

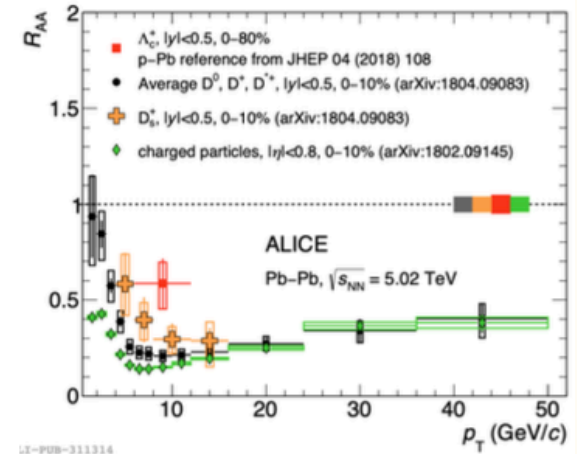
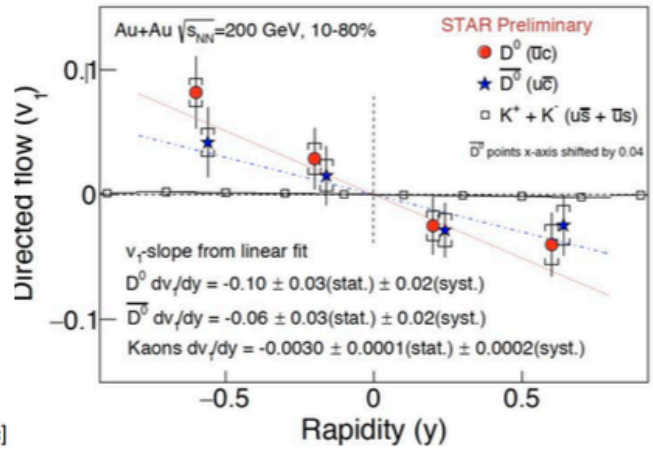
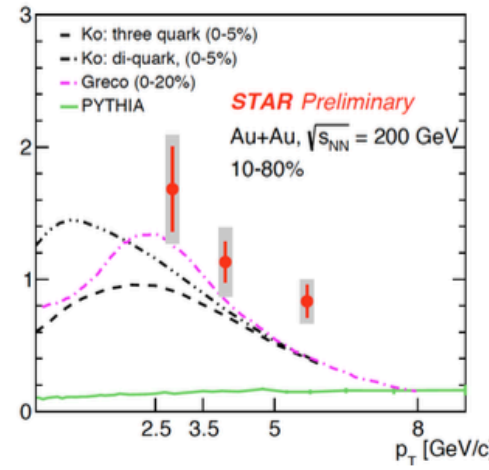
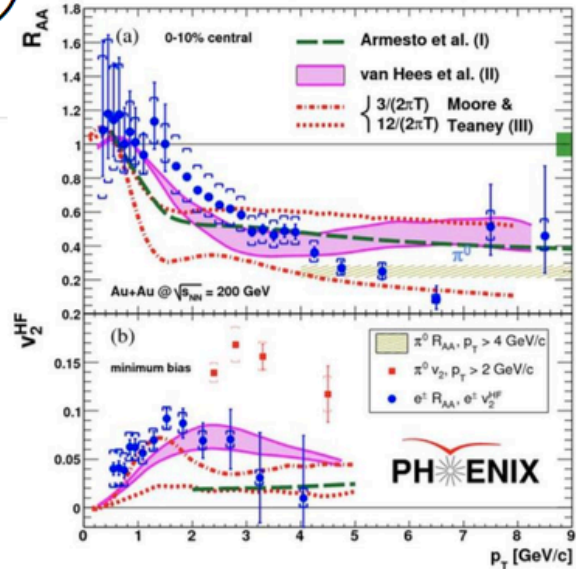
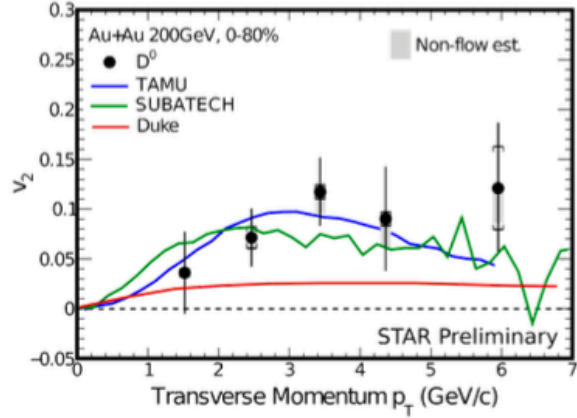
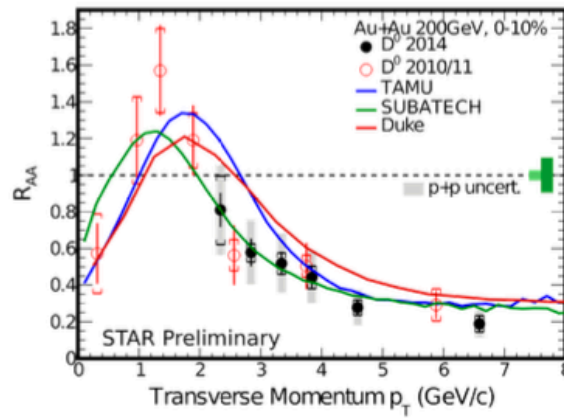


# 重クオーク

林 真一, 東大CNS  
*HIC*チュートリアル研究会  
2019/08/20

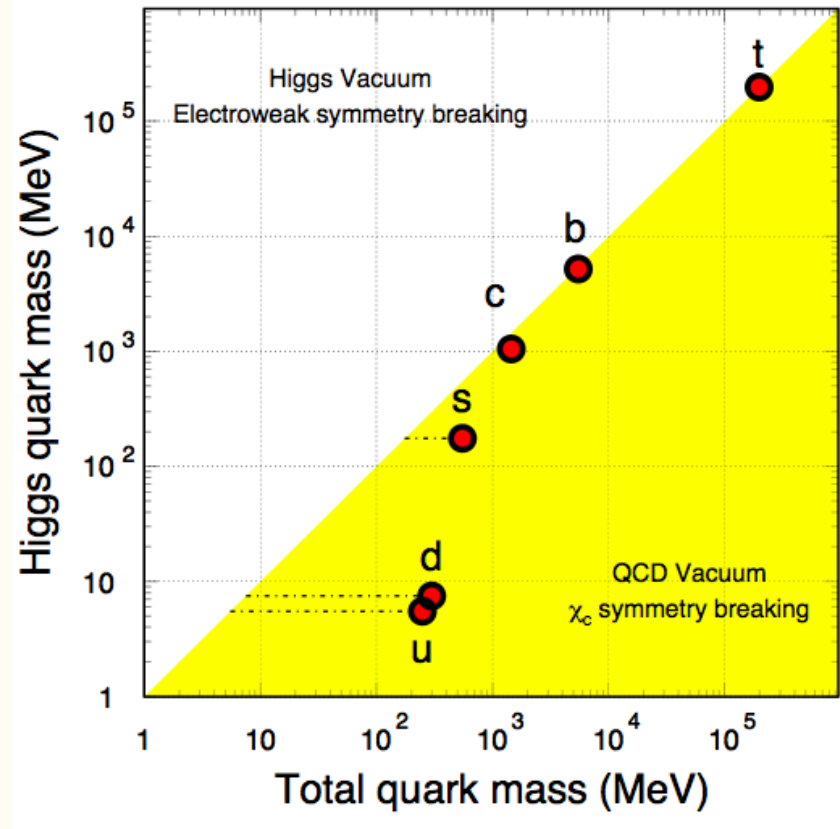
# 重クォーク

- 衝突エネルギー損失、ジェットクエンチング



LI-PUB-311314

# 重イオン衝突における重クォーク



チャームとボトム：トップは今は難しい(将来はあるかも…もっと大きな加速器が必要)

✓カイラル質量の影響はほぼない → 重クォークはQGP中でも重クォーク

## 重クォークの特徴

- 質量が重い:  $m_c \sim 1.3 \text{ GeV}/c^2$ ,  $m_b \sim 4.8 \text{ GeV}/c^2$ 
  - $m_{\text{HQ}} > \Lambda_{\text{QCD}}$ : 生成過程は摂動論的QCDで取り扱える
  - 熱的生成がない ( $m_{\text{HQ}} \gg T_{\text{QGP}}$ ) → 初期から終状態まで数に変化しない
- 生成時間は比較的短い:  $t_{\text{form}} \sim 1/(2m_{\text{HQ}})$ 
  - ✓ チャーム:  $\sim 0.1 \text{ fm}/c$
  - ✓ ボトム:  $\sim 0.01 \text{ fm}/c$
  - QGPの生成時間より短い
- 熱的緩和時間が程よく長い:
  - $T = 300 \text{ MeV}$ ,  $\alpha_s = 0.4$  で  $\tau_{\text{therm}} \sim 15 \text{ fm}/c$  for charm

衝突初期に生成された時点での運動量分布や粒子相関

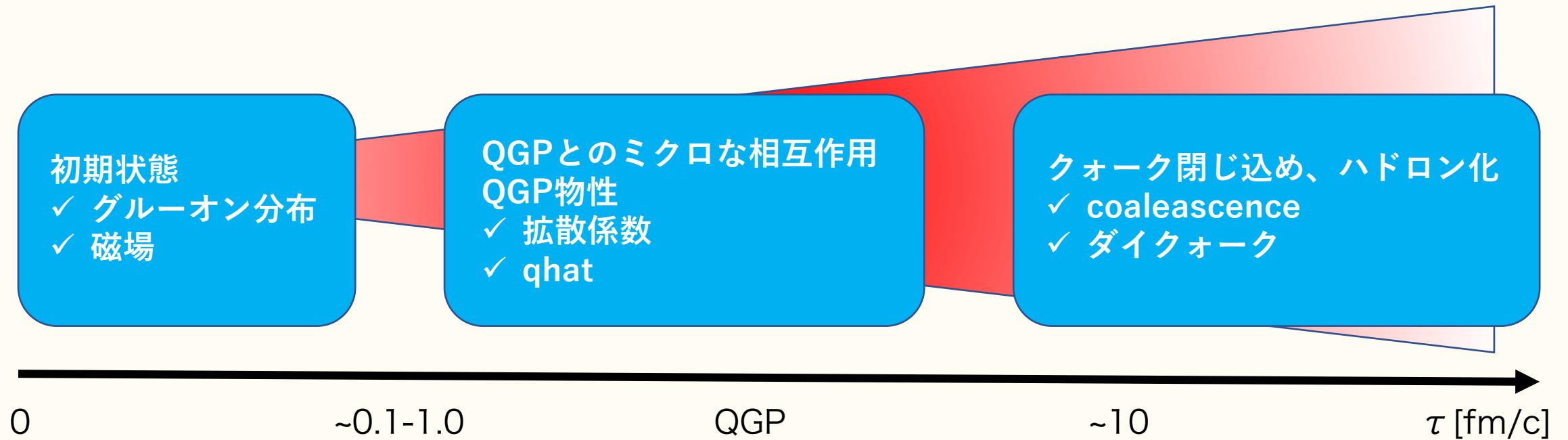
- pp, p-A 測定, pQCD計算などから知ることができる



終状態での変化量 ~ 重クォークとQGPとの相互作用の結果

QGPに対して外から入れた(ような)プローブでQGP中で働く力を理解したい

ちなみに募集した質問の中に重クォークというワードはありませんでしたが…



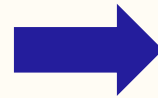
重クォークは衝突のあらゆる段階を経験しており(緩和時間が長ければある程度初期の情報も消失していないはず)、QGP物性、初期状態からハドロン化まで色々と研究できる可能性がある魅力的なプローブです

# 重クォークとQGP相互作用

## a. 弾性衝突過程(低運動量)

QGP熱的パートンの衝突は

- ✓ 比較的小さな運動量移行:  $q^2 \sim T^2$
- ✓ 前後の衝突に相関はない

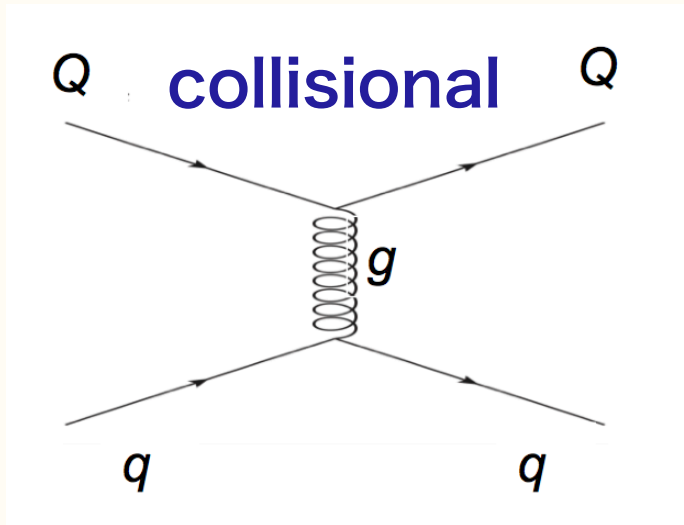


ブラウン運動

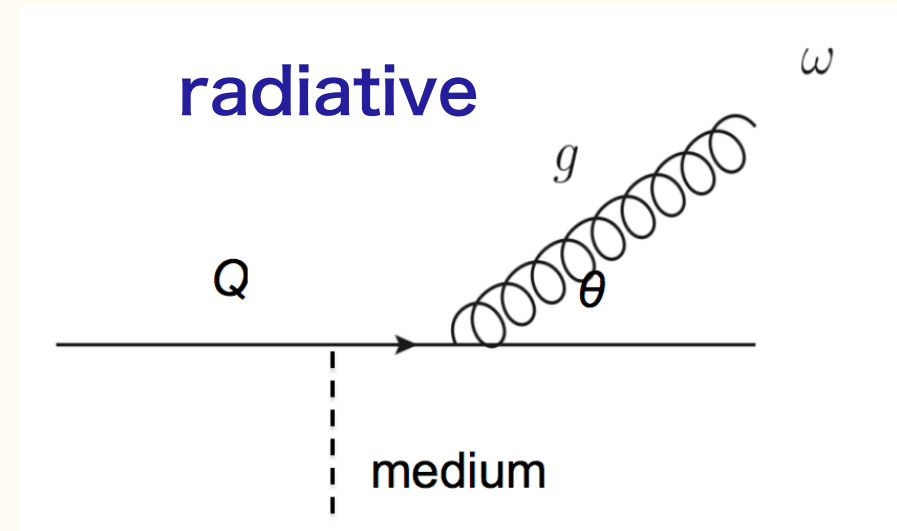
QGP中を不純物として漂う

## b. グルーオン放射過程(高運動量) $\rightarrow \hat{q}$

a)



b)



# 弾性衝突過程(ブラウン運動)

## Langevin方程式 (Fokker-Plank方程式)

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -\eta_D(p)\vec{p} + \vec{\xi}$$

$$\langle \xi^i(t)\xi^j(t') \rangle = \kappa \delta^{ij} \delta(t-t')$$

摩擦力    ランダム力(揺らぎ)

揺動散逸定理: 平衡状態での摩擦力と揺らぎの関係  
 $t \rightarrow \infty$  で平衡状態(マクスウェルボルツマン分布)

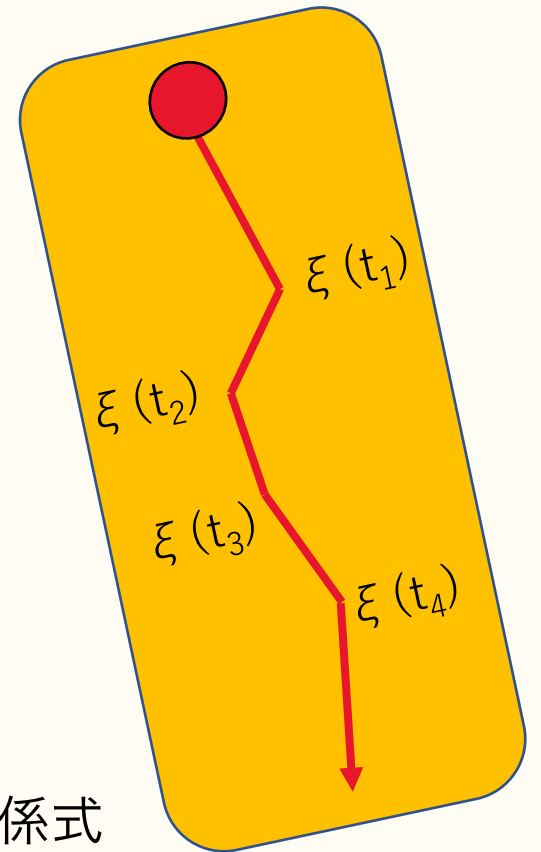
アインシュタインの関係式

$$\eta_D(p) = \kappa / (2MT)$$

空間拡散係数( $D_s$ )との関係:

$$x_i(t) = \int dt' p_i(t') / M \rightarrow$$

$$\begin{aligned} \langle x^2(t) \rangle &= 2D_s t \\ &= \iint dt_1 dt_2 1/M^2 \langle p(t_1)p(t_2) \rangle \\ &= 2T/M\eta_D = 4T^2/\kappa \end{aligned}$$



# 弾性衝突過程模型

## 強結合だと非摂動効果の取り入れが必要

### - T-Matrix approach :

- あるポテンシャル $V$ 中の2体散乱( $qQ_{HQ}$ )をT-Matrixを使って解く  

$$A_Q(\vec{p}) \sim |T|^2 \quad D_s = T/(MA_Q)$$
- ポテンシャル $V$ : Lattice 計算
  - $V = F$  (自由エネルギー),  $U$  (内部エネルギー)

### - Quasi-particle Model (QPM):

Boltzmann transport approach with pQCD scattering matrix  $M_{(q, g)+Q \rightarrow (q, g)+Q}$

非摂動効果

- ✓  $\alpha_s(T)$
- ✓ thermal mass:  $m(T) \sim g(T)T$   
 グルーオン、クォークに衣を着させる



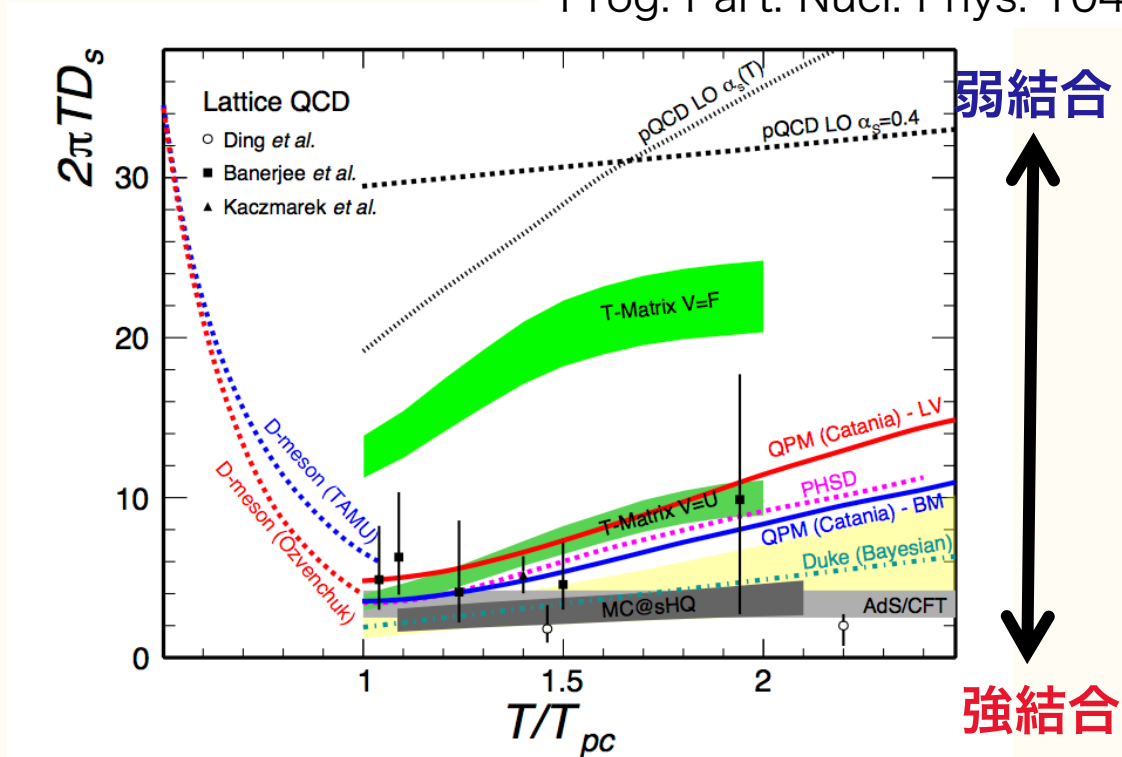
Latticeの状態方程式を再現するように取る

### - Ads/CFT

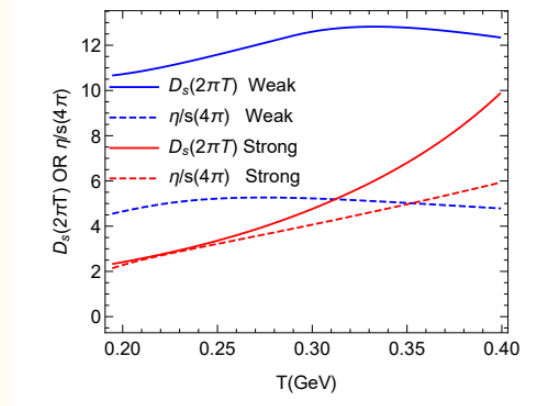


# 重クォークのQGP中での空間拡散係数

Prog. Part. Nucl. Phys. 104:97



arXiv:1612.09138



## - 重クォークとQGP中のパートンの結合の強さによる

- pQCD計算で  $D_s \sim 1/\alpha_s^2 T$
- ✓ 強結合:  $2\pi TD_s/(4\pi\eta/s) \sim 1$
- ✓ 弱結合:  $2\pi TD_s/(4\pi\eta/s) \sim 2.5$

# 重クォークの熱化

- 十分相互作用をしたのち熱分布(expo(-E/T))に漸近

➤ 緩和時間はQGP中のパートンとの相互作用の強さに依る

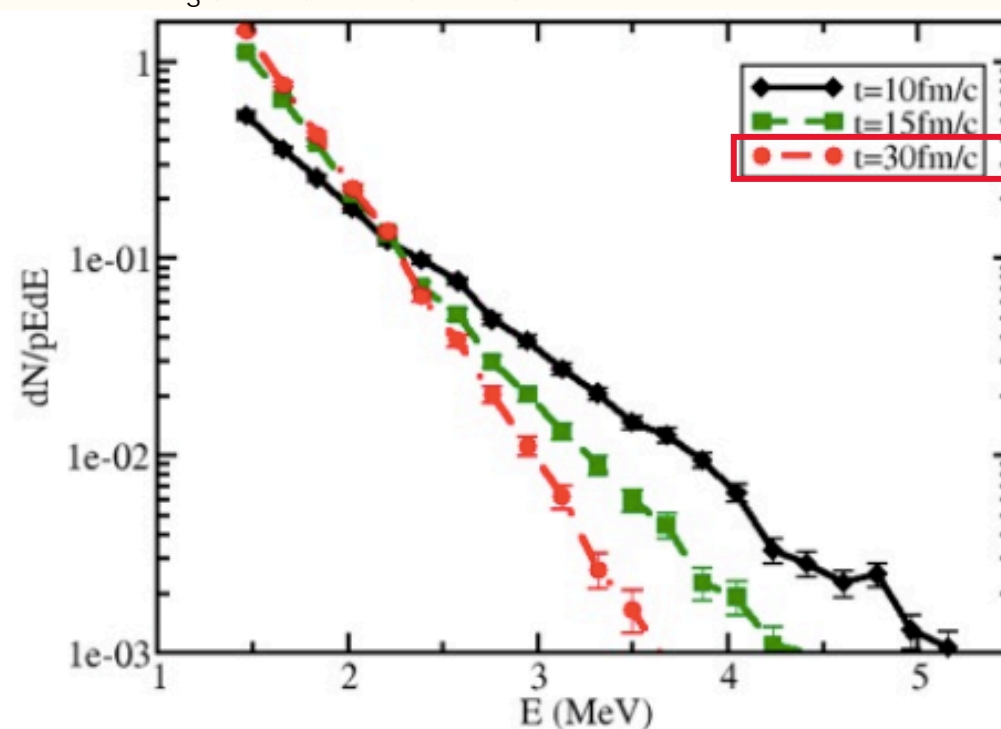
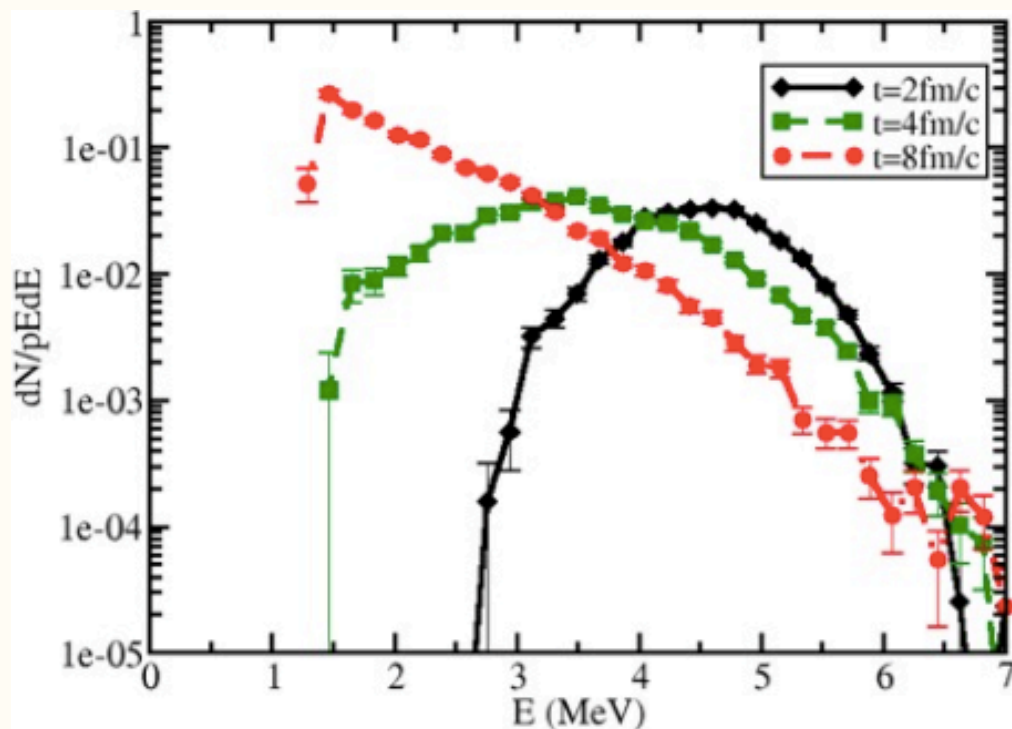
$$\checkmark \tau_{\text{therm}} \sim 1/\eta_D$$

$$\rho_T = 5 \text{ GeV}/c$$

$$T = 300 \text{ MeV 一定 (static)}$$

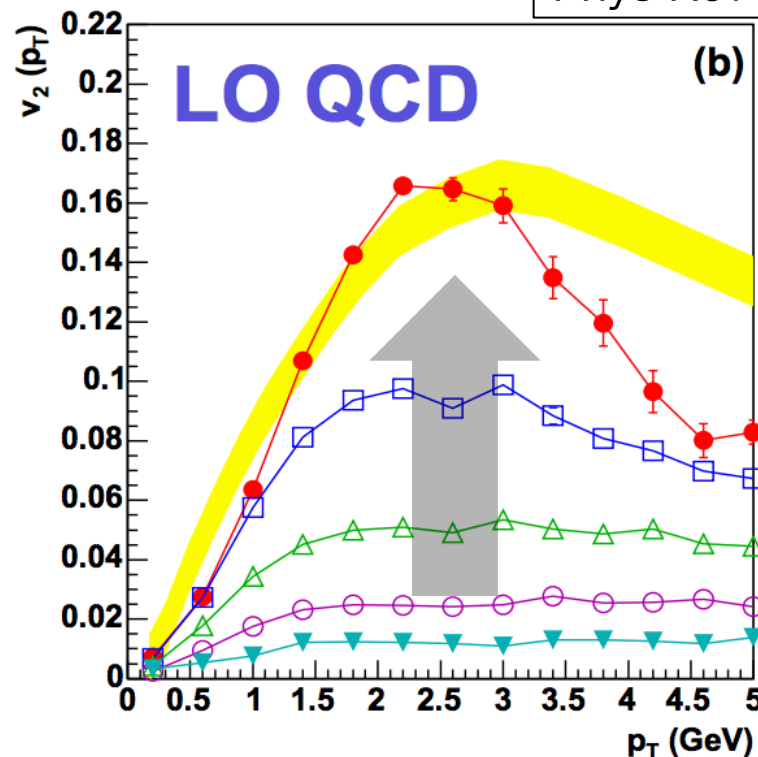
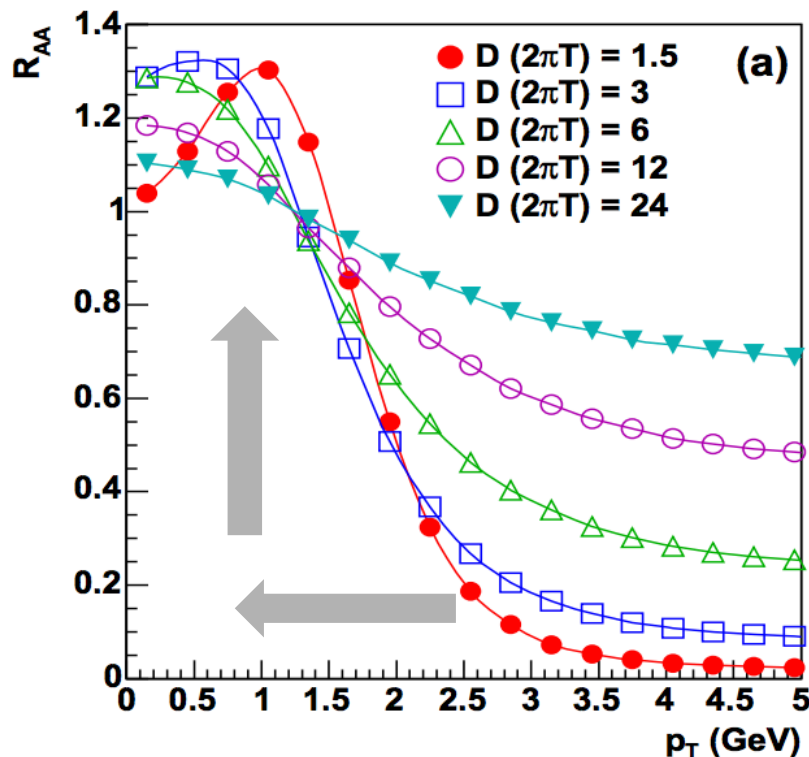
$$D_s(2\pi T) = 6 \text{ (固定)}$$

arXiv:1209.5405



# D中間子測定に対する $D_s$ 依存性

Phys Rev C.71.064904



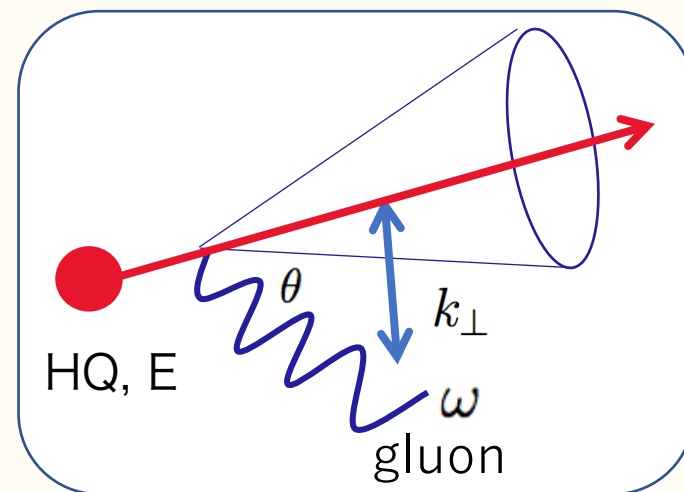
- 低運動量の $R_{AA}$ ,  $v_2$ を測定することで拡散係数を制限できる
- $R_{AA}$ ,  $v_n$ : 初期状態, hydro模型(flow), ハドロン化などによって変わる
  - 重イオン衝突発展を包括的に記述した模型(Transport模型)の必要性

# グルーオン放射過程

Phys.Lett.B519:199-206 (2001)

$$dP = \frac{\alpha_s C_F}{\pi} \frac{d\omega}{\omega} \frac{k_{\perp}^2 dk_{\perp}^2}{(k_{\perp}^2 + \omega^2 \theta_0^2)^2}, \quad \theta_0 \equiv \frac{M}{E},$$

$$\propto \left(1 + \frac{\theta_0^2}{\theta^2}\right)^{-2} \cdot k_{\perp} \longrightarrow \omega \theta \quad \text{小角度近似}$$



$C_F$ : Casimir factor

- チャームクォーク:  $p \sim 5 \text{ GeV}/c$ ,  $\beta \sim 0.96$ ,  $\gamma \sim 4$
- Dead cone effect:
  - ✓ 質量が重いほど小角度放射が抑制される (因果律から)
  - ✓ 高エネルギー(相対論的極限)になる程フレーバー依存性はなくなる

カラーチャージ依存性: Casimir factor  $C_q = 4/3$ ,  $C_{\text{gluon}} = 3$

- グルーオンの方がクォークよりエネルギー損失が大きい

$$\text{ヒエラルキー: } \Delta E_g > \Delta E_{LQ} > \Delta E_c > \Delta E_b$$

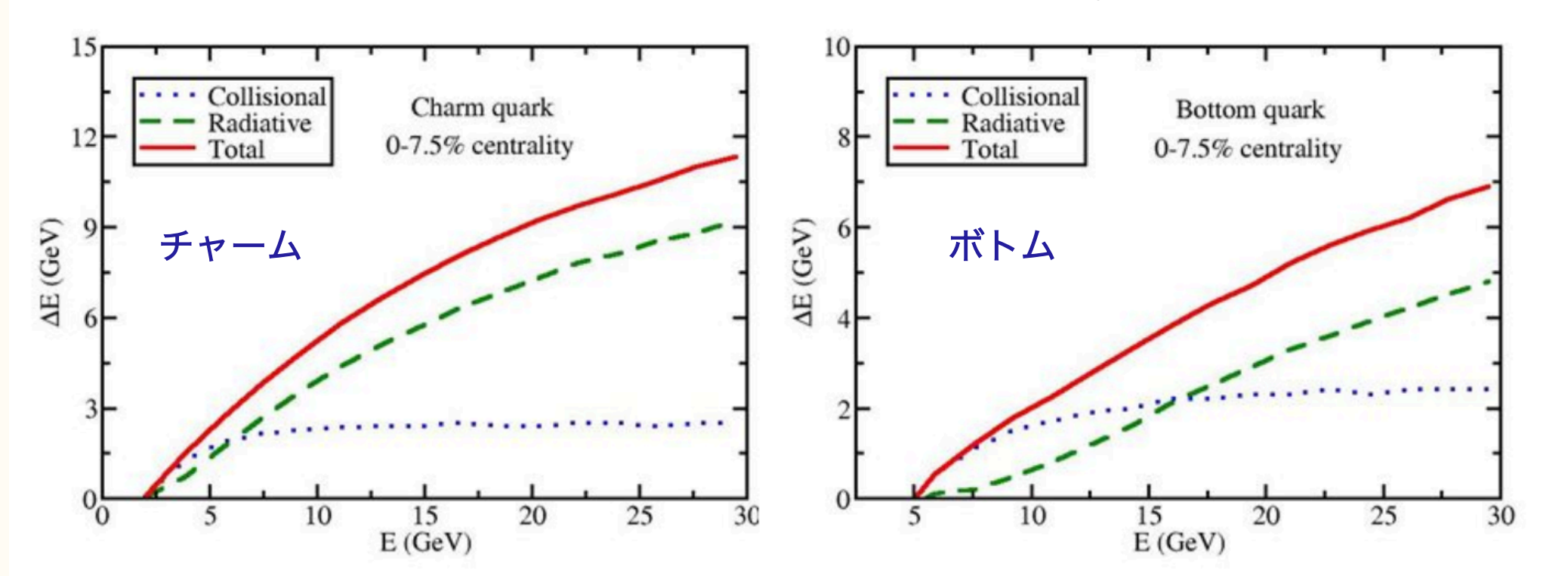
Multiple-radiation in dense matter:  $\tau_{\text{form}}$  of gluon  $2Ex(1-x)/(k_{\perp}^2 + x^2 M^2)$

# Collisional vs radiative energy loss

-  $E_{HQ}$ ,  $M_{HQ}$ による

- 弾性衝突過程をみるには比較的低いエネルギー領域の測定が必要
- ✓ ボトムの方が高いエネルギーまで衝突過程が支配的

Phys. Rev. C 88, 044907 (2013)



# ハドロン化

## - 非摂動過程

➤ 第一原理計算は確立していない

## - 軽クォークハドロン収量は統計模型(化学フリーズアウト温度のGCE)で記述できる

➤ 重クォークハドロンも従う? Statistical hadronization model(カノニカル生成)

Phys.Lett. B571 (2003) 36-44

## ✓ Fragmentation(クォーク破砕): 主に高運動量

## ✓ Coalescence(クォーク融合): 主に中間運動量

位相空間が重なり合うほどクォーク多重度が増えると近くのクォークとの融合が起こる

✓ 即時融合: Wigner関数

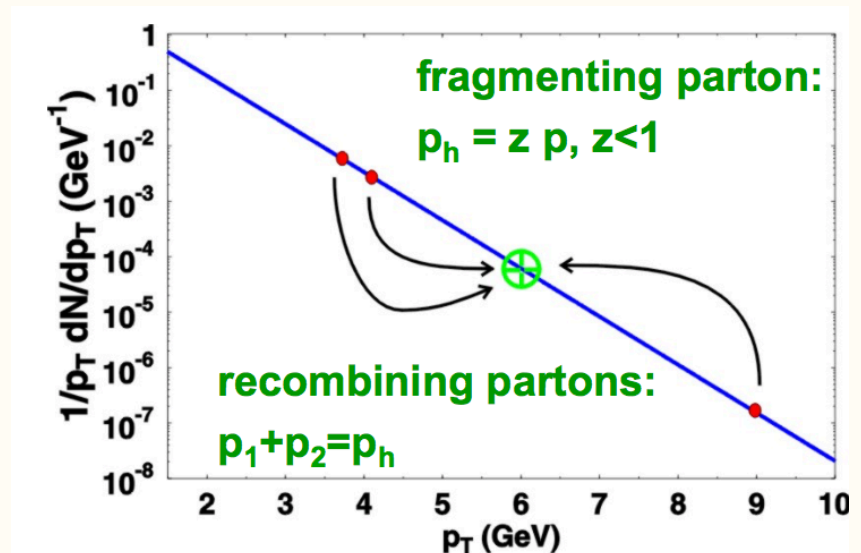
### a. バリオン生成増大?

fragmentationよりできやすい

3クォーク融合 + ダイクォーク融合

### b. $D_s$ 中間子, $B_s$ 中間子の収量増大

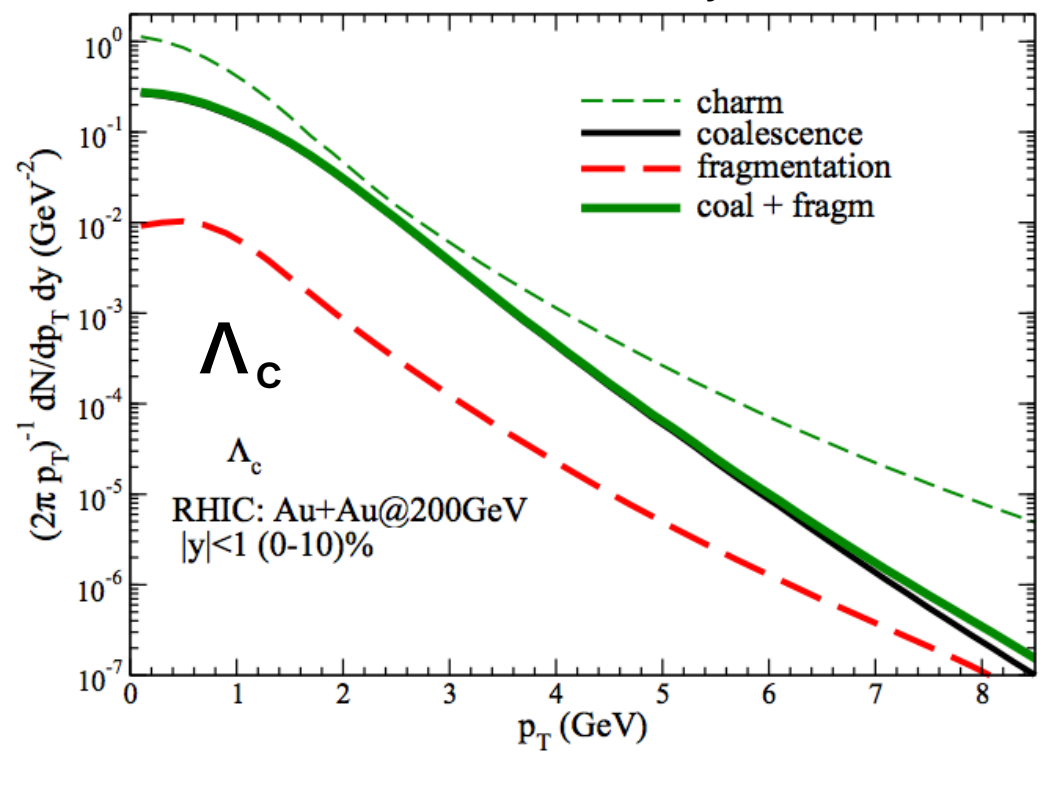
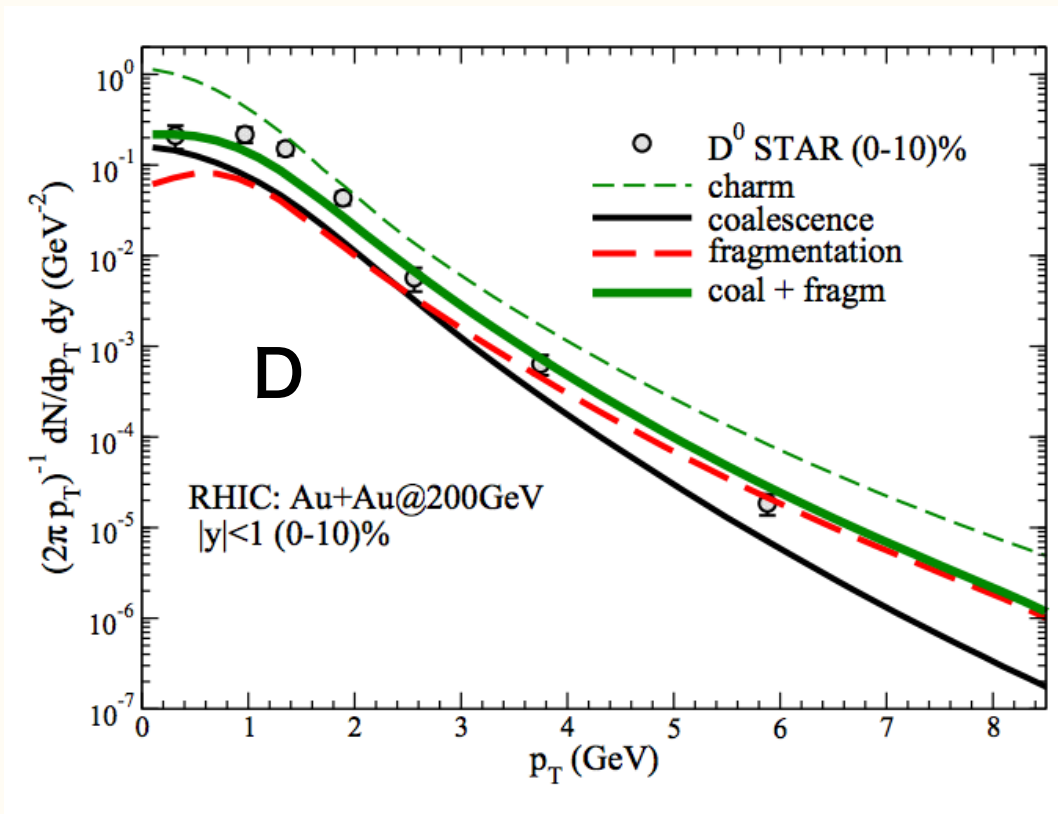
ストレージネス増大+coalescence



# fragmentation vs coalescence

- 低中間運動量領域でcoalescenceによるチャームバリオンの収量の増大

Eur.Phys.J.C (2018) 78:348



# 重クォークtransport模型

Initial production + (pre-equilibuild) + interaction with QGP expansion + Hadronization + (Hadron gas interaction)

定性的にはradiative energy loss入れるとDsは下がる

ideal/viscous hydro: 20-30%程度の差

Model	HQ production	nPDF	Bulk Evolution	HQ interaction	Hadronization	Hadron Phase	$2\pi$ TDs at $T_c$
TAMU	FONLL	EPS09	Hydro2+1D ideal	LV non-perturbative T-Matrix	frag+reco	Yes	3-4
Duke	MC@NLO	EPS09	VISHNU Hydro2+1D viscous	LV, BM+rad	frag+reco	yes(UrQMD)	~2 (baysian)
Catania(QPM)	FONLL	-	HQ interact with massive quasi-particles, T dependent $\alpha_s$ off-shell parton transport	BM, LV	frag+reco	-	~3(LV), ~5(BM)
PHSD	Pythia tuned FONLL	EPS09		BM, DQPM	frag+reco	yes	~3
Nantes, SUBATECH(MC@sHQ +EPOS)	FONLL	EPS09	EPOS3+1 ideal hydro	BM+ rad	frag+reco	-	~3
LBT	LO pQCD	EPS09	VISHNew 2+1viscous hydro	BM+ rad	frag+reco	-	



# 実験における重クォークハドロン測定

## - 重クォークハドロンは寿命が比較的長い

✓  $D^0$ :  $c\tau \sim 123 \mu\text{m}$

✓  $B^+$ :  $c\tau \sim 455 \mu\text{m}$

✓  $\Lambda_c$ :  $c\tau \sim 60 \mu\text{m}$

崩壊長測定

✓ D/B選択

✓ 信号とバックグラウンドの選別

## - 実験的に必要な能力

✓ 高統計データ, 崩壊点再構成能力, 粒子同定

### 直接測定

不変質量分布から直接ハドロンの信号を導出

✓  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$  BR 3.9%

✓  $\Lambda \rightarrow p K^- \pi$  BR 5%

✓ 重クォーク相関が直接残っている

✓ S/Bが小さい

✓ 分鎖比や検出効率が間接測定に比べ小さい

### 間接測定

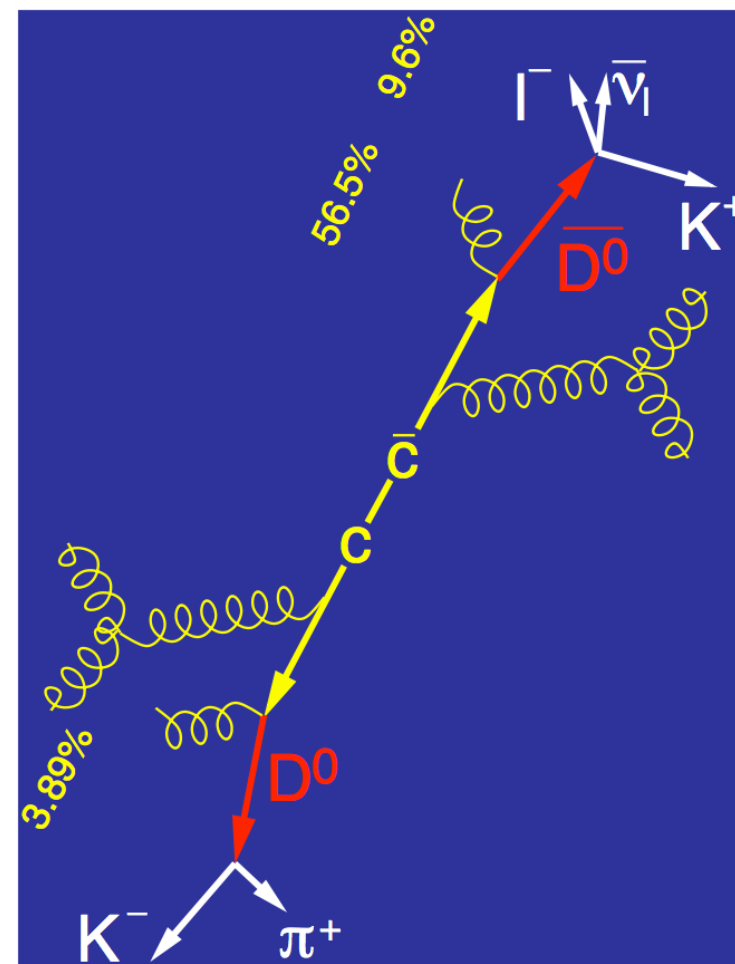
✓ セミレプトニック崩壊(単レプトン) BR ~ 10%

✓  $B \rightarrow J/\psi X$

✓  $B \rightarrow D$

✓ 比較的分鎖比が大きく同定法も確立されていて容易な場合が多い

✓ 親ハドロンの運動量分布や相関は鈍る



# HF->e $R_{AA}$ and $v_2$ 測定(RHICで最初のHF測定)

Phys Rev Lett 98 172301 (2007)

※c, b は分けられていない  
低運動量だとチャームが支配的

- 高運動量で強い抑制
- Positive  $v_2$

✓ 重クォーク-QGPは強結合

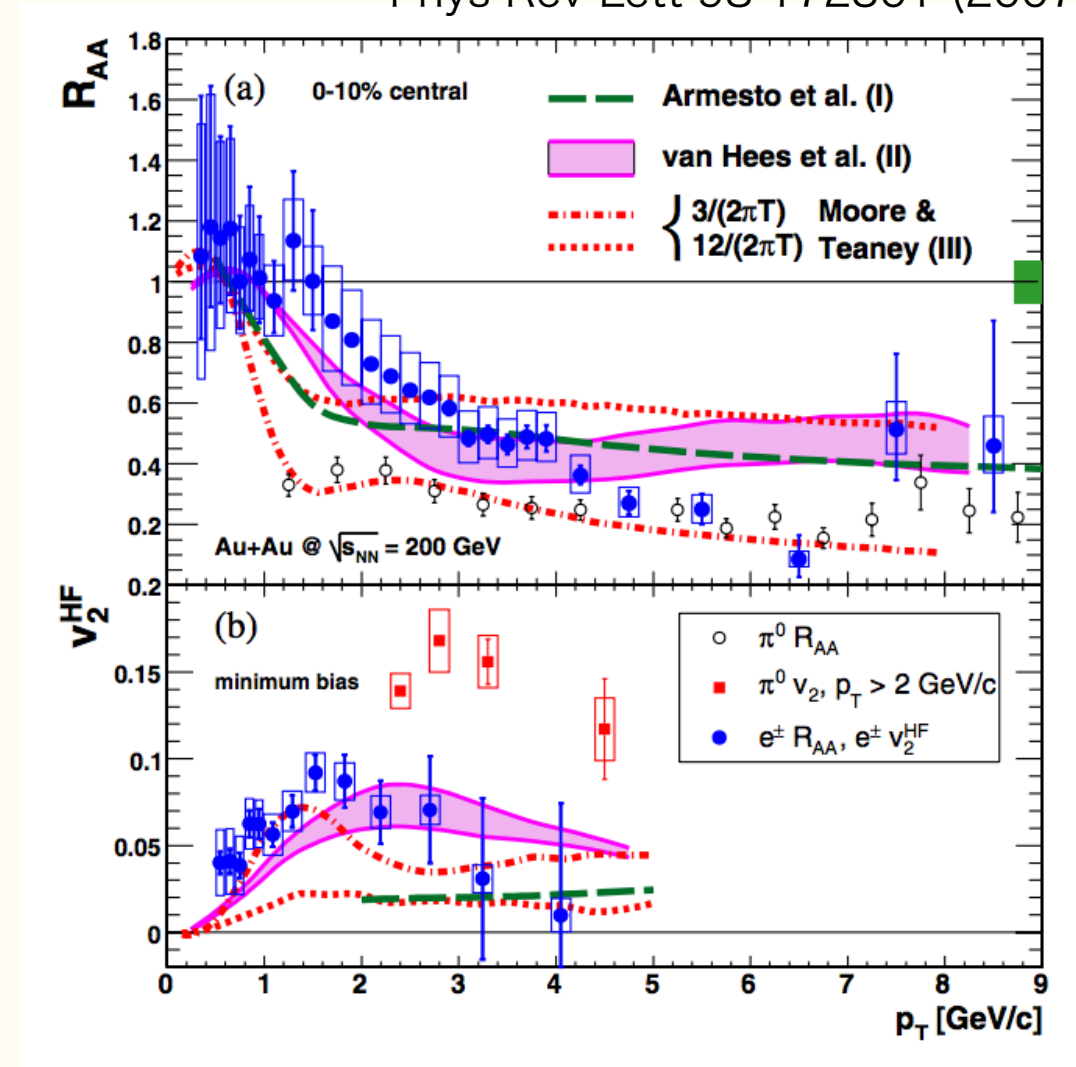
( I ) pQCD radiative energy loss

$$\hat{q} = 14 \text{ GeV}^2/\text{fm}$$

( II ) Langevin calculation

Elastic scattering mediated by  
resonance+coalescence

$$D_s 2\pi T = 4-6$$



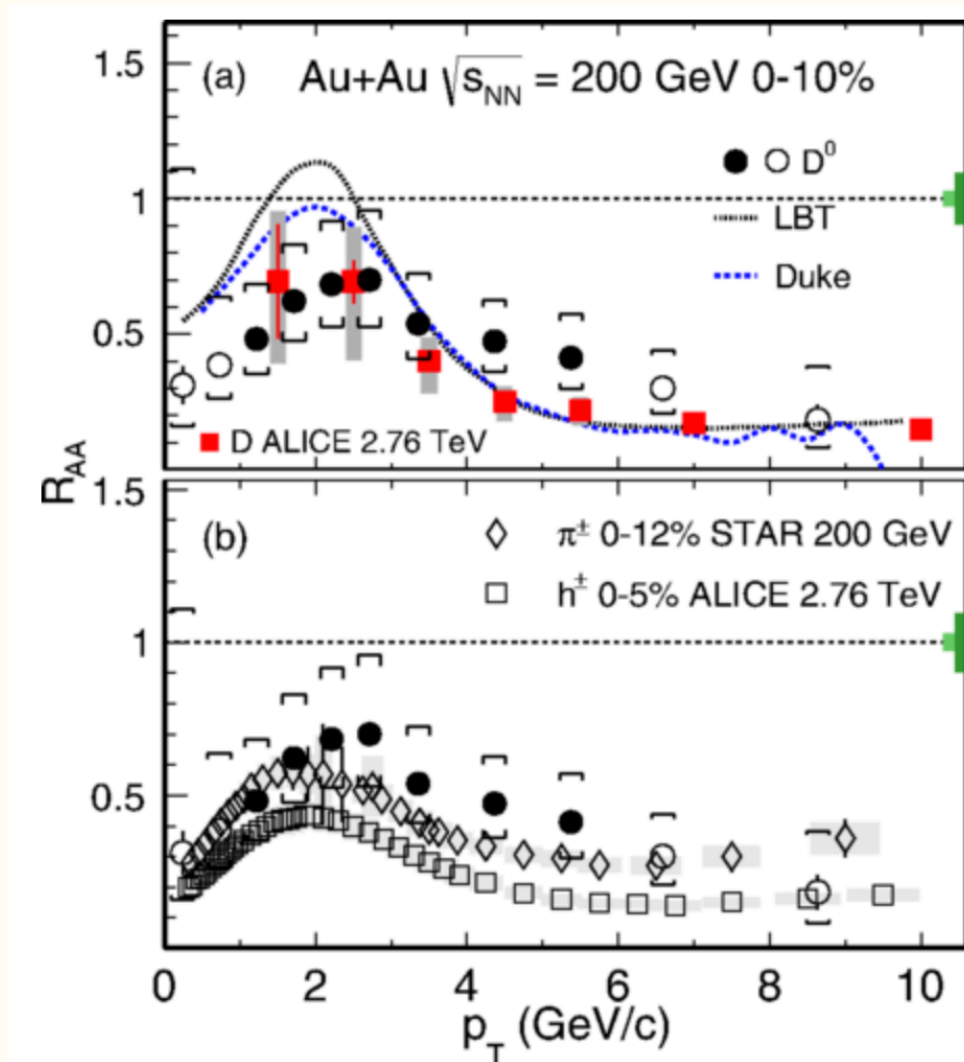
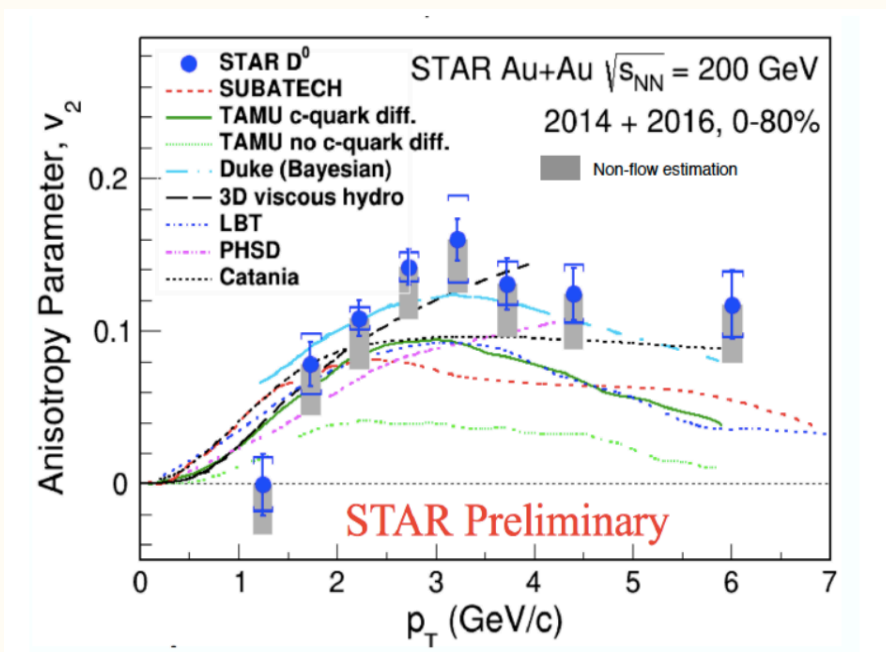
# D中間子 $R_{AA}$ and $v_2$ 測定

Phys. Rev. C 99, (2019) 034908

- 高運動量で軽いハドロンと同程度の抑制
- D中間子  $v_2$

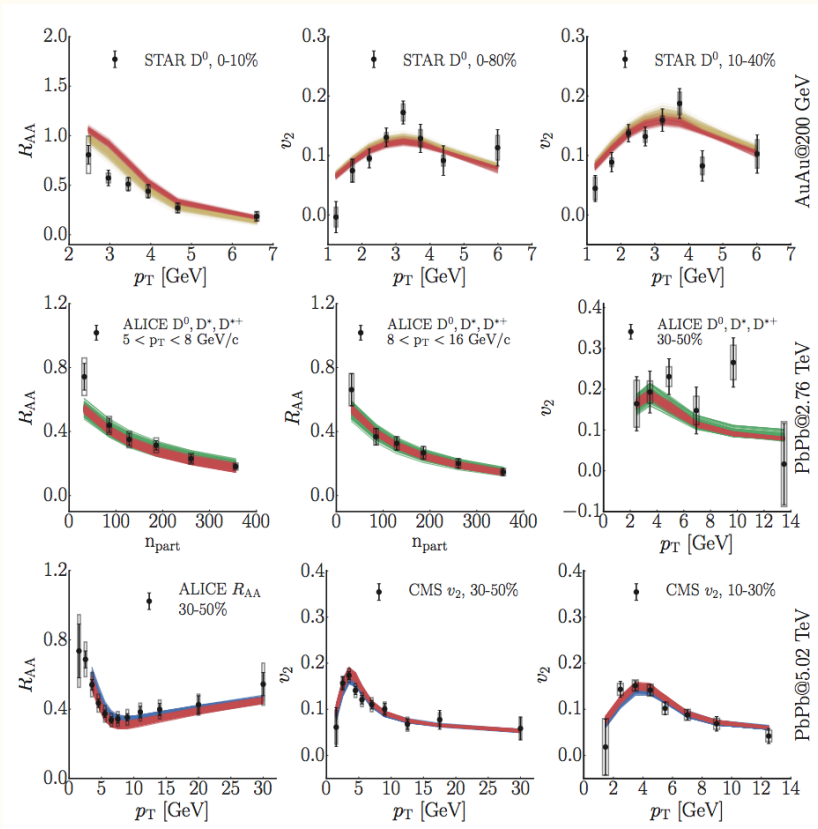
LBT, Duke: collisional + radiative model  
TAMU: Collisional only

•  $D_s(2\pi T) = 2-5$  at  $\sim T_c$



# ベイズ推定による物性量の制限

- RHIC, LHCのD中間子結果( $R_{AA}$ ,  $v_2$ )
- Duke模型: collisional(Langevin, pQCD) + radiative(LGV)

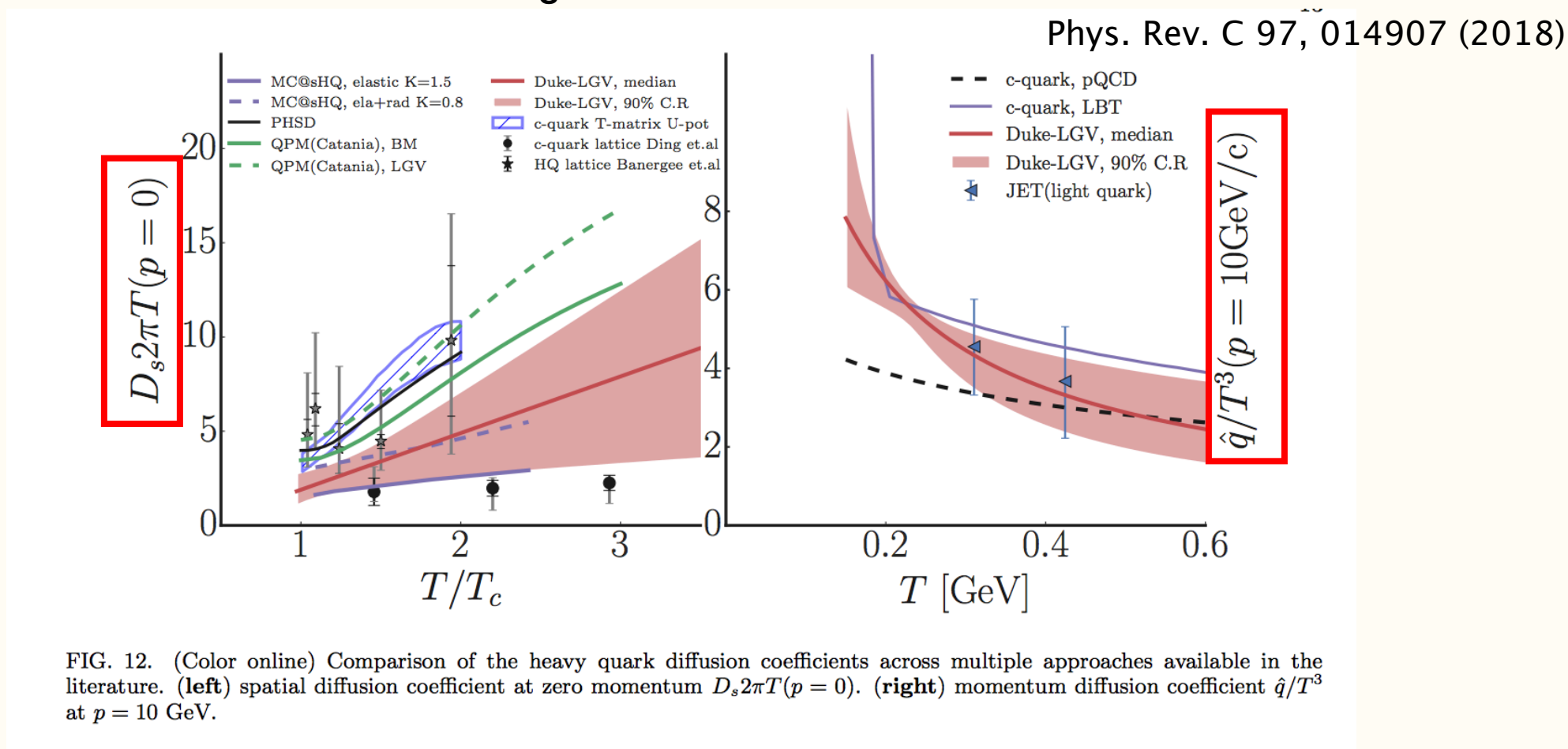


Phys. Rev. C 97, 014907 (2018)

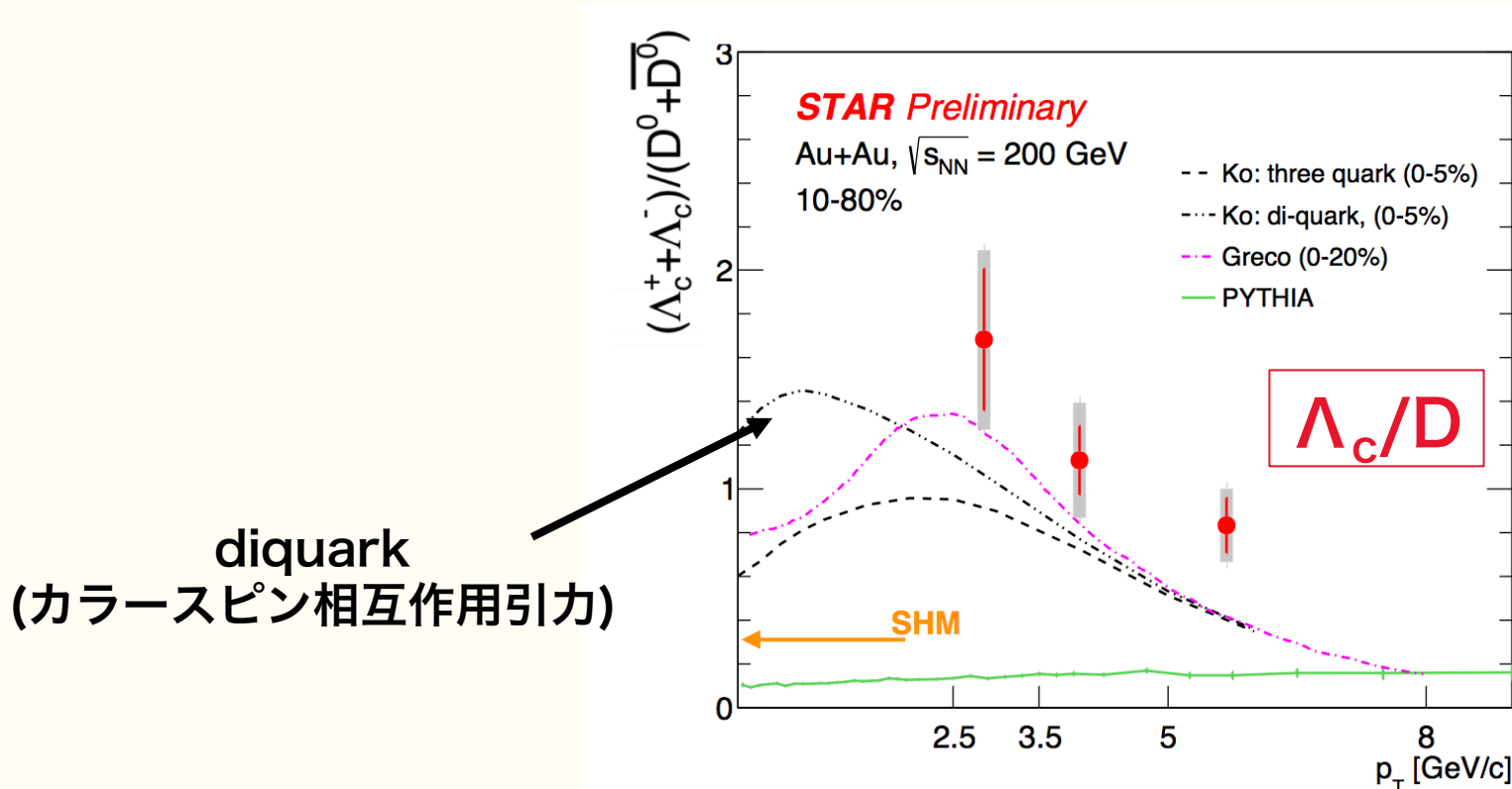
FIG. 8. (Color online) Emulator predictions for 200 random input parameters sampled from the posterior distributions. This figure is similar to Fig.5 but with the input parameters chosen from the posterior distribution, and the outputs are predictions from the GP emulators.

# ベイズ推定による物性量の制限

- 模型依存性はあるが測定から $D_s$ を制限

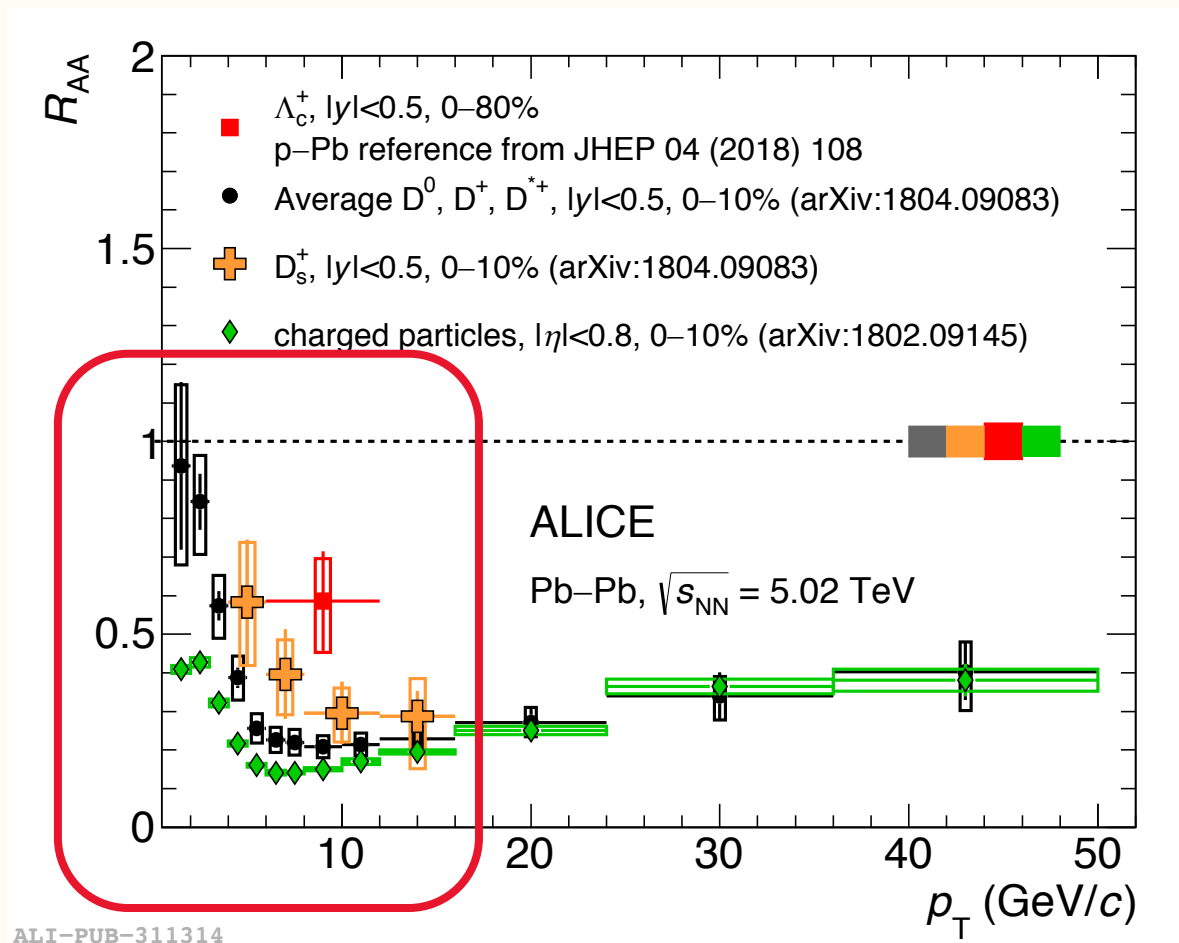


# $\Lambda_c$ 測定



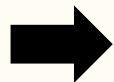
- Fragmentation(Pythia)より大きな収量
- 統計モデル(熱模型)の予想より多い収量(運動量依存性考慮せず)
- (定性的には) **coalescence**による生成が必要
  - diquark構造を検証するにはより低い運動量測定が必要

# $D_s$ 中間子測定



$$R_{AA}(D_s) > R_{AA}(D)$$

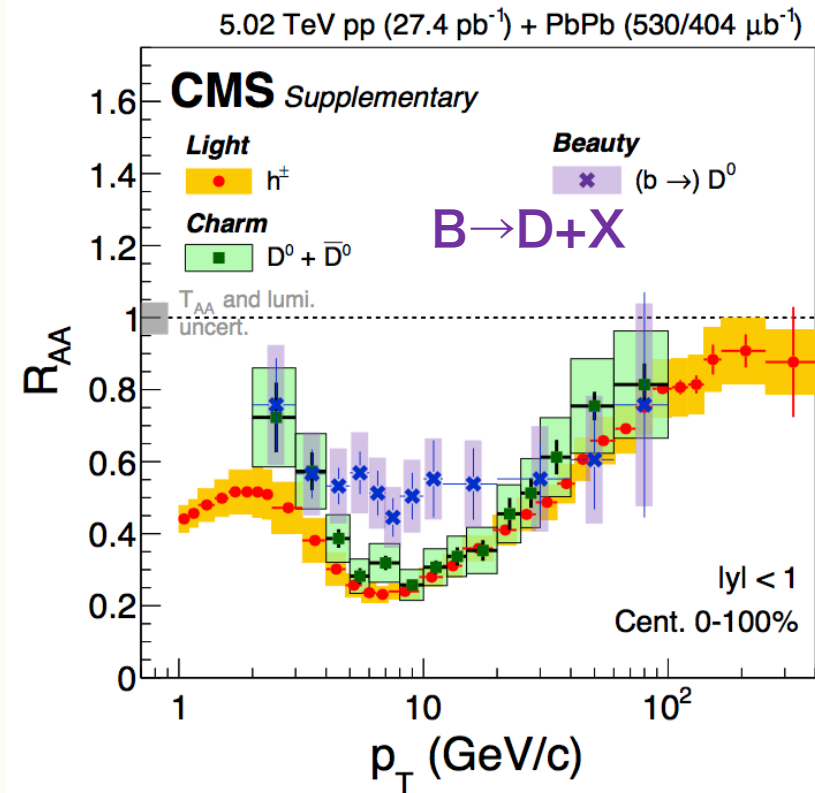
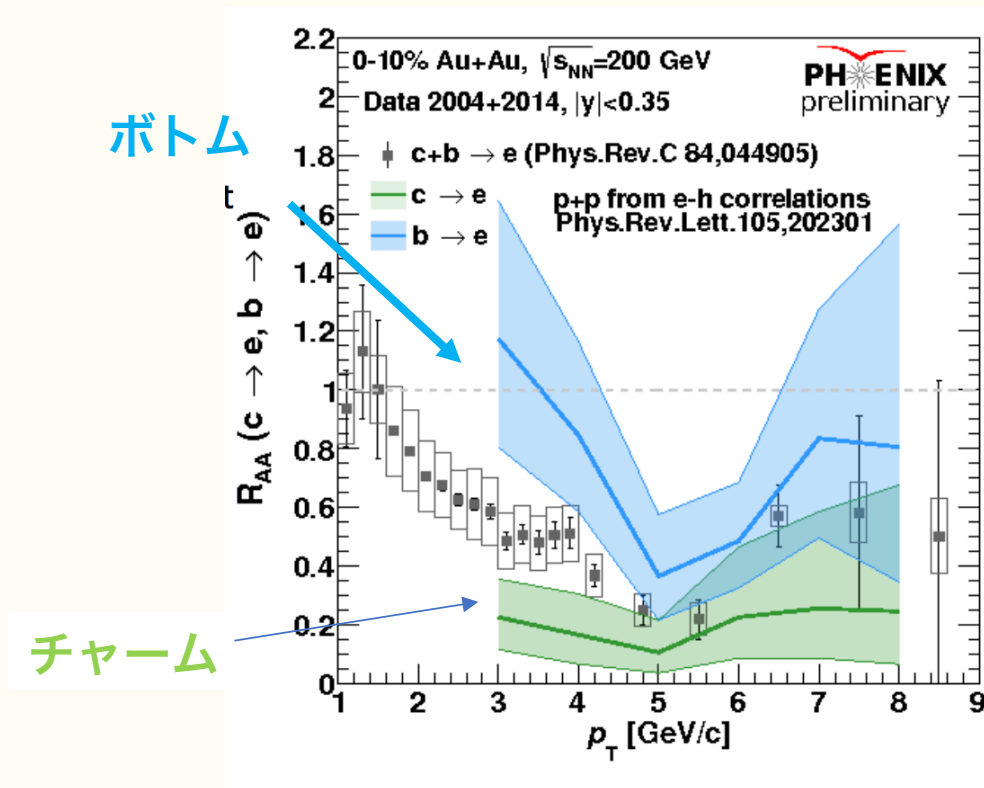
$$R_{AA}(\Lambda_c) > R_{AA}(D)$$



Strangeness enhancement + coalescenceを示唆

# B中間子測定

Phys. Rev. Lett. 123, 022001 (2019)



## - ヒエラルキー:

- ✓  $R_{AA}(B) > R_{AA}(\text{Prompt } D) \sim R_{AA}(h)$  around 10 GeV/c
- ✓  $R_{AA}(B) \sim R_{AA}(\text{Prompt } D) \sim R_{AA}(h)$  at  $p_T > 30$  GeV/c

## - 低運動量側の測定はまだ不十分 アップグレード後に期待



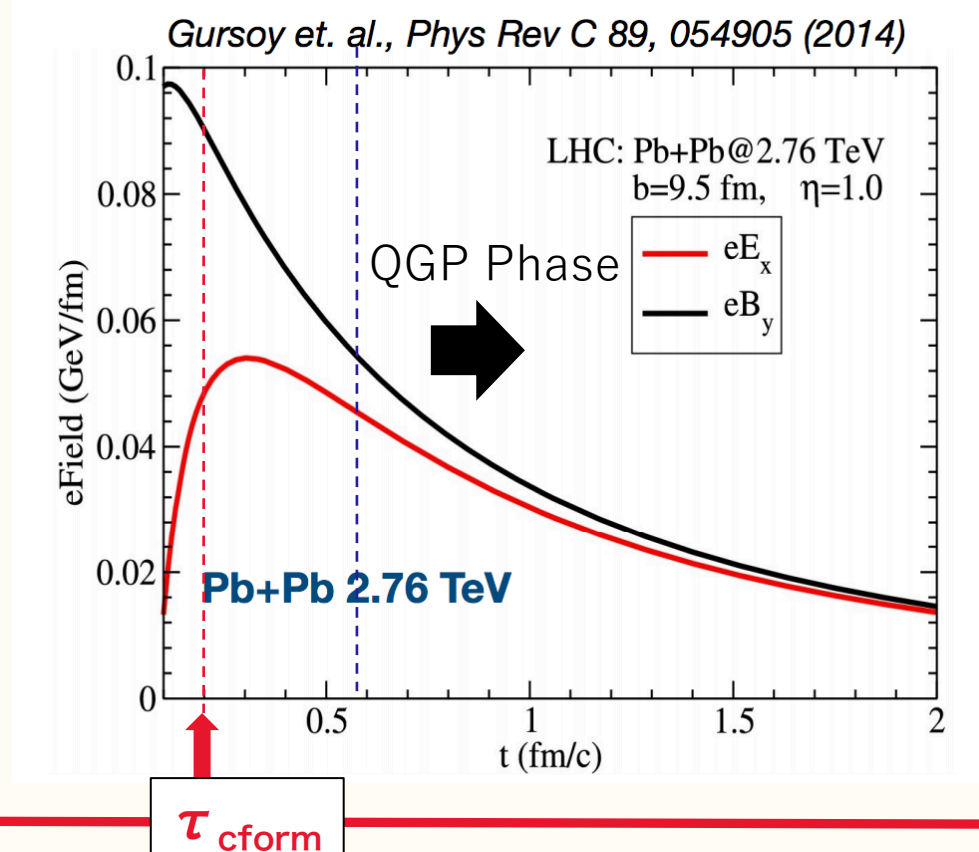
# 磁場のプローブとしての重クォーク

## - 入射イオンが作る強磁場

➤ 衝突後急激に弱まる

## - 重クォークは生成時間が比較的短い

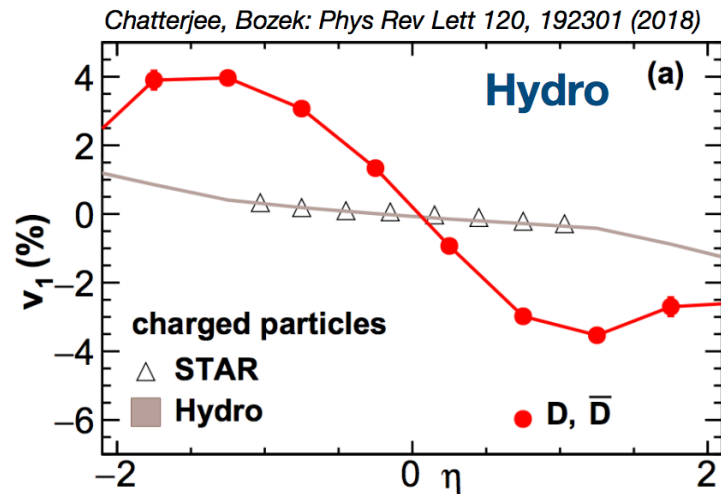
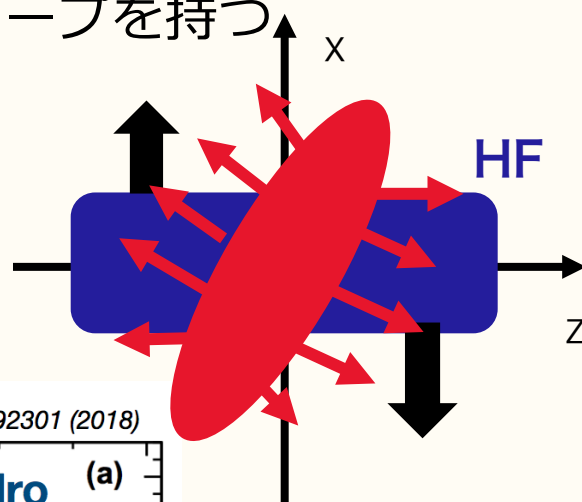
➤ 軽いクォークより初期の強い磁場の影響を受けやすい



# 重クォーク Directed flow

## - 初期のbulkの傾き

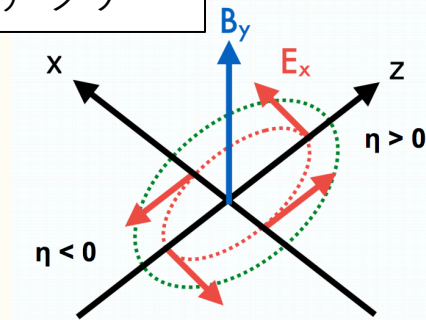
- 重クォーク生成  $\propto N_{\text{coll}}$  (rapidity対称)
- バルクの傾きと膨張によってrapidityに対し大きな $v_1$ スロープを持つ
- 電荷依存性なし



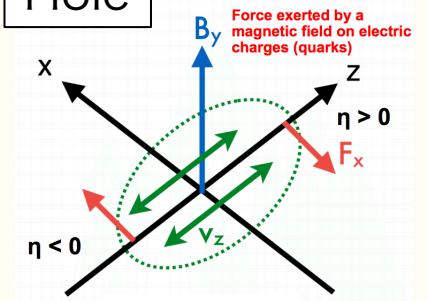
## - 初期の磁場 $F = qvB + qE$

- 平均では $v_1 = 0$
- 電荷依存性あり  $\Delta v_1 \neq 0$
- 流体発展しても残る? 緩和時間による

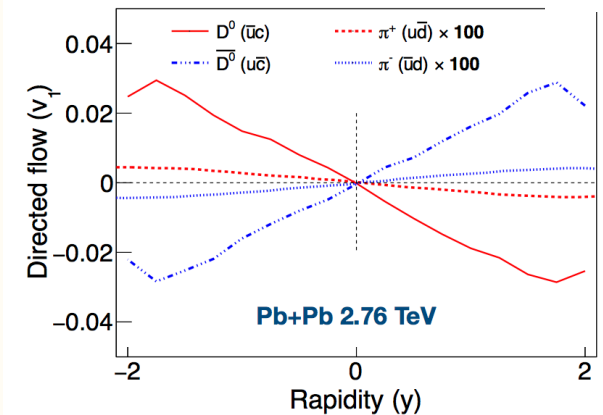
ファラデー



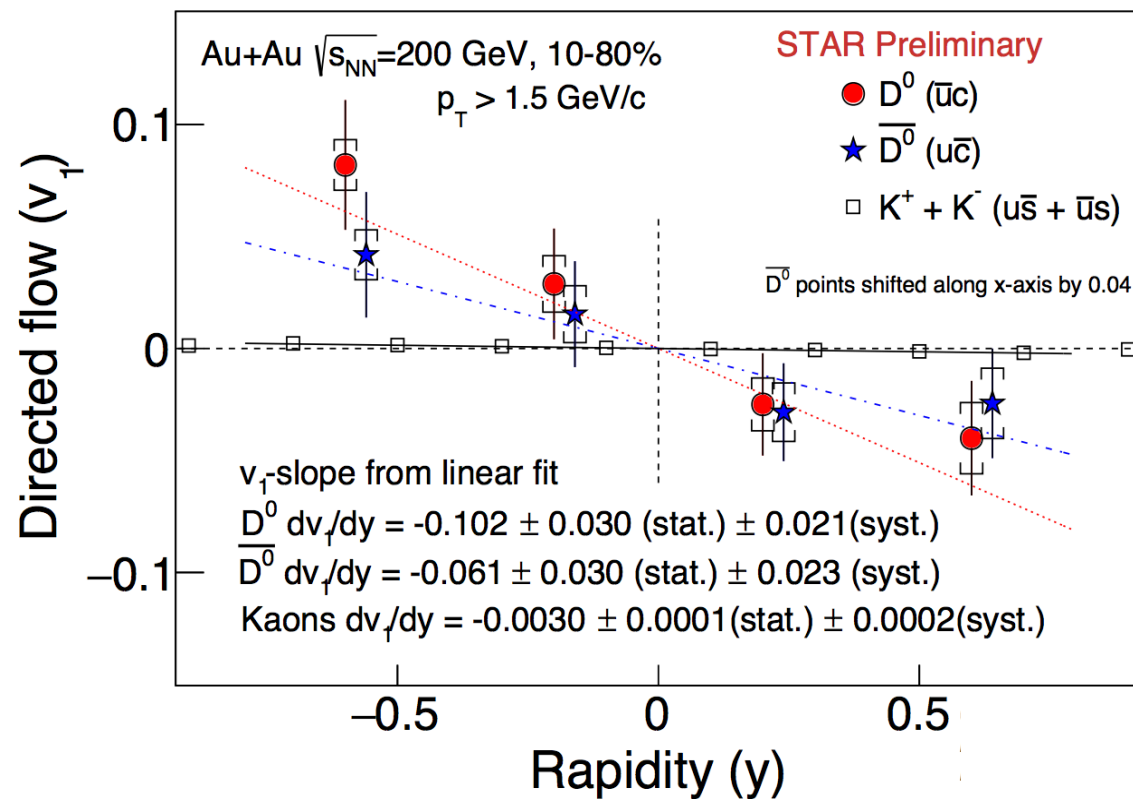
Hole



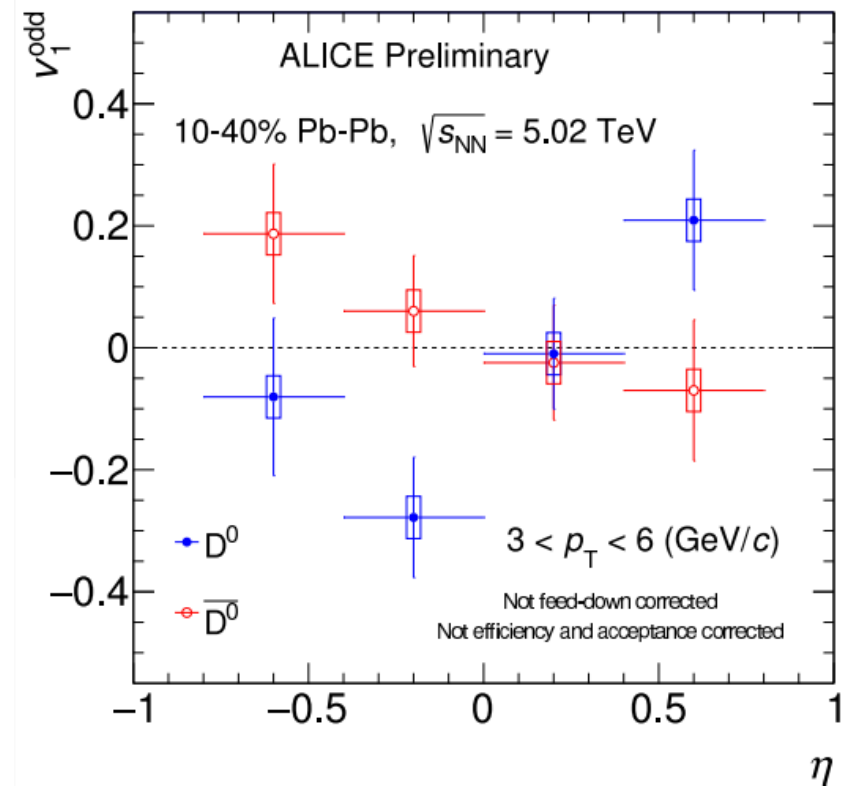
Das et. al., Phys Lett B 768, 260 (2017)



# D中間子Directed flow 測定



$$dv_1/dy = -0.081 \pm 0.021$$
 (stat)  $\pm 0.017$  (sys)
 
$$\Delta v_1/dy = -0.041 \pm 0.041$$
 (stat)  $\pm 0.020$  (sys)



$$\Delta v_1/dy = 0.52 \pm 0.18$$
 (stat)  $\pm 0.06$  (syst)

**$\Delta v_1$ の兆候(2.7 $\sigma$ ) 逆スロープ?**

# Summary

- 重クォークはQGP物性に敏感
- 重クォークは衝突のあらゆる段階を経験している
  - 色々なものに敏感
    - ✓ QGP物性(輸送係数)
    - ✓ 初期状態
    - ✓ ハドロン化
  - 実験との比較にはtransport模型が必要
    - ✓ Initial production + (pre-thermalization) + interaction with QGP expansion + Hadronization + (Hadron gas interaction)
- RHIC, LHCでの重クォーク測定
  - 重クォーク-QGPは強結合  $D_s 2\pi T \sim 2-5$  at  $T_c$ 
    - ✓ 温度依存性はこれから
  - $R_{AA}(B) > R_{AA}(D) \sim R_{AA}(h)$  around  $p_T = 10$  GeV/c
  - チャームクォークに対してもcoalescenceが成り立つ

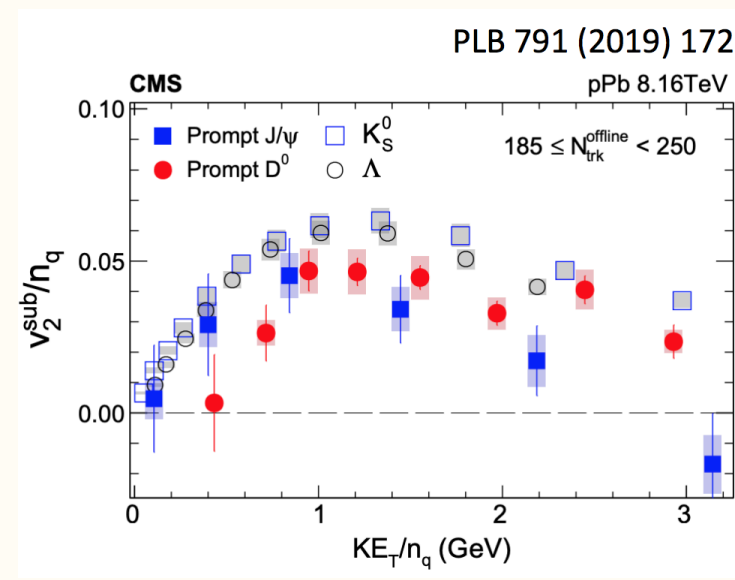
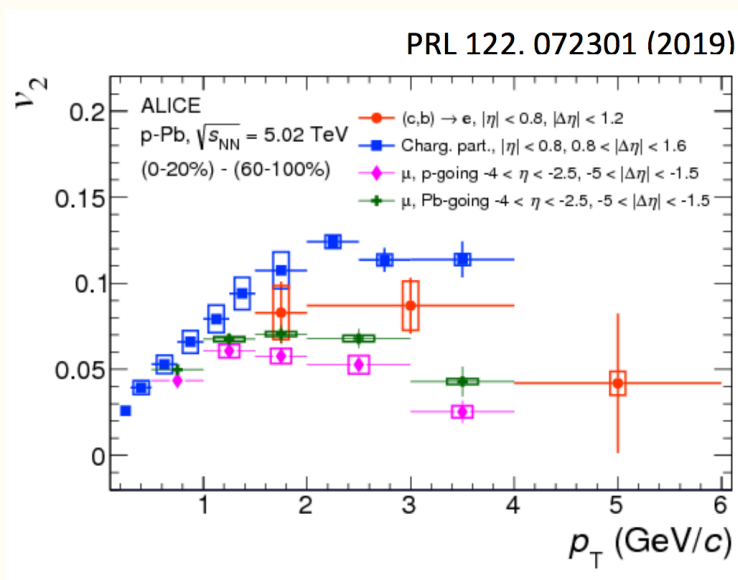
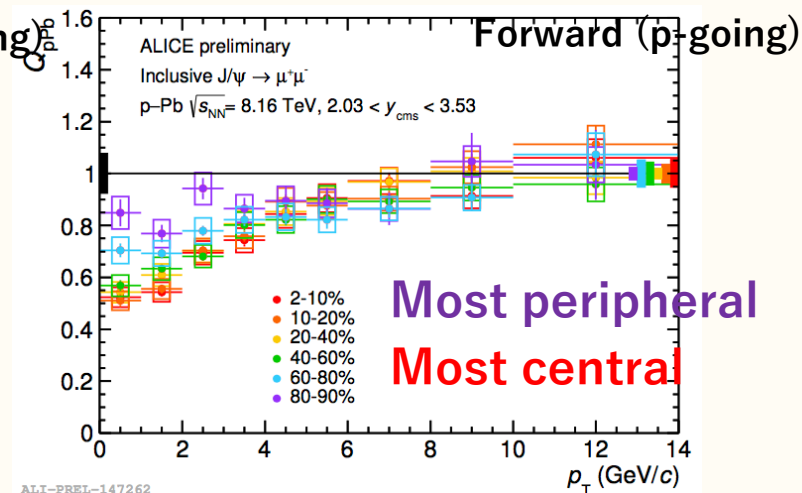
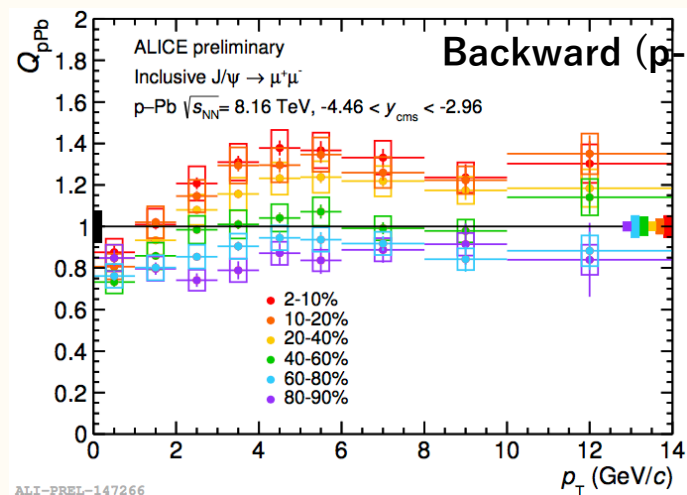
実験的には本格的なボトムハドロン測定が始まるところ

# Other recent topics

## - Small System

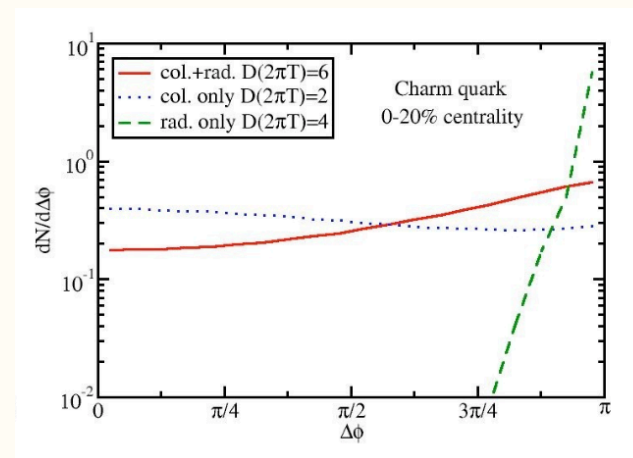
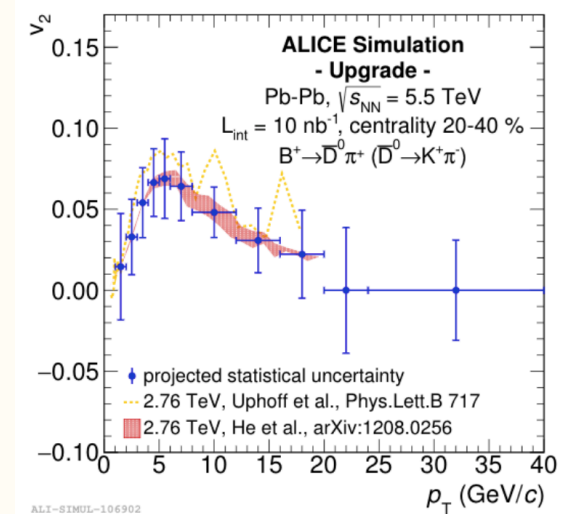
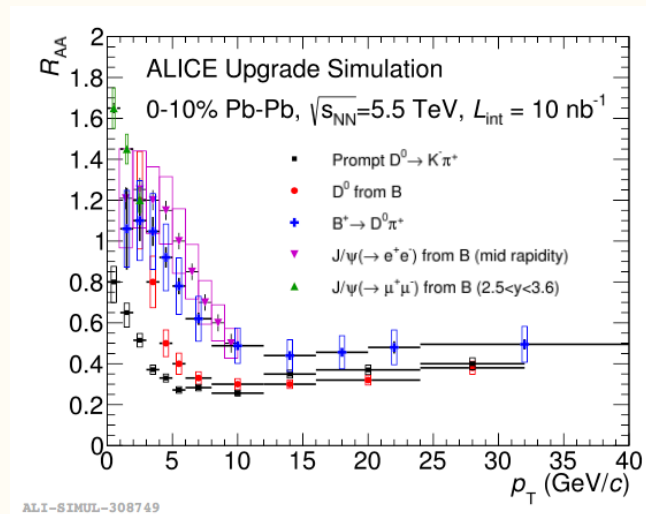
- Non zero  $v_2$
- J/psi enhancement around intermediate  $p_T$

小さなQGPの影響は？



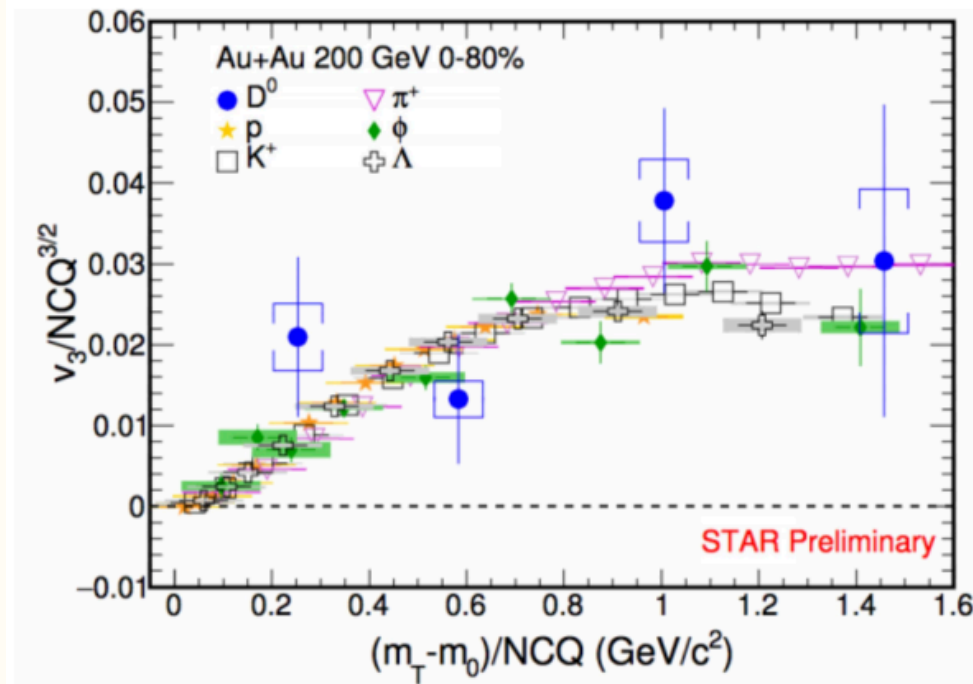
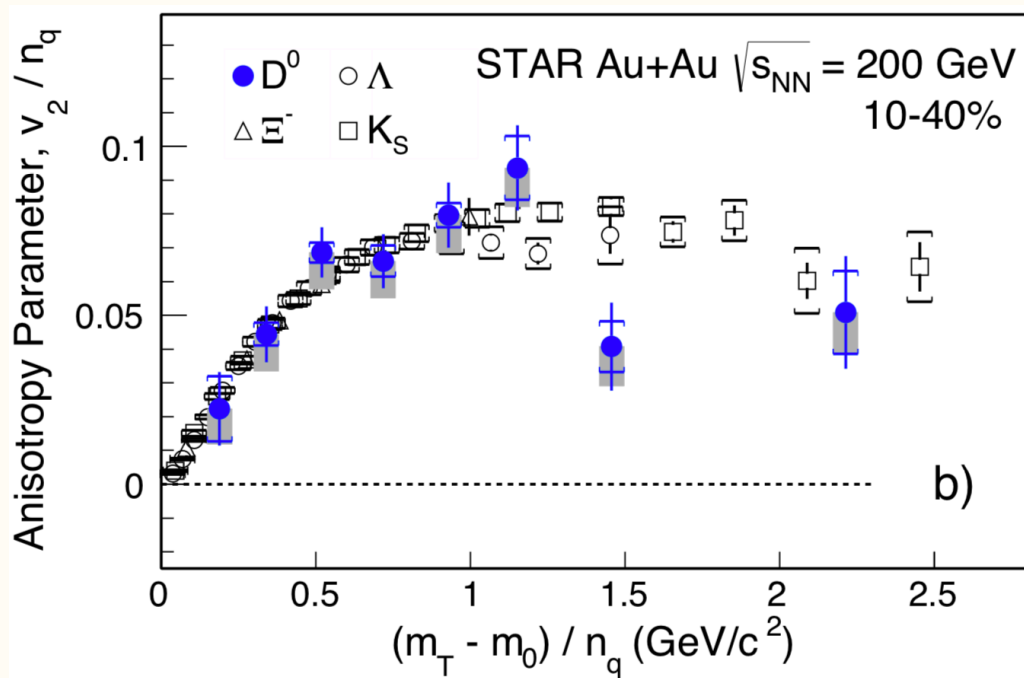
# Future plan

- ボトムハドロンの詳細測定
- 2粒子相関
- 高強度磁場測定(D, B  $v_1$ )
- coalescence
  - ダイクォーク
  - エキゾチックハドロン



# backup

# クォーク数スケーリング



- D中間子に対してもクォーク数スケーリングが成り立っている

✓ QGP flow+ coalescence の影響

→ かなりのチャームクォークが熱平衡に達している？ 強結合相互作用