

惠州强子谱仪 (HHaS)

仇浩

重离子科学与技术全国重点实验室

中国科学院近代物理所

目录

- HIAF高能终端可能研究的物理
- 谱仪概念设计
- 各探测器
- 预期性能
- 部分模拟结果
- 造价估计
- 国际竞争
- 合作组

HIAF

“十二五”国家重大科技基础设施
广东惠州

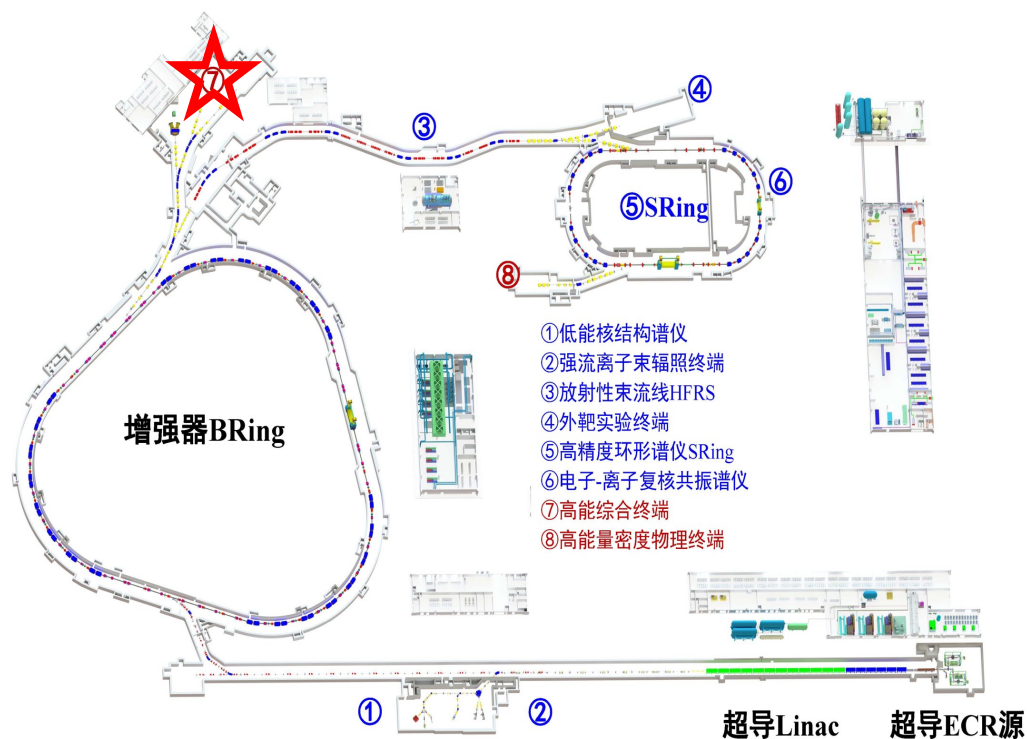


HIAF



- 全部设备安装完成
- 今年将建成并完成首轮实验

HIAF及HIAF-U

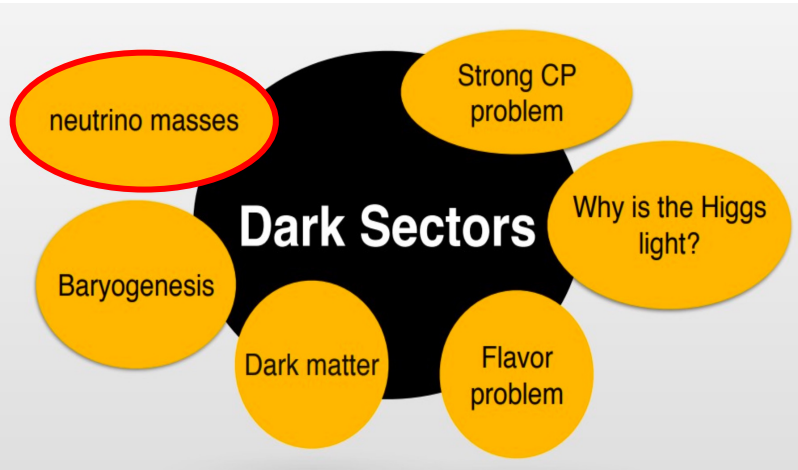


	E_k (GeV/u)	$v_{s_{NN}}$ (GeV)
HIAF p束	<9.3	<4.58
HIAF U束	<2.45	<2.85
HIAF-U U束	<9.1	<4.54

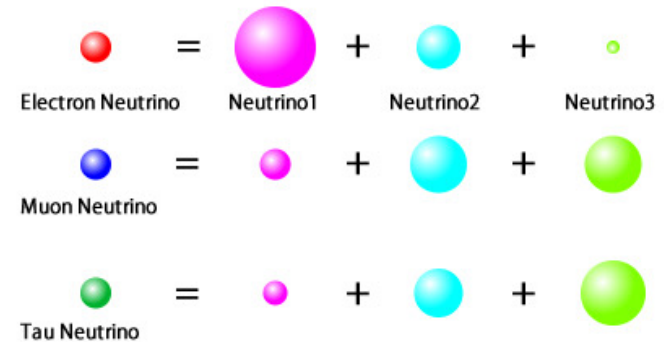
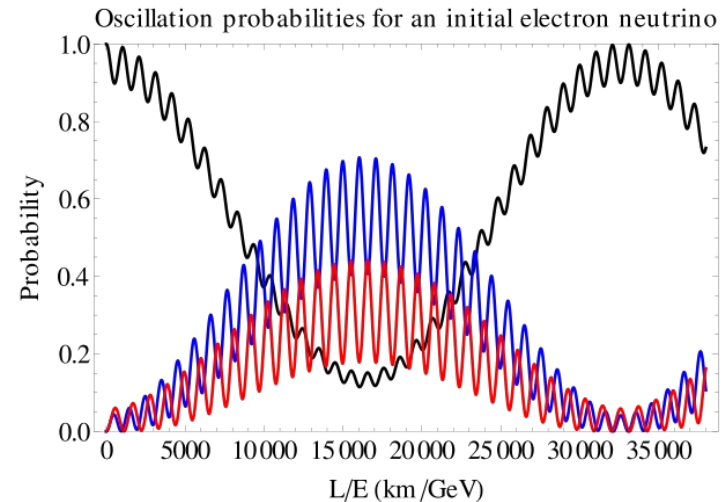
惠州强子谱仪(Huizhou Hadron Spectrometer)

- 质子束流 + 可能产生的K/ π 次级束流: η 介子物理、轻强子物理
- 重离子束流: 超核、核物质相结构、状态方程

η 介子物理

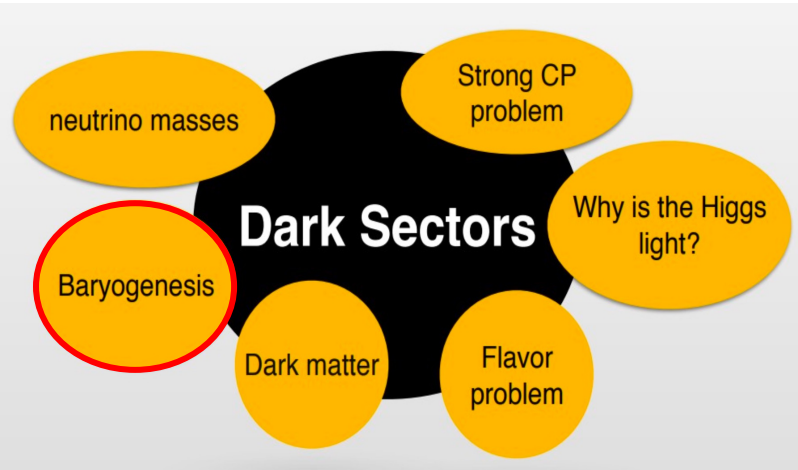


C. Gatto

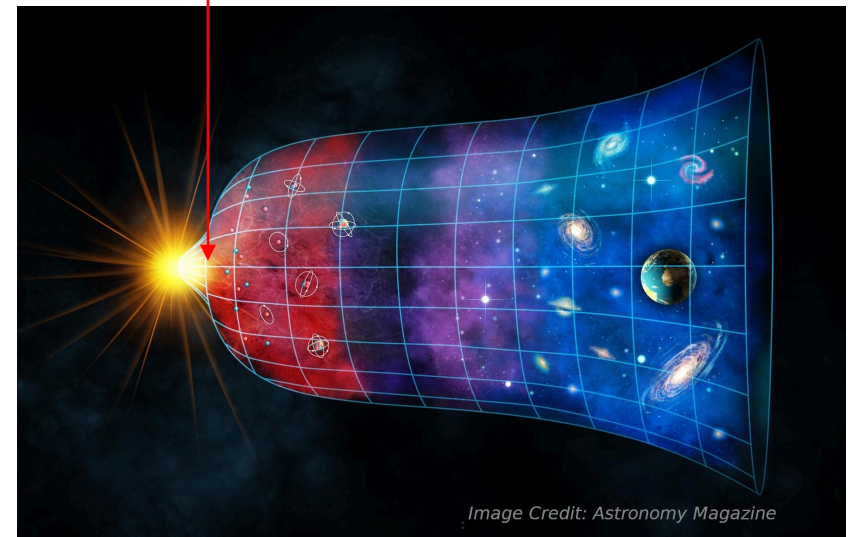
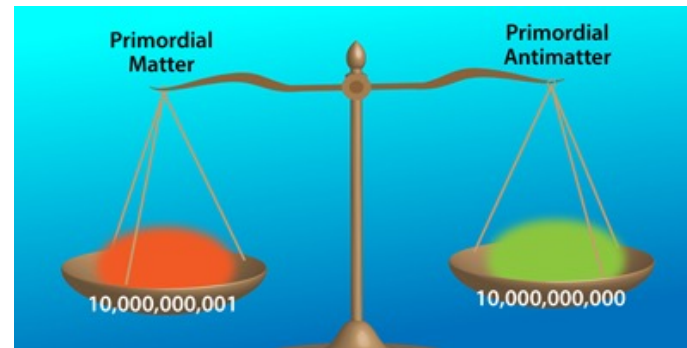


- 粒子物理标准模型面临一些难题，需要超出当前标准模型的新物理
- e.g. 中微子有质量

η 介子物理

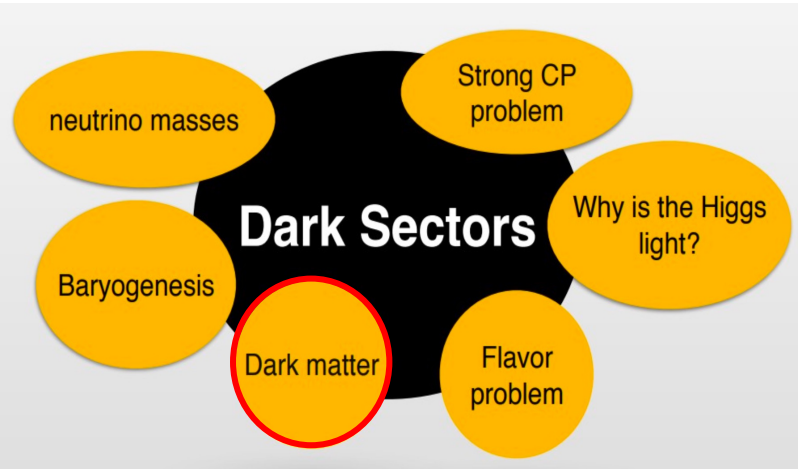


C. Gatto

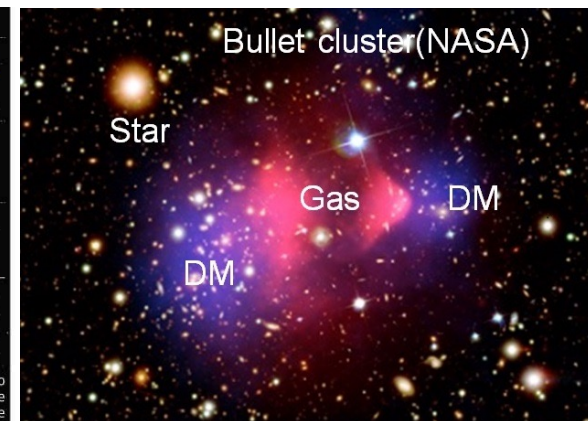
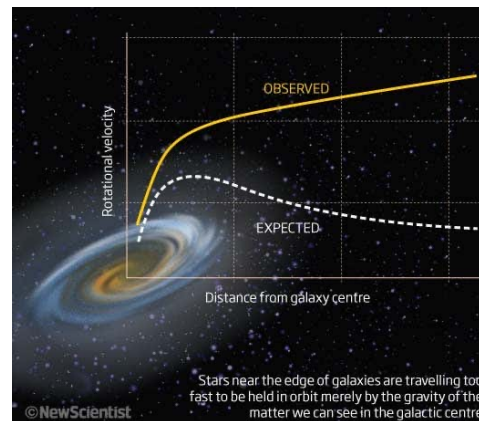
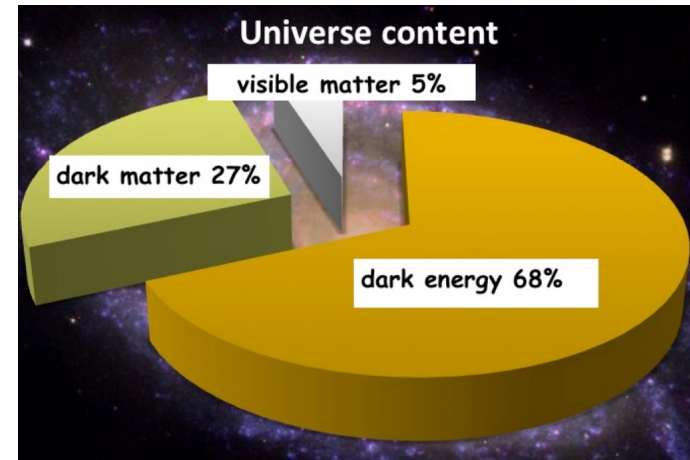


- 粒子物理标准模型面临一些难题，需要超出当前标准模型的新物理
- e.g. 宇宙正反物质不对称

η 介子物理



C. Gatto

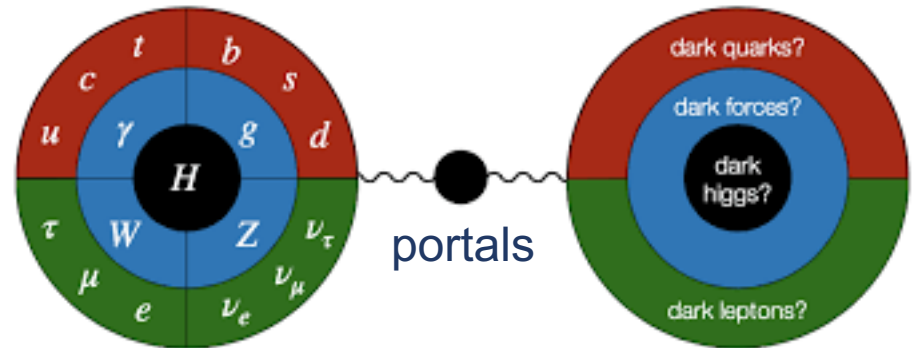


- 粒子物理标准模型面临一些难题，需要超出当前标准模型的新物理
- e.g.暗物质

η 介子物理



C. Gatto

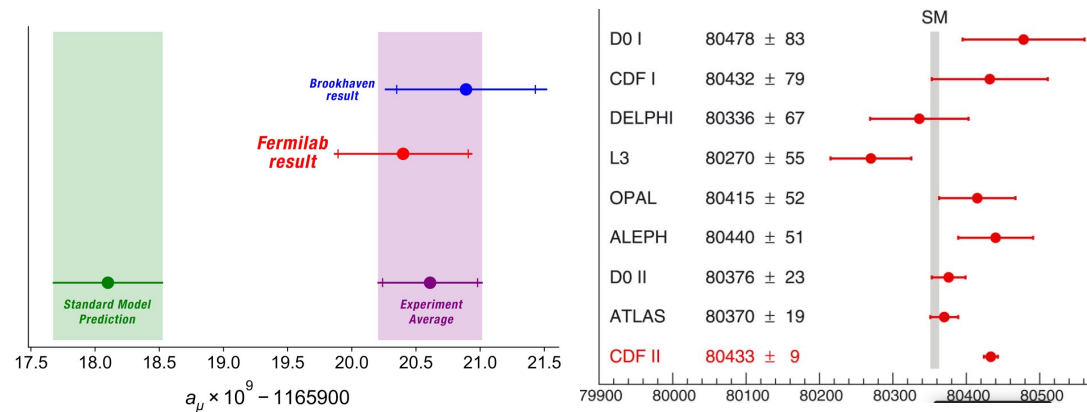
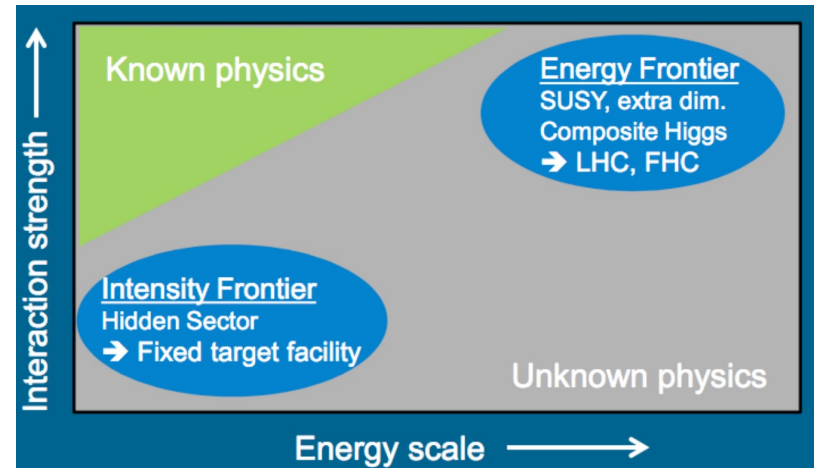


- 粒子物理标准模型面临一些难题，需要超出当前标准模型的新物理
- 可能存在一组（sector）暗物质粒子，通过“门户”（portal）粒子与标准模型粒子有很微弱的联系

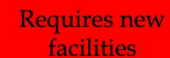
η 介子物理



C. Gatto



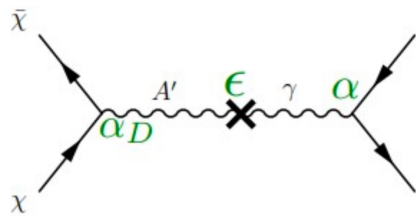
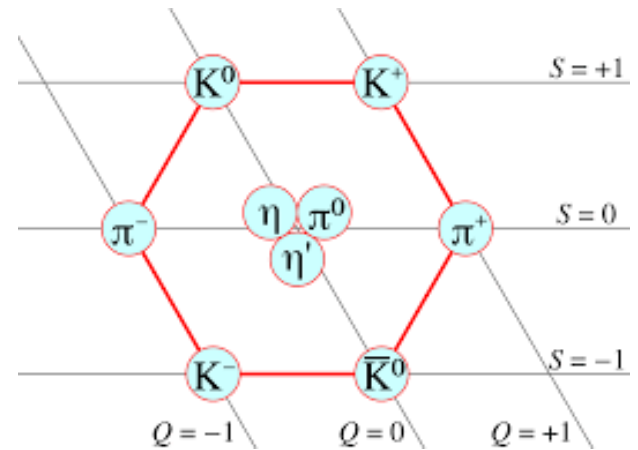
- 粒子物理标准模型面临一些难题，需要超出当前标准模型的新物理
- 除了标准模型预言的Higgs粒子，LHC的高能量前沿实验没有发现其它新粒子/新物理
- 高精度前沿测量，也是发现新物理的重要手段，如 μ 子反常磁矩 $g-2$ 、W质量



- 11

η介子物理

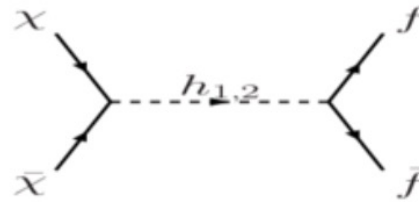
- η、η'和Higgs是已知仅有的3种全零量子数粒子
 - $Q = I = J = S = B = L = 0$
- ⇒ 标准模型衰变被压低
- ⇒ 新物理的分支比更大
- η / η' 衰变可以用来寻找多种连接暗物质世界的门户(portal)粒子，以及检验基本对称性



暗光子

$$\eta \rightarrow \gamma A'$$

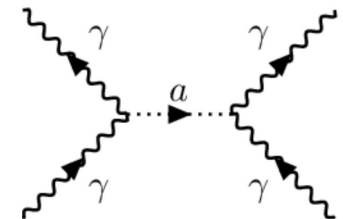
$$A' \rightarrow \mu^+ \mu^- / e^+ e^-$$



暗Higgs粒子

$$\eta \rightarrow \pi^0 H$$

$$H \rightarrow \pi^+ \pi^- / \mu^+ \mu^- / e^+ e^-$$



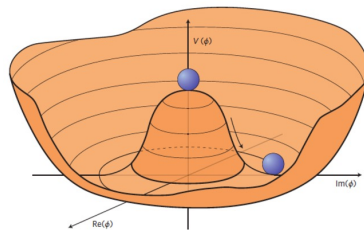
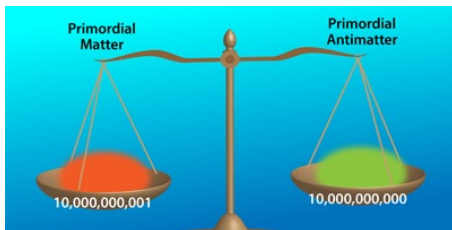
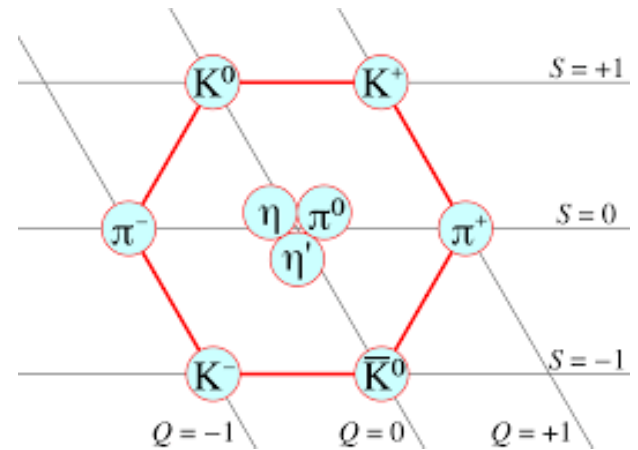
类轴子

$$\eta \rightarrow \pi \pi a$$

$$a \rightarrow \gamma \gamma / \mu^+ \mu^- / e^+ e^-$$

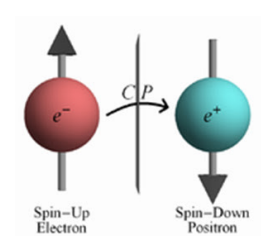
η 介子物理

- η 、 η' 和Higgs是已知仅有的3种全零量子数粒子
 - $Q = I = J = S = B = L = 0$
- $\Rightarrow$ 标准模型衰变被压低
- $\Rightarrow$ 新物理的分支比更大
- η / η' 衰变可以用来寻找多种连接暗物质世界的门户(portal)粒子，以及检验基本对称性



P: 1957

CP: 1980

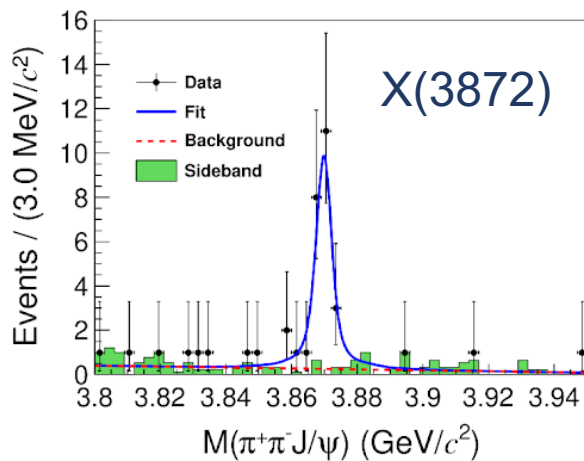


寻找新的CP不对称性

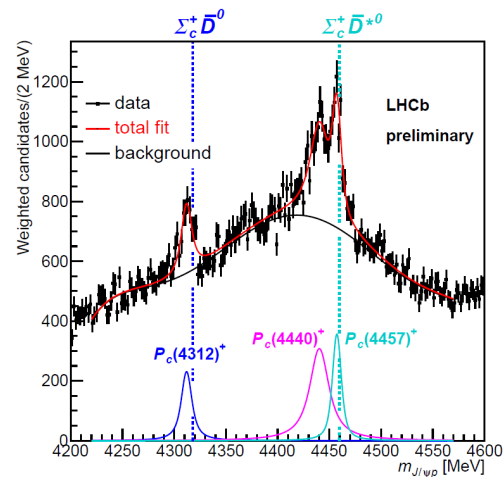
$$\eta \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$$

- 基本对称性是物理学中的重要问题

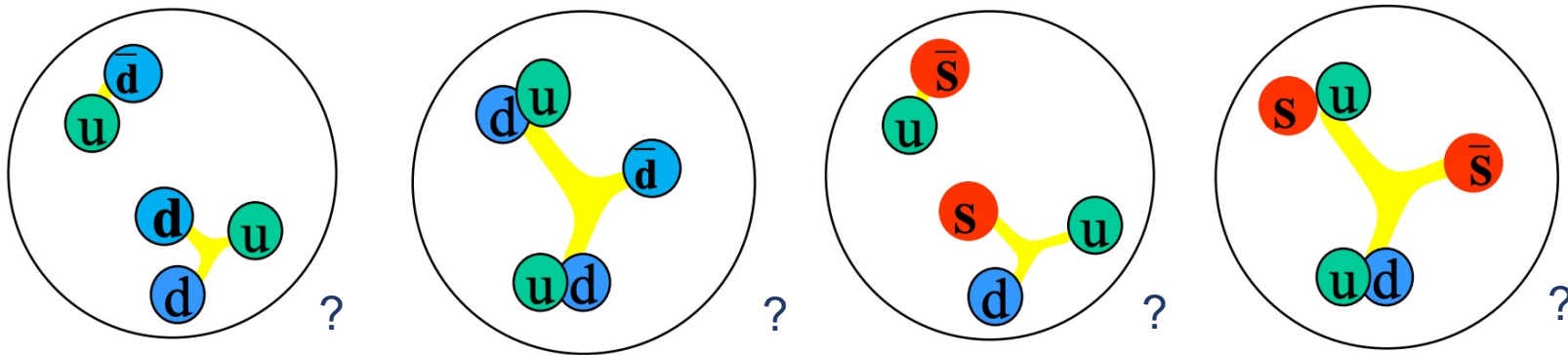
轻强子物理



四夸克态

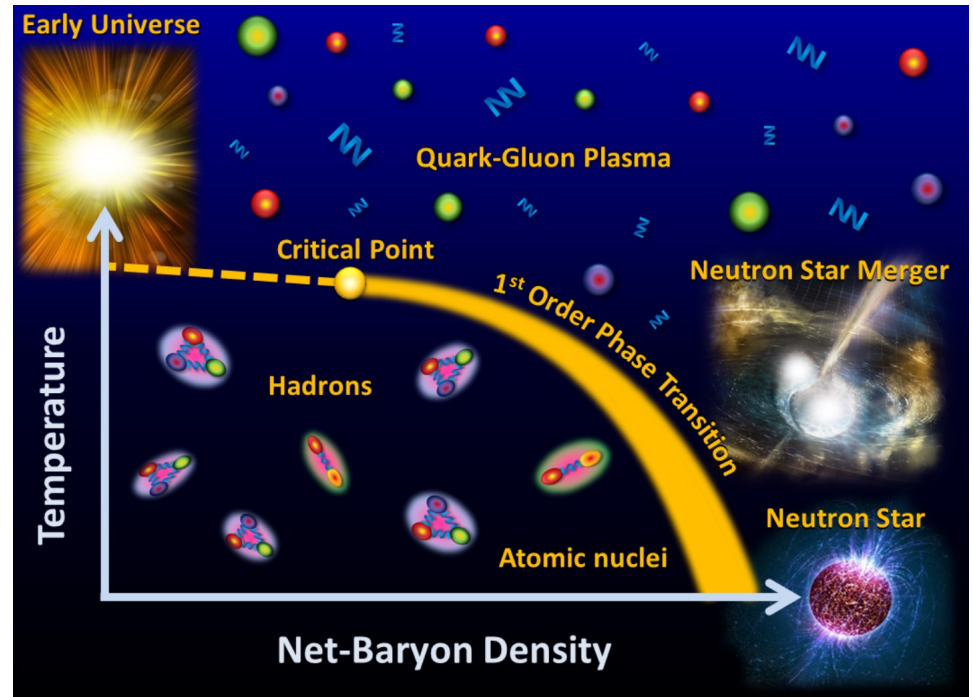
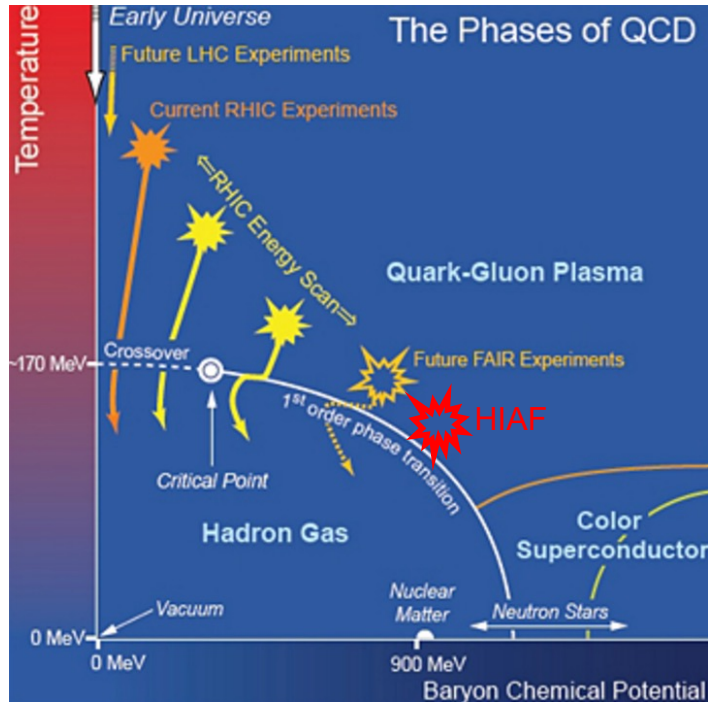


五夸克态



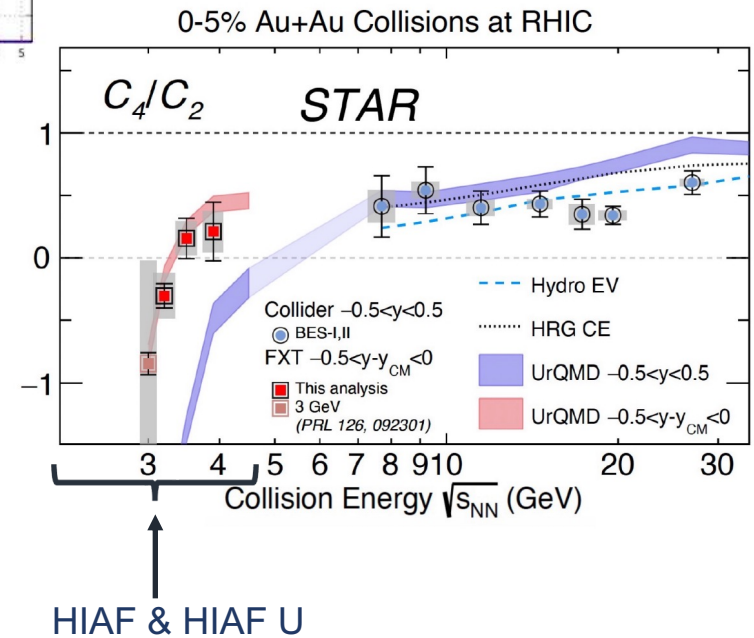
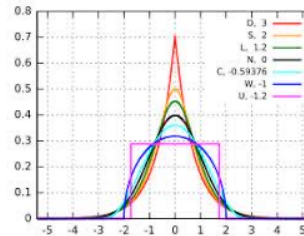
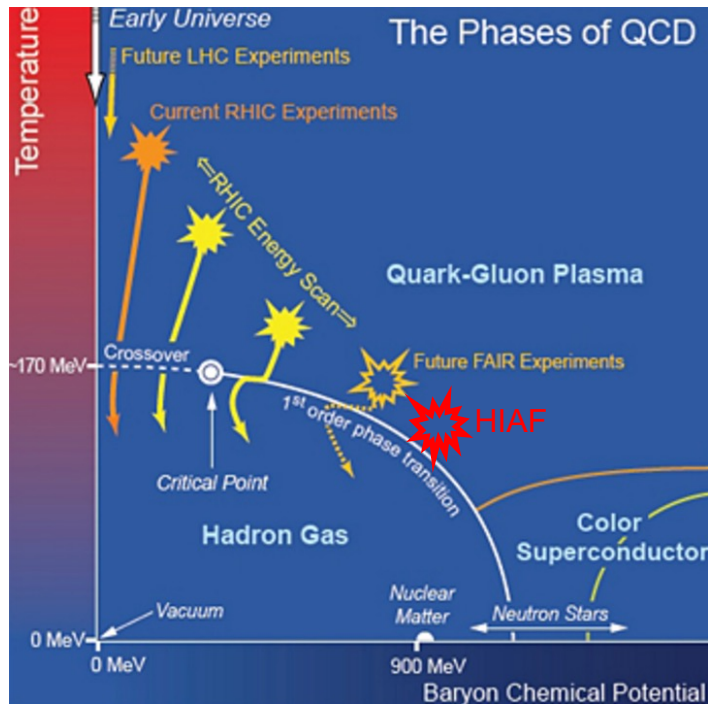
- HIAF也为轻强子物理研究提供了良好的束流条件

核物质相结构



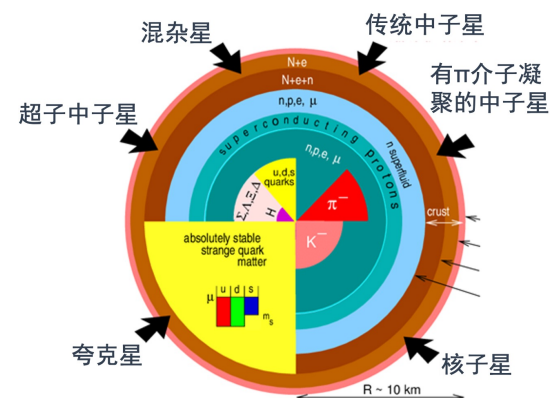
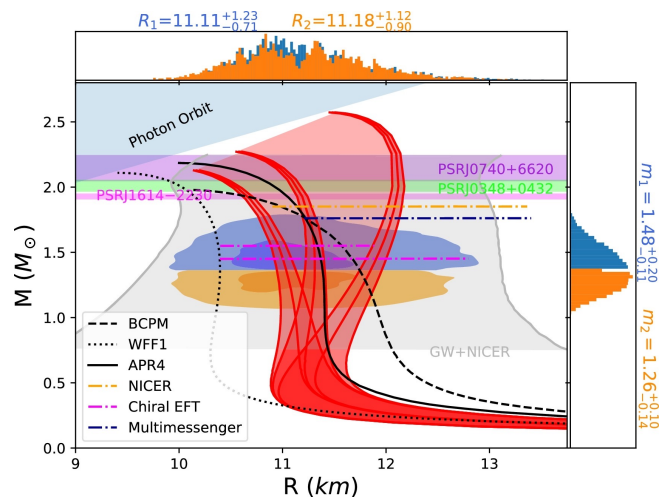
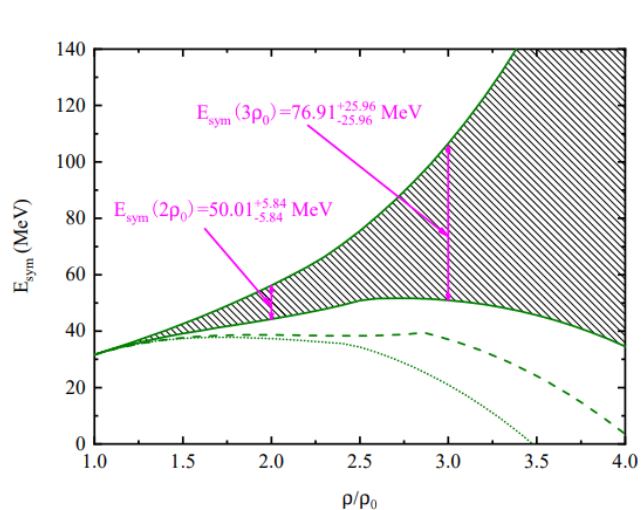
- 通过不同能量的重离子碰撞，能扫描核物质相图上的不同区域
- 寻找理论预言的一级相变和临界点

核物质相结构



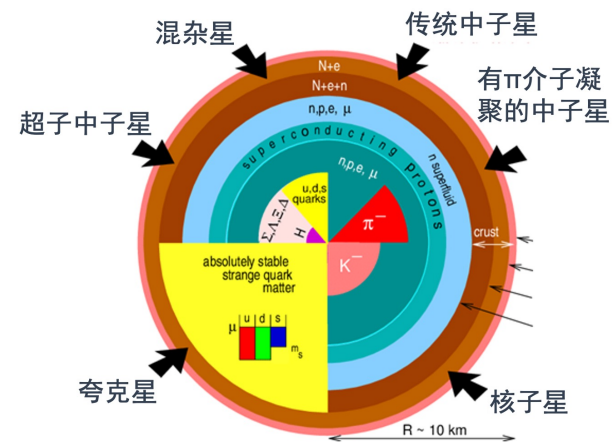
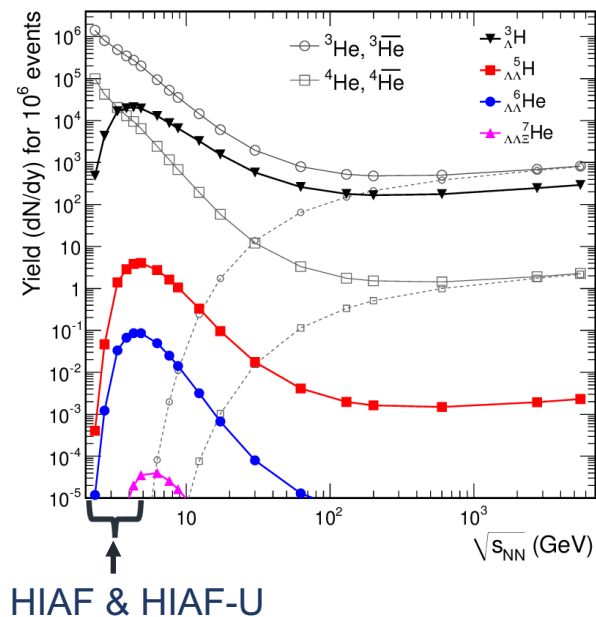
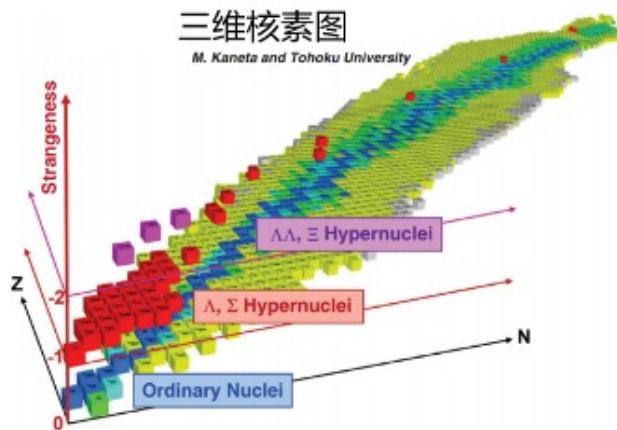
- 通过不同能量的重离子碰撞，能扫描核物质相图上的不同区域
- 寻找理论预言的一级相变和临界点

核物质状态方程



- 高密核物质状态方程
- $\Rightarrow$ 中子星结构和性质

超核

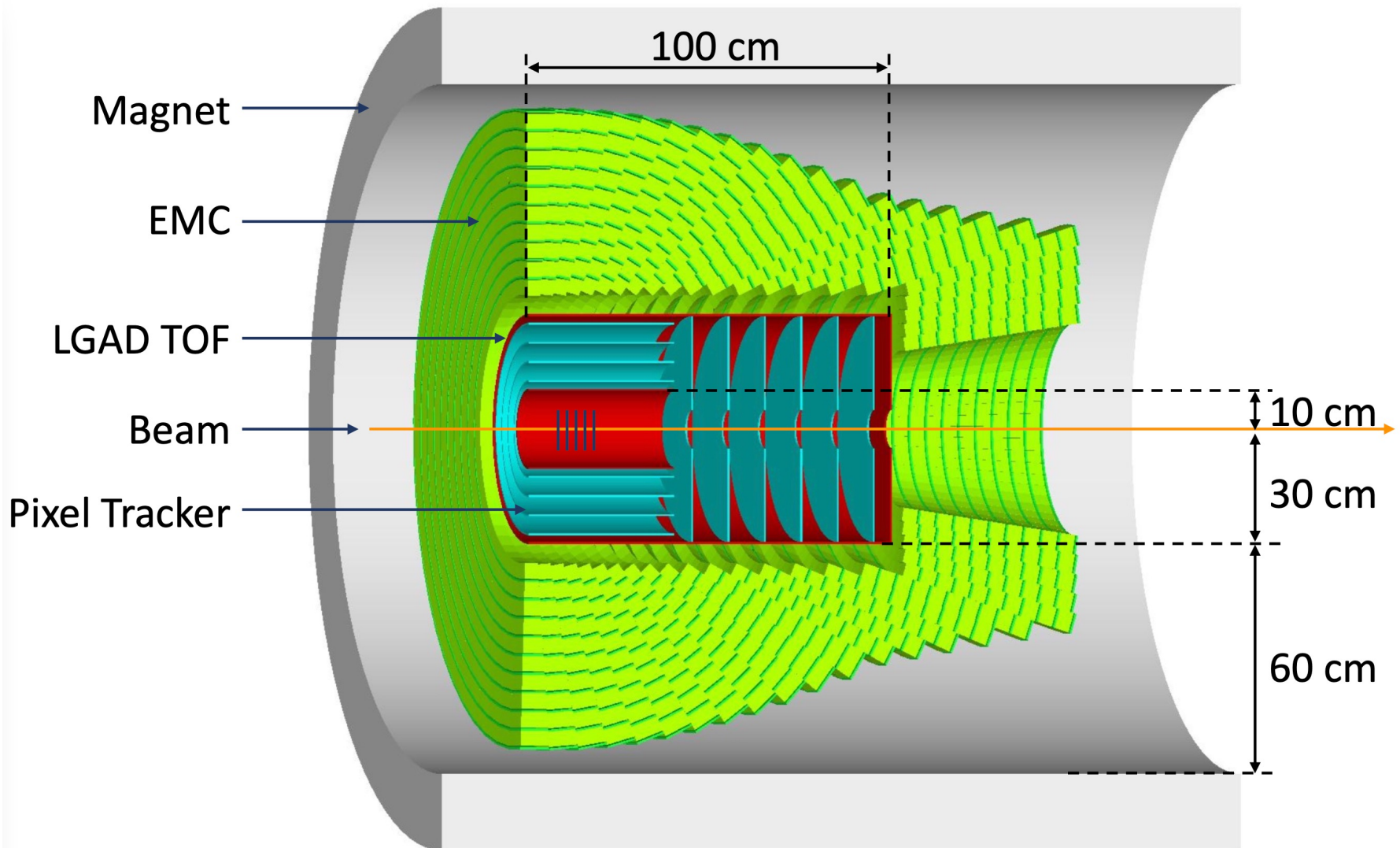


- 超核性质、（多奇异）超核的发现
- $\Rightarrow$ 超子-核子、超子-超子相互作用
- $\Rightarrow$ 中子星结构和性质

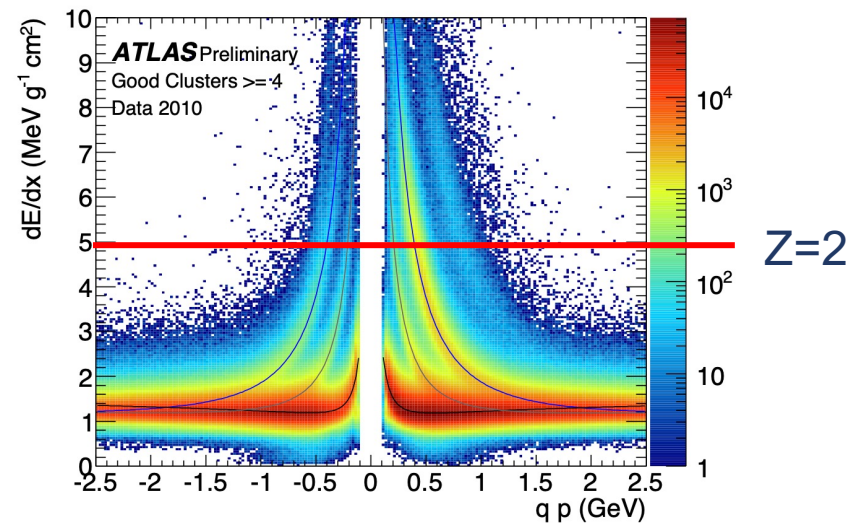
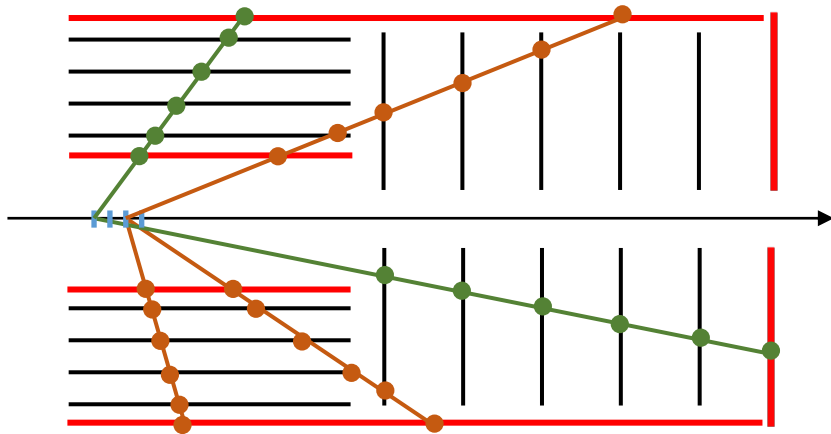
目录

- HIAF高能终端可能研究的物理
- 谱仪概念设计
- 各探测器
- 预期性能
- 部分模拟结果
- 造价估计
- 国际竞争
- 合作组

惠州强子谱仪(HHaS)概念设计



5维硅像素径迹探测器

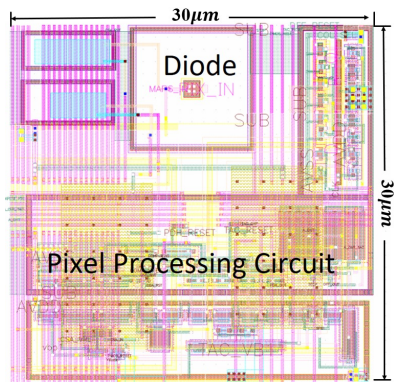


- 5维径迹探测：3维位置 + 时间 + 能量损失
 - 时间用于区分不同碰撞事例： $\Delta t \sim 10\text{ns}$ (1/100MHz)
 - $\Rightarrow$ 寻找稀有事例（如超出标准模型）、高精度测量所必需
 - 能量损失(dE/dx)用于区分不同轻核电荷 Z (d, ^4He , ^6Li ...)
 - $\Rightarrow$ 超核等测量所必需
- 像素尺寸 $\sim < 100\mu\text{m} \Rightarrow \Delta x \sim < 30\mu\text{m}$
- $X/X_0 \sim 0.3\%$
- 单pixel死时间 $\sim 10\mu\text{s} \Rightarrow$ 控制高事例率时的占有度

5维硅像素径迹探测器

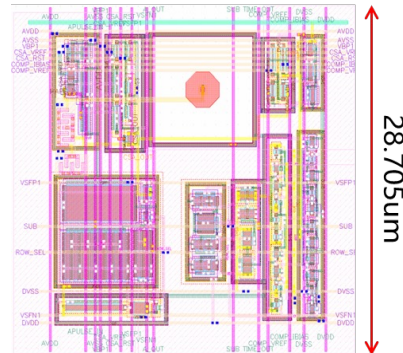
Nupix-H1

完成



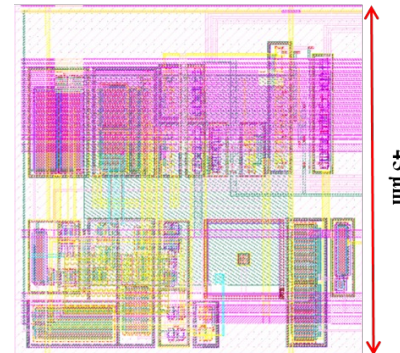
Nupix-H2

完成



Nupix-H3

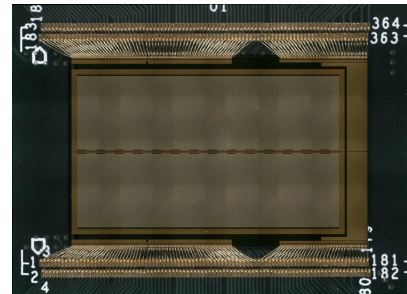
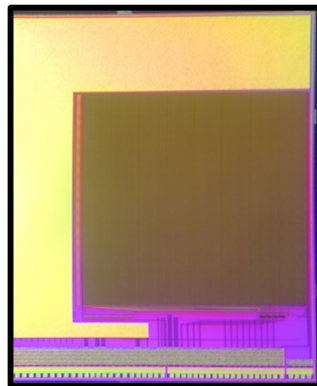
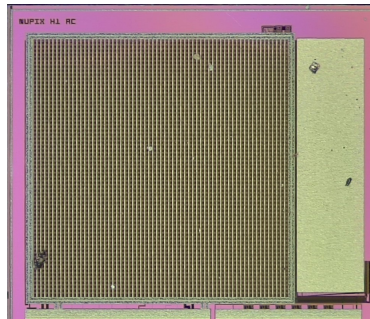
测试中



Nupix-H4

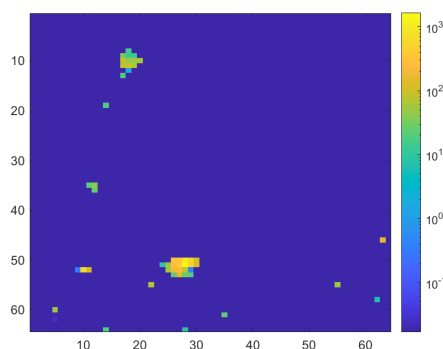
设计中

全面瞄准
HHaS需求

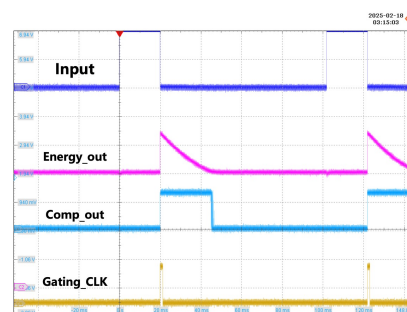
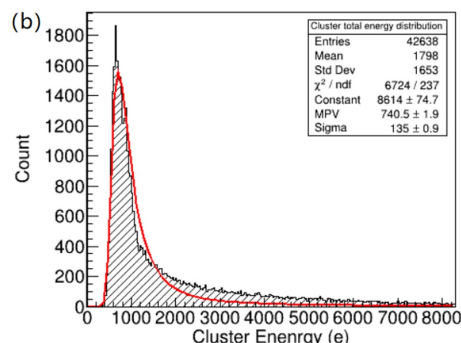


- 已完成3代Nupix-H芯片设计、流片
- 逐步接近HHaS需求指标

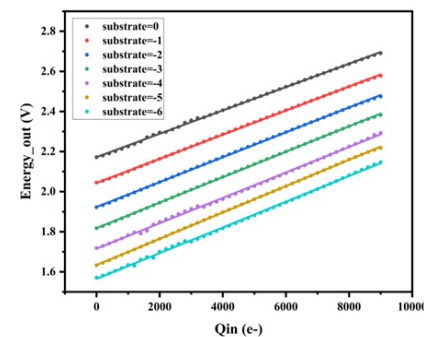
5维硅像素径迹探测器



Nupix-H1测试⁹⁰Sr β团簇及其能谱

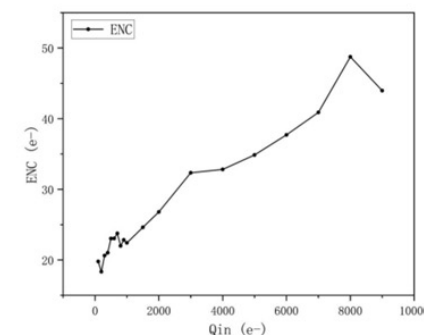


Nupix-H2-test芯片功能
电子学测试波形



Nupix-H2-test能量
测量范围测试结果

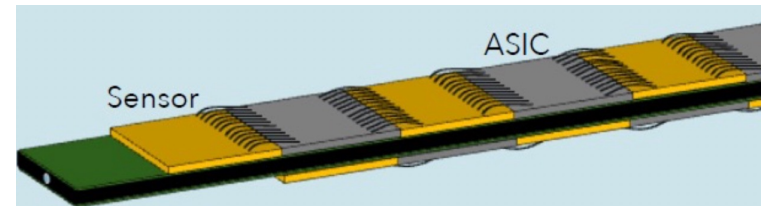
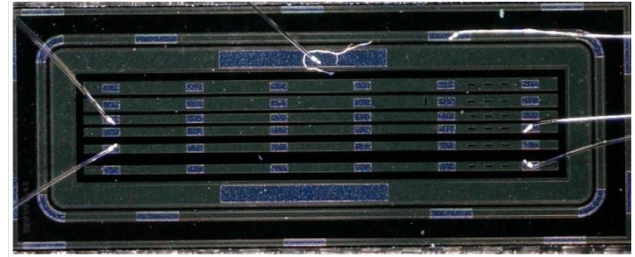
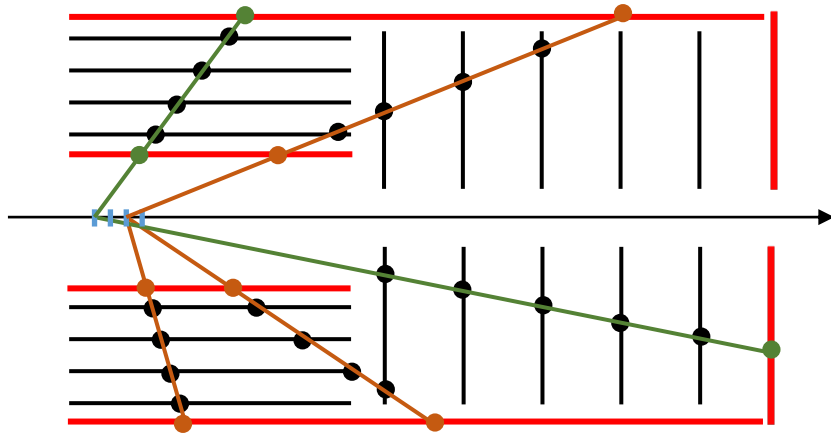
参数	HHaS需求	Nupix-H2-test测试结果	状态
像素尺寸	~100 um	28.705 um	达标
能量测量范围	≥ 16 MIPs (~ 12 ke ⁻)	9 ke ⁻	接近指标
能量测量噪声	≤ 1/5 MIPs (~ 150 e ⁻)	≤ 48.75 e ⁻	达标
时间测量精度	≤ 10 ns	25.88 ns	达到指标同量级
功耗	≤ 200 mW/cm ²	\	暂未要求
死时间	≤ 10 μs	\	暂未要求



Nupix-H2-test能量
测量噪声测试结果

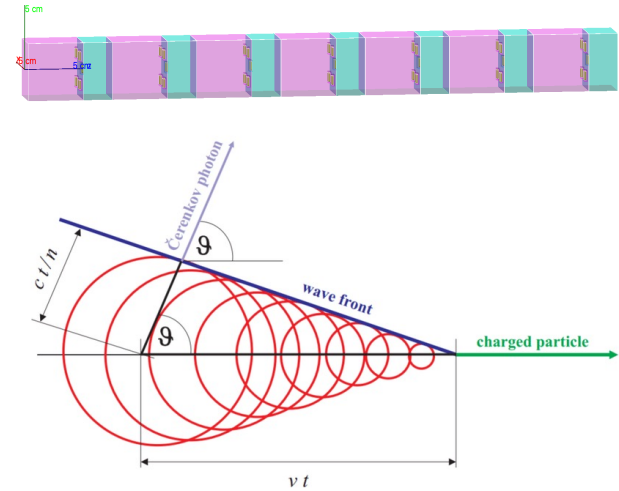
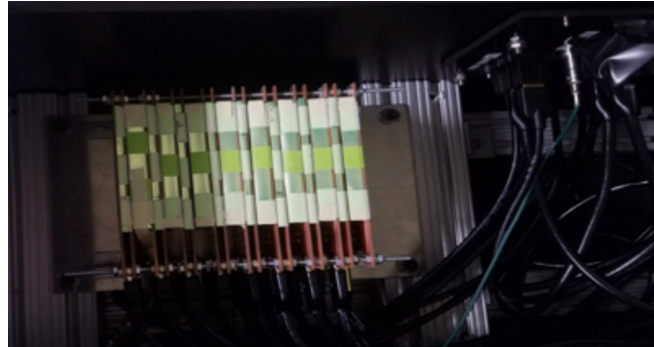
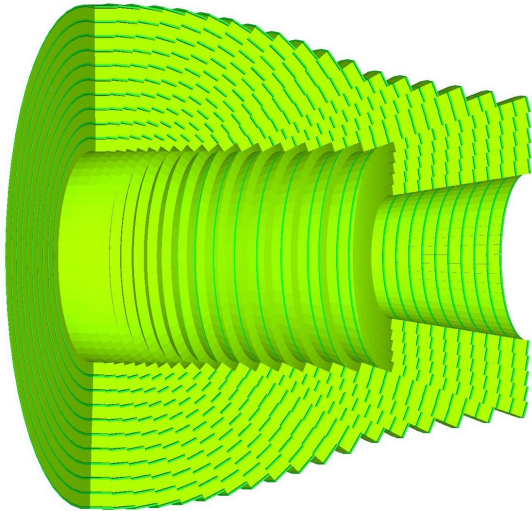
- 基于国内工艺，首次实现了MAPS芯片每个像素时间、能量损失读出
- 逐步接近HHaS需求指标

LGAD飞行时间探测器



- 最内层测量起始时间，外层、端盖测量到达时间
- 带电粒子鉴别 + 进一步区分不同事例的径迹
- $\Delta t \sim 30\text{ps}$
- 拟采用条状电极AC LGAD
 - $\Delta x_{r\phi} \sim 10\mu\text{m} \Rightarrow$ 同时用于径迹拟合
 - 片内无死区
- $X/X_0 \sim < 3\%$

双读出电磁量能器



- REDTOP实验组研发的ADRIANO2式电磁量能器
- 铅玻璃+闪烁体双读出 $\Rightarrow$ 很好的 e^+ vs. π^+ 、 γ vs. n 鉴别能力
 - 铅玻璃：切伦科夫光，仅对电磁簇射敏感
 - 闪烁体：对电磁和强子簇射同时敏感
- $\Delta E/E \sim 3\% @ 1\text{GeV}$
- $\Delta t \sim 200 \text{ ps}$ ，用于区分不同事例的信号
- 成型时间（模块死时间） $\sim \mu\text{s}$ ，控制高事例率时的占有度

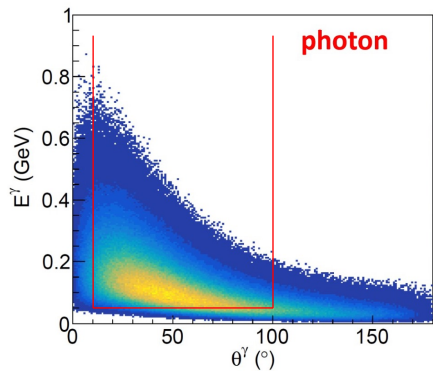
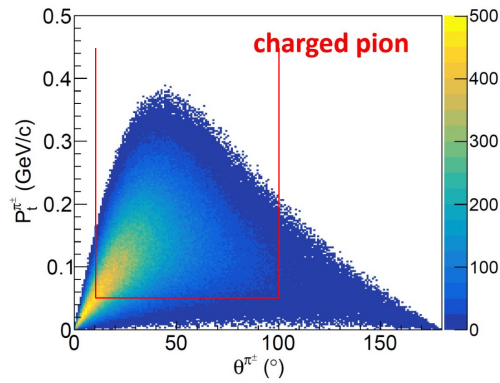
目录

- HIAF高能终端可能研究的物理
- 谱仪概念设计
- 各探测器
- 预期性能
- 部分模拟结果
- 造价估计
- 国际竞争
- 合作组

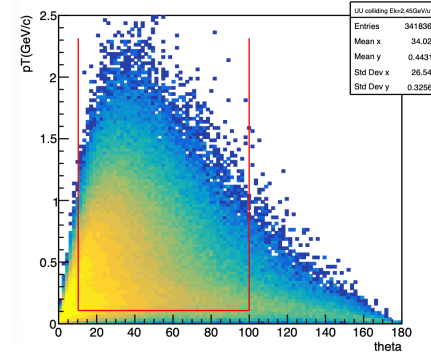
性能预期

charged particles

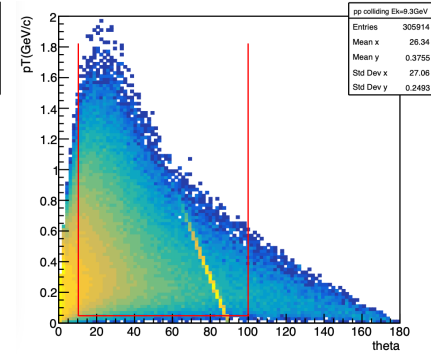
$$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 (\gamma\gamma)$$



2.45GeV/u U+U



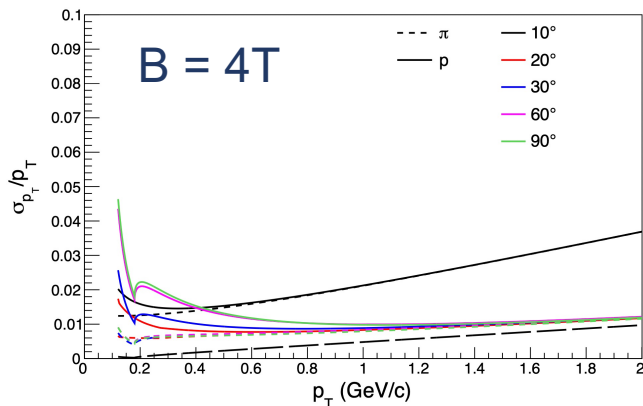
9.3GeV p+p



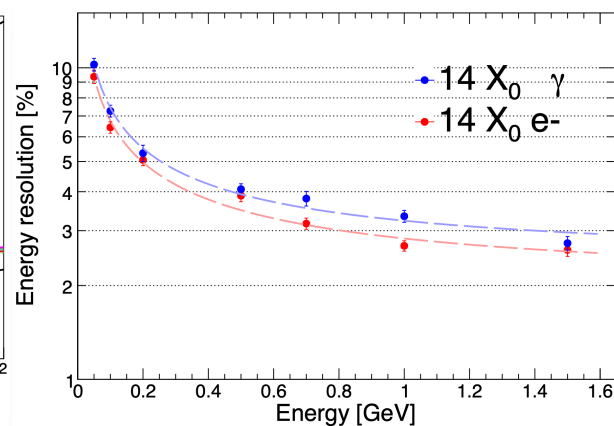
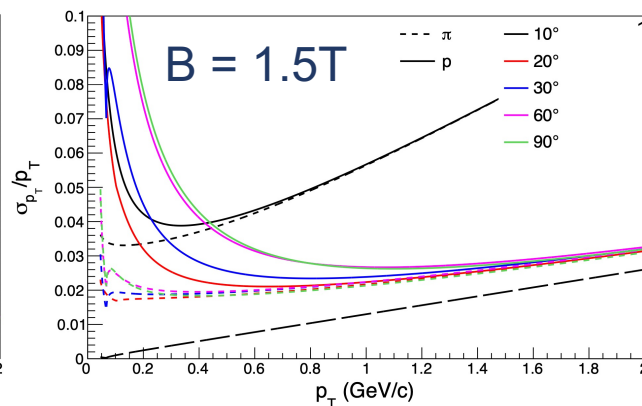
方位角、能动量覆盖

事例率	~100 MHz (p束流), ~1 MHz (重离子束流)
方位角覆盖	θ : $10^\circ \sim 100^\circ$; ϕ : $0 \sim 2\pi$
带电粒子动量测量范围	$p_T > 50 \text{ MeV}$ (0.8 T磁场)
γ 能量测量范围	$E > 50 \text{ MeV}$
典型动量分辨	~1% (4 T磁场); ~3% (1.5 T磁场)
EM能量分辨	~3% @ 1GeV
典型径迹位置分辨	~500 μm (碰撞顶点附近)
鉴别粒子	$e^\pm$, γ , $\pi^\pm$, $K^\pm$, p , d , t , ^3He , ^4He

性能预期



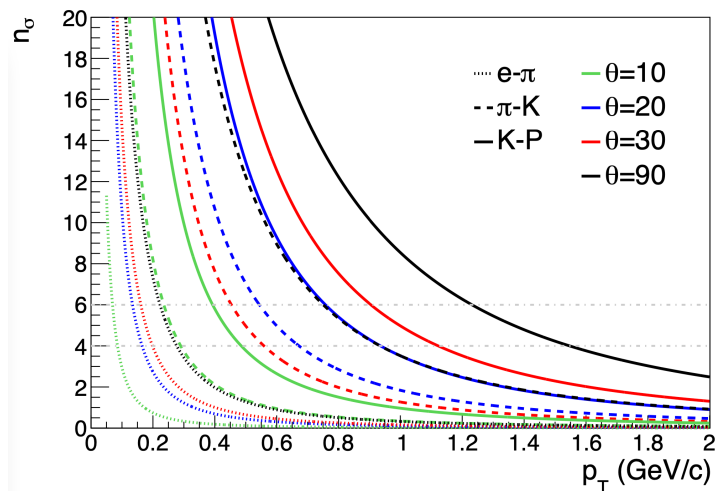
动量分辨



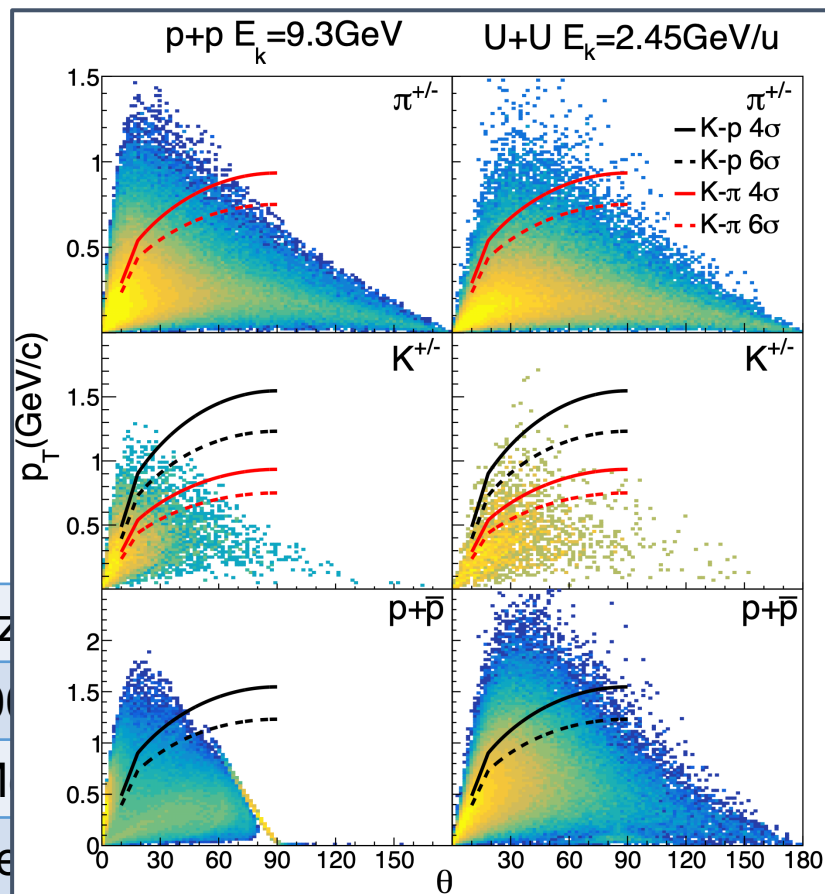
EM能量分辨

事例率	~100 MHz (p束流), ~1 MHz (重离子束流)
方位角覆盖	θ : $10^\circ \sim 100^\circ$; ϕ : $0 \sim 2\pi$
带电粒子动量测量范围	$p_T > 50\text{ MeV}$ (0.8 T磁场)
γ 能量测量范围	$E > 50\text{ MeV}$
典型动量分辨	~1% (4 T磁场); ~3% (1.5 T磁场)
EM能量分辨	~3% @ 1GeV
典型径迹位置分辨	~500 μm (碰撞顶点附近)
鉴别粒子	$e^\pm$, γ , $\pi^\pm$, $K^\pm$, p , d , t , ^3He , ^4He

性能预期

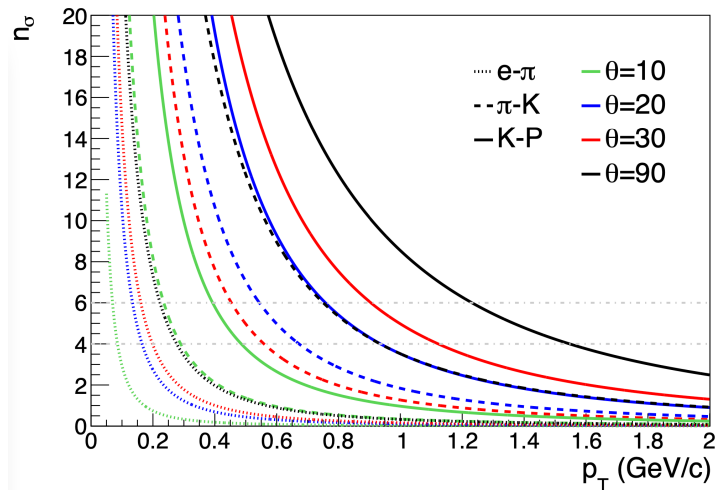


TOF粒子鉴别能力

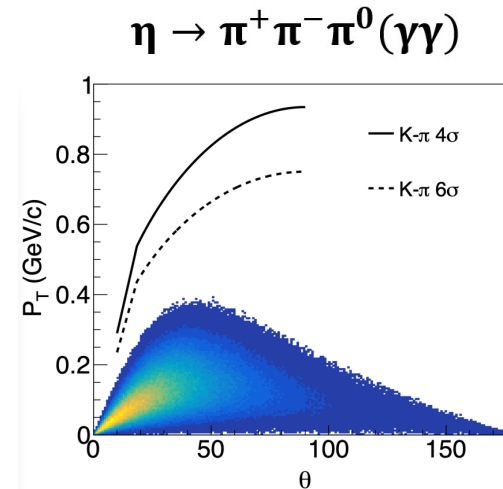


事例率	~100 MHz
方位角覆盖	θ : $10^\circ \sim 100^\circ$
带电粒子动量测量范围	$p_T > 50 \text{ MeV/c}$
γ 能量测量范围	$E > 50 \text{ MeV}$
典型动量分辨	~1% (4 T磁场); ~3% (1.5 T磁场)
EM能量分辨	~3% @ 1GeV
典型径迹位置分辨	~500 μm (碰撞顶点附近)
鉴别粒子	$e^\pm$, γ , $\pi^\pm$, $K^\pm$, p , d , t , ^3He , ^4He

性能预期



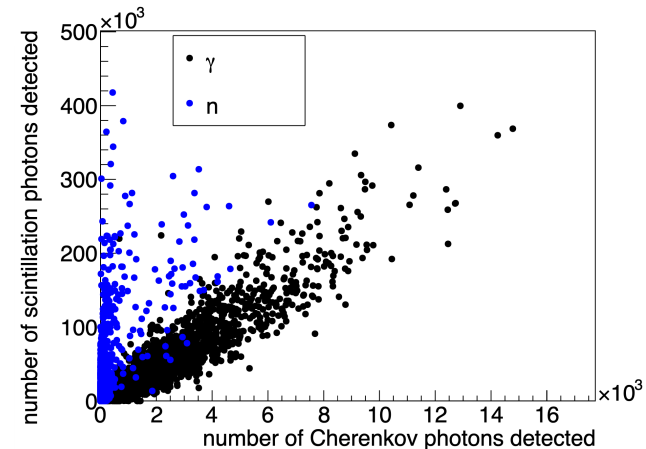
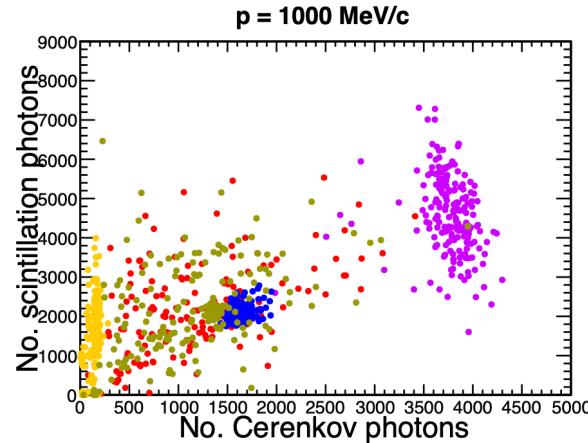
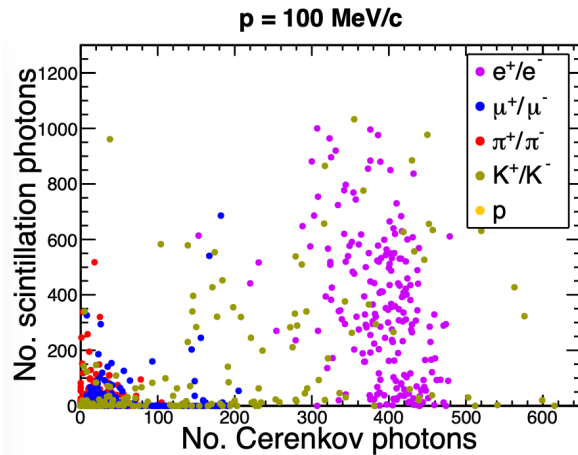
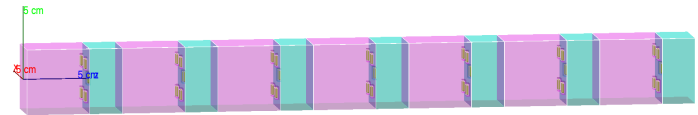
TOF粒子鉴别能力



事例率	~100 MHz (p束流), ~1 MHz (重离子束流)
方位角覆盖	θ : 10°~100°; ϕ : 0~2 π
带电粒子动量测量范围	$p_T > 50$ MeV (0.8 T磁场)
γ 能量测量范围	$E > 50$ MeV
典型动量分辨	~1% (4 T磁场); ~3% (1.5 T磁场)
EM能量分辨	~3% @ 1GeV
典型径迹位置分辨	~500 μ m (碰撞顶点附近)
鉴别粒子	e^+ , γ , π^+ , K^+ , p , d , t , ^3He , ^4He

性能预期

双读出量能器EM vs. 强子簇射鉴别



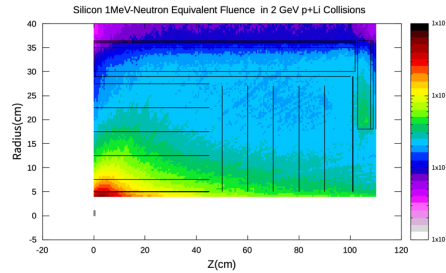
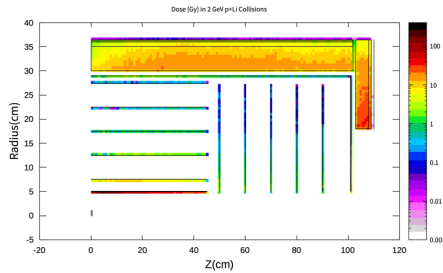
事例率	$\sim 100 \text{ MHz}$ (p束流), $\sim 1 \text{ MHz}$ (重离子束流)
方位角覆盖	$\theta: 10^\circ \sim 100^\circ$; $\varphi: 0 \sim 2\pi$
带电粒子动量测量范围	$p_T > 50 \text{ MeV}$ (0.8 T磁场)
γ 能量测量范围	$E > 50 \text{ MeV}$
典型动量分辨	$\sim 1\%$ (4 T磁场); $\sim 3\%$ (1.5 T磁场)
EM能量分辨	$\sim 3\%$ @ 1GeV
典型径迹位置分辨	$\sim 500 \mu\text{m}$ (碰撞顶点附近)
鉴别粒子	e^+ , γ , π^+ , K^+ , p, d, t, ^3He , ^4He

目录

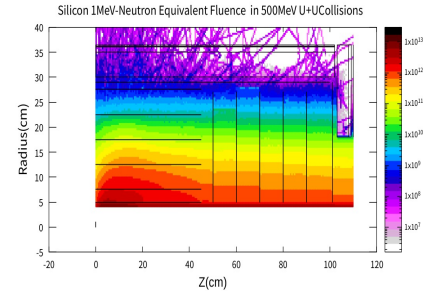
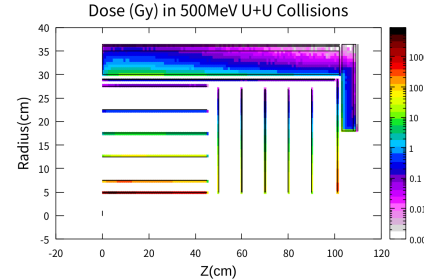
- HIAF高能终端可能研究的物理
- 谱仪概念设计
- 各探测器
- 预期性能
- 部分模拟结果
- 造价估计
- 国际竞争
- 合作组

辐射剂量模拟

2 GeV p+Li, 100MHz, 1个月



500 MeV U+U, 1MHz, 1个月

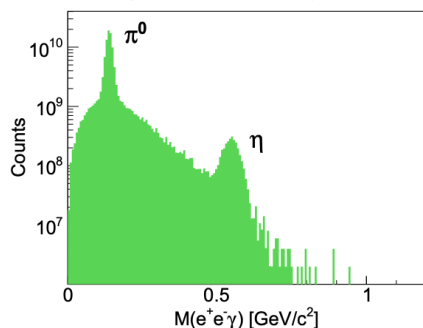


	FLUKA模拟结果		参考抗辐照性能		
	辐射剂量 (Gy)	Si1MeV等效中子通量(n_{eq}/cm^2)	探测器/材料	辐射剂量 (Gy)	Si1MeV等效中子通量 (n_{eq}/cm^2)
最内层硅	3000	3×10^{12}	pixel	2×10^4	1.7×10^{13}
			LGAD		1×10^{15}
最内层EMC	50	3×10^{11}	铅玻璃	20	
			SiPM		1×10^{14}

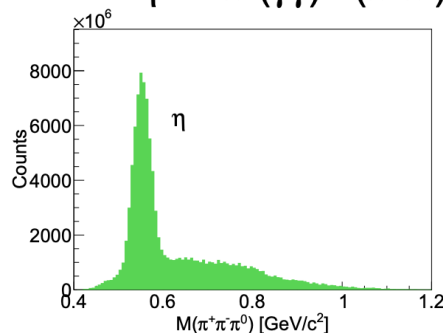
- 大部分探测器部件、材料可以满足抗辐照要求
- 铅玻璃收到的辐射剂量接近其极限, 需要选择测试

η介子物理模拟

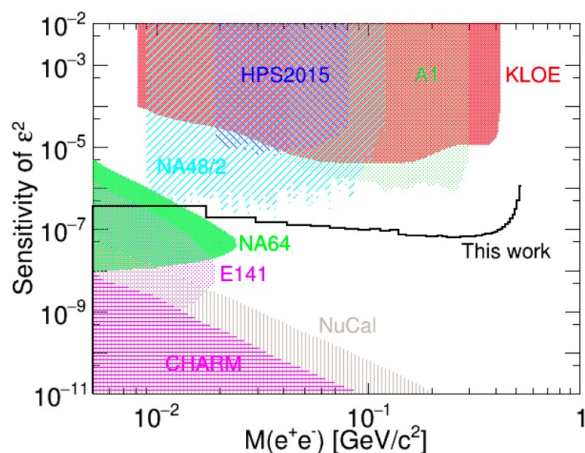
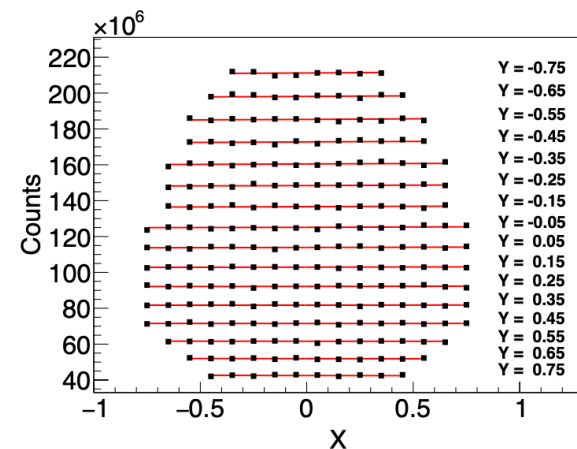
$$\eta \rightarrow e^+e^-\gamma$$



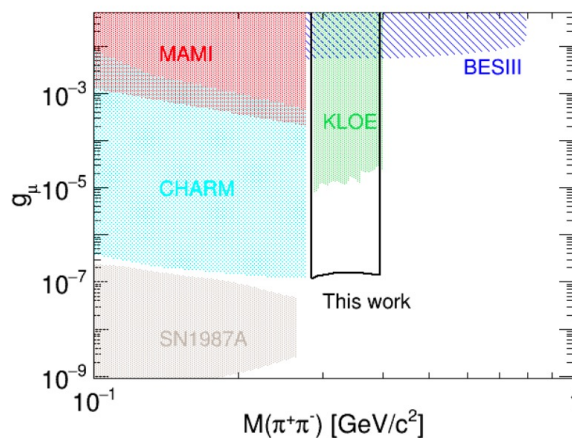
$$\eta \rightarrow \pi^0(\gamma\gamma) h(\pi^+\pi^-)$$



$$\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$$



寻找暗光子



寻找暗Higgs

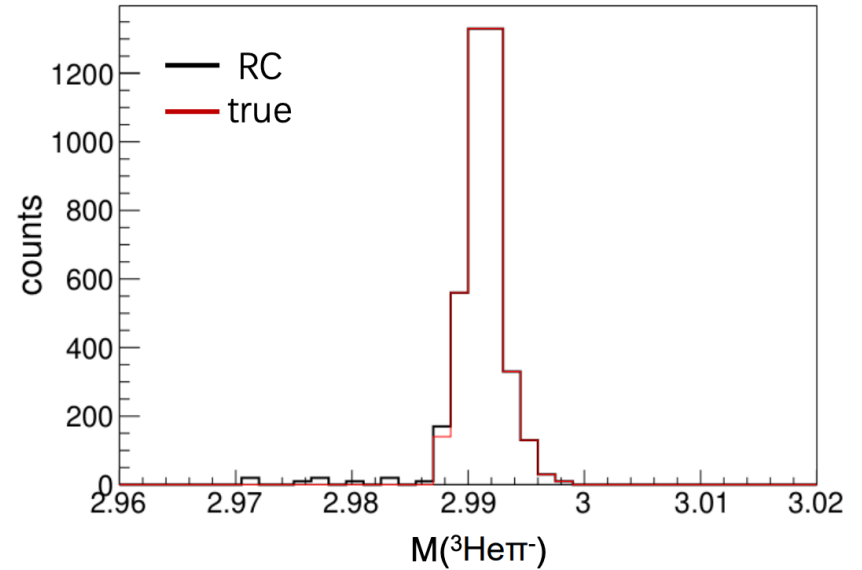
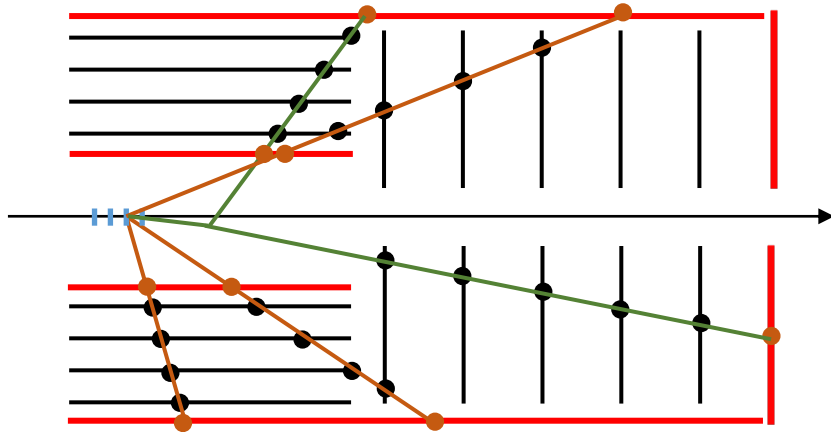
- $\Delta c \sim 5 \times 10^{-5}$
- 比COSY和KLOE-II现有结果精确~2个量级

CP对称性检验

Nuclear Science and Techniques (2025) 36:137

- 1.8 GeV p + ^7Li , 100MHz事例率, 一个月, 平均流强/峰值流强 = 30%
- 共产生 6×10^{11} 个η ~当前世界所有η数据的1000倍

超核重建模拟



- 几百 μm 的位置分辨能力
⇒ 几乎无本底的超核等弱衰变粒子重建

目录

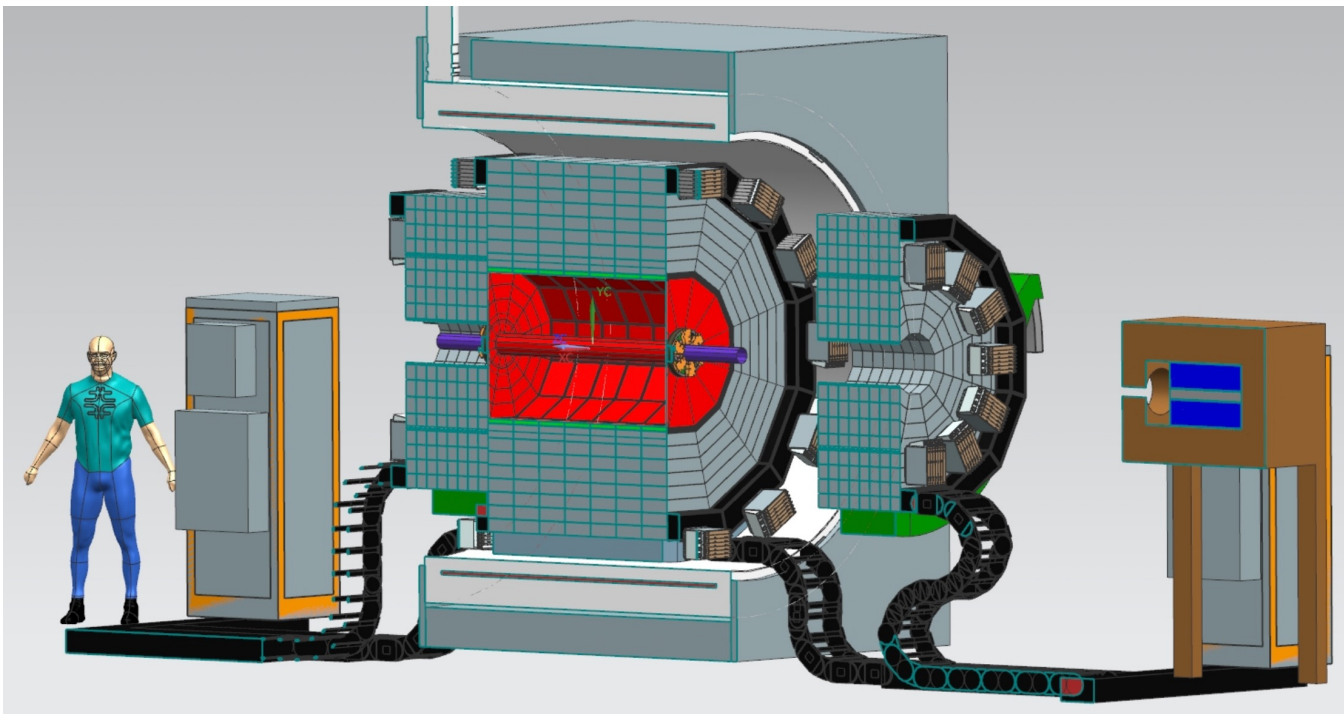
- HIAF高能终端可能研究的物理
- 谱仪概念设计
- 各探测器
- 预期性能
- 部分模拟结果
- 造价估计
- 国际竞争
- 合作组

造价估计

子系统	预算（万元）
靶	50
硅像素径迹探测器	3000
LGAD飞行时间探测器	3300
电磁量能器	2200
螺线管磁铁	2000
技术支持系统	100
数据获取系统	2400
合计	13050

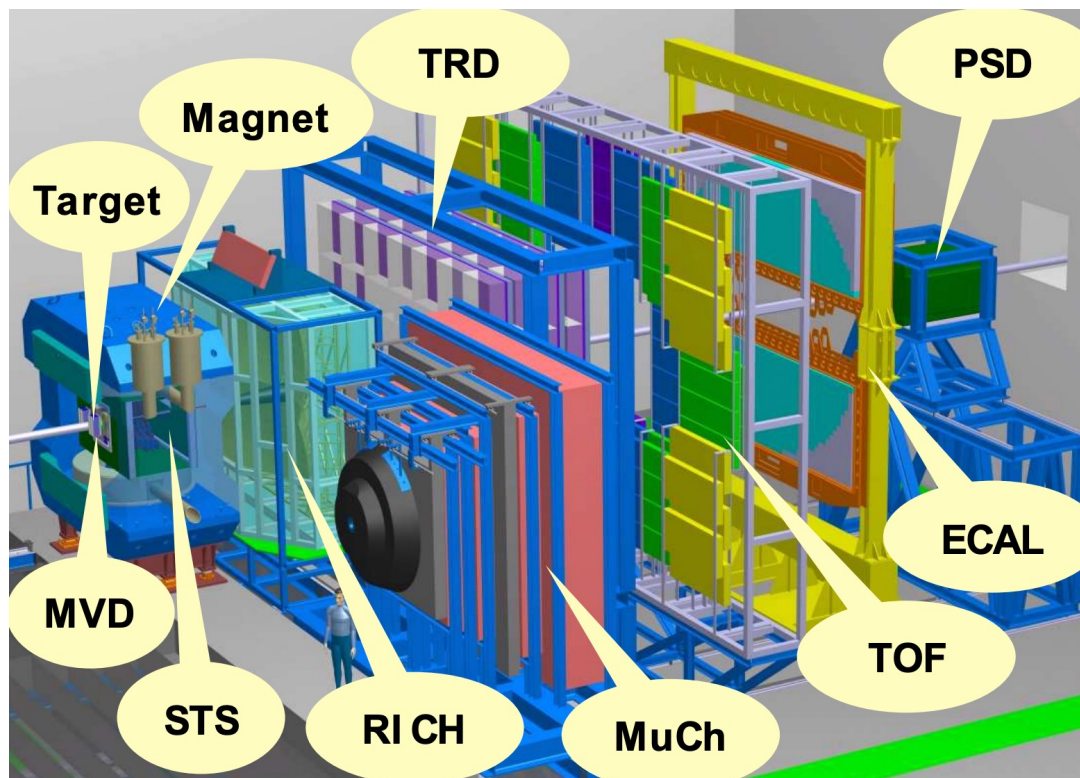
- 总建造预算约1.3亿

国际竞争 - REDTOP



- 82-152 M USD, 5.6 – 10亿元
- 处于争取加速器实验室、经费支持阶段
- 无dE/dx测量, 无法满足相结构、超核研究需求
- 电磁+强子量能器

国际竞争 - CBM



- 55M欧元，4亿元
- 计划2028年建成
- 事例率 $<10\text{MHz}$ ，无更高的质子打靶事例率
- 低能区方位角覆盖不足

合作组

第一届HIAF高能终端谱仪合作组会议

Nov 16 – 18, 2024
Asia/Shanghai timezone

Enter your search term



Overview

Timetable

Participant List

70 participants



- 欢迎加入

仇浩 – 中科院近代物理所

小结

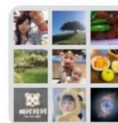
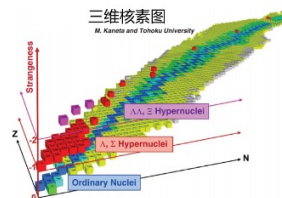
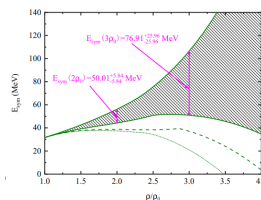
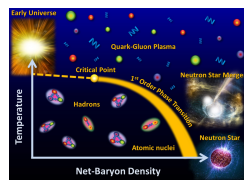
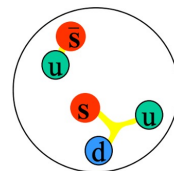
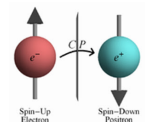
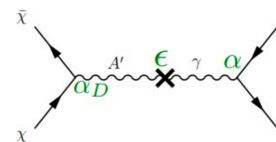
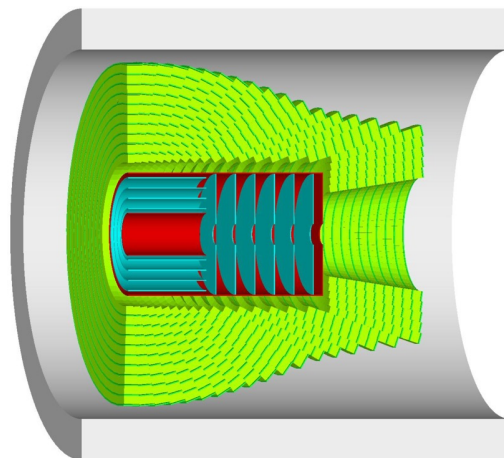
- 惠州强子谱仪(HHaS)

- 先进的探测器技术

- 5维硅像素径迹探测器
- LGAD飞行时间探测器
- 切伦科夫-闪烁光双读出电磁量能器

- 优异的性能

- 极高事例率: $\sim 100\text{MHz}$ (质子束流)
- 大接受度
- 全面的粒子鉴别: e^+ , γ , π^+ , K^+ , p , d , t , ^3He , ^4He
- 紧凑尺寸 $\Rightarrow$ 造价可控 ~ 1.3 亿
- 具有与CBM+REDTOP相当的性能和潜力
- 可以研究广泛的物理



群聊: 惠州强子谱仪HHaS



谢谢 欢迎加入 😊

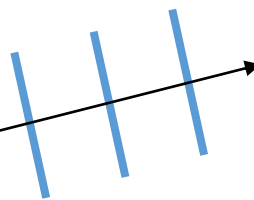
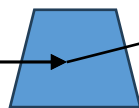
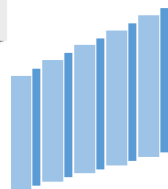
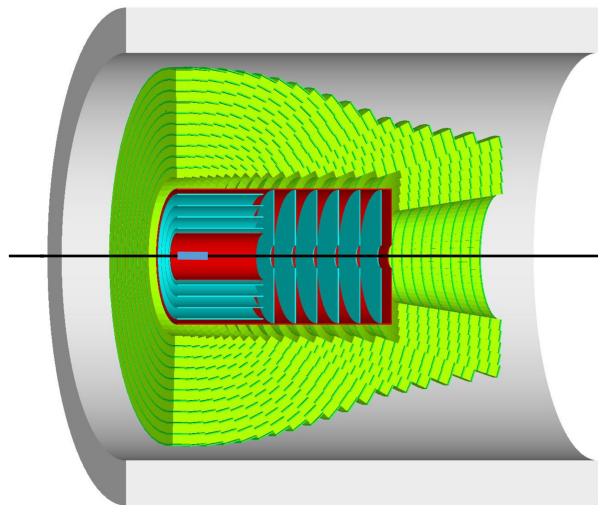
未来的未来

极化束流、靶？

- 自旋物理

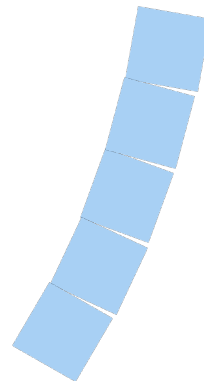
缪子探测器：塑料 + MRPC？

- η 介子物理增加 > 2 倍衰变道



类弹粒子探测器？

- 类弹超核
- 短程关联



π & K 介子束流？

- η 介子物理研究更干净
- 轻强子 & 超核

中子墙：液闪？

- 轻强子物理
- 短程关联

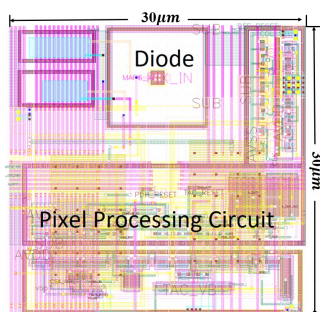
- 欢迎新想法+贡献

Back-up

5维硅像素径迹探测器

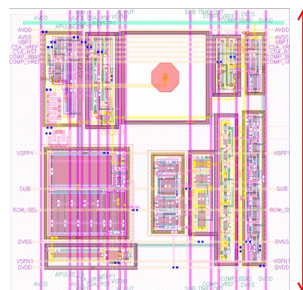
Nupix-H1

完成



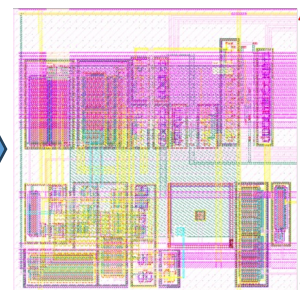
Nupix-H2

完成



Nupix-H3

流片中



Nupix-H4

设计中

全面瞄准
HHaS需求

设计指标:

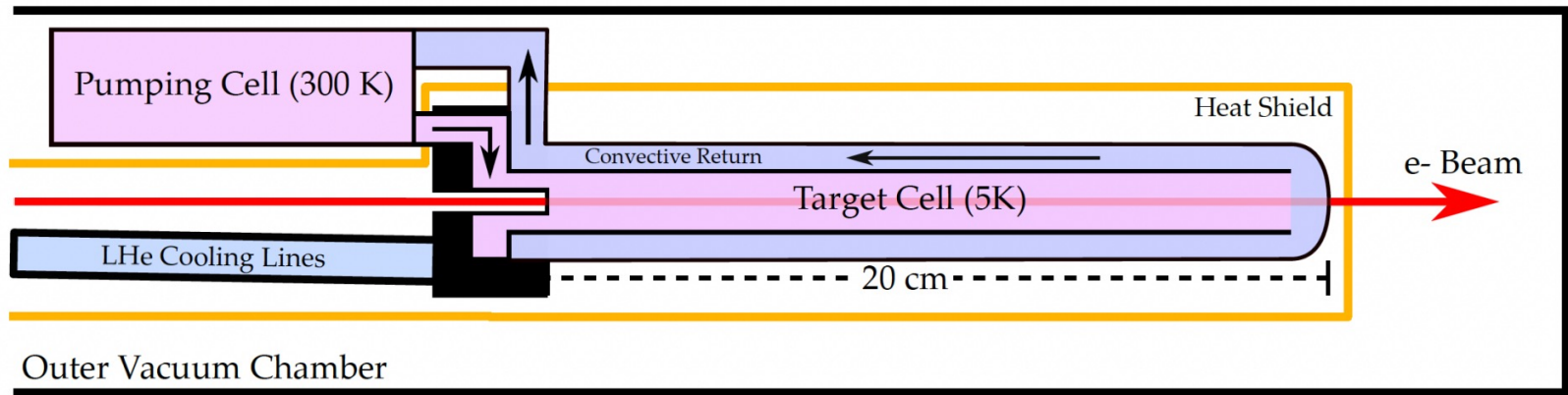
像素尺寸	30 μm	30 μm	45 μm	$\sim 100 \mu\text{m}$
能量测量范围	6 MIPs ($\sim 5 \text{ ke}^-$)	12 MIPs ($\sim 10 \text{ ke}^-$)	16 MIPs ($\sim 15 \text{ ke}^-$)	16 MIPs ($\sim 15 \text{ ke}^-$)
能量测量噪声	$< 1/5$ MIPs (150 e^-)	$< 1/5$ MIPs (150 e^-)	$< 1/5$ MIPs (150 e^-)	$< 1/5$ MIPs (150 e^-)
时间测量精度	百ns级	$\sim 25 \text{ ns}$	$\sim 10 \text{ ns}$	$\sim 10 \text{ ns}$
功耗	-	-	$\leq 600 \text{ mW/cm}^2$	$\sim 200 \text{ mW/cm}^2$
死时间	-	-	102.4 μs	$\sim 10 \mu\text{s}$

- 已完成两代Nupix-H芯片设计、流片、测试，Nupix-H3流片中
- 逐步接近HHaS需求指标

数据带宽需求

- 重离子碰撞
 - 1MHz
 - ~100 track
 - 6 hits / track
 - $1\text{M} \times 100 \times 6 = 600\text{M hits / s}$
- η 介子物理
 - $\sim > 100\text{MHz}$
 - ~4 track
 - 6 hits / track
 - $100\text{M} \times 4 \times 6 = 2400\text{M hits / s}$
- CEE
 - 10kHz
 - ~100 track
 - ~30 hits / track
 - ~20 digi / hit
 - $10\text{k} \times 100 \times 30 \times 20 = 600\text{M digi / s}$
- 新谱仪数据带宽需求与CEE在同一个量级

未来的未来



- ^3He 极化靶概念图

未来的未来

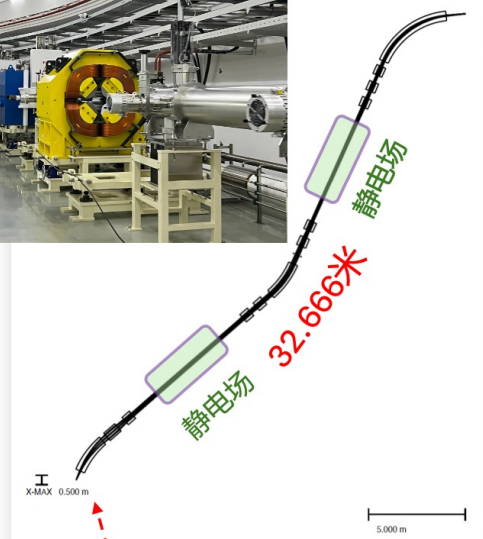
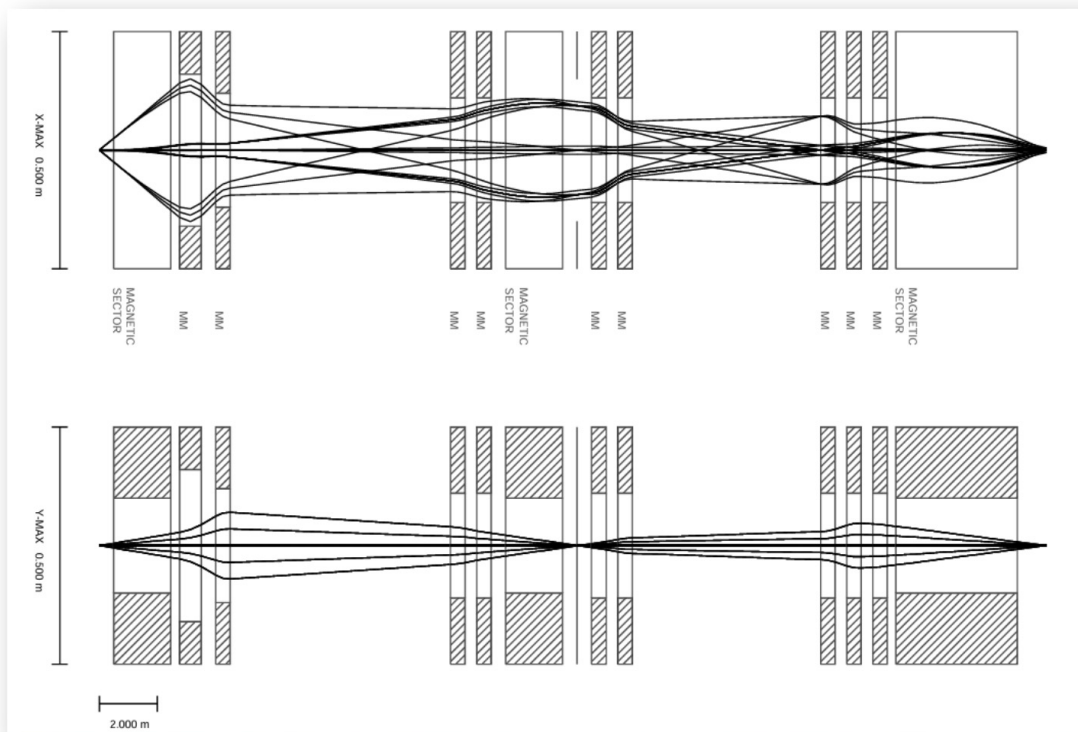
13/30

带电次级束流线设计

➤ 带电粒子束流的分离和甄别

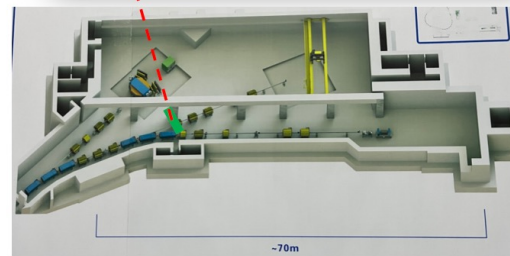
□ **总长32.67米**：3个二级磁铁，9个四级磁铁，2个静电场，若干多极磁铁

□ **预估造价**：磁铁 100 万+电源50万+真空设备+束流诊断系统 ~ 300万+其他？

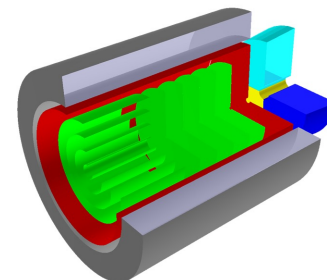
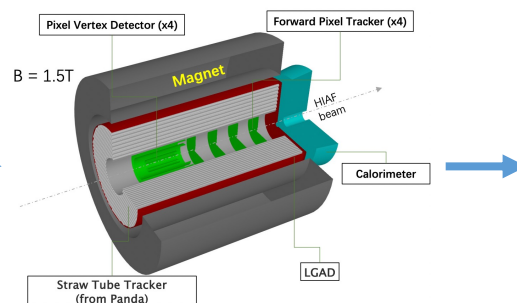
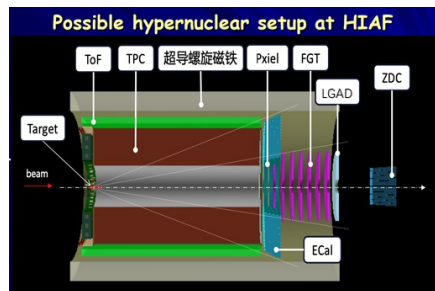


x-z平面

y-z平面

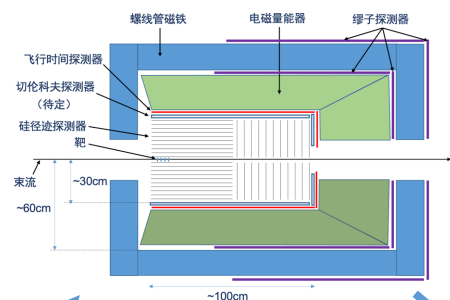


- π & K 介子束流设计模拟
- 叶志鸿、王科、申国栋、冒立军

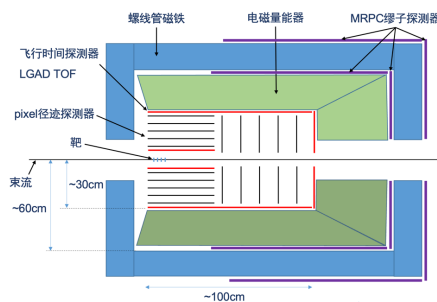


2024.8

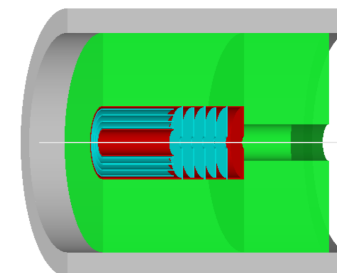
现在



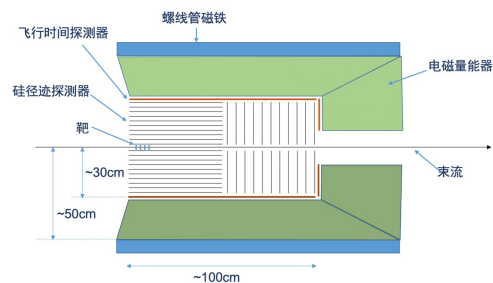
2022.9



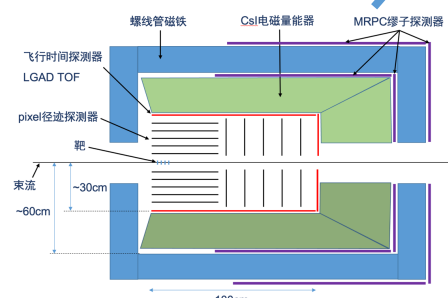
2023.2



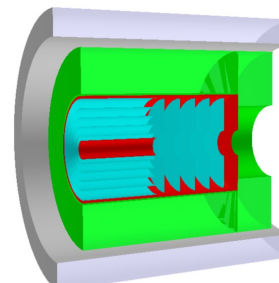
现在



2022.8



2022.12

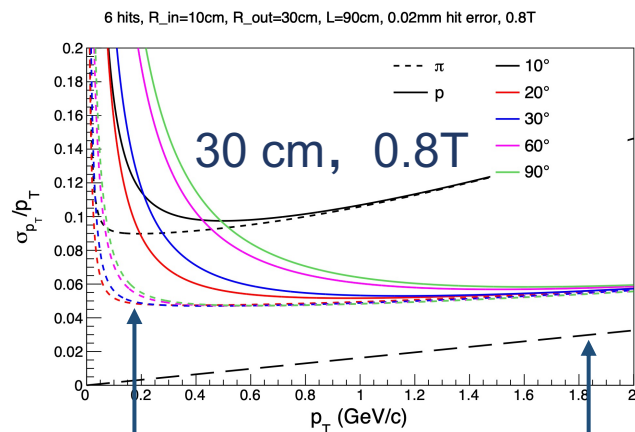


2024.8

径迹探测器+飞行时间探测器尺寸

R ~ 30 cm vs. 50 cm

动量分辨率问题

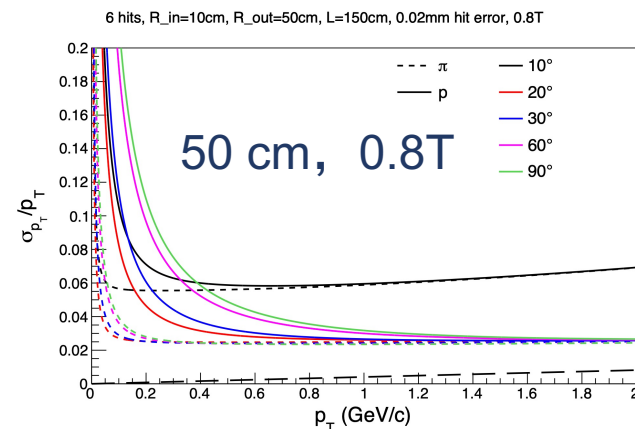
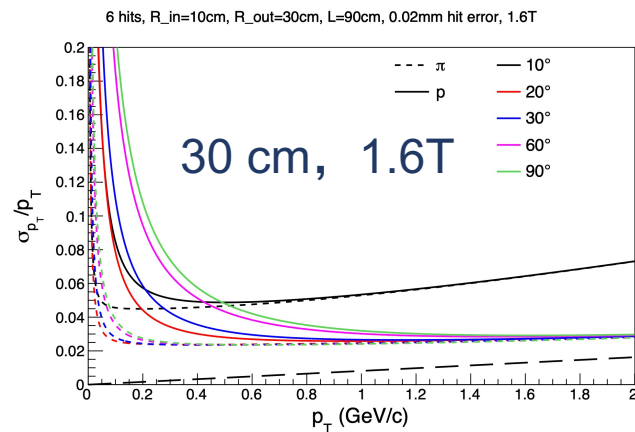


多次库伦散射贡献

$$\propto \sqrt{(X/X_0) / (B L)}$$

hit误差贡献

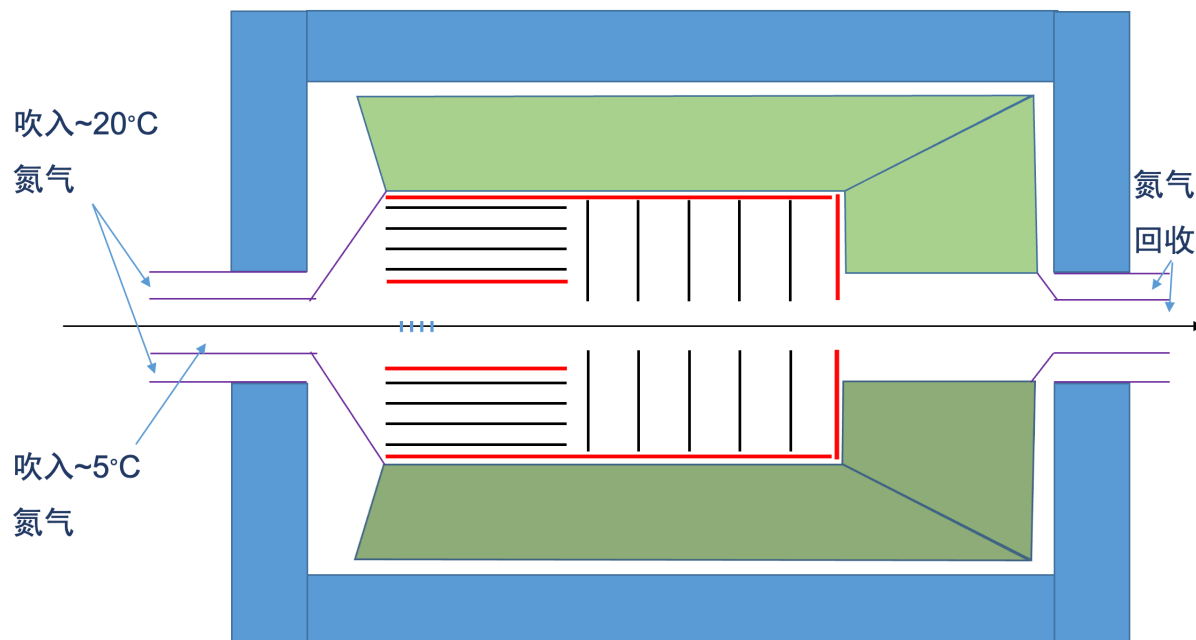
$$\propto \sigma / (B L^2 \sqrt{N})$$



- hit误差贡献不重要 $\Rightarrow$ 从 $\sigma = 20\mu\text{m}$ 进一步提高pixel位置精度, 几乎没有意义
- 提高磁场强度, 增大探测器半径, 都可以提高动量分辨

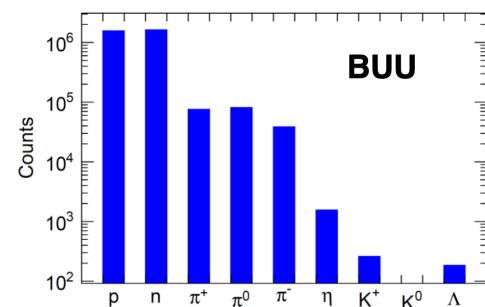
径迹探测器+飞行时间探测器尺寸

机械布置和散热问题

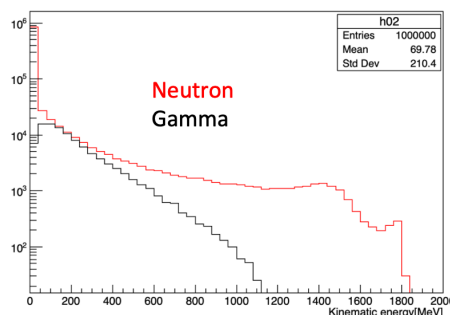


- 最外层LGAD可以用水冷
- 预冷气冷却可以大幅提升散热效果
 - STAR pixel的冷却气体进出温差只有1.5度
 - 如果吹入氮气温度~5°C，回收氮气温度~15 °C，则同通风量散热量可以增大7倍
 - 额外的好处：更低的芯片工作温度，更小噪声
 - 外围吹常温氮气，防止水汽凝结

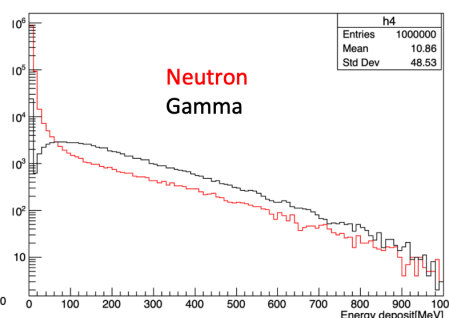
量能器方案



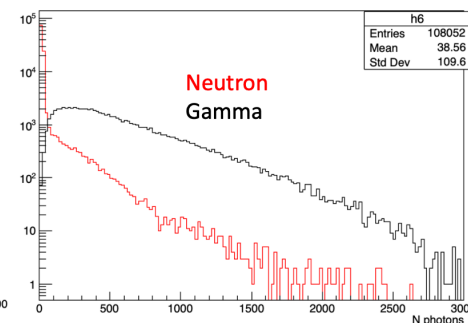
粒子动能分布



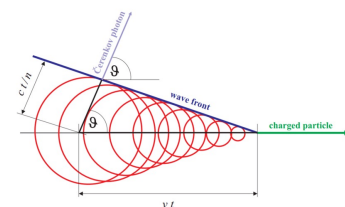
铅玻璃中沉积
能量分布



切伦科夫光
产额分布

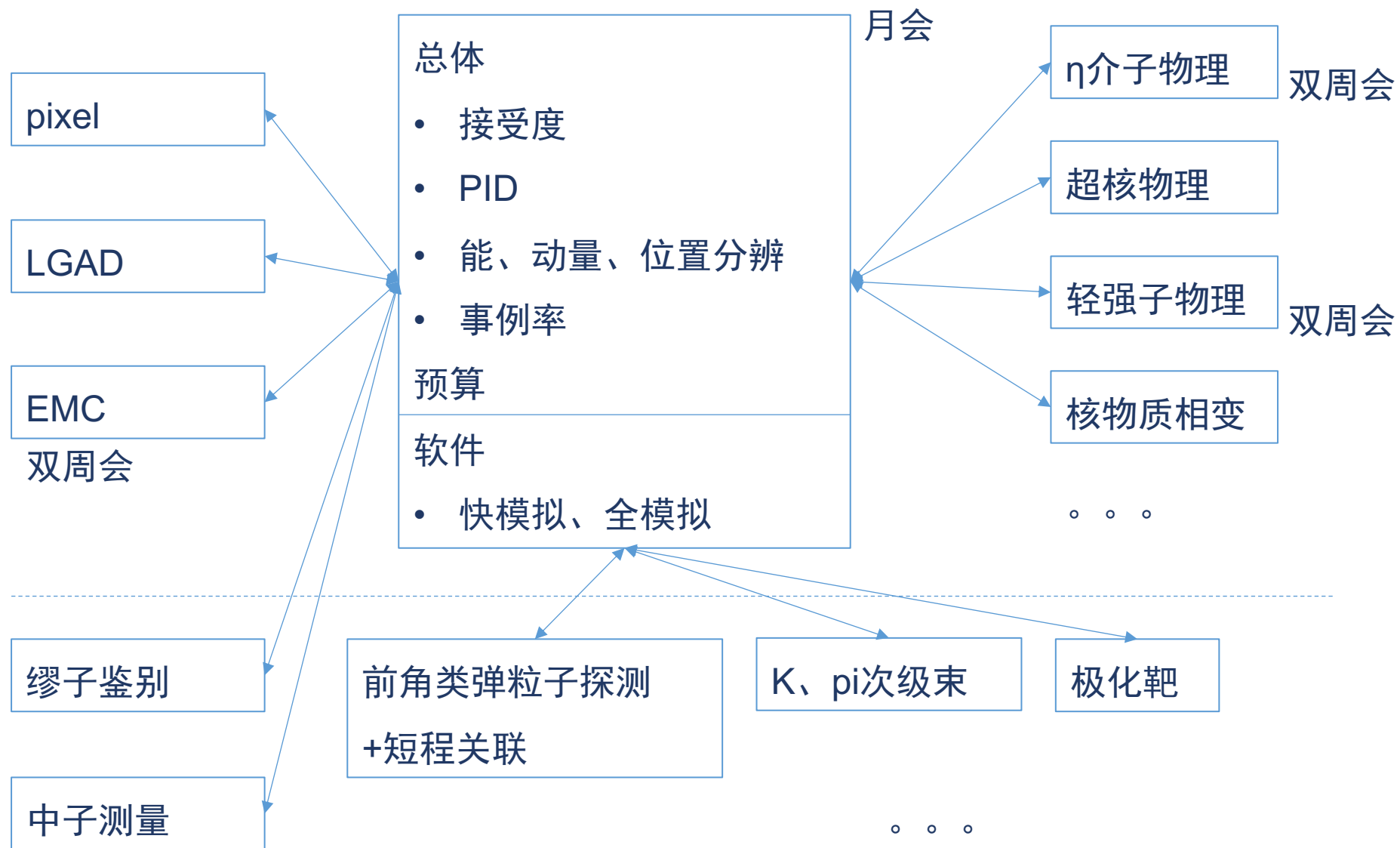


↓
 $\propto$ 闪烁体量能器光产额



- $\pi^+/\pi^-/e^+e^- \sim 100$, $n/\gamma \sim 8 \Rightarrow$ 为鉴别 e^+e^- 、 γ , 需大幅压低 π^+/π^- 、 n 本底
- 无论使用何种闪烁体探测器, 闪烁光产额 $\propto$ 沉积能量, γ 将混入很多的中子本底
- 而强子簇射产生的切伦科夫光远少于电磁簇射, 测量切伦科夫光, 强子簇射本底被压低

合作组

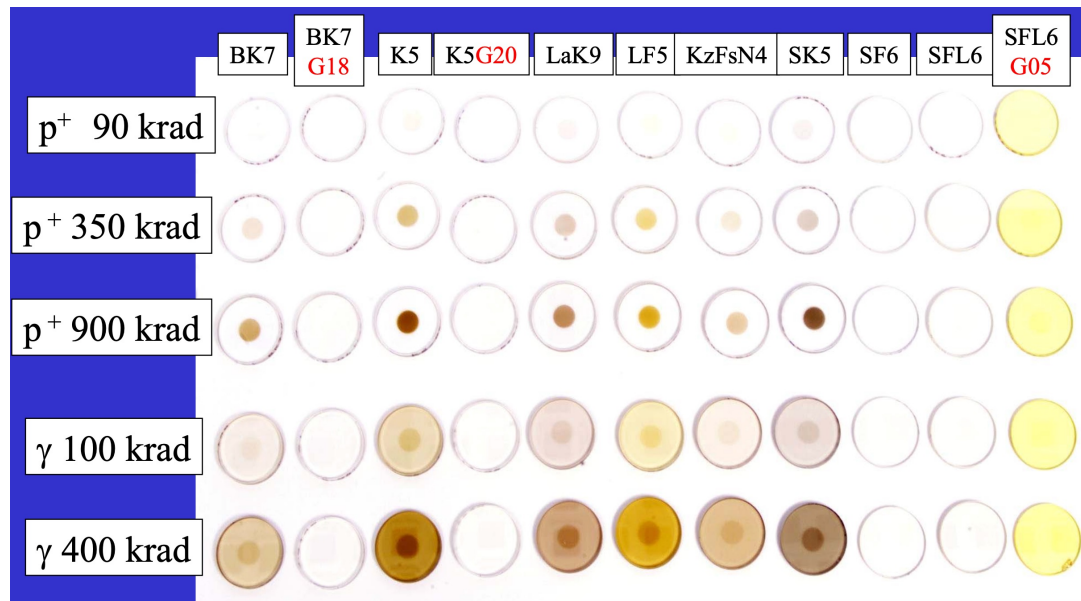


量能器方案

	FLUKA模拟结果		参考抗辐照性能		
	辐射剂量 (Gy)	Si1MeV等效中子通量(n_{eq}/cm^2)	探测器/材料	辐射剂量 (Gy)	Si1MeV等效中子通量 (n_{eq}/cm^2)
最内层硅	3000	3×10^{12}	pixel	2×10^4	1.7×10^{13}
			LGAD		1×10^{15}
最内层EMC	50	3×10^{11}	铅玻璃	20	
			SiPM		1×10^{14}

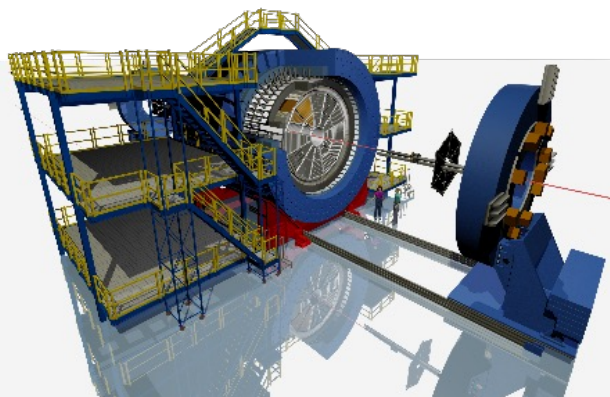
- 表中铅玻璃收到的辐射剂量(50Gy)接近其极限，但铅玻璃有很多不同型号、配方
- 表中：TF101，接收20Gy辐照后光传输率降低1%
 - [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)90990-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90990-3) ——80年代文献
- 国产铅玻璃ZF2（即ADRIANO2 使用的型号），抗辐射性能无相关资料，待测试
- 德国SCHOTT公司SF6型号铅玻璃，4000Gy辐射剂量照射后，目测透光性良好
- 其它措施：PbF₂晶体替代 / 紫外光或高温恢复

量能器方案



- 表中铅玻璃收到的辐射剂量(50Gy)接近其极限，但铅玻璃有很多不同型号、配方
- 表中：TF101，接收20Gy辐照后光传输率降低1%
 - [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)90990-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90990-3) ——80年代文献
- 国产铅玻璃ZF2（即ADRIANO2 使用的型号），抗辐射性能无相关资料，待测试
- 德国SCHOTT公司SF6型号铅玻璃，4000Gy辐射剂量照射后，目测透光性良好
- 其它措施：PbF₂晶体替代 / 紫外光或高温恢复

物理目标



- STAR – 闪耀25年

+ 顶点探测器

大接收度
径迹探测

+

电磁量能器

+

飞行时间
探测器

+

缪子探测器

+

内层 TPC
升级

+

前向径迹探测器
+量能器

QGP的发现和性质

+

质子
自旋

+

反物质

+

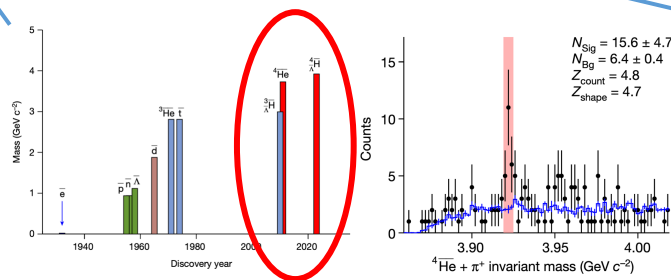
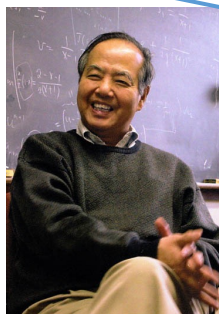
相变&
临界点

+

超边缘碰撞
(光生物质)

+

原子核
形状



物理目标



REVIEW ARTICLE

Electron-ion collider in China

Chapter 2 EicC physics highlights	10	2.4.2 Exotic hadrons at EicC	27
2.1 One-dimensional spin structure of nucleons	10	2.4.3 Cross section estimates and simulations	29
2.2 Three-dimensional tomography of nucleons	13	2.5 Other important exploratory studies	33
2.2.1 Transverse momentum dependent parton distributions	13	2.5.1 Proton mass	33
2.2.2 Generalized parton distributions	17	2.5.2 Structure of light pseudoscalar mesons	35
2.3 Partonic structure of nucleus	21	2.5.3 Intrinsic charm	36
2.3.1 The nuclear quark and gluon distributions	21	2.6 QCD theory and phenomenology	38
2.3.2 Hadronization and parton energy loss in nuclear medium	23	2.6.1 Synergies	38
2.4 Exotic hadronic states	24	2.6.2 Lattice QCD	39
2.4.1 Status of hidden-charm and hidden-bottom hadron spectrum	24	2.6.2.1 Nucleon spin structure	39
		2.6.2.2 Proton mass decomposition	39
		2.6.2.3 1-D and 3-D structure of nucleons	39
		2.6.2.4 Partonic structure of the nucleus	40
		2.6.2.5 Exotic hadrons	40
		2.6.3 Continuum theory and phenomenology	41
		2.6.3.1 Mass and matter	41
		2.6.3.2 1-D hadron structure	42
		2.6.3.3 Meson fragmentation functions	43

- 有成功的单一物理目标的专门实验，也有成功的多物理目标实验

Back-up

Back-up

物理目标	过程	后续衰变	测量末态粒子	束流种类	质心系能量	束流能量	靶	极化	测量方法、测量量等信息
双重子态	$p p \rightarrow \pi^+ d$	-	$\pi^+ d$	p	~2.6 GeV (扫描附近)	~ 3 GeV	p	更好	微分截面
双重子态	$p p \rightarrow d \pi^+ \pi^0$	$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$	$d \pi^+ \gamma \gamma$	p	> 2.7 GeV (固定)	> 3 GeV	p		d π^0 不变质量
双重子态 重子内的五夸克成分	$p p \rightarrow D30 \pi^- \pi^-$	$D30 \rightarrow p p \pi^+ \pi^+$	$p p \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	p	> 2.7 GeV (固定)	> 3 GeV	p		p p $\pi^+ \pi^+$ 不变质量谱
隐奇异核子共振态	$p p \rightarrow p p \phi$	$\phi \rightarrow K^+ K^-$		p	~ 3.2 GeV?	~ 4.6 GeV?	p	更好	p phi不变质量
重子内的五夸克成分	$p n \rightarrow d \phi$	$\phi \rightarrow K^+ K^-$		p	~ 3.2 GeV?	~ 4.6 GeV?	d? He3?	更好	截面 vs. 束流能量? 先不管
重子内的五夸克成分	$p p \rightarrow p p \eta'$	$\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$	$p p \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^- \gamma \gamma$	p	~ 3.2 GeV?	~ 4.6 GeV?	p	更好	截面 vs. 束流能量? 先不管
		$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$							
重子内的五夸克成分		$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$	$p K^+ p \pi^- \gamma \gamma \gamma$	p	~ 3.2 GeV?	~ 4.6 GeV?	p	更好	截面 vs. 束流能量? 先不管
		$\Lambda(1405) \rightarrow \Sigma^0 \pi^0$							
		$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$							
		$\Lambda \rightarrow p \pi^-;$							
		$\Lambda(1405) \rightarrow \Sigma^+ \pi^-$							
隐奇异核子共振态	$p p \rightarrow p K^+ \Lambda(1405)$	$\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0;$							
隐奇异核子共振态	$p p \rightarrow p K^+ \Lambda(1520)$	$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$	$p K^+ p \gamma \gamma \pi^-$	p	~ 3.2 GeV?	~ 4.6 GeV?	p	更好	$\Lambda(1405)$ 的不变质量谱
“失踪”重子共振态	$p p \rightarrow p K^+ \Lambda(1520)$	$\Lambda(1520) \rightarrow p K^-$	$p K^+ p K^-$	p	~ 3.2 GeV?	~ 4.6 GeV?	p	更好	$\Lambda(1520)$ 的不变质量谱
“失踪”重子共振态	$p p \rightarrow p n \pi^+$	-	$p \pi^+ (n)$	p	~ 3.5 GeV?	~ 5.6 GeV?	p	更好	p π^+ 不变质量
“失踪”重子共振态	$p p \rightarrow p K^+ \Lambda$	$\Lambda \rightarrow p \pi^-$	$p K^+ p \pi^-$	p	~ 3.5 GeV?	~ 5.6 GeV?	p	更好	K+ Λ 不变质量
“失踪”重子共振态	$p p \rightarrow p K^+ \Sigma^0$	$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma$	$p \pi^- \gamma$	p	~ 3.5 GeV?	~ 5.6 GeV?	p	更好	K+ Σ^0 不变质量
		$\Lambda \rightarrow p \pi^-$							
Λ 内部结构	$p p \rightarrow p K^+ \Lambda$	$\Lambda \rightarrow p \pi^-$	$p K^+ p \pi^-$	p	~ 3.5 GeV?	~ 5.6 GeV?	p	不需	Λ 衰变常数 (衰变p动量方向跟 Λ 方向夹角)
ckm矩阵元Vus	$p p \rightarrow p K^+ \Lambda$	$\Lambda \rightarrow p e \nu$	$p K^+ p e$	p	~ 3.5 GeV?	~ 5.6 GeV?	p	不需	Λ 半轻衰变(10^8 个Lambda) BR, transition form factor

标准模型相关诺奖

- 1995
- 2012
- 1990
- 1988
- 1984
- 1980
- 1979
- 1976
- 1969
- 1965
- 1957

数据处理能力需求

- 径迹重建CPU时间
 - 0.0012 s / hit
 - 7 hits / track
 - 4 track / event
 - 1.e8 event / s
 - 平均流强/最高流强 ~ 0.3
 - 1个月取数，12个月处理
 - 总的需要CPU核数： $0.0012 \times 7 \times 4 \times 1.e8 \times 0.3 / 12 = 1.e5$
- CPU机群预算：10万元/100CPU核 * 1.e5 核 = 1亿元
- 使用GPU代替CPU $\sim 1/3$
- 未来计算机发展 $\sim 1/2$
- 量能器重建能量 $>50\text{MeV}$ 触发/在线选择
- $\Rightarrow$ 数据处理机群预算在千万元量级

缪子探测器

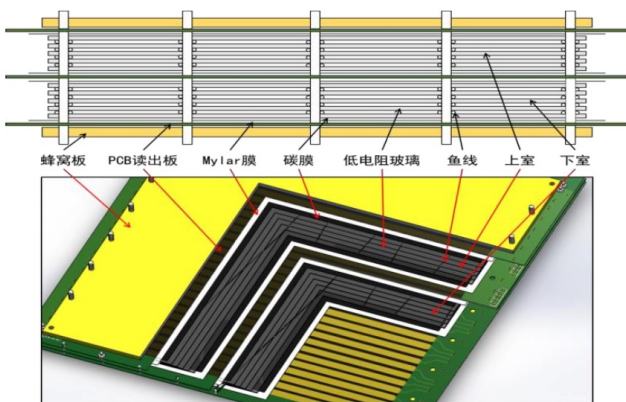
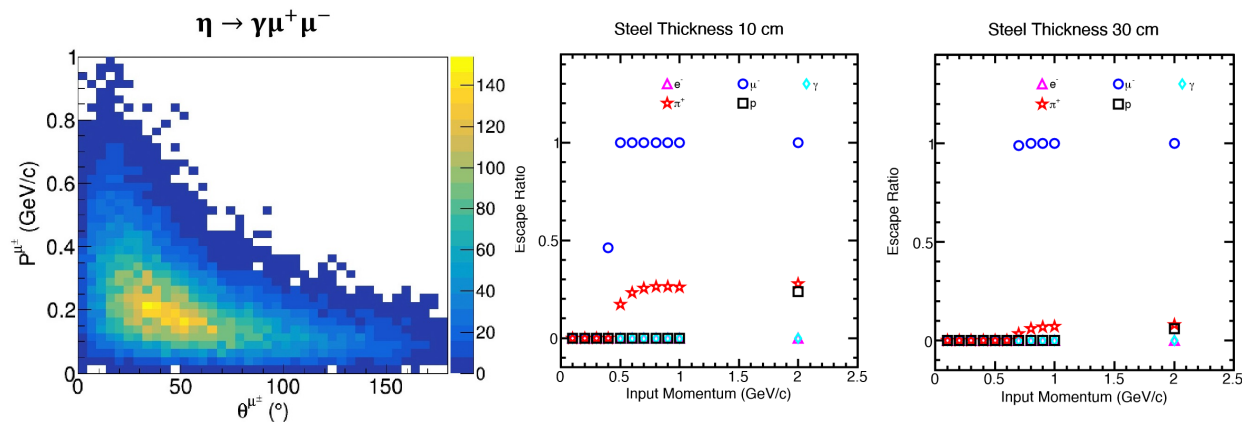


图 10 eTOF MRPC 结构示意图。



- MRPC，类似CEE ETOF
- 阻挡物质越少， μ^+ -动量可以越低，但 π^+ -压低系数变小
 - 石墨作为阻挡材料？更高效的 μ^+ / π^+ -鉴别技术？
- 时间分辨：几十ps
- 位置分辨：几cm 读出条pitch、双端读出时间差，与径迹4维配对
- 因为大角度区没有高动量 μ^+ ，仅布置于前角
- 面积 $\sim 11 \text{ m}^2$ 造价 ~ 500 万

王荣、孙旭

慢引出束流时间结构

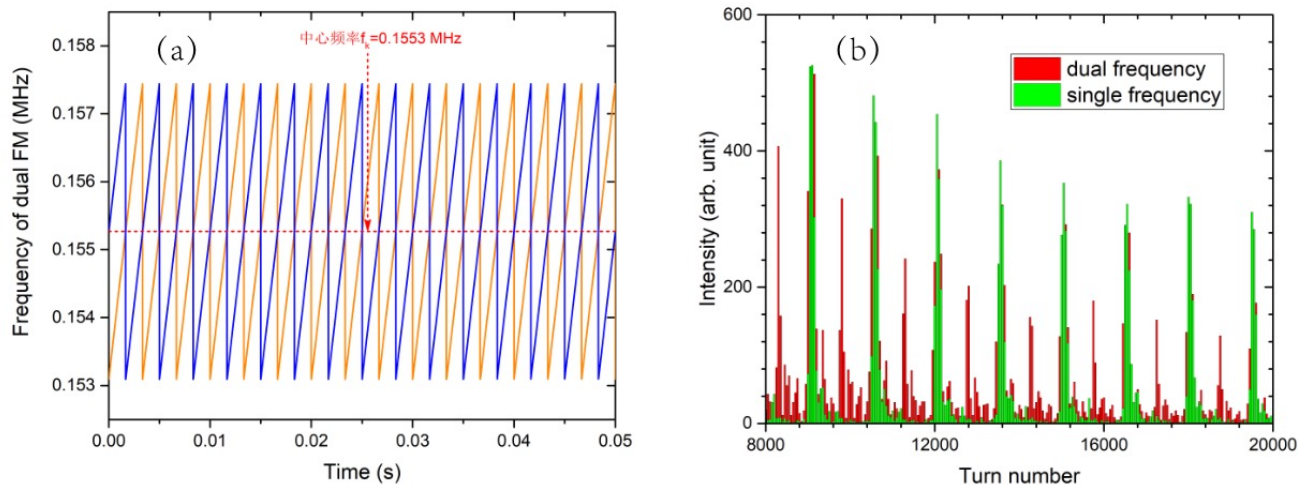


图 5.13 (a) RKO双频调制时频率随时间变化, (b) RKO双频调制对spill时间结构的影响

Figure 5.13 (a) the frequency variation with time in the dual FM process of RKO, (b) the influence of dual frequency modulation of RKO on the spill structure

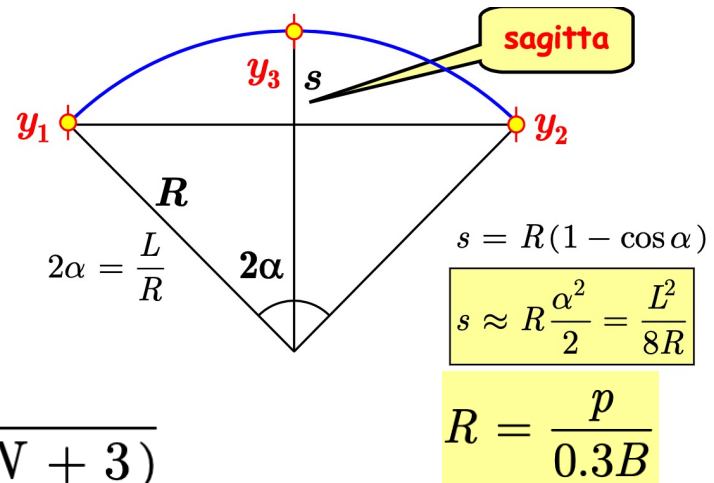
- BRing出来的spill的时间结构
- 红色是双频扫描的, 1个峰和1个峰的重复频率在10~30kHz之间, 峰与峰之间的束流较少
- BRing引出平台一个周期大约2us, 按照3s的引出平顶, 总共1.5e6圈, 1e11ppp的流强, 平均一圈才6.7e4个离子, 估计涨落会比较大, 也会有时间结构, 需要模拟62

径迹探测器动量分辨率

- hit误差部分贡献:

$$\frac{\delta p}{p^2} = \frac{\sigma}{0.3BL^2} \sqrt{4C_N}$$

$$C_N = \frac{180N^3}{(N-1)(N+1)(N+2)(N+3)}$$



An Introduction to Charged Particles Tracking
– Francesco Ragusa

- 多次库伦散射MCS部分贡献:

- 先计算长度 $l/2$ 的径迹的散射角度 θ_0

- 再计算长度 $l/2$ 的径迹两端 θ_0 的角度对应的曲率 $1/R = \theta_0 / (l/2)$

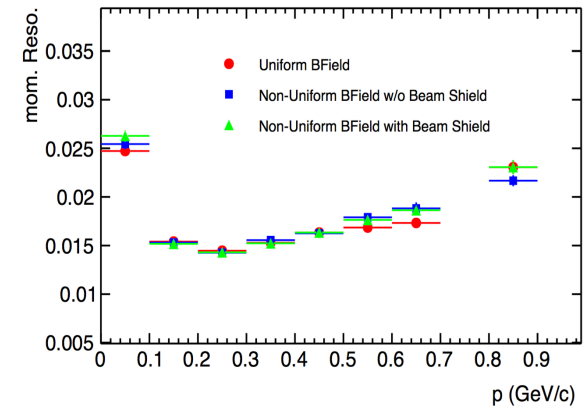
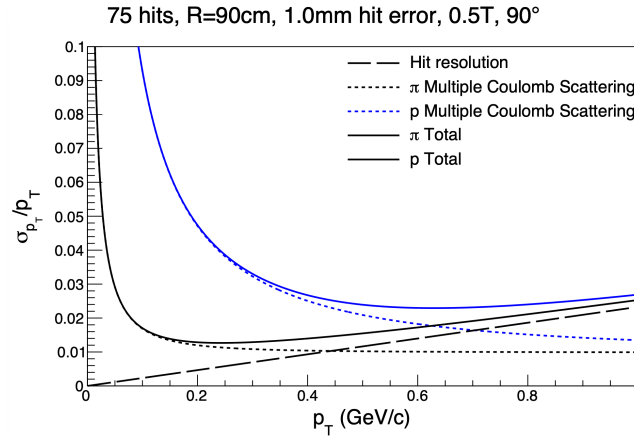
- 最后导出MCS动量分辨率贡献

$$R = \frac{p}{0.3B}$$

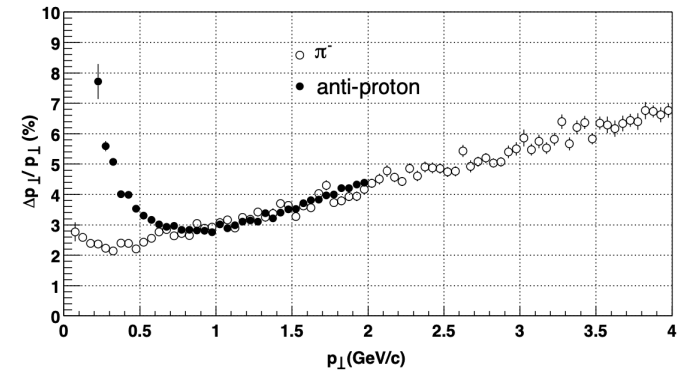
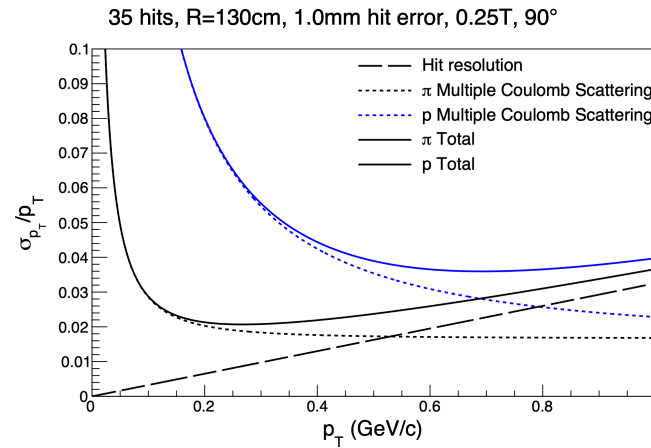
- 这一部分贡献只是一个大概估算, 实际情况取决于hit误差与MCS相对贡献大小等

径迹探测器动量分辨率

CEE box TPC



STAR TPC



- CEE、STAR实验使用公式和模拟结果基本相符

数据率

- 重离子碰撞
 - 1MHz
 - ~100 track
 - 6 hits / track
- η 介子物理
 - $\sim > 100\text{MHz}$
 - ~4 track
 - 6 hits / track
- CEE
 - 10kHz
 - ~100 track
 - ~30 hits / track
 - ~20 digi / hit
- 因此，硅径迹探测器完成片上集团重建后，新谱仪数据率与CEE在同一个量级

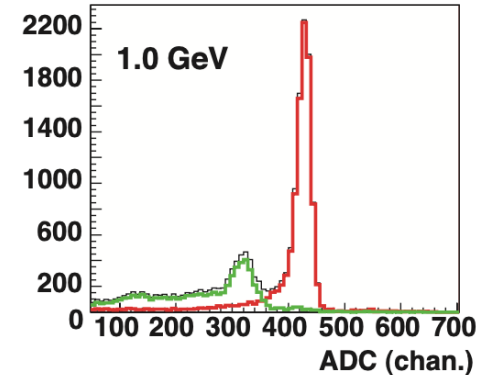
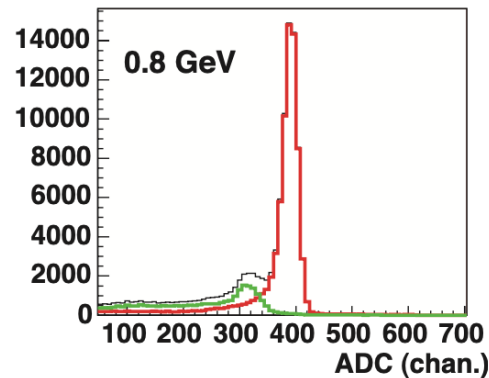
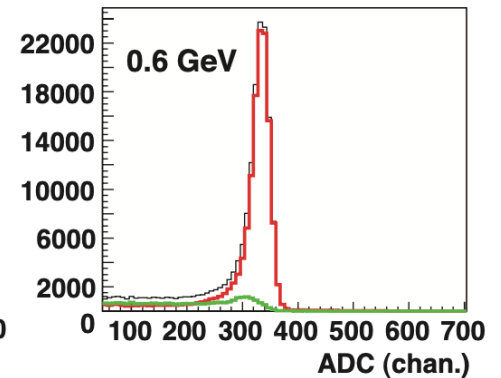
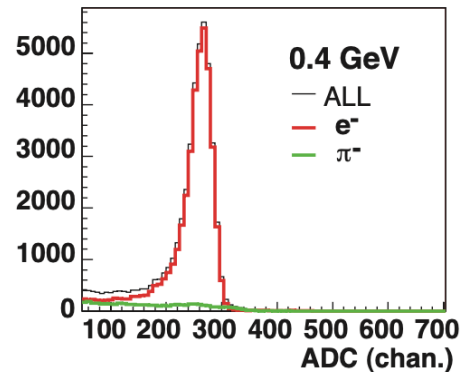
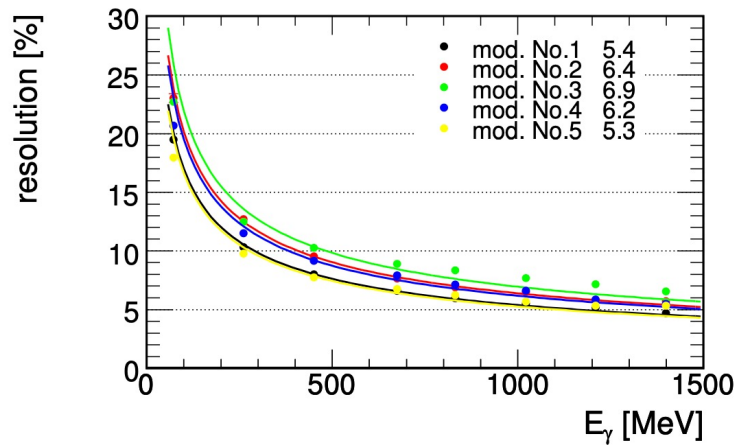
硅径迹探测器

- 造价
 - 400元/cm² (芯片100 + FPCB电子学100 + 支撑结构等200) + 1200万研发费用 + 300万劳务费
 - 总面积28000 cm² $\Rightarrow 400 * 28000 = 1100$ 万
 - 桶部：最外层25cm半径，30cm长，最外层面积 $3.14 * 25^2 * 30 = 4700$ cm²，5层，总面积 $4700 * 6 / 2 = 14000$ cm²
 - 前端：30cm半径，5层， $3.14 * 30^2 * 5 = 14000$ cm²
 - 总造价1100万 + 1200万 + 300万 = 2600万

LGAD飞行时间探测器

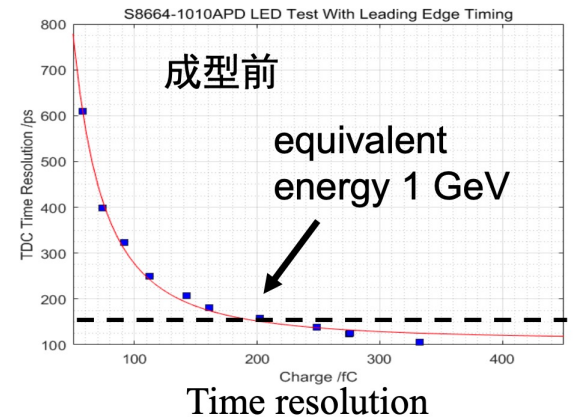
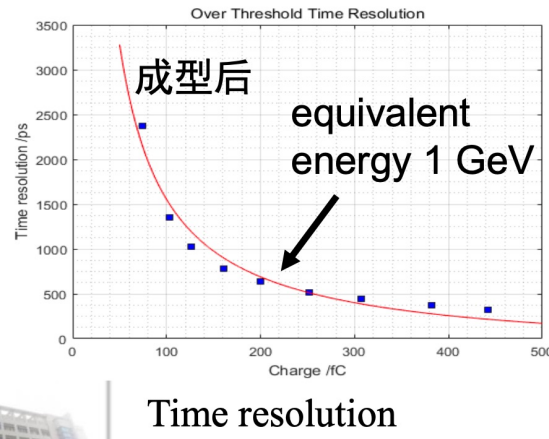
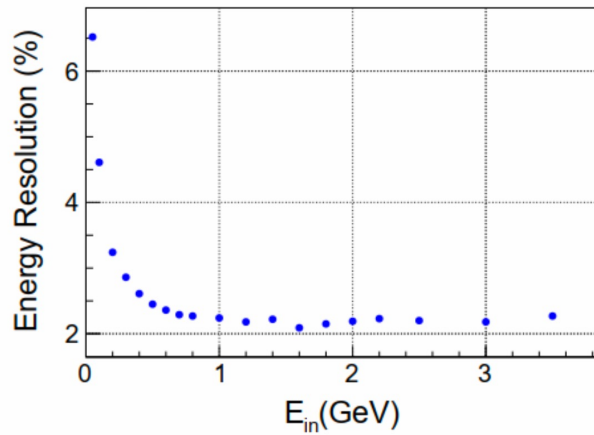
- 造价
 - LGAD传感器（高能所-微电子所，2平方米）面积： 900万
 - ASIC（TSMC芯片，有不确定性）： 600万
 - 模块组装（倒装焊等）： 400万
 - 电子学读出板： 500万
 - 高压系统（假设每个模块单独供高压）： 300万
 - 低压系统： 100万
 - 冷却系统： 300万
 - 电缆等： 200万

铅玻璃

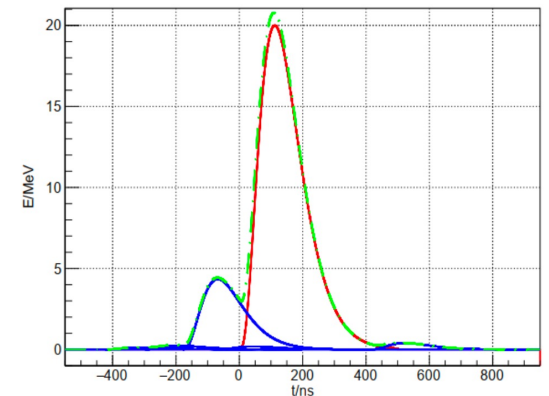
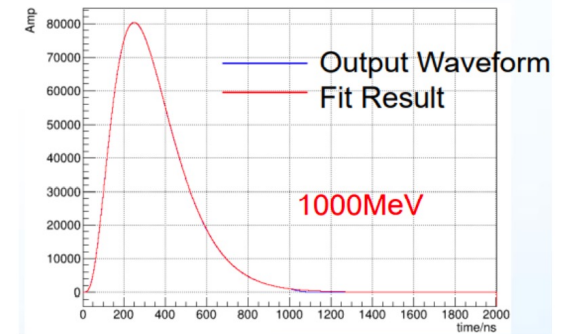


- HADES EMC
- 能量分辨率 $\sim 6\%$ @ 1GeV, $\sim 25\%$ @ 50MeV
- 时间分辨 $\sim 215\text{ps}$ (0.8 GeV电子)
- 成型时间 $\sim 0.5\ \mu\text{s}$
- 强子簇射切伦科夫光产额低于电子簇射, 有利于压低中子、 π 本底
- 造价: $\sim <1000$ 万

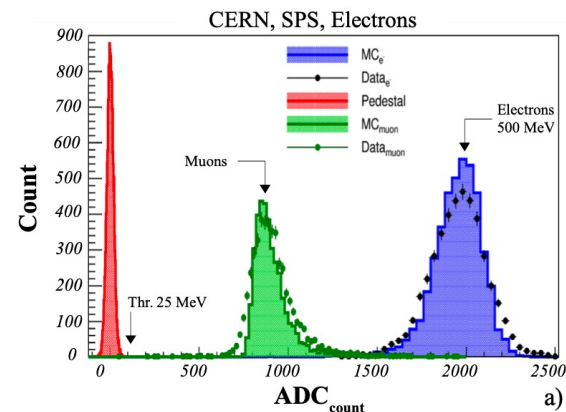
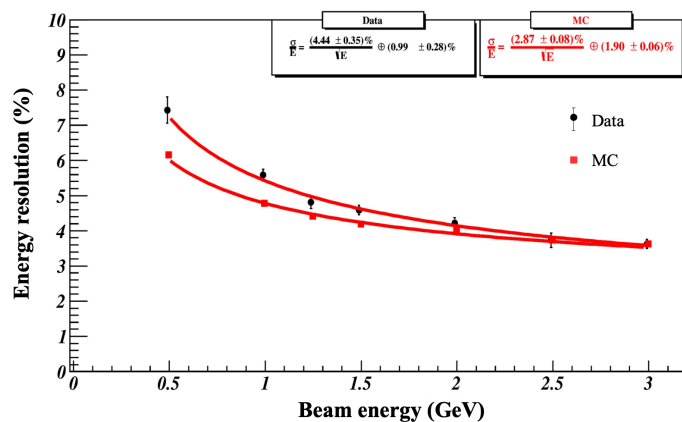
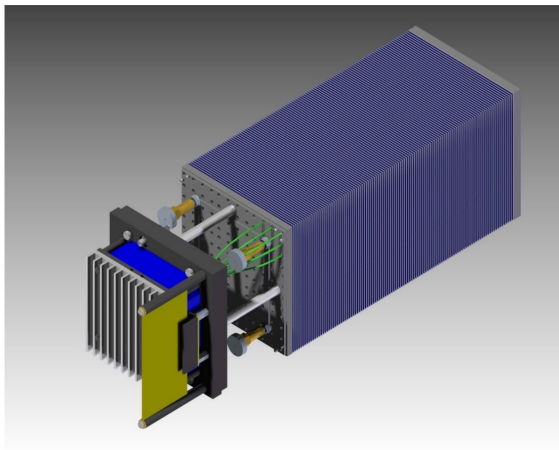
纯CsI



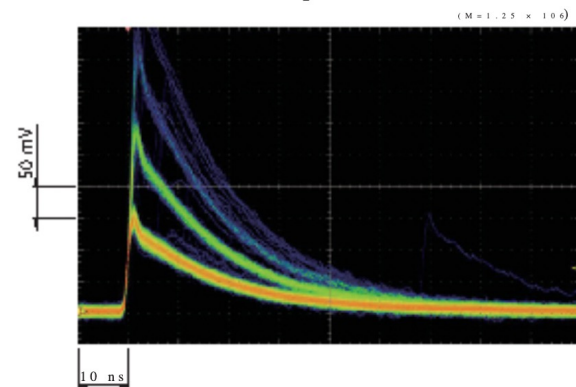
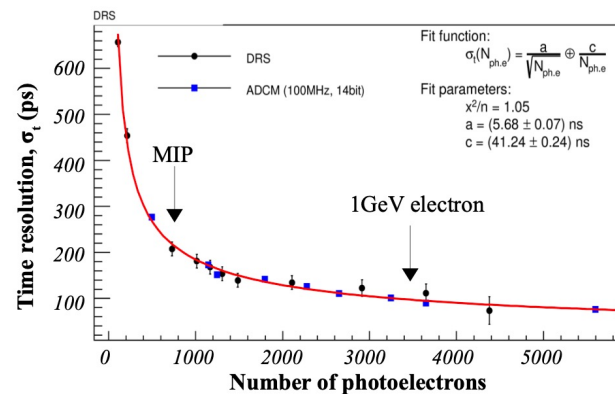
- 科大STCF预研
- 能量分辨率 $\sim 2\%$ @ 1GeV, $\sim 7\%$ @ 50MeV
- 时间分辨
 - 成型前: $\sim 150\text{ps}$ @ 1GeV, 小信号 $\sim 1\text{ns}$
 - 成型后: 600ps @ 1GeV, 小信号几个ns
- 成型时间 $\sim 1\ \mu\text{s}$
- 造价: 5800万 ($\theta=10\text{-}100^\circ$) / 4000万 ($\theta=10\text{-}60^\circ$)



采样型

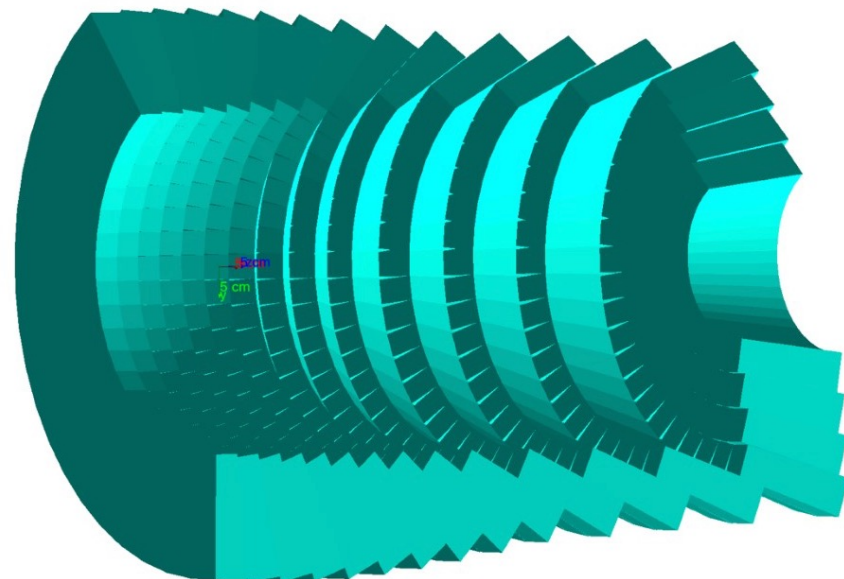


- NICA-MPD量能器，国内清华等参与研制生产
- 0.3mm铅 + 1.5mm塑闪（铅辐射长度0.56cm）
- 能量分辨率~6%@1GeV，~20%@50MeV（公式推算）
- 阈值可设在25MeV
- 时间分辨~100ps @ 1GeV，~500ps @ 50MeV
- Micro-Pixel Avalanche Diodes (MAPD)死时间~50ns
 - 还有没有另外的电子学成型时间？
- 造价~<1千万
 - MPD ECAL 4.5m直径，6m长，第一期造价~3千万



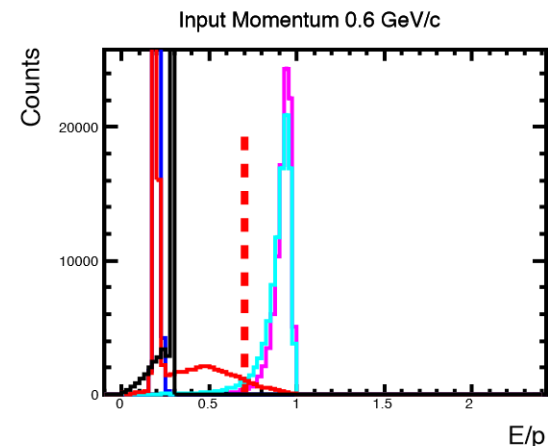
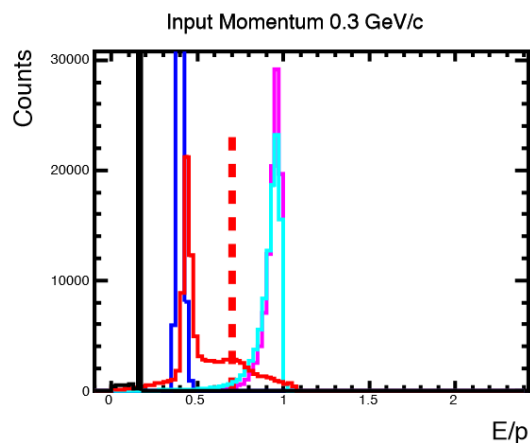
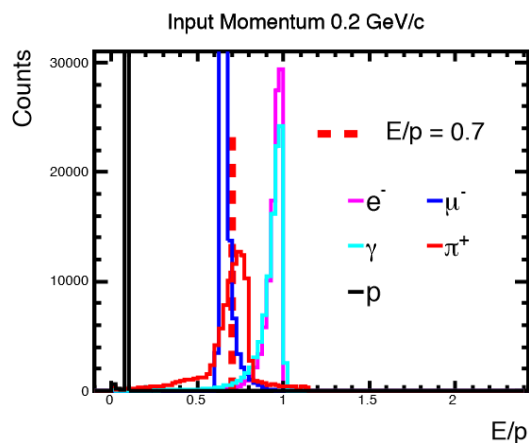
纯CsI电磁量能器

Module	角度	数量	短边(cm)	长边(cm)
Shape 1	6.5	10	4.23	6.5
Shape 2	3	4	5.45	6.5
Shape 3	3	3	5.45	6.5

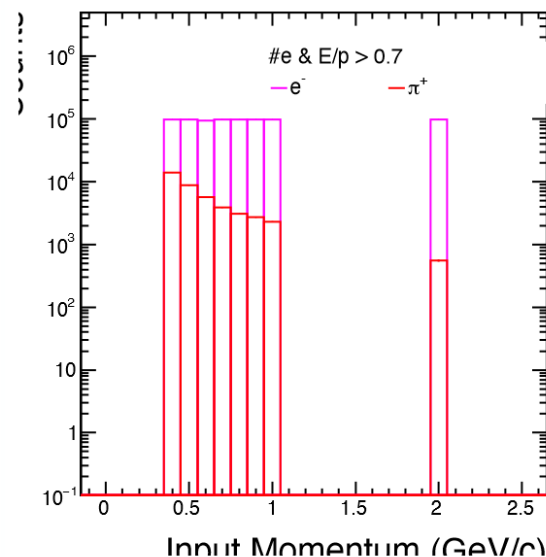


- 纯CsI晶体
 - 光衰减时间: 6ns / 35ns快慢成分
 - 光产额: 2.3 / 5.6% NaI
- 共~800块晶体, 每块长20cm, 尾端面6.5cm×6.5cm
- 每块晶体4片APD读出
- 能量分辨率 ~3% @ 1GeV
- 时间分辨好于1ns, 可在100MHz事例率下区分不同事例
- 耐辐射性: 100krad未见性能变化, 10^{12} 中子/cm²辐射后光产额降低0-20%
- 中科大、近物所等 (STCF EMC预研)
- 造价: 5800万 ($\theta=10-100^\circ$) / 4000万 ($\theta=10-60^\circ$)

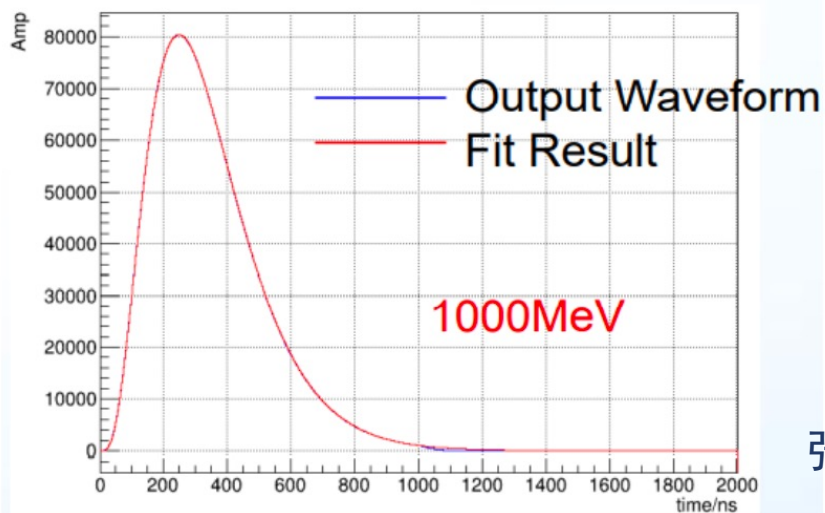
纯CsI电磁量能器



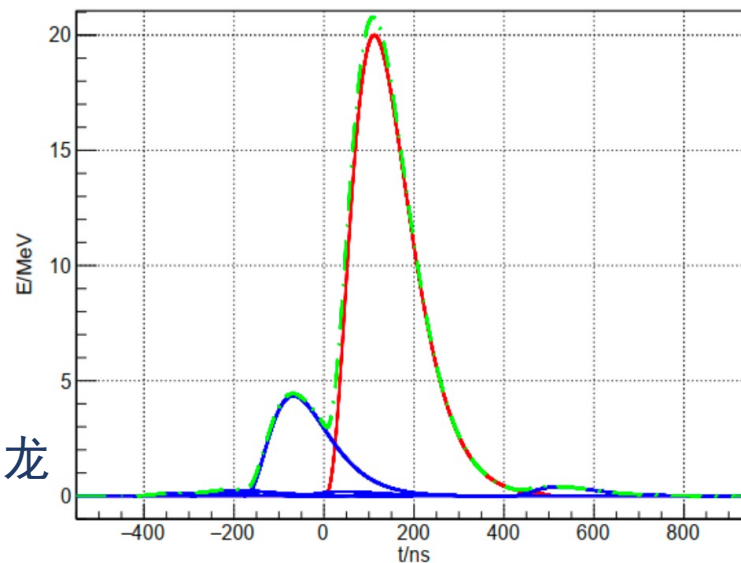
- 从0.2GeV/c动量开始，具有较好的 e / π 鉴别能力
- π 压低一个量级以上



纯CsI电磁量能器

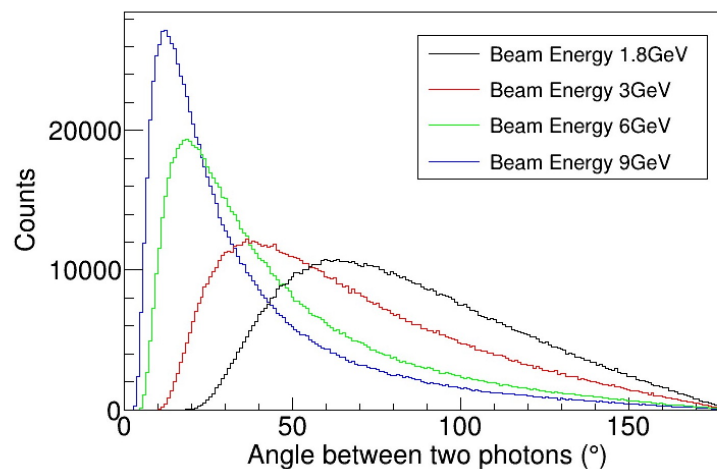


张云龙



- 电子学输出信号波形可长达1000ns
- 考虑100MHz事例率
- 每事例4个带电粒子+4中子可能簇射
- 每个晶体堆积事例概率~1
- 可用波形采样、拟合处理事例堆积
- 衰变双光子夹角较大，晶体尺寸满足分辨要求

$$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \gamma \gamma$$



EMC抗辐照性能要求估计

- 电离辐射剂量
 - 100MHz事例率，每个事例1.8GeV能量，一半能量均匀沉积在前角40cm半径，25cm厚的晶体里，则一个月的辐射剂量为
 - $100 \times 10^6 \times 1.8 \times 3600 \times 24 \times 30 \times 1.60218 \times 10^{-10} \times 0.5 / (3.14 \times 40 \times 40 \times 25 \times 4.51 / 1000) = 66 \text{ Gy}$
- 中子辐射剂量：
 - 100MHz事例率，每个事例4个中子，一半均匀射向前角40cm半径晶体，则一个月的总中子通量为
 - $100 \times 10^6 \times 4 \times 3600 \times 24 \times 30 \times 0.5 / (3.14 \times 40 \times 40) = 1 \times 10^{11} \text{ n / cm}^2$
- 与mu2e实验测试使用剂量(900 Gy、 $9 \times 10^{11} \text{ n / cm}^2$)在一个量级 *J. Phys.: Conf. Ser.* **928** 012041
- 可以通过150° C高温退火去除辐射影响 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 432 (1999) 138

缪子探测器

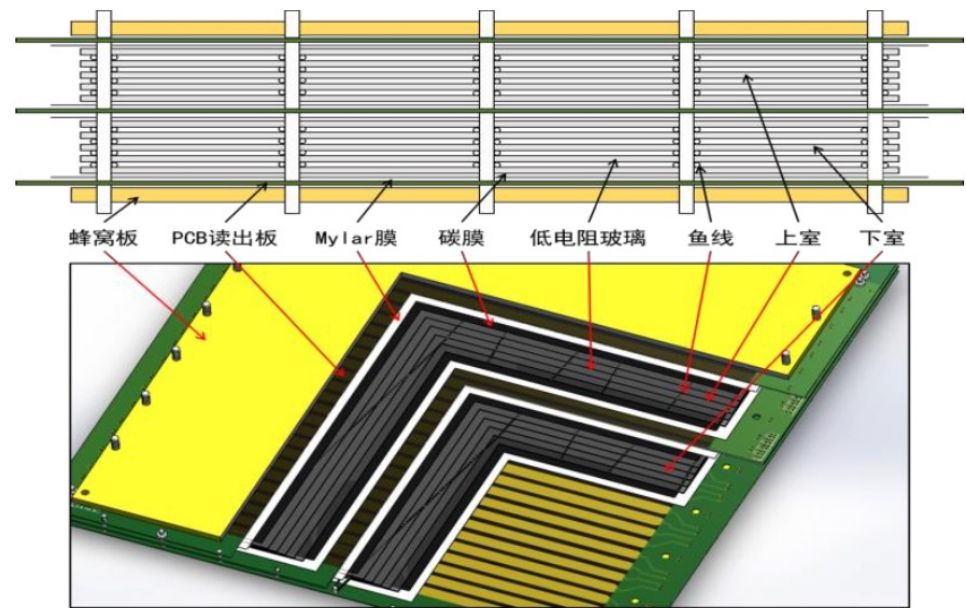
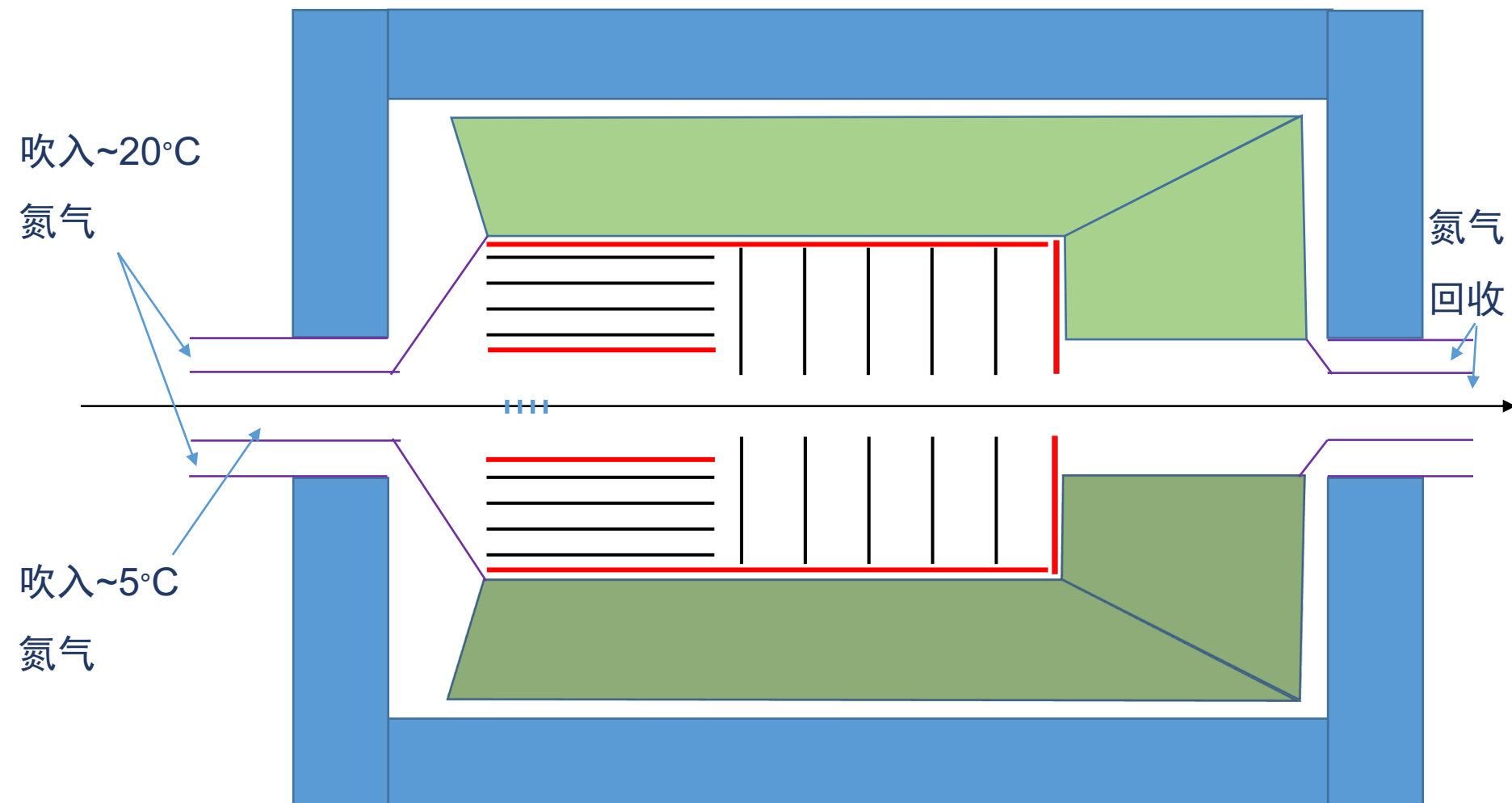


图 10 eTOF MRPC 结构示意图。

- MRPC，类似CEE ETOF
- 读出条pitch 25mm；双端读出时间差得到沿读出条方向位置信息： $100\text{ps} \cdot c = 30\text{mm}$
- 两个维度均可得到cm量级的位置分辨率，与几十ps的时间分辨配合，可以与径迹进行4维配对，压低强子簇射本底
- 面积： $3.14 \cdot 0.55 \cdot 0.55 + 3.14 \cdot 0.8 \cdot 0.8 + 2 \cdot 3.14 \cdot 0.55 \cdot 1 + 2 \cdot 3.14 \cdot 0.8 \cdot 1 = 11 \text{ m}^2$
- 造价：CEE ETOF 8m^2 ，350万 $\Rightarrow 11 \text{ m}^2$ ，500万

预冷气散热概念设计

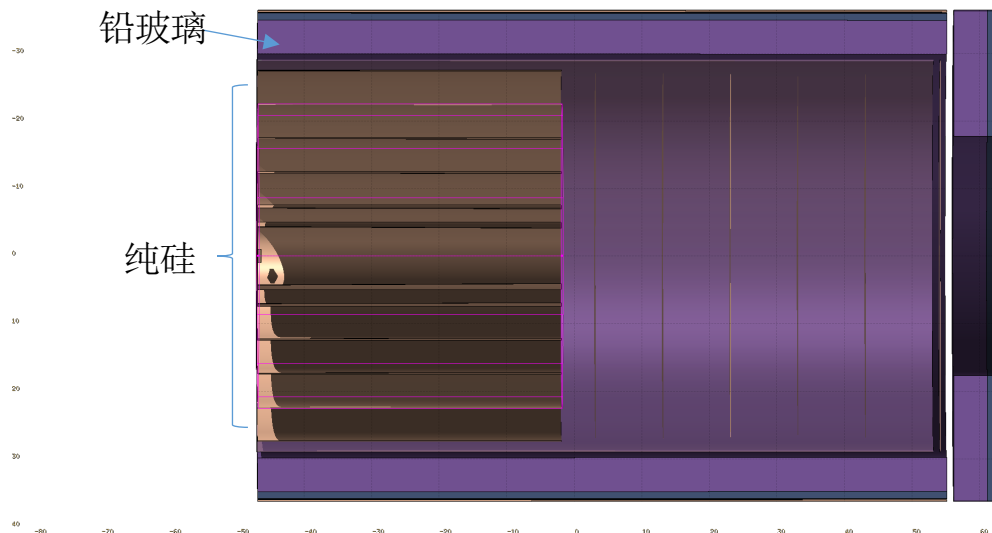


Beam dump

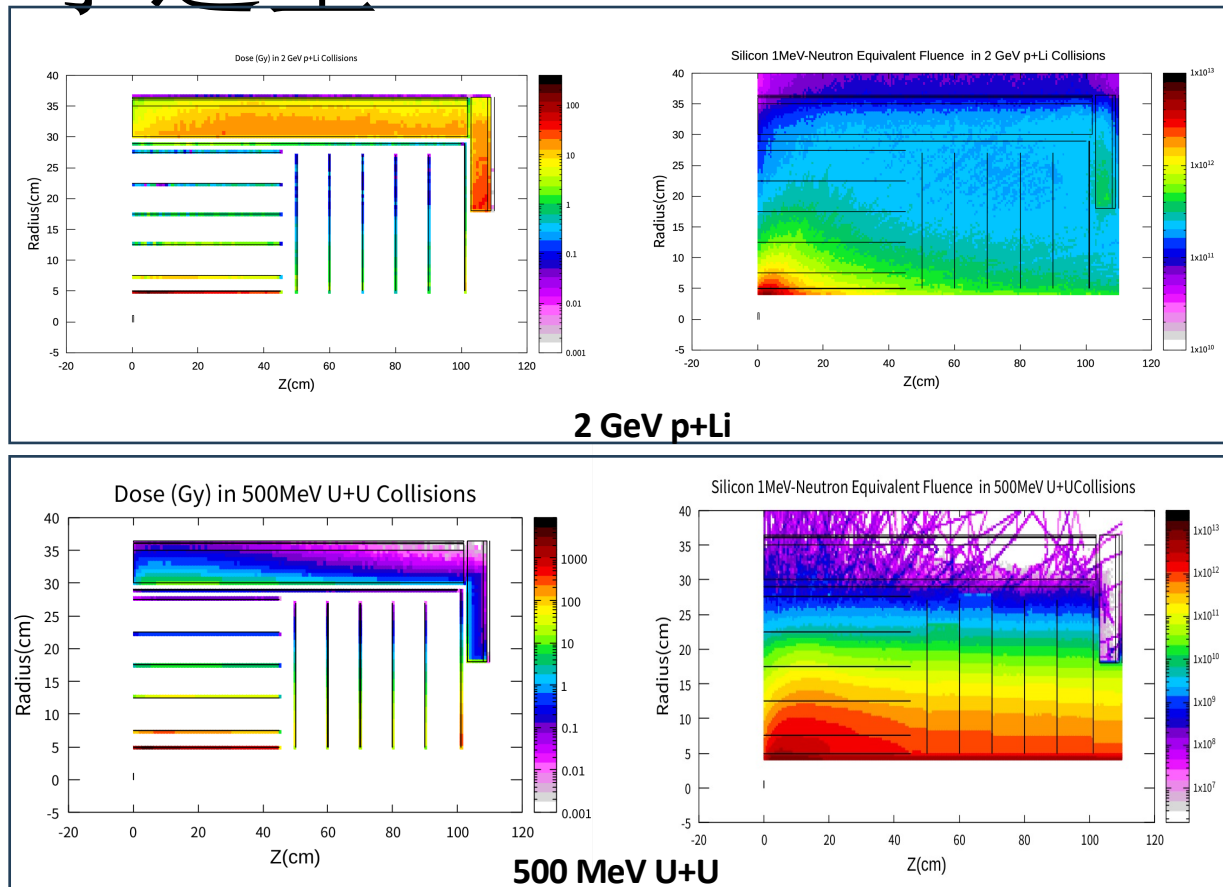
模拟设置

探测器

- 硅径迹探测器：纯硅，100微米厚度
- LGAD：纯硅，300微米
- 电磁量能器（1层铅玻璃+CsI+硅）
- 事件产生：Fluka
- 500MeV U+U: 靶厚度250微米, 非弹散射事件率：2%
 - 单束流粒子剂量 $\Rightarrow$ 一个月剂量： $1\text{MHz} / 0.02 \times 3600\text{s/h} \times 24\text{h/d} \times 30\text{d}$
- 2GeV p+Li: 靶厚度5毫米, 非弹散射事件率：0.4%
 - 单束流粒子剂量 $\Rightarrow$ 一个月剂量： $100\text{MHz} / 0.004 \times 3600\text{s/h} \times 24\text{h/d} \times 30\text{d}$



一个月运行辐射剂量和1MeV等效中子通量



一个月运行辐射剂量和1MeV等效中子通量

	2 GeV p+Li (100MHz 1 month)		500 MeV U+U (1MHz 1 month)		探测器可承受 参考剂量/通量		
	Dose (Gy)	Si1MeV fluence (n_{eq}/cm^2)	Dose (Gy)	Si1MeV fluence (n_{eq}/cm^2)	探测器/材料/元件	Dose (Gy)	Si1MeV fluence (n_{eq}/cm^2)
最内层Si	200	3×10^{12}	3000	3×10^{12}	pixel	2×10^4 [1] 1×10^6 [3]	1.7×10^{13} [1] 1×10^{13} [2] 1×10^{15} [3]
					LGAD		1×10^{15} [4]
量能器	20 50 (前角局部)	3×10^{11}	20	10^9	铅玻璃	20 [5]	
					SiPM		1×10^{14} [6]

[1] ALPIDE抗辐射 (ALICE IST upgrade已大规模使用): $1.7 \times 10^{13} n_{eq}/cm^2$

https://indico.cern.ch/event/695271/contributions/2956083/attachments/1637991/2614211/CERN_LHC_Rad_symp_23042018_HHI.pdf

[2] CMOS pixel探测器抗辐射 (Supix-1, CEPC, 山大): $1 \times 10^{13} n_{eq}/cm^2$ <https://arxiv.org/abs/2202.11471>

[3] DMAPS抗辐射 (MALTA2, HL-LHC): $1 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$ <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10246423&tag=1>

[4] LGAD抗辐射 (NDL, HL-LHC, 高能所、北师大): $1 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900220310056>

[5] 铅玻璃抗辐射 (TF101): 20Gy辐照后透光率降低1% [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)90990-3](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90990-3)

[6] SiPM抗辐射综述: $1 \times 10^{14} n_{eq}/cm^2$

https://indico.ipmu.jp/event/166/contributions/2761/attachments/2145/2627/SiPM-rad-dam-review_PD18_Musienko-v3.pdf

- pixel、LGAD、SiPM, 已有同类探测器满足抗辐射要求, 需要研发和选型时确定抗辐射指标并实现
- 铅玻璃受到的辐射剂量与现有产品的抗辐射能力接近, 需要专门研发提高, 或每次实验后拆卸高温淬火恢复

Back-up

e & muon

C, T, CP-violation

- CP Violation via Dalitz plot mirror asymmetry: $\eta \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$
- CP Violation (Type I - P and T odd, C even): $\eta \rightarrow 4\pi^0 \rightarrow 8\gamma$
- CP Violation (Type II - C and T odd, P even): $\eta \rightarrow \pi^0 \ell^+ \ell^-$ and $\eta \rightarrow 3\gamma$
- Test of CP invariance via μ longitudinal polarization: $\eta \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- CP inv. via γ^* polarization studies: $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ & $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$
- CP invariance in angular correlation studies: $\eta \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^-$
- CP invariance in angular correlation studies: $\eta \rightarrow \mu^+ \mu^- \pi^+ \pi^-$
- CP invariance in μ polar. in studies: $\eta \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$
- T invar. via μ transverse polarization: $\eta \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$ and $\eta \rightarrow \gamma \mu^+ \mu^-$
- CPT violation: μ polar. in $\eta \rightarrow \pi^+ \mu^- \nu$ vs $\eta \rightarrow \pi^- \mu^+ \bar{\nu}$ - γ polar. in $\eta \rightarrow \gamma \gamma$

Other discrete symmetry violations

- Lepton Flavor Violation: $\eta \rightarrow \mu^+ e^- + c.c.$
- Radiative Lepton Flavor Violation: $\eta \rightarrow \gamma(\mu^+ e^- + c.c.)$
- Double lepton Flavor Violation: $\eta \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^- + c.c.$

Non- η/η' based BSM Physics

- Neutral pion decay: $\pi^0 \rightarrow \gamma A' \rightarrow \gamma e^+ e^-$
- ALP's searches in Primakoff processes: $p Z \rightarrow p Z a \rightarrow l^+ l^-$ (F. Kahlhoefer)
- Charged pion and kaon decays: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu A' \rightarrow \mu^+ \nu e^+ e^-$ and $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu A' \rightarrow \mu^+ \nu e^+ e^-$
- Dark photon and ALP searches in Drell-Yan processes: $q\bar{q} \rightarrow A'/a \rightarrow l^+ l^-$

New particles and forces searches

- Scalar meson searches (charged channel): $\eta \rightarrow \pi^0 H$ with $H \rightarrow e^+ e^-$ and $H \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- Dark photon searches: $\eta \rightarrow \gamma A'$ with $A' \rightarrow \ell^+ \ell^-$
- Protophobic fifth force searches: $\eta \rightarrow \gamma X_{17}$ with $X_{17} \rightarrow \pi^+ \pi^-$
- QCD axion searches: $\eta \rightarrow \pi\pi a_{17}$ with $a_{17} \rightarrow e^+ e^-$
- New leptophobic baryonic force searches: $\eta \rightarrow \gamma B$ with $B \rightarrow e^+ e^-$ or $B \rightarrow \gamma \pi^0$
- Indirect searches for dark photons new gauge bosons and leptoquark: $\eta \rightarrow \mu^+ \mu^-$ and $\eta \rightarrow e^+ e^-$
- Search for true muonium: $\eta \rightarrow \gamma(\mu^+ \mu^-)|_{2M_\mu} \rightarrow \gamma e^+ e^-$
- Lepton Universality
- $\eta \rightarrow \pi^0 H$ with $H \rightarrow \nu N_2$, $N_2 \rightarrow h' N_1$, $h' \rightarrow e^+ e^-$

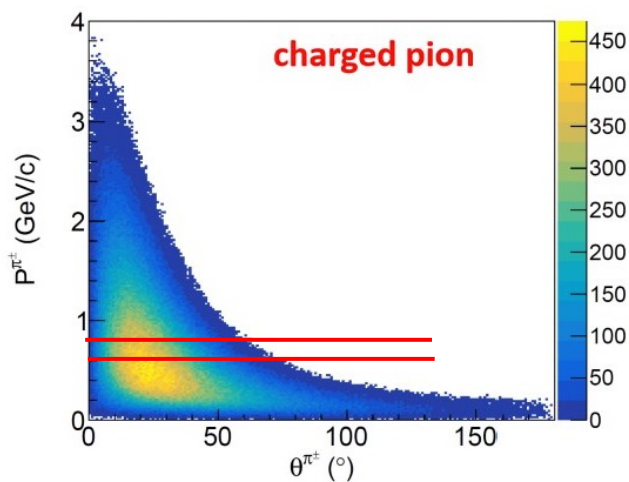
Other Precision Physics measurements

- Proton radius anomaly: $\eta \rightarrow \gamma \mu^+ \mu^-$ vs $\eta \rightarrow \gamma e^+ e^-$
- All unseen leptonic decay mode of η/η' (SM predicts 10^{-6} - 10^{-9})

High precision studies on medium energy physics

- Nuclear models
- Chiral perturbation theory
- Non-perturbative QCD
- Isospin breaking due to the u-d quark mass difference
- Octet-singlet mixing angle
- Electromagnetic transition form-factors (important input for g-2)

缪子鉴别

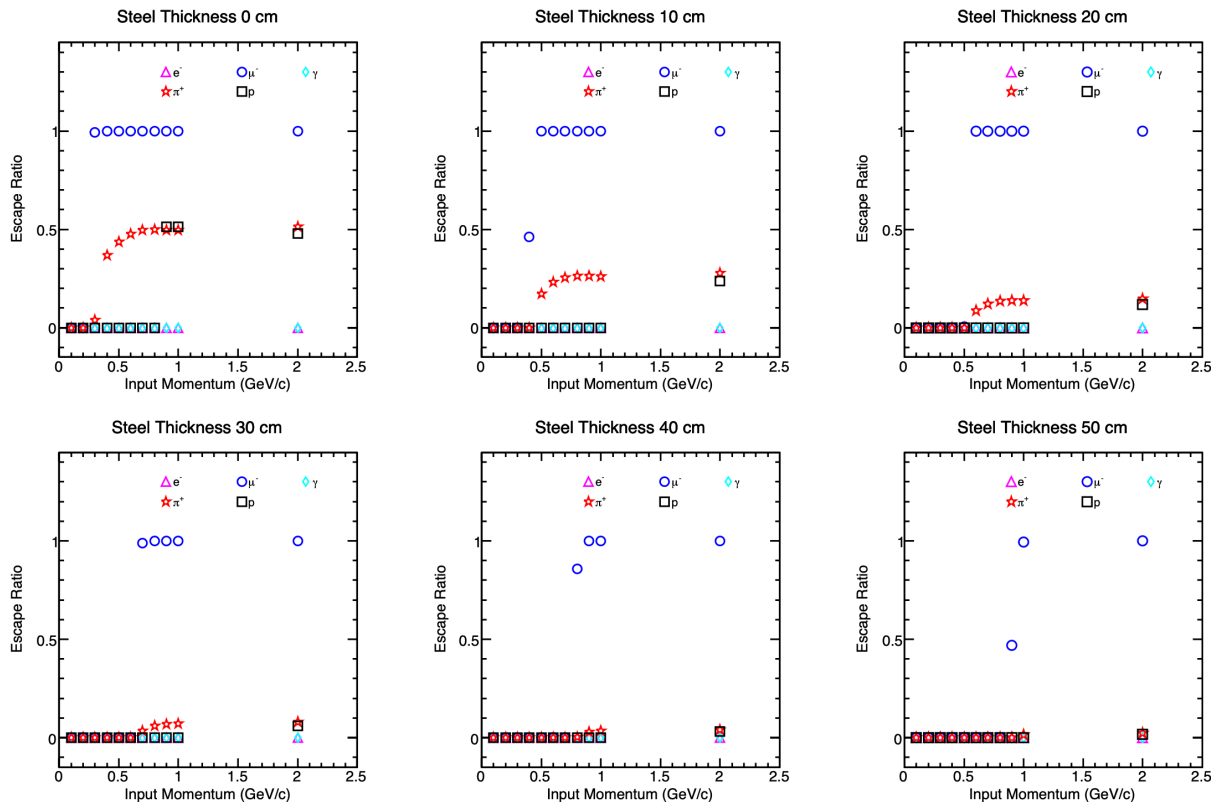


eta衰变的pi+-分布

近似为衰变缪子分布

王荣

孙旭



- 低动量下鉴别缪子、高效排除pi+-, 很困难 $\Rightarrow$ 可能只需要覆盖前角10-60度范围
- 可以调节EMC+铁的厚度, 选取一定动量以上的缪子进行鉴别
- 例如, 选取25cm CsI + 20cm铁, 可以选择0.6GeV/c以上缪子, pi+-排除在7倍左右
- 选取25cm CsI + 40cm铁, 可以选择0.8GeV/c以上缪子, pi+-排除在30倍左右
- 需要结合真实物理eta、本底产额、衰变运动学进行模拟, 决定最佳铁厚度

量能器（晶体）

Table 6.2 Properties of scintillating crystals applied in particle physics experiments

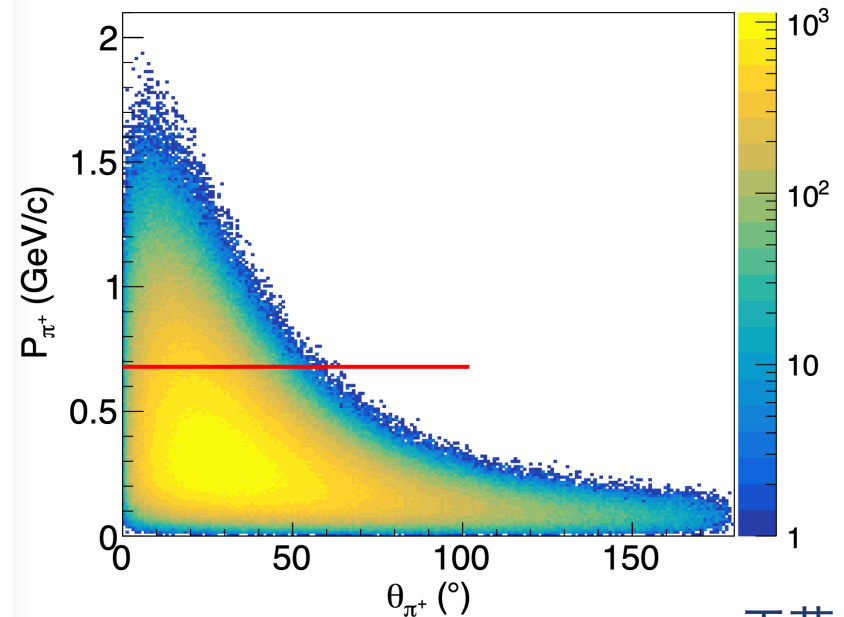
	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI	BaF ₂	CeF ₃	BGO	PbWO ₄	LYSO
Density [g cm ⁻³]	3.67	4.51	4.51	4.89	6.16	7.13	8.3	7.1
Radiation length [cm]	2.59	1.85	1.85	2.06	1.68	1.12	0.89	1.16
Molière radius [cm]	4.8	3.5	3.5	3.4	2.6	2.3	2.0	2.07
Interaction length [cm]	41.4	37.0	37.0	29.9	26.2	21.8	18.0	20.3
dE/dx)mip [MeV cm ⁻¹]	4.79	5.61	5.61	6.37	8.0	8.92	9.4	9.2
Refractive index [at λ_{peak}]	1.85	1.79	1.95	1.50	1.62	2.15	2.2	1.8
Hygroscopicity	Yes	Slight	Slight	No	No	No	No	No
Emission spectrum, λ_{peak}								
Slow component [nm]	410	560	420	300	340	480	510	
Fast component [nm]			310	220	300		510	420
Light yield rel. to NaI								
Slow component	100	45	5.6	21	6.6	9	0.3	
Fast component			2.3	2.7	2.0		0.4	75
Decay time [ns]								
Slow component	230	1300	35	630	30	300	50	
Fast component			6	0.9	9		10	35

林德旭

- 考虑到几百MHz的事例率，需要光衰减时间~ns量级
- 初步考虑纯CsI，紫外扩展的SiPM，只对6ns快成分敏感 ~3个事件堆积，可以接受
 - 能量分辨率~2.3%@1GeV，总造价约1亿，科大STCF正在进行相关预研
- BaF2快成分光衰减时间0.9ns，但比CsI贵2-3倍 ⇒ ~2亿量能器造价，可能太贵了

切伦科夫探测器(待定)

- 是否需要，取决于TOF和EMC能否在整个动量范围衔接电子鉴别
 - TOF: e / π 鉴别 @ $p < 0.3 \text{ GeV}/c$
 - EMC: ?
- 与REDTOP的CTOF类似
- 气凝胶介质，选择折射率1.02
- 只有粒子 $\beta > 1/1.02 = 0.98$ ，才会发出切伦科夫光
 - e : $p > 2.5 \text{ MeV} \Rightarrow$ 几乎所有电子可见
 - π : $p > 685 \text{ MeV} \Rightarrow$ 排除绝大部分强子，更高动量 e / π 鉴别依靠电磁量能器
- 只探测有无切伦科夫光，不成像
 - 制作成简单、统一的模块：暗盒、白膜、SiPM读出
 - 无需成像系统、无需高精度的平面 $\Rightarrow$ 低成本、低风险
- REDTOP CTOF造价（最便宜版本）：0.6 M USD $\Rightarrow$ 400万元



王荣

REDTOP detector

Central Tracker

~ 1m x 1.5 m
Thin LGAD
98% coverage

ADRIANO2 Calorimeter (tiles)

Scint. + heavy glass sandwich
35 X₀, 2.9λ_I (~ 64 cm deep)
Triple-readout +PFA
96% coverage

μ-polarizer

Active version (from
TREK exp.) - optional

CTOF

~ 1m x 1.5 m
Lead-glass tiles
98% coverage

10x Be or Li targets

- 0.33 mm thin
- Spaced 10 cm

Fiber tracker or ITS3

for rejection of γ-conversion
and vertexing

2.4 m

2.7 m

1.5 m

1 m

CT