

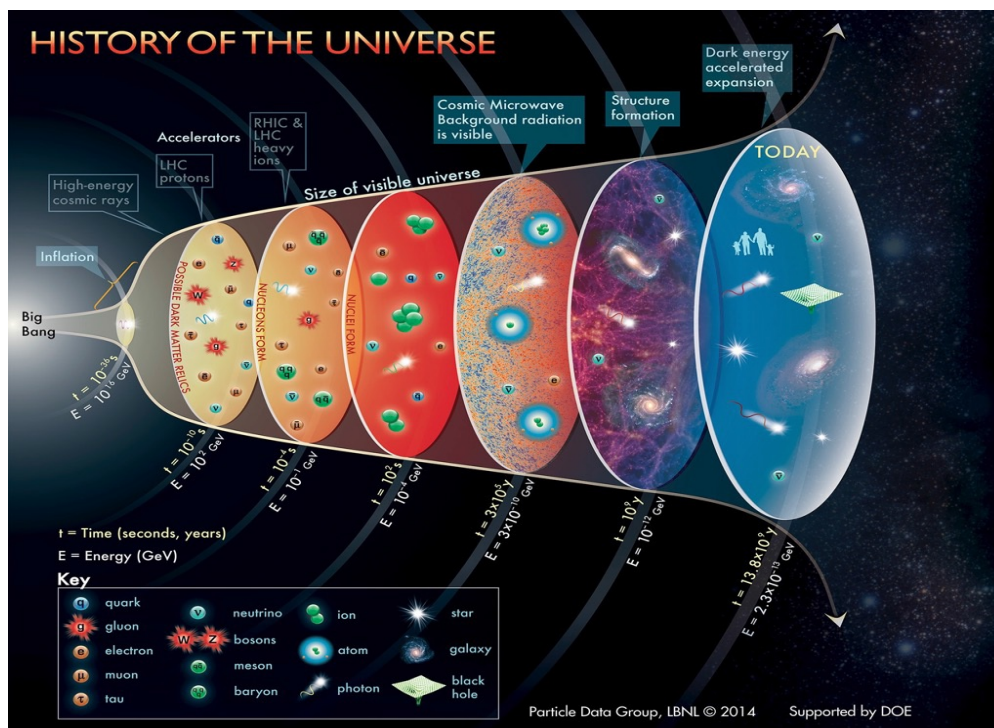
# 数理物質融合科学センター 宇宙史国際研究拠点 クォーク・核物質部門

部門長 江角晋一  
高エネルギー原子核実験グループ

contents

- Lattice QCD グループ
- QGP実験グループ
- 元素合成グループ

QCD熱力学  
QGPから核子生成  
核子から軽元素合成  
超新星による重元素合成



# 格子QCDによる勾配流法を用いたQCD熱力学量の研究

金谷和至(t)、谷口裕介(t)、江尻信司(n)、梅田貴士(h)、鈴木博(k)、北沢正清(o)、石見涼(n)、白銀瑞樹(n)、若林直樹(n)  
.....  
t: 筑波大、n: 新潟大、h: 広大、k: 九大、o: 阪大

有限温度・有限密度クォーク物性の解明

=> 宇宙の初期進化、重い原子核の高エネルギー衝突、中性子星の内部構造etc

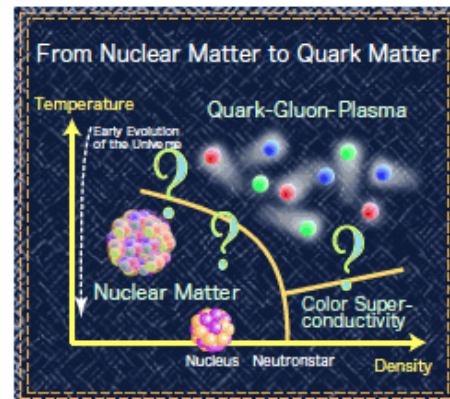
格子QCDによる数値シミュレーション：基本法則の第一原理からの唯一の研究方法

\* 世界的には、staggered型クォークを使った研究が先行。

しかし、連続極限が保証されない。

\* 我々はWilson型改良クォーク（連続極限保証）を使った研究を蓄積。

T-積分法の開発によるfixed-scale approachの展開, histogram法の展開、など



## 勾配流法： Lüscher(2009-), Narayanan-Neuberger(2006)

仮想的な「時間」 $t$ を導入して、一種の拡散方程式で場を「flow」させる。

$$\dot{B}_\mu = D_\nu G_{\nu\mu}, \quad B_\mu|_{t=0} = A_\mu \quad \text{flowした場} \approx \text{元のを} \sqrt{8t} \text{の範囲で平均化}$$

流れをうまく選べば、flowした場の演算子を有限にできる。 Lüscher-Weisz (2011)

=> ある  $t > 0$  における物理量計算を、一種の「くりこみ」とみなせる！

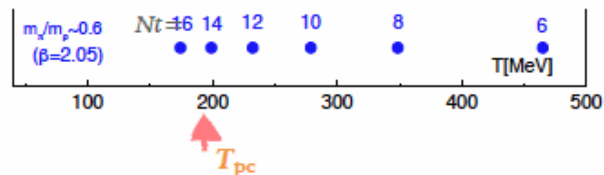
格子化で破れてしまう性質（カイラル対称性、ローレンツ不変性など）に関する物理量も、破れを気にしないで定義・評価可能！

## 勾配流法による動的クォークを含むQCDの熱力学

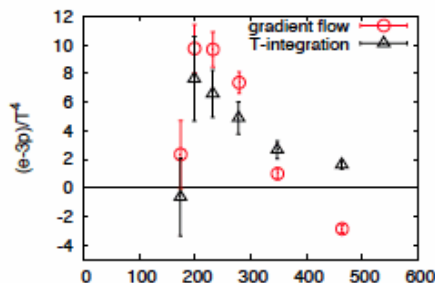
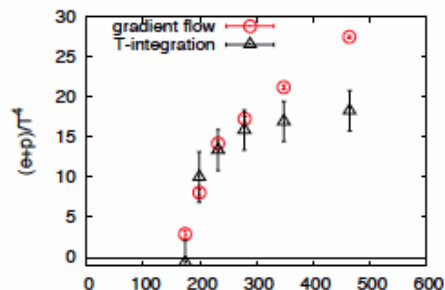
勾配流による鈴木の方法 [H. Suzuki (2013-)] で、現実的な(2+1)-flavor QCD熱力学を初めて研究

- エネルギー運動量テンソル, 状態方程式
- カイラル オーダーパラメータ
- 位相感受率、アクシオン質量 => 暗黒物質

# 2016年度の研究成果



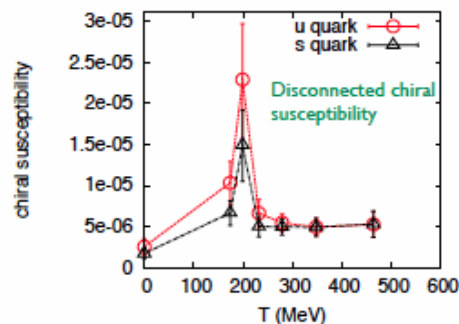
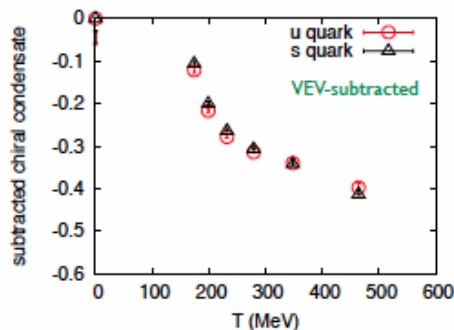
## Energy-momentum tensor and EOS



Iwasaki gauge + NP clover at  $a \approx 0.07$  fm,  $m_{ps}/m_v \approx 0.63$ ,  $T/T_{pc} \approx 0.92 - 2.44$  with the fixed-scale approach.

- ★ 従来の方法の結果を少ない計算量で再現。=> 勾配流法の実用的有用性を実証

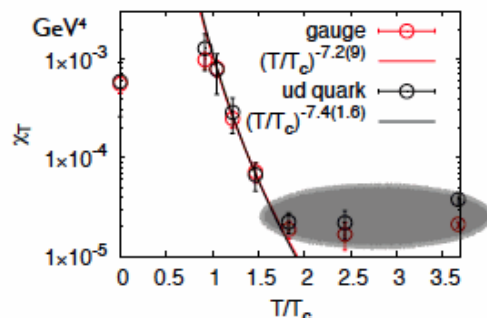
## Chiral condensate / disconnected susceptibility



- ★ Wilsonクォークの苦手とするカイラル対称性の物理量を初めて評価 => 物理量の直接計算方法であることを実証

WHOT-QCD arXiv: 1609.01471

## Topological susceptibility / axion mass at high temperatures

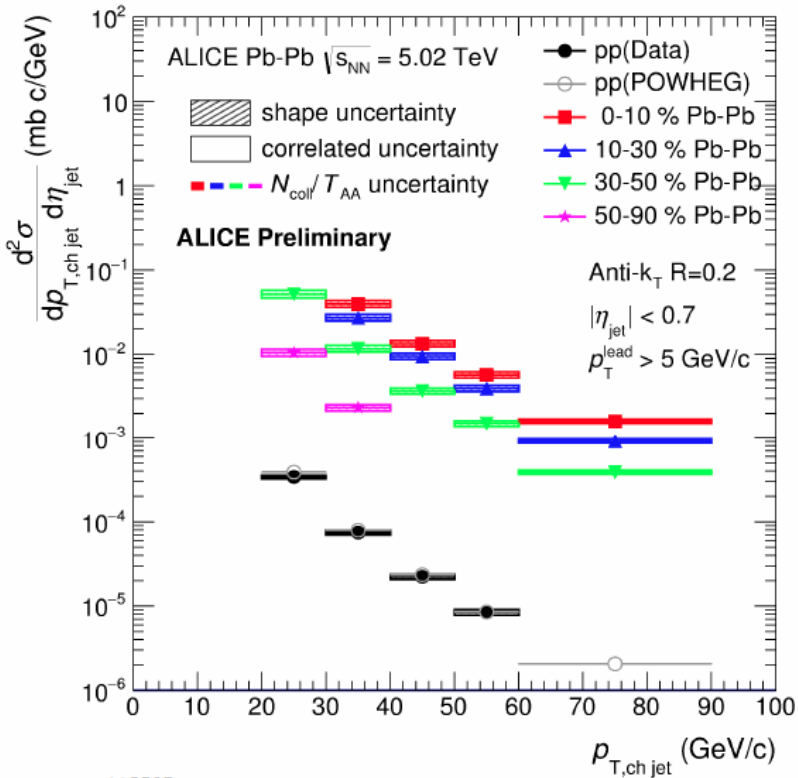


- ★ 計算コストが100倍高い格子カイラルクォークを用いなくても、2つの評価方法が一致 => 結果の信頼性を実証
- ★ アクシオン質量の温度依存性を計算 => アクシオンが暗黒物質の候補となるか検証

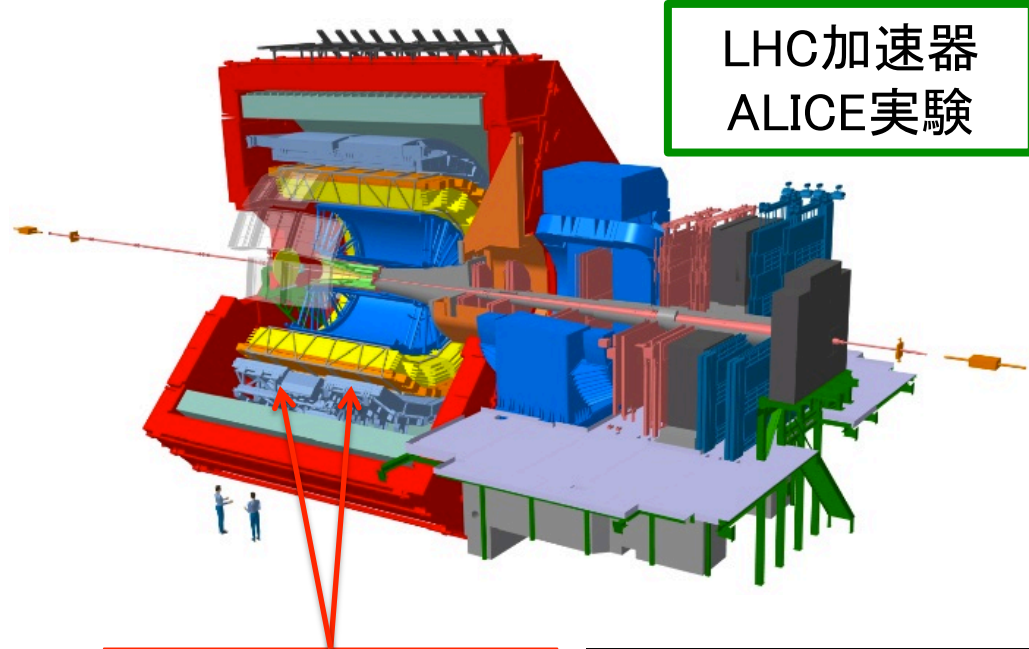
WHOT-QCD arXiv: 1611.02411

➡ 勾配流法のさらなる応用と精密化

LHC加速器  
ALICE実験

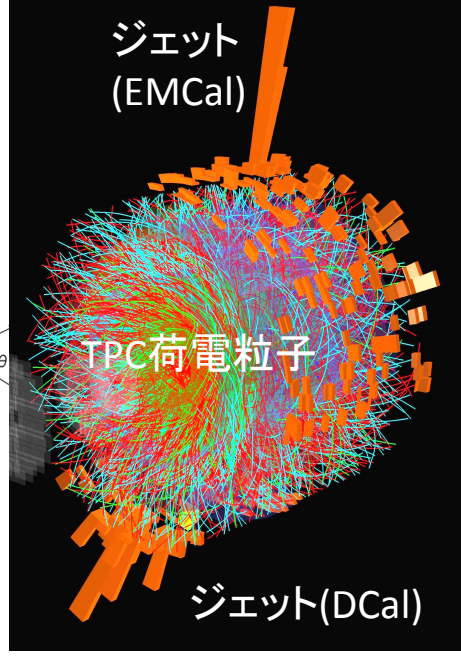
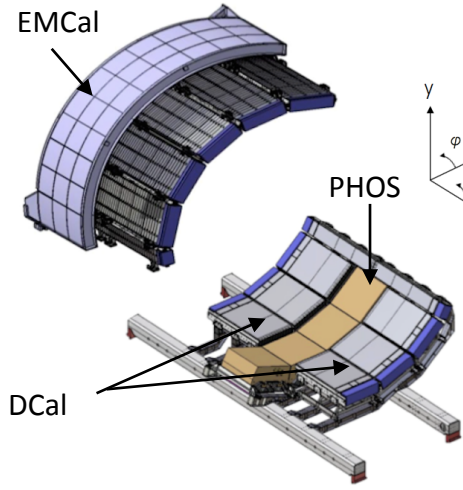
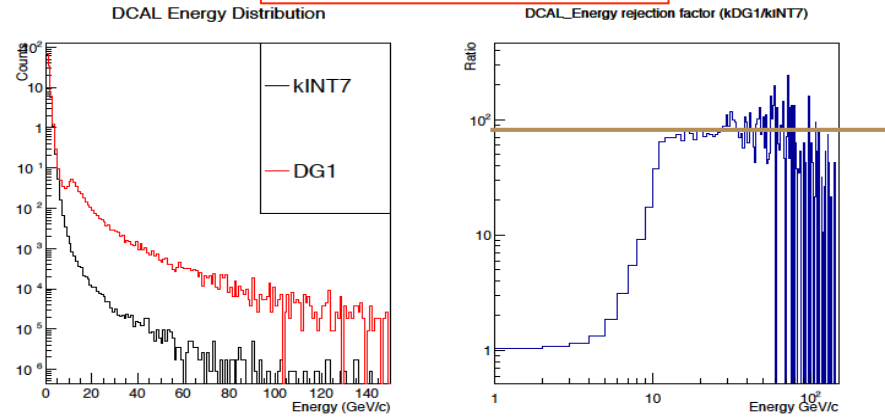


ALI-PREL-113505



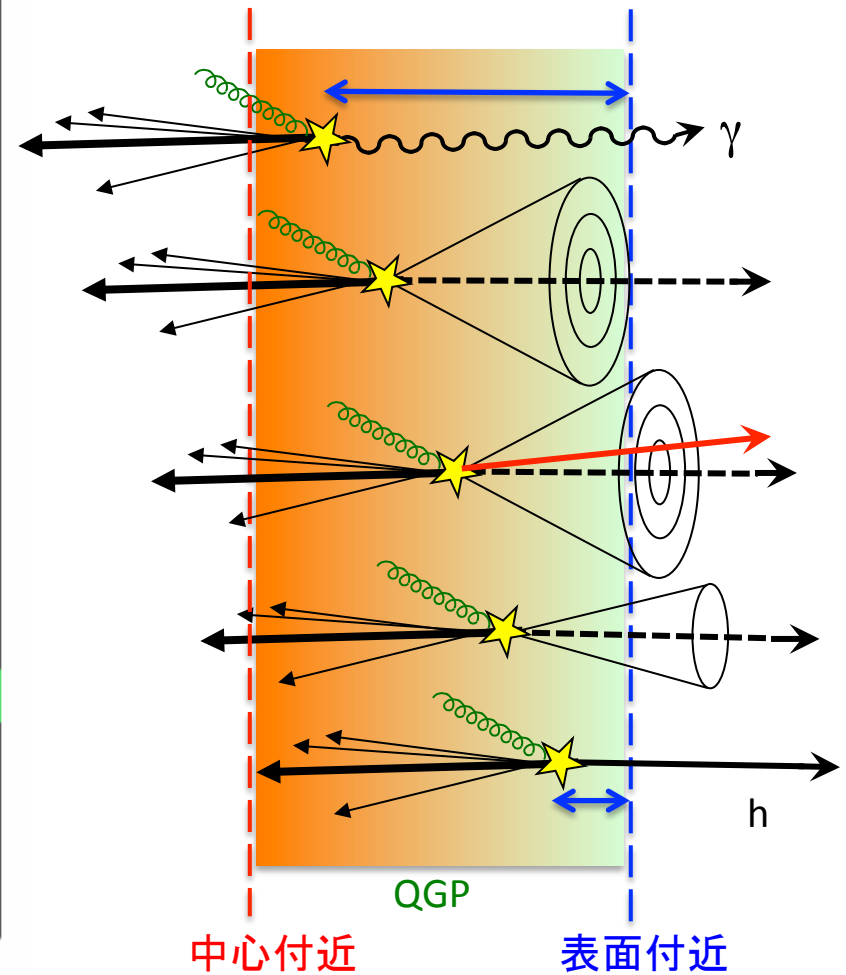
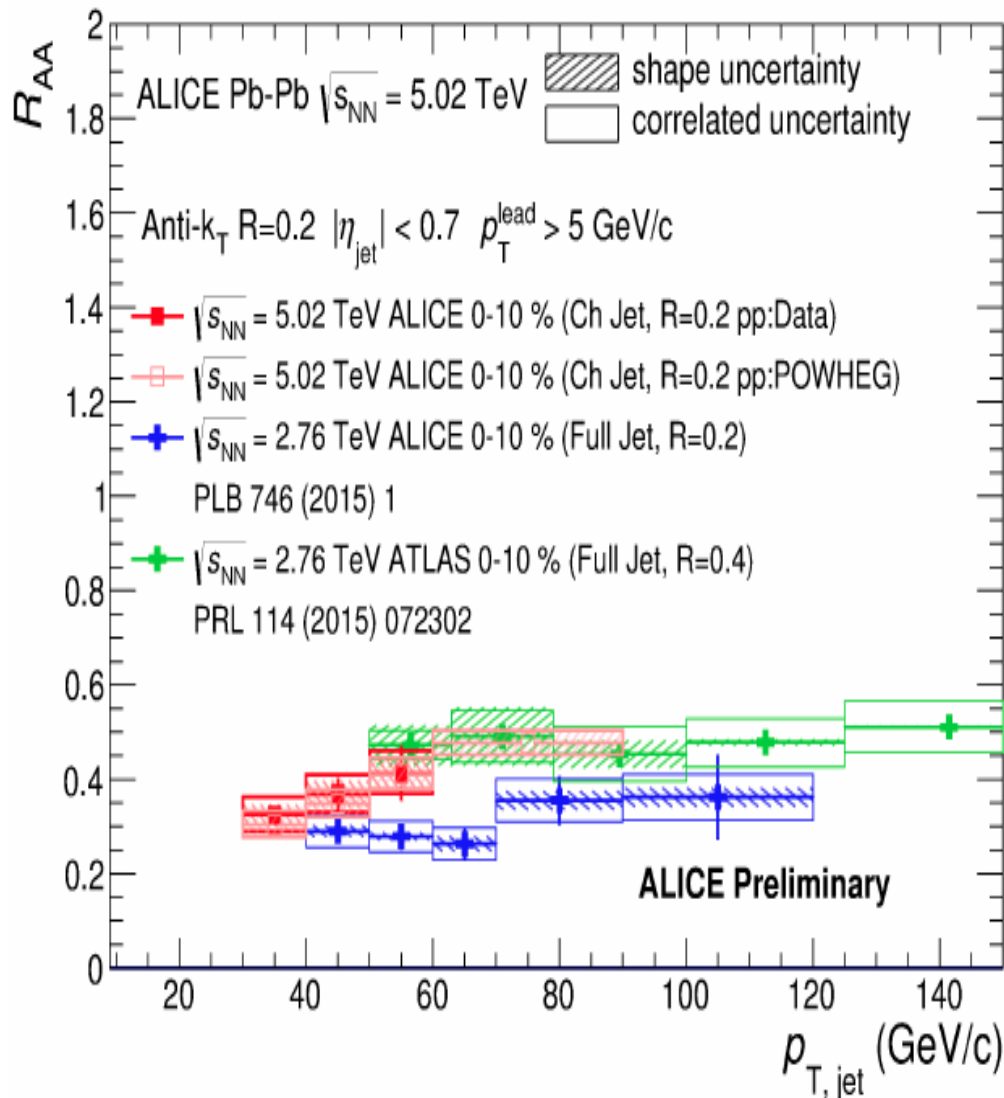
筑波大(三明、基盤S)  
により導入したDcal  
中條:Dcal検出器副代表

Dcalによるトリガー効率



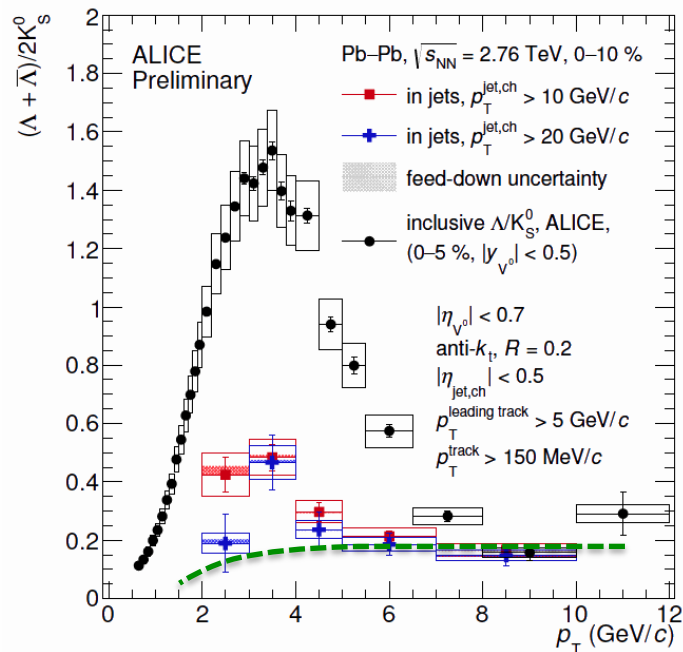
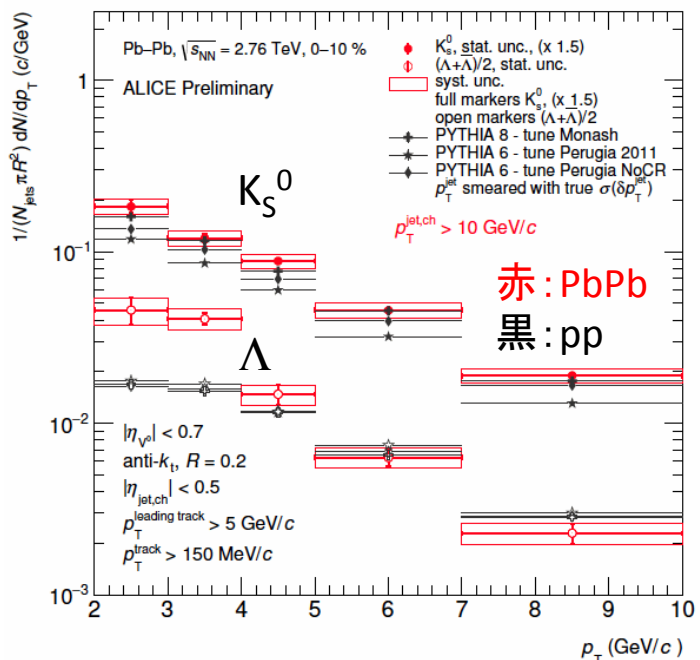
$R_{AA}$  (Nuclear Modification Factor)  
 独立な核子散乱による重ね合わせ  
 により規格化した粒子生成量

ジェットの $R_{AA}$ 測定



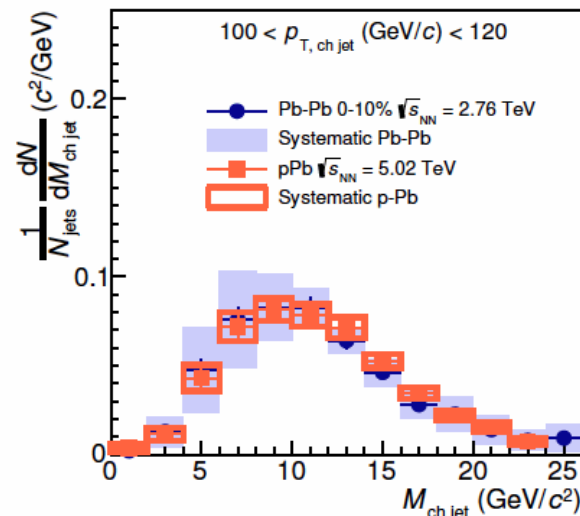
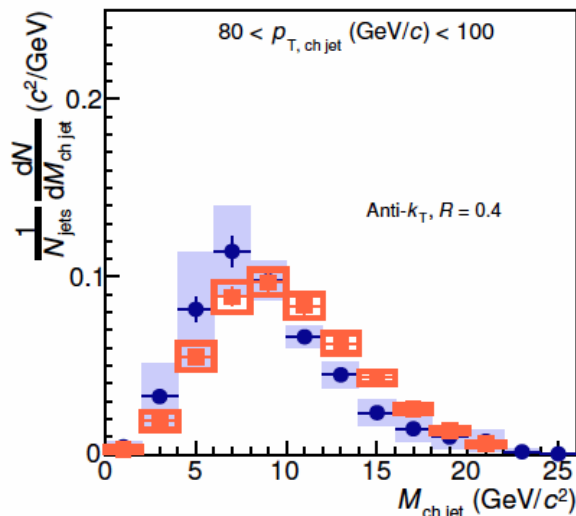
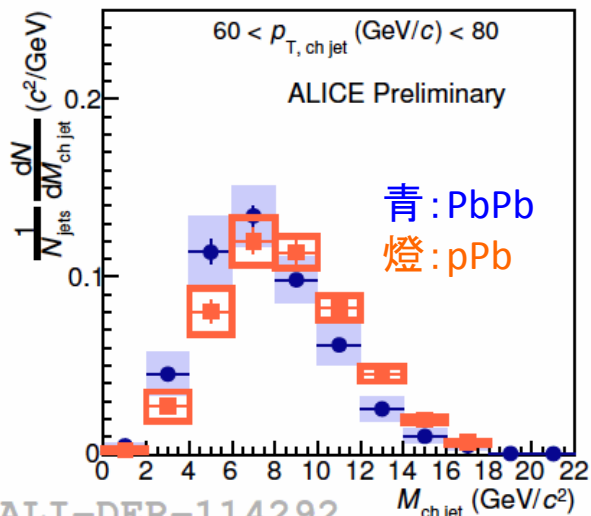
# ジェットの内部構造 の変化の研究

ジェットの内での  
粒子生成比:  
Baryon/Meson



## 低エネルギー領域でジェット質量分布の変化

国際TT: Oliver Buchs、PWG-JE



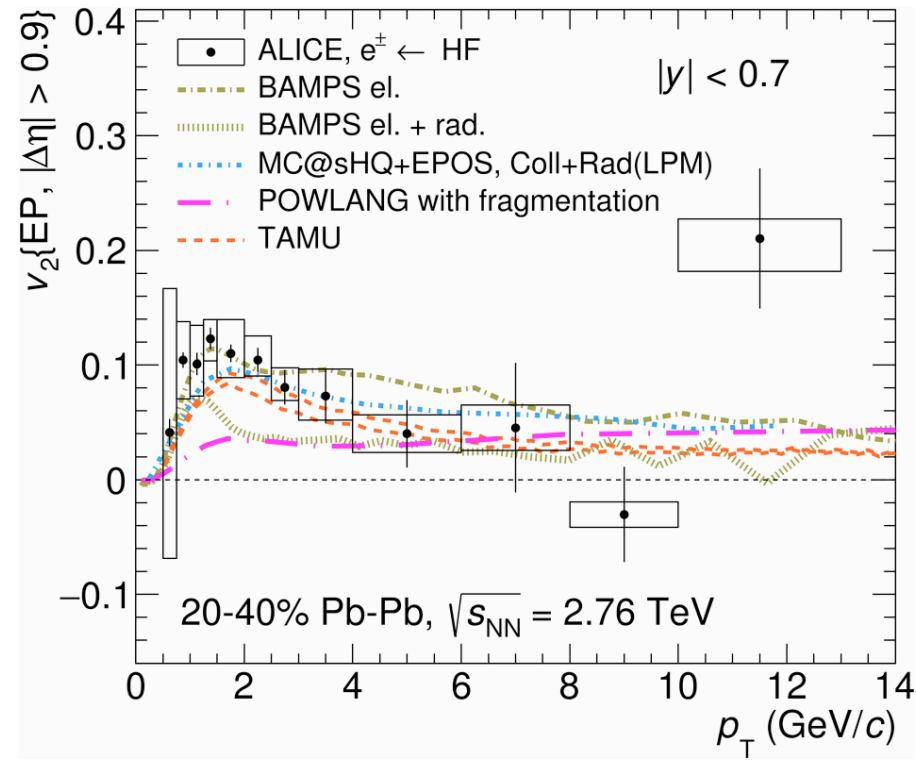
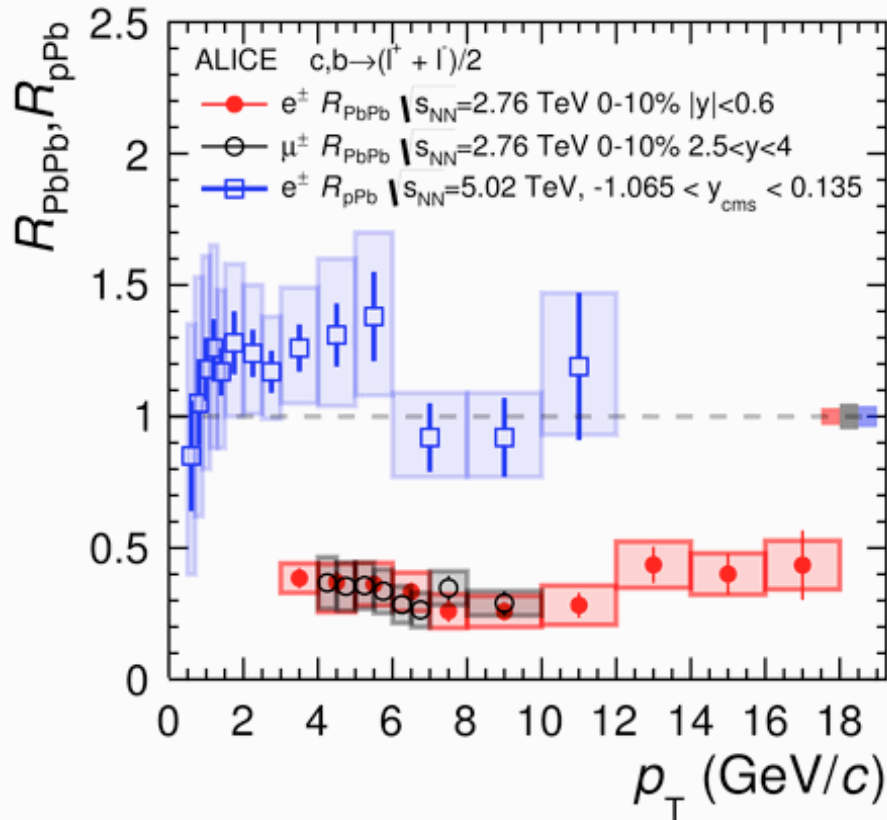
ALI-DER-114292

# LHC-ALICEにおけるheavy-flavorの研究

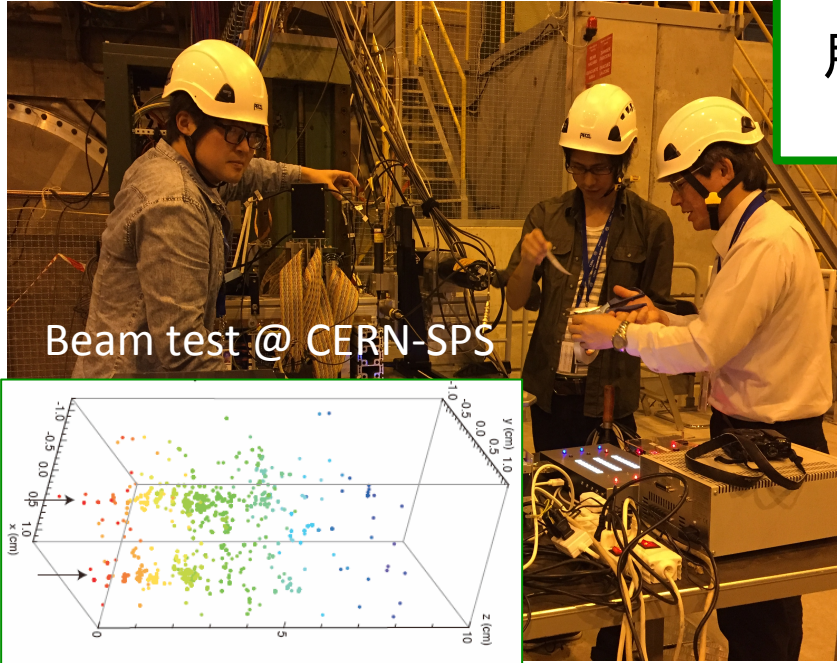
- Charm, beauty起源の粒子(D, leptons)の生成の抑制  
QGP中でのcharm及びbeauty quarkのエネルギー損失
- Charm, beauty起源の粒子(D, leptons)のQGP中での集団運動  
熱的平衡後の圧力勾配

EMCalを用いたheavy-flavor起源electronの測定 (坂井、PWG-HFE)

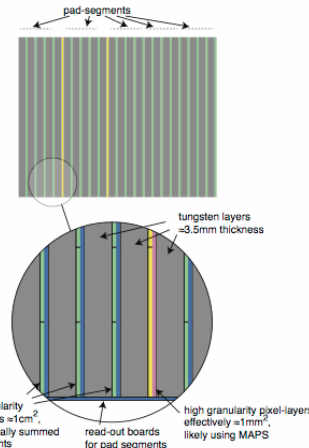
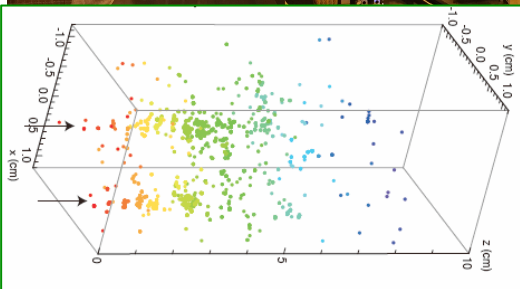
今後charm起源とbeauty起源のelectronを分離してRun1では詳細に研究が行われなかったbeautyの研究、及びheavy-flavor起源のjetの解析を行う。



# シリコン・カロリメータを用いた超前方光子検出器 ALICE実験アップグレード



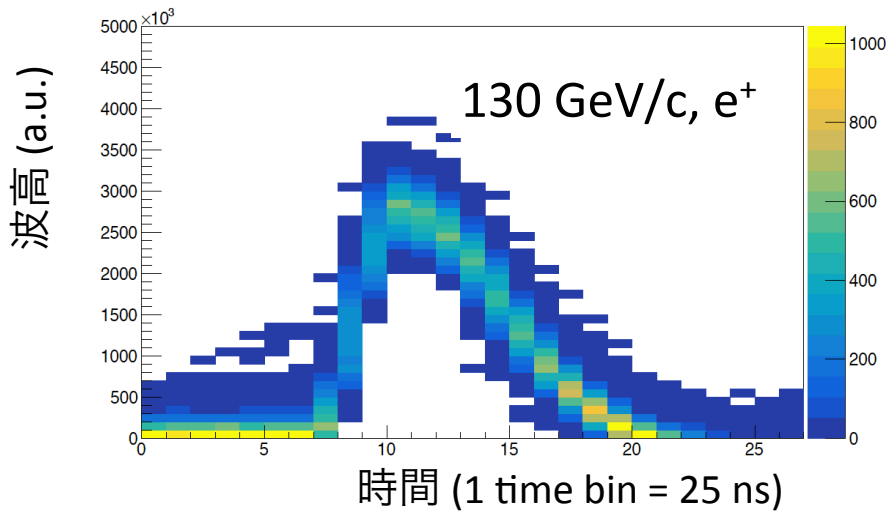
Beam test @ CERN-SPS



## ALICE実験 Grid-Tire2 計算拠点 @筑波大



### 中條、稲葉(筑波技術大)、加藤(技官)



### MonALISA Repository for ALICE



# RHIC実験の現状と次期計画

PHENIX実験終了

- ・日本側検出器の一部が来週つくばへ戻る
- ・同衝突点で新実験計画 sPHENIX(ジェット物理) 5年後開始(2021~)
- ・さらにeRHIC計画

Heavy Flavor (VTX, HFT)

Small systems (pp, pAl, pAu, dAu,  $^3\text{HeAu}$ )

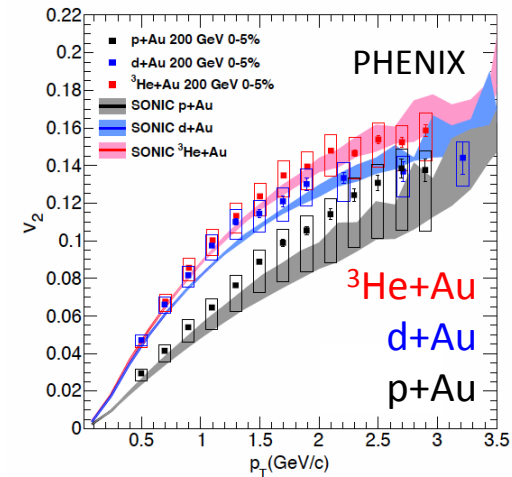
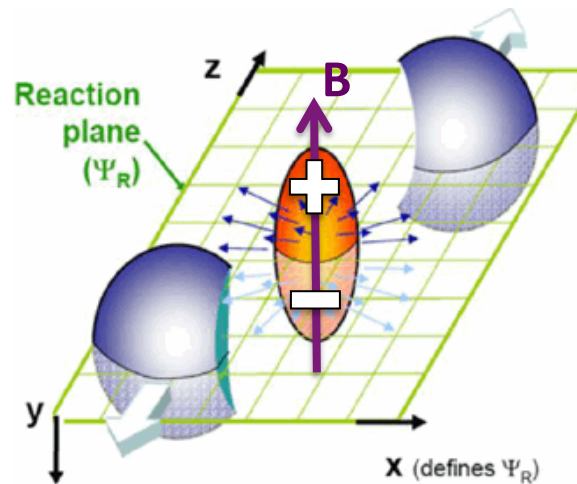
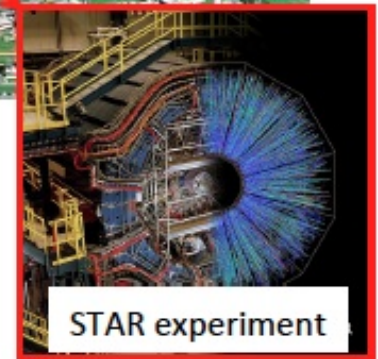
Energy Scan with dAu (2016)

Isobar Collisions (2017)

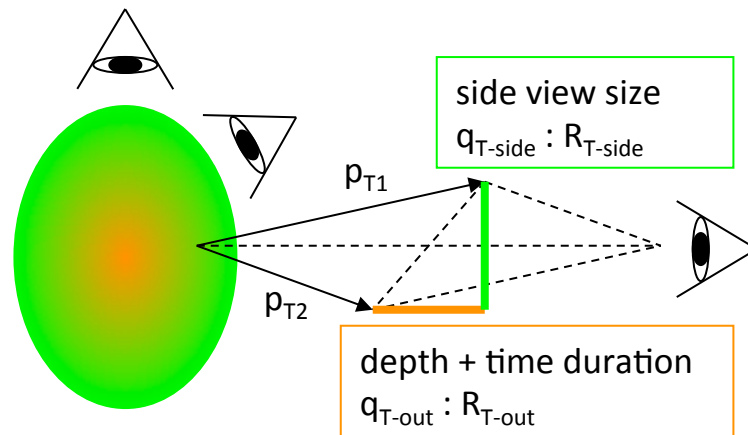
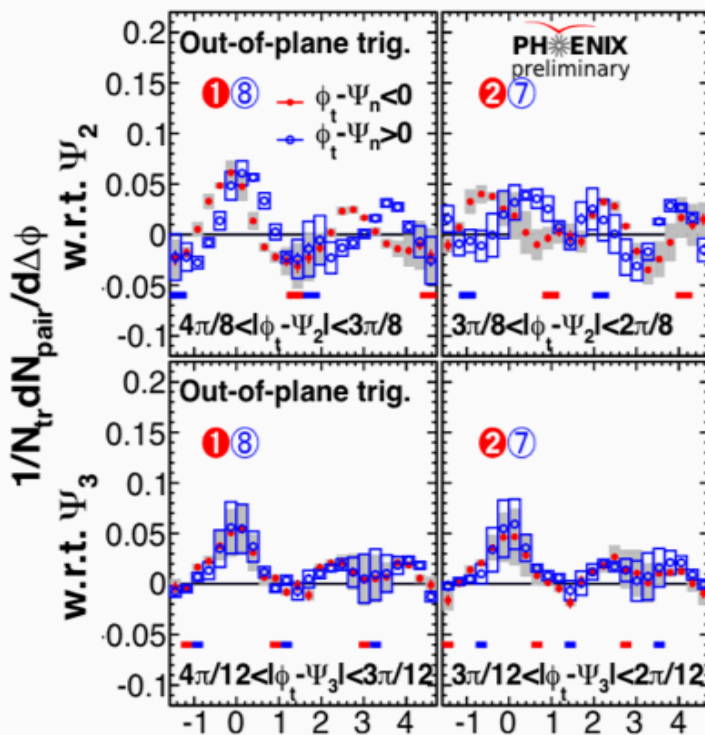
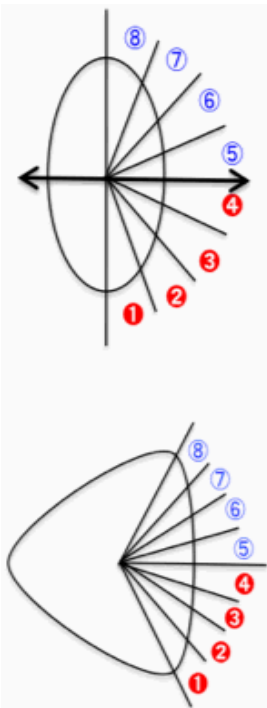
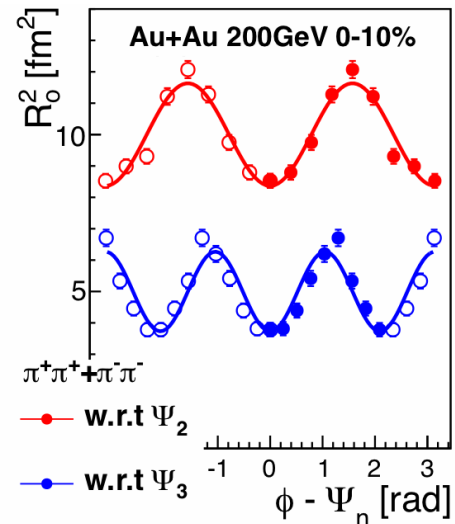
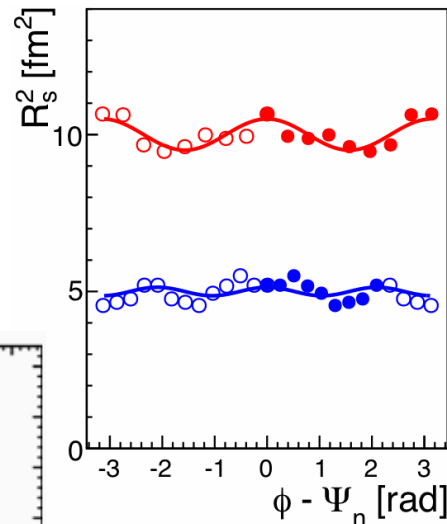
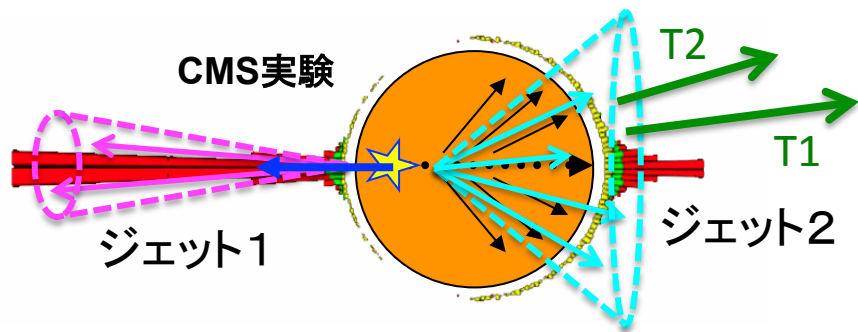
Zr+Zr[A96,Z40], Ru+Ru[A96,Z44]

STAR実験によるBES2

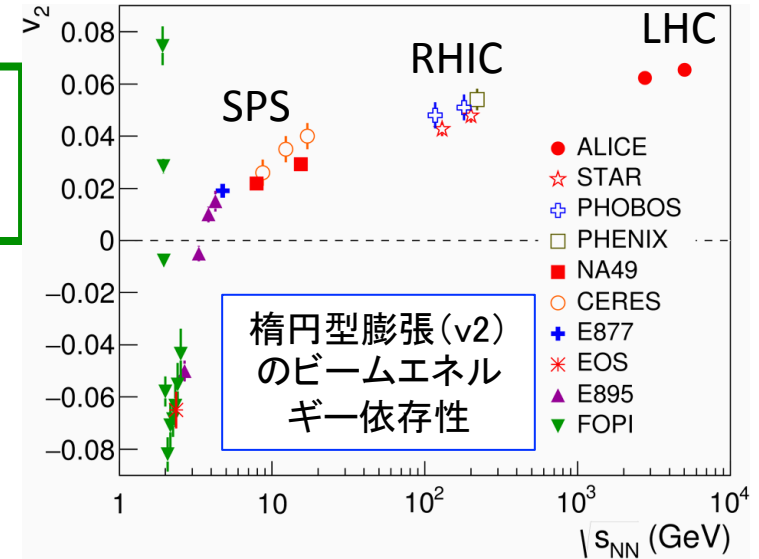
- ・筑波大、STAR実験参加
- ・2019~2020にビームエネルギー走査実験プログラム2



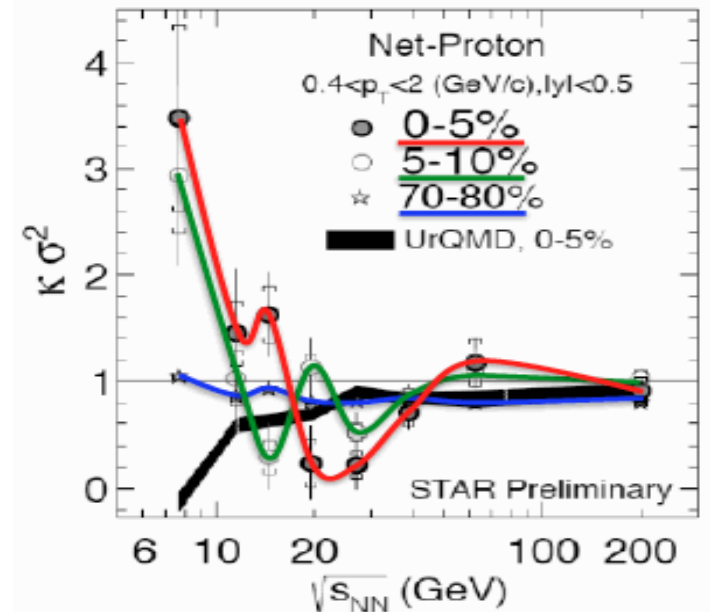
# パートン・エネルギー損失とその再分配 多粒子相関によるハード・ソフト(ジェット・バルク)物理解析



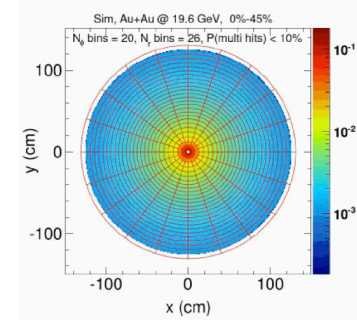
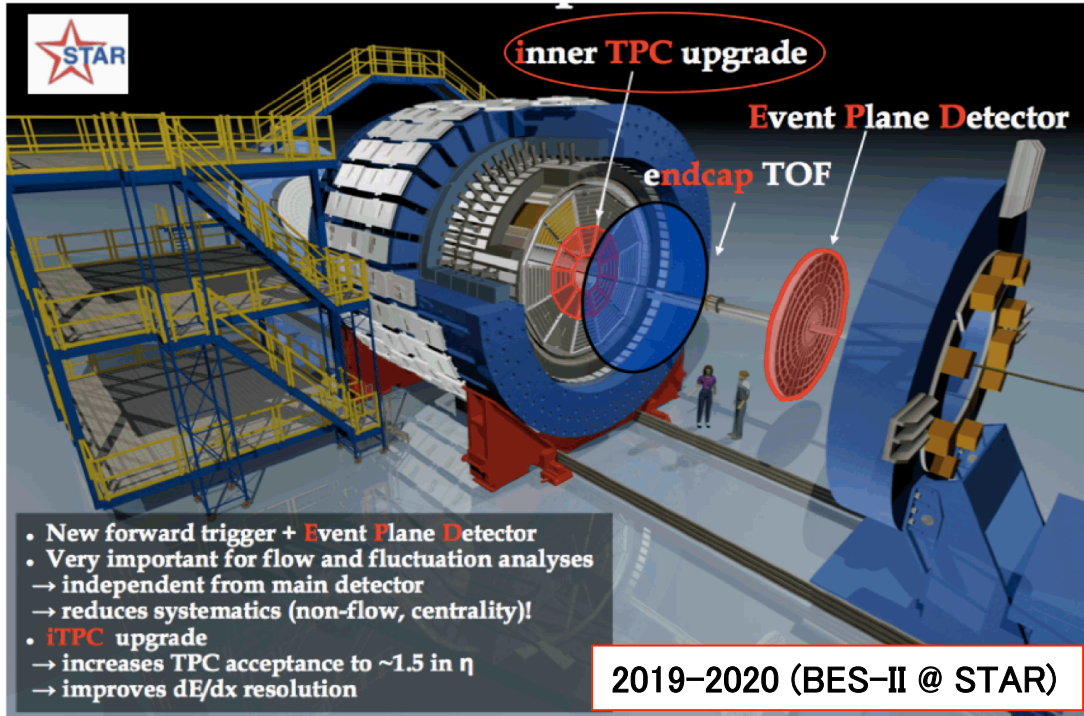
# 衝突ビーム・エネルギーを選び、 高温・高密度領域のQCD相図の探索



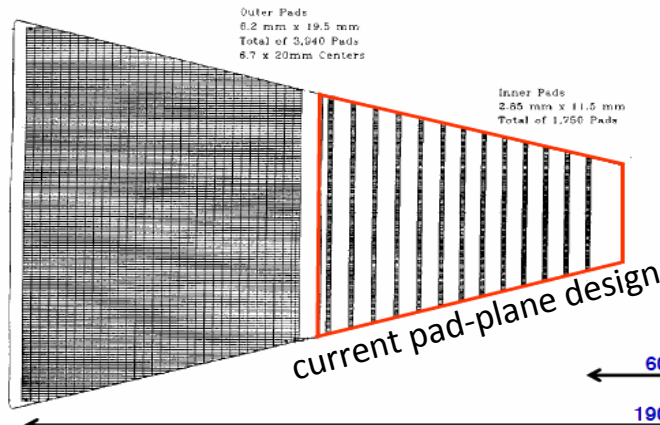
## 臨界点揺らぎ探索測定



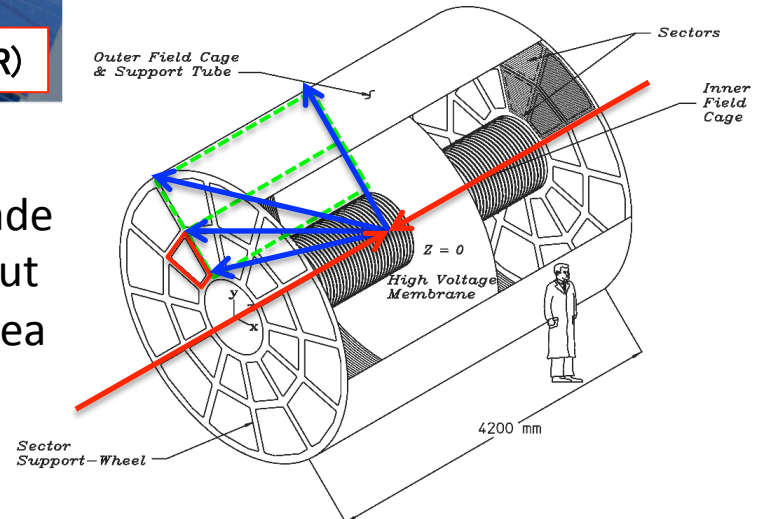
# Beam Energy Scan II (BES-II) RHIC加速器 STAR実験 ビームエネルギー走査実験による臨界点探索 (2019-2020)



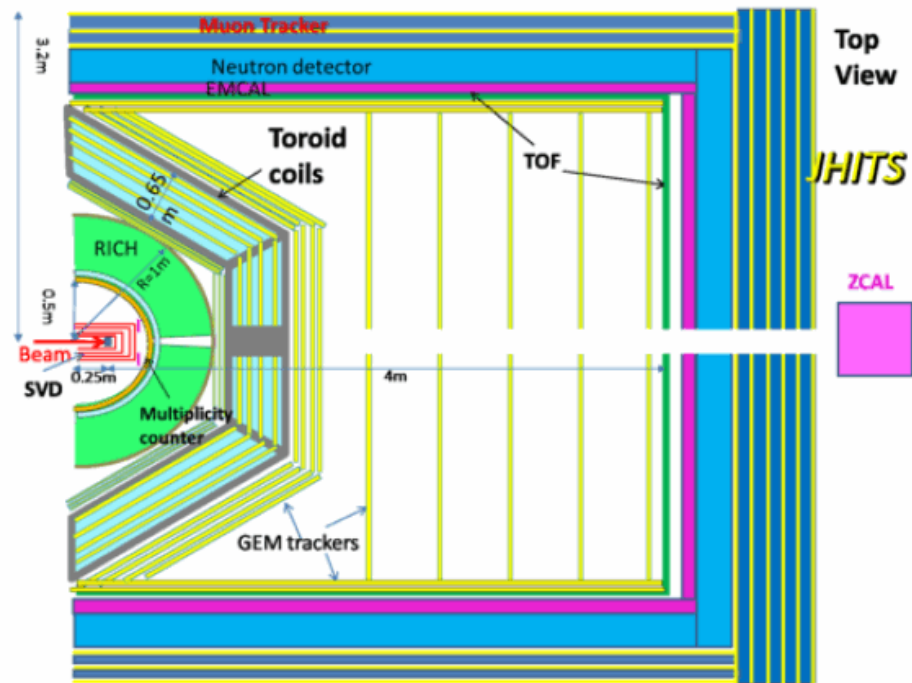
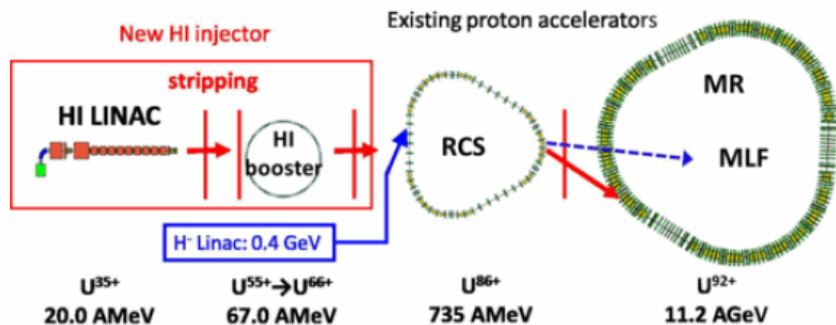
EPD検出器



iTPC upgrade  
full read-out  
of inner area

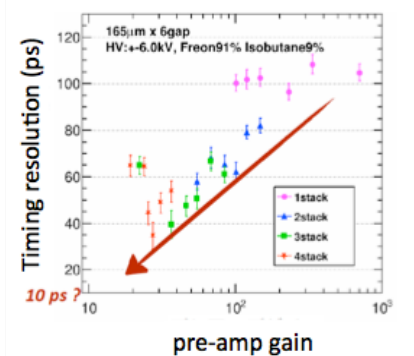


# J-PARC加速器で 重イオン加速を実現し、 重イオン衝突実験を計画中



4 stacks MRPC (6 gaps x 4)

T. Nonaka (U. Tsukuba, 2015, master thesis)



多段型レジスティブ・プレート・  
チェンバー(MRPC)による  
飛行時間検出器の開発

# 元素の起源

—数理物質融合科学センター 宇宙史国際研究拠点、  
クォーク・核物質部門(元素合成)の活動—

小沢、鈴木グループ

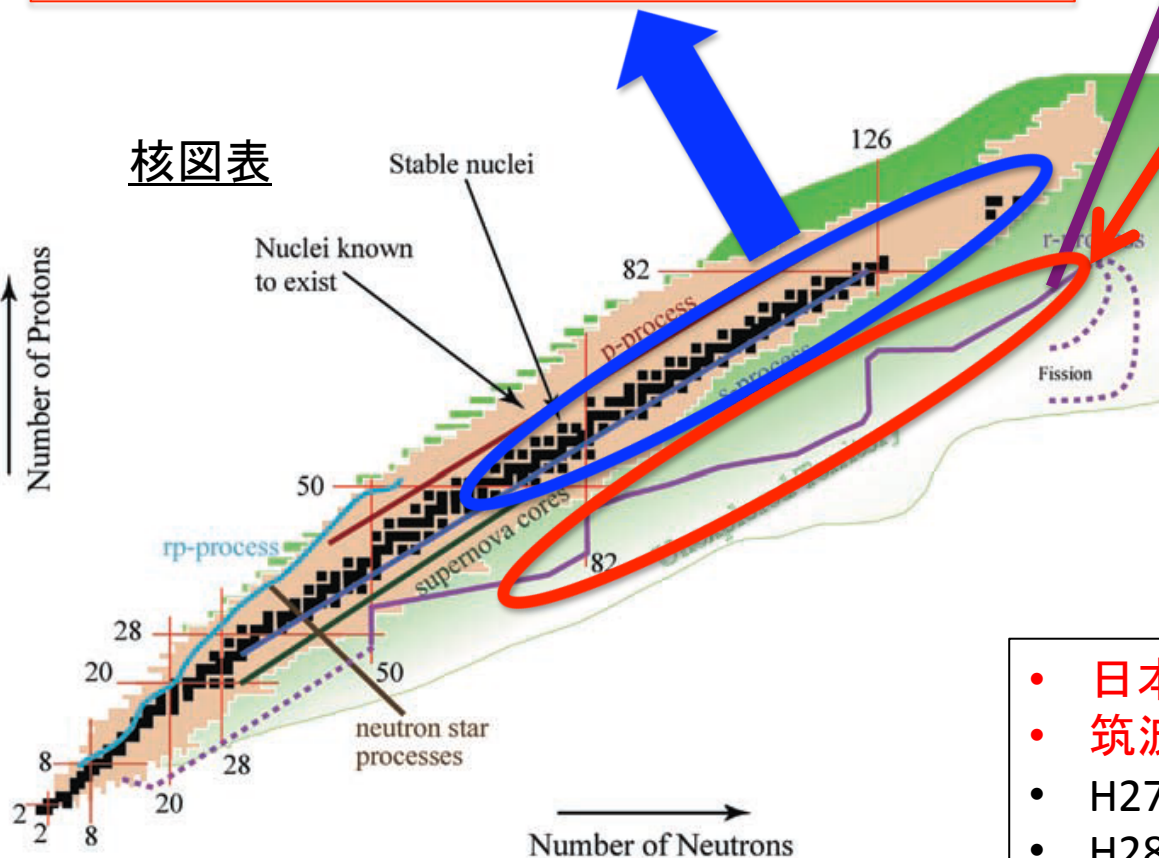
— 21世紀に解決すべき科学上の11大問題 —  
3番目: 重元素はいかにして造られたのか?

重元素合成仮説(Rプロセス)

↓ 検証には、、、

不安定核の質量測定が必須!

核図表



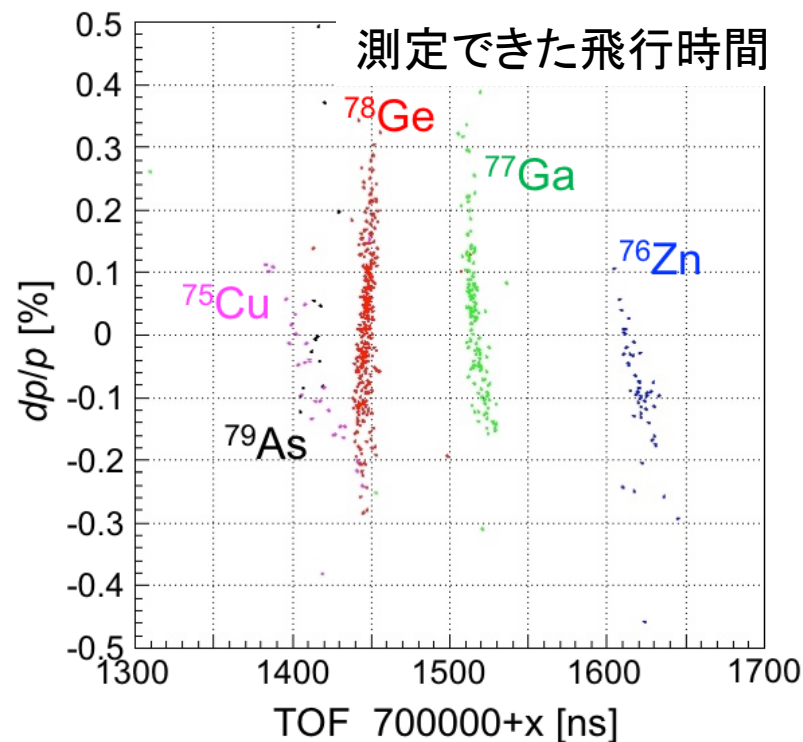
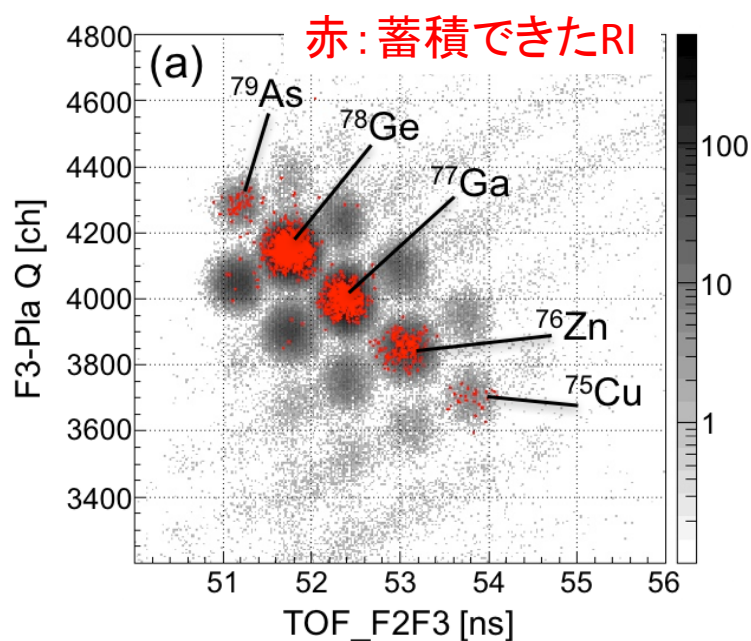
稀少RIリング@RIBF

- 日本初の不安定核質量測定装置
- 筑波大中心で約10年かけて製作
- H27、3月完成
- H28、10月実験プロポーザル提出
- H29より質量測定開始!

# 稀少RIリング、コミッションング実験

平成28年11月

## RIBFで生成したRIビームの蓄積と飛行時間測定に成功！



## 飛行時間→質量(解析中)

# まとめと展望

- Lattice QCD グループ
- QGP実験グループ
- 元素合成グループ
  
- 南極天文部門
- 素粒子構造部門
- クォーク・核物質部門

宇宙史国際研究拠点連携にむけて、各グループの研究力強化を目指すとともに、部門内グループ間及び、拠点内グループ間の連携の強化を目指す。もちろん、拠点間の連携も目指す。

ATLAS実験の重イオン衝突研究グループとの連携。