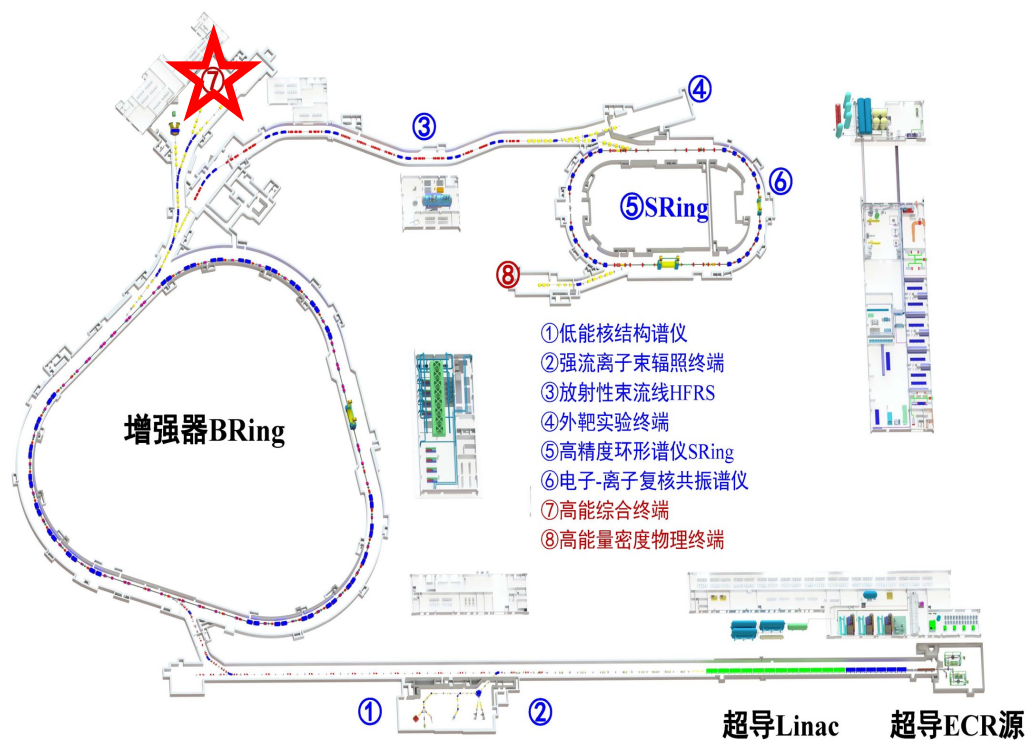


HIAF高能终端新谱仪的建议

陈旭荣、何熊宏、胡强、林德旭、仇浩、孙旭、
田野、王荣、杨海波、张亚鹏、赵承心

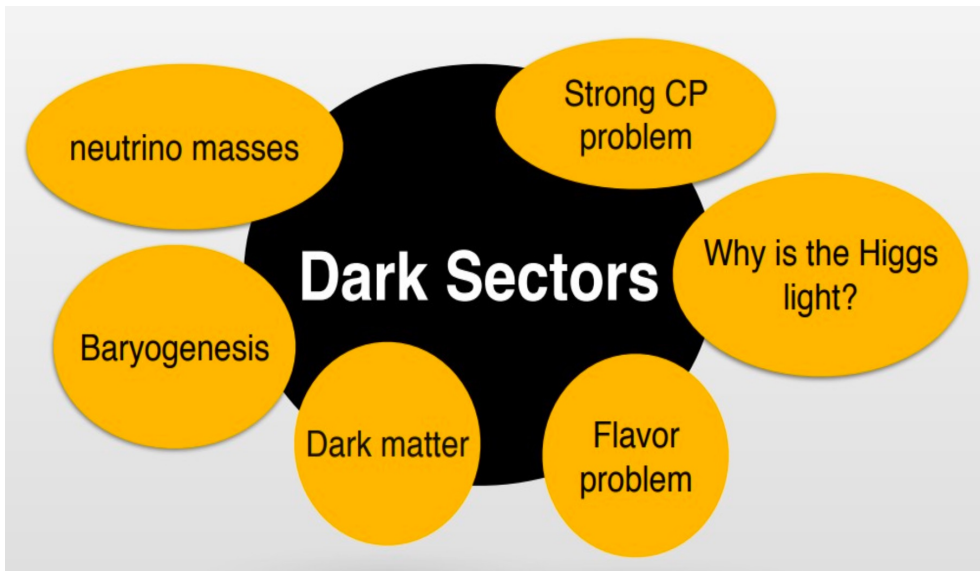
HIAF及HIAF-U



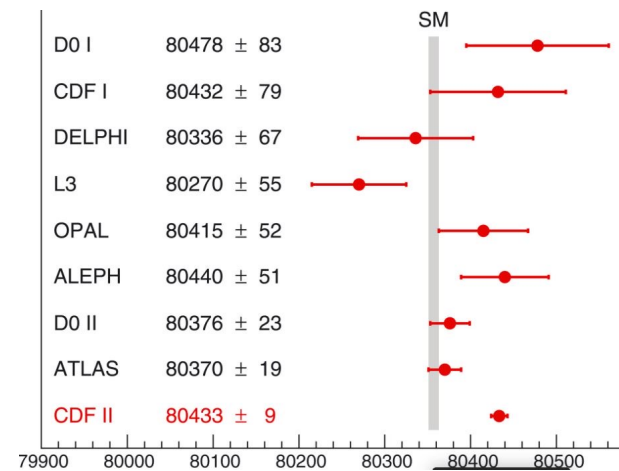
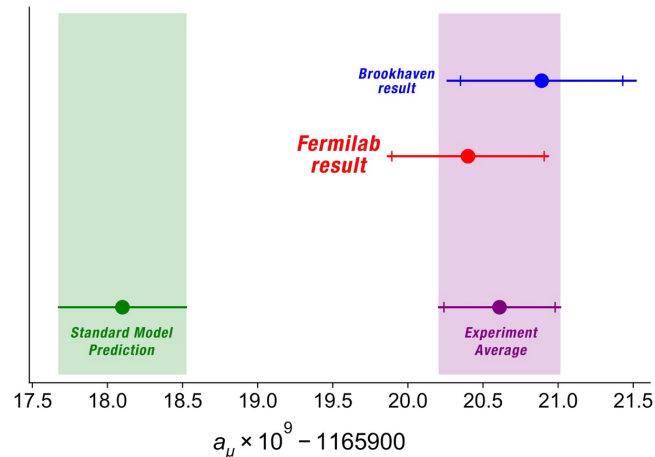
	E_k (GeV/u)	v_{sNN} (GeV)
HIAF p束	<9.3	<4.58
HIAF U束	0.8-2.45	2.24-2.85
HIAF-U U束	2.95-9.1	3.01-4.54

- 可以提供最高能量9.3GeV/u的高流强质子束流
 - 为 η 介子物理、轻强子物理研究提供了良好的束流条件
- HIAF(HIAF-U)高能终端可以提供0.8-2.45 GeV/u (2.95-9.1 GeV/u)能量的高流强U束
 - 为超核、高重子密度区核物质相结构、状态方程研究提供了良好束流条件

η 介子物理

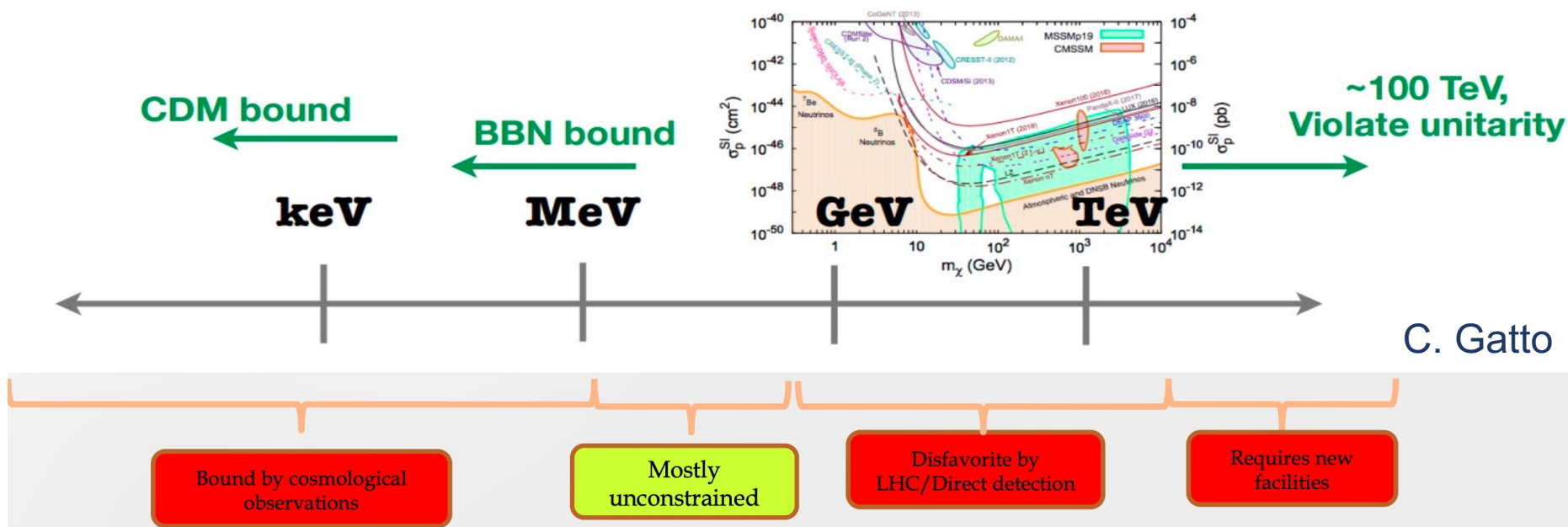


C. Gatto



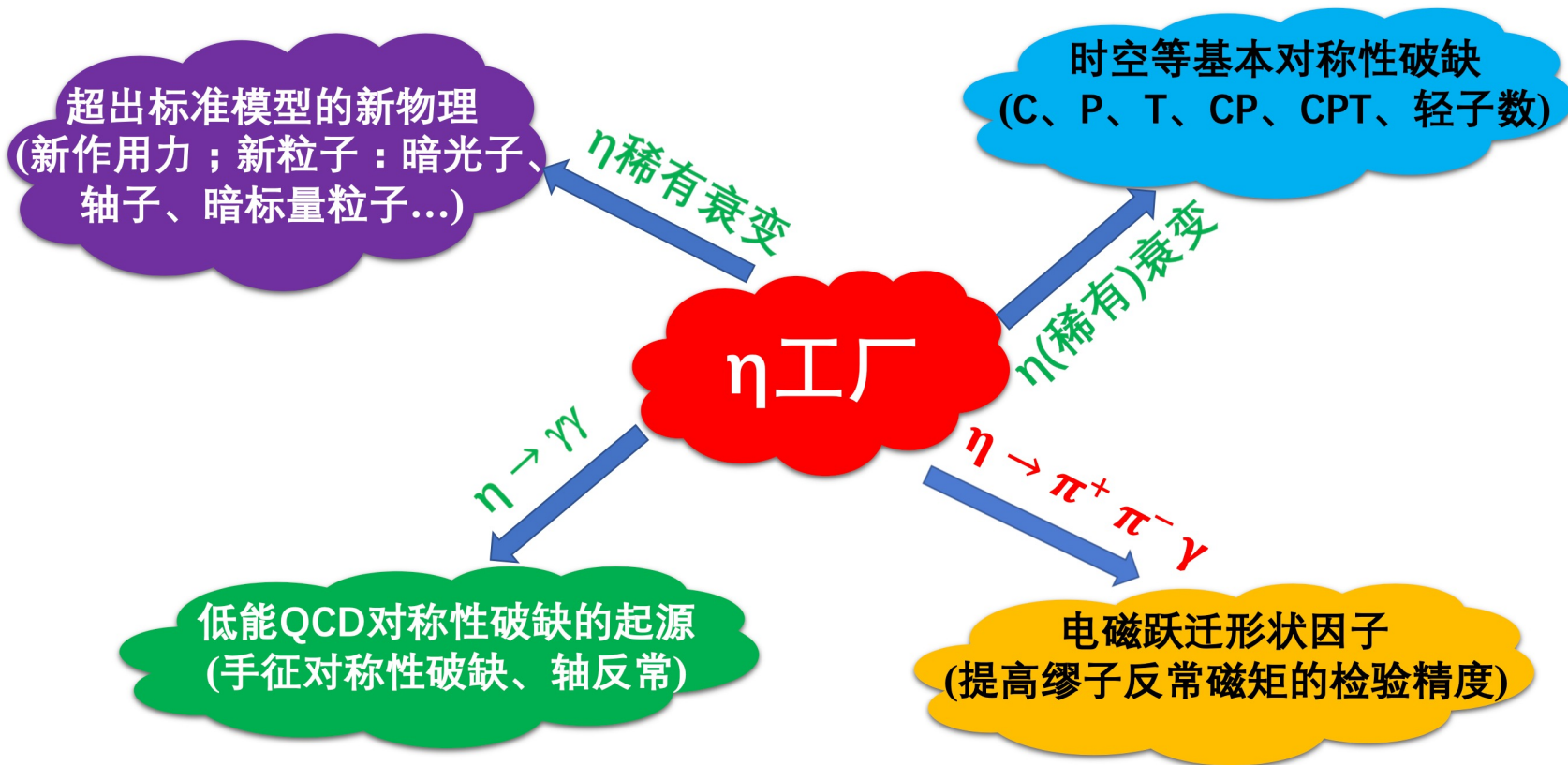
- 粒子物理标准模型面临一些难题，需要超出当前标准模型的新物理
- 除了标准模型预言的Higgs粒子，LHC的高能量前沿实验没有发现其它新粒子/新物理
- 高精度前沿测量，也是发现新物理的重要手段，如 μ 子反常磁矩 $g-2$ 、W质量

η 介子物理



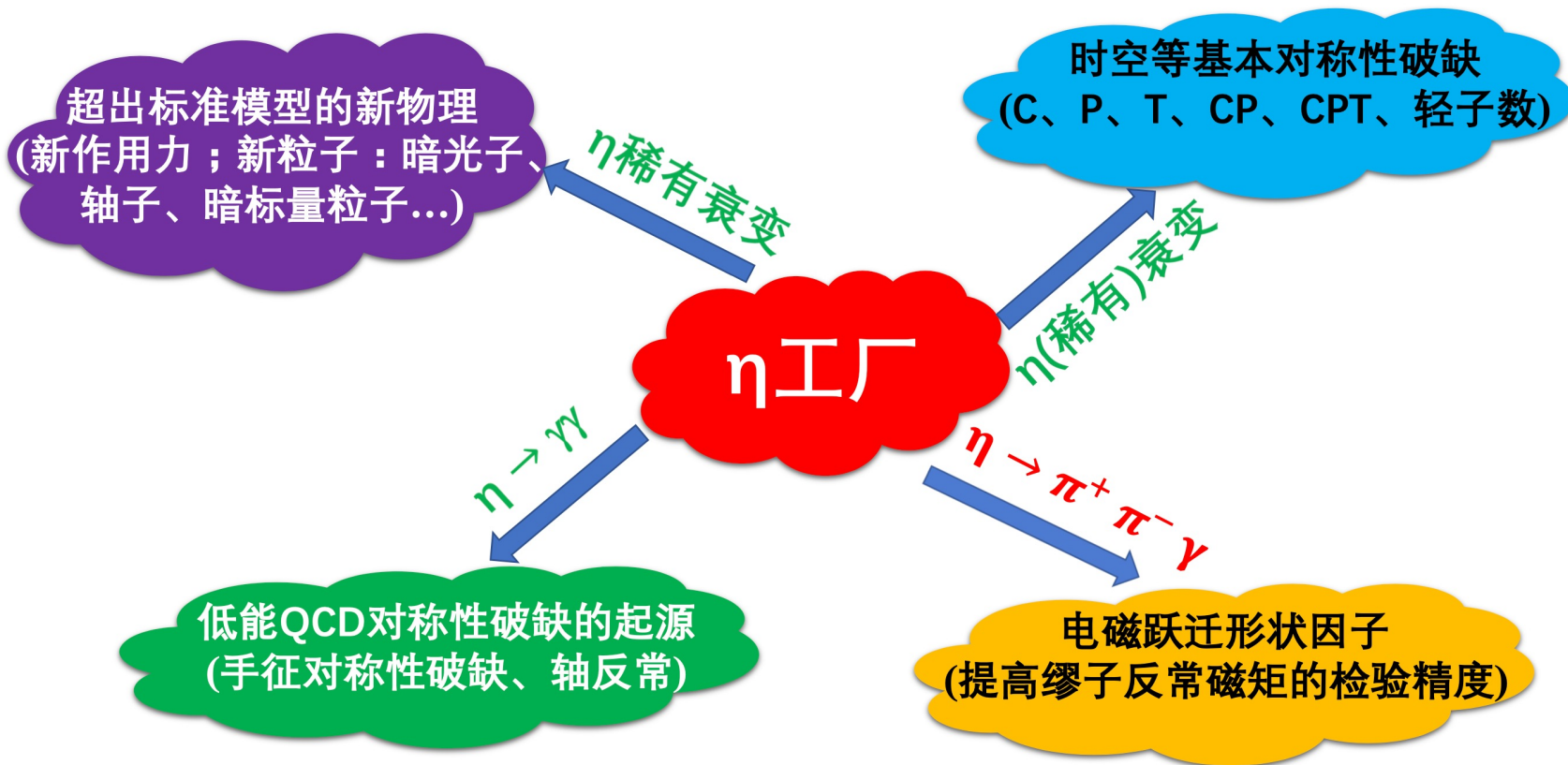
- 在暗物质粒子寻找中，传统的大质量弱相互作用粒子(WIMP, GeV~100TeV)可能存在的参数空间不断被实验排除
- 轻暗物质粒子(MeV~GeV)当前实验限制较少，是重要的实验寻找方向
 - 需要引入弱相互作用以外的新相互作用，避免在宇宙演化中太早冻出、密度太大，使宇宙闭合
- 强流加速器装置是寻找轻暗物质粒子的有力工具

η 介子物理



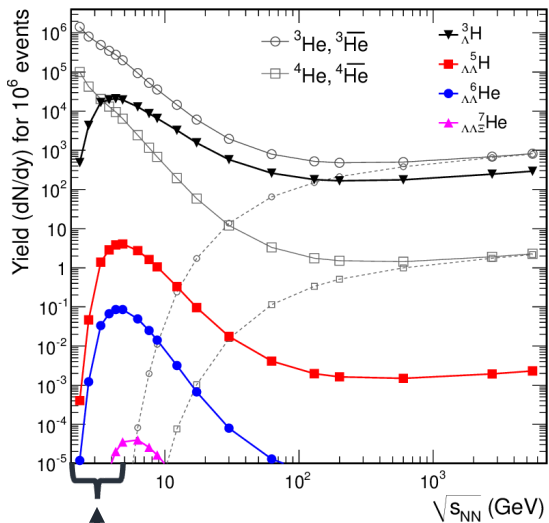
- η 、 η' 介子是除Higgs之外，唯二的全零量子数 ($Q = I = J = S = B = L = 0$) 粒子
 - 所有强衰变都在最低阶被P、CP、G宇称、同位旋和电荷守恒所禁止
 - 所有电磁衰变都在最低阶被C宇称和角动量守恒所禁止
- ⇒ 与其它粒子相比， η 衰变中，新物理（如果存在）产生的分支比更大

η 介子物理

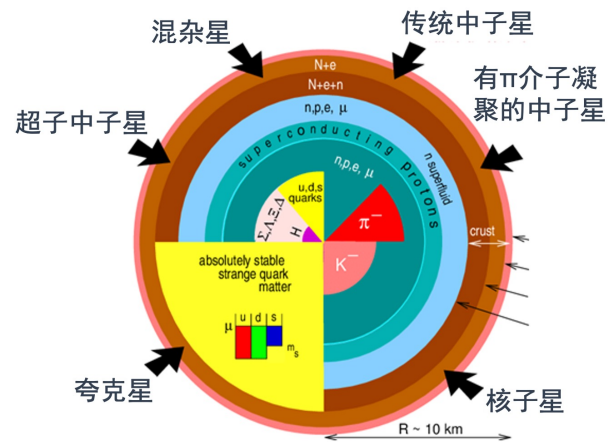
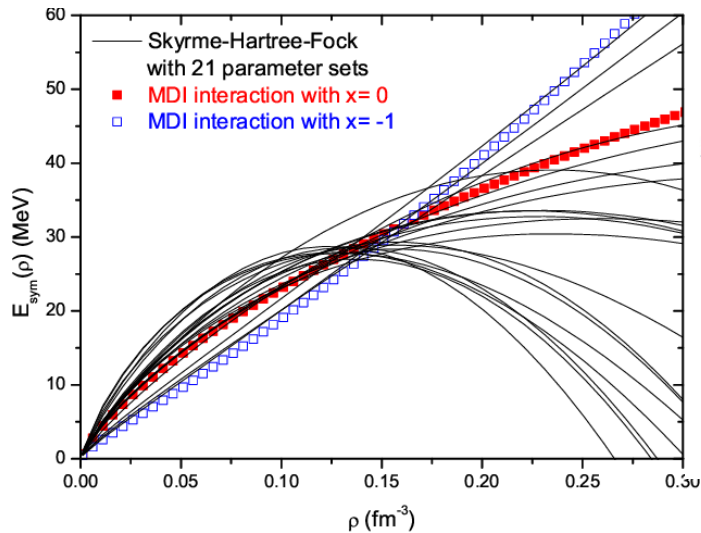


- 寻找暗光子: $\eta \rightarrow \gamma A'$, $A' \rightarrow \mu^+\mu^-$, $A' \rightarrow e^+e^-$
- 寻找(类)轴子: $\eta \rightarrow \pi\pi a$, $a \rightarrow \gamma\gamma$, $a \rightarrow \mu^+\mu^-$, $a \rightarrow e^+e^-$
- 寻找暗标量粒子: $\eta \rightarrow \pi^0 H$, $H \rightarrow \mu^+\mu^-$, $H \rightarrow e^+e^-$
- CP对称性: $\eta \rightarrow \pi^0\pi^+\pi^-$
- 轻子味普适性: $\eta \rightarrow \mu^+\mu^-X$, $\eta \rightarrow e^+e^-X$

超核、状态方程

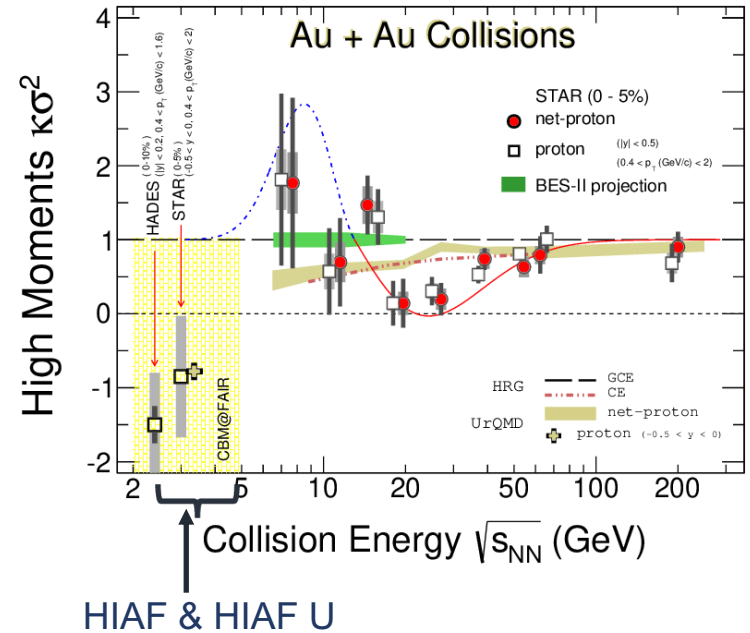
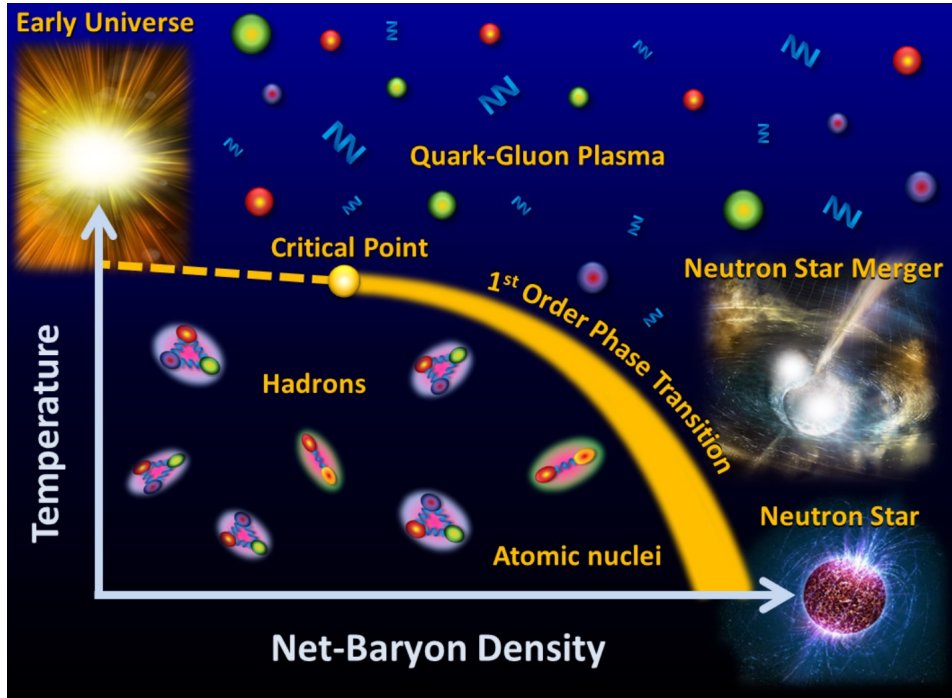


HIAF & HIAF-U



- HIAF & HIAF+能区的重离子碰撞能产生和研究超核，特别是多奇异超核
 - ⇒ 超子-核子、超子-超子相互作用 ⇒ 中子星结构和性质
- 重离子碰撞可以产生高密核物质，从而研究其状态方程，例如不同重子密度下的对称能参数
 - ⇒ 理解中子星结构和性质

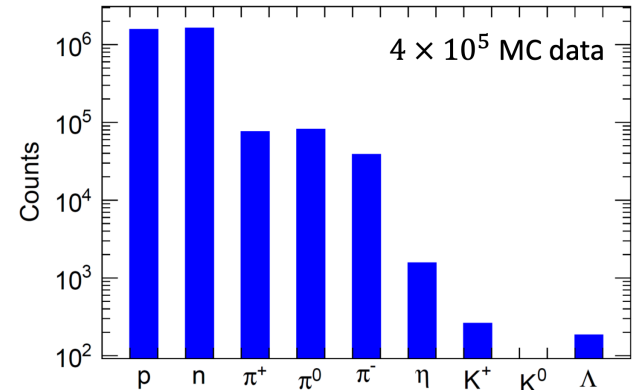
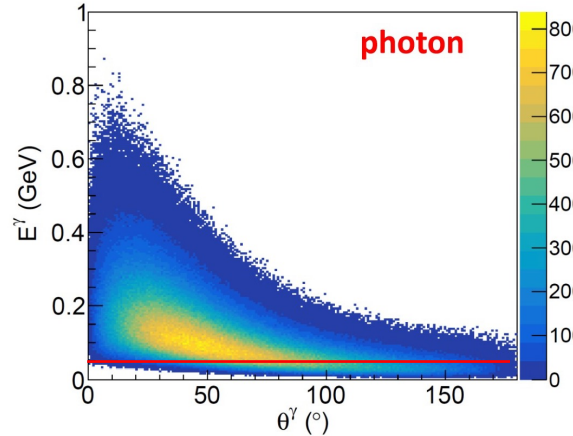
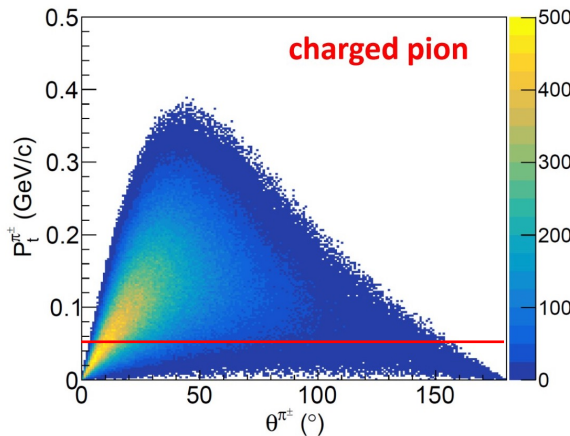
核物质相结构



- 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，研究核物质相结构，寻找理论预言的一级相变和临界点
 ⇒ 理解早期宇宙演化

谱仪性能需求—— η 介子物理

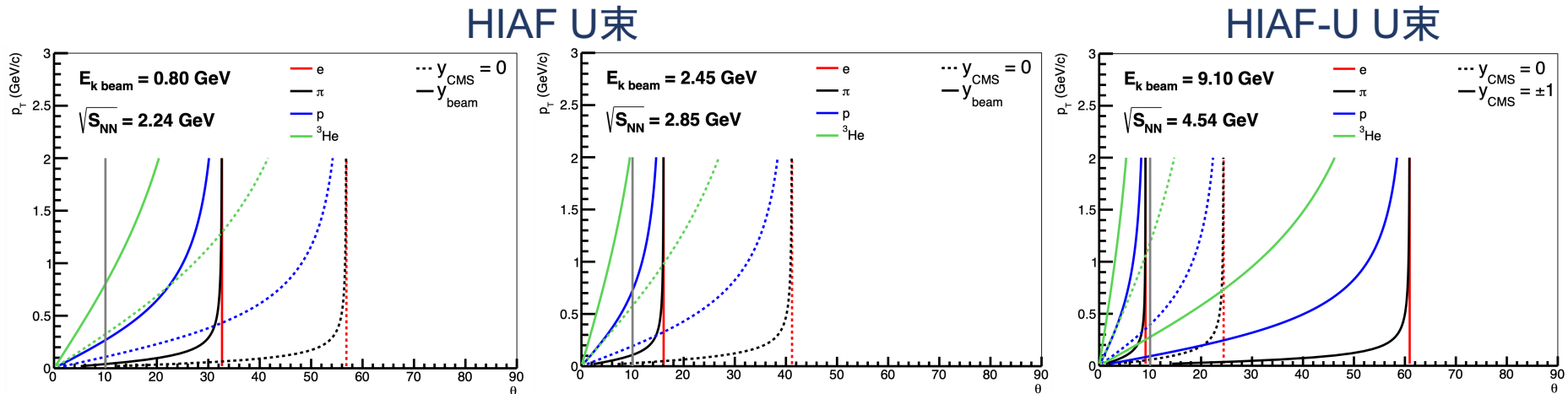
$$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 (\gamma\gamma)$$



- 1.8 GeV $p+^7\text{Li}$ 或 750 MeV $\pi^++^7\text{Li}$
- π^+ , e^+ , μ^+ , γ 粒子测量与鉴别, 尽量大的方位角覆盖
 - 带电粒子横动量50MeV-600MeV
 - γ 能量50MeV-2GeV
 - 鉴别 e^+ 、 μ^+ , 高效排除 π^+ -本底: $\pi^+/e^+ \sim 100$, $\pi^+/\eta \sim 100$
 - 鉴别 γ , 高效排除n本底: $n/\gamma \sim 10$, $n/\eta \sim 1000$
- >100MHz事例率, 进行远超当前统计水平的精确测量(REDTOP提的700MHz)

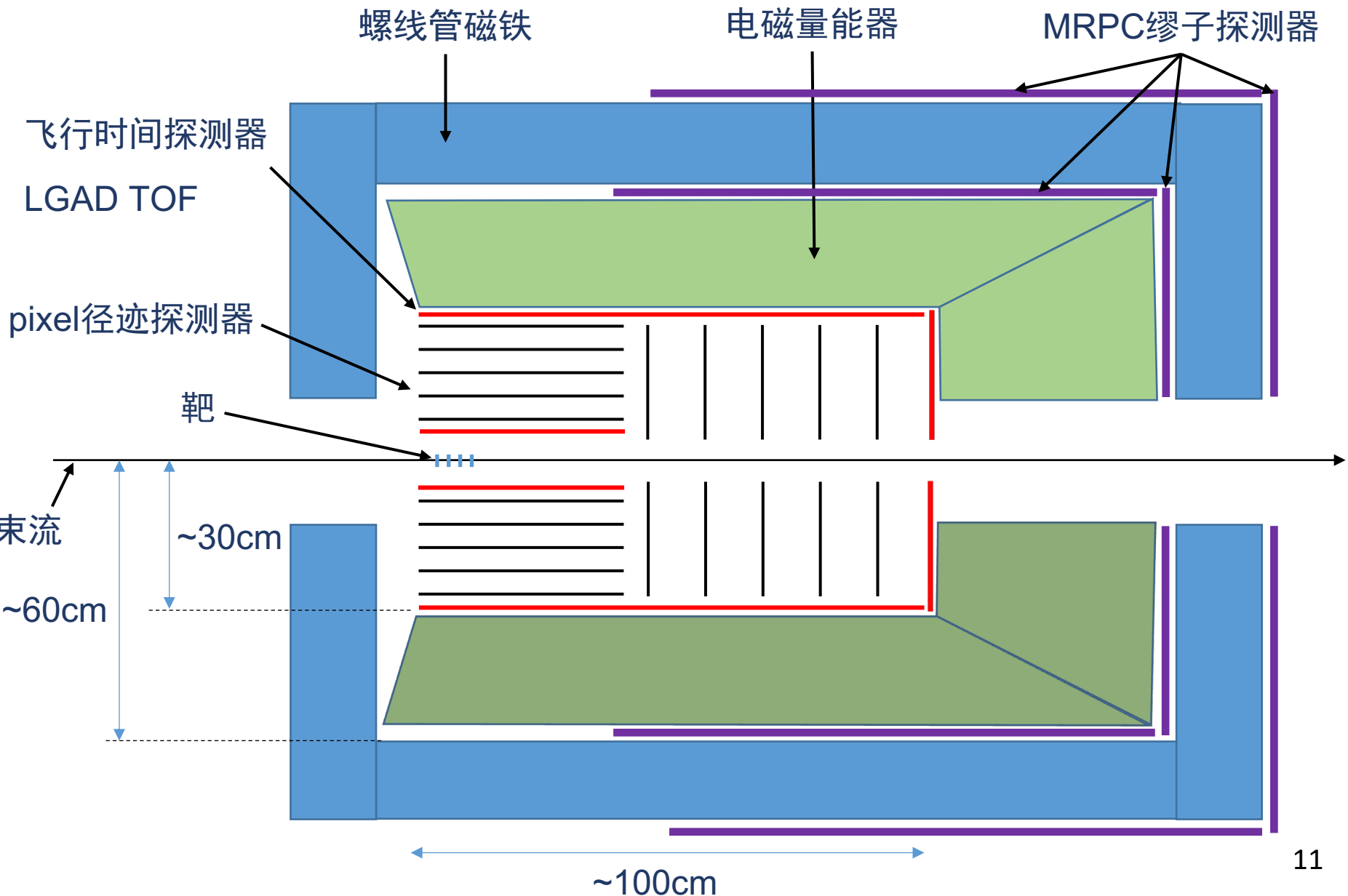
王荣

谱仪性能需求——重离子碰撞



- 相结构、超核物理：0.8-9.1 GeV/u束流能量U+U
 - π^+ , K^+ , p, d, t, He^3 , He^4 粒子测量与鉴别
 - 覆盖所有束流能量、所有粒子的中心快度——靶快度区
 - \Rightarrow 10-100度的接收度
 - 对高阶矩等关联测量至关重要
 - 尽可能大的动量覆盖范围
 - 精确的顶点重建能力有助于降低超核重建本底

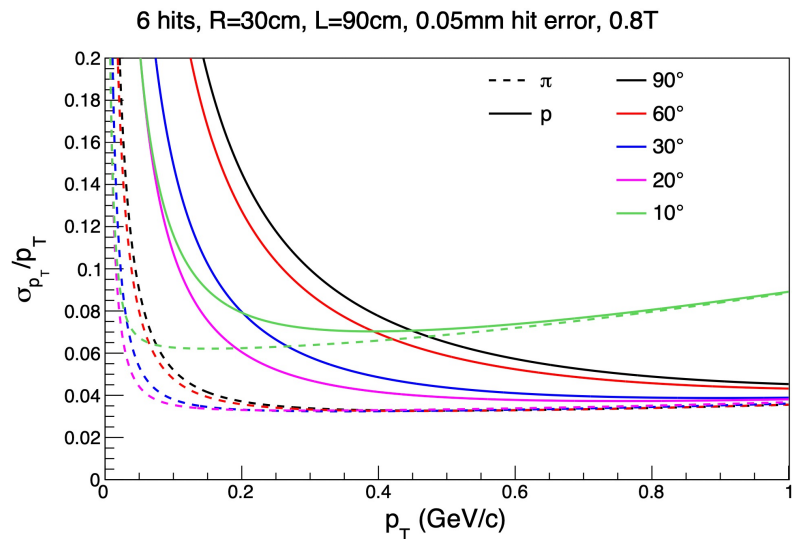
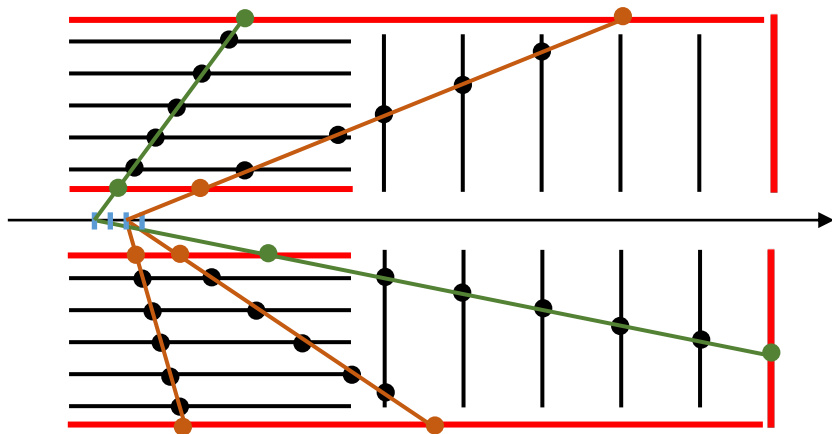
谱仪概念设计



谱仪特点

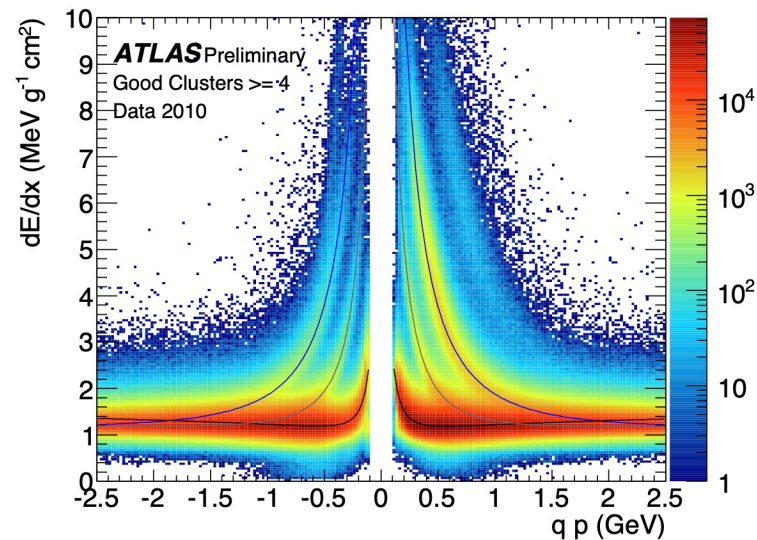
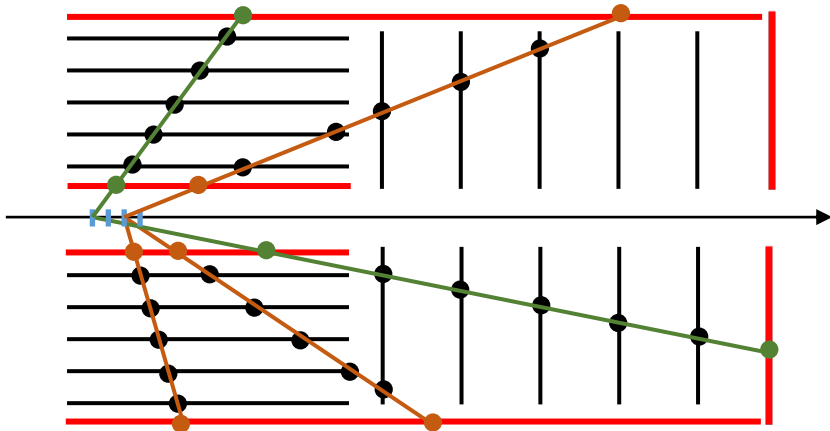
- 全硅径迹探测器
 - 极高事例率
 - η 物理: $>100\text{MHz}$, 几小时即可采集与当前全世界 η 事例相当的统计
 - 重离子碰撞: $>\text{MHz}$ (STAR 1kHz, CEE 10kHz, ALICE 50kHz, CBM 10MHz)
 - 紧凑谱仪
 - 径迹探测器+TOF半径仅30cm, 大幅降低量能器、磁铁、缪子探测器等造价
 - 高位置分辨
 - 利用更短的径迹长度达到一定的动量分辨能力
 - Λ 、超核等有次级衰变顶点的粒子重建本底 ~ 0
- 螺线管磁场
 - 不同电荷态、不同能量束流粒子轨迹一致, 便于布置探测器测量小角度粒子
 - 磁铁内部空间磁场均匀性好, 磁体体积小、造价低

硅径迹探测器



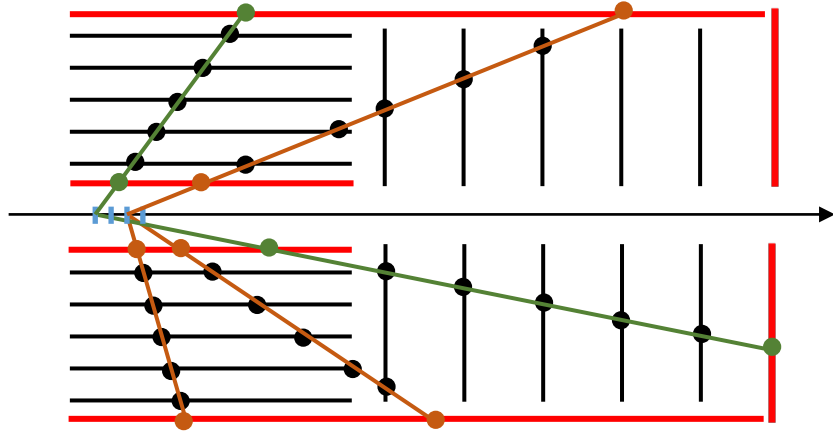
- 100微米pixel size
- 单pixel死时间~1 μ s (1/MHz)
 - 因为pixel很小，尽管 η 物理事例率>100MHz，死时间内击中概率极低
- 能量、时间双读出，时间分辨好于10ns (1/100MHz)，以区分不同事例的hit
 - 极少量堆积事例，可利用外层LGAD TOF hit在径迹层面上进一步区分
- 配合0.8 T磁场，动量相对误差大部分在4-6%
- 能量分辨动态范围 1-50 MIP，dE/dx测量足以进行轻核Z鉴别
- 片上完成集团重建，节省数据传输带宽、存储量
- 需2-3年研发 总面积~28000 cm² 造价~1400万 + 1200万（研发）

硅径迹探测器

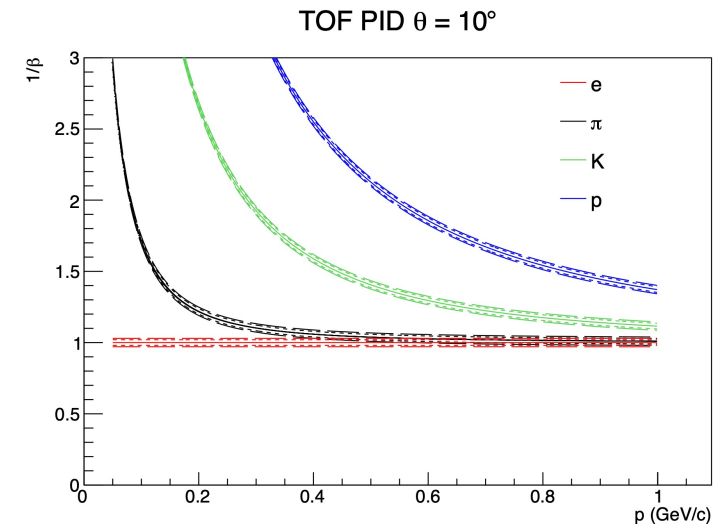
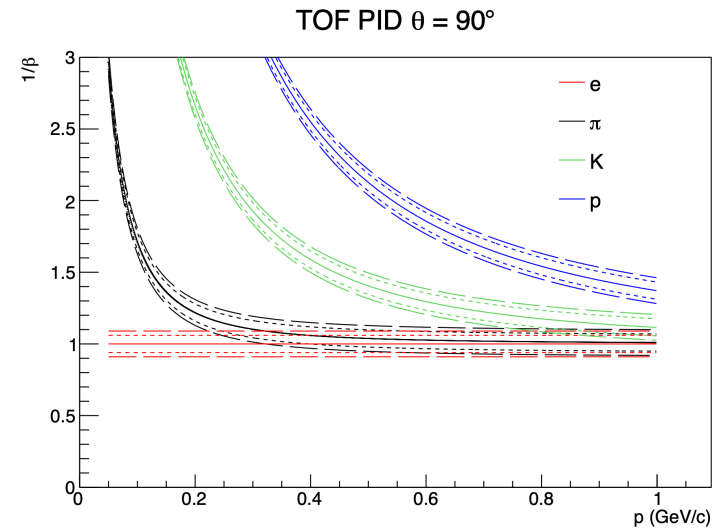


- 100微米pixel size
- 单pixel死时间 $\sim 1\mu\text{s}$ (1/MHz)
 - 因为pixel很小，尽管 η 物理事例率 $>100\text{MHz}$ ，死时间内击中概率极低
- 能量、时间双读出，时间分辨好于 10ns (1/100MHz)，以区分不同事例的hit
 - 极少量堆积事例，可利用外层LGAD TOF hit在径迹层面上进一步区分
- 配合 0.8 T 磁场，动量相对误差大部分在4-6%
- 能量分辨动态范围 1-50 MIP， dE/dx 测量足以进行轻核 Z 鉴别
- 片上完成集团重建，节省数据传输带宽、存储量
- 需2-3年研发 总面积 $\sim 28000\text{ cm}^2$ 造价 $\sim 1400\text{万} + 1200\text{万}$ （研发）

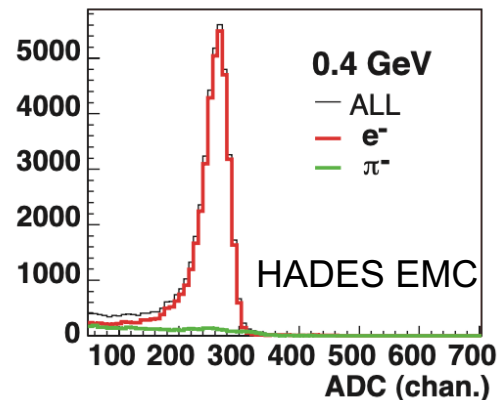
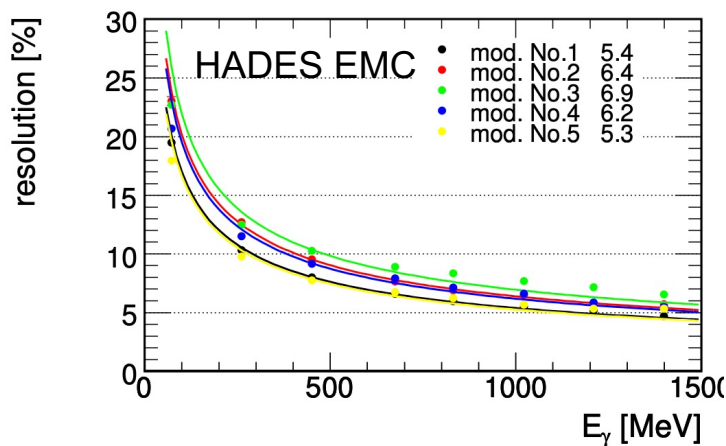
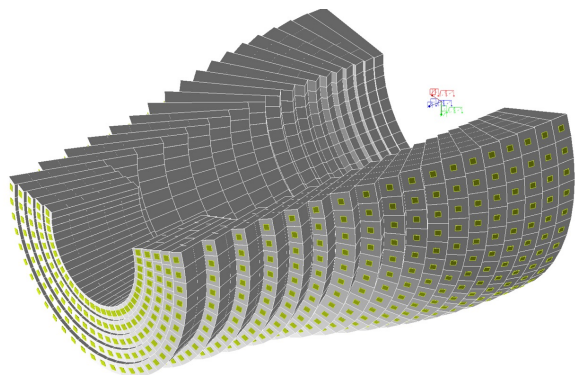
LGAD飞行时间探测器



- 时间分辨~30ps
- 在 $p < 0.2$ GeV/c 时实现 6σ e/ π 鉴别
- 其它粒子很好鉴别
- ATLAS应用
- 总面积~22000 cm² 造价~3300万



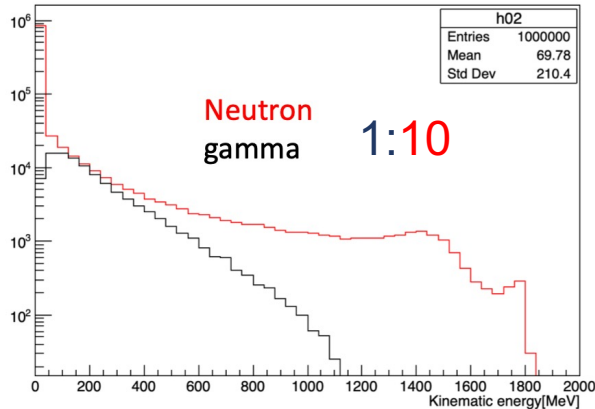
量能器



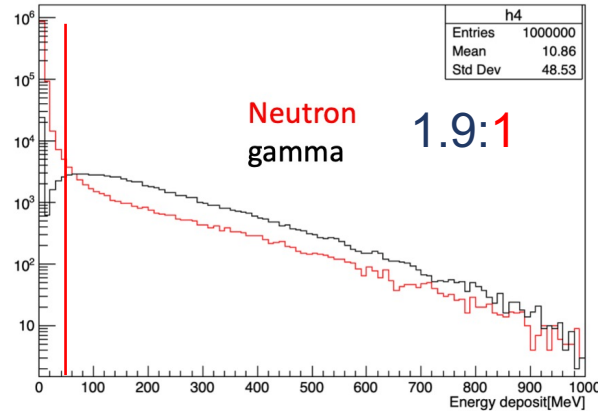
- 当前主要考虑铅玻璃
- $\Delta E/E \sim 6\%$ @1GeV
- $\Delta t \sim 200\text{ps}$ 成型时间 (模块死时间) $< \mu\text{s}$
- 强子簇射产生的低能强子不产生切伦科夫光, 有利于压低中子、 π 本底
- ~ 1200 模块, 造价 ~ 1000 万
- 其它选项: 纯CsI、铅塑闪Shashlik、ADRIANO2 (闪烁光/切伦科夫光双读出)

γ -n、e- π 鉴别

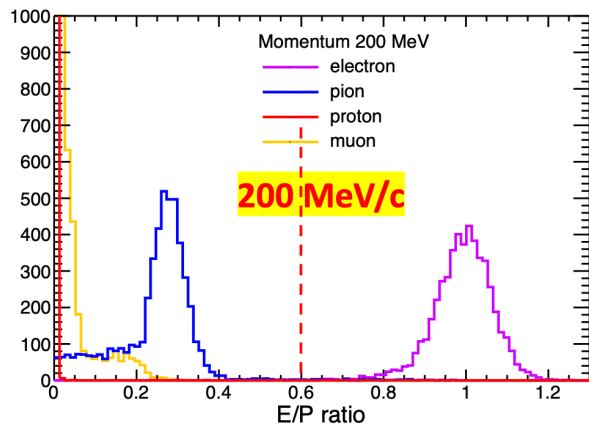
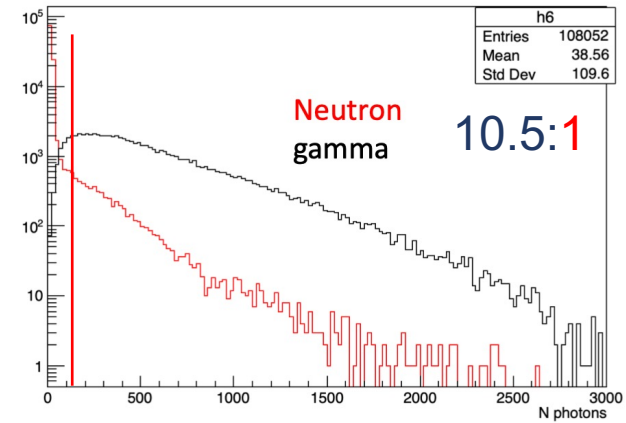
Initial kinetic energy



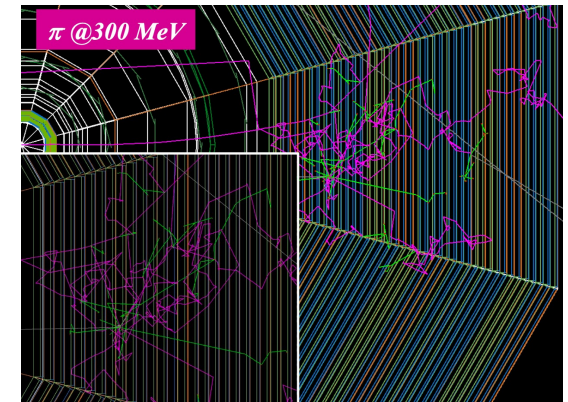
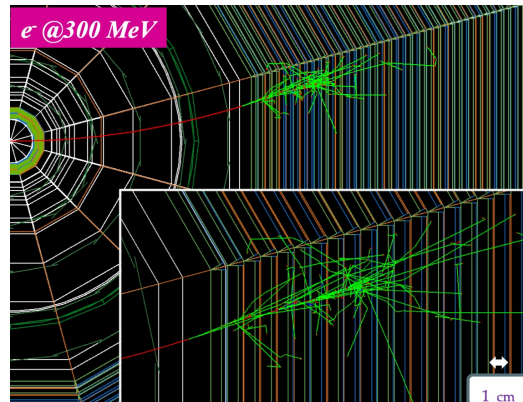
Energy deposit in Lead Glass



N photons collected by SiPMs



田野



C. Gatto

- γ :n \sim 1:10 \Rightarrow \sim 10:1
- e- π : 利用径迹p信息, E/p很容易鉴别
- 簇射范围大小、形态: 信号集中在一个量能器单元 vs. 多个单元

缪子探测器

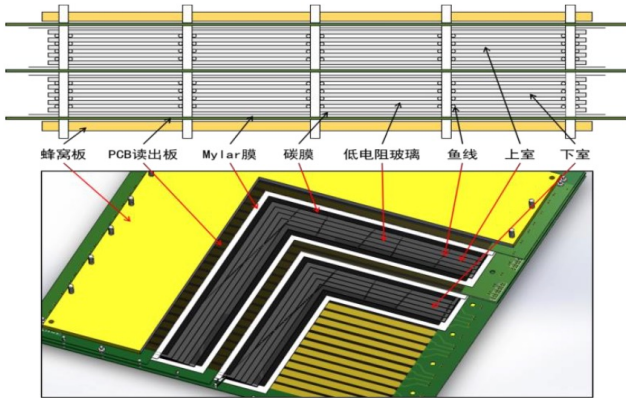
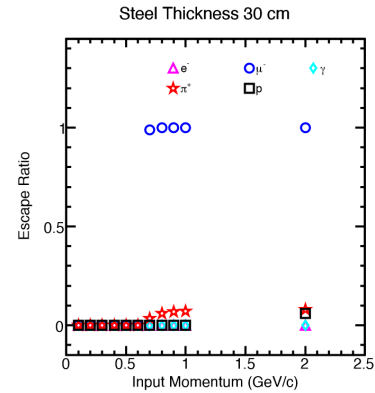
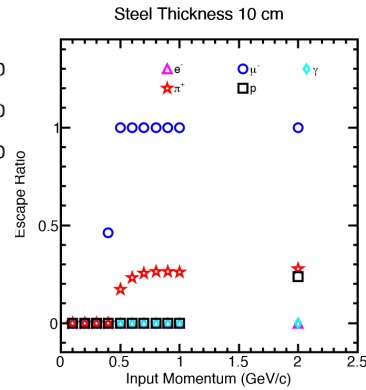
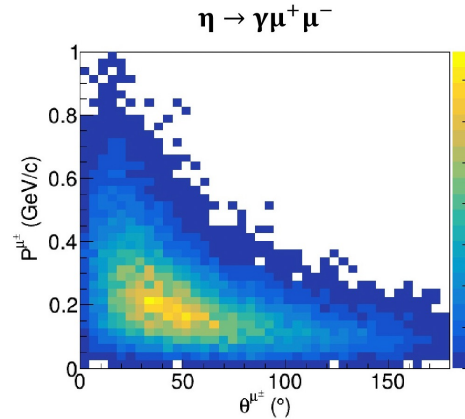
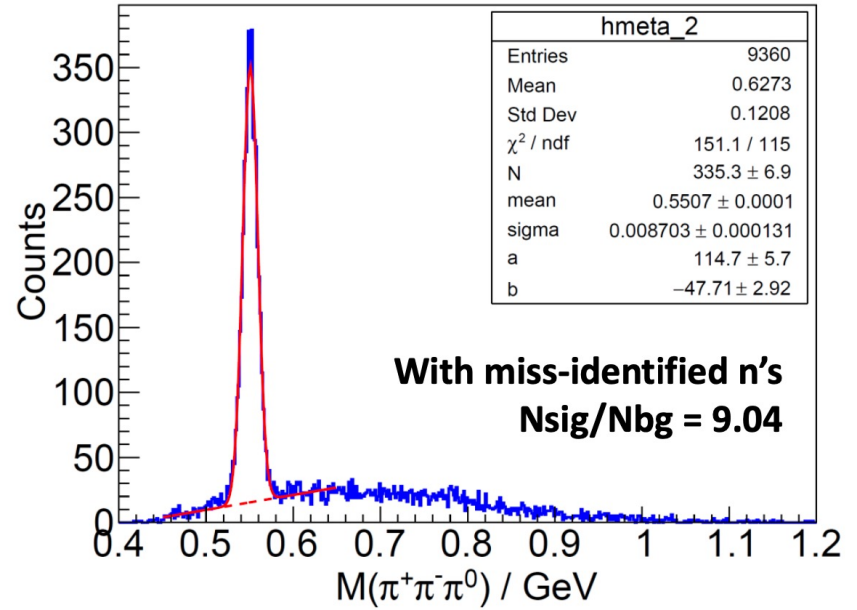
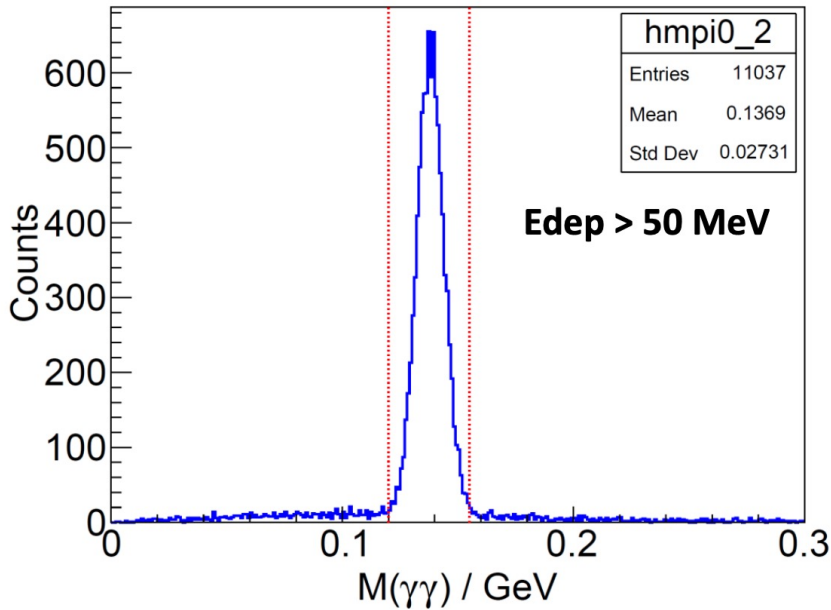


图 10 eTOF MRPC 结构示意图。



- 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
 - 更高效的 μ^+ / π^+ 鉴别技术？ADRIANO2？
- 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

η重建模拟



- $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 (\gamma\gamma)$
- 可以很好重建 π^0 、 η
- 一个月产生的 η 数目:

- $100 \cdot 10^6 \text{ evt/s} \cdot 3600 \text{ s/h} \cdot 24 \text{ h/d} \cdot 30 \text{ d} \cdot 0.3 \cdot 0.004 \text{ } \eta/\text{evt} \sim 3 \cdot 10^{11} \eta$

平均流强/最高流强



王荣

数据带宽需求

- 重离子碰撞
 - 1MHz
 - ~100 track
 - 7 hits / track
 - total: 7.e8 hits/s
- η 介子物理
 - ~>100MHz
 - ~4 track
 - 6 hits / track
 - total: 3.e9 hits/s
- 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
- CEE
 - 10kHz
 - ~100 track
 - ~30 hits / track
 - ~20 digi / hit
 - total: 6.e8 digi / s

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

造价

子系统	预算（万元）
Target	50
pixel tracker	1400 + 1200(研发)
LGAD TOF	3300
EMC	1000
MRPC MTD	500
Solenoid	600
Supporting structure	100
DAQ	1600
Total	8550 + 1200(研发)

谱仪名称

- 中国超核谱仪CHNS
- 螺线管全硅径迹谱仪SSS
- GeV-Energy Silicon Tracker (GEST)

- 探险，罗曼史

Noun [[edit](#)]

gest (*countable and uncountable, plural **gests***)

- 仪式

1. (*archaic*) A story or adventure; a verse or prose romance. [quotations ▼]

- 仪态

2. (*archaic*) An action represented in sports, plays, or on the stage; show; ceremony. [quotations ▼]

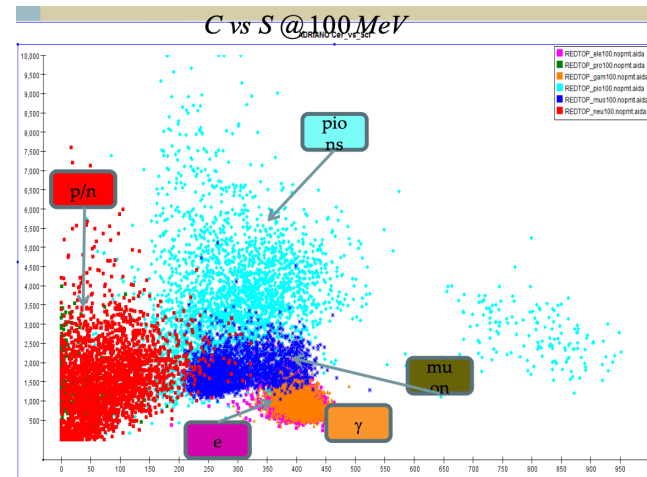
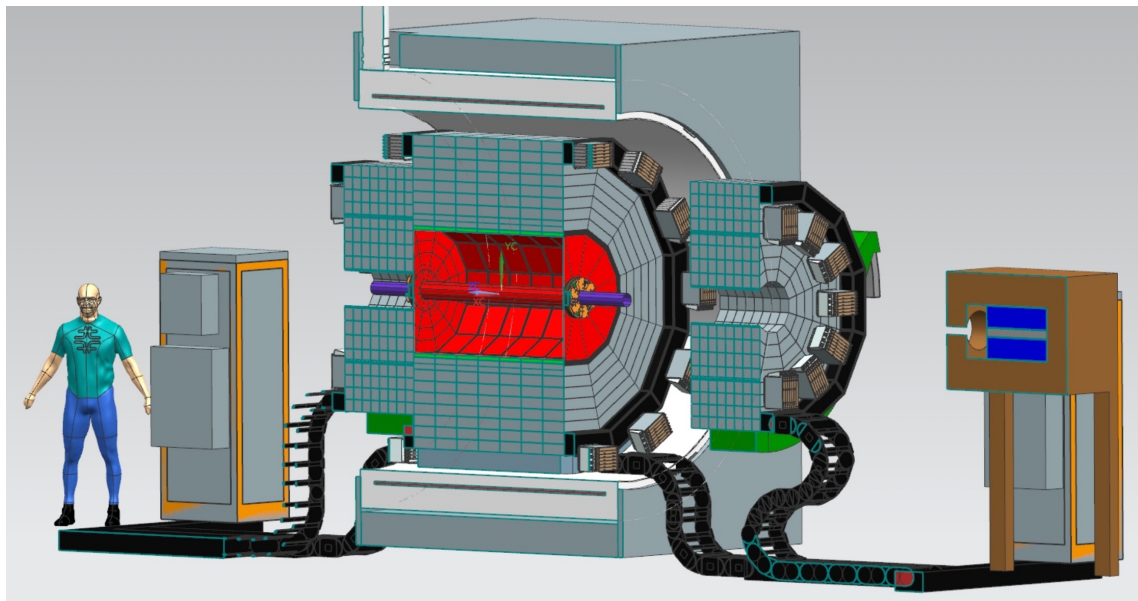
- 手势、姿势

3. (*archaic*) bearing; deportment [quotations ▼]

4. (*obsolete*) A gesture or action. [quotations ▼]

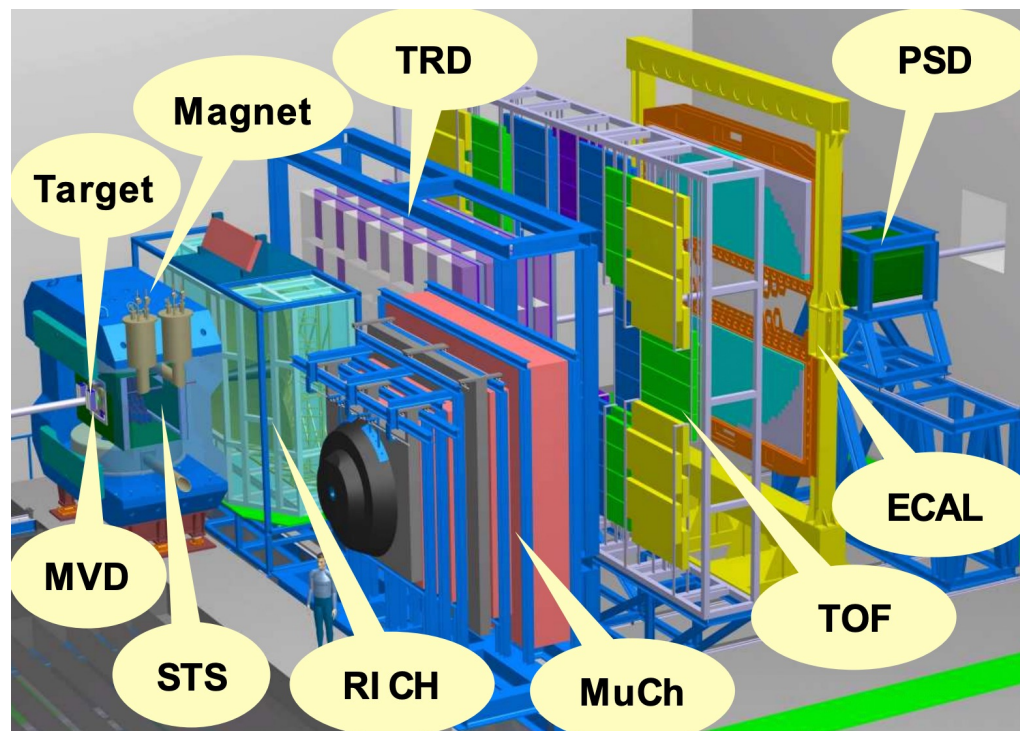
- Silicon Tracker At Huizhou (STAH)

国际竞争-REDTOP



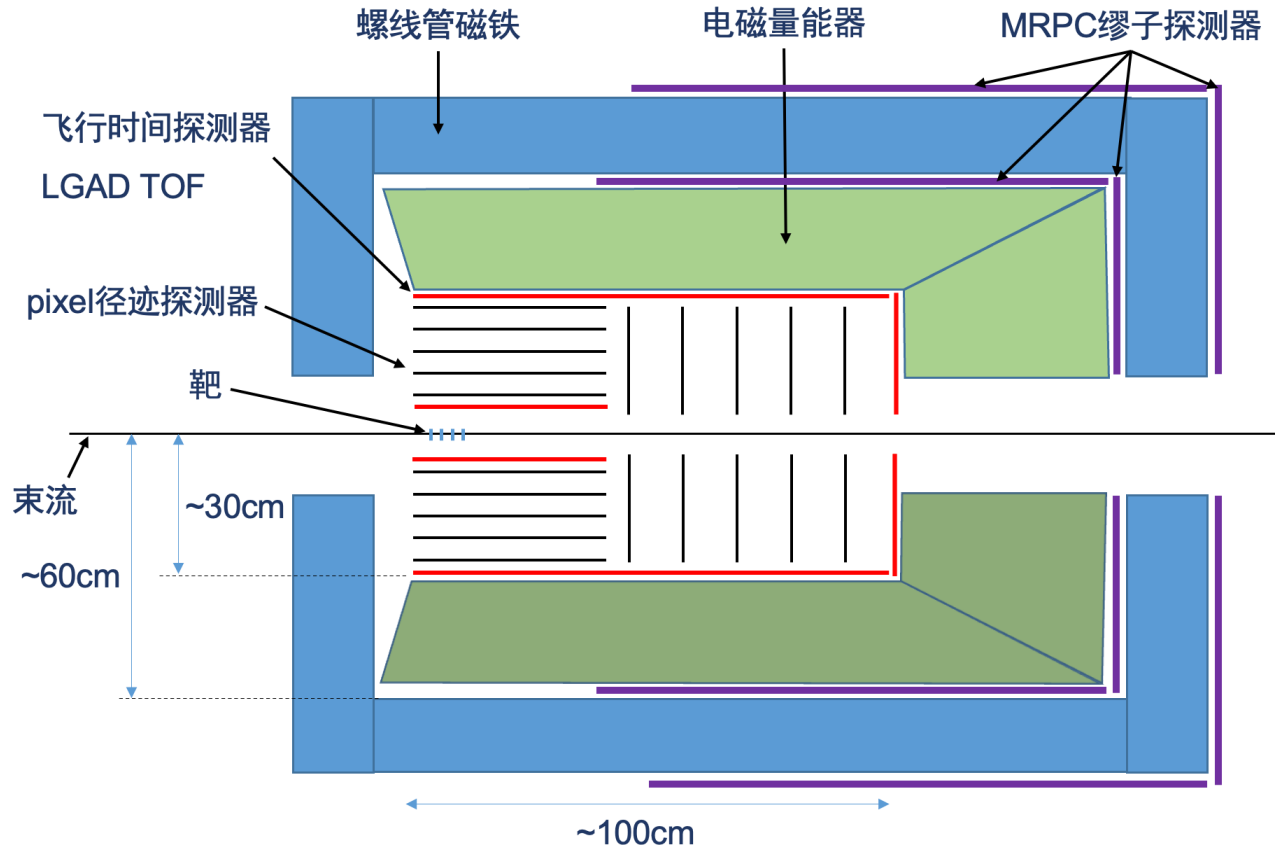
- 82-152 M USD, 5.6 – 10亿元
- 处于争取加速器实验室、经费支持阶段
- 事例率500MHz, HIAF高能终端谱仪 > 100MHz
- 无dE/dx测量, 无法满足相结构、超核研究需求
- 闪烁光、切伦科夫光双读出采样型量能器 (电磁+强子量能器)
 - e、 μ 、 γ 鉴别能力好 (压低 π 、中子本底)
 - 可测量中子

国际竞争-CBM



- 55M欧元，4亿元
- 计划2028年建成
- μ 子模式需单独运行
- 覆盖能量2.5-11 AGeV，与HIAF + HIAF-U (0.8-9.1 AGeV)接近
- 事例率 $<10\text{MHz}$ ，HIAF高能终端谱仪 $> 1\text{MHz}$

小结



- 在HIAF高能终端，建造一个极高事例率的螺线管全硅径迹探测器，可以进行 η 介子物理、轻强子物理、超核、核物质状态方程、相结构研究
- 总造价约1亿
- 具有与CBM、REDTOP相当的性能和潜力

Back-up

慢引出束流时间结构

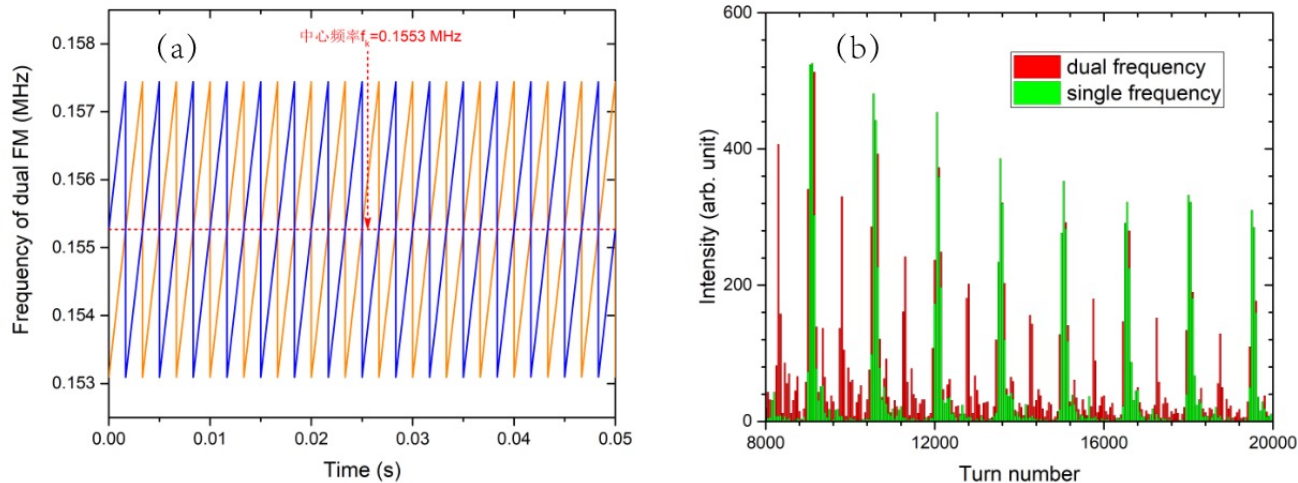


图 5.13 (a) RKO双频调制时频率随时间变化, (b) RKO双频调制对spill时间结构的影响

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

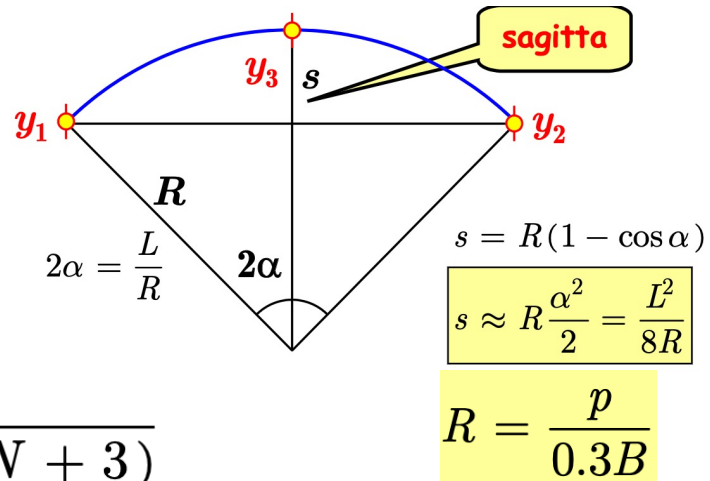
- BRing出来的spill的时间结构
- 红色是双频扫描的, 1个峰和1个峰的重复频率在10~30kHz之间, 峰与峰之间的束流较少
- BRing引出平台一个周期大约2us, 按照3s的引出平顶, 总共1.5e6圈, 1e11ppp的流强, 平均一圈才6.7e4个离子, 估计涨落会比较大, 也会有时间结构, 需要模拟8

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:

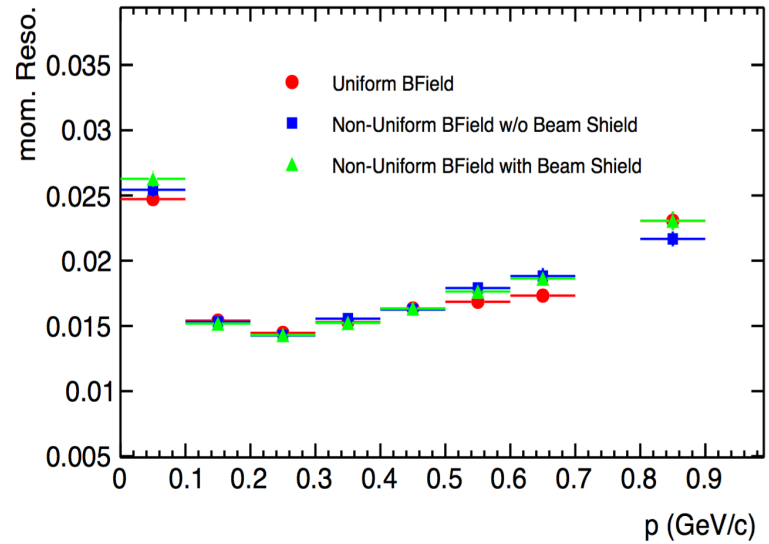
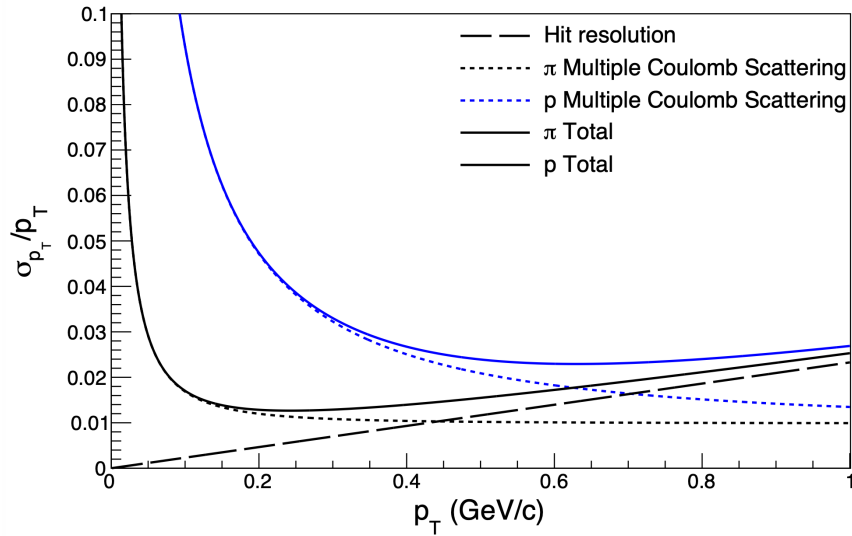
- 先计算长度 $l/2$ 的径迹的散射角度 θ_0
- 再计算长度 $l/2$ 的径迹两端 θ_0 的角度对应的曲率 $1/R = \theta_0 / (l/2)$
- 最后导出MCS动量分辨率贡献
- 这一部分贡献只是一个大概估算，实际情况取决于hit误差与MCS相对贡献大小等

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

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

径迹探测器动量分辨率

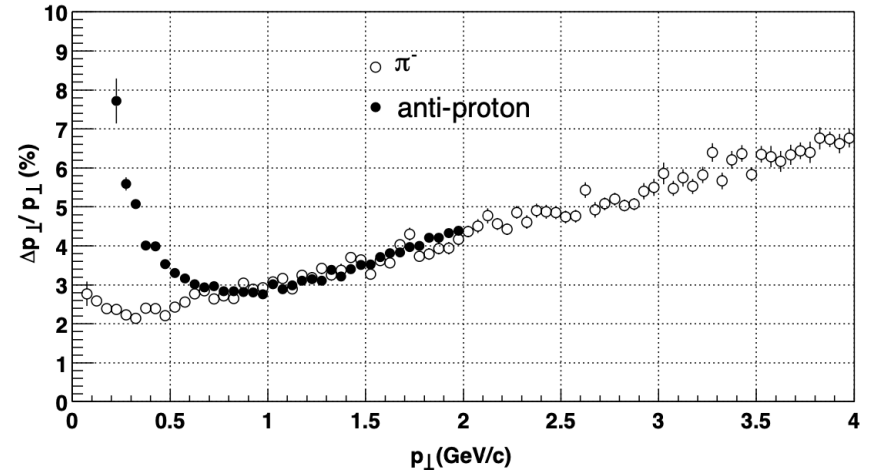
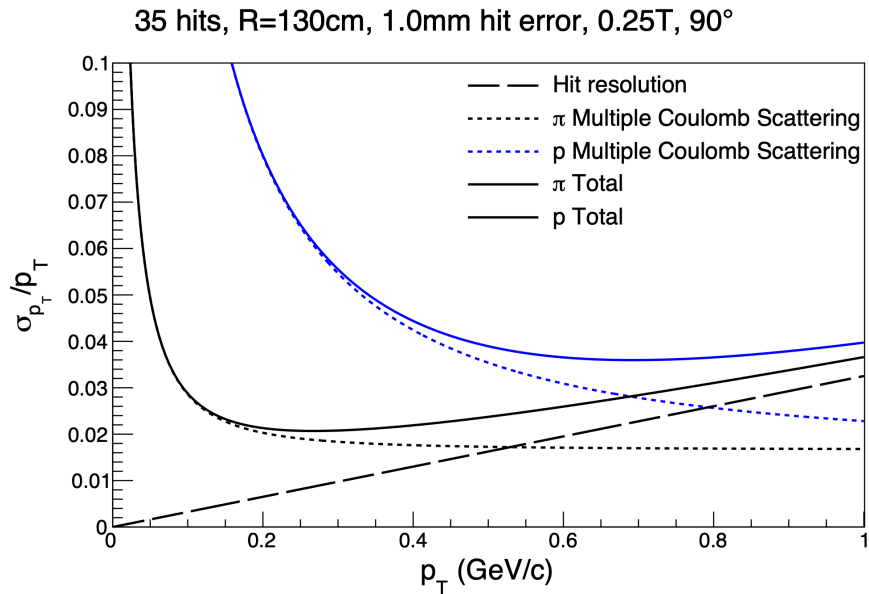
75 hits, R=90cm, 1.0mm hit error, 0.5T, 90°



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 32

硅径迹探测器

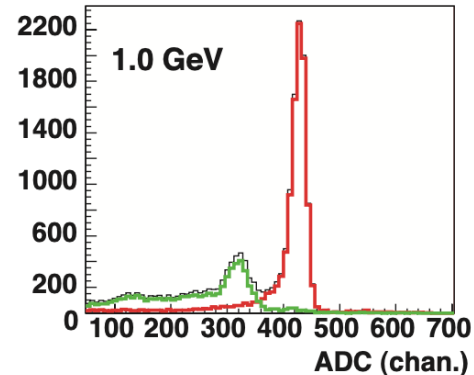
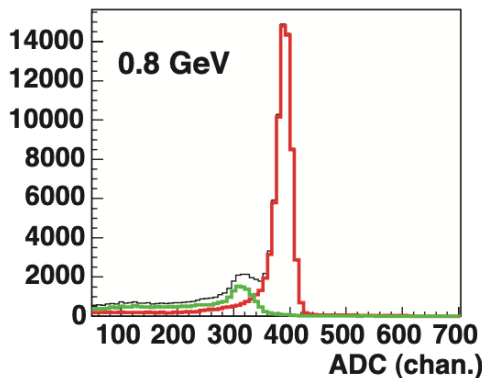
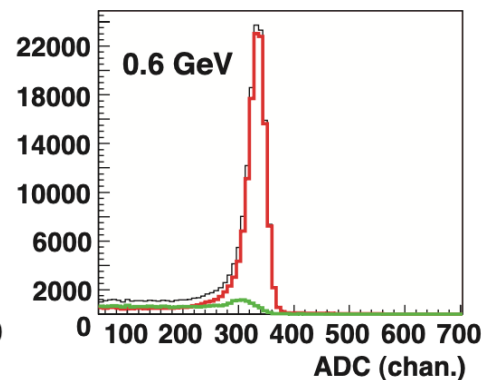
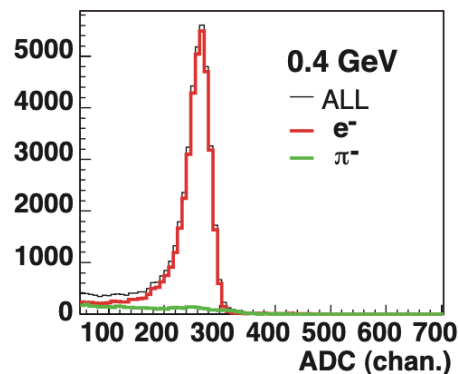
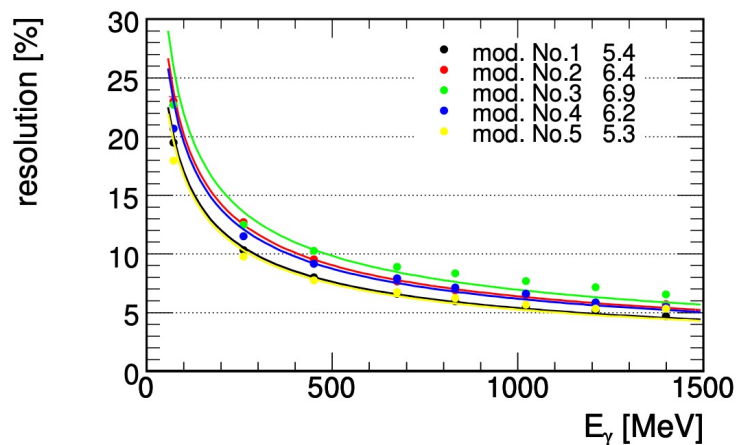
- 造价
 - 400元/cm² (芯片100 + FPCB电子学100 + 支撑结构等200) + 1200万研发费用 + 300万劳务费
 - 总面积28000 cm² \Rightarrow 400 * 28000 = 1100万
 - 桶部：最外层25cm半径，30cm长，最外层面积 $3.14 * 25 * 2 * 30 = 4700$ cm²，5层，总面积 $4700 * 6 / 2 = 14000$ cm²
 - 前端：30cm半径，5层， $3.14 * 30 * 30 * 5 = 14000$ cm²
 - 总造价1100万 + 1200万 + 300万 = 2600万

LGAD飞行时间探测器

- 造价

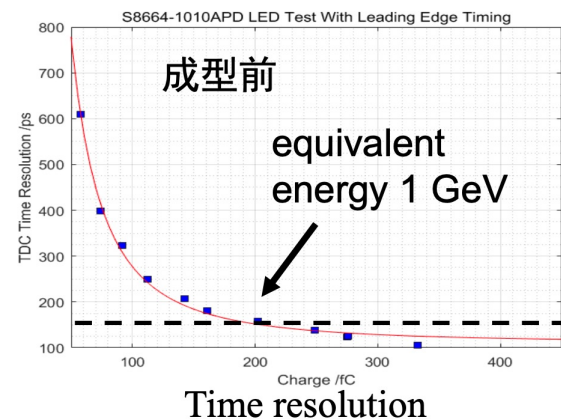
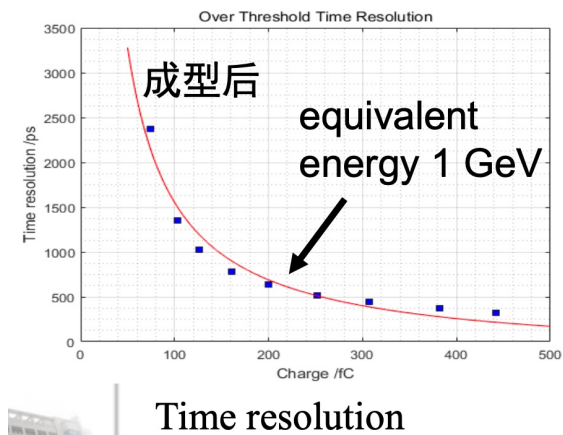
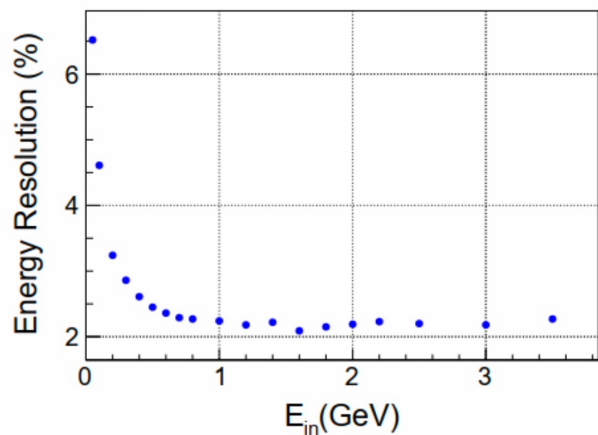
- LGAD传感器（高能所-微电子所，2平方米）面积： 900万
- ASIC（TSMC芯片，有不确定性）： 600万
- 模块组装（倒装焊等）： 400万
- 电子学读出板： 500万
- 高压系统（假设每个模块单独供高压）： 300万
- 低压系统： 100万
- 冷却系统： 300万
- 电缆等： 200万

铅玻璃

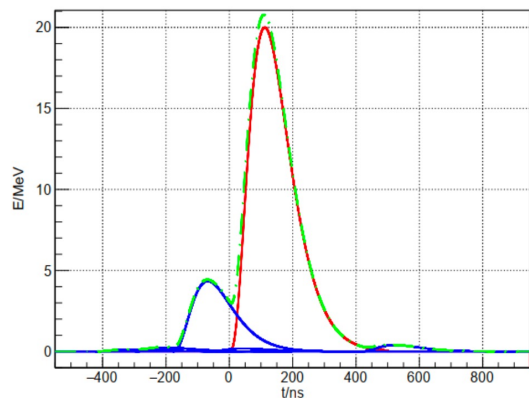
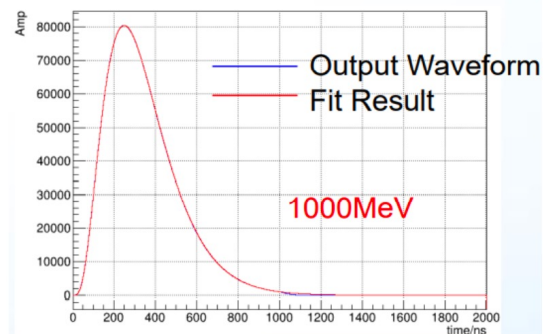


- HADES EMC
- 能量分辨率 $\sim 6\%$ @ 1GeV, $\sim 25\%$ @ 50MeV
- 时间分辨 $\sim 215\text{ps}$ (0.8 GeV电子)
- 成型时间 $\sim 0.5\ \mu\text{s}$
- 强子簇射切伦科夫光产额低于电子簇射, 有利于压低中子、 π 本底
- 造价: $\sim <1000$ 万

纯CsI

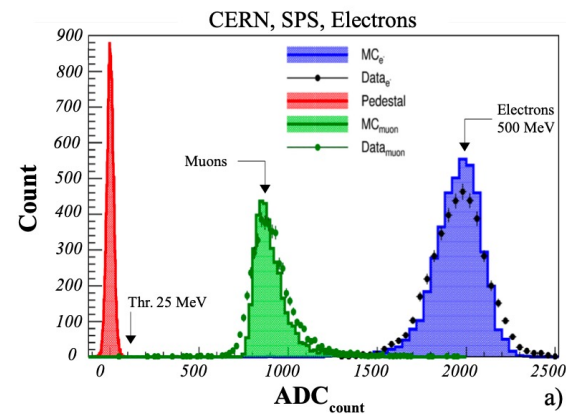
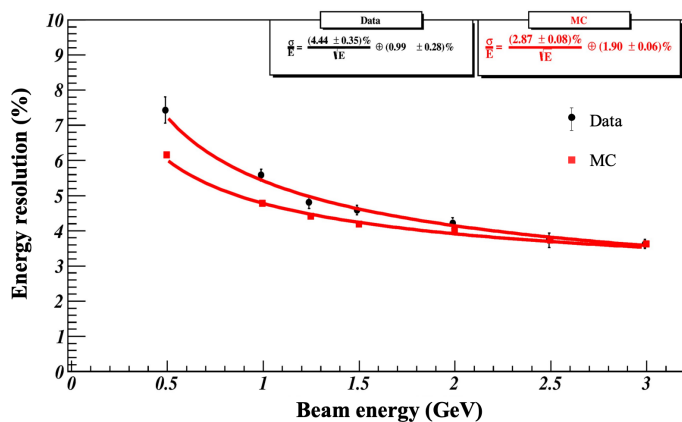
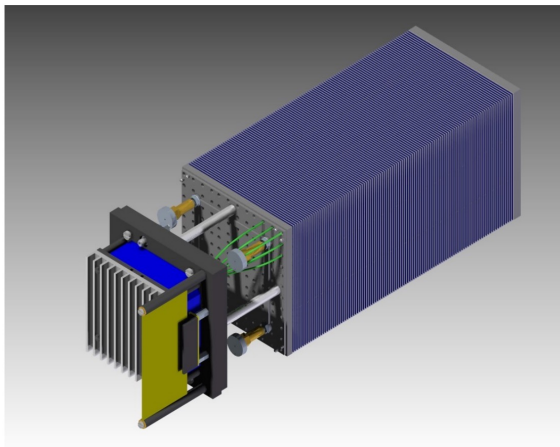


Time resolution

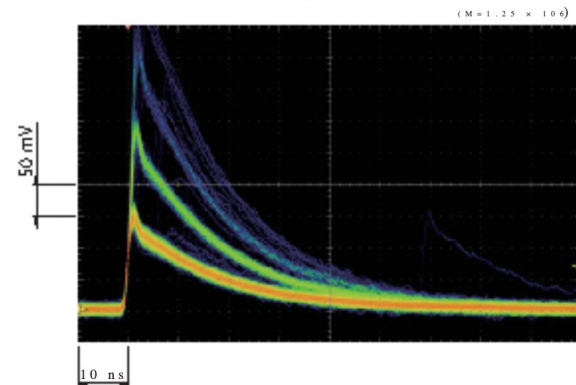
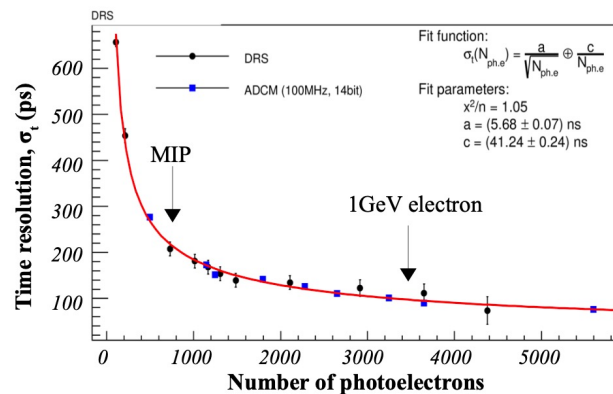


- 科大STCF预研
- 能量分辨率 $\sim 2\%$ @ 1GeV, $\sim 7\%$ @ 50MeV
- 时间分辨
 - 成型前: $\sim 150\text{ps}$ @ 1GeV, 小信号 $\sim 1\text{ns}$
 - 成型后: 600ps @ 1GeV, 小信号几个ns
- 成型时间 $\sim 1\ \mu\text{s}$
- 造价: 5800万 ($\theta=10-100$ 度) / 4000万 ($\theta=10-60$ 度)

采样型

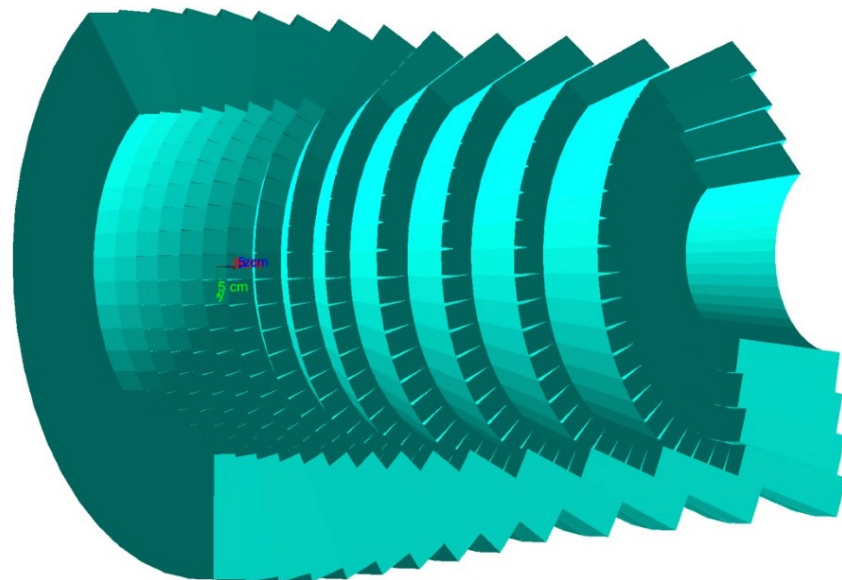


- NICA-MPD量能器，国内清华等参与研制生产
- 0.3mm铅 + 1.5mm塑闪（铅辐射长度0.56cm）
- 能量分辨率~6%@1GeV，~20%@50MeV（公式推算）
- 阈值可设在25MeV
- 时间分辨~100ps @ 1GeV，~500ps @ 50MeV
- Micro-Pixel Avalanche Diodes (MAPD)死时间~50ns
 - 还有没有另外的电子学成型时间？
- 造价~<1千万
 - MPD ECAL 4.5m直径，6m长，第一期造价~3千万



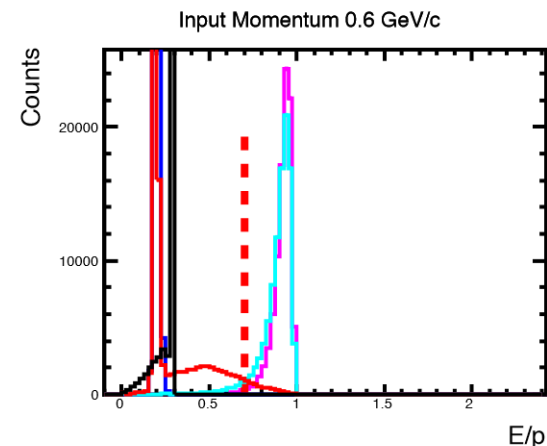
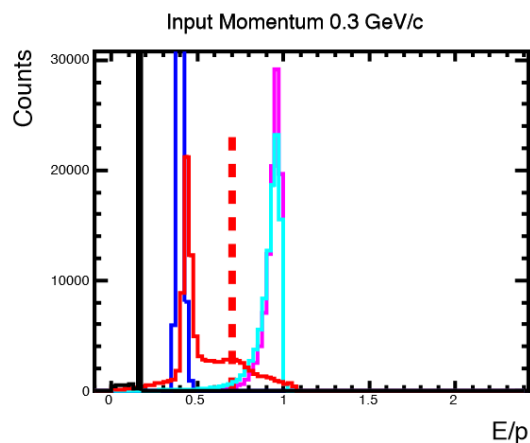
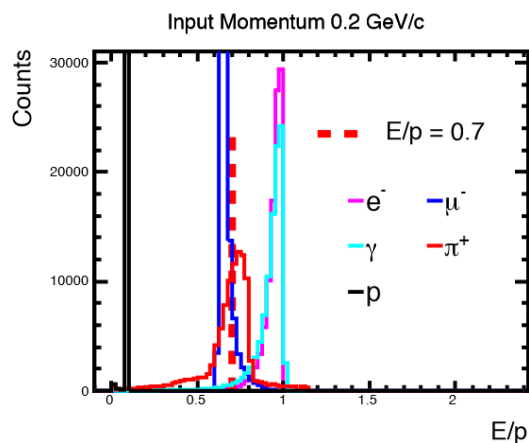
纯CsI电磁量能器

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

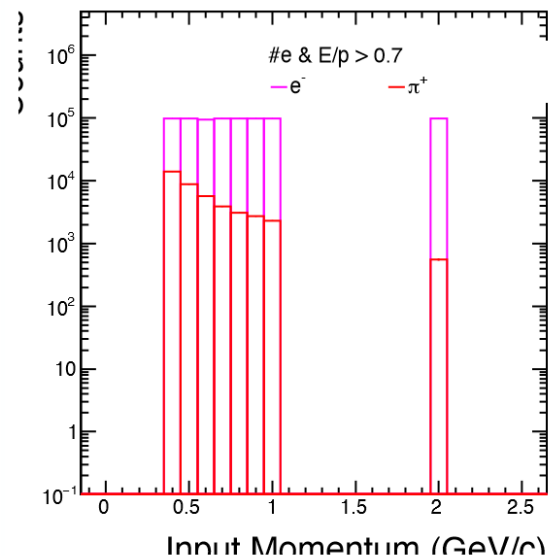


- 纯CsI晶体
 - 光衰减时间：6ns / 35ns快慢成分
 - 光产额：2.3 / 5.6% NaI
- 共~800块晶体，每块长20cm，尾端面6.5cm×6.5cm
- 每块晶体4片APD读出
- 能量分辨率 ~3% @ 1GeV
- 时间分辨好于1ns，可在100MHz事例率下区分不同事例
- 耐辐射性：100krad未见性能变化， 10^{12} 中子/cm²辐射后光产额降低0-20%
- 中科大、近物所等（STCF EMC预研）
- 造价：5800万（ $\theta=10-100$ 度）/ 4000万（ $\theta=10-60$ 度）

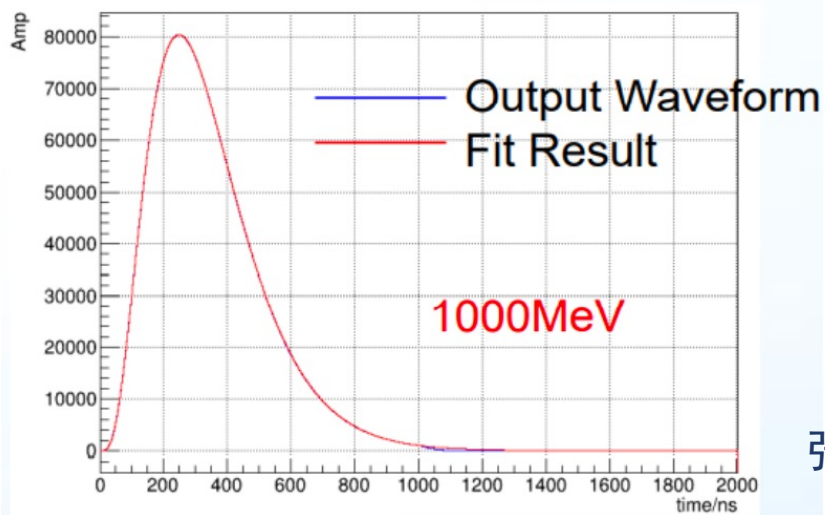
纯CsI电磁量能器



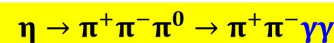
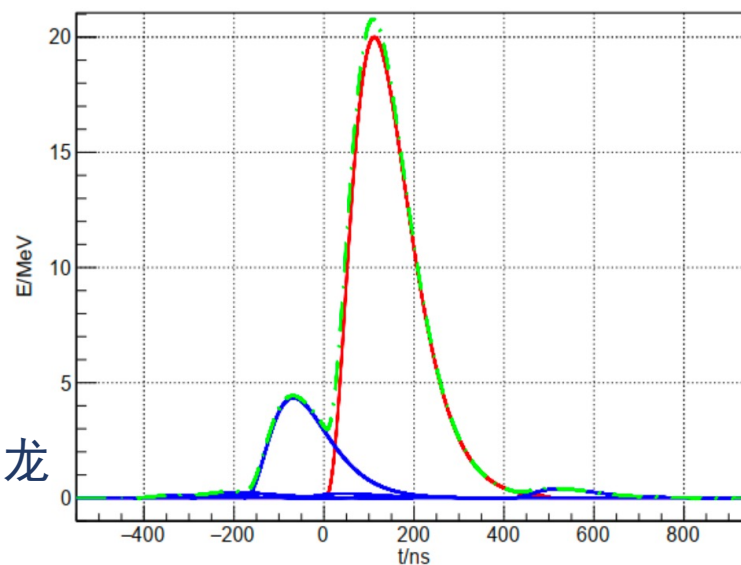
- 从0.2GeV/c动量开始，具有较好的 e / π 鉴别能力
- π 压低一个量级以上



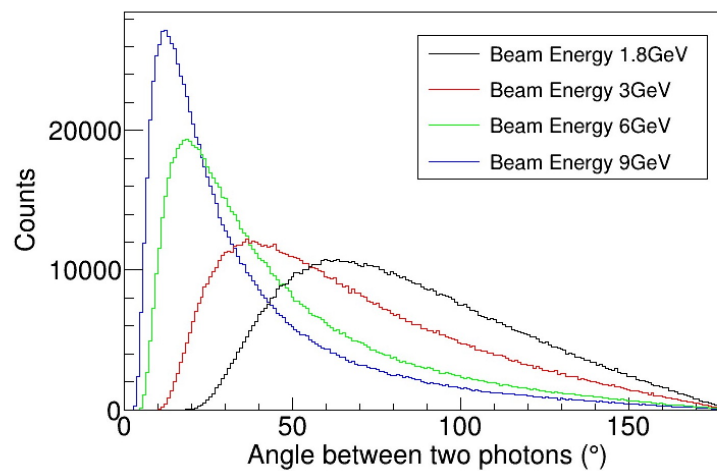
纯CsI电磁量能器



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

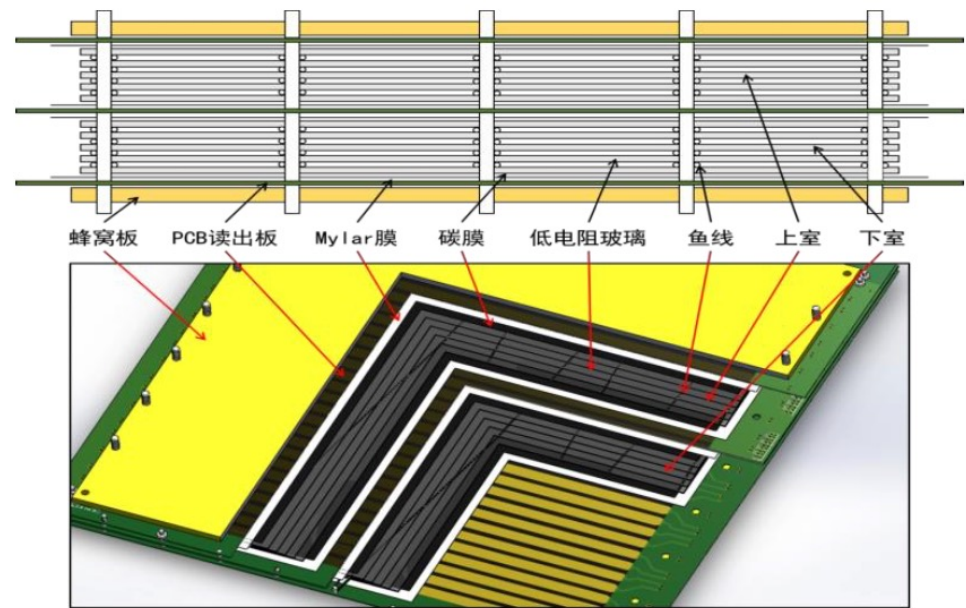


图 10 eTOF MRPC 结构示意图。

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

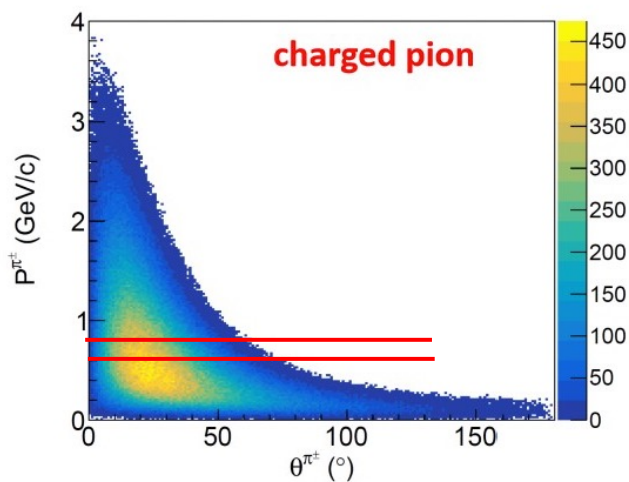
- Proton radius anomaly: $\eta \rightarrow \gamma \mu^+ \mu^-$ vs $\eta \rightarrow \gamma e^+ e^-$
- All unseen leptonic decay mode of η / η' (SM predicts $10^{-6} - 10^{-9}$)

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

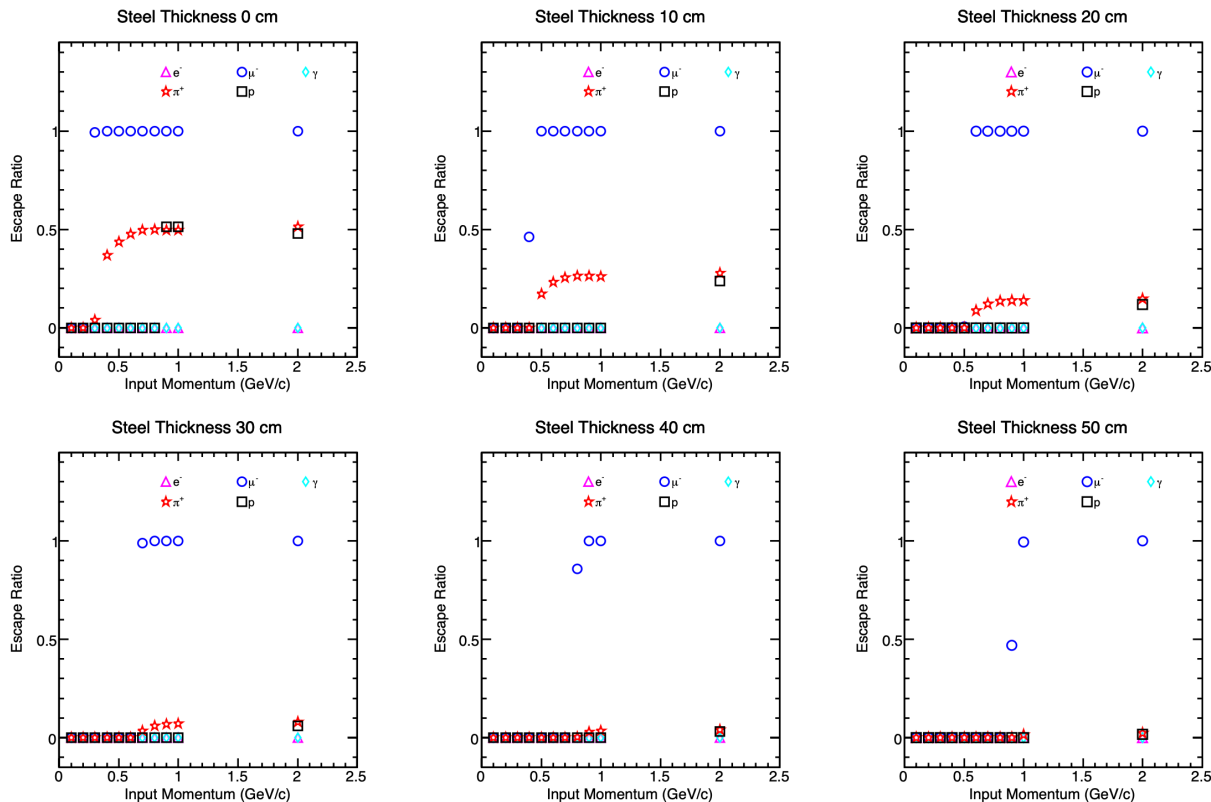


eta衰变的pi+-分布

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

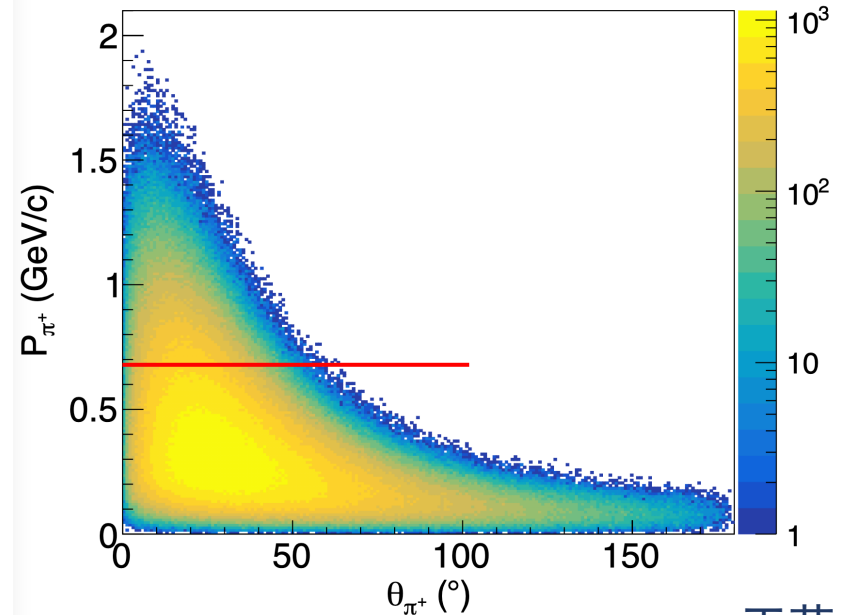
	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI	BaF ₂	CeF ₃	BGO	PbWO ₄	LYSO
Density [g cm ⁻³]	3.67	4.51	4.51	4.89	6.16	7.13	8.3	7.1
Radiation length [cm]	2.59	1.85	1.85	2.06	1.68	1.12	0.89	1.16
Molière radius [cm]	4.8	3.5	3.5	3.4	2.6	2.3	2.0	2.07
Interaction length [cm]	41.4	37.0	37.0	29.9	26.2	21.8	18.0	20.3
dE/dx)mip [MeV cm ⁻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₄₇

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

