
Faits scientifiques marquants de la décennie 2006-2016 au LAL

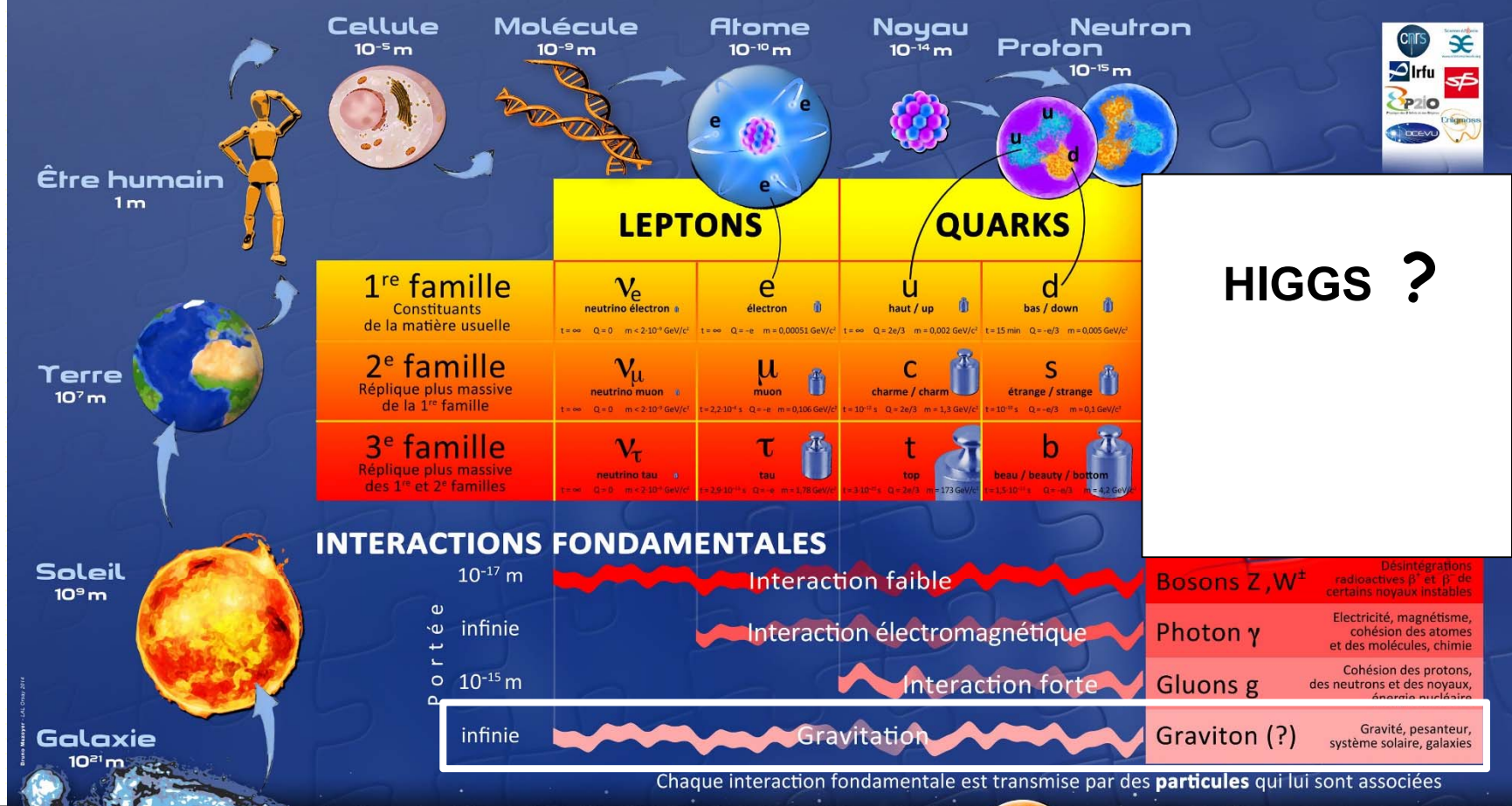


Plan de l'exposé

- Une image de notre discipline en 2006
- Une décennie couronnée de résultats majeurs
 - Un regard sur l'origine de l'univers : **Planck**
 - Naissance de l'astronomie gravitationnelle : **LIGO, Virgo**
 - De l'origine de la masse : **LHC, ATLAS, LHCb**
- Les défis de la prochaine décennie

Retour en 2006.... : Modèle standard de la physique des particules

Composants élémentaires de la matière



Études quarks b et top
Neutrinos : masse, oscillation

les joue un rôle dans le fonctionnement particulier du Soleil :
à partir de nucléons lors des réactions de production de l'énergie



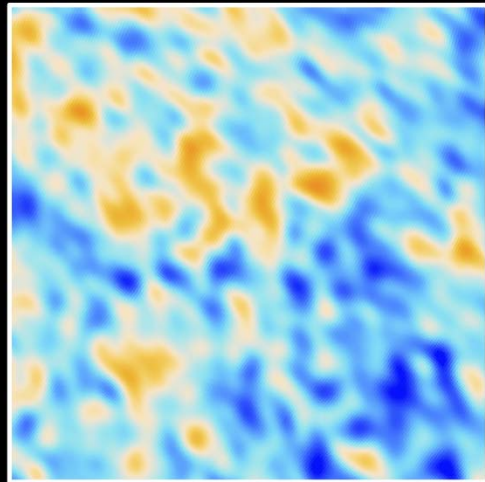
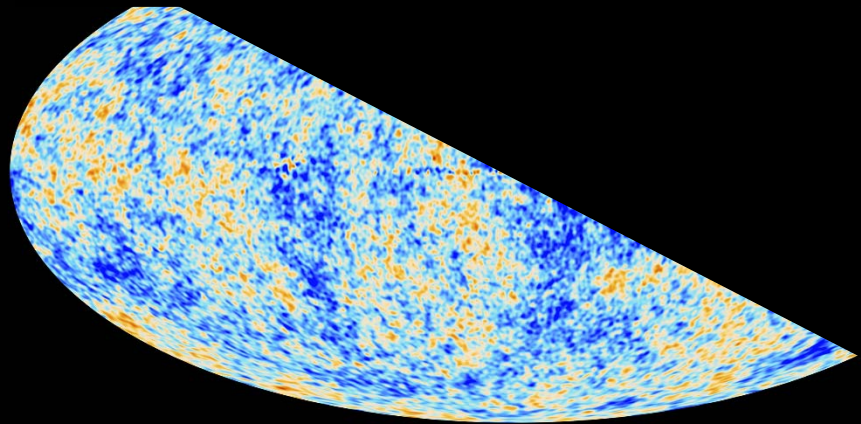
ANTIMATIÈRE

Le LHC va démarrer sous peu...

Retour en 2006.... :

Rayonnement fossile et composition de l'univers

Rayonnement fossile vue par WMAP



WMAP

Composition de l'univers avant Planck



Satellite Planck lancée en 2009....

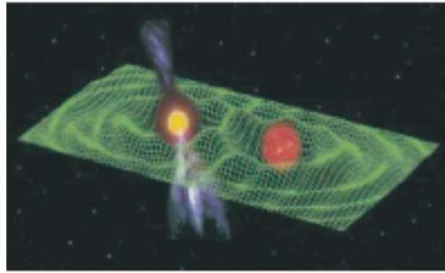
Retour en 2006.... : Ondes gravitationnelles



Russell A. Hulse

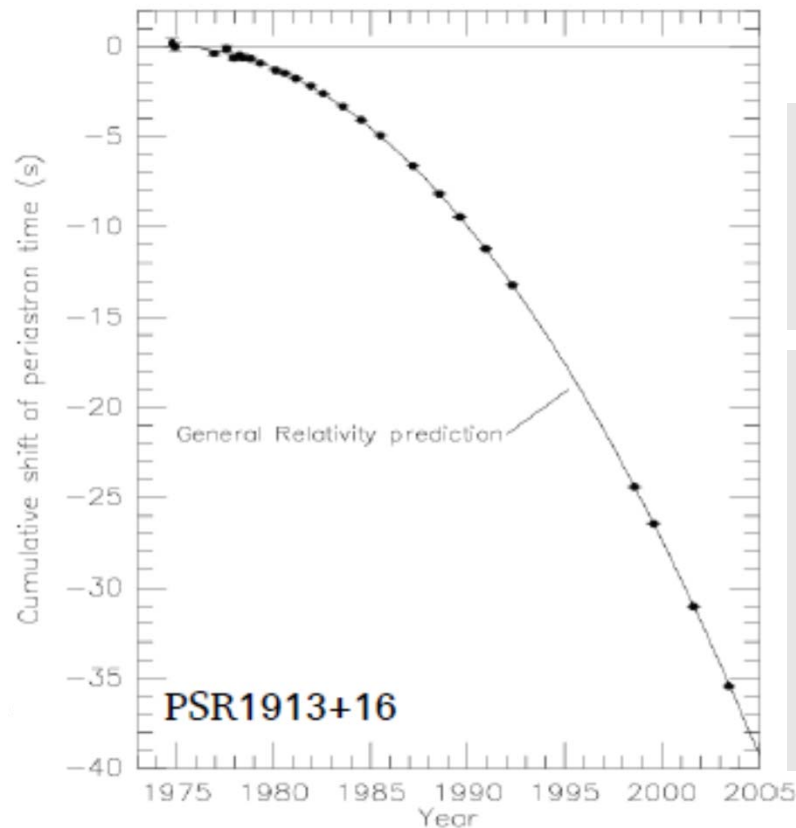


Joseph H. Taylor Jr.



Onde gravitationnelles : Prédiction de la relativité générale (Einstein 1916)

Evidence indirecte de l'existence d'ondes gravitationnelles avec l'étude de pulsars binaires (Hulse & Taylor Nobel en 1993)



Recherche directe depuis 1960, mais élan nouveau avec les grandes expériences d'interférométrie au sol (Virgo/LIGO)

→ première prise de données scientifiques en 2005 pour une détection directe

→ Premiers calculs/simulations de coalescence de trou noirs en 2006

Une décennie récompensée par des prix Nobel

Anisotropie du CMB
Mather/Smoot



De Planck à QUBIC

2006

2008

Accélération de
l'expansion de l'univers
Perlmutter/Schmidt/Riess

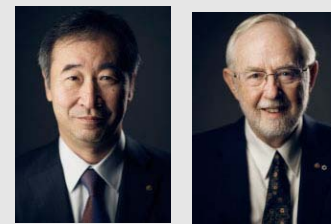


De EROS à LSST

2011

2013

Oscillation de neutrinos
Kajita/McDonald



De Opera/Nemo à SuperNemo
Solid

2015

2016

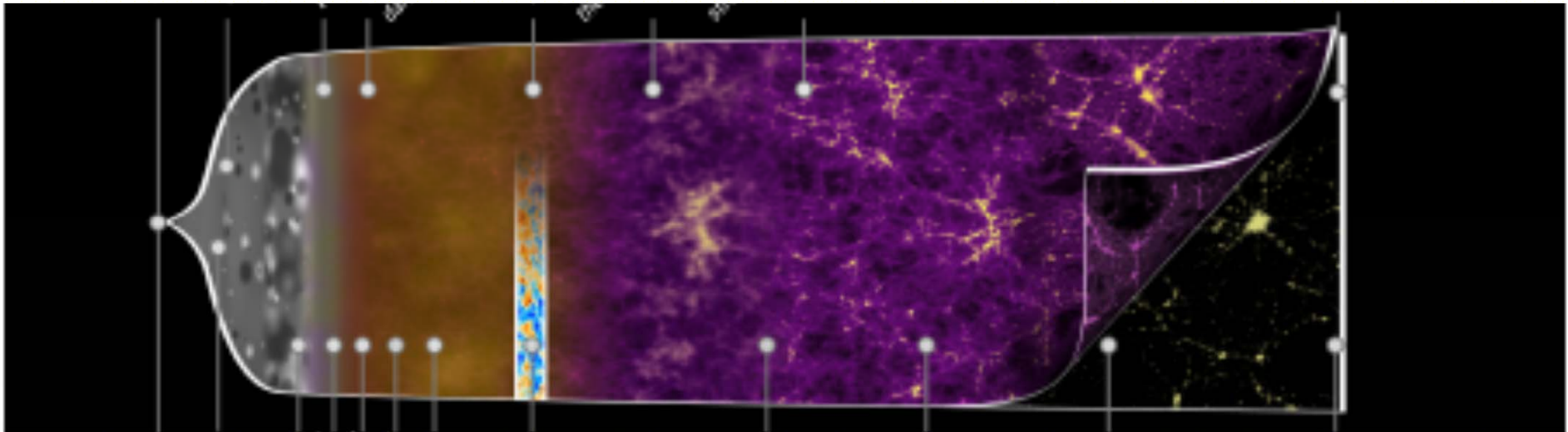


Nambu/Kobayashi/Maskawa
Trois familles de quarks
Quark b et violation de CP
De Babar à LHCb



Engler/Higgs
Mécanisme de Higgs
De D0 à ATLAS

Planck et le CMB



Les objectifs du projet Planck

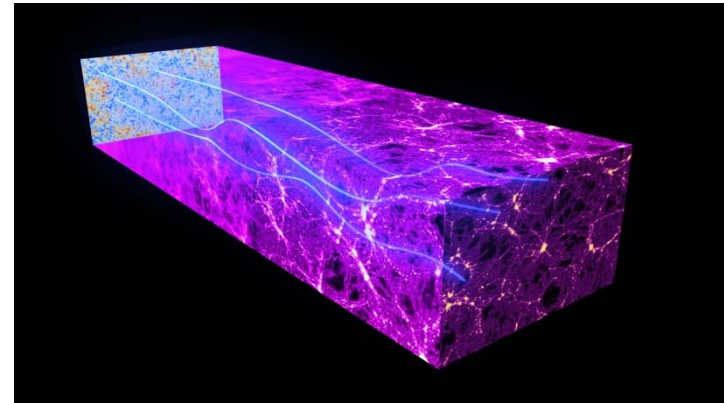
Trois grandes observations à la base du « big bang »:

- Récession des galaxies lointaines (Univers en expansion)
- Abondance primordiale des éléments légers
- Rayonnement de fond diffus cosmologique (CMB)

Objectif de Planck

Mesure précise de ce rayonnement CMB

→ Contraindre le modèle Λ CDM
(cosmologie de précision)



- Comprendre l'évolution de l'univers (expansion) H_0
- Quelle forme de matière/énergie dans l'univers : Ω_m , Ω_b , masse et nombre de famille des neutrinos
- Anisotropies primordiales : (A_s, n_s)
- → De nombreuses autres études d'astrophysique

Historique de la mission Planck

Planck : fusion de deux réponses à appel projet ESA en 1993

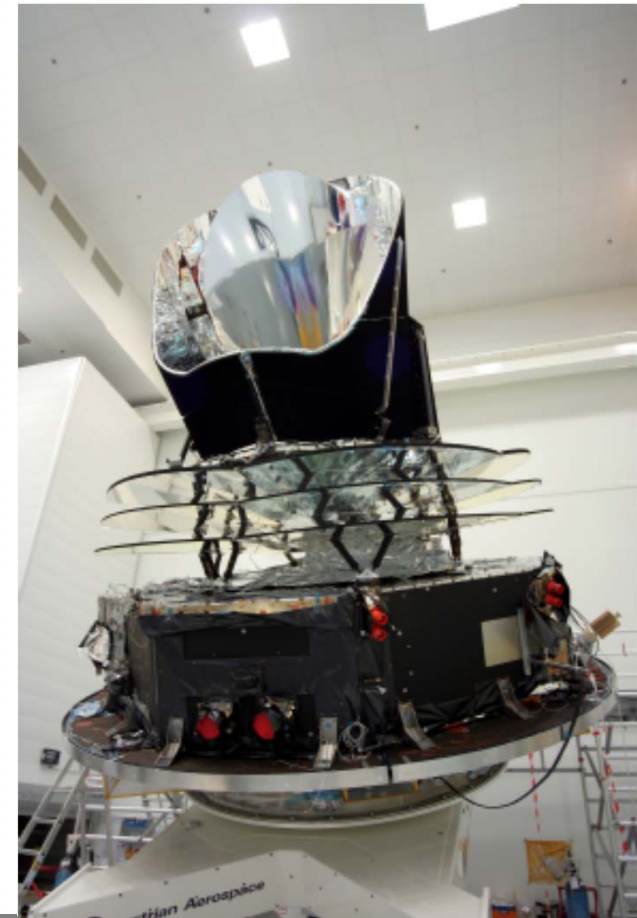
→ Le LAL rejoint le projet en 1997 : première expérience spatiale au laboratoire !

Construction du satellite et des instruments entre 2002 et 2007.

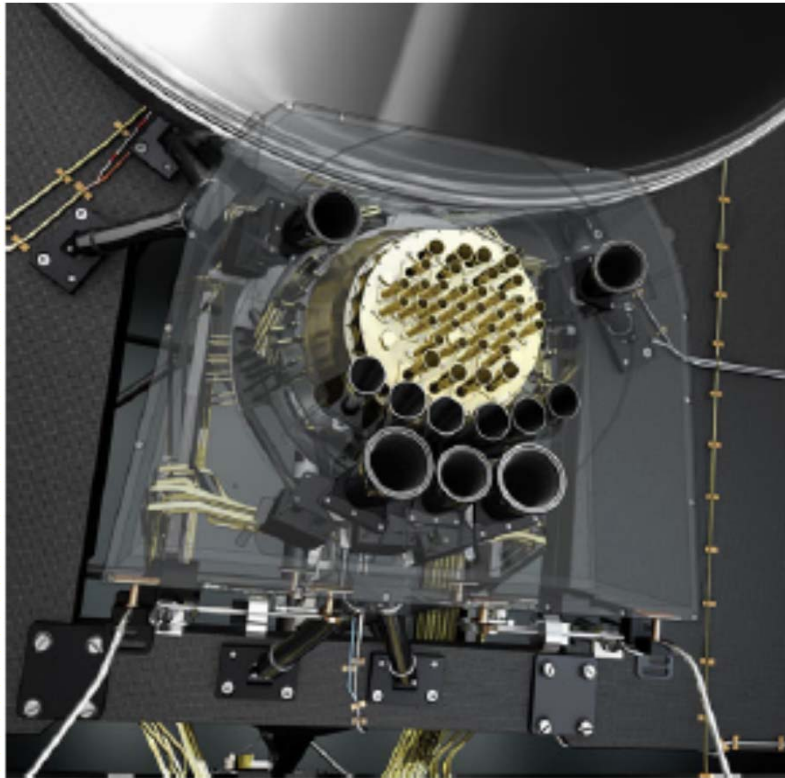
Lancement en Mai 2009 depuis Kourou

Prise de données scientifiques pendant ~30 mois pour HFI et ~37 mois pour LFI !

→ 5 (9) cartographies du ciel à 95% pour LFI+HFI (LFI seul)

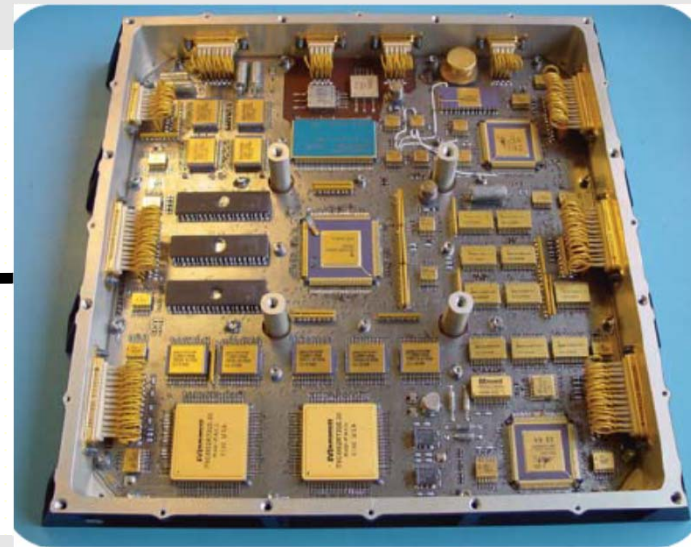


Réalisation du LAL dans Planck



Mesure de la température (T) de la polarisation E en tout point du ciel à différentes fréquences

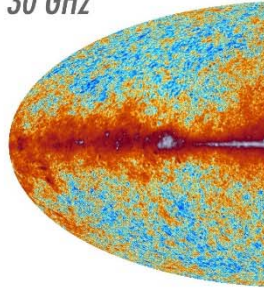
Responsabilité LAL:
Calculateur de bord de l'instrument HFI



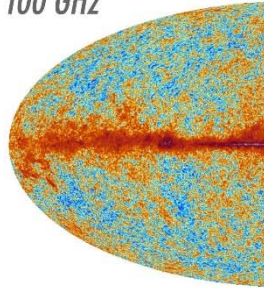
Pilote l'électronique/cryogénie, compresse et transfère les données vers le satellite
→ Excellent fonctionnement pendant l'ensemble de la mission

De WMAP à Planck :

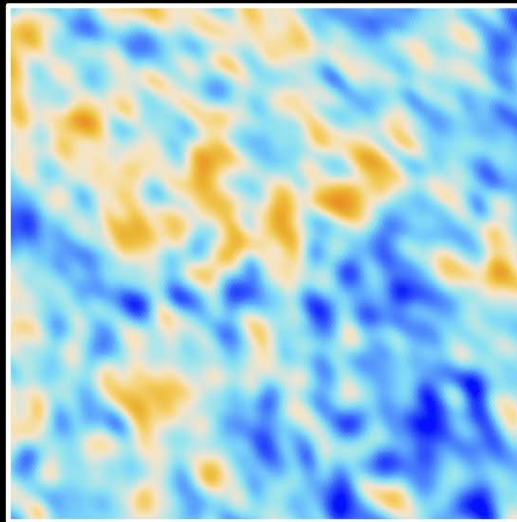
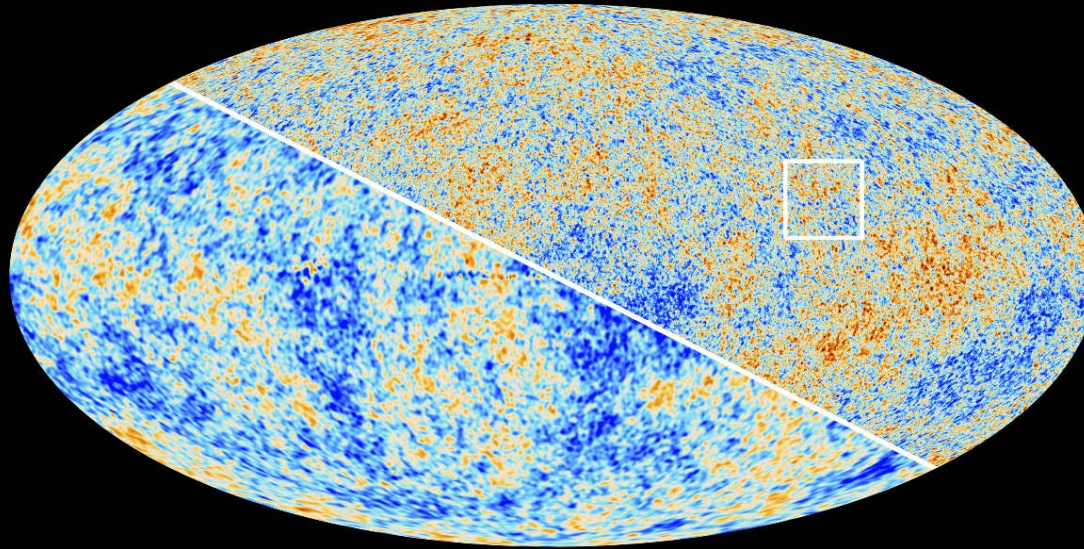
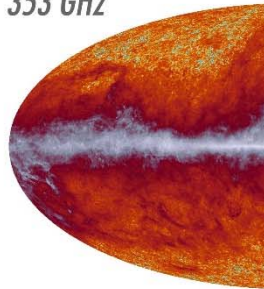
30 GHz



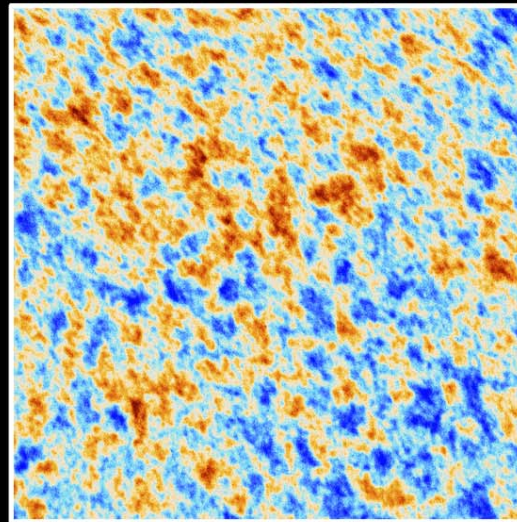
100 GHz



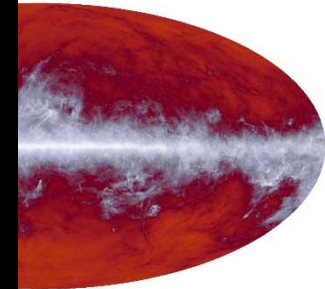
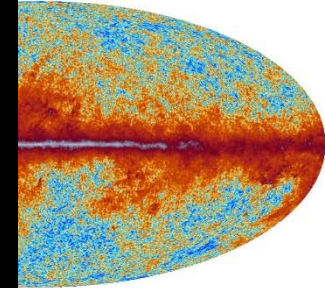
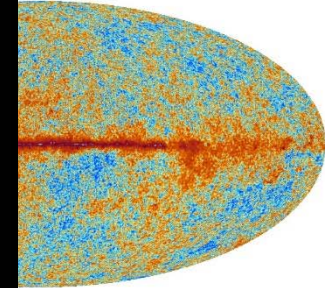
353 GHz



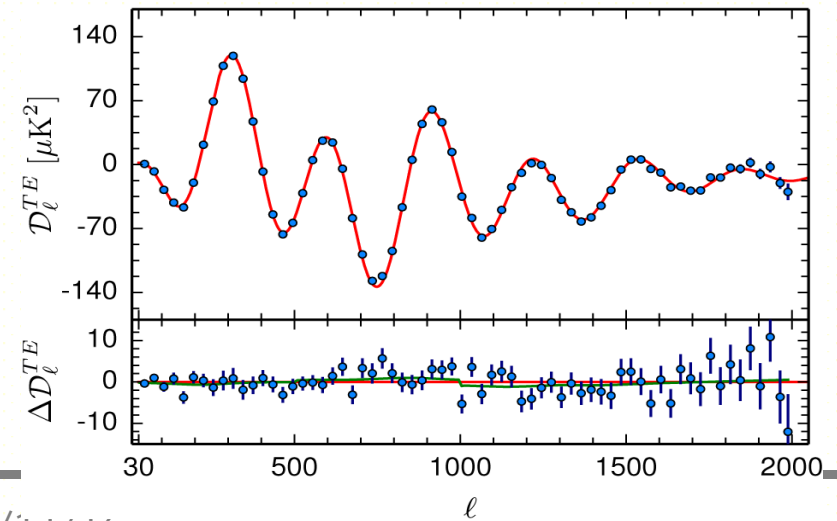
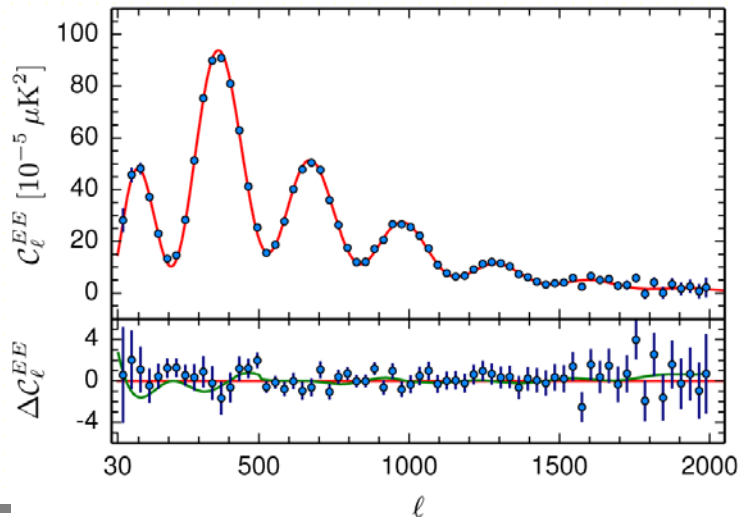
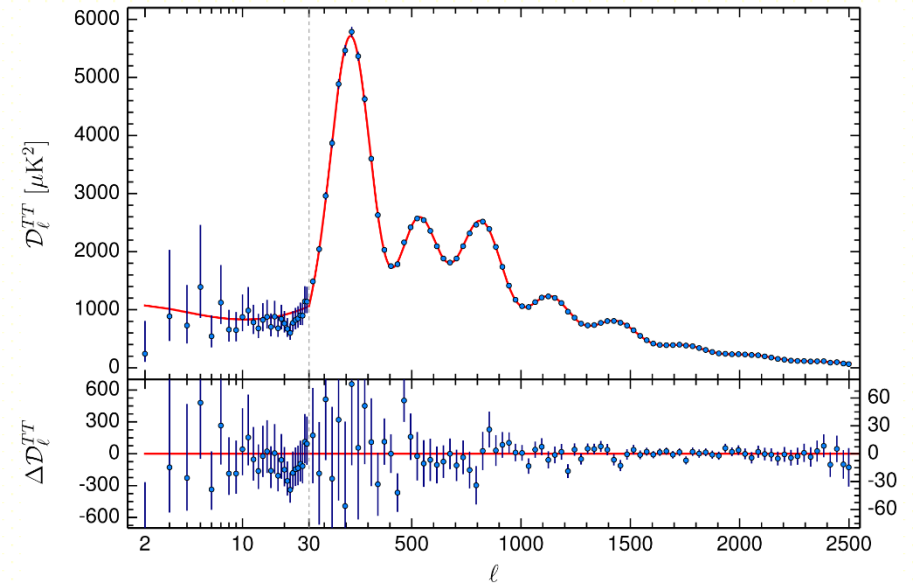
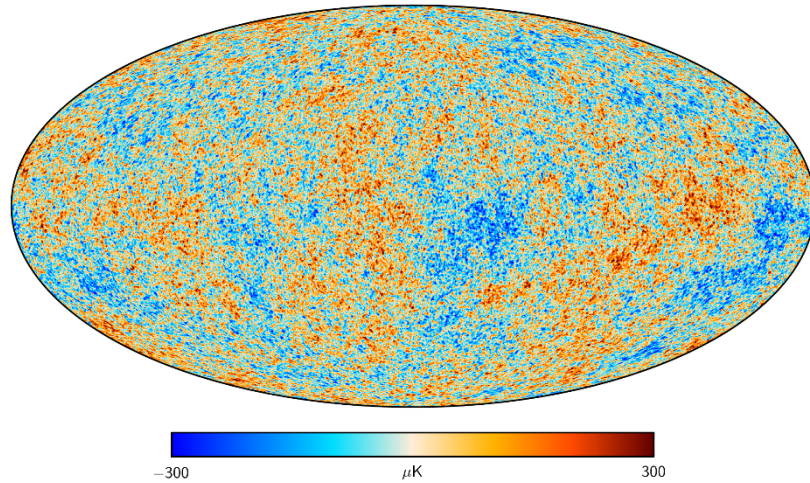
WMAP



Planck



Planck : première cosmologie de précision avec le CMB

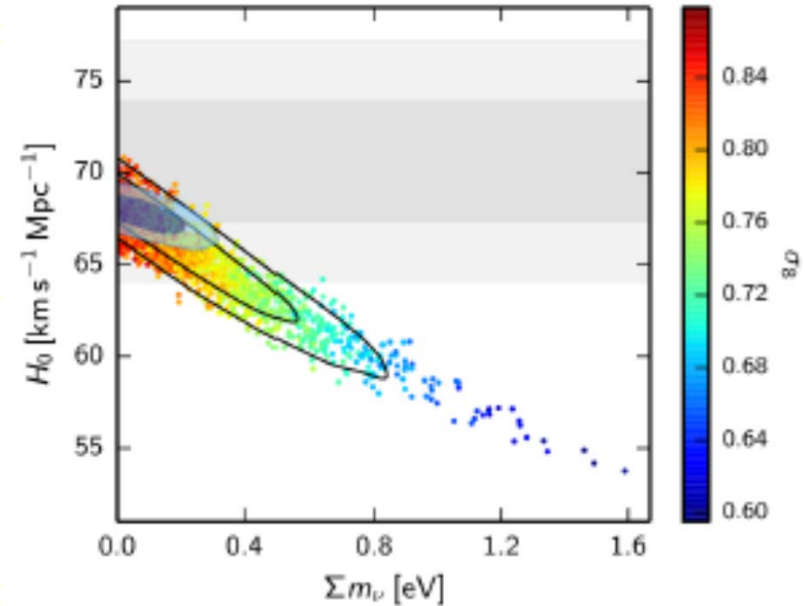
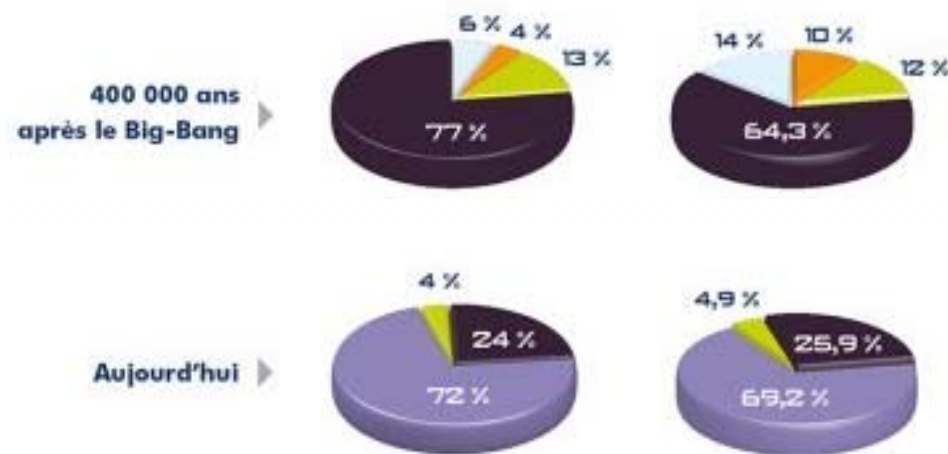


L. Serin, 10/11/16

Polarisation B \rightarrow ondes gravitationnelles primordiales (inflation) QUBIC

Planck : première cosmologie de précision avec le CMB

Planck : Avant → Après



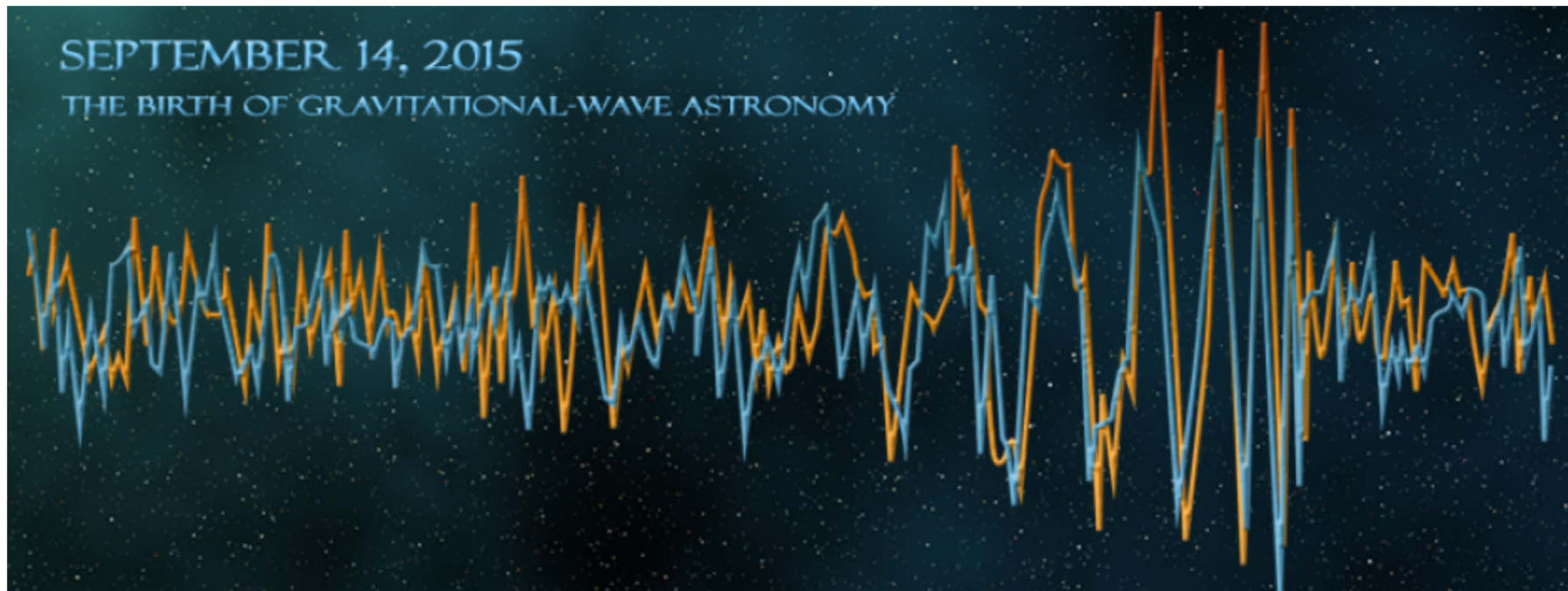
Energie noire
Matière noire

→ L'un des défis majeurs des
prochaines décennies

$$\Sigma m_\nu < 0.21 \text{ eV (95 \% CL)}$$

$$N_\nu = 3.15 \pm 0.23 \text{ (attendu } 3.046)$$

Virgo/LIGO et les ondes gravitationnelles



Objectifs des projets LIGO et Virgo

Ondes gravitationnelles prédites depuis 1916

Effet d'ondes gravitationnelles prouvé de manière indirecte, mais quid d'une détection directe ?

→ Une longue quête instrumentale pour atteindre le niveau de détection nécessaire pour des événements de faible amplitude et (très) rares



→ Accès à des phénomènes violents de l'univers avec un **messenger inédit**
Une nouvelle astronomie pour comprendre notre univers.

Historique du projet

Projet Virgo initié au début des années 1990 avec forte contribution IN2P3/INFN :

→ Construction d'un interféromètre de Michelson.... de plusieurs kms



Implication du LAL dès 1991

Premier run scientifique en 2007

Amélioration graduelle de la sensibilité

Début « Advanced Virgo »
avec performance attendue
similaire LIGO en Janvier 2017

Accord scientifique (Analyse/accès données/publications/runs)
Virgo/LIGO dès 2007

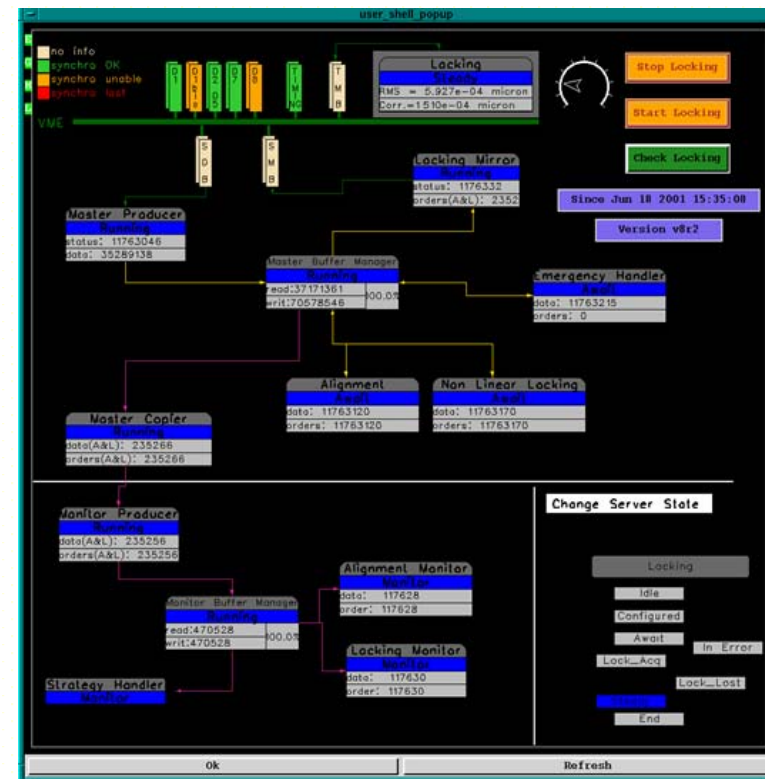
Réalisation du LAL dans Virgo

Conception et réalisation de l'enceinte à vide



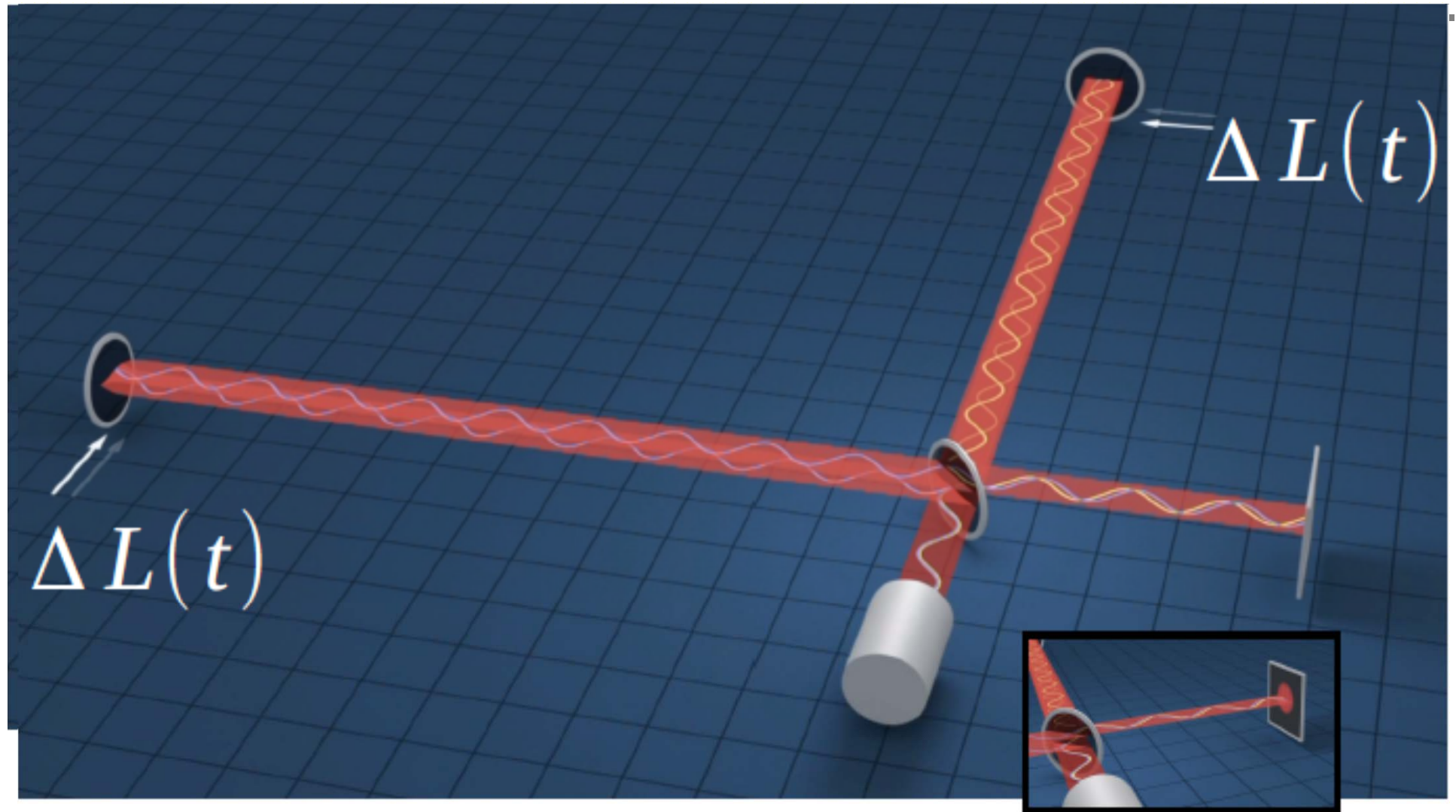
~7000 m³ sur 3 km à 10⁻⁹ mbar

Responsabilité du LAL dans le contrôle/commande global de Virgo



Toute infime perturbation/vibration est une source bruit ou faux signal !

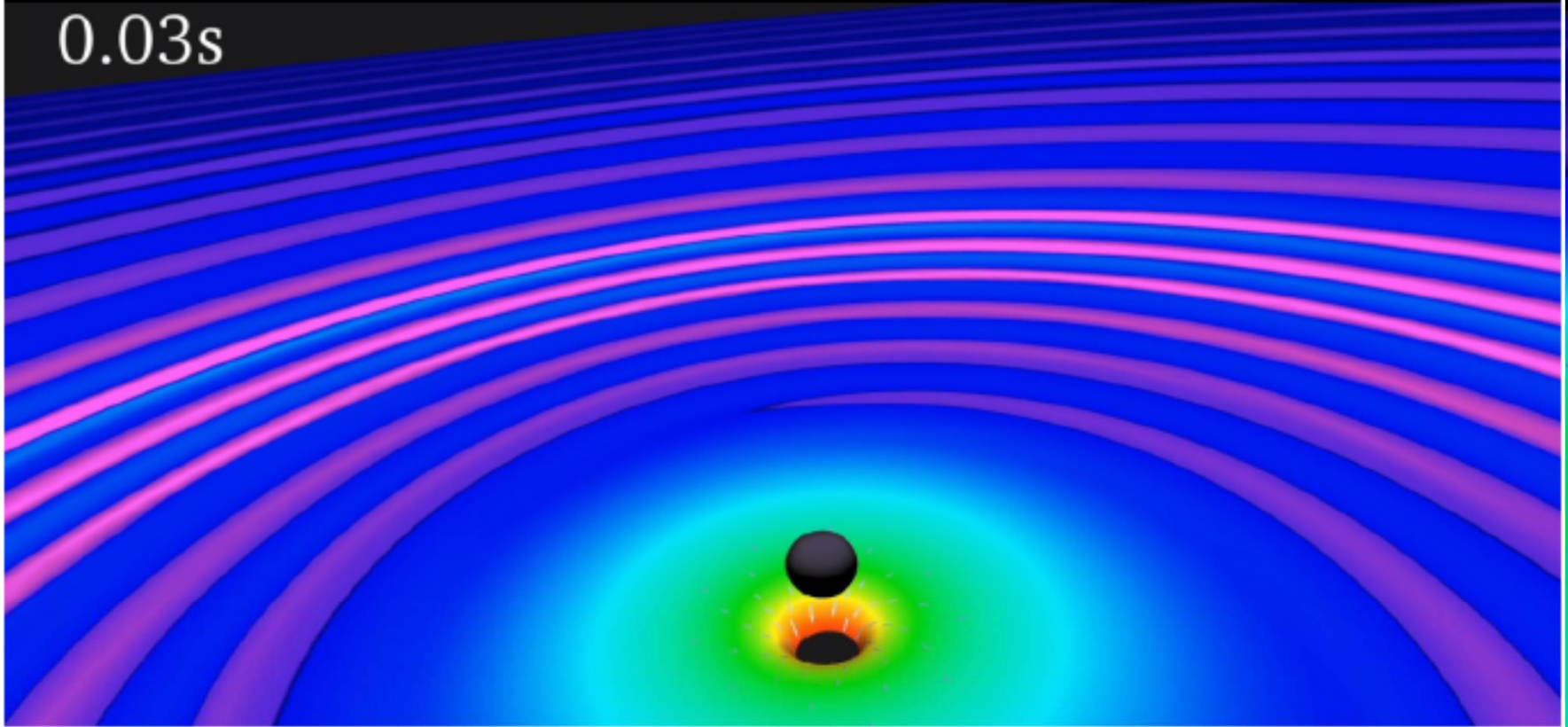
Détecter une onde gravitationnelle



Constructive interference
→ bright light

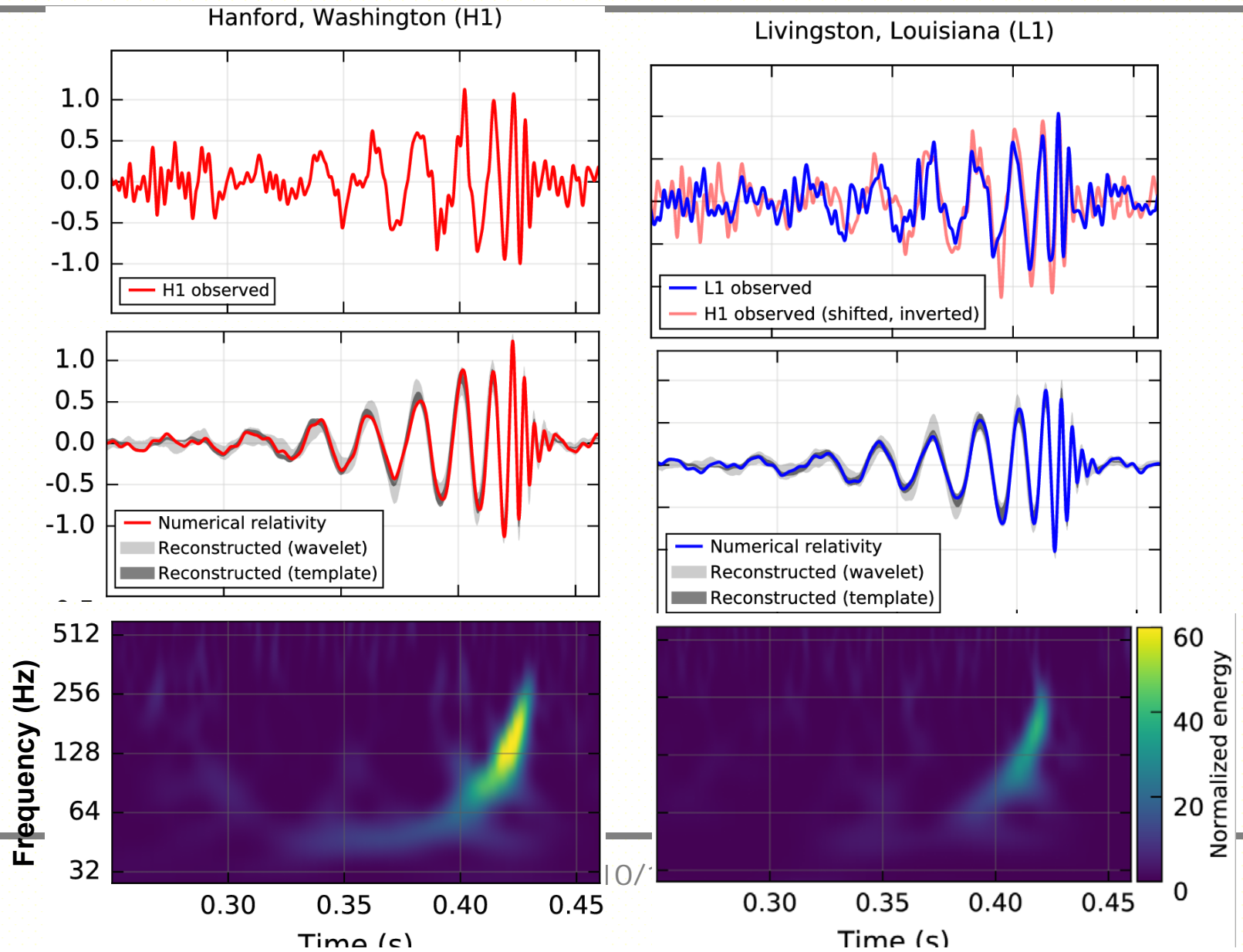
Et parfois coalescence de deux trous noirs

0.03s

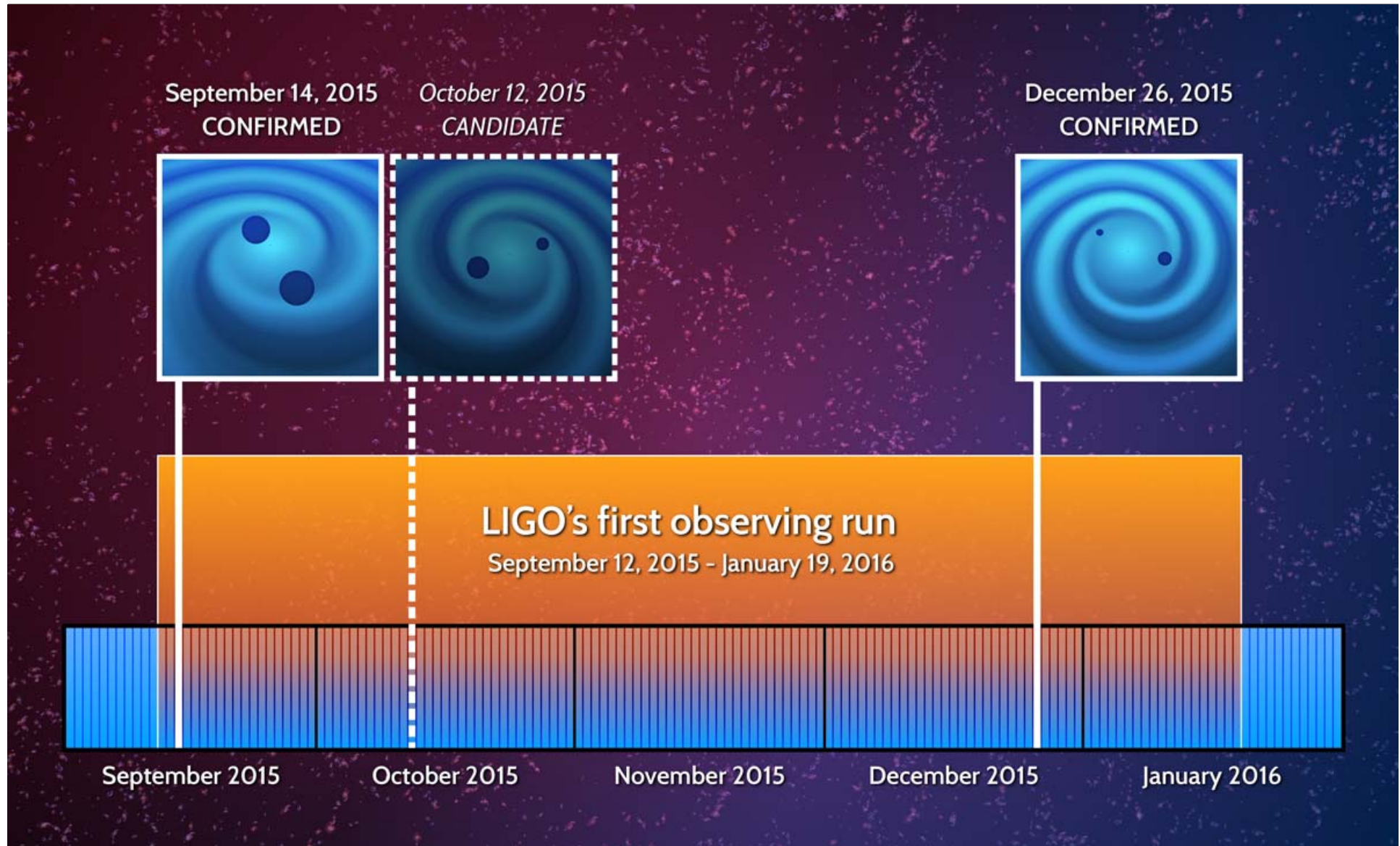


**The final black hole reaches a stable state,
releasing its excess of energy through gravitational waves.**

Première observation directe d'une onde gravitationnelle



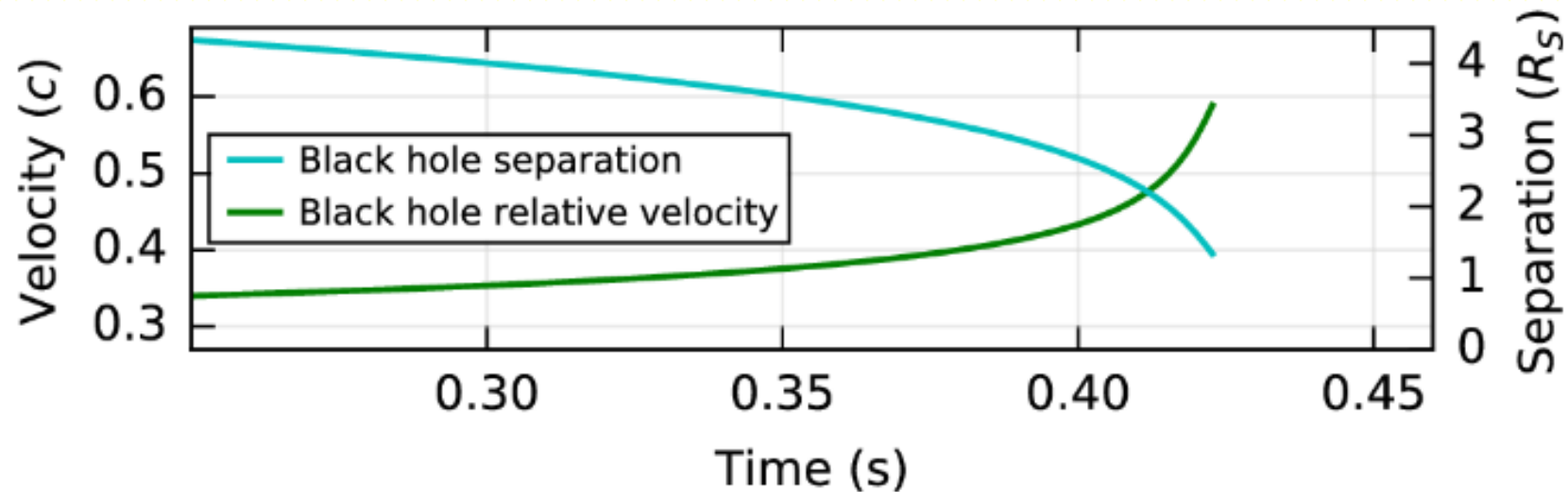
Première observation d'un système binaire de trou noirs et de leur coalescence → **Naissance d'une astronomie gravitationnelle**



Test de physique fondamentale

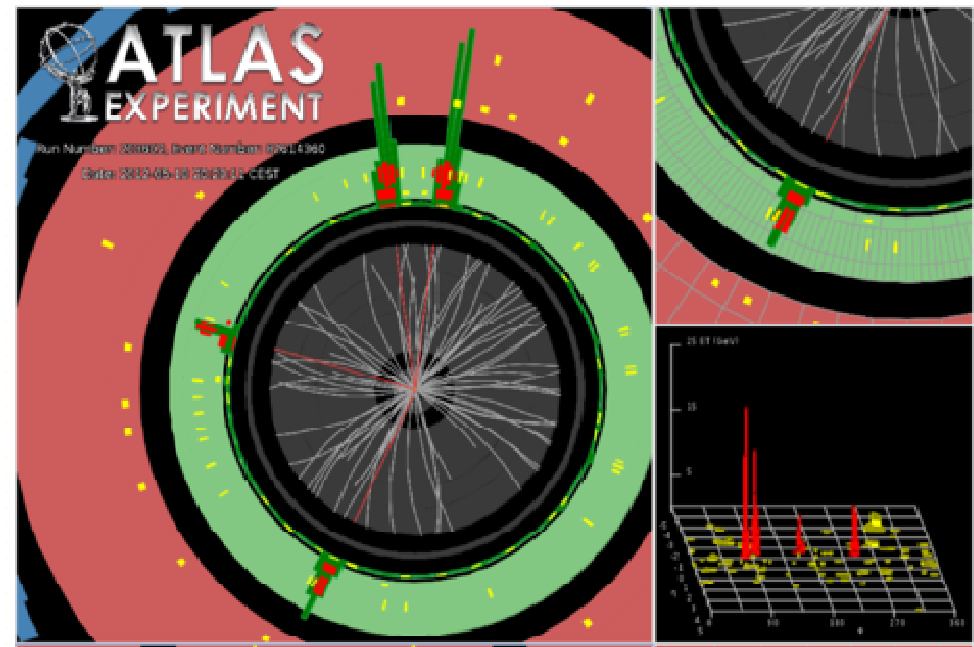
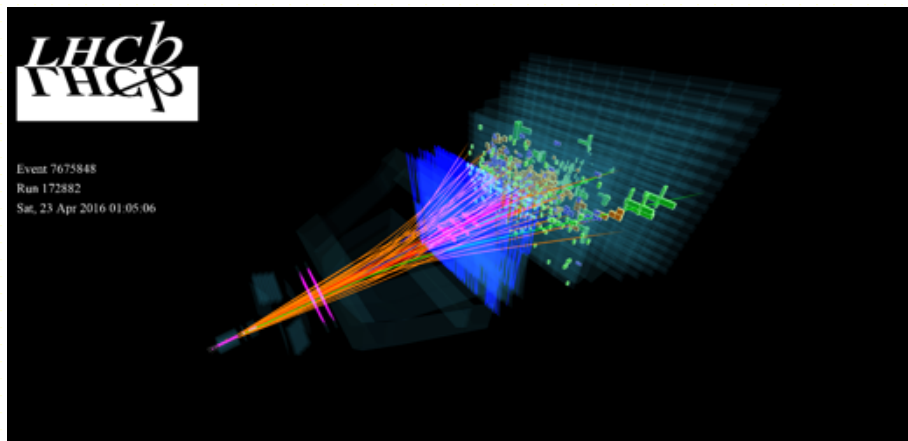
Test de la relativité générale en champs fort :

- des objets de ~ 30 masses solaires à 0.6 de la vitesse de la lumière !



Des limites sur la masse du graviton : $m_g < 10^{-22}$ eV

Le LHC, LHCb, ATLAS et la découverte du Higgs



Les objectifs de physique du LHC

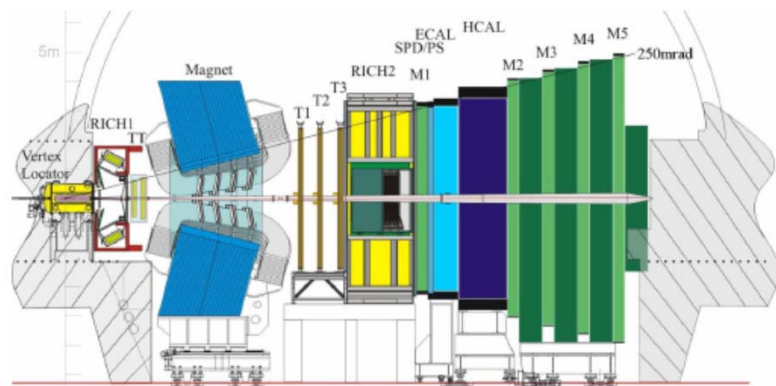
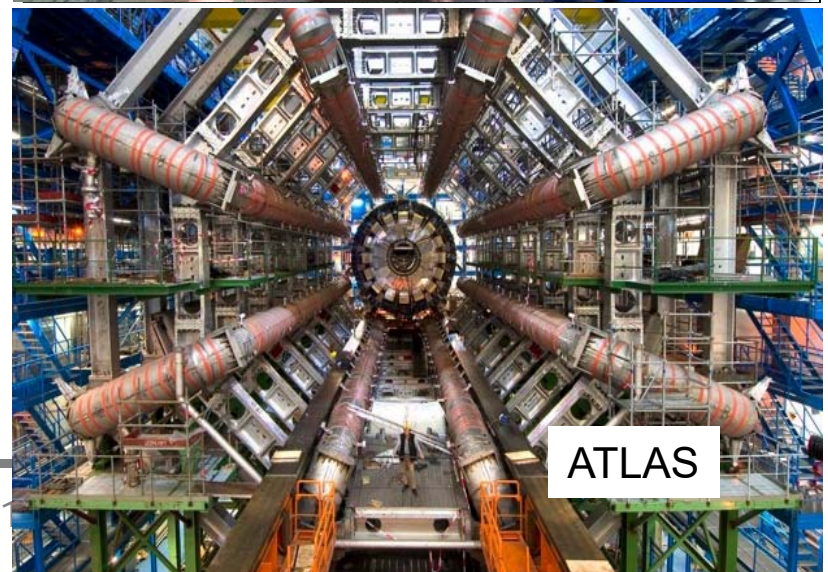
Modèle Standard de la physique des particules étudié avec précision depuis les années 1980 (LEP au CERN de 1990→2000) avec découverte du dernier quark top en 1994, mais **élément manquant avec le boson de Higgs, absence de candidat pour la matière noire....**

→ Objectif premier du LHC/ATLAS : prouver ou non l'existence du mécanisme de brisure symétrie BEH avec l'observation du boson de Higgs

→ Nouveau domaine en énergie et haute luminosité : une nouvelle physique au-delà du modèle standard avec l'observation de nouvelles particules (ATLAS) ou de déviation au modèle standard (ATLAS/LHCb)

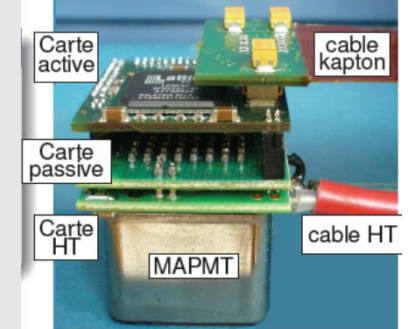
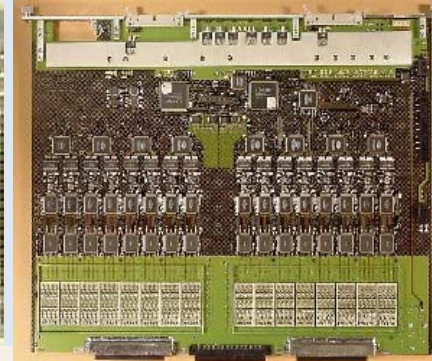
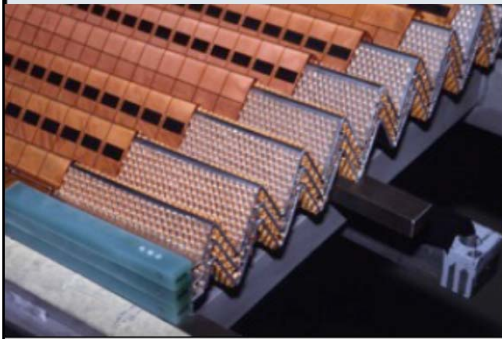
Historique du projet LHC, ATLAS, LHCb

- 1983 : première études sur le LHC
- ~1990' : Démarrage du projet LHC et des R&D sur les détecteurs
 - Le LAL impliqué dans les R&D sur la calorimétrie en 1990 avec idées innovatrices (D. Fournier) pour ATLAS et en 1997 pour LHCb
- 1998→2006/8 Construction en parallèle de l'accélérateur et des expériences
- 2010 Premières collisions
- 2011 : déjà les prémices d'un Higgs ...
- 2012 : Découverte du Higgs**

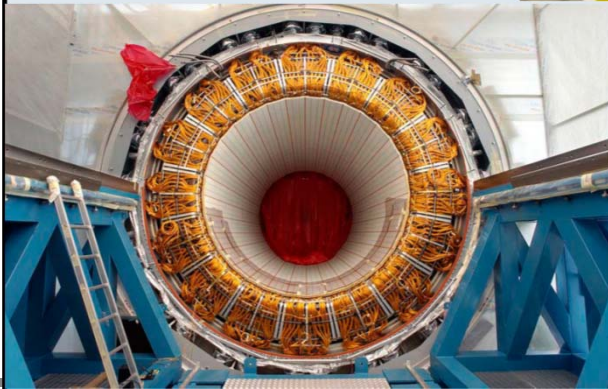


Réalisation du LAL dans ATLAS et LHCb

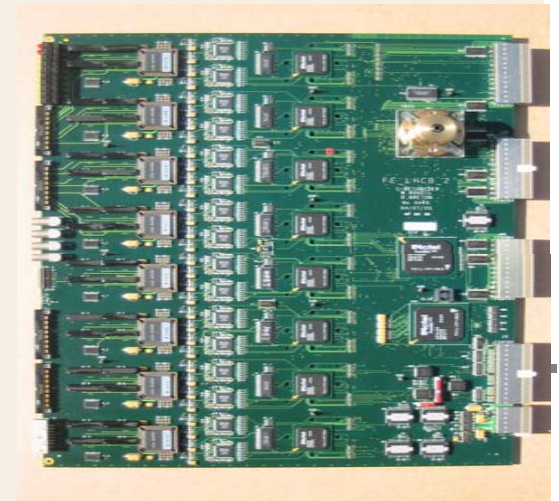
- Rôle moteur dans la conception, construction et mise en fonctionnement du calorimètre électromagnétique de ATLAS
→ détecteur clef de la découverte du Higgs



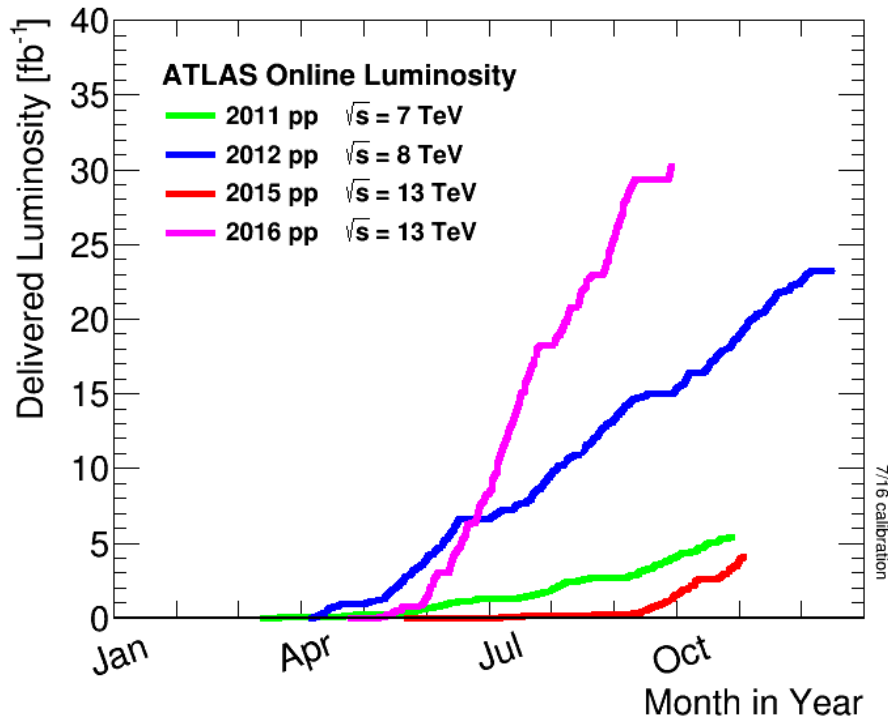
Carte de lecture des calorimètres



LHCb



Un accélérateur et des détecteurs performants

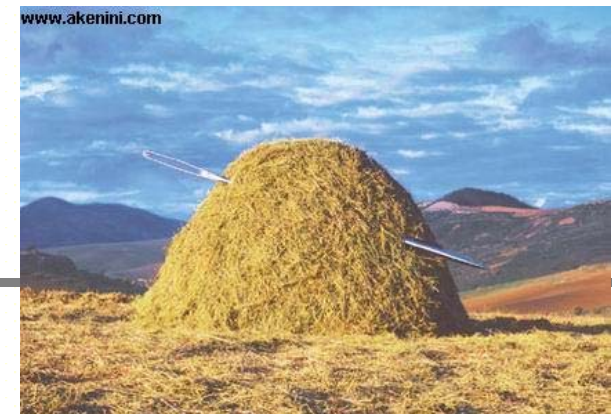
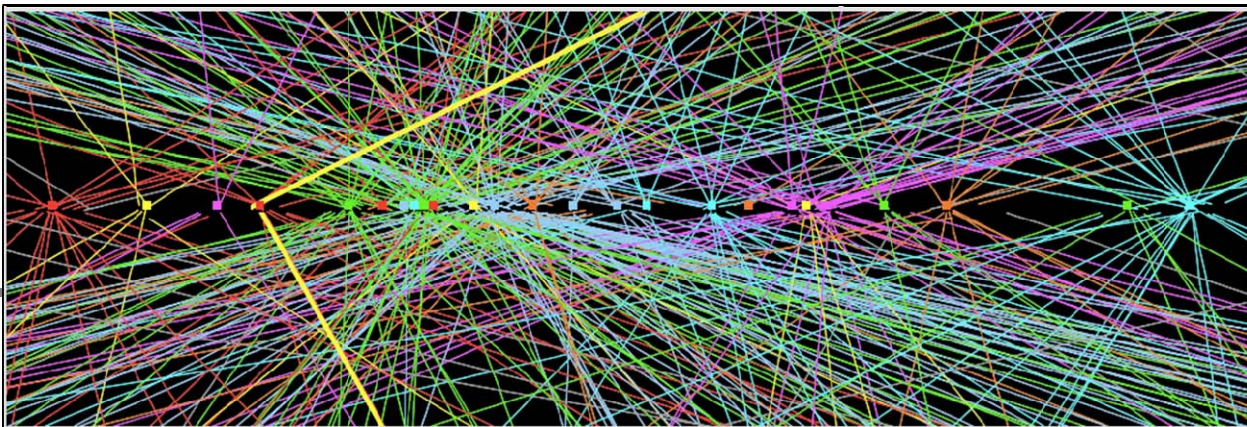


Données 2011+2012 :

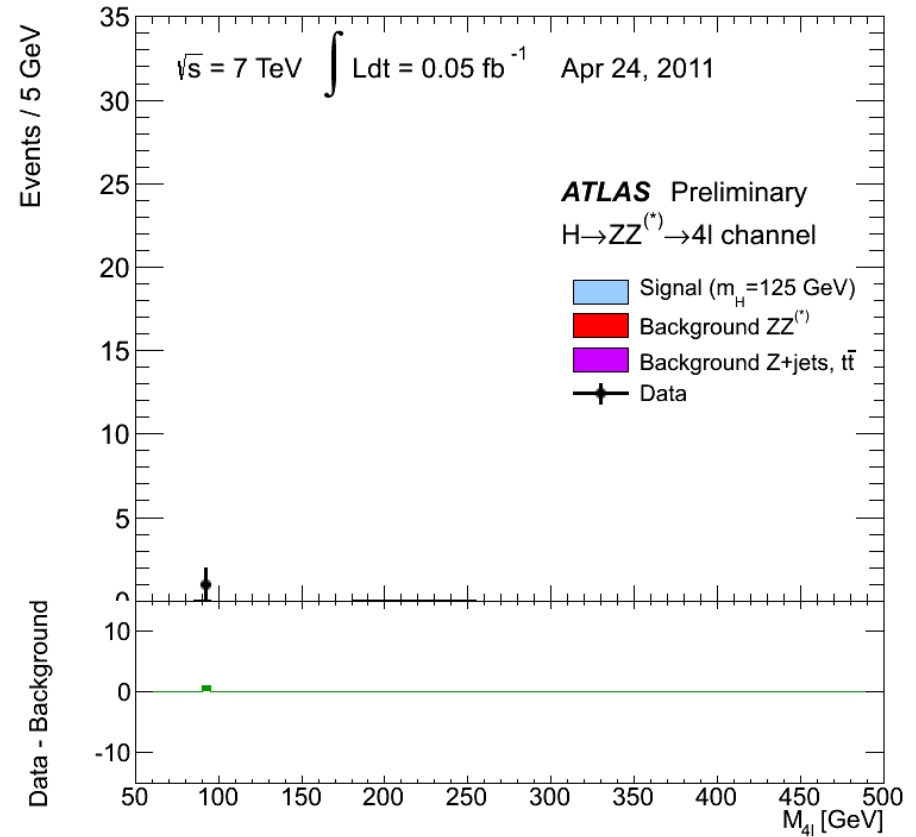
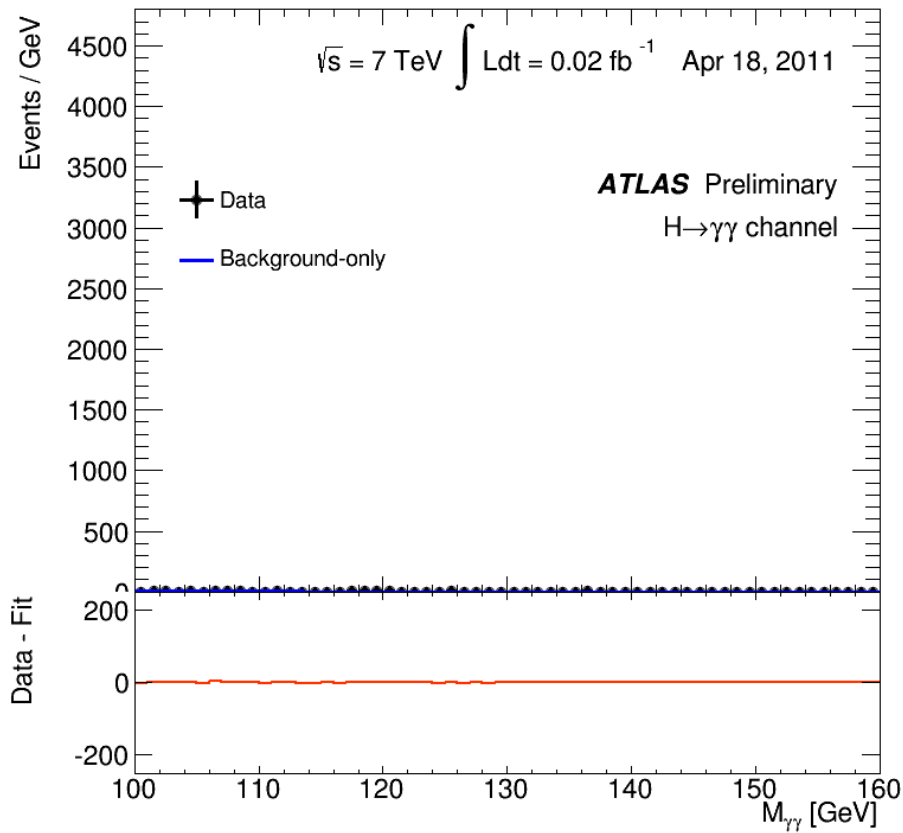
$\sim 10^{15}$ (1 million de milliards) de collisions

Si le Higgs existe, on pense pouvoir observer à 200-300 évènements
→ performance du détecteur et moyens de calcul

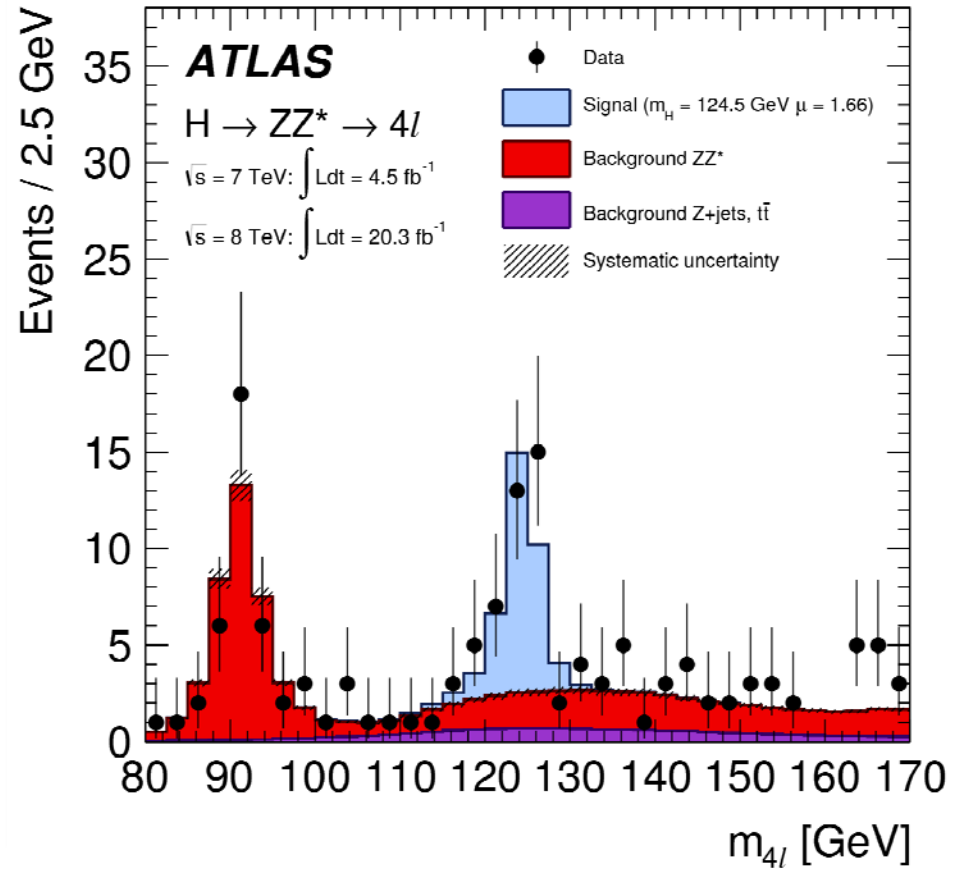
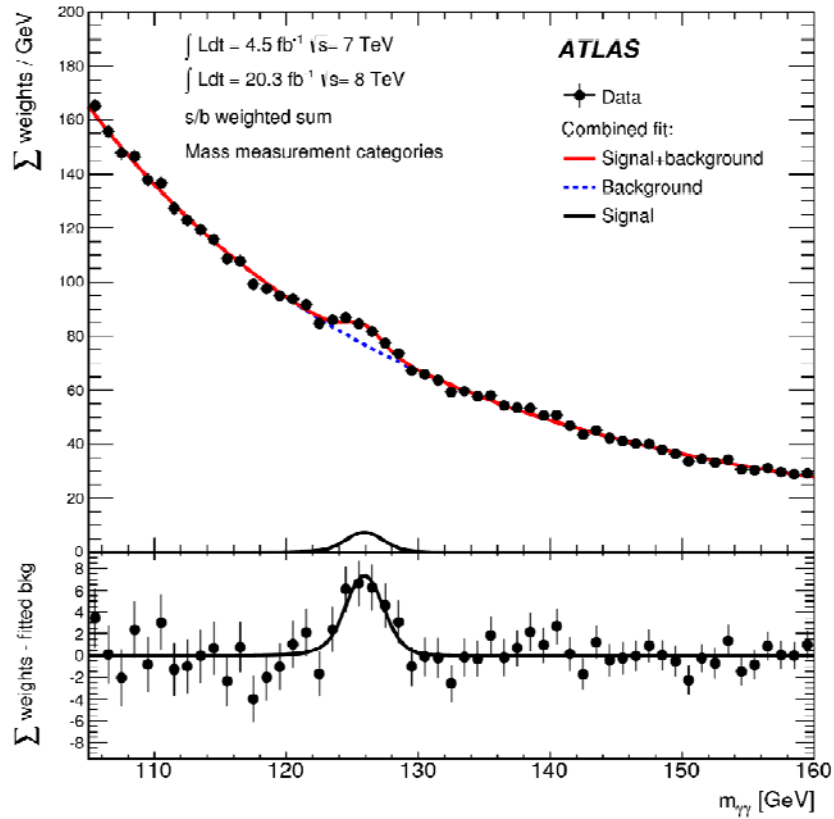
Il est plus beaucoup plus simple de trouver une aiguille dans une meule de foin



La découverte du Higgs de 2011 à 2012

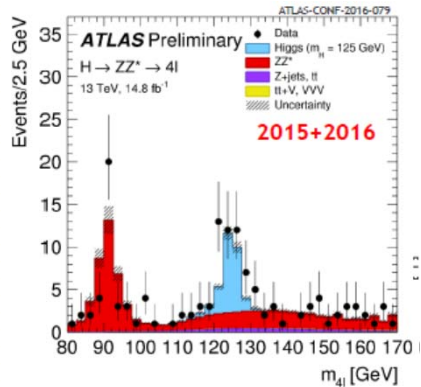
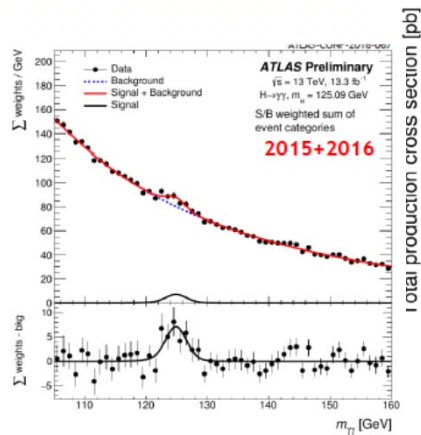


La découverte du Higgs

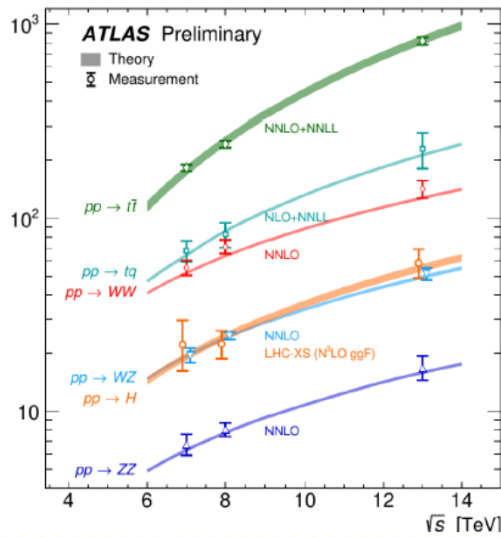


Et une foison de résultats qui continue...

Higgs toujours là

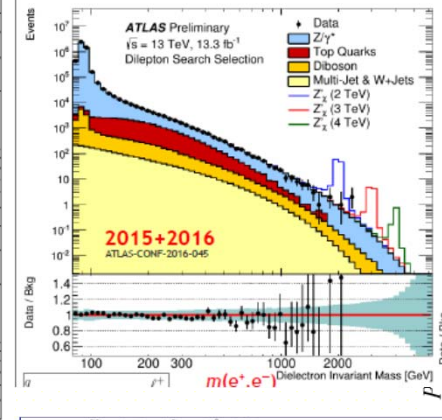


Modèle Standard

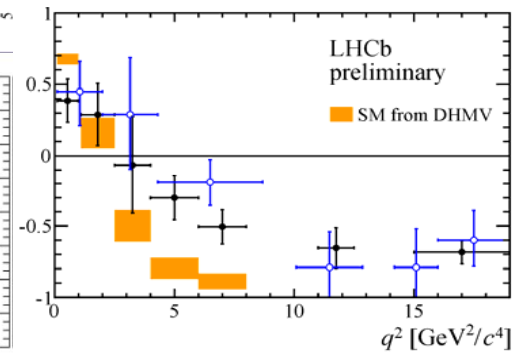
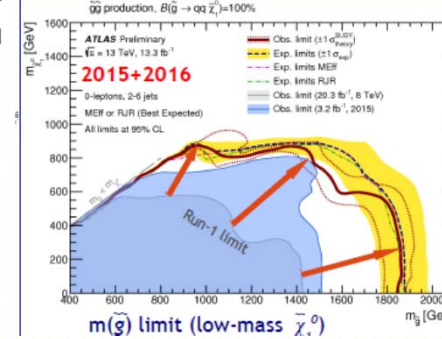
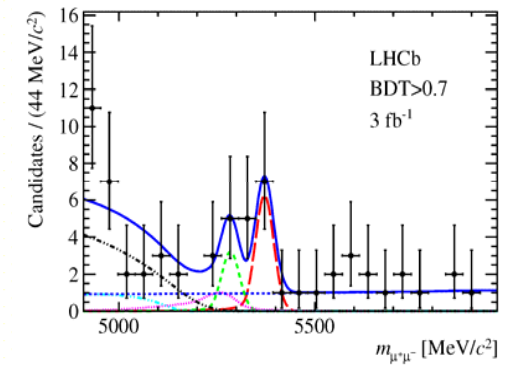


Pas encore de signe de nouvelle physique

directe



indirecte



Et la prochaine décennie....

Physique des particules :

- LHC et sa phase HL-LHC jusqu'en 2030 ([ATLAS](#), [LHCb](#)) : étudier le Higgs, nouvelle physique mais nécessité d'investir aujourd'hui dans les collisionneurs post-LHC (HE-LHC, FCC, ILC,.....)
- Nombreuses questions encore ouvertes dans le secteur des neutrinos (masse, nature,.....) : [SuperNemo](#), [Solid](#)

Cosmologie :

- Energie noire ([LSST](#)) , inflation ([QUBIC](#)) à partir de ~2020

Ondes gravitationnelles

- [Advanced Virgo](#) en fonctionnement début 2017

Et savoir rester ouvert/réactif à toute idée émergente

Conclusion

- Résultats et découvertes remarquables dans lesquels le LAL a été impliqué
- Résultent d'un investissement humain et financier à long terme (25 ans) sur des projets scientifiques et technologiques ambitieux
- Fruit du travail de chercheurs, étudiants en thèse mais ingrédient essentiel pour notre thématique d'un accompagnement de personnels administratifs et techniques hautement qualifiés (et de toutes nos tutelles !)