

# Notes sur la mesure de la vitesse des neutrinos dans l'expérience OPERA

Éric Gourgoulhon

Laboratoire Univers et Théories (LUTH)  
Observatoire de Paris / CNRS / Université Paris Diderot  
Meudon, France

<http://luth.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon/>

**Café+ du LUTH**

5 octobre 2011

- 1 L'expérience OPERA
- 2 Autres mesures de la vitesse des neutrinos
- 3 Interprétations conventionnelles
- 4 Vers une nouvelle physique ?

- Prépublication équipe OPERA [[Adam et al., arXiv:1109.4897](#)]
- Séminaire de Dario Autiero, CERN, 23.09.2011 [[PDF](#)]
- Thèse de Giulia Brunetti (2011) [[PDF](#)]
- Séminaire de Pierre Binetruy, APC, 28.09.2011
- Séminaire de Dario Autiero, APC, 04.10.2011

# Outline

- 1 L'expérience OPERA
- 2 Autres mesures de la vitesse des neutrinos
- 3 Interprétations conventionnelles
- 4 Vers une nouvelle physique ?

# Le principe



Le principe est simple :

- Produire des neutrinos au CERN
- Les détecter  $d = 730$  km plus loin, au Gran Sasso
- Mesurer le temps de parcours  $T$
- $V = d/T$

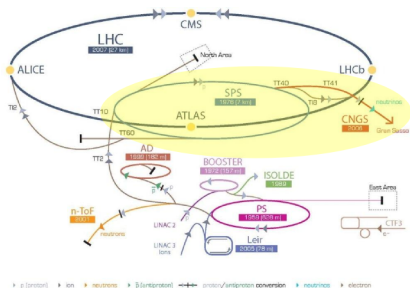
Rem :  $V \simeq c \implies T \simeq 2.44$  ms.

# 1<sup>ère</sup> étape : production des neutrinos

On utilise des **protons** accélérés à  $E = 400$  GeV (facteur de Lorentz :  $\Gamma = 426$ ) grâce au synchrotron SPS du CERN.

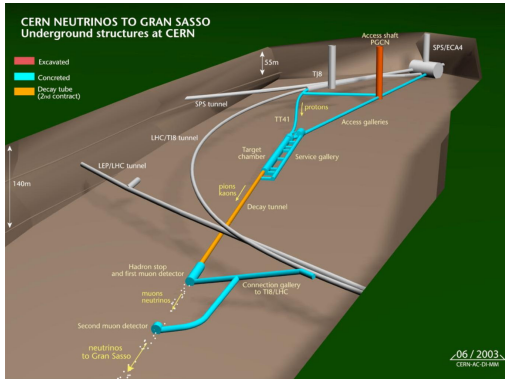
Ces protons sont projetés sur une cible de graphite.

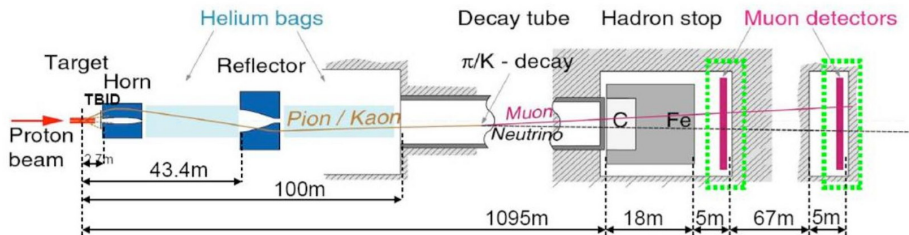
La collision génère des **pions** et des **kaons**, qui se désintègrent en donnant des muons et des **neutrinos muoniques**  $\nu_\mu$ .



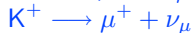
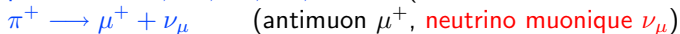
## CNGS

= CERN Neutrino beam to Gran Sasso



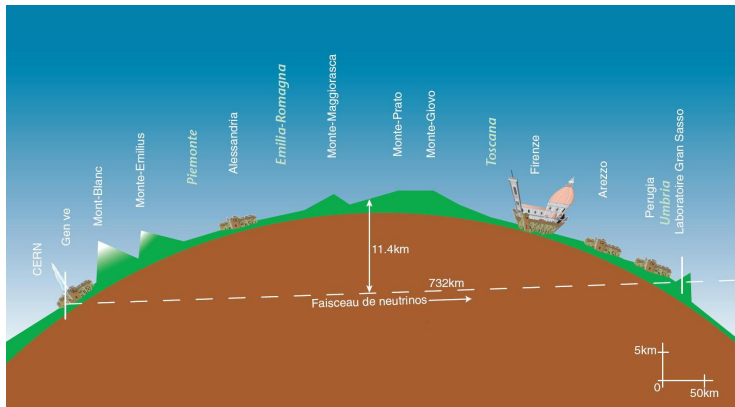
1<sup>ère</sup> étape : production des neutrinos

[Adam et al., arXiv:1109.4897]



Le faisceau de neutrinos qui sort du CERN contient 97% de  $\nu_\mu$ , 2% de  $\bar{\nu}_\mu$  et < 1% de  $\nu_e$ ,  $\bar{\nu}_e$

L'énergie moyenne des neutrinos est  $\langle E_\nu \rangle = 17 \text{ GeV}$

2<sup>ème</sup> étape : voyage des neutrinos

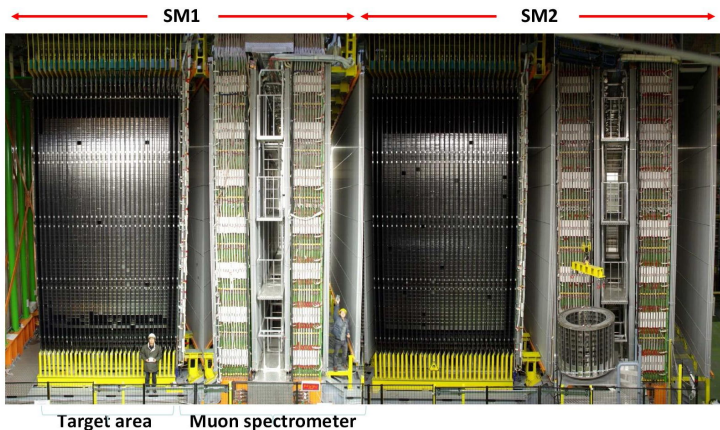
[CERN AC Note (2000-03)]

Vue la très faible interaction des neutrinos avec la matière, c'est facile !  
 ...ou presque (oscillations  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ , interaction non nulle avec la matière)



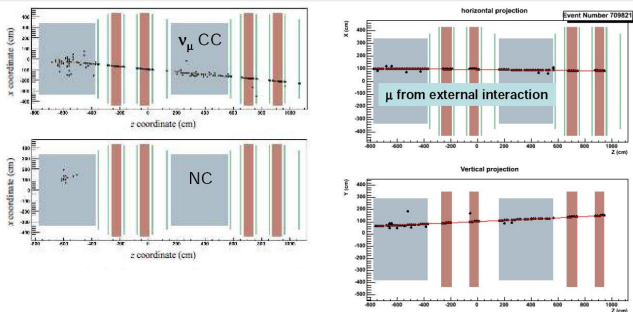
# 3<sup>ème</sup> étape : détection des neutrinos

Détecteur OPERA dans le tunnel du Gran Sasso (peu de rayons cosmiques)



[D. Autiero (2011)]

Deux Super Modules (SM) de 625 t chacun : plaques de plomb + émulsions nucléaires + scintillateurs

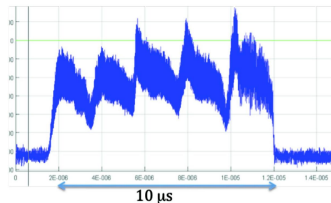
3<sup>ème</sup> étape : détection des neutrinos

[D. Autiero (2011)]

Largeur du faisceau de neutrinos au Gran Sasso : 2.8 km

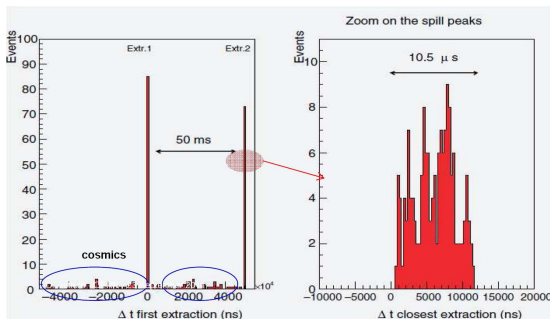
- 1 Les **neutrinos** interagissent avec le plomb (*événements internes*) ou avec la roche environnante (*événements externes*) : interaction faible par **courant chargé** ( $W^+$  et  $W^-$ ) ou **courant neutre** ( $Z^0$ )  $\implies$  production de **muons**
- 2 Le passage d'un **muon** (charge électrique non nulle) à travers un scintillateur produit des **photons**
- 3 Les **photons** sont détectés par des photomultiplicateurs

# Signal émis et détecté



Émission des protons au CERN :  
 2 paquets (*extractions*) de  
 $\sim 2 \times 10^{13}$  protons, de longueur  
 temporelle  $10.5 \mu\text{s}$  séparés de  
 50 ms

[Adam et al., arXiv:1109.4897]



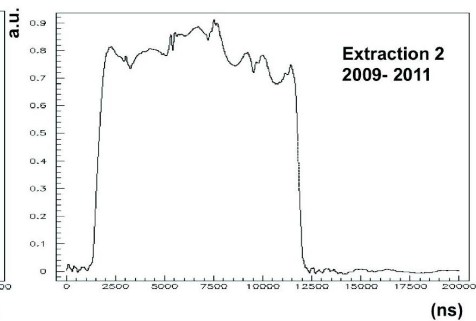
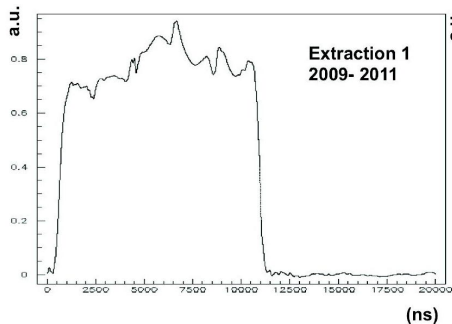
Signal détecté au Gran Sasso

[D. Autiero (2011)]

# Sommation des événements pour augmenter la statistique

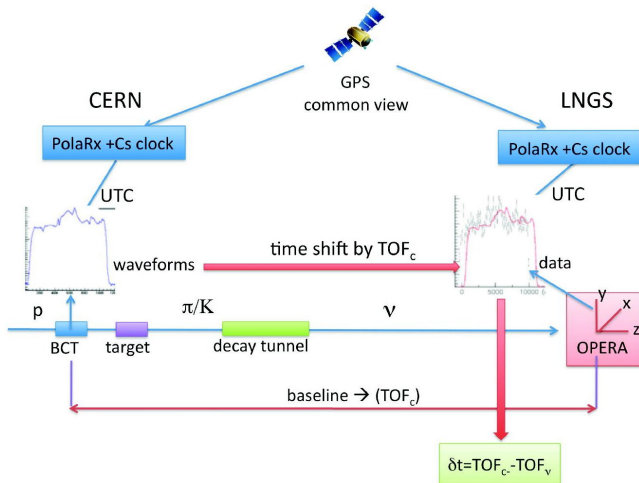
Campagnes de 2009, 2010, 2011 :  $\sim 10^{20}$  protons

Sommation de toutes les extractions :



[Adam et al., arXiv:1109.4897]

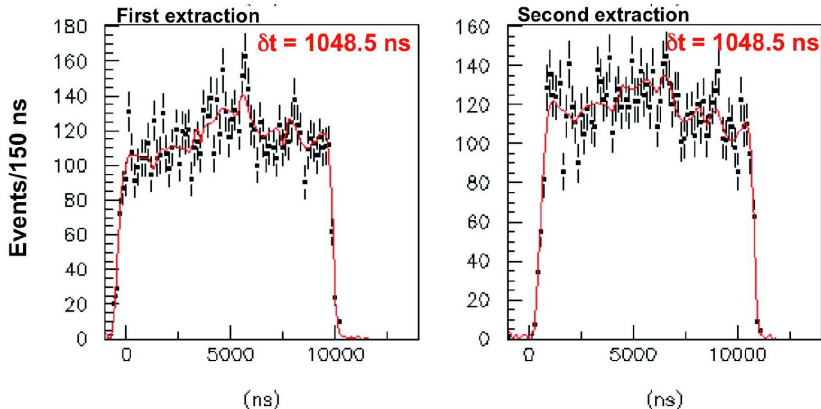
# Mesure du temps de parcours des neutrinos



[Adam et al., arXiv:1109.4897]

TOF = time of flight, LNGS = laboratoire du Gran Sasso  
 BCT = beam current transformer (743 m en avant de la cible de graphite)

# Mesure du temps de parcours des neutrinos



[Adam et al., arXiv:1109.4897]

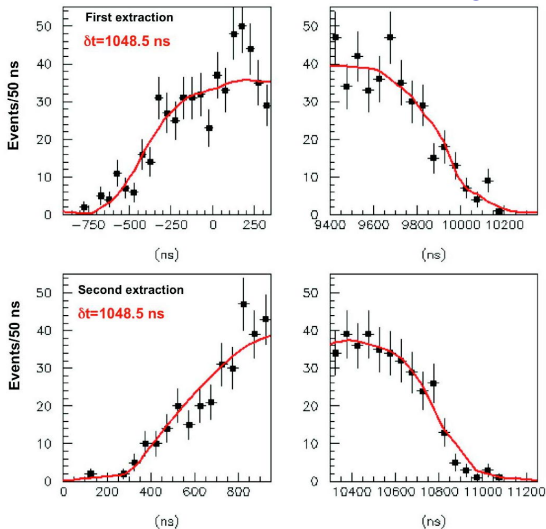
— : distribution temporelle des 16 111 neutrinos détectés au Gran Sasso entre 2009 et 2011

— : somme de tous les profils temporels des faisceaux de protons du CERN

$\delta t$  : décalage temporel à ajuster (origine liée à une échelle des temps de 2006)

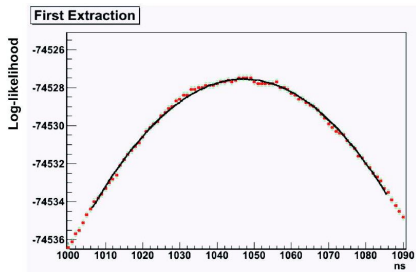
# Mesure du temps de parcours des neutrinos

Zoom sur la montée et la descente du signal :



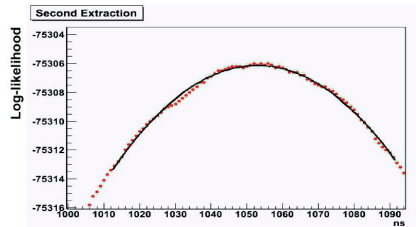
[Adam et al., arXiv:1109.4897]

# Mesure du temps de parcours des neutrinos



Maximum de vraisemblance

$$\Rightarrow \delta t = 1048.5 \pm 6.9 \text{ ns}$$



$$\chi^2/\text{ndf} = 1.06 \text{ (extract. 1), } 1.12 \text{ (extract. 2)}$$

[Adam et al., arXiv:1109.4897]



# Mesure du temps que mettrait la lumière

Distance entre le point de mesure des protons au CERN (BCT) et l'origine du repère d'OPERA :  $d = 731278.0 \pm 0.2 \text{ m}$

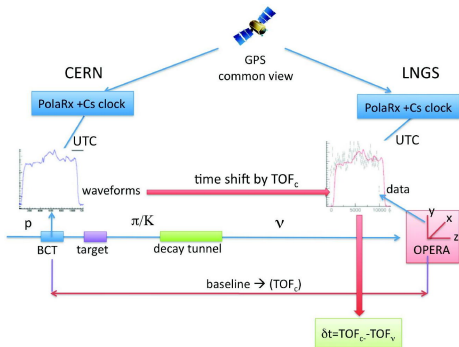
Il s'agit de la *distance euclidienne* entre les deux points dont on a déterminé précisément les coordonnées  $(x, y, z)$  dans le système de référence ETRF2000

Mesure des coordonnées : GPS + triangulation dans le tunnel du Gran Sasso

Calcul du temps de vol de la lumière :  $\text{TOF}_c = d/c$

- effet Sagnac (rotation du repère ETRF2000) pas pris en compte ( $\sim 2\text{ns}$ )
- courbure de l'espace-temps (champ gravitationnel de la Terre) négligeable

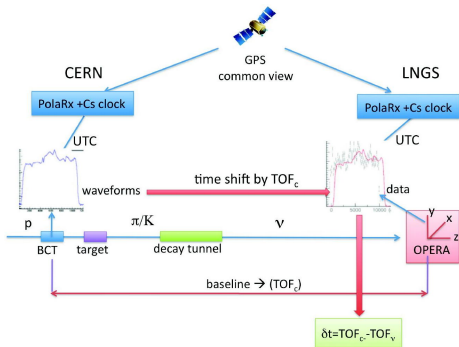
## Synchronisation des horloges CERN / Gran Sasso



[Adam et al., arXiv:1109.4897]

- Sur chaque site : même système d'horloge atomique (césium) couplée à un récepteur GPS
- Synchronisation a posteriori par GPS en vue commune
- Comparaison précise des deux systèmes GPS par un système GPS transportable par l'institut de métrologie allemand PTB

## Synchronisation des horloges CERN / Gran Sasso



[Adam et al., arXiv:1109.4897]

*Rem.* : les protons étant ultra-relativistes, le décalage entre le BCT et le point de production des neutrinos dans le “decay tunnel” n’introduit qu’une erreur de 0.2 ns.

- Sur chaque site : même système d’horloge atomique (césium) couplée à un récepteur GPS
- Synchronisation a posteriori par GPS en vue commune
- Comparaison précise des deux systèmes GPS par un système GPS transportable par l’institut de métrologie allemand PTB

# Résultat final

Correction de l'échelle de temps de 2006 tenant compte d'une meilleure mesure des positions et des temps :  $\delta t_{\text{cor}} = -987.8 \text{ ns}$

$$\Rightarrow \delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = \underbrace{\delta t_{2006}}_{1048.5 \text{ ns}} + \delta t_{\text{cor}}$$

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

Rem. :  $\delta t = 60 \text{ ns} \iff \delta \ell = 18 \text{ m}$

$\Rightarrow$  Variation relative vitesse des neutrinos / vitesse de la lumière :

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

# Résultat final

Correction de l'échelle de temps de 2006 tenant compte d'une meilleure mesure des positions et des temps :  $\delta t_{\text{cor}} = -987.8 \text{ ns}$

$$\Rightarrow \delta t = \text{TOF}_c - \text{TOF}_\nu = \underbrace{\delta t_{2006}}_{1048.5 \text{ ns}} + \delta t_{\text{cor}}$$

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

Rem. :  $\delta t = 60 \text{ ns} \iff \delta \ell = 18 \text{ m}$

$\Rightarrow$  Variation relative vitesse des neutrinos / vitesse de la lumière :

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

- Pas de dépendance en énergie (entre  $\langle E_\nu \rangle = 14 \text{ GeV}$  et  $\langle E_\nu \rangle = 43 \text{ GeV}$ )
- Pas de dépendance jour / nuit
- Pas de dépendance vis-à-vis des saisons

# Résultat final

*“Despite the large significance of the measurement reported here and the stability of the analysis, the potentially great impact of the result motivates the continuation of our studies in order to investigate possible still unknown systematic effects that could explain the observed anomaly. We deliberately do not attempt any theoretical or phenomenological interpretation of the results.”*

*[Adam et al., arXiv:1109.4897]*

# Outline

- 1 L'expérience OPERA
- 2 Autres mesures de la vitesse des neutrinos
- 3 Interprétations conventionnelles
- 4 Vers une nouvelle physique ?

# Autres mesures de la vitesse des neutrinos

- **Supernova SN 1987A** : détection d'une douzaine de neutrinos quasi-simultanée avec l'explosion optique ( $\pm$  quelques heures) : vue la distance de la supernova, cela implique  $\frac{|v - c|}{c} < 2 \times 10^{-9}$   
*NB : antineutrinos électroniques à  $\langle E_\nu \rangle \sim 10$  MeV*  
[Hirata et al., PRL **58**, 1490 (1987)]



# Autres mesures de la vitesse des neutrinos

- **Supernova SN 1987A** : détection d'une douzaine de neutrinos quasi-simultanée avec l'explosion optique ( $\pm$  quelques heures) : vue la

distance de la supernova, cela implique  $\frac{|v - c|}{c} < 2 \times 10^{-9}$

*NB* : antineutrinos électroniques à  $\langle E_\nu \rangle \sim 10 \text{ MeV}$

[Hirata et al., PRL 58, 1490 (1987)]

- **MINOS (2007)** : Fermilab (Chicago)  $\rightarrow$  Soudan mine (Minnesota),  $d = 734 \text{ km}$ , 473 neutrinos muoniques à  $E_\nu \sim 3 \text{ GeV}$  :

$\frac{v - c}{c} = 5.1 \pm 2.9 \times 10^{-5}$   $\leftarrow$  compatible avec OPERA à  $1\sigma$  et avec  $v = c$  à  $1.8\sigma$ ...

[Adamson et al., PRD 76, 072005 (2007)]

# Autres mesures de la vitesse des neutrinos

- **Supernova SN 1987A** : détection d'une douzaine de neutrinos quasi-simultanée avec l'explosion optique ( $\pm$  quelques heures) : vue la

distance de la supernova, cela implique  $\frac{|v - c|}{c} < 2 \times 10^{-9}$

*NB* : antineutrinos électroniques à  $\langle E_\nu \rangle \sim 10 \text{ MeV}$

[Hirata et al., PRL 58, 1490 (1987)]

- **MINOS (2007)** : Fermilab (Chicago)  $\rightarrow$  Soudan mine (Minnesota),  $d = 734 \text{ km}$ , 473 neutrinos muoniques à  $E_\nu \sim 3 \text{ GeV}$  :

$\frac{v - c}{c} = 5.1 \pm 2.9 \times 10^{-5}$   $\leftarrow$  compatible avec OPERA à  $1\sigma$  et avec  $v = c$  à  $1.8\sigma$ ...

[Adamson et al., PRD 76, 072005 (2007)]

# Autres mesures de la vitesse des neutrinos

- **Supernova SN 1987A** : détection d'une douzaine de neutrinos quasi-simultanée avec l'explosion optique ( $\pm$  quelques heures) : vue la distance de la supernova, cela implique  $\frac{|v - c|}{c} < 2 \times 10^{-9}$

*NB : antineutrinos électroniques à  $\langle E_\nu \rangle \sim 10$  MeV*

[Hirata et al., PRL 58, 1490 (1987)]

- **MINOS (2007)** : Fermilab (Chicago)  $\rightarrow$  Soudan mine (Minnesota),  $d = 734$  km, 473 neutrinos muoniques à  $E_\nu \sim 3$  GeV :

$\frac{v - c}{c} = 5.1 \pm 2.9 \times 10^{-5}$   $\leftarrow$  compatible avec OPERA à  $1\sigma$  et avec  $v = c$  à  $1.8\sigma$ ...

[Adamson et al., PRD 76, 072005 (2007)]

Expériences prochaines (**absolument nécessaires!**) :

- **T2K (Tokai to Kamioka)** (Japon) :  $d = 295$  km
- **MINOS (USA)** : nouvelles données

# Outline

- 1 L'expérience OPERA
- 2 Autres mesures de la vitesse des neutrinos
- 3 Interprétations conventionnelles**
- 4 Vers une nouvelle physique ?

# Outline

- 1 L'expérience OPERA
- 2 Autres mesures de la vitesse des neutrinos
- 3 Interprétations conventionnelles
- 4 Vers une nouvelle physique ?