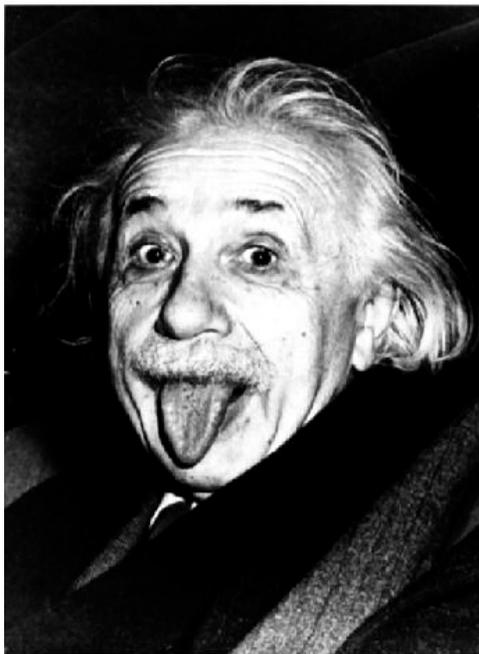


現代物理学 における 時間と空間

杉本茂樹 (IPMU)

みなさん、アインシュタインって、ご存知ですか？



=



(c) 石森プロ

アインシュタイン 1879－1955

こう見えても、人類史上、最高の物理学者の一人で、
我々、物理を志す者にとっては **憧れのヒーロー** なのです。

- ◆ 彼の輝かしい業績の中でも、最高傑作と言えるのが「**相対性理論**」と呼ばれる理論です。

- ◆ 相対性理論には、次の2つがあります。

特殊相対性理論

時間と空間の概念を一新させた理論

一般相対性理論

全く新しい重力理論



1905年に特殊相対論を発表。当時まだ26歳の若さだった。

- ◆ これらはもうノーベル賞を10個位あげても全然惜しくないくらいの、超画期的な理論なのです。

(アインシュタインは別の業績でノーベル賞を受賞している。)

今回は、特に「**特殊相対性理論**」の解説をしつつ
時間と空間について考えていきたいと思います。

① **光速の謎**

② **アインシュタインの革命的アイデア**

③ **時間の遅れ**

④ **長さの収縮**

⑤ **質量の増加**

⑥ **エネルギーと質量の関係**

⑦ **実験的検証**

黒板による
講義形式

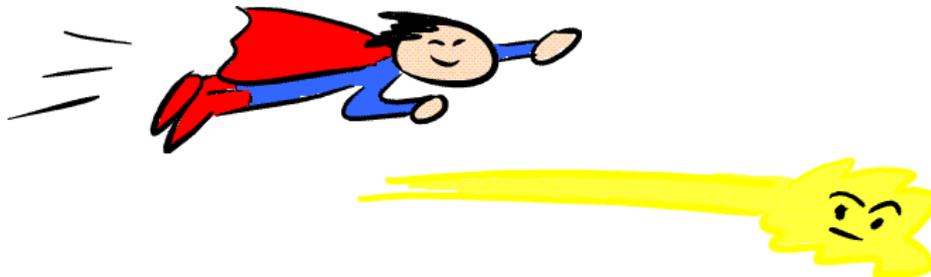
① 光速の謎

光の速さ \doteq 30万 km/s (より正確には 299,792,458 m/s)

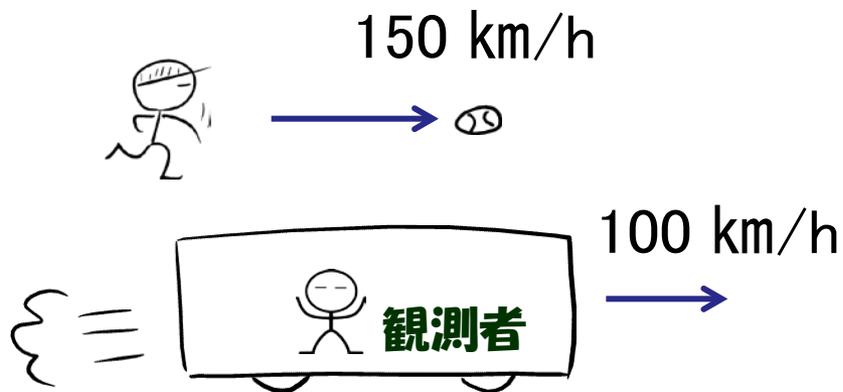
だいたい1秒間に地球を7周半

素朴な疑問

光に追いつくくらいの猛スピードで走ったら
光はゆっくり進んでいるように見えるだろうか？

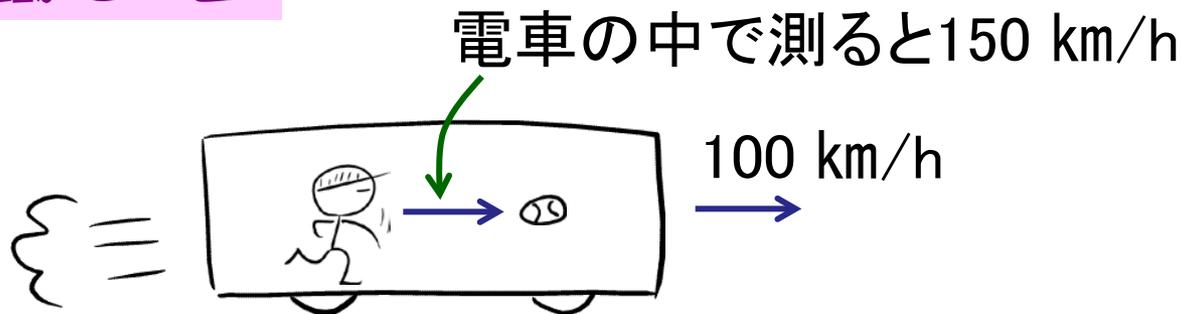


常識 その1



**電車に乗っている観測者
にとってはボールの
速さは 50 km/h に見える。**

常識 その2

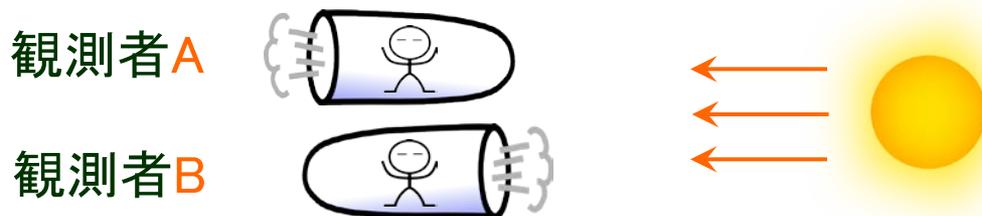


**この人にとってはボールの
速さは 250 km/h に見える。**



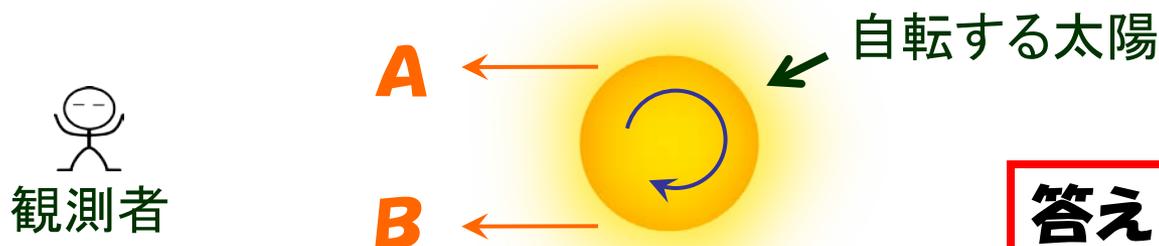
もんだい

問1. 光源に近づく 観測者A と、光源から遠ざかる 観測者B の観測する光速はどちらが速いか？



答え: 同じ!

問2. A と B の光はどちらが速いか？



答え: 同じ!

19世紀の終わりごろに、詳細な実験が行われたが、どの光も全く同じ速さだった！現在でもこの事情は変わらない。⁷

つまり

**光源が動いていようが、観測者が動いていようが、
誰がどう測っても真空中の光速は同じ(約 30万 km/s) !**



(イラスト: 松本ぷりっつのブログより)

大変不思議であるが、これが現実である。

常識では考えられないことが世の中で起こっている!

② アインシュタインの革命的アイデア

「光源が動いていようが、観測者が動いていようが、誰がどう測っても真空中の光速は同じ」



という実験事実を素直に受け入れ、むしろ、これを原理として時間と空間の概念を考え直してみようではないか。

2つの基本原理

- **光速度不変の原理**: 誰が観測しても光速は同じ
- **相対性原理**: 自然法則はどんな慣性系でも同じ*

* 重力の影響や空気抵抗などが無視できる状況で、等速直線運動をする系のこと

これら2つの原理から何が導かれるか考えてみよう!

予定

- ✓ ① 光速の謎
- ✓ ② アインシュタインの革命的アイデア
- ③ 時間の遅れ
- ④ 長さの収縮
- ⑤ 質量の増加
- ⑥ エネルギーと質量の関係
- ⑦ 実験的検証

黒板による
講義形式

3

$$T_A = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} T_B$$

4

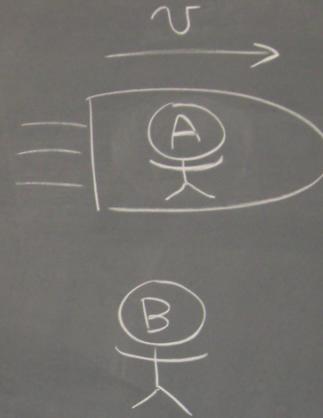
$$l_A = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} l_B$$

5

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

6

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



⑦ 実験的検証

★ 光速不変の原理について

1964 年に CERN (ヨーロッパの研究機関) で行われた実験

π^0 中間子: 放っておくと崩壊して光を出す。寿命 10^{-16} 秒くらい

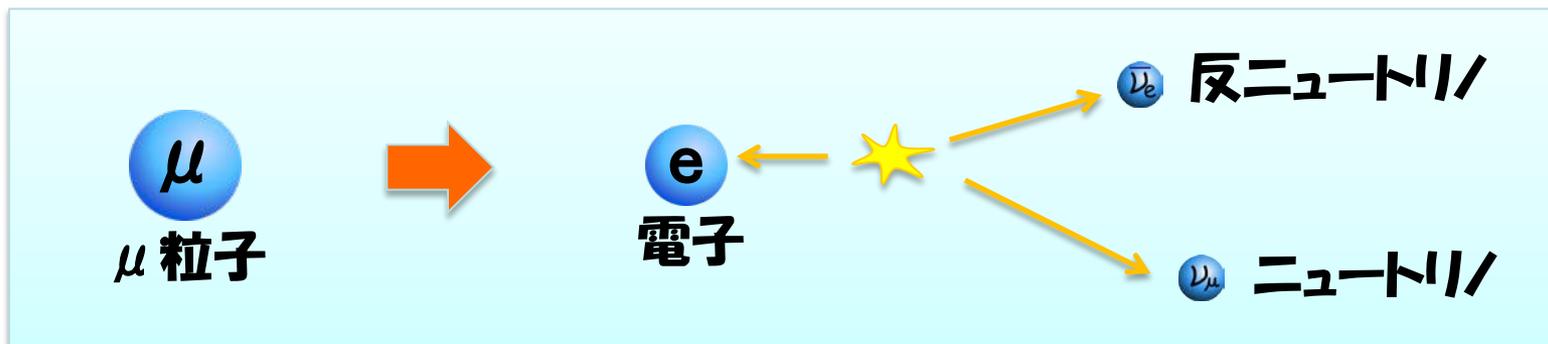


- 光速の 99.975% で飛ぶ π^0 中間子から発せられた光の速度を測定しても、やはり約 30 万 km/s だった。

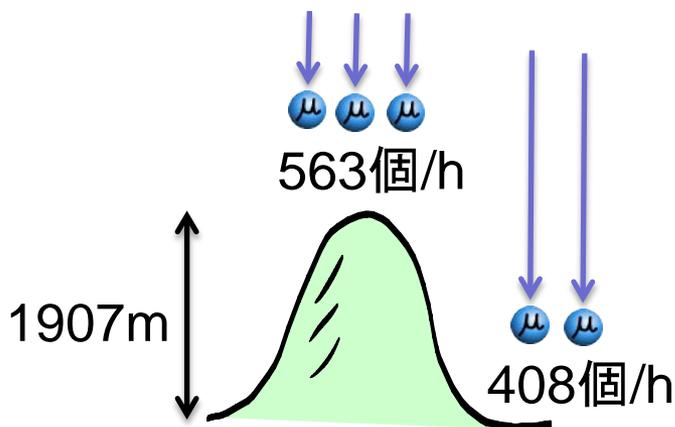


★ 時間は本当に遅れるのか？（その1）

μ 粒子：静止系では、寿命 約 2×10^{-6} 秒で崩壊する。



- 1963年、フリッシュとスミスは、光速の99.5%の速さで空から降ってくる μ 粒子の数を標高1907mの山の上と下とで観測。山の上では1時間に563個、下では1時間に408個観測した。

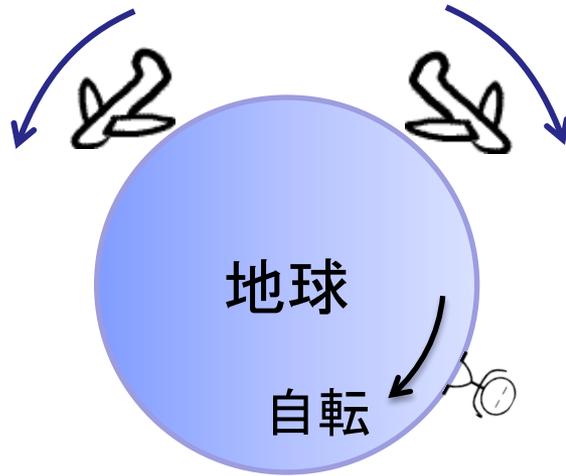


寿命が 2×10^{-6} s なら、平均到達距離はだいたい $(2 \times 10^{-6} \text{ s}) \times 30 \text{ 万 km/s} = 600 \text{ m}$ のはずだが、それよりも長生きしている！

時間の遅れの効果で寿命が延びた！

★ 時間は本当に遅れるのか？（その2）

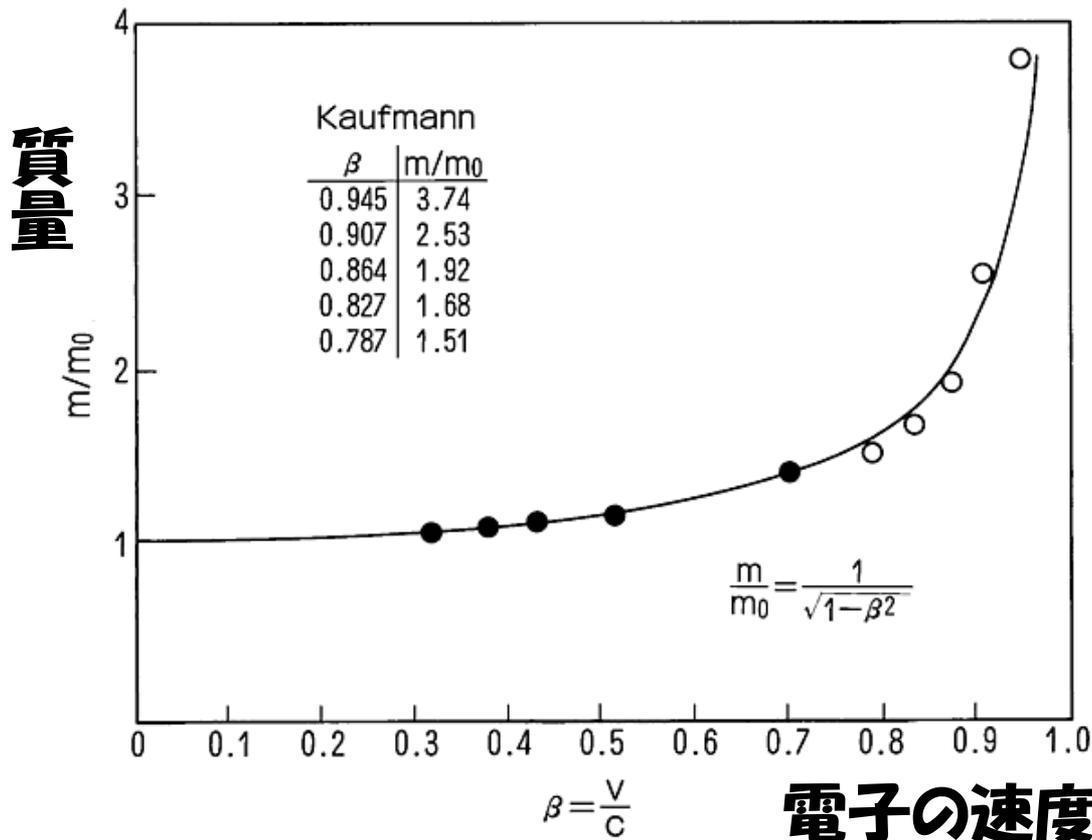
- 1971年、ハーフェールとキーティングは



精密な原子時計を積んだ
飛行機を西回りと東回りに飛行させ、
地上にある時計と比較。

- この場合、一般相対論的効果も取り入れなければいけないが、それも含めて、相対論の预言通りの時間の遅れが観測された！
- ◆ 今では、この時間の遅れの効果は **カーナビ** に応用されている。この効果を考慮にいれて衛星の時計を調整しないと、カーナビの精度が悪過ぎて使い物にならない！

★ 質量は本当に増加するのか？



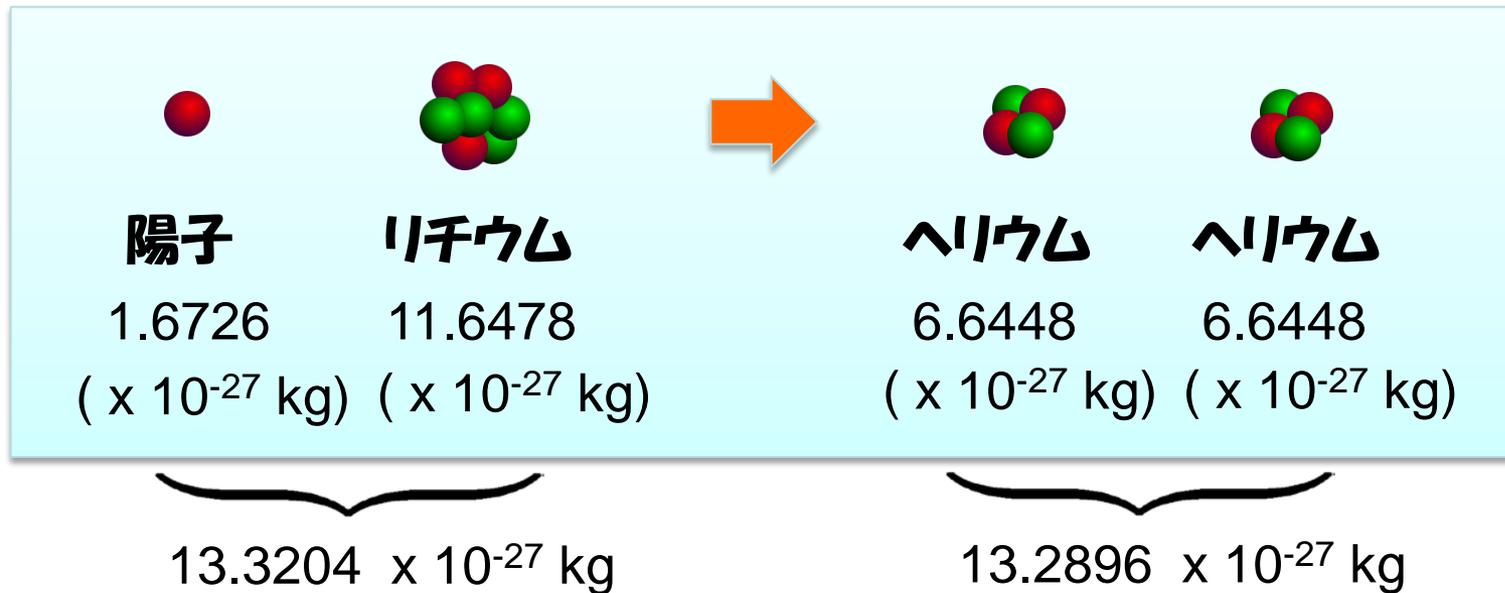
← ラジウムから
ベータ線として
放出される電子の
速度と質量の関係

- $\beta = v/c$ (c は光速)、 m_0 は静止質量
- カウフマン(1901年)の測定
- ブーヘラー(1909年)の測定
- 相対性理論による計算

(<http://www.rist.or.jp/atomica/> より転載)

★ $E=mc^2$ の検証

- 1932年、コッククロフトとウォルトンはリチウムの原子核に陽子をぶつけて、2個のヘリウム原子核を生じる反応を観測



- 質量の合計が 3.08×10^{-29} kg だけ減少する！
質量の一部がエネルギーに転換されたことを意味する。
- 反応前の陽子や反応後のヘリウムの運動エネルギーを測定し、 $E = mc^2$ が成立していることが確認された。

まとめると、今のところ

相対論の予言はことごとく的中している！

- 今では、加速器で陽子を光速の 99.999999% に加速できる時代。相対論がなかったら、こんな装置は全く制御できない。
- 高い精度を要求しなければ、大学での学生実験でも相対論の正しさを検証することができる。カーナビが正しく機能していることも相対論の正しさを裏付けている。
- このように、相対論は非常に高い精度で十分に検証されており、現代物理学の基礎理論として確立している。
- もし相対論が実験と矛盾することが分かったら大事件である。

★ ニュートリノが光速を超えた！？

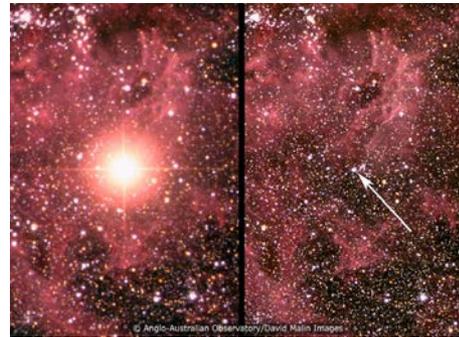
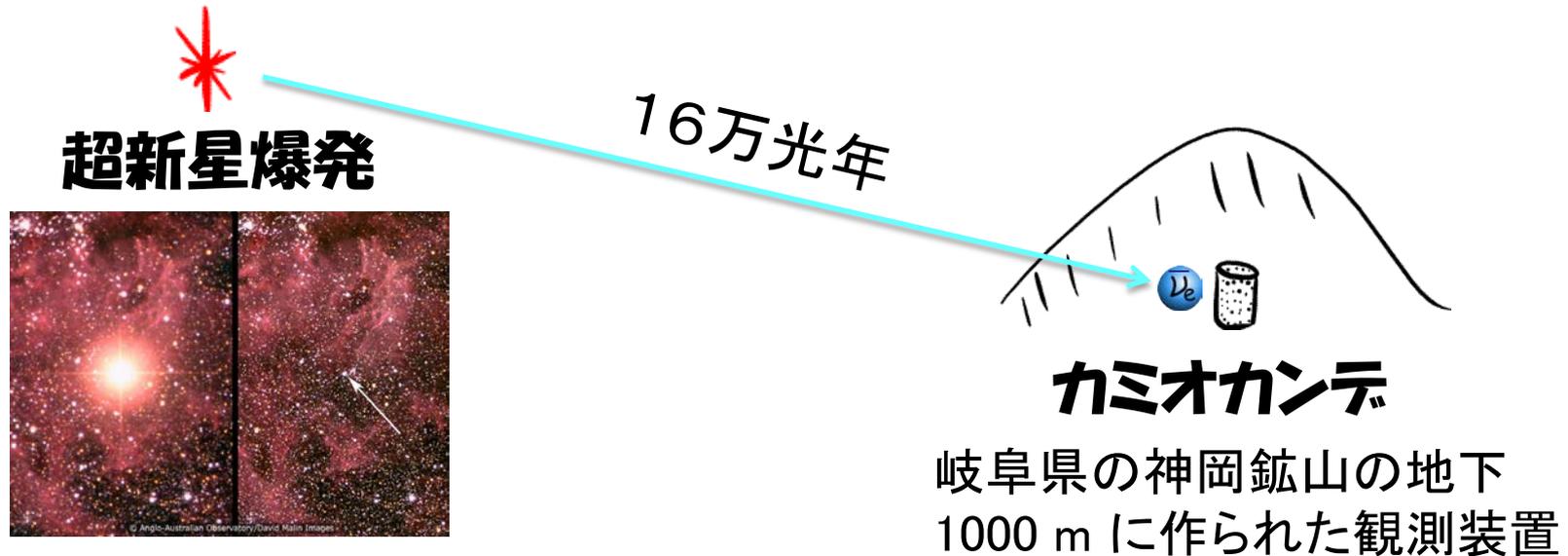
- 今年の9月に、ニュートリノの速度を精密に測定したら光速を超えていた、という実験結果が発表された。



なんと、光速の約 1.000025 倍のスピードだった！

- 非常に慎重になされた実験であると思われるが、物理の実験結果が確立するには検証実験が不可欠なので、まだ決定的な結論とは言えない。
- 実際、今のところ、多くの物理学者はこの結果に懐疑的。
(マスコミがあまりにも騒ぎすぎ！)

- 1987年に16万光年離れたところで起きた超新星爆発で発生したニュートリノは光とほぼ同時に観測された。



もし、ニュートリノの速度が光速の約 1.000025 倍だとすると、ニュートリノの方が光よりも4年くらい先に着いていないといけない計算になる。

- しかし、もし本当にニュートリノが光よりも速いとしたら、何を意味するのか？ 考えてみるのは楽しいので、みなさんも是非、考えてみてください。

おしまい