# 电子核子碰撞实验
## 第二节:实验方法详解

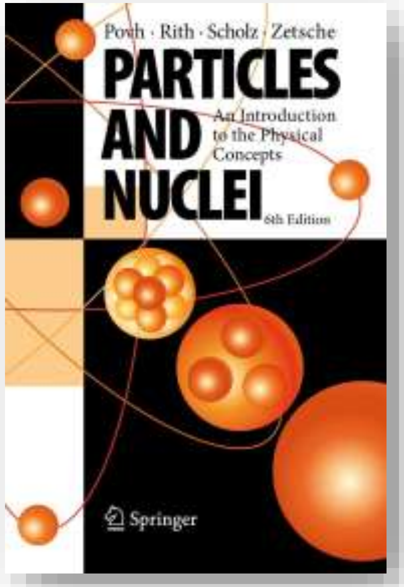
叶志鸿，清华大学物理系
yez@tsinghua.edu.cn

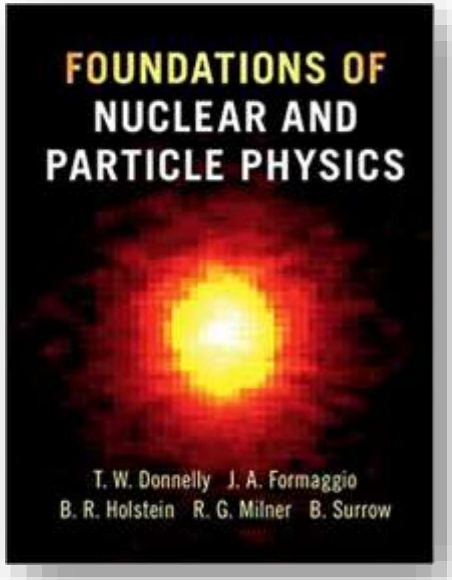
复旦大学2022年“优秀学生培养计划”粒子物理与核物理暑期学校
08/20/2022

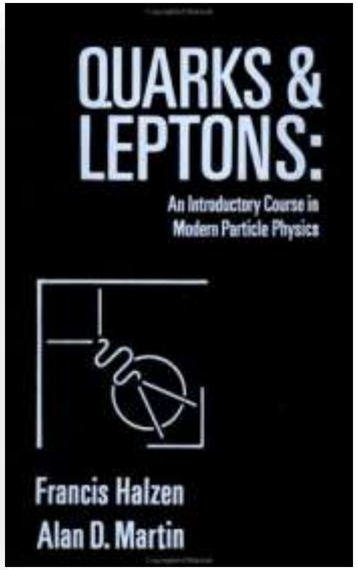
# 课堂内容

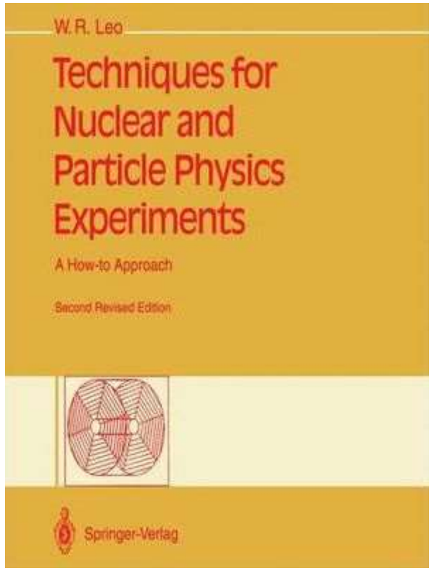
- 第一节：物质结构概要
- 第二节：实验方法详解和实验实例(Hall-A Tritium Experiments)
- 第三节：未来展望

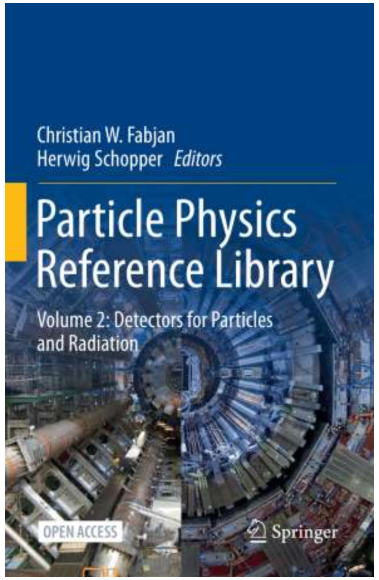
推荐读物（请联系本人索取英文版PDF）：



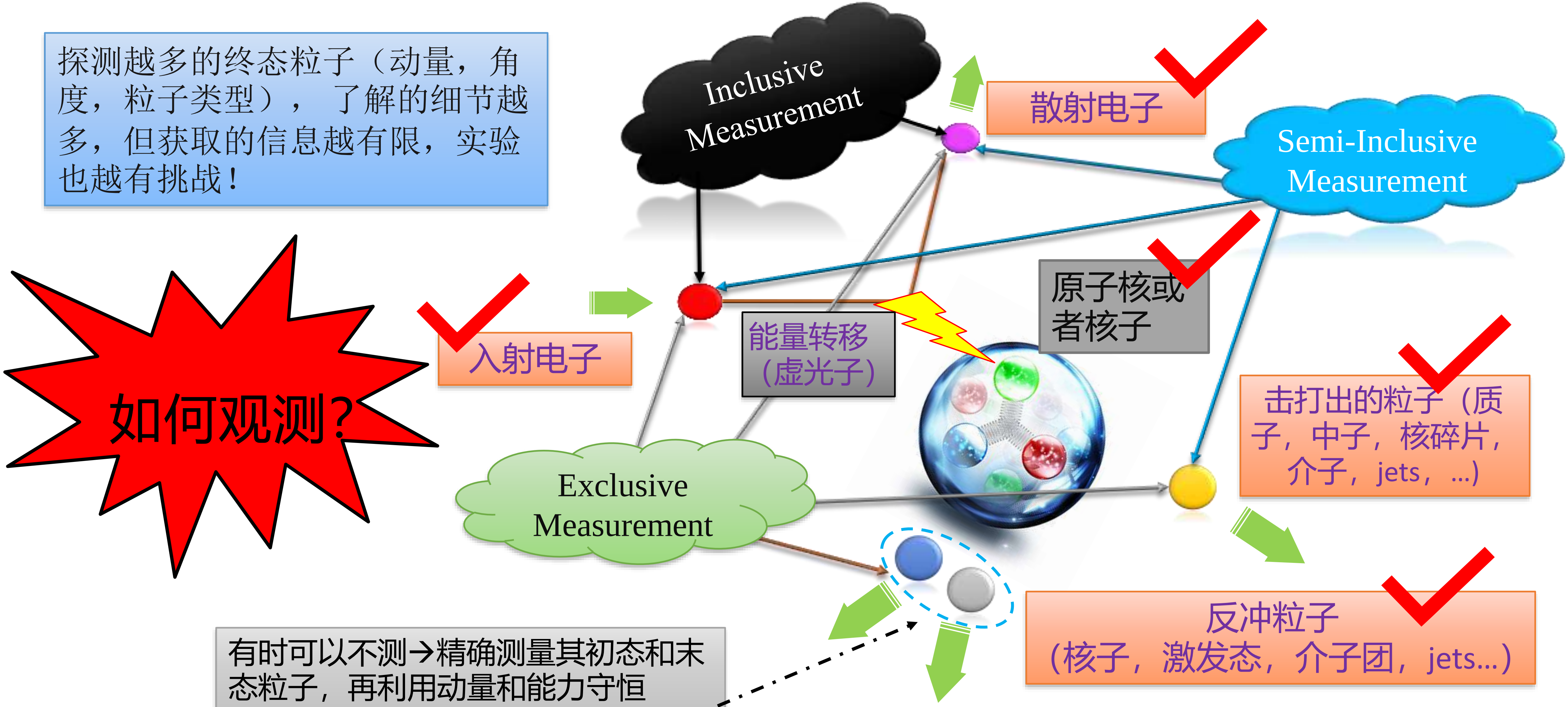



# 电子散射实验综述

➢ 高能电子核子碰撞过程：

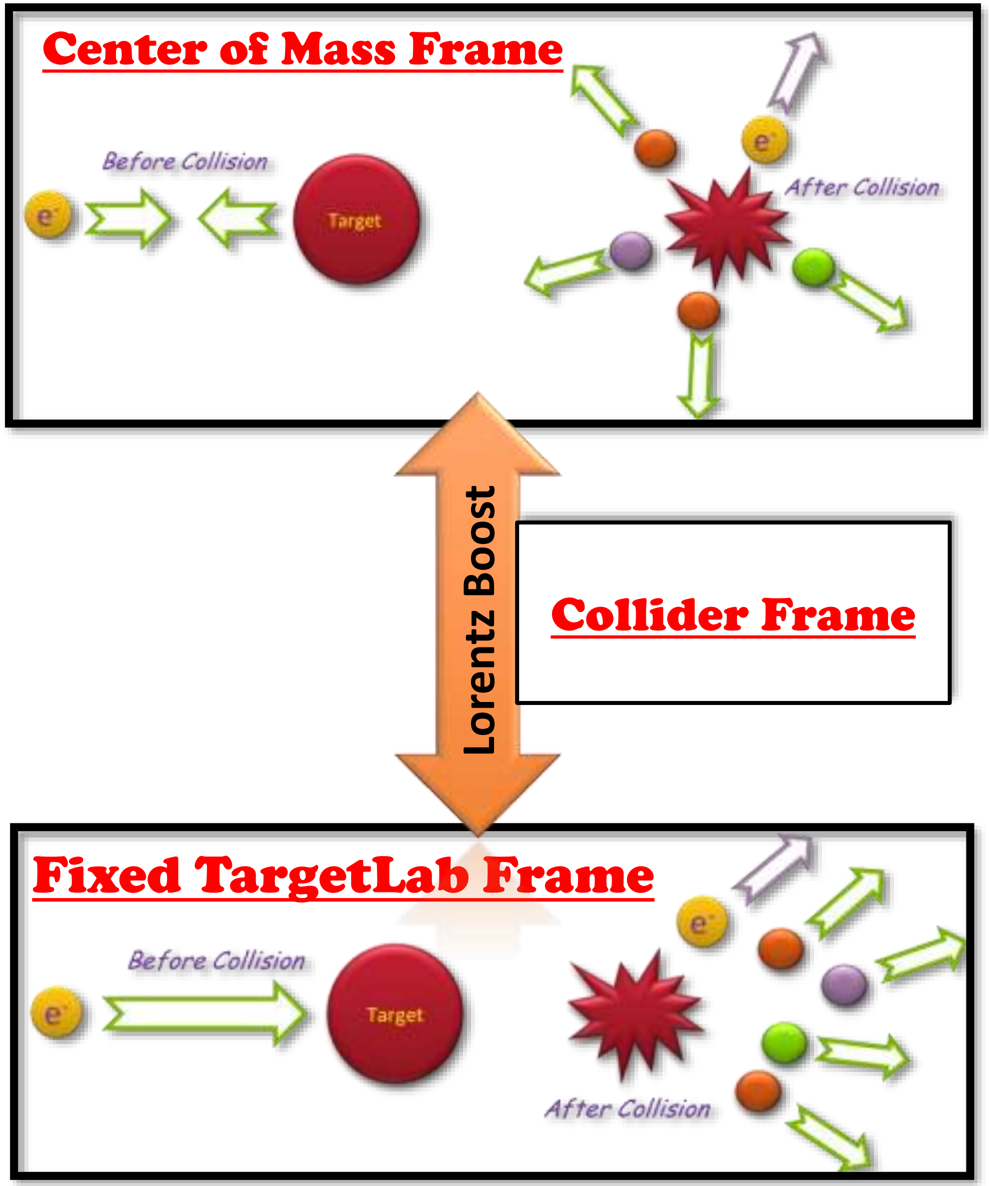
探测越多的终态粒子（动量，角度，粒子类型），了解的细节越多，但获取的信息越有限，实验也越有挑战！



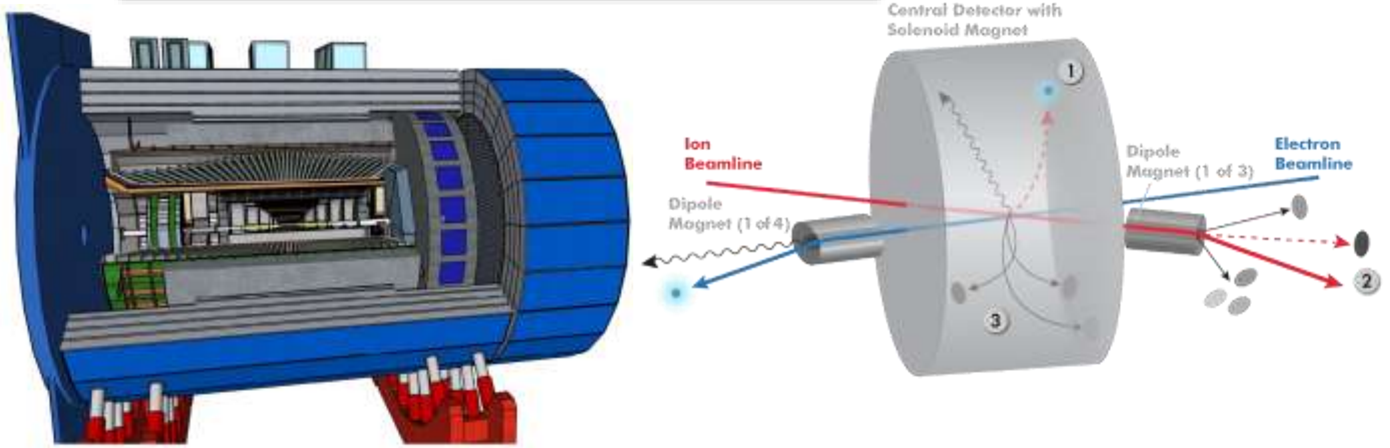

有时可以不测→精确测量其初态和末态粒子，再利用动量和能力守恒

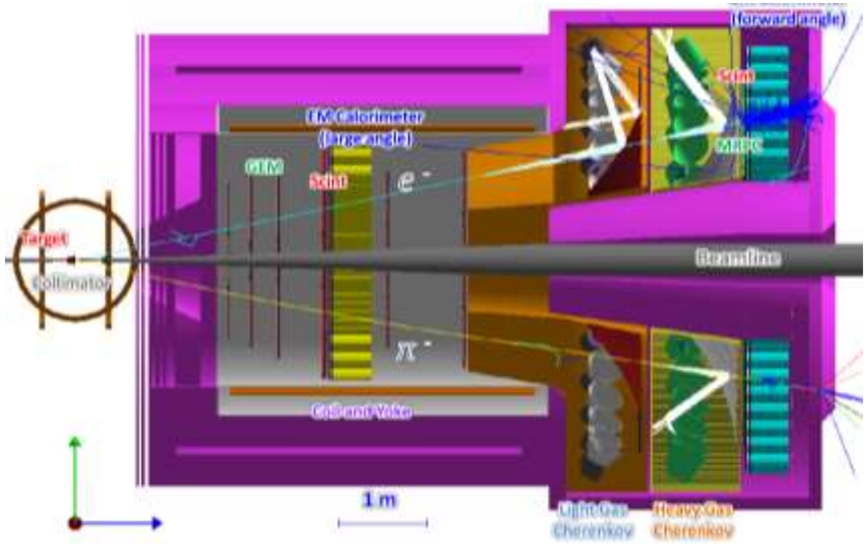
# 电子散射实验综述

- 实验环境：




Electron-Ion Collider （EIC）




SoLID

# 实验观测量



## ➢从物理量到实验观测量:如SIDIS

❑ 入射和出射电子的动量参量（Kinematic Variables）

- ✓ 入射和出射动量（$P_{e0}, \theta_{e0}, \phi_{e0}, P_{e\prime}, \theta_{e\prime}, \phi_{e\prime}$）
- ✓ 高能电子加速器上: ($E_0, 0,\ 0, E', \theta_{e\prime}, \phi_{e\prime}$)
- ✓ 入射电子的极化率和极化方向

$$Q^2 = 4E_0E'\sin^2(\theta/2) \qquad \nu = E_0 - E'$$

$$y = \frac{E_l - E_{l'}}{E_l} = \frac{q\cdot P}{l\cdot P} \qquad x_{bj} = \frac{Q^2}{2m_p\nu}$$

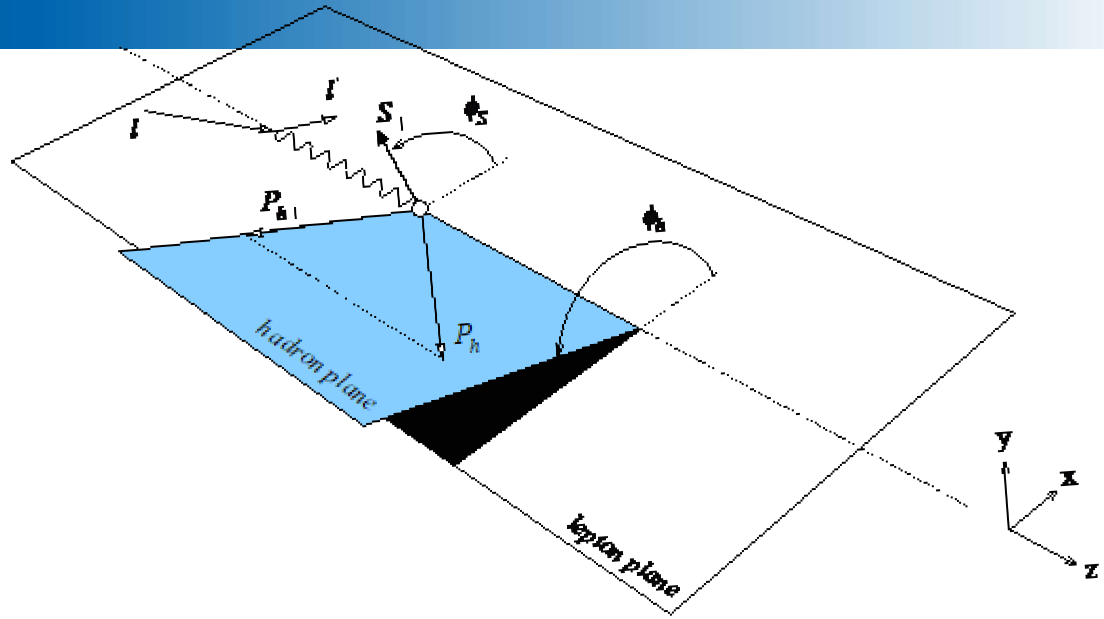
❑ 核子(“靶”)的动量参量（Kinematic Variables）

- ✓ 质量和动量（$M_N, P_N, \theta_N, \phi_N$）
- ✓ 固定靶实验（ $M_N, 0$， $0$， $0$ ）
- ✓ 极化率和极化方向（ $\phi_T$ ）

❑ 末态强子（介子，核子）的动量参量

- ✓ 质量和动量（$M_h, P_h, \theta_h, \phi_h$）
- ✓ 强子极化方向

$$P_T = \frac{p\cdot P_h}{|q^2|} \qquad z = \frac{P\cdot P_h}{P\cdot q}$$

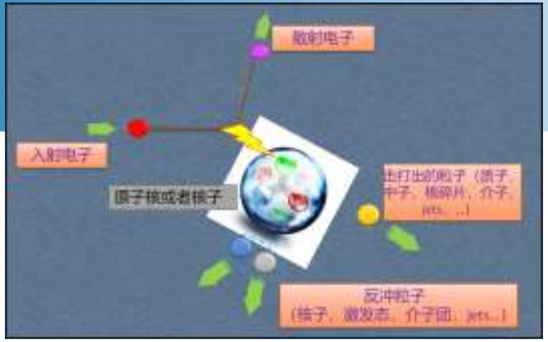



❑ 物理观测量：如单举微分反应截面

$$\frac{d\sigma^{raw}_{EX}}{dE'd\Omega}(E_0, E'_i, \theta_0) = \frac{N^i_{EX}\cdot\epsilon_{e-\pi}}{N_e\cdot\eta_{tg}\cdot\epsilon_{eff}\cdot(\Delta E'_{EX}\Delta\Omega_{EX})}$$

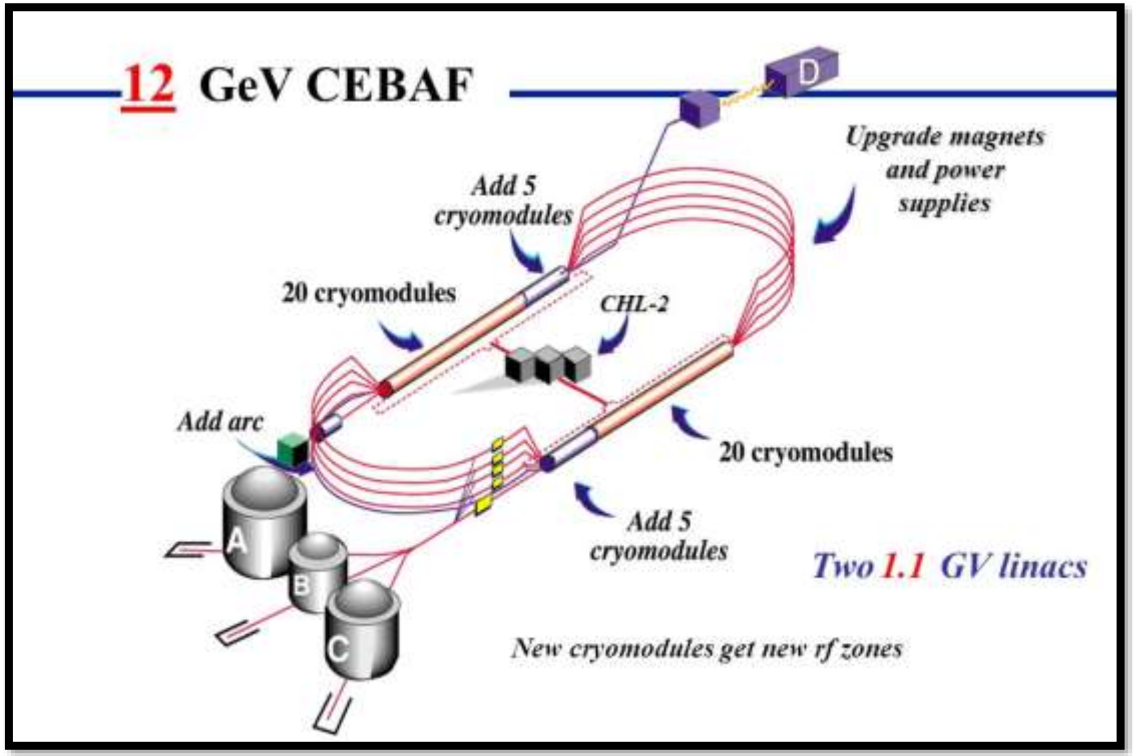
- 探测到的散射电子数
- Pi介子掺杂矫正
- 入射电子数（电流*时间）
- 靶内核子数（密度*长度）
- 电子微分空间（动量*角度）
- 探测器效率矫正

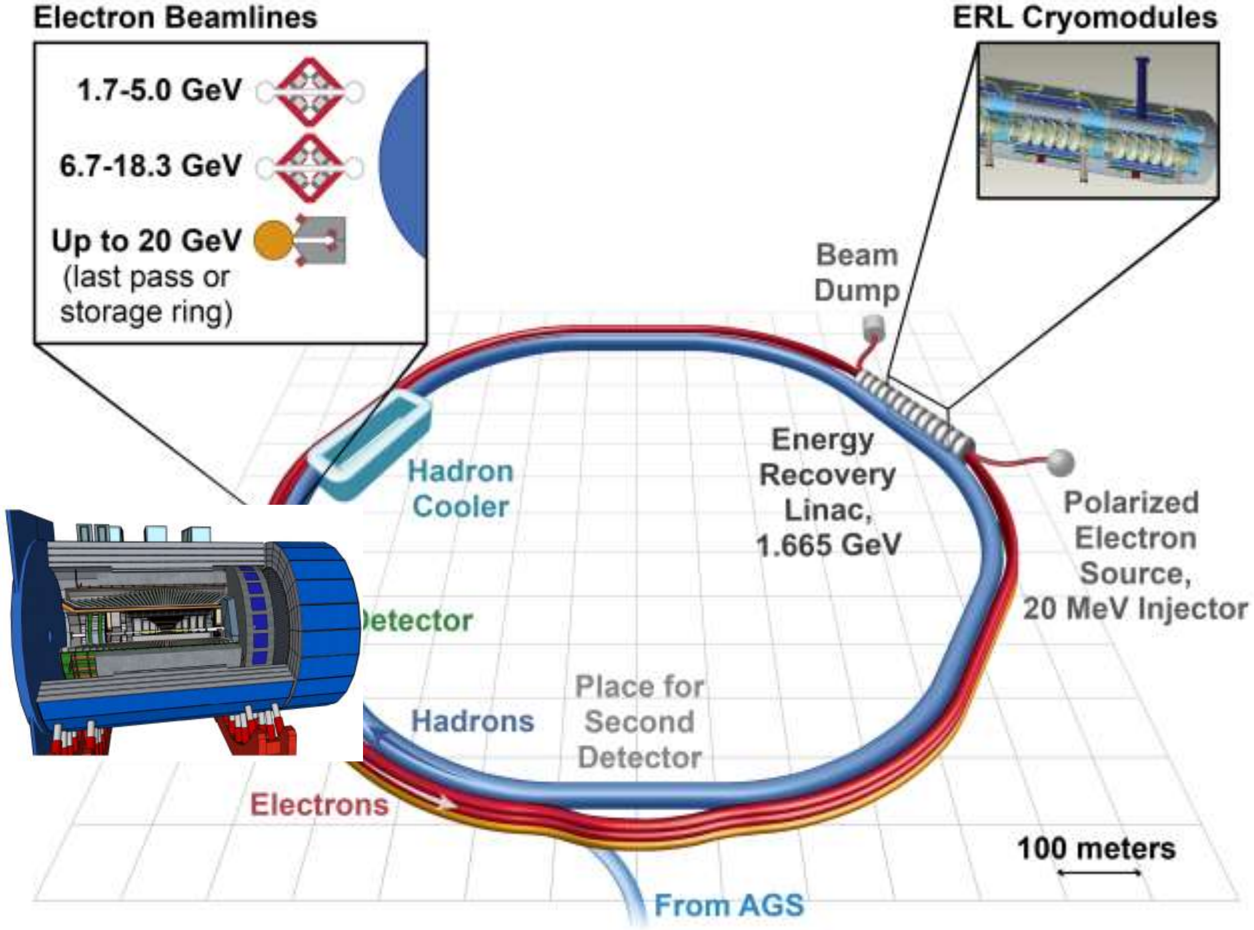
# 电子散射实验综述




## ➢入射电子:

- ❑ 入射电子的能量，极化率和流强都通过调试加速器参数而固定
- ❑ EIC中，质子或者离子也由加速器提供



# 电子散射实验综述

- ➢Jefferson Lab坐落于美国弗吉尼亚州Newport News：

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

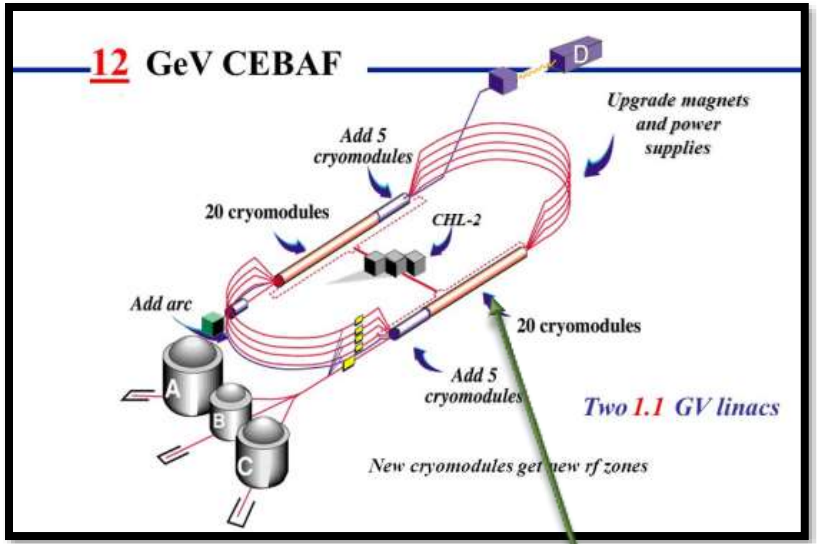
JSA

Jefferson Lab
Thomas Jefferson National Accelerator Facility

Located at Newport News, Virginia;  Funded by Department of Energy; First operation in 1990s

# 电子散射实验综述

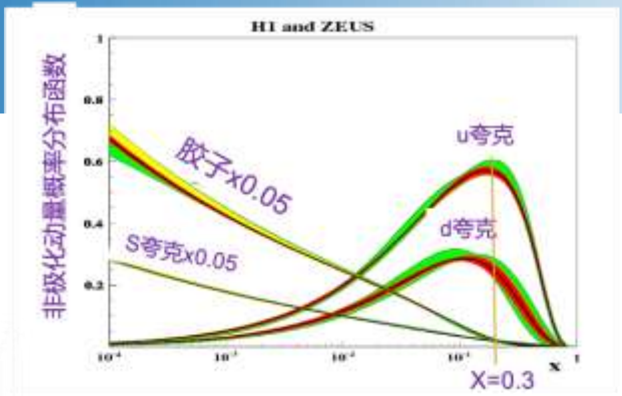
## ➢电子加速器技术(Jefferson Lab)：



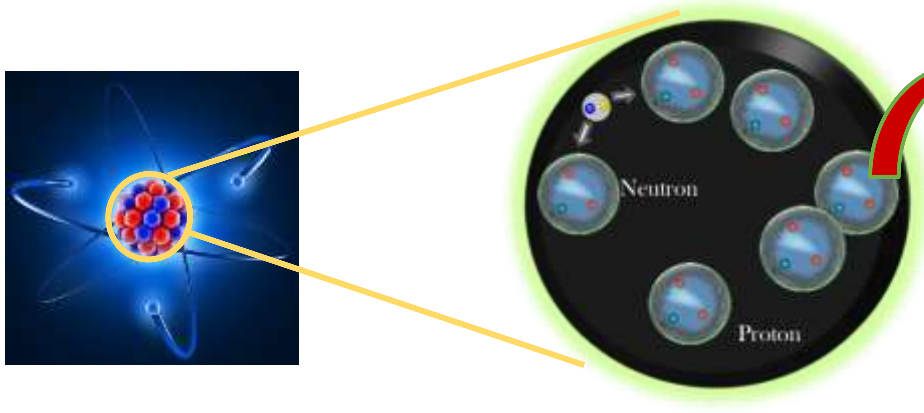

- ❖ 高流量电子加速器
- ❖ 低温超导加速腔
- ❖ 纵向和横向极化可控
- ❖ 同时输送连续200uA电子
- ❖ 无线电快频率分离技术可将不同能量，不同电流的电子输送到4个实验大厅同时做实验

ARC

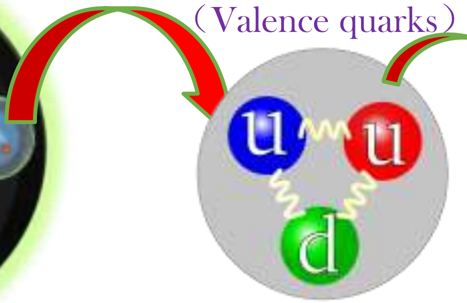
Superconducting Radio-Frequency Cavity



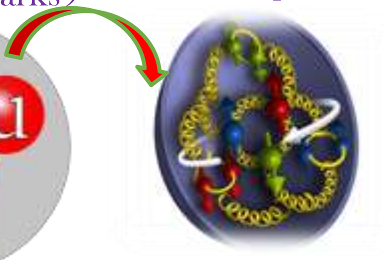

## ➢如何研究夸克？：




价夸克
（Valence quarks）




海夸克
（Sea quarks）



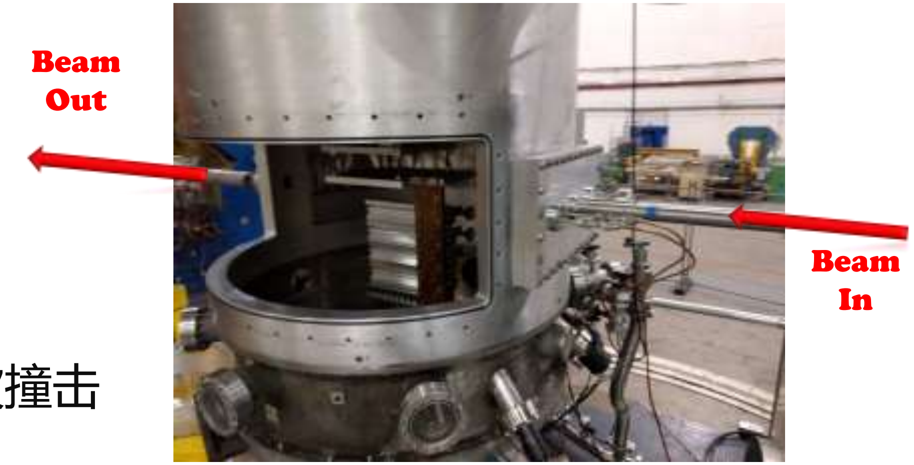
$u, d$ $s, c, t, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{t}$

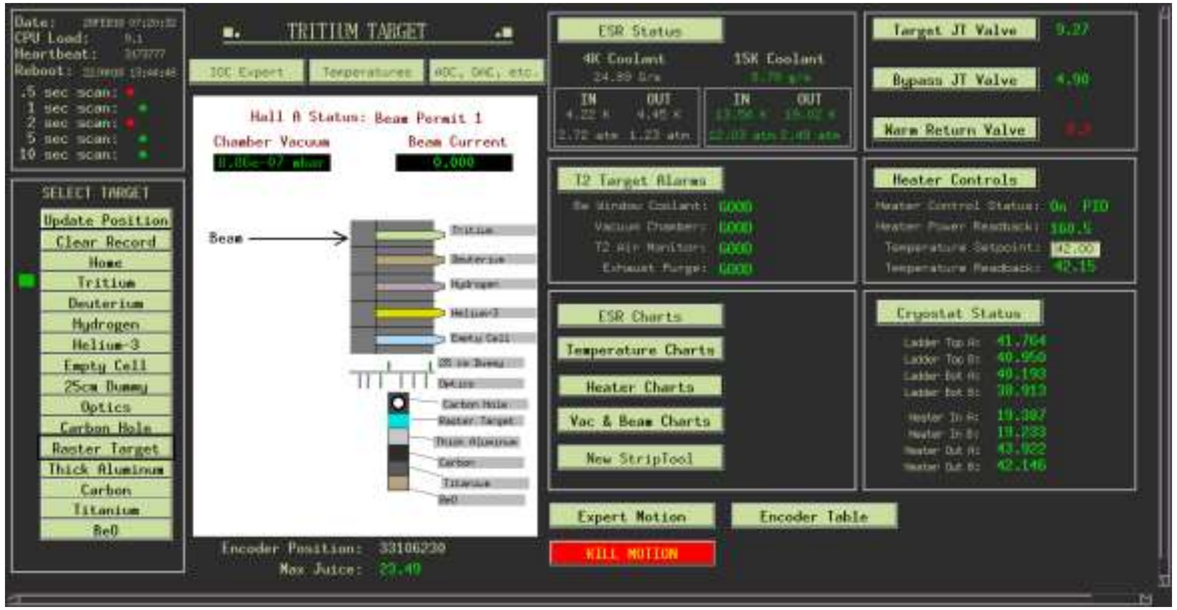
- ❑ <u>现实</u>: 无法直接观测到自由存在的夸克!
  - 通过测量 质子 (uud) 和中子 (udd) 来测量 u 和 d 夸克的性质
    价夸克: 在原子中，“u” 和 “d”夸克被间接观测到的几率最大 （携带高动能的比例最大）
- ❑ <u>然而</u>: 实验上没有自由中子可以使用 （中子的衰变周期是15分钟）
  - 一般用Deuterium (p+n) 或者 Hellium-3 (2p+n) 作为有效中子
  - 然而: 核子里面的中子是时刻运动的 (Fermi-Motion) ; 可能和自由中子不一样 (EMC effect).
- ❑ <u>海夸克</u>: 比u和d重的夸克，观测几率小（携带高动量的比例小），通过真空能和胶子衰变涨落
  - 可以通过观测重介子 (e.g., K+(u-sbar), K-(ubar-s) ， 或者亚稳定的重强子衰变

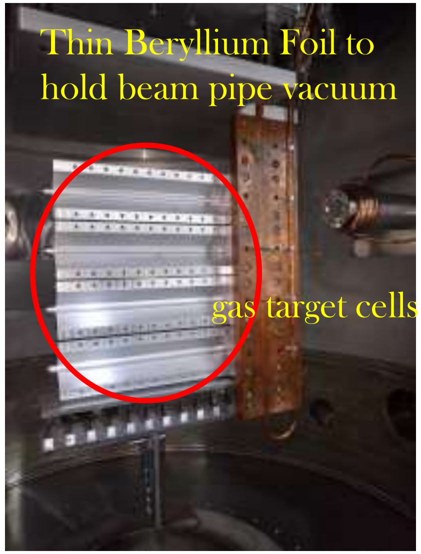
# 电子散射实验综述

## ➢非极化固定靶

- ❖ 超低温真空腔存储多种气体，液体和固体靶
- ❖ 电子输送管道直接穿过真空腔
- ❖ 避免靶的氧化和高温气化
- ❖ 远程控制不同靶（或者不同原子核）到电子束流线上被撞击



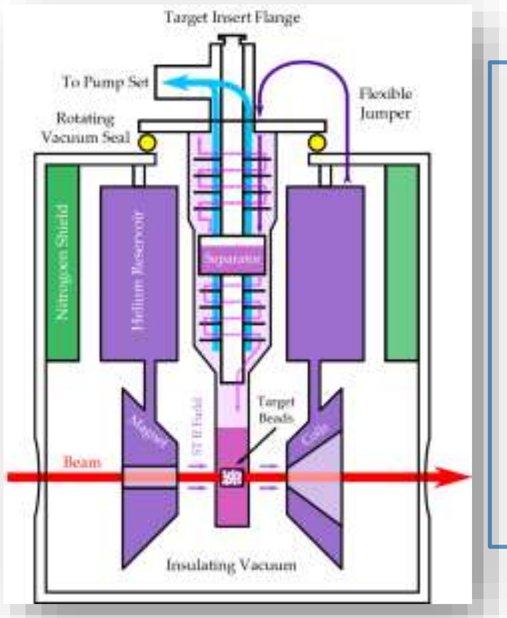




# 电子散射实验综述

➢极化固定靶:

## Polarized NH3 Targets

*"proton"*




**重要参数**

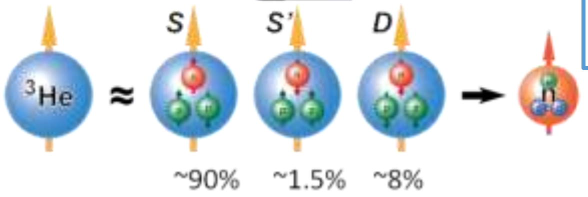
- ✓系统半径: 1.2m(W) x2m(H)
- ✓磁场强度: 5 Tesla
- ✓靶长: ~3 cm
- ✓亮度: $10^{35}$ $cm^{-2}$ $s^{-1}$
- ✓最高极化率: >90%
- ✓平均极化率: 70%
- ✓稀释效应: ~0.13
- ✓运行温度: 1K

- 经过多年的实验，非常成熟的技术
- 达到很高极化率，但是实验环境要求也很高
- JLab的主要极化靶
- UVA的极化靶组是最顶尖的

https://userweb.jlab.org/%7Eckeith/Frozen/Frozen.html
http://twist.phys.virginia.edu/

## Polarized He3 Targets

*"neutron"*




**重要参数**

- ✓系统半径: R=1.83m(outer)
- ✓磁场强度: 25~30 Gauss
- ✓靶长: 40 cm
- ✓亮度: $10^{36}$ $cm^{-2}$ $s^{-1}$
- ✓最高极化率: >70%
- ✓平均极化率: ~60% @ 15uA
- ✓稀释效应: 0.3
- ✓运行温度：～20C

- 多个极化方向（ longitudinally and transversely polarized）
- 1998年 开始在Jlab使用（Jian-Ping Chen）
- 已经在13个实验使用过
- 将会在7个以上已经批准的12GeV实验上面使用
- 还有不少改进空间
- 有很宽的医学物理和其他方面的应用

http://hallaweb.jlab.org/equipment/targets/polhe3/polhe3_tgt.html

# 电子散射实验综述



## ➢末态粒子信息

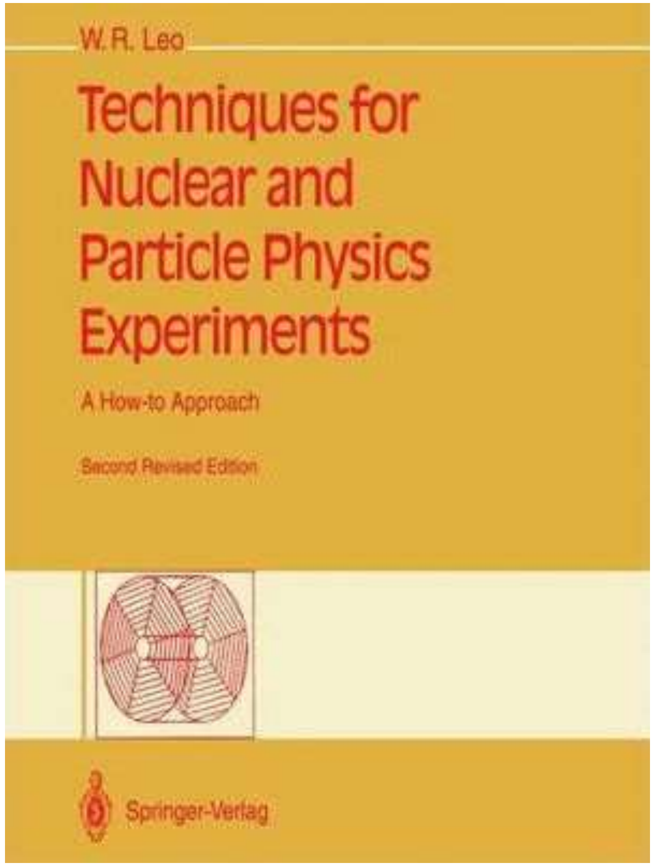
| 测什么? | | 怎么测? |
| --- | --- | --- |
| ✓ 位置和角度 | $(x,y,z,\theta,\phi)$ | ❖ 非磁场中多个探测器平面的入射位 |
| ✓ 动量 | $\|\vec{P}\|$ | ❖ 带电粒子在磁场中的偏转 |
| ✓ 能量 | $E$ | ❖ 量能器（Calorimeters） |
| ✓ 质量 | $m$ | ❖ 粒子甄别系统（Particile Identification）/质量谱仪 |
| ✓ 时间/速度 | $v,\beta$ | ❖ 时间飞行仪器（Time of Flight） |
| ✓ 自旋极化 | $\Leftarrow,\Uparrow,\Rightarrow,\Downarrow$ | ❖ 极化分析仪（Polarimetry） |
| ✓ Life-time | $\tau$ | ❖ 衰变粒子的顶点重建（Vertex Reconstruction） |

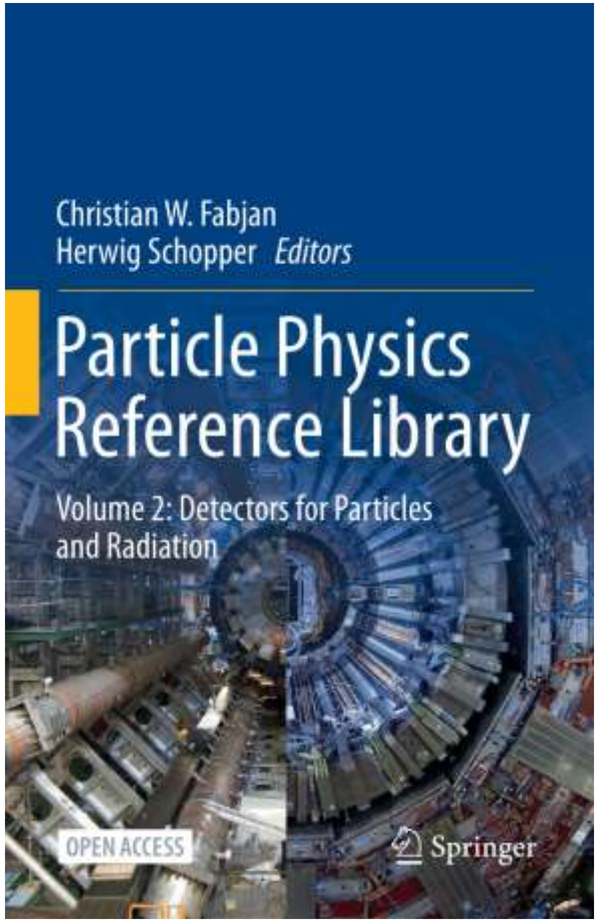
❑ 需要不同高能粒子探测器的相互配合

# 探测器系统

➢部分探测器举例→**Backup#42~#57**

❑ 关于探测器，模拟，数据分析的推荐书籍



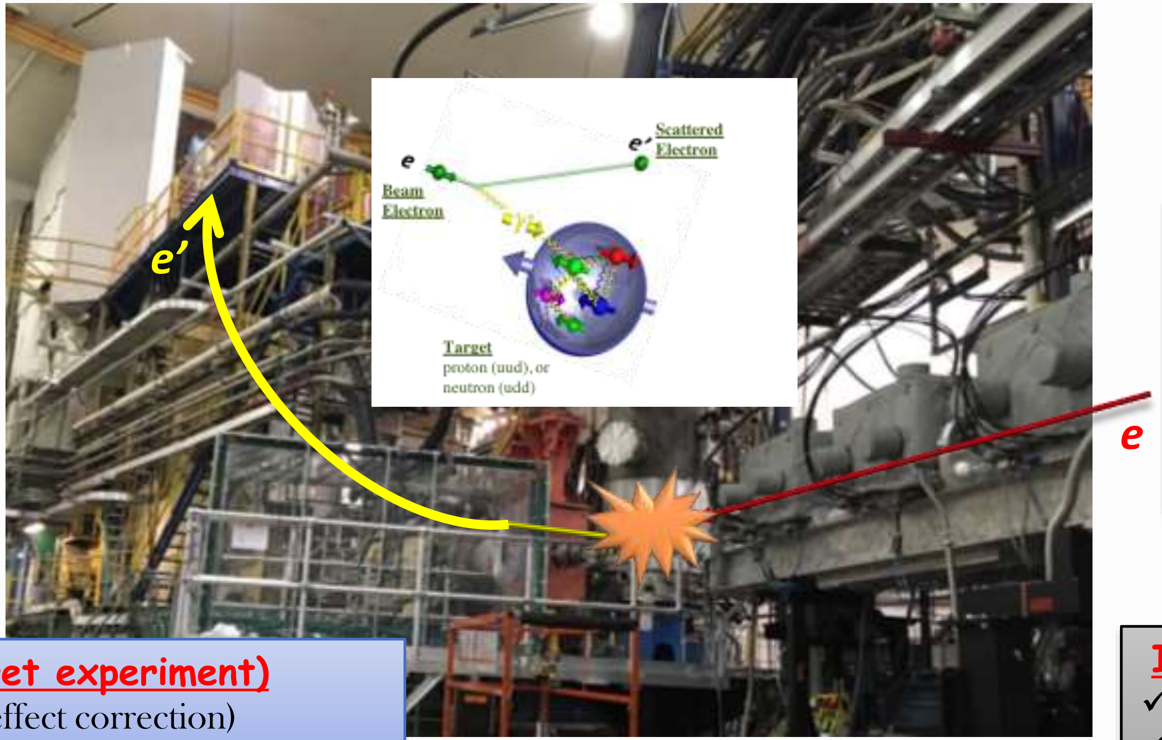



# 数据采集系统

## ➢单粒子探测

- ❖ 参与碰撞反应的粒子一般要离开碰撞点飞行一段时间/距离再由探测器测量
- ❖ 探测器信号的产生时间和粒子到达时间可能有不同时（探测器尺寸，反应时间，信号传输线路等）
- ❖ 需要触发系统判断碰撞发生时间，并通知数据采集系统收集并同步所有探测器信号

**Detectors**
- ✓ Position
- ✓ Angle
- ✓ Time
- ✓ Speed
- ✓ Momentum
- ✓ Energy
- ✓ Particle Type (Mass, Charge)

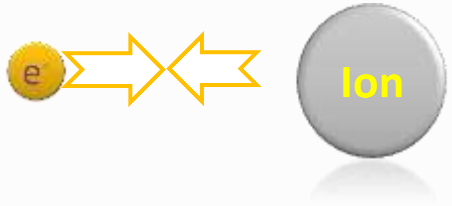



**e Beam**
- ✓ Current
- ✓ Energy
- ✓ Position
- ✓ Polarization
- ✓ Arrival Time

**Target (fixed target experiment)**
- ✓ In-Beam Density (boiling effect correction)
- ✓ Polarization (for a polarized target only)
- ✓ Target Atoms (if mixed materials)
- ✓ Reaction Point (for a long target)

*Collider Mode*

**Ion Beam (EIC)**
- ✓ Current
- ✓ Energy
- ✓ Position
- ✓ Angle
- ✓ Polarization
- ✓ Arrival Time



# 数据采集系统

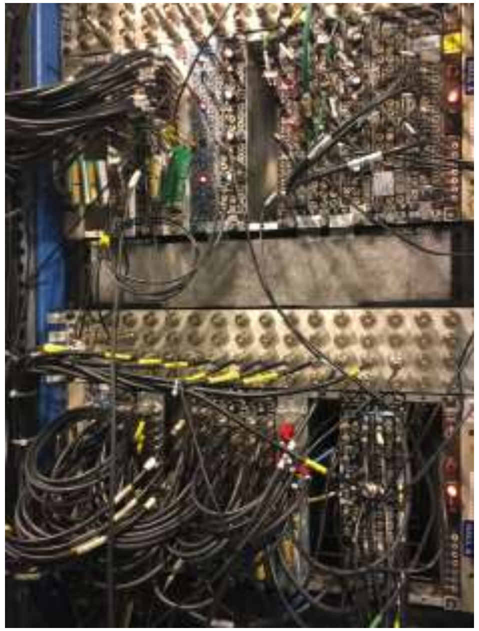


## ➢单粒子探测

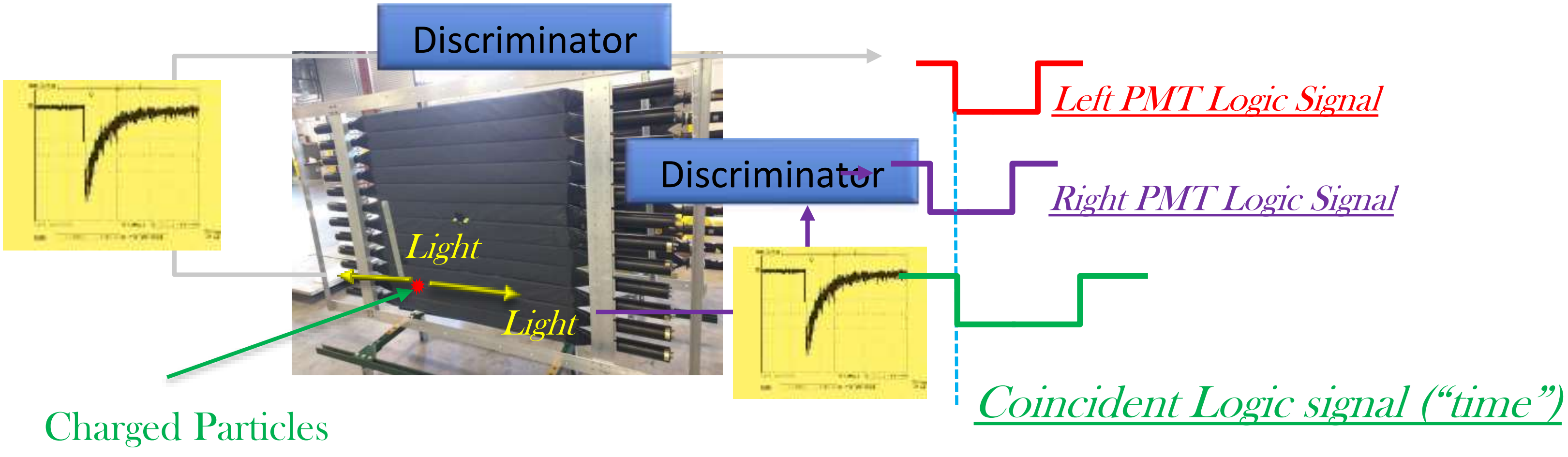
- ❖ 数据采集系统包括：
  - ✓ 触发系统→判断碰撞事件发生
  - ✓ 前端电子学→收集探测器信号（如PMT的脉冲信号）
  - ✓ 电脑系统→收集所有系统信号（束流，靶信息等），判断触发信号的有效性，存储前端电子学输送的探测器信号

- ❖ 不同的探测器系统需要不同前端电子学

- ❖ 不同实验，不同粒子探测，需要设计不同触发系统

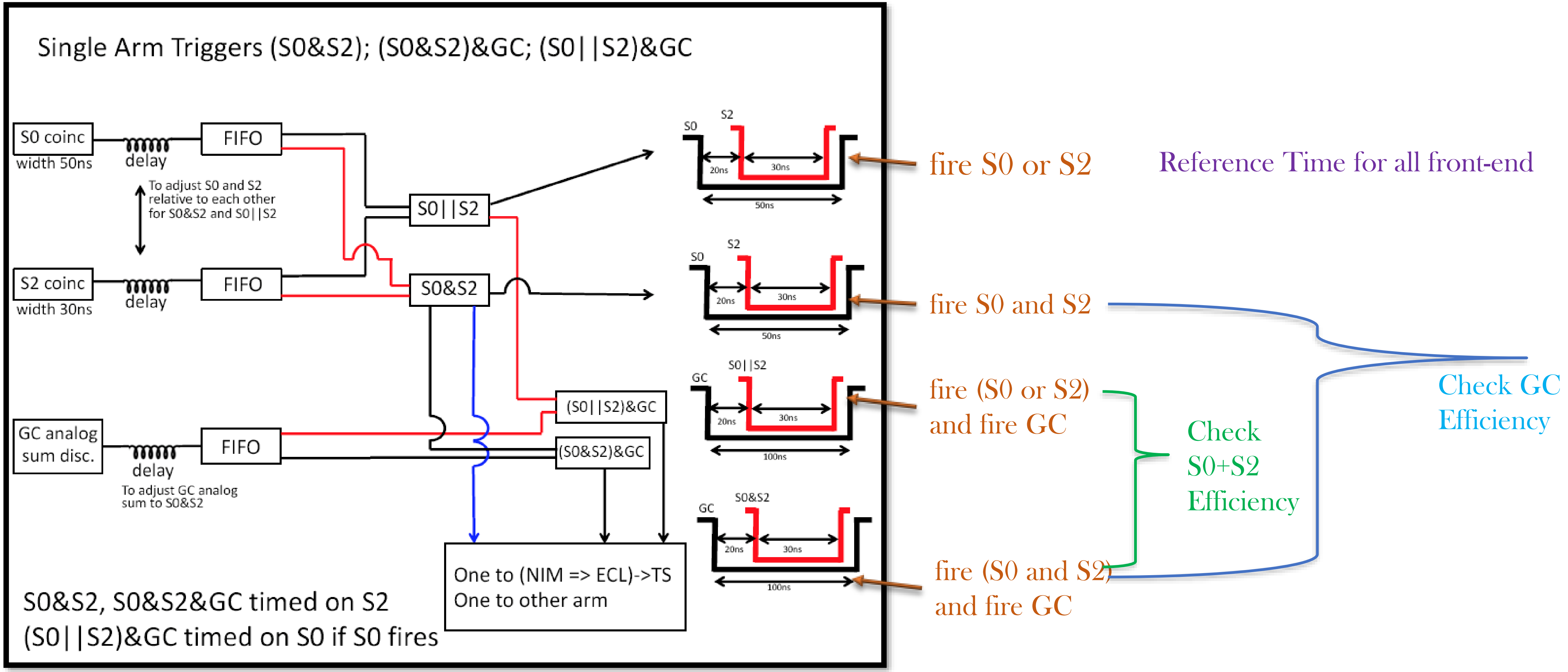
例子：如何设计触发信号，判断带电粒子穿过塑料闪烁体探测器 时间?




**Note:** delay time due to different cable lengths should be considered

# ➢触发系统设计:

- ❖ 排除背景信号和偶然触发信号，需要两组探测器“同时”看到同一信号
- ❖ 排除其他粒子信号，需要加入粒子甄别探测器的触发信号（如CER可以保留电子，去除Pi介子）
- ❖ 根据实验需求，设计各种复杂的触发系统

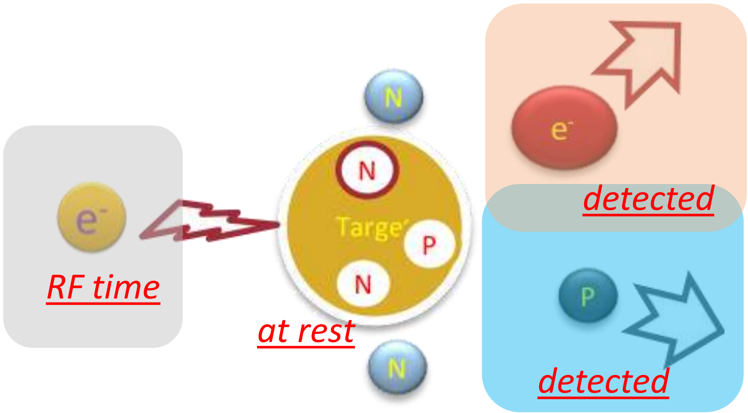


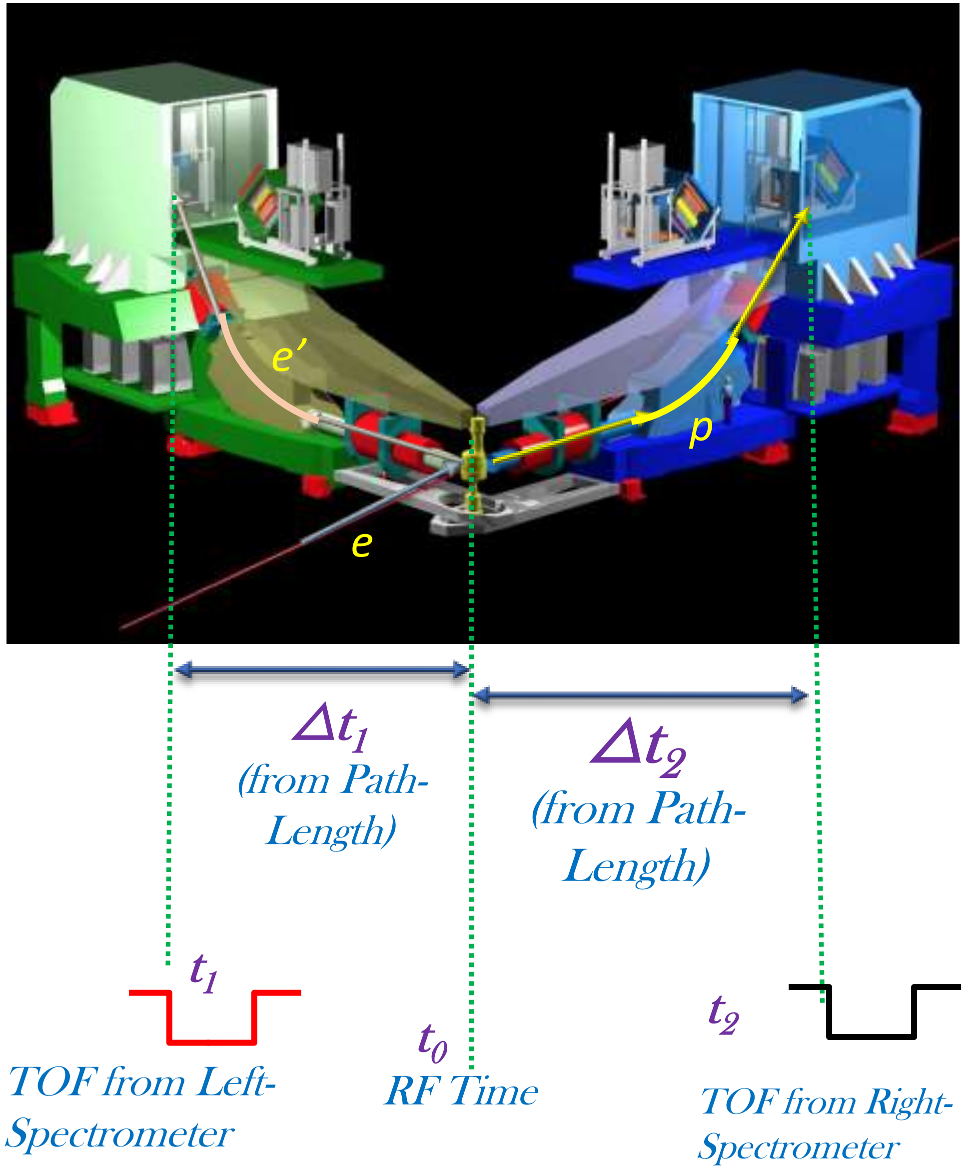
# 数据采集系统

## ➢双（多）粒子探测

- SIDIS & Exclusive Measurements→需要判断测量的末态粒子来自同一个碰撞反应
- 入射电子束流非绝对连续，如Jlab，每2ns来一束电子团簇(beam bunch)
- 一个团簇一般之多一个电子会与原子核碰撞→团簇到达时间(RF Time)==碰撞发生时间


- 末态粒子由探测器测量，时间根据飞行距离反推到反应点



# 数据采集系统



➢实验控制室：

❑ 实验运行是24/7，持续几个月到几年→需要合作者在控制室轮流值班

❑ 值班人员(Jlab为8 hrs一班)：
- 采集数据；
- 监控探测状态
- 初步数据分析
- 修改实验设置
- 记录各种信息
- 与多部门之间沟通

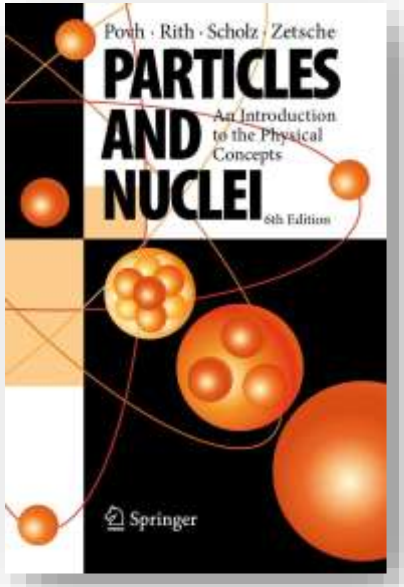
❑ 专家（主要为博士生和博士后）
- 为值班人员提供支持
- 深入数据分析
- 维修探测器
- 解决其他问题

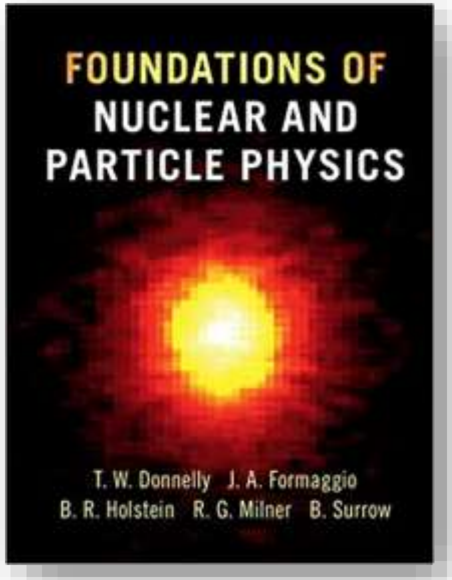
❖ 其他人员:
- 实验发言人，实验室管理层→定制实验计划，多部门沟通协调
- 实验协调员：所有信息沟通的节点
- 支持团队（加速器，靶，电子学，探测器，低温制冷，辐射防护等）

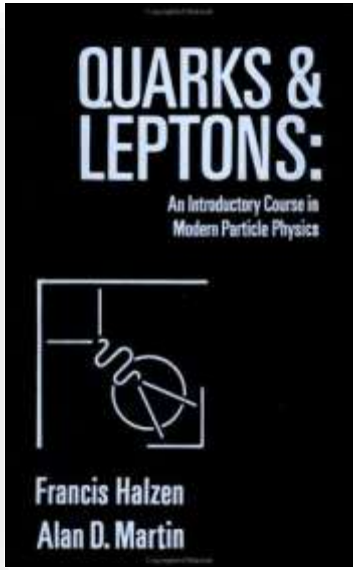
# 课堂内容

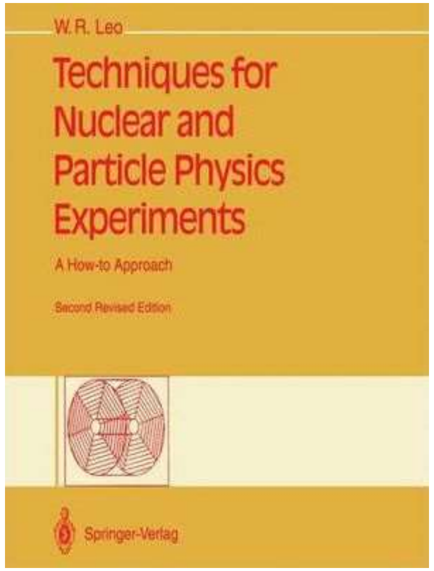
- 第一节：物质结构概要
- 第二节：实验方法详解和实验分析实例(Hall-A Tritium Experiments)
- 第三节：未来展望

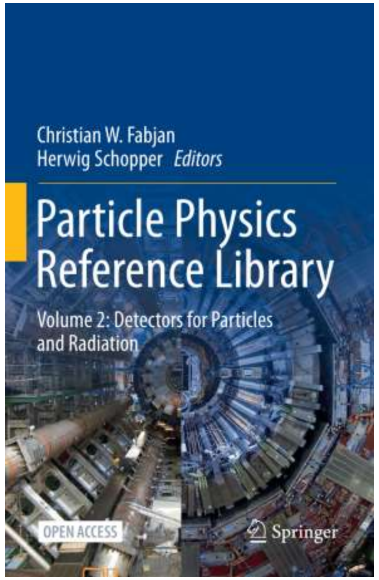
推荐读物（请联系本人索取英文版PDF）：



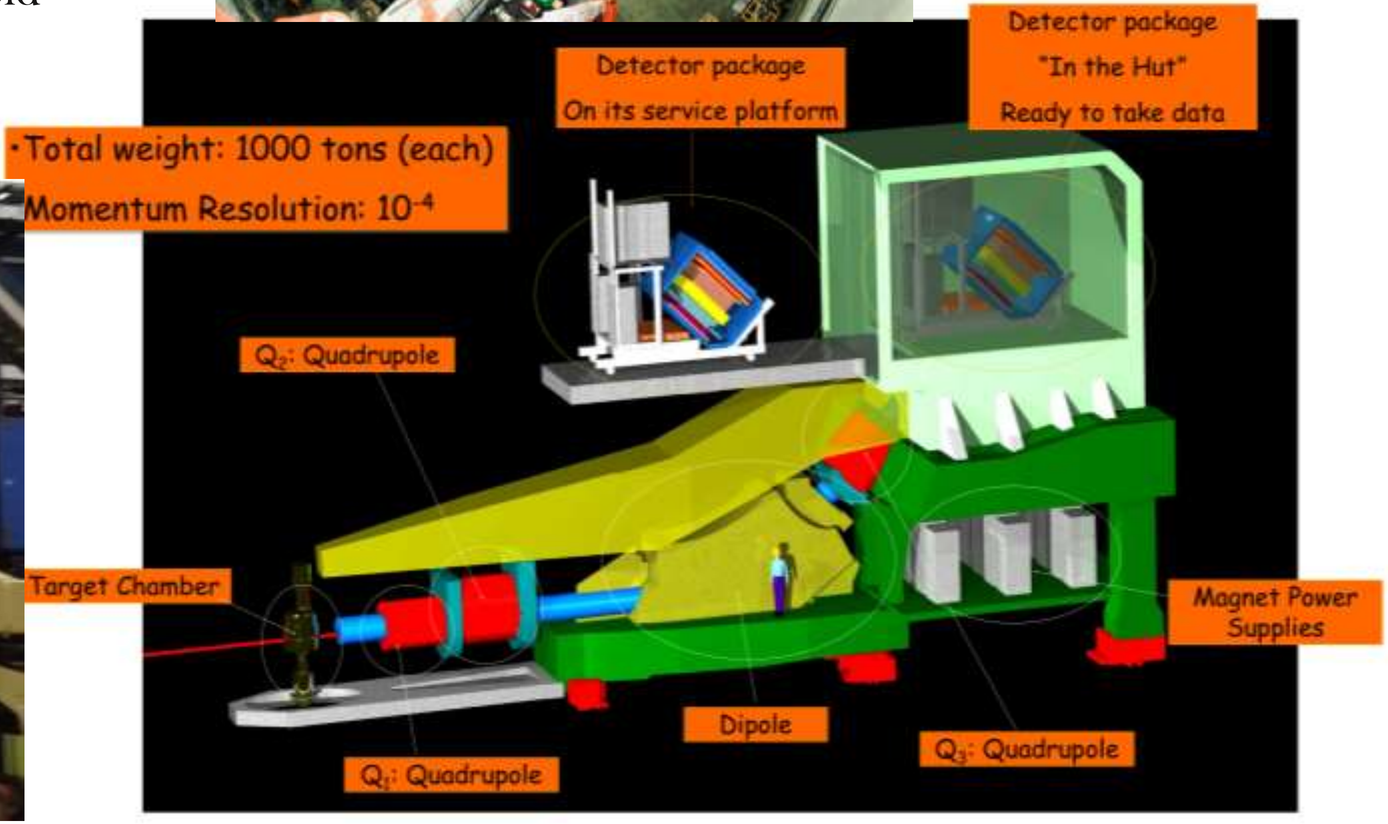



# 实验实例：Hall-A Tritium

- Hall-A实验大厅
  - ❑ Two identical high resolution spectrometers (HRS)
  - ❑ Each HRS includes 3 Quadrupoles (Q) + 1 Dipole
    QQDQ setup to obtain high momentum resolution ($10^{-4}$)
  - ❑ A ~20 meter flight path allowing to precise measure the angles and positions
  - ❑ The detector-hut is ~10 meter above the floor to avoid radiation damage and background.

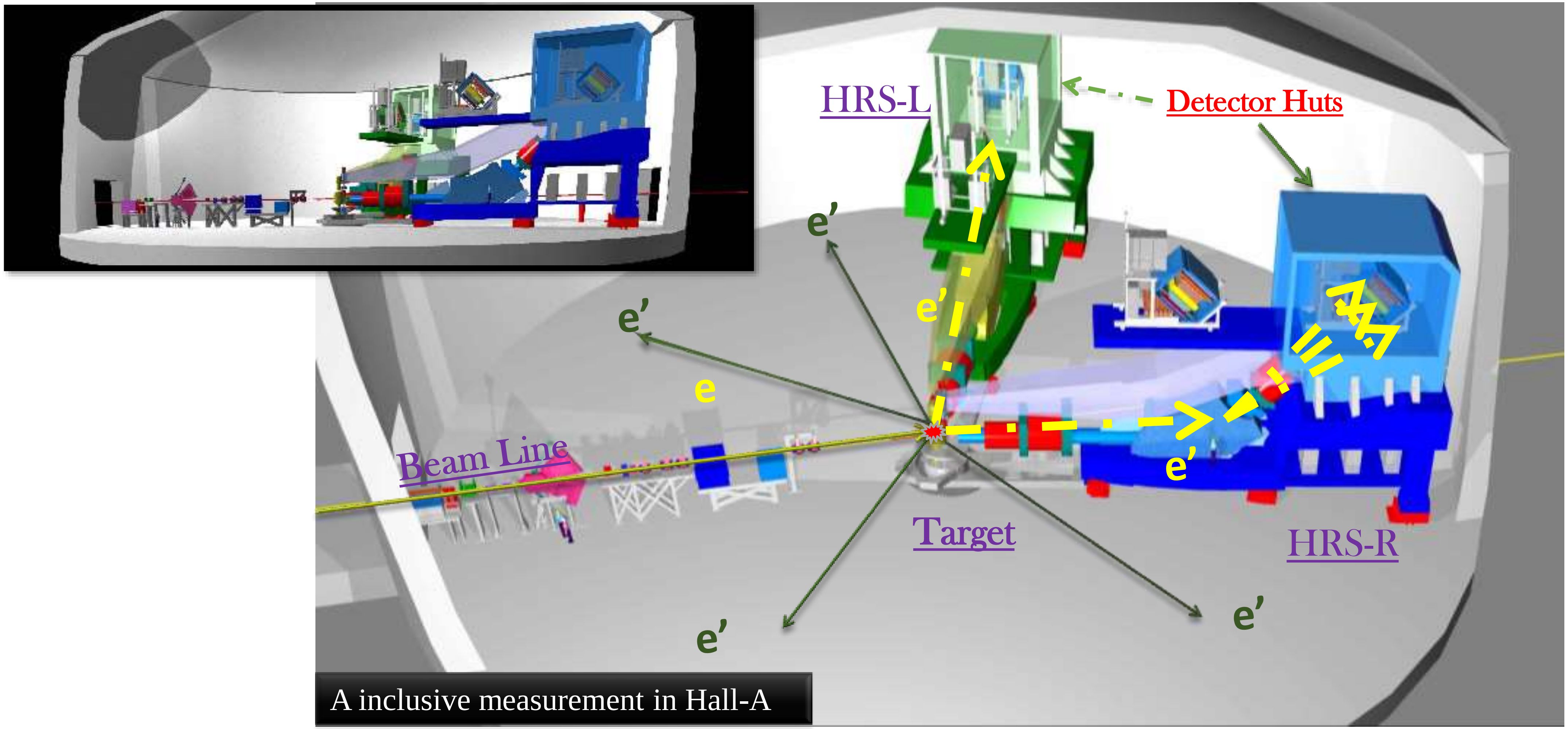


# 实验实例：Hall-A Tritium



➢High Resolution Magnetic Spectrometer (HRS)

- ❑ 极小接收角度（+/-60mrad)和极小接收动量（+/-5%）但极高分辨率
- ❑ 可以接收极高流量的反应（高入射电流，高靶厚度，极高粒子计数率）
- ❑ 一般一组实验设置只能测量单个物理反应

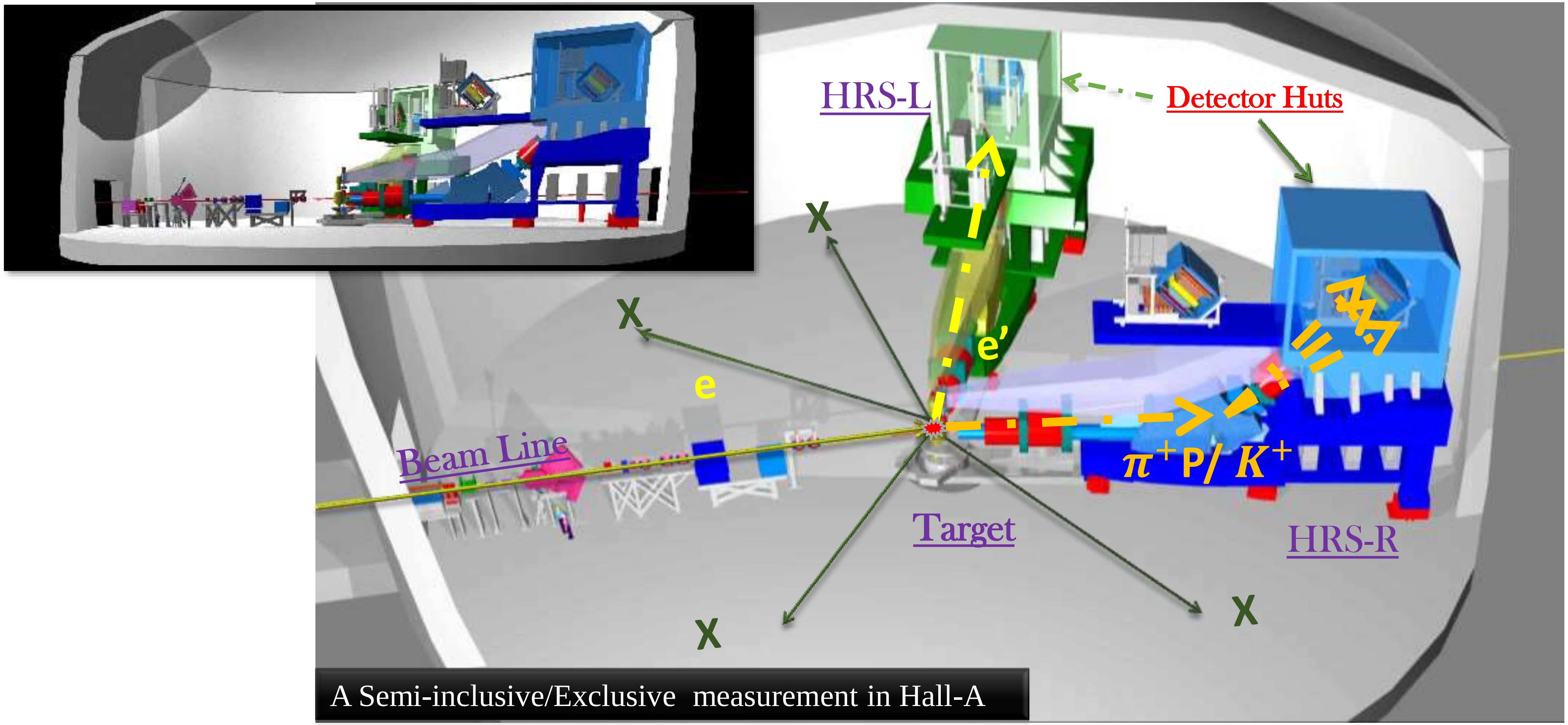



A inclusive measurement in Hall-A

# 实验实例：Hall-A Tritium

➢High Resolution Magnetic Spectrometer (HRS)

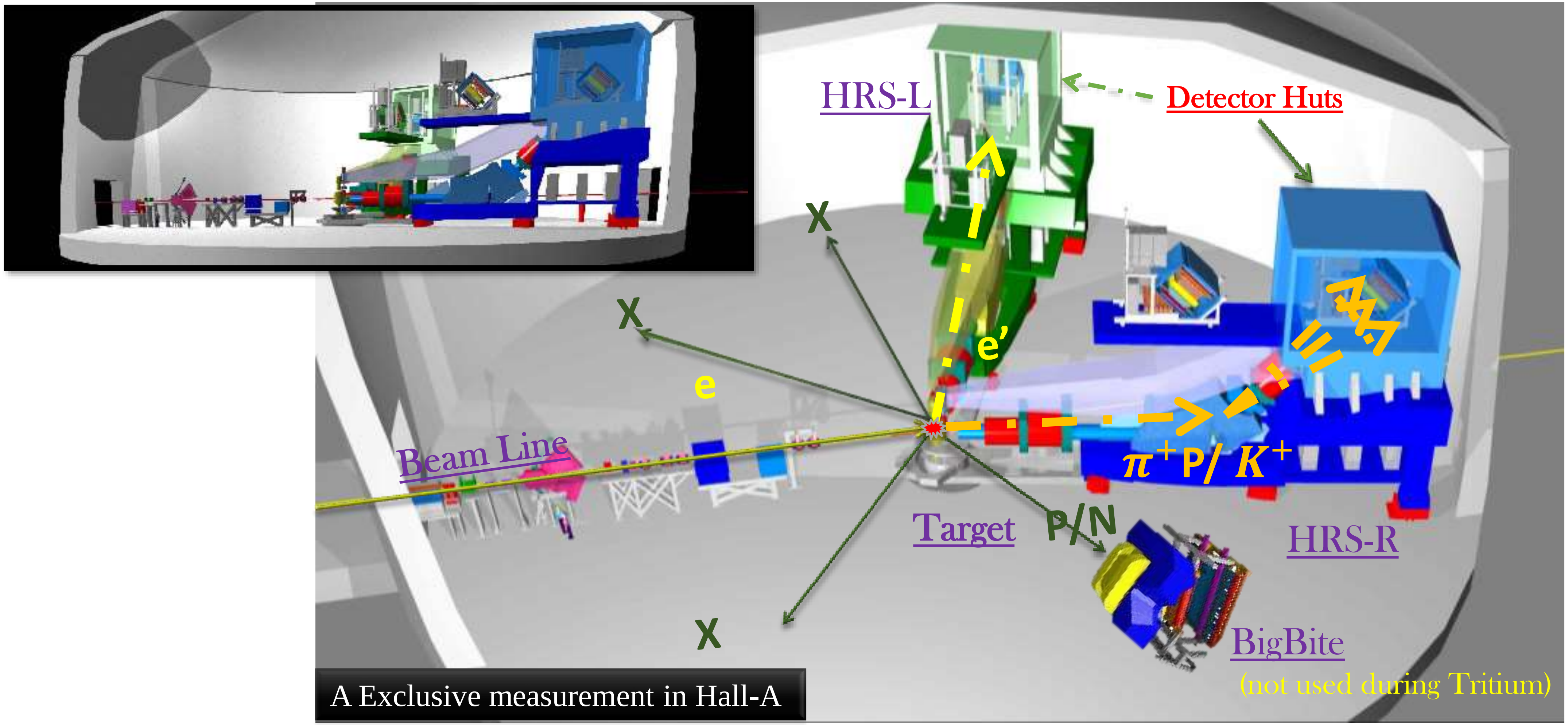
- ❑ 极小接收角度（+/-60mrad)和极小接收动量（+/-5%）但极高分辨率
- ❑ 可以接收极高流量的反应（高入射电流，高靶厚度，极高粒子计数率）
- ❑ 一般一组实验设置只能测量单个物理反应



A Semi-inclusive/Exclusive measurement in Hall-A

# 实验实例：Hall-A Tritium

- High Resolution Magnetic Spectrometer (HRS)
  - ❑ 极小接收角度（+/-60mrad)和极小接收动量（+/-5%）但极高分辨率
  - ❑ 可以接收极高流量的反应（高入射电流，高靶厚度，极高粒子计数率）
  - ❑ 一般一组实验设置只能测量单个物理反应



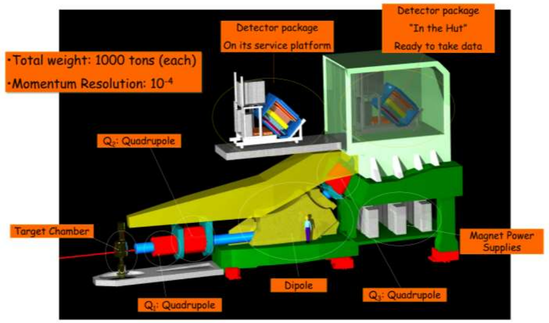
A Exclusive measurement in Hall-A

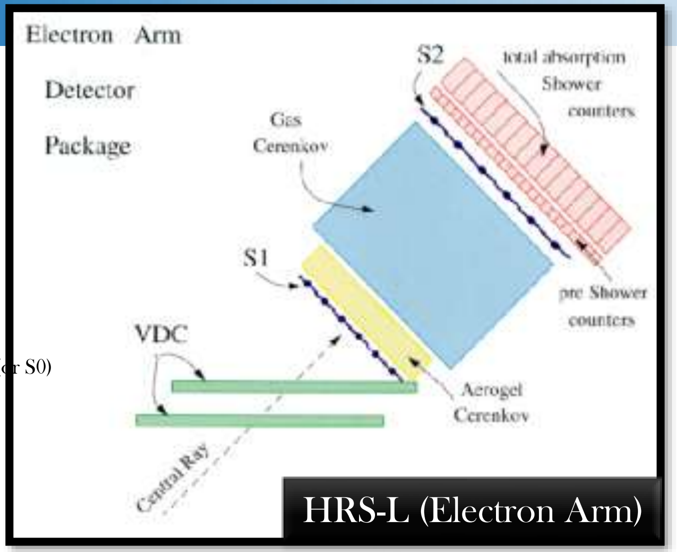
# 实验实例: Hall-A Tritium

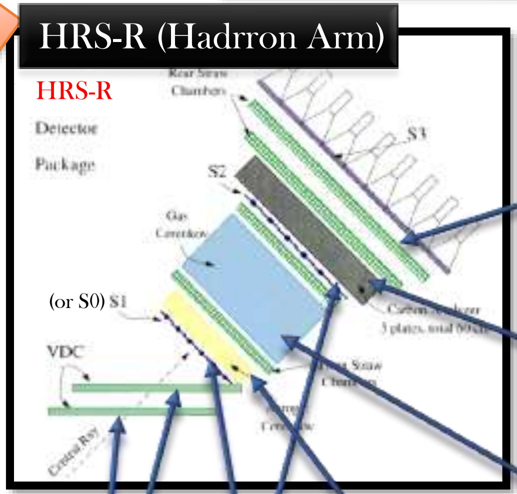


## ➢Hall-A实验大厅

The detector hut contains a set of detectors hold in a retractable rack, protected by a thick concrete door from radiations (e.g. neutrons).




Calorimeters

Polarimetry (Proton Polarization, not in used)

Front-End Electrons + Trigger System

Timing

$e^{+/-}$ & $\pi^{+/-}$ Separation

Positions and Angles Tracking

$\pi^{+/-}$ and $K^{+/-}$ Separation

# 实验实例：Hall-A Tritium

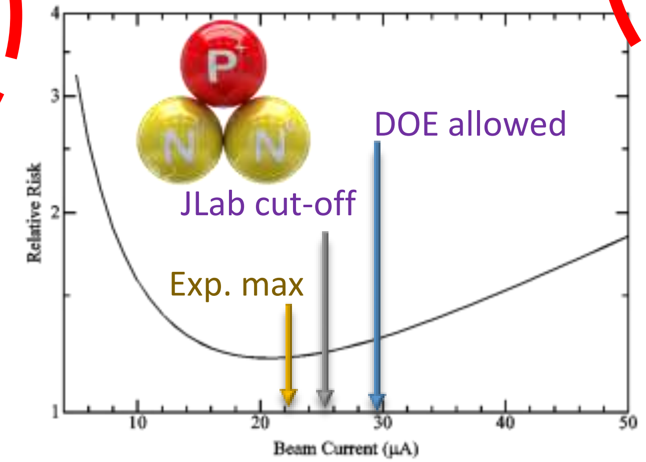


➢同一探测器，四组不同物理测量(2017~2018)

### E12-10-103 (MARATHON)

- ❖ d/u Ratio at x→1
- ❖ Isospin-dependent EMC Effect


Spokespeople: G (Makis) Petratos, J. Gomez, A. Katramatou, R. Holt (J. Arrington), D. Meekins, R. Ransome,
PhD Students: T. Hague, M. Mycz, T. Su (Kent), J. Bane (Tennessee) Tyler Kutz (Stony Brooks ), H. Liu (Columbia)




### E12-11-112 (Inclusive SRC)

- ❖ Study Isospin Effect in 2N-SRC and 3N-SRC
- ❖ Measure GMn at small $Q^2$


Spokespeople: J. Arrington, D. Day, D. Higinbotham, P. Solgignon*, Z. Ye
PhD Students: Shujie Li, Nathaly Santiestevan (UNH)

### E12-17-003 (Hypernucleus)

- ❖ Search for Lambda-N-N Hypernuclear


Spokespeople: F. Garibaldi, P. Markowitz, S. Nakamura, J. Reinhold, L. Tang, G. Urciuoli
PhD Student: Bishnu Pendey (Hampton)

Tritium Specs:

- 1099 Ci
- 200 psia
- Cool with 40K
- Beam 22.5mA (~15W heat)

### E12-14-009 (Exclusive SRC)

- ❖ Measure proton mom. dis. in $^3$H & $^3$He
- ❖ Verify in neutron-rich nuclei: $n_p(k)>n_n(k)$


Spokespeople: L. Weinstein, W. Boeglin, F. Hauenstein, O. Hen, S. Gilad
PhD Students: Reynier Cruz Torres (MIT)

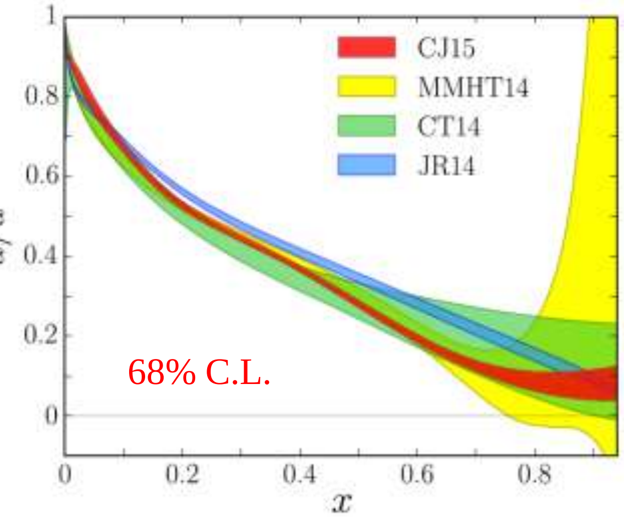
# 实验实例：Hall-A Tritium

## ➢MARATHON Experiment

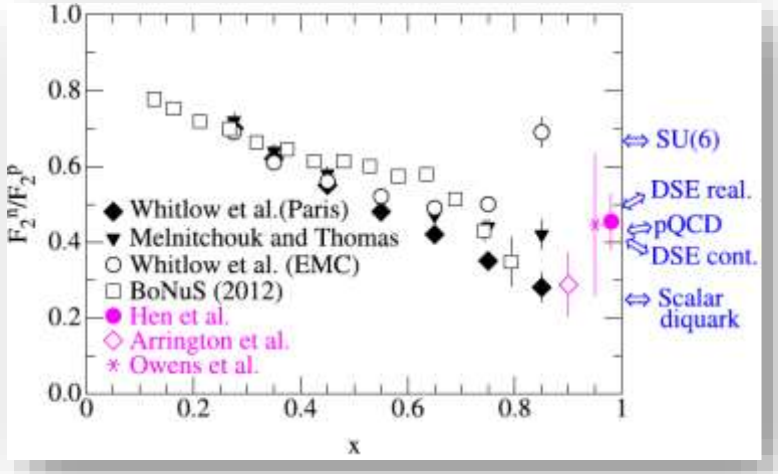
- ❖ 精确测量 x→1 的F2n/F2p 可以判断不同QCD模型对 d/u的预测

$$F_2 = \sum_q e_q^2 f_1^q(x)$$

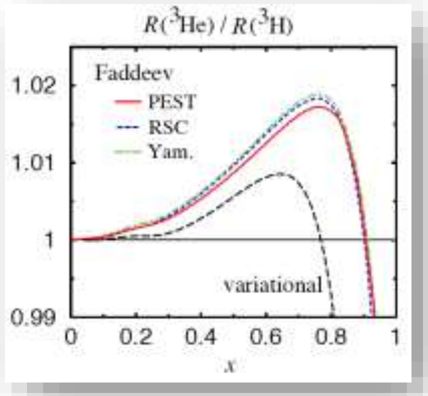
A. Accardi et. al. Phys. Rev. D 93, 114017 (2016).




C. Roberts, R. Holt, S. Schmidt, PLB 727 (2013) 249–254




- ❖ 传统实验用H2测F2p，用D2作为有效中子测F2n→具有超大的核效应修正



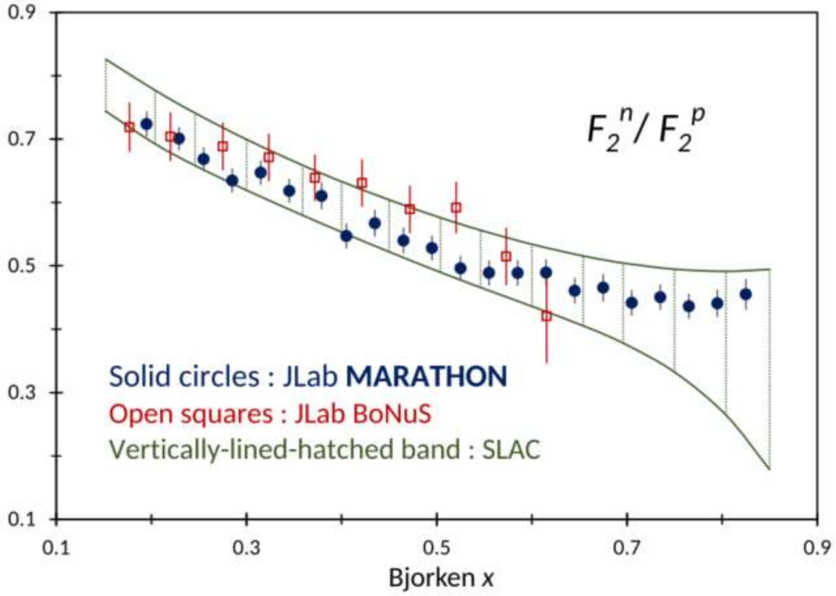

- ❖ 全新方法：利用镜像原子核H3和He3（核效应几乎一样），提取F2n/F2p

$$\frac{F_2^n}{F_2^p} = \frac{2\mathcal{R} - F_2^{^3\text{He}}/F_2^{^3\text{H}}}{2F_2^{^3\text{He}}/F_2^{^3\text{H}} - \mathcal{R}}$$

Super-Ratio in EMC (DIS)

$$\mathcal{R} = \frac{R(3_{He})}{R(3_H)}$$

$$R(3_{He}) = \frac{F_{3He}}{2F_p + F_n}, \quad R(3_H) = \frac{F_{3H}}{F_p + 2F_n},$$

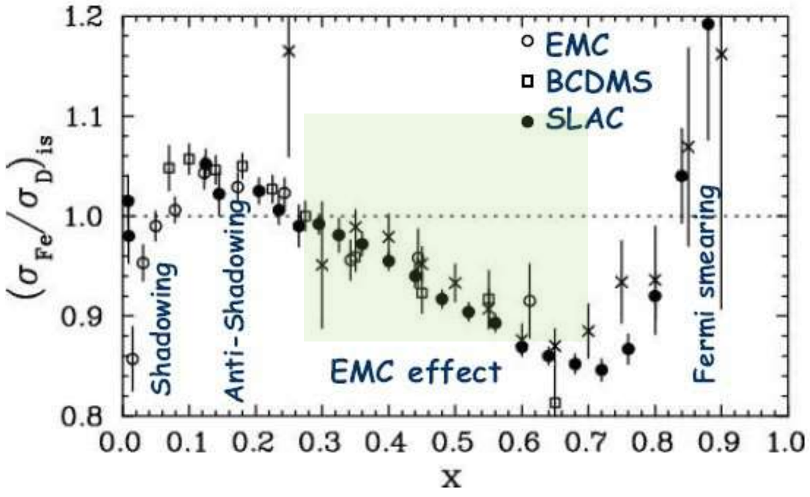



- ❖ 结果已发表 PRL128, 132003 (2022)

# 实验实例：Hall-A Tritium

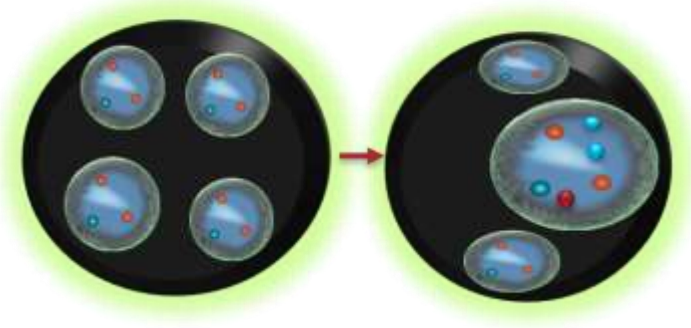
## ➢MARATHON Experiment

- ❖ EMC Effect: Per-nucleon DIS cross-section ratio between a nucleus-A to the deuteron decreases linearly in 0.3<x<0.7

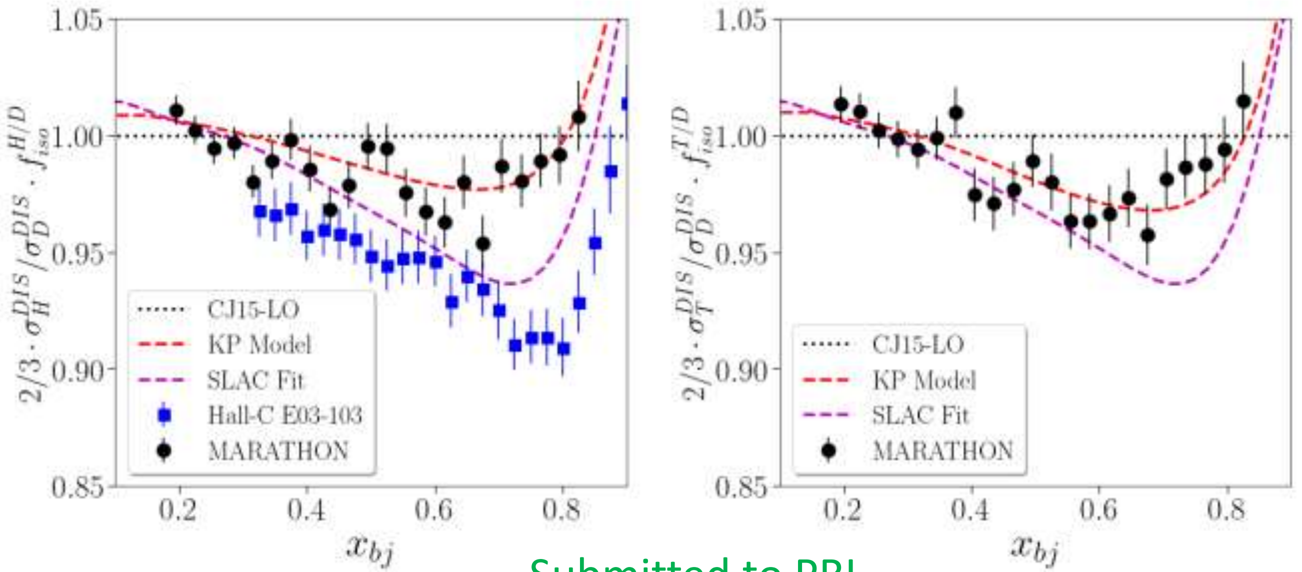



- ▪ No accepted explanation
- ▪ Nucleon must be modified
  - Which nucleons are modified?
  - Isospin Dependent?
  - Flavor dependent?

○ 自由的核子等于束缚的核子？



- ▪ Tritium/D2 and He3/D2 gave maximum isospin asymmetry in DIS

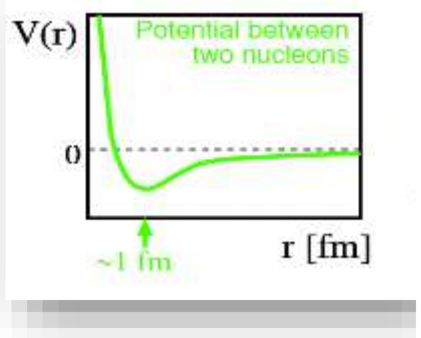



Submitted to PRL

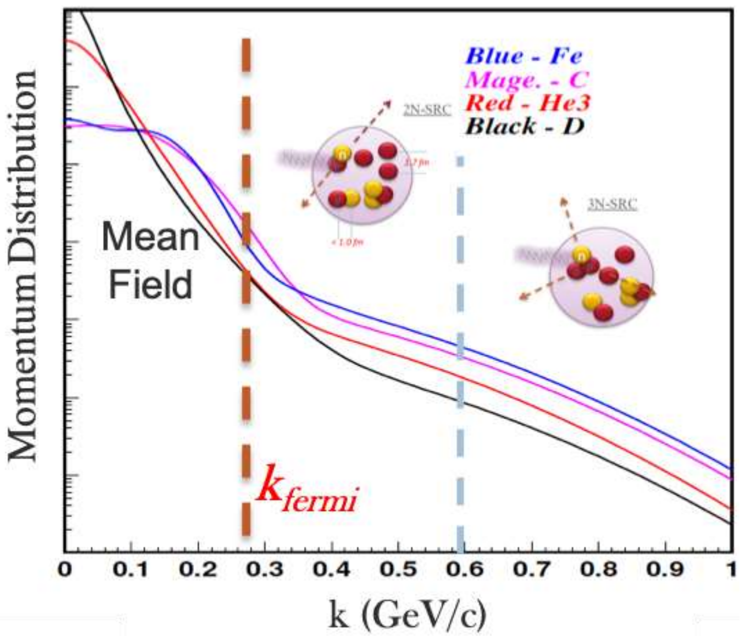
- But no flavor sensitive→ Need new experiment !

# 实验实例：Hall-A Tritium

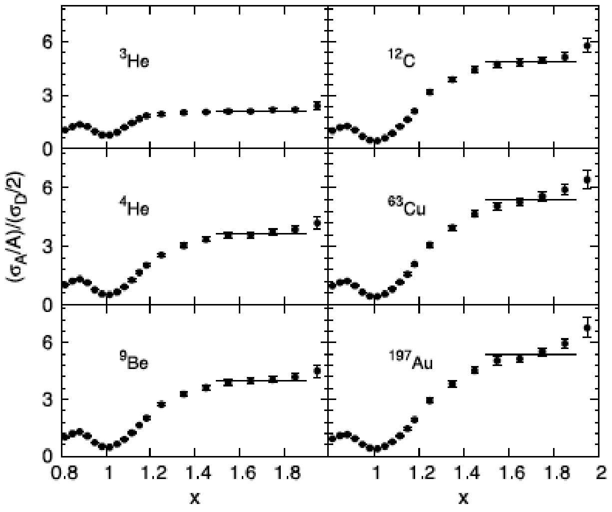
- E12-11-112 (inclusive SRC):
  - 核子之间80%的概率是长距“弱”作用（平均场模型）
  - 短程关联（Short-range correlations, SRC):
    - ✓ 重核内2N-SRC (3N-SRC) 类似于$^2$D ($^3$He&$^3$H) 原子核
    - ✓ 不同原子核内的核子动量分布具有相似尾巴
    - ✓ 高密度，高动量（研究中子星内部，原子核的夸克结构等）
  - 2N-SRC has been observed by inclusive and exclusive QE scattering

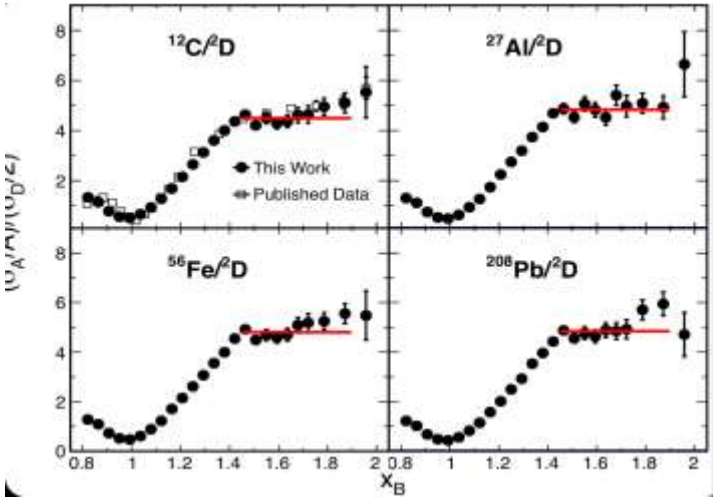



C. Ciofi degli Atti and S. Simula, Phys. Rev. C 53 (1996).



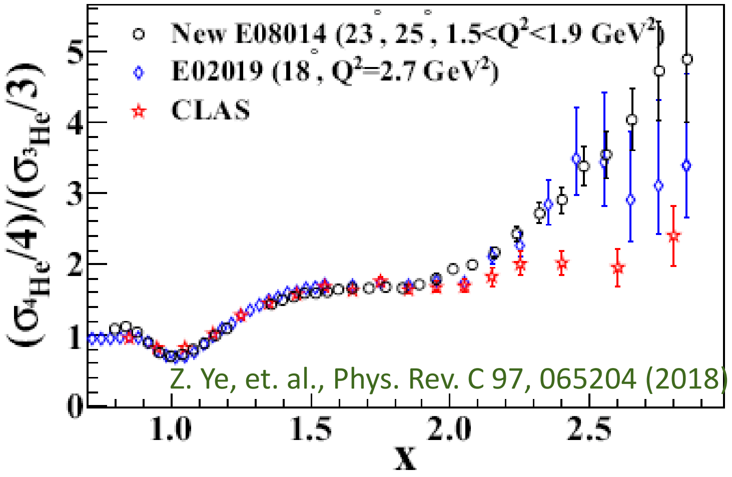

N. Fomin, E02-019 results, arXiv:0812:2144




Schmookler et al., Nature (2019)

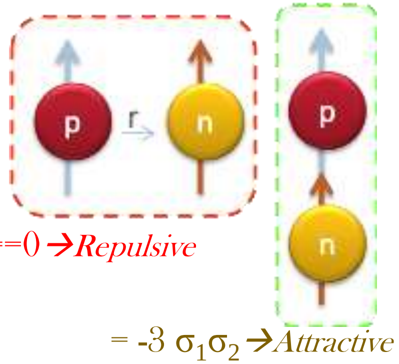
■ No signal about 3N-SRC!




Z. Ye, et. al., Phys. Rev. C 97, 065204 (2018)

# 实验实例: Hall-A Tritium

- E12-11-112 (inclusive SRC):
  - 2N-SRC is strongly Isospin-Dependent

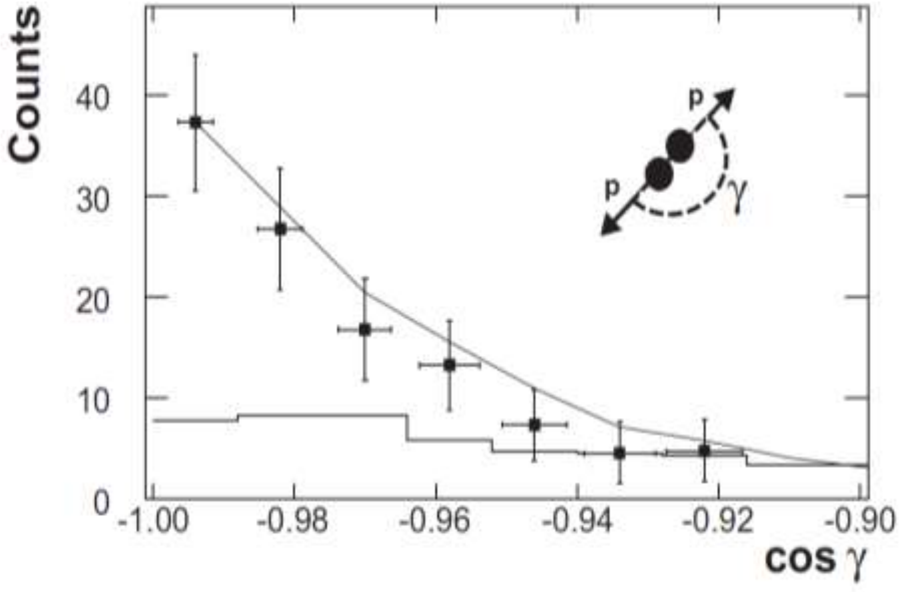



Spin component in V(r)

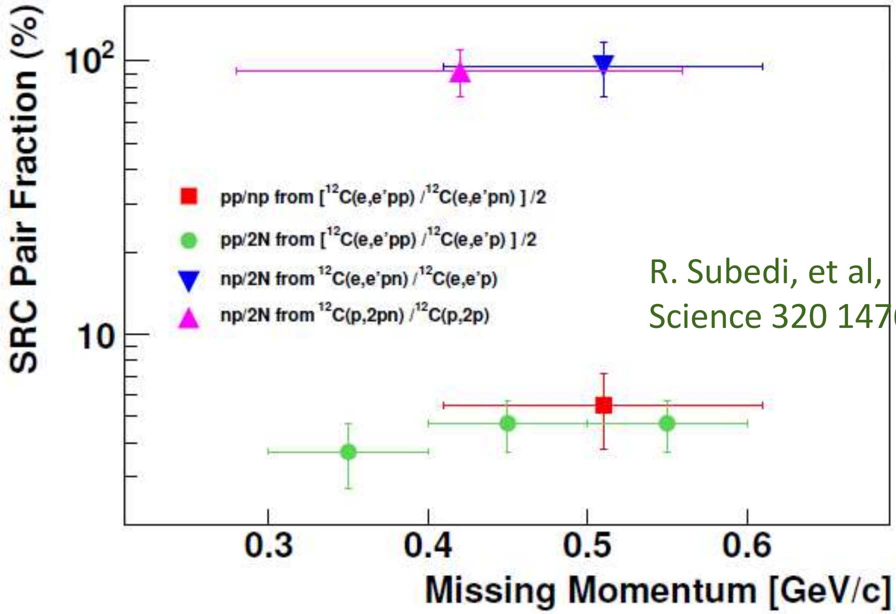
$$-S_{12} = -3(\vec{\sigma}_1 \cdot \hat{r})(\vec{\sigma}_2 \cdot \hat{r}) + (\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2)$$

At small r, tensor-force dominates:

R. Shneor et al, PRL 99 072501 (2007)



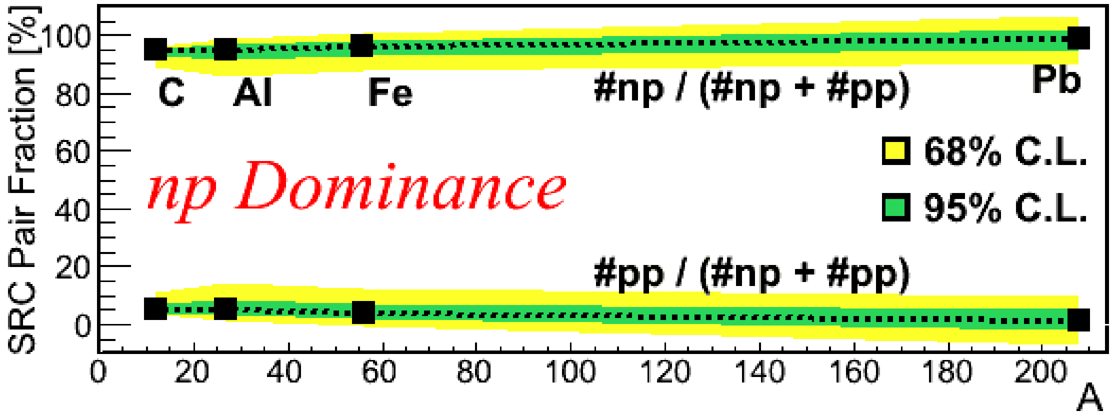

- Back-to-back in SRC w/ A(e,e'pN)A-2 reaction in Hall-A, JLab




R. Subedi, et al, Science 320 1476 (2008)

- np pairs are 90% in 2N-SRC!

O. Hen et al., Science 346, 614 (2014)



# 实验实例: Hall-A Tritium

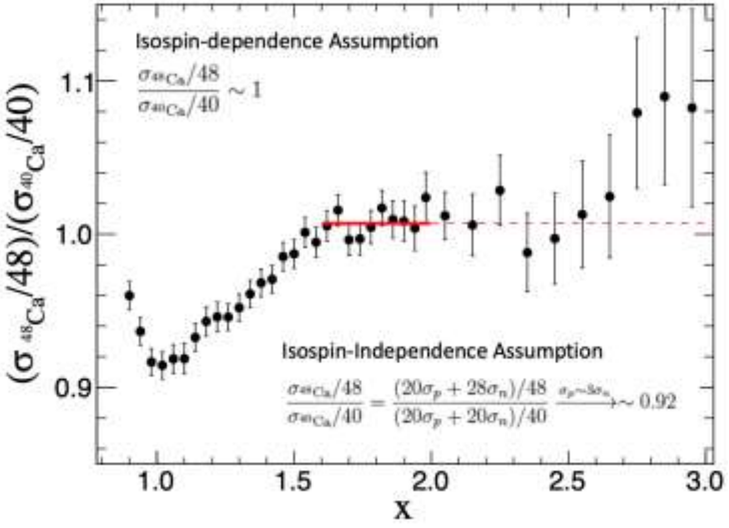
- E12-11-112 (inclusive SRC):

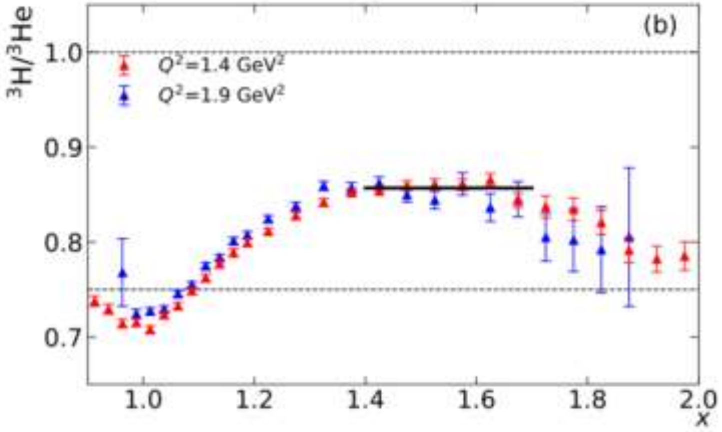
D. Nguyen, Z. Ye, et al, RPC **102**, 064004 (2020)

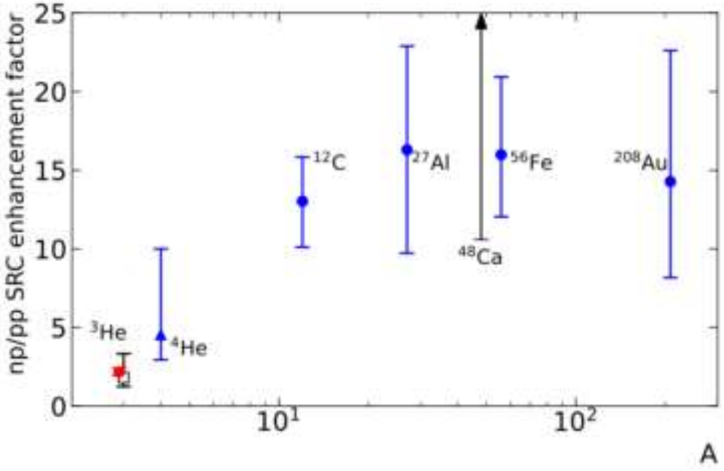
- Isospin-Dependence was seen in (e,e'p) with big errors
  → but not fully conformed by (e,e')
- Use Inclusive QE scattering on He3/H3 to study isospin dependence
  ✓Much clearer than Ca48/Ca40 ratio

$$R = \frac{\sigma_{H3}/3}{\sigma_{He3}/3} = \frac{(\sigma_p + 1\sigma_n)/3}{(2\sigma_p + \sigma_n)/3} \xrightarrow{\sigma_p \approx 3\sigma_n} 0.71$$

$$R = \frac{\sigma_{H3}/3}{\sigma_{He3}/3} = \frac{(2\sigma_{np} + \sigma_{nn})/3}{(2\sigma_{np} + \sigma_{pp})/3} \xrightarrow[np-domin]{T=0} 1.0$$




- Very high precision in (e,e') with H3&He3 to study isospin-SRC
- Less np dominated in light nuclei vs a more universal feature in heavy nuclei

S. Li, et. al, accepted by Nature (to be published on Sep. 1st)

# 实验实例：Hall-A Tritium



## ➢Unpolarized Inclusive Cross-Section Measurements:

- ❑ 实验测量单举微分反应截面

$$\frac{d\sigma^{raw}_{EX}}{dE'd\Omega}(E_0, E'_i, \theta_0) = \frac{N^i_{EX} \cdot \epsilon_{e-\pi}}{N_e \cdot \eta_{tg} \cdot \epsilon_{eff} \cdot (\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX})}$$

探测到的散射电子数 → $N^i_{EX}$

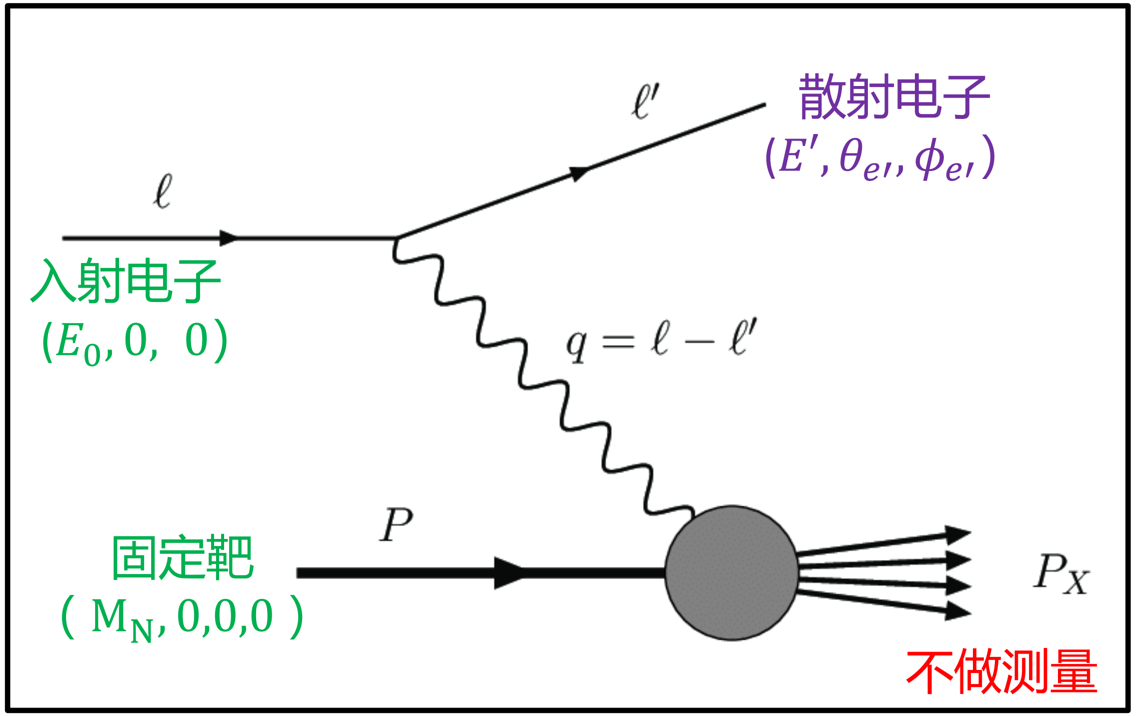
π介子掺杂矫正 → $\epsilon_{e-\pi}$

入射电子数（电流*时间） → $N_e$

靶内核子数（密度*长度） → $\eta_{tg}$

探测器效率矫正 → $\epsilon_{eff}$

电子微分空间（动量*角度） → $\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX}$




- ❑ 动量参数

$$Q^2 = 4E_0 E' \sin^2(\theta/2) \qquad \nu = E_0 - E' \qquad x_{bj} = \frac{Q^2}{2m_p \nu}$$

- ❑ 从观测量到物理量：

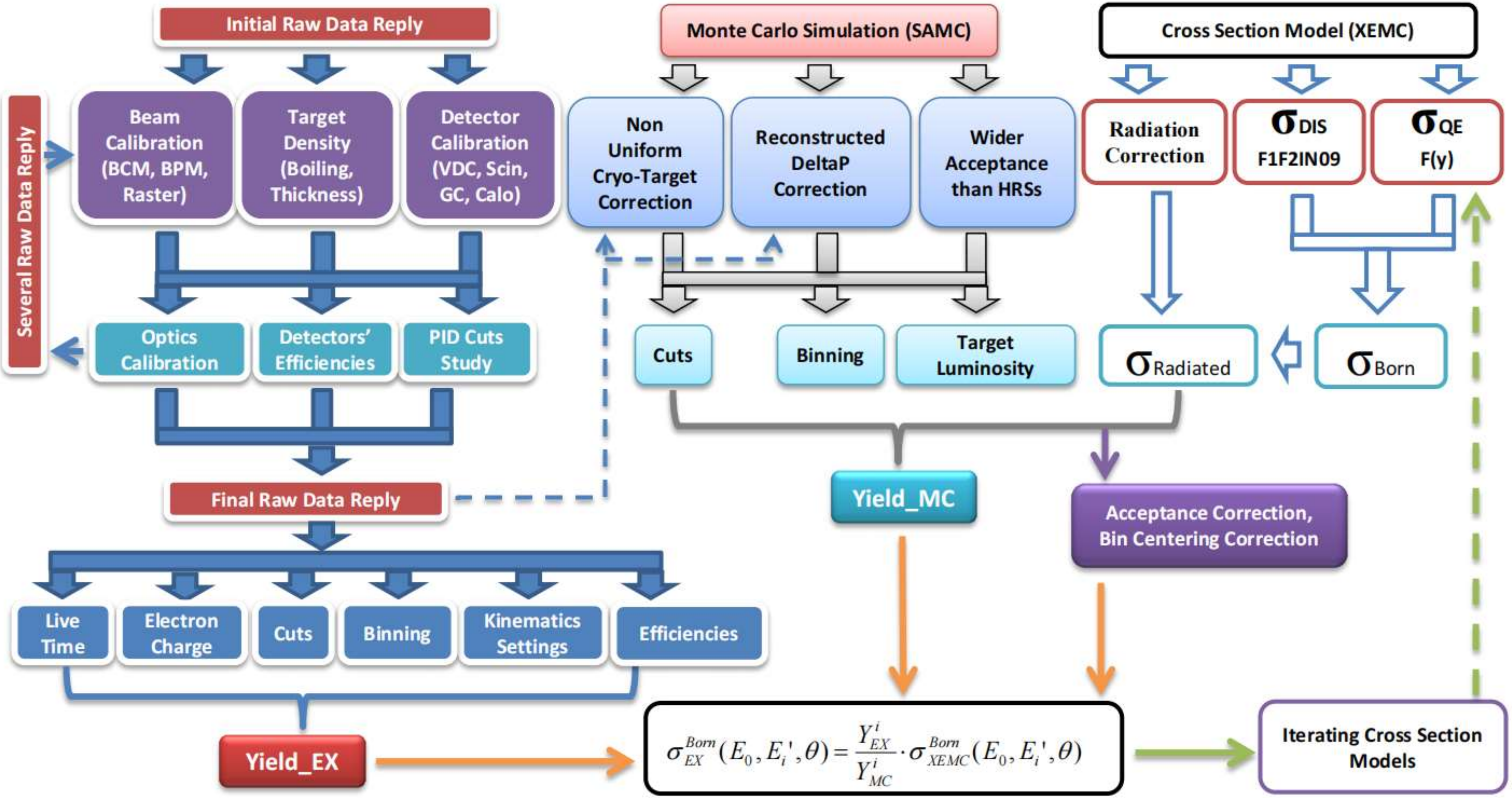
$$d\sigma^{raw}_{EX}(E_0, E'_{EX}, \theta_{EX}) \xrightarrow[\text{corrections}]{\text{theory}} d\sigma^{born}_{EX}(E_0, E'_{Real}, \theta_{real}) \xrightarrow{\text{Jacobian Trans.}} d\sigma^{born}_{EX}(Q^2, x)$$

$$\xrightarrow{\text{Leading-Order}} \frac{2\pi\alpha^2}{(xs^2)} \frac{1 - y + \frac{1}{2}y^2}{y^2} \sum_q e_q^2 f_1^q(x)$$

# 实验实例：Hall-A Tritium



➢实验分析流程：




$$\sigma_{EX}^{Born}(E_0, E_i', \theta) = \frac{Y_{EX}^i}{Y_{MC}^i} \cdot \sigma_{XEMC}^{Born}(E_0, E_i', \theta)$$

# 实验实例：Hall-A Tritium

➤Unpolarized Inclusive Cross-Section Measurements:

探测到的散射电子数

π介子掺杂矫正

$$\frac{d\sigma^{raw}_{EX}}{dE'd\Omega}(E_0, E'_i, \theta_0) = \frac{N^i_{EX} \cdot \epsilon_{e-\pi}}{N_e \cdot \eta_{tg} \cdot \epsilon_{eff} \cdot (\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX})}$$

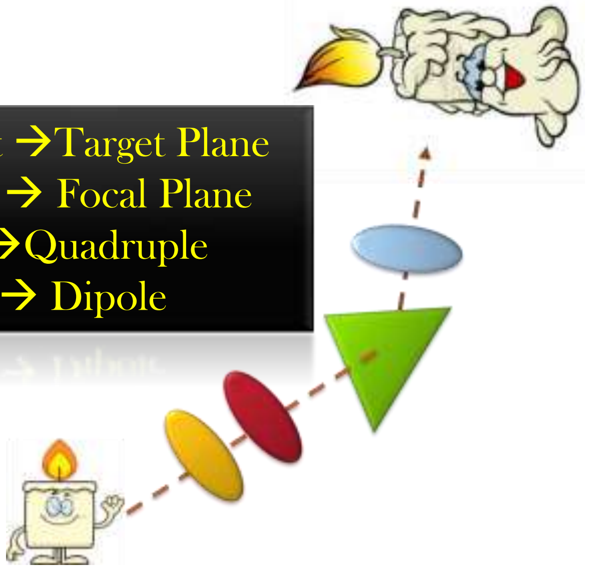
入射电子数（电流*时间）

靶内核子数（密度*长度）

探测器效率矫正

电子微分空间（动量*角度）

“Optics” Reconstruction→重建反应平面的动量信息

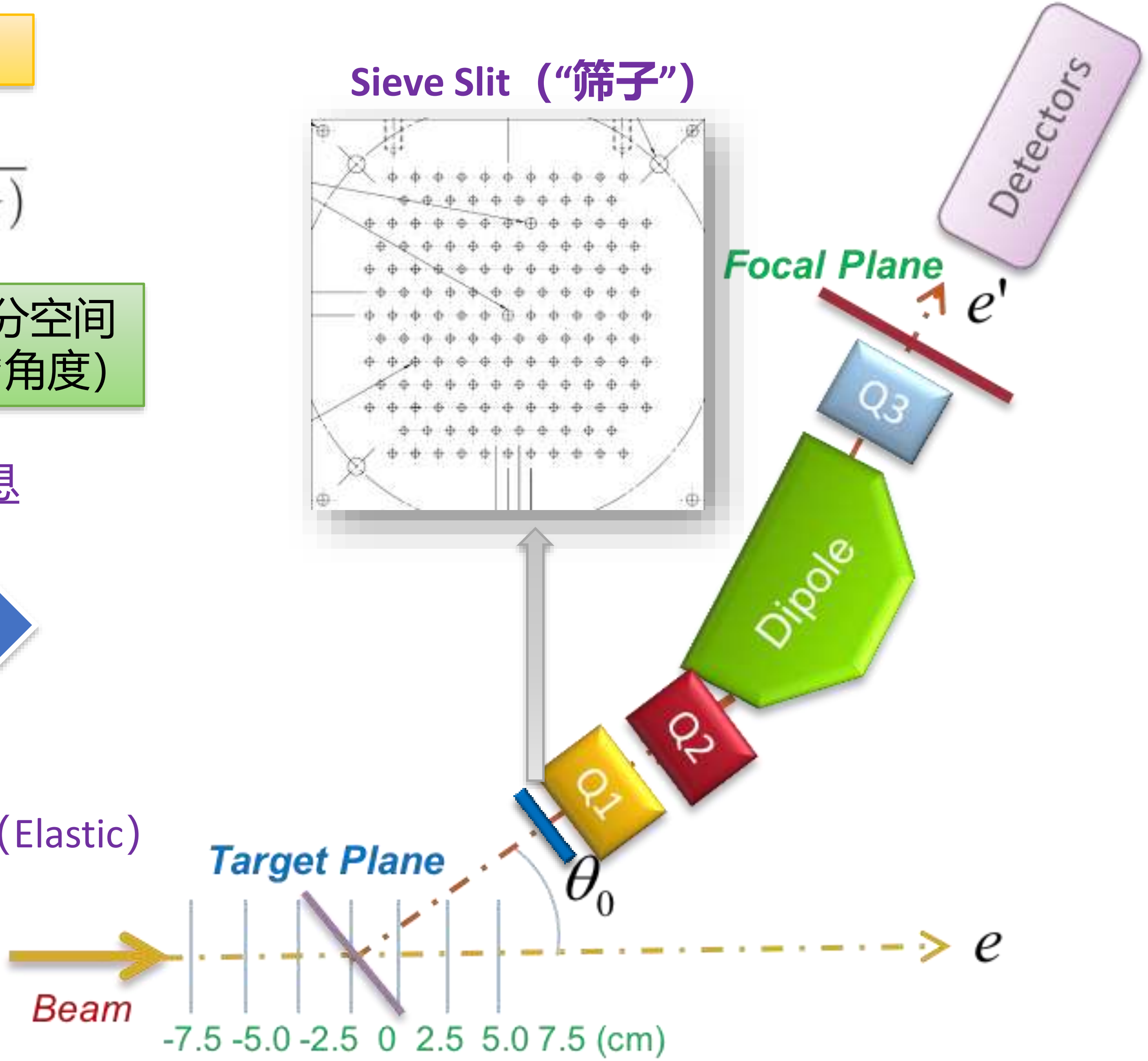


- Object →Target Plane
- Image → Focal Plane
- Lens →Quadruple
- Prism → Dipole

“光学”矫正数据：

✓ 特殊实验设置

✓ 熟悉物理反应（Elastic）



# 实验实例：Hall-A Tritium

➢Unpolarized Inclusive Cross-Section Measurements:

$$\frac{d\sigma^{raw}_{EX}}{dE'd\Omega}(E_0, E'_i, \theta_0) = \frac{N^i_{EX} \cdot \epsilon_{e-\pi}}{N_e \cdot \eta_{tg} \cdot \epsilon_{eff} \cdot (\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX})}$$

- 探测到的散射电子数 → $N^i_{EX}$
- π介子掺杂矫正 → $\epsilon_{e-\pi}$
- 入射电子数（电流*时间） → $N_e$
- 靶内核子数（密度*长度） → $\eta_{tg}$
- 探测器效率矫正 → $\epsilon_{eff}$
- 电子微分空间（动量*角度） → $\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX}$

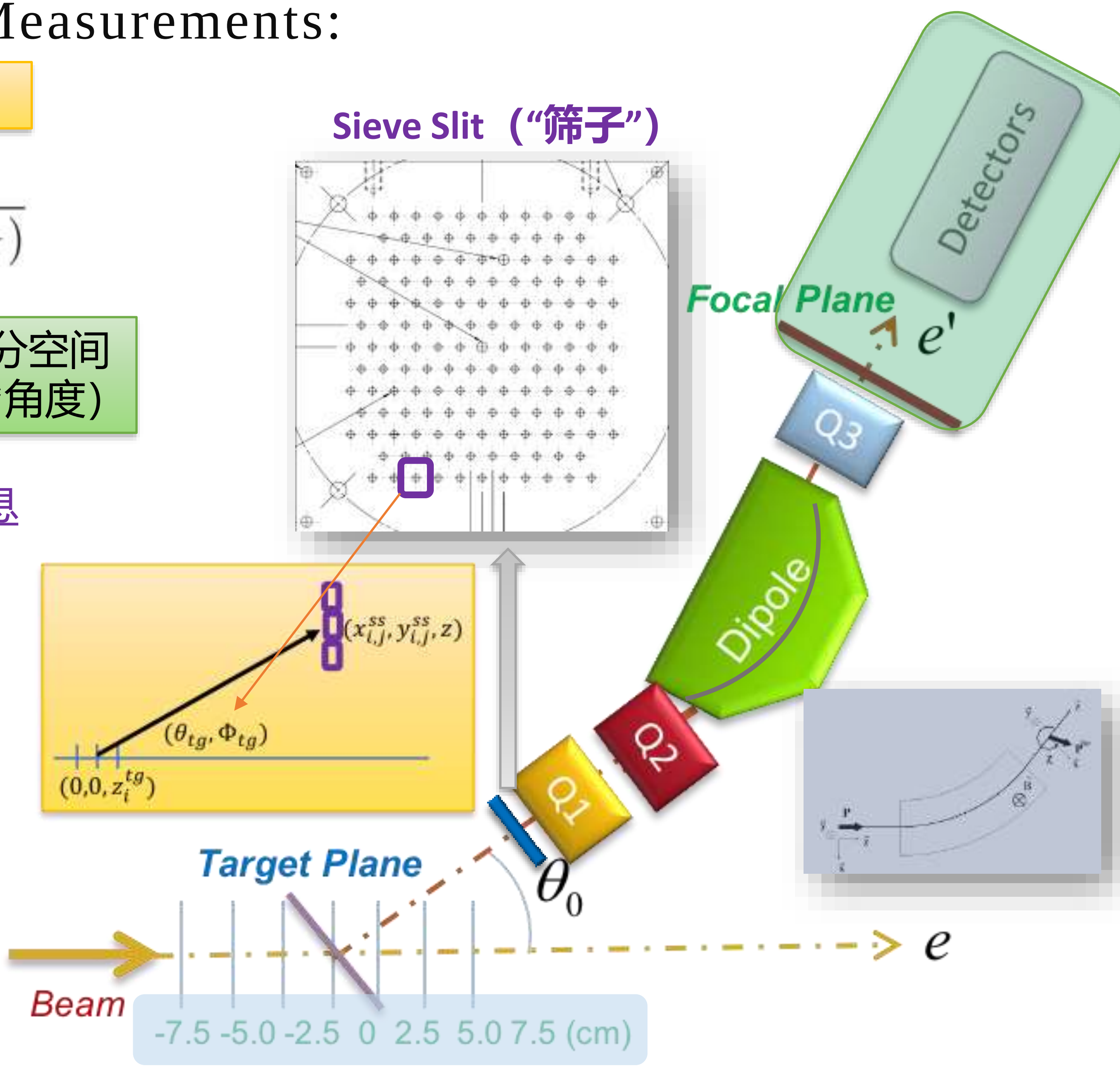
"Optics" Reconstruction→重建反应平面的动量信息

$$\begin{pmatrix} \delta p \\ y_{tg} \\ \theta_{tg} \\ \phi_{tg} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Optics \\ Matrix \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{fp} \\ y_{fp} \\ \theta_{fp} \\ \phi_{fp} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \delta p = \sum_{i,j,k,l} C^D_{ijkl} x^i_{fp} y^j_{fp} \theta^k_{fp} \phi^l_{fp} \\ y_{tg} = \sum_{i,j,k,l} C^Y_{ijkl} x^i_{fp} y^j_{fp} \theta^k_{fp} \phi^l_{fp} \\ \theta_{tg} = \sum_{i,j,k,l} C^T_{ijkl} x^i_{fp} y^j_{fp} \theta^k_{fp} \phi^l_{fp} \\ \phi_{tg} = \sum_{i,j,k,l} C^P_{ijkl} x^i_{fp} y^j_{fp} \theta^k_{fp} \phi^l_{fp} \end{cases}$$

Measured in Focal Plane

❑ 光学系数通过已知实验数据拟合

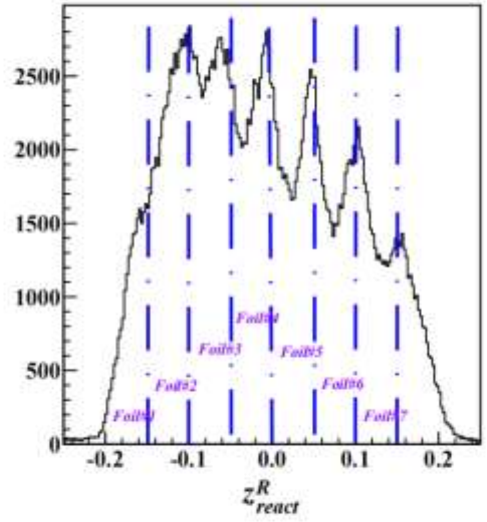


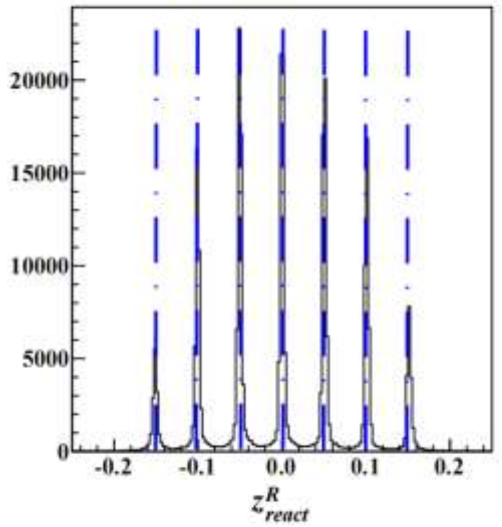
# 实验实例：Hall-A Tritium

➢Unpolarized Inclusive Cross-Section Measurements:

$$\frac{d\sigma^{raw}_{EX}}{dE'd\Omega}(E_0, E'_i, \theta_0) = \frac{N^i_{EX} \cdot \epsilon_{e-\pi}}{N_e \cdot \eta_{tg} \cdot \epsilon_{eff} \cdot (\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX})}$$

- $N^i_{EX}$：探测到的散射电子数
- $\epsilon_{e-\pi}$：π介子掺杂矫正
- $N_e$：入射电子数（电流*时间）
- $\eta_{tg}$：靶内核子数（密度*长度）
- $\epsilon_{eff}$：探测器效率矫正
- $\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX}$：电子微分空间（动量*角度）



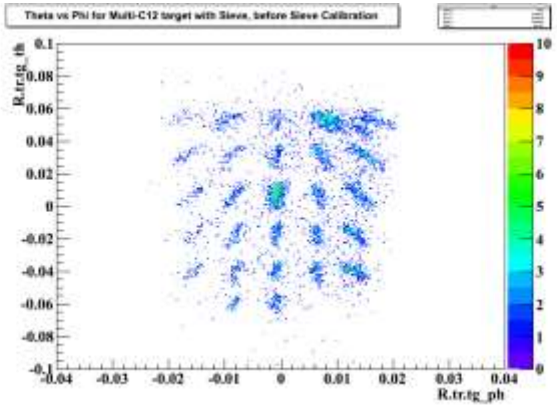

"Optics" Reconstruction→重建反应平面的动量信息

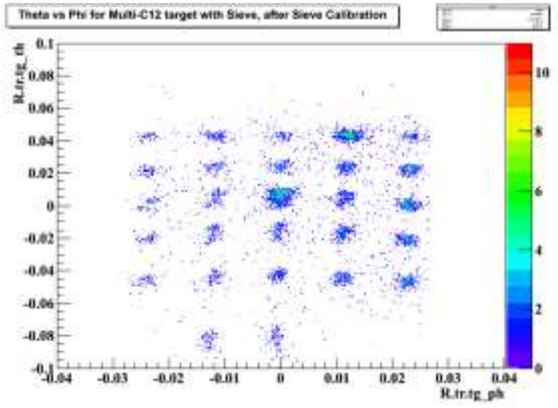
$$\begin{pmatrix} \delta p \\ y_{tg} \\ \theta_{tg} \\ \phi_{tg} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Optics \\ Matrix \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_{fp} \\ y_{fp} \\ \theta_{fp} \\ \phi_{fp} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} \delta p = \sum_{i,j,k,l} C^D_{ijkl} x^i_{fp} y^j_{fp} \theta^k_{fp} \phi^l_{fp} \\ y_{tg} = \sum_{i,j,k,l} C^Y_{ijkl} x^i_{fp} y^j_{fp} \theta^k_{fp} \phi^l_{fp} \\ \theta_{tg} = \sum_{i,j,k,l} C^T_{ijkl} x^i_{fp} y^j_{fp} \theta^k_{fp} \phi^l_{fp} \\ \phi_{tg} = \sum_{i,j,k,l} C^P_{ijkl} x^i_{fp} y^j_{fp} \theta^k_{fp} \phi^l_{fp} \end{cases}$$

Measured in Focal Plane

❑ 光学系数通过已知实验数据拟合



# 实验实例：Hall-A Tritium

➢Unpolarized Inclusive Cross-Section Measurements:

$$\frac{d\sigma^{raw}_{EX}}{dE'd\Omega}(E_0, E'_i, \theta_0) = \frac{N^i_{EX} \cdot \epsilon_{e-\pi}}{N_e \cdot \eta_{tg} \cdot \epsilon_{eff} \cdot (\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX})}$$

- 探测到的散射电子数
- π介子掺杂矫正
- 入射电子数（电流*时间）
- 靶内核子数（密度*长度）
- 探测器效率矫正
- 电子微分空间（动量*角度）

❑ 入射电子数：

✓ 实验向加速器请求特定电流

✓ 实验大厅实时测量真实电流涨落

✓ 记录电子束流打靶的时间

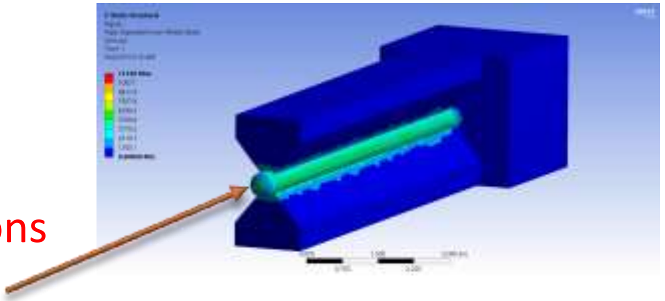
$$\mathrm{N}_e = \sum_i I_i \cdot \Delta T_i / e$$

❑ 靶核子数： $\eta_{tg} = \frac{\rho \cdot l \cdot N_a}{A}$,

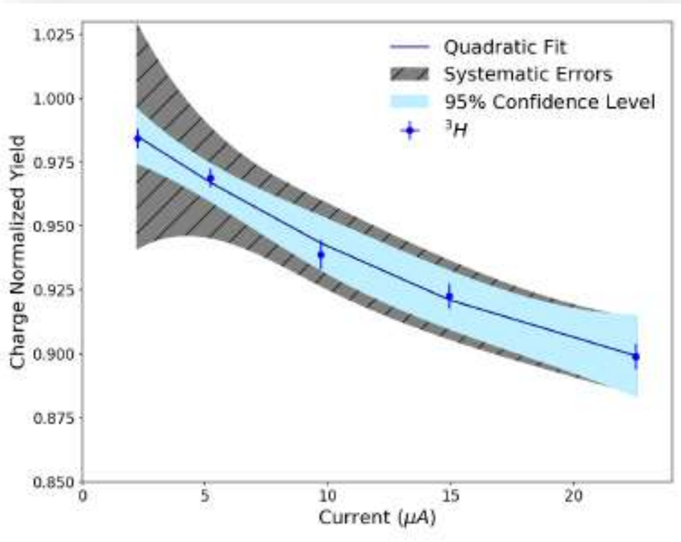
✓ 靶的长度为实验已知量

✓ 固体靶的密度为已知量

✓ 液体和气体的密度随温度涨落(电子束流加热作用)



Electrons




**Target Boiling Correction**

✓ 向加速器要求多组电流 (2.5uA, 5uA, 10uA, 15uA, 22.5uA)

✓ 测量电子轰击液体/气体靶的散射电子数

✓ 同时测量电子轰击固体靶作为对照组

✓ 分析散射电子数的变化（矫正电流后）

✓ 拟合矫正函数

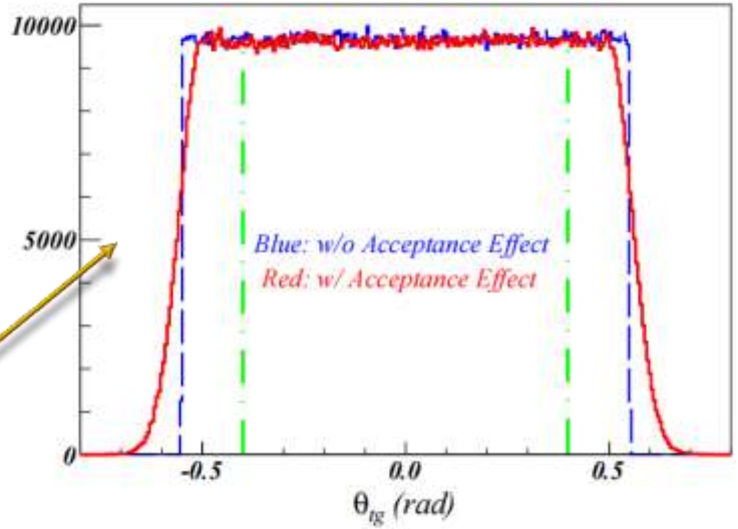
$$\rho = \rho_0 \cdot (1.0 - B \cdot I/100)$$

# 实验实例: Hall-A Tritium

➢Unpolarized Inclusive Cross-Section Measurements:

$$\frac{d\sigma^{raw}_{EX}}{dE'd\Omega}(E_0, E'_i, \theta_0) = \frac{N^i_{EX} \cdot \epsilon_{e-\pi}}{N_e \cdot \eta_{tg} \cdot \epsilon_{eff} \cdot (\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX})}$$

- 探测到的散射电子数 → $N^i_{EX}$
- π介子掺杂矫正 → $\epsilon_{e-\pi}$
- 入射电子数（电流*时间） → $N_e$
- 靶内核子数（密度*长度） → $\eta_{tg}$
- 探测器效率矫正 → $\epsilon_{eff}$
- 电子微分空间（动量*角度） → $\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX}$

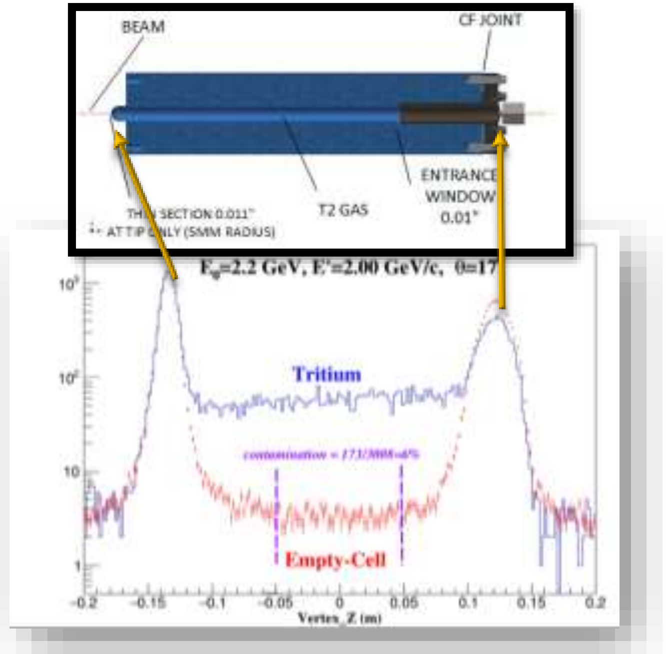



❑ 粒子甄别（Particle Identification）：

✓ 来自碰撞点的散射电子

X 物理信息被改变的散射电子（如能损，次级碰撞等）

X 电子束流被靶外其他材料散射（气体容器，空气，加速器管道材料等）→取中间一半的气体



# 实验实例：Hall-A Tritium

➢Unpolarized Inclusive Cross-Section Measurements:

$$\frac{d\sigma^{raw}_{EX}}{dE'd\Omega}(E_0, E'_i, \theta_0) = \frac{N^i_{EX} \cdot \epsilon_{e-\pi}}{N_e \cdot \eta_{tg} \cdot \epsilon_{eff} \cdot (\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX})}$$

探测到的散射电子数

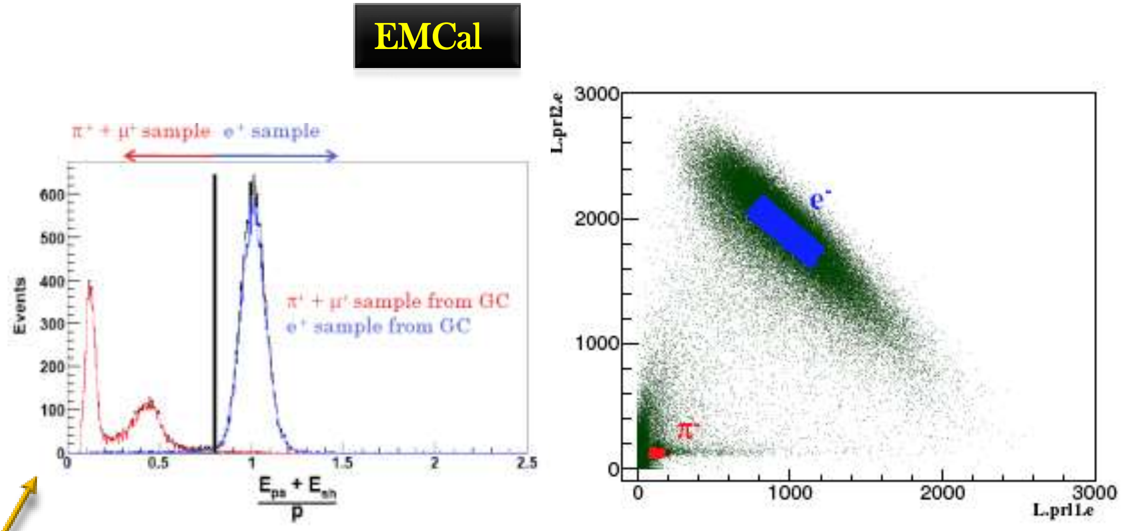
π介子掺杂矫正

入射电子数（电流*时间）

靶内核子数（密度*长度）

探测器效率矫正

电子微分空间（动量*角度）




❑ 粒子甄别（Particle Identification）：

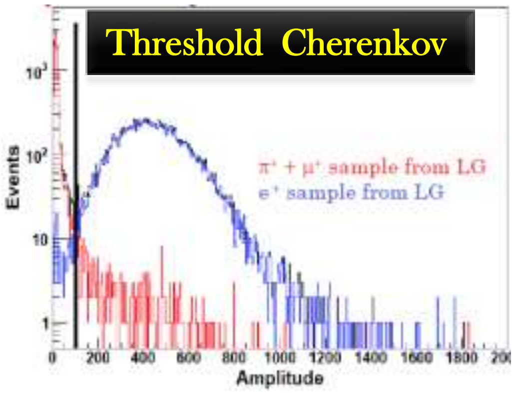
✓ 来自碰撞点的散射电子

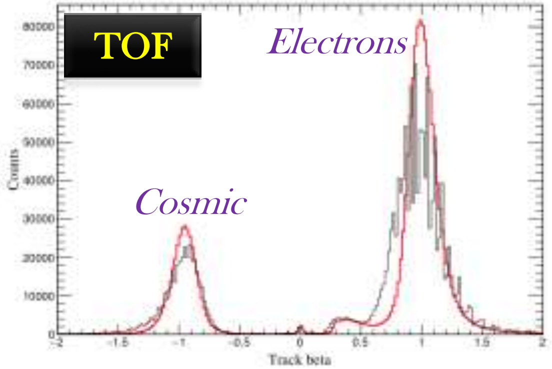
X 物理信息被改变的散射电子（如能损，次级碰撞等）

X 电子束流被靶外其他材料散射（气体容器，空气，加速器管道材料等）→取中间一半的气体

X ~~来自高能光子衰败的正负电子对(极少，实验验证)~~

X 误判为散射电子的其他粒子，π/K介子，宇宙射线等



# 实验实例：Hall-A Tritium



➢Unpolarized Inclusive Cross-Section Measurements:

探测到的散射电子数

π介子掺杂矫正

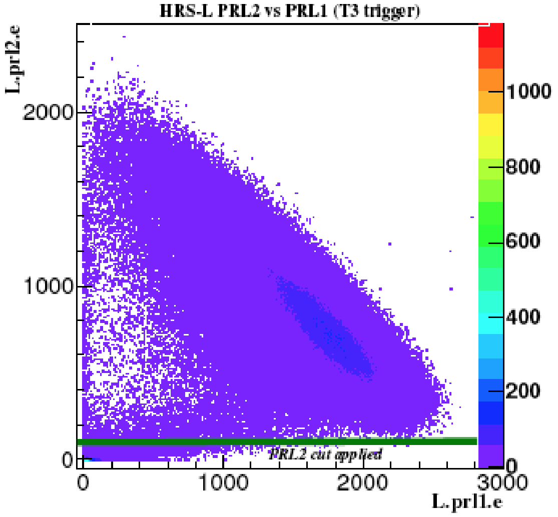
$$\frac{d\sigma^{raw}_{EX}}{dE'd\Omega}(E_0, E'_i, \theta_0) = \frac{N^i_{EX} \cdot \epsilon_{e-\pi}}{N_e \cdot \eta_{tg} \cdot \epsilon_{eff} \cdot (\Delta E'_{EX} \Delta\Omega_{EX})}$$

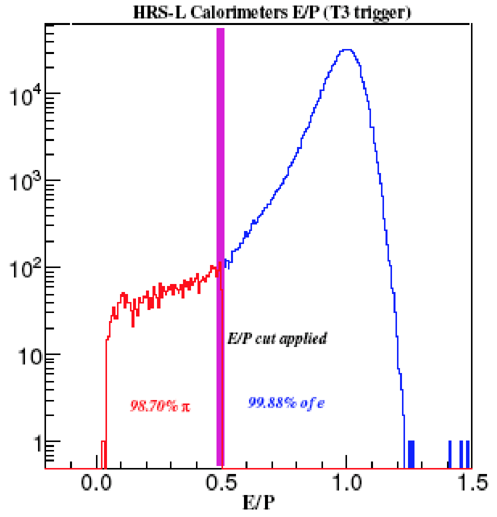
入射电子数（电流*时间）

靶内核子数（密度*长度）

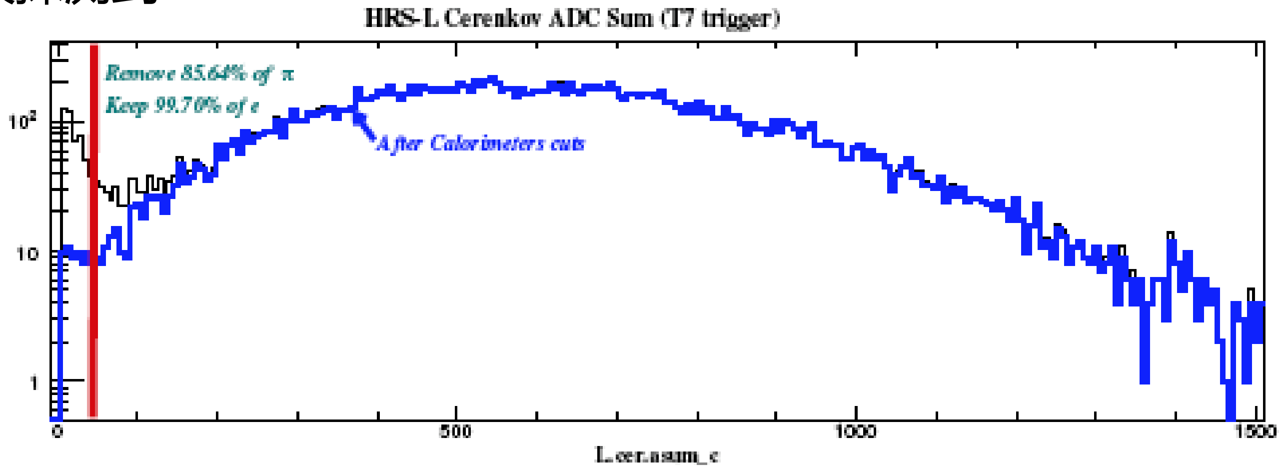
探测器效率矫正

电子微分空间（动量*角度）




- ❑ 探测器效率→穿过探测器的粒子（电子）多少比例被探测到?受以下硬件问题影响
  - ✓ 粒子达到探测器的死区
  - ✓ 没留下足够大信号
  - ✓ 无法进行有效轨迹重建
  - ✓ 无法产生有效触发信号
  - ✓ 前端电子学继续数据过慢
  - ✓ 电脑存储数据过慢
- ❑ PID效率（如介子掺杂矫正）
  →数据分析过程中人为判断的准确度




- ❑ 通过两组探测器探测同一种粒子，相互判断
  （如：N个被探测器#1测到的电子，多少被探测器#2同时看到？）

# 实验实例: Hall-A Tritium

➢Unpolarized Inclusive Cross-Section Measurements:

$$\frac{d\sigma^{raw}_{EX}}{dE'd\Omega}(E_0, E'_i, \theta_0) = \frac{N^i_{EX}\cdot \epsilon_{e-\pi}}{N_e\cdot\eta_{tg}\cdot\epsilon_{eff}\cdot(\Delta E'_{EX}\Delta\Omega_{EX})}$$

探测到的散射电子数

π介子掺杂矫正

入射电子数
(电流*时间)

靶内核子数
(密度*长度)

探测器效
率矫正

电子微分空间
(动量*角度)

❑ 其他矫正

- ✓ Energy Lose
- ✓ Radiative Correction
- ✓ Bing-Centering Correction
- ✓ Acceptance Correction

❑ 误差分析

# 第二节总结



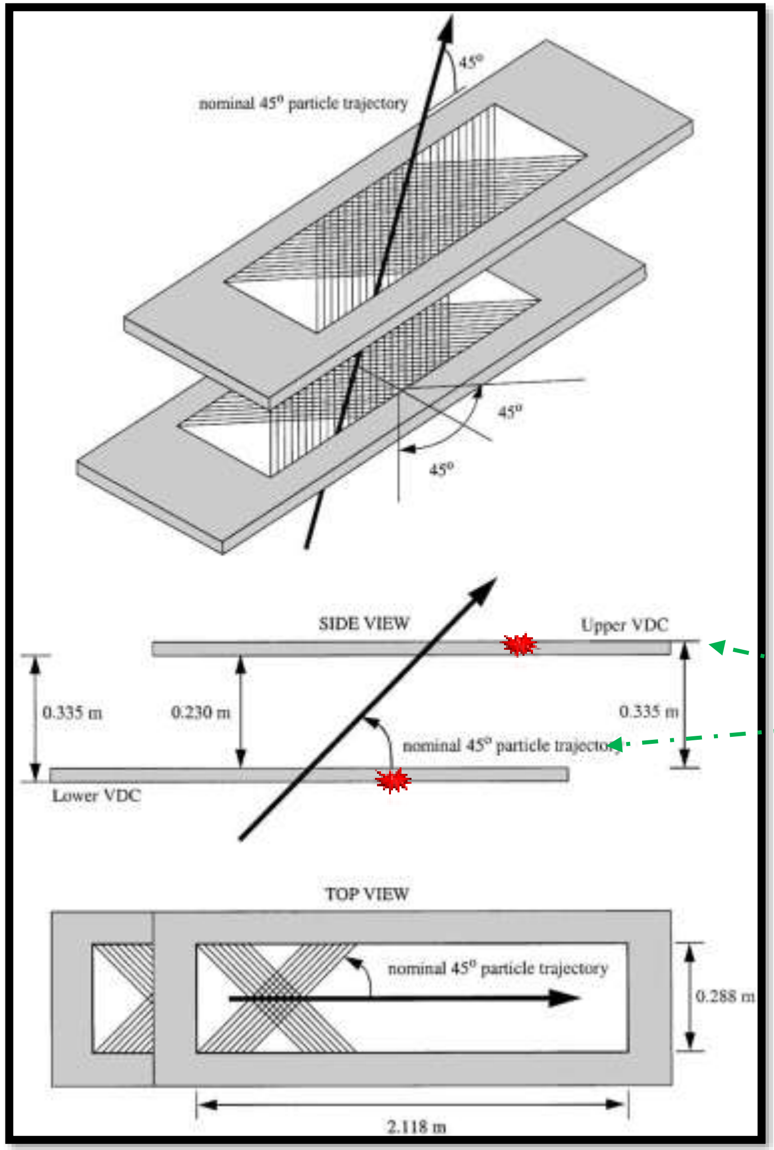
- 电子散射实验综述
- 各种粒子探测器
- 数据采集系统量
- 实验分析实例

**下节预告：未来展望**

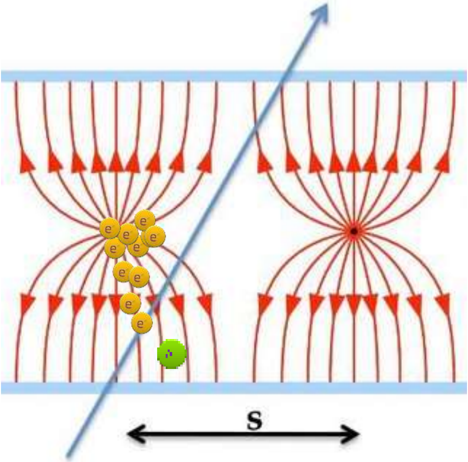
# Backup

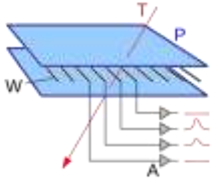
# 轨迹探测器

## ➢Drift Chambers（DC)




- ❑ 高能带点粒子经过气体电离出外围电子
- ❑ 强电场中，电离电子产生雪崩效应产生大量次级电子;
- ❑ 电子漂移到阳极丝以脉冲信号被前端电子学记录



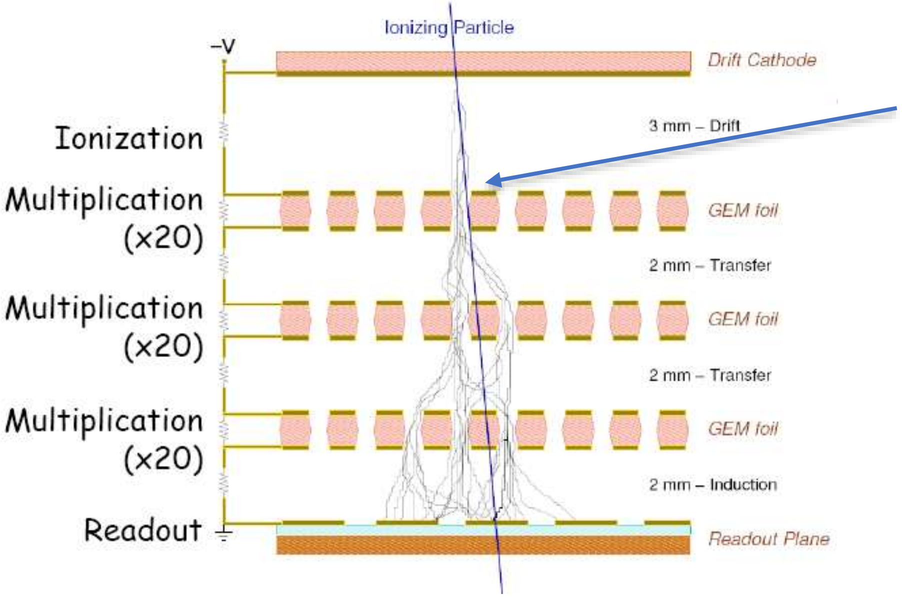



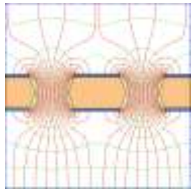
- ❖ 每个DC至少两个不同方向的阳极丝平面（45度夹角）；通过判断每个平面的哪根阳极丝有脉冲信号，即可判断入射位置
- ❖ 非电磁场环境，两组DC提供两组（x，y）信息，即可判断粒子穿过的位置(x, y) and 角度 $(\theta, \phi)$

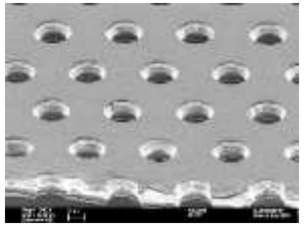
# 轨迹探测器

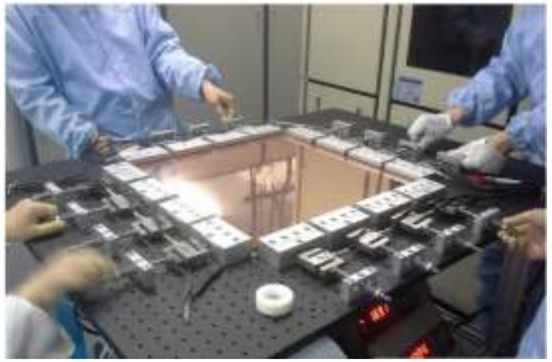
## ➢Gas Electric Multiplier（GEM)

- ❑ 在多层薄膜上精细打洞
- ❑ 洞内部产生强电场
- ❑ 电离电子经过洞产生雪崩放大，末端记录大信号
- ❑ 可在强磁场中工作
- ❑ 高计数率（50MHz/mm2)



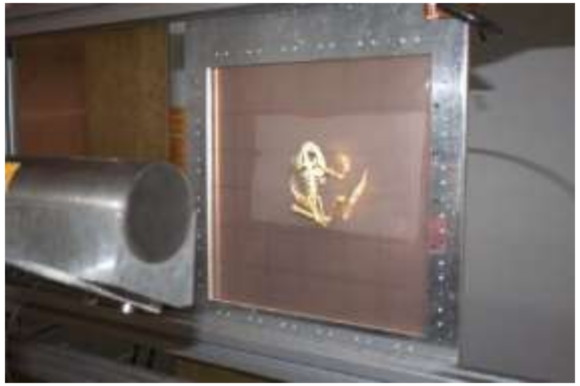



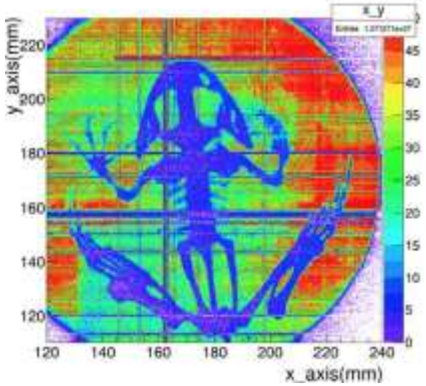




- ❑ 电子脉冲信号被底部读出条读出
- ❑ 其他类似MPGD技术（muRELL)

❖ 极高的位置分辨率



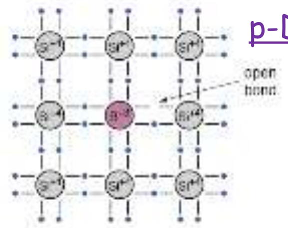


# 轨迹探测器

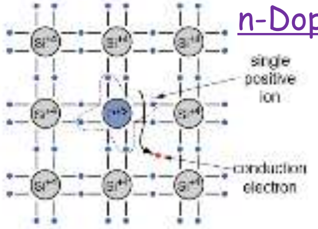
## ➢Silicon Tracker

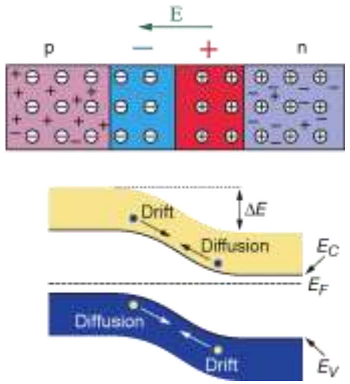
❑ 硅半导体pn-Junction

p-Doping



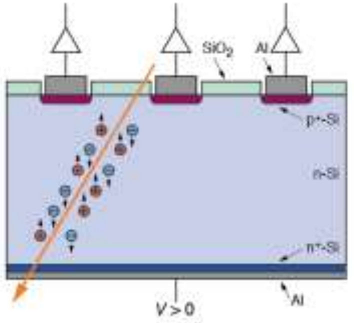

n-Doping




pn-Junction

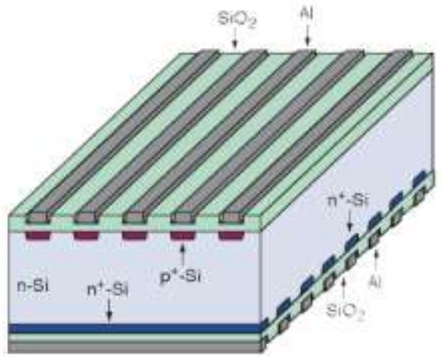
❑ 高能带电粒子硅半导体的电子并产生雪崩信号



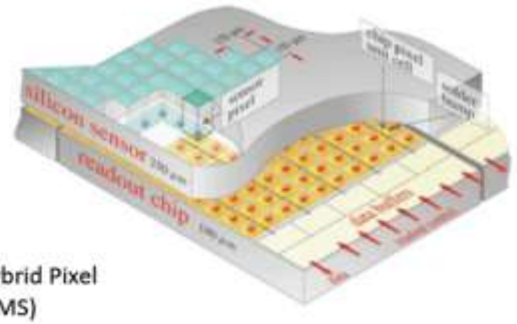

✓Voltage < 200 V
✓Amplification~$10^7$

❑ 电子脉冲信号被底部读出条读出

❖ 长条读出（时间探测）和像素读出（时间和位置探测）

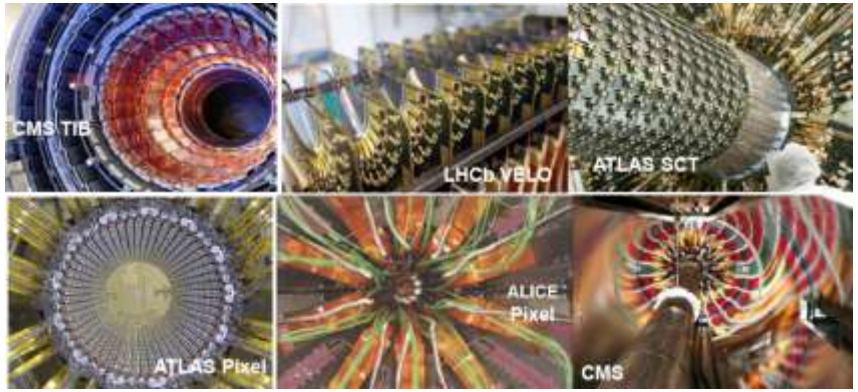



Scheme of a double sided strip detector
(biasing structures not shown)

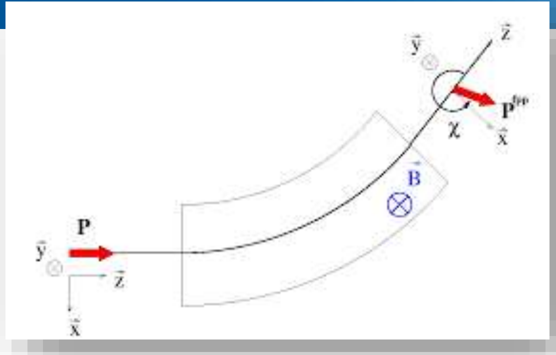


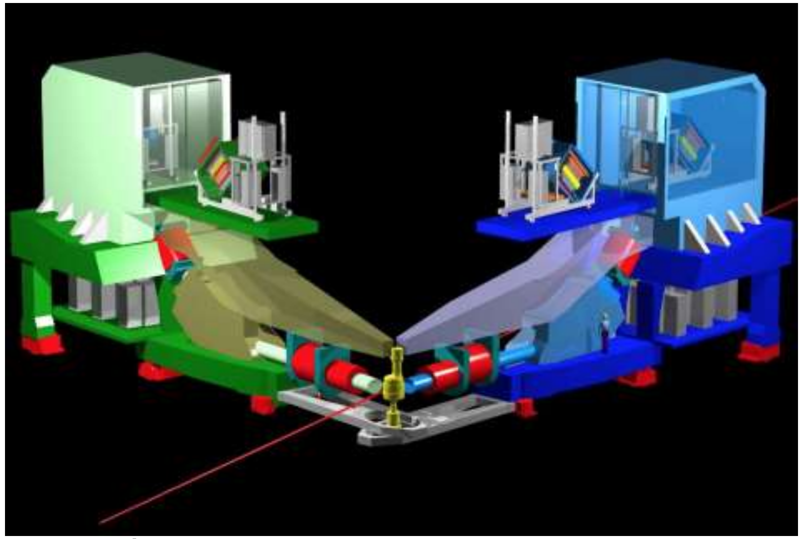

Hybrid Pixel
(CMS)

❖ 可在强磁场工作（顶点测量）；可塑性高
❖ 怕温度变化；怕中子辐射

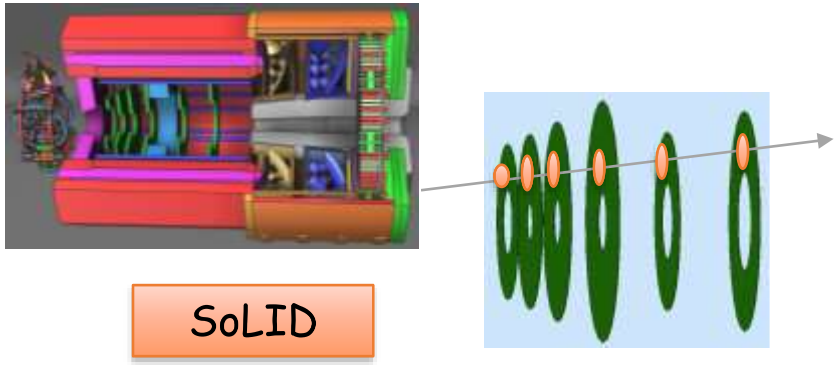


# 轨迹探测器



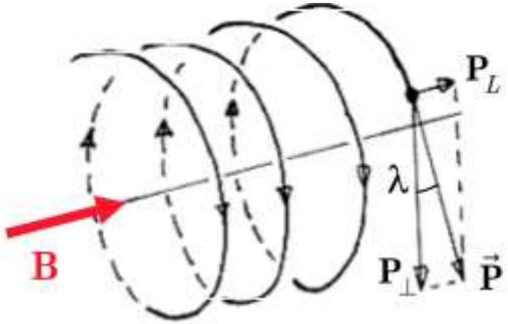
- 带电粒子动量
  - 在均匀强磁场中，带电粒子的偏转半径由其动量决定
  - 高精度磁谱仪（双极子+四极子磁铁组合）→可测量0.1%精度的带电粒子动量
  - In a Solenoid magnet （e.g., SoLID, EIC, or other collider detectors), 多组tracking探测器可决定粒子的偏转轨迹，从而获得去动量

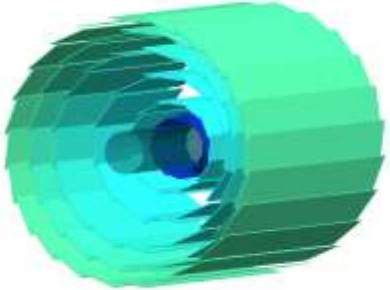


SoLID

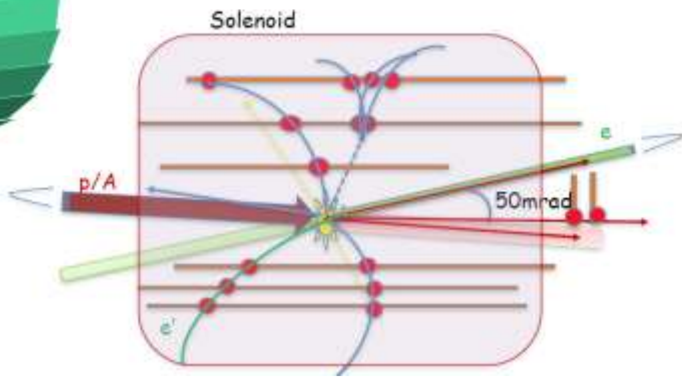
固定靶实验高能粒子趋近于朝前飞行

$$R(m) = \frac{P_T(GeV)}{0.3 \cdot B(T)}$$



对撞机探测器

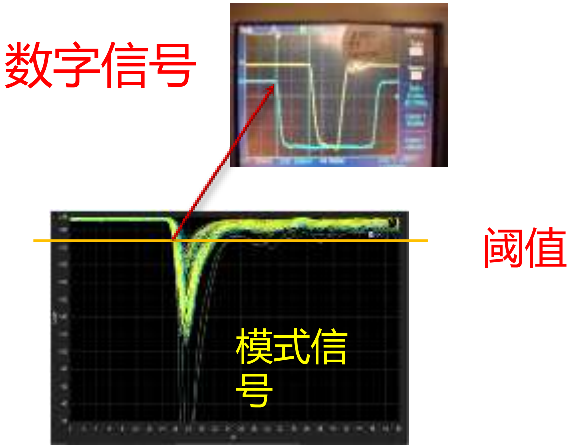


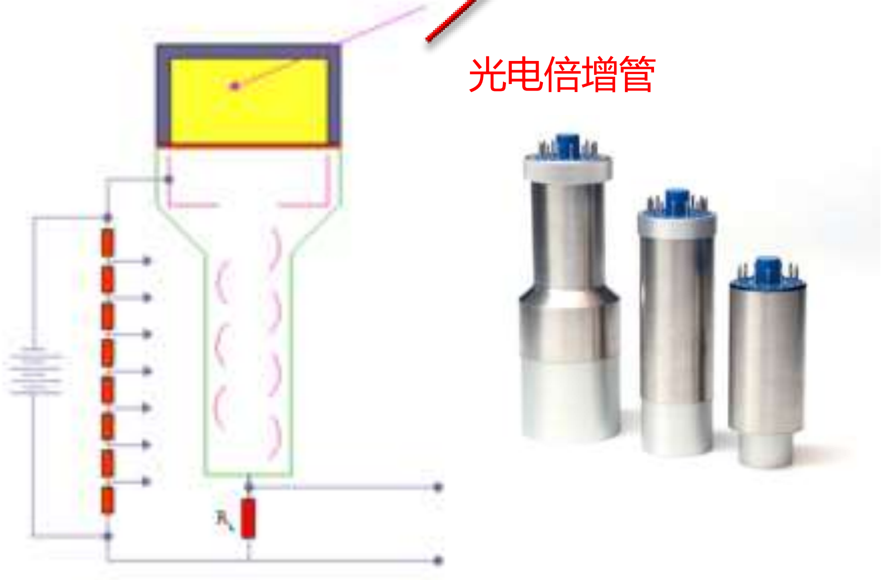

对撞实验中粒子“均匀”飞向各个方向

# 时间探测器

## ➢塑料闪烁体

- ❖ 塑料掺杂荧光材料
- ❖ 带电粒子穿过塑料并电离产生光信号
- ❖ 光电倍增管（Photon-Multiplier Tube，PMT)将光信号转变为"模式"电信号
- ❖ 以超过某一阈值的模式信号为时间起点（粒子穿过时间）
- ❖ 时间信息以数字信号方式传递到数据采集系统

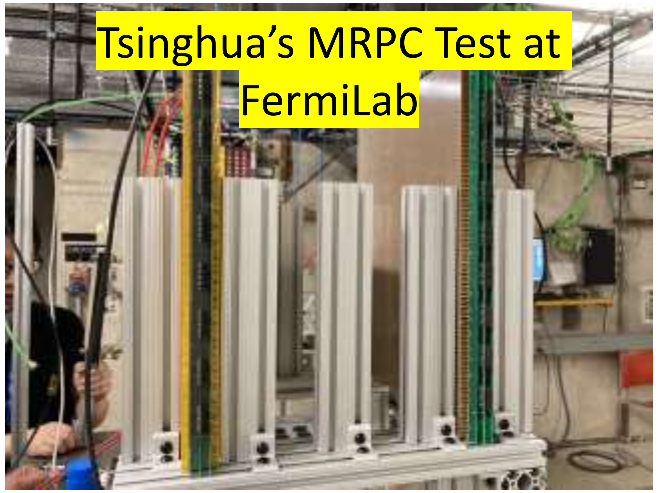


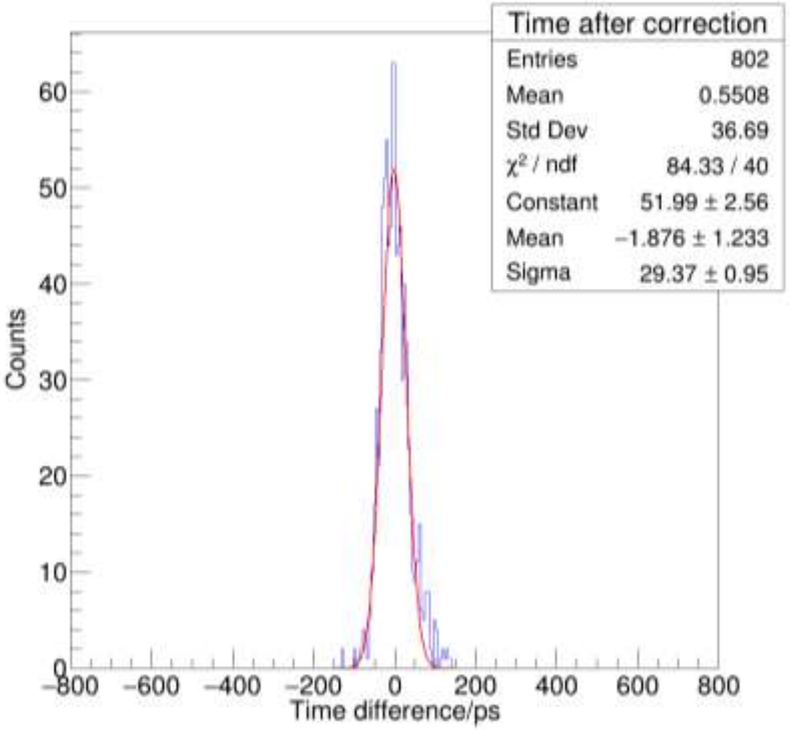



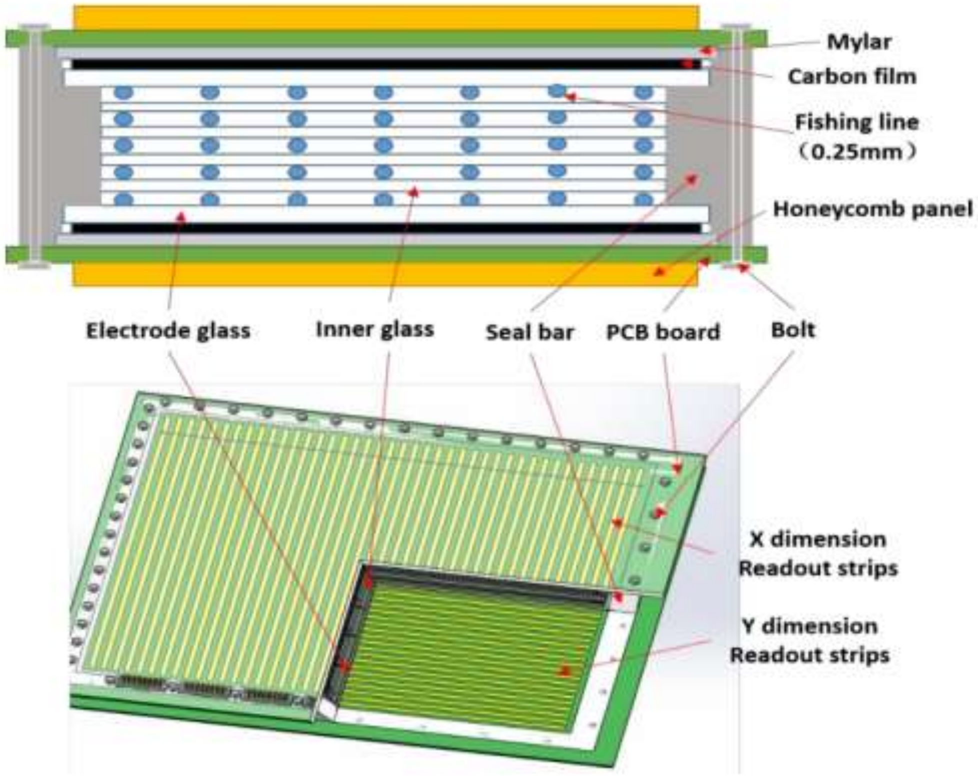
# 时间探测器

## ➢Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC)

- ❖ 气体由多层低电阻玻璃分割成极薄气隙
- ❖ 5000~15000V高压
- ❖ 电离电子在强电场的气隙中雪崩放大并被迅速收集脉冲信号
- ❖ 极高时间分辨率 (<20ps)
- ❖ 极高计数率- 50 KHz/cm²
- ❖ 耐辐射；耐强磁场



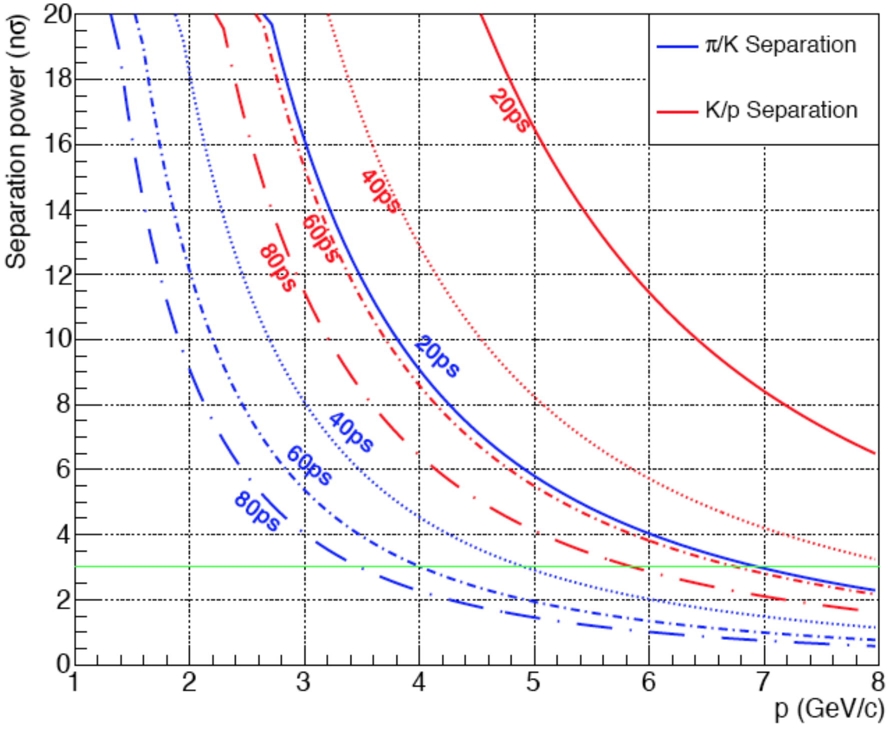
## ➢Time-of-Flight (TOF):

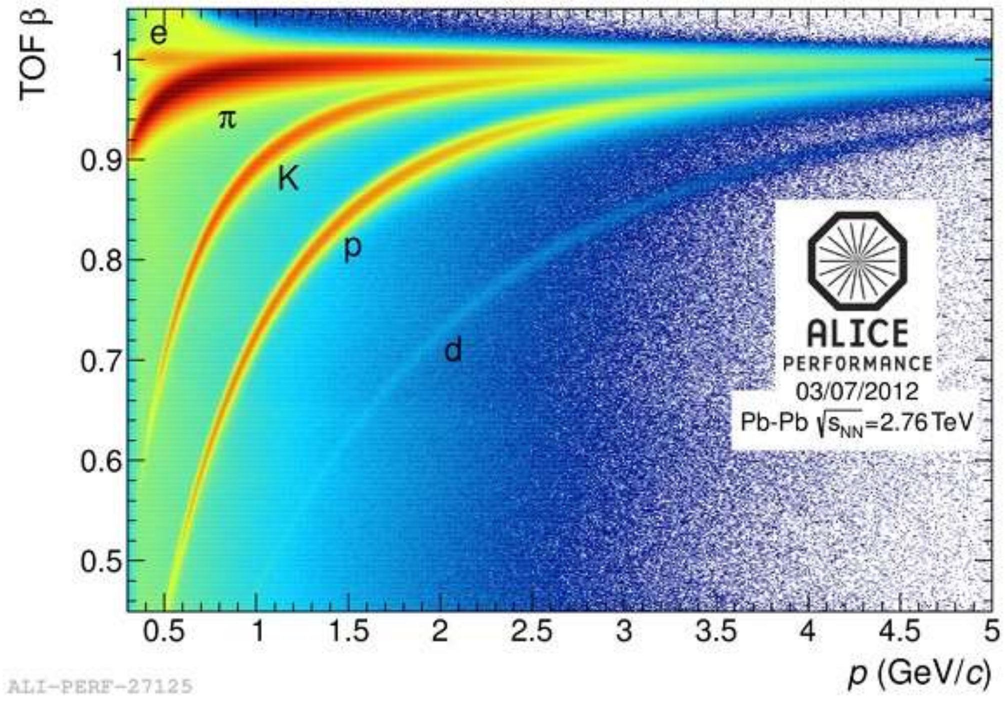
- ❑ 带电粒子的速度可由两个固定距离时间飞行仪探测器测量：

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{L}{(t_1 - t_2) \cdot c}$$

- ❑ TOF-Beta 关联于粒子动量（Tracking 获得）和粒子种类（质量）：

$$\beta = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2c^2}}$$

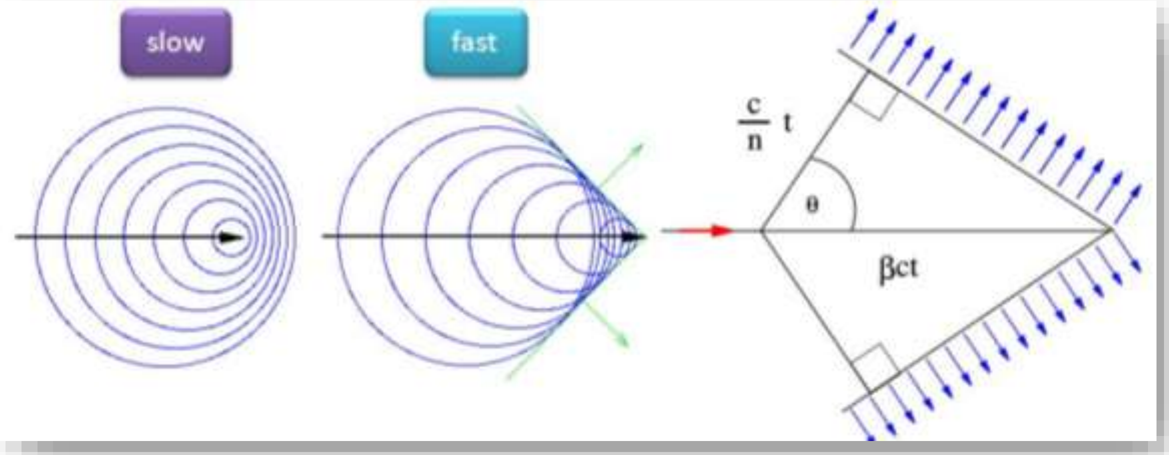



- ❑ 穿过同一组时间飞行仪的带电粒子，如动量相同，其时间差反应其质量之差：

$$\Delta t = t_1 - t_2 \simeq \frac{Lc}{2p^2}(m_1^2 - m_2^2)$$

## ➢奇伦科夫辐射原理




- 当带电粒子穿过某介质，且其速度高于介质内光速，产生奇伦科夫辐射
  - 介质内分子被带电粒子极化变为双极子（dipoles）
  - 双极子震荡产生奇伦科夫幅射光

- 奇伦科夫光的辐射角取决于带电粒子速度和介质的折射率：

$$cos\theta = \frac{1}{\beta n}$$

- 介质的折射率决定了特定粒子发生奇伦科夫光辐射的动量阈值：

$$P_{threshold} = \frac{mc}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

奇伦科夫光阈值探测器

- 已知介质，已知动量，通过测量角度可获取粒子质量（种类）：

$$\beta = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2c^2}}$$

奇伦科夫光环成像探测器（RICH）

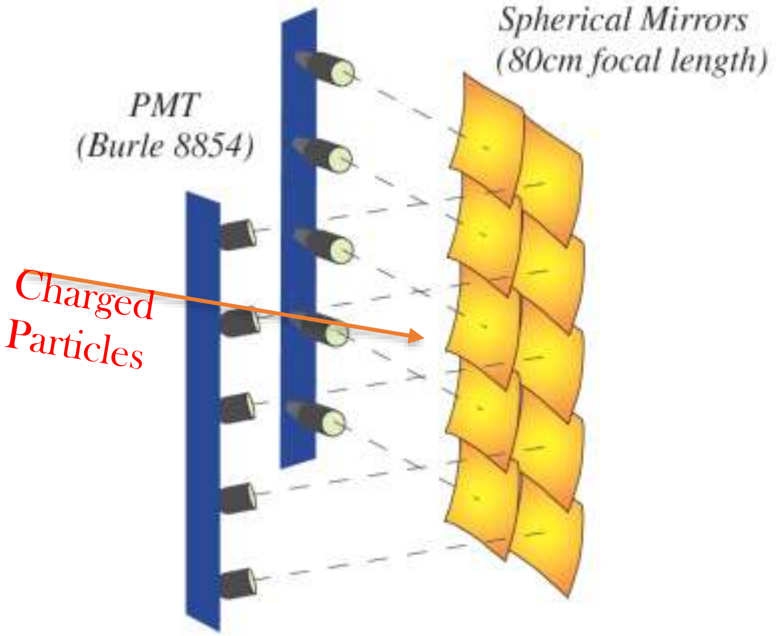
# 奇伦科夫探测器



## ➢奇伦科夫辐射原理

- ❑ Hall-A Gas Cherenkov Detector was tuned to allow electrons with 18 MeV/c to emit light, while pions requires 4.3 GeV/c

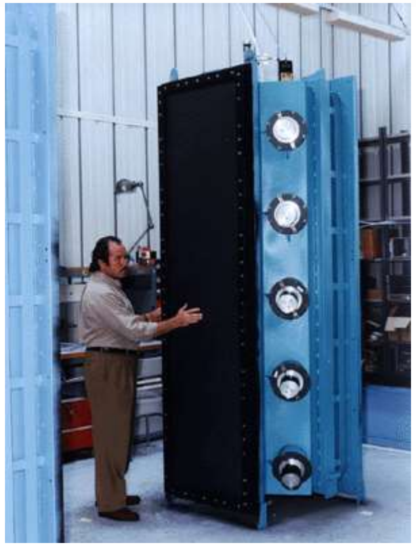
$$P_{threshold} = \frac{mc}{\sqrt{n^2 - 1}}$$




Cherenkov lights are focused by mirrors and reflected to the PMT

| radiator | index | Threshold (GeV/c) e | π | K | p |
|---|---|---|---|---|---|
| quartz (DIRC) | 1.473 | 0.00048 | 0.13 | 0.47 | 0.88 |
| aerogel (mRICH) | 1.03 | 0.00207 | 0.57 | 2.00 | 3.80 |
| aerogel (dRICH) | 1.02 | 0.00245 | 0.69 | 2.46 | 4.67 |
| $C_2F_6$ (dRICH) | 1.0008 | 0.01277 | 3.49 | 12.34 | 23.45 |
| $CF_4$ (gRICH) | 1.00056 | 0.01527 | 4.17 | 14.75 | 28.03 |

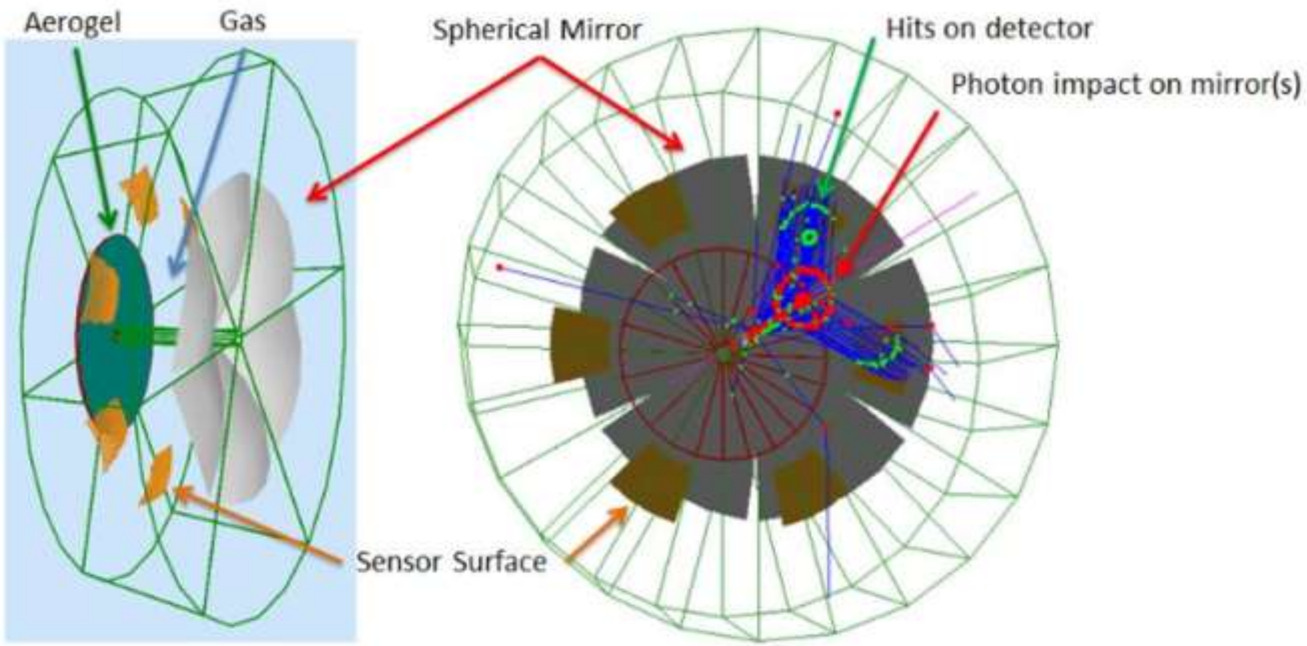
**Table 11.40:** Table of Cherenkov thresholds for various media.



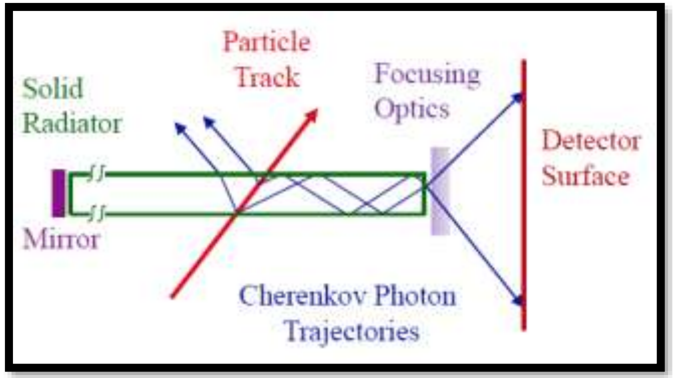
## ➢奇伦科夫辐射原理

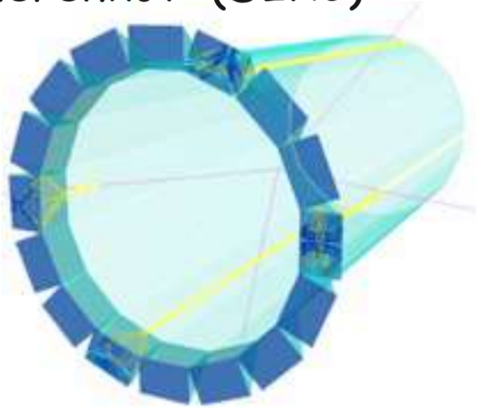
- ❑ Ring Image Cherenkov Detector

$$cos\theta = \frac{1}{\beta n} \qquad \beta = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2c^2}}$$

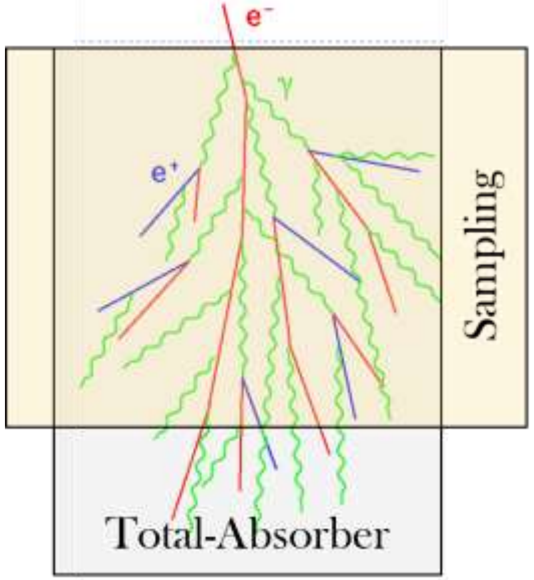



- ❑ Detector of Internal Reflective Cherenkov (DIRC)

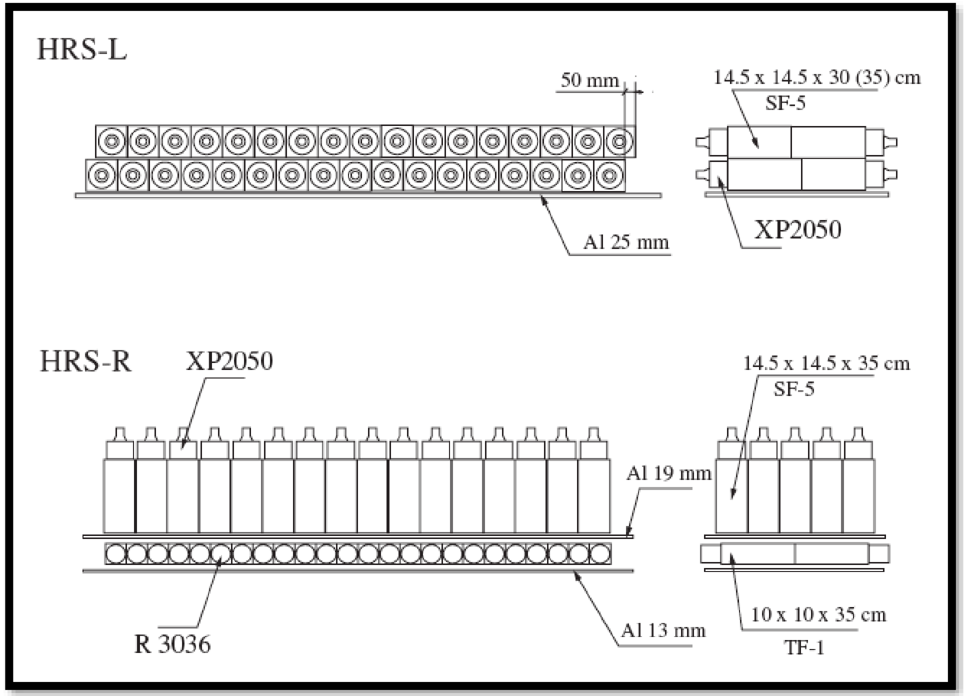


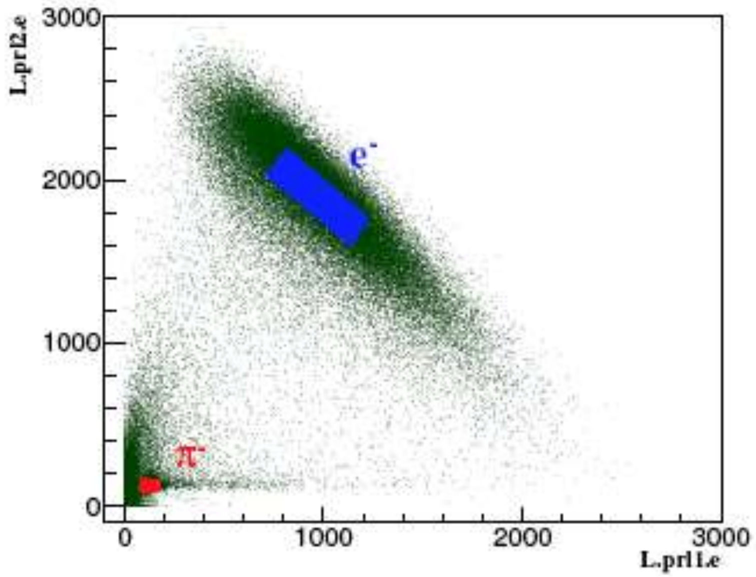
## ➢电磁量能器（EM Calorimeter）




- ❑ 光子，正负电子穿过致密材料会释放大部分能量（电磁雪崩过程，包括电离，韧致辐射，电子对产生等）
- ❑ 强子主要在EMCal里留下电离能；需要更厚的致密材料才发生雪崩过程.
- ❑ 要求：致密+透明，如PbWO4 Crystal or Pb-Glass ； 光由底部光电倍增管读出.
- ❑ 一般使用双层结构（PreShower + Showr)


Electrons are more easily develop EM cascade even in the first layer

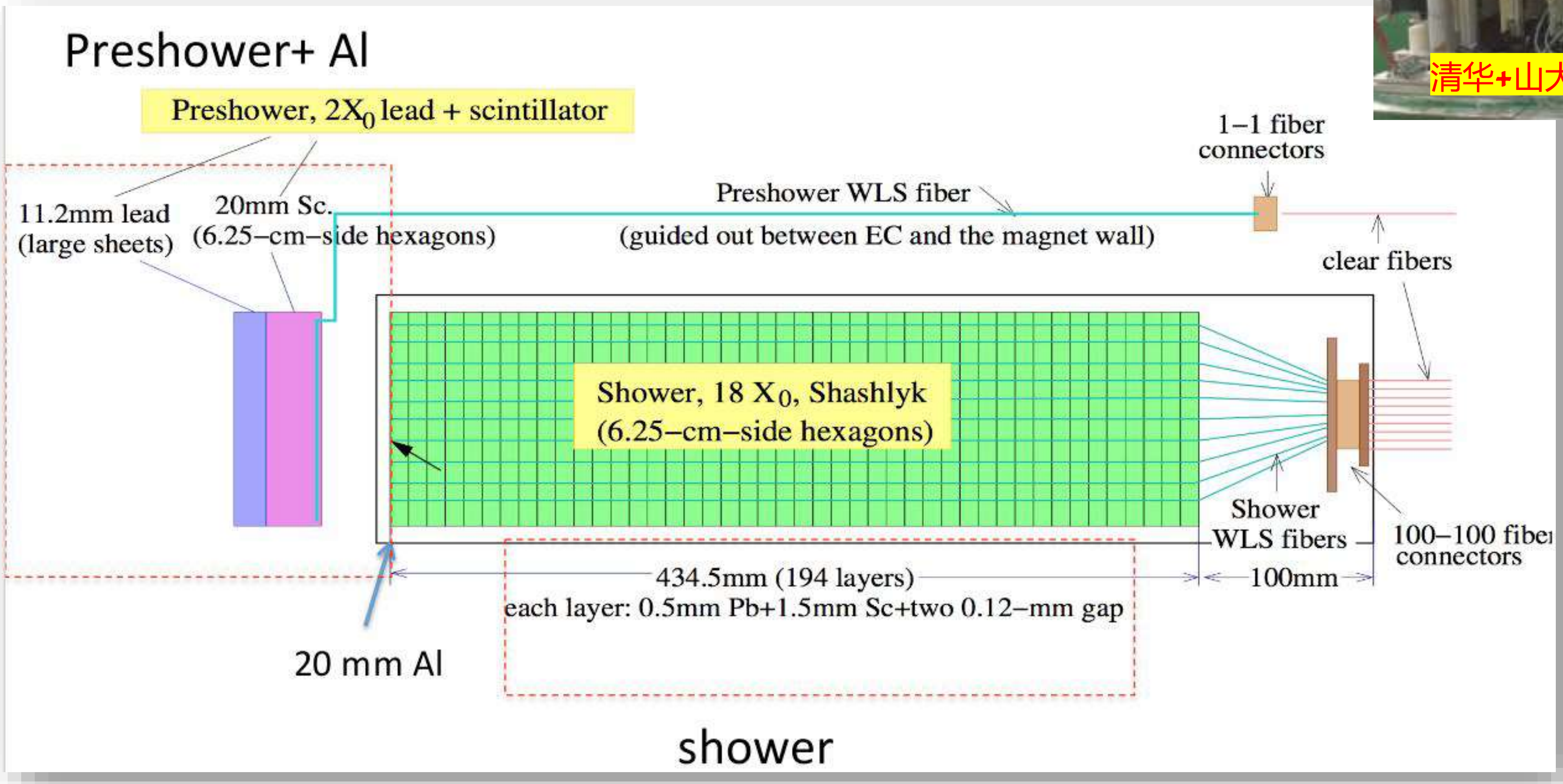



Pions most likely develop their energy only via ionization in the first layer;

# 量能器

## ➢Shashlyk采样行电磁量能器（Shashlyk EMCal）

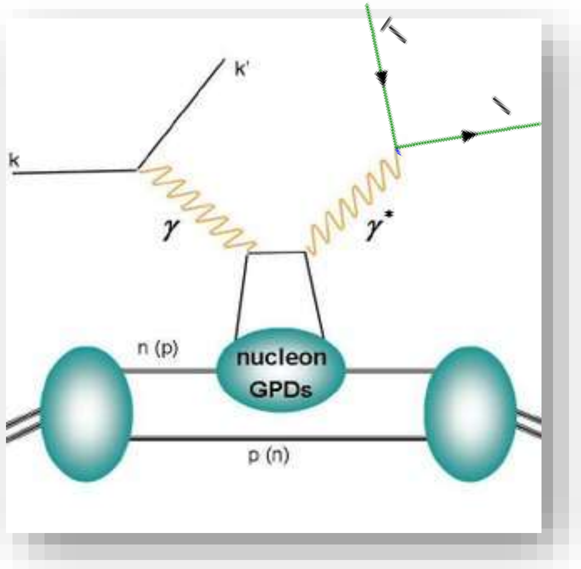
- ❑ Shashlyk Type：（铅板+塑闪...）叠加; 透明光纤引出光+光电倍增管读出信号
- ❑ 能量分辨率低
- ❑ 便宜；维护容易

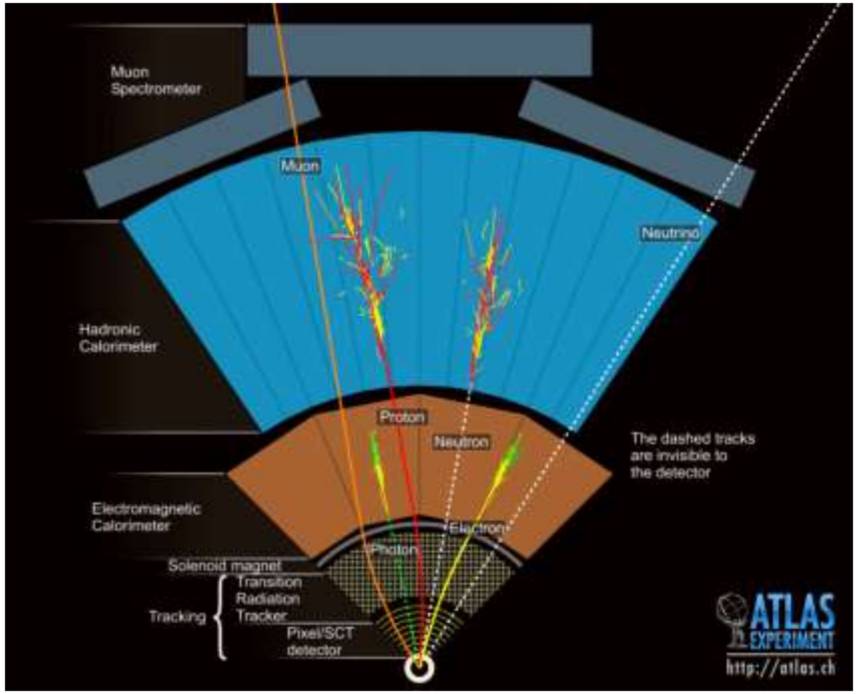

# 其他探测器系统

## ➢缪子探测器系统

- ❑ 缪子（Muon）是“重电子”，物理性质几乎一样，只是更重 (105.66 MeV) 和不稳定 (2.2 us)
- ❑ 一些物理测量里面，测量正负缪子比测量正负电子更加干净




✓如Double-DVCS对GPD的测量
✓电子容易与其他背景混淆：
  ✓光子及其容易产生正负电子对
  ✓各种电离过程容易产生电子

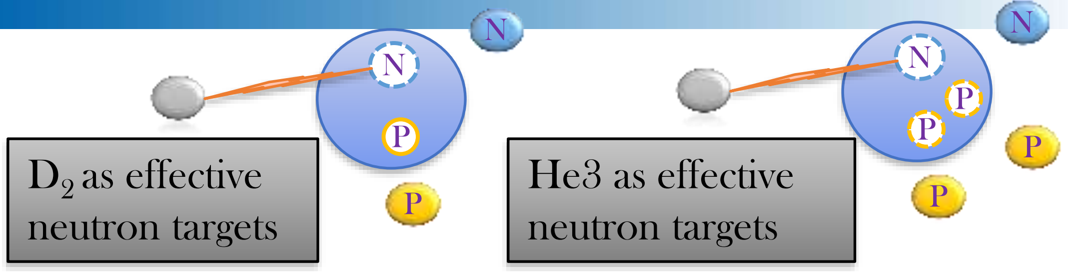



- ❑ 缪子可以产生电离信号，但是很难产生轫致辐射（电磁雪崩及其困难）
- ❑ 利用其极强的穿透能力，设计特殊的缪子探测器系统进行精确测量

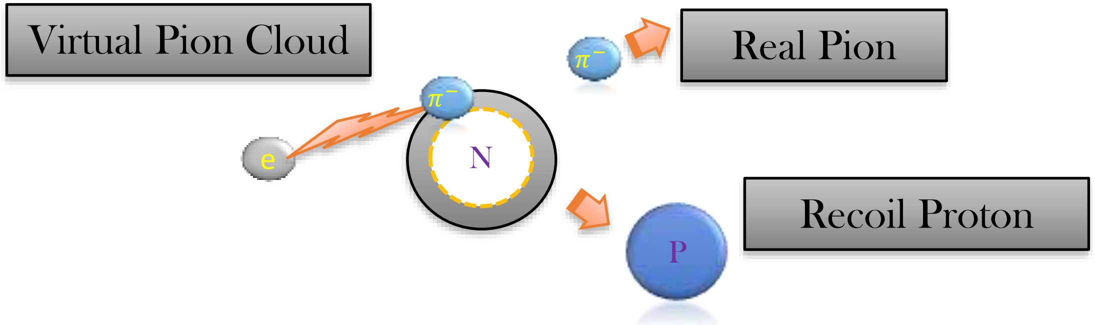
# 其他探测器系统

## ➢反冲核子探测器系统（固定靶）

- ❑ 利用D2或He3作为“有效中子靶”，有时需确定电子击中的是中子并测量其动量

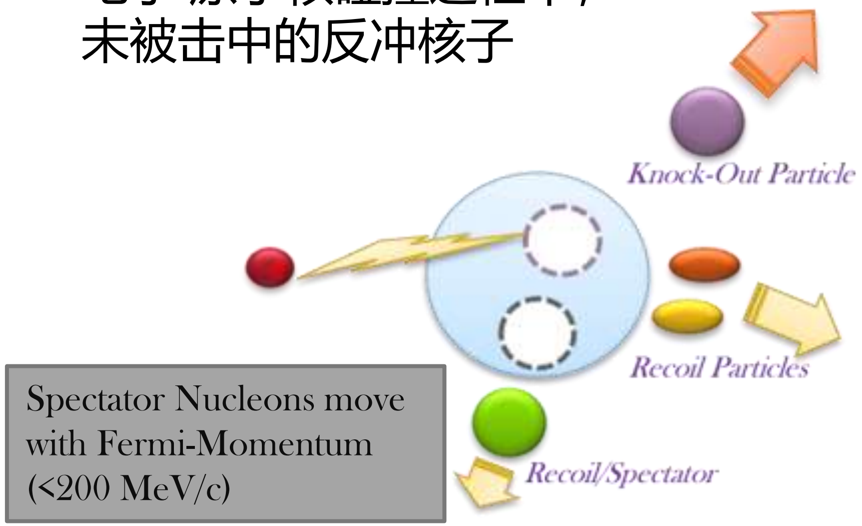



- ❑ 测量Pi介子和K介子的结构，电子击中的核子外部的Pi和K，留下低能反冲核子

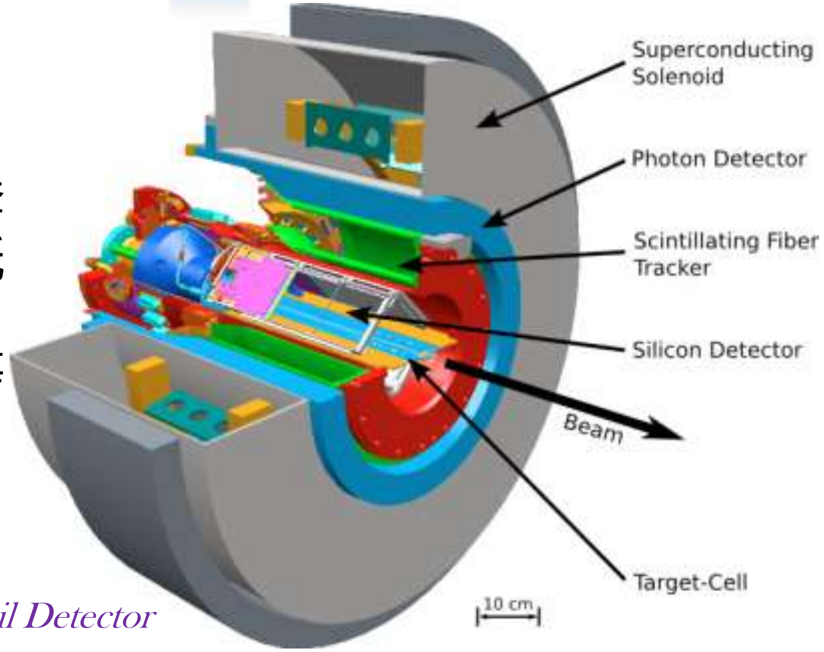



- ❑ 反冲核子一般能量极低，难以穿透靶区


- ❑ 电子-原子核碰撞过程中，未被击中的反冲核子




- ❑ 针对气体靶，设计一套微型探测器系统，对低能核子进行轨迹重建，时间测量，粒子甄别等



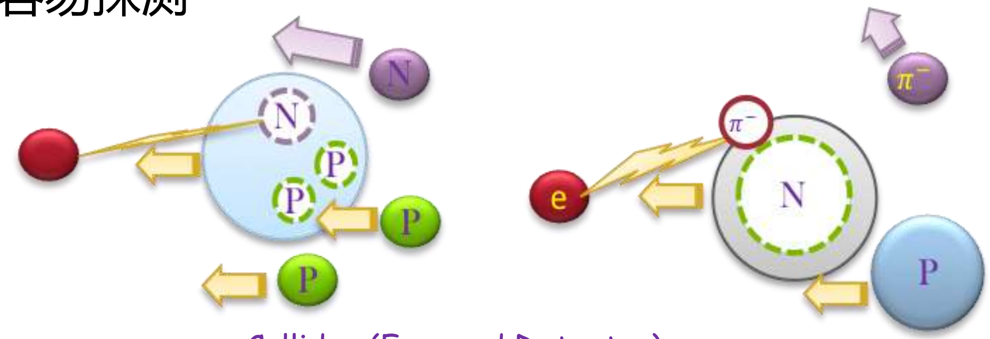

*HERMES Recoil Detector*

# 其他探测器系统

## ➢反冲核子探测器系统（对撞机）

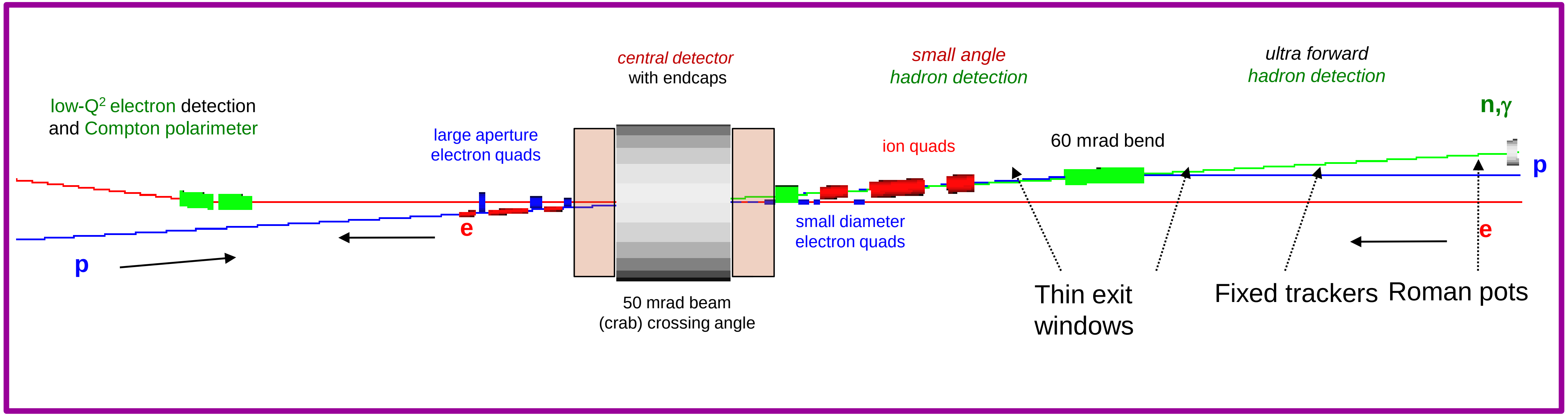
❖ 在对撞机系统里，反冲核子拥有高动量（来自加速器）→更容易探测


Fixed Target (Recoil Detector)




Collider (Forward Detector)

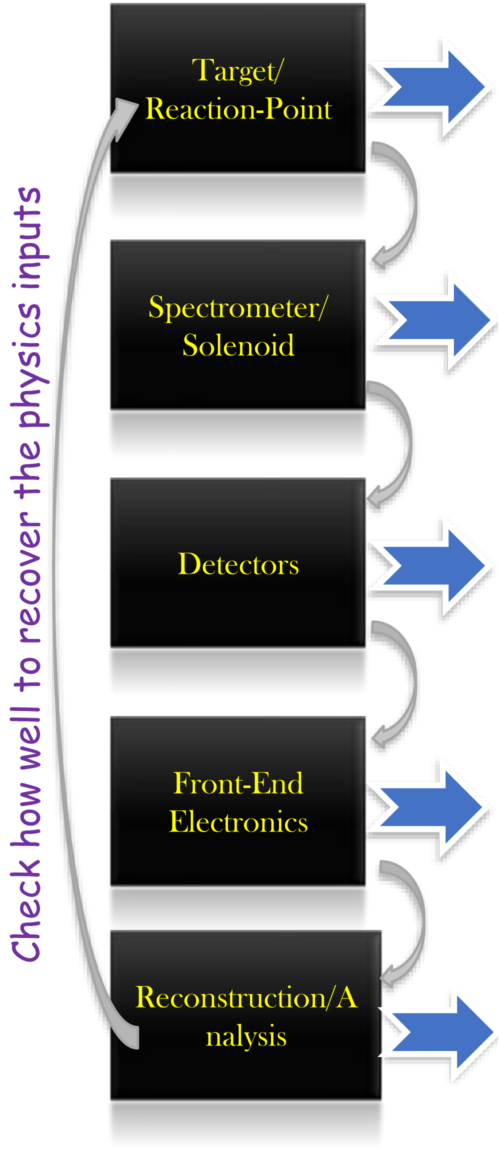
❖ 一般在对撞点远端（100m），探测器系统结合加速器系统，进行反冲核子的测量



# Monte-Carlo Simulation

## ➢ General Idea:

❖ A Monte-Carlo Simulation is basically like running an experiment in your computer




Simulate the physics reaction w/ model inputs

Simulate how particles travel in a EM field

Simulate how detectors respond to particles

Simulate how detectors signals converted into different electric signals

Reconstruct physics quantities after building in "actual effects" (energy-loss, background, detector resolution, etc.)

❖ Many application
- ✓ Design experiments
- ✓ Design detectors
- ✓ Evaluate detector/electronics performance
- ✓ Help pre-processing of the online experimental data
- ✓ Apply correction and evaluation uncertainties to real data

❖ Software and Tools
- ✓ Event Generators for dedicated physics processes (w/ theory models)
- ✓ Fast simulation to study particles propagating through EM fields and materials (DYI codes)
- ✓ Sopesticated MC simulation, using Geant4