

「超光速ニュートリノ」を相対論と両立させるには

中西 襄^{*1}

9月23日の超光速ニュートリノの発見の報道は、まことに劇的であった。本当に超光速粒子が存在するのだろうか^{*2}。実験の報告を要約すると次のようである。

OPERA ニュートリノ実験グループは²⁾ CERNの加速器を用いて作った μ ニュートリノ・ビームを放射し、730kmはなれたイタリアのGran Sasso地下実験室で検出した。GPSを用いて精密測定されたそのニュートリノの速さ v は、真空中の光速 c の観測値を超えていて、

$$(v - c)/c = (2.48 \pm 0.28(\text{stat.}) \pm 0.30(\text{sys.})) \times 10^{-5}$$

であった。

この結果は、SN1987Aの超新星からのニュートリノの速さが光速と 10^{-9} のオーダーの誤差で一致していたこと³⁾と矛盾しているように見える。ただ、超新星からのニュートリノのエネルギーは10MeV程度の低エネルギーであるのに対し、彼らのニュートリノのエネルギーは17GeVの高エネルギー・ニュートリノであるから、同一物ではないとは言える。しかしニュートリノにとってはいずれもウルトラ相対論的エネルギー領域なので、その値に依存してこれほどまでに速さが異なるのは不自然である。

現状では、大方の物理屋はOPERAグループの実験結果の正しさを疑っているようで、もちろんその可能性が一番大きいであろう。しかし、それならばどうしてOPERAグループがそんなミスを犯したのが解明されなければならない。他の実験グループによる追試が待たれるところである。しかし追試が行われるまで黙って指をくわえているのも能のない話なので、この実験結果をとりあえず正しいものと仮定して、相対論と矛盾なく説明する物理的可能性について考察してみた。

以下、OPERAの結果も相対論も間違っていないという大前提で議論する。その場合、もしニュートリノのような普通の素粒子が真に超光速で走るとすると、原理的に未来から過去に情報

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

^{*2} 相対論は超光速粒子の存在を禁止はしていないが、超光速粒子が光速以下に減速されることは許さない。超光速粒子はタキオンと呼ばれ、純虚数の質量を持つ粒子とされる。これは古典的には可能であるが、超光速とコンシステントに量子化することはできない¹⁾。波動方程式による波の伝播は最高階の微分の形で決まり、質量項の符号には依らないからだ。実際タキオン場の4次元交換関係の Δ 関数は、空間的方向で0である。それで $\text{Re}\Delta^{(1)}$ を用いた量子化が提起されたことがあるが、この関数は時間的方向でも0にならないので、タキオン場の正しい交換関係ではありえない。

を伝達することが可能になり、因果律に反する。それゆえ、矛盾を避ける唯一の方法は、「真空中の光速」としての観測値 c_0 は相対論で用いている基本定数としての「真の真空中の光速」 c とは異なると考えることであろう。そうすれば OPERA の結果は $c_0 < v < c$ と理解され、問題はなくなる。それではなぜ $c_0 < c$ なのか。これへの回答として考えられるのが、ダークマターの存在である。宇宙に満ちていると考えられているダークマターが、もし媒質のように働くならば、光は媒質中では伝播速度が落ちるから、自然に説明がつく。

ダークマターの候補としては、よくニュートラリーノのような中性の新素粒子が想定されるが、中性の粒子で構成されたダークマターは媒質の役割は演じられない。普通の物質のように巨視的には中性だが、微視的には荷電素粒子から構成されている物質でなくてはならない。私は、以前にダークマターは観測不可能なバラバラクォーク雲であろうという説⁴⁾を唱えたが、これならクォークが荷電素粒子だから媒質の役割を演じられるであろうと思われる。以下、この論説から引用する。

* * *

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ではなく、もっと普遍的で明晰な議論であるべきであろう。カラーを最も簡単にかつ完全に閉じ込めるには、QEDにおいて縦波光子を閉じ込めたのと同じ方法を用いればよい。つまり、カラーチャージ演算子を作用させてゼロになる状態を、物理的状态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。

このように物理的状态を定義したとき、「Behind-the-Moonの問題」が起こらないかという危惧がある。つまり、たとえば電荷ゼロの状態のみを物理的状态としても、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态になるから、実質上電子の出現を禁止できない。ところがこのことは、じつは対称性がアーベリアンのときの特殊性なのである。カラーのときのように非可換な対称性の場合には、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。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が、3つの波束の位置が全く異なっている場合は、全体として無色であっても、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。

この理論の普通と異なるところは、物理的部分空間が漸近場に関してフォック構造を持たないことである。カラー閉じ込めの詳しい考察は、小嶋氏との共著論文で行なったので、そちらを参照していただきたい^{5),6)}。

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、観測にかかることはない。また宇宙のはじめにできたとき、安定性から中性子雲が出来るであろうから、電磁気的にはとらえられないであろう。このバラバラ

なクォークでできている中性子的な雲は、もちろん重力に関しては普通の物質と変わるところはない。

* * *

上記の論説では、ダークマターをすべてこのバラバラクォーク雲でもって説明しようと考えた。その立場のままでは、OPERA グループの実験結果が説明できれば大変いいのだが、SN1987A の観測結果³⁾との整合性をも考慮すると、これはどうも無理なようだ。そこで一歩後退して、今回は OPERA グループの実験結果と相対論との整合性についてだけに話を限定し、ダークマターをも同時に説明することは諦める。

超新星からのニュートリノの速さはほぼ光速である。この「光速」を c_0 と同定すると、ニュートリノ質量が $m = E\sqrt{1 - (c_0/c)^2} \sim 85\text{keV}$ と大きくなってしまい、1eV 以下という実験事実と合わない。従ってこの「光速」は c と考えなければならない。ということは、大マゼラン星雲からの道のりの大部分にはバラバラクォーク雲はほとんど存在しないはずということになる。実際の観測によれば、光の到達はニュートリノの到達からわずか 3 時間後であったので、 c_0 で走った距離はせいぜい 10 光年のオーダーということになる。従って、バラバラクォーク雲は星などの密度が大きい天体の近傍でのみ多く存在すると考えなければならない。バラバラクォーク雲は、粒子として観測されないこと以外は通常の物質の気体のようなものだから、重いものの近くに集まるのは自然であろう。

OPERA グループの実験に対する理論的批判が早速現われた⁷⁾。もし実際に超光速ニュートリノが放射されたのであれば、途中で制動輻射により電子陽電子対が多量に生成されてエネルギーを失うはずだというのである。この議論は、超光速なら

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu + \text{something}$$

というプロセスが運動学的に可能になるという主張に基づいている。しかし、ここで考えたようにもし「超光速」が相対論の意味での真の超光速でないのであれば、ニュートリノの静止系がとれるから、このようなプロセスは運動学的に不可能になる。

SN1987A 超新星のデータとの整合性の困難について議論していただいた九後氏に感謝する。

文 献

- 1) N. Nakanishi, Prog. Theor. Phys. Suppl. No.51 (1972), 1; Sec. 17.
- 2) T. Adam et al., arXiv:1109.4897 [hep-ex].
- 3) K. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. **58** (1987), 1490.
- 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.
- 7) A. G. Cohen and S. L. Glashow, arXiv:1109.6562 [hep-ph].