

高重复频率缪子源HEMS

&

正反缪子素转换实验MuMuBar

鲍煜

2021年4月13日

CSNS

报告提纲

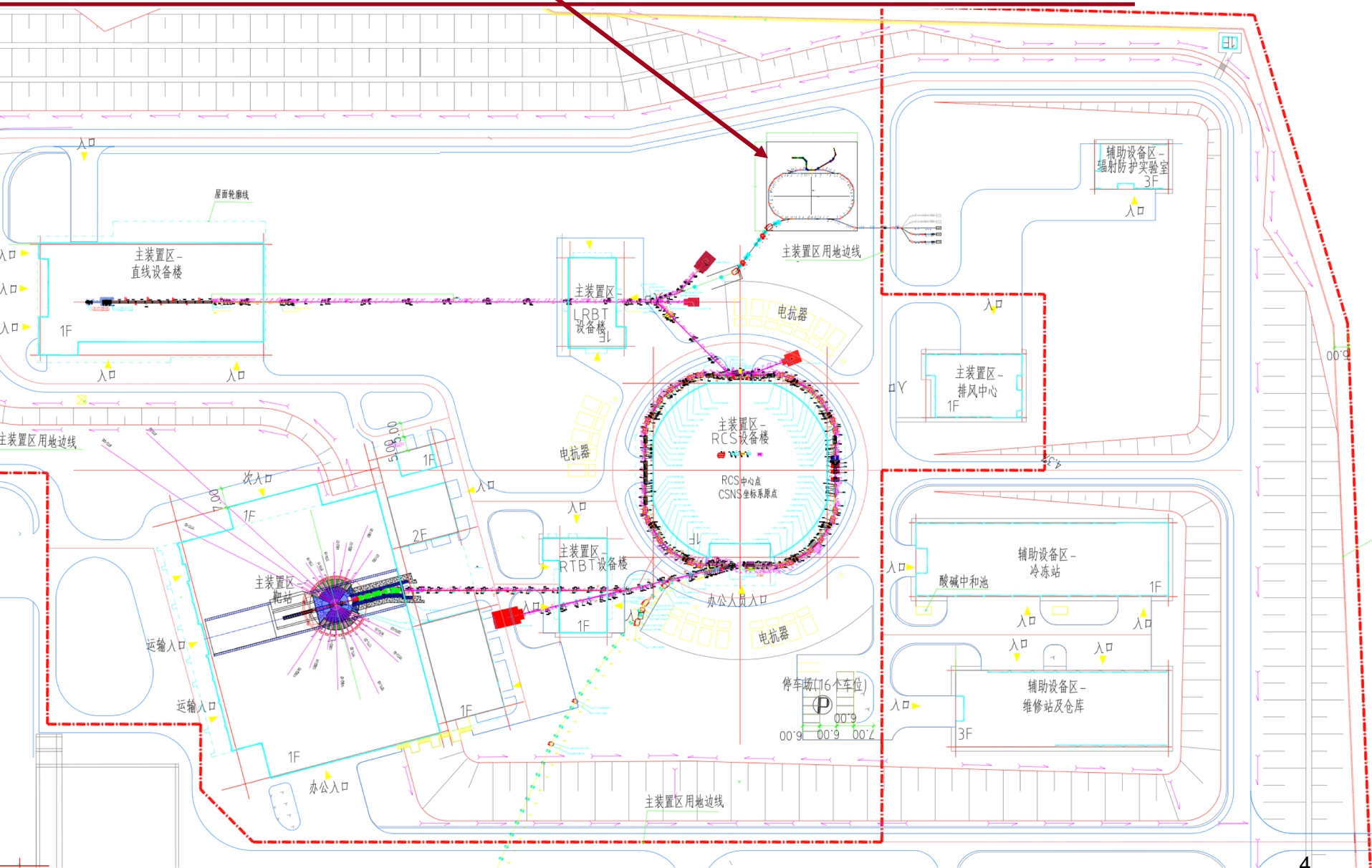
- 中国散裂中子源质子加速器系统
- 基于CSNS的高频缪子源HEMS
- 正反缪子素转换实验MuMuBar
- 总结

中国散裂中子源 CSNS

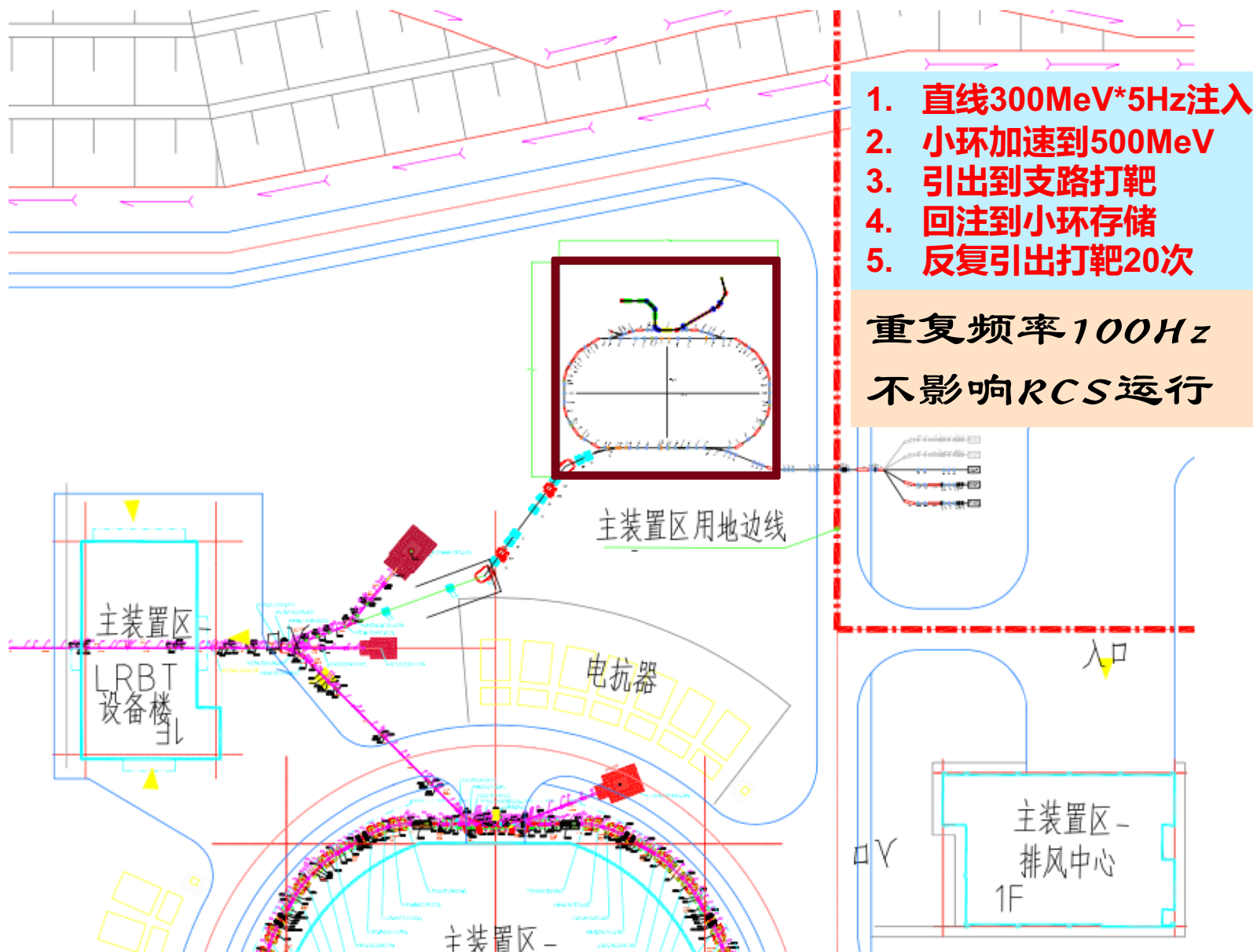


- 国内首台高强度质子加速器装置，圆满完成一期工程建设，流强达到100kW，质子能量1.6GeV
- 即将在十四五期间开展功率升级工程，达到500kW束流运行

高重复频率缪子源 (HEMS)



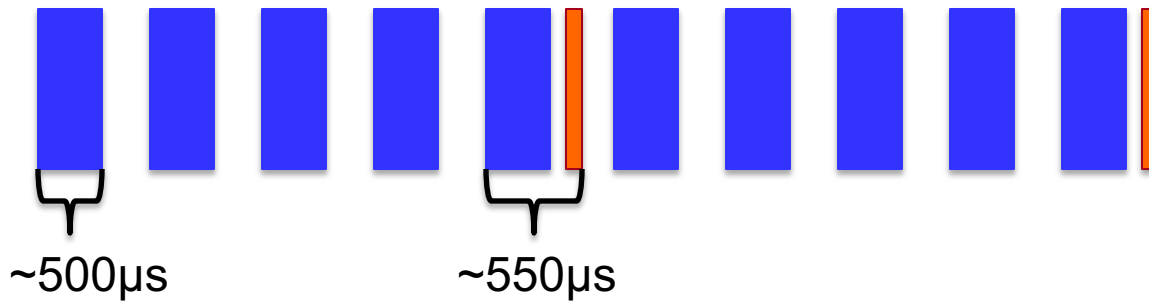
高重复频率缪子源 (HEMS)



加速器主要参数

直线注入	
能量	300 MeV
注入方式	横向涂抹
注入脉冲宽度	~40 μ s
峰值流强	~40mA
注入频率	5 Hz
加速储存环	
能量	500 MeV
束团粒子数	3×10^{12}
周长	80 m
回旋周期	352-409 ns
束团长度	150ns
加速时间	50ms
横向发射度	150 mm mrad
横向接受度	350 mm mrad
外支路	
引出/打靶/回注频率	100Hz
平均打靶质子数POT	1.5×10^{13}
打靶功率	1.2 kW

直线注入方式

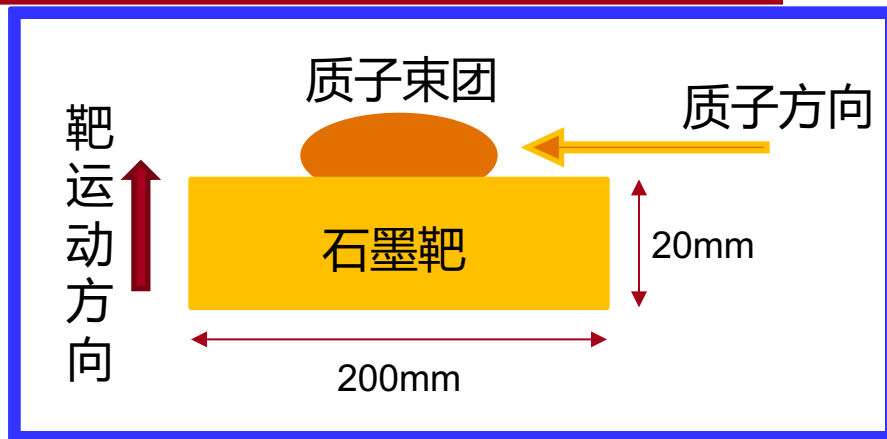


1. 保持直线25Hz运行
2. 使用脉冲离子源，将每5个脉冲中的一个加长约10%
3. 使用快速kicker将约 $40\mu\text{s}$ 束流踢入小环

仅需增加散裂直线加速器功率~2%

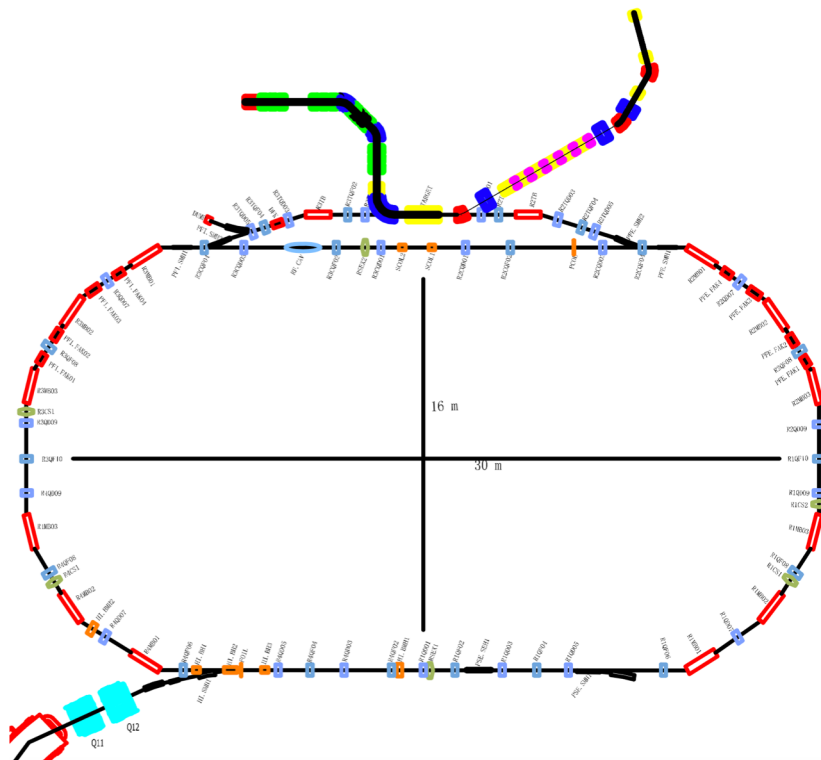
质子打靶方式

1. 质子束团引出到支线
2. 长靶每次刮取部分粒子
3. 长靶从束团边缘处移动至束团中心，直至束流全部损失



主要参数：

- 石墨靶： $\phi 20\text{mm}$ (3σ)，长 200mm
- 移动速度：20mm/20ms
- 180ms回复到初始位置
- 5Hz频率重复



关键技术

- **kicker磁铁（已开展）**：
 - 高重复频率：1000Hz
 - 快速上升下降时间：~185ns
 - 长寿命：大于5年
- **加速器方案设计（已开展）**
 - 注入引出设计
 - 加速环设计
 - 缪子源设计
- **靶站（即将开展）**：
 - 移动靶站稳定性
 - 屏蔽及辐射剂量

高能所散裂中子源会议纪要

2020（散升加技字 03 号）

加速器分总体会议

签发：傅世年

高频率缪子源方案讨论会会议纪要

时间：2020年6月1日 下午 14:00

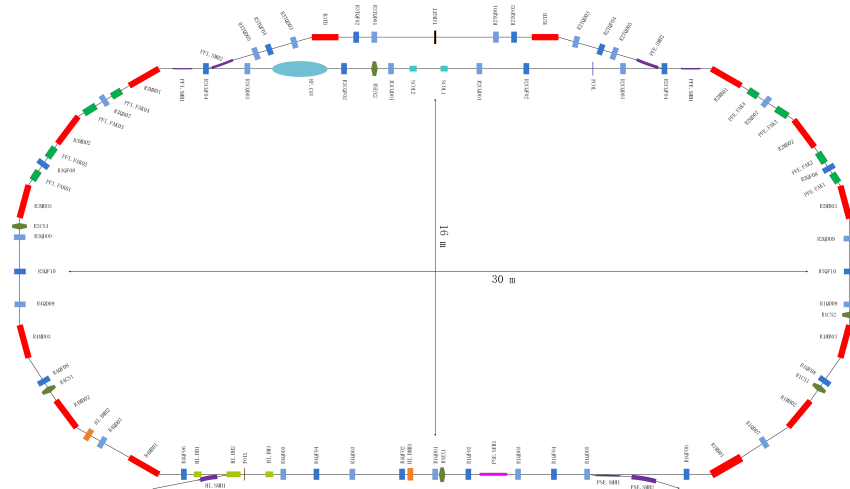
地点：东莞 CSNS 园区 A2-422/高能所 C112 会议室

主持：傅世年

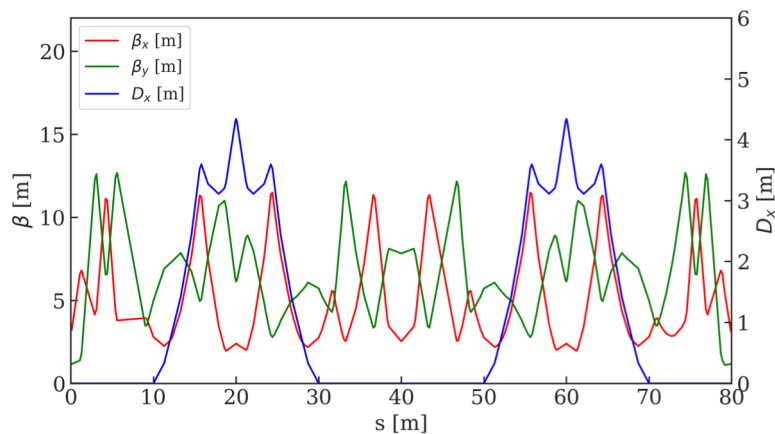
6. 最后傅世年肯定了高频率缪子源建造的意义，并期望能进一步完善和细化方案，邀请理论物理专家进一步评估并在高能所的战略研讨会中进行报告。

高频缪子源目前工作进展 (1)

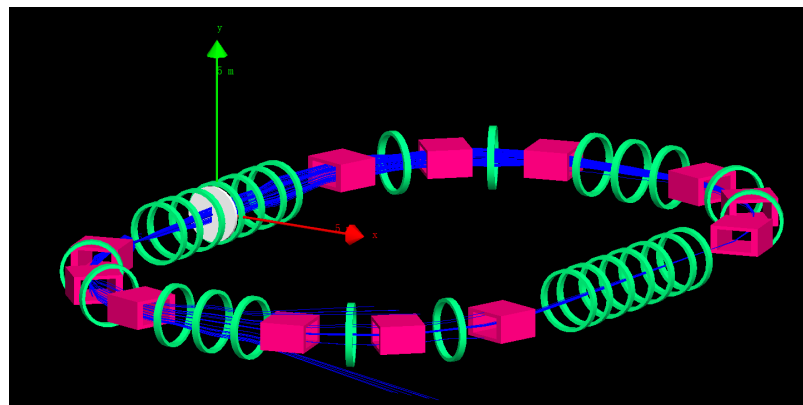
质子束流设计模拟



束流动力学设计

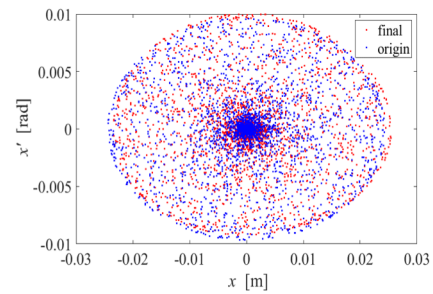
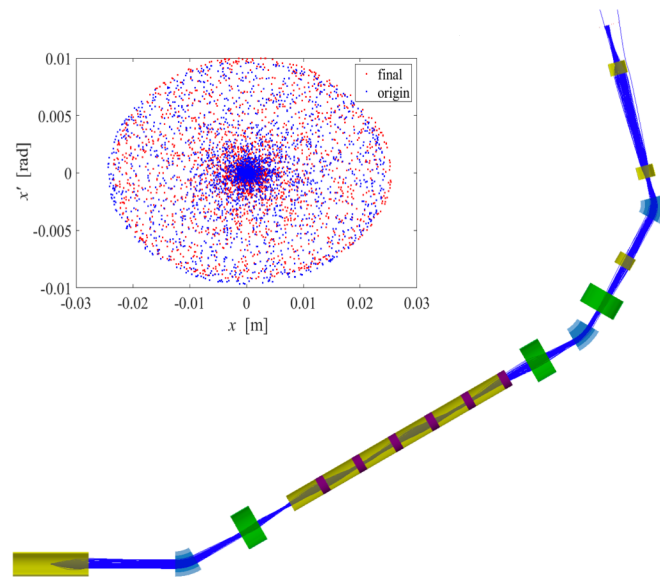
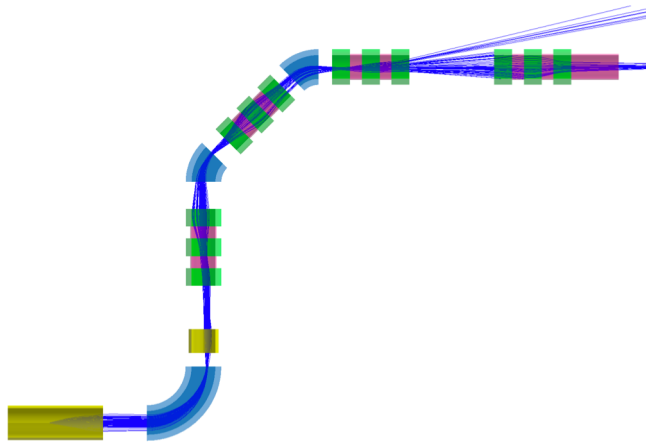


6D多粒子模拟

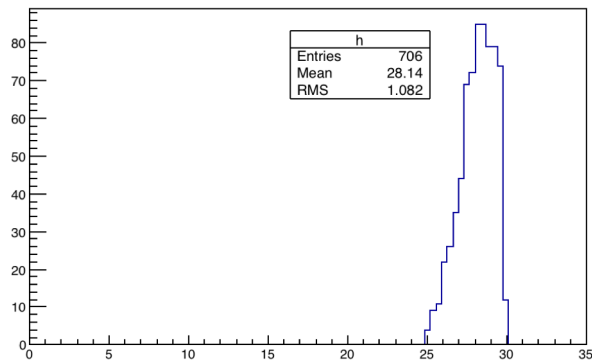


高频缪子源目前工作进展 (2)

两条缪子束线设计模拟

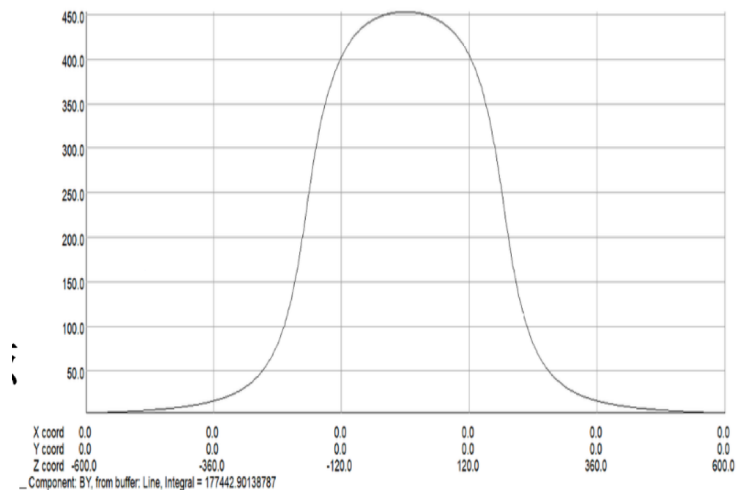
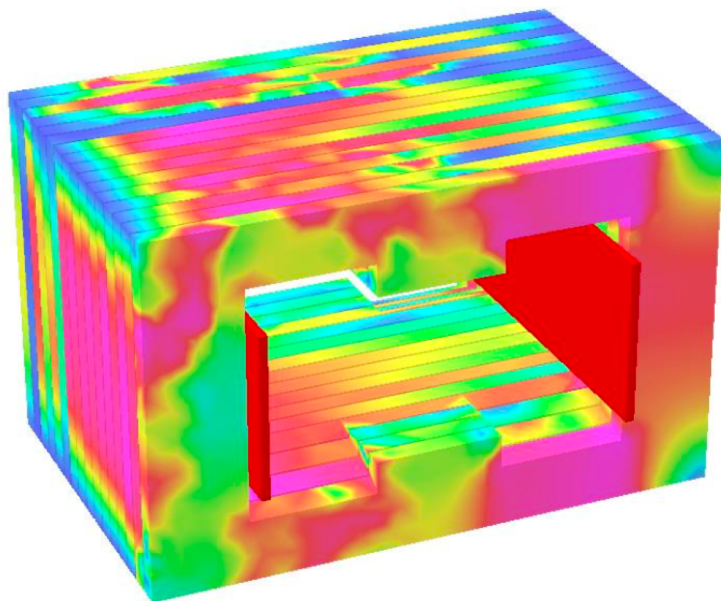


$\text{sqrt}(P_x^2 + P_y^2 + P_z^2)$



高频缪子源目前工作进展（3）

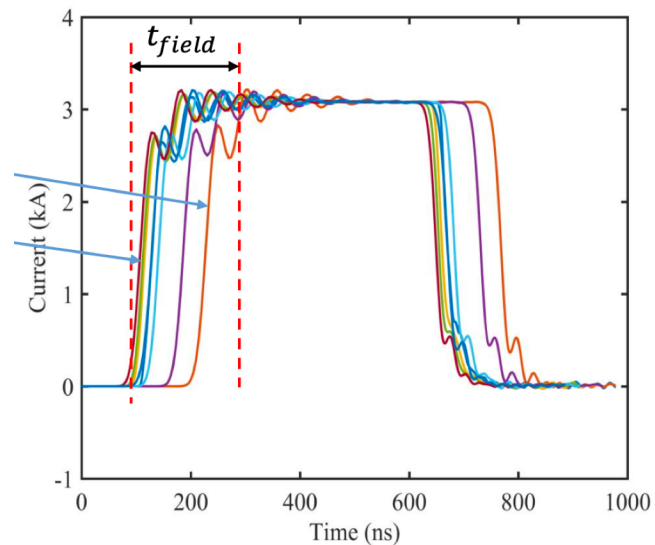
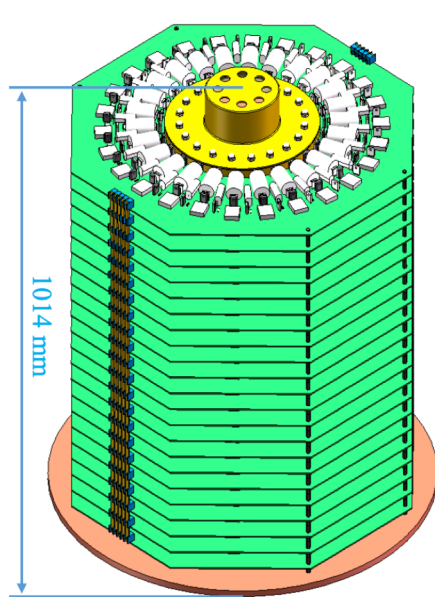
关键Kicker磁铁设计



已完成初步设计并达到物理需求

高频缪子源目前工作进展（4）

高重频快速电源



已完成设计仿真，并已开展样机研制

与国际缪子源参数对比

参数	HEMS II	PSI	ISIS	JPARC
μSR应用				
重复频率[Hz]	100	CW	40	25
μ ⁺ 强度[μ ⁺ /s]	1E6	4E8	5E5	3E6
探测器路数	256	6~12	96	128
极化率	90%	95%	95%	90%
e ⁺ /μ ⁺	<1%	<1%	<1%	<1%
动量范围[MeV/c]	20-200	10-350	20-200	20-300
计数率[MEvent/h]	Up to 400	~20	200	180
粒子物理实验				
MuMuBar	2E8 μ ⁺ /s	8E6 μ ⁺ /s	NA	NA

HEMS科学目标

国际领先水平的缪子应用平台

先进的muSR材料学应用
平台

中子、光源的重要补充

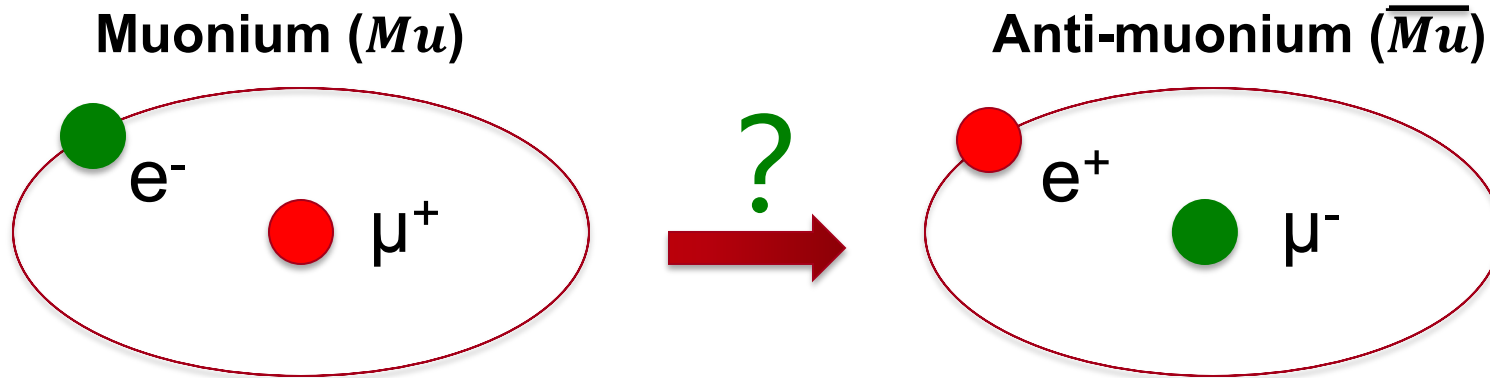
粒子物理前沿实验

独特方法寻找新物理



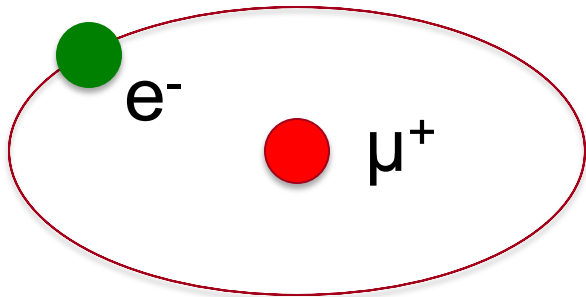
MuMuBar

CSNS的粒子物理前沿机遇： MuMuBar

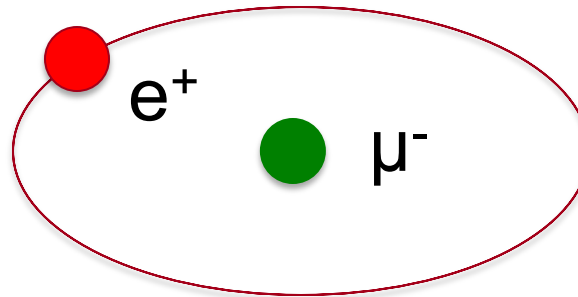


CSNS的粒子物理前沿机遇：MuMuBar

Muonium (Mu)



Anti-muonium (\overline{Mu})



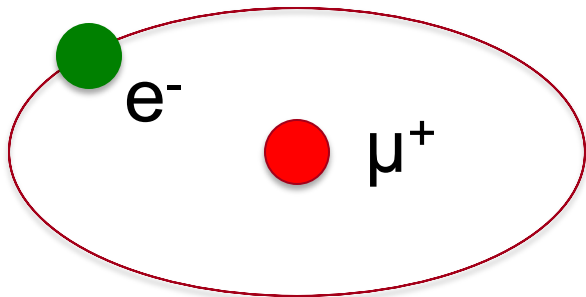
Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	=2.2 MeV/c ²	= 1.28 GeV/c ²	=173.1 GeV/c ²	0	=125.09 GeV/c ²
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino	W W boson	

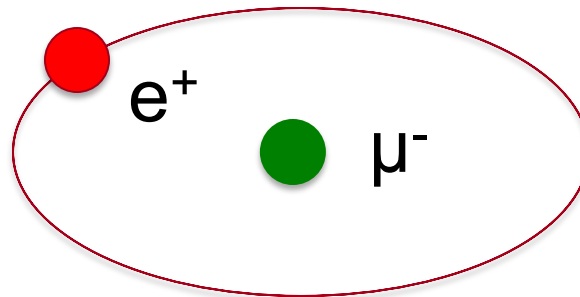


CSNS的粒子物理前沿机遇：MuMuBar

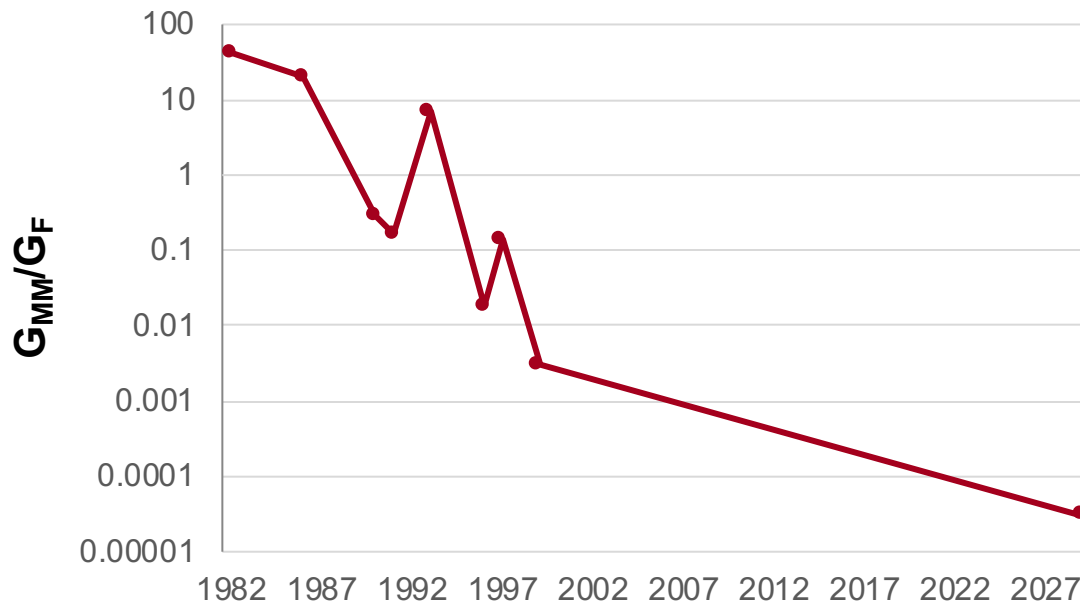
Muonium (Mu)



Anti-muonium (\overline{Mu})



MuMuBar探索历史



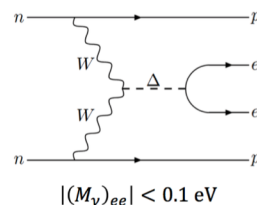
Type-II Seesaw Models

26

Connection with neutrino mass matrix

$$\frac{|(Y_\Delta)_{ee}| |(Y_\Delta)_{\mu\mu}|}{(M_\Delta^2/\text{GeV}^2)} = \frac{|(M_\nu)_{ee}| |(M_\nu)_{\mu\mu}|}{(M_\Delta^2/\text{GeV}^2) \cdot v_\Delta^2} < 2.0 \times 10^{-7}$$

$\nu\nu\beta\beta$ decays dominated by light neutrinos for $M_\Delta > 100 \text{ GeV}$



$$|(M_\nu)_{ee}| < 0.1 \text{ eV}$$

Take $M_\Delta v_\Delta = 800 \text{ GeV} \cdot \text{eV}$ to evade the constraints

Come back to viable neutrino mass matrices

$$\mathbf{A}_2 \begin{pmatrix} \times & 0 & \times \\ \times & \times & \times \\ 0 & \times & \times \end{pmatrix} \quad \mathbf{B}_2 \begin{pmatrix} \times & 0 & \times \\ 0 & \times & \times \\ \times & \times & 0 \end{pmatrix}$$

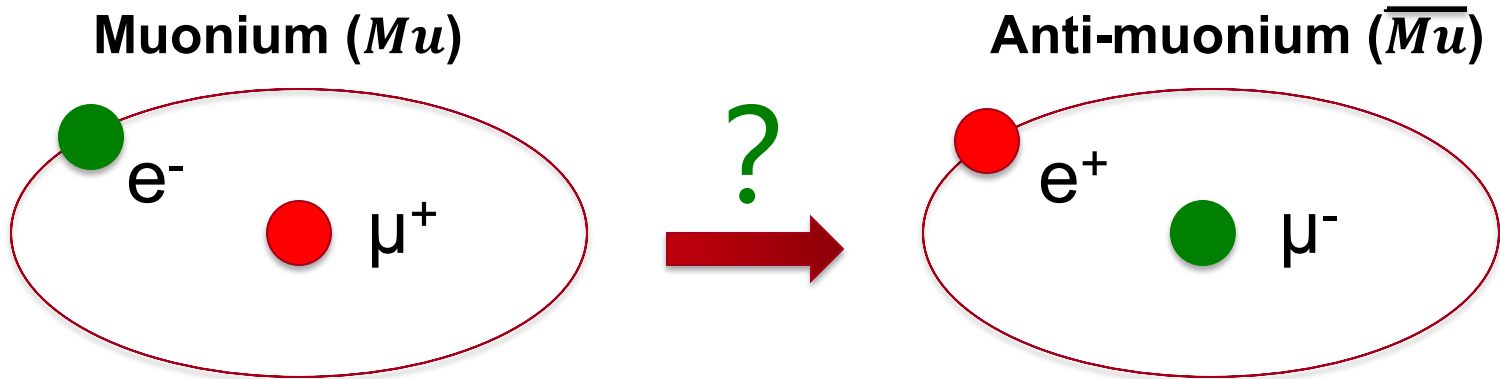
$$(Y_\Delta)_{ee}(Y_\Delta)_{\mu\mu} = 0 \quad (Y_\Delta)_{ee}(Y_\Delta)_{\mu\mu} \neq 0$$

For two-zero texture \mathbf{B}_2

$$\frac{|(M_\nu)_{ee}| |(M_\nu)_{\mu\mu}|}{(M_\Delta^2/\text{GeV}^2) \cdot v_\Delta^2} \approx 1.6 \times 10^{-8}$$

Discovery may be around the corner (one order of magnitude below)!

CSNS的粒子物理前沿机遇：MuMuBar



缪子束流要求：

强度： $> 2 \times 10^8 \mu^+/\text{s}$
 单脉冲粒子数： $< 5 \times 10^6$
 动量： $< 30 \text{MeV}/c$
 动量展宽： $< 10\%$

重复频率 $> 40 \text{Hz}$

• 目标：精度提高两个数量级

• 获得中科院基础前沿0到1原始创新项目支持

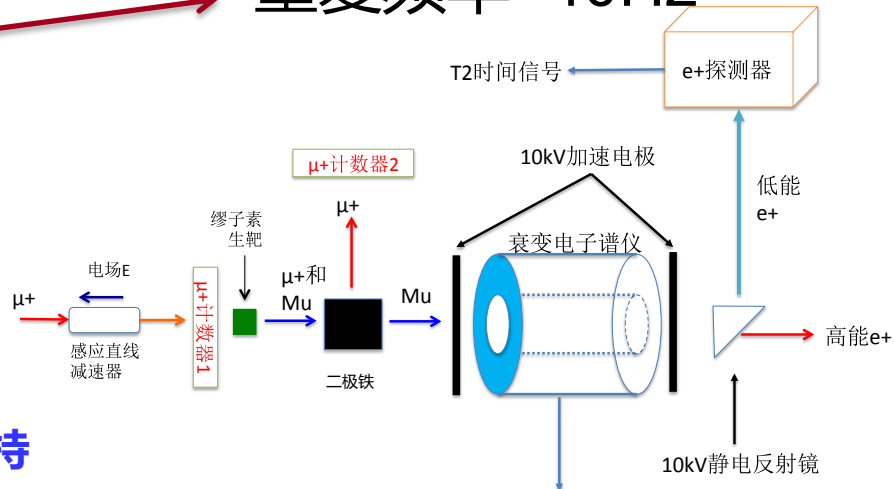
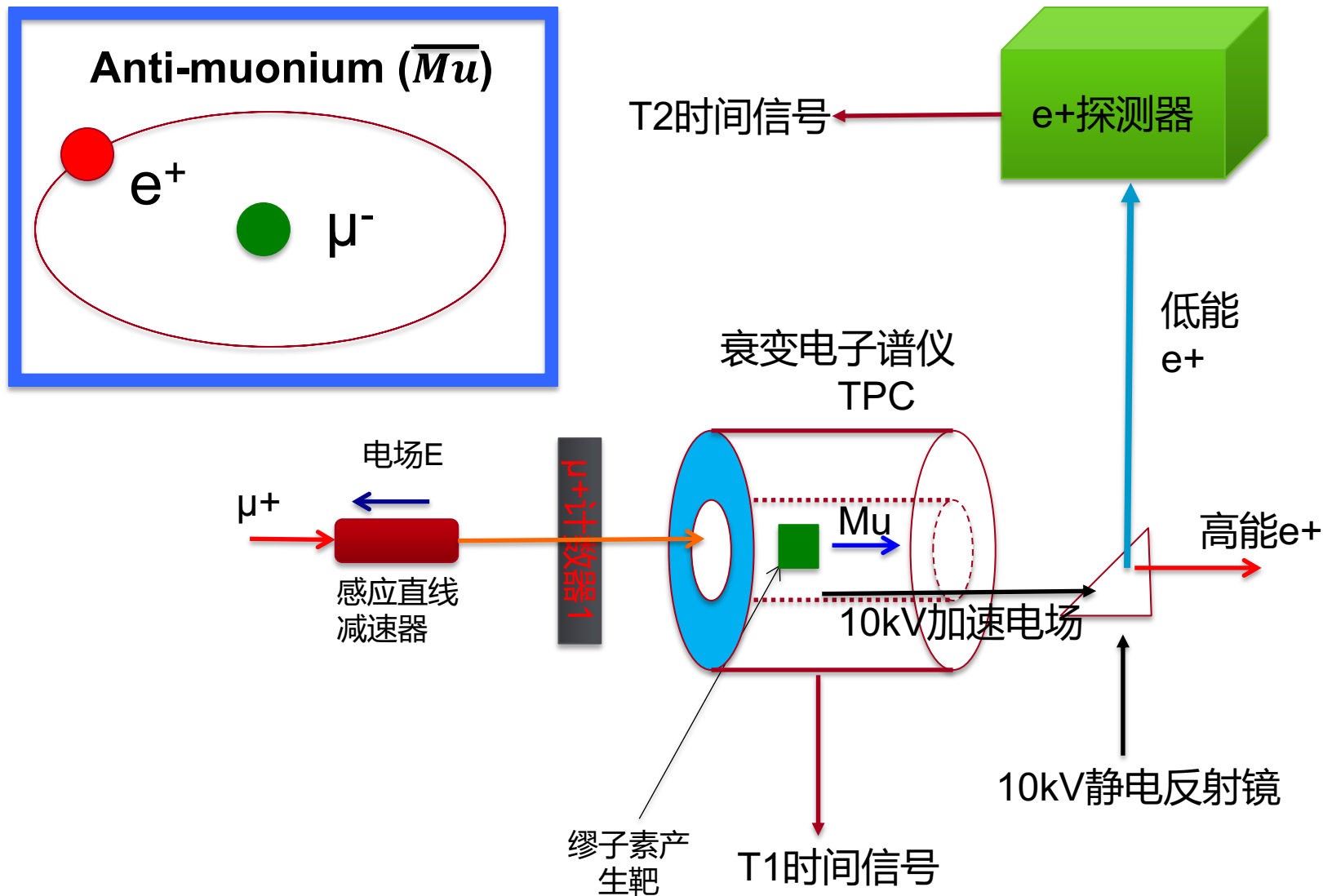


图 3 MuMuBar 实验探测器系统初步设计示意图。

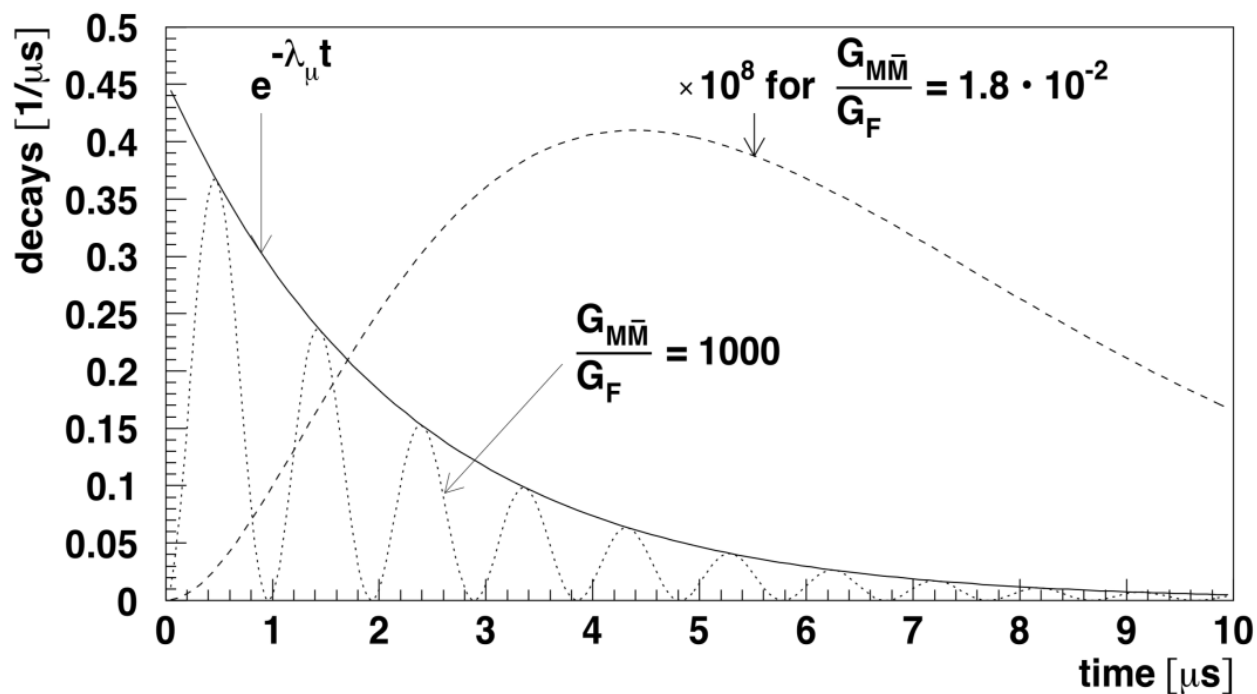
MuMuBar实验设计



实验本底

实验本底：

1. μ^+ 衰变产生的 e^+ 通过Bhabha散射产生
高能量 e^- 与偶然符合的低能量 e^+
2. μ^+ 允许的衰变： $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$
Branch ratio = $3.4 \cdot 10^{-5}$



MuMuBar实验目前工作进展

缪子素产生测试



理论模型计算

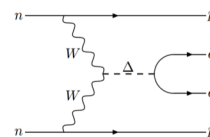
Type-II Seesaw Models

26

Connection with neutrino mass matrix

$$\frac{|(Y_\Delta)_{ee}| |(Y_\Delta)_{\mu\mu}|}{(M_\Delta^2/\text{GeV}^2)} = \frac{|(M_\nu)_{ee}| |(M_\nu)_{\mu\mu}|}{(M_\Delta^2/\text{GeV}^2) \cdot v_\Delta^2} < 2.0 \times 10^{-7}$$

$\nu\beta\beta$ decays dominated by light neutrinos for $M_\Delta > 100 \text{ GeV}$



$$|(M_\nu)_{ee}| < 0.1 \text{ eV}$$

Take $M_\Delta v_\Delta = 800 \text{ GeV} \cdot \text{eV}$ to evade the constraints

Come back to viable neutrino mass matrices

$$A_2 \begin{pmatrix} 0 & \times & 0 \\ \times & \times & \times \\ 0 & \times & \times \end{pmatrix} \quad B_2 \begin{pmatrix} \times & 0 & \times \\ 0 & \times & \times \\ \times & \times & 0 \end{pmatrix}$$

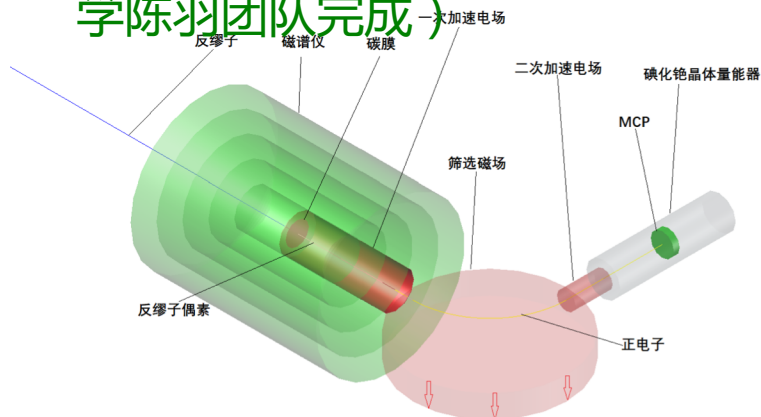
$$(Y_\Delta)_{ee}(Y_\Delta)_{\mu\mu} = 0 \quad (Y_\Delta)_{ee}(Y_\Delta)_{\mu\mu} \neq 0$$

For two-zero texture B_2

$$\frac{|(M_\nu)_{ee}| |(M_\nu)_{\mu\mu}|}{(M_\Delta^2/\text{GeV}^2) \cdot v_\Delta^2} \approx 1.6 \times 10^{-8}$$

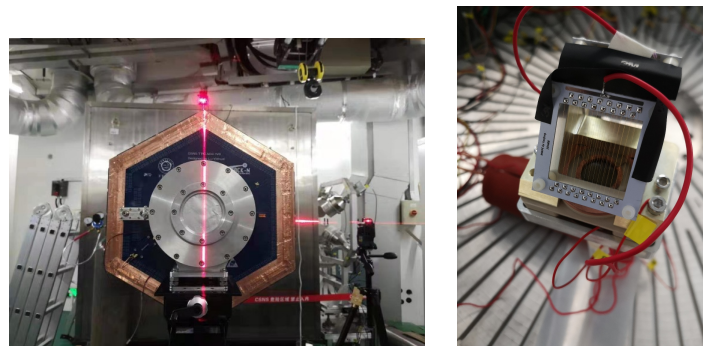
Discovery may be around the corner (one order of magnitude below)!

实验Geant4模拟 (中山大学陈羽团队完成)

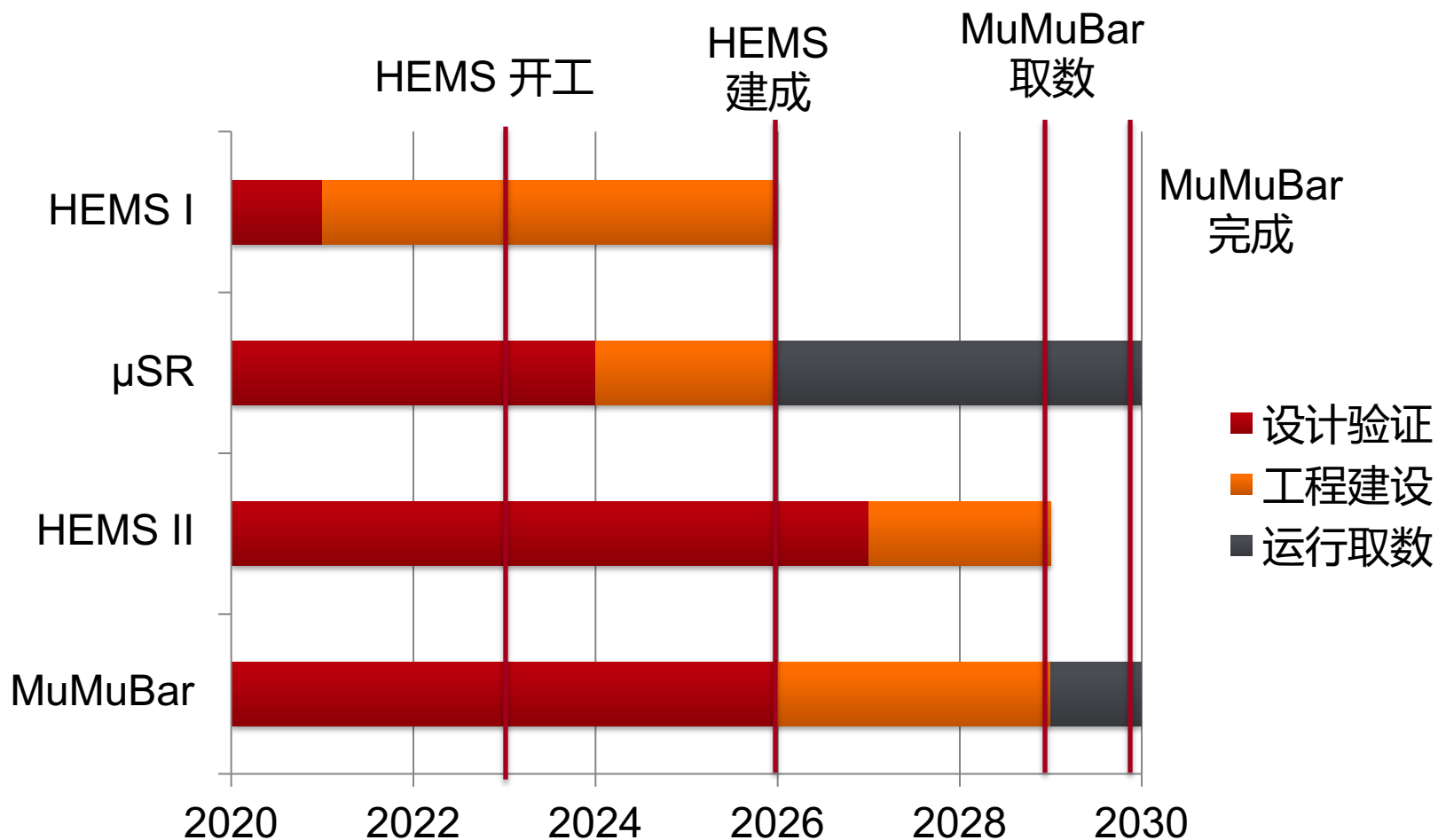


已重建PSI1999实验

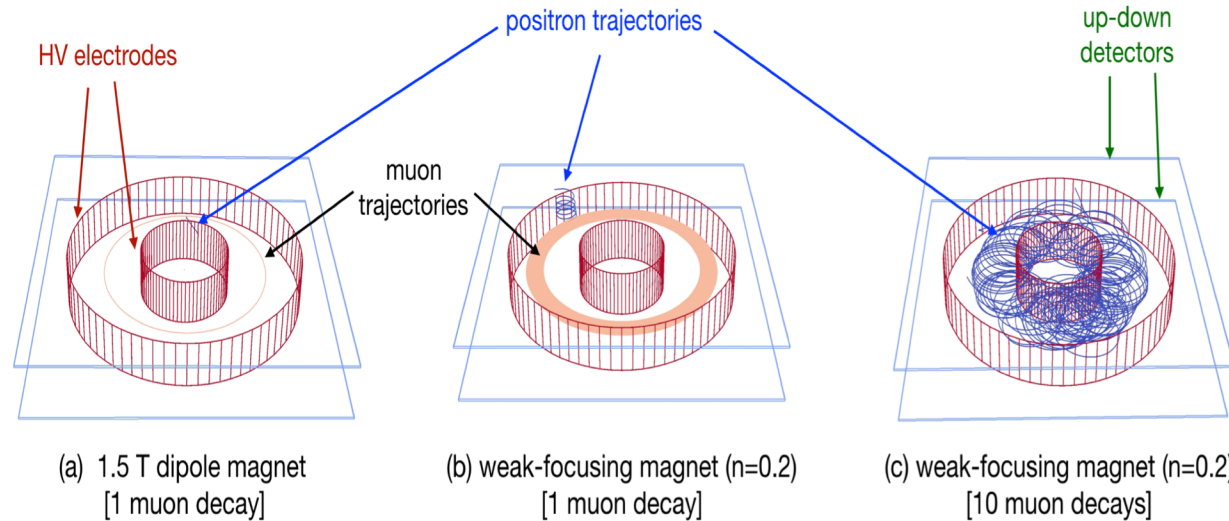
部分探测器样机研发



时间计划



HEMS的粒子物理前沿机遇：muon EDM (by 交大Khaw)



束流要求：

极化： $> 90\%$

流强： $> 5 \times 10^6 / \text{s}$

单脉冲粒子数： $< 5 \times 10^4 / \text{bunch}$

重复频率 $> 100 \text{Hz}$

灵敏度比PSI目标值提高近一个量级，直接挑战新物理预测的区域

总结

- 缪子是探索新物理的重要灵敏探针
- 基于中国散裂中子源高强度质子加速器，我们设计了国际先进水平的高重复频率缪子源**HEMS**
 - 获得高能所加速器专家好评，正在争取经费支持
- 基于HEMS我们将开展正反缪子素转换实验**MuMuBar**
 - 获得中科院项目经费支持，正在开展预研工作

诚邀各位共同合作！

本人微信



yubao@ihep.ac.cn