

D'un Boson à l'Univers ... et ensuite ?

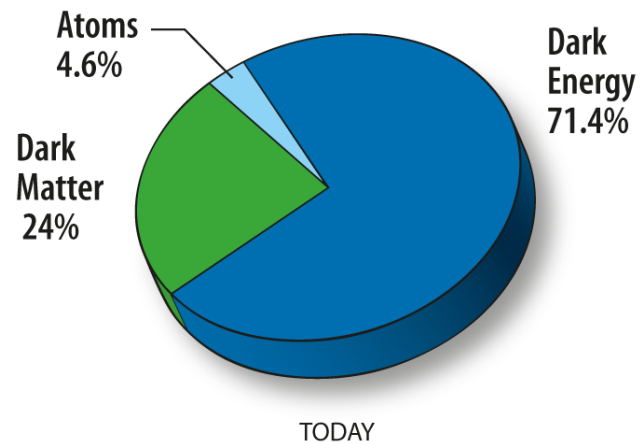


Quelles nouvelles voies...

Quelles nouvelles expériences?

- Rappels des séances précédentes
- Un éventail de nouveaux outils
(Barbara Clerboux, Jean-Marie Frère)
- Débat
- Echappées vers le futur
(François Englert)
- Suite du débat
- Modérateur: Frédéric Soumois,
journaliste scientifique

Matière Noire



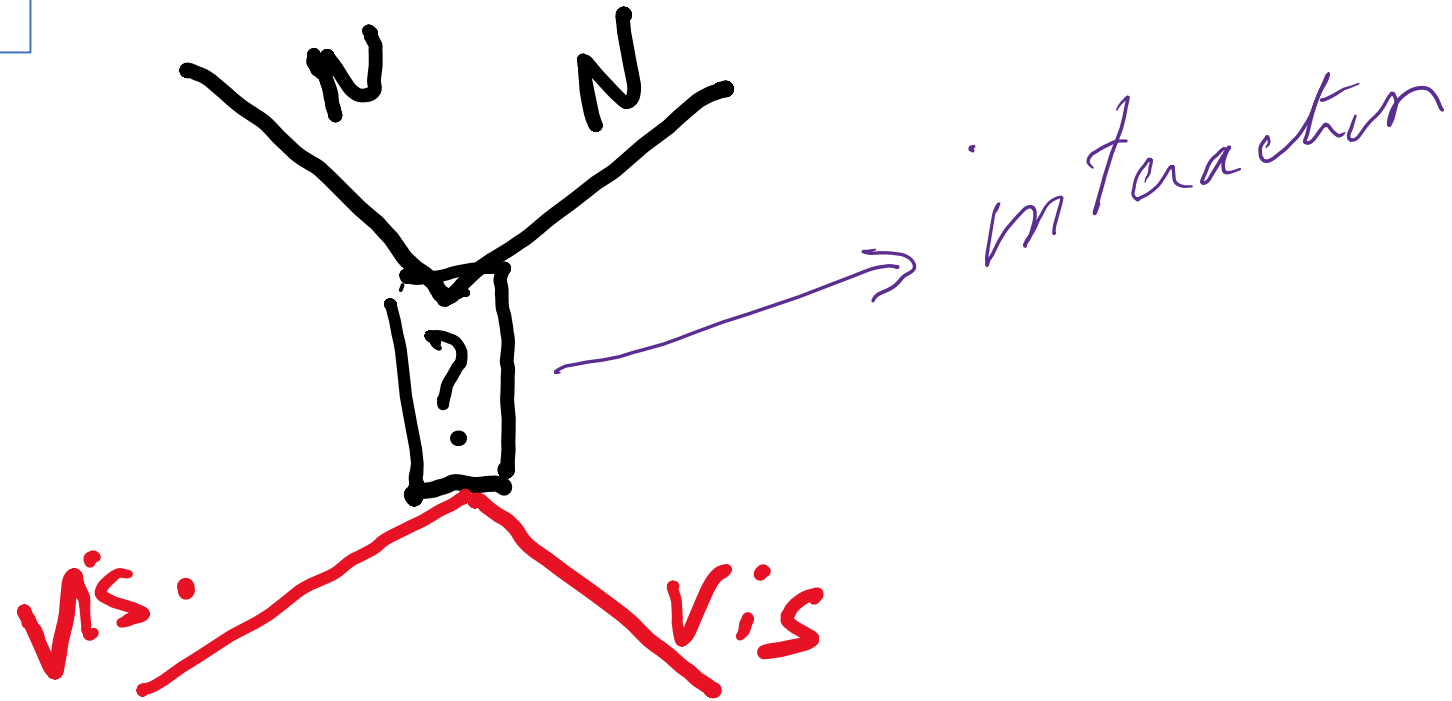
Indications : la matière visible n'est pas suffisante pour empêcher les étoiles les plus lointaines de s'échapper des galaxies, même problème au niveau des amas ...

Solutions :

- Revoir la gravitation à partir de l'échelle des galaxies (il existe des essais, mais pas convaincants)
- Accepter l'existence de « matière noire » (qui explique aussi l'évolution du début de l'univers)

La matière noire n'a pas nécessairement d'interactions avec la matière ordinaire, mais si de telles interactions existent, elles sont très faibles, (et peuvent expliquer l'abondance de la matière noire).

Détection de la matière noire



Matière "ordinaire", visible (parfois difficilement : neutrinos)



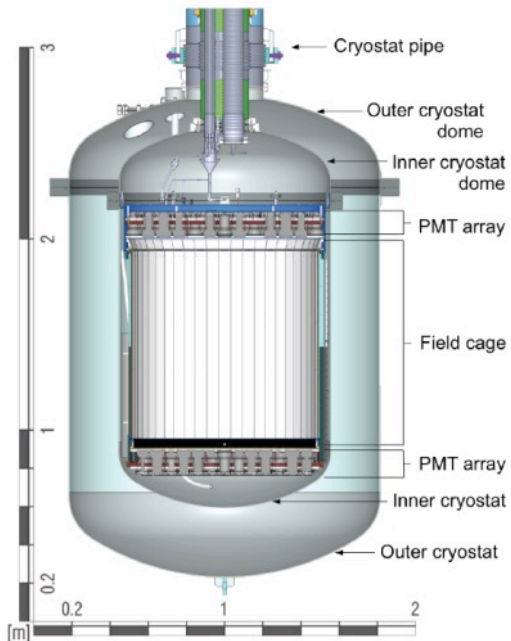
Matière noire : invisible dans les détecteurs.

Détection **directe** de la matière noire

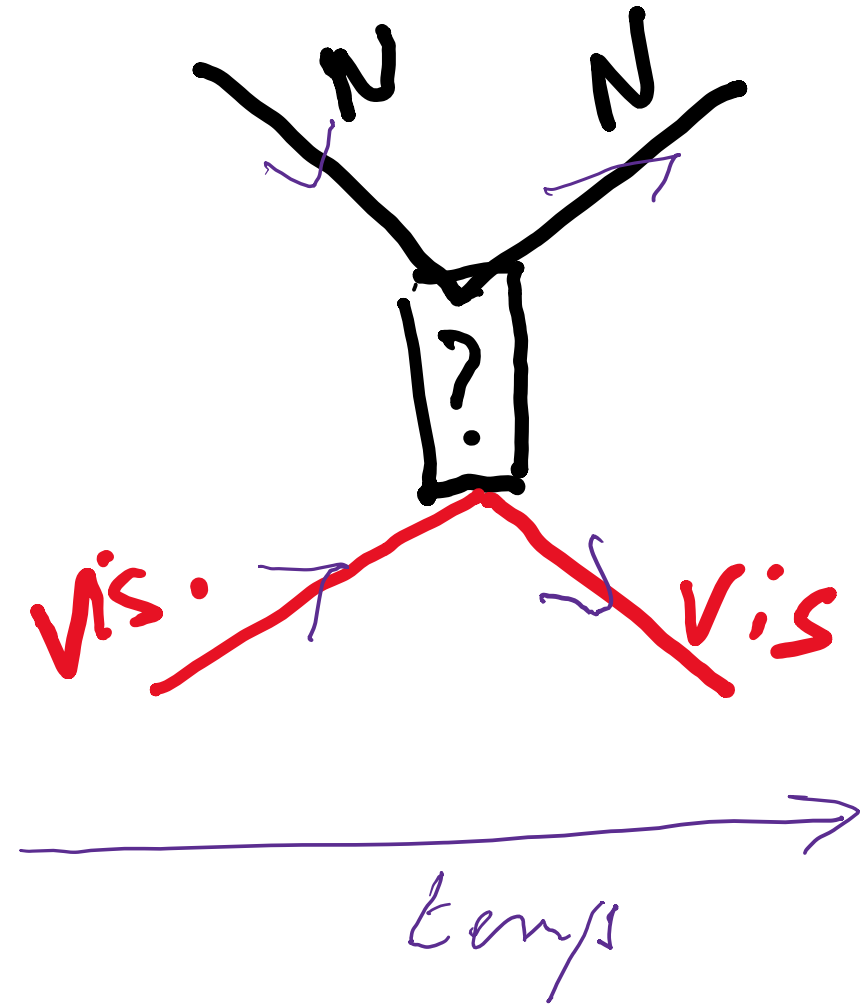
Un grand détecteur, isolé des rayons cosmiques, on détecte **un très faible recul (diverses techniques)**

Des détecteurs cryogéniques mesurent ce recul.

Exemples : Xenon 1 Tonne (Tunnel du Gran Sasso)



Crédit image : Xenon 1T collaboration

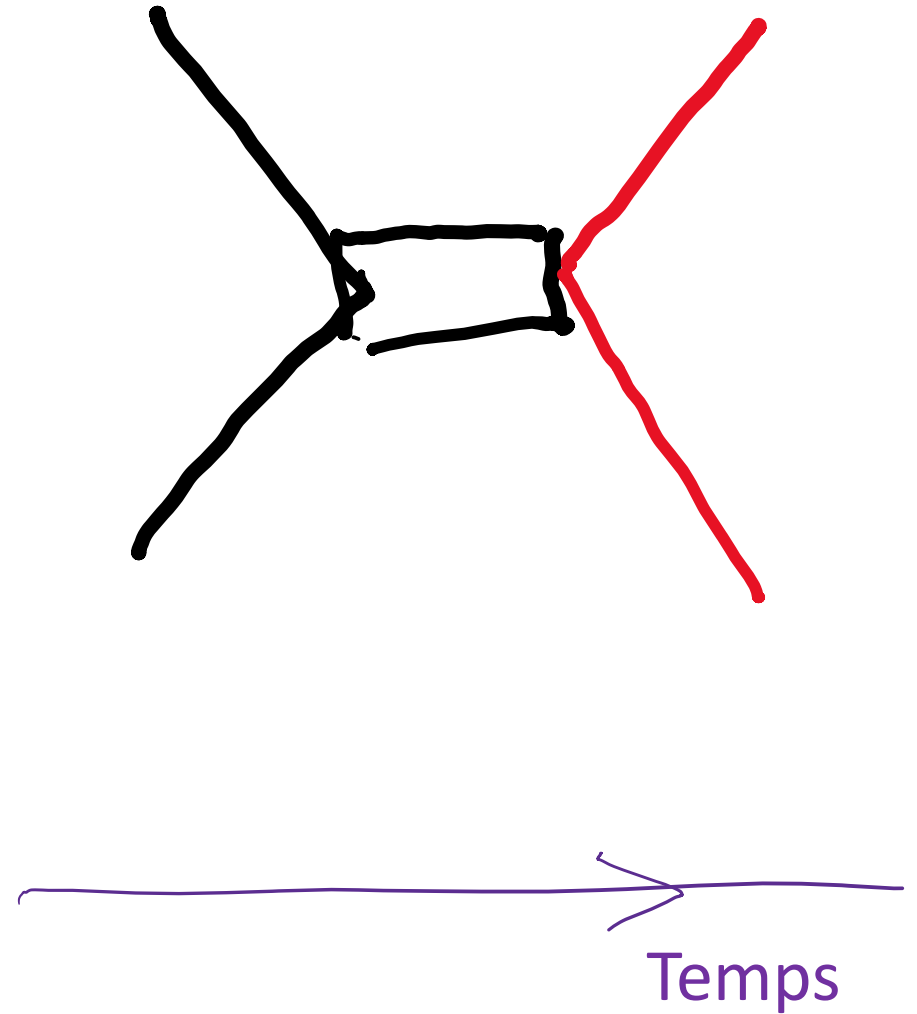


La Terre se déplace dans la galaxie, et donc par rapport à la matière noire (vitesse en centaines de km/s)

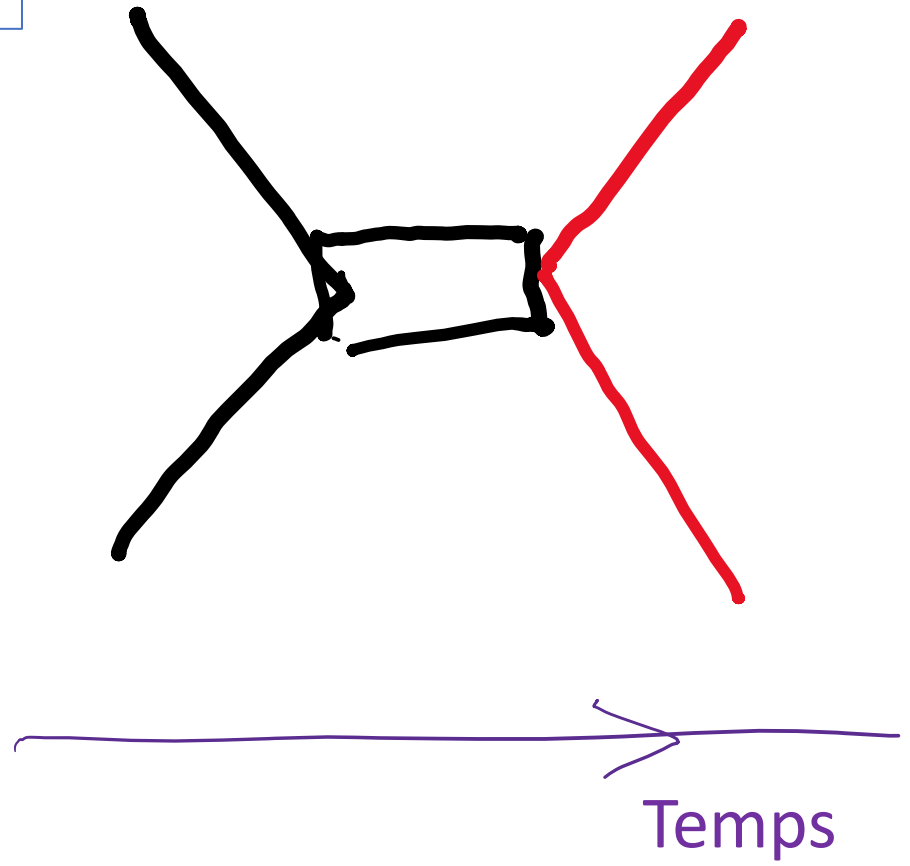
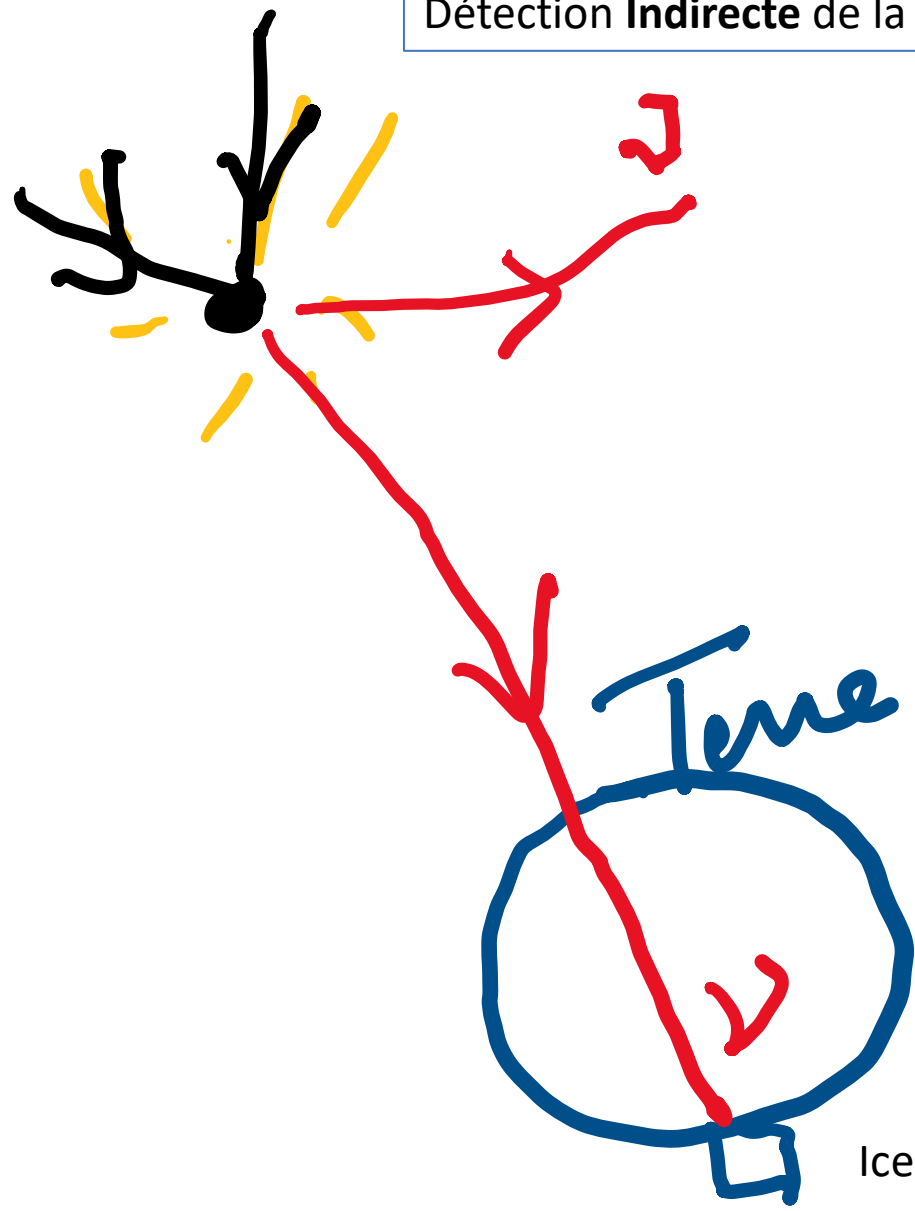
Implication d'équipes belges : non

Détection **Indirecte** de la matière noire

2 particules de matière noire s'annihilent (par exemple dans le Soleil) et produisent entre autres des neutrinos, qui sont détectés dans de grands détecteurs terrestres (par exemple, IceCube)

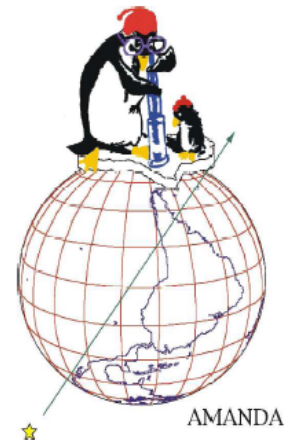
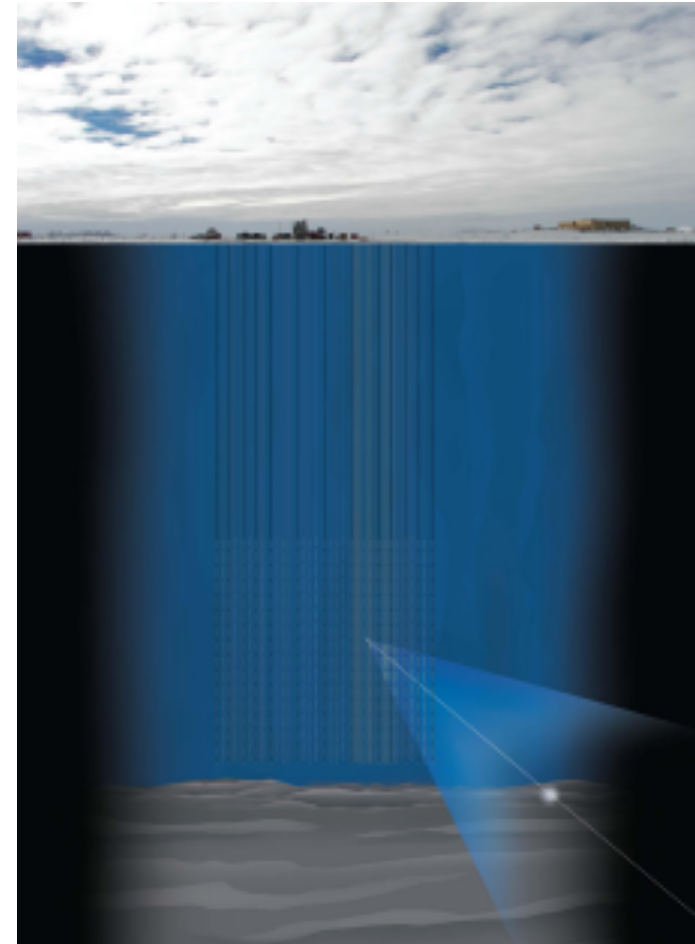
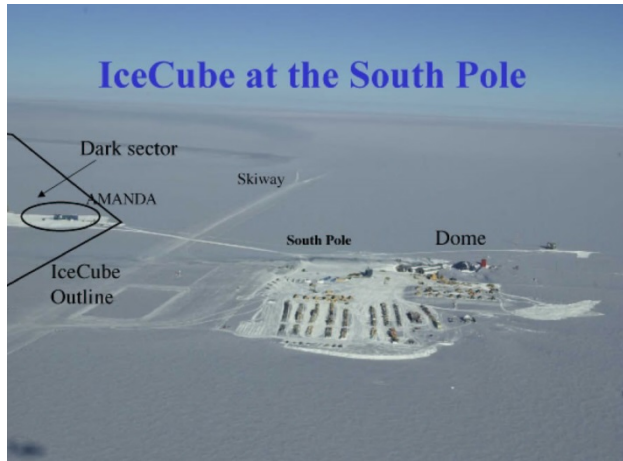
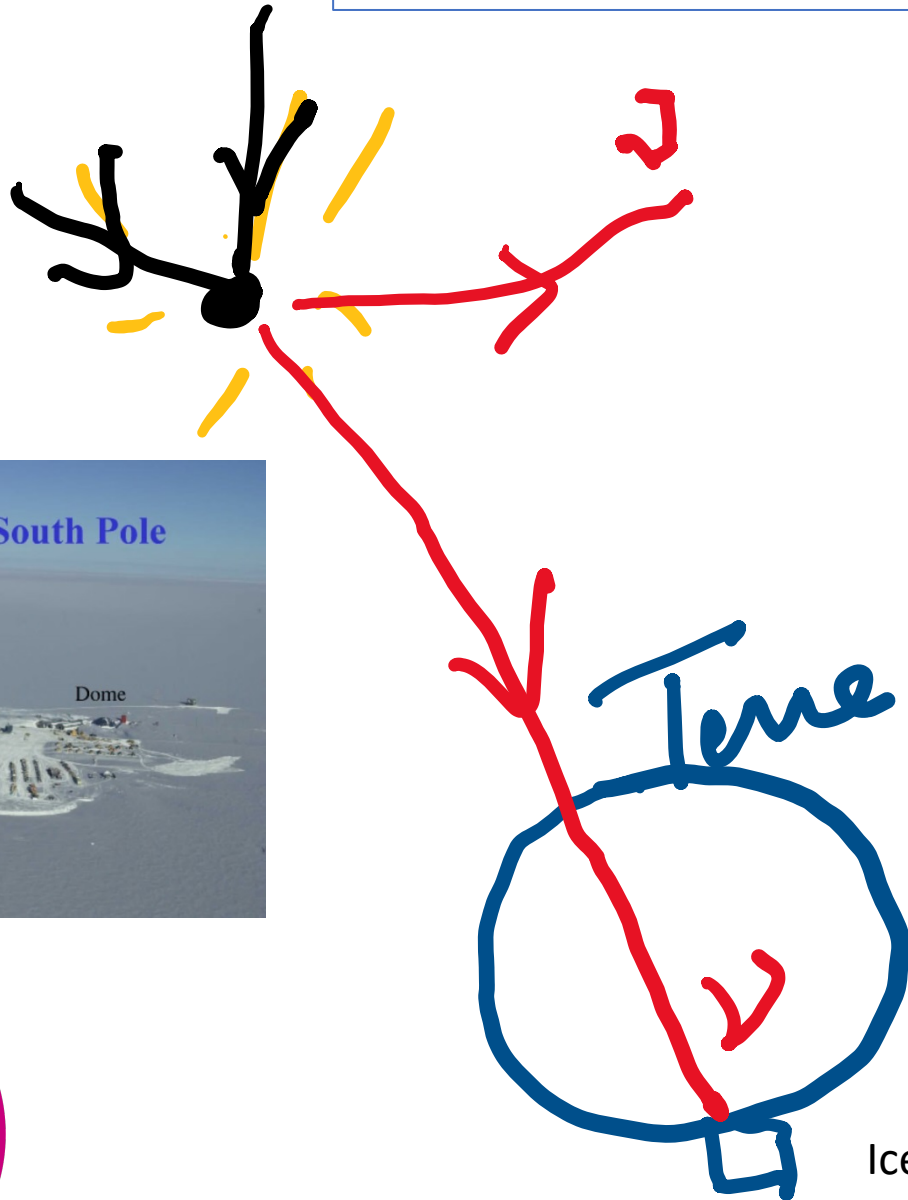


Détection **Indirecte** de la matière noire



IceCube (à 2000m sous la glace du Pôle Sud)

Détection **Indirecte** de la matière noire



IceCube (à 2000m sous la glace du Pôle Sud)

Crédit image : IceCube Collaboration

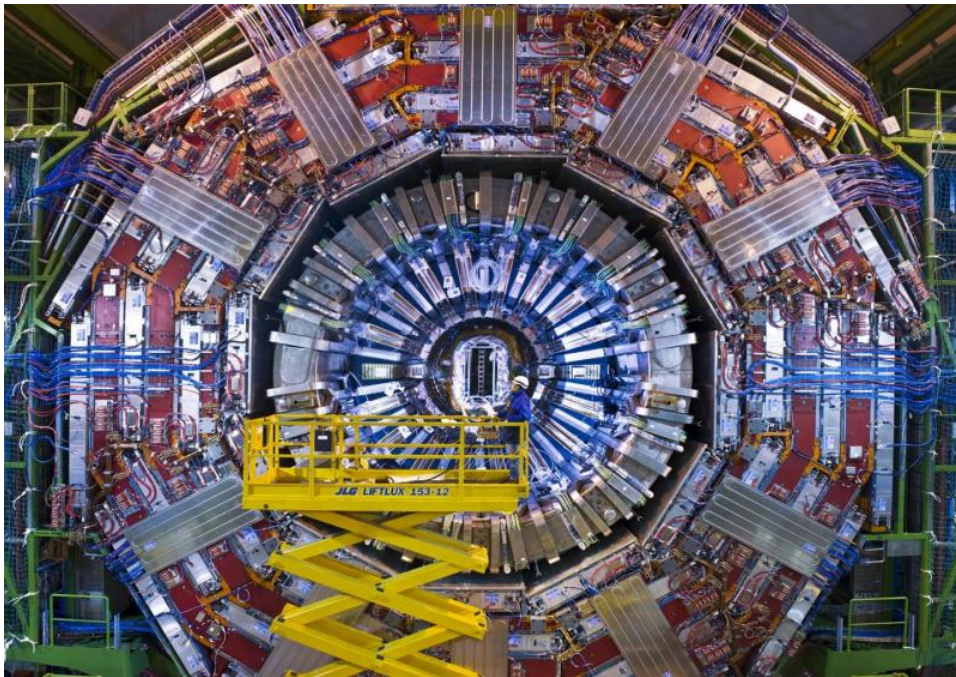
Participation belge : IceCube

IISNfnrs
Institut interuniversitaire
des sciences nucléaires

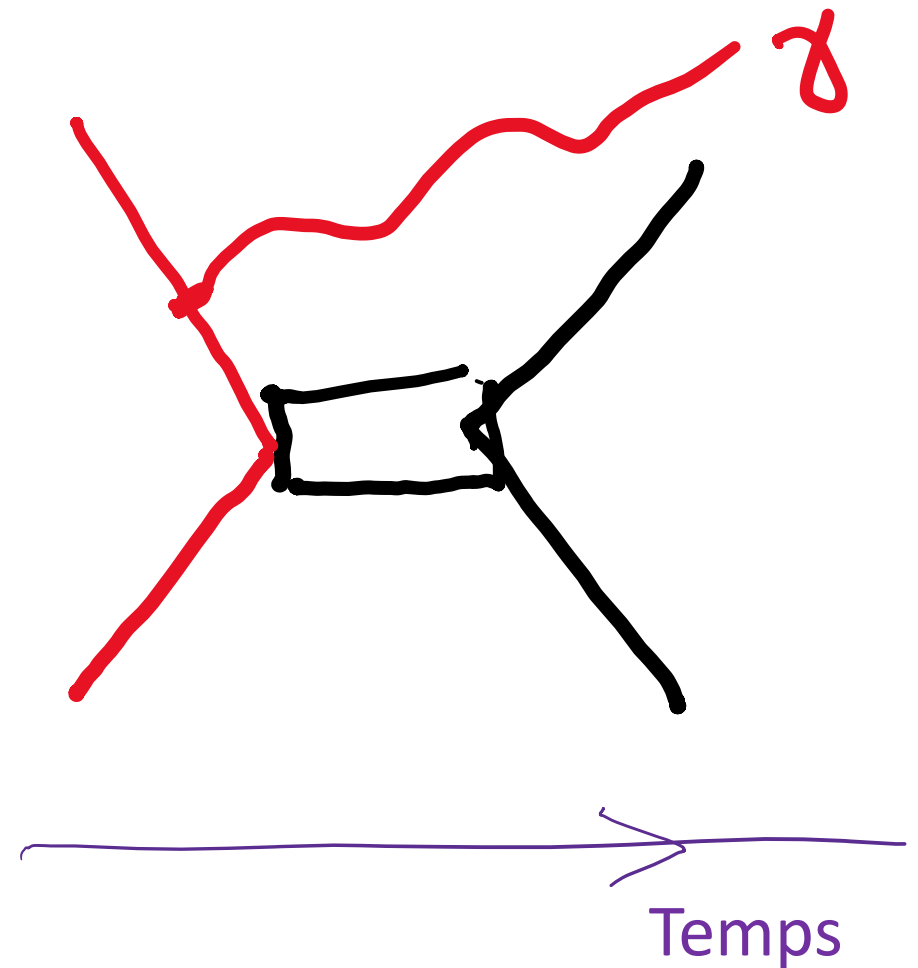
Création en paires de la matière noire

Un grand accélérateur envoie une particule sur une antiparticule, qui s'annihilent, et produisent de la matière noire (invisible) (Exemples : LHC, expériences CMS, ATLAS,...)

Une particule –témoin, par exemple un photon, permet de constater la réaction



Crédit image: CERN/CMS



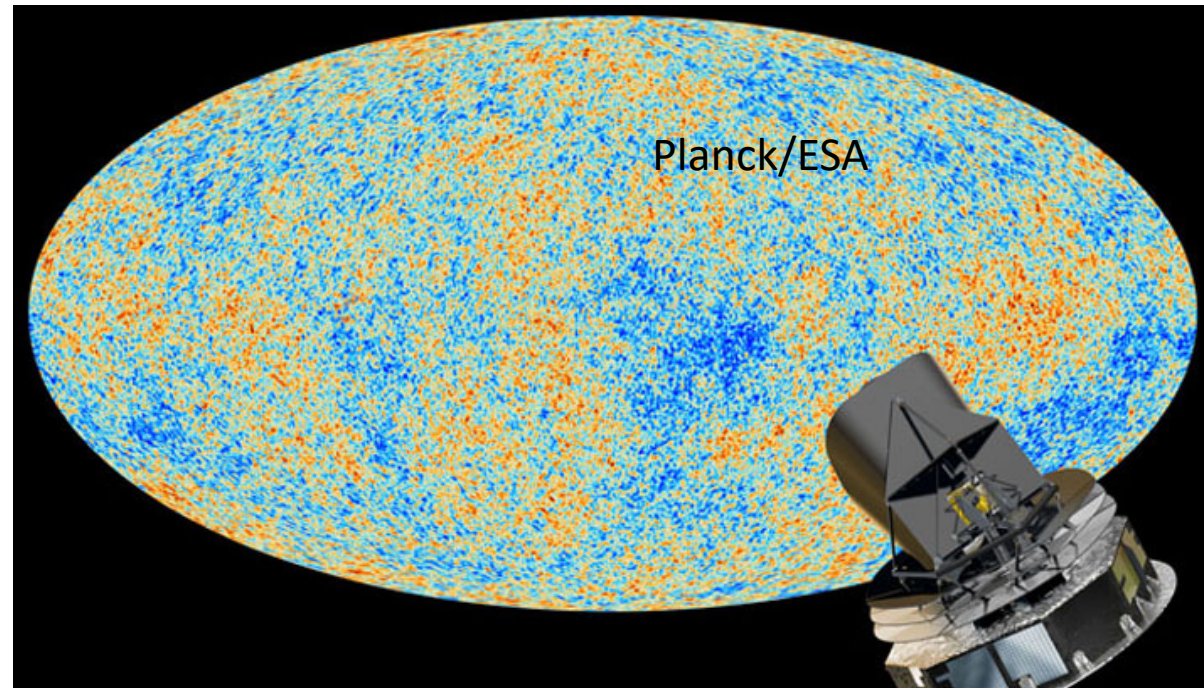
Implication d'équipes belges : oui : CMS

Matière Noire ... Approche par modélisation de l'univers naissant

Le rayonnement fossile du Big Bang a été refroidi jusqu'à 3°K
(photons dans la bande TV et radar, qui faisaient scintiller les appareils de TV analogique)

Ses anisotropies (minuscules) encodent l'évolution de l'univers naissant, sensible à la présence de matière noire, d'énergie noire, au nombre de familles de neutrinos...)

Exemple : Satellite Planck



De plus hautes énergies ... retour aux rayons cosmiques

La plus haute énergie détectée en rayons cosmiques : de l'ordre de 10^{20} eV, soit 10^8 TeV (cent millions de TeV), mais ils sont extrêmement rares à cette énergie → détecteurs de grande surface

Si l'énergie du LHC n'est "que" 7 TeV par faisceau (énergie « design »), la comparaison n'est pas si simple: ce qui compte là, c'est l'énergie disponible pour la création de particules, (7 TeV+ 7 TeV au maximum au LHC, mais réduit du fait que la collision a lieu entre "partons" qui ne portent qu'une fraction de l'énergie des protons) , Il faudrait un rayon cosmique de 64 000 TeV frappant un proton pour obtenir une énergie disponible similaire!

→ l'utilisation des rayons cosmiques vise plutôt la compréhension de l'Univers, des phénomènes cataclysmiques, des noyaux galactiques actifs ... leurs sources ne sont pas complètement élucidées .

De plus hautes énergies ... retour aux rayons cosmiques

- Hémisphère Nord : Telescope Array (UTAH) : 762 km²
- Hémisphère Sud : Auger
- Neutrinos cosmiques : IceCube (au Pôle Sud):

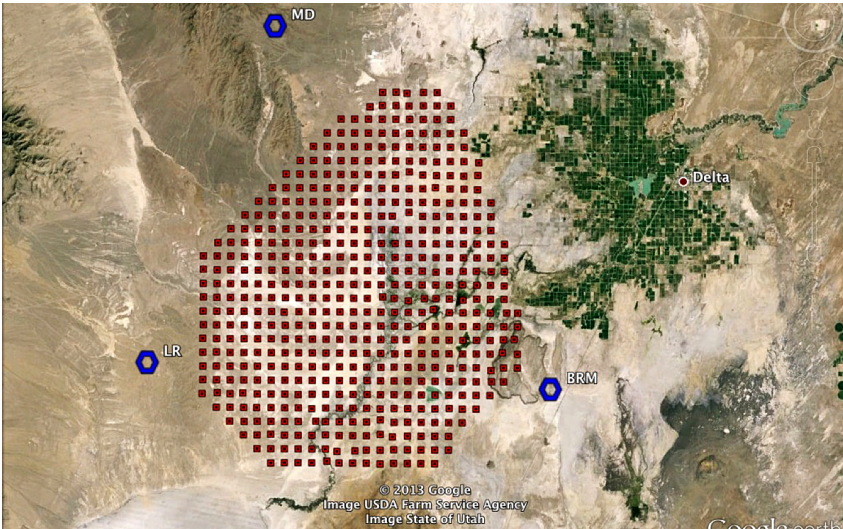
contribution belge



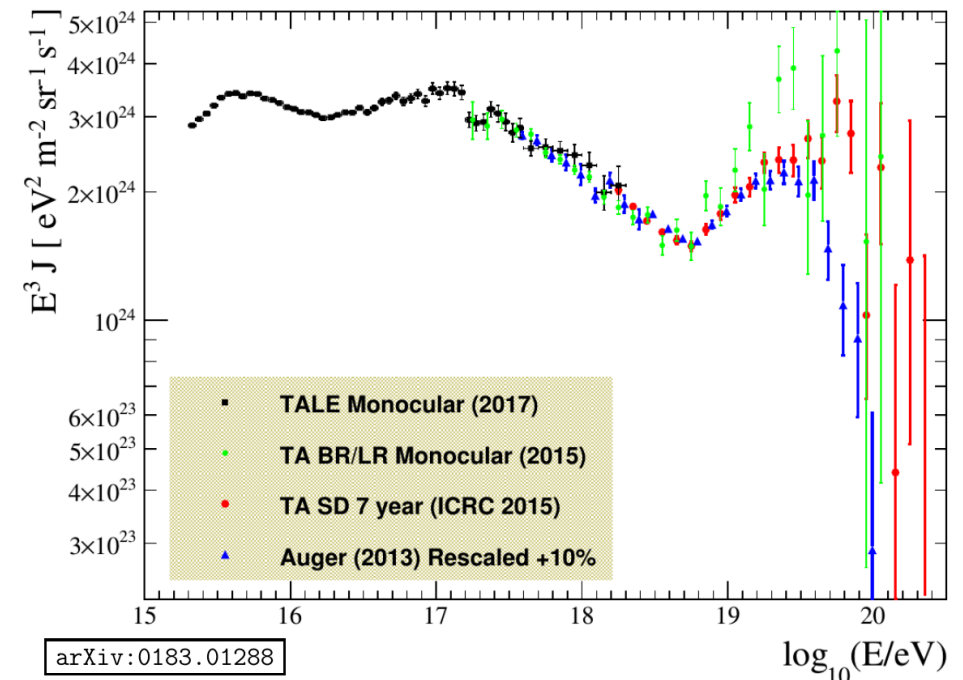
contribution belge



contribution belge



< Energy Spectrum (TA-SD, TA-FD, TALE-FD) >

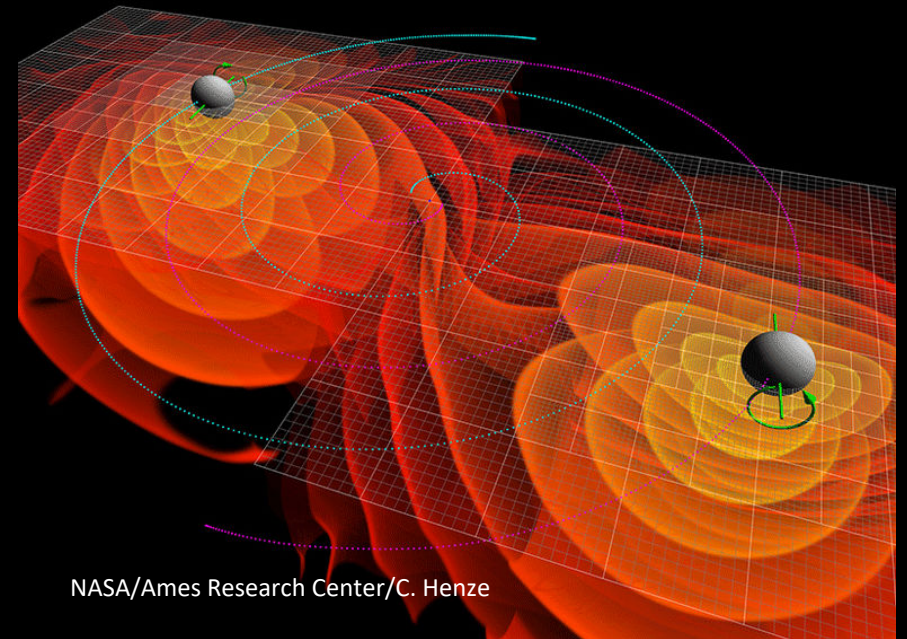


GW150914

Il y a 1,3 Milliards d'années *

Deux trous noirs s'étreignaient dans une spirale fusionnelle ...
L'annonce en est parvenue sur Terre le 14 septembre 2015

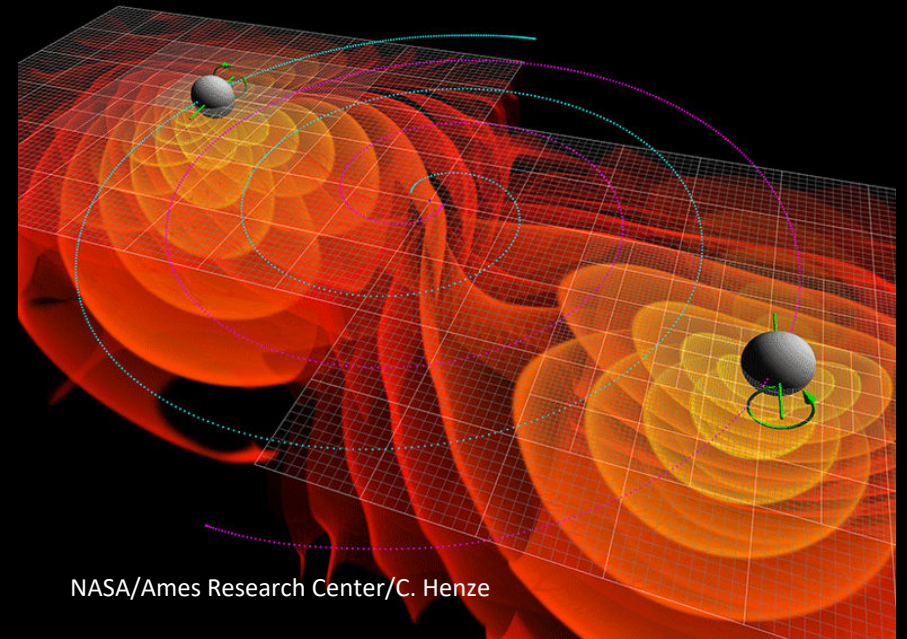
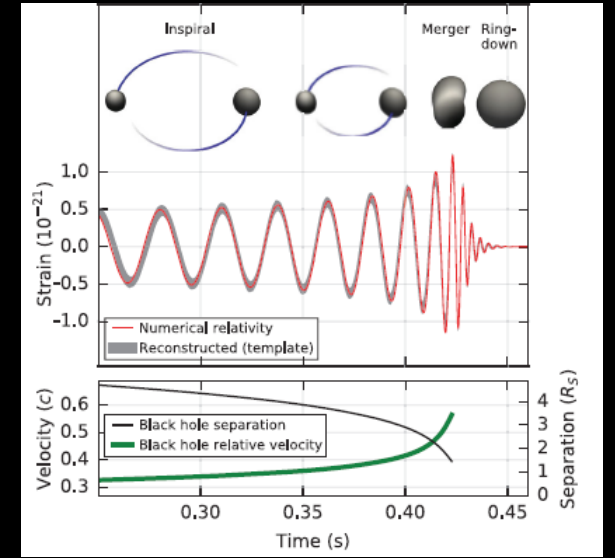
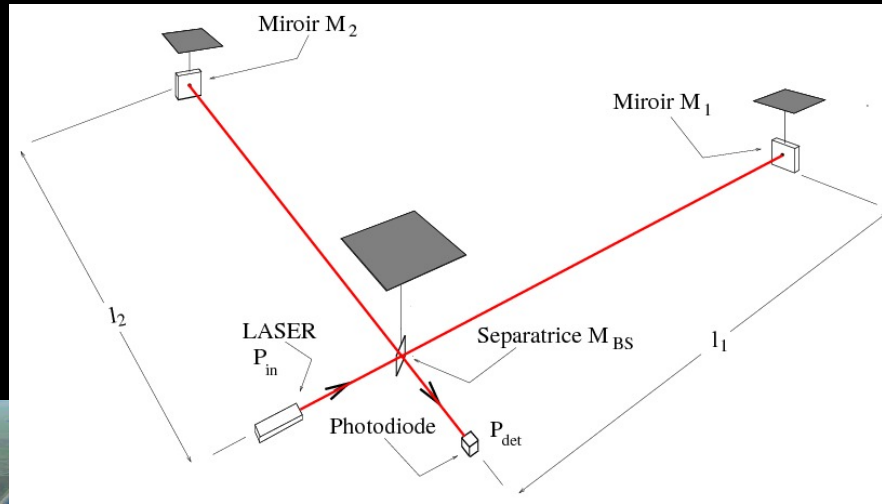
La découverte des ondes gravitationnelles fut surtout une confirmation, mais en même temps, elle offrit un nouveau moyen d'investigation. Dès la première observation, ce fut la révélation d'une population jusque là insoupçonnée de trous noirs (que l'on dit primordiaux), et qui pourraient contribuer en partie à la matière noire.



NASA/Ames Research Center/C. Henze

* (à quelques centaines de millions d'années près ...)

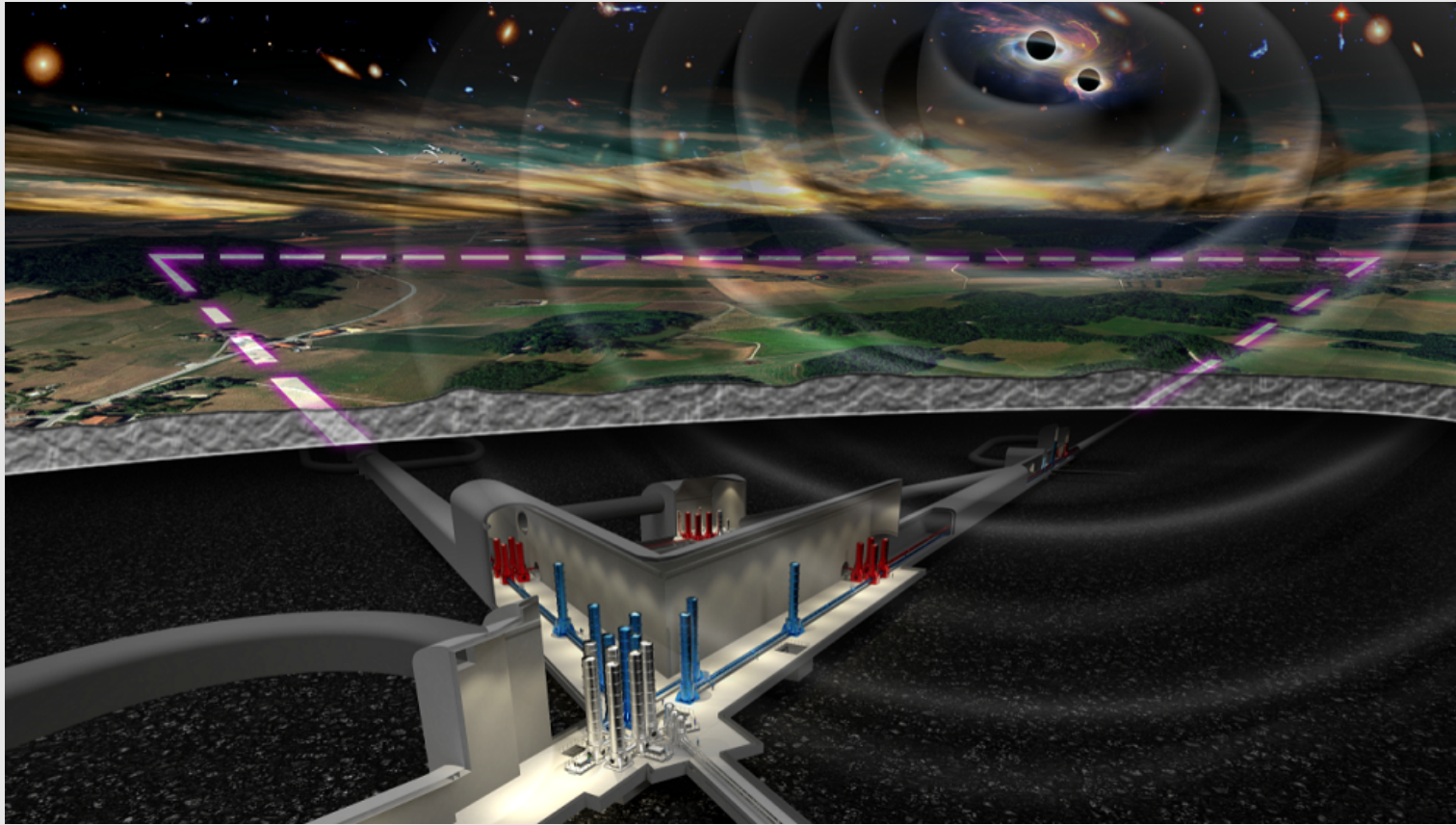
Observations en cours:
détecteurs LIGO (US)
et VIRGO (EU)



NASA/Ames Research Center/C. Henze

Participation belge : Virgo





Prochaine étape: Einstein « Telescope »

- Implantation possible dans la région des 3 frontières (BE-NL-DE)
→ attrait particulier pour nous!
- Configuration en triangle : sensible à toutes les polarisations
- En tunnel : réduction des vibrations
- Certaines optiques refroidies:
- Bras de 10 km (3km pour Virgo)

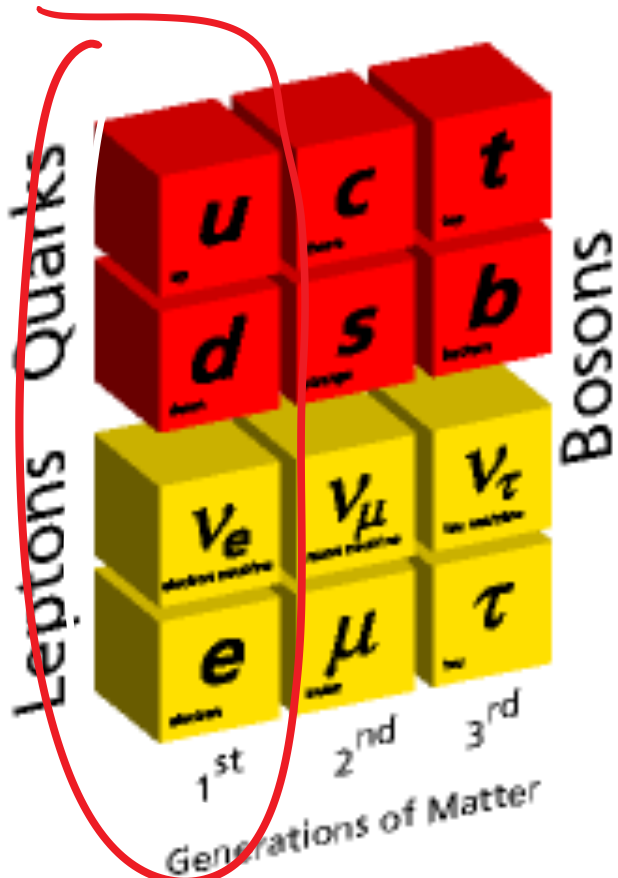
Une meilleure sensibilité en fréquence permettra d'observer beaucoup plus d'objets, notamment moins massifs (objets stellaires) et de tester de façon beaucoup plus critique la relativité générale, la distribution des trous noirs ... l'objet d'un autre cours !



Comprendre les particules
et leurs interactions

3 familles

Elementary Particles



Boson de
Brout-Englert-Higgs

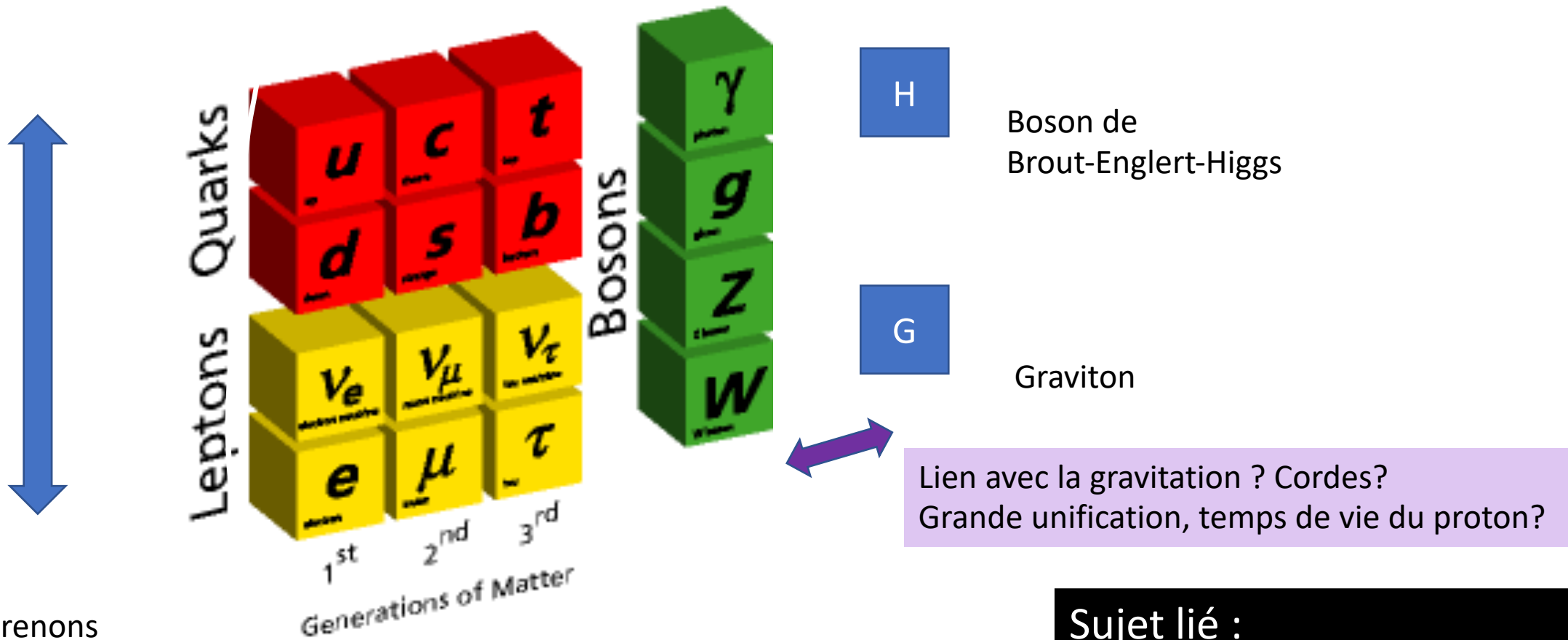


Graviton

Pourquoi?
Spectre de masses??

toute la chimie
+ nucléaire

Elementary Particles



Nous comprenons ces interactions, Grâce au mécanisme de Brout-Englert-Higgs

Lien avec la gravitation ? Cordes?
Grande unification, temps de vie du proton?

**Sujet lié :
La défaite de l'anti-matière**

Nous ne comprenons pas cette direction
« interactions horizontales? »

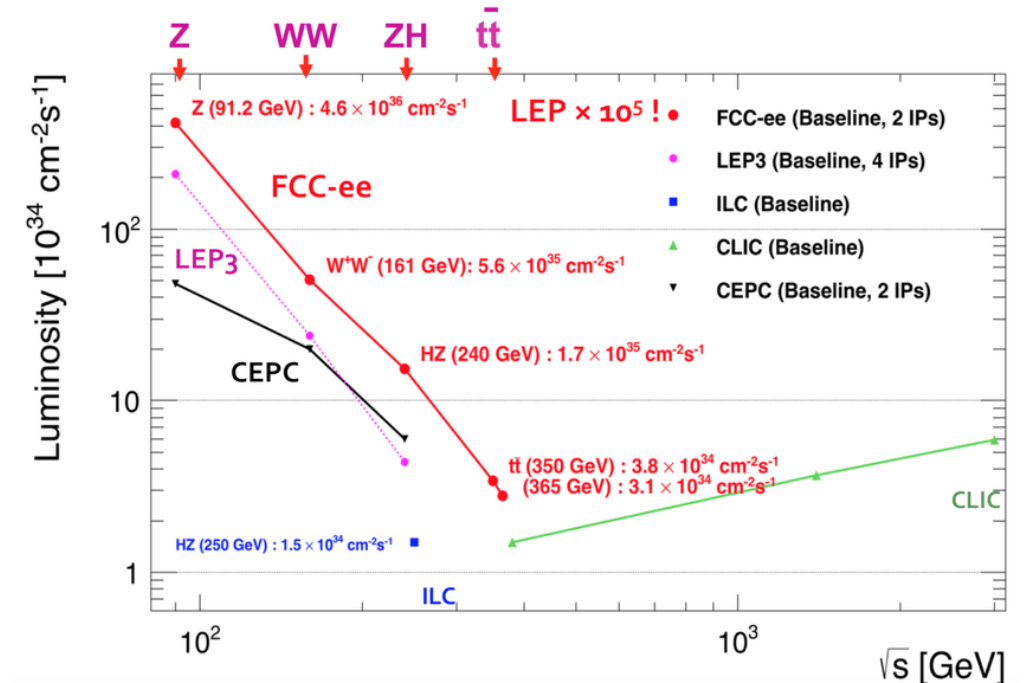
La course aux énergies ... électrons ou protons?

- Les **électrons** ont beaucoup d'avantages :
 - + élémentaires, ils n'ont pas de sous-constituents, toute l'énergie disponible peut être affectée à la création de nouvelles particules
 - + Il y a en outre peu de bruit, la plupart des particules émises étant directement liées à l'objet recherché
On peut parler de collisions « propres »
 - Par contre, il est difficile d'obtenir à la fois de très hautes énergies et de fortes intensités (pertes par rayonnement)

La dernière machine disponible (LEP2) atteignait un peu plus de 200 GeV d'énergie disponible.

Des projets existent pour une machine avec faisceaux e^+ et e^- qui serait une « usine à H » pour en étudier les propriétés du boson H avec précision

Projets usine à H à partir d'annihilations e^+e^- :
Machine e^+e^- linéaire : ILC (Japon), CLIC (CERN)
Collisionneur e^+e^- : FCC-ee (CERN, nouveau tunnel de 100 km de circonférence), CEPC (China)



La course aux énergies ...électrons ou protons?

Implication belge : CMS , HL-LHC



- Les **protons** ont
 - + l'avantage de **permettre de très hautes énergies** (pas de perte par rayonnement de « freinage » comme les électrons) et de hautes intensité (en stockant les faisceaux de haute énergie et en multipliant les collisions)
 - Mais comme ils sont **composites** (3 quarks dits de valence, mais plus de la $\frac{1}{2}$ de l'énergie portée par la « mer », soit un amas de quarks et antiquarks divers, et de gluons), **seule une fraction de l'énergie disponible participe vraiment à la collision,**
et les **autres parties du proton engendrent des réactions secondaires qui obscurcissent l'image**
- La machine actuelle (LHC) a atteint (devrait atteindre) une énergie « brute » disponible de 13 TeV (14 TeV), mais seule une fraction est utilisable : selon le cas, on place des limites allant de 1 à 5 TeV.

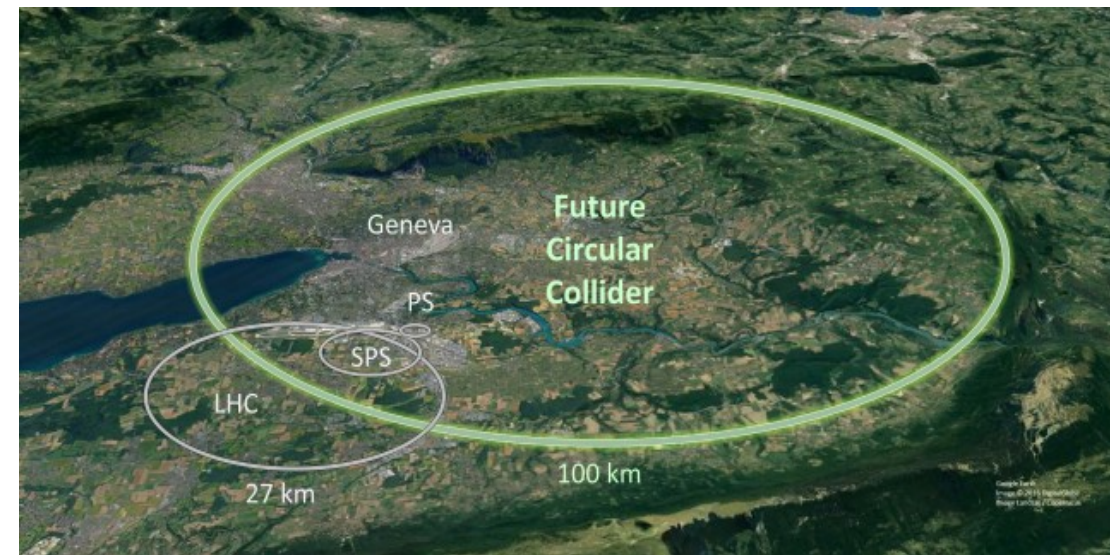
Après le LHC : « High-luminosity - LHC » (HL-LHC)

données : 2026-2036

Un projet de machine p-p (FCC-hh au CERN, 100 km de circonférence)

pourrait atteindre approx. 100 TeV d'énergie « brute » disponible.

Rien n'indique toutefois que de nouvelles particules soient à découvrir dans cette fenêtre, plutôt qu'à des énergies moins accessibles



La course aux énergies ... et les voies indirectes ?

Mesures de précision extrême

Exemple (dans un autre canal) : l'expérience NA 62 au CERN - présence belge



$$\Gamma \sim m_\tau * g^4 * \left(\frac{m_\tau}{M_W}\right)^4$$

Nous avons vu qu'à très basse énergie, une réaction est d'autant plus improbable que la masse de la particule intermédiaire est grande

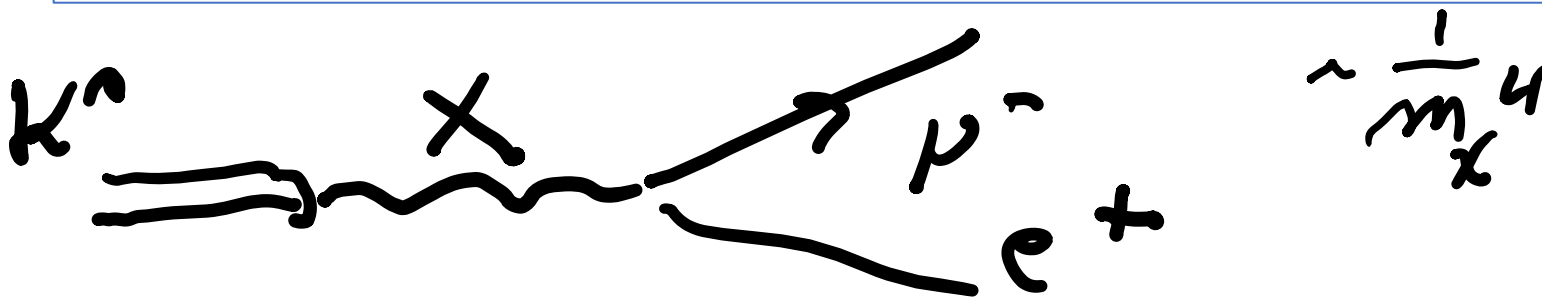
Une des particules de choix est le « méson K neutre » d'une masse approx ½ fois celle du proton, il est instable, mais, dans notre monde, il a une « demi- vie » « longue » : 51 nanosecondes ...

On en produit des quantités ... et on arrive à les observer, en maintenant les contaminations très basses.

Ainsi, si on observe, par exemple 10^{12} désintégrations, on peut étudier des désintégrations « rares » à l'échelle d'un millièème de milliardième ..

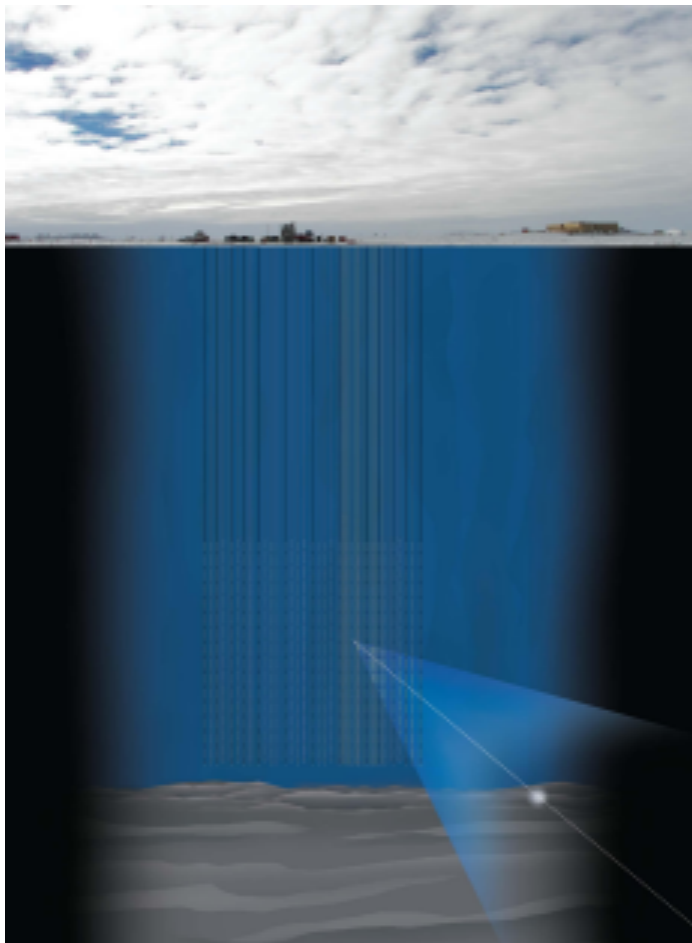
C'est la probabilité qui serait associée à une particule X de masse hypothétique de 1000 fois la masse du W ,

suyant (K -> electron antimuon) , une telle particule est exclue pour une masse inférieure à 100 TeV, pourtant inaccessible aux machines actuelles ou en projet



Limite de l'approche: peu d'analyses peuvent atteindre cette précision, et on n'obtient pas une image complète.

D'une caverne au Japon,
à la glace du Pôle Sud



NEUTRINOS

À la chasse (ou la pêche?) aux oscillations de neutrinos...

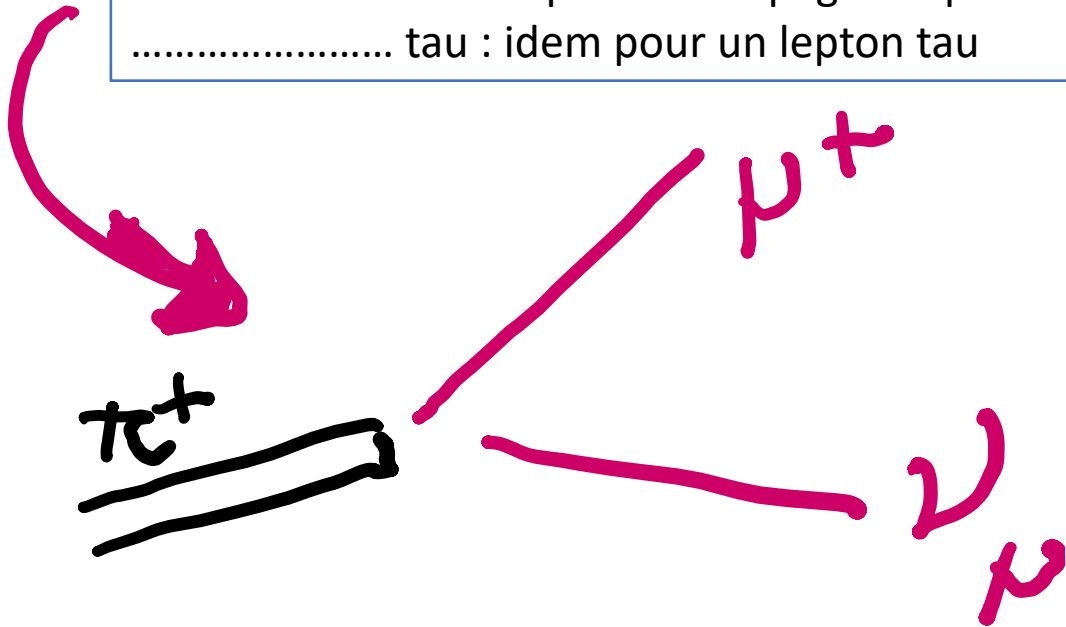
Crédit images : IceCube, SuperKamioka

Les Neutrinos ... Oscillent

3 sortes de neutrinos connus et peut-être d'autres ...

On peut les classer par masse ou par la nature de leurs interactions (un peu comme si sur un terrain de foot, on classait les joueurs par leur poids ou la couleur de leur maillot !)

(anti)neutrino électronique : produit en même temps qu'un électron (par exemple désintégration nucléaire)
.....muonique : accompagne la production d'un muon
..... tau : idem pour un lepton tau



Une fois échappés à leur « créateur » les neutrinos évoluent sous le seul effet de leur masse ...
Mais, justement, les neutrinos « de saveur » ne coïncident pas avec les neutrinos « de masse »
(et nous savons qu'il y a AU MOINS 3 neutrinos de masse).

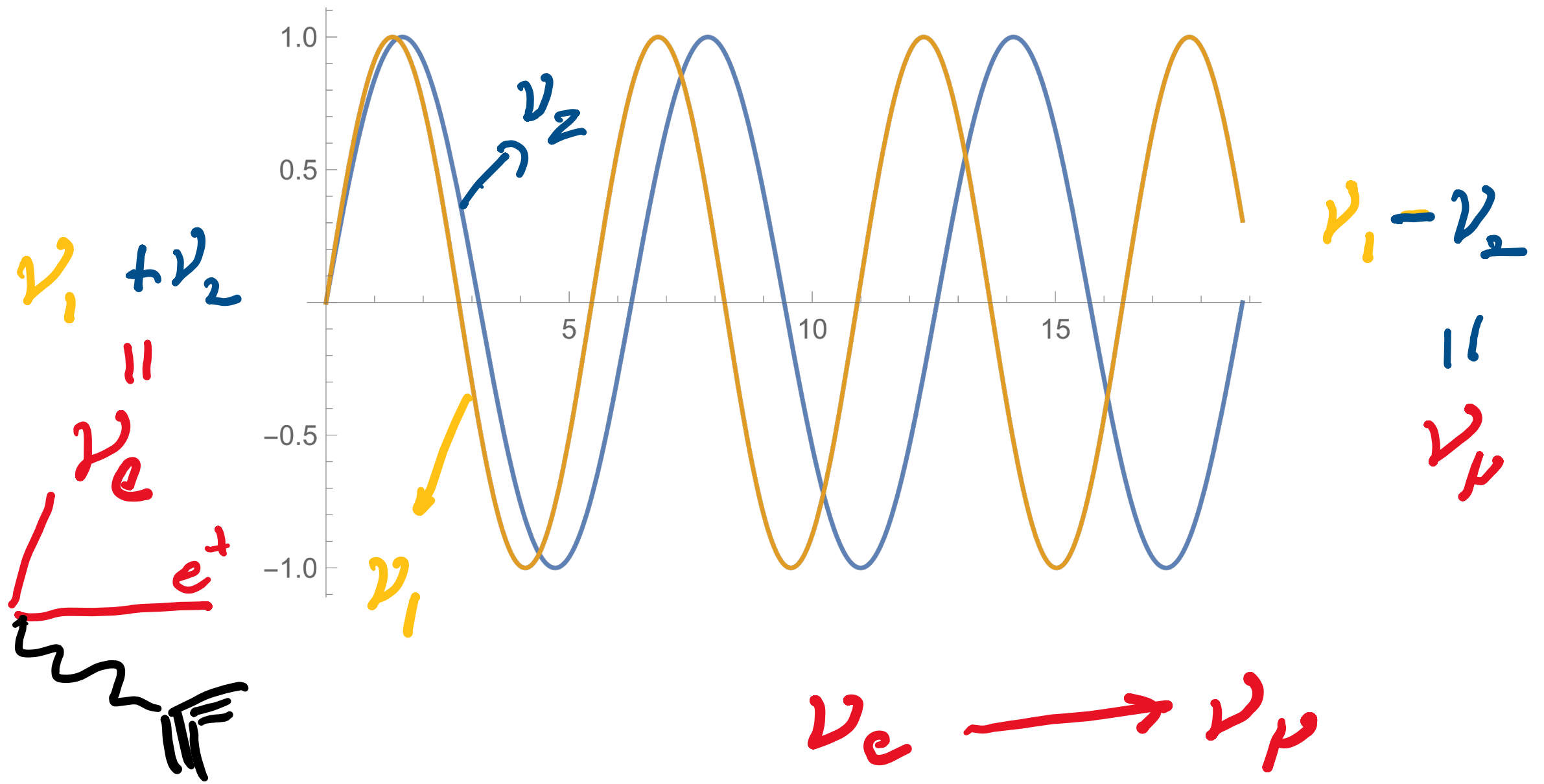
Par exemple (les chiffres ne sont pas les chiffres réels, mais un essai de pédagogie)

$$\nu_e = (\nu_1 + \nu_2) / \sqrt{2}$$

$$\nu_\mu = (\nu_1 - \nu_2) / \sqrt{2}$$

$$\begin{aligned} \nu_1 &\rightarrow m_1 \\ \nu_2 &\rightarrow m_2 \end{aligned}$$

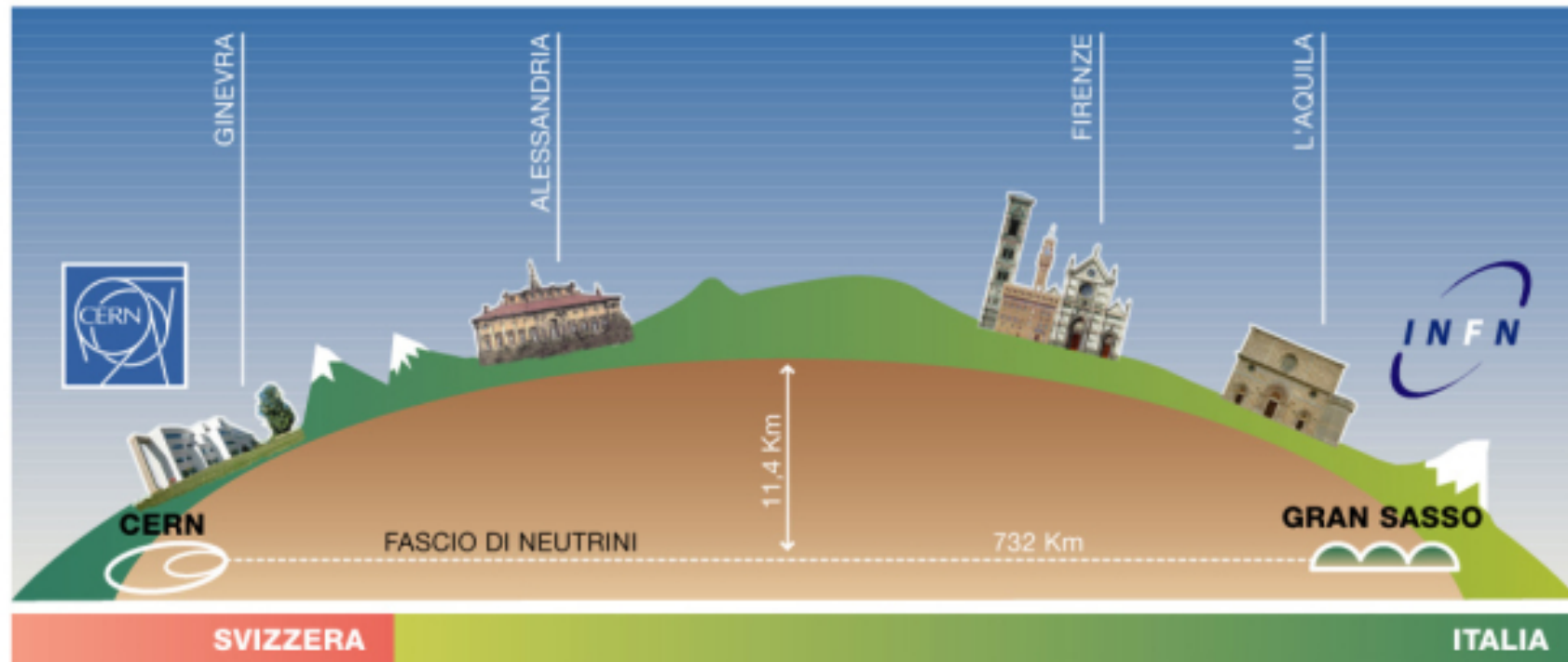
Les 2 neutrinos sont des ondes, qui se propagent avec des longueurs d'ondes différentes ... (un peu comme les battements entre 2 cordes qu'on accorde ...)



Exemple vécu :

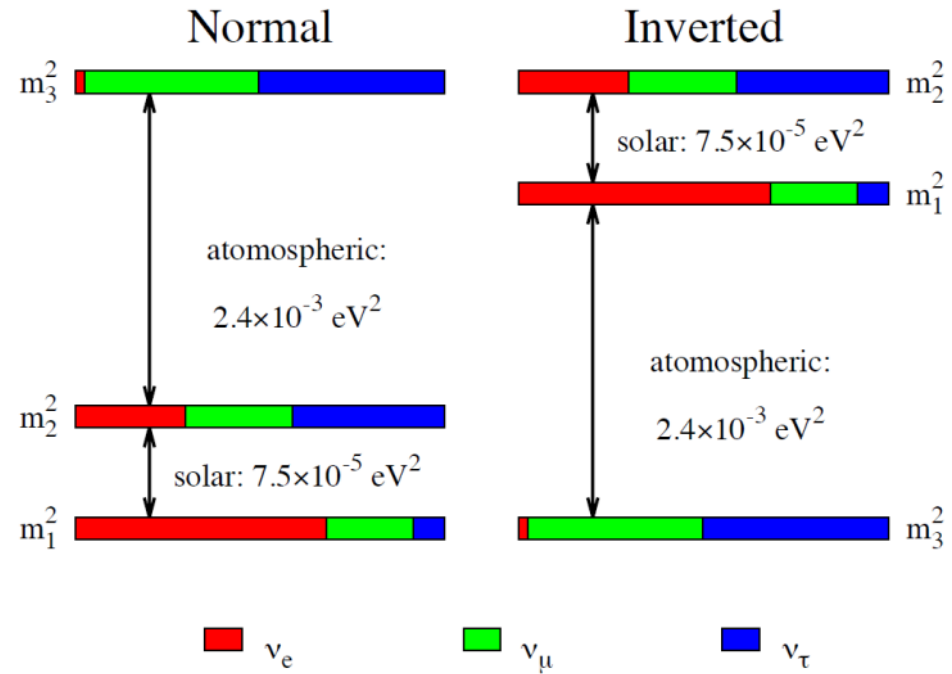
Un neutrino « mu » produit au CERN
voyage ... sous l'église et le cimetière de Meyrin ... bien loin jusqu'au tunnel du Gran Sasso en Italie,

Il interagit dans l'expérience CHORUS pour produire un « tau », il a donc oscillé de neutrino « mu » en neutrino « tau ».



En fait , le mélange est plus complexe,
... et on n'a pas encore décidé entre ces deux
schémas (c'est l'objet entre autres,
de l'expérience JUNO).

Sans parler des neutrinos stériles ...



Crédit image : JUNO

Les neutrinos : beaucoup de questions :

Combien de neutrinos « de masse » ? Des neutrinos stériles ? (les joueurs qui restent sur le banc?)
Quelles masses (nous ne connaissons que les différences...)

2 expériences en cours

- Recherche de neutrinos « stériles » suite à des anomalies dans les mesures de réacteurs :
participation belge : expérience SOLID à MOL
- Masses des neutrinos: participation belge ; expérience JUNO en Chine



Et encore : les grands détecteurs de neutrinos solaires et atmosphériques,
les limites sur le temps de vie du proton : $> 10^{33}$ années, soit $\dots 10^{23}$ fois l'âge de
l'Univers (**comment obtient-on cette limite?**)

