

重イオン衝突によるクォーク・グルーオンプラズマの探索

浜 垣 秀 樹

1. 誕生から数マイクロ秒の宇宙

1977年に出版された、宇宙初期の物理について書かれた古典的な名著「The First Three Minutes」¹⁾において、ワインバーグ (Steven Weinberg) は、「我々は、素粒子の物理について未だ十分には理解していない為、そのような混沌とした状態の性質について確信を持って計算できない。」として、最初の100分の1秒について断定的な結論を述べることを避けた。

その当時、まだ、物質の基本構成要素であるクォークはその存在がやっと実在のものとして認識されつつある段階であり、強い相互作用についての理論は生まれたてであり、現象の自在な記述からは程遠い状態にあった。しかしながら、それからおよそ30年の間における理論・実験両面にわたる進展には実に目を瞠るものがある。超高温・高密度状態における強い相互作用をする物質系についての理解が進み、最初の数マイクロ秒の宇宙の状態が明らかになりつつある。

2. 量子色力学の進展とクォーク・グルーオンプラズマ

量子色力学 (QCD) の発展の歴史や摂動論的 QCD についての詳細は他の稿^{2,3)}に譲

る。

非摂動論的領域の QCD の基本的な性質として「クォークの閉じ込め」がある。ハドロンの構成要素であるクォークはハドロン中に閉じ込められており単体では存在しないことは経験的に判っているが、その理解は非線形・非摂動的取り扱いの困難さもあってなかなか進まない。

この閉じ込めが永久のものではないことを格子 QCD 計算が示した⁴⁾。ある温度を境に、ハドロン物質はクォークやグルーオンが閉じ込めから開放された新しい物質相へと相転移する。ハドロンは白色しか許されないため、この相転移には色自由度の開放という意味合いもある。この新物質の通称、クォーク・グルーオンプラズマ (QGP) は、クォークとグルーオンからなる (量子色力学的な) 色のプラズマ状態という気分で付けられた。

超高温の初期宇宙に、クォークとグルーオンが主役を務めていた時代があったのである。宇宙の膨張につれて温度が下がり、やがて相転移が起こり、クォークとグルーオンはハドロン中に閉じ込められて主役に座を降り、ハドロンを基とする今日の物質が作られたと考えられている。この相転移は、宇宙の進化の理解、及び基本的な力の本質の理解という両方の観点から、強い興味を持たれている。

3. ビッグバンを実験室で再現する

天体観測によって、宇宙初期(ビッグバン)の状態を調べることは一般的に困難である。「晴れ上がり」前の宇宙を見る手段が極端に限られているからである。

実験室において小さなスケールの高温・高密度状態を実現し、その状態を調べようとする試みが30年ほど前に開始された。そのため殆ど唯一の方法が、重い原子核同士を高いエネルギーで衝突させることである。先駆的な研究が1970年代の後半、米国ローレンス・バークレイ研究所(LBL)のペバラック加速器で開始された。その後、80年代半ばには、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)のAGS加速器、欧州原子核研究機構(CERN)のSPS加速器での研究が続いた。これらの加速器は、いずれも高エネルギー実験用に建設されたものを転用したものであった。

2000年にBNLの重イオン衝突型加速器(RHIC)が稼動開始し、研究は新たな時代に突入した⁵⁾。RHICは、重イオン衝突研究を主目的として建設された世界最初の衝突型加速器であり、周長約3.8キロの2重リングには計1,740個の超伝導磁石が用いられ、核子辺り100 GeVに加速された金原子核同士を正面衝突させることができる。RHICでは、2000年以降、毎年約4-5か月間に亘って実験が遂行され、興味深い結果が続々と得られている。因みに、日本からの研究グループは、大型実験フェニックス(PHENIX)実験に計画立案段階から深く関わり、装置の建設、実験の遂行において大きな役割を担ってきた。

以下、紙面の都合もあり、二つの話題について紹介する。

4. 超高密度状態実現の証拠

未知の物質の内部構造を知るためには、十分に性質の分かっているプローブが重要である。医療におけるX線などがこの典型的な例であるが、QGPを同定し、その性質を探るためのプローブとして、ジェットが注目されている。

高エネルギーでの核子(陽子、中性子の総称)同士の衝突に於いては、核子自身ではなくて、パートン(核子内に閉じ込められたクォーク、グルーオンの総称)が衝突の主体である。時として、パートン同士は大角度散乱をおこし、互いに反対方向に大きな横運動量を持って叩き出される。パートンは、真空中では単独で存在できないため、やがて、進行方向の狭いコーン内に生成される複数個のハドロン(ジェット)となる。ジェットの生成過程は摂動論的QCDを用いて良く記述されるので、素性が良く分かっている。

原子核同士の衝突反応においては、散乱されたパートンは、同時に生成される高温・高密度の反応領域を横切る際、強い相互作用によりエネルギーを失うが、その損失度はQCDを基にした計算によりかなりの精度で予測可能である⁶⁾。このことから、ジェットを高密度状態のプローブとして用いることが考えられた。

エネルギー損失について定量的に議論するために、抑制ファクター R_{AuAu} を次のように定義する。

$$R_{AuAu}(p_T) = \frac{dN(AuAu)/dp_T}{\langle N_{coll} \rangle dN(pp)/dp_T}$$

ここで、 $dN(AuAu)/dp_T$ は今注目している粒子の金-金衝突での生成量、 $dN(pp)/dp_T$ は陽子-陽子衝突での生成量、 $\langle N_{coll} \rangle$ は一回の金-金衝突あたりの平均核子間衝突数である。反応が核子-核子衝突の単なる重ね合せ

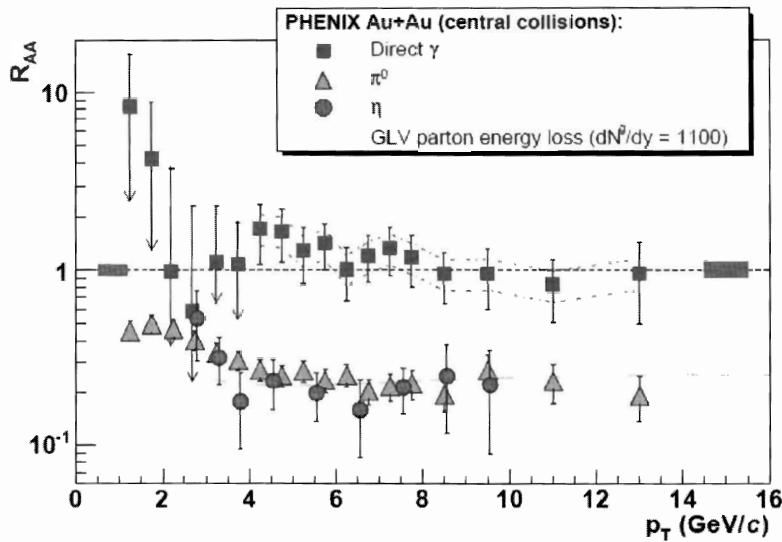


図1 核子対当たりの重心エネルギー200 GeV横運動量の関数としてプロットした、直接光子、中性 π 中間子、 η 中間子についての、原子核修正因子 R_{AA} 。

の場合、 $R_{AuAu} = 1$ になる。

図1に、直接光子、 π 、 η についての R_{AuAu} を、横運動量の関数としてプロットしたものを示す⁷⁾。電磁相互作用しか行わない直接光子は $R_{AuAu} \sim 1$ であるが、 π 、 η については大きな抑制が見られる。反応初期過程の効果ならば、直接光子にも同様の抑制が見られるはずなので、これら π 、 η の R_{AuAu} の抑制はパートンが大きなエネルギー損失を被ったことによる。この結果は、反応直後に非常に高い密度を持った状態が生成されていることを示しており、併せて、ジェットのプロープとしての有効性を実証するものである。

5. クォーク・グルーオンプラズマは液体か？

閉じ込めが破れ、クォークやグルーオンが自由に飛び回る新しい物質相は、ガス状の高温プラズマ状態と想定されたため、クォーク・グルーオンプラズマと名付けられた。しかしながら、RHICで生成された高温状態はどうやら期待通りには振舞わないことが判

て来た。

原子核同士の衝突では、真正面の衝突は稀で多くは中心を外した衝突となる。その際、二つの原子核が重なり合う反応領域はラグビーボール的な形状となる。反応領域が速やかに熱的平衡状態に達すると、圧力勾配ベクトルに沿って集団運動するため、最終的に放出されるハドロン粒子は、短軸方向のほうが長軸方向に比べて多い。方位角分布をフーリエ展開した第2項目が大きな値を持つため、係数 v_2 が評価に使われる。

色々なハドロン粒子について v_2 が測られて来た。ハドロンの構成要素であるクォークのレベルで流体的に振舞っているという推測に基づき、試しに、 v_2 をハドロンの構成クォーク数 n （バリオンでは3個、メソンでは2個と数える）で割ったもの（ v_2/n ）を、横運動量をクォーク数 n で割ったもの（ p_T/n ）の関数としてプロットしたものを図2(a)に、また、横運動エネルギーを n で割ったもの（ E_k/n ）の関数としてプロットしたものを図2(b)に、それぞれ示す。驚くべきことに、 v_2/n を E_k/n の関数としてプロットして

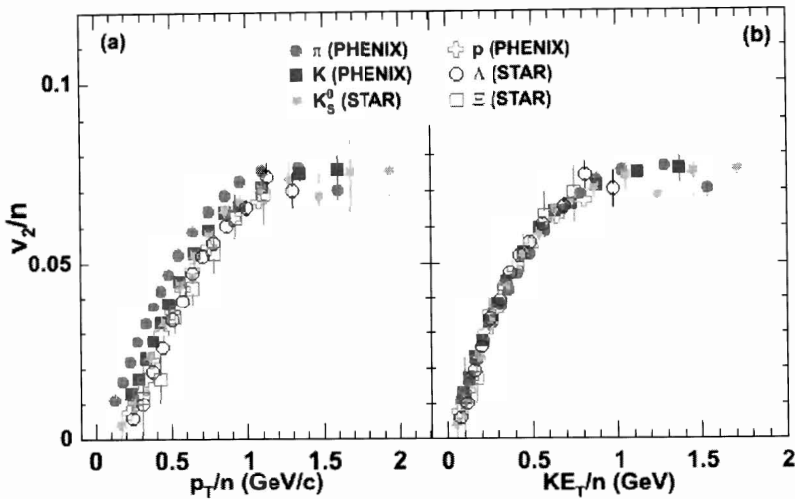


図2 種々のハドロンについての方位角異方性の大きさ v_2 を含まれるクォーク数 n で割ったものを、(a)横運動量をクォーク数で割ったものの関数として、また、(b)横運動エネルギー（横方向の総エネルギーから粒子の静止質量エネルギーを引いたもの）をクォーク数で割ったものの関数として、それぞれプロットしたもの。

みると、全ての粒子のデータがひとつの曲線に乗る⁸⁾。このことは、流体的振舞がハドロン相ではなくてQGP相における性質であることを強く示唆するものである。

更に考察を進めると、衝突直後にクォーク、グルーオンが熱的平衡に達し、その後粘性の無い理想流体として振舞うと仮定した流体力学計算が最も良く合うことが分かってきた。粘性があると実験で観測されたような大きな v_2 は取り得ない⁹⁾。小さな粘性は、クォークやグルーオン間の相互作用が予想以上に大きいことを意味し、QGPはクォークやグルーオンが自由に飛び交う気体的なものという当初の認識に大きな変更を迫るものとなった。

6. RHIC, LHC 等における将来の展望

以上、駆け足で重イオン衝突研究を概観した。RHICでの研究により、初期宇宙を実験室において再現し、その性質を探るという30年来の夢が叶いつつある。今後の研究の

方向であるが、大きく次の二つがある。

ひとつは、RHICにおける研究の高度化、精密化である。そのために、RHIC-IIと呼ばれる改造計画が立案され、ルミノシティ強化とそれに対応した実験装置の強化を意図している。

もうひとつの可能性は、CERN欧州原子核研究機構で建設中のLHC大型衝突型加速器での研究である。2008年には、RHICに比べて20倍余りの衝突エネルギーでの鉛原子核同士の衝突が実現する。より初期の宇宙への肉薄が可能となり、液体的振舞がQGPに普遍的なものかどうかの決着が期待される。また、グルーオン密度の飽和を预言する色ガラス凝縮 (CGC)¹⁰⁾等の高エネルギーで顕著になる新しい効果もあり、大きな進展が期待される。

■ 参考文献 ■

- 1) Steven Weinberg, "The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe": 1977年, ISBN: 0465024378.
- 2) 山田作衛, 「総論」, 学術月報本号.

- 3) 小平治郎, 「漸近的自由性と摂動論的量子色力学」, 学術月報本号.
- 4) 宇川彰, 「格子量子色力学計算の現状」, 学術月報本号.
- 5) RHIC の ホーム ページ : <http://www.bnl.gov/rhic>.
- 6) M. Gyulassy. *et al.*: Nucl. Phys. B 594 (2001) 371; B 571 (2000) 197; Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 5535.
- 7) S.S. Adler *et al.* (PHENIX Collaboration), “Common suppression pattern of high pT eta and pi0 in Au+Au at sqrt (s_NN) = 200 GeV”, Phys. Rev. Lett. 96, 202301 (2006).
- 8) PHENIX Collaboration, private communications.
- 9) D. Teaney, “The Effects of viscosity on spectra, elliptic flow, and HBT radii”, Phys. Rev. C 68: 034913, 2003.
- 10) 板倉数記: 「カラーガラス凝縮—ハドロン・原子核の高エネルギー極限における姿」日本物理学会誌 59 (2004) 148.

浜 垣 秀 樹 (はまがき・ひでき)
東京大学大学院理学系研究科 助教授