



清华大学 物理系复系40周年系庆

THE 40TH ANNIVERSARY OF THE REESTABLISHMENT
DEPARTMENT OF PHYSICS, TSINGHUA UNIVERSITY

高能重离子碰撞实验中的 奇异和重味探针

朱相雷

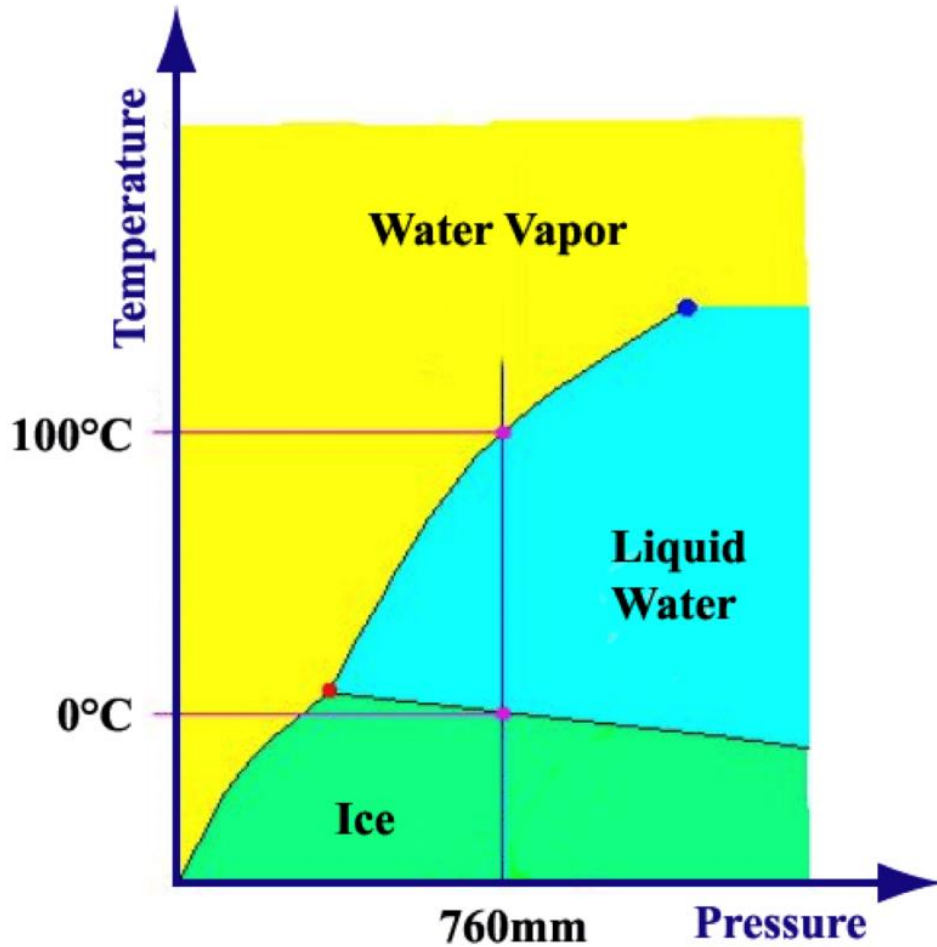
清华大学工程物理系

8/26/2022

核物理前沿与交叉研讨会

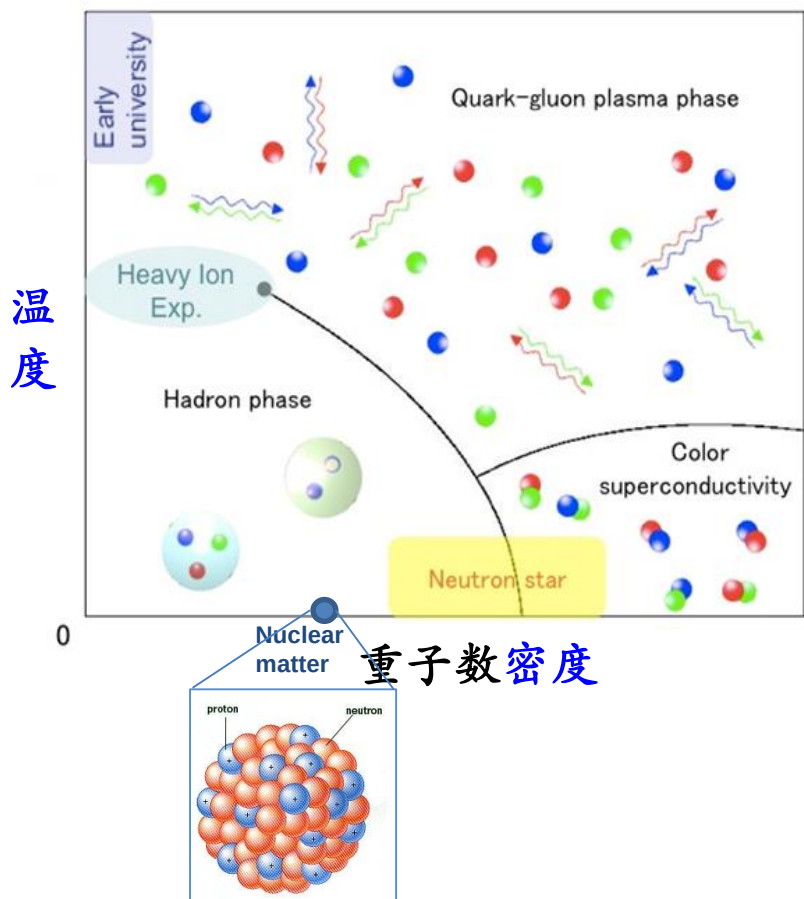
2022.8.25-28, 北京香山

水的相图



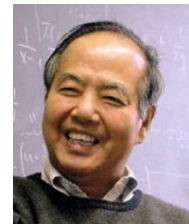
- 水分子之间存在复杂的相互作用力
- 水的相图 (phase diagram) 描述水分子在不同的外部条件 (温度、压强) 下组成的宏观物质形态
- 相变: 不同相之间的转化
冰 ↔ 水 ↔ 水蒸气

QCD相图



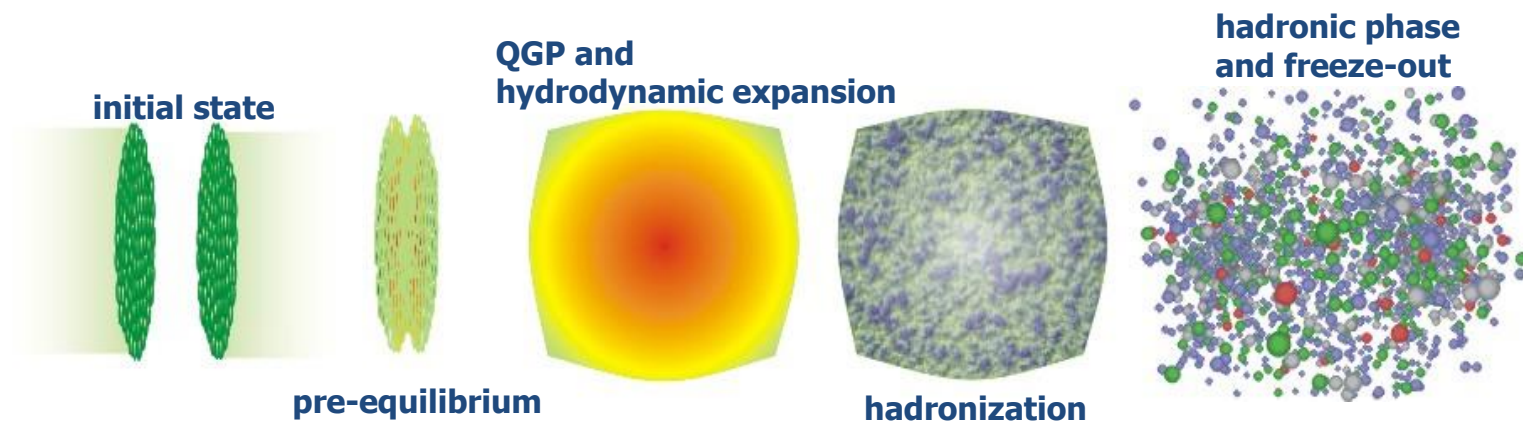
- 夸克：物质世界基本组分
- QCD：量子色动力学 (Quantum Chromodynamics)
- **QCD相图**：描述由**夸克胶子**构成的，在不同温度、密度条件下的**宏观物质形态**
 - 低温、低密：**夸克囚禁**在强子内
 - 高温、高密：**新物态**——**夸克胶子等离子体 (Quark-Gluon Plasma, QGP)**
- 与其它领域的联系：
宇宙学、天体物理，宇宙起源与演化

相对论重离子碰撞



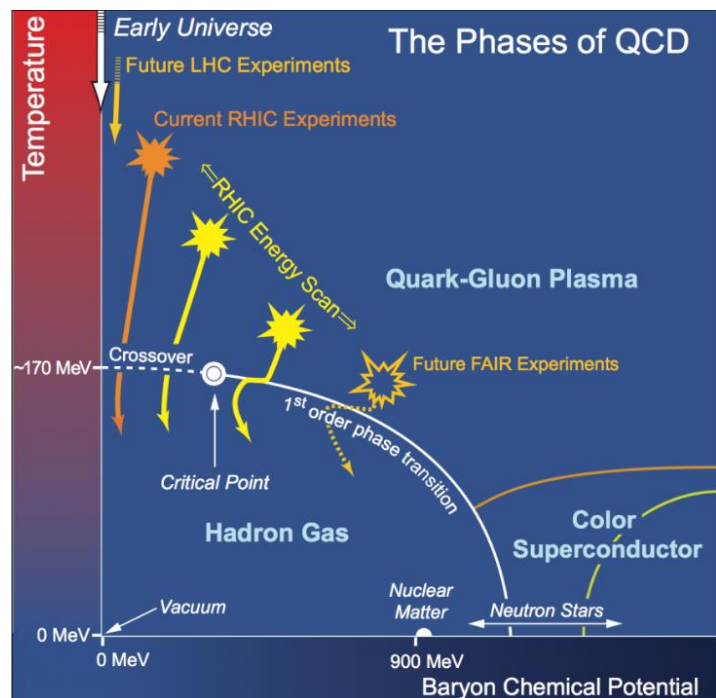
李政道

- 高能（相对论）重离子碰撞可在实验室中产生极高温或高密条件



- 热密物态快速膨胀并冷却（mini-bang），需根据末态粒子的信息（信号）反推热密物态特性
- 重离子碰撞实验：BNL/AGS，CERN/SPS，BNL/RHIC，CERN/LHC

QCD相图 (2007)



2007年美国能源部科学局核科学顾问委员会长期规划报告
2007, DOE Office of Science, NSAC, Long Range Plan

<http://science.energy.gov/np/nsac/>

- 2007年, RHIC已确认QGP在200 GeV的金核-金核碰撞中产生!

• 待解决的关键物理问题:

- 1) QCD相变在什么能量开始发生?
高密区一级相变?
QCD临界点?

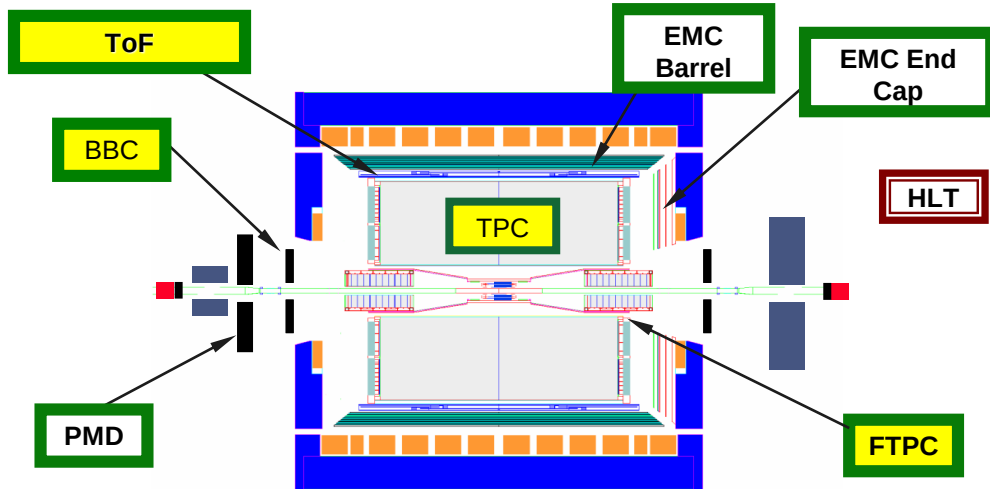
2010-2014年进行能量扫描实验
(7.7 - 62.4 GeV), 探测高密区

- 2) QGP物态的定量特性

在200 GeV提升亮度升级探测器
精确测量

在更高能量的LHC进行精确测量

STAR 能量扫描实验



- STAR:
RHIC上的对撞机实验
- 在中心快速区 ($|\eta| < 1$) 具有 2π 方位角覆盖
- 第一阶段能量扫描(BES-I)
 $\text{Au+Au } \sqrt{s_{\text{NN}}} = 62.4 - 7.7$
GeV

Year	Collisions	$\sqrt{s_{\text{NN}}}$ (GeV)	Minimum bias events
2010	Au+Au	7.7	~ 4 M
2010	Au+Au	11.5	~ 12 M
2014	Au+Au	14.5	~ 13 M
2011	Au+Au	19.6	~ 36 M
2011 / 2018	Au+Au	27	~ 70 M / ~ 560 M
2010	Au+Au	39	~ 130 M
2017	Au+Au	54.4	~ 556 M
2010	Au+Au	62.4	~ 46 M

奇异强子是QCD相变的重要探针

Rafelski & Müller, 1982

- 奇异夸克

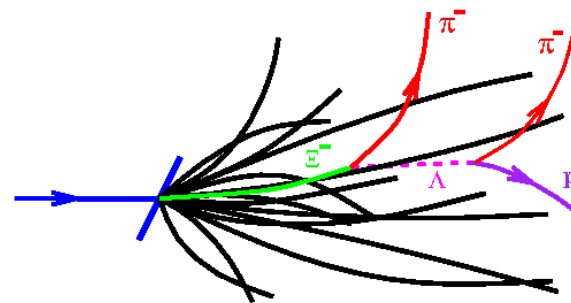
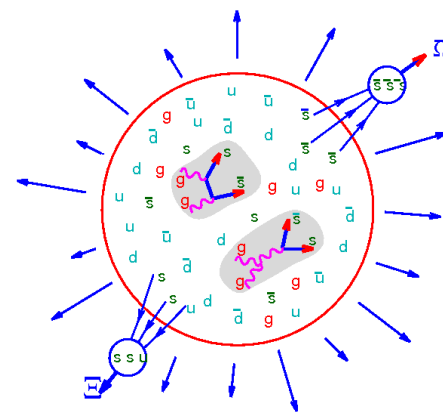
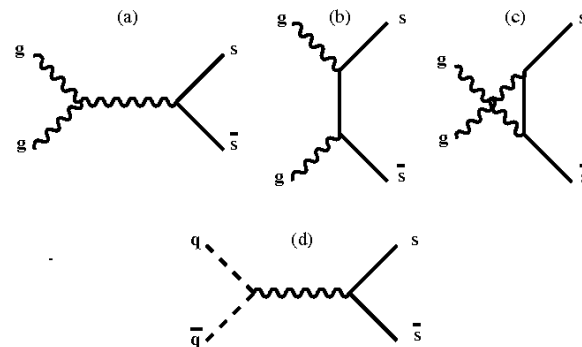
- 在对撞核中不存在其价夸克
- 流质量 $\sim 100 \text{ MeV} < T_c$
- 容易在退禁闭的QGP介质中对产生

→ 奇异性增强！

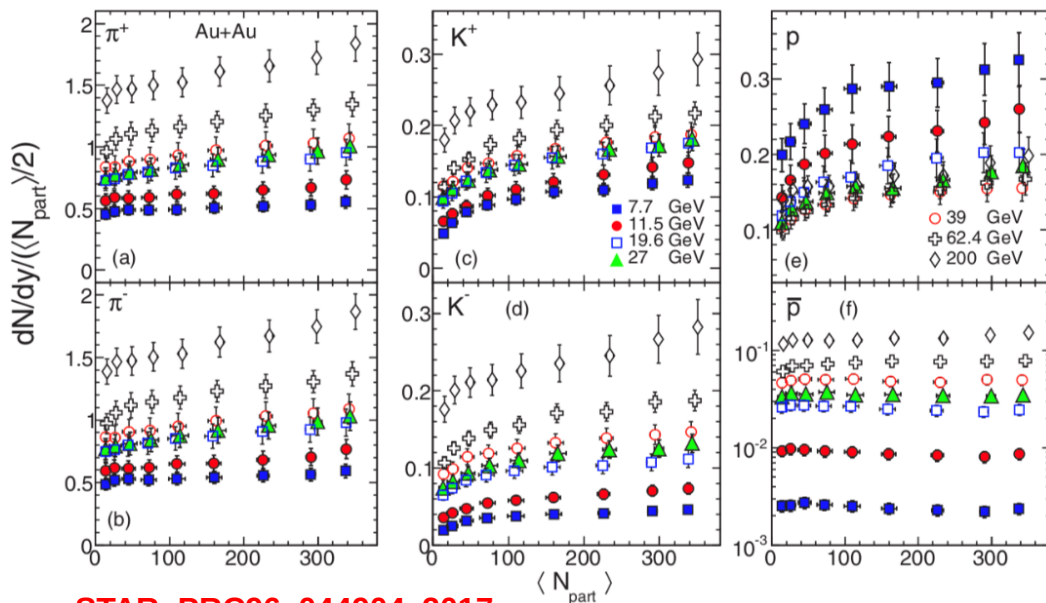
- 带有（多个）奇异夸克的强子

- 在QGP强子化阶段通过夸克重组并和产生
- 强子散射截面较小
- 对介质早期演化动力学较敏感
- 实验上容易重建，并在所有 p_T 范围进行测量

→ 可系统研究热密介质特性！

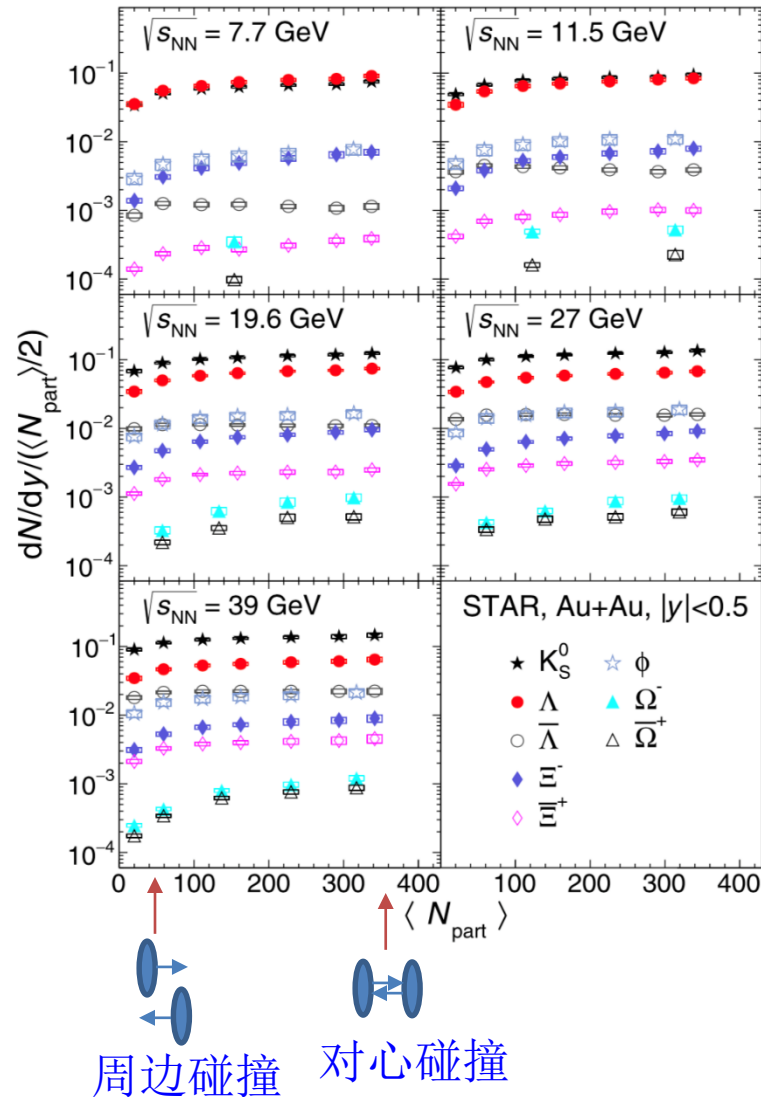


中心快度区的奇异强子产额 (dN/dy)



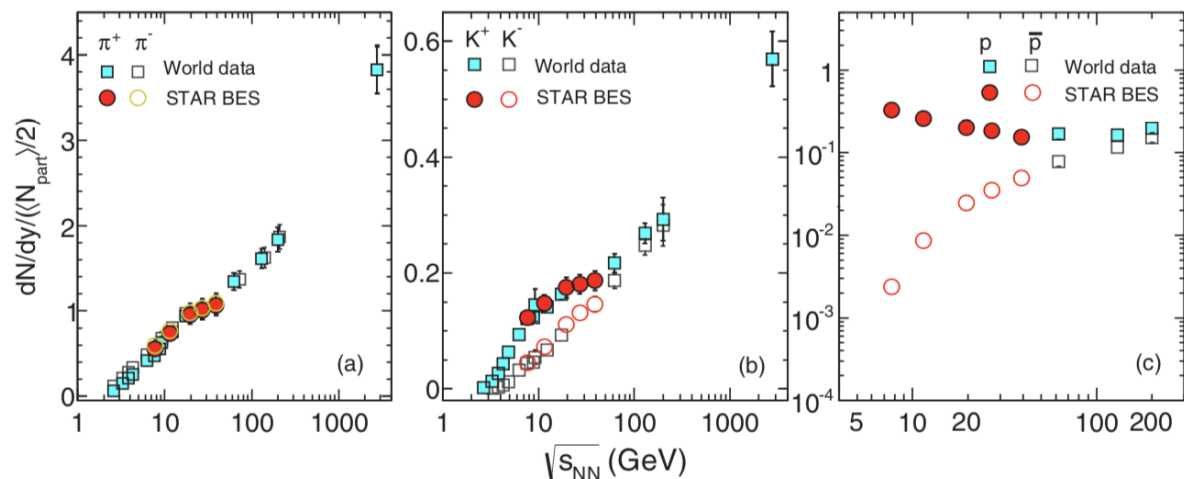
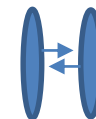
STAR, PRC96, 044904, 2017

- (每参与碰撞核子对的) 各个强子产额随着碰撞更对心以及能量更高而增加
- 例外:
 - p 和 Λ 产额随能量提高而下降
 - $\bar{p}$ 和 $\bar{\Lambda}$ 产额不随碰撞对心度变化

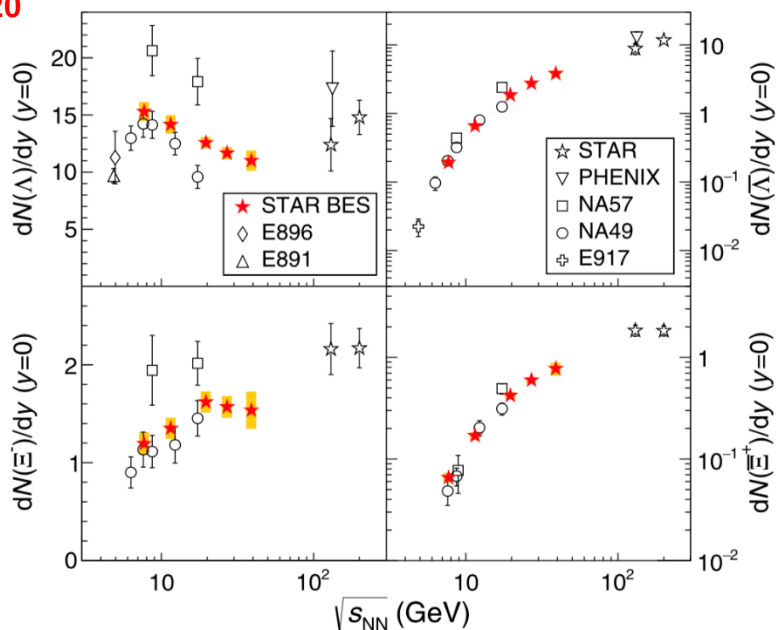
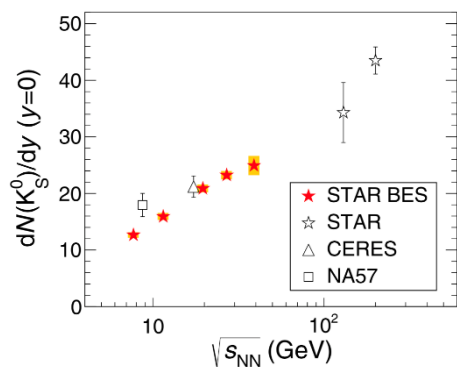


STAR, PRC102, 034909, 2020

对心碰撞中的强子产额随能量的变化

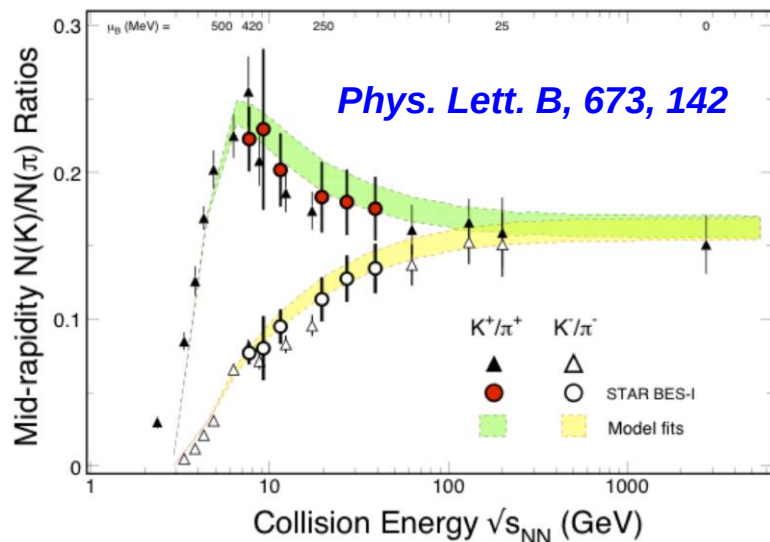
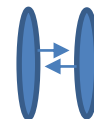


STAR, PRC96, 044904, 2017
STAR, PRC102, 034909, 2020

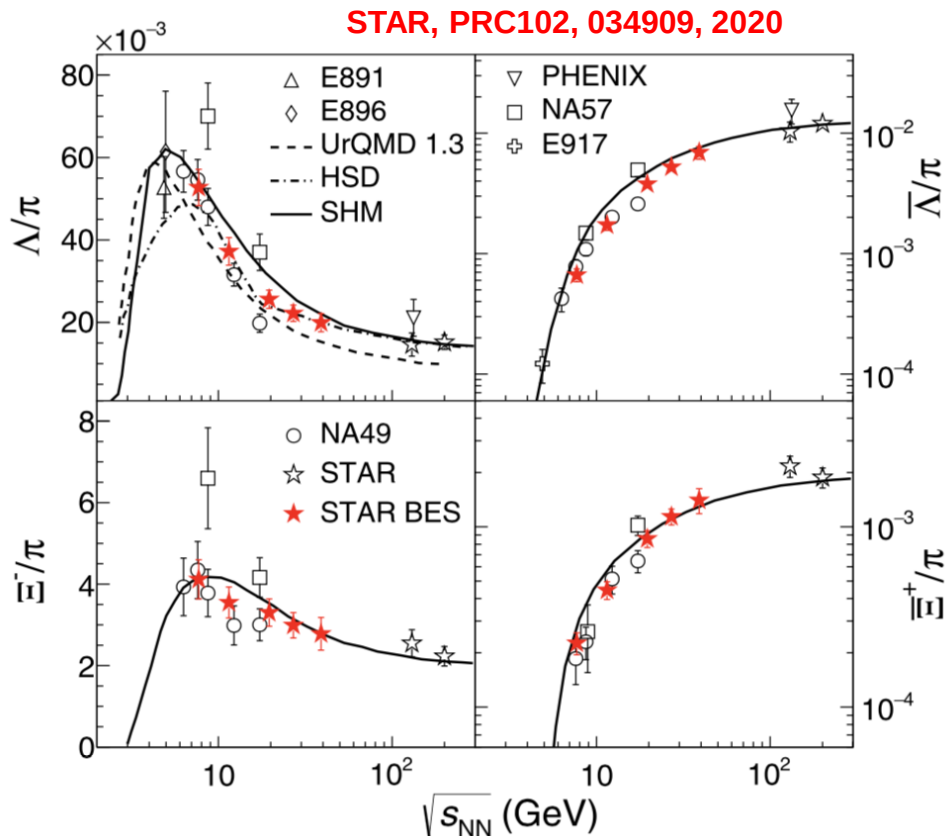
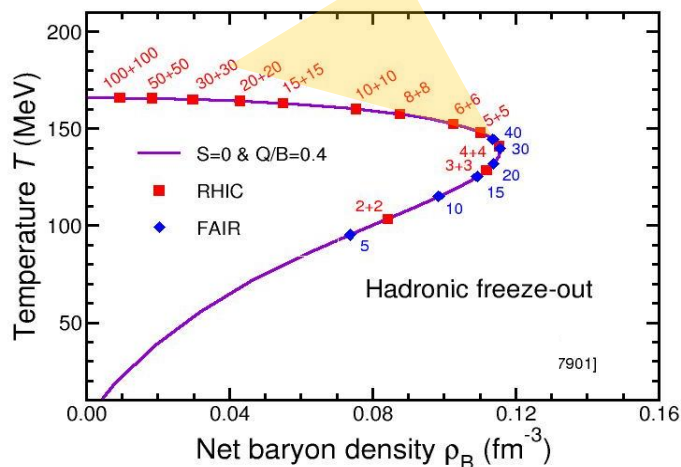


- STAR BES-I 数据与其他实验数据基本一致
- 各强子产额随能量的变化表现出丰富的结构
- p 和 Λ 产额在 39 GeV 附近最小：
 - 小于 39 GeV，主要来源于碰撞核的重子停止
 - 大于 39 GeV，主要来源于重子反重子对产生

奇异强子和 π 介子产额比



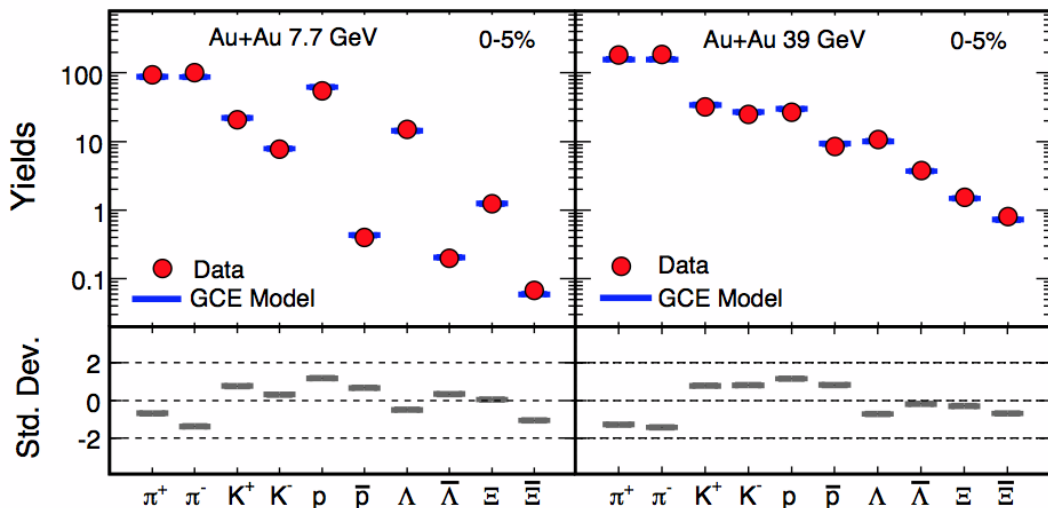
RHIC BES-I



- 各个奇异强子和 π 介子产额比显示 $\sqrt{s_{NN}} \sim 8 \text{ GeV}$ 的重离子碰撞中产生的热密介质在化学冻结时刻的净重子数密度最大。

介质化学冻结热力学参数: T_{ch} vs. μ_B

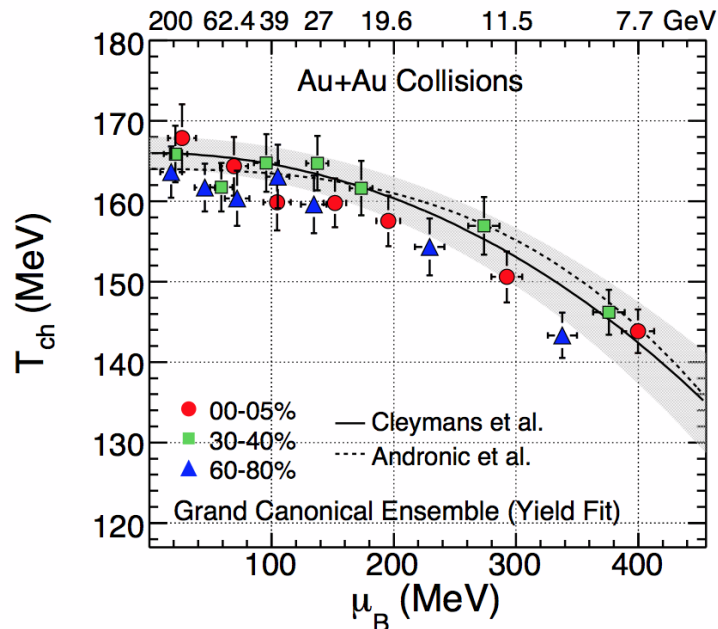
STAR, Phys. Rev. C 96, 044904, 2017



- ✓ Particles used : π , K , p , Λ , Ξ
- ✓ Ensemble used: **Grand canonical (GCE)**
- ✓ Fit parameters: T_{ch} , μ_B , μ_s and γ_s

Thermus, S. Wheaton & J. Cleymans, Comput. Phys. Commun. 180: 84-106, 2009.

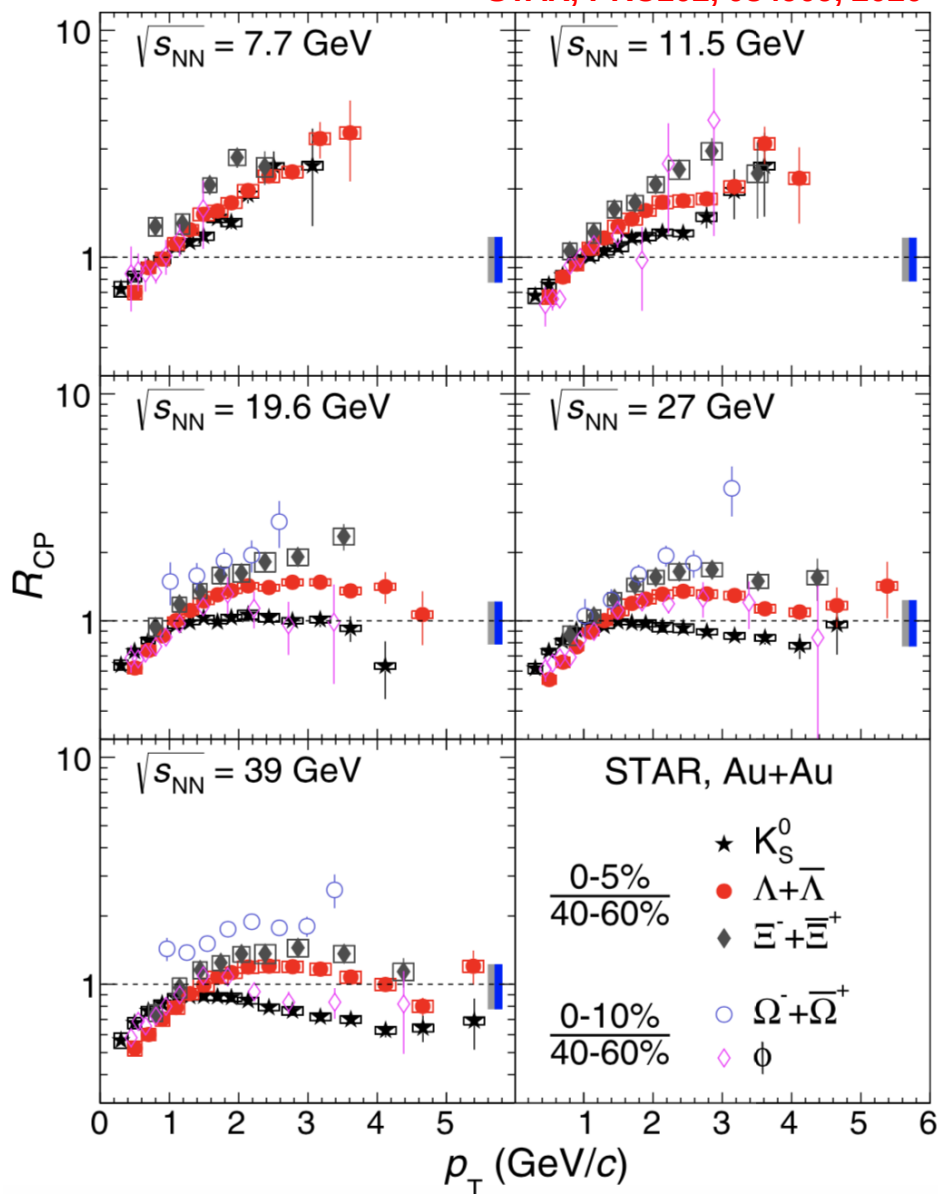
- 利用统计模型直接拟合多种强子产额，提取STAR BES-I各能量Au+Au碰撞产生的介质的 T_{ch} , μ_B , μ_s 等热力学参数。
- 限定QCD相变的相边界！



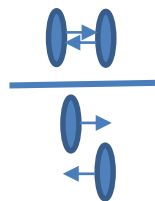
Andronic: NPA 834 (2010) 237
 Cleymans: PRC 73 (2006) 034905
 Au+Au 200 GeV : Phys. Rev. C **83** (2011) 24901

QGP信号随碰撞能量的变化：核修正因子 R_{CP}

STAR, PRC102, 034909, 2020

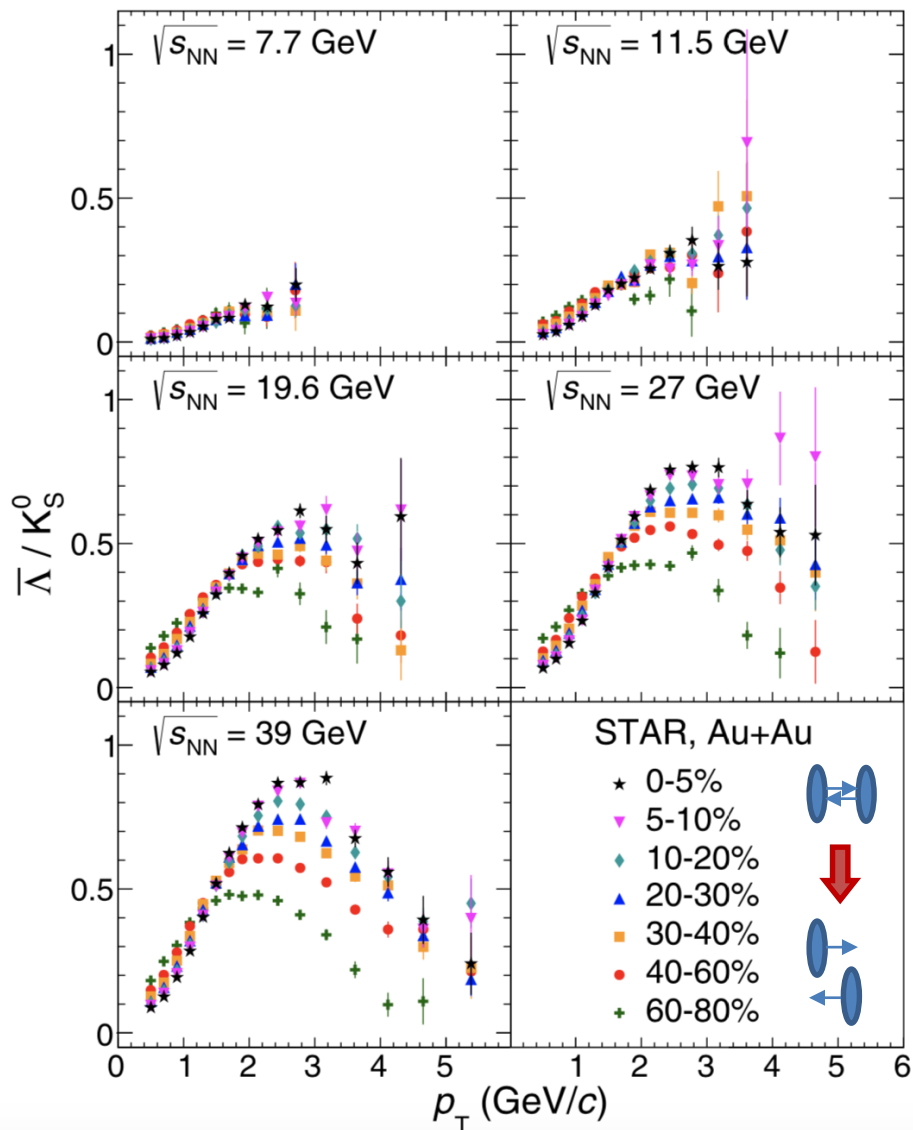


$$R_{CP}(p_T) = \frac{[d^2\sigma/(N_{bin}p_T dp_T dy)]_{central}}{[d^2\sigma/(N_{bin}p_T dp_T dy)]_{peripheral}}$$



- 高能重离子碰撞中，高 p_T 的粒子 $R_{CP} < 1$ 是QGP的典型信号：**喷注淬火**
- STAR BES-I数据显示：
 - 能量在39 GeV， K_S^0 的 R_{CP} 小于1，喷注淬火！
 - 能量小于11.5 GeV，高横动量 K_S^0 和其它强子的 R_{CP} 显著大于1！
 - 低能下，Cronin效应或径向流效应会与部分子能损存在竞争

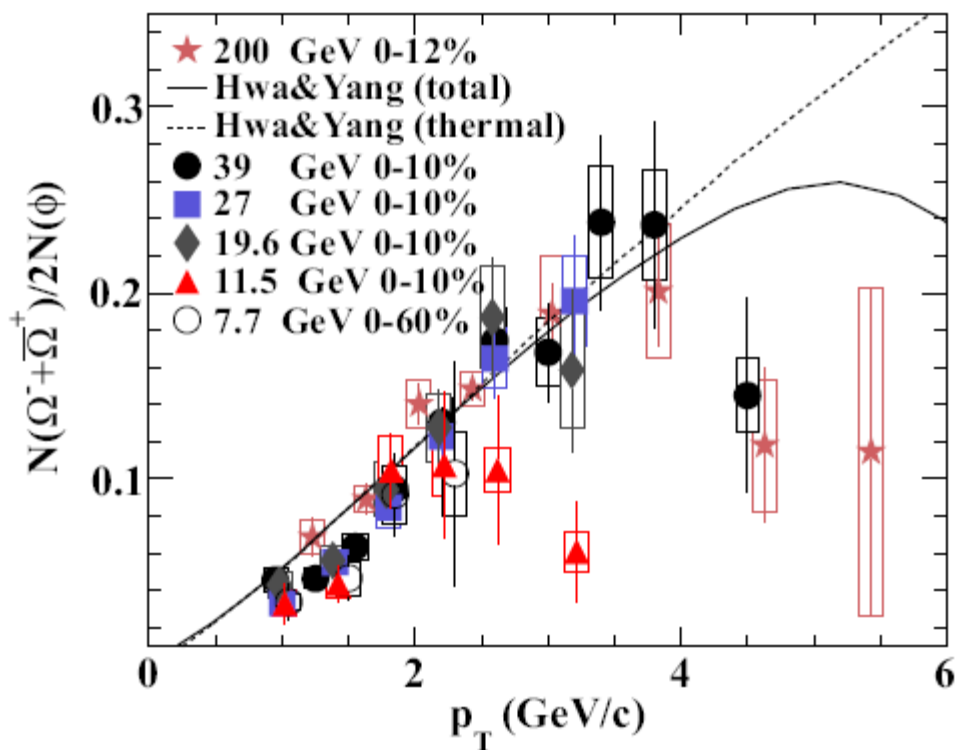
QGP信号随碰撞能量的变化：重子介子比 $\bar{\Lambda}/K_S^0$



STAR, PRC102, 034909, 2020

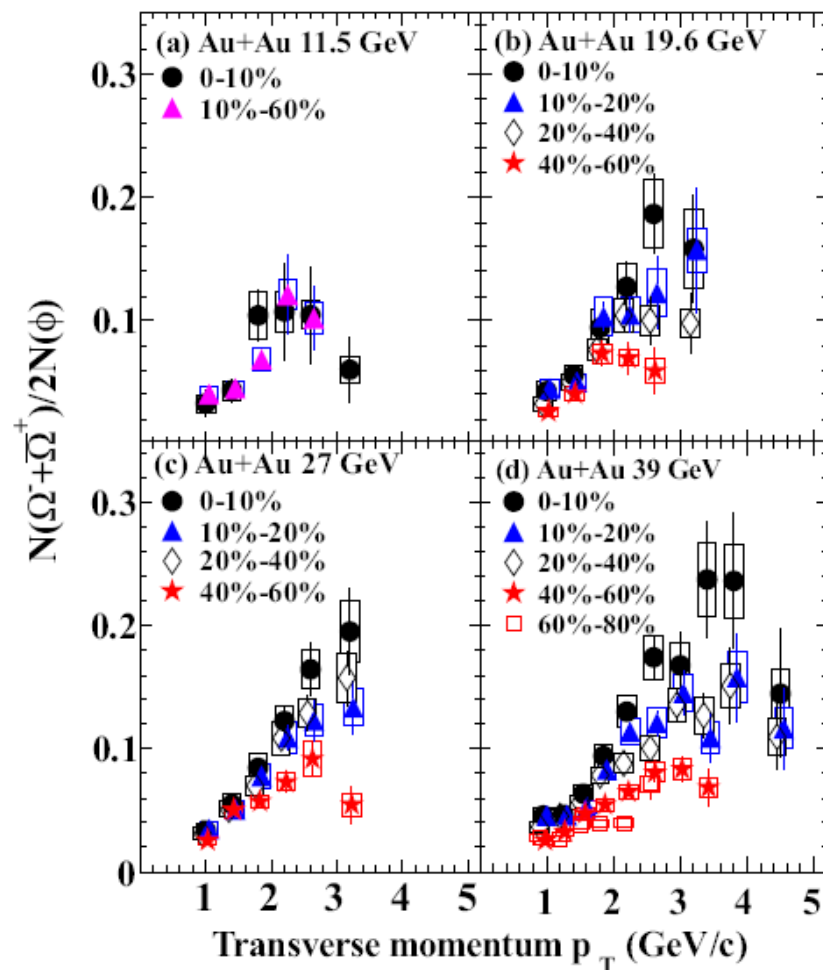
$\sqrt{s_{NN}} < 19.6$ GeV, 中等 p_T , 对心碰撞 (0-5%) 的 $\bar{\Lambda}/K_S^0$ 相对周边碰撞 (40-60%) 可能没有增强

QGP信号随碰撞能量的变化：重子介子比 Ω/ϕ

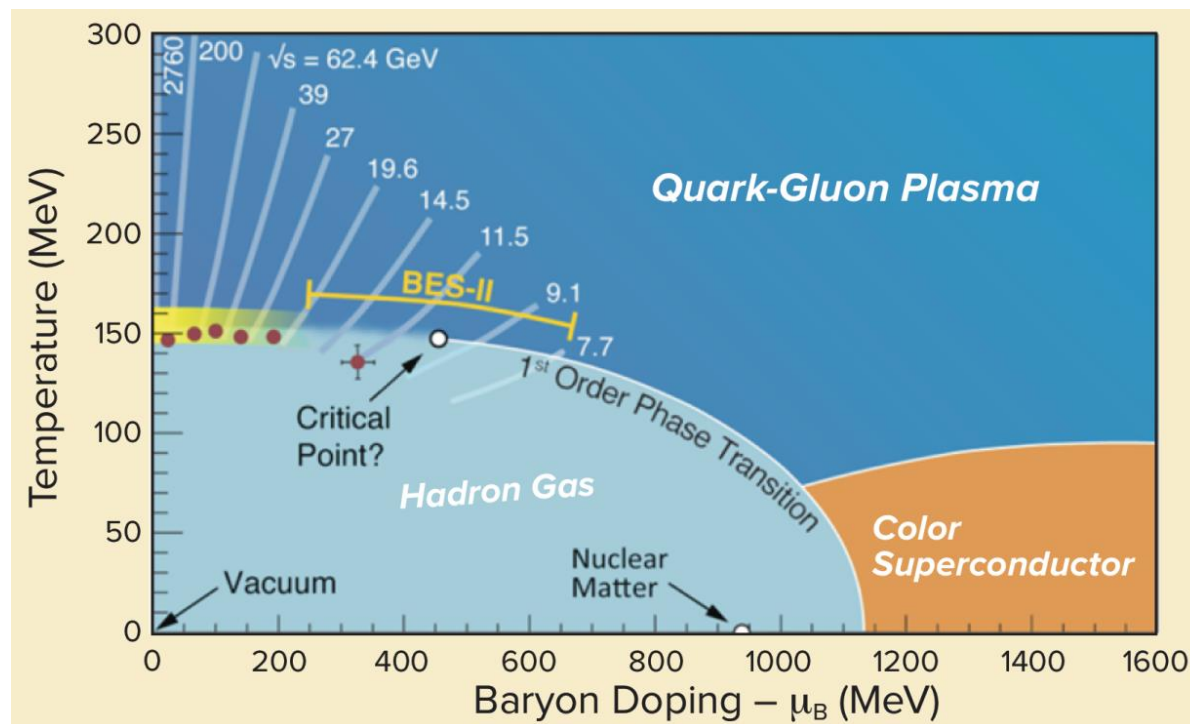


STAR, Phys. Rev. C 93, 021903 (R), 2016

- 中等 p_T Ω/ϕ 比：
低能（11.5 GeV）与较高能（ ≥ 19.6 GeV）碰撞可能存在偏离
- 19.6, 27和39 GeV对心碰撞中的 Ω/ϕ 比显著大于周边碰撞



QCD相图 (2015)



2015年美国能源部科学局核科学顾问委员会长期规划报告
2015, DOE Office of Science, NSAC, Long Range Plan

<http://science.energy.gov/np/nsac/>

STAR BES-II 探测器升级



iTPC:

- Improves dE/dx
- Extends η coverage from 1.0 to 1.5
- Lowers p_T cut-in from 125 MeV/c to 60 MeV/c
- Ready in 2019

EndCap TOF:

- Forward rapidity coverage is critical
- PID at $\eta = 0.9$ to 1.5
- Improves the fixed target program
- Provided by CBM-FAIR
- Ready in 2019

EPD:

- Improves trigger
 - Reduces background
 - Allows a better centrality and reaction plane measurement
- Ready in 2018

iTPC: <https://drupal.star.bnl.gov/STAR/starnotes/public/sn0619>

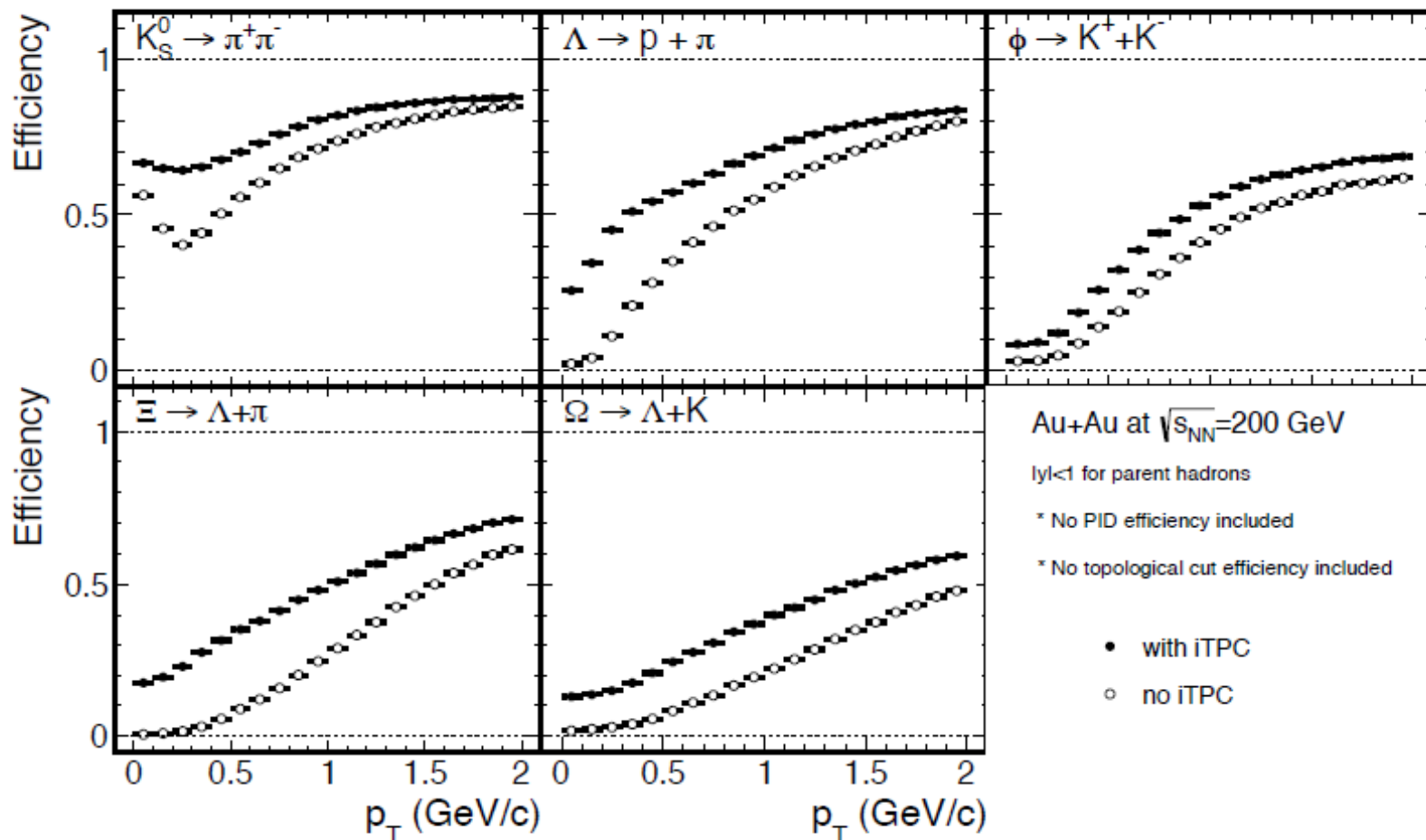
eTOF: STAR and CBM eTOF group, arXiv: 1609.05102

EPD: J. Adams, et al. Nucl. Instr. Meth. A 968, 163970 (2020)

- 1) **Enlarge rapidity acceptance**
- 2) **Improve particle identification**
- 3) **Enhance centrality/EP resolution**

这三个探测器已经在2019年（Run-19）全部安装完毕并参与STAR BES-II对撞取数。

iTPC大幅提升了STAR探测器的奇异强子重建能力



- Significant improvement of efficiency especially for Ξ , Ω

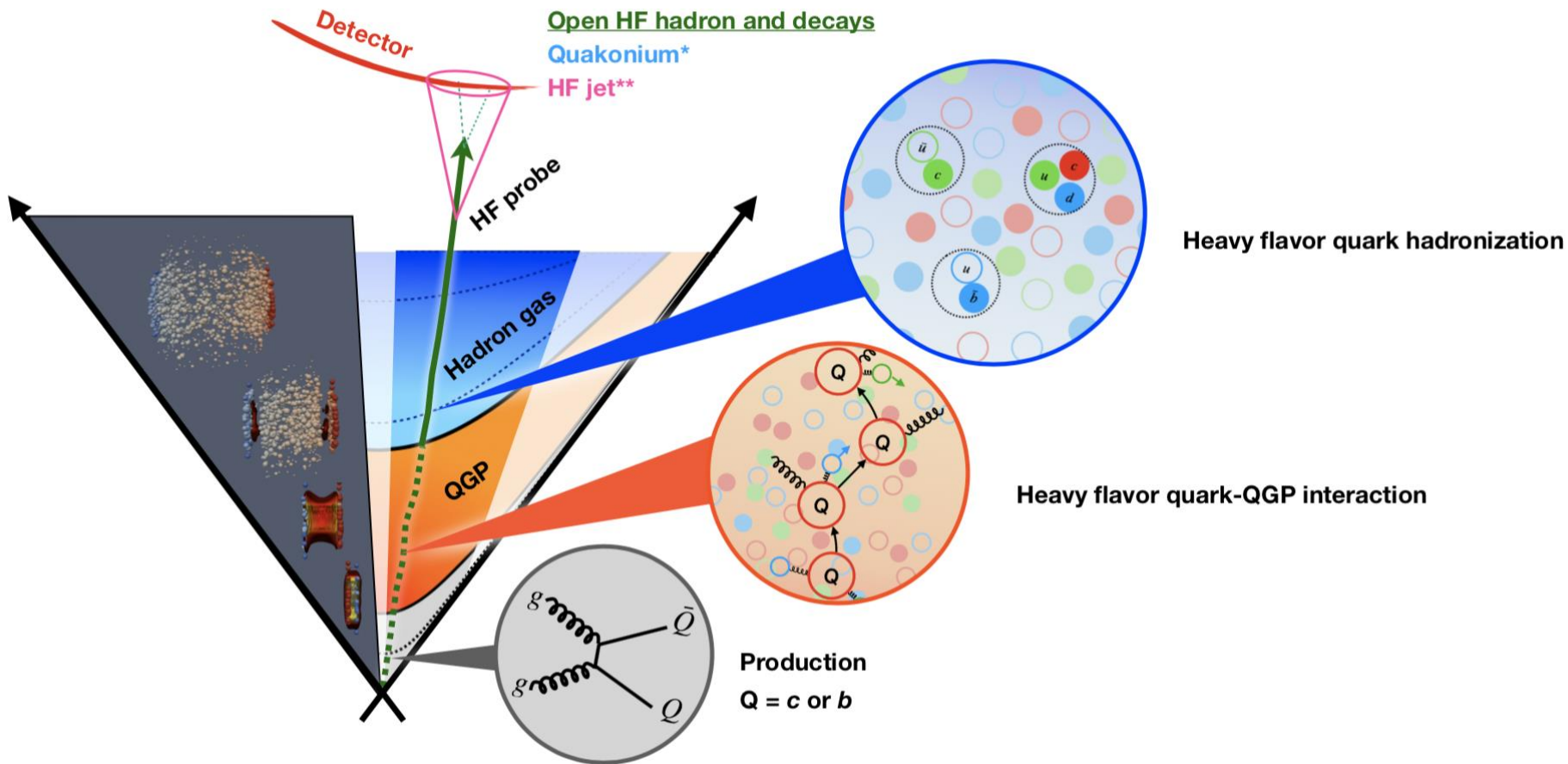
H. Masui, A. Schmah / LBNL

STAR BES-II 获取的对撞数据（2019-2021）

Year	<i>Collisions</i>	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	Good events
2019	Au+Au	19.6	~ 582 M
2019	Au+Au	14.5	~ 324 M
2020	Au+Au	11.5	~ 235 M
2020	Au+Au	9.2	~ 162 M
2021	Au+Au	7.7	~ 100 M
2021	Au+Au	17.3	~ 250 M

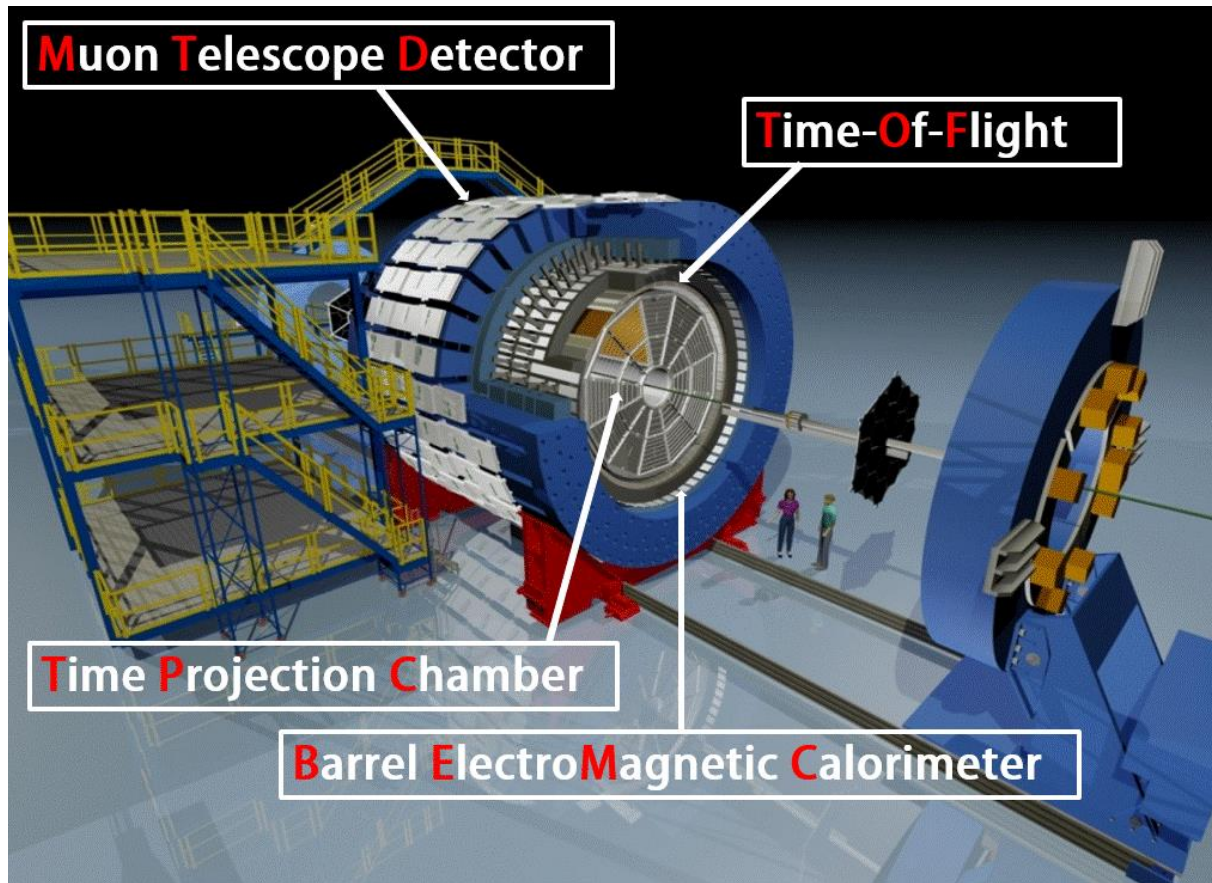
**STAR BES-II对撞取数已经在2021年6月底圆满完成！
在7.7-19.6 GeV能区多个能量点获取了大统计量实验数据。**

重味——QGP特性的探针



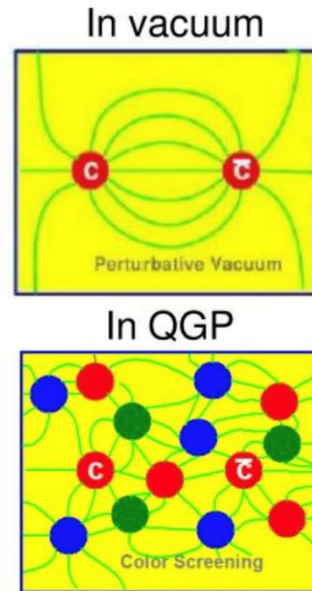
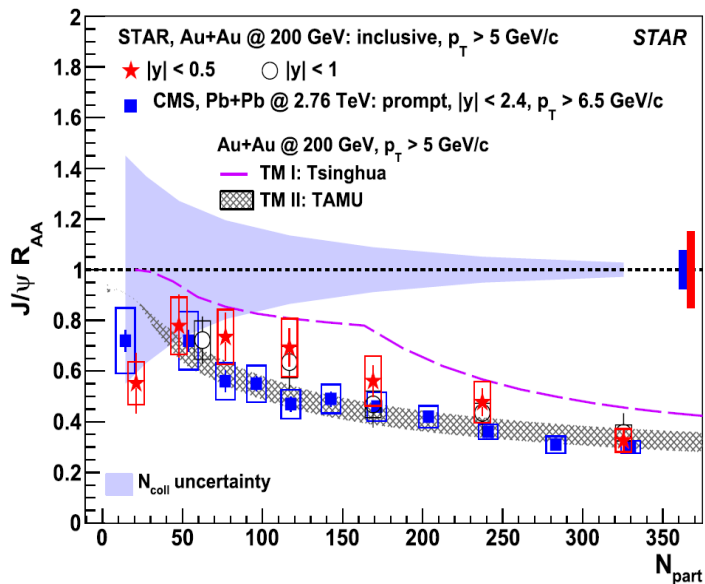
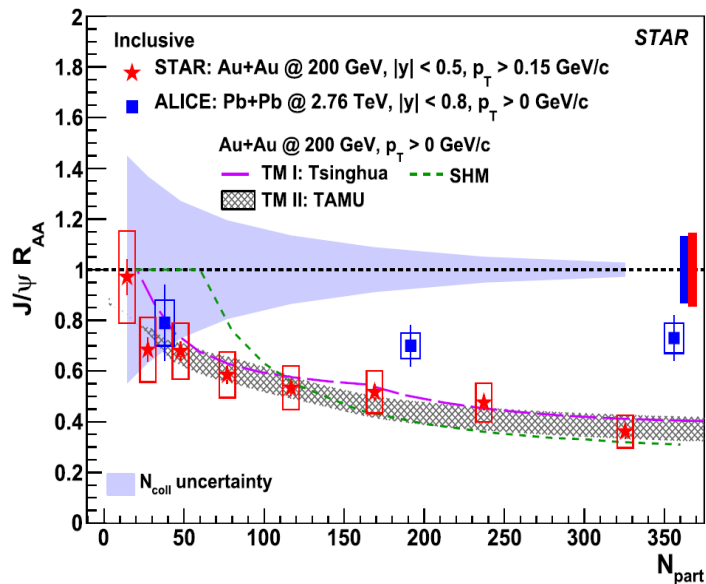
Qipeng Hu, SQM2022

STAR实验缪子探测器升级



- **MTD:**
Based on MRPC technology
Identify and trigger on muons
 - ✓ $|\eta| < 0.5$, $\varphi \sim 45\%$
 - ✓ Less bremsstrahlung compared to electrons
- Installed in 2013,
Au+Au 200 GeV data taking during 2014-2016

STAR 200 GeV 金核-金核碰撞中 J/ψ 产额压低



STAR, Phys. Lett. B 797 (2019) 134917

- 基于STAR升级MTD探测器利用双muon衰变道精确测量了RHIC能量下 J/ψ 产额压低
- 中心碰撞中较高横动量的 J/ψ 产额存在显著压低，暗示QGP中色屏蔽效应的存在

$$R_{AA}(p_T) = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{dN_{AA}/dp_T}{dN_{pp}/dp_T}$$

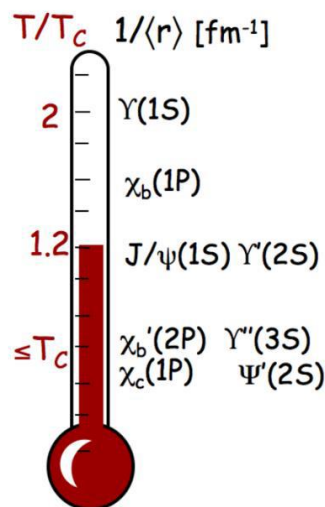
production yields in AA collisions

production yields in pp collisions

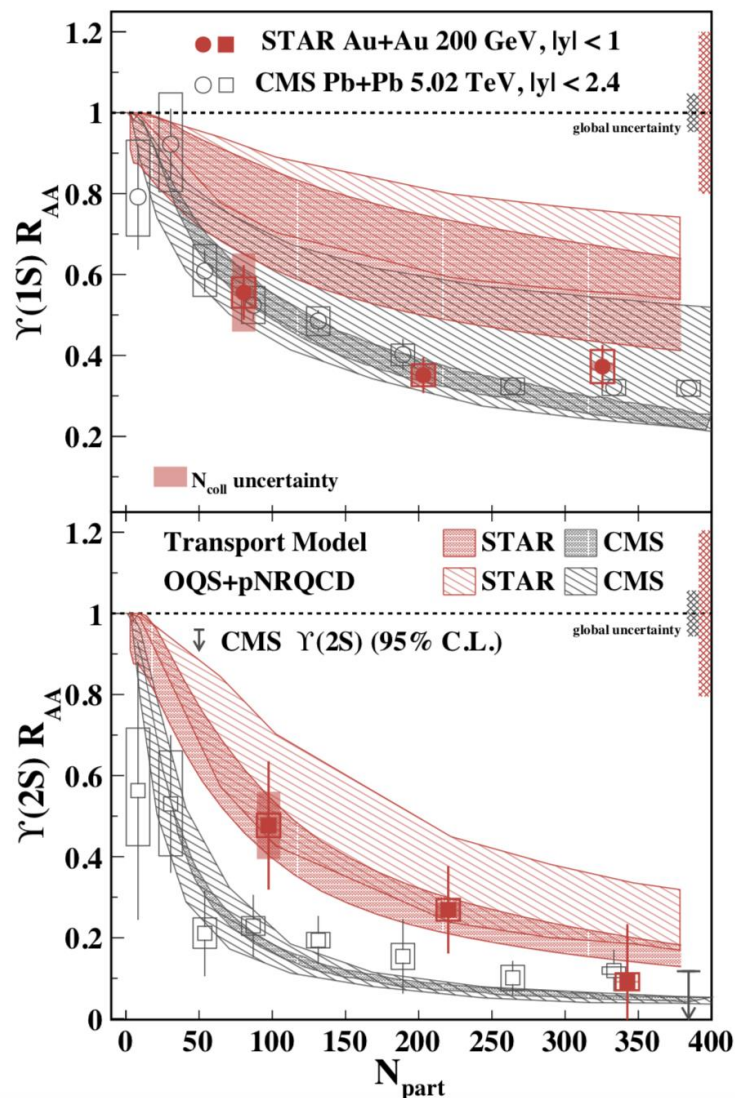
binary nucleon-nucleon collisions

STAR 200 GeV金核-金核碰撞中 Υ 产额压低

- 结合双muon道和双电子道测量了 Υ 产额压低。
- RHIC能量下重离子碰撞中存在显著的 $\Upsilon(1S)$ 产额压低，压低幅度与LHC相近。
- 在中心碰撞中 $\Upsilon(2S)$ 产额压低程度比 $\Upsilon(1S)$ 更大，即顺次熔解现象。

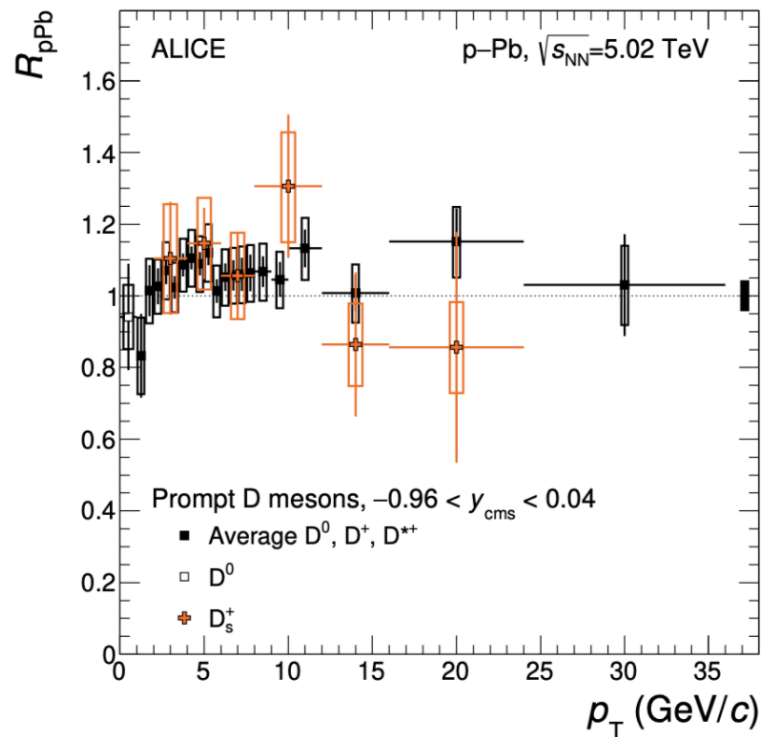
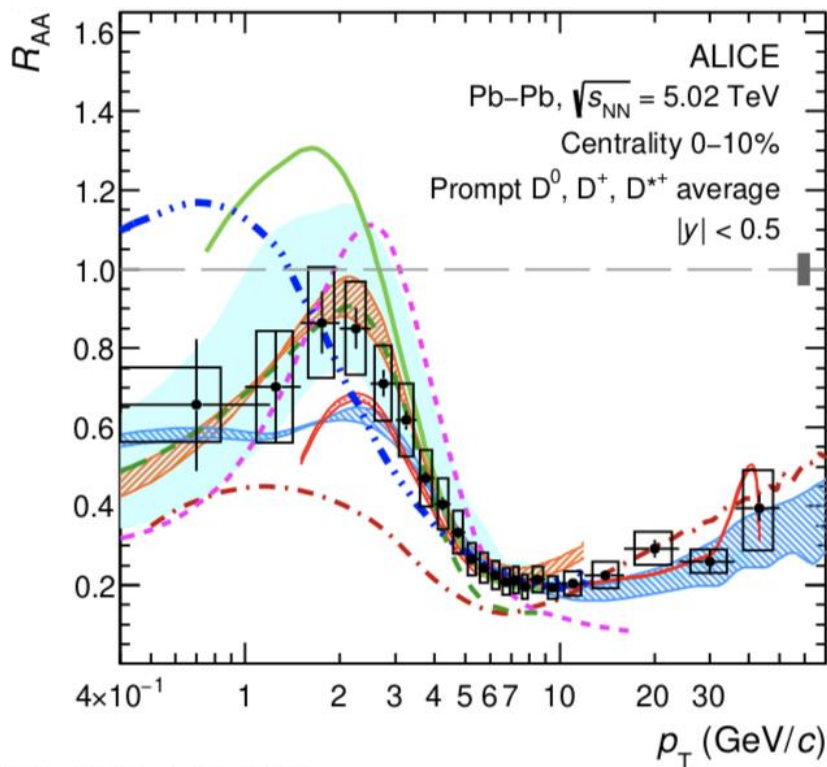


STAR, arXiv: 2207.06568, submitted to PRL



LHC重离子碰撞中的粲强子测量

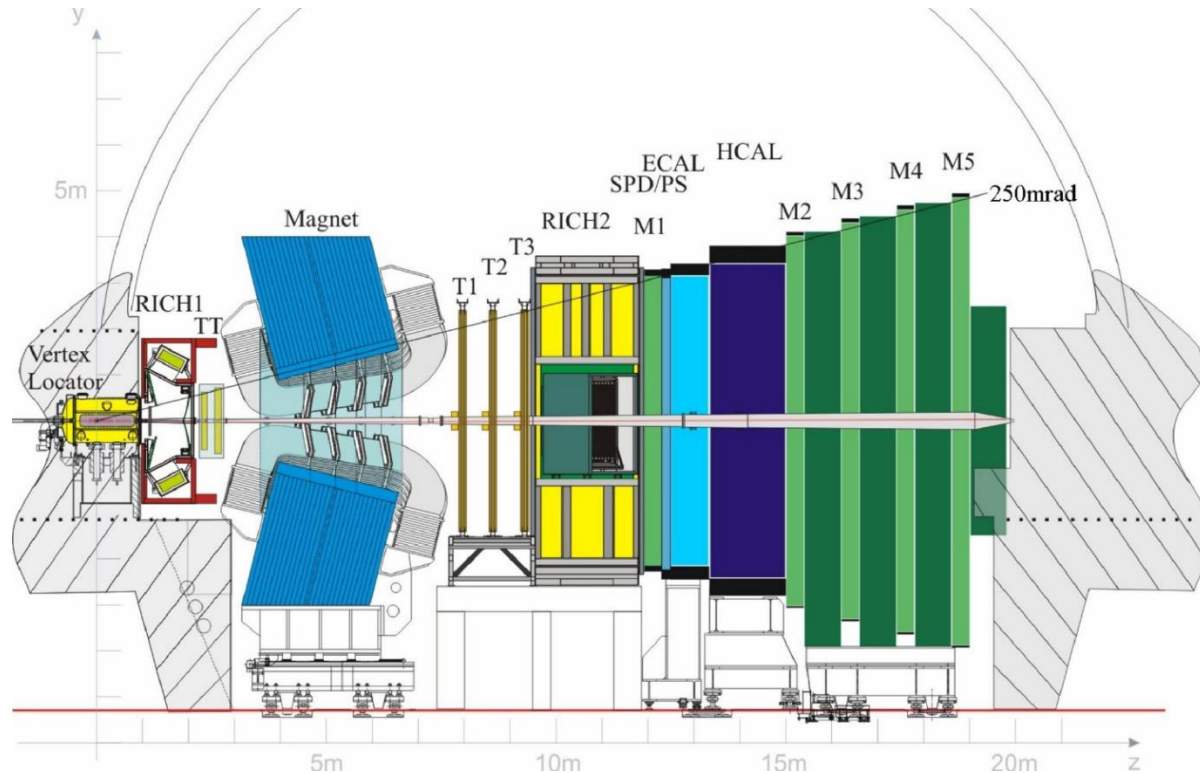
ALICE, JHEP12(2019)092



ALI-PUB-501952

- 铅核-铅核碰撞中，粲夸克与QGP介质发生强烈相互作用
- 亟需对质子-铅核碰撞中的粲强子产生进行精确测量，限定**冷核物质效应**，定量抽取粲夸克在QGP中的扩散系数等重要参数

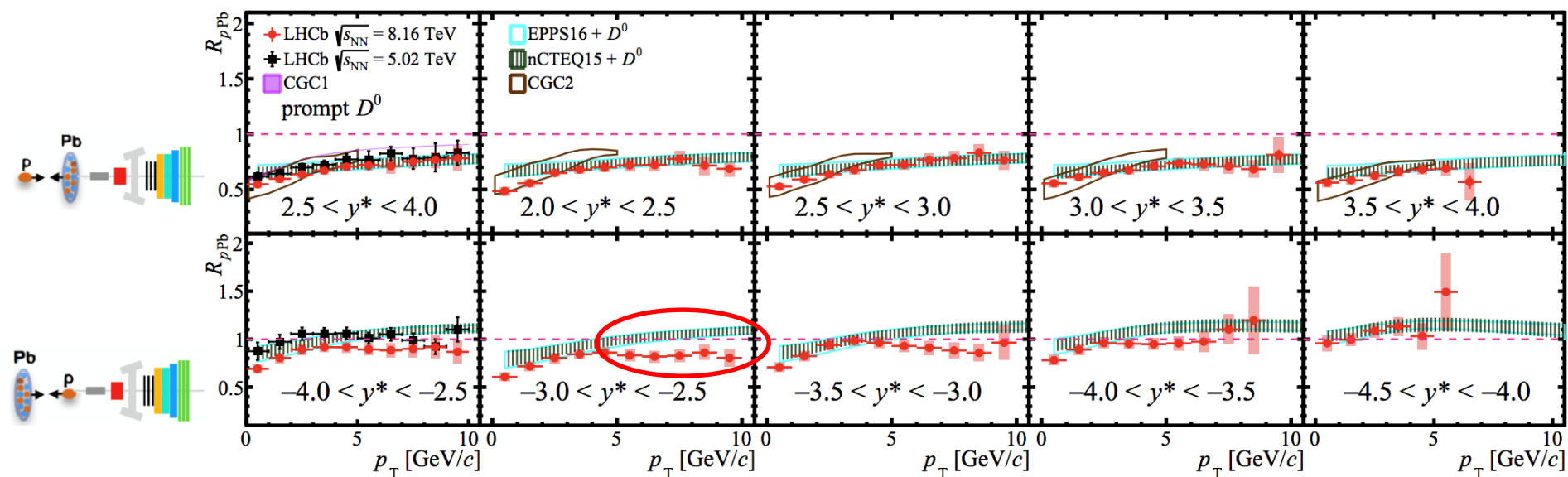
LHCb 上的重离子碰撞实验



- LHCb是LHC上4个大型综合型探测器之一， b 物理实验
- 具有独特的前向覆盖，尤其擅长重味强子测量
- 获取的质子-铅核碰撞等数据能够**精确限定冷核物质效应**！

LHCb质子-铅核碰撞中的 D^0 测量

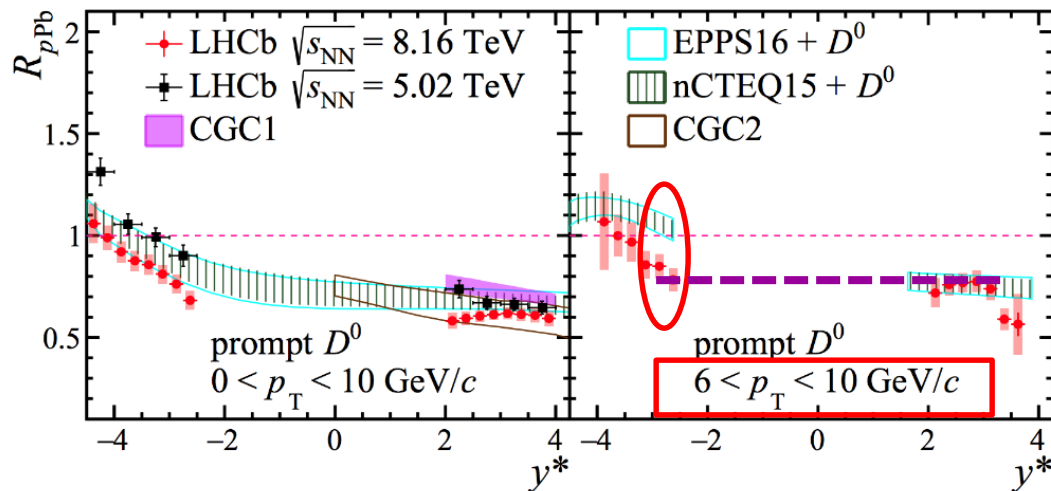
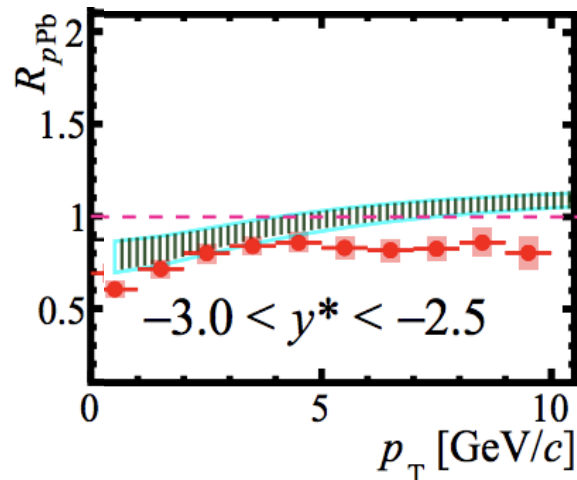
arXiv:2205.03936



- LHCb可在前向和后向快度区精确测量质子-铅核中的粲强子产生
- 前向：核修正因子小于1，与nPDF和CGC等冷核物质模型符合
- 后向：高横动量核修正因子低于1以及nPDF预言！

LHCb质子-铅核碰撞中的 D^0 测量

arXiv:2205.03936



预示

质子-铅核碰撞中等快度区的开粲强子在高横动量也存在产额压低!

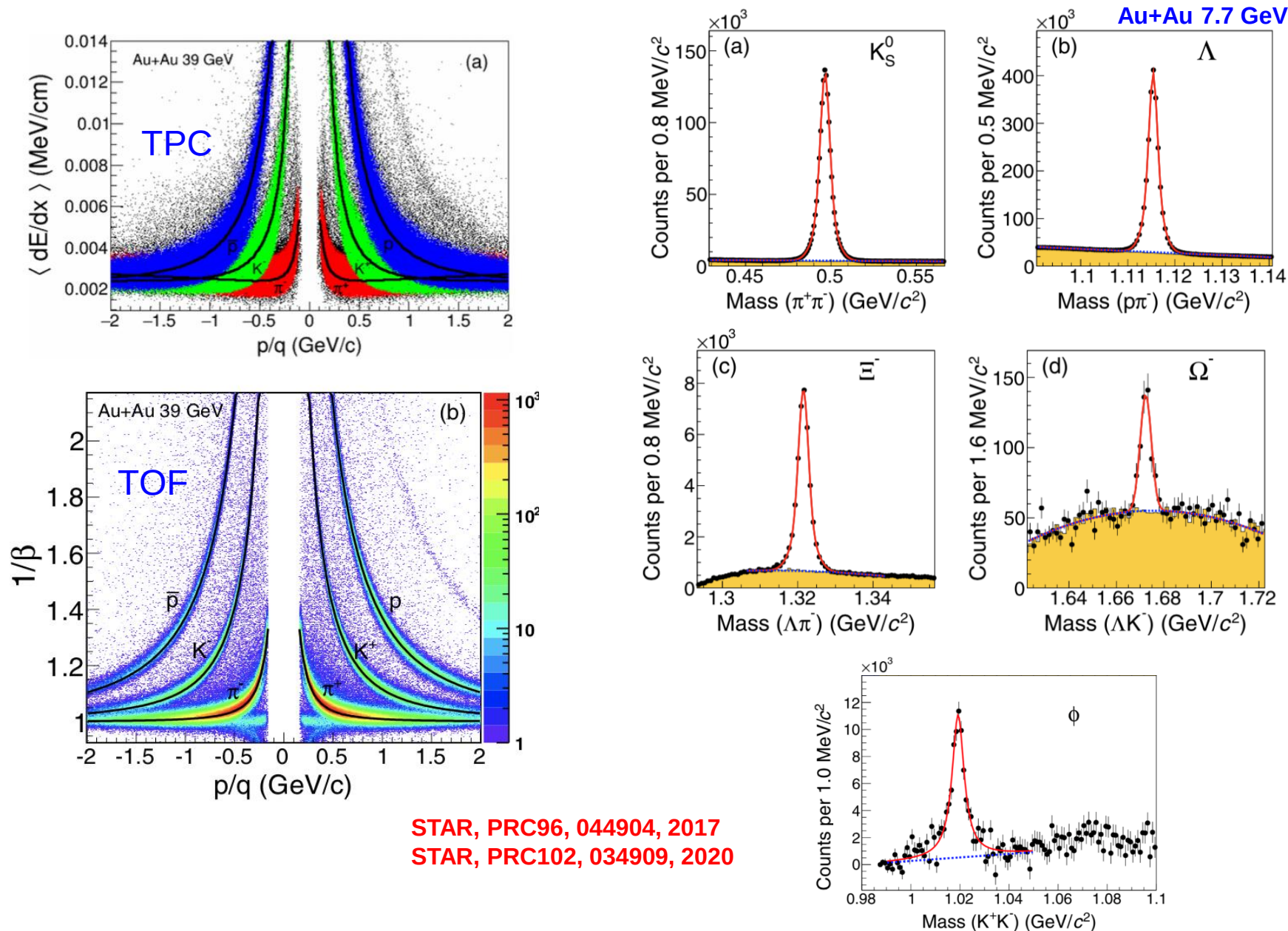
$$R_{pPb} \sim 0.8$$

总结和展望

- 系统测量了STAR 能量扫描实验中的奇异强子产生
 - 提取化学冻结时刻的热力学参数，限定QCD相边界
 - 退禁闭相变开始能量点很可能位于11.5和19.6GeV之间
- 高密区QCD相结构将在STAR BES-II、HIAF/CEE、NICA/MPD和FAIR/CBM等大科学装置上进一步探索
- 基于STAR MTD升级测量重离子碰撞中的重夸克偶素产生，确认QGP的色屏蔽效应和 Υ 顺次溶解
- 基于LHCb实验精确限定影响重离子碰撞中的QGP重味探针的冷核物质效应，将在Run3精确测量QGP特性

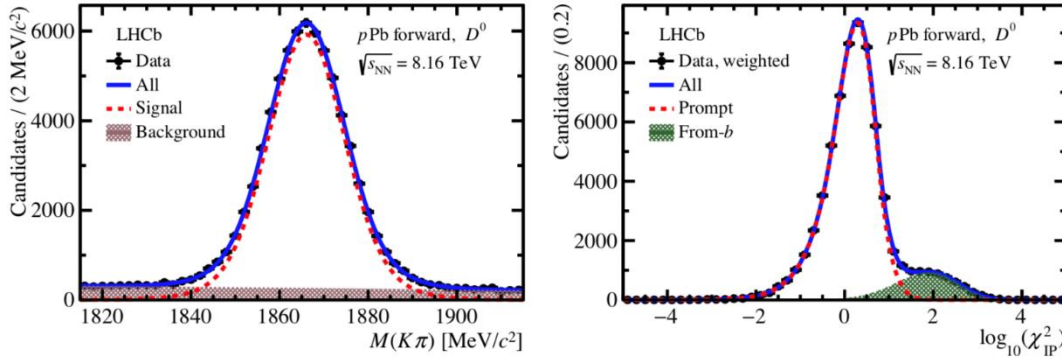
谢谢！

STAR实验粒子鉴别和奇异强子重建

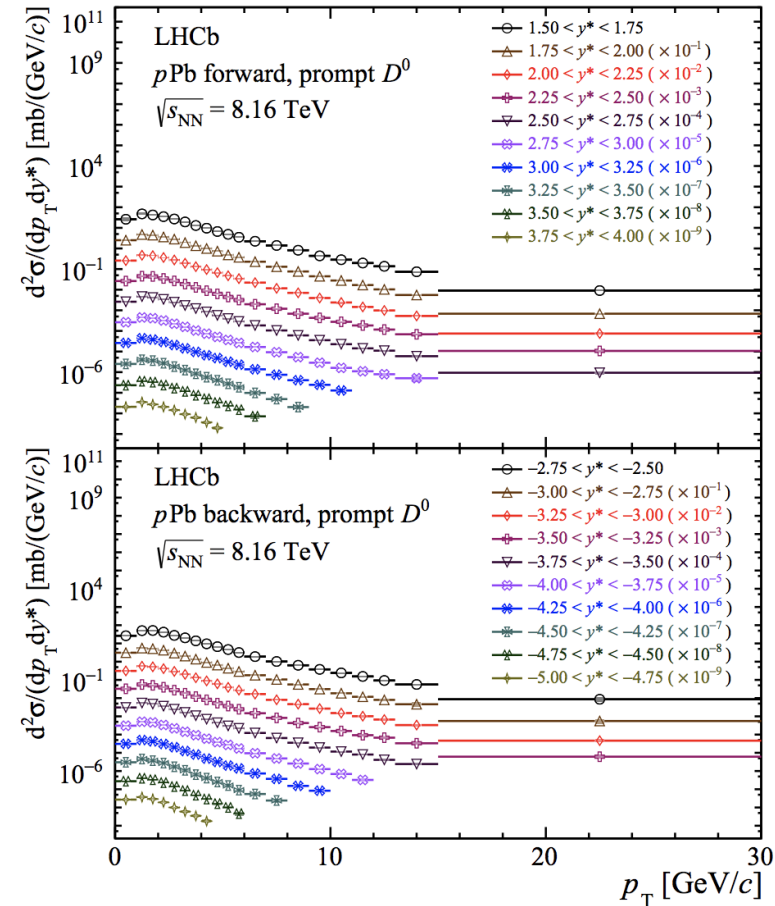


New D^0 measurement at 8.16 TeV

arXiv:2205.03936



- Precise measurement of prompt D^0 production in $p\text{Pb}$ collisions
- 20 times larger statistics than previous LHCb D^0 result at 5 TeV
- $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$
- Use impact parameter to separate the prompt and b -decay components
- $0 < p_T < 30 \text{ GeV}/c$
- $p\text{Pb}$: $1.5 < y < 4.0$; $\text{Pb}p$: $-5.0 < y < -2.5$

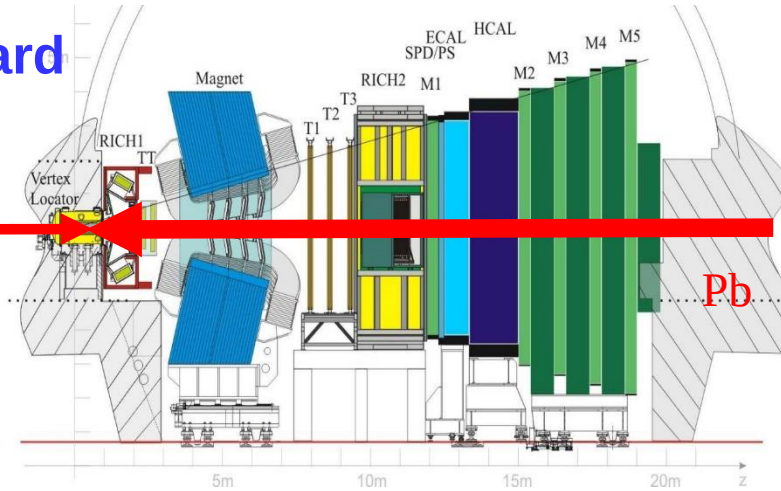


LHCb $p\text{Pb}$ datasets

Forward

$p\text{Pb}$

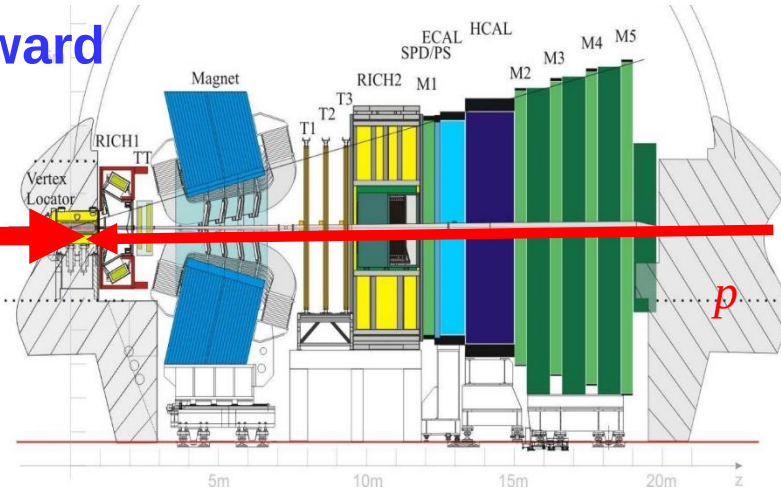
p



Backward

$\text{Pb}p$

Pb



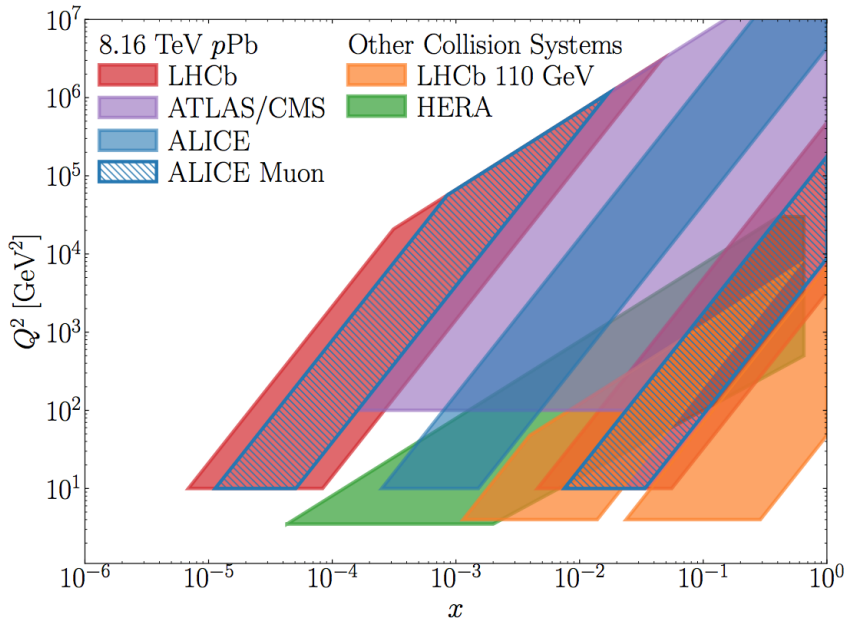
➤ Rapidity Coverage

- ✓ y^* : rapidity in nucleon-nucleon cms
- ✓ $y_{\text{cms}} = \pm 0.465$
- ✓ **Forward:** $1.5 < y^* < 4.0$
- ✓ **Backward:** $-5.0 < y^* < -2.5$
- ✓ Common region: $2.5 < |y^*| < 4.0$

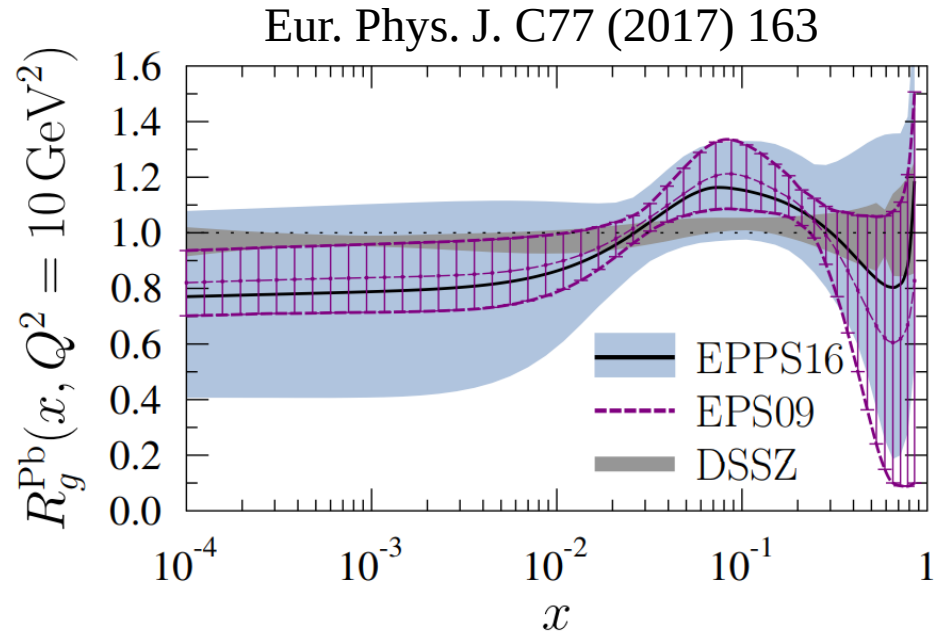
- ✓ $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 5.02 \text{ TeV}$ (2013, Run I)
 - ✓ $p\text{Pb}$ (1.06 nb^{-1}) + $\text{Pb}p$ (0.52 nb^{-1})

- ✓ $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 8.16 \text{ TeV}$ (2016, Run II)
 - ✓ $p\text{Pb}$ (13.6 nb^{-1}) + $\text{Pb}p$ (21.8 nb^{-1})

LHCb: frontier experiment in phase space



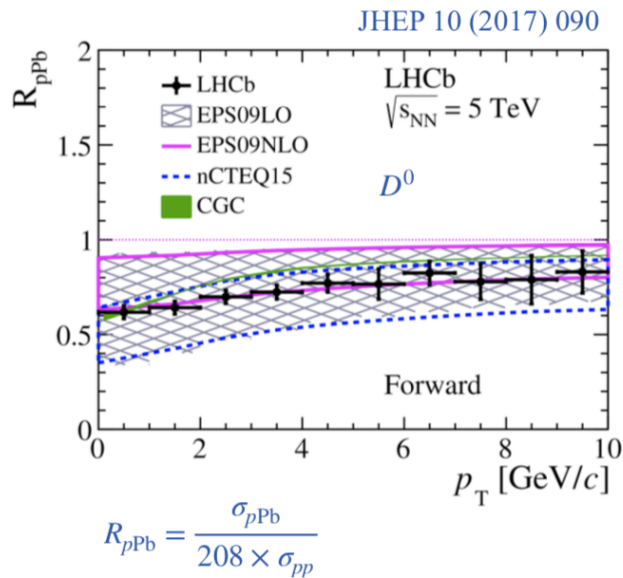
Graphic by T. Boettcher



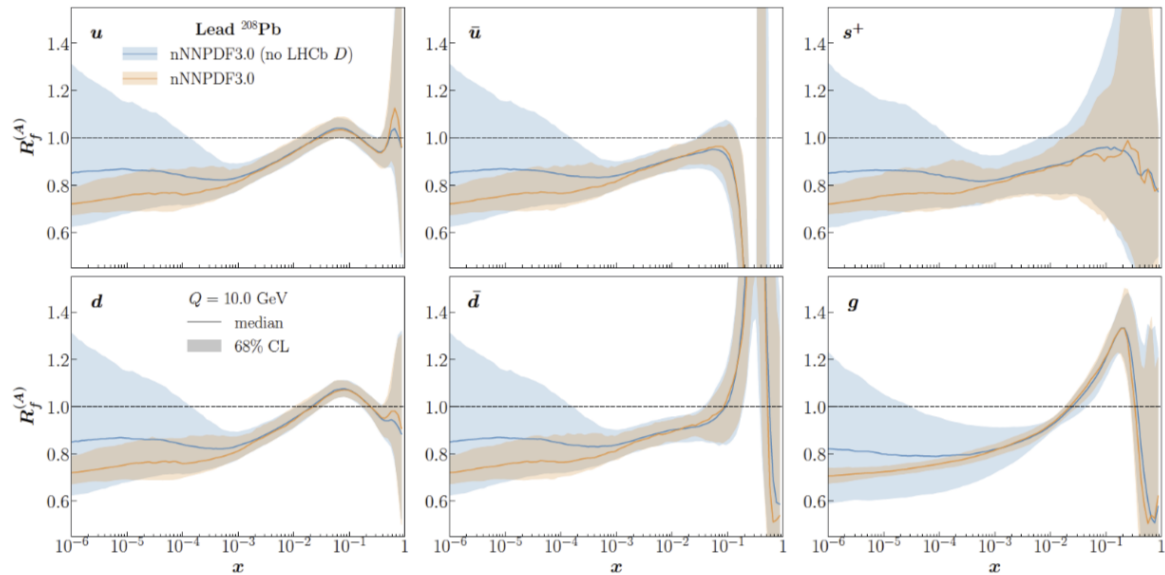
Thanks to the boost, the high resolution, the low- p_T reach and the fast read-out

- disentangle initial state from other phenomena
- constrain initial state
- sensitive to the physics on the saturation scale

LHCb D^0 data constrain nPDF



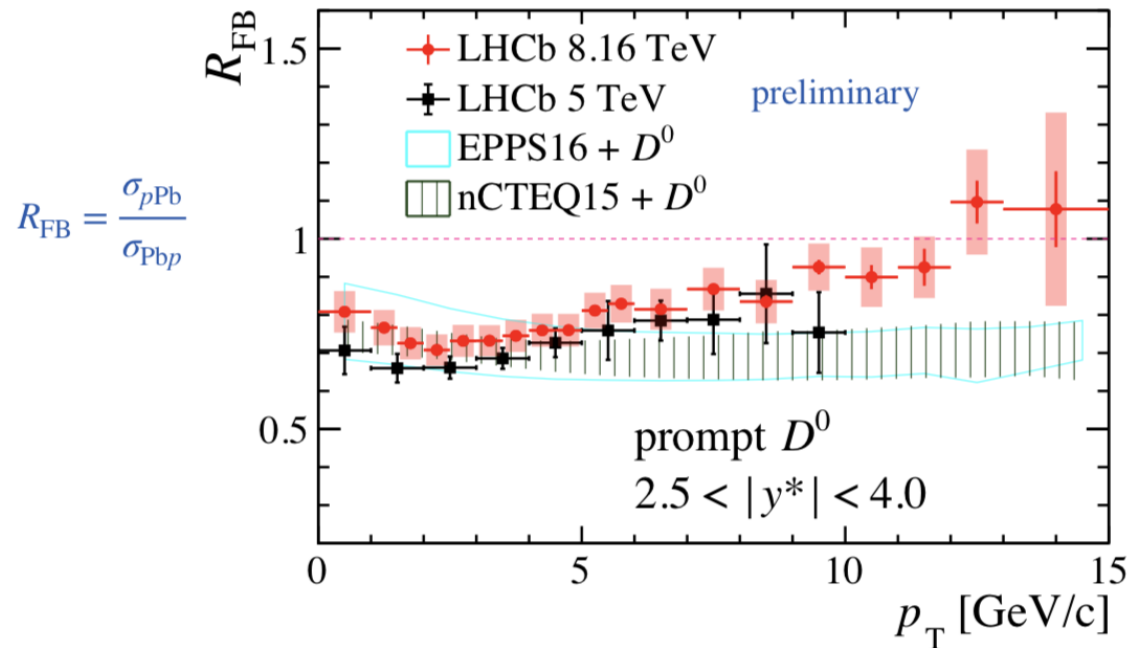
- nNNPDF3.0 [arXiv:2201.12363](https://arxiv.org/abs/2201.12363)
- LHCb measurement of prompt D^0 production in pPb collisions at 5 TeV makes an impressive impact on reducing nPDF uncertainty down to $x \sim 10^{-6}$



jiayin sun, LHC seminar

D^0 forward-backward production ratio

arXiv:2205.03936



- Forward-backward production ratio R_{FB}
 - Low p_{T} : **consistent with nPDF expectations**
 - High p_{T} : **data > nPDF**