

RBRC 科学評価委員会の理研理事長宛報告書

ブルックヘブン国立研究所

2010年10月27-29日

【仮訳】

1. 前書き

RBRC(理研 BNL 研究センター)科学評価委員会の前回会合は2009年10月21-22日に開かれた。本報告書では、それ以降のRBRCにおける研究の重要な進展及び将来の見通しについて、特に理研-BNL 研究協力協定の延長が提案されている2012年から6年間について、議論している。

本科学評価委員会は、Wit Busza 教授(委員長)、Miklos Gyulassy 教授、今井憲一教授、Alfred Mueller 教授、Charles Prescott 教授、宇川彰教授(以上前年より委員)、Richard Milner 教授(過去に委員の経験あり)、国広悌二教授、Horst Stocker 教授、及び Robert Sugar 教授(以上3名は新委員)から構成されている。委員会メンバーについては住所及び所属とともに付録に載せる(省略)。

本委員会は、会合の始めの非公開セッションで、特にこの委員会に出席するためブルックヘブンを来訪した延興センター長から開催に当たって説明を受けた。

延興センター長は、仁科センターの組織構成、その予算及び人員、理研諮問委員会、理研の評価制度及びスケジュール、並びに本委員会の検討と報告が理研の意思決定の流れの中で果たす役割について概説した。特に仁科センター・アドバイザー・カウンシル(NCAC)が開催される日取り5月26-27日について言及した。これは、10月25-28日に開催される理研アドバイザー・カウンシル(RAC)に情報を伝える重要な会合である。

RBRC 科学評価委員会の委員長は、NCAC 会合に出席することが期待されている。Busza 委員長が都合がつかず出席できないので、Milner 教授が出席する予定である。

延興センター長は、委員会に、最近の研究活動と成果を検討することに加え、6年延長の科学的見通し、期待される成果、及び提案されている電子-イオン施設 eRHIC における将来の研究機会について評価することを要請した。

本報告書では、我々は現行の研究プログラム及び最近の成果の検討から始め、続いて提案された6年延長期間の計画に係る議論について記述する。

2. 現行プログラム及び計画の概観

Nick Samios RBRC センター長が、科学プログラムの最近の成果、RHIC(相対論的重イオン衝突型加速器)加速器の実績及び(RBRC の)運営について概要を説明した。

彼は、RHIC における重イオン・プログラムの実験から新たに生み出された物理学の成果は、これまでに引続き並外れて優れたものである、と指摘した。良く知られているように、RHIC では物質の新しい状態が発見された。これは、クォークとグルーオンが高温、高密度で強く結合されたプラズマ(sQGP)、すなわち完全液体である。最近プラズマ中で生成された直接光子が観測され、プラズマ温度は、通常の原子核物質がクォークとグルーオン相に相転移するとして理論的に予測された温度よりも相当高いことが示された。また、去年、高温 sQGP 中で(基本的対称性である) (P,CP)の局所的破れの可能性が観測された。もしもこのデータの解釈が正しければ、これはまことにエキサイティングである。

Samios センター長はまた、スピンプログラムにおいて根本的に重要な問題である陽子スピンの起源に関するパズル、(すなわち、それがクォーク又はグルーオンのスピンによるものか、それともそれらの軌道角運動量によるものか)の理解が引続き進展していると指摘した。500GeV において W ボソンのレプトンへの崩壊におけるスピン非対称性が最近初めて測定された。そのような測定は、反アップクォーク及び反ダウンクォークの偏極を決定するために重要である。

高エネルギー密度物質の研究に関連して、Samios センター長は、RBRC の理論研究者がプラズマ及びカラーガラス凝縮(CGC)の概念の発展に重要な寄与をしていることを大きな誇りに思うと述べた。彼はまた、RHIC での 200GeV の Au+Au 衝突及び CMS(CERN の実験グループの一つ)により LHC(CERN の大型ハドロン衝突型加速器)の 7TeV の p+p 衝突で観測された長距離 2 粒子相関におけるリッジ構造は、RHIC の 200GeV での重水素-金衝突で観測されたトリガー jets の逆サイド側の 2 粒子相関ピークの消滅とともに、重イオン衝突の初期状態に関するプラズマ及び CGC の描像を強化するものであると指摘した。

格子 QCD(量子色力学)計算の進展の議論は印象的であった。彼は、RBRC の物理学者が η 及び η' の質量の最初の計算並びに軽クォークの質量を電磁相互作用の影響をも含めて決定することに重要な寄与をしたことを指摘した。

Samios センター長は、RHIC 加速器にとって Run 10 実験が行われた去年は実り多い年であったと報告できることが非常に嬉しいと述べた。臨界点の探索に必要な非常に低いエネルギーを含めて、種々のエネルギーでの Au+Au 衝突で多くのデータが得られた。さらに、500GeV の偏極 p+p 衝突の技術試験 Run によりたいへん有望な結果が得られた。

Samios センター長は、プレゼンテーションの最後に、RBRC の運営並びに研究者のキャリア形成及び科学的リーダーシップにおける RBRC の役割について議論した。彼は、実験グループは秋葉康之リーダーと A. Deshpande 副リーダーに、理論グループは L. McLerran リーダーと A. Baltz 副リーダーに、引続き率いてもらおうと述べた。

Samios センター長は、RBRC の若手研究者を学術研究職のテニュア(終身在職権)職及びテニュア・トラック職の地位につけることに成功したことを示した。RBRC は、若手研究者にとって引続き第一級のキャリアパスである。

最後に、彼は、昨年 RBRC の研究者が受けた多くの賞及び助成金、開催したワークショップ(6件)並びに印象的な論文発表記録(理論:42件、実験:29件)を示した。

3. 科学的進展

A. 実験プログラム

委員会は、秋葉康之リーダーから実験プログラムの説明を受けた。RBRC の実験については PHENIX 実験(RHIC を用いた高エネルギー重イオン実験の 1 つ。大型国際共同研究)が依然として活動の中心である。実験グループの主要な研究活動は 3 つである。すなわち RHIC スピン物理、重イオン物理、PHENIX の検出器のアップグレードである。

前回の評価以来、スピン物理における進展は大きい。PHENIX に対するアップグレードは実験開始の準備が整っており、これにより陽子のスピン構成要素及び陽子の全スピンに対しどのように寄与しているかについて我々の知識がしっかり拡大されることが約束される。シリコン衝突点飛跡測定器並びに北及び南ミュオン・アームからなるこれらのアップグレードにより、PHENIX の能力が大きく強化される。衝突点飛跡測定器により、PHENIX は重クォーク(bとc)を含む事象を分離して研究することが可能になり、一方、ミュオン・アームにより、 W^\pm ボソンを含む事象の同定が可能となる。これらの新しい道具は一丸となって、独自の新しいデータを核子スピン構造についての全世界データに加えることが出来る。これから数年のRHIC運転計画では、重心エネルギーで $\sqrt{s}=200$ 及び $\sqrt{s}=500\text{GeV}$ の偏極陽子に豊富な実験時間が配分されている。

核子スピンのパズルは、核子構造の研究コミュニティをこれまで以上に困惑させ続けている。全ての関連するデータを総合的に解析して得られた結果は、驚くべき謎を示している。つまり、核子の正味スピンは、核子に内在する構成要素に直接帰することができないということである。RHIC での偏極 pp 衝突から得られた Run 9 の結果が解析され、スピン構造の総合的解析に組み込まれた。クォーク及びグルーオン・スピンに対し得られた結果は、その寄与がかなり小さく、1/2 という全スピン量のおそらく 20%以下であることが示された。

この(核子スピンの探求という)物語は、偏極陽子ターゲットに対する電子及び μ 粒子の深部非弾性散乱とともに 1980 年代に始まった。EMC 実験により、有限の x 値で有意なスピン非対称性が測定された。しかし、全ての領域で x を加え合わせても、クォーク散乱のデータからは 10-20%の核子スピンしか説明できなかつたのである。それ以来「スピン危機」が生まれた。行方不明のスピンは、グルーオンとともにあると仮定され、グルーオンの寄与の探究が続けられた。核子を電子及び μ 粒子をプローブとして探査することの価値は限られていた。これらはいずれも

電氣的に中性である核子のグルーオン成分とは直接結合しないからである。そこで偏極陽子の出番となり、RHIC での pp 実験が偏極したグルーオン構造を探索する上で重要な役割を果たした。直近の Run 9 と RHIC における以前の実験とを合わせて、PHENIX 測定器の光子及びハドロンと同定能力を用いて得られたデータから、グルーオンの担うスピンの探究範囲が広がられた。

会合では、PHENIX実験のRun 10 におけるラン・コーディネーター(実験調整役)のStefan Batheが、大成功であったRun 10 のまとめを行い、竹谷篤がPHENIX衝突点飛跡測定器のピクセル検出器について議論し、Rachid NouicerがStripixel検出器の建設の進展について概説した。Abhay Deshpandeはスピン物理のトピックスを紹介した。 π^0 及び π^\pm 生成の縦方向のスピン非対称性(A_{LL})のRun 9 での結果を聞いた。これらの測定は、グルーオンのスピンへの寄与 ΔG を直接的に測定している。測定された非対称性は、非常に小さな誤差でゼロに一致しており、 x のかなり大きな範囲(0.01 から 0.4)にわたりグルーオンがスピンの有意な担い手であることが排除されている。かくして、いわゆる「スピン危機」は未解決となる。将来の実験測定装置では、 x の0.01 以下を探索する必要性が残されている。RHICのPHENIX実験がこの課題に最も適している。来るRun 11-13 で行われる期待される高ルミノシティ(輝度)の実験により、より小さな誤差で、より小さな x まで広げたデータが得られるはずである。

一方で、核子スピンの起源の探究は、核子の構成要素の軌道運動に広げられている。これは、もしもクォーク、反クォーク及びグルーオンがスピンの担い手でない場合に残される唯一の可能性である。横スピンの測定及び横方向の軌道運動を取り入れた理論モデルが開発中である。

反クォークのスピン偏極の有無がRHICで直接測定されている。岡田謙介が、PHENIXの中央アームでのWボソンの観測について説明した。PHENIXでは、今や W^\pm 生成(中央検出器中で e^\pm へ崩壊するW)が測られ、重心系エネルギーで $\sqrt{s}=500\text{GeV}$ の偏極pp衝突における断面積と非対称性が測定されている。PHENIXで、前方ミュオン・アームへのアップグレードがなされれば、来るRun 11 では前方及び後方Wの直接測定が行われ、反クォークのスピン偏極の最初の兆候が得られる。これは理論モデルに対する有意義な入力情報となる。

RHICの年々増大し続けるルミノシティと偏極を利用するため、PHENIXでは南北のミュオン・アームの新トリガーシステムを完成・設置した。中川格が、ミュオン・システムの現況について説明した。トラッキングは、3 層の陰極ストリップチェンバーと、それに続いて合計 80cmの鉄鋼板の間に挟まれた x 及び y 方向の 5 層のIarocci管(ストリーマーチューブ)からなる。透過する μ 粒子($p > 2\text{GeV}/c$ について)を検出しシステムをトリガーする。Run 9 で宇宙線を用いてその性能が測定された。高い p_t の飛跡に対する効率は 99%を超えている。このミュオン・システムをトリガーする可能性のある突き抜けハドロンを除くために前方及び後方方向にハドロン吸収材が追加された。

Kieran Boyleが、Run 9 の 200GeV実験での π^0 及び直接光子の解析を説明した。 π^0 および光子生成の縦方向のスピン非対称性(A_{LL})により、陽子中のグルーオンスピンの探索された。 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ の信号が明確に見られた。 p_t に依存して、(π^0 の信号の下にある)5-20%のバックグラウンド

の減算が行われた。解析の初期段階では、Run 9 の高いルミノシティにより、検出器に衝突頻度に依存する測定バイアスが引き起こされた。(このバイアスを除くには)ビームが交差する際に多重衝突が起こることを考慮する必要がある。多重衝突の確率は、「0 の確率」法によって推定され、その影響が補正された。 $A_{LL}(\pi^0)$ についての結果は、以前のRun 5 及びRun 6 のデータと整合しており、誤差がかなり改善されている。Run 6 とRun 9 データを合わせたグローバル解析が示され、 ΔG は 0 に一致し、その誤差は約 ± 0.2 であった。

David Kawallが、62GeVでの荷電ハドロン生成(大部分は π^\pm である)における縦方向の非対称性について報告した。 π^\pm の生成は、多くはクォーク・グルーオン散乱によるものである。深部非弾性散乱実験から Δq (クォークの偏極量)の値は十分に良く知られているので、データからグルーオンの偏極度 $\Delta g(x)$ を抽出できる。理論モデルではもしも $\Delta g(x) > 0$ ならば、 $A_{LL}(\pi^+) > A_{LL}(\pi^0) > A_{LL}(\pi^-)$ となる。 π^\pm の非対称性を測定することにより $\Delta g(x)$ に明確な制限がかかる。 \sqrt{s} を変えることは、調べる x の範囲を変えることである。より小さな \sqrt{s} のデータでより大きな x の値が調べられる。62GeVで1週間実験した結果、荷電ハドロンの非対称性は他のデータを用いたグローバル・フィットと整合しており、 $\Delta G=0$ と矛盾はないことが示された。将来の実験からこれよりはるかに多くのデータが得られれば、これらの荷電ハドロン非対称性によりモデルをさらに制約することができる。

John Kosterは、単一スピンの測定の進展について説明した。単一スピンの横非対称性(A_N)により、縦方向の二重スピン非対称性(A_{LL})とは全く異なった物理プロセスを調べることができる。QCD計算の理論予測は単純な物理プロセスの断面積については成功している。最も注目すべきは、 $p+p \rightarrow \pi^0 + X$ が計算され、その結果が断面積データと広範囲にわたり大変良く一致していることである。したがって、これに関係した物理プロセスは理論的に理解されたと考えられる。横非対称性は、摂動QCD(pQCD)モデルでは消えることが予測される。しかし、以前行なわれたFermilabの固定標の実験で、前方での高い p_t では $A_N(\pi^0)$ が明瞭にゼロでなくなることが見られた。より最近ではSTAR及びPHENIXでもゼロでない A_N が観測された。これらのデータは一致しており、明らかに標準pQCDモデルにはないメカニズムの存在が示唆されており、2つのモデルが提案されている。「Siver効果」モデルでは、スピン方向と依存するパートンの横運動量を導入し、一方、「Collins効果」モデルでは、衝突後に破砕するクォークのもつ横運動量によって説明している。これらとは別に第3の説明では、相互作用中の高次効果に帰している。

John KosterはRun 8 のデータも示した。中間ラピディティ領域では、 $p_t=11\text{GeV}$ に至るまで非対称性 $A_N(\pi^0)$ はほぼ 0 であった。これは測定 p_t 範囲を既存データにくらべて大きく拡大するものである。前方領域での測定を行うため、二つの PbWO_4 シンチレート結晶カロリメータ(「ミュオン・ピストン・カロリメータ」)が2006-2007年に設置された。これにより、前方向及び後方向で π^0 生成非対称度の検出ができるようになった。それに続く63GeVの実験では明瞭な非ゼロ非対称性(A_N)が見られたが、これは以前のデータと一致している。これに対して、後方向 π^0 は比較できるほどの非対称性を示さなかった。今後 η メソン及び2重スピン非対称性 $A_{LL}(\pi^0)$ の解析を進める計画が説明された。

RBRCでの実験プログラムの評価

RBRC は、PHENIX 実験及び RHIC 加速器の両方へ非常に重要な寄与を果たし続けている。VTX 衝突点飛跡測定器が、RBRC の主導のもとに成功裏に完成したことは、BNL での RHIC 重イオン物理にとって長く待ち焦がれていた大きなマイルストーンである。本委員会は、チャーム及びビューティ・クォークの同定に決定的に重要な役割を果たす PHENIX 検出器のアップグレードが行えたことは、RBRC と DOE 間の費用分担と RBRC の人員投入によるものであることを特記する。この人員と努力の投資の成果は、今後 6 年の協定延長期間に結実するであろう。

RBRC 実験グループの指導部が素晴らしいものであることも、指摘されなければならない。

B. 理論プログラム

委員会は、Larry McLerran から RBRC の理論グループの研究活動のまとめを聴いた。引き続き、RBRC の大学フェロー・プログラムのメンバー及び RBRC のポスドクが、彼らの研究を詳細に説明するプレゼンテーションをした。それらは、QCD 理論並びに重イオン物理とハドロン物理の現象論に重点をおいた広範囲の諸問題にわたるものであった。

Zhongbo Kang は、種々の実験で見られた横単一スピン非対称性について説明を試みた。 π^+ 生成 ($A_N(\pi^+)$) に関して HERMES (ドイツ DESY で行われている電子ビーム深部非弾性散乱実験) と STAR (RHIC を用いた高エネルギー重イオン実験の一つ) の例及び FERMILAB の E704 (偏極 Λ) の例が彼の理論で説明され、大きな横非対称性を示すデータが説明された。標準 pQCD ではこれらの非対称性が説明できず、これらの非ゼロの値を取り込むため特別な方法が考え出されなければならない。非対称パートン分布関数によるスピン相関 (Sivers 関数) 又は非対称破碎関数 (Collins 関数) が提案されている。

準包括的深部非弾性散乱 (SIDIS) により、Sivers 関数が抽出できる (例えば、HERMES 発表論文を見よ)。Sivers 関数を使った偏極 DRELL-YAN (DY) 過程 ($p \uparrow p \rightarrow e^+ e^- X$) の予測によると非対称性の符号変化、すなわち負の A_N 、が引き起こされる。反対に、非対称破碎関数 (Collins 関数) 過程では、正の DY 非対称性が予測される。かくして、これらの横スピン非対称性過程における運動学を明らかにするため、RHIC での DY 非対称性測定が求められている。

BNL の物理部門の一員である Jianwei Qiu は、RHIC におけるスピン物理の将来について議論した。陽子スピンは依然として QCD の主要なパズルである。核子内パートンのスピンの役割及びパートンの動的な運動の役割は、依然として理解されるに至っていない。エネルギーの高い散乱における因子分解及び横運動量依存項の因子分解が、理論的に仮定されているが、この両者とも正しい仮定であるという証明が必要である。Next-to-leading-order (NLO) 摂動 QCD 計算は、観測された断面積を説明する上でたいへんうまくいった。 ΔG に関する測定は収束しつつあり、小さいか又はゼロと矛盾がない。実験で予期される進展に合わせるように、理論のほうでも計算を (NNLO 及び小さな x へ) 拡張する必要がある。現在、理論は、横非対称性の決定的な試験、すなわち DY 非対称性の測定を待ち望んでいる。来るべき RHIC 実験で

PHENIX VTX システムが運用されると、重クォークの生成非対称性が予期される。 J/ψ 並びにオープン・チャーム及びボトムクォークの生成非対称性の予測がなされている。

将来計画となっている電子-原子核衝突加速器(EIC)はエキサイティングである。核子スピン構造を理解する上で、電子-原子核衝突加速器のインパクトは大きい。理論研究者たちは、この将来の実験施設の計画を進める上で必要不可欠の存在であり、この施設の物理的動機の確立に主導的な役割を果たしている。

Feng Yuanは、個人的にスライドを示すことはできなかったが、kTに依存する非積分グルーオン分布関数に関する彼の研究のまとめを説明した。彼は、CGCカラー双極子の計算と、横運動量依存構造関数について彼自身で行った摂動QCDの研究とを比較した。Fengの新しいアプローチの鍵となる利点は、カラー双極子/CGCモデルとは異なり、大きな運動量移行においては(標準理論である)共線因子分解の結果を自然に再現していることである。こうした大横運動量移行ではkT因子分解近似が100%の破れている。現在、彼の理論の応用は、RHICの前方方向のデータに焦点が当てられており、将来の応用はEICでの物理に向けられている。協定延長期間中での彼の研究の興味は、CGCが予測する幾何学的スケーリング則が包括的粒子生成の高 x 高 p_t の領域でどのように振舞うかにある。

Derek Teaney は、RHIC での A+A 衝突での初期状態の事象毎のゆらぎがどのように終状態に現れるかについての最近の研究について議論した。特に、(反応領域の)非均質な幾何的形狀が流体力学的発展によって発生すると予測されている三角形のフローに焦点が当てられている。彼は、良く知られた楕円状のフローと新しい揺らぎ起源の高次モーメントフローとの相関を定量化するためにキュムラント法を提案した。これから、RHIC で生成される「強結合クォーク・グルーオン・プラズマ」の粘性・エントロピーとの相関から一連の新予測が導かれる。粒子のフリーズ・アウト分布での粘性補正に関する彼の研究は、重イオン現象論の輸送係数の決定においてその分野で日常的に利用されており、その理論的不確かさを減少させている。

Rainer Friesは、高 p_t での高次のフーリエ・モーメントがA+A衝突の(反応領域の)幾何形状の揺らぎを探る上でどれだけ感度があるかに関する彼の新しい研究を紹介した。この研究は、上にのべたD.Teaneyの低 p_T の長波長領域に焦点をあてた研究を補完するものである。この研究の目的は、ジェット・クエンチング輸送パラメータ「 \hat{q} 」が現在もっている非常に大きな不確かさを減少させることにある。このパラメータは、sQGP中での高エネルギージェット伝播の横運動量拡散率を評価するものである。単一粒子の原子核抑制ファクター $R_{AA}(p_t)$ から \hat{q} を決定する際に、偏心率のゆらぎにより系統的な不確かさが強められる。より高次の方位モーメントについての予備的研究がしめされた。これは初期状態sQGP不均質により誘起される相関を制約する上で新しい実験手段を与える。彼の将来の研究は、AdS/CFT現象論に基づく非QCDなジェットエネルギー損失機構の提案を検証することである。

Adrian Dumitru は、RHIC 及び LHC のエネルギーでの 2 粒子相関の CGC 理論にもとづく小 x 発展についての彼の最近の研究を発表した。大きなラピディティ間隔をもった 2 つの同一方向側にあるハドロンの中に「リッジ相関」がみられたことは、カラー電場とカラー磁場が局所的に集まっている新奇なカラー・フラックス・チューブが出来ていることの証拠であると解釈された。

これは以前から提案されている Lund モデルのカラー・フラックス・チューブ・モデルと良く似ているが、(彼のモデルは)CGC 理論の飽和運動量に依存する新奇な特徴をもっている。例えば、フラックス・チューブの半径は、生成された粒子のラピディティー空間で局所密度を支配しているパラメータである飽和運動量 $Q_{\text{sat}}(x, A)$ の逆冪にスケールする。この理論はさらに新奇な平行カラー電磁場領域の存在を導きだす。この領域の中ではパリティ対称性と CP 対称性が動的に破れるのである。7TeV での p+p 衝突でリッジ状の相関を初めて発見した CMS 実験の最初の成果は、CGC が予測した n 点関数の証拠であると主張された。来る延長期間においてこの研究は、eRHIC と近い将来の LHC 重イオンデータへの応用の可能性に取り組む。

Zhong-Bo Kang は、F. Yuan 及び他の研究者と一緒に研究している、横スピン非対称性をスピン依存構造関数の横運動量依存性を調べる探針として用いる方法の進展について議論した。研究した問題は、横運動量依存構造関数の普遍性をいかに定義するかということである。

一般には、それら(横運動量依存構造関数)は普遍的でない。彼は、この問題を解く見込みがありそうな新しい理論の枠組みを提案した。パートン破碎関数の普遍性を試験するため、 $ep \rightarrow$ 偏極 Λ 反応についての予測を提案した。

Cecilia Lunardini は、ニュートリノ天体物理学及び宇宙論について議論した。彼女は、ビッグバン元素合成のパラメータ空間のスキャンをモデルに依存しない方法で行った。そして sterile ニュートリノをおそらく含む余分な軽い自由度(標準理論では存在しない軽い新粒子)が存在する余地があるかどうかについて報告した。この可能性は将来実験的に調べることができるかも知れない。彼女は、太陽質量の 40 倍以上の質量の星がおこす、超新星になりそなった重力崩壊が生み出す余分なニュートリノの信号について計算した。こうした失敗超新星崩壊は、星の重力崩壊の全部のうち 20 パーセントに達する可能性がある。彼女は、この余分なニュートリノは、30MeV 以上のエネルギー領域では標準的なニュートリノ源(から生み出されるバックグラウンド)の上に観測できる可能性があることを示した。この方向の将来の研究が計画されている。

古城徹は、日高義将、L. McLerran 及び R. Pisarski と共に、コヒーレント的あるいは量子的なパイオン雲によって核子の軸性電荷を理解する試みについての最近の研究を発表した。これは、バリオンの動力学を「大きな N_c 近似」と「位相的描像」の対比で探究する一連の研究の一つである。彼は、カラー数 N_c が大きい極限では skyrmion パイオン雲は崩壊し、コヒーレントなパイオン雲によるよりもむしろ価クォークによって軸性電荷の値 $g_A \sim 1.25$ がより自然に説明されることを示唆した。このモデルは、Sakai-Sugimoto モデルに刺激された弦理論と類似の性質を持っており、skyrmion は不安定で崩壊してしまう。彼らは、対を作らない一つのクォークが重なりがない空間波動関数中に位置していると仮定しており、これは格子 QCD でカラー数 $N_c > 3$ の場合をシミュレーションすることにより検証できると提案している。これにより、将来、このような大きな N_c 近似による現象論の研究と RBRC 格子理論の研究の間で有用な共同研究がなされるようになるであろう。

Denes Molnar は、sQGP での非平衡輸送現象の詳細なパートン・カスケード輸送モデルの比較について、第 2 次 Israel-Stewart 拡張粘性流体力学理論と比較して報告した。格子 QCD 状

態方程式の予測を試験するため使用されるバルク集団流れの観測量への補正を定量化するため、先進的な共変散逸理論が世界中で開発されている。

RBRC理論プログラムの評価

若手教授職を大学と RBRC 合同ポジションとして種を蒔くという構想とフェローの厳密な選定過程は 10 年の間大変良く機能した。エネルギー省及び国立科学財団は、いくつかのケースで、RBRC フェローの研究を資金支援する義務を引継いでいる。現在いるフェローのうち 2 人は、たいへん名誉があり資金潤沢なエネルギー省の「Early Career Award 新人奨励賞」を最近受けた。現在いるフェローの 3 人は、「Outstanding Junior Investigator Awards 優秀若手研究者賞」を受けた。

過去 10 年の RBRC 理論の新しい研究成果を広める重要なメカニズムは、多くの RBRC ワークショップを主催したことである。これらのワークショップには、スピン物理 41 回、格子ゲージ理論の進歩 10 回、重イオン現象論 40 回、そのほか多数の特定トピックのものがある。20 人の理論研究者(ほぼフェローが半分、ポスドク半分である)及び 10 人の実験研究者が定常的にいる状態が、重要な議論と新奇なアイデアを刺激するために最適である。

当初は T.D.Lee のイニシアチブにより、現在は L.McLerran のリーダーシップによる RBRC 理論の運営により、強い相互作用の系での多体理論について重大な影響力を持つを世界クラスの理論センターを生み出した。

本委員会は、強い相互作用及びスピン構造の物理学の分野で世界的に認められるリーダーになる物理学者の新らしい世代を訓練するという、創業所長 T.D.Lee の将来展望と期待を RBRC は本当に成功したと満足感をもって認めるものである。この目を見張るような科学的生産性が今後の 6 年の延長期間中も引続き花開くと期待するに足る十分な根拠がある。

C. 格子 QCD 計算プログラム

RBRC における格子ゲージ理論研究者は、BNL 及びコロンビア大学の同僚と共に RBC 共同研究グループを形成し、零温度及び高温での最先端の格子 QCD 計算を実行している。零温度の研究では、格子クォークのドメイン・ウォール・フェルミオン(DWF)法が使用されている。高温 QCD における研究では、今日まで主としてスタッガード・クォーク法が使用されてきたが、DWF クォークを用いた有望な試験的研究が最近なされている。DWF クォークは、有限間隔格子でほぼ正確なカイラル対称性を持つという利点を有しているが、他のほとんどのクォーク定式化よりも少なくとも 1 桁大きな計算容量が必要となる。それゆえ、BNL の強力な専用計算機の存在は QCD の数値研究において重要な役割を果たしている。零温度 QCD における研究は、イギリスのグループ UKQCD と共同で実施されている。高温 QCD の研究は、ビールフェルト及び GSI の仲間と共に、いくつかのケースでは hotQCD 共同研究の中で行われている。hotQCD 共同研究には、アメリカで高温 QCD を研究している大部分の格子ゲージ理論研究者

が参加している。このように、RBRC 格子ゲージ理論研究者は、研究を進展する上で重要な役割を果たす数多くの重要な国際共同研究を作り上げている。

零度QCD

出淵卓、Thomas Blum 及び Norman Christ は、零温度 QCD の研究における RBC/UKQCD 共同研究の最近の進展及び将来計画について説明した。共同研究は、幅広い研究プログラムにおいて利用するために、アップ、ダウン及びストレンジ DWF クォークを用いたゲージ・コンフィギュレーションの計算データ集合を生成する過程にある。これまで、およそ 0.09 フェムトメートル(fm)及び 0.11 fm の格子間隔で、パイオン質量が小さいところで 287MeV までの計算データ集合を生み出した。去年、格子間隔およそ 0.14 fm でパイオン質量が 180MeV と 250MeV の 2 つの新しい計算データ集合について良い進展があった。軽いパイオン質量が実現しているので、これらの計算データ集合では RBC/UKQCD により追求されている多くの計算に対するカイラル外挿近似の精度が相当改良されるはずである。Tom Blum は、0.14 fm という比較的大きな格子間隔の場合でさえ、有限格子間隔による悪影響はほんの 2、3%程度の系統誤差を生じさせるのみであるという証拠を示した。去年の最も印象的な物理の成果は、 η 及び η' の質量並びにそれらの混合角度の最初の計算であり、また、軽クォークの質量を電磁相互作用の影響までも考慮して決定したことであった。

K 中間子物理の研究は、RBC/UKQCD グループの大きなテーマであったし、今後もそうあり続けるであろう。ここでは、DWF クォークのほぼ厳密なカイラル対称性が特に重要な役割を果たしている。この共同研究グループでは既に、K 中間子のバグ・パラメータ B_K の見事な決定がなされている。このパラメータは、標準モデルの試験において重要な役割を果たしている。K \rightarrow $\pi + \pi$ 崩壊の研究が進捗しており、(CP 保存の破れの重要なパラメータである) ϵ'/ϵ 比の決定が、この研究の野心的かつ長期的な目標である。

Norman Christ は(次世代 QCD 計算機である)QCDCQ を説明し、その稼働初年に計画されているゲージ・コンフィギュレーション生成のプログラムについて詳説した。彼はまた、RBC/UKQCD の長期的物理目標についても説明した。最後に、Norman は、2015 年に 1 ペタ flops という彼の希望を示した。そのような機械が導入されるまではまだ期間があるので、そのアーキテクチャーについての計画あるいは財源について言及されなかったのは無理からぬことである。後者については、かなりの検討と議論が必要であろう。

これまで述べられた概論に加えて、RBC/UKQCD プロジェクトの詳細な説明がいくつかなされた。

大田滋生は、核子の構造に関する研究の現状について説明した。このプロジェクトに含まれるのは、核子形状因子及び構造関数の計算とそれからの軸性電荷を決定、そしてパートンが担っている運動量とヘリシティの割合の計算などである。この研究にとって、(RBRC で生成された)新しい軽クォークの計算データ集合が相当な助けになるはずである。なぜなら、多くのケースについて、カイラル領域(クォーク質量が低い領域)で期待されるクォーク質量への依存性はこれまで観測されていないからである。

青木保道は、B 中間子の崩壊と混合に関する RBC/UKQCD の研究について議論した。直近の目的は、レプトンの崩壊定数と混合パラメータ ξ である。これらは標準モデルの検証において重要な役割を果たしている。今日までの計算には、DWF 法による軽クォークと静的な b クォークが使用されている。計算はまだ初期の段階で、いまだ他のクォーク定式化を使用した計算精度のレベルに達してしない。しかし、結果の重要性に鑑み、これらの計算をいくつかのクォーク定式化で行うことは大変価値のあることである。長期的には、(DWF 法による)カイラル・クォークが勝利する可能性が十分にある。

Christof Lehner は、格子上で非常に軽いクォークと非常に重いクォークを研究する上での課題について説明した。彼は相対論的重クォークのコロンビア定式化のチューニングについて議論した。この定式化は RBC/UKQCD 共同研究が b -クォークの静的近似を越えての B 中間子の研究の中で使用しようと計画している手法である。彼はまた、 ϵ regime で同僚との以前に行なった非常に軽いクォークについての研究について説明した。

新谷栄悟は、DWF ディラック演算子の反転を高速化する low mode projection 法の使用について説明した。その結果は大変有望に見える。RBC/UKQCD 共同研究では DWF クォークのシミュレーションを実際的なものにするため長い道のりのアルゴリズム改良をしてきているが、この研究はそうした一連のアルゴリズム改良の最新のものである。これまで、新谷はこの前処理手法がはじめに使用されるのは、中性子と陽子の電気双極子モーメントの計算及び中性パイオンが 2 個の光子に崩壊する計算であろうと述べた。

高温QCD

Frithjof Karschが、高温QCDにおける研究プログラムについて説明した。主目的はQCD相ダイアグラムとその普遍的性質をカイラル領域(クォーク質量の小さい領域)で理解すること、状態方程式及び相転移温度を計算すること、並びに化学ポテンシャルが小さい場合のカイラル相転移線の曲率を決定することである。彼は、非常に小さなクォーク質量での予期された $O(n)$ スケーリング挙動に関する証拠を提示し、スケーリング規則が臨界温度 T_c 及び臨界線の曲率を決めるためにどのように使用できるかを示した。彼はまた、相転移領域での状態方程式と遮蔽質量についての最近の成果を示した。今まで、高温QCDに関するRBCの大抵の研究は、3種類のスタaggerド・クォーク型作用を使っている。すなわち、P4型作用、asqtad型作用、及び最も最近のHISQ型作用である。HISQ型作用は、有限格子間隔の悪影響及びtaste対称性の破れが他の2つよりも小さいので、すばらしいポテンシャルがあるように見える。Karschはまた、DWFクォーク型作用の最近の試験的研究から得られた成果について示した。スタaggerド・クォークよりもかなり計算の上で高価であるが、DWF型作用は有限格子間隔でほぼ厳密なカイラル対称性を持ち、それゆえカイラル極限(クォーク質量が0になる極限)での高温QCDを研究する上で特に有用である。

RBRCにおける格子QCDの評価

RBC 共同研究により、格子 QCD において広範で質の高い研究プログラムがなされている。高温 QCD の研究は、重イオン衝突における RHIC 実験プログラムを直接支援している。核子の内部構造に係る研究は RHIC スピンプログラムを支援している。他の研究は、RHIC 実験との結びつきはゆるくなるが、高エネルギー物理と原子核物理の重要な問題を取り扱っている。大規模格子 QCD 計算には多年にわたる努力が必要あり、1 年間の進展は漸増であることは無理もない。にもかかわらず、我々は、あらゆる面でよい進展がなされており、QCDCQ の到着とともに今年後半には進展が加速されるに違いないと考えている。まとめると、RBC 研究プログラムは強力であり、将来へのすばらしい見通しを持つといえる。

4. 2012 年度から 2017 年度までの 6 年間延長の提案についての評価

委員会は、2012 年度から 2017 年度までの 6 年間の協定延長の提案を注意深く検討した結果、それを熱烈に支持するものである。

提案された実験プログラム

QCD の研究と理解は今日の原子核物理学の中心テーマである。現時点で QCD に関する実験研究を進めている機関は、ブルックヘブン国立研究所とジェファーソン研究所であり、そこに CERN が重イオン物理における大きな研究活動をまさに開始し始めていて、COMPASS 実験を進めている。RBRC はその当初から RHIC プログラムの成功に指導的役割を果たしている。

まもなく到着する衝突点飛跡測定器と新ミュオン・トリガーは 2011 年度に開始される実験から PHENIX 実験に重要な新しい能力を提供する。我々は、重イオン(重クォーク・フレーバー測定)及び偏極陽子(ΔG を決める A_{LL} 、反クォークの偏極を決める W ボソン検出と一緒の A_L 、及び横スピン構造を研究するための A_N)のデータ取得のためのすばらしい期間に入ることを期待する。2012 年から 2017 年までの年は、QCD の理解を大幅に前進させる可能性を持つ重要なデータの収穫期であるに違いない。これは、RBRC が多年にわたり投資してきたことによる成果である。さらに、RBRC グループは、2015 年以降の PHENIX 測定器の将来計画においても指導的役割を果たしている。

前方物理のプログラム、特に RHIC での $d+Au$ 衝突実験は、高エネルギー QCD を研究する主たる実験プログラムとして HERA に取って代わった。次の 10 年にわたり、BNL はこのリーダーシップを CERN と分かち合うであろう。CERN の種々の衝突実験は、より高エネルギーであるが融通が利かないという面がある。RBRC の物理学者及び卒業生は、BNL の理論研究者と共に、このような衝突で調べられる、高密度、純粋(非平衡)状態の QCD 物質、パートン飽和及び色ガラス凝縮の研究を引っ張っている。これは、高エネルギーイオン-イオン衝突で生成され、その後クォーク・グルーオン・プラズマに進化する物質の初期状態を形成するものである。電子-イオン衝突加速器 eRHIC により、そのような物質の精密な研究がなされるであろう。

将来についてさらに考察すると、eRHIC は RHIC の主要なアップグレードと見なされており、2013 年に立案されることになるアメリカの次期原子核物理長期計画課題において焦点となるであろう。eRHIC 建設の研究動機は、QCD の仮想粒子、たとえば海クォーク及びクレーオン、を研究するための専用の最適化された装置の必要性にあり、またそれら仮想粒子が、ハドロン物質の構造と性質の中で果たす役割を理解することにある。過去 2 年間にわたり BNL は、eRHIC のための加速器の設計を進めてきた。また、この装置で行なわれるべき物理実験を遂行する物理学者の強力なグループを育成してきた。eRHIC の一部は RHIC の偏極ビーム能力に基づいており、RBRC にとっては、その科学的にも、新検出器の開発及び加速器の建設においてもすばらしい機会となろう。さらに、それは日本の新しい J-PARC の能力を良く補完する。我々は、今後訪れる重大な計画立案の過程において、日本の物理学者をこのエキサイティングな新プロジェクトに惹きつけるためにも、RBRC が eRHIC へますます参加することを奨励するものである。

委員会は、RBRC 延長提案における次の表明をたいへん強く支持する。

「RBRC は、PHENIX のアップグレードの議論と計画の過程に深く関っており、アップグレードにおいて主要な役割を果たすつもりである。この中には superPHENIX の測定器アップグレードの R&D と、おそらくその段階的な実現が含まれている。我々はまた、将来の eRHIC において可能な物理実験を探究する。」

PHENIX の VTX 測定器のアップグレードを計画し完了させるのに RBRC は 5 年以上の月日を要した。次期 sPHENIX 測定器の計画立案は、延長期間を通して極めて重要である。RBRC の sPHENIX の長期計画立案への参加の重要性は強調しすぎることはない。VTX アップグレードを完成させることができたのは、RBRC と DOE の密接な協調のおかげである。superPHENIX のようなたいへん野心的な提案は、強力な国際的支援と協力が絶対に必要である。非常に重要なことがこの方向に懸かっている。sPHENIX の立案作業の「スピノフ」として、RHIC での RBRC のスピン及び重イオン実験プログラムの両方が大きな恩恵を受けるであろう。

提案された理論プログラム

アメリカにおける QCD 理論の指導的役割は、RBRC と BNL の原子核理論グループにあり、この分野に最近加わった多数の傑出した若手理論家を訓練する上で決定的に重要な役割を果たしている。特に、RBRC フェロー・プログラムは、原子核理論の若手リーダーを見極めるうえで大きな成功を収めた。陽子中の偏極グルーオン分布の最近の測定で、偏極量がかなり小さいことが示されている。この結果から 2 つの重要な結論が得られる。一つは、価クォーク・モデルは陽子のスピンを説明できないことが確定的に示されたこと、もう一つは、陽子のスピンに対するパートンの軌道角運動量の寄与が大きいことが強く示されたことである。BNL で今後 5-10 年間に行われる測定により、グルーオン・スピンの測定が改良され、海クォークの寄与の精度が大幅に改善されるに違いない。価クォークのもつ陽子スピンに対する軌道角運動量の寄与は、JLab の 12GeV へのアップグレード後に開始されるが、これを良く決定するためには、BNL の eRHIC で計画されているような電子イオン衝突加速器が必要であろう。

次の 10 年間はスピン物理にとってたいへん実りある期間となるに違いない。BNL の理論グループはスピン物理においてたいへん強力であり、RBRC の若手理論家と協働して、データの意味するところを解釈しより深く理解する上で世界を引っ張っていくに違いない。スピン物理の長期的な将来計画を考える上で eRHIC は格別エキサイティングである。eRHIC ではスピン及び軌道角運動量の空間分布とパートンの成分が明確に決定されるに違いない。

過去 10 年間にわたり、BNL での重イオン実験プログラムは並外れた大成功を収めた。これからの 10 年の研究は、生成されるクォーク・グルーオン・プラズマの性質をよりよく理解することである。この方向において、摂動 QCD、流体力学及び弦理論に由来するアイデアによる強力な理論活動があり、BNL-RBRC の理論研究者と卒業生はこの分野の指導的役割を果たしている。重クォークの探索に焦点を当てた、来るべき実験プログラムにより、プラズマの形成と性質についての重要な新しい情報が追加されるに違いない。まもなく CERN が生み出す高エネルギー

ギー領域でのデータと共に、プラズマの性質をよりよく理解し、強い結合効果がどのようなレベルで重要か決定し、そしてそのような効果を理解する上で弦理論がどの程度まで有用かを決定するために必要な情報が理論研究者に提供されるに違いない。

提案された格子QCD計算プログラム

RBRC は、1997 年にこの分野に参入して以来、格子 QCD 計算で世界の指導者たる役割を果たしてきた。RBRC の活動は、当初は 1998 年に完成した 0.6Tflops の QC DSP 計算機により、最近では 2005 年に運用開始された 10Tflops の QCDOC 計算機により支えられてきた。RBRC 及びコロンビア大学、イギリス及びドイツ、並びに日本から来た物理学者の国際グループが、数年にわたりその規模を拡大し続けながら、格子 QCD の分野で著しい進展を遂げた。

近い将来の重要なイベントは、2011 年に期待される 400Tflops の QCDCQ の設置である。RBRC に支援されて、コロンビア大学及びエジンバラ大学の物理学者は、IBM と共同でその開発に携わった。試作機の最近の試験は、ドメイン・ウォール QCD 計算についてたいへん良い性能を示した。この計算機は古い QCDOC を置き換えるもので、今後数年にわたりこれまでの重要な実績を継続して生み出していくために RBRC は強い立場に立つことになる。期待される成果は、物理的なパイオン質量を使った広い空間でのドメイン・ウォール QCD シミュレーションである。この計算はアイソスピンの破れ効果を含み目的によっては QED 効果さえ含む。これらの進展は、格子 QCD 計算をクォーク及びグルーオンに対する物理の道具として新しい段階に至るであろう。

さらに先を見ると、RBRC は、これまでもすばらしかったように、格子 QCD における国際共同研究のハブとして機能し続けるに違いない。だが、RBRC の計算がいかに計画されてきたか再考する必要があるように思える。高性能計算機は開発が速い。遅くとも 2012 年までにアメリカと日本で数十 Pflops 級の計算機が作られる。100 Pflops 級計算機が 2015 年くらいに続くであろう。また、10 年以内にエクサ・スケールの計算機製造の可能性を探る活動が既にある。RBRC が自分達で計算機の建設を追及すべきかどうか、計算機メーカーとの共同であるいは商品化されたものを多用するアプローチを追及すべきかどうか、また、そのような活動がどのような財政の裏づけをとるべきか、議論される必要がある。

5. まとめ

本委員会の全体的評価として、RBRCの進めている物理研究の課題は、素粒子及び原子核物理学の中で最も重要なものの一つである。RBRCの科学の質と量は素晴らしい状態を維持し続けており、RBRCの環境は素晴らしい国際共同研究を育み、その分野での若手リーダーを生み出している。我々の判断では、今日まで、RBRCは理研とBNL、日本とアメリカの両方にとって良いものであった。提案された6年の延長は良く考え抜かれており、RBRCの強みとすばらしく良く合致していて、重要で時宜を得た科学的問題が取り組まれている。今後も大きな科学上の発見をなす可能性が高い。

eRHICは提案段階である。もしもそれが現実になったならば、RBRCが設立されたときにRHICがRBRCに研究機会を与えたように、eRHICもRBRCに機会を与えるであろう。RHICでのスピンプログラムが理研、BNL両者にとって良い計画であったように、eRHICでも同様な進展を得るためには研究プログラムの計画立案及び準備においてRBRCが主要な役割を果たすことが極めて重要である。

以上