

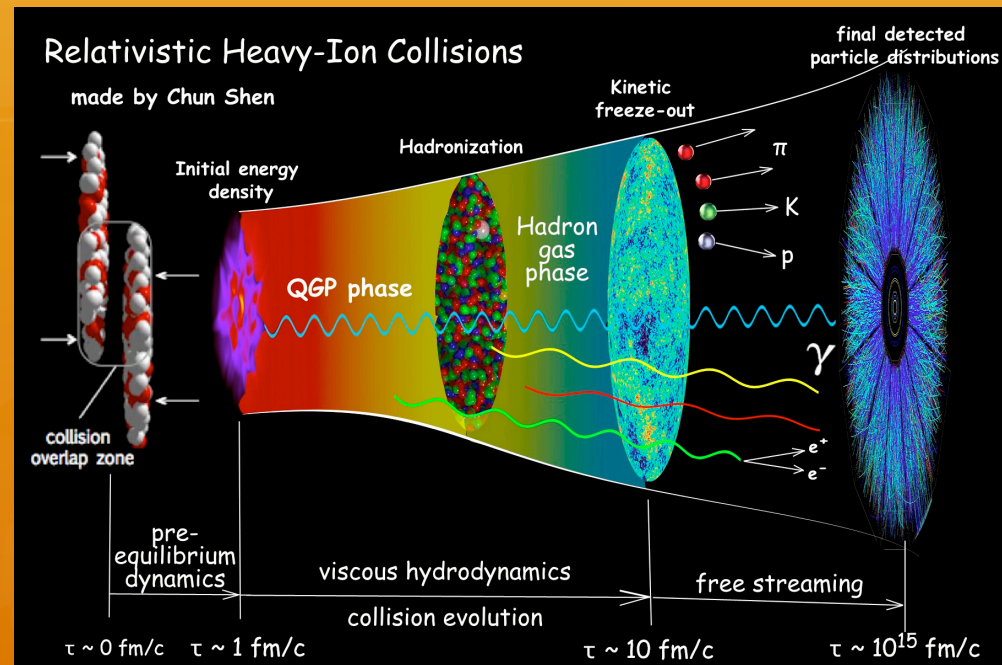
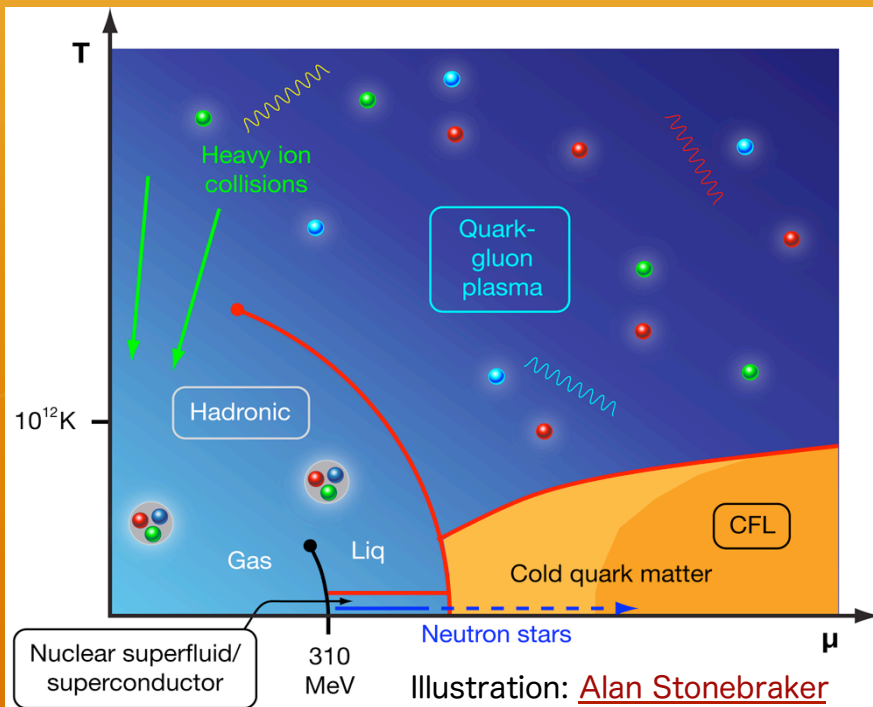
高エネルギー重イオン 衝突の今後の展望

郡司 卓

東京大学大学院理学系研究科
原子核科学研究センター

高エネルギー重イオン衝突の目的

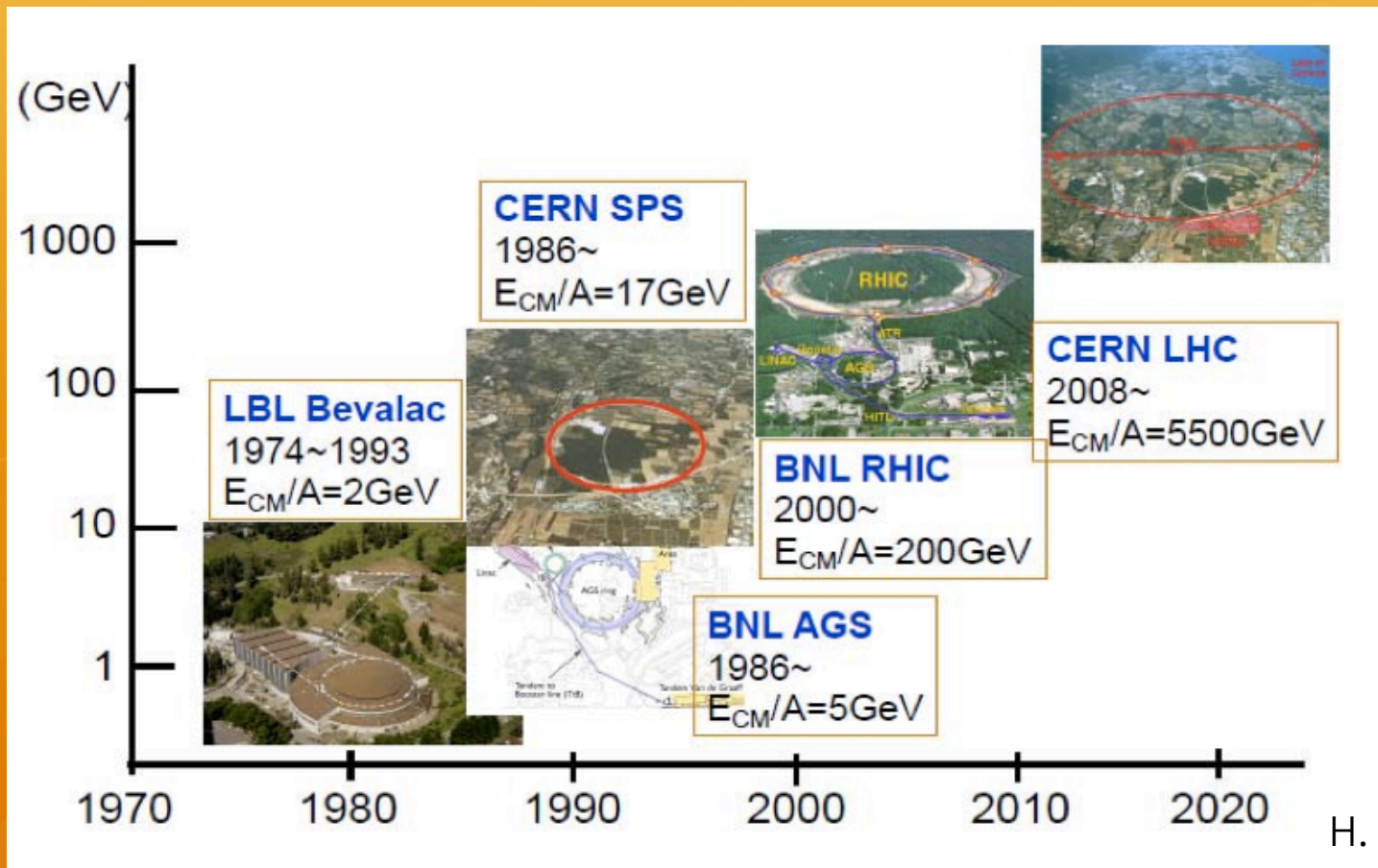
- ❁ クォーク物質の物性研究(EOS, 輸送特性)
- ❁ QCD相構造の解明(臨界点, 相転移)
- ❁ 非摂動的QCDの性質解明 (閉じ込め、カイラル対称性の回復現象、質量獲得機構)
- ❁ 高強度グルーオン場の動力学と熱化の解明. 時空発展の理解



重イオン衝突の歴史

❁ 重イオン加速器の歴史

- ❁ ここ30年で、 10^3 の衝突エネルギーの増加
- ❁ RHIC(2000-), LHC(2010-)が現在の研究センター



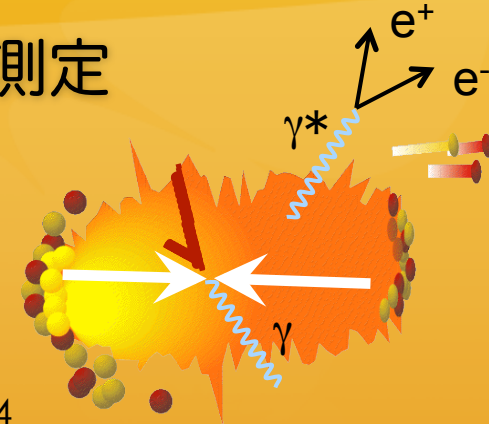
高エネルギー重イオン 衝突の現在

最近の主な成果

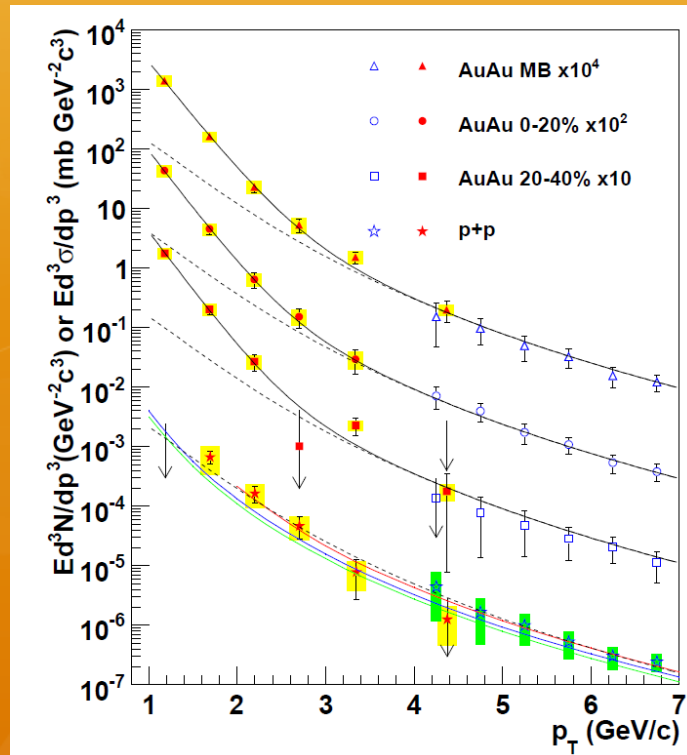
- ・ 熱的光子と平均温度
- ・ 集団運動(フロー)と比粘性
- ・ 高運動量粒子の収量抑制と阻止能
- ・ クォークoniumとカラー遮蔽
- ・ レプトン対測定

平均温度の測定

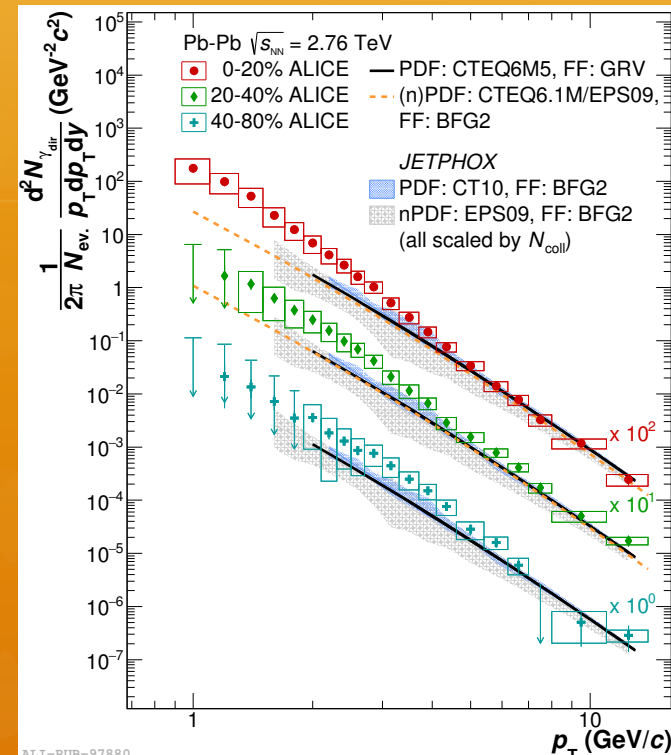
- ❁ クォーク・ハドロン物質からの光子の測定
 - ❁ 仮想光子崩壊電子対(RHIC-PHENIX)
 - ❁ 光子の外部変換(LHC-ALICE)
 - ❁ $T_{\text{eff}} = 304\text{MeV}$ (LHC), 240MeV (RHIC)



PHENIX, Phys. Rev. Lett. 104, 132301



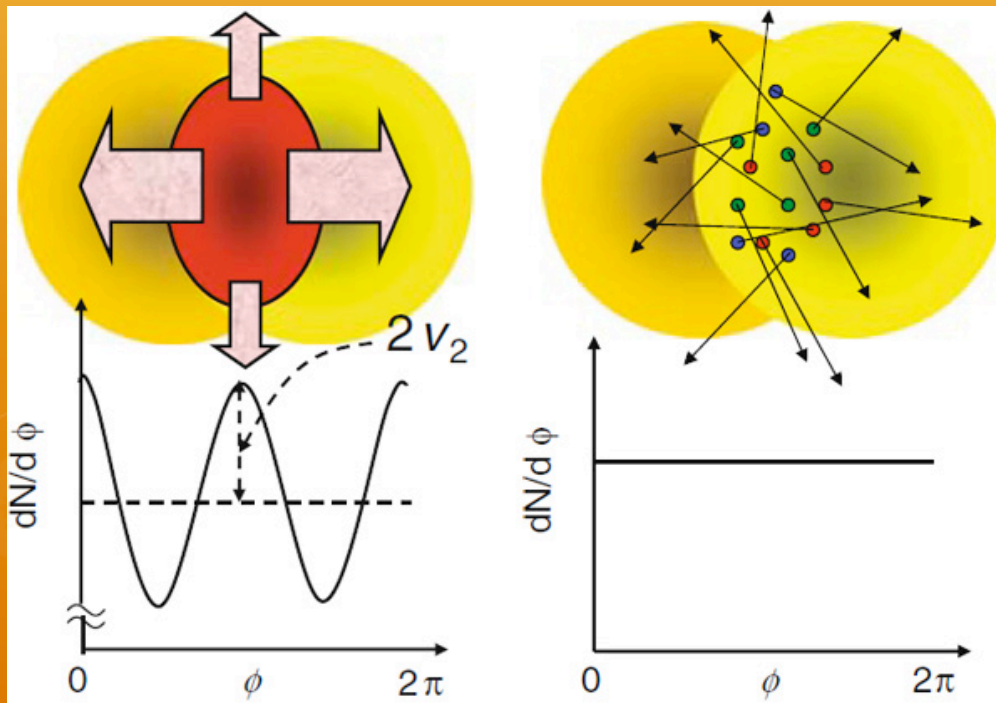
ALICE, ArXiv:1509.07324



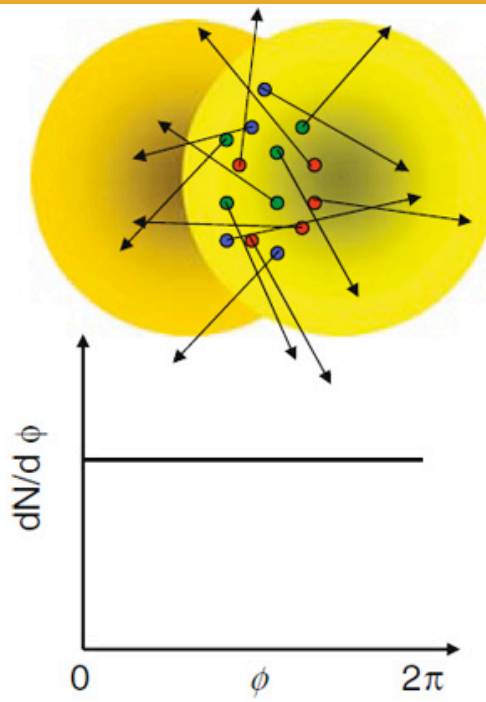
楕円フローと流体模型

- ❁ 楕円フロー＝運動量の非等方性
 - ❁ 初期の空間異方性＋熱平衡化と圧力勾配(粒子間相互作用)により生成
 - ❁ 理想流体計算とほぼ一致→強結合クォーク物質

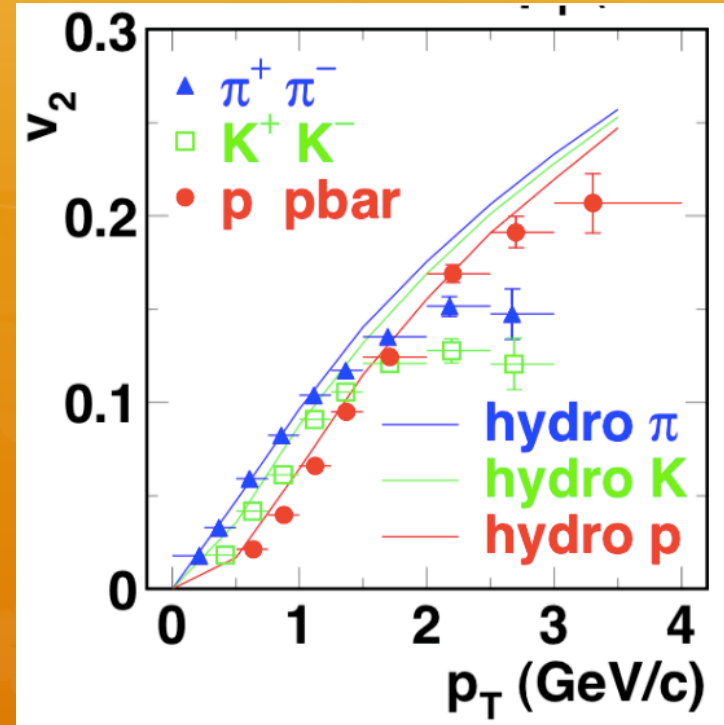
強結合 ($\lambda = 0$)



弱結合 ($\lambda = \infty$)



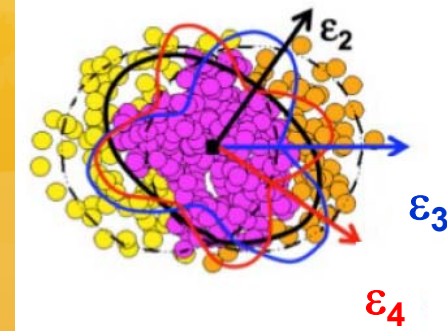
PHENIX, Phys. Rev. Lett. 91, 182301



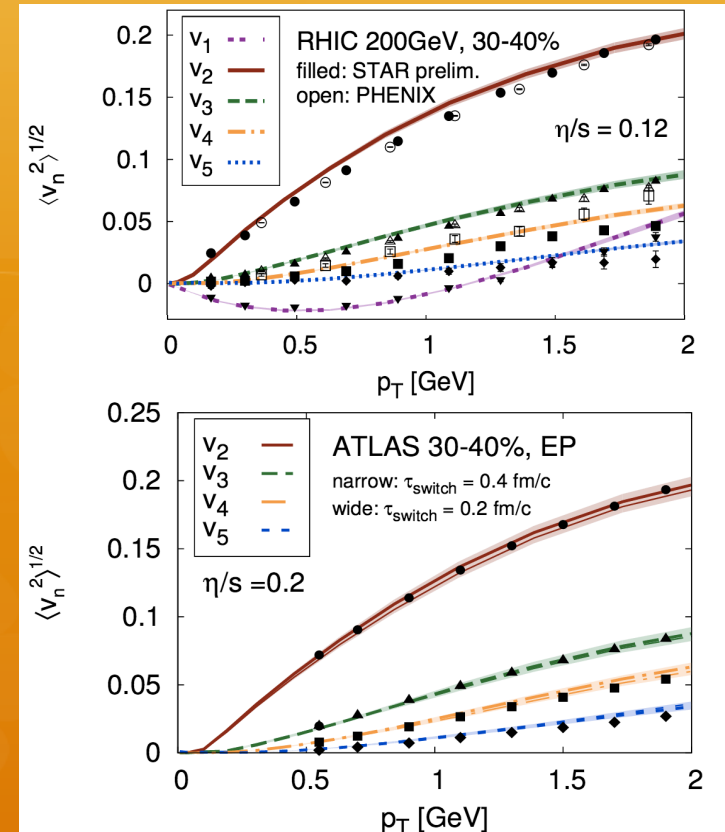
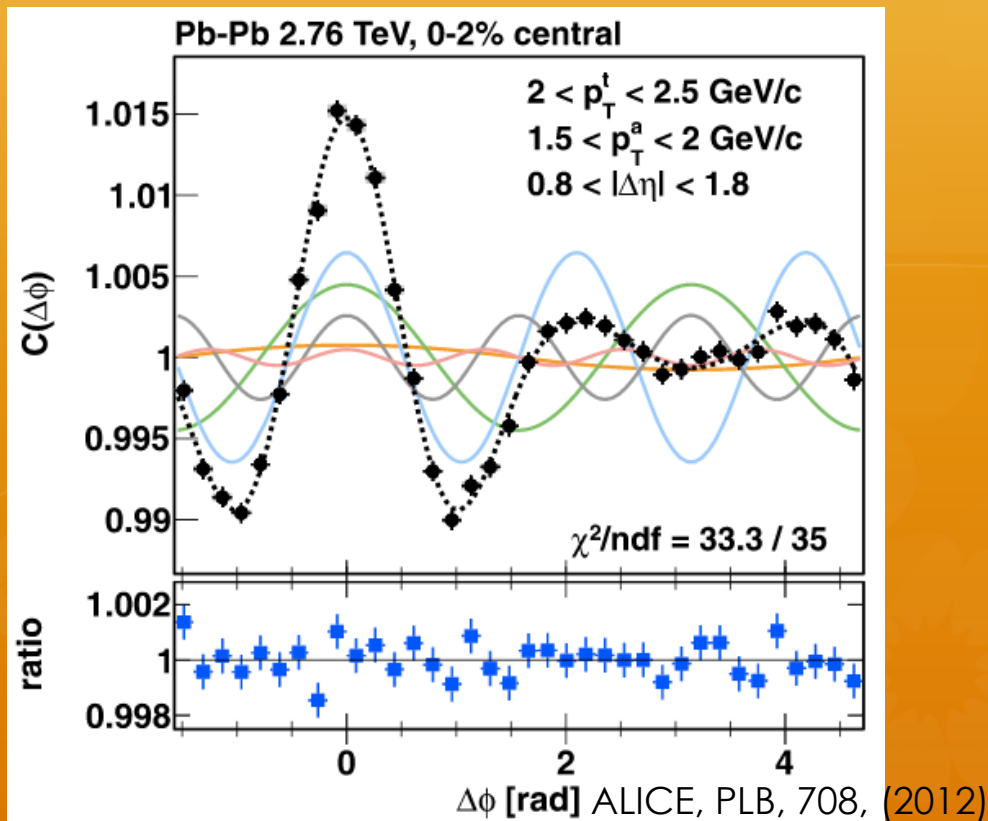
高次フローの測定

✿ 衝突形状の高次の揺らぎ

- ✿ フローの高次成分となって現れる
- ✿ Dumping factor $v_n \propto \exp(-\beta n^2)$, $\beta \propto \eta/s$
- ✿ $\eta/s = 0.12$ at RHIC, 0.2 at LHC

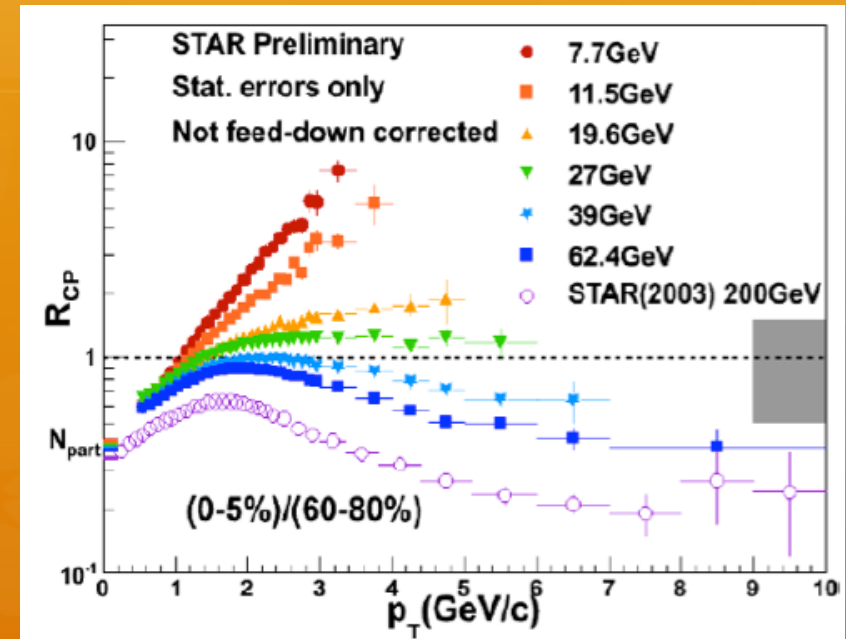
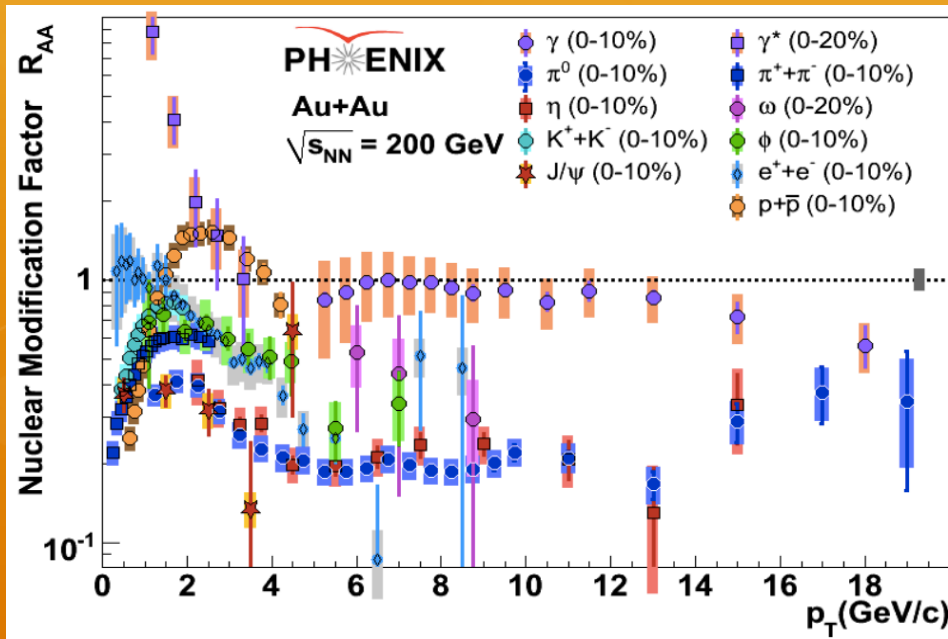
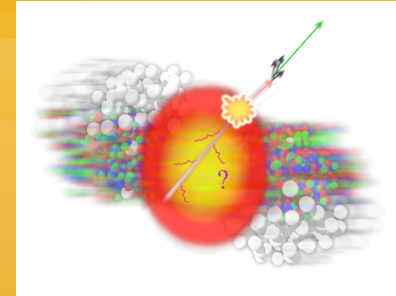


Gale et al. arXiv:1209.6330



高運動量パートンのエネルギー損失

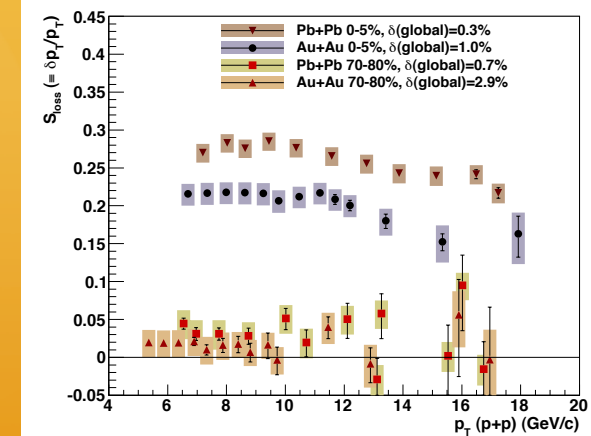
- ❁ クォーク物質中でのエネルギー損失
 - ❁ ハード過程起源の光子には見られない
 - ❁ 強結合クォーク物質
 - ❁ エネルギー損失のPath Length ($\propto L^3$)依存性
 - ❁ 重クォークのエネルギー損失(ブラウン運動)
- ❁ $\sqrt{s_{NN}} < 30\text{GeV}$ では、 $R_{cp} > 1$



ジェットの直接測定

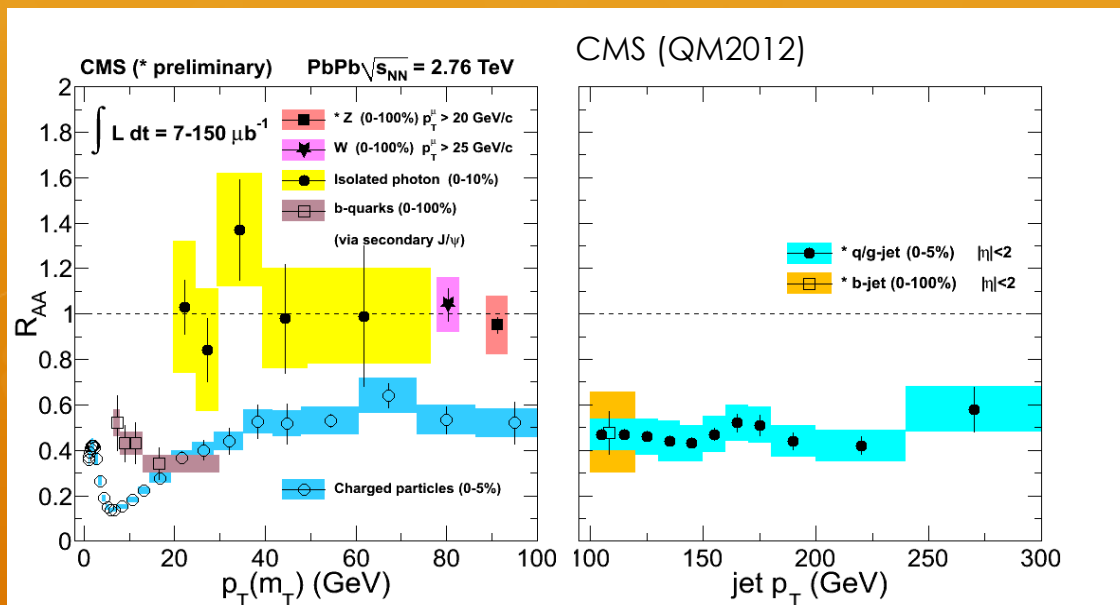
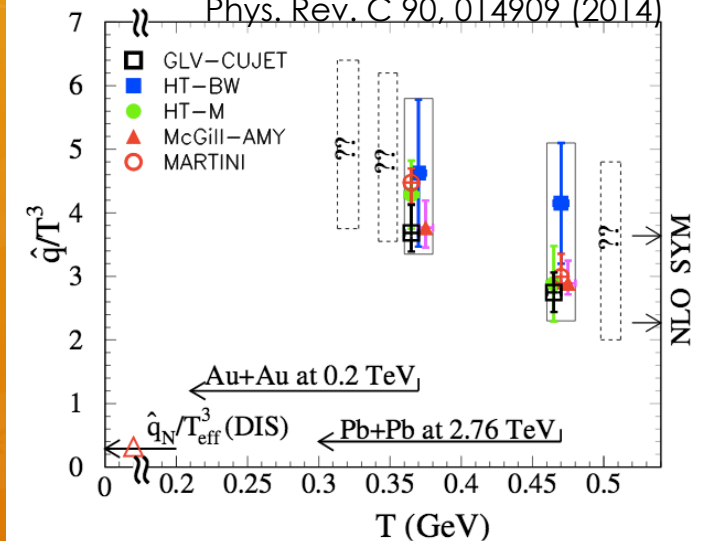
- ✿ パートンのエネルギー損失の直接測定
- ✿ Δp_T や阻止能の評価
- ✿ 失われたエネルギーの振舞
 - ✿ 大立体角の低運動量粒子生成
 - ✿ エネルギーの伝搬(EOS)

PHENIX, Phys. Rev. C 87, 034911 (2013)



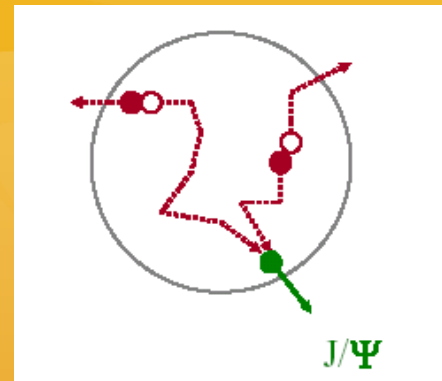
M. Burke et al.

Phys. Rev. C 90, 014909 (2014)

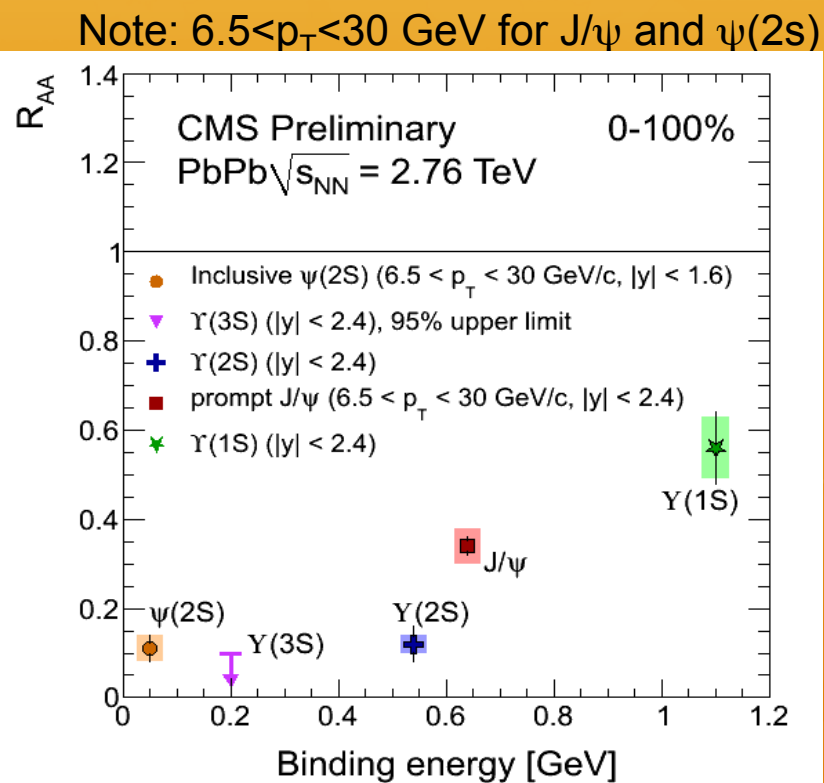
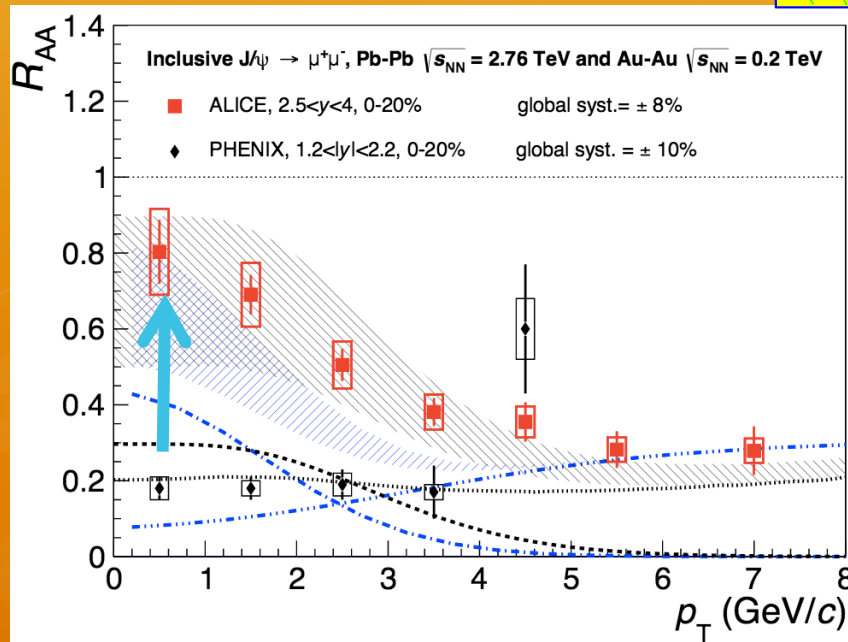
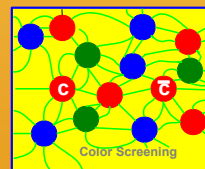


J/ψの収量増大とΥの抑制

- ✿ LHCでは低運動量J/ψの収量の増大
 - ✿ 無相関なccbarの再結合
- ✿ ψ, Υの溶解
 - ✿ 束縛エネルギーに準じた抑制量
 - ✿ カラー遮蔽効果



ALICE, arXiv:1506.08804

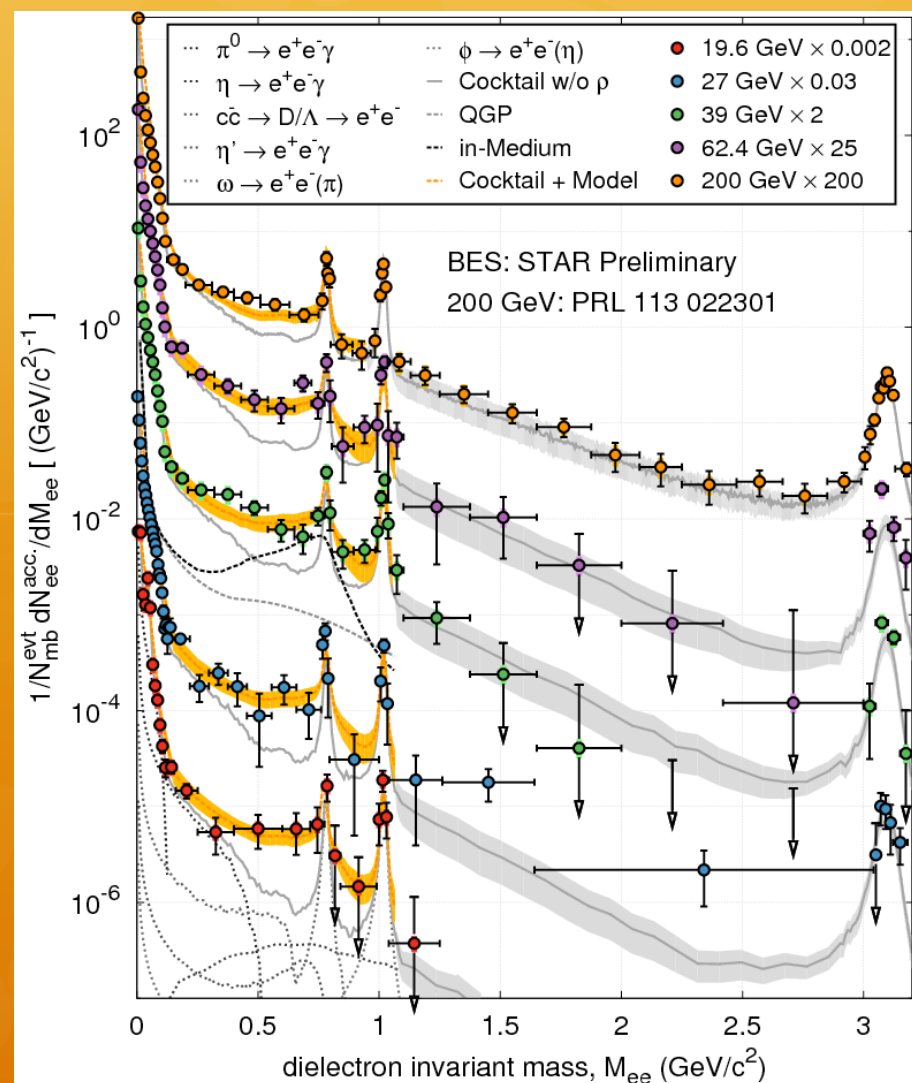
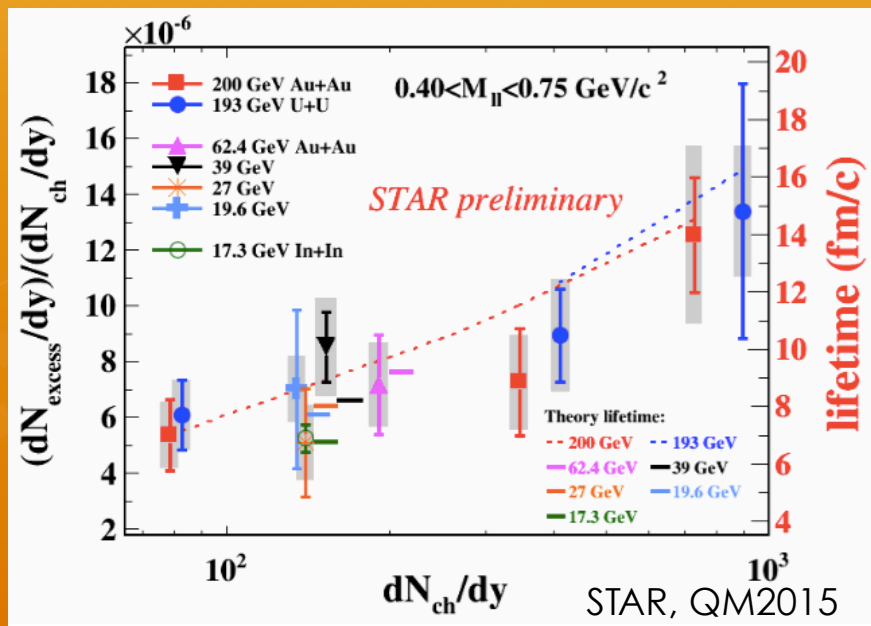


レプトン対

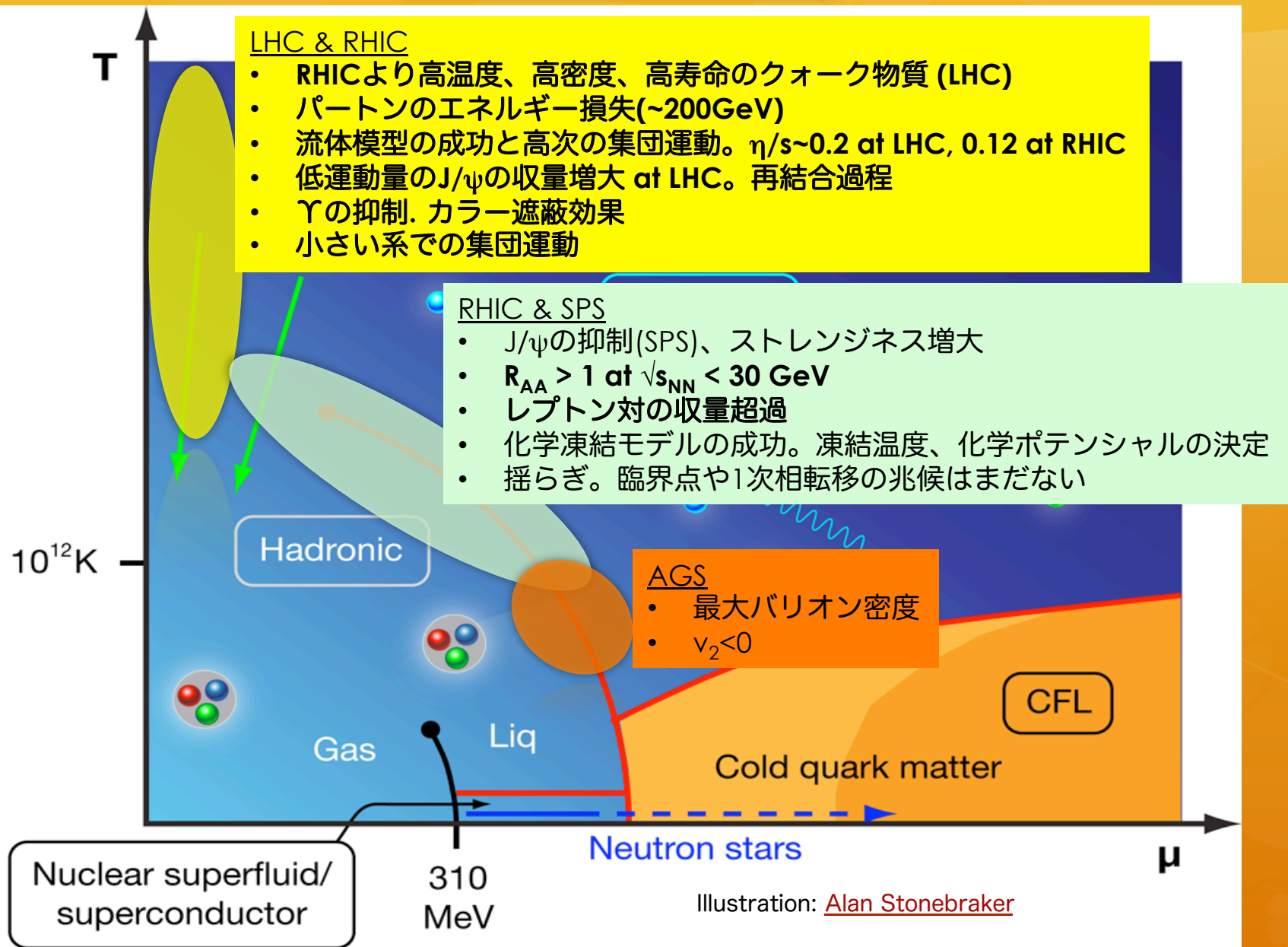
✿ $\sqrt{s_{NN}} = 19.6 - 200 \text{ GeV}$ (STAR実験)

✿ SPSと同様にRHIC
でも、IMRに超過収量
✿ ρ のbroadeningと
無矛盾

Lifetime (QGP+HD)



簡単なまとめ



高エネルギー重イオン の今後

今後の計画

LHC-ALICE実験高度化

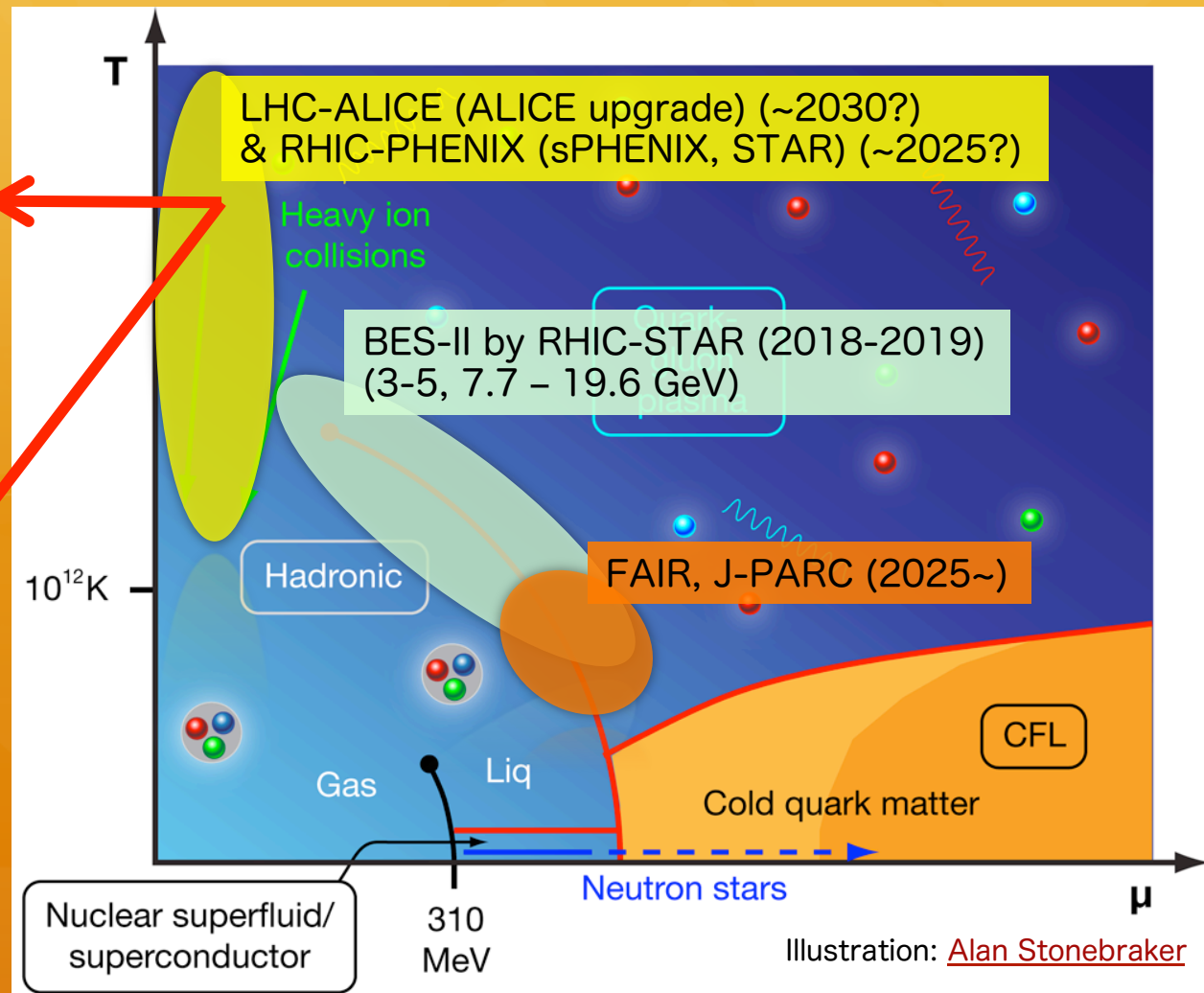
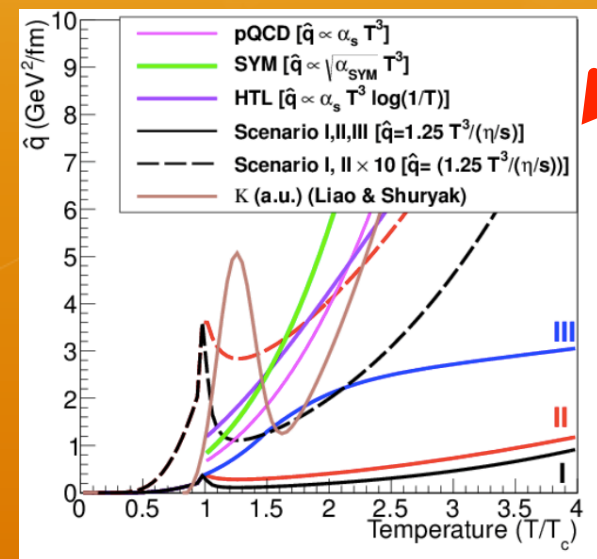
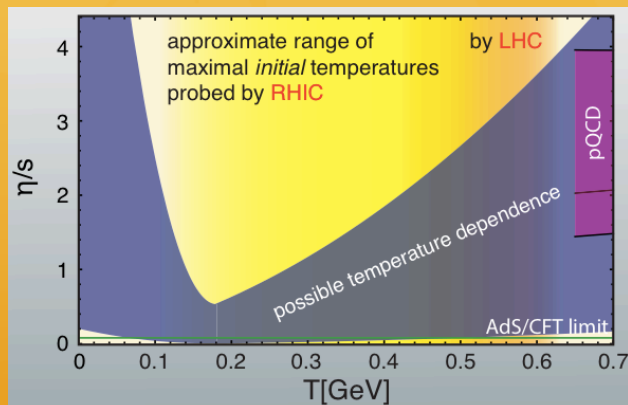
RHICの今後(sPHENIX実験, BES-II at STAR実験)

J-PARCでの重イオン物理

他分野とのクロスオーバー

今後の計画

✿ クォーク物質やQCD相図の精密研究



ALICE upgrade (2021~)

New Inner Tracking System (ITS)

- improved pointing precision
- less material

Muon Forward Tracker (MFT)

- new Si pixel tracker
- 広島大学

Time Projection Chamber (TPC)

- new GEM technology
- continuous readout
- faster readout electronics
- 東大、長崎総科大

MUON ARM

- continuous readout electronics

Data Acquisition (DAQ)

- New architecture
- online tracking
- data compression
- 長崎総科大、東大
- Tier2 (筑波)

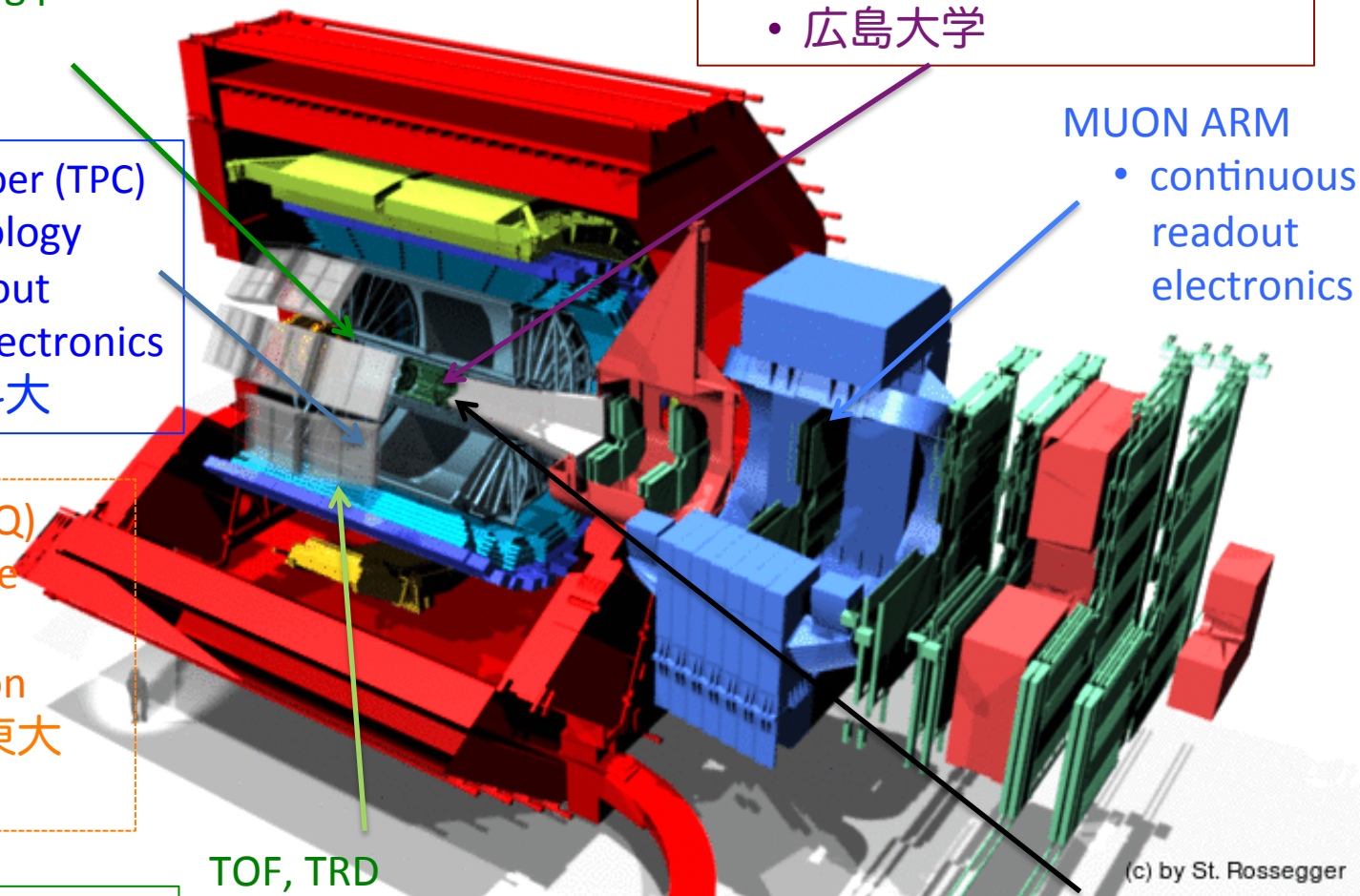
FoCAL (not yet official)

- 筑波

TOF, TRD

- Faster readout

New Trigger Detectors (FIT)



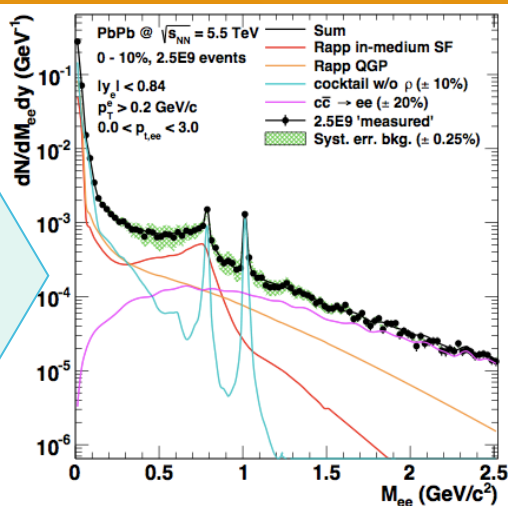
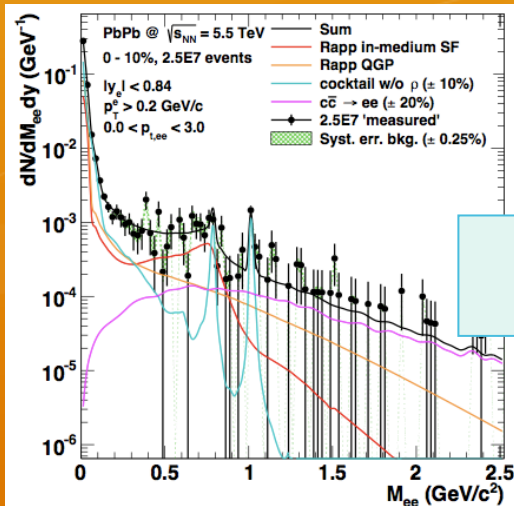
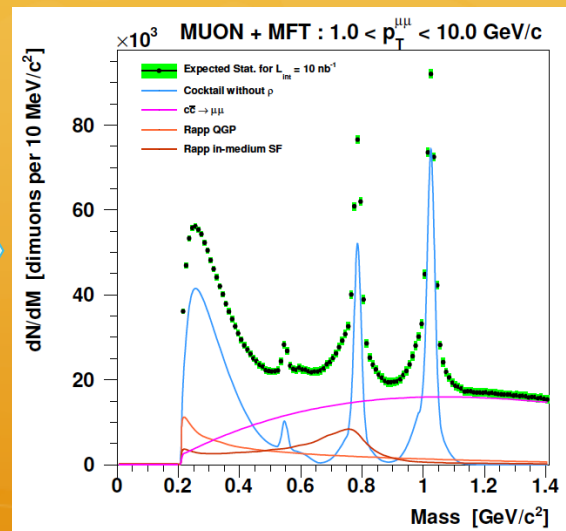
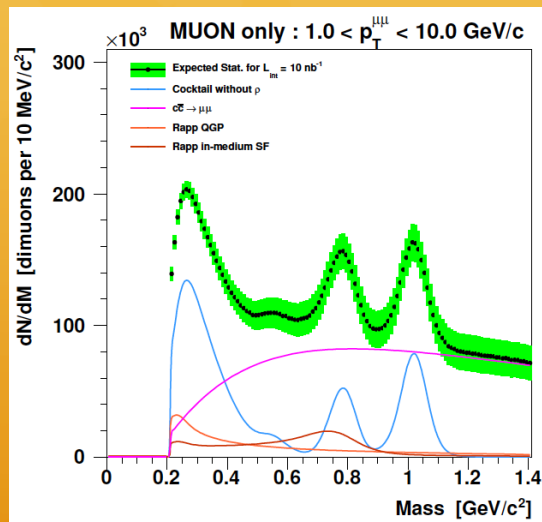
目標：50kHzのPb-Pb衝突を全て記録 (今の100倍)

ALICE after upgrade

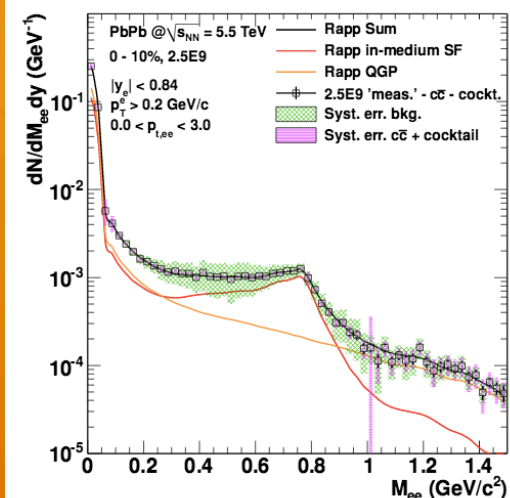
❁ (例) レプトン対測定

MFT upgrade →

ITS+TPC Upgrade
↓



重クォーク
分を引く



ITS & MFT

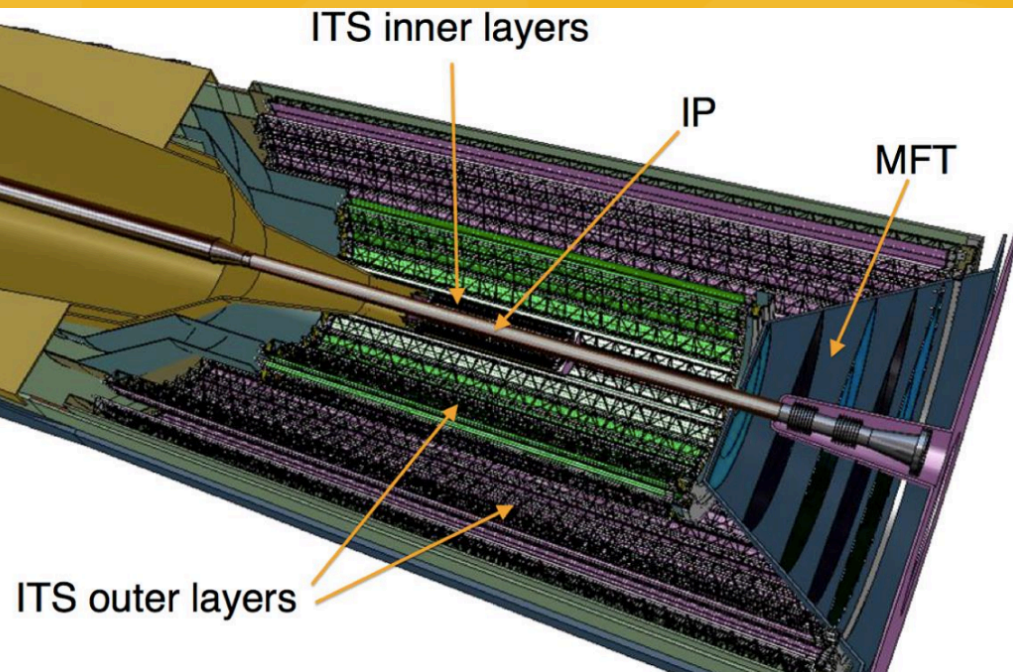
CERN-LHCC-2013-024
CERN-LHCC-2015-001

ITS: 中央領域の7層のシリコンピクセル検出器

- 重クォークの測定精度の向上
- 12.5 Gpxls $28 \times 28 \mu\text{m}^2/\text{pxl}$
- Area: $\sim 10\text{m}^2$,
- Inner: 3 layers ($0.3\%X_0$)
- Outer: 2+2 layers ($1\%X_0$)
- Acc: $|\eta| \leq 1.22$
- Rate $< 100\text{kHz}$
- r coverage: 22 – 430 mm

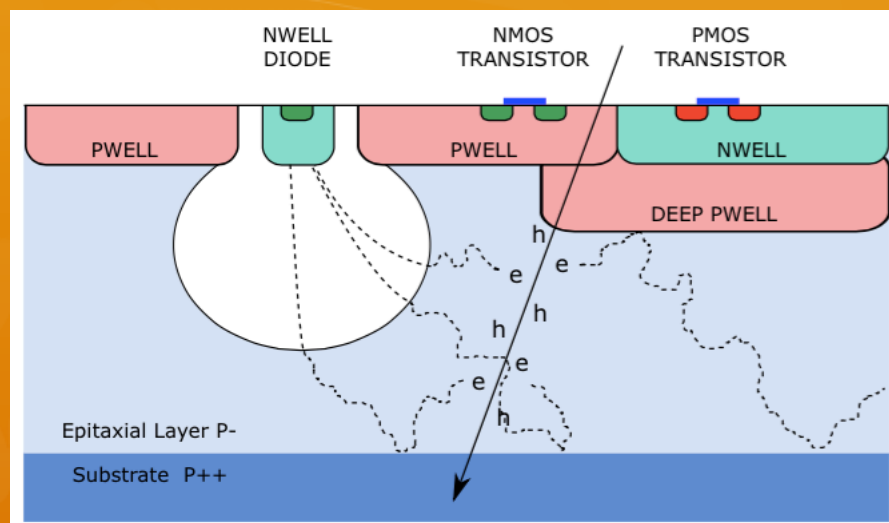
MFT: 前方領域の5層のシリコンピクセル検出器

- ミューオン検出器群の前に導入
- ミューオンの運動量分解能の向上
- 重クォーク測定
- ITSと同じテクノロジー

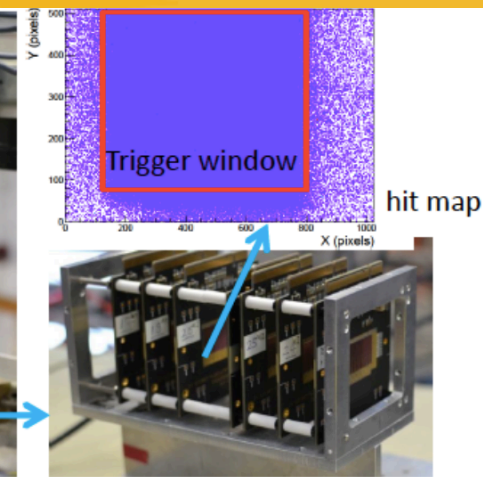
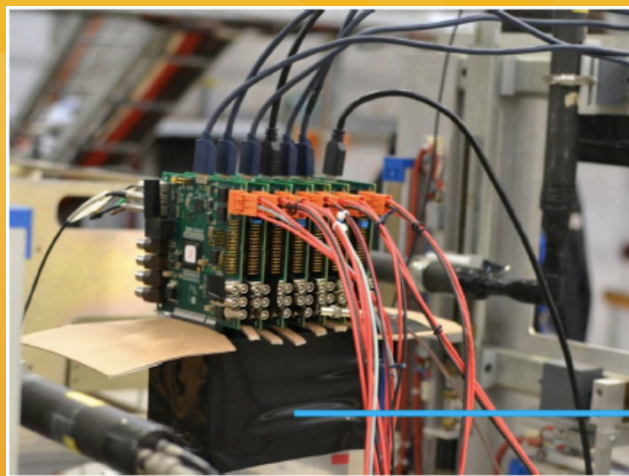
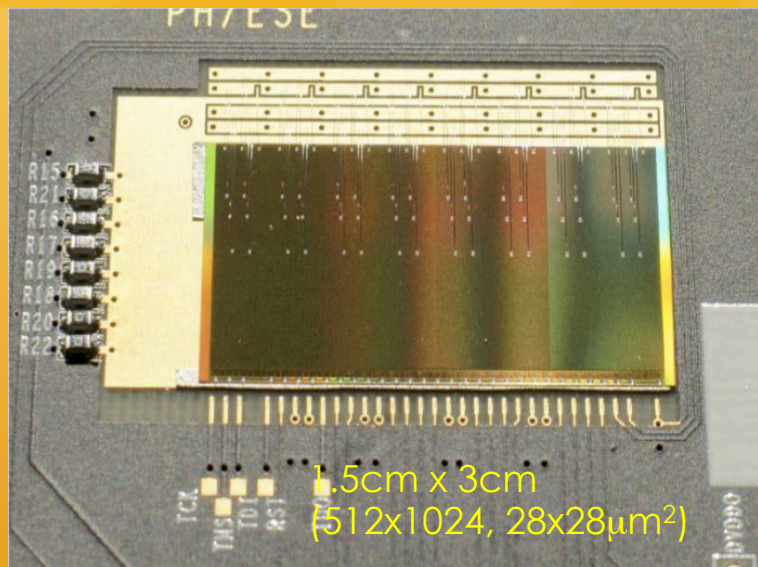


CMOS Pixel Sensor using TowerJazz $0.18\mu\text{m}$ process

- Chip size: 15mm x 30mm
- Pixel pitch $\sim 30 \mu\text{m}$, size $28 \times 28 \mu\text{m}^2$
- Spatial resolution $\sim 5 \mu\text{m}$
- Integration time: $\sim 4 \mu\text{s}$
- Power density : $40 \text{ mW}/\text{cm}^2$
- 20-40 μm thickness high resistivity p-type epitaxial layer
- 2-4 μm small n-well diode

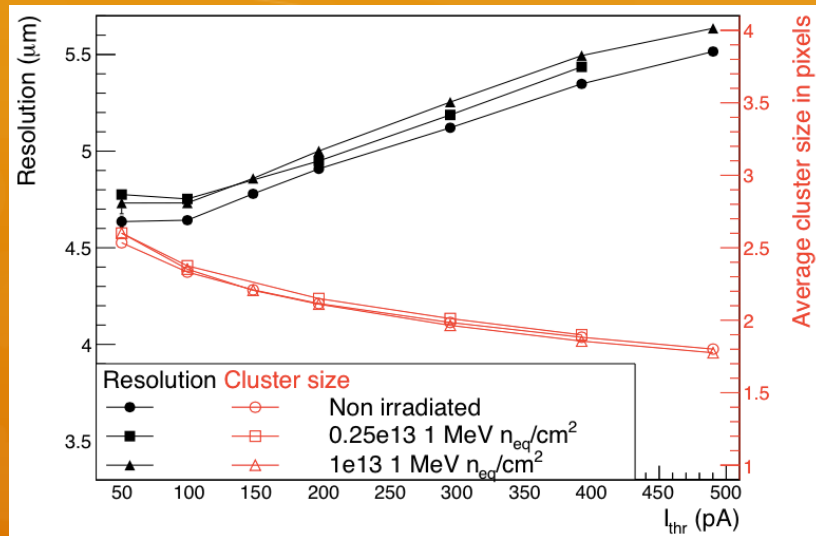
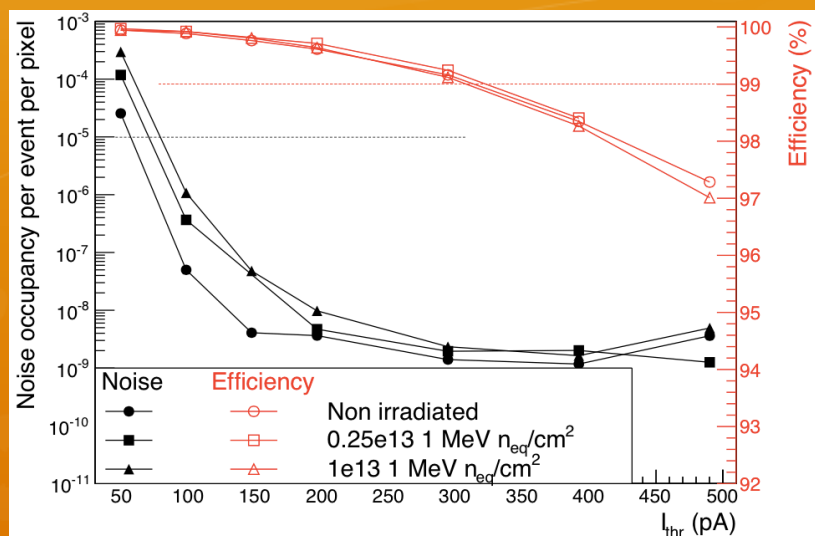


プロトタイプ(ALPIDE)

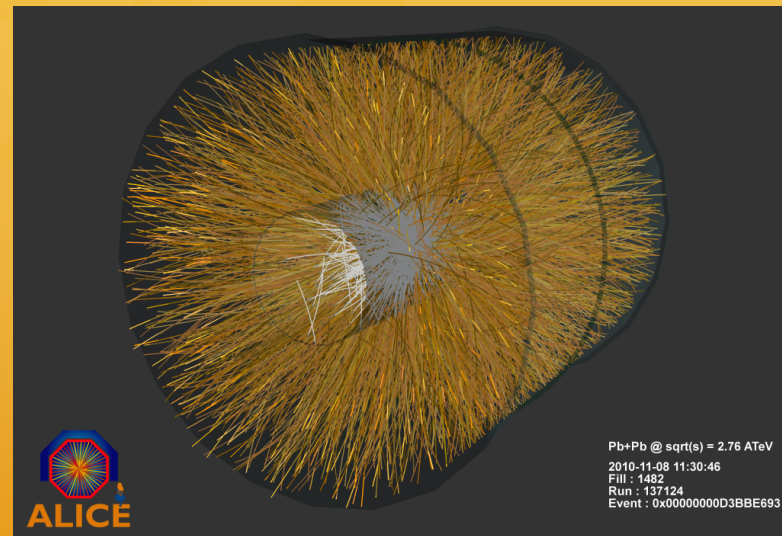
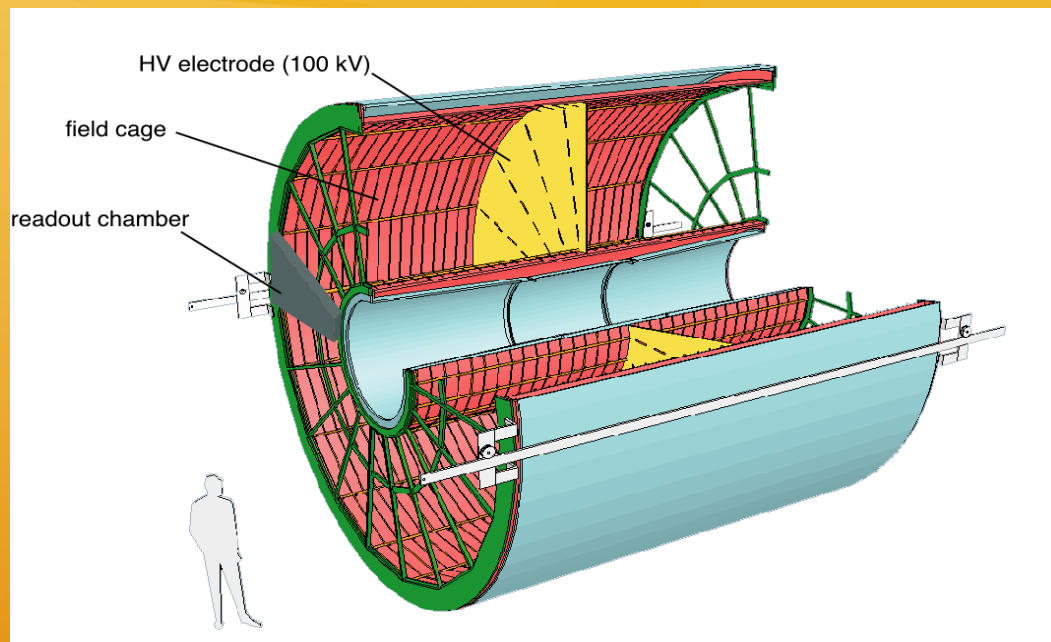


Full scale prototype in 2014 & beam test at PS-CERN

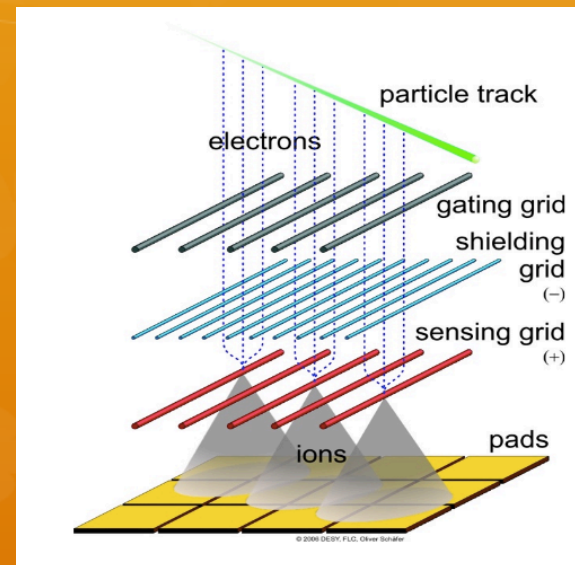
- $\lambda_{\text{fake}} \ll 10^{-5}$ / event/pixel @ $\epsilon_{\text{det}} > 99\%$
- Spatial resolution $\sim 5 \mu\text{m}$



ALICE-TPC

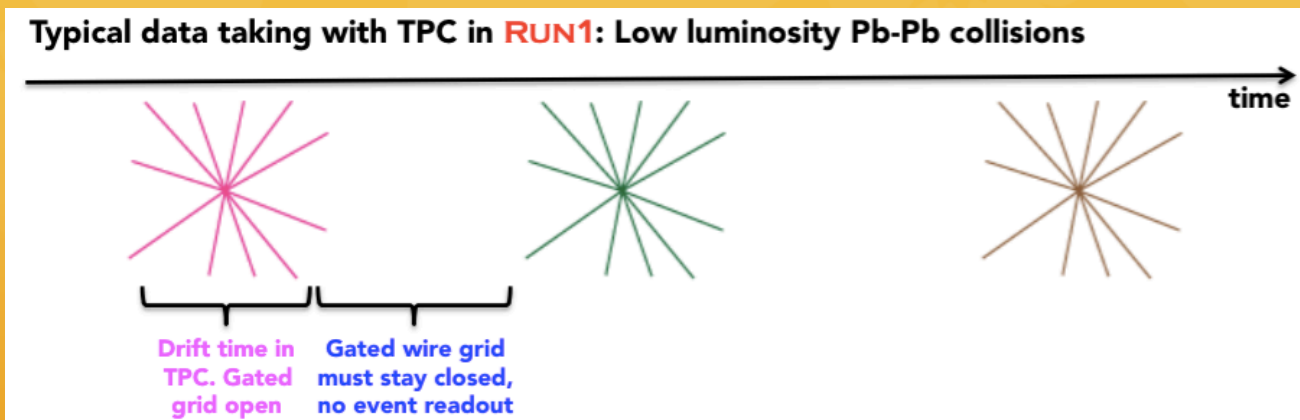


磁場=0.5T (Central barrel)
 体積= $\sim 90\text{m}^3$ (世界で一番大きい)
 ガス= $\text{Ne}/\text{CO}_2/\text{N}_2$ (90/10/5)
 ドリフト電場 = $0.4\text{kV}/\text{cm}$, $94\mu\text{sec}$ drift time
 ゲーティンググリッド ($100\mu\text{sec} + 180\mu\text{sec}$)
 → 最大のレート = 3.5kHz
 72 個のMWPCs から構成。
 557768 の読み出しパッド (大きさ $\sim 4 \times 7.5\text{ mm}^2$)

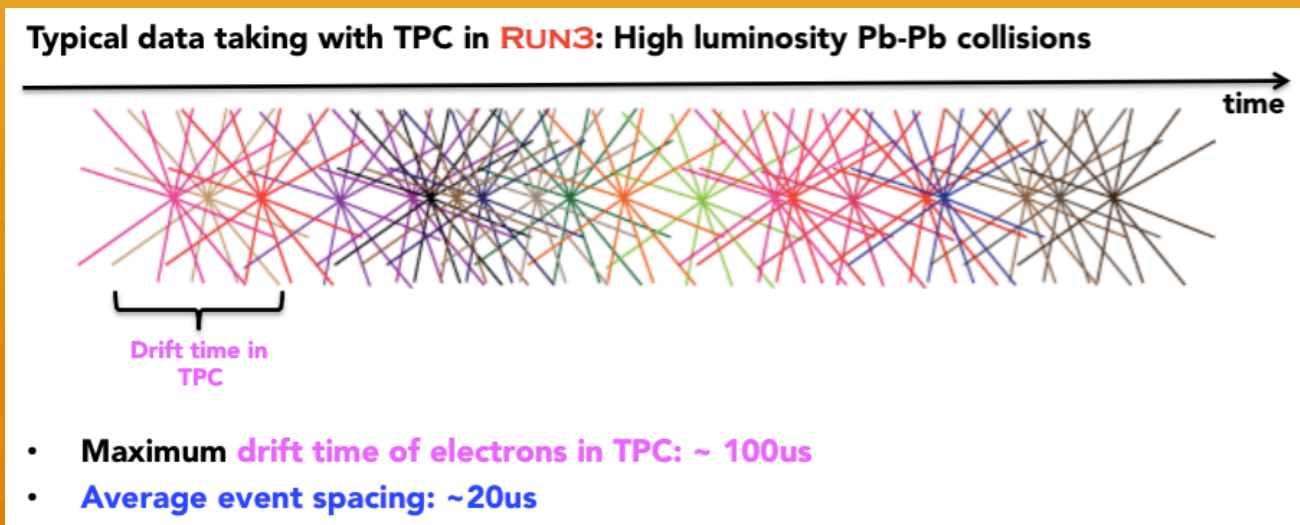


ALICE-TPC operation

現在のTPCのoperation. Pb-Pbの衝突レートは数kHz



2021年以降のTPCのoperation. Pb-Pbの衝突レートは50kHz



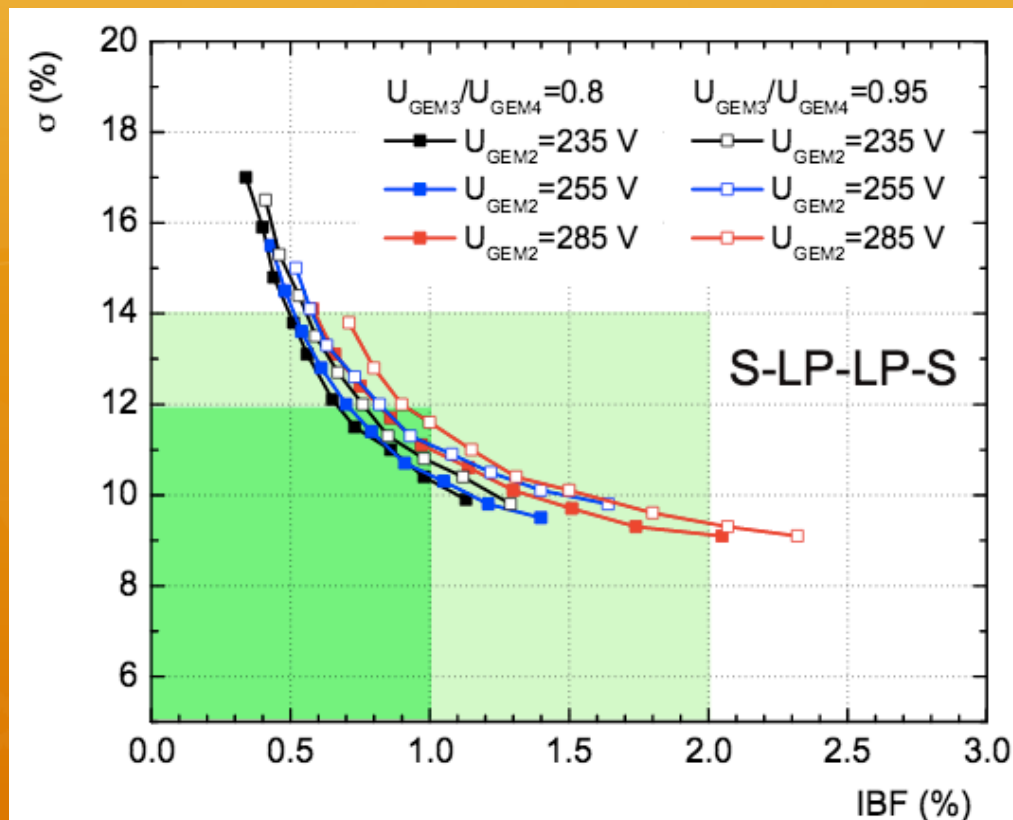
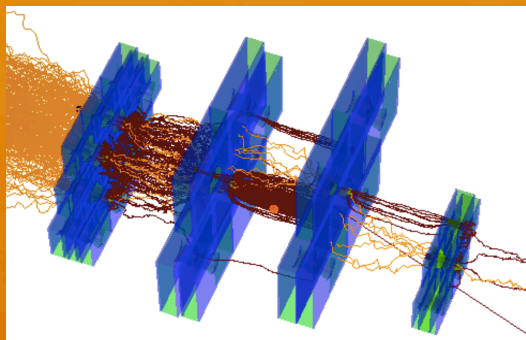
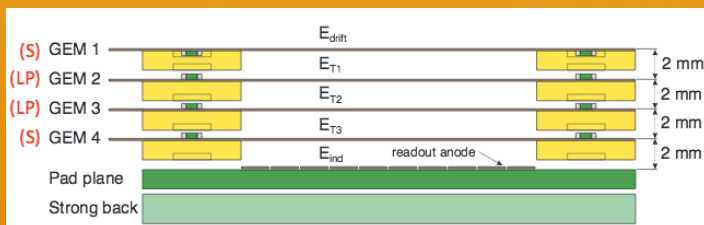
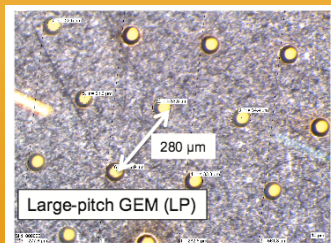
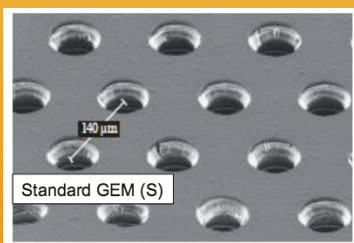
TPCのドリフト時間内に平均で5イベントのパイルアップ

→Gating Gridは使えない。イオンバックフロー(IBF)を別な方法で抑える必要

GEM-TPC Upgrade

CERN-LHCC-2013-020
CERN-LHCC-2015-002

- TPCの増幅部: Wire→GEMに変更
- 4層のGEM. S-LP-LP-Sの構成
- IBF<1%を達成し、Gating Gridなしの連続運転を行う。(1%だとオフラインで補正できる)



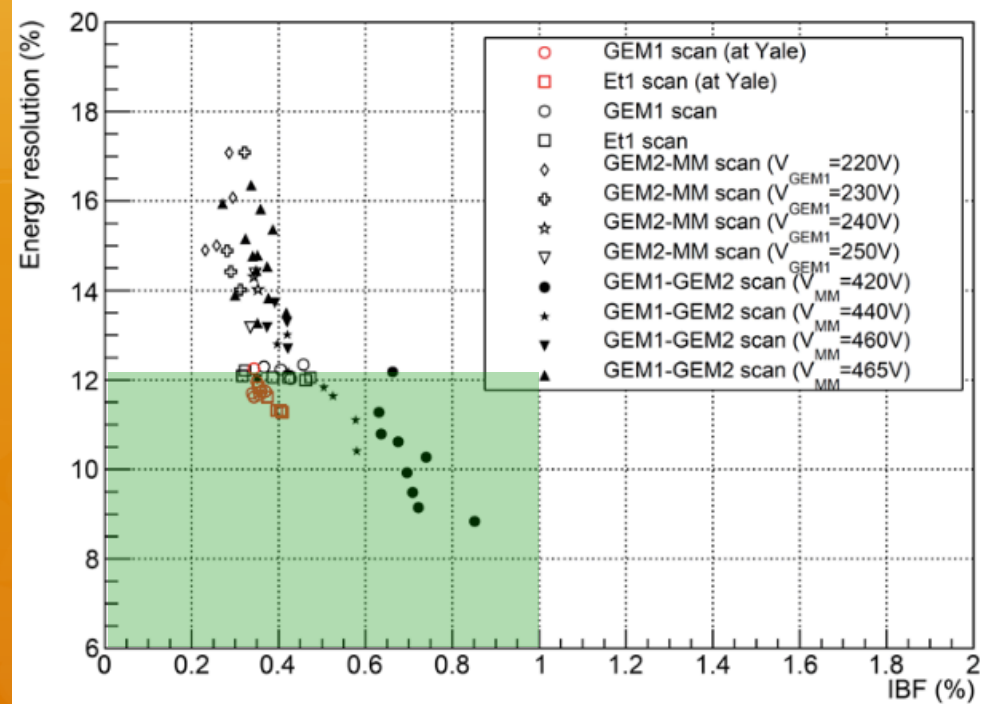
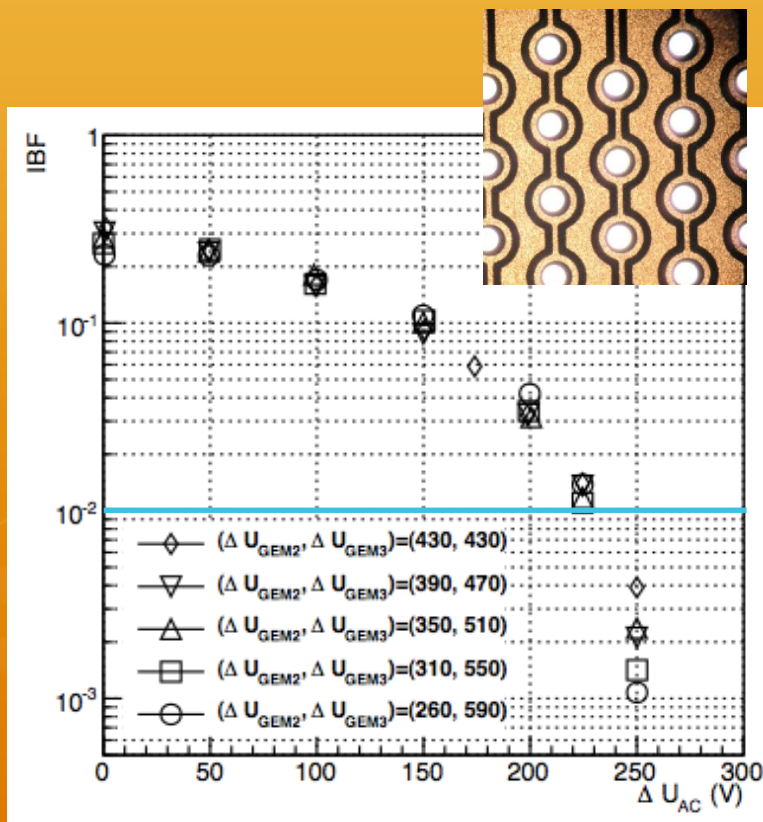
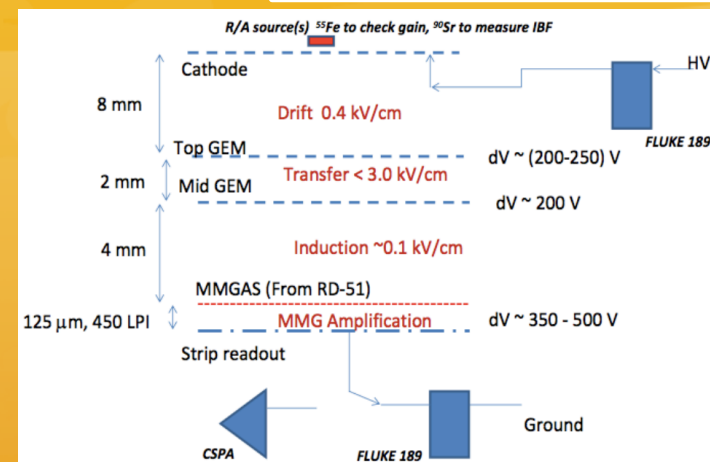
More R&D

CERN-LHCC-2013-020
CERN-LHCC-2015-002

IBF抑制のためのR&D

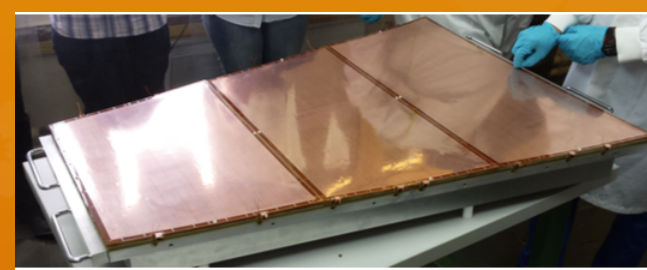
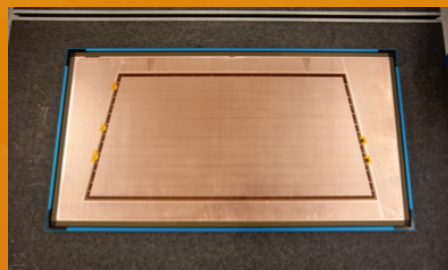
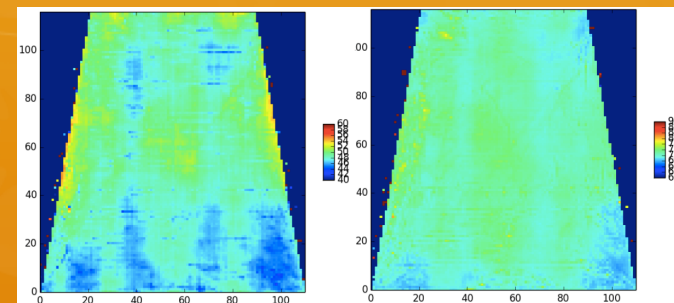
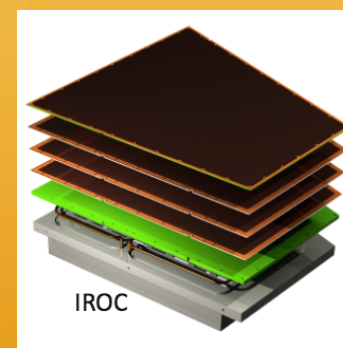
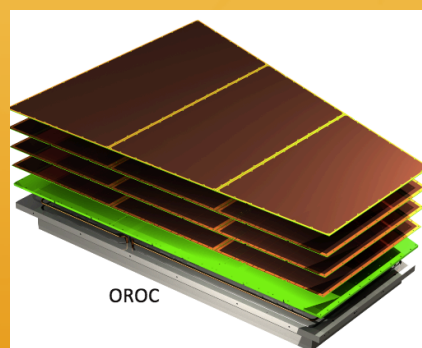
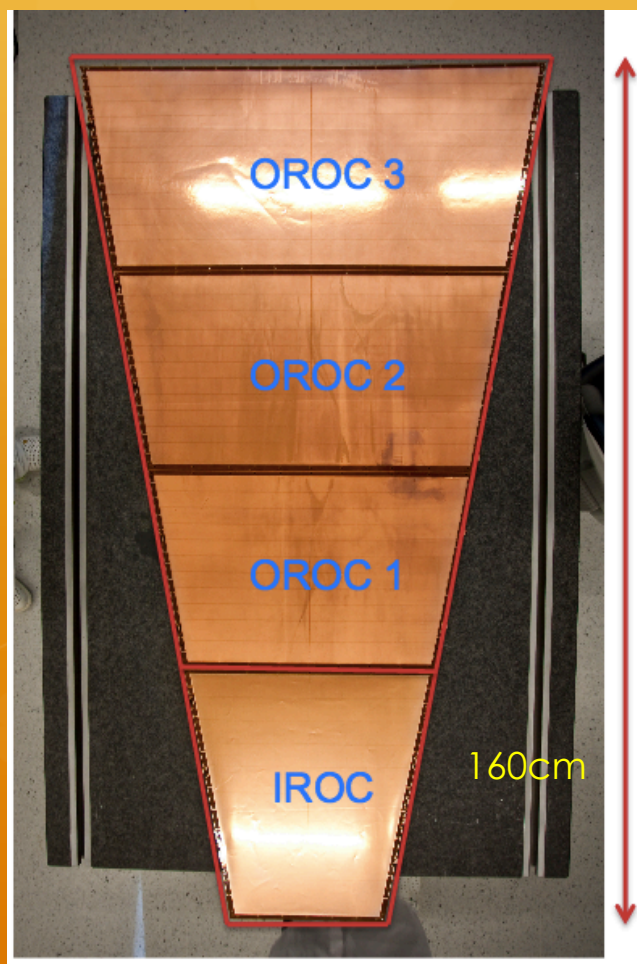
2GEM + MMG

COBRA-GEM



量産に向けた準備

- ❁ GEMの必要枚数 = 576枚. 900枚をCERNで製作予定
- ❁ QA, 製作工程の最適化中



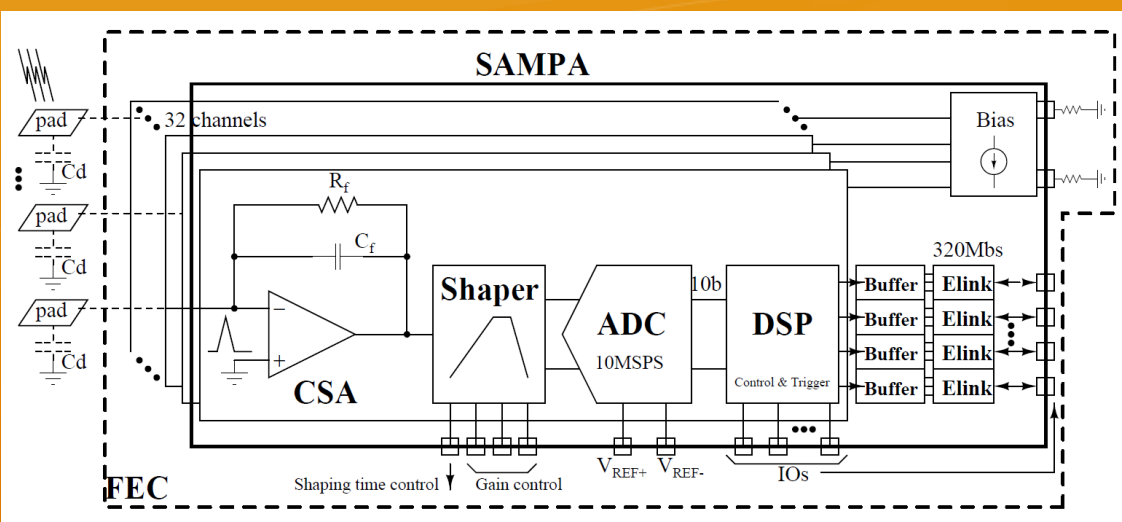
GEM-TPCフロントエンド

CERN-LHCC-2013-020
CERN-LHCC-2013-019

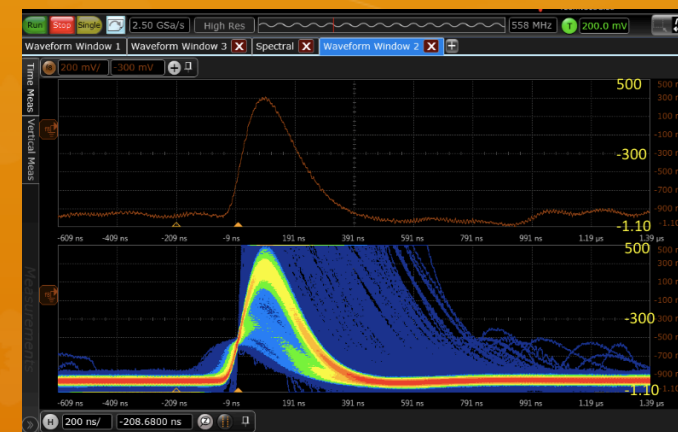
❁ SAMPAチップを製作

- ❁ Pos/Neg. Polarity
- ❁ Continuous/triggered readout
- ❁ SAR ADC (10 or 20 MSPS)
- ❁ DSP (baseline filter, zero suppression, lossless compression)
- ❁ Interface with GBT chip (rad hard optical link. 4.8Gbps)

❁ MPW1(2014), MPW2 (2015)



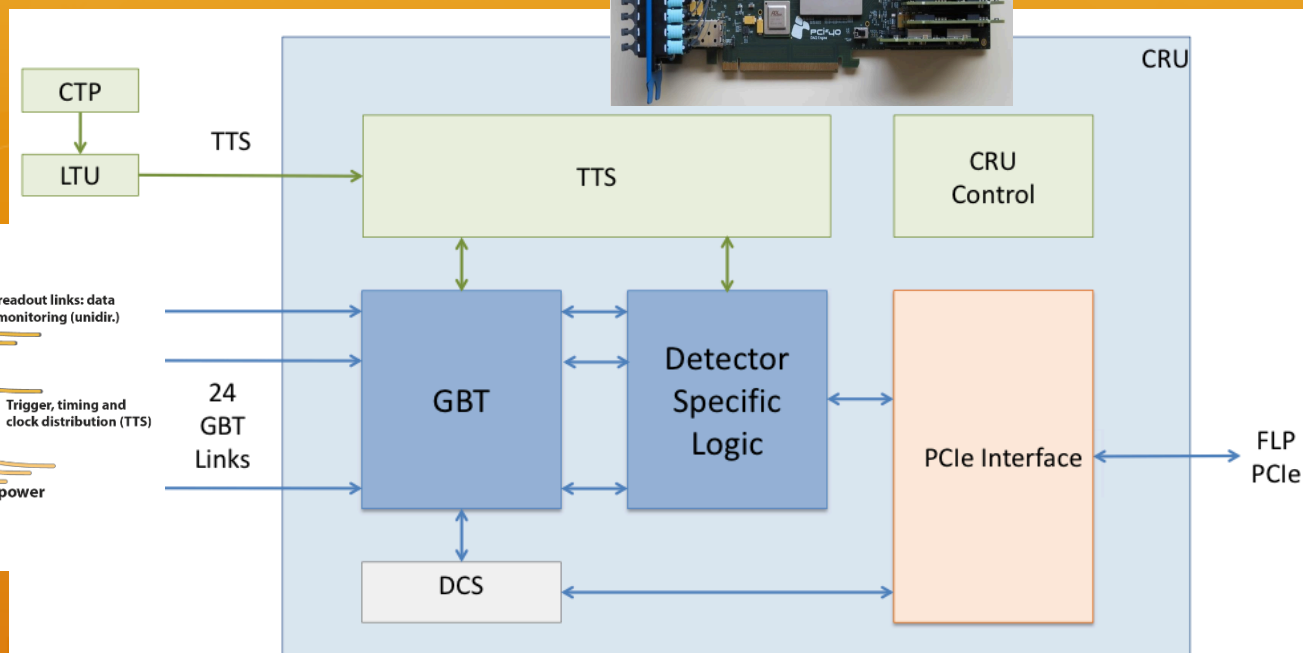
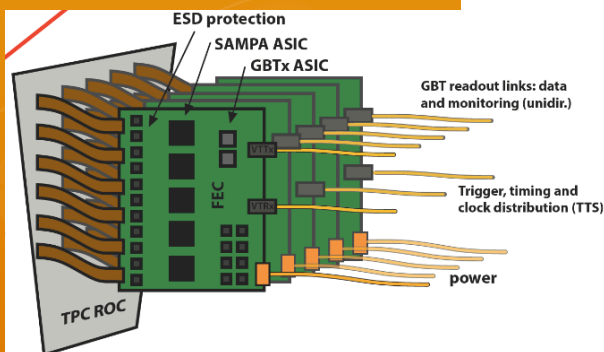
S-LP-LP-Sセットアップ。Fe線源



ALICE common backend system

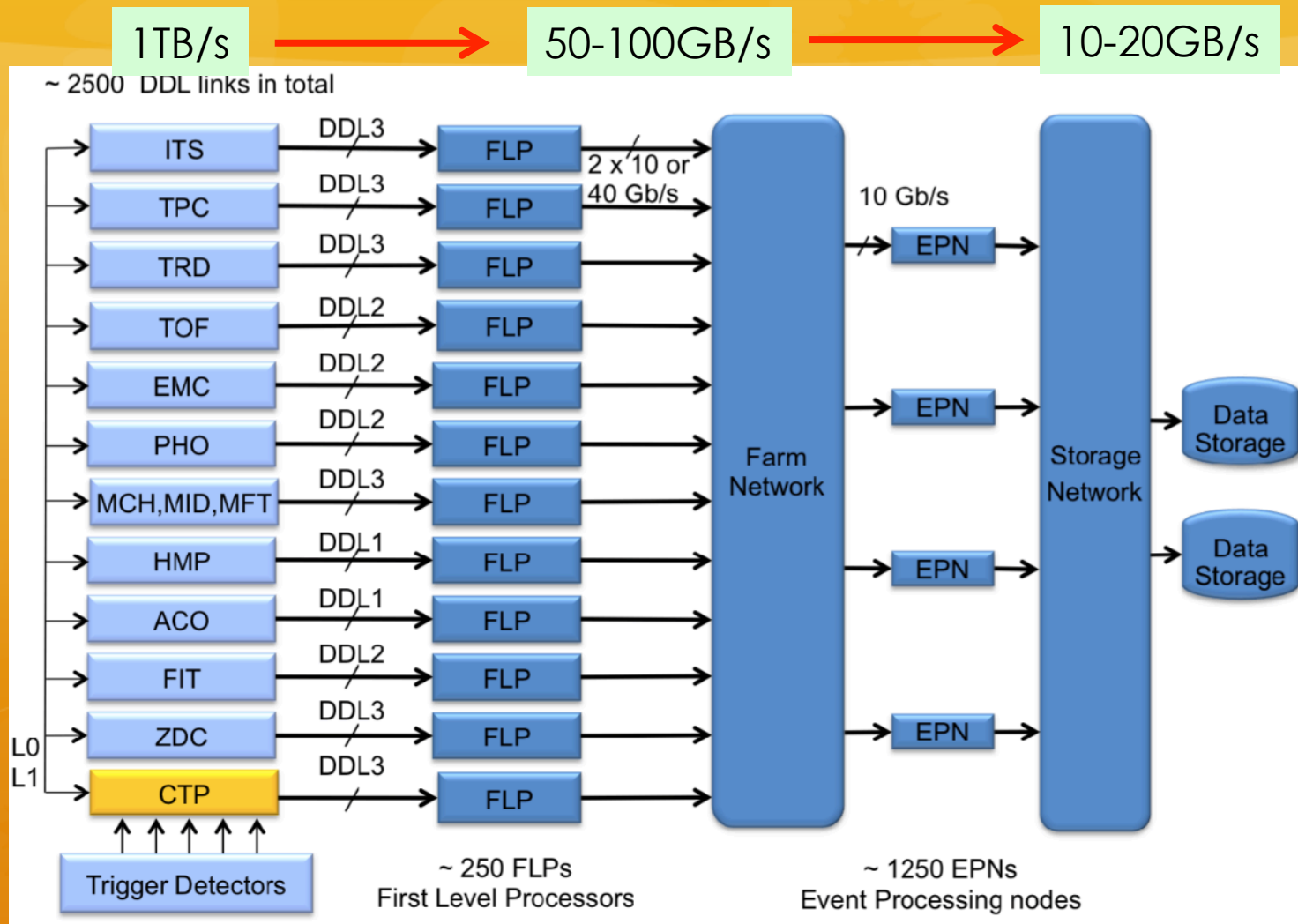
CERN-LHCC-2013-019

- ❁ CRU (Common Readout Unit)
 - ❁ 全ての検出器でバックエンドを共通化
 - ❁ フロントエンドと後段のonline farmとのinterface
 - ❁ 高性能のFPGA(ALTERA Arria 10)を使用。検出器の仕様の違いはFPGAのファームウェアで吸収
 - ❁ LHCbのPCI40がベース



Readout System

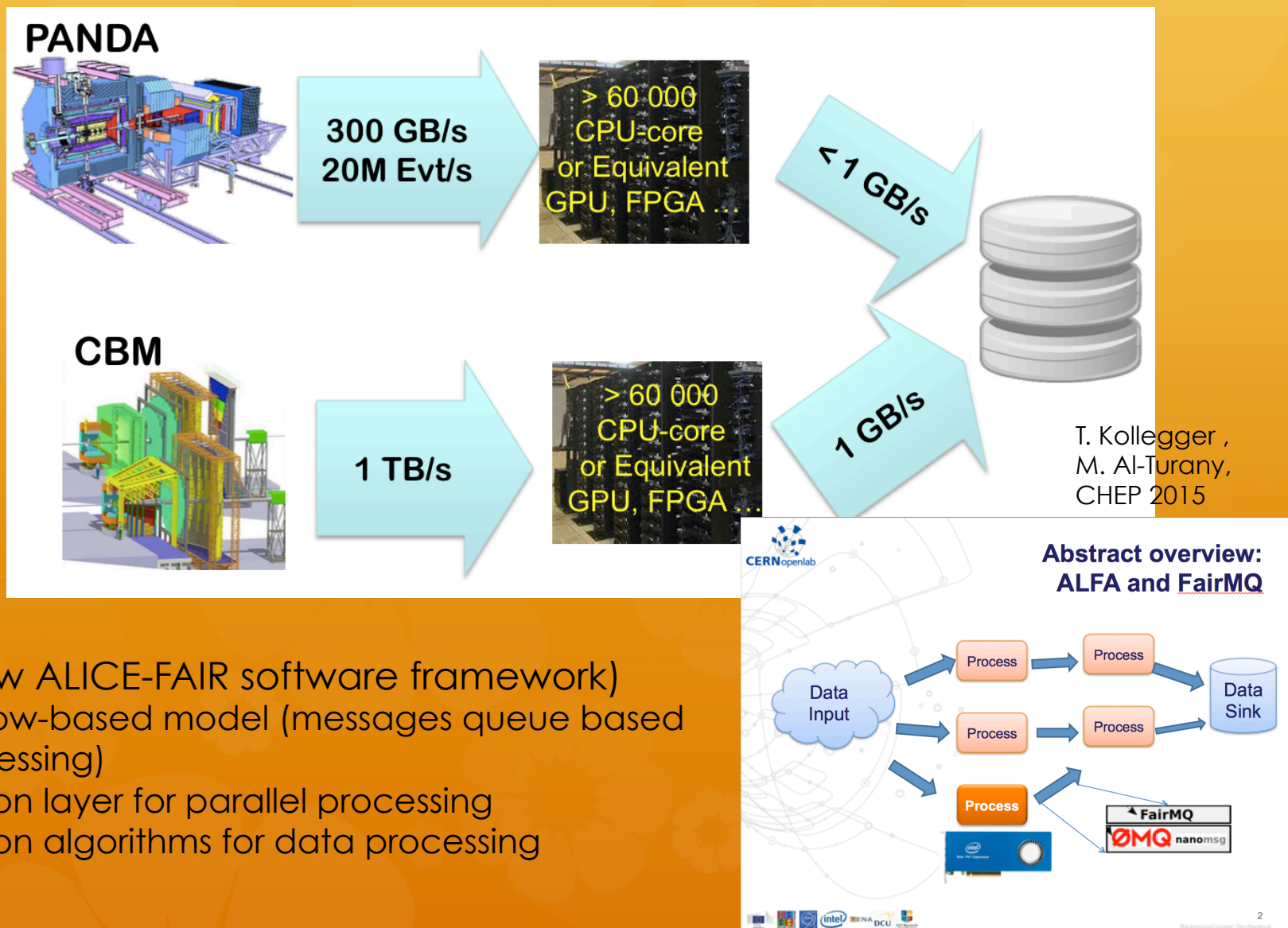
CERN-LHCC-2015-006



オンライン処理が重要

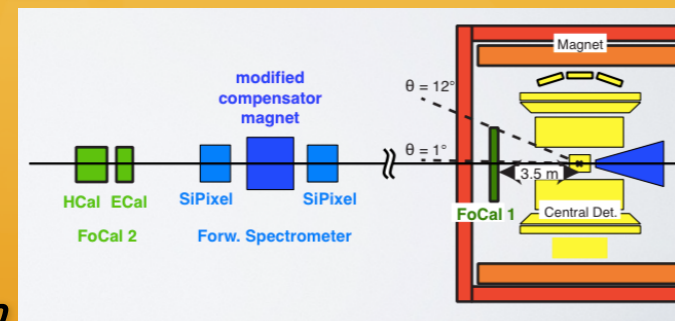
- FLP: CRUやGPUによるオンライン処理 (検出器内でのクラスタリング、飛跡再構成)
- EPN: GPUやCPUファームによるオンライン処理(グローバルトラッキング)

ALFA = ALICE-Fair software framework

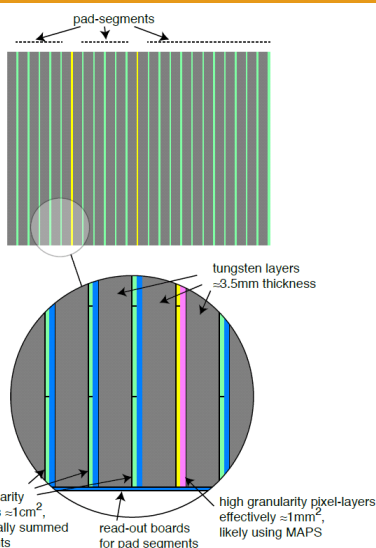


FoCAL

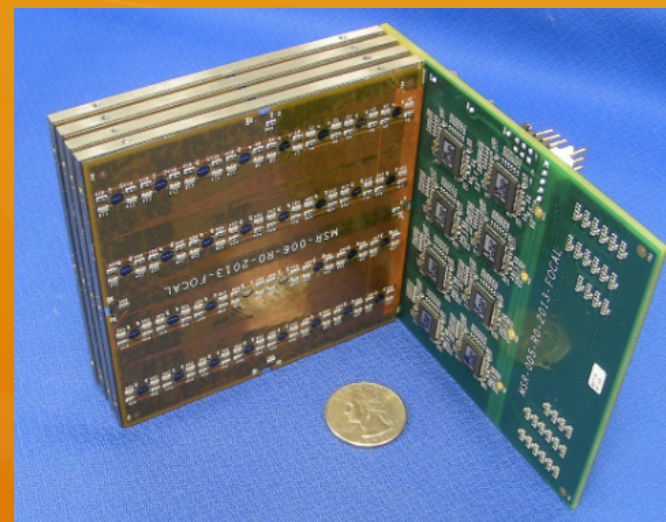
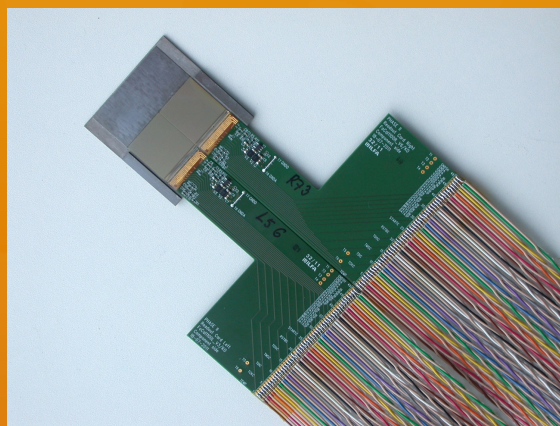
- ❁ ALICEアップグレード後の計画(検討中)
- ❁ 前方方向にスペクトロメータの建設
 - ❁ Small-xの物理
 - ❁ 初期条件、熱化機構
- ❁ 高エネルギー光子/ π^0 の分離
 - ❁ W+Siサンドイッチカロリメータ
 - ❁ ピクセル層(1mm^2)とパッド層(1cm^2)



W+Siパッド層



W+MAPSベースのピクセル層

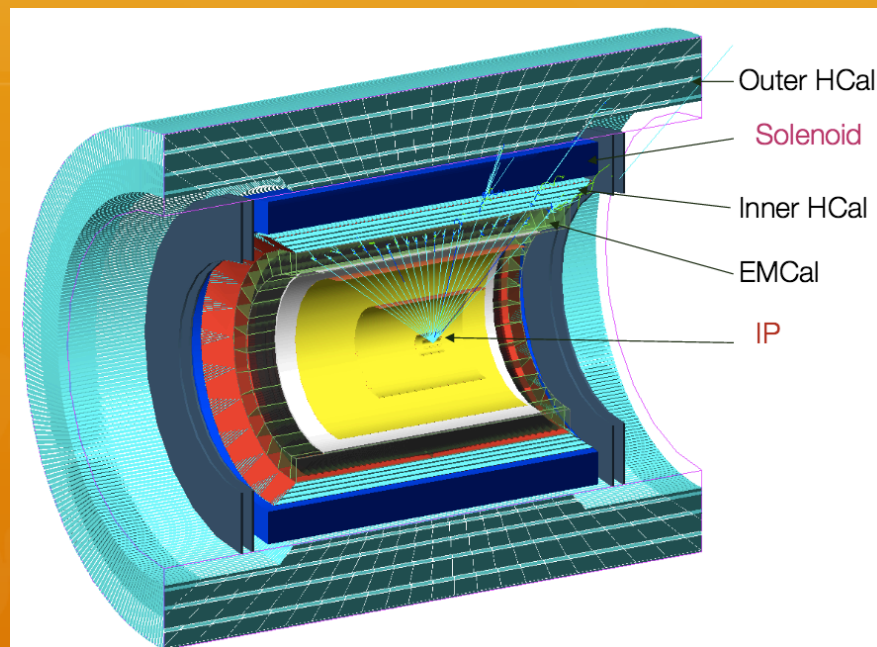
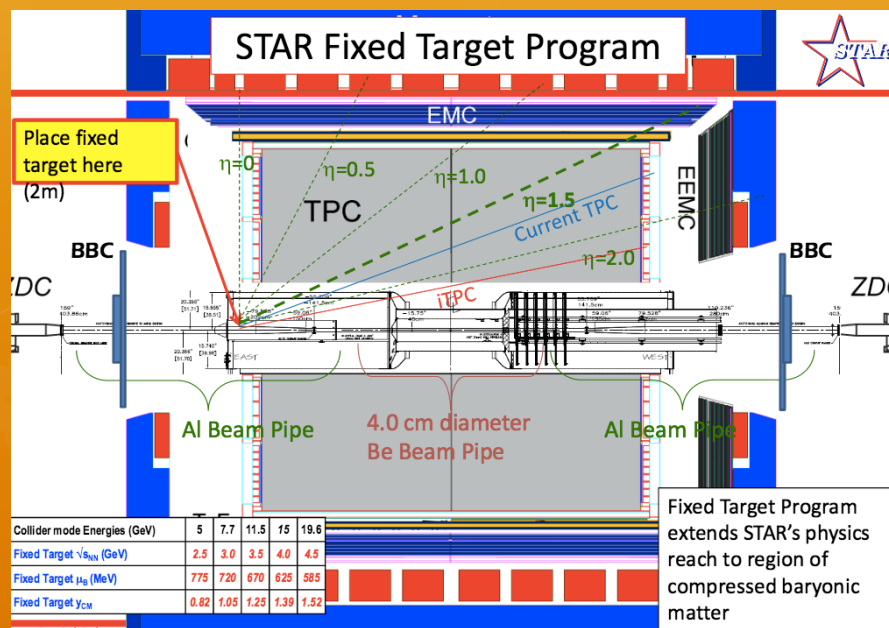


RHICの今後

https://drupal.star.bnl.gov/STAR/files/BES_WP11_ver6.9_Cover.pdf

sPHENIX: arXiv:1207.6378

- ❁ BES-II by STAR (2018-2019)
 - ❁ 臨界点、QCD相構造の探索
 - ❁ $\sqrt{s_{NN}} = 3$ (固定標的モード)- 7.7 – 19.6 GeV
- ❁ sPHENIX (2020-2021)
 - ❁ ジェットと Υ 測定に特化した新しい実験
 - ❁ IP=7層シリコン or 4層シリコン+TPC



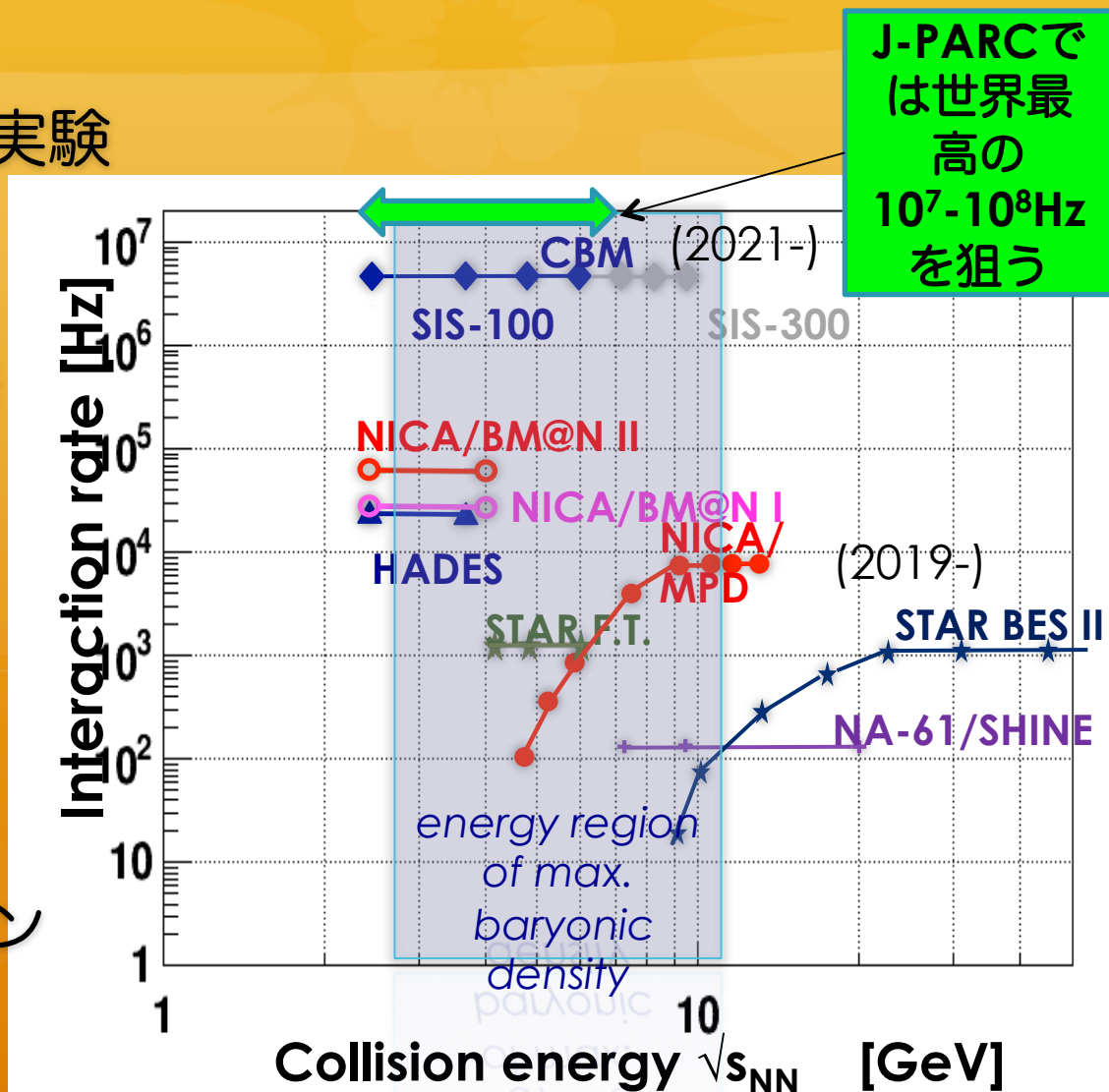
J-PARCでの重イオン実験

❁ J-PARCでの重イオン実験

- ❁ 世界最高強度での固定標的実験
- ❁ 通常原子核の5-10倍程度の密度

❁ 目標

- ❁ 臨界点と相境界の探索
- ❁ 高密度物質の性質
- ❁ エキゾチックハドロン
- ❁ ストレンジネス物理

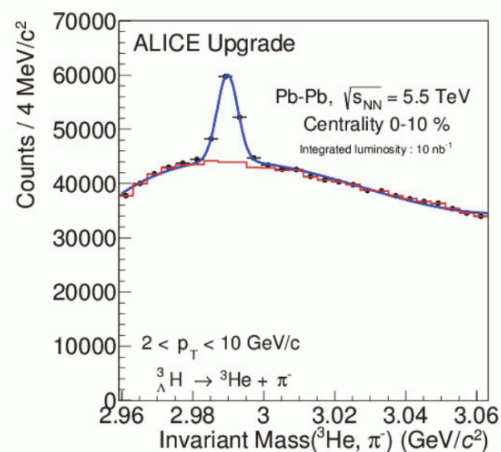


詳しくは佐甲さんの講演

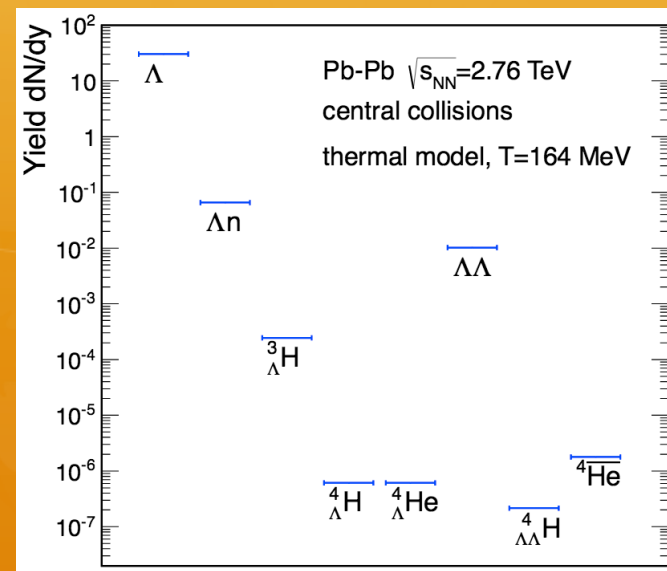
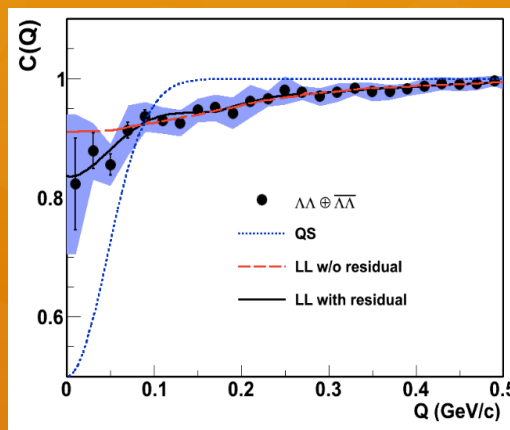
重イオン衝突によるハドロン・ ストレンジネス物理

- ✿ エキゾチックハドロンの探索
 - ✿ 収量、運動量分布、フロー → q融合 or h融合(内部構造)
 - ✿ チャーム、ボトム (XYZ [CMS/LHCb], P_c^+ [LHCb])
 - ✿ Θ^+ , H^0 , $\Omega\Omega$, kaonic nuclei
- ✿ (反)ハイパー核
- ✿ バリオン間相互作用
 - ✿ YN, YYなどの相関関数

[A. Andronic, Phys. Lett. B 697 \(2011\) 203](#)



STAR Phys. Rev. Lett. 114, 022301



State	dN/dy [81]	B.R.	$\langle \text{Acc} \times \epsilon \rangle$	Yield
${}^3\text{H}$	1×10^{-4}	25 % [82]	11 %	44000
${}^4\text{H}$	2×10^{-7}	50 % [82]	7 %	110
${}^4\text{He}$	2×10^{-7}	32 % [83]	8 %	130

重イオン衝突による精密核物理

CERN Press Release
Nature Physics (2015)
doi:10.1038/nphys3432

- Highest precision measurements of mass difference in the nuclei sector
- Improvement by 1–2 orders of magnitude compared to earlier measurements
- Constraint on CPT symmetry violation improved by a factor 2 for deuteron. First measurement of $\Delta\epsilon$ for (anti-) ${}^3\text{He}$
- 3×10^4 for anti- ${}^4\text{He}$ in Run3

Mass difference

$$\frac{\Delta\mu_{d\bar{d}}}{\mu_d} = [0.9 \pm 0.5(\text{stat.}) \pm 1.4(\text{syst.})] \times 10^{-4}$$

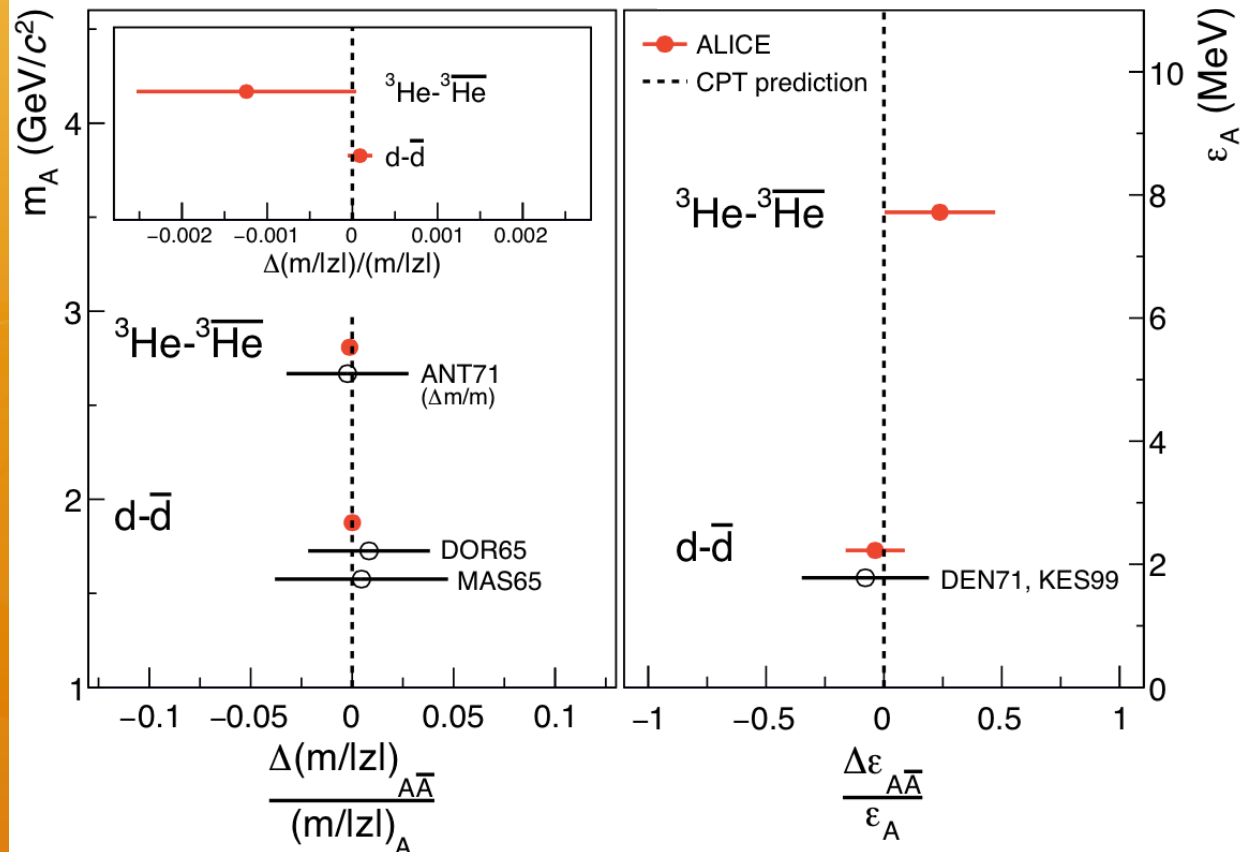
$$\frac{\Delta\mu_{{}^3\text{He}{}^3\bar{\text{He}}}}{\mu_{{}^3\text{He}}} = [-1.2 \pm 0.9(\text{stat.}) \pm 1.0(\text{syst.})] \times 10^{-3}$$

Binding energy difference

$$\Delta\epsilon_{A\bar{A}} = Z\Delta m_{p\bar{p}} + (A-Z)\Delta m_{n\bar{n}} - \Delta m_{A\bar{A}}$$

$$\frac{\Delta\epsilon_{d\bar{d}}}{\epsilon_d} = -0.04 \pm 0.05 (\text{stat.}) \pm 0.12 (\text{syst.})$$

$$\frac{\Delta\epsilon_{{}^3\text{He}{}^3\bar{\text{He}}}}{\epsilon_{{}^3\text{He}}} = 0.24 \pm 0.16 (\text{stat.}) \pm 0.18 (\text{syst.})$$



まとめ

❁ 高エネルギー重イオン衝突の現状

❁ 様々な諸量がわかってきた。

- ❁ 光子の測定より系の平均温度の算出
- ❁ 楕円フローや高次フローの測定から比粘性の算出
- ❁ 高エネルギーパートンのエネルギー損失の測定と阻止能の算出
- ❁ などなど

❁ 小さい系ので集団運動→起源はわかっていない

❁ 高エネルギー重イオン衝突の将来

❁ LHC-ALICE実験の高度化

- ❁ LHCエネルギーで物性の本格的な研究
- ❁ これまでの100倍でのデータ取得。Pb-Pbの全事象を取る
- ❁ シリコンピクセル検出器、GEM検出器、読み出し系、オンラインの高速データ処理系の開発が進んでいる

❁ RHICにおけるBES-IIとsPHENIX実験

- ❁ QCD相図の解明と新たな測定量に基づく物性研究

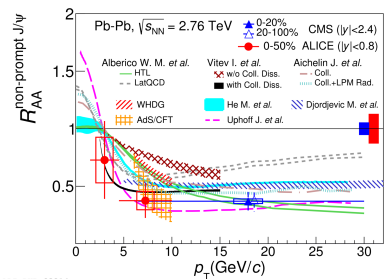
❁ 高エネルギー重イオン衝突で、ハドロンのストレンジネス・精密核物理・核子構造に関する研究が可能。連携強化が非常に有益！！

バックアップ

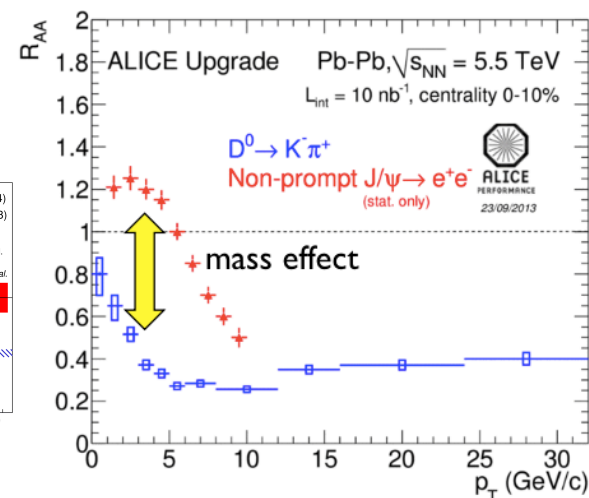
重クォーク

ITS/TPC/MFT → 重クォーク測定能力の向上 ($p_T > 0$)

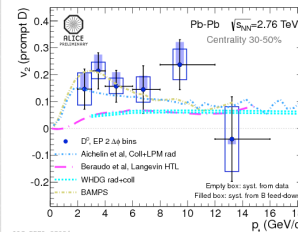
Non-prompt
J/ψ R_{AA} (now)



Prompt D^0 and Non-prompt J/ψ R_{AA}

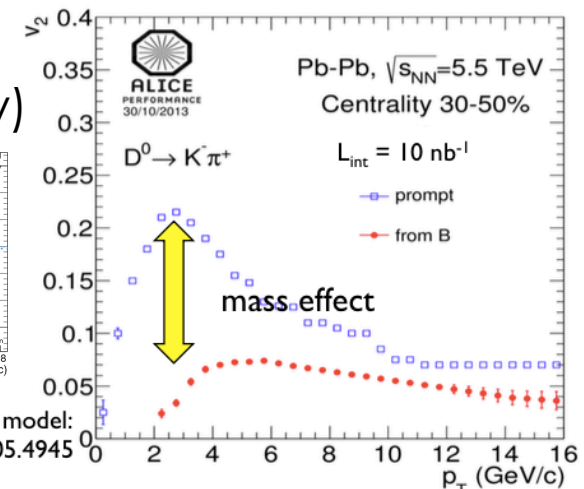


$D^0 v_2$ (now)

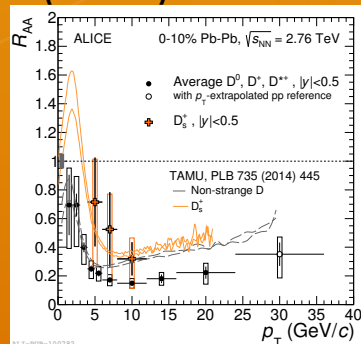


Input values from BAMPS model:
C. Greiner et al. arXiv:1205.4945

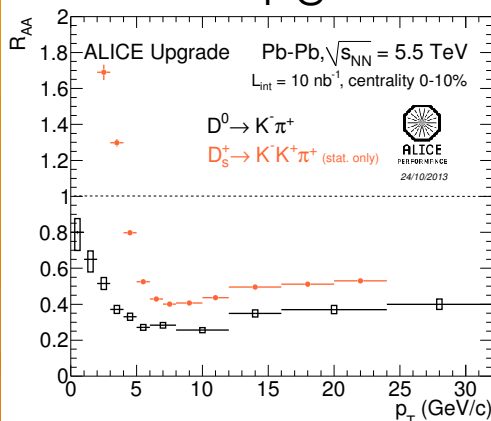
Prompt and non-prompt $D^0 v_2$



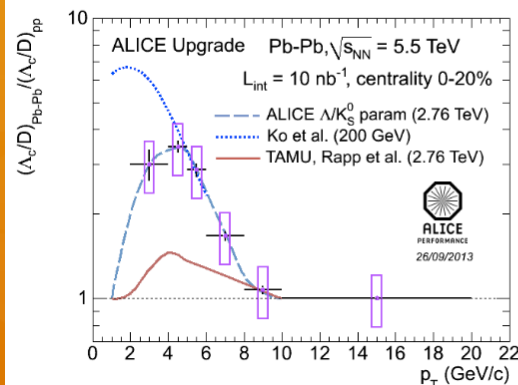
$D, D_s R_{AA}$
(now)



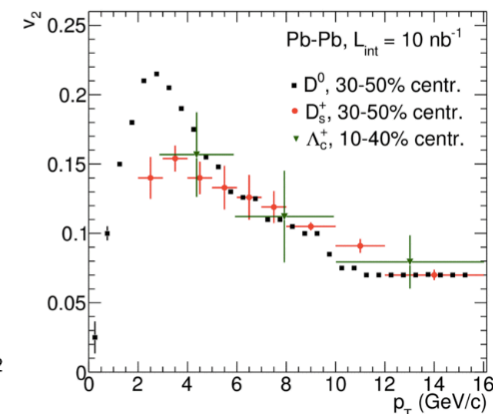
upgrade



Λ_c/D "enhancement"



$D^0, D_s, \Lambda_c v_2$



Observable	Current, 0.1 nb^{-1}		Upgrade, 10 nb^{-1}	
	$p_{\text{T}}^{\text{min}}$ (GeV/c)	statistical uncertainty	$p_{\text{T}}^{\text{min}}$ (GeV/c)	statistical uncertainty
Heavy Flavour				
D meson R_{AA}	1	10 %	0	0.3 %
D_{s} meson R_{AA}	4	15 %	< 2	3 %
D meson from B R_{AA}	3	30 %	2	1 %
J/ψ from B R_{AA}	1.5	15 % ($p_{\text{T}}\text{-int.}$)	1	5 %
B^+ yield	not accessible		3	10 %
Λ_{c} R_{AA}	not accessible		2	15 %
$\Lambda_{\text{c}}/\text{D}^0$ ratio	not accessible		2	15 %
Λ_{b} yield	not accessible		7	20 %
D meson v_2 ($v_2 = 0.2$)	1	10 %	0	0.2 %
D_{s} meson v_2 ($v_2 = 0.2$)	not accessible		< 2	8 %
D from B v_2 ($v_2 = 0.05$)	not accessible		2	8 %
J/ψ from B v_2 ($v_2 = 0.05$)	not accessible		1	60 %
Λ_{c} v_2 ($v_2 = 0.15$)	not accessible		3	20 %
Dielectrons				
Temperature (intermediate mass)	not accessible			10 %
Elliptic flow ($v_2 = 0.1$) [4]	not accessible			10 %
Low-mass spectral function [4]	not accessible		0.3	20 %
Hypernuclei				
$^3_{\Lambda}\text{H}$ yield	2	18 %	2	1.7 %

他分野とのクロスオーバー

❁ 高エネルギー重イオンの物理の多様性

❁ クォーク物質の生成過程

❁ 核子構造

❁ 初期状態。原子核核子内のクォーク・グルーオン分布

❁ 非平衡物理

❁ 熱化機構。高強度グルーオン場のダイナミクス

❁ クォーク物質の性質探求

❁ 強相関物性科学(冷却原子系、強相関電子系)

❁ クォーク物質＝ハドロン生成の種

❁ ハドロン物理

❁ 閉じ込め機構. エキゾティックハドロンの探索. ハドロン構造(チャーム、ボトム)

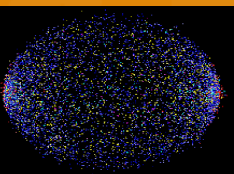
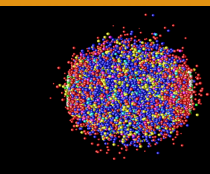
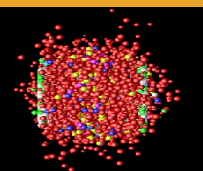
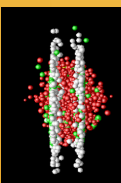
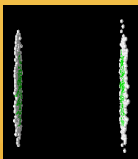
❁ ダイバリオン、メソノーバリオン・バリオン間相互作用

❁ ストレンジネス物理

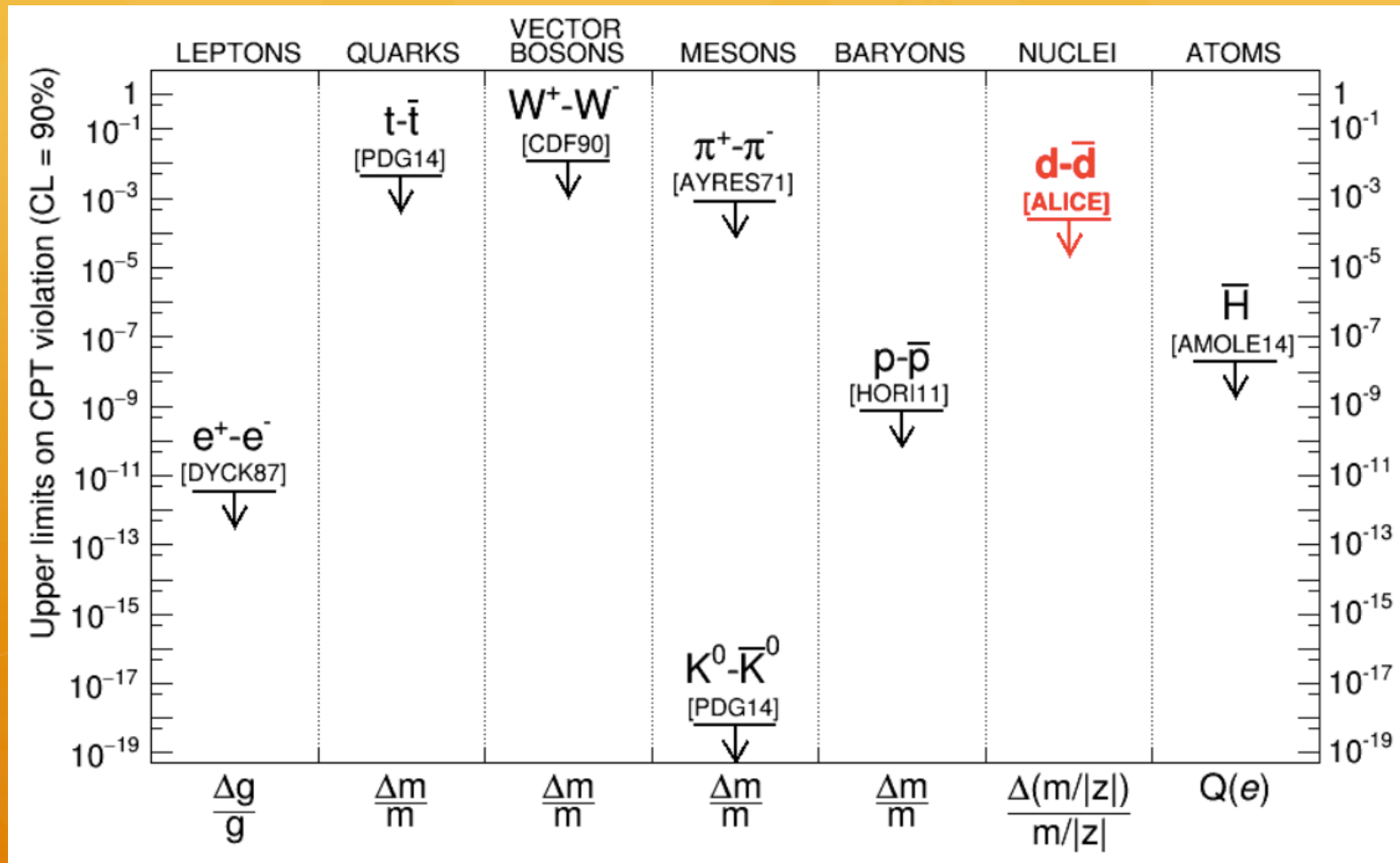
❁ ハイパー核、YN/YY相互作用

❁ 精密核物理

❁ CPT対称性 (粒子－反粒子の質量差、束縛エネルギー差)



重イオン衝突による精密核物理



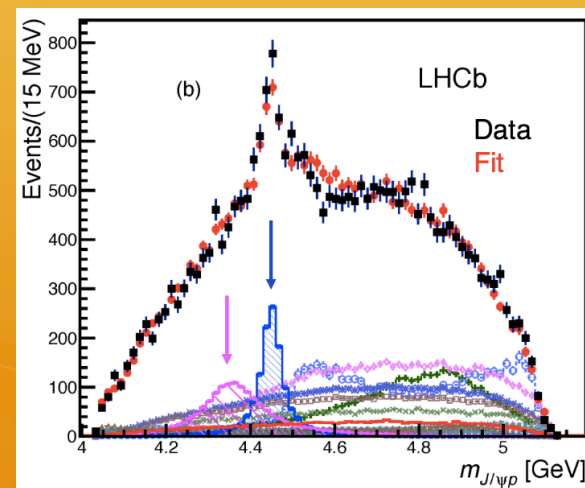
重イオン衝突によるハドロン・ストレンジネス物理

✿ エキゾチックハドロンの探索と内部構造

- ✿ 収量、運動量分布、フローの測定 → q融合 or h融合?
- ✿ チャーム、ボトム → LHC
- ✿ $Z(4330)^+$ 、 $P_C^+(\rightarrow J/\psi + P)$
- ✿ ストレンジネス → LHC, J-PARC
- ✿ Θ^+ 、 H^0 、 $\Omega\Omega$ 、kaonic nuclei



Phys. Rev. Lett. 115, 072001 (2015)



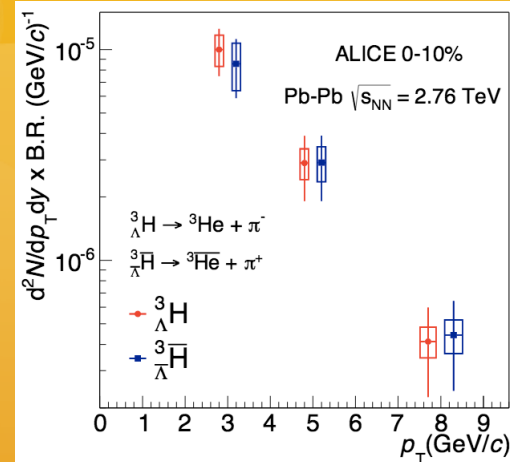
arXiv:1107.1302

Run3+Run4での収量	q融合	h融合	統計
$X(3872) \rightarrow \pi \pi J/\psi$	100	2300	800
$D_s(2317) \rightarrow D_s \pi$ (br=10%仮)	15	100	400
$D^{*-} p \rightarrow D^- p$ (br=10%仮)	100	6500	1500

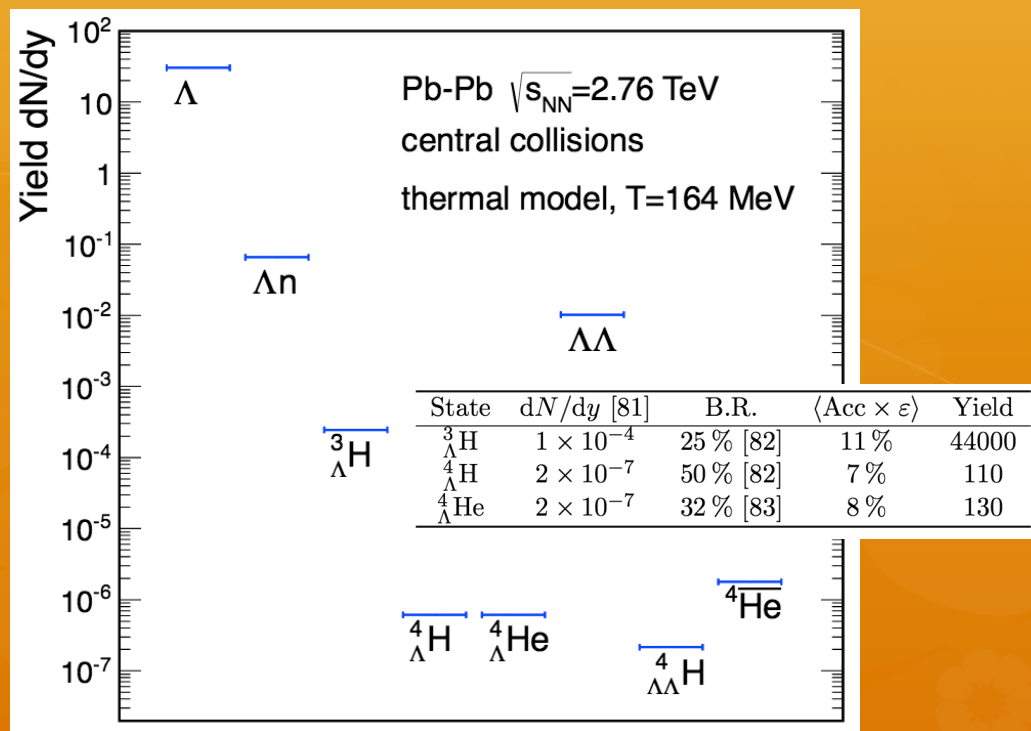
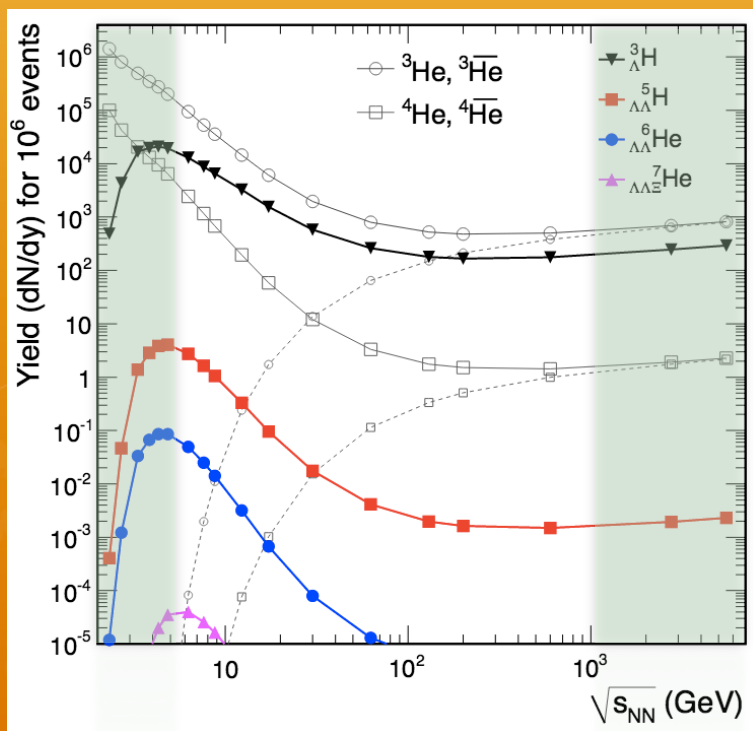
	RHIC				LHC			
	2q/3q/6q	4q/5q/8q	Mol.	Stat.	2q/3q/6q	4q/5q/8q	Mol.	Stat.
Mesons								
$f_0(980)$	3.8, 0.73($s\bar{s}$)	0.10	13	5.6	10, 2.0 ($s\bar{s}$)	0.28	36	15
$a_0(980)$	11	0.31	40	17	31	0.83	1.1×10^2	46
$K(1460)$	—	0.59	3.6	1.3	—	1.6	9.3	3.2
$D_s(2317)$	1.3×10^{-2}	2.1×10^{-3}	1.6×10^{-2}	5.6×10^{-2}	8.7×10^{-2}	1.4×10^{-2}	0.10	0.35
T_{cs}^+	—	4.0×10^{-5}	2.4×10^{-5}	4.3×10^{-4}	—	6.6×10^{-4}	4.1×10^{-4}	7.1×10^{-3}
$X(3872)$	1.0×10^{-4}	4.0×10^{-5}	7.8×10^{-4}	2.9×10^{-4}	1.7×10^{-3}	6.6×10^{-4}	1.3×10^{-2}	4.7×10^{-3}
$Z^+(4430)^+$	—	1.3×10^{-5}	2.0×10^{-5}	1.4×10^{-5}	—	2.1×10^{-4}	3.4×10^{-4}	2.4×10^{-4}
T_{cb}^0	—	6.1×10^{-8}	1.8×10^{-7}	6.9×10^{-7}	—	6.1×10^{-6}	1.9×10^{-5}	6.8×10^{-5}
Baryons								
$\Lambda(1405)$	0.81	0.11	1.8–8.3	1.7	2.2	0.29	4.7–21	4.2
Θ^+	—	2.9×10^{-2}	—	1.0	—	7.8×10^{-2}	—	2.3
$\bar{K}^* K^+$	—	1.9×10^{-2}	1.7	0.28	—	5.2×10^{-2}	4.2	0.67
$\bar{D}^* N^+$	—	2.9×10^{-3}	4.6×10^{-2}	1.0×10^{-2}	—	2.0×10^{-2}	0.28	6.1×10^{-2}
$\bar{D}^* N^+$	—	7.1×10^{-4}	4.5×10^{-2}	1.0×10^{-2}	—	4.7×10^{-3}	0.27	6.2×10^{-2}
Θ_{cs}^+	—	5.9×10^{-4}	—	7.2×10^{-3}	—	3.9×10^{-3}	—	4.5×10^{-2}
$B N^+$	—	1.9×10^{-5}	8.0×10^{-5}	3.9×10^{-5}	—	7.7×10^{-4}	2.8×10^{-3}	1.4×10^{-3}
$B^* N^+$	—	5.3×10^{-6}	1.2×10^{-4}	6.6×10^{-5}	—	2.1×10^{-4}	4.4×10^{-3}	2.4×10^{-3}
Dibaryons								
H^+	3.0×10^{-3}	—	1.6×10^{-2}	1.3×10^{-2}	8.2×10^{-3}	—	3.8×10^{-2}	3.2×10^{-2}
$\bar{K}^* N^+$	5.0×10^{-3}	5.1×10^{-4}	0.011–0.24	1.6×10^{-2}	1.3×10^{-2}	1.4×10^{-3}	0.026–0.54	3.7×10^{-2}
$\Omega\Omega^+$	3.2×10^{-5}	—	1.5×10^{-5}	6.4×10^{-5}	8.6×10^{-5}	—	4.4×10^{-5}	1.9×10^{-4}
H_c^{++}	3.0×10^{-4}	—	3.3×10^{-4}	7.5×10^{-4}	2.0×10^{-3}	—	1.9×10^{-3}	4.2×10^{-3}
$\bar{D}^* N^+$	—	2.9×10^{-5}	1.8×10^{-3}	7.9×10^{-5}	—	2.0×10^{-4}	9.8×10^{-3}	4.2×10^{-4}
$B^* N^+$	—	2.3×10^{-7}	1.2×10^{-6}	2.4×10^{-7}	—	9.2×10^{-6}	3.7×10^{-5}	7.6×10^{-6}

重イオン衝突によるハドロン・ストレンジネス物理

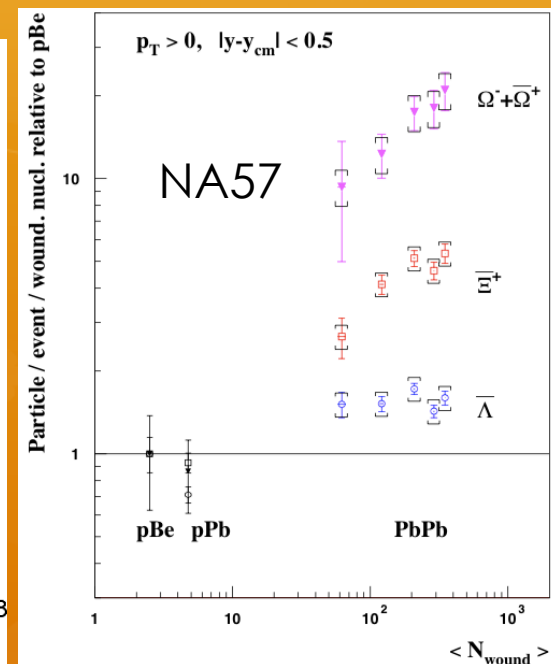
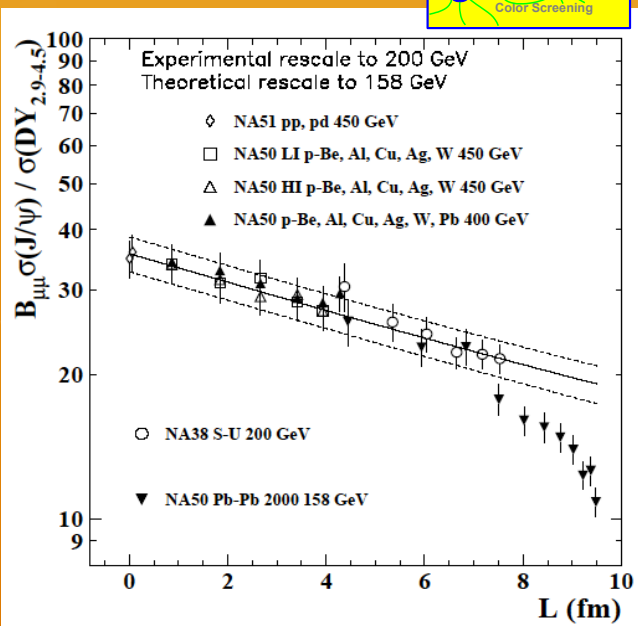
- ✿ ハイパー核(と反ハイパー核)
- ✿ J-PARCエネルギーで最大
- ✿ LHCでは、反ハイパー核も生成可能



A. Andronic, Phys. Lett. B 697 (2011) 203



- 
- The diagram shows a grid of colored dots (red, green, blue) on a yellow background. Two red dots are labeled 'C' and 'C-bar' (C with a bar over it). Below the grid, the text 'Color Screening' is written.



統計モデルと化学凍結

❁ 熱的統計モデル

- ❁ 粒子比を化学凍結温度と化学ポテンシャルのみで記述
- ❁ SIS-AGS-SPS-RHICの粒子比をよく再現する

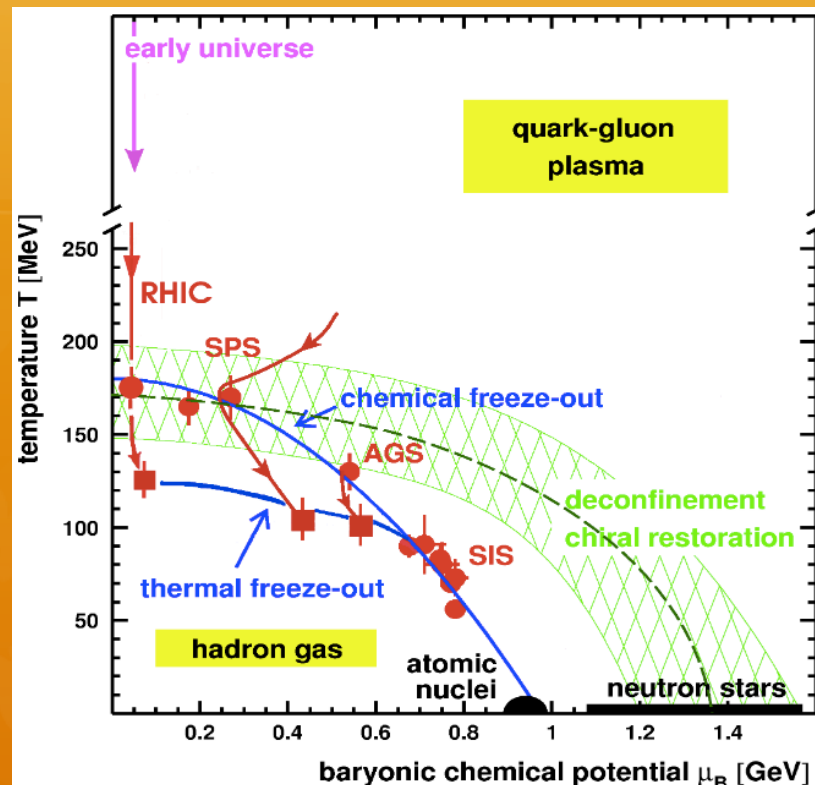
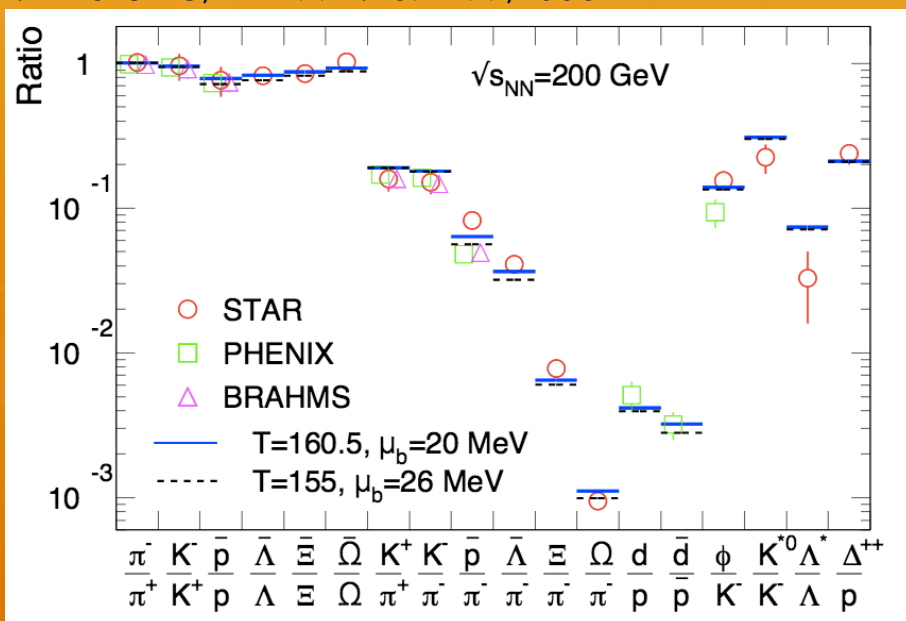
$$n_i = \frac{N_i}{V} = -\frac{T}{V} \frac{\partial \ln Z_i}{\partial \mu} \Big|_{T=T_{ch}} = \frac{d_i}{2\pi^2} \int \frac{p^2 dp}{\exp[(E_i - \mu_i)/T_{ch}] \pm 1}$$

$$\frac{K}{\pi} = \frac{e^{-(E_K)/T}}{e^{-(E_\pi)/T}} = e^{-(E_K - E_\pi)/T} \approx e^{-\Delta m/T}$$

$$\frac{\bar{p}}{p} = \frac{e^{-(E+\mu)/T}}{e^{-(E-\mu)/T}} = e^{-2\mu/T}$$

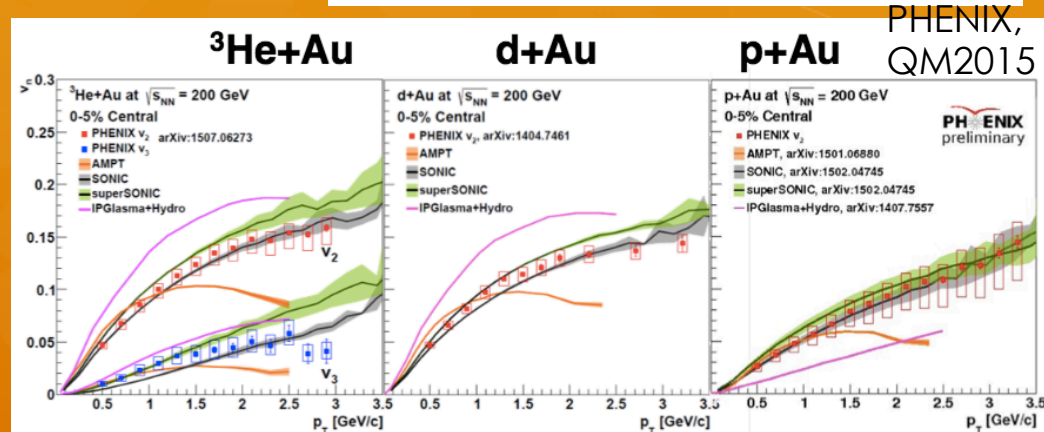
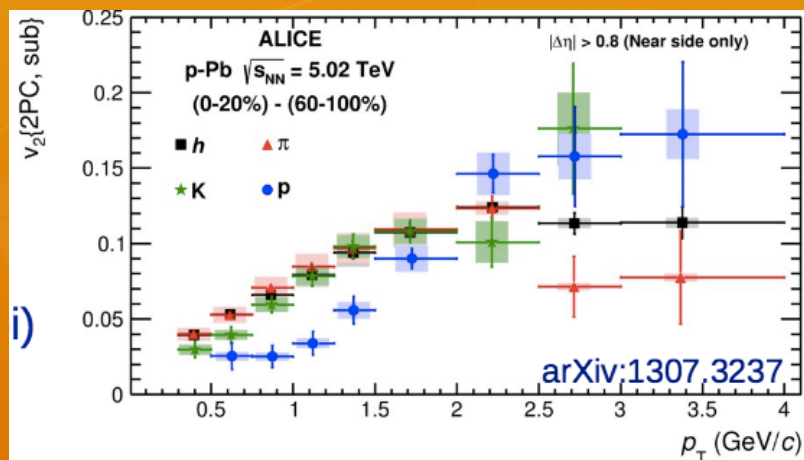
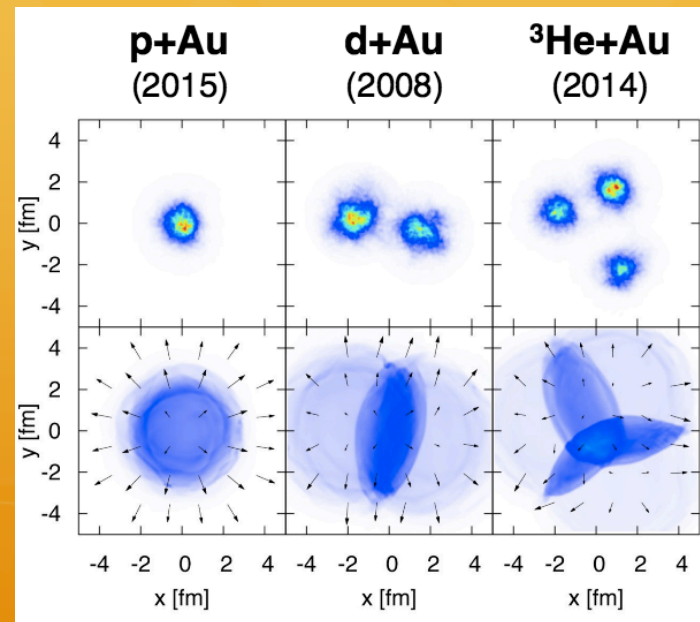
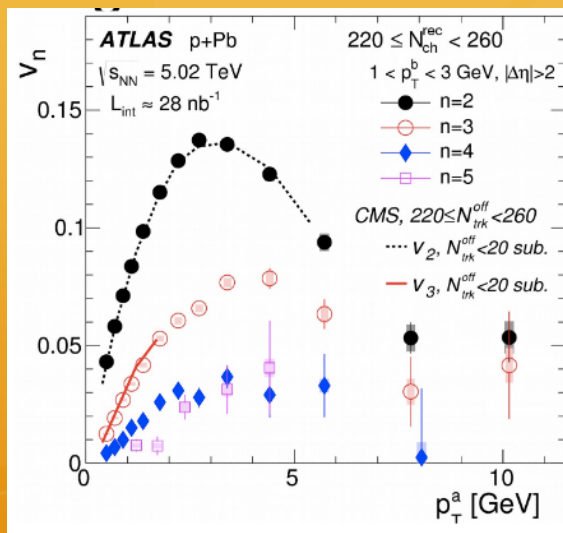
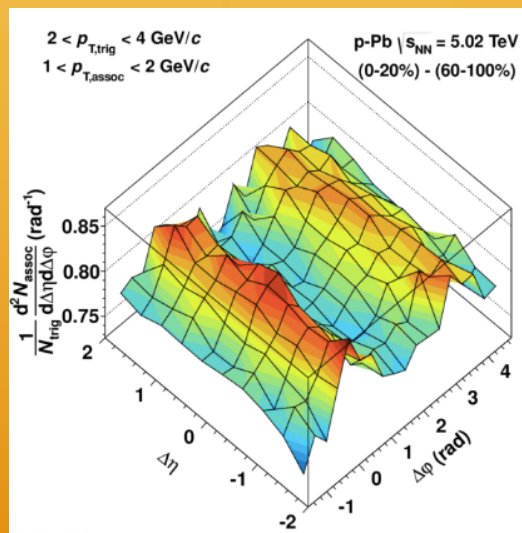
U. Heinz
AIP Conf.Proc.602:281-292,2001

A. Andronic, NPA772:167-199,2006



小さい系の物理

❁ 重イオン衝突で見られたフローの発見



PHENIX,
QM2015