

素粒子物理学から探る宇宙初期の状態の探索

筑波大学数理物質科学研究科博士後期課程 1 年 ○馬場 惇 (Atsushi BABA)
for WHOT-QCD Collaboration

概要

素粒子物理学の目的の一つに、物体の間に働く相互作用の種類や性質を探索することが挙げられる。現在、物体同士に働く力は 4 種類の相互作用で全て説明できると考えられており、そのうちの 3 種類については様々な現象に適用し、解くことで理解されてきている。本講演では、そのうちの強い相互作用と呼ばれる相互作用について着目する。強い相互作用を説明する理論は量子色力学 (Quantum ChromoDynamics, QCD) と呼ばれている。QCD はビッグバン直後の宇宙の状態の探索において非常に大きな役割を果たすことが知られている。そのため、近年では高温な状態での非平衡な性質の探索が理論と実験の両面から活発に行われている。

1 序論

1.1 素粒子と標準模型

素粒子物理学の目的は、自然の中に現れる最も基本的な粒子やその間に働く力（相互作用）を解明することである。現在、素粒子は物質を構成するクォークやレプトン、相互作用を媒介するゲージ粒子などが知られている。

例えば、物質を細かく分割していくと、原子や分子まで分割することができる。原子は原子核とその周りを回る電子で構成されている。ここで、電子は素粒子であると考えられている。一方で原子核はさらに細かく分割することができて、陽子や中性子から構成されていることが分かっている。これらは 20 世紀^{*1}前半までは素粒子であると考えられてきた。しかし、1964 年に陽子や中性子などを構成するクォークと呼ばれる粒子が提唱された。現在ではこのクォークが素粒子であると考えられている。

これらの粒子は、例えば高エネルギー加速器研究機構の HP [1] にあるように表の形でまとめられている。現在までに知られている素粒子とその相互作用をまとめて標準模型と呼ばれている。

標準模型の中では、基本的な相互作用として電磁相互作用、重力相互作用、強い相互作用、弱い相互作用の 4 つが存在すると考えられている。その中でも、強い相互作用を記述

^{*1} 20 世紀は 1901 年から 2000 年

する理論は量子色力学 (Quantum ChromoDynamics, QCD) と呼ばれており、原子核を構成するクォークとそれらを結びつけるゲージ粒子であるグルーオンの相互作用を説明する理論である。

1.2 宇宙の成り立ちと QCD

QCD はクォークとグルーオンの相互作用を記述する理論であるが、実はこれらは単体で観測することができない。どのような実験を行っても、人類はクォークを単独で観測したことがないのである。このような性質は、クォークが陽子や中性子に隠されている、という意味でクォークの閉じ込めと呼ばれて QCD の大きな特徴の一つである。

このように閉じ込められてしまっているクォークでも実は単体で現れるはずである、とされている状況がある。それは、超高温の状態である。具体的には、1 兆 °C 以上。このように極限の環境では、陽子や中性子からクォークが溶け出してくる。このような状態の変化を相転移という^{*2}。ちなみに、このようなクォークが溶け出した状態は名前がつけられており、クォーク-グルーオン・プラズマ (Quark-Gluon Plasma, QGP) と呼ばれている。

1 兆 °C 以上という超高温はもちろん我々の身近なところでは実現されていない。太陽ですら中心温度は 1500 万 °C 程度なのでまだ足りない。QGP が実現していた状況として、大きく分けて宇宙初期、ハドロン衝突実験、中性子星の内部の 3 つが考えられている。

この 3 つの中でも、今回は特に宇宙初期について注目したい。宇宙の歴史は、138 億年前のビックバンから始まったと考えられている。ビックバン直後から急速に膨張することで宇宙全体が冷えていき、元素の合成が始まり、星や銀河が形成され、現在の宇宙が出来上がった。宇宙の歴史の模式図が、例えば理化学研究所の HP [2] にある。

元素合成はおよそビックバン後約 10 分で始まったと考えられている。つまりこの頃にはもうすでに原子核が形成されており、クォークは閉じ込められてしまっている。そのもう少し前、およそ $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 秒の間に QGP になっていたと考えられている。その後は宇宙全体が冷えていくため、クォークが陽子や中性子に閉じ込められ、それらが結びつくことで原子核が形成し、元素の合成が始まる。つまり、QGP の解明をすることは、物質が生成される直前の状態を探索することにつながる。もう少しカッコよくいうと、QGP の研究をすることで現在宇宙に存在する物質の初期条件を探索することができる。

^{*2} 相転移というのは聞き馴染みがないかもしれないが、最も身近でよく取り扱われる例として、水がある。水は、0°C から 100°C では液体だが、0°C 以下まで冷やすと氷、つまり固体に変化するし、100°C 以上まで温めると水蒸気、つまり気体に変化する。このような状態の変化のことを相転移と呼んでいる。

2 本論

QCD を解くと、低温ではクォークが閉じ込められている状態となっているが、高温での QGP への相転移は 1970 年代には理論的にも実験的にもすでに知られていた。一方で、QGP の性質については長い間説明されていなかった。

2001 年に RHIC^{*3}で行われた実験で、QGP は液体のような性質を持つことが報告された。さらにいうと、その中でも粘性が極めて低い完全流体に近いような性質を持つことがわかった。実はこの実験結果が出る以前は、クォークが束縛されずに自由に動き回る、気体のような性質を持つのではないかと思われていた。QGP の流体としての振る舞いは想定外の性質だったため、この実験を皮切りに QGP の粘性に関する研究が活発に行われ始めた。^{*4}

QGP の理論的な研究としては、QCD を“解く”必要がある。QCD のは、相互作用が強いという性質を持つため、素粒子理論の研究で広く用いられている摂動論^{*5}が使えないという問題がある。これに対して非摂動論的な手法として、こうし QCD という手法が広く用いられている。これは、QCD を非摂動論的に解くためのほぼ唯一の方法である。この手法は時空間を格子状に区切る、つまり離散化してその上に QCD を構成する手法なので、コンピュータを用いた数値計算と非常に相性が良い。実際に格子 QCD を用いて粘性係数を計算したものが図 1 である。

2.1 Technical details

この節ではテクニカルな事項について 2 点だけコメントをする。ここまでの内容とは違って大学院生以上向けの内容となってしまうので、高校生はこの節は読み飛ばしてください。

2.1.1 粘性係数の計算方法

粘性係数は、物質の非平衡な現象についての性質である。一方で、格子 QCD での有限温度の計算は、大抵が虚時間形式に基づくものである^{*6}。虚時間形式での定式化は、平衡な統計力学を記述する。

^{*3} 相対論的重イオン衝突器 (Relativistic Heavy Ion Collider)。アメリカのブルックヘブン国立研究所にある加速器のこと。

^{*4} 気体は粒子同士が弱く相互作用をしている状態である。一方で流体は粒子同士が強く相互作用及ぼしあいながら集団運動をしている状態なので、全く違う振る舞いとなっている。

^{*5} 自由な粒子に対して摂動（小さな相互作用）を逐次加えていく近似手法

^{*6} 格子 QCD に置ける実時間形式の定式化は、保科君の講演で行われている。

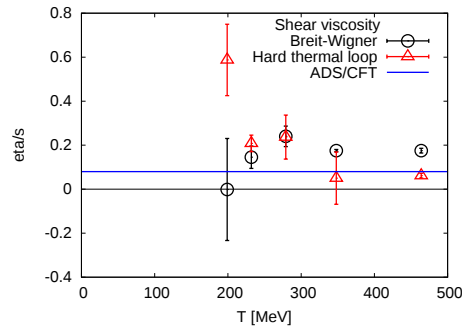


図1 [3] から引用。格子 QCD によって計算されたずり粘性 (share viscosity) を温度の関数としてプロットしたもの。丸と三角は、それぞれ異なるフィット関数による結果である。横軸の少し上にある線は AdS/CFT による結果を参照値として引いてある。これはまだ研究途中の結果であり、解析を進めることで結果が変わる可能性がある。

このように、平衡な理論から非平衡な現象を推察するための手法として、線形応答理論がよく用いられる。線形応答理論を用いて導かれた輸送係数とカレントの相関関数の関係式を、久保公式と呼ぶ^{*7}。ただし、久保公式では粘性係数と実時間の相関関数が結びついているので、これを虚時間のものと結びつける必要がある。これを解決するために、スペクトル関数を経由して解析接続を行なった^{*8}。細かい計算などについては [3] にあります。

2.1.2 格子 QCD と gradient flow

格子 QCD は非摂動論的な正則化に過ぎない。そのため、くりこみは必要である。このくりこみ係数についても、非摂動論的なものを用いる必要がある。

今計算したいのはエネルギー運動量テンソル (EMT) の相関関数である。EMT は場の理論では並進対称性の保存カレントとして定義される。一方で、格子正則化は並進対称性を破ってしまっているため、破れた真空の寄与を取り除くために加法くりこみが必要になる。そのため、格子 QCD において正しく繰り込まれた EMT を得るのは非常に大変であった。これまではこの困難のためにクエンチ近似^{*9}による解析がメインで行われてきた。

これに対して近年、gradient flow [4–6] というものを用いた方法が提案された [7, 8]。この方法によって、従来の方法よりも非常に簡単に full QCD での EMT のくりこみを行うことができるようになった。本研究でも、この方法を用いて EMT のくりこみを行なった。

^{*7} ここでは、カレントとしてエネルギー運動量テンソルを用いることで粘性係数を計算している。

^{*8} この解析接続において、有限のデータから連続な関数を得る、ill-posed な逆問題を解く必要がある。現在はこの問題に対してスペクトル関数の形を適当に仮定してフィットする、という方法を取っている。

^{*9} フェルミオンのループの効果を無視するという近似。

3 結論

格子 QCD を用いて、粘性係数の計算を行なった。この結果は、full QCD による世界初の計算結果である。ずり粘性については、誤差の落ち着いた結果が得られた。一方で、体積粘性 (bulk viscosity) という種類の粘性もあるが、こちらについては誤差が非常に大きくなってしまっているため、さらに統計数を増やして解析する必要がある。これらの結果はまだ完全に解析を終えたものではないため、今後さらなる解析を進めていき最終的な結果を出す必要がある。

参考文献

- [1] <https://www.kek.jp/ja/newsroom/2012/08/31/1800/>
- [2] <https://www.nishina.riken.jp/research/theory.html>
- [3] Y. Taniguchi, A. Baba, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, T. Shimojo, A. Suzuki, H. Suzuki, T. Umeda, [arXiv:1901.01666 [hep-lat]]
- [4] M. Lüscher, *JHEP* **1008**, 071 (2010), Erratum: [*JHEP* **1403**, 092 (2014)], [arXiv:1006.4518 [hep-lat]].
- [5] M. Lüscher and P. Weisz, *JHEP* **1102**, 051 (2011) [arXiv:1101.0963 [hep-lat]].
- [6] M. Lüscher, *JHEP* **1304**, 123 (2013) [arXiv:1302.5246 [hep-lat]].
- [7] H. Suzuki, *PTEP* **2013**, 083B03 (2013), Erratum: [*PTEP* **2015**, 079201 (2015)], [arXiv:1304.0533 [hep-lat]].
- [8] H. Makino, H. Suzuki, *PTEP* **2014**, 063B02 (2014), Erratum: [*PTEP* **2015**, 079202 (2015)], [arXiv:1403.4772 [hep-lat]].

馬場惇

1994 年 2 月生まれ。公文国際学園高等部卒業、首都大学東京卒業、筑波大学大学院博士前期課程終了、同大学院数理物質科学研究科博士後期課程第 1 学年在籍中。格子 QCD の研究がしたくて筑波大に入り、やってみたら楽しかったので博士後期課程までできました。専門は格子 QCD。