

# 高エネルギー重イオンWGLレポート (「**極限状況下での素粒子・ ハドロン物性研究**」)

郡司 卓

東大CNS

for the 高エネルギー重イオンWG

# *Outline*

- **これまでの会合に関して**
- **背景**
- **今後の研究展開**
- **研究組織の充実化**
- **リソースに関して**
- **今後の流れ**

# これまでの会合に関して

- **WGメンバー:**
  - **10人(実験: 国内7人、 国外3人)+2人(理論)**
- **会合:**
  - **9回の会合をこれまでに実施 (全てEVO)**
    - <http://indico.cns.s.u-tokyo.ac.jp/categoryDisplay.py?categId=11>
  - **各自の研究計画、理論と実験の状況整理、今後の研究展開(TFを形成)や研究組織の重要性などをWG内で議論**
  - **中間レポートを3月中旬までに纏め・公開し、以後はオープンで議論を進める**

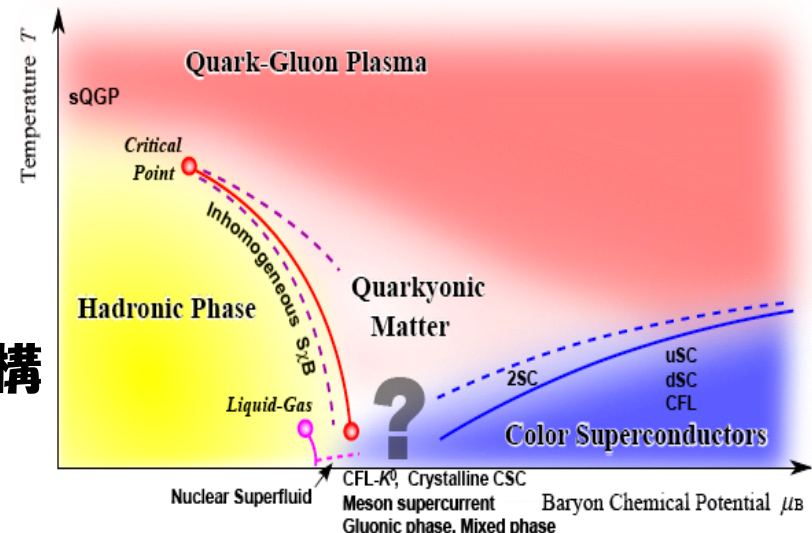
# 研究の背景

## • 高エネルギー重イオンの物理

- 極限状態における物質の存在形態、初期宇宙の様相
- 非摂動論的な領域でのQCDの理解
- 極限状態で対称性が果たす役割、QCD真空、相転移機構

## • 極限状態でのQCD物質の豊かな相構造

- クォークグルオンプラズマ
  - クォーク非閉じ込め相
  - カイラル対称性の回復
  - 初期宇宙( $\sim 10 \mu\text{sec}$ )
- 臨界点(線)・非一様混合相
  - 相構造(対称性)、QCD相転移機構
- カラー超電導相
  - クォーク対凝縮、中性子星
- 高エネルギー重イオンはこれらの研究に強力な手法



# 本研究の方向性

- **研究課題**
  - － 「**極限状況下における素粒子・ハドロン物性**」
- **研究の方向性**
  - － **強相関QGPの物性研究**
    - 「**発見**」の場から「**精密研究**」への展開
  - － **QCD相図の解明**
    - 未知なる**沃野の研究分野**
    - **QCD臨界点(線)、非一様混合相の探索や性質解明**
  - － **カイラル対称性の回復**
    - **QCD真空の構造変化の解明**
    - 対称性が回復した場として、**重イオン衝突は有意義**
  - － **コミュニティの拡大・活性化とリソース拡充化**
- **国際共同実験を中心とした研究遂行**
  - － **これまでの国際ネットワークの活用**
  - － **実験策定や検出器建設段階から携わりinitiativeを取る**

# 強相関QGPの物性研究

- **高エネルギー重イオンの歴史・背景**
  - **1974–: LBL Bevalac ( $E_{\text{CM}}/A=2\text{GeV}$ )**
    - Restoration of broken symmetries of the physical vacuum
      - これは以降の高エネルギー重イオンでも主たる研究主題
    - Creation of abnormal dense states of nuclear matter
  - **1986–: BNL AGS ( $E_{\text{CM}}/A=5\text{GeV}$ ), CERN SPS ( $E_{\text{CM}}/A = 17\text{GeV}$ )**
    - Search for the new state of QCD matter (QGP)
    - **QGP生成の尻尾 となる実験結果**
      - ストレンジネスの収量増大、 $J/\psi$ 収量抑制、低質量レプトン対の異常収量
  - **2000–: BNL RHIC ( $E_{\text{CM}}/A = 200\text{GeV}, 62.4\text{GeV}, 39\text{GeV}, 7.7\text{GeV}$ )**
    - Search for the new state of QCD matter (QGP)
    - **QGP生成の確証(流体的な振舞、強相関QGPの形成)**
      - 高横運動量ハドロン・重クォークの収量抑制、パートンレベルでの集団運動、熱的仮想光子対、 $J/\psi$ 収量抑制、低質量レプトン対の収量増大 など
  - **2010–: CERN LHC ( $E_{\text{CM}}/A = 2760\text{GeV}, 5500 \text{GeV}$ )**
    - **QGPの物性研究**

# 強相関QGPの物性研究

## • 今後の動向

### – 「発見」の場から「精密検証」へ

#### • 系全体、時空発展全体を追う枠組みの完成

- 衝突初期条件(グルオン飽和)の解明
- 熱化のメカニズムの理解
- 物性量の算出と系統性(状態方程式、輸送係数、阻止能、遮蔽長など)

#### • 強相関QGPの由来、クロスオーバー相転移の解明

#### • 異なる衝突系(エネルギー、核種、 $p+p/p+A$ )における系統性

### – RHICとLHCが主たる研究の場

#### • LHC

- 重イオンに特化したALICE実験への継続的参加
- 今後10-20年はPb+Pb, p+Pb, Ar+Arなどの系統的研究が可能
- 早期結果の精査と10-20年後の指針の決定(ALICEでも議論を開始予定)

#### • RHIC

- Energy scan : Au+Au@200, 62.4, 39, 27, 19.6, 7.7GeV
- 検出器upgradeが進行中。新たな測定量を通じた物性研究が可能
- STAR/PHENIXで10年後のdecadal planが議論されている

# 強相関QGPの物性研究

## • 展開計画

### – 今後10年

- LHC(ALICE): 物理解析。LHCエネルギーでのQGP物性量の算出
- RHIC: エネルギースキャンを用いたQGP物性の系統的研究
- 検出器upgrade
  - Jet測定の為の電磁&ハドロンカロリメータの開発・建設(ALICE/ sPHENIX)
  - 初期条件・熱化解明におけた前方方向電磁カロリメータ開発・建設(ALICE)
  - 低質量レプトン対の精密測定に向けたカロリメータ開発・建設(sPHENIX)

### – 10年後

- LHC(ALICE): グルオン飽和の定量化、早期熱化機構の解明
- RHIC(sPHENIX): jetやレプトン対など稀事象を用いたQGP物性研究
- 次世代ALICE実験の計画立案とR&D
  - 時間sliceに敏感なレプトン・光子測定を主眼とする実験計画、検出器R&D

### – 20年後

- 次世代ALICE実験の建設と実験の遂行。時間sliceなフローを使った物性量の系統的研究、時空発展シナリオの完成



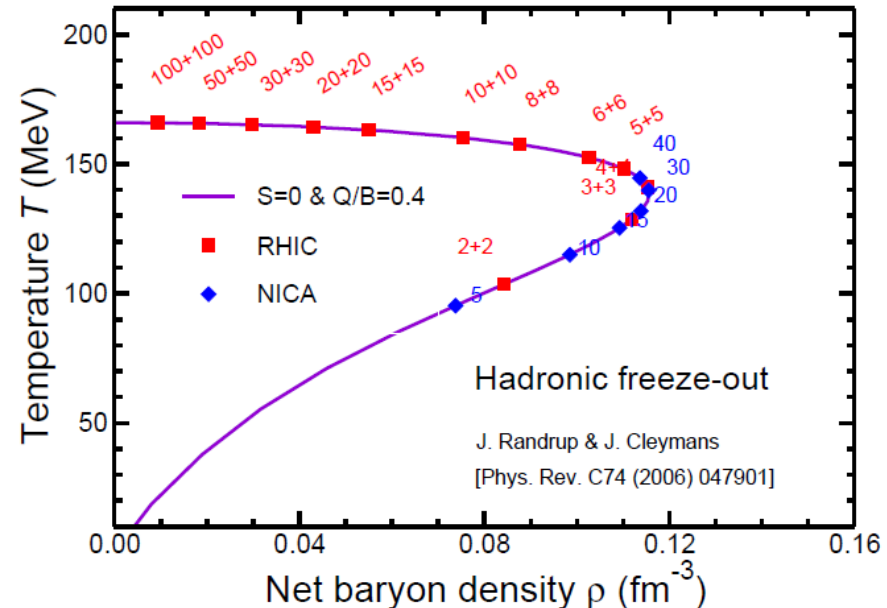
# QCD相図の解明

## ● 背景と方向性

- QCDの基本3態: ハドロン相、QGP相、カラー超電導相
- 相境界の位置、境界近傍や相転移の振舞は未知
  - 高温側、高密度極限はクロスオーバーと考えられているが、その詳細は理論的・実験的には分かっていない。強相関性との関連性
  - 有限温度・有限密度領域は、理論的にも実験的にも分かっていない
- 高エネルギー重イオンを通じて、

QCD臨界点(線)の探索、  
非一様混合相の探索、  
性質解明を進めたい

- 高密度側からQCDの多様性に迫る
- 研究中心
  - RHIC ( $E_{cm}/A = 200 - 7.7 \text{ GeV}$ )
  - FAIR ( $E_{cm}/A = 5 - 10 \text{ GeV}$ )
  - J-PARC ( $E_{cm}/A = 4 - 6 \text{ GeV}$ )



# QCD相図の解明

## ● 展開計画

### – RHIC/FAIR/J-PARCの有意性

- RHIC: energy scanを用いた系統的なQCD相のmappingが可能
- FAIR/J-PARC: 高ルミ/シティで最高密度領域の詳細研究が可能
  - Hadron 測定(freezeout/HBT/flow as baseline)+揺らぎの測定+稀事象なevent(レプトン対、jet、重クォーク)の測定を進めたい

### – 初期計画(現在～約5年後)

- RHIC energy scanの実行と物理データ解析
- PHENIX次期計画への検出器R&D(大アクセラタンス下での揺らぎ・レプトン測定)
- FAIRへ向けての検出器R&D(カロリメータ、RICHの開発)
- J-PARCの重イオン加速器建設(イオン源、injectorなど)の可能性の議論

### – 中期的(約10年後)

- RHIC-PHENIXでのenergy scan実験。FAIR SIS100での実験遂行
- FAIR SIS300に向けた実験立案、検出器R&D
- J-PARCでの重イオン加速器建設。実験立案と検出器R&D

### – 長期的(約20年後)

- FAIR SIS300・実験検出器の建設。J-PARCでの重イオン実験開始

# カイラル対称性の研究

## • 背景と方向性

- 通常原子核密度中での部分的回復の研究
  - ストレンジネス・ハドロン物理の主テーマの一つ
    - ベクトル中間子( $\rho, \omega, \phi$ )の核密度中での質量・幅の変化
    - $\pi$ 中間子と原子核の束縛中での $\pi$ 崩壊定数測定
- 高温度・高密度状況下での対称性の回復に関する研究
  - QCD相図(非閉じ込め相転移、カイラル相転移)とも密接に関連する物理。RHIC/LHCでのQGP生成は強い動機づけ
  - FAIR/J-PARCの高密度原子核系でも検証する事は重要
  - これまでの実験的研究
    - HADES(GSI), CERES(SPS), NA60(SPS), PHENIX(RHIC)での低質量レプトン対の収量増大。統一的な見解はまだない(特にPHENIXの結果)
    - FAIR/J-PARCの高バリオン密度領域での、重イオン衝突でのレプトン測定はまだない
  - 重イオン衝突における実験的な検証には、これまでの研究成果を精査し、有効な手段(測定量や手法)を検証する必要がある
    - LMVは間接的。Medium modificationとカイラル対称性との関連性
    - 他のフローの可能性( $\sigma$ メソン、擬スカラー中間子)
    - まだまだ議論を重ねて行きたい

# コミュニティの活性化

- **この物理の発展にはコミュニティの活性化が重要**
  - 高エネルギー重イオン衝突実験は国際共同実験。多くの研究機関の協力のもとで遂行
  - コミュニティの活性化には、魅力ある物理はもちろんの事、豊富な人的資源、研究資金(検出器開発、現地での研究遂行費)が不可欠
    - 掲げる物理(Big picture / big science)やその物理で繋がる大規模研究組織の確立は一つの方法
      - (例)EMMI@GSIのような「極限状況下での物性」で繋がる組織
      - (例)「初期宇宙」で繋がる物理
      - BNL / CERN / FAIRなど海外における研究拠点の充実化
      - その一方で、先導性や魅力のある検出器・関連技術開発もコミュニティの活性化に重要なアイテム。技術開発においても引っ張っていく
- **この点も継続して検討していく予定**

# リソースの概略

## • 投入されてきたリソース

### – RHIC-PHENIX建設時:

- 人員：約30-40人(9研究・大学機関)
- 主な予算：2-3億円/年(日本学術振興会：日米科学協力事業(高エネルギー))

### – RHIC-PHENIX 2004年時(高統計Au+Auラン)

- 人員：約100人(10研究・大学機関) \*spin研究者も含む
- 主な予算：物品費:1億円/年、旅費:1.5千円/年(日米科学協力事業(高エネルギー))

## • 現在投入されているリソース

### – RHIC-PHENIX：

- 人員：約60人(8研究・大学機関) \*spin研究者も含む
- 主な予算：TBC/年(日本学術振興会：日米科学協力事業(高エネルギー))

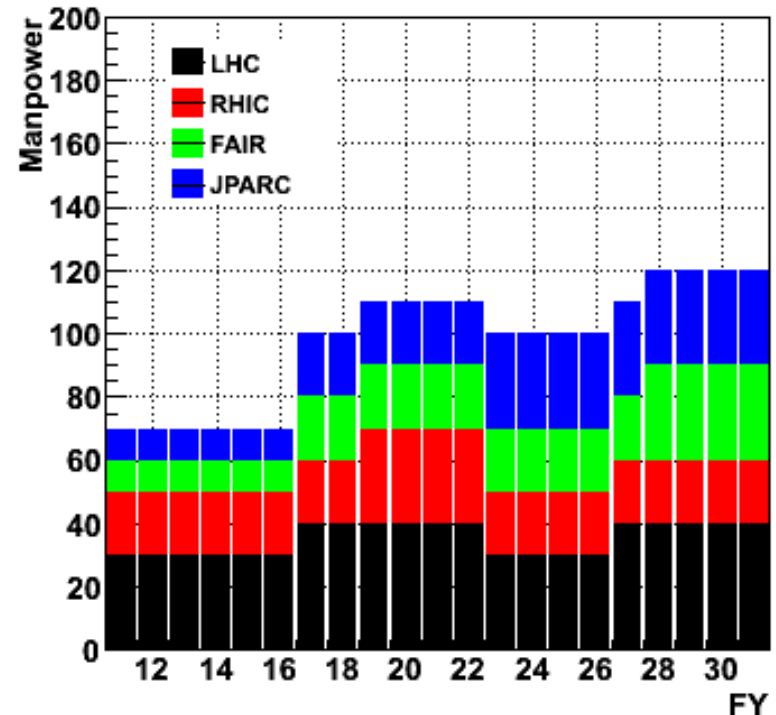
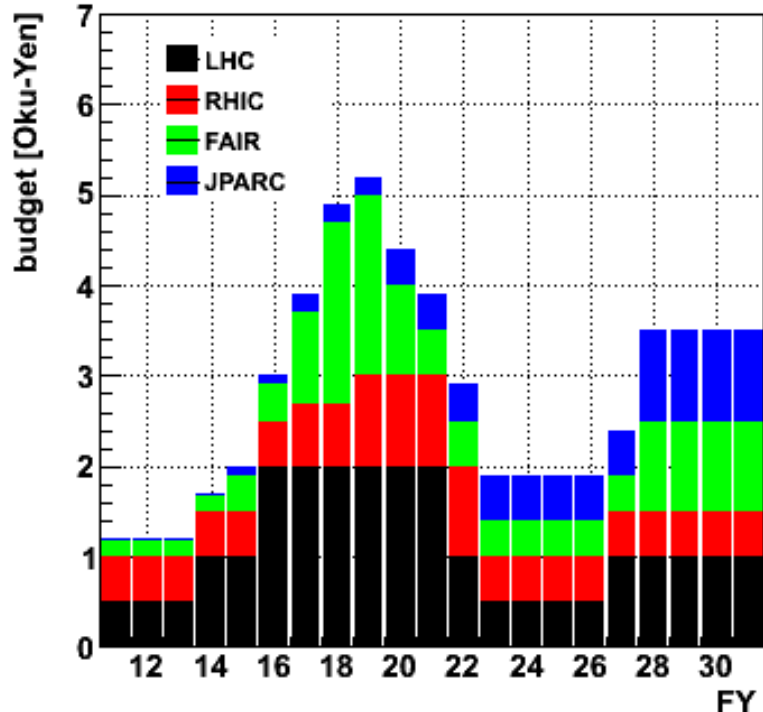
### – LHC-ALICE：

- 人員：約20人(3研究・大学機関)
- 主な予算：各機関の自助努力が基本であった
  - 平均すると約6千万円/年(特別研究推進、基盤研究、大学運営費)
  - 今年度に特推が終了し、来年度は頭脳循環(東大・広島)が渡航費
    - » 頭脳循環を海外派遣事業の目玉にしたいとの事(学振)

# リソースの概略

## 今後必要となるリソース

- 全て行うリソースの確保は難しい。議論を重ねて戦略を練る予定



DCAL建設 HCAL/FCAL建設 sALICEのR&D/建設

sPHENIXのR&D 建設

FAIR 検出器R&D 建設 SIS300 実験 R&D 建設

J-PARC実験 R&D 建設

\*RHICでの経験(予算、人員)より求めたもので、今後の議論で精度を高めていく

# 今後のWGのプラン

- **現在、中間レポートを纏めている。**
  - **これを第一稿として、重イオンコミュニティに提示予定(3月中旬を目途に)**
- **この後の議論はオープンにし、詳細な検討へと移行する**
  - **物理目標とそれに向けた実験的取組の具体化**
  - **実験的取組の順位づけ**
  - **コミュニティ拡大化への戦略**
- **第2稿のレポートを5-6月頃を目途に作成**

# WGメンバー

- **世話人: 早野(東大)**
- **代表: 郡司(東大CNS)**
- **副代表: 中條(筑波)**
- **実験: 江角(筑波), 大山(Heidelberg),  
坂井(LBL), 坂口(BNL), 志垣(広島),  
下村(筑波), 鳥井(広島), 蜂谷(理研)**
- **理論: 平野(東大), 福嶋(慶応)**



Backup slides

# 研究の背景

## 高エネルギー重イオンと絡み合う物理

### – QCD、現象論(動的過程の記述)

- 格子QCD計算
  - 状態方程式、輸送係数、阻止能
- 核子構造 (初期条件)
  - グルオン飽和
- 非平衡QCD
  - 熱平衡化機構、プラズマ不安定性
- 相対論的流体力学、熱・統計力学
- 摂動論的QCD

### – 強相関で繋がる系(物性)

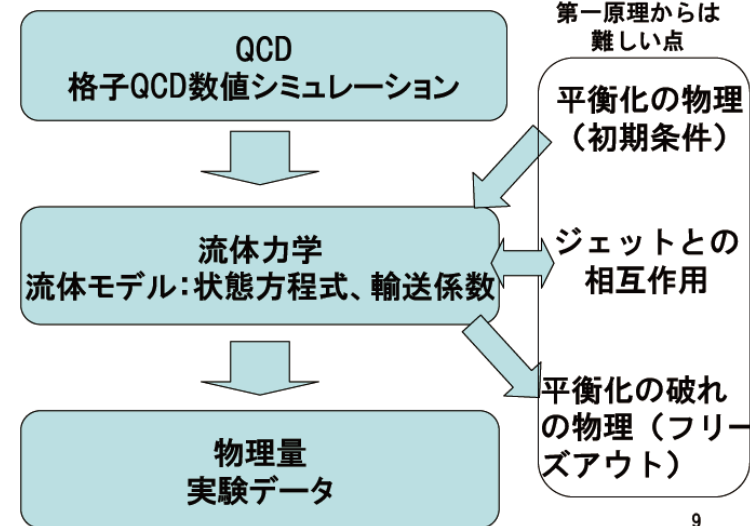
- 冷却原子系(極低温強結合Fermiガス)
- 半導体中の高密度電子ホールの強相関系

### – 弦理論、重力理論との対応

- AdS/CFT対応

### – 宇宙との繋がり

- 初期宇宙の世界、中性子星、クォーク星



豊かな物理  
多様な世界との繋がり

# 研究の背景

## • 高エネルギー重イオンと絡み合う物理

### – 他のWGとの繋がり

#### • ハドロンWG

##### – カイラル対称性の回復研究

» 対称性が回復する場として高エネルギー重イオンは有意義な研究手法

##### – Charmを含むExotic hadron

» 高エネルギー重イオン衝突において、収量が増大するとの予想 ( $\text{Charm生成} \propto N_{col}$ ,  $\text{軽いクォーク} \propto N_{part}$ )

#### • ハイパー核・ストレンジネスWG

##### – RHIC-STAR実験が重イオンで

${}^3_{\Delta}H$ と $\text{anti-}{}^3_{\Delta}H$ を観測

#### • 核子構造

##### – 陽子・原子核核子中でのグルオン飽和

