RHIC におけるスピン物理プロジェクト

理化学研究所 放射線研究室
RHIC スピン物理グループ

1998 年 2 月 21 日

1 始めに

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の重イオン衝突型加速器 RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) は核子あたり 100GeV の金原子核同士を衝突させ、宇宙初期に存在したと考えられるハドロン物質の新しい相であるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) を実験室で作り出し、その性質を調べることを目的とする世界初の衝突型加速器である。ここではまた、高輝度の偏極陽子の加速も行なわれ、偏極陽子衝突を可能にする世界初の衝突型加速器となる。偏極陽子は 25GeV から 250GeV まで約 70% の偏極率で衝突させることができ、核子のスピン構造の解明および対称性に対する精密測定による標準模型の検証を目的とする。

RHIC での偏極陽子加速、及び PHENIX 検出器による偏極陽子衝突実験への日本グループの参加は、1995 年より理化学研究所 (理研) 放射線研究室（研究室主任 石原正泰）のプロジェクトとして開始された。参加機関は、理研、京大、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、東大、東大原子核科学研究センター (CNS)、東工大、阪大核物理研究センター (RCNP) である。

ここでは、このスピン物理プロジェクトの概要を示し、現在の活動状況を簡単に説明する。今後、定期的に活動状況をより詳しく報告していく予定である。

2 RHIC

RHIC は、世界で始めての相対論的重イオンの衝突型加速器で、 1991 年に建設が開始され、そして今では世界で始めての偏極陽子の衝突型加速器という肩書きも携えて、 1999 年 10 月からの物理実験開始に向かって、建設が順調に進められている。

2.1 RHIC 加速器

偏極陽子衝突型加速器としての RHIC 加速器のレイアウトを図 1に示す。

RHIC は周長約 3.83km、 6 個のビームクロス点を持つ六角対称な二重リングから成り、リングのアーク部には総計 264 個の超電導双極電磁石と、 276 個の超電導四重極電磁石 (正確には Corrector-Quadrupole-Sextupole) を持つ。陽子などの加速粒子の偏極を保持し、更に衝突点での偏極方向を自在に制御するために重要なのは、各リングに 6 セットずつ置かれた超電導螺旋型双極電磁石である。偏極を保持する役割を果たすのがスネーク電磁石、衝突点での偏極方向を制御するのがローテーター電磁石と呼ばれている。

偏極陽子イオン源としては、 KEK から移設される光励起型偏極負陽子イオン源が用いられる。現在、その改良及び低エネルギー・トランスポート・ラインの開発が進んでいる。ここから発生する 80% の偏極率の負陽子イオンは RFQ、 LINAC を経て 200MeV に加速され、さらに AGS ブースターで 1.5GeV、AGS で 25GeV まで加速される。その後、トランスファー・ラインを経て RHIC の二つのリングに打ち込まれる。

RHIC でのビームバンチ数は 60(将来は 120)、衝突周期は約 210 ナノ秒 (105 ナノ秒) である。偏極陽子衝突のルミノシティーの設計値は、ビーム寿命 10 時間の平均で 250GeV の陽子・陽子衝突に対して 1×10^{31}

$\mathrm{cm^{-2}sec^{-1}}$ (2×10^{32} $\mathrm{cm^{-2}sec^{-1}}$) である。衝突ダイヤモンドの長さは ±10cm 程度と予想されている。ビーム強度増強、バンチ数の増加等によるルミノシティ増強の検討も進んでおり、将来一桁程度のルミノシティー増強が見込まれている。

超電導双極電磁石及び四重極電磁石は、全数の RHIC リングへの搬入が終了している。現在は電磁石の所定位置への据え付け作業、連結作業が進行している。

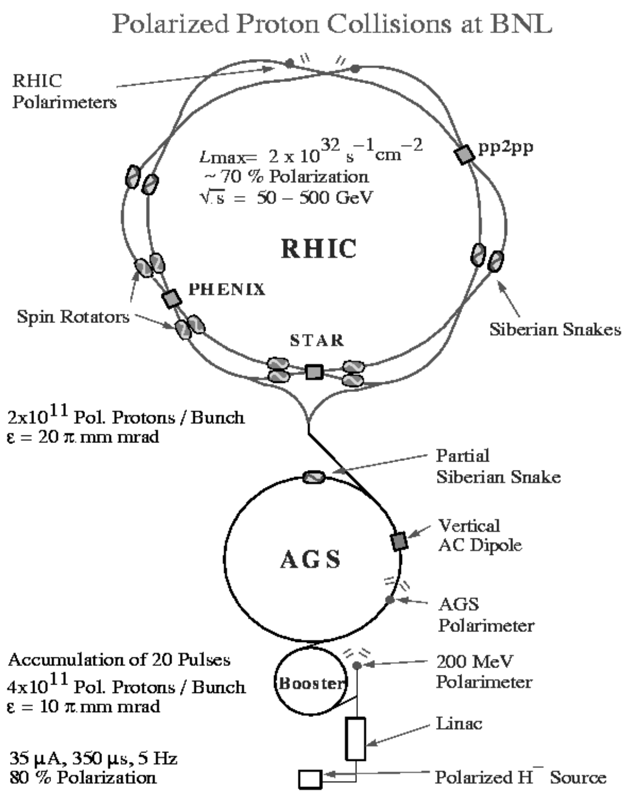

図 1: 偏極陽子衝突型加速器としての RHIC 加速器のレイアウト。

2.2 PHENIX 検出器

PHENIX 検出器は RHIC の 6 個のビームクロス点のうちのひとつに設置される大型検出器であり、重イオン衝突実験及び偏極陽子衝突実験を行なう。 PHENIX 実験には世界 11 カ国から、 400 名以上の研究者が参加している。

PHENIX 検出器の透視図を図 2に示す。実験装置は大きく分けて、ビーム衝突点近傍に置かれる測定器群 (内部計測器)、中央の双極電磁石 (中央電磁石) とその回りを囲む測定器群 (中央アーム)、そして、二つのミューオンアームから成る。

内部計測器は、衝突時間測定の為の超前方に置かれる一対のカウンター、 BBC (Beam-Beam Counter) と、荷電粒子多重度測定用の MVD(Mulitiplicity Vertex Detector) である。

中央アームは、 η=±0.35、 $\Delta\phi$=90°をカバーする左右 (東西) 二つのアームから成る。荷電粒子のトラッキングの為には 3 セットのパッド・チェンバー (PC1–3)、ドリフトチェンバー (DC)、及び、 TEC(Time Expansion Chamber) を用いる。 TEC の dE/dx 情報は粒子識別にも用いられる。中央アームにはトラッキングシステムの他に、種々の粒子識別装置が備えられている。 TOF(Time-Of-Flight Counter)、 EM-Cal(Electromagnetic Calorimeter)、 RICH (Ring Image Cherenkov Counter) である。

ミューオンアームは、前方および後方に設置される。設置される方角から、それぞれ北アーム、南アームと呼ばれている。有効感応領域は $1.2< |\eta| <2.4$、 $\Delta\phi=360°$ と広い。各ミューオンアームはミューオン電磁石、ミューオン飛跡検出器、ミューオン同定用検出器からなる。南側のミューオン電磁石は搬入・設置の便を図って、北側より短く設計されている。

詳しくは、 [2] PHENIX 実験の Web ページを参照されたい。

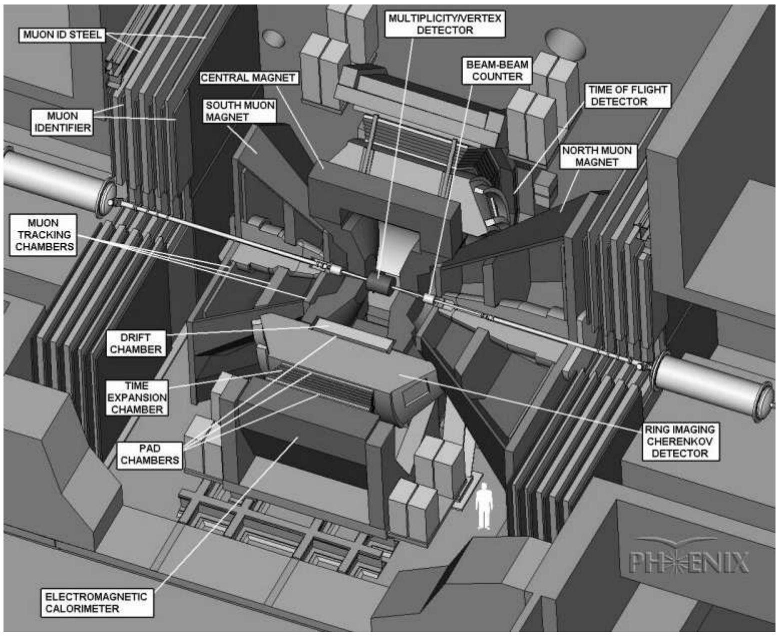

図 2: PHENIX 検出器の透視図。

スピン物理においては、光子やレプトンを終状態として持つ過程が重要な役割を果たす。従って、スピン物理グループはミューオンアーム及び、中央アームの EMCal の活動に参加している。

EMCal は、 3/4 を覆う鉛・シンチレーターのサンドイッチ型カロリメーター及び 1/4 を覆う鉛ガラス・カロリメーターを用いて光子、電子の粒子識別及びエネルギー、入射位置の測定を行なう。

重イオン物理、スピン物理双方の要求を満たすため、数 100MeV から 80GeV までの広い領域の光子、電子のエネルギーを測定する。 $\Delta\eta=\Delta\phi=0.01$ と細かくセグメント化されていることにより 2 光子崩壊による高い運動量の π^0、 η 粒子に対する同定能力が高く、直接生成される光子の抽出に威力を発揮する。200 ピコ秒程度の時間分解能を持つため、低い運動量領域での荷電粒子識別にも用いることが出来る。

ミューオン飛跡検出器は、 3 つのステーションに別れて設置されるカソード・ストリップ・チェンバー (CSC) である。合計 9 点での半径方向および方位角方向の位置を 100 ミクロンの精度で測定することを目指し、プロトタイプでは実際にこの目標は達成されている。

ミューオン同定用検出器は、厚さ 10cm および 20cm の鉄鋼板と、垂直方向 2 層、水平方向 2 層のイアロッチ・チューブのパネルを交互にならべたものである。イアロッチ・チューブはガスカウンターであり、比例領域で運転される。ひとつひとつのカウンターは厚さ 0.9cm、幅 8.35cm の断面をもち、長さは場所により 2.5m から 5.2m の範囲である。内部はカーボン導電塗料を塗布した 8 つのサブセルにわかれており 8 本のアノードワイヤーを有する。 8 本のアノードワイヤーの出力は足し合わされ出力される

重イオン物理、スピン物理双方の要求を満たすため、 2GeV から 100GeV 程度までのミューオンを、トラックし、同定しなければならない。低い運動量での分解能は、トラッキング部に入る前のハドロン吸収用の物質の中でのエネルギー損失で決まっており、高い運動量領域では、飛跡検出器の位置分解能ににによって決まっている。パイオンに対する除去率は、 10^{-3} 以上が見込まれている。

2.3 スピン物理

RHIC での偏極陽子衝突実験の目的は、核子のスピン構造の研究および、対称性を用いた標準模型の検証である。

クォーク模型によるバリオン八重項の磁気双極子モーメントの説明の成功などから、陽子のスピンはクォークが担っていることが単純に信じられていた。一方、核子のスピン構造は、1970 年代後半から偏極レプトンの偏極陽子からの散乱実験で調べられてきた。SLAC の実験において 一旦検証されたかに見えたクォーク模型による核子の描像も、実験データの精度が上がるに連れて、変更を迫られてきている。というのも、CERN で行われた EMC 実験の結果は、 陽子のスピンに対するクォークの寄与は実験精度の範囲内でゼロと一致すると解釈されたからである。その後、実験は中性子にも拡張され、また精度を増し、現在では核子のスピンの約 30% がクォークに担われていて、しかも反クォークは親の核子とは反対向きに偏極しているとするのが通説である。残りの 70% はグルーオンや、軌道角運動量であろうと思われるが、こうした描像の検証を行う。

レプトン散乱による構造研究では、仮想光子によって核子の構成要素をたたき出すわけだが、グルーオンは、光子とは直接の結合をしないため、レプトンと核子の包含反応での偏極測定は難しい。また光子はクォークと反クォークを区別しないので、反クォークの偏極だけを選択的に測定するのも難しい。核子同士の衝突による反応には、光子の直接生成、ヘビー・フレーバー粒子の生成など、グルーオンの寄与が支配的な反応が存在し、グルーオンの偏極 ΔG の測定が可能である。また、レプトン対生成や、ウィークボゾン生成など反クォークの寄与が知られている反応によって、反クォークの偏極 $\Delta\bar{q}$ を分離することができる。また、ウィークボゾン生成においては関与するクォークのフレーバーが殆ど固定されていることから、偏極度のフレーバー分解を直接検証できる。

これらの測定において測られる量は、運動方向に偏極した陽子の衝突の断面積に対する非対称度である。衝突点での偏極方向をローテーター電磁石を用いて制御することにより、両方の陽子のヘリシティーを指定した場合の非対称度、

$$\mathcal{A}_{LL} = \frac{\sigma(++) + \sigma(--) - \sigma(+-) - \sigma(-+)}{\sigma(++) + \sigma(--) + \sigma(+-) + \sigma(-+)}$$

や、片方だけを指定した場合の非対称度、

$$\mathcal{A}_L = \frac{\sigma(+) - \sigma(-)}{\sigma(+) + \sigma(-)}$$

を測定する。 $\pm$ は衝突する陽子のヘリシティーを表す。この測定量から、例えば光子の直接生成の場合は、

$$\mathcal{A}_{LL} \approx \frac{\Delta G}{G} \cdot A_1^p \cdot \hat{a}_{LL}(gq \to \gamma q)$$

として、グルーオンの偏極、非偏極の分布関数の比、 $\Delta G/G$ を得る。 A_1^p は、偏極レプトン生成における測定量、 $\hat{a}_{LL}(gq \to \gamma q)$ はこの反応に支配的な素過程、グルーオン・コンプトン散乱の非対称度である。

以上に加えて、運動方向に垂直に偏極した核子のなかのクォークの偏極は、今まで測られている偏極とは違う可能性が示唆されているが、この測定も核子同士の衝突の方が有利であるといわれている。したがって、偏極した核子同士の衝突による核子のスピン構造の研究は従来のレプトン散乱による研究とあわせて、より精密な構造理解に向けて非常に重要な役割を担っているといえる。

一方、核子が偏極していることにより、パリティを破る反応を取り出せるが、これは、クォークの下部構造の検出に有効であるといわれている。

3　活動状況

3.1　RHIC 加速器

超電導螺旋型双極電磁石の開発は理研と BNL が共同で行なっている。既に設計、プロトタイプ製作、動作試験、磁場測定等の評価試験が終了している。現在は電磁石製作のための自動巻き線機が開発され、まもなく大量生産が開始される。図 3に自動巻き線機による電磁石製作の様子を示す。 RHIC リングへの設置はスネーク電磁石が 1999 年 9 月、ローテーター電磁石が 2000 年 9 月の予定である。

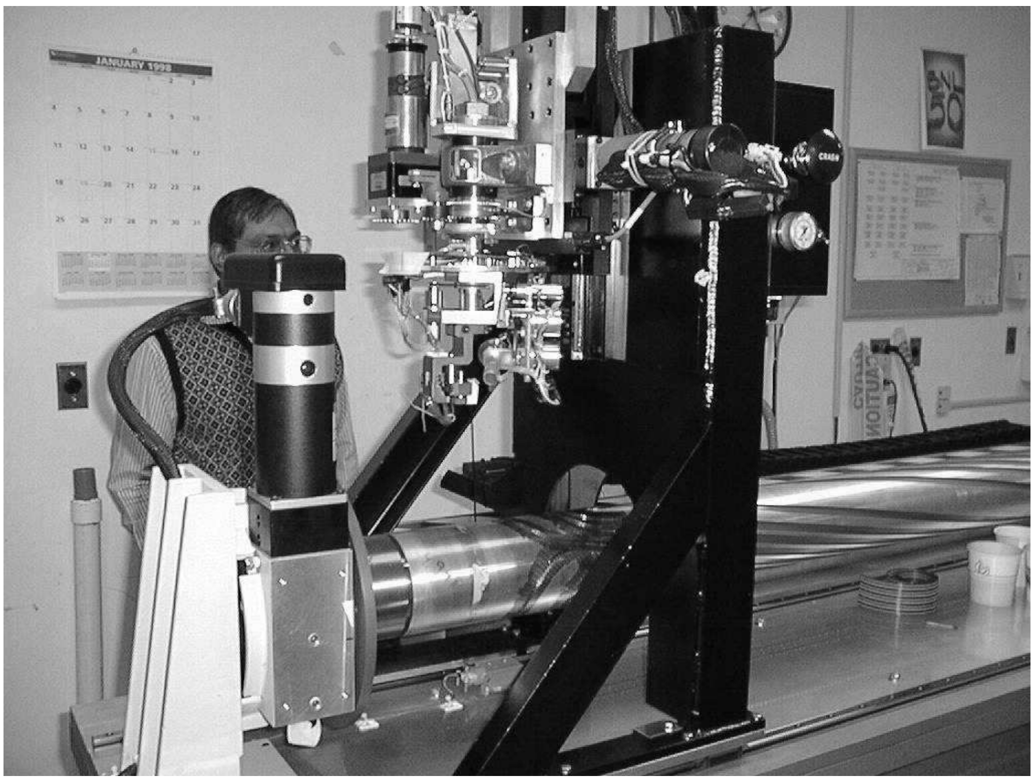

図 3: 自動巻き線機による超電導螺旋型双極電磁石の製作の様子。この自動巻き線機は、 11 軸制御であり、数値制御工作機械で切削加工されたアルミのシリンダーの溝に、直径約 1 ミリの超電導ケーブルを超音波加熱を利用して接着することができる。

また、 RHIC 加速中に存在するスピン共鳴による減偏極が螺旋型双極電磁石により避けられ、ビームの蓄積モード中も保持されることは、スピン・トラッキング・コードによるシミュレーション計算が行なわれ、数値的に理解されている。

RHIC に入射するための AGS での偏極陽子加速のテストは AGS-E880 として進んでいる。 AGS にはスピン共鳴による減偏極を避けるためにパーシャル・スネーク電磁石及び交流双極電磁石が設置されている。これを用いて 1997 年のテストでは 21.7GeV で 50%、 24.3GeV で 40% という偏極度が予備的データとして得られている。

偏極陽子の偏極度を測定するポラリメーターのための検討、テスト実験、設計も現在進行中である。その中のひとつのオプションとして炭素ターゲットによるパイオンの生成非対称度の測定が考えられているが、そのための AGS でのテスト実験 AGS-E925 が、 E880 からの偏極陽子ビームを抽き出すことにより行なわれている。現在炭素ターゲットによる実験データの解析が進行中であり、来年には水素ターゲットによる測定が行なわれる。ポラリメーターの他のオプションとしては炭素ターゲットによる偏極陽子の

弾性散乱や、偏極陽子ガス・ジェット・ターゲットによる弾性散乱が検討されている。

3.2 PHENIX 検出器

図 4に示すのは、 [2] PHENIX 実験の Web ページ から見ることのできる、現在の PHENIX 実験ホールの様子である。

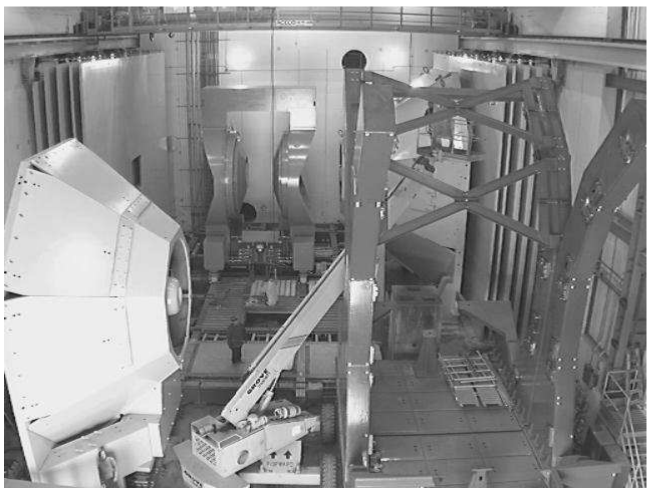

図 4: 現在の PHENIX 実験ホールの様子。左手前にあるのが組み立てが終了した南電磁石である。ミューオン同定用の鉄鋼板はその奥、及び右奥にある。右奥には北電磁石も設置されている。中央奥に設置されているのは、中央電磁石、そして右手前にあるのが中央アームのフレームである。

ミューオンアームの建設には、主に、米国からロスアラモス国立研究所 (LANL)、ローレンス・リバモア国立研究所 (LLNL)、ルイジアナ州立大 (LSU)、ニューメキシコ州立大 (NMSU)、オークリッジ国立研究所 (ORNL)、ニューメキシコ大 (UNM)、テネシー大 (UT)、中国から原子能科学研究院 (CIAE)、そして日本より理研、京大、東工大が参加している。前述のように、ミューオンアームは、電磁石、飛跡検出器、ミューオン同定用検出器からなる。

電磁石は北電磁石及び南電磁石から構成される。南電磁石は，高さが 8m，重さが 200t あまりで，ランプシェードの形をしている。 PHENIX への組み込み及びメンテナンスの便を図って，電磁石全体がレールの上にのり，台座に備え付けのローラ及び油圧駆動装置を用いて，水平面の二次元方向に移動できるようになっている。南電磁石の基本設計は，理研が LLNL、 LANL 等と共同で進め，三菱電気株式会社に製作を依頼した。 1997 年 2 月に予定通り完成し，神戸工場で試験を行い，基本性能が確認された。電磁石及びコイルの製作の過程や，試験の様子に関しては [4] PHENIX 電磁石及びコイルの製作の Web ページ を参照されたい。その後 BNL に輸送され，1997 年 12 月末に PHENIX の実験ホールで南電磁石の主要部の組み立てが完成した (図 4参照)。現在磁場測定及び解析の準備が進行中である。

飛跡検出器は主に、 LANL、 UNM、 LSU、 NMSU の共同で建設が進んでいる。

ミューオン同定用検出器は、京大、東工大、理研が、 ORNL、 CIAE などと共同で開発を行なった。鉄鋼板は既に実験ホールに設置されている。 KEK でのビームテスト等を経て仕様が決定され、現在は鉄鋼板中にはさむイアロッチ・チューブのパネルを BNL 及び KEK において製作中である。作業は先ずイタリアから到着するイアロッチ・チューブの一本ずつに対し、動作確認、バーンインの QA(Quality Assurance) を行ない、パネルに組み込む。パネルの組み立て方法も確立し、量産体制に入っている。図 5に KEK で組み立て中のパネルの写真を示す。

ミューオンアーム及び、中央アームにおけるスピン物理のためのソフトウェア開発も行なわれている。

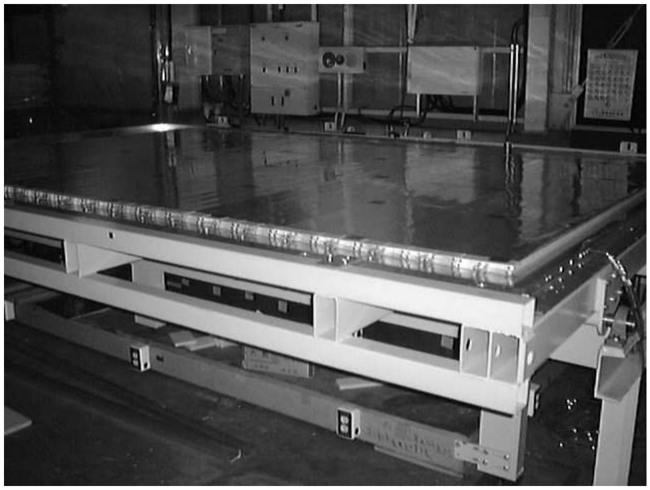

図 5: KEK で組み立て中のミューオン同定用イアロッチ・チューブ・パネル。パネルは水平な台の上で組み立てられ、片面が終われば反転させて残りの面を組み立てる。この台は反転させるためのフリッパーと組み立て台を兼ねている。

ミューオンアーム用としては、ミューオンの同定及び、運動量解析のためのパターン認識プログラムが開発されている。ここから得られるミューオンの同定能力、運動量解析能力をパラメーター化することにより、スピン物理のシグナルに対する感度の評価や、シグナルに対するバックグラウンドの評価も行なっている。また、シグナルを捕らえるためのトリガーの研究も進んでいる。

中央アームのソフトウェアとしては、現在主に EMCal に対するプログラム開発を行なっている。スピン物理のためには重イオン物理に較べ高い運動量の光子、電子に対する測定が重要である。光子、電子の測定のためのパターン認識プログラムは、そのエネルギー、入射位置を正確に測定し、また、高い運動量の π^0 粒子の 2 光子崩壊などによりできる、 2 粒子以上を含むひとつのクラスターからの複数の粒子の分離のために、高性能が要求される。そのプログラムの評価やバックグラウンドの評価のためにはシミュレーションが必要とされ、高速で大量のシミュレーションを実行するプログラムの開発を行なっている。

さらに、偏極陽子衝突の種々の測定に対する理論との比較にも、前述の偏極レプトン散乱等の実験結果に基づいた精度の良いシミュレーションが必要である。しかし、クォーク、グルーオンのスピンに依存する分布関数は、現在までに提案されているものは、シミュレーションの入力として使うためには精度が不十分である。これまでの実験結果をすべて取り入れた分布関数を作る作業を、理研、東工大が佐賀大、神戸大、福井工業大の理論グループと協力して進めている。

3.3 PHENIX CC-J

PHENIX CC-J (Computing Center in Japan) は PHENIX 実験のアジア地区における地域計算機センターとして立ち上がりつつあり、 RHIC 全体のための計算機センターである RCF(RHIC Computing Facility) とともに PHENIX 実験の解析の中心となる施設である。

RCF と PHENIX CC-J とは同様の環境を整える必要があるため、現在そのためのスペックの検討が進み、 RCF と共同で環境開発を行なっていく予定である。主な課題としては、未曽有の大量のデータを扱うためのデータ・ストレージ、オブジェクト指向データベース、さらにネットワークやデータ・テープの輸送による日米間のデータ転送の確立が挙げられる。

RCF では今後、 RHIC でのデータの流れ、解析プロセスのチェーンをシミュレートし、この全く新しいシステムを確立する作業に入る。 PHENIX CC-J からも、この作業を協同して行ない、日本におけ

る PHENIX 実験の解析のための環境を作り上げて行く。

3.4 理研 BNL 研究センター

一方、このスピン物理プロジェクトを理論研究も含めて進めていく場として、理研 BNL 研究センターを 1997 年 10 月、 BNL に開設した。センター長にコロンビア大学の李政道教授をむかえ、 RHIC でのスピン物理および、重イオン物理の研究に着手した。東大の矢崎鉱一教授を中心に、日本国内の研究者の積極的参加も支援している。今年度は理論部門のみの発足であったが、来年度は 10 月から実験部門も発足する予定である。

開設からわずか数ヶ月の間に、論文 15 編、ワークショップも BNL で 4 度、国内で 1 度、そして格子 QCD 専用計算機の建設などの成果をあげている。来年度も和光本所の研究グループおよび国内研究者と協同で研究を進めて行く予定である。

国内で行なわれたワークショップとしては、 1997 年 11 月 28、 29 日に理研シンポジウム「核子のなかのクオークとグルーオン」が開催された。実験については、 PHENIX のほか、 SMC、 SLAC、 HERMES、 ZEUS、 CDF 等の現状が報告され、理論では、核子のスピン依存構造関数をはじめ、ジェットの物理、ハード・プロセスに関するいろいろな原子核効果などが発表された。討論のセッションでは、'Experimental observables and theoretical definitions' と題して、スピン依存構造関数の意味と不確定性が詳しく討論された。更に、 QCD 摂動計算の何次までが意味があるか、格子 QCD の手法、 QCD で理解できない現象、などが活発に議論された。会議録は 理研 BNL 研究センターから発行される予定である。

4 終りに

RHIC は、原子核物理実験の業界にとって初めての衝突型加速器を用いた大型実験であり、今後 10 年以上に渡って続くプロジェクトとなる。検出器は長いサイクルの間、持続して稼働することが要求される。 RHIC 加速器は、 1999 年 1 月にエンジニアリング・ランを開始し、その時点で PHENIX 検出器は初めてのビームに同期したシグナルを得、物理データ収集のチェーンの動作がテストされる。このテストまで既に 1 年を切り、各検出器パートの組み立ても着実に進み、最終形態が見えつつある。実験ホールの様子も日々変化し、検出器の組み込みに向けて期待も高まり、同時に緊張感も高まっている。今後も引き続きプロジェクトの報告をしつつ、この期待と緊張感をお伝えできればと思う。

関連 Web ページ

[1] RHIC のページ

`http://www.rhic.bnl.gov/index.html`

[2] PHENIX 実験のページ

`http://www.rhic.bnl.gov/phenix/index.html`

[3] RHIC スピン物理グループのページ

`http://www.rarf.riken.go.jp/rarf/rhic/index.html`

[4] PHENIX 電磁石及びコイルの製作

`http://www.rarf.riken.go.jp/rarf/rhic/mms/index.html`

(文責 後藤 雄二)