

# OPERA実験と光の片道速度

## OPERA Experiment and the One-way Speed of Light

道村唯太

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

坪野研究室 修士課程2年

# Scope

- 超光速ニュートリノ、OPERA実験  
概要(特に時計の同期法について)  
(検出器の仕組みとか、素粒子のことは知らないので触れない)  
問題を指摘する論文いくつか紹介
- 時計の同期法と片道光速  
「片道光速」に対する批判  
片道光速は測定できるのか？
- 修論実験との関連  
片道光速の異方性探査  
RMS理論の $\alpha$ を測定してることになるのか？

# OPERA実験概要

- CERNで $\nu_\mu$ を生成、約730km離れた Gran Sasso Laboratory(LNGS)のOPERA検出器で検出
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ のニュートリノ振動を初観測 [2010年5月]
- time of flight が光より $60.7 \pm 6.9(\text{stat.}) \pm 7.4(\text{sys.})$  ns 短かったことを発表 [2011年9月]
  - $(v-c)/c = (2.48 \pm 0.28(\text{stat.}) \pm 0.30(\text{sys.})) \times 10^{-5}$   
有意水準 $6\sigma$ (99.9999998%)
- もう一度測定を行い、11月末までに結果発表予定

# 地図



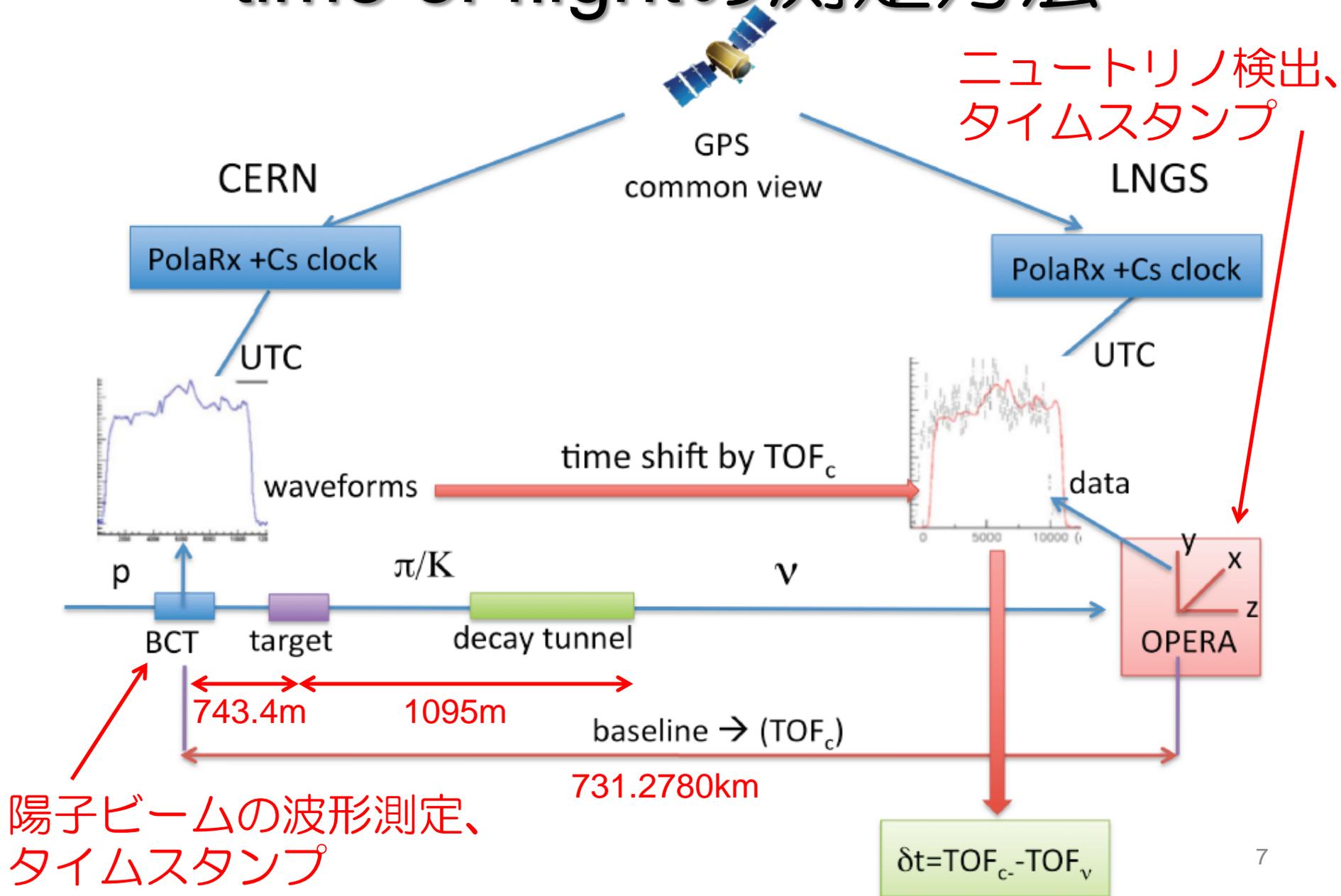
# 730kmを日本で言うと



# 実験の2つのポイント

- 基線長の測定
  - CERN-LNGS間の距離730kmを20cmの精度で
- time of flight の測定
  - 数nsの精度で
  - これまでのGPSでは~100nsが限界
- 後者について

# time of flightの測定方法



# GPS common-view法

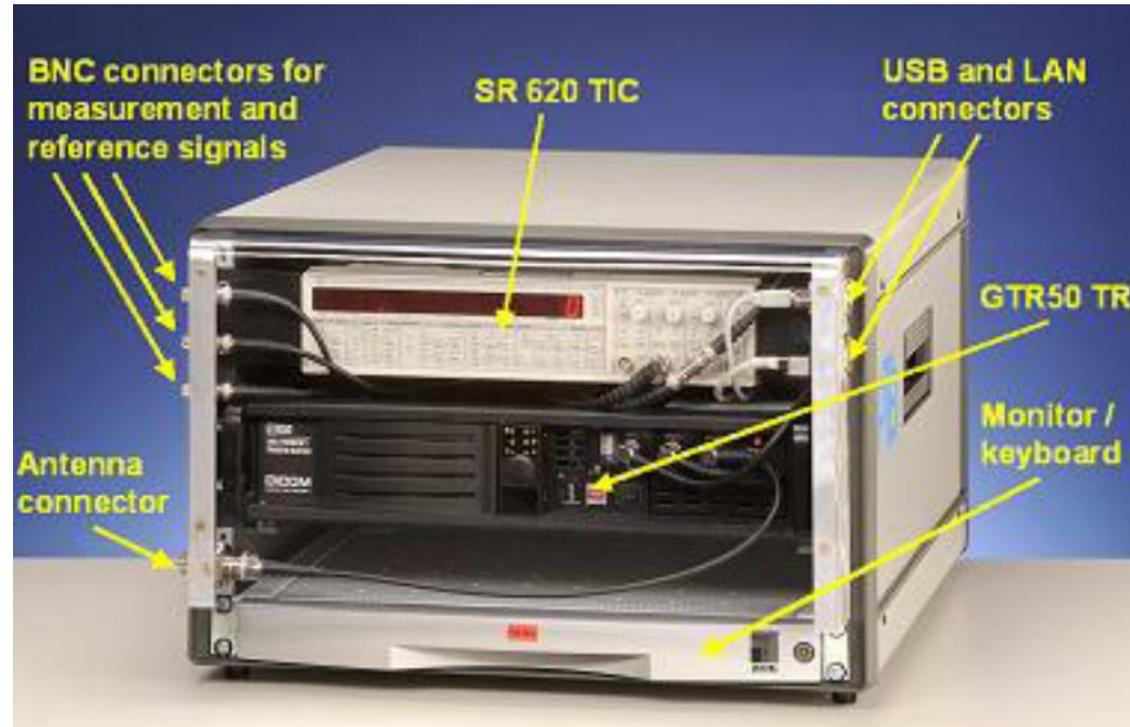
- 同じGPS衛星を使って、GPSとCERN、GPSとLNGSの時刻を比較することによりCERNとLNGSの時刻を比較する
- CERNとLNGSにはGPS受信機PolarRx2eとCs原子時計
- それでも精度不足なのでtime-transfer deviceを使う



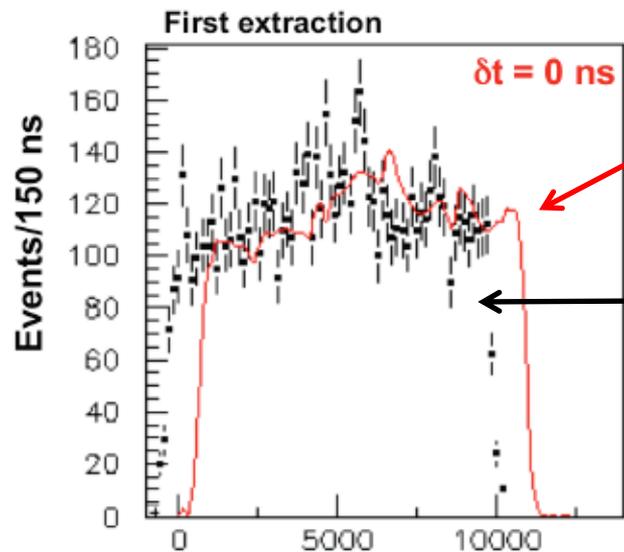
<http://www.navtechgps.com/Downloads/PolarRx2e.pdf>

# Time-Transfer Device

- 較正用の時計(写真下)
- LNGSの時計と比較、CERNに持って行き、CERNの時計とも比較
- CERNとLNGSの時刻のずれは  $2.3 \pm 0.9$  nsec

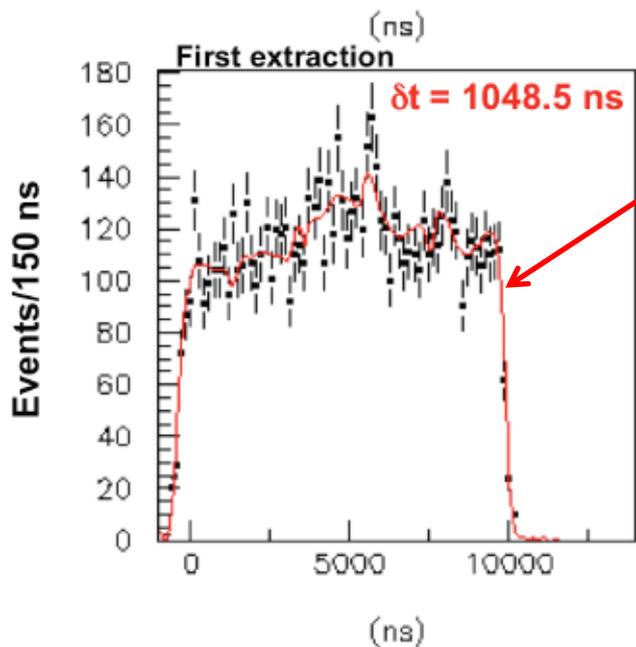


# time of flight測定結果



陽子ビームの時間分布を  
光のTOFだけずらしたもの

ニュートリノイベントの時間分布



光のTOFより1048.5 nsec早く着いたと  
するとうまくフィットする

→ blind testのため987.8 nsecずらして  
ある(補正かける前のデータ使ってる)

→ 実際の $\delta t = 60.7 \text{ nsec}$

→ 超光速！！

# 他の測定との比較

- OPERA(17GeV、2011)  
 $(v-c)/c = (2.48 \pm 0.28(\text{stat.}) \pm 0.30(\text{sys.})) \times 10^{-5}$
- Fermilab、>30GeV、1979  
 $|v-c|/c < 4 \times 10^{-5}$
- MINOS(Fermilab、3GeV、734km、2007)  
 $(v-c)/c = (5.1 \pm 2.9) \times 10^{-5}$   
(有意水準 $1.6\sigma$ 。素粒子実験では $5\sigma$ で”発見”。  
検出器の場所の精度が悪かった)
- SN1987A(anti、~10MeV、 $5.19 \times 10^{21}$  m)  
 $|v-c|/c < 2 \times 10^{-9}$

# 結果に対する反応

- arXivに80以上
- Cohen-Glasgow effectが見えていないからおかしい
- CERN側では陽子ビームの時間分布しか見てないから怪しい

などなど.....

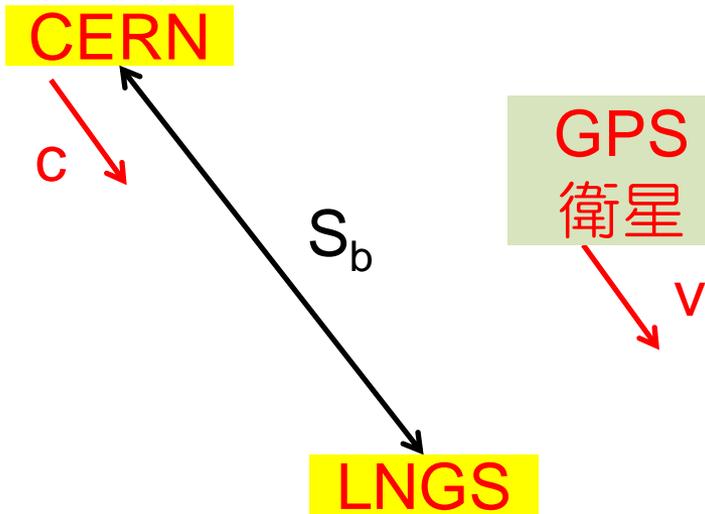
- 次ページからは時計同期に関する論文2つ紹介

# TTDによる時計同期が怪しい

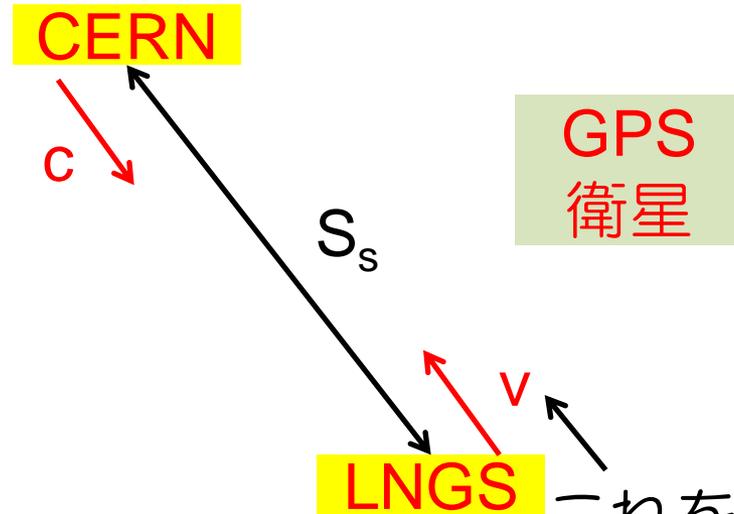
- Carlo R. Contaldi: The OPERA neutrino velocity result and the synchronisation of clocks  
<http://arxiv.org/abs/1109.6160>
- TTD(= Time-Transfer Device)がCERNからLNGSへ運ばれる間に加わる
  - ①地球重力場 ←特にこれ
  - ②Doppler効果
  - ③Sagnac効果の影響が考えられてない
- 例えばLNGSに着いてから4日間置いておかれるだけで30 nsecくらいはずれる

# GPS衛星静止系、相対論効果

- Ronald A. J. van Elburg: Time-of-flight between a Source and a Detector observed from a Satellite  
<http://arxiv.org/abs/1110.2685>



基線静止系



GPS衛星静止系

これを忘れてたのでは？

$\tau_b = \frac{S_b}{c}$  ではなく  $\tau_0 = \gamma\tau_s = \gamma \frac{S_s}{c+v} = \frac{S_b}{c+v}$  → 64 nsecのずれにつながる

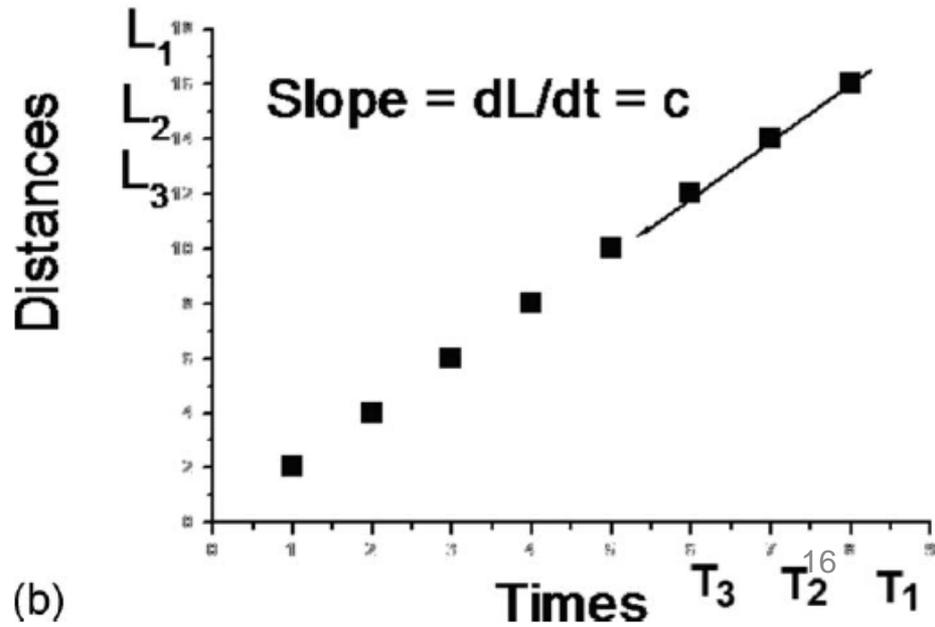
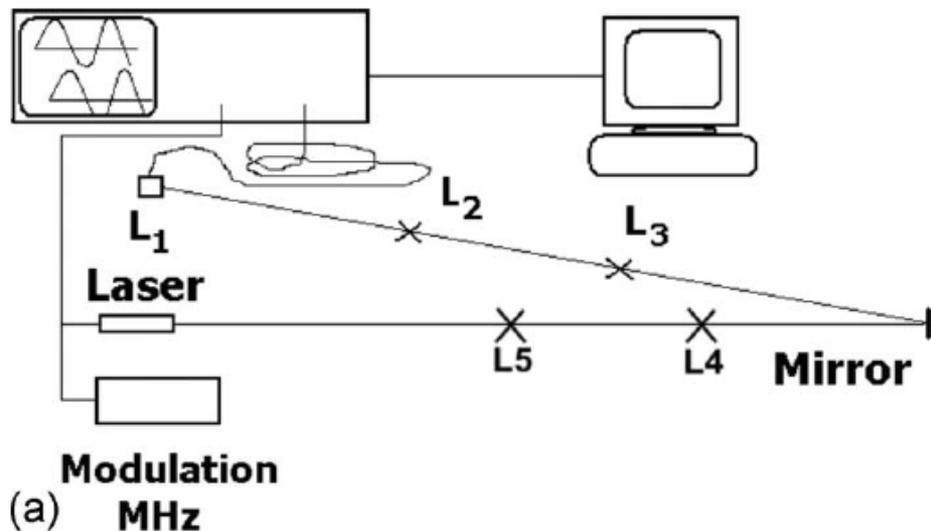
# One-way Speed

- 今回のOPERA実験はニュートリノの片道速度を測定する実験
- 片道速度の測定には常に時計合わせの問題がつきまとう
- 光の片道速度の場合はもっと(?)ややこしい
- 測定できないと主張する人もいる
  
- 例えばこんな実験
  - E. D. Greaves *et al.*: A one-way speed of light experiment

[http://ajp.aapt.org/resource/1/ajpias/v77/i10/p894\\_s1](http://ajp.aapt.org/resource/1/ajpias/v77/i10/p894_s1)

# Greaves *et al.* (2009)

- レーザー光に~1MHzの強度変調
- レーザーから出た光強度を $L_i$ の位置にPD置いて測定
- オシロ上でreferenceとPD信号の位相のずれを測定
- PDを置く場所を変えていき、位相のずれの距離依存性を見れば片道光速が測定できる

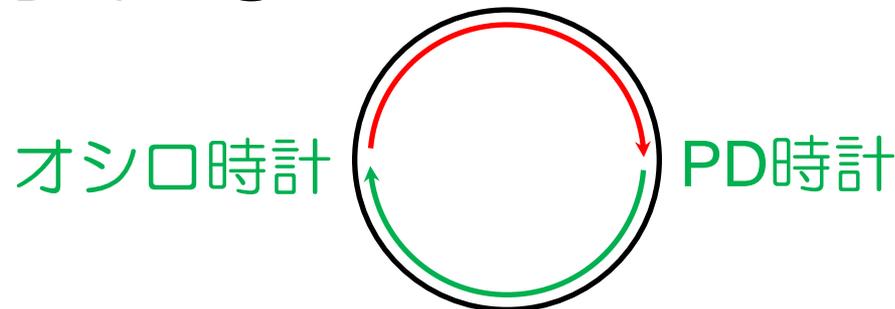


# Greaves *et al.* (2009)

- PDからオシロまでのケーブルによる遅れは79 nsecで常に一定だから考えなくてよい
- 離れた場所の時刻を比較しているわけではないので時計同期も必要ない
- と主張するが.....

# Greaves et al. (2009)への反論

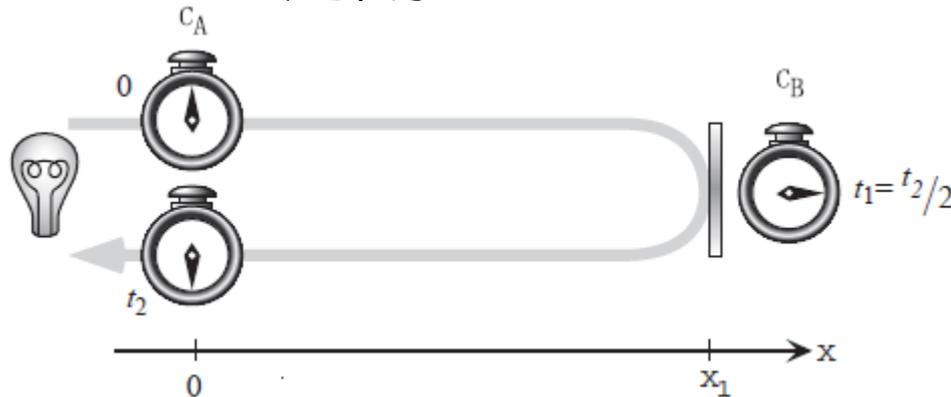
- J. Finkelstein [http://ajp.aapt.org/resource/1/ajpias/v78/i8/p877\\_s1](http://ajp.aapt.org/resource/1/ajpias/v78/i8/p877_s1)  
ケーブルの遅延79 nsecはケーブルの両端の時計が同期して初めて意味を持つもの  
この実験は結局、往復速度を測定してる
- R. de Abreu & V. Guerra <http://arxiv.org/abs/0911.5272>  
同様の反論  
(ケーブル長L)/c = 79 nsecと計算した時点で、  
PDとオシロの時計をEinsteinの同期法に従って同期させている



光の往復を使う

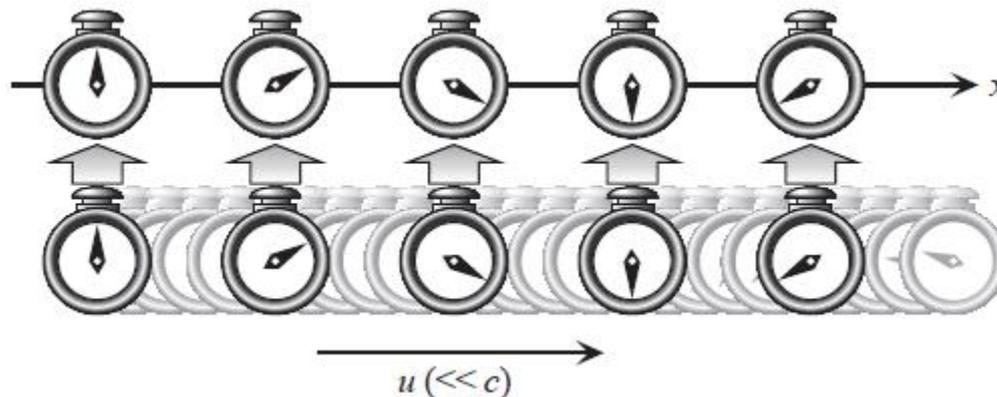
# 時計の同期法

- Einsteinの同期法



往路と復路で光速は  
変わらないとする

- Slow clock transport (MansouriとSexlが提案)



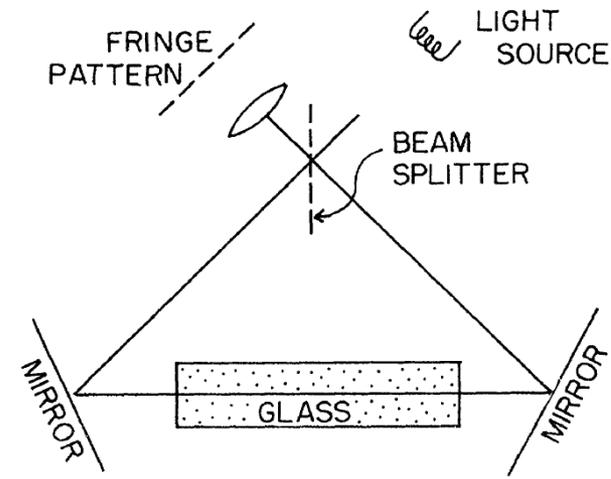
往路と復路で光速が  
変わってもよい

図は関谷修論(2000)より

- どちらを選んでも測定結果は変わらないはず

# 片道光速測定不可能論者の主張

- Yuan-Zhong Zhang: *Special Relativity and Its Experimental Foundations* (1997)
- 片道光速測ろうとすると2点の時計同期が必要で、それをslow clock transportでやると結局closed pathだから片道光速を測っていることにならない
- 片道光速測れないんだからMS理論は必要ない
- Robertson理論(往復光速の異方性はあるが、片道光速の異方性はない)で十分
- 自らの方法でTrimmerの実験も片道光速の異方性を測っていることにならないことを証明



# 片道光速測定不可能論者の主張

- 通常のclosed pathの場合は確かに片道光速は測れないのだろう
- でも途中に媒質を入れたような実験(Trimmerの実験)はどうか？
- Trimmerの実験を解析するのに片道光速を測定できないとする自らの方法を使って片道光速の異方性が測定できないと証明しているのでなんか怪しい

# 片道光速の異方性は測れる

- Clifford M. Will: Clock synchronization and isotropy of the one-way speed of light (1991)  
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.45.403>
- 片道光速の異方性を測ったといういくつかの実験に対して、MS理論を適用し、実際に測定できていることを証明
- 測定結果は時計同期の方法に依らないことを証明
- この方法で修論実験も場合も考えてみれば、ひとまず安心できそう

# MS理論における光速

- Einsteinの同期法

$$c(\theta)/c = 1 + \boxed{\left(\frac{1}{2} + \delta - \beta\right)} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin^2 \theta - \boxed{(1 + \alpha - \beta)} \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

MM型実験 KT型実験

- Slow clock transport同期法

$$c(\theta)/c = 1 - \left(\frac{v}{c}\right) \boxed{(1 + 2\alpha)} \cos \theta + O\left((v/c)^2\right)$$

IS型実験

- 一見、同期法で測定結果が変わってしまいそうなので、ここをつっこまれても大丈夫なようにしておきたい

# ぱっと計算してみたところ

- 今回の修論実験は時計の同期法に依ってしまった
- とはいえ、MM型実験でも計算してみたところ、同期法に依ってしまった
- そんなはずはないのでなんか計算間違ってる？
  
- もやもやのままですみません

# REMARKS

- そもそも「同期法はなんでもいい」となるのは特殊相対論が成り立つとき。これのテストをするわけだから同期法に依るのはしょうがない？
- 片道光速の測定可能性と、片道光速の異方性の測定可能性は違う？
- SMEの $k_{tr}$ は測定できる  
でもわかりにくいので、できればMS理論の $\alpha$ で勝負したい

# References

- Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam  
<http://arxiv.org/abs/1109.4897>
- Advanced GPS-based time link calibration with PTB's new GPS calibration setup  
<http://www.pttimeeting.org/archivemeetings/2010papers/paper40.pdf>
- The OPERA neutrino velocity result and the synchronisation of clocks  
<http://arxiv.org/abs/1109.6160>
- Time-of-flight between a Source and a Detector observed from a Satellite  
<http://arxiv.org/abs/1110.2685>
  
- A one-way speed of light experiment  
[http://ajp.aapt.org/resource/1/ajpias/v77/i10/p894\\_s1](http://ajp.aapt.org/resource/1/ajpias/v77/i10/p894_s1)
- Comment on “A one-way speed of light experiment” by E. D. Greaves, An Michel Rodríguez, and J. Ruiz-Camacho [Am. J. Phys. 77 (10), 894–896 (2009)]  
[http://ajp.aapt.org/resource/1/ajpias/v78/i8/p877\\_s1](http://ajp.aapt.org/resource/1/ajpias/v78/i8/p877_s1)
- Comment on ‘A one-way speed of light experiment’  
<http://arxiv.org/abs/0911.5272>
  
- Clock synchronization and isotropy of the one-way speed of light  
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.45.403>

# 取り上げきれなかった文献

- Neutrino velocity measurement with the OPERA experiment in the CNGS beam  
[http://operaweb.lngs.infn.it:2080/Opera/ptb/theses/theses/Brunetti-Giulia\\_phdthesis.pdf](http://operaweb.lngs.infn.it:2080/Opera/ptb/theses/theses/Brunetti-Giulia_phdthesis.pdf)
- A review of time and frequency transfer methods  
<http://iopscience.iop.org/0026-1394/45/6/S22>
- On the experimental determination of the one-way speed of light  
<http://iopscience.iop.org/0143-0807/32/4/013>