核物理将来レポート:高エネルギー重イオン (第 3 稿)

江角　晋一 (筑波大学)、大山　健 (Heidelberg University)、
郡司　卓 (東京大学)*、坂井　信吾 (Lawrence Berkeley National Laboratory)、
坂口　貴男 (Brookhaven National Laboratory)、志垣　賢太 (広島大学)、
下村　真弥 (Iowa State University)、中條　達也 (筑波大学)†、
鳥井　久行 (東京大学)、蜂谷　崇 (理化学研究所)、
平野　哲文 (上智大学)、福嶋　健二 (慶応大学)

2011 年 12 月 29 日

1 Introduction

1.1 高エネルギー重イオンの夢

原子核素粒子物理学の永きに亘る大きな目標として、自然を支配する基本法則、物質を構成する究極の基本要素および、ビッグバンから始まる宇宙の進化と物質創成機構の解明が挙げられる。この中にあって、高エネルギー重イオングループは、以下の夢を持って研究を推進する。

1. **初期宇宙での極限物質の様相とその進化、物質創成の謎の解明**
2. **星の終焉での極限物質の様相、高密度 QCD 多体系の相構造の解明**
3. **QCD 真空の構造、ハドロン質量の発現機構の解明**
4. **高強度ゲージ場と非平衡 QCD のダイナミクスの解明**

図 1 に温度とバリオン化学ポテンシャルを変数にとった QCD 物質の相図 (理論予想) を示す [1]。QCD 真空はクォークとグルオンが複雑に凝縮した状態である。QCD 真空は、高温高密度という極限状況下で様々な性質を持つ事が示唆されている [1, 2]。格子 QCD 第一原理計算によれば、10^{12} K 以上の超高温状態では QCD 真空がクロスオーバーを起こし、「クォークの非閉じ込め」と「カイラル対称性の回復」が実現したクォーク・グルオン・プラズマ (QGP) が生成されると考えられている [3]。QGP は宇宙開闢から 10μsec 後の世界の極限物質状態であり、その後の初期宇宙の進化や物質創成を理解する上で非常に重要な相である。また、様々な有効理論計算によれ

* 高エネルギー重イオン WG 代表、gunji@cns.s.u-tokyo.ac.jp
† 高エネルギー重イオン WG 副代表、 chujo@sakura.cc.tsukuba.ac.jp

ば、有限密度下における QCD 物質は、QCD 臨界点 (線)、非一様混合相、非同時に起こる非閉じ込め相転移とカイラル相転移、ダイクォーク凝縮、ダイクォーク励起、クォーキオニック相などという非常に豊かな相構造を持つ事が示唆されている。この相構造の解明は、中性子星やクォーク星といったコンパクト星の形成の謎、星の終焉における極限物質、宇宙における物質の起源や星の進化への理解に非常に重要である。また、ハドロンがどのような機構で質量を得るのか？という問いに対して、未だ実験的検証は十分でなく、この問いに答える事も夢である。

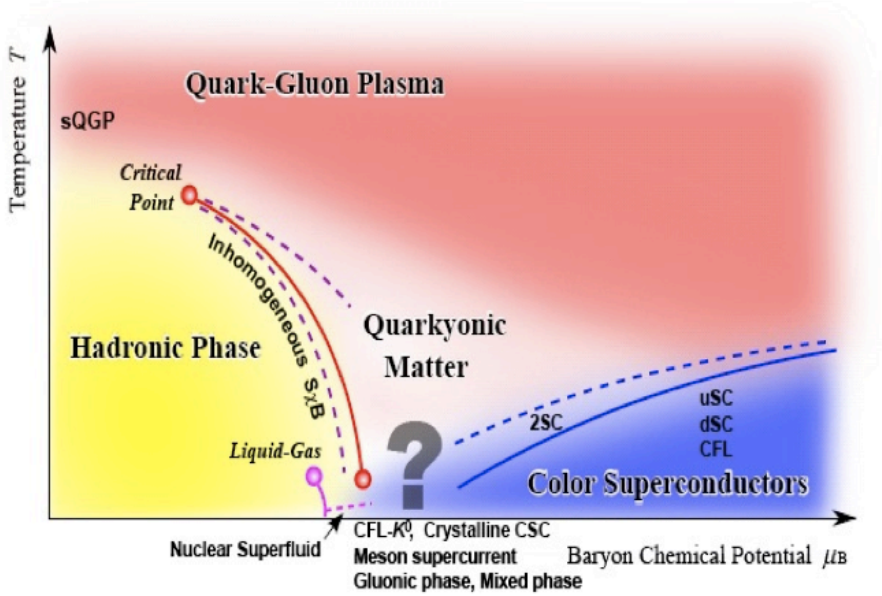

図 1　QCD 相図の温度やバリオン化学ポテンシャル依存性 [1]

1.2　高エネルギー重イオン衝突の歴史

高エネルギー重イオン衝突は、高温高密度 QCD 物質を作り出す唯一の実験的手法である。1970 年代半ばの BEVALAC 加速器 (米国ローレンスバークレイ研究所、実験室系エネルギー 2GeV/核子) にて原子核衝突の先駆的研究が行われて以来、1980 年代の AGS 加速器 (米国ブルックヘブン国立研究所、実験室系エネルギー 10-20GeV/核子) や SPS 加速器 (欧州 CERN 研究所、実験室系エネルギー 160-200GeV/核子) における中間エネルギー重イオン衝突を経て、現在はブルックヘブンの RHIC 加速器 (2000 年〜、重心系エネルギー 200GeV/核子）や CERN の LHC 加速器 (2009 年〜, 重イオンは 2010 年〜、重心系エネルギー 2.76, 5.5TeV/核子) での高エネルギー重イオン衝突が研究の中心となっている [4]。また、将来計画の一つとして、高密度 QCD 相構造研究に向けた高・中間エネルギー重イオン衝突も、ドイツの GSI 研究所の FAIR 加速器にて計画されている [5]。

1.3 日本グループの貢献

日本グループは BEVALAC 加速器から AGS そして SPS 加速器における重イオン衝突実験に参画し、長年に渡りこの分野を牽引してきた。現在は、京都大学、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、筑波大学、東京大学、東京工業大学、長崎総合科学大学、広島大学、理化学研究所、立教大学が、RHIC で行われている国際共同大型実験 PHENIX 実験[*1]に参加しており、RHIC における QGP 物理やスピン物理を先導している [6]。筑波大学、東京大学、広島大学の日本グループは CERN-LHC で行われている国際共同大型実験 ALICE 実験[*2]に参加し、LHC エネルギーでの重イオン衝突を通じた QGP の物性研究を展開している [7]。

理論においても日本の研究者は QGP や重イオン衝突の物理に多大な寄与をしてきた。南部による対称性の自発的破れと核子の質量獲得機構は、現代的な観点では QCD のカイラル対称性の動的破れとクォークの質量獲得と解釈できる。1980 年代に初田と国広は、この観点から QCD 物性論の幕開けとなる先駆的研究を展開した。その後、QCD 相図上に臨界点が存在する可能性を最初に指摘したのは浅川と矢崎である。歴史的には 1970 年代初めにクォーク物質が中性子星内部に存在し得ることを予言した一人が伊藤である。まだ大型加速器もなく、宇宙線における多重発生現象を解析していた 1950 年代、磯、森、並木はランダウ流体モデルの場の理論的基礎づけを行った。1980 年代以降、重イオン衝突における QGP 生成のシグナルとして、松井と Satz は J/ψ 粒子の抑制現象を提案し、これは現在も QGP をプローブする強力な手段である。宮村らも同時期に有限温度媒質中での J/ψ の質量変化を提案し、ハドロンスペクトルの変化の先駆的な研究を行った。

1.4 研究テーマ, Key Figure

上記で掲げた夢を受けて、以下のテーマに関する実験研究を推進する。

- **QGP 物性の精密研究、熱平衡化機構 (ゲージ場のダイナミクス) の研究**
- **有限密度 QCD 相構造の研究**
- **カイラル対称性の回復現象の研究**

高エネルギー重イオングループの将来計画の Key figure を図 2 に示す。エネルギーフロンティア (RHIC/LHC) では、QGP 物性の精密研究、高強度ゲージ場のダイナミクスの研究やカイラル対称性の回復現象の研究を、高インテンシティ重イオン衝突 (RHIC/FAIR/J-PARC) では、有限密度 QCD 相構造の研究やカイラル対称性の回復現象の研究を推進する。他の WG との関連性を、QCD 相図上で示したものを図 3 に示す。高エネルギー重イオン WG は、極限状態における QCD 多体系の物性研究にユニークな立場を取る。

[*1] 13 ヶ国、60 研究機関、600 研究者が参加。PHENIX 実験の成果として、これまで 100 本以上の学術論文を出版し、総引用数は 1 万件を超える。また、100 本以上の博士論文が提出されている

[*2] 33 ヶ国、113 研究機関、1000 研究者が参加。

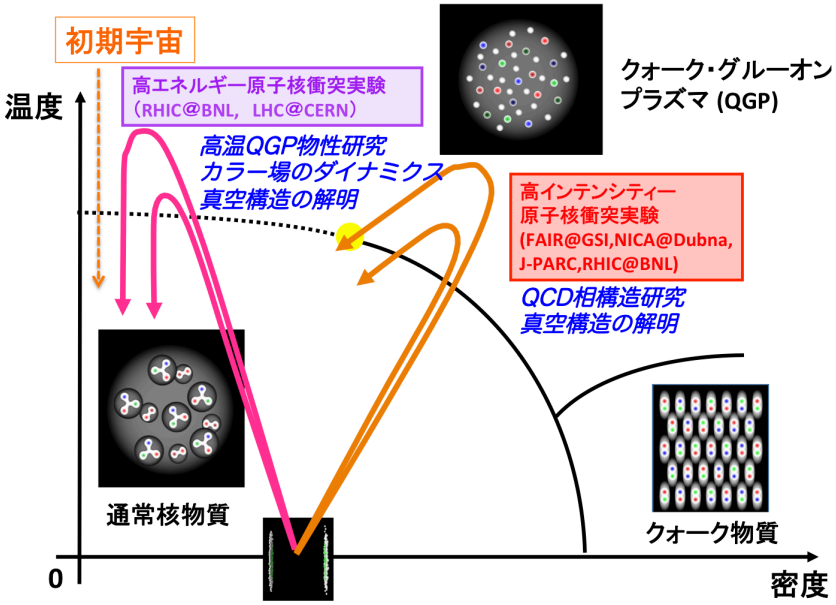

図 2　高エネルギー重イオングループの Key figure。

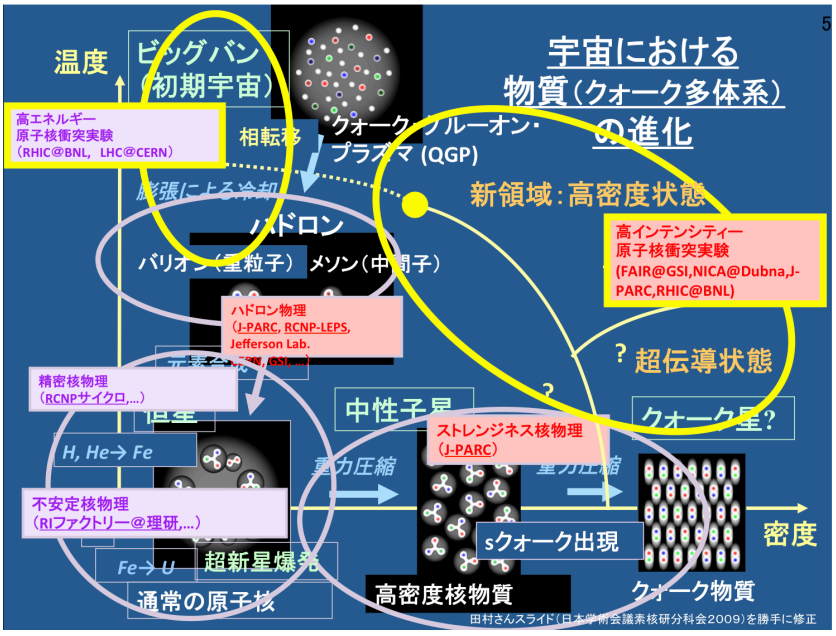

図 3　QCD 相図における、他の WG との関連性。元の出典 [8] を修正

2 Recent Achievement

上で掲げた研究項目に関する、ここ 10 年の進展、現状を纏める。

2.1 QGP 物性の精密研究、熱平衡化機構の研究

2.1.1 研究の目標

これまで QGP 探索を目的として AGS/SPS/RHIC 加速器で高エネルギー重イオン衝突実験が行われてきた。RHIC での 10 年間に亘る研究を通じて、2.1.2 章に纏められる通り QGP 生成の確証は得られたと言っていいであろう。従って、今後は QGP の「発見」から「精密研究」へと展開し、かつ熱平衡化機構の理解を率先すべきと考える。QGP 物性の精密研究の目標は、QGP 物性量 (比粘性、輸送係数、阻止能、遮蔽長、相関長など) の密度、温度依存性を明らかにし、熱平衡化機構の研究目標は、衝突初期に現れる高強度カラー場のダイナミクスの理解を通じて QGP への熱平衡化機構を解明する事である。

高エネルギー重イオン衝突は非常に複雑な時空発展を伴う極めて動的な過程である。その中から QGP 物性の物理量を引き出すには、高エネルギー重イオンのダイナミクスを定量的に記述する理論的枠組みが必要である。その枠組みとして、状態方程式を与える格子 QCD 計算、熱平衡化以降の時空発展を記述する相対論的流体力学、高エネルギー QCD 反応や熱化のダイナミクスに不可欠なグルオン発展方程式（カラーグラス凝縮を予言）などがある。また実験的プローブとして有効なハード過程の記述に摂動的 QCD 計算 (pQCD) も欠かせない。さらに、強結合系プラズマ物性を記述するゲージ理論と対応させる理論（AdS/CFT 対応）の有用性も近年では盛んに議論されている。QGP 物性の算出や熱化機構の解明には、実験結果と共に、これらの理論的・現象論的な発展が必要不可欠である。

2.1.2 研究の現状

2000 年に RHIC が稼働して以来、RHIC では核子あたりの重心系エネルギー ($\sqrt{s_{NN}}$) が 200GeV, 130GeV, 62.4 GeV, 39 GeV, 11GeV, 7.7GeV の金・金衝突や銅・銅衝突、これらの比較対象実験として $\sqrt{s_{NN}} = 200$GeV の重陽子・金衝突が行われてきた。LHC では 2010 年に $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV の最初の鉛・鉛衝突が行われた。RHIC での 10 年に亘る実験研究や LHC での早期実験結果を基に QGP 物性研究の現状を簡単に纏める。

- エネルギー密度
  重イオン衝突における Bjorken エネルギー密度は、全横方向エネルギー (dE_T/dy) を用いて求められてきた。この決定には他の因子として QGP の生成時間 (τ_0) が必要であり、この値は未だ正確には決まっていないが RHIC エネルギーで $\tau_0 = 0.2 - 0.6$ fm/c と考えられている (図 7 参照)。これを基に、エネルギー密度は RHIC では 9-27 GeV/fm^3、LHC では 27-80 GeV/fm^3 と求められている [9, 10]。

- 運動学的凍結 (運動学的フリーズアウト)、動径方向のフロー
  運動学的凍結とは、系の時空発展途上で生成されたハドロン間の弾性散乱が終わり、ハドロンの運動量分布が固定される事である。$\pi^{\pm}$/K$^{\pm}$/p$^{\pm}$ の横運動量分布を Blast wave model(熱平衡分布に動径方向への膨張を入れたモデル) で同時フィットをする事で、運動学的凍結時の温度と動径方向のフローを決める事ができ、RHIC の中心衝突では凍結温度=100 MeV、動径方向フローの大きさ $< v/c >= 0.60$ となっている。一方、終状態のハドロン分布をよく再現する流体計算からは、凍結温度は 110-120 MeV 程度、膨張速度は 0.5 程度が得られている [9]。LHC では凍結温度は同様であるが、動径方向のフローは $< v/c >= 0.66$ と RHIC より大きなフローを測定している [11]。
- 化学的凍結 (化学的フリーズアウト)
  化学的凍結とは、QGP からハドロンが生成され、ハドロン間の非弾性散乱の終焉と共にハドロンの粒子数・組成比が固定されることである。高エネルギー重イオン衝突におけるハドロン生成比は統計モデル (パラメタ:化学凍結温度、バリオン化学ポテンシャル) で非常によく記述することができ、化学凍結温度は 160-180 MeV 程度、バリオン化学ポテンシャルは 10-25MeV 程度と分かっている。RHIC エネルギーでは、初めてストレンジネスも化学平衡に達している事が明らかになった [9]。
- グルオン密度、阻止能、輸送係数
  RHIC/LHC での QGP 物性研究では、AGS/SPS では非現実的であった、高横運動量パートンや重クォークといったハード過程が、プローブとして利用できることがわかった。RHIC や LHC での重イオン衝突では、高横運動量のハドロン、重クォーク、ジェットの収量が、陽子・陽子衝突から予想される収量よりも大きく抑制される事、またジェット対相関が、QGP との相互作用により変化を受ける事が、明らかになった (図 4,　図 5)。

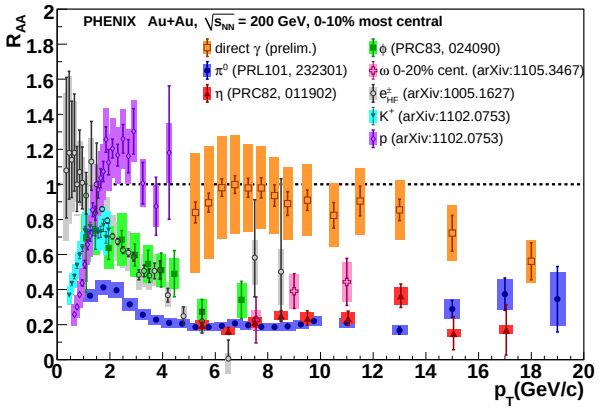

図 4　RHIC-PHENIX 実験が測定した R_{AA}[*4]

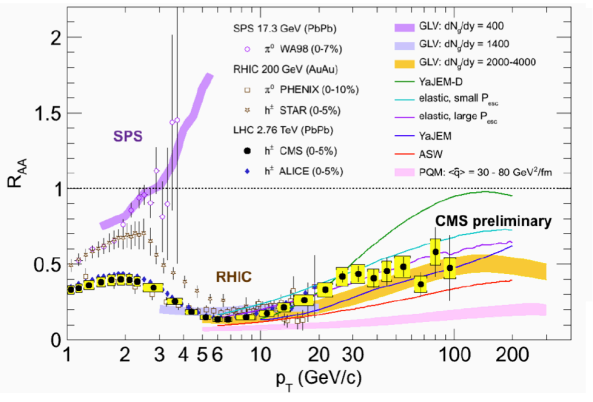

図 5　LHC で測定された荷電ハドロンの $R_{AA}(p_T)$

これは、高横運動量パートンが QGP 中で主にグルオン制動放射や衝突過程を通じてエネルギー損失 (Jet quenching) を起こすためと考えられ、抑制量から QGP 中のグルオン数密

度、パートン阻止能や輸送係数といった力学量を議論できるようになった。様々な実験結果 (収量抑制量の中心衝突度依存性、p_T 依存性、飛距離依存性、対相関 away-side 収量) を再現するには、弱結合から期待される輸送係数ではなく、強結合系での輸送係数が必要であるものの、エネルギー損失機構の不定性や QGP 開始時間の不定性により、精密な値を出せていないのが現状である [12, 13, 14, 15].

LHC では、高横運動量ハドロン測定に加えて、初めて重イオン衝突においてジェットの再構成と収量測定が行われ [16]、ALTAS/CMS では、100-200GeV のジェットに対して $R_{AA} = 0.5$ の抑制を測定した。CMS では、ジェットとハドロンの相関を測定し、ジェットによって失われたエネルギーが大角度方向のソフト粒子生成に使われている事が分かった。エネルギー損失機構の理解に更なる進展が期待される。

- 初期温度

  QGP の温度を測るプローブとして、熱的光子、熱的電子対やクォーコニウムが挙げられる。熱的光子の発生量とそのエネルギー分布は、系の自由度や生成された物質温度の時空発展を反映する。クォーコニウムはある温度以上でカラー遮蔽による収量抑制が起こり、かつ抑制開始温度はクォーコニウムの系 (半径、束縛エネルギー) に依存するため、様々なクォーコニウムを測定することで系の到達温度を検証することが出来る。RHIC エネルギーにおいては、PHENIX 実験が高エネルギー光子の電子・陽電子への内部変換過程を利用して熱的光子由来の電子対を測定した。光子の横運動量分布から平均温度を見積もると約 220 MeV であることがわかった (図 6 参照) [17]。また、流体計算を基にしたモデル計算を用いて、系の初期温度と生成時間の相関を出すことに成功した (図 7 参照)。今後は熱的光子の方位角異方性 (v_2) の測定から更なる理解が進むものと思われる [18]。クォーコニウム測定に関しては、RHIC で J/ψ の収量抑制が測定され、LHC では加えて $\Upsilon(2S+3S)$ の大きな抑制も測定している [19, 20]。温度の算出には抑制温度とその運動学依存性の理解が必要であるが、格子 QCD 計算や有効ポテンシャル模型による統一的な解釈がないのが現状である。

- 比粘性 (η/s)

  衝突反応面に対する粒子の集団的フロー[*5]の測定を通じて、QGP の比粘性を算出する試みが行われて来た [9]。RHIC の金・金衝突では、非常に大きな楕円フローが測定され、その運動量依存性はハドロンの構成クォーク数でスケールしていることが分かり、集団運動がハドロンレベルでなくパートンレベルで起こっている事が明らかになった (図 8、図 9)。楕円フローの大きさは、QGP 物質の比粘性に強く依存し、その大きさは、比粘性が小さい理想流体を仮定した計算結果と良い一致を示した (図 8) [9]。これは、生成された物質の性質を明確な形で示した最初の例であり、生成された物質が、理想気体的なものではな

[*4] 金・金衝突における粒子収量を陽子・陽子衝突における収量 × 平均核子衝突回数で割ったもの。1 と無矛盾であれば、収量は陽子・陽子衝突の重ね合わせで記述される。

[*5] このフローは衝突反応面に対する放出粒子の角度分布 $dN/d\phi \propto (1+2v_2*\cos(2\phi)+2v_3\cos(3\phi)+2v_4\cos(4\phi)...)$ の高次フーリエ成分 (v_n) で検証されてきた。$n=2$ が楕円フローであり、現在は高次フロー ($n=3,4,5,6,,$) の解析が進んでいる

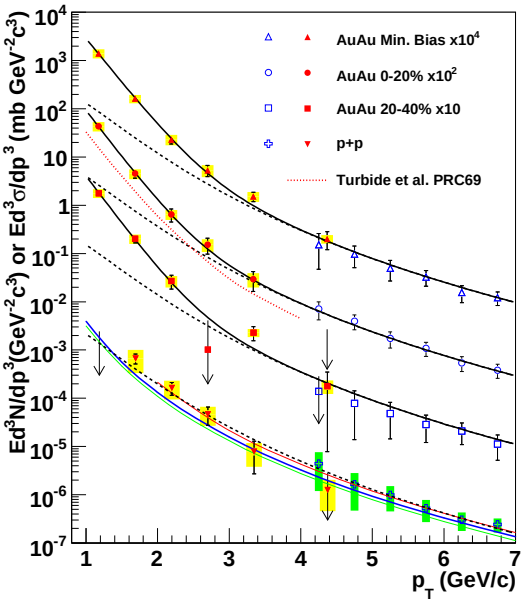

図 6　仮想光子崩壊からの電子対測定で得られた光子の横運動量分布 [17]

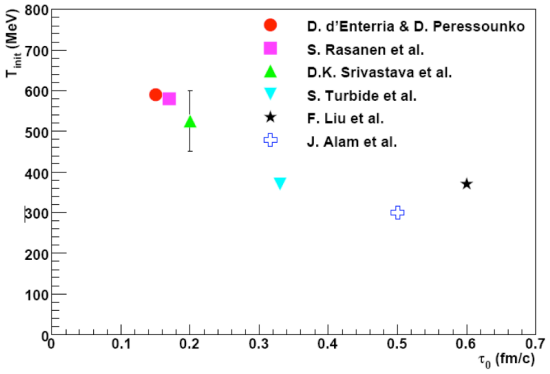

図 7　熱的光子測定により制限された初期温度と初期時間

く、むしろ相関の強い流体的なものであること示す事となった。楕円フローの測定から、$\eta/s = (1 - 2.4) \times 1/4\pi$ と制限できているものの、この値は衝突初期条件に強く依存する事が分かっている [21]。現在、v_2 やそれ以上の高次 (v_3, v_4) 成分の系統的な測定が進められ、異なる初期条件を基にした流体計算との比較・検証が進められている [22, 23]。

LHC でも、楕円フローや高次フローの測定が進められている。楕円フローの p_T 依存性は RHIC と殆ど同じである事が分かった。

ラピディティ方向への長相関であるリッジ現象や away-side の 2 ピーク構造、および、LHC での高多重度陽子・陽子衝突における リッジ現象と、上の高次の非等方性のラピディティ方向への長相関 との関連性も注目されている。

図 10 は様々な測定を通じて算出された η/s であり、図 11 は色々な物質における η/s と相転移近傍での振舞である。

2.1.3　今後の展望

本研究を本格的に推進するにあたり、以下の課題を解決することが重要である。

- 衝突初期条件の解明

  比粘性が小さいであろうという定性的な知見は得られたものの、その定量性は、衝突前の系の初期条件に強く依存する。流体計算の初期条件 (初期エネルギー密度やエントロピー密

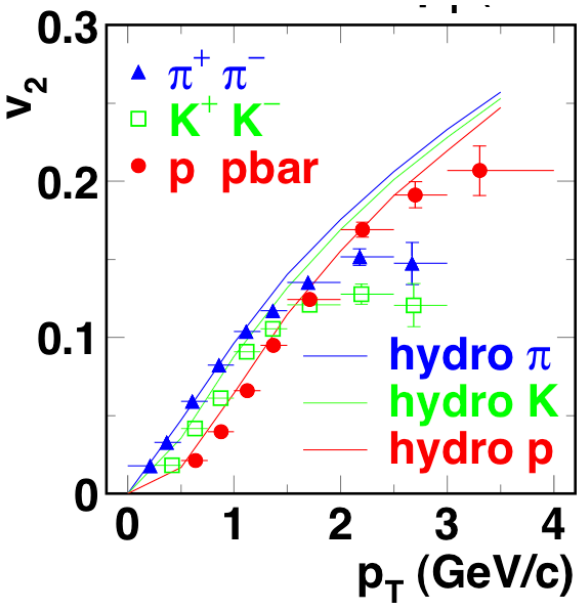

図 8　v_2 の p_T 依存性と流体モデル計算 [9]

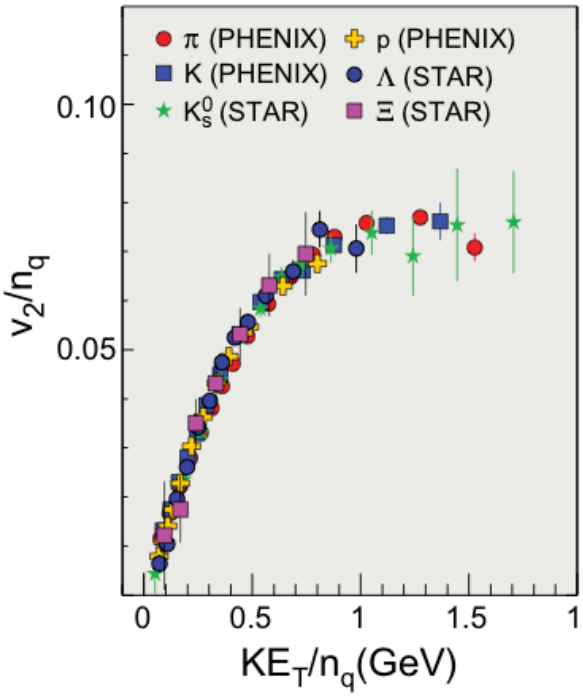

図 9　v_2 のハドロン構成数でのスケーリング [9]

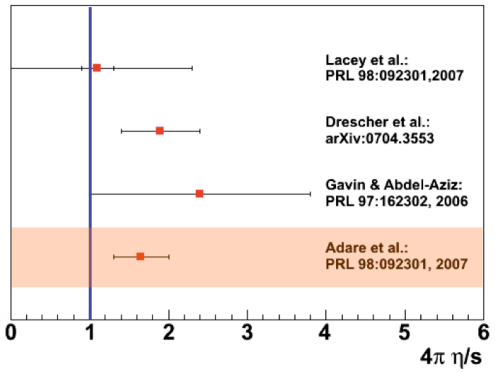

図 10　色々な測定を通じて算出された比粘性 [22]

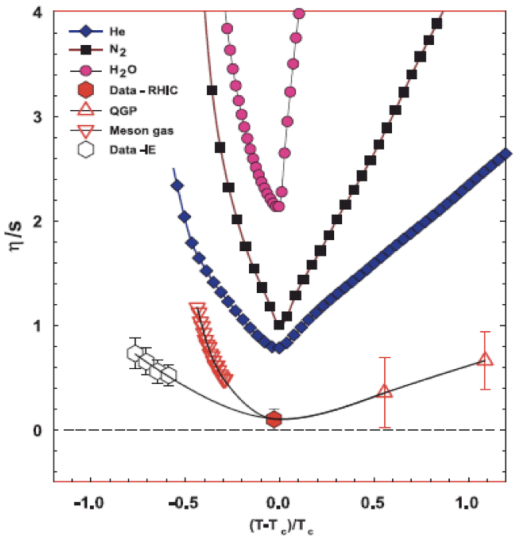

図 11　色々な物質相に対する、比粘性の相転移温度での振舞．赤の六角形が実験データ

度) には、大きく分けて、反応関与核子数を用いてパラメタ化する Glauber 初期条件か、高エネルギー極限 (small x, $x \sim p_T/\sqrt{s} \leq 10^{-2}$) で顕在化するであろうグルオン飽和状態からパラメタ化する CGC 初期条件がある。η/s の決定には系の初期条件の確定が必須であるが、現在の RHIC での実験結果では初期条件を確定するに至っていない。

高エネルギー重イオン衝突における衝突初期条件は原子核内のパートン分布によって決定される。深非弾性散乱実験で測定された陽子内のパートン分布関数によれば、高エネルギー散乱で重要となる small x 領域においてはグルオン分布がクォーク分布を凌駕する [24]。LHC で到達できる小さい x 領域 (x(LHC) $\sim$ x(RHIC) $\times 10^{-2}$) では、$g \to gg$ と $gg \to g$ 過程のバランスによりグルオンの飽和状態が実現し易いと考えられている [25]。グルオン飽和に関する定量的研究を進め、初期条件を確定することが重要である。

- 熱化機構の解明

  衝突後、局所熱平衡状態が形成されるまでのダイナミクスは全く分かっていない。流体モデル計算によれば、QGP 形成時間 (τ_0) は 0.2 - 0.6 fm/c と考えられているが、多重ハードパートンの散乱で平衡状態に達するボトムアップ的なシナリオでは、この早期熱平衡化は説明できない。衝突後のダイナミクスや早期熱平衡化のシナリオの一つが、まず衝突軸方向に高強度カラー電磁場の形成され、それがラピディティ依存の揺らぎとカラー電磁場によって成長し、その際に生じる不安定性を通じてグルオンやクォーク異常粒子が生成され、最後に、粒子間衝突によって系の熱平衡化がなされるというものである [26, 27]。この高強度カラー場のダイナミクスと QGP への早期熱平衡化の解明は、重イオンの時空発展の理解と強相関 QGP 物性の起源の解明に重要である。また、LHC では RHIC と異なり初期ハード散乱過程が非常に優位である。衝突直後に生成されるジェットと Glasma の相互作用および、その熱化への寄与は、高エネルギージェットの収量抑制、失ったエネルギーの振舞の理解にも重要である。

- 時空発展ダイナミクスの精密化

  これまで適用されてきた流体計算の初期エネルギー・エントロピー密度は Glauber 初期条件や CGC 初期条件に基づいて空間的に滑らかにされたものである。しかし実際の高エネルギー重イオン衝突では、これらの密度分布は空間的な揺らぎを持って局所熱平衡状態が作られる。現在、イベント毎に揺らぎを取り入れた流体計算 [28] や有限の比粘性値を入れた粘性流体計算 [29] の開発が進んでいる。実験結果との比較、検討という観点から、衝突初期や熱化機構を取り入れたイベント毎の粘性流体の発展と、QGP からハドロン相の転移 (流体描像からハドロンカスケード、平衡化の破れ) を正確に記述する、理論モデルや現象論の充実が必要不可欠である。その促進には、系統的な実験研究が必須である。

これらの課題を受けて、以下の実験的取り組みを推進する。

- 様々な衝突システムでの高エネルギー重イオン衝突

  様々な衝突エネルギーや衝突核種の重イオン衝突を遂行する。多くの測定量を異なる衝突条件下で集め、時空発展のダイナミクスを完成させ、物性量の温度や密度依存性を算出する。

RHIC 加速器での重イオン衝突、特に $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$ GeV から 200 GeV までの衝突エネルギーにて、金・金衝突、ウラン同士衝突や金・ウラン衝突を行い、同時にビームの高輝度化へのアップグレードを推進する。また、LHC での最高エネルギー重イオン衝突も推進する。具体的には $\sqrt{s_{NN}}$=2.76 TeV や 5.5 TeV の鉛・鉛衝突や陽子・鉛衝突、軽い原子核衝突実験を遂行する。並行して物理測定強化の為のアップグレード計画に参与する。

- 大きなラピディティ範囲での実験測定
  衝突初期条件の定量的な評価や衝突直後のダイナミクスの理解に向けて、大きなラピディティ領域での粒子生成を測定する [30]。$x \leq 10^{-2}$ での原子核中グルオン分布の評価とラピディティ方向 (Δy) の長距離粒子相関を通じた衝突直後 ($\tau \sim \tau_0 \exp(-\Delta y/2)$) のダイナミクス研究を進める。
- 類似プローブ、時間断片撮像的なプローブの活用
  QGP 物性の研究や時空発展の完全理解に、異なる重心系エネルギーと異なる衝突システムにおいて、類似なプローブを使った比較測定が重要である。RHIC と LHC で類似プローブを用いた測定を進めるべく、RHIC-PHENIX 実験の次期計画 [31] や LHC-ALICE のアップグレード計画 [32] に参与する。
  これまで色々なプローブを使って物性研究を進めてきたが、多くのプローブは最終的には系の時空発展の影響を色濃く受けてしまう。これに対し、時間断片的に QGP が撮像できれば、QGP 物性の詳細下とその時空発展を直接的に議論することができ、非常に有意義である。更なる精密化を目指した取り組みを進める。

2.2 有限密度 QCD 相構造の研究

2.2.1 研究の目標

極限状況下でのハドロン多体系に関する重要な研究テーマの一つが有限温度や有限密度における QCD 相図の決定である。RHIC や LHC で実現される高温度・低バリオン密度領域における QCD 物質の静的性質は格子 QCD 計算で検証可能であるが、高密度側では、例えば QCD 臨界点の存在をとっても、様々な有効模型によってその存在が予言されているものの、第一原理から出発する格子ゲージ理論による検証は、深刻な符号問題のために確定的段階に至っていない。様々な有効模型によれば、QCD 臨界点 (線)、非一様混合相、非同時に起こる非閉じ込め相転移とカイラル相転移、ダイクォーク凝縮、ダイクォーク励起、クォーキオニック相などという多様な相構造の存在が示唆されている [1]。このように、有限密度における QCD 物性や QCD 物質の相構造の解明は、未知なる沃野の研究テーマであり、実験的研究がこれらの理解に重要な指針を与える。本研究の目標は、RHIC、FAIR や J-PARC 加速器で実現される高・中間エネルギーの重イオン衝突を通じて、高バリオン密度状態を生成し、衝突エネルギーを変える事で様々な有限密度 QCD 物質相を生成し、その相構造の系統的な理解を目指す。

2.2.2 研究の現状

これらの系統的な実験研究には、高バリオン密度が達成可能な高・中間エネルギーでの重イオン衝突 ($\sqrt{s_{NN}} = 1 - 50$ GeV) が有効である。これまで RHIC-AGS 加速器や CERN-SPS 加速器を使い、核子あたりの重心系エネルギー 5-20GeV で重イオン実験が行われてきた (E802, E866, NA44, NA49 実験など) [4]。これら一連の実験は QGP 探索を意図したもので、必ずしも QCD 相図の解明を主眼にした実験ではないものの、今後の指針に影響を与える重要な実験成果を出してきた。現在、QCD 臨界点の探索、1 次相転移に伴う混合相の探索などを目的として、CERN-SPS で NA61(SHINE) 実験が進行中である [33]。

RHIC 加速器でも、QCD 臨界点の探索を目的にした中間エネルギー重イオン衝突が行われてきた (62.4GeV, 39GeV, 11.5GeV, 7.7GeV)。今後は 27 GeV など、未走査エネルギー領域の重イオン衝突を行う予定である。

これまで得られた、高・中間エネルギー重イオン衝突実験の成果を纏める [9, 34, 38, 35]。

- フリーズアウト特性
  様々な衝突エネルギーでの重イオン衝突で測定された粒子生成比と統計モデルより算出した化学凍結温度とバリオン化学ポテンシャルを図 12 にプロットする [34]。これは、重イオン衝突によりプローブ可能な密度領域や温度領域をを予想する上で重要なインプットである。また、AGS エネルギー以下では化学凍結温度と運動学的凍結温度が同じであるが、それ以上では両凍結温度に違いが出てくる (図 13 参照) [35]。
- 最高バリオン密度
  AGS エネルギーでバリオン密度が最大 (図 14 参照) である [36]。高密度 QCD 物質生成に向けた足がかりとして重要な実験結果である。
- ストレンジネス生成
  図 15 に K/π 収量比の重心系エネルギー依存性を示す [37]。AGS のエネルギーから K/π 収量比が急激に増える。
- フローの振舞
  図 16 は、荷電粒子に対する $\sqrt{s_{NN}} = 39, 62, 200$ GeV の $v_n (n = 2, 3, 4)$ の横運動量依存性を示す。39GeV 以上ではフロー強度の衝突エネルギー依存性はほとんど見られない [23]。図 17 は、p_T で積分した v_2 の重心系エネルギー依存性である [38]。高いエネルギー領域では平均 p_T の上昇に伴って積分 v_2 も大きくなるが、AGS のような低いエネルギー領域では楕円的異方性の符号反転 (out-of-plane から in-plane へ放出粒子方位角の変化)(図 17) が起こる。
- 揺らぎの測定、高次モーメントの測定

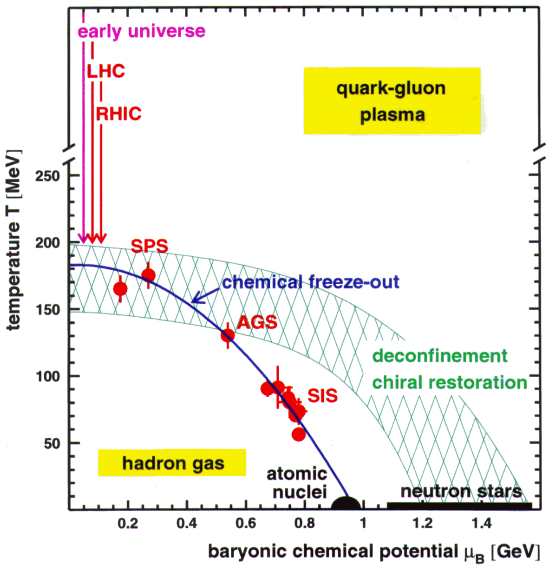

図 12　粒子比と統計モデルで決定された化学凍結温度とバリオン化学ポテンシャル [34]

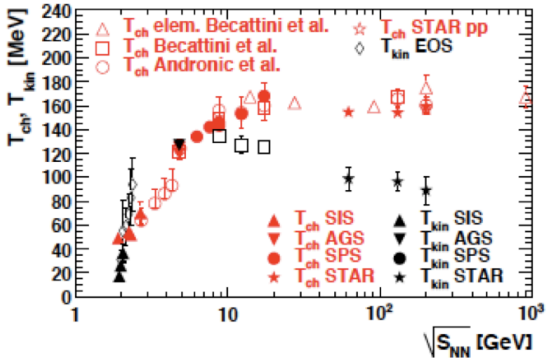

図 13　化学凍結温度 (赤)、運動学的凍結温度 (黒) の衝突エネルギー依存性 [35]

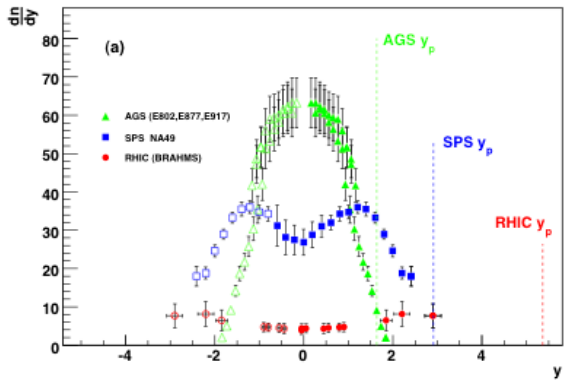

図 14　AGS/SPS/RHIC における net proton のラピディティ分布 [9, 36]

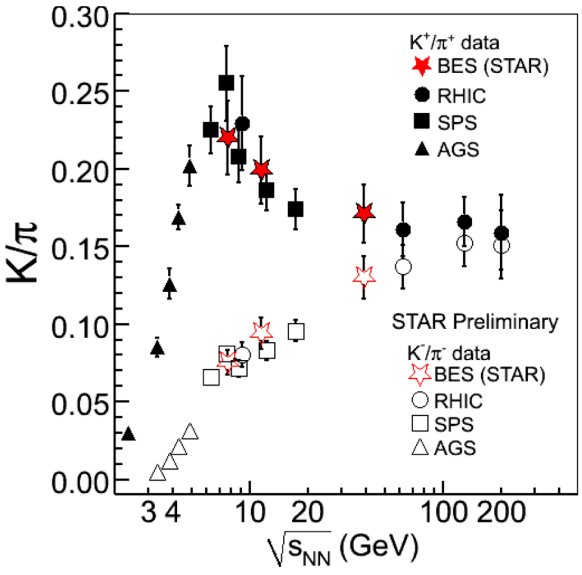

図 15　K/π 粒子比の重心系エネルギー依存性 [37]

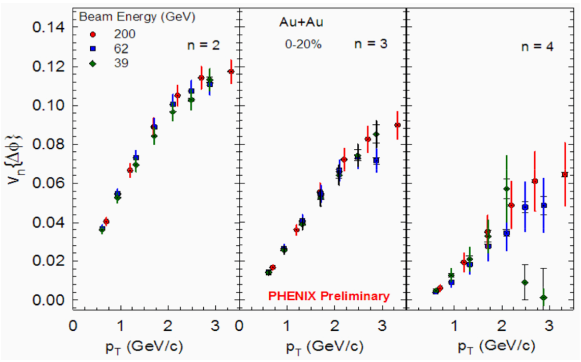

図 16　RHIC のビームエネルギースキャンにおける $v_n(n = 2, 3, 4)$ の横運動量依存性と衝突エネルギー依存性 [23]

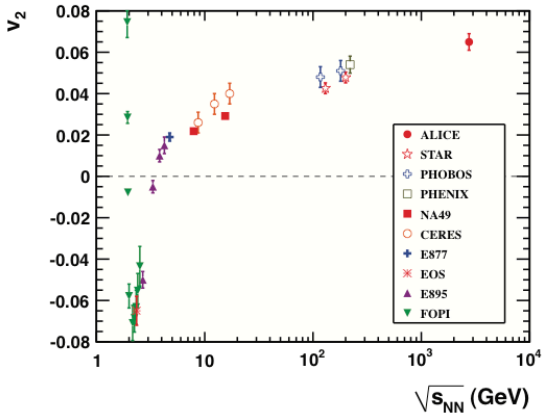

図 17　方位角異方性の衝突エネルギー依存性 [38]

2.2.3　今後の展望

この研究の推進には、幅広い衝突エネルギーにて重イオン衝突を遂行することが重要である。未踏の地である高密度 QCD 物質の探索を目的として、AGS-SPS あたりの衝突エネルギーが重要であり、RHIC 加速器 (BNL)、NICA 加速器 (JINR)、FAIR 加速器 (GSI)、J-PARC 加速器が主要研究施設となる。各々がカバーできる衝突エネルギーとフリーズアウト時の (T,ρ) をプロットしたのが図 18 である [39]。このうち、RHIC と NICA は衝突型加速器で、FAIR と J-PARC は固定標的型加速器である。

本研究を推進する上で重要な問題が「何を測定すればいいのか？それを測定すると何が分かるか？」という問いに対して、明確な答えがないことである。事象毎のバリオン数などの揺らぎや揺らぎの高次モーメントの測定などが有力なシグナルとして示唆されているものの、これらを明確な信号として捉えるには、系のフリーズアウトと相転移点 (線) が近くないと難しい。

FAIR や J-PARC のエネルギーはまさに SPS や AGS のエネルギーであり、これまでの先行研究と異なる新たな視点が必要である。従来の AGS での実験結果は、低運動量ハドロンの測定が主であり、系の初期状態に敏感な稀少プローブや透過プローブを使った実験は存在しない。しかし、その後の SPS/RHIC での実験結果から、ハード過程やレプトン測定といった稀少プローブの重要性が明らかとなった。図 19 と図 20 は、様々な衝突エネルギー (実験室系、固定標的) における系の時空発展の予想ラインである [40, 41]。衝突直後に多様な QCD 相構造が顕在化する可能性があるため、衝突初期に生成され、その後のダイナミクスを反映するプローブや、光子・レプトンなどの透過的なプローブを利用することで、新しい物質相や相構造の研究に実験的な筋道を与える可能性がある。FAIR や J-PARC の高いルミノシティを活かし、SPS や AGS で出来なかった希少・透過プローブの測定を進めたい。

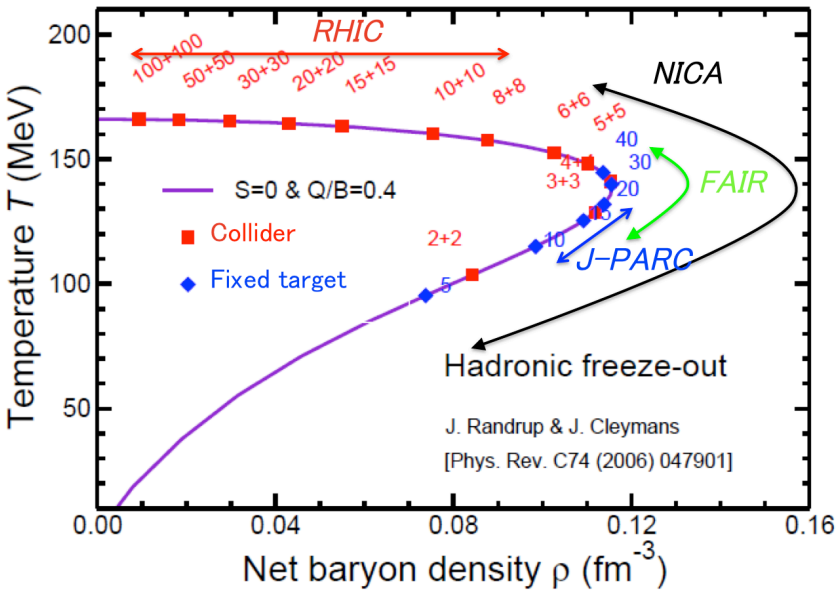

図 18　様々な衝突エネルギーにおけるフリーズアウト時の温度と net バリオン密度の相関図。RHIC, NICA, FAIR, J-PARC がカバーできる衝突領域も示している [39]

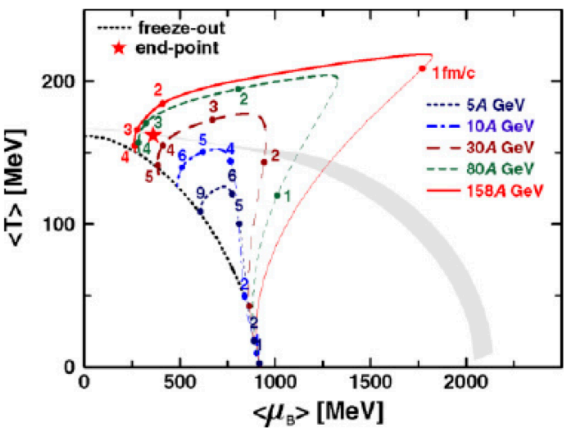

図 19　様々な衝突エネルギーにおける系の時空発展予想 [40]

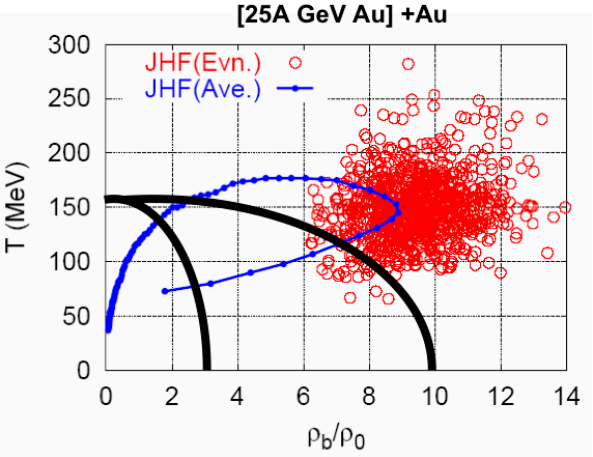

図 20　J-PARC エネルギーにおける系の時空発展のシミュレーション結果 [41]

2.3 カイラル対称性の回復現象に関する研究

2.3.1 研究の目標

QCD 真空の構造解明とカイラル相転移時の構造変化の解明は、長年に亘る QCD 物理の重要な研究テーマである。必ずしも非閉じ込め相転移とカイラル相転移は同時に起こるとは限らないものの、高エネルギー重イオン衝突はカイラル相転移やカイラル対称性回復研究に有効である。高エネルギー重イオンは温度を変数とした、非閉じ込めという極限状況下での QCD 真空構造に対する知見を与え、中間エネルギー重イオン衝突は様々な密度スケールでの知見を与える。高・中間エネルギー重イオン衝突を通じて、カイラル対称性のより完全に近い回復現象に迫り、QCD 真空構造やハドロン質量の発現機構を探求する事が本研究の目標である。

2.3.2 研究の現状

これまで、重イオン同士や陽子・重イオン衝突において、レプトン対崩壊の測定を通じて、低質量ベクトル中間子の性質変化を直接的に見る試みが行われてきた [42]。原子核物質中での実験的研究として、陽子・原子核反応や光子・原子核反応を通じて、原子核内でベクトル中間子を作り、その核内崩壊を見る実験が核研 TAGX($\gamma + A$)、ELSA-TAPS($\gamma + A$)、KEK-E325($p + A$)、Spring8-LEPS($\gamma + A$)、JLab-CLAS($\gamma + A$) で行われてきた[*6]。KEK-E325 は、ω/ρ より低質量側に優位な超過収量を測定し、ϕ 質量付近は、低い $\beta\gamma$ 成分に対して低質量側に超過収量が測定された。結果は初田・Lee の予想するベクトル中間子の質量変化と無矛盾であった。その一方で、JLAB-CLAS 実験はベクトル中間子の質量変化を棄却し、質量幅の変化を主張する実験結果を報告した。残念ながら、統一的な見解がないのが現状であり、今後は高統計による測定、様々な運動学依存性、反応学依存性を通じた系統的な研究が必要であると考えられる。

SPS や RHIC の高エネルギー重イオン衝突でも、精力的に低質量レプトン対の測定が行われてきた。SPS-CERES 実験では、重イオン同士衝突において電子対の低質量領域で大きな収量増大が測定されている [43](図 21、図 22 参照)。また SPS-NA60 実験においても、インジウム同士の衝突において収量増大が測定されている [44]。RHIC-PHENIX 実験からも、低質量領域に通常のハドロン崩壊からでは記述できない異常収量を測定している [45](図 23 参照)。CERES での結果は、$\pi^+\pi^- \to \rho \to e^+e^-$ の過程でかつ ρ の巾が物質中で大きく広がっているというシナリオと無矛盾であるが、質量変化に関しては、議論できる統計精度がないのが現状である。PHENIX 実験で測定された異常収量は、熱的光子からの内部変換による電子対の寄与や ρ メソンの質量・巾の変化を考慮した様々なモデル計算をもってしても、完全に記述されるに至っていない。

[*6] 原子核中におけるカイラル対称性の部分的回復研究は、ハドロン物理 WG の主研究テーマの一つである。詳細はハドロン WG のレポートを参照されたい。

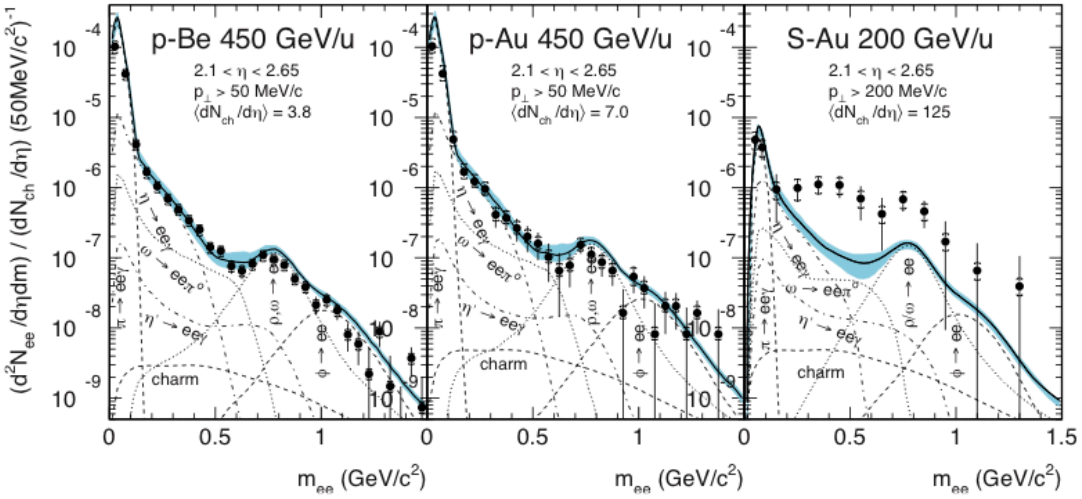

図 21　CERES 実験で測定された、様々な衝突系に対する電子対質量分布 [43]

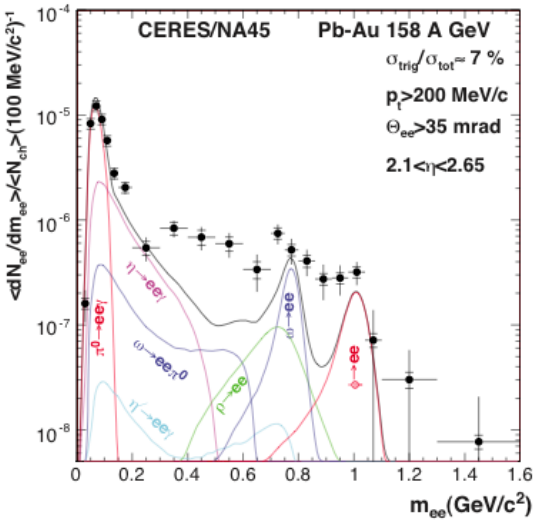

図 22　CERES 実験で測定された、Pb+Au 衝突における電子対質量分布 [43]

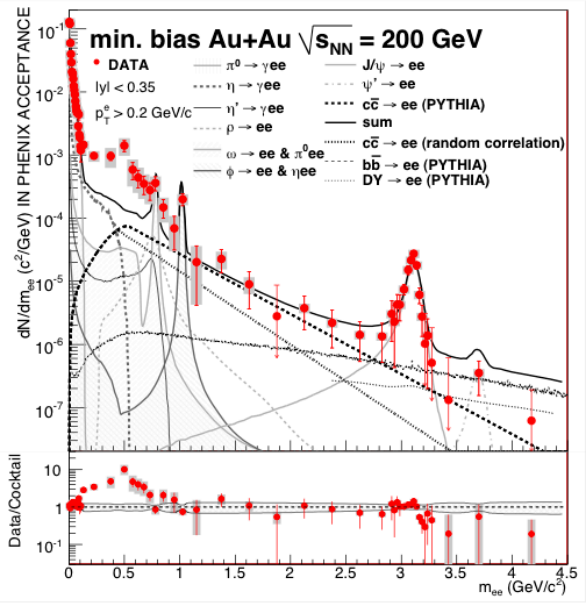

図 23　RHIC-PHENIX 実験の Au+Au 衝突における電子対質量分布 [45]

2.3.3 今後の展望

高エネルギー重イオン衝突において、カイラル対称性回復のシグナルを捉えるのは容易ではない。大きな粒子多重度や複雑な動的時空発展があるからである。例えば、ベクトル中間子のレプトン対測定に対しても、ハドロン化に伴う中間子生成、ハドロン相中や QGP 中での熱的レプトン対などがバックグランドになり、さらに実験的に測定する上では無相関レプトン対も存在する。

これらの問題点の解決に 2 つの方向性が考えられる。一つは、測定上の困難さを低減する為の検出器アップグレード計画や新たな解析手法の開発である。RHIC-PHENIX 実験では Dalitz 崩壊電子の除去を目的として、Hadron Blind 検出器 (HBD) が導入され、現在は HBD を用いたデータ解析が進行中である。この結果が今後の指針の一つになる。その一方で、SPS で成功を収めたミューオン対を利用することも重要である。既存の PHENIX/ALICE 実験でミューオン対を使った研究はバックグランドの低減や運動量分解能の向上に改善の余地がある。PHENIX の次期計画や ALICE の検出器アップグレード計画を推進し、研究遂行に当たることが有意義である。

二つ目は、低質量ベクトル中間子や低質量レプトン対以外のプローブを測定する事である。高・中間エネルギー重イオン衝突で K^*、η, η'、σ 中間子の測定も同様に進めて行きたい。また、カイラル対称性の回復現象の検証としてカイラル磁気効果も有力である [46]。非中心衝突では、正電荷を持つ粒子がほぼ光速ですれ違うため、衝突部分に強い外部磁場が作られる。理論計算によると、もしも衝突で生成される高温物質中に、トポロジー的グルオン励起と、カイラル対称性の回復した (ほぼ) ゼロ質量クォークがあれば、カイラル磁気効果 (Chiral Magnetic Effect) によって、パリティと荷電パリティを破る電荷非対称度が誘起される。そのため、カイラル磁気効果は QCD 真空のトポロジー的な性質と、カイラル対称性の回復を同時に検証できるシグナルとして期待されている。また強磁場の効果によって生成される光子数が増大するなど、磁場による新奇現象の可能性も指摘されている。

3 Future Program

この章では、2 章の現状を踏まえ、今後の方向性や具体的な取り組みを纏める。

3.1 QGP 物性の精密研究、熱平衡化機構の研究

この研究計画のタイムラインを下の図に示す。

1. RHIC-LHC に渡る包括的な QGP 物性研究
   - RHIC/LHC での高エネルギー重イオン衝突の遂行
     様々な衝突システム (エネルギー、衝突核種) にて、多くの系統的な測定を行い、時空発展のダイナミクスの理解とともに、物性量の温度・密度依存性を導出する。継続的に行われる実験データの物理解析に尽力する。

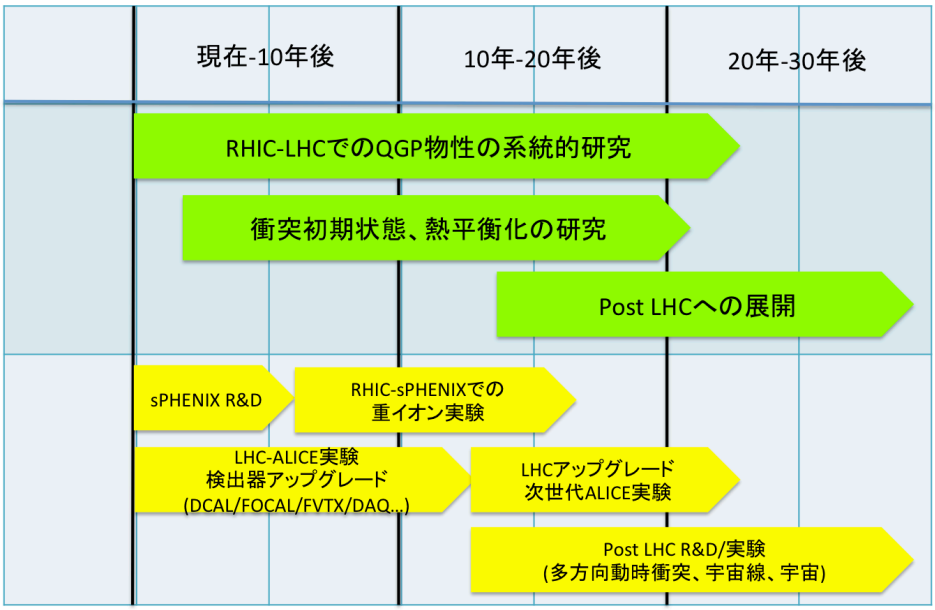

図 24　研究遂行へのタイムライン

- 次世代 RHIC-PHENIX 実験 (sPHENIX) への展開
  PHENIX の次期計画である sPHENIX 計画への展開を図る。LHC と相補的な測定を進めるために、高横運動量ハドロンやジェットの測定、大きな運動学領域での粒子相関測定、大きなアクセプタンスの基で光子・レプトン測定を推進したい。
- LHC-ALICE 実験増強計画の推進
  ALICE 実験では段階的なアップグレード計画が進行している。ジェット対測定に特化した電磁カロリメータやハドロンカロリメータを建設し、ジェットのエネルギー損失や失ったエネルギーの伝搬の検証を通じて QGP の物性研究を行う。ALICE の他のアップグレード計画としては、重クォークの QGP 中での振舞 (特に低運動量) を検証する最内層シリコンピクセル検出器の建設、高横運動量ハドロン識別の PID 検出器の建設や前方シリコン検出器の建設がある。
- 次世代 ALICE 実験の立案。時間断片プローブの測定
  時間スライスに敏感なプローブを考案し、QGP の時間断片撮像をとり、QGP 物性の時空発展の直接検証を行いたい。どんなプローブをどのように測定すればいいのかに関して詳細な議論が必要であるが、光子やレプトンの透過的なプローブを、大きなアクセプタンス、高い検出効率、大きなバックグランド除去能を持つ検出器群の中で測定したい。現在の ALICE はこれらの測定に特化しておらず、次世代 ALICE 検出器として提言すべく、R&D を進めたい。

2. 衝突初期状態の研究、QGP の熱平衡化機構の解明

- RHIC/LHC での高エネルギー重イオン衝突の遂行
  陽子・重イオン衝突を遂行し、大きなラピディティ領域での粒子生成を測定することで、原子核中のグルオン分布を定量に評価する。また、重イオン同士衝突を遂行し、大きなラピディティ範囲での多粒子相関を通じて衝突直後のダイナミクスの理解に迫りたい。
- LHC-ALICE 実験実験増強計画の推進
  衝突初期状態として重要なグルオン飽和の定量的研究や、熱平衡化までのダイナミクスの理解を目的とし、ALICE 検出器アップグレード計画を推進する。特に、前方ラピディティ ($2.5 \leq \eta \leq 4.5$) に電磁カロリメータを建設し、直接光子、中性 π 中間子やレプトン対の測定を行う。また、長期アップグレード計画として、更に前方ラピディティ ($4.5 \leq \eta \leq 6$) にスペクトロメータを建設する。

3. post LHC への展開
   現在の RHIC-LHC の高エネルギー重イオン衝突で到達できる最高温度は $4T_c$($\leq$800 MeV) 程度である。QGP の強結合性は相転移温度付近に強く現れると考えられており、超高温の極限では弱結合 QGP が実現すると考えられる。$T \geq$10-100T_c スケールでの QGP 物性研究は非常に興味深い。この超高温を実現するには LHC 以上の超大型加速器でも十分ではなく、例えば、多方向の同時衝突によって温度を上げるなどの新しいアイデアと技術革新が必要である。また、宇宙線を使った検証、スペクトロメータを宇宙に打ち上げるなどのアイデアにも目を向け、超高温 QGP への研究展開を実現させたい。

3.1.1 現在-10 年の取り組み

LHC では最初の 10 年に、鉛・鉛衝突実験 ($\sqrt{s_{NN}} = 2.76,\ 5.5$ TeV) や原子核効果の検証に陽子・鉛衝突実験 ($\sqrt{s_{NN}} = 8.8$ TeV)、軽い原子核を用いた衝突実験 (Ar+Ar) が予定されている。物理解析を行い、光子・レプトン対を用いた QGP の初期温度測定、ジェットや高横運動量ハドロンのエネルギー損失によるパートン密度や阻止能の測定、重クォークやクォーコニウム測定による輸送係数や遮蔽長・クォーク間ポテンシャルの測定を通じた QGP 物性の性質解明にあたる。

物理解析研究と並行して ALICE 実験の検出器アップグレード計画を進める。ジェット対測定用の電磁カロリメータ (DCAL) や前方方向細分型電磁カロリメータ (FOCAL) の開発・建設を進め、新規提案検出器としてハドロンカロリメータなど物理戦略に基づく新たな増強計画を提案する。

RHIC では今後 5-10 年を目処に、金・金衝突 ($\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV)、ウラン衝突や衝突エネルギースキャンが行われる予定である。PHENIX 実験は重クォーク崩壊点測定用シリコン検出器を 2010 年に建設し、今後の 2-3 年にチャームとボトムの独立測定による QGP の物性研究を行う。この物理解析と並行して、次世代 PHENIX アップグレード計画を推進する。クォークと QGP との結合についての研究、高エネルギーパートンとの相互作用機構については、クォーク・グルオンジェット、ダイジェット、重クォークジェット、直接光子とジェットの同時生成過程についての精密測定が重要である。熱的光子の方位角異方性や熱的電子対の測定 (質量、方位角異方性、横運動量分布の同時測定) は時空発展の詳細に敏感である為、系の時空発展に対して透過的なプローブで

ある光子・レプトンの精密測定も重要である。既存のシリコン検出器を生かし、新たに $|\eta| \leq 1$ と全方位角を覆う、複数層のシリコン飛跡検出器、preshower 検出器、電磁カロリメータとハドロンカロリメータ、粒子同定検出器、前方方向スペクトロメータ (small x の物理) を組み合わせた図 26 の sPHENIX 検出器の建設を進める。

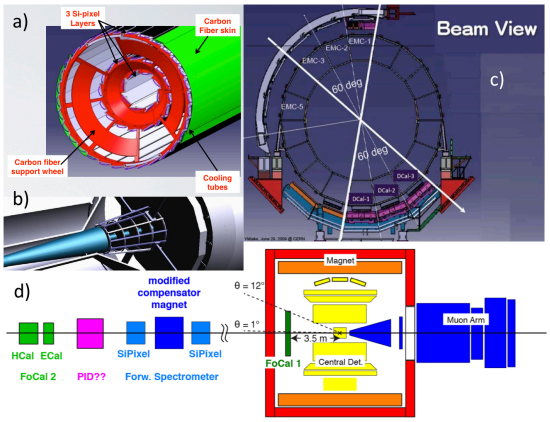

図 25　ALICE upgrade 計画. a) 最内層 vtx 検出器、b) 前方 vtx 検出器、c)DCAL, d)FoCAL と前方スペクトロメータ [32]

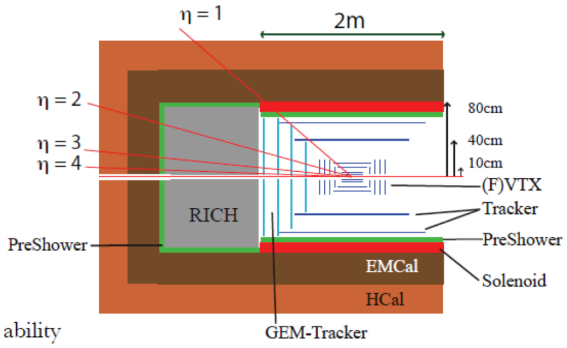

図 26　次世代 PHENIX 検出器 (sPHENIX) の計画 [31]

3.1.2　10-20 年の取り組み

LHC の 10 年間の成果を精査し、次世代 ALICE 実験に向けた検出器 R&D を推進する。特に現在の ALICE 実験では十分な精度で測定することが出来ないであろう、低・中間質量レプトン対 (低質量ベクトル中間子、熱的電子対、仮想光子からの崩壊電子対)、低エネルギー光子測定や時間スライスに敏感なプローブの測定を目指して、高輝度性やトリガー能力に優れた次世代 ALICE 実験検出器群の開発・建設を進め、15 年を目処に次世代 ALICE 実験を遂行する。

その一方で、相補的に RHIC エネルギーでの sPHENIX 実験を遂行する。透過的なプローブを通じて物性量の衝突後時間依存性や、ジェットを用いた QGP とパートンの相互作用を通じて RHIC で達成できる温度領域 ($T_c - 2T_c$) における熱力学量の温度依存性を検証する。衝突エネルギースキャンに際し、electron cooling によるビーム輝度の向上を活用し、上記の稀少事象を様々な衝突エネルギーのもとで検証する。

3.1.3　20 年以降の取り組み

post LHC への取り組みを実現させ、多方向同時衝突、宇宙線観測実験や実験を宇宙の場に移し、超高温度 QGP 物質の物性研究を可能にしたい。強結合 QGP から弱結合 QGP まで、幅広く物性研究を展開し、統一的な理解を得て、高温度領域における QCD 物性研究を終了させる。

3.2 有限多体系 QCD 物質の相構造の研究

この研究計画のタイムラインを下の図に示す。

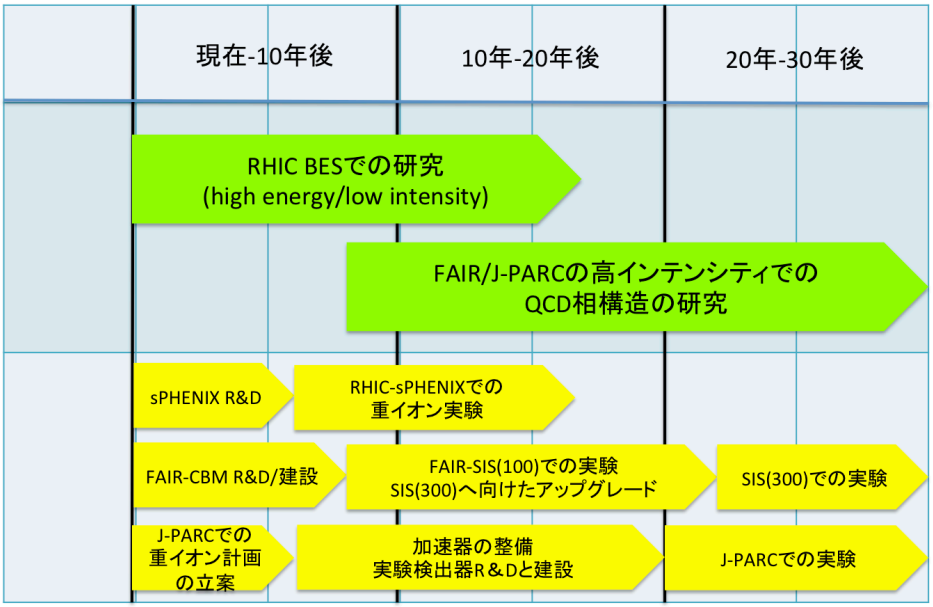

図 27　研究遂行へのタイムライン

1. RHIC の beam energy scan (BES) の遂行
   RHIC では $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV の金・金衝突を継続する一方で、衝突エネルギーのスキャン ($\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 18, 27, 39$ GeV) が今後 5 年間を中心に行われる予定である。現在のルミノシティでは測定量がグローバルな観測量に制限されてしまうものの、粒子多重度、バリオン数比、平均横運動量 (横エネルギー)、粒子密度相関長などの揺らぎや、その高次モーメントの測定を通じて QCD 臨界点の探索を進める。その一方で、electron cooling によるビーム輝度の向上を活用し、光子・レプトン対やハードな過程を通じた検証を進めたい。レプトン対の測定は高密度状態におけるカイラル凝縮やダイクォーク凝縮の検証に有益であると考えられるため、RHIC のビーム輝度の向上に並行し、レプトン対に対して大きなアクセプタンスを持つ次世代 PHENIX 実験検出器 (sPHENIX) の建設を行う。
2. FAIR/J-PARC の高インテンシティ重イオン衝突実験の遂行[*7]
   FAIR の SIS100/300 では重イオンを核子あたり 15GeV/45GeV まで加速可能である。現在は SIS100 を使って、2018-2019 年の実験開始を目指している。FAIR での実験研究を進める一方で、その後約 10-20 年をかけて SIS300 へのアップグレード建設を目指したい。

[*7] FAIR/J-PARC を同時に遂行する意義、現実性、その戦略は今後の綿密な議論の基に決定していきたい。本レポートでは実験研究の方向性に関する優先順位付けは考えない。

J-PARC では、30(50)GeV の 1 次陽子ビームを得られる事から、重イオンビームを J-PARC のメインリングに入射する事が出来れば、核子あたり 12(20)GeV のビームエネルギーが得られる。この領域での重イオン衝突では、通常原子核密度の 5-10 倍の密度が達成できると考えられ、バリオン密度が最も大きくなる事が過去の実験からも分かっている [41]。
SIS100 のエネルギーは J-PARC のエネルギーとほぼ同じであり、実際の参画には工夫が必要である。SIS100 での 30GeV 陽子強度 10^{13} proton/sec と比較すると、J-PARC では 50GeV の陽子の強度として一桁大きい 10^{14} proton/sec を目指しており、重イオンのビーム強度に関して言えば FAIR よりも J-PARC の方が優位であることが予想される。今後、J-PARC における重イオン加速を視野に入れた長期総合研究計画の策定を行い、研究参画を考えていきたい [47]。また、現在ロシアの JINR(Joint Institute for Nuclear Research) 研究所では、核子あたりの衝突重心系エネルギー 2-11GeV の重イオン衝突実験が計画されている [48]。現存する Nucletron 重イオン加速器を拡張してコライダー型の NICA 加速器を作り、2016 年くらいから MPD 実験 (Multi-Purpose-Detector) が開始される予定である。こちらへの参画も今後検討を重ねて行く。

3.2.1 現在-10 年の取り組み

RHIC のビームエネルギースキャン ($\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 18, 27, 39$ GeV) を遂行し、グローバルな観測量 (ハドロンの横運動量分布、方位角異方性、粒子多重度とラピディティ相関、揺らぎや高次モーメントの測定) を通じて、臨界点や非一様混合相に関する研究を行う。その一方で、RHIC が高密度 QCD 相探索の中心的施設となるように電子 cooling 技術を用いたビーム輝度向上を推進する。sPHENIX 実験での実験遂行、特に稀少・透過的プローブを用いた新しい QCD 相探索実験に向けた検出器 R&D や建設を進める。RHIC でのエネルギー走査実験が FAIR/J-PARC での実験展開に重要なインプットを与える為、RHIC の実験結果を精査し、FAIR/J-PARC での研究展開案を具体化する。

FAIR 加速器を用いた本研究に直結する実験として CBM 実験があげられる[*8] [49]。予算状況から CBM 実験の検出器建設は段階に分けて進める事が決まっている。CBM は図 28 に示された通り、ハドロン・電子・光子測定に特化した検出器群とミューオン測定に特化した 2 通りのプランがある。レプトン対や光子の測定を目指し、高インテンシティ重イオン衝突下で十分な性能を持つ RICH/EMCAL/VTX 検出器の R&D や建設を行う。また、高ルミノシティ下で、高多重度中の稀事象を探すために、事象選択のトリガーロジック・早い読出回路の開発や DAQ の開発を進める。

重イオンを J-PARC で加速・利用するためには、イオン源や速い繰り返しの 3GeV シンクロトロン (RCS) の代わりとなるインジェクター (例えば FFAG) が必要である。また、重イオンビームに対する要求としては、重イオンの核種とエネルギーを柔軟にかえられること (QCD 相のマッピング)、大強度であること (稀少プローブへのアクセス)、衝突技術のブレークスルー (より高密度状

[*8] 現在では、15 ヶ国、51 機関、400 人以上の参加がある

態形成の為の多方向原子核衝突の実現可能性など) などが挙げられる。20 年後の重イオン衝突実験開始を目指し、重イオン加速に向けた加速器設備の考案を進め、J-PARC での重イオン物理の更なる検討、実験立案、プロポーザルを行い検出器 R&D を開始する。

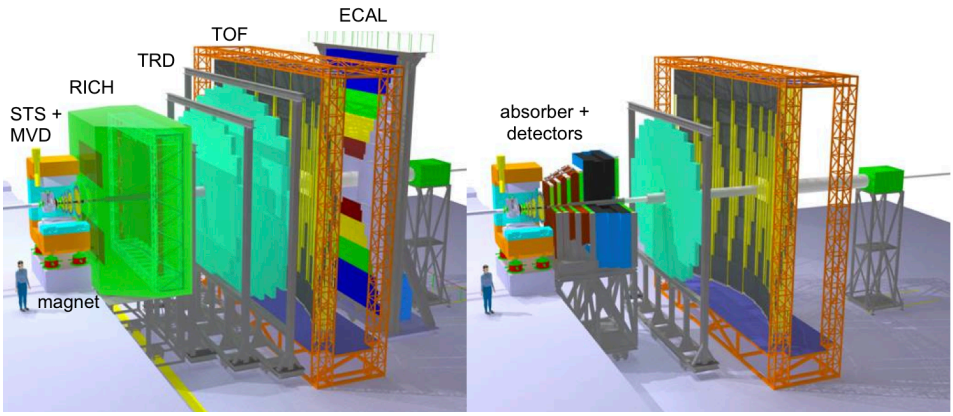

図 28　CBM 実験の検出器群の 2 候補 [49]

3.2.2　10-20 年の取り組み

電子 cooling によるビーム輝度の向上を受け、RHIC の衝突エネルギースキャンを実行し、sPHENIX 実験で稀少・透過的プローブを用いた高密度 QCD 相解明の検証を継続する。

FAIR では、CBM 実験用検出器の建設を終え、SIS100 での実験遂行やデータ解析にあたる。また、SIS300 に向けた検出器アップグレード計画を推進する。検出器をより高いエネルギーでより高い多重度下での測定に対応できるようにアップグレードを行っていく。

J-PARC では、重イオン加速器の整備や実験にむけた検出器 R&D を進める。

3.2.3　20 年以降の取り組み

SIS300 に向けた検出器建設と実験準備を経て、SIS300 での重イオン衝突実験を行う。さらに J-PARC での系統的な重イオン実験 (原子核同士衝突、陽子・原子核衝突) を継続する。SIS300 と J-PARC での早期結果を精査し、高密度 QCD 相構造研究を解明し (臨界点、閉じ込め相転移線、カイラル相転移線など)、更なる詳細研究に向けた加速器の高輝度化、加速エネルギーの広範囲化を目指し、それに追従する実験アップグレード計画を策定する。

3.3　カイラル対称性の回復現象に関する研究

この研究計画のタイムラインを下の図に示す。

1. RHIC/LHC の高温度領域での研究
   高温度側では、非閉じ込め状態への相転移とほぼ同時にカイラル対称性が回復すると考えら

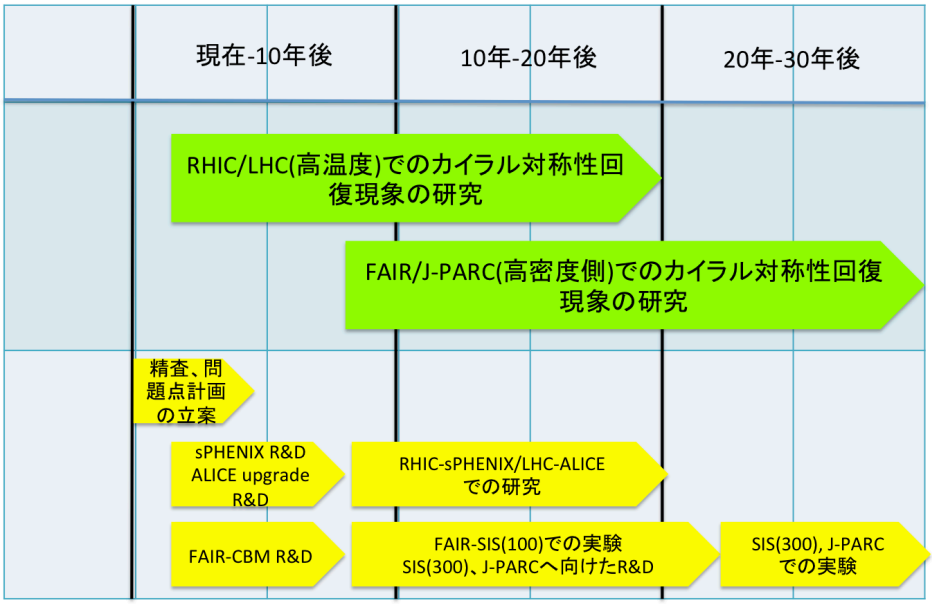

図 29　研究遂行へのタイムライン

れている。従って、RHIC や LHC で実現される QGP は、カイラル対称性が回復した世界として非常にユニークな場である。要検討事項は、高エネルギー重イオン衝突という高粒子多重度中で、カイラル対称性の回復の指標となるクォーク対凝縮の情報を得る為に、何を測定するのがベストなのか、という事である。低質量ベクトル中間子 (ρ、ω、ϕ) の電子対測定は、質量・巾の変化とその運動学依存性の議論に最適であるが、現行の RHIC・LHC での実験では、粒子多重度と中性 π 中間子の Dalitz 崩壊や外部変換からの電子対が大きなバックグランドとなっており、精密な測定段階に至っていない。従って、バックグランドの改善に向けた既存実験の検出器増強計画、新たなプローブの可能性や新規実験計画の策定を最初の数年で進めたい。低質量領域のレプトン対測定に関しては、PHENIX/CERES 実験が低質量領域に既存のハドロン崩壊成分以上の超過収量を測定してきたが、ここから低質量ベクトル中間子の質量・幅の変化を引き出すには、QGP やハドロンガスからの熱的電子対の寄与を正確に押さえる必要があり、その検証には、高エネルギー重イオンの時空発展の理解が必須である。QGP 物性の精密研究と並行して進めて行きたい。

2. FAIR/J-PARC の高密度領域での研究

高密度領域では必ずしも非閉じ込め相転移とカイラル相転移が同時に起こるとは限らないが、CERES や HADES 実験での先行研究より、高密度側でのカイラル対称性の回復現象のヒントが得られつつある。FAIR や J-PARC エネルギー領域での高エネルギー重イオン衝突で達成される高バリオン密度領域で、低質量ベクトル中間子、レプトン対、擬スカラー中間子や σ 中間子などを様々な崩壊モードで系統的に測定し、カイラル対称性の回復現象の完全理解を目指す。また、p+A 衝突を用いた通常原子核密度におけるカイラル対称性の部分

的回復研究も同様に推進したい。

3.3.1 現在-10 年の取り組み

PHENIX 実験では 2007-2010 年に HBD 検出器を使った低質量レプトン対測定に特化した実験を行ってきた。金・金衝突における HBD 検出器の性能は高粒子多重度下における電子対測定に重要な指針を与える為、現在までに取得されたデータの解析を継続する。そして、その中で判明した問題点の改善と他のプローブ測定 (ミューオン対、σ 中間子など) を含めた検出器建設計画を策定し、ALICE 実験や sPHENIX 実験での研究を行う。ALICE 実験では前方シリコンピクセル検出器の建設計画があり、ミューオン対の質量分解能の向上が期待できるため、このアップグレード計画への参画を考えたい。

FAIR 実験で金・金衝突における低質量レプトン対や様々な崩壊モードで低質量ベクトル中間子を測定する事を目指して、高粒子多重度中でも十分な性能を持つカロリメータや電子同定用 RICH の開発を行う。J-PARC での実験遂行を目指し、加速器の整備と並行して、最適なプローブの選定、測定に向けた実験案の策定や R&D を進めたい。

3.3.2 10-20 年の取り組み

sPHENIX や ALICE アップグレード・次世代 ALICE 実験の下での実験を進め、様々なシステムでの系統的な測定を通じて、高温度側のカイラル対称性の回復現象研究を終える。FAIR での SIS(100) での重イオン衝突を遂行し、高密度下での研究をスタートさせ、p+A 衝突や核種変更を通じて低質量レプトン対や低質量ベクトル中間子の系統的な測定を行う。J-PARC での実験遂行に向けた、検出器、高速読出回路や DAQ の R&D を行い、本格的な建設を開始する。

3.3.3 20 年以降の取り組み

J-PARC や FAIR-SIS300 での実験の遂行。高バリオン密度中でのレプトン対、σ などの系統的測定を行い、高密度中でのカイラル対称性回復の実験研究を進める。高密度下でのカイラル対称性の回復現象の研究を終える。

4 Outlook (Facility, Detectors, Resources)

ここでは、研究遂行に関連する Facility や実験増強計画を纏める。

4.1 Facility and Detectors

4.1.1 LHC 加速器と LHC-ALICE 実験

今後 10-20 年は、1-2 年間のシャットダウンが数回はあるものの、$\sqrt{s_{NN}}$=5.5 TeV の重イオン衝突ランが予定されている。現在の予定では、LHC オペレーション期間のうち 1 カ月程度が重イオン衝突に充てられている。今後 10-20 年で、鉛・鉛衝突、陽子・鉛衝突や軽い系の Ar・Ar 衝突

が行われる予定である。その一方で、10 年後を目処にした LHC のルミノシティ増強計画や、20 年後を目処にしたエネルギー増強計画が立案されている。その先は、電子・陽子、電子・原子核衝突に向けた LHeC の建設が考案されている。現在、LHC-ALICE 実験の増強計画として、ジェット対測定用の電磁カロリメータ、グルオン飽和研究用の前方飛跡検出型カロリメータ、最内層シリコン検出器、前方シリコン検出器、高横運動量粒子同定検出器などが挙がっている。

4.1.2 RHIC 加速器と RHIC-PHENIX 実験

RHIC ではルミノシティのアップグレード計画と共に、電子・陽子や電子・原子核衝突の為の電子加速器の建設計画が進行中である。また、RHIC-PHENIX 実験では、これまでの研究成果を基にした次世代 PHENIX 実験 (sPHENIX) の建設計画が立案されており、5-10 年を目処に建設を進めて行く予定である。

4.1.3 FAIR 加速器

2011 年の 12 月に正式な建設プロジェクトとなり、2018-2019 年に SIS100 での実験をスタートさせる予定である。SIS300 へのアップグレード用予算の目処は未だ立っていない。FAIR では高密度 QCD 相探索を目的とした CBM 実験が予定されている。現在は、CBM 実験の検出器を建設する予算や人的資源が不足しており、前実験の HADES 実験検出器を基盤として、徐々に CBM の検出器を建設して行く予定である。

4.1.4 J-PARC 加速器

J-PARC における重イオン衝突は、最高バリオン密度近くの高密度 QCD 物質の研究に有益である。J-PARC の長期計画の一つに重イオン加速の可能性が考えられており、10-20 年程度のタイムラインで加速器施設の準備が可能であると考えられる。重イオン加速に向けてイオン源や MR へのインジェクター (FFAG などが候補) を整備する必要がある。この推進は、我々のコミュニティからの強力な指針、戦略があってこそであり、積極的なコミットメントを考えたい。

4.2 Resources

4.2.1 資金、人的資源

以上の研究計画を遂行するにあたり、必要となるであろう資金・マンパワーを下に示す。コミュニティの現状を踏まえ、この資金とマンパワーを得る事は非常に難しいと言える。研究組織の拡充化を目指す一方で、現在の資源をどのように生かすべきか、将来の資金をどのように調達するべきか、コミュニティで物理戦略や研究題目の順位付けの議論を行い具体的な指針を策定していく。

4.2.2 新しい研究組織の確立

RHIC における QGP 生成を受け、LHC の稼働とともに、今後は LHC-RHIC という広いエネルギー範囲に渡る QGP 物性が花開くものと期待される。その一方で、RHIC のエネルギースキャ

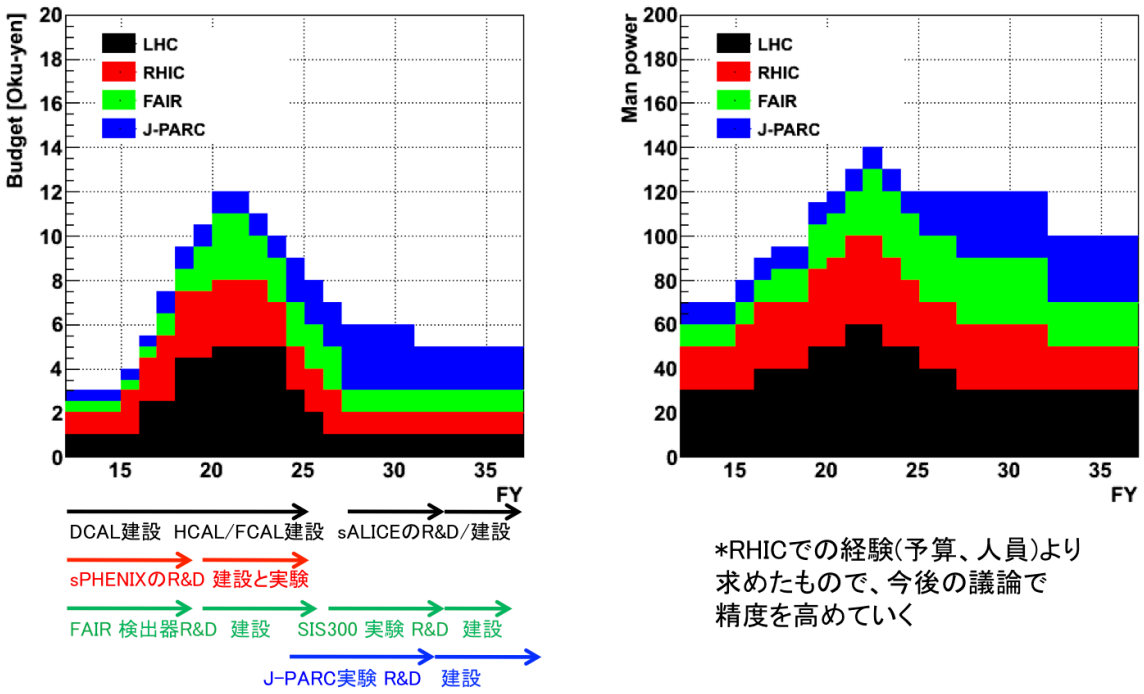

図 30　研究遂行に必要な資金 (左) とマンパワー (右). J-PARC 加速器建設に関わる経費は計上していない。

ン、10 年後に始動する FAIR や J-PARC での高・中間エネルギーでの重イオン衝突は、高密度 QCD 物質の相構造研究に新展開を齎すものと期待される。

高エネルギー重イオン衝突を通じた QCD の物性研究の発展には、状態方程式などの静的な性質を与える格子 QCD 計算、グルオン飽和という small x における核子構造や熱平衡化過程の記述に必要な非平衡 QCD、それらをインプットにした相対論的 (粘性) 流体計算、強結合状態を記述するゲージ・重力対応 [50]、など様々な理論体系が必要である。また、QCD 相構造の研究には依然として信頼たる理論計算が必要である。これらの理論体系との密なる連携は本研究の推進に必要不可欠である。

これら理論グループとの連携を含む高エネルギー重イオンの物理で繋がる新しい研究組織の確立を考えて行きたい。例えば、QGP 物性を「強結合多体系の物理」で括り、半導体中の高密度電子正孔系に見られる強相関や相構造 [51]、完全流体として振る舞う極低温強結合 Fermi ガス [52] と関連して研究を展開するのが一案である。また原子核コミュニティのみならず、素粒子・物性も含む、掲げる物理 (強結合物性系、高強度場の物理、初期宇宙、高密度天体) や、最先端検出器の開発で繋がる、新しい融合的な研究コミュニティの立ち上げを実現したいと考えている。

4.3 他 WG との連携

4.3.1 ハドロン WG

ハドロン WG が掲げるエキゾチックハドロン探索は、我々が掲げるクォーク閉じ込め機構の理解というテーマと共通点が大きい。エキゾチックハドロン探索手法として、重イオン事象から生成されるペンタクォークや H ダイバリオン、$\Lambda(1405)$ 等のエキゾチックハドロンに期待が持たれている [55]。特に LHC 等の高エネルギー領域では、重いクォークの生成断面積が大きいため、チャームやボトムクォークを含むエキゾチックハドロン探索に期待できる。現在までに測定されたハドロン生成や原子核生成は、化学熱平衡統計モデルでの記述以外に、近い位相空間において複数のバリオンが結合し生成されるモデル (coalescence model) も存在し、どちらも同様の収量を記述できることが知られている。４個以上のクォークからなるハドロンの収量からこれらのモデルの選別が可能で有ることが示唆されており、重いハドロン生成機構の解明にも役立てることができる。また、２次フロー (v_2) の構成クォーク数スケーリング則を利用することにより、生成されたハドロンに含まれるクォーク数の直接測定も可能である。他にも、従来の 2Λ HBT 相関と同様の手法を用いて、Λ 間相互作用についての知見が得られることが期待されている。重イオン衝突を用いて反原子核を大量生成し、反原子核ビームとすることで新たなハドロン物理の開拓に広がる可能性が示唆されている。RHIC 加速器の STAR 実験において、陽子から He まで、更に反陽子から反ヘリウムまでの測定が行われ、化学熱統計モデルとの予想と矛盾していないことが示された [56]。 重イオン衝突事象により生成されるエキゾチックハドロンや反原子核を利用した新しい可能性については、まだまだ議論し始めたばかりである。今後の将来計画へどう盛り込んでいくのか議論を続けていきたい。高エネルギー重イオン WG が掲げる重要な研究テーマの一つとして、これまでの章で記述してきたように、高温クォーク物質中におけるカイラル対称性の自発的破れの回復を通したハドロンの質量発現機構の解明がある。ハドロン WG もまた、この研究課題と大きな関連性を持つ、通常原子核を用いたカイラル対称性部分回復の実験的探索を提案している。このハドロン WG のアプローチは、時間的に安定で量子数の定まった状態としての利点がある一方で、核子について成立しているポテンシャル描像とカイラル対称性回復描像の実験的区別が困難という問題を抱える。他方、高エネルギー原子核衝突実験ではより複雑な時空発展を経るが、高温高強度のカラー場の存在が確立しており、両者は単なる量的差異ではなく質的に異なる条件下という意味で相補的な物理意義を持つ。今後、どのように連携を取りこの関連性と相補性をを発展させていくか、議論を継続していきたい。

4.3.2 ストレンジネス WG

化学熱平衡統計モデルによると、重イオン中心衝突においては $\sqrt{s_{NN}}$=4GeV 以上において s クォークは、u,d クォークと正準平衡化することが知られている。この衝突エネルギーは J-PARC の重イオン衝突で達成可能であり、J-PARC や FAIR 重イオン衝突では、ストレンジネスを含むハドロンの大量生成が期待される。特に、このエネルギー領域では、ストレンジネスを含むハイ

パー核生成収量が最大になることが予想されている [57]。2 つのラムダを含む原子核生成、例えば ${}^{5}_{\Lambda\Lambda}H$ などは、10^6 個の重イオン中心衝突に対しておよそ 5 個生成されると予想されており、重イオン衝突はハイパー核探索に有用である。ハイパー核の Mesonic Decay の測定は既に重イオン衝突事象から出てきた ${}^{3}_{\Lambda}H$ の崩壊幅 (崩壊長) の測定から既に行われており、過去のデータと矛盾していない結果得られている [58]。真空中 Λ の崩壊長とは誤差の範囲で一致しており、今後、J-PARC や FAIR エネルギー領域においての高統計の測定が期待される。さらに、重イオンを利用してハイパー核ビームを発生させ、ターゲットとの衝突により新たな研究手法が期待できる。今後、J-PARC や FAIR における研究展開を計画の一つとして取り入れていきたい。

4.3.3 **核子構造** WG

RHIC や LHC での高エネルギー重イオンでは、衝突初期条件の解明や衝突直後の高強度ゲージ場のダイナミクスと早期熱平衡化機構の解明が強く求められている。高エネルギー重イオン衝突のリファレンスとして、陽子・陽子衝突や (重) 陽子・原子核衝突も重要であり、高エネルギー QCD 反応の素過程の理解も必須である。衝突初期条件は原子核内核子のパートン分布で決定されるため、この研究は核子構造との繋がりが非常に深い。今後、核子構造 WG との共同研究として、例えば、RHIC の将来計画である電子・陽子衝突、電子・原子核衝突を推進し、陽子や原子核核子内のパートン分布の精密研究、small x におけるグルオン場のダイナミクスの研究を進めていきたいと考えている。また、LHC の長期将来計画にも電子・陽子、電子・原子核衝突が考えられており、こちらへの積極的な参画も検討していきたい。

4.3.4 **計算物理** WG

QCD の非摂動的効果が顕著に、かつ、動的に現れる高エネルギー重イオン衝突反応の理論計算は大規模な数値計算を必要とする。現状では、第一原理である有限温度格子 QCD 数値計算で得られた QGP の状態方程式をインプットとして、相対論的流体数値シミュレーションが行われ、高エネルギー重イオン衝突反応における QGP の時空発展が記述されている。今後、計算物理との関わりとして、本 WG の観点から二つの大きな方向性が考えられる。一つは第一原理計算自身の発展、もう一つは現象論的アプローチである流体数値シミュレーションの発展である。前者では、実験結果の物理的解釈をする上で、有限温度におけるスペクトル関数や輸送係数の導出、有限密度系における相構造や状態方程式などを得ることが重要となる。ただし、すでに述べた通り、有限密度系では符号問題のため実際の計算にはブレークスルーを要する。後者では、揺らぎの入ったイベント毎流体シミュレーションを行う枠組みを作り、流体力学を基礎としたイベントジェネレータを構築することが QGP の精密物理を展開する上で必須となる。実験と同程度のイベントを貯めるための流体モデルの定式化と同時に、その大規模数値計算も実行する必要がある。QGP を理解する上では、高エネルギー重イオン衝突反応と有限温度密度格子 QCD 計算は、相補的な手段である。そのため、今後、計算物理 WG とも連携していくことが必要である。

参考文献

[1] K. Fukushima and T. Hatsuda, Rep. Prog. Phys. **74** (2011), 014001

[2] N. Cabibbo, G. Parisi, Phys.Lett.B59:67-69,1975; G. Baym, NSAC 1983, Long Range Plan; L. McLerran, Nucl. Phys. **A830**, 709c-712c, 2009;

[3] F. Karsh, Lect. Notes Phys. **583**, (2002), 209

[4] R. Stock, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 30 S633; H. Satz, Phys.Rept. 403-404 (2004) 33-50; http://www.bnl.gov/rhic/; http://lhc.web.cern.ch/lhc/

[5] http://www.gsi.de/portrait/fair_e.html

[6] http://www.phenix.bnl.gov/

[7] http://aliweb.cern.ch/

[8] 第 21 期日本学術会議物理学委員会素粒子原子核物理分科会 田村裕和氏「J-PARC での原子核物理」 http://hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/SCJ/20090601.htm

[9] Nucl. Phys. **A, 757**, 1-27, 2005 (BRAHMS); Nucl. Phys. **A, 757**, 184-283, 2005 (PHENIX); Nucl. Phys. **A, 757**, 28-101, 2005 (PHOBOS); Nucl. Phys. **A, 757**, 102-183, 2005 (STAR)

[10] A. Toia for the ALICE Collaboration, arXiv:1107.1973

[11] M. Floris for the ALICE Collaboration, arXiv:1108.3257

[12] N. Armesto *et al.* J. Phys. G 37, 025104, 2010

[13] J. Jia, R. Wei, Phys. Rev. C 82, 024902, 2010

[14] A. Adare *et. al.*, (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. 98, 172301 (2007)

[15] Y. Akamatsu *et. al.*, Phys. Rev. C 80, 031901, 2009

[16] K. Aamodt *et al.* for the ALICE Collaboration, Phys. Lett. B 696 (2011) 30-39; G. Aad *et al.*, for the ATLAS Collaboration, Phys. Rev. Lett 105, 252303 (2010): A. Angerami *et al.*, for the ATLAS Collaboration, arXiv:1108.5191; S. Chatrchyan *et al.*, for the CMS Collaboration, Phys. Rev. C, 84, 024906, 2011; C. Roland *et al.*, for the CMS Collaboration, arXiv:1107.3106

[17] A. Adare, *et. al.*, (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. C 81, 034911 (2010)

[18] A. Adare, *et. al.*, (PHENIX Collaboration, arXiv:1105.4126

[19] A. Adare *et al.* for the PHENIX Collaboration, Phys. Rev. Lett. 98, 232301, (2007)

[20] P. Pillot *et al.*, for the ALICE Collaboration, arXiv:1108.3795; C. Silvestre *et al.*, for the CMS Collaboration, arXiv:1108.5077

[21] T. Hirano *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 34, (2007), S879; P.Romatschke, *et al.*, Phys.Rev.C78:034915,2008

[22] R. Averbeck *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 35 104115, 2008; R. Lacey *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 092301,(2007); H.-J. Drescher et al.: arXiv:0704.3553; S. Gavin and M. Abdel-Aziz, Phys. Rev. Lett **97**:162302, 2006

[23] R. Lacey *et al.*, for the PHENIX Collaboration, arXiv:1108.0457; J. Jia *et al.*, for the ATLAS Collaboration, arXiv:1107.1468; R. Snellings *et al.*, for the ALICE Collaboration, arXiv:1106.6284;
[24] Altarelli G and Parisi G, Nucl. Phys. B 126 (1977) 298; Kuraev E A, *et al.*, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 72 (1977) 3; Balisky I I, *et al.*, Sov. J. Nucl. Phys. 28 (1978) 822
[25] L.D. McLerran and R. Venugopalan, Phys. Rev. D 49 (1994) 2233; Y.V. Kovchegov, Phys. Rev. D 54 (1996) 5463; I. Balisky, Nucl. Phys. B 463 (1996) 99
[26] R J Fries, J I Kapusta and Y Li, arXiv:nucl-th/0604054;T Lappi and L McLerran, Nucl. Phys. A772, 200 (2006)
[27] P. Arnold, G. Moore, and L. Yaffe, Phys. Rev. D 72 (05) 054003; P.Romatschke, R. Venugopalan, 2006; H. Fujii, K. Itakura, Nucl. Phys. A809 (2008) 88; A Dumitru, Y Nara and M Strickland, Phys. Rev. D75, 025016 (2007)
[28] Y. Hama, *et al.*, J.Phys. 35, 24 (2005); R. Andrade, *et al.*, , Phys. Rev. Lett. 97, 202302 (2006); R. Andrade *et al.*, Phys. Rev. Lett. 101, 112301 (2008); H. Petersen *et al.*, Phys. Rev. C79, 054904(2009), Phys. Rev. C81, 044906 (2010); K. Werner *et al.*, arXiv:1004.0805 [nucl-th]; H. Holopainen, *et al.*, arXiv:1007.0368 [hep-ph]
[29] H. Song, *et al.*, Phys.Lett.B658:279-283,2008, Phys.Rev.C77:064901,2008, Phys.Rev.C78:024902,2008; C. Shen, *et al.*, Phys.Rev.C82:054904,2010
[30] A. Dumitru *et al.*, Nucl.Phys.A810:91-108,2008
[31] A. Sickles, *et al.*, for the PHENIX Collaboration, arXiv:1107.2035
[32] T. Peitzmann, *et al.*, for the ALICE Collaboration, arXiv:1106.5807
[33] https://na61.web.cern.ch/na61/xc/index.html
[34] K. Redlich, J. Phys.: Conf. Ser. **5**, (2005),162
[35] B.I. Abele, *et al.*, (STAR), Phys.Rev. bf C79, 034909, (2009)
[36] E802 Collab., L. Ahle *et al.*, Phys. Rev. C 60 (1999) 064901; E877 Collab., J. Barette *et al.*, Phys. Rev. C 62 (2000) 024901; E917 Collaboration, B.B. Back *et al.*, Phys. Rev. C 66 (2002) 054901; NA49 Collab., H. Appelshauser *et al.*, Phys. Rev. Lett. 82 (1999) 2471; BRAHMS Collab., I.G. Bearden *et. al.*, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 102301
[37] L. Kumar, *et al.*, for the STAR Collaboration, arXiv:1106.6071
[38] K. Aamodt, *et al.*, (ALICE), hys. Rev. Lett. **105**, 252302 (2010)
[39] J. Randrup and J. Cleymans, Phys. Rev. **C 74**, 2006, 047901
[40] Yu. B. Ivanov, *et al.*, Phys. Rev. C 73 (2006), 044904
[41] http://nuclth.kek.jp/jhf02/ohnishi.pdf
[42] Review として, R. S. Hayano and T. Hatsuda, Rev. Mod. Phys. Vol. 82, (2010), 2949
[43] A. Agakichiev *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75**, (1995), 1272 A. Agakichiev *et al.*, Eur. Phys. J. **C4**, (1998), 231
[44] R. Arnaldi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **96**, (2006), 162302, R. Arnaldi *et al.*, Eur. Phys. J.

C64, (2009), 1
[45] A. Adare *et al.*, Phys. Rev. C. **81**, (2010), 034911
[46] D. Kharzeev, *et al.*, Nucl. Phys. A803, 227 (2008); H. Warringa, J. Phys. G35, 104012 (2008); K. Fukushima, *et al.*, Phys. Rev. D 78, 074033 (2008)
[47] http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/∼jparchua/share/jparc_propsepcts.pdf
[48] http://nica.jinr.ru/
[49] http://www.gsi.de/forschung/fair_experiments/CBM/index_e.html; CBM Physics Book http://www.gsi.de/forschung/fair_experiments/CBM/PhysicsBook_e.html
[50] P.Kovtun, D.T.Son, A.O.Starinets, hys.Rev.Lett. **94**, (2005), 111601
[51] T. Suzuki and R. Shimano, Phys. Rev. Lett. **103**, (2009), 057401
[52] J. E. Thomas, Nucl. Phy. A **830**, (2009), 665c
[53] S. Cho *et al.*, arXiv:1011.0852; A. Ohinishi *et al.*, arXiv:1103.1700
[54] J. H. Chen *et al.*, (STAR collaboration), Nucl. Phys. A **835**, 117-120, 2010.
[55] PRL 106, 212001 (2011)
[56] STAR Collaboration, Nature 473 (2011) 353-356
[57] A.Andronic and P.Braun-Munzinger *et.al.*, Phys. Lett. B 697(2011) 203
[58] STAR Collaboration, Science 328 (2010) 58