

基于 HIAF-HFRS 窄带中微子束的 中微子-核截面测量方案

徐宇^{1,2}

¹先进能源科学与技术广东省实验室（东江实验室），惠州

²中国科学院近代物理研究所，兰州

中国物理学会高能物理年会（CHEP），广州

2026 年 7 月 17 日

物理背景与意义

1. 物理背景与意义
2. HIAF-HFRS 束线设置与参数
3. 预期实验结果
4. 未来规划与总结

从宇宙正反物质不对称到中微子 CP 破坏

[根本问题] 为什么存在多于反物质？

- 宇宙起源的核心问题——正反物质不对称的起源
- Sakharov 条件 (1967): CP 破坏 + 重子数不守恒 + 偏离热平衡
- 标准模型满足 Sakharov 条件吗？

[观测事实] 重子不对称

- $\eta_B = n_B/n_\gamma = 6.1 \times 10^{-10}$ (CMB + BBN)
- CKM CP 破坏已由 Belle/LHCb 精确测量, $J \sim 3 \times 10^{-5}$
- 但由此产生的电弱重子不对称最多 $\sim 10^{-20}$ — 差约 10 个量级
- $\Rightarrow$ 必须存在新物理的 CP 破坏源

[轻子产生机制] 最自然的解决方案

- Fukugita–Yanagida (1986): Seesaw 重中微子 N 的 CP 破坏衰变 $\rightarrow$ 轻子不对称
- Sphaleron 过程将轻子不对称转化为重子不对称
- $\Rightarrow$ 低能可检验预言: 中微子 $\delta_{CP} \neq 0$

中微子 δ_{CP} 的测量是轻子产生机制的关键实验检验

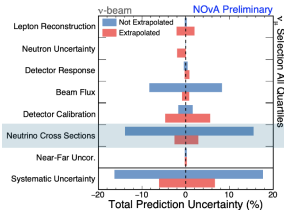
中微子 CP 破坏测量：进入系统误差时代

当前中微子实验：T2K / NOvA：

- 在 $\sim 3\sigma$ 水平上排除 CP 守恒 (Nature 2025)
- 统计误差水平：10% - 25%

下一代中微子实验：DUNE / T2HK

- 统计误差大幅降低：3% for ν_e and 1% for ν_μ
- 系统误差成为主导瓶颈
- ν -核截面不确定度是制约 δ_{CP} 精度的首要系统误差

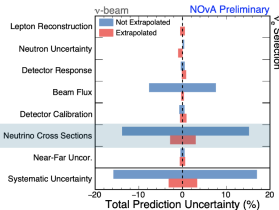


T2HK和DUNE对截面测量有独有的要求 T2HK

- 离轴束, $E_\nu^{\text{peak}} \sim 0.6 \text{ GeV}$
- ν_e 与 $\bar{\nu}_e$ appearance 的差值 $\Rightarrow \delta_{CP}$
- 要求 $\sigma(\nu)/\sigma(\bar{\nu})$ 比值精度 $\sim 2\%$
- 对核模型特别敏感 (CCQE + Δ 共振主导)

DUNE

- 宽能区 0.5–8 GeV, 需分段截面约束
- 截面不确定度是系统误差预算中最大单项
- PRISM 计划:
 - 可移动近探测器, 合成虚拟窄通量
 - 但需大曝光量, 依赖组合算法



当前截面测量的状态与瓶颈

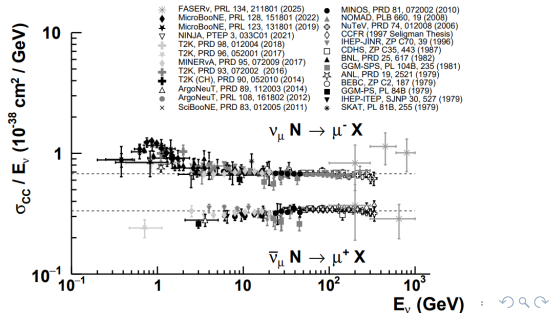
近点探测器截面测量：

- NOvA ND ν_e CC: 统计 7.4% / **系统 17%** (PRL 130, 051802)
- NOvA ND ν_μ CC: 低 Q^2 区与所有发生器显著偏离 (PRD 107, 052011)
- NOvA ND $\bar{\nu}_\mu$ CC: $\sim 10^6$ 事例，跨能区偏差 (2026 新结果)
- T2K ND280: 通量 $\sim 10\%$ (NA61/SHINE 对标后从 $\sim 20\%$ 降); CC0 π Np 在 C/O 靶完成
- MINERvA: 多靶 (He-Pb) 截面系统 $\sim 8-10\%$, 通量为主导
- DUNE/Hyper-K 需 $\sim 1-2\%$, 当前差距约一个量级

实验对比

实验 (近点)	E_ν (GeV)	靶材	主导系统差
T2K ND280	0.4–0.8	CH, H ₂ O	通量 ($\sim 10\%$)
NOvA ND	1–5	CH	通量+截面 ($\sim 17\%$)
MINERvA	1–20	He, C, Pb, Fe	通量 ($\sim 5\%$)

通量与强子产生截面是核心瓶颈



我们还可以知道什么

标准模型精确检验：

- **轻子普适性检验**： $\sigma(\nu_e)/\sigma(\nu_\mu)$ 比值精度 $\sim 1\%$ 可检验 $e-\mu$ 普适性^a
- **弱混合角测量**： $\nu-e$ 散射在低 Q^2 测量 $\sin^2 \theta_W$ ，互补 LEP^b
- **轴矢形状因子**：CCQE 截面提取 $F_A(Q^2)$ ，约束核子结构^c

新物理探索：

- **非标准相互作用 (NSI)**：精确截面可约束 ν 与夸克的 NSI 耦合^d
- **惰性中微子**：短基线反常信号需要精确截面输入^e

核多体物理：

- **短程关联 (SRC)**： ν 与高动量核子对散射，探测核子-核子关联^f
- **EMC 效应**：不同靶材截面比揭示核介质中夸克分布修正^g
- **2p2h/MEC**：多核子发射过程 $\rightarrow$ 核流模型约束^h

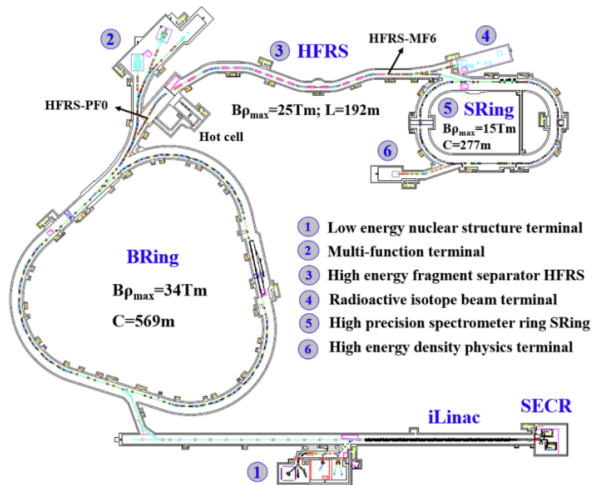
天体物理应用：

- **超新星 ν 探测**：精确截面是 JUNO、SK、Hyper-K、DUNE 超新星灵敏度的关键输入ⁱ
- **大气 ν 通量**： ν -核截面精度直接决定大气 ν 振荡分析系统误差^j

^aM. Day, K. S. McFarland, PRD 86, 053003 (2012); ^bJ. Erler, S. Su, Prog. Part. Nucl. Phys. 71, 119 (2013); ^cA. S. Meyer et al., PRD 93, 113015 (2016); ^dY. Farzan, M. Tortola, Front. in Phys. 6, 10 (2018); ^eS. Boser et al., Prog. Part. Nucl. Phys. 111, 103736 (2020); ^fJ. Arrington et al., J. Phys. G 36, 025005 (2009); ^gD. F. Geesaman, K. Saito, A. W. Thomas, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 45, 337 (1995); ^hT. Katori, M. Martini, J. Phys. G 45, 013001 (2018); ⁱK. Scholberg, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 62, 81 (2012); ^jM. Sajjad Athar et al., J. Phys. G 49, 120501 (2022)

HIAF-HFRS 束线设置与参数

1. 物理背景与意义
2. HIAF-HFRS 束线设置与参数
3. 预期实验结果
4. 未来规划与总结



BRing 设计参数

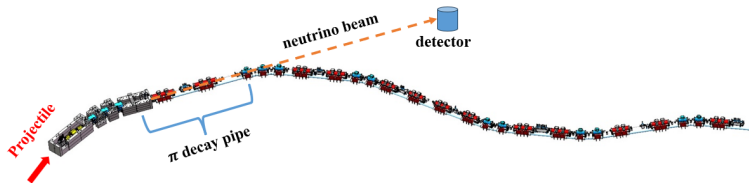
离子种类	动能 (GeV/u)	束流强度 (ppp)
p	9.3	6.0×10^{12}
$^{16}\text{O}^{8+}$	4.25	6.0×10^{11}
$^{18}\text{O}^{6+}$	2.6	6.0×10^{11}
$^{78}\text{Kr}^{19+}$	1.7	3.0×10^{11}
$^{209}\text{Bi}^{31+}$	0.85	1.2×10^{11}
$^{238}\text{U}^{35+}$	0.835	1.0×10^{11}
$^{238}\text{U}^{78+}$	2.6	1.0×10^{10}

- 快引出模式: 3 Hz
- 慢引出模式: 引出时间1-3 s

HIAF 状态

- 2025年12月: 束流验收完成
- 2026年4月: HFRS束线平台验收完成
- 预期2026年10月: HIAF总体验收完成

HFRS 中微子束线布局



工作原理:

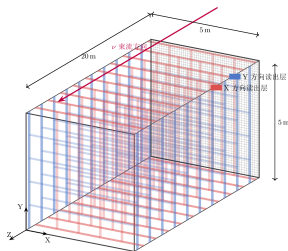
- BRing 质子/重离子轰击靶, 二级铁动量选择
- $\pi^\pm$ 进入 32 m 直线段衰变
- 中微子束流射向中微子探测器
- $\pi^\pm$, $\mu^\pm$ 等带电粒子通过二级铁进入后续束线

特点:

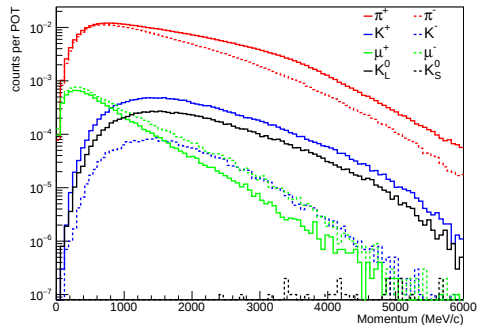
- 束线上的beam monitor 可对束流进行精确测量
- 慢引出模式下, 可同时进行中微子实验和缪子实验

中微子探测器

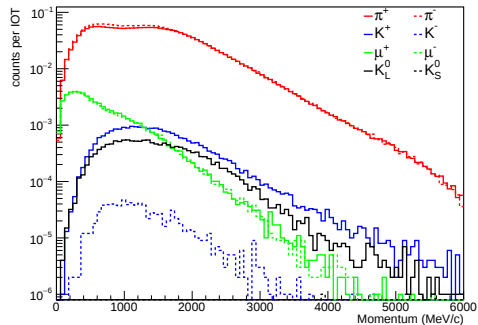
- 液体闪烁体探测器, 5*5*20 m
- 采用类似NOvA的X-Y交错排布
- 可以较好重建反应产物的径迹和能量



强子产额——质子 vs $^{16}\text{O}^{8+}$



9.3 GeV 质子 + C 靶



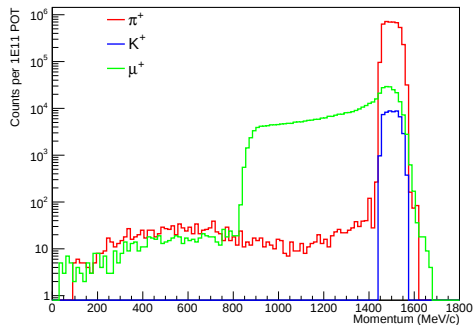
4.26 GeV/u $^{16}\text{O}^{8+}$ + C 靶

驱动	π^+	π^-	K^+	μ^+	π^+/π^-
质子	4.43×10^{-2}	3.31×10^{-2}	1.69×10^{-3}	1.19×10^{-3}	1.34
$^{16}\text{O}^{8+}$	1.90×10^{-1}	2.02×10^{-1}	2.52×10^{-3}	5.49×10^{-3}	0.94

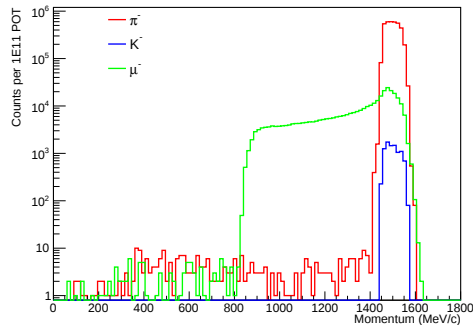
$^{16}\text{O}^{8+}$ 驱动 $\Rightarrow \pi^+ \approx \pi^-$, 中微子与反中微子束流纯度与强度近似相同

动量选择与束流成分

中心动量 $p_\pi = 1.5 \text{ GeV}/c$, HFRS 第一块二极铁后



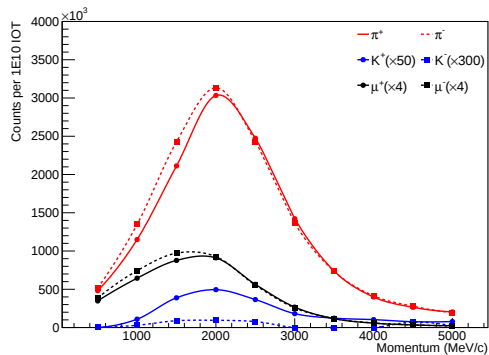
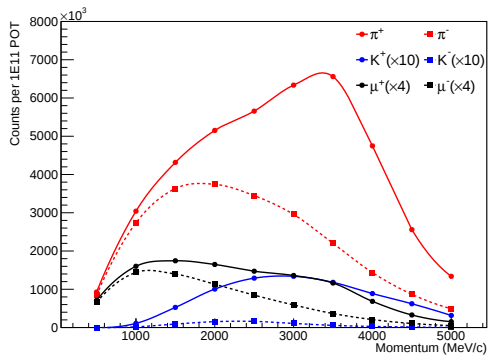
- π^+ 主导, $\text{FWHM} \approx 120 \text{ MeV}/c$
- $\Delta p/p = 4\%$ (设计值 $\pm 2\%$)



- 切换极性 $\Rightarrow \pi^-$ 束 ($\bar{\nu}_\mu$ 模式)

π 产额 vs. 中心动量

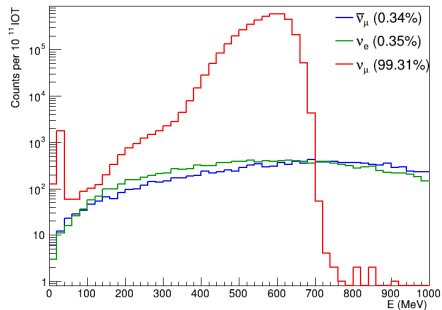
不同设置下进入衰变管道的产额



- $\pi^\pm$ 在所有动量下主导 (比 K 、 μ 高 1-2 量级)
- 质子: $p_\pi = 1-5 \text{ GeV}/c$ ($E_\nu \approx 0.4-2.1 \text{ GeV}$)
- ^{16}O : $p_\pi \leq 3 \text{ GeV}/c$ ($E_\nu \lesssim 1.3 \text{ GeV}$)
- 束流能量连续可调

1. 物理背景与意义
2. HIAF-HFRS 束线设置与参数
3. 预期实验结果
4. 未来规划与总结

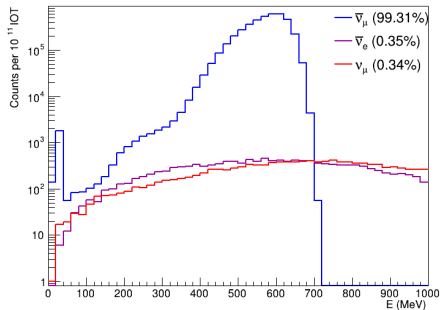
中微子束流组分



正电荷模式 (ν_μ 束)

束流特征参数:

- $E_\nu \approx 600$ MeV, T2K/T2HK 一振荡极大
- $\text{FWHM} \approx 124$ MeV ($\Delta E/E|_\sigma \approx 8.8\%$)
- 高纯度: 本底中微子含量比传统中微子束流小一个量级

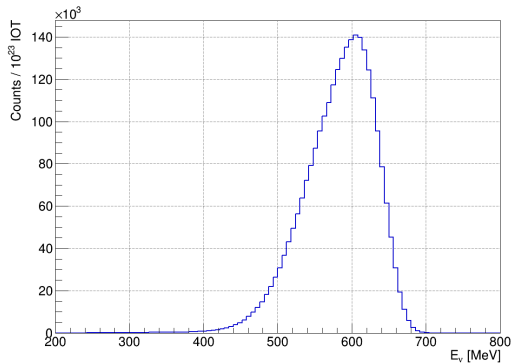
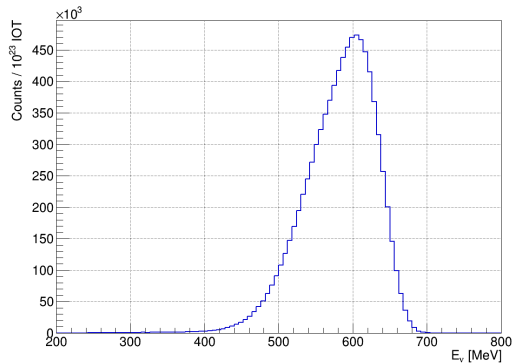


负电荷模式 ($\bar{\nu}_\mu$ 束)

$\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ 对称性优势:

- 正/负模式 ν 强度与纯度近似相同
- 传统质子束 $\bar{\nu}_\mu$ 被压制 2-3 倍
- HIAF-HFRS 可测量 ν_μ 和 $\bar{\nu}_\mu$ 截面

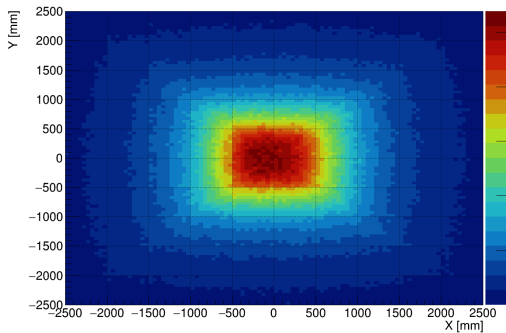
探测器CC 事例(左: ν_μ ; 右: $\bar{\nu}_\mu$)



- 运行参数: $^{16}\text{O}^{8+}$, 1.2×10^{12} ppp
- 快引出模式下, 1年束流时间:
 - ν_μ : > 10000 CC事例
 - $\bar{\nu}_\mu$: 约 4000 CC事例

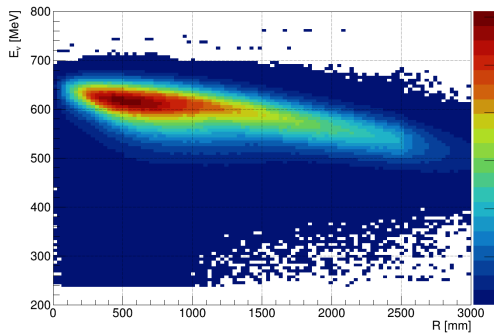
通量横向分布与能量-半径关联

探测器平面 ν_μ 通量



CC事例顶点R位置

- E_ν - r 关联 可原位校验束流模型



E_ν - r 关联

HFRS束流的优势——系统误差的消减

近点探测器 ν_μ CC 截面系统误差：

来源	T2K ND280 ^a	NOvA ND ^b	MINERvA ^c
束流通量	主导	主导	主导
探测器系统	~ 3-5%	~ 3-5%	~ 3-5%
总系统误差	~ 10-15%	~ 10-15%	~ 8-10%

^aarXiv:2607.10644 ^bPRD 107, 052011 ^cB. Ramson, N2026

HFRS 束流对系统误差的消减：

- ① **束流通量 < 1%**：慢引出模式下，HFRS 沿线束流监测器可对每个 π 介子进行 event-by-event 记录，直接测量入射粒子；窄动量选择 ($\Delta p/p = \pm 2\%$) 进一步压低模型依赖
- ② **核模型依赖消除**： E_ν 由 π 运动学先验已知，无需从未态重建；截面提取几乎模型无关
- ③ **高纯度 > 99.8%**：电荷+动量选择，反号污染 < 0.2%，本底扣除系统误差可忽略

HFRS 截面测量不确定度预算:

来源	不确定度
束流通量	$< 1\%$
核模型依赖	$< 0.5\%$
本底扣除	$< 0.1\%$
探测器效率	$\sim 3 - 4\%$
系统总计	$\sim 4 - 5\%$
统计误差 (1 年运行)	$\sim 1-2\%$
总计	$\sim 5\%$

对T2K/T2HK:

- 探测器效率项可抵消
- $\sigma_{\mu}/\sigma_{\bar{\mu}}$ 比值精度 $\sim 2\%$

截面测量精度对比

实验	E_{ν} 范围	总精度
HIAF-HFRS	0.3–2.5 GeV	$\sim 2-3\%$
MINERvA	1–20 GeV	$\sim 8-10\%$
T2K ND280	0.4–0.8 GeV	$\sim 10-15\%$
NOvA ND	1–5 GeV	$\sim 10-15\%$
MiniBooNE	0.3–3.0 GeV	$\sim 15-20\%$

关键优势:

- 近点探测器 ν_{μ} CC 截面系统误差主导
- HFRS 将通量系统差从 $\sim 10\%$ 压低至 $< 1\%$
- 窄带束消除核模型依赖, 截面提取几乎模型无关

未来规划与总结

1. 物理背景与意义
2. HIAF-HFRS 束线设置与参数
3. 预期实验结果
4. 未来规划与总结

HFRS 中微子实验建设规划

第一阶段

第二阶段

第三阶段

探测器原型验证



内容:

- 搭建单个液闪探测器模块 ($0.1 \times 0.1 \times 1 \text{ m}$)
- 硬件搭建、电子学集成与开发
- 能量与径迹重建算法测试

经费: ~ 10 万元

小探测器运行



内容:

- 由 10×10 个模块组装成 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 探测器
- 安装在 HFRS 束线上
- 与缪子束流实验同步运行
- 取得初步物理结果

经费: ~ 100 万元

大探测器建设



内容:

- 完成大型探测器 ($5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$) 建设
- 多能量点扫描运行
- 高精度截面测量

经费: ~ 5000 万-1 亿元

预期时间线: 第一阶段 $\sim 1-2$ 年 $\rightarrow$ 第二阶段 $\sim 2-3$ 年 $\rightarrow$ 第三阶段 $\sim 5-8$ 年

总结

提出利用 HIAF-HFRS π 衰变窄带 ν_μ 束，用于高精度 ν -核截面测量。

核心特点：

- $p_\pi = 1\text{--}5\text{ GeV}/c$, $\Delta E/E \approx 5\text{--}8\%$
- 纯度 $> 99.8\%$, 反号污染 $< 0.2\%$
- $^{16}\text{O}^{8+}$ 驱动 $\Rightarrow \nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ 同等强度
- 慢引出 + beam monitor $\Rightarrow$ 通量不确定度 $< 1\%$

物理潜力：

- ν -核截面总精度 $\sim 2\text{--}3\%$ (1 年运行)
- NSI, 2p2h 测量等多个物理目标
- $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ 对比测量
- 互补 T2K、NOvA、DUNE、Hyper-K

HIAF Upgrade 计划：粒子能量提高 3 倍，流强提高一个量级，可覆盖 DUNE 全能区 (E_ν 可达 8 GeV)，满足新一代振荡实验对截面精度的需求。

谢谢！ 欢迎提问

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 两体衰变

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)}, \quad E_\nu^{\max} \approx 0.428 E_\pi \text{ (前向)}$$

$$\text{离轴: } E_\nu^{\text{peak}} \approx \frac{0.43 E_\pi}{1 + \gamma^2 \theta^2}$$

Backup: 本底估计

束流相关: μ^+ 衰变 $\bar{\nu}_\mu$ (二极管抑制)、 $K_{e3} \nu_e$ (K/π 抑制)、反号 $< 0.2\%$

探测器相关: NC π^0 (拓扑 veto)、宇宙线 (快提取 $\times 10^6$ 压低)

Backup: ν_μ CC 反应道 ($E_\nu \approx 600$ MeV)

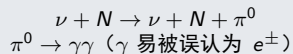
靶材料: CH (闪烁体)

主要本底反应

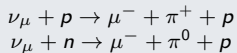
ν_μ CC 准弹性 (CCQE)



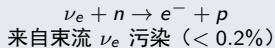
NC π^0 产生



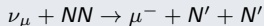
ν_μ CC 共振 π 产生 (CC1 π)



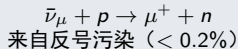
ν_e 本底



ν_μ CC 多核子发射 (2p2h/MEC)



反中微子本底



T2K 能区截面主导: CCQE $\approx$ 40%, CC1 π $\approx$ 30%, 2p2h/MEC $\approx$ 20%, DIS $\approx$ 10%

Backup: 束流中产生中微子的衰变过程

$\pi^\pm$ 衰变

K 衰变

μ 衰变 (本底)

主导道

两体

μ^+ 衰变

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

(99.9877%)

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

(63.56%)

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

($\approx 100\%$)

ν_e 本底

三体 ($K_{\mu 3}$)

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$$

(1.23×10^{-4})

$$K^+ \rightarrow \pi^0 + \mu^+ + \nu_\mu$$

(3.35%)

$\bar{\nu}_\mu$ 模式

三体 ($K_{e 3}$)

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

(99.9877%)

$$K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$$

(5.07%)

K_L^0 半轻

$$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm + \mu^\mp + \nu_\mu$$

(27.04%)

$$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm + e^\mp + \nu_e$$

(40.55%)

说明:

- 窄带束通过二极铁选择特定动量 $\pi^\pm$, 仅其衰变产生信号 $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$
- K 贡献因 K/π 压低 ($< 5\%$), K_L^0 需中性粒子通道存在才显著
- μ 衰变产生的 $\nu_e, \bar{\nu}_\mu$ 是主要本底来源