

暗黒物質の素粒子はとらえられない

中西 襄^{*1}

重力の源となっている暗黒物質は確かに存在している。それゆえそれを構成している素粒子は、何らかの方法で粒子としてとらえられるはずだと信じられているようだ。しかし、そうではない可能性があることを非可換ゲージ場の量子論の枠組みに基づいて指摘する。

宇宙に通常のバリオン物質の数倍程度という大量の暗黒物質（ダークマター）が存在することはほぼ確実になっている¹⁾。暗黒物質を構成する粒子を直接とらえようとする実験が行われるようになって久しいが、いまだにそれらしきものは全く見つかっていない²⁾。筆者はそれは原理的に不可能なことを試みているからだろうと思う。今までの物理学における分析的原則に従えば、そこに物があれば、それを構成している粒子があり、その粒子の存在は何らかの手段をもってとらえることが可能である。だがこの信念はいつでも正しいといえるだろうか。ブラックホールは重力や電磁力を及ぼす何者かであるが、ブラックホールを構成する素粒子が直接観測できるとは誰も思わない。暗黒物質もそれを構成している素粒子は原理的に観測不可能なものと考えるのが自然ではないだろうか。もちろんブラックホールとは違い、暗黒物質は地球上にもあると推定されるので、古典物理学的な意味でとらえられないのではなく、量子物理学特有の「観測問題」に関連した理由に基づいて観測不可能になると考えるのである。

暗黒物質は、銀河形成時期に非相対論的運動をすることから、ニュートリノのような軽い粒子ではありえない。電気的に中性であることから、もちろん荷電レプトンではない。そしてまた、宇宙線粒子との強い相互作用が観測されていないことからハドロンではない。それゆえ一般に、標準理論に含まれていない素粒子から構成されていると信じられている。従来、それは WIMP、すなわち Weakly Interacting Massive Particles であろうと考えられてきた。だが最近になって、SIMP すなわち Strongly Interacting Massive Particles のほうがよいのではないかという説も現れた³⁾。SIMP なら、暗黒物質の存在量がバリオンのそれと同じオーダーという事実を単なる偶然のせいになくしてよい。WIMP にせよ、SIMP にせよ、それを定式化するだけのために、標準理論の粒子の影武者みたいな「ダーク粒子」の世界の存在を仮定するということが行われている。しかしこのアイデアは、分からないものを別の分からないものに置き換えただけというこ

^{*1} 京都大学 (数理解析研究所) 名誉教授. e-mail: nbr-nak@trio.plala.or.jp

とになってしまっていないだろうか。非常な成功を収めた素粒子の標準理論の枠組みからできるだけ逸脱することなく、暗黒物質の粒子の直接観測不可能性を説明するのが望ましいであろう。このような観点から、筆者は7年前「暗黒物質のバラバラ・クォーク雲説」を唱えた⁴⁾。だが残念ながら、どうも多くの人に理解していただけなかったようなので、もう一度ていねいに説明したいと思う。

よく知られているように、標準理論ではクォークは閉じ込められているものとする。閉じ込めは通常クォーク・反クォークの系でダイナミカルな議論が行われるが、しかしこれでは、カラーを持つすべての状態が観測されないということの説明にはなりえない。カラーを持つ粒子が全く観測されないという、電荷の保存則にも比すべき極めて定性的な事実を説明するのは、複雑なダイナミカルな議論によってではなく、もっと普遍的で明晰な原理であるべきであると筆者は信じている。カラーを最も簡単にかつ完全に閉じ込めるには、QEDにおいて縦波光子、電弱理論のヒッグス機構において南部・ゴールドストーン粒子^{*2}を閉じ込めたのと同様に、補助条件を用いるのが最も自然であろう。つまり、九後・小嶋条件に加えて、カラー・チャージ Q^a を作用させてゼロになる状態を、物理的状態 $|\text{phys}\rangle$ と定義するのである。こうすれば、カラーのある状態は非物理的だから、観測にかかることはない⁵⁾。

このように物理的状態を定義したとき、「Behind-the-Moonの問題」が起こらないかという危惧がある。つまり、たとえば電荷がゼロの状態のみを物理的状態と設定したとしても、ここに電子があって月の裏側に陽電子があれば物理的状態になるから、実質上電子の出現を禁止できない。ところがこのことが起こりうるのは、じつは対称性がアーベリアンであるときの特殊性なのだ。カラーのときのように非可換な対称性の場合、クォークのようなノントリヴィアルな表現から、無色というトリヴィアルな表現を構成するには、単純積ではなく、積の一次結合を用いなければならないからである。無色の状態における3つのクォークの波束が同じ位置にあれば、もちろんバリオンとして観測されるであろう。しかし、3つの波束の位置が全く異なっている場合には、全体として無色であっても、個々の波束の直積の状態ではないから、それぞれのクォークが単体として観測されることはない。この意味で閉じ込めが実現しているのである^{*3}。つまりQCDの非可換性に起因する「量子もつれ」が不可避であるため、局所的にクォークを単体として取り出せないのである。

この理論の普通と異なるところは、物理的部分空間 $\{|\text{phys}\rangle\}$ が漸近場に関してフォック構造を持たないことである。それゆえこの理論を実験的に検証する

^{*2} ヒッグス機構の共変理論では、ゴールドストーンの定理により NG 粒子の存在は不可避である。 π - μ 崩壊は、角運動量保存則に従い、スピン1のWボソンではなくスピン0のNG粒子を通じて起こる。NG粒子はノルムが正、すなわちゴーストではなく、れっきとした素粒子なのである！

^{*3} 角運動量の場合は非可換な対称性であるが、角運動量のノントリヴィアルな状態でも物理的状態であって、それを実験のセットアップに利用できるから、観測が可能になるのである。

のには、exclusive reactions の断面積の総和が、対応する inclusive reaction の断面積より真に小さいようなハドロンの高エネルギー反応があるかどうかを見ればよい。カラー閉じ込めの詳しい考察および数学的定式化については、原論文を参照していただきたい^{5),6)}。

暗黒物質の議論に戻ろう。上に述べた波束の位置が全く異なる 3 つのクォークから作られた無色状態は、定義から明らかに物理的状态ではあるが、それぞれのクォークが観測にかかることはない。ビッグバン宇宙のはじめにおいて、バリオンになり損ねた u クォークと d クォークが大量に残ったと考えるのは不自然ではないであろう。こうしてできたと考えられる物質としては、たとえば u,d,d が分子のようにではなく、O 原子、H 原子、H 原子が均等に分布する液体の水のような感じの、バラバラなクォークでできた、全体として電氣的に中性の雲みたいなものをイメージしたらいいのではないかと思う*4。上述の議論から明らかのように、このバラバラ・クォークの雲を構成する個々の粒子をとらえることは原理的に不可能である。しかしながら、それを古典的な物質としてとらえることは可能である。とくに重力に関しては、普通の物質となんら変わるところはない。したがって重力からのみその存在が帰結されている暗黒物質と同定するのは、極めて自然であろうと思う。なお、暗黒物質をクォークだとする仮説は、従来、宇宙線粒子との電磁相互作用や強い相互作用が観測されていないという事実により排除されてきたが、ここで述べた仮説に基づけば、その反応全体が非物理的な過程になるので困難にはならない。クォークは「単体としては実在しない」のである。

もしもここで述べた仮説が正しければ、カラーの閉じ込めと暗黒物質の正体という現代物理学の 2 大問題が一挙に解決することになるばかりでなく、「実在」という概念を深刻に考え直さなければならないという哲学上の問題も提起することになるわけだ。

このごろの若い人の中には、非可換ゲージ場の量子論は経路積分でしか定式化できないみたいに思っている人があるようだ。もちろんこれは全くの誤解で、九後・小嶋理論という立派な共変的正準形式の非可換ゲージ理論が存在する。ここで述べた仮説のキーポイントとなる補助条件の設定は、経路積分法では導入できない。したがって、バラバラ・クォークの雲の暗黒物質仮説が正しければ、オペレーター形式と経路積分形式との違いを実体のレベルで確立することにもつながる。

*4 d クォークが安定かどうかはよくわからないが、とりあえずこの雲の状態では d クォークが安定であるものと仮定する。もっと他の可能性もあるかもしれない。要するに、個々ではカラーがあって非物理的だが、全体では無色でありかつ電氣的に中性であればよい。

- 1) 松本重貴・瀬波大土, 日本物理学会誌 **63** (2008), 265.
- 2) 日経サイエンス 2015年10月号 (暗黒物質特集).
- 3) Y. Hochberg, E. Kuflik, H. Murayama, T. Volansky and J. G. Wacker, arXiv:1411.3727v2 [hep-ph] (2015).
- 4) 中西襄, 素粒子論研究 **116** (2008), 148.
- 5) N. Nakanishi and I. Ojima, Prog. Theor. Phys. **71** (1984), 1359.
- 6) N. Nakanishi and I. Ojima, Prog. Theor. Phys. **72** (1984), 1197.