

宇宙創成物理学概論 第5回 レポート

C3SM2016 木村佑斗

2023年6月1日

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 [1][2]。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。この閉じ込め機構のせいで、実験では直接検出できるのはハドロンだけだ。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° と 180° 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 [1]。

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わから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で、この世の我々人類を含めた物質はどのように今の質量を獲得したのかに直接関わるものである。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 ^3He 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。この宇宙の普通の物質はほとんど u と d だけで構成されている。u と d の質量はほとんど等しく、裸の(つまりハドロンの衣を着ていない)質量は約 3MeV であるのに対し、s クォークは約 100MeV である。s を実験に取り入れることで、u と d だけからなる安定な世界からの”ズレ”を調べることができる。この”ズレ”によって例えば先ほどの中性子星内部のような高密度状態の状態方程式のパラメータが得られ、宇宙が高密度だった頃の時間発展のヒントが得られるかもしれない。

参考文献

[1] 「ハドロン物理学入門」永江知文 著

[2] Clay Mathematics Institute : <http://www.claymath.org/millennium-problems>