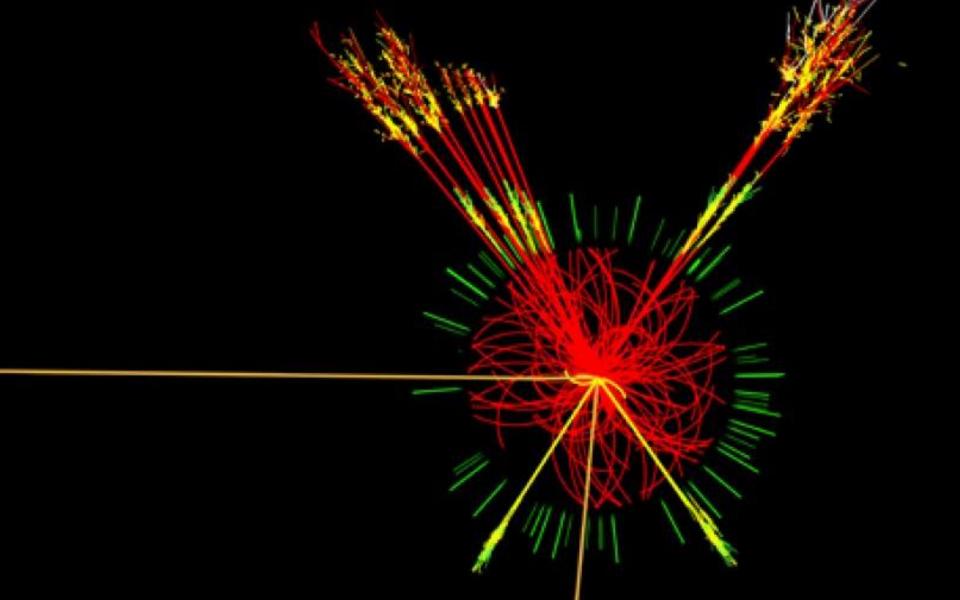


Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

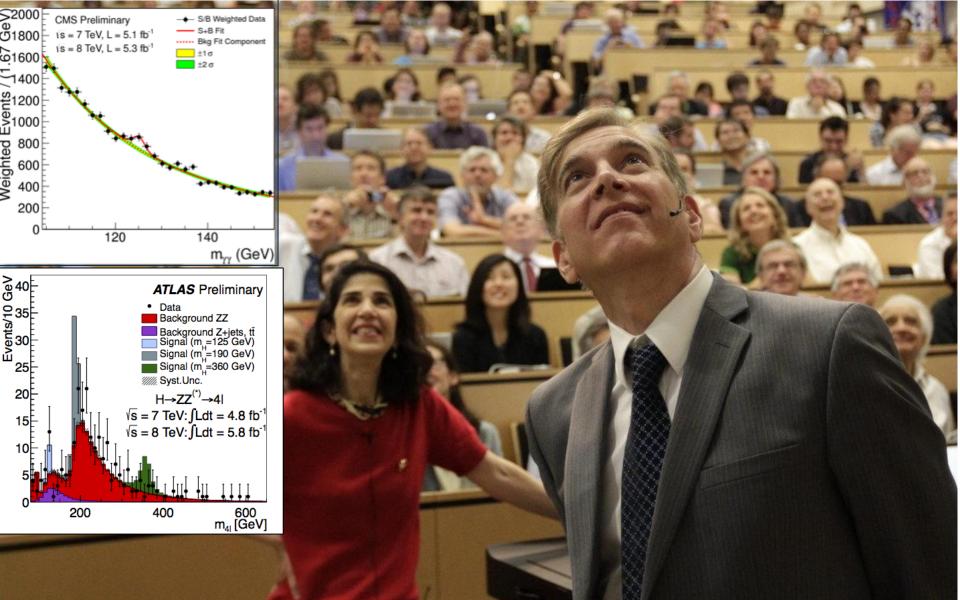


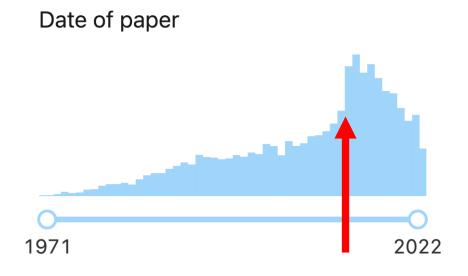
10 ans de (quelques) découvertes et autres choses

Ursula Bassler
Directrice adjointe scientifique IN2P3









La moitié des publications après 2012!

21,679 publications avec « Higgs » dans le titre ≈ 9000 avec top ou violation de CP ≈ 1300 avec Z boson ou W-boson 37000 avec neutrino!

Qu'est-ce que nous avons appris ?



Le Higgs pour les...





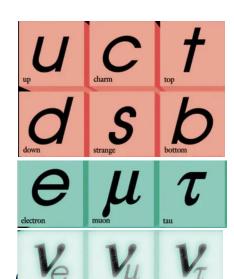
Interaction électromagnétique: photons, portée infinie décroissant, $m_{\gamma} = 0$ Interaction forte: gluons \rightarrow « portée infinie croissant avec auto-couplage » \rightarrow $m_{g} = 0$





Interaction faible : W et Z \rightarrow portée fini avec autocouplage \rightarrow $m_{W,Z} \neq 0$ Couplage au champ de Higgs: mécanisme de Brout, Englert, Higgs

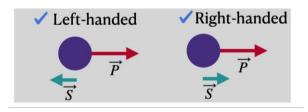
$$L = gM_{W}W^{+\mu}W_{\mu}^{-}H + \frac{gM_{Z}}{\cos\theta_{W}}Z^{\mu}Z_{\mu}H +$$



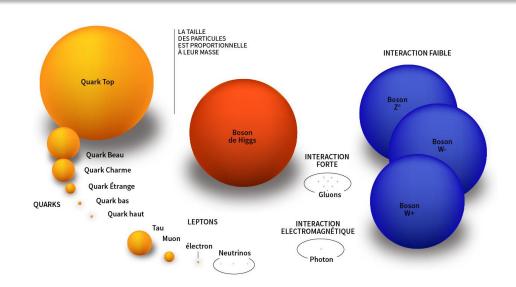
quarks et leptons: m≠0

couplage au champs de Higgs : couplage de **Yukawa** entre un champ scalaire et un champ fermionique

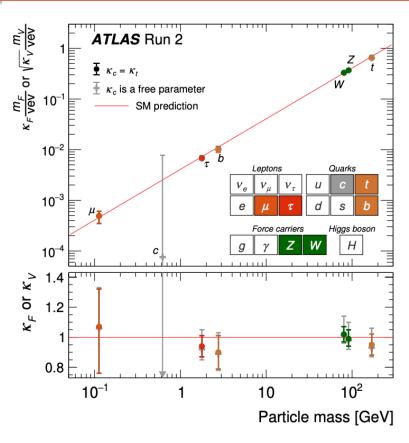
$$L = -\frac{m_f}{v} \left(\bar{f}_L f_R + \bar{f}_R f_L \right) H$$



Est-ce que le Higgs est le Higgs?



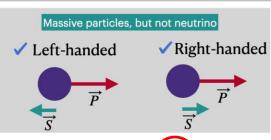
- Le couplage des particules élémentaires (quarks, leptons, bosons) est proportionnel à leur masse
- → Distinction des trois familles des particules: couplage au boson de Higgs!

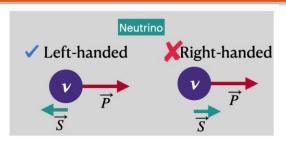


1ère génération couplage ~O(10⁻⁹) : mesure (peut-être) par la production du Higgs dans un collisionneur e⁺e⁻ "monochromatique"



Et les neutrinos?





Modèle Standard:

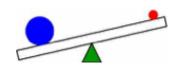
Pas de neutrinos droits!

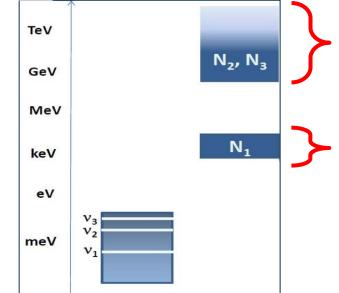
1998: découverte de l'oscillation des neutrinos → neutrinos massifs

$$L = -\frac{m_f}{v} \left(\bar{f}_L f_R + \bar{f}_R f_L \right) H$$

Si les neutrinos acquirent leur masse par le mécanisme de Higgs: des neutrinos droits existent!

"See-saw" mécanisme: les neutrinos droits serai très lourds ≈10²⁰ eV





leptogenèse: masse > 140 MeV

Contraintes des recherches de matière noire: masse = 1-50 keV

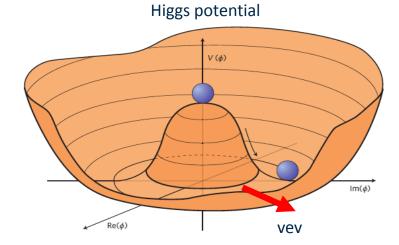
Contrainte



Et le Higgs himself?

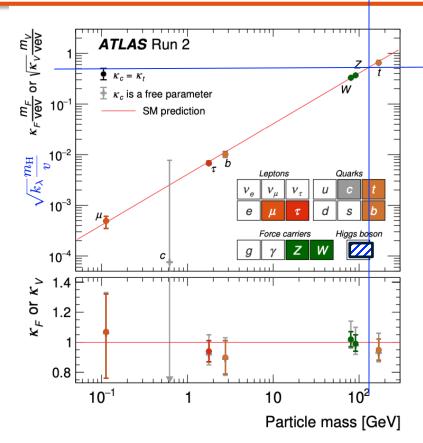
Le boson de Higgs a une masse

⇒il couple à lui-même : V(H)=
$$\frac{1}{2}m_H^2$$
H²+ $\frac{1}{4}\lambda$ H⁴



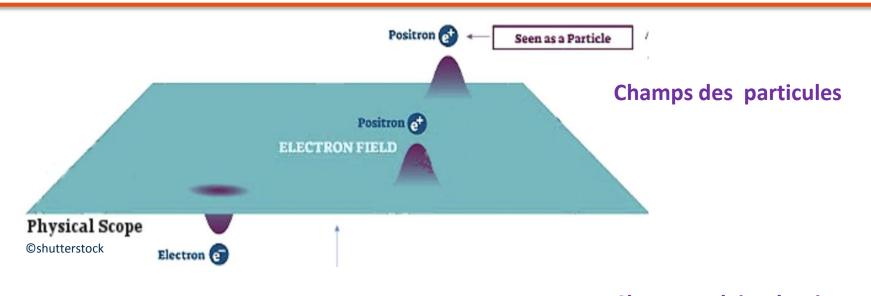
Minimum du potentiel: valeur d'expectation du vide (vev)

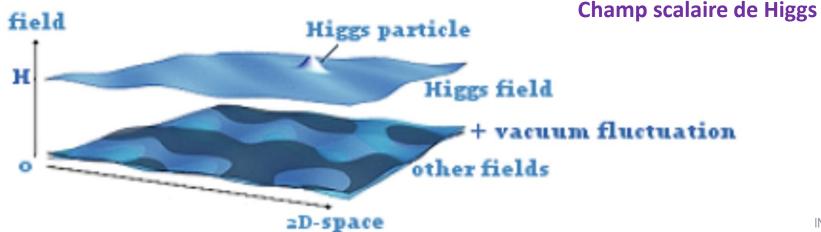
$$v = \frac{2MW}{g} = \sqrt{\frac{m_H^2}{\lambda}}$$



mesure du processus d'autocouplage pour vérifier la cohérence

Le champs de Higgs

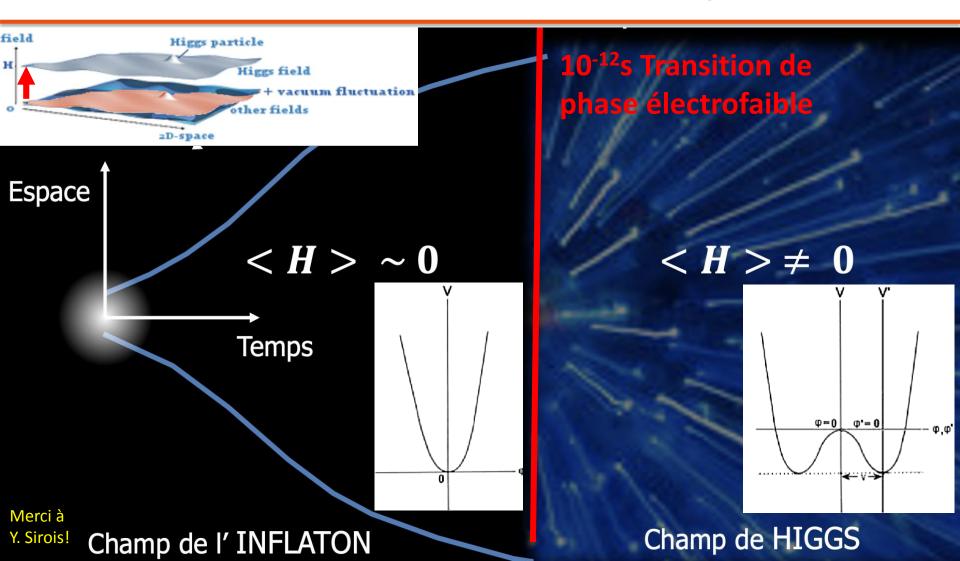




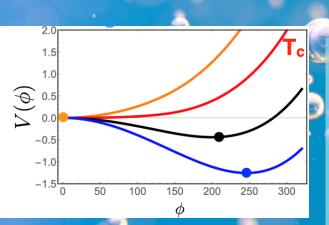
CNTS IN2P

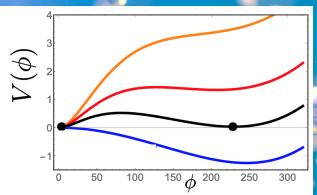
CDU IN2P3 janvier⁹

Le champs de Higgs dans l'Univers primordial



Comment Cette transition de phase a eu lieu?





Transition de phase du 2nd order :

état d'équilibre thermique

- → scénario favorisé par le modèle standard avec m_H>70 GeV
- → pas de création de la matière par baryogenèse/leptogenèse

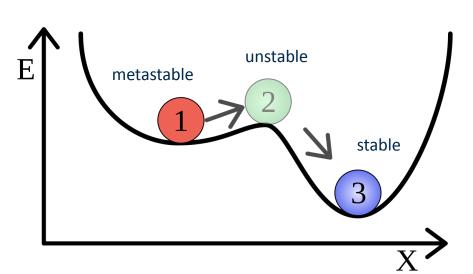
Transition de phase du 1er order :

- → formation de "bulles de notre vide » et effets tunnel:
- → baryo-/leptogenèse possible
- → nécessite physique au-delà du modèle standard
- → ondes gravitationnelles primordiales!

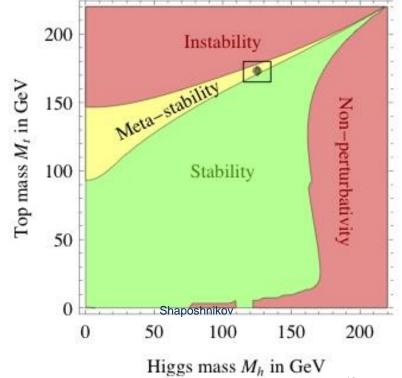
Un seul vide?

découverte du boson de Higgs → vide est dynamique!

 stabilité du vide est déterminée par les masses des particules lourdes : boson de Higgs et quark top → Calcul actuels indiquent une métastabilité



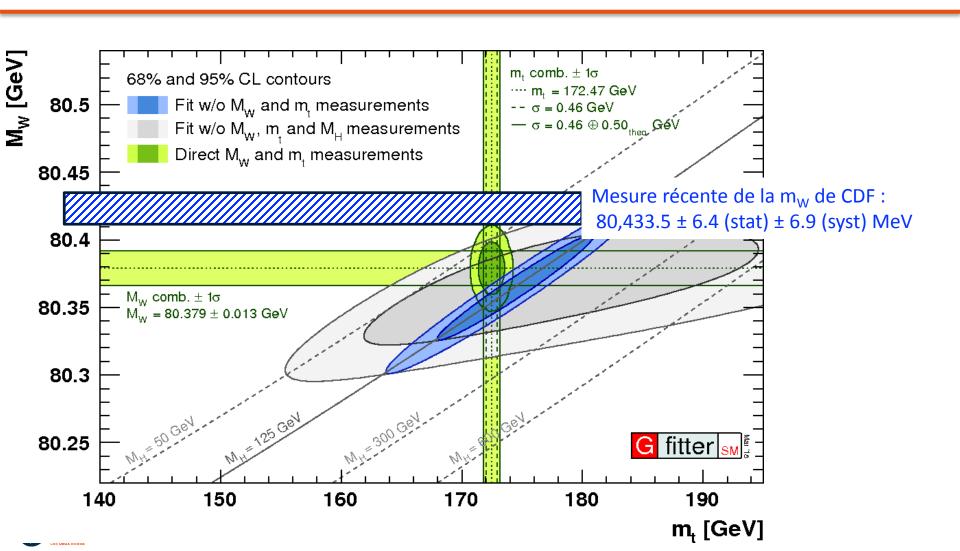
Transition vers un autre vide? Ou nouvelle physique?





12

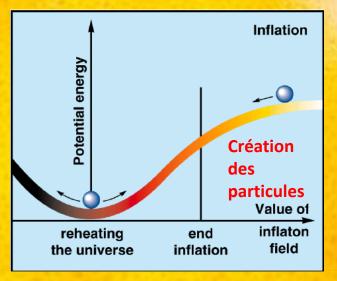
Peut-être?



Radius of the Visible Inflation Big Bang

Le boson de Higgs et inflation cosmique?

Univers homogène → modèle de l'inflation cosmique: Expansion de l'Univers pans les premiers 10⁻³⁴s d'un facteur 10²⁶



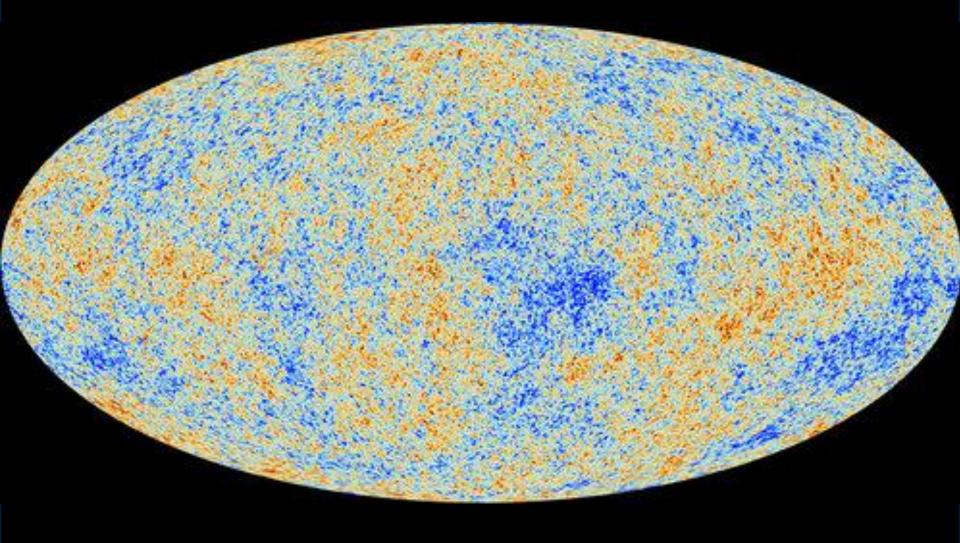
- des champs scalaires existent!
- le Higgs est trop lourd:
- expansion engendré serait 10¹¹⁸x trop rapide!

Recherche d'oscillations Higgs-inflaton

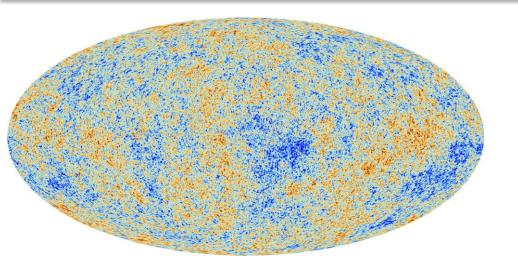
→ l'inflaton ne serait pas très léger.

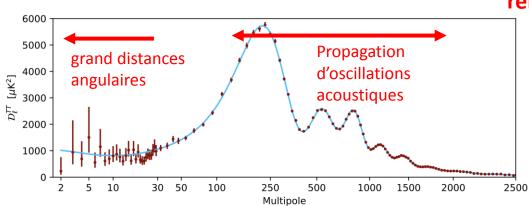
14





2013: Planck premiers résultats





Température du rayonnement fossile: 2,7K avec des anisotropies de ≈ 0,000 1

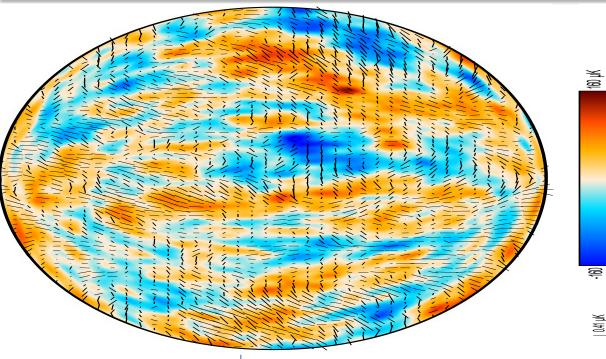
- Homogénéité de l'Univers
- → causalité entre des régions trop éloignés
- → Inflation cosmique: l'univers s'étend exponentiellement à une vitesse supérieur de celle de la lumière

Simple modèle d'inflation décrit remarquablement les données de Planck

Pas d'indication d'interaction du champ d'inflation avec d'autres champs



Traquer l'inflation



E-mode: Diffusion élastique de

Thompson: $(E\gamma \ll m_e)$

→polarisation dans

des régions dense en

matière





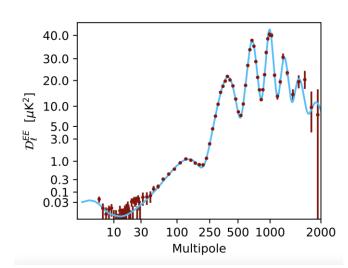


B-mode: générés par

des ondes gravitationnelles primordiales)

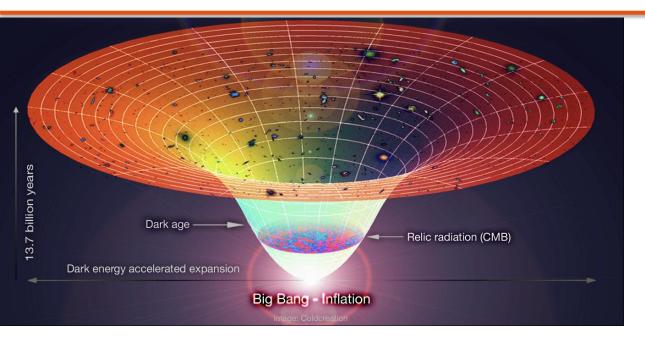
- effet lentille des galaxies

Photons mesurés garde l'information de la dernière diffusion sur un électron avant la recombinaison



- → Recherche par des corrélations «en 4 points »
- → Polarisation observé directement corrélé aux densités de matière
- **→** Limites sur les OGP

« Modèle Standard » de la cosmologie: ACDM



Mesures de précisions des six paramètres cosmologiques

→ Densité baryonique : 0.02230±0.00014

→ Densité de matière noire : 0.1188±0.0010

 \rightarrow Age de l'Univers : 13.799±0.021 × 10⁹ ans

Modèle ΛCDM:

Λ: constante

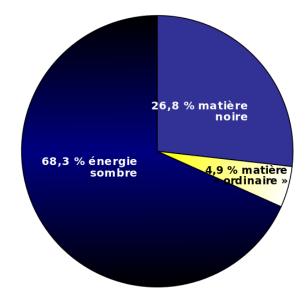
cosmologique: expansion

accéléré de l'Univers

→ énergie noire

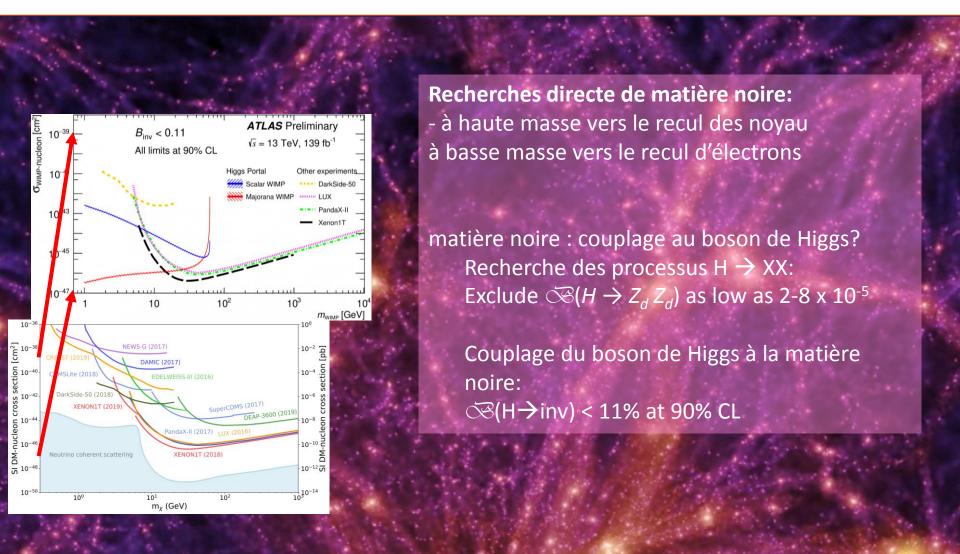
CDM: « Cold Dark Matter »

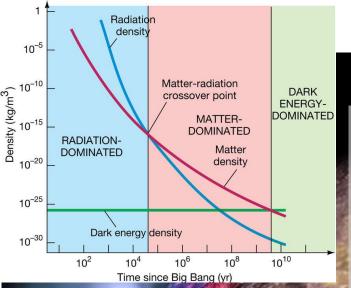
→ Matière noire





Higgs: portail vers la matière noire?





Énergie noire?

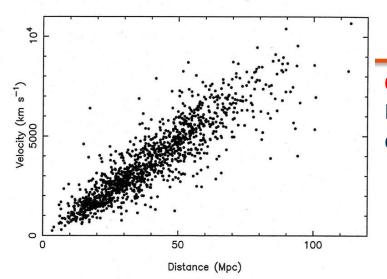
Après la phase d'inflation l'expansion de l'Univers a différente phases:

- expansion rapide dominé par les photons et des particule relativistes
- ralenti par la matière : attraction gravitationnelle
- accéléré par l'"énergie noire

« pourrait être une propriété de l'espace-temps même ou juste un grand malentendu comment marche la gravitation à l'échelle cosmique"

Recherche auprès des collisionneurs?

« essayer de déterminer la nature d'une interaction faible à long distance à l'aide des distances les plus courtes impliquant les énergies les plus élevées sur terre...



la constante de Hubble

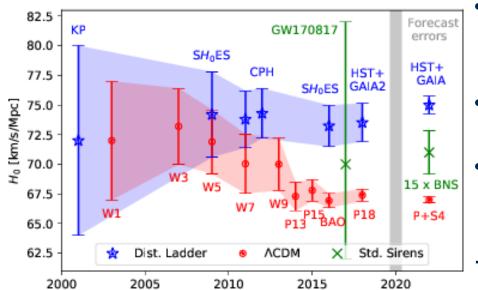
Constante de Hubble H₀:

Mesure le taux d'expansion de l'Univers: de plus loin est un objet de plus vite elle s'éloigne

Mesures de la constante de Hubble

Crux: mesure des distances!

- à partir « chandelles standards »
 (Céphéides, géante rouge supernovæ) :
 extrapolation de proche en loin
- à partir du CMB (modèle Λ CDM) : extrapolation de loin en proche
- à partir de « sirènes standards » : ondes gravitationnelles
- → Résultats divergents : **JWST?**

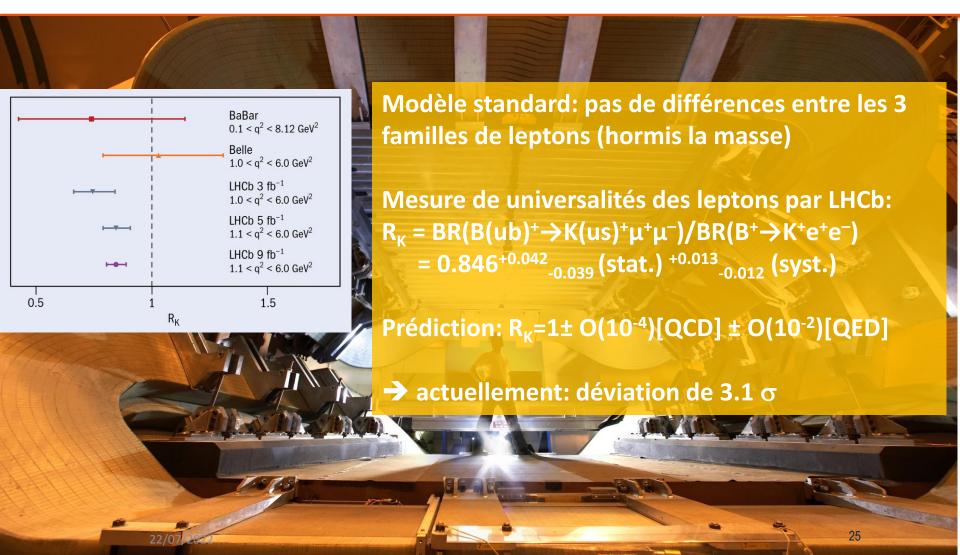


year

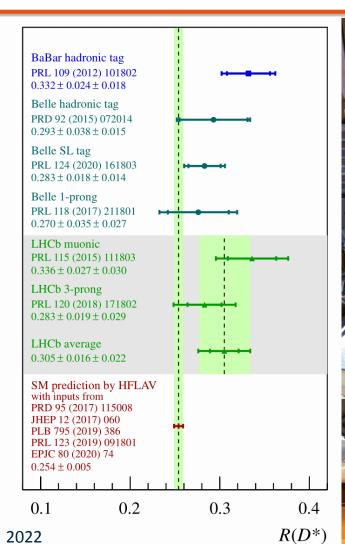




2014: Universalité des leptons



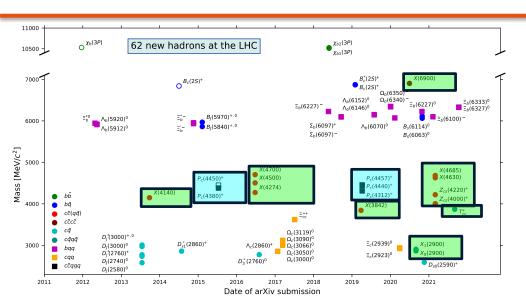
Mais aussi les τ







2015: pentaquarks au LHC



LHC: Plus de 60 hadrons découverts!

- 50 mésons possibles : 1 non observé
- 75 baryons possibles: ≈ 50 observés

→ hadrons exotiques @ LHC:

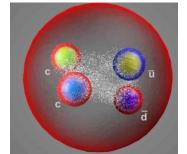
- 13 tetraquarks : 3 cqqq, 8 ccqq, 1 cccc
- 5 pentaquarks: ccqqq

Est-ce que des hexaquarks existent?

Structure des tetraquarks?

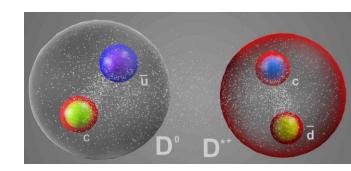
tetraquarks compacts:

Tous les 4 quarks voies les couleurs des autres



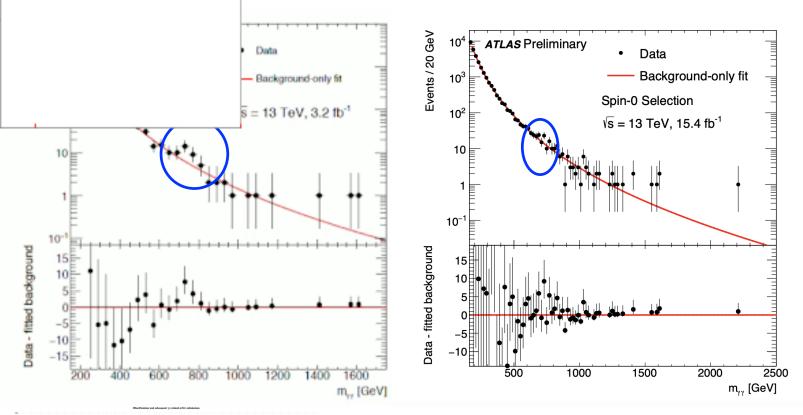
molécules hadroniques:

2 di-quarks "blancs" sont lié par échange de pions





Excès d'événements di-photon à 750 GeV

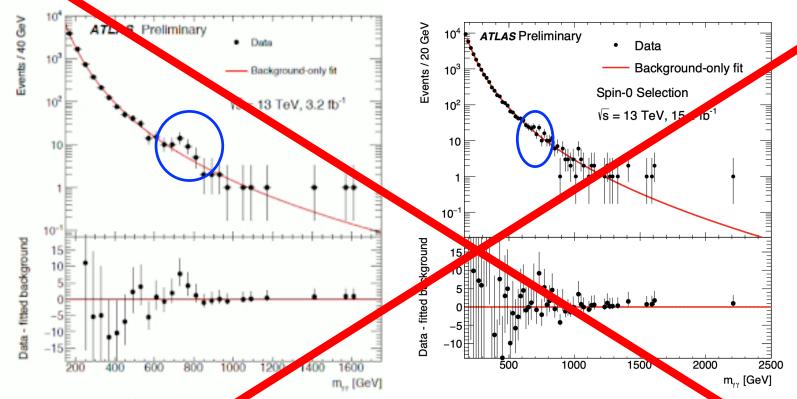




- Observation d'un excès d'événements dans le canal di-photon autour de 750 GeV dans les données analysés en décembre 2015
- Disparition de l'effet dans l'analyse présenté en août 2016 avec 5 fois plus de données

→ Fluctuation statistique!

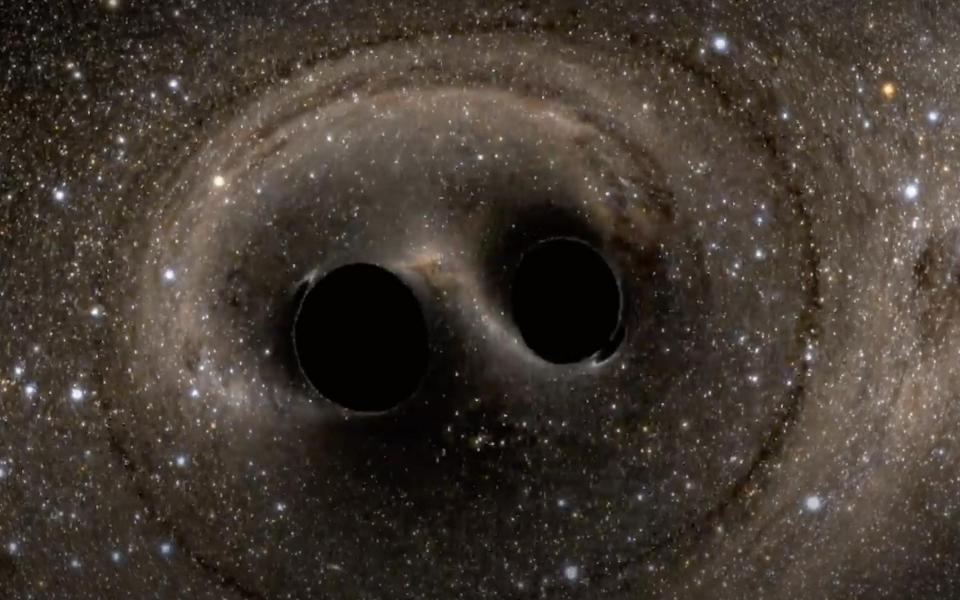
Excès d'événements di-photon à 750 GeV

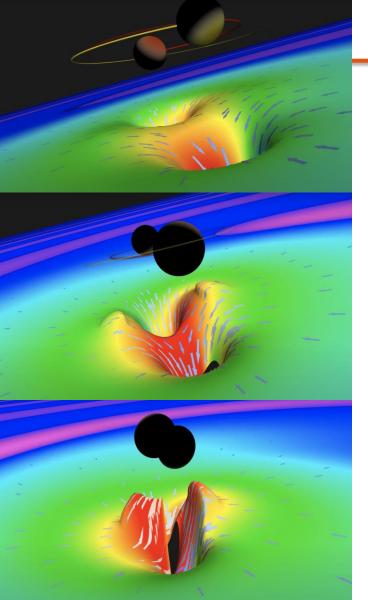




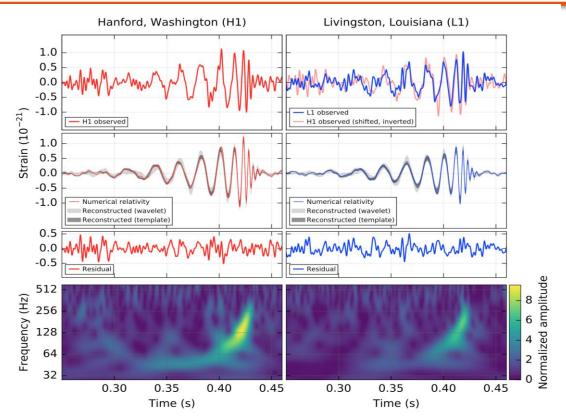
- Observation d'un excès d'événements dans le canal di-photon autour de 750 GeV dans les données analysés en décembre 2015
- Disparition de l'effet dans l'analyse présenté en août 2016 avec 5 fois plus de données
- → Fluctuation statistique!







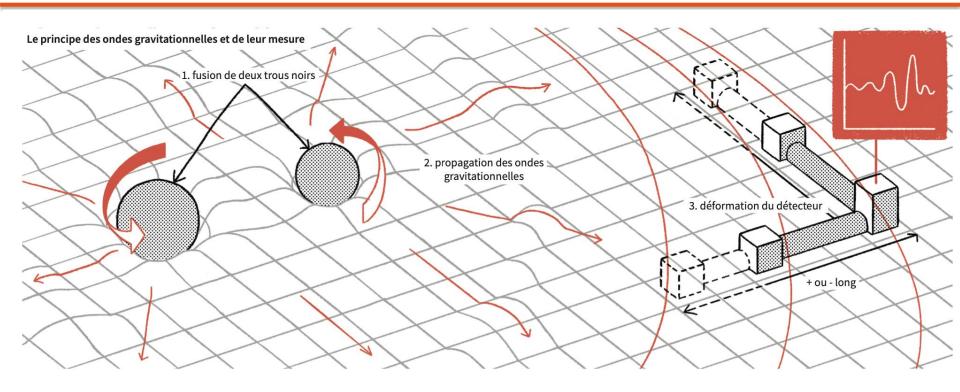
2016: Ondes Gravitationnelles



M1= 36 M_{\odot} M2=29M_{\odot} Δ M=3M_{\odot} \rightarrow puissance: 3 10⁴⁹W distance: 1,3Md années-lumière

Simulation d'une coalescence de deux trous noirs: https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v10

Principe de mesures des ondes gravitationnelles



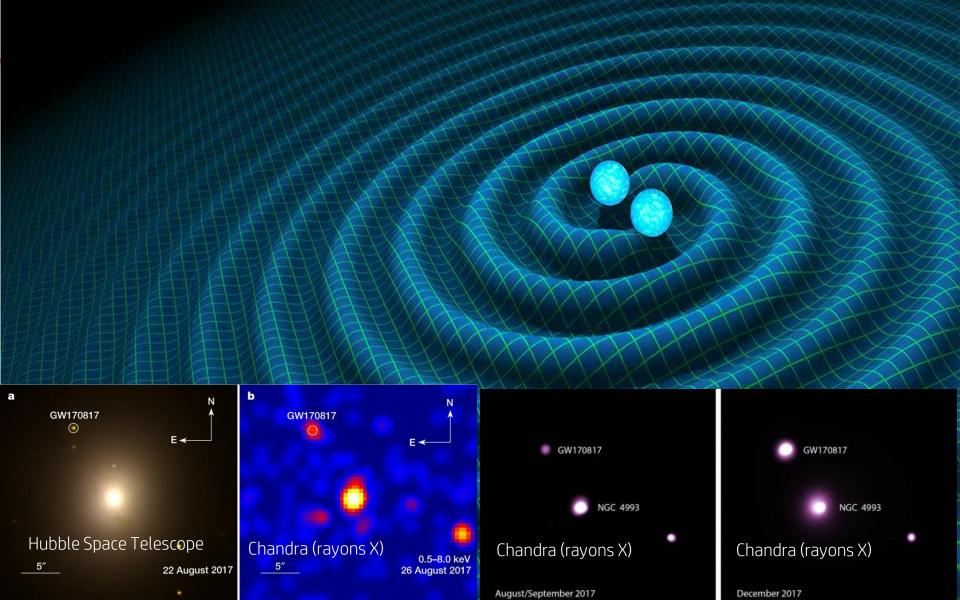
1er observation d'une onde gravitationnelle

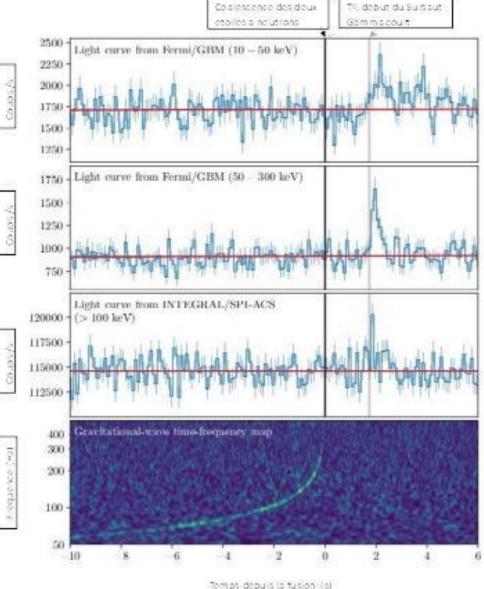
1 er observation directe d'un trou noir

1^{er} observation d'une coalescence de deux trous noirs

→ nouvelle astronomie







2017: Multi-messagers!

Observation de la coalescence de deux étoiles à neutrons « simultanément » par Ligo-Virgo, Fermi et Integral: Kilonova!

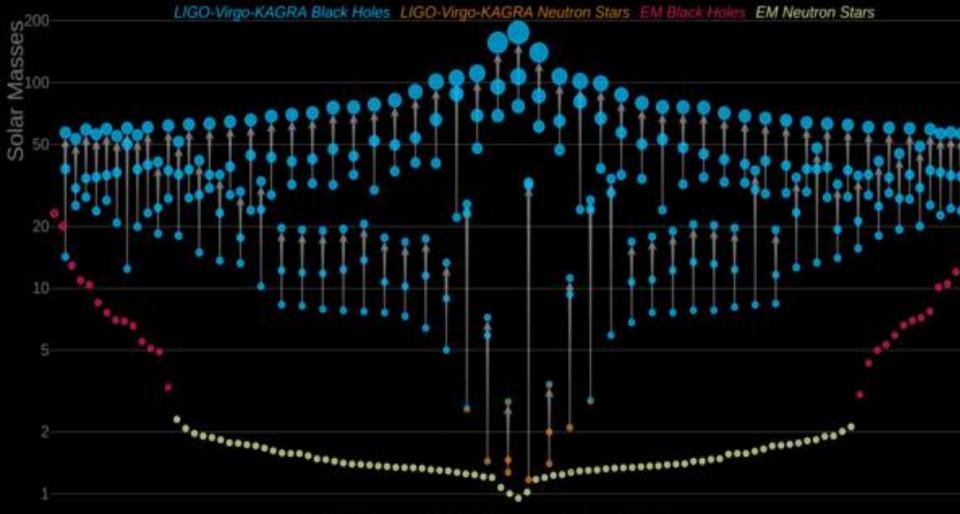
Distance parcourue des signaux:

140M années-lumière
Différence des temps d'arrivées entre le signal gravitationnel et le signal électromagnétique:

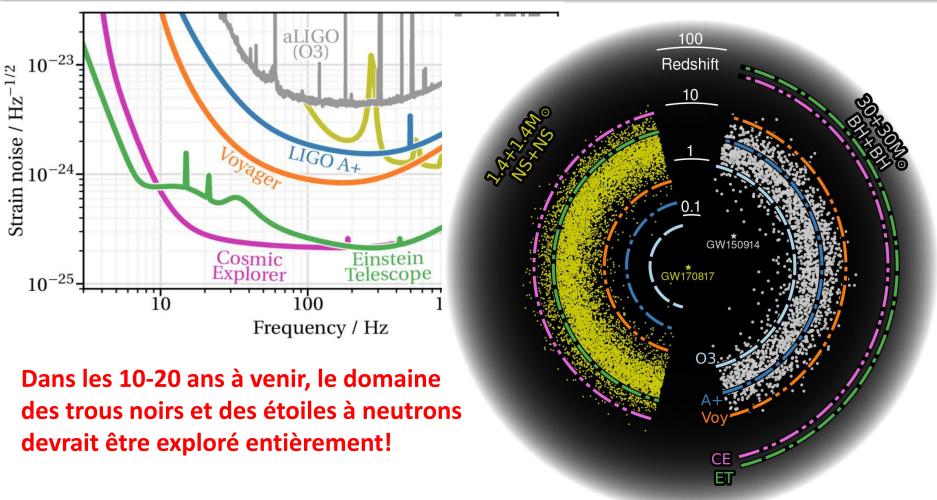
2 secondes

→ Temps de formation du signal électromagnétique

Masses in the Stellar Graveyard

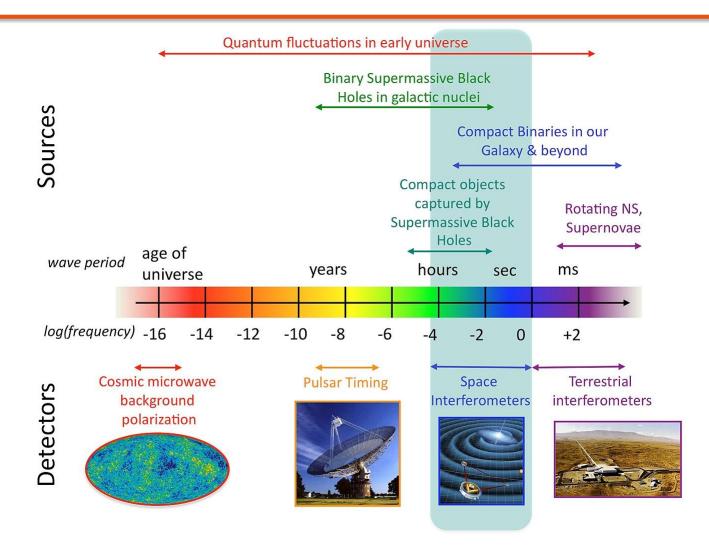


Aller au bout





Spectres des ondes gravitationelles









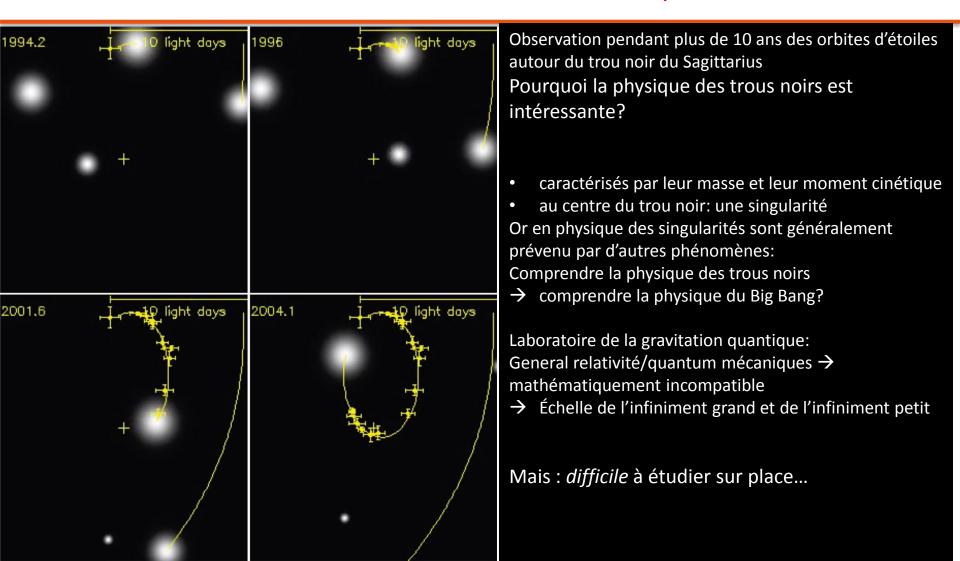
2019: Voir un trou noir

Event Horizon Télescope :Observation directe du trou noir du centre de la voie lactée

Observations indirectes



Trou noir en action







2017: Muographie appliqué aux pyramides!





Pression du proton



incident photon

-0.5

0.5

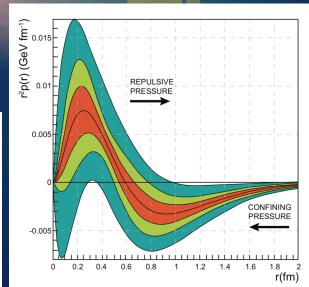
 $b_x (fm)_{0.0}$

→ sonde gravitationnel

target electroi

scattered photon

scattered electron

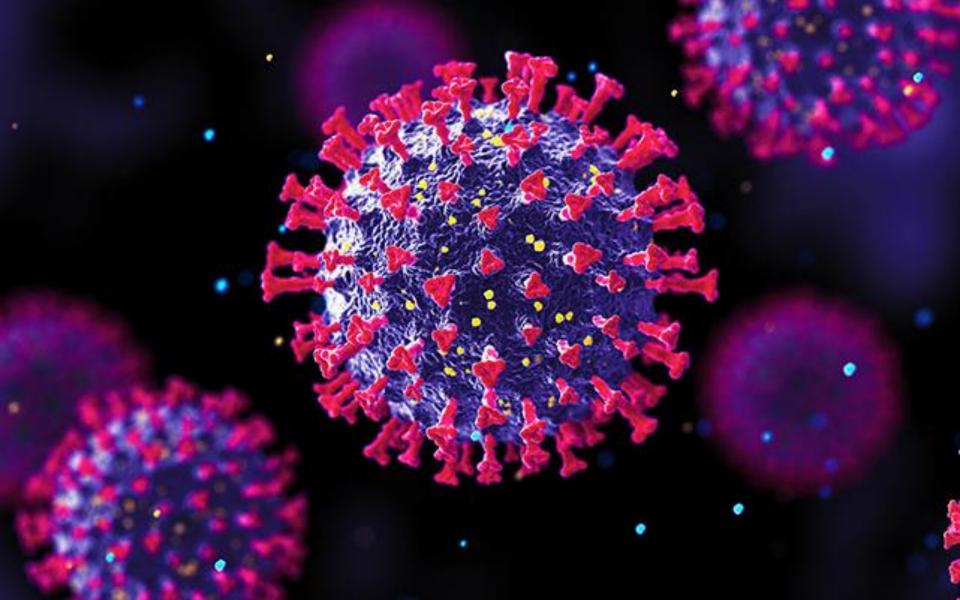






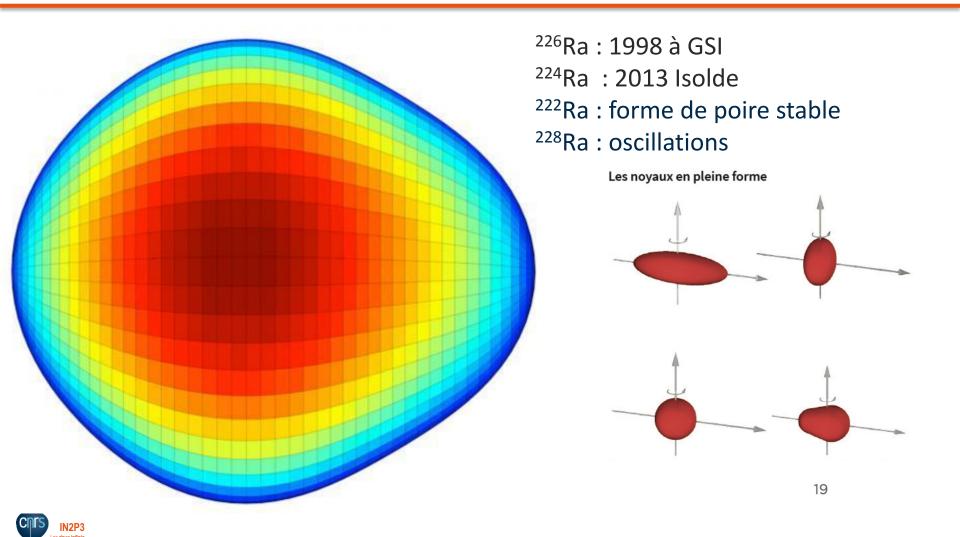




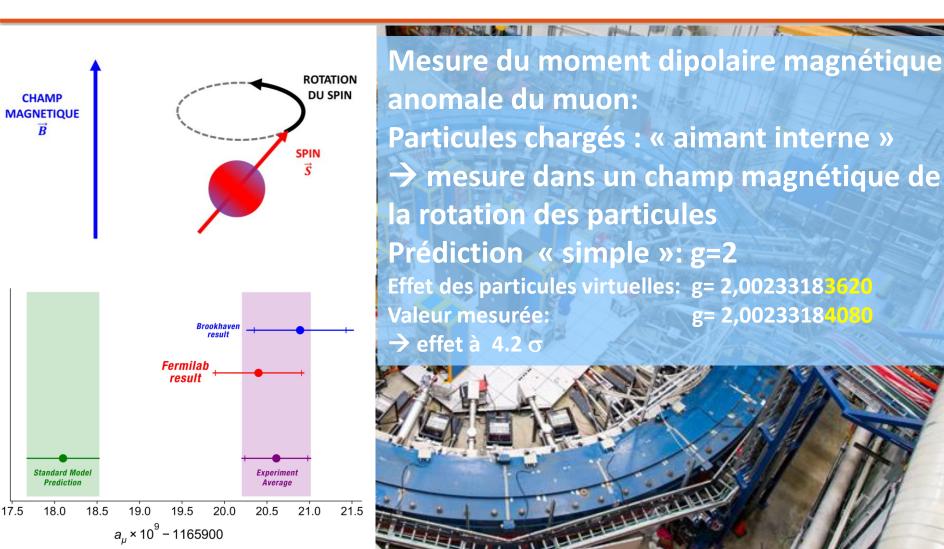




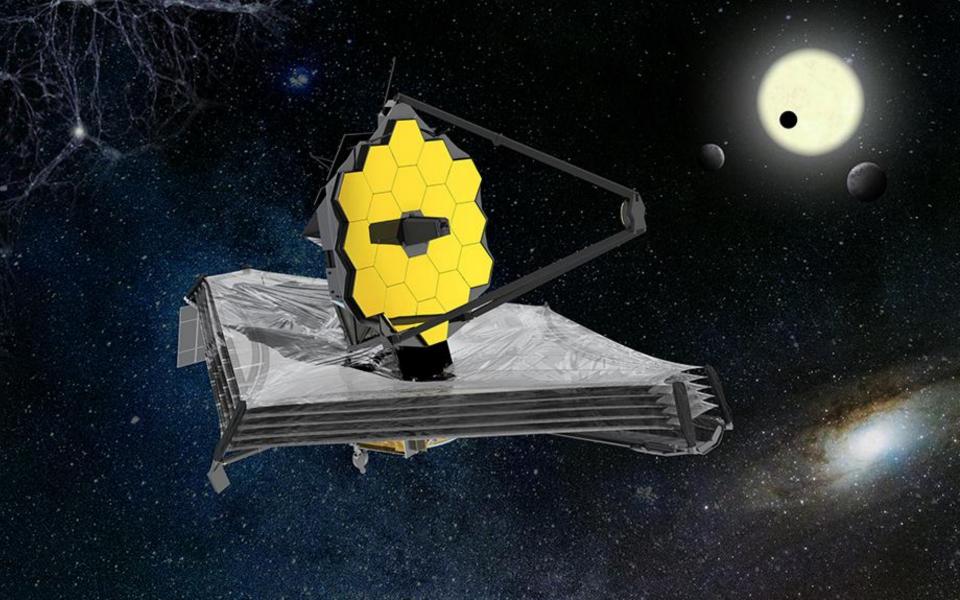
2020: Une poire comme noyau

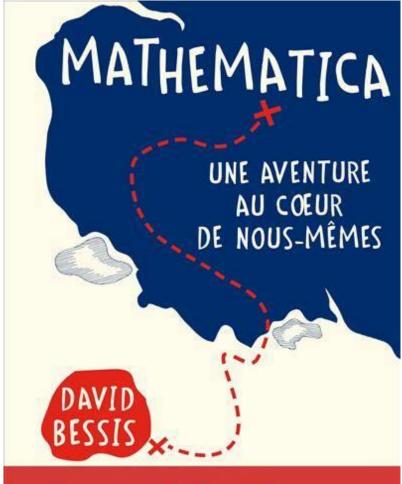












Les mathématiques: Une expérience sensible

