

数兆度の奇妙な世界 宇宙の初めはさらさらだった



研究ノート

浅川 正之*

Strange world at some trillion degrees

Key Words: Quarks, Gluons, Hadrons, Strong Interaction,
Quark-Gluon Plasma, Viscosity

はじめに

相転移という現象は耳慣れないかも知れないが、ありふれた現象である。氷が水に変わり水が水蒸気になる、あるいは磁石を熱すると磁化が消える等、いずれも相転移の実例である。物質が温度や圧力などの変化に伴って態を変えること、それが統計物理学で相転移と言われる現象である。

本稿は二兆度程度の温度における相転移のお話である。お話であっても決して絵空事ではない。地球上で確認された現代物理学の最先端のお話である。

強い相互作用とは

物質の基本的相互作用としては、日常親しみ深い重力相互作用と電磁相互作用を含む四種類が知られている。そのうち、原子核内で働き陽子と中性子を原子核として繋ぎとめているのが強い相互作用と言われるものである。この力について創立間もない大阪帝国大学で研究していた湯川秀樹は、この力はその当時未発見であった中間子という粒子によって媒介されるという理論を発表し、後にノーベル物理学賞を受けることとなった。これら強い相互作用をする粒子は総称してハドロンと呼ばれている。湯川が

予言した中間子が確認されて以降、1950年代、60年代にはハドロンが堰を切ったように止めどもなく見つかり続け、ハドロンは「素粒子」と考えるにはあまりに多過ぎるように思われた。実際その通りで、ハドロンはクォークとグルーオンというより基本的な粒子から構成されていることが判明したのである。かなり前になるが、トップクォークが発見されたというニュースを記憶されている方もいるだろう。トップクォークとは現在までに六種類確認されているクォークの一つである。我々がよく知っている電磁気の世界では、電荷間の力はそれらの間に光子が飛ぶ(物理学者は光子が交換されると言う)ことによって生じるが、クォークの世界では光子に相当するものがグルーオンである。グルーオンは、クォーク同士を結合する糊とか膠(にかわ)の働きをするものということで、gluon(= glue(糊、膠)+ on(粒子を表す接尾語))と名付けられたのである。我々が知る全ての物質を構成する陽子や中性子、あるいは中間子は、大雑把にはクォークや反クォークが束縛されて出来ている複合粒子なのである。ちょうど、原子の世界が原子核と電子の束縛状態であるのとよく似ている。大きさのスケールが十万倍程度原子の世界より小さくなったと考えればよい。斯くして強い相互作用の基礎理論は、クォークとグルーオンの言葉を使って記述されることがわかったのである。それでは、クォークやグルーオンはより細かい構造は持たないのだろうか? 現在までのところその徴候は見えていない。クォークもグルーオンも「素粒子」と考えてよさそうである。

ここまでは、ハドロンの世界は原子の世界とよく似た一回り小さな世界として想像可能であった。しかしながら、強い相互作用の世界の性質には漸近自由性と閉じ込めという不思議な性質がある。この二



* Masayuki ASAKAWA

1963年8月生
東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
博士課程修了(1991年)
現在、大阪大学大学院 理学研究科物理学
専攻、教授、理学博士、原子核理論、
ハドロン理論
TEL : 06-6850-5344
FAX : 06-6850-5529
E-mail : yuki@phys.sci.osaka-u.ac.jp

つは直感的には同じことの裏表と言えるような現象である。漸近自由性は言葉は一見難しいが、要するに近づけば近づくほど粒子間の見かけの電荷が小さくなり、自由に動いているのと同じになるということであり、閉じ込めとは読んで字のごとくクォークやグルーオンは閉じ込められているということである。もう少し詳しく言えば、クォークやグルーオンはハドロンという複合状態の中に閉じ込められていて、単独に取り出すことは出来ないということである。これは、原子をイオン化すれば電子を取り出すことが出来るのとは大違いである。クォークというものが存在してこれこれの性質を持つとは言うが、それは言ってみれば陽子や中性子の中に探りを入れてそれらの中に実際にクォークやグルーオンがいることを観察しているのであり、クォークを陽子や中性子という檻から単離して観測出来ているのではないのである。

クォークグルーオンプラズマとは

いままでの説明では、温度とか圧力とかいうことは全く考慮して来なかった。しかし、例えば、水素原子と酸素原子の複合状態である水は、温度や圧力を変えることによりさまざまな状態に変化する。温度を上げていくと遂には水素原子と酸素原子に分解する。物質の世界では相転移はあまねく観測されている現象である。素粒子の世界ではどうなのであるうか？

高校や量子力学の講義で習った黒体輻射を思い出してみよう。通常の黒体輻射は光子からなり、黒体輻射の分布関数とは光子の分布関数である。同様に、温度をさらに上昇させていくと、ハドロンの泡のようにどんどん生成していき、黒体輻射が空間を埋め尽くすようにハドロン（実は湯川が予言した湯川中間子とその主な成分であることがわかる）が空間を埋め尽くすようになるだろう。ハドロンは大きな質量をもち、アインシュタインの相対性理論により生成するには大きなエネルギーが必要なので、より高い温度が必要とされるのである。そうなるとハドロン同士が重なり合うようになり、ハドロンという檻の中に閉じ込められていたクォークやグルーオンが、くっつき合った檻の中を自由に動きまわれるように

なって閉じ込めが無くなったのと同じようになるだろう。ちょうどこれは、動物園で柵の中にいる動物から外にいる我々を見たら、我々が柵の中に見えると言うのと似ている。さらに、強い相互作用には漸近自由性という性質があるのであった。結局、このようにして閉じ込めが無くなった世界ではクォークやグルーオンはほぼ自由に振る舞うようになるだろうと考えられ、この仮想的な状態はクォークグルーオンプラズマと呼ばれてきた。この状態への変化は、真空を熱していくと（何もない真空を熱していくというのは考えにくいかもしれないが、黒体輻射の時も実は同じような考え方をしていたのである）いろいろな理論的考察から二兆度弱の温度で生じると考えられた。太陽の中心の温度が約一千万度、地上では未だ核融合は実用化されていない。クォークグルーオンプラズマなどというものは、まさに机上の空論、理論物理学者の戯れにしか過ぎないのではないかと思われたとしてももったもである。しかし、この状態が10のマイナス23乗秒程度という極く極く短い時間であるが実際に地球上の実験室でつくられ、その性質が判明したのである。

それがどのようにして判明したか説明する前に、クォークグルーオンプラズマの宇宙の歴史における意義について説明しておこう。宇宙は最初は熱い火の玉であり、それが膨張・冷却して現在の宇宙に至ったとするビッグバン宇宙論が現在一般に信じられている。宇宙の最初の10のマイナス5乗秒程度は、宇宙はクォークグルーオンプラズマであったと考えられている。我々を構成する陽子や中性子はその時刻以降に出来たのである。原子核はその時にはまだ存在せず、現在存在する元素は宇宙がさらに冷える過程や、星たちが宇宙に誕生した後、超新星爆発という最期を遂げた際に生じたものである。こう考えれば、この世界に存在するすべてのものがクォークグルーオンプラズマと関係していると言っても決して大袈裟ではないだろう。

地上におけるクォークグルーオンプラズマと判明したその驚くべき性質

数兆度というような途方もない温度の世界はいかにして作られたのであろうか。温度を上昇させるに

は、出来るだけ小さな領域に出来るだけ多くのエネルギーを注入すればよい。つまり、可能な限り密な（相対性理論により、密度が高い＝エネルギー密度が高い）物質を衝突させればこの要請にかなうのである。それでは、地球上で最も密度が高いものは何であろうか？ いろいろな金属元素を思い浮かべられた方が多いと思うが、実は原子核である。これは、原子の極く一部を占めている原子核が原子の質量の大部分を持っていることから納得していただけるだろう。原子核の密度は1立方センチメートルあたりにすると、およそ 3×10^{14} グラム程度である。金のように大きな原子核（金の原子核は陽子と中性子合わせて197個からなる）を、非常に大きなエネルギーまで加速させて正面衝突させるのが、地上で可能な最も高いエネルギー密度、つまり最も高い温度を実現する方法である。2000年からアメリカのブルックヘブン国立研究所にある加速器、RHICで金原子核と金原子核の超高エネルギー正面衝突の実験が開始された。2008年に運転を開始したスイス・フランスの大型ハドロン衝突型加速器(LHC)でも、より高いエネルギーにおける鉛原子核と鉛原子核の正面衝突が計画されている。非常に高いエネルギーで原子核を衝突させると何が起きるのだろうか？ 原子核がそのように密な物体であるなら、衝突の瞬間に止ってしまうのではないだろうか？ 実際、このようなストーリーは半世紀程前にランダウとフェルミという大物理学者（ともにノーベル物理学賞を受賞）によって考えられたが、現在のRHICやLHCではエネルギーが十分高いので衝突する原子核は互いにすり抜けてしまうことがわかっている。その際、あいだに何も残さないのではなく、エネルギーを残していき、これが数兆度という超高温の物質になるのである。

現在までにRHICで得られたデータを総合的に検討すると、我々が未だかつて目にしたことがなかった、全く新しい状態が生成されたことは確実である。ただし、この状態は予想されたクォークとグルーオンがほぼ自由に飛び回っている状態ではなかった。

かなり専門的になってしまうが、そのような結果がどのようにして得られたか簡単な説明を試みたい。原子核はいつも真正面に衝突するのではなく、中心



図1：ブルックヘブン国立研究所の全景。奥に見えるリングの下にRHICがある。RHICの一周はおよそ3.8キロである。（ブルックヘブン国立研究所のホームページより）

と中心が同一軸上にない衝突も起こし得る。というより、こちらの方が普通なのである。例えば、ピンポン玉とピンポン玉が中心が少しずれて衝突して、（考えにくい）互いにすり抜けて飛んでいくような状況を考えてみよう。そうすると、2つのピンポン玉の配置から、あいだに生成されるエネルギー密度の高い部分の断面（衝突軸に垂直な面で切った断面）は細長いアーモンドのような形、つまり2つの円を中心を少しずらして描いた時の交わりの図形である。この時、この図形の短軸方向の圧力勾配は長軸方向より大きいので、この数兆度の物質は短軸方向により強く加速され、その結果が検出器で測定される粒子分布に反映されると考えられる。この粒子の非等方的分布の特徴から、この生成された物質の粘性（特にずれ粘性）の値を引き出すことが出来るのである。無次元化して粘性の大小を比較するために、粘性の値をエントロピー密度で割った値が使われることがある。この新しい状態に対して、ずれ粘性割るエントロピー密度の値は極めて0に近い値であることがわかった。値は確定していないが、0.1とか0.2というような程度の値であると考えられている。これは、今までに知られているいかなる物質よりも小さな値である。例えば水の場合は条件によるがだいたい数～数十という値である。粘性が小さいということ、液体がサラサラであるということは、実は液体を構成しているもの（今の場合はクォークとグルーオン、水の場合は水分子）同士が、強く相互作用をしているということである。ここは専門家でもなかなか直感が働かないところで、どうしても

自由ガスの方がさらさらな気がしてしまうが、実際は粒子間の相互作用が弱いと粘性は大きくなってしまふ。結局、クォークとグルーオンがほぼ自由に飛び回っている世界をつくらうとしたら、全く逆の世界が出来てしまったのである。ただし、クォークとグルーオンはもはやハドロン中に閉じ込められてはいない。クォークグルーオンプラズマがこのような世界であることを予測していた物理学者は誰もいなかった。宇宙初期の自然は誰もが予想しない性質を持っていたのである。ここに、物理学における実験の意義がある。実験物理学と理論物理学は互いに相補的であり、独立しては成立しないのである。仮に

これが実験を伴わない机上の空論であり続けられたら、我々は間違った認識を持ったままであったらう。この非常に小さなずれ粘性は、その後、ずれ粘性における下限の存在という数理物理学的予想をもたらし、ブラックホールや超弦理論との数学的關係も議論されて、原子核物理学、素粒子物理学、数理物理学全体を巻き込む一大研究分野となって進展が続いている。

最後に、記述の簡明性を優先して、一部厳密性を犠牲にした個所があることをお断りしておきます。読者のご寛容をお願いする次第です。

