

CSNS 中能质子束应用

- 中国科学院高能物理研究所
- 中国散裂中子源科学中心

报告人：敬罕涛、邓亦凡、谭志新、蒋伟、吴帆等

日期：2026年7月15日

CONTENTS

01 实验终端设计背景

实验终端设计背景与应用领域

02 核心结构设计

瞬时流强调整，能量调节，本底控制，高功率运行

03 关键参数与应用场景

测试点流强、通量、剂量参数

04 在质子闪疗中的应用潜力

辐照终端在质子闪疗中的可能应用价值

05 未来计划

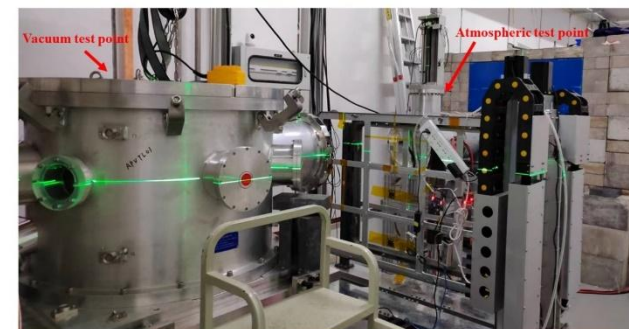
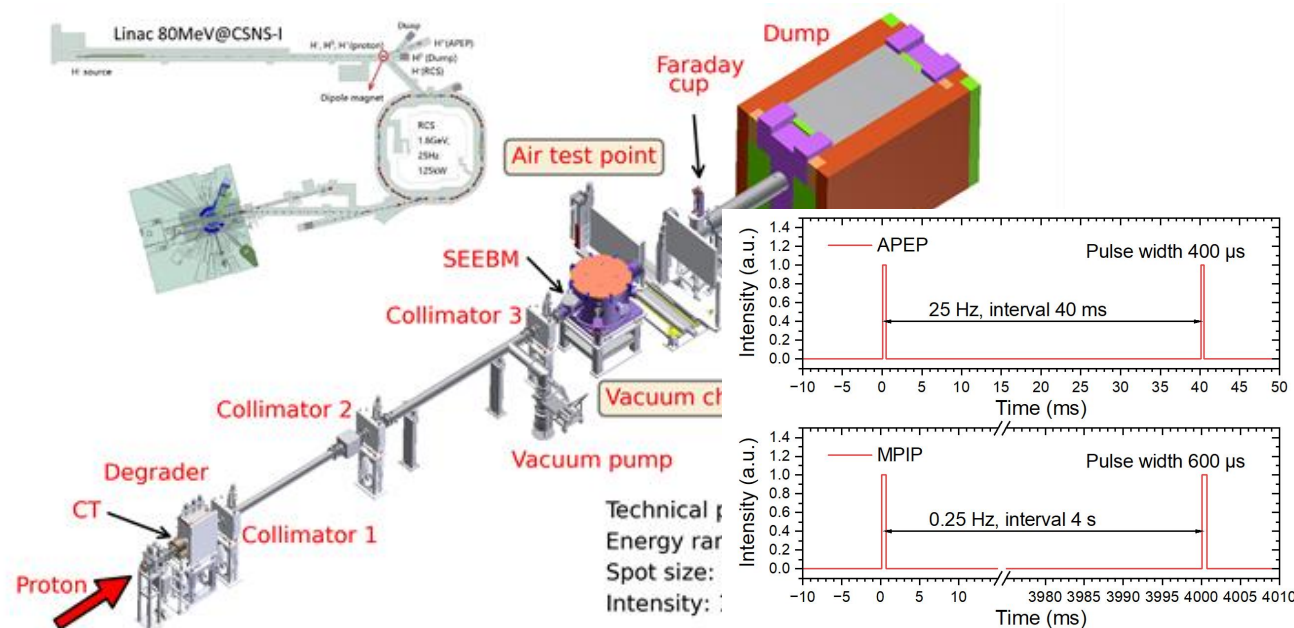
设计与改造实施计划

1. 设计背景与应用领域

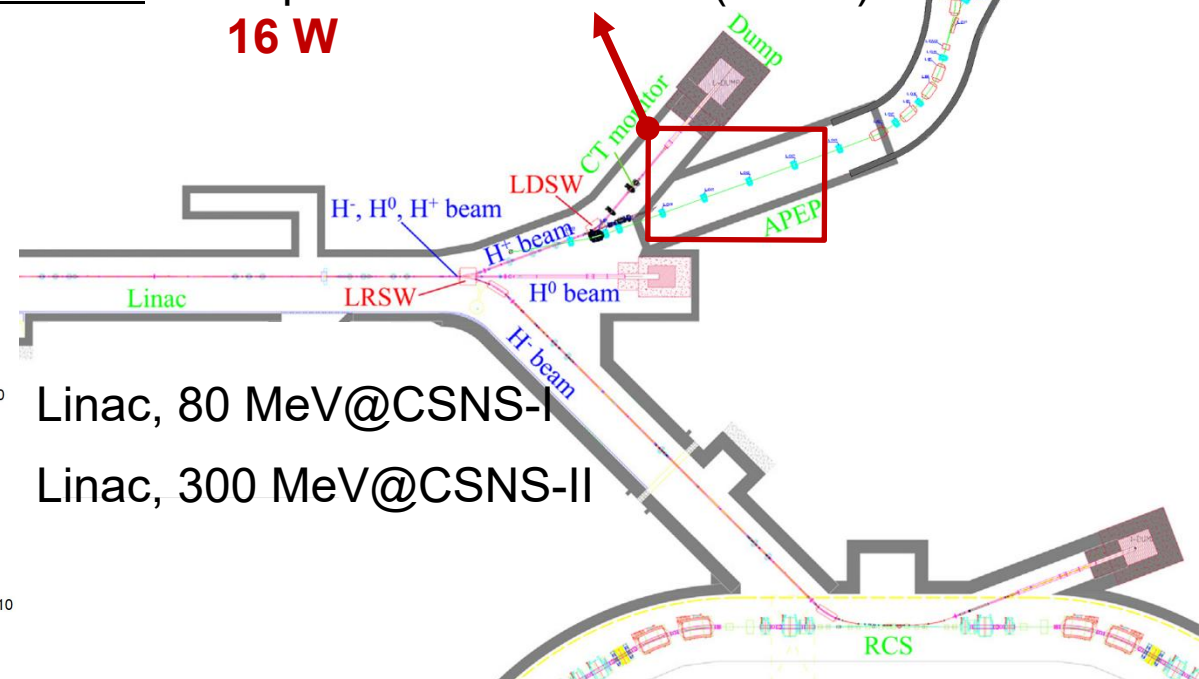
• CSNS-APEP现状与升级计划

APEP: 器件及电子学辐照测试、材料辐照损伤、质子探测器标定

Facilities	Energy (MeV)	Aver. Intensity (p/s)	Aver. Flux (p/cm ² /s)	Inst. Intensity (p/s)	Spot (cm ²)	Frequency (Hz)	Pulse (μs)
APEP (CSNS-I)	10 – 80	$10^8 - 10^{11}$	$10^7 - 10^9$	$10^9 - 10^{13}$	$1 \times 1 - 5 \times 5$	25	400



Associated Proton
Experimental Platform (APEP)
16 W



1.1 APEP近年来用户实验情况

- 从2021年10月开始调试并试运行，到2023年上半年已经完成超过100个实验研究，实际束流时间超过1500小时。
- 2023-至今，改造为同位素辐照实验为主的终端

***Chips radiation damage;**

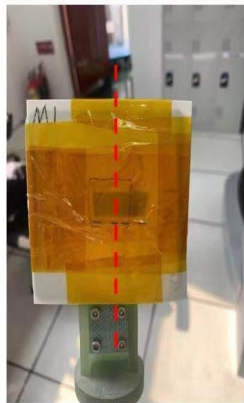
***Material radiation research ;**

***Detector radiation and calibration ;**

***Space Electronics radiation damage; *Radiation-induced mutation breeding;**



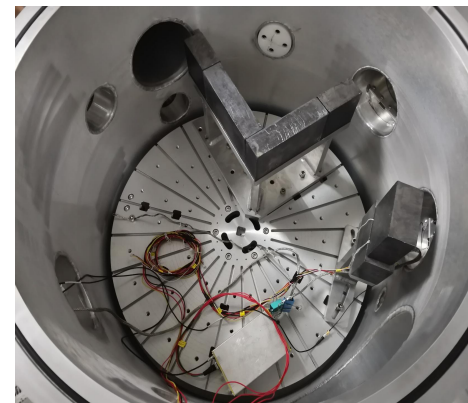
Detector radiation tests



Si material radiation damage



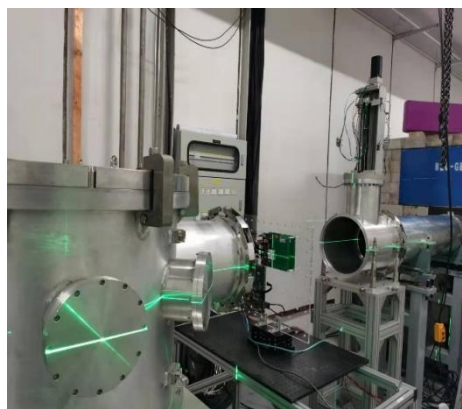
Radionuclide activity measurements



Detector calibration



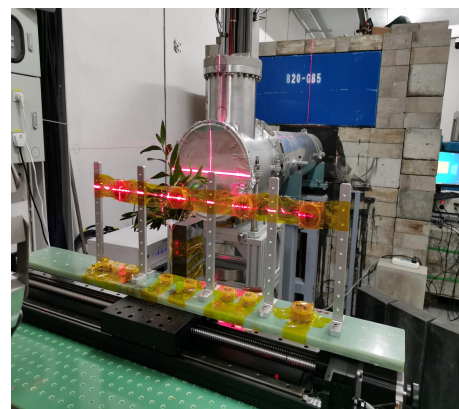
Space photoelectric device radiation



ASIC SEE for LHCb detector



ASIC SEE for ATLAS



Radiation-induced mutation breeding



Communication devices radiation

1.2 基于质子束的医用同位素核数据应用

有前景的Ac-225放射性同位素生产和药物生产，以及衍生同位素Bi-213的生产和核药生产（被美国Department of Energy Isotope Program (DOE IP) 列为重要核素）

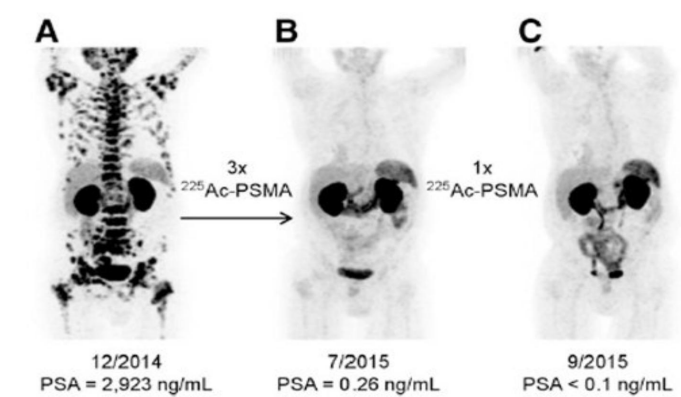
- 优点
 - 半衰期适合（9.9d）；
 - 衰变过程中放出4个α和2个β，能量沉积大，射程短；杀死癌细胞更有效；
 - Ac³⁺的离子半径适合于大型多齿类螯合剂进行配位，更有利于制作高效的靶向药物；
- 缺点：
 - 生产反应道不多；
 - 加速器生产方式需要300-400MeV的较高能量；

国内主要医用同位素市场需求

核素	需求 (Ci/年)	经济效益 (万元/年)	年增长趋势	购置情况
⁹⁹ Mo	20000	9800	5%	全部进口
¹²⁵ I	4000	7700	15%	全部进口
¹³¹ I	9000	8700	15%	80%进口
⁸⁹ Sr	50	2000	-	全部进口
¹⁴ C	30	1000	10%	全部进口
¹⁸ F	45000	30000	10%	自主生产
⁶⁰ Co	900万	22000	-	自主生产

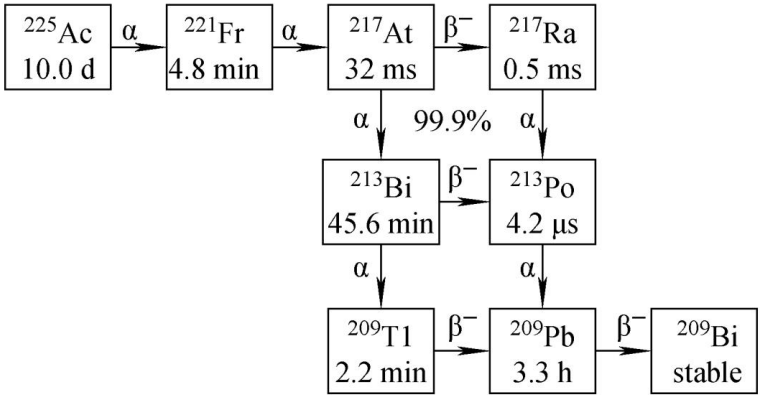
Radionuclide	Half-life
²²⁵ Ac	10 d
²¹¹ At	7.2 h
²¹² Bi	60 m
²¹³ Bi	46 m
²¹² Pb	10.6 h
²²³ Ra	11.43 d
²²⁶ Th	31 m
²²⁷ Th	18.7 d

For the past ten years, alpha emitters have been the highest priority for the DOE Isotope Program.



This picture shows three different images of a single patient with end-stage prostate cancer. The first was taken before treatment with actinium-225, the second after three doses, and the third after an additional dose. The treatment, done at the University Hospital Heidelberg, was extremely successful.

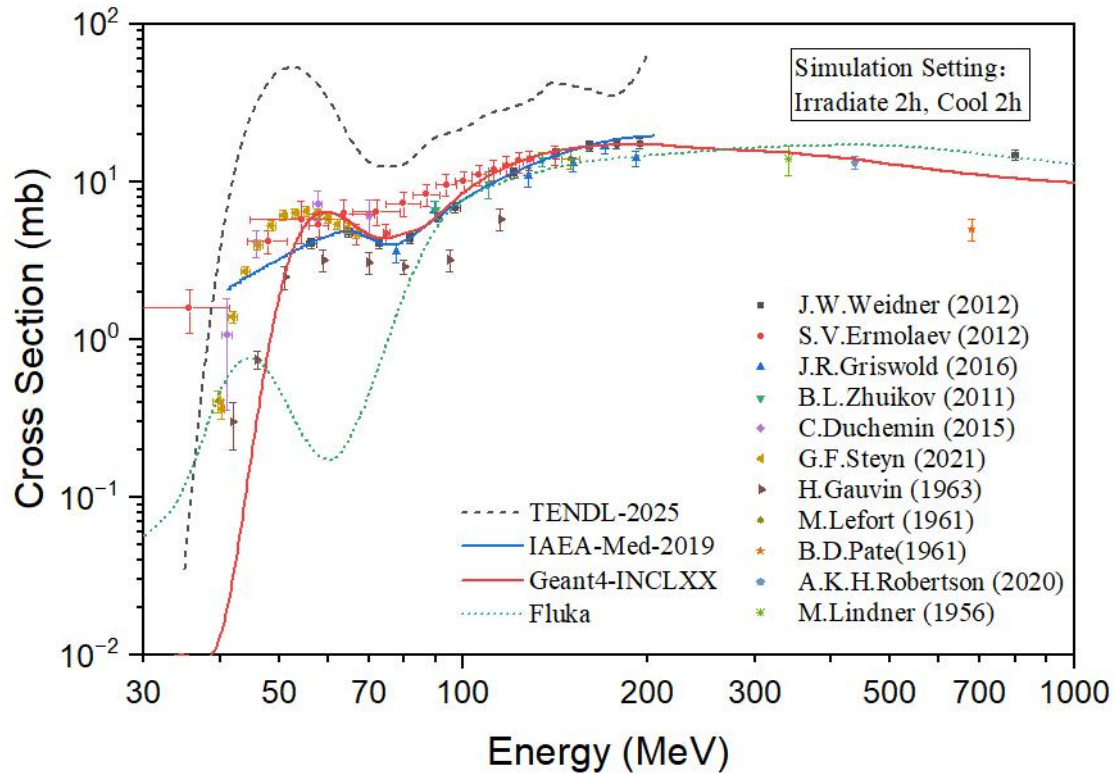
Image courtesy of Clemens Kratochwil, University Hospital Heidelberg - J. Nuc. Med., v57, 2016, pp 1941-1944



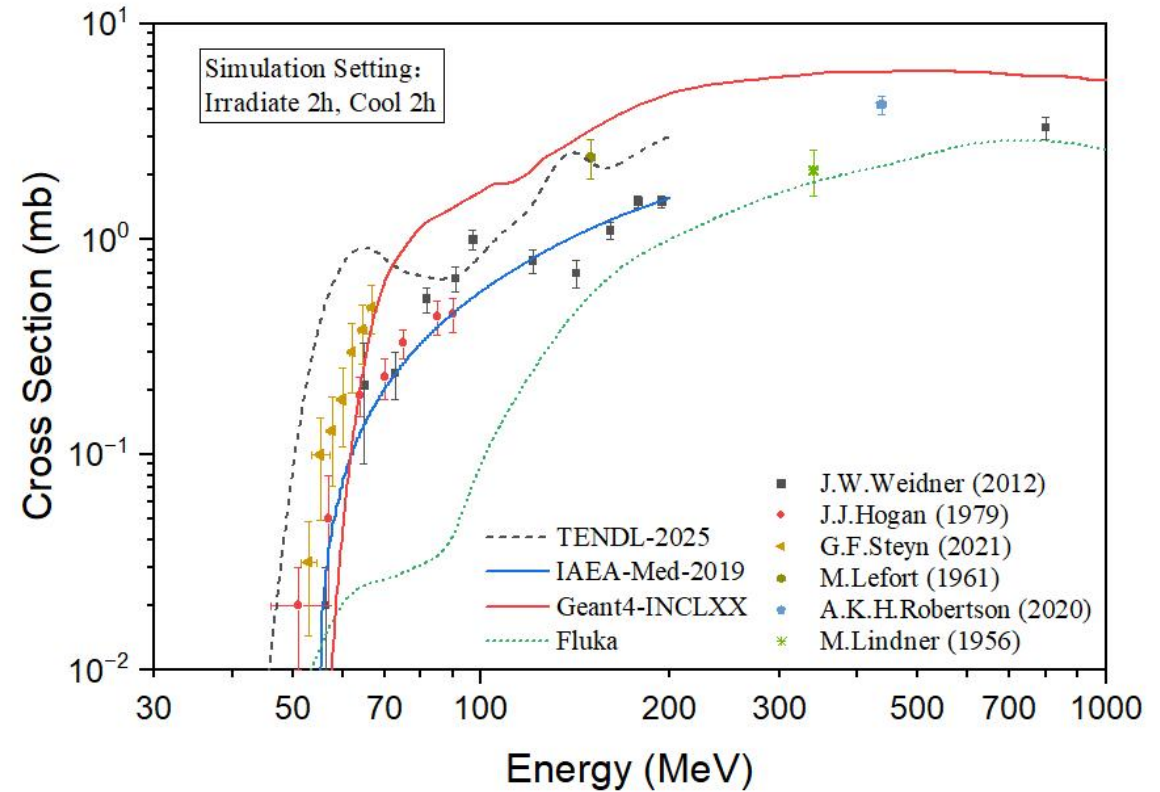
1.3 产额计算可靠性的评估

截面数据差异 (以 ^{225}Ac 、 ^{225}Ra 为例)

- IAEA-med: 基于实验数据评价, 为评价基准(<200MeV)
- Geant4-INCXX: ^{225}Ac 截面较准确、 ^{225}Ra 截面整体偏大
- Fluka: 低能区严重偏小, >150MeV能区较准确

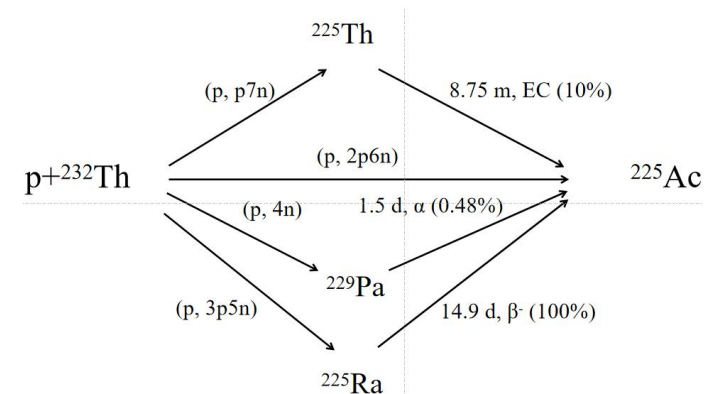
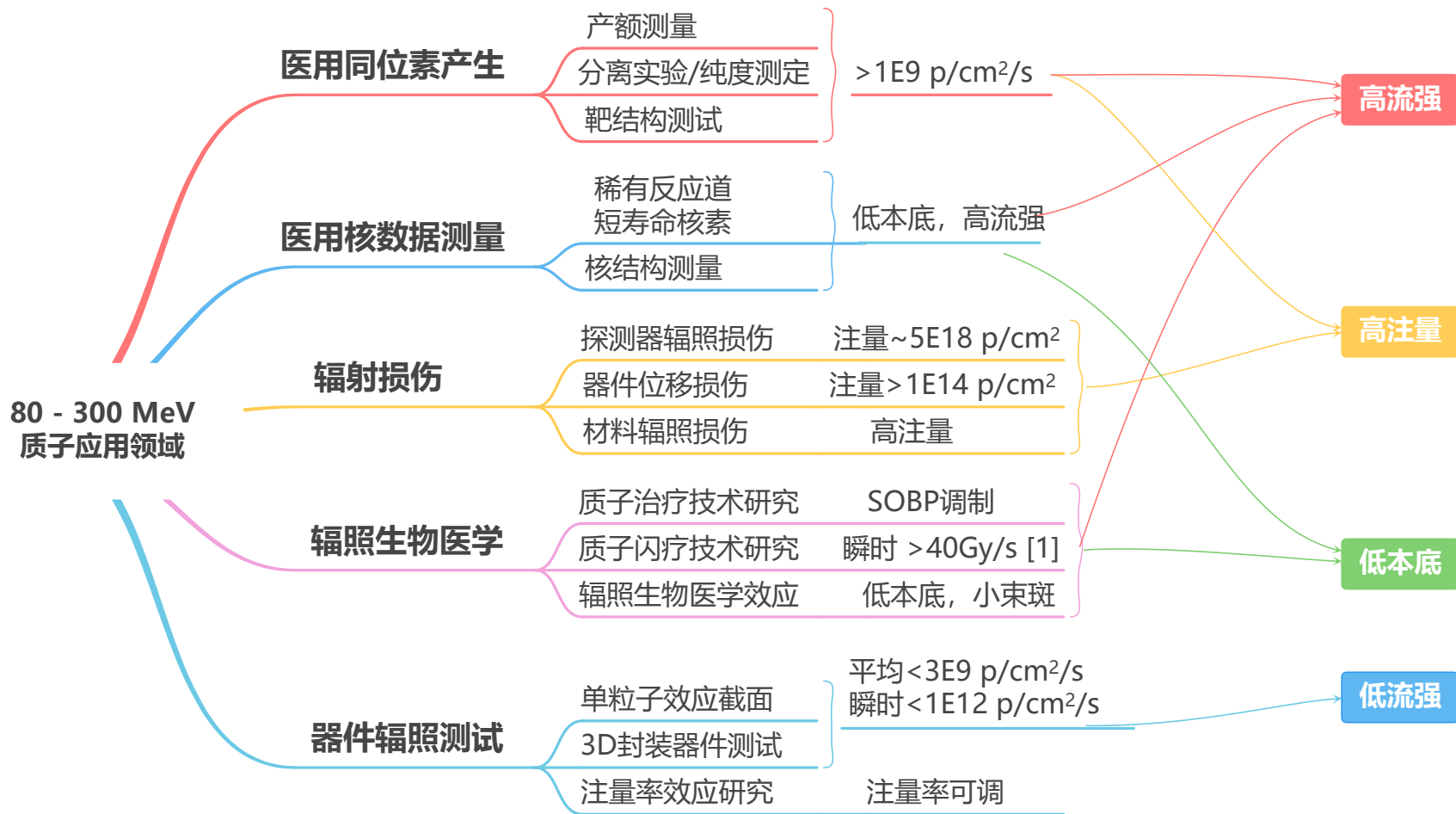


$^{232}\text{Th}(p,x)^{225}\text{Ac}$ 反应截面

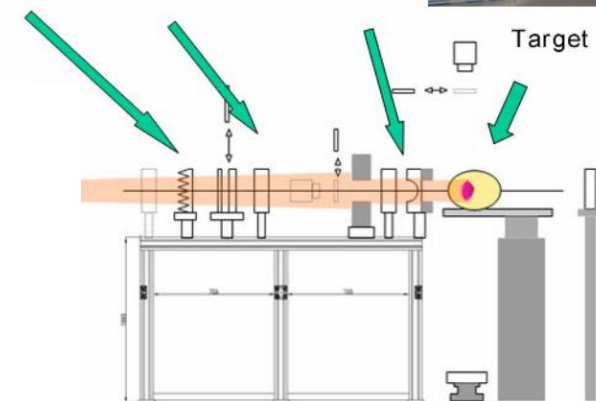
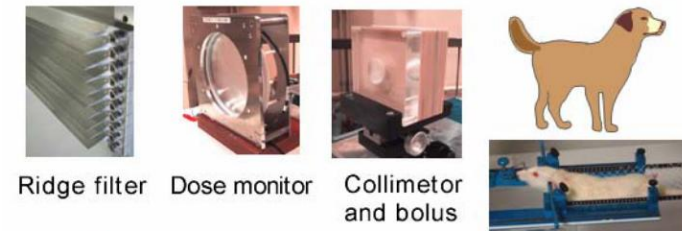


$^{232}\text{Th}(p,x)^{225}\text{Ra}$ 反应截面

1.4 设计背景与应用领域



短寿命核素分支测量举例



CYRIC System [2]

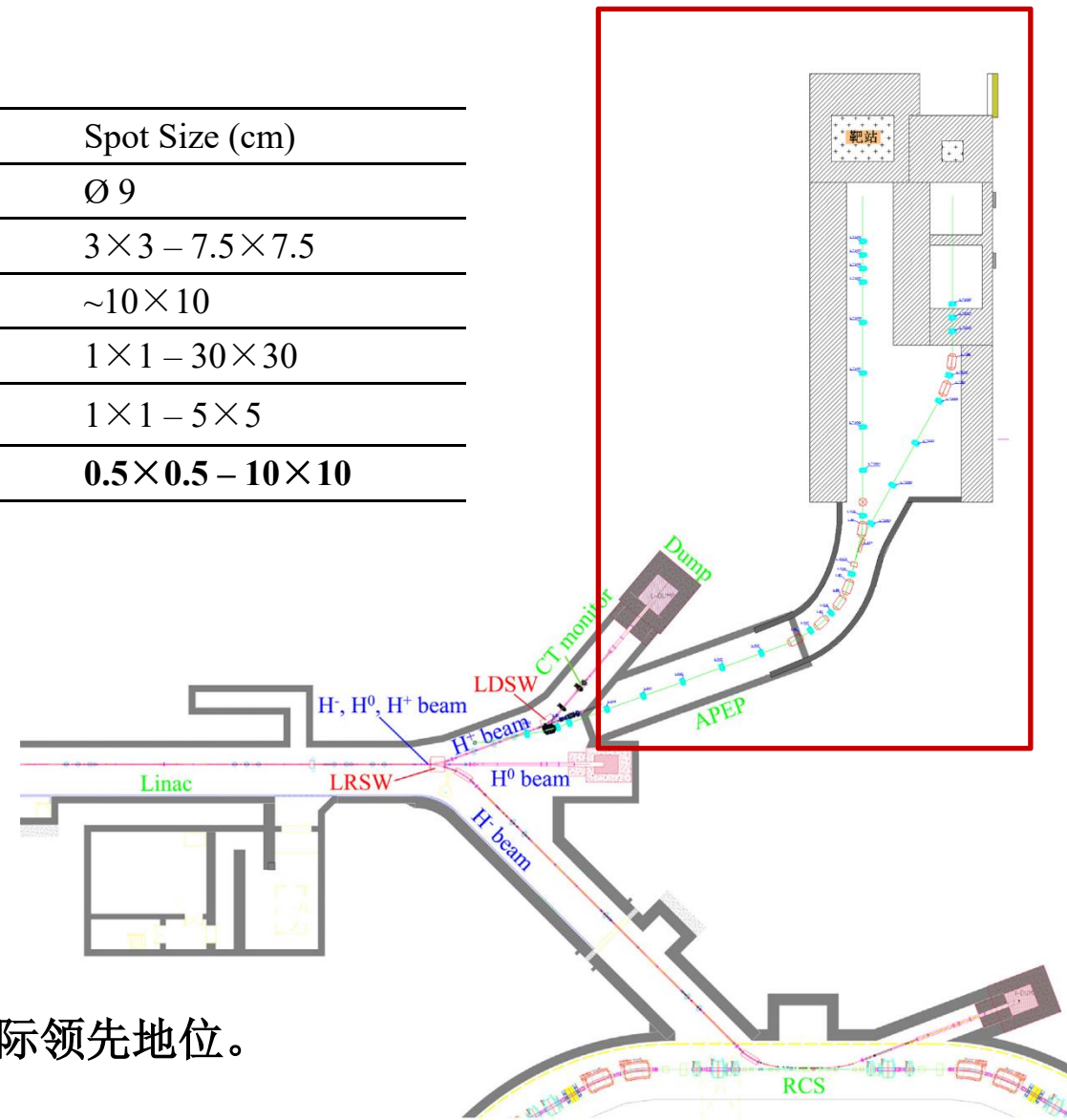
[1] S. Jolly, H. Owen, M. Schippers, and C. Welsch, "Technical challenges for FLASH proton therapy," Physica Medica, vol. 78, pp. 71–82, Oct. 2020

[2] A. E. Torshabi et al., "A Study on Beam Flattening Based on Compact Double Scatterer Applicable to Rotational Beam Irradiation System in the Proton Therapy Facility at CYRIC, Tohoku University," Progress in Nuclear Science and Technology, vol. 1, no. 0, pp. 509–512, Feb. 2011

2.1 核心结构设计

Facilities	Energy (MeV)	Flux (p/cm ² /s)	Spot Size (cm)
PSI	6 – 230	2×10^9	$\varnothing 9$
TRIUMF (BL1B)	120 – 500	$10^5 - 4 \times 10^7$	$3 \times 3 - 7.5 \times 7.5$
XiPAF	60 – 230	$10^5 - 10^8$	$\sim 10 \times 10$
SESRI	60 – 300	$10^4 - 10^8$	$1 \times 1 - 30 \times 30$
APEP(CSNS-I)	10 – 80	$10^7 - 10^{10}$	$1 \times 1 - 5 \times 5$
APEP(CSNS-II)*	80 – 300	$10^6 - 10^{12}$	$0.5 \times 0.5 - 10 \times 10$

- 大范围流强调整设计——限流器设计
- 大范围能量调整设计——降能器设计
- 低本底实验环境设计——本底优化设计
- 高功率运行设计——散热与辐射防护设计
- 建成后，各项指标满足多个领域研究需求，束流参数处于国际领先地位。

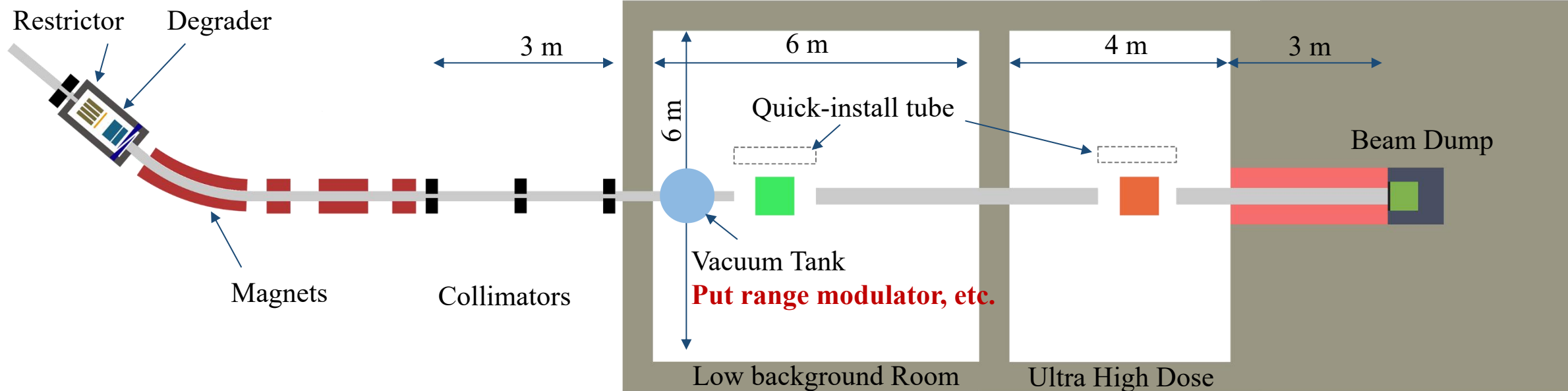


2.2 核心结构设计

总体布局与关键参数

- 限流器及降能器置于弯转磁铁前，束流经降能器后重新收集传输
- 开关为引出磁铁，可实现单发辐照模式 (600 μ s, 8.32E13 p)
- 分为低本底实验终端，和高剂量实验终端
- 设置真空罐，用于安装可拆卸装置 (如射程调制器)

Native Beam		At Air Test Point	
Performance	Value	Performance	Expected Value
Power :	1 kW	Energy :	50 – 300 MeV
Frequency :	0.25 Hz (1pulse/4s)	Intensity :	$10^7 - 10^{13}$ p/s
Intensity:	2.08×10^{13} p/s	ΔE (FWHM) :	< 10%
Energy:	300 MeV	Spot Size :	$1 \times 1 - 10 \times 10$ cm ²
Beam size:	ϕ 3 cm	Spot Uniformity :	> 90%



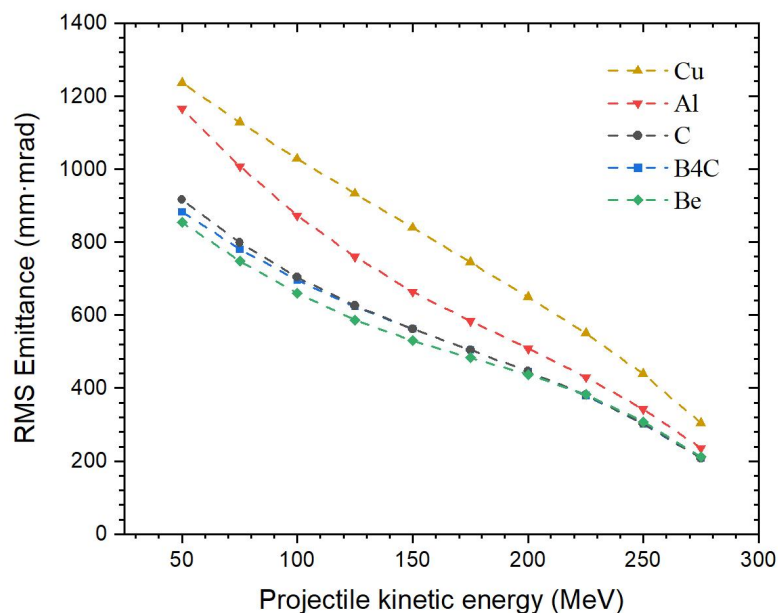
实验终端总体布局设计

2.3 核心结构设计

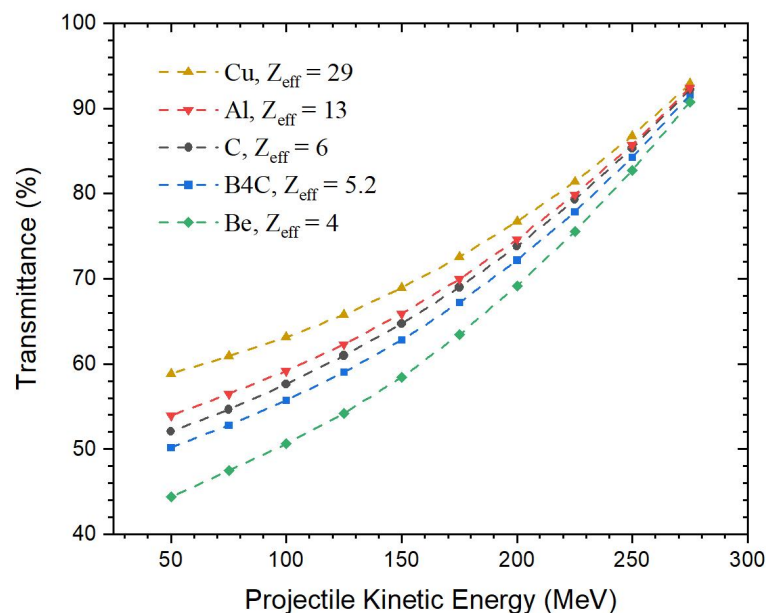
降能器与能量调节

- Cu, Al 发射度较大
- Be 降能用厚度大, 透过率低
- B4C 热性能与机械性能差于石墨

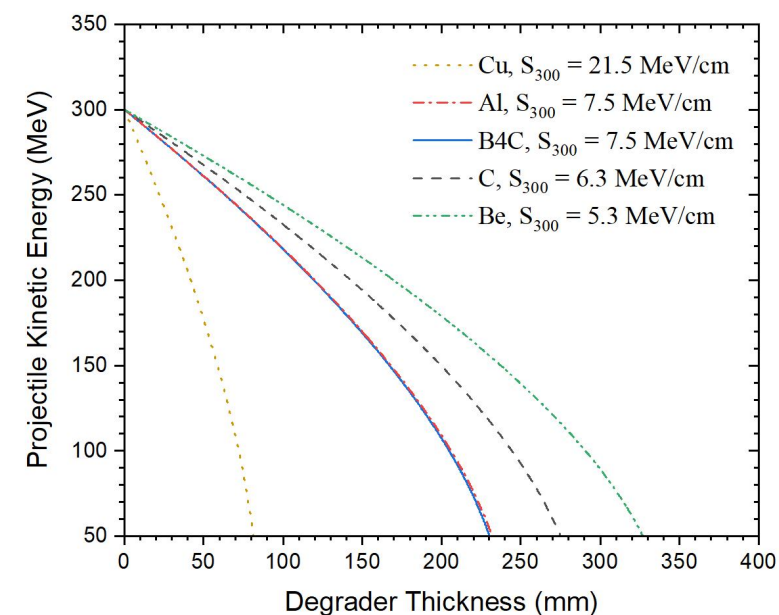
Performance			B ₄ C	Graphite	Beryllium
Thermal and Mechanical	Melting point (°C)		2350	~3600	1287
	Conductivity (W/m/K)	20°C	29	103	157
		1000°C	14	40	72
	Heat capacity (J/kg/K)	20°C	800	700	2.398
		1000°C	2200	1929	3.364
	Mohs Hardness		9.5	0.5	5.5
	Density (g/cm ³)		2.4-2.52	1.8-2.0	1.85



发射度对比



透过率对比

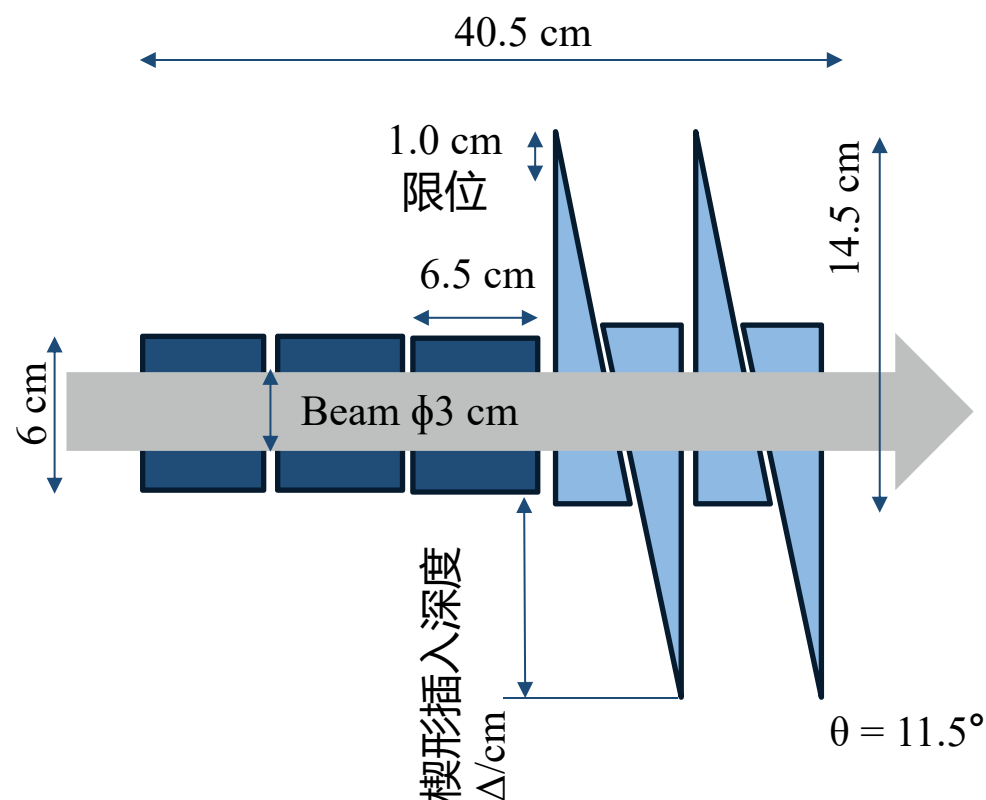


降能厚度对比

2.4 核心结构设计

降能器与能量调节

• 结构设计



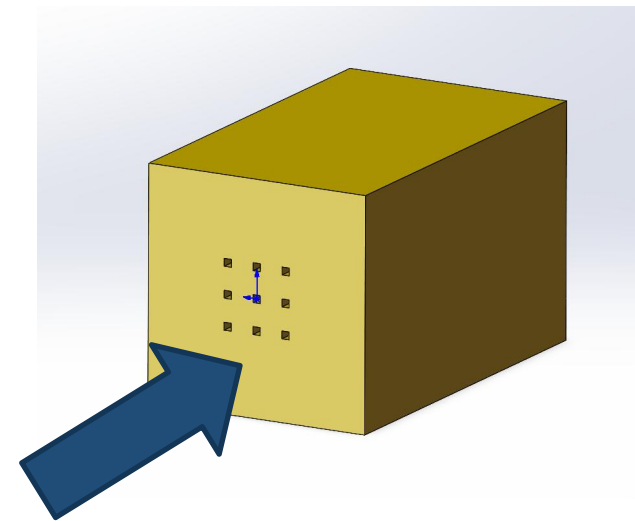
石墨楔形降能器，加三个块状石墨降能器

出射能量 (MeV)	块1 (cm)	块2 (cm)	块3 (cm)	楔形1厚度 (cm)	$\Delta 1 (>1)$ (cm)	楔形2厚度 (cm)	$\Delta 2 (>1)$ (cm)
300	×	×	×	0.000	-2.500	0.000	-2.500
290	×	×	×	1.576	1.373	0.000	-2.500
280	×	×	×	3.123	5.175	0.000	-2.500
270	×	×	×	3.052	5.000	1.585	1.396
260	×	×	×	4.476	8.500	1.644	1.540
250	×	×	×	4.476	8.500	3.093	5.101
240	×	×	×	4.476	8.500	4.508	8.579
230	6.5	×	×	3.863	6.994	0.000	-2.500
220	6.5	×	×	3.052	5.000	2.153	2.792
210	6.5	×	×	4.476	8.500	2.034	2.499
200	6.5	×	×	4.476	8.500	3.298	5.605
190	6.5	×	×	4.496	8.550	4.501	8.561
180	6.5	6.5	×	3.679	6.541	0.000	-2.500
170	6.5	6.5	×	3.052	5.000	1.765	1.838
160	6.5	6.5	×	4.272	8.000	1.639	1.527
150	6.5	6.5	×	4.476	8.500	2.483	3.602
140	6.5	6.5	×	4.476	8.500	3.484	6.062
130	6.5	6.5	×	4.476	8.500	4.435	8.399
120	6.5	6.5	6.5	4.311	8.095	0.000	-2.500
110	6.5	6.5	6.5	3.052	5.000	2.106	2.676
100	6.5	6.5	6.5	4.272	8.000	1.677	1.620
90	6.5	6.5	6.5	4.476	8.500	2.208	2.926
80	6.5	6.5	6.5	4.476	8.500	2.882	4.583
70	6.5	6.5	6.5	4.476	8.500	3.494	6.087
60	6.5	6.5	6.5	4.476	8.500	4.039	7.426
50	6.5	6.5	6.5	4.476	8.500	4.516	8.599

2.5 核心结构设计

多孔流强限制器

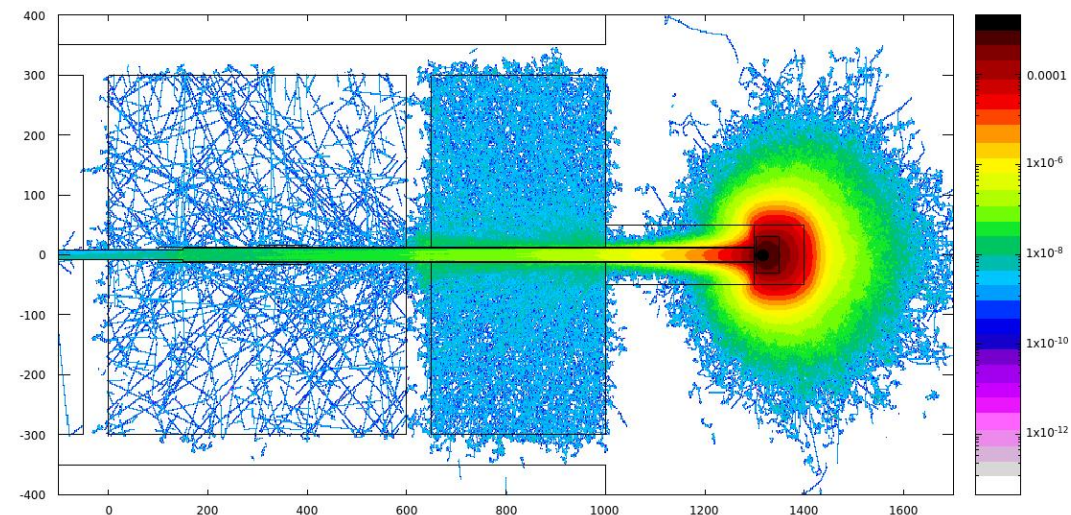
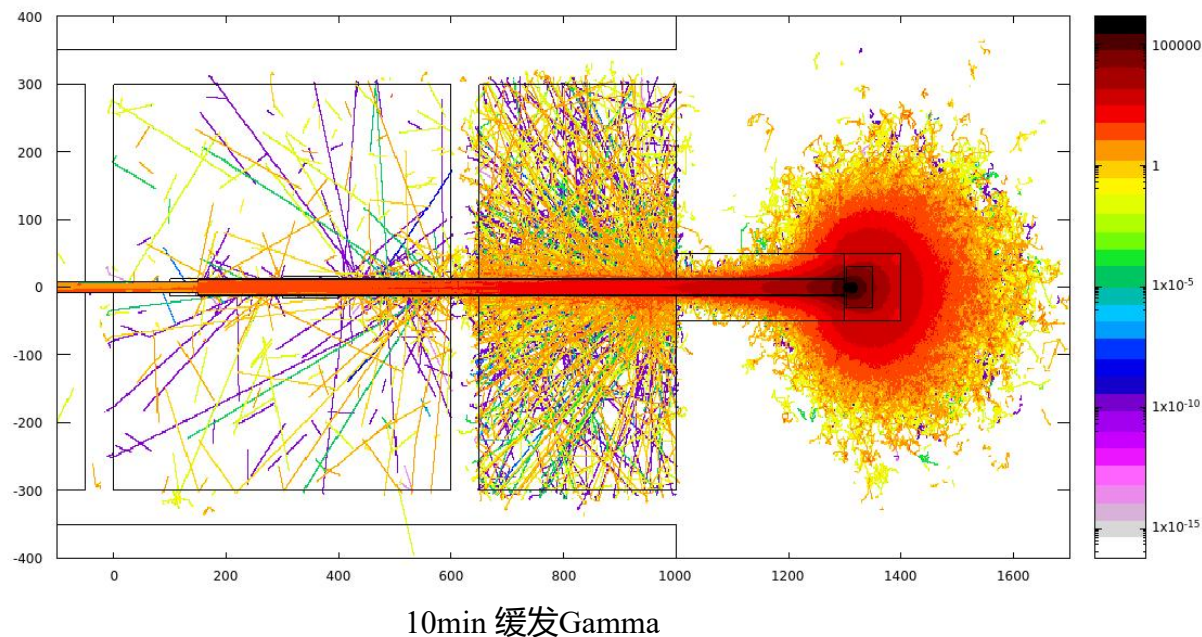
- 使用多孔流强限制器降低流强
- 通过限制器前准直孔控制 1孔模式，3孔模式，及9孔模式
- 实现瞬时流强及平均流强可调（绿色可用于器件辐照）
- **可实现流强降低3个量级**



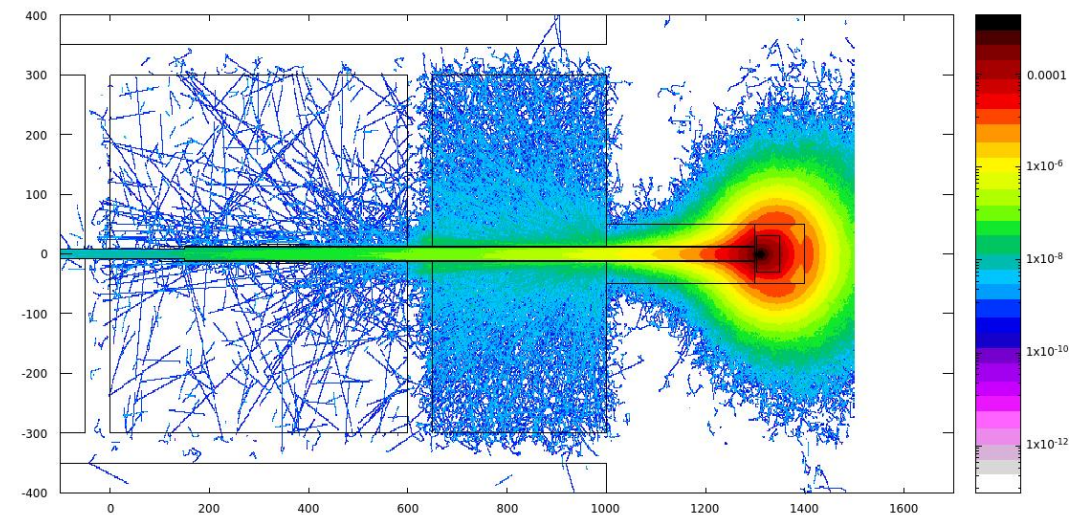
	1孔 @AirTest		3孔 @AirTest		9孔 @AirTest	
E(MeV)	Inst. flux (p/s/cm ²)	Aver. flux (p/s/cm ²)	Inst. flux (p/s/cm ²)	Aver. flux (p/s/cm ²)	Inst. flux (p/s/cm ²)	Aver. flux (p/s/cm ²)
300	5.43E+12	4.07E+08	1.63E+13	1.22E+09	4.88E+13	3.66E+09
250	9.20E+11	6.90E+07	2.76E+12	2.07E+08	8.27E+12	6.20E+08
200	3.68E+11	2.76E+07	1.10E+12	8.26E+07	3.30E+12	2.48E+08
150	1.77E+11	1.33E+07	5.31E+11	3.98E+07	1.59E+12	1.19E+08
100	8.94E+10	6.71E+06	2.68E+11	2.01E+07	8.04E+11	6.03E+07
50	4.47E+10	3.35E+06	1.34E+11	1.00E+07	4.01E+11	3.01E+07

2.6 核心结构设计

- 本底优化**
- 1. 废束站停束层: 50*50 cm SiC
 - 2. 中子吸收层: ~2.5 cm B板
 - 3. 增加Fe屏蔽Gamma、中子
 - 4. 设置超高剂量厅、低本底厅



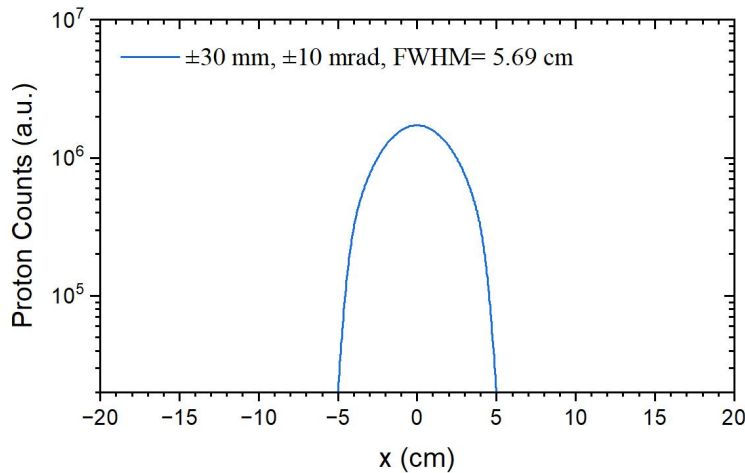
瞬发中子



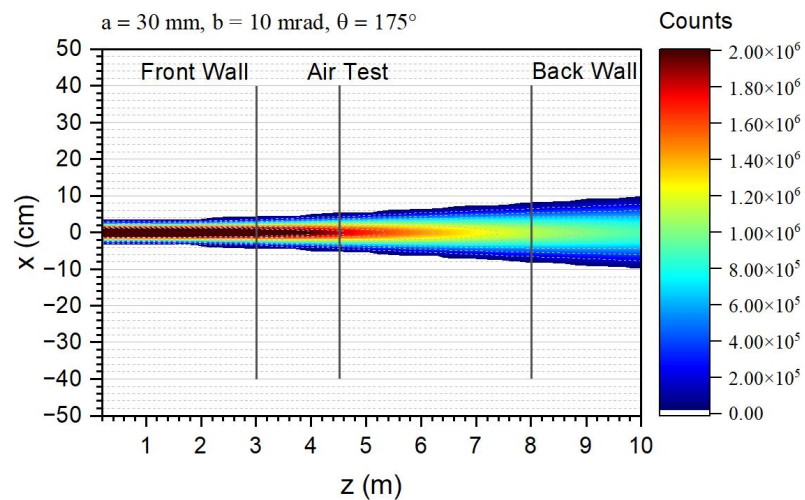
瞬发Gamma

- 停束10min后, 剂量 $<10\mu\text{Sv}$, 可进入操作

3.1 核心参数与应用



Spot Distribution @Test

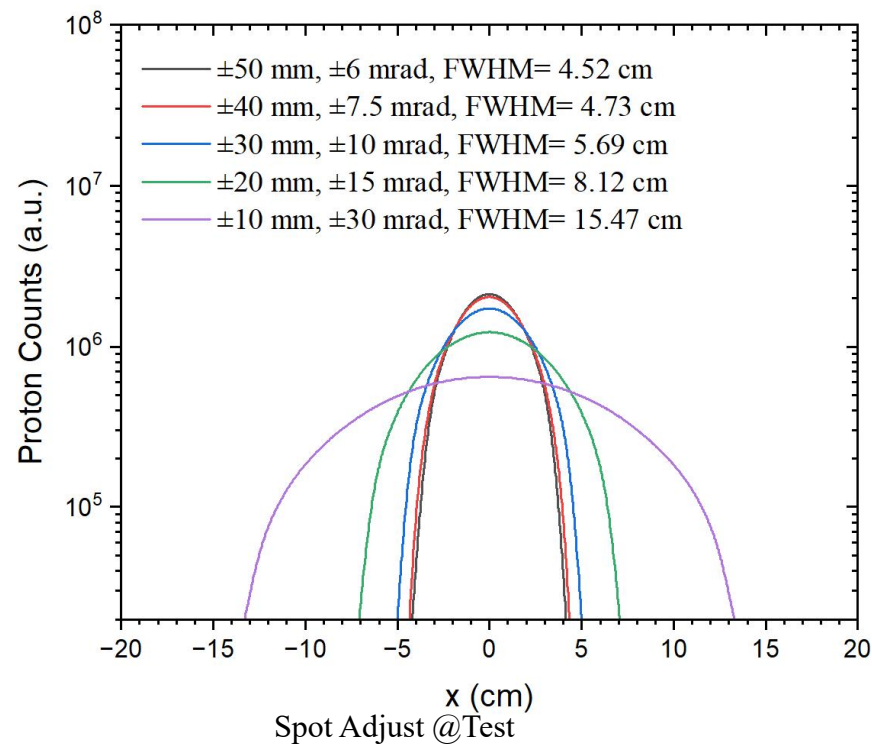
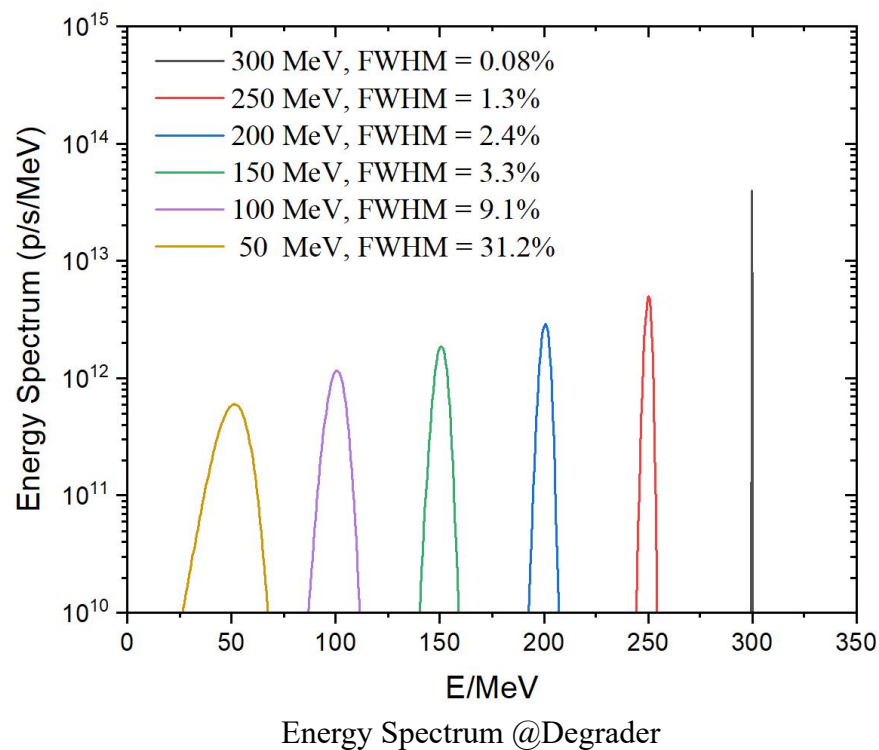


Beam propagation within the terminal

Beam Information					Average		Instantaneous	
Ek (MeV)	Bragg Pos (mm)	Accept I (p/s)	Accept Trans (%)	I @Test (p/s)	Flux@Test (p/cm ² /s)	Aver. Dose (Gy/s)	Flux@Test (p/cm ² /s)	Inst. Dose (Gy/s)
290	487.5	1.722E+13	82.77%	1.012E+13	4.048E+11	2.698E+02	2.698E+15	1.799E+06
280	457.5	1.581E+13	75.96%	9.286E+12	3.715E+11	2.684E+02	2.476E+15	1.790E+06
270	432.5	1.453E+13	69.81%	8.535E+12	3.414E+11	2.553E+02	2.276E+15	1.702E+06
260	402.5	1.322E+13	63.51%	7.765E+12	3.106E+11	2.532E+02	2.071E+15	1.688E+06
250	377.5	1.201E+13	57.73%	7.057E+12	2.823E+11	2.411E+02	1.882E+15	1.607E+06
240	352.5	1.095E+13	52.61%	6.432E+12	2.573E+11	2.316E+02	1.715E+15	1.544E+06
230	327.5	9.857E+12	47.37%	5.791E+12	2.317E+11	2.189E+02	1.544E+15	1.460E+06
220	302.5	9.108E+12	43.77%	5.352E+12	2.141E+11	2.146E+02	1.427E+15	1.431E+06
210	282.5	8.360E+12	40.18%	4.912E+12	1.965E+11	2.010E+02	1.310E+15	1.340E+06
200	257.5	7.690E+12	36.96%	4.519E+12	1.807E+11	1.975E+02	1.205E+15	1.317E+06
190	237.5	7.091E+12	34.08%	4.167E+12	1.667E+11	1.872E+02	1.111E+15	1.248E+06
180	217.5	6.395E+12	30.73%	3.757E+12	1.503E+11	1.742E+02	1.002E+15	1.162E+06
170	197.5	5.976E+12	28.72%	3.511E+12	1.404E+11	1.686E+02	9.363E+14	1.124E+06
160	177.5	5.526E+12	26.56%	3.247E+12	1.299E+11	1.628E+02	8.658E+14	1.085E+06
150	157.5	5.128E+12	24.64%	3.013E+12	1.205E+11	1.584E+02	8.034E+14	1.056E+06
140	137.5	4.765E+12	22.90%	2.800E+12	1.120E+11	1.550E+02	7.466E+14	1.034E+06
130	122.5	4.419E+12	21.24%	2.596E+12	1.039E+11	1.462E+02	6.923E+14	9.745E+05
120	107.5	3.542E+12	17.02%	2.081E+12	8.324E+10	1.195E+02	5.549E+14	7.969E+05
110	92.5	3.314E+12	15.93%	1.947E+12	7.789E+10	1.146E+02	5.192E+14	7.643E+05
100	77.5	3.027E+12	14.55%	1.779E+12	7.115E+10	1.064E+02	4.743E+14	7.095E+05
90	62.5	2.752E+12	13.23%	1.617E+12	6.468E+10	8.803E+01	4.312E+14	5.869E+05
80	52.5	2.484E+12	11.94%	1.460E+12	5.839E+10	7.130E+01	3.892E+14	4.753E+05
70	42.5	2.219E+12	10.67%	1.304E+12	5.215E+10	5.629E+01	3.477E+14	3.753E+05
60	32.5	1.926E+12	9.26%	1.132E+12	4.528E+10	4.225E+01	3.018E+14	2.817E+05
50	22.5	1.388E+12	6.67%	8.157E+11	3.263E+10	2.556E+01	2.175E+14	1.704E+05

3.2 核心参数与应用

- 能散：磁铁前能散<10%（100MeV以上）经二级磁铁后进一步改善
- 束斑：使用聚焦系统调整基础束斑，3-m准直器用于刮除束晕
- 流强：多孔限流器可降低流强3个量级
- 时间控制：可使用单发模式（600 μ s，）

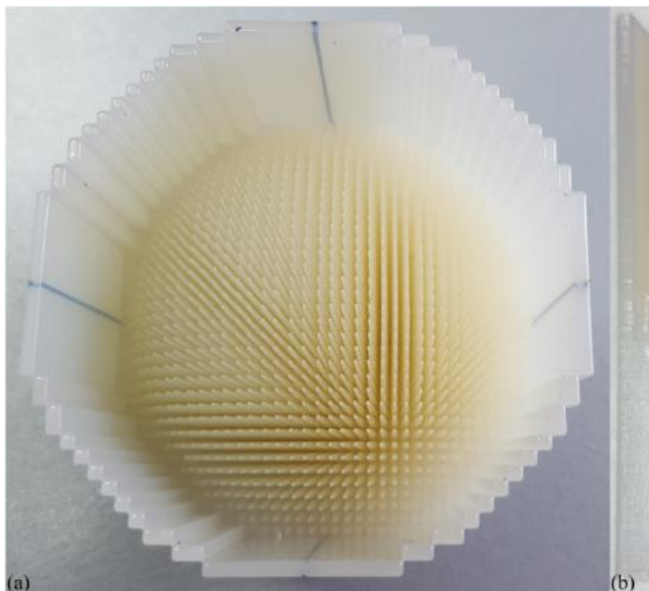


3.3 核心参数与应用

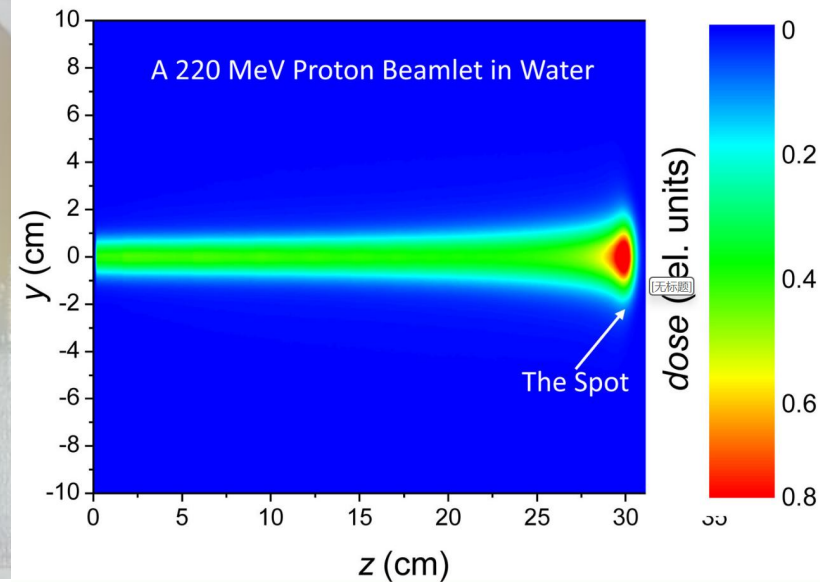
应用场景		需求参数	终端方案	是否满足
核数据测量	注量率	$> 1\text{E}11 \text{ p/cm}^2$	1kW 时注量率达 $2.94\text{E}12 \text{ p/cm}^2$	√
	本底	纯束时自然本底	打靶后移至良好屏蔽的低本底位置进行测量	
探测器辐照损伤	总注量	$1.16\text{E}16 - 5.58\text{E}18 \text{ p/cm}^2$	1kW运行1天可达标，20天达国际领先。2kW工况下，辐照时间减半	√
器件位移损伤	总注量	$> 1\text{E}14$	1kW运行15 min可达到辐照注量要求	√
质子闪疗	剂量率	$> 40 \text{ Gy/s}$	1kW 平均剂量率可达 600 Gy/s ，单发瞬时剂量率达 $1\text{E}6 \text{ Gy/s}$	√
	总质子	$4\text{E}11 \text{ p within } 100\text{ms}$	$8.32\text{E}13 \text{ p within } 0.6\text{ms}$	
	SOBP	对能谱进行展宽	真空罐内放置射程调制器	
	准入性	辐照结束后可进入	辐照1h，10min 通风后可进入	
器件辐照测试	瞬时注量率	$< 2\text{E}12 \text{ p/cm}^2/\text{s}$	限流器1孔模式下，250MeV以下能量可用；3孔模式200MeV以下可用	√
	平均注量率	$< 3\text{E}9 \text{ p/cm}^2/\text{s}$		

4. 在质子闪疗中的应用潜力

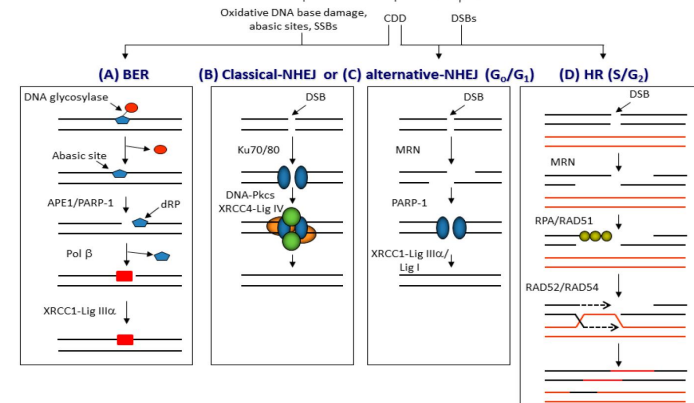
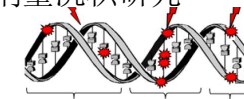
- Range modulator设计与测试
- 质子剂量学研究
- 超高剂量率生物学效应研究
- 辐照生物学机理研究



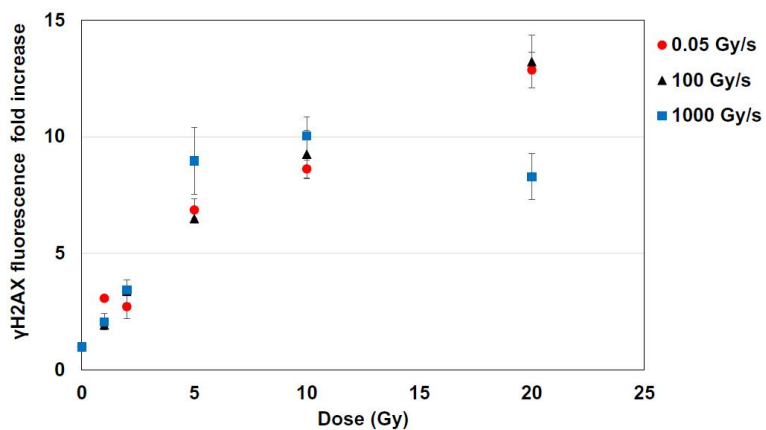
SOBP调制



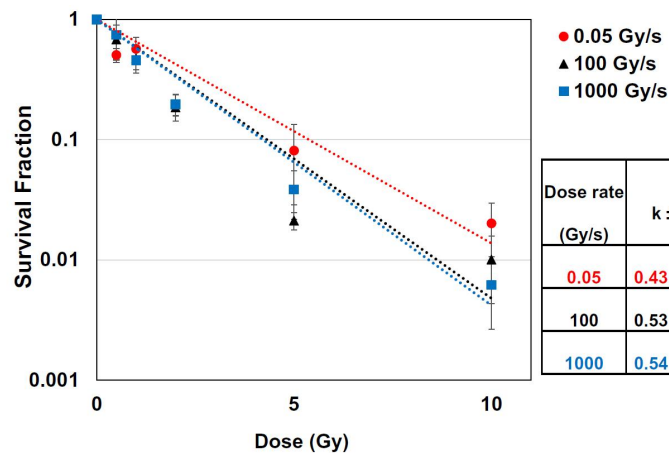
Compensator Smearing
剂量沉积研究



电离辐射 (IR) 诱导的 DNA 损伤的反应



质子剂量率对 DNA 损伤的影响



质子剂量率对克隆细胞存活率的影响

Dose rate (Gy/s)	$k \pm SE$	95% CI	R^2
0.05	0.43 ± 0.04	0.32, 0.54	0.95
100	0.53 ± 0.06	0.38, 0.69	0.89
1000	0.54 ± 0.03	0.37, 0.64	0.96

5. 未来计划

- 当前已经完成初步的物理设计方案，包括束线和实验布局，屏蔽体设计等
- 中能质子与原子核的核反应过程，处在模型过渡能区，理论模型预测交叉，同时存在大量数据空白，特别是短寿命核的反应到，80-300MeV 质子在核数据测量方面具有很大潜力。
- 当前在进行伽玛探测等实验测量的研究（见吴帆的海报），同时要开始配套束流监控、剂量测量等探测装置的设计。
- 未来在闪疗、和辐照、探测器标定等方面。

➤ 第二届测试束流与先进探测技术研讨会 (TB&D-2)

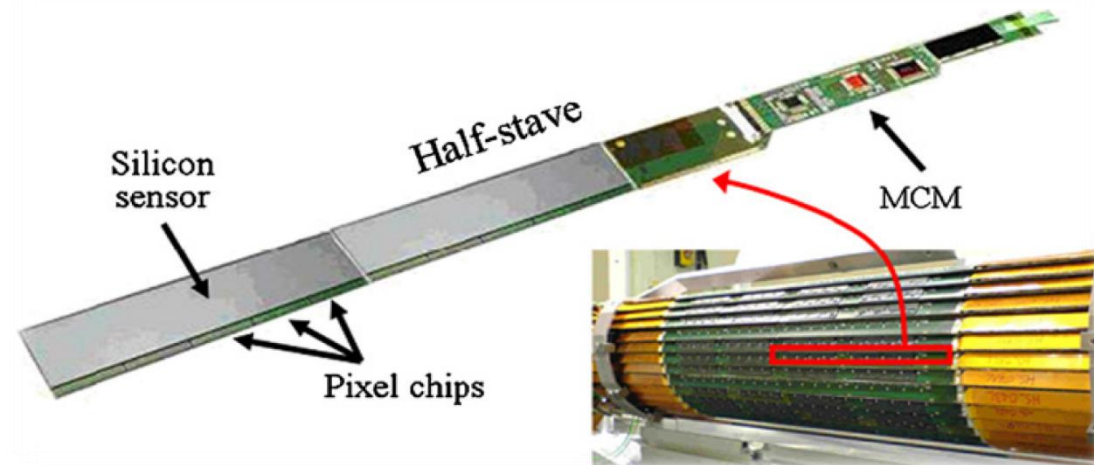
➤ 2026年10月9-11日 @湖南·长沙

➤ 报名和摘要投稿链接:

<https://indico.ihep.ac.cn/e/TBAndD-2>

➤ 会议主题

- 测试束装置及测试束流物理研究
- 测试束中的先进测量技术
- 先进探测器研究与束流测试
- 束流测试中的电子学与数据获取
- 束流测试实验的数据分析方法
- 高能质子辐照效应研究
- 测试束线未来发展需求和方向
- 高能质子核数据



请大家多提宝贵建议！

