

RBRC 研究評価委員会報告（仮訳）

2000 年 9 月 28-29 日

1. 概要

研究評価委員会は 2000 年 9 月 28-29 日に BNL において行われた。委員会のメンバーと概要は別添されている。

委員会はセンター長である T.D.Lee 氏と副センター長の N.P.Samios のリーダーシップによる RBRC の成功と発展に引き続き深い感銘を覚えた。センターのプログラムの発展と若い物理学者の優秀さ、遂行能力、そして知的環境は全て見事である。

現在、センターは適切な規模にほぼ達しつつあり、今後人数の大幅な増加は見込んでいない。これはセンターの目的と一致するものであり委員会は賢い選択と考える。委員会は第一期フェローである若手研究者のすばらしい研究歴の展開について学び、嬉しく思う。これはセンターの人事決定が優れていたことの証であり、今後続く世代のもっとも優秀な研究者達を一層引きつけることに貢献するであろう。

スピンプログラムに関与するフェロー（理論 Vogelsang と実験 Deshpande）の昨年の活動は、同研究プログラムを優秀なレベルに高めるのに貢献したが、理研スピングループは新しく創設された BNL スピングループと併せて、“臨界規模”に到達した。

もう一つの新しい発展は実験物理学者のための理研／大学フェローシップの導入である。これはスピンプログラムに対する大学院生の参加を促し、さらに若い実験研究者がスピ実験の分野で働くことを一層勇気づける事となる。

非常に沢山の重要な理論研究が進められた。それらの中には、従来予想もされなかったカラー超伝導性を示すハドロン物質に対する新しい考え方やクォークグルーオン相からハドロン相への相転移の際、強い相互作用によるパリティ非保存、時間反転不変性の破れを伴う重要な物理的な真空状態、偏極実験の解析の高次の補正などが含まれる。これらや、他の非常に興味深い研究の可能性の探求については、後の章で多少詳しく述べる。

RBRC において進められている理論研究の一つの重要な構成部分は、コロンビア大学にある同様のマシンと共に価格性能比で記録を達成した QCDSF スーパーコンピュータであり、効果的に使われつつけている。このコンピュータは他所では不可能な格子ゲージ論の特定の枠組みによる QCD の研究を可能にした。この格子ゲージ論のアプローチは、特定の QCD 計算を十分に制御された近似で行うための唯一の可能性に沿うものである。

委員会は、コロンビアの Christ 教授グループと IBM により開発中の QCDOC という新しいコンピュータの計画を知り嬉しく思う。このマシンは 10Tflops を超すパワーを提供し、非常に貴重な QCD の成果を生むことが期待される。委員会は RBRC におけるこの先端技術の開発と利用を強く支持する。

最後に、BNLの相対性重イオン衝突装置のコミッショニングと初運転の成功を書き留める必要がある。この成功はRHICプログラムに携わる全研究者を明らかに発奮させた。サイベリアンスネークを使用したRHICでの偏極陽子ビームの運転の成功は、スピンプログラムにおいて画期的な出来事であり、RBRCによる努力の成果のなかで大切な部分であり、金と金の原子核同士の衝突の初のデータはセンターの理論的活動に欠くことのできない情報を提供しつつある。

2. 理研BNLセンターにおける理論物理学

2. 1 RBRCの理論グループ活動についての印象全般

研究評価委員会会議のはじめに、Lee教授によりRBRC理論グループの概要が紹介された。我々は、RBRC理論グループは1999年9月から2000年9月の期間内に17人の若い理論学者を雇用し、(8ポスドク、3フェロー、6大学の終身職予定者/RHICフェロー)、それにより一年以内のうちに成果発表出版数(実験を含み31から78)が2倍以上に達したという実績にみられるように、著しい理論研究活動の発展が見られたとの報告を受けた。また、私たちは2000年10月から理論において5人の終身職予定の大学/RHICフェローが発令されたとの報告もうけた。RBRCのメンバーにより毎週3つのセミナーが開催され、さらにBNLスタッフと共同で行われるセミナーも毎週3つ開催されている。さらに多くのトピックスに関するワークショップも開催されている。RBRCは昨年1999年の研究評価委員会から14のワークショッププロシーディングを出版している。

Lee教授のもとで育て上げられた理論グループの活動の急速な発展に私たちは全員深い感銘を受けた。私たちは、優秀な若い人材を引きつけ、彼らが強い相互作用の物理学の研究に挑戦して行くための進路を保証する、非常に革新的な方法である終身職予定の大学/RHICフェロープログラムが成功裏に実施されたことを歓迎する。

委員会は理論グループの若いメンバーによる16の発表を聞いた。それらは全て資質の高いものであった。理論グループの研究プログラムは非常によく焦点が絞られており、又、(RHICの)実験プログラムと良く関連付けられたものである。我々はこれらの発表が網羅したトピックの広さと共に、各発表の研究の深度に感銘を受けた。これらの若い研究者達は最高の素質を持っており、この分野で最も実り多い成果を挙げている。

委員会の理論メンバーは、発表後3つのグループにわかれてRBRCの14人の理論研究者と会った。我々はLee教授の素晴らしく理知的な指導力のもとで働く全ての若い研究者から、大いなる熱意、高い研究への意気込みとモラルを感じた。委員達は皆、RBRCが1グループ内の様々なメンバーや他のシニアな訪問研究者などを含むBNLの素粒子および理論グループとの相互関係を応援する交流を促進するために、RBRCが高度に理知的で刺激的な環境を提供していることを評価している。何人かの理論研究者はRHIC実験に携わる研究所の実験研究者と密接に協力して研究している。

また若手研究者の何人かが、独自にワークショップを企画し、催すというまれな機会を RBRC が提供していることを多いに感謝していたことも付記したい。これらのワークショップは RBRC の若い理論学者がさらに大きなコミュニティ、世界各国の多様な研究機関の参加者と相互関係を持ち、共同研究を発足させる機会を提供している。

2. 2 RBRC の理論活動の批評

理論グループの各メンバーによって行われる研究は下記のように分類される。

- ・ 格子ゲージ理論と非摂動論 QCD
- ・ 極限下の物質
- ・ 相対論的衝突の力学と現象論
- ・ RHIC におけるスピン物理
- ・ その他の課題

ここで、我々は個々の理論研究をレビューする。

格子ゲージ理論というのは、強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) の非摂動的領域を研究するための他に類を見ない理論方法である。RBRC におけるこの分野の研究は極めて高度なもので、今日の発展の最先端の課題に挑戦するものである。

カイラル行列理論、カイラル摂動理論および対称性を考慮することにより、ディラック演算子の固有値の分布情報を導き、それを格子計算による数値結果と比較し、優れた一致が得られることを見出した。(Wettig)

多大なる努力が、格子ディラック演算子のドメインウォール法による離散化を利用した格子 QCD のシミュレーションを行うために払われてきた。ドメインウォール法はカイラル対称性の破れに同調する格子フェルミ粒子の対するモード倍加の困難を解決する最も有望な方法を提供する。しかしながら、これにより計算の複雑さは増大する。RBRC の研究者は、この矯正テクニックによりその手法の QCD 現象論に対する適用において先駆的な仕事をしてきた。特に、この手法は核子の励起状態の研究、核子の軸性ベクトル結合の計算 (佐々木)、そして k 中間子の弱い崩壊の π 中間子への崩壊に関する行列要素の計算 (Blum) に適用された。結果のいくつかは実験データと一致することが判明し、そのいくつかは原因を説明する必要のある不一致を示し、ほかの計算は現在進行中である。相当量の注意がドメインウォール法の計算面、特に実際の数値計算ではウォール間の無限分離の理論的境界を解決できないという事実に帰因する残留カイラル対称性の破れを如何に制御するかに向けられている (青木)。

極限的な物理的状況下における物質の研究は RHIC 相対論的重イオン衝突の実験プログラムの基本的動機である。高温における状態方程式の計算は、バリオン密度が全体でゼロの状態の時に限り、格子ゲージ理論の第一原理による計算が非常に発展したが、有限バリオン密度のときの同様の研究は、大きな技術的な問題によって、困難であった。クォークグルーオン多体系での対称性の破れに係わる問題に関して、解析的な弱結合の技法及び変分法的アプ

ローチを用いて、この分野での重要な発展が見られた。特に興味深いのは高密度クォーク物質のカラー超伝導状態および、それがいかに特定のハドロン物質の形成に連続的に関連しているかについての推論である (Schaefer)。クォーク物質において、カラー超伝導状態を導く不安定性の原因となる引力は、反三重項チャンネルにおける一個のグルーオン交換によるものであり、グルーオン伝搬関数に対する媒質効果がギャップ方程式に引き起こすフィードバック効果が研究された (Rischke)。状態図における臨界点の存在の可能性及びその重イオン衝突実験で実測可能な観測量との関連性が、共に研究された (Stephanov)。

有限サイズの原子核と無限大の核物質に適用可能な QCD の有効場の理論の構築においても努力が行われている。特別なケースにおいて、より系統的で尚且つ QCD と明らかな関係をもつアプローチを用いることにより、良く知られている膨張が回復した (Kolek)。真空のカイラル対称性の自発的な破れのメカニズムは light front 量子化の手法を用いて研究されてきた。真空の triviality とゼロモードの存在に帰因する困難が適切な束縛条件を認識することにより解決された。南部-ヨナ・ラシニオ模型に簡単な適用をすることにより、これらの束縛条件はカイラル対称性の破れを説明するギャップ方程式に帰着することが示された (板倉)。

基本的なクォーク・グルーオンの自由度からハドロン形成の最終段階までにいたる相対論的核子・核子衝突における時空発展の理論的説明は、理論学者に多大なる挑戦を提示する。運動量の縦成分が小さい領域でのグルーオン分布関数のための初期条件は荷クォークにより作られる random color source を含む典型的なヤン-ミルズ方程式を解くことにより研究されている (Venugopalan)。高エネルギーの原子核衝突の初期段階における膨張しているグルーオン・パートンの系から局所的熱力学的平衡状態に向かう引き続く発展が、摂動論的 QCD 方法を取り入れることにより系統的に研究されている (Son)。高エネルギー原子核衝突のパートンカスケード力学をモデル化し、モンテカルロ法でコンピューターシミュレーションをするための手法が、ハドロン化のアルゴリズム、及び終状態でのハドロン-ハドロン相互作用と共に研究されている (奈良)。

新しい物理現象の信号は RHIC の物理研究において最も重要なものである。SPS 実験で観察された J/ψ 抑制の理論的解釈が、RHIC 実験との関連を含め勢力的に研究されている。強いパリティの破れが実現する状態と、その結果として粒子生成で観察が可能となる現象の発現を予測する QCD の軸性異常に関する新しい推論が提唱されている。遠距離のチャーモニウム-チャーモニウム相互作用 Scale 測の異常により説明された (Kharzeev)。重イオン衝突のストレンジネス生成もまた、衝突によって生成される物質の初期の形態を特徴づける重要な観測量である。重イオン衝突における二重ハイペロン生産は、他の方法では不可能であるハイペロン-ハイペロン相互作用について情報を得る事を意図して研究されていた (Schaffner-Bielich)。

また、RBRC においては、RHIC の偏極陽子ビームを用いたスピン物理の実験プログラムを支援するための理論的研究も行われている。RHIC スピンプログラムによって測定されるべき重要な観測量のなかの一つは、グルーオン・クォーク・コンプトン散乱過程を経て生成され、核子のグルオン偏極の情報を伝達するプロンプト光子のを観測することである。しかしながら、二次の QCD の補正計算では、現在の非偏極ビームのデータを説明しきれないこ

とが知られている。ソフトグルーオン放射による結果の高次の QCD 補正が再積算テクニックを用いる collinear factorization の枠組みで系統的に研究された(Vogelsang)。非偏極の初期段階から生成された λ の偏極度は、スピンの自由度を伴う興味深い問題である。(非偏極)クォークの偏極破碎関数を用いた新しい分析方法により RHIC での λ 粒子偏極の予測値が得られた(Boer)。RBRC 理論グループによって研究されている他のトピックは宇宙マイクロ波背景輻射との相互作用のために生ずる 5×10^{19} 電子ボルトの Greisen-Zatsepin-Kuzmin リミットを超える超高エネルギー宇宙線の起源についてである。非常に重い化石粒子が崩壊し、ニュートリノを放射し、さらにそれが高エネルギー光子放出 (π Z-bursts π) 新しいメカニズムと、それから予想される高エネルギーニュートリノのフラックスの特長が研究されている(Kusenko)。

2. 3 コメント

RBRC における数値計算に基づく研究は、コロンビア大学の類似のマシンと共に価格性能比で世界記録を達成し、かつ効果的に利用されている QCDSP スーパーコンピュータにより支えられている。委員会はコロンビア大学の Norman Christ による QCD 計算のために特化した、新しく強力な QCDOC スーパーコンピュータの発表を聞いた。その QCDOC は理研と米国エネルギー省による支援のもとで、Christ のグループと IBM との共同研究により開発中である。理研に対して、11264 ノード の QCDOC スーパーコンピュータを RBRC に設置することが提案された。そのピーク性能は 10Tflops 以上であり、格子 QCD 計算において期待される連続性能は 5Tflops である。QCDOC の構成は、高性能 CPU、埋め込み型 4Mbytes DRAM、及びコミュニケーションユニットの 1 チップへの統合に基礎をおいている。これは格子 QCD 演算だけでなく、局所相互作用をする広範囲に分布したデータを取り扱う幅広いアプリケーション(例えば輸送方程式の解法)に非常によく適応している。プロセッサ開発に関して多大な資源とノウハウを持つ IBM の積極的な参加は、プロジェクトの成功に更なる確信を与える。

現存の QCDSP スーパーコンピュータはもとより計画中の QCDOC スーパーコンピュータはより一層と QCD に関して計りしれなく貴重な結果を生み出す可能性を秘めている。RBRC における格子 QCD プログラムを更に支援するためにこの分野における若い研究者たちを数人新たに雇用することが望まれる。これは上記のスーパーコンピュータの能力を最大限に引き出し、高温 QCD や理研の支援のもとで行われる実験プログラムに深く関わるハドロン構造などの分野の研究を広く展開させる。

すでに述べた通り、BNL の理論グループやコロンビア大学、ニューヨーク州立大学ストーニーブルックやミシガン工科大学などの近隣の理論グループとの研究協力は RBRC の研究において極めて重要である。これらのグループの何人かのシニアメンバーは直接シニアコラボレーターとして、あるいは間接的に助言者として RBRC における若き物理学者の研究プログラムの発展に欠くことのできない役割を果たしてきた。終身職保障の RHIC フィジックスフェローの採用により、更なる刺激が大学をはじめとするアメリカの広範囲にわたる知的社会から RBRC の活動にもたらされることを我々は期待する。

RBRC は若い日本人の原子核・素粒子理論学者の教育において特別な役割を果たしている。RBRC においてリサーチアソシエイトとして任用されていたうちの二人は日本に帰国し東京大学で終身職についた。日本でも 1 名筑波を中心として非常に活発な研究活動が進められている格子ゲージ理論の分野でも 1 名新しく採用があった。この分野においてより一層日本人物理学者が RBRC における研究に参加し、それにより今まで以上密接な RBRC と日本の格子グループの共同研究が促進されることを望む。

将来の職業上の進路は世界中の若い物理学者の大きな関心事であり、我々は RBRC の若い物理学者との面接を通じてかれらも例外なくそのような関心を持つことがわかった。RHIC フィジックスフェロープログラムが RBRC において鍛練された若い物理学者たちのための職業上の進路を計画的に確保するものとなることを期待する。我々は以前理研フェローでありその後 RHIC フィジックスフェローであった Kharzeev がブルックヘブンの原子理論グループの終身雇用メンバーとなったことを聞き嬉しく思う。そして、我々はもう一人の理研フェローであった Rischke が最近ドイツの一流大学の教授職を享受したことを聞いた。このような RBRC のメンバーの成功例は個人の研究が高く認められたからだけでなく、Lee 教授により入念に仕込まれたプログラムが適切かつ効果的であったことによるものであろう。

3. 理研 BNL 研究センターにおける実験グループ

RBRC 研究評価委員会は RBRC 実験グループの発表を聞き、この実験プログラムに参加し研究を進めている大勢のサイエンティストや大学院生との会話を楽しんだ。

実験グループのプログラムは偏極陽子衝突におけるスピン現象の研究に焦点を向けている。これは、RHIC が理研の協力によって、偏極ビームが加速可能な、世界初の高エネルギーハドロン加速器となったことにより拓かれた、高エネルギー物理学における新しくかつ非常に興味のある研究を目指したものである。

このプログラムはすばらしい発展を遂げ、その物理学的目的が達成出来るのはほぼ確実と思われる。これらはすでに以前のレポートにおいて述べられているので、ここでは主要な事項について簡潔に要約する。基本的な研究課題は核子のスピン構造であり、なかでもグルーオンスピン構造の関数である。偏極ビームを用いることによって、ほかにもいろいろな研究が可能となる。例えばこれまで研究されることがなかったスピンの構造を記述する新しいパラメータである "transversity"、W ボソン生成時の標準理論でのパリティの破れ、および、標準理論を超えたパリティや時間反転対称性の破れの新しい源の探究等である。

我々は特に昨年の二つの業績について述べる。

第一に、RHIC のスピンコミッションングプログラムにおいてサイベリアン・スネークの一つを使用して偏極陽子ビームを 24.3 GeV/c から 30 GeV/c まで加速することに成功した。これはこのエネルギー領域には強い減偏極共鳴があるだけに特に重要な意義を持つものである。これはスネークが予想通り適確に機能した事を確証するものであった。今後より高いエネルギーでの加速のために更なる努力が必要とされるとはいえ、これはこの研究プログラムにとって幸先の良い結果である。

第二に、RHICにおいて陽子ビームの偏極度がクローン核子干渉の原理を用いた偏極度計により、入射エネルギーと加速後とで、それぞれ測定された。9月のスピニング以前は我々もリングにおける偏極度測定が可能か否か心配をしていた。我々はDr.Kuritaから、偏極度測定の明晰な実験結果を聞いて満足している。ビームの偏極度絶対値の正確な測定は今後の課題である。

下記はプログラムの進展状況、その他の昨年の主要な業績、そして今後直面するいくつかの問題点に関する具体的なコメントである。

1. 理研とRBRCの共同研究の進展は素晴らしく、これがスピンプログラムの強力な推進力の一つになっている。理研の物理学者及び日本の大学の物理学者、そして大学院生の多大な努力、またBNLと米国の物理学者の協力的努力はこのプロジェクトにおいて重要なかぎを握っている。我々は可能であればこのプログラムにより多数の日本の大学が参加することが望ましいと考える。現在の参加者は大部分が京都大学で、あとは東京工業大学からの若干名の学生に限られている。
2. 委員会はBNLスピニンググループの設立の知らせを聞いて満足している。このグループはRBRC及び理研スピニンググループと密接に協力して研究を進め、スピンプログラム全体の成功に大きな貢献をもたらすであろう。
3. スピン現象専門の理論学者であるWerner Vogelsangや実験物理学者のMatthias Grosse PerdekampとAbhay Deshpandeらの参加はRBRCの研究活動を大幅に強化した。RBRCグループはBNLスピニンググループと共に相互に補強しあい、今や“臨界規模”に達した集団を形成している。その事例として関連する物理課題と研究計画をそれぞれ検討する二種の極めて充実した会合が両者により開催されている。
4. 実験に興味のある大学教官をとりこむ、理研の大学／理研フェロー制度の拡充は非常に好ましい動向である。特にこの制度はプログラムに参加する大学院生の増加を促すものである。これまでの一般的な経験に加えて、日本の大学の学生との最近の経験から、このプログラムのバイタリティー、成功、そして今後の発展のためにはこの学生の参加がどれだけ重要かが覗える。このことは、若手研究者が将来スピニング実験の分野で研究することをより一層元気づけるものである。
5. RBRCと理研グループ（日本の大学を含む）の主要な研究努力は強力的にPHENIX実験に向けられている。理研のPHENIX装置とスピンプログラム全般に対する寄与は、その成功にとってかけがえのないものである。RHICの最初の運転の際に行われた、サイベリアンスネークのテストが成功したことはプログラムの進展の重要な一里塚である。
6. 委員会はPHENIX電磁カロリメーターが最近の運転において優秀な性能が確認されたことの知らせを嬉しく思う。中性のパイ中間子への崩壊の明解な信号が、予測していた値と非常に近い分解能で得られた。周知の通り、電磁カロリメーターの性能は、スピニング測定にとって関連する物理情報を最大限に抽出出来る主要な道具立ての一つである。この典型的

な例は、直接光子 (Direct photon) の測定からグルオン・スピン構造を決定することである。

7. 委員会は Dr.Perdekamp が発表した、PHENIX のスピン実験のための新トリガーシステムによって可能になるさまざまなメリットに関して感銘を受けた。これは明確にプログラムの成功と生産性を増進させるものである。

8. 何人ものスピン物理学者に述べられ、委員会も共感する関心事は、スピンプログラムのために十分な (加速器の) 運用時間が割り与えられることである。偏極の実験はとらえがたく複雑である。ビームは綿密に調整され、評価、モニターされ、また一旦パラメーターが設定されればデータ収集のために適切な時間を要する。もし全体的に運用時間が短かった場合、研究の成功に必要な条件を保証するため、スピン研究のための時間に十分に優先度を与えるべきである。