

# Collège Joseph Bédier – Saint André, La Réunion

**Mardi 08 novembre 2022**

**Nicolas Arnaud** ([nicolas.arnaud@ijclab.in2p3.fr](mailto: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)





# Introduction

# Je me présente ...

- **Premier voyage à La Réunion**
  - Dans l'hémisphère sud en fait
- 48 ans, marié,  
**un fils**, Davide,  
**en classe de quatrième**



- Je suis **chercheur CNRS** en  
« **physique des deux infinis** » depuis 2003
  - Mon laboratoire est à **Orsay, près de Paris**
  - Mais j'habite actuellement à **Florence en Italie**
- Études « **bac+8** »
  - **Filière scientifique au lycée** (« série C »)
  - **Classes préparatoires** (équivalent bac+2)
  - **École Nationale des Ponts et Chaussées** (bac+5)  
aujourd'hui « **École des Ponts ParisTech** »
  - **Master 2, puis thèse de doctorat** (bac+8)



# 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.





**IJCLab :**  
**un laboratoire**  
**de recherche**

# IJCLab

→ [Présentation été 2022](#)



**Le CNRS/IN2P3:  
L'Institut National de  
Physique Nucléaire et de  
Physique des particules**

# CNRS/IN2P3

→ [Présentation FTP 2022](#)



# Le CERN

# CERN

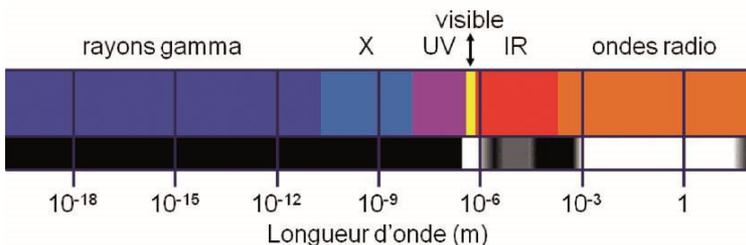
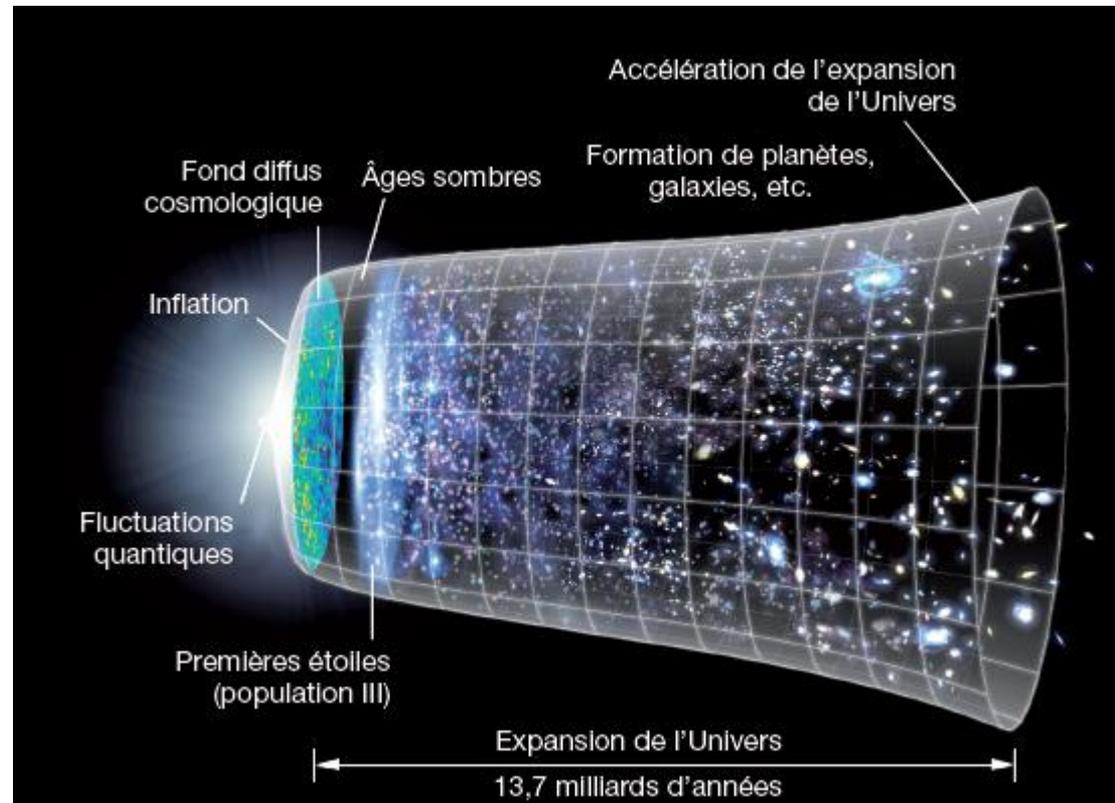
→ [Présentation ressources humaines](#) [2018, en anglais]



# Voyage dans les deux infinis

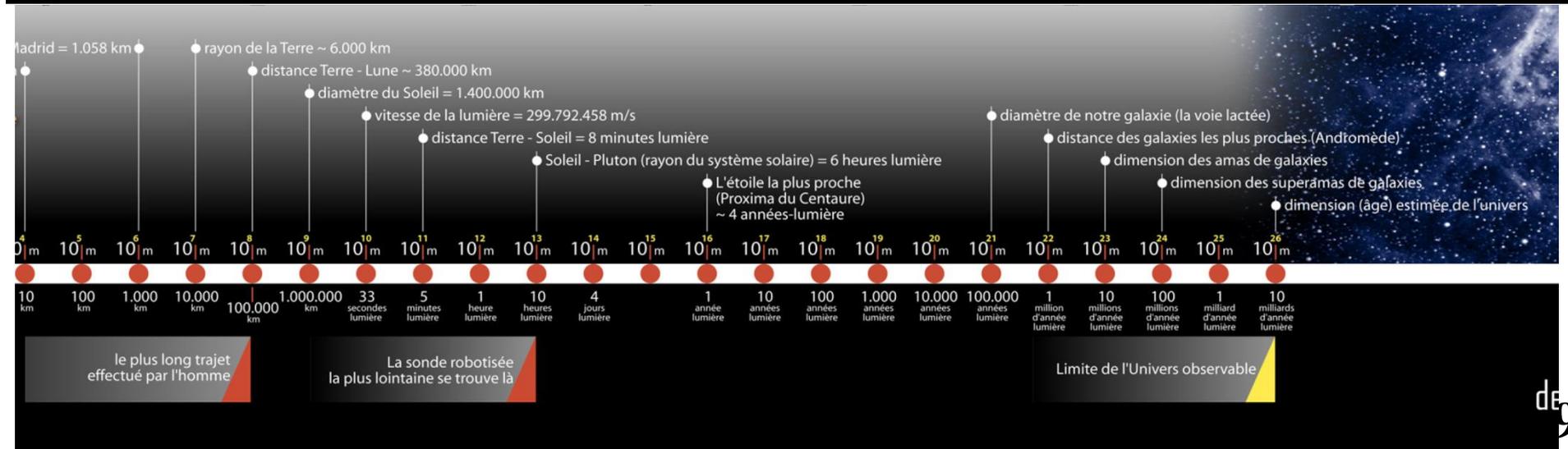
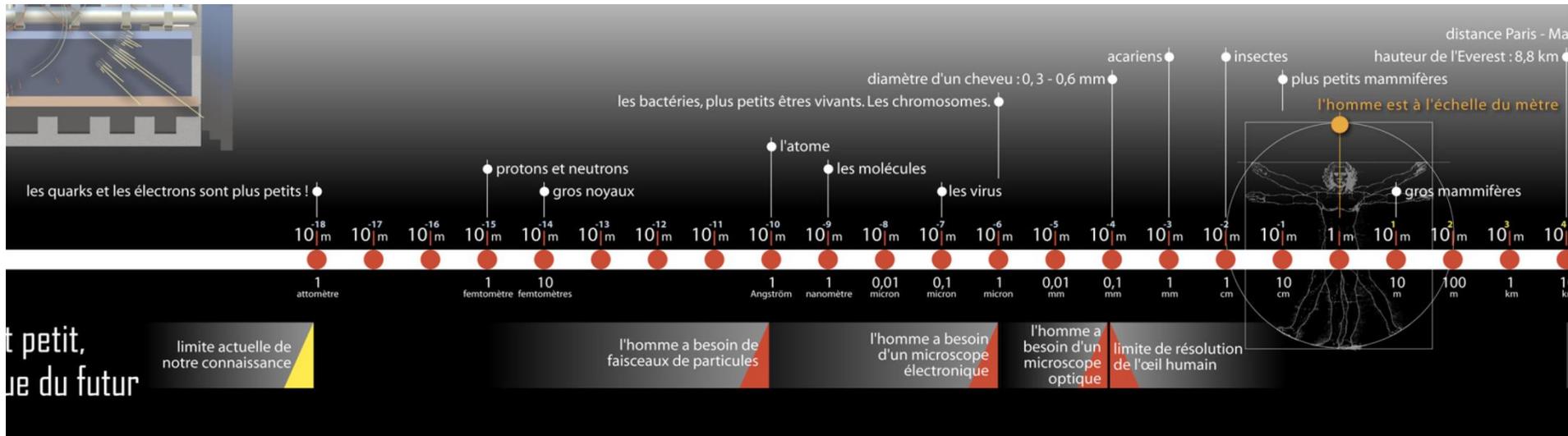
# Un voyage dans le temps

- -13,7 milliards d'années : le Big-bang
- -13,7 milliards d'années + 380 000 ans : émission du rayonnement de fond diffus cosmologique (CMB)
- Antiquité
- Le XX<sup>e</sup> siècle
  - Développement continu de la « physique des deux infinis »
- 2012 & 2013, 2015 & 2017
- Et aujourd'hui ? Et demain ?



# Un voyage dans les échelles de distance

- De  $10^{-18}$  m (infiniment petit) à  $10^{26}$  m (infiniment grand)



# Difficile de faire plus éloigné en apparence

- $10^{26} \text{ m} / 10^{-18} \text{ m} = 10^{44}$

- Un (très très très très très) grand nombre :

100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000

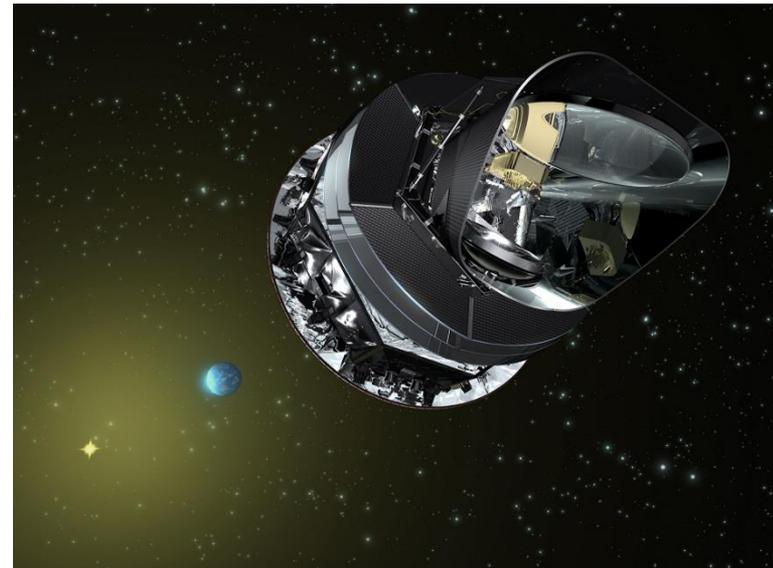
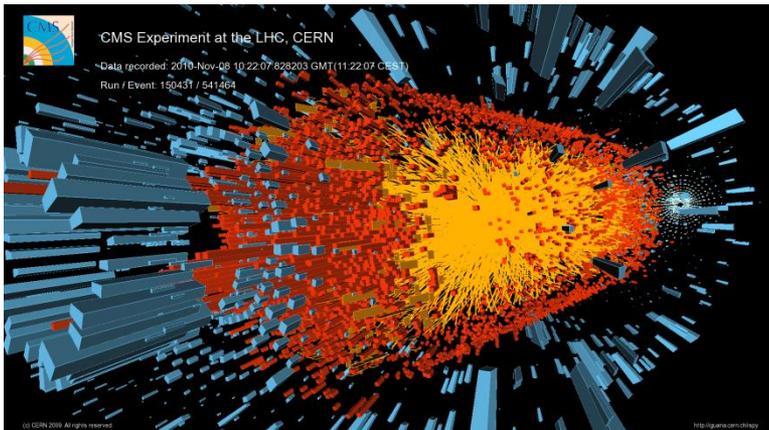
44 zéros ...

→ Un nombre certainement plus grand que tous ceux que vous connaissez ou auxquels vous pouvez simplement penser ...

- Quel(s) lien(s) peut-il exister entre ces « deux infinis » aussi « distants » ?
- Progrès considérables de ces deux sciences au cours du XX<sup>e</sup> siècle
  - Et également depuis le début du XXI<sup>e</sup> ...
- Peu à peu apparition de relations, de correspondances, de points communs, etc.

# Un voyage du (très) froid au (très) chaud

- **0,1 K** (-273,05°C)
- 1,9 K
- 2,7 K
- ...
- **1600 milliards de degrés Celsius**
- Température ↔ Energie
- **Densité d'énergie**



# Un voyage auprès des forces fondamentales

- **Quatre interactions fondamentales**

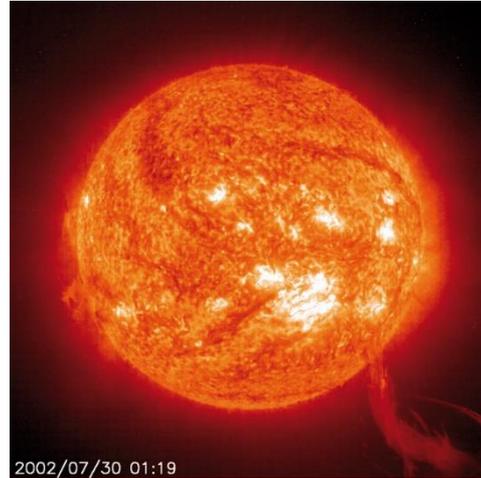
- Interaction forte
- Interaction électromagnétique
- Interaction faible
- Gravitation

- Des **portées très différentes**

- D'une fraction de la taille du noyau atomique à l'infini !

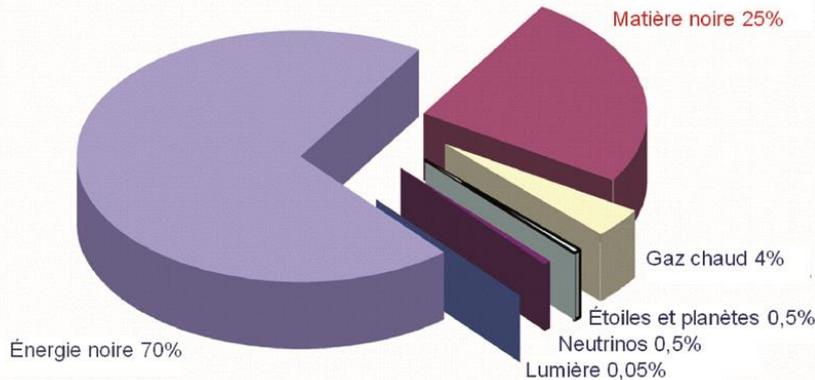
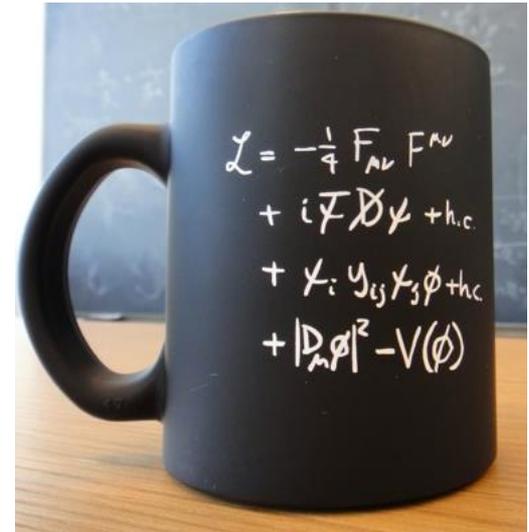
- Des **intensités très variées**

- 40 ordres de grandeur ( $10^{40}$ ) !



# Un voyage au-milieu des théories scientifiques

- La **relativité restreinte**
- La **mécanique quantique**
- Le **Modèle Standard de la physique des particules**
- **L'espace-temps**
- La **loi de la gravitation universelle**
- La **relativité générale**
- Le **Modèle Standard cosmologique**



## Composants élémentaires de la matière

	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1 <sup>re</sup> famille Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électronique	$e$ électron	$u$ haut / up	$d$ bas / down	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
2 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\mu$ muon	$c$ charm / charm	$s$ strange / étrange	
3 <sup>e</sup> famille Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau	$\tau$ tau	$t$ top	$b$ bottom / bas / bas	

INTERACTIONS FONDAMENTALES	Portée
Interaction faible	$10^{-17}$ m
Interaction électromagnétique	infinie
Interaction forte	$10^{-15}$ m
Gravitation	infinie

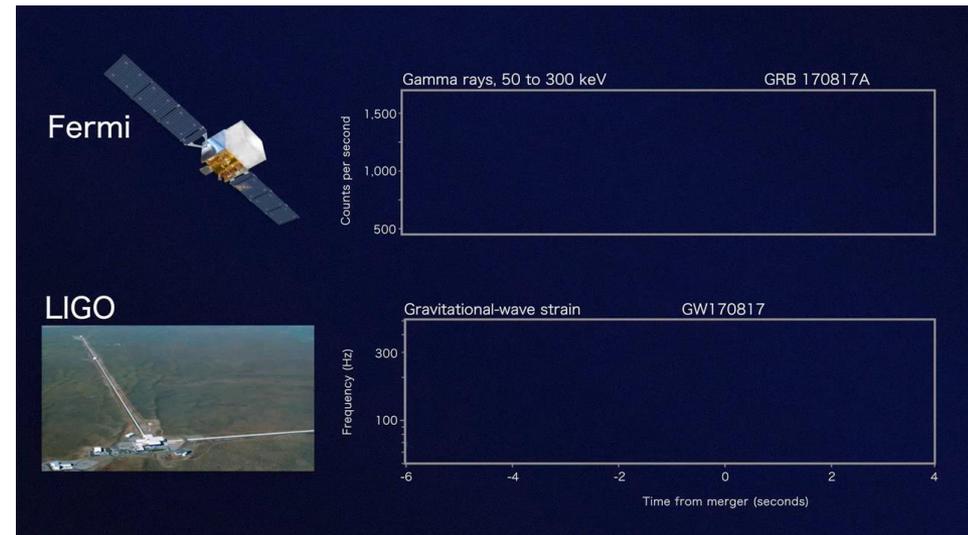
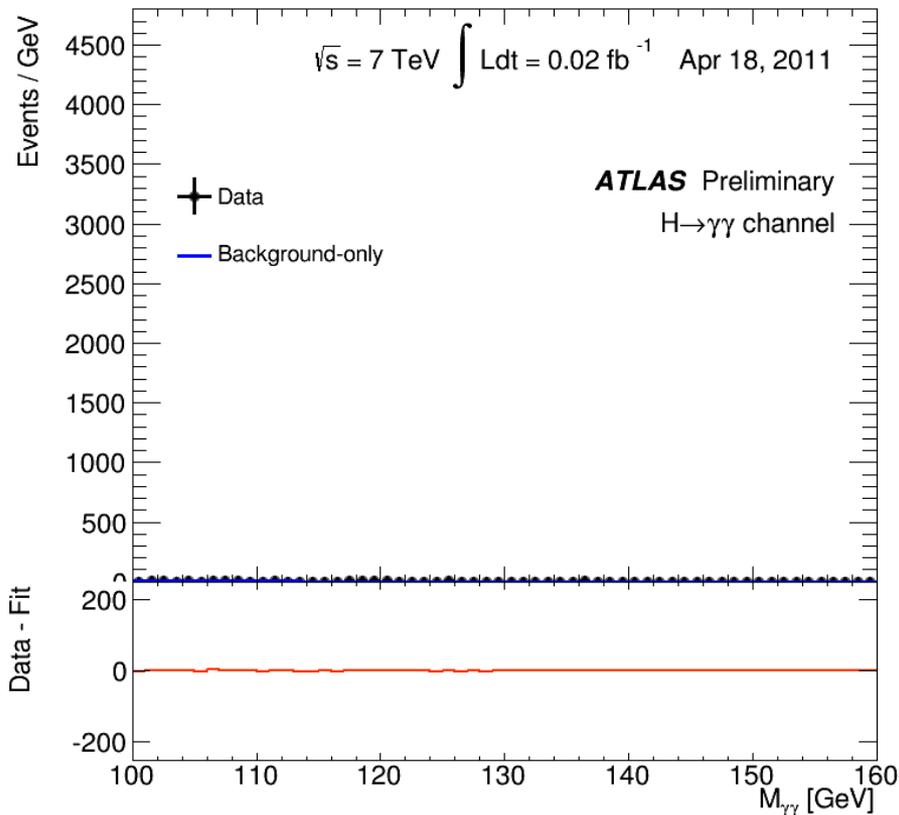
Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

**ANTIMATIÈRE**  
À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Chaque des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil.  
 - la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz.  
 - les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire.  
 - l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.

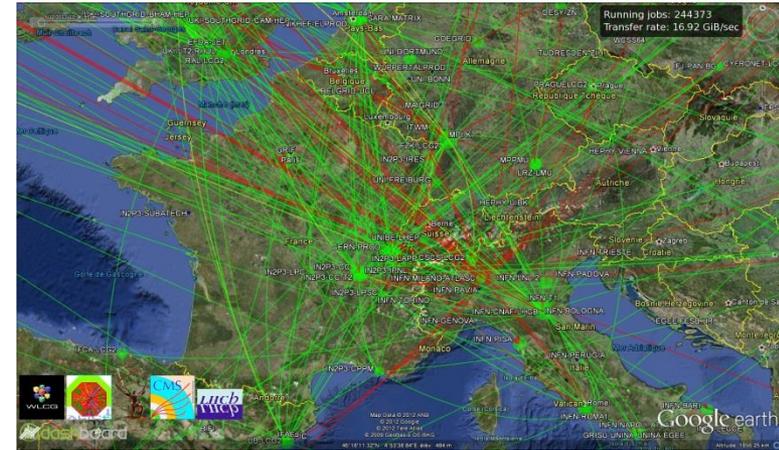
# Un voyage parmi les découvertes

- **Boson de Brout-Englert-Higgs**
  - CERN (**ATLAS** + **CMS**), 2012
- **Fusion de deux étoiles à neutrons**
  - **LIGO** + **Virgo**, 2017



# Un voyage au cœur des technologies

- Le **collisionneur LHC** et ses détecteurs associés
- Le **satellite Planck**
- **Une évolution incroyable des outils**
  - Expériences « à la main »  
→ **Tout analogique & numérique**
  - **Ordinateurs** : processeurs, stockage, réseaux, etc.
- **Des retombées multiples**
  - **Internet**
  - **GPS**
  - **Imagerie médicale**
  - **Radiothérapie**

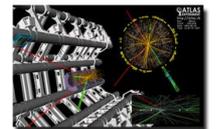


# Un voyage dans la communauté scientifique

- Les **théoriciens** « imaginent » des modèles
- Les **expérimentateurs** les « testent »  
→ Aller-retours incessants entre ces deux communautés scientifiques

## Exemple

- **1964** : proposition du « mécanisme de Higgs » par plusieurs équipes indépendantes
  - **2012** : découverte d'un nouveau boson massif au LHC
  - **2013** : en mars, ce boson devient *un boson de Higgs*  
en octobre, F. Englert et P. Higgs obtiennent le prix Nobel de physique
- Des « explorateurs-découvreurs » aux **grandes collaborations internationales** actuelles
  - **Une grande diversité de métiers**
    - **Physiciens, ingénieurs, techniciens, administratifs**
  - Prix, distinctions et récompenses



# « Infiniment petit » / « Infiniment grand »

- Deux abus de langage
    - L'infini ( $\infty$ ) est une limite mathématique inatteignable
  - Mais les questions physiques associées sont pertinentes
    - Y-a-t-il une plus petite brique élémentaire de matière ?
    - Quelle est la taille de l'Univers ?
  - Et je ne connais pas de manière plus concise de désigner ces deux concepts ...
- Ces expressions sont bien commodes et utilisées par tous
- L'important est de savoir leur donner un sens scientifique – et sans aller au-delà
- **Infiniment petit**
    - Les particules élémentaires de la matière : électrons, quarks, etc.
    - Les interactions fondamentales qui agissent sur elles
  - **Infiniment grand**
    - L'histoire, l'évolution et la composition de l'Univers



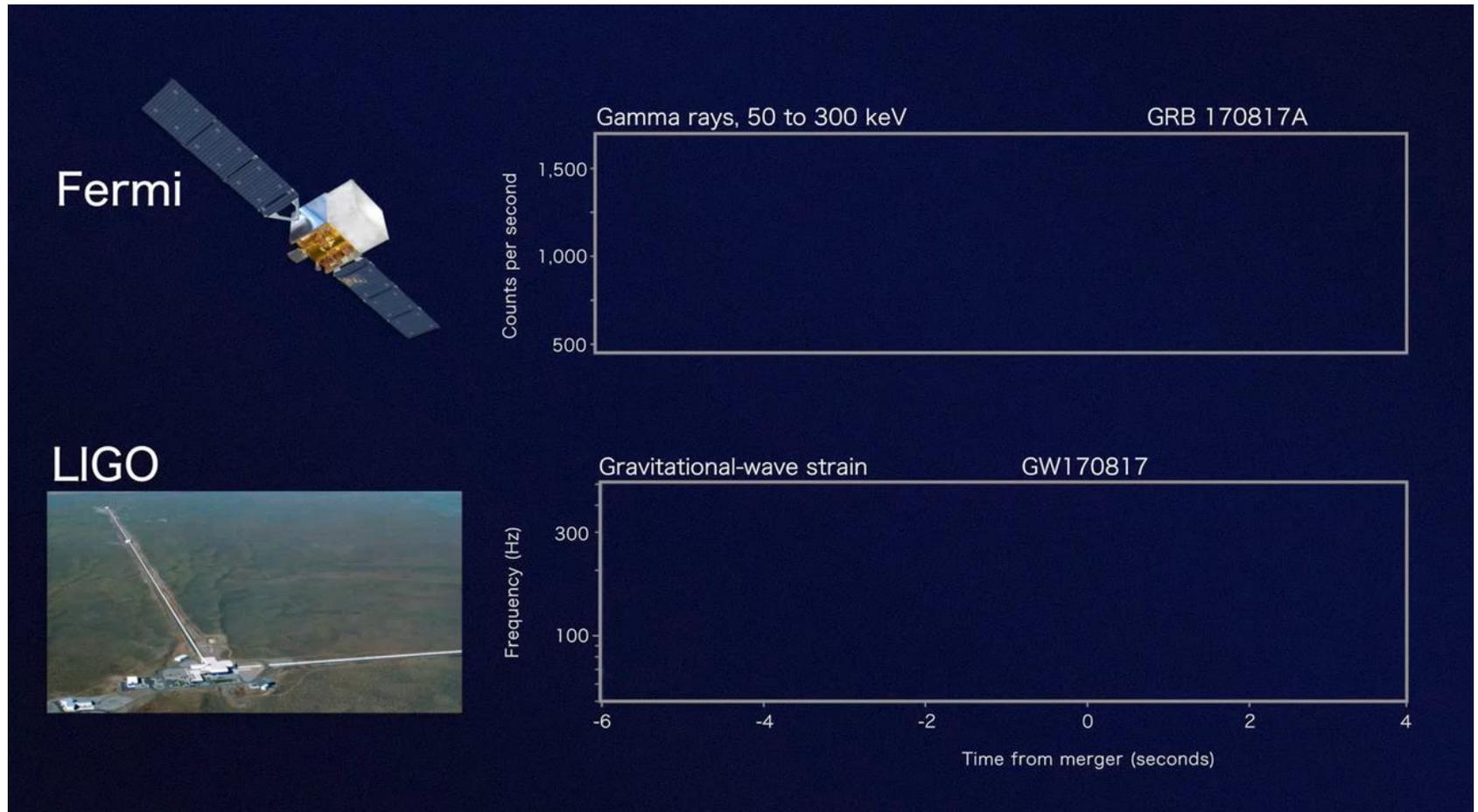
# **La découverte des ondes gravitationnelles**

**17-18 août 2017 :  
12 heures extraordinaires**

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

# Jeudi 17 août 2017, 14h41 heure de Paris

- Signaux enregistrés avec un écart de deux secondes
  - LIGO (ondes gravitationnelles)
  - Instrument GBM (sursauts gamma) du satellite Fermi

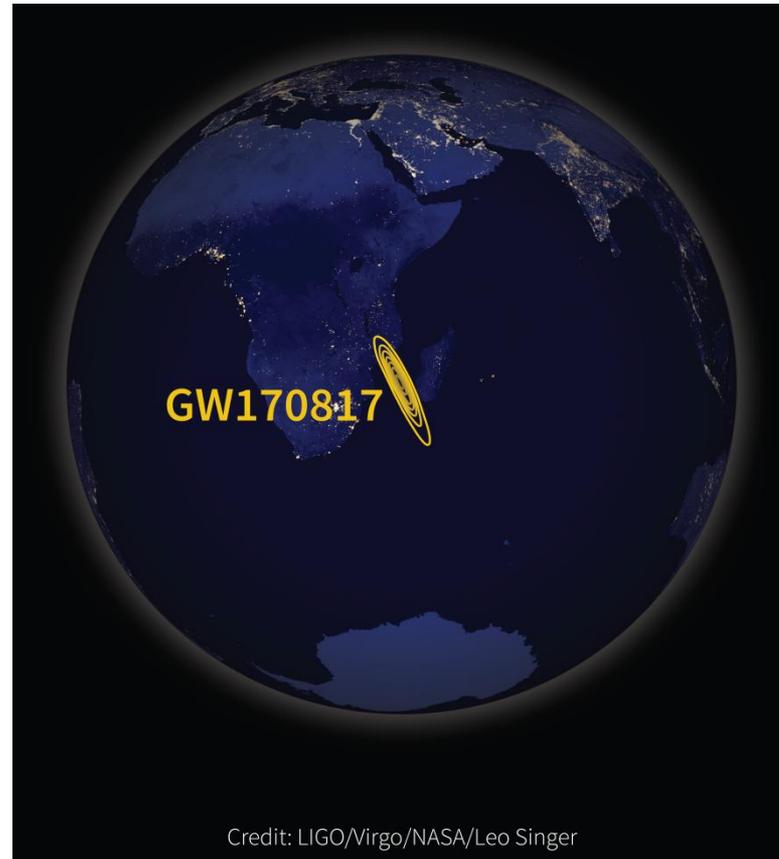


# Plus tard le même jour ...

- 19h55

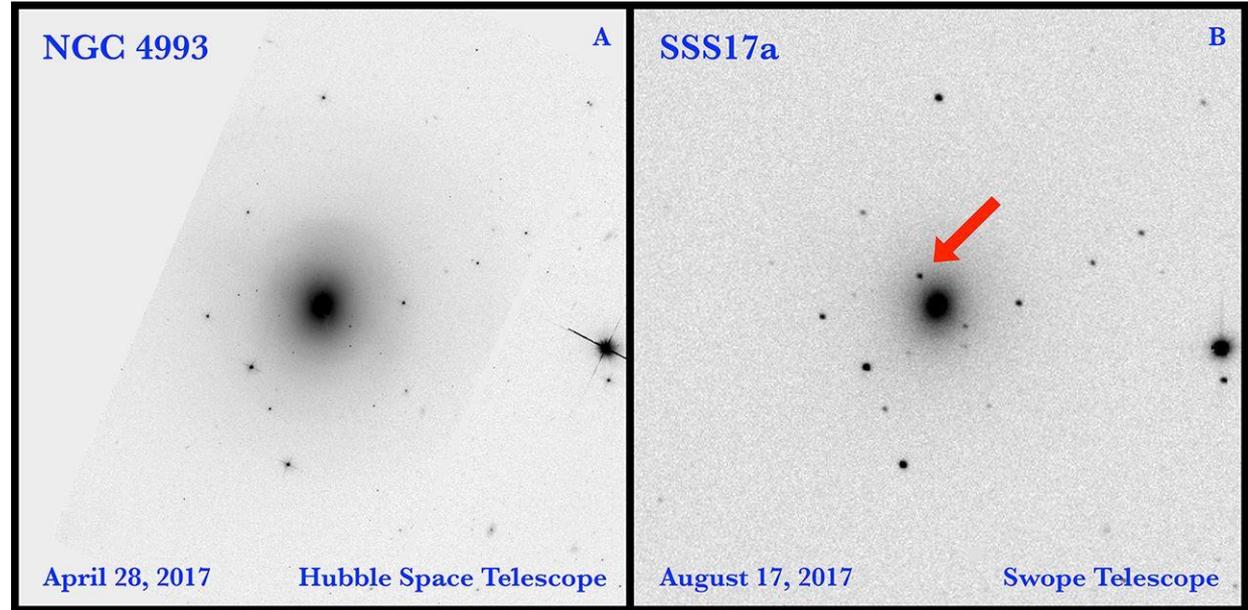
→ Localisation LIGO-Virgo

- Position dans le ciel :  
28 degrés carrés
- Estimation de la distance  
de la source

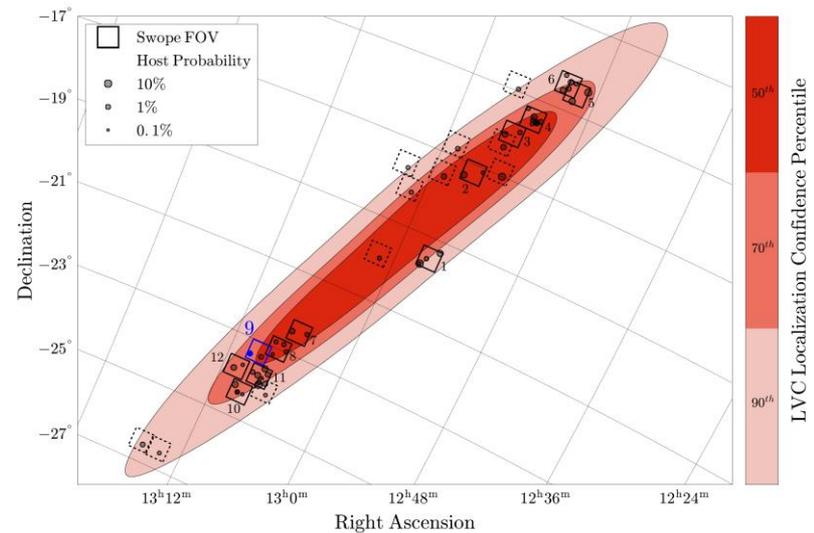


# La nuit suivante ...

- 18/08/2017  
01h33 heure de Paris
- Découverte de la  
contrepairtie optique  
à l'aide du  
téléscope SWOPE  
au Chili

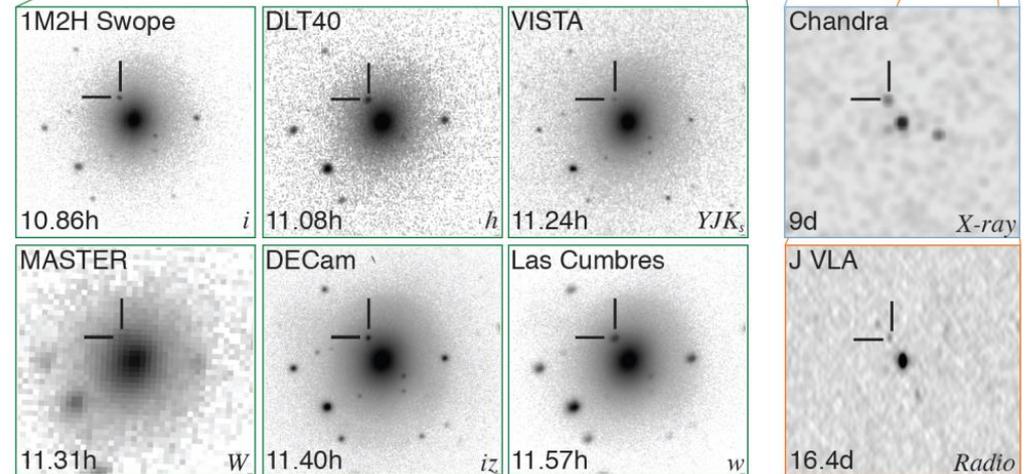
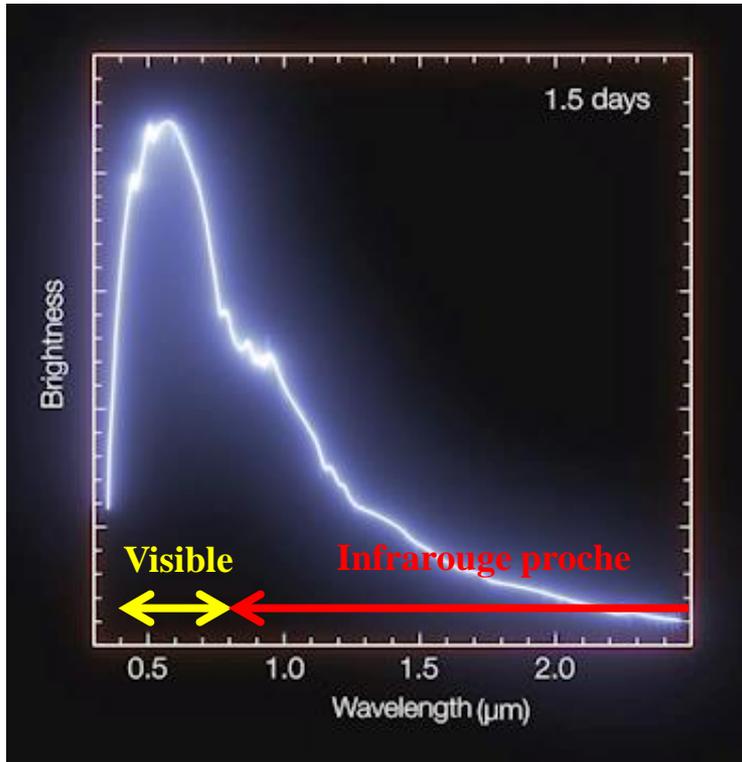
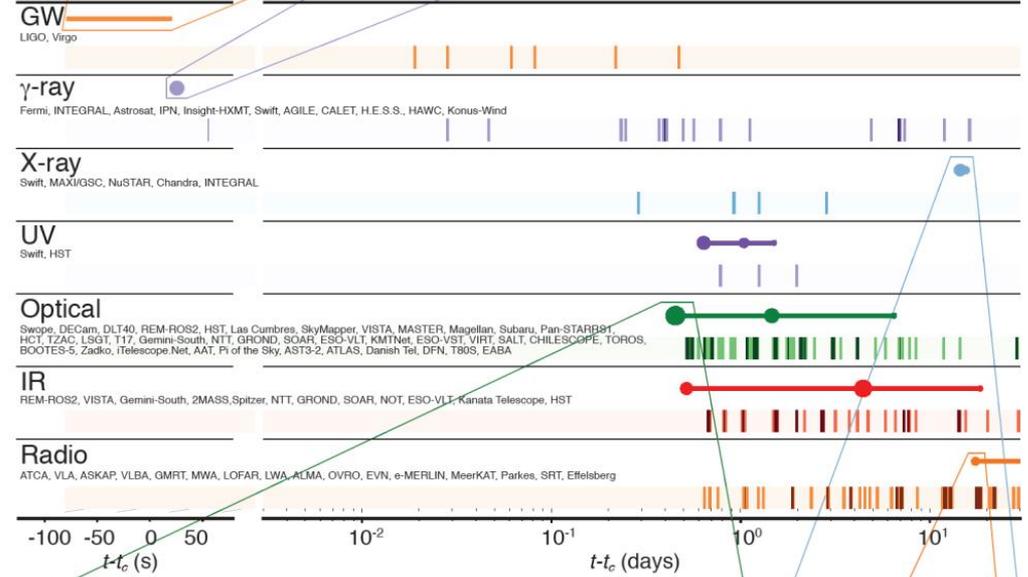
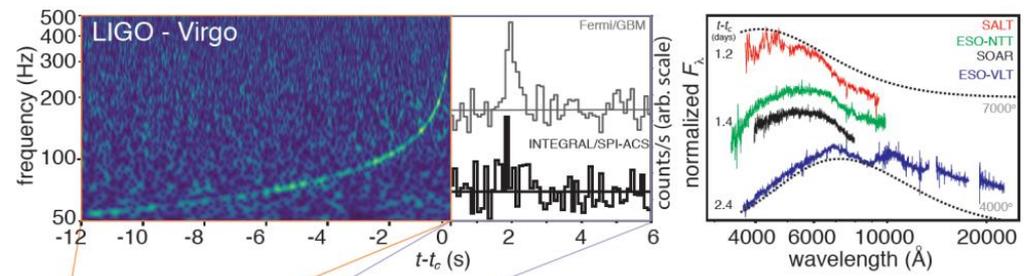


~ (1 / 160 000)-ème du ciel



# Astronomie multi-messagers

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

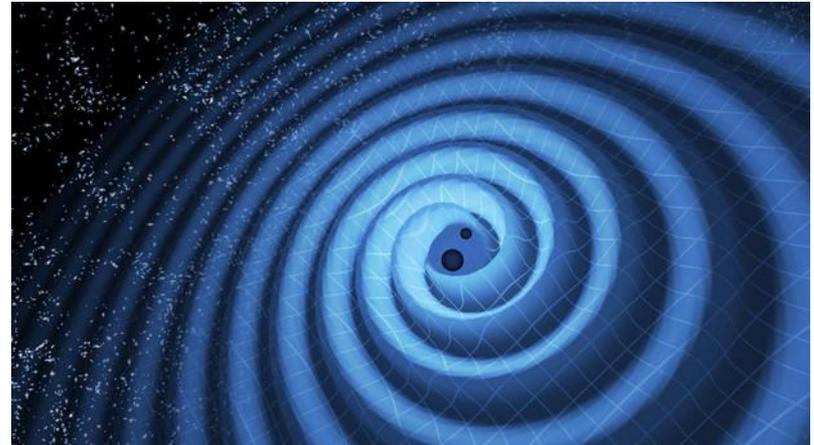


# Détecter les ondes gravitationnelles

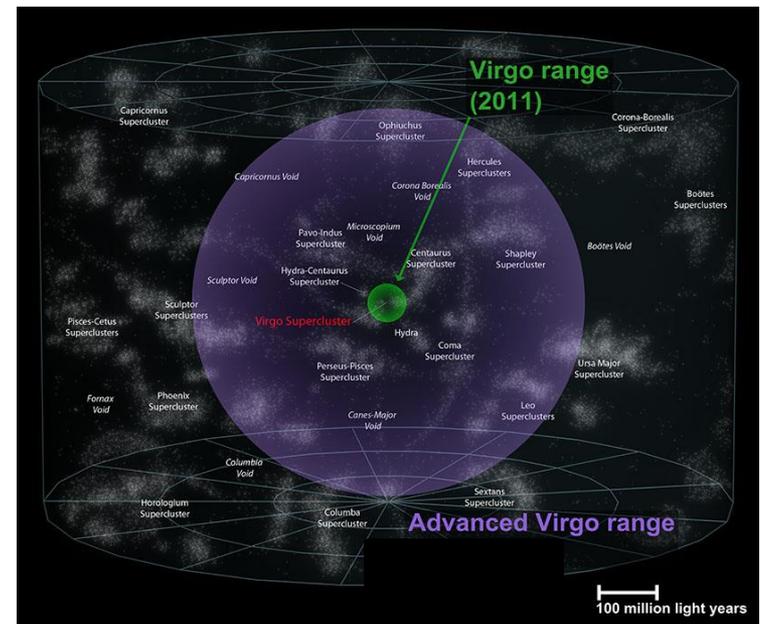
*Merci à tous mes collègues du groupe Virgo du LAL et des collaborations Virgo et LIGO, auxquels j'ai emprunté des idées et du matériel pour cette présentation*

# Les ondes gravitationnelles

- 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
- Pas d'émission d'ondes gravitationnelles (OG) si la source est axisymétrique
  - Une « bonne » source doit avoir une distribution de masse asymétrique
- L'amplitude  $h$  d'une OG
  - est sans dimension
  - Décroît comme  $1/(distance \text{ à la source } d)$
  - Les détecteurs  $y$  sont directement sensibles

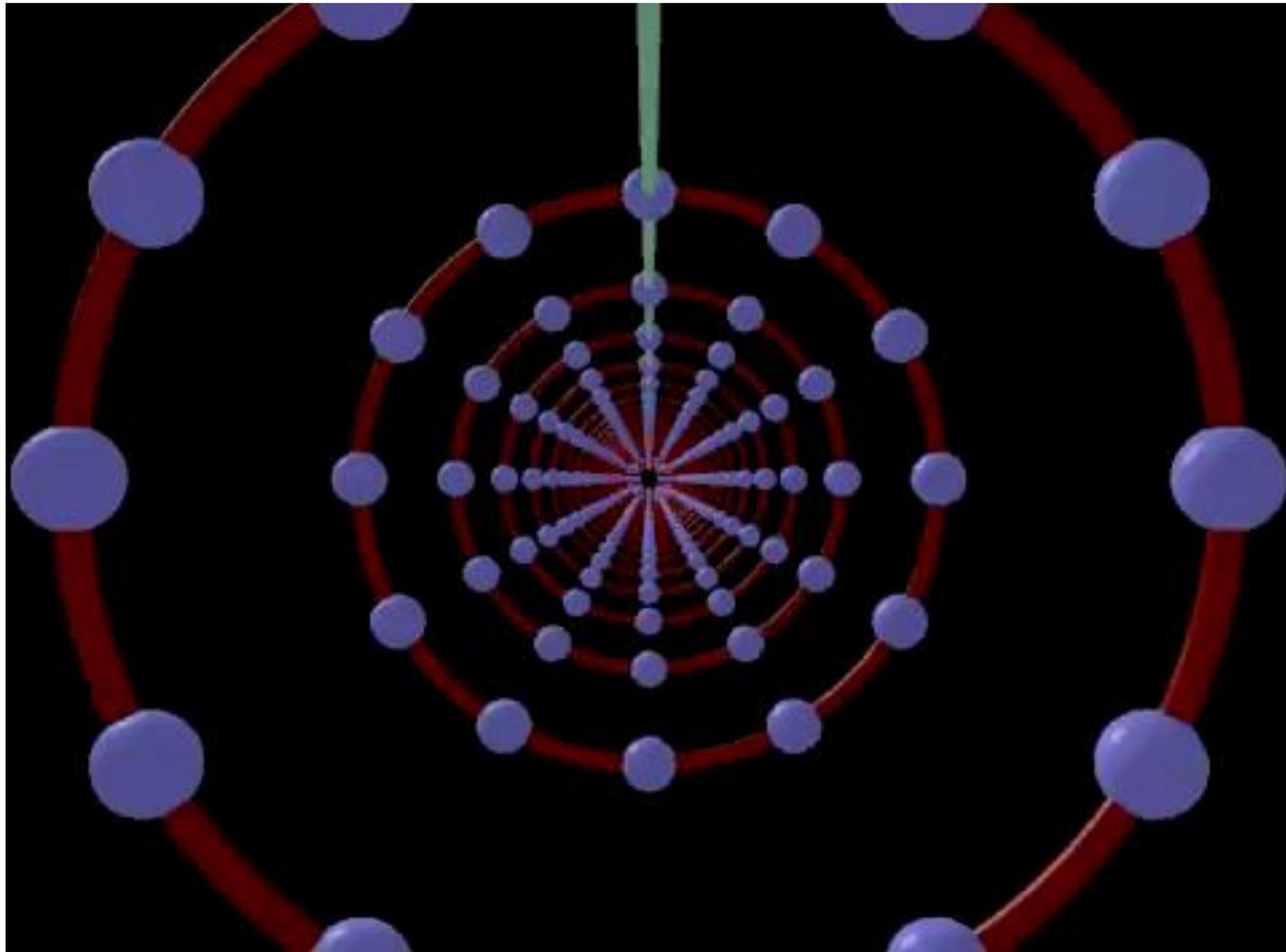


- Gain d'un facteur 2 (10) en sensibilité  
⇔ Gain d'un facteur 2 (10) en distance  
⇔ Volume d'Univers observable augmenté par un facteur 8 (1000)

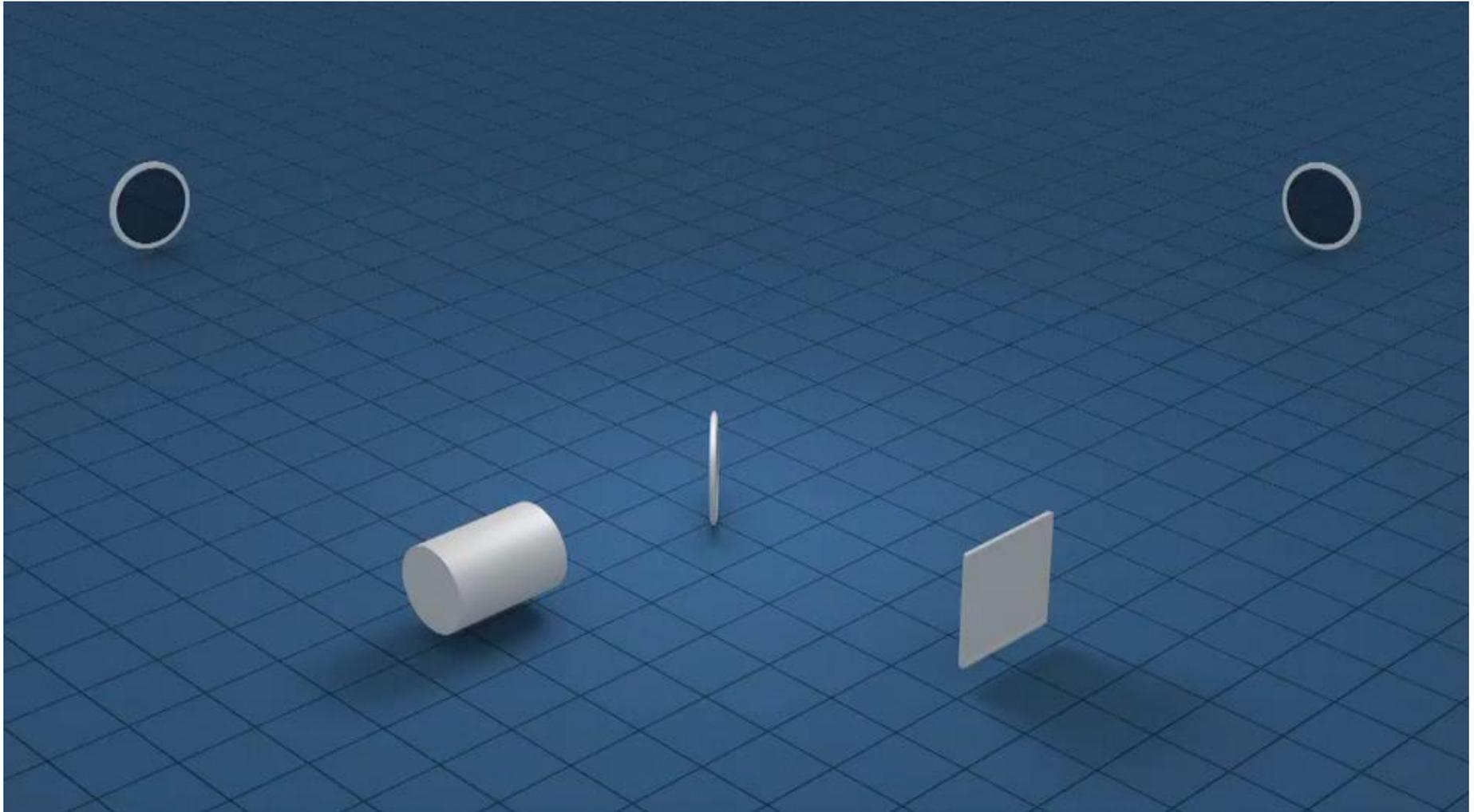


# Effet d'une onde gravitationnelle

- En trois dimensions



# Principe de fonctionnement

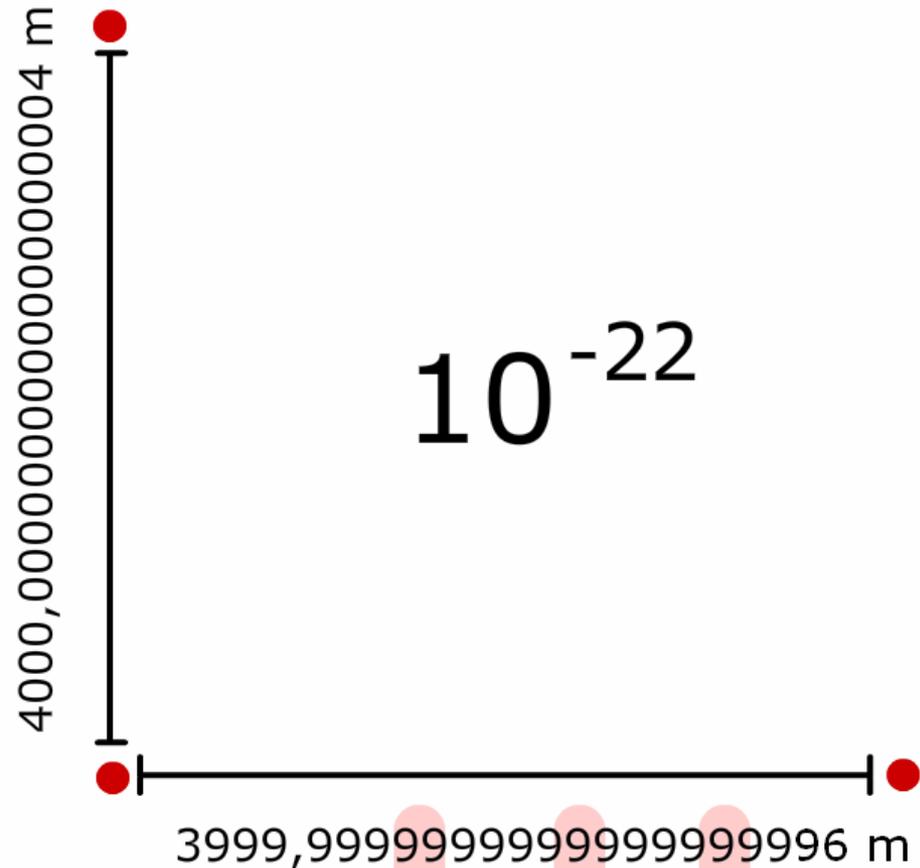


$$\underbrace{\text{Sensibilité}}_{\text{Valeurs très petites}} \propto \frac{1}{(\text{longueur des bras}) \times \sqrt{\text{puissance laser}}}$$

Valeurs très petites

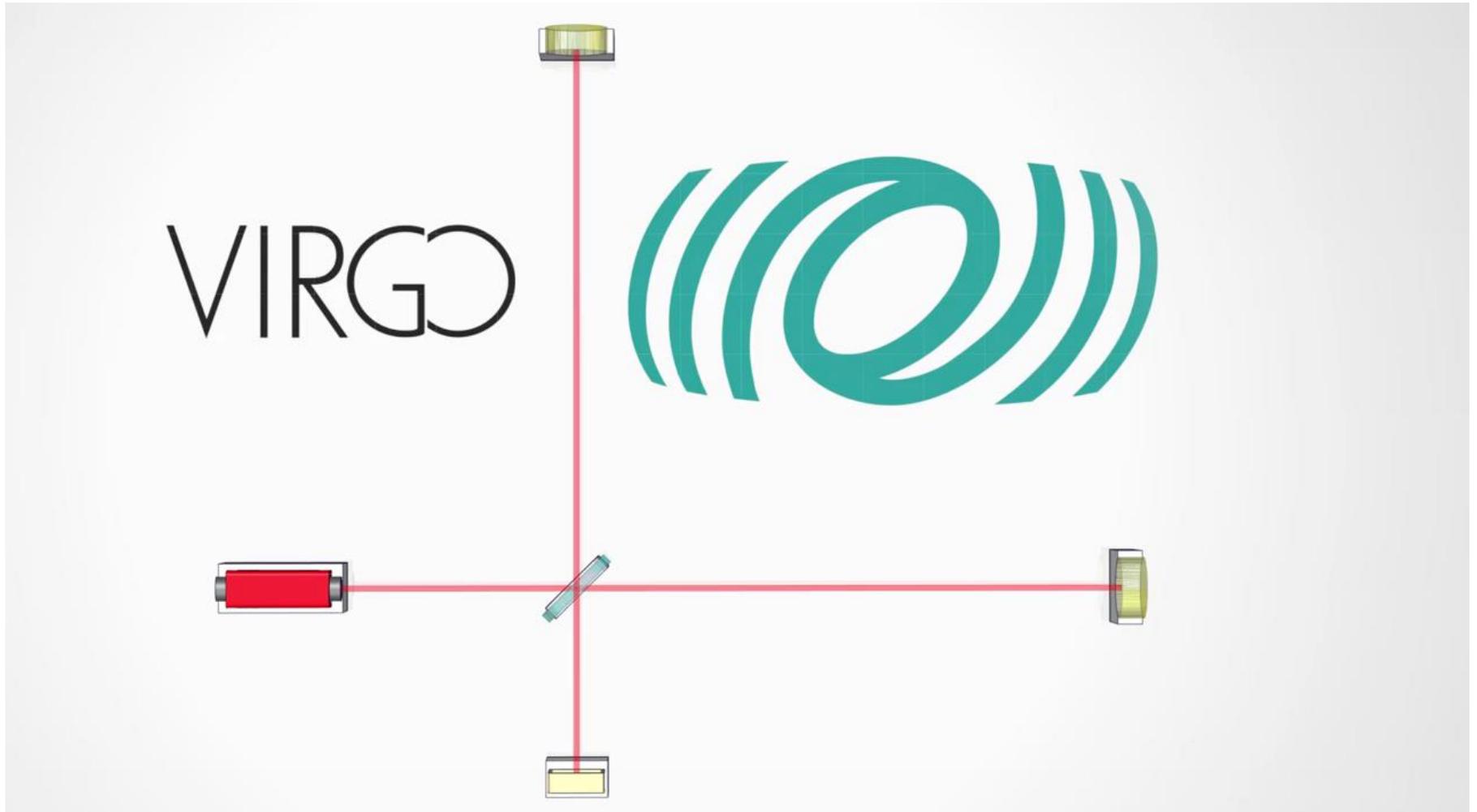
# Une sensibilité record

- Variation relative de longueur ( $\Delta L/L$ ) très faible
  - De l'ordre d'une fraction de millième de milliardième de milliardième ( $10^{-21}$ ) !
- $10^{-21}$ 
  - Taille d'un atome rapportée à la distance Terre-Soleil
  - Distance entre le Soleil et l'étoile Proxima du Centaure mesurée à 0,02 mm près
- Effet sur des longueurs de 4 km
  - Taille des détecteurs LIGO
  - Milliardième de milliardième de mètre



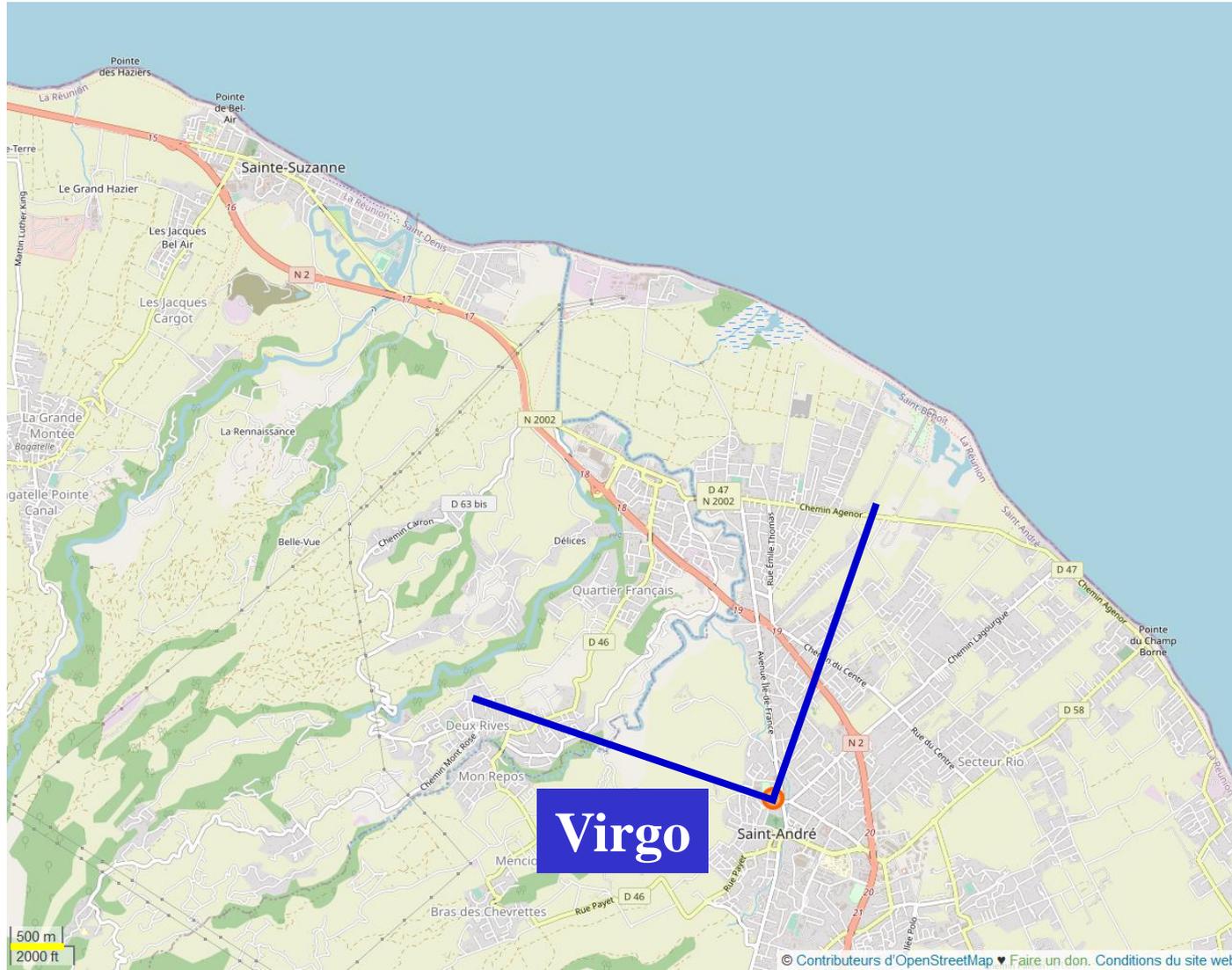
# Un détecteur réel : Virgo avancé

- <https://www.youtube.com/watch?v=6raomYII9P4>, © Marco Kraan, Nikhef (Pays-Bas)



# Virgo au college Joseph Bédié

- Deux bras de 3 km de long formant un angle droit



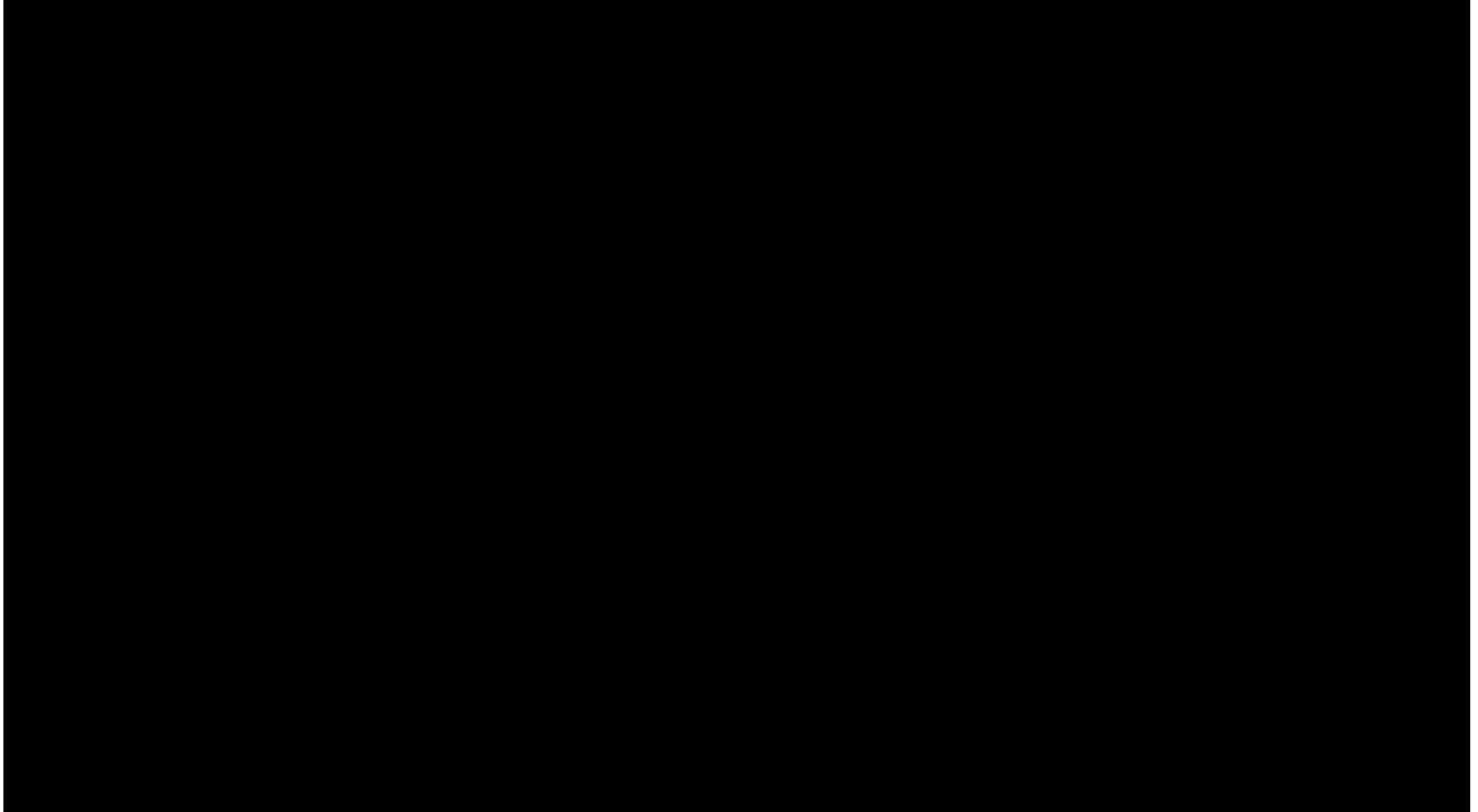
# Les détecteurs de l'extrême

- Journal du CNRS



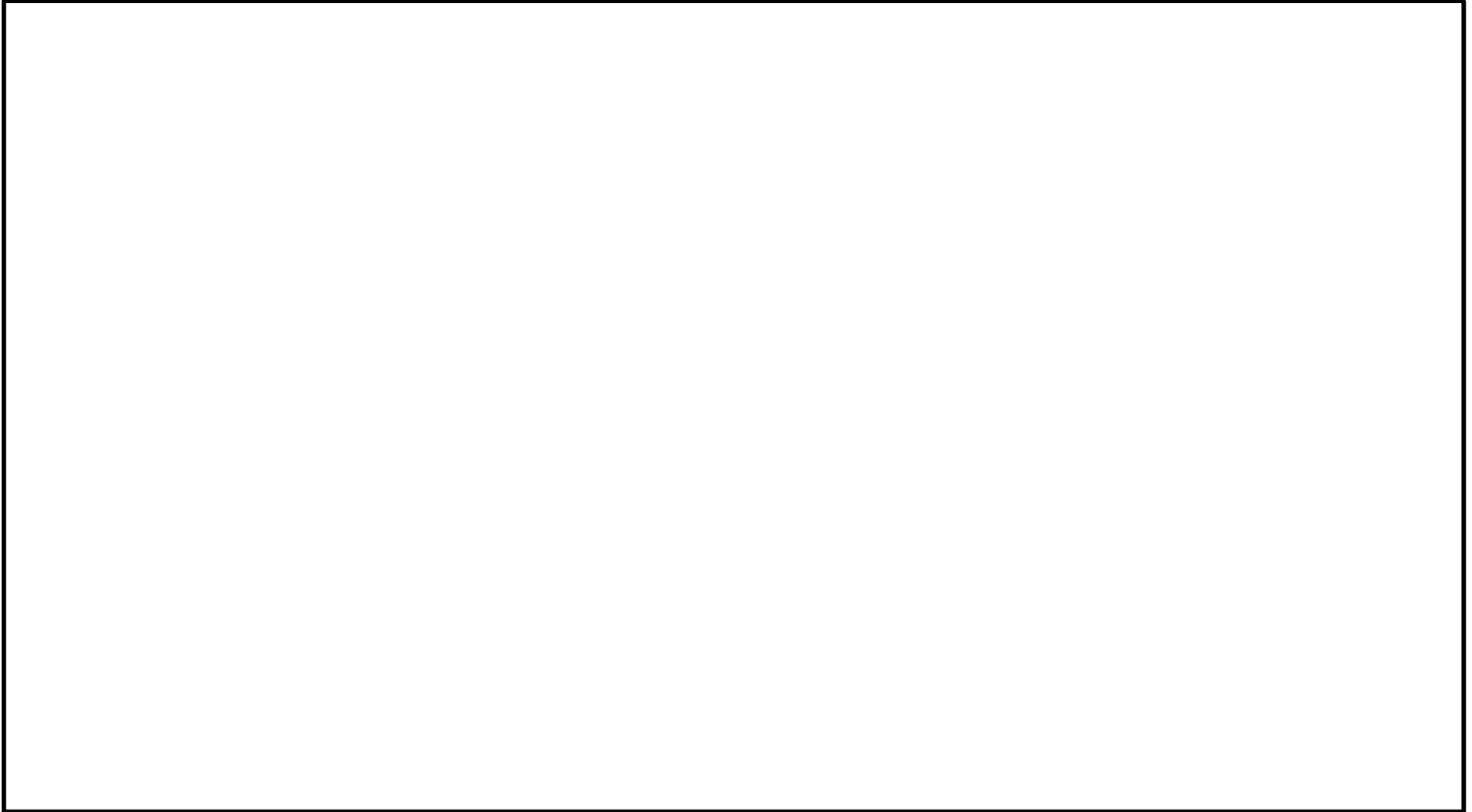
# Virgo and EGO

- At the frontier of knowledge and at the service of society



# Les miroirs les plus parfaits du monde

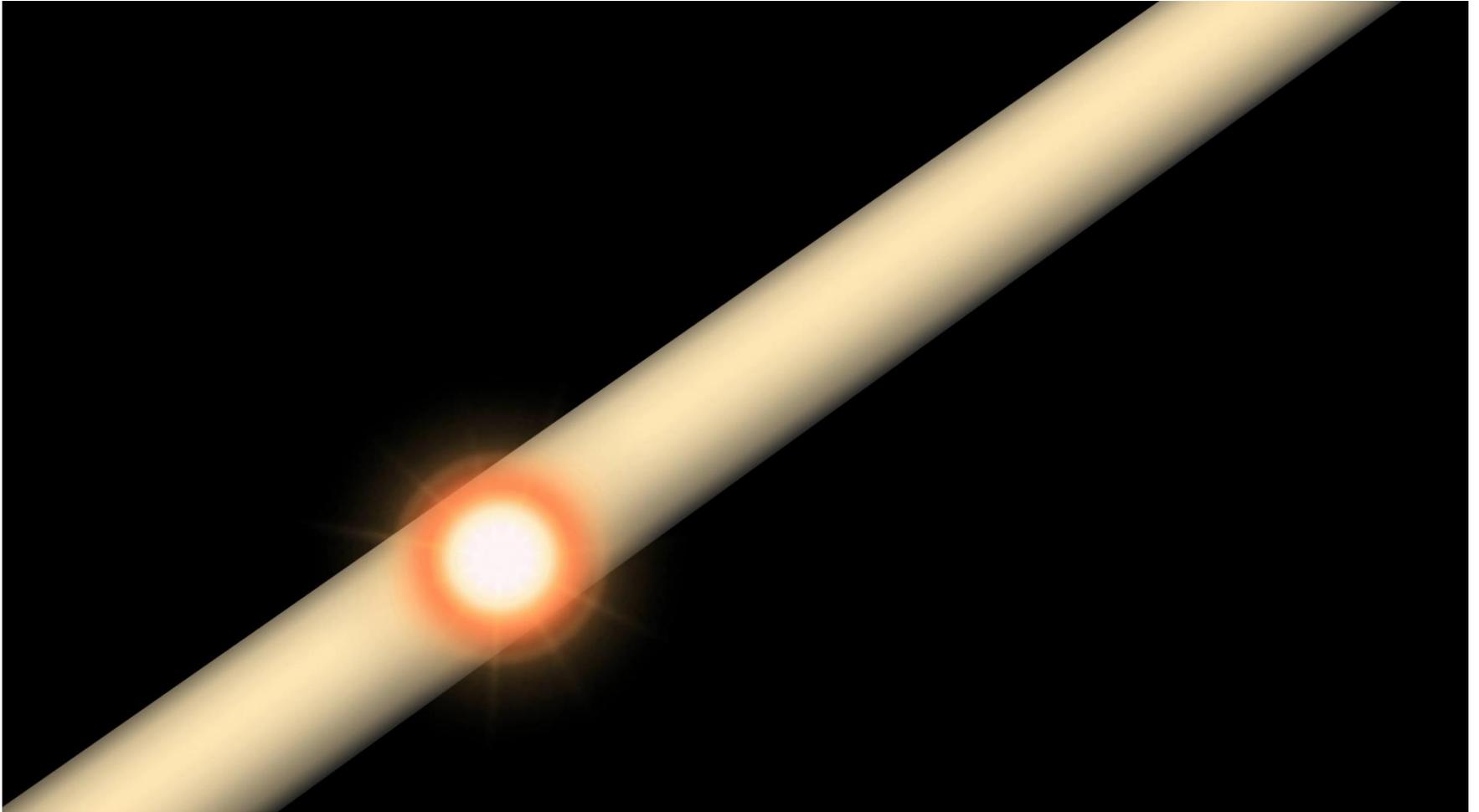
- Journal du CNRS





**LHC**

# Accélération de particules au LHC



# Le LHC en direct

- <https://op-webtools.web.cern.ch/vistar/vistars.php?usr=LHC1>

LHC Page1      Fill: 8345      E: 6800 GeV      t(SB): 01:41:14      05-11-22 00:38:14

**PROTON PHYSICS: STABLE BEAMS**

Energy: **6800 GeV**      **I B1:** **3.09e+14**      **I B2:** **3.12e+14**

Beta\* IP1: **0.45 m**      Beta\* IP2: **10.00 m**      Beta\* IP5: **0.45 m**      Beta\* IP8: **2.00 m**

Inst. Lumi [(ub.s)<sup>-1</sup>]      IP1: 18225.98      IP2: 8.00      IP5: 18237.92      IP8: 355.81

**FBCT Intensity and Beam Energy**      Updated: 00:38:10

**Instantaneous Luminosity**      Updated: 00:38:12

**Comments (04-Nov-2022 22:57:19)**

\*\*\* STABLE BEAMS \*\*\*  
fill for physics (2462b)

preparing levelling & XRPs

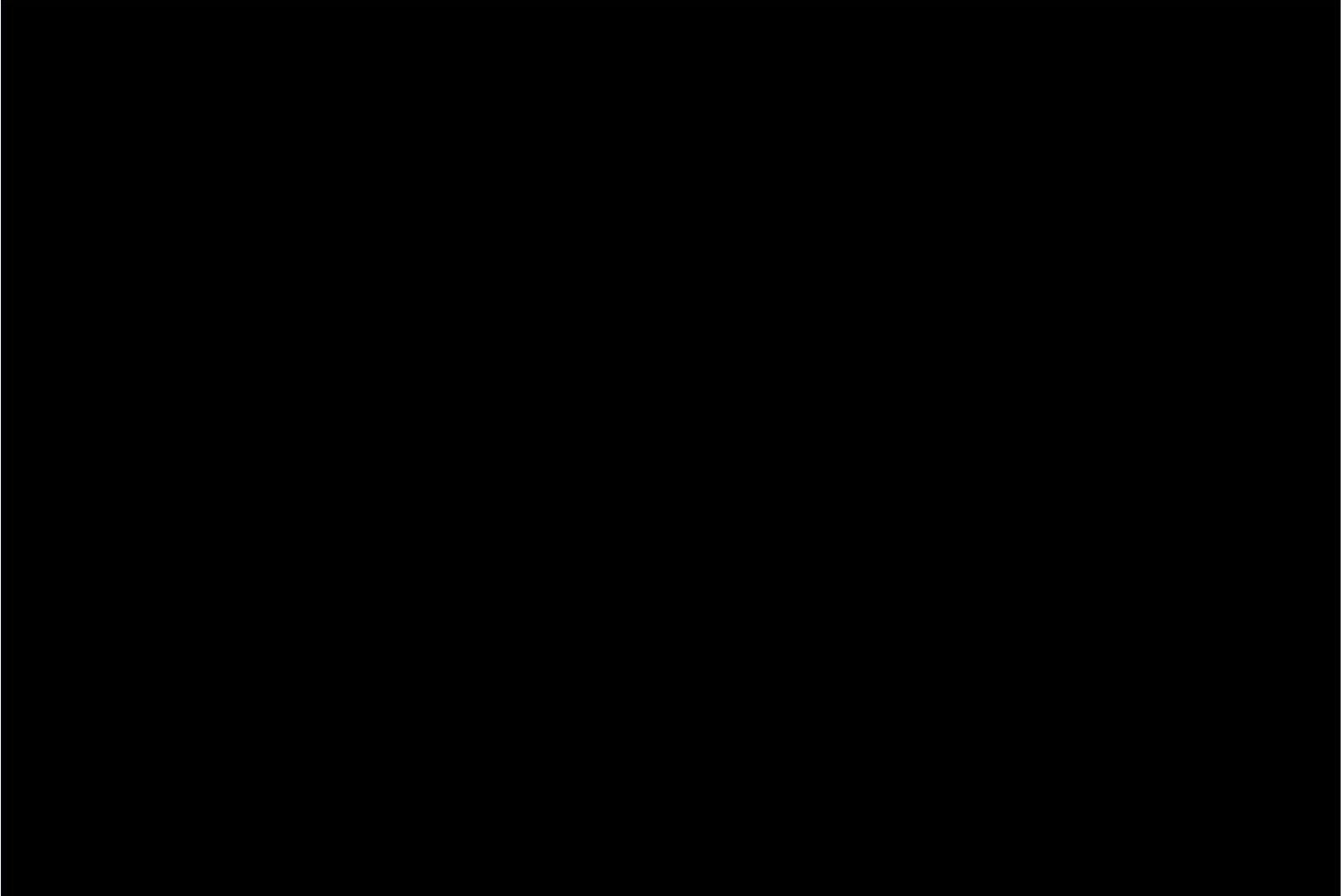
**BIS status and SMP flags**

	B1	B2
Link Status of Beam Permits	true	true
Global Beam Permit	true	true
Setup Beam	false	false
Beam Presence	true	true
Moveable Devices Allowed In	true	true
Stable Beams	true	true

AFS: 25ns\_2462b\_2450\_1737\_1735\_180bpi\_17inj\_2INDIV      PM Status B1 ENABLED      PM Status B2 ENABLED

# Intermède gourmand

- Une collision de particules vue sous l'angle de la confiserie ...



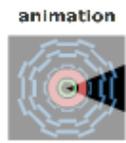
# Un petit tour du côté des détecteurs du LHC

- **Des cathédrales de métal et d'électronique !**
  - Dimensions de **plusieurs dizaines de mètres**
  - Poids de **plusieurs milliers de tonnes** ( $\approx$  Tour Eiffel)
- 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**
  - Surfaces/volumes actifs, câbles, alimentations, etc.
- **Volume total de données :  $\sim$  plusieurs Encyclopédia Universalis / seconde**
  - Impossible de tout conserver
  - **Tri en temps réel des événements** : **drastique** et très performant
- Données stockées et analysées au moyen de **milliers d'ordinateurs** répartis dans des **centaines de centres de calcul** du monde entier
- Chaque collaboration du LHC compte **plusieurs milliers de membres**



# Interactions des particules avec le détecteur ATLAS

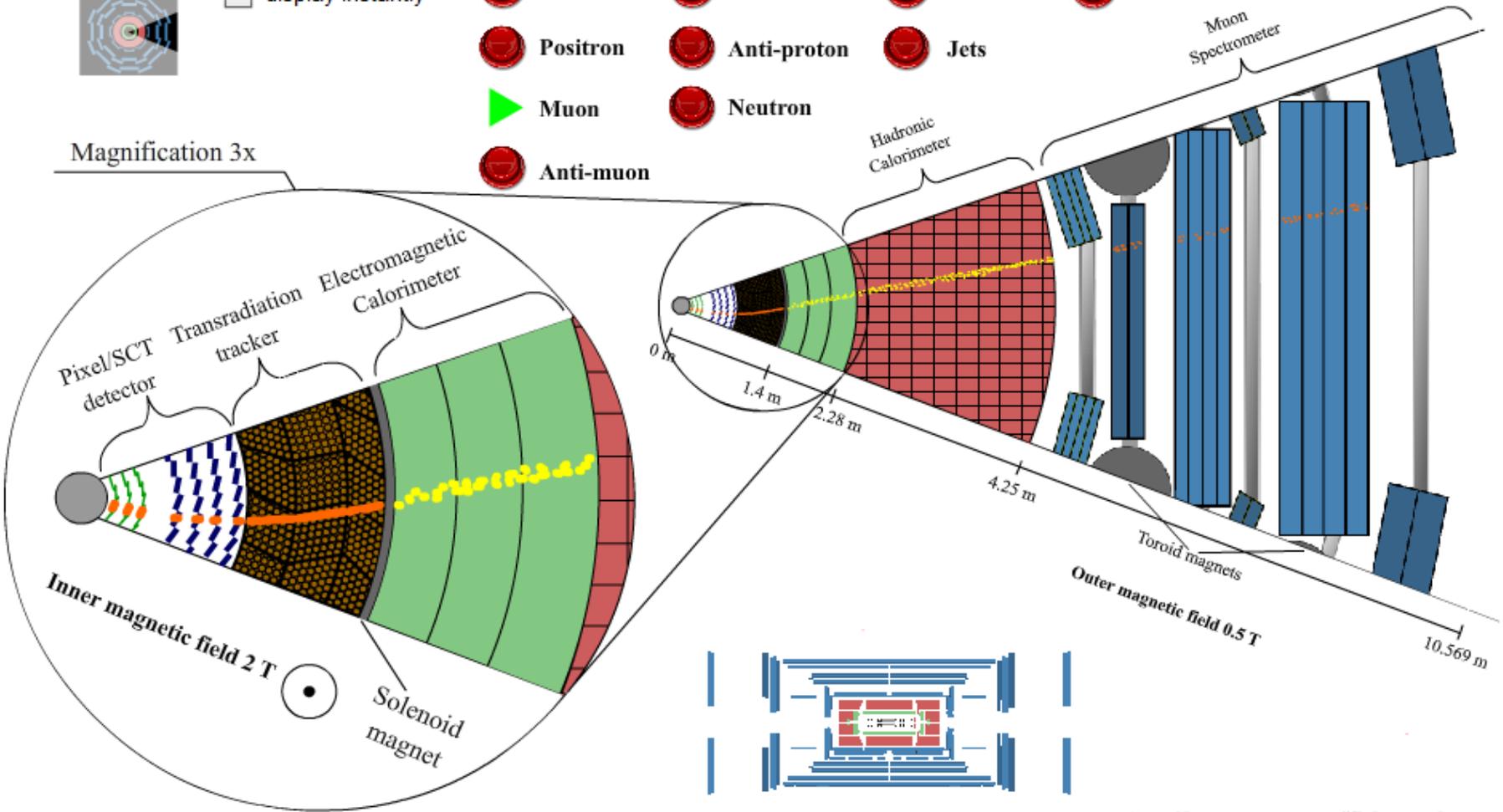
**ATLAS**



display instantly

- Electron
- Proton
- Neutrino
- Photon
- Positron
- Anti-proton
- Jets
- Muon
- Neutron
- Anti-muon

Magnification 3x



Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel

# Le LHC à Saint André

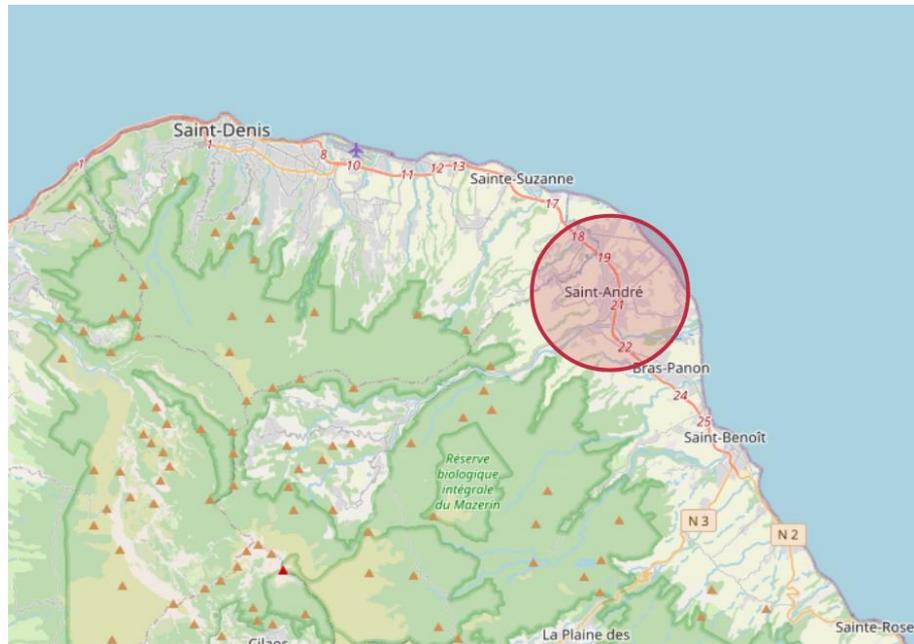
- Application : LHC in your neighborhood



# Du LHC au FCC

- Application : LHC in your neighborhood
  - LHC

- FCC [ordre de grandeur]





# Conclusions

# « Pour l'honneur de l'esprit humain »

- Extrait d'une lettre (2 juillet 1830) de Jacobi à Legendre, suite à la mort de Fourier :

(...) Il est vrai que M. Fourier avait l'opinion que le but principal des Mathématiques était l'utilité publique et l'explication des phénomènes naturels ; mais un philosophe comme lui aurait dû savoir que le but unique de la science, c'est l'honneur de l'esprit humain (...)

- Citation reprise notamment par Jean Dieudonné dans le titre de son livre (1987) : « Pour l'Honneur de L'esprit Humain – Les Mathématiques d'Aujourd'hui »
- Le besoin de progresser – en sciences comme dans tous les domaines – est une caractéristique de l'humanité qu'il convient de défendre et de préserver.
- Le progrès scientifique s'accompagne d'avancées technologiques qui peuvent être :
  - nécessaires pour atteindre le but fixé
  - espérées pour résoudre un problème
  - complètement inattendues
- Y renoncer ou le limiter aura forcément des conséquences à long terme.  
→ On ne peut pas utiliser ce qu'on n'a pas encore découvert ou pas encore compris
- La science donne un cadre pour comprendre les grands problèmes sociétaux, proposer des actions pour s'y attaquer, tester et vérifier leurs conséquences.