RSCCにおける高エネルギー原子核実験データ解析

四日市 悟 (理化学研究所 放射線研究室)

放射線研究室では、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) における RHIC/PHENIX 実験 [1, 2] をはじめとした粒子加速器を用いた実験により、原子核物理学/ハドロン物理学の研究をおこなっている。PHINIX 実験のデータ解析のため、1999 年に RIKEN–CCJ (computing center in Japan) という PC クラスタによる計算センターの建設を開始し、2000 年より同実験の計算センターとして重要な役割を果たしてきた。2004 年からは 理研情報基盤センターと協力して RIKEN super combined cluster system(RSCC) のうち 128node(256CPU) を占有利用し、実験データ解析を行ってきた。

ここでは、最近の加速器実験のデータ処理の特徴と PC クラスタとの関係を紹介し、また CCJ/RSCC を用いて得たこれまでの成果と将来の展望について述べる。

1 加速器実験のデータ処理の特徴

加速器を用いた原子核/素粒子物理学実験における測定データは、固定標的実験/衝突型実験にかかわらず、現在ではほぼすべて電子的に記録される。測定器には それぞれの原子核/素粒子反応について反応点からの粒子 (群) の飛跡を検出するもの、エネルギー、速度、時間を測定するものなどがある。図 1 に PHENIX 実験の測定器群を示した。同測定器群の channel 数は合計およそ 30 万である。

さて、このデータ処理には大きな特徴が 2 つある。一つはデータをイベント単位に分割できることと、そのためクラスタ利用時に並列計算が必ずしも必要ないこと、二つ目はデータ量が膨大であることと、それに伴って job 数が多いことである。

測定されたひとつひとつの原子核/素粒子反応のことをイベントと呼ぶ。たとえば PHENIX 実験では、典型的には各イベントにつき数千の粒子が発生し、それぞれが測定器を通過して、合計数万のヒット情報を生成する。データ解析ではこの数万のヒット情報から数千本の粒子飛跡を再構成し、また各粒子の運動量やエネルギーを決定することになる。CPU power の 90%以上はこの飛跡再構成に費やされる。一般にイベント間の相関はないので、こうしたデータ解析は PC クラスタを用いた並行処理に向いている。つまり、データをイベント単位で分割して各ノードで解析することができ、その際 CPU 間/ノード間の通信は発生しないので、処理速度は CPU 数に比例する。ただし、各ノードとストレージやデータベースサーバとの通信は制限要素となりうる。

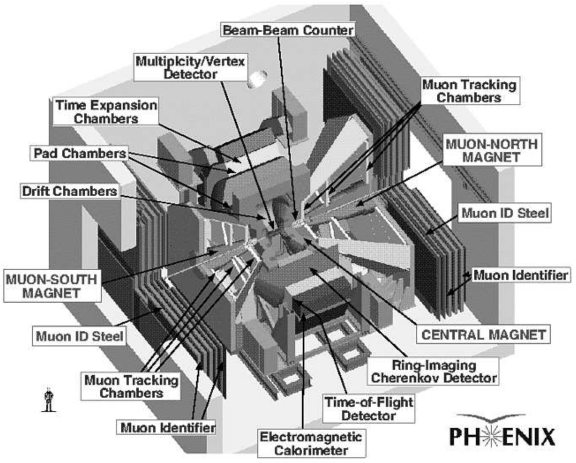

図 1: PHENIX 測定器

飛跡再構成のあとは、その情報を用いて測定器の校正をおこない、ふたたび飛跡再構成をおこなったり、また興味のあるイベントのみにデータを削減したファイルをつくって詳しく解析し、物理量を出す解析プロセスをおこなる。モンテカルロシミュレーションにより生成した疑似データとの比較も必要である。

加速器や測定器性能の向上とともに年間データ量は増える傾向にある。PHENIX 実験の場合、現在最大で 100MB/sec でのデータ記録が可能で、

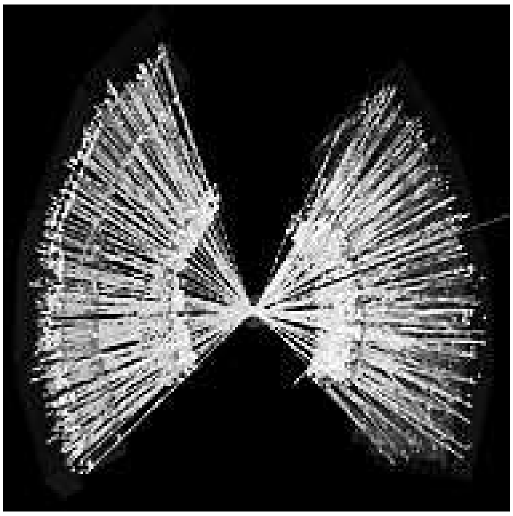

図 2: PHENIX 実験での飛跡再構成の一例

2003 年から 2004 年にかけておこなわれた Run-4 では、約半年の実験期間で合計約 220 TB の raw data を記録している。典型的ファイルサイズは 1.5GB であるため、この量は 13 万ファイルに相当する。さらに、現在 (2005 年 3 月) は Run-5 の最中であるが、2005 年の 1 月 ~3 月の 60 日間で 140TB のデータを収集した。1 日単位でみると、およそ 5TB 程度が最高記録である。これは ほぼ 60MB/sec で 24 時間書き続けることに相当する。

2 RSCC 利用の実際

RSCC の 256CPU(3.06GHz) の計算力は現 CCJ の約 3 倍である。

RSCC の占有利用にあたっては、情報基盤センターの協力により、pc2c クラスタについて、OS に RedHat Linux8.0(2005 年 3 月上旬に Scientific Linux3.02 に更新) を採用していただき、また CCJ に従来からある NFS ファイルサーバおよび PostgreSQL データベースサーバと接続することで、PHENIX 実験のデータ解析環境を構築することができた。

現在共同実験者 13 人のアカウントが設定され、従来のデータの解析やシミュレーション、また 2005 年の Run-5 で出るデータの解析の準備がおこなわれている。

pc2c クラスタでは、Batch queueing system として当初 NQSII/ERSII が用意されていた。しかし、われわれの典型的な job 投入スタイルは、2~3 時間で終わる job が 数千から数万で一区切りといったものであり、さらにそれを利用者おのおのが入れるという状態は同システムの想定外であったため、以下のような不具合が発生した。同時に 1000 本/人程度しか投入できないので、数万投入したい場合は自動投入 script を利用者が作成する必要がある、コマンドレスポンスが遅い、job 切替のオーバーヘッドが大きく CPU を 100%使えない、誤動作する、等々である。そのため 2005 年の 1 月末に LSF を導入していただいた。CCJ で使用実績のあるものであり、現在のところ安定に動作している。

3 これまでの成果と展望

RHIC/PHENIX では 重イオン衝突実験が 2000 年に開始され、これまでに重心系エネルギー ($\sqrt{s_{NN}}$) = 62.4GeV, 130 GeV および 200 GeV の Au–Au 衝突実験と 200 GeV の d–Au および Cu–Cu 衝突実験がおこなわれた。クォーク ・グルーオン ・プラズマ (QGP) の検出をめざしていろいろな側面からのデータ解析がおこなわれており、すでに出版された論文は 24 本 (さらに投稿中 10 本)[6] 、国際会議報告は 100 本以上にのぼる.

放射線研究室が主力を投入している PHENIX における偏極陽子衝突実験は、陽子のスピンを指標とした核子のクォーク ・グルーオン構造の解明を目指しておこなわれている。電子を用いた深部非弾性散乱実験で判明した、陽子のスピンが 3 つのクォークのスピンの和だけでは説明できないという問題 ('spin crisis') を解決するためには、陽子の中のグルーオン偏極を測定できる偏極陽子衝突実験が不可欠である。世界初の偏極ビーム衝突型加速器ということで運転も困難をきわめている中、Run-3 の $\sqrt{s} = 200$ GeV のデータはいちはやく CCJ で解析され、π^0 粒子生成の非対称度 A_{LL} 測定の結果が得られた [7]。低い p_T でマイナスに出ているこの測定結果は、誤差範囲が大きいながらも従来の理論では説明できない値であり、それだけに解釈は難しいが、陽子中のクォークのスピンにさらにグルーオンのスピンの影響を加えても陽子のスピンを説明できない可能性を示唆しており、大きな話題を呼んでいる。

さらに高統計をめざした偏極陽子衝突実験のデータ収集がまさにこの3月から4月にかけて開始される予定で、このデータを即座にネットワーク経由で理研に輸送し、RSCCで解析する計画が、情報基盤センターの協力も得つつ鋭意進行中である。すでに bbftp を用いて BNL から理研への 1TB/day 程度での数日間にわたる継続的データ転送には成功しており、またiperfを用いて 7-800 Mbps の band width があることが確認されている。目標は 5TB/day(=60MB/sec) でのデータ転送である。これが達成できると、PHENIX 実験のデータ収集と (平均して) 同じ速度で転送できることになる。200TB 程度の収集が予定されており、転送終了後はRSCC/pc2cを用いておよそ 5~10 週間で最初の飛跡再構成が終わると考えられている。

参考文献

[1] `http://www.bnl.gov/rhic`

[2] `http://www.phenix.bnl.gov`

[3] `http://ccjsun.riken.go.jp/ccj/`
S. Yokkaichi et al.: RIKEN Accel. Prog. Rep. 38
S. Yokkaichi et al.: RIKEN Accel. Prog. Rep. 37 (2004) 257
Y. Watanabe et al.: RIKEN Accel. Prog. Rep. 36 (2003) 262

[4] `http://www.rhic.bnl.gov/RCF/`

[5] `http://www.sdsc.edu/hpss/`

[6] `http://www.phenix.bnl.gov/papers.html`

[7] Phys. Rev. Lett 93 (2004) 202002