

实验型缪子源及其粒子物理的应用

赵光, Nikos Vassilopoulos (代表EMuS合作组)

zhaog@ihep.ac.cn

第十三届全国粒子物理学术会议

2021/8/18

报告大纲

- 背景介绍
- 实验型缪子源的设计
 - 基于超导螺线管的基准方案
 - CSNS上的简化方案
- 可能的粒子物理应用
 - 中微子截面测量
 - 缪子偶素转化实验
- 总结与展望

什么是缪子

- μ 子是粒子物理标准模型中基本粒子之一，属于轻子的一种，有时也称为重电子
 - 质量： $105.7 \text{ MeV}/c^2$
 - 自旋： $1/2$
 - 电荷态： -1
 - 寿命： $2.2 \mu\text{s}$
 - 反粒子： μ^+
- Caltech的C.D. Anderson 和S. Neddermeyer在1936年发现了宇宙射线中的 μ 子（当时认为是介子, mu meson）

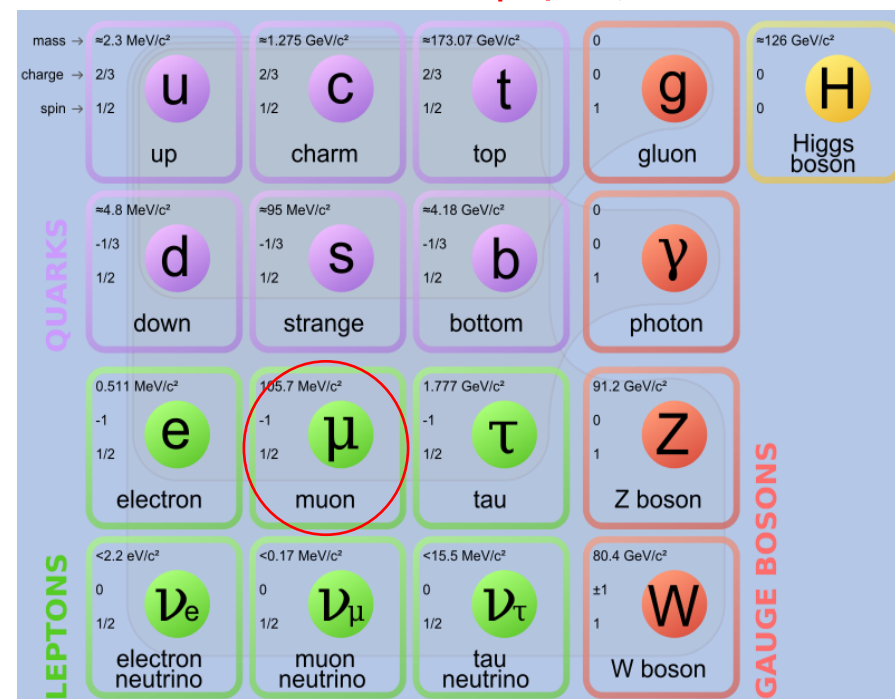


Anderson,

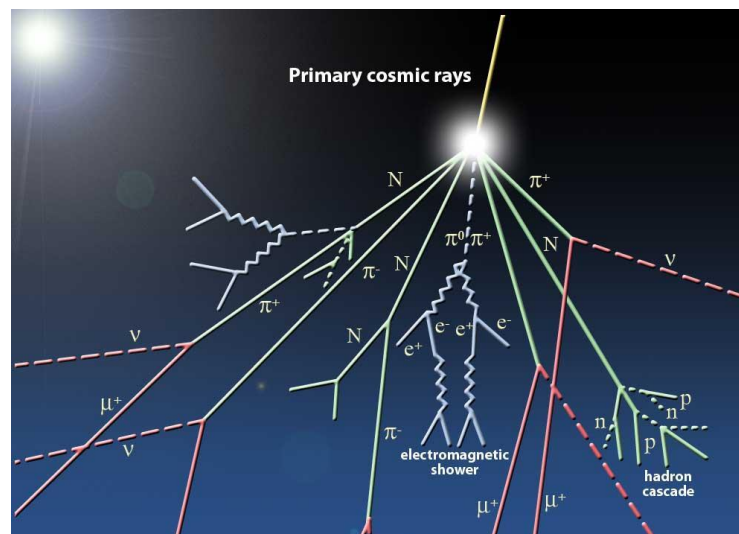


Neddermeyer

SM基本粒子

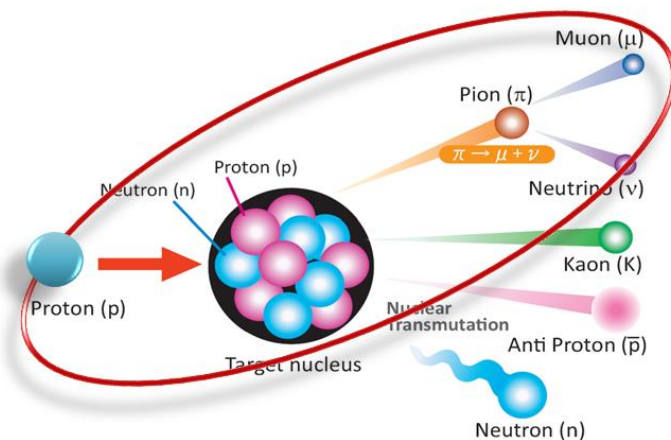


缪子的产生

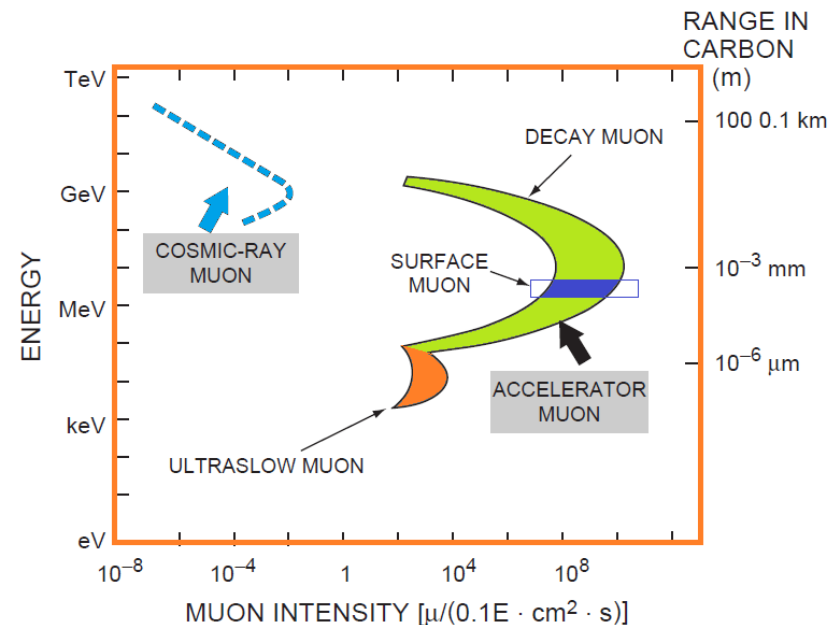


宇宙线μ子产生

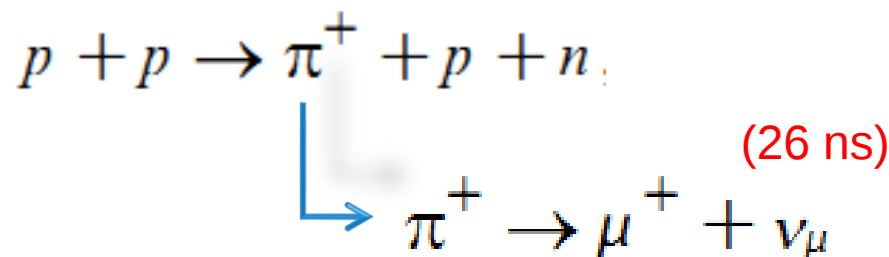
缪子源：由加速器人工产生缪子的装置



加速器产生μ子



单π产生（阈能280MeV）
双π产生（阈能600MeV）

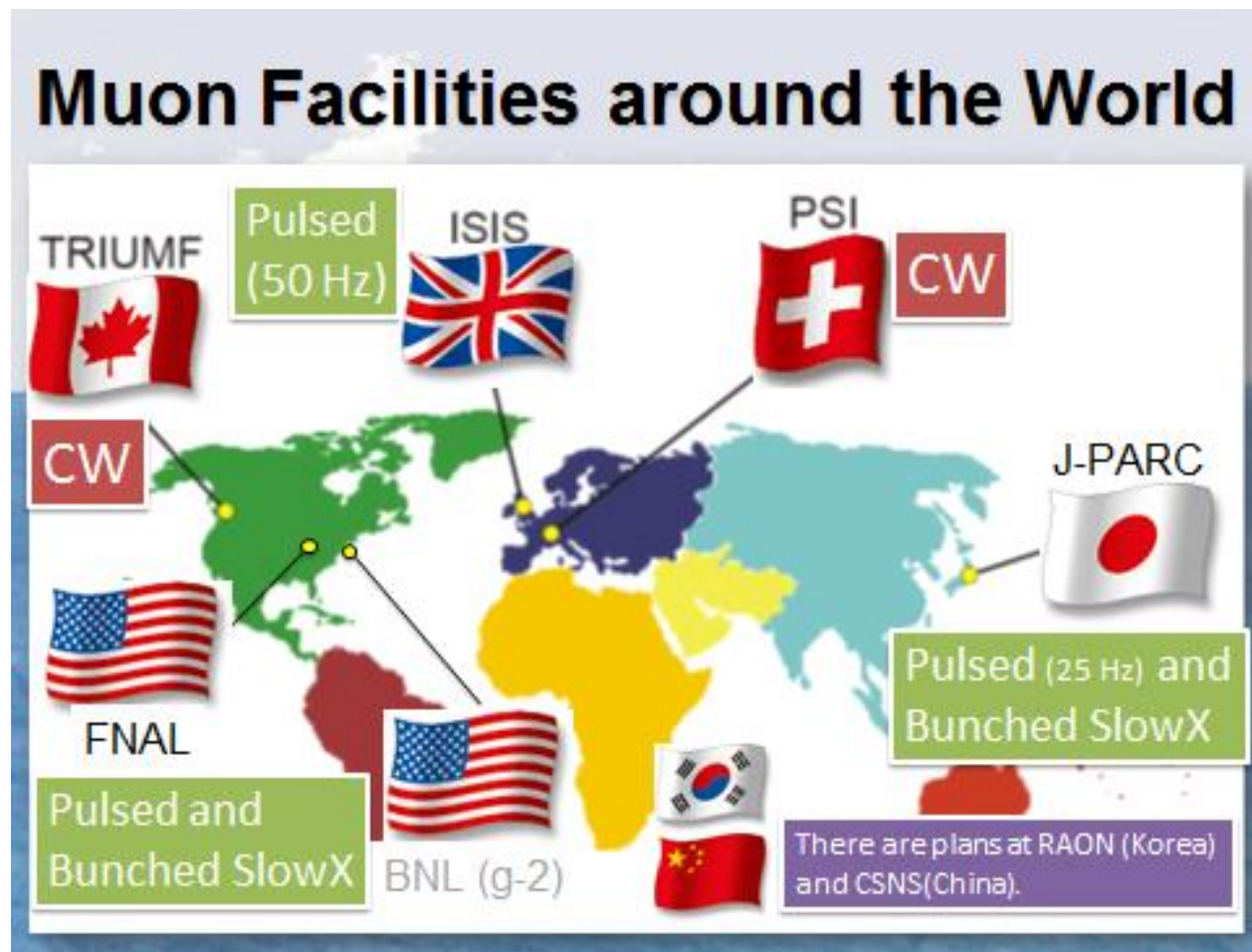


缪子源的科学意义

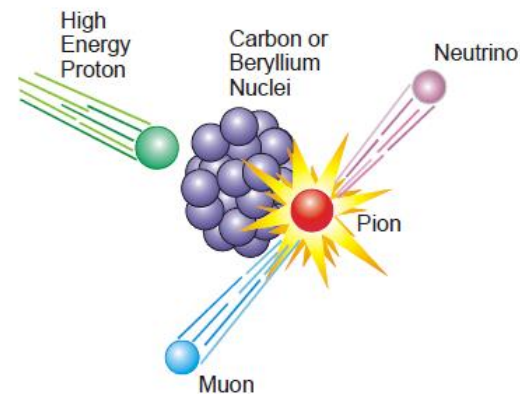
- 高强度缪子源在粒子物理和多学科应用方面发挥重要作用
- 粒子物理：缪子作为一个基本粒子，高性能的缪子源是粒子物理研究中非常重要的实验装置
 - μ 稀有衰变实验：轻子味道破坏实验 (Mu2e , COMET, MEG) , 和 μ g-2/EDM 实验
 - 中微子工厂：中微子振荡实验研究
 - 缪子对撞机：未来粒子物理能量前沿研究
- 多学科：利用缪子自旋旋转、弛豫和共振技术 (μ Spin Rotation, Relaxation and Resonance, 简称 μ SR技术) 可以广泛地用来开展多学科研究

需要高强度的缪子源作为研究基础

国际上的缪子装置



μ 子比较容易通过核反应产生，比较有效的方法是利用高强度的、能量在几百MeV以上的质子束打靶产生。所以，国际上的 μ 子源都建在高束流功率的加速器装置上。



薄靶：穿透型薄靶利于其余束流的应用
(驱动中子源)

侧向收集：通过 μ 束线的自然收集

能不能在中国建造自己的缪子源？

实验型缪子源的设计

设计目标

长期(~30年)运行的世界级的高流强缪源 & 多功能、多科学目标

- **表面缪模式:** 29MeV/c
μSR, 缪慢化, 缪物理...
- **衰变缪模式:** 40-150MeV/c
μSR, μ⁻应用
- **高动量缪模式:** 200-450MeV/c
缪束应用, 中微子物理 ...

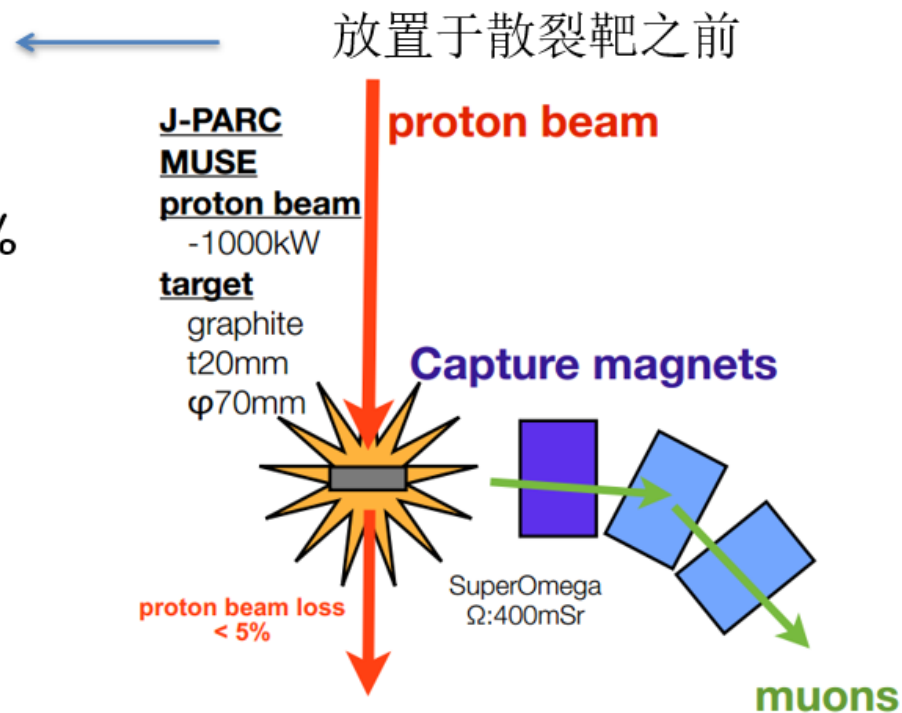
优化目标

- μSR: $IP^2 = \text{Intensity} * \text{Polarization}^2$
- 其它: 流强

具有极大挑战性的设计目标

传统缪子源的次级粒子产生和收集

- 薄靶
- 侧面收集
- 高极化率
90-100%



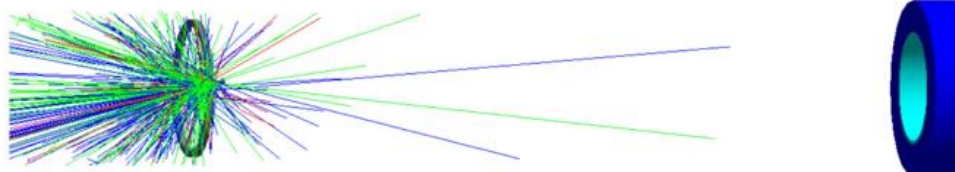
改进方案:

- ◆ 我们可以使用**厚**靶
- ◆ **创新**的收集方案提高次级粒子收集效率

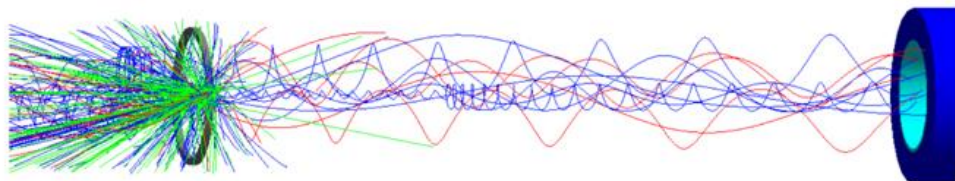
次级粒子在超导螺线管中的收集

R.M. Dzhilkibaev, V.M. Lobashev, Sov.J.Nucl.Phys **49**, 384 (1989)

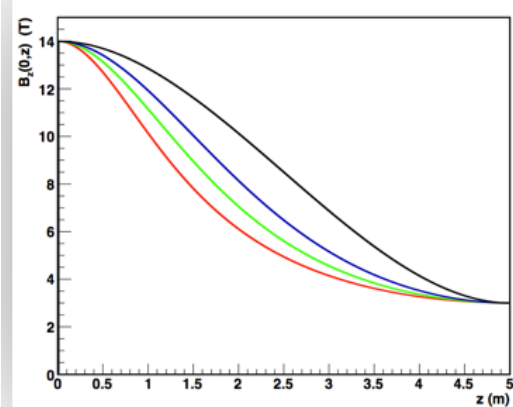
Instead of this



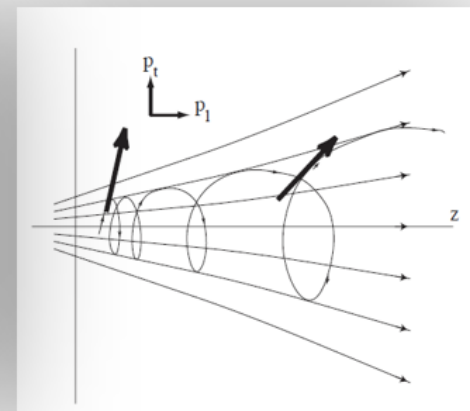
Do this



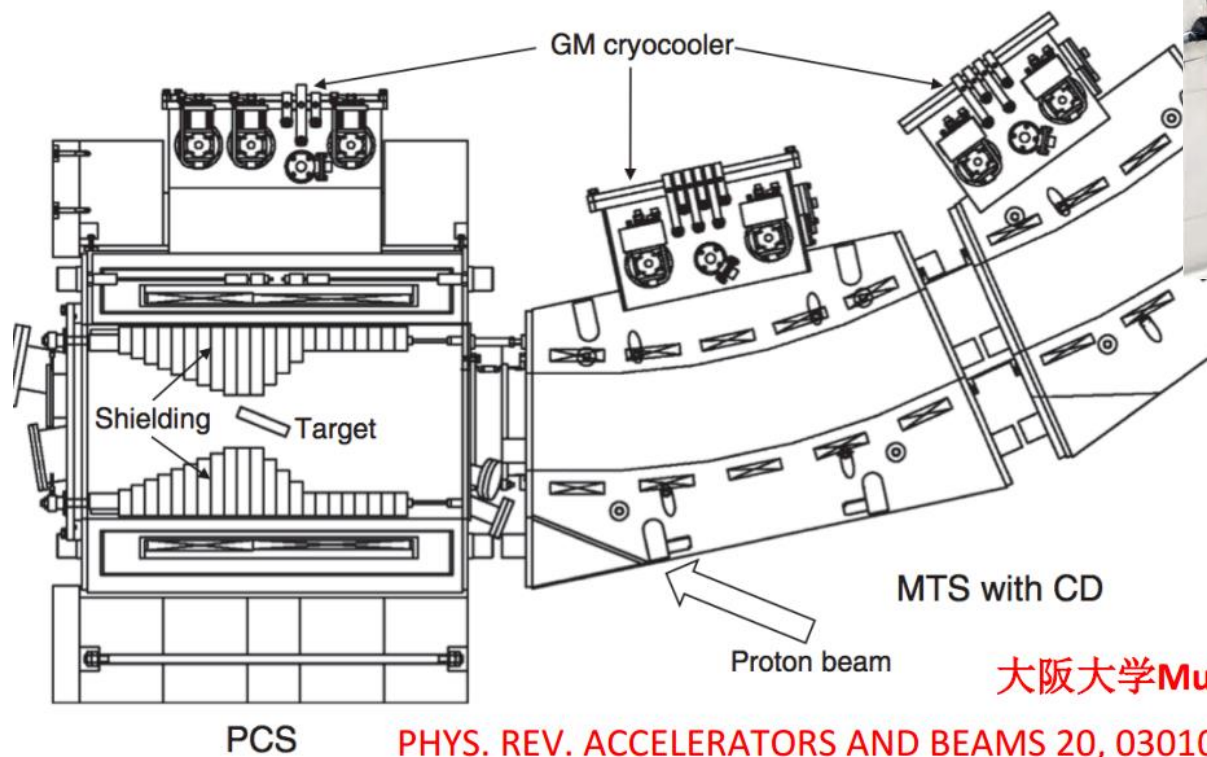
Put target inside solenoids



$P_T^2 / B = C$
conservation of
magnetic moment


$$P_T \rightarrow P_L$$

MUSIC实验的验证



MUSIC muon yields

μ^+ : $3 \times 10^8/\text{s}$ for 400W

μ^- : $1 \times 10^8/\text{s}$ for 400W

$10^8/\text{s}$ for 1MW @PSI

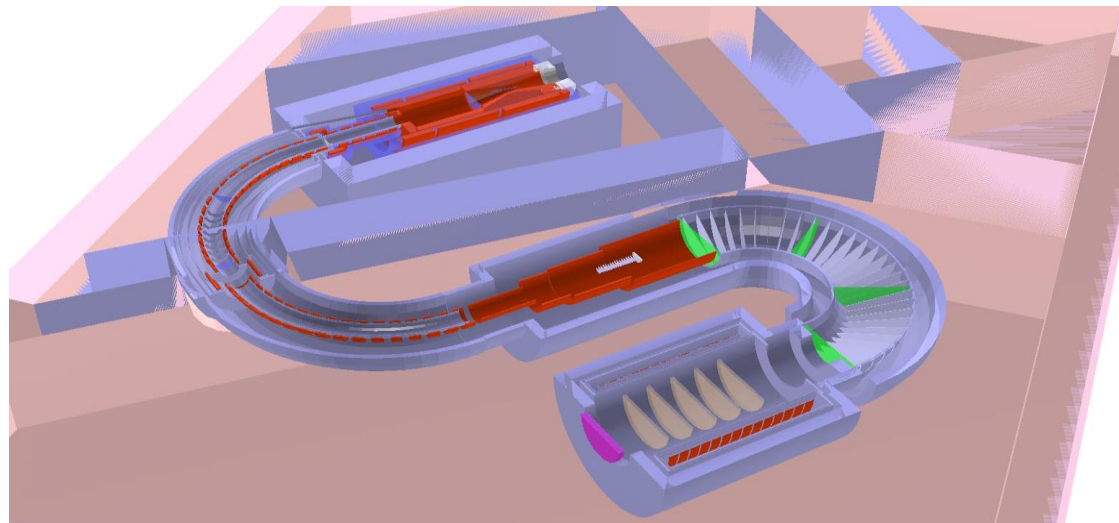
大阪大学MUSIC

大接受度，宽动量区间

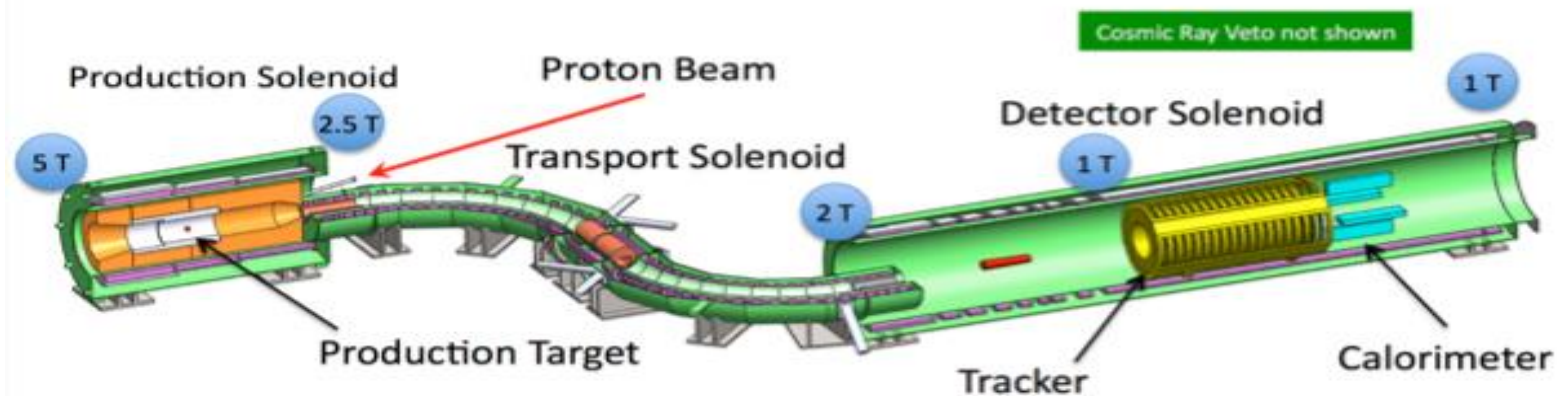
传统方法1000倍的俘获效率

基于超导螺线管收集方案的实验（后向收集）

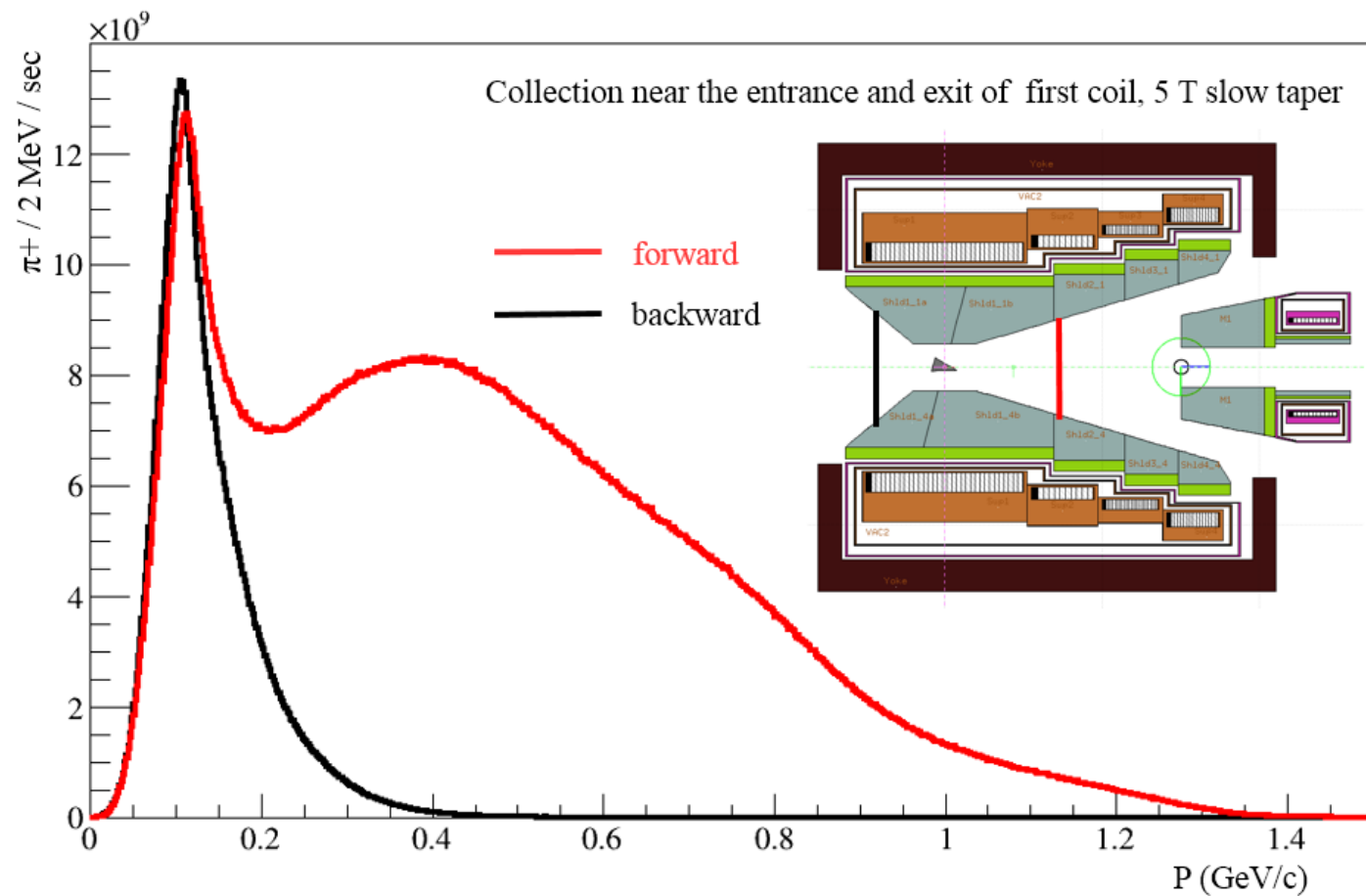
■ COMET @J-PARC:



■ Mu2e @ FNAL



前向还是后向收集



高流强、大动量区间是
EMuS设计的特色，
因此我们选择**前向收集**方案

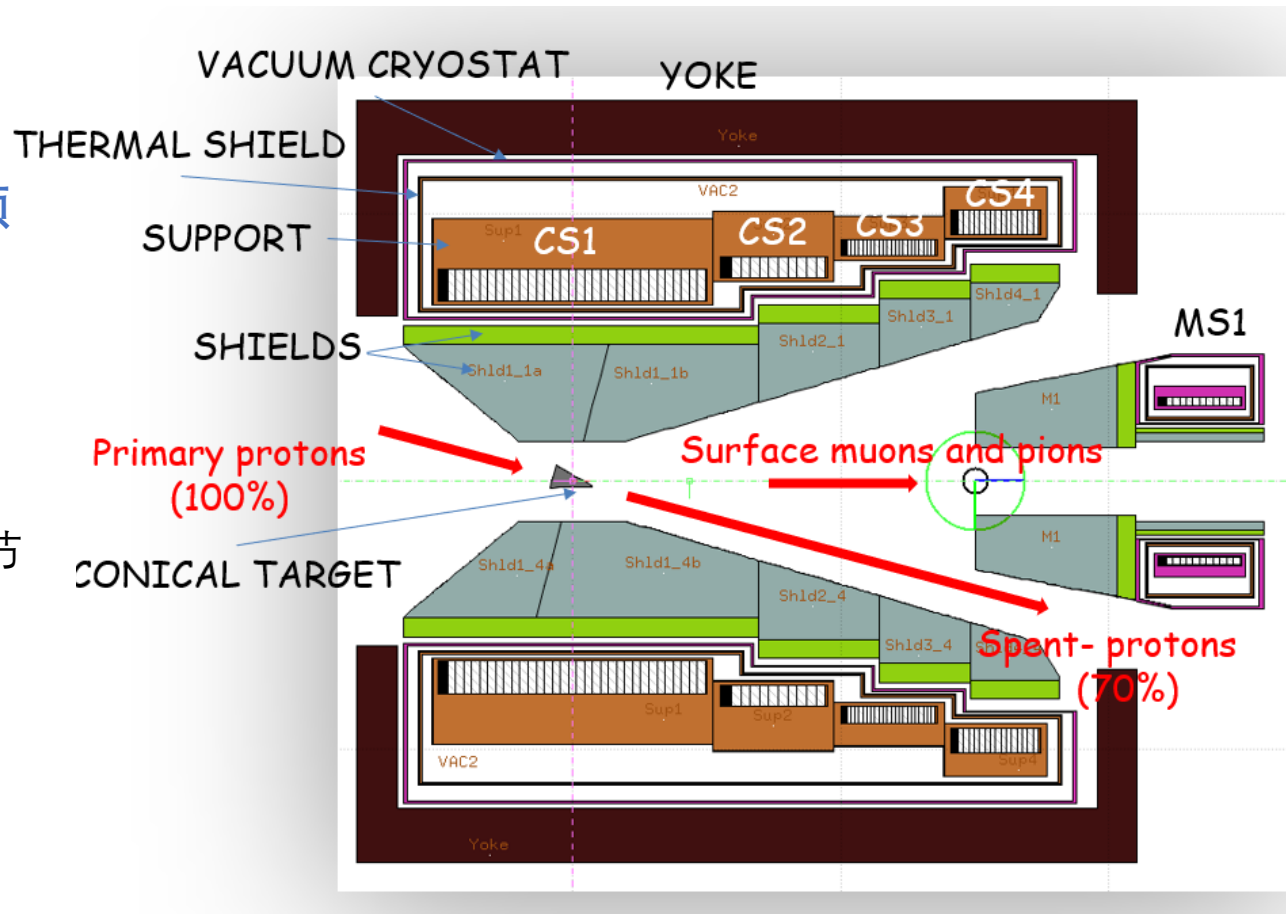
基准方案的靶站

假设25 kW, 1.6 GeV质子束流

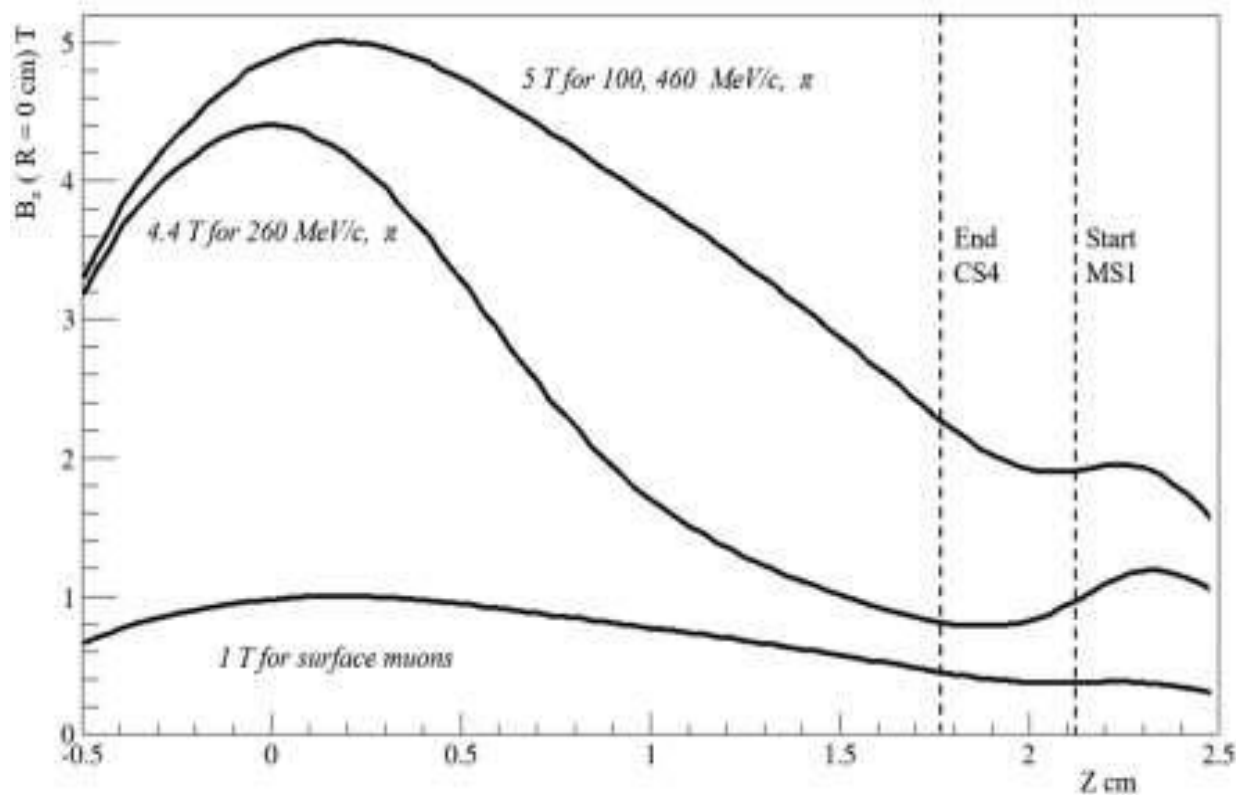
综合考虑**约束强度和质量、辐射安全和预算**，靶站的设计如右图 →

靶站的主要特征:

- 15 cm锥形厚碳靶
- 质子束流以15度入射
- 梯型分布的俘获磁铁， 可以产生可调节的绝热磁场
- 针对不同磁场， 质子束流均可引出
- 辐射屏蔽以保护磁铁线圈（难点）



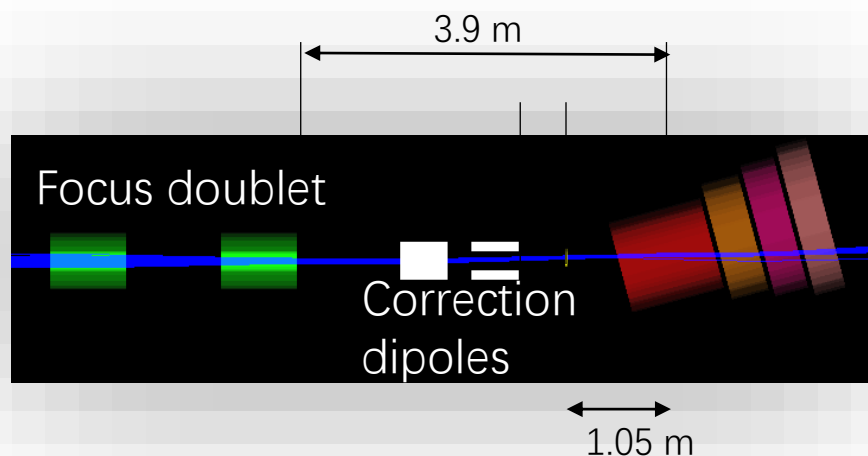
可调的磁场



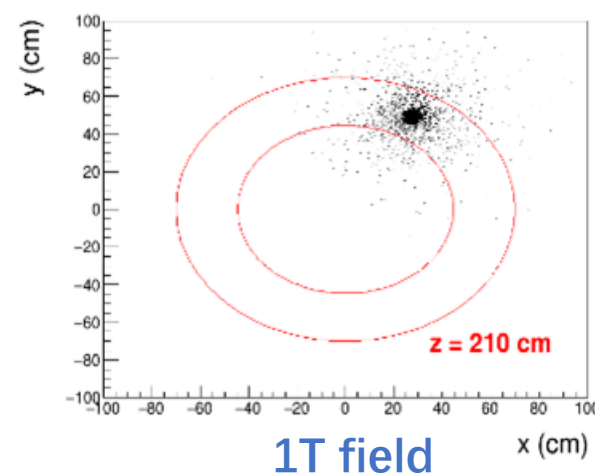
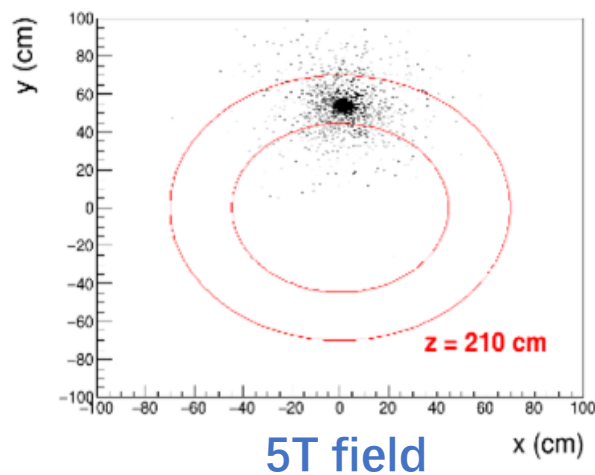
Adjusted magnetic fields:

- 5T for 100, 460 MeV/c pions
- 4.4T for 260 MeV/c pions
- 1T for surface muons

可调的质子束流及其引出

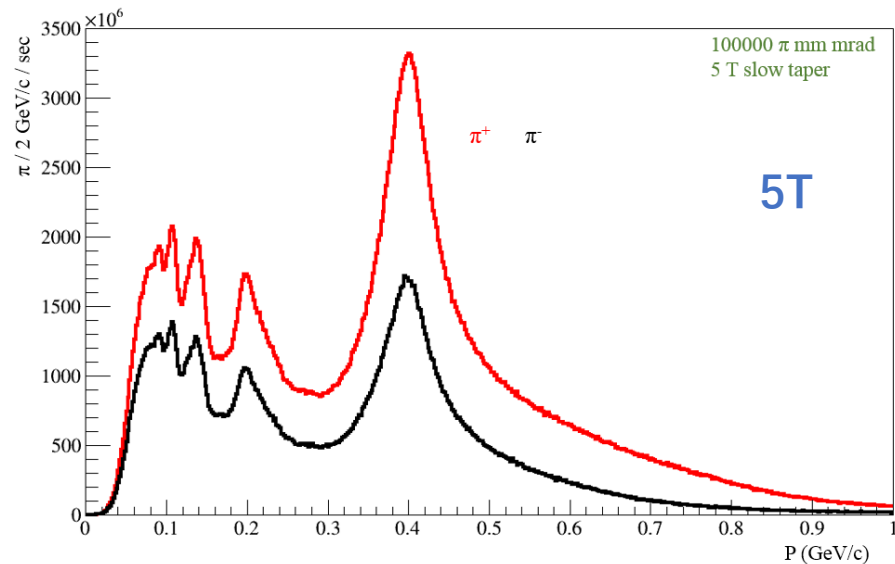


Proton distribution @ target station exit



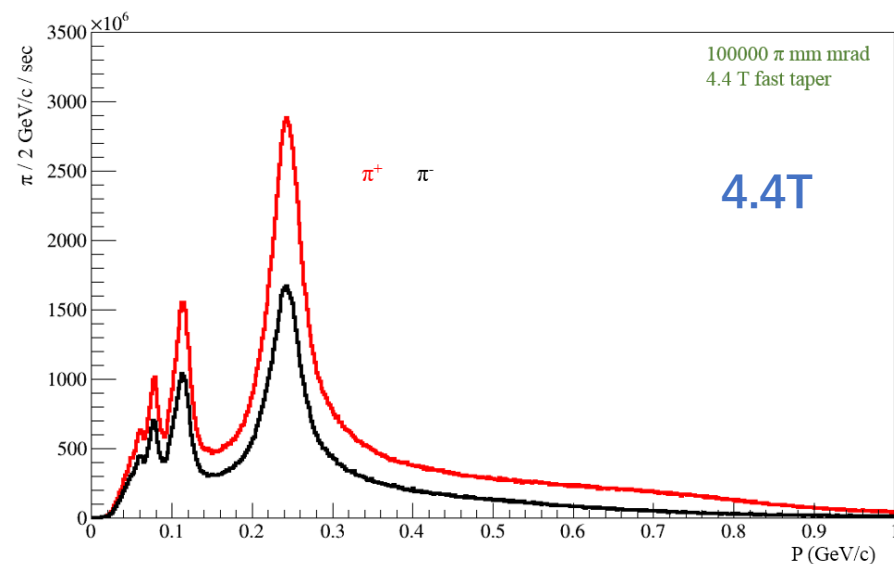
- 对次级粒子的收集要求束斑尺寸尽量小
- 需要矫正二极铁在不同模式下质子束流均准确穿过靶体同时从引出孔安全引出

靶站出口处的粒子产额



Surface muons

Upstream shielding (cm)	60			80		
Field type	fast	medium	slow	fast	medium	slow
$\mu^+(10^6)/\text{sec}$	26	29	46	32	30	41
Polz	-0.83	-0.83	-0.79	-0.82	-0.85	-0.85
$\text{IP}^2 \mu^+(10^6)/\text{sec}$	18	20	29	21	22	29
Purity (%)	86	86	85	84	88	88

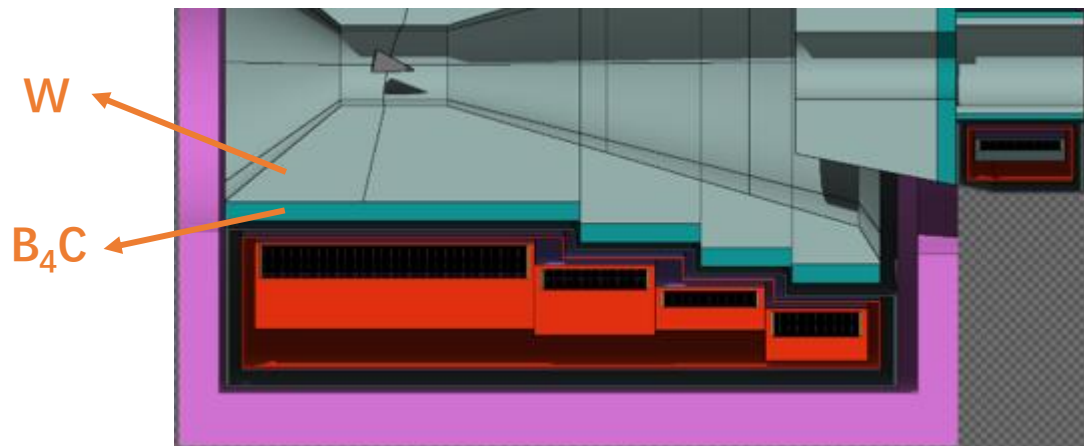


Pions

P (MeV/c) $\pm 10\%$	100		260		450	
Taper	5 T slow		4.4 T fast		5 T slow	
MS1's shielding (cm)	60	80	60	80	60	80
Lifetime years	23	30	23	30	23	30
$\pi^+ (10^{10})/\text{sec}$	1.92	1.9	5.9	4.43	9.47	6.96
$\pi^- (10^{10})/\text{sec}$	1.28	1.26	3.34	2.56	4.66	3.45

辐射计算及屏蔽的设计

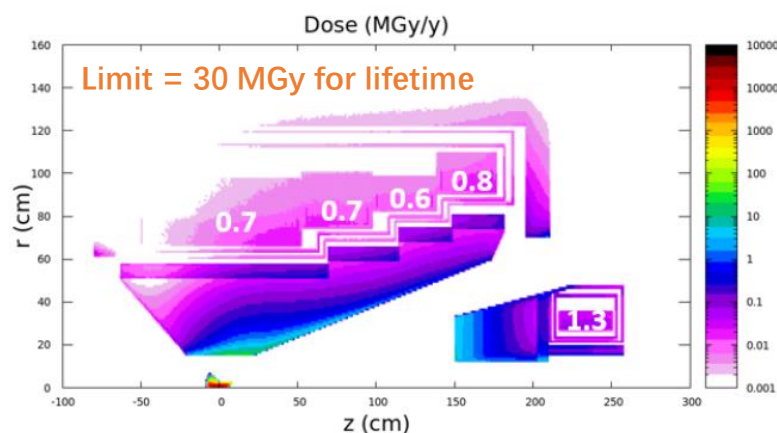
- 靶在超导螺线管内部，且前向收集次级粒子，会在靶站内产生巨大的辐射
- 在辐照环境下，线圈的机械、电、热性能会下降。要求辐射约束：
 - 线圈上绝缘材料的总剂量 < 30 MGy (实验生命周期) → 关键因素，需要实验预言
 - 线圈导体RRR (电性能) > 100 (每个连续工作周期)
 - 线圈运行温度 < 6.2 K (每个连续工作周期) } 可通过复温恢复性能
- 钨(W)+ 碳化硼(B₄C) 的屏蔽



俘获螺线管	长度 [cm]	开始点 [cm]	最大场强 [T]	内径 [cm]	内部钨屏蔽体半径 (最小值, 最大值) [cm]	钨屏蔽体厚度 (最小值, 最大值) [cm]
CS1	100.35	-49.5	5	67	15	43
CS2	36.5	55.75	--	76	29.5, 42.7	36.5, 23.3
CS3	34.5	100.75	--	84	42.7, 52.7	32.3, 22.3
CS4	31.9	141.7	--	92	52.7, 60	28.3, 21
MS1	30	218.7	--	28	15	60

辐射计算的结果

Annual dose



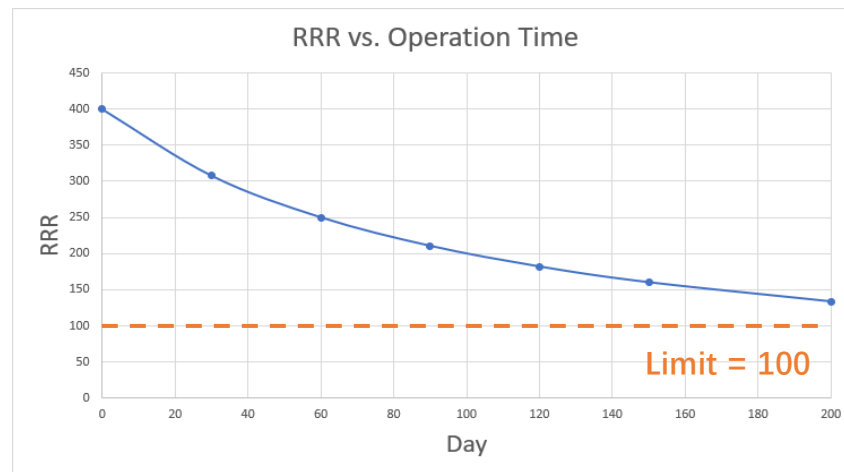
Peak dose in the epoxy:

- CS's: < 1.0 MGy/y
- MS1: ~ 1.3 MGy/y

Operation time:

- CS's: > 30 years
- MS1: ~ 23 years

RRR



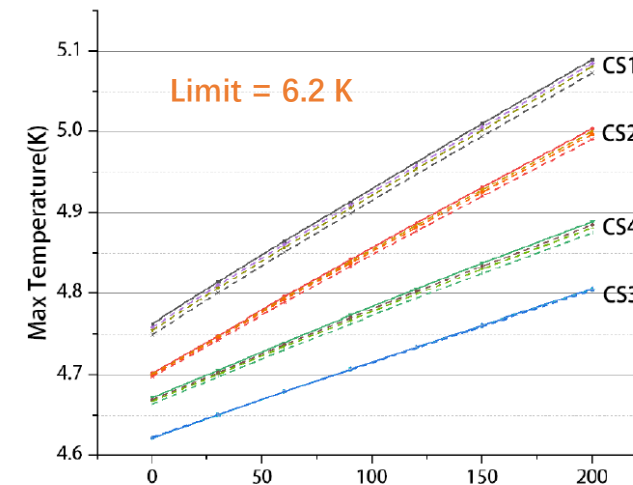
RRR of the conductor:

- > 100 for 200 accelerator days

Operation time:

- Can run for a whole accelerator year before fully recovery by warming up to room temperature

Temperature



Temperature of the solenoids:

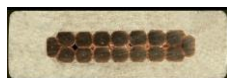
- < 5.1 K

Operation time:

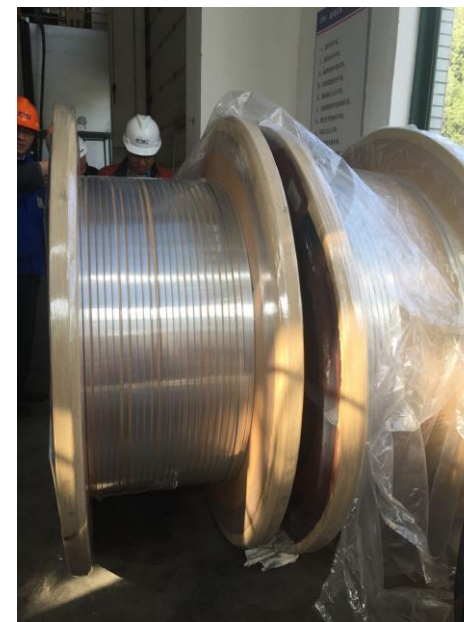
- Can run for a whole accelerator year before fully recovery by warming up to room temperature

抗辐射铝基卢瑟福超导电缆的研制

- 2018年，高能所和统力电工签订合同，研制由国家重大科学仪器研制项目支持的EMuS项目抗辐射超导磁体样机的铝基卢瑟福超导电缆
- 2020年初，统力电工成功地完成了3条截面尺寸4.7 mm × 15 mm、1500 m的铝基卢瑟福超导电缆的研制。该产品由16股NbTi超导线制成的卢瑟福电缆经外面包覆纯铝而成，为国内首次实现生产。



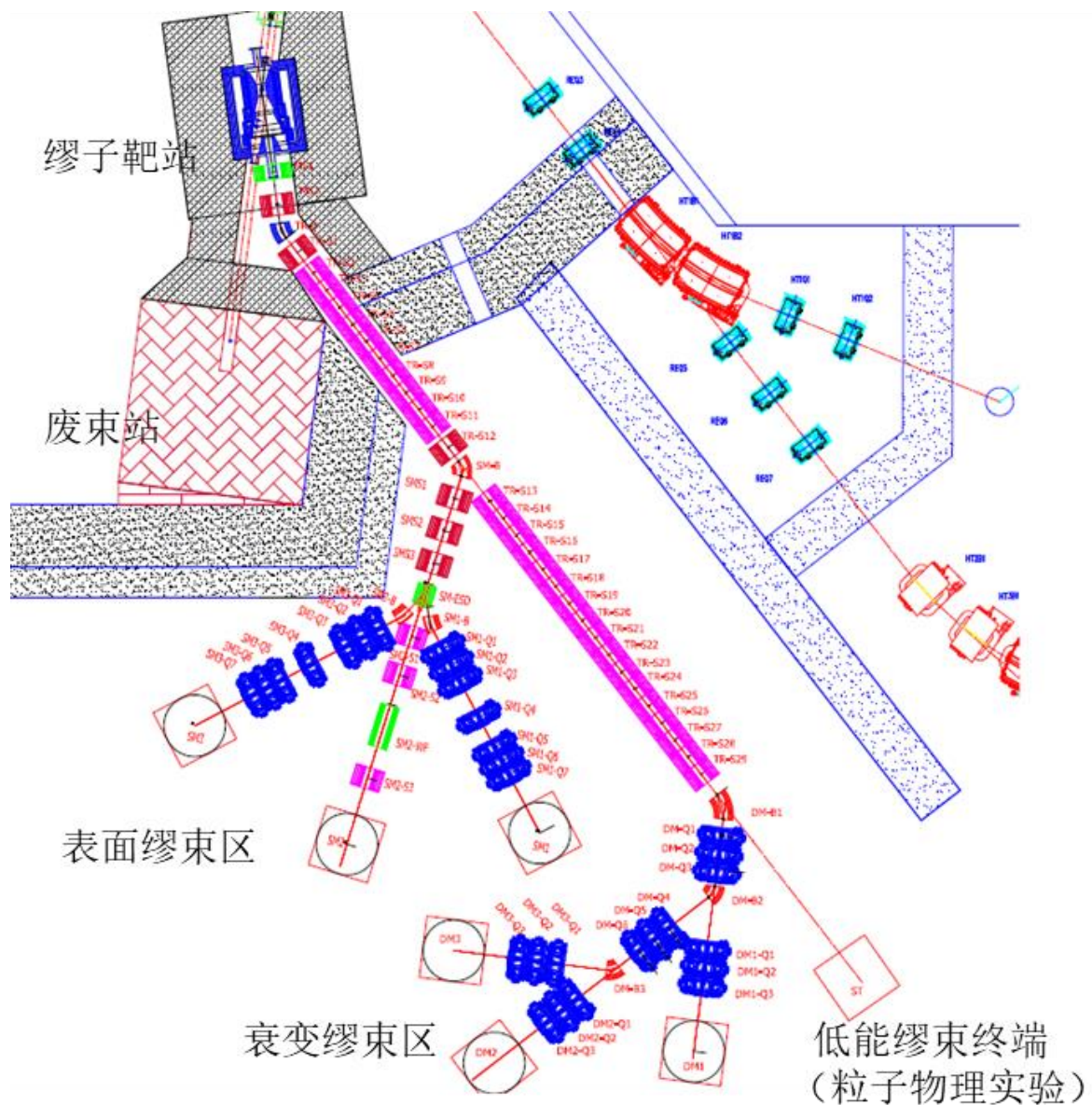
Sample of 10 m cable



3 piece of cables

缪束线

- 实现高通量缪子束流传输，采用大孔径螺线管束线收集和传输；
- 为了充分利用大发射度缪子束，采用静电分离器进行分束处理，将束流一分三，建立三个终端。
- 借助螺线管磁聚焦结构，通过前后两块二极磁铁配合筛选，衰变缪子束实现了高流强、高极化。
- 为充分利用高能质子束，采用常温四极磁铁在垂直方向上引出接近100%极化表面束流。



中国散裂中子源 (CSNS)



IHEP
Dongguan
Branch

- The site for CSNS is in Dongguan, Guangdong Province.
- CSNS is the first large scientific facility in southeastern China, jointly invested by the central government and local government. It will promote advanced researches in the economic developed zone of Guangdong-Hong Kong. **Total budget: ~2.3B CNY (or 350M USD)**

- 缪子源需要依托高束流功率的加速器装置
- CSNS提供了非常好的条件
 - 国家“十一五”重点建设项目
 - 2011年在东莞开工建设
 - 2018年完成国家验收
 - 2020年提前达到100 kW的设计指标
- 在CSNS束流扩展应用，提出建设一个简化方案的缪子源。目前已作为CSNS-II的子项目，获得批准。

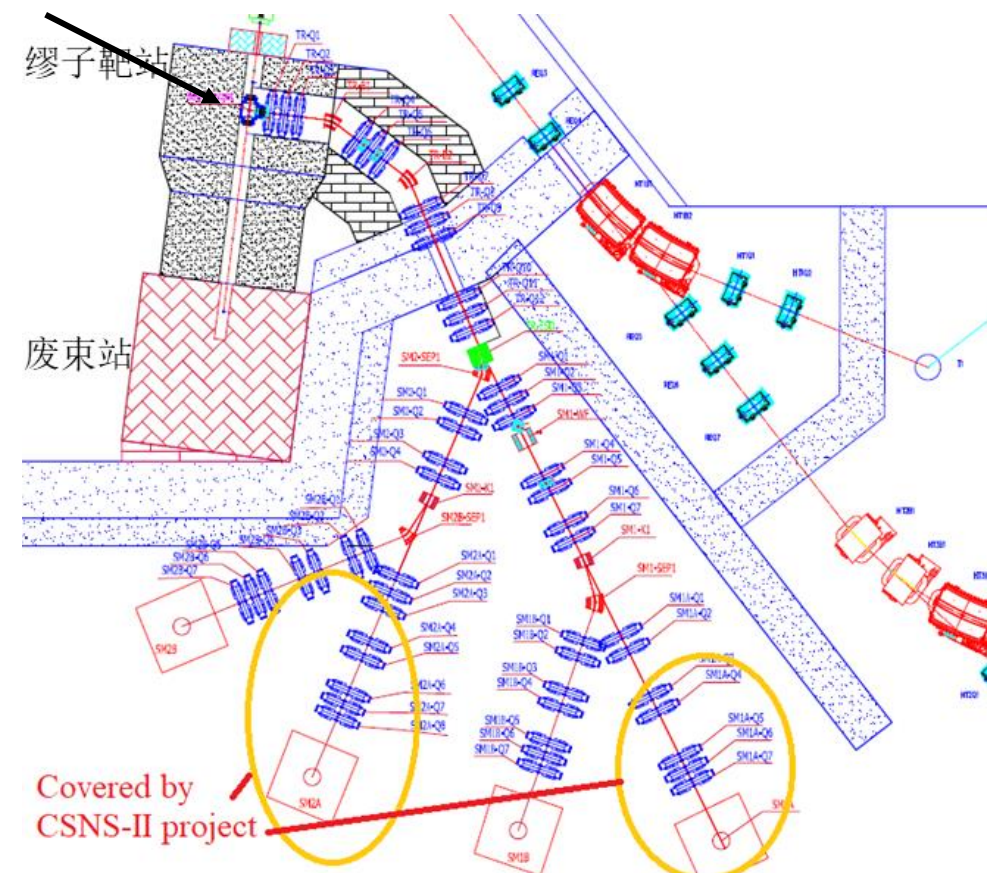
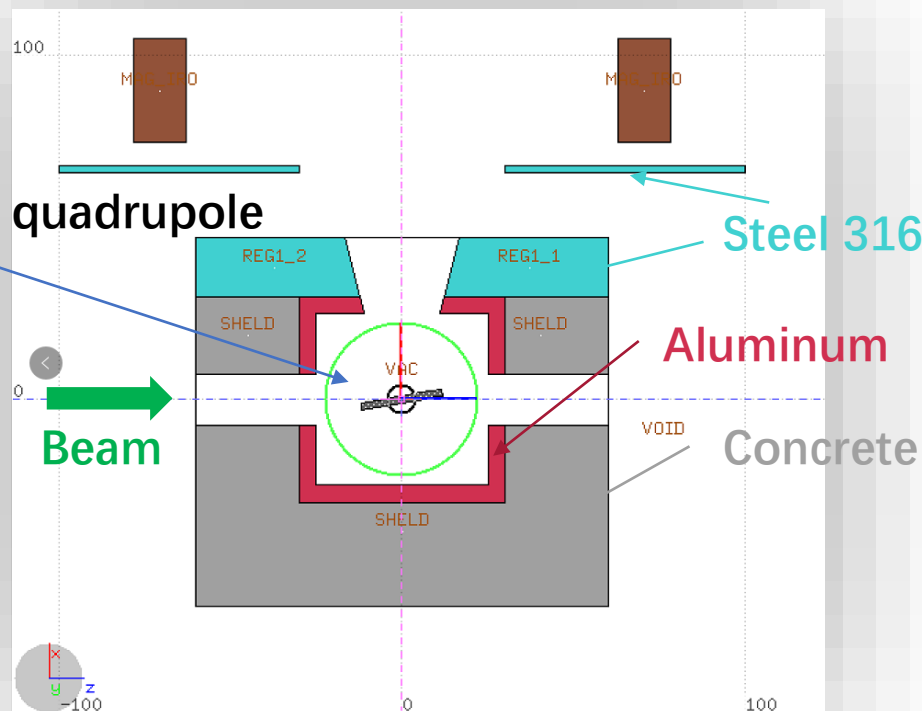
CSNS上的简化方案

- $19 \times 10^6 \mu^+/\text{sec}$ within $4500 \pi \text{ mm mrad}$
- At least 30 yr of lifetime
- Target's shielding designed

Target station location

- Sideways collection (90°)
- Quadrupole collection

Target outside the quadrupole

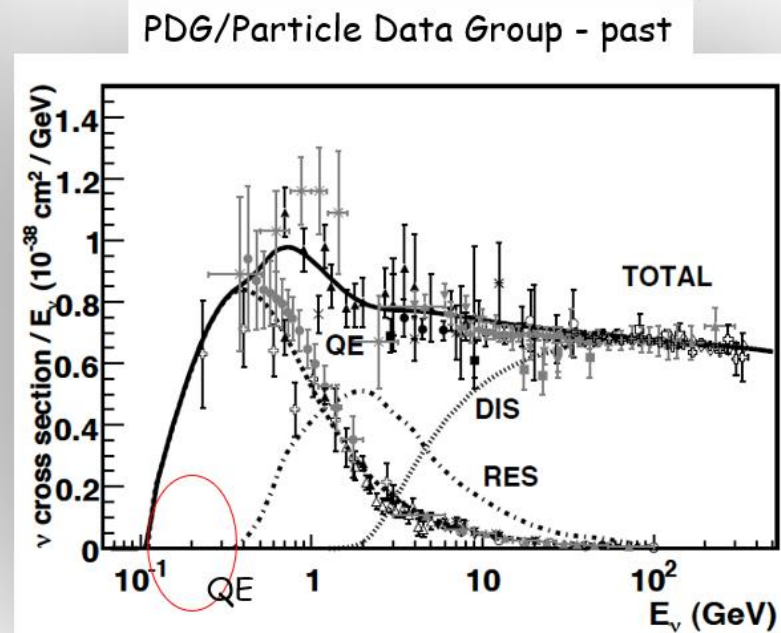
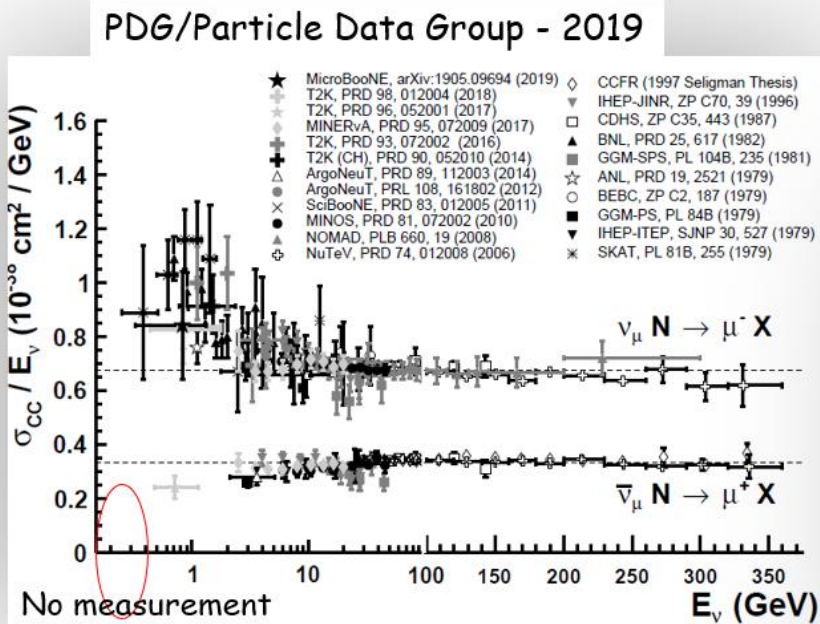


EMuS位于高能质子束应用区，
同高能质子束共用一个实验厅

可能的粒子物理应用

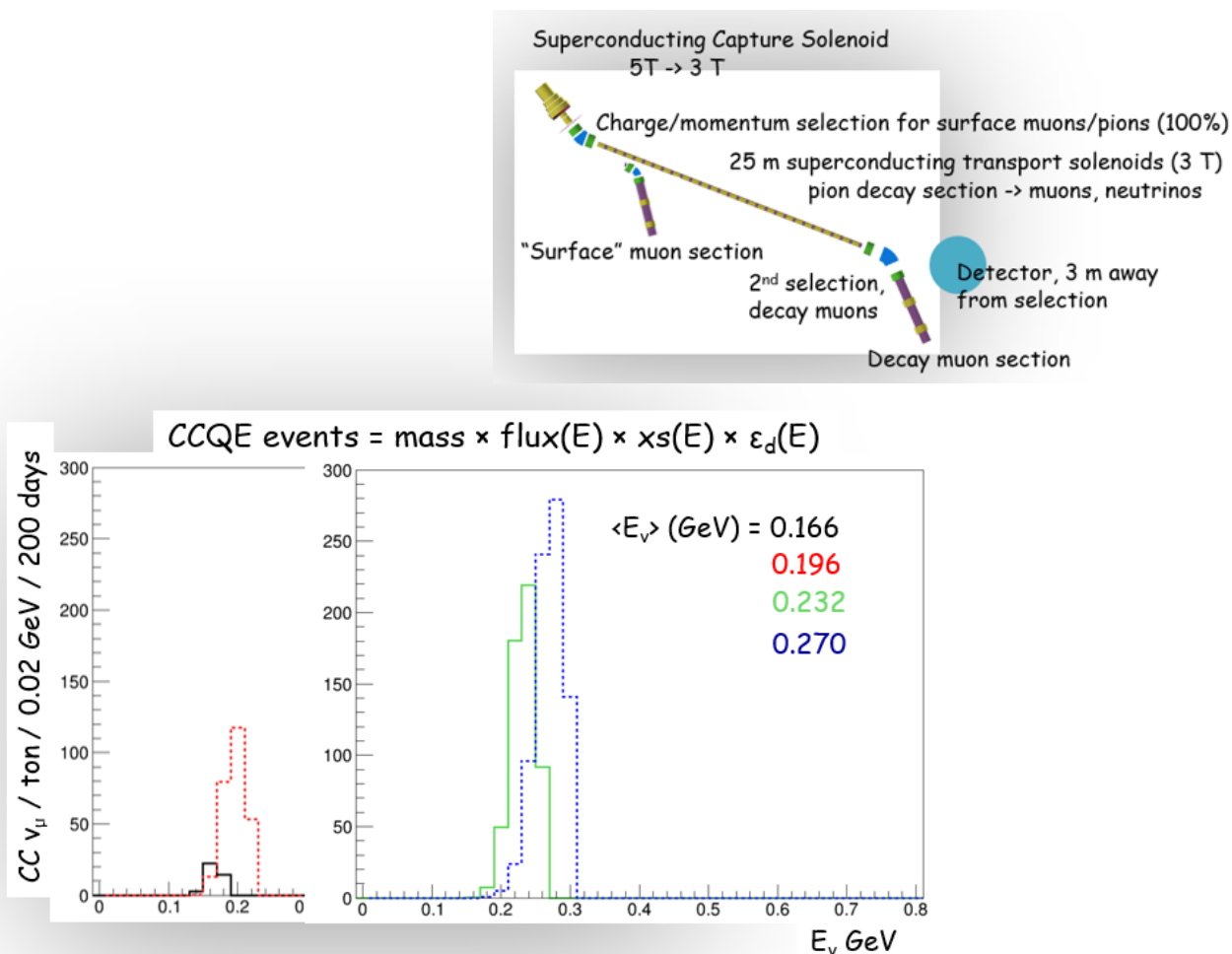
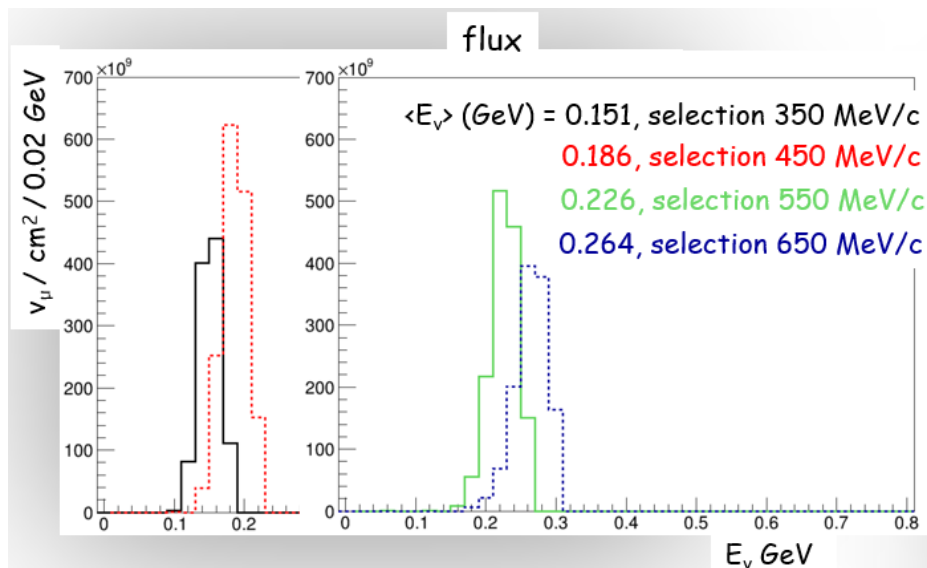
中微子截面的测量

低能中微子CCQE截面没有实验测量，该结果的误差是中微子震荡实验的重要系统误差来源



- There is a lack of cross sections measurements below 0.300 GeV
- "CCQE" only region

中微子截面的模拟结果



Selection π^+ , P(MeV/c) $\pm$ 10 %	350	450	550	650
N_ν ($\times 10^{12}$) / cm^2 / 200 days	1.04	1.58	1.41	1.23
CC ν_μ / ton / 200 days	38	263	547	786

ν_μ $\sim$ 1% - 2.5% stat. error

- Indication that can measure the ν_μ CCQE from 0.196 - 0.270 GeV

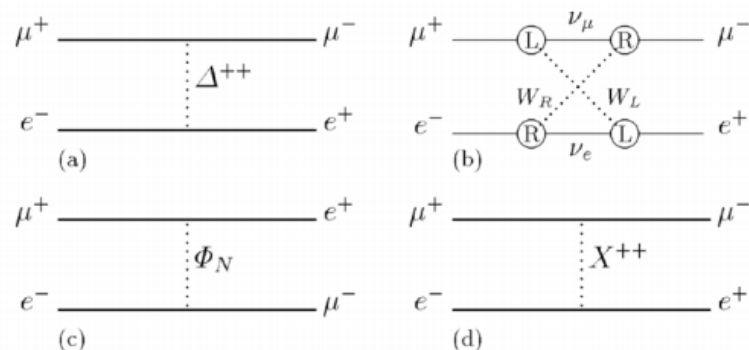
缪子偶素转换实验 (MACE)

■ Muonium:

- 缪子与电子组成结合形成缪子偶素（类氢原子）
- 寿命: $2.2 \mu s$
- 主要衰变模式: $M_\mu \rightarrow e^+ e^- \bar{\nu}_\mu \nu_e$

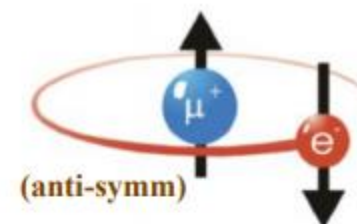
■ Muonium -> Anti-muonium

- 轻子味道破坏过程
- 寻找超出SM的新物理

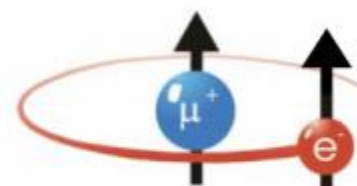


$$\sim (\bar{\mu} \Gamma e) (\bar{\mu} \Gamma e)$$

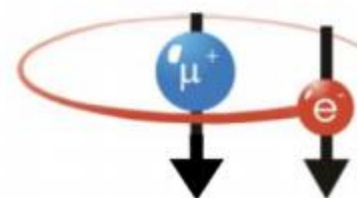
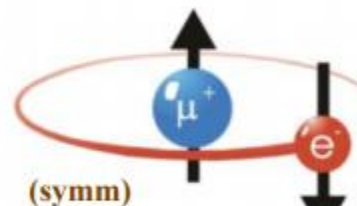
effective operator



Spin-0 (singlet)
paramuonium

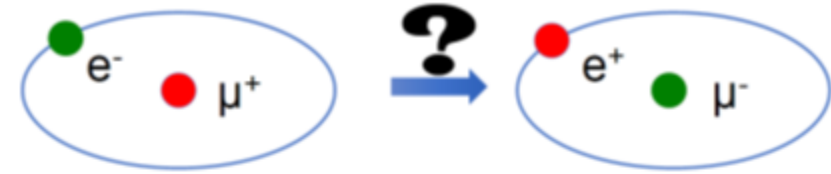
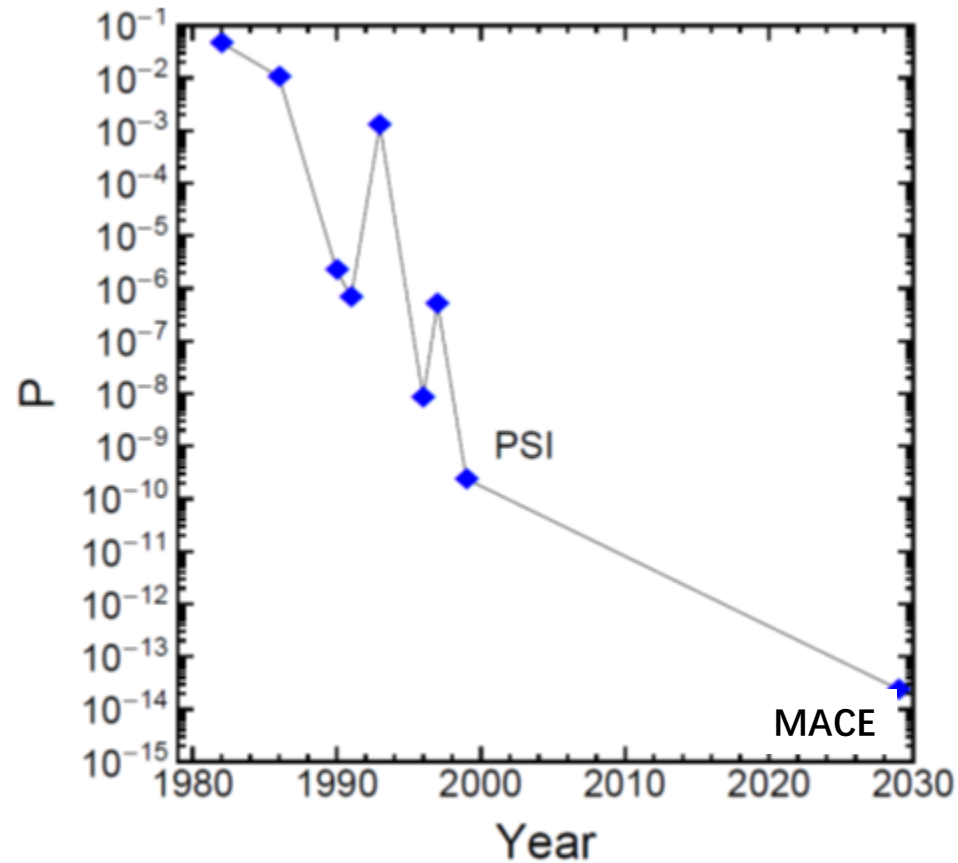


Spin-1 (triplet)
orthomuonium



Hughes (1960)

Breakthrough of MACE with EMuS



- The latest bound was done at PSI more than 20 years ago with a muon intensity $8 \times 10^6 \mu^+ / s$ and high-precision magnetic spectrometer.
- Timing resolution in detector: $\sim ns$
- Position resolution in detector: $\sim mm$
- EMuS plans to offer high-intensity μ^+
- Current timing resolution in detector: $\sim ps$
- Current position resolution in detector: $\sim \mu s$
- Expect to be improved by $> O(10^2)$?

Require $10^8 \mu^+ / s$ with the beam spread $< 5\%$

总结

- 提出了缪子源的设计方案
 - 基准方案采用超导螺线管收集方案，目标为具有国际竞争力
 - 将会在CSNS建造简化版方案的缪子源
 - 该两种方案的TDR已经完成初稿
- 介绍了基于缪子源方案的粒子物理应用
 - 中微子截面的测量
 - 缪子偶素转换的测量
- 计划进一步开展抗辐射超导靶站的相关预研，欢迎同行专家的参加和支持

谢谢！