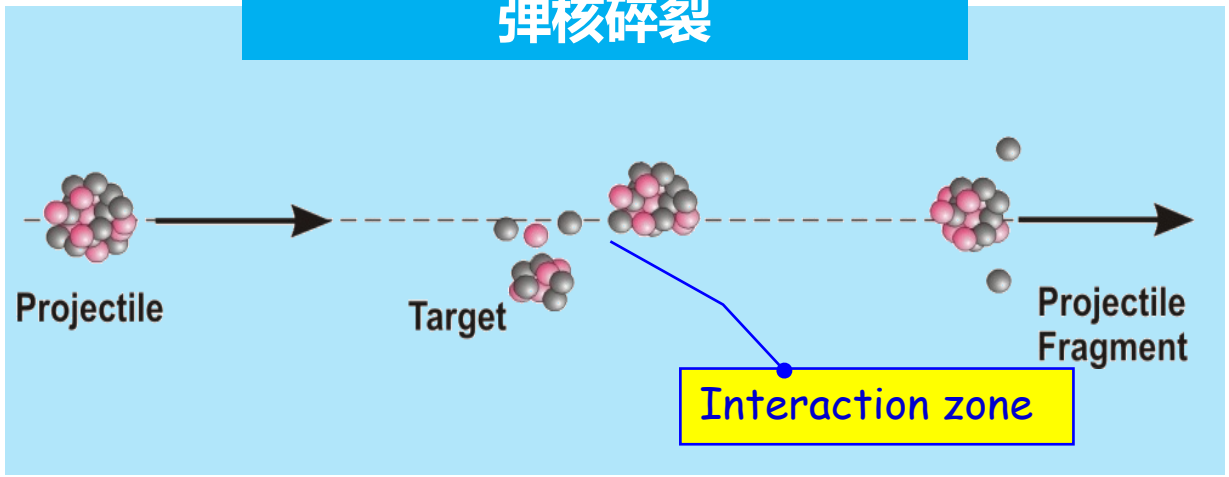
N

极远离稳定线核素的主要产生途径

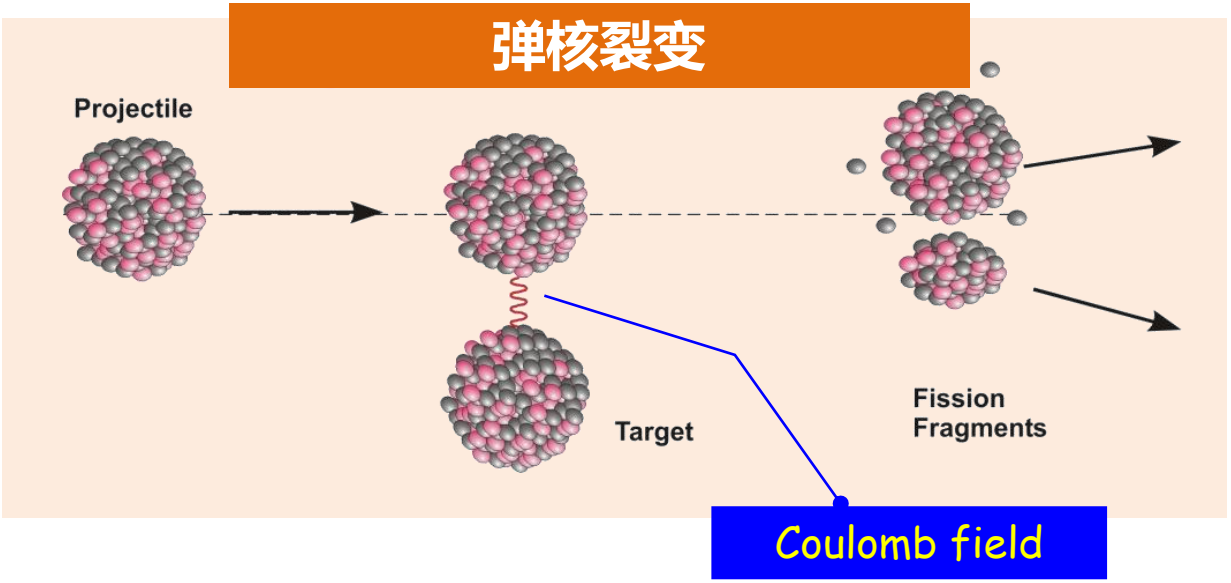


弹核碎裂/裂变反应 + In-Flight分离技术

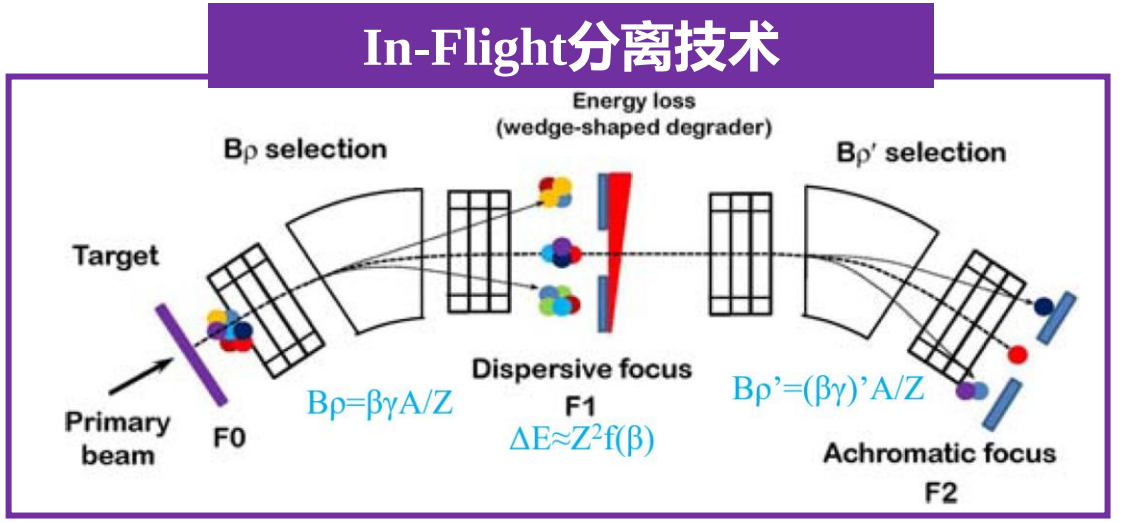
弹核碎裂



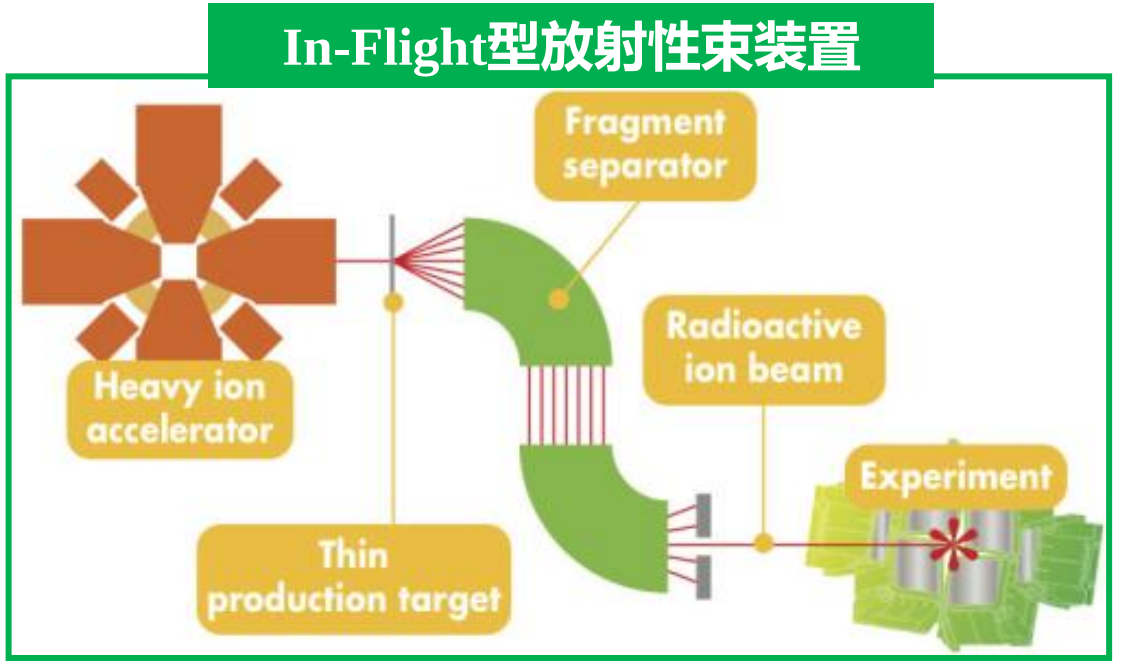
弹核裂变



In-Flight分离技术



In-Flight型放射性束装置



In-Flight型放射性束装置

	当代装置		新一代装置	
美国	MSU 回旋加速器+A1900 中能加速器(~100MeV/u)	→	MSU 直线加速器+ARIS 高能加速器(~200MeV/u)	✓已运行
日本	RIKEN 回旋加速器+RIPS 中能加速器(~100MeV/u)	→	RIKEN 超导回旋加速器+BigRIPS 高能加速器(~350MeV/u)	✓已运行
德国	GSI 同步加速器+FRS 高能加速器(~1GeV/u)	→	GSI 同步加速器+SuperFRS 高能加速器(~1GeV/u)	□建设中
中国	IMP 回旋加速器+RIBLL1 中能加速器(~100MeV/u) IMP 同步加速器+RIBLL2 高能加速器(~500MeV/u)	→	IMP 同步加速器+HFRS 高能加速器(~1GeV/u)	□建设中

下一代装置特点：

强流

+

高能

why高能束流？

高能放射性束装置的优势

高能束流

- 初级靶优势 —厚靶→ 更高产额的放射性束流
- 新机制优势 —裂变→ 更丰中子的放射性束流
- 运动学优势 —前冲性→ 更高品质的放射性束流
- 电荷态优势 —全剥离→ 更加纯净的放射性束流

why高能束流？

高能放射性束实验的优势

Experimental methods

- interaction cross section
- elastic/inelastic scattering
- knockout/quasi-free knockout
- electromagnetic excitation
- charge-exchange reactions
- fission
- spallation
- fragmentation/cascade fragmentation
- ……

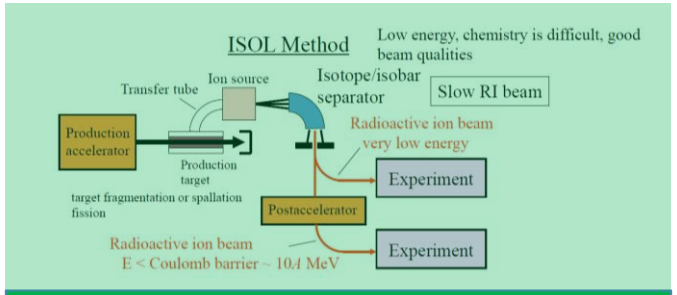
实验上的优势

粒子能量高→厚靶 ➡ **实验亮度高**

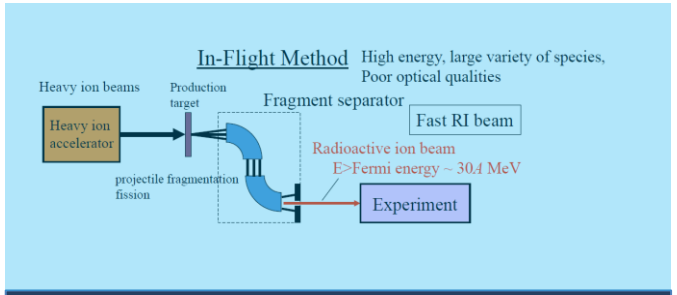
理论上的优势

粒子能量高→波长短 ➡ **极大简化理论处理**

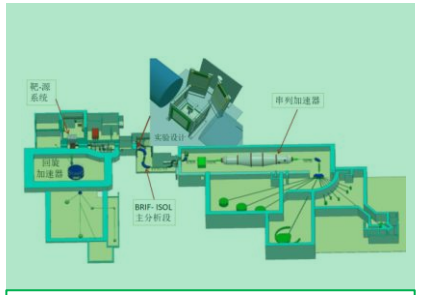
国内放射性核束装置



ISOL型装置

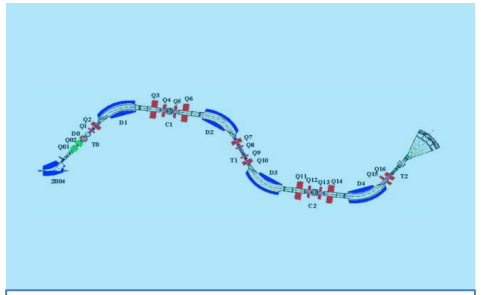


In-Flight型装置



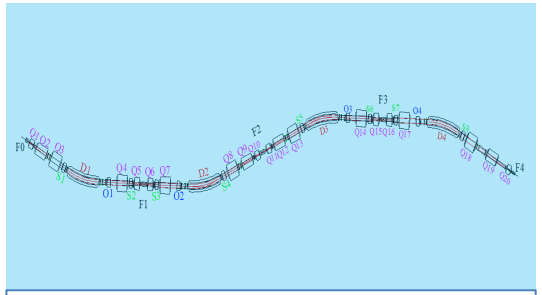
BRIF

低能放射性束流
(~ 10 MeV/u)



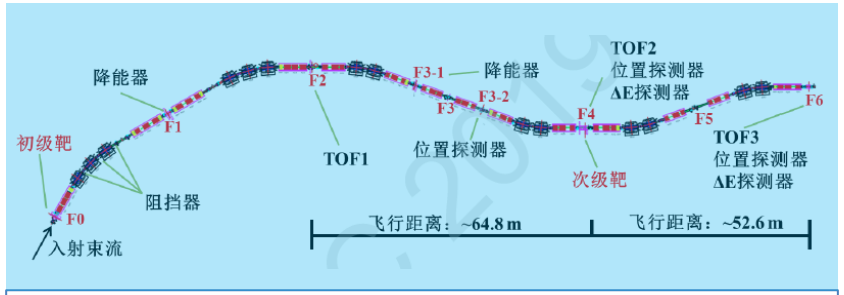
RIBLL1

中能放射性束流
(~ 50 MeV/u)



RIBLL2

高能放射性束流
(~ 500 MeV/u)



HFRS（建设中）

高能放射性束流
(~ 1000 MeV/u)

提纲

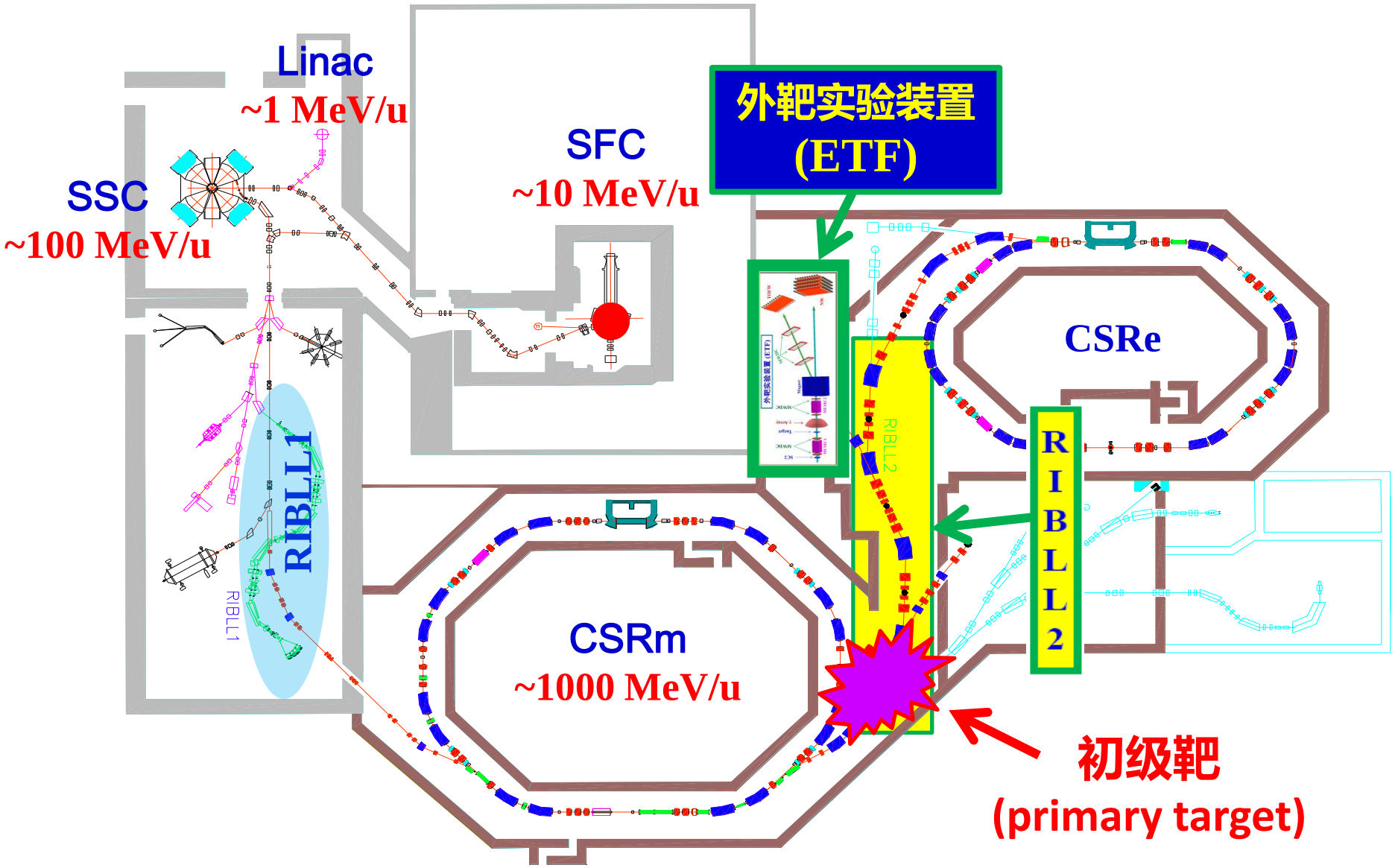
一 高能放射性束特点

二 RIBLL2及其物理研究

三 HFRS及可开展的物理研究

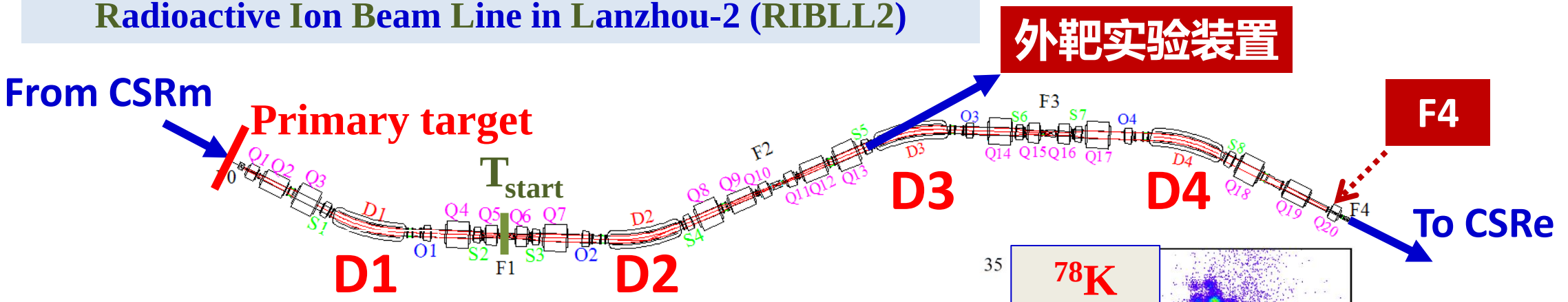
四 总结

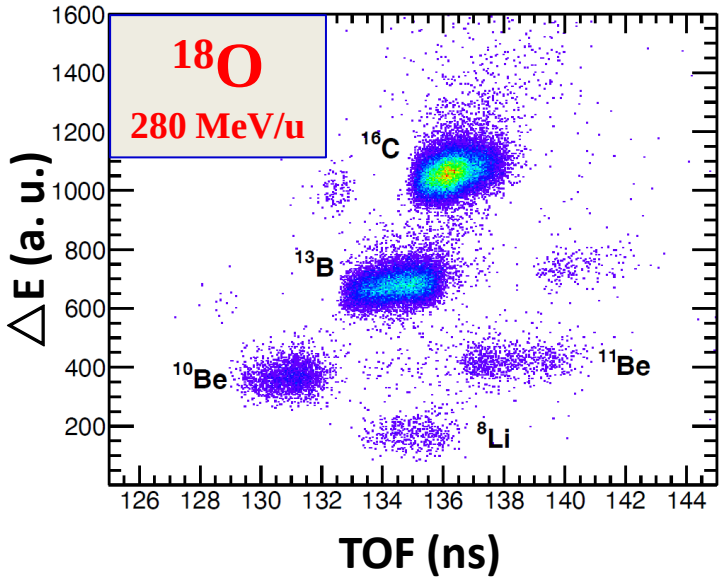
兰州重离子加速器

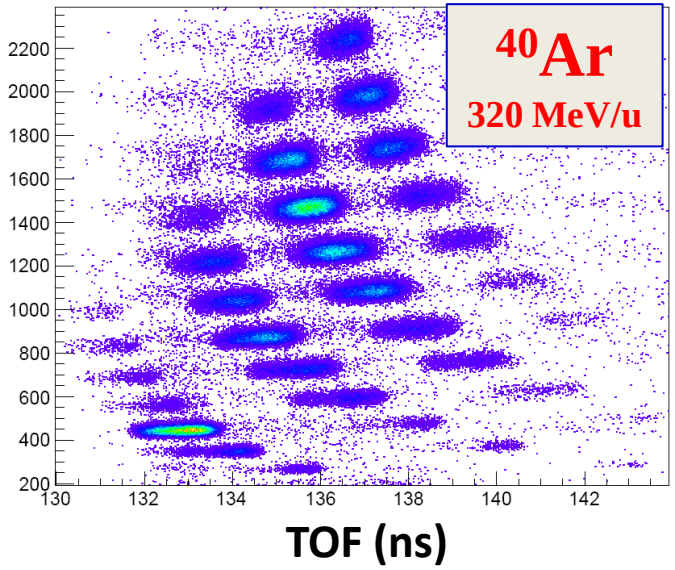

Linac
~1 MeV/u
SSC
~100 MeV/u
SFC
~10 MeV/u
外靶实验装置
(ETF)
CSRe
RIBLL2
RIBLL1
CSRm
~1000 MeV/u
初级靶
(primary target)

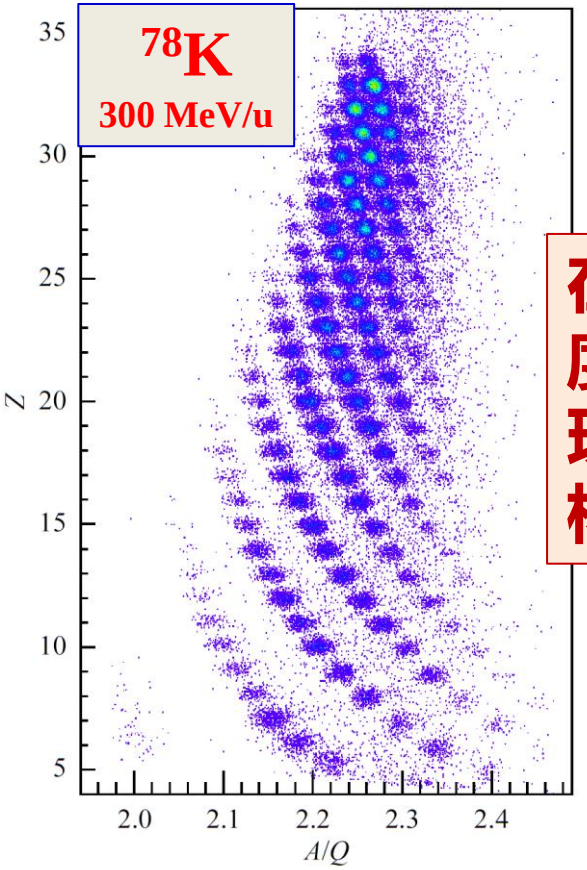
RIBLL2

Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou-2 (RIBLL2)



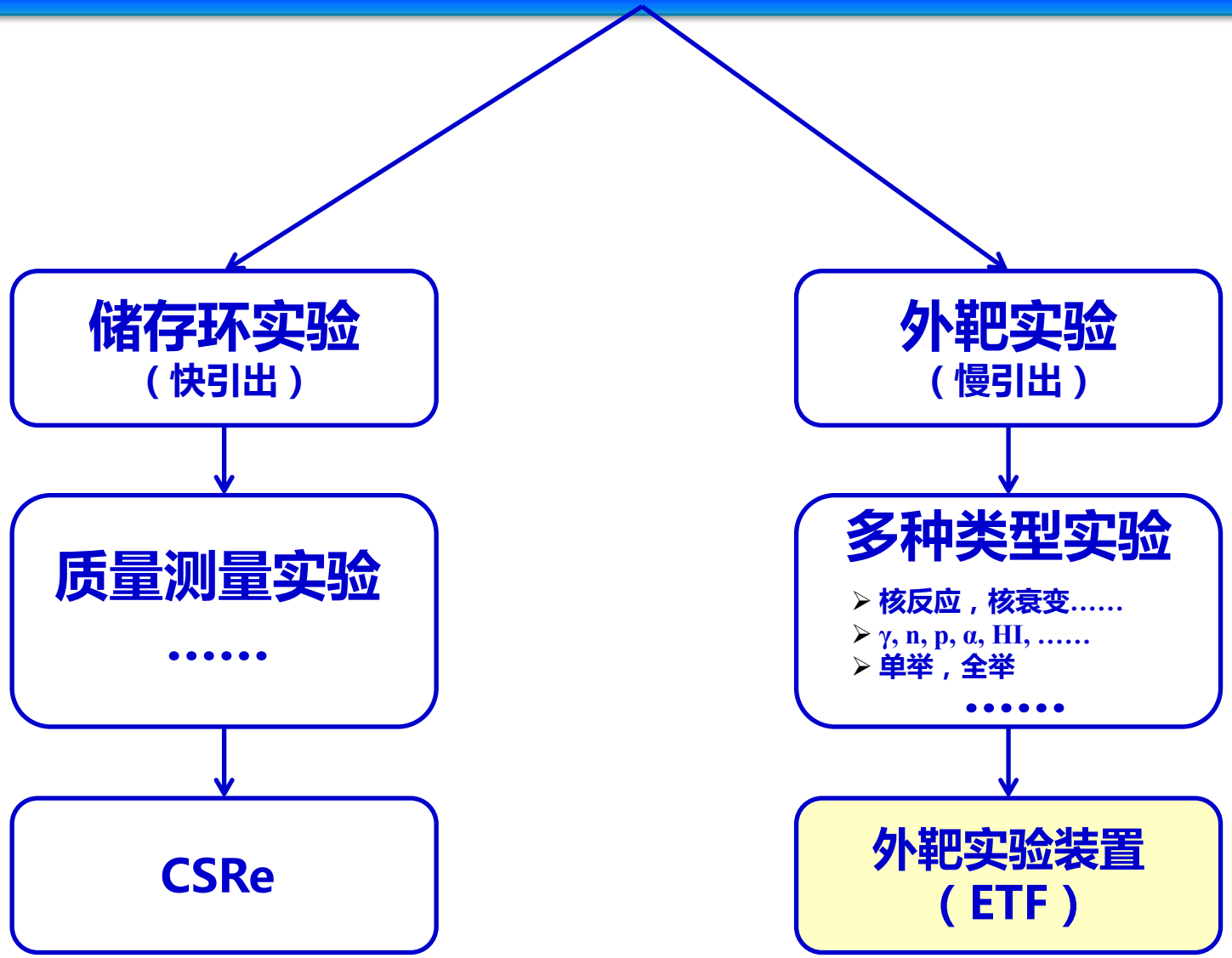






在全动量接收度模式下，实现对A~70区核素粒子鉴别

RIBLL2


储存环实验
（快引出）
质量测量实验
……
CSRe
外靶实验
（慢引出）
多种类型实验
核反应，核衰变……
γ, n, p, α, HI, ……
单举，全举
……
外靶实验装置
（ETF）

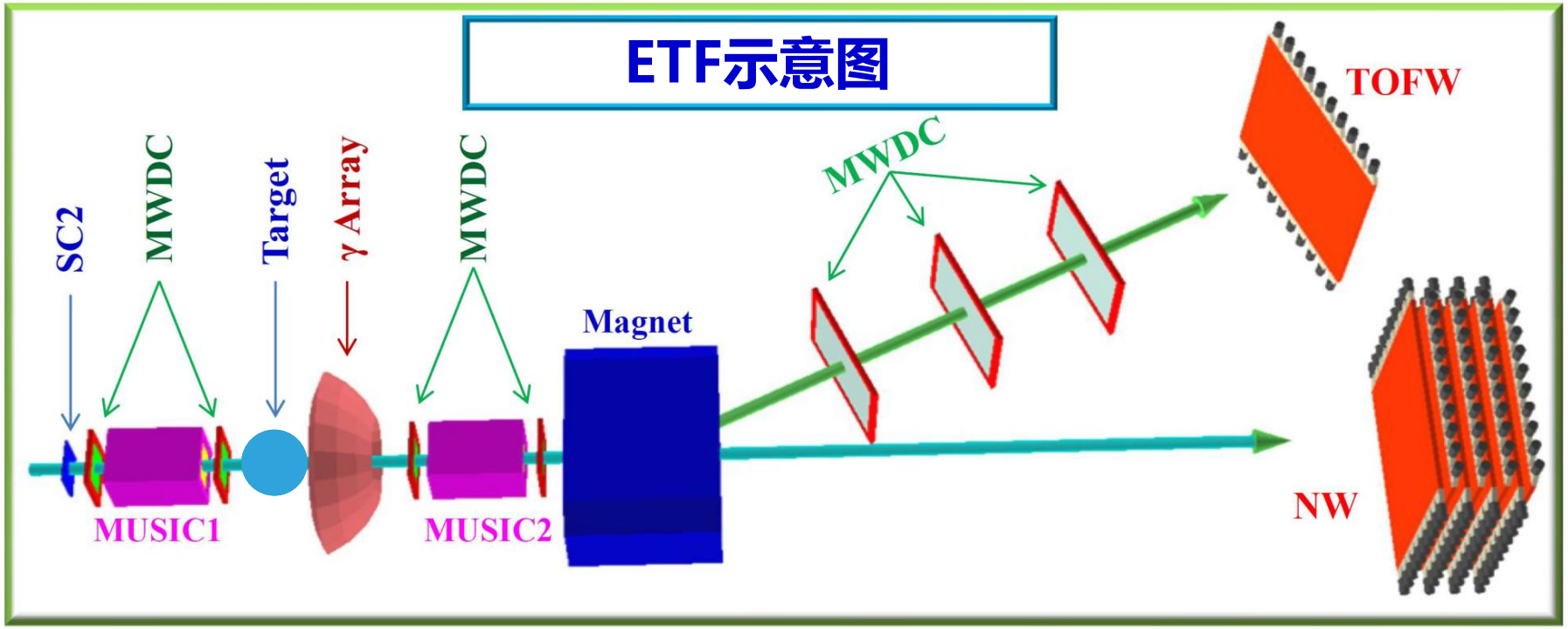
高能放射性束外靶实验方法

测量粒子：	类弹碎片	伽马射线	大散射角轻粒子	类弹速度轻粒子
测量方法：	dE-E Bρ-dE-TOF 偏转磁铁+径迹探测器+飞行时间探测器	伽马阵列 (高角分辨+高探测效率)	dE-E (DSSD+晶体) TOF+MWDC	中子探测阵列 多丝漂移室
实验类型：	➢相互作用截面 ➢敲出反应截面 ➢电荷交换截面 ➢……	➢在束伽马谱学 (敲出+非弹+…)	➢Missing mass 重构非束缚态	➢Invariant mass 重构非束缚态

CSR外靶实验装置

（External Target Facility, ETF）

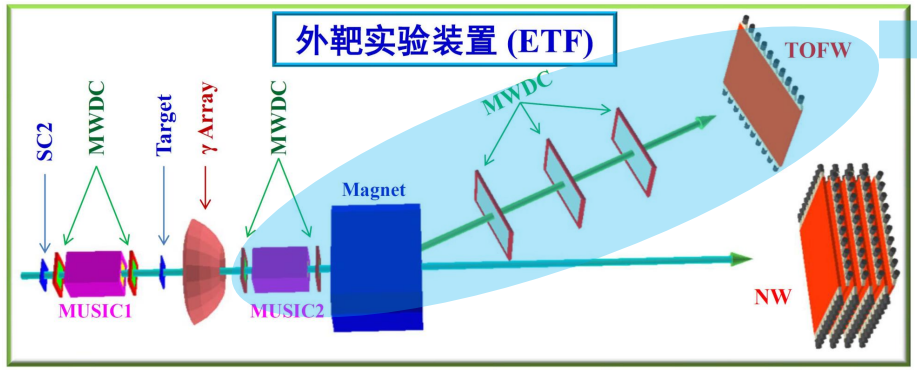
RIBs From RIBLL2



Y. Z. Sun, et al., *Nucl. Inst. Meth. A* 927 (2019) 390

CSR外靶实验装置

CSR外靶实验装置类弹碎片测量系统已于2018年投入物理实验运行

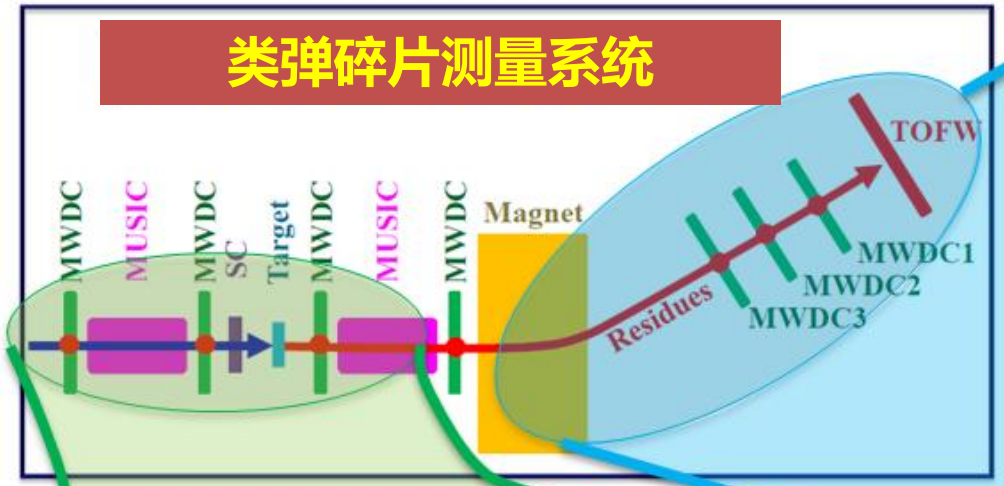


测量粒子	类弹碎片	伽马射线	大散射角轻粒子	类弹速度轻粒子
测量方法	~~dE-E~~ Bρ-dE-TOF 偏转磁铁+径迹探测器+飞行时间探测器	伽马阵列 (高角分辨+高探测效率)	dE-E (DSSD+晶体) TOF+MWDC	中子探测阵列 多丝漂移室
物理实验	➢相互作用截面 ➢敲出反应截面 ➢电荷交换截面 ➢……	➢在束伽马谱学 (敲出+非弹+…)	➢Missing mass 重构非束缚态	➢Invariant mass 重构非束缚态

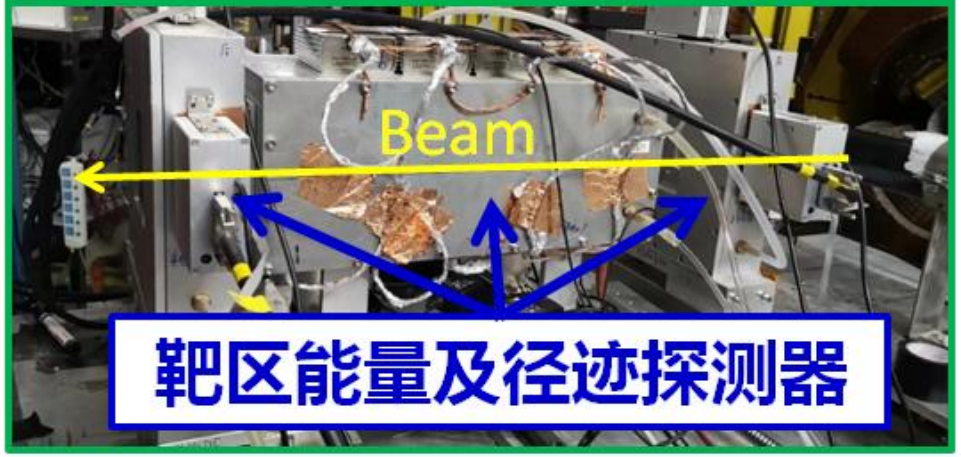
2018年

CSR外靶实验装置

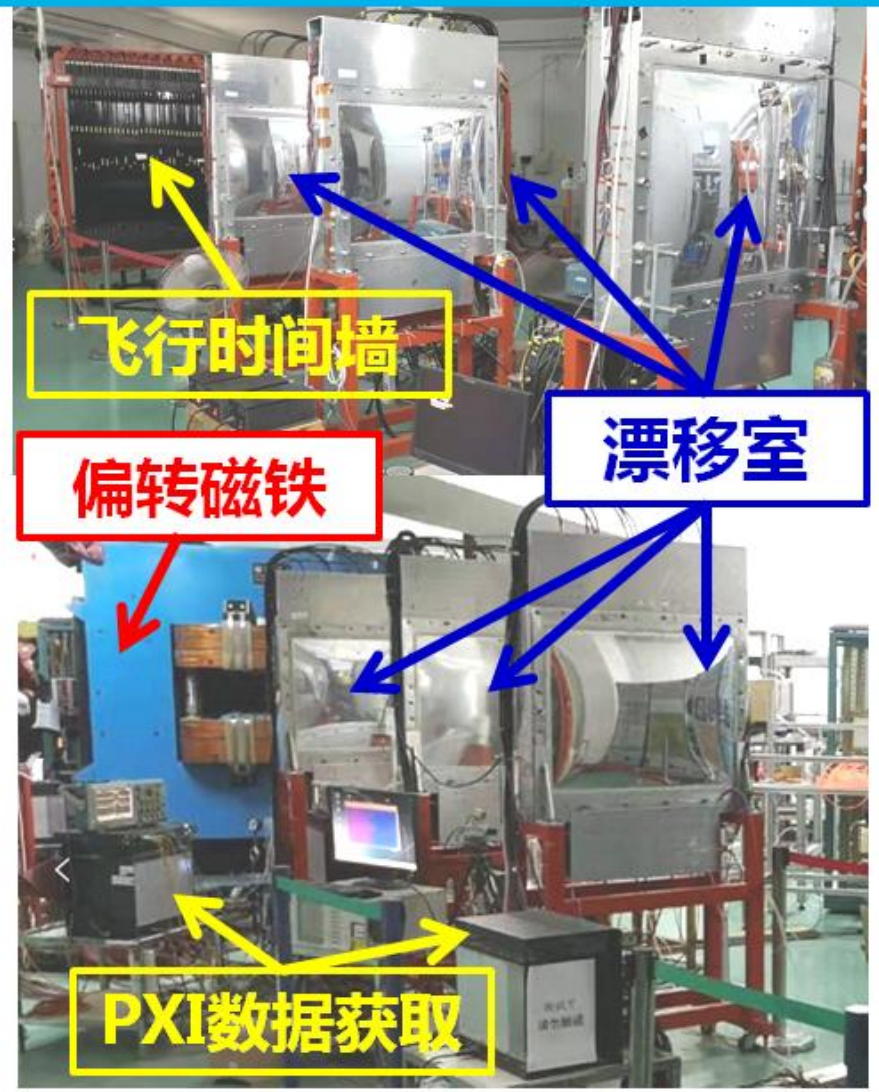
类弹碎片测量系统



靶区实物图



磁铁下游实物图



CSR外靶实验装置—基于PXI的电子学系统

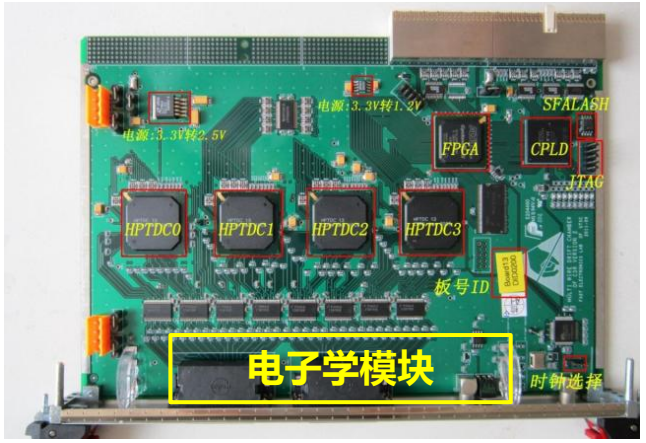
特点

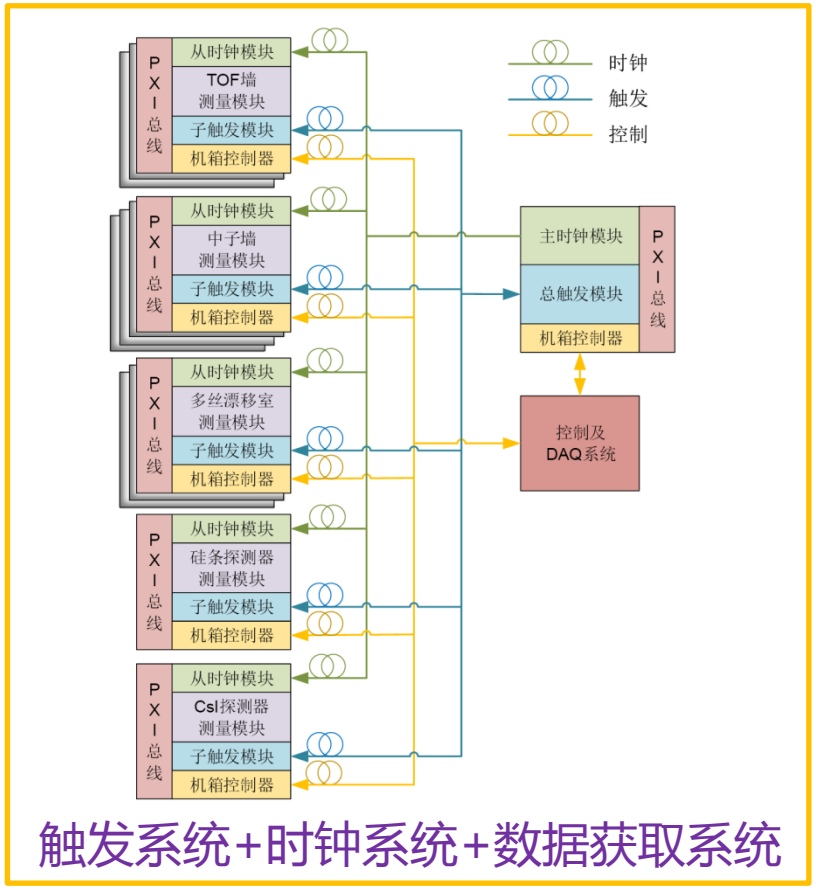
- 读出路数多(~10000路)
- 信号种类多(PMT,MWDC,Gamma,Si)
- 触发逻辑复杂

→

- 特殊研制
- 高集成度

>10套（机箱+电脑）同时工作

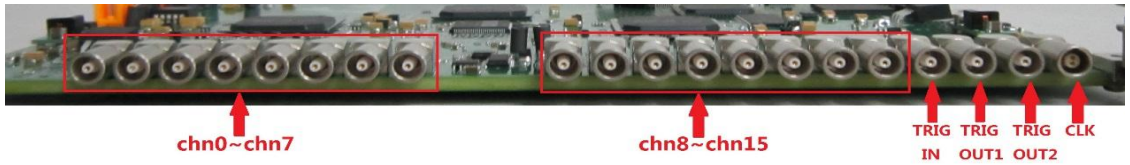




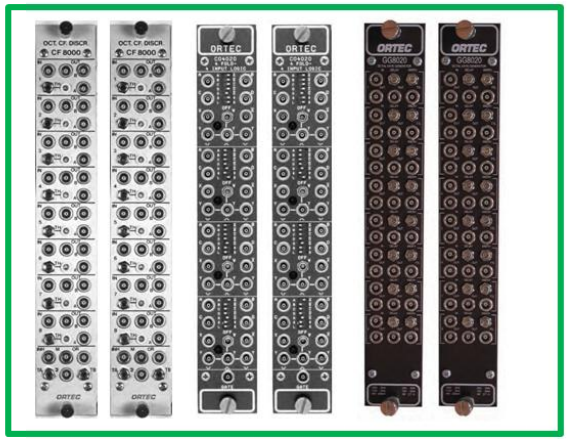
触发系统+时钟系统+数据获取系统

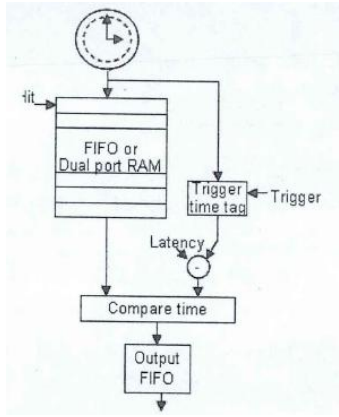
近物所联合中科大研制

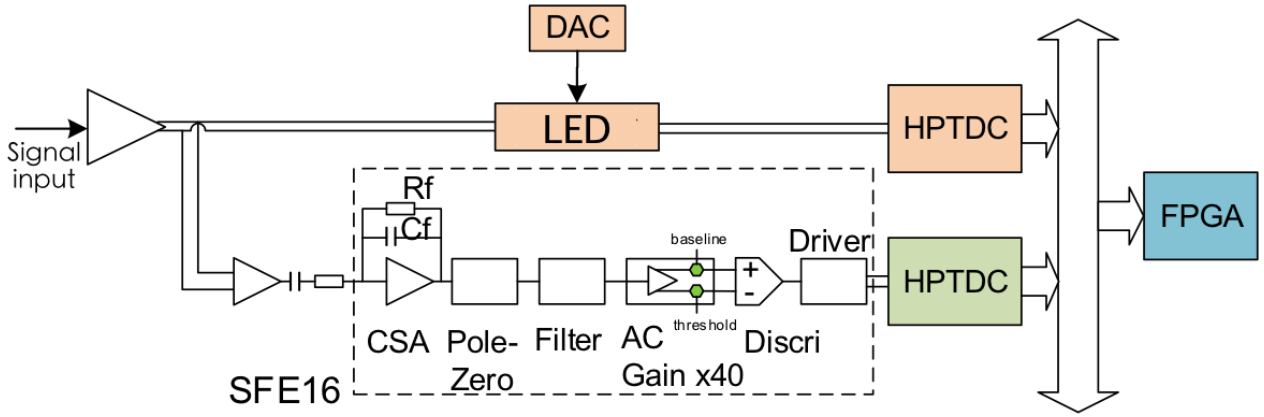
CSR外靶实验装置—时间信号测量模块



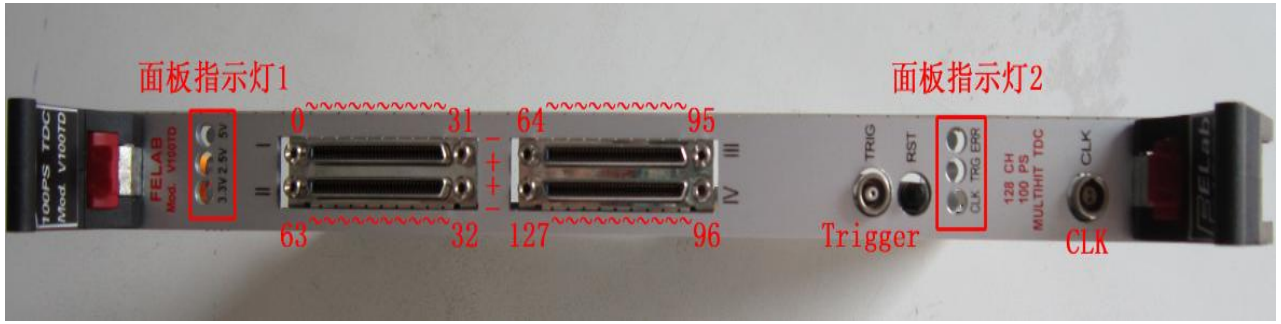
16通道：前沿甄别+逻辑运算+时间测量+幅度测量



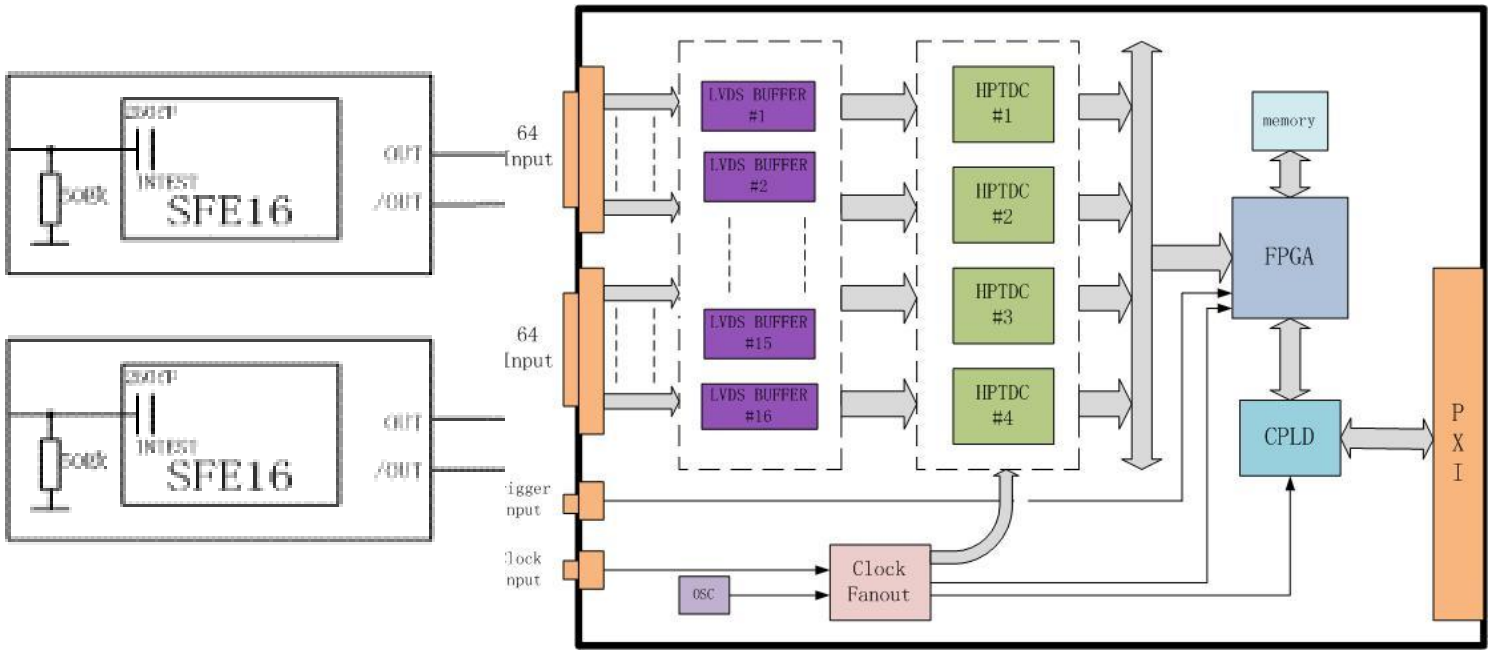




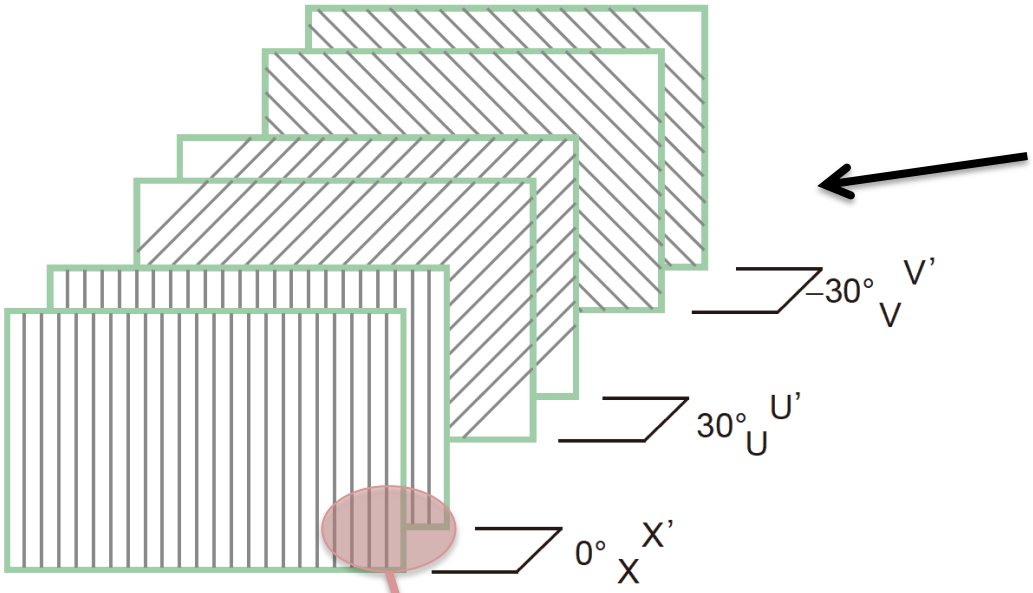
CSR外靶实验装置—多丝漂移室信号测量模块

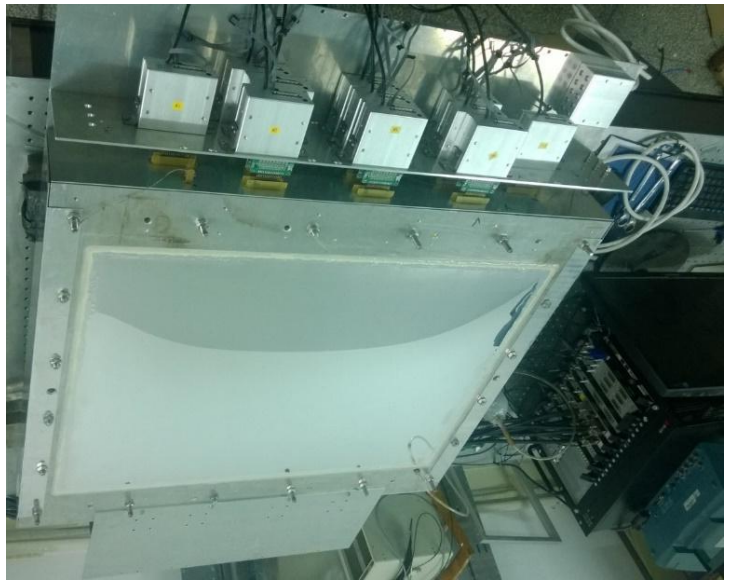


128通道

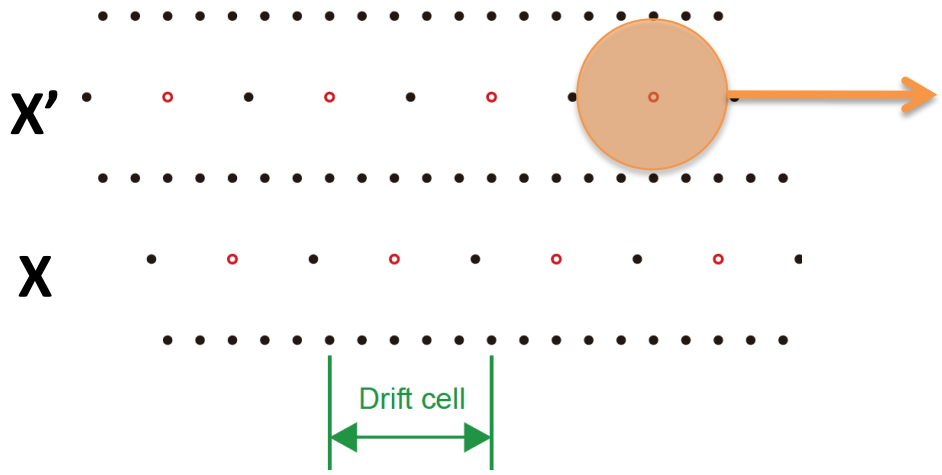


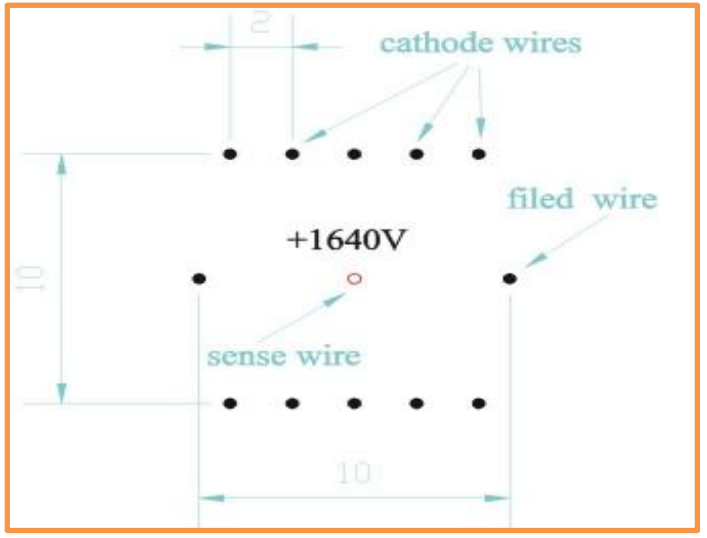
CSR外靶实验装置—多丝漂移室

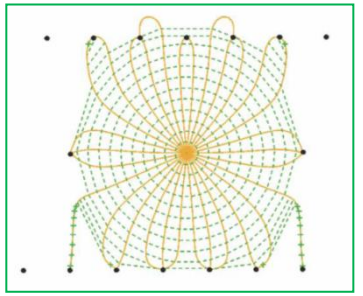




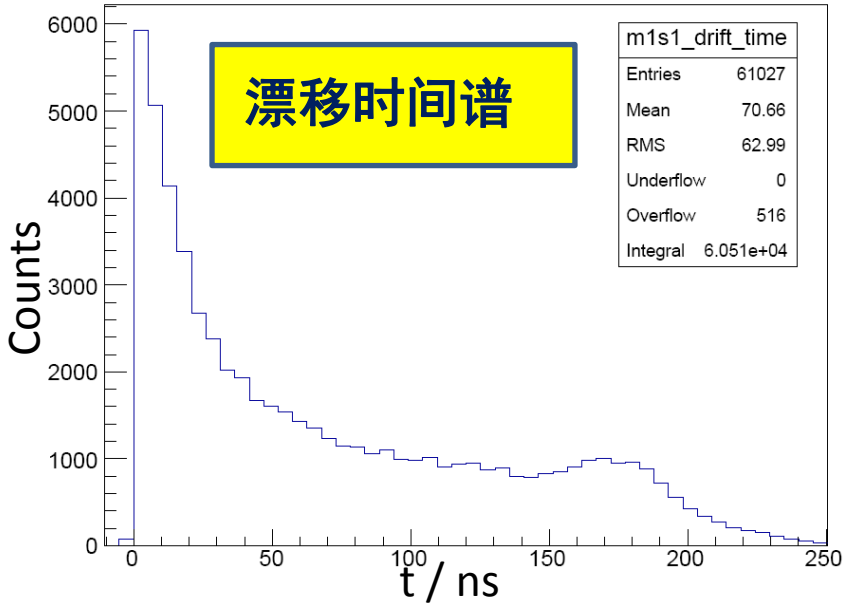
Y. Z. Sun, et al., *NIMA* 894 (2018) 72

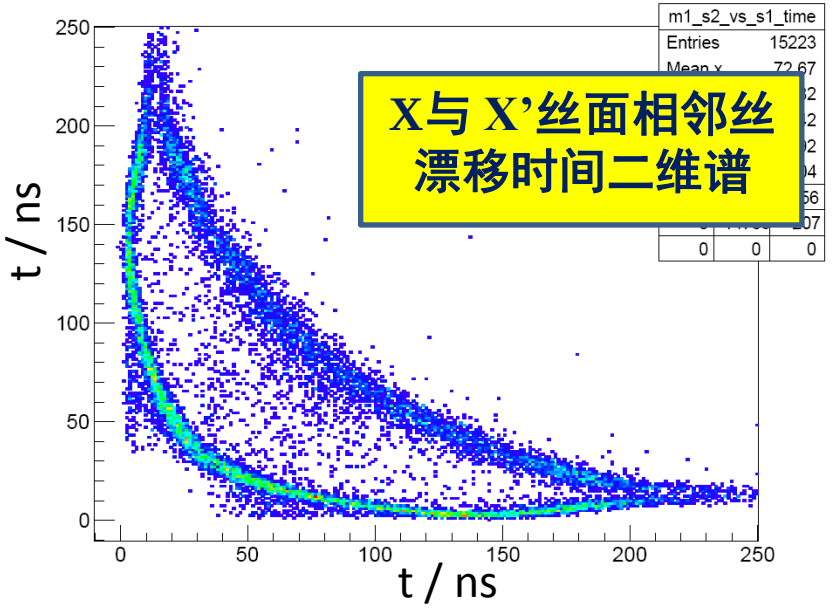


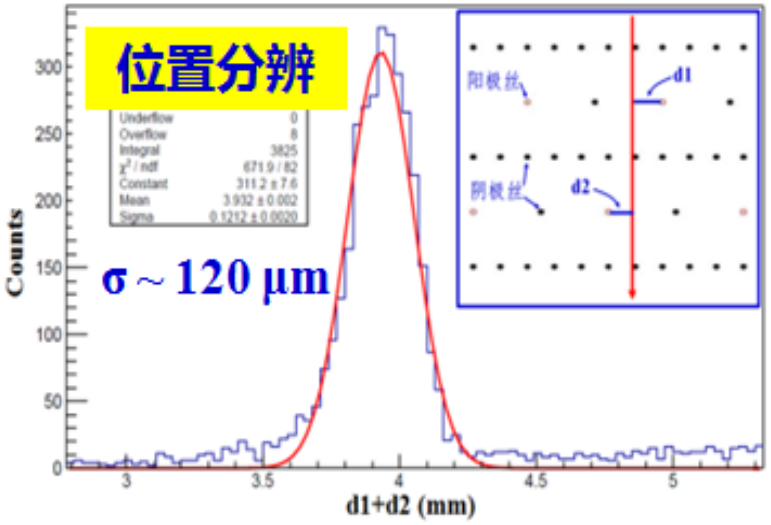


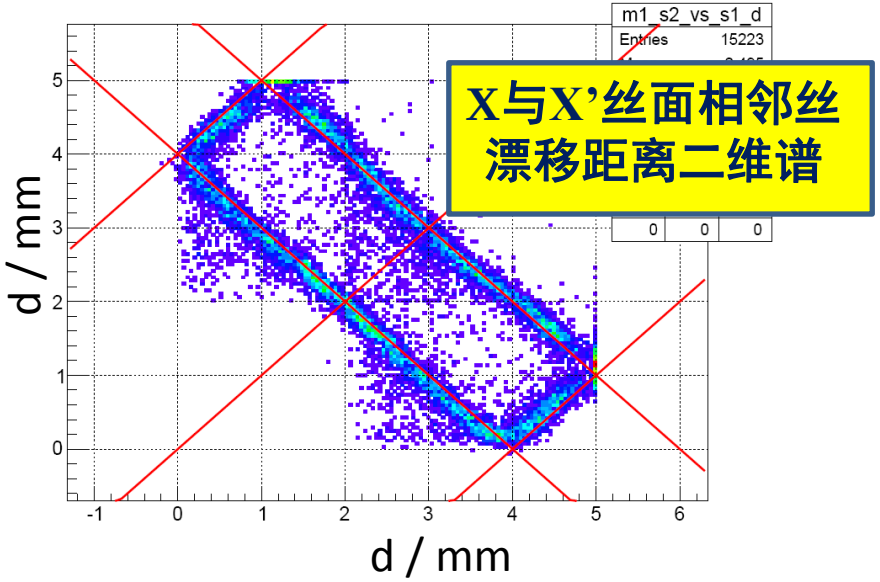


CSR外靶实验装置—多丝漂移室

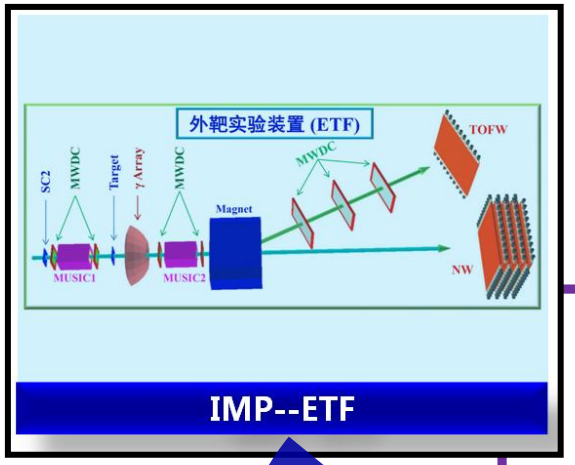








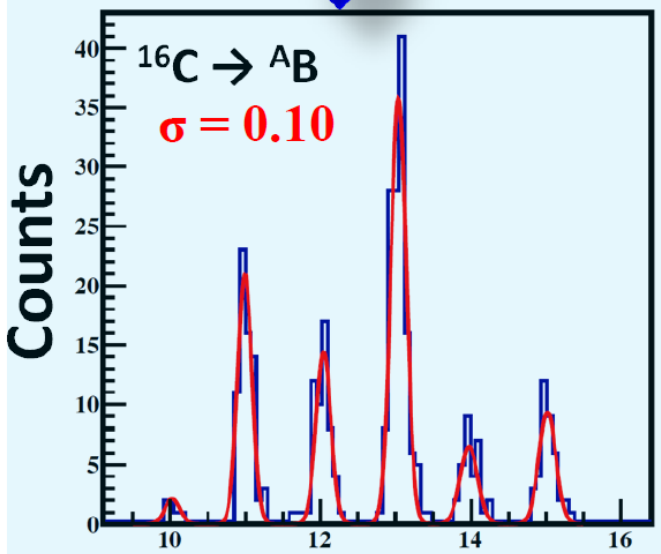
CSR外靶实验装置—粒子鉴别能力



IMP--ETF

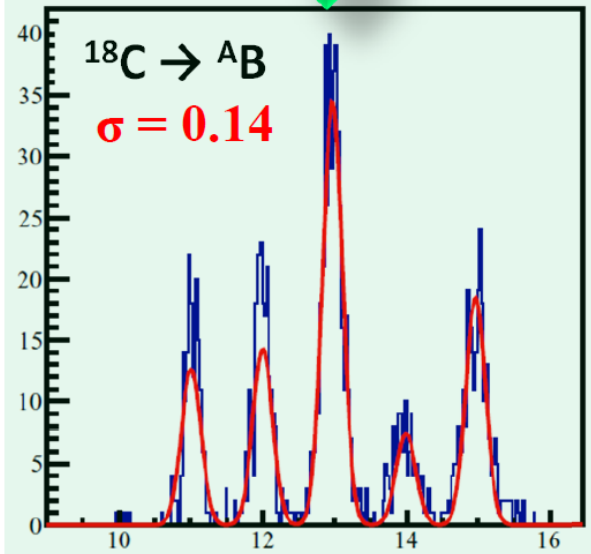
ETF@IMP

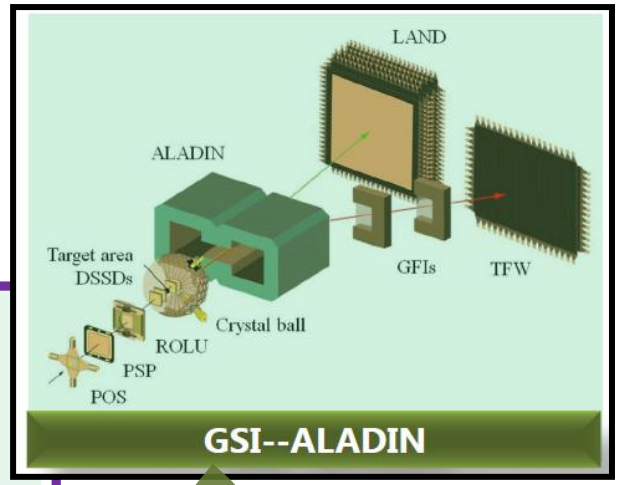
Phy. Rev. C 100(2019)044609



ALADIN@GSI

Phy. Rev. C 93(2016)054601





GSI--ALADIN

CSR外靶装置上的核物理研究—敲出反应

基于中高能放射性束的敲出反应：
研究非稳定原子核结构的最常用的手段之一

- ➢在束γ 谱测量 → 能级纲图
- ➢反应截面测量 → 谱因子
- ➢剩余核纵向动量分布$P_{//}$ 测量 → 轨道角动量

理论上的优势

采用eikonal近似：极大简化了理论计算

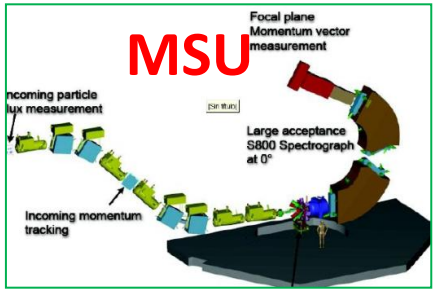
$$\sigma_{\mathrm{exp}} = C^2S \times \sigma_{sp}$$

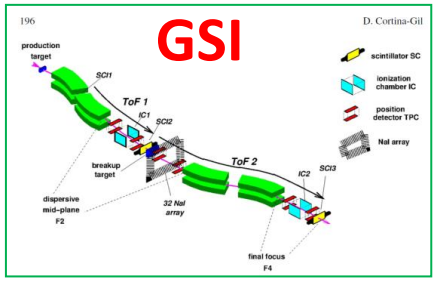
(Experiment: σ_{exp}; Structure theory: C^2S; Reaction theory: σ_{sp})

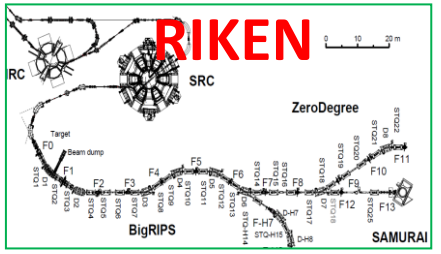
实验上的优势

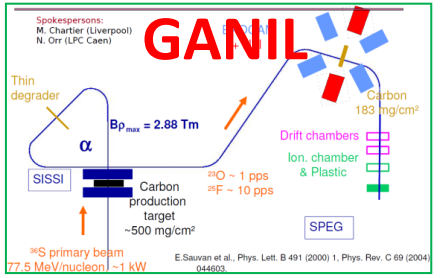
(i) 反应截面大(~10 mb)
(ii) 反应靶较厚(~1 g/cm^2)
(iii) 高能→运动学前冲

⇒ 实验亮度高
⇒ 探测器立体角小





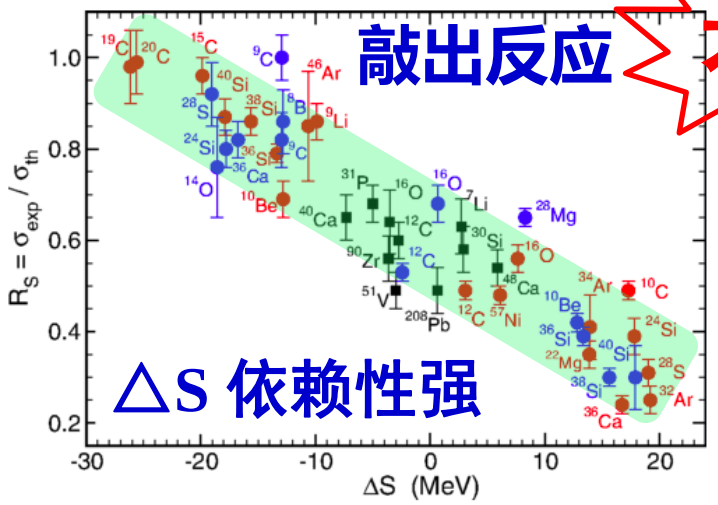




CSR外靶装置上的核物理研究—敲出反应

Phys. Rev. Lett 93(2004)042501
Phys. Rev. Lett 108(2012)252501

敲出反应

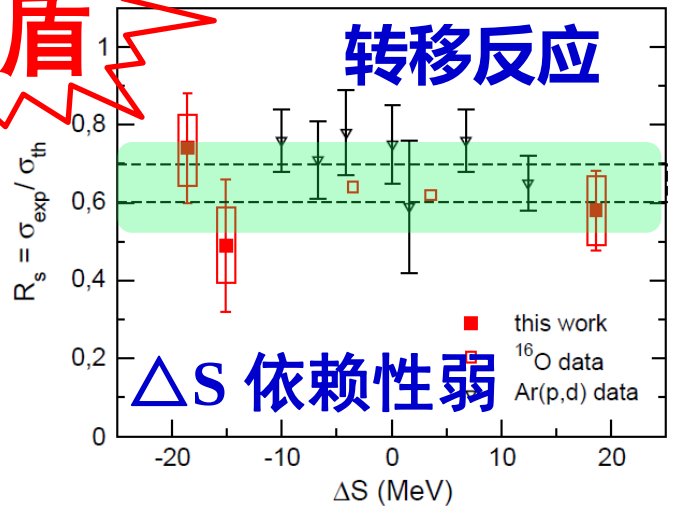


ΔS 依赖性强

矛盾

Phys. Rev. Lett. 104(2010)112701
Phys. Rev. Lett. 110(2013)122503

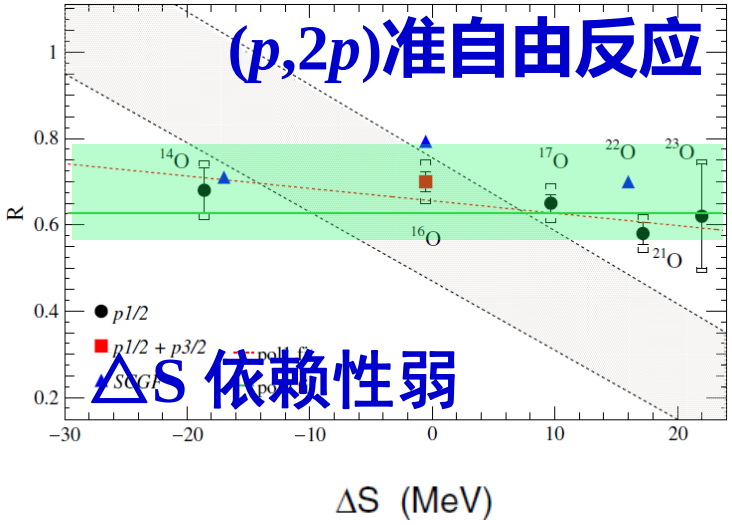
转移反应



ΔS 依赖性弱

Phys. Rev. Lett. 120(2018)052501
Phys. Lett. B 753(2016)204

(p,2p)准自由反应



ΔS 依赖性弱

Progress in Particle and Nuclear Physics 118 (2021) 103847

Contents lists available at ScienceDirect
Progress in Particle and Nuclear Physics
journal homepage: www.elsevier.com/locate/ppnp

Review

Quenching of single-particle strength from direct reactions with stable and rare-isotope beams

T. Aumann [a,b], C. Barbieri [c,d,e], D. Bazin [f,g], C.A. Bertulani [h], A. Bonaccorso [i], W.H. Dickhoff [j], A. Gade [f,g], M. Gómez-Ramos [a,k], B.P. Kay [l], A.M. Moro [k,m], T. Nakamura [n], A. Obertelli [a,*], K. Ogata [o,p], S. Paschalis [q], T. Uesaka [r]

PHYSICAL REVIEW C **103**, 054610 (2021)

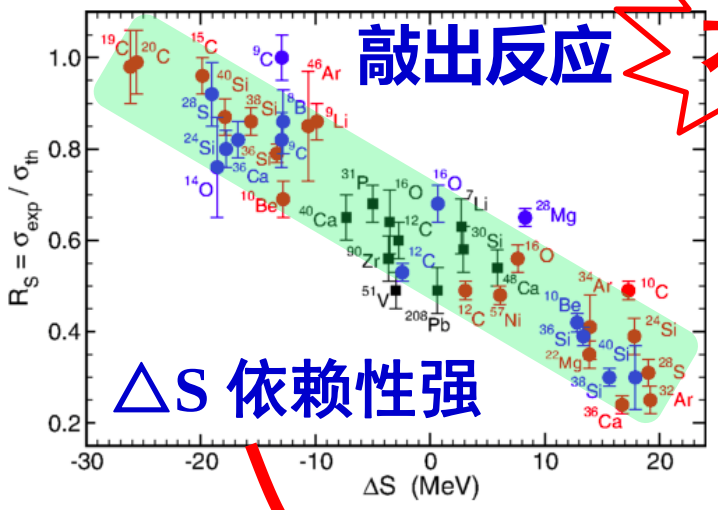
Updated systematics of intermediate-energy single-nucleon removal cross sections

J. A. Tostevin [1] and A. Gade [2,3]
[1]*Department of Physics, Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 7XH, United Kingdom*
[2]*National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan State University, East Lansing, Michigan 48824, USA*
[3]*Department of Physics and Astronomy, Michigan State University, East Lansing, Michigan 48824, USA*

CSR外靶装置上的核物理研究—敲出反应

Phys. Rev. Lett 93(2004)042501
Phys. Rev. Lett 108(2012)252501

敲出反应

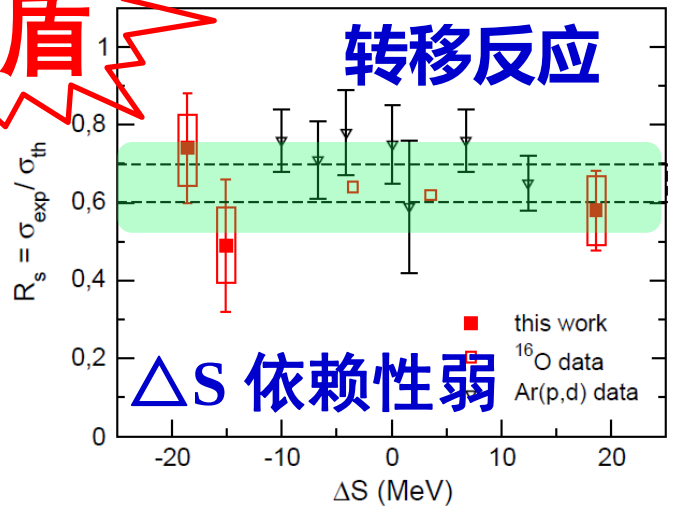


ΔS 依赖性强

矛盾

Phys. Rev. Lett. 104(2010)112701
Phys. Rev. Lett. 110(2013)122503

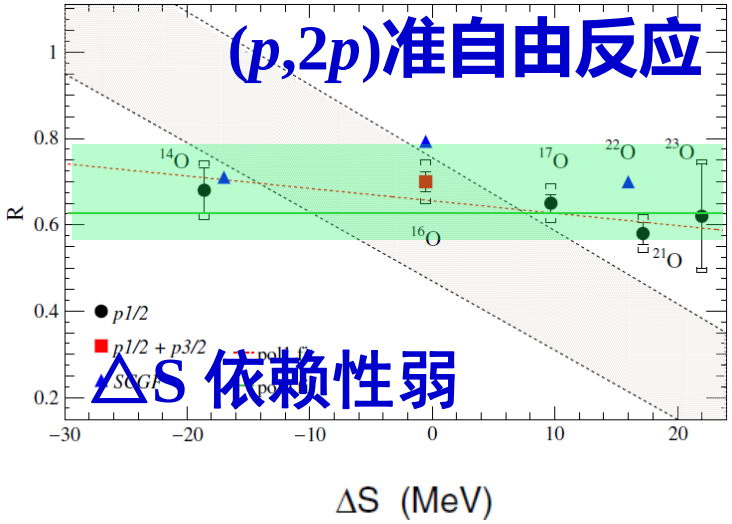
转移反应



ΔS 依赖性弱

Phys. Rev. Lett. 120(2018)052501
Phys. Lett. B 753(2016)204

(p,2p)准自由反应



ΔS 依赖性弱

核结构及核反应理论上的观点：
1) 核结构：有未考虑的关联？
Phys. Rev. Lett. 106(2011)162502
2) 核反应：敲出反应模型失效？
Phys. Rev. Lett. 108(2012)252501

解决途径

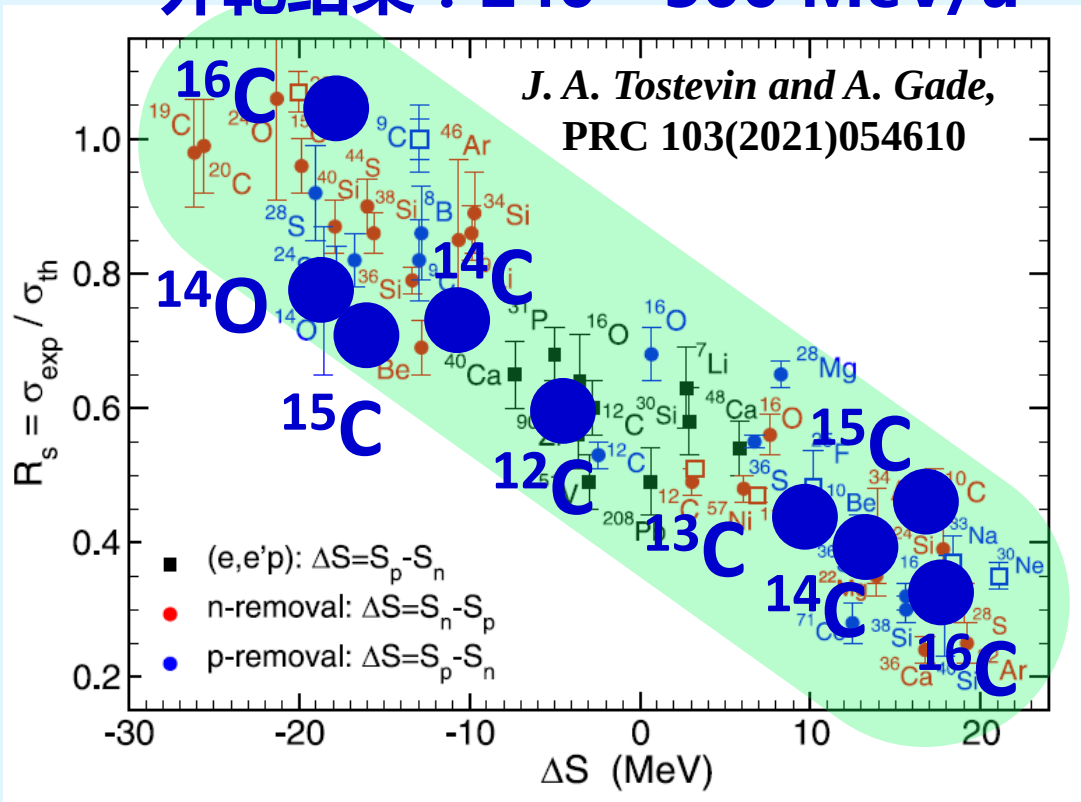
谱因子
能量依赖性

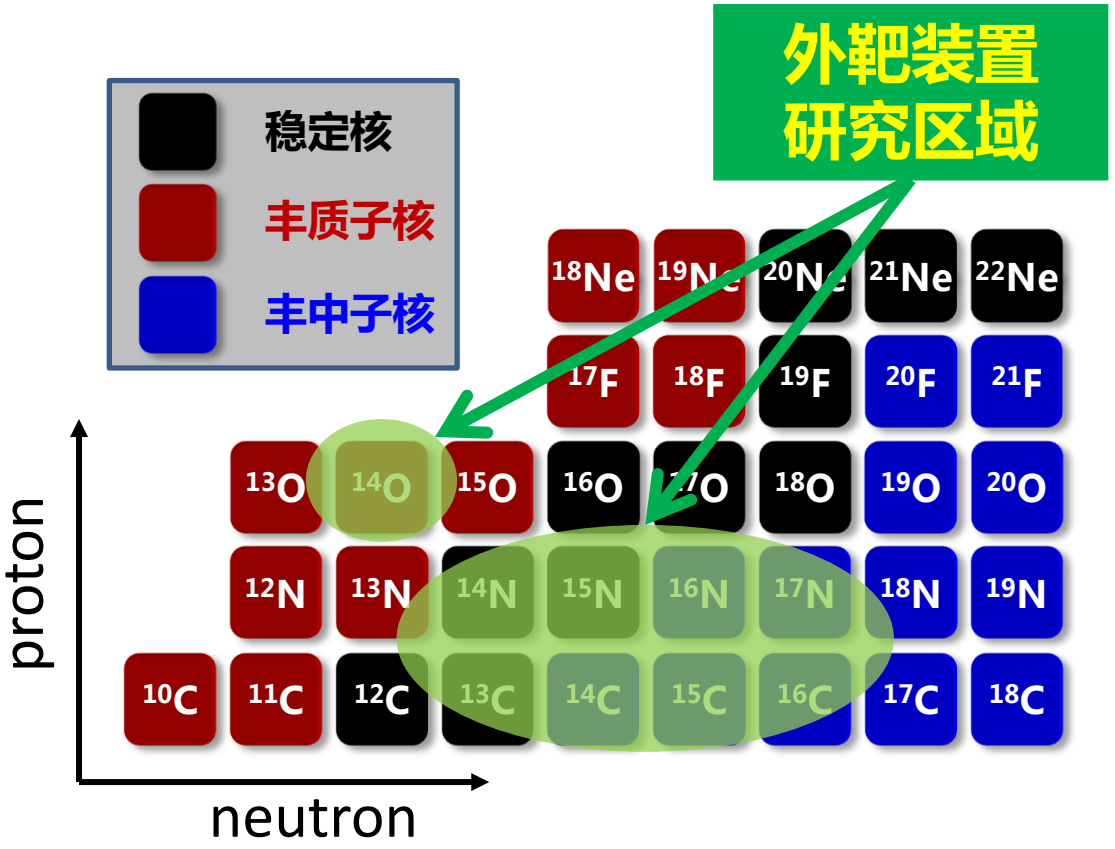
更高能束流
(>200 MeV/u)

RIBLL2
外靶

CSR外靶装置上的敲出反应实验结果

外靶结果：240 - 300 MeV/u

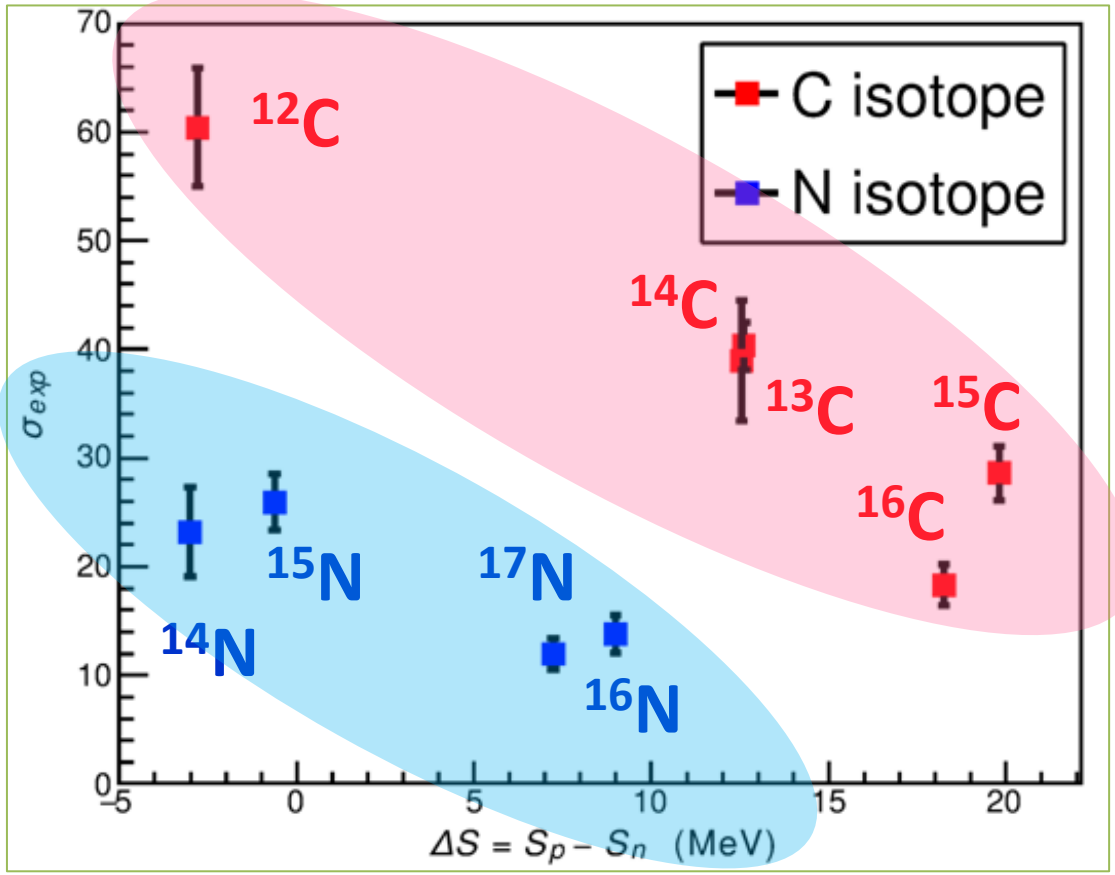


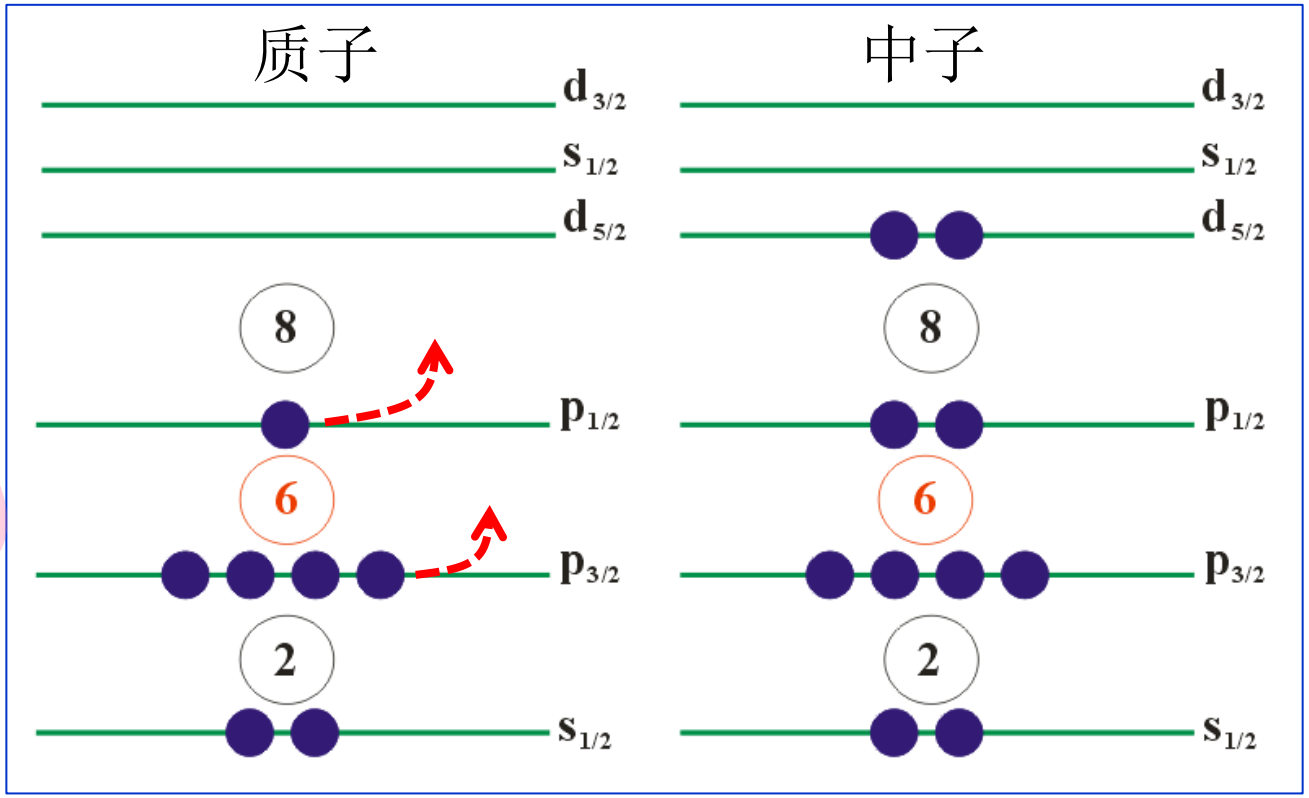


^{14}O (-p), *Phys. Rev. C* 90 (2014) 037601
^{16}C (-p), *Phys. Rev. C* 100 (2019) 044609
$^{14\text{-}16}$C (-n), *Phys. Rev. C* 104 (2021) 014310
$^{12\text{-}15}$C, $^{14\text{-}17}$N (-p), Paper in preparation

系统的实验测量表明：敲除反应在不同能区均具有很强的适用性！

CSR外靶装置上的敲出反应实验结果





N同位素单质子敲出截面系统地小于C同位素的单质子敲出截面

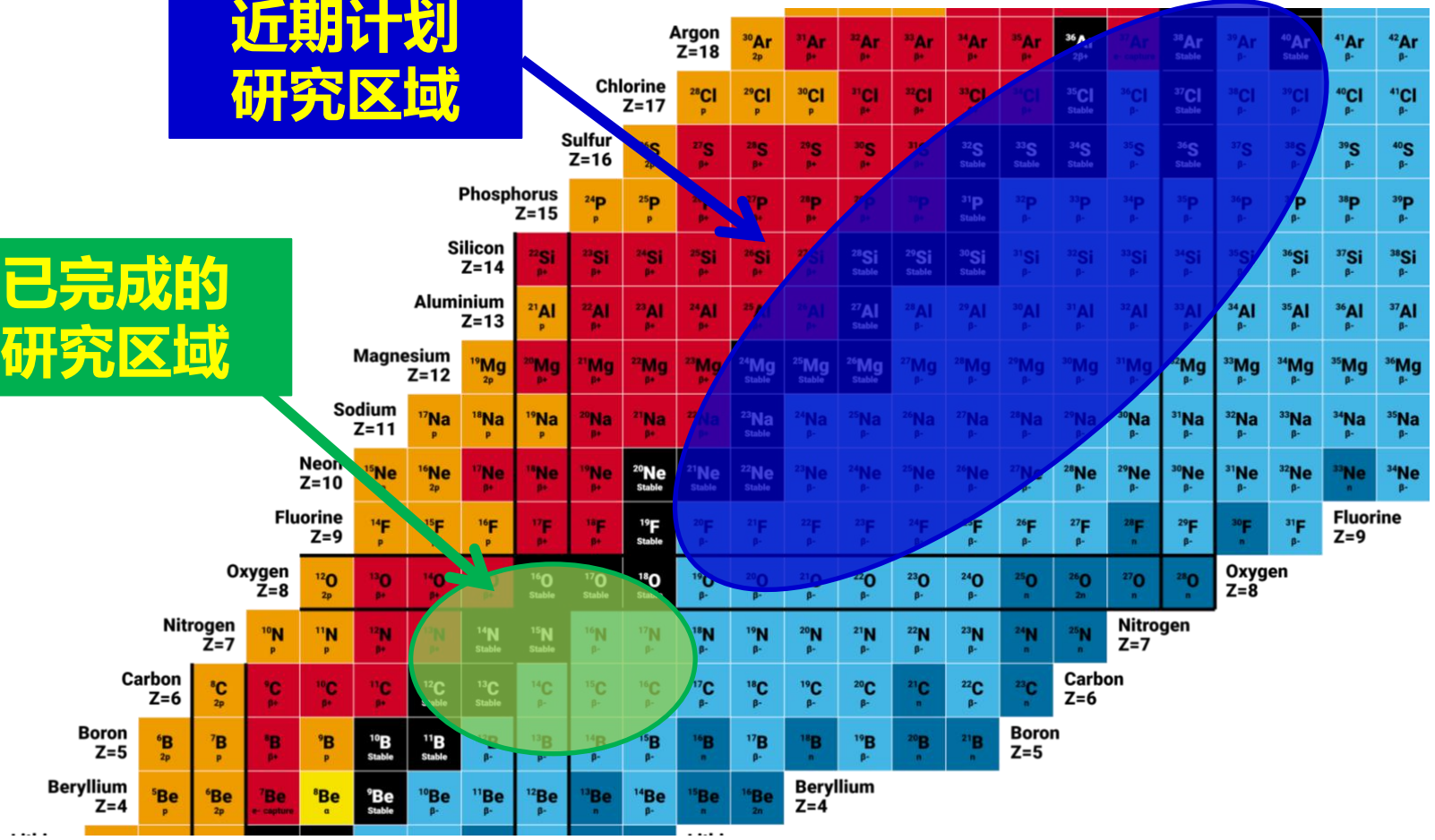
Z = 6 壳

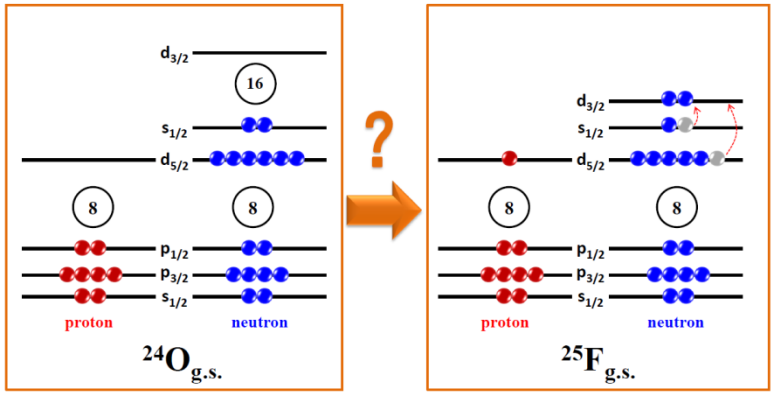
CSR外靶实验装置下一步实验计划

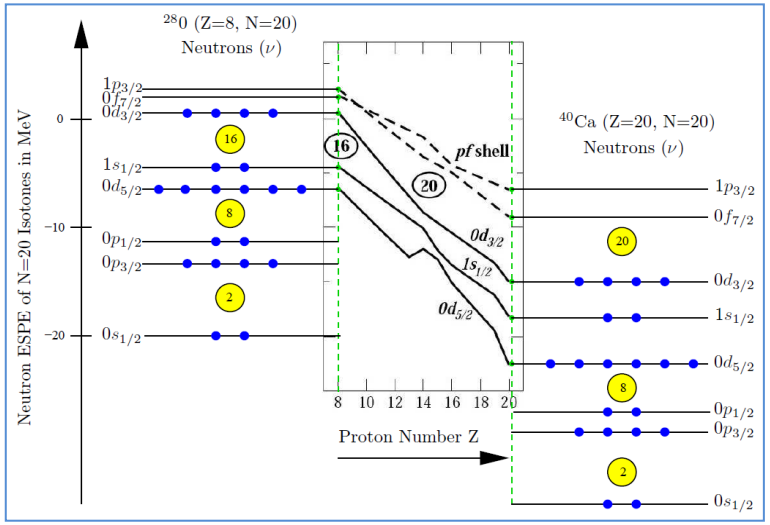
未来3-5年内，开展丰中子sd壳核的反应机制及结构演化研究

近期计划
研究区域

已完成的
研究区域

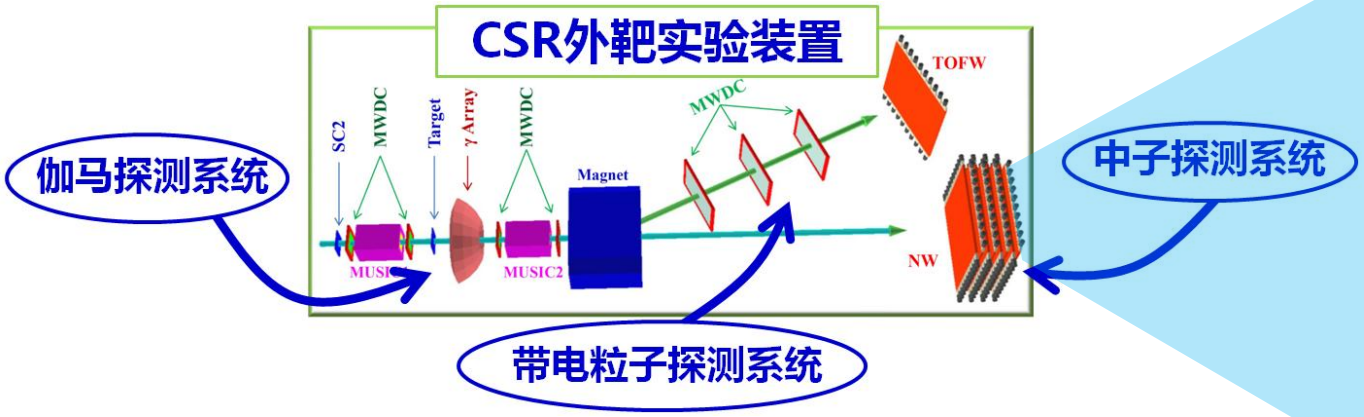






CSR外靶实验装置下一步实验计划

启用中子探测系统



中子探测系统：

- 数据获取系统调试完毕
- 宇宙射线测试已经完成

中子探测系统的投入物理运行后，将极大地拓展外靶实验研究内容！

提纲

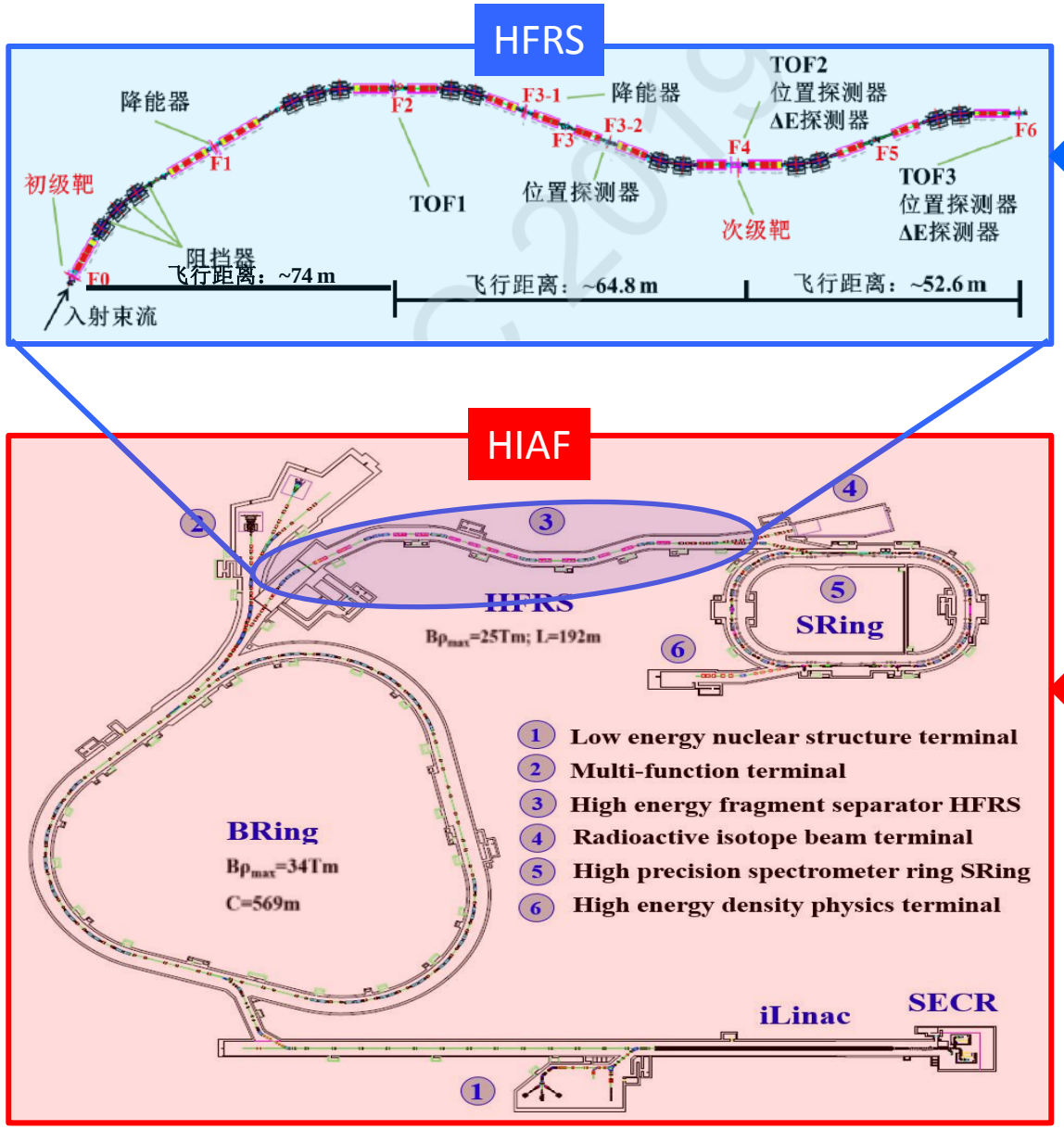
一 高能放射性束特点

二 RIBLL2及其物理研究

三 HFRS及可开展的物理研究

四 总结

HIAF及HFRS



高能放射性束流线(HFRS)
High energy Fragment Separator

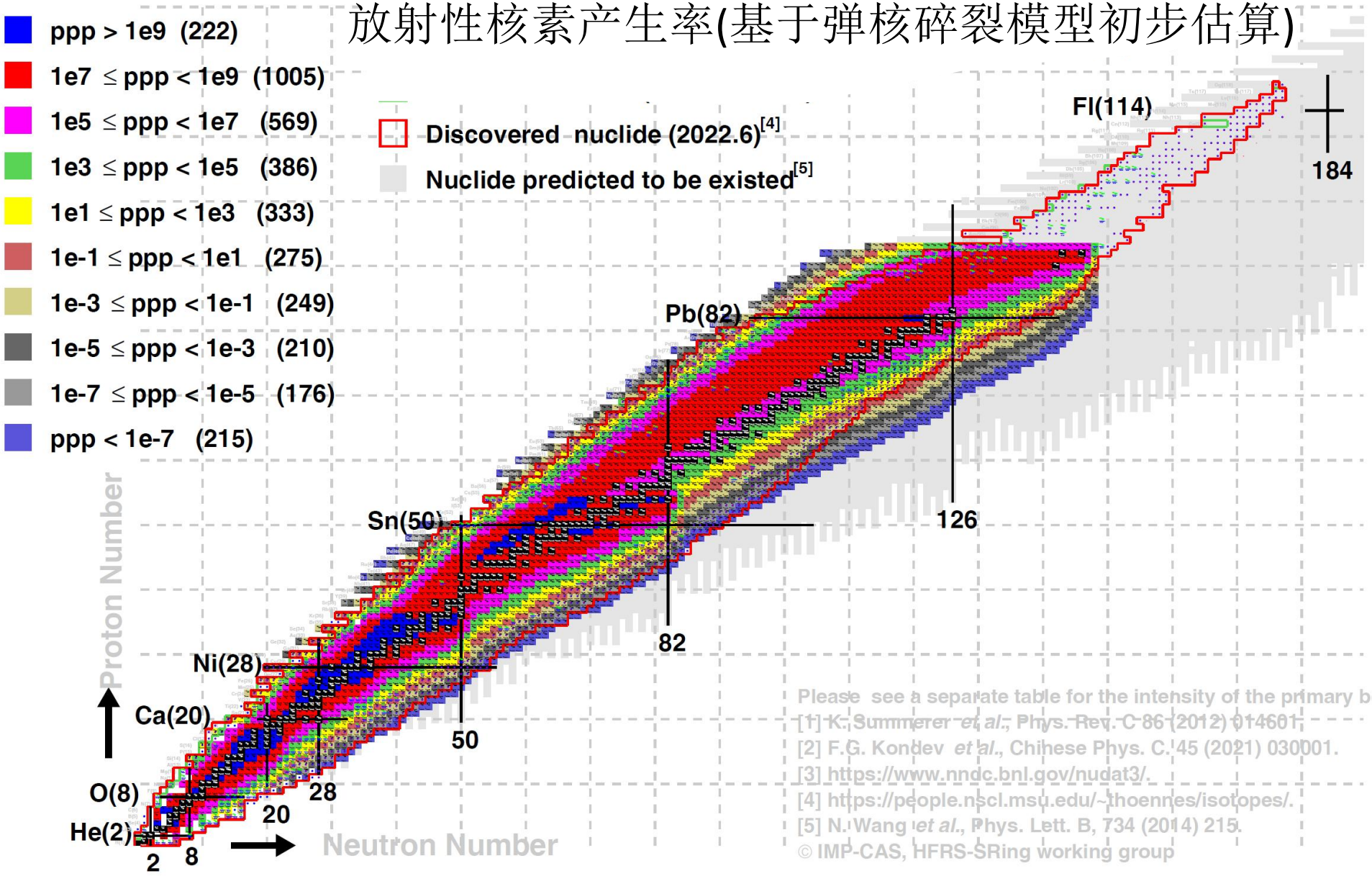
流强(pps)	能量(GeV/u)	粒子鉴别能力
1 (^{78}Ni) 10^6 (^{132}Sn)	2.9 (A/Z=2) 1.7 (A/Z=3)	up to Z ~ 90
粒子流强高	粒子速度快	鉴别能力强

强流重离子加速器装置(HIAF)
High Intensity heavy-ion Accelerator Facility

Ion species	Energy (GeV/u)	Intensity (ppp)
proton	9.3	2.0×10^{12}
$^{18}O^{6+}$	2.6	6.0×10^{11}
$^{78}Kr^{19+}$	1.7	3.0×10^{11}
$^{209}Bi^{31+}$	0.85	1.2×10^{11}
$^{238}U^{34+}$ (80+)	0.8 (2.6)	1.0 (0.3) $\times10^{11}$

HFRS上可产生的放射性核素

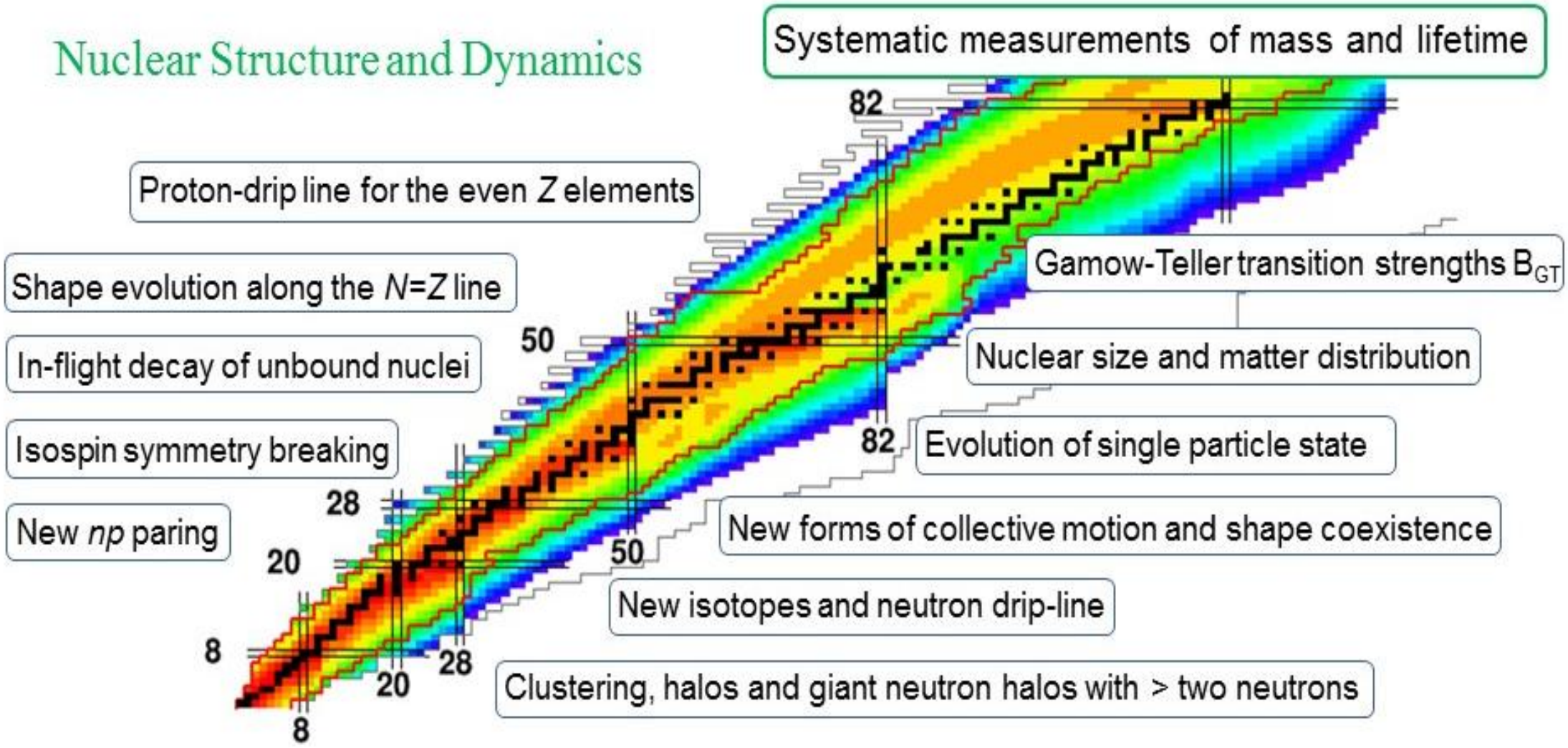
放射性核素产生率(基于弹核碎裂模型初步估算)



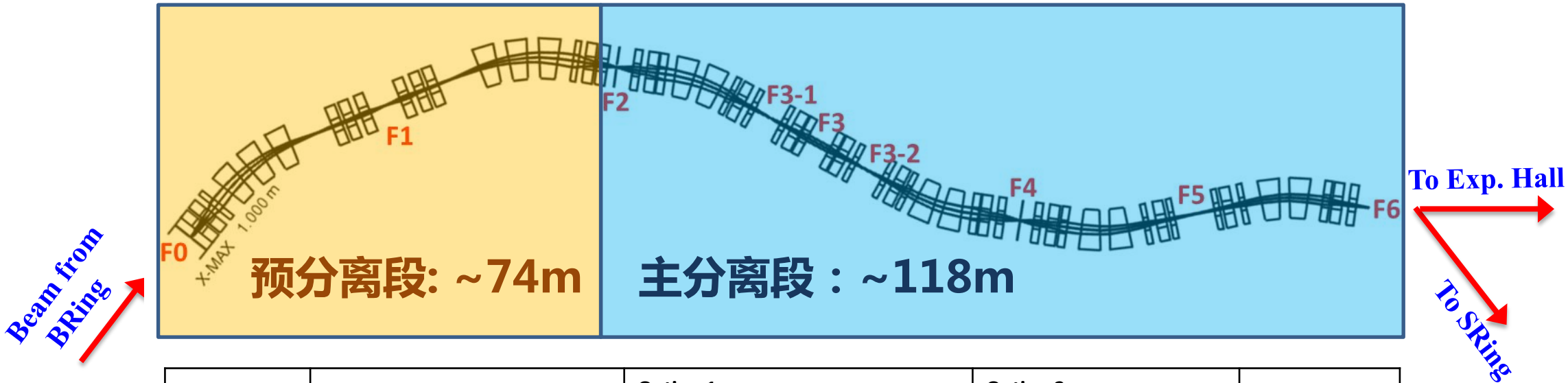
Please see a separate table for the intensity of the primary beam.

[1] K. Summerer *et al.*, Phys. Rev. C 86 (2012) 014601.
[2] F.G. Kondev *et al.*, Chinese Phys. C 45 (2021) 030001.
[3] https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/.
[4] https://people.nscl.msu.edu/~thoennes/isotopes/.
[5] N. Wang *et al.*, Phys. Lett. B, 734 (2014) 215.

HFRS上可开展的放射性束物理研究



HFRS束线探测设备



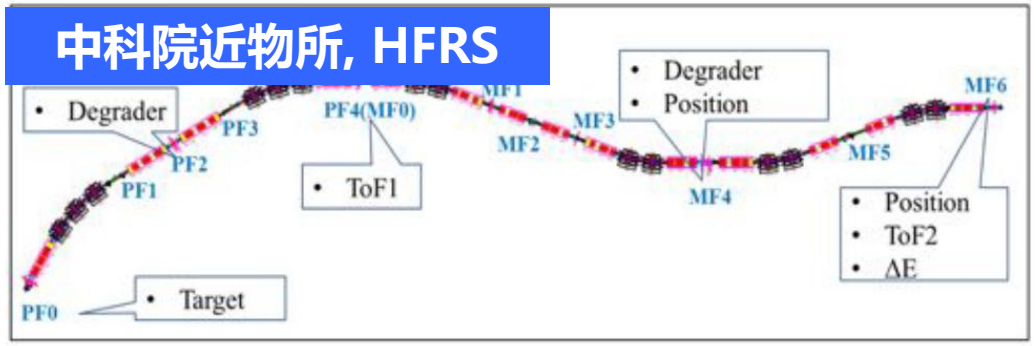
Detector	Requirements	Option 1 (guaranteed)	Option 2 (Expected)	
Small TOF	• ~30(x)×30(y) mm² • <50 ps，~5.0e+7 pps	Plastic Scint+PMT(SiPM)	Diamond	Electronics and DAQ
Large TOF	• ~250(x)×5(y) mm² • <50 ps，~2.3e+7 pps	Plastic Scint+PMT(SiPM)		
Tracking	• ~250(x)×5(y) mm² • <0.5 mm，~2.3e+7 pps	PPAC or MWPC (Delay-line) KDC	GEM-TPC、MCP	
ΔE	• ~250(x)×5(y) mm² • <0.5%，~2.3e+7 pps	MUSIC PreAmp+Amp+Flash ADC	Gasous Xenon	
F2 Tracking	• ~30(x)×30(y) mm² • <1 mm，~5.0e+7 pps	Fiber + SiPM		
F5 Tracking	• ~250(x)×5(y) mm² • <5 mm，~2.3e+7 pps	Plastic Scint+PMT(SiPM)		

HFRS束线设备研制时间表

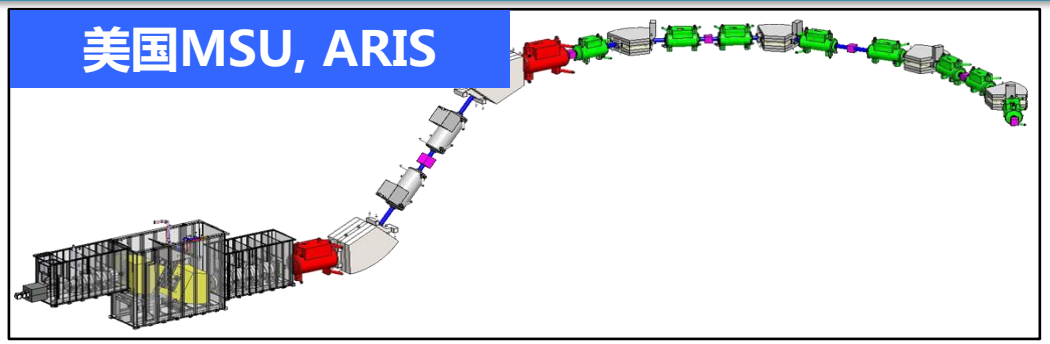
	任务	参与人	时间节点				
			2022. 06	2022. 12	2023. 06	2023. 12	2024. 6
1	各靶室设计	章学恒	完成设计	完成招标		完成加工	
2	初级靶系统	章学恒、马少波		完成性能测试			
3	降能器系统	章学恒、杨振		验证加工工艺	完成设计	完成招标	完成加工
4	狭缝及次级靶系统						
5	金刚石探测器	马少波、章学恒		完成大面积研制研制		完成样机性能测试，判断是否满足应用要求	
6	快时间塑闪探测器（小面积、大面积）	郑勇、王凯龙		完成样机研制		完成样机性能测试，判断是否满足应用要求	
7	KDC位置探测器	寺岛知、王惠仁					
8	GEM-TPC位置探测器	余玉洪					
9	延迟线读出多丝正比室	郑勇		完成样机研制		完成样机性能测试，判断是否满足应用要求	
10	MUSIC	唐述文					
11	氙闪烁光探测器	章学恒、马少波	完成样机加工	完成样机性能初步测试		完成样机性能测试，判断是否满足应用要求	
12	MCP位置探测器	马少波、章学恒		完成样机加工		完成样机性能测试，判断是否满足应用要求	
13	光纤位置探测器						
14	数据获取	余玉洪、马少波					
15	高纯锗探测器	郑勇		完成设计		完成预言测试	
16							

国际上新一代高能放射性束流装置

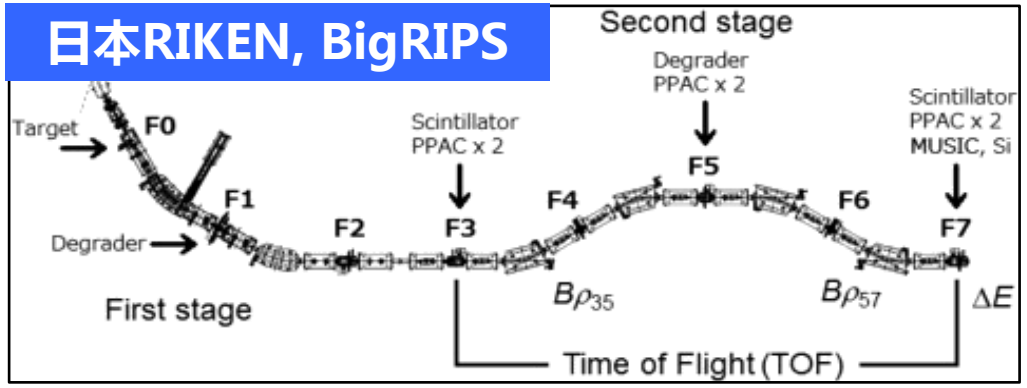
中科院近物所, HFRS



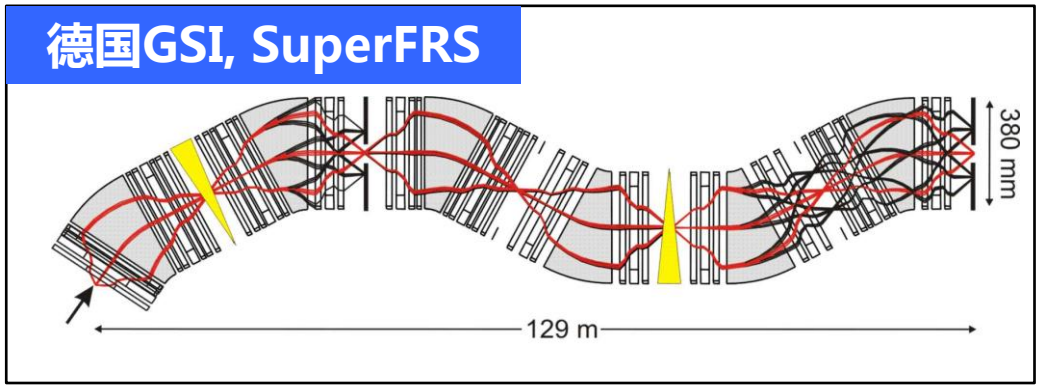
美国MSU, ARIS



日本RIKEN, BigRIPS



德国GSI, SuperFRS



装置	长度 (m)	角接收度 (mrad)	动量接收度 (%)	分辨本领	最大磁刚度 (Tm)
HFRS	191.8	±30 (X); ±15 (Y)	±2.0	850/1100	25
SuperFRS	182.2	±40 (X); ±20 (Y)	±2.5	750/1500	20
BigRIPS	78.2	±40 (X); ±50 (Y)	±3	1260/3420	9.5
ARIS	86.8	±40 (X); ±40 (Y)	±5	1720/3000	8

HFRS的独特之处

具有最高的磁刚度，可传输分离最高能量放射性束流

$B\rho_{max}$ = 25 Tm　$\Delta P/P = \pm 2\%$　30 π·mm·mrad

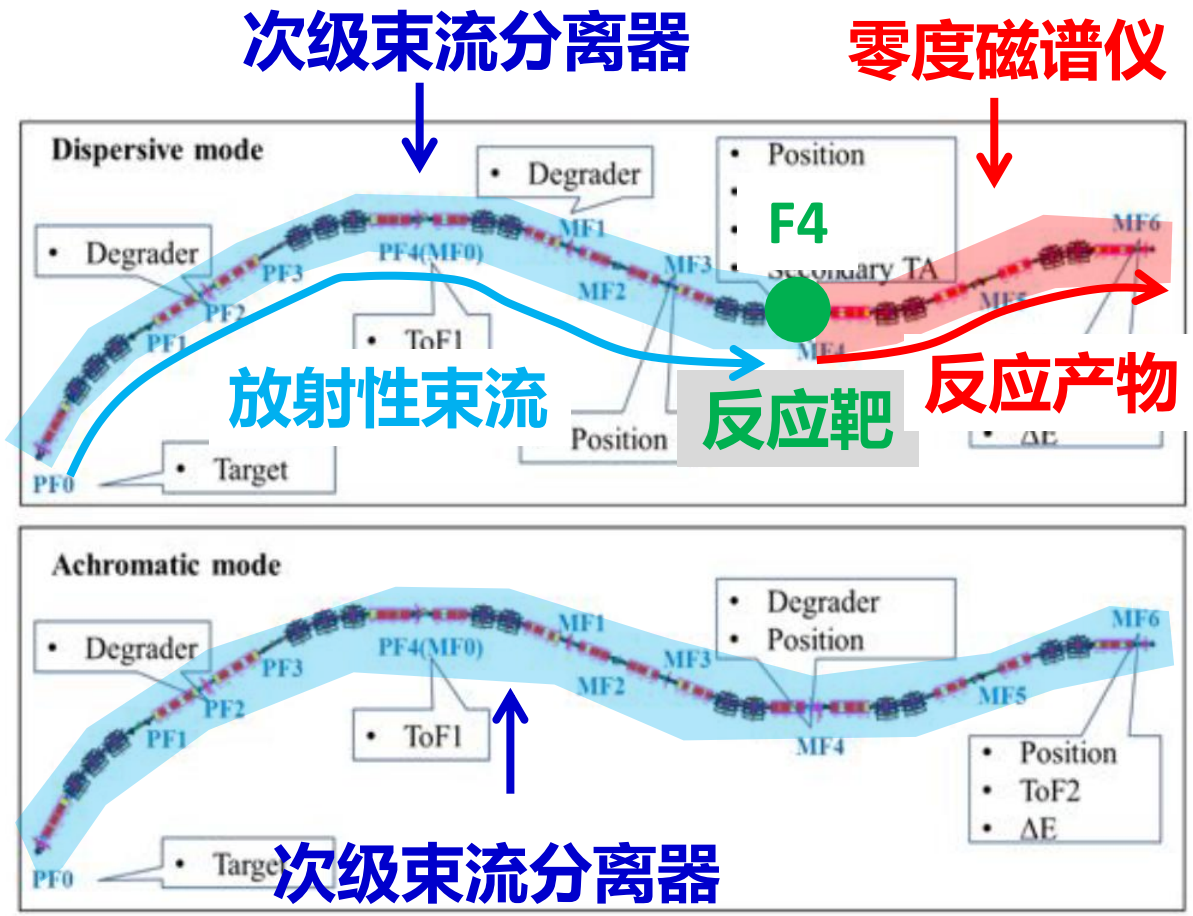
- Synthesis of neutron rich hypernuclei
- Nucleon excitations in nuclei
- Giant resonance of neutron rich nuclei
- Spectroscopy of meson-nucleus bound system
- …

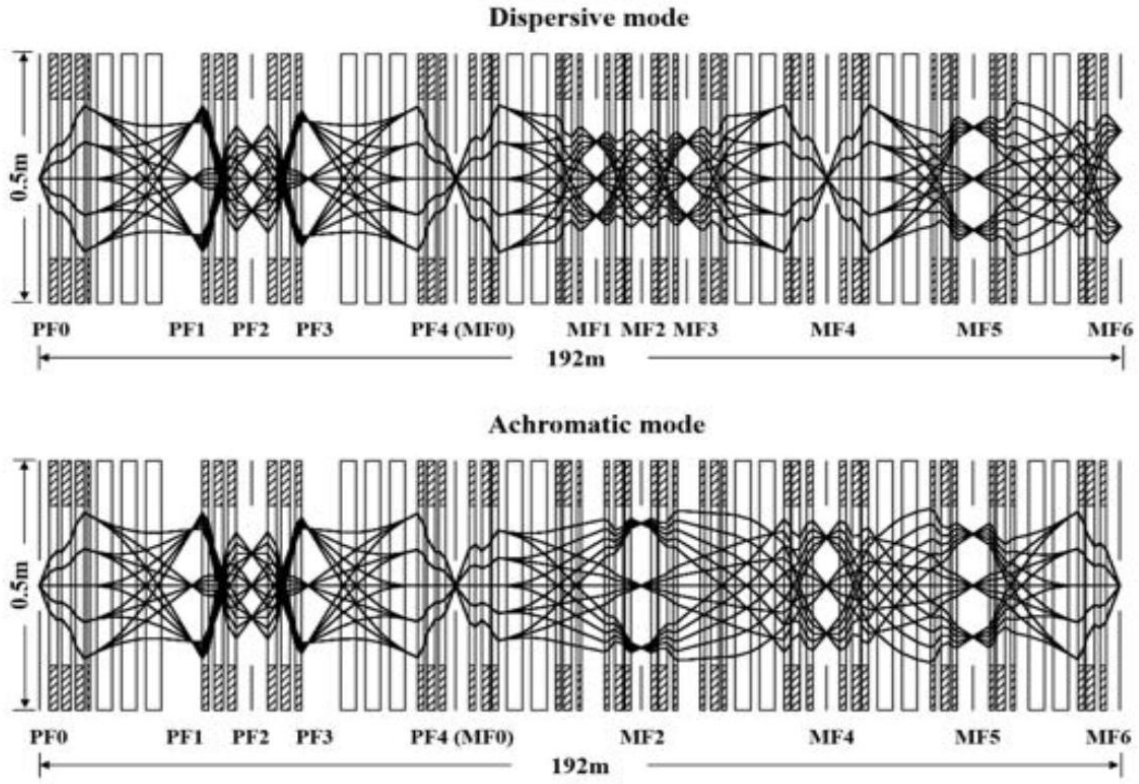
} Bρ=25Tm

Unique Experiments at HIAF!

HFRS的独特之处

具有双运行模式，主分离器后半段可用作次级反应谱仪





HFRS上的放射性束物理实验分类

F0打靶实验
放射性束产生、基本性质研究

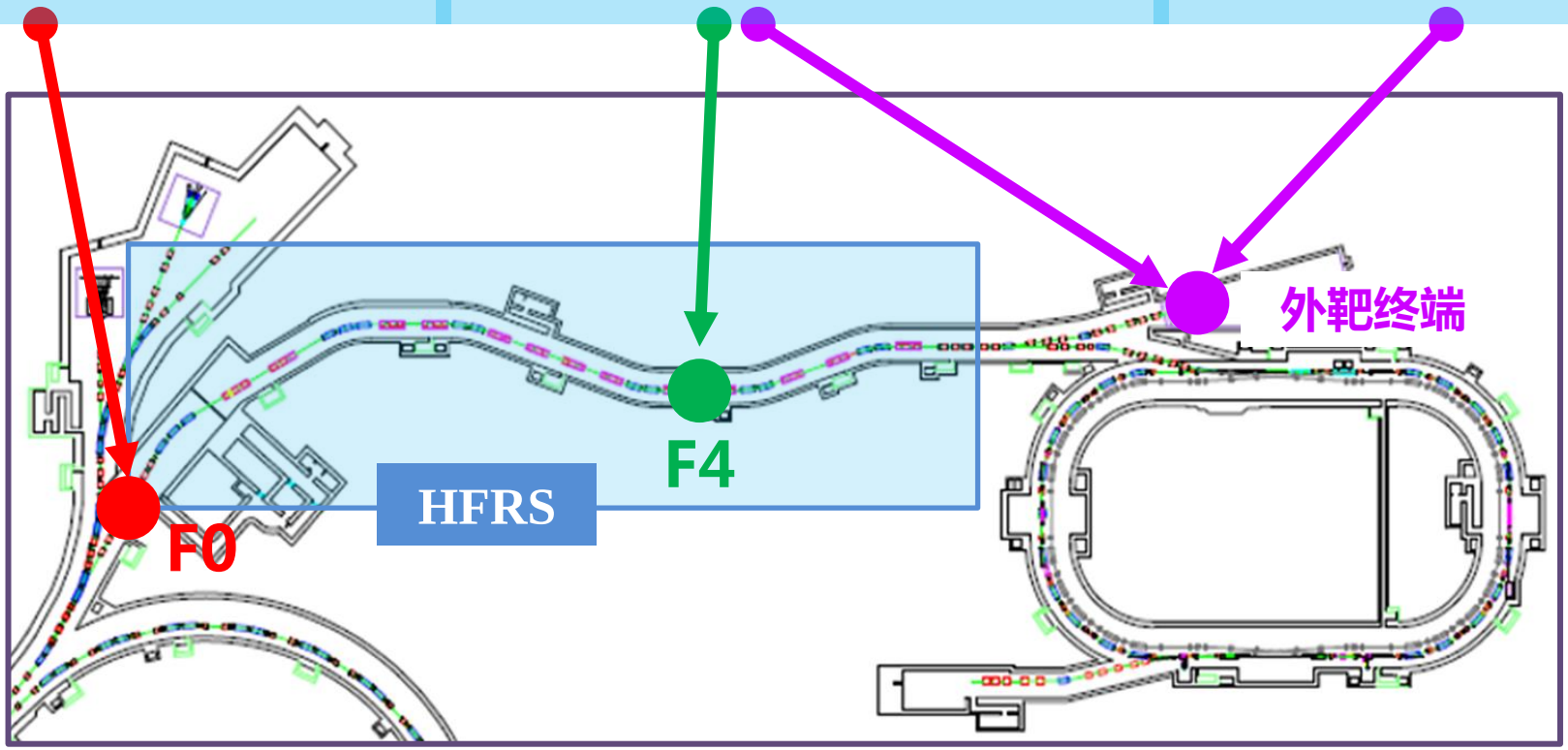
- RIB production mechanism
- New isotope
- Mass measurement using HFRS
- ……

F4打靶实验
奇特核结构及反应研究

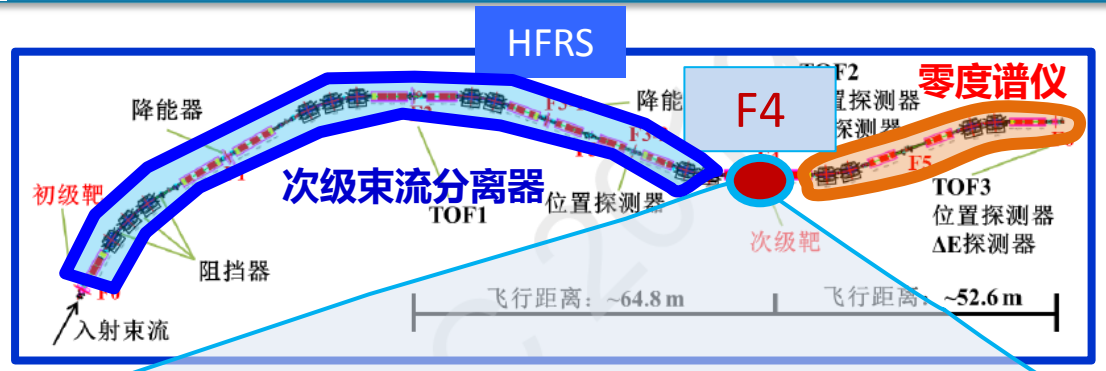
- Interaction cross section
- Knockout reaction
- In-beam gamma
- Charge change/exchange
- ……

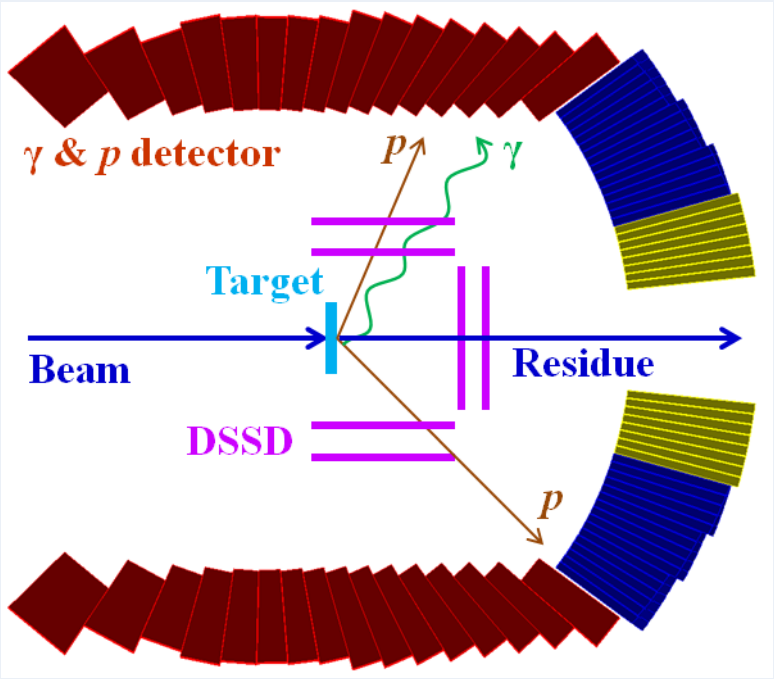
外靶终端实验
放射性束慢化实验、衰变研究

- β delayed γ, p, n, … emission
- Isomer / Proton decay
- Low energy experiment
- Mass/Laser spectroscopy
- ……



F4靶区探测系统研制及可开展的物理研究规划





F4靶区探测系统构型

- New magic numbers
- Shell evolution
- Shape coexistence
- halos
- ……

① F4-F6谱仪：类弹产物测量

- Interaction/Fragmentation cross section
- Knockout (inclusive cross section + momentum distr.)
- Charge exchange
- ……

② CsI阵列：在束γ谱测量

- Spectroscopy of nuclei at limits → $E(2^+)$, $E(4^+)$, …
- Knockout (exclusive cross section + momentum distr.)
- Inelastic/Coulomb excitation→ B(E2)
- ……

③ CsI阵列+DSSD阵列：轻带电粒子ΔE, E, 径迹

- Quasi-free scattering
- Missing mass → unbound states
- Reaction mechanism of knockout/quasi-free/…
- ……

CsI阵列的研制

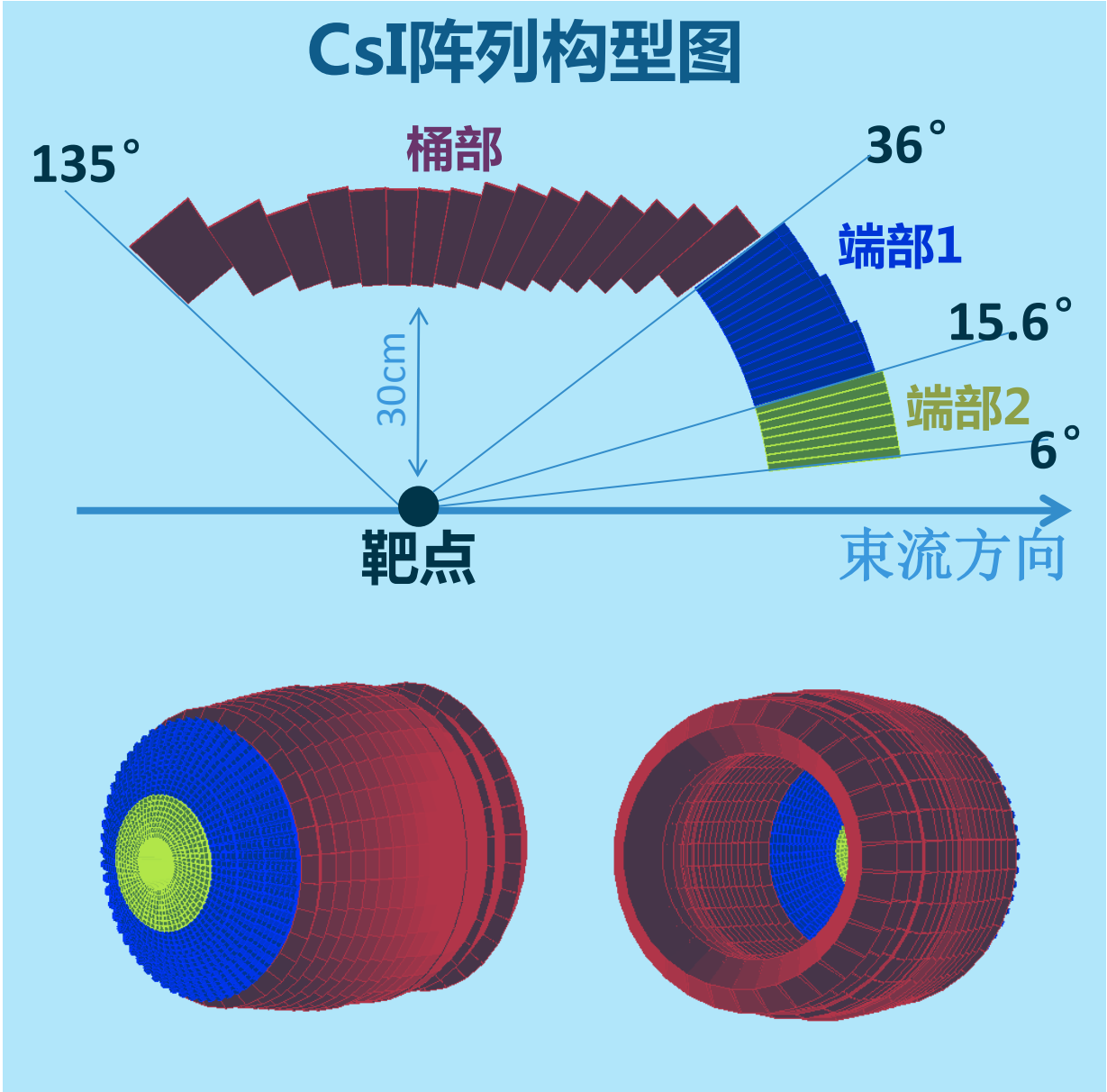
物理需求

测量高能放射性束打靶后产生的

- 在束伽马射线
- 质子等轻粒子

指标要求 (E_{beam} ~ 500MeV/u)

- γ能量分辨：~10% FWHM @1 MeV
- γ探测效率： >50% @1 MeV
- 轻粒子能量测量范围：Up to 300 MeV



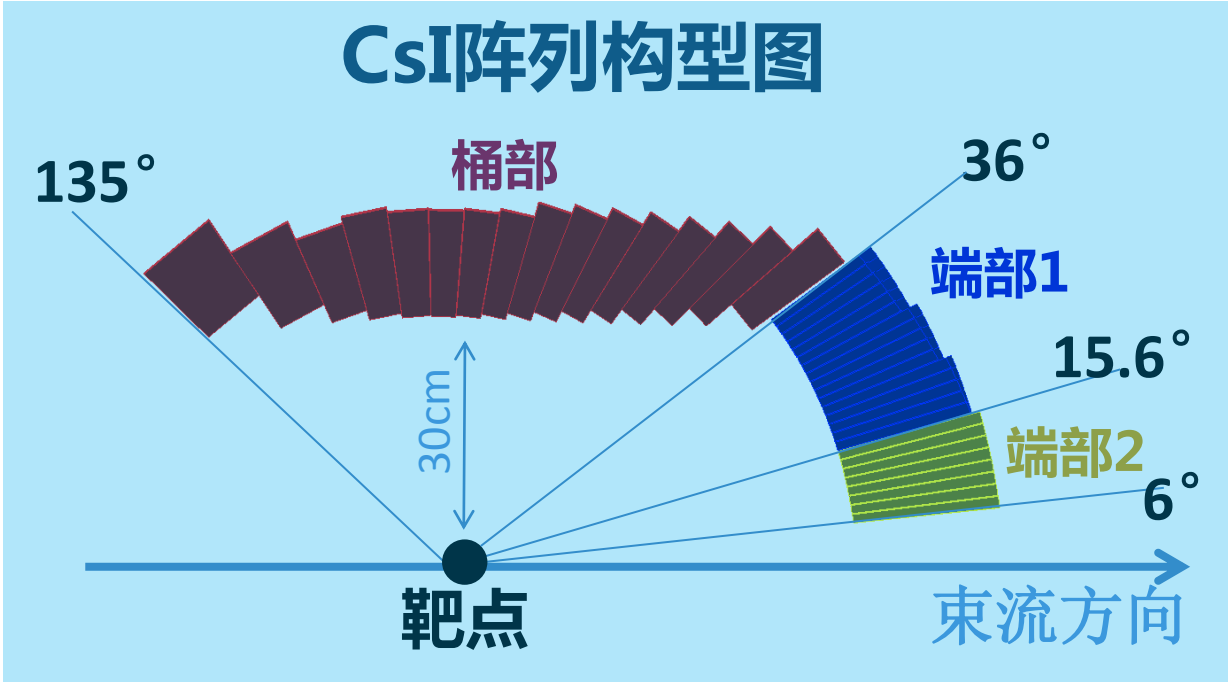
CsI阵列构型设计及模拟结果

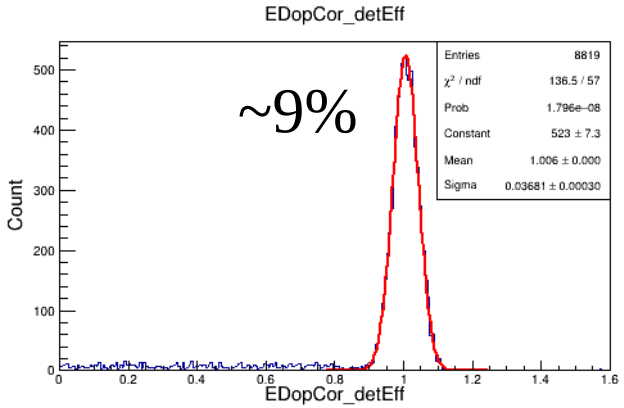
设计参数

- CsI(Tl)晶体数量：
  640(桶部)+1024(端部1)+512(端部2) = 2176
- 覆盖极角范围：6 ~135 °
- 晶体长度：110~180mm

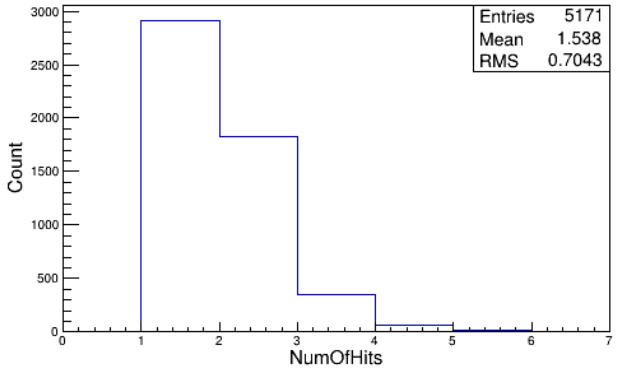
模拟结果 (E_{beam} ~ 500MeV/u)

- γ能量分辨：~9% FWHM @1 MeV
- γ全能峰探测效率：~70% @1 MeV

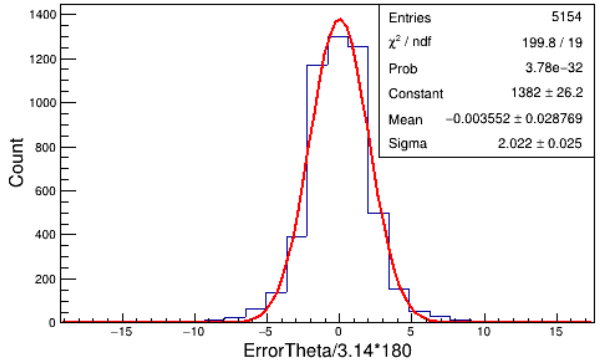




γ能谱(多普勒修正+addback)

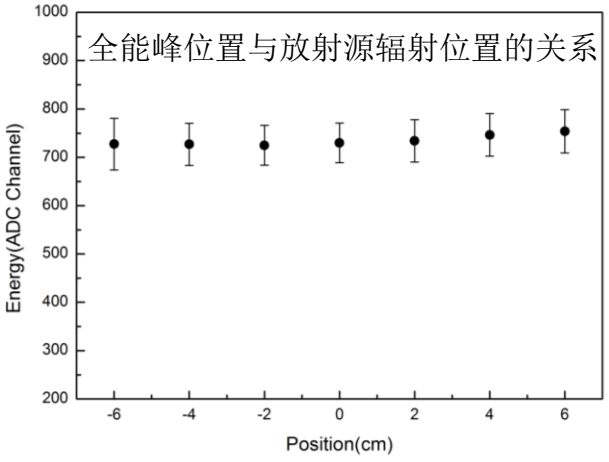


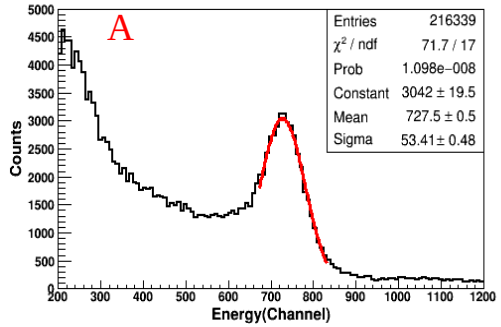
晶体点火重数分布

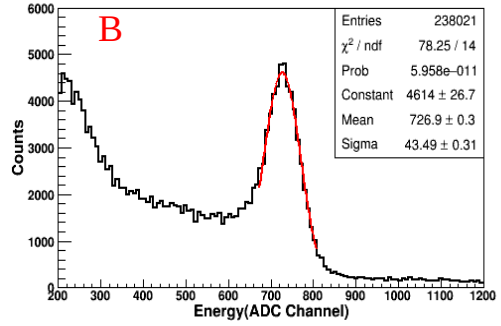


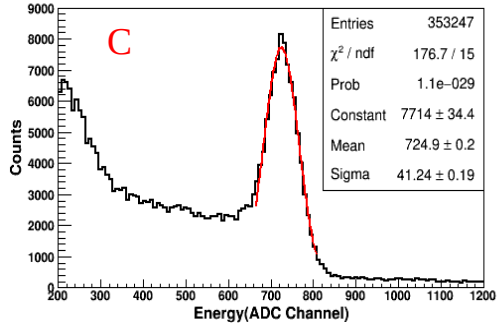
晶体点火位置分辨

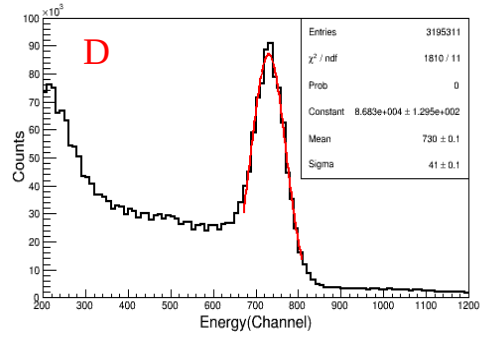
CsI晶体包装测试进行中

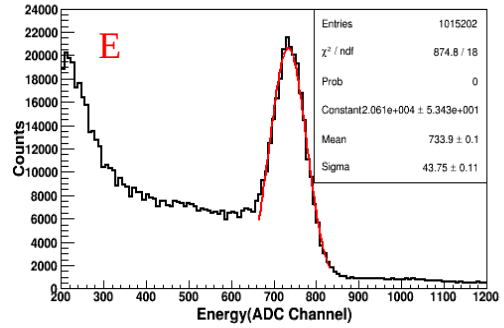


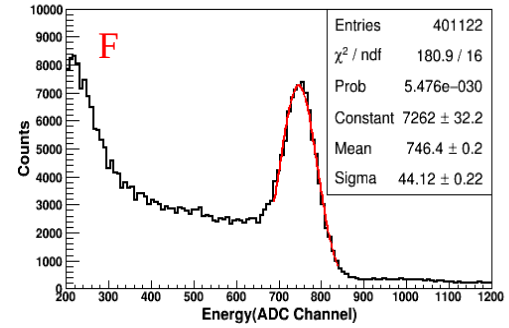












CsI阵列读出电子学研制

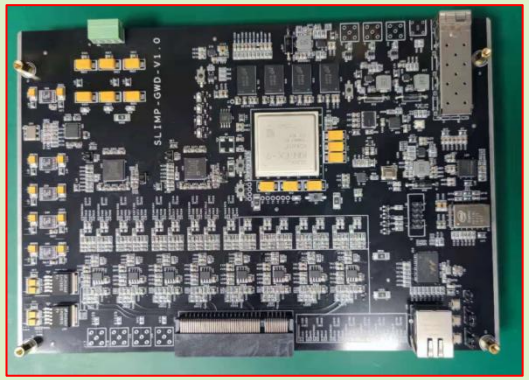
技术路线：波形数字化技术

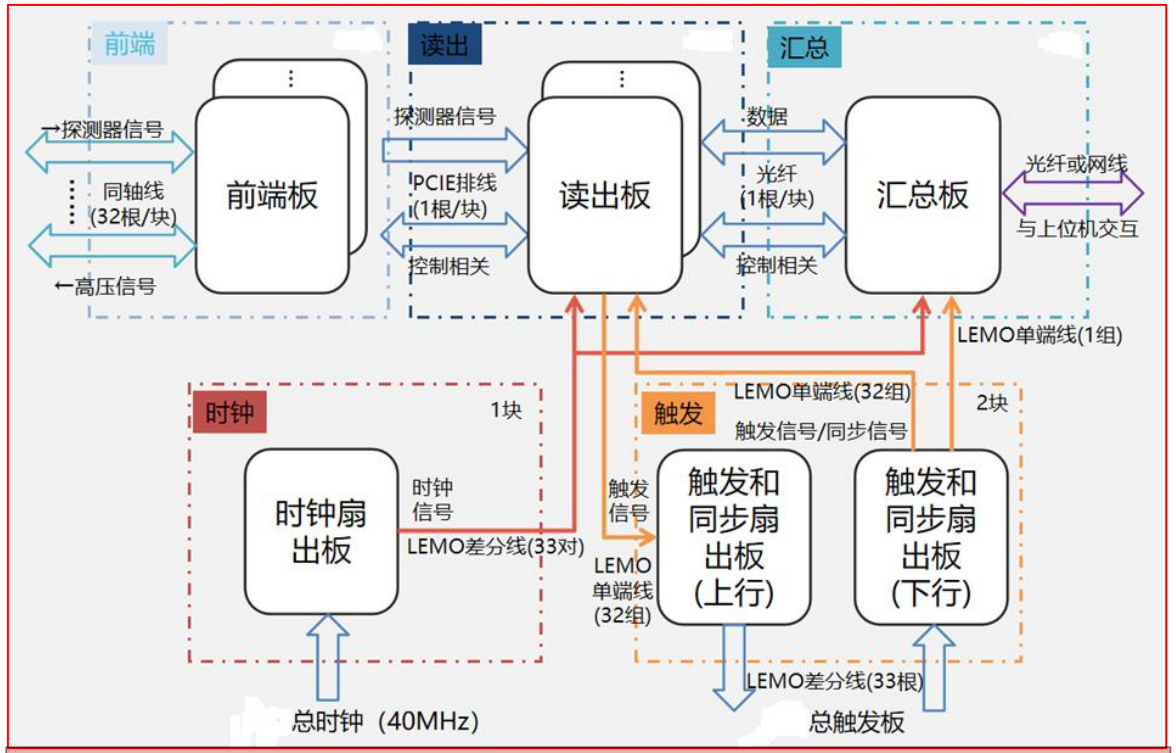
设计指标：

- ✓ 信号采集动态范围：
  100keV～10MeV / 1MeV～500MeV
- ✓ ADC精度：每通道14位
- ✓ 采样率：~50 MSPS
- ✓ 其他：FPGA内在线数字滑动平均、基线恢复、数字成形、在线粒子鉴别等算法集成

前端板实物图↑

读出板实物图→





读出电子学系统框图

已完成电子学原理样机设计、上位机控制程序编写以及关键功能测试。
正在进行电子学系统的复制与FPGA算法的优化。

提纲

一 高能放射性束特点

二 RIBLL2及其物理研究

三 HFRS及可开展的物理研究

四 总结

总结

- 强流和高能是国际上新一代In-flight型放射性束装置的共同特点。
- 位于兰州的高能放射性束流线RIBLL2可以提供数百MeV/u的放射性束流，RIBLL2外靶实验装置也已经投入物理运行，基于外靶装置首先开展了系列不稳定核的反应研究。
- 位于惠州的新一代放射性束流装置HIAF-HFRS正在兴建当中，HFRS可产生极远离稳定线的放射性束流，将为探索不稳定核中的新现象新规律提供新机遇。

谢谢大家！