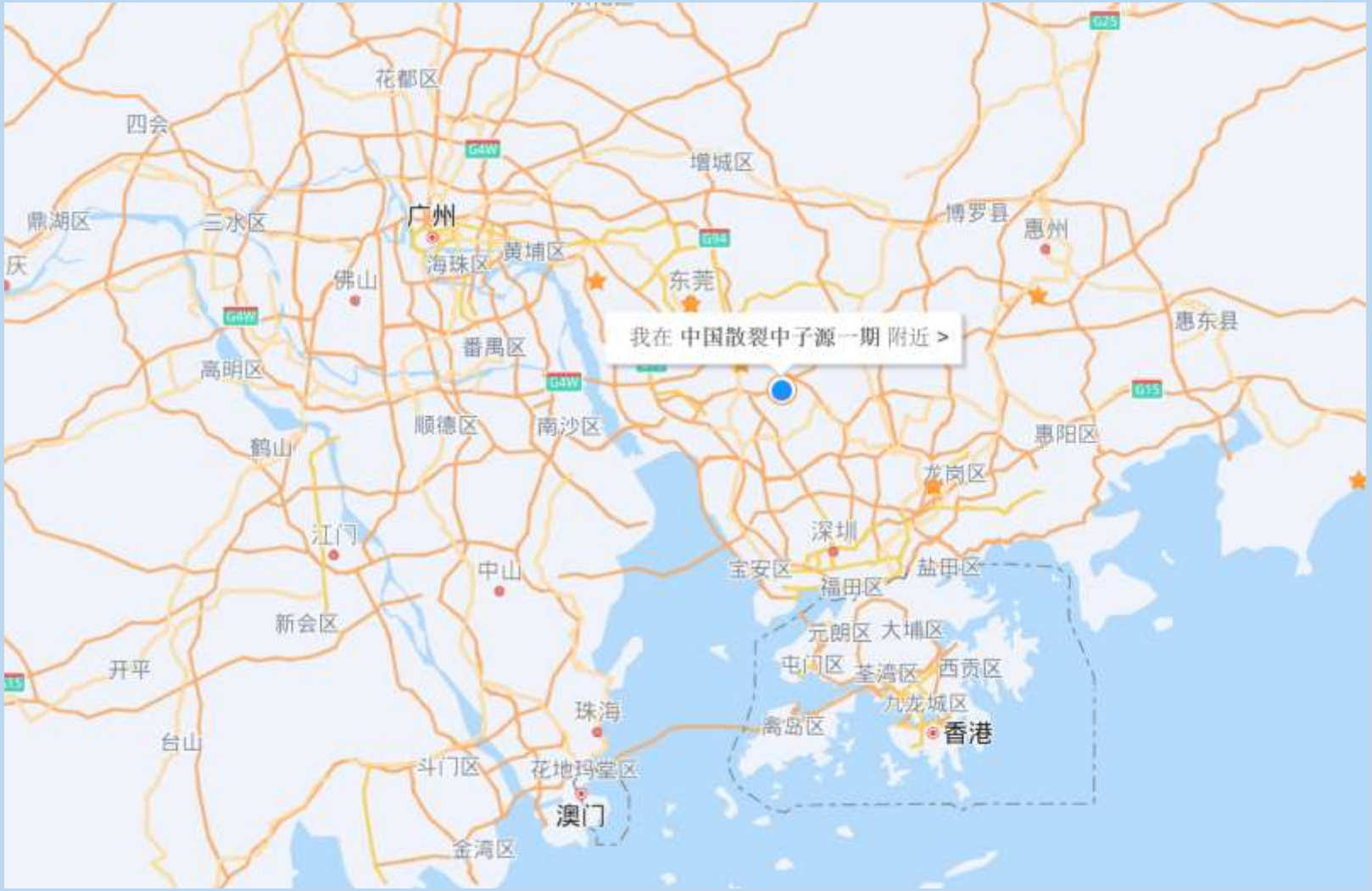


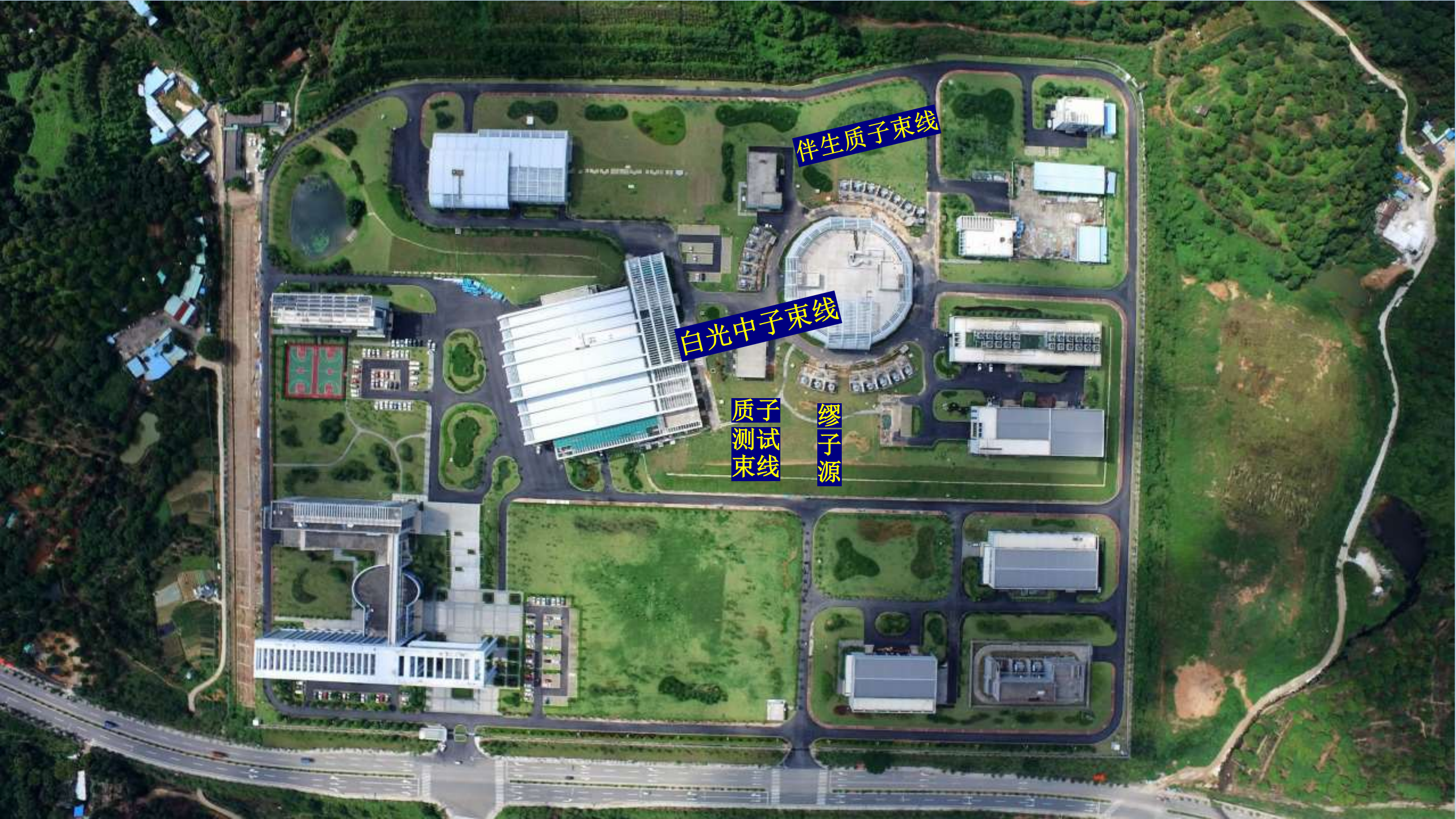
中国散裂中子源
质子束流扩展应用

樊瑞睿 代表束流扩展应用组

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

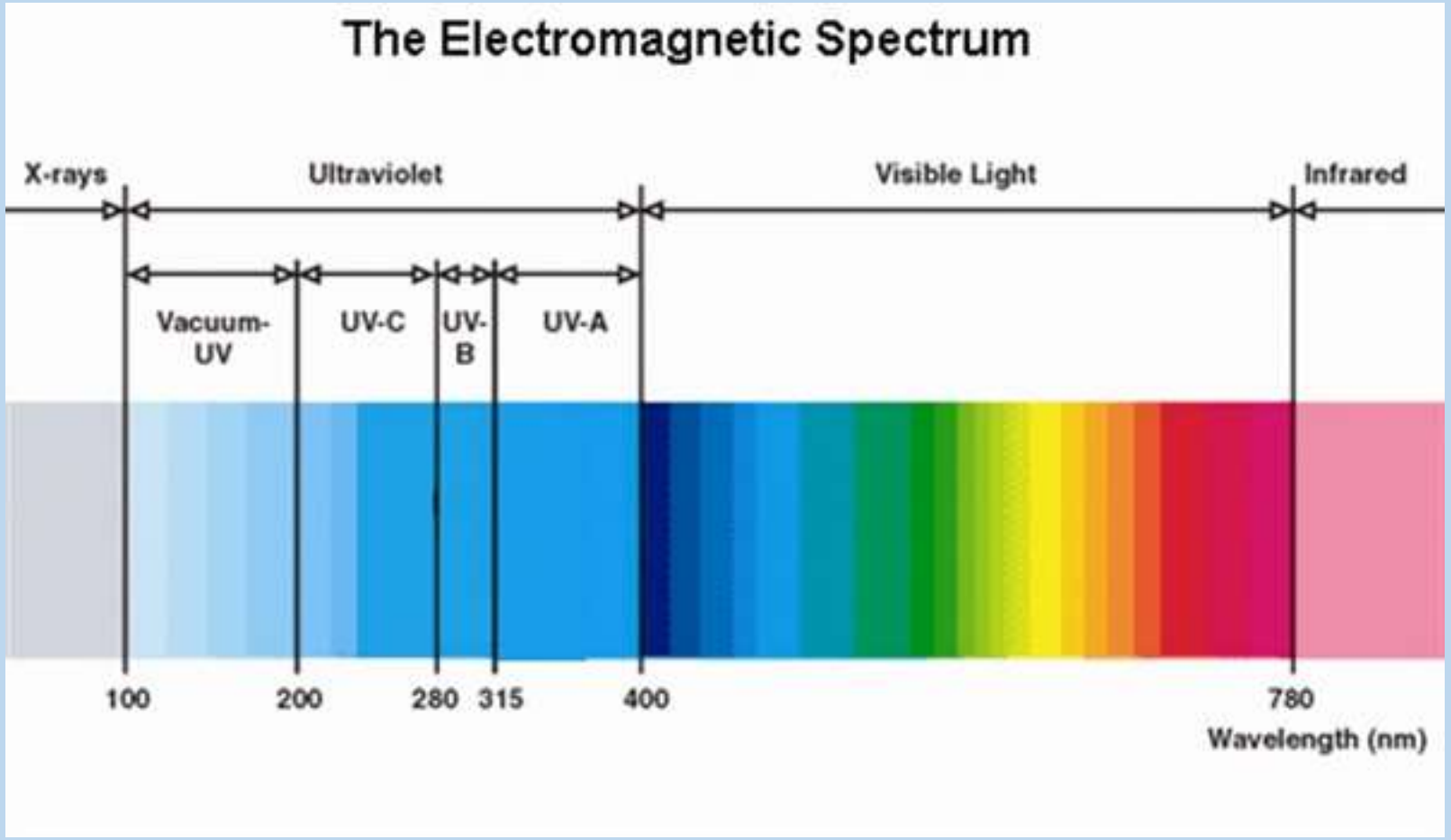

伴生质子束线
白光中子束线
质子
测试
束线
缪
子
源

提纲

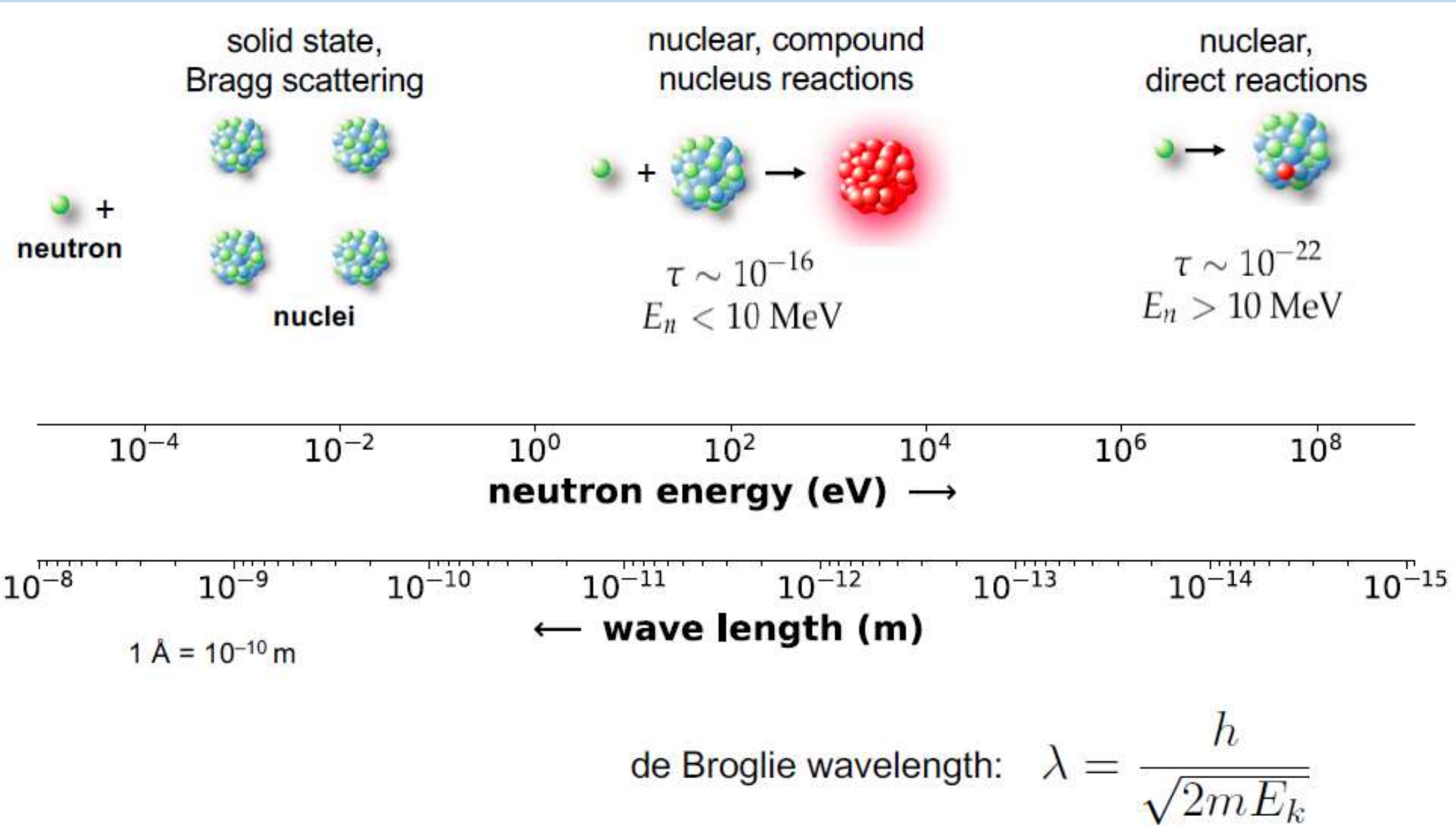
- 白光中子束线
  - Back-n合作组及白光中子源束线
  - 相关实验
    1. 束流品质及本底测量
    2. 核数据测量实验
    3. 探测器标定及测试
    4. 中子共振照相实验
    5. 辐照效应实验
  - 未来探测器发展规划
- 其他束流线
  - 伴生质子束线
  - 质子测试束线
  - 缪子源

白光中子束线

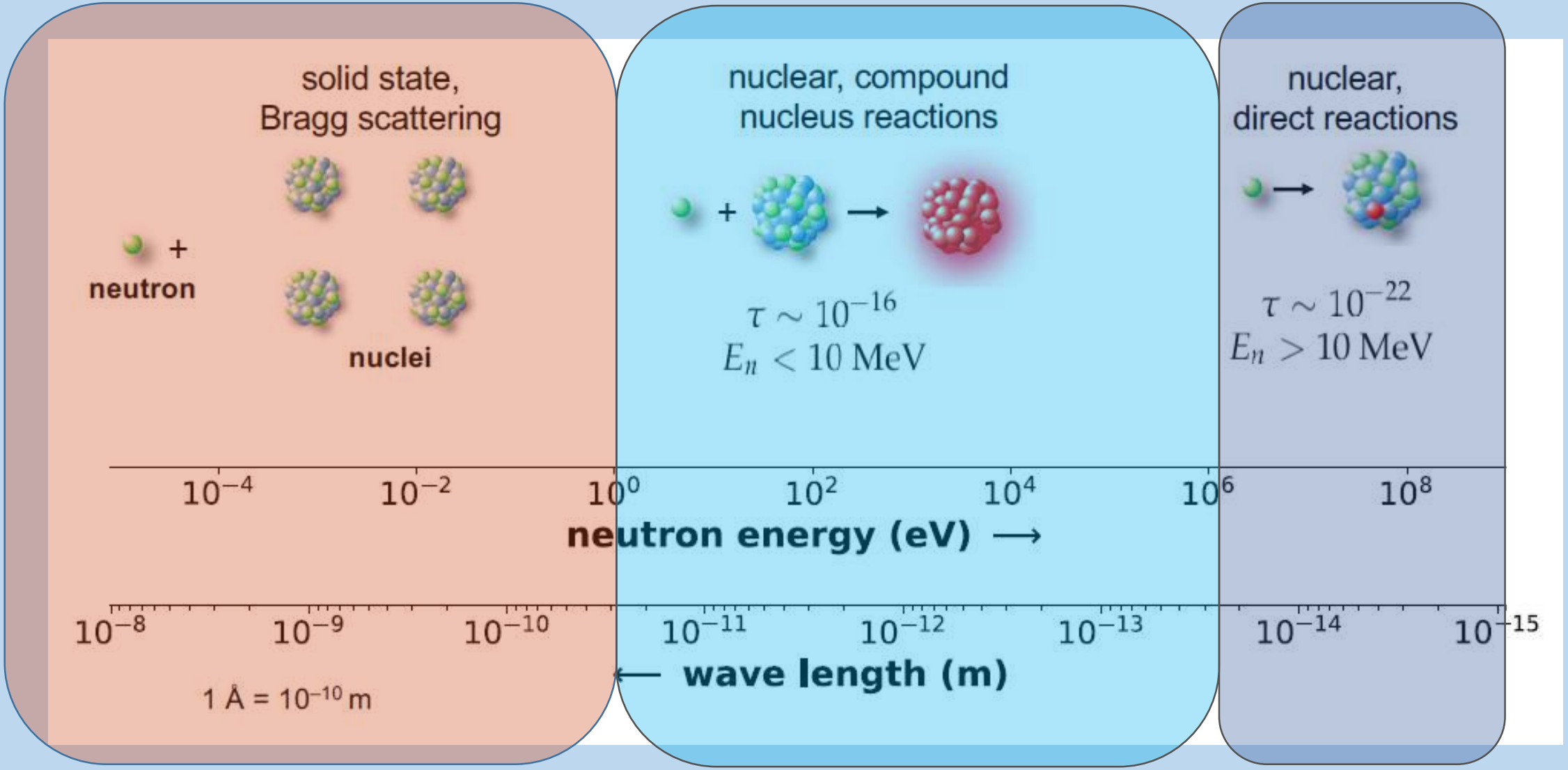
- Back-n合作组及白光中子束线
- 相关实验
  1. 束流品质及本底测量
  2. 核数据测量实验
  3. 探测器标定及测试
  4. 中子共振照相实验
  5. 辐照效应实验
- 未来探测器发展规划



白光中子 → 白光中子 宽能谱中子



de Broglie wavelength: $\lambda = \dfrac{h}{\sqrt{2mE_k}}$

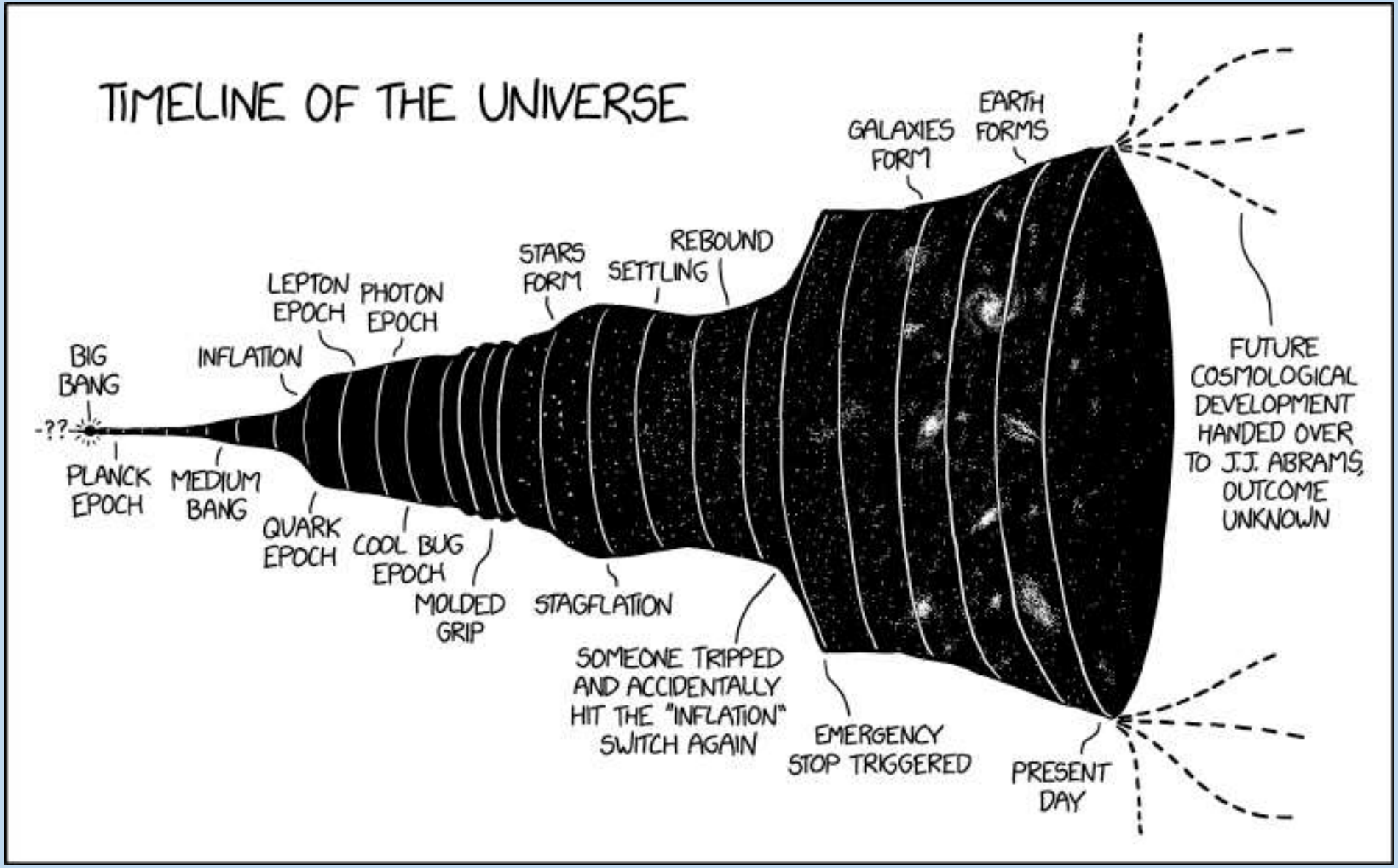


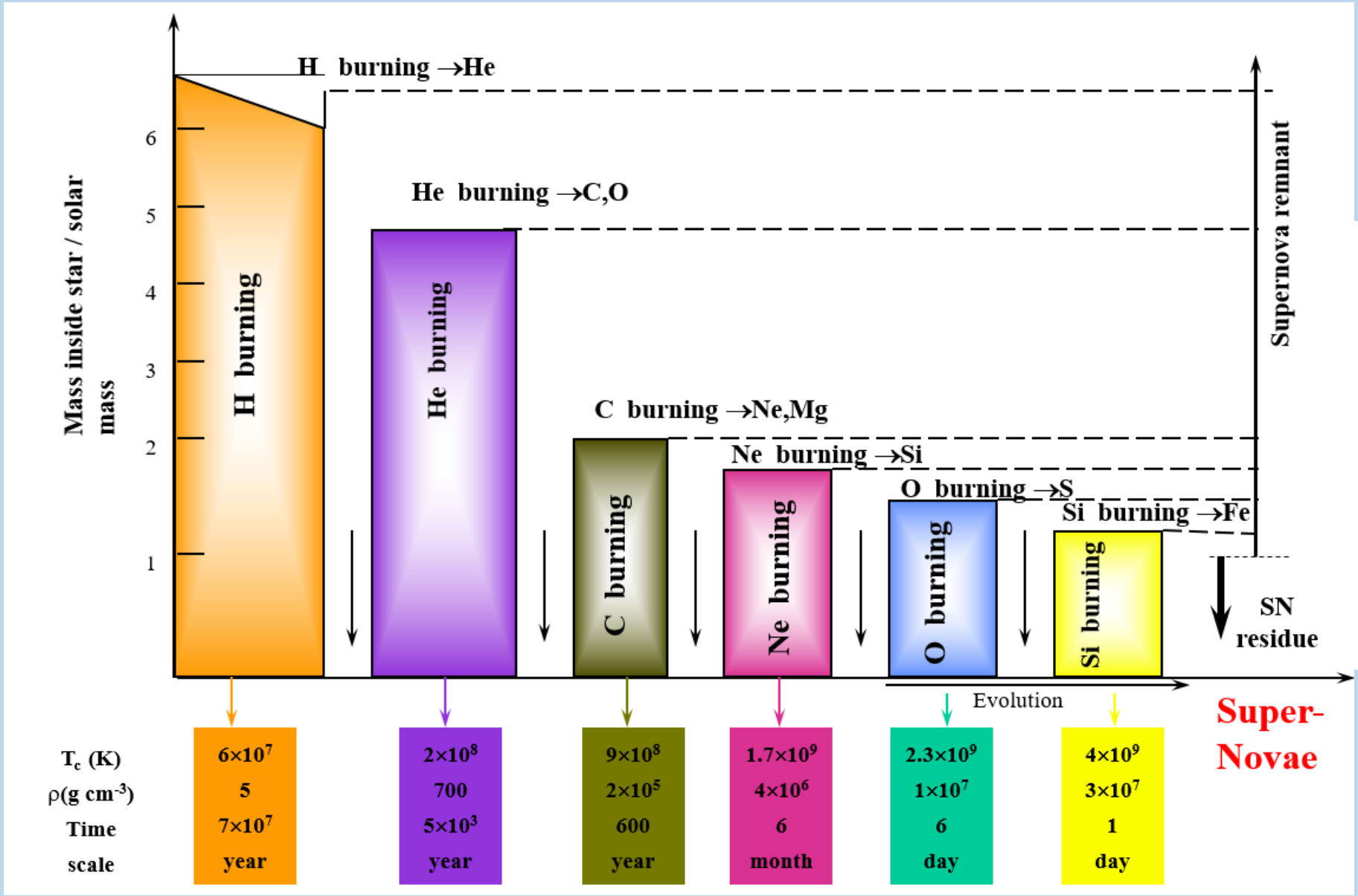
中子散射谱仪　　白光中子　　高能强子物理

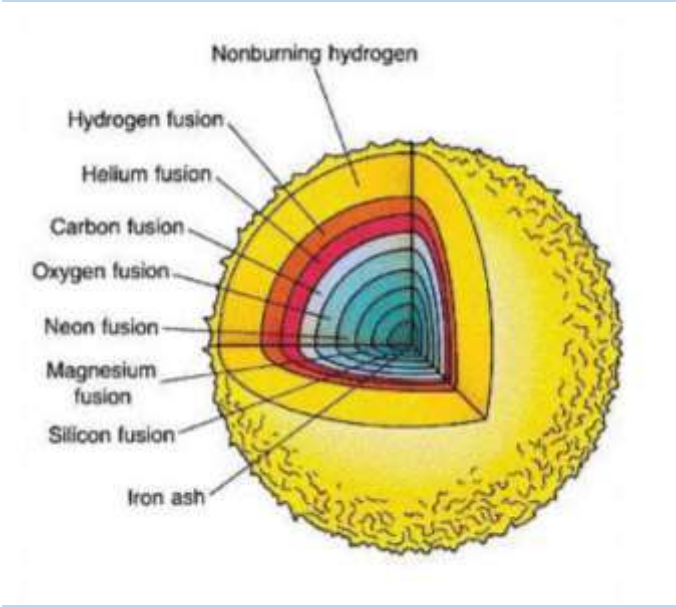
有什么用？

传统说法：

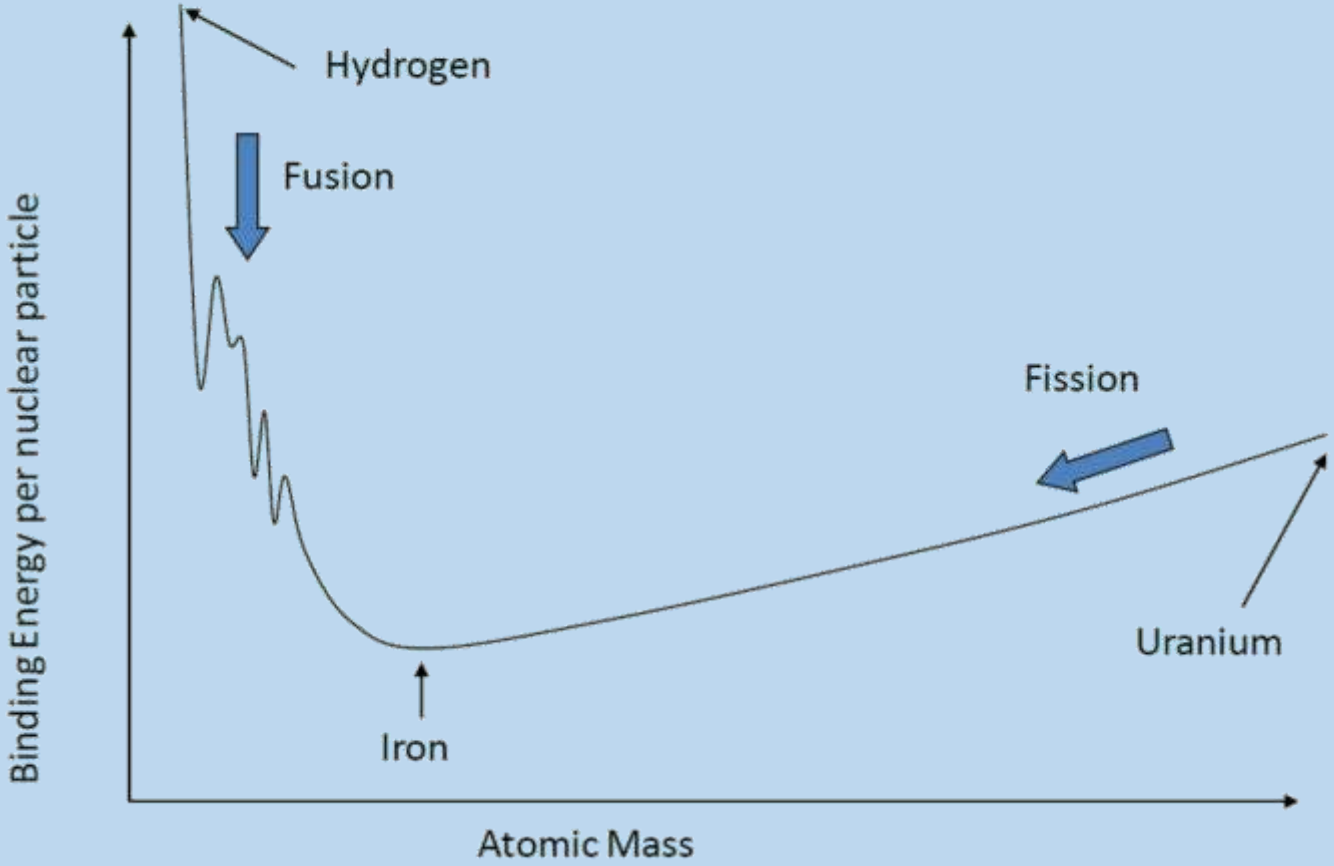
“白光中子束线是国际上开展中子物理学特别是核数据测量实验研究的最重要实验装置。先进核能技术、核天体/基础核物理、国防核应用、核医学等。新时期对核数据测量的精度和广度都提出了更高的要求。”


TIMELINE OF THE UNIVERSE
-??
BIG BANG
PLANCK EPOCH
MEDIUM BANG
INFLATION
LEPTON EPOCH
PHOTON EPOCH
QUARK EPOCH
COOL BUG EPOCH
MOLDED GRIP
STARS FORM
SETTLING
REBOUND
STAGFLATION
GALAXIES FORM
EARTH FORMS
SOMEONE TRIPPED AND ACCIDENTALLY HIT THE "INFLATION" SWITCH AGAIN
EMERGENCY STOP TRIGGERED
PRESENT DAY
FUTURE COSMOLOGICAL DEVELOPMENT HANDED OVER TO J.J. ABRAMS, OUTCOME UNKNOWN


H burning →He
He burning →C,O
C burning →Ne,Mg
Ne burning →Si
O burning →S
Si burning →Fe
Mass inside star / solar mass
6
5
4
3
2
1
H burning
He burning
C burning
Ne burning
O burning
Si burning
Supernova remnant
SN residue
Evolution
Super-Novae
T_c (K)
ρ(g cm^-3)
Time scale
6×10^7
5
7×10^7
year
2×10^8
700
5×10^3
year
9×10^8
2×10^5
600
year
1.7×10^9
4×10^6
6
month
2.3×10^9
1×10^7
6
day
4×10^9
3×10^7
1
day


Nonburning hydrogen
Hydrogen fusion
Helium fusion
Carbon fusion
Oxygen fusion
Neon fusion
Magnesium fusion
Silicon fusion
Iron ash

Energy from Fission and Fusion

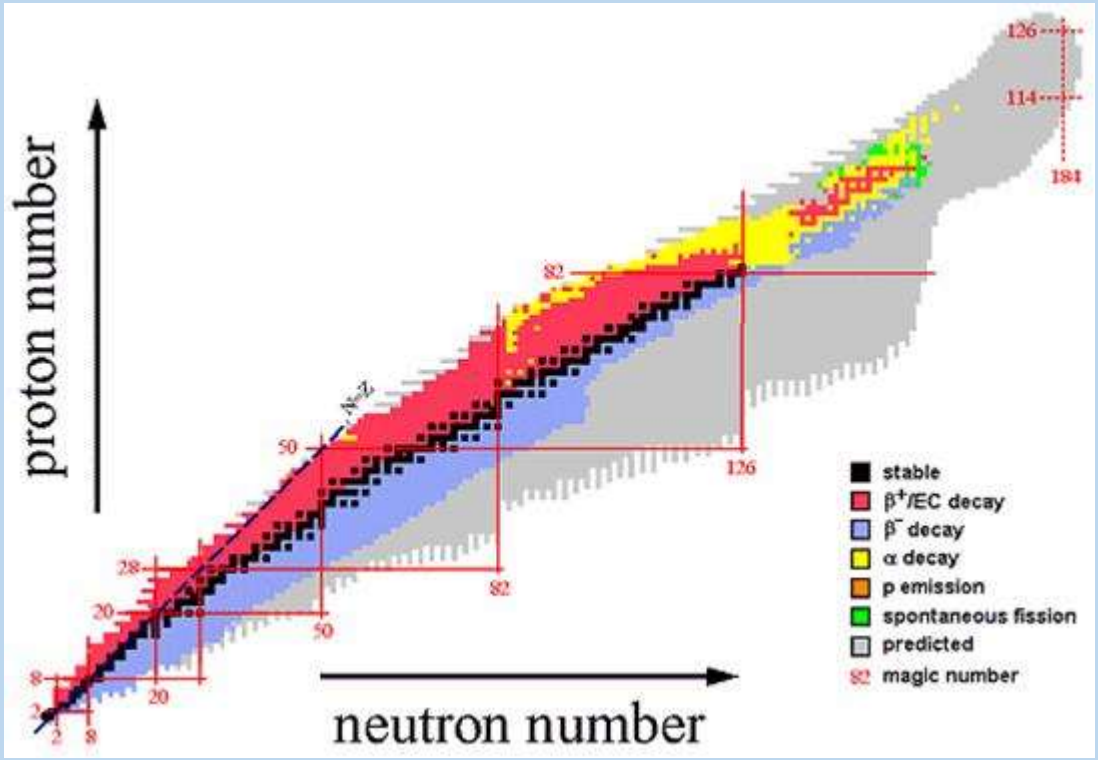


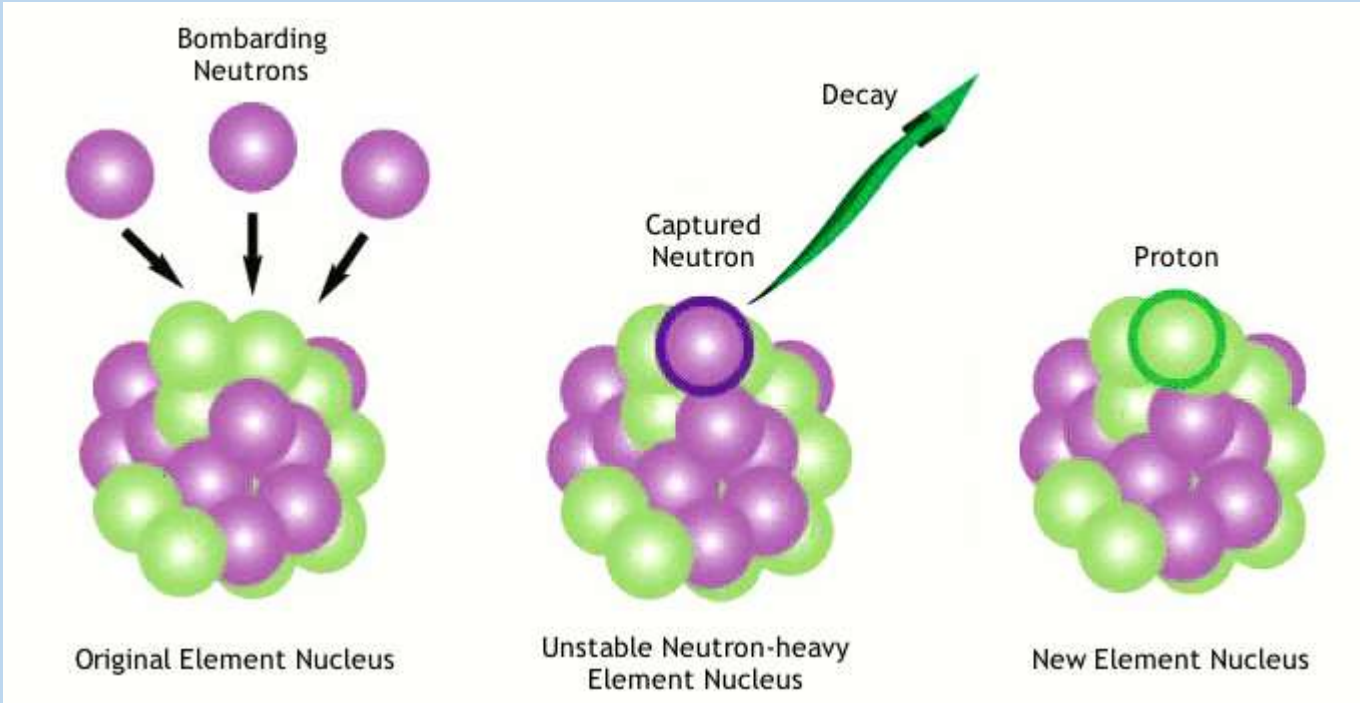
- The most stable element is Iron ($_{26}Fe^{56}$).
- For elements lighter than iron:

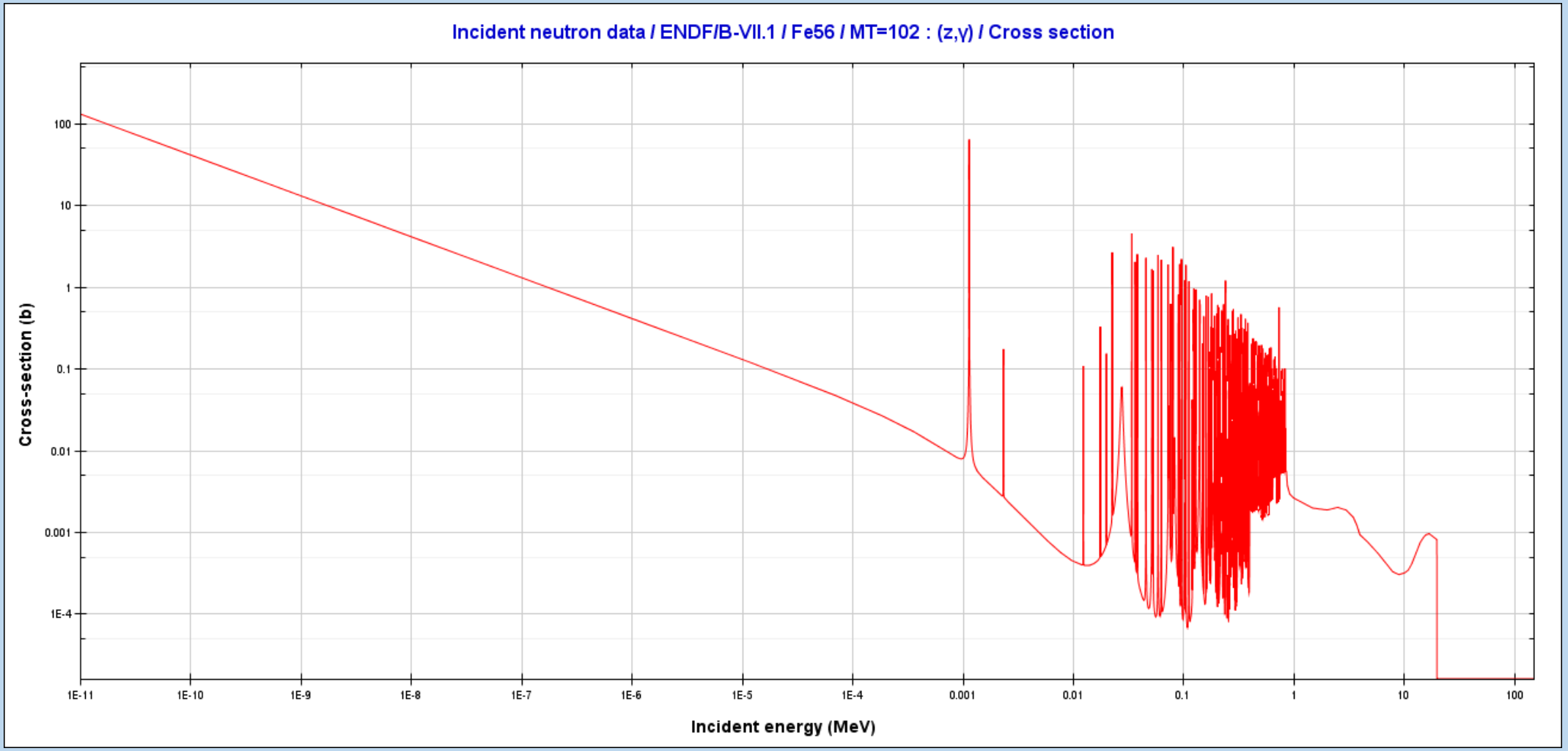
  Fusion releases energy
- For elements heavier than iron:

  Fission releases energy
- The universe is slowly turning to Iron!

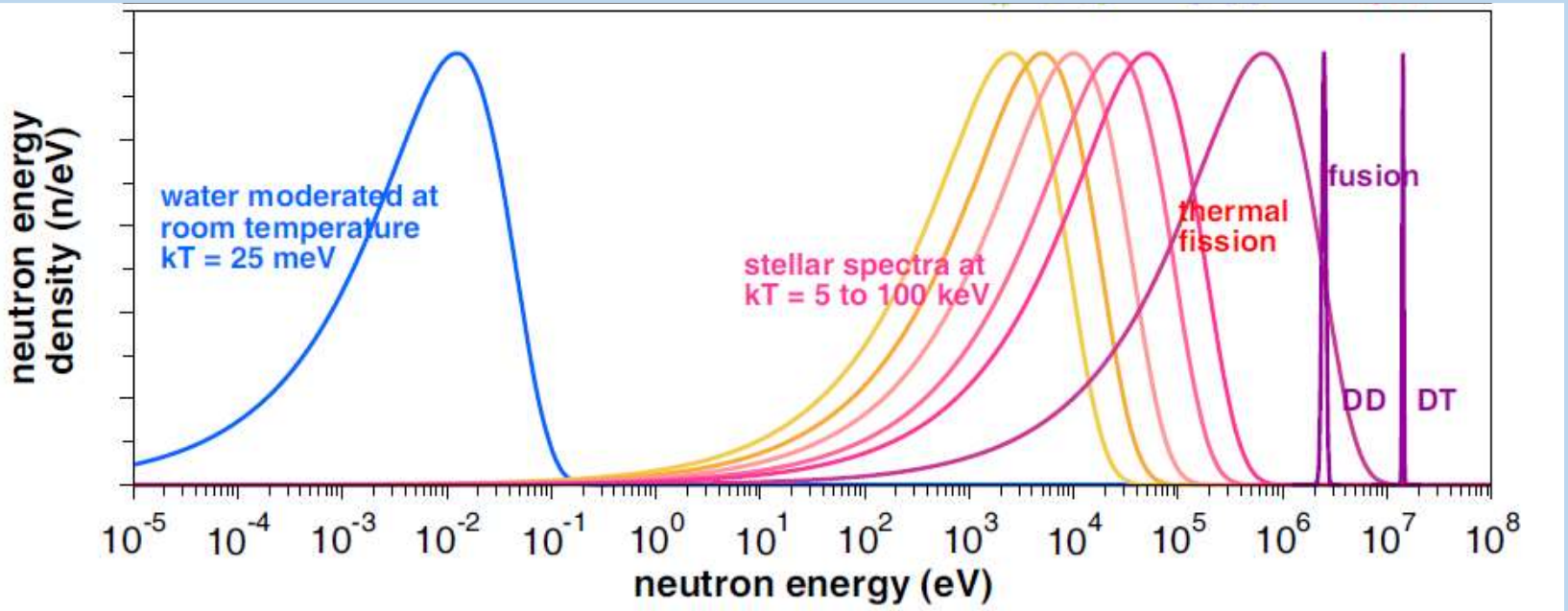
中子俘获反应+Beta衰变

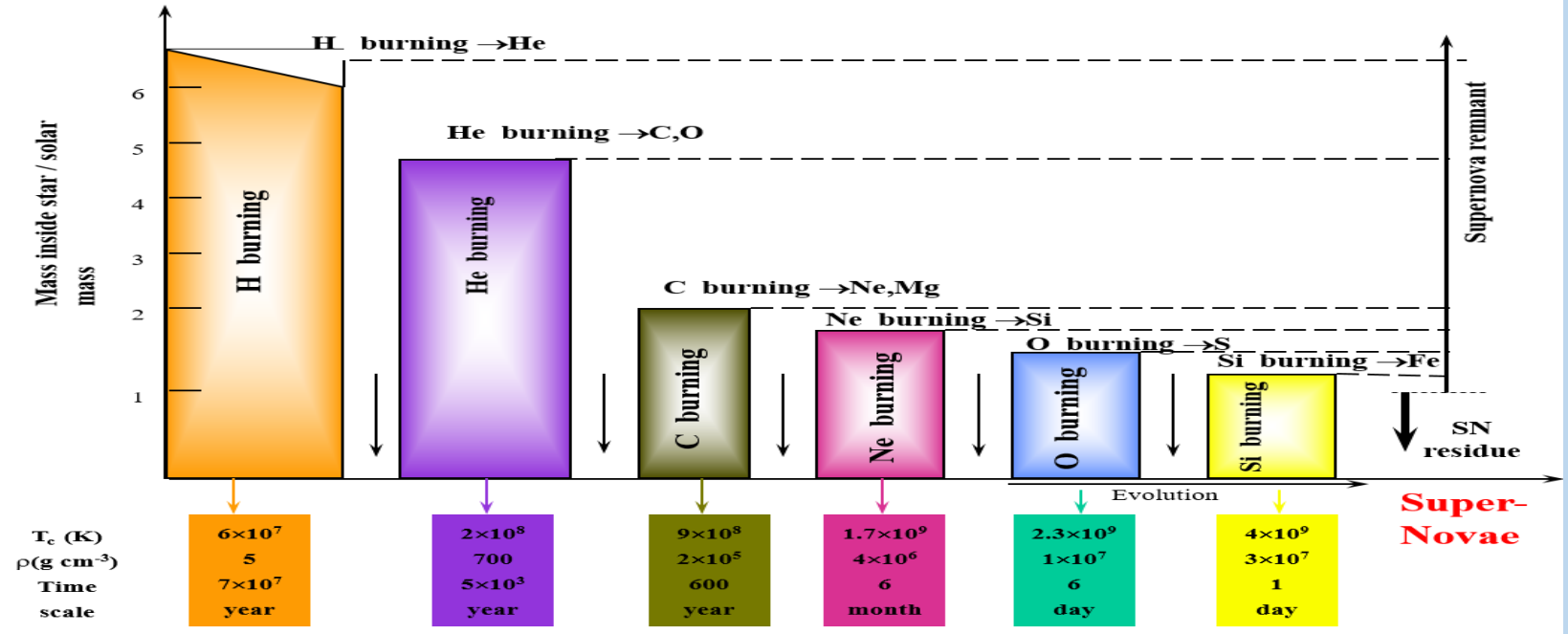






一个典型的中子俘获截面曲线





4E9K恒星内部中子平均能量为：0.3MeV

初级白光中子源

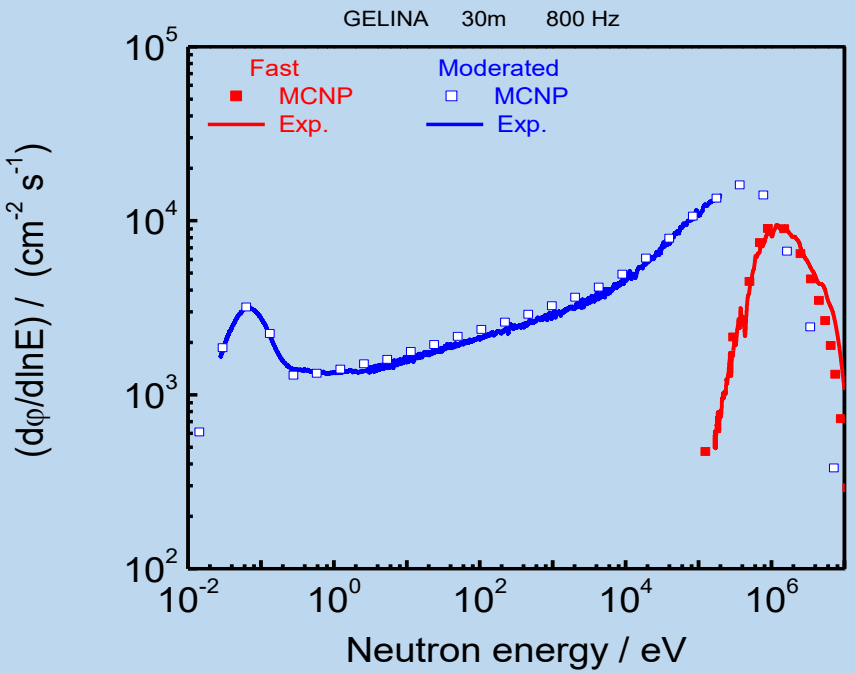
- 电子驱动白光中子源（光核作用）

$$ {}_{z}X^{A} + \gamma \rightarrow {}_{z}X^{A-1} + n + Q $$

Table 2.1.1. *The Binding Energy of the Last Neutron in Light Nuclei**

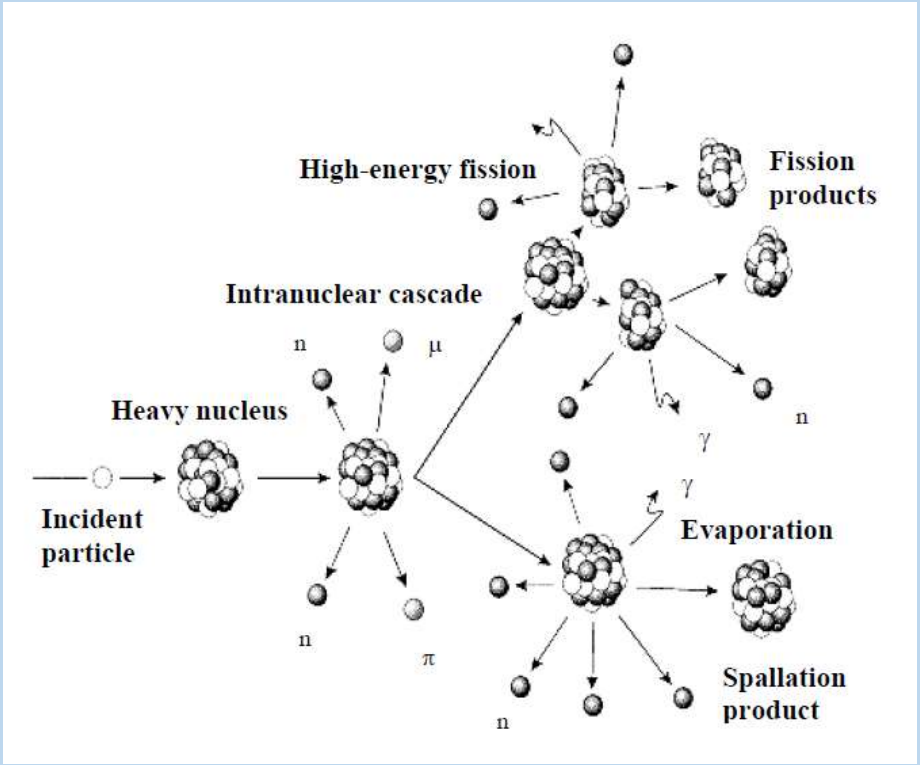
Nucleus	Binding Energy (Mev)	Nucleus	Binding Energy (Mev)
H^2	2.225	C^{12}	18.720
H^3	6.258	C^{13}	4.937
He^3	7.719	C^{14}	8.176
He^4	20.577	N^{13}	20.326
He^5	−0.956	N^{14}	10.553
Li^6	5.663	N^{15}	10.834
Li^7	7.253	N^{16}	2.500
Li^8	2.033	O^{15}	13.222
Be^8	18.896	O^{16}	15.669
Be^9	1.665	O^{17}	4.142
Be^{10}	6.814	O^{18}	8.047
B^9	18.575	F^{18}	9.141
B^{10}	8.440	F^{19}	10.442
B^{11}	11.456	F^{20}	6.599
C^{11}	13.092		

* The binding energies were calculated using the tables of Everling *et al.*, Nucl. Phys. **18**, 529 (1960).



高级白光中子源

- 质子驱动白光中子源（散裂作用）



Process	Example	Yield	Energy Deposition [MeV/n]
DT solid target	400keV deuterons on tritium in Titan	4.0×10^{-5} n/d	10 000
Deuteron stripping	35 MeV deuterons on liquid Lithium	2.5×10^{-3} n/d	10 000
electrons Bremsstrahlung (Photo-neutrons)	100MeV electrons on U-238	5.0×10^{-2} n/e	2000
Fission	U-235 (n,f)	1 n/fission	180
DT-fusion	laser or ion-beams imploding pellets	1 n/Fusion	3
spallation	1 GeV protons on Pb	30 n/p	20

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







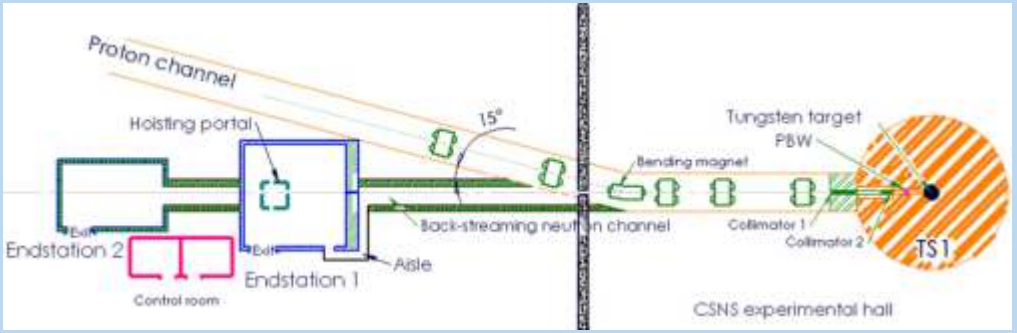
白光中子束线和科学目标

- **科学需求：** 白光中子源是国际上开展中子物理学特别是核数据测量实验研究的最重要实验装置。
  - 先进核能技术、核天体/基础核物理、国防核应用、核医学等。
  - 新时期对核数据测量的精度和广度都提出了更高的要求。

- **发展态势：**
  - 国际上，早期的白光中子源主要是利用强流和中能的电子直线加速器产生的（第一代白光中子源，代表：OREAL、RPI、GELINA、IREN）
  - 从上世纪80年代后期开始，脉冲白光中子源便朝着基于高功率质子加速器的方向发展（第二代白光中子源，代表：LANL/LANSCE和CERN/n-TOF，J-PARC/ANNRI勉强占边）；
  - 国内几十年来一直在寻求建造白光中子源，以为核数据测量提供必要的平台，CSNS才提供了真正的机会。

CSNS反角中子束的有利条件

- CSNS：100/500 kW, 1.6 GeV
  - 打靶可产生非常强的脉冲中子，世界4大散裂中子源之一。
- 沿质子束打靶通道反流的中子束
  - 非常强，对RTBT输运线设备有伤害，需要仔细地考虑中子的屏蔽/准直/捕集（废物利用）
  - 很好的能谱结构和时间结构，有可能用于白光中子束线(世界上首例)
  - (10^7 n/cm^2/s at 50 m)
- 强度高、能谱宽、供束时间充分



白光中子源设计示意图

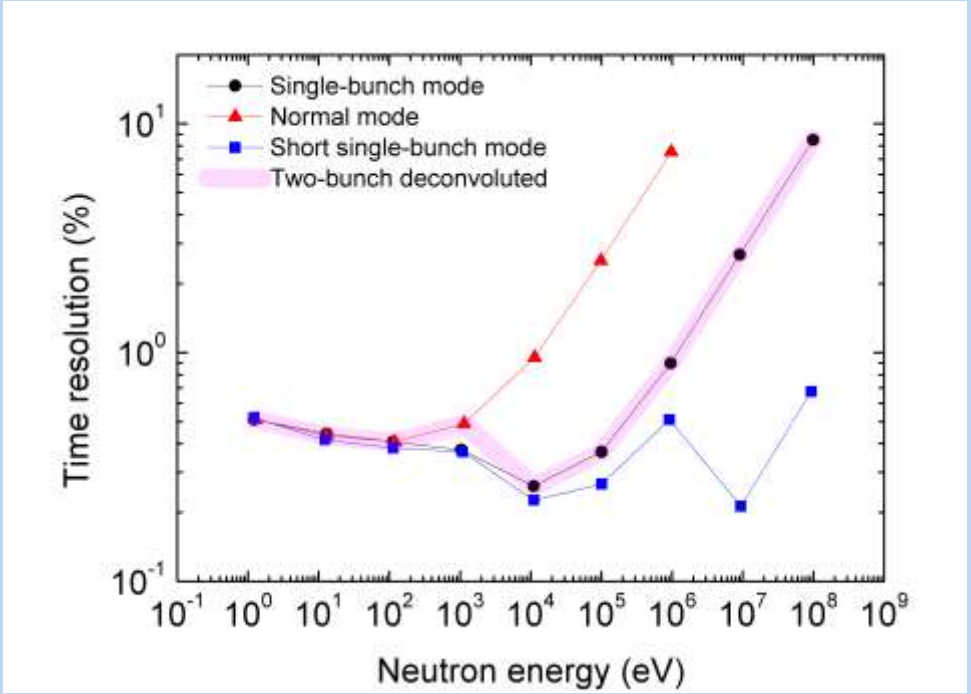
CSNS与国际白光中子源的比较

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}

Back-n: 在靶上的中子注量率最高

Back-n工作模式

- 兼用模式
  - 对中子散射应用完全没有影响
  - 通常模式：RCS正常设置
  - 短束团模式：RCS特殊设置提供较短的束团
- 白光源专用模式
  - 牺牲部分束流功率：采用50% or 30%正常束流功率（Phase-I：50 kW or 30 kW），质子束束团长度可从14 ns降至1.5 ns，对应快中子时间分辨率提高约10倍
  - 加速器设置：LEBT斩波和RCS高频需要特殊设置



Back-n不同模式下的时间分辨

CSNS反角白光中子源建设历程

- 反角白光中子源早期研究回顾
  - 2007：作为CSNS束流扩展应用的方向之一启动，与原子能院中子物理室/核数据中心紧密合作
  - 2008：证实反角中子可用于核数据测量
  - 2010：CSNS经理部同意安排该终端（RTBT布局作调整）
  - 2011：CSNS经理部同意同时建设反角终端的隧道
  - 2013：CSNS经理部同意加速终端设计和建设，安排少量经费
- 项目建设关键节点
  - 2013年9月成立白光中子源合作组（高能所、原子能院、九院和西核所），后来科大加入；组建由5个单位共同参加的建设队伍；
  - 2013年12月：中子束线物理设计评审
  - 2014年5月：物理终端总体方案评审
  - 2014年12月：白光工作组决定分两阶段建设：自筹经费；科工局项目
  - 2015年2月：探测器方案设计评审
  - 2015年10月：首批物理实验方案评审
  - 2016年3月：CSNS调概，反角白光中子束线列入工程建设，917万
  - 2016年6月：国家重点研发计划“白光中子源实验技术研究”，1750万
  - 2017年5月：白光中子源实验研讨会，成立用户委员会和研究方向合作小组

Back-n装置建设过程

- 总体设计和中子束线物理设计：2013年3月-2014年6月
- 中子束线设备技术设计：2014年1月-2015年6月
- 中子束线设备研制：2015年1月-2016年3月
- 中子束线设备的安装和调试：2016年1-12月
- 探测器技术设计：2015年2-12月
- 首批探测器研制：2015年7月-2016年8月
- 探测器离线调试：2016年8月-2017年2月
- 探测器在线安装和调试：2017年3月-2017年8月
- 带束流调试：2017年8-11月（质子束首次打靶：2017年8月28日）
- 白光中子束流特征测量实验：2018年1-3月
- 首批实验：2018年3-7月
- **开放实验：2018年下半年开始**

合作组成员

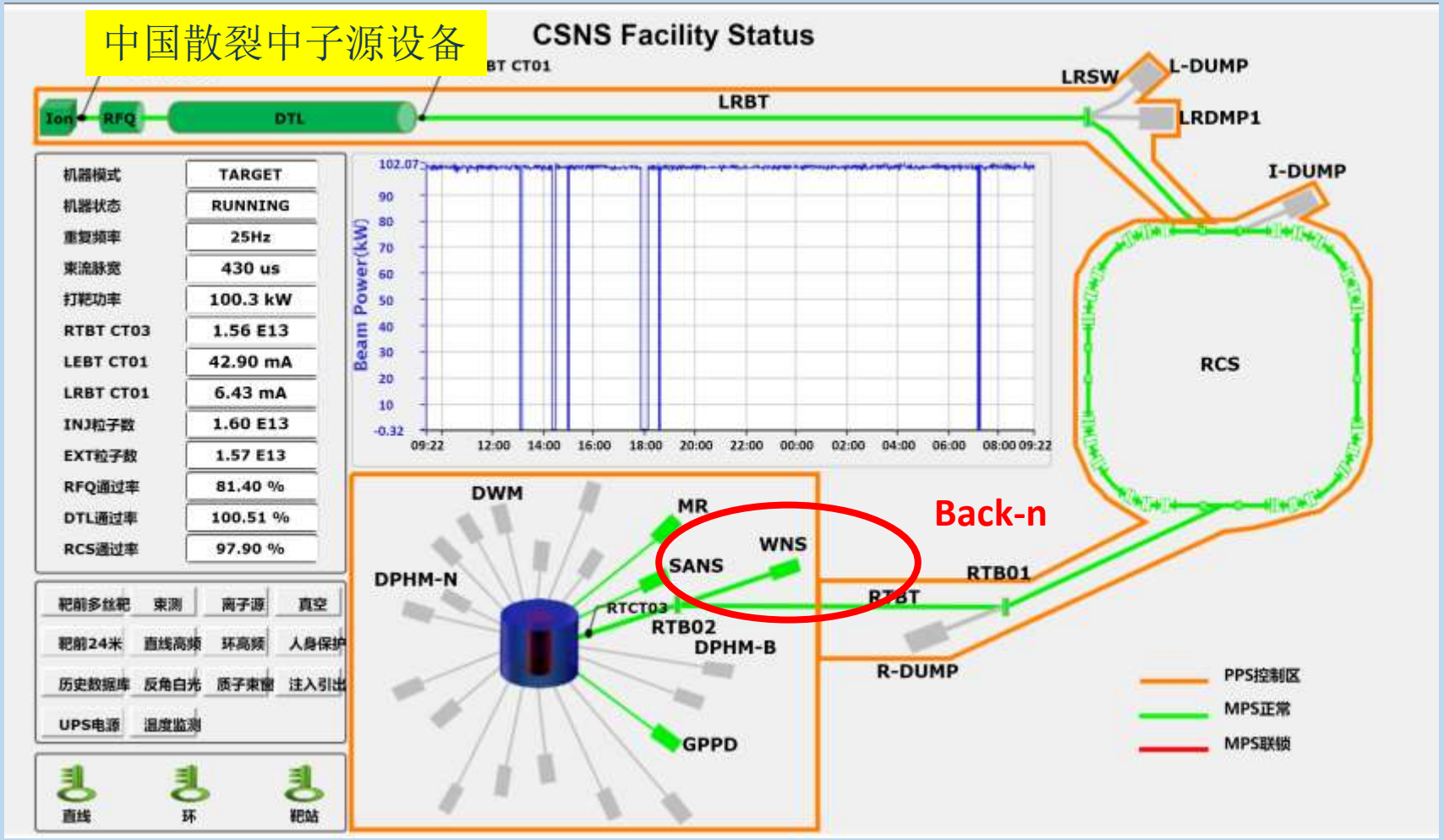
- 中国科学院高能所
- 中国原子能科学研究院
- 中国工程物理研究院二所
- 西北核技术研究所
- 中国科学技术大学
- 北京大学
- 北京航空航天大学
- 西安交通大学
- ……

目前Back-n文章作者清单中共87人，来自11家单位

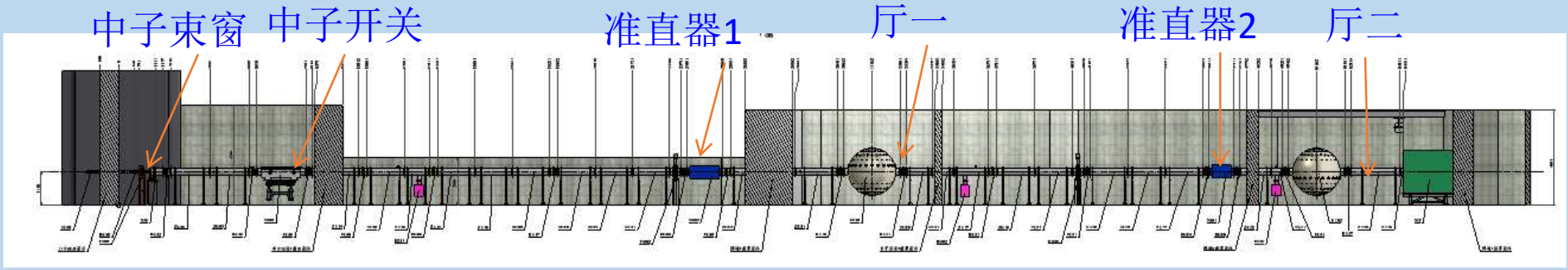


2018年第二届白光中子源用户会议合影

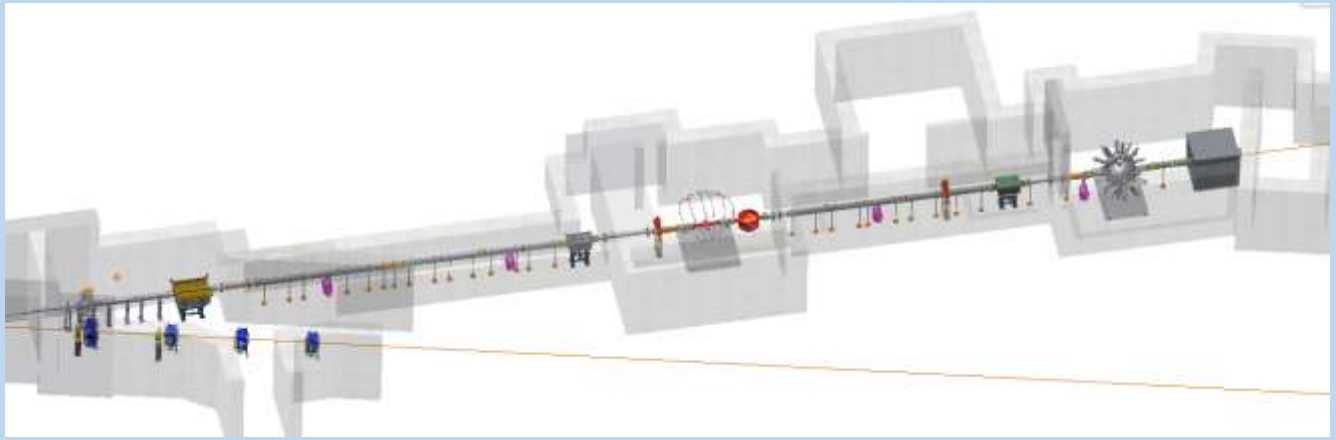
Back-n的位置


中国散裂中子源设备
CSNS Facility Status
Ion
RFQ
DTL
LRBT
LRSW
L-DUMP
LRDMP1
I-DUMP
RCS
机器模式 TARGET
机器状态 RUNNING
重复频率 25Hz
束流脉宽 430 us
打靶功率 100.3 kW
RTBT CT03 1.56 E13
LEBT CT01 42.90 mA
LRBT CT01 6.43 mA
INJ粒子数 1.60 E13
EXT粒子数 1.57 E13
RFQ通过率 81.40 %
DTL通过率 100.51 %
RCS通过率 97.90 %
Beam Power(kW)
102.07
90
80
70
60
50
40
30
20
10
-0.32
09:22
12:00
14:00
16:00
18:00
20:00
22:00
00:00
02:00
04:00
06:00
08:00 09:22
靶前多丝靶
束测
离子源
真空
靶前24米
直线高频
环高频
人身保护
历史数据库
反角白光
质子束窗
注入引出
UPS电源
温度监测
直线
环
靶站
DWM
MR
WNS
SANS
DPHM-N
RTCT03
RTB02
DPHM-B
GPPD
Back-n
RTB01
RTBT
R-DUMP
PPS控制区
MPS正常
MPS联锁

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

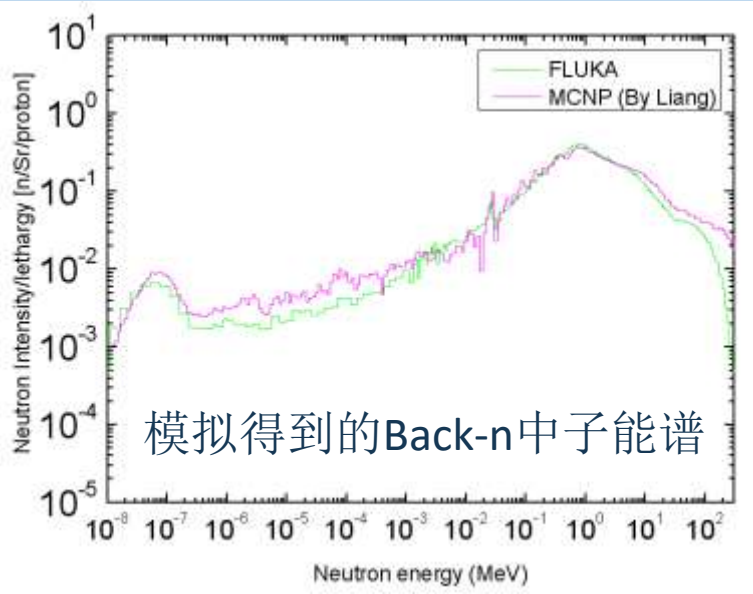
*对应100kW束流功率下

*Back-n white neutron facility for nuclear data measurements at CSNS， 2017 JINST 12 P07022.

白光中子束线

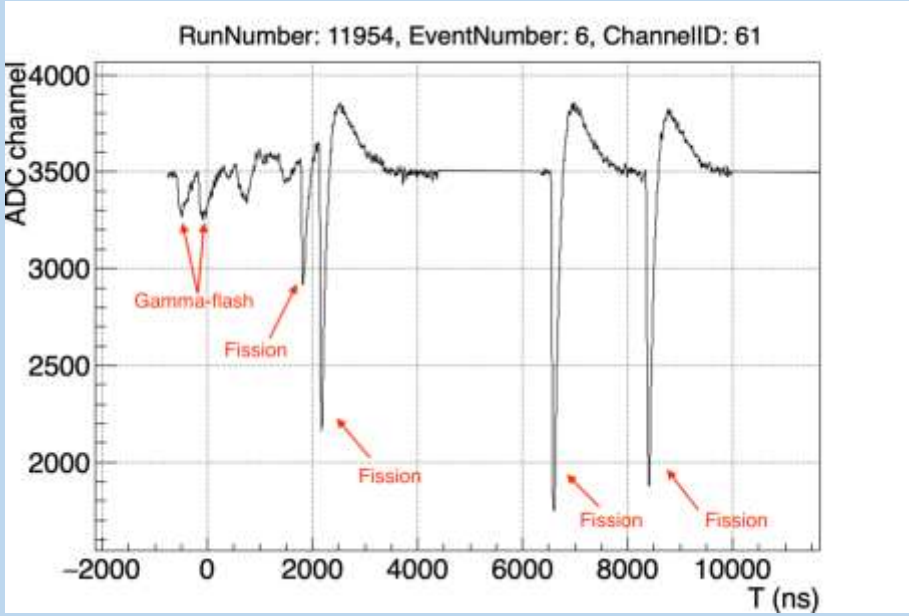
- Back-n合作组及白光中子束线
- 相关实验
  1. 束流品质及本底测量
  2. 核数据测量实验
  3. 探测器标定及测试
  4. 中子共振照相实验
  5. 辐照效应实验
- 未来探测器发展规划

Back-n中子特征及信号时间结构

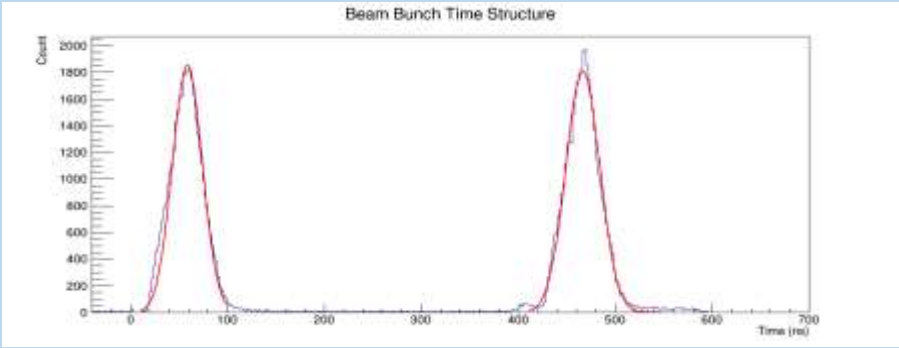


模拟得到的Back-n中子能谱

估算中子产额10^{16}n/s@100kW，
中子注量10^{7}n/cm^2/s@50m;



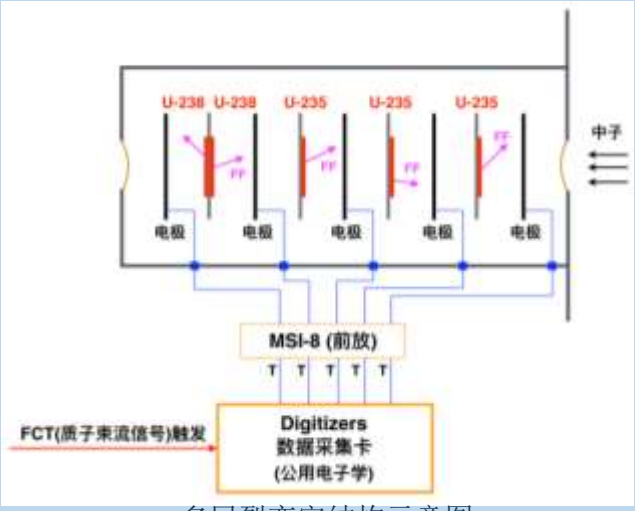
一个周期内探测器的典型波形



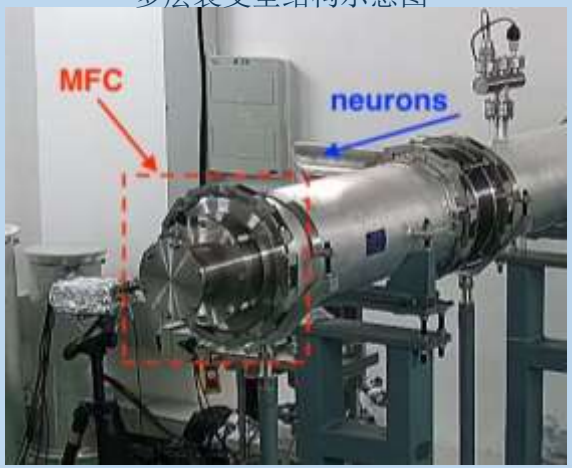
质子打靶的双数团结构

- 束团时间间隔： 409.0±2.0 ns
- 束团半高宽：41.6±2.0 ns

Back-n 能谱和注量测量实验

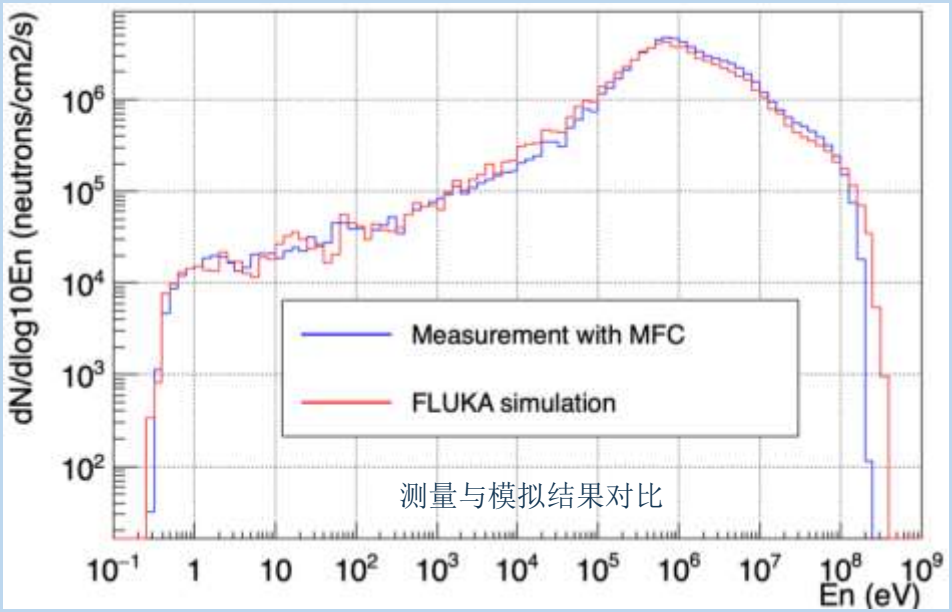


多层裂变室结构示意图



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^{235}U薄片样品作为中子转换层



测量与模拟结果对比

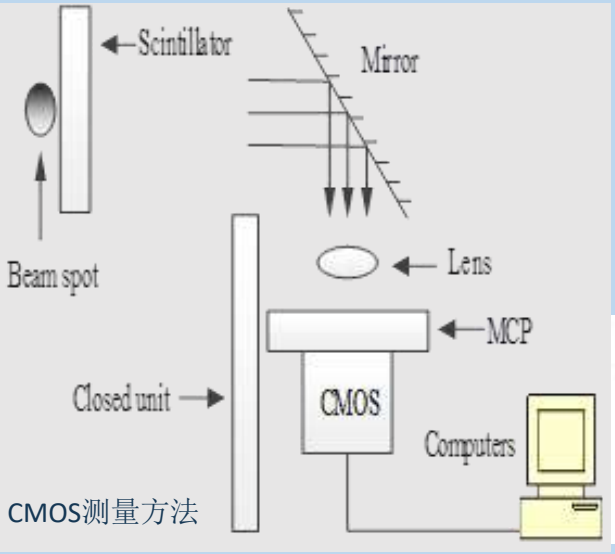
WNS Back-n厅2(#ES2)能谱/注量

- #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

Eur. Phys. J. A (2019) **55**: 115

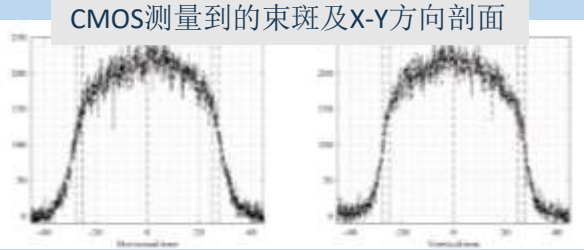
Back-n束斑测量



CMOS测量方法

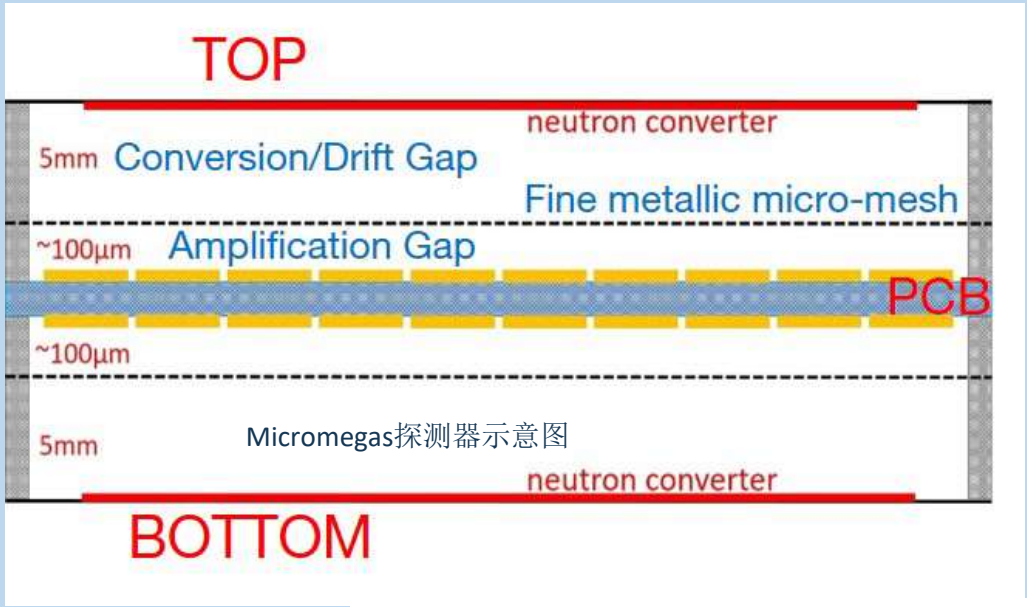


CMOS测量到的束斑及X-Y方向剖面

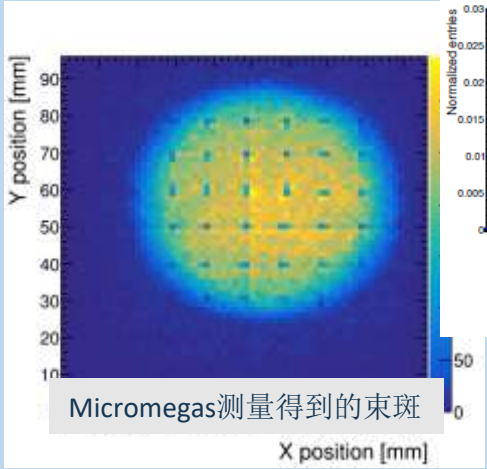


能量/MeV	计数圈半径/mm				
	5	10	15	20	25
1e-6~1e-3	6.34	6.69	7.11	7.76	8.95
1e-3~0.1	5.77	5.89	6.21	6.81	8.08
0.1~1	6.80	6.79	7.38	8.66	11.77
1~2	6.98	7.09	7.64	8.80	11.64
2~3	7.07	7.13	7.71	8.89	11.78
3~8	5.13	5.21	5.81	7.00	9.99
8~14	6.86	6.84	7.34	8.46	11.28

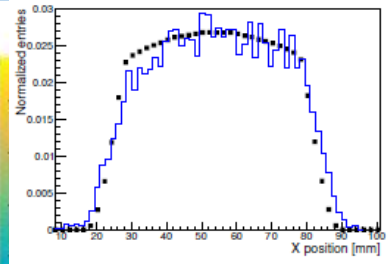
CMOS相机方法



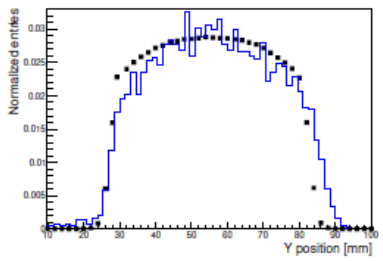
Micromegas探测器示意图



Micromegas测量得到的束斑



Projection on X



Projection on Y

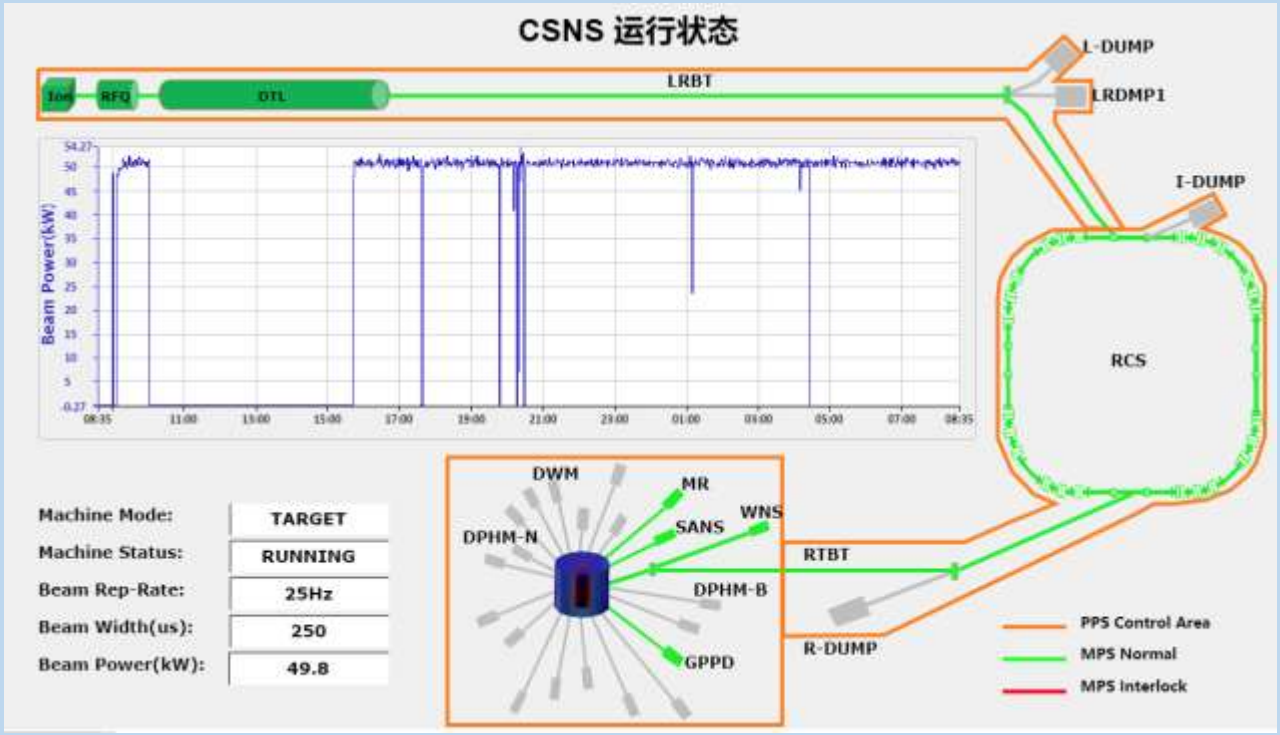
Micromegas测量得到的X－Y方向投影及与模拟结果对比

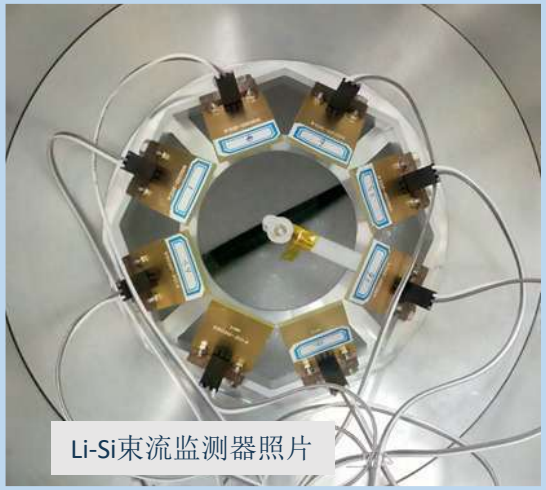
Micromegas探测器

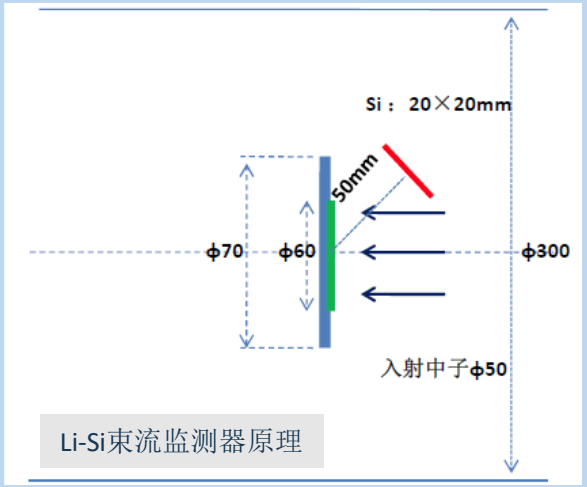
Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 957 (2020) 163407

Back-n的束流监测

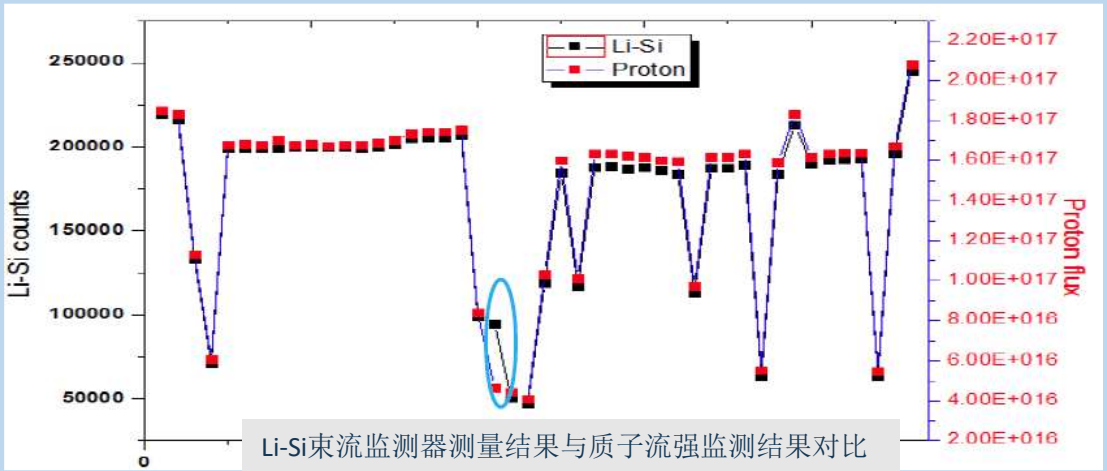
- 使用质子流强监测
- Li-Si束流监测器




Li-Si束流监测器照片



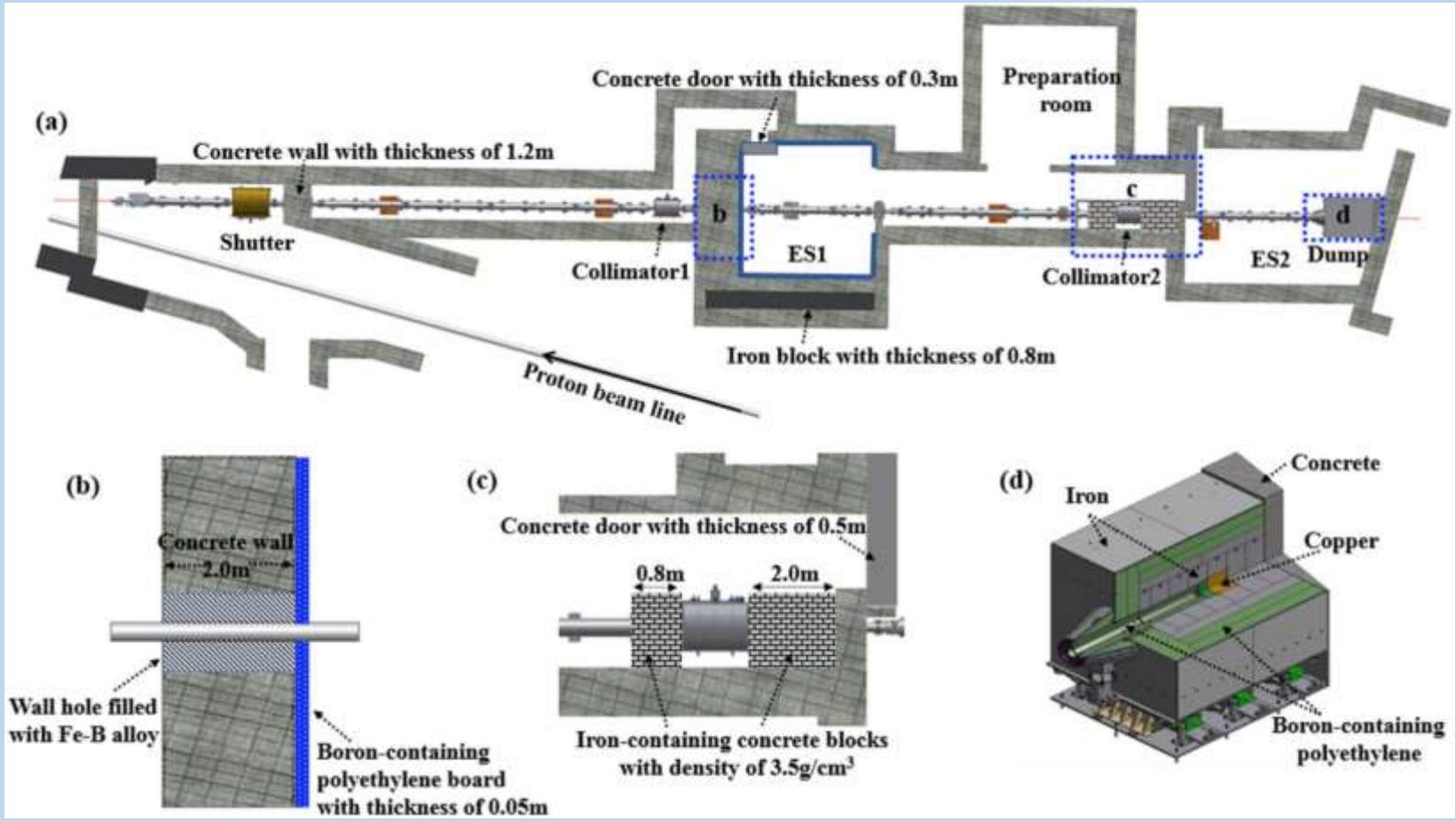
Li-Si束流监测器原理



Li-Si束流监测器测量结果与质子流强监测结果对比

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 946 (2019) 162497

Back-n本底测量



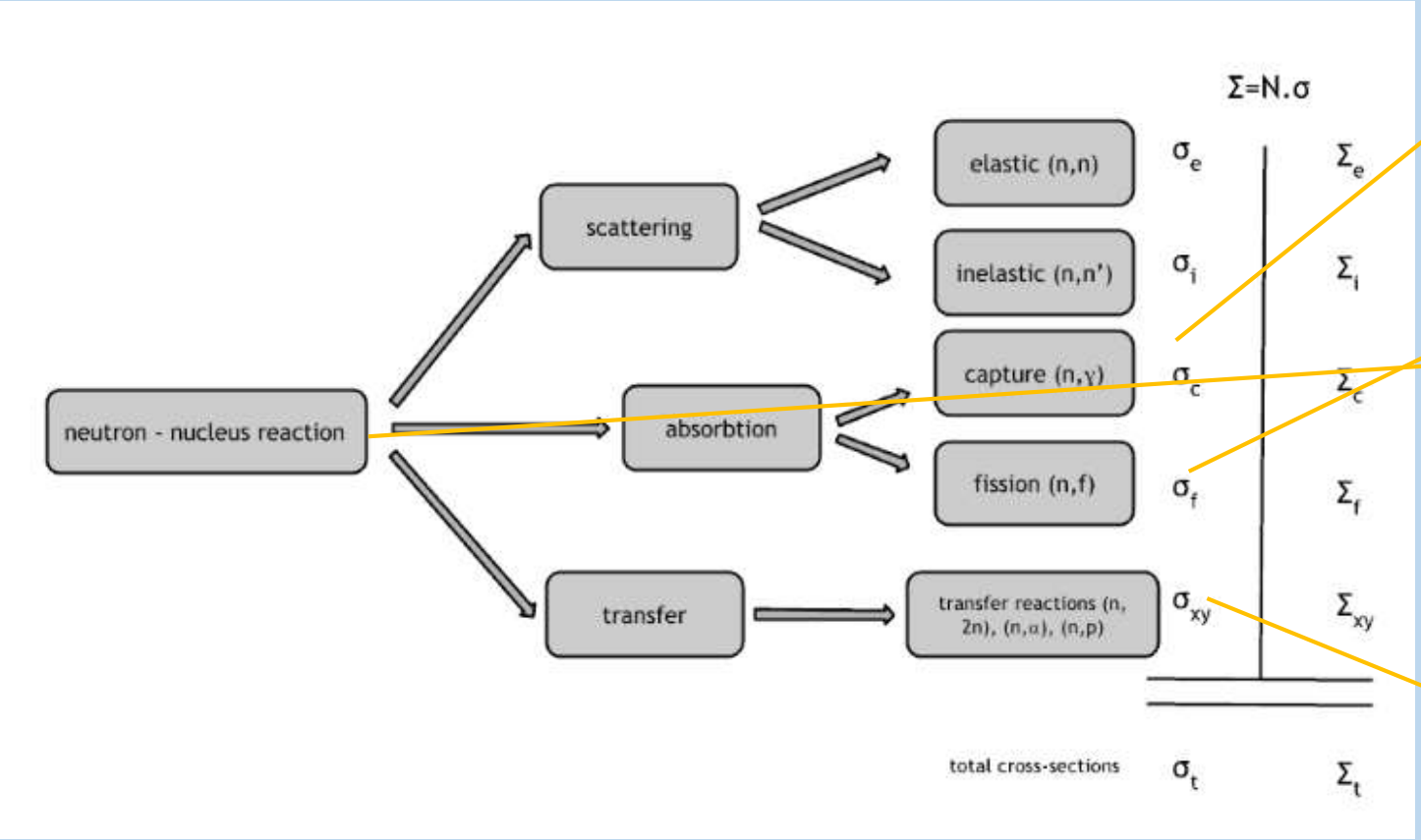
实验厅1和厅2本底控制水平完全满足实验需求；前墙穿墙孔附近还是能看出来有轻微漏中子，影响很小；屏蔽门、捕集器周围没有明显漏中子，屏蔽效果很好

Neutron and γ background measurements of the experimental halls at the CSNS back-streaming white neutron source，NIMA Volume 980, 11 November 2020, 164506

提纲

- Back-n合作组及白光中子源束线
- 相关实验
  1. 束流品质及本底测量
  2. 核数据测量实验
  3. 探测器标定及测试
  4. 中子共振照相实验
  5. 辐照效应实验
- 未来探测器发展规划

核数据测量实验

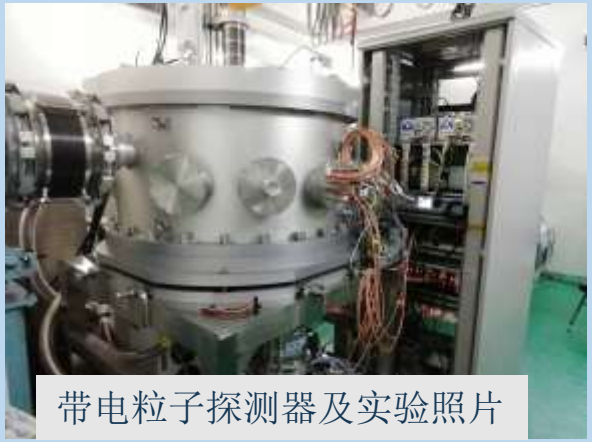




C6D6探测器及实验照片



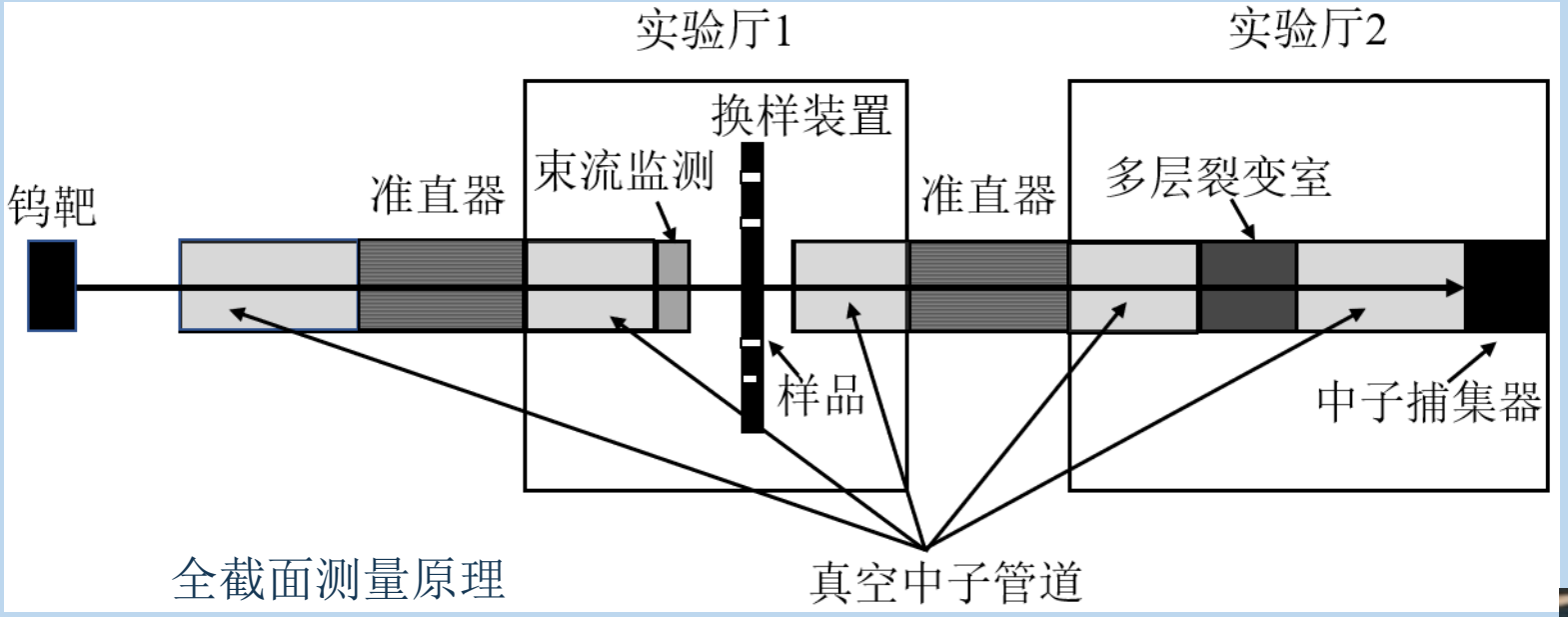
裂变截面、全截面测量探测器及实验照片



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。

全截面测量谱仪-NTOX

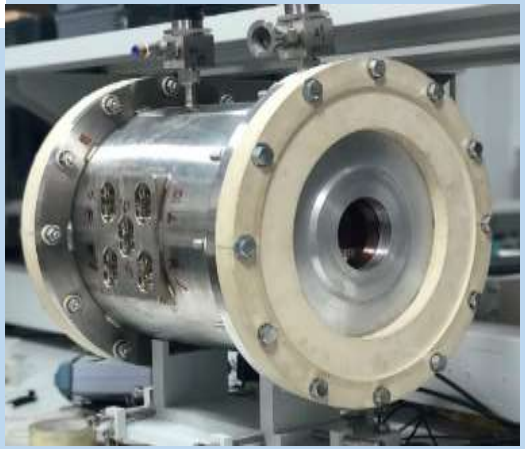



NTOX换样设备

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。

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

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 940 (2019) 486–491



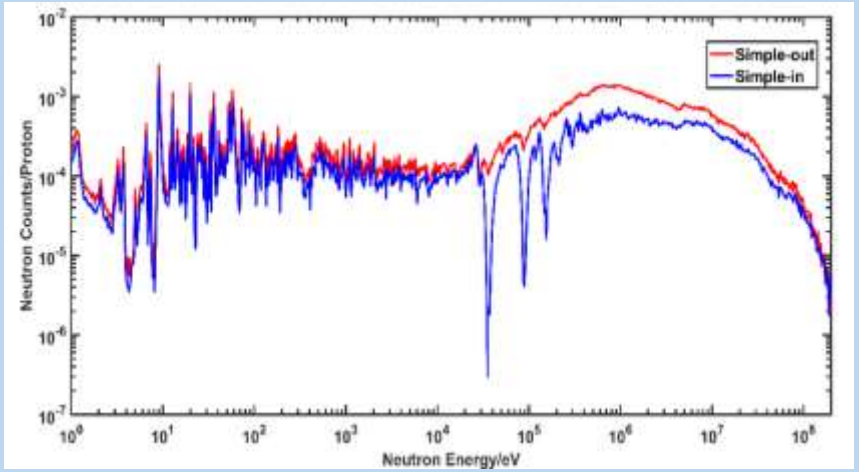
样机内装：
- 高纯U235镀片*3层
- 高纯U238镀片*3层
- 高纯U236镀片*1层
- 纯底衬片*1层

NTOX裂变室

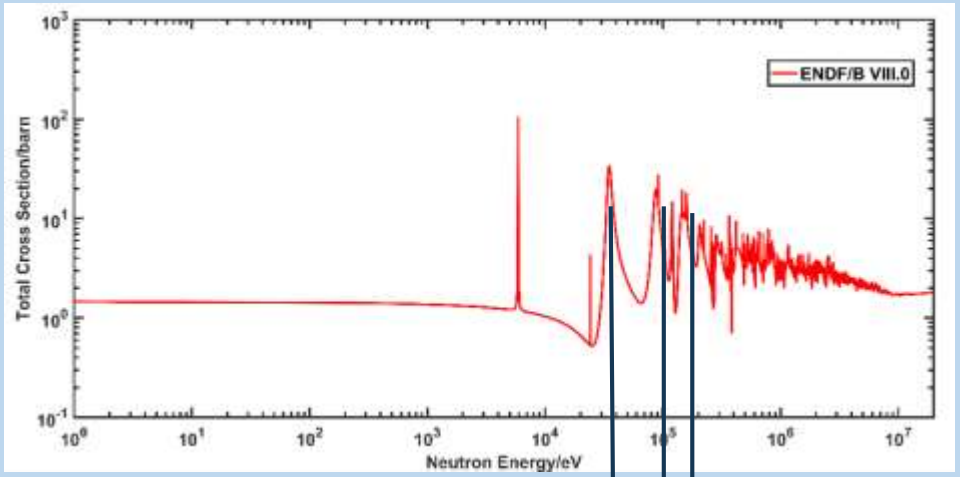
40mm铝实验/U235裂变室

- 全截面实验与核数据库对比

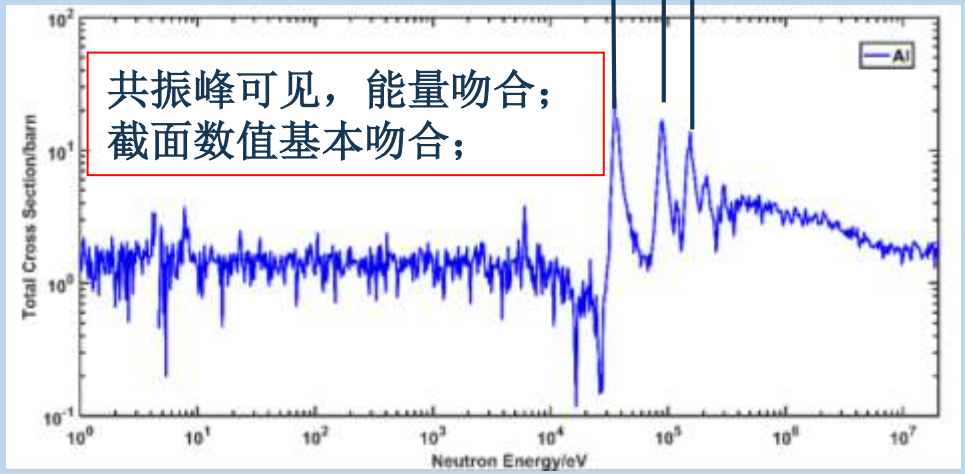
无样品/有样品时U5裂变室中子能谱



NUCL SCI TECH (2019) 30:139



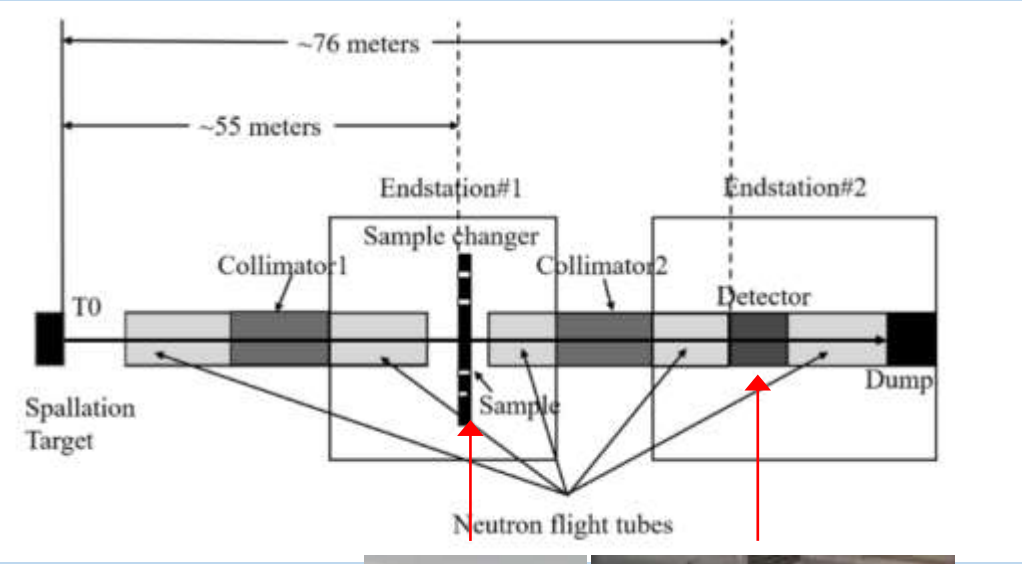
铝全截面实验



共振峰可见，能量吻合；
截面数值基本吻合；

元素分析方法

NTOX全截面测量装置







$$s = -\frac{1}{N_s}\ln T$$

σ-全截面

N_s-靶核面密度

T-中子透射率

$$N_s = -\frac{mhn}{SM}$$

m-样品总质量

η-成分含量（百分比）

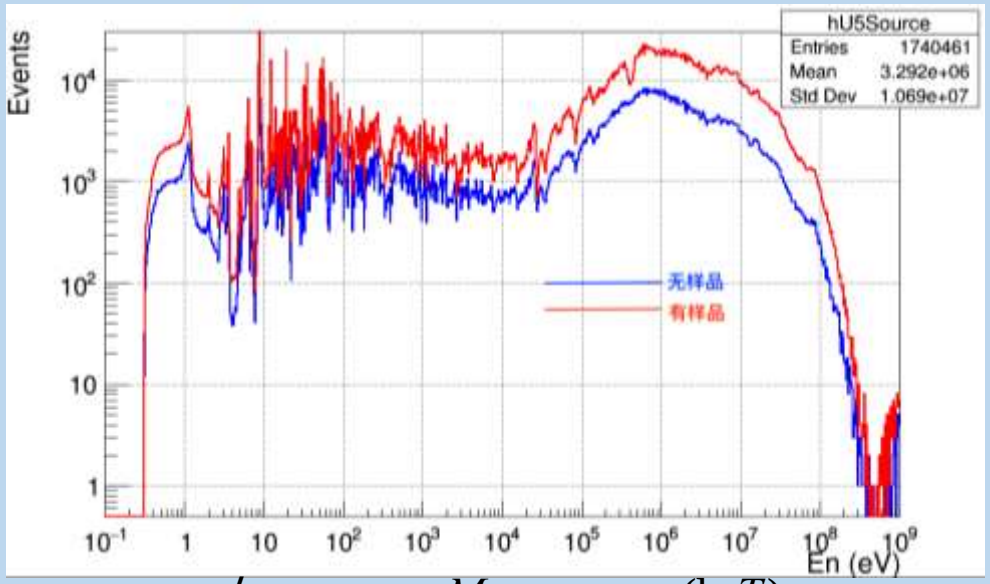
M-成分分子量

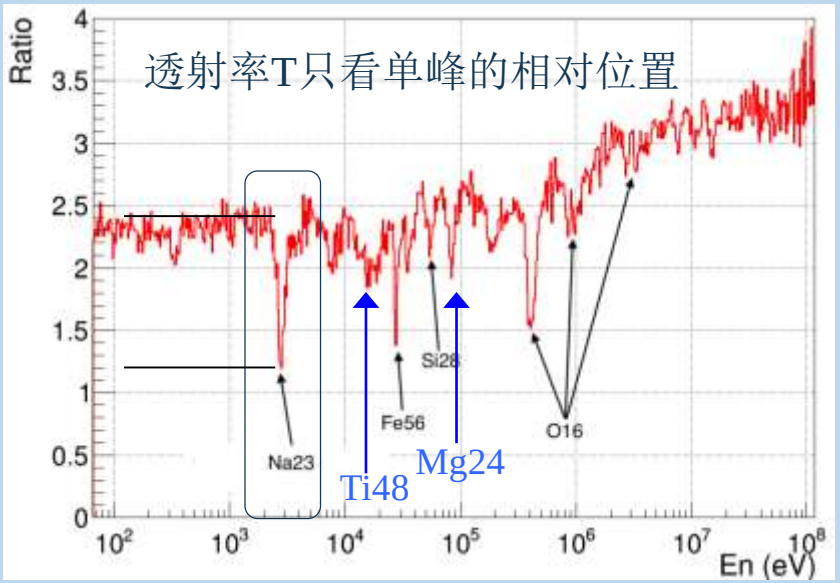
S-样品表面积

n-靶核系数

$$h = -\frac{SM}{s\,mn}\ln T$$

$$\frac{h_{Na}}{h_{Fe}} = \frac{n_{Fe}}{n_{Na}} \cdot \frac{M_{Na}}{M_{Fe}} \cdot \frac{s_{Fe}}{s_{Na}} \cdot \frac{(\ln T)_{Na}}{(\ln T)_{Fe}}$$





$$\frac{h_{Na}}{h_{Fe}} = \frac{n_{Fe}}{n_{Na}} \cdot \frac{M_{Na}}{M_{Fe}} \cdot \frac{s_{Fe}}{s_{Na}} \cdot \frac{(\ln T)_{Na}}{(\ln T)_{Fe}}$$

实验数据

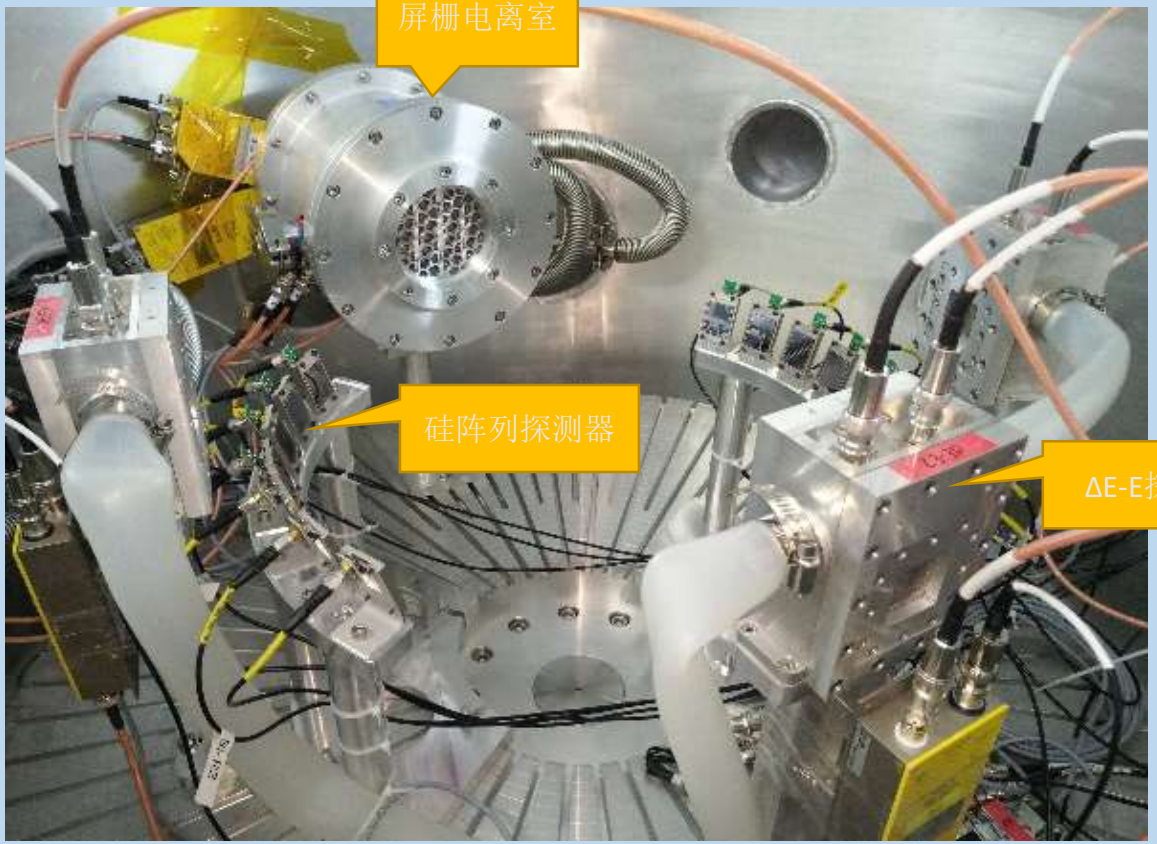
$\eta_{Na}/\eta_{Fe} = 0.1327$
$\eta_{Na}/\eta_{Mg} = 0.3267$
$\eta_{Na}/\eta_{Si} = 0.2159$
$\eta_{Si}/\eta_{Fe} = 0.6148$

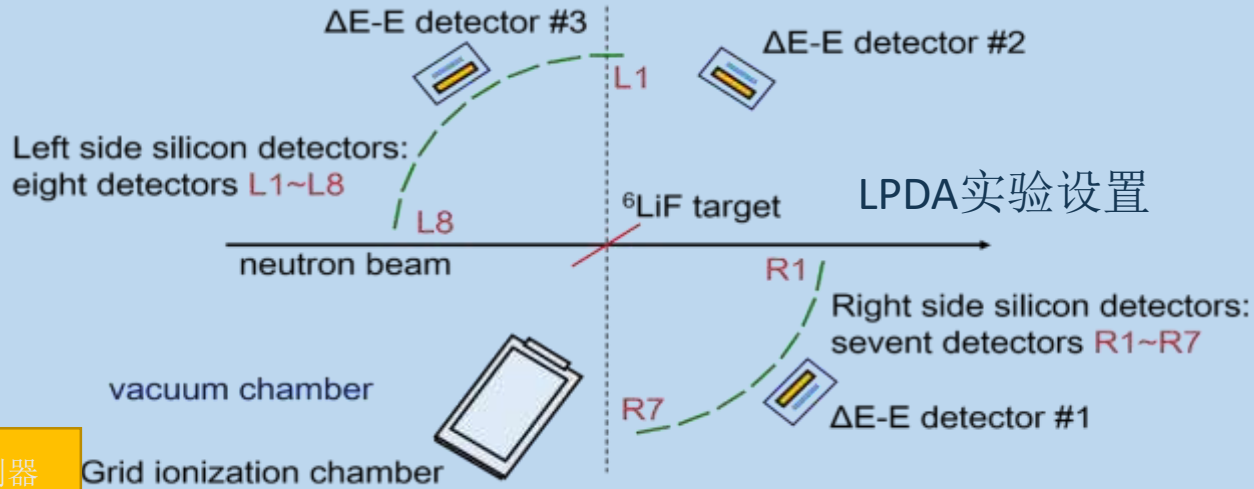
样品数据

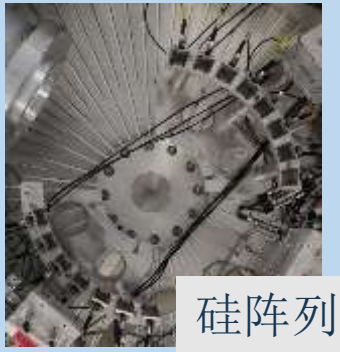
$\eta_{Na}/\eta_{Fe} = 0.1398$
$\eta_{Na}/\eta_{Mg} = 0.2875$
$\eta_{Na}/\eta_{Si} = 0.0417$
$\eta_{Si}/\eta_{Fe} = 3.35$

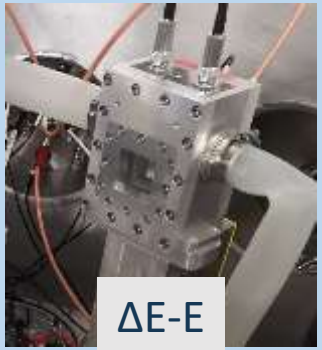
岩石类型	代号	SiO2	Al2O3	CaO	FeO	T.Fe2O3	K2O	MgO	Na2O	TiO2	SUM	含量检查
钛铁矿	SX67-05	5.53	3.52	0.89		54.87	0.097	2.82		32.97	100.697	c
辉长岩	GBW07112	35.69	14.14	9.86		24.75	0.15	5.25	2.11	7.69	99.64	c
辉长岩	MO-5	37.66	13.35	7.81		20.98	0.8	7.48	2.35	6.99	97.42	c
辉长岩	MO-3	37.62	13.67	15.75		18.54	0.204	8.66	0.72	1.46	96.624	c
角闪石岩	MU-3	37.95	14.24	11.04		18.26	0.382	12.7	2.14	1.91	98.622	c
高钛玄武岩	NAO_HighTi	43.21	13.47	6.94		17.07	1.39	7		7.84	96.92	c
辉长岩	JGb-1		17.49	11.9		15.06	0.24	7.85	1.2	1.6	55.34	c
斜三角岩	GBW07122	49.6	13.8	9.6		14.8	0.48	7.2	2.07	0.922	98.472	c

带电粒子探测器（LPDA）布局



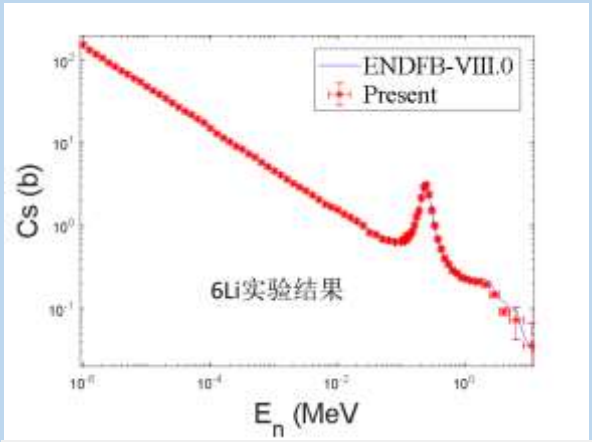


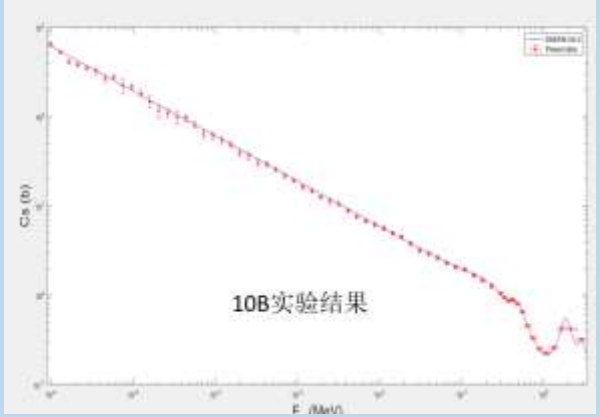

硅阵列

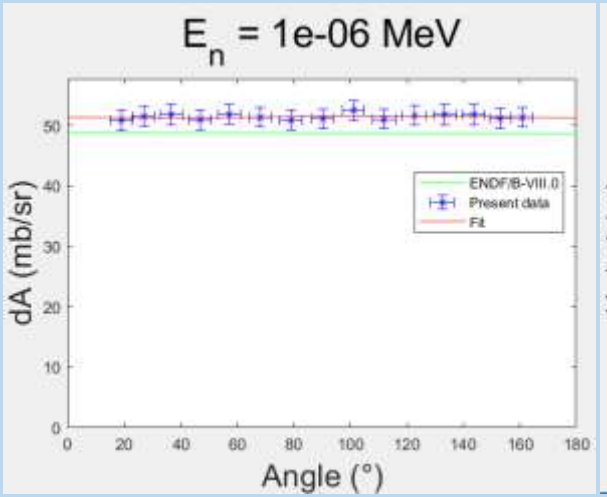

ΔE-E

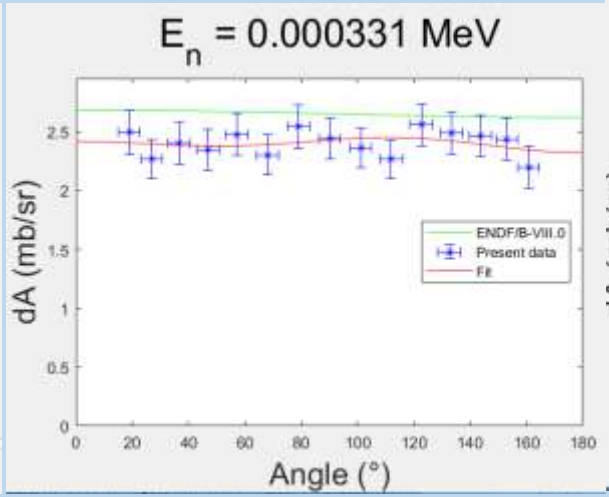

GIC

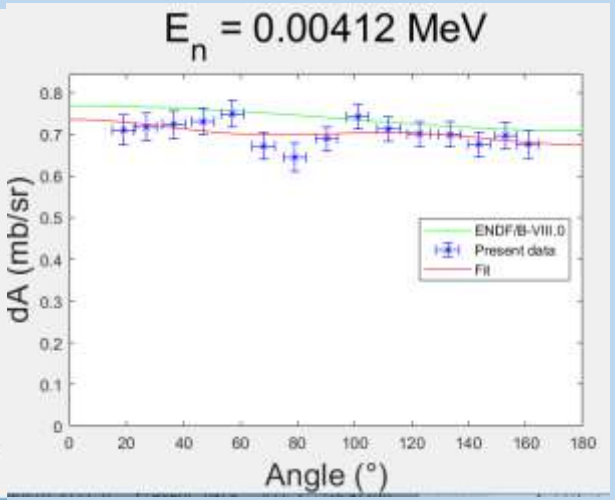
硅阵列探测器

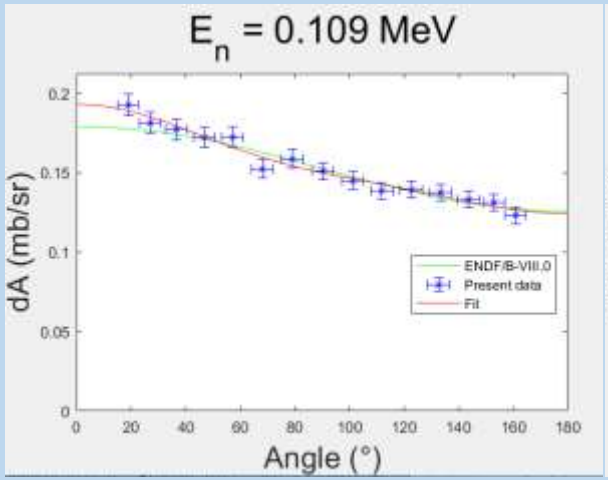


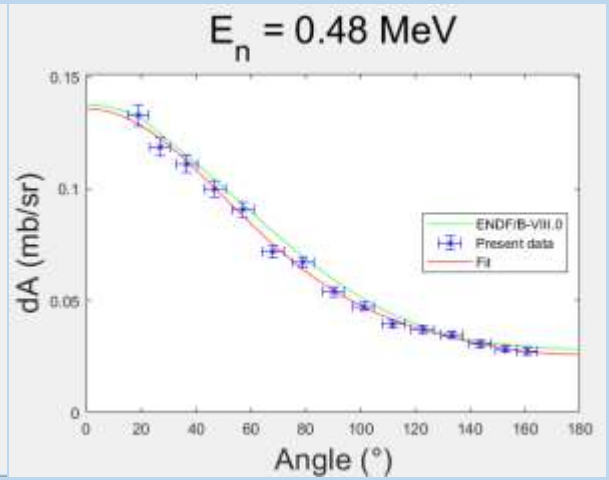


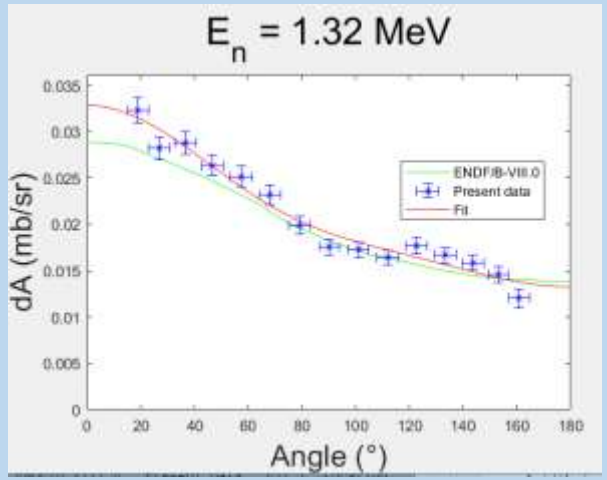










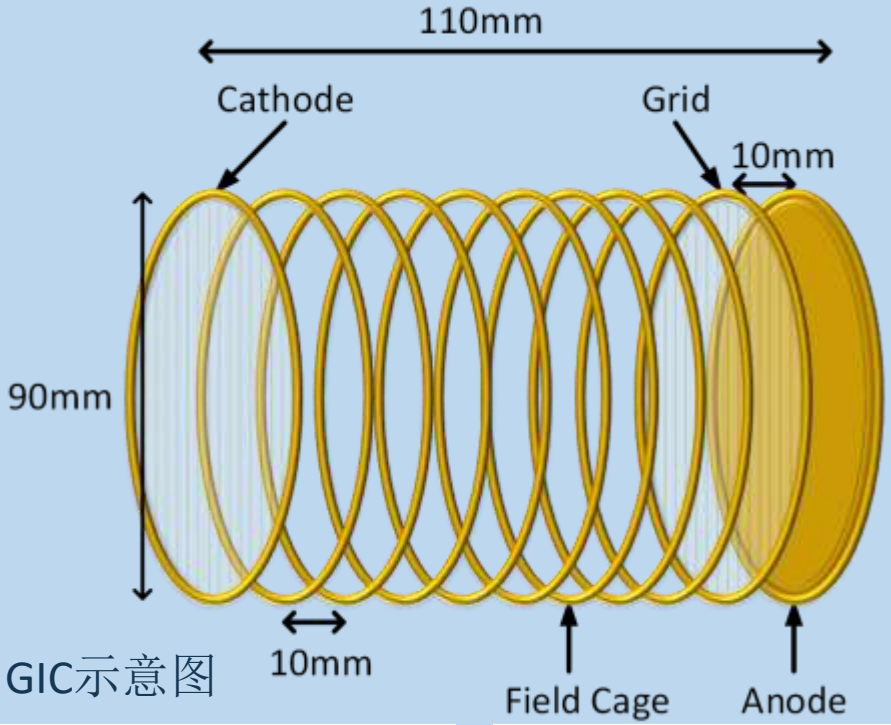


Chinese Physics C Vol. 44, No. 1 (2020) 014003

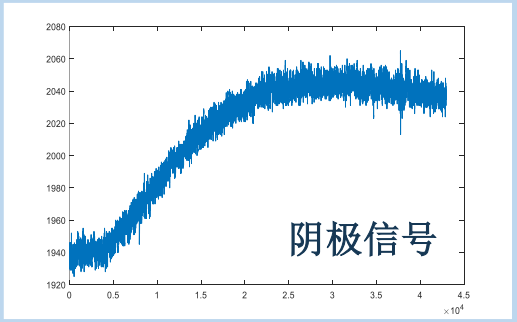
Chinese Physics C Vol. 43, No. 12 (2019) 124002

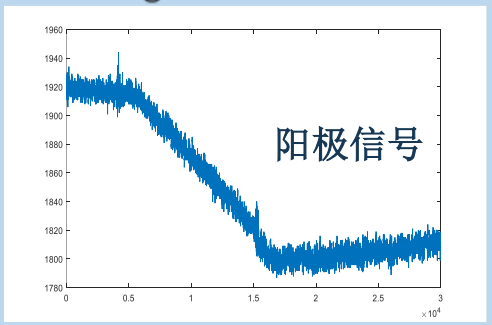
^{10}B的双微分截面

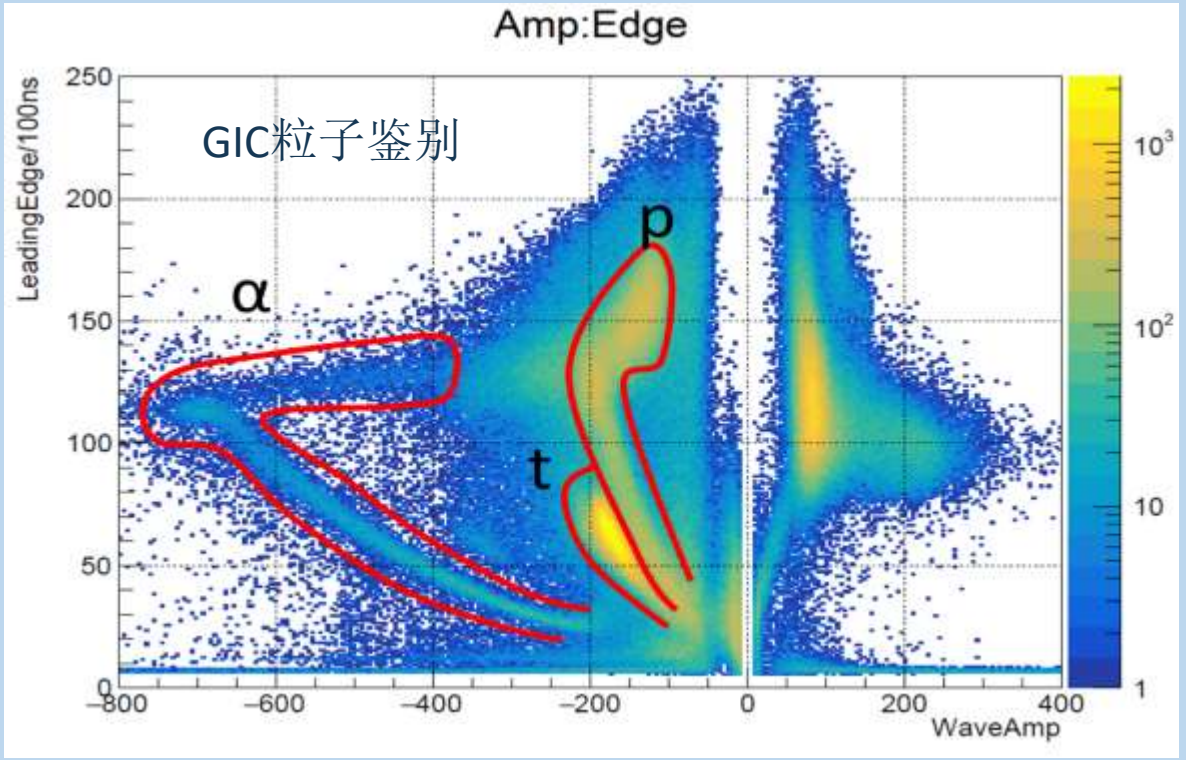
屏栅电离室（GIC）



GIC示意图



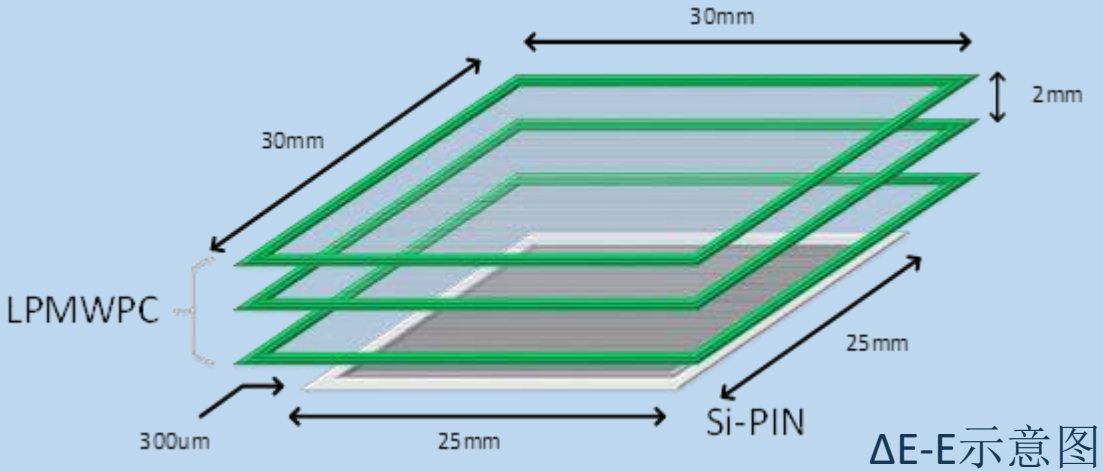




通过阴极和阳极的信号上升时间及幅度来鉴别粒子

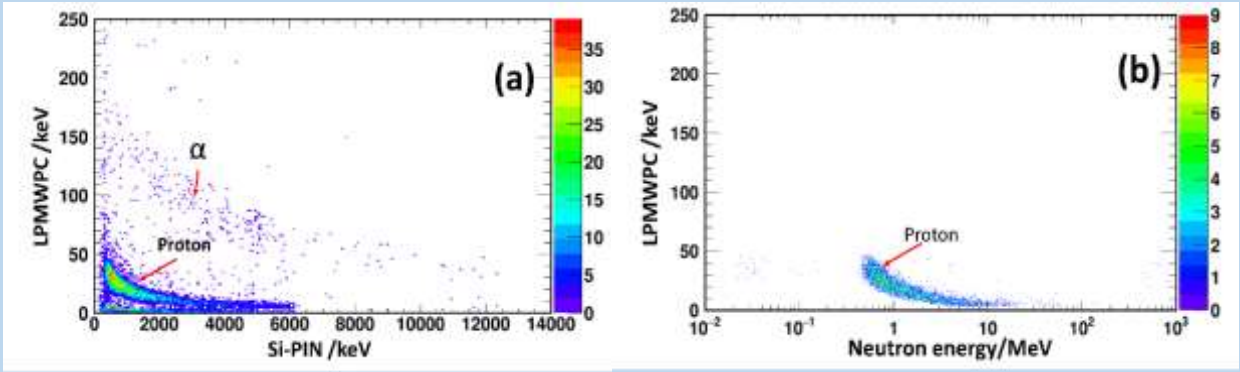
H. Yi， R. Fan*, et al 2019 JINST 14 P02011
Y. Zhao, R. Fan, et al 2017 JINST 12 P11001

ΔE-E探测器（LPMWPC+Si）

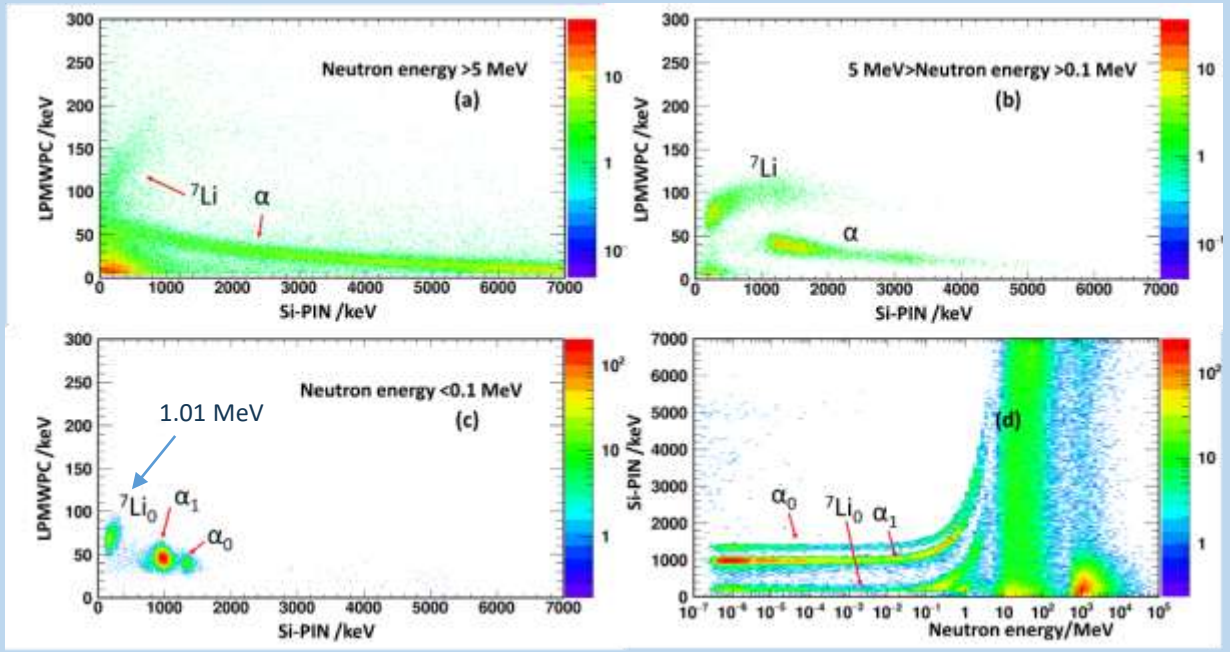


ΔE-E示意图

LPMWPC气压可以在300-1E5Pa之间调整



可以将粒子探测下阈拓展到500keV



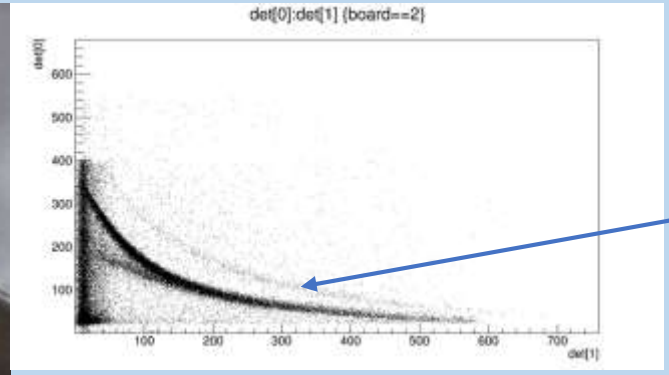
后续还加入了CsI探测器作为第三级，可以测量100MeV的质子事件。

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 981 (2020) 164343

从中子到质子

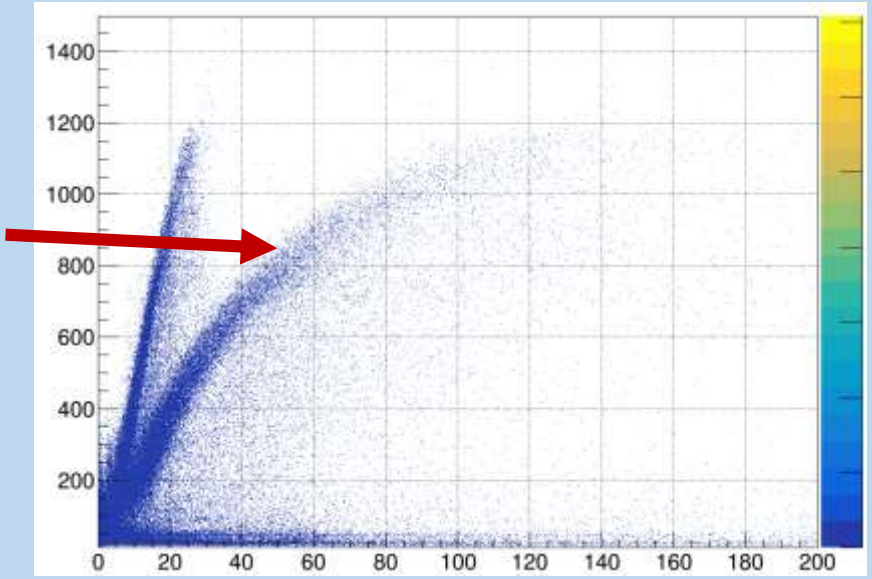


ΔE-E探测器阵列



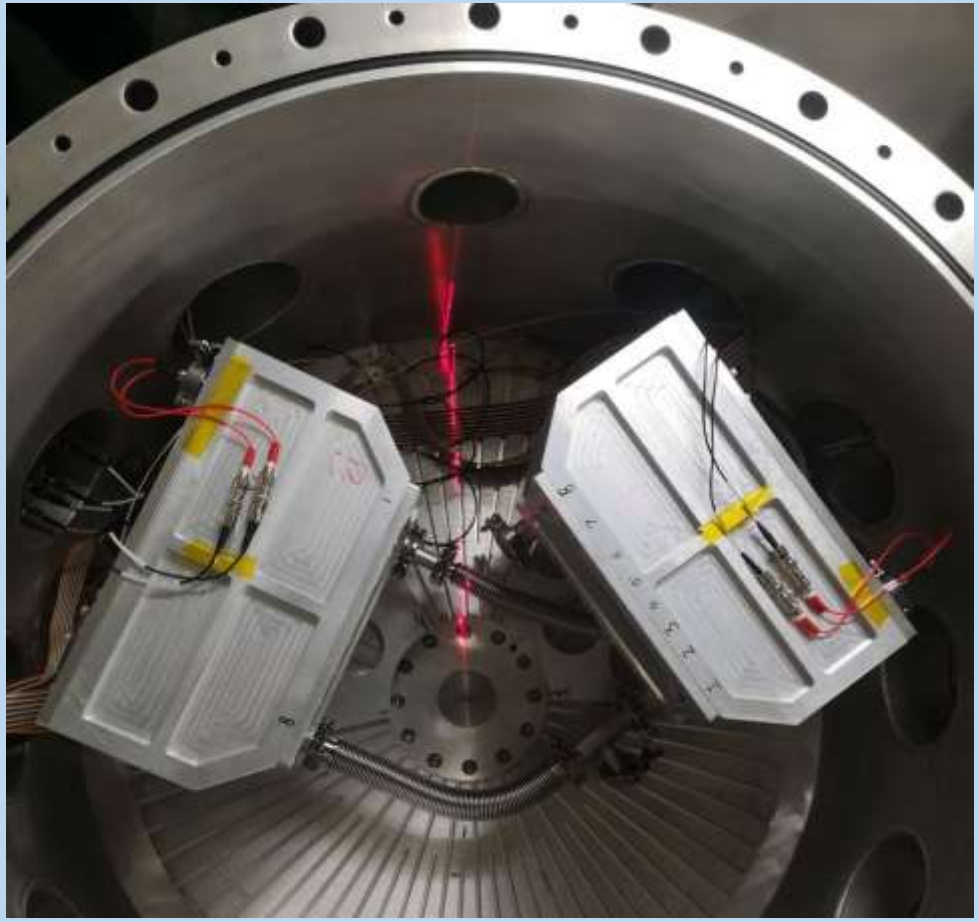
通过硅和CsI闪烁体进行的粒子分辨横轴是CsI信号幅度，纵轴是硅信号幅度

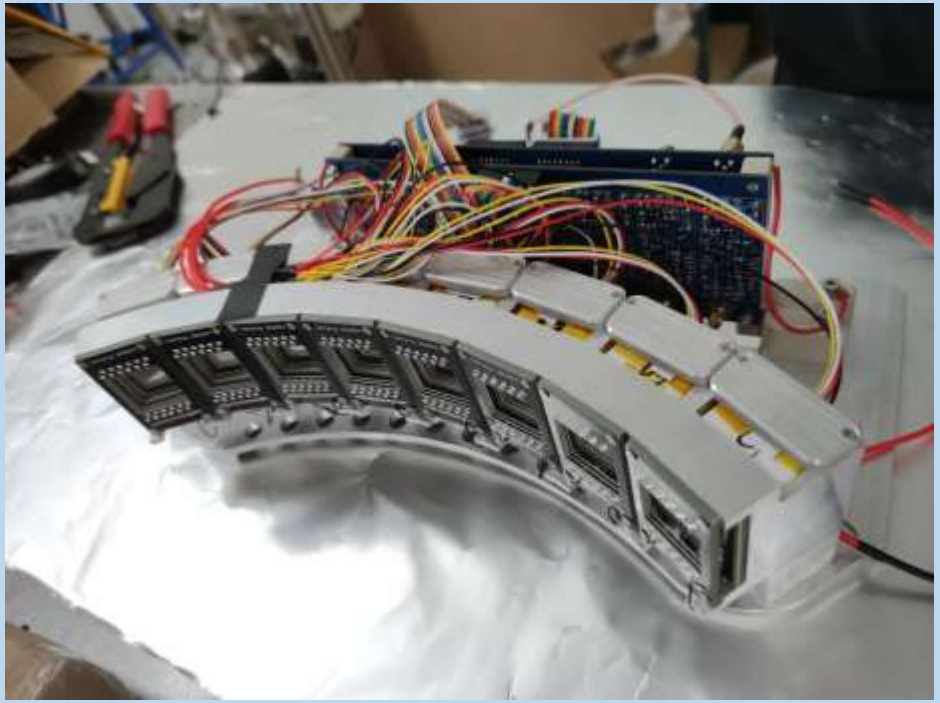
CsI测量得到的质子响应曲线，横轴是换算质子能量，纵轴是CsI信号幅度



可以通过ΔE-E谱得到质子事件，通过中子飞行时间换算相应反冲质子能量。测试结果显示，探测器测量的质子能区覆盖100MeV。
显示白光中子源可以进行探测器对不同能量质子响应标定。

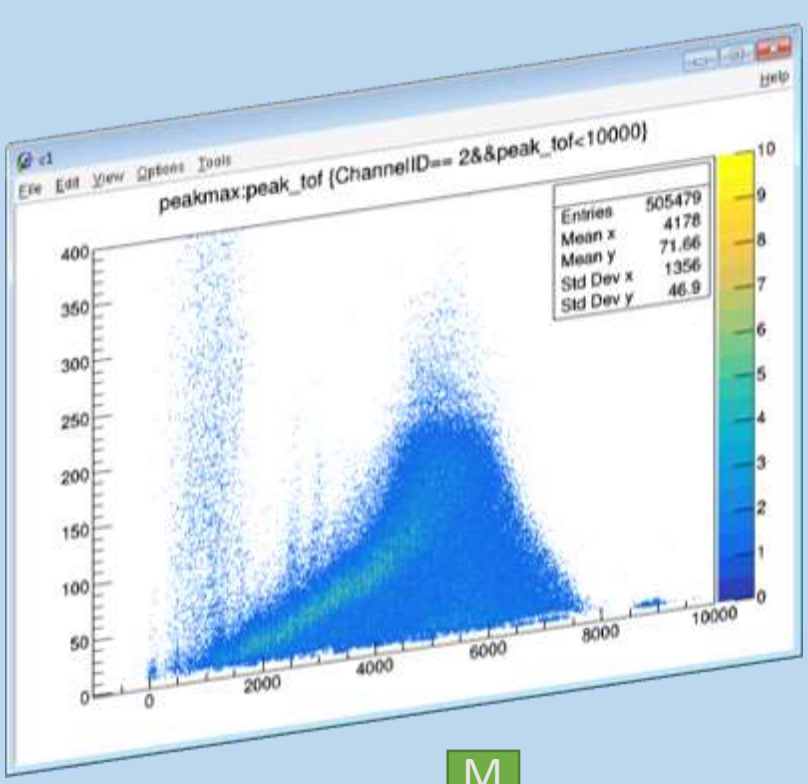
LPDA模块

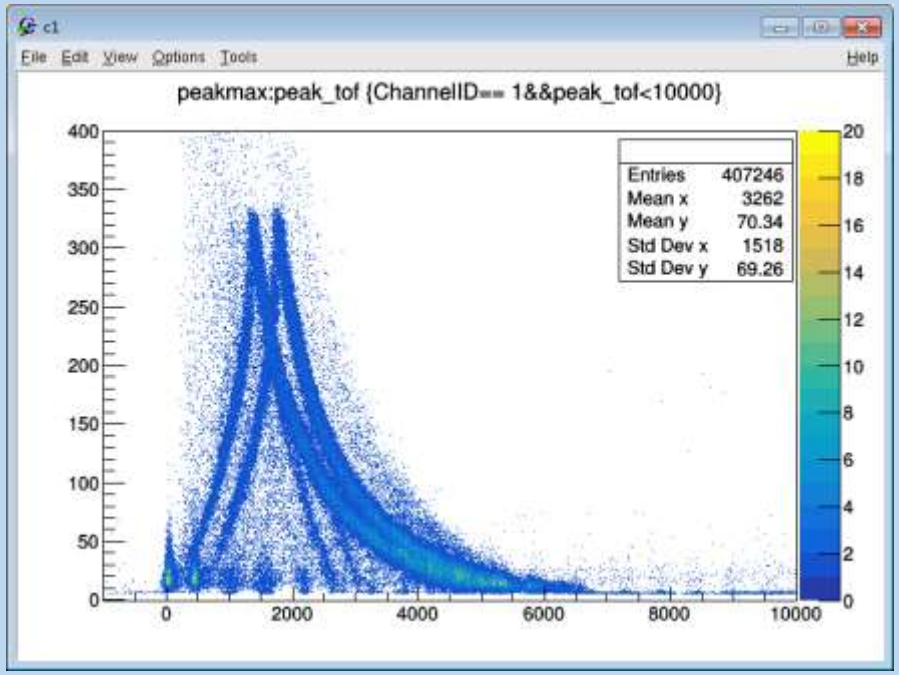


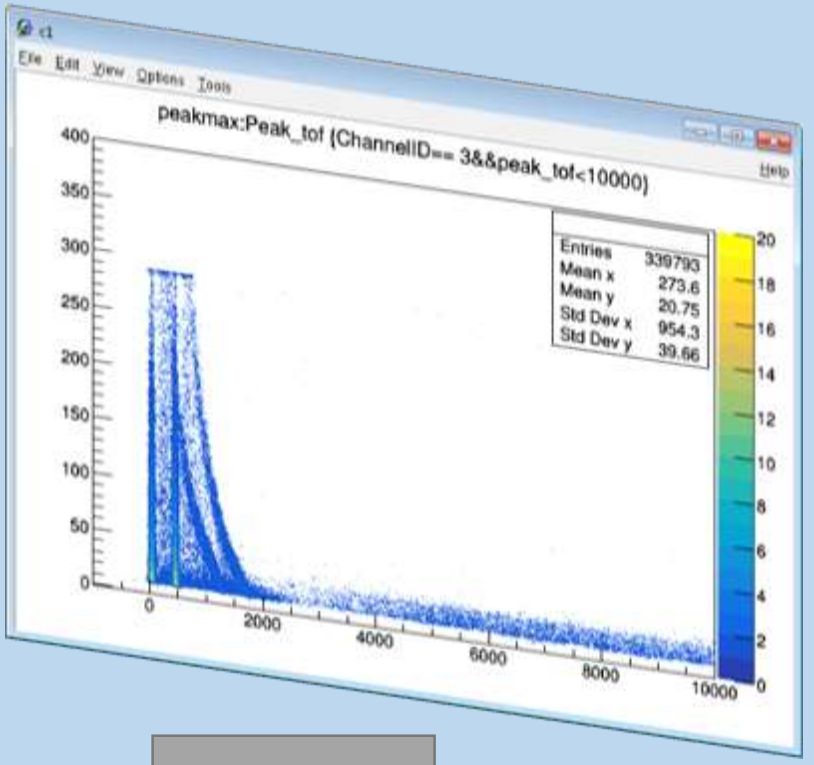


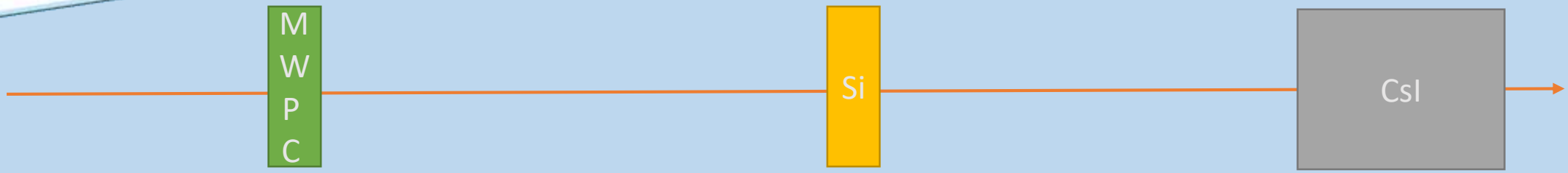
LPDA分为两个模块，每个模块覆盖23.5-90度角度。包含8套LPMWPC+Si+CsI探测器望远镜。整个探测器共48路读出。已于2020年6月制作完毕，并进行了初步测试。

质子在每种探测器内沉积信号

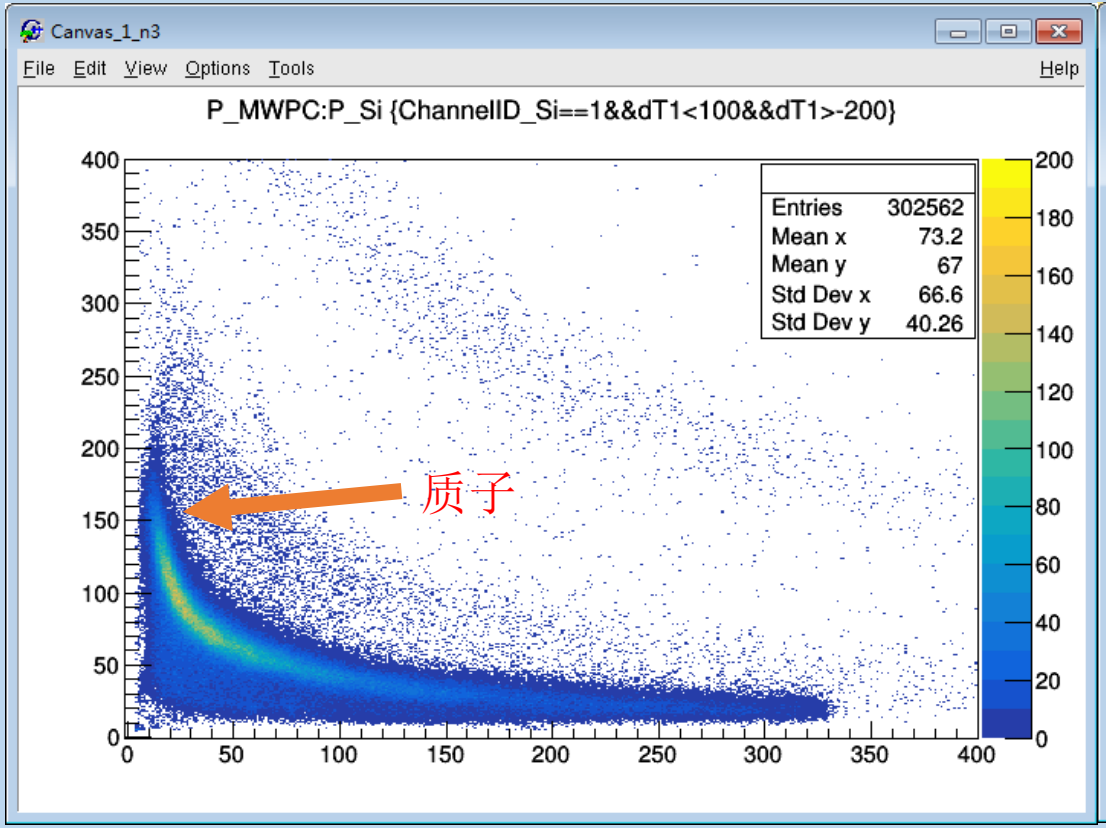




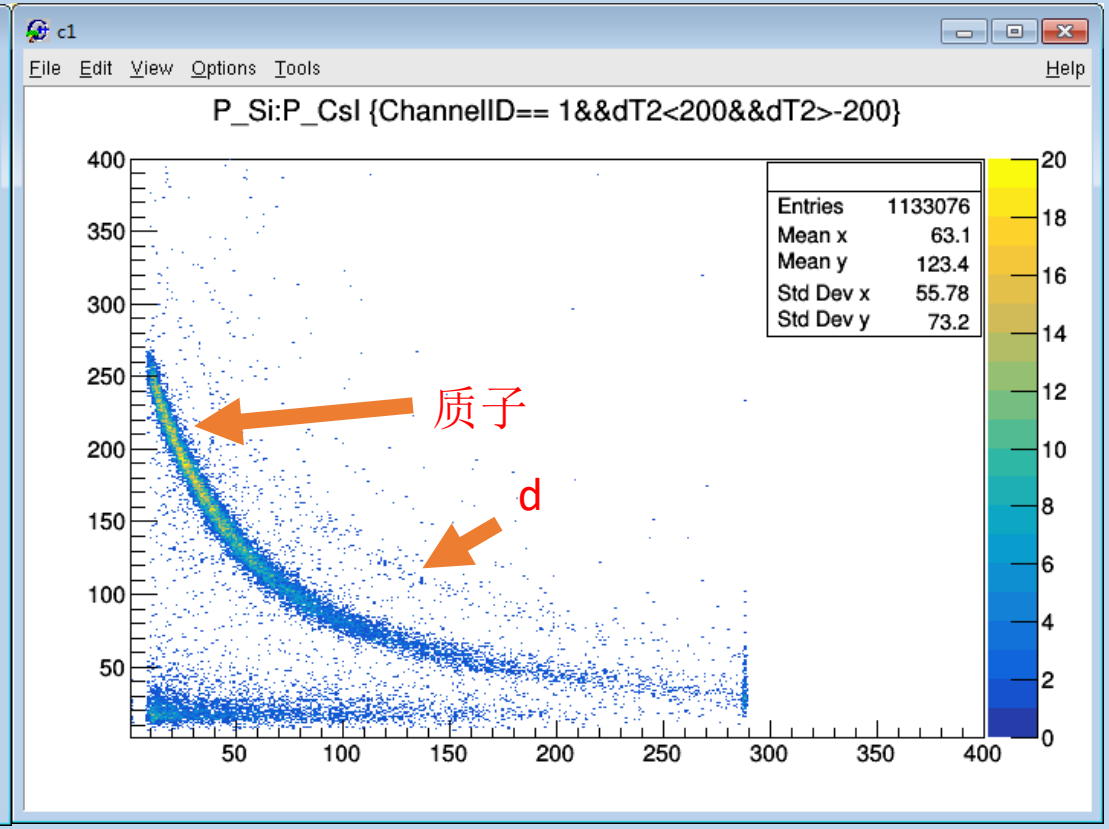




ΔE-E粒子鉴别二维谱



经由**MWPC+Si** ΔE-E符合后的事件

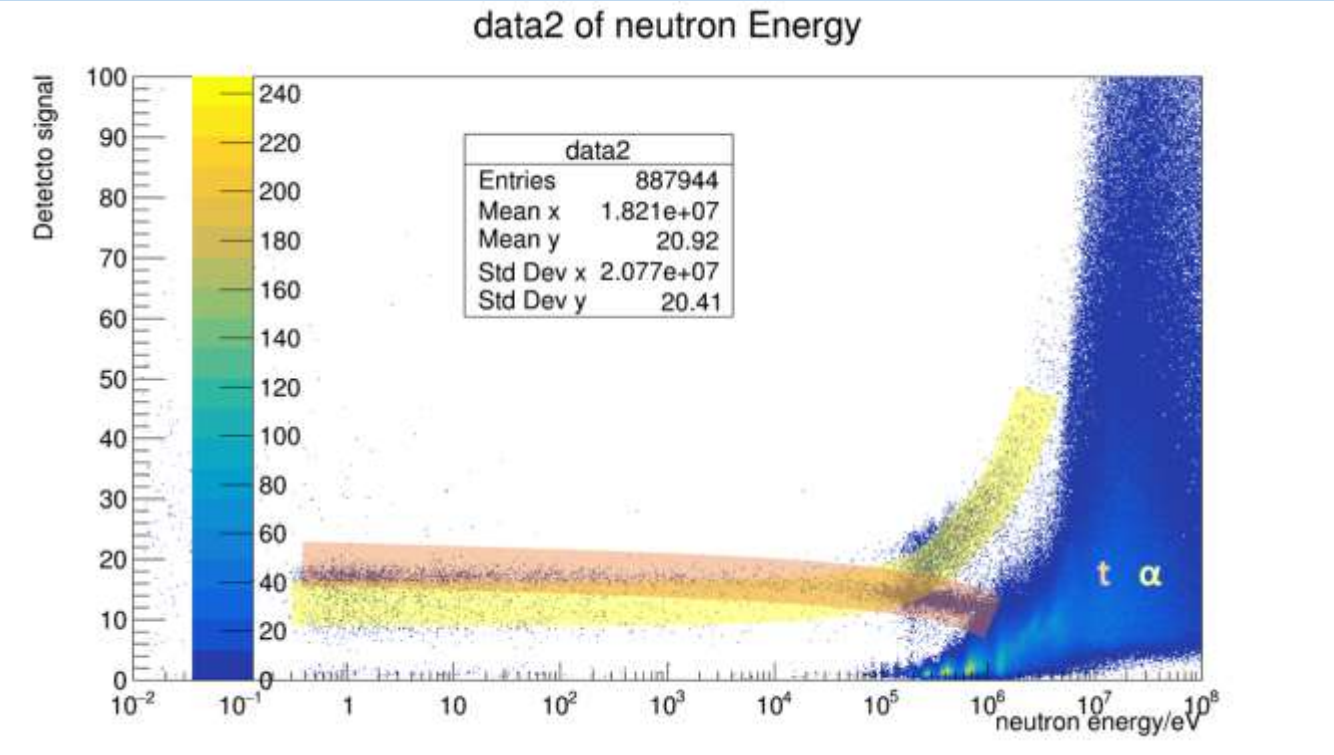


经由**Si+CsI** ΔE-E符合后的事件

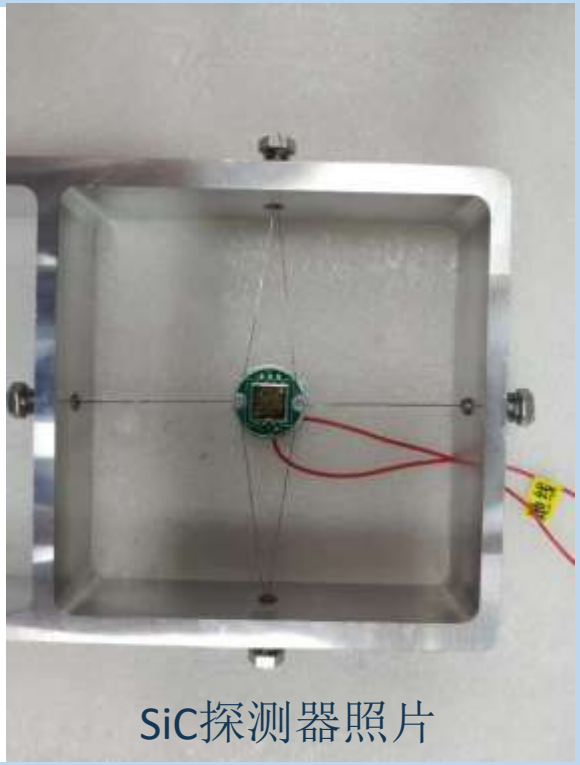
SiC探测器与实验

2019年2月使用SiC探测器在束进行了6Li（n，α）反应产物测量实验，可以看到氚和α曲线。

SiC探测器辐照时间约100小时，合计中子注量10^{10}以上，未发现明显的性能变化。



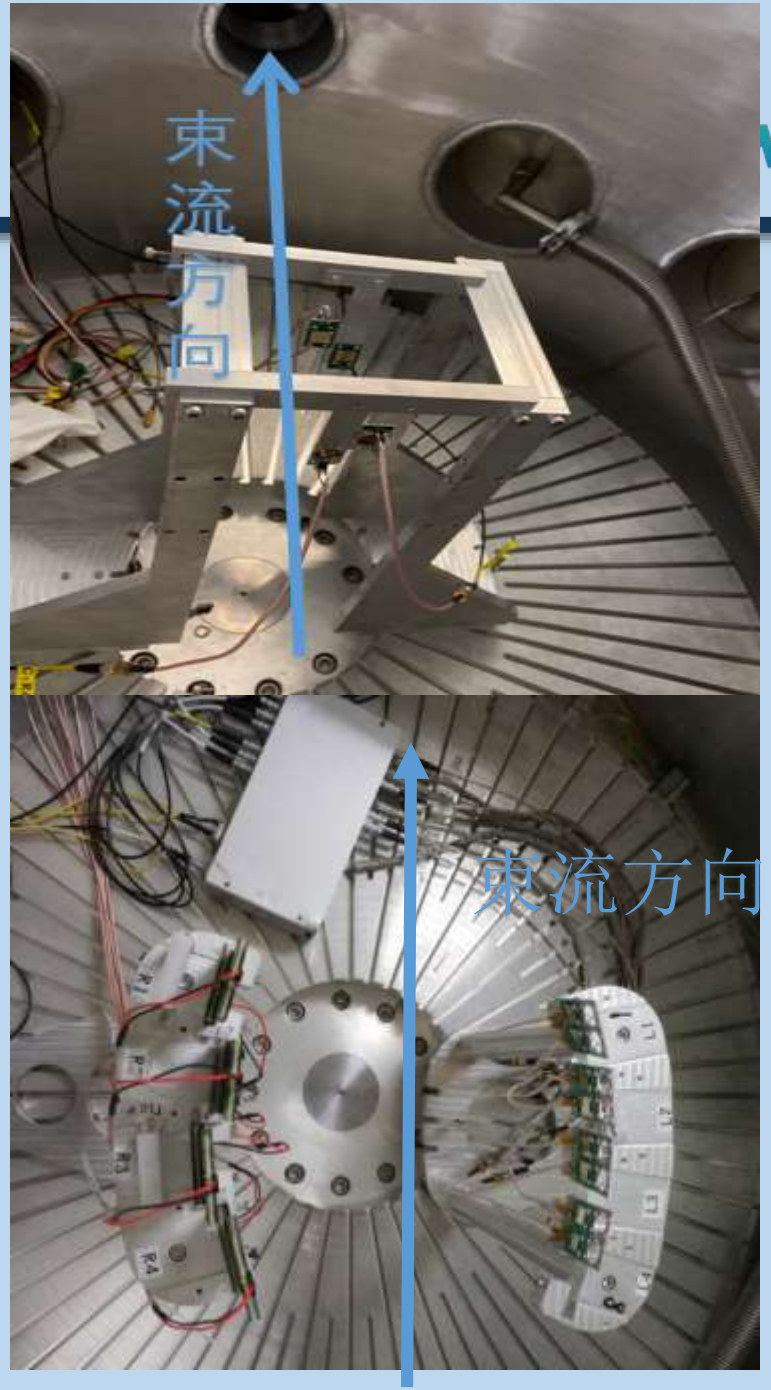
SiC测量^{6}LiF靶0°角出射产物



SiC探测器照片

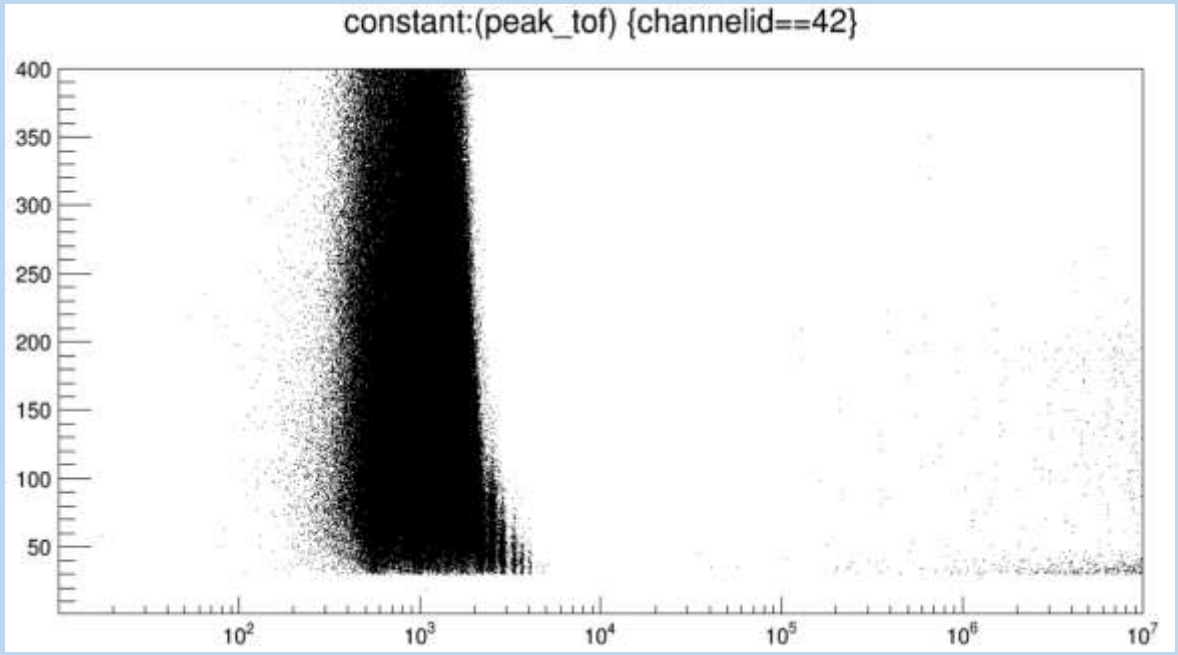
实验过程

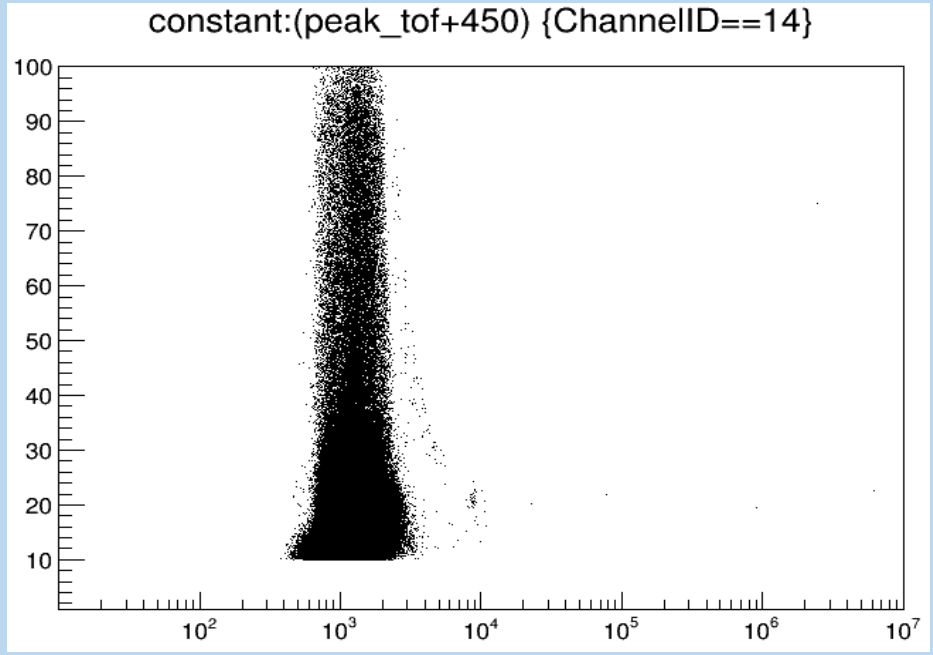
- ^{63}Ni（n, α）实验，2019年12月：
- 在白光LPDA谱仪内，中子束流轰击高富集的^{63}Ni同位素靶（以及用来刻度的^{6}LiF靶和做本底的^{62}Ni靶），靶前后用支架固定4块碳化硅探测器。利用前后角各两块探测器的分别测量前角和后角出射的α粒子。
- ^{17}O（n, α）实验，2020年6月：
- 靶包括^{17}O靶（$W^{17}O_3$），做本底的^{16}O靶，和^{6}LiF刻度靶。在前角区安装碳化硅探测器阵列（8块），后角区安装硅探测器阵列（8块）。



实验结果

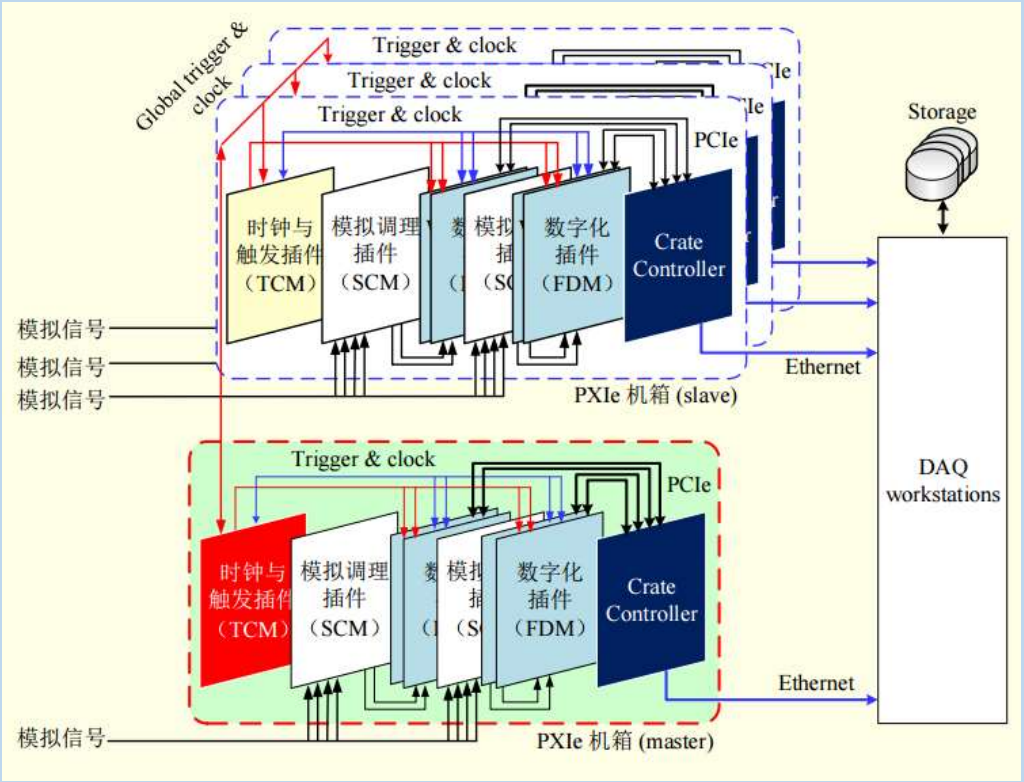
- ^{63}Ni（n, α）实验：在低能区（10^5~10^8ns）能够观察到100道和200道两团信号，可能是Ni的某种同位素的（n, α），由于截面太小未观察到^{63}Ni的事件带
- ^{17}O（n, α）实验：可以看到^{17}O(n, α)^{14}C在200~300keV的双峰，以及更高能区的一个事件带，低能区还需要更精确的分析





^{63}Ni(n, α)实验和^{17}O(n, α)实验中子飞行时间(ns)-信号二维谱

共用电子学系统



共用电子学系统总体架构





共用读出平台及电子学插件

共用电子学：Back-n合作组中科大电子学组开发，由模拟调理插件(SCM)、触发时钟插件(TCM) 、波形数字化插件(FDM)组成。

- 采样精度:12 Bit
- 采样率: 1G Hz
- 接口: PXIe

目前已有通道48路。

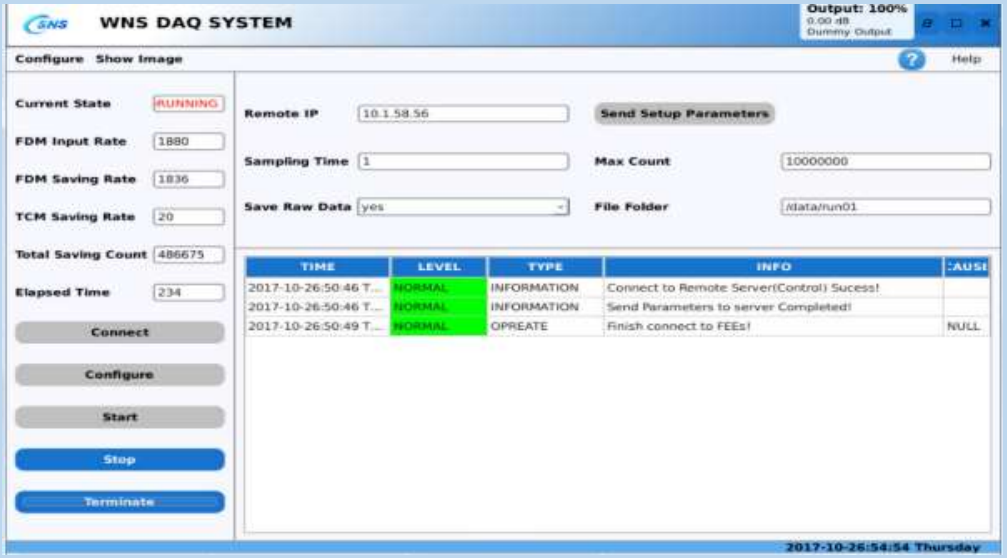
Review of Scientific Instruments **89**, 013511 (2018); doi: 10.1063/1.5006346
IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 66, NO. 7, JULY 2019

数据获取系统

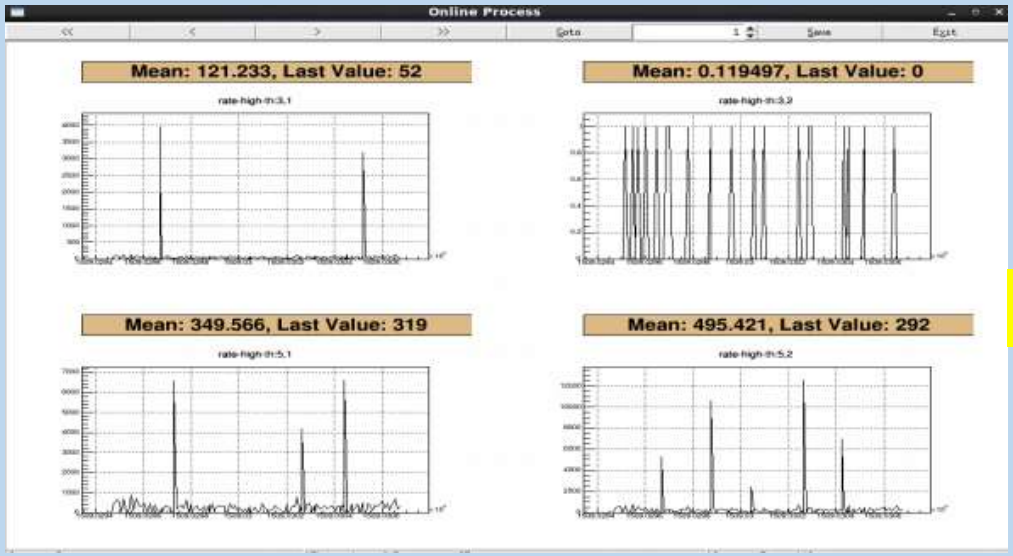
数据获取系统：Back-n合作组开发，2.0G Hz×56核数据处理能力；多线程并行处理；图形化。
可视化部分：

- 数据获取操作界面
- 数据在线显示界面

从2017年7月开始使用，应用到30个物理实验及探测器测试中。经过数轮优化，目前性能稳定。



数据获取操作界面



获取系统**在线显示**界面

休息一下



白光中子束线

- Back-n合作组及白光中子束线
- 相关实验
  1. 束流品质及本底测量
  2. 核数据测量实验
  3. 探测器标定及测试
  4. 中子共振照相实验
  5. 辐照效应实验
- 未来探测器发展规划

概况



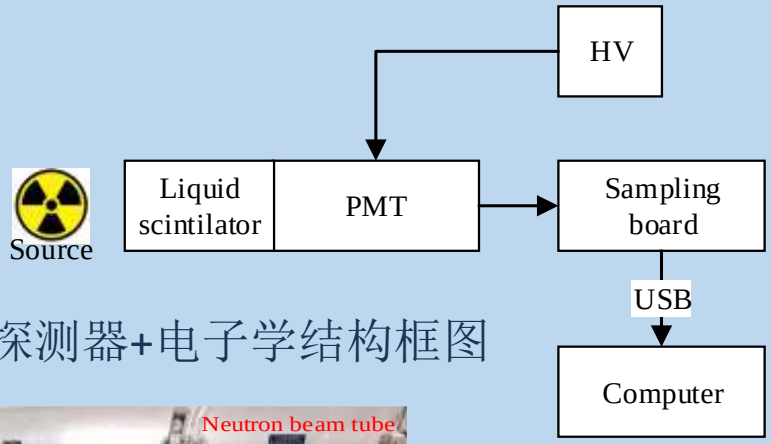


Back-n具备中子探测器刻度和测试的良好条件。

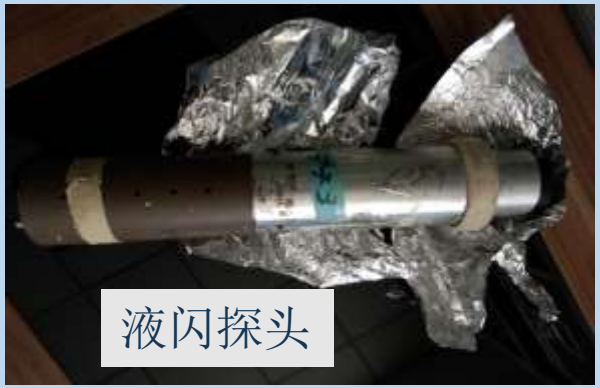
九院和21所先后完成基于裂变靶室的中子探测器标定，及其他探测器标定。项目组内也进行了SiC、ΔE-E等探测器的研发测试。

Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 973 (2020) 164165

脉冲甄别方法测试

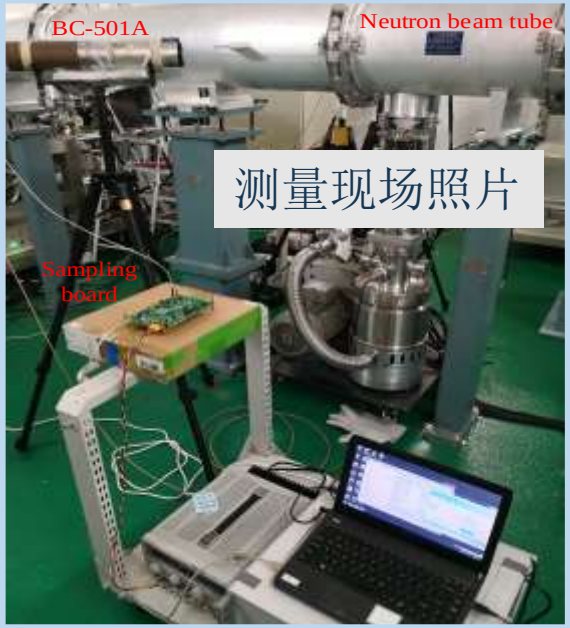


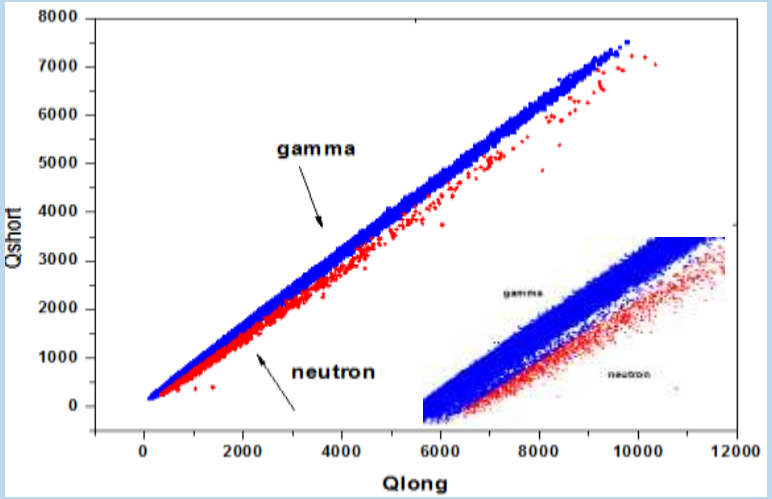
探测器+电子学结构框图



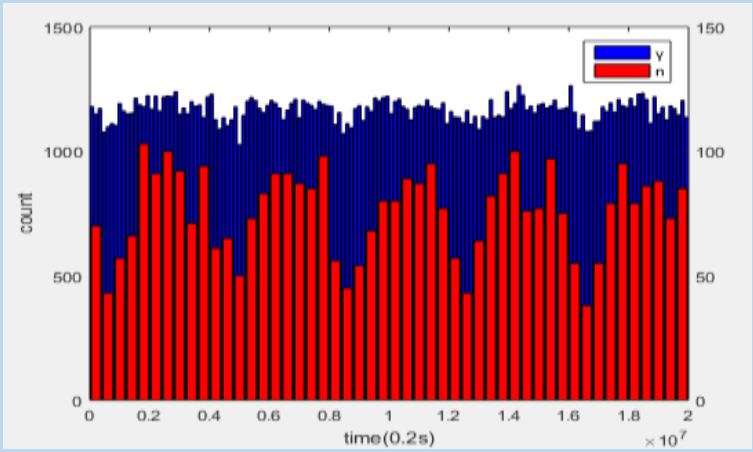


基于FPGA采样电路板





现场n/γ本底事例鉴别分析



现场n/γ本底时间结构

IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 65, NO. 12, DECEMBER 2018

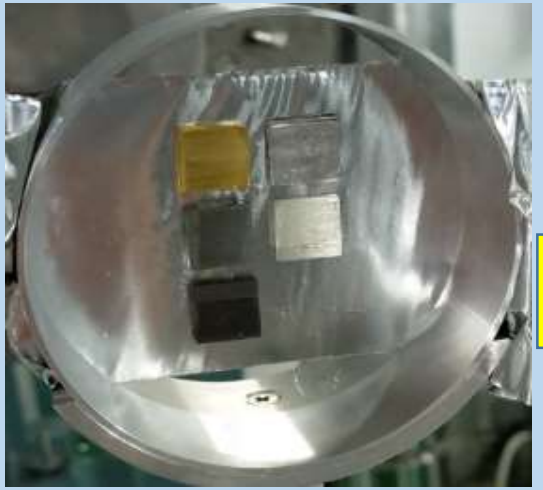
白光中子束线

- Back-n合作组及白光中子束线
- 相关实验
  1. 束流品质及本底测量
  2. 核数据测量实验
  3. 探测器标定及测试
  4. 中子共振照相实验
  5. 辐照效应实验
- 未来探测器发展规划

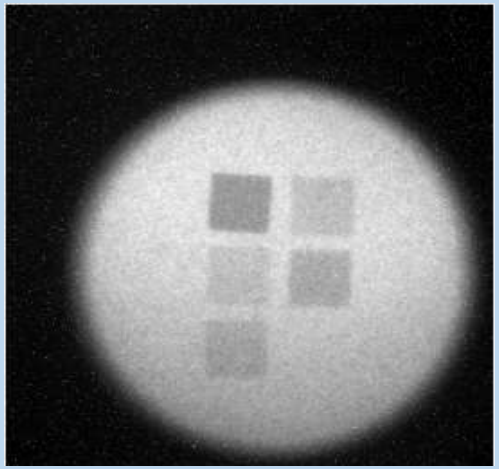
中子共振照相技术

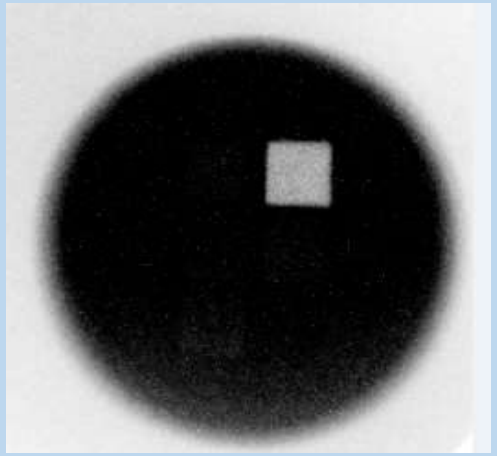
样品实物：

Au、Ag、W、Ta、In

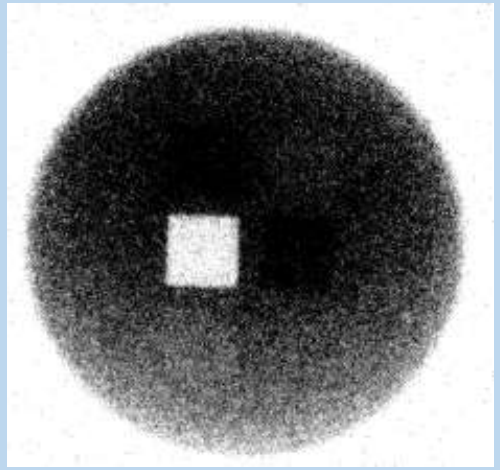


普通透射照相



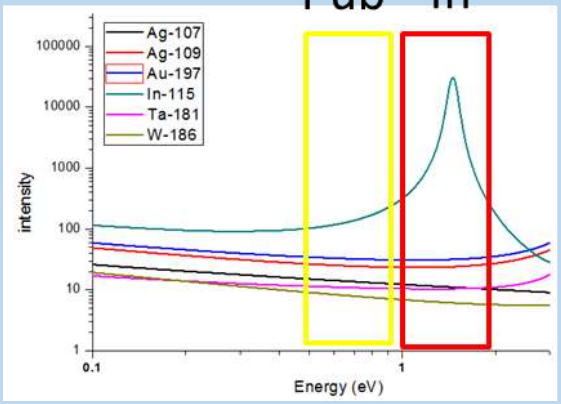


共振核素检出：In



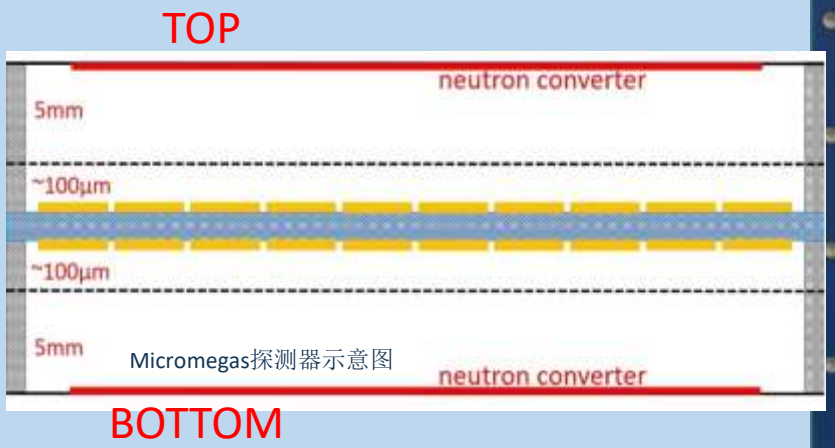
共振核素检出：W

Pub In



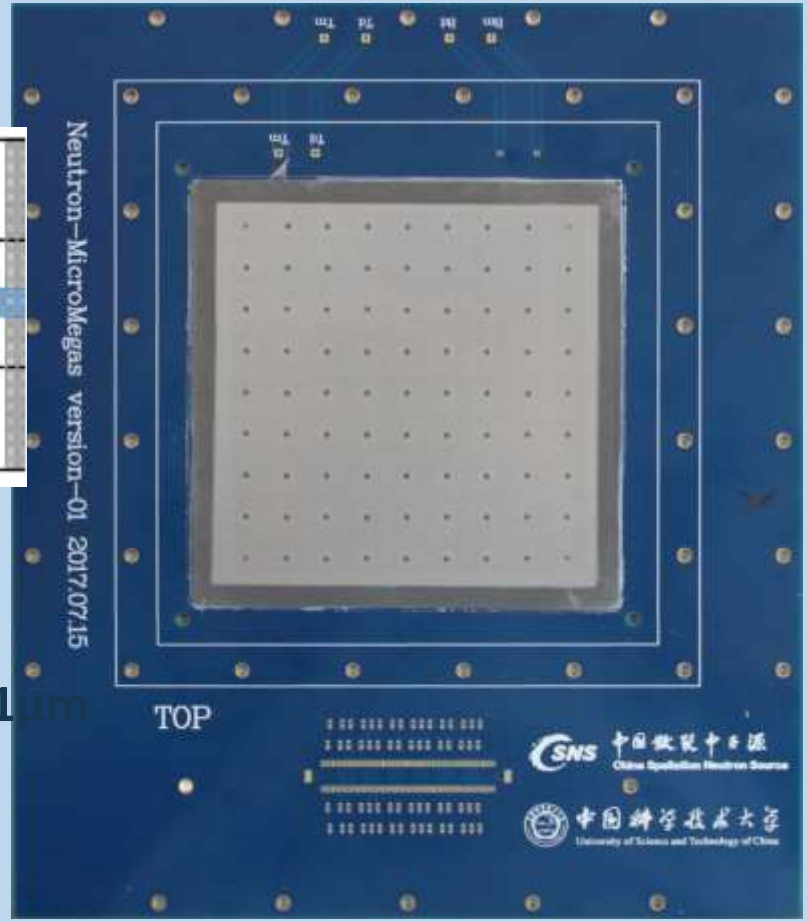
In核素共振峰检出：[Pub] – [In]

Micromegas探测器

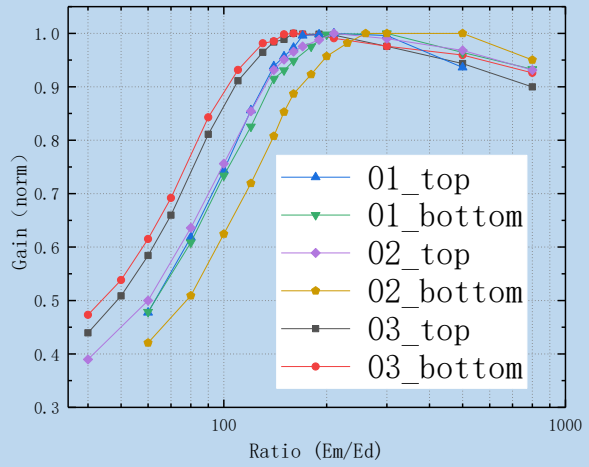


Micromegas探测器示意图

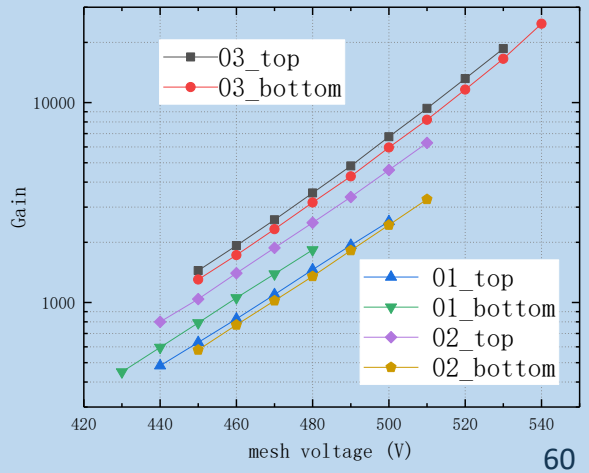
- 金属阳极（无阻性层）探测器
- 天然B/^{6}Li中子转换体，1μm/0.1μm
- 电压：Vm=-380V，Vd=-450V
- 束斑直径ϕ=20，30或60cm



Micromegas探测器照片



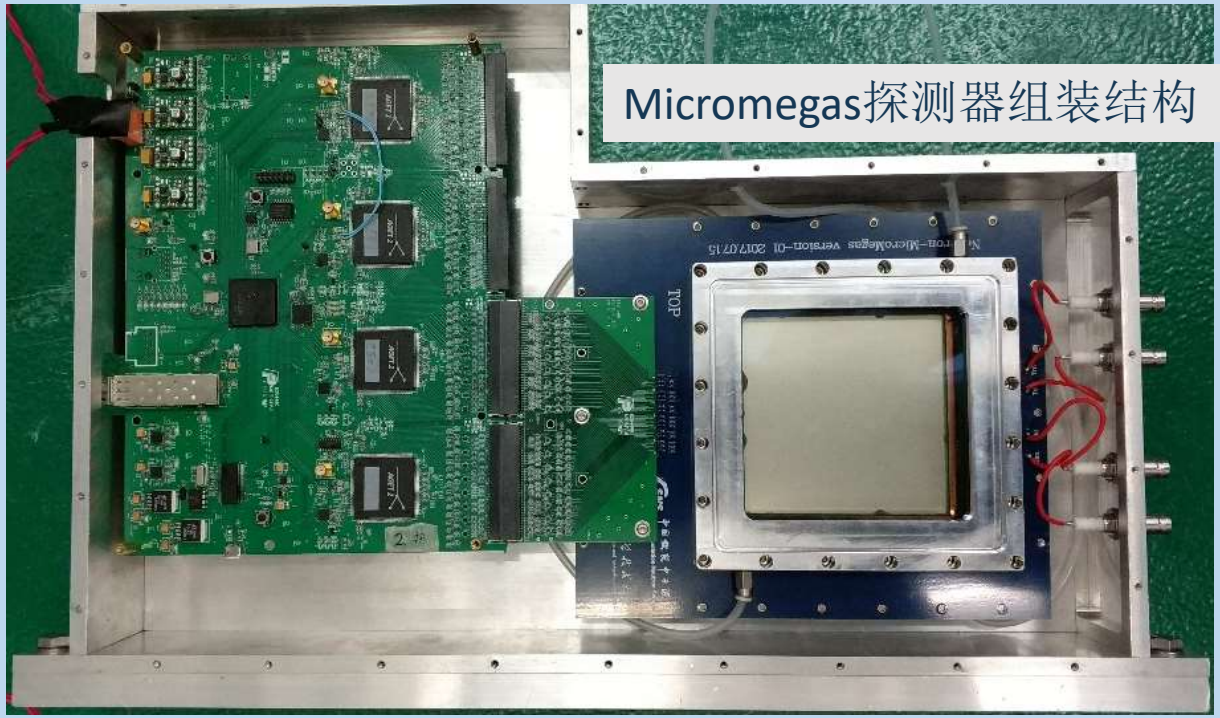
Micromegas透过率测试



Micromegas增益测试

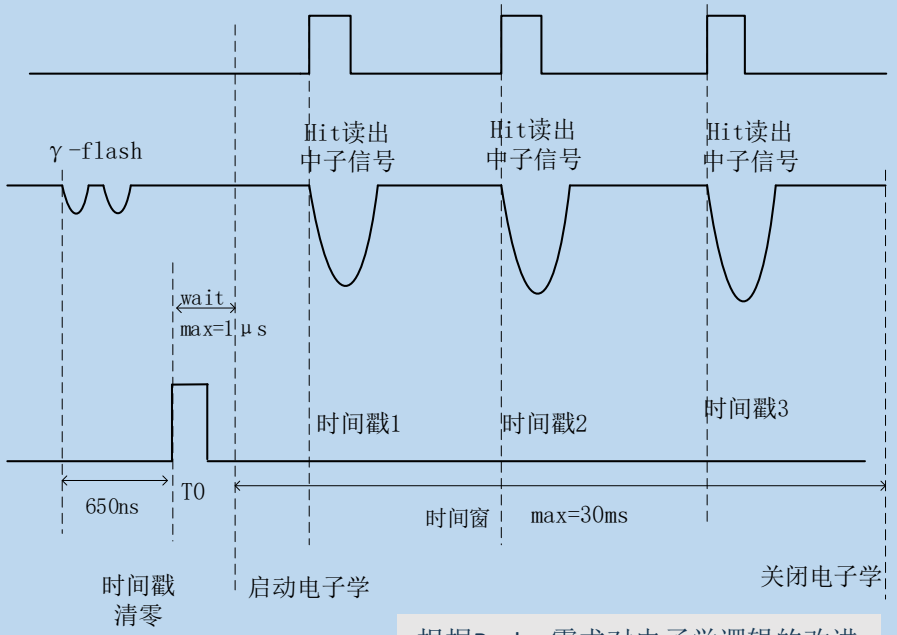
Micromegas电子学

科大研发，与PANDAX-III电子学基本一致
共256通道AGET芯片的读出电子学
波形采样、每芯片4块AGET



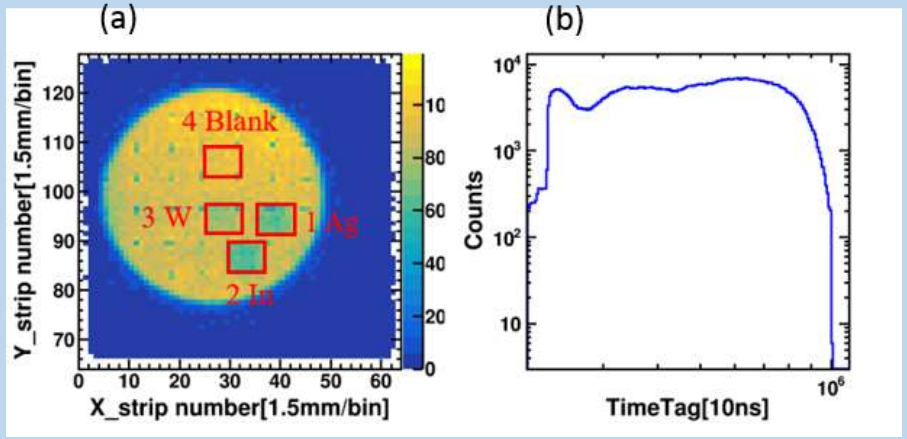
Micromegas探测器组装结构

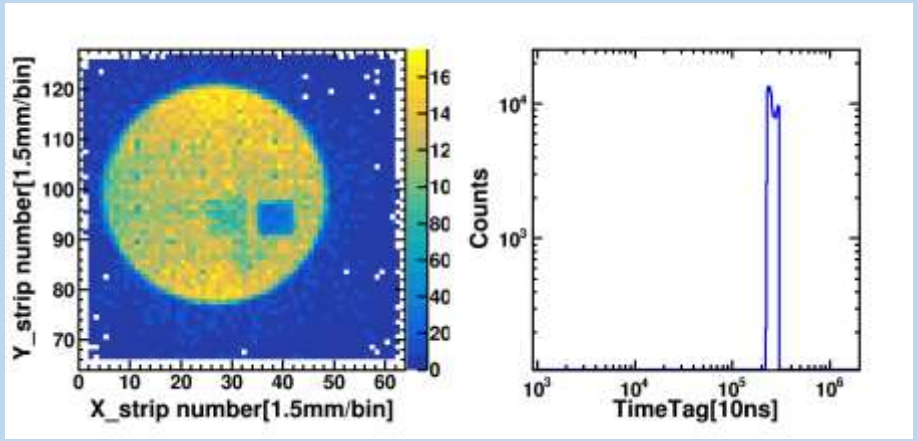
- 由法国Saclay实验室设计的通用TPC读出芯片
- **通道数：**64 （每通道512个采样电容）
- **动态范围**: 120fC, 240fC, 1pC, 10pC
- 达峰时间: 50ns - 1μs (16 values)
- 采样率: 1MHz - 100MHz可配置

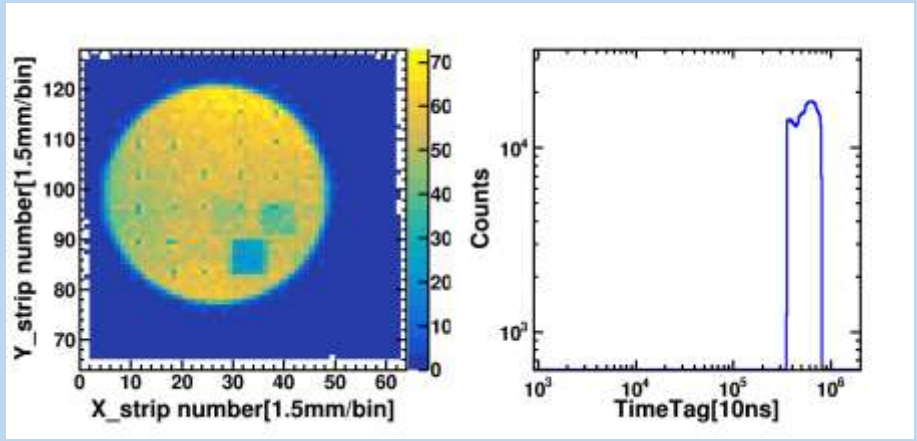


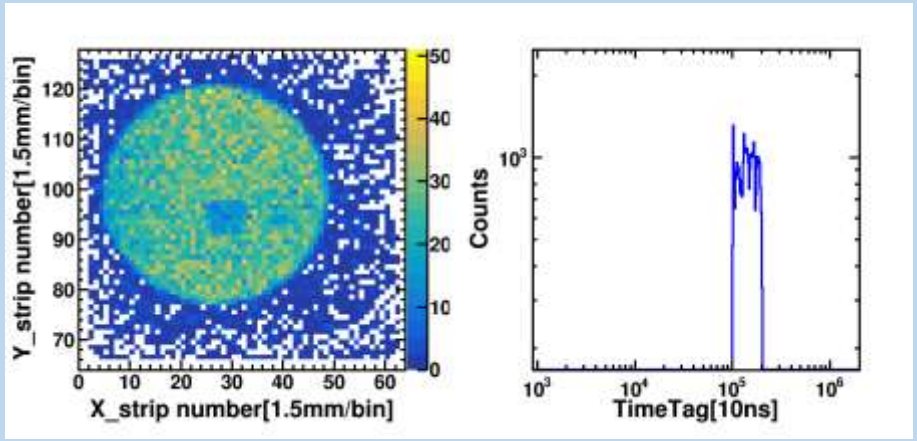
根据Back-n需求对电子学逻辑的改进

Micromegas共振成像









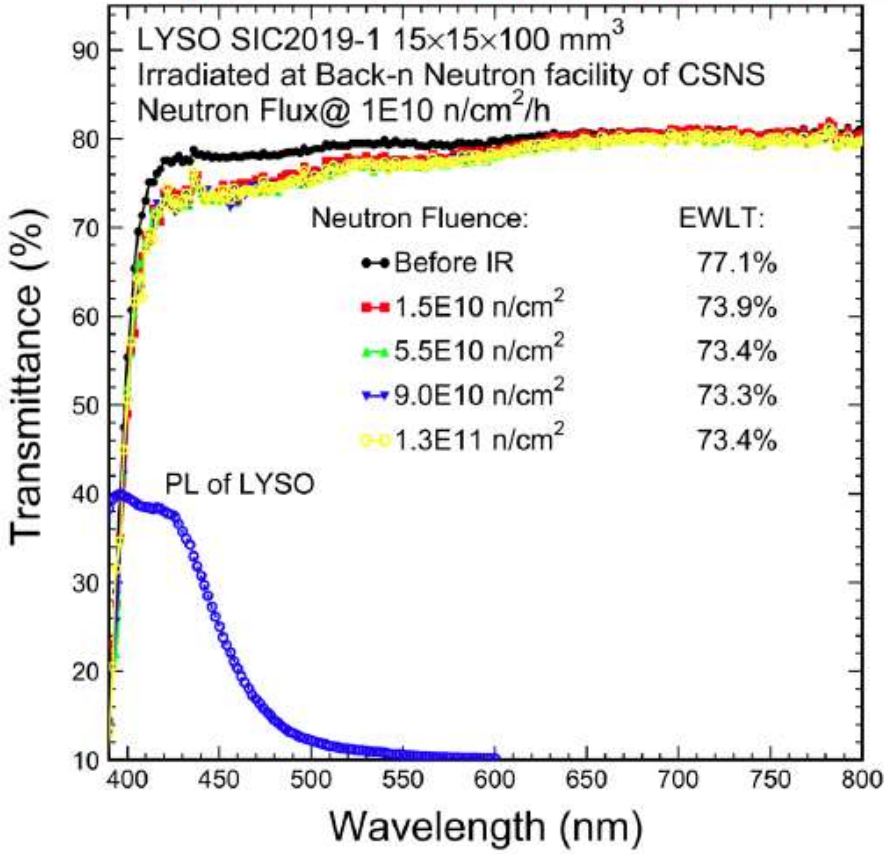
使用B转换膜进行共振中子成像可以看到对不同元素的成像结果。

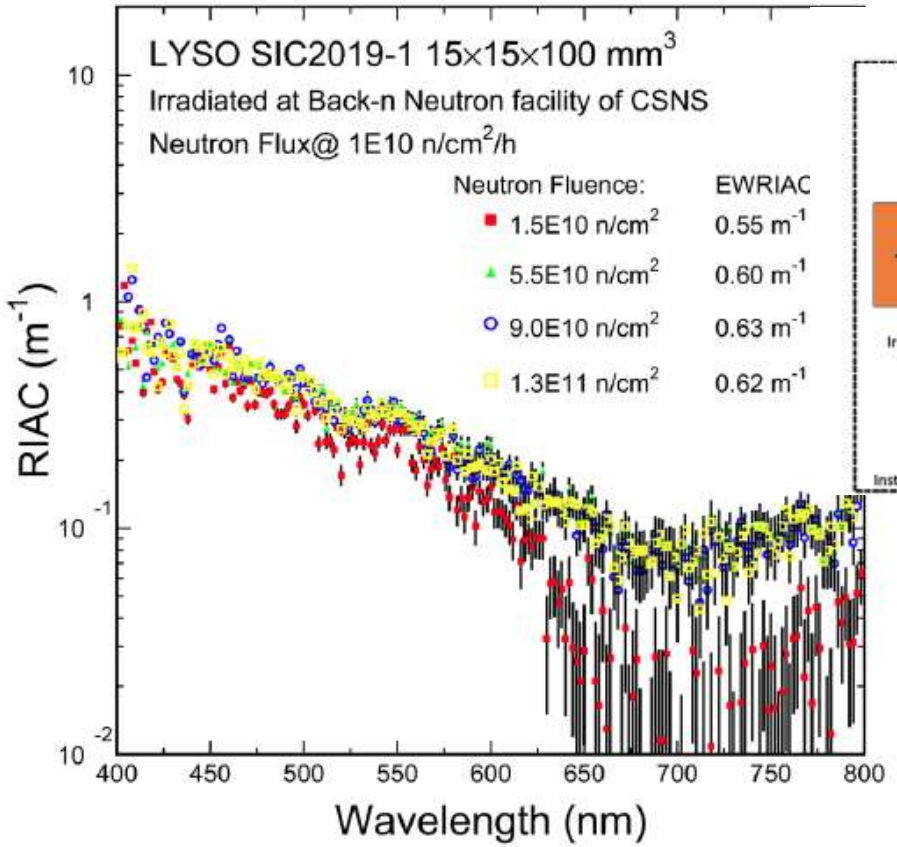
白光中子束线

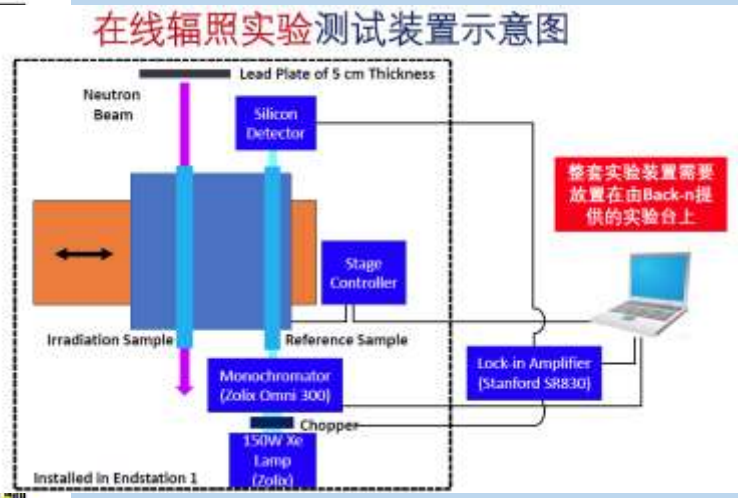
- Back-n合作组及白光中子束线
- 相关实验
  1. 束流品质及本底测量
  2. 核数据测量实验
  3. 探测器标定及测试
  4. 中子共振照相实验
  5. 辐照效应实验
- 未来探测器发展规划

闪烁晶体辐照损伤实验

对LYSO 晶体辐照中子剂量达到1.5E10 n/cm² 观察到明显的辐照损伤







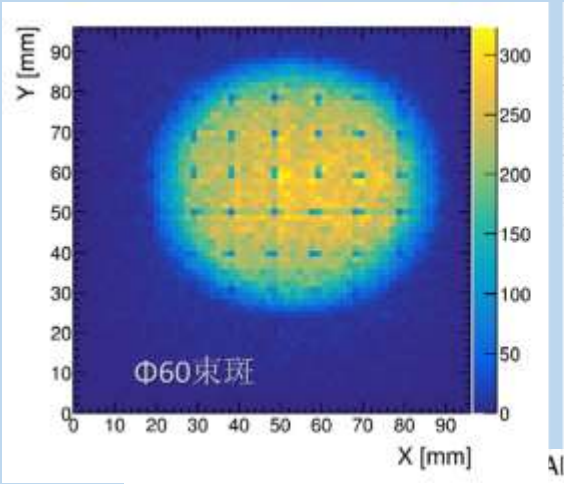
南开大学准备4种类型，共8块样品晶体。包括CsI、BaF、BGO、LYSO

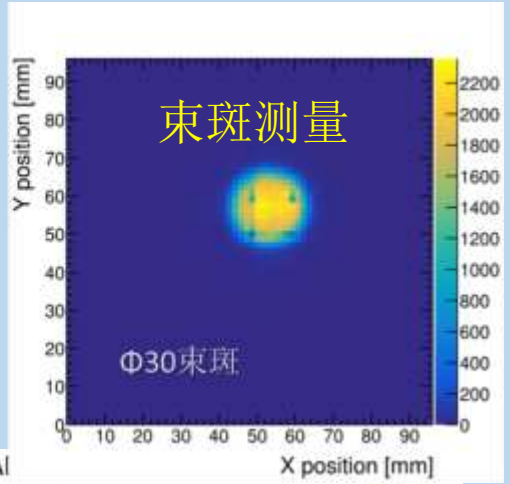
白光中子束线

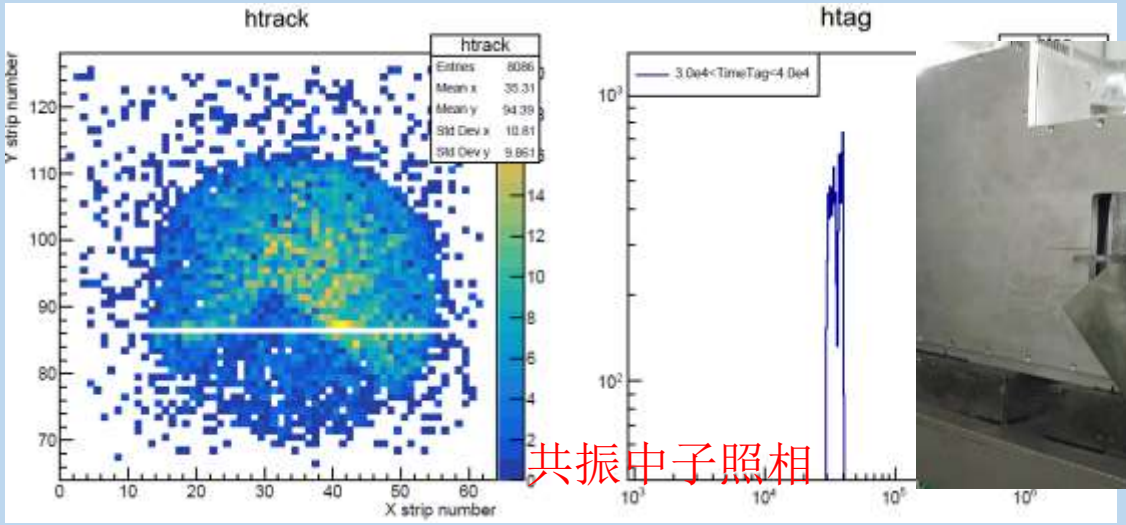
- Back-n合作组及白光中子束线
- 相关实验
  1. 束流品质及本底测量
  2. 核数据测量实验
  3. 探测器标定及测试
  4. 中子共振照相实验
  5. 辐照效应实验
- 未来探测器发展规划

未来探测器发展规划

- Back-n目前的困难：空间、时间
- 发展多用途型探测器：TPC
  - 束流品质测量：束斑、能谱
  - 核数据测量：带电粒子、裂变碎片
  - 其他相关研究：中子共振照相

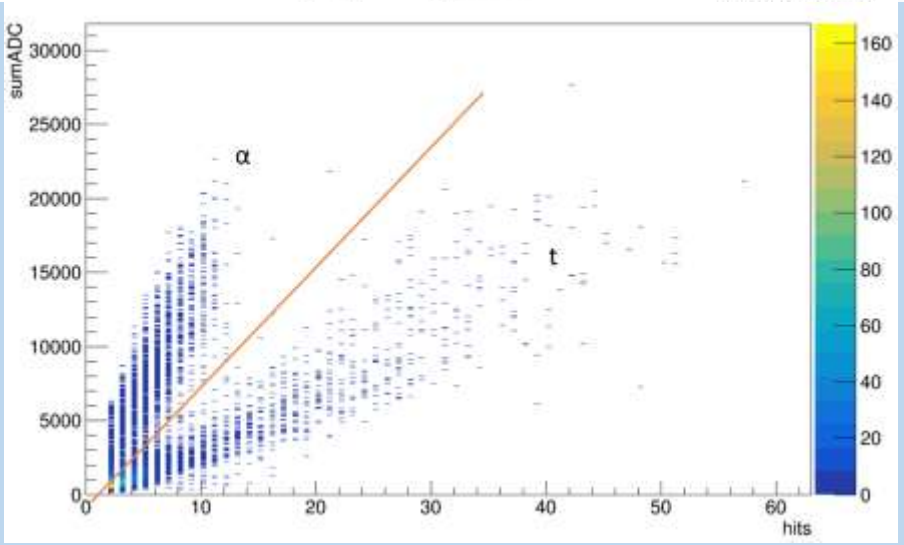








共振中子照相



次级粒子鉴别

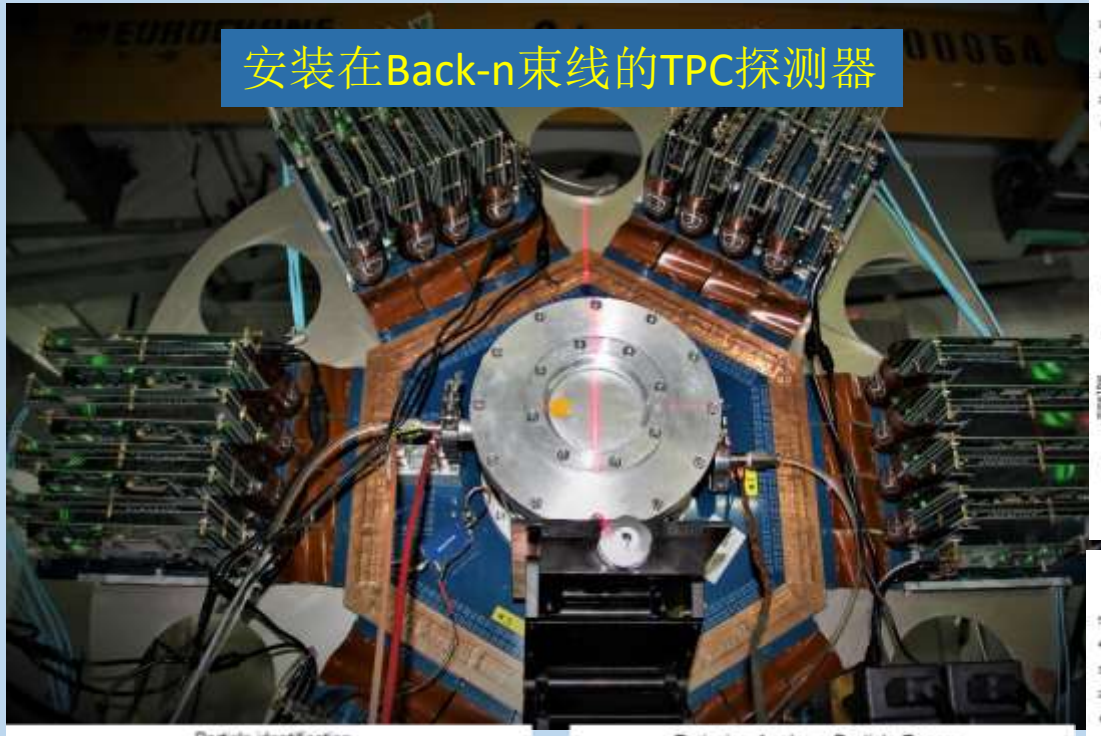
Back-n多用途TPC

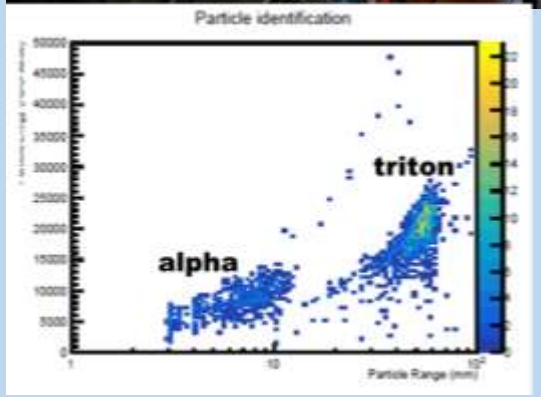
白光中子多用途TPC（MTPC）探测器投入巨大，制作复杂，数据分析工作繁琐需要多家单位联合进行。合作组包括：

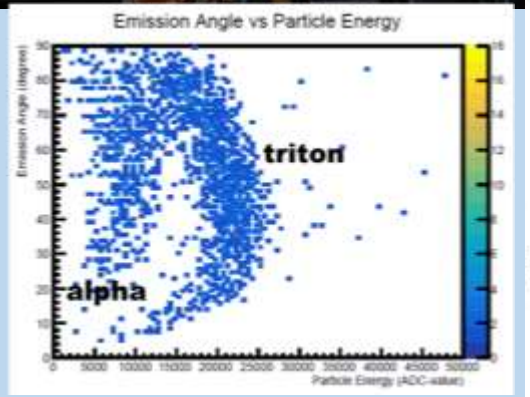
- **东莞研究部（物理设计、测试、数据分析）**
- **中科大（电子学、Micromegas工艺）**
- **实验中心（DAQ）**
- **北大（物理设计）**
- **九院二所……**

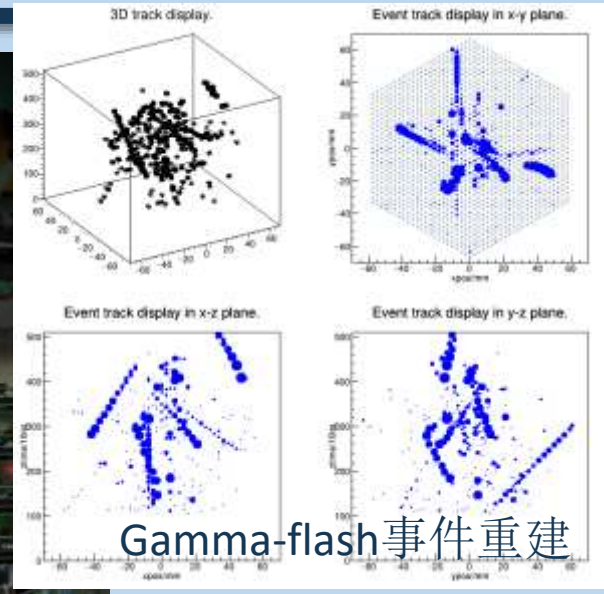
2020年1月进行了首次束流实验，验证了探测器的工作状态和白光中子束线实验的可行性。重要意义：

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

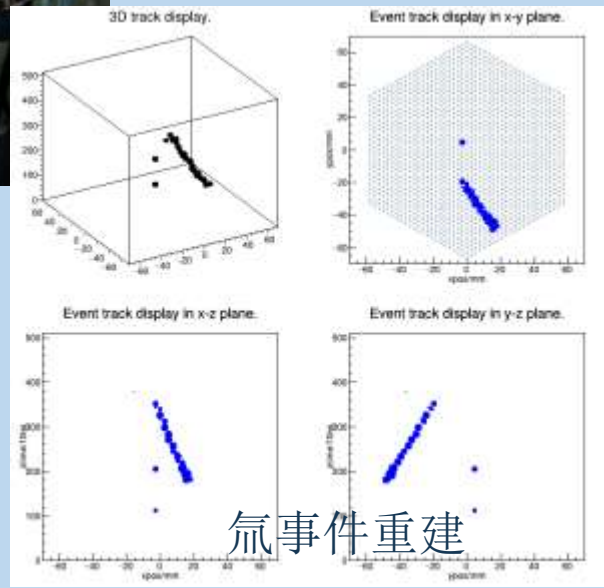








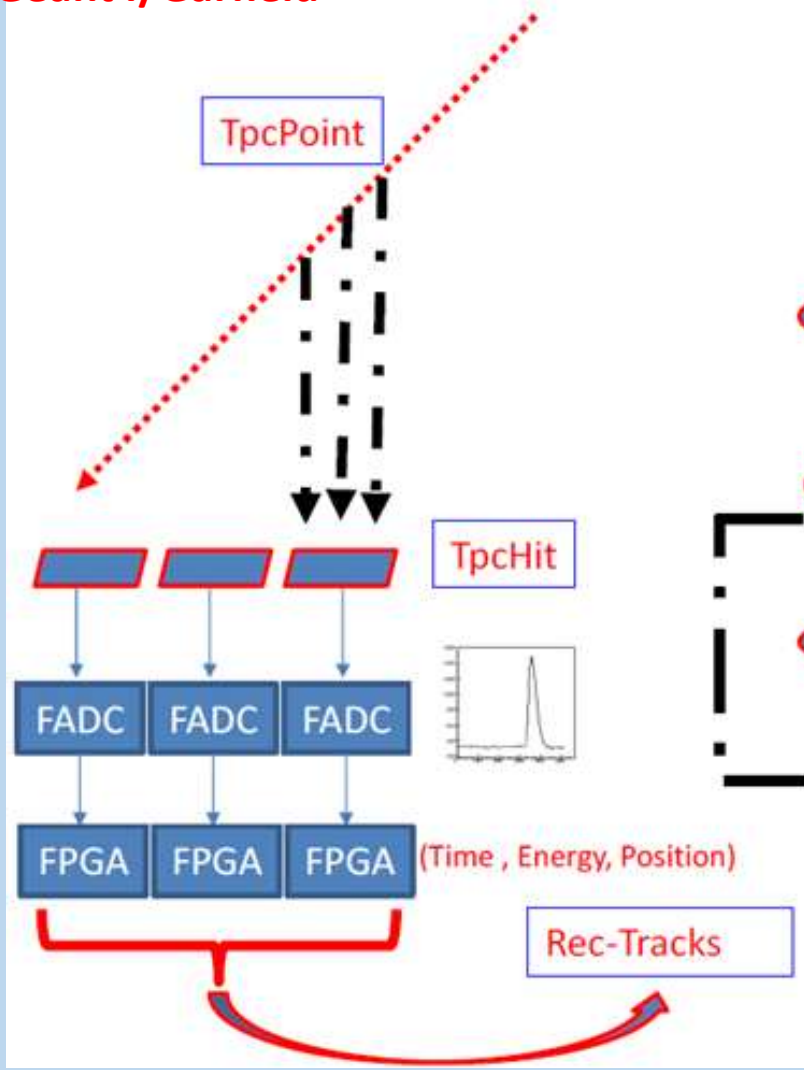
Gamma-flash事件重建



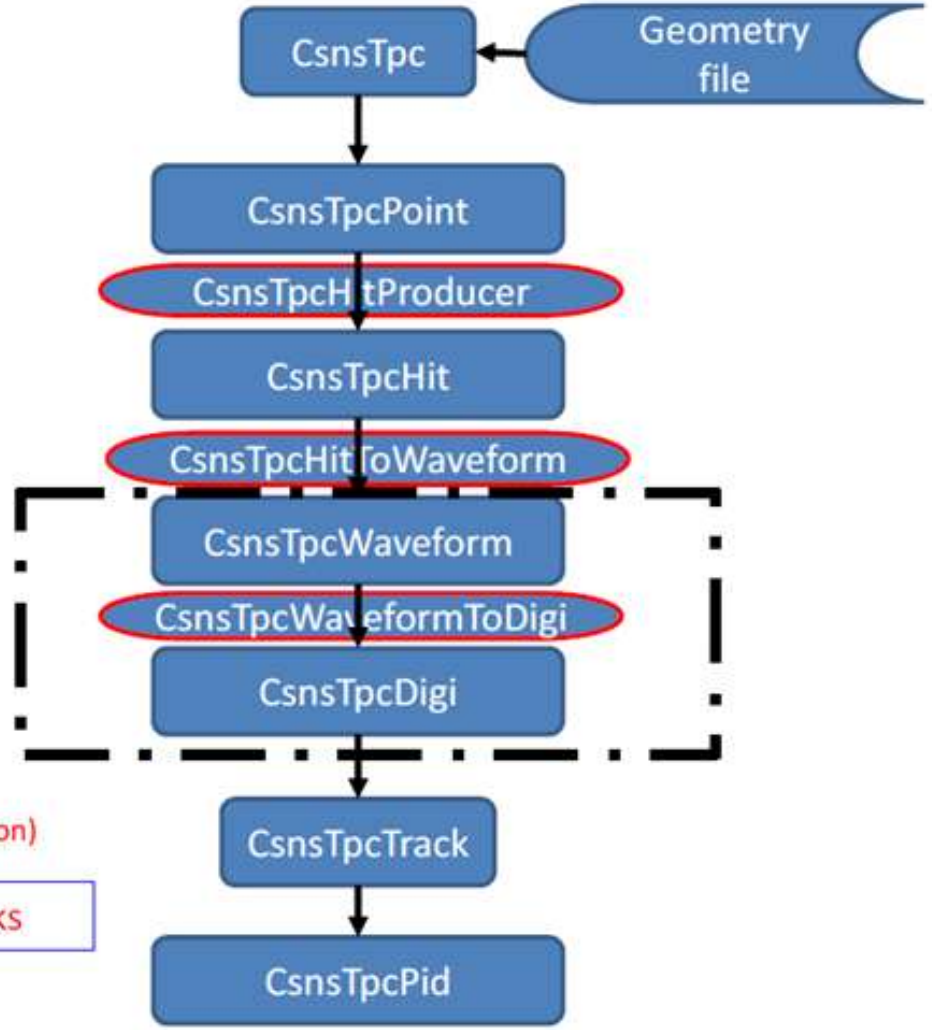
氚事件重建

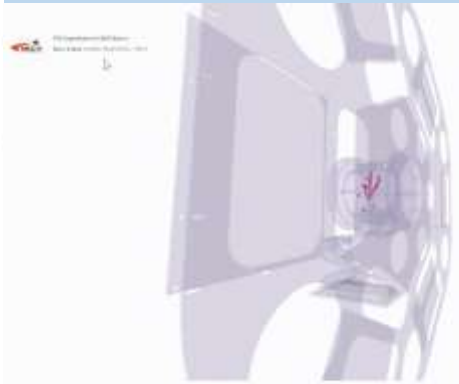
TPC软件框架

Geant4/Garfield++



Experimental Data



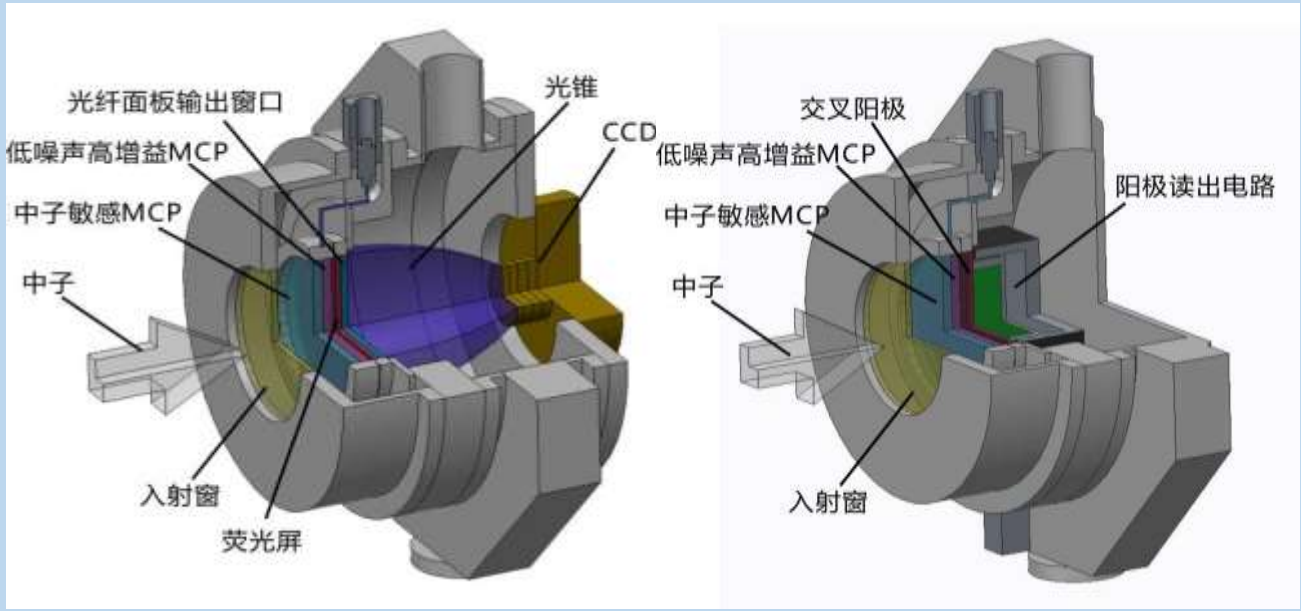


MTPC在线显示

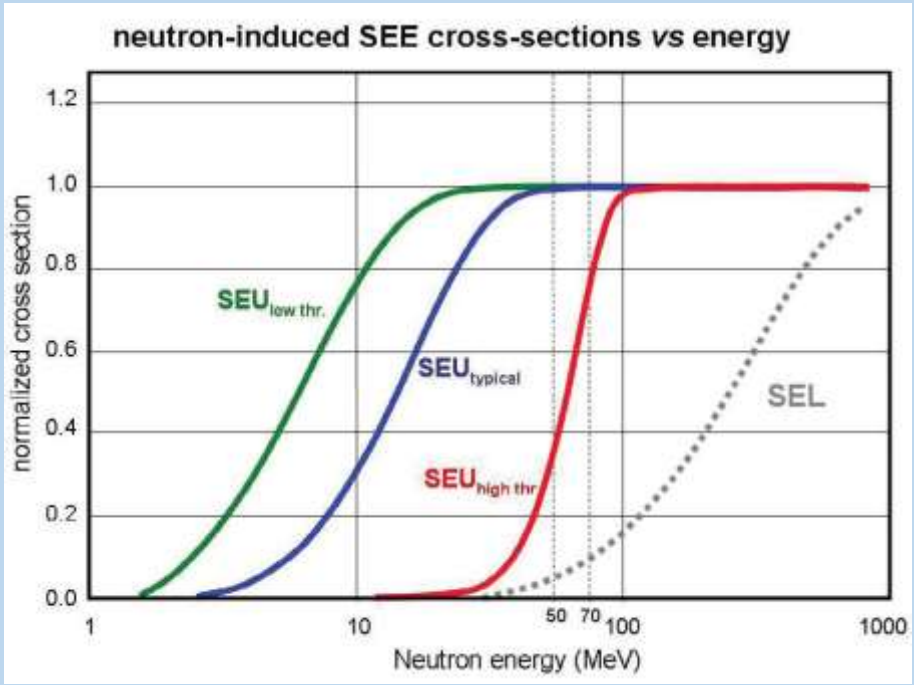
- ✓ TPC developer
  - Management of Framework : *Sun Yankun*
  - Event generator : *Jiang Wei*
  - Simulation: *Fan Ruirui, Yi Han, + Bai Haofan*
  - Waveform analysis: *Chen Yonghao and Yi Han*
  - Reconstructed Tracks : *Li Yang*
  - Event display: *Li Yang*
  - PID : *Yi Han and Sun Yankun*

未来探测器发展规划

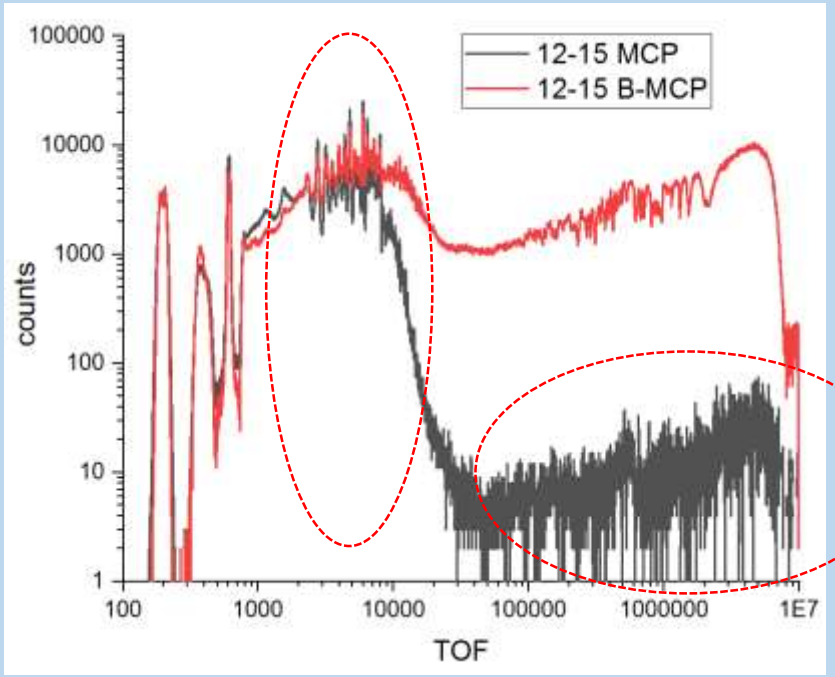
- Back-n的最大优势：亮度高、较好的时间分辨
- 中子共振照相技术：CMOS相机、MCP、MAPMT
- 单粒子效应技术：SEE截面测量、中子能谱反演

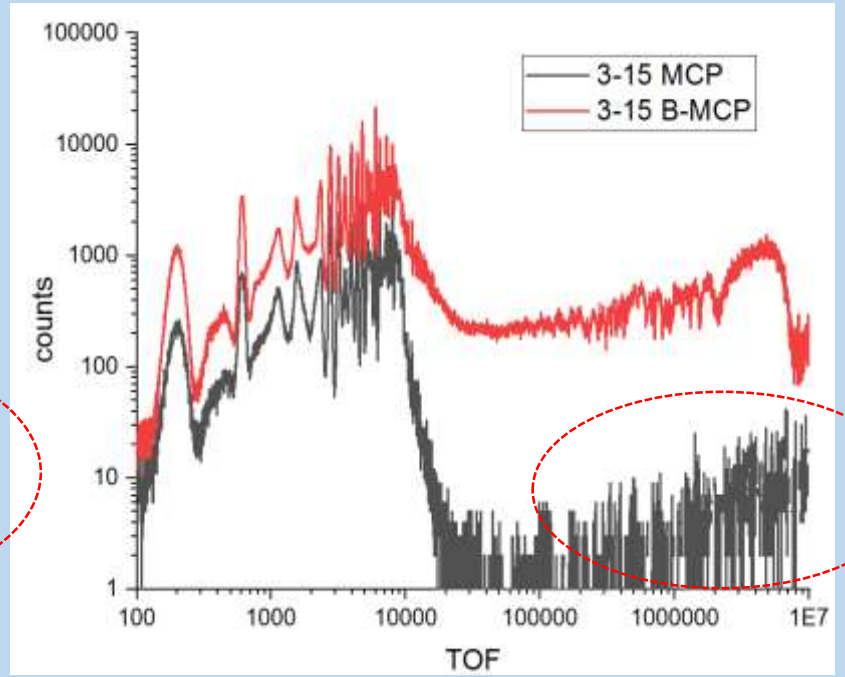


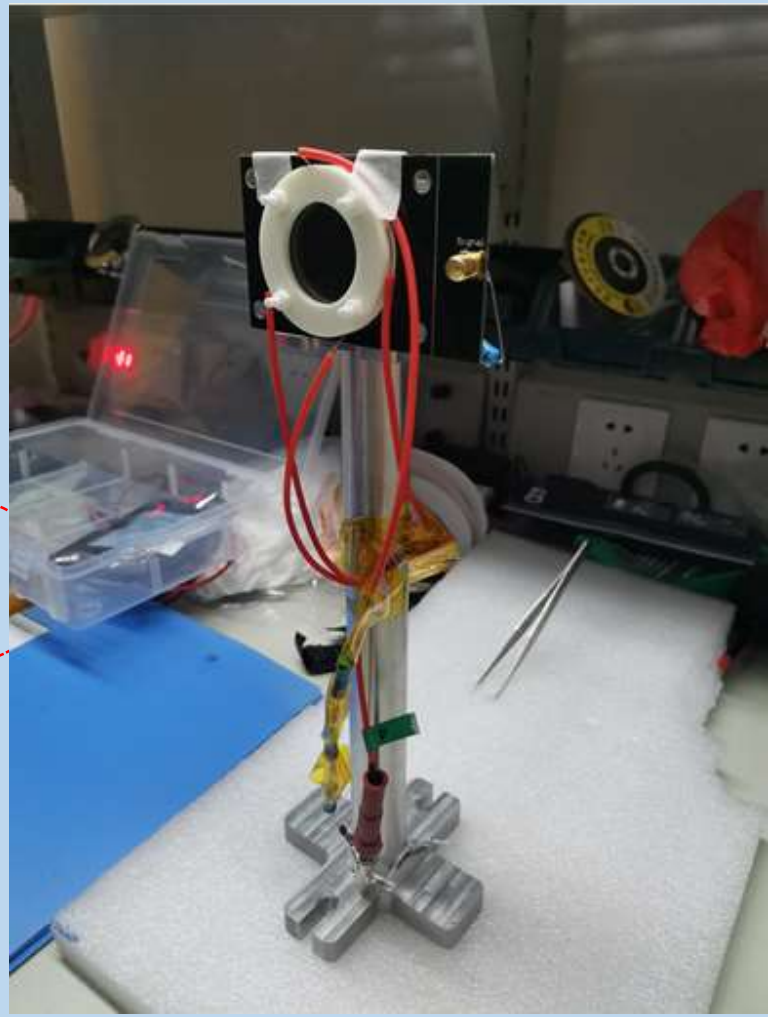
共振中子照相方案设计



掺硼MCP探测器

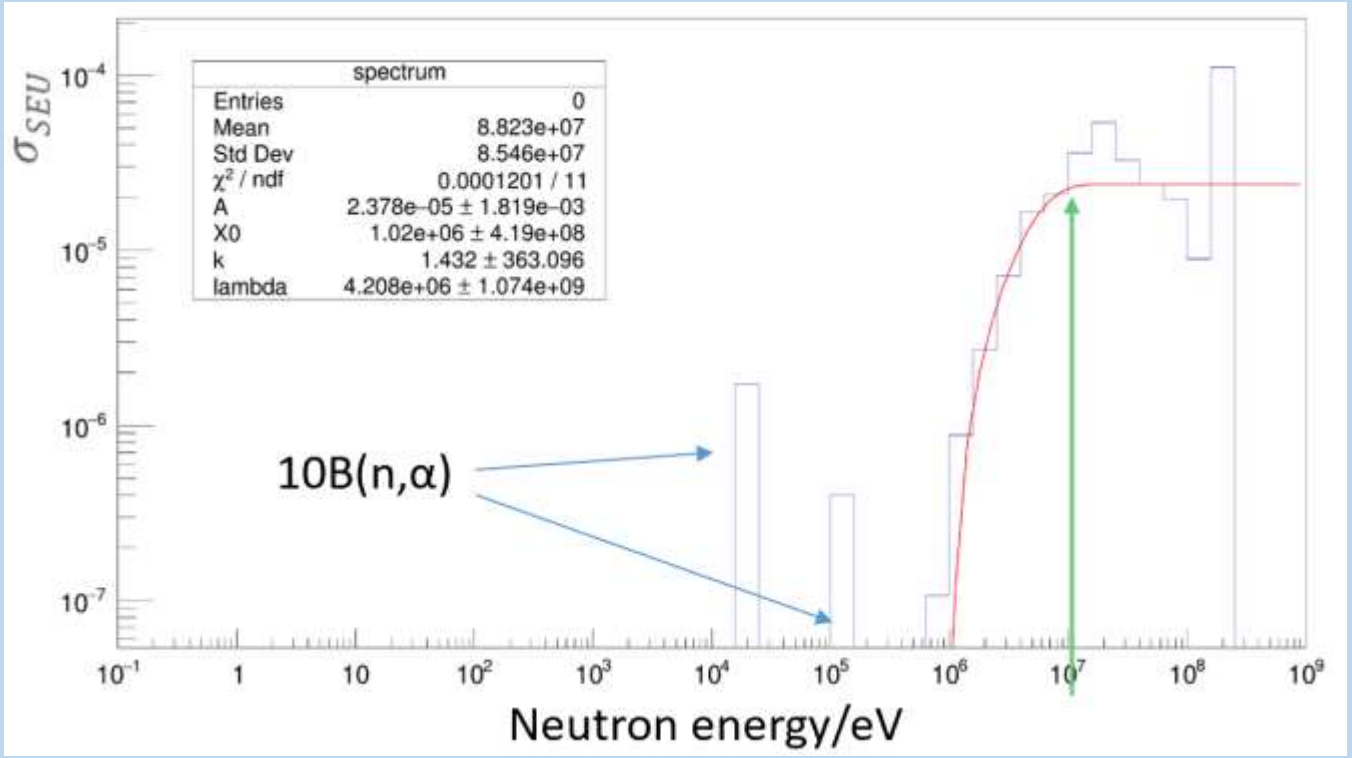






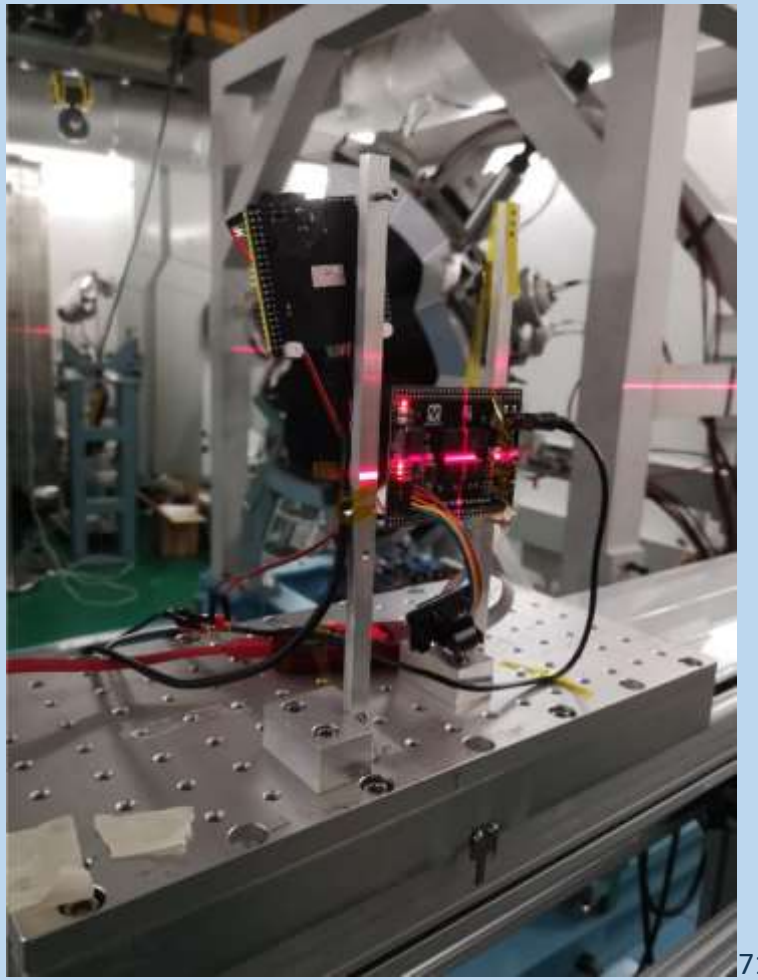
1. MCP对比差别明显：关心区域（50μs以上），B-MCP得到BACK-n能谱轮廓
2. 普通MCP组也有较明显低能区信号响应，——普通MCP含有天然硼元素
3. 6μs（~0.5MeV以上），两组形状细节吻合：普通MCP对快中子有响应
   可能存在γ-flash的影响

使用芯片作为探测器



芯片单粒子效应

不同能量中子

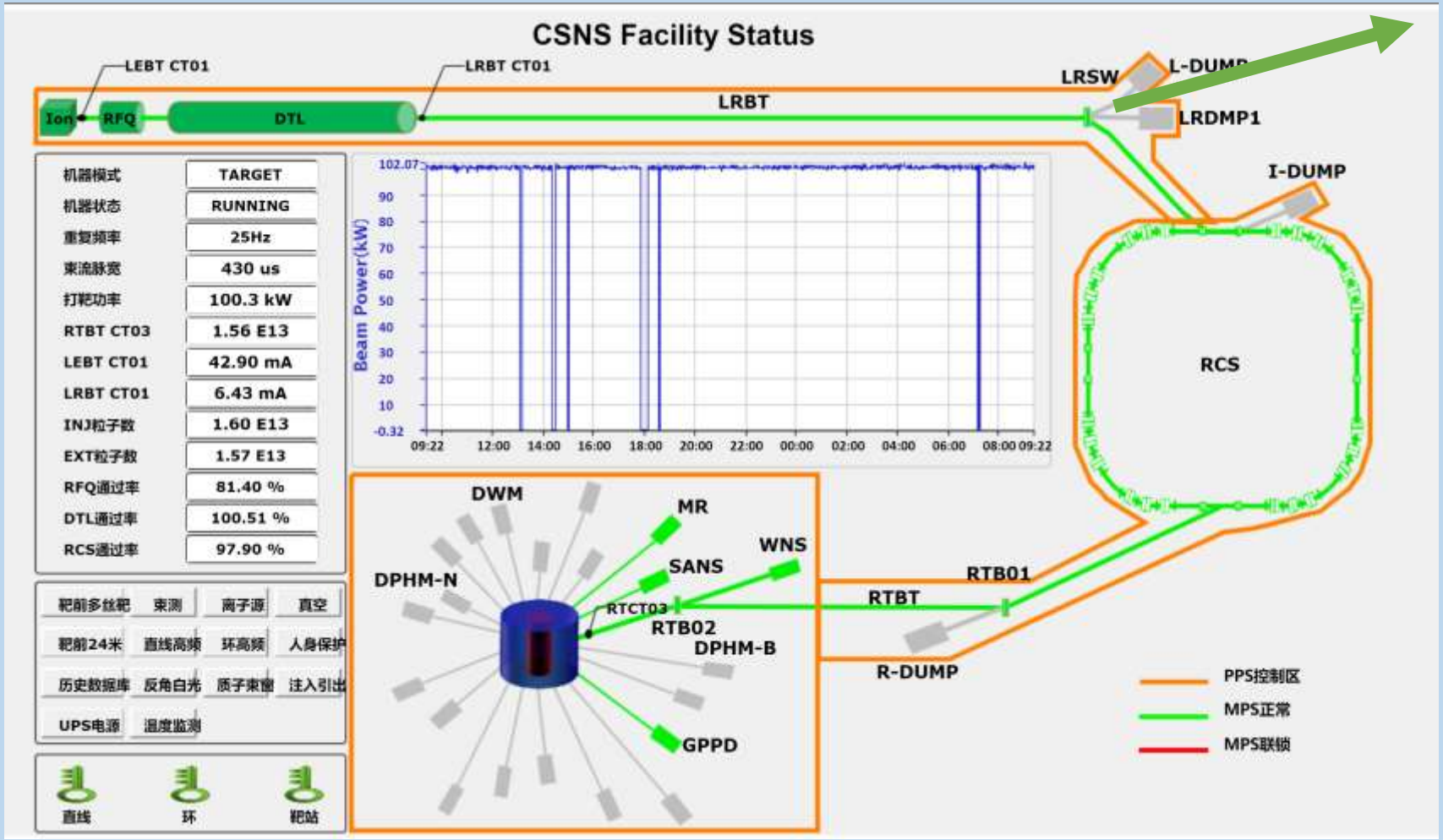


提纲

- 白光中子束线
  - Back-n合作组及白光中子源束线
  - 相关实验
    1. 束流品质及本底测量
    2. 核数据测量实验
    3. 探测器标定及测试
    4. 中子共振照相实验
    5. 辐照效应实验
  - 未来探测器发展规划
- 其他束流线
  - 伴生质子束线
  - 质子测试束线
  - 缪子源

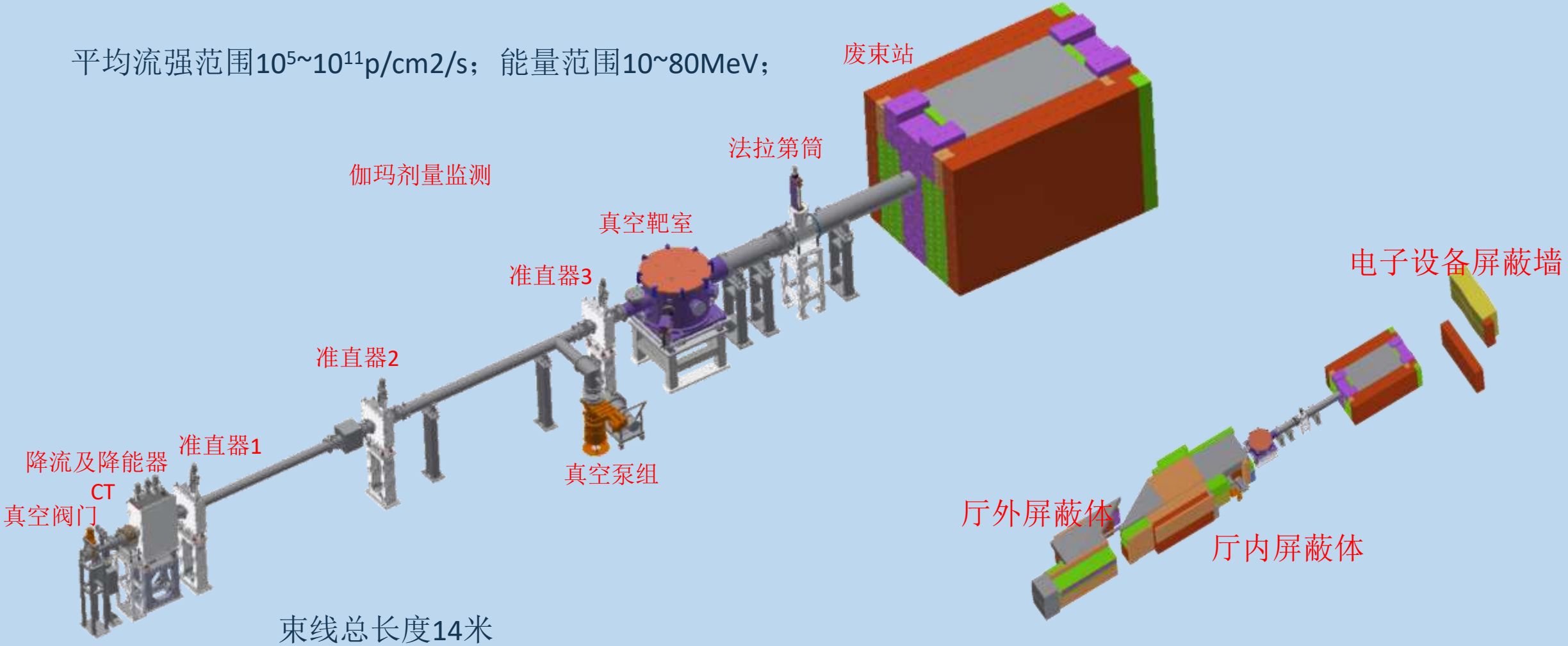
伴生质子束线

伴生质子束线



布局及主要建设内容

平均流强范围10^5~10^{11}p/cm2/s；能量范围10~80MeV；



束线总长度14米

束斑测量

针对三个准直器孔径的标准束斑参数等共十种不同的组合模式进行了测量工作
（降能器空档位，质子能量80MeV）

标准束斑


准直孔30-34-80mm

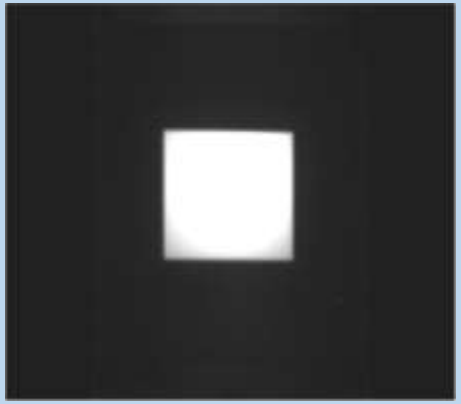

准直孔25-29-70mm


准直孔20-23-60mm


准直孔15-17-55mm

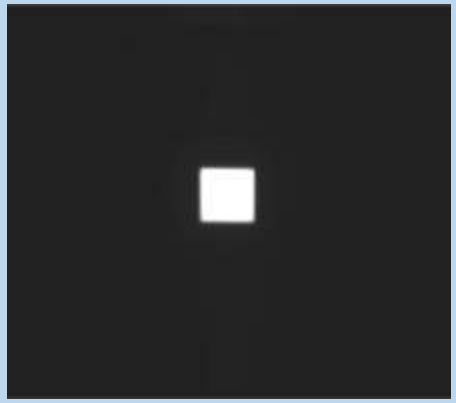

准直孔10-11-35mm

严格卡束


准直孔30-34-50mm


准直孔25-29-40mm


准直孔20-23-30mm


准直孔15-17-20mm


准直孔10-11-11mm

50mm束斑可看到向Y负方向略偏，40mm以下仅选取了束核部分，偏心现象大幅弱化
严格卡束后束核/束晕比略降，束斑方正，束边锐化

LHCb UT探测器单粒子效应测试

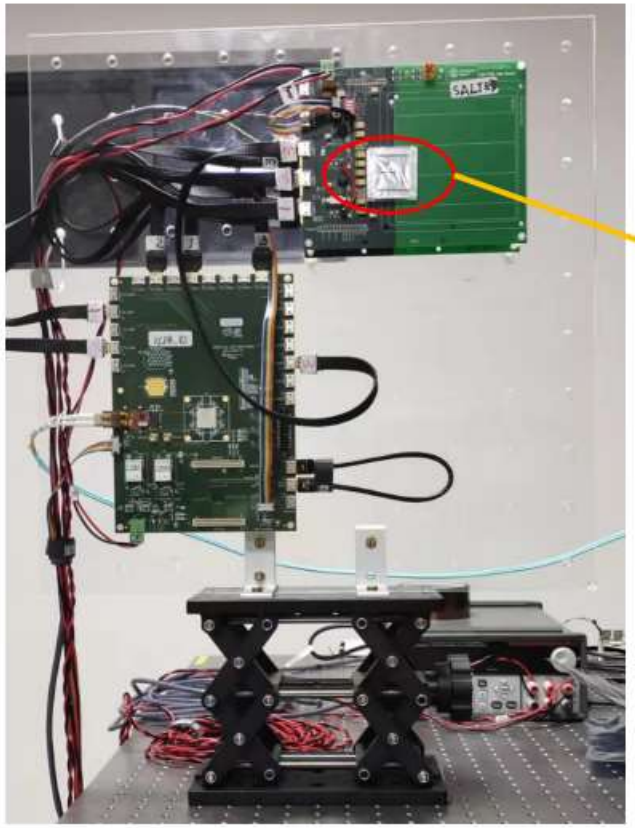


Fig1.前端电子学部分正面照

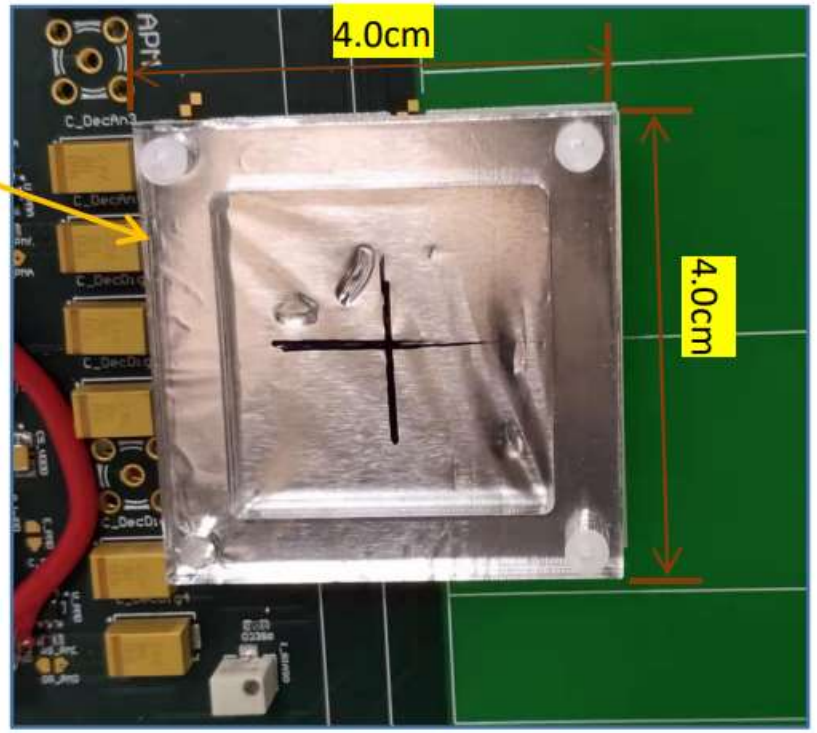


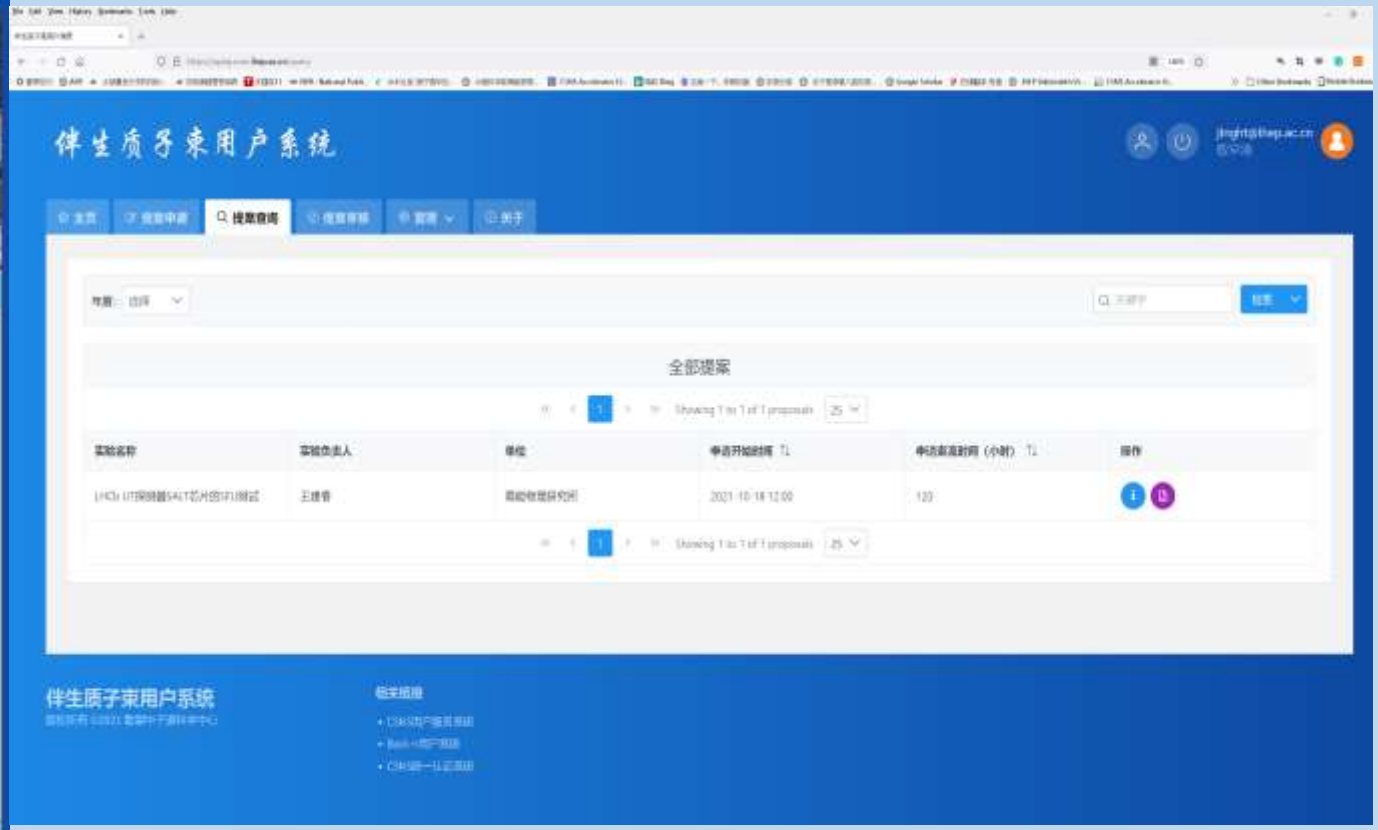
Fig2 束流测试位置放大图片

SALT芯片为硅微条探测器的读出电子学芯片，专用ASIC设计，包含寄存器单元，它们在高能粒子作用可能产生翻转，从而引入错误计数。

用户申请系统

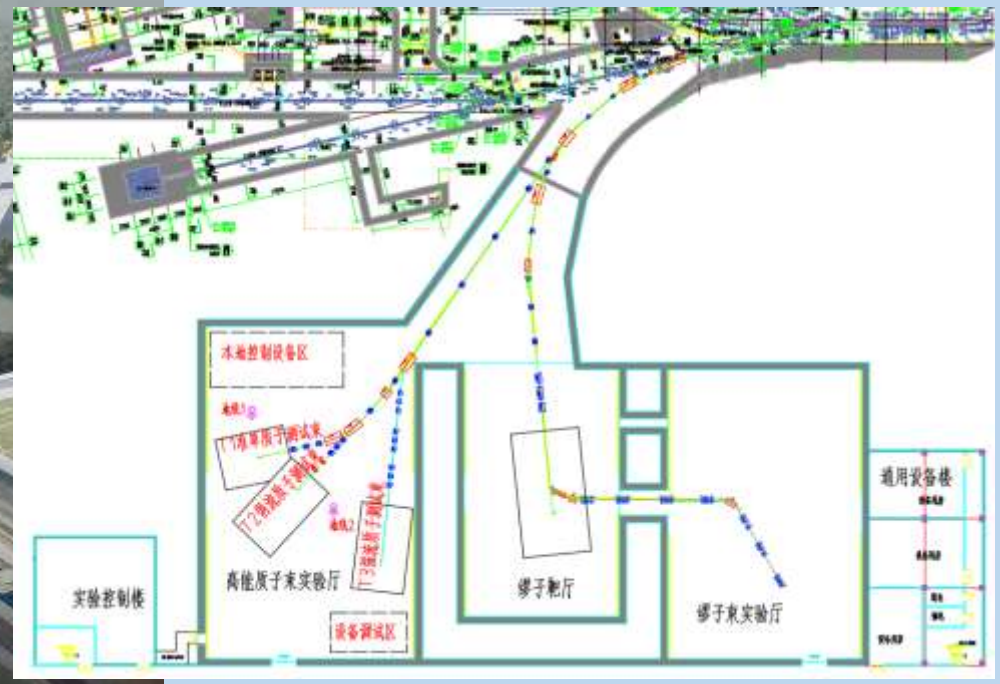
- （https://apep.csns.ihep.ac.cn/）



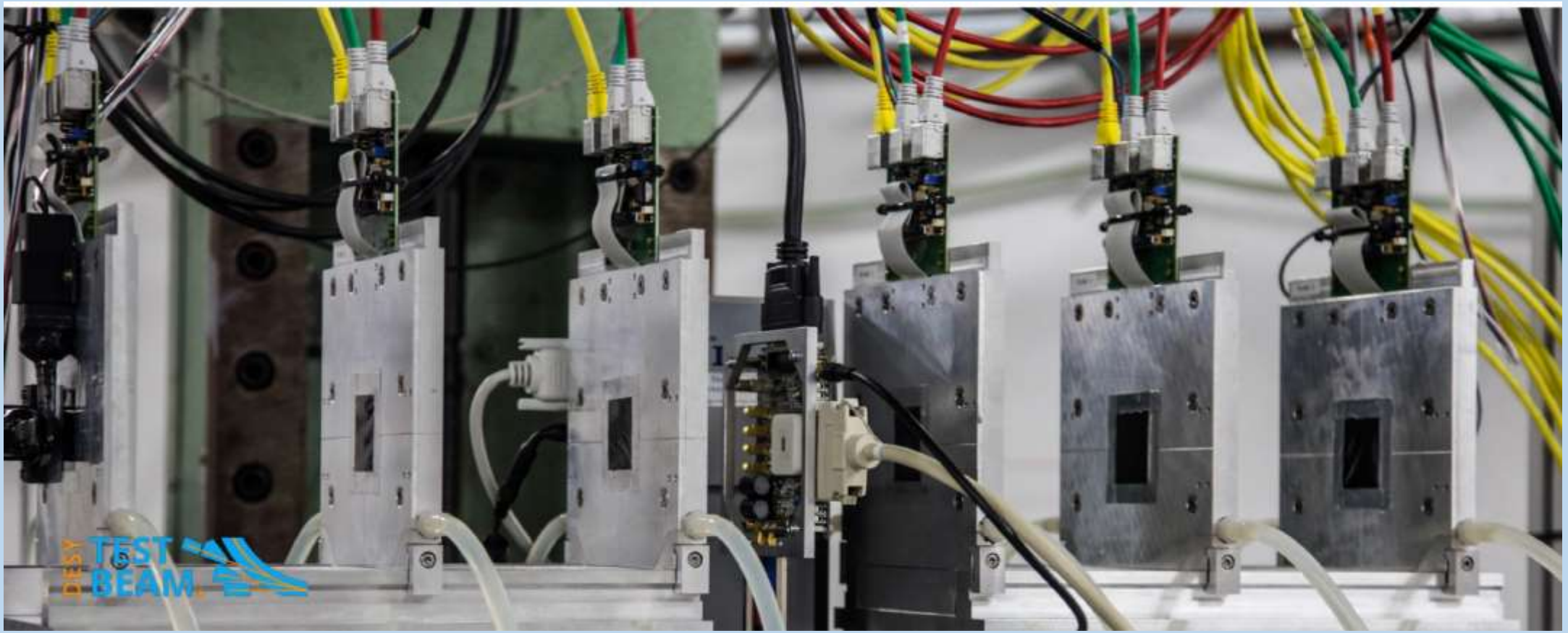


CSNS-II期

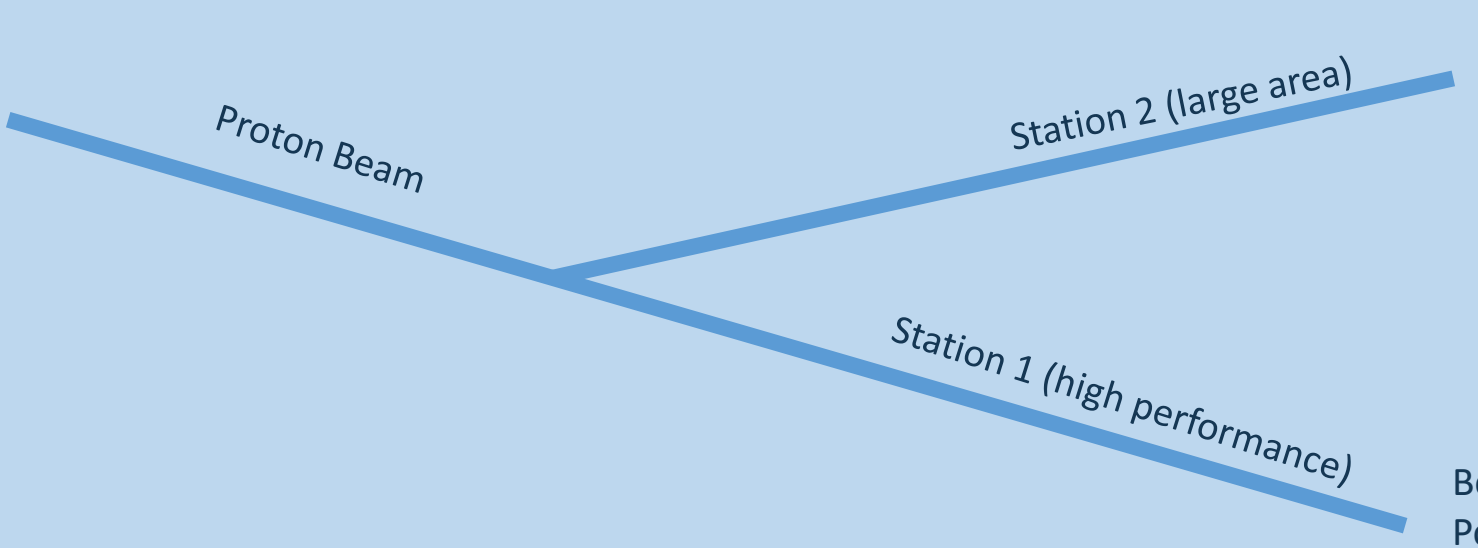




高能质子测试束线



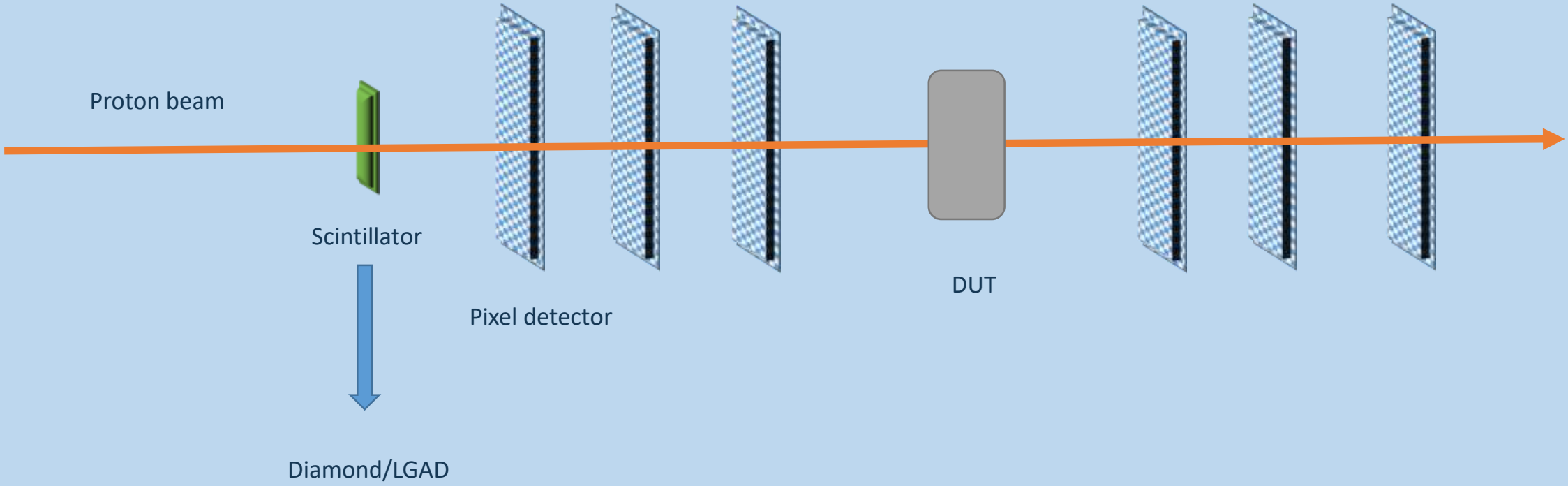
POEM experiment stations



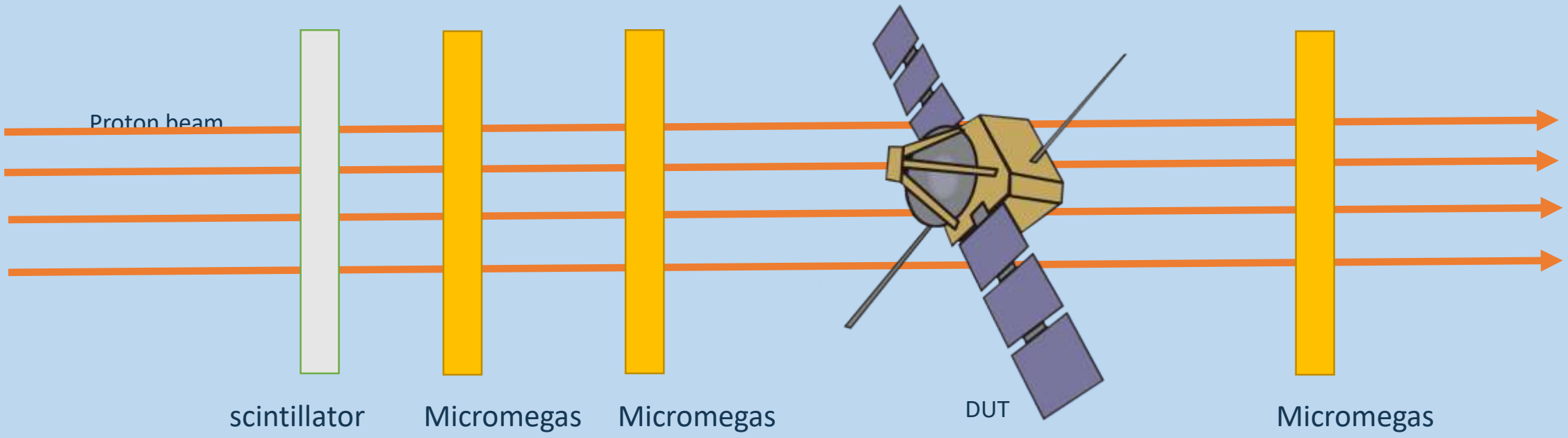
Beam Size: 30cmX30cm
Position resolution: <150um
Time resolution:~1ns

Beam Size: phi3cm
Position resolution: <10um
Time resolution:<100ps

Station 1 telescope

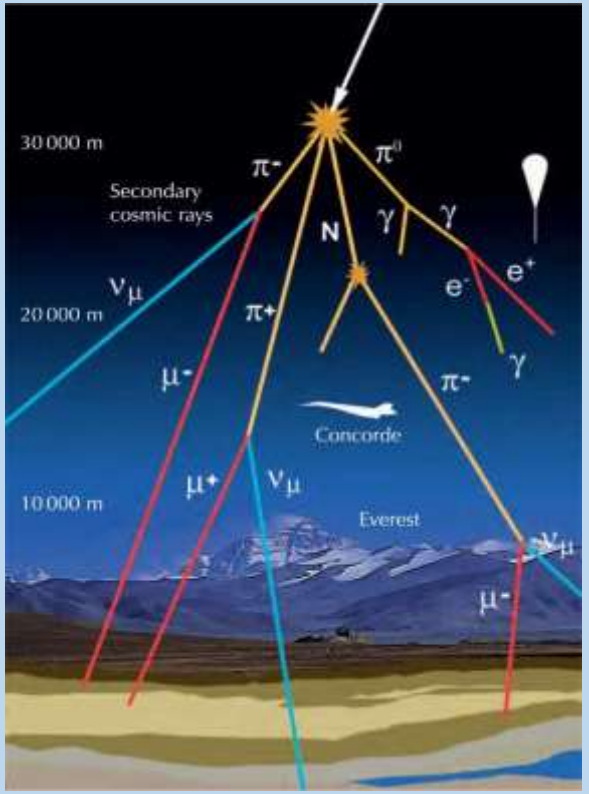


Station 2 telescope



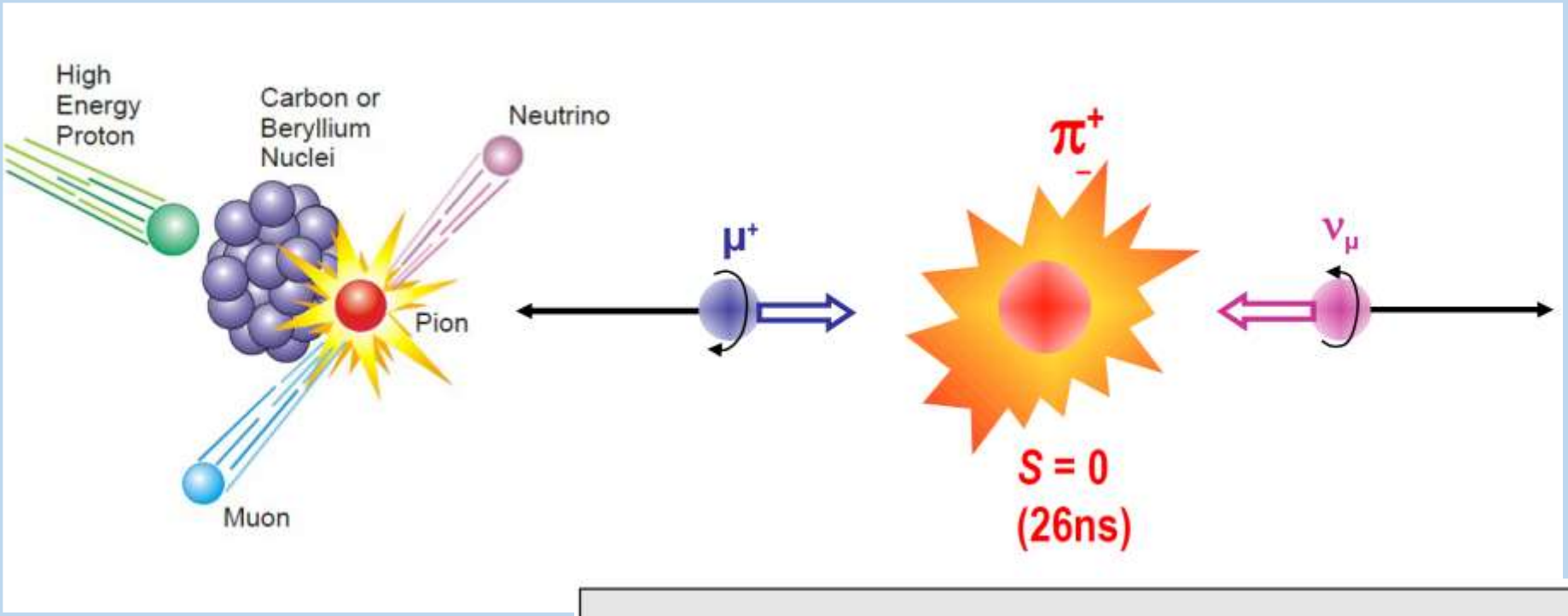
缪子源

缪子（英文为Muon），又称μ子，是由两位美国加州理工学院的物理学家Carl D. Anderson和Seth Neddermeyer于1936年发现的[1]。它是一种轻子，性质同电子有很多相似之处，但比电子重207倍，有时称为重电子。自然界中的μ子主要由π介子在高层大气中衰变产生（见图1.1-1），当宇宙射线中的质子或离子撞击高层大气中的原子核时,就会产生π介子，后者在相对短的距离里衰变成 μ子和μ子中微子。由于相对论效应延长了高能量μ子的寿命，它们中很多可以达到地面,到达地表。人工产生的μ子通常称为μ子源，由加速器提供的高能量质子束或离子束打靶产生。



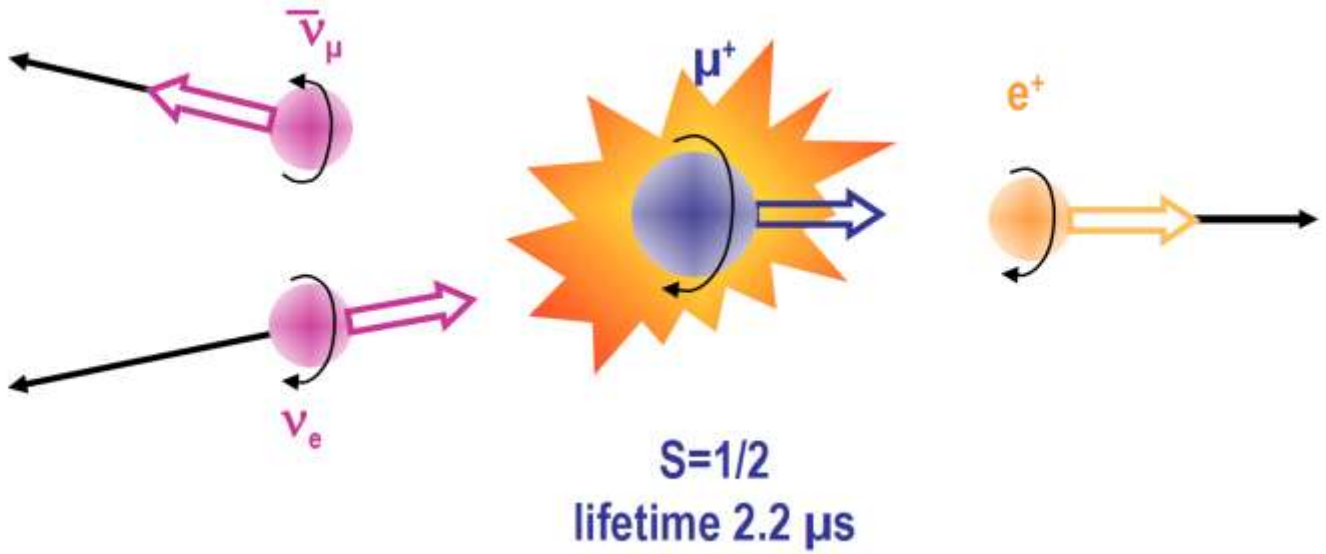


Production of Muon



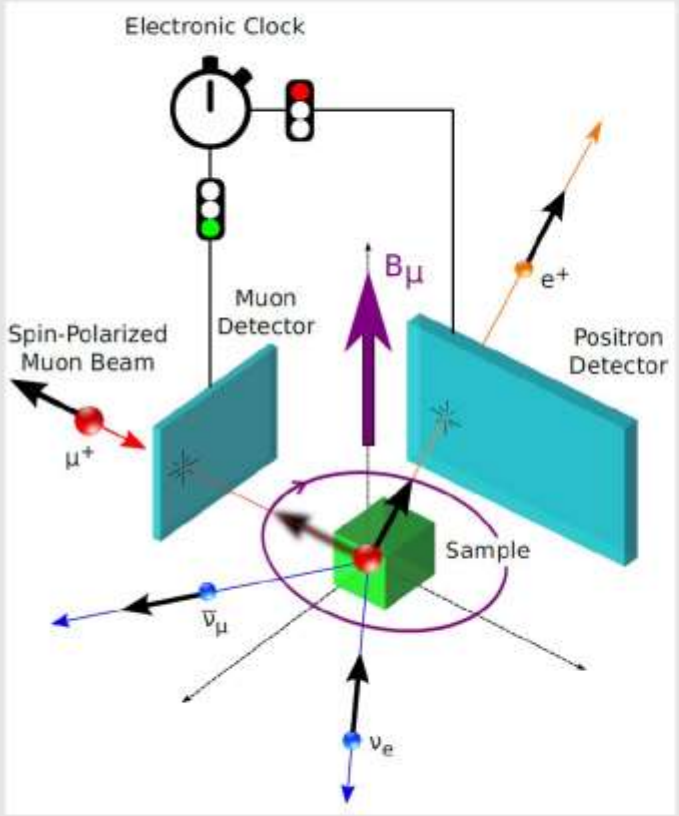
Two-body decay	▶ muon has always the energy 4.1 MeV in the reference frame of the pion (assuming $m_\nu = 0$)
Spin pion = 0	▶ muon has a **spin 1/2 and is 100% polarized** (since only left-handed neutrinos exist)

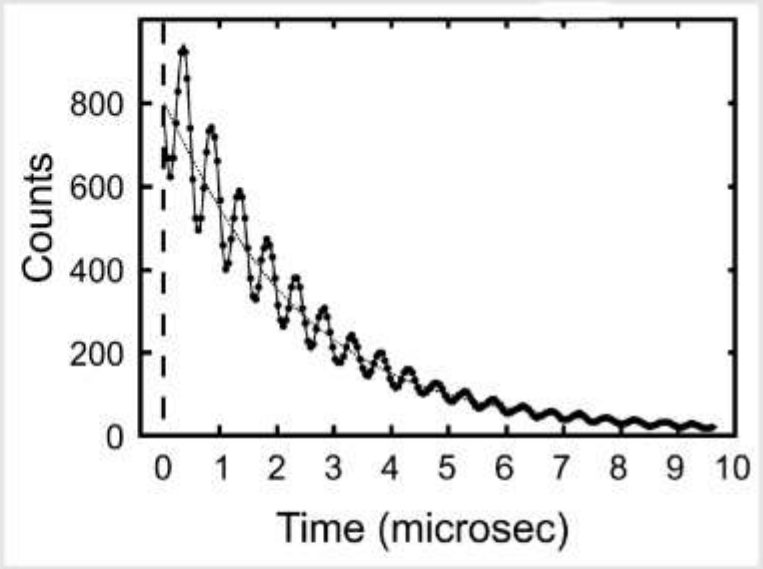
β -Decay of the Muon



Three-body decay	▶	Distribution of positrons energies
Weak-decay of muon	▶	Parity-violation leading to **positrons emitted preferentially along spin direction.**

The MuSR Technique

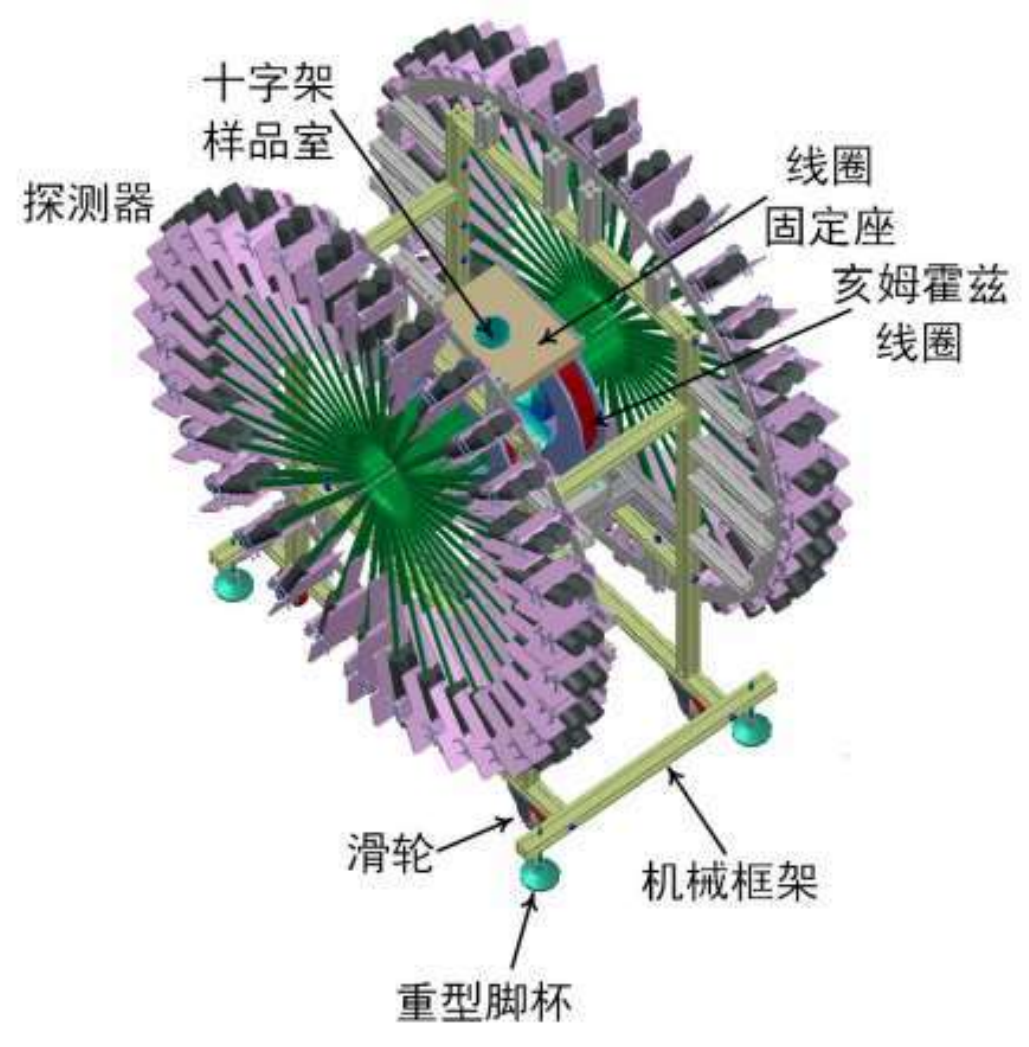


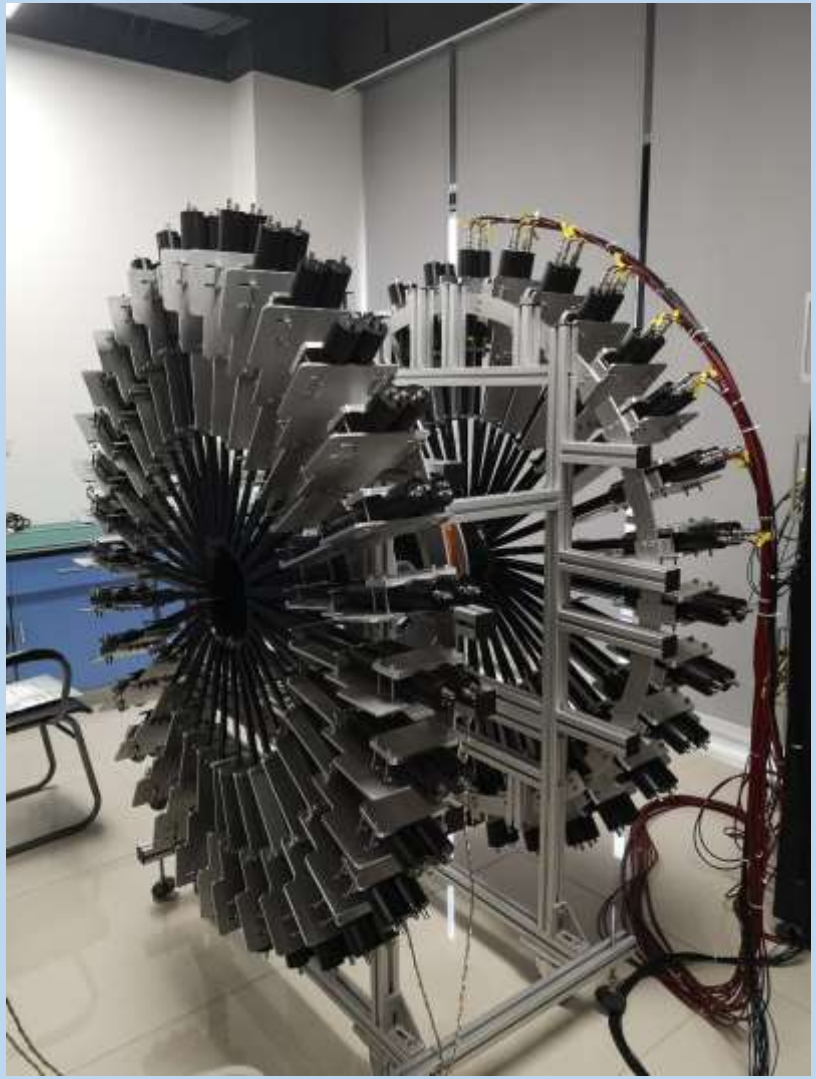


$$N(t) = Bkg + N_0 \exp(-t/\tau_\mu)[1 + a\,\hat{\mathbf{n}} \cdot P(t)]$$

$\hat{\mathbf{n}}$ - direction of detector

MuSR探测器







散裂中子源园区照片

谢谢各位的聆听！
欢迎各位专家莅临指导！