

RHIC が拓く新天地：クォークとグルーオンが紡ぎ出す未知の世界

延與秀人 理化学研究所 / 理研 BNL 研究センター

浜垣秀樹 東京大学原子核研究センター

エピローグ

SSC が米国議会決定により中止されたことは記憶に新しいが、かつて 1983 年にも ISABELL と呼ばれる衝突型加速器計画が米国 Brookhaven 研究所に建設途中にして中止され、周長 3.8 km の空のトンネルを残して人々の記憶から消えていった。21 世紀を迎えた今、この加速器計画は世界初の重イオン衝突型加速器として、また世界初の偏極陽子衝突型加速器として生まれ変わった。これが RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) である。

2000 年には金の原子核が核子あたり 65 GeV まで加速され衝突が観測された¹。偏極陽子の加速テストも成功裏に行われた²。明けて 2001 年、金の原子核は核子あたり 100 GeV まで加速され、総エネルギーにして約 40 TeV での衝突が行われた。衝突時の瞬間消費電力としては 2×10^{19} ワットに相当する(ちなみに東京電力の総発電能力は 6×10^{10} ワットである)。2001 年には原子核の衝突実験に引き続き、偏極陽子の衝突実験も行われる。スピン軸を揃えた(偏極という)陽子同士の散乱としては世界最高エネルギーであり、これまで研究されていたエネルギー領域と比べ 10 倍の高エネルギーである。これら 2 種類の衝突実験を通じて RHIC はハドロン物理学の新天地を拓く。そこで正に解明されつつある物理学を紹介しよう。

原子核は核子(中性子と陽子)からなり、核子は 3 つのクォークがグルーオンと呼ばれる糊粒子で結合された系である。クォークやグルーオンはお互いの距離が離れるほど引力が強くなる性質を持っていて、決して単体で観測されることはない。これを「閉じ込め」と呼ぶ。RHIC の原子核衝突で得られる高温状態では「閉じ込め」が解け、クォークやグルーオンがプラズマ状態になるであろう。この状態はビッグバン直後の宇宙の状態であったと考えられている。

重イオン衝突はクォークとグルーオンをバラバラにしようという挑戦であるが、翻って、3 つのクォークが陽子として「閉じ込め」られる機構も理解されているわけではない。クォークは電荷($2/3$)もしくは($-1/3$)、スピン($1/2$)をもつ粒子で、これらが 3 つ絡み合っただけでスピン($1/2$)の陽子や中性子を形成する。3 つのクォークが陽子や中性子を作る時にも角運動量保存則が成り立つはずであるが、その機構は謎である。特にナイーブに予想されていた「クォークのスピンが陽子のスピンを担っている」という描像はまったく成り立たないことが実験的に分かっている。この問題を解き、見失われたスピンの担い手を探すのが RHIC における偏極陽子衝突実験である。

クォーク・グルーオン・プラズマは出来たか

RHIC での重イオン衝突実験の第一目標は QGP 生成を検証することである。RHIC の実験開始に先立って、CERN は 2000 年 2 月に 160 GeV/核子の鉛ビームと鉛固定標的との衝突において QGP が実現された可能性が大きいと発表した²。重心系エネルギーが 10 倍以上大きい RHIC では、QGP 生成のチャンスは CERN-SPS 以上に高く、可能性を示唆するに留まった CERN の実験結果を超え、確定的な証拠が得られると期待されている。QGP への相転移を起こすための鍵となるパラメーターは衝突により達成されたエネルギー密度で、単位ラピディティあたりの横方向放出エネルギー dE_T/dy から推定できる。2001 年度に行われた核子あたりの重心エネルギー 200 GeV の金・金中心衝突で達成されたエネルギー密度は約 $6 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ と推定された。因みに QGP 相転移に必要なエネルギー密度は $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 程度と予想されている。

RHIC で生成された高温状態の熱力学的様子を調べる手段として、外向きの集団的な粒子流（フロー）の観測がある。RHIC ではこれまでの実験と比較してより強いフローが観測された。また、ビームの衝突方向に垂直な平面内での放出粒子核分布の楕円非対称性（elliptic anisotropy）ⁱⁱが大きく、その傾向が流体モデルによって良く再現される。これらの現象は、RHIC においては衝突の初期に熱力学的な平衡状態が達成され、その後粒子群が流体的に振舞うことを強く示唆している。

生成された系の化学組成はハドロンの収量比から推定することができる。系が化学平衡にある場合、化学組成は系の温度、化学ポテンシャルにより決まる。RHIC では、ストレンジネスを含むバリオン（ハイペロン）が大量に生成されていることがわかった。ハイペロンは生成に高い温度を必要とし、ハドロン同士の衝突では作りにくい。ストレンジクォークが高温の QGP 相で短時間に生成されている可能性がある。

高エネルギーの衝突では高い頻度でジェットⁱⁱⁱが作られる。重イオン衝突では、ジェットは高温ハドロン媒質中を通過する際に主にグルーオンの制動放射によりエネルギーを失うと予想されている。これにより媒質の状態を探ることができる。金・金の中心衝突において高い運動量を持つ粒子の収量が予想より小さいことが観測された。図 1 は、金・金中心衝突での π^0 収量の運動量分布である。色々な理論計算との比較が試みられているが、QGP 中のエネルギー損失を考慮した場合が実験結果をうまく再現する。因みに、この現象は CERN-SPS では観測されていない。

これらの実験結果から QGP が実現されたと結論するのは早計であろう。しかしながら、QGP 検証を行なうための基礎となる多くのデータが得られている。

陽子のスピン構造の物理

核子のスピン構造は偏極した電子やミュオン（レプトンと呼ばれる）を偏極固定ターゲットに照射して内部構造を調べる実験（深部非弾性散乱実験）で研究されてきた。この結果が前述の陽子スピンの謎をもたらした。RHICで行われる偏極陽子どうしの散乱実験は、強い相互作用をする陽子の構成要素各々をすべてプローブできるところが最大の魅力である。このような実験で重要な要素となるのは偏極した陽子を加速する技術である。磁場のなかで陽子は歳差運動をする。この周波数と加速器の周回周波数の比が整数になると共鳴を起こし、偏極が失われる。この共鳴に打ち勝ち高エネルギーまでの加速を実現するためのトリックがサイベリアン・スネーク電磁石である。RHICでは双極電磁石をねじったような構造のものを作成した。これにより陽子のスピンの向きを周回ごとに 180° ひっくり返し、前周回での歳差運動を次の周回でキャンセルする。これによりスピンを保持したまま高エネルギー領域まで加速できる。

陽子スピンの謎を解く最大の候補はグルーオンが偏極している可能性であるが、これはレプトンでは直接プローブすることはできない。RHICではグルーオン同士の散乱やグルーオンとクォークの散乱を同定することができ、グルーオンの偏極度をダイレクトに測定する。もしグルーオンが偏極していれば、2001年度に収集された $100\text{GeV} + 100\text{GeV}$ の衝突データの解析から貴重な実験的証拠が得られるだろう。RHICの偏極陽子衝突のもうひとつのハイライトは弱い相互作用を媒介するWボソンの生成である。弱い相互作用の特徴と偏極陽子散乱の特徴を組み合わせるとクォークの種類(反クォークを含め u, \bar{u}, d, \bar{d} の4種類)を同定し、その偏極度を測ることができる。この測定はRHICで陽子を 250GeV と 250GeV で衝突させることにより可能になる。クォーク・反クォークの種類を識別した偏極度の計測は世界で初めてのものとなる。

クォークやグルーオンの偏極度がわかると、相互作用の対称性を調べることができる。パリティを破るような未知の相互作用に対しては、テバトロンやLHCのような偏極していない加速器より感度のよい探索ができる可能性も指摘されている。

終わりに

このようにRHICは21世紀の初頭を担う重要な加速器実験である。日本からは東大、東大CNS、筑波大、広島大、早稲田大、KEKが重イオン衝突実験を主眼として、理研、理研BNL研究センター、京大、東工大が偏極陽子衝突実験を主眼として参加している。この実験に対する日本の寄与は財政的にも人的にも非常に大きく、日米科学技術協力事業（高エネルギー物理学分野）によりPHENIX検出器の主だった部分としてリングイメージチェレンコフ測定器、ビーム・ビーム衝突測定器や飛行時間測定器が建設されている。また、理化学研究所とBNLとの協定により偏極加速を可能とするための加速器の改造と偏極実験のための測定器建設が行われ、LINUX 300台からなる日本側解析センターも設立された。クォークとグルーオンが紡ぎだす未知の世界の解明にむけてこれからが正念場である。

参考文献

- 1) 永宮正治：「高エネルギー重イオン衝突実験」, パリティ 2000 年 12 月号 102 ページ
- 2) 齋藤直人：「スピン偏極陽子コライダー」, パリティ 2001 年 5 月号
- 3) B. シュワルツチャイルド (延与秀人 訳)：「CERN はクォーク・グルーオン・プラズマを作り出したか」, パリティ 2000 年 10 月号 35 ページ；杉立徹、三明康朗：日本物理学会誌：55 巻 11 号 868 ページ。

図の説明

図 1： 0 の横運動量分布。中心衝突の場合が四角で、周辺衝突の場合が丸で示されている。曲線は核子同士の衝突の重ね合わせで推定される値とその推定誤差である。中心衝突の場合には実験結果が予想を明らかに下回っている。

i 相対論的に扱える速度： $\frac{1}{2} \ln\left(\frac{E+p_z}{E-p_z}\right)$ で定義される。

ii ビームの衝突方向から測った角度分布を $\cos(n\theta)$ で展開したときの $n=2$ 項。90 度と 270 度方向へのフローの大きさをあらわす。

iii 核子内のクォークやグルーオンが大角度に散乱されハドロン化する時に生じる、多数の粒子がジェット状に放出される現象。

中性パイ中間子の横運動量分布

