

HIAF高能终端谱仪初步设计

仇浩

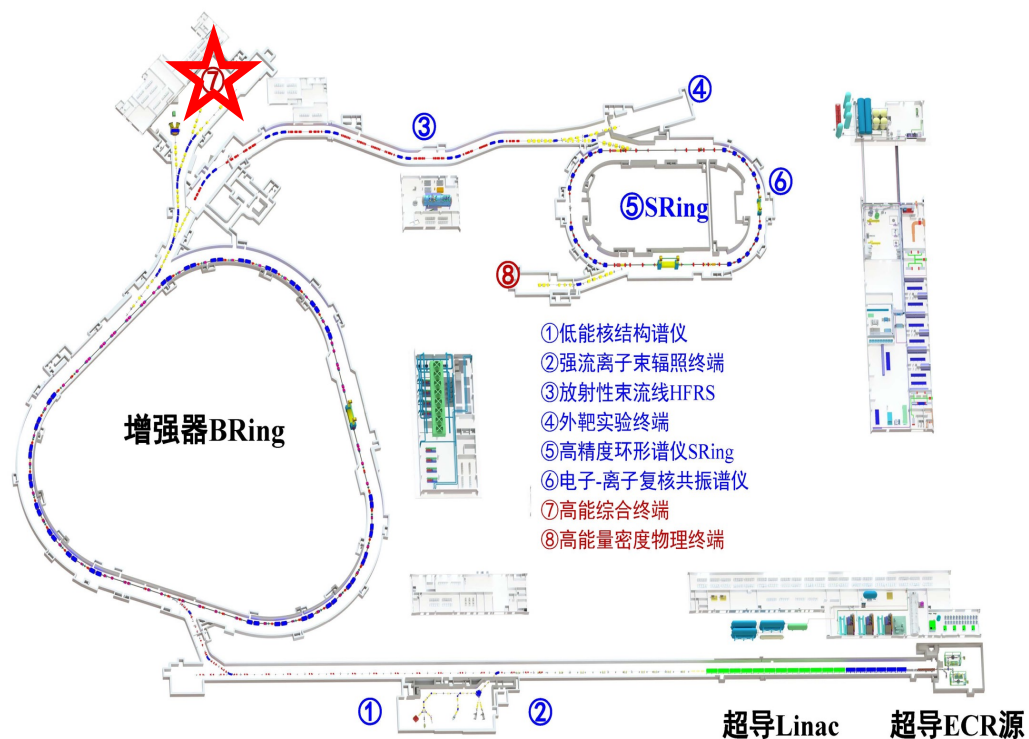
中国科学院近代物理所

HIAF

“十二五”国家重大科技基础设施
广东惠州，2025年建成



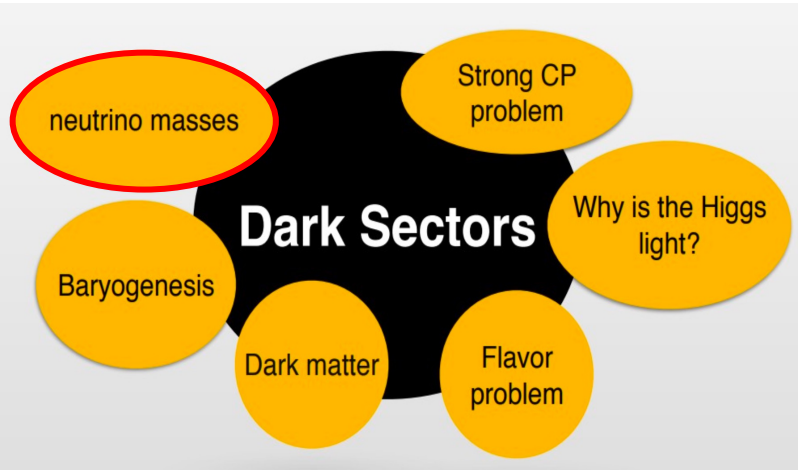
HIAF及HIAF-U



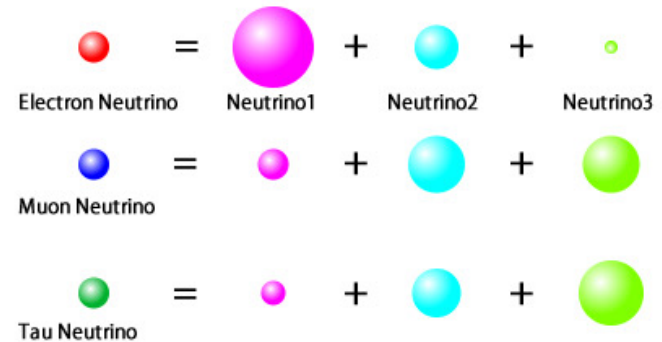
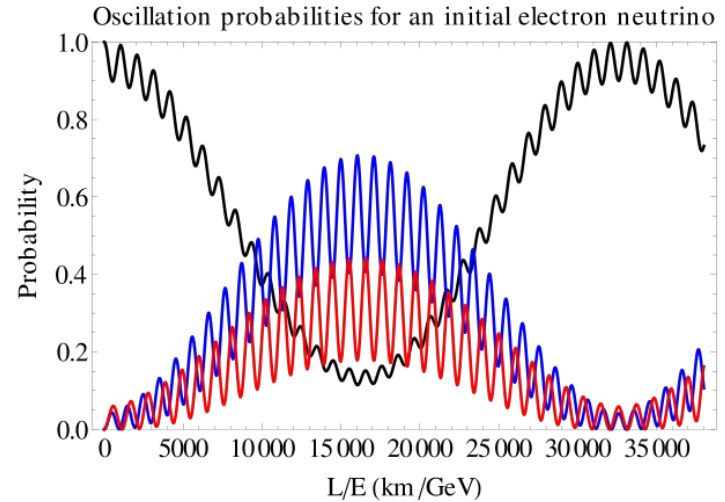
	E_k (GeV/u)	$v_{s_{NN}}$ (GeV)
HIAF p束	<9.3	<4.58
HIAF U束	<2.45	<2.85
HIAF-U U束	<9.1	<4.54

- 最高能量9.3GeV/u的质子束流
 - η 介子物理、轻强子物理
- HIAF(HIAF-U): <2.45 GeV/u (<9.1 GeV/u)的U束
 - 超核、核物质相结构、状态方程
- 可能产生K/ π 次级束
 - η 、轻强子、超核

η 介子物理

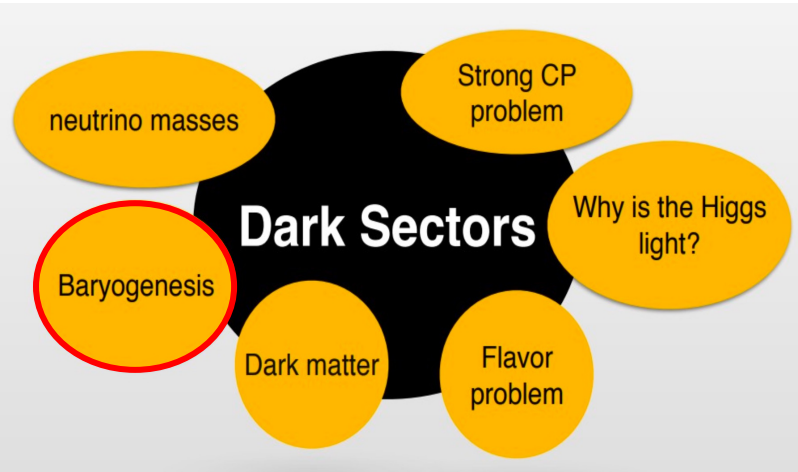


C. Gatto

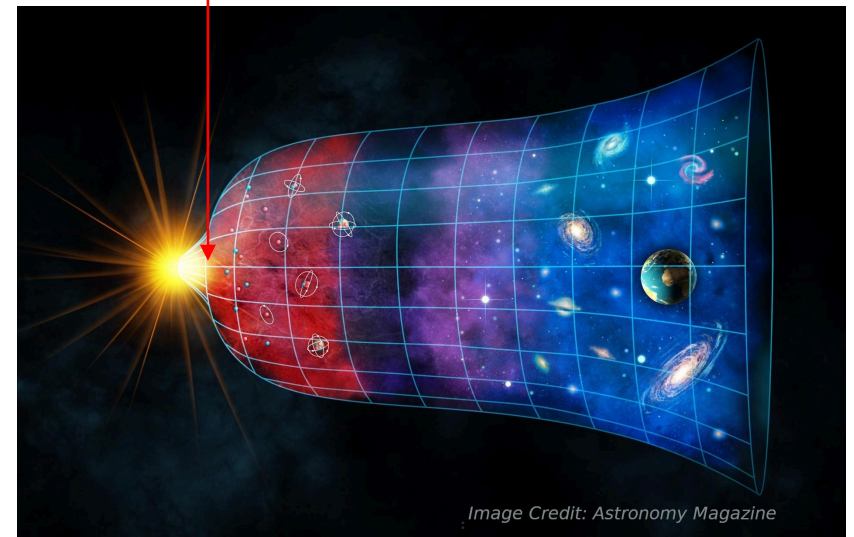
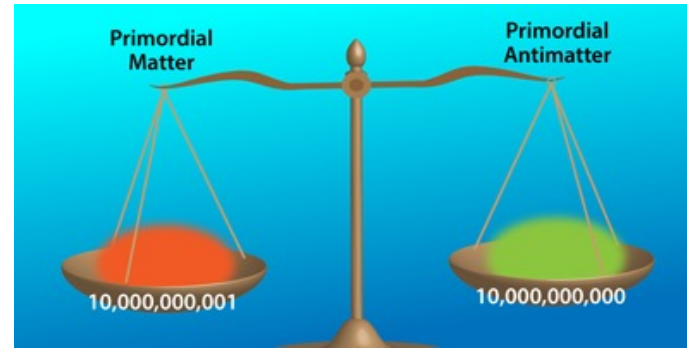


- 粒子物理标准模型面临一些难题，需要超出当前标准模型的新物理
- e.g.中微子有质量

η 介子物理

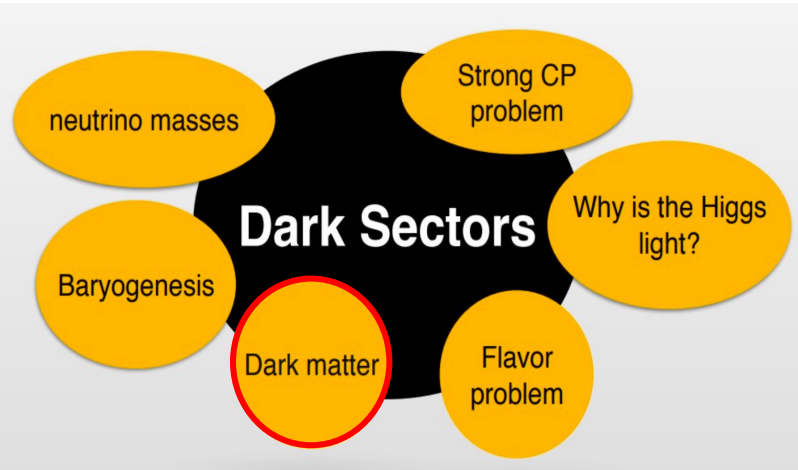


C. Gatto

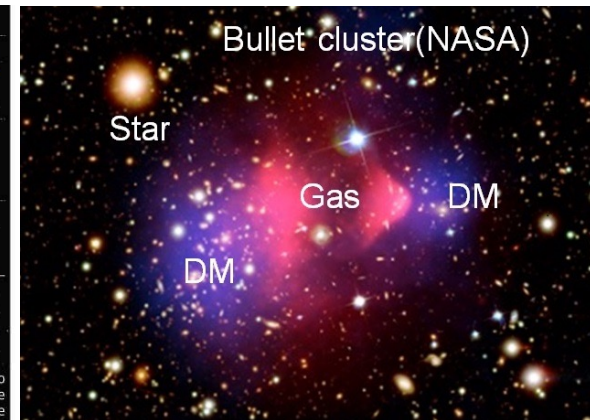
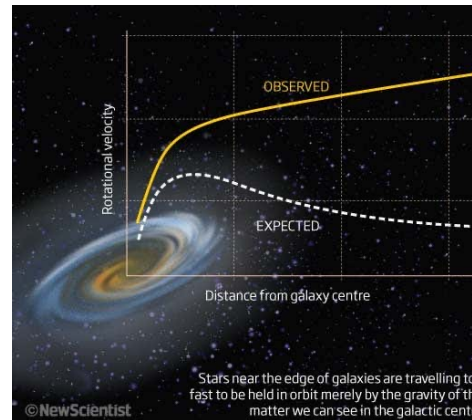
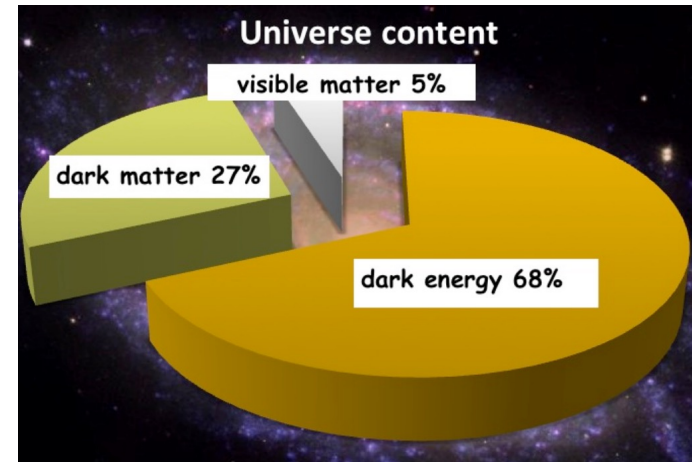


- 粒子物理标准模型面临一些难题，需要超出当前标准模型的新物理
- e.g.宇宙正反物质不对称

η 介子物理



C. Gatto

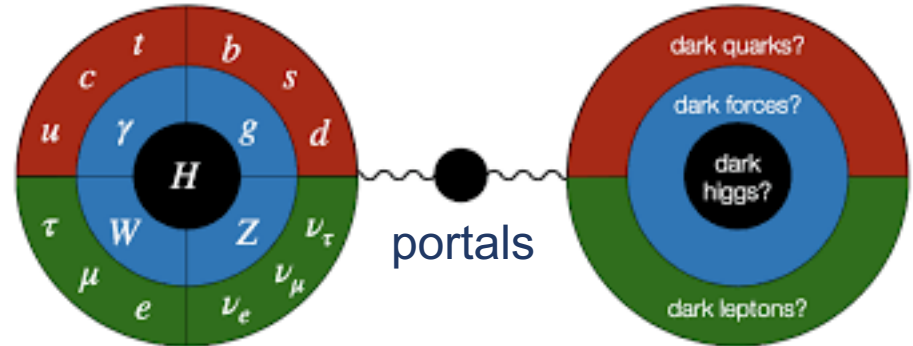


- 粒子物理标准模型面临一些难题，需要超出当前标准模型的新物理
- e.g.暗物质

η 介子物理



C. Gatto

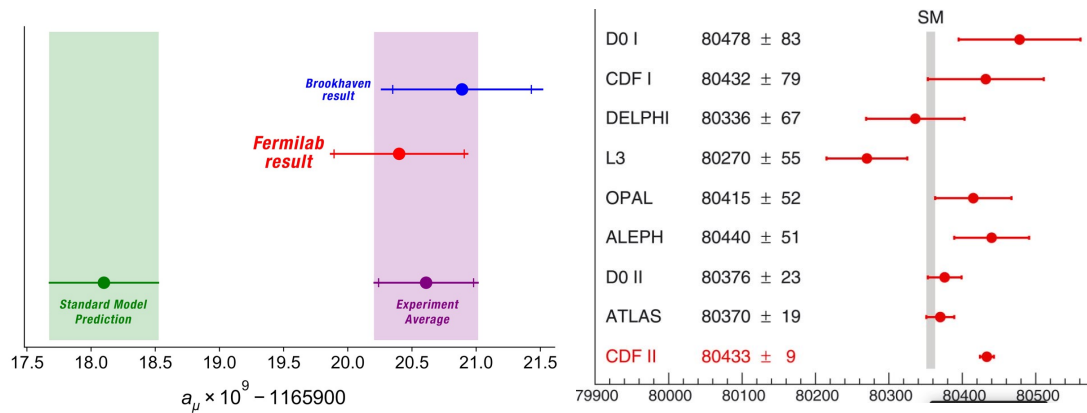
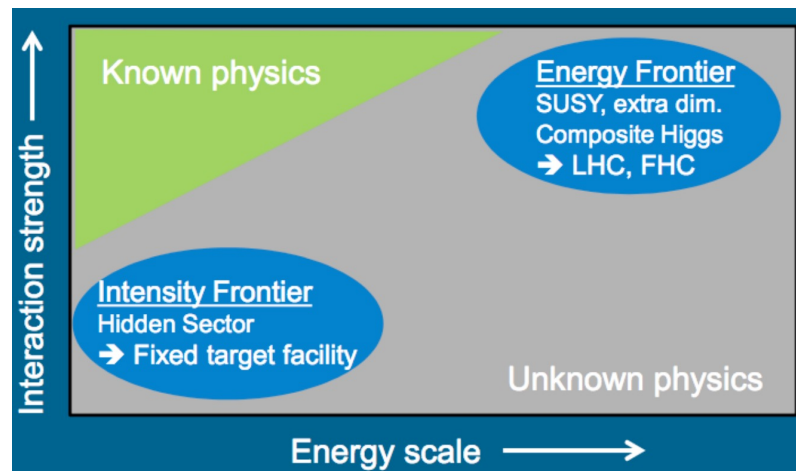


- 粒子物理标准模型面临一些难题，需要超出当前标准模型的新物理
- 可能存在一组（sector）暗物质粒子，通过“门户”（portal）粒子与标准模型粒子有很微弱的联系

η介子物理

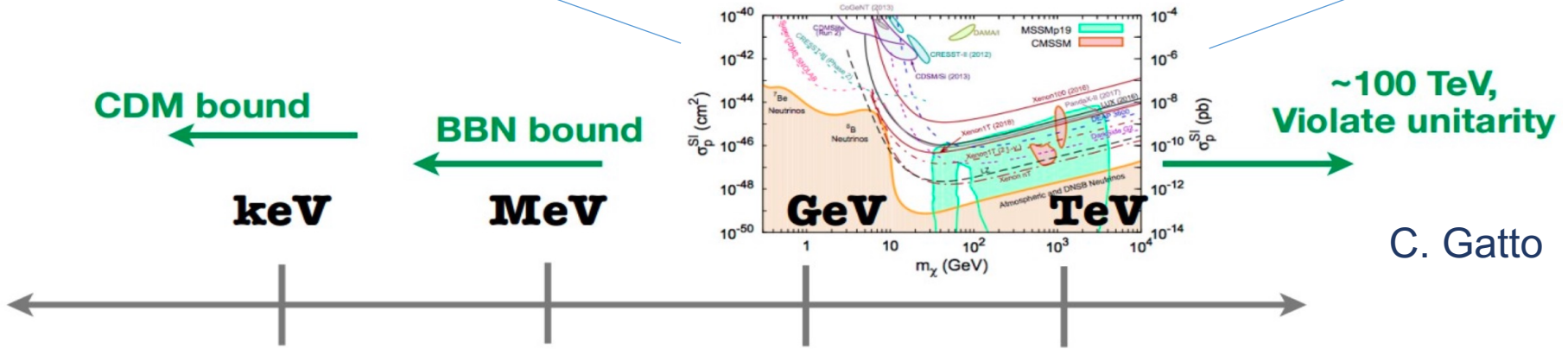
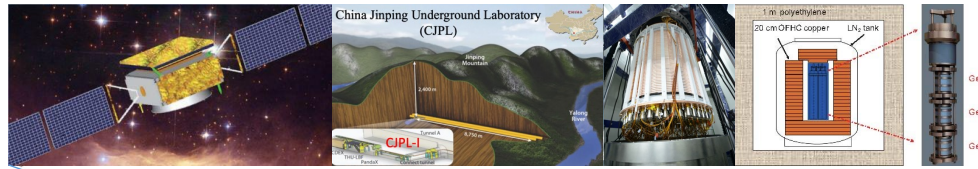


C. Gatto



- 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

η 介子物理



C. Gatto

Bound by cosmological observations

Mostly unconstrained

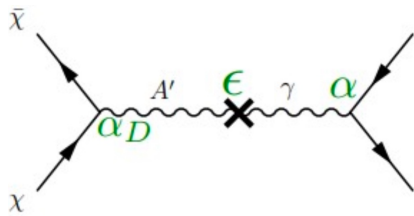
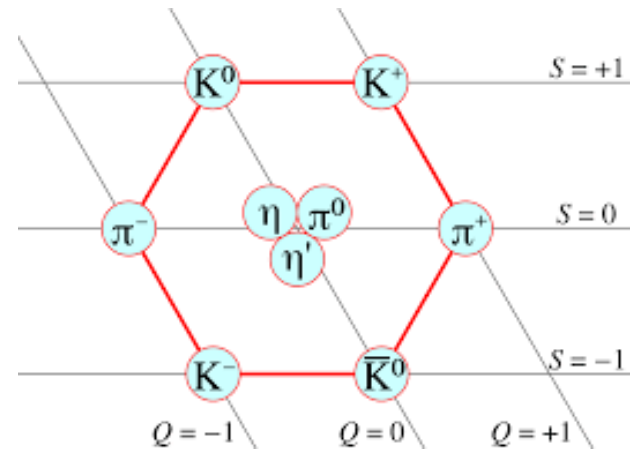
Disfavorite by LHC/Direct detection

Requires new facilities

- 在暗物质粒子寻找中，传统的大质量弱相互作用粒子(WIMP, $\text{GeV} \sim 100\text{TeV}$)可能存在的参数空间不断被实验排除
- 轻暗物质粒子($\text{MeV} \sim \text{GeV}$)当前实验限制较少，是重要的实验寻找方向
- 强流加速器装置是寻找轻暗物质粒子的有力工具

η介子物理

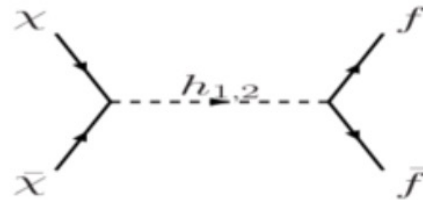
- η、η'和Higgs是已知仅有的3种全零量子数粒子
 - $Q = I = J = S = B = L = 0$
- ⇒ 标准模型衰变被压低
- ⇒ 新物理的分支比更大
- η / η' 衰变可以用来寻找多种连接暗物质世界的门户(portal)粒子，以及检验基本对称性



暗光子

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

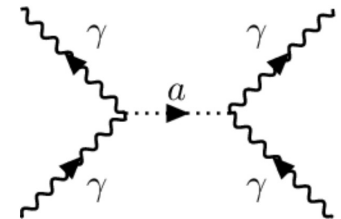
$$A' \rightarrow \mu^+ \mu^- / e^+ e^-$$



暗Higgs粒子

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

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



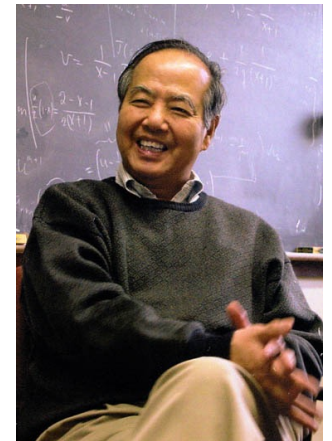
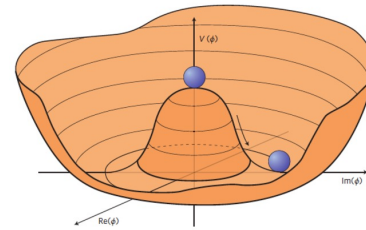
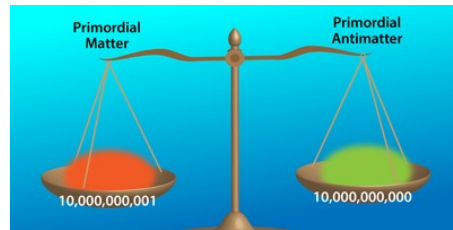
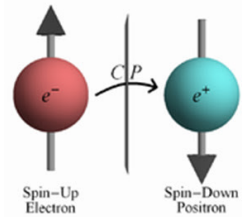
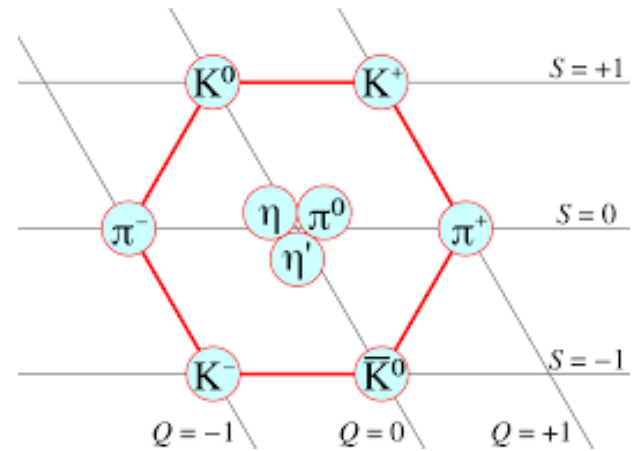
类轴子

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

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

η介子物理

- η、η'和Higgs是已知仅有的3种全零量子数粒子
 - $Q = I = J = S = B = L = 0$
- ⇒ 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

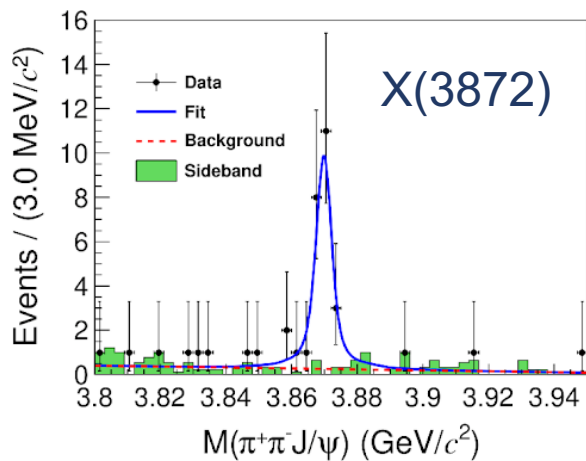


寻找新的CP不对称性

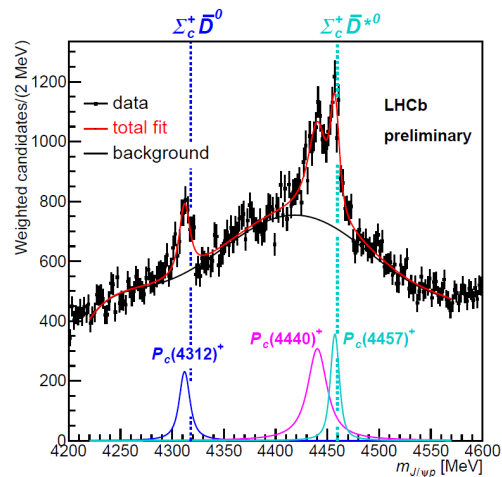
$$\eta \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^-$$

对称展示宇宙之美
不对称生成宇宙之实

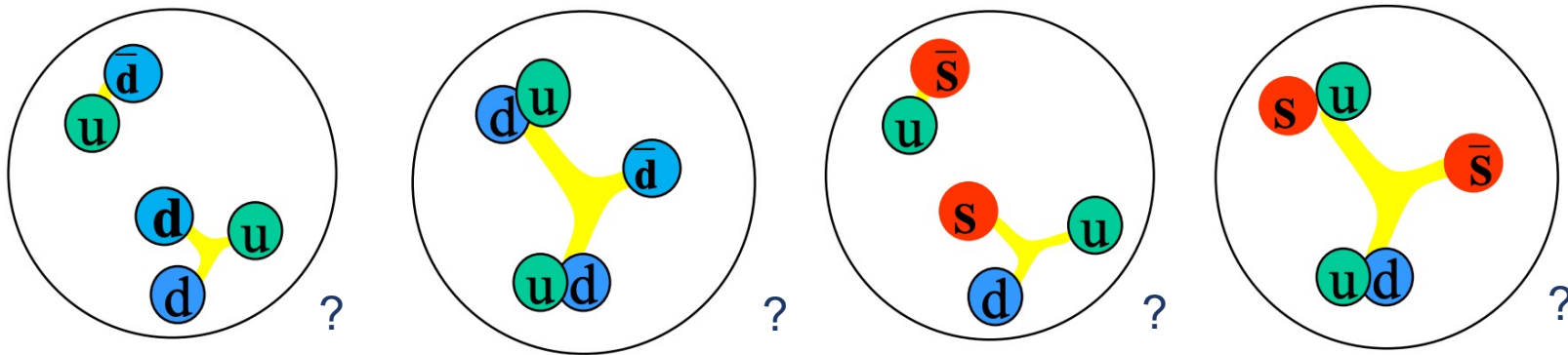
轻强子物理



四夸克态

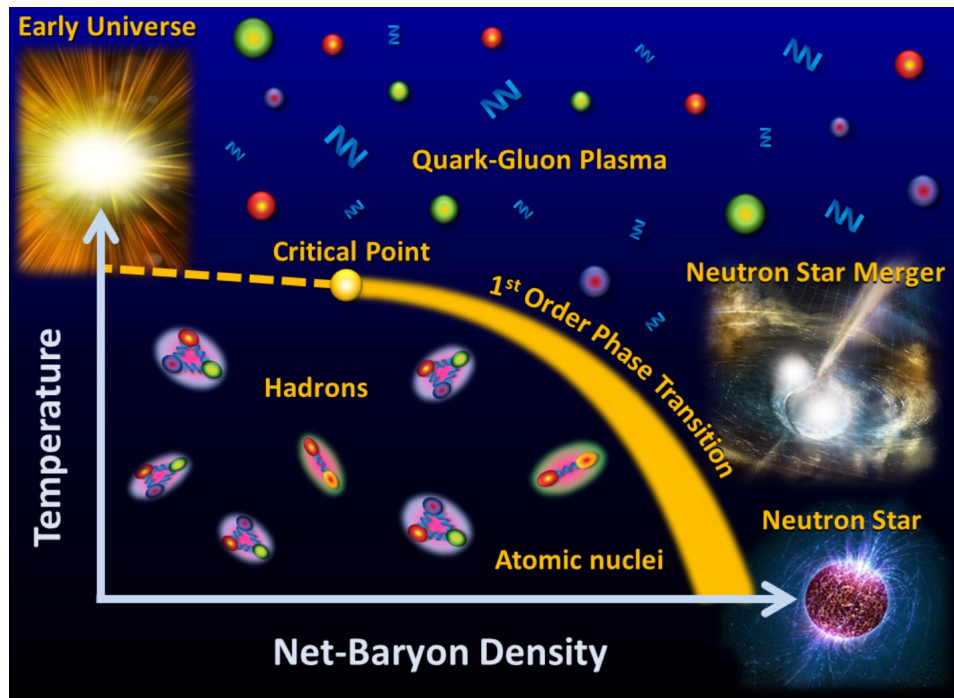
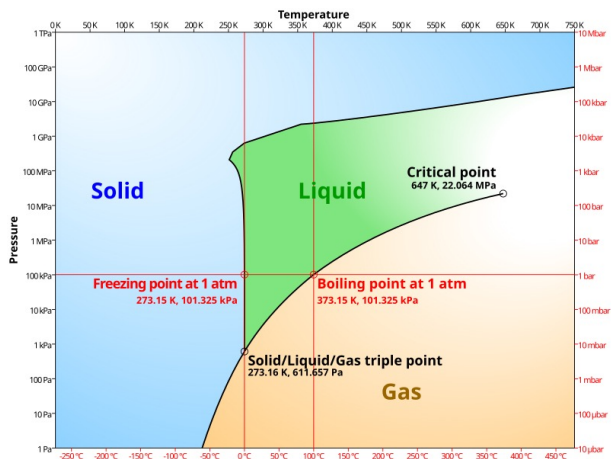


五夸克态



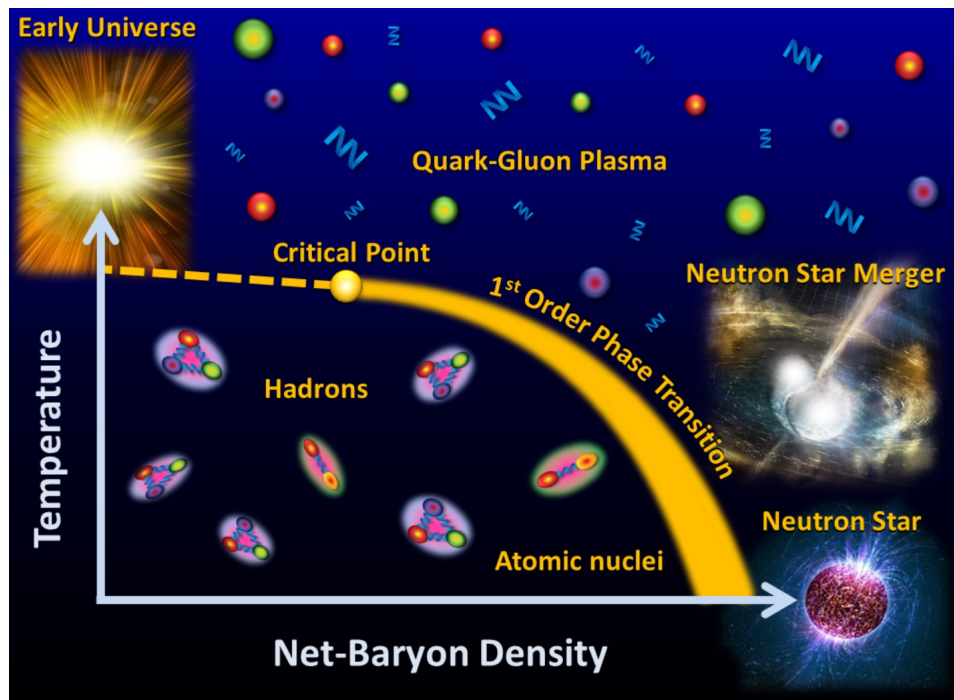
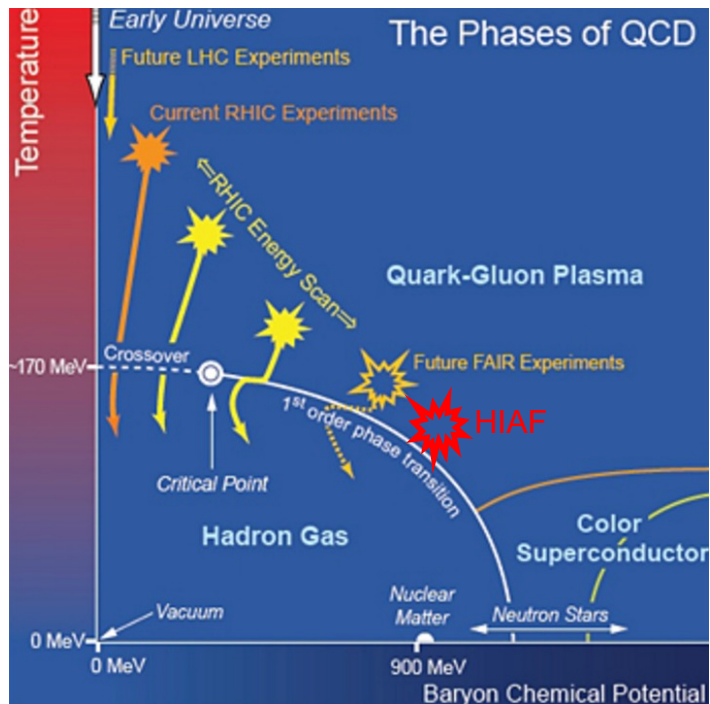
- HIAF也为轻强子物理研究提供了良好的束流条件

核物质相结构



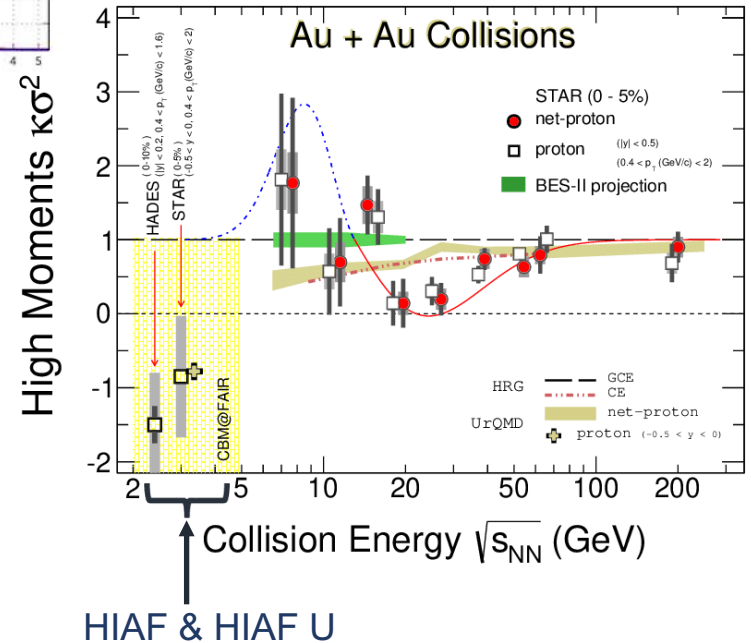
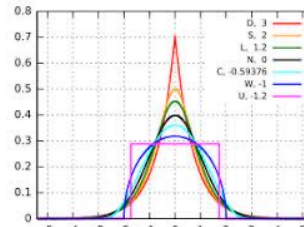
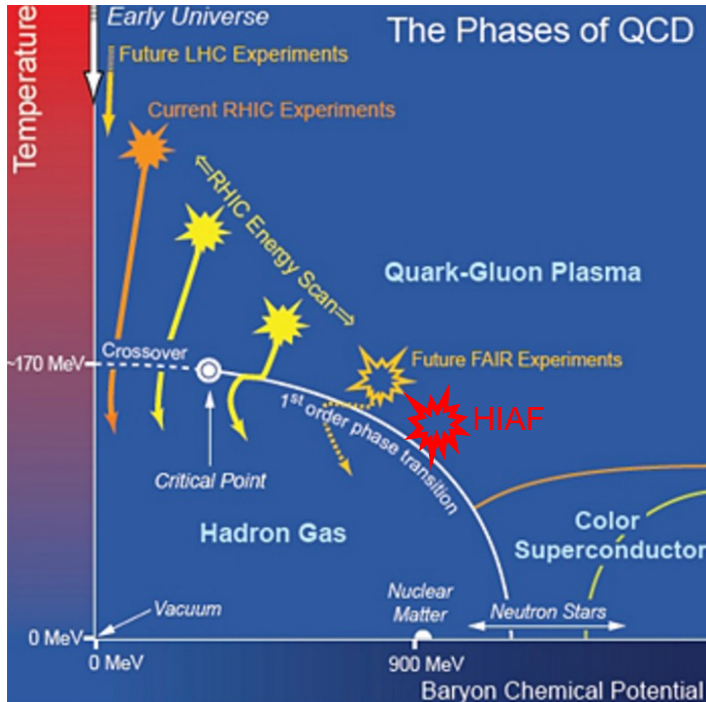
- 通过不同能量的重离子碰撞，能扫描核物质相图上的不同区域
- 寻找理论预言的一级相变和临界点

核物质相结构



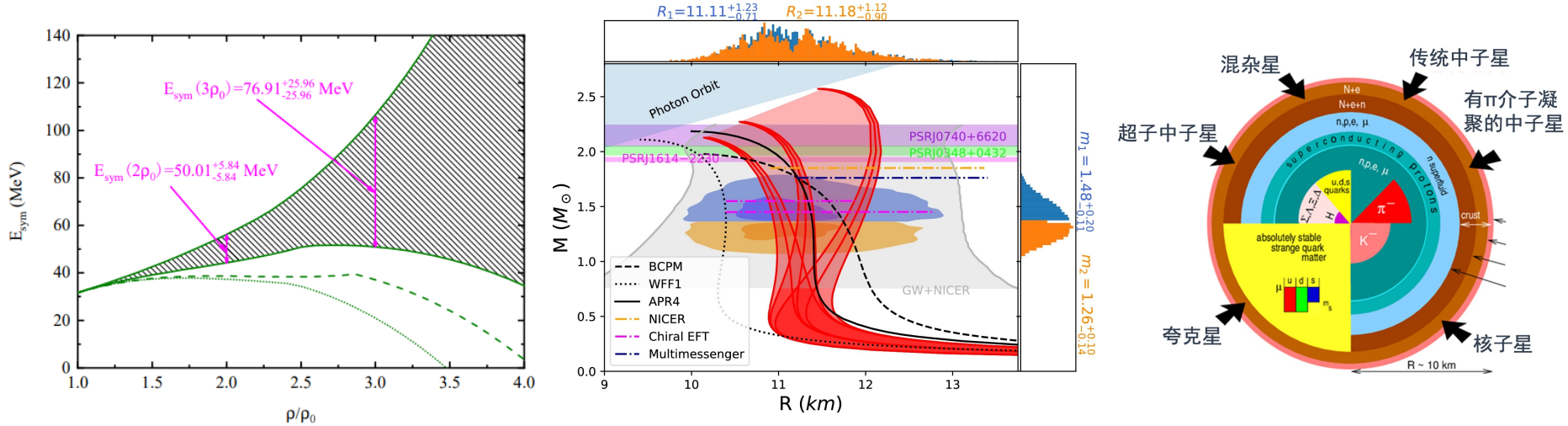
- 通过不同能量的重离子碰撞，能扫描核物质相图上的不同区域
- 寻找理论预言的一级相变和临界点

核物质相结构



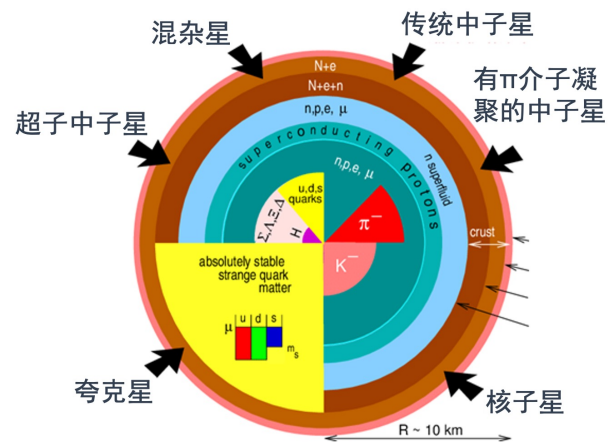
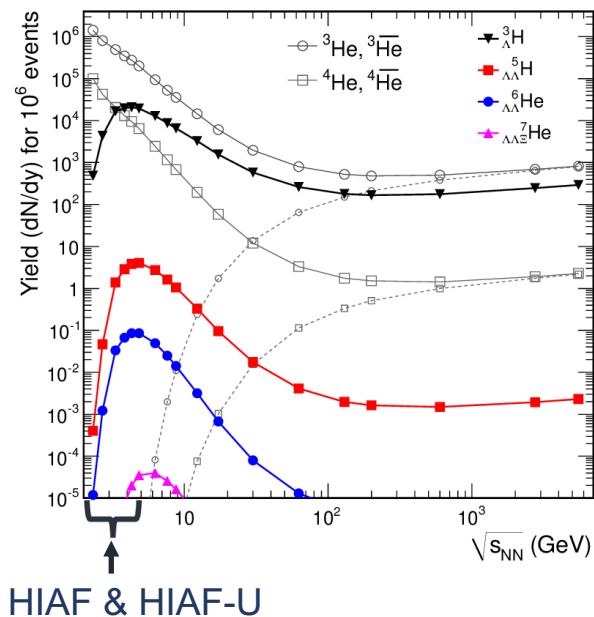
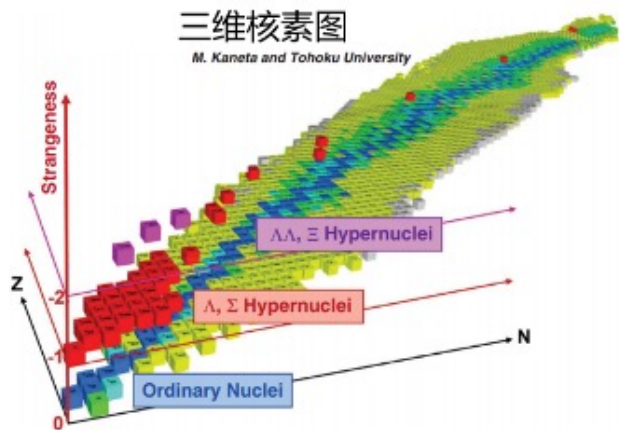
- 通过不同能量的重离子碰撞，能扫描核物质相图上的不同区域
- 寻找理论预言的一级相变和临界点

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

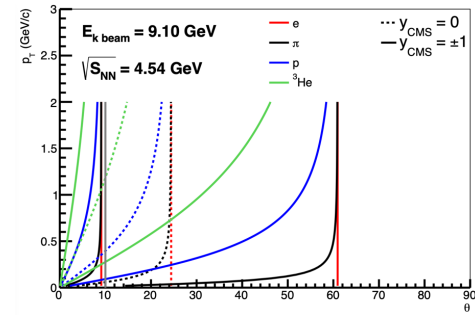
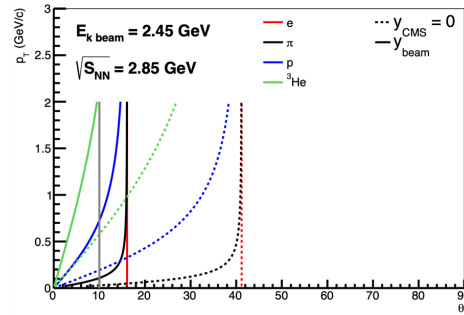
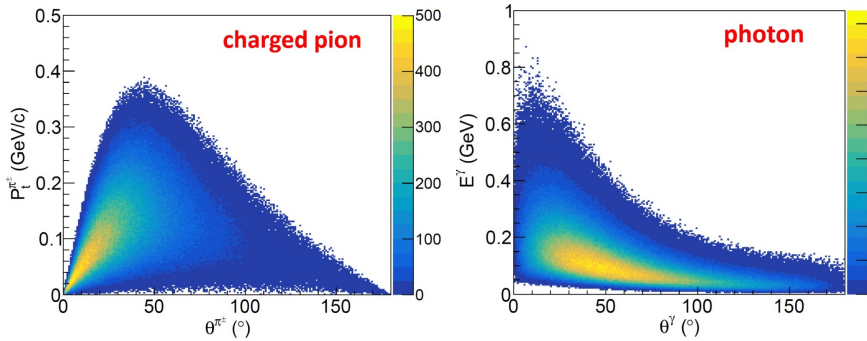
超核



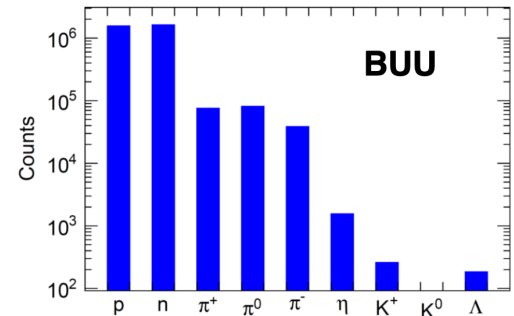
- 超核性质、（多奇异）超核的发现
- \Rightarrow 超子-核子、超子-超子相互作用
- \Rightarrow 中子星结构和性质

谱仪性能需求

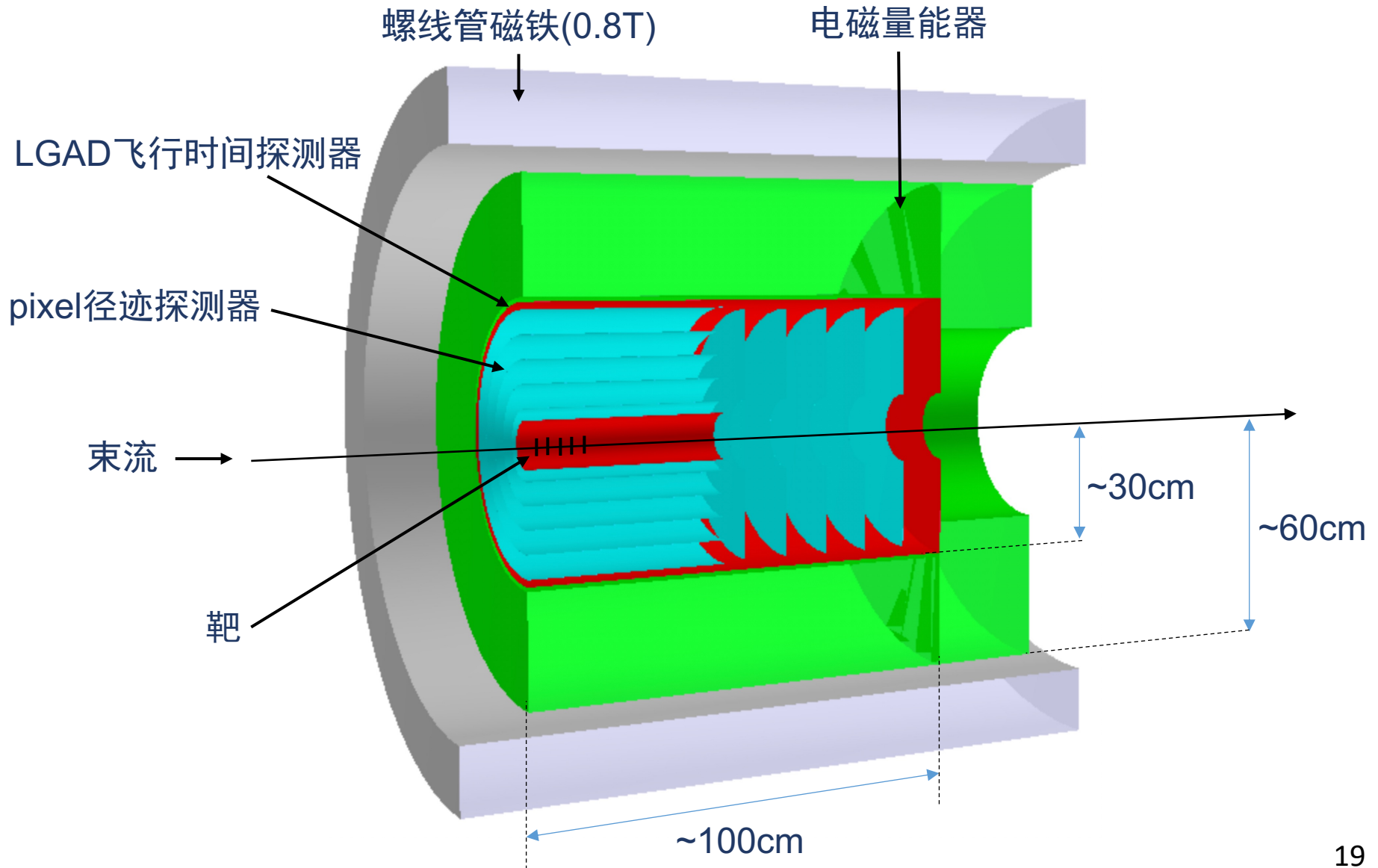
$$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 (\gamma\gamma)$$



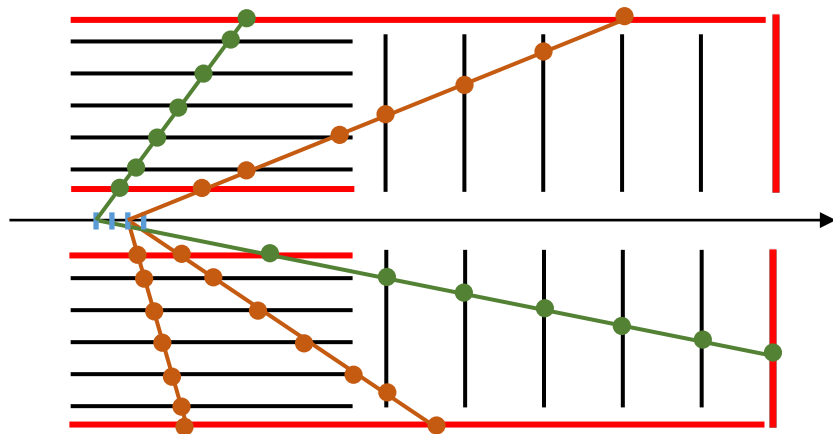
- 带电粒子横动量50MeV-500MeV
- γ 能量50MeV-1GeV
- 大方位角覆盖($\theta: 10^\circ \sim 100^\circ$, $\varphi: 0 \sim 2\pi$)
 - 覆盖重离子碰撞的中心快速度区
- e^+ , γ , π^+ , K^+ , p , d , t , He^3 , He^4 粒子鉴别
 - $\pi^+/e^+ \sim 100$, $n/\gamma \sim 8 \Rightarrow$ 为鉴别 e^+ 、 γ , 需大幅压低 π^+ 、 γ 本底
- 高位置分辨, 压低超核等衰变粒子本底
- 远超同能区现有实验的事例率



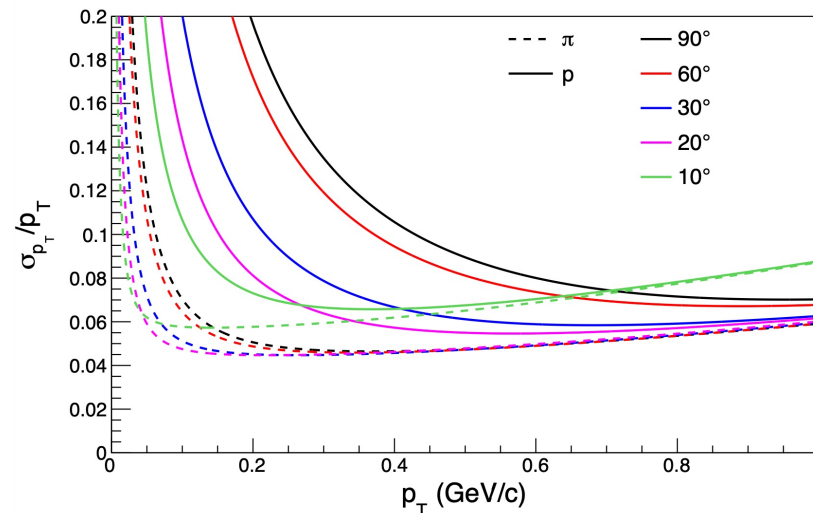
谱仪概念设计



硅径迹探测器

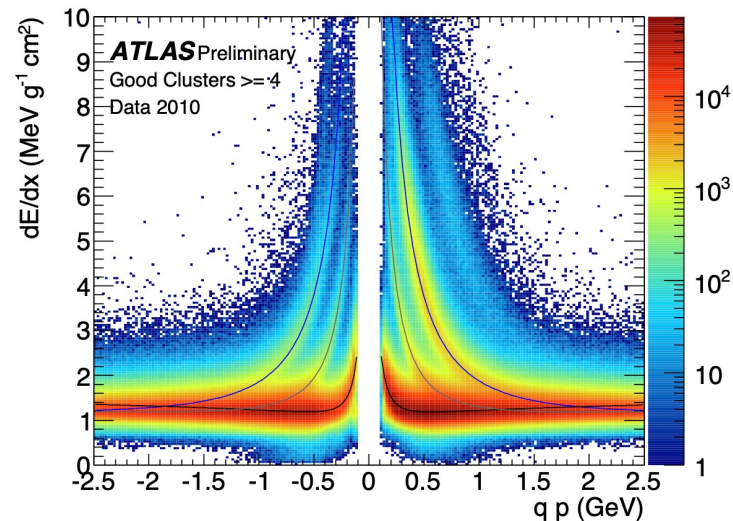
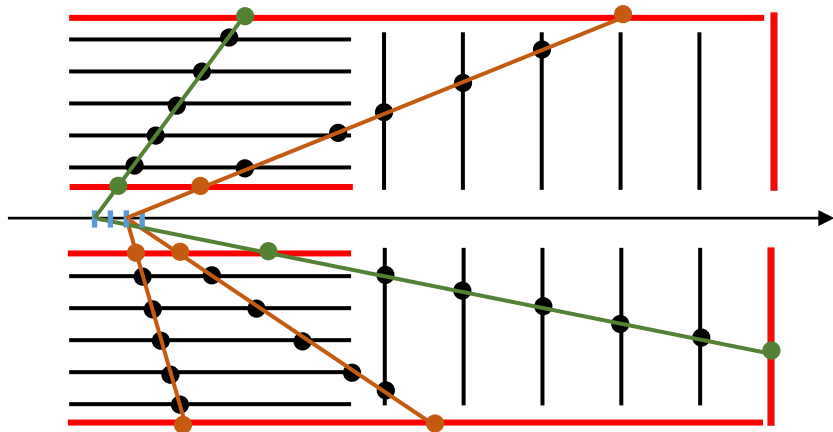


5 hits, R=20cm, L=90cm, 0.05mm hit error, 0.8T



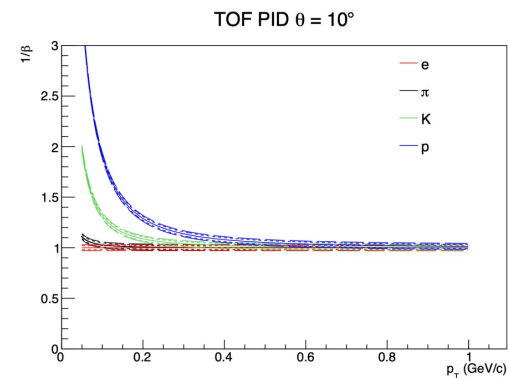
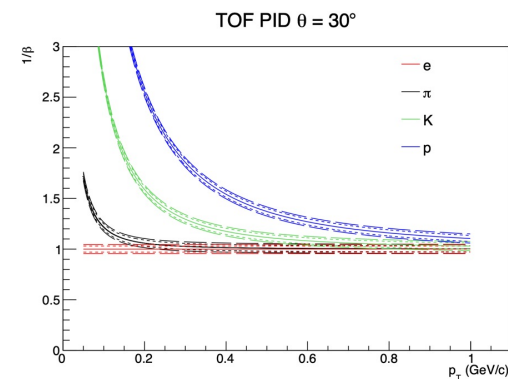
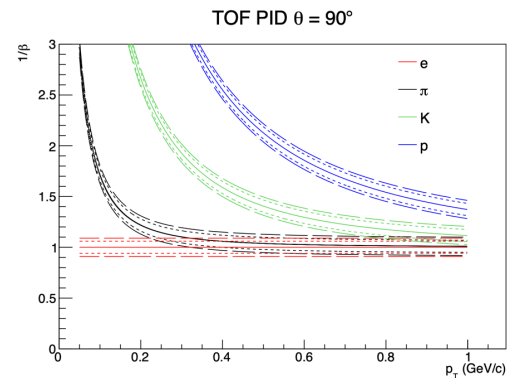
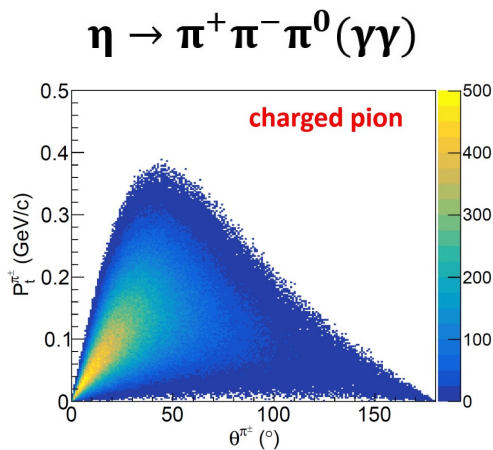
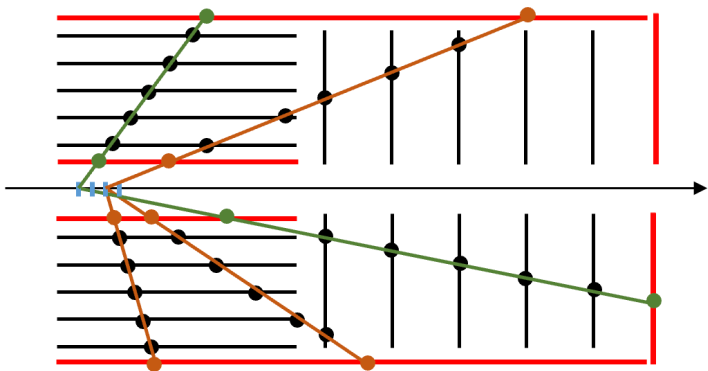
- 像素尺寸~100 μ m
 - 使用很短(~30cm)的径迹长度即可得到较好的动量分辨：4-6% (0.8T磁场)
 - 精确重建衰变顶点，压低超核等本底
- 能量、时间双读出
 - 通过时间区分不同碰撞事例： $\Delta t \sim 10$ ns (1/100MHz)
 - dE/dx用于区分不同轻核电荷Z
- 单pixel死时间~10 μ s
 - 即使事例率高达100MHz，每事例4条径迹情况下，占有度仅~10⁻³

硅径迹探测器



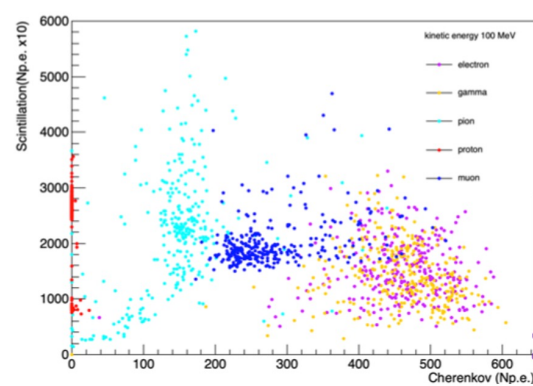
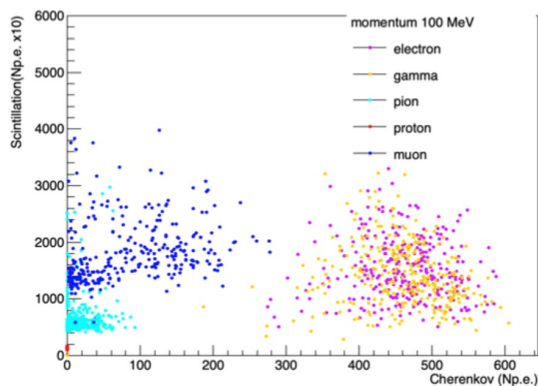
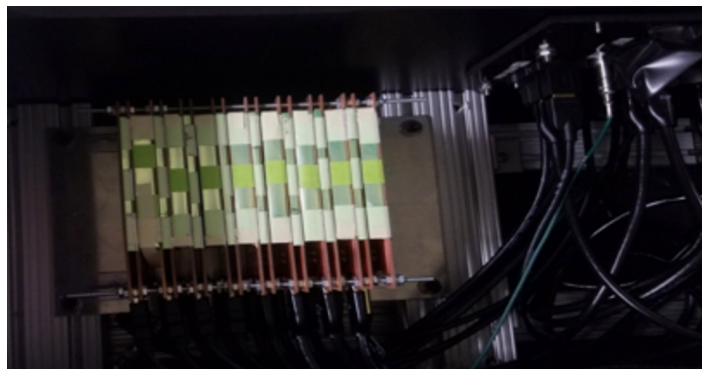
- 像素尺寸 $\sim 100\mu\text{m}$
 - 使用很短($\sim 30\text{cm}$)的径迹长度即可得到较好的动量分辨: 4-6% (0.8T磁场)
 - 精确重建衰变顶点, 压低超核等本底
- 能量、时间双读出
 - 通过时间区分不同碰撞事例: $\Delta t \sim 10\text{ns}$ (1/100MHz)
 - dE/dx 用于区分不同轻核电荷 Z
- 单pixel死时间 $\sim 10\mu\text{s}$
 - 即使事例率高达100MHz, 每事例4条径迹情况下, 占有度仅 $\sim 10^{-3}$

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
- $\Delta t \sim 30\text{ps}$
- 能很好地鉴别几乎所有主要带电粒子
 - 高动量 e / π 鉴别用电磁量能器补充

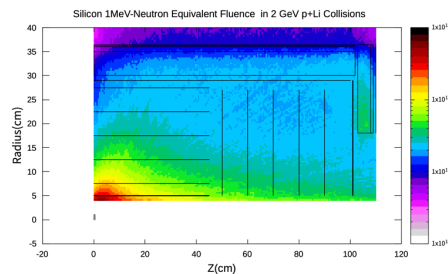
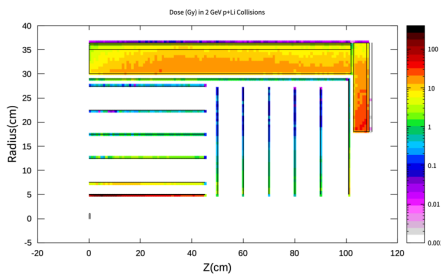
双读出电磁量能器



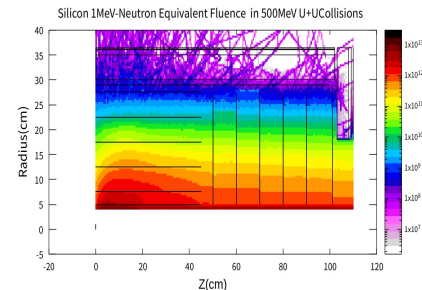
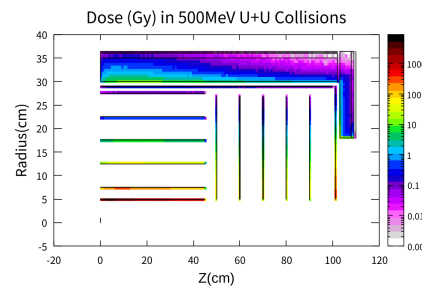
- REDTOP实验组研发的ADRIANO2式电磁量能器
- 铅玻璃+闪烁体双读出 \Rightarrow 很好的 e^+ vs. π^+ 、 γ vs. n 鉴别能力
 - 铅玻璃：切伦科夫光，仅对电磁簇射敏感
 - 闪烁体：对电磁和强子簇射同时敏感
- $\Delta E/E \sim 3\%$ @1GeV
- $\Delta t \sim 200\text{ps}$ ，用于区分不同事例的信号
- 成型时间（模块死时间） $\sim \mu\text{s}$
 - 100MHz事例率 \times 每事例4条径迹时，占有度 $< 10\%$

辐射剂量

2 GeV p+Li, 100MHz, 1个月



500 MeV U+U, 1MHz, 1个月



FLUKA模拟结果

辐射剂量 (Gy) Si1MeV等效中子通量 (n_{eq}/cm^2)

最内层硅

3000

3×10^{12}

最内层EMC

50

3×10^{11}

参考抗辐照性能

探测器/材料

辐射剂量 (Gy)

Si1MeV等效中子通量 (n_{eq}/cm^2)

pixel

2×10^4

1.7×10^{13}

LGAD

1×10^{15}

铅玻璃

20

SiPM

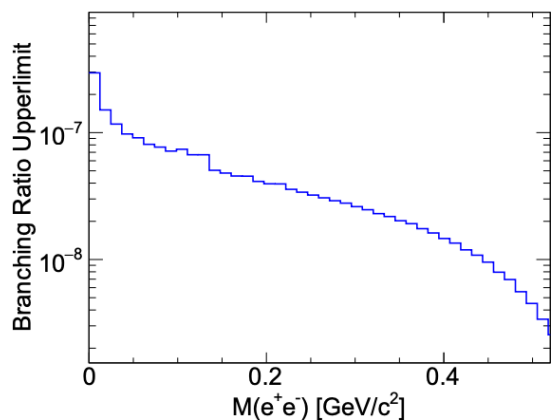
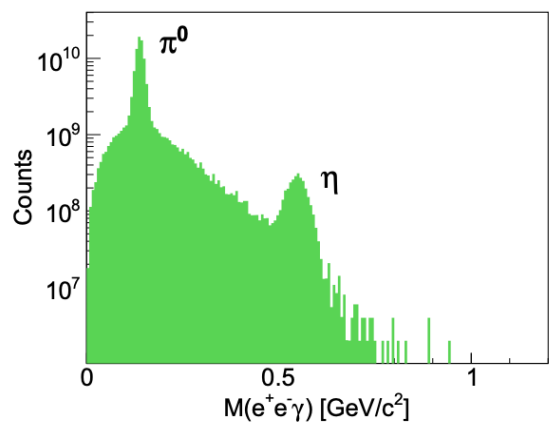
1×10^{14}

- 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 (TF101: 接收20Gy辐照后光传输率降低1%)
 - 研发抗辐照更好的铅玻璃 / PbF_2 晶体替代 / 紫外光或高温恢复

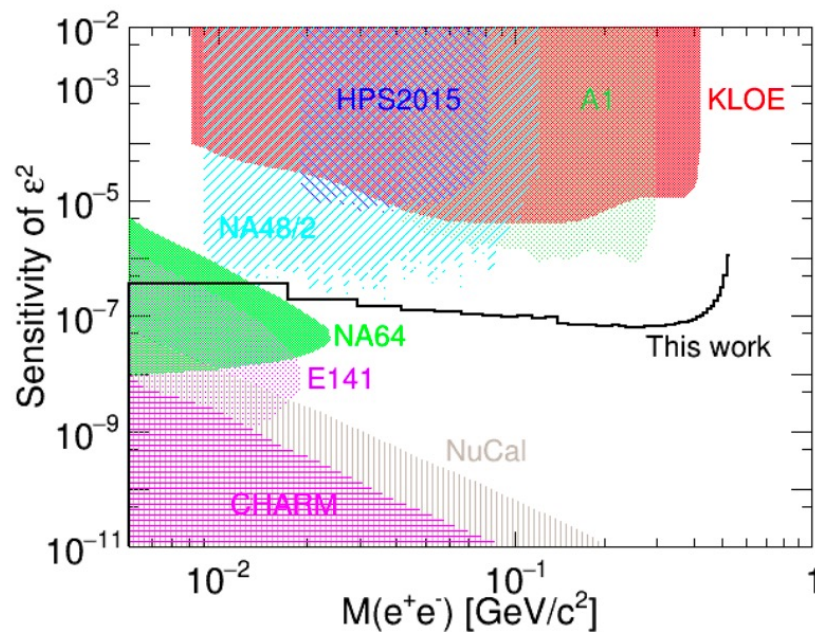
数据带宽需求

- 重离子碰撞
 - 1MHz
 - ~100 track
 - 7 hits / track
 - $1M * 100 * 6 = 700M$ hits / s
- η 介子物理
 - ~>100MHz
 - ~4 track
 - 6 hits / track
 - $100M * 4 * 6 = 2400M$ hits / s
- CEE
 - 10kHz
 - ~100 track
 - ~30 hits / track
 - ~20 digi / hit
 - $10k * 100 * 30 * 20 = 600M$ digi / s
- 新谱仪数据带宽需求与CEE在同一个量级

η 介子物理模拟-暗光子寻找

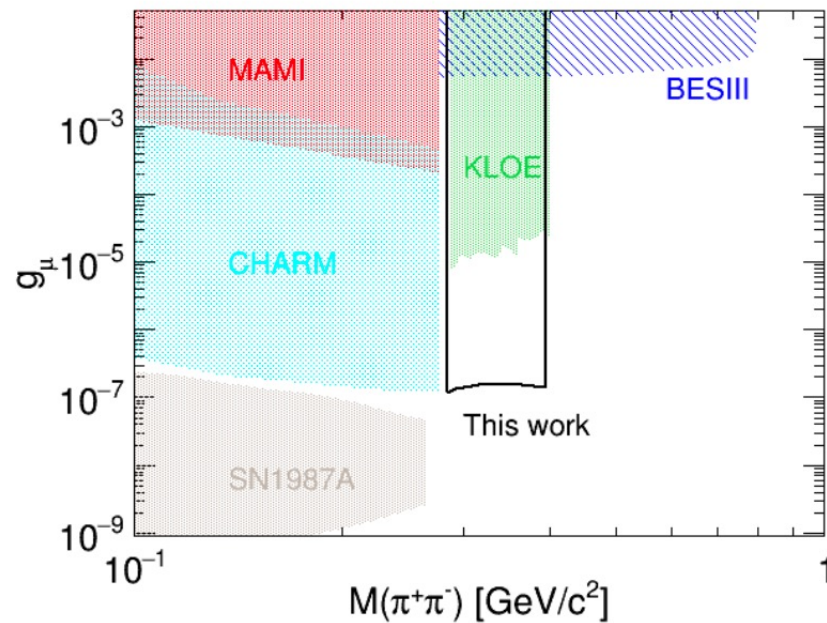
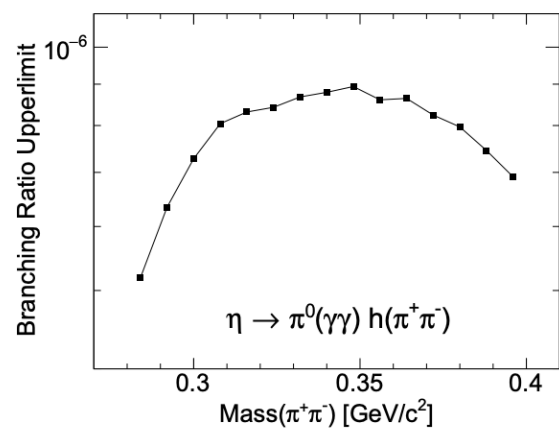
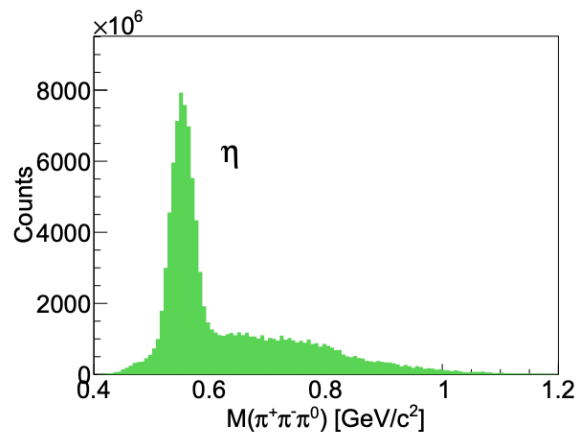


$$\eta \rightarrow e^+e^-\gamma$$



- 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

η 介子物理模拟-暗Higgs寻找



- 1.8 GeV $p + {}^7\text{Li}$
- 100MHz事例率，一个月，平均流强/峰值流强 = 30%
- 共产生 6×10^{11} 个 η

η 介子物理模拟- C&CP对称性

$$u \equiv (p_{\pi^+} + p_{\pi^0})^2$$

$$t \equiv (p_{\pi^-} + p_{\pi^0})^2$$

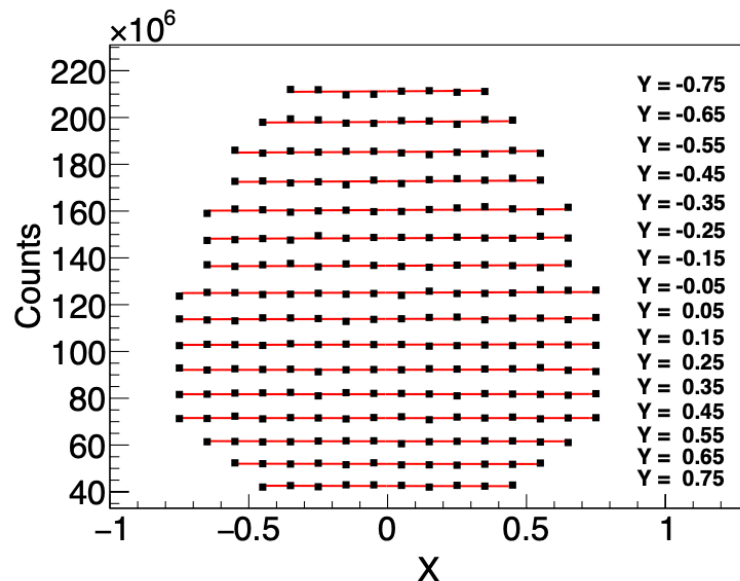
$$s \equiv (p_{\pi^+} + p_{\pi^-})^2$$

$$X \equiv \sqrt{3} \frac{T_{\pi^+} - T_{\pi^-}}{Q_\eta} = \frac{\sqrt{3}}{2m_\eta Q_\eta} (u - t),$$

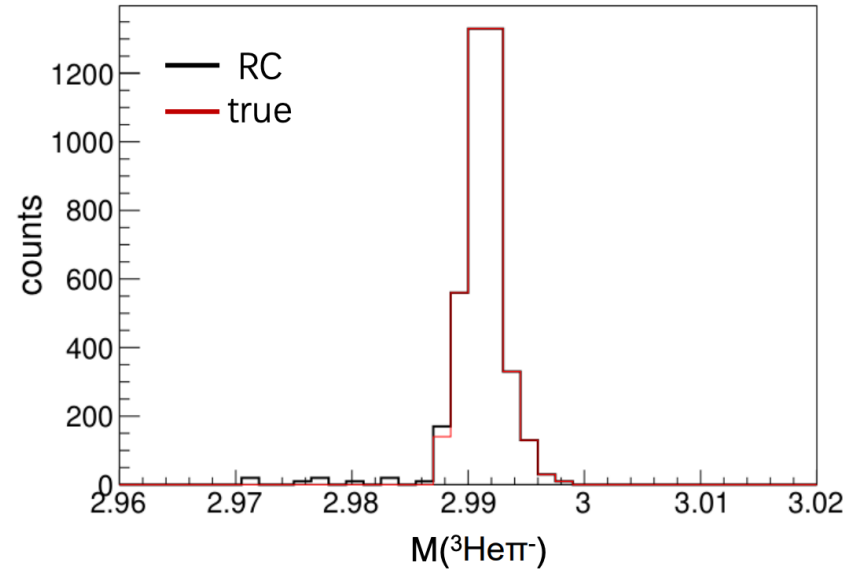
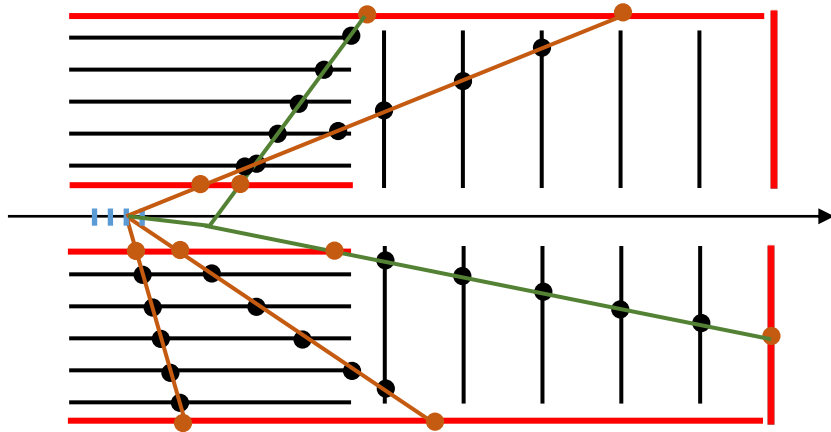
$$Y \equiv \frac{3T_{\pi^0}}{Q_\eta} - 1 = \frac{3}{2m_\eta Q_\eta} [(m_\eta - m_{\pi^0})^2 - s] - 1,$$

$$N(X, Y) = N_0(1 + aY + bY^2 + cX + dX^2 + eXY + fY^3 + gX^2Y + hXY^2 + lX^3 + \dots),$$

- 1.8 GeV p + ^7Li
- 100MHz事例率，一个月，平均流强/峰值流强 = 30%
- $\Delta c \sim 5 \times 10^{-5}$
 - 比COSY和KLOE-II现有结果精确~2个量级



超核重建



- 几十 μm 的位置分辨能力
⇒ 几乎无本底的超核等弱衰变粒子重建

造价

子系统	预算（万元）
Target	50
pixel tracker	1400 + 1200(研发)
LGAD TOF	3300
EMC	4500
Solenoid	600
Supporting structure	100
DAQ	1600
Total	11550 + 1200(研发)

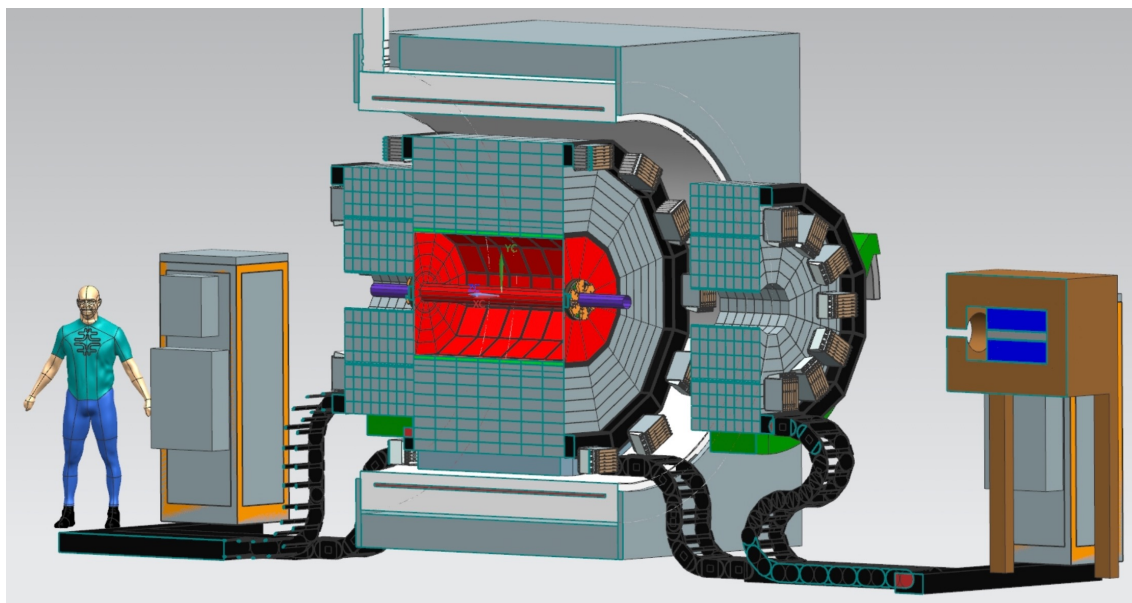
谱仪名称

1. 惠州GeV谱仪 GeV-Energy Spectrometer at Huizhou (GESH)
2. HIAF GeV谱仪 GeV-Energy Spectrometer at HIAF (GESH)
3. 中国超核谱仪 China Hyperon-Nuclei Spectrometer (CHNS)
4. GeV全硅谱仪 GeV-Energy Silicon Tracker (GEST)
a notable deed or exploit; a tale of adventure or romance
5. 紧凑GeV谱仪 Compact GeV-energy Spectrometer (CGS)
6. 惠州高能谱仪 Huizhou High Energy Spectrometer (HHES)

◦ ◦ ◦

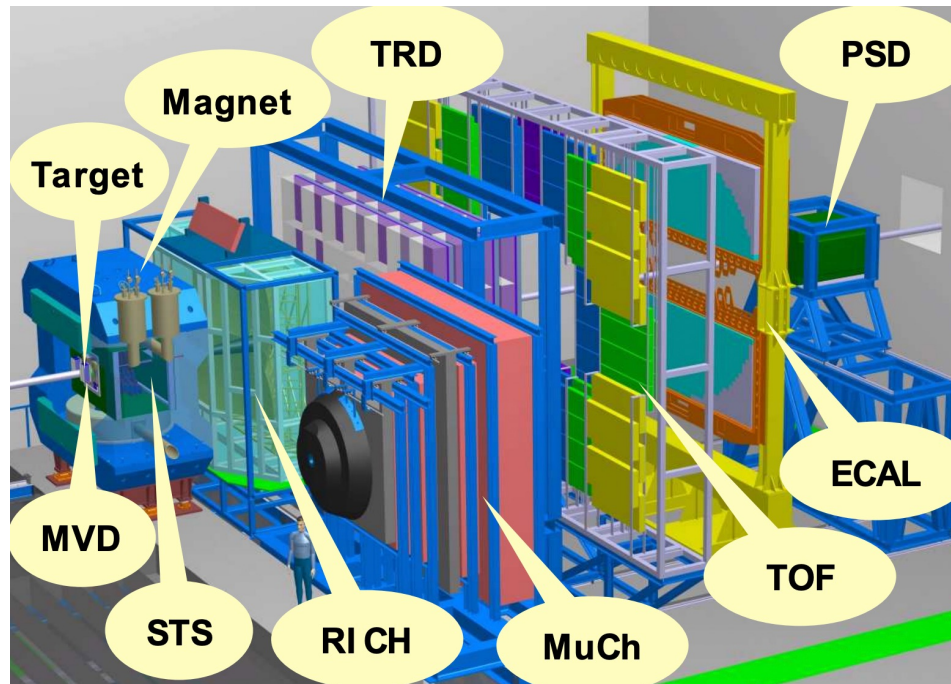
- 欢迎更多想法
- 将由实验组讨论决定

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
- 事例率500MHz vs. HIAF高能终端谱仪 > 100MHz
- 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
- 覆盖能量2.5-11 AGeV，与HIAF + HIAF-U (0.8-9.1 AGeV)接近
- 事例率<10MHz vs. HIAF高能终端谱仪 > 1MHz
- 无电磁量能器（ γ 测量）、无更高的质子打靶事例率

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



Overview

Timetable

Contribution List

Registration

Participant List

70 participants

First Name

Last Name

Affiliation



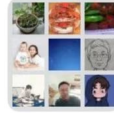
合作组



群聊：HIAF 高能终端谱仪



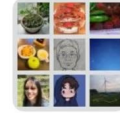
该二维码7天内(1月4日前)有效, 重新进入将更新



群聊：惠州强子谱仪-轻强子隔周
三8pm



该二维码7天内(1月4日前)有效, 重新进入将更新



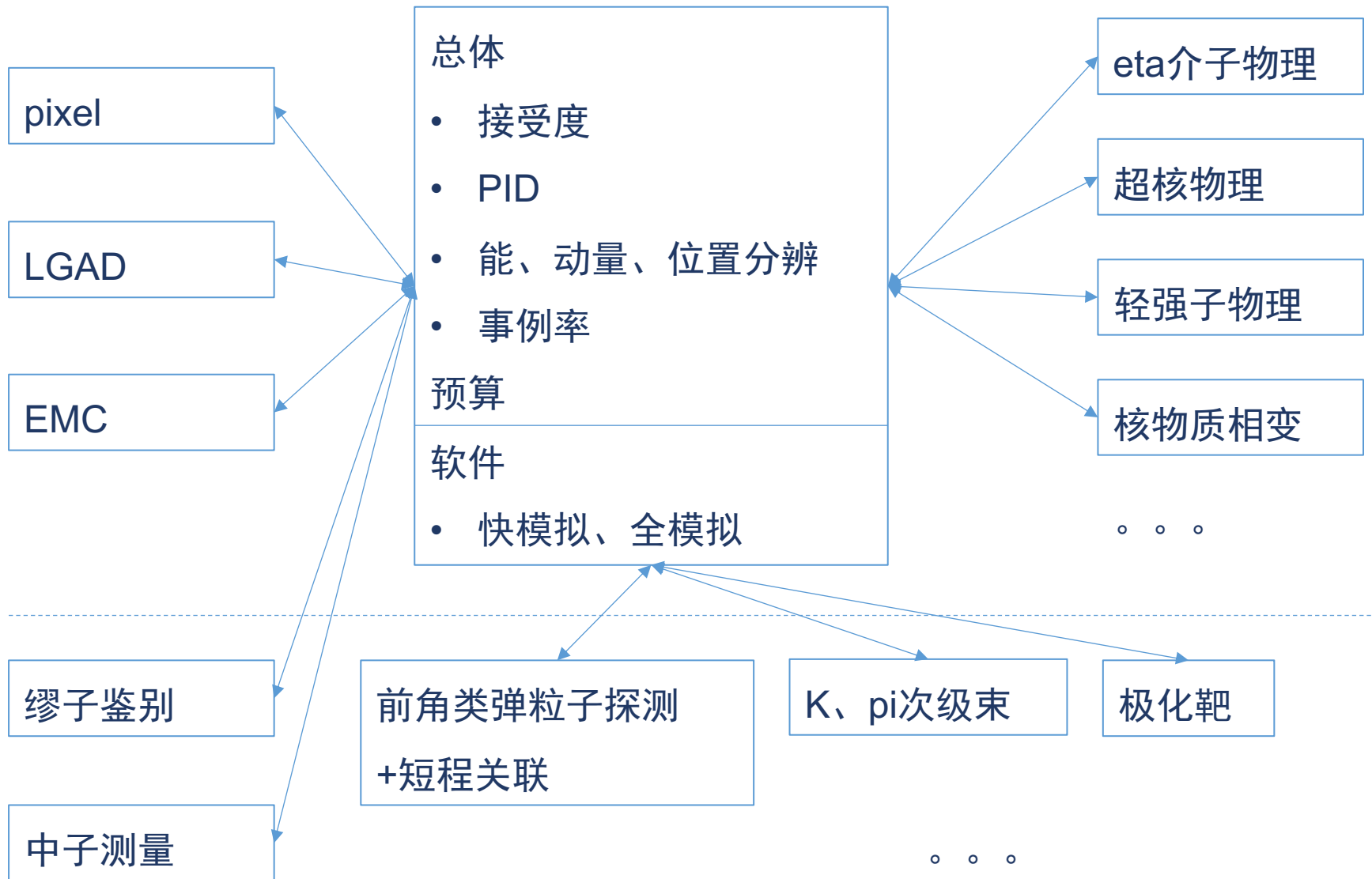
群聊：惠州强子谱仪-eta物理 隔
周三4pm



该二维码7天内(1月4日前)有效, 重新进入将更新

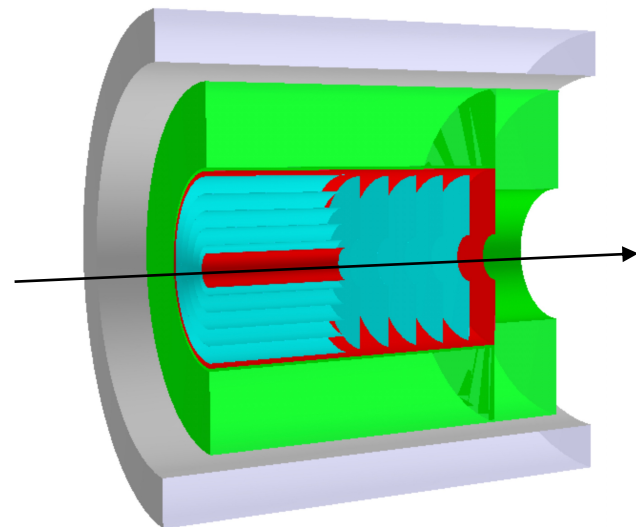
- 每月第二个周三，在线月会（可能需要再调整时间）
- 轻强子物理、 η 介子物理在线双周会
- 欢迎加入~

合作组



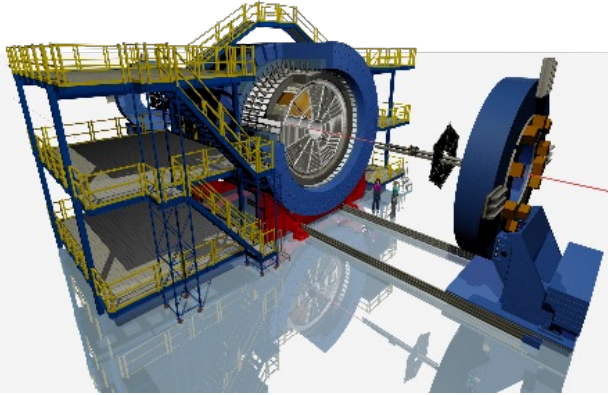
小结

- 我们提议在HIAF高能终端建造一个螺线管谱仪，具有
 - 能量时间双读出全硅径迹探测器
 - $\sim 100\mu\text{m}$ 像素尺寸
 - 紧凑尺寸 \Rightarrow 造价可控
 - 超核物理 ~ 0 本底
 - 切伦科夫-闪烁光双读出电磁量能器
 - e^+ vs. π^+ & γ vs. n 粒子鉴别能力强
 - 极高事例率
 - 质子束流: $>100\text{MHz}$
 - 重离子束流: $>\text{MHz}$
- 物理目标:
 - 质子束流: η 介子物理、轻强子物理
 - 重离子束流: 超核、相结构、核物质状态方程



- 总造价 $\sim >1$ 亿
- 具有与CBM+REDTOP相当的性能和潜力

P.S. I: 多物理目标, 可实现吗?



• 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

+

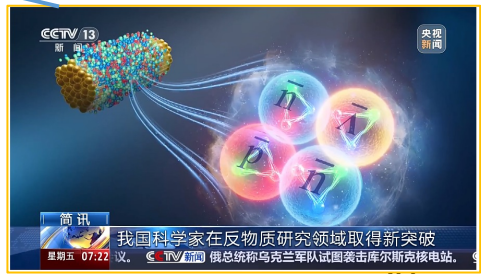
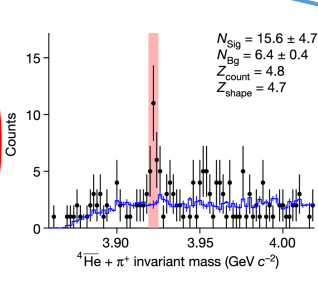
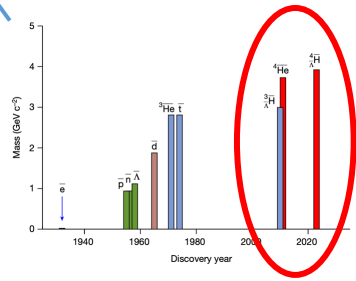
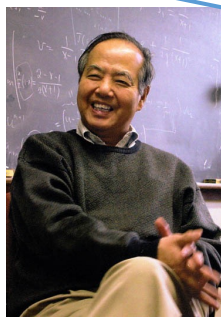
相变&临界点

+

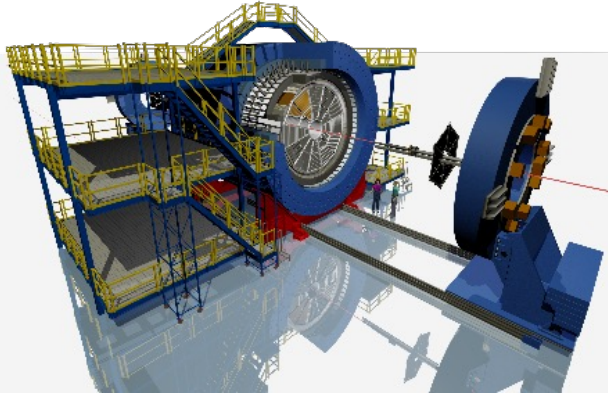
超边缘碰撞
(光生物物质)

+

原子核形状



P.S. I: 多物理目标，可实现吗？



- 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
(光生物物质)

+

原子核
形状

- 有非常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
- 认真的考虑、模拟、讨论、硬件研发
 - 欢迎更多的想法
- 作为第一个专门为HIAF高能终端考虑的粒子/核物理实验，可以有广泛的物理目标
 - 如果后期更细致的研究发现某些目标确实无法兼顾，再讨论做出取舍

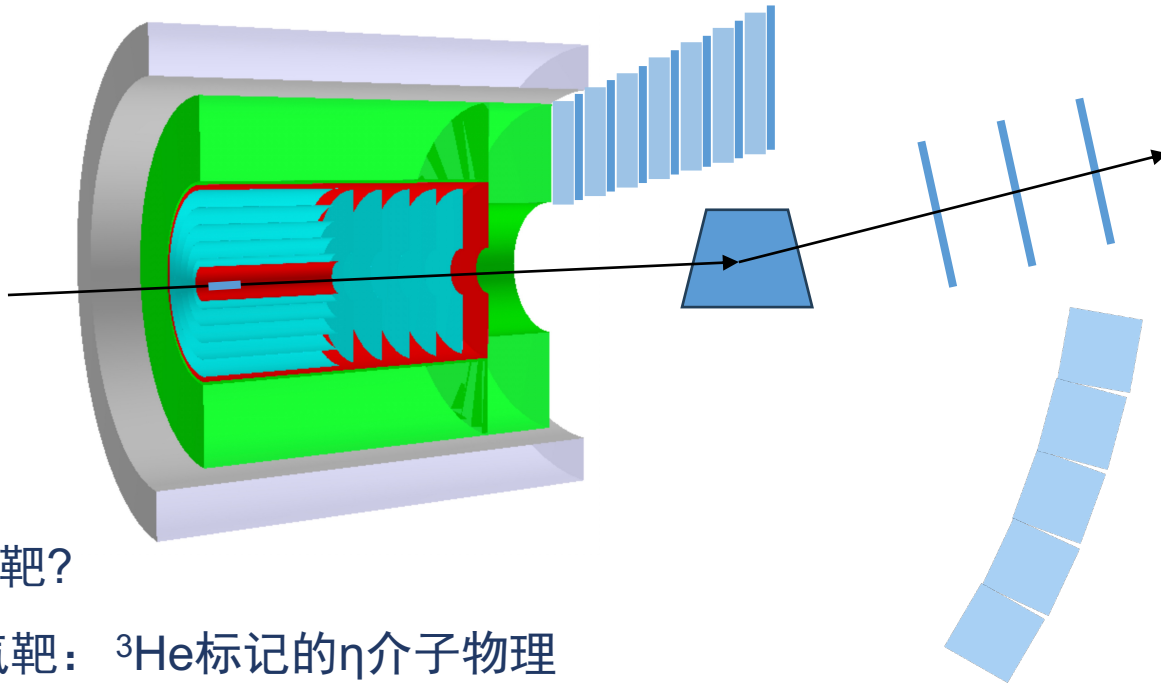
P.S. II: 未来的未来

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

液态靶?

- 氦靶: ^3He 标记的 η 介子物理
- 氢靶: 轻强子、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

谢谢 😊

Back-up

Back-up

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 ~ 1/3
- 未来计算机发展 ~1/2
- 量能器重建能量>50MeV触发/在线选择
- ⇒数据处理机群预算在千万元量级

缪子探测器

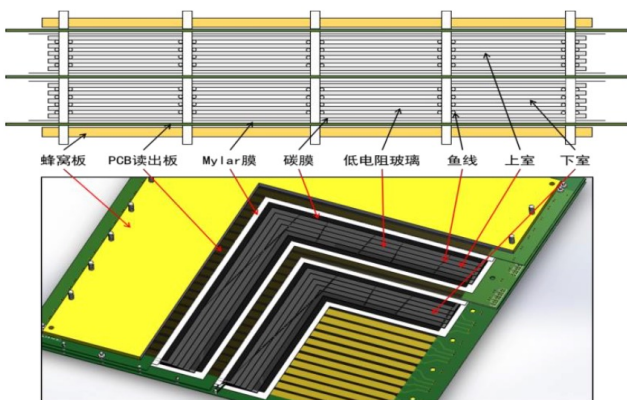
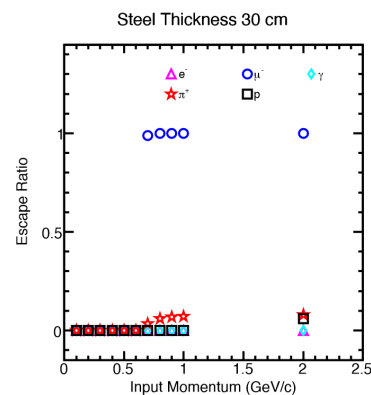
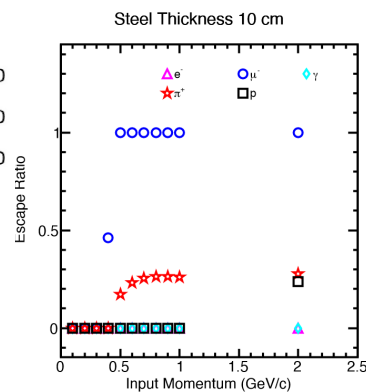
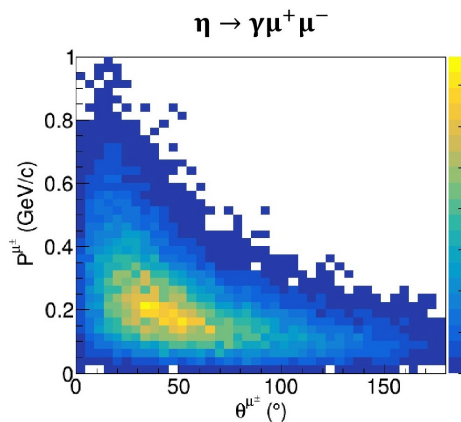


图 10 eTOF MRPC 结构示意图。



- 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

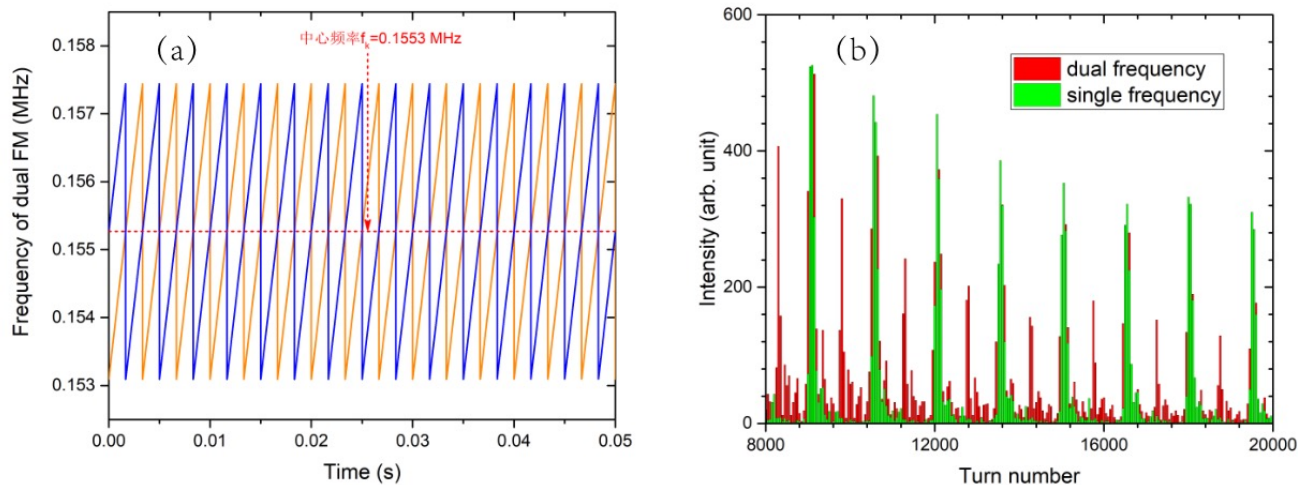


图 5.13 (a) RKO双频调制时频率随时间变化, (b) RKO双频调制对spill时间结构的影响

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

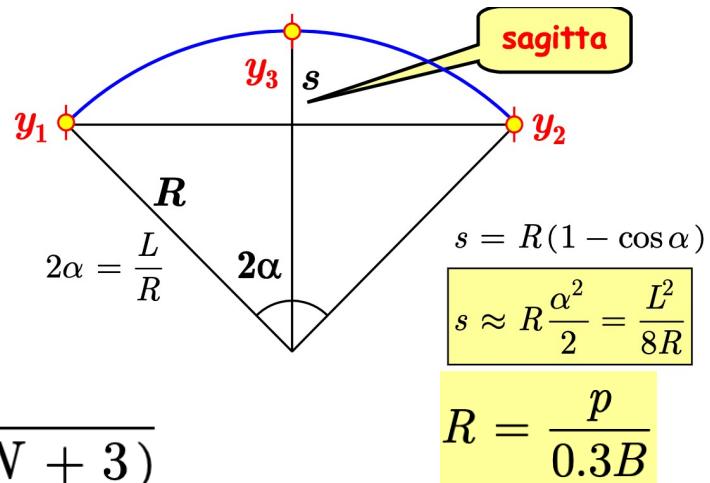
- BRing出来的spill的时间结构
- 红色是双频扫描的, 1个峰和1个峰的重复频率在10~30kHz之间, 峰与峰之间的束流较少
- BRing引出平台一个周期大约2us, 按照3s的引出平顶, 总共1.5e6圈, 1e11ppp的流强, 平均一圈才6.7e4个离子, 估计涨落会比较大, 也会有时间结构, 需要模拟45

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:

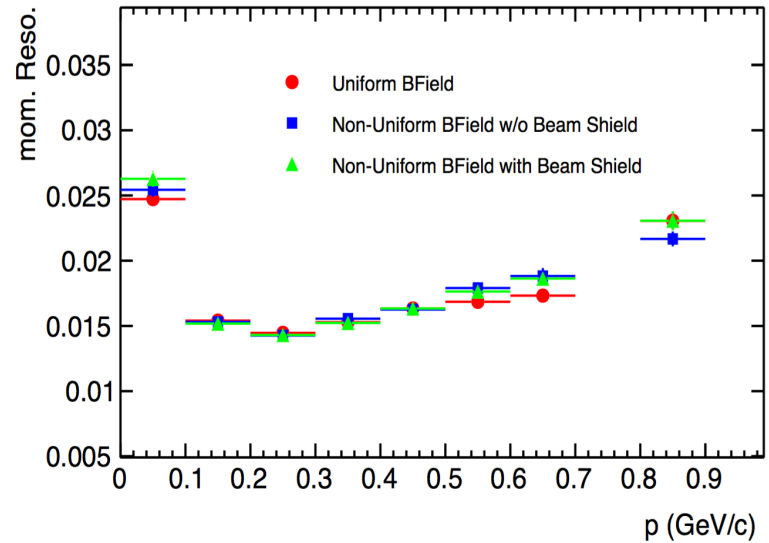
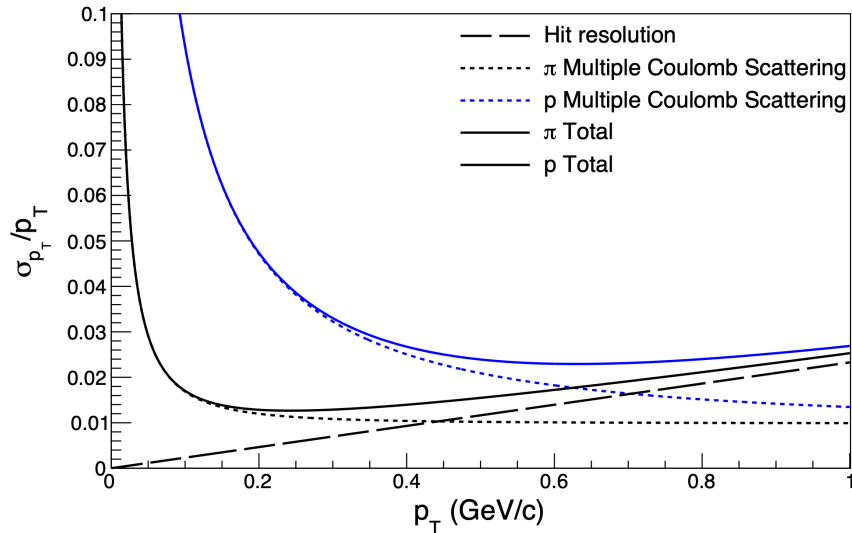
- 先计算长度 $l/2$ 的径迹的散射角度 θ_0
- 再计算长度 $l/2$ 的径迹两端 θ_0 的角度对应的曲率 $1/R = \theta_0 / (l/2)$
- 最后导出MCS动量分辨率贡献
- 这一部分贡献只是一个大概估算，实际情况取决于hit误差与MCS相对贡献大小等

$$\theta_0 = \frac{13.6}{\beta c p} z \sqrt{x/X_0} [1 + 0.038 \ln(x/X_0)]$$

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

径迹探测器动量分辨率

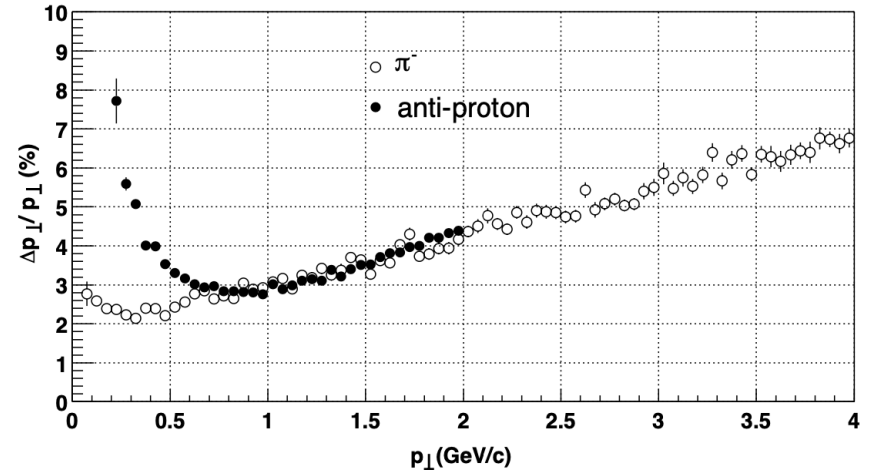
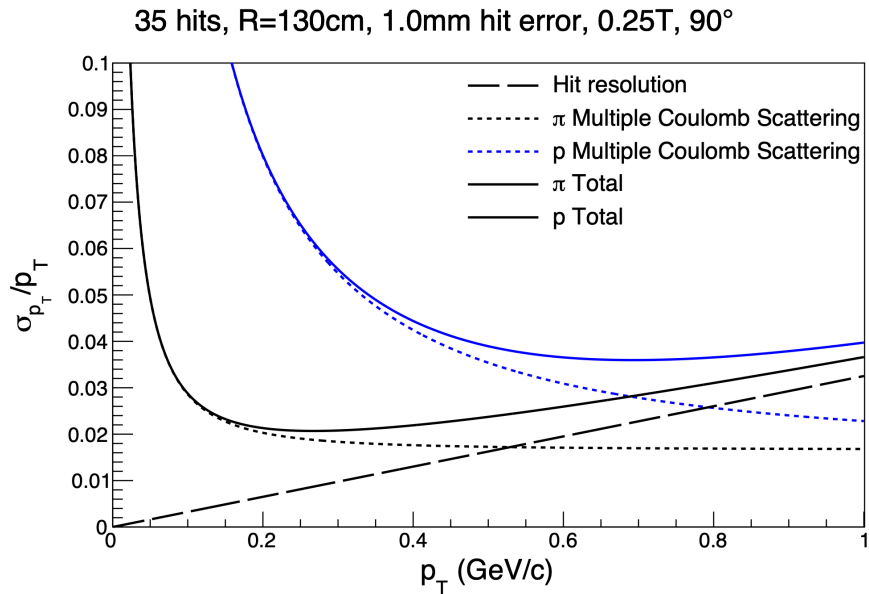
75 hits, R=90cm, 1.0mm hit error, 0.5T, 90°



Dhananjaya

- CEE 1-box TPC与模拟结果(pion)比较

径迹探测器动量分辨率



Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 499 (2003) 659–678

- STAR TPC 0.5T磁场下结果，与发表文章的比较

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

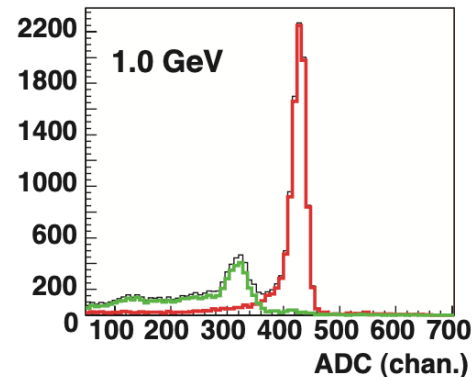
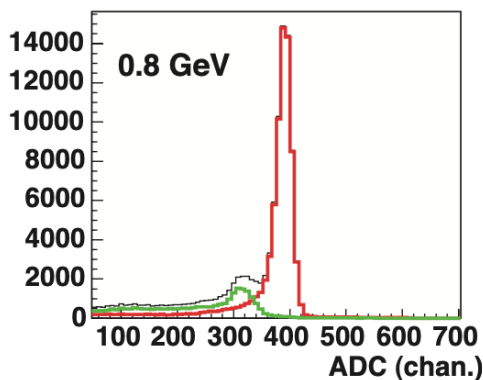
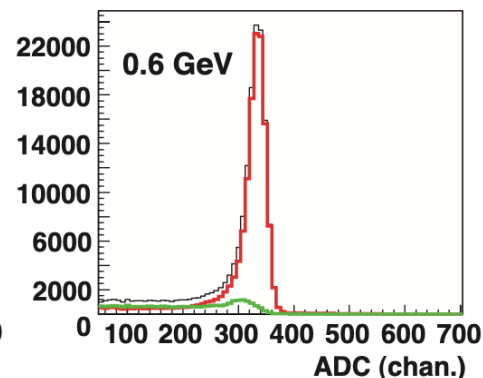
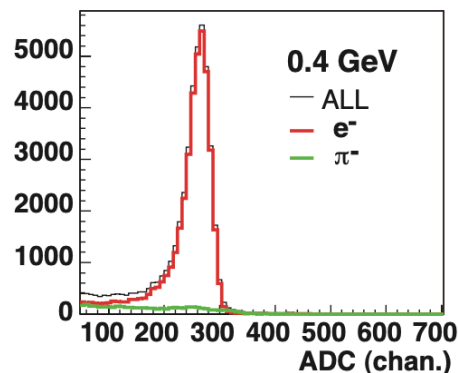
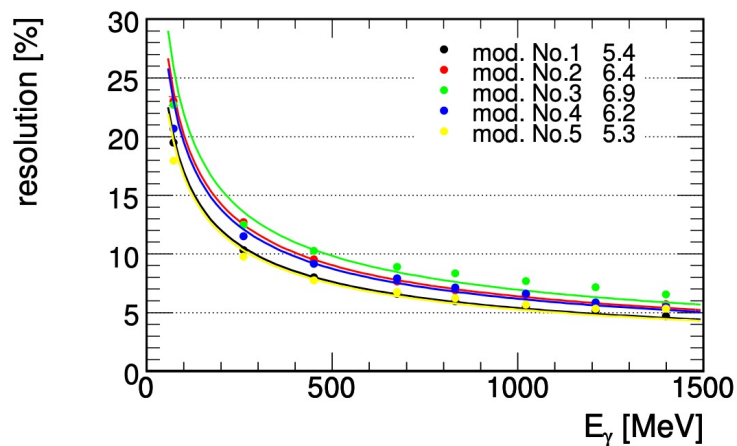
硅径迹探测器

- 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， $3.14 * 30 * 30 * 5 = 14000$ cm²
 - 总造价1100万 + 1200万 + 300万 = 2600万

LGAD飞行时间探测器

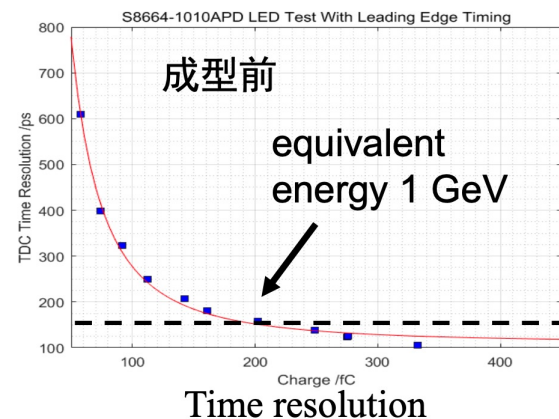
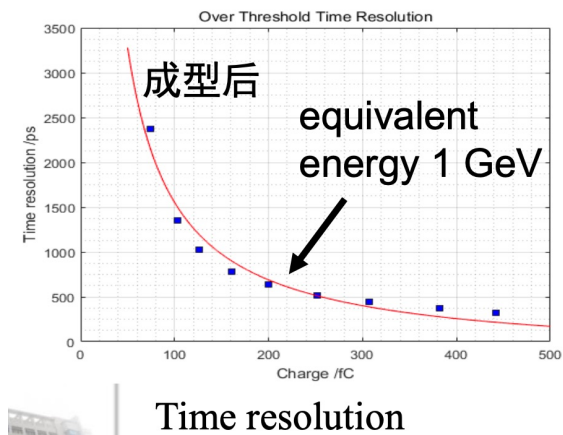
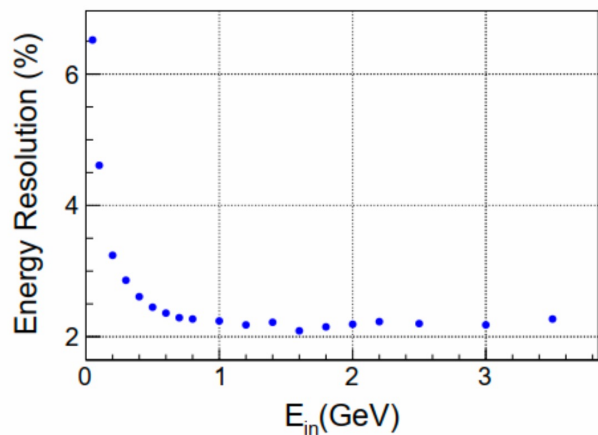
- 造价
 - LGAD传感器（高能所-微电子所，2平方米）面积： 900万
 - ASIC（TSMC芯片，有不确定性）： 600万
 - 模块组装（倒装焊等）： 400万
 - 电子学读出板： 500万
 - 高压系统（假设每个模块单独供高压）： 300万
 - 低压系统： 100万
 - 冷却系统： 300万
 - 电缆等： 200万

铅玻璃

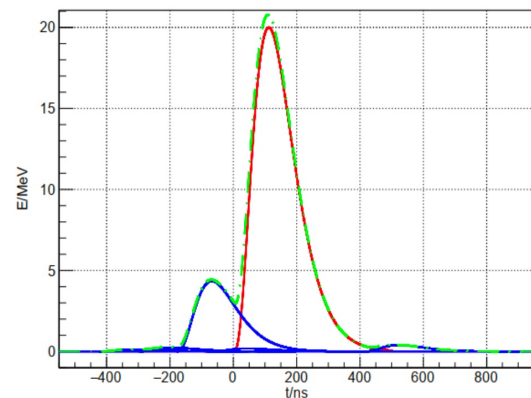
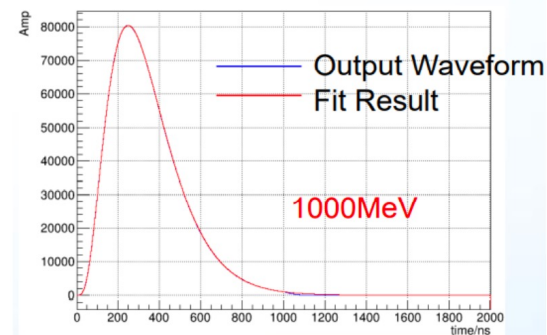


- HADES EMC
- 能量分辨率 $\sim 6\%$ @ 1GeV, $\sim 25\%$ @ 50MeV
- 时间分辨 $\sim 215\text{ps}$ (0.8 GeV电子)
- 成型时间 $\sim 0.5\ \mu\text{s}$
- 强子簇射切伦科夫光产额低于电子簇射, 有利于压低中子、 π 本底
- 造价: $\sim <1000$ 万

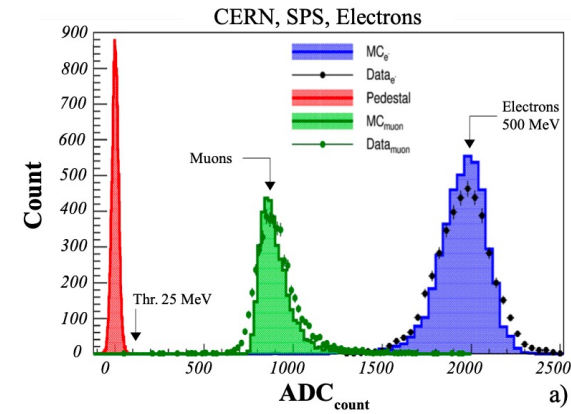
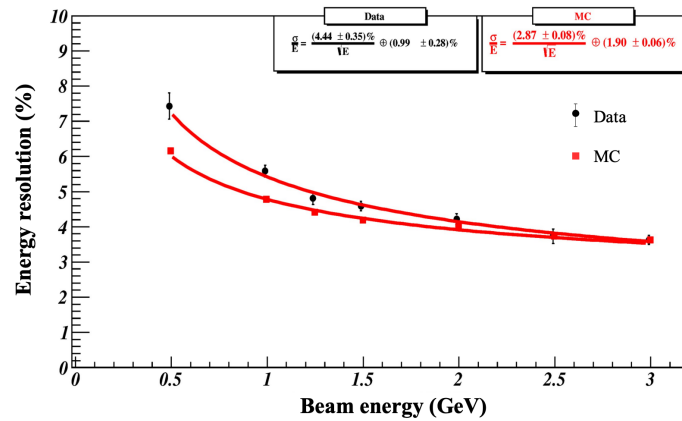
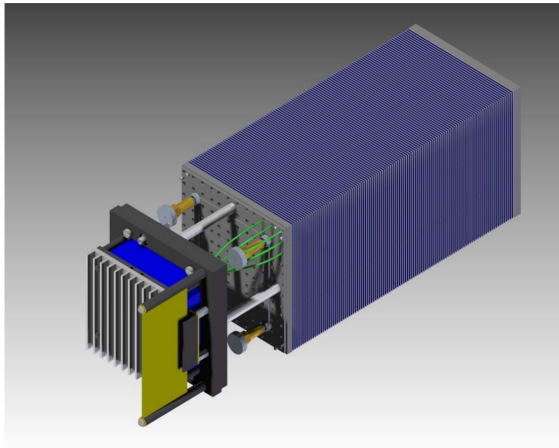
纯CsI



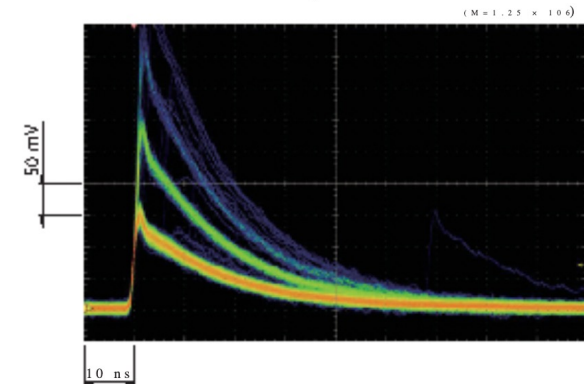
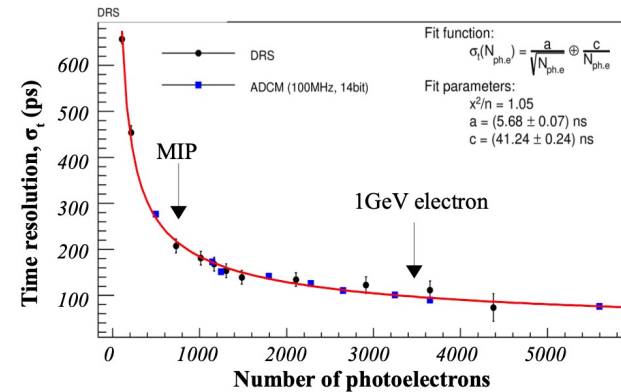
- 科大STCF预研
- 能量分辨率 $\sim 2\%$ @ 1GeV, $\sim 7\%$ @ 50MeV
- 时间分辨
 - 成型前: $\sim 150\text{ps}$ @ 1GeV, 小信号 $\sim 1\text{ns}$
 - 成型后: 600ps @ 1GeV, 小信号几个ns
- 成型时间 $\sim 1\ \mu\text{s}$
- 造价: 5800万 ($\theta=10\text{-}100\text{度}$) / 4000万 ($\theta=10\text{-}60\text{度}$)



采样型

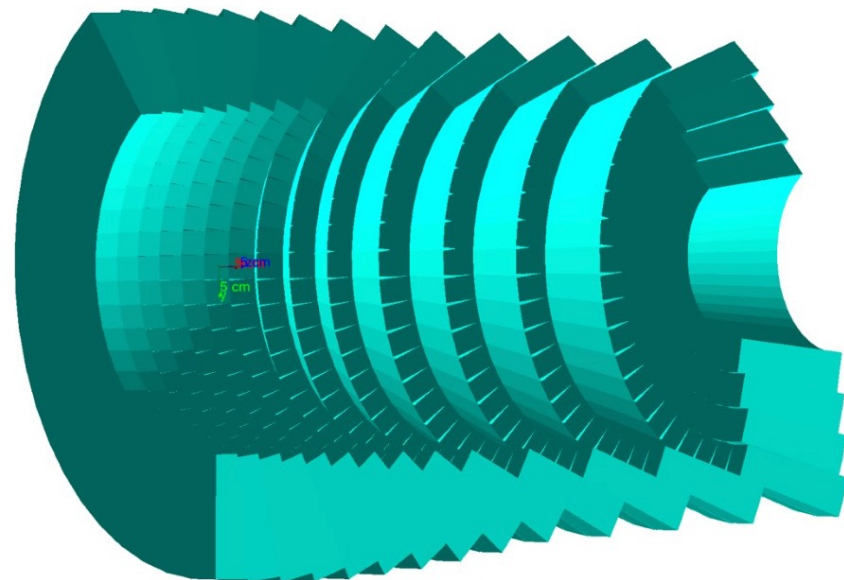


- NICA-MPD量能器，国内清华等参与研制生产
- 0.3mm铅 + 1.5mm塑闪（铅辐射长度0.56cm）
- 能量分辨率~6%@1GeV，~20%@50MeV（公式推算）
- 阈值可设在25MeV
- 时间分辨~100ps @ 1GeV，~500ps @ 50MeV
- Micro-Pixel Avalanche Diodes (MAPD)死时间~50ns
 - 还有没有另外的电子学成型时间？
- 造价~<1千万
 - MPD ECAL 4.5m直径，6m长，第一期造价~3千万



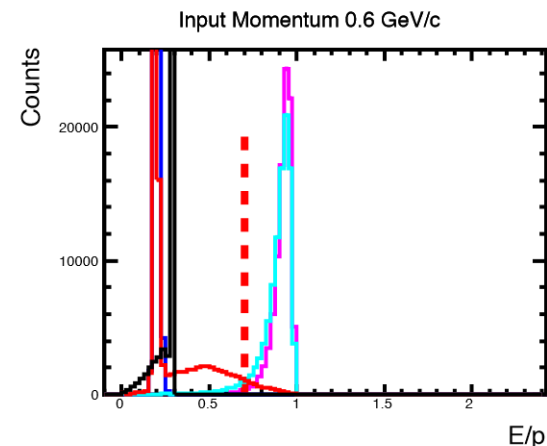
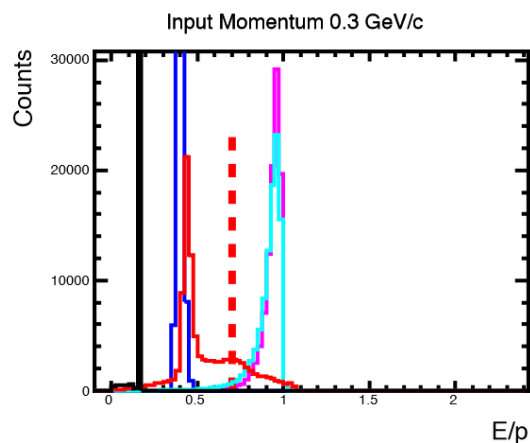
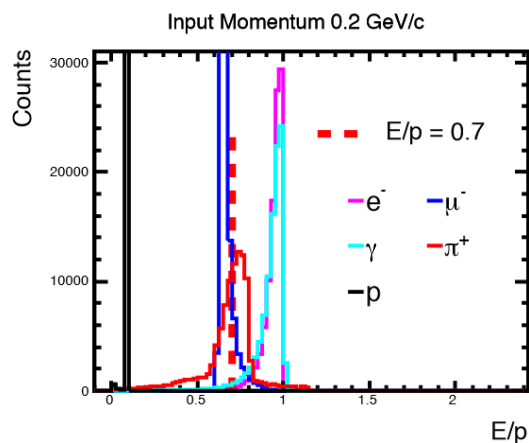
纯CsI电磁量能器

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

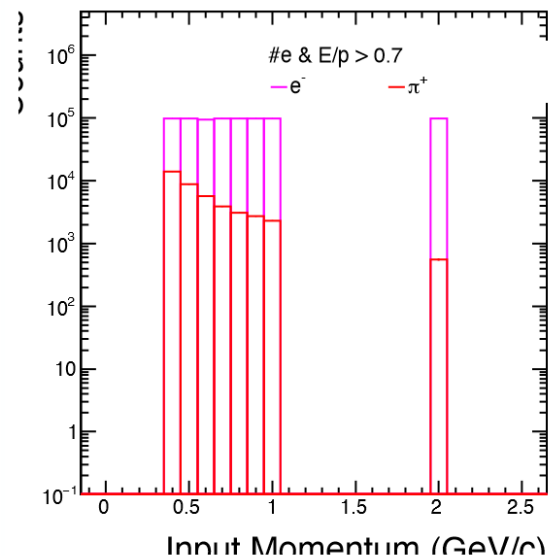


- 纯CsI晶体
 - 光衰减时间：6ns / 35ns快慢成分
 - 光产额：2.3 / 5.6% NaI
- 共~800块晶体，每块长20cm，尾端面6.5cm×6.5cm
- 每块晶体4片APD读出
- 能量分辨率 ~3% @ 1GeV
- 时间分辨好于1ns，可在100MHz事例率下区分不同事例
- 耐辐射性：100krad未见性能变化， 10^{12} 中子/cm²辐射后光产额降低0-20%
- 中科大、近物所等（STCF EMC预研）
- 造价：5800万（ $\theta=10-100$ 度） / 4000万（ $\theta=10-60$ 度）

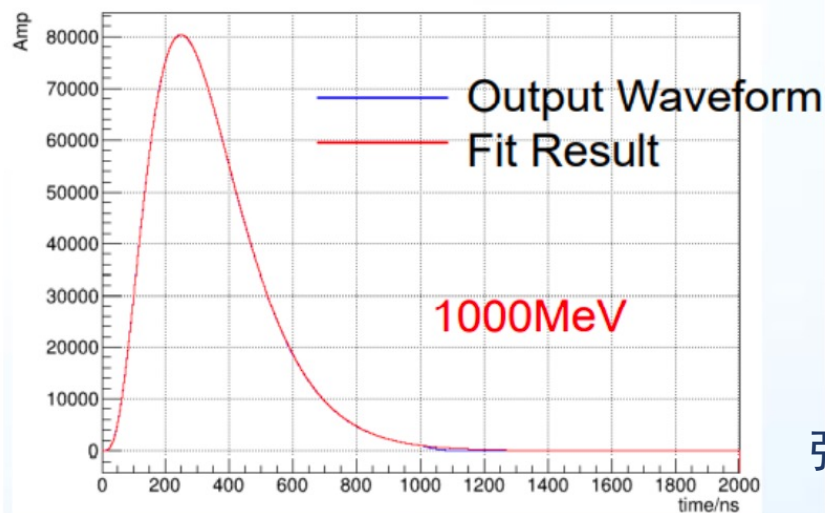
纯CsI电磁量能器



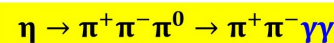
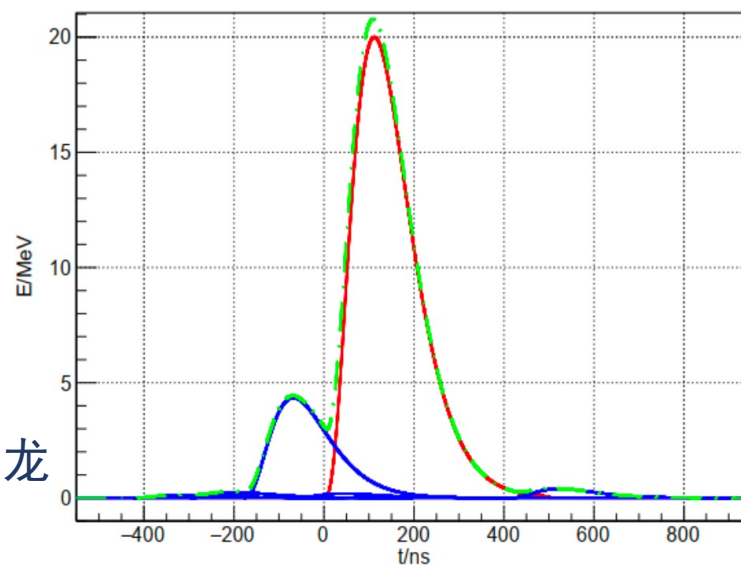
- 从0.2GeV/c动量开始，具有较好的 e / π 鉴别能力
- π 压低一个量级以上



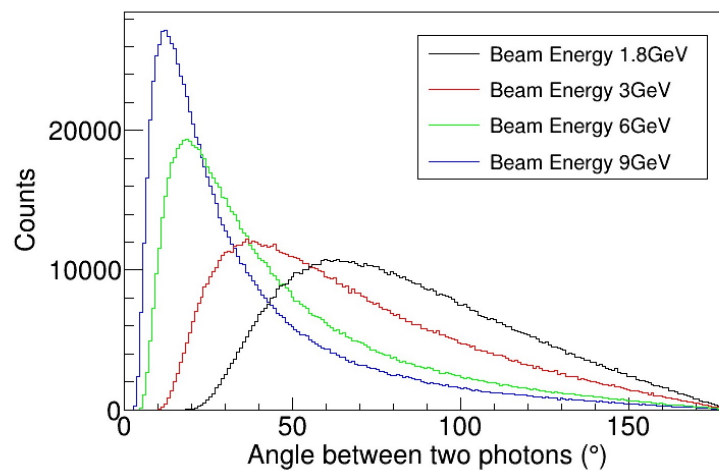
纯CsI电磁量能器



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



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
 - $100e6 * 1.8 * 3600 * 24 * 30 * 1.60218e-10 * 0.5 / (3.14 * 40 * 40 * 25 * 4.51 / 1000) = 66 \text{ Gy}$
- 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
 - $100e6 * 4 * 3600 * 24 * 30 * 0.5 / (3.14 * 40 * 40) = 1e11 \text{ n / cm}^2$
- 与mu2e实验测试使用剂量(900 Gy、 $9e11 \text{ n / cm}^2$)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

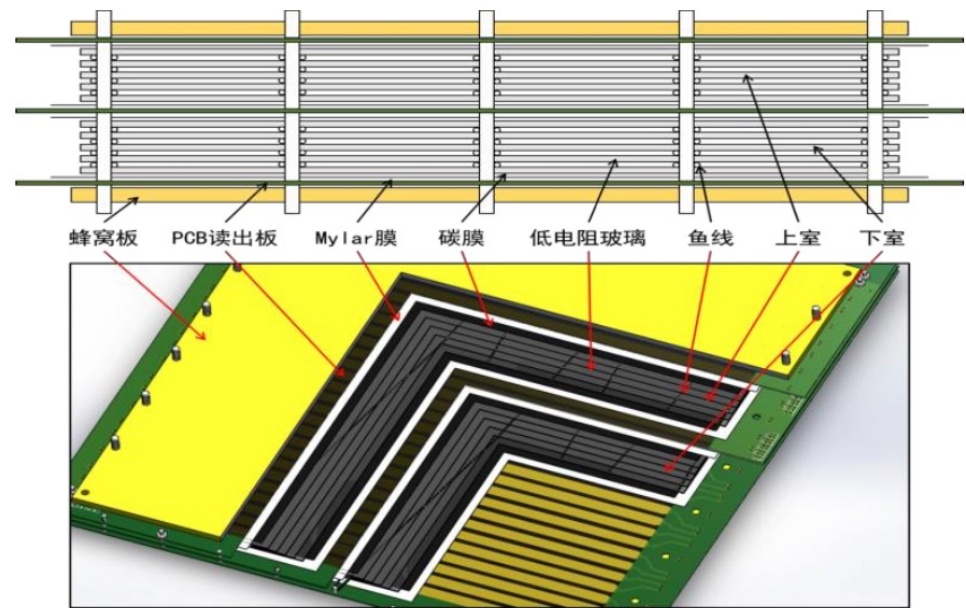


图 10 eTOF MRPC 结构示意图。

- 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 m^2 ，500万

Beam dump

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 $\eta \rightarrow \pi^- \mu^+ \nu$ - 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 leptokuark: $\eta \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 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

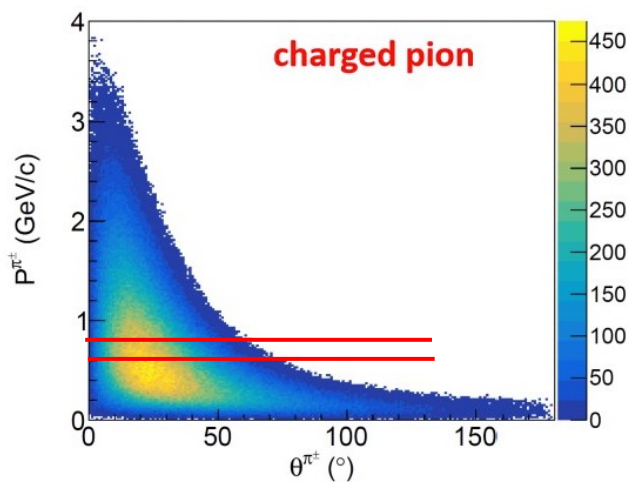
- Proton radius anomaly: $\eta \rightarrow \gamma \mu^+ \mu^-$ vs $\eta \rightarrow \gamma e^+ e^-$
- All unseen leptonic decay mode of η / η' (SM predicts $10^{-6} - 10^{-9}$)

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)

- 绝大部分eta衰变道研究需要电子 & / 缪子

缪子鉴别

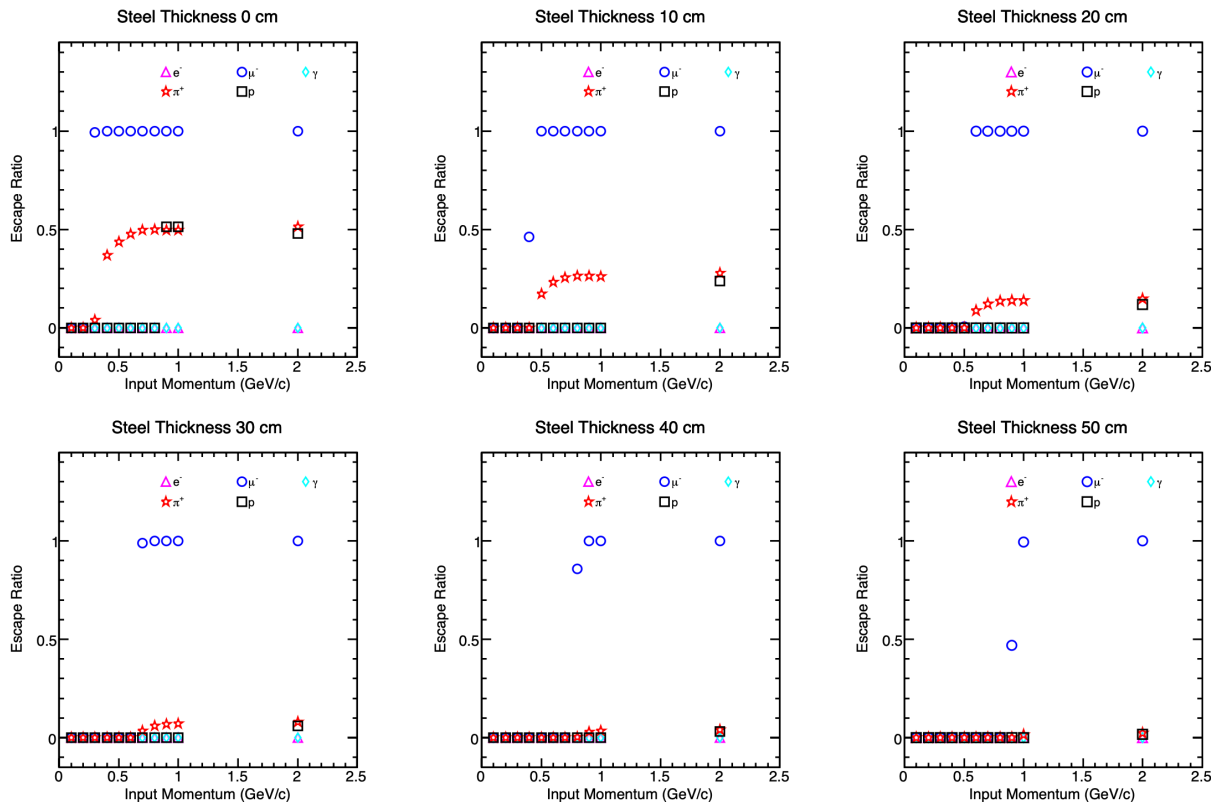


eta衰变的pi+-分布

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

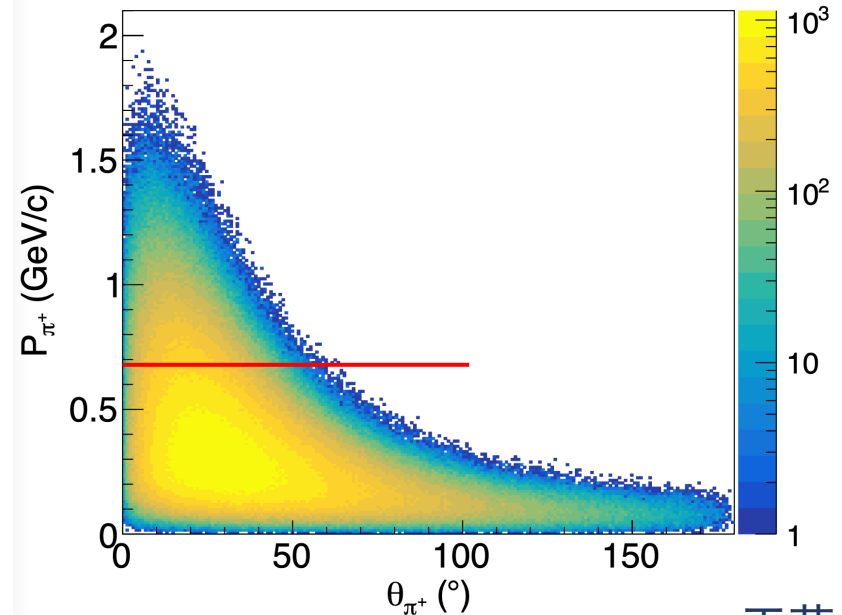
	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI	BaF ₂	CeF ₃	BGO	PbWO ₄	LYSO
Density [g cm ⁻³]	3.67	4.51	4.51	4.89	6.16	7.13	8.3	7.1
Radiation length [cm]	2.59	1.85	1.85	2.06	1.68	1.12	0.89	1.16
Molière radius [cm]	4.8	3.5	3.5	3.4	2.6	2.3	2.0	2.07
Interaction length [cm]	41.4	37.0	37.0	29.9	26.2	21.8	18.0	20.3
dE/dx)mip [MeV cm ⁻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₆₄

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 / pi 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
 - pi: $p > 685 \text{ MeV} \Rightarrow$ 排除绝大部分强子，更高动量e pi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

10x Be or Li targets

- 0.33 mm thin
- Spaced 10 cm

CTOF

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

Fiber tracker or ITS3

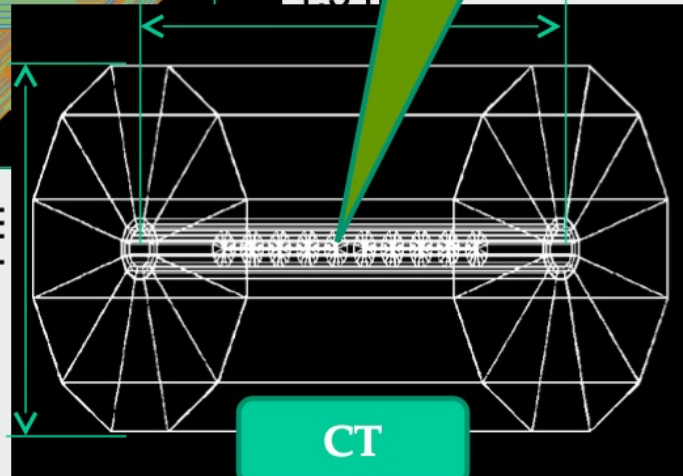
for rejection of γ-conversion
and vertexing

2.4 m

2.7 m

1.5 m

1 m



CT