

LHC ALICE 実験における Exoticsの研究

浜垣 秀樹

(hamagaki_hideki@pilot.nias.ac.jp)

長崎総合科学大学 新技術創成研究所
(IIST@NIAS)

探索候補リスト

- ExHIC collaboration; PRC 84 (2011) 064910

Particle	m (MeV)	g	I	J^P	$2q/3q/6q$	$4q/5q/8q$	Mol.	$\omega_{\text{Mol.}}$ (MeV)	Decay mode
Mesons									
$f_0(980)$	980	1	0	0^+	$q\bar{q}, s\bar{s}(L=1)$	$q\bar{q}s\bar{s}$	$\bar{K}K$	67.8(B)	$\pi\pi$ (Strong decay)
$a_0(980)$	980	3	1	0^+	$q\bar{q}(L=1)$	$q\bar{q}s\bar{s}$	$\bar{K}K$	67.8(B)	$\eta\pi$ (Strong decay)
$K(1460)$	1460	2	$1/2$	0^-	$q\bar{s}$	$q\bar{q}q\bar{s}$	$\bar{K}KK$	69.0(R)	$K\pi\pi$ (Strong decay)
$D_s(2317)$	2317	1	0	0^+	$c\bar{s}(L=1)$	$q\bar{q}c\bar{s}$	DK	273(B)	$D_s\pi$ (Strong decay)
T_{cc}^{1a}	3797	3	0	1^+	—	$qq\bar{c}\bar{c}$	$\bar{D}\bar{D}^*$	476(B)	$K^+\pi^- + K^+\pi^- + \pi^-$
$X(3872)$	3872	3	0	$1^+, 2^-^c$	$c\bar{c}(L=2)$	$q\bar{q}c\bar{c}$	$\bar{D}D^*$	3.6(B)	$J/\psi\pi\pi$ (Strong decay)
$Z^+(4430)^b$	4430	3	1	0^-^c	—	$q\bar{q}c\bar{c}(L=1)$	$D_1\bar{D}^*$	13.5(B)	$J/\psi\pi$ (Strong decay)
T_{cb}^{0a}	7123	1	0	0^+	—	$qq\bar{c}\bar{b}$	$\bar{D}B$	128(B)	$K^+\pi^- + K^+\pi^-$
Baryons									
$\Lambda(1405)$	1405	2	0	$1/2^-$	$qqqs(L=1)$	$qqqs\bar{q}$	$\bar{K}N$	20.5(R)–174(B)	$\pi\Sigma$ (Strong decay)
$\Theta^+(1530)^b$	1530	2	0	$1/2^+^c$	—	$qqqq\bar{s}(L=1)$	—	—	KN (Strong decay)
$\bar{K}KN^a$	1920	4	$1/2$	$1/2^+$	—	$qqqs\bar{s}(L=1)$	$\bar{K}KN$	42(R)	$K\pi\Sigma, \pi\eta N$ (Strong decay)
$\bar{D}N^a$	2790	2	0	$1/2^-$	—	$qqqq\bar{c}$	$\bar{D}N$	6.48(R)	$K^+\pi^-\pi^- + p$
$\bar{D}^*N^a$	2919	4	0	$3/2^-$	—	$qqqq\bar{c}(L=2)$	$\bar{D}^*N$	6.48(R)	$\bar{D} + N$ (Strong decay)
Θ_{cs}^a	2980	4	$1/2$	$1/2^+$	—	$qqqs\bar{c}(L=1)$	—	—	$\Lambda + K^+\pi^-$
BN^a	6200	2	0	$1/2^-$	—	$qqqq\bar{b}$	BN	25.4(R)	$K^+\pi^-\pi^- + \pi^+ + p$
B^*N^a	6226	4	0	$3/2^-$	—	$qqqq\bar{b}(L=2)$	B^*N	25.4(R)	$B + N$ (Strong decay)
Dibaryons									
H^a	2245	1	0	0^+	$qqqqss$	—	ΞN	73.2(B)	$\Lambda\Lambda$ (Strong decay)
$\bar{K}NN^b$	2352	2	$1/2$	0^-^c	$qqqqqs(L=1)$	$qqqqq\bar{s}$	$\bar{K}NN$	20.5(T)–174(T)	ΛN (Strong decay)
$\Omega\Omega^a$	3228	1	0	0^+	$ssssss$	—	$\Omega\Omega$	98.8(R)	$\Lambda K^- + \Lambda K^-$
H_c^{++a}	3377	3	1	0^+	$qqqqsc$	—	$\Xi_c N$	187(B)	$\Lambda K^-\pi^+\pi^+ + p$
$\bar{D}NN^a$	3734	2	$1/2$	0^-	—	$qqqqq\bar{q}c$	$\bar{D}NN$	6.48(T)	$K^+\pi^- + d, K^+\pi^-\pi^- + p + p$
BNN^a	7147	2	$1/2$	0^-	—	$qqqqq\bar{q}b$	BNN	25.4(T)	$K^+\pi^- + d, K^+\pi^- + p + p$

筋書き

- はじめに
- 原子核、ハイパー核
- ダイバリオン
- 重いクォークを含むハドロン
- まとめと展望

はじめに

LHC ALICE実験の高度化

- LHC ALICE実験の今後5年間の予定
 - 2018年:LHC RUN2。11月に鉛-鉛衝突実験
 - 2019～2020年:LHC休止(LS2)に合わせて、主要検出器・読み出し系・データ収集解析システムの高度化
 - 2021年～2023年:RUN3
- LHC強化により実現される50kHz (MB:ミニマムバイアス) 鉛-鉛衝突のデータ全てを活用出来るシステムの実現
 - **現状、500Hz～1kHz程度のデータ収集能力 → 100倍**
 - TPC(タイムプロジェクションチェンバー): 電子増幅部をGEMとすることで、イオンバックフローを減らし、ゲートなしの連続運転を実現
 - ITS(インナートラッキングシステム): シリコンピクセル検出器に総取っ替えし、低物質質量と高速読み出しを実現

化学的凍結仮説とハドロン収量

- 化学的凍結仮説: 重イオン衝突系の時空発展のある時点で粒子収量が凍結される(=非弾性散乱の終焉)
 - u, d, s から構成される熱平衡ハドロン系を仮定
 - 少数のグローバルパラメータにより、ハドロン収量が決定される

$$\rho_i = \gamma_s^{|s_i|} \frac{g_i}{2\pi^2} T_{ch}^3 \left(\frac{m_i}{T_{ch}} \right)^2 K_2(m_i/T_{ch}) \lambda_q^{Q_i} \lambda_s^{s_i}$$

$$\lambda_q = \exp(\mu_q/T_{ch}),$$

$$\lambda_s = \exp(\mu_s/T_{ch})$$

Q_i : 1 for u and d, -1 for u and d

s_i : 1 for s, -1 for s

g_i : spin-isospin freedom

m_i : particle mass

global parameters

T_{ch} : chemical freeze-out temperature

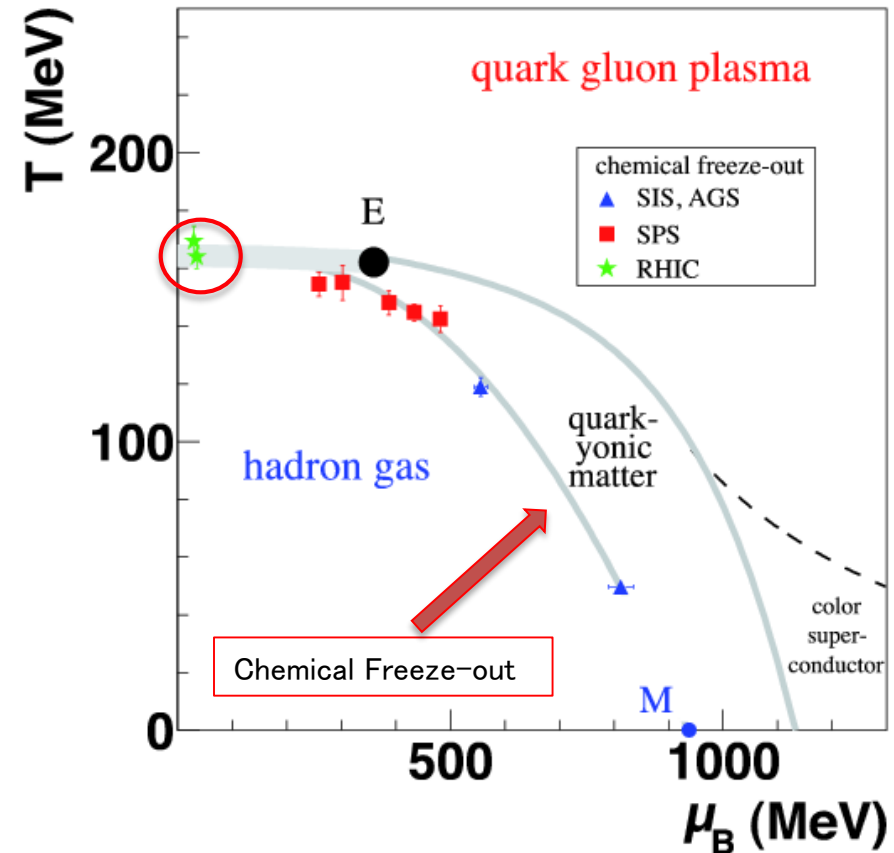
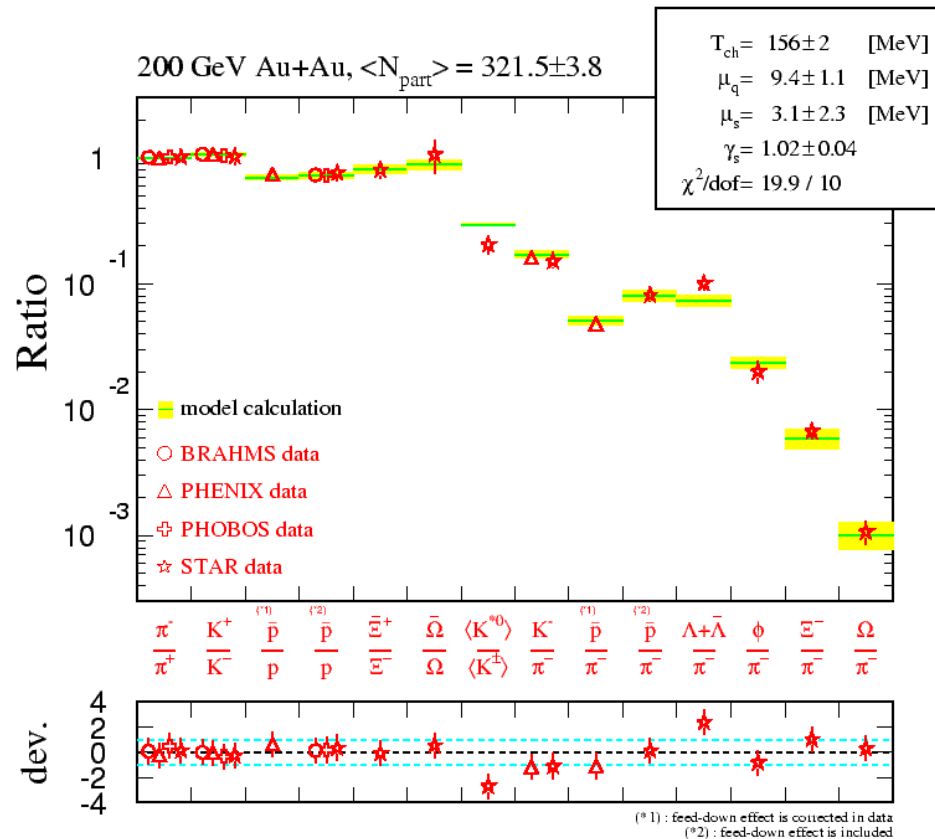
μ_q : light-quark chemical potential

μ_s : strangeness chemical potential

γ_s : strangeness saturation factor

- ハドロン収量(比)の測定 → 化学凍結温度、バリオン密度が求められる

ハドロン収量と化学的凍結

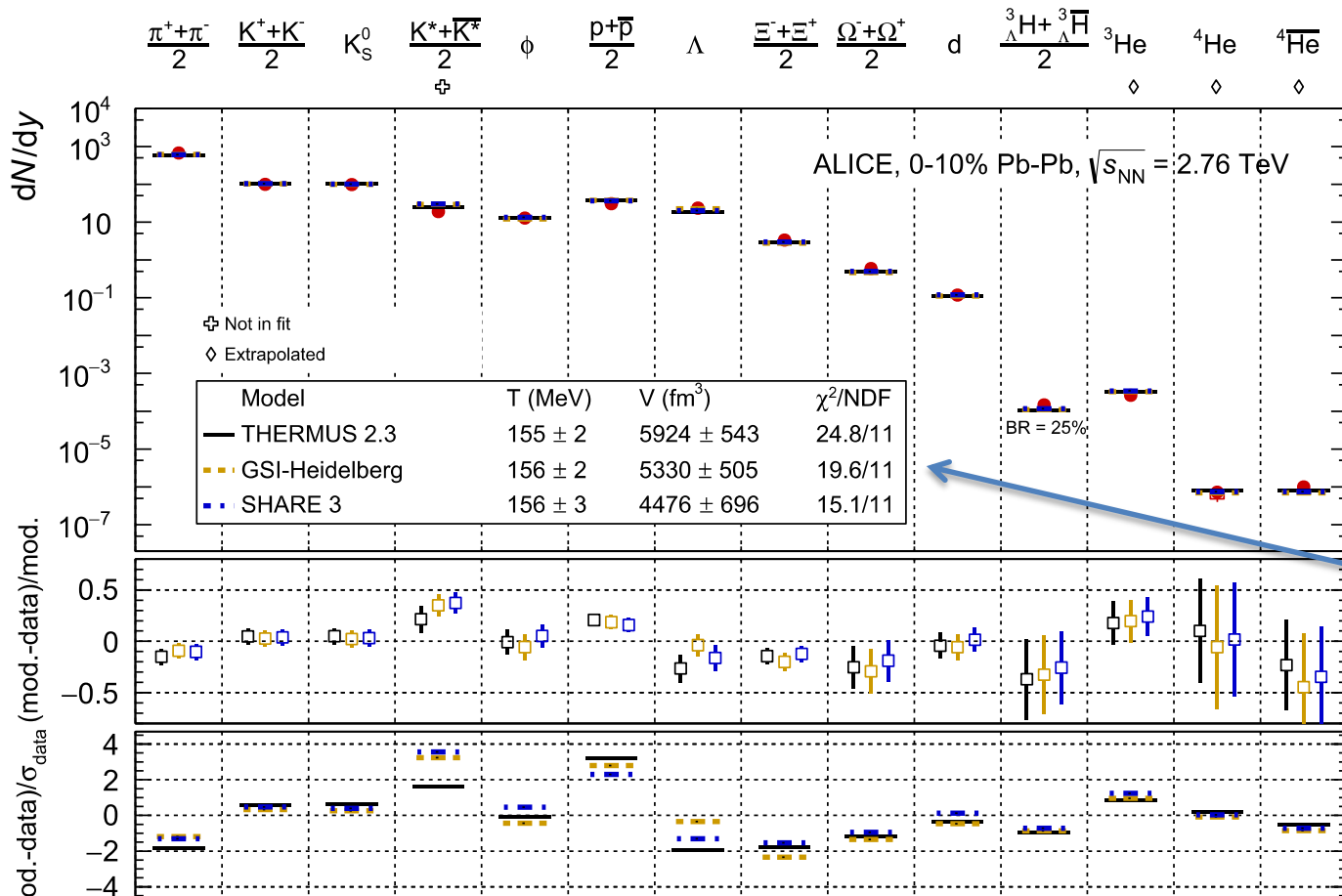


- 低エネルギーから高エネルギーまでの重イオン衝突において、化学的凍結仮説はハドロン収量を良く再現する
- このことを用いて、探索する粒子の収量を予想する

原子核、ハイパー核

LHC でのハドロン収量

- ALICE実験: Pb-Pb $s_{\text{NN}}^{1/2} = 2.76$ TeV, 10% 中心衝突
- 化学的凍結模型により、パイオンから ^4He までの収量が再現



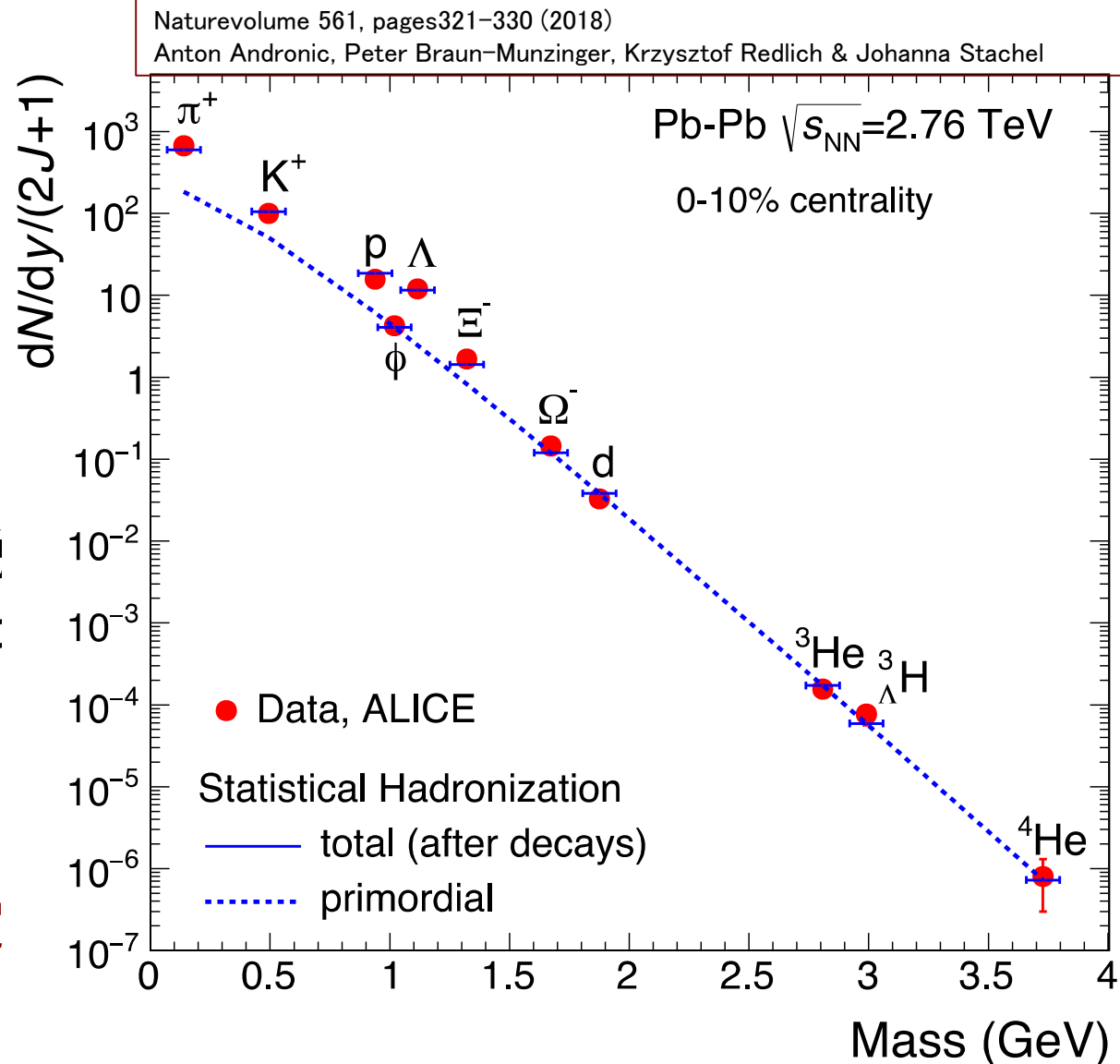
NPA 971 (2018) 1–20
ALICE collaboration

三つの化学的
凍結模型

$T_{\text{CF}} \sim 155\text{--}156$ MeV

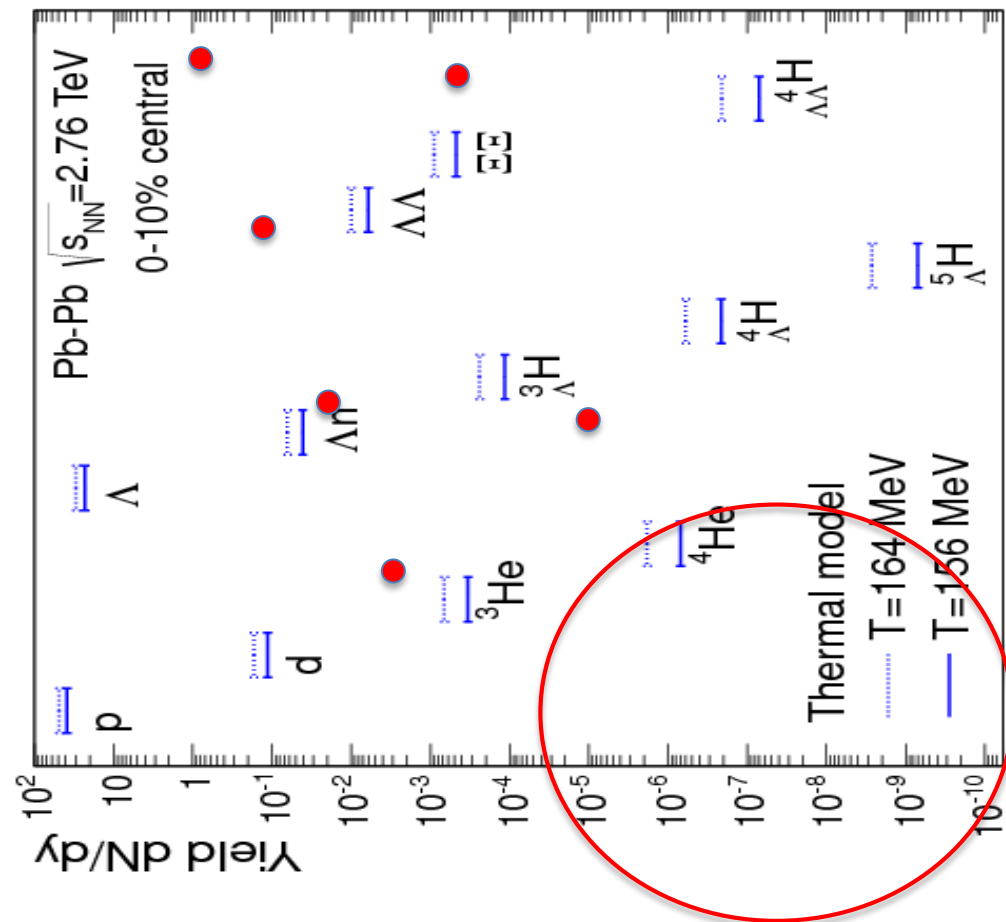
ハドロン収量と化学的凍結模型

- ~ 9 桁に亘って、衝突あたりの収量を再現
- 何故、このようなシンプルな模型がメソン、バリオンから軽原子核迄の収量をうまく説明するのか、定まった解釈はない
- ハドロン化過程の動的な理解 = A01研究班の研究課題設定に合致

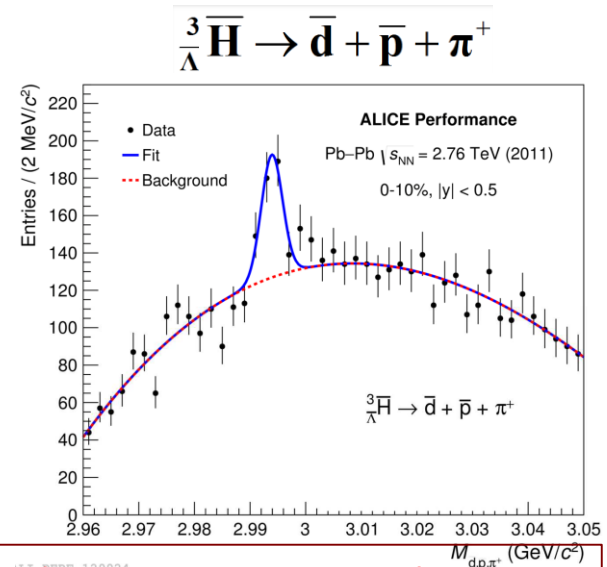
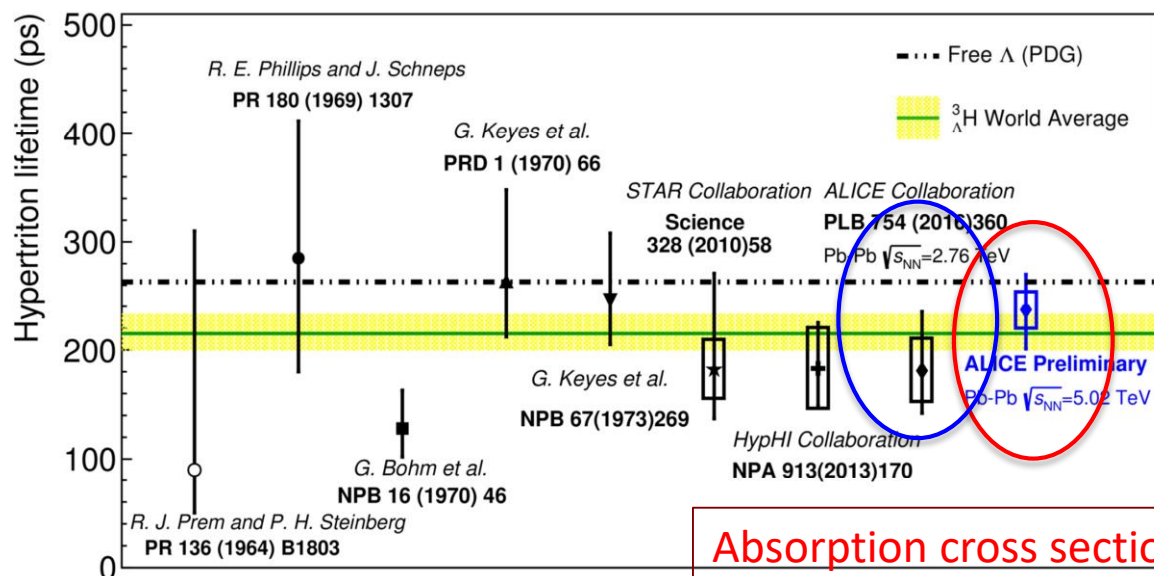
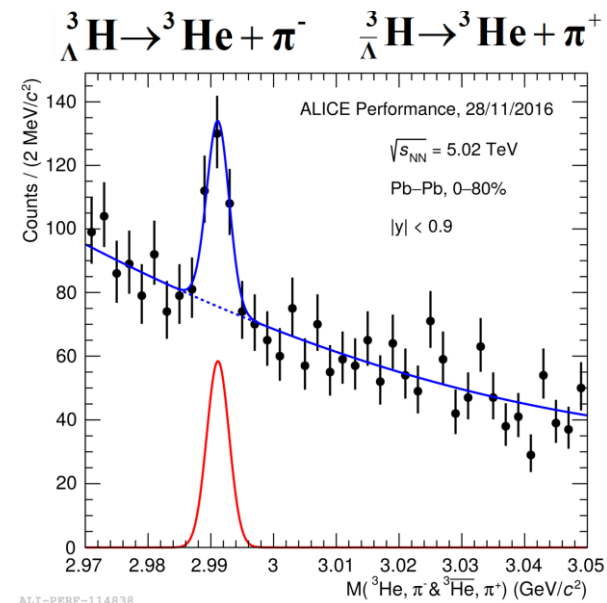
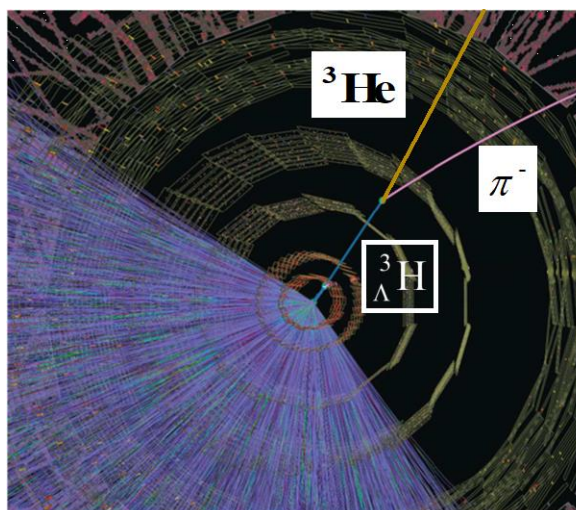
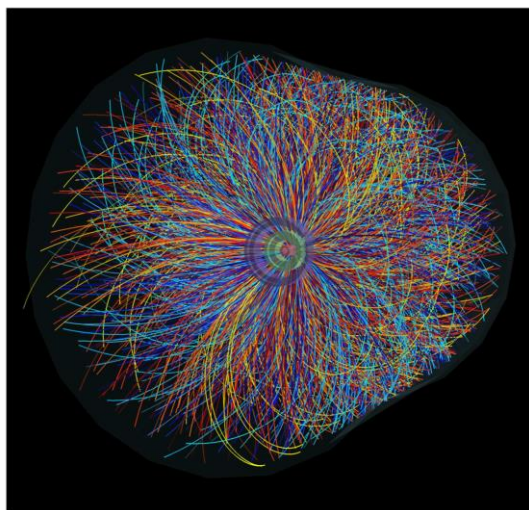


ALICE RUN3 の予想

- バリオンを一つ足す毎に収量が $\sim 1/500$ の為、RUN3では5バリオンが限界か？
- ハイパー核、ダブルハイパー核 (${}_{\Lambda}^3\text{H}$ 、 ${}_{\Lambda}^4\text{H}$ 、 ${}_{\Lambda}^4\text{He}$ 、 ${}_{\Lambda\Lambda}^4\text{H}$ 、 ${}_{\Lambda}^5\text{H}$ 、 ${}_{\Lambda\Lambda}^5\text{H}$)
- ${}_{\Lambda}^3\text{H}$ の寿命測定 (次ページ)
 - loosely bound 系の weak decay の寿命: free decay と異なる？
 - 高統計データ



$\Lambda^3\text{H}$ の寿命測定



Absorption cross section needs more precise evaluation

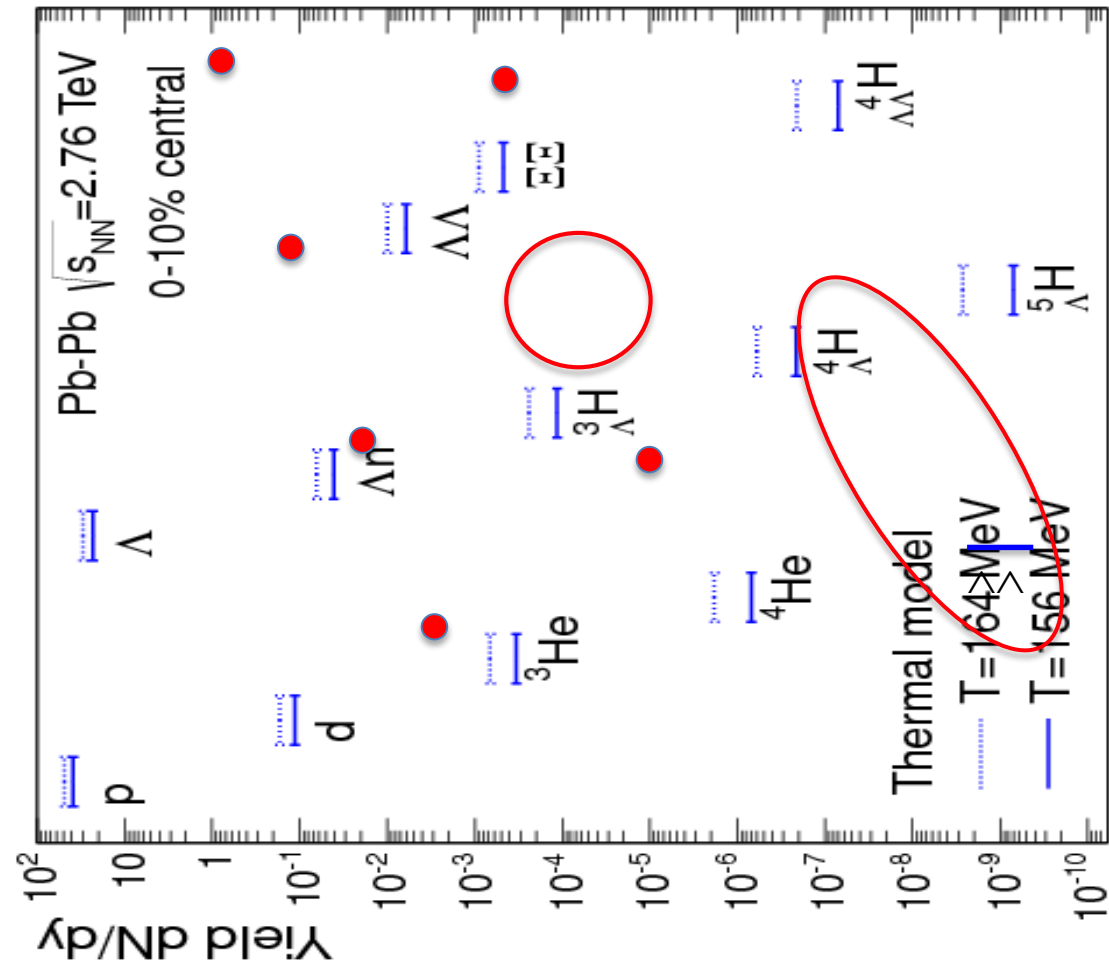
ダイバリオン

ダイバリオン

- 重陽子
 - Harold Clayton Urey (1931年): 唯一(?)の確定したダイバリオン
- Flavour SU(3) 空間へ拡張されたバリオン間相互作用(=核物理の基本)
- 格子QCDで、ほぼ physical point で相互作用の計算が可能(初田さんの話)

収量予想

- LHC RUN3 で十分な収量が予想される
- 収量が化学的凍結模型の予想から大きくずれた場合
 - ダイバリオン生成過程の見直し?
 - 予想外の配位?

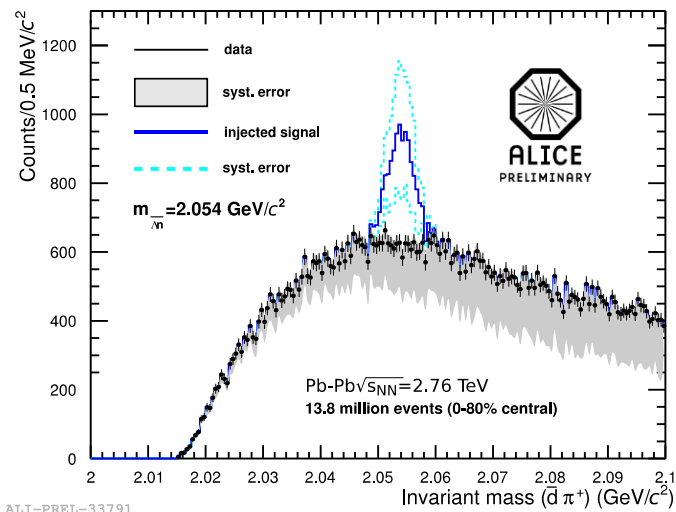
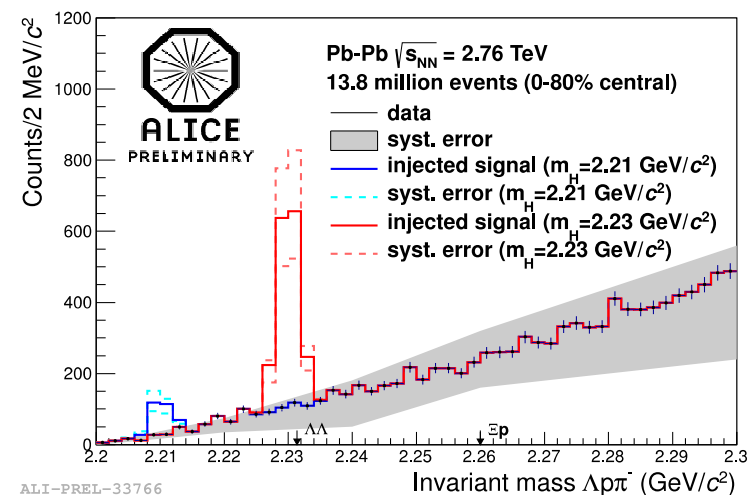


測定方法

- 不変質量法
 - 不変質量を直接的に決める
 - 非束縛共鳴状態の場合、励起エネルギーが小さく自然幅が小さい時は有効
 - 束縛状態(質量欠損がある)の場合、束縛エネルギーに応じて崩壊モードが異なる可能性
- 二粒子散乱
 - 固定標的を用いた場合、組み合わせが限られる
- 二粒子相関法(femtoscropy)
 - 散乱実験の延長
 - final state interaction を測る
 - HBT (Hanbury Brown and Twiss) 効果

ALICE: $\Lambda\Lambda$ 、 ΛN の束縛状態の探索

ALICE Coll.: EPJ Web of Conferences 97,00013 (2015)

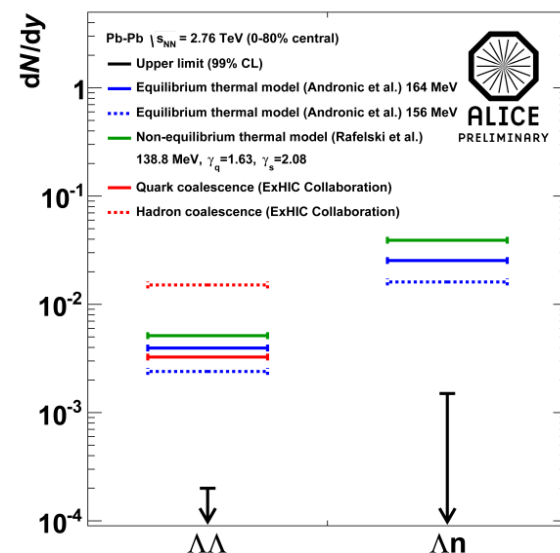


- $\Lambda p\pi$ の不変質量
— H($\Lambda\Lambda$ 束縛状態) $\rightarrow \Lambda + p + \pi$

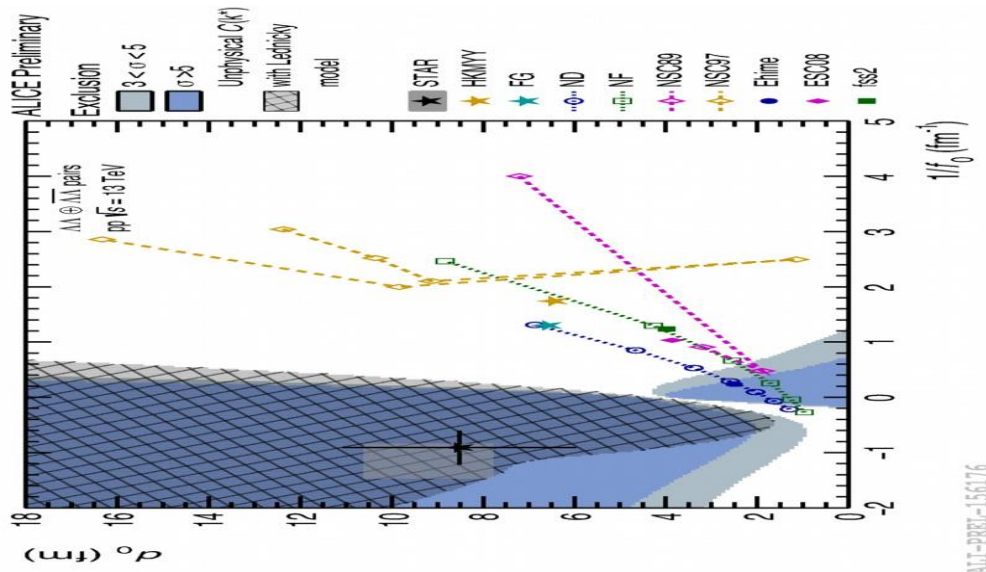
- $d\pi^-$ の不変質量
— $\Lambda n \rightarrow d + \pi^-$

モデルとの比較

- equilibrium thermal model
- non-equilibrium thermal model
- coalescence predictions



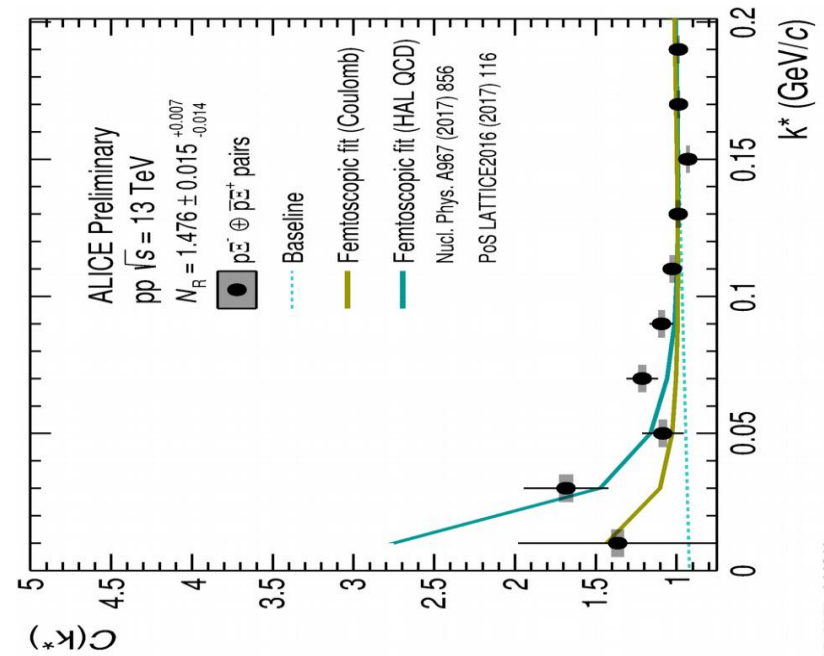
S=-2 Di-Baryon の探索



$\Lambda\Lambda$ 相関 (pp衝突の結果)

ALICE Coll.; arxiv 1805.12455

$\Lambda\Lambda$ 相関関数が非常にフラットな構造を持つため、散乱の二つのパラメータを小さな不定性で決定出来ていない。



$p\bar{p}$ 相関 (pp衝突の結果)

ALICE preliminary

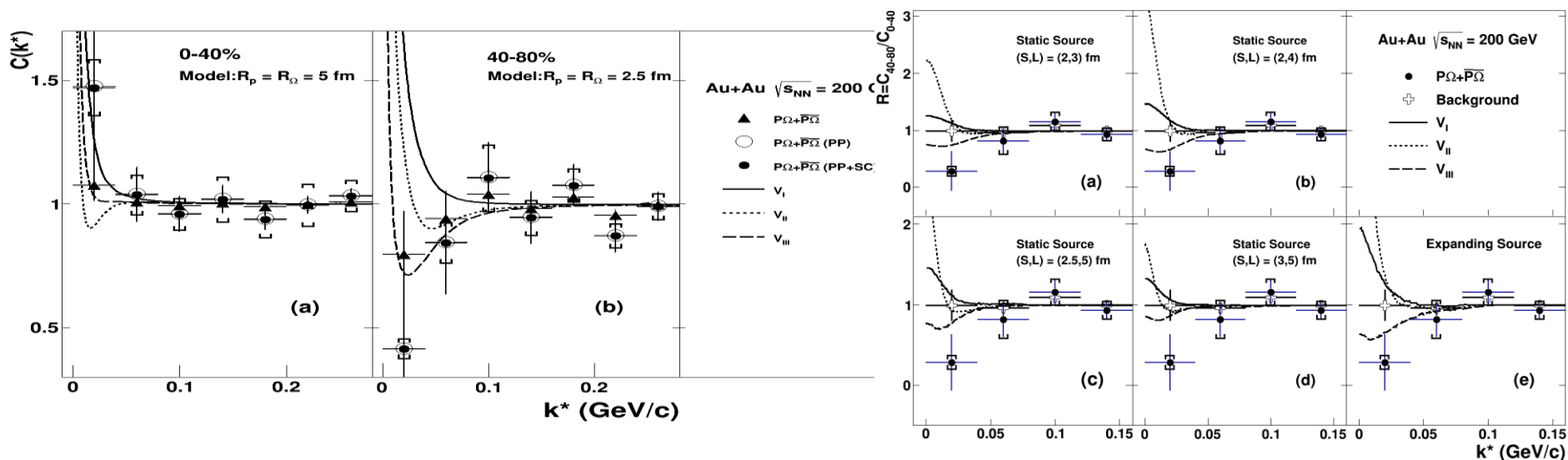
$p\bar{p}$ 相関関数をふた通りの計算と比較

HAL QCD

Coulomb-only

p-Ω 相関

- $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeVの金・金衝突で、p-Ω 相関
 - STAR Coll.: arXiv:1808.02511 [hep-ex]
- 相関のパターンは、重イオン衝突の衝突中心度によって異なる → 比を取ることでその他の効果を低減できる
 - K. Morita, A. Ohnishi, F. Etminan and T. Hatsuda, PRC 94, 031901(R) (2016)
- 測定された比: $k^* < 40$ MeV/c で1より小 → 散乱長は正 → p-Ω 束縛状態を示唆
- 定量的な結論には高統計データが必要 → LHC RUN3に期待

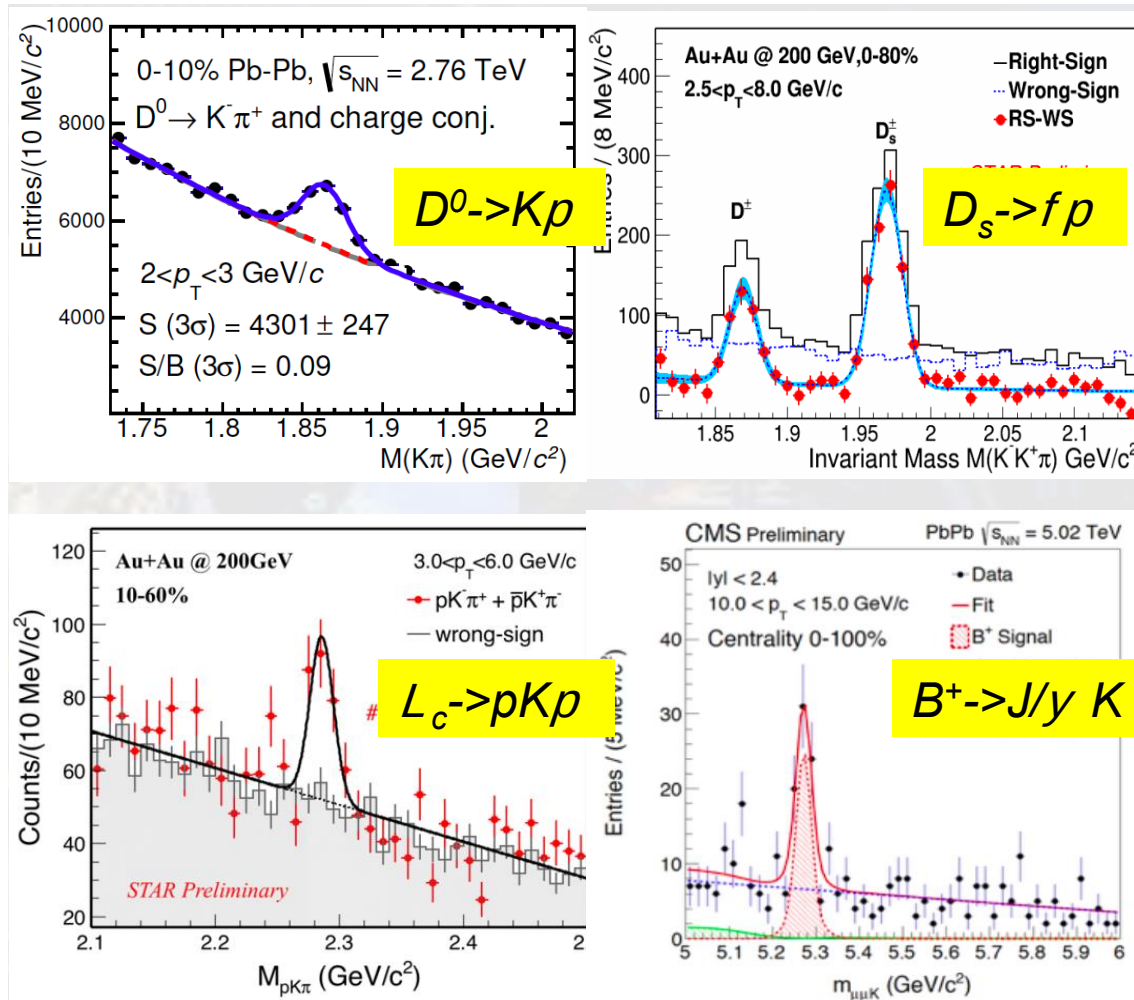


ショッピングリスト

ストレンジ数	組み合わせ	現状	LHC RUN3 予想
1	$N+\Lambda$ ($N+\Sigma$)	Δ Au+Au 200GeV (STAR) p+Nb 3.2GeV (HADES) p+p 7TeV, 13TeV (ALICE)	$\bigcirc$
2	$\Lambda+\Lambda$ ($\Lambda+\Sigma$, $\Sigma+\Sigma$)	Δ Au+Au 200GeV (STAR) p+p 7TeV, 13TeV (ALICE)	$\bigcirc$
2	$N+\Xi$	Δ p+p 13TeV (ALICE)	$\bigcirc$
3	$N+\Omega$	Δ Au+Au 200GeV (STAR)	$\circ$
3	$\Lambda+\Xi$ ($\Sigma+\Xi$)	$\times$	$\bigcirc$
4	$\Xi+\Xi$	$\times$	$\bigcirc$
5	$\Xi+\Omega$	$\times$	$\bigcirc$
6	$\Omega+\Omega$	$\times$	$\bigcirc$

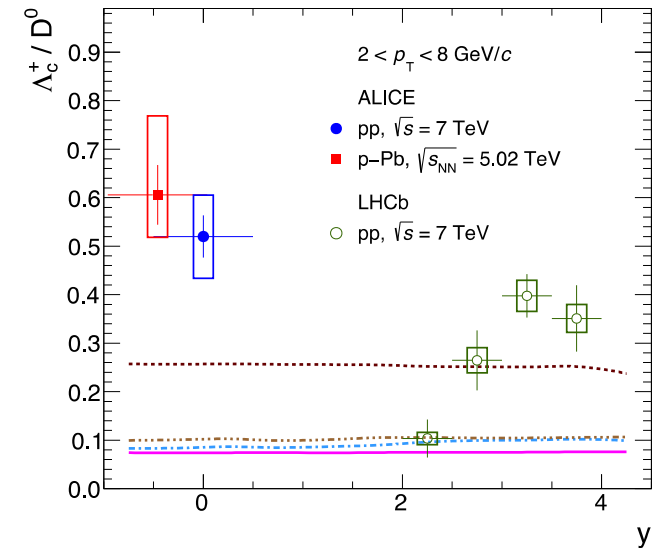
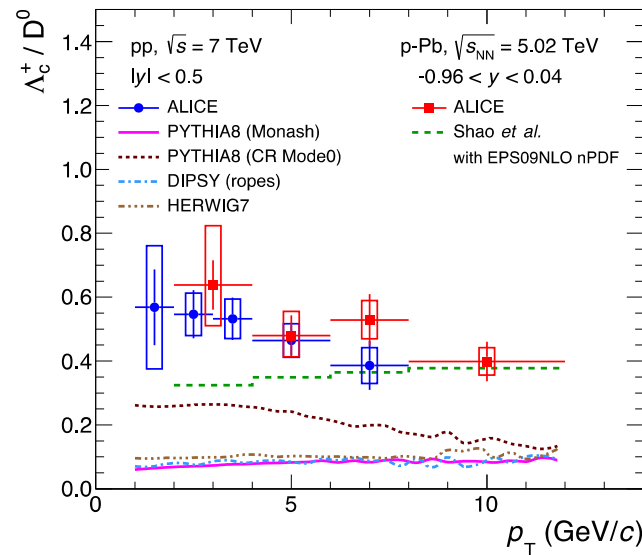
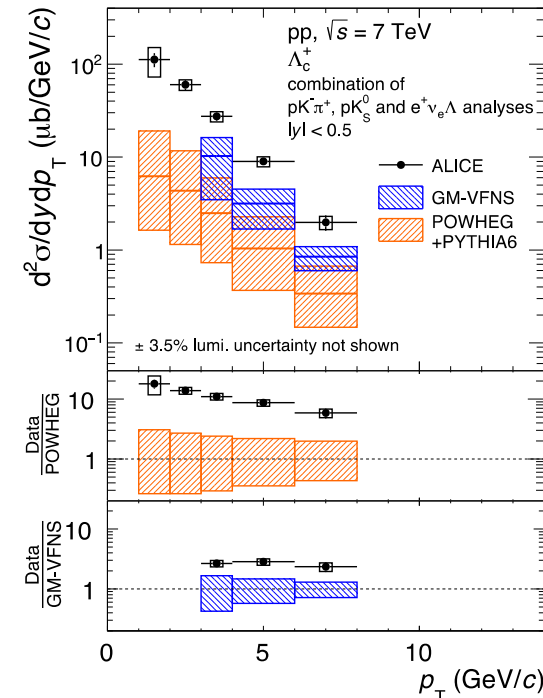
チャーム、ボトム (HEAVY FLAVOUR) を含むハドロン

重いクォークを含むハドロンの測定



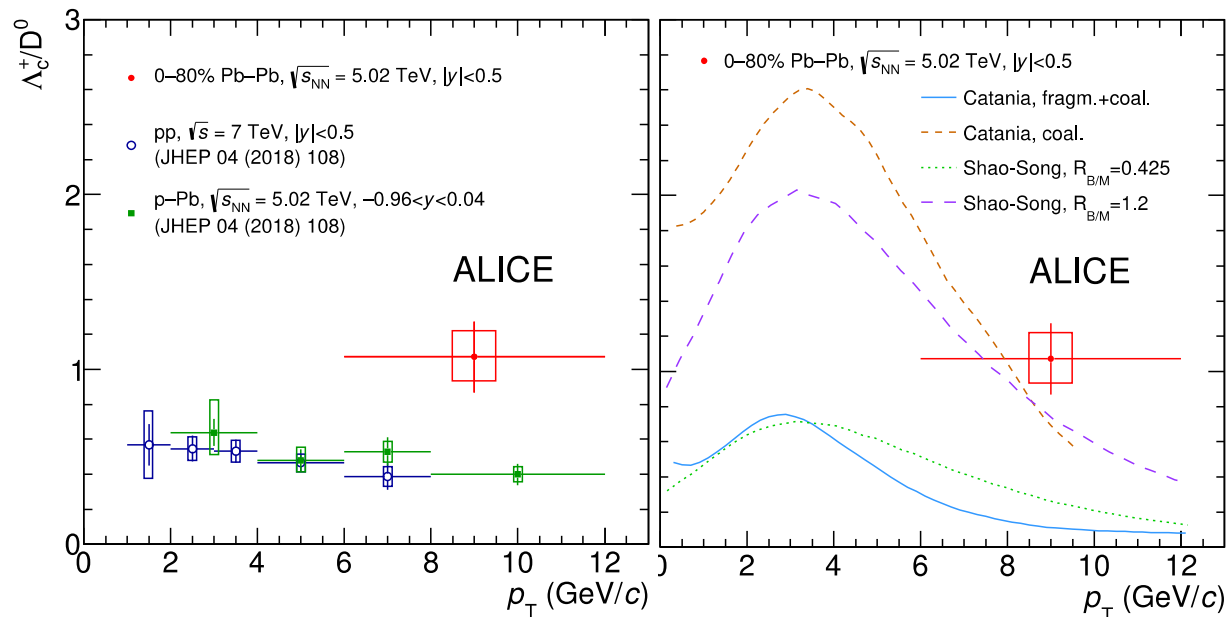
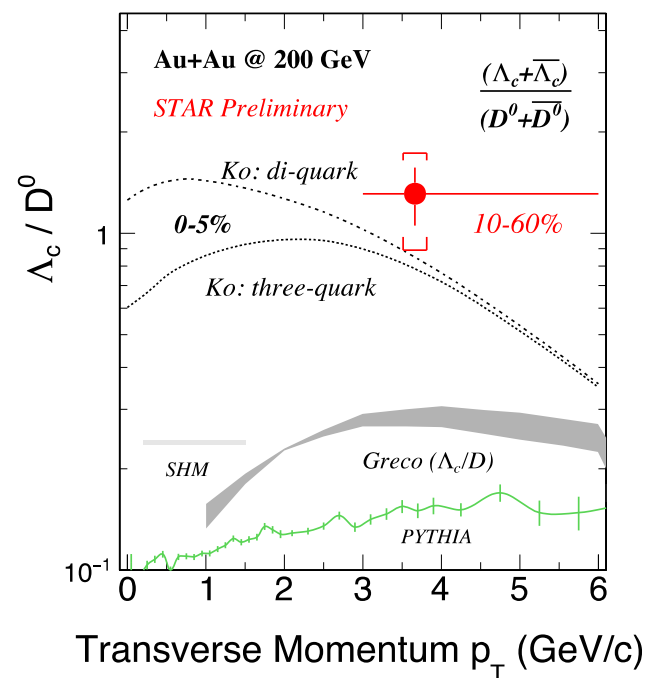
pp、pPb 衝突における Λ_c^+ 測定

- 模型は Λ_c^+ p_T スペクトル実験結果を下回る。D⁰ については良い一致
- Λ_c^+/D^0 : いくつかもモデル計算との比較。LHCb のpp での測定結果も表示。モデル計算はラピディティ依存性無し。



重イオン衝突における Λ_c^+ 測定

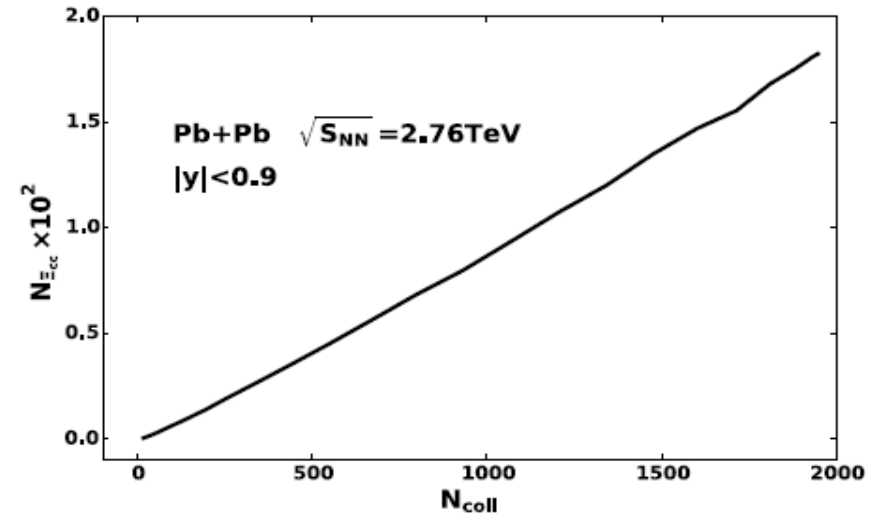
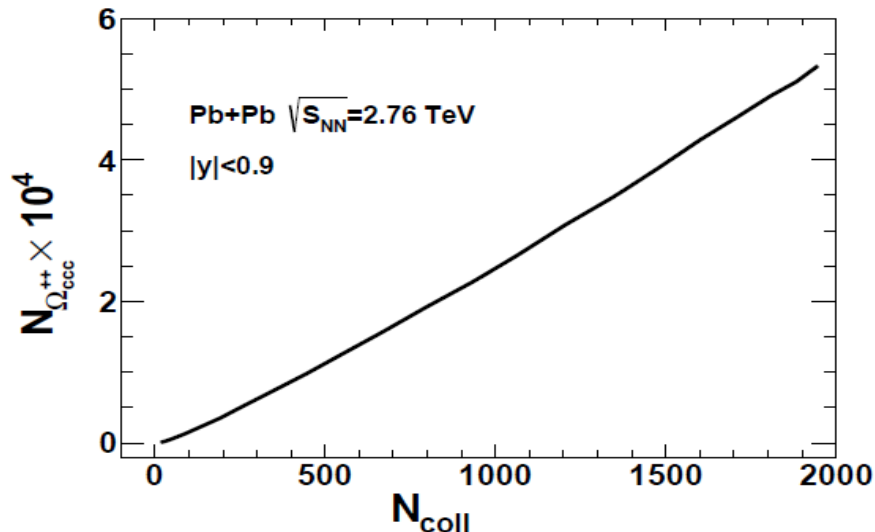
- STARとALICEで重イオン衝突での Λ_c^+ 、 D^0 の測定
- PbPb の Λ_c^+/D^0 は pp、pPb と比べて大きな値
- クォークコアレスセンスから大きな寄与がありそう
- di-quark の情報を得るには low p_T の測定が必要



Ξ_{cc} と Ω_{ccc}

- Ω_{ccc} と Ξ_{cc} の p-p 衝突での生成断面積は小さい
 - $\sigma(\Xi_{cc}) \sim 10 \text{ nb}$ at 1.8 TeV; $\sigma(\Omega_{ccc}) = 0.06 - 0.13 \text{ nb}$ at 7 TeV
- 重イオン衝突ではコアレスセンス過程が重要
 - $N(\Xi_{cc}) \propto N_c^2$, $N(\Omega_{ccc}) \propto N_c^3$; $N_c \sim 100$ ($N_b = 3 \sim 4$) at LHC
- Pb-Pb衝突での予想 (? to be confirmed)
 - $N(\Xi_{cc}) \sim 10^{-2}$ per central Pb+Pb collision
 - $N(\Omega_{ccc}) \sim 3 \times 10^{-4}$ per central Pb+Pb collision

by Pengfei Zhuang



まとめと展望

まとめと展望

(まとめ)

- ハドロン収量をよく再現する化学的凍結(統計力学的ハドロン化)模型
- 原子核、ハイパー核測定 of 現状、LHC RUN3 での可能性
- ダイバリオン測定 of 現状
- チャームを含むバリオン測定 of 現状

(展望)

- LHC RUN3 で、高統計データを用いた研究が可能
- スレンジバリオン: 二粒子相関、ダイバリオン: $\Omega\Omega$ 、 $\Xi\Omega$ 、 $\Xi\Xi$ 、
□
- チャーム、ボトム (Heavy Flavor) : ハドロン収量、二粒子相関 ($D-D$ 、 Λ_c-N)、ダイバリオン、原子核