



基于强流重离子加速器的超-核谱仪

关键技术研究

报告人：郭爱强

负责单位：中国科学院近代物理研究所

合作单位：复旦大学，华中师范大学
香港中文大学（深圳），山东大学
北京航空航天大学

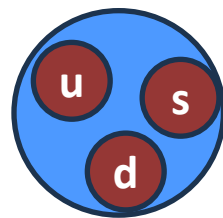
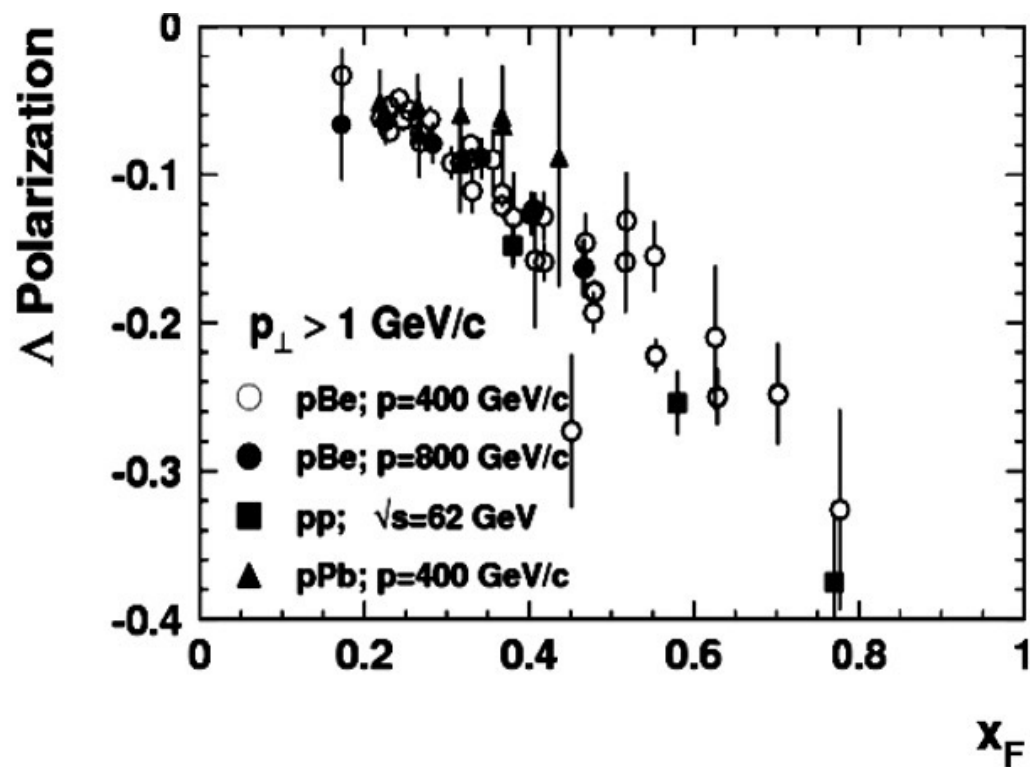


提纲

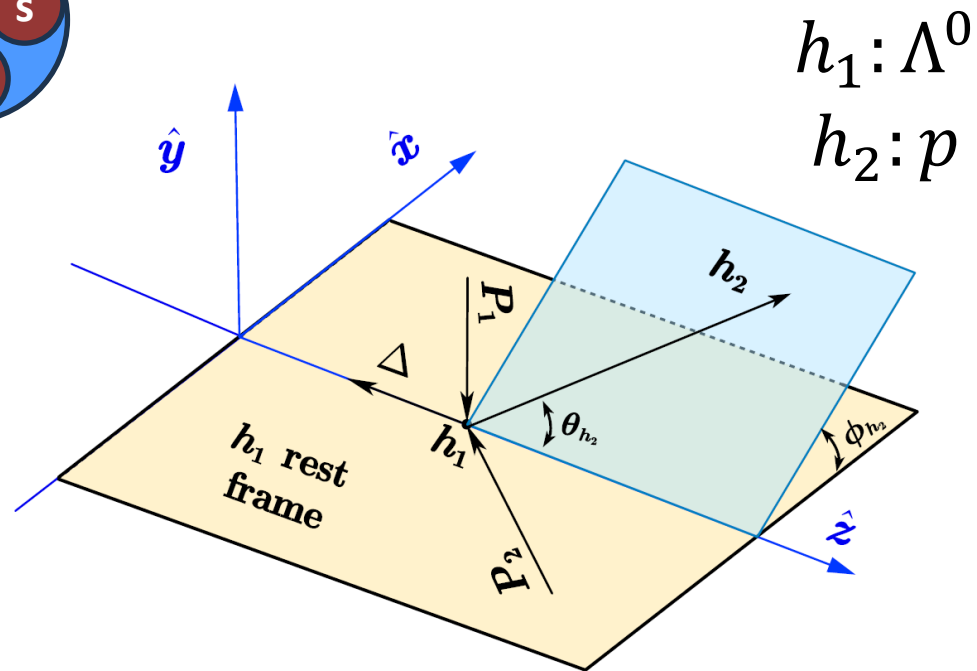


- 一 研究背景和研究目标
- 二 任务分解与考核指标
- 三 技术路线和实施进度
- 四 经费执行与人员投入
- 五 问题总结及未来展望

一、超-核谱仪：超子、核子极化及其相互作用



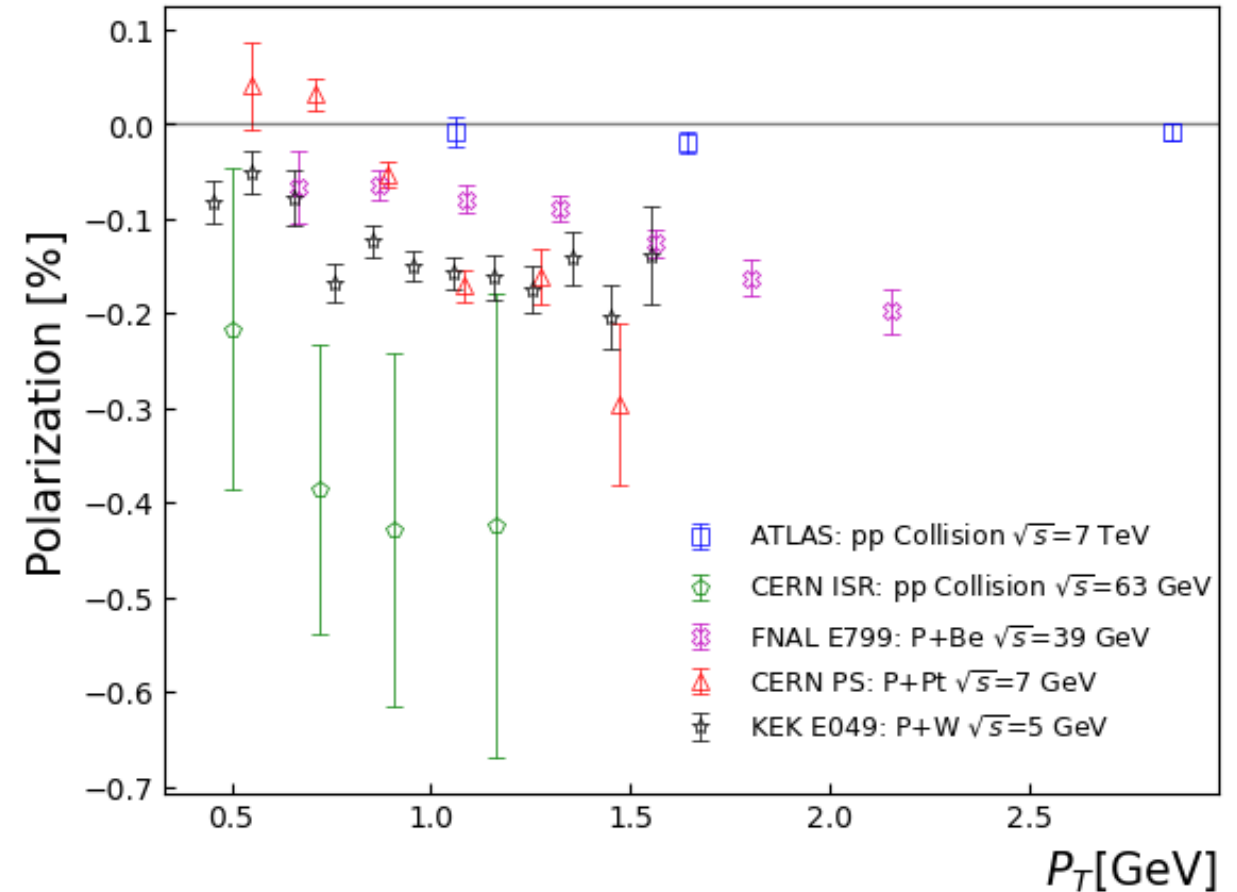
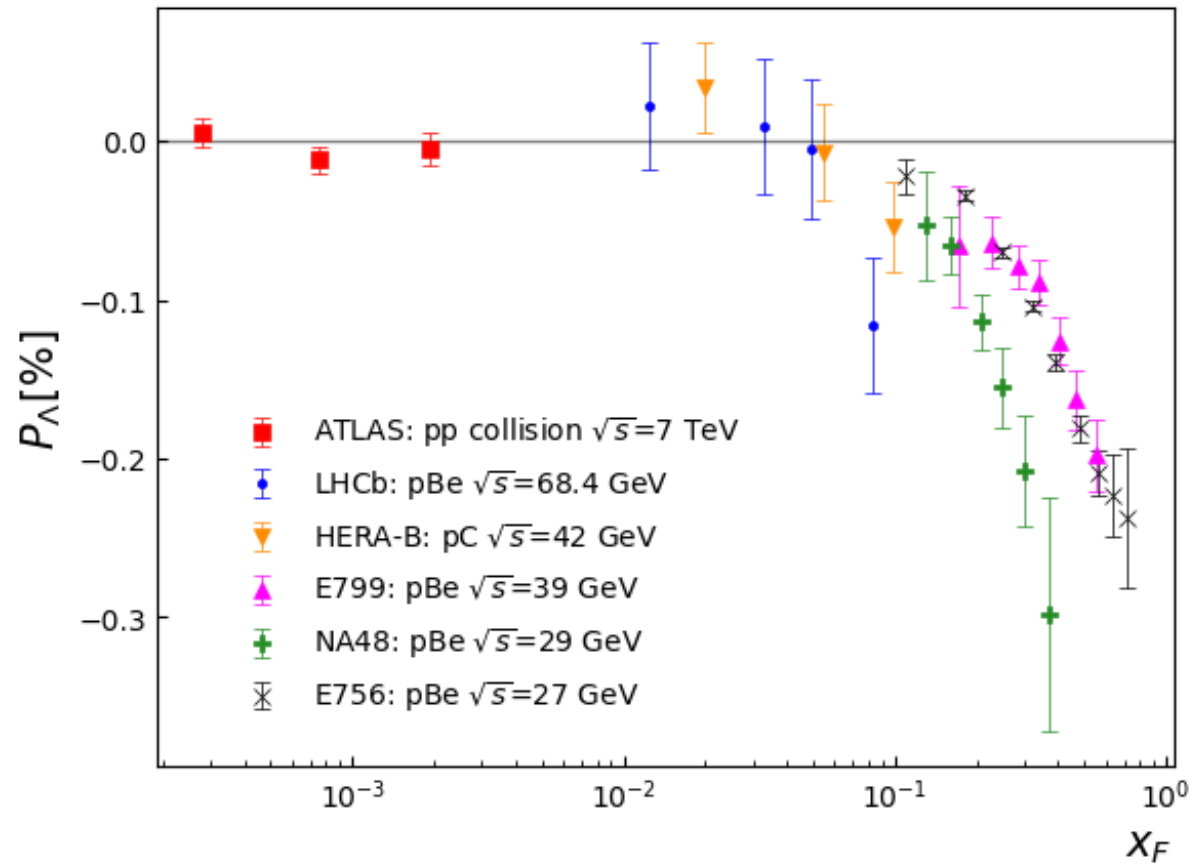
Λ^0 极化可以通过弱衰变测量 $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$



- 在非极化pp和pA碰撞中，发现末态产生超子是极化的 (1970's)
- 具有 P_t 和 x_f 依赖，和质心能量和靶质量无关

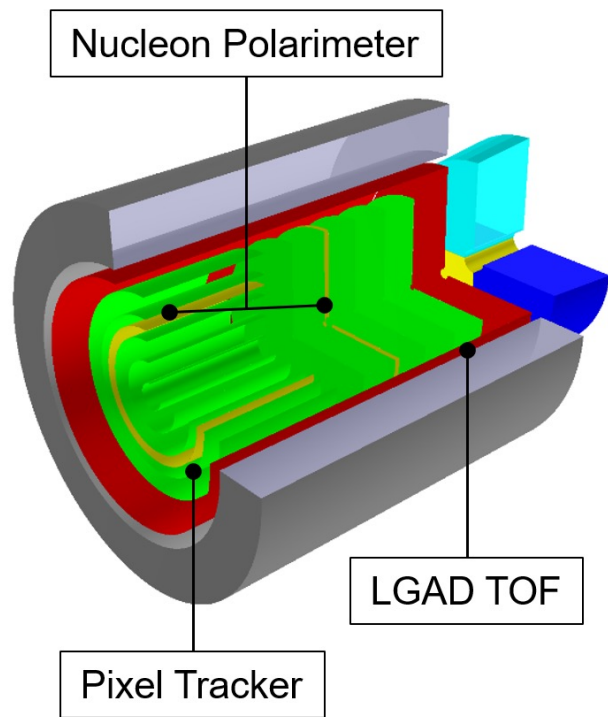
$$\text{yield} \sim (1 + \alpha P \cos \theta_{h_2}) / 4\pi$$

一、超子极化测量结果

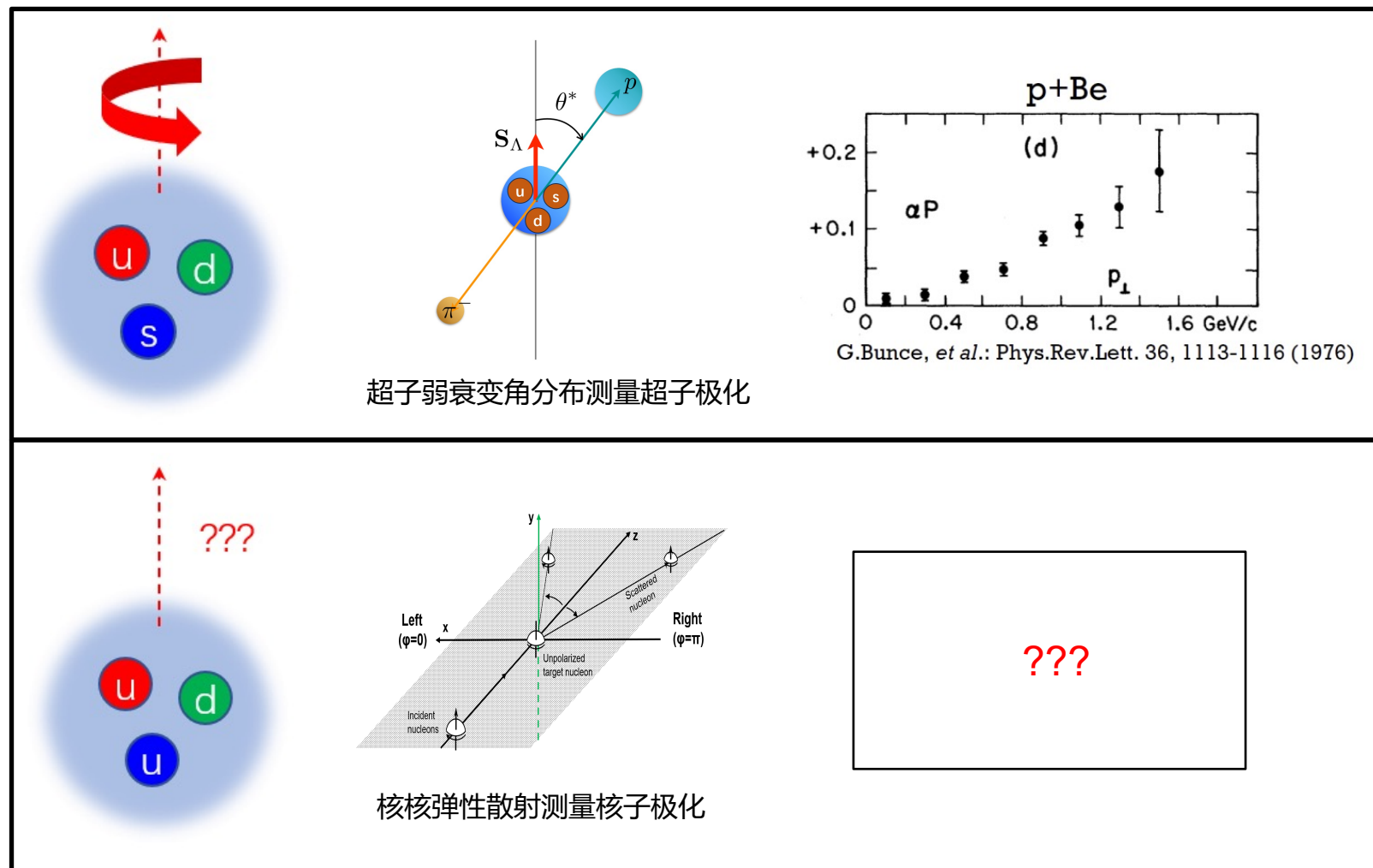


In standard collinear pQCD, the single quark polarization P from hard scattering follows the scaling relation: $P \propto \alpha_s \frac{m_q}{Q}$
 [Phys.Rev.Lett. 41 (1978) 1689]

一、超-核谱仪：超子、核子及其相互作用



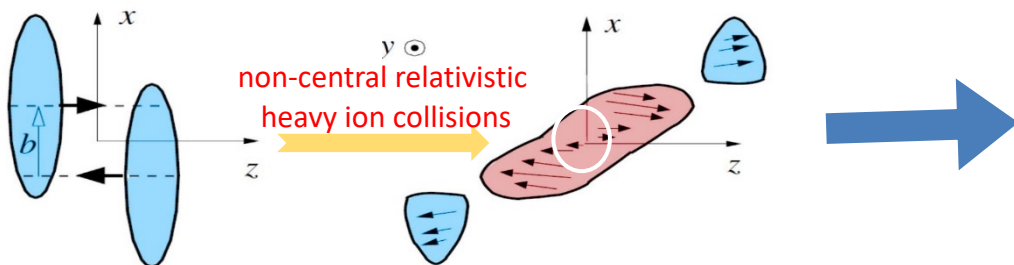
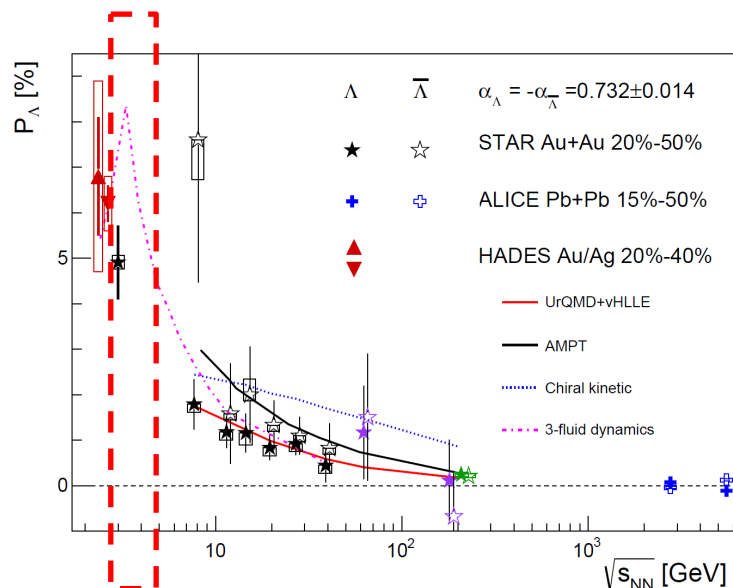
世界上首次研究核
子的自发极化现象



➤ 以核子极化为参考/对比，可以更好的理解超子的极化机制以及自旋起源

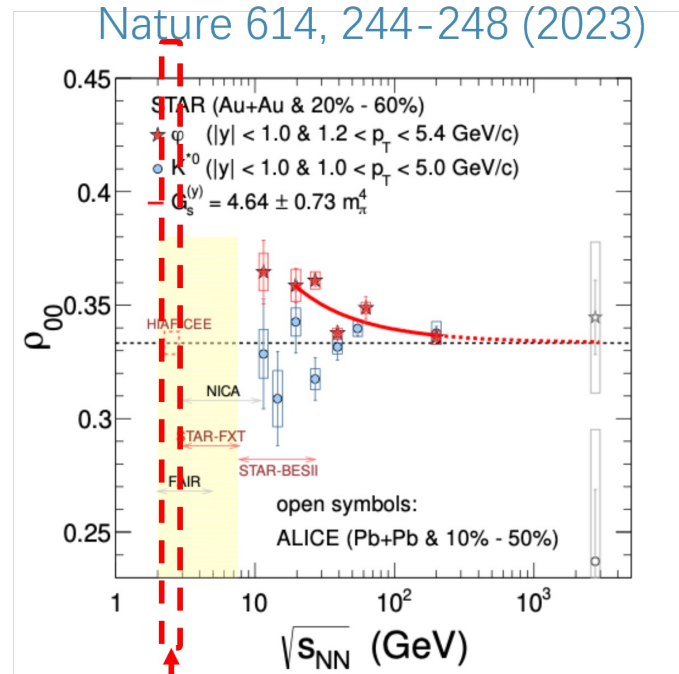
AA碰撞中超子整体极化

重离子反应中的整体极化效应
HIAF覆盖能区信号显著



Global Spin Alignment

Nature 614, 244-248 (2023)

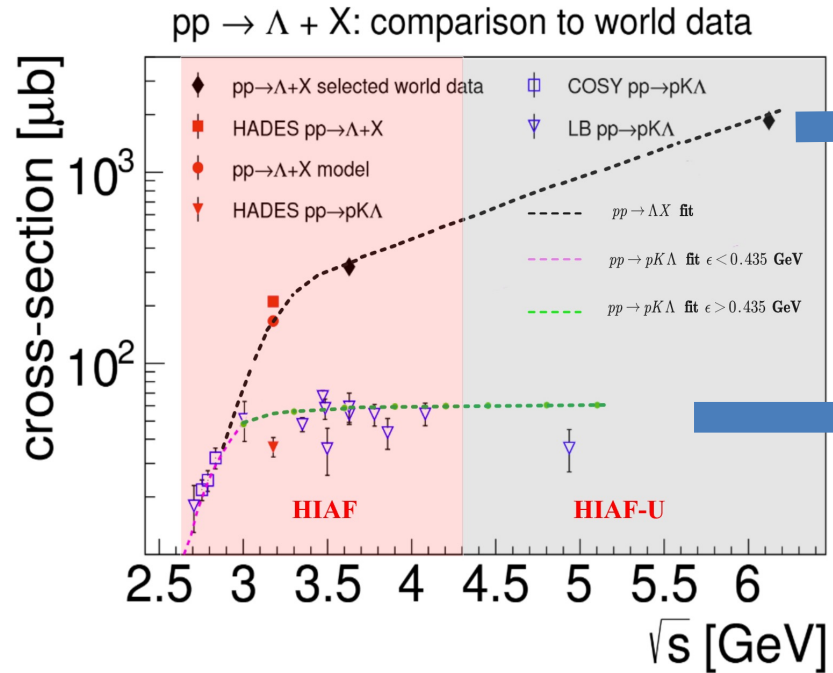


$AA \rightarrow \Lambda + X$

global polarization

Zuo-Tang Liang, Xin-Nian Wang, PRL 94, 102301 (2005); PLB 629, 20 (2005).
Jian-Hua Gao, Shou-Wan Chen, Wei-tian Deng, Zuo-Tang Liang, Qun Wang,
Xin-Nian Wang, PRC 77, 044902 (2008).

H-NS系统研究超子极化：跨能区、跨反应过程



$$pp(A) \rightarrow \Lambda + X$$

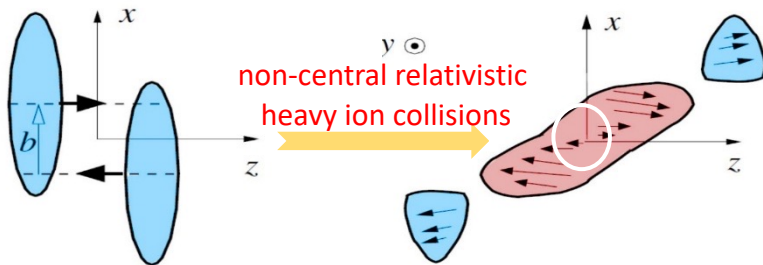
**polarization through
hadronization**

Zuo-tang Liang, and C. Boros, Phys. Rev. Lett. 79, 3608 (1997); PRD 61, 117503 (2000).
H. Dong and Zuo-tang Liang, PRD 70, 014019 (2004); PRD 72, 033006 (2005).

$$pp \rightarrow p + K + \Lambda$$

**polarization through
intermediate state**

R. Machleidt, K. Holinde and C. Elster, Phys. Rept. 149, 1 (1987).
B. C. Liu, B. S. Zou, PRL 96, 042002 (2006).



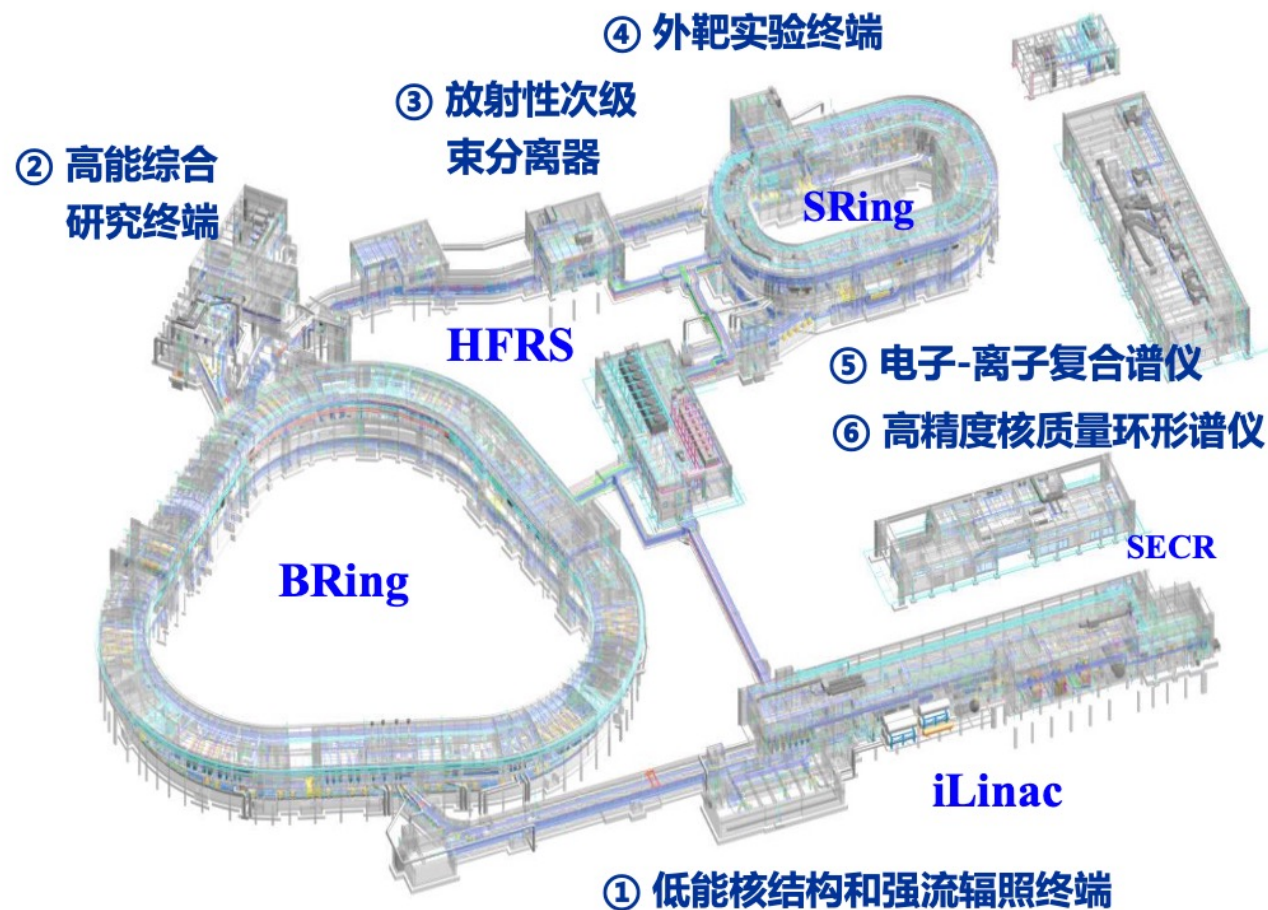
$$AA \rightarrow \Lambda + X$$

global polarization

Zuo-Tang Liang, Xin-Nian Wang, PRL 94, 102301 (2005); PLB 629, 20 (2005).
Jian-Hua Gao, Shou-Wan Chen, Wei-tian Deng, Zuo-Tang Liang, Qun Wang, Xin-Nian Wang, PRC 77, 044902 (2008).

一、研究背景：HIAF介绍

HIAF：强流重离子加速器装置，“十二五”国家重大科技基础设施之一



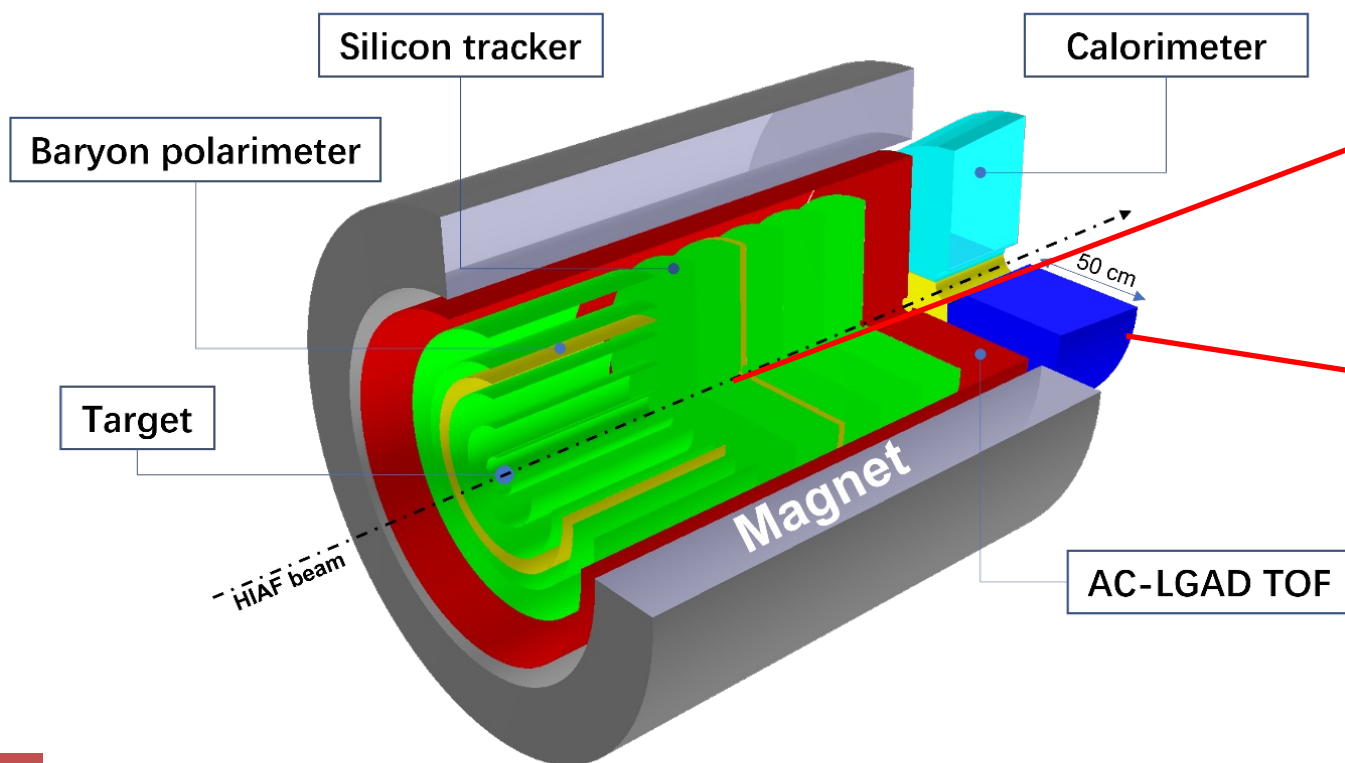
• HIAF特色和优势：束流指标和时间窗口

研究所	装置	重复频率	离子种类	设计流强	达到流强
BNL	AGS Booster	/	Au ³²⁺	/	5×10^9
CERN	LEIR	/	Pb ⁵⁴⁺	/	9×10^8
JINR	NICA	/	Au ³²⁺	4×10^9	/
GSI	SIS18	2.7Hz	U ²⁸⁺	1.0×10^{11}	3×10^{10}
FAIR	SIS100	2.7Hz	U ²⁸⁺	$(1.0-2.0) \times 10^{11}$	/
IMP	HIAF-BRing	3-5Hz	U ⁴⁵⁺	2.0×10^{11}	/
IMP	HIAF-SRing	/	U ⁴⁵⁺	1.0×10^{12}	/

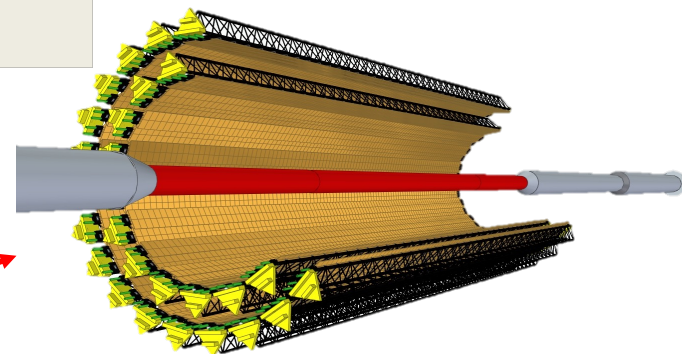
国际上脉冲流强最高的快循环重离子同步加速器

一、研究内容：项目研究内容

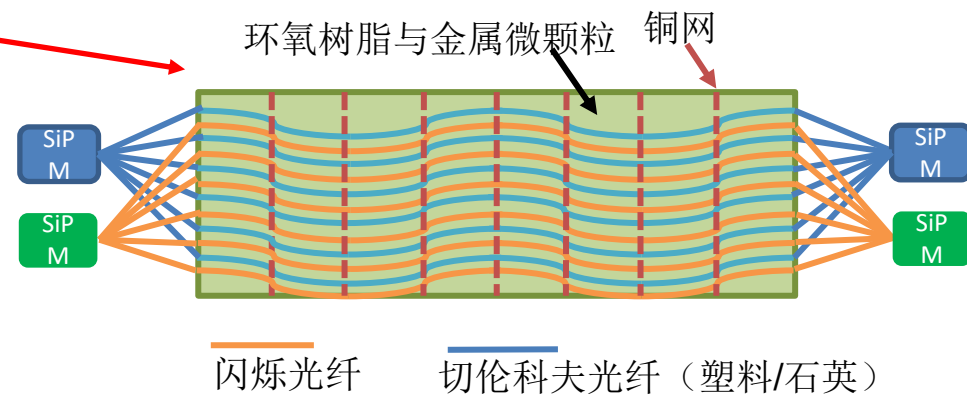
1. 完成**超核谱仪的结构设计**，开发专用的软件框架
2. 发展**基于单片有源像素传感器(MAPS)的径迹探测器**核心技术
3. 发展**具有切伦科夫光和闪烁光双读出的量能器**技术
4. 超核/超子物理**理论研究**



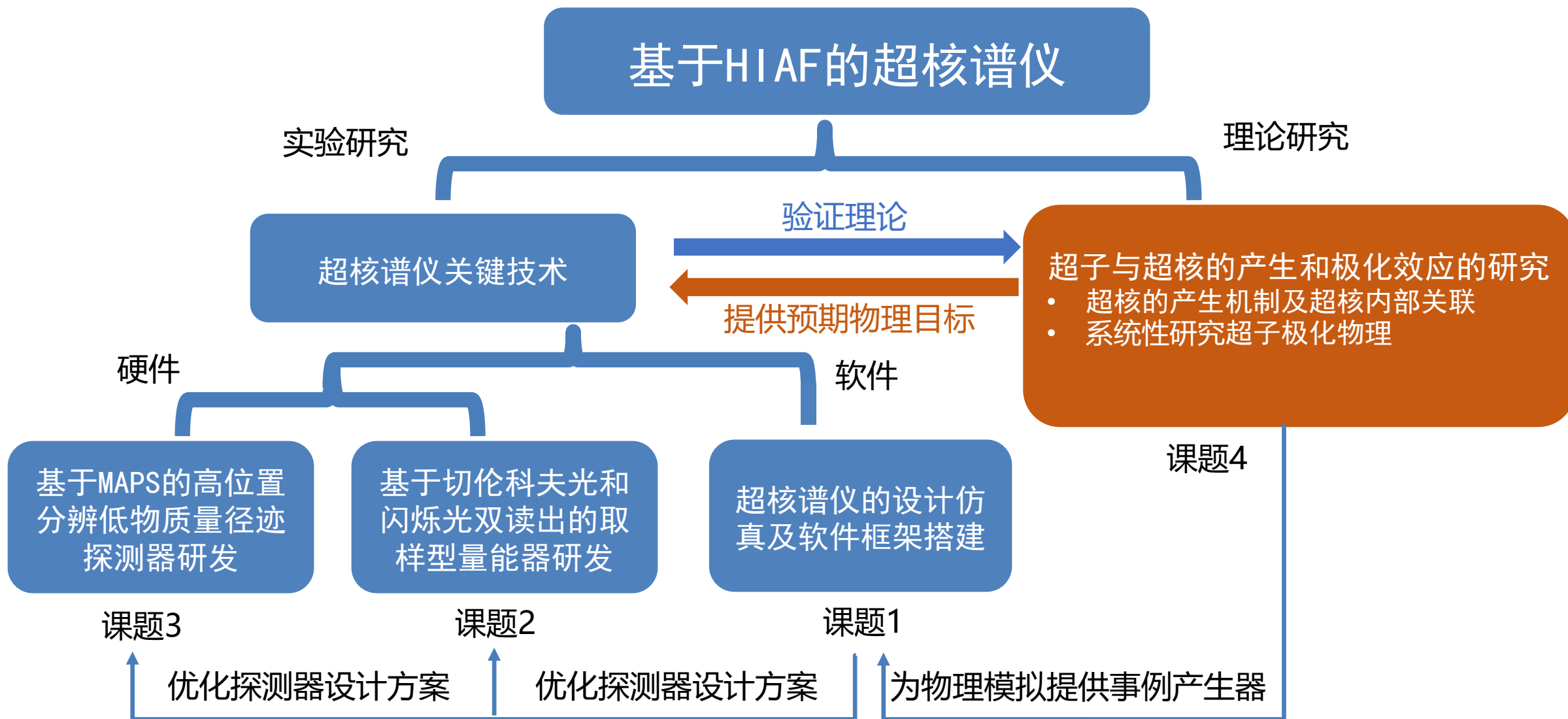
基于国产工艺的硅像素探测器



高精度双读出型量能器



二、任务分解：课题设置



三、实施进展：课题1任务

课题一：超核谱仪的设计仿真及软件框架搭建

超核谱仪设计

利用先进模拟软件完成构型设计
完成关键指标性能研究，如动量分辨，顶点分辨等

超核谱仪软件开发

基于FairRoot完成超核谱仪软件框架
完成事例产生重建算法开发

提供优化思路

提供模拟参数

提供模拟工具

关键物理模拟

利用得到的探测器性能参数进行关键物理模拟，明确物理目标
通过模拟结果为探测器设计优化提供思路

课题一主要考核指标

超核谱仪设计：完成结构设计及性能研究，提交设计报告

超核谱仪软件开发：完成软件框架搭建，及事例产生重建算法开发，提交软件包及使用手册

超核物理模拟：实现关键超核物理过程的模拟，明确超核谱仪物理目标

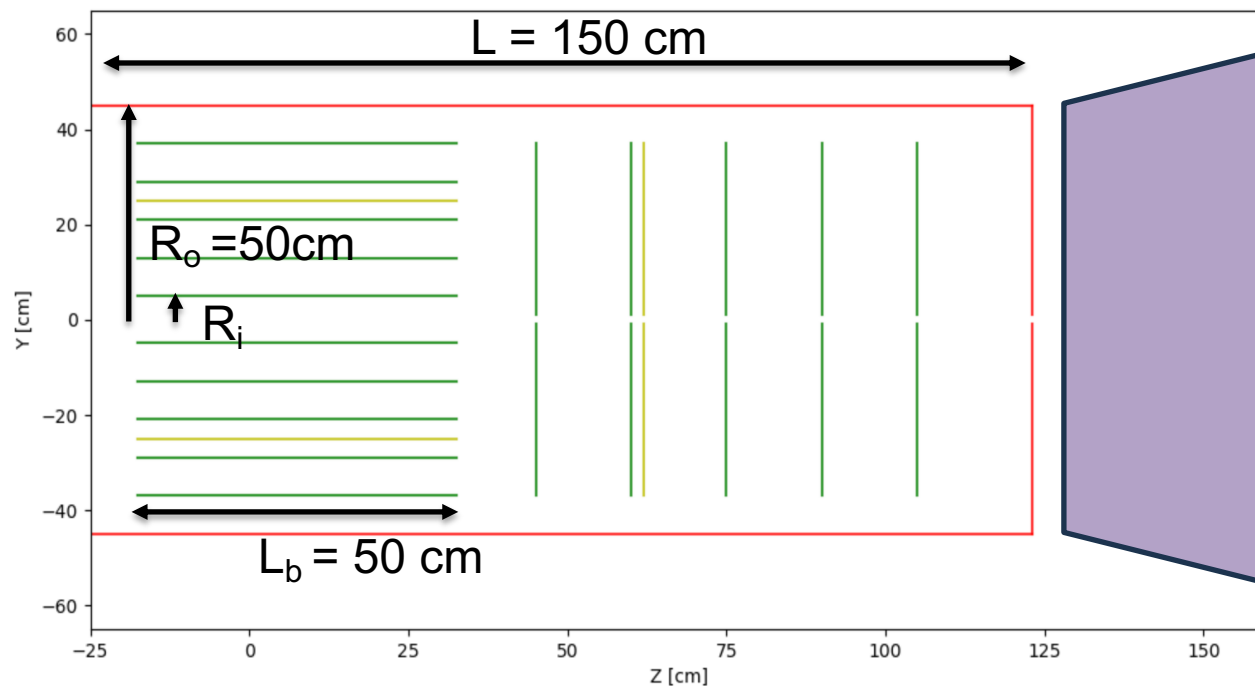
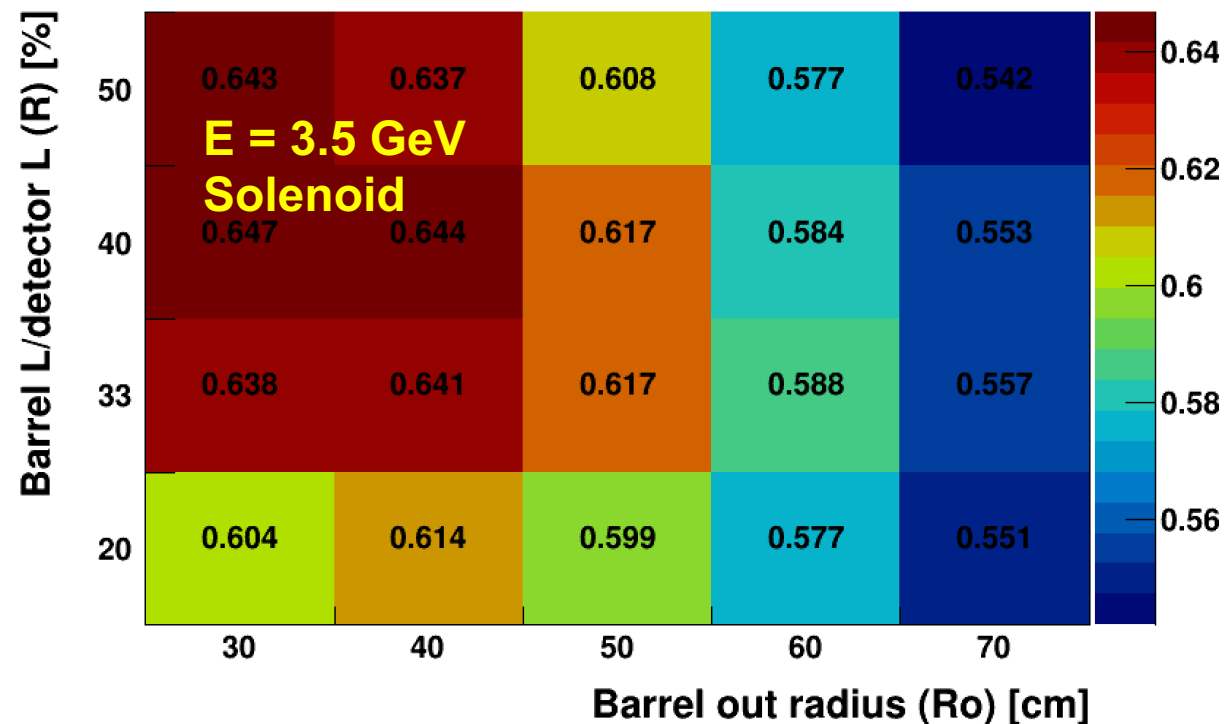
课题承担单位：中国科学院近代物理研究所

课题参与单位：北京航空航天大学

三、实施进展：课题一

谱仪设计仿真

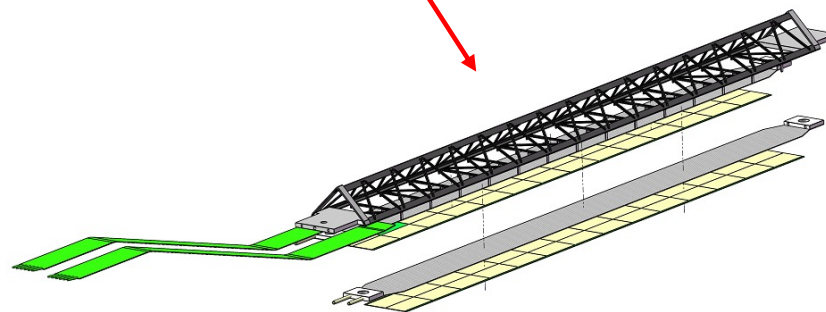
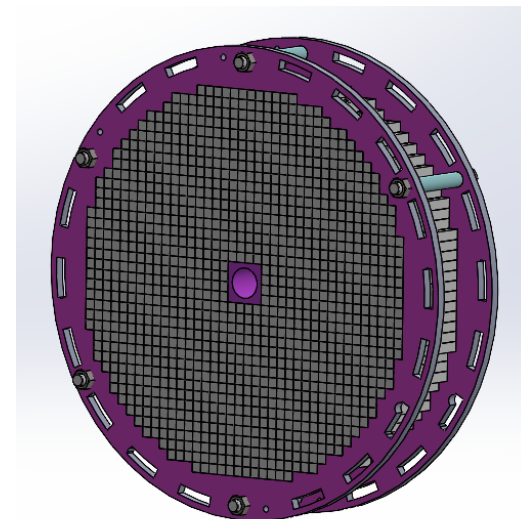
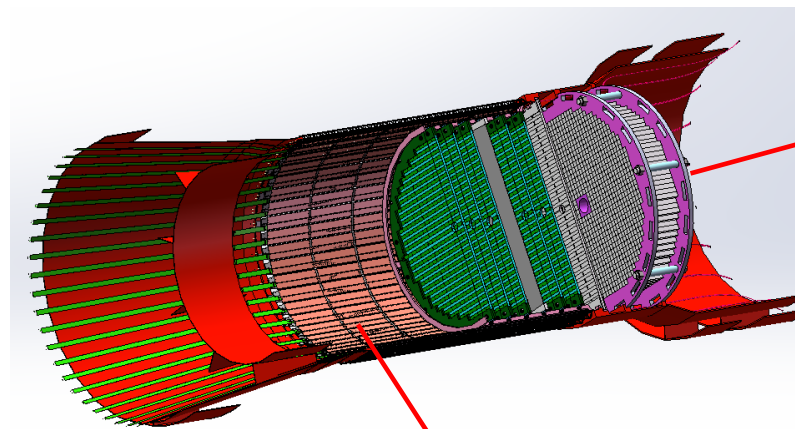
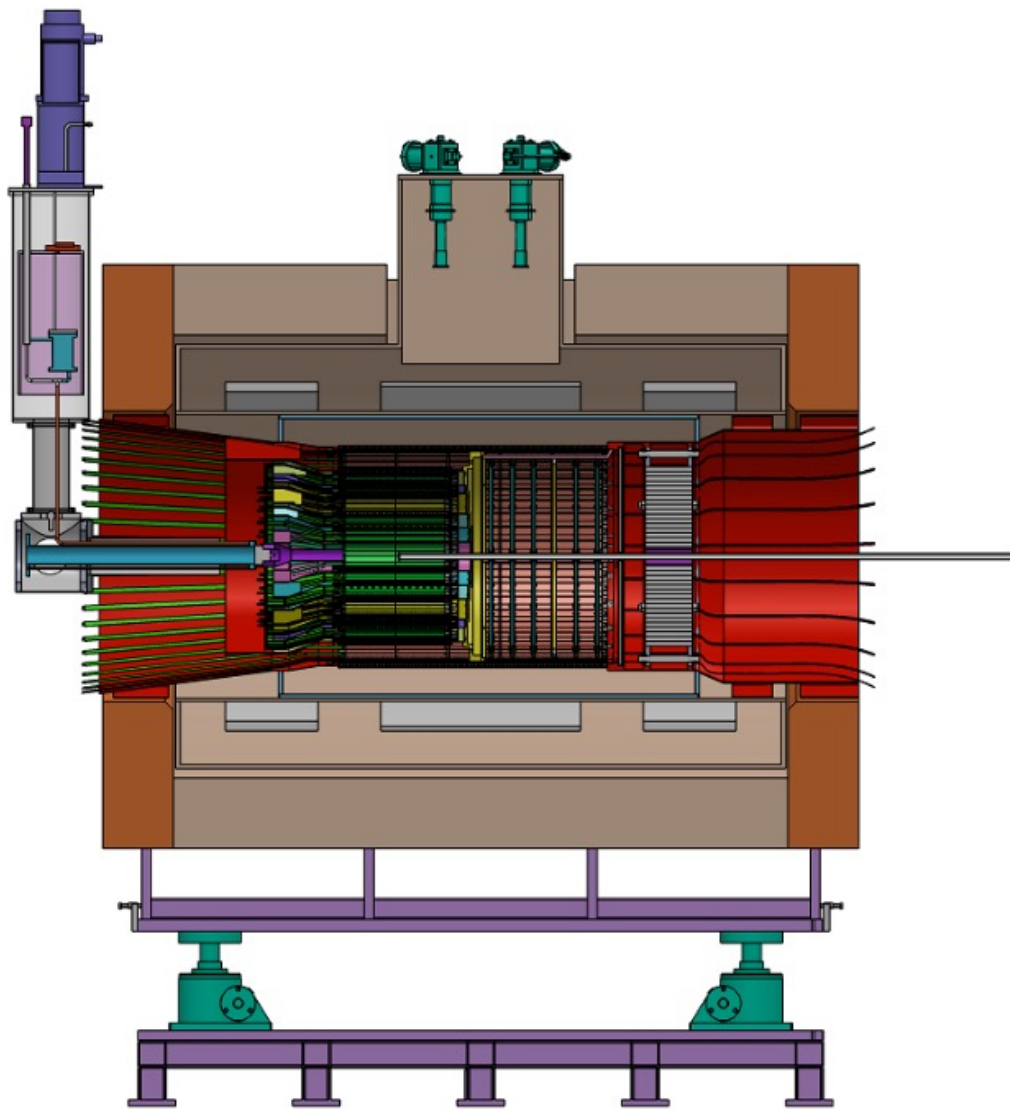
几何优化：利用GEANT4等成熟模拟软件并结合数值计算方法进行探测器设计和优化。并通过蒙特卡洛模拟验证其性能



Efficiency comparison at different beam energy

三、实施进展：课题一

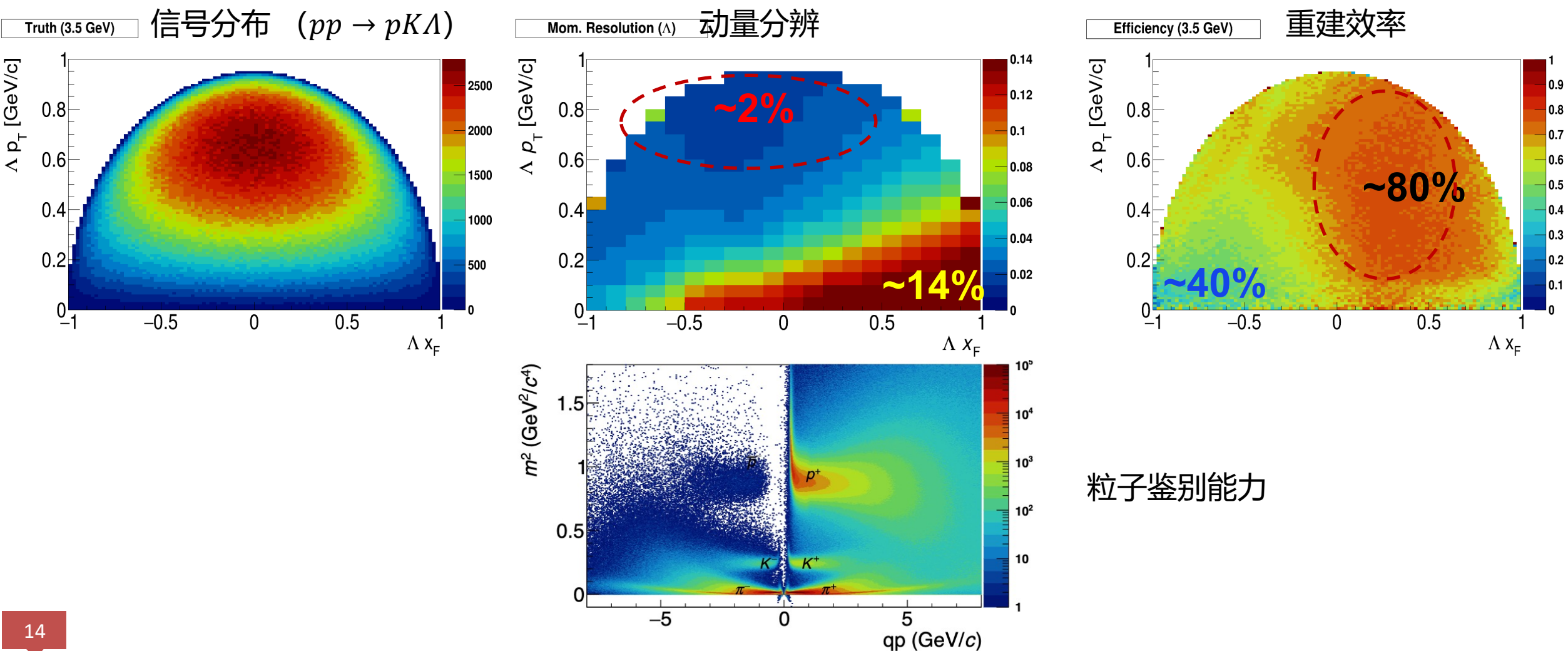
康新才



三、实施进展：课题一

谱仪设计仿真

性能估计：利用GEANT4等成熟**模拟软件**并结合**数值计算方法**进行探测器设计和优化。并通过蒙特卡洛模拟验证其性能

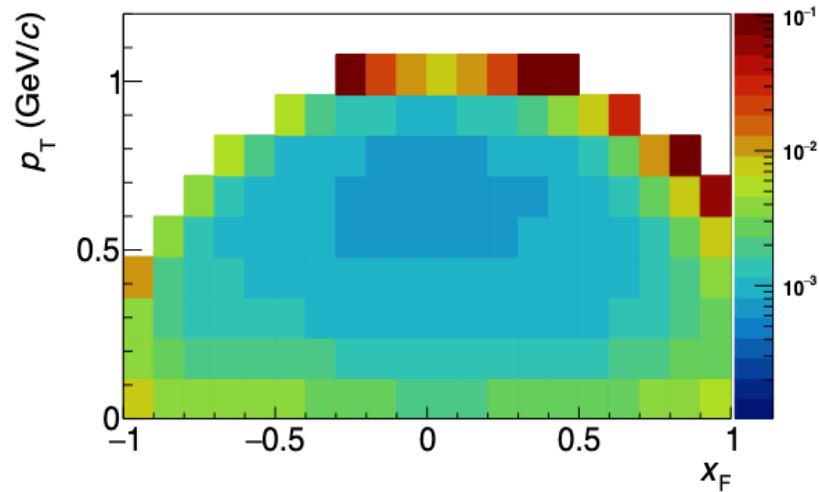


三、实施进展：课题一

谱仪软件框架

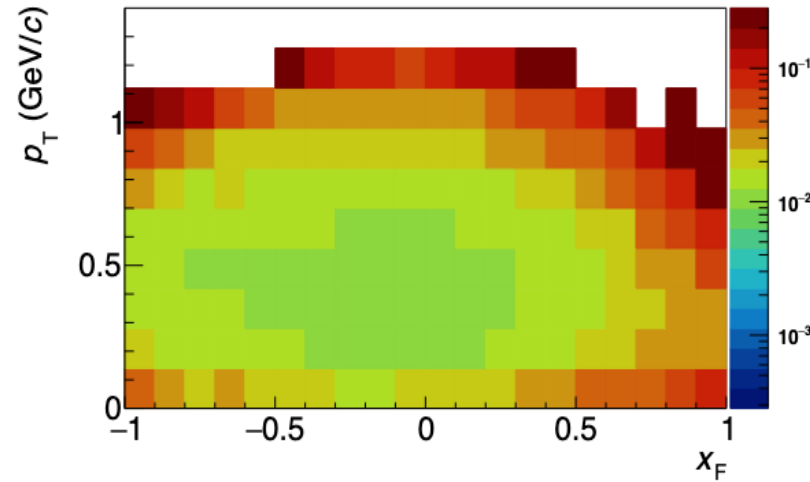
物理模拟：基于FairRoot开发适用于超核谱仪的软件框架，对关键物理过程进行模拟

10^9 simulated pp $\rightarrow$ pK+ Λ events



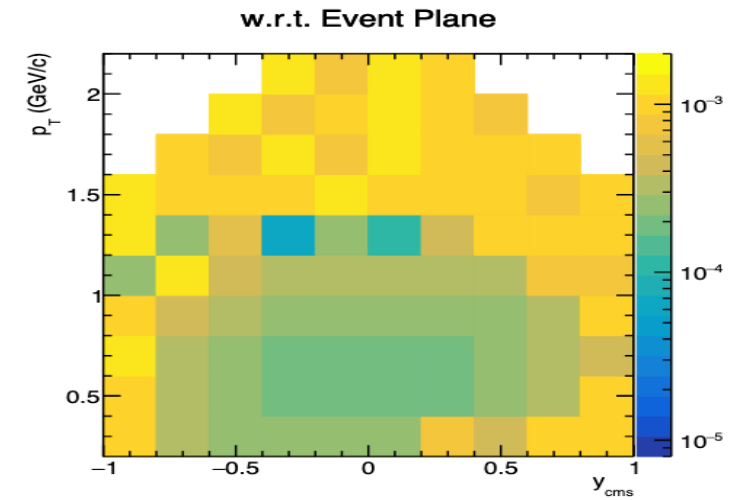
2D uncertainty of Λ polarization

10^{13} pp $\rightarrow$ X p events



2D uncertainty of p polarization

10^{11} Au+Au events



2D uncertainty of Λ global polarization

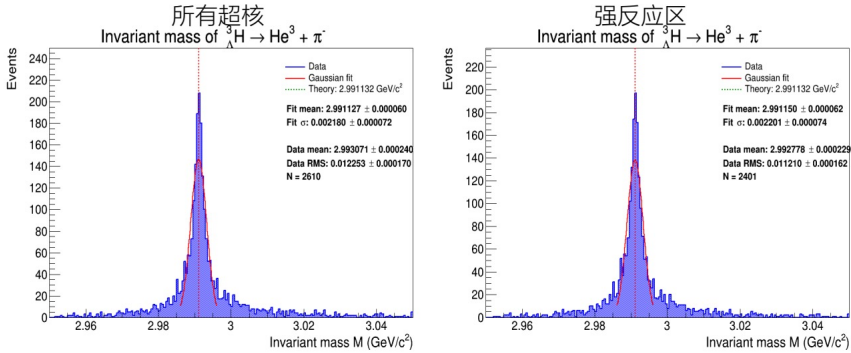
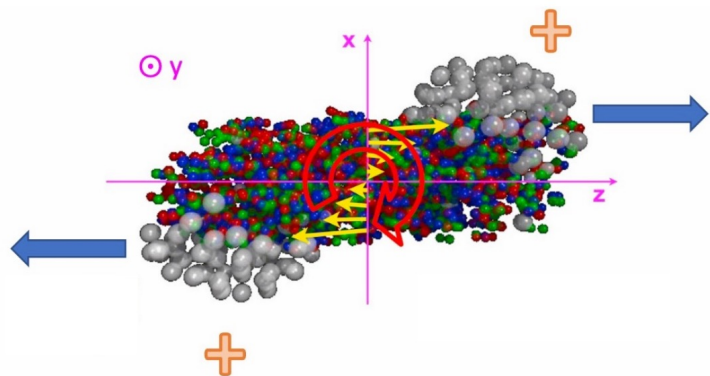
三、实施进展：课题一

谱仪软件框架

物理模拟：基于FairRoot开发适用于超核谱仪的软件框架，对关键物理过程进行模拟

超核研究

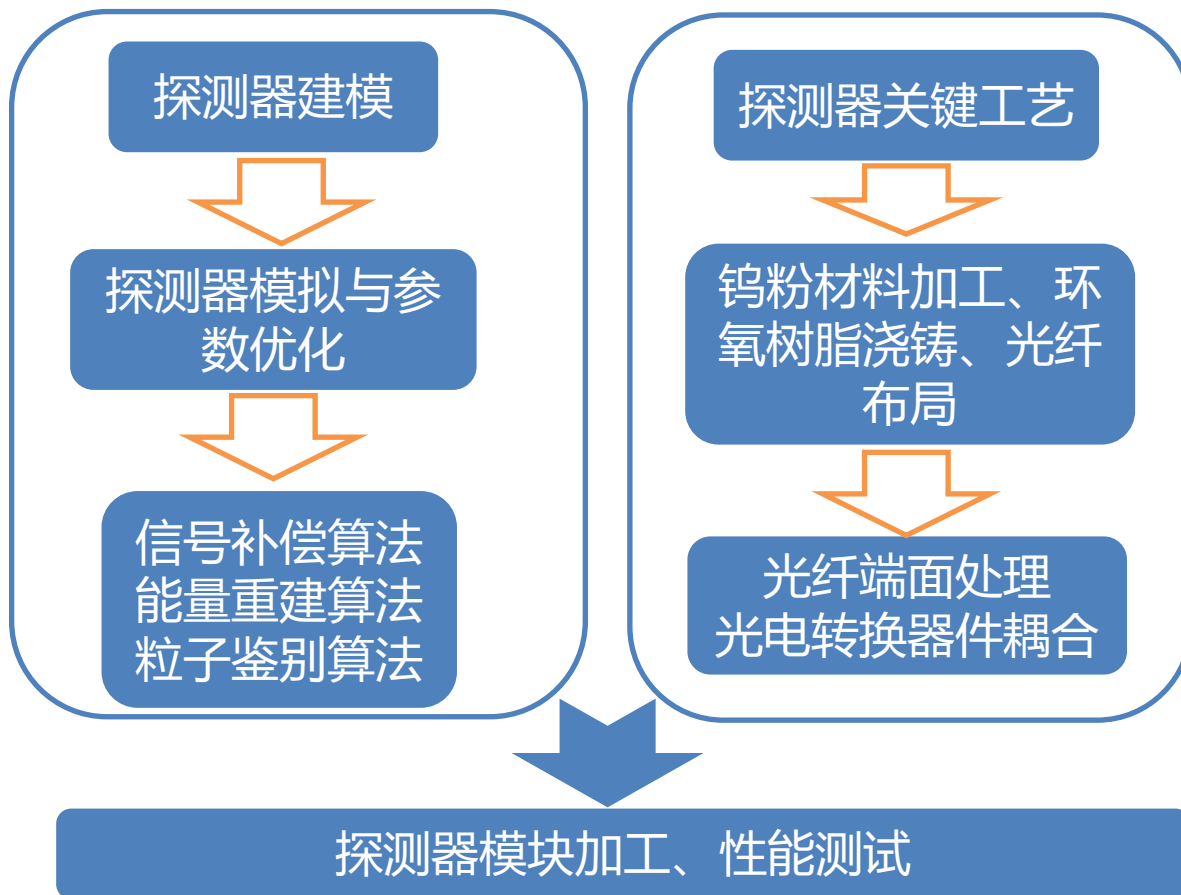
DCM 级联碰撞模型



物理目标	状态
pp/pA 中 Λ 极化	完成
pp/pA 中质子极化	完成
AA 中 Λ 整体极化	完成
Y-N相互作用	进行中
CP破坏	将要开展
QCD相图	将要开展
强子物理：重子激发态，奇特态	将要开展

三、实施进展：课题2任务

课题二：高精度双读出型量能器研究



课题二主要考核指标

能量分辨率：电磁簇射能量分辨率好于 $5\%/\sqrt{E[\text{GeV}]}$ ，强子簇射能量分辨率好于 $60\%/\sqrt{E[\text{GeV}]}$

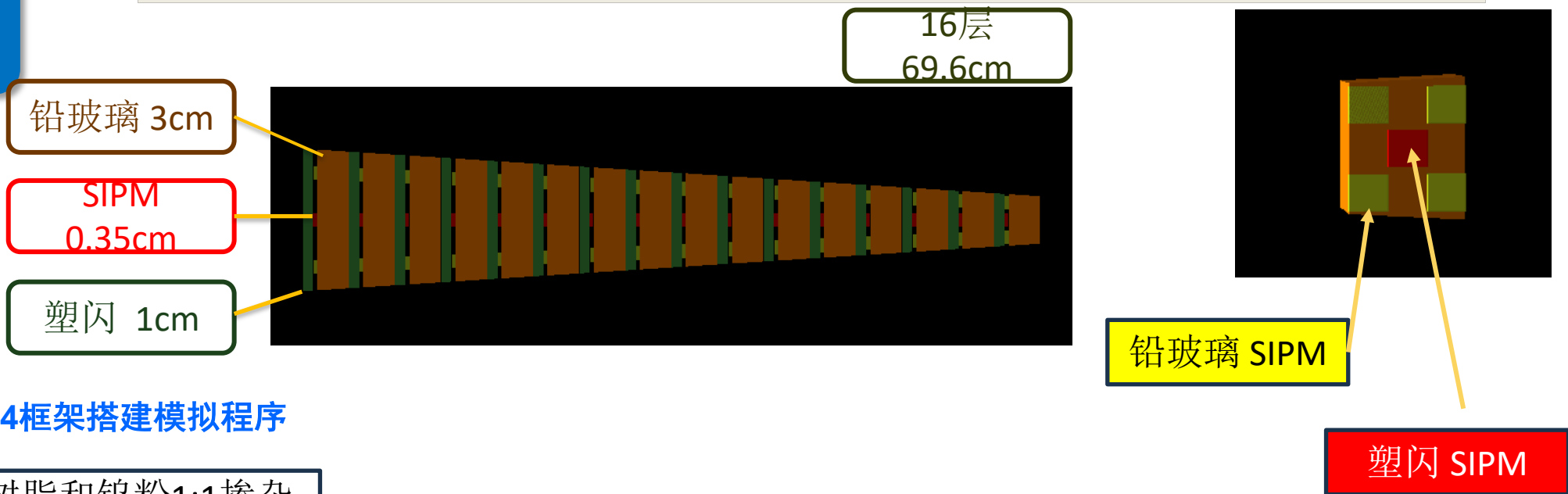
粒子鉴别效率：实现光子/中子鉴别效率不低于95%

课题承担单位：复旦大学

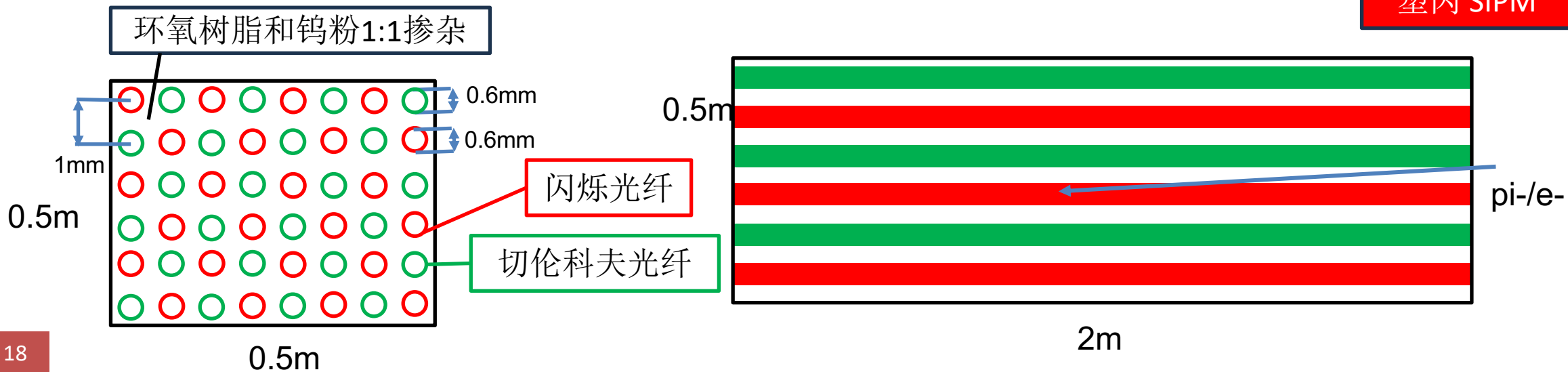
三、实施进展：课题二

高精度双读
出量能器

• 双读出型量能器构型



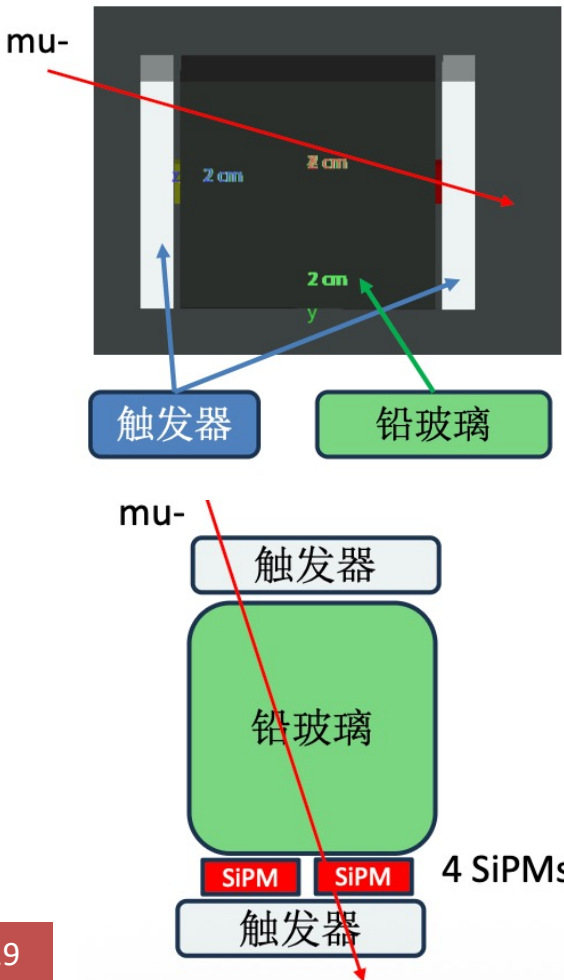
基于Geant4框架搭建模拟程序



三、实施进展：课题二

高精度双读出量能器

单元块的结构设计与性能模拟



切伦科夫光子数

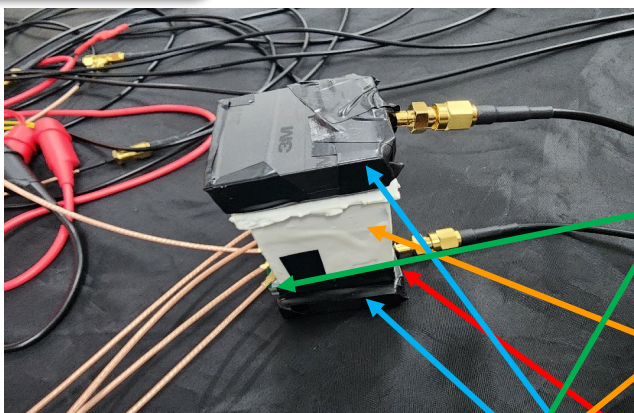
量能器结构	产生光子	量能器吸收	反射层吸收	SiPM(顶部)接收	SiPM(顶部)探测	SiPM(底部)接收	SiPM(底部)探测
4侧面粗糙	2946	1369	1195	68.79	16.14	303.2	71.67
(%)	100%	46.47%	40.56%	2.34%	0.55%	10.29%	2.43%
全表面粗糙	2945	1479	883.4	108.5	24.22	454.2	102
(%)	100%	50.22%	30.00%	3.68%	0.82%	15.42%	3.46%
SiPM读出窗口粗糙	2927	1342	1073	102.4	24.2	403.2	95.18
(%)	100%	45.85%	36.66%	3.50%	0.83%	13.78%	3.25%

模拟得到的不同设置下SiPM接受的光子数

三、实施进展：课题二

高精度双读出量能器

- 对**铅玻璃+塑闪**构型的单元模块开展了宇宙线测试，完成了SiPM及读出电子学的基本设计。

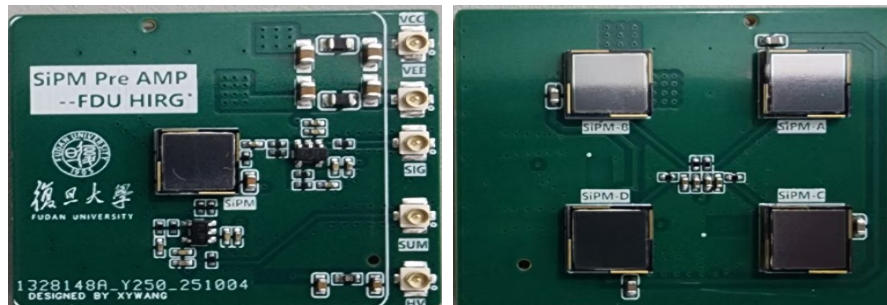
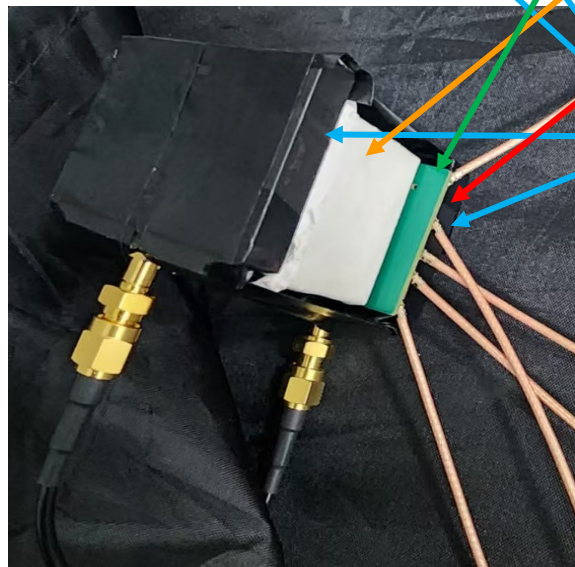


SiPM board

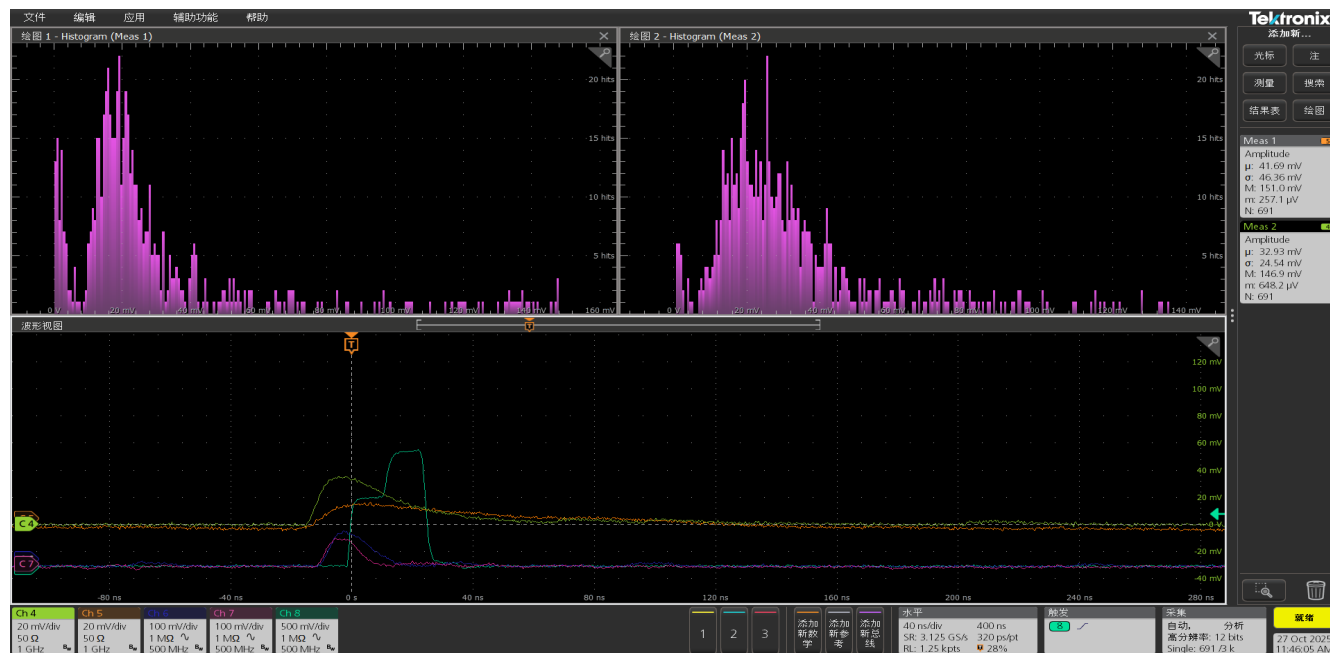
Lead glass

Scintillator

trigger



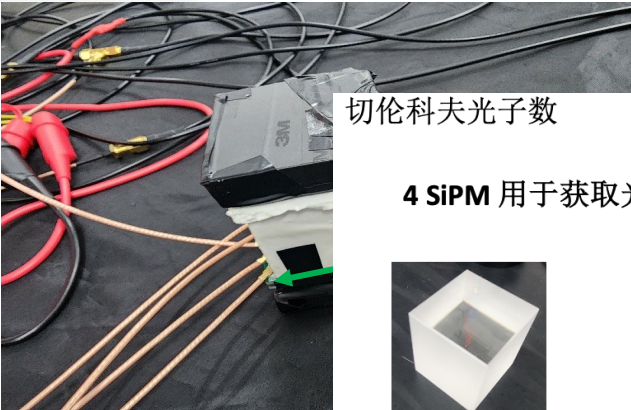
SiPM前端电路板



三、实施进展：课题二

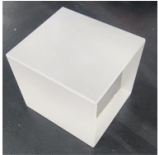
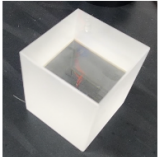
高精度双读
出量能器

- 对**铅玻璃+塑闪构型**的单元模块开展了宇宙线测试，完成了SiPM及读出电子学的基本设计。



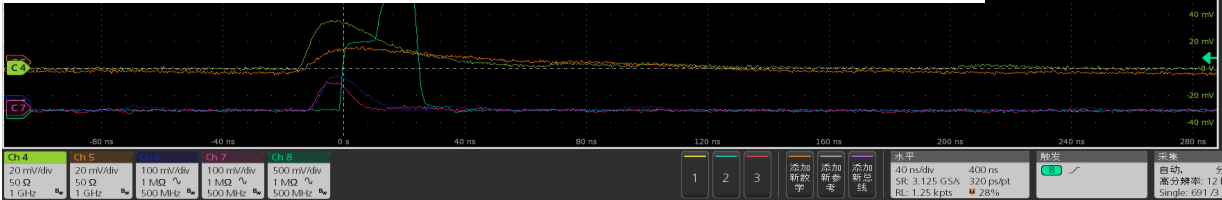
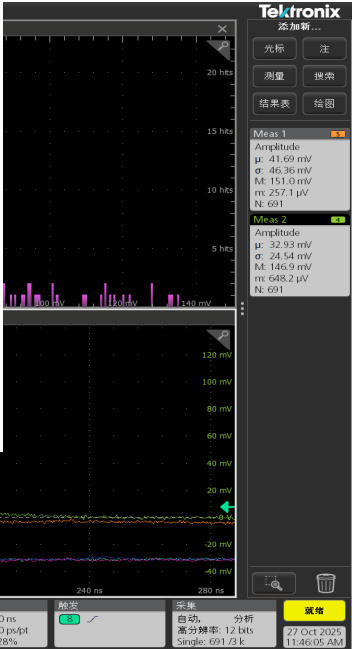
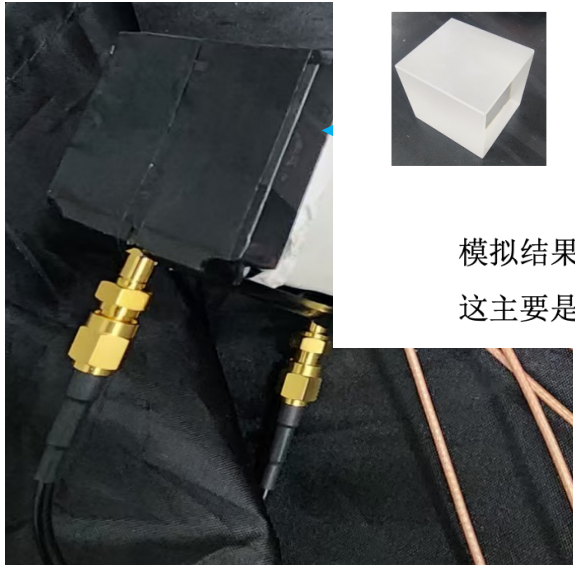
切伦科夫光子数

4 SiPM 用于获取光子



表面	涂层	无涂层	4侧面涂层	5表面涂层	除 SiPM 窗口外全涂层
抛光	宇宙线测试	33.72	56.68	85.11	95.42
	模拟	14.88	34.3	52.02	71.76
粗糙	宇宙线测试	40.2	57.58	79.70	
	模拟	18.56	33.79	54.95	

模拟结果略低于实际测试测量值，但两者仍处于大致相同的量级范围内。
这主要是因为实际实验中的空气间隔比模拟中的设定值更小。



三、实施进展：课题二

高精度双读
出量能器

- 对**铅玻璃+塑闪**构型的单元模块开展了宇宙线测试，完成了SiPM及读出电子学的设计。

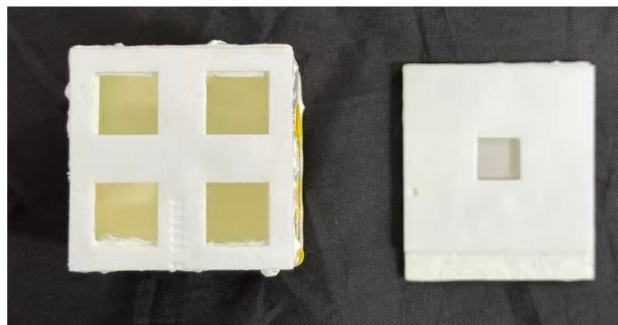
柔性PCB



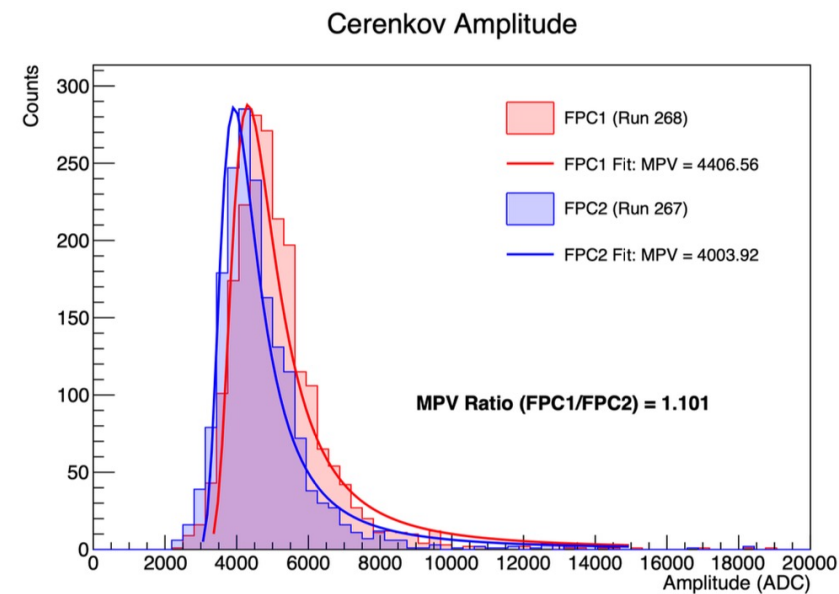
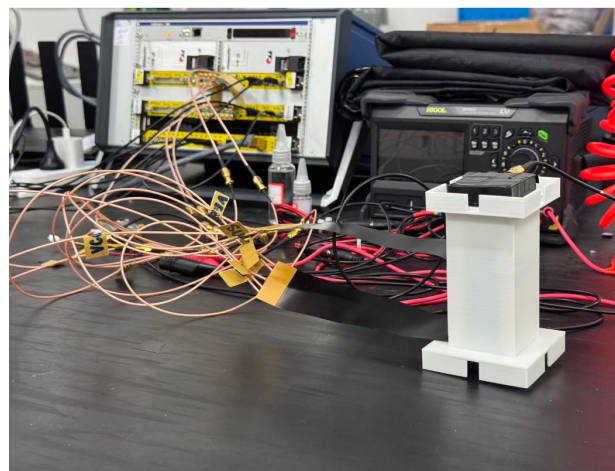
测试模块



铅玻璃: **抛光** 塑闪: **2mm**



测试系统



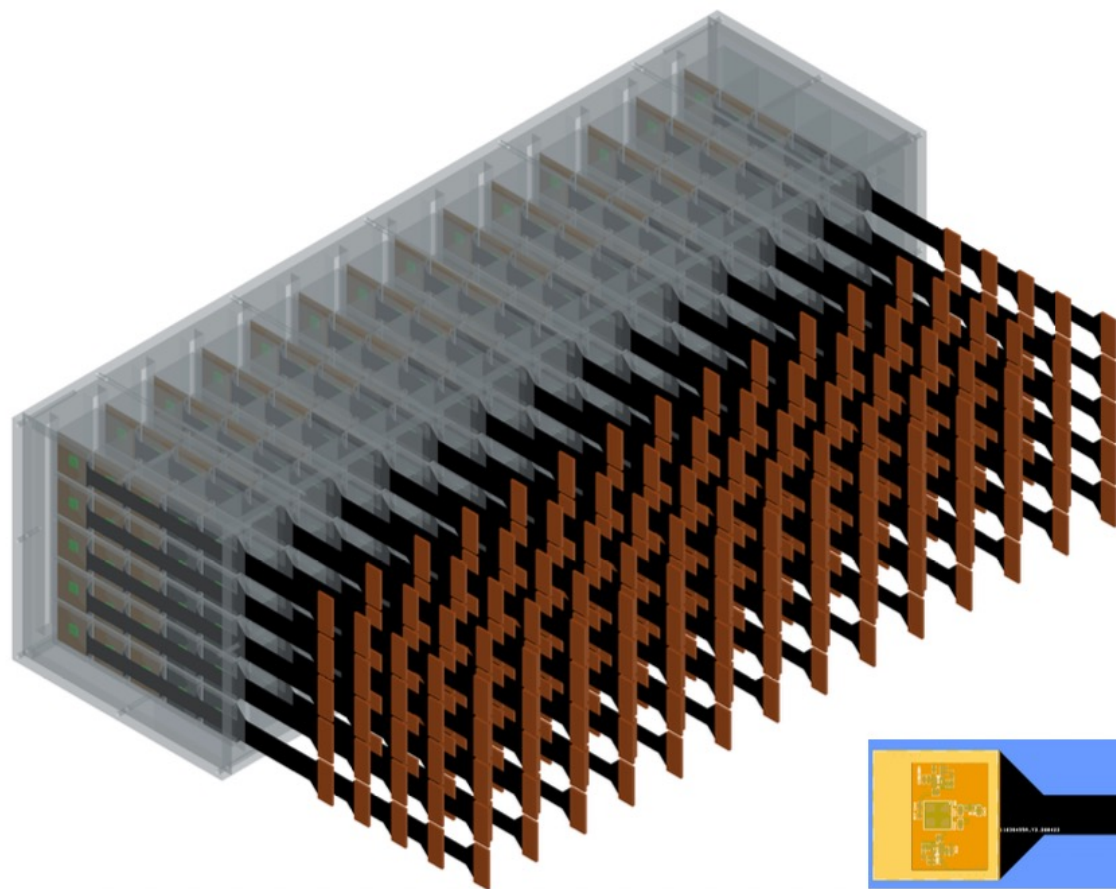
读出电子学宇宙线测试结果

三、实施进展：课题二

高精度双读出量能器

- 完成了包含温度补偿的SiPM读出板及样机的整体设计

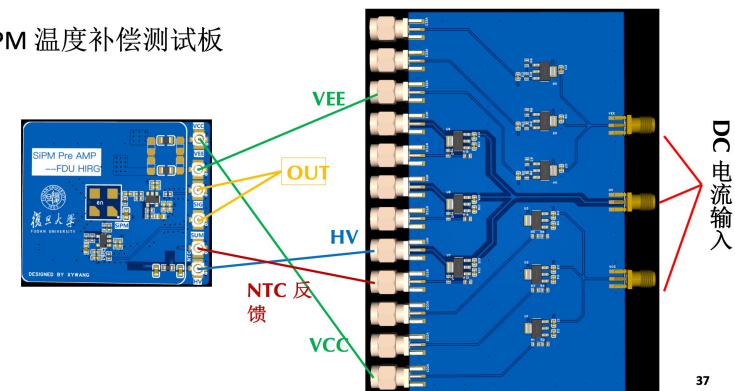
样机整体设计



包含温度补偿的SiPM读出板
FPC 读出板



SiPM 温度补偿测试板



三、实施进展：课题3任务

课题三：基于MAPS的高位置分辨低物质质量径迹探测器研发

课题三主要考核指标

发展基于MAPS的径迹探测器技术：

- MAPS芯片集成精度优于5 微米
- 单层物质质量小于0.35% X0
- 研制模块样机

探索多层筒形结构探测器原型机的集成方案和研发

课题承担单位：华中师范大学

课题参与单位：中国科学院近代物理研究所

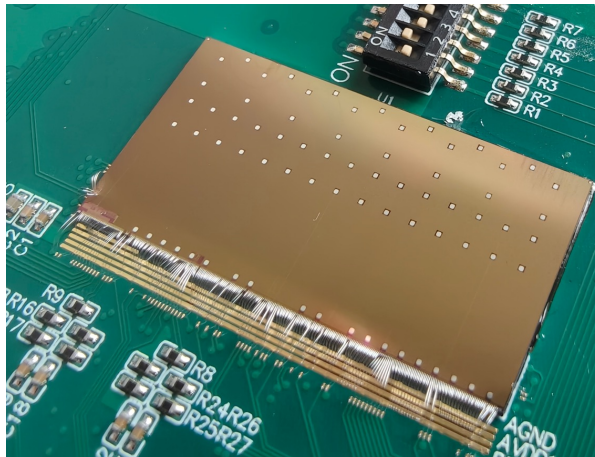
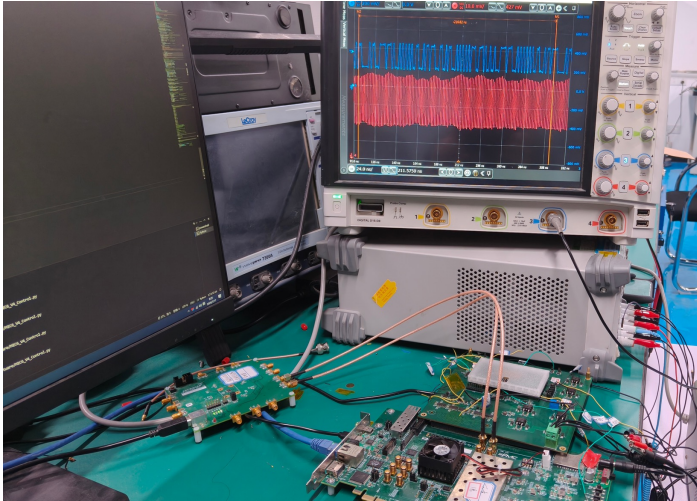


三、实施进展：课题三

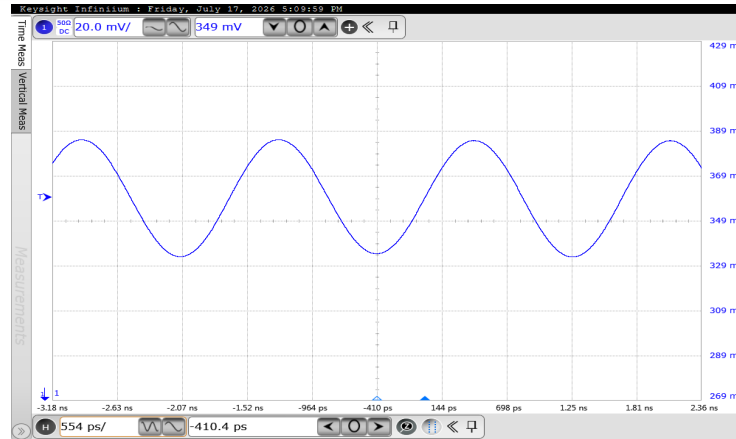
肖乐 (CCNU) 提供

✓ Preliminary test of MIC6_V4 chip at CCNU

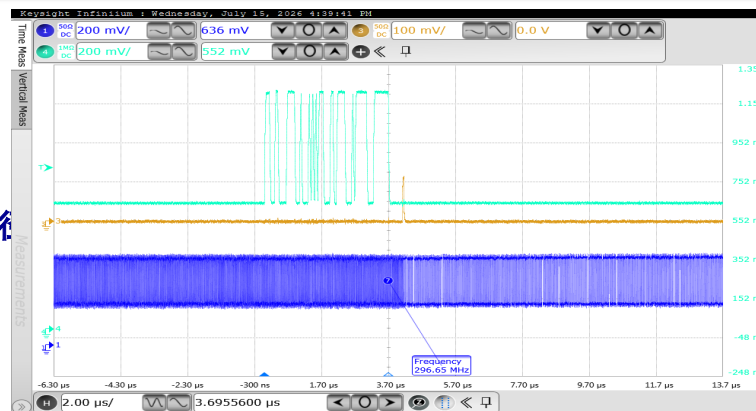
MIC6_V4 Test System



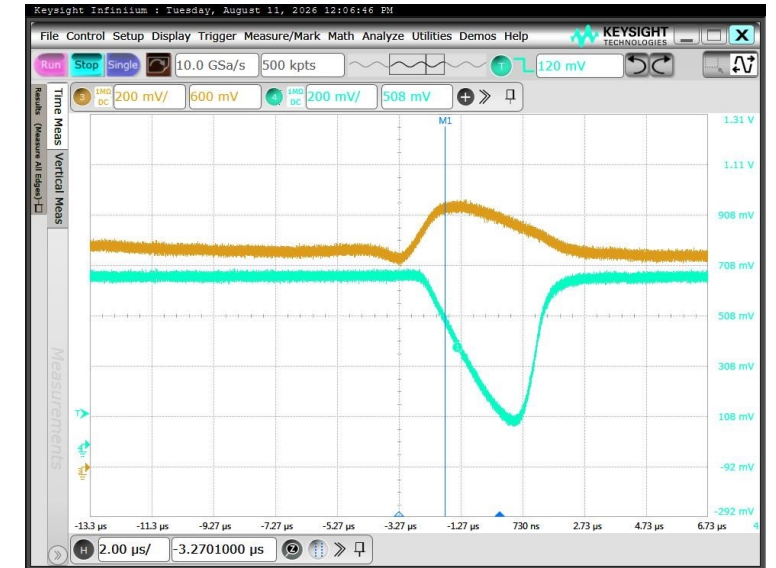
PLL Output 600MHzClock



CMU Configure PLL Clock



Pixel Out_A & Out_D



Positive results:

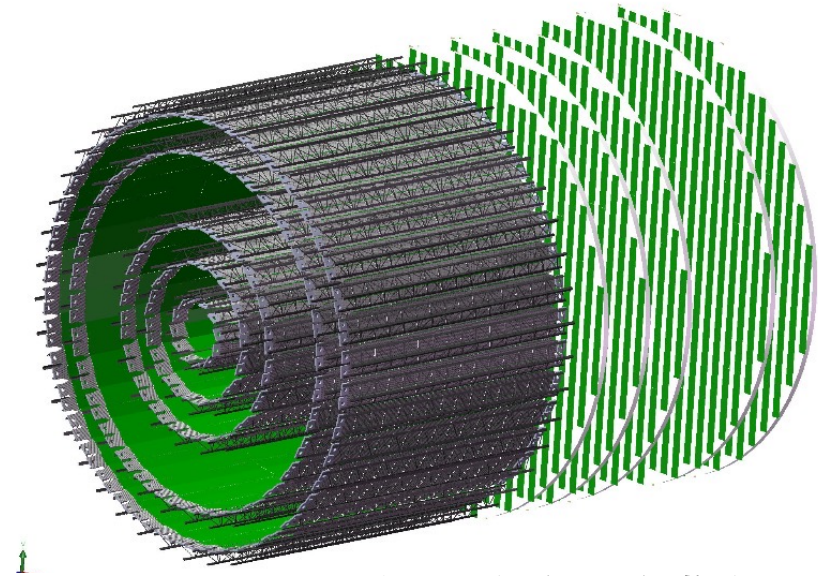
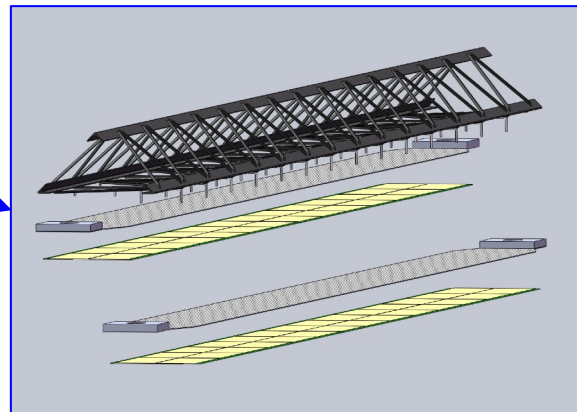
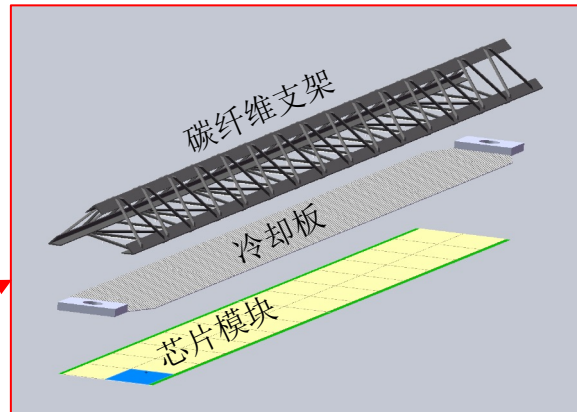
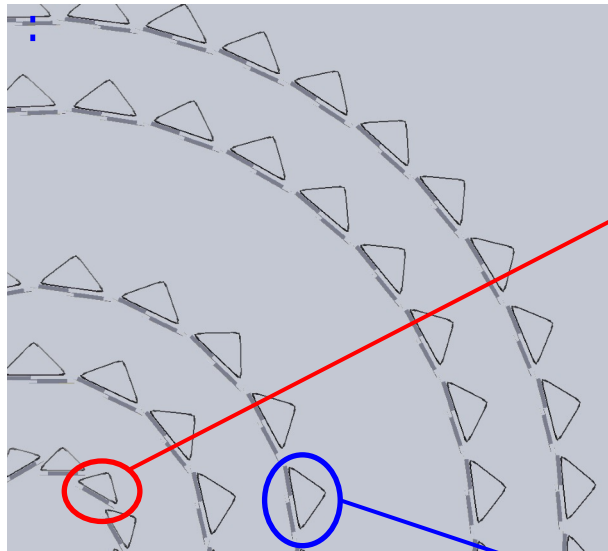
- MLVDS Module ✓
- PLL Module ✓
- Control Management Unit ✓
- DAC ✓
- Pixel Front-end ✓

三、实施进展：课题三

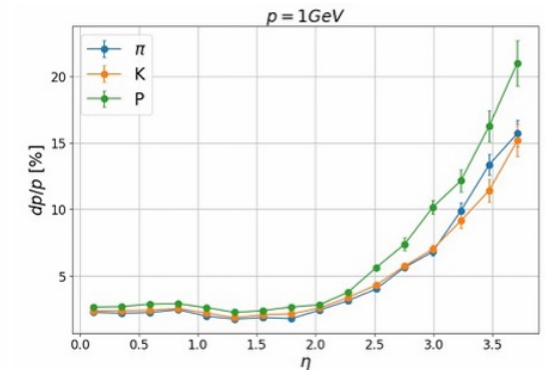
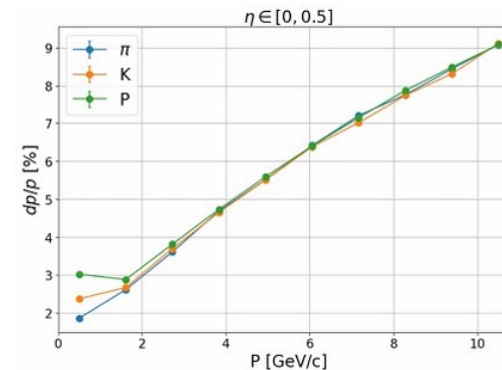
高位置分辨低
质量MAPS径
迹探测器

- 根据物理要求，通过模拟，完成几何结构设计

桶部stave模块结构设计

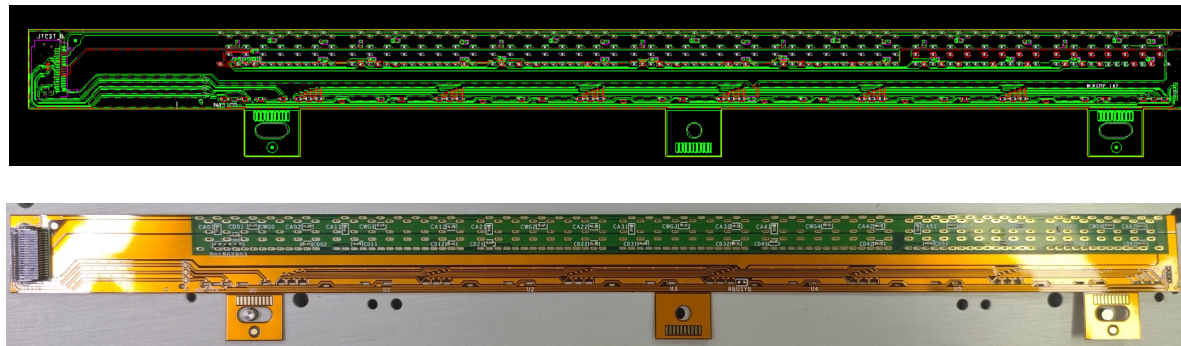
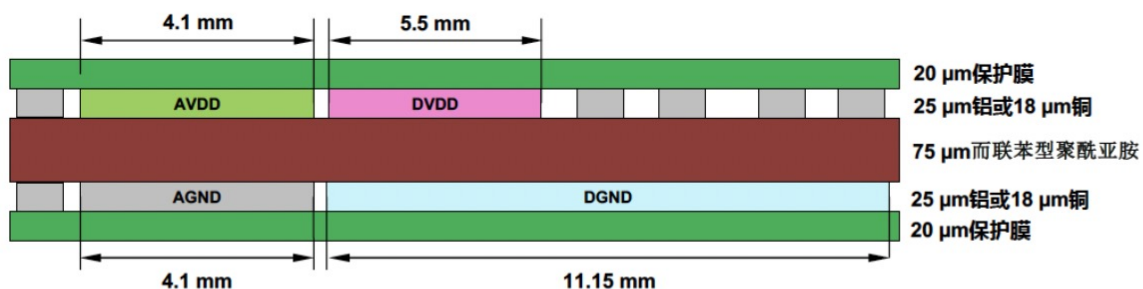


不同粒子的动量分辨率



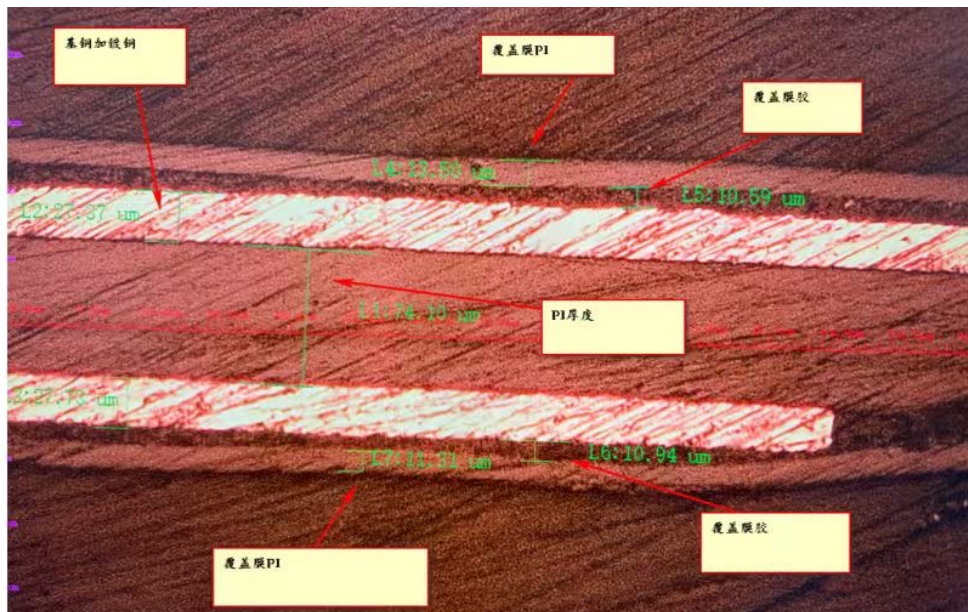
三、实施进展：课题三

- ✓ 开展并完成了柔性PCB板（FPC）的设计，在国内完成铜基FPC研制（聚酰亚胺膜75微米厚，双铜层18微米/层，双覆盖膜层18微米/层）



FPC层数及物质设计

叠层设计					
层	材料名称	FPC	FPC	FPC	单位
	Coverlay PI	12.5	12.5	12.5	μm
	Coverlay AD	15	15	15	μm
Top	Base copper+plating	22	22	22	μm
	Polyimide	75	75	75	μm
Bot	Base copper+plating	22	22	22	μm
	Coverlay AD	15	15	15	μm
	Coverlay PI	12.5	12.5	12.5	μm
					μm
	设计厚度	174	174	174	μm
					μm
FPC厚度要求mm		0.17	厚度公差mm	± 0.05	

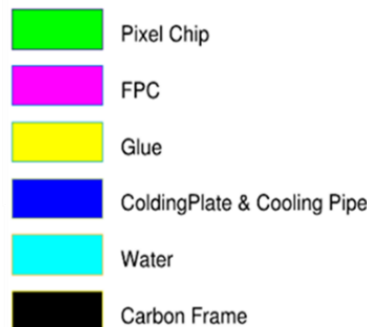
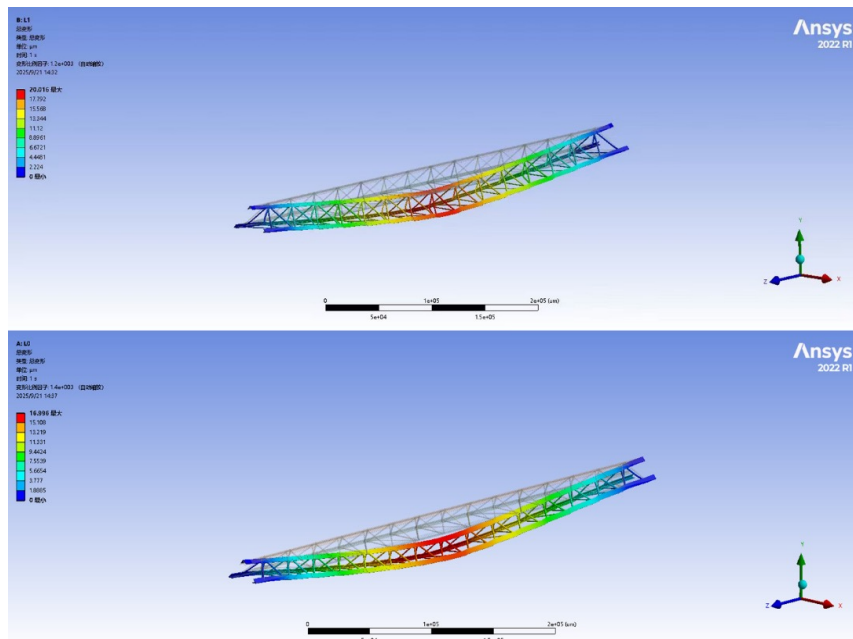


三、实施进展：课题三

高位置分辨低 物质质量MAPS径 迹探测器

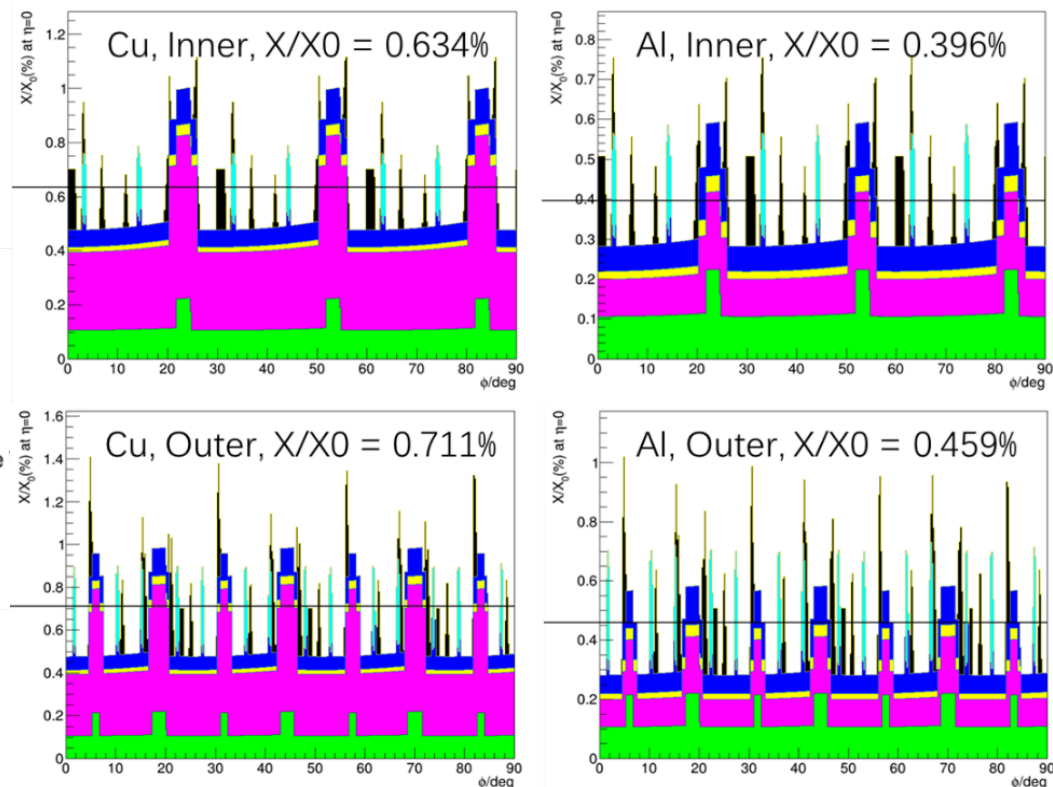
- 设计迭代与工艺预研：通过**有限元分析方法**（FEA）**验证机械性能及物质质量分布**

- ✓ 完成机械性能模拟和物理仿真模拟
- ✓ 基于选材和结构进行了FEA仿真，验证了当前设计的机械性能达标



目前采用水冷。
考虑采用风冷以
显著减小物质质量

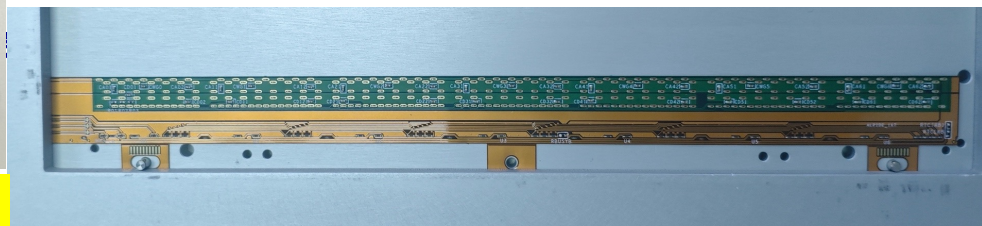
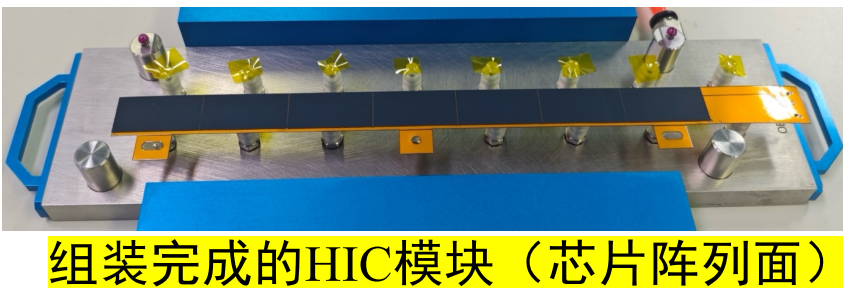
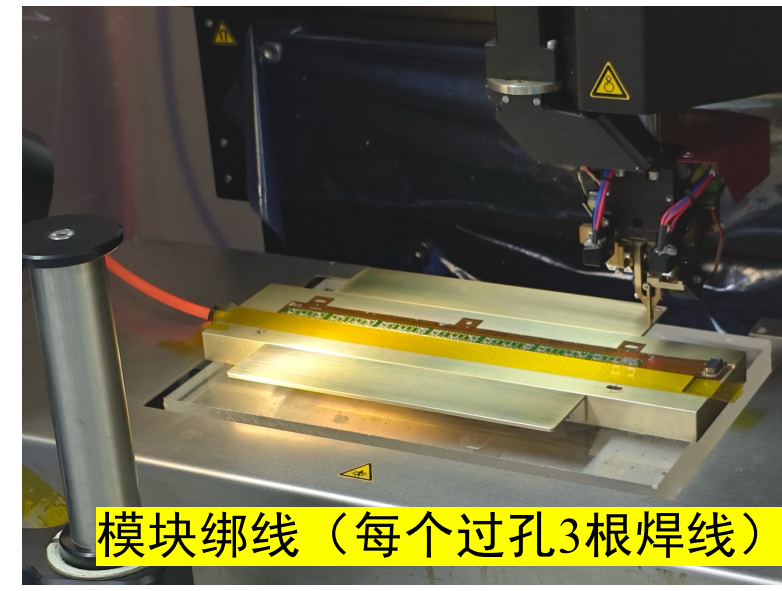
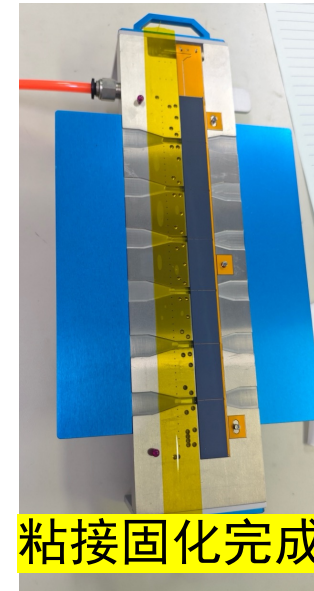
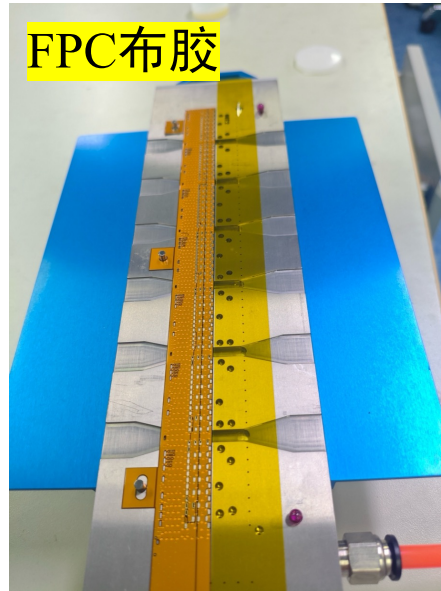
- ✓ 基于Geant4+DD4Hep模拟了两种不同选材（铜基与铝基）的FPC的物质质量分布



Al/Cu两种FPC选材下，内层和外层的单层物质质量沿 Φ 方向分布（ $\eta = 0$ ）

三、实施进展：课题三

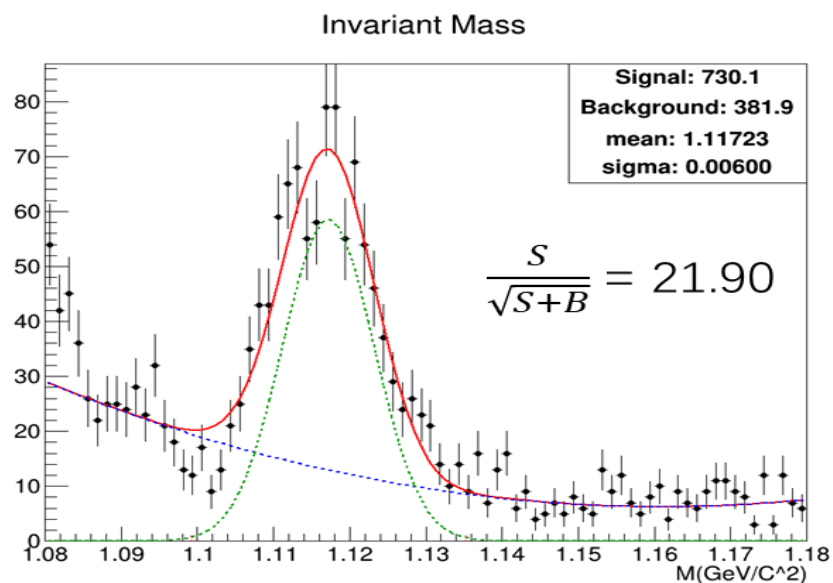
- ✓ 制定了HIC模块组装与测试的技术方案，用于HIC模块组装与测试平台已就位
- ✓ 利用MAPS样片成功组装了HIC 模块样机，**芯片集成精度好于10微米**



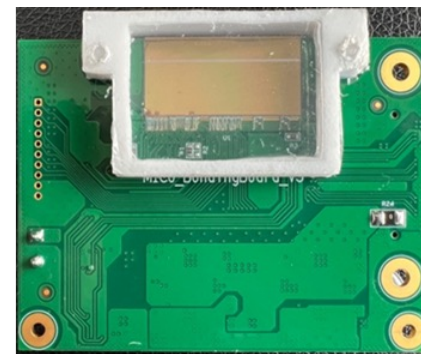
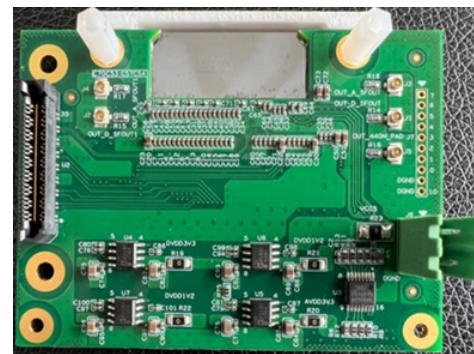
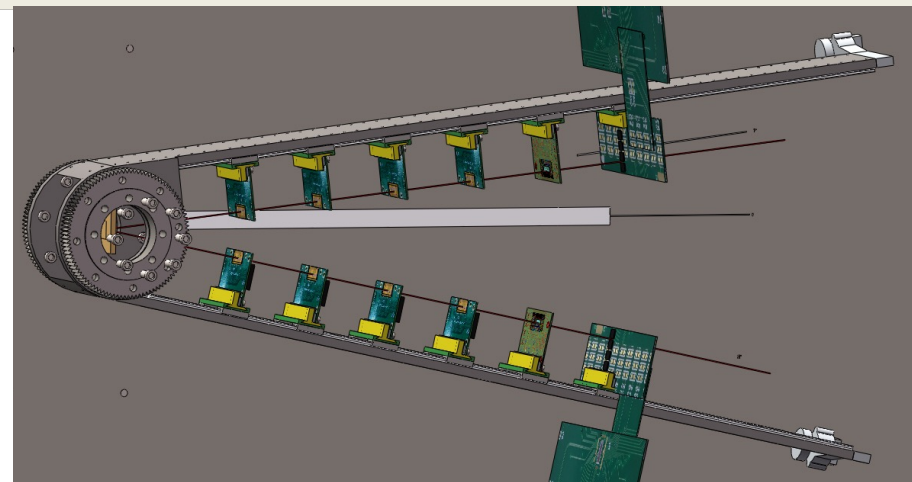
三、实施进展：课题三

高位置分辨低 物质质量MAPS径 迹探测器

- H-NS0将在HIAF上使用束流能量2.6/4.2 GeV氧束+碳靶进行实验，验证MAPS系统和LGAD系统正常运行并尝试重建 Λ 超子



- ✓ 模拟了从19° (12°+7°) 到29° (17°+12°) 等六种几何参数下H-NS0重建 Λ 超子的性能。基于模拟结果，张角19°为最佳几何配置
- ✓ 根据结果估计，H-NS0运行三周左右的时间，可以重建出10000个 Λ 超子信号



三、实施进展：课题4任务

课题四：超子与超核的产生和极化效应的研究

课题四主要考核指标

超子和超核的产生机制

分析重离子碰撞超子产生率、动量分布，获取超子-核子相互作用特征

超子极化效应

分析极化超子碎裂函数，计算多夸克关联和末态相互作用对自旋极化的影响，探索重离子碰撞中超子极化的新机制

极端条件下的性质

结合理论模型和数据，探讨超子-核子作用如何改变和物质相态，深入理解核物质状态方程

超子谱仪设计理论支撑

结合理论计算和数值模拟，为超核谱仪设计和优化提供理论支持

推动理论：建立超子极化模型，在超子核子相互作用和产生机制方面取得重要理论进展，发表相关科学论文。

支撑实验：建立超核产生数值模拟框架，建议极化观测量，组织相关研讨，以论文和会议报告的形式呈现成果

人才培养：培养本领域的硕士博士研究生

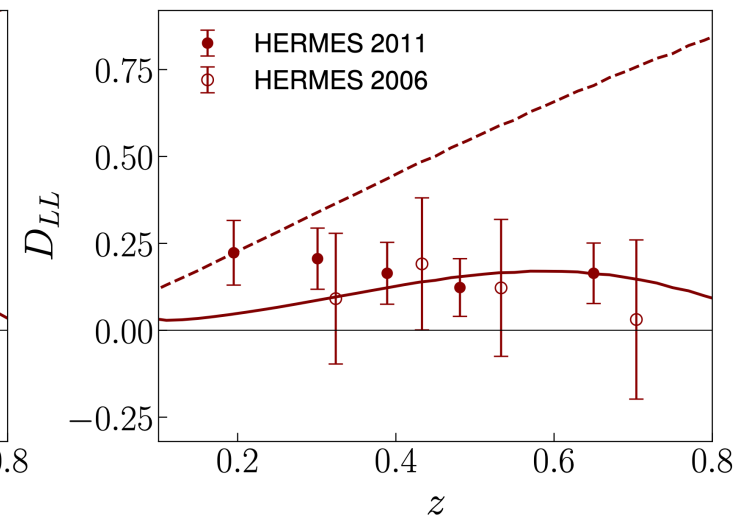
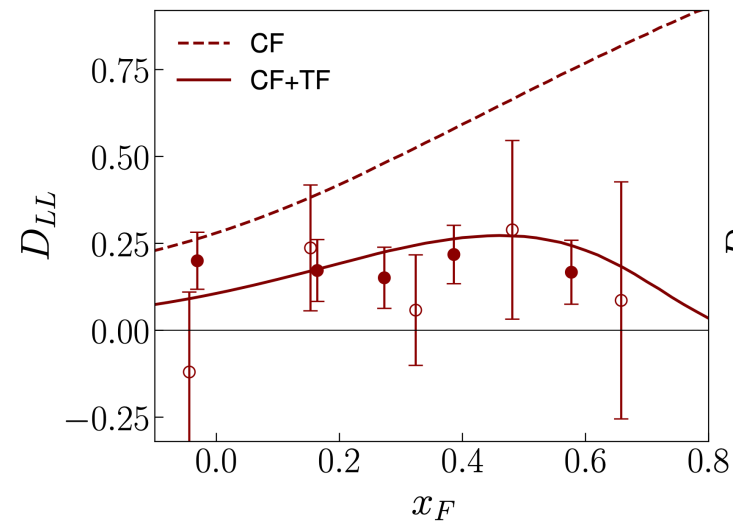
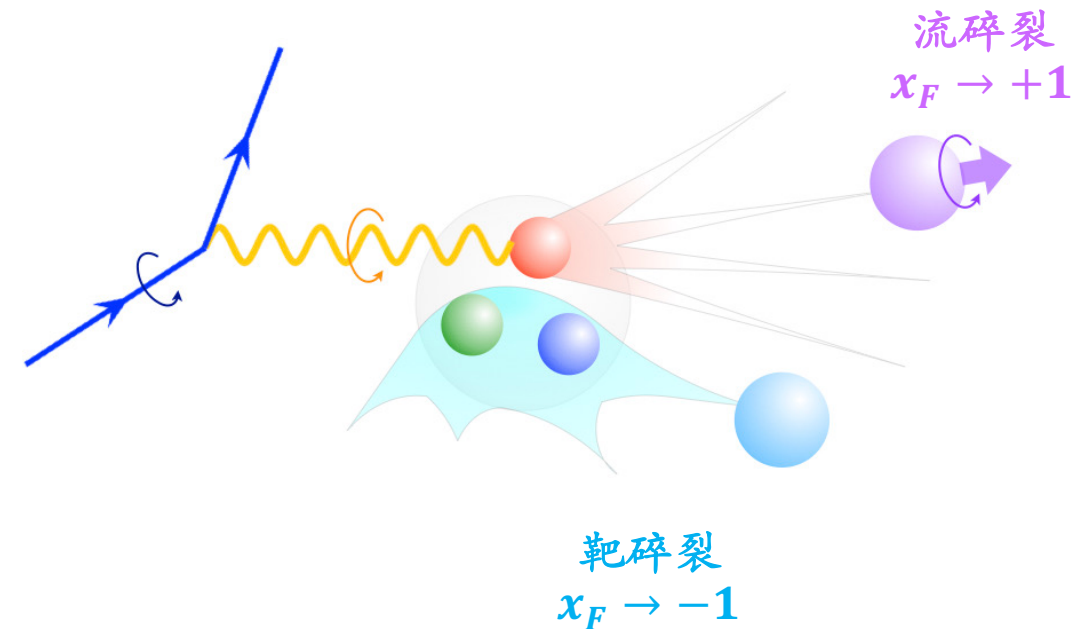
课题承担单位：香港中文大学(深圳)

课题参与单位：山东大学

三、实施进展：课题四

超子与超核的产生和极化效应的研究

- 极化轻子束流与非极化靶反应中，自旋转移与靶碎裂机制



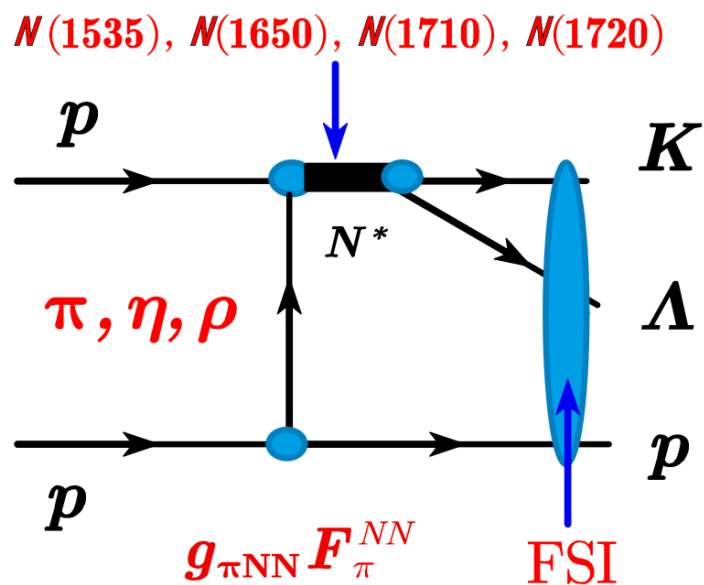
HERMES Collaboration, Phys. Rev. D 74 (2006) 072004; J. Phys. Conf. Ser. 295 (2011) 012114.

Xiaoyan Zhao, Zuo-tang Liang, Tianbo Liu,
Ya-jin Zhou, PRL 134 (2025) 231901.

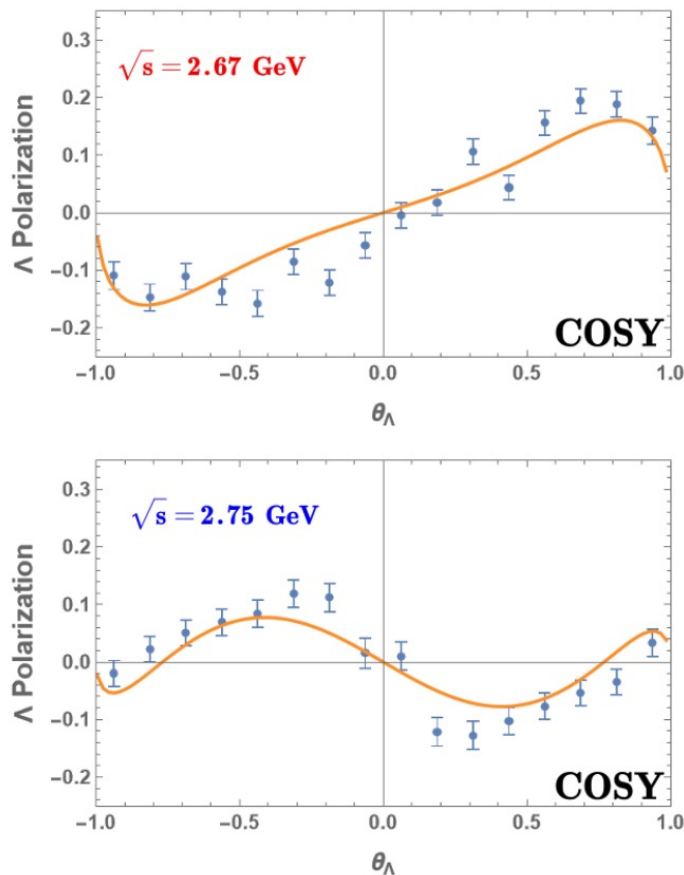
三、实施进展：课题四

超子与超核的产生和极化效应的研究

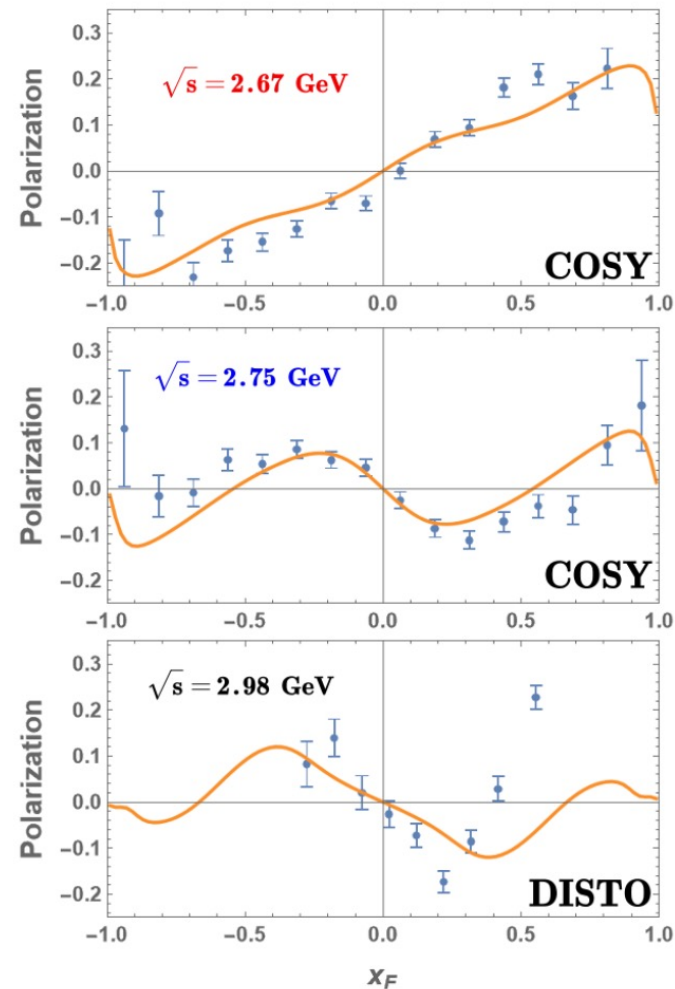
- 通过介子交换模型研究低能区超子/核子极化



介子交换模型



Lambda Polarization

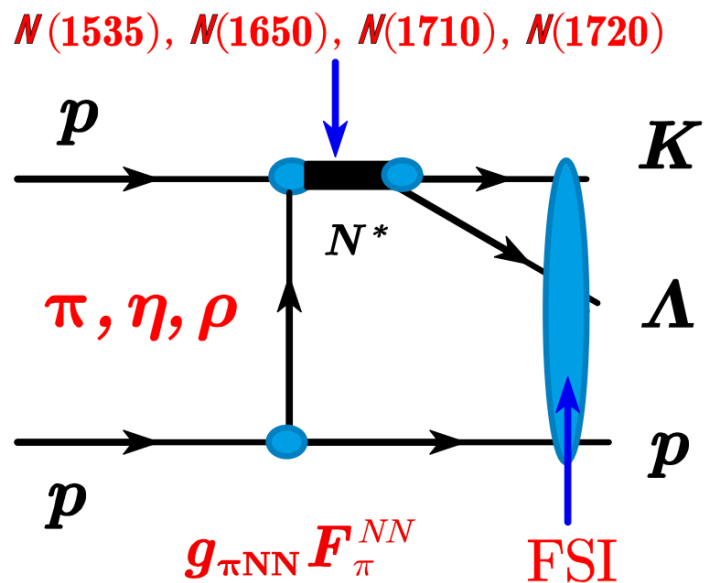


三、实施进展：课题四

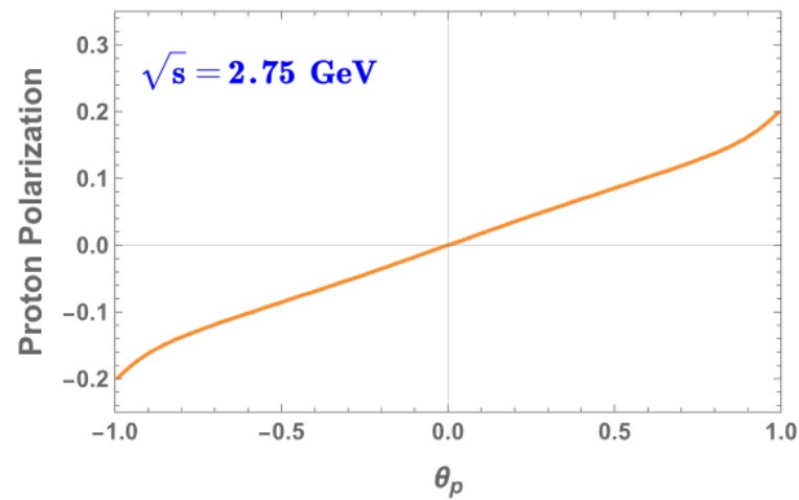
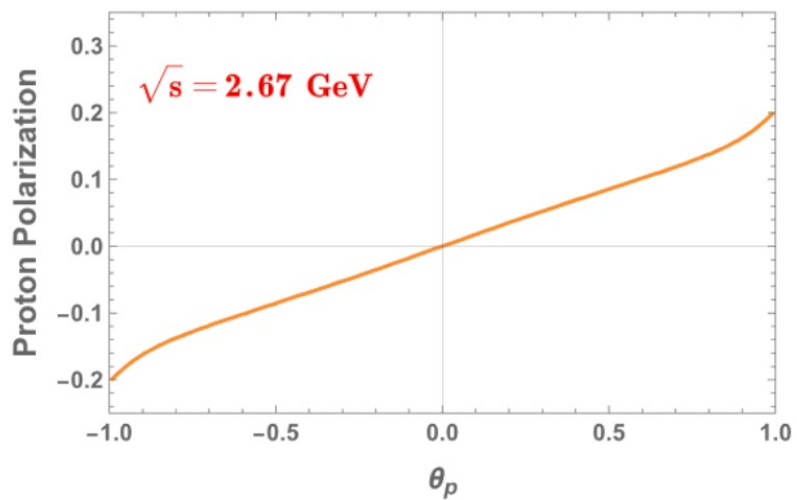
超子与超核的产生和极化效应的研究

- 通过介子交换模型研究低能区超子/核子极化

proton Polarization



介子交换模型



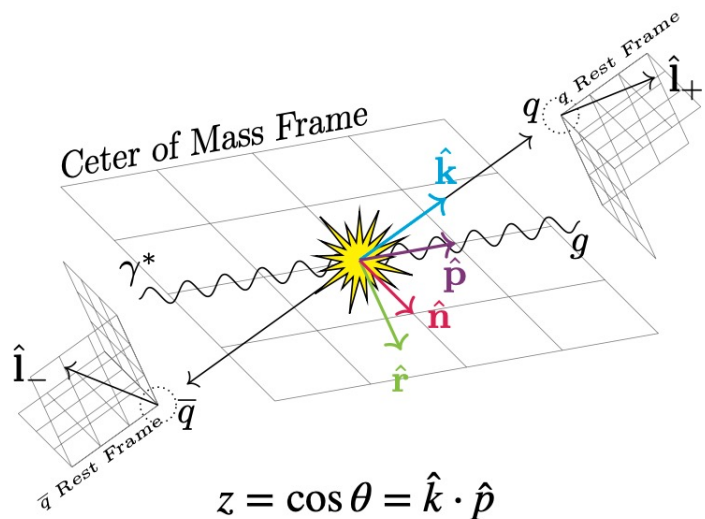
三、实施进展：课题四

超子与超核的产生和极化效应的研究

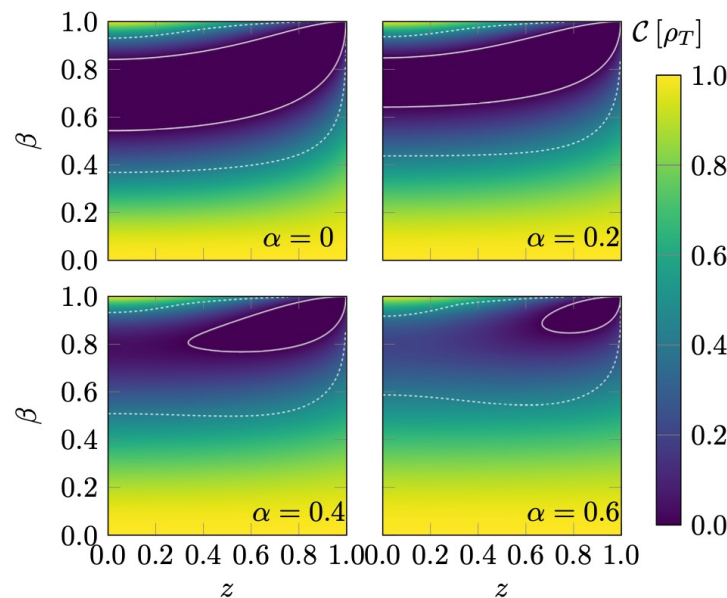
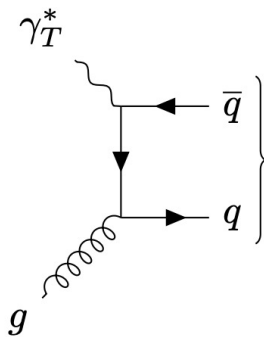
- 高能产生正反夸克对的量子纠缠效应

Wei Qi, Zijing Guo, Bo-Wen Xiao, PRD 113, 054048 (2026).

虚光子-胶子熔合的正反夸克对产生过程



横向极化虚光子反应道



$$\alpha = Q^2/\hat{s}$$

$$\beta = \sqrt{1 - 4m^2/\hat{s}}$$

横向极化的光子则在阈值附近和极端相对论区域产生显著纠缠

五、总结

- 项目实施处于启动期到核心研发期的过渡阶段，符合预期的进度安排。
 - 课题1: 完成探测器几何优化，及关键物理过程的快模拟
 - 课题2: 估计能量分辨随各个参数的分布，对铅玻璃+塑闪的单元模块开展了宇宙线测试
 - 课题3: 根据物理要求，完成几何结构设计；利用有限元分析方法验证机械性能及物质量分布
 - 课题4: 研究了极化轻子束流与非极化靶反应中，自旋转移与靶碎裂机制；利用介子交换模型研究超子-核子末态相互作用及低能区超子极化
- 项目经费执行率合理，人力投入充分

任务	第一年度		第二年度		第三年度		第四年度		第五年度	
项目启动：软件完成谱仪探测器及支撑结构的优化，硬件上完成量能器和径迹探测器的结构设计。理论上建立统一的超子碎裂函数描述框架。	启动期									
中期目标：软件上完成超核谱仪的探测器设计和性能研究。硬件方面完成量能器及 MAPS 探测器的设计，并开始制造样机。理论上系统研究不同产生过程中超子极化行为，构造理论框架描述实验现象。 考核方式：谱仪及核心探测器设计报告。学科主流期刊论文。					中期考核★					
			核心研发期							
软件方面开展软件框架开发及系统联合仿真，硬件上开展量能器和径迹探测器模块样机加工及束流测试，理论上开展高能重离子碰撞中极端条件下的超子与超核产生机制研究。							验证期			
终期目标：软件上完成超核谱仪探测器设计及软件框架搭建。硬件上完成双读出型量能器及基于单片有源硅像素芯片的径迹探测器研发，并制造模块样机，参数达到设计指标。理论上完成超子极化及超核产生的理论研究。 考核方式：谱仪及核心探测器设计报告。学科主流期刊论文。									项目验收★	
								总结验收期		

五、2026年计划

➤ 项目实施进入核心研发期

- 课题1: 构造探测器真实几何结构，开展探测器全模拟算法开发
- 课题2: 搭建一个5*5*14的铅玻璃塑闪阵列，开展初步性能测试，模拟优化光纤钨粉模块
- 课题3: 计划通过优化设计并试制关键样机，完成H-NS0原理样机中MAPS探测模块及整体结构的研制与测试。
- 课题4: 完善介子交换模型研究超子-核子末态相互作用及低能区超子极化

任务	第一年度		第二年度		第三年度		第四年度		第五年度	
项目启动：软件完成谱仪探测器及支撑结构的优化，硬件上完成量能器和径迹探测器的结构设计。理论上建立统一的超子碎裂函数描述框架。	启动期									
中期目标：软件上完成超核谱仪的探测器设计和性能研究。硬件方面完成量能器及 MAPS 探测器的设计，并开始制造样机。理论上系统研究不同产生过程中超子极化行为，构造理论框架描述实验现象。 考核方式：谱仪及核心探测器设计报告。学科主流期刊论文。					中期考核★					
			核心研发期							
软件方面开展软件框架开发及系统联合仿真，硬件上开展量能器和径迹探测器模块样机加工及束流测试，理论上开展高能重离子碰撞中极端条件下的超子与超核产生机制研究。							验证期			
终期目标：软件上完成超核谱仪探测器设计及软件框架搭建。硬件上完成双读出型量能器及基于单片有源硅像素芯片的径迹探测器研发，并制造模块样机，参数达到设计指标。理论上完成超子极化及超核产生的理论研究。 考核方式：谱仪及核心探测器设计报告。学科主流期刊论文。									项目验收★	
								总结验收期		

Backup

一、超核：核子和超子形成的束缚态

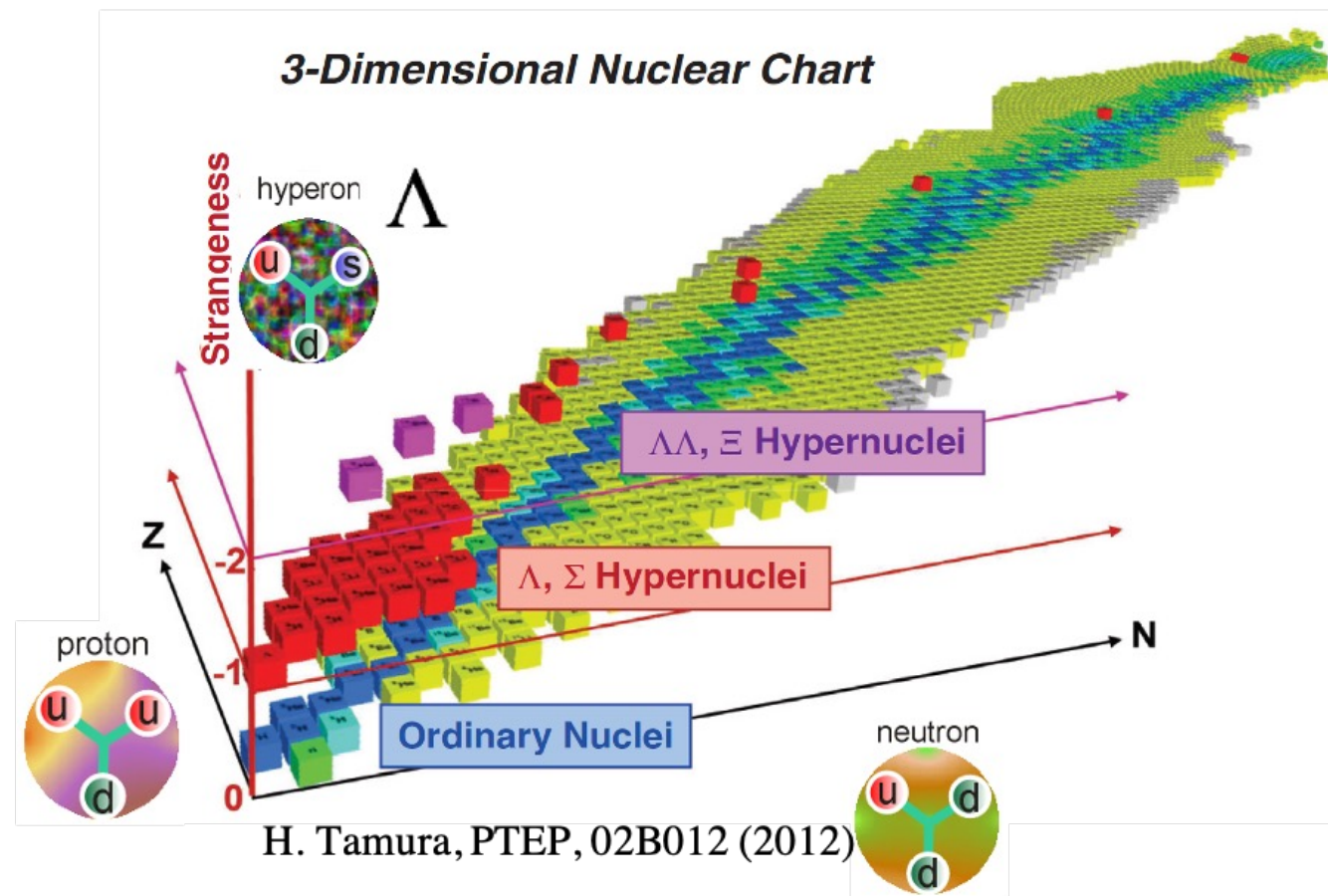
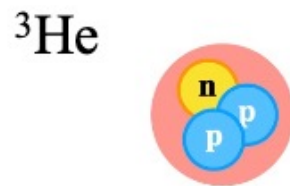
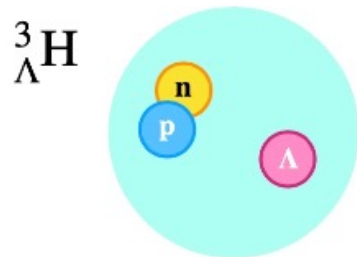
超子-核子相互作用：探索重子-重子相互作用在SU(3)对称性下的性质，**理解核力起源**

超子-核子(YN)相互作用

超核

传统核物质

核子-核子相互作用



超核核素是传统核素向**奇异夸克自由度**的拓展

一、研究内容：技术挑战

超核产生及性质研究

- 测量超核的**产额**, **寿命**, **集体流**等信息, 理解YN作用机制
- 发现和研究**双 Λ 超核**

超子极化

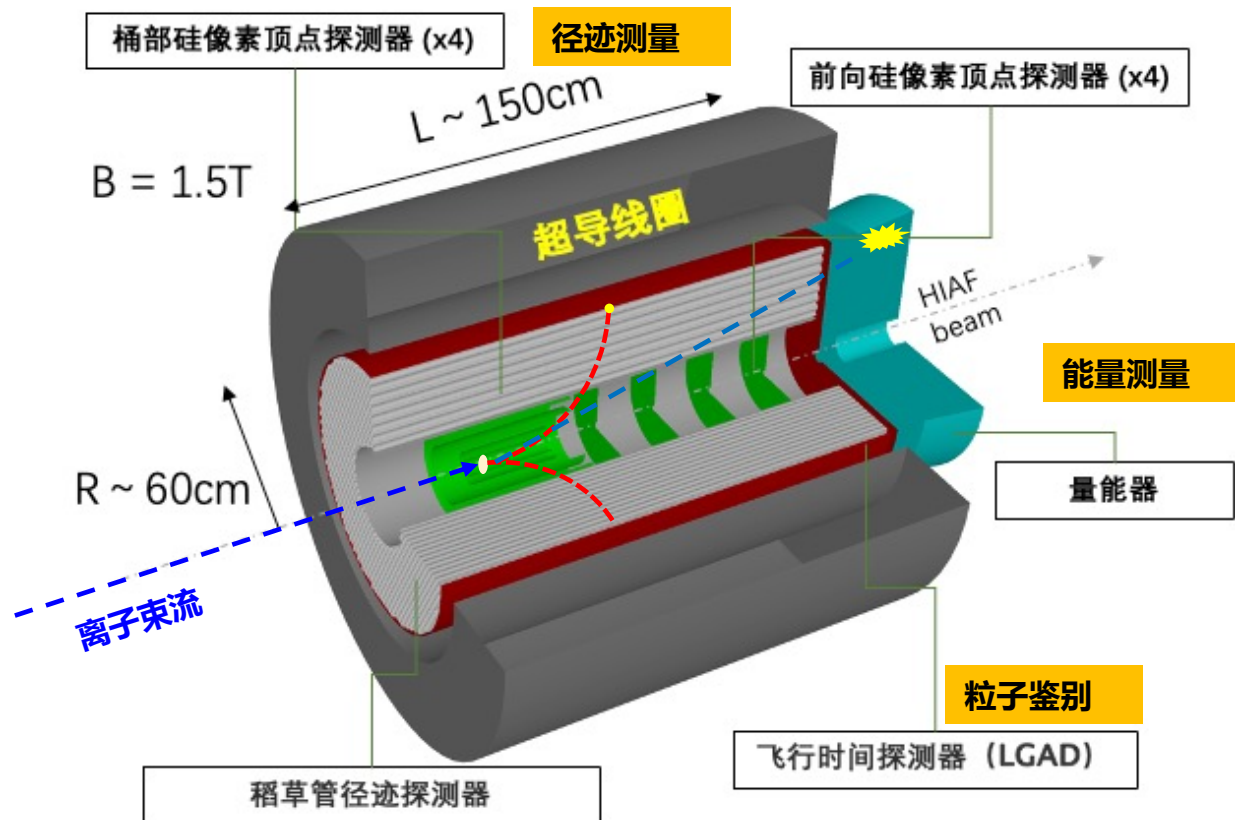
- 通过p-p, p-A, AA过程研究超子极化现象, 理解非微扰QCD

重离子碰撞实验特点:

高事例率, 高径迹数, 强辐照

探测器挑战:

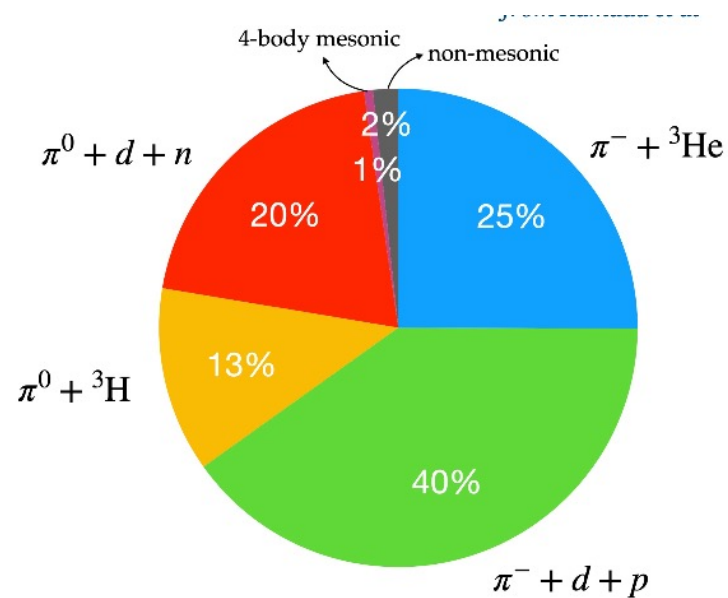
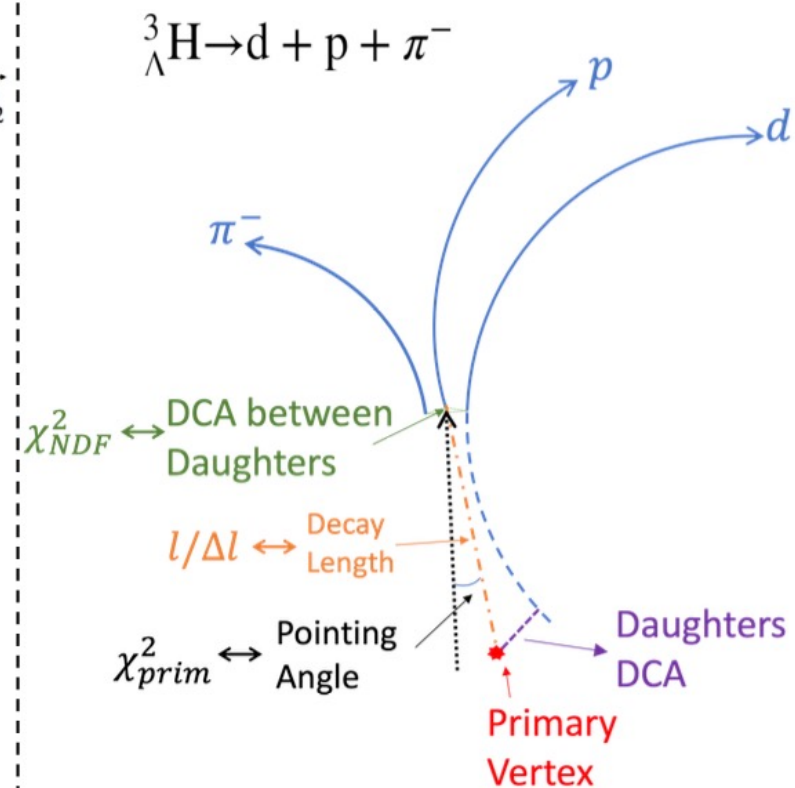
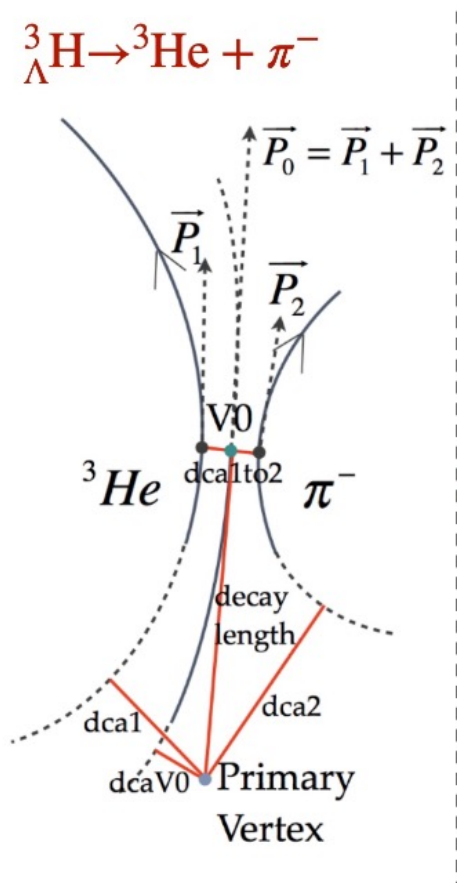
高精度, 快速响应及抗辐照能力



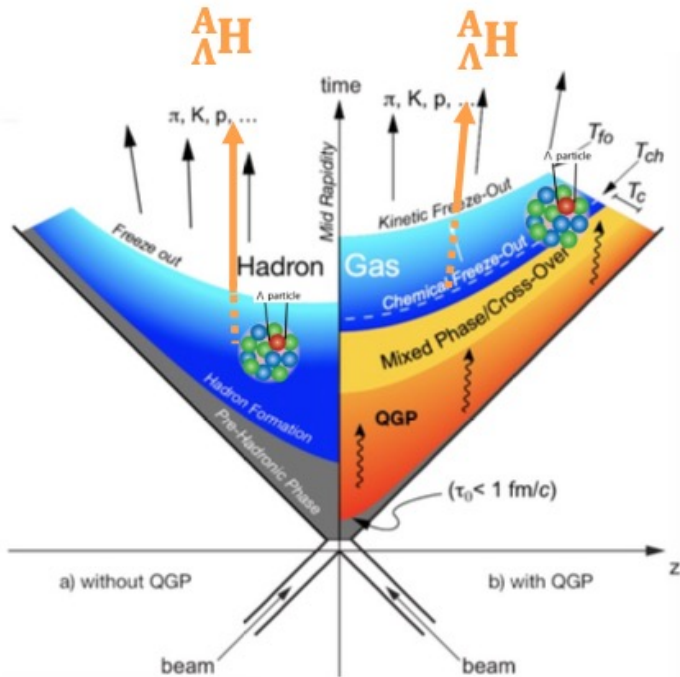
预期性能要求:

- 高动量分辨 $\sim 1\% @ 1\text{GeV}/c$
- K, π , proton, d, t, He^3 , He^4 粒子鉴别
- 高位置分辨, 压低本底水平, 低物质量
- 好的能量分辨 $\sim 5\%/\sqrt{E[\text{GeV}]}$
- 大接受度: $\theta: 10\sim 100^\circ$, $\phi: 0\sim 2\pi$
- 高事例率: $> \text{MHz}$ 水平

一、研究内容：超核衰变模式



一、研究内容：超核HIC产生机制



1. 凝聚形成 (Coalescence Formation)

- 主导中快度区域：在碰撞中，凝聚机制在中快度区域占主导地位。凝聚模型假设超核是在粒子冻结后，通过核子之间的最终状态相互作用形成的。既粒子在动量和位置空间非常接近时，通过相互作用形成超核

2. 热模型 (Thermal Model)

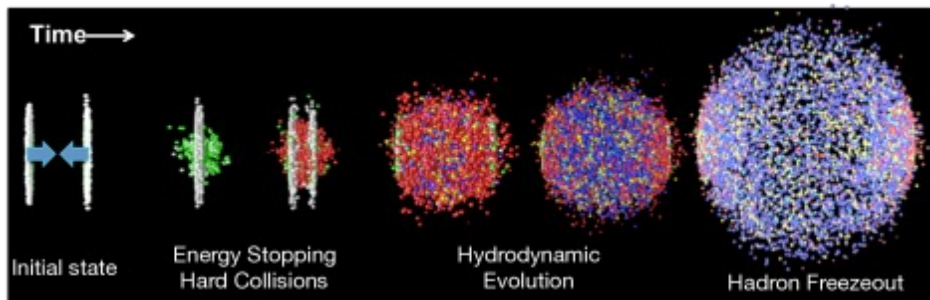
- 强子化学冻结：在热模型中，超核在强子化学冻结温度 (T_{ch}) 和重子化学势 (μ_B) 下形成。这个过程假设系统达到热平衡，从而允许超核的形成。

3. 核碎片化 (Nuclear Fragmentation)

- 束流快度区域：在束流快度区域，核碎片化过程占主导地位，特别是在重超核的形成中。在这个过程中，超簇（包含超子的核团）可能会经历碎片化，形成更小的核结构。

4. 动力学簇形成 (Dynamical Cluster Formation)

- 基于反应的形成：这种机制考虑了在动力学过程中，簇可能在动力学冻结之前形成。这意味着在碰撞过程中，随着系统的演化，簇的形成是一个动态的过程。



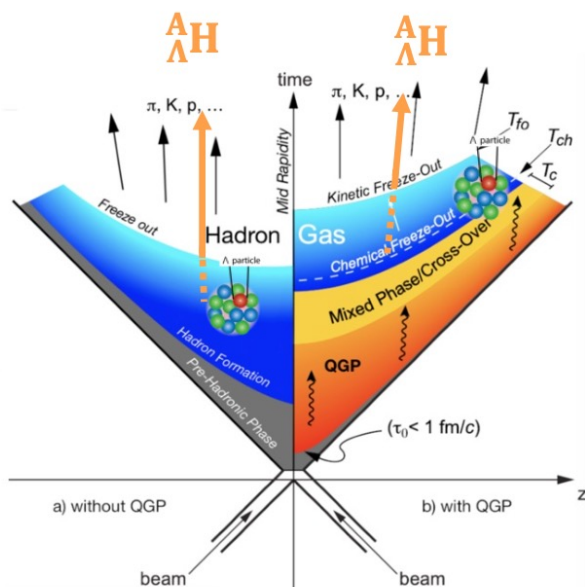
一、研究内容：超核实验研究

超核产生及性质研究

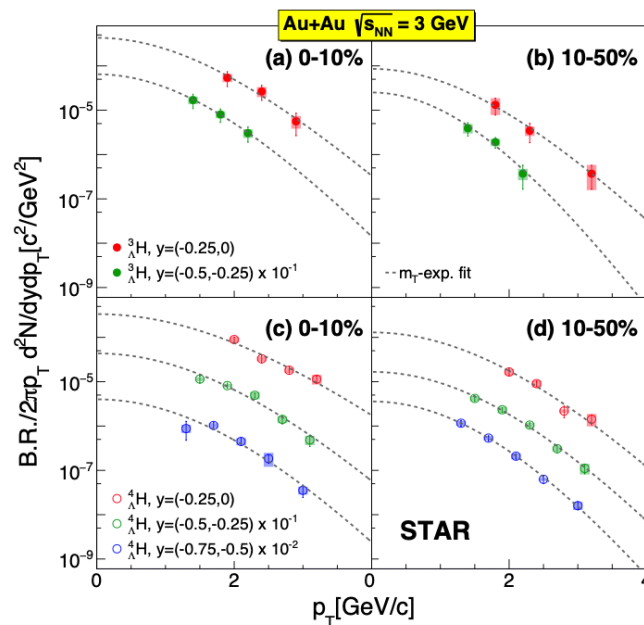
- 测量超核的**产额**，**寿命**，**集体流**等信息，理解YN作用机制
- 发现和研究**双 Λ 超核**

超子极化

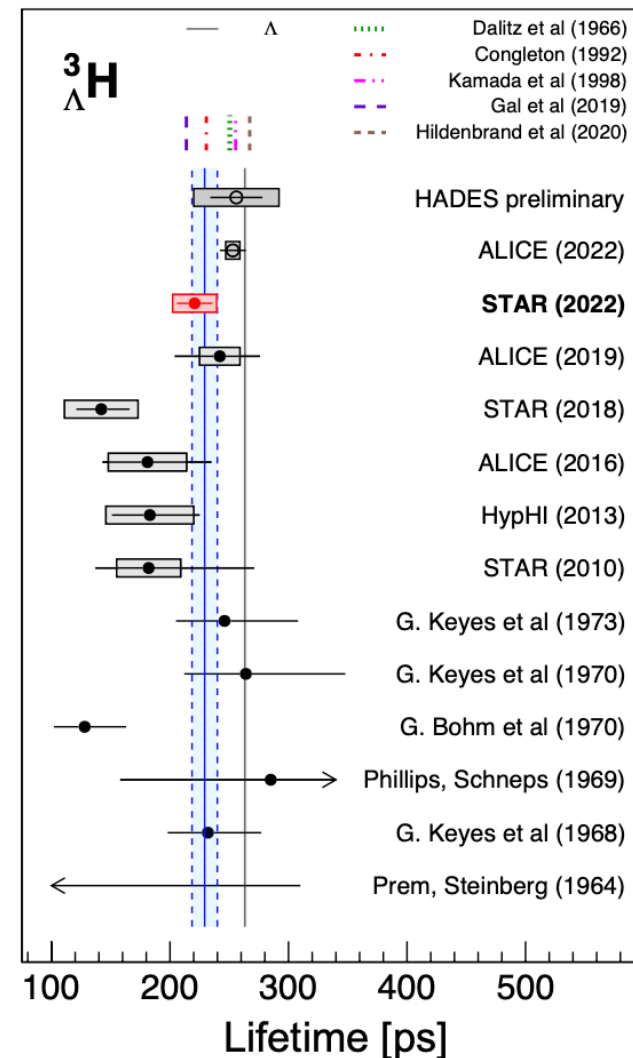
- 通过p-p, p-A, AA过程研究超子极化现象，理解非微扰QCD



超核在重离子碰撞中
产生机制未完全理解

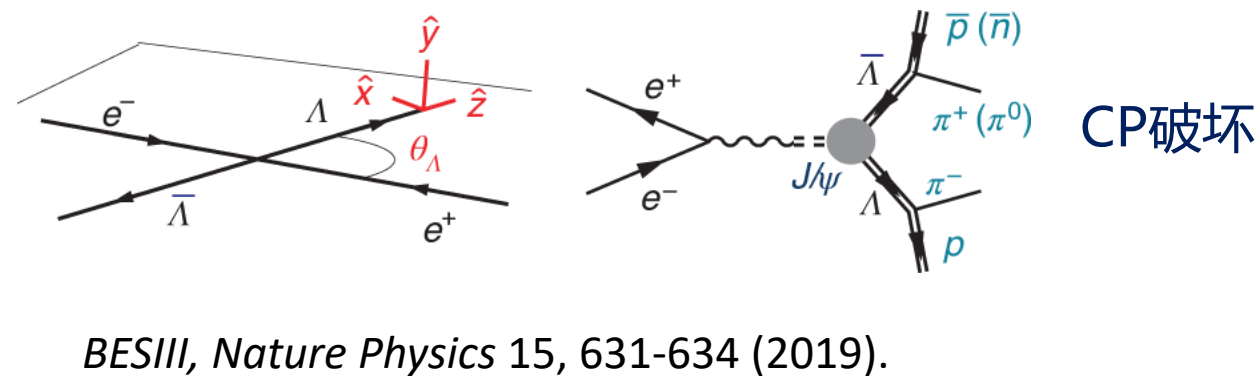
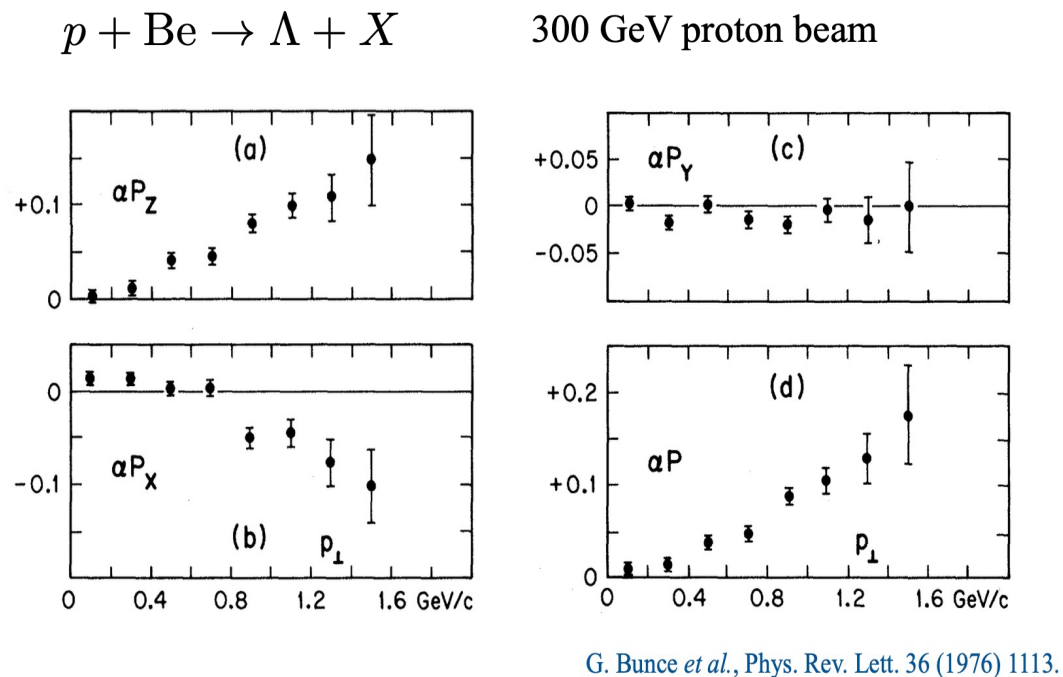


超核产额随 p_t 及中
心度分布的测量



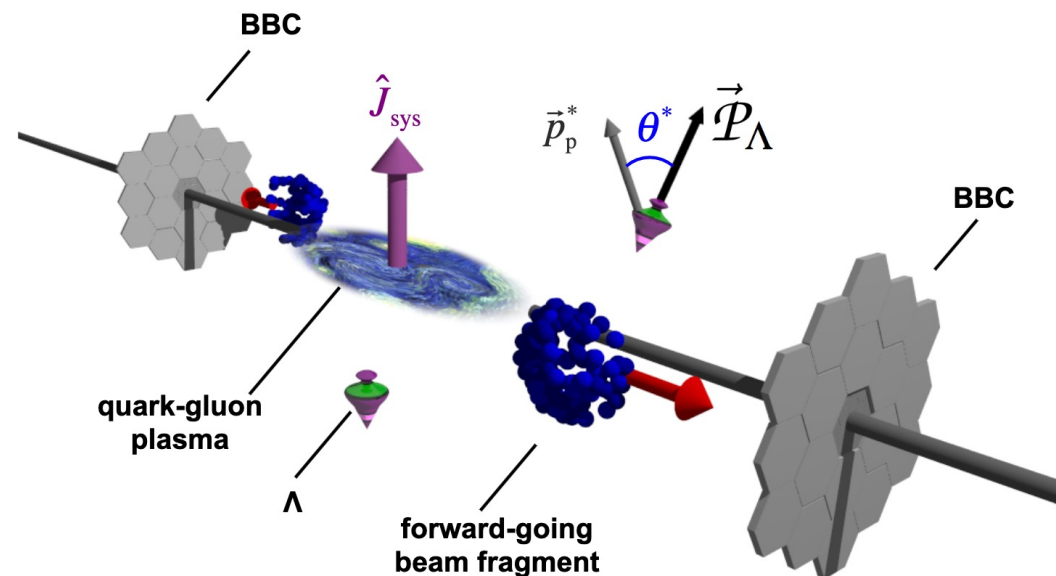
超核寿命的测量
理解超核结构

一、研究背景和研究内容：超子极化物理



超子极化一直是**高能物理研究热点**：

- pp/pA对撞中自极化：**非微扰QCD**
- 重离子碰撞：**高重子密度下重子涡度的特征**
- 正负电子对撞：**CP破坏**

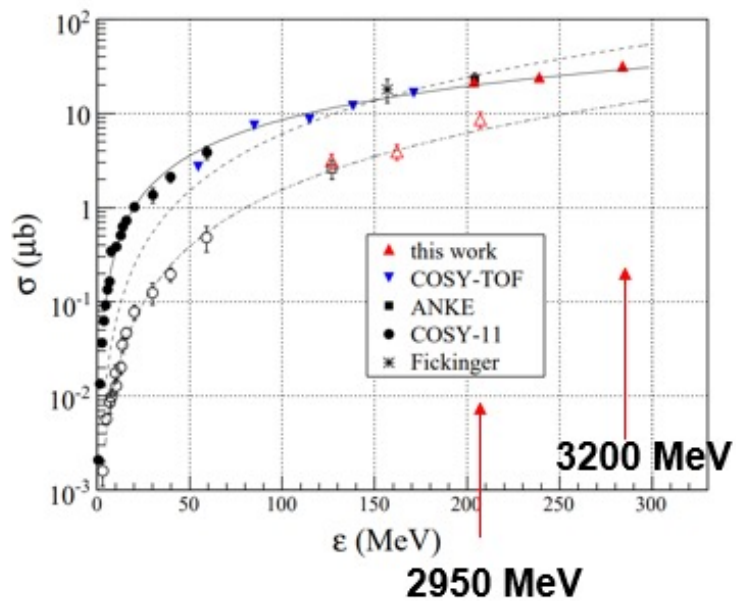


STAR, Nature 548, 62-65 (2017).

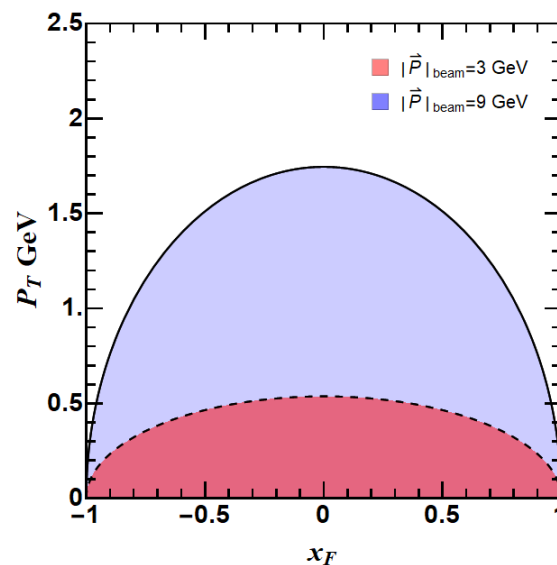
系统角动量与
超子自旋关联

一、研究内容：超子物理测量量

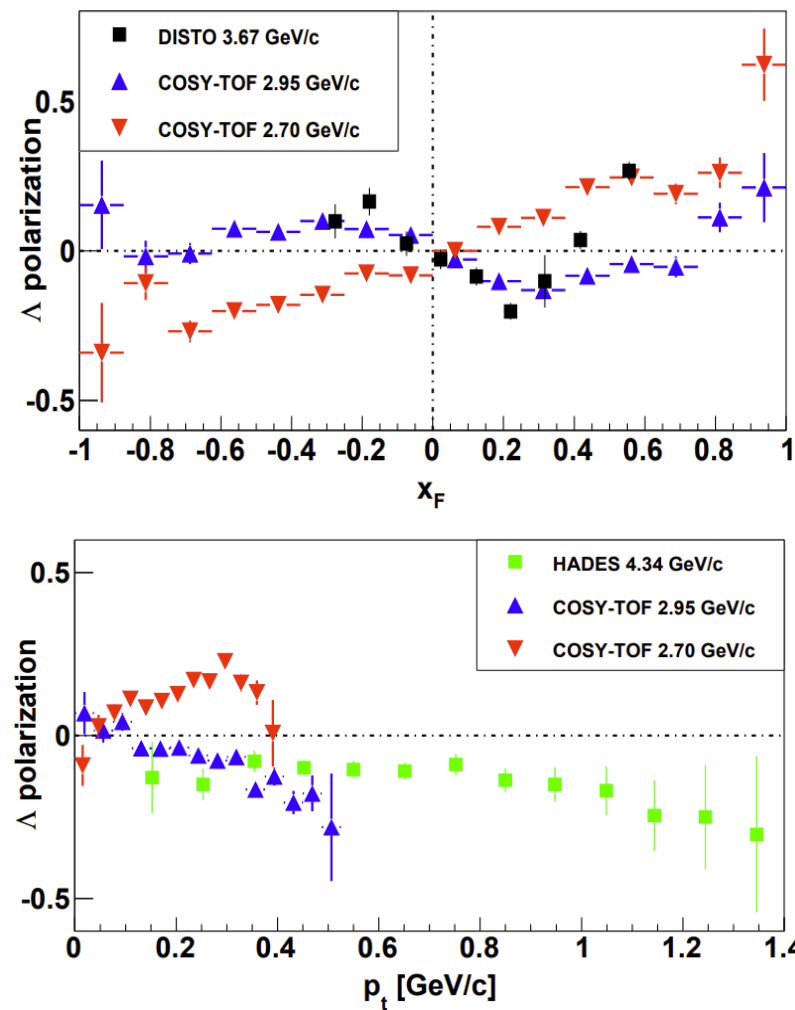
- Λ 在pp对撞中有较大的产生截面
- Λ 极化随 P_t , x_F , 等变量的分布.



Cross section of Lambda, etc.



P_t , x_F , coverage at HIAF

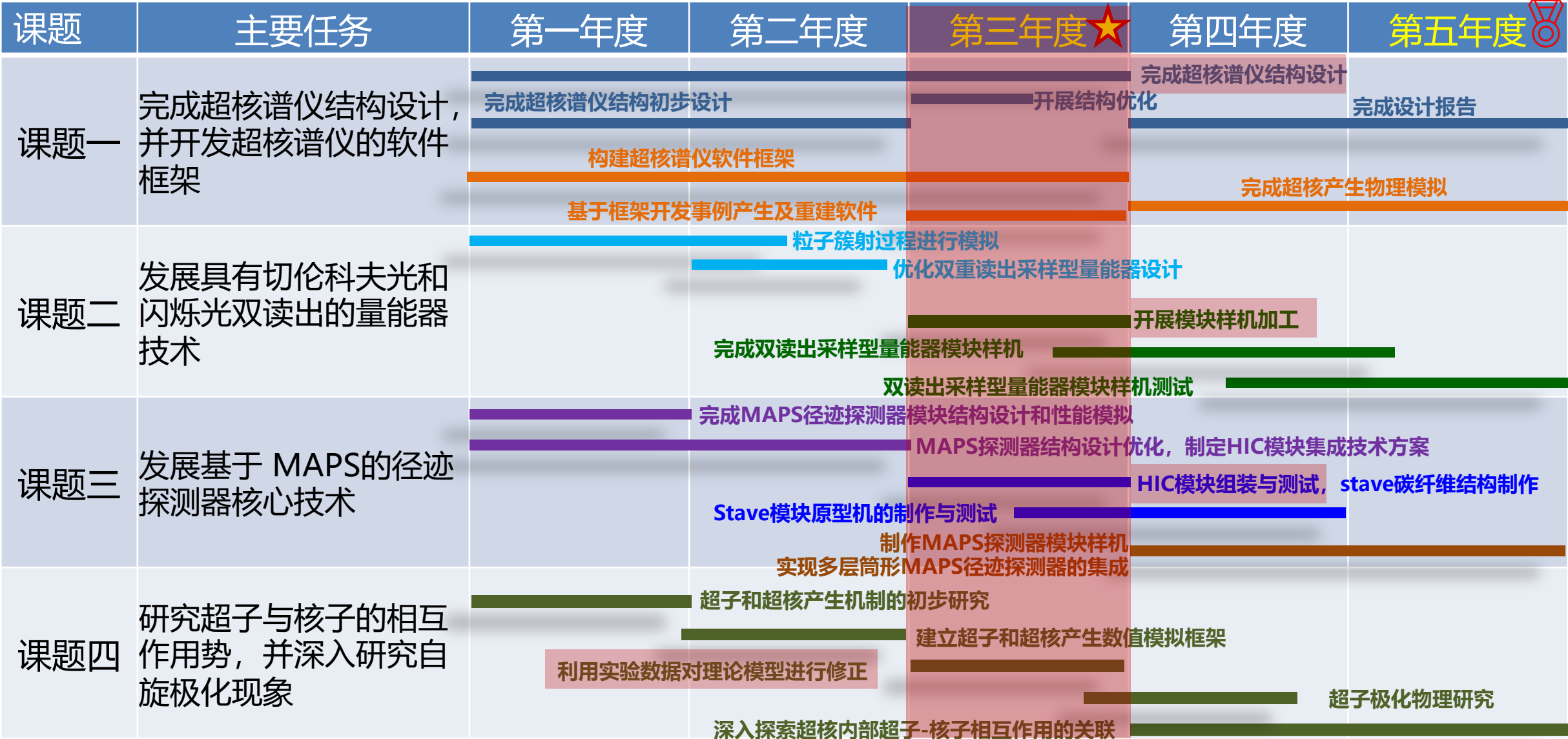


EPJA 52, 337 (2016)

二、进度安排

课题	主要任务	第一年度	第二年度	第三年度★	第四年度	第五年度🏆
课题一	完成超核谱仪结构设计,并开发超核谱仪的软件框架		完成超核谱仪结构初步设计	开展结构优化	完成超核谱仪结构设计	完成设计报告
			构建超核谱仪软件框架			
			基于框架开发事例产生及重建软件		完成超核产生物理模拟	
课题二	发展具有切伦科夫光和闪烁光双读出的量能器技术		粒子簇射过程进行模拟	优化双重读出采样型量能器设计		
			完成双读出采样型量能器模块样机	开展模块样机加工		
			双读出采样型量能器模块样机测试			
课题三	发展基于 MAPS的径迹探测器核心技术		完成MAPS径迹探测器模块结构设计和性能模拟	MAPS探测器结构设计优化, 制定HIC模块集成技术方案		
			Stave模块原型机的制作与测试	HIC模块组装与测试, stave碳纤维结构制作		
			制作MAPS探测器模块样机			
			实现多层筒形MAPS径迹探测器的集成			
课题四	研究超子与核子的相互作用势, 并深入研究自旋极化现象		超子和超核产生机制的初步研究	建立超子和超核产生数值模拟框架		
			利用实验数据对理论模型进行修正			
					超子极化物理研究	
			深入探索超核内部超子-核子相互作用的关联			

二、进度安排



二、任务分解：课题1任务

课题一：超核谱仪的设计仿真及软件框架搭建

超核谱仪设计

利用先进模拟软件完成构型设计
完成关键指标性能研究，如动量分辨，顶点分辨等

超核谱仪软件开发

基于FairRoot完成超核谱仪软件框架
完成事例产生重建算法开发

提供优化思路  提供模拟参数  提供模拟工具

超核物理模拟

利用得到的探测器性能参数进行超核物理模拟，明确物理目标
通过模拟结果为探测器设计优化提供思路

课题一主要考核指标

超核谱仪设计：完成结构设计及性能研究，提交设计报告

超核谱仪软件开发：完成软件框架搭建，及事例产生重建算法开发，提交软件包及使用手册

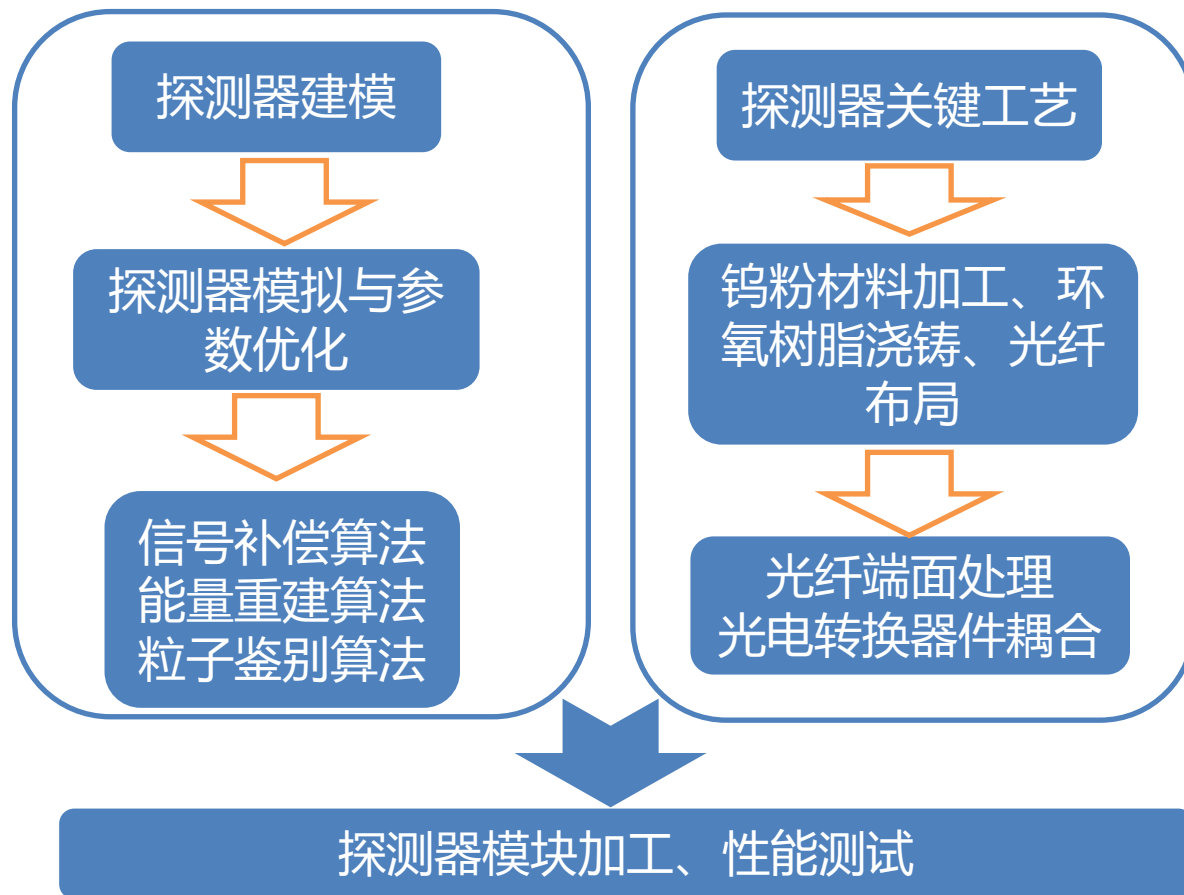
超核物理模拟：实现关键超核物理过程的模拟，明确超核谱仪物理目标

课题承担单位：中国科学院近代物理研究所

课题参与单位：北京航空航天大学

二、任务分解：课题2任务

课题二：高精度双读出型量能器研究



课题二主要考核指标

能量分辨率：电磁簇射能量分辨率好于 $5\%/\sqrt{E[\text{GeV}]}$ ，强子簇射能量分辨率好于 $60\%/\sqrt{E[\text{GeV}]}$

粒子鉴别效率：实现光子/中子鉴别效率不低于95%

课题承担单位：复旦大学

二、任务分解：课题3任务

课题三：基于MAPS的高位置分辨低物质质量径迹探测器研发

课题三主要考核指标

MAPS径迹探测器设计与仿真

FPC设计与制作
芯片拼接工艺的研究

Stave机械结构设计与制作
Stave模块组装工艺的研究

HIC模块组装与测试

Stave模块组装与测试

多层筒形MAPS探测器原型机结构设计

MAPS径迹探测器模块样机
多层筒形探测器集成

发展基于MAPS的径迹探测器技术：

- MAPS芯片集成精度优于5 微米
- 单层物质质量小于 $0.35\% X_0$
- 研制模块样机

探索多层筒形结构探测器原型机的集成方案和研发

课题承担单位：华中师范大学

课题参与单位：中国科学院近代物理研究所

二、任务分解：课题4任务

课题四：超子与超核的产生和极化效应的研究

课题四主要考核指标

超子和超核的产生机制

分析重离子碰撞超子产生率、动量分布，获取超子-核子相互作用特征

超子极化效应

分析极化超子碎裂函数，计算多夸克关联和末态相互作用对自旋极化的影响，探索重离子碰撞中超子极化的新机制

极端条件下的性质

结合理论模型和数据，探讨超子-核子作用如何改变和物质相态，深入理解核物质状态方程

超子谱仪设计理论支撑

结合理论计算和数值模拟，为超核谱仪设计和优化提供理论支持

推动理论：建立超子极化模型，在超子核子相互作用和产生机制方面取得重要理论进展，发表相关科学论文。

支撑实验：建立超核产生数值模拟框架，建议极化观测量，组织相关研讨，以论文和会议报告的形式呈现成果

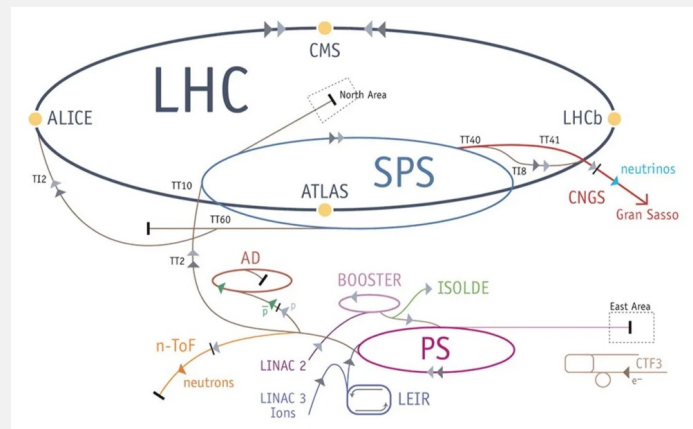
人才培养：培养本领域的硕士博士研究生

课题承担单位：香港中文大学(深圳)

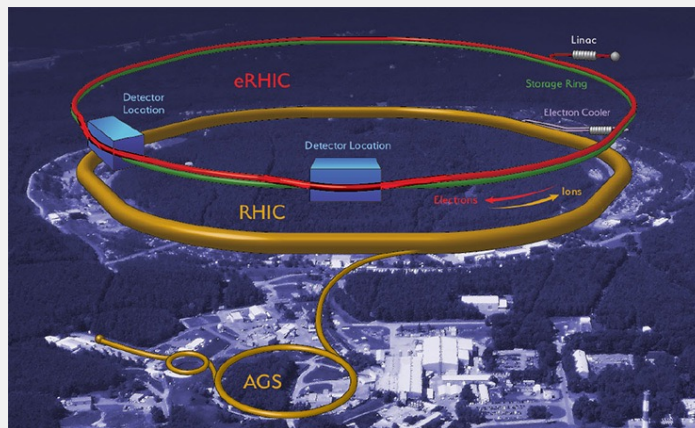
课题参与单位：山东大学

一、研究背景：国外研究现状

现在



LHC/CERN

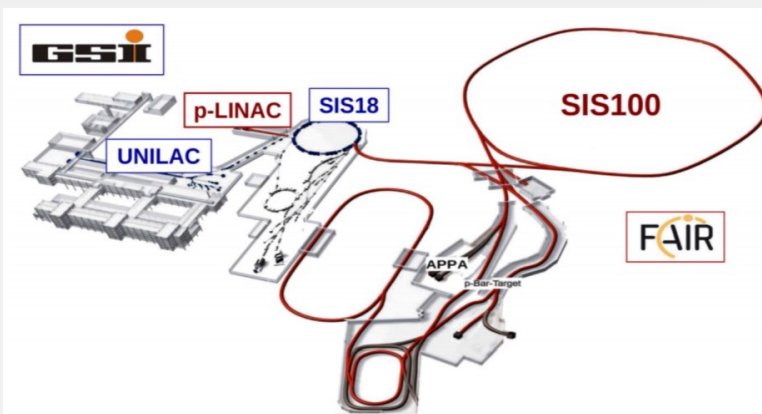


RHIC/US

计划中

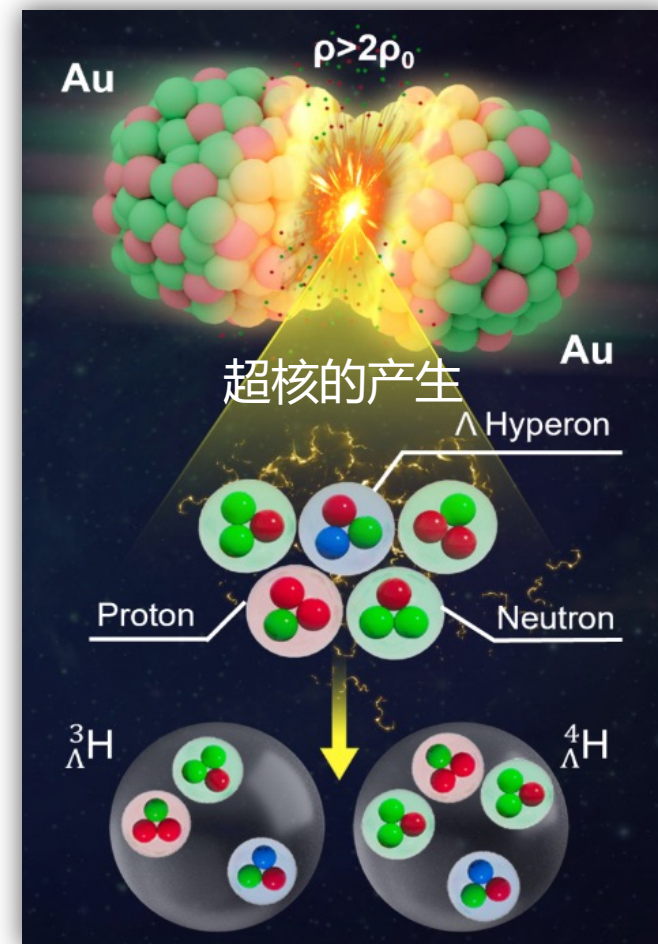


NICA/Russia



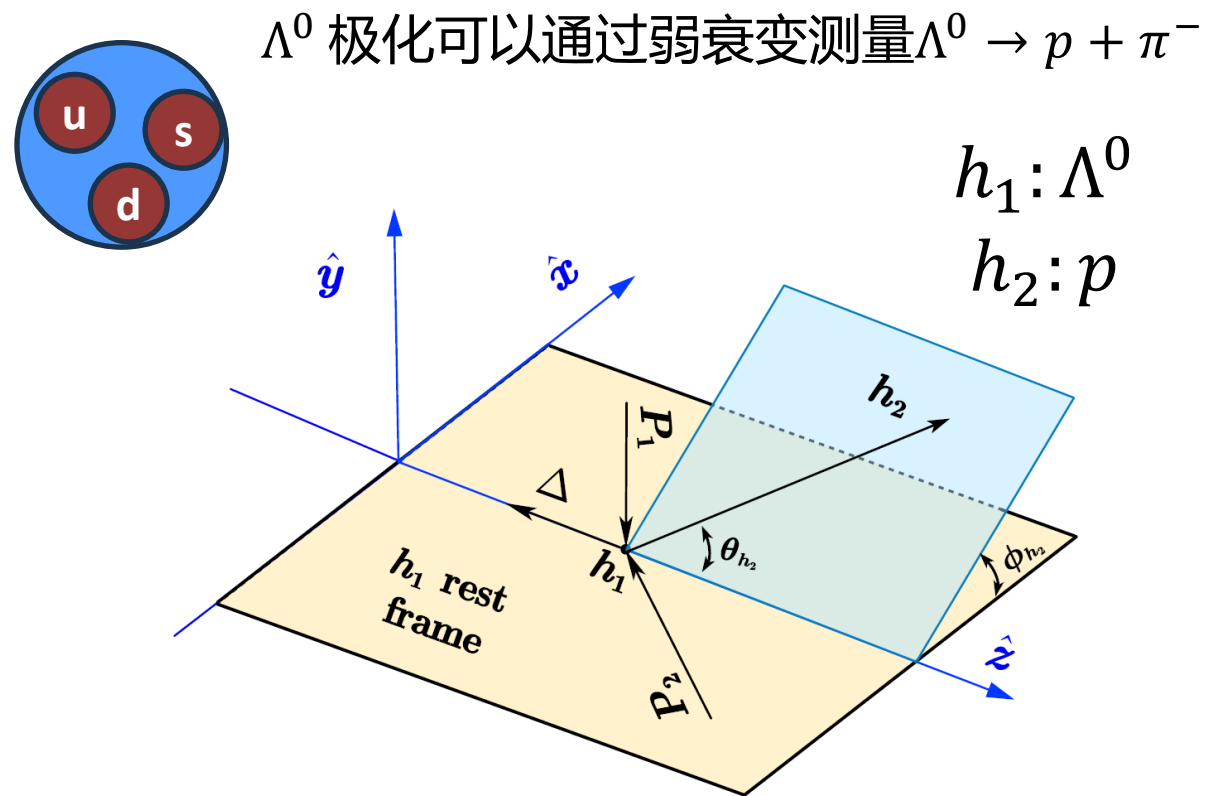
FAIR/Germany

重离子碰撞中超核的产生

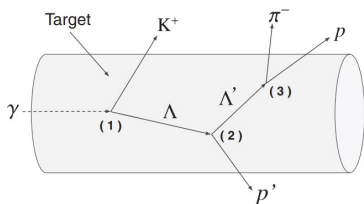


世界上各大**重离子实验装置**都将**超核**作为重要研究方向！

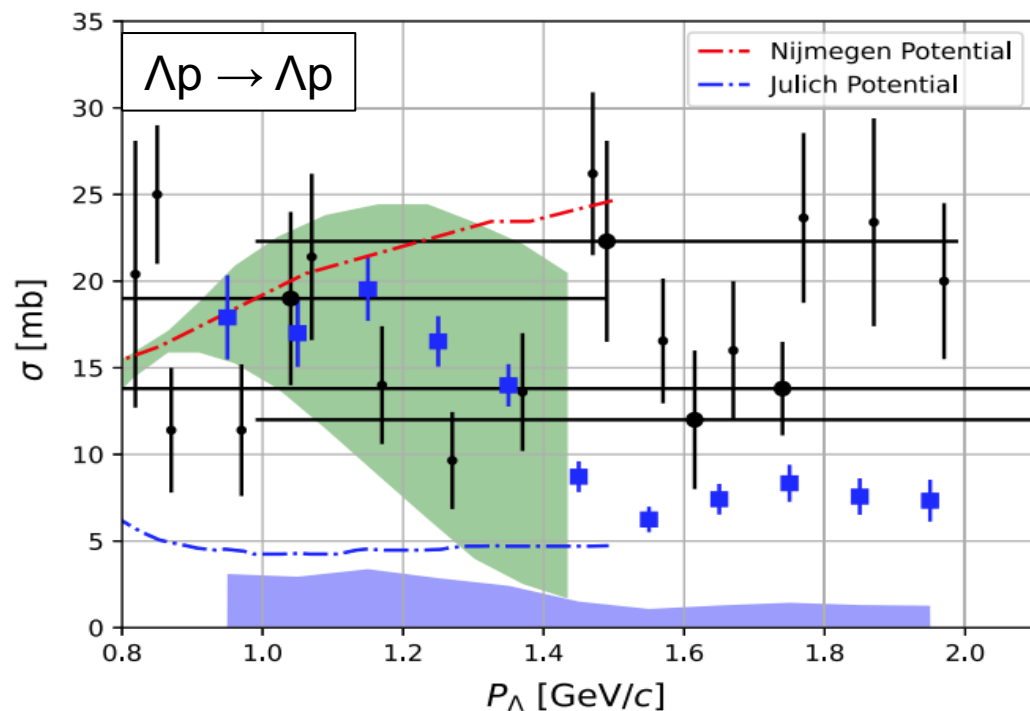
一、超-核谱仪：超子、核子及其相互作用



一、超-核谱仪：超核研究物理意义

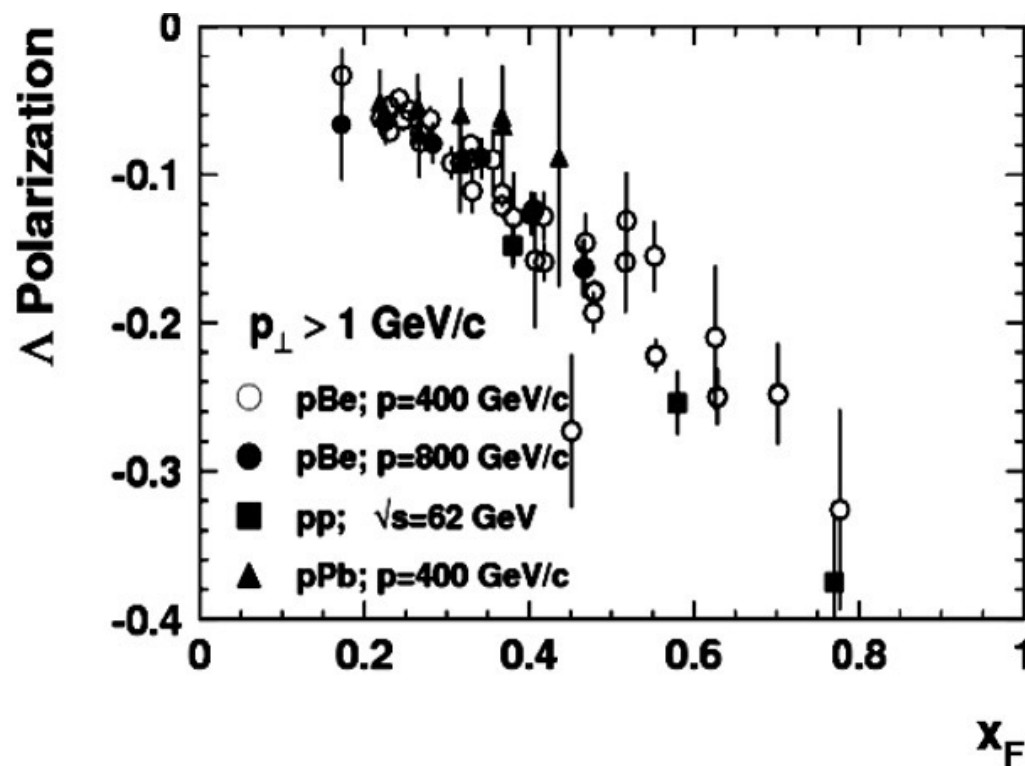


CLAS collaboration
PRL, 127, 272303 (2021)



- 由于超子寿命很短，我们对**YN/YY**及**YNN**相互作用**认识还很有限**
- **超核**是研究这些相互作用的**天然实验室**

一、超-核谱仪：超子、核子及其相互作用



$$P_H = \Delta\sigma / \sigma_{unp}$$

$$\sigma_{unp} \sim f_{1A}(x_a, k_{\perp a}) f_{1B}(x_b, k_{\perp b}) \otimes \hat{\sigma}(ab \rightarrow cX) \otimes D_1(z_c, k_{Fc}) \rightarrow pp \rightarrow qq \rightarrow hX$$

$$\Delta\sigma \sim h_{1A}^{\perp}(x_a, k_{\perp a}) f_{1B}(x_b, k_{\perp b}) \otimes \delta\hat{\sigma}(a^{\uparrow}b \rightarrow c^{\uparrow}X) \otimes H_{1T}^{c \rightarrow h}(z_H, k_{FH}) \rightarrow pp \rightarrow q(\uparrow)q \rightarrow h(\uparrow)X$$

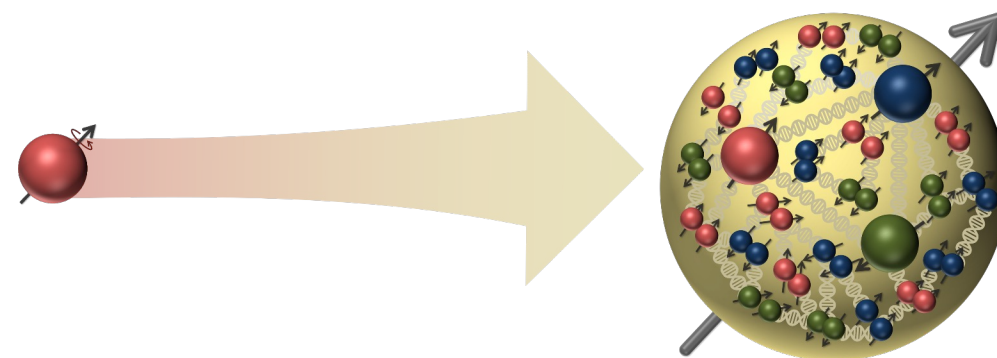
$$+ f_{1A}(x_a, k_{\perp a}) f_{1B}(x_b, k_{\perp b}) \otimes \hat{\sigma}(ab \rightarrow cX) \otimes D_{1T}^{\perp c \rightarrow h}(z_H, k_{FH}) \rightarrow pp \rightarrow qq \rightarrow h(\uparrow)X$$

Boer-Mulders

spin transfer

transverse polarization in fragmentation of unpolarized quark (Belle data)

- 在非极化pp和pA碰撞中，发现末态产生超子是极化的 (1970's)
- 具有 P_t 和 x_F 依赖，和质心能量和靶质量无关
- 极化来源无法在微扰QCD下解释，极化碎裂函数，自旋转移？ ...
- 帮助理解核子内部自旋结构



三、实施进展：课题一

谱仪设计仿真
及软件框架

- 利用GEANT4等成熟**模拟软件并结合数值计算方法**进行探测器设计和优化。
- 基于FairRoot开发适用于超核谱仪的软件框架，对关键物理过程进行模拟。

任务	第一年度	第二年度	第三年度	第四年度	第五年度
项目启动：首先基于 GEANT4 和 Garfield 仿真平台，优化探测器几何结构与材料配置。	模拟验证				
中期目标：完成探测器概念设计及关键部件的 GEANT4 性能验证报告，交付软件基础框架； 考核方式：谱仪探测器设计报告。			中期考核★		
FairRoot 基础框架与事例生成模块的验证，进行全系统联合仿真，提交动量/角度/顶点分辨率的量化评估数据；		软件框架开发			
终期目标：完成最终设计报告与软件文档，组织专家组对探测器参数是否达到国际同类装置水平进行评审。 考核方式：谱仪探测器设计报告。软件包及使用手册。			系统集成测试		
					项目验收★
					总结

三、实施进展：课题二

高精度双读出量能器

- 基于模拟研究了双光纤量能器的能量分辨率及纵向颗粒度对量能器性能的影响
- 对铅玻璃+塑闪的单元模块开展了宇宙线测试，完成了SiPM及读出电子学的基本设计。

任务	第一年度	第二年度	第三年度	第四年度	第五年度
项目启动：基于 GEANT4 建立包含钨/铅/铜等多金属微颗粒材料的强子簇射模型，结合闪烁光纤（BGO 或 LYSO）与石英光纤的双通道光传输特性，完成探测器参数化建模。	设计验证期				
中期目标：攻克三项核心工艺：1) 多金属颗粒浇铸成型；2) 光纤集成与固定；3) <u>SiPM</u> 耦合与信号提取。 考核方式：完成样机及测试报告		中期考核★ 工艺研发与样机制作			
开展束流测试，使用质子束与电子束分别标定强子与电磁响应。				束流测试期	
终期目标：完成样机束流测试，满足 1) 电磁能量分辨率：5%/ $\sqrt{E[\text{GeV}]}$ @电子束；2) 强子能量分辨率：60%/ $\sqrt{E[\text{GeV}]}$ @质子束。3) 电磁/强子簇射鉴别效率大于 95%。 考核方式：最终测试报告，由专家组评审				项目验收★ 测试验收	

三、实施进展：课题三

高位置分辨低
物质质量MAPS径
迹探测器

实施方案：

- 设计迭代与工艺预研：通过**有限元分析方法**（FEA），**优化设计和验证机械性能**
- 样机制作与测试：**高精度芯片拼接**完成HIC模块制作，实现stave模块样机的制作与测试
- 系统集成：设计增强碳纤维端轮，组装3层筒形结构制

任务	第一年度			第二年度		第三年度		第四年度		第五年度	
设计迭代与工艺预研，完成 1) 机械结构设计 2) HIC 模块工艺开发；3) 关键设备准备	设计迭代与工艺预研										
中期目标：样机制作与单体测试。完成内/外桶 stave 样机试制，及进行性能验证。					中期考核★						
考核方式：提交 stave 模块技术设计报告，通过专家组评审。					样机制作与单体测试						
多层筒面集成：设计增强碳纤维端轮，组装 3 层筒形结构。									系统集成		
终期目标：1) MAPS 像素探测器的芯片集成精度在 5 微米以内，实现高精度超声焊接，焊线抗拉力满足磁场工作环境。2) 硅像素探测器的单层物质质量低于 0.35% X ₀ ，完成多层筒面结构的 MAPS 径迹探测器的集成技术方案。										项目验收★	
考核方式：提交 stave 模块技术设计报告及测试报告，通过专家组评审。										验收	

二、进度安排

任务	第一年度		第二年度		第三年度		第四年度		第五年度	
项目启动：软件完成谱仪探测器及支撑结构的优化，硬件上完成量能器和径迹探测器的结构设计。理论上建立统一的超子碎裂函数描述框架。	启动期									
中期目标：软件上完成超核谱仪的探测器设计和性能研究。硬件方面完成量能器及 MAPS 探测器的设计，并开始制造样机。理论上系统研究不同产生过程中超子极化行为，构造理论框架描述实验现象。 考核方式：谱仪及核心探测器设计报告。学科主流期刊论文。			核心研发期							
软件方面开展软件框架开发及系统联合仿真，硬件上开展量能器和径迹探测器模块样机加工及束流测试，理论上开展高能重离子碰撞中极端条件下的超子与超核产生机制研究。							验证期			
终期目标：软件上完成超核谱仪探测器设计及软件框架搭建。硬件上完成双读出型量能器及基于单片有源硅像素芯片的径迹探测器研发，并制造模块样机，参数达到设计指标。理论上完成超子极化及超核产生的理论研究。 考核方式：谱仪及核心探测器设计报告。学科主流期刊论文。								项目验收★		
							总结验收期			

三、实施进展：课题四

超子与超核的
产生和极化效
应的研究

实施方案

- pp及pA中超子极化：全局拟合方法提取自旋依赖的碎裂函数
- 重离子碰撞中超子全局极化：理论模型+数值模拟，超子在不同能量下的自旋行为。
- 超子-核子相互作用：化学势对超核形成的影响，揭示超子-核子相互作用。多体输运理论框架和机器学习，超子对核物质状态方程影响。

任务	第一年度		第二年度		第三年度		第四年度		第五年度	
聚焦于建立统一的超子碎裂函数描述框架，同时深入分析中低能区 pp 及 pA 反应中超子的极化反常现象。通过全局拟合方法提取自旋依赖的碎裂函数。	超子极化									
中期目标：系统研究不同产生过程（pp, pA, AA）中超子极化行为，构造理论框架描述实验现象。并对 HIAF 能区结果做预言。 考核方式：学术报告及学科主流期刊论文。					中期考核★ 超子极化					
终期目标：建立不同系统中超子极化理论框架。建立超核产生模型及超子对核物质状态方程影响的定量模型。 考核方式：学术报告及学科主流期刊论文。							项目验收★ 超子-核子相互作用			

二、技术挑战

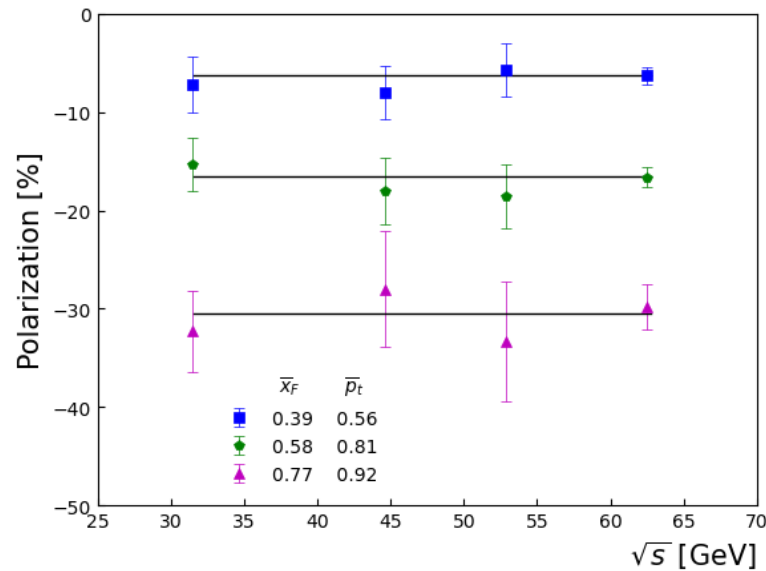
超子极化

- 通过p-p, p-A, AA过程研究超子及核子极化现象, 理解非微扰QCD

超核产生及性质研究

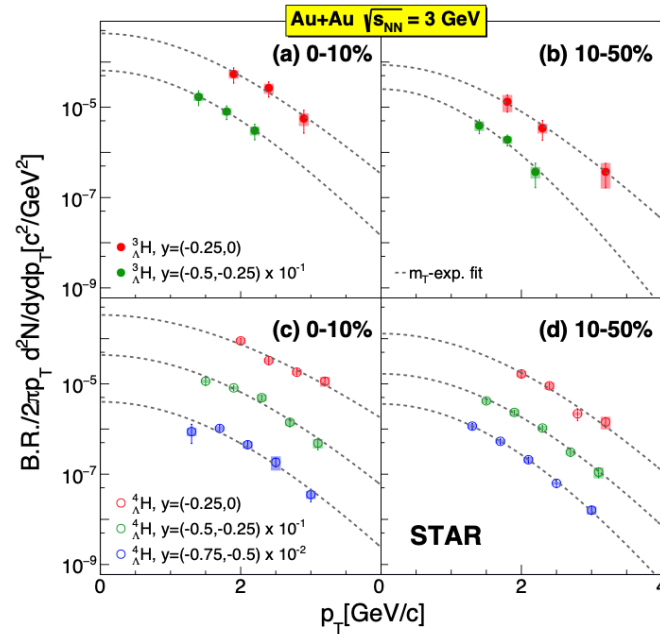
- 测量超核的**产额**, **寿命**, **集体流**等信息, 理解YN作用机制

超子极化



超子极化多维测量

超核产生



超核产额随 p_t 及中心度分布的测量

重离子碰撞实验特点:

高事例率, 高噪声, 强辐照

技术挑战:

- 快速响应: 事例率 > MHz 水平
- 高动量分辨, 高位置分辨, 低物质量
- K, π , proton, d, t, He^3 , He^4 粒子鉴别
- 抗辐照