

LHC能区底夸克能损 及椭圆流的研究

答辩人: 李东升 (PB18020518)

导师: 张一飞 教授



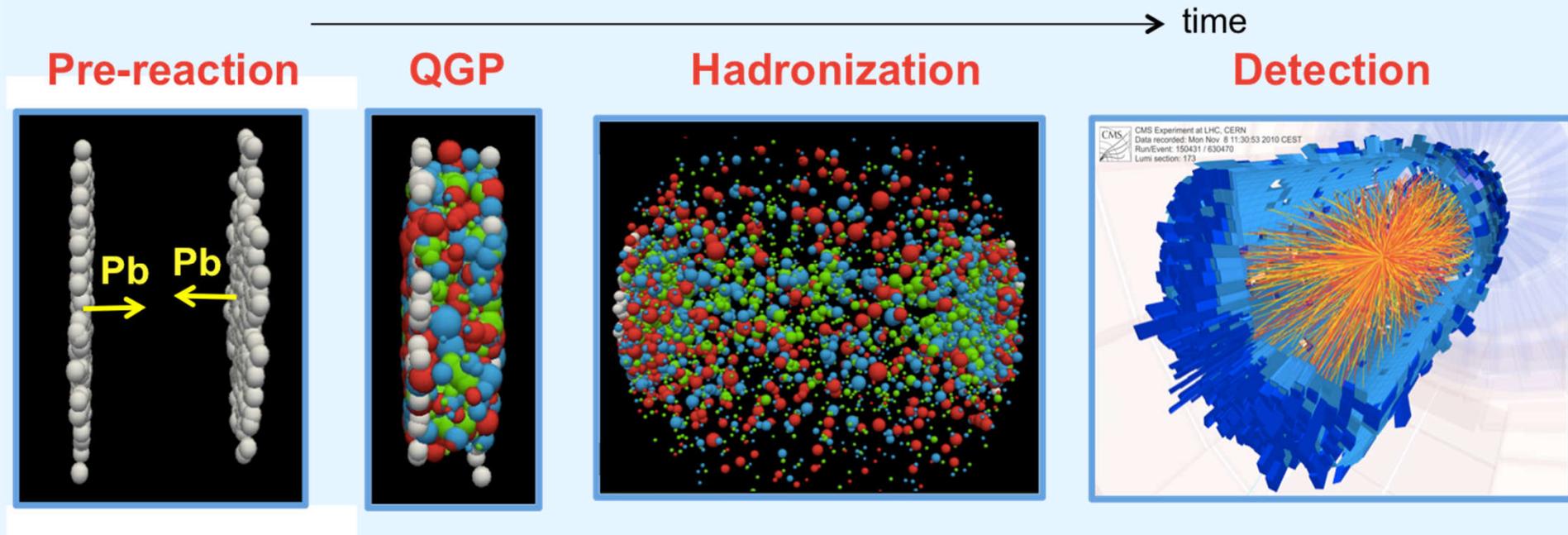
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

目录

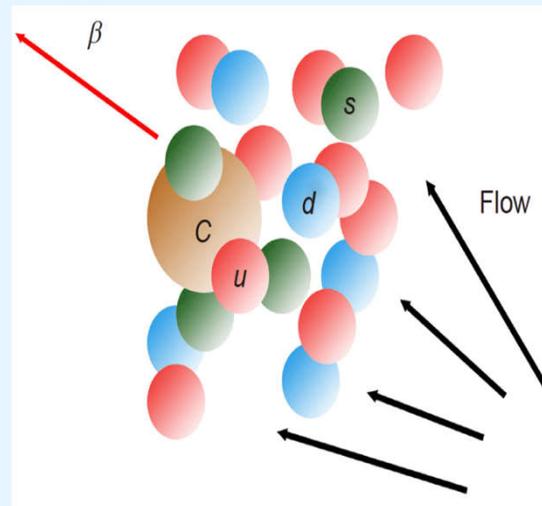
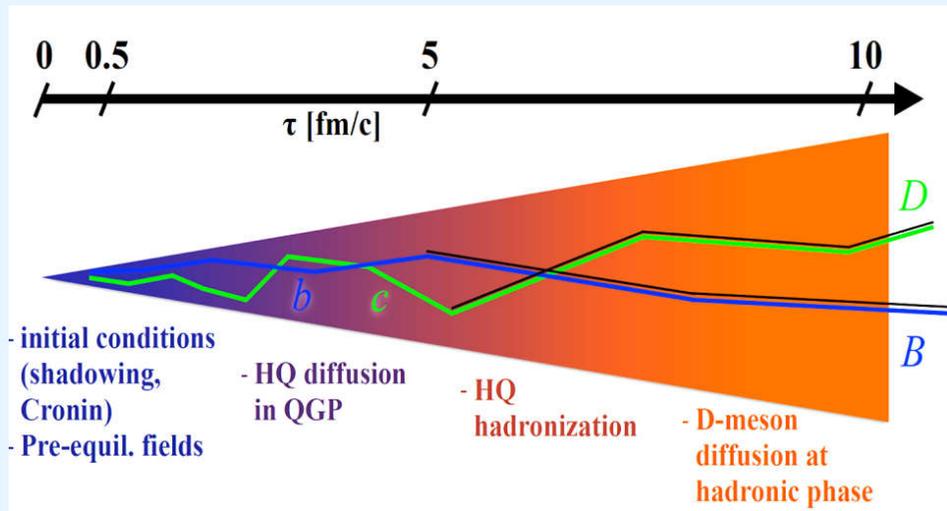
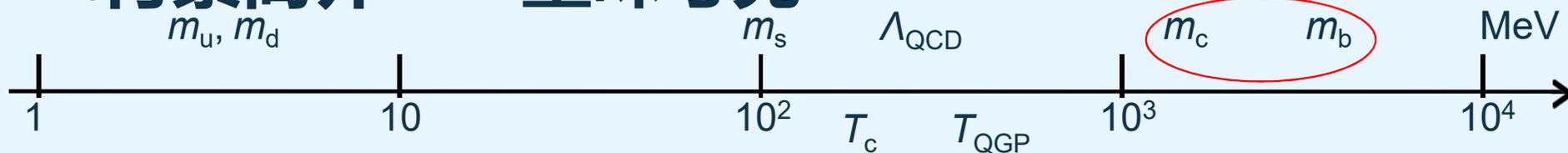
- 一.背景简介
- 二.半轻子衰变的模拟
- 三.粲底电子核修正因子
- 四.粲底电子椭圆流
- 五.爆炸波拟合
- 六.总结

一.背景简介——重离子碰撞

- 夸克禁闭
- 夸克胶子等离子体(Quark-Gluon Plasma, QGP), 重离子碰撞



一.背景简介——重味夸克



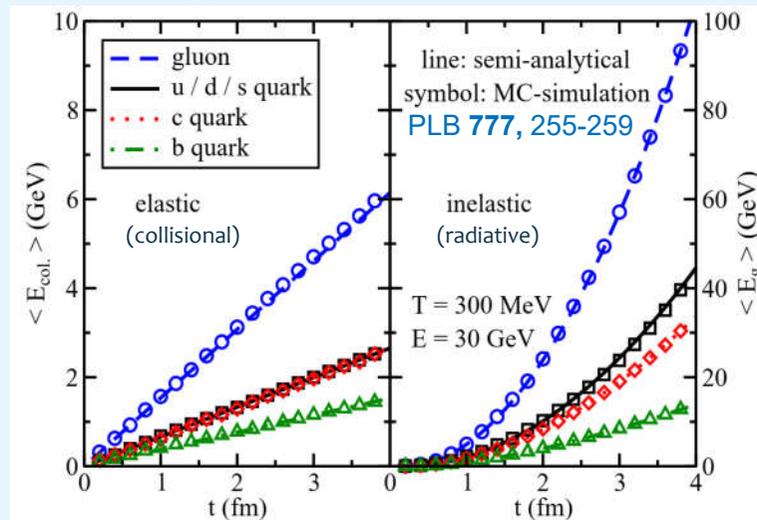
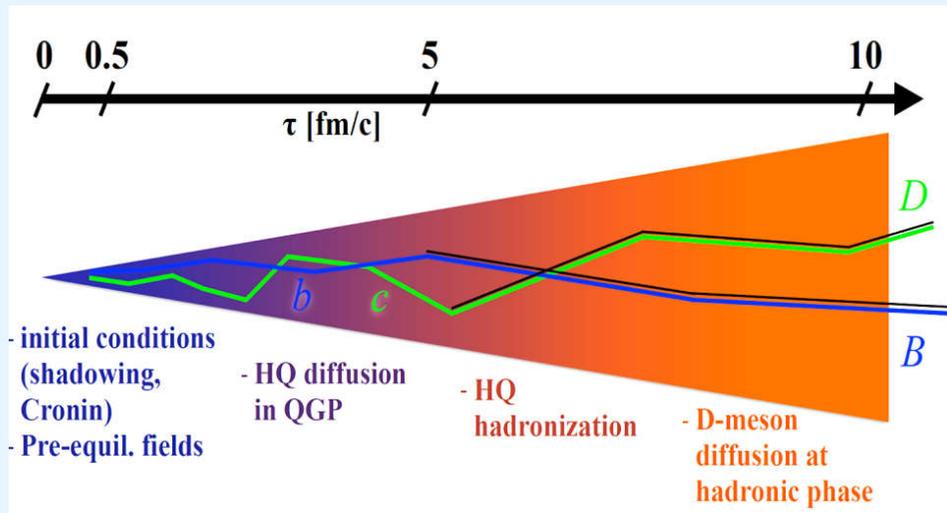
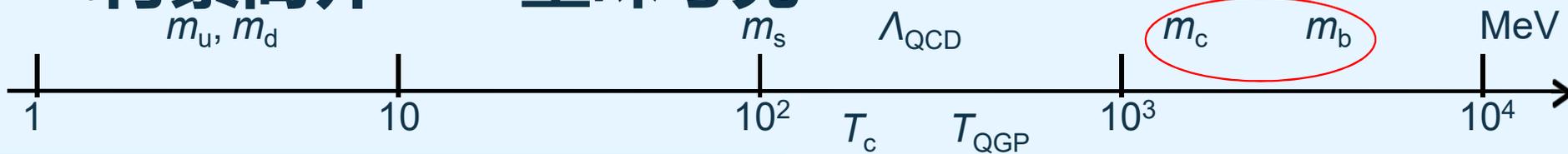
布朗运动

D – 扩散系数

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \sim D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2}$$

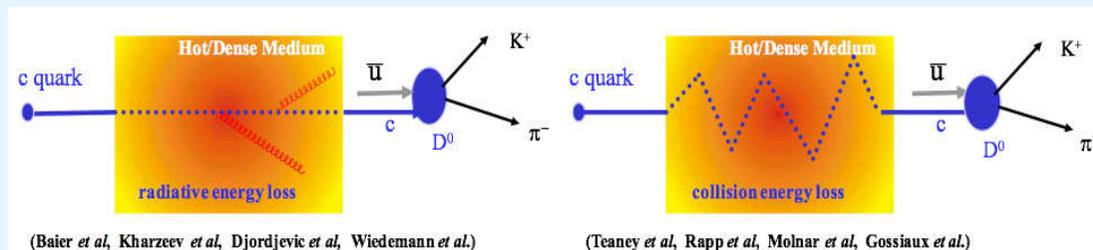
- 碰撞初期产生, 经历几乎整个演化过程
- 研究QGP的灵敏探针--能损, 输运性质.....

一.背景简介——重味夸克



夸克的质量越大，对应的能损越大。

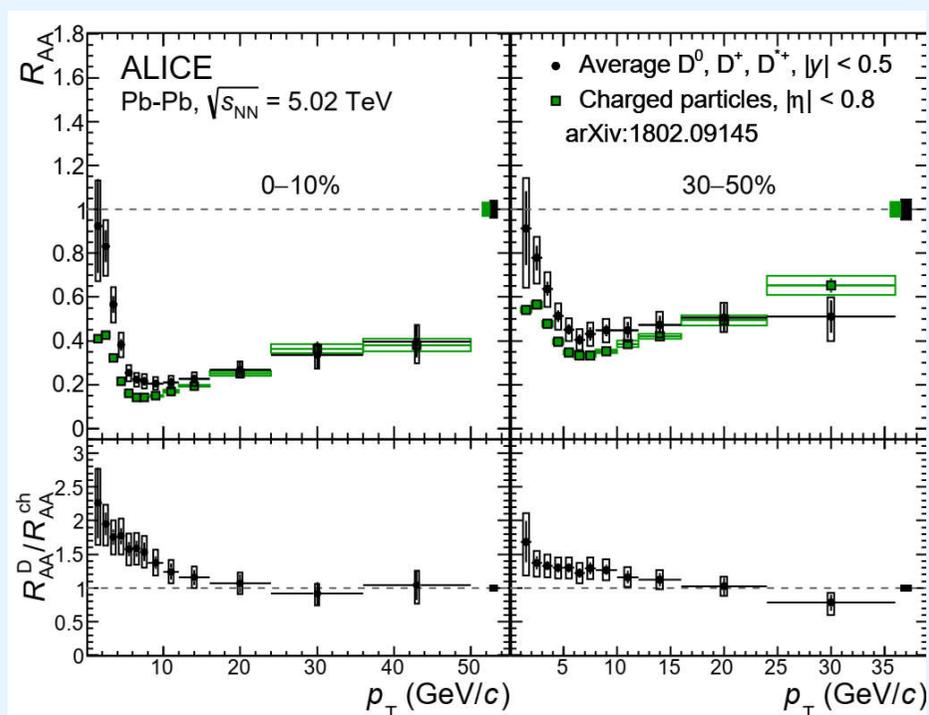
- 碰撞初期产生，经历几乎整个演化过程
- 研究QGP的灵敏探针--能损, 输运性质.....



一.背景简介——研究现状

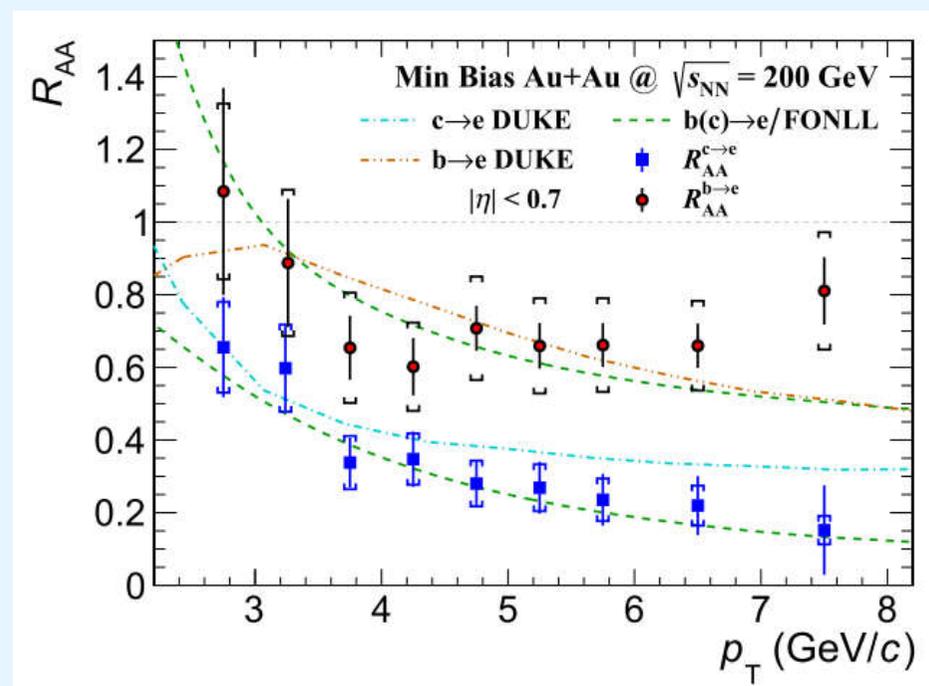
• 核修正因子 R_{AA}

压低的核修正因子 ($R_{AA} < 1$) 反映能损信息



开粲强子

JHEP 1810 (2018) 174 (ALICE)



粲底电子

PLB 805 (2020) 135465

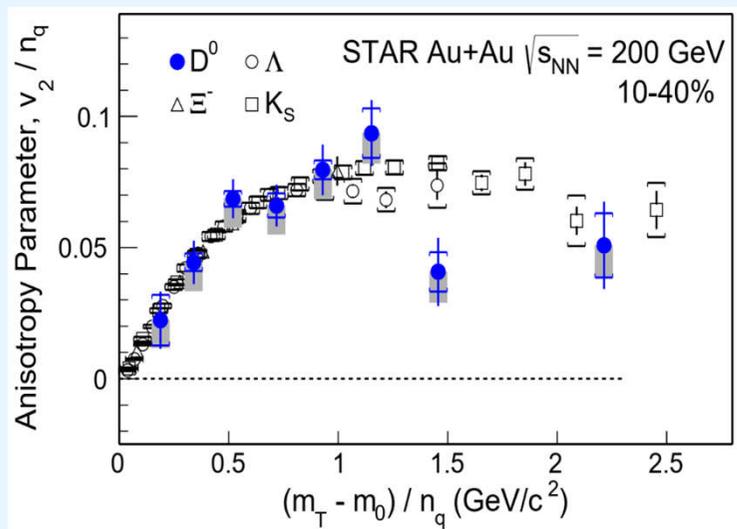
一.背景简介——研究现状

• 椭圆流 v_2

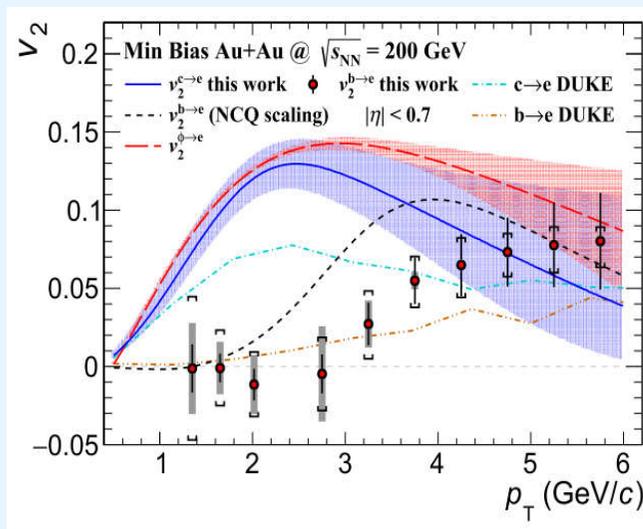
夸克组分数标度(number-of-constituent-quark scaling, NCQ scaling)
RHIC能区(~GeV)下, 粲夸克已热化, 底夸克未热化。



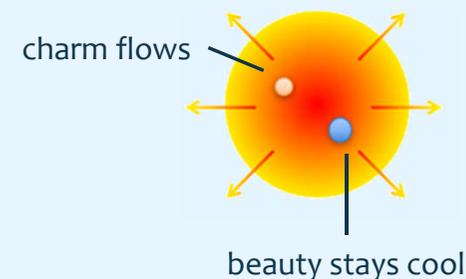
LHC能区(~TeV)下,
底夸克是否热化?



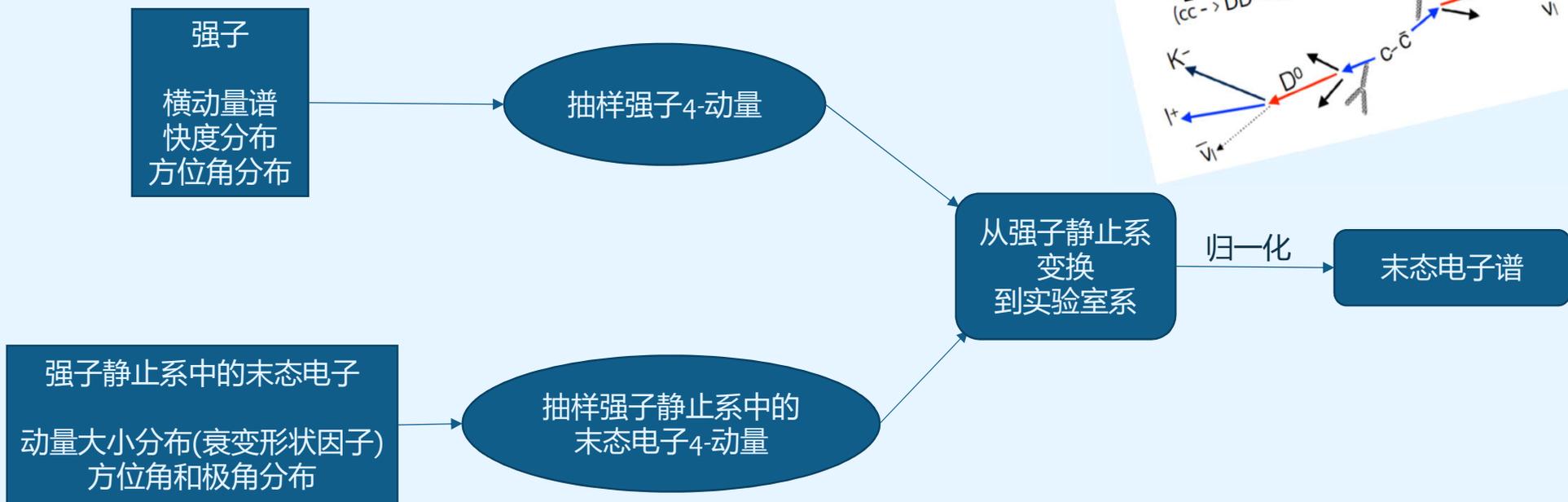
开粲强子(符合NCQ scaling)
PRL 118, 212301 (STAR)



底电子(偏离NCQ scaling)
PLB 805 (2020) 135465



二.半轻子衰变的模拟——基本方法



强子

横动量谱	ALICE,CMS,ATLAS的测量 以及 TAMU模型的计算结果
速度分布	Pythia模拟
方位角分布	均匀分布 或 $\frac{dN}{d\phi} \propto 1 + 2v_2 \cos(2(\phi - \Psi_{RP}))$

强子静止系中的末态电子

形状因子	CLEO实验 或 Pythia的结果
方位角/极角分布	均匀分布

二.半轻子衰变的模拟——粲电子谱

Measurement	5.02 TeV	
	0-10% and 30-50% Pb+Pb	p+p
	Reference	Reference
D ⁰	JHEP 2018, 174 (ALICE)	JHEP 05, 220 (ALICE)
D [±]		
D _s		
Λ _c	arXiv:2112.08156 (ALICE)	PRL 127, 202301 (ALICE)
J/ψ	EPJC 78, 509 (CMS) PRC 82, 064905 (TAMU)	JHEP 03, 190(ALICE) EPJC 78, 171 (ATLAS)

➔ 粲电子谱

二.半轻子衰变的模拟——底电子谱与底强子谱

重味电子谱

减掉
粲电子谱

底电子谱

拟合

Levy参数

底强子谱

$$S(p_T^e; C, n, T) = \int_0^{p_T^{\max}} d p_T^h L(p_T^h; C, n, T) s(p_T^e, p_T^h)$$

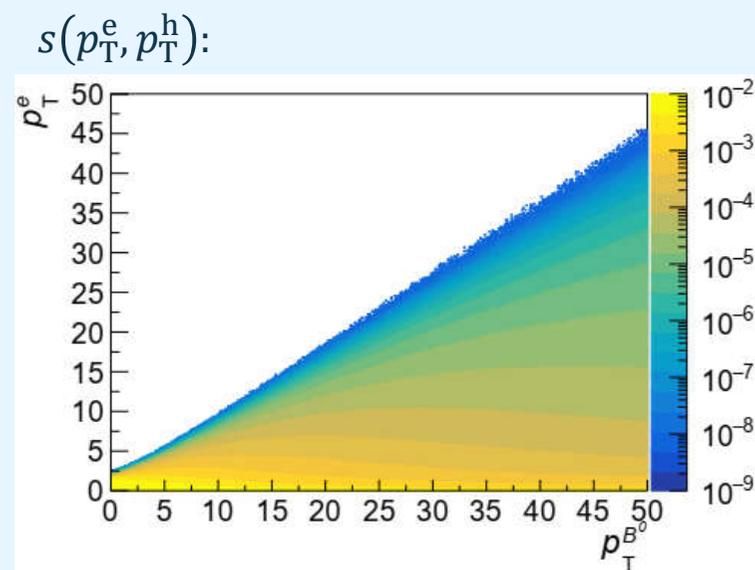
其中,

$S(p_T^e; C, n, T)$ --底电子谱, C, n, T 为相应参数

p_T^e, p_T^h --底电子/强子横动量

$L(p_T^h; C, n, T)$ --Levy函数

$s(p_T^e, p_T^h)$ --具有横动量 p_T^h 的底强子, 衰变为具有横动量 p_T^e 的电子的概率



三. 粲底电子核修正因子——核修正因子

定义: $R_{AA} = \frac{1}{\langle N_{coll} \rangle} \frac{dN_{AA}/dp_T}{dN_{pp}/dp_T}$

描述能损

- $R_{AA}^{c,b \rightarrow e}$ [PLB 804, 135377 (ALICE)]

- $R_{AA}^{c \rightarrow e} = \frac{1 - f_{PbPb}^{b \rightarrow e}}{1 - f_{pp}^{b \rightarrow e}} R_{AA}^{c,b \rightarrow e}$

- $R_{AA}^{b \rightarrow e} = \frac{f_{PbPb}^{b \rightarrow e}}{f_{pp}^{b \rightarrow e}} R_{AA}^{c,b \rightarrow e}$ 其中, $f^{b \rightarrow e} = \frac{b \rightarrow e}{HFE}$

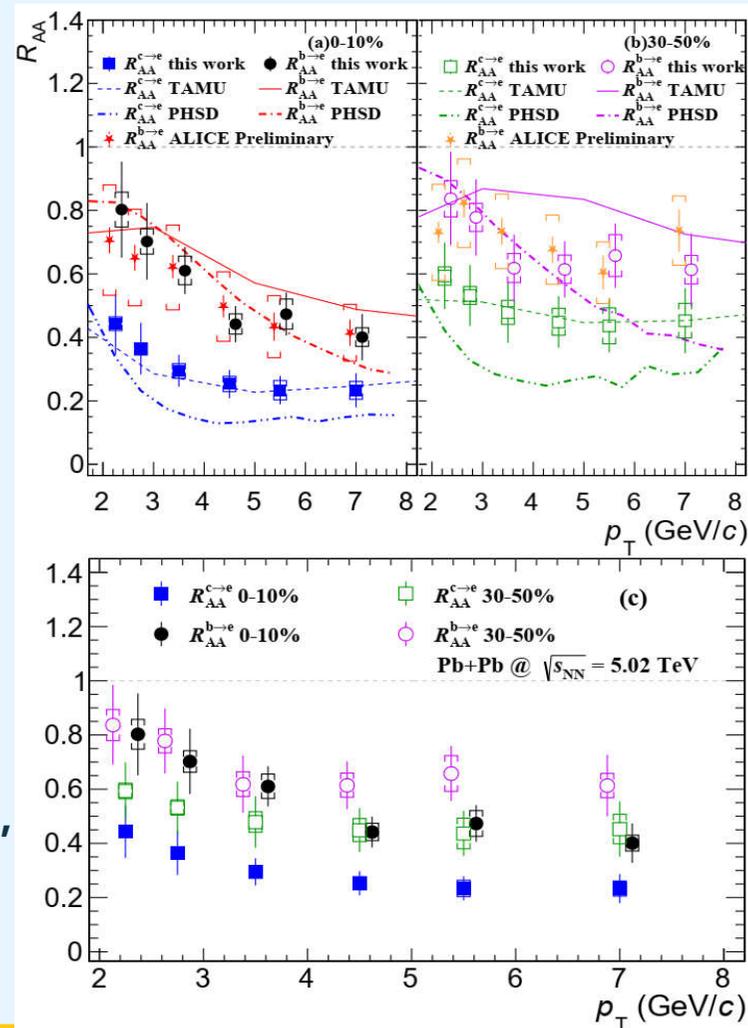
结论:

- $R_{AA}^{b \rightarrow e}$ 与ALICE组的初步结果一致 [PoS HardProbes 2020 (2021) 034]

- 与TAMU模型的结果比较接近, 与PHSD模型的结果差别较大。

- 观察到 $p_T = 2-8 \text{ GeV}/c$ 内 $R_{AA}^{c \rightarrow e}, R_{AA}^{b \rightarrow e}$ 压低, 粲底夸克与介质作用损失能量, 并且 $R_{AA}^{b \rightarrow e}$ 压低程度小于 $R_{AA}^{c \rightarrow e}$, 粲夸克能损大于底夸克

- 中心碰撞中, 粲底夸克将损失更多能量。



四. 椭圆流 v_2

定义: $\frac{dN}{d\phi} \propto 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos[n(\phi - \Psi_{RP})]$

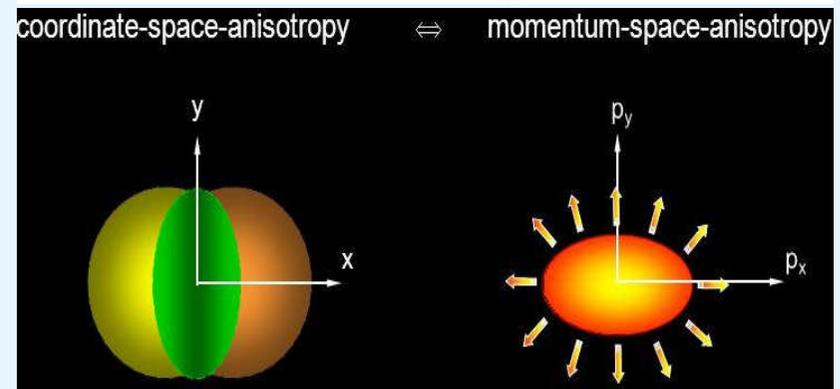
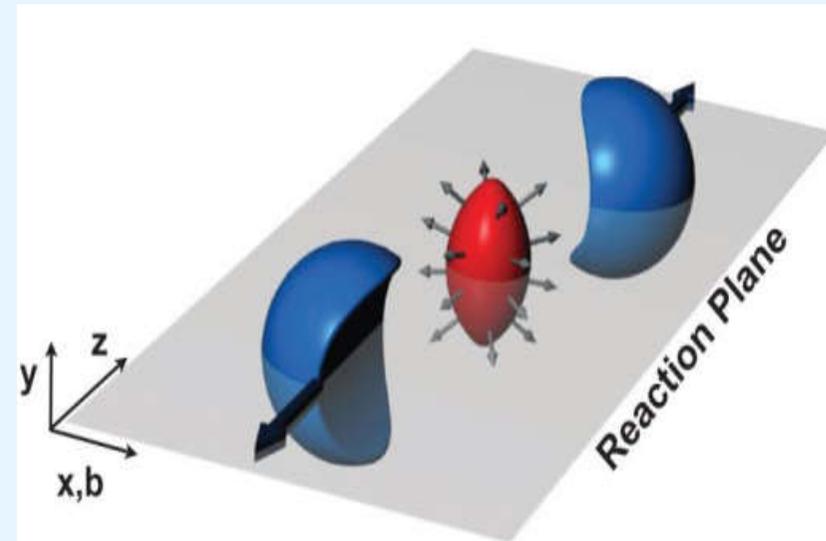
椭圆流 v_2 为主

$$\rightarrow \frac{dN}{d\phi} = 1 + 2 v_2 \cos(2\phi)$$

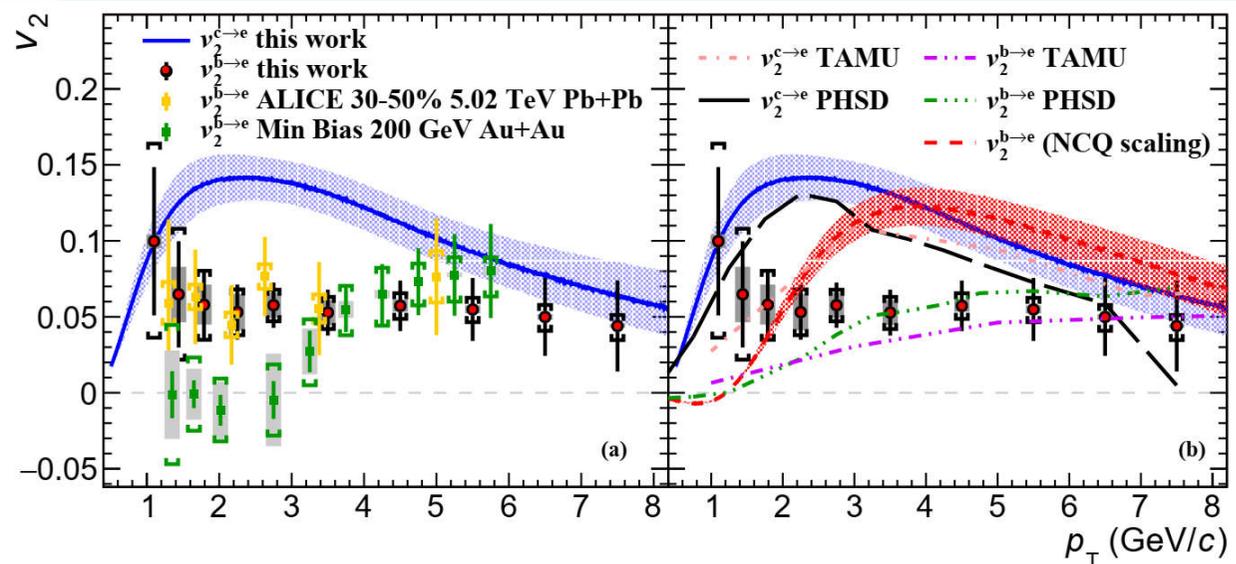
- 重味电子椭圆流 $v_2^{c,b \rightarrow e}$ [NPA 967, 636–639 (ALICE)]
- D 介子 v_2 [PRL 120, 102301 (ALICE)]
- Λ_c v_2 (NCQ scaling)
- J/ψ v_2 [PRL 119, 242301 (ALICE)]

$$v_2^{c \rightarrow e} = w_{D \rightarrow e} v_2^{D \rightarrow e} + w_{\Lambda_c \rightarrow e} v_2^{\Lambda_c \rightarrow e} + w_{J/\psi \rightarrow e} v_2^{J/\psi \rightarrow e}$$

$$v_2^{b \rightarrow e} = \frac{v_2^{c,b \rightarrow e} - (1 - f_{PbPb}^{b \rightarrow e}) v_2^{c \rightarrow e}}{f_{PbPb}^{b \rightarrow e}}$$



四. 椭圆流 v_2



结论:

- 与ALICE实验组结果 [PRL 126,162001 (ALICE)] 相符, 并且精度更好、覆盖了高横动量区域。
- 在 $p_T < 3$ GeV/c, 观察到非零的 $v_2^{b \rightarrow e}$, 以85%的置信度偏离200 GeV Au+Au的结果, 可能存在能量依赖。
- $v_2^{c \rightarrow e}$ 与PHSD模型的结果比较接近; 在 $p_T > 3$ GeV/c, $v_2^{b \rightarrow e}$ 与TAMU/PHSD模型的结果均相符。
- 在 $p_T = 3 \sim 8$ GeV/c, $v_2^{b \rightarrow e}$ 以 $4.95\text{-}\sigma$ 偏离NCQ scaling 的结果, 表明底夸克尚未达到热化。
- 为底夸克输运系数的理论计算提供参考。

五. 爆炸波拟合

· 爆炸波模型:

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d^2N}{p_T dp_T dy} \propto \int_0^1 r dr m_T I_0 \left(\frac{p_T \sinh \rho}{T_{kin}} \right) K_1 \left(\frac{m_T \cosh \rho}{T_{kin}} \right)$$

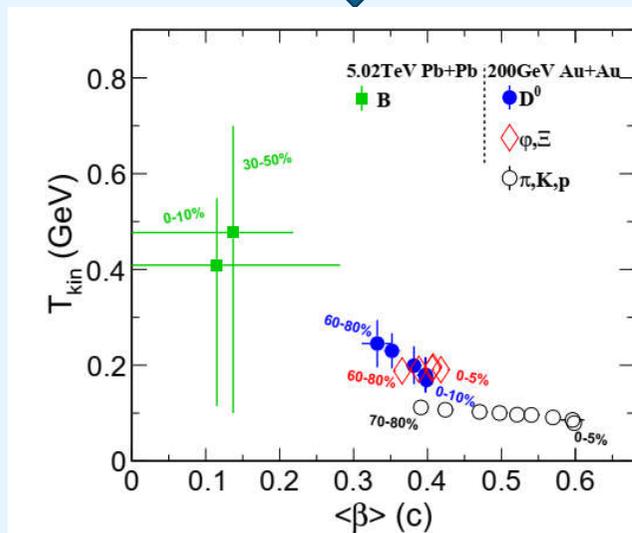
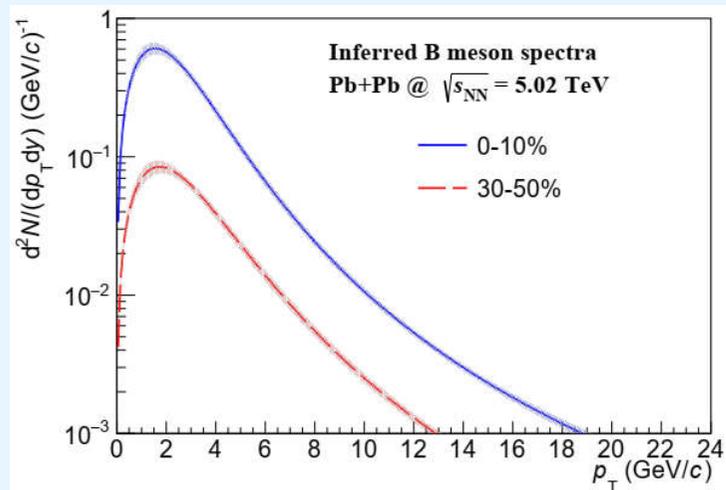
其中, I_0, K_1 为修正Bessel函数, $\rho = \tanh^{-1} \beta$, $\beta = \beta_s r$, $\langle \beta \rangle = \frac{2}{3} \beta_s$.

T_{kin} : 热力学冻结温度

$\langle \beta \rangle$: 横径向流速度

各种强子与系统
脱离耦合的次序

误差较大, 暂时无法得到明确结论。



总结

1. 在5.02 TeV的0-10%和30-50%中心度Pb+Pb碰撞中，观察到粲底电子核修正因子压低，底电子压低程度弱于粲电子，表明粲、底夸克与介质作用而损失能量，并且前者能损更大。同时比较了不同中心度的结果，发现粲底夸克在中心碰撞中会损失更多能量。
2. 在5.02 TeV的30-50%中心度Pb+Pb碰撞中，观察到非零的底电子椭圆流，与200 GeV结果进行比较，发现底夸克与介质的相互作用存在能量依赖迹象。同时观察到底电子椭圆流偏离夸克组分数标度假设下的结果，表明底夸克尚未热化。
3. 反推了底强子谱，使用爆炸波模型拟合得到相应参数，目前误差较大，无法得到明确结论。

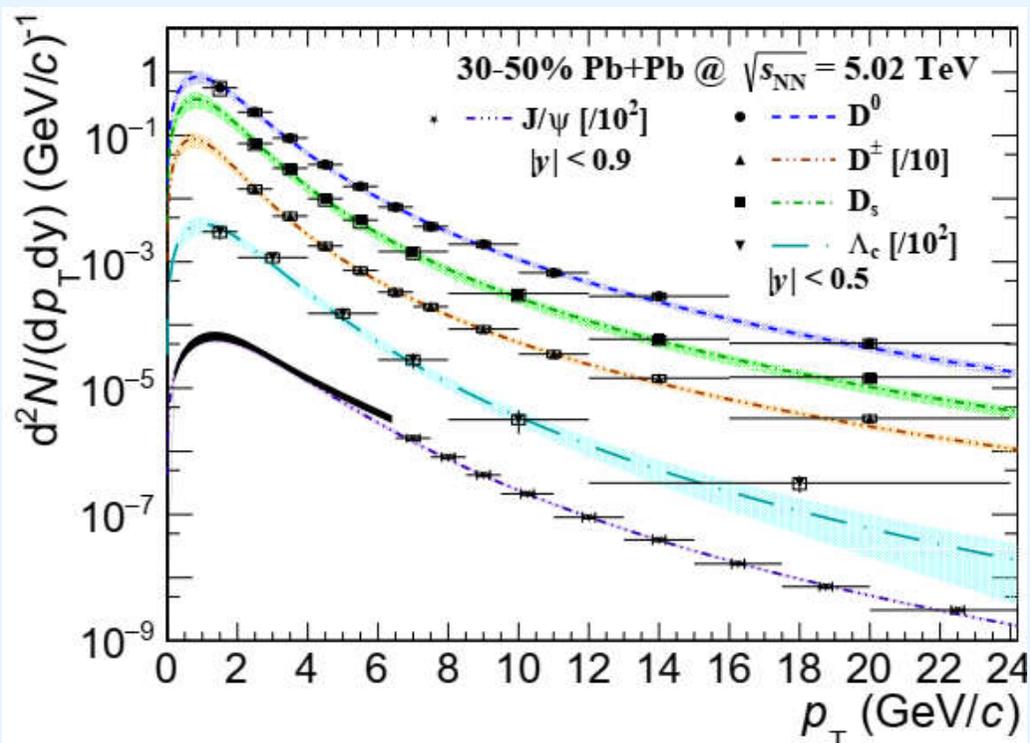
谢谢!

二.半轻子衰变的模拟——粲电子谱

Levy函数:

$$L(p_T; C, n, T) = C \frac{(n-1)(n-2)}{nT[nT + m(n-2)]} \left[1 + \frac{\sqrt{p_T^2 + m^2}}{nT} \right]^{-n}$$

➔ 参数化的横动量谱



Measurement	5.02 TeV	
	0-10% and 30-50% Pb+Pb	p+p
	Reference	Reference
D ⁰		
D [±]	JHEP 2018, 174 (ALICE)	JHEP 05, 220 (ALICE)
D _s		
Λ _c	arXiv:2112.08156 (ALICE)	PRL 127, 202301 (ALICE)
J/ψ	EPJC 78, 509 (CMS) PRC 82, 064905 (TAMU)	JHEP 03, 190 (ALICE) EPJC 78, 171 (ATLAS)

➔ 粲电子谱

三. 粲底电子核修正因子——底电子份额

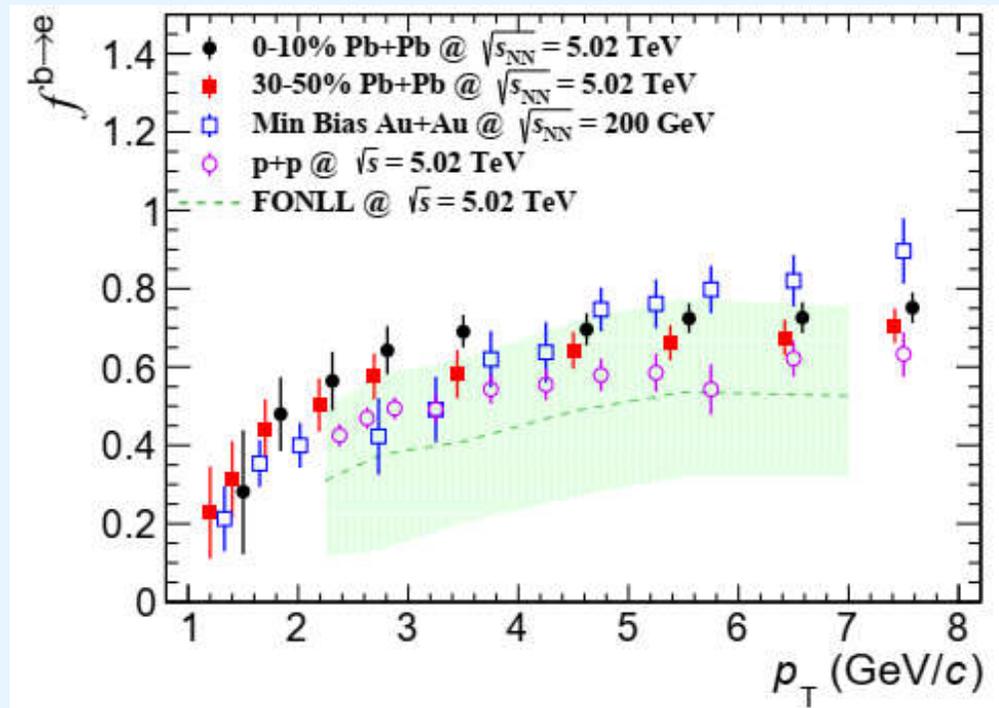
HFE(c,b→e)

PLB 804, 135377 (ALICE)

$$c \rightarrow e = D^0 \rightarrow e + D^\pm \rightarrow e + D_s \rightarrow e + \Lambda_c \rightarrow e + J/\psi \rightarrow e$$

$$b \rightarrow e = \text{HFE} - c \rightarrow e$$

$$f^{b \rightarrow e} = \frac{b \rightarrow e}{\text{HFE}}$$

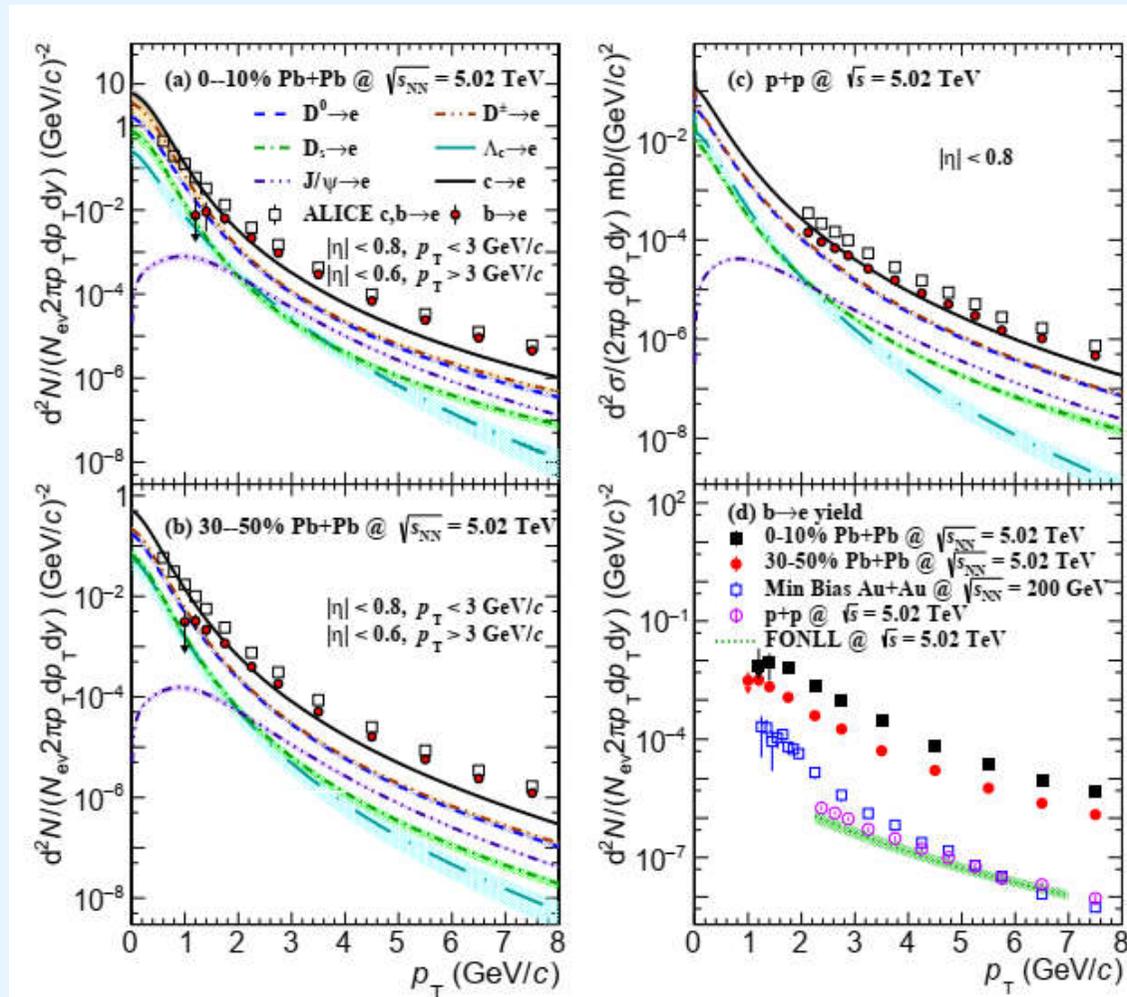


三. 粲底电子核修正因子——不变产额

HFE(c,b→e)
PLB 804, 135377 (ALICE)

$$c \rightarrow e = D^0 \rightarrow e + D^\pm \rightarrow e + D_s \rightarrow e + \Lambda_c \rightarrow e + J/\psi \rightarrow e$$

$$b \rightarrow e = \text{HFE} - c \rightarrow e$$



四. 椭圆流 v_2

定义: $\frac{dN}{d\phi} \propto 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cos[n(\phi - \Psi_{RP})]$

椭圆流 v_2 为主

$$\rightarrow \frac{dN}{d\phi} = 1 + 2 v_2 \cos(2\phi)$$

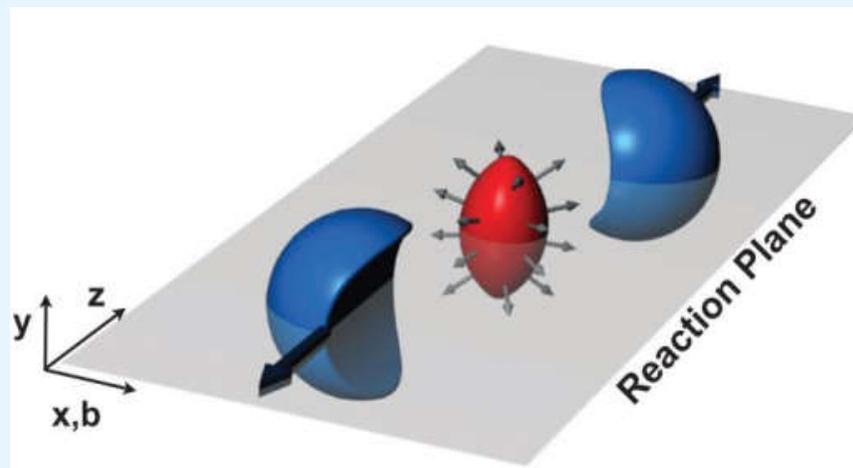
• D 介子 v_2 [PRL 120, 102301 (ALICE)]

• J/ψ v_2 [PRL 119, 242301 (ALICE)]

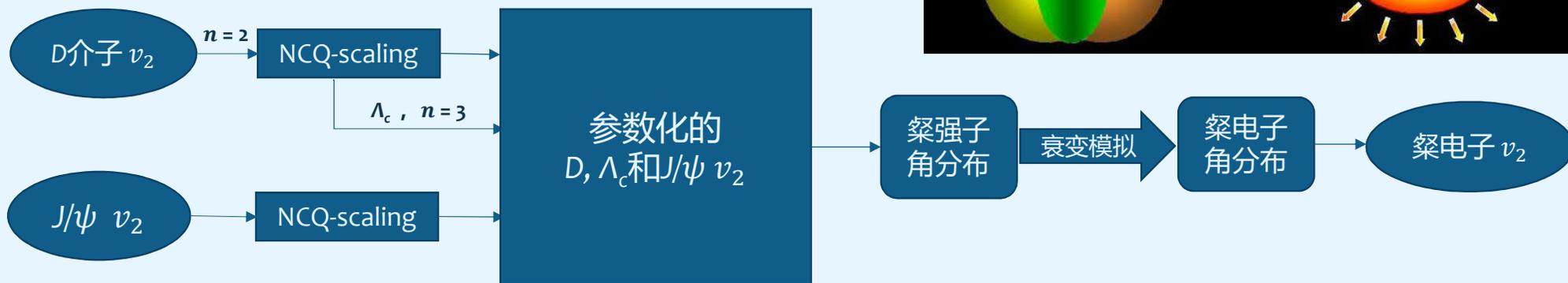
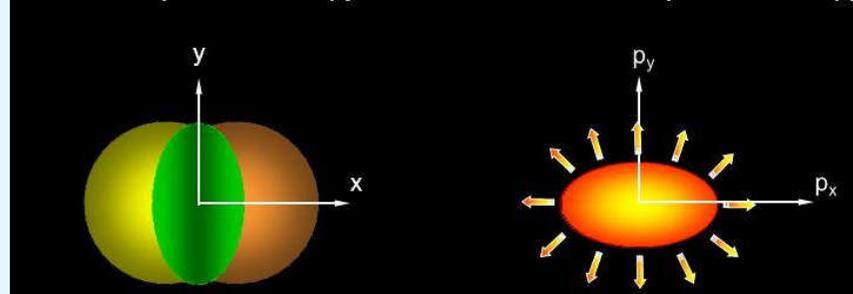
• 夸克组分数标度 (NCQ scaling):

$$v_2 = \frac{p_0^n}{1 + \exp\left(\frac{p_1 - (m_T - m_0)/n}{p_2}\right)} - \frac{p_0^n}{1 + \exp\left(\frac{p_1}{p_2}\right)} + p_3 (m_T - m_0)$$

其中, $p_i (i = 0 \sim 3)$ 为参数, m_T 为横质量, n 为组分夸克数。



coordinate-space-anisotropy \Leftrightarrow momentum-space-anisotropy



A Large Ion Collider Experiment (ALICE)

Central barrel coverage : $|\eta| < 0.9$

Time Projection Chamber (TPC)

- ⇒ Track reconstruction
- ⇒ Particle identification via specific energy loss dE/dx

Time-Of-Flight (TOF)

- ⇒ Particle identification via time of flight

Electromagnetic Calorimeter (EMCal)

- ⇒ Trigger
- ⇒ Particle identification via energy deposited in the EMCal per track momentum

Inner Tracking System (ITS)

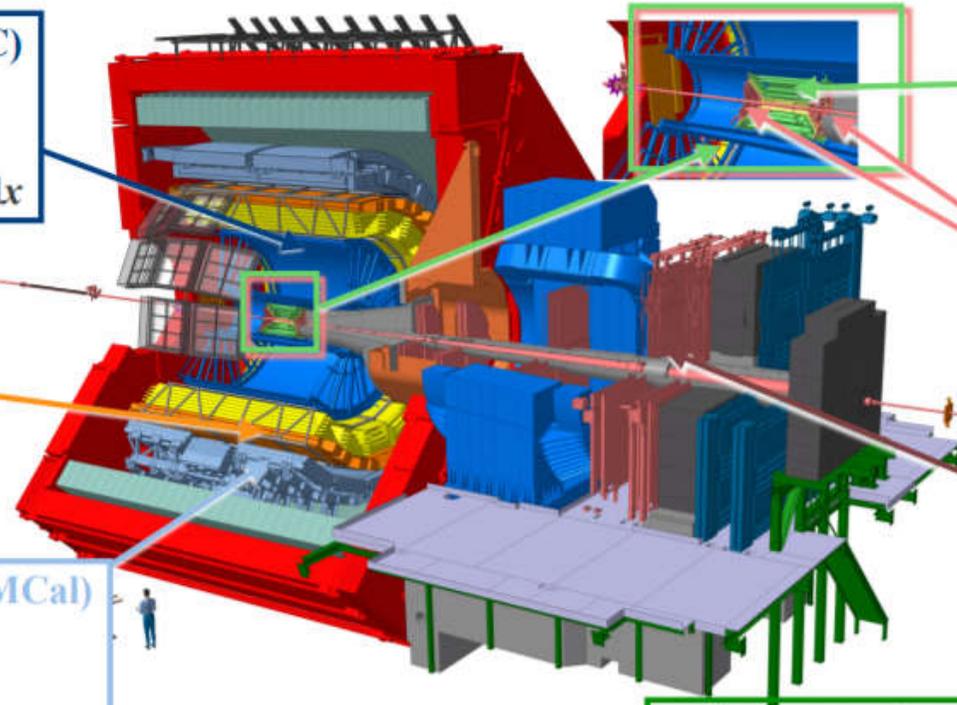
- ⇒ Track reconstruction
- ⇒ Vertex determination

V0

- ⇒ Trigger
- ⇒ Centrality estimation
- ⇒ Event-plane determination

Muon Spectrometer

- ⇒ Trigger
- ⇒ Muon identification
- ⇒ Track reconstruction



$$D^0 \rightarrow K^- \pi^+, D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$$

$$\Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+, \Lambda_c^+ \rightarrow p K_s^0 \rightarrow p \pi^+ \pi^-$$

$$B \rightarrow D + X, D, B \rightarrow e^+ \nu_e X, D, B \rightarrow \mu^+ \nu_\mu X$$

衰变模拟:

1. 已知母粒子产额 p_T 分布

母粒子速度分布 -- Gauss 分布 ($\mu=0, \sigma=1.7$)

Decay from factor -- 母粒子静止参考系中子粒子产额的 p_T 分布

2. 母粒子速度和 p_T 抽样,

在母粒子静止系中对子粒子 p_T 抽样

洛伦兹变换, 回到实验室系, 得到实验室系中子粒子产额的 p_T 分布

3. 保留速度符合要求的子粒子

4. 模拟的母粒子数 scale 到真实情况, 并考虑分支比。

