低温高密核物质测量谱仪的研制

CSR-External-Target-Facility Experiment (CEE)

许 怒

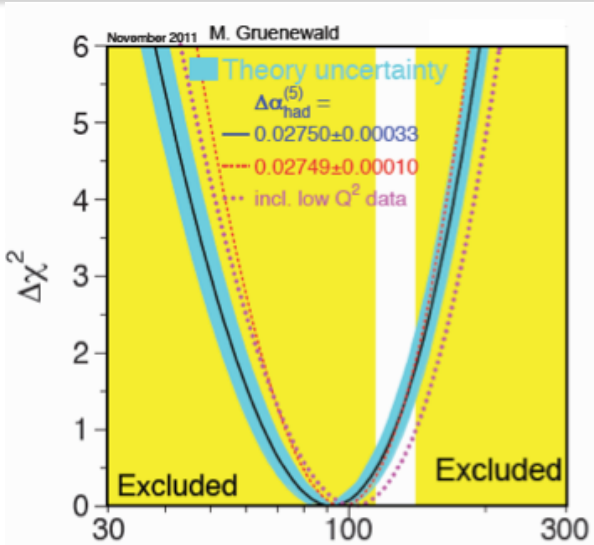
华中师范大学

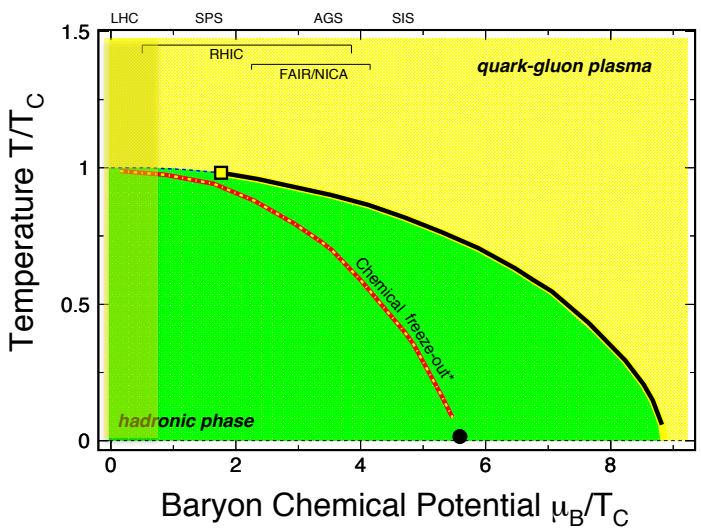
华中师范大学，清华大学，中国科学技术大学
中国科学院近代物理所，中国科学院上海应用物理所

提 纲

1. 科学意义
2. 国内外现状
3. 拟研制科研仪器设备描述
4. 预期目标
5. 已有基础
6. 技术方案

21世纪量子色动力学 (QCD)





(1) Higgs 粒子发现 –

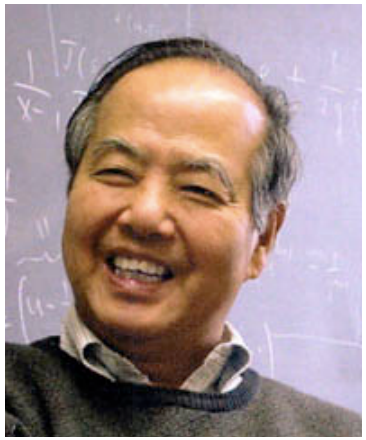
- 质量起源
- 标准模型 (Standard Model)
  ➔标准理论(Theory)

(2) QCD 相结构 –

- 夸克禁闭
- 手征对称自发破缺
- 临界点，相边界
- 核子螺旋度结构
- …
- 小x区非线性QCD
- …

QCD的“涌现”特性
emergent properties

科学问题



李政道

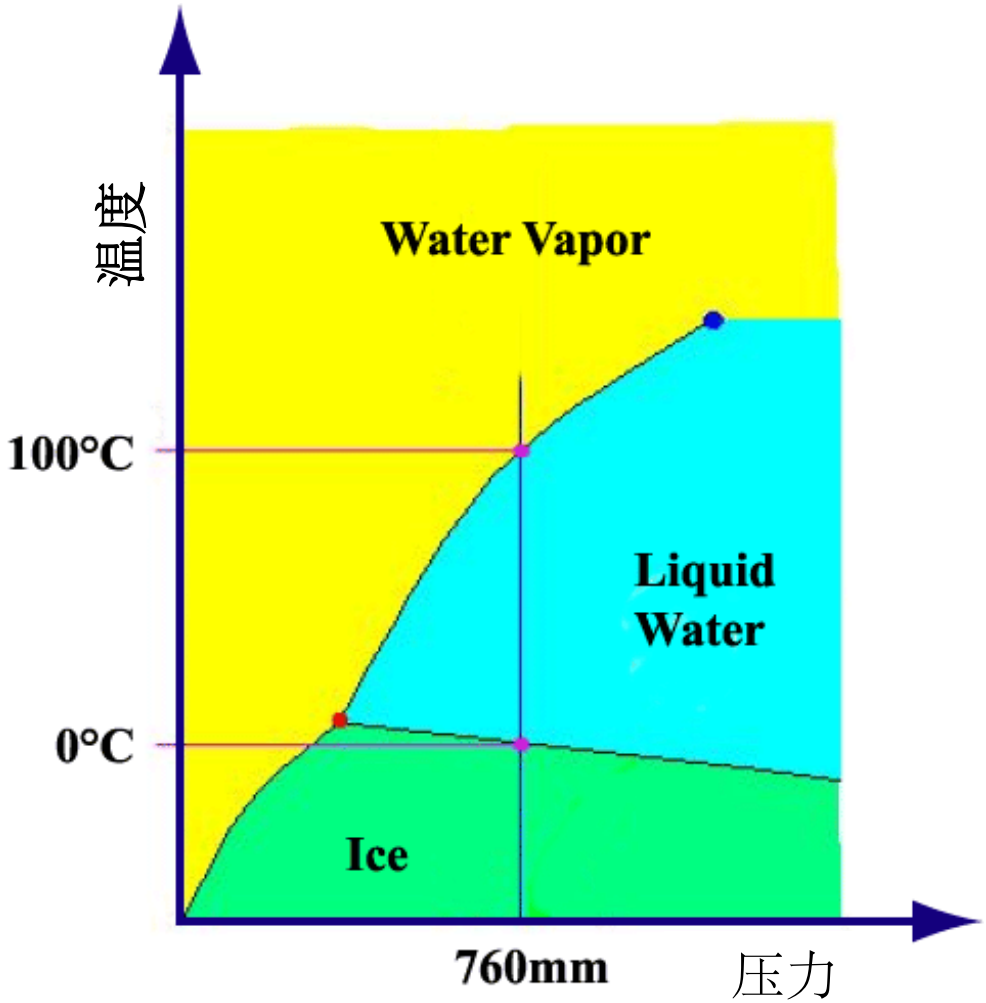
- 本世纪物理中的重大疑难问题之一 **夸克禁闭:**
  夸克是物质产生的基本单元.
  夸克禁闭在强子中，尚未发现自由夸克:
  $\Delta v_0 \sim 1\ fm^3$, $\rho_0 \sim 0.16\ fm^{-3}$, $\varepsilon_0 \sim 0.15\ GeV/fm^3$

- **重离子对撞物理**: **大体积，热密系统**
  $\Delta v \sim 1000\ fm^3 = 1000\ v_0$
  $\rho >> 3\ fm^{-3} \sim 20\ \rho_0$
  $\varepsilon >> 3\ GeV/fm^3 \sim 20\ \varepsilon_0$
  $\Longrightarrow$ 夸克胶子等离子体 **(QGP)**

  ➔ ***QGP:*** *"夸克，胶子在大体积内自由"运动的物质新形态*
  ➔ ***QCD*** *相结构*

- **与其他领域的联系:**
  宇宙学与天体物理, 宇宙起源与演化，部分子量子统计

相图



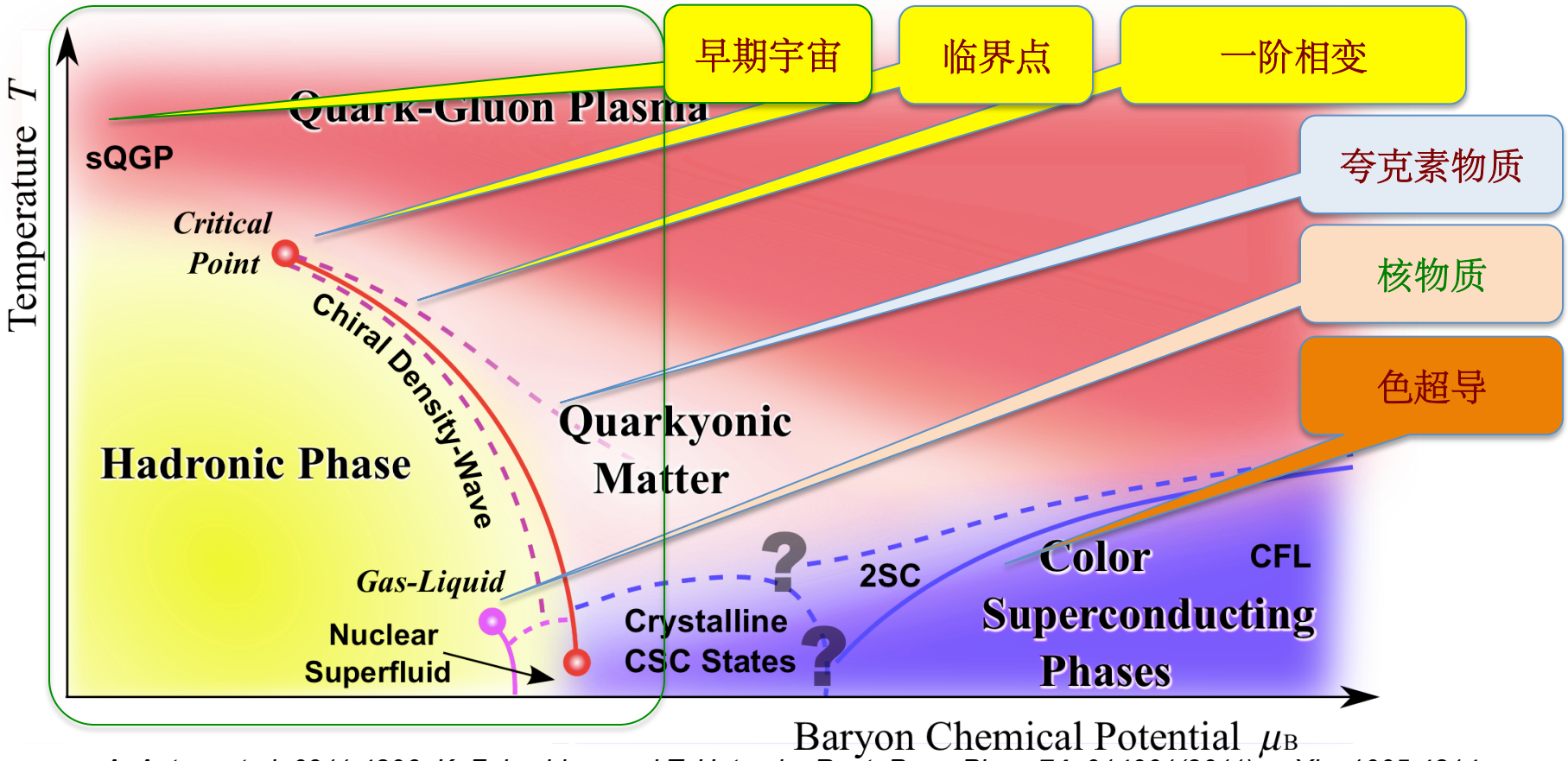
相图: 显示对于给定自由度，在外部条件下，物质如何自组织的规律。

水: H_2O

QCD 相图: 夸克胶子自由度(色自由度) 的物质结构.

(E. Fermi, 1950)

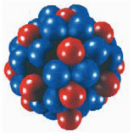
QCD 相结构示意图



*A. Anton, et al. 0911.4806; K. Fukushima and T. Hatsuda, Rept. Prog. Phys. **74**, 014001(2011); arXiv: 1005.4814*

1）低温、高重子密度. 夸克, 强子相互作用

2）丰富的物理内涵：相结构、中子星、色超导、夸克素物质

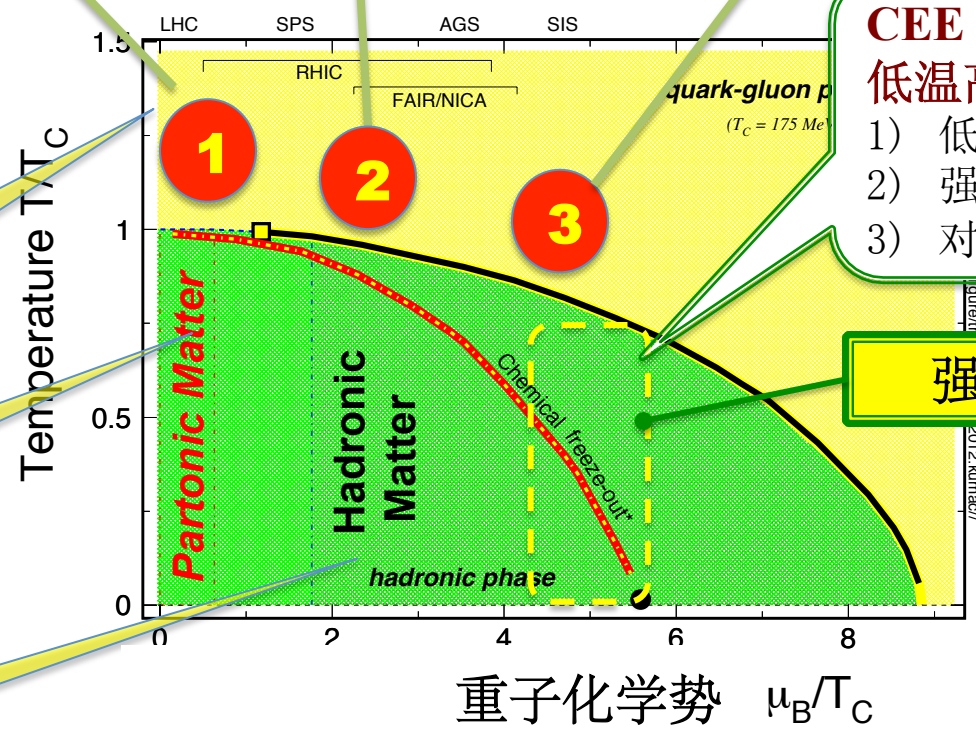


QCD相结构示意图

1 T_{ini}, T_C **LHC, RHIC**

2 T_E **RHIC, SPS**

3 **Large μ_B FAIR, CSR**



CEE 兰州重离子加速器
低温高密核物质测量谱仪
1） 低温、高重子密度
2） 强子相互作用
3） 对称能$E_{sym}(\rho)$

早期宇宙
发展演化

部分子物质
(QGP)

强子物质

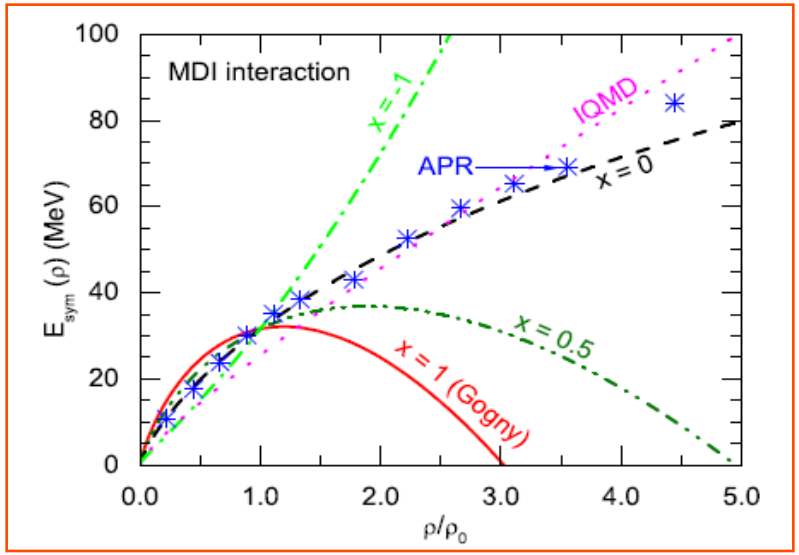
强关联核物质

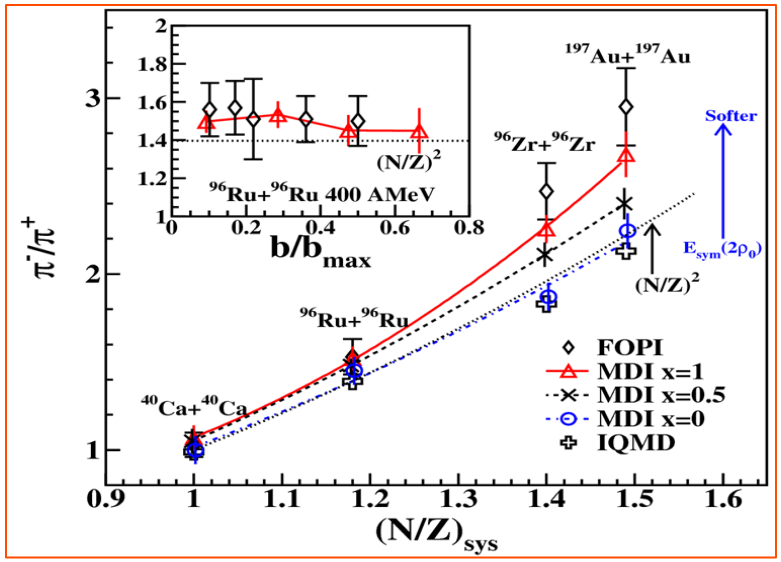
T_C=175 MeV ≅2*10^{12} K

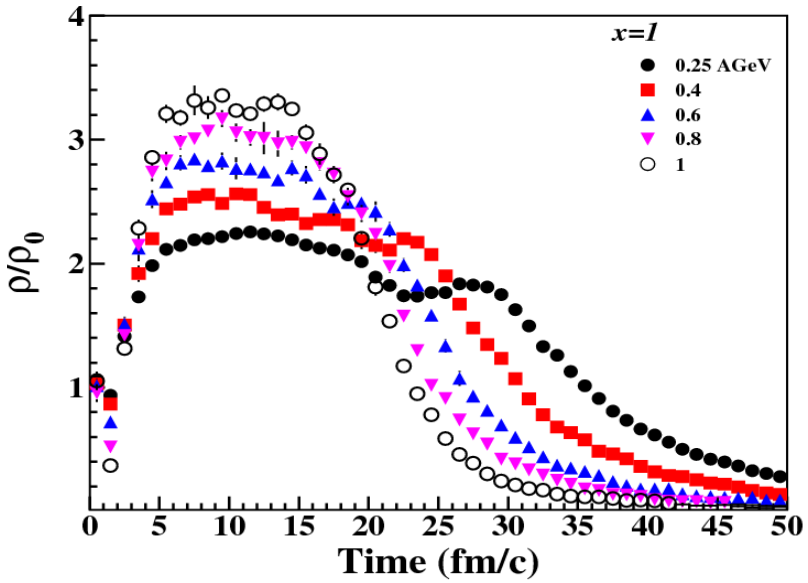
科学意义与现状

非对称核物质状态方程

M. Zhang, ZG. Xiao, et al., PRC 80 (2009) 034616； F. Fu， ZG. Xiao, et al, PLB 666 (2008) 359







对称能随密度的依赖行为

→ 是核物理和天体物理的重要输入

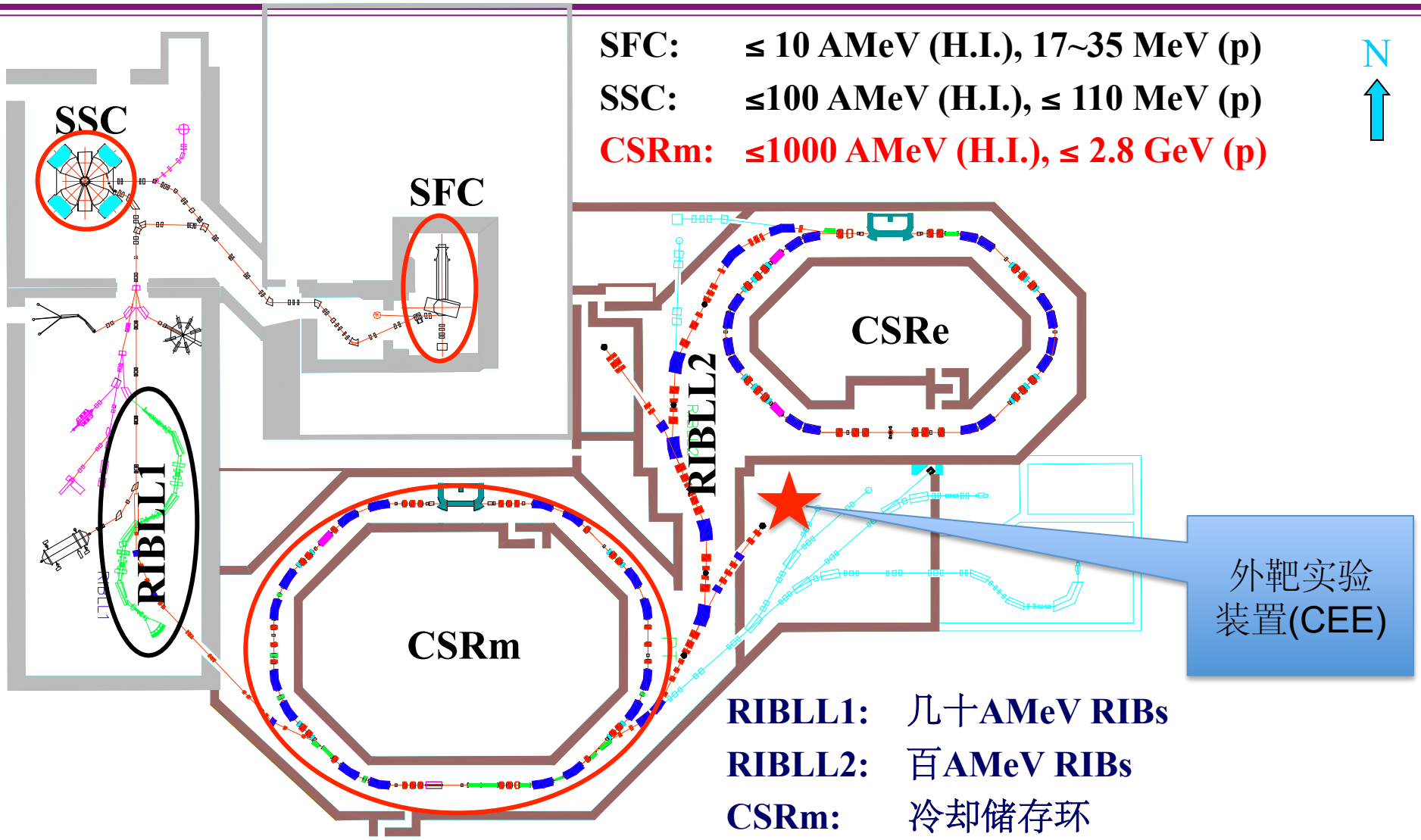
→ 也是核物质相图的一个重要部分

→ 主要核物理实验室研究的前沿课题

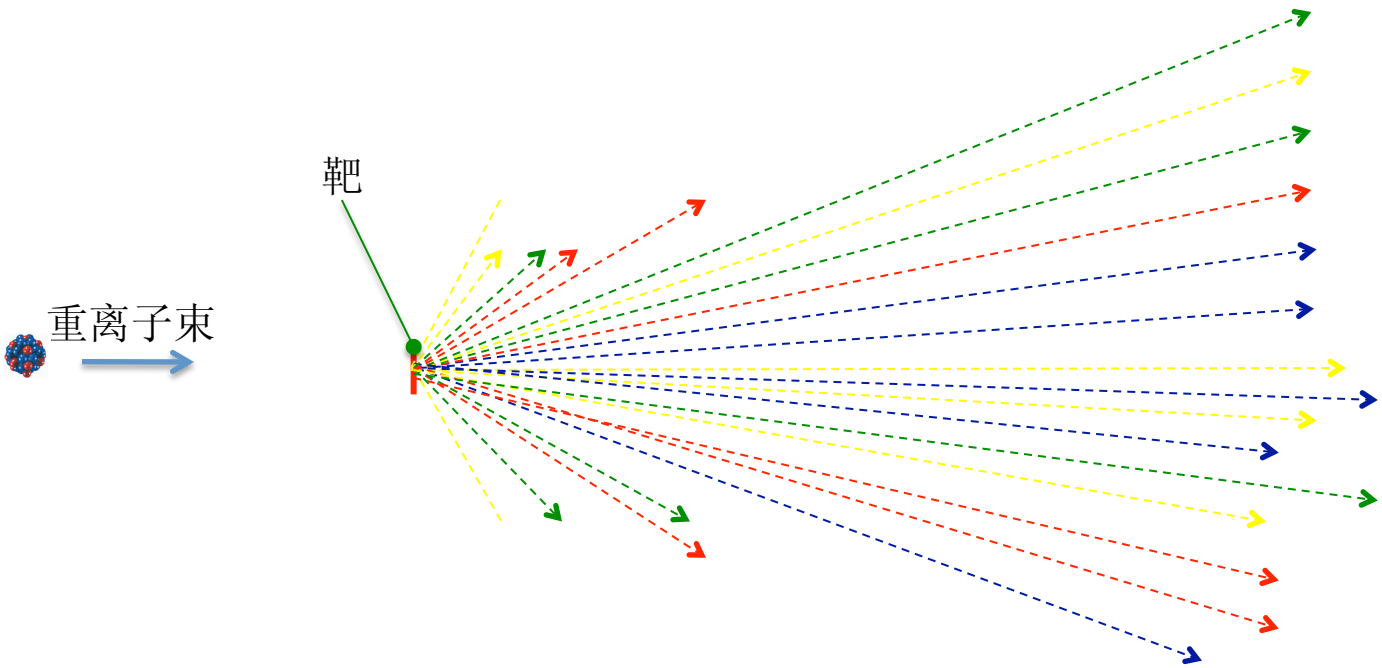
HIRFL-CSR: $\rho \sim 2\rho_0$密度区，观测量对E_{sym}灵敏度最大，**是研究$E_{sym}(\rho)$的理想能区**

现状

HIRFL-CSR 重离子加速器

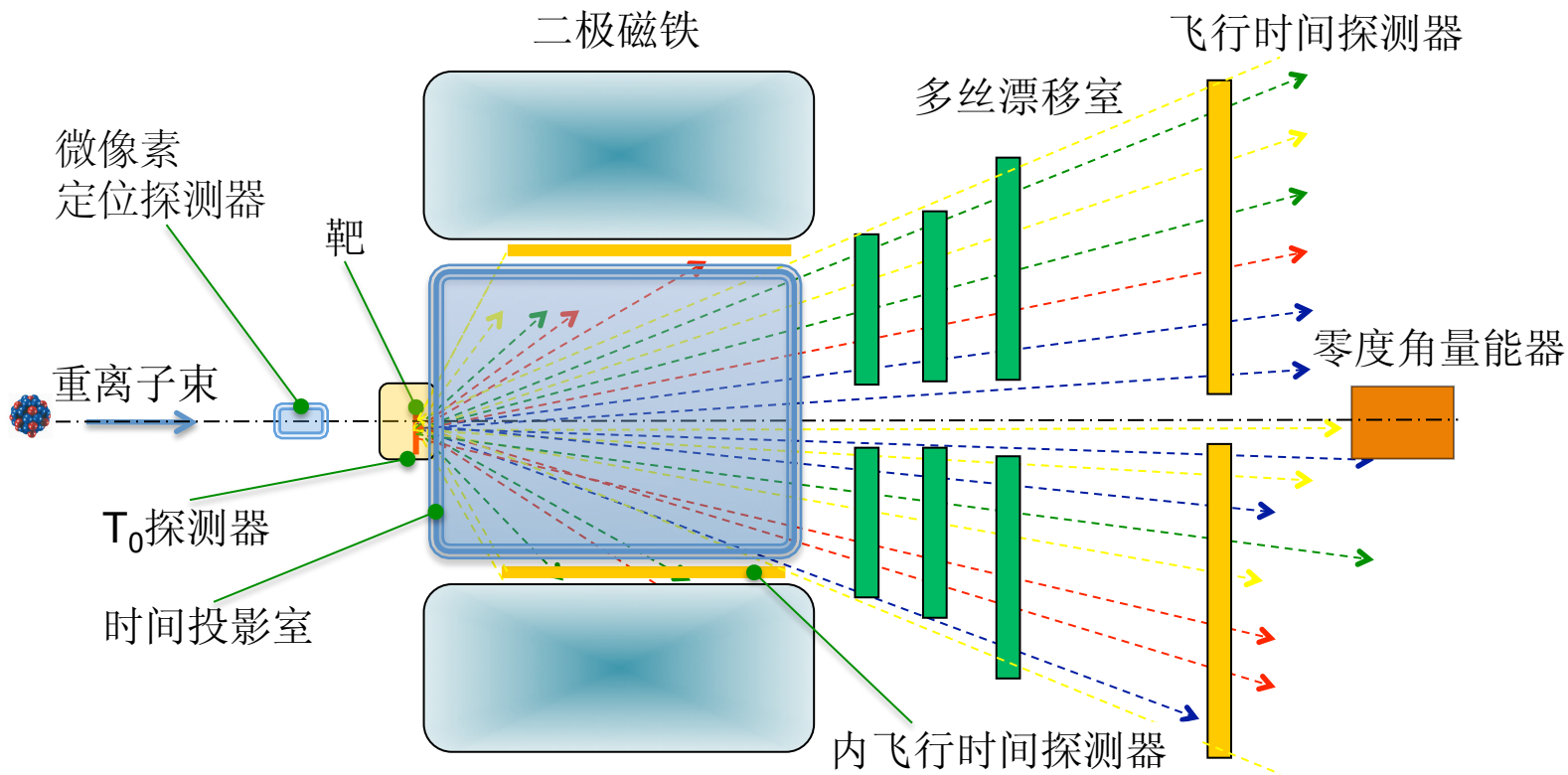


CEE 概念性设计



CEE 概念性设计

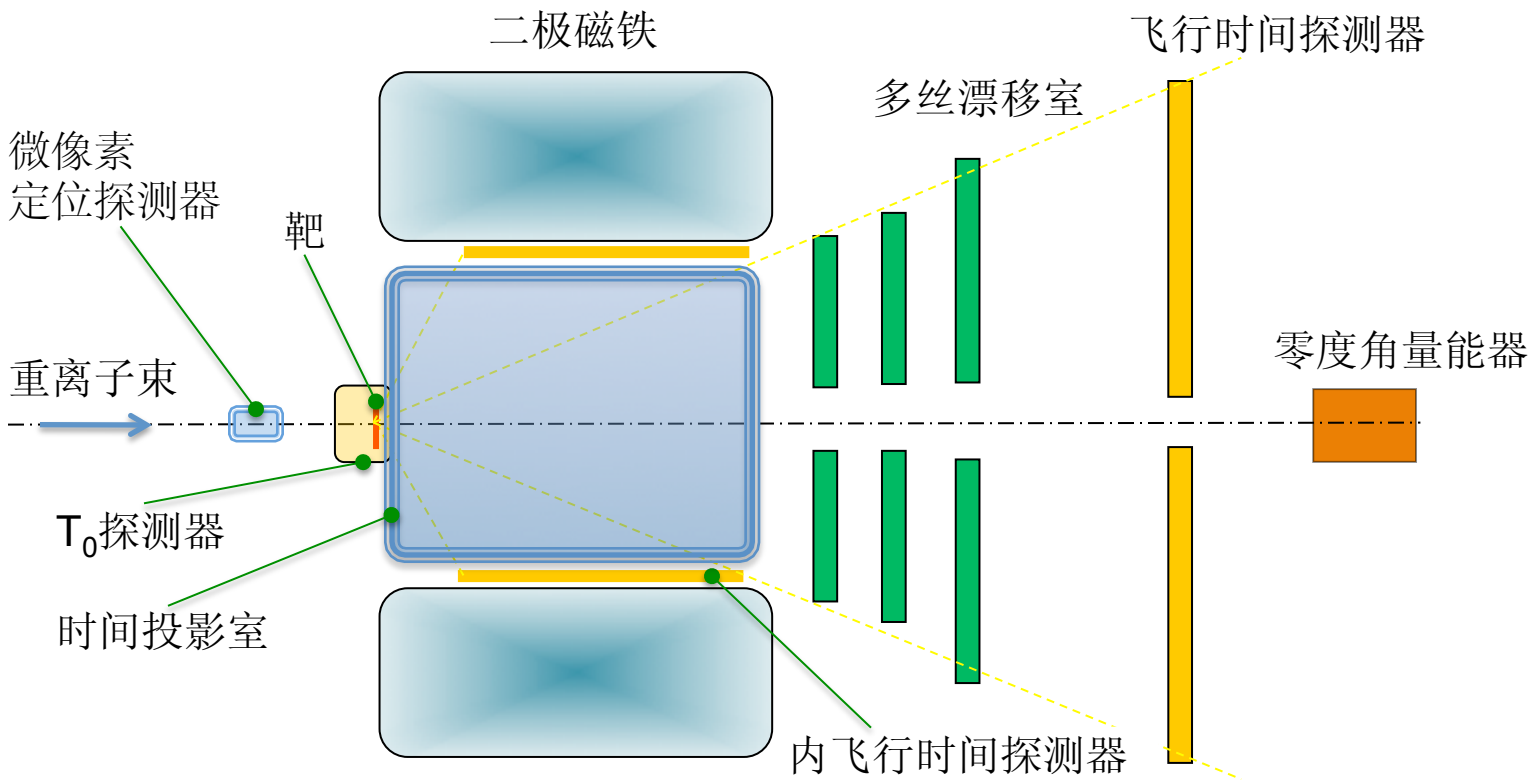
低温高密核物质测量谱仪（CEE）



多功能中高能重离子物理实验谱仪

CEE 概念性设计

低温高密核物质测量谱仪（CEE）



技术亮点:

1）微像素定位探测器（华中师范大学、中科院近代物理研究所）
2）高计数率高精度飞行时间探测器（清华大学、中国科学技术大学）
3）高精度三维径迹探测器TPC（中科院上海应用物理所）
4）新型数据获取系统（中国科学技术大学）

预期目标

项目目标与意义

利用当前最新探测技术在中国建立一个功能完善的中高能重离子物理实验通用谱仪：

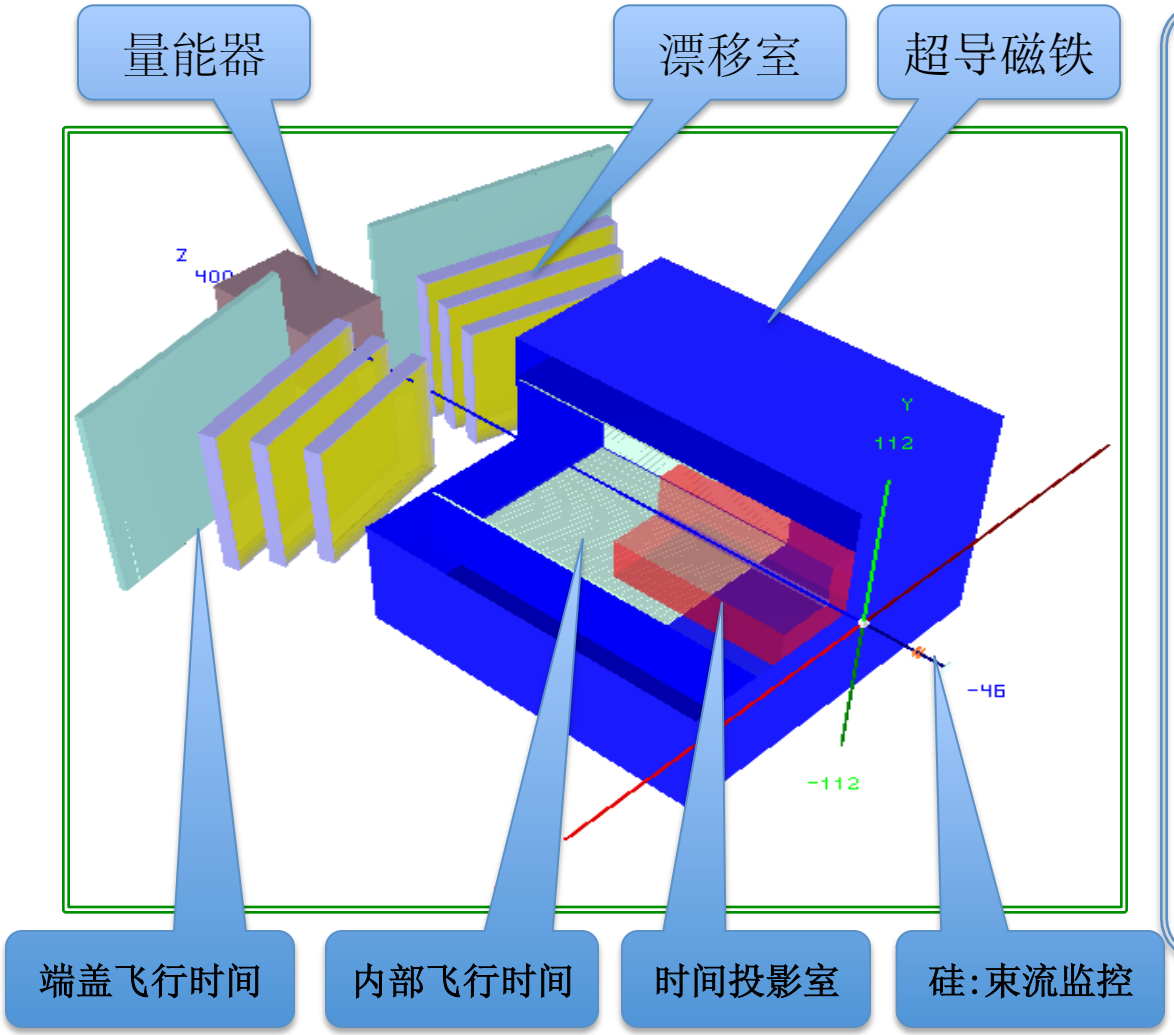
1）研究高重子密度下的QCD相结构和对称能(新物理)

- 系统研究:*C+C*, *Ca+Ca*, … , *U+U* 碰撞
- 粒子产额，包括π介子，核子，轻核
- 方位角分布：v_n：*n=0*, *1*, *2*, *3*
- 净电荷 Δ_{ch}, 净质子数 Δ_p 涨落

2）研发和应用最新探测器技术（新技术）

3）凝聚一支中高能核物理团队，培养下一代核物理科学家

谱仪结构及创新点

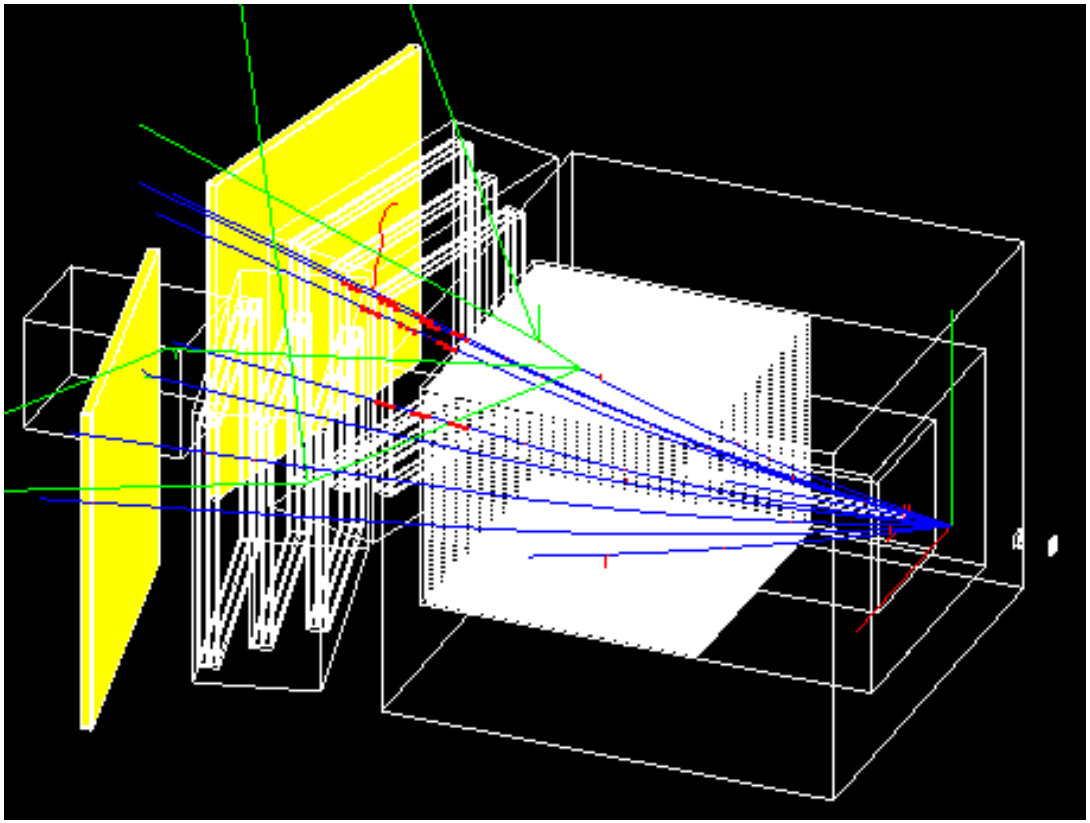


→ 大接收度、通用特色、新物理

→ 多种新型探测技术技术突破

→ 先进的电子学和数据获取系统, 面向将来

谱仪结构及技术方案



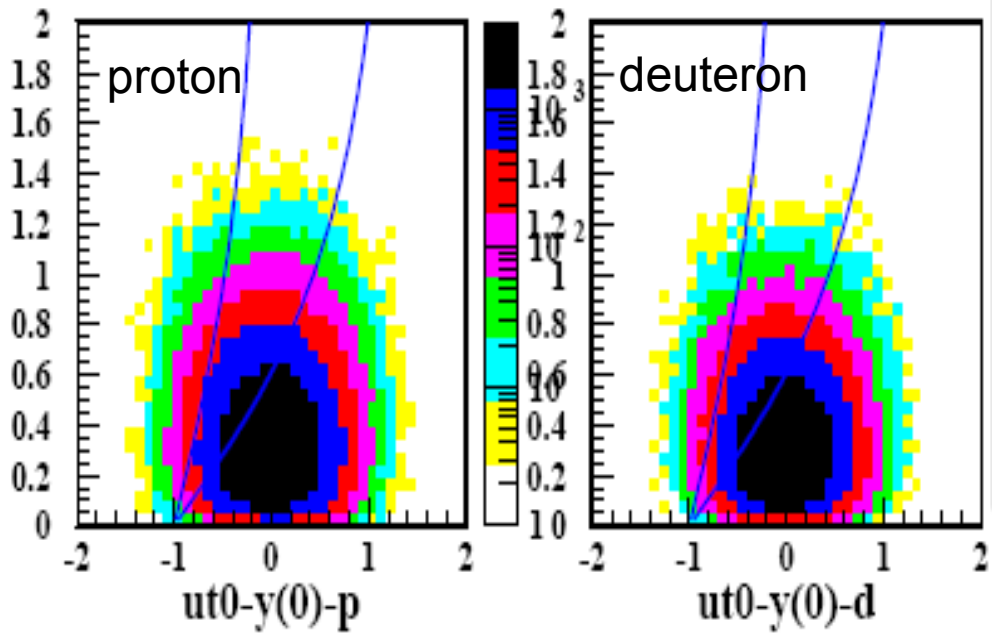
- → 磁铁，大面积漂移室, **TPC, MRPC** *自主研发*
- → 硅像素，**ZDC** *国际合作研制*
- → 先进的读出电子学和数据获取系统 *自主研发*

这将是国际上这一能区性能最好的通用大型谱仪

CEE技术路线与主要技术指标

CEE总体参数:	
总体尺寸(长×宽×高)	5×4×3 m^3
质心系覆盖范围	~ 2π
实验事件率	< 10^4/s
总信号路数	~ 1×10^4

运动学覆盖区间:



物理目标决定技术路线

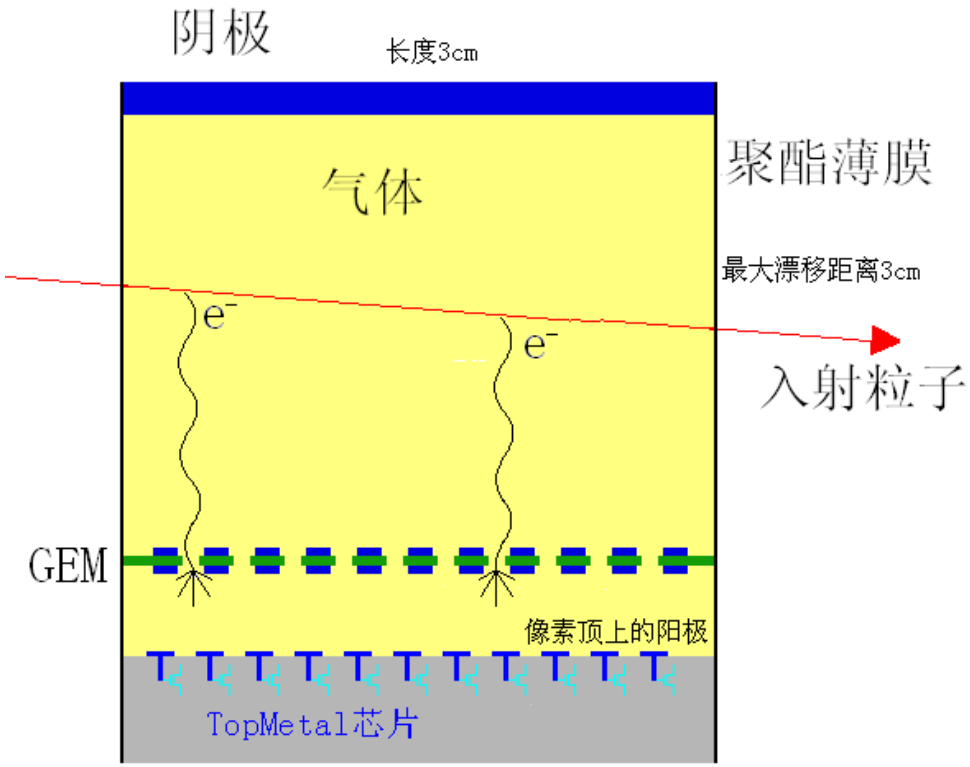
固定靶实验: 超导二极磁铁＋TPC＋iTOF＋MWDC＋eTOF →

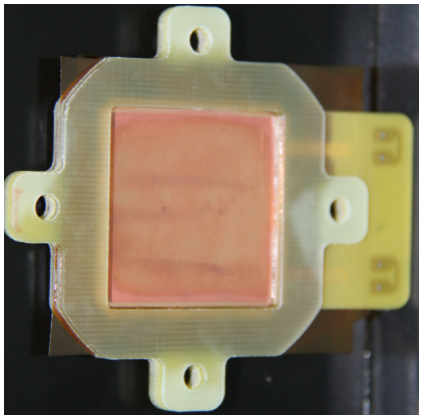
- 探测带电粒子
- 重建衰变粒子(Λ)

事件挑选: 零度角量能器

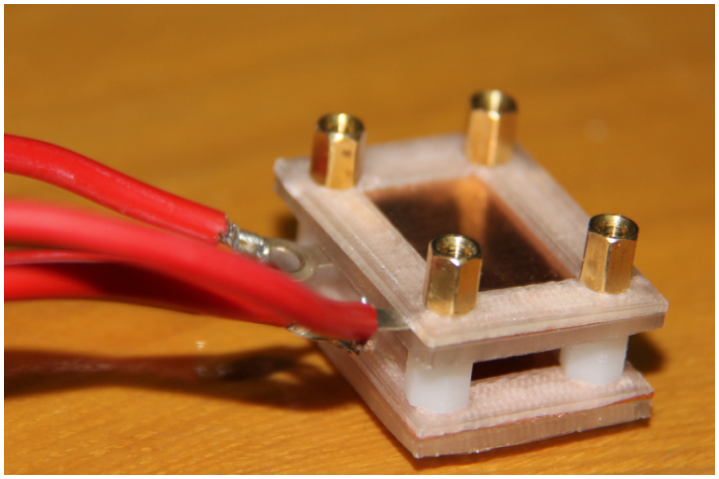
束流监控: 微像素定位探测器

微像素定位探测器





GEM



探测器原型

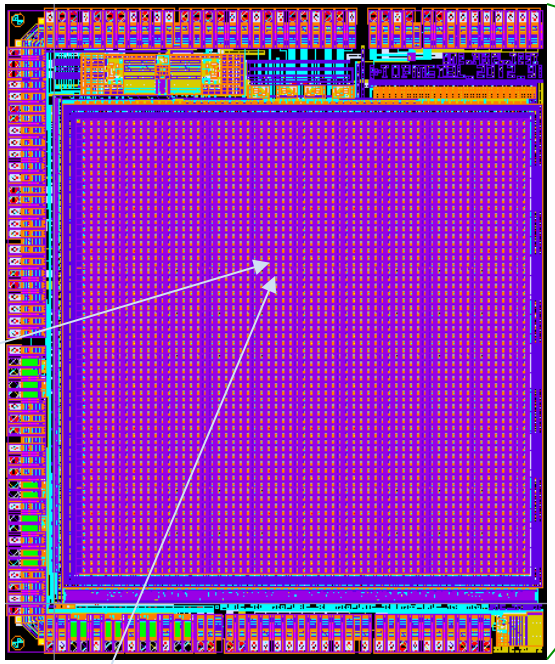
径迹上多个点定位入射粒子。

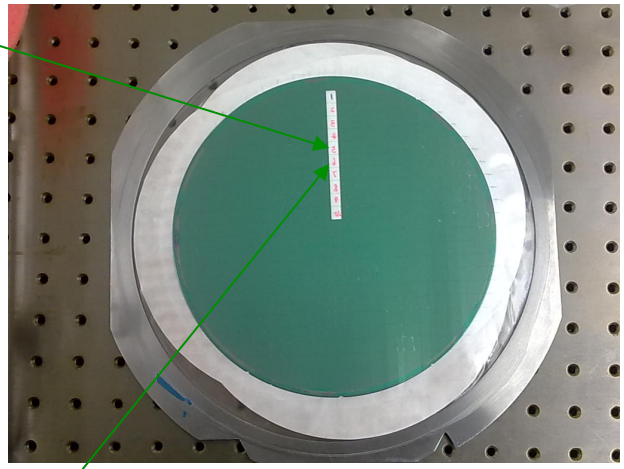
入射粒子位置分辨：≤ 50微米

硅像素探测器的研发及其应用

像素阵列：**64x64**

像素大小：**80x80**微米





顶层金属芯片晶圆

顶层金属芯片**(TopMetal)**的显微镜照片

优势：高集成度，可直接收集空间电子可作为读出芯片连接多种传感器，实现高空间分辨

应用目标：束流监控，高精度TPC, X光成像， CT…

华中师范大学**2010**建设了硅像素实验室，已具有研制该类探测器的基本环境和有关人员。

飞行时间探测器 (TOF)

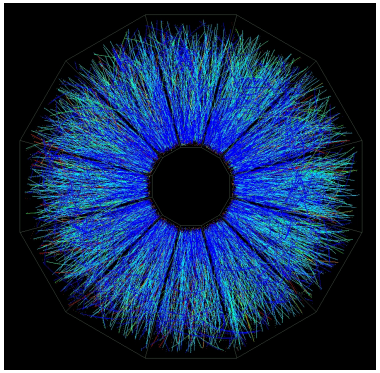
CEE MRPC的主要参数和优势：

1）时间分辨率高：　$\Delta t \leqslant 70ps$
2）高计数率下工作：　$\geqslant$ 70 kHz/cm^2
3）在强磁场中做粒子探测，造价低

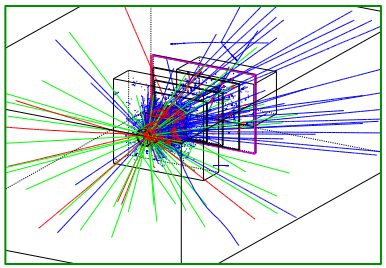
中国STAR合作组在世界上首次研发制造MRPC飞行时间探测器并在STAR实验上应用成功。ALICE和其他国际实验组都采用该新型技术。

应用目标：我们将在CEE上做一个世界一流的飞行时间探测器并参与未来国内国际大型高能实验。

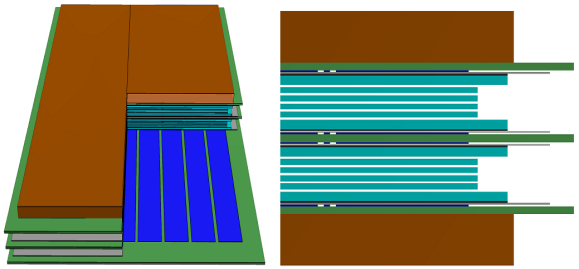
STAR at RHIC



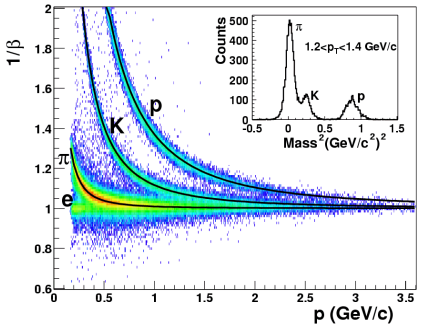
CEE at CSR



MRPC结构

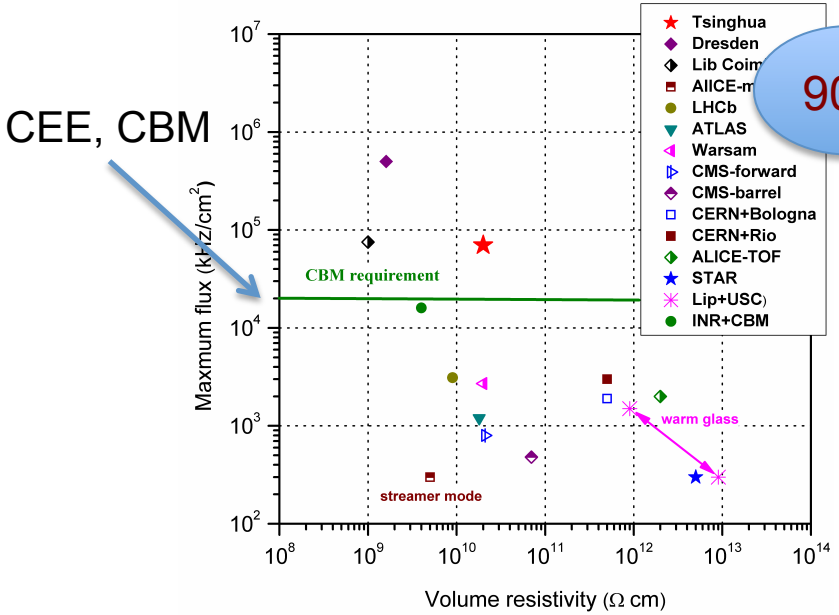


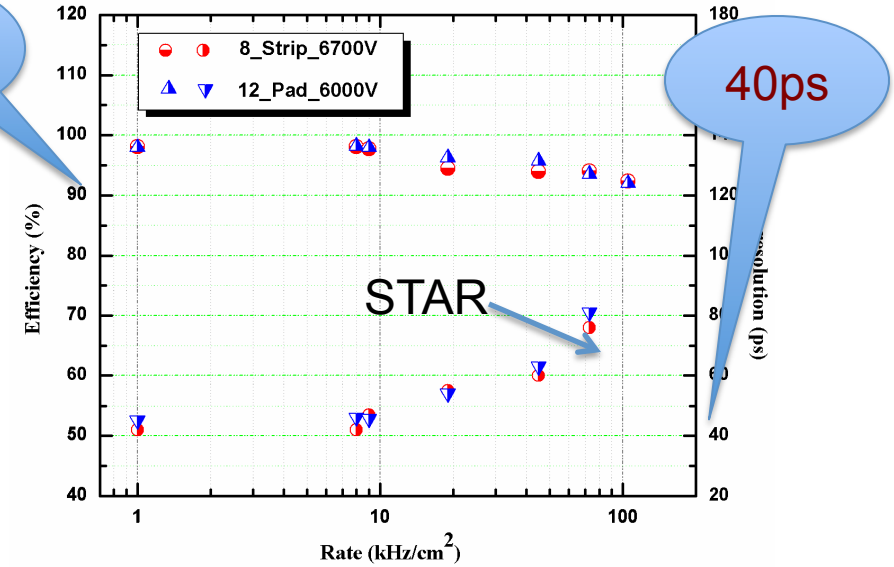
粒子鉴别(STAR)



谱仪描述与预期目标

优良性能:高精度, 高计数率



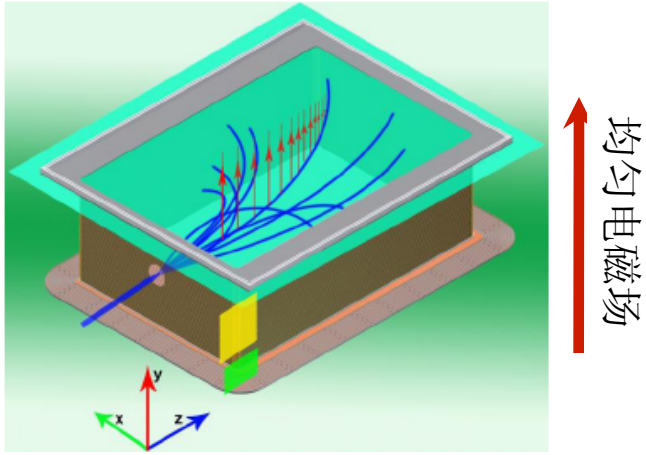


Momentum		500MeV	600MeV	800MeV
Pion sample	MRPC #1	56	47	45
	MRPC #2	51	48	40
	MRPC #3	46	48	45
Proton sample	MRPC #1	29	32	36
	MRPC #2	28	30	35
	MRPC #3	31	31	35

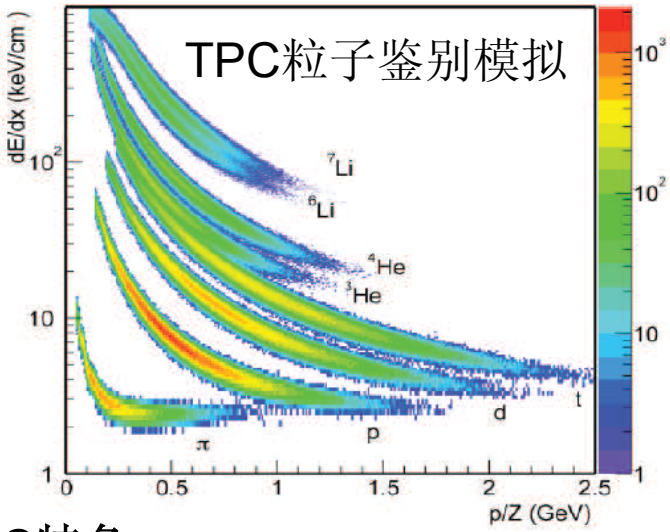
(ps)

时间投影室探测器（TPC）

TPC工作原理



1) 带电粒子在飞行路径上将气体电离，电离出的电子向读出面漂移，并被收集。读出片信号给出3D位置和到达时间
2) 粒子动量由磁场中的偏转轨迹确定，粒子种类由能损及在磁场中的偏转决定
3) 垂直位置由电子漂移时间决定



本TPC特色：

- 高密: 同时测量数百条径迹 ≥ 200粒子
- 高位置分辨率: 顶点分辨 ≤ 200μm
  双径迹分辨 ≥ 2.5cm
- 低材料气体迹探测器

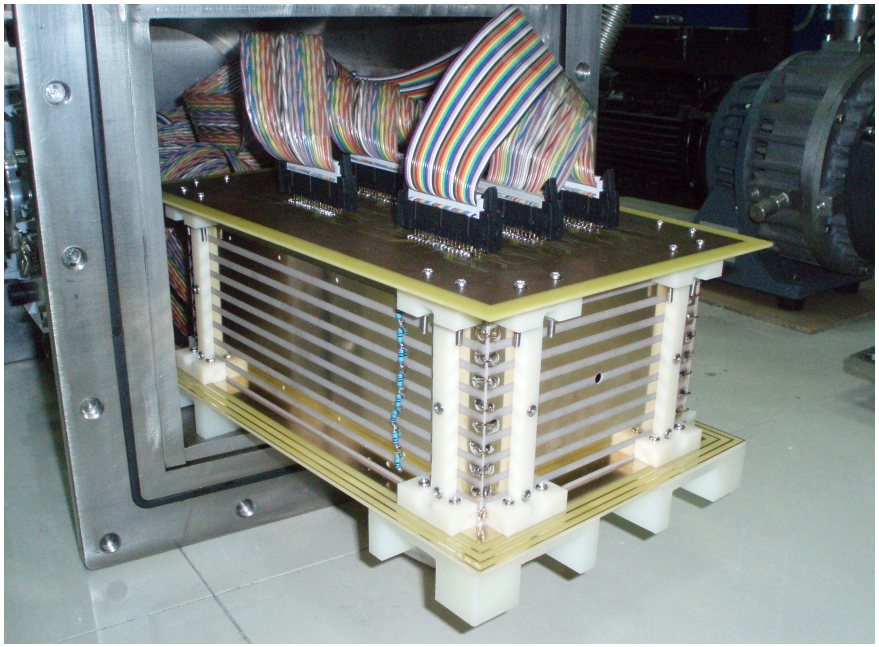
最先进的大型带电粒子3维径迹探测器. 现应用于HIRFL/CSR (~100MeV/u), 将来应用于十二五的HIAF(~GeV/u) 核物理实验装置.

中国科学院上海应用物理所将负责研制TPC的工作。

时间投影室探测器(TPC)样机

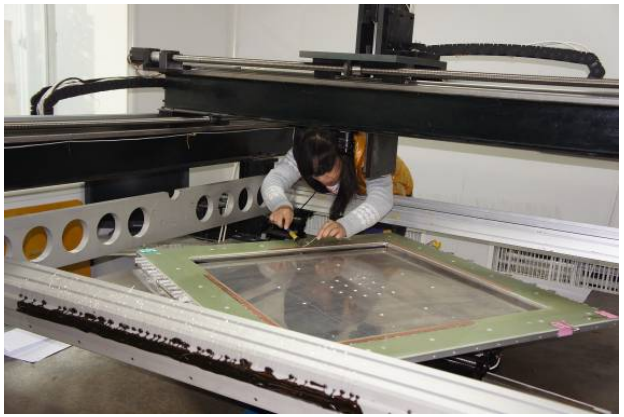
技术指标：

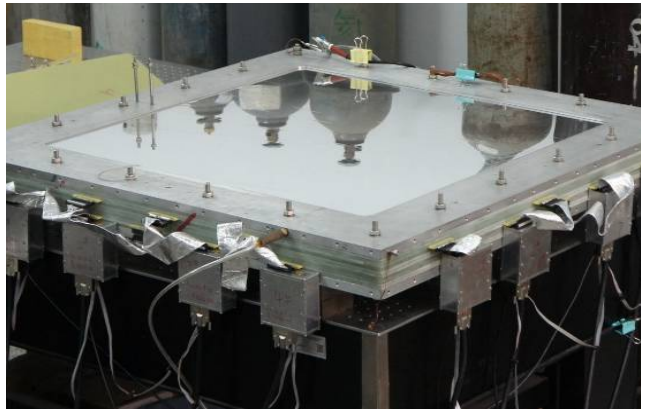
读出板面积	1.1 m× 0.9 m
读出片数量	12000 (120×100)
读出片大小	9 mm × 9 mm
电子漂移距离	60 cm
气体组成	90% Ar + 10% CH_4
电场强度	150V/cm
dE/dx 量程	$Z \leq 8$, π,p,d,t,He-O
双径迹分辨率	≥ 2.5 cm
径迹多重性	≥ 200

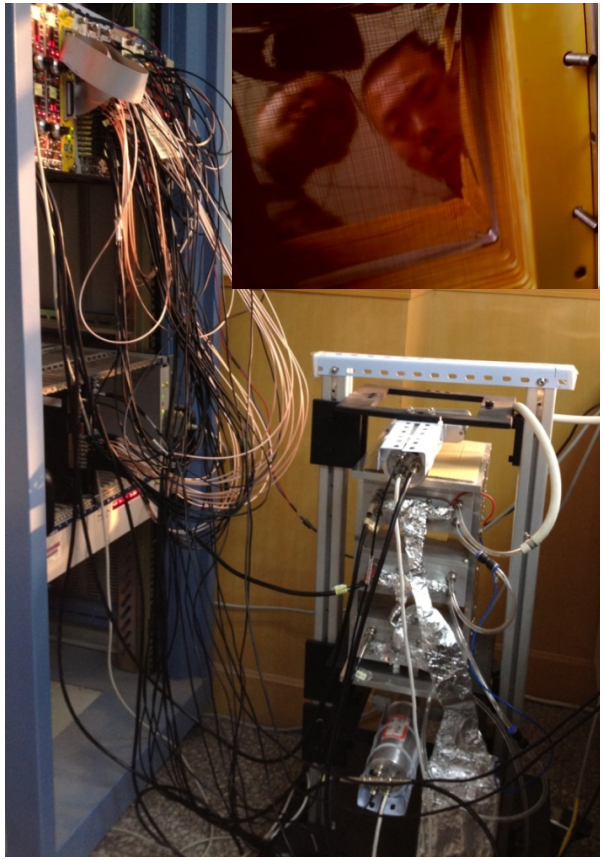


中国科学院上海应用物理所**TPC**样机

MWDC技术基础与配套条件







中科院近物所：完整的设计、制作与测试的人员队伍和硬件设施。

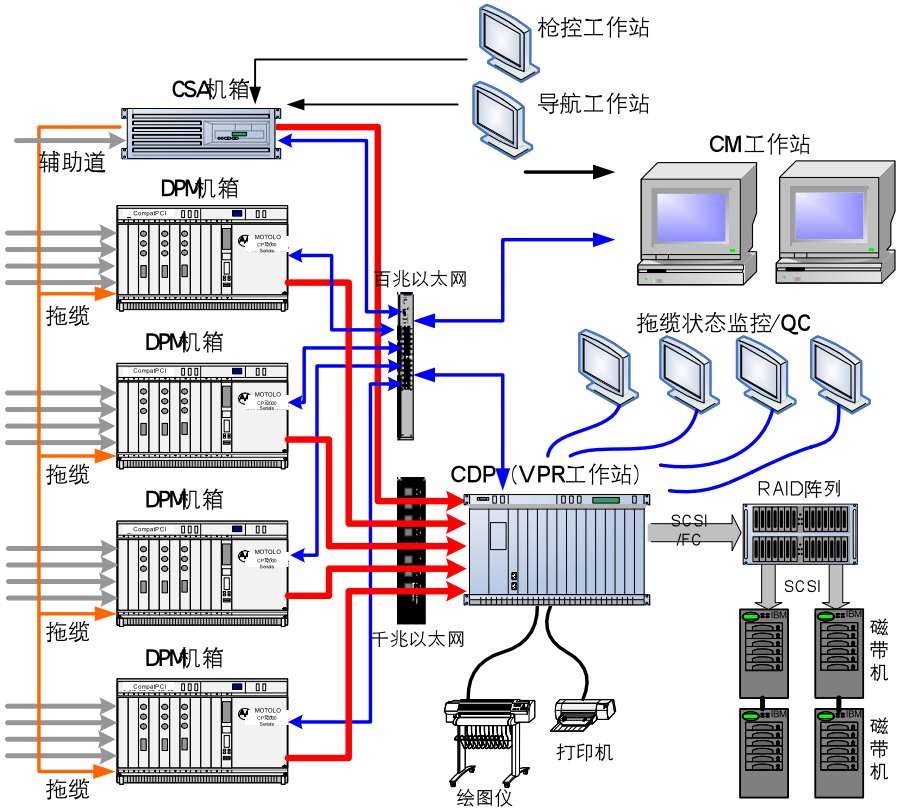
中国科大：强大的读出电子学和数据获取的人员队伍和硬件设施。

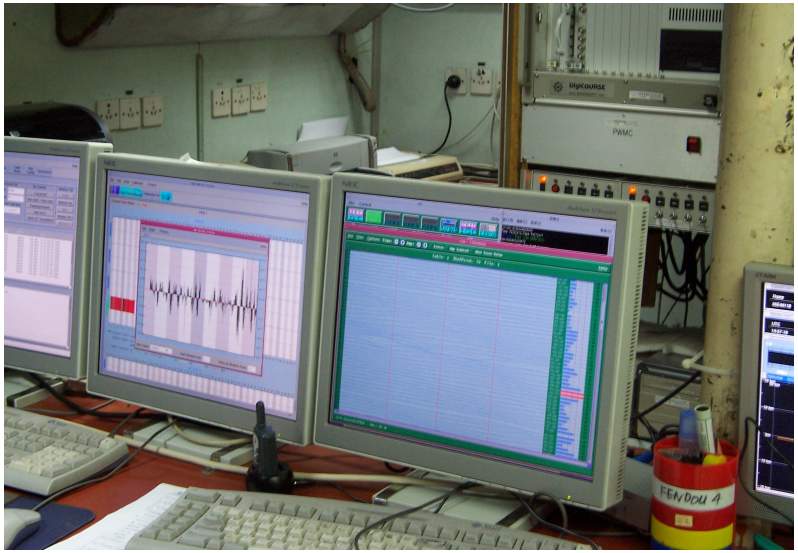
清华大学：成熟的MWDC测试平台与径迹重建算法研究。

DAQ 工作基础

国家十一五“863”计划
(深水高精度海上石油地震勘探DAQ系统)

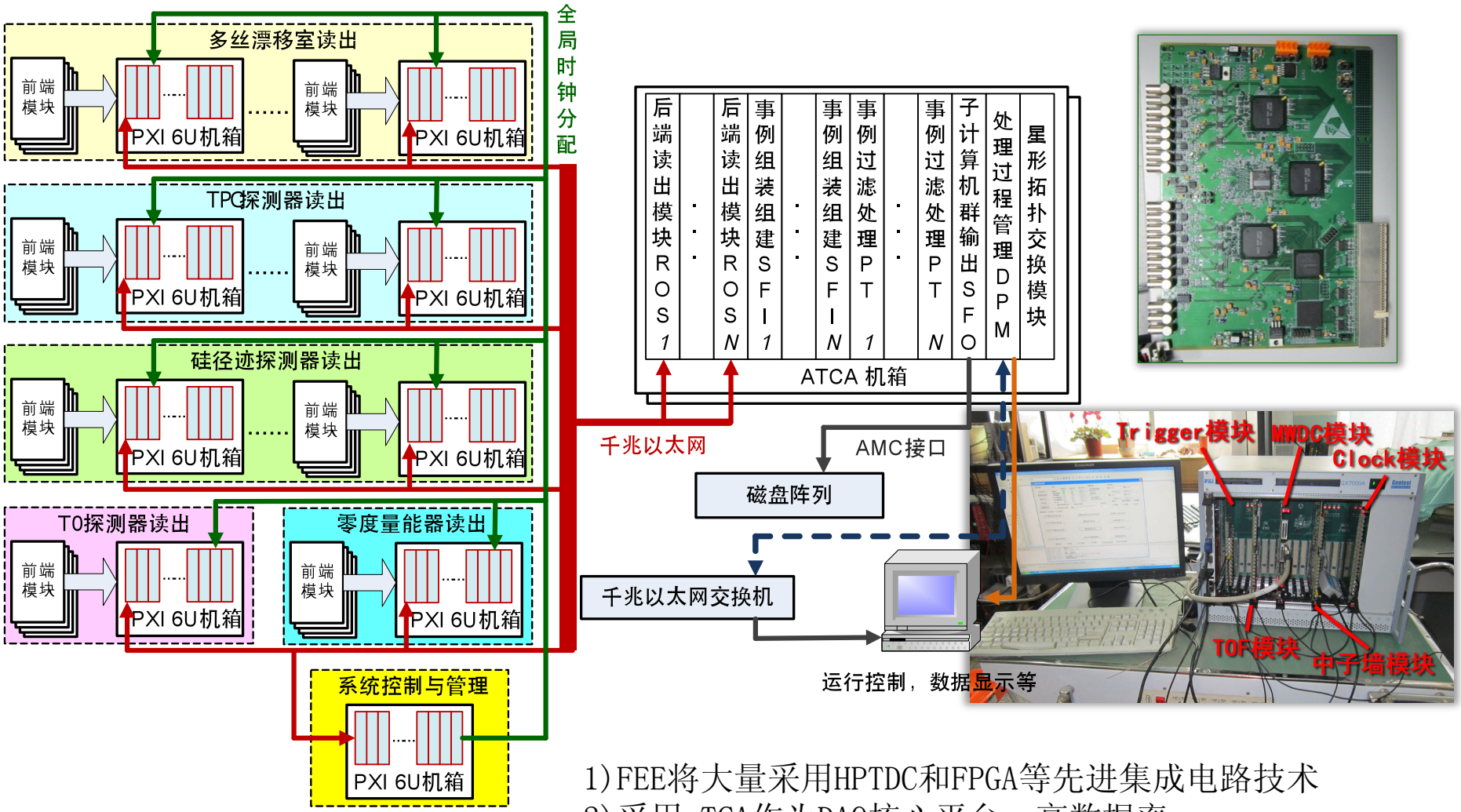
1）通道数：1920X16= 30720
2）净数据率： 184.32 Mbyte/s





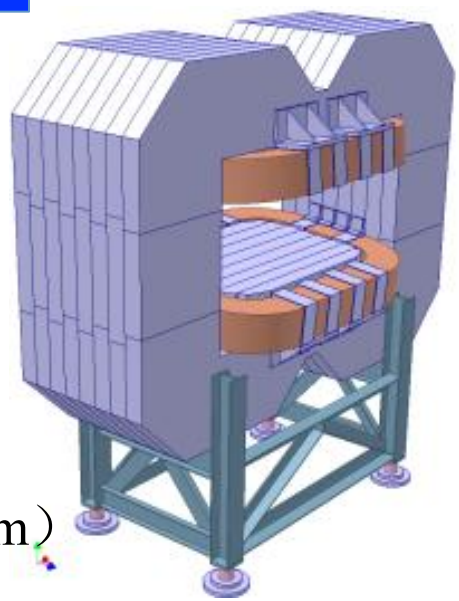
中国科学技术大学

读出电子学系统及DAQ构架



1) FEE将大量采用HPTDC和FPGA等先进集成电路技术
2) 采用xTCA作为DAQ核心平台，高数据率
3) 基于无触发的理念，将部分触发功能同DAQ系统融合，系统更为灵活

超导二极磁铁



中心磁场	0.5 T
好场区尺寸	1 ×1 ×1.5 m^3
磁场稳定 / 均匀度	0.01% / 1%
总体尺寸	～2.5×3×4 m^3
重量	200吨

优势：

大气隙（> 1 m）
低漏场
高均匀度 （1%）

技术方案：

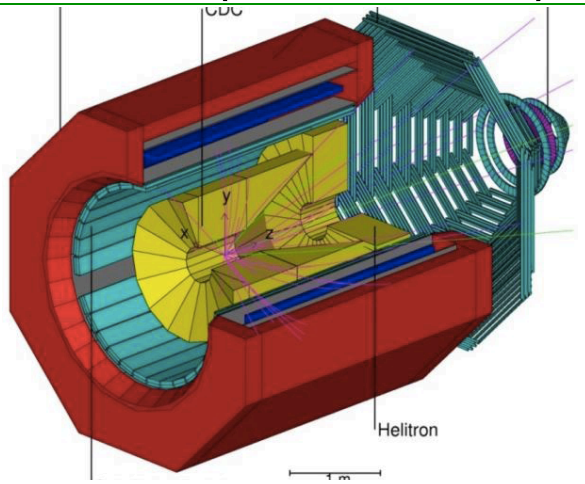
- 采用马鞍形超导线圈，线圈采用Hollow tube型超导电缆绕制，采用两相氦冷却；
- 超导线圈安装于不锈钢内筒上，为抵抗强大的电磁力，在外部进行加固和绑扎；
- 整个线圈结构采用钛合金拉杆悬挂于窗口型铁芯中，以增强中心磁场和屏蔽漏场，保证线圈和铁芯的中心重合度以减小偏心导致的电磁力。

中国科学院近代物理所等已具有研制该类二极超导磁铁的经验和能力

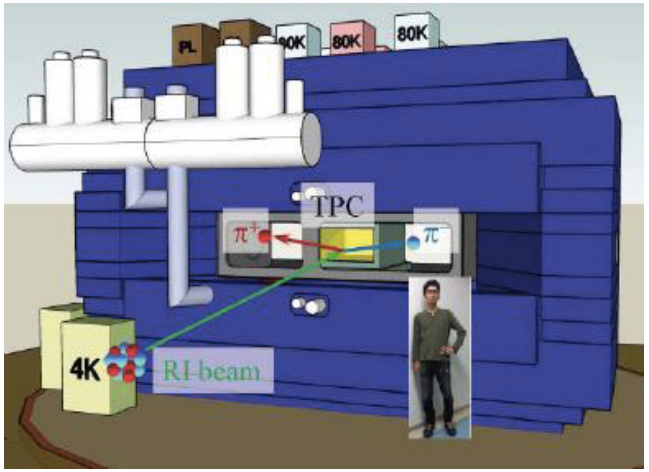
现状

与同类谱仪比较

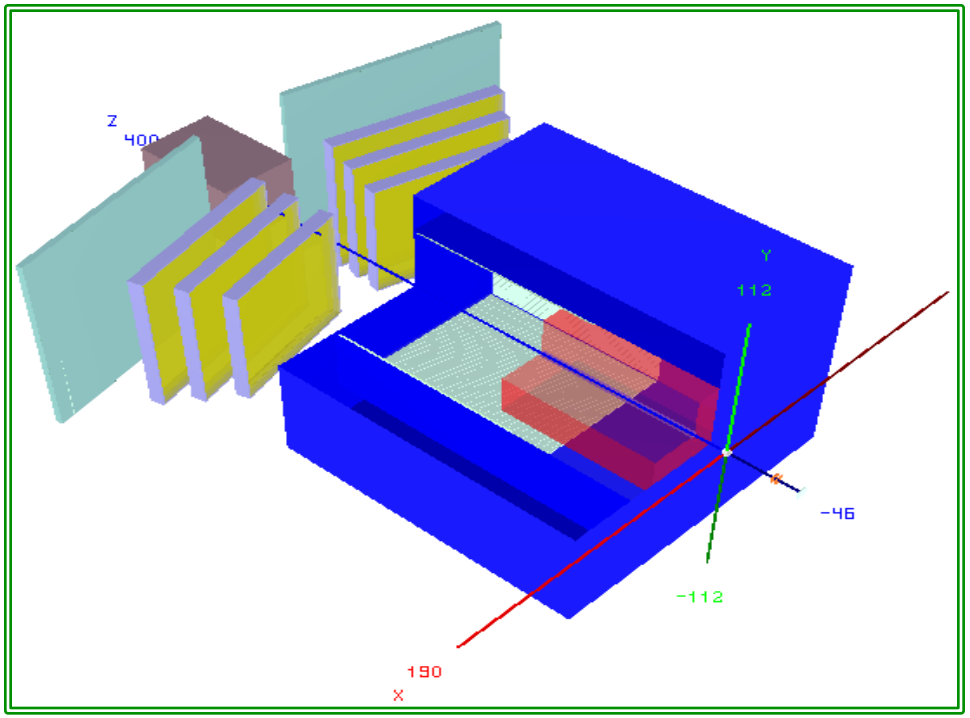
FOPI (GSI，德国)



SAMURAI (RIKEN，日本)



CEE vs. FOPI(已结束)**:** 大二极磁铁构型，覆盖区域更大，且强调前角高精度测量，覆盖更多的物理目标。很好的放射性束流实验和精细实验装置。



CEE vs. SAMURAI（2014－15 建成）：设计构造相似。CEE中高能重离子物理实验谱仪, 覆盖更多的物理目标。初级束流和放射性束流实验的精细装置。

与同类谱仪性能比较

	FOPI	SAMURAI	CEE
运行状态	关闭（2012）	在建	预研
动量分辨	5~10%	~5%	**<5%**
时间分辨	150ps	~150ps	**<70 ps**
事件率	250/s	200/s	**10^3~10^4/s**
数据率	~50MB/s	~100MB/s	**~500MB/s**
工作能区	400~1930 AMeV	100~300 AMeV	**300~2800 AMeV**
束流种类	初级束流	初级/次级束流	初级/次级束流
子探测器种类	2(后期3)	3	5
通道数	~2000	~10000	~10000

工作基础

1）团队成员具有参与国内外大型实验探测器研制和物理分析的丰富经验（**ALICE**、**BES**、**CBM**、**STAR**、**FOPI**、**SAMURAI**）

2）各主要单位都具有良好的研发环境，具有最新的粒子探测技术，读出电子学和**DAQ**研发基础，且已经围绕**CEE**的物理内容和探测设备都有充分的预研和积累

3）将以先进的合作组运行模式来协调工作，遵循大型探测器研制规律开展研制工作

团队的组成和实验合作经验

(I) 参加单位：

1）华中师范大学
2）清华大学
3）中国科技大学
4）中国科学院近代物理所
5）中国科学院上海应用物理所

(II) 国际，国内实验合作经验：

- ALICE Experiment at LHC:	Geneva
- BES at IHEP:	Beijing
- STAR Experiment at RHIC :	New York
- Experiments at GSI:	Darmstadt
- Experiments at CSR:	Lanzhou

项目负责人简介
许怒

1982 中国科学技术大学，学士

1990 纽约州立大学石溪分校, 博士

2001 劳伦斯伯克利国家实验室，高级研究员

2008 布鲁克海文国家实验室，STAR合作组发言人

2010 华中师范大学物理科学与技术学院，院长

夸克与轻子物理教育部重点实验室，主任

中组部“千人计划”

顾问委员会成员：BNL, FAIR, NICA, HIRFL

美国物理学会会士, 英国物理学会会士

STAR合作组

国家: 12

研究单位: 52

研究人员: 550

工作基础

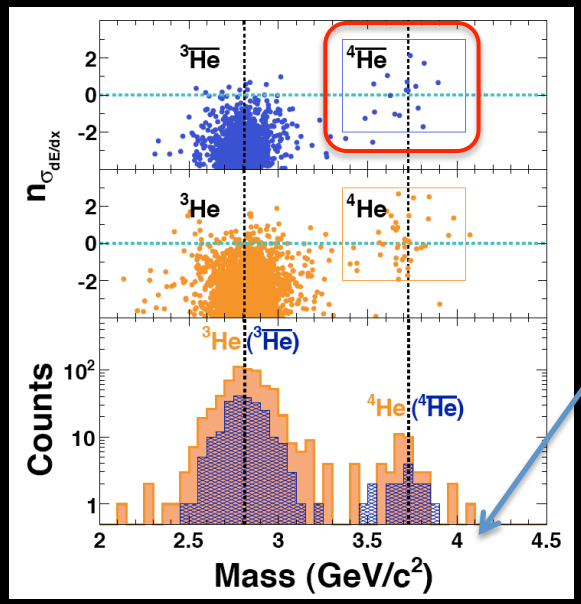
STAR 上最重的反物质的发现

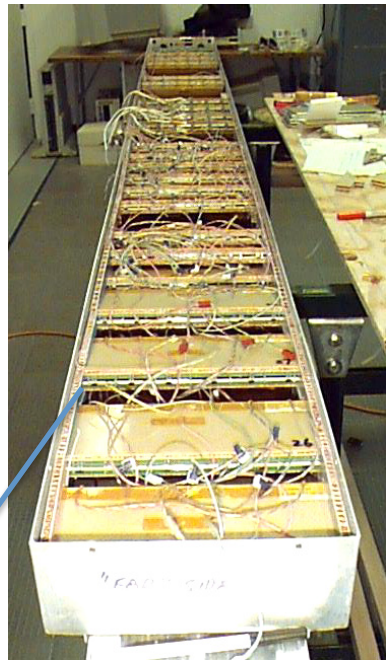
nature April, 2011

"Observation of the Antimatter Helium-4 Nucleus"

by ***STAR Collaboration***

Nature*, 473, 353(2011).*





CEE:
All institutes are from STAR Experiment
我们也掌握了和MRPC有关的前端电子学(FEE)研制的核心技术

NSFC, MOST, CAS 资助！

- TOF-MRPC模块由STAR中国合作组研制
- 至今最重的反物质，$\bar{\alpha}$
- 更多新的物理结果

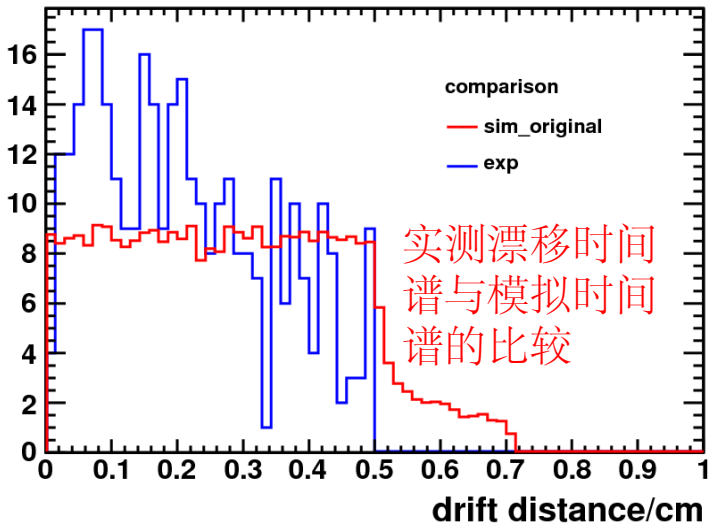
可行性分析

1) Monte Carlo模拟表明探测器系统设计能达到预期的物理目标

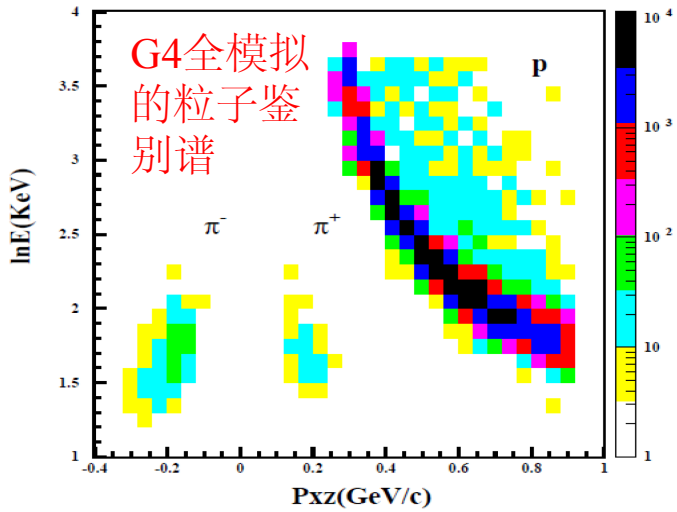
2) 束流测试结果支持探测器概念设计

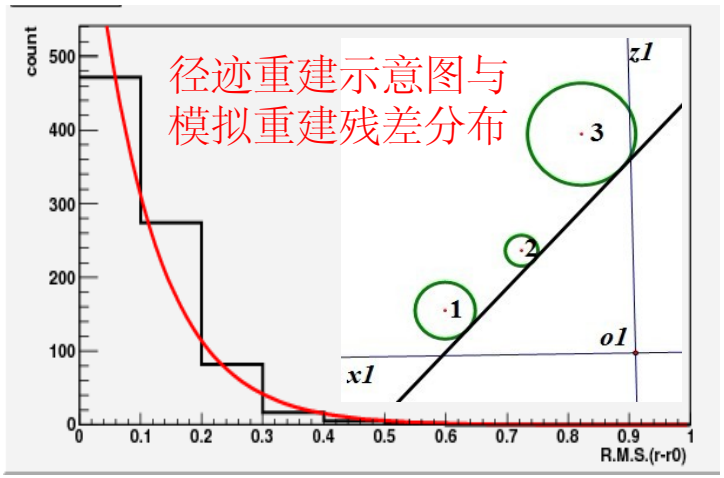
3) 有经验的队伍：物理目标，R&D，探测器运行

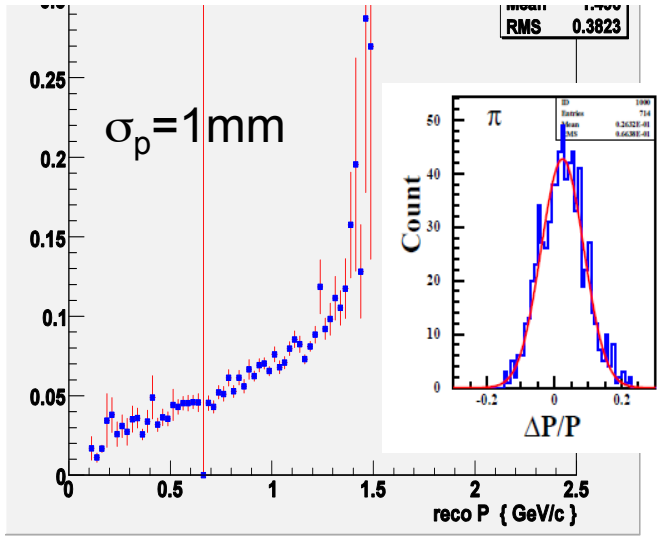
可行性分析：MC模拟-径迹探测器



实测漂移时间谱与模拟时间谱的比较





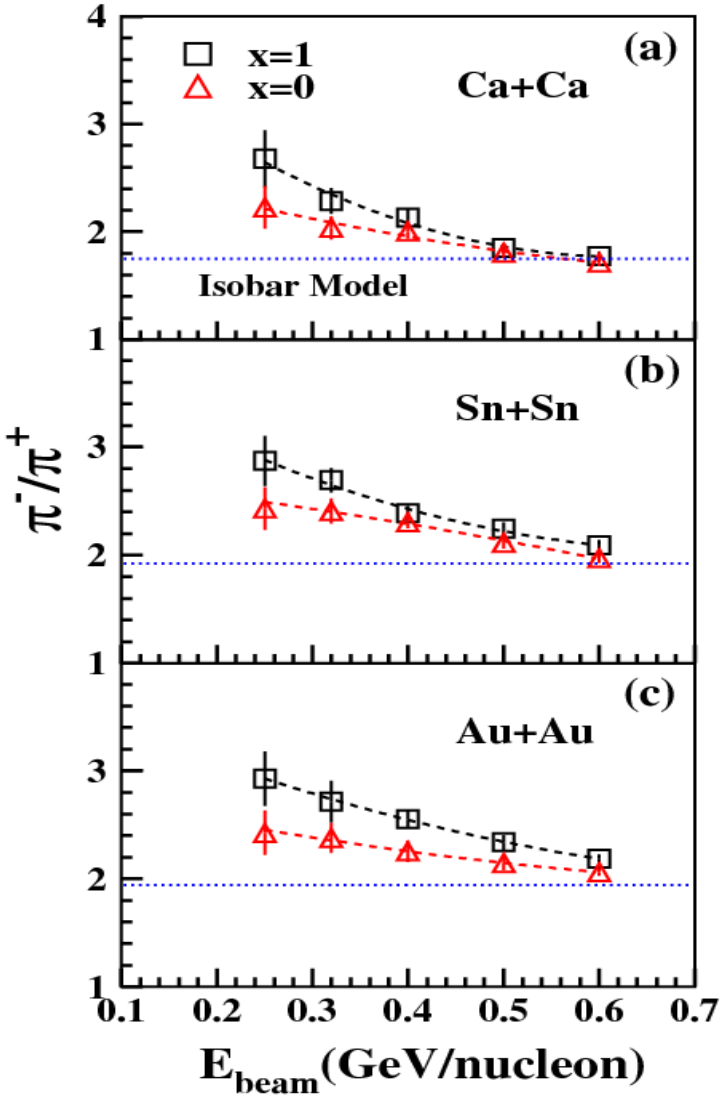


探测器信号模拟

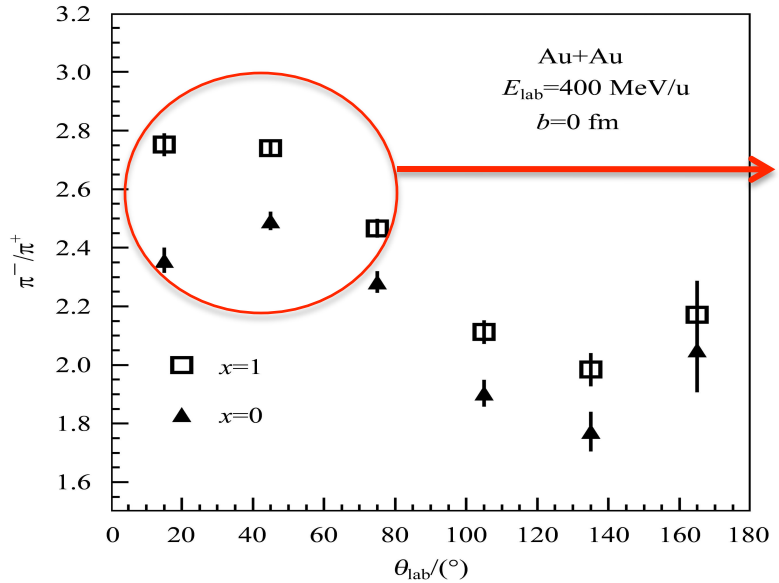
清华/科大两家模拟相互校验。

径迹探测器的重建效率可达95%，动量分辨优于5%。

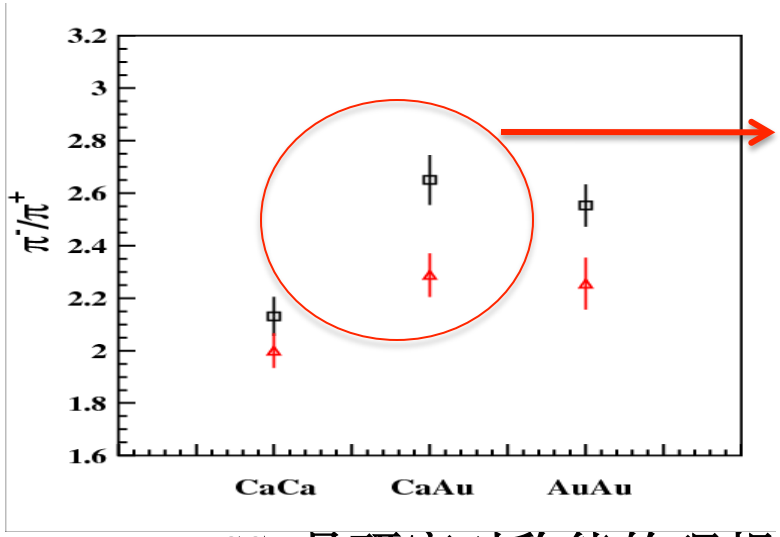
可行性分析：MC模拟-物理模拟



HIRFL-CSR能区的对称能效应



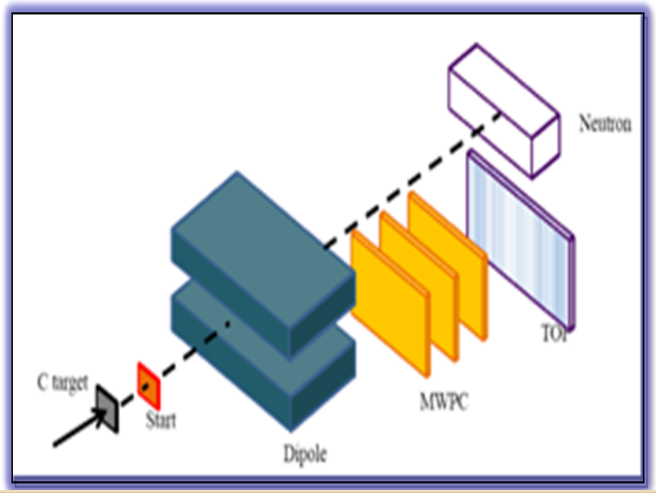
中前角区观测量的对称能依赖敏感

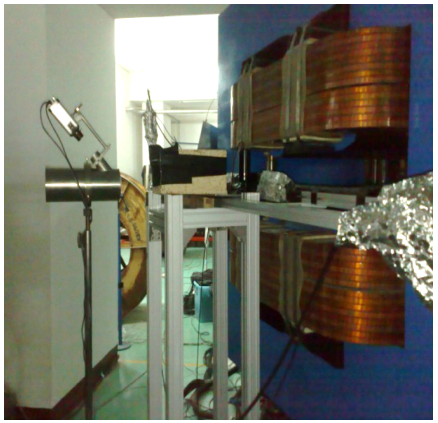


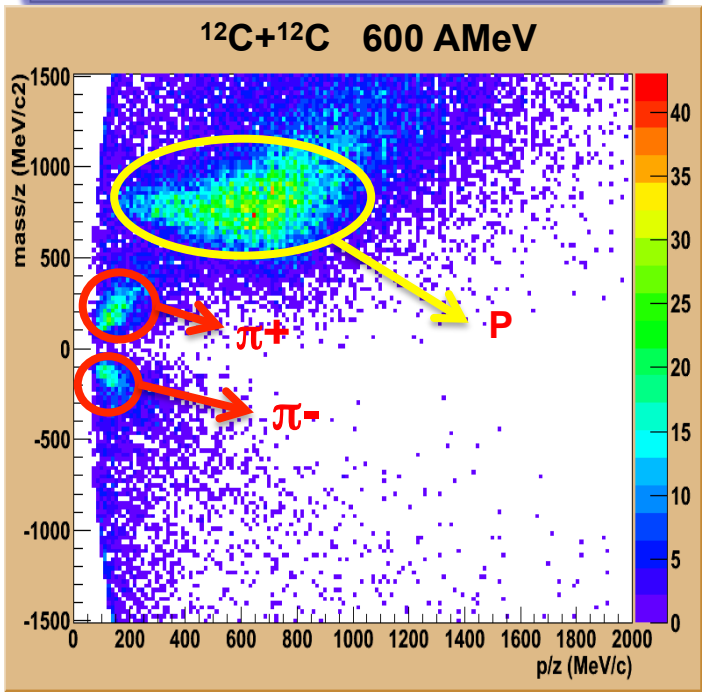
CEE上的逆运动学反应甚至可以更好地研究对称能问题。

HIRFL-CSR是研究对称能的理想能区；
CEE的概念性设计可以满足物理目标需求

可行性分析前期束流测试结果





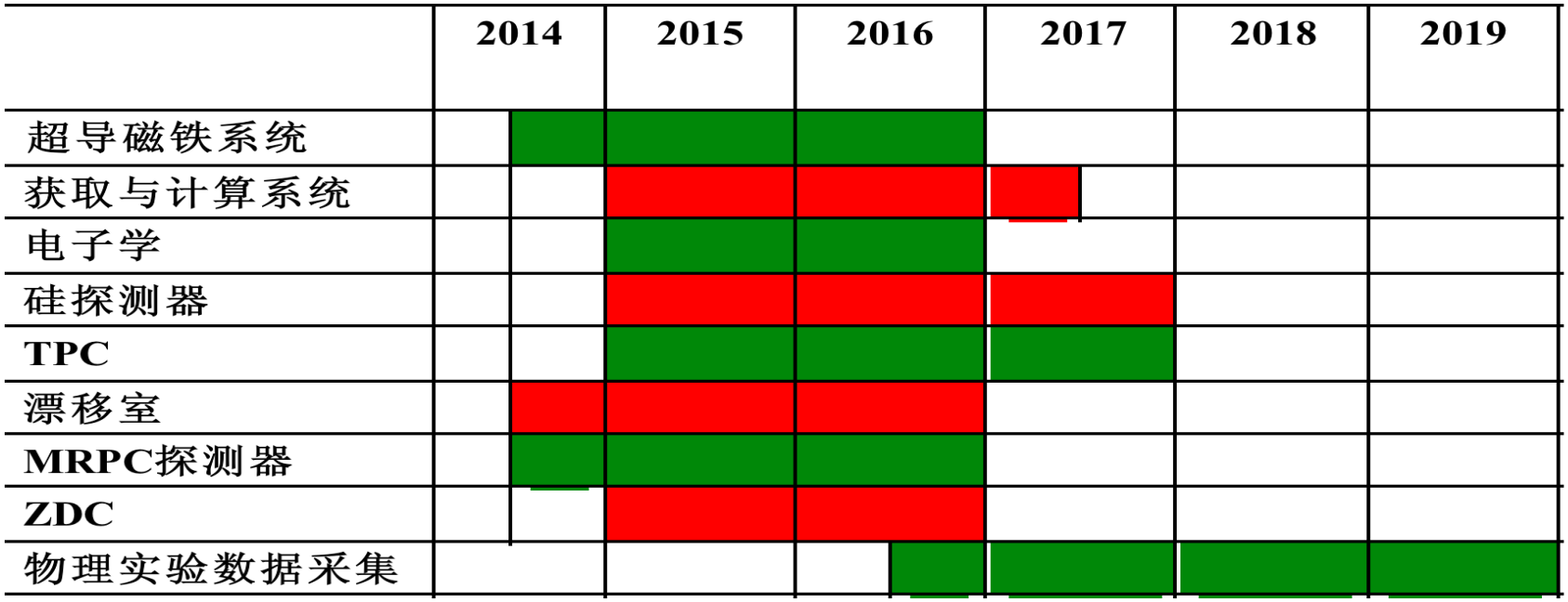


束流测试实验结果支持谱仪的概念性设计

总预算

科目	申请经费(万元)	备注（计算依据与说明）
一. 研究经费	8175.5	每一栏数目为子系统相应栏目总计。关于每个子系统的经费明细，请参阅附件中《各子系统预算明细表》，其中包含了每个子系统的经费申请表，和购买/试制设备明细表，以及测试化验加工费用明细表。
1. 科研业务费	2030.5	用于科研活动所需经费总和
(1) 测试/计算/分析费	801.0	各子系统组装，机械测试，物理性能测试，刻度费用
(2) 能源/动力费	343.0	各种燃料动力费用
(3) 会议费/差旅费	406.0	往返装置现场以及举办小型研讨会
(4) 出版物/文献/信息传播费	62.5	网络使用、资料查询、论文发表、专利申报等。
(5) 其他	418.0	包括专家咨询费，和不可预见费用
2. 实验材料费	3199.0	用于购买原材料和附属配件所需经费总和
(1) 原材料/试剂/药品购置费	2836.0	各子系统原材料/试剂/药品购置费
(2) 其他	363.0	PCB制作和焊接，光纤、电缆、接口卡、网络交换设备等附属设备
3. 仪器设备费	2154.0	用于购置和试制各子系统所需设备的经费总和
(1) 购置	1586.0	各子系统购置所需设备花费
(2) 试制	568.0	各子系统试制所需设备花费
4. 实验室改装费	384.0	用以对项目实施的实验场地进行调整、搬迁与改造（比如电磁环境和水电配套条件改造、优化），以便于研制活动的开展。以及在CSR现场的建设安装、外围和工装费用
5. 协作费	408.0	外单位加工费等
二. 国际合作与交流费	253.0	用于各合作单位的国际合作与交流费用
1. 项目组成员出国合作交流	198.0	参加国际会议、访问国外实验室学习和交流制作经验
2. 境外专家来华合作交流	55.0	邀请国外专家访问
三. 劳务费	623.5	直接参加项目研究的研究生、博士后人员的劳务费用
四. 管理费	811.0	间接费用，包含管理费和绩效支出
合计	9863.0	

时间进度计划


2014
2015
2016
2017
2018
2019
超导磁铁系统
获取与计算系统
电子学
硅探测器
TPC
漂移室
MRPC探测器
ZDC
物理实验数据采集

谱仪创新点小结

1）新技术(PXI无触发DAQ, Si-Pixel, MRPC TOF)，
大角度覆盖(5-75°)
填补该能区世界空白

2）世界领先: 飞行时间探测器($\leq$ 40ps, $\geq$70kHz/cm^2)
填补国内空白: 大型时间投影室探测(TPC),
硅像素探测器

3）瞄准世界前沿科学目标
先进大型核科学测量设备

总结

1) 利用当前最新技术在中国大型重离子加速器 **HIRFL-CSR，HIAF**上建设性能先进的多功能中高能重离子物理实验谱仪：
   - 三年完成基本实验设备建设
   - 高重子密度下的QCD相结构，对称能高密行为，夸克素物质，…（科学目标）

2) 在中高能核物理领域建立一支由高校－中科院研究所密切结合的优秀科研团队

3) 为国家中长期高能核物理规划，核探测技术发展及其应用做贡献

感谢各位专家指导和支持！

总预算

项目编号	项目名称	经费（万元）	占总预算（%）
一	**装置建设费**	**8263.3**	**84.8**
	超导磁铁系统	2106	22.4
	电子学、获取与计算系统	2100.5	21.3
	TPC探测器	1548	15.7
	eTOF+iTOF	919.7	9.3
	硅像素探测器	821	8.3
	MWDC探测器	748.1	7.6
	触发	206	2.1
	ZDC	184	1.9
二	**建安、外围及工装系统**	**310**	**3.1**
三	**模拟与数据分析**	**516**	**5.2**
四	**不可预见费用**	**404**	**4.1**
	装置总投资	**9863.3**	**100**