

## “ニュートリノ”は光速より早いのか？ The velocity of "Neutrino" is faster than "Light" or never so

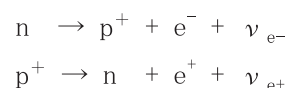
藤原 昇  
FUJIWARA Noboru

最近、素粒子の一つであるニュートリノの速度が光速より早いとの観測結果が発表され二つの意味で話題になっている。一つは実験事実の信頼性についての話題、他の一つは過去へ時間が戻って行く SF 的意味での話題である。ここでは前者の話題として、今回の実験結果と過去の観測事実及び実験事実との間の矛盾に触れることにより実験事実の信頼性は極めて低いことを指摘する。特に 1987 年の超新星爆発によって放出された光とニュートリノの観測速度との対比を中心に述べる。

### 1 “ニュートリノ”とは？

最初にニュートリノ（中性微子  $\nu$ ）について簡単に紹介する。良く知られているように物質の化学反応の最小単位は原子である<sup>1)</sup>。原子は原子核の周りを電子 ( $e^-$ ) が回っている構造である。その原子核は陽子 ( $p^+$ ) と中性子 ( $n$ ) の集まりで、負の電荷をもつ電子の数と正の電荷をもつ陽子の数は同じで、原子は電氣的に中性である。

昨年 3 月 11 日に起きた事故で話題になった原子炉は、ウランの核分裂で放出されるエネルギーを利用している。原子核が分裂したり融合したりする核反応は、中性子が陽子へ、又は陽子が中性子への転化を伴う。次の式が示すように、中性子が陽子に、または陽子が中性子に変る際に、電子とニュートリノ ( $\nu$ ) が放出される。



$e^-$  は電子、 $e^+$  は陽電子（電子の反粒子）である。 $\nu_{e^-}$  は電子ニュートリノ、 $\nu_{e^+}$  はその反粒子である。

ニュートリノは電荷を持たず他の粒子との相互作用は極めて弱い（弱い相互作用）。そのほとんどは地球を何も無かったかの如く通り抜ける。中性子も電氣的に中性だがこれは陽子や中性子との間で核力と呼ばれる極めて強力な相互作用をする（強い相互作用）。電荷と電荷との間の相互作用は電磁相互作用と呼んでおり核力より二桁弱い。化学反応は電磁相互作用による反応である。

陽子や中性子は電子とともに素粒子と呼ばれていたが、1974 年、高エネルギー実験によりチャームクォーク ( $c$ ) やその他のクォークが発見され<sup>2)</sup>、陽子や中性子などはクォークで構成されていることが実証された。陽子や中性子はアップクォーク ( $u$ ) とダウンクォーク

ク (d) で構成されている。結局、我々の周りの物質は全て電子、u クォーク及び d クォークの三種の基本粒子の集合体である。実に多様な物質が存在するがそれはこれ等 3 種の組み合わせ方の違いによる<sup>1)</sup>。

小林、益川の素粒子標準理論<sup>3)</sup>によると、この宇宙は 6 種のクォークと 6 種のレプトン (電子やニュートリノ) 及びそれぞれの反粒子で構成されている。この理論は実験的に実証され、その功績により 2008 年ノーベル物理学賞が贈られた。話題のニュートリノは上記式に出てくる電子ニュートリノの他にミューオンニュートリノ及びタウニュートリノの 3 種 (それぞれの反粒子を入れて 6 種) 存在する。これら粒子の全てが現在の科学技術により人工的に生成可能である。ニュートリノの質量は極めて小さく電子のその一万分の一以下である。

さてニュートリノに関する前置きはこれぐらいにして話題の実験に移る。

## 2 発表された実験事実

2011 年 10 月 20 日、「光速より早いニュートリノが発見された」という実験結果がオンライン出版の形で Nature<sup>4)</sup> 及び Preprint<sup>5)</sup> に発表された。その内容は以下の通りである。

スイスのジュネーブ郊外にあるヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) の高エネルギー粒子物理研究所から発射されたニュートリノ粒子を、CERN から 730 km つまり光速で 2.44 ミリ秒離れたイタリアのラクイラ (L' Aquila ローマの東北東約 50km) の近くにあるグランサッソ国立研究所 (Gran Sasso Laboratory) で測定したところ“ニュートリノの速度は光速よりも早い”との発表である。

原子核や素粒子の実験設備は途方もない予算が必要で、ヨーロッパでは 1954 年、それぞれの国が出資して一つの共同研究所を設立したのが CERN である。今から 40 年ほど前、私もここを訪問している。日本では、筑波に設置している国立高エネルギー加速器研究機構がこの分野の研究センターになっている。

話を元に戻して、ニュートリノの速度  $v$  と光の速度  $c$  との関係は次の通りであった。

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

時間換算で 730 km を光速で 2.44 ミリ秒かかる時間よりも

$$60.7 \text{ ns} \pm 6.9 \text{ ns}(\text{stat.}) \pm 7.4 \text{ ns}(\text{sys.})$$

だけニュートリノが早かったとの結果である。ここで (stat.) 及び (sys.) はそれぞれ測定の統計誤差及び系統誤差、ns (ナノ秒) は  $10^{-9}$  秒である。系統誤差は例えば CERN のニュートリノ発射地点とグランサッソ国立研究所の測定地点との距離の見積もり誤差などである。統計誤差と系統誤差が独立だとすれば両者を組み合わせると時間の標準偏差は 10.1 ns で

ある。3年間、150,000回にわたる実験結果（16,000個のニュートリノ）を解析して得られた値である。

この国際共同プロジェクトの名前は OPERA (the **O**scillation **P**roject with **E**mulsion-**T**racking **A**pparatus experiment) プロジェクトと呼ばれ、日本の名古屋大学グループも参加している。2006年から予備測定を実施し、2008年から本格的な測定を始めた。このプロジェクトの本来の目的はニュートリノの速度を測定することではなく、ニュートリノ振動を調べることにあった。既に述べたようにニュートリノには電子ニュートリノ ( $\nu_e$ )、ミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ ) 及びタウニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) の3種ある。もしニュートリノが質量を持ち、かつその質量が異なっていればこの三種が互いに入れ替わる現象が観測されるはずで、この現象を“ニュートリノ振動”と呼んでいる。ミューニュートリノビームを使ってタウニュートリノに変身する  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  の出現をとらえることでニュートリノ振動現象を直接検証しようとするのが OPERA 実験である。2010年6月には OPERA 初のタウニュートリノ反応候補を検出した<sup>6)</sup>。この研究の副産物としてニュートリノの速度が光速より早いと結論付けざるを得ない結果が得られた。

### 3 実験の概要

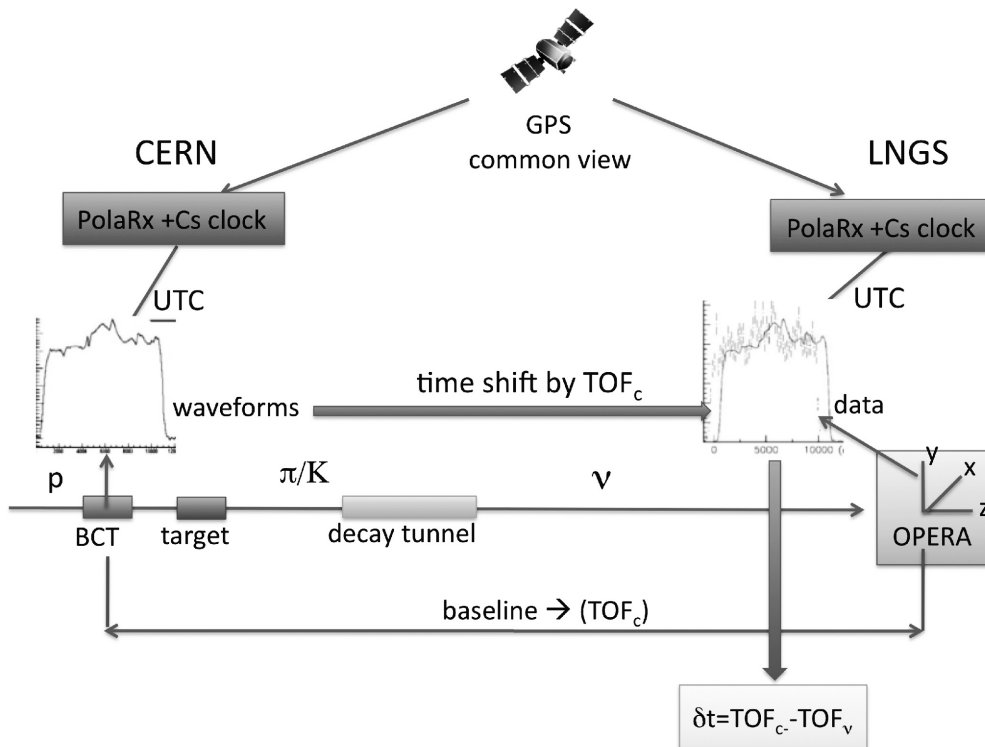


図 実験装置の概略 (文献4より)

図に実験設備の概要を示す<sup>5)</sup>。左側がジュネーブ CERN のニュートリノビーム生成側、右側が同地点から直線距離（地球は丸いので地下を通った直線距離）で 750 km 離れたイタリア・グランサツソのニュートリノ測定側である。両者を結んでいるのが図の GPS つまり Global Positioning System である。図で LNGS は Gran Sasso Laboratory、UTC は Coordinated Universal Time の略で両地域共通の時間を刻む時計システムである。BCT は Beam Current Transformer の略で、ニュートリノビームを生成する陽子ビーム強度の時間分布を精度よく測定する装置である。TOF は Time of Flight の略である。

### 3-1 CERN でのニュートリノビームの生成

ミューニュートリノの生成は CERN の直径 7 km の加速器 SPS (the Super Proton Synchrotron) で加速された 400 GeV の陽子を使う。エネルギーの単位 GeV (ギガエレクトロンボルト) は  $10^9$  eV で、1 eV は 1 ボルトの電位差で加速したときの電子の運動エネルギーである。SPS から取り出された陽子を炭素棒ターゲット (図の target) に当ててパイ中間子 ( $\pi$ ) を生成する。さらに  $\pi$  が図の decay tunnel で崩壊してミューオン ( $\mu$ ) と ミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ ) が生成される。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$$

$\pi$  の 99.9877% がミューオンとミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ ) に崩壊する。残りは電子と電子ニュートリノである。

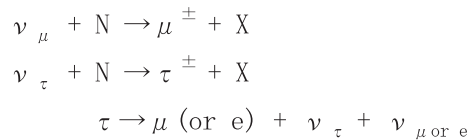
陽子ビームの時間分布は図の BCT で精確に測定される。陽子ビームはバンチしておりその時間分布の幅は  $10.5 \mu\text{s}$  で 50 ms 間隔で放射される。 $10.5 \mu\text{s}$  のバンチの中に  $2.5 \mu\text{s}$  及び 5 ns の周期構造がある。図の左側の waveform と記されている分布図が陽子の時間分布である。横軸が時間、縦軸が陽子の測定頻度である。この陽子で生成されたニュートリノの時間分布は陽子の  $10.5 \mu\text{s}$  の時間分布と同じはずである。この  $\nu_\mu$  を 730 km 飛ばしてイタリアのグランサツソ国立研究所でそれを検出する。ミューニュートリノの平均エネルギーは 17.5 GeV<sup>5)</sup> である。一般に化学反応は eV、原子核反応は MeV、素粒子反応は GeV のエネルギー領域で起こる。

### 3-2 イタリアのグランサツソでのニュートリノの検出

グランサツソ国立研究所の測定器は山中の地下深くにある。図右側の OPERA がニュートリノ検出器で、300 ミクロンの原子核乾板 (富士フイルム社)、鉛板 (1mm 厚) 及びプラスチックシンチレーターを交互にサンドイッチにした構造である<sup>7)</sup>。さらにその途中に磁場を使ったミューオンスペクトロメータが設置されておりミューオンのエネルギーと運動の方向 (x, y, z 方向) を同定できる。原子核乾板は荷電粒子が通過するとその軌跡が残り、ま

たプラスチックシンチレーターは荷電粒子が通ると蛍光を発する。ニュートリノは電氣的に中性なので直接検出することはできない。上記検出器の中でニュートリノによる反応で生成された荷電粒子を検出する。またニュートリノは弱い相互作用しかしない（極稀にしか反応しない）ので、1,250 トンもの大量の反応物質（兼検出器）が用意されている。

ニュートリノ振動の検証が実験の目的なので  $\nu_\mu$  が  $\nu_\tau$  に変身する事象を観測する。 $\nu_\mu$  と  $\nu_\tau$  の区別は、次式に示す通り、それによって起こる反応により区別する。



N は原子核、X は N の一個の陽子が中性子に、または一個の中性子が陽子になった原子核である。タウ ( $\tau$ ) は寿命が  $T = 2.9 \times 10^{-13}$  秒なので、生成されてから崩壊するまでに cT は 0.1mm 程度、エネルギーが高ければ相対論効果で数倍の飛程距離を残すので、生成点と崩壊点を検出することにより粒子の種類を同定する。 $\mu$  または  $\tau$  の観測された時間及び場所も精確に測定される。その結果が図の右側の data である。横軸が時間、縦軸がニュートリノの測定頻度である（青の測定データ）。図の実験が測定された陽子の時間分布を赤の実験で、光速で 730 km 走った時間 ( $\text{TOF}_c = 2.44$  ミリ秒) だけずらして表示している。ニュートリノの時間分布が左側、つまり時間の早い方に ( $\delta t = 60.7$  ns) ずれているのが表示されている。

このようにして  $\nu_\mu$  または  $\nu_\tau$  は荷電粒子に変換して検出する。すでに述べたように、 $\nu_\tau$ 、つまりニュートリノ振動が 1 例検出されている。その副産物が今回のテーマであるニュートリノの速度に関する結果である。グランサツソで検出されたニュートリノの時間分布と上記陽子ビームの時間分布を比較することによりニュートリノ速度を決定し、光速より早いと結論付けた。

#### 4 1987 年の大マゼラン星雲超新星 SN1987A からのニュートリノ観測の結果

1987年、大マゼラン星雲で超新星爆発が起き、それによる可視光線を含む多種の電磁波やニュートリノが観測された。ニュートリノは日本の KAMIOKANDE 検出器（岐阜県の神岡鉱山跡に作った地下検出器）で12個観測され<sup>8)</sup>（小柴昌俊がこの功績により2002年にノーベル物理学賞が贈られた）、またイタリアの IMB 検出器で8個観測された<sup>9)</sup>。SN1987A は南半球でしか見えなかったが、南半球では3等級程の明るさで肉眼でも十分確認できた。SN1987A は徐々に減光し、数か月で見えなくなった。ニュートリノの殆どは地球を素通りするのでその一部が北半球の日本やイタリアで観測できた。

さてこの場合の光とニュートリノの観測ではニュートリノが光よりも3時間先に観測されている<sup>10)</sup>。しかし超新星爆発の理論によれば光はニュートリノの数時間後に放射される

のでニュートリノの速度が光よりも早い事を意味しない。むしろ速度に関しては同じであった事を意味している。

地球から大マゼラン星雲までの距離は16.4万光年である。つまり SN1987A から地球までは光の速度で16.4万年かかるのである。もしグランサッソ国立研究所での観測が正しければ SN1987A からの光はニュートリノよりも4.06年±0.165年遅く届いているはずである。観測結果はそのようにはなっていない。グランサッソの観測結果は詳細な検討を重ねた結果の発表であるが、超新星 SN1987A からの光とニュートリノの観測結果とは完全に矛盾する。

## 5 誤差の問題

超新星からのニュートリノ測定と同じように、今回の実験で光も測定されていれば相対的な速度の差は比較的小さな誤差で測定できたはずである。CERN とグランサッソ間を結ぶ飛行経路は地下を通る直線コースなので光の測定は不可能である。従ってニュートリノ速度の絶対値を測定しなければならない。一般に絶対値の測定は相対値の測定に比べて極めて難しい。そもそもこの実験はニュートリノ振動の観測が目的で飛行時間の測定が目的ではなかった。

ニュートリノ速度の絶対値測定誤差の第一は 6.9 ns という統計誤差であるが、これについては異議を挟む余地はないだろう。解析に使われてイベントの個数は 16,111 個である。問題は系統誤差である。飛行時間測定に関連した系統誤差と飛行距離の見積もりに関する系統誤差である。今回の結果はこれらの誤差についても厳密な検討を行った結果系統誤差を 7.4 ns と見積もっているのであるが、問題が残るとすればこの系統誤差であろう。

放射線の飛行時間測定でまず基本になるのがCERNとそこから730 km 離れたグランサッソで同じ時間を数 ns の誤差で刻む時計がないといけない。この実験では GPS と Cs 原子時計を組み合わせる時間が決められている。相対的な時間測定の誤差は測定器に依存するが現在の科学技術では 1 ns 程度の時間分解能は十分ある。検出器の最も高い時間分解能は100 ps (1ps=10<sup>-9</sup> 秒) である<sup>11)</sup>。

またCERNとグランサッソの間の距離の決定精度が誤差に大きく影響する。10 ns の誤差は距離 2 m の誤差、60 ns が12 m に相当する。距離の測定には時間測定と同様 GPS が使われ、730 km に対して 2 m の誤差が見積もられている。この誤差のさらなる検討が必要であろう。

## 6 相対性理論との関係

特殊相対性理論によると静止系での時間間隔  $\Delta t$  は、速度  $v$  で動いている系から見れば次式で与えられる時間間隔  $\Delta t'$  となる。

$$\Delta t' = \Delta t / \{ 1 - (v/c)^2 \}^{1/2}$$

但し  $c$  は光の速度。一般に  $v$  は  $c$  より十分小さいので  $\Delta t'$  はほぼ  $\Delta t$  に等しい。 $v$  が  $c$  に近くなると  $\Delta t'$  は  $\Delta t$  より長くなる。光の速度に近い速度で飛んでいる素粒子はその寿命が静止系での寿命よりはるかに長く観測されることが実証されている<sup>1 2)</sup>。例えば宇宙から降り注ぐ  $\mu$  中間子の寿命は静止系で  $2.20 \times 10^{-6}$  秒である。これらの素粒子は光速に近い速度で降り注いでいる場合が多く我々から見れば寿命は遙かに長くなる。 $v$  を光速の 99% とすれば寿命は静止系の 50 倍に伸びる。

特殊相対性理論によれば、質量を持った粒子は光速を超えることができない。高エネルギー加速器で電子を加速する場合、電子は軽いので（エネルギー換算で 0.5 MeV の質量）100 MeV 程度でほぼ光速になる。しかしさらなる加速が可能である。つまり速度は光速を超えられないが質量がどんどん増加する。静止質量  $m_0$  の粒子が速度  $v$  で走るとその質量  $m'$  は次の式で与えられる。

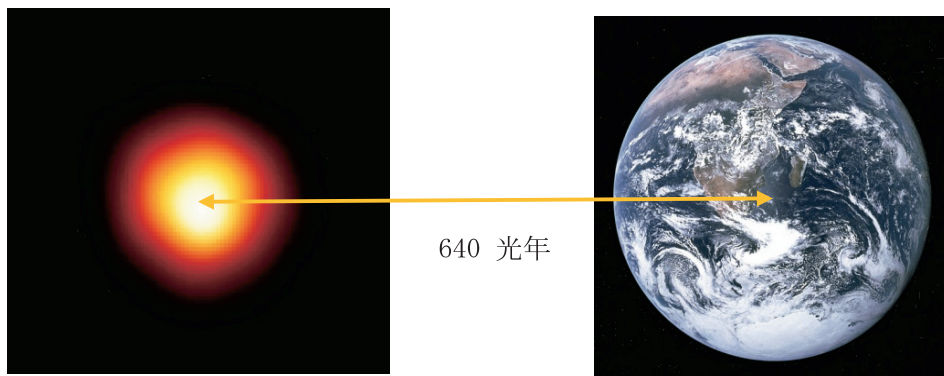
$$\Delta m' = \Delta m_0 / \{ 1 - (v/c)^2 \}^{1/2}$$

つまり電子は光速を越えず加速されたエネルギーは質量に転化する。このことは素粒子の高エネルギー実験で実証済みであり、この事に矛盾した例は見つかっていない。

もし今回の実験結果が正しければ古典力学がそれを包含した形で特殊相対性力学に進化したように、今までの特殊相対性理論を包含した形での修正が必要となる。しかしこれまでの光速に近い領域での多くの実験事実はそのことを要求していない。

## 7 最後に

冬の星座オリオン座の星、赤色超巨星ベテルギウス（0 ～ -1 等星（変光星））が星の最期を迎え、2012年か2013年に超新星爆発すると予想されている<sup>1 3) 1 4)</sup>。1987年に観測さ



ハッブル宇宙望遠鏡で撮影された  
ベテルギウス（-1 等星）  
（1995 年 3 月 3 日撮影 Wikipedia より）

1972 年 12 月 7 日アポロ  
17 号が撮影した地球  
（Wikipedia より）

れた超新星 SN1987A は 16.4 万光年彼方の星でしたが、図に示すようにベテルギウスは地球との距離が 640 光年と近い。質量は太陽の 20 倍、直径は太陽の千倍である。超新星爆発後の 2 週間ほどは満月の明るさと推定されている。可視光線、X線、 $\gamma$ 線、ニュートリノ等多くの放射線が放出される。放射線その他で、地球にもその影響が及ぶ。

この超新星爆発で再度光とニュートリノの速度が観測されるはずである。日本のニュートリノ観測装置スーパー KAMIOKADE 検出器がそのニュートリノを待ち構えている。またこの星からの光の変化は北半球で肉眼でも十二分に観測できる。グランサッソの観測結果が正しければニュートリノが光よりも 6 日ほど早く地球に到達するはずである。

最後に、グランサッソの観測結果の系統誤差のさらなる検討とともに、独立な実験による検証が望まれる。

## References

- 1) 藤原昇、池原健二、磯部ゆう 著 「自然学」—自然の共生循環を考える—  
東海大学出版会 2004 年
- 2) Aubert, J. J. (1974 年). “Experimental Observation of a Heavy Particle  $J$ ” .  
*Physical Review Letters* **33**: 1404.  
Augustin, J. E. (1974 年). “Discovery of a Narrow Resonance in  $e^+e^-$  Annihilation.  
*Physical Review Letters* **33**: 1406.
- 3) Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa (1973 年). “CP Violation in the  
Renormalizable Theory of Weak Interaction”  
*Progress of Theoretical Physics* **49** (2): p.p. 652--657. Kyoto
- 4) Published online 20 October 2011 /Nature
- 5) OPERA Preprint at <http://static.arxiv.org/pdf/1109.4897.pdf>  
“Measurement of the neutrino velocity  
with the OPERA detector in the CNGS beam”
- 6) N. Agafonova et al., (OPERA Collaboration) (2010). “Observation of a first  $\nu$   
 $\tau$   
candidate event in the OPERA experiment in the CNGS beam”.  
*Physics Letters B*, **691** (3): 138–145.
- 7) The OPERA Detector at <http://operaweb.lngs.infn.it/spip.php?rubrique39>
- 8) K.Hirata et al., *Phys.Rev.Lett.* 58(1987)1490
- 9) R.M.Bionta et al., *Phys.Rev.Lett.* 58(1987)1494
- 10) [http://ja.wikipedia.org/wiki/SN\\_1987A](http://ja.wikipedia.org/wiki/SN_1987A)
- 11) Time Resolution of a Large Area Planar Spark Counter N.Fujiwara et al.,  
*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Vol.263, p.381,1988



1 2) Life-Time of Charmed Particles Produced in 20 GeV  $\gamma$  p Experiment

K. Abe 他日米共同プロジェクトメンバー 1982

Physical Review Letters, Vol.48, p.1526, 1982

1 3) The Spotty Surface of Betelgeuse

NASA, 2010年1月6日

1 4) 「オリオン座のベテルギウス、謎の縮小」

ナショナルジオグラフィック ニュース, (2009年6月11日) 2009年12月22日閲覧。