

Lycée de Bois d'Olive – Saint Pierre, La Réunion

Jeudi 10 novembre 2022

Nicolas Arnaud (nicolas.arnaud@ijclab.in2p3.fr)

Laboratoire de Physique des Deux Infinis Irène Joliot-Curie (Université Paris-Saclay & CNRS/IN2P3)
European Gravitational Observatory (CNRS, INFN & NIKHEF Consortium)



Je me présente ...

- **Premier voyage à La Réunion**
 - Dans l'hémisphère sud en fait
- 48 ans, **chercheur CNRS** en « **physique des deux infinis** » depuis 2003
 - **Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3)**
 - Laboratoire d'origine : **IJCLab** (Orsay, près de Paris)
 - Issu de la fusion en 2020 de cinq laboratoires – dont le **LAL**
 - **Détaché à EGO**, laboratoire d'accueil du **détecteur d'ondes gravitationnelles Virgo**
 - J'habite actuellement à **Florence** en **Italie**
- **Études**
 - **Filière scientifique au lycée** (« **bac C** » en 1992)
 - **Classes préparatoires** (1992-1995)
 - **École Nationale des Ponts et Chaussées** (« **École des Ponts ParisTech** », 1995-1999)
 - 1997-1998 : **année de césure**, **stage d'un an** au **LAL** (groupe **Virgo**, Orsay)
 - **Master 2** (DEA) à la place de la troisième année d'école
 - **Thèse** au **LAL** dans l'expérience **Virgo** (1999-2002)
- **Post-doc** (CDD chercheur) au **CERN** dans l'expérience **LHCb** (2002-2003)
- Recrutement au **CNRS** comme **chargé de recherche** (1^{er} octobre 2003)

Un chercheur, quèsaco ?

- Chercheur CNRS ?
- Physique des deux infinis ?
- Docteur ?
- Ingénieur ?

→ Vos questions !

- À votre avis
 - Sur quoi je travaille ?
 - Dans quels buts ?
 - Où ?
 - Comment ? Quels outils ?
 - Avec qui ?
 - À quoi je sers ?
 - Est-ce que je trouve ?
 - ...

→ Avez-vous déjà rencontré ou vu (en vrai, dans les medias, sur internet, etc.) des scientifiques ?

▪ Si oui, qu'en avez-vous pensé ?

▪ Si non, pourquoi ?



La recherche et la science

- Que pensez-vous de la science ?
- Quelle image en avez-vous ?
 - Positive
 - Négative
 - Neutre
- La science fait-elle partie de votre quotidien ?
- La science est-elle utile à la société ?
- Qu'attendez-vous des chercheurs ?
- Quels défis pour la science dans le monde de demain qui sera le vôtre (et, j'espère, encore le mien) ?

World Wide Web

The WorldWideWeb (W3) is a wide-area [hypermedia](#) information retrieval initiative aiming to give universal access to a large universe of documents.

Everything there is online about W3 is linked directly or indirectly to this document, including an [executive summary](#) of the project, [Mailing lists](#), [Policy](#), November's [W3 news](#), [Frequently Asked Questions](#).

[What's out there?](#)

Pointers to the world's online information, [subjects](#), [W3 servers](#), etc.

[Help](#)

on the browser you are using

[Software Products](#)

A list of W3 project components and their current state. (e.g. [Line Mode](#), [X11 Viola](#), [NeXTStep](#), [Servers](#), [Tools](#), [Mail robot](#), [Library](#))

[Technical](#)

Details of protocols, formats, program internals etc

[Bibliography](#)

Paper documentation on W3 and references.

[People](#)

A list of some people involved in the project.

[History](#)

A summary of the history of the project.

[How can I help ?](#)

If you would like to support the web..

[Getting code](#)

Getting the code by [anonymous FTP](#), etc.



Du lycée à « Ponts Paris Tech »

- Lycée Hélène Boucher à Paris

- Bac mention AB



- Classes préparatoires au lycée Marcelin Berthelot à Saint Maur

- M', 5/2

- École Nationale des Ponts et Chaussées

- Nom de marque : « École des Ponts Paris Tech »

- Fondée en 1747

- Déménagement : quartier latin → Champs-sur-Marne



Les premières années LAL

- Printemps 1997 : préparation du « **stage long** »
 - Normalement une **passerelle vers l'entreprise**
 - Pour moi : **orientation vers la recherche publique**
 - ♦ Filière « **IMI** » : **Ingénierie Mathématique et Informatique**
 - Un **unique** module de « **physique moderne** » : **statistique et quantique**
 - **Candidatures spontanées** envoyées par **courrier postal**
 - ♦ Labos astro/cosmo/particules/spatial de la région parisienne
 - **Une seule réponse** :
 - le groupe **Virgo** du Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (**LAL**) à Orsay
 - **Vrai/faux entretien**
 - ♦ Invité par chercheur V
 - Chercheur H présent « par hasard » : mon futur encadrant en fait !
- **Début d'une longue histoire ... qui se poursuit 24 ans plus tard !**



Les premières années LAL

→ Tout s'enchaîne naturellement ... mais non sans quelques **difficultés** !

- Stage long

- Master 2

- Thèse



Rapport de Stage long

Nicolas ARNAUD ('99L)
EI Collège I.M.I
École Nationale des Ponts et Chaussées

Détection d'ondes gravitationnelles par le détecteur VIRGO:
Application aux signaux impulsifs
Coïncidences avec d'autres interféromètres

*Tuteur : Patrice Hello
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire (CNRS)
groupe VIRGO, Bâtiment 208, Université Paris Sud*

1er Septembre 1997 - 31 Août 1998

1



Rapport de Stage de DEA

Nicolas ARNAUD
DEA de Physique Théorique de l'École Normale Supérieure
École Nationale des Ponts et Chaussées

Le Contrôle Global de l'expérience VIRGO

*Tuteur : Fabien Cavalier
Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire IN2P3/CNRS/UPS/
groupe VIRGO, Bâtiment 208, Université Paris Sud
B.P. 34, 91898 Orsay Cedex*

18 Janvier 1999 - 26 Février 1999

1

ORSAY
n° d'ordre :

LAL 02-09
Mars 2002

UNIVERSITÉ DE PARIS SUD
CENTRE D'ORSAY

THÈSE présentée

pour obtenir

Le GRADE de DOCTEUR EN SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ PARIS XI ORSAY

Spécialité : Physique Théorique

par

Nicolas ARNAUD

*Contrôle Global de la partie centrale du détecteur
d'ondes gravitationnelles Virgo*

*Recherche de signaux impulsifs :
application aux coïncidences entre interféromètres*

Soutenue le 18 Mars 2002 devant la Commission d'examen

MM. François	RICHARD	Président
Bruno	ALLEN	Rapporteur
Fabien	CAVALIER	Invité
Thibault	DAMOUR	
Michel	DAVIER	Directeur de Thèse
Adalberto	GLAZOTTO	
Jean-Pierre	THIBAUD	Rapporteur

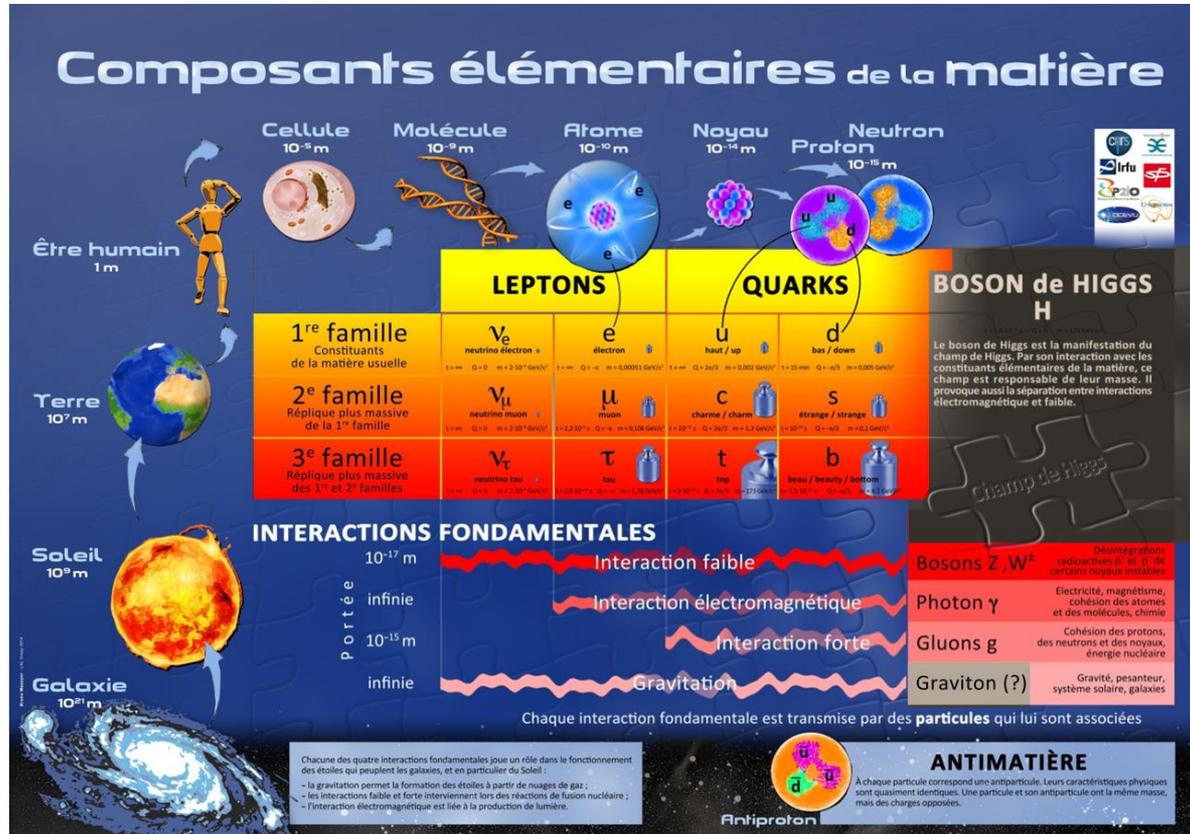
→ Classé sur **liste complémentaire** au concours CNRS 2002

- **Encouragement à re-candidater l'année suivante**

- ♦ Poste de fellow au **CERN** – choix de l'expérience **LHCb**

LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- Physique des particules
 - Constituants élémentaires de la matière et leurs interactions fondamentales



- Automne 2002
 - -6 ans avant le (vrai-faux) démarrage du collisionneur LHC du CERN
 - -10 ans avant la découverte du boson de Brout-Englert-Higgs (BEH) au LHC

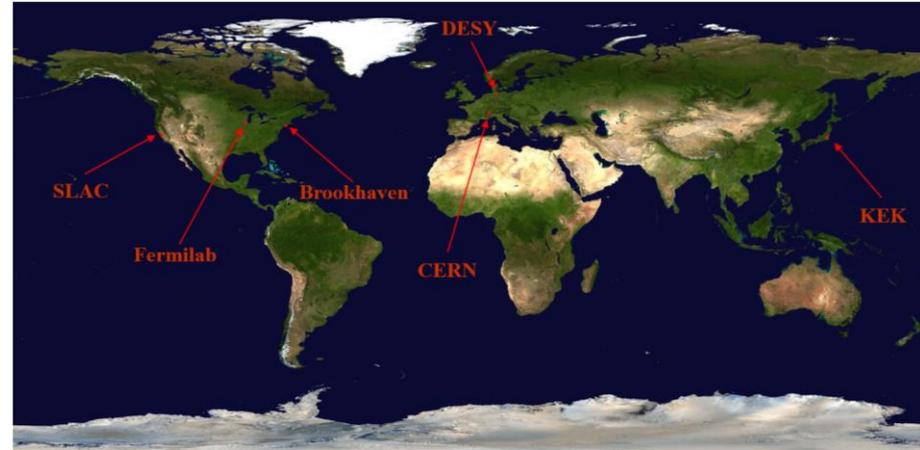
LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- Carte des grands laboratoires du domaine
 - **CERN**, **SLAC**, etc.

→ **Années 1960-80** : **changement d'échelle**

- **Expériences de plus en plus grosses** :
construites dans un seul laboratoire,

par la mise en commun de moyens aux échelles nationales puis internationales



- 1949 : idées de **coopération scientifique à l'échelle européenne**
 - **Réconciliation par la science** après la seconde guerre mondiale

• **Dans quel domaine ?**

- Physique nucléaire ↔ enjeux militaires
- **Physique des particules** :
recherche fondamentale, « neutre »

• **29 septembre 1954** : création de
**l'Organisation Européenne
pour la Recherche Nucléaire**

- Acronyme conservé
(car déjà habituel) : **CERN**

Ils ont été à l'origine du CERN en France



Raoul Dautry
(1880-1951)
Ingénieur et
homme politique



Lew Kowarski
(1907-1979)



Louis de Broglie
(1892-1987)



Francis Perrin
(1901-1992)



François de Rose
(1910-2014)
Diplomate

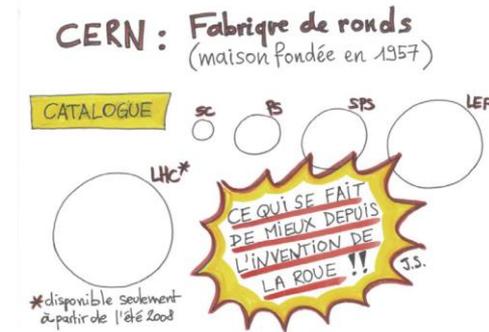


Pierre Auger
(1899-1993)

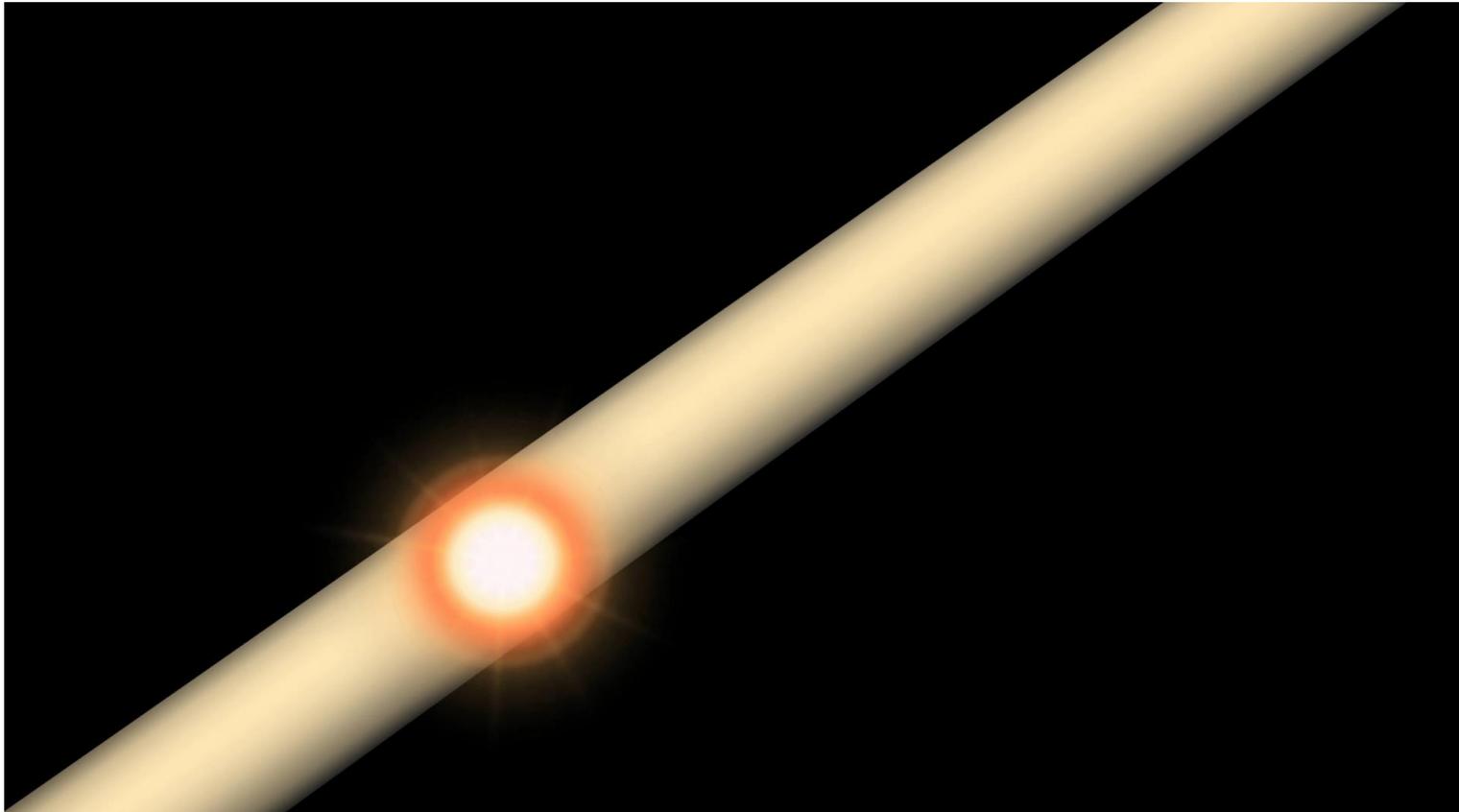
LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- **Le complexe accélérateur du CERN**

- Une suite de machines construites depuis les années 1950
- Chaque accélérateur sert d'injecteur à la génération suivante



- **LHC : Large Hadron Collider** – collisionneur proton-proton à 6,8 TeV par faisceau



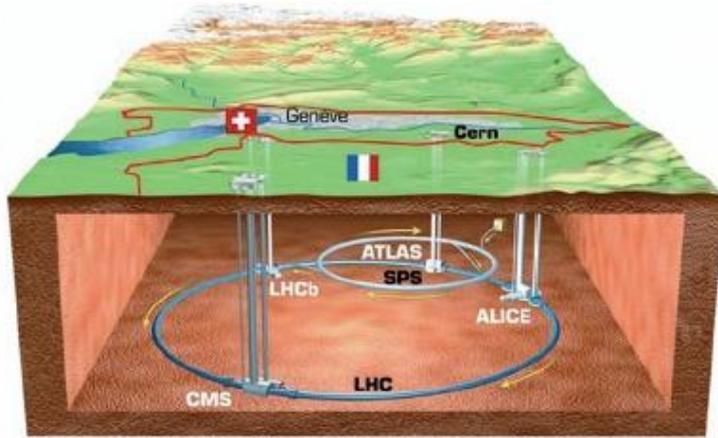
T: téra (10^{12})
eV: électron-volt

Masse d'un
proton (p) :
 $\sim 1 \text{ GeV}/c^2$

1 TeV =
1000 GeV

LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- **LHC**
 - 27 km de circonférence
 - Protons : ~11250 tours / seconde, regroupés en ~2000 paquets de 10^{11} p chacun
 - Collisions à 40 MHz dans les détecteurs géants : ALICE, ATLAS, CMS, LHCb



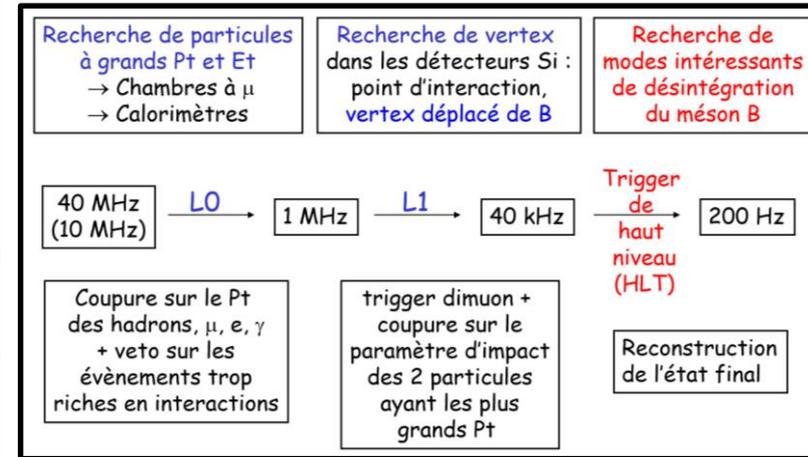
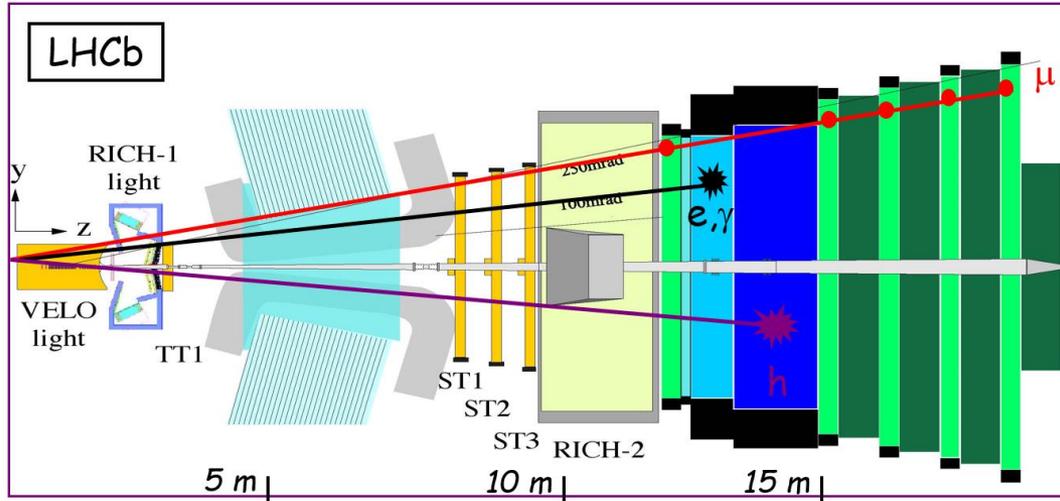
- **Des cathédrales de métal et d'électronique !**
 - Dimensions de plusieurs dizaines de mètres
 - Poids de plusieurs milliers de tonnes



- Des millions de canaux électroniques reçoivent des informations lors des collisions
 - Les particules déposent de l'énergie en traversant les différents détecteurs ; ces dépôts sont convertis en signaux électriques puis lus et enregistrés

LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- Le spectromètre **LHCb**
 - Instrumenté dans une seule direction pour étudier une certaine gamme de particules

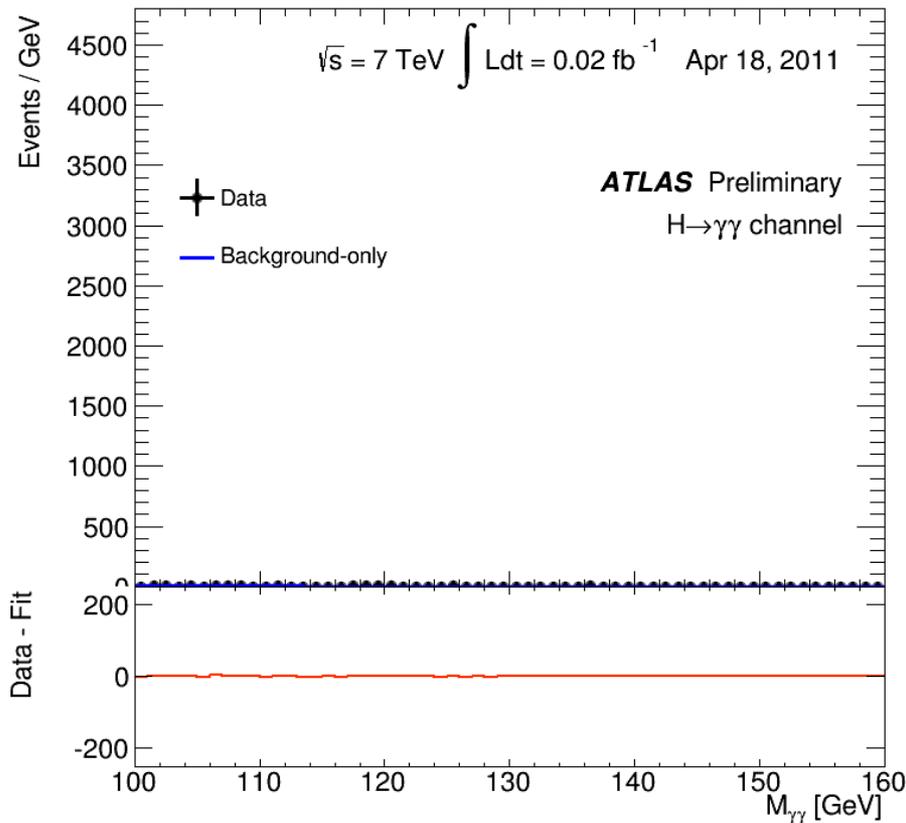


- Travail pendant un an sur le **système de tri des collisions** de LHCb
 - **Volume total de données** : ~ plusieurs Encyclopédia Universalis / seconde
 - Impossible de tout conserver
 - **Sélection en temps réel des événements** : **drastique** et **performante**
 - **Trois niveaux successifs** à l'époque
 - **De moins en moins d'événements** à chaque étape
 - **Accès à plus d'informations** et **plus de temps pour les traiter**
 - **Beaucoup de progrès depuis** – 20 ans après !

} **Affinage**
de la
sélection

LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

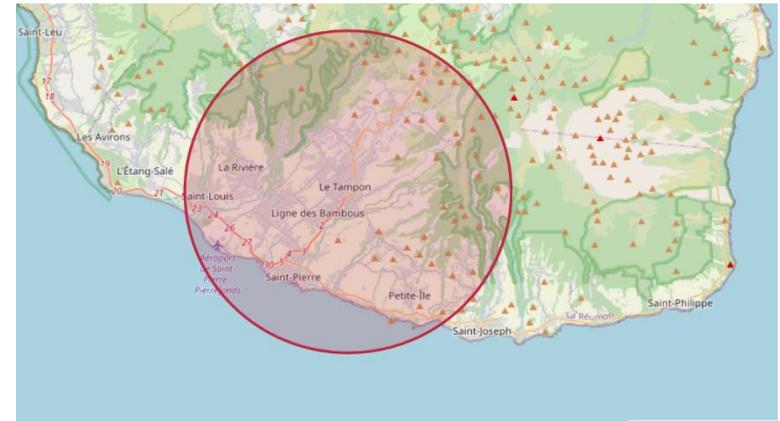
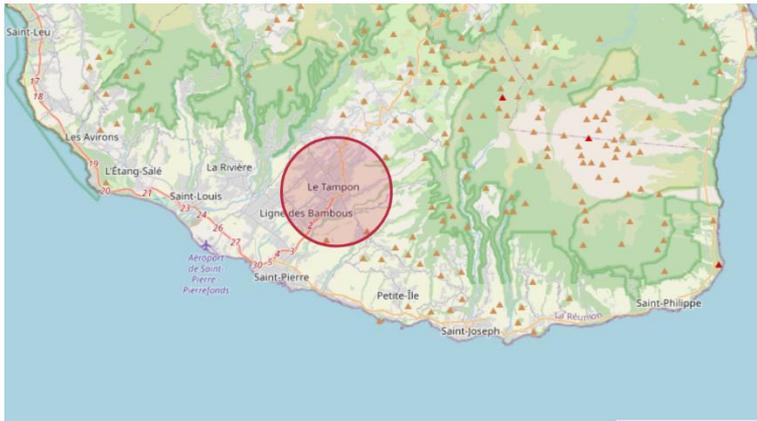
- Retour vers le futur : **4 juillet 2012**, annonce de la **découverte du boson BEH**
→ Le **signal** sort peu à peu du **bruit de fond** ...



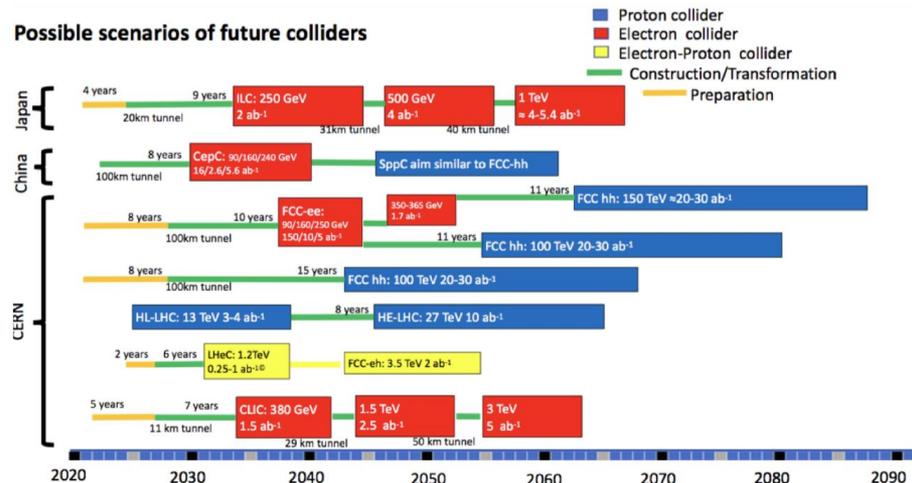
... à mesure que la quantité de données analysées augmente au cours du temps

LHCb (2002-2003) – le CERN et le LHC

- Le futur se prépare aujourd'hui (et déjà hier en fait)
 - Études pour un futur collisionneur beaucoup plus grand / beaucoup plus puissant
- LHC
 - FCC [ordre de grandeur]



- Un exemple de planning à très, très, très long terme ...



CNRS

- **Reçu** au concours 2003 du **CNRS** :
6 postes pour ~90 candidats
 - Impossible de terminer mon fellow au CERN :
poste à pourvoir immédiatement !
 - **Décision (imposée) à prendre** :
mobilité thématique ou géographique
→ **Mon choix** : rester au LAL mais
passage sur l'expérience **BaBar**
 - ◆ **Perspective** : **partir aux Etats-Unis**
au bout d'un an
(après titularisation)

→ Me voilà **fonctionnaire de l'État Français** ...

→ [Présentation IJCLab été 2022](#)

→ [Présentation IN2P3 pour le FTP 2022](#)

→ [Présentation ressources humaines CERN](#)

[2018, en anglais]

CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

EXTRAIT NO 002
DE LA DECISION COLLECTIVE 2509987

DELEGATION ILE-DE-FRANCE SUD

AVENUE DE LA TERRASSE
91190 GIF-SUR-YVETTE
TEL.01-63-82-30-30

CHERCHEURS

LE DIRECTEUR GENERAL DU CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

-VU LA LOI NO 82-610 DU 15 JUILLET 1982 MODIFIEE
-VU LA LOI NO 83-634 DU 13 JUILLET 1983 MODIFIEE
-VU LA LOI NO 84-16 DU 11 JANVIER 1984 MODIFIEE
-VU LE DECRET NO 94-874 DU 7 OCTOBRE 1994 MODIFIE
-VU LE DECRET NO 83-1260 DU 30 DECEMBRE 1983 MODIFIE
-VU LE DECRET NO 84-1185 DU 27 DECEMBRE 1984 MODIFIE
-VU L'AVIS DE L'INSTANCE D'EVALUATION

DECIDE :

NOM : ARAUD - ARTICLE UNIQUE -
PRENOM : NICOLAS NO-AGENT : 8010796

GRADE : CR2 ECHELON : 005 INDICE : 0544

POSTE NO : 210309 QUOTITE : 100

AFFECTE(E) A C8607 LAL SECTION : 03

DIRIGE(E) PAR MR D ALMAGNE

EST TITULARISE(E) A COMPTER DU 01/10/2004 AU TERME DE SON STAGE.

GRADE : CR2 ECHELON : 005 INDICE : 0544

AVEC UNE ANCIENNETE DE 01 AN 08 MOIS 00 JOURS

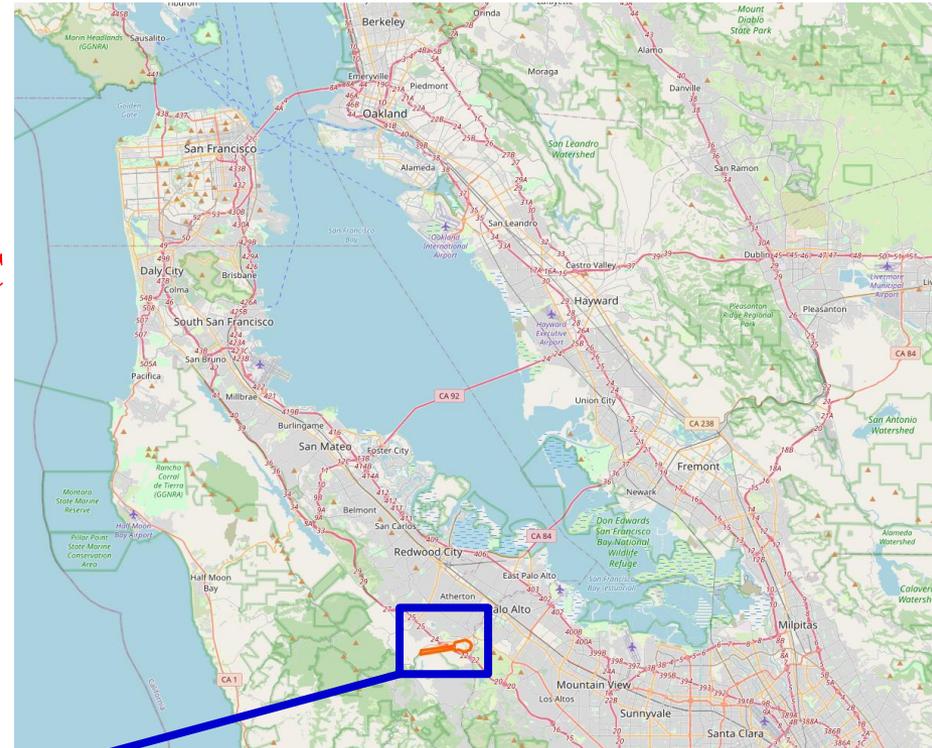
A GIF-SUR-YVETTE , LE 26/01/2005

POUR LE DIRECTEUR GENERAL DU C.N.R.S.
ET PAR DELEGATION
LE DELEGUE REGIONAL
J.P. CARESSA

Le détecteur BaBar à SLAC (2005-2008)



- **France** (CNRS + CEA) : responsable d'une partie du détecteur BaBar : le **DIRC**
→ **Détaché sur place** (SLAC, près de l'Université Stanford, CA)
pour m'en occuper
 - Hardware, software, performances, qualité des données, system manager
- SLAC National Accelerator Laboratory



Le détecteur BaBar à SLAC (2005-2008)

- **DIRC** : **D**etector of **I**nternally **R**elected Cherenkov light
- **Effet Cerenkov** : les **particules chargées** qui se déplacent **plus vite que la lumière** dans un **milieu diélectrique** (c/n) **émettent des photons le long de leur trajectoire.**

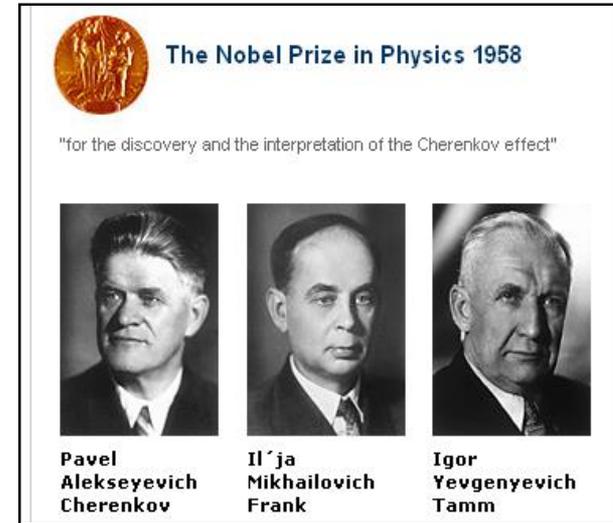
→ **Equivalent du passage du mur du son pour un avion**

- **L'angle du cône dépend de la vitesse v ,** rapportée à celle de la lumière ($\beta=v/c$)

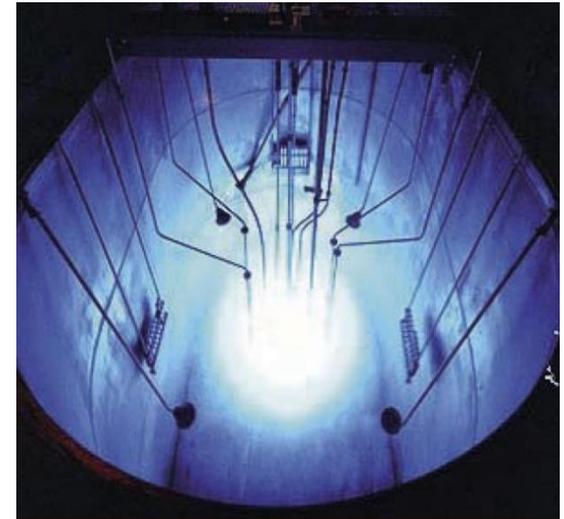
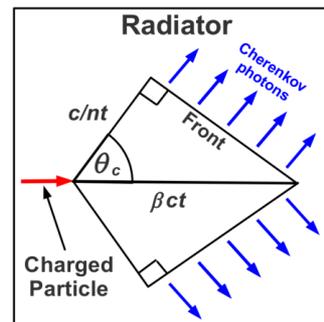
▪ **Seuil** : $\beta > 1/n$

- Utilisé pour **déterminer la masse** (et donc **la nature**) d'une **particule**
 - Mesures de **l'impulsion** (quantité de **mouvement**) et de la **vitesse**

→ **Masse** → **Type de la particule**

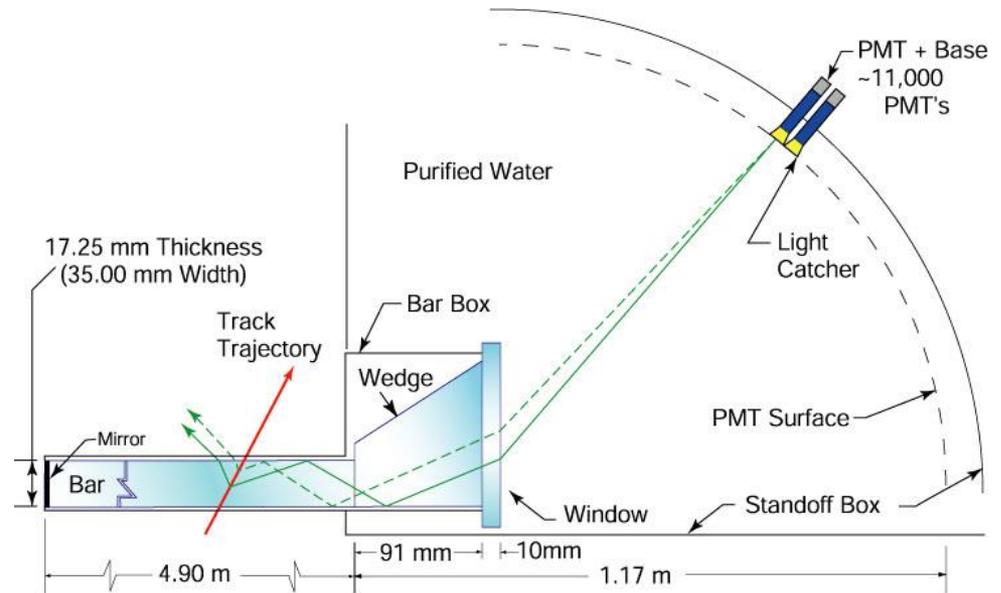
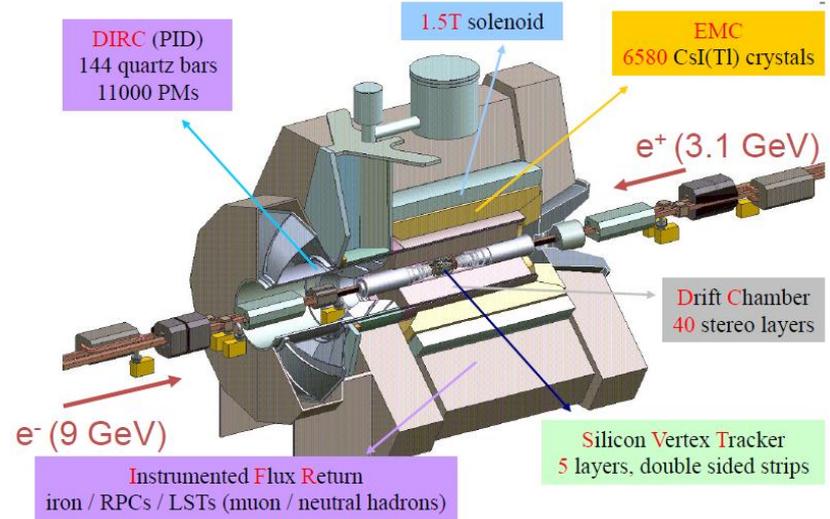
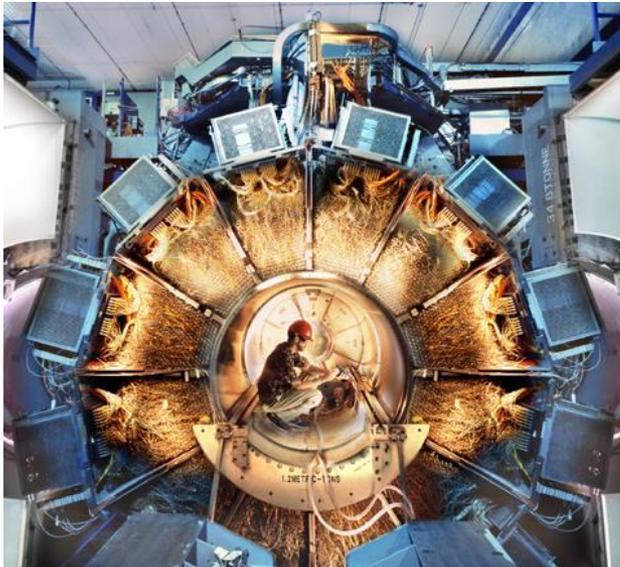
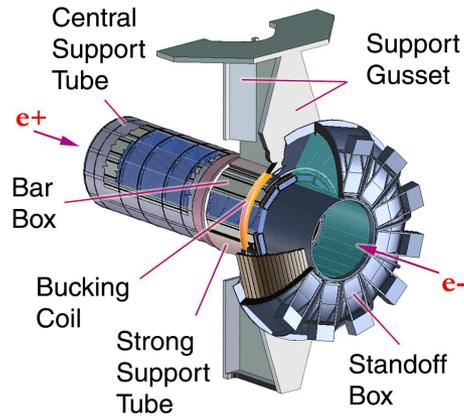


$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta}$$



Le détecteur BaBar à SLAC (2005-2008)

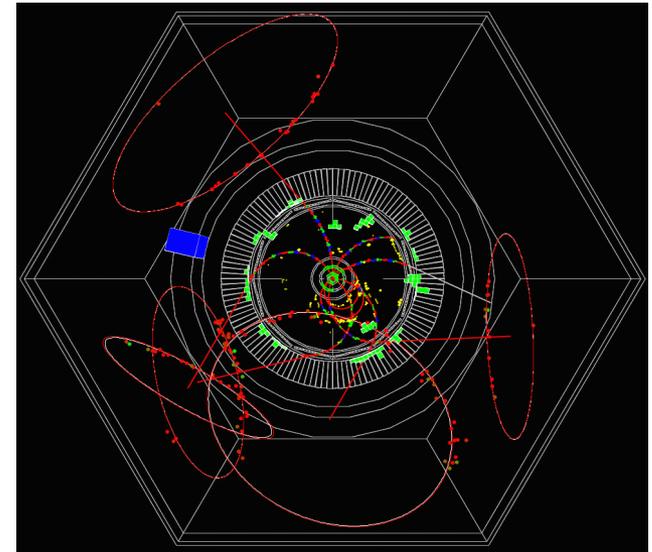
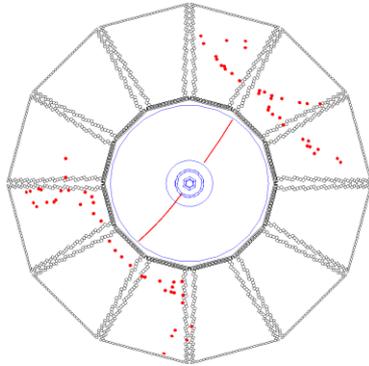
- **DIRC** : **D**etector of **I**nternally **R**elected **C**herenkov light



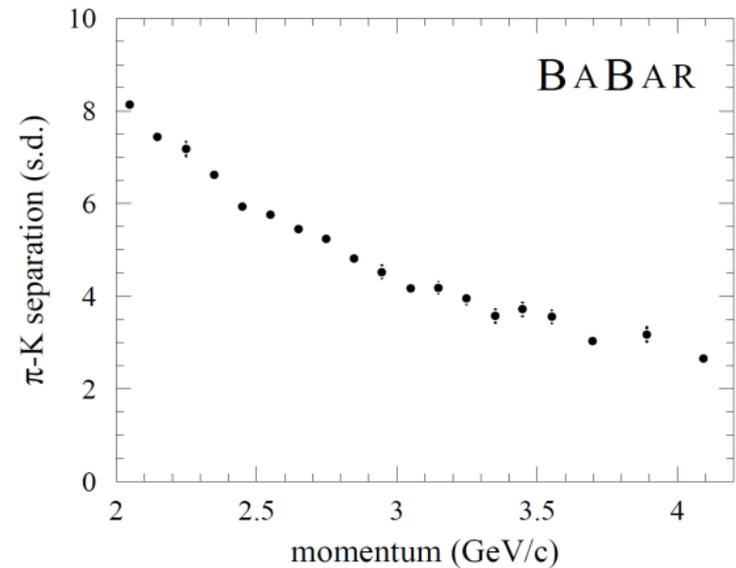
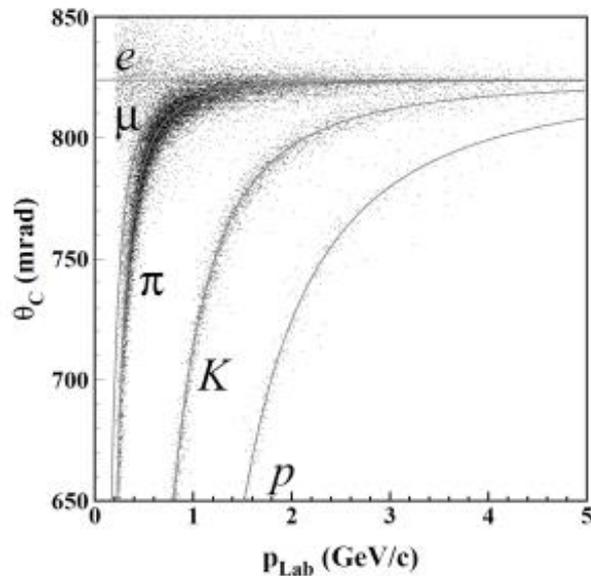
4 x 1.225 m
Synthetic Fused Silica
Bars glued end-to-end

Le détecteur BaBar à SLAC (2005-2008)

- **DIRC** : **D**etector of **I**nternally **R**elected **C**herenkov light

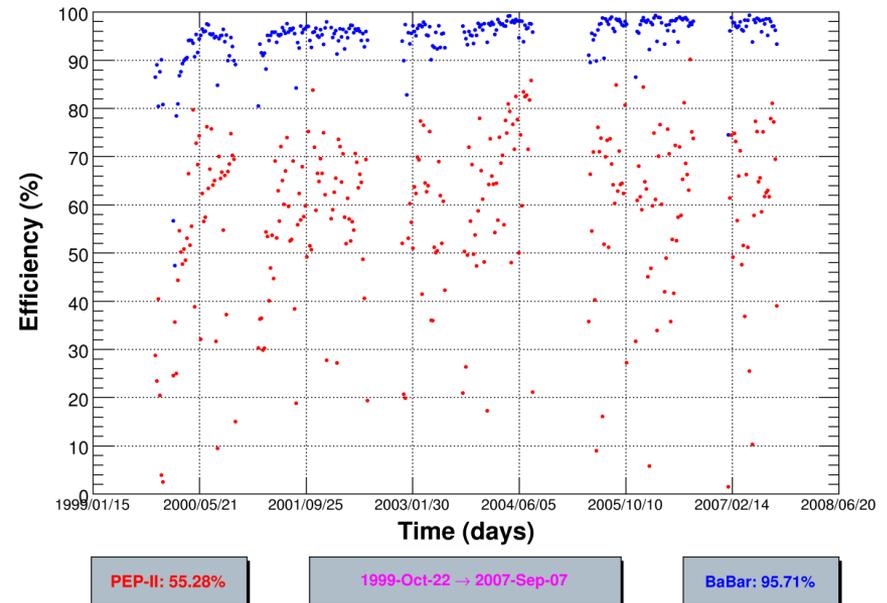
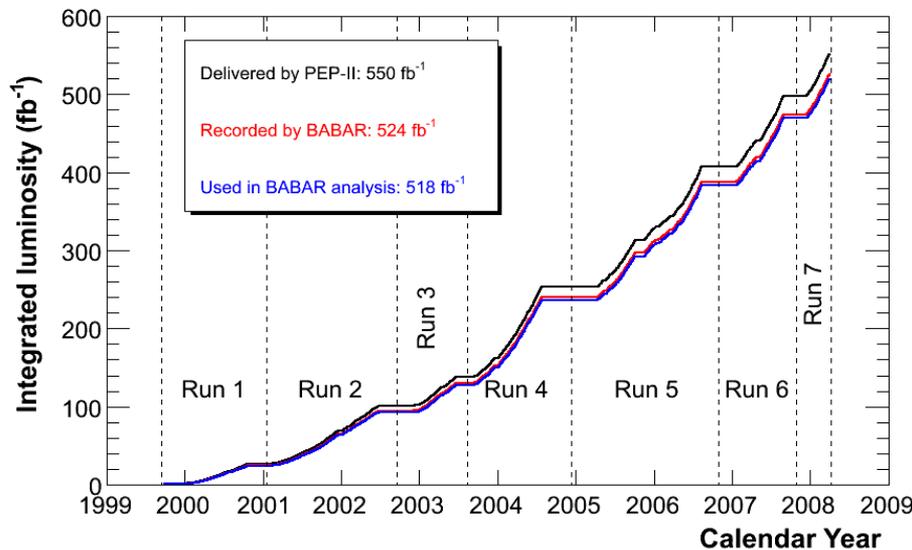


→ Principalement utilisé pour **séparer pions** (π) et **kaons** (K)



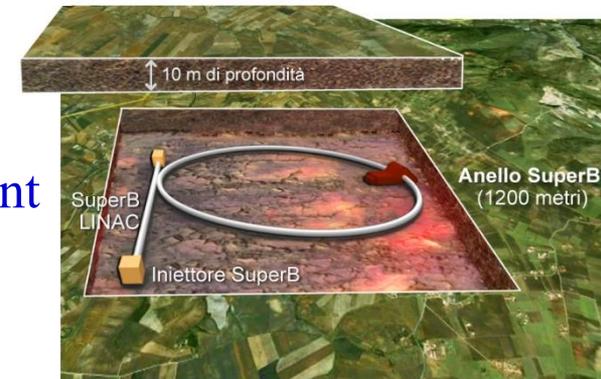
Le détecteur BaBar à SLAC (2005-2008)

- **BaBar** : « usine » de production de particules – **B-Factory**
 - Concurrence avec **Belle** au Japon (**KEK-B**)
- **Enregistrer le plus d'événements (intéressants) possible**
 - Produire le plus de collisions possible (accélérateur de SLAC moins performant)
 - Maximiser le rendement du détecteur
 - Identifier au vol les événements les plus intéressants et les enregistrer
 - Contrôler la qualité des données – brutes comme reconstruites
- **24h/24, 7 jours sur 7** : astreintes, organisation en « trois-huit »



Le projet SuperB à Frascati (2009-2013)

- Projet de « **super-usine** » à particules
 - **100 fois plus de données que BaBar**, accumulées en quelques années
 - **Accélérateur** très **performant**
 - **Détecteur** capable de **tenir le choc** et de **suivre la cadence**
 - **Budget** à garder **sous contrôle**
 - ◆ **Le pays hôte est celui qui contribue (paye) le plus**
 - ◆ **Nouvel accélérateur / réutilisation de composants de BaBar pour le détecteur**
- Un nouveau projet de cette taille doit « **faire ses preuves** »
 - Au sein de la **communauté scientifique** : agréger des **chercheurs / labos / pays**
 - **Après des tutelles et des agences de financement**
 - **Qu'est-ce-qu'il apporte par rapport aux expériences existantes ou prévues ?**
- **Compétition** toujours **difficile**, souvent **âpre** et **longue**
 - Au final, **SuperB a « perdu »** cette bataille :
refus du pays hôte (l'Italie) de s'engager financièrement
- Un **mal** pour un **bien**
 - **Refus** de devenir un « **projet zombie** »
 - **On fait son deuil et puis on passe à autre chose ...**



Virgo acte II (2014 – actuellement)

- Moins de deux ans avant la découverte des ondes gravitationnelles
 - Mais personne ne le sait alors !

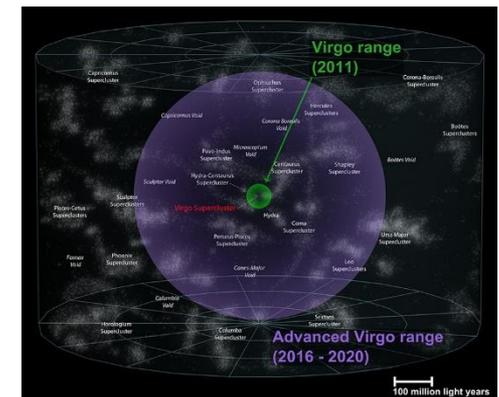
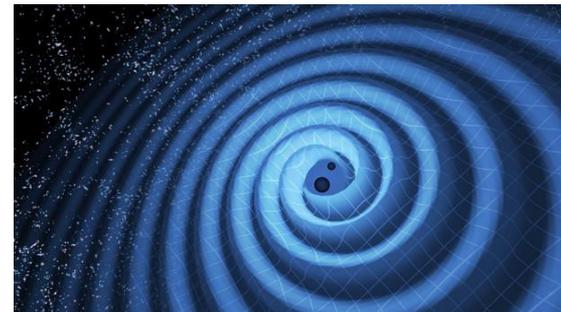
→ Les temps longs de la recherche

- ~50 ans pour le boson BEH / ~1 siècle pour les ondes gravitationnelles

<i>Théorie</i>	<ul style="list-style-type: none">• 1916 : Prédications des OG (Einstein)• 1957 : Conférence de Chapel Hill• 1963 : Trous noirs de Kerr• 1990's : développements théoriques pour la coalescence de systèmes binaires (Blanchet, Damour, Deruelle, Iyer, Will, Wiseman, etc.)• 2000 : Idem pour le cas de systèmes binaires de 2 trous noirs (Buonanno, Damour)• 2006 : simulations de la fusion de deux trous noirs (Baker, Lousto, Pretorius, etc.)
<i>Expérience</i>	<p>(Bondi, Feynman, Pirani, etc.)</p> <ul style="list-style-type: none">• 1960's : premières barres de Weber• 1970 : premier prototype d'ITF (Forward)• 1972 : Etudes de faisabilité détaillées (Weiss)• 1974 : PSRB 1913+16 (Hulse & Taylor)• Années 1980 : Prototypes (~10 m de long) (Caltech, Garching, Glasgow, Orsay)• Fin des années 1980 : projets Virgo & LIGO• Années 1990 : LIGO et Virgo financés• 2005-2011 : premières prises de données• 2007 : accord Virgo-LIGO – partage des données, analyses et publications communes• 2012 : financement des détecteurs avancés• 2015 : démarrage de LIGO avancé• 2017 : démarrage de Virgo avancé• À suivre ... <p style="text-align: right;">} Premières découvertes !</p>

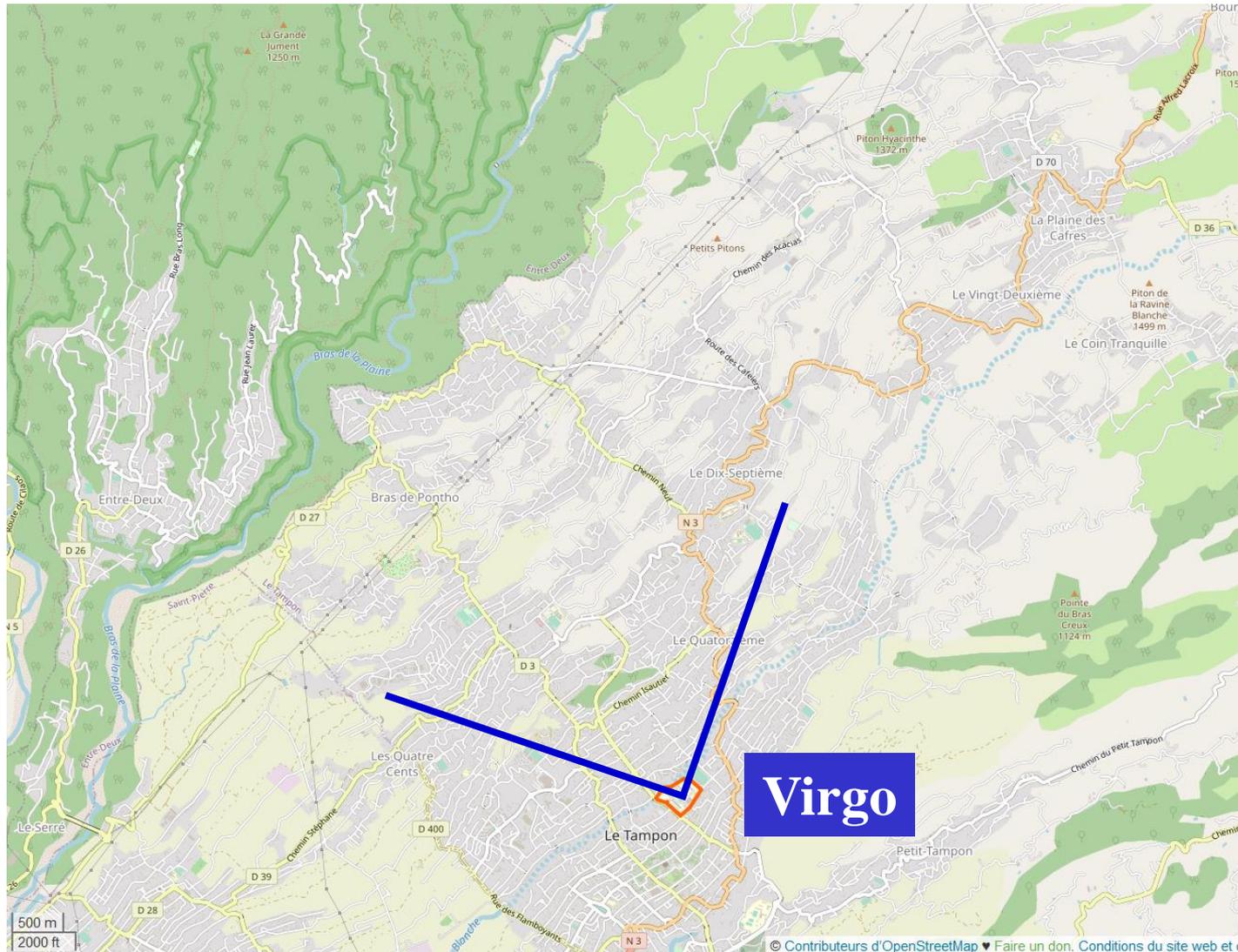
Virgo acte II (2014 – actuellement)

- **Détachement sur site** prévu pour la rentrée 2015
 - Repoussée d'un an suite à des problèmes familiaux
→ Installation à **Florence** à l'été 2016 – depuis six ans
- **Les ondes gravitationnelles (OGs) : une des premières prédictions de la relativité générale (1916)**
 - Les masses accélérées induisent des perturbations de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière en s'atténuant comme l'inverse de la distance
- **Faiblesse de la gravitation**
 - Rigidité de l'espace-temps
→ Si toute masse accélérée émet des OGs, aucune source terrestre n'en émet assez pour être détectable
- **Sources : phénomènes violents dans le cosmos**
 - Rares dans la région d'Univers observable
→ Voir (un peu) plus loin donne potentiellement accès à (beaucoup) plus de sources



Virgo acte II (2014 – actuellement)

- **Virgo** au lycée Roland Garros



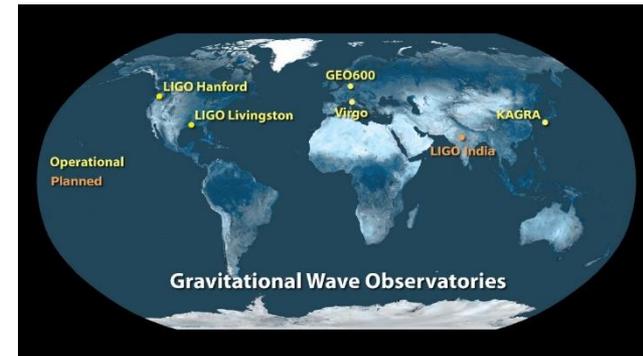
Virgo acte II (2014 – actuellement)

- L'union fait la force : le **réseau de détecteurs LIGO-Virgo-KAGRA**



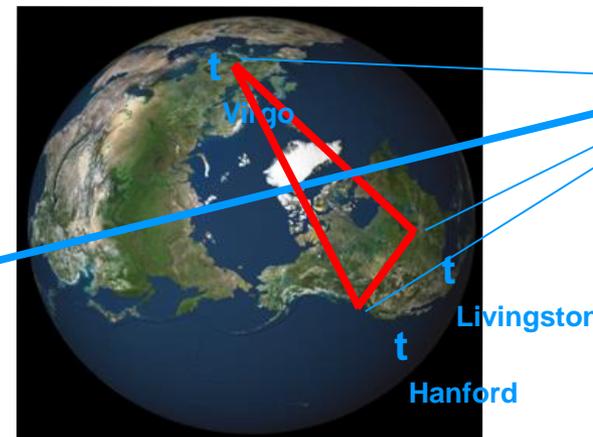
→ Permet de **mieux séparer les vrais signaux d'OGs** (a priori présents dans plusieurs détecteurs) **des bruits** (a priori limités à un instrument particulier)

→ **Triangulation** : estimation de la position de la source



- **Chaque collaboration** est responsable de son détecteur et de la prise de données
- **Toutes les données** sont mises en commun et analysées de manière conjointe
- **Résultats publiés** au nom du réseau entier
- **Données publiques** après une « période d'exclusivité »

★ **GHOST**



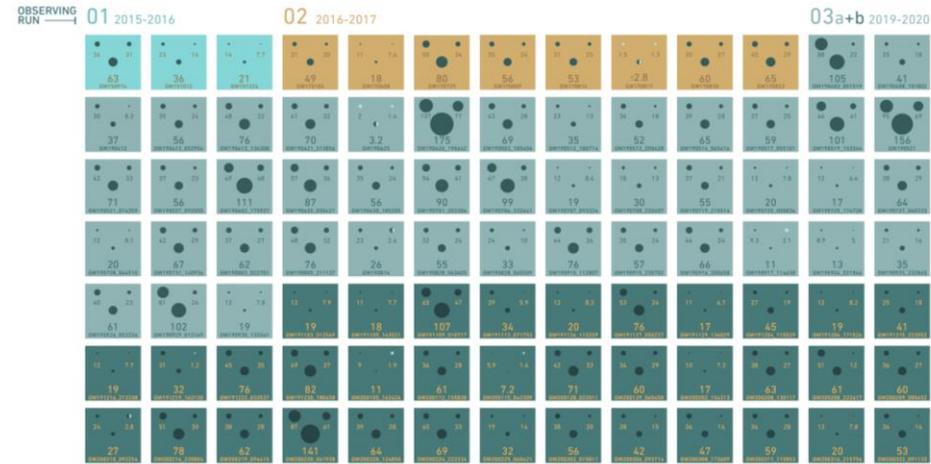
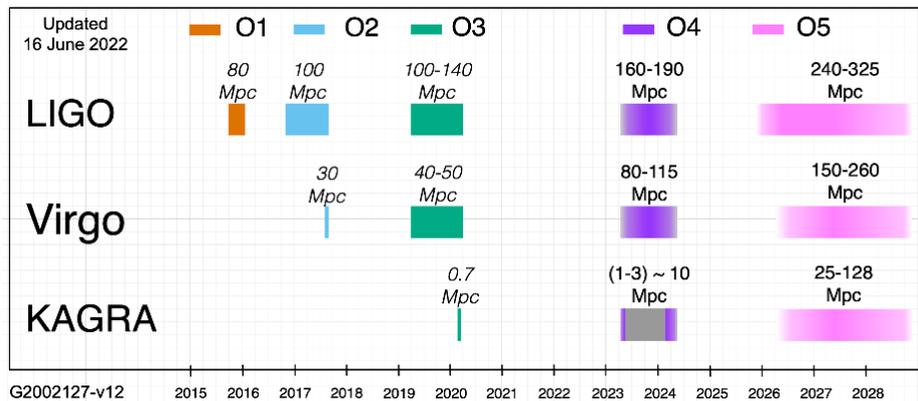
SOURCE

IFO Pair	Δt max (ms)
V-H	27.20
V-L	26.39
H-L	10.00

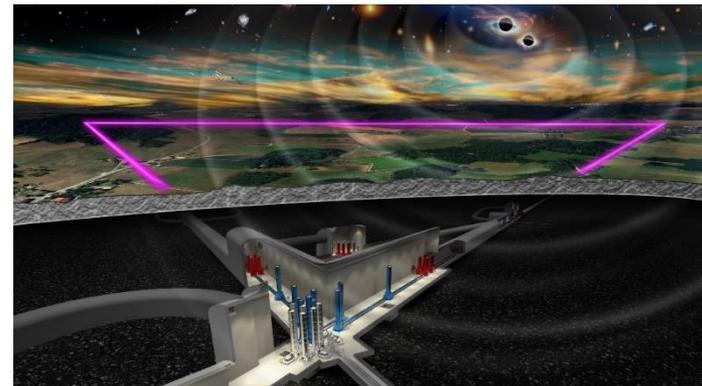
- [Gravitational Wave Open Science Center](#)

Virgo acte II (2014 – actuellement)

- **Alternance** de périodes de prise de données et d'arrêts pour améliorations
 - **Détection de ~90 signaux** entre septembre 2015 et mars 2020
 - **Phase d'amélioration depuis**
 - Ralentie par la pandémie de covid-19
 - **Démarrage d'une nouvelle prise de données au printemps 2023**
 - <https://observing.docs.ligo.org/plan>



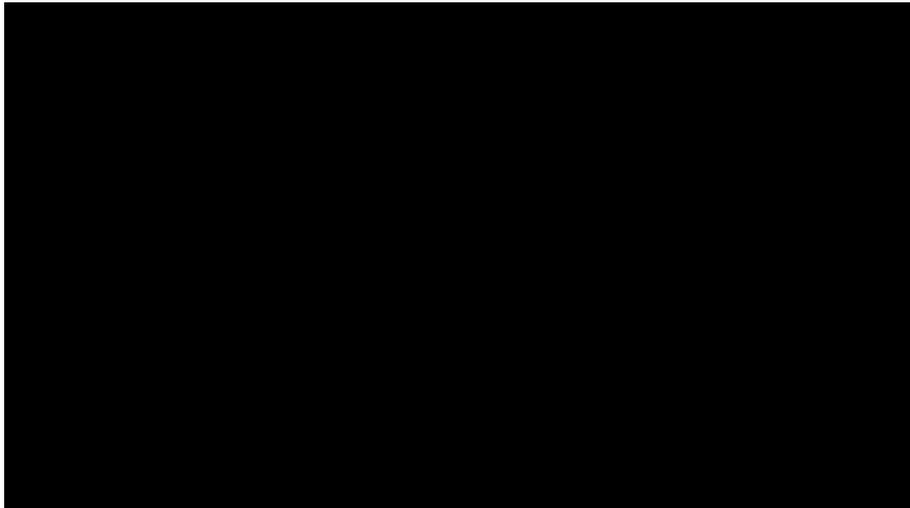
- **Objectif à moyen-long terme** : pousser les infrastructures existantes à leurs limites
- **Objectif à plus (très) long terme** : des détecteurs de troisième génération
 - En Europe : le **Einstein Telescope (ET)**



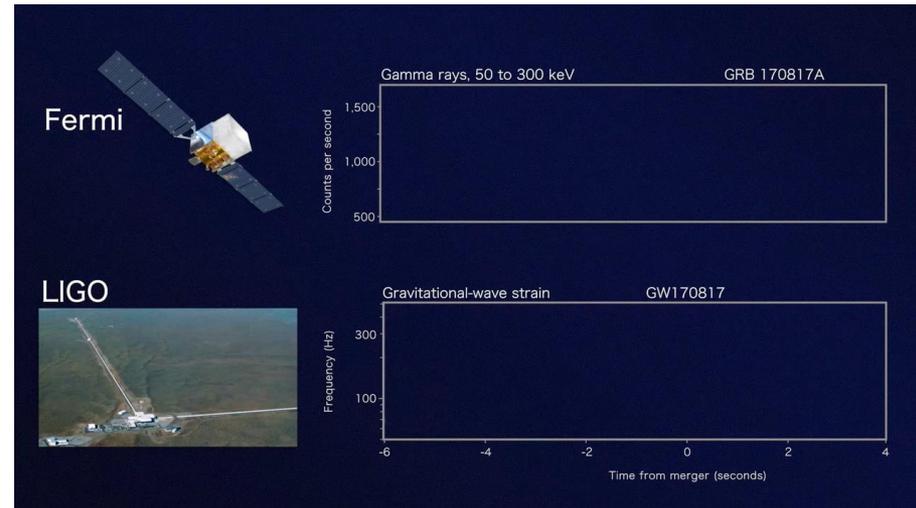
Virgo acte II (2014 – actuellement)

- **Une détection historique** : GW170817

- Il y a bien longtemps, dans une galaxie lointaine, très lointaine ...



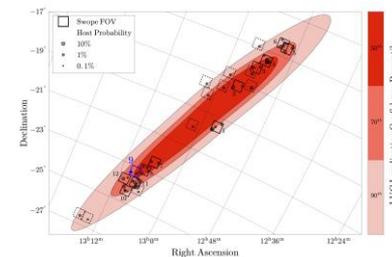
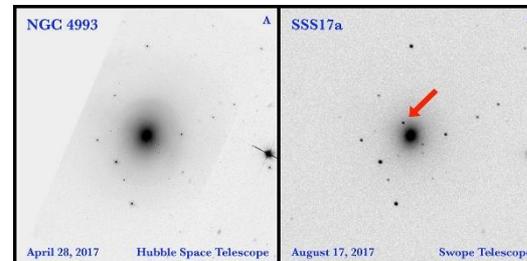
- Le **17 août 2017, 14h41 heure de Paris** sur Terre et en orbite ...



- **19h55** : localisation LIGO-Virgo

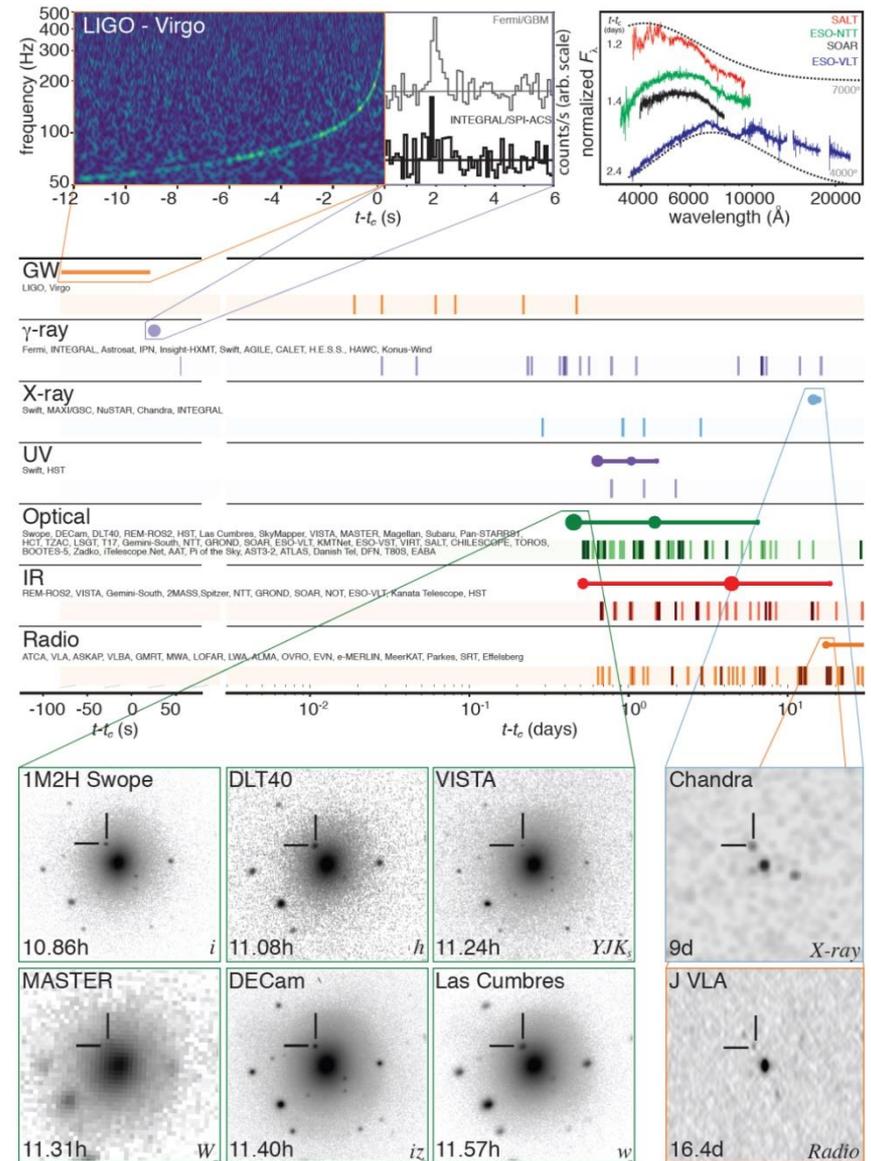
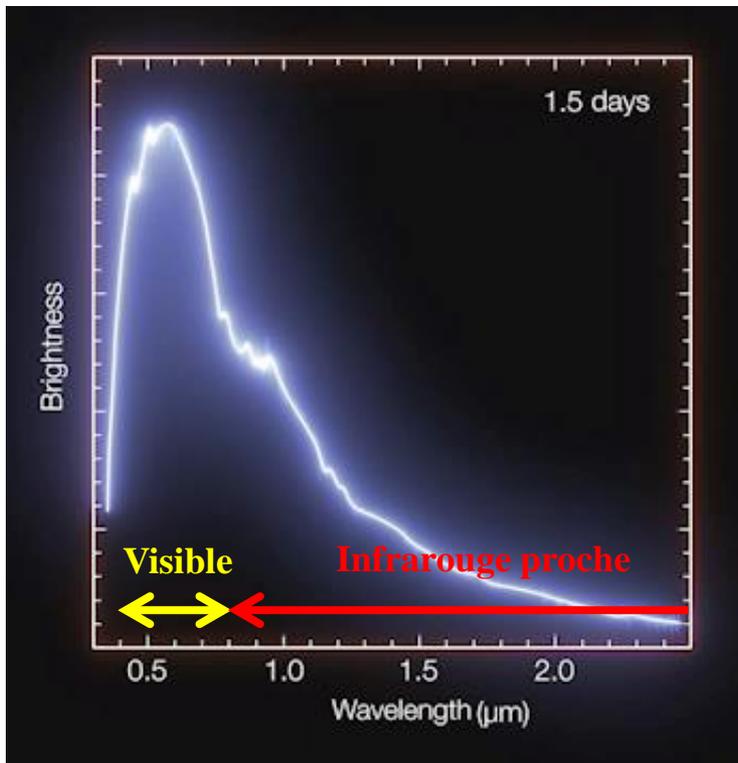


- **01h33** le 18/08 : télescope SWOPE



Virgo acte II (2014 – actuellement)

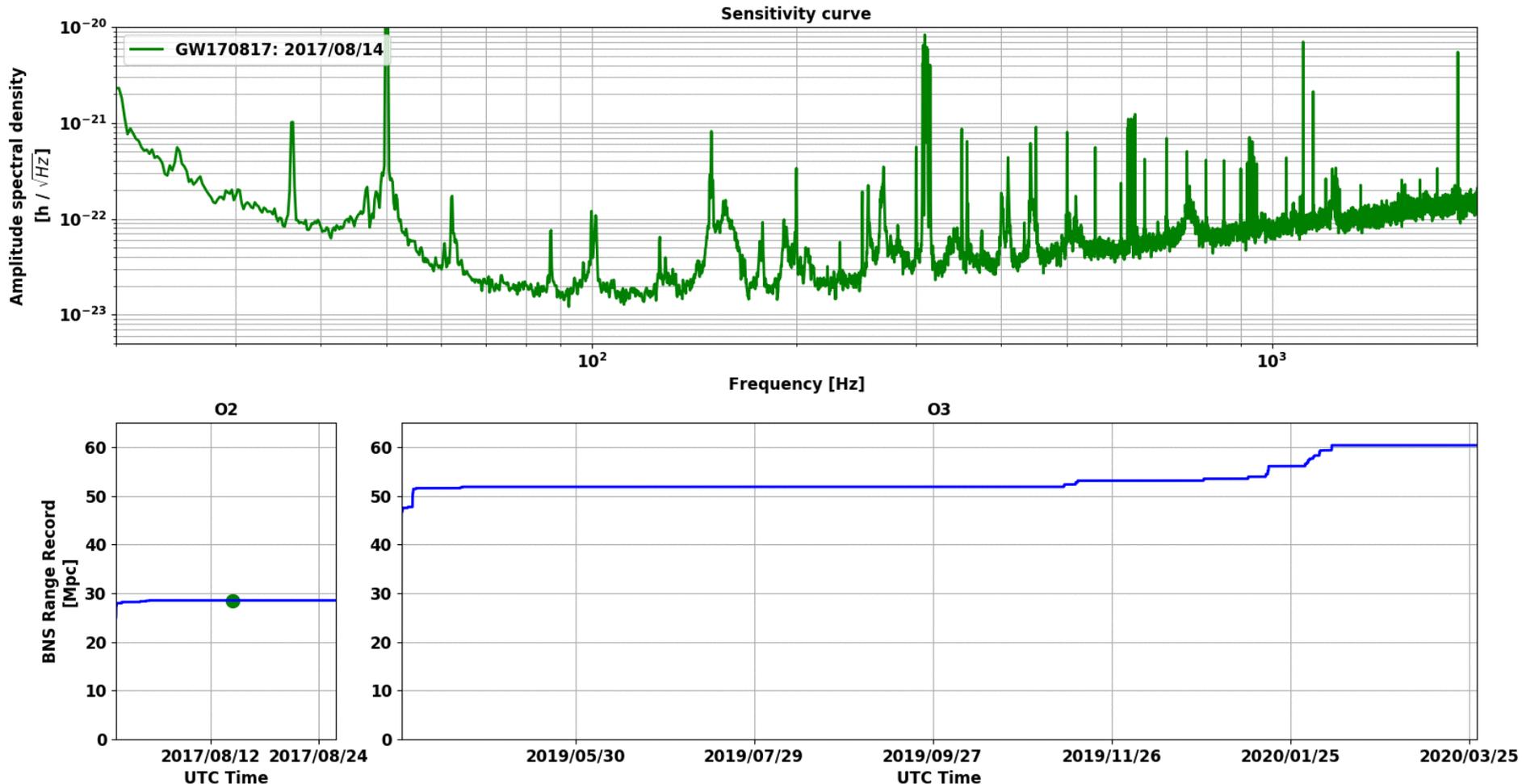
- Astronomie multi-messagers
 - Ondes gravitationnelles, sursauts gamma, l'ensemble du spectre électromagnétique



Virgo acte II (2014 – actuellement)

- Amélioration des performances du détecteur Virgo en 2017-2020

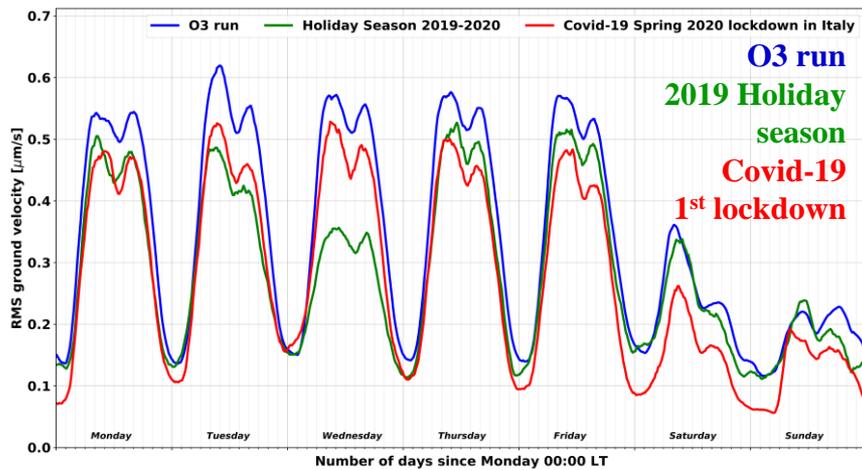
Advanced Virgo sensitivity improvement during O3 and comparison with O2



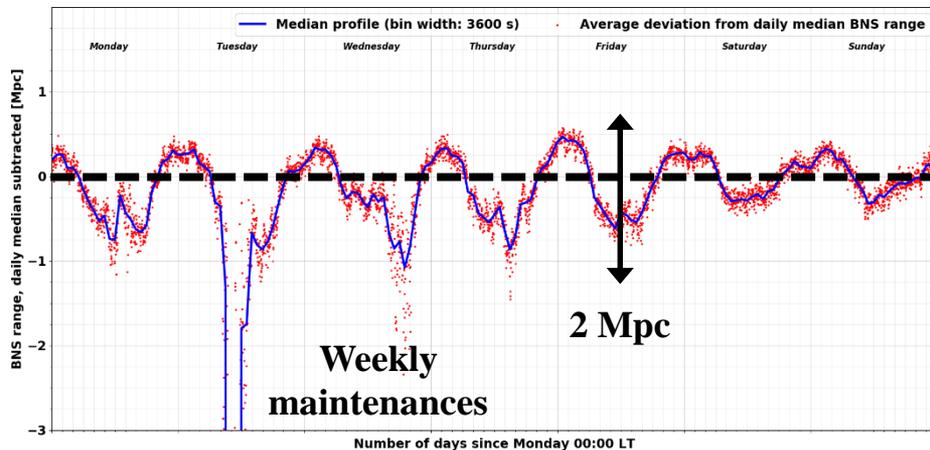
Virgo acte II (2014 – actuellement)

- Impacts du bruit sismique

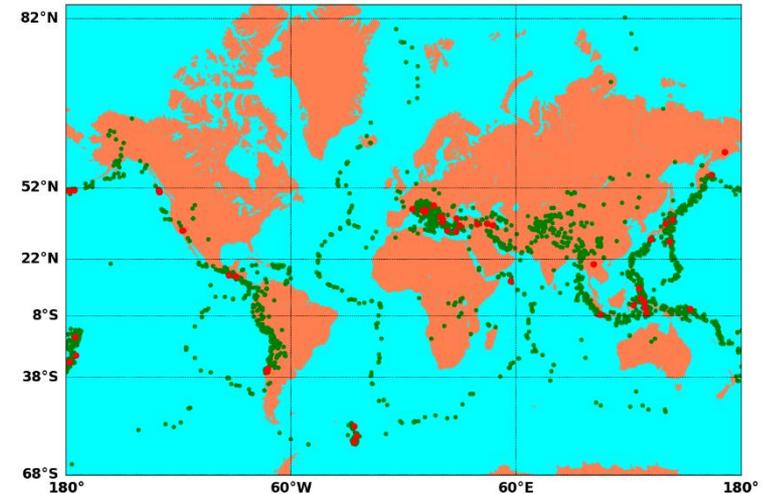
- Composante anthropogénique



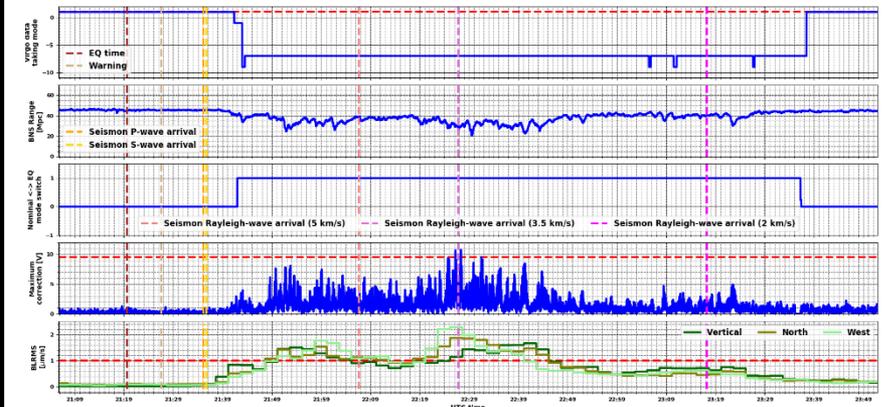
- Estimation de la sensibilité



- Tremblements de terre



- Survivre à un fort séisme



Conclusions

- Un parcours de presque 25 ans en recherche fondamentale publique
 - La mi-temps est passée ...
 - Espérons qu'il reste encore quelques bonnes années !
- De (petites) pierres à un grand édifice
- Une grande diversité de métiers et d'activités
 - Il y en a pour tous les goûts !
- Du travail pour les générations futures
 - Pourquoi pas vous ?
- Un élément supplémentaire à prendre en compte
 - Développement durable, économie, frugalité
- Valable dans absolument tous les domaines
 - ♦ Chacun doit apporter sa (petite) pierre à ce (grand) édifice

???

•

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

•

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

•

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

•

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

•

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

•

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■