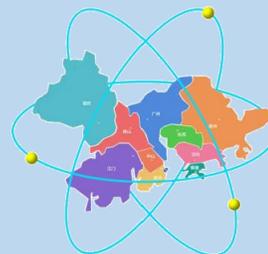


CSNS白光中子源上的核物理及核数据实验

樊瑞睿 代表 Back-n合作组

散裂中子源科学中心

中科院高能物理研究所东莞研究部

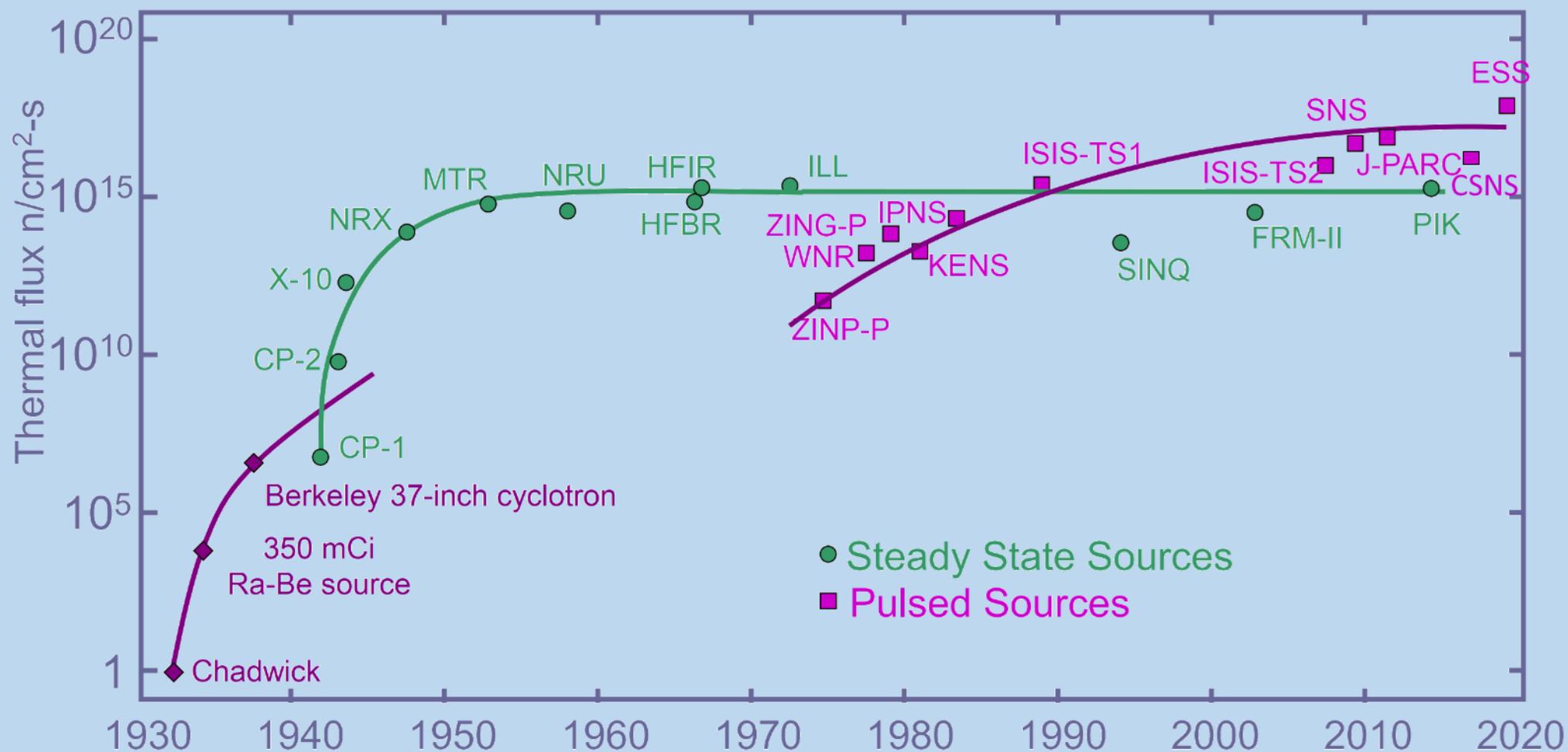


提纲



- 中国散裂中子源介绍
- 白光中子源Back-n
- Back-n上的相关物理实验

国际上中子源的发展

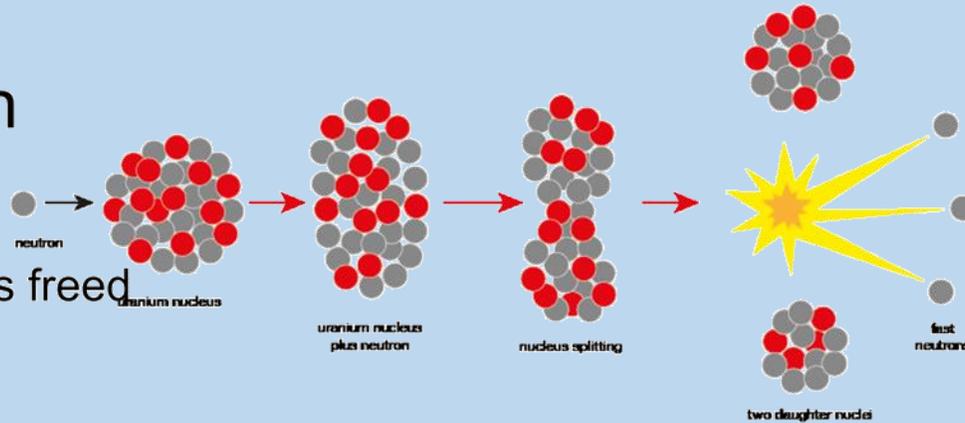


Updated from Neutron Scattering, K. Skold and D. L. Price, eds., Academic Press, 1986

反应堆与散裂中子源

Fission

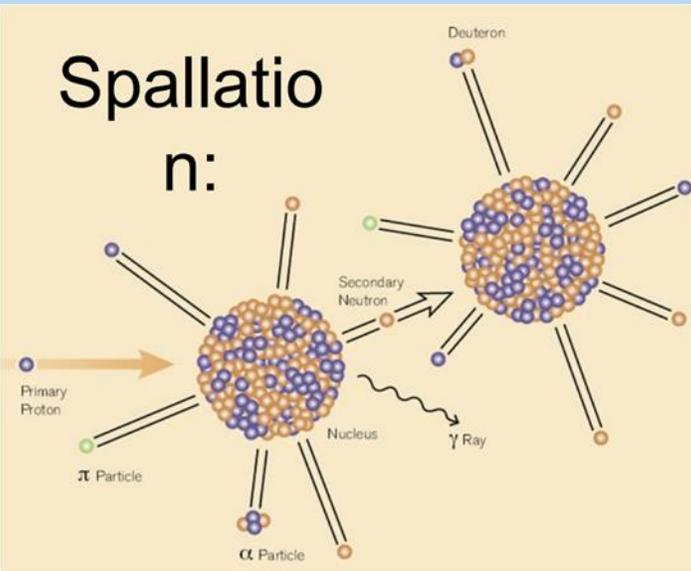
200 MeV/fission
 $2.35 - 1 = 1.35$ neutrons freed
 $\Rightarrow 150$ MeV/neutron



Fission
(continuous)
Spallation
(pulsed)

Spallation

n:

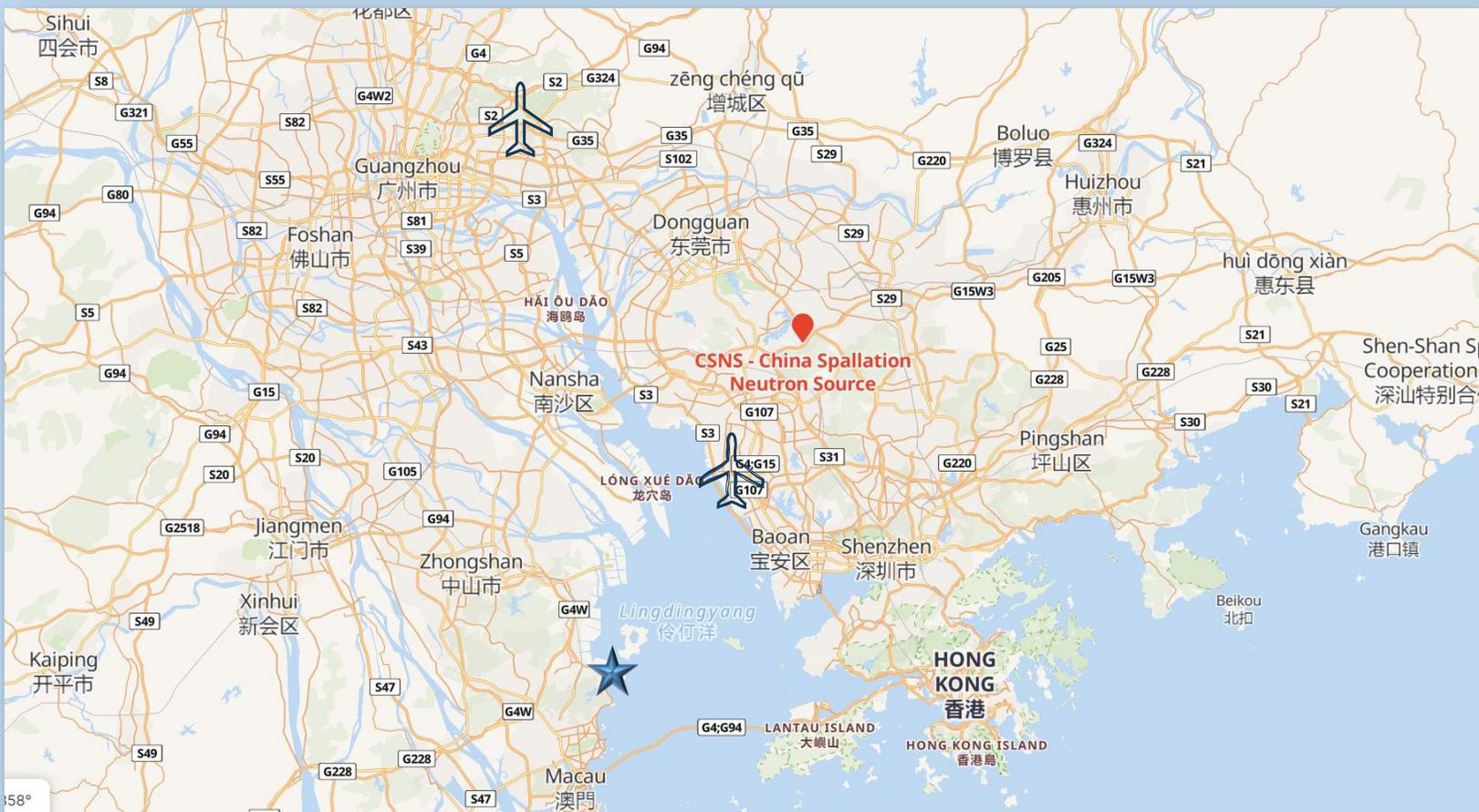


1 GeV proton in:
250 MeV becomes mass (endothermic reaction)
30 neutrons freed
 $\Rightarrow 25$ MeV/neutron

6x more neutrons per unit heat

Oxford School of Neutron Scattering
ESS Neutron Instruments Division
Oxford, 2013-09-04

散裂中子源的位置



广东省东莞市大朗镇中子源路1号，
距离深圳机场40分钟车程

May, 2009

中国散裂中子源装置地A点拍摄 (09.5.9)

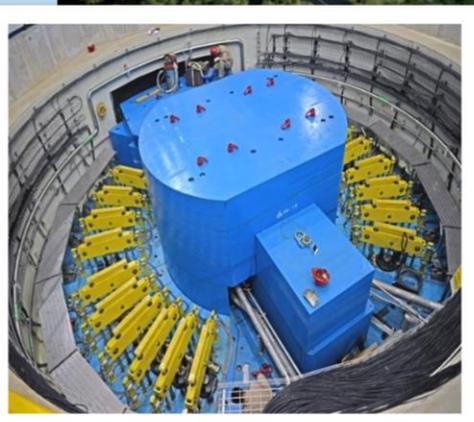
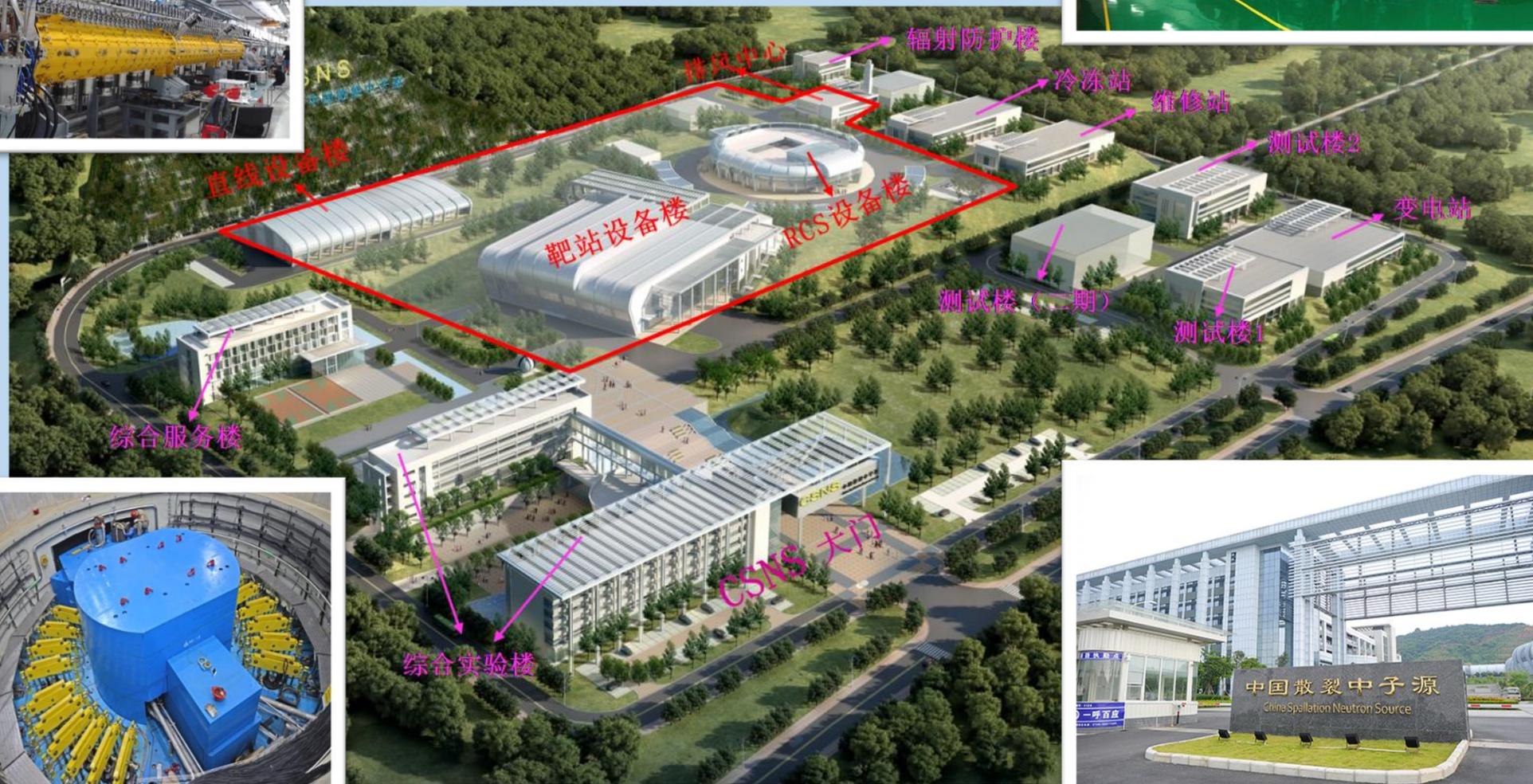
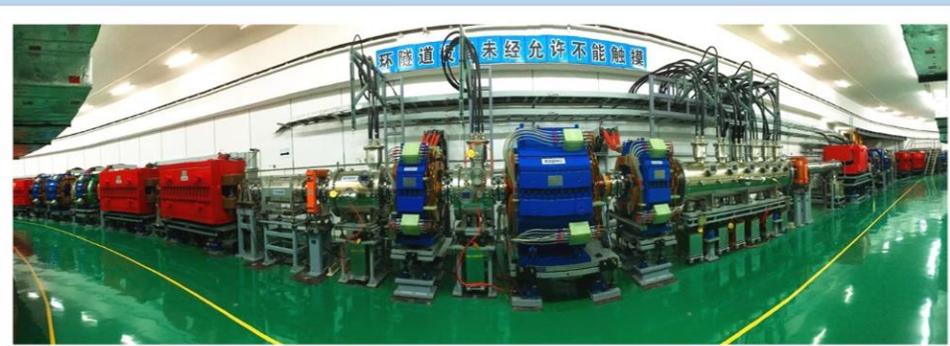


December, 2017

中国散裂中子源工程进展照片 (2017.12)



中国散裂中子源园区布局



Target and experiment hall



LINAC service building



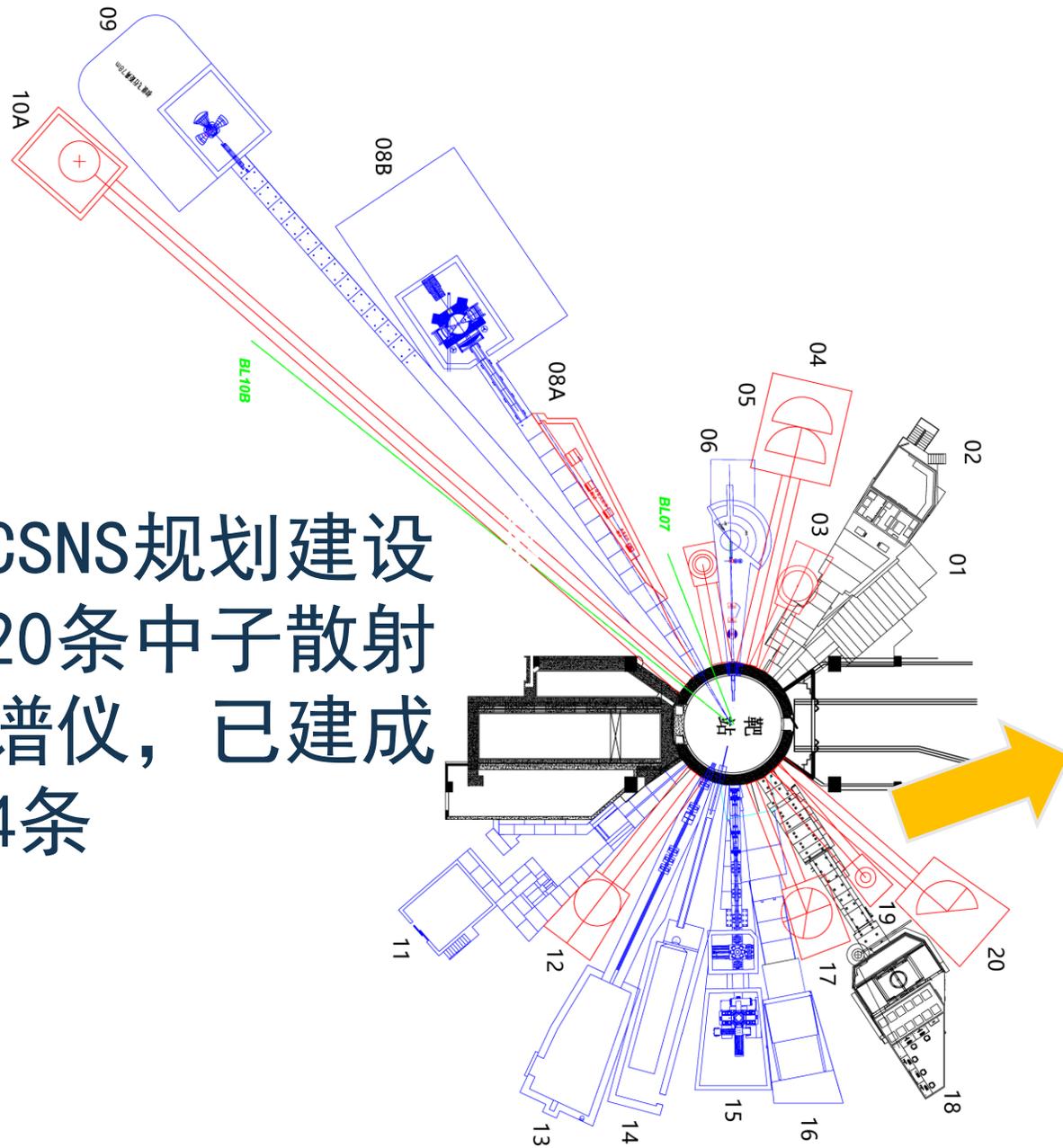
RCS service building



中子散射谱仪



CSNS规划建设
20条中子散射
谱仪，已建成
4条

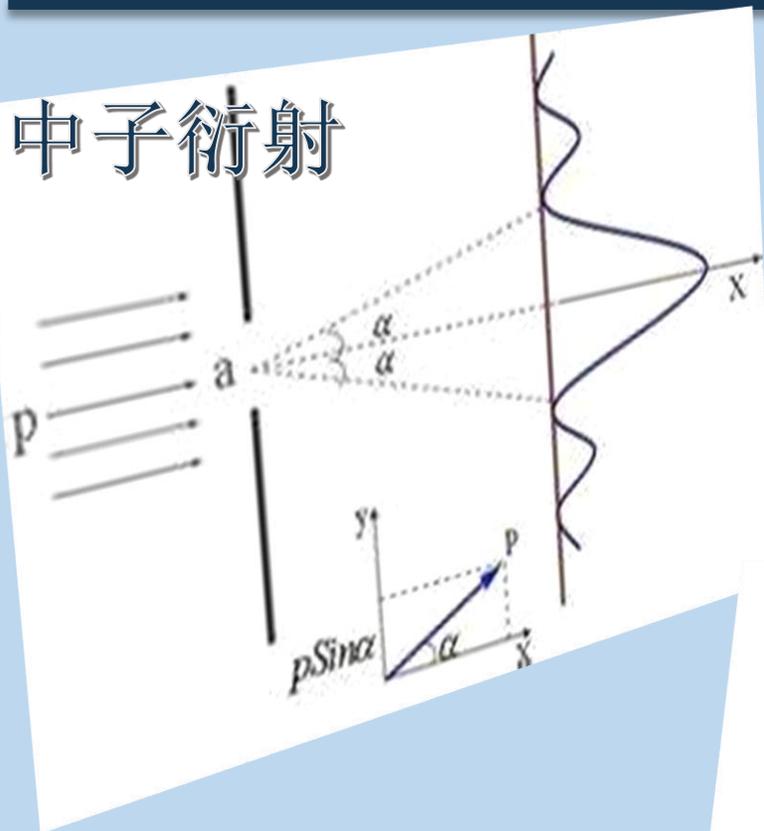


谱仪大厅照片 摄于2021/8

中子散射学科



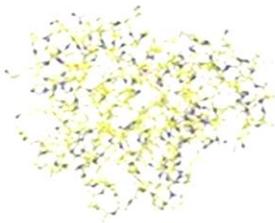
中子衍射



中子散射应用

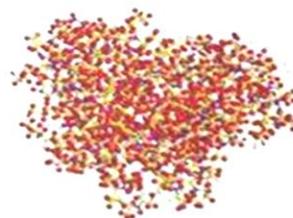
中子成像

X-ray v.s. Neutron



X-ray result

● N ● C ○ ○

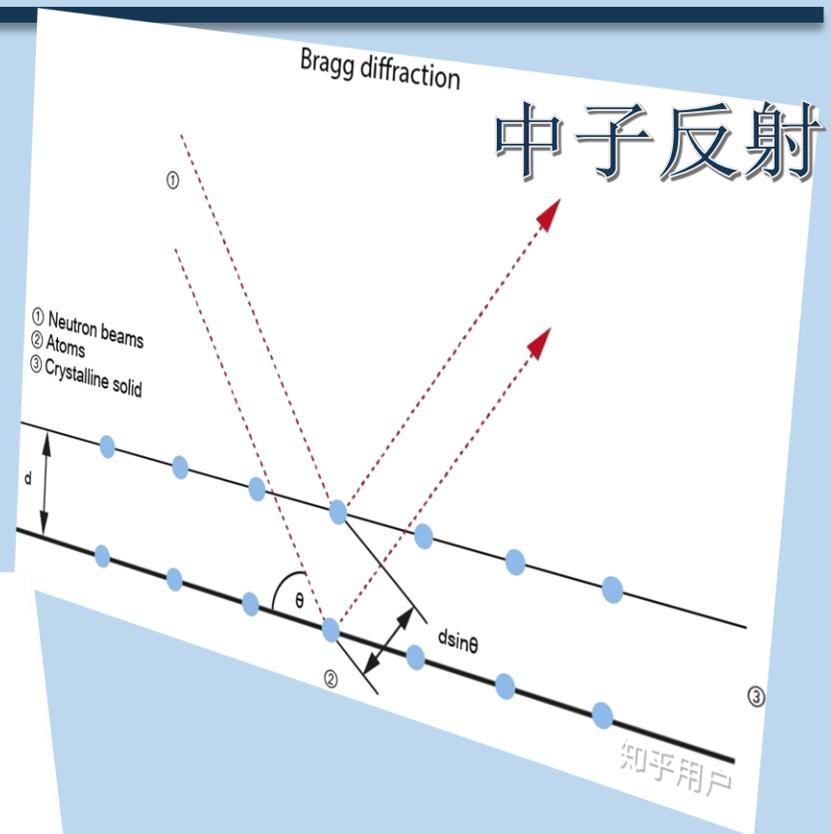


neutron result

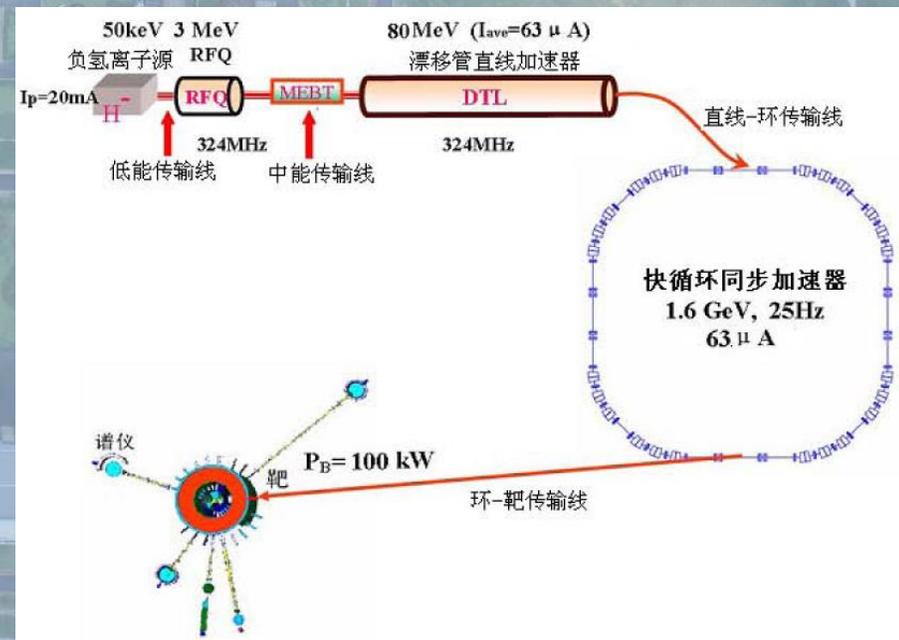
● N ● C ○ ○ ● H

Bragg diffraction

中子反射



加速器结构



Ion source

Linac 80 MeV H⁻

Irradiation beam
80 MeV proton

RCS
1.6 GeV proton

White neutron source
< 200 MeV neutron

Neutron target

test beam
1.6 GeV proton

Muon target

muon beam

束流扩展应用

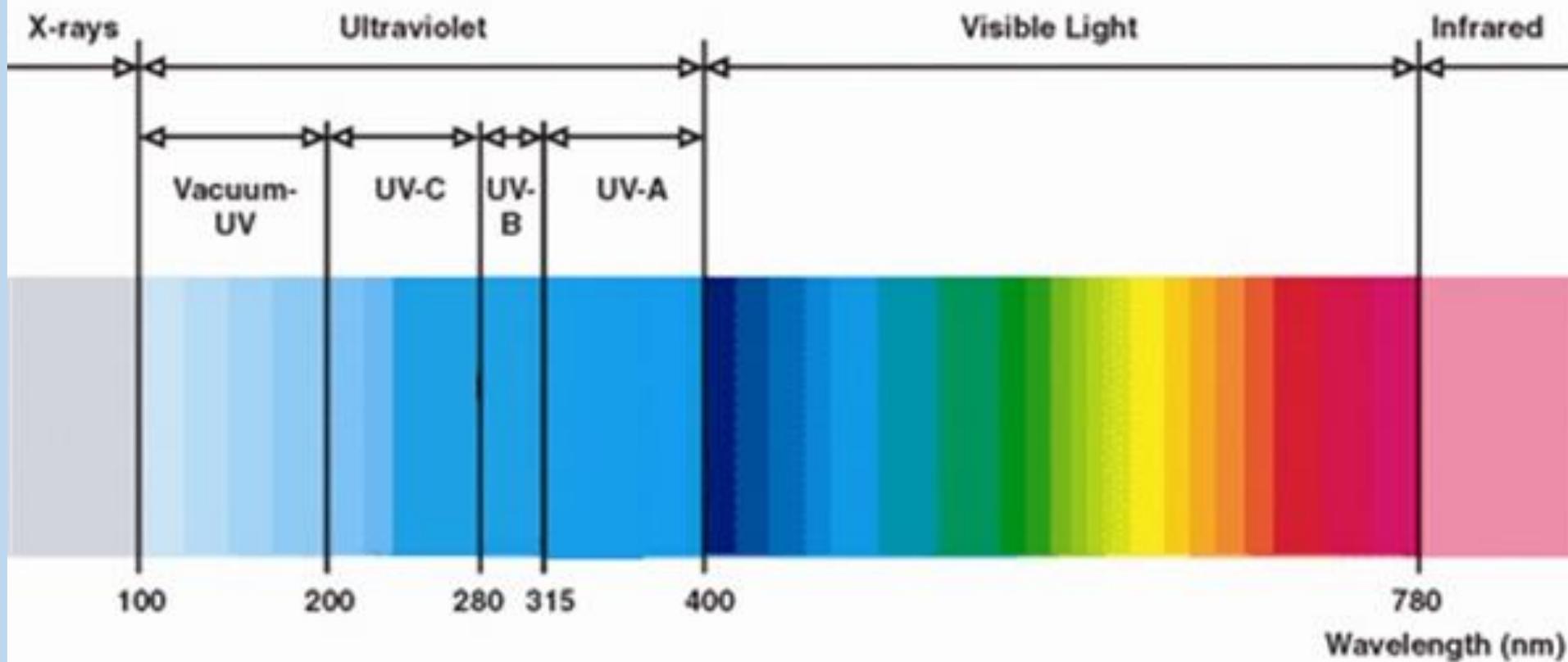
Beam parameters			
Beamline	Particle	Energy	flux
White neutron source	Neutron	0.5 eV -200 MeV	1E7 n/cm ² /s
Irradiation beam	Proton	80 MeV	1E9 p/s
Test beam	Proton	1.6 GeV	1E3 – 1E8 p/s
Muon beam	Muon	4 MeV	1E5 muon/pulse

提纲



- 中国散裂中子源介绍
- 白光中子源Back-n
- Back-n上的相关物理实验

The Electromagnetic Spectrum

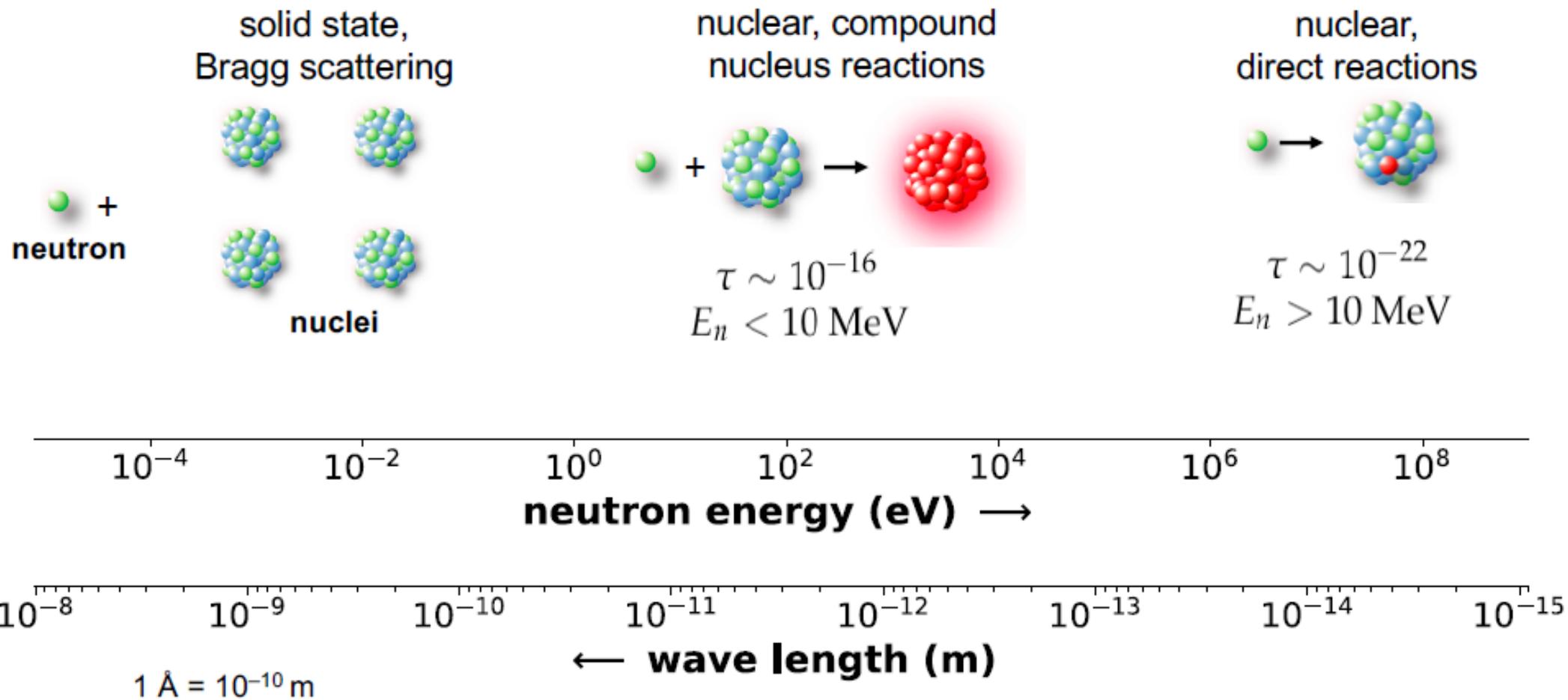


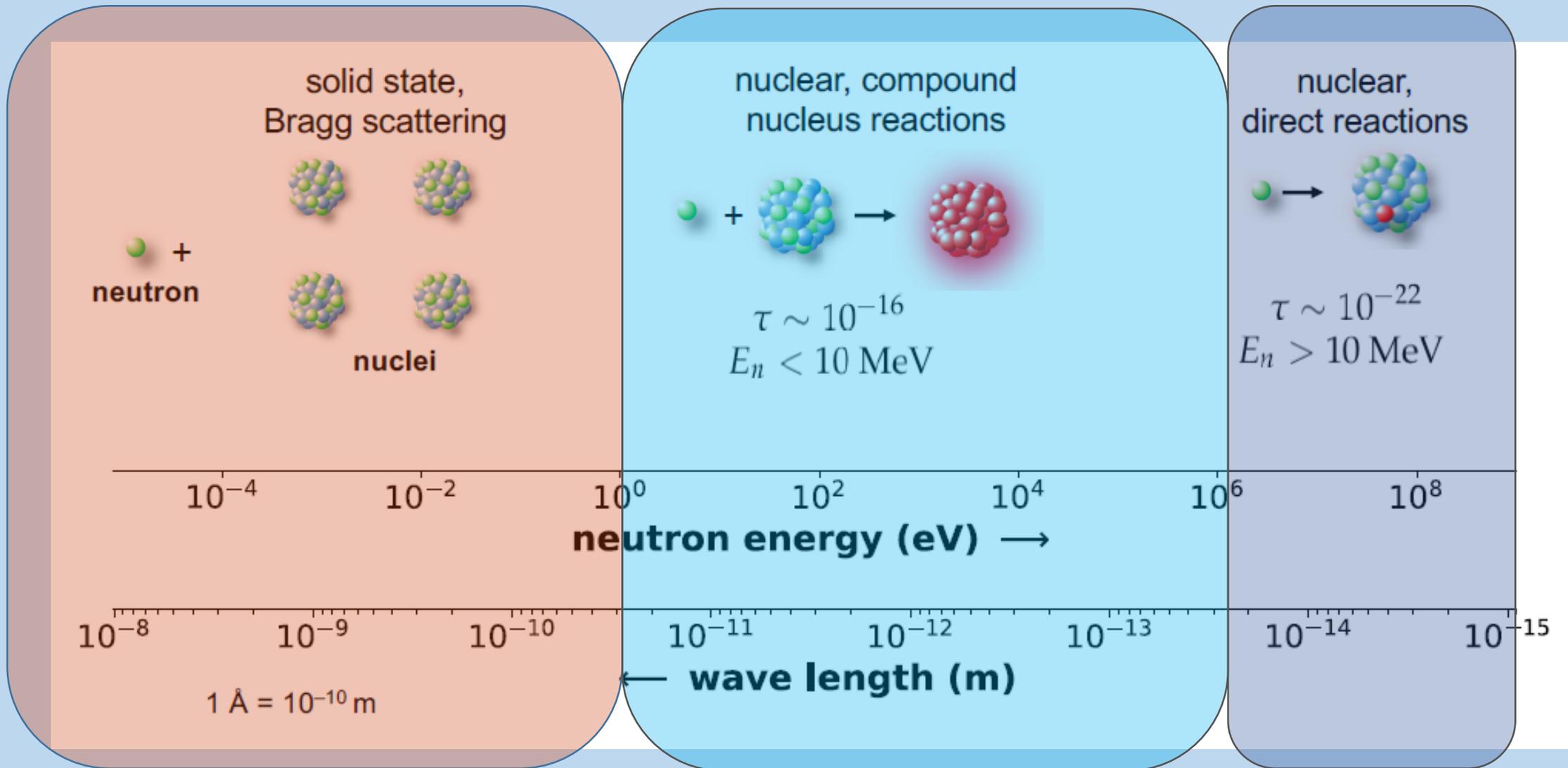
白光中子



白光中子

宽能谱中子





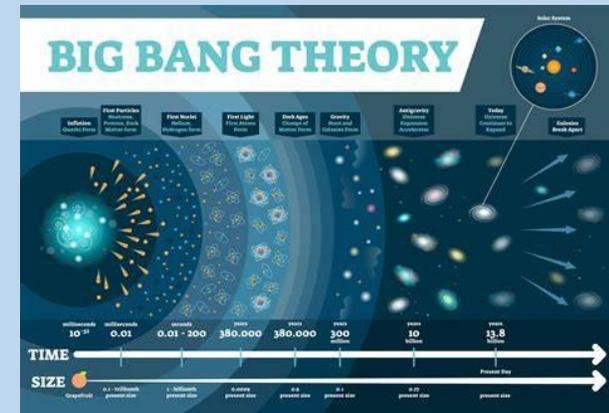
中子散射谱仪

核物理、核数据

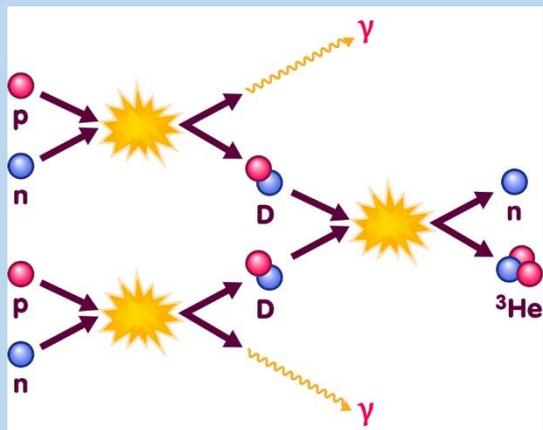
高能强子物理

什么是核数据？

- **核数据**是用于描述入射粒子（如中子、质子、伽马等）与原子核发生相互作用概率的**核反应数据**（如反应截面、弹性散射角分布、双微分截面、能谱等）及**原子核自身基本性质**，如原子核的质量、结构及发射粒子方式与强度等**核结构与放射性衰变**数据的统称。
- 核数据是核事业发展的**重要基础数据**，一切与原子核自身特性、粒子与核反应过程相关的**核科学研究、核设施建设**以及**核技术应用**都离不开核数据。
- 核数据及核反应截面研究是重要的**核相互作用的物理基础**，反映着自然界基本作用的关系。同时核数据也是核天体物理中最重要的**计算依据**和**理论基石**。

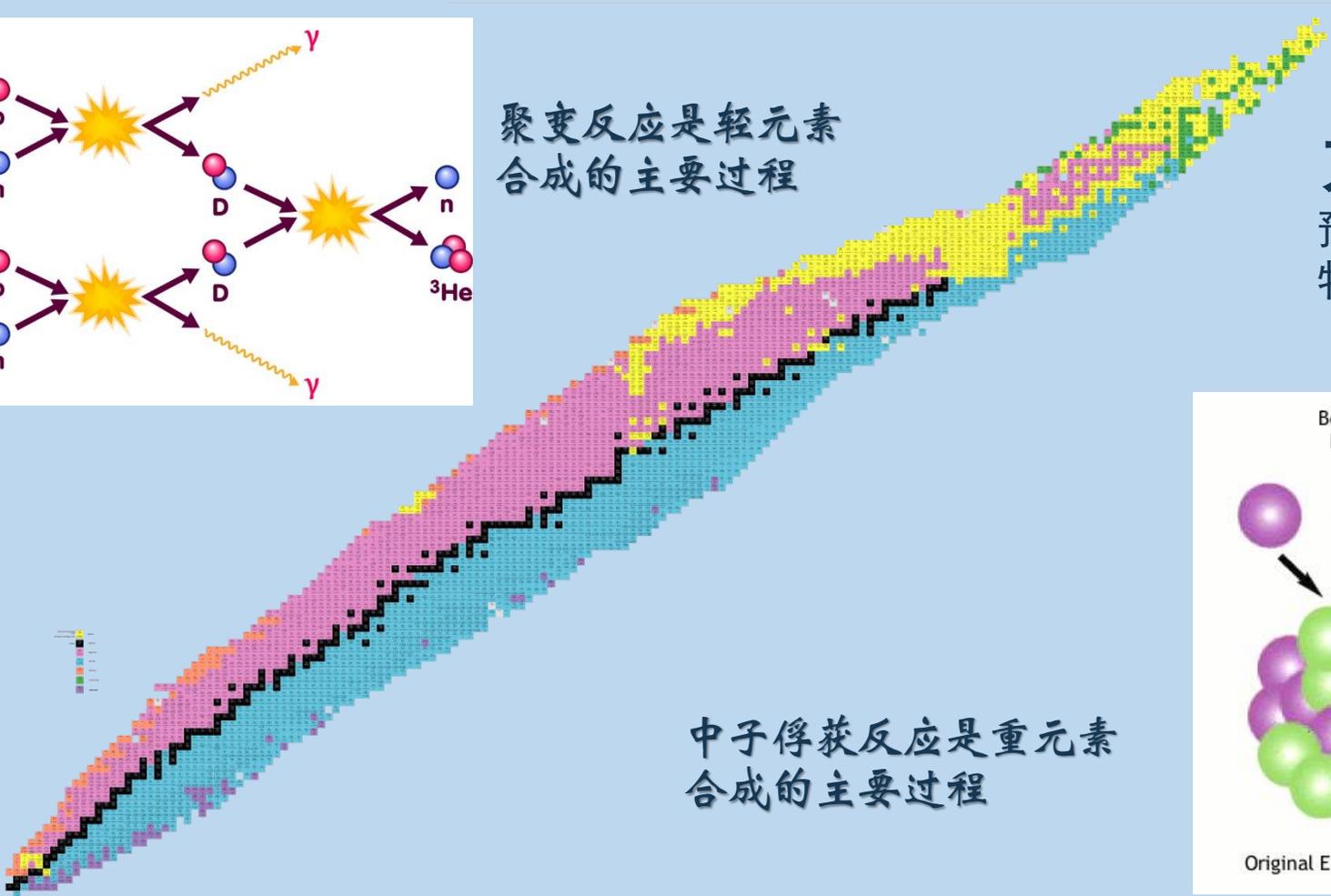


国际核数据研究方向

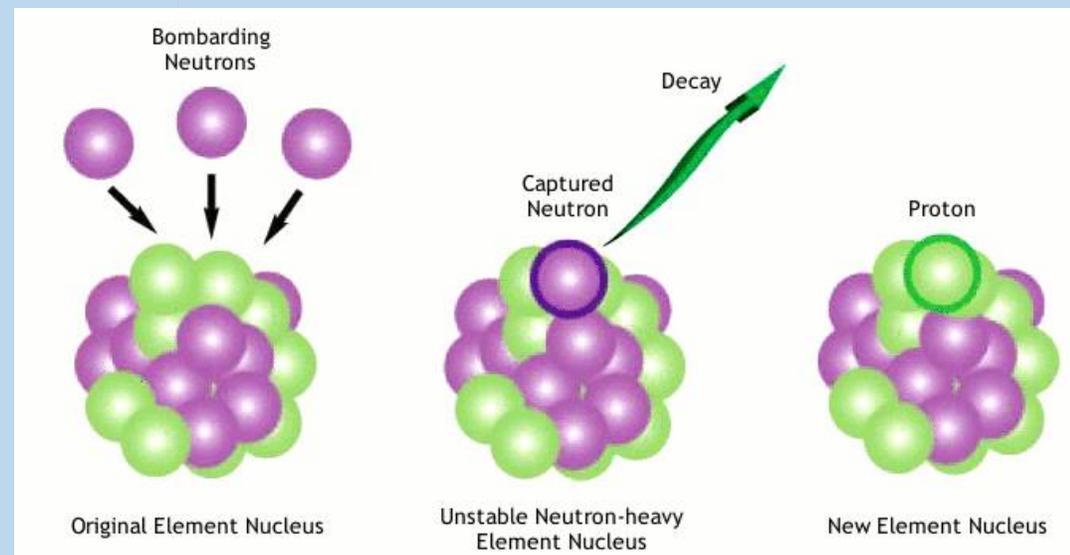


聚变反应是轻元素合成的主要过程

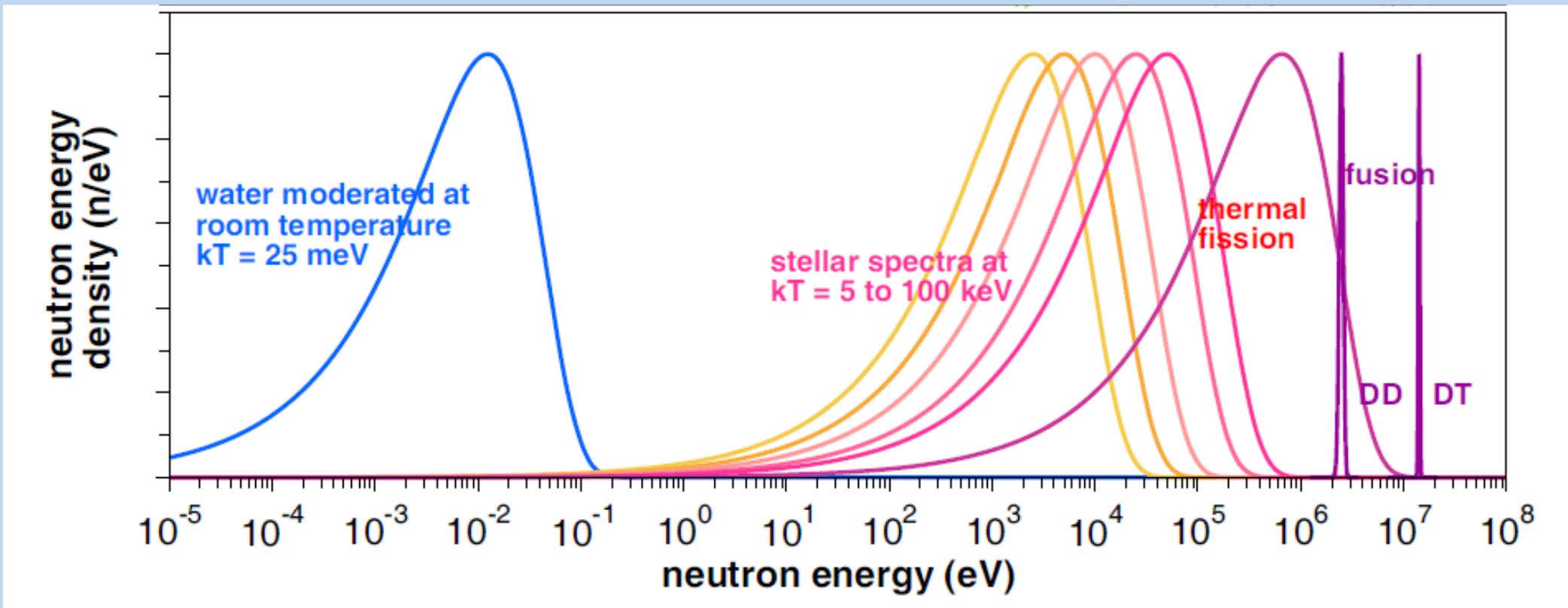
元素起源，大爆炸核合成模型成功预测了几乎所有元素的形成和丰度，是天体物理的理论基础之一。



中子俘获反应是重元素合成的主要过程



了解重核形成的过程必须了解原子核与中子的反应截面，这是核数据的主要目标之一



从0.1 eV到几十个MeV

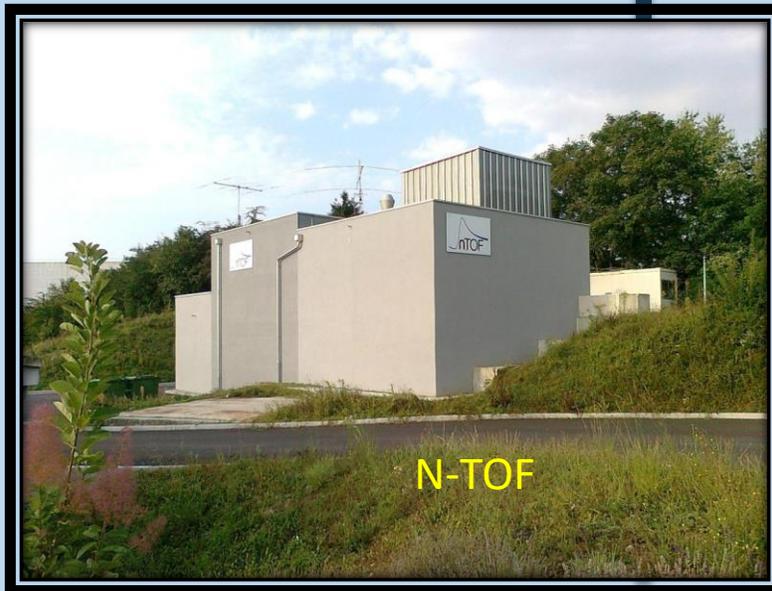
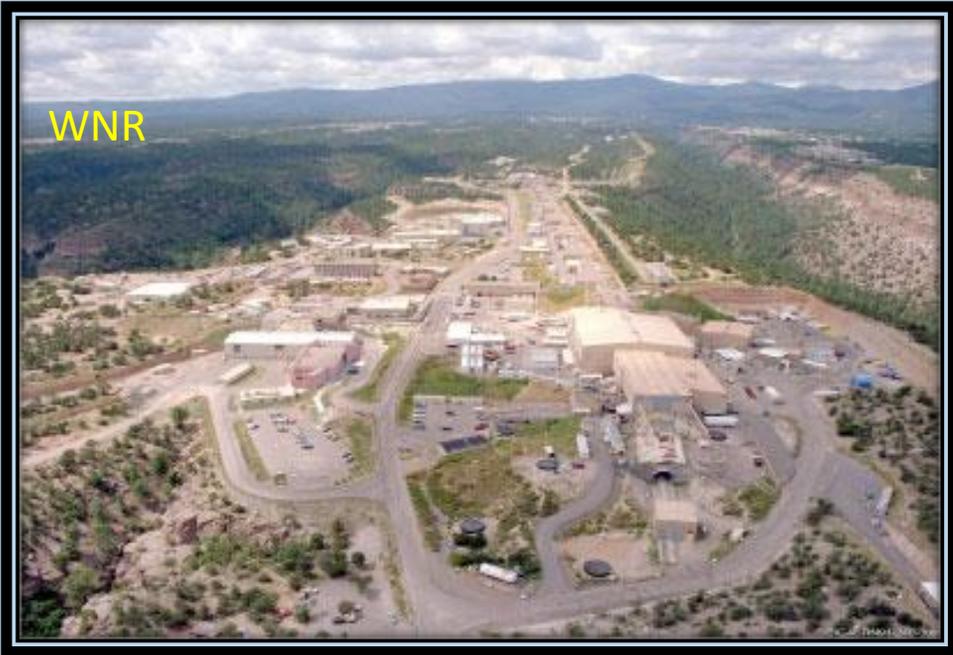
例如：4E9K恒星内部中子平均能量为：0.3MeV

世界上主要的脉冲白光中子源



- 美国
- 欧洲
- 中国

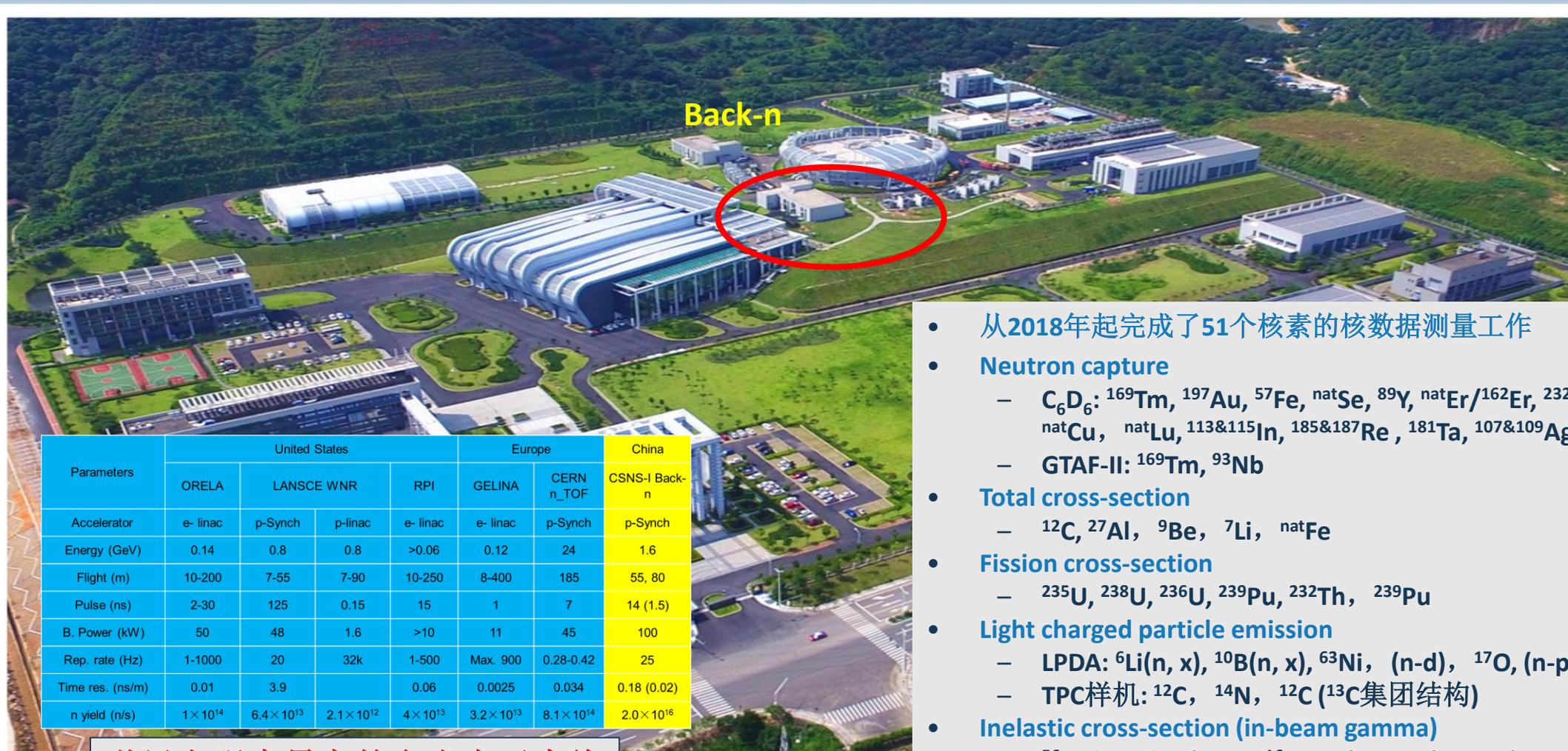
Facility	Location	particle	beam energy (MeV)	neutron target	pulse width (ns)	beam power (kW)	pulse frequency (Hz)
RPI	RPI, Troy, USA	e-	60	Ta	5	0.45	500
		e-	60	Ta	5000	>10	300
ORELA	ORNL, Oak Ridge, USA	e-	180	Ta	2-30	60	12-1000
GELINA	JRC-Geel, Belgium	e-	100	U	1	10	40-800
nELBE	FZD, Rossendorf, Germany	e-	40	L-Pb	0.01	40	500000
IREN	JINR, Dubna, Russia	e-	30	W	100	0.42	50
PNF	PAL, Pohang, Korea	e-	75	Ta	2000	0.09	12
KURRI	Kumatori Japan	e-	46	Ta	2	0.046	300
		e-	30	Ta	4000	6	100
LANSCE-MLNSC	LANL, Los Alamos, USA	p	800	W	135	800	20
LANSCE-WNR	LANL, Los Alamos, USA	p	800	W	0.2	1.44	13900
n_TOF	CERN, Geneva, Switzerland	p	20000	Pb	6	10	0.4
MLF-NNRI	J-PARC, Tokai, Japan	p	3000	Hg	1000	1000	25
ISIS	Oxfordshire, United Kingdom	p	-	W			
ESS	Lund, Sweden	p	-	W			
CSNS	Dongguan, Guangdong, China	p	1600	W		120	25
NFS	GANIL-SPIRAL2, Caen, France	d	40	Be	<0.5	2	150k-880k



世界上白光中子源外景



白光中子实验装置 (Back-n) 的位置



- 从2018年起完成了51个核素的核数据测量工作
- Neutron capture
 - C_6D_6 : ^{169}Tm , ^{197}Au , ^{57}Fe , ^{nat}Se , ^{89}Y , $^{nat}Er/^{162}Er$, ^{232}Th , ^{238}U , ^{93}Nb , ^{nat}Cu , ^{nat}Lu , $^{113\&115}In$, $^{185\&187}Re$, ^{181}Ta , $^{107\&109}Ag$, ^{165}Ho
 - GTAF-II: ^{169}Tm , ^{93}Nb
- Total cross-section
 - ^{12}C , ^{27}Al , 9Be , 7Li , ^{nat}Fe
- Fission cross-section
 - ^{235}U , ^{238}U , ^{236}U , ^{239}Pu , ^{232}Th , ^{239}Pu
- Light charged particle emission
 - LPDA: $^6Li(n, x)$, $^{10}B(n, x)$, ^{63}Ni , $(n-d)$, ^{17}O , $(n-p)$ 弹散
 - TPC样机: ^{12}C , ^{14}N , ^{12}C (^{13}C 集团结构)
- Inelastic cross-section (in-beam gamma)
 - $^{56}Fe(n, n')$, ^{nat}Mo , ^{16}O , ^{nat}Ru , ^{nat}Lu , ^{nat}Mo , ^{nat}Ti , ^{209}Bi , ^{90}Zr , ^{55}Cr , ^{155}Eu , ^{178}Hf , ^{232}Th

Parameters	United States			Europe		China	
	ORELA	LANSCE WNR		RPI	GELINA	CERN n_TOF	CSNS-I Back-n
Accelerator	e- linac	p-Synch	p-linac	e- linac	e- linac	p-Synch	p-Synch
Energy (GeV)	0.14	0.8	0.8	>0.06	0.12	24	1.6
Flight (m)	10-200	7-55	7-90	10-250	8-400	185	55, 80
Pulse (ns)	2-30	125	0.15	15	1	7	14 (1.5)
B. Power (kW)	50	48	1.6	>10	11	45	100
Rep. rate (Hz)	1-1000	20	32k	1-500	Max. 900	0.28-0.42	25
Time res. (ns/m)	0.01	3.9		0.06	0.0025	0.034	0.18 (0.02)
n yield (n/s)	1×10^{14}	6.4×10^{13}	2.1×10^{12}	4×10^{13}	3.2×10^{13}	8.1×10^{14}	2.0×10^{16}

世界上强度最高的白光中子束线

合作组成员

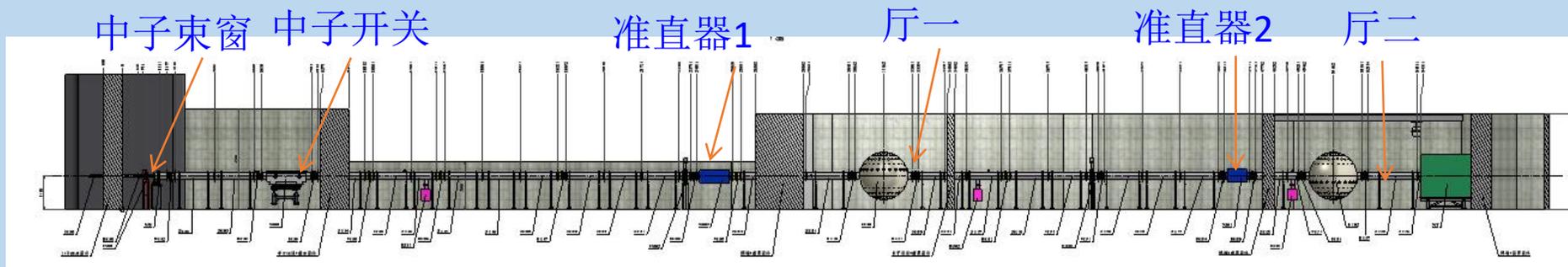


- 中国科学院高能所
- 中国原子能科学研究院
- 中国工程物理研究院二所
- 西北核技术研究所
- 中国科学技术大学
- 北京大学
- 北京航空航天大学
- 西安交通大学
-

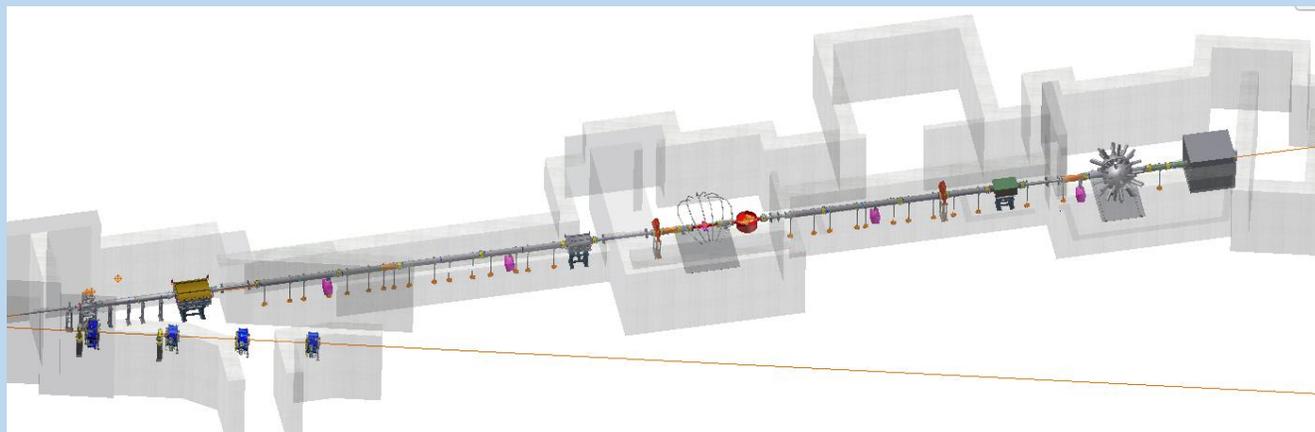
目前Back-n文章作者清单中共90人，来自13家单位



反角中子终端3D布局图



Back-n束线剖面



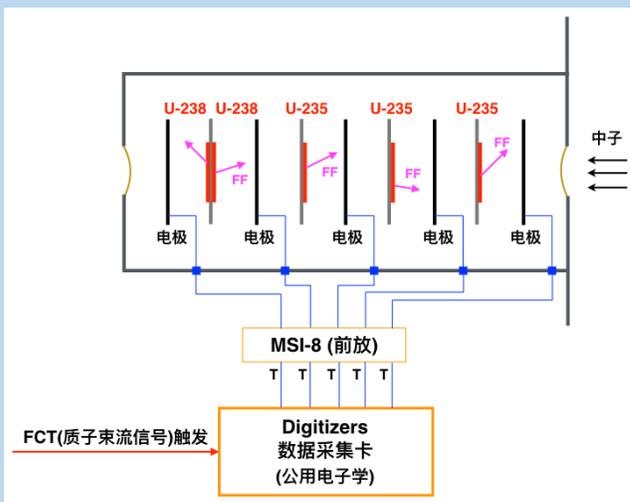
Back-n束线俯视图

Back-n不同准直器模式下的流强

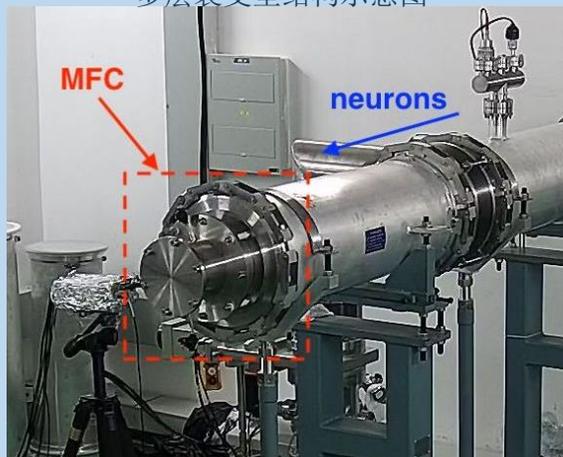
Shutter (mm)	Coll#1 (mm)	Coll#2 (mm)	ES#1 spot (mm)	ES#1 flux (n/cm ² /s)	ES#2 spot (mm)	ES#2 flux (n/cm ² /s)
Φ3	Φ15	Φ40	Φ15	1.27E5	Φ20	4.58E4
Φ12	Φ15	Φ40	Φ20	2.20E6	Φ30	7.81E5
Φ50	Φ50	Φ58	Φ50	4.33E7	Φ60	1.36E7
78×62	76×76	90×90	75×50	5.98E7	90×90	2.18E7

*对应100kW束流功率下

Back-n 能谱和注量测量实验

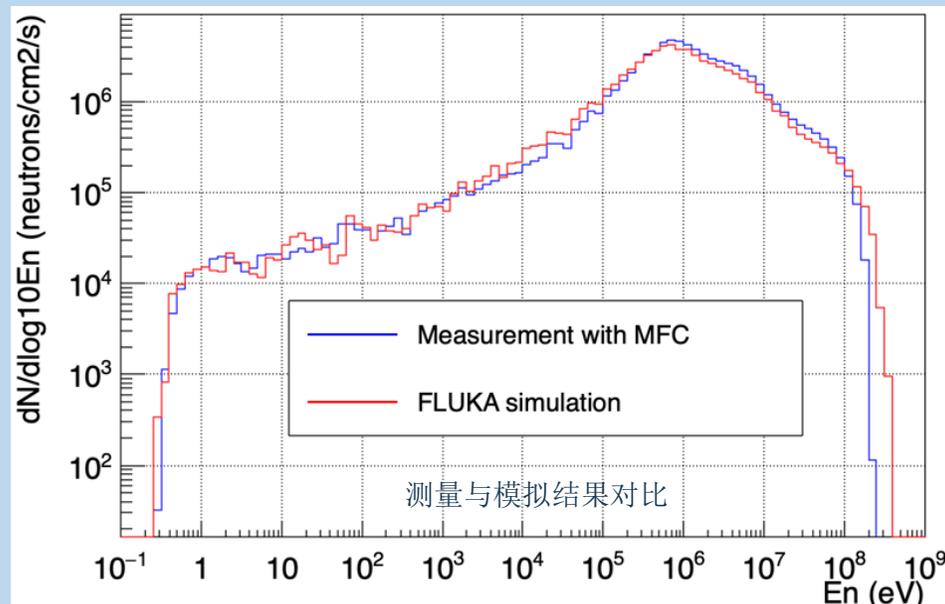


多层裂变室结构示意图



多层裂变室照片

- 使用多层裂变室(multi-layer fission chamber, MFC)测量
- 使用质量精确已知的²³⁵U薄片样品作为中子转换层



WNS Back-n厅2(#ES2)能谱/注量

- #ES2飞行距离: ~76米
- 结果归一到100 kW打靶功率

中子能量范围	通量 (neutrons/cm ² /s)
0.1-1 eV	4.08×10^3
1-10 eV	1.79×10^4
10-100 eV	3.01×10^4
0.1-1 keV	5.01×10^4
1-10 keV	1.23×10^5
10-100 keV	4.30×10^5
0.1-1 MeV	2.98×10^6
1-10 MeV	2.77×10^6
10-200 MeV	6.21×10^5
Total	7.03×10^6

提纲

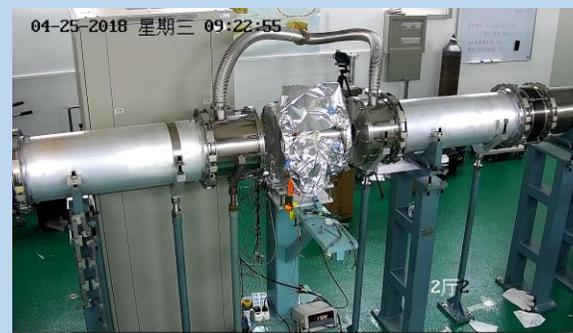


- 中国散裂中子源介绍
- 白光中子源Back-n
- Back-n上的相关物理实验

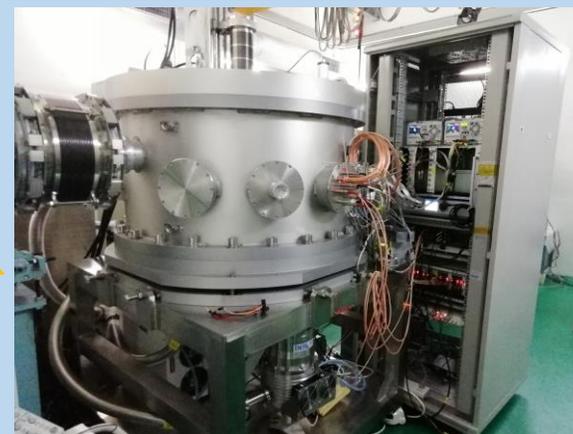
核数据测量实验



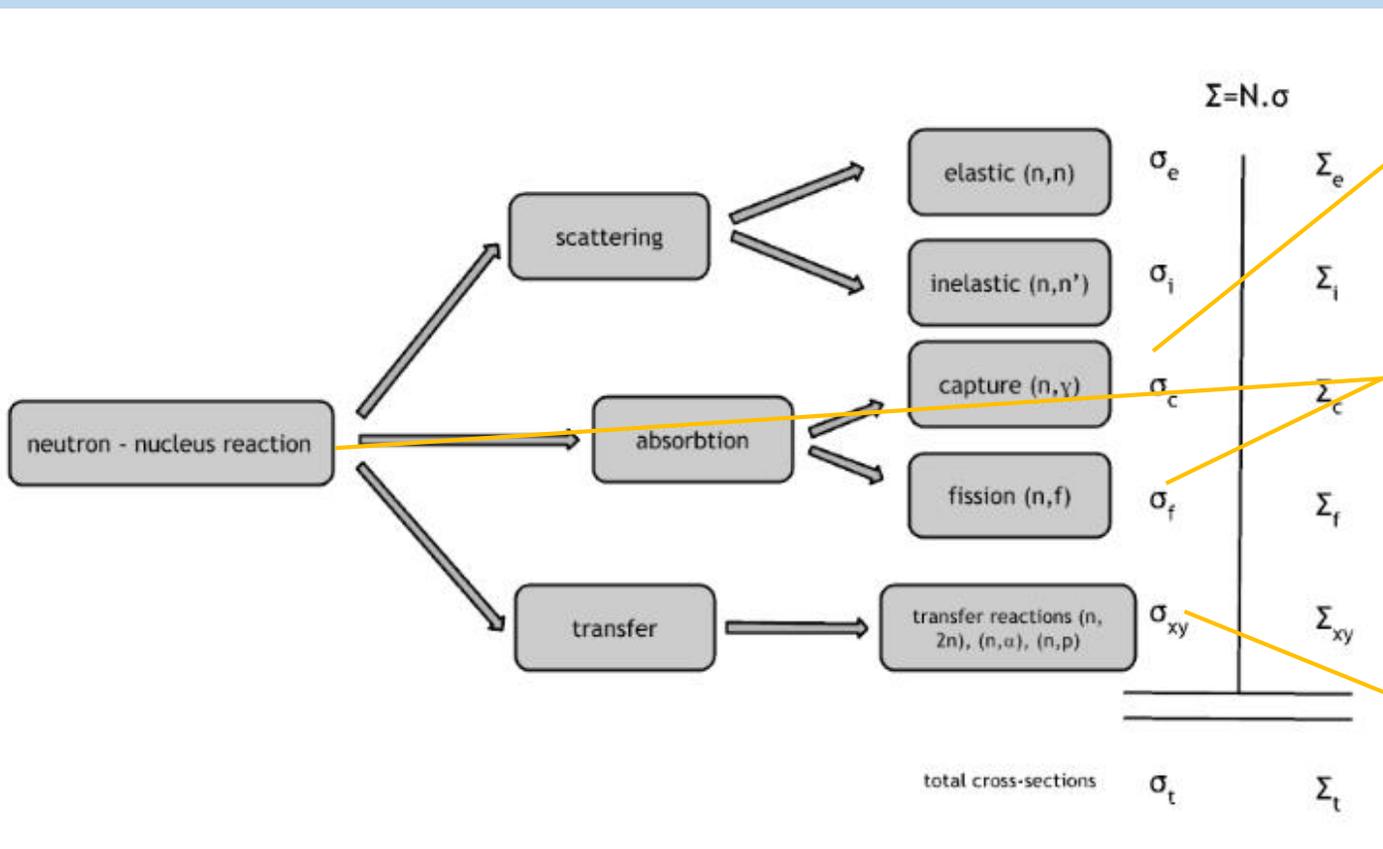
C6D6探测器及实验照片



裂变截面、全截面测量探测器及实验照片

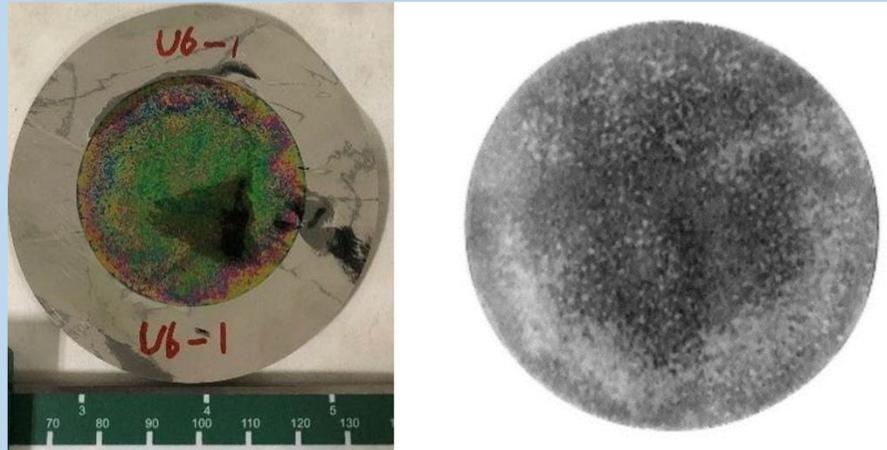


带电粒子探测器及实验照片

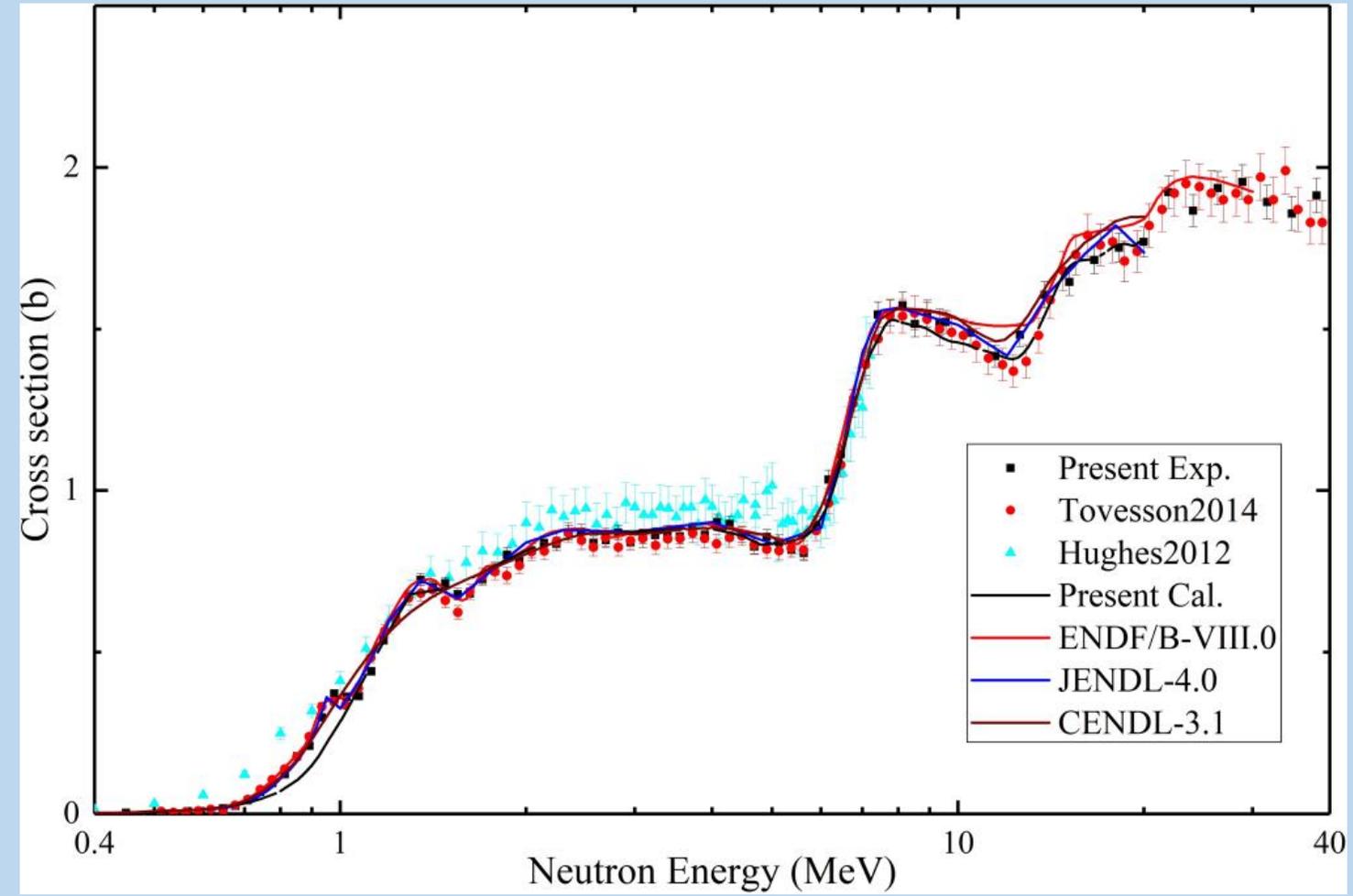
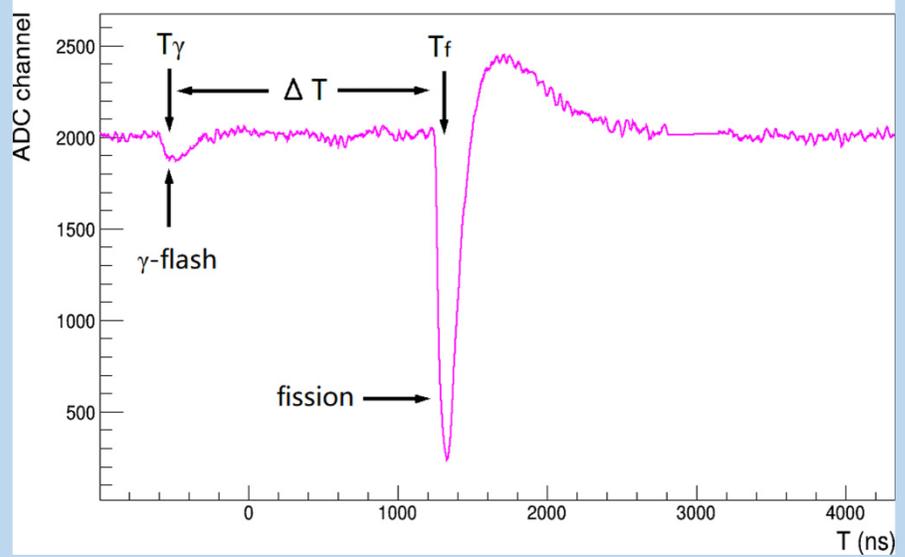


目前开展的项目包括：俘获截面测量 (n, γ)；裂变截面及全截面测量 (n, f)；带电粒子测量 (n, x)；非弹性散射测量 (n, γ) 等。

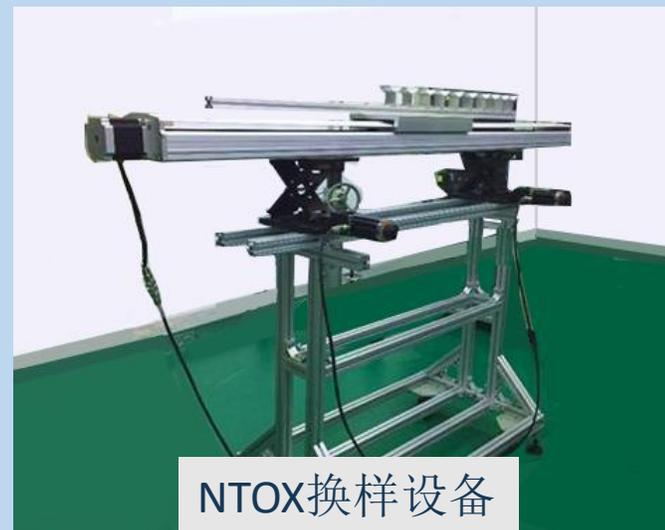
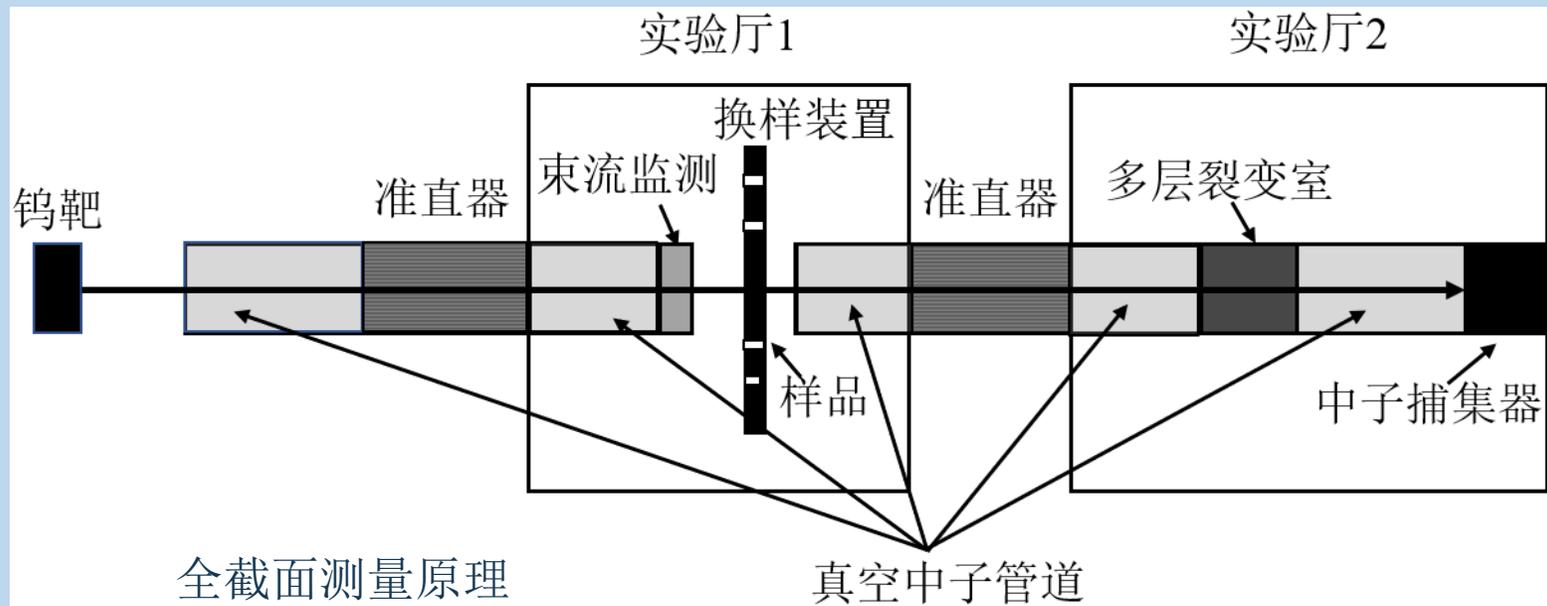
U236裂变截面测量



T signal (RunNumber: 10787, EventNumber: 11, Channel: 51)

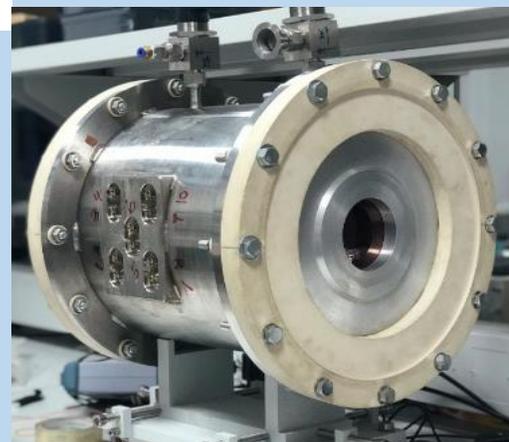


全截面/裂变截面测量谱仪-NTOX



根据全截面理论公式，用同一探测器，只需要测得有样和无样的中子穿透率之比，就能计算得到全截面。因此测量过程简单，测量精度是所有截面测量中最高的。

$$\sigma_t = \frac{1}{nt} \ln \frac{1}{T}$$

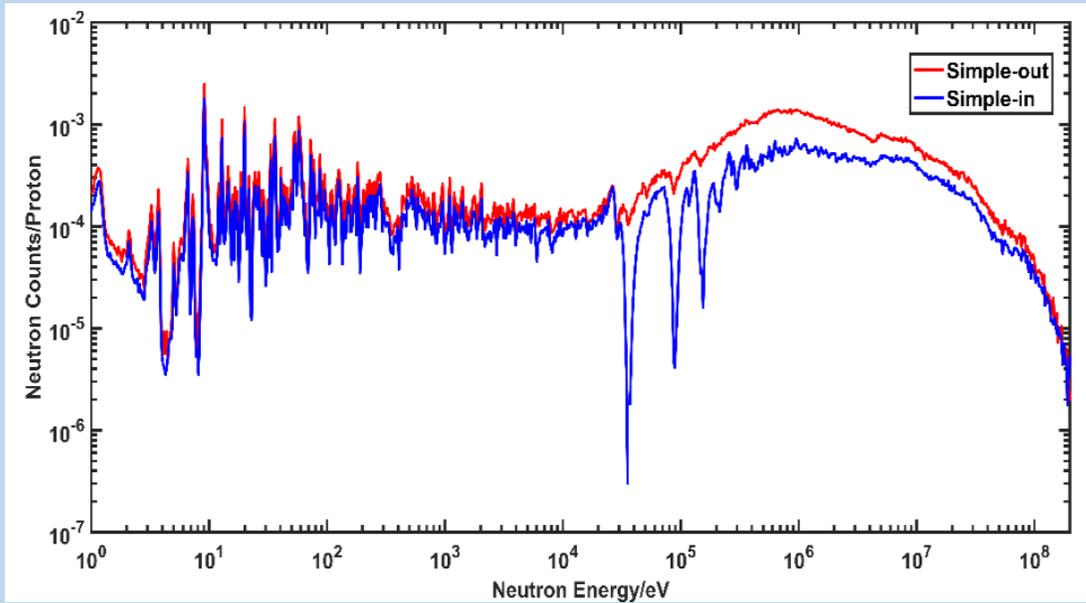


- 样机内装：
- 高纯U235镀片*3层
 - 高纯U238镀片*3层
 - 高纯U236镀片*1层
 - 纯底衬片*1层

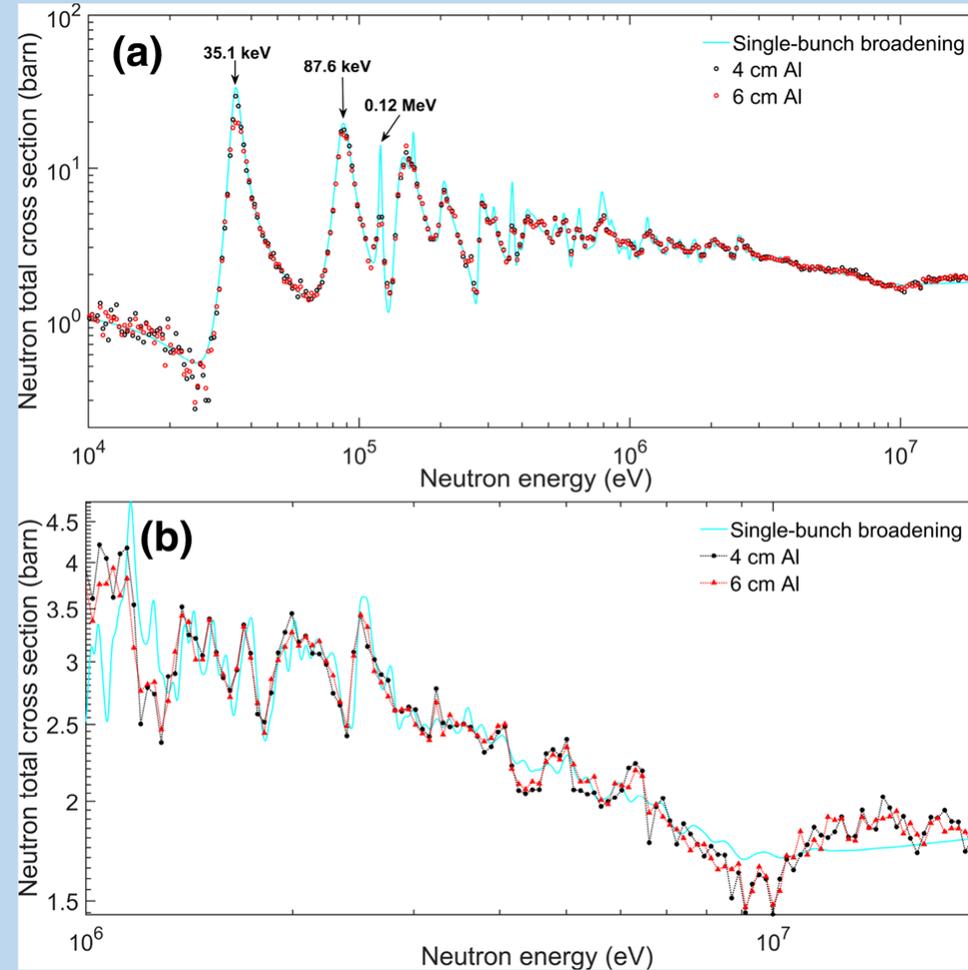
NTOX裂变室

铝实验/U235裂变室

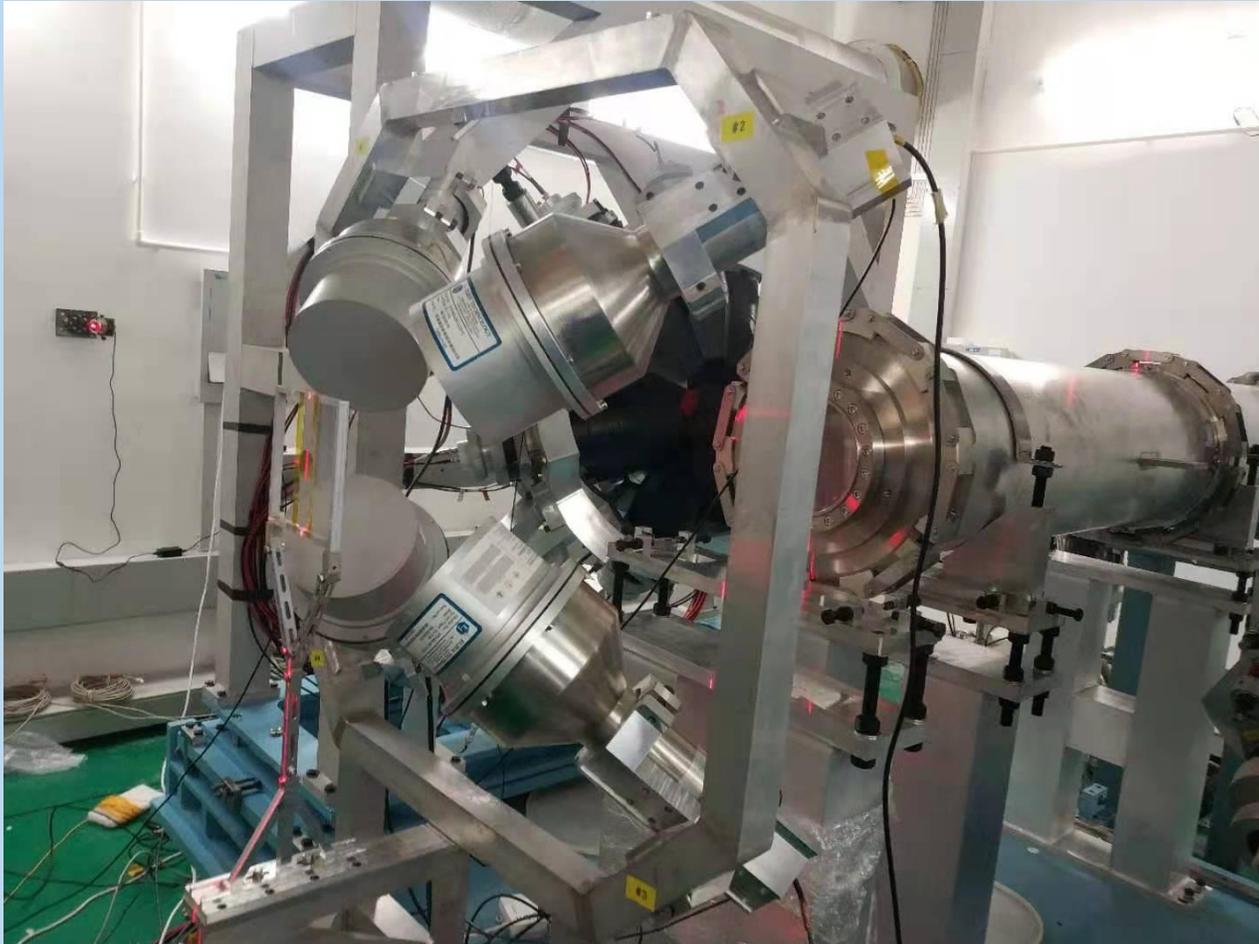
- 全截面实验与核数据库对比



无样品/有样品时U5裂变室中子能谱

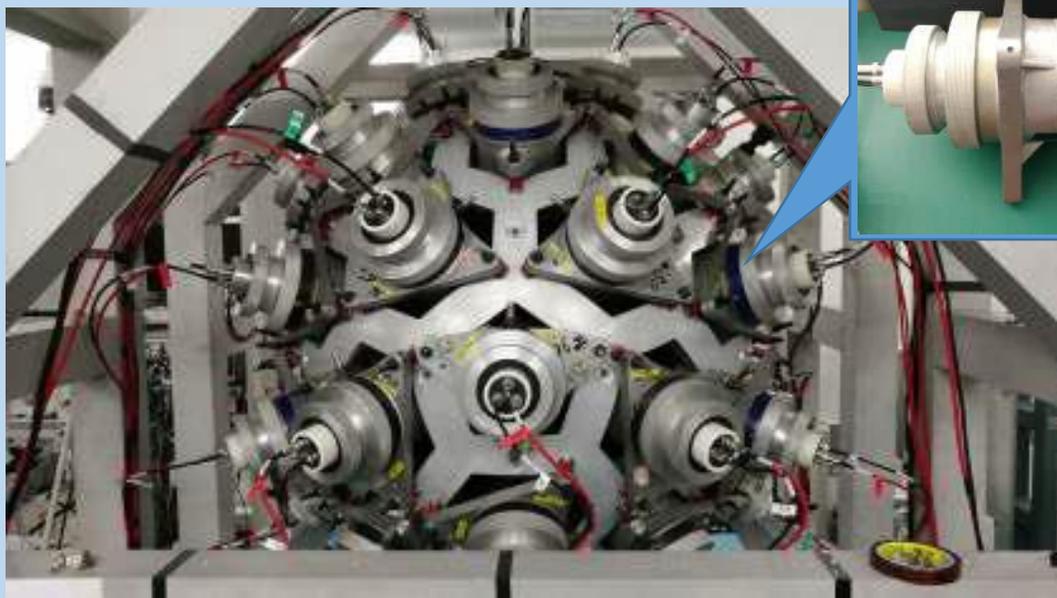


天体物理方向研究

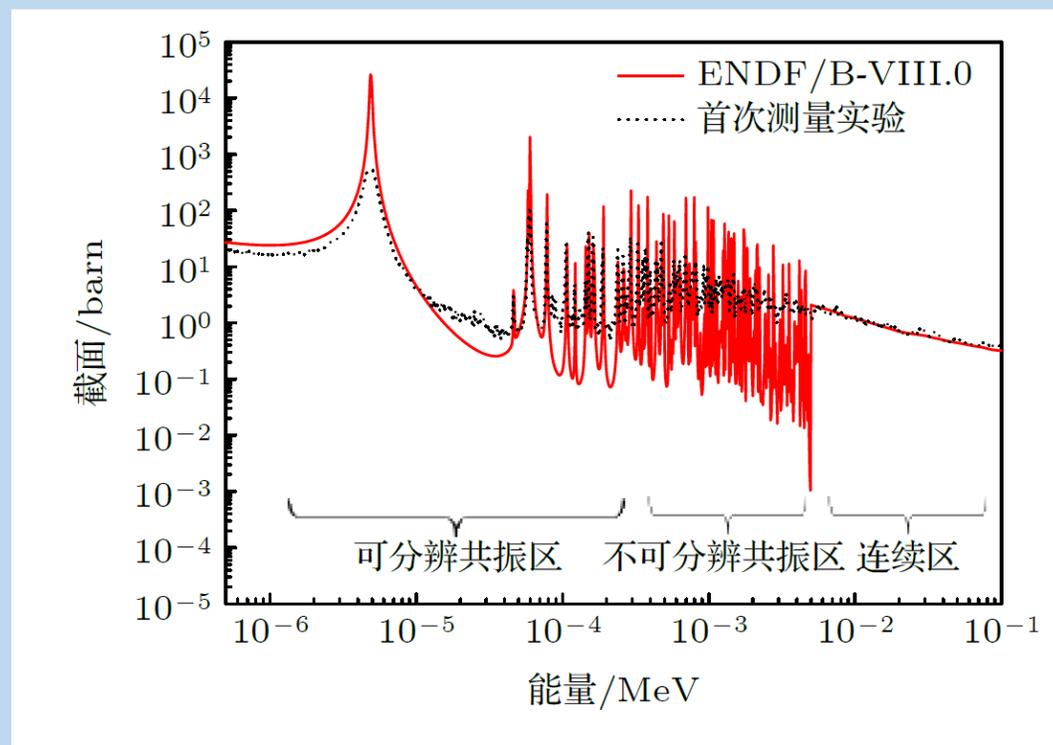


- 从2018年起完成了51个核素的核数据测量工作
- Neutron capture
 - C_6D_6 : ^{169}Tm , ^{197}Au , ^{57}Fe , ^{nat}Se , ^{89}Y , $^{nat}Er/^{162}Er$, ^{232}Th , ^{238}U , ^{93}Nb , ^{nat}Cu , ^{nat}Lu , $^{113\&115}In$, $^{185\&187}Re$, ^{181}Ta , $^{107\&109}Ag$, ^{165}Ho
 - GTAF-II: ^{169}Tm , ^{93}Nb
- Total cross-section
 - ^{12}C , ^{27}Al , 9Be , 7Li , ^{nat}Fe
- Fission cross-section
 - ^{235}U , ^{238}U , ^{236}U , ^{239}Pu , ^{232}Th , ^{239}Pu
- Light charged particle emission
 - LPDA: $^6Li(n, x)$, $^{10}B(n, x)$, ^{63}Ni , $(n-d)$, ^{17}O , $(n-p)$ 弹散
 - TPC样机: ^{12}C , ^{14}N , ^{12}C (^{13}C 集团结构)
- Inelastic cross-section (in-beam gamma)
 - $^{56}Fe(n, n')$, ^{nat}Mo , ^{16}O , ^{nat}Ru , ^{nat}Lu , ^{nat}Mo , ^{nat}Ti , ^{209}Bi , ^{90}Zr , ^{55}Cr , ^{155}Eu , ^{178}Hf , ^{232}Th

GTAf-II 探测器



GTAf-II 谱仪是由40个探测器单元组成一个厚度为15 cm, 内半径为10 cm的BaF₂晶体球壳, 共覆盖了95.2%的立体角。单个探测器单元的能量分辨率为20% ± 2% (0.662 MeV), 时间分辨率为(677 ± 32) ps。



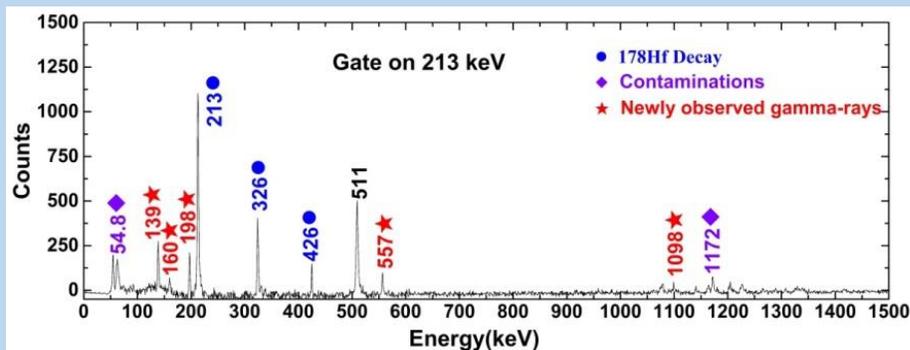
原子核激发态寿命测量与同质异能素核能释放途径新技术方法研究



感谢吴晓光老师提供素材



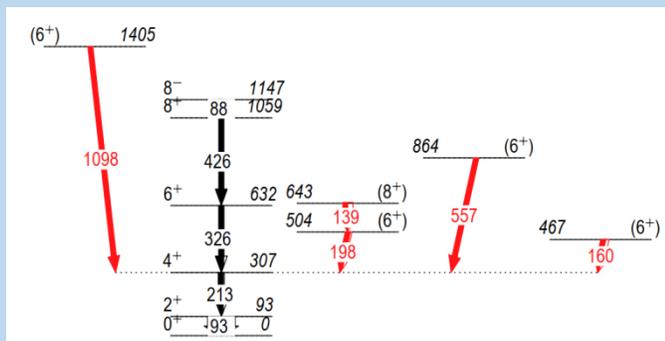
实验测量装置照片



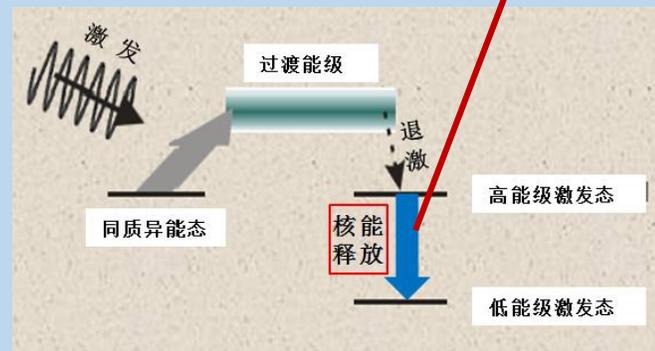
实验测量得到的谱图

研究内容：计划在中国散裂中子源的反角白光中子源上利用白光中子束流轰击铅靶，通过中子非弹反应来布居铪核素的同质异能态，并开展以下两方面的研究工作：

- 1, 开展ns级寿命测量工作，通过原子核激发态寿命测量提取绝对约化跃迁几率, 并与核结构理论计算比较, 在稀土区开展原子核奇异性质及相关核结构性质研究。
- 2, 开展同质异能素核能释放途径新技术方法研究，主要的内容是利用在束谱学技术，同时结合核结构理论计算，希望能找到一个可以打破跃迁禁戒条件的过渡能级，探索核能释放新途径。

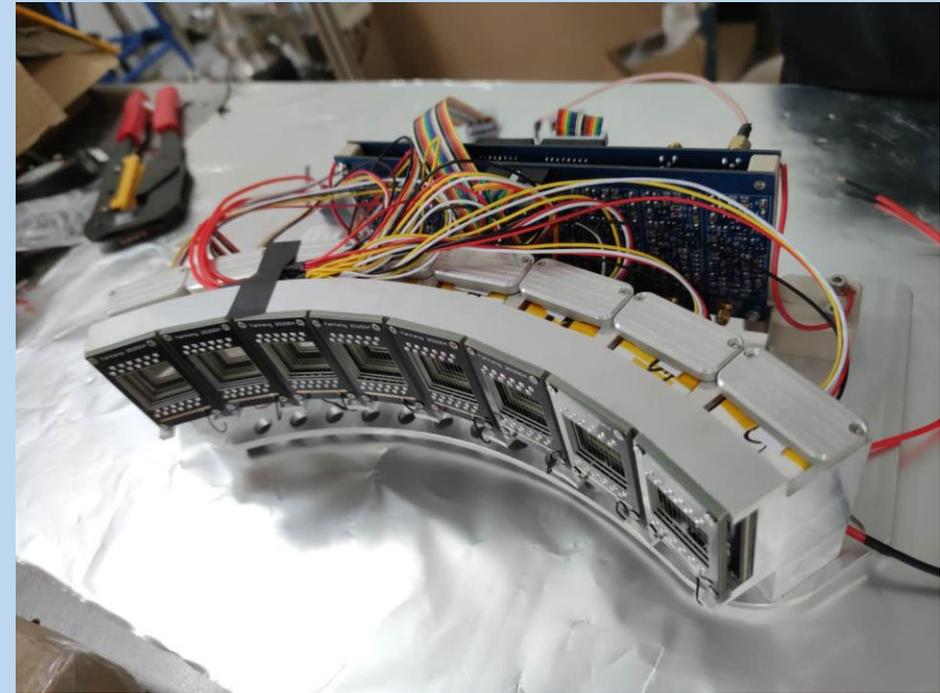


新搭建的部分¹⁷⁸Hf衰变纲图



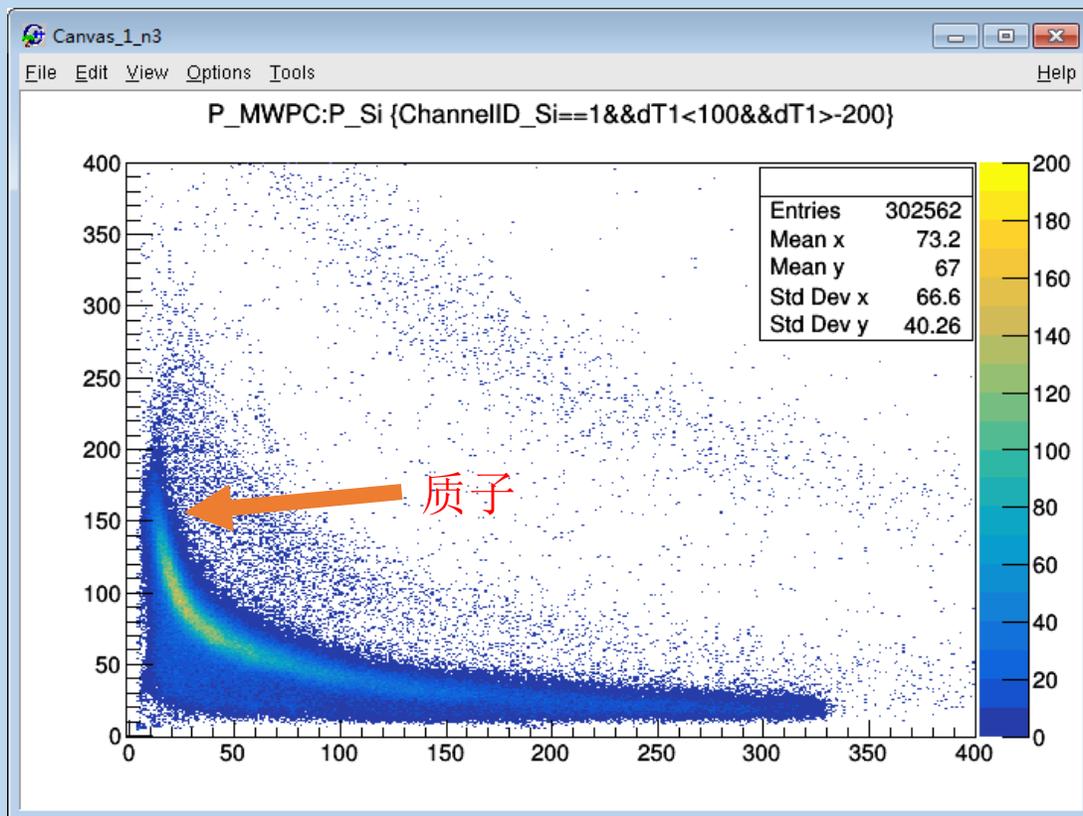
同质异能素核能释放途径示意图

LPDA模块

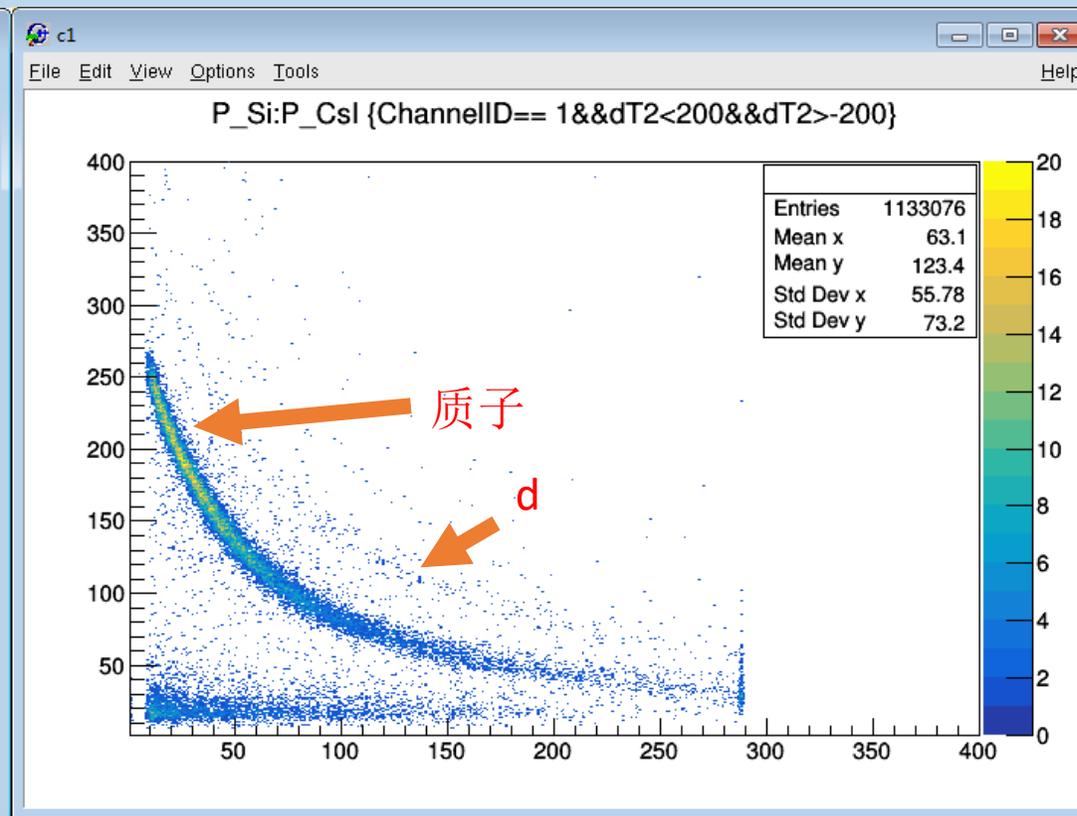


LPDA分为两个模块，每个模块覆盖23.5-90度角度。包含8套LPMWPC+Si+CsI探测器望远镜。整个探测器共48路读出。

ΔE -E粒子鉴别二维谱

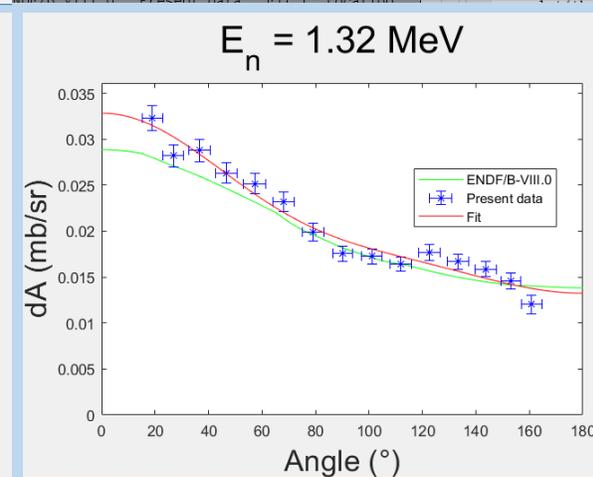
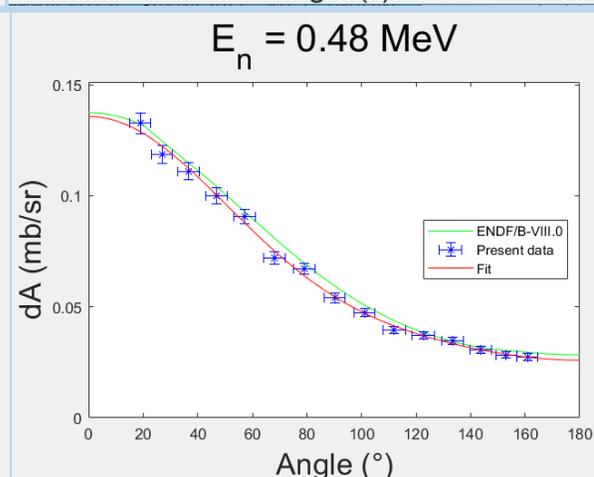
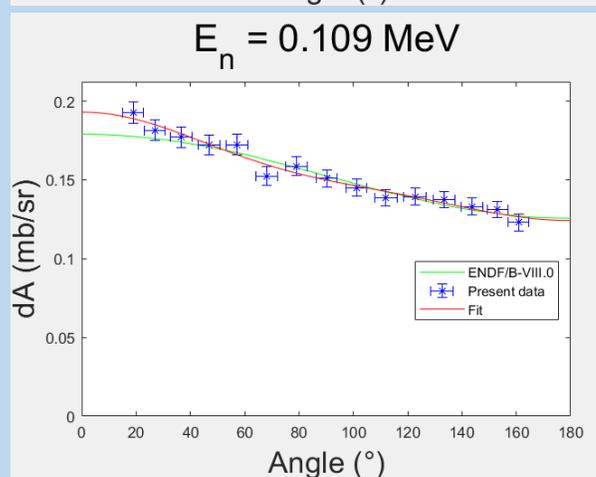
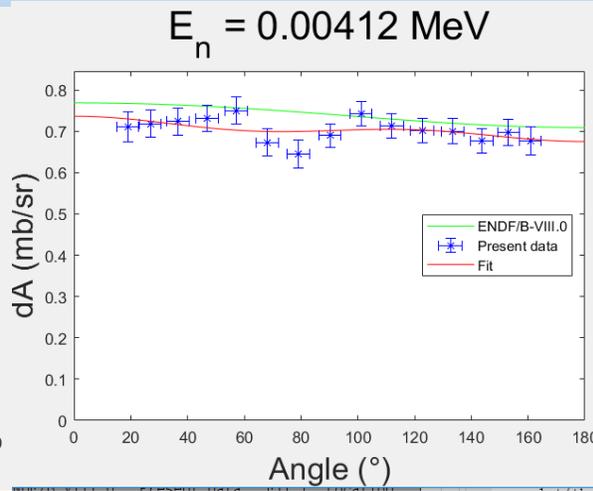
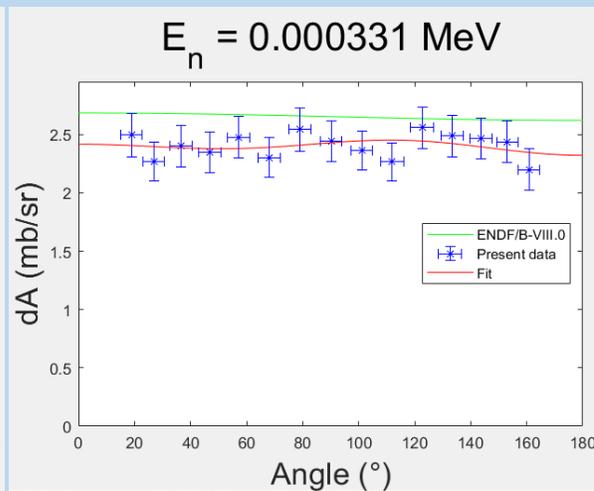
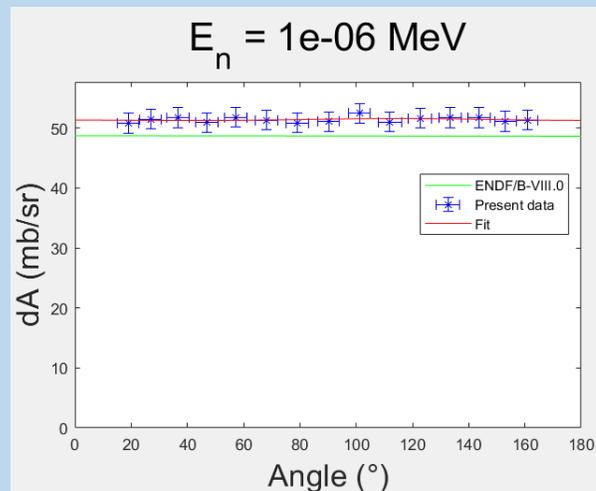
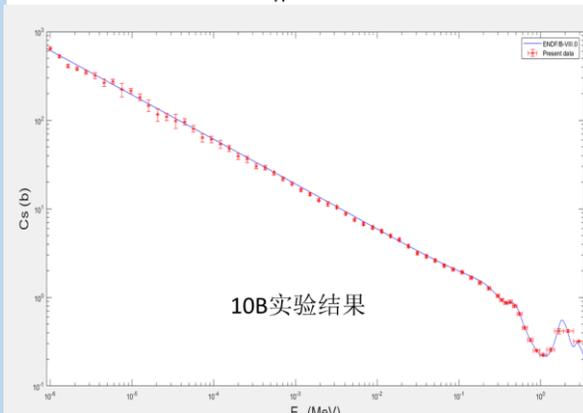
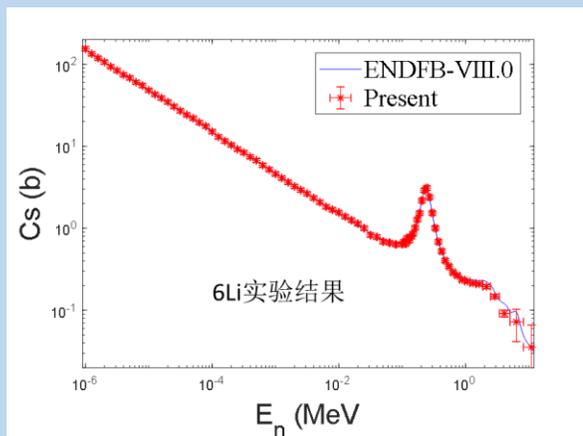


经由MWPC+Si ΔE -E符合后的事件



经由Si+CsI ΔE -E符合后的事件

硅阵列探测器



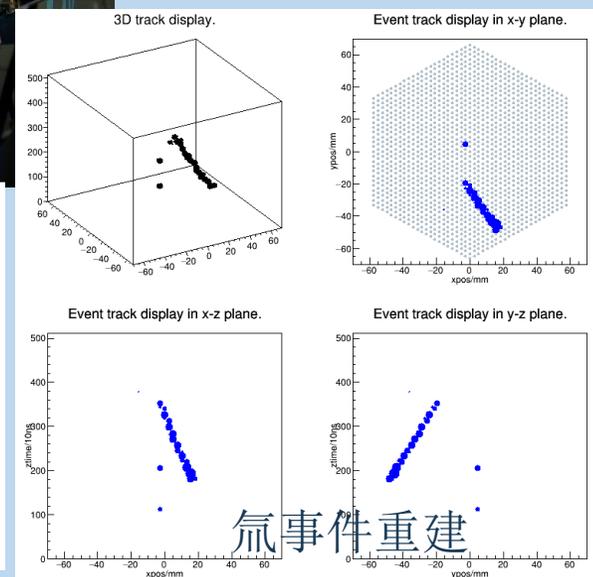
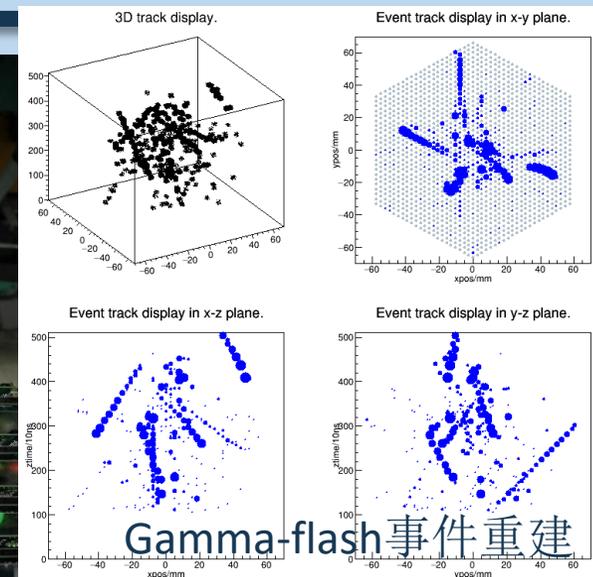
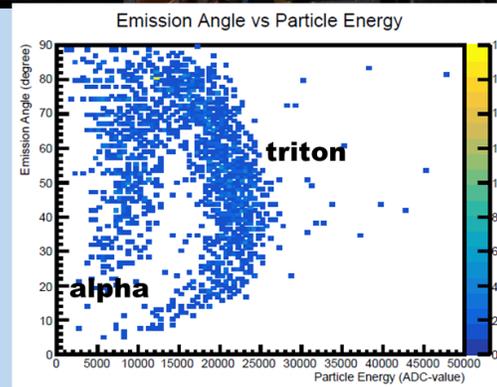
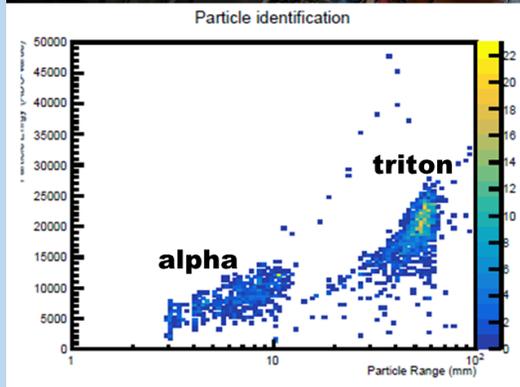
Back-n多用途TPC



白光中子多用途TPC (MTPC) 探测器投入巨大, 制作复杂, 数据分析工作繁琐需要多家单位联合进行。合作组包括:

- 东莞研究部 (物理设计、测试、数据分析)
- 中山大学 (数据分析)
- 深圳大学 (数据分析)
- 中科大 (电子学、Micromegas工艺)
- 实验中心 (DAQ)
- 北大 (物理设计)
- 九院二所.....

2020年1月进行了首次束流实验, 验证了探测器的工作状态和白光中子束线实验的可行性。重要意义:
国内首次中子核数据实验、国际上第二台中子核数据专用TPC探测器

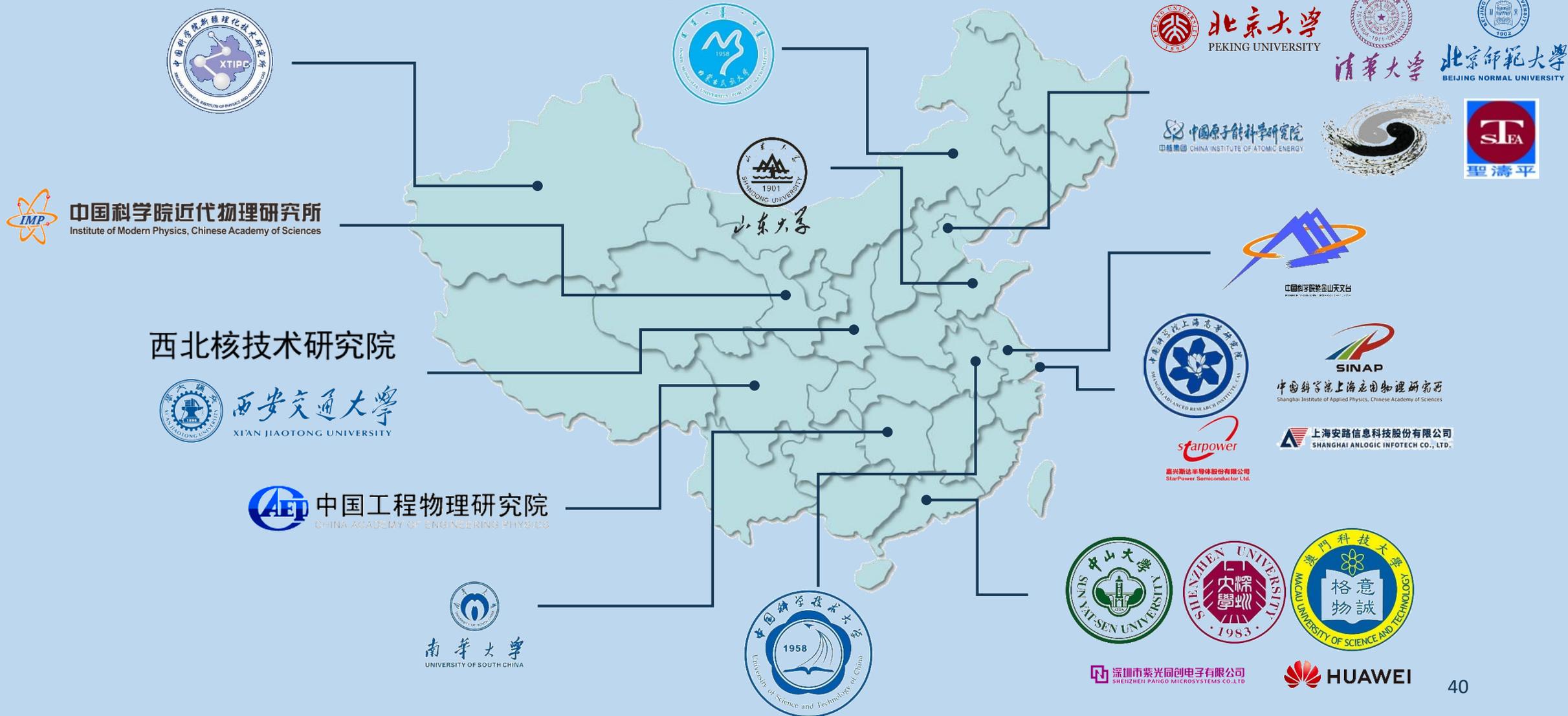


未来的物理方向



1. 核数据的精确测量
 - 裂变及产额测量（核工程）
 - 俘获截面测量（重核产生、新型反应堆工程）
2. 核物理及核天体物理
 - 核结构核谱学
 - 核合成模型
3. 中子应用
 - 共振成像
 - 单粒子效应研究

实验单位分布



白光中子束线实验申请



<https://backn.csns.ihep.ac.cn/>

每年两次组织专家评审提案（免费科研类实验），及两次项目组内部实验，束流周期内可以随时提出临时实验（收费实验）

The screenshot shows the website for the CSNS Back-n facility. At the top, there is a navigation bar with links for '联系我们 | 中国科学院 | 高能物理研究所'. Below this is a main menu with '首页', '成果', '设施', '公告', and '白光源介绍'. A sub-header reads '中国散裂中子源 (CSNS) —— 反角白光源'. The main content area features an aerial view of the facility and a text block describing the Back-n source. Below the text is a '用户登录' (User Login) section with input fields for 'fanrr@ihep.ac.cn' and a password, along with '登录' and '注册' buttons. A '忘记密码?' link is also present. To the right of the login section is a '通告' (Notice) section with a list of links: '用户登录须知', '白光中子源实验用户须知', and 'CSNS反角白光中子源第三...'. At the bottom of the page, there is a grid of service tiles: '提案申请' (Proposal Application), '访问申请' (Access Application), '安全培训' (Safety Training), '实验报告' (Experimental Report), '个人信息' (Personal Information), and '专家审核' (Expert Review).

A grid of six service tiles, each with an icon and a link:

- 提案申请** (Proposal Application): 申请你的时机 >
- 访问申请** (Access Application): 申请你的访问 >
- 安全培训** (Safety Training): 开始培训 >
- 实验报告** (Experimental Report): 查看试验报告 >
- 个人信息** (Personal Information): 修改个人信息 >
- 专家审核** (Expert Review): 进入专家审核 >

感谢聆听！

fanrr@ihep.ac.cn

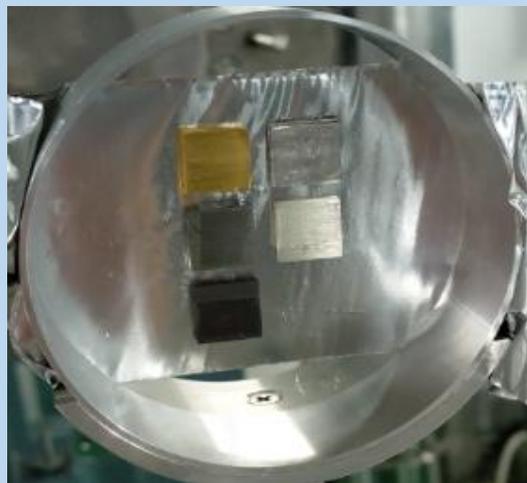


Backup

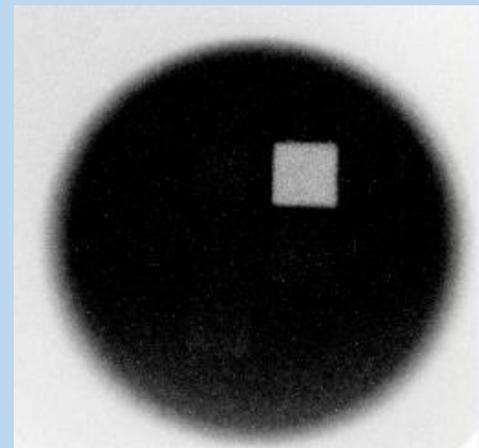
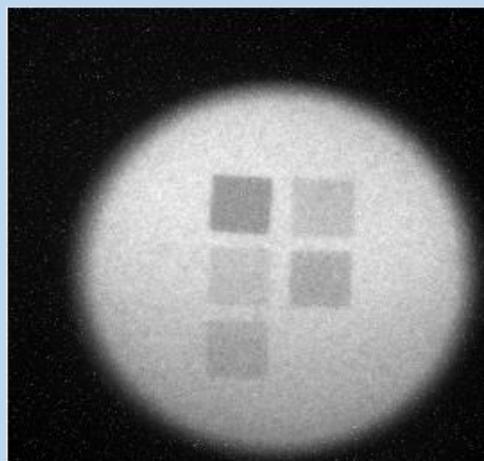
中子共振照相技术

样品实物:

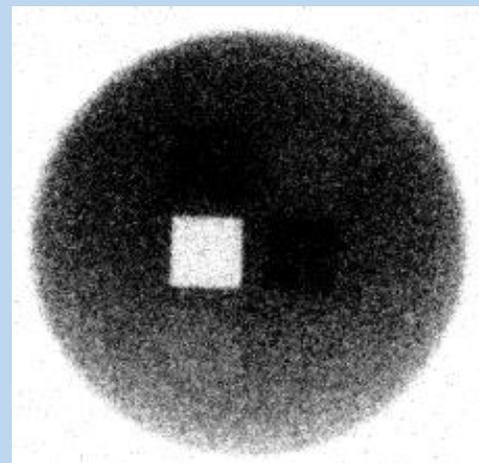
Au、Ag、W、Ta、In



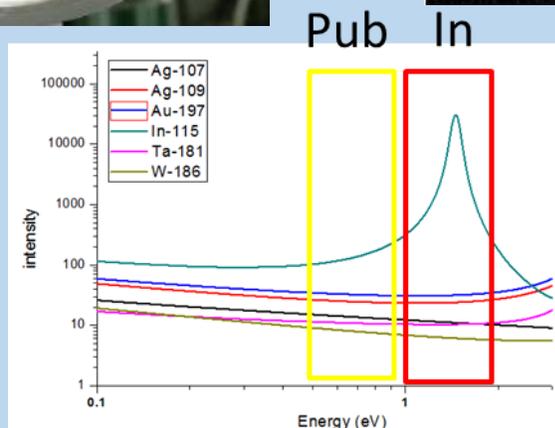
普通透射照相



共振核素检出: In

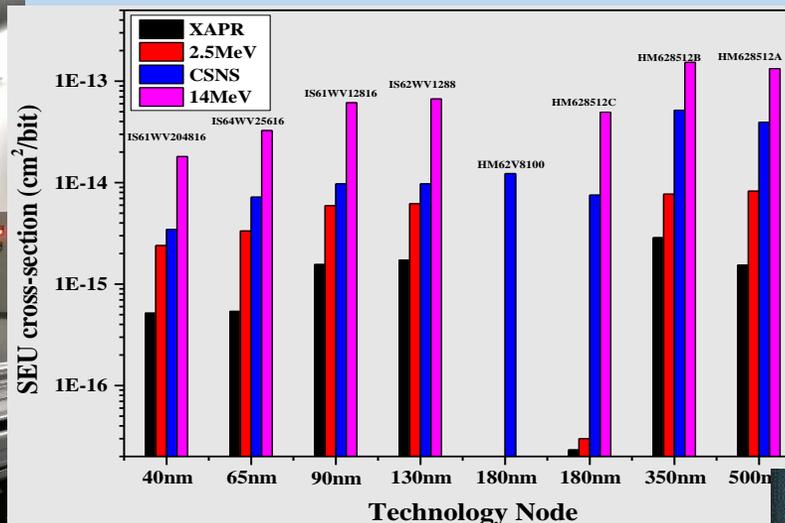
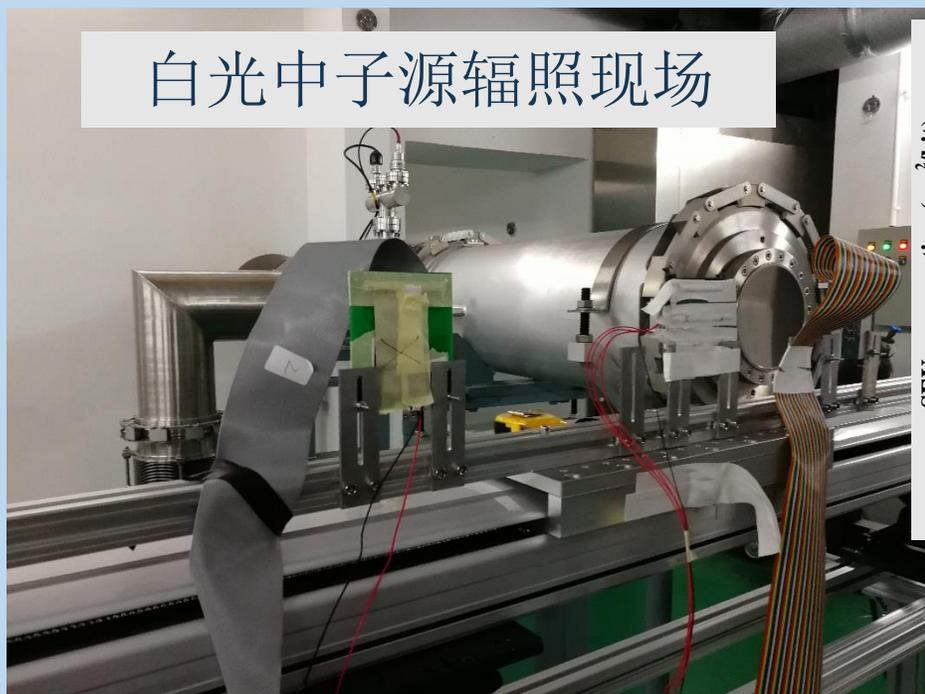


共振核素检出: W



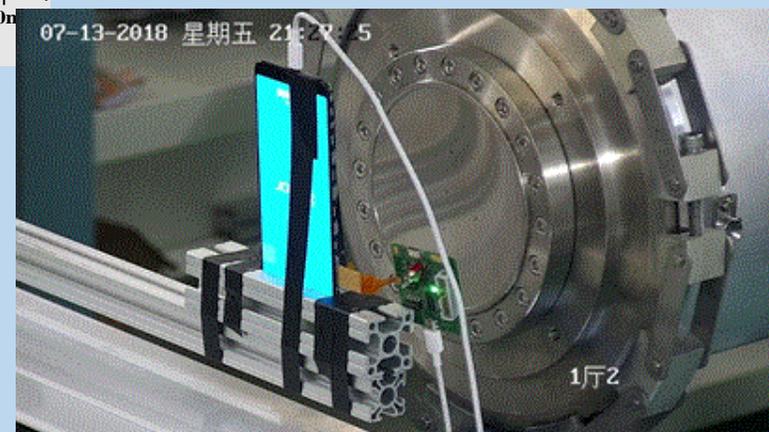
In核素共振峰检出: [Pub] - [In]

单粒子效应实验



不同中子源SRAM翻转截面对比

手机单粒子效应实验现场



西北核技术研究所、航天510研究所、北京圣涛平公司等分别在Back-n上完成了相关单粒子效应实验。