

高エネルギー原子核衝突実験の最新結果 国際会議 QM2012 から

野中千穂¹

名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構、名古屋大学大学院理学研究科

2012年米国ワシントン D.C. で行われた国際会議 QM 2012 で報告された物理成果を実験結果を中心に紹介する。

1 はじめに

国際会議クォークマター 2012 (Quark Matter 2012 (QM2012)) [1] は高エネルギー重イオン衝突実験物理で最も大きな会議の一つであり、今回で23回目を迎えた。約1年から1年半ごとに開催され、年々参加人数が増加傾向にある。今回は実験、理論研究者で750人ももの参加者があり、基調講演が32、パラレル講演が167、ポスタープレゼンテーションにいたっては300以上という、ここ数年で最も大きな規模であった。

さて、2005年に米国ブルックヘブン国立研究所の Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) での強結合 QGP 生成が確立してから現在の主たる目的は QGP の詳細な研究となってきた。具体的には QGP の状態方程式、輸送係数が対象である。それを目的に RHIC、CERN の Large Hadron Collider (LHC) で大規模な高エネルギー重イオン衝突実験が遂行されている。様々な実験結果が報告されているが、そこから QGP の性質を知ることはそれほど簡単なことではない。困難の一つはクォークやグルーオンは直接観測できないことがあげられる。そのため、QGP をどのように観測して行くのかが大事である。様々な実験結果の包括的な理解が QGP 解明につながると考えられている。

まず現在の高エネルギー重イオン衝突実験の理解を概観する。高エネルギーで重イオン同士が衝突後、短時間で熱平衡状態に達し、流体膨張が起こる。ここで QGP からハドロン相への量子色力学 (QCD) 相転移が起こり、フリーズアウト過程を経て多くの粒子が検出器に飛び込んでくる。この重イオン衝突実験の時間と今回の QM 2012 のトピックを図 1 に示した。

今回の会議では RHIC からは PHENIX、STAR からの実験報告があった。それらは Au+Au 衝突のエネルギースキャン実験 ($\sqrt{s_{NN}} = 7.7, 19.6, 27, 39, 62, 200$ GeV)、衝突系依存性として U+U 193 GeV、Cu+Au 200 GeV 実験の結果も報告された。LHC からは、重イオン衝突実験に特化した検出器を持つ ALICE だけでなく、ATLAS、CMS と 3 つの実験グループからの Pb+Pb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ GeV の結果が報告された。この RHIC と LHC で期待されている QGP 物理はどのようなものであろうか？ RHIC の大きな特徴はエネルギースキャンや系依存性など様々な衝突実験を行っていることである。これは QCD 相図上で有限密度方向の解析を可能にするものであり、この結果 QCD 相転移現象の詳細な理解が可能になる。一方、LHC はエネルギーフロンティアである。このエネルギー領域でのポイントは強結合 QGP が RHIC と同様に見出されるかどうかということになるであろう。例えば RHIC と LHC の生成粒子数の違いを見てみよう。文献 [2] によると $pp(\bar{p}\bar{p})$ 衝突では粒子生成量は $s_{NN}^{0.11}$ で増大し、重イオン衝突では $s_{NN}^{0.15}$ で増大している。ここで s_{NN} は核子核子衝突あたりの全エネルギーである。その結果、LHC ($\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV) での重イオン衝突実験では RHIC ($\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV) と

¹e-mail address: nonaka@hken.phys.nagoya-u.ac.jp

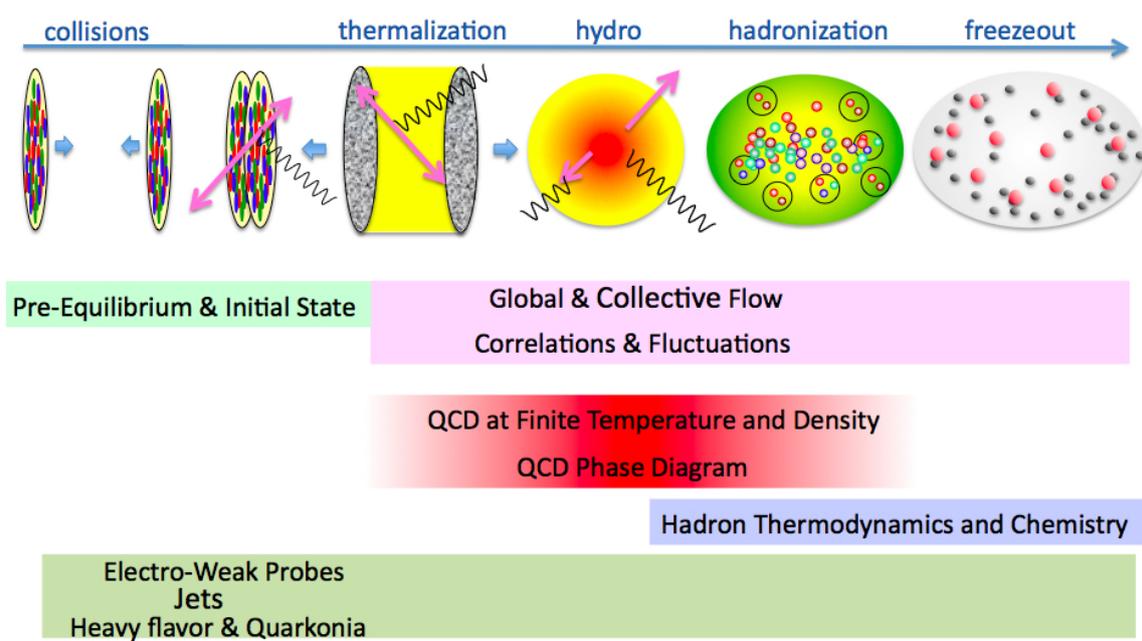


図 1: 高エネルギー重イオン衝突後の時間発展と QM 2012 で取り上げられたトピック。以上に加えて理論と実験の新しい発展に関するセッションもあった。

比べ 2 倍強の粒子生成量となっている。このような粒子生成量の圧倒的な違いからも LHC では RHIC と異なる新たな物理現象が見出されることが期待できる。

2 重イオン衝突実験の時間発展から

QGP の特徴を多角的に捉えるために様々な実験結果が数多く報告されている。これらのデータを重イオン衝突実験の時間発展の視点から整理して見ていく。

2.1 初期条件

高エネルギー重イオン衝突直後については理論的には確立していないことが数多く存在し、今まさに新たな研究成果が次々と報告されているところである。特に短時間で熱平衡に達する機構についての議論が活発である。ここで実験で確認すべき大事なことの一つは衝突後に QGP 生成に十分なエネルギー密度、温度に達したかどうかを検証することである。そのヒントになるのが光子の横運動量分布である。ここでは PHENIX [3]、ALICE [4] の結果を見てみる。両者の結果で共通であるのは低横運動量領域ではボルツマン分布に従い、高横運動量領域では横運動量のべきで記述できることが見てとれることである。そのためどちらのエネルギー領域でも低横運動量では熱平衡状態に達していると解釈することが可能である。実験で達した温度は光子の横運動量分布のボルツマン分布でのフィットによる概算することができる。それによると、PHENIX (RHIC) では $T = 221 \pm 19 \pm 19$ MeV (Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV)、ALICE (LHC) では $T = 304 \pm 51$ MeV (Pb+Pb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV) という値が得られている。最近の格子 QCD によると相転移温度は $T_c = 150 \sim 160$ MeV [5, 6, 7] と報告されているので、このことから RHIC、LHC で相転移が起こり QGP が生成していると考えられる。し

かしここで注意しなければいけないことは、光子は強い相互作用をしないため、この実験で見えているものは、衝突直後の初期条件からフリーズアウトまでの全時間発展の平均温度であるということである。そのため実際の初期条件ではもっと大きな温度が実現されていると考えられる。

2.2 流体膨張—ハドロン化—フリーズアウト過程

ここでは様々な興味深い物理現象が起こると考えられ、それを議論するのに必要な実験結果も豊富に存在している。粒子の集団運動（フロー）、ジェットが高温・高密度の媒質中でエネルギーを失うジェットエネルギー損失機構、熱的光子の生成といった物理現象が考えられている。系が膨張し、全体の温度が冷えてくると QGP 相からハドロン相への相転移（ハドロン化）が起こる。その過程は横運動量領域によって状態方程式（流体模型）、リコンビネーション模型、フラグメンテーション模型でそれぞれ記述できると考えられている。さらに生成したハドロンの平均自由行程が大きくなりそれ以上相互作用なくなると、ハドロンの情報が凍結し（フリーズアウト）それらが、検出器へと飛び込んでくることになる。これら一連の過程において大きな役割を果たすのが相対論的流体模型である。相対論的流体模型の RHIC で発見された強い楕円フローの説明成功、さらに Romatschke らによる相対論的粘性流体模型での楕円フローの実験解析成功 [8] 以来、相対論的流体模型は現象論的模型の中心になってきた。この QM 2012 でも講演、ポスター発表を含めて 18 もの研究成果の発表があった。ここ数年の高精度の実験結果の理解から現在高エネルギー重イオン衝突実験を記述するのに求められている模型は次のようなものである。イベントごとのゆらぎを取り入れた初期状態、(3 + 1) 次元の相対論的粘性流体模型、そしてハドロン間の相互作用を含む現実的なフリーズアウト過程のいずれも必要とされている。流体模型の基調講演を行った Ollitrault の講演 [9] の中に相対論的流体模型の初期条件、数値計算の次元、粘性の存在、フリーズアウト過程に注目しそれぞれの過程が模型にどのように取り扱われているかの議論があった。それを見ると最近の相対論的粘性相対論的流体模型の発展は著しいが、重イオン衝突実験のそれぞれの時間発展の記述と言う観点からすると、まだまだこれからであるという印象を受ける。特にハドロン間の相互作用を取り入れることが可能になるハドロンベースのイベントジェネレーターを取り入れた模型はやっと出てきたばかりである。McGill グループ [10] がその結果を示したが、計算時間がかかるためか、統計が不十分でまだ最終結果とは言えなかった。

フローに関する実験結果の中で最近の大きな成果は方位角分布の高次調和成分の実験結果であろう。粒子生成は方位角に対して式 (1) のようにフーリエ展開することができる。

$$\frac{dN}{dyd\phi} \propto 1 + 2v_1 \cos(\phi - \Theta_1) + 2v_2 \cos 2(\phi - \Theta_2) + 2v_3 \cos 3(\phi - \Theta_3) + 2v_4 \cos 4(\phi - \Theta_4) + \dots, \quad (1)$$

ここで、 v_1 、 v_2 は以前から良く測定されていた直接フローと楕円フローである。新しいのはそれらに加えてさらに高次成分が測定され始めたことである。例えば v_3 は初期に存在するイベントごとのゆらぎに起因するということがわかってきた。従来のようなスムーズなアーモンド型をした初期条件から流体計算を行っても有限な v_3 の値は得られない。さらに、以前はマッハコーン生成の痕跡であると考えられていた粒子相関の away side に存在した 2 つの山が実は高次成分の重ね合わせで説明できることが見出された（例えば [11]）。実験解釈がこのように精度の良い実験結果と、理論からの定量的解析ともに変化していくことも重イオン衝突実験物理の面白さの一つであると思われる。同時に一つの実験結果に対してもすれば様々な定性的な解釈が提示されることが良くあるが、精度の良い定量的な解析がいかに重要であるかが、この実験解析解釈の変遷から伺える。この物理量の詳細な解析から

例えば初期の粒子分布に起因するエネルギー分布が終状態でそのように変化するかを調べることで、状態方程式、輸送係数といった QGP の詳細な特徴を知ることができると期待されている。

このようににわかに注目を集めたフローの方位角分布の高次調和成分の実験結果であるが、この実験結果の定量的な解析はとても難しい。相対論的流体模型の計算においてイベントごとの初期条件の使用の必要性、実際の実験なみの計算統計量と行った精度の良い数値計算が要求される。特に初期条件のゆらぎの存在は相対論的流体模型における正しい衝撃波の取り扱いを要請している。高エネルギー重イオン衝突実験理解に適用されている相対論的模型中のアルゴリズムは、SHASTA、KT、PPM、などである。未だに単純な差分法を使用したものも見られ、相対論的流体模型の数値解析という観点からみると残念ながら十分に吟味されているとは言えない。特に広く使用されているのは SHASTA であるが、これは約 40 年前に最初に提案された Flux-Corrected Transport (FTC) 法である。衝撃管のテスト計算をみると解析解と比較して SHASTA の結果もそれほど悪くはないが、高エネルギー重イオン衝突実験の数値計算では小さな誤差が大きな誤差へ集積すると考えられる。さらに実験結果の粘性を議論するためには数値計算の中に存在する人口粘性の影響の小さなアルゴリズムを選択することが重要である [12]。

この高次調和成分について、RHIC、LHC の双方から豊富な実験結果が報告された。ALICE ではほとんどの中心衝突度で v_2 が最も大きな値を持つが、中心衝突 (0-5 %) では v_3 が支配的であることが見出された [4]。これも v_3 の起源はイベントごとのゆらぎであることの証拠の一つであると考えられる。CMS は中心衝突 (0-2 %) では ϵ_n が $n = 2 \sim 5$ ではほとんど一致することを示した [13]。

楕円フローの振舞は横運動量域ごとに理解することができる。それは横運動量ごとに支配的な物理が異なるためである。図 2 に横運動量ごとに支配的な物理とその特徴を示した。低横運動量領域は相対論的流体模型で記述される。それぞれの粒子が流体の流れに乗って運動するために、質量が重い粒子ほど楕円フローの値が小さくなる。この振舞は「mass ordering」と呼ばれる。中横運動量領域ではリコンビネーション模型が支配的となる。ここでは個々の粒子と言うよりも、メソンかバリオンであるかでフローの振舞が決まる。すなわちクォーク数スケールリングを実験結果の中に見出すことができる。これは最近 v_3 や v_4 にも拡大されて実験解釈が行われつつある。これはまさに高エネルギー重イオン衝突後にクォークのスープできた証拠と考えられ、RHIC での強結合 QGP 生成への根拠の一つと考えられた。高横運動量領域になると今度はジェットのエネルギー損失機構が支配的な物理となる。そこでは楕円フローの振舞はパートンの媒質中との相互作用によって決まってくるので、ジェットが媒質中を通る距離によって決まってくる考えられている [14, 15]。

さて実際の実験結果はどうであろうか。特にリコンビネーションを主に実験結果を眺めてみる。LHC エネルギー領域の ALICE 実験では楕円フローのクォーク数スケールリングの様子を $\text{Pb+Pb } \sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV に対し衝突度 10-20 %、40-50 % について示した [4]。これによると、RHIC と比較すると LHC における楕円フローはクォーク数スケールリングが悪くなっていることを示唆する結果が得られた。まだ理論の詳細な解析はなされていないが、これから共鳴粒子からの寄与などを取り入れたより詳細な解析が必要と思われる。また RHIC においてもエネルギー スキャン 実験 ($\text{Au+Au } \sqrt{s_{NN}} = 7.7, 11.5, 19.6, 27, 39, 62.4$ GeV) の結果が報告された [16]。いずれの衝突エネルギーでも中心度が 0-8 % となっている。これをみると衝突エネルギーが 11.5 GeV よりも小さくなるとリコンビネーション模型からのずれが見出されている。特に ϕ 中間子のずれが大きい。これは ϕ 中間子のハドロン相中での散乱断面積が小さいことを反映しているのかもしれない。エネルギー スキャン 実験では直接フロー、 v_1 のラピディティに対する振る舞いも報告された [16]。これによると、 π 中間子の v_1 はいずれの衝突エ

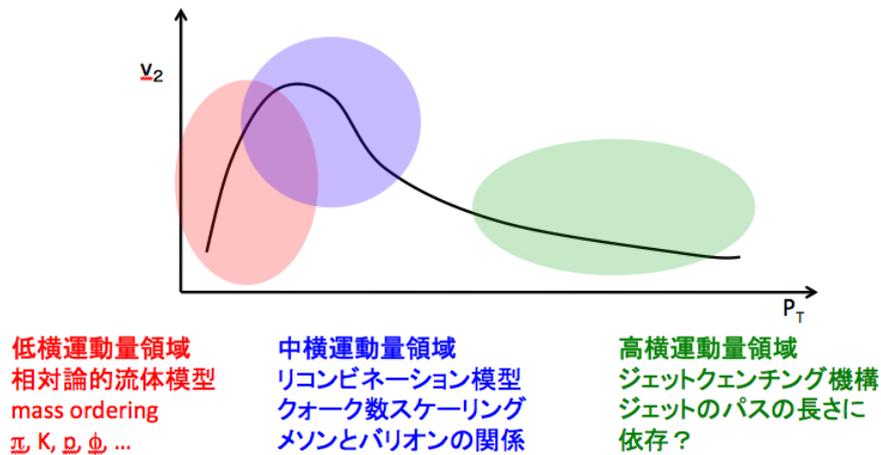


図 2: 楕円フローと各横運動量で支配的な物理。

エネルギーでも負の傾きを持っているのに対し、陽子の v_1 は 11.5 GeV と 7.7 GeV の間で傾きが負から正に変化している。このように π と陽子の v_1 の傾きの違いは AGS のような低い衝突エネルギー実験でもすでに観察されており、相対論的流体模型の適用限界を示しているものと理解できる可能性がある。

LHC では v_2 が非常に高い横運動量領域まで測定された。CMS では $P_T = 40$ GeV までの楕円フロー v_2 を衝突度 0-10 %、10-20 %、20-30 %、30-40 %、40-50 %、50-60 % について報告している [17]。それによると $P_T = 40$ GeV 付近であっても v_2 は有限であることがわかった。このような高横運動量領域における楕円フローの実験結果はジェットエネルギー抑制機構の理論確立への大きな手がかりになると期待されている。さらに楕円フローだけでなく、 v_3 、 v_4 についても測定がなされた [13]。

以上、様々な実験結果が報告されたが、理論からの定量的な解析はこれからであることは言うまでもない。

3 物理量から

さて以上は高エネルギー重イオン衝突実験の時間発展の観点から実験結果のいくつかについて述べた。ここでは物理量、ジェット、重いフレーバー、電弱プローブから実験結果を取り上げたい。

3.1 ジェット

ジェットと媒質の相互作用、ジェットの媒質中のエネルギー損失から QGP の性質の情報を得ることが可能であると期待されている。現在ジェットエネルギー損失の機構を記述するために 4 つの模型が提案されている。いずれも摂動 QCD を元に発展した模型であり、媒質の取り扱いがそれぞれの模型の特徴となっている (表 1)。難しいのは媒質との相互作用が強い相互作用によって支配されるために簡単な摂動論では取り扱いができないことである。まだ決定的な理論に達したとは言いがたく同じ媒質を用いたそれぞれのジェットエネルギー損失機構の比較 [18]、あるいは第一原理計算である格子 QCD を用いたジェットエネルギー損失の評価方法が提案されてきている [19]。そのため実験結果理解が特に大事であると考えられる。

表 1: 摂動 QCD-をベースにしたジェットエネルギー損失モデル [12]。: (E : パートンのエネルギー、 k_T : 生成したグルーオンの横運動量、 μ = 媒質から受け取る運動量、 T : 温度、 Λ = 媒質の運動量スケール、 x = 生成グルーオンの運動量割合)

Model	Assumption about the medium and kinematics	Scales	Resummation
GLV	static scattering centers (Yukawa), opacity expansion	$E \gg k_T \sim \mu, x \ll 1$	Poisson
ASW	static scattering centers, multiple soft scattering (harmonic oscillator approximation)	$E \gg k_T \sim \mu, x \ll 1$	Poisson
HT	observable matrix elements at scale Λ (thermalized or non-thermalized medium)	$E \gg k_T \gg \Lambda \sim \mu$	DGLAP
AMY	perturbative, thermal, $g \ll 1$ (asymptotically large T)	$E > T \gg gT \sim \mu$	rate equation

RHIC と LHC の双方で原子核増大因子 $R_{AA}(= 1/N_{\text{coll}} \cdot (dN_{A+A}/dP_T)/(dN_{p+p}/dP_T))$ の実験結果が報告された。この原子核増大因子はその定義からわかるようにもし $R_{AA} = 1$ であれば、その重イオン衝突実験結果は陽子陽子衝突の重ね合わせで説明できると考えられる。PHENIX からは Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV の π^0 の R_{AA} の値 [20] が、ALICE からは Pb+Pb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV の 荷電ハドロンの R_{AA} の両者とも正面衝突 (0-5 %) の実験結果が報告された。両者とも $P_T = 6$ GeV 付近で $R_{AA} = 0.1$ 程度と 1 からの大きなずれ (抑制) が見られ、 $P_T = 20$ GeV ($R_{AA} \sim 0.2$) までわずかな上昇が見られる。興味深いのは R_{AA} の定性的な振る舞いだけでなく、RHIC と LHC で R_{AA} の値が定量的にもほとんど同じであることであった。この実験結果をみると、ジェットエネルギー損失の機構は RHIC と LHC では差異がないように考えられる。そこで PHENIX は fractional momentum loss δP_T と呼ばれる量を用いて、両者の比較を行った [20]。 δP_T は陽子陽子衝突の横運動量分布を T_{AA} 倍したものと重イオン衝突の横運動量分布を比較し、両者の粒子生成量が同じになるときの横運動量の差を評価したものである。それによると、ALICE の $\delta P_T/P_T$ の値は全横運動量領域において RHIC よりも大きいことが示された。この物理量であれば衝突エネルギー差をより明快に知ることができると考えられる。さらに PHENIX はエネルギーキャン実験 (Au+Au $\sqrt{s_{NN}} = 200, 62.4, 39$ GeV) でも $\delta P_T/P_T$ の振る舞いを調べている。それによると正面衝突 (0-10 %) では衝突エネルギーが高いほど $\delta P_T/P_T$ の値は大きくなるが、衝突エネルギーが 39 GeV と 62.4 GeV ではほとんど差がないことが報告された [20]。

ジェットについてはCMS、ATLAS からより詳細な結果が報告された。例えば、ATLAS からは $R_{CP}(=1/N_{\text{coll}}^{\text{peripheral}}/N_{\text{coll}}^{\text{central}} \cdot (dN_{A+A}^{\text{central}}/dP_T)/(dN_{A+A}^{\text{peripheral}}/dP_T))$ のジェット半径 ($R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$) 依存性が報告された [21]。 $R_{CP}^{0.3}$ 、 $R_{CP}^{0.4}$ 、 $R_{CP}^{0.5}$ をそれぞれ $R_{CP}^{0.2}$ で割ったものの P_T 依存性を見ると、 R が小さいほど $R_{CP}^R/R_{CP}^{0.2}$ の値が小さいことがわかる。これによると小さなジェット半径を持つジェットほどエネルギー抑制が起きていることがわかる。またジェットの実験結果を利用して ATLAS はジェットフラグメンテーションを各中心度に対して評価している [21]。これは直接的なジェットエネルギー損失機構を知る手がかりになると考えられる。さらに γ -jet 関連の実験結果も PHENIX[20]、CMS[22] から報告された。光子は媒質と相互作用をしないと考えられるため、 γ -jet 関連の実験結果はジェットエネルギー抑制のよりクリアな指標を与えると期待できる。PHENIX はジェットの周辺の角度依存性について調べ、大きなエネルギー損失を受けた粒子はジェットのまわりにより広い角度で分布していることを見出した。これは CMS が 2011 年のクォークマターで発表したダイジェットの運動量バランスの実験結果と一致している [22]。

3.2 重いフレーバー、クォークonia

重いフレーバーは重イオン衝突実験では主としてグルーオン融合過程によって生成され、そのため初期のグルーオン密度や分布の手がかりになると考えられている。さらに RHIC や LHC のような高エネルギー重イオン衝突実験では生成した重いフレーバー (の一部) が熱平衡状態に達すると考えられ、重いフレーバーと媒質との相互作用から、媒質の輸送係数などの情報が得られると考えられる。ただし、重いフレーバーの媒質中におけるエネルギー損失機構はいくつか提案されている (gluon bremsstrahlung radiation、 collisional energy loss、 collision dissociation など) が、まだ議論の渦中にある。さらに重いフレーバーでは冷たい原子核効果 (cold nuclear effect: gluon shadowing、 カラーガラス凝縮など) が無視できない。また RHIC では重いフレーバーの再結合 (regeneration) の重要性も指摘された。QGP 生成のわかりやすいシグナルとして提案され広く受け入れられた J/Ψ 抑制であるが、実際の実験結果理解はそれほど単純には行かないことがわかってきた。

まず RHIC と LHC で原子核増大因子 (R_{AA}) の N_{part} 依存性を比較してみる [23]。すると LHC (Pb+Pb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV) の R_{AA} が RHIC よりも大きな値を持つことがわかった。これは LHC の方が衝突エネルギーが高いため重いフレーバーが多く生成しその結果再結合がより多く起こっていることを示唆していると考えられている。RHIC における J/Ψ の楕円フローの振る舞いは理解することが難しい実験結果の一つである。STAR (RHIC) は J/Ψ の楕円フローの横運動量依存性を示した。それによると J/Ψ の楕円フローは $P_T \sim 7$ GeV までほとんど 0 であることがわかった [24]。これはオープンチャーム D の v_2 は有限でありリコンビネーションモデルの解析から部分的な熱平衡状態が実現していること、 J/Ψ の R_{AA} の振る舞いから再結合を取り入れる必要があること、などを考えると $v_2 \sim 0$ であることを理解するのは難しい。一方 LHC における J/Ψ の楕円フローは ALICE によって有限であることが示された [4]。これらを統一的に理解していくことは理論におけるチャレンジの一つであると考えられる。

さらにボトムに関する実験結果も報告された。今回の QM 2012 での大きな驚きの一つが、ボトムの R_{AA} がチャームよりもより多く抑制されることが PHENIX により報告された [25] ことである。PHENIX は新しく導入された VTX 検出器によってボトムとチャームの寄与を分離することに成功した。しかしこの衝撃的な実験結果は従来多くの理論による重いフレーバーのエネルギー損失機構から

の予想とはまったく異なるものであった。さらなる実験精度の向上や理論の発展が必要である。

3.3 電弱プローブ

強い相互作用をせず媒質をそのまま透過すると考えられる光子やレプトン対は重イオン衝突実験の全過程を写し出す物理量として多くの情報を含んでいることが期待される。PHENIX によって報告された直接光子の楕円フロー v_2 の横運動量依存性も現在まだ理論からの説明がなされていない物理量の一つである。PHENIX で測定された光子の v_2 は $P_T < 4$ GeV で 0.05 ~ 0.1 程度の値をもつ [26]。これは例えば相対論的流体モデルによる単純な計算はうまくいかないことがわかってきた。 P_T が 4 GeV よりも大きなところではほとんど 0 となっている。

さらにレプトン対の実験結果も充実してきている。レプトン対の不変質量分布は、有限温度・密度中のハドロンの性質を知る格好の手段であると考えられている。たとえば、PHENIX からは ρ 中間子の質量付近でバックグラウンドからの増大が観測されている [26]。この増大が ρ 中間子の質量変化からくるのか、あるいは崩壊幅の媒質中の変化によるものなのか、まだ結論には到達していないと考えられている。すでに様々な理論計算は存在するが、SPS、RHIC、LHC を統一的に記述する現実的な理論計算はまだこれからであると考えられる。このようにジェット、重いフレーバー、電弱プローブの現実的な評価は重イオン衝突実験を記述するダイナミカルなモデルの存在があつて初めて可能になるものであり、これからの大きな発展が見込まれる。

4 まとめ

今年行われた 1 週間にもわたった大規模な国際会議、QM 2012 のごく一部について実験結果を中心にまとめた。このように QGP 状態の解明をめざし、大規模で精密な実験が世界的規模で遂行されている。そしてそこから報告された数多くの実験結果を多角的に研究することで QGP の統一的な知見が得られつつある。ここでは主として実験結果について述べたが、QGP 状態の定量的な解明には理論からの理解が不可欠であり、それに必要なモデルの開発、実験解析が続々と行われている。次回のクォークマターは 2014 年、ドイツ GSI で行われる。(さらに 2015 年は日本での開催が予定されている!) それまでには今回の実験結果理解によって、QGP 状態の詳細が明らかになっているであろう。私自身は QM 2014 での新しい実験結果を楽しみに、それまでには現実的な現象論的モデルを完成させ新たな実験理解に対し準備万端で望むことを目標にしている。

参考文献

- [1] <http://qm2012.bnl.gov> : ここで述べる実験結果はここから全て参照可能。
- [2] Babely *et al.* [ALICE Collaboration], Phys. Rev. Lett. **105**, 252301 (2010) [arXiv:1011.3916 [nucl-ex]].
- [3] A. Adare *et al.* [PHENIX Collaboration], Phys. Rev. Lett. **104**, 132301 (2010) [arXiv:0804.4168 [nucl-ex]].

- [4] “*Overview of recent ALICE results*”, talk by K. Safarik at QM2012.
- [5] S. Borsanyi *et al.*, [arXiv:1007.2580 [hep-lat]].
- [6] A. Bazavov *et al.*, arXiv:1111.1710 [hep-lat].
- [7] T. Umeda *et al.* [WHOT-QCD Collaboration], PoS LATTICE **2010** (2010), 218.
- [8] P. Romatschke and U. Romatschke, Phys. Rev. Lett. **99**, 172301 (2007).
- [9] “*Hydro Overview*”, talk by J-Y. Ollitrault at QM2012.
- [10] “*E-by-E MUSIC Afterburner*”, talk by S. Jeon at QM2012.
- [11] S. Mohapatra for the ATLAS Collaboration, [arXiv:1109.6721 [nucl-ex]].
- [12] C. Nonaka and M. Asakawa, arXiv:1204.4795 [nucl-th].
- [13] “*Highlight from CMS*”, talk by G. Roland at QM2012.
- [14] *First Three Years of Operation of RHIC*, Nucl. Phys. **A757**,1 (2005).
- [15] *Quark Gluon Plasma. New discoveries at RHIC: Case for the Strongly Interacting Quark-Gluon Plasma.*, Nucl. Phys. **A750**,1 (2005).
- [16] “*STAR Results from RHIC Beam Energy Scan-I*”, talk by L. Kumar at QM2012.
- [17] S. Chatrchyan *et al.* [CMS Collaboration], Phys. Rev. Lett. **109**, 022301 (2012) [arXiv:1204.1850 [nucl-ex]].
- [18] S. A. Bass, C. Gale, A. Majumder, C. Nonaka, G. Y. Qin, T. Renk and J. Ruppert, Phys. Rev. **C79**, 024901 (2009).
- [19] A. Majumder, arXiv:1202.5295 [nucl-th].
- [20] “*PHENIX Highlights*”, talk by T. Sakaguchi at QM2012.
- [21] “*Jets in ATLAS*”, talk by M. Spousta at QM2012.
- [22] “*Overview of results on jets from the CMS Collaboration*”, talk by G. Veres at QM2012.
- [23] “*ALICE results on quarkonia*”, talk by E. Scapparini at QM2012.
- [24] “*Heavy Flavor Results from STAR*”, talk by W. Xie at QM2012.
- [25] “*Heavy Flavor in PHENIX*”, talk by M. Rosati at QM2012.
- [26] “*PHENIX Low-mass Dileptons and Photons*”, talk by I. Tserruya at QM2012.