

# 宇宙創成物理学概論第1回レポート

C3SM2016 木村佑斗

2023年12月25日

## 1 ダークマターの存在

### 1. 「渦巻銀河の天体の回転速度から」

望遠鏡で渦巻銀河の内側と外側の天体を観測し、それらの回転速度（銀河の中心に対する公転速度）を計算した。渦巻銀河は中心がとても明るいので天体が密集していて重力が強い。つまり、渦巻銀河は外側より内側の方が重力が強いはずだ。したがって、重力と遠心力の釣り合いにより、外側の天体の方が速度が遅いはずである。確かに遅いのだが、予想された速度よりも早かった。つまり外側の重力が見える物質だけでは説明がつかず、外側も内側と同じくらい重力が強いことになる。これは目に見えない（観測できない、光らない）物質の存在を示唆した[?]

### 2. 「重力レンズによって」

実際に観測された像(重力レンズによって1つの天体が2つや4つに見える)の離れ方が、通常の物質だけで計算された重力レンズで生まれた像の離れ方より大きかった。このことはダークマターの存在を示している。

### 3. 「宇宙マイクロ波背景放射から」

原子ができたことで（束縛されていない荷電粒子が無くなったことで）光子は誰にも邪魔されずに進むことができるようになった。原子ができた時期を「再結合期」もしくは「宇宙の晴れ上がり」という。これ以降は光子は荷電粒子に散乱されることがなくなったので、真っ直ぐ私たちの望遠鏡に向かってこれた。再結合期に宇宙の中の物質と放射が振動し始めた。これを「バリオン音響振動」という。物質の重力はものを内側に引き入れようとし、放射の圧力はものを外側に押し出すように働いた。それぞれの力が互いに拮抗していたので振動が起きた。この時、ダークマターの総量が内側に引っ張る重力ポテンシャルの強さを決定した。この影響が振動の形成につながったので、その振動パターンからその時に存在していたダークマターのエネルギー密度を決定できる[?]

## 2 ハドロン物理学における重要な未解決問題

ハドロン物理学において、重要な課題は2つある。1つはクォークの閉じ込めの問題、2つ目はカイラル対称性の破れによるハドロンの質量獲得機構である。クォーク閉じ込めの数学的証明に関しては、米国のクレイ社が提示している21世紀の数学の7大問題の1つとして知られている[?][?]。なぜクォークは単体で存在できないのか、この機構はまだ解明されていない。私の研究室の教授の大西宏明先生は「閉じ込めの機構を実験だけ

で明らかにすることは多分できないんじゃないか。」と言っていた。というのも、実験では直接検出できるのはハドロンだけだからだ。また、QGP(クォーク・グルーオン・プラズマ)という状態がある。これは高温または高密度で実現される。この状態はクォークが閉じ込められていない状態とされているが、これは高温・高密度がゆえにハドロンが互いに重なり、何が1個のハドロンなのか区別できなくなっているだけかもしれない。とにかく、本質的にクォーク閉じ込めの機構を解明するための実験的方法はわかっていない。しかし、少なくともハドロンではない物質(クォークマター)の存在は実験的に確認されている。その根拠は「ジェット」の消失現象である。たとえば電子-陽電子衝突や陽子-反陽子衝突を高エネルギーで行うとクォーク-反クォークが生成される。重心系で見ればクォーク-反クォークはback to backに飛んでいく。(反)クォークは単体では存在できない(これがまさに閉じ込めなのだが)のでごく短い時間で真空中の反クォークと出会いメソンになる。そして検出される。ここは私はまだ理解していないが重心系で $0^\circ$ と $180^\circ$ 方向に検出される事象が集中する(これをジェットと言っている)。しかし、金-金衝突ではこの検出事象が有意に現象する。これは金-金衝突でできたQGP(クォーク・グルーオン・プラズマ)状態中でクォークがエネルギーを失い、検出器まで到達できないことから説明できる。陽子-金衝突ではジェットは消失しないことから、原子核中ではクォークはエネルギーを失わないとわかっている。このように新たなことはわかってきているが、閉じ込めと関連しているのかはよくわかっていない。

2つ目のカイラル対称性の破れによってクォークはハドロン中で大きな質量を得ている。u,dクォークは元々3MeVほどだが、ハドロンを構成しているu,dは300MeVほどになる。最初に3MeVはヒッグス粒子が与え、ハドロン中の+297MeVはカイラル対称性が破れたQCD真空との相互作用によって生じている、と理論的に言われている。QCD真空が高密度だったり、有限温度のクォークで満たされるとハドロンの質量に変化が見られるかもしれない。これをカイラル相転移というが、クォーク閉じ込めと似ている。実際、格子QCDシミュレーションでカイラル相転移とクォーク閉じ込め相転移の関係が調べられている[?]。

これらの我々が興味ある領域は実験室で作れても直接検出はできない。したがって、理論・シミュレーションで予言されたパラメータを再現するのかもしれないのかを確かめることがこのテーマ内での実験の役割である。

今まで述べてのはハドロン物理の最も大きな問題だが、もちろんこれ以外にも課題はある。私がこれから関わりそうなテーマはK中間子束縛状態である。最も簡単な例は $\Lambda(1405)$ で、これはudsでできた粒子としてクォークモデルを適用してもエネルギーレベルを説明できない粒子(状態)である。 $\Lambda(1405)$ は $K^-$ と陽子の束縛状態ではないかと考えられている( $K^-p$  bound state)。このようなK中間子束縛状態を調べるために、 $K^-$ のビームを標的粒子(重水素や $^3\text{He}$ など)に当てて、出てきたガンマ線や他の粒子の運動量・エネルギーから中間状態のエネルギー状態を再構成する。このK中間子束縛状態を詳しく調べることで、中性子星内部のような高密度物質の状態方程式の決定にもつながる。

## 参考文献

- [1] 「宇宙96%の謎」佐藤勝彦著
- [2] 「ダークマターと恐竜絶滅」Lisa Randall 著
- [3] 「ハドロン物理学入門」永江知文著
- [4] Clay Mathematics Institute : <http://www.claymath.org/millennium-problems>