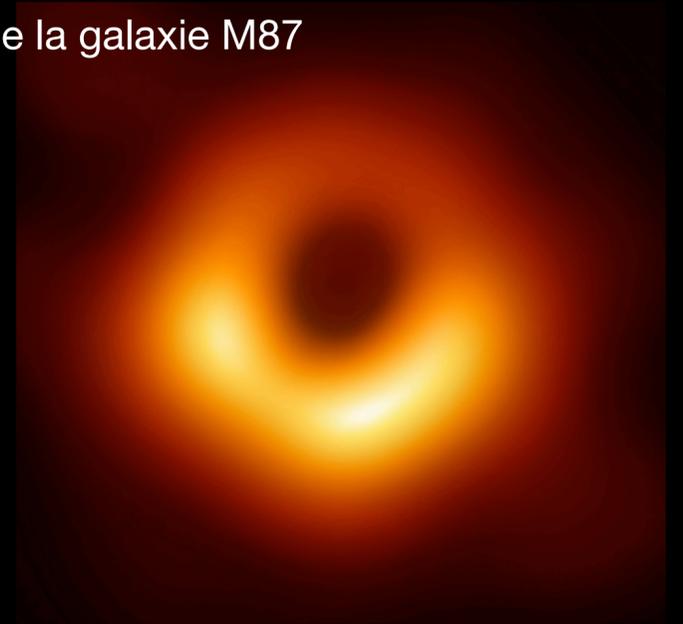


Ondes & Cosmos

optique, thermodynamique, gravitation



Explorer les liens qui existent entre les phénomènes ondulatoires, des plus petites échelles (atomes, photons, ..) aux plus grandes (le cosmos)

- Cours 1 : Les ondes c'est quoi ..?
✓ 26 avril @ 18h15
- Cours 2 : Les ondes et la thermodynamique
✓ 3 mai @ 18h15
- Cours 3 : Le cosmos et la gravitation
✓ 10 mai @ 18h15

Ondes & Cosmos

Contenu, objectifs

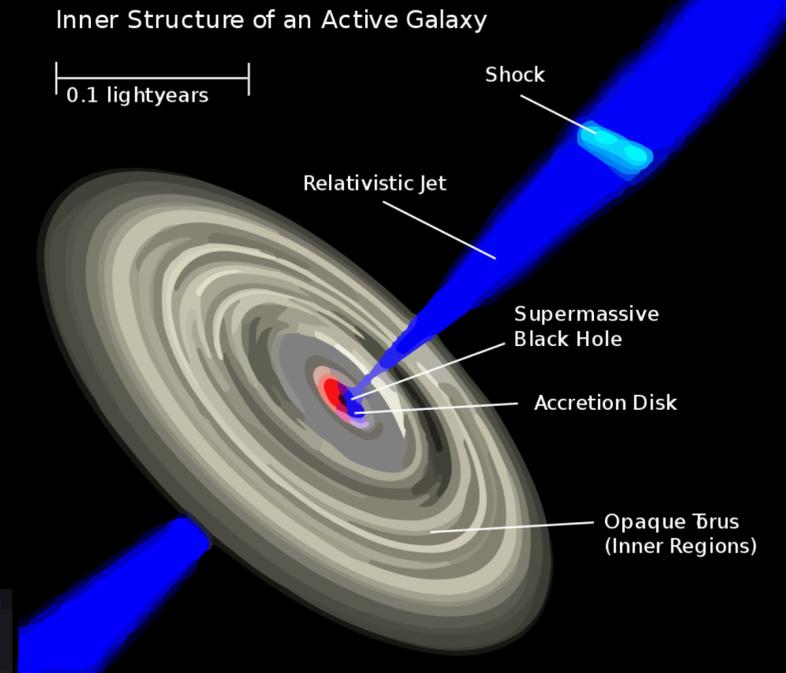
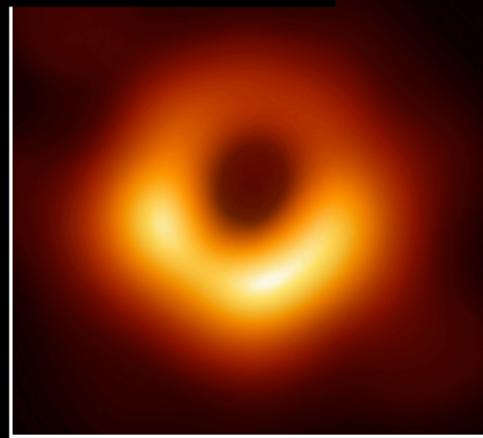
- Cours 3 : Le cosmos et la gravitation
 - ✓ lumière comme porteuse d'information
 - ✓ équivalence mass-énergie, dualité ondes-corpules
 - ✓ couple matière-lumière : rayonnement électromagnétique, le fond diffus
 - ✓ l'Univers acoustique / l'acoustique d'un trou noir
 - ✓ Les ondes gravitationnelles : principes, recensement, l'avenir

Observer le coeur d'une galaxie

M87 & son trou noir super-massif

- galaxie elliptique M87 ;
- $M_{\text{BH}} \sim 6 \times 10^9 M_{\odot}$
- distance ≈ 15 Mpc (qq 50 millions an-lum)
- Observations radio passées : jet étendu, très fin
- Origine : compression / expansion d'une colonne de gaz chaud, collimation par champs magnétiques

Le trou noir de la galaxie M87



Arrêtez les presses !!

Annnonce imminente pour le centre de la Voie Lactée / EHT :



Event Horizon Telescope

12 May 2022
15:00 CEST

Press Conference at ESO

on groundbreaking Milky Way results from the **Event Horizon Telescope Collaboration**

Live in 45 hours
May 12 at 3:00 PM

Hyperlien actif (cliquer l'image)



European Southern Observatory

Announcement

Press conference at ESO on groundbreaking Milky Way results from the Event Horizon Telescope Collaboration

28 April 2022



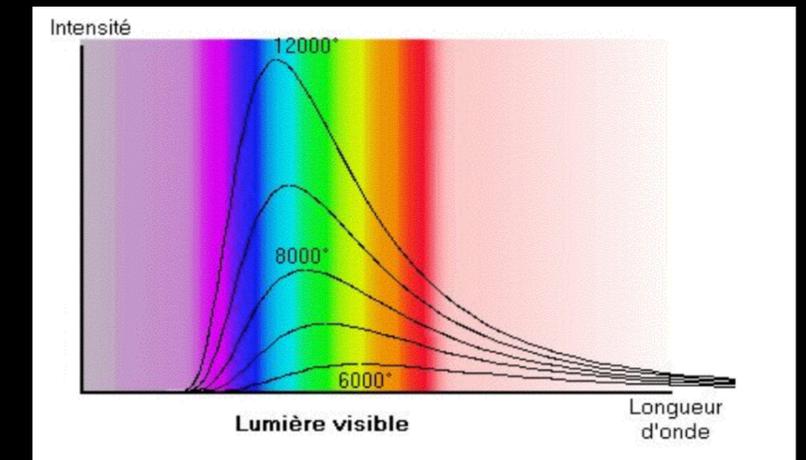
The European Southern Observatory (ESO) and the [Event Horizon Telescope](#) (EHT) project will hold a press conference to present new Milky Way results from the EHT.

- **When:** On 12 May at 15:00 CEST
- **Where:** Eridanus Auditorium, [ESO Headquarters](#), Garching bei München, Germany and [online](#)
- **What:** A press conference to present groundbreaking Milky Way results from the EHT
- **Who:** The ESO Director General will deliver the opening words. EHT Project Director Huib Jan van Langevelde and EHT Collaboration Board Founding Chair Anton Zensus will also deliver remarks. A panel of EHT researchers will explain the result and answer questions. This panel is composed of:
 - Thomas Krichbaum, Max Planck Institute for Radio Astronomy, Germany
 - Sara Issaoun, Center for Astrophysics | Harvard & Smithsonian, US and Radboud University, the Netherlands
 - José L. Gómez, Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC), Spain
 - Christian Fromm, Würzburg University, Germany
 - Mariafelicia de Laurentis, University of Naples "Federico II" and the National Institute for Nuclear Physics (INFN), Italy
- **RSVP:** This invitation is addressed to media representatives. To participate in the conference, members of the media must register by completing an [online form](#) before **May 9 23:59 CEST**. Please indicate whether you wish to attend in person or if you will participate online. On-site journalists will have priority to query panellists during the conference, with reporters watching remotely also being able to send in questions. In-person individual interviews will also be possible immediately after the conference. Masks will be mandatory for participants in the in-person press conference.

The conference will be streamed online on the [ESO website](#) and on the [ESO YouTube](#) channel. There will be simultaneous press conferences organised around the world, including in Washington D.C., Santiago de Chile, Mexico City, Tokyo, and Taipei.

Le couple rayonnement - matière

Equilibre thermique et corps noir

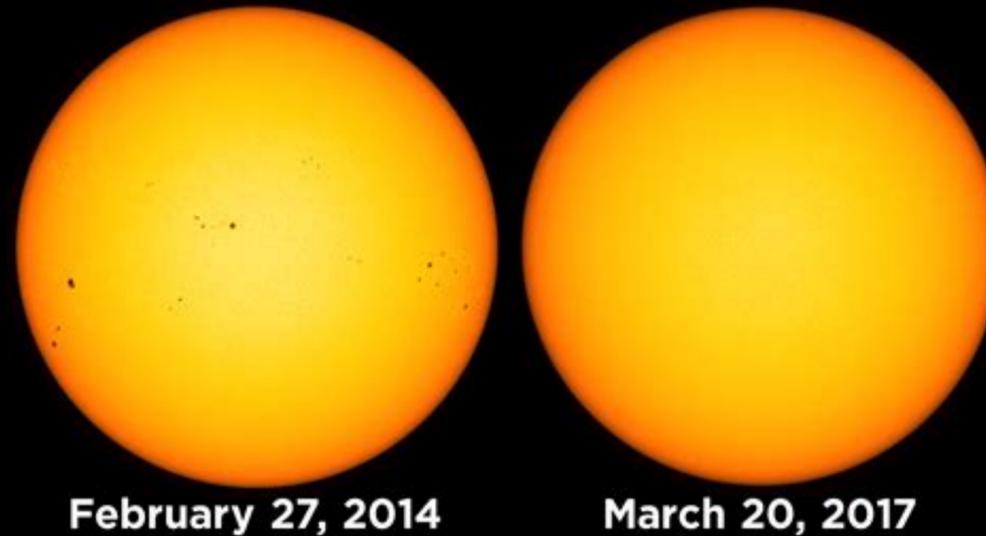


- Tous les modes possibles : tendance vers l'équilibre *thermodynamique*
- *Couleur* du rayonnement en relation directe avec la température T *rigoureusement uniforme*
- Concept de bain thermique : les détails disparaissent ..
- Principe de Carnot : équilibre thermique entre les corps

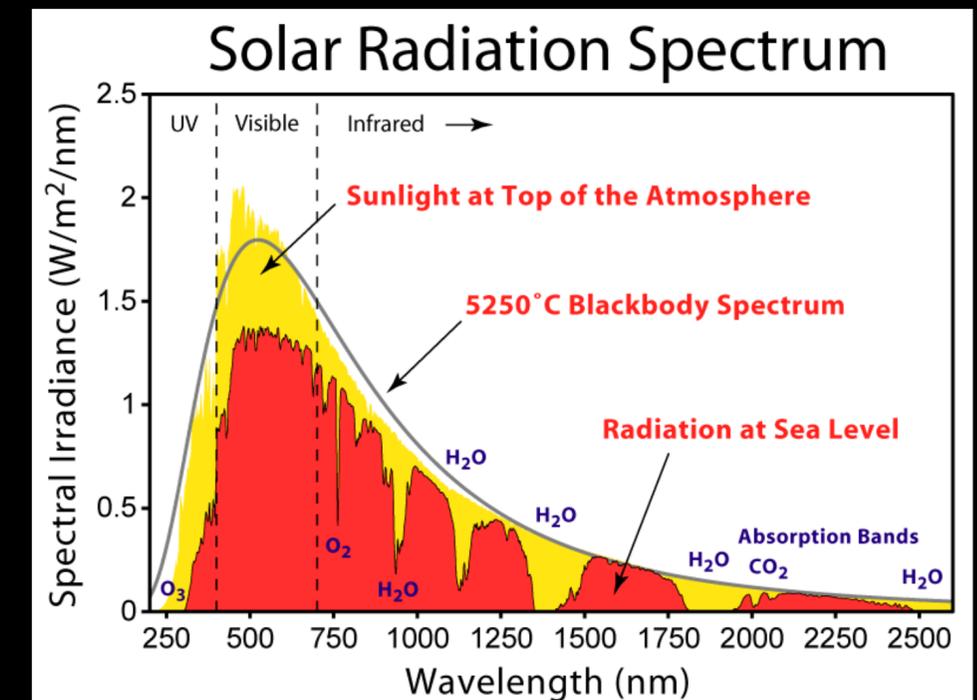
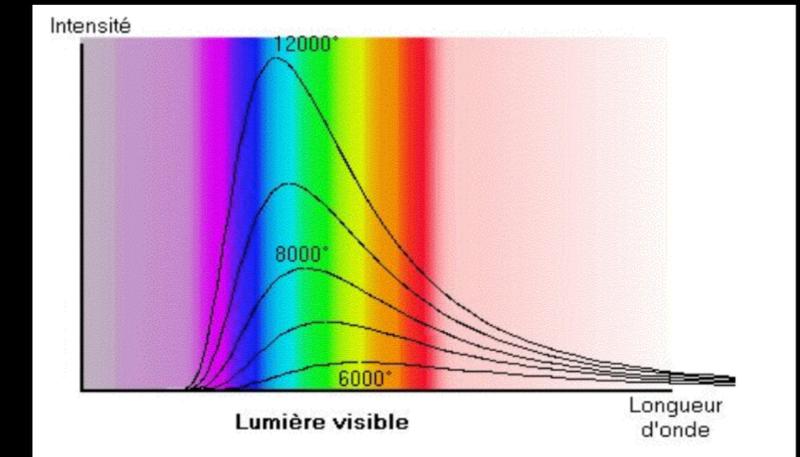


Le couple rayonnement - matière

Le Soleil comme "corps noir"



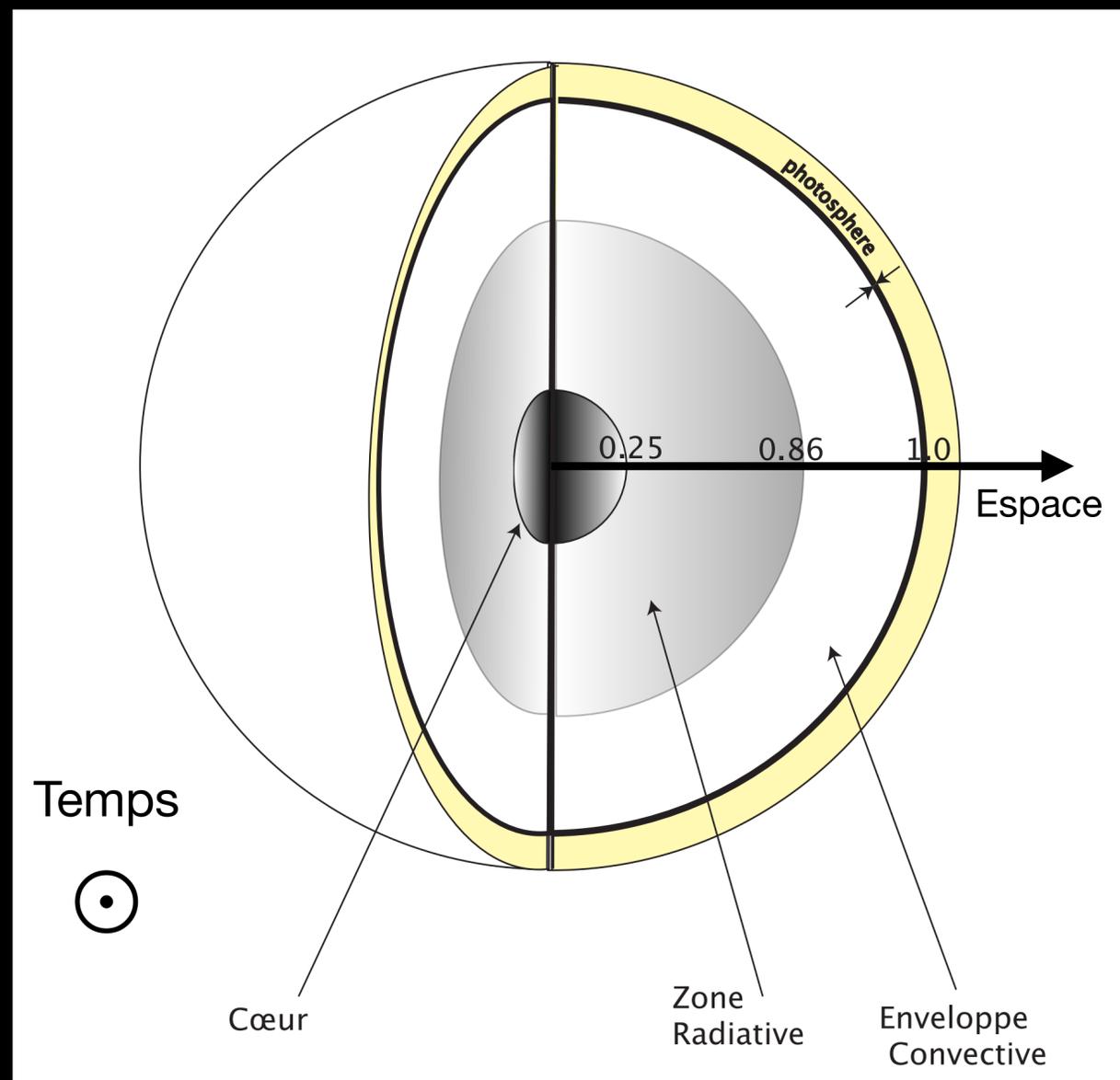
- Atmosphère à $\approx 5\,800^\circ\text{K}$
- Plasma chaud, ionisé : électrons libres
- Lente diffusion de la lumière vers la surface (la photosphère)
- Ejections, taches solaires : déséquilibre thermique, processus physiques (MHD, ..)



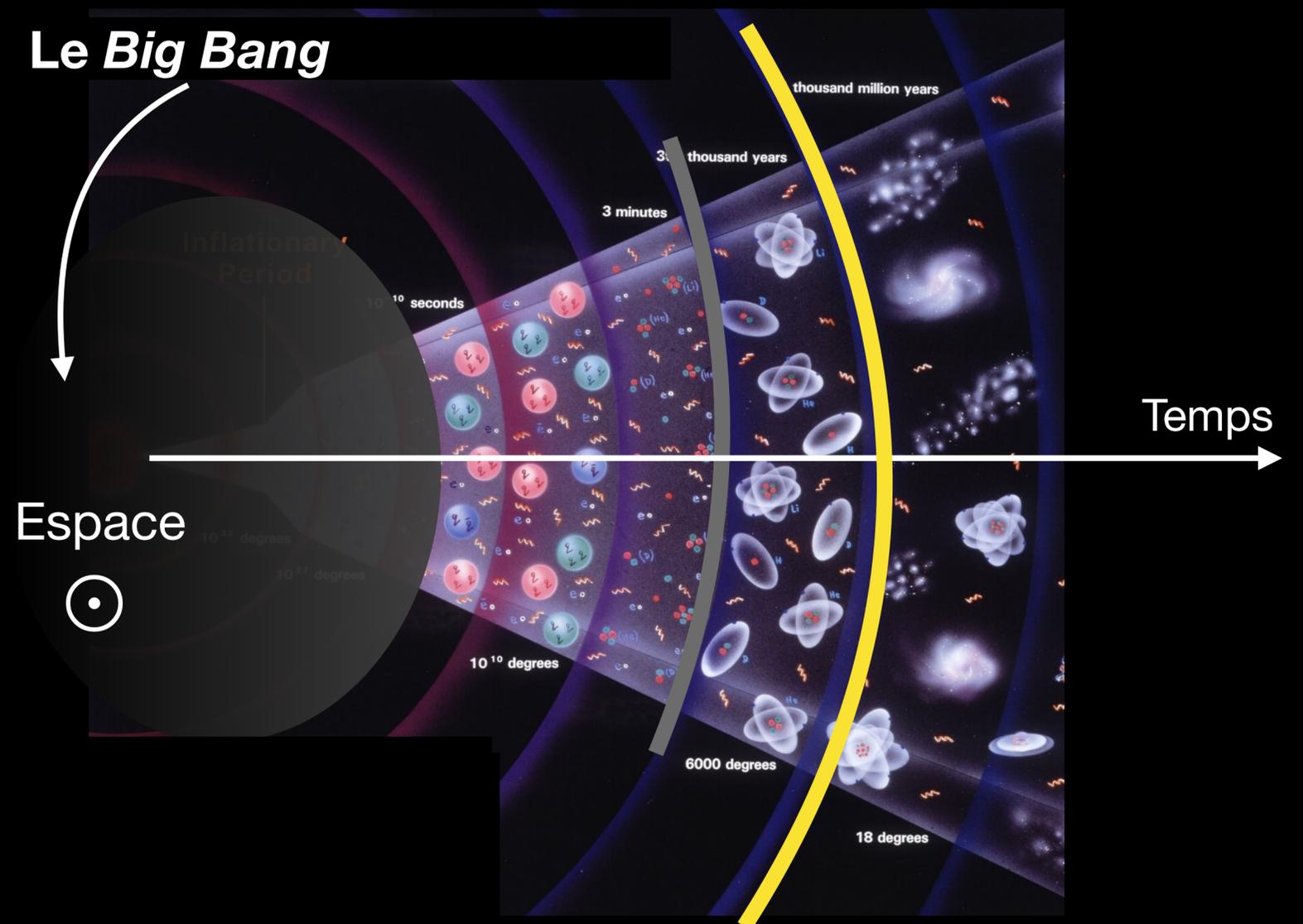
Le couple rayonnement - matière

Le cosmos tout entier .. vu comme une étoile

- Coupe dans l'espace :



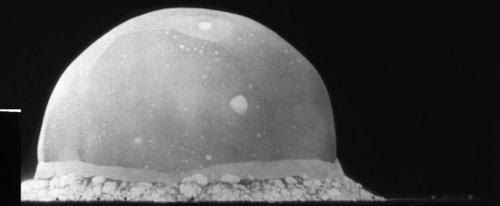
- Coupe dans le temps :



Le *Big Bang* : comme Taylor-Sedov

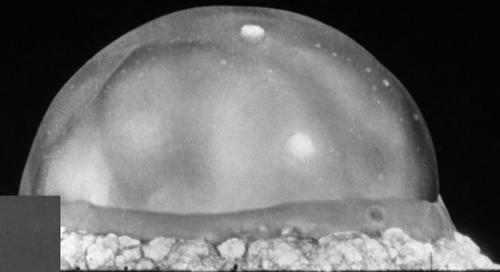
Expérience Trinity, Los Alamos
15 juillet 1945

Croissance des distances
cosmiques avec le temps

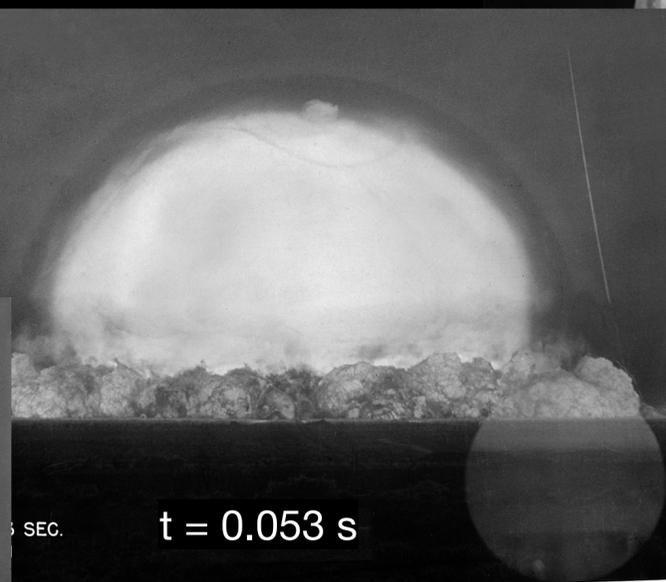


t = 0.016 s

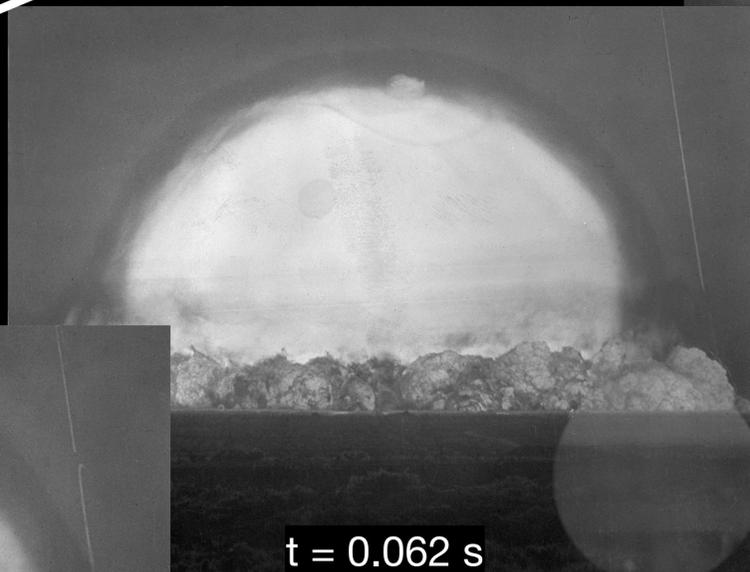
100 m



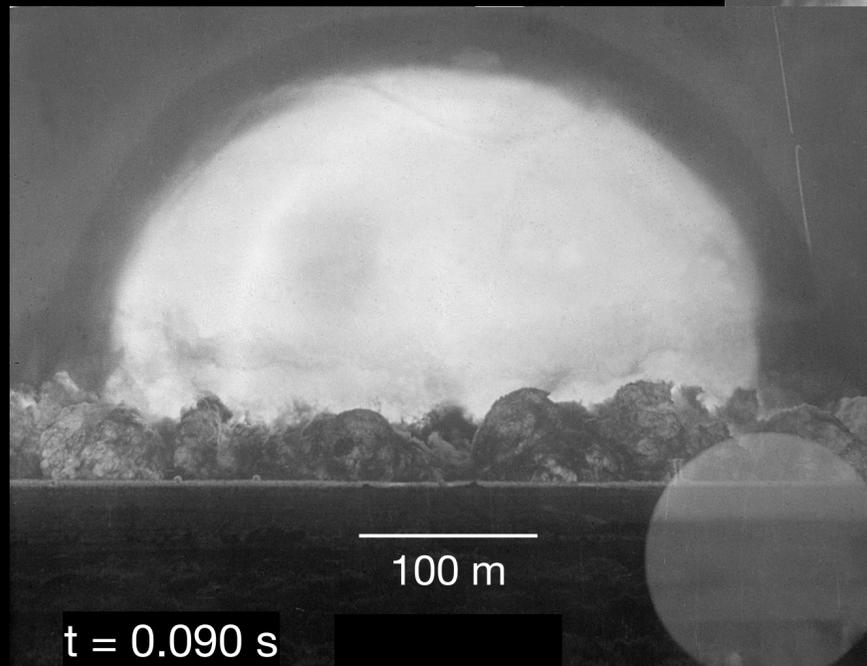
t = 0.025 s



t = 0.053 s

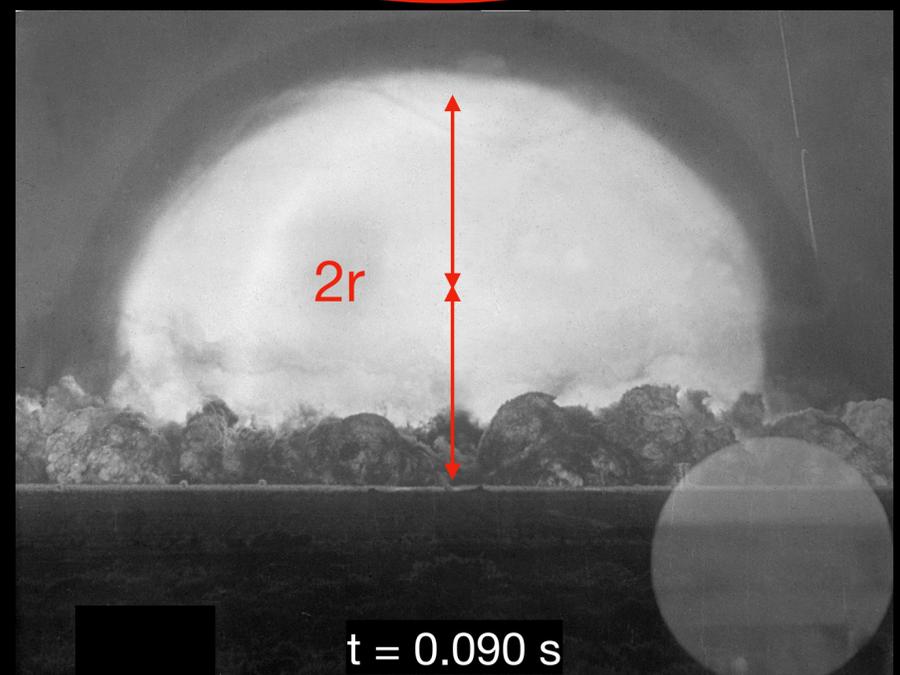


t = 0.062 s

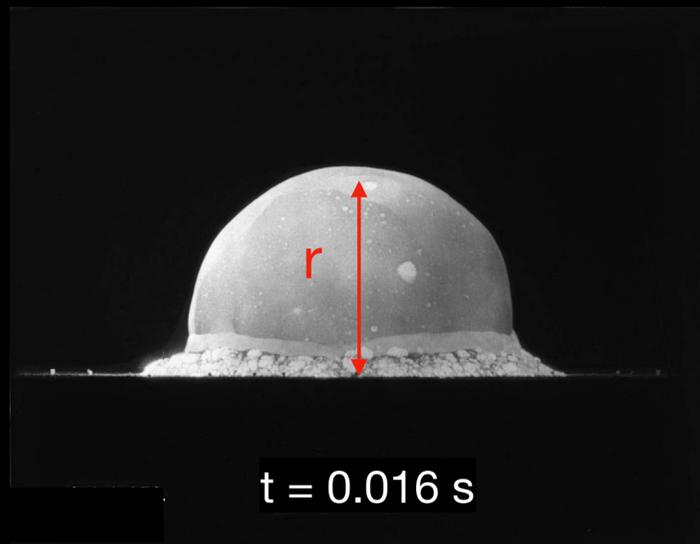


t = 0.090 s

$r(t) \sim t^{2/3}$



t = 0.090 s



t = 0.016 s

Une meilleure vision “locale” du Big Bang

Plutôt comme un jour typique @ Brest ..

- Univers au départ très dense et chaud ;
- Couple fort entre le rayonnement et la matière
- Parcours optique de la lumière devient progressivement plus long
- Après $\approx 280\,000$ ans : recombinaison, parcours libre

Une meilleure vision “locale” du Big Bang

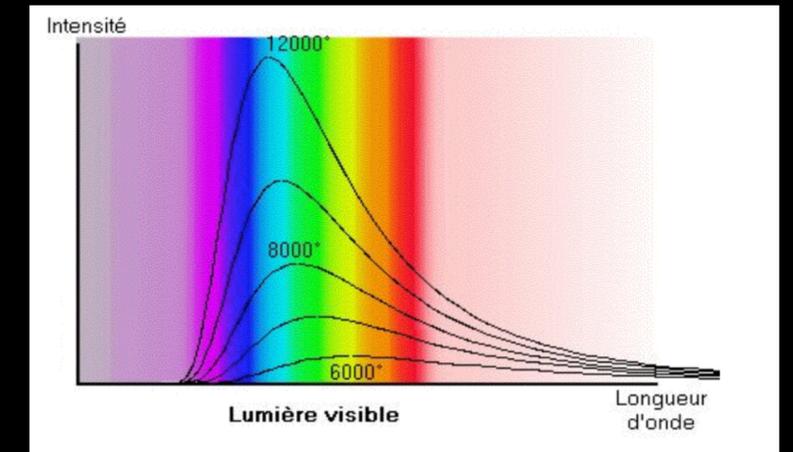
Plutôt comme un jour typique @ Brest ..

- Univers au départ très dense et chaud ;
- Couple fort entre le rayonnement et la matière
- Parcours optique de la lumière devient progressivement plus long
- Après $\approx 280\,000$ ans : recombinaison, parcours libre

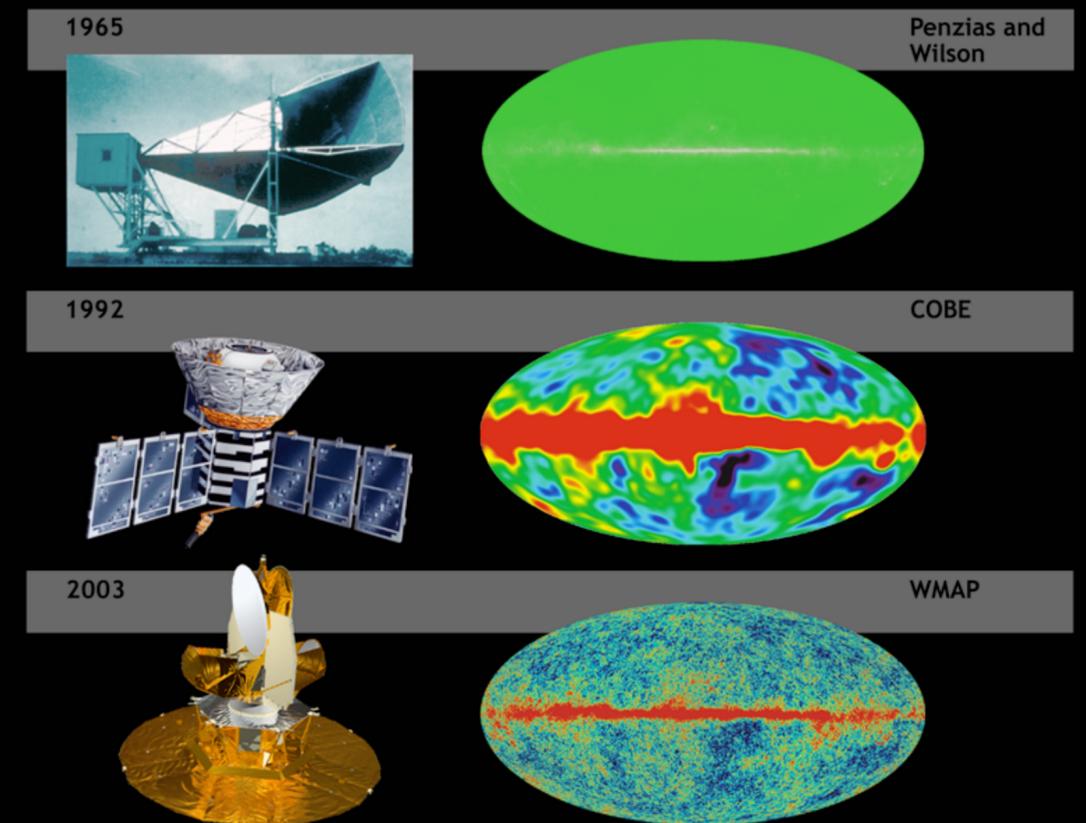


Le couple rayonnement - matière, bis

Le cosmos tout entier comme "corps noir" !!

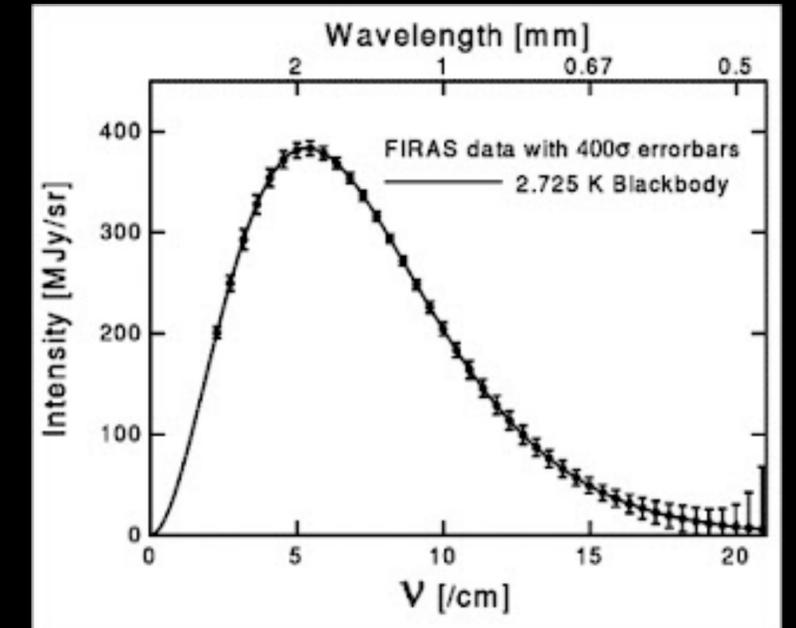


- Fond cosmique diffus aujourd'hui $T \approx 2,73^\circ \text{K}$
- *Origine de l'évolution dynamique du Cosmos*
- Couple fort entre le rayonnement électromagnétique et les électrons libres
- Fluctuations de température (couleurs) de l'ordre de $5 \times 10^{-6} \text{K}$
- Découverte en 1965 ; missions COBE, WMAP

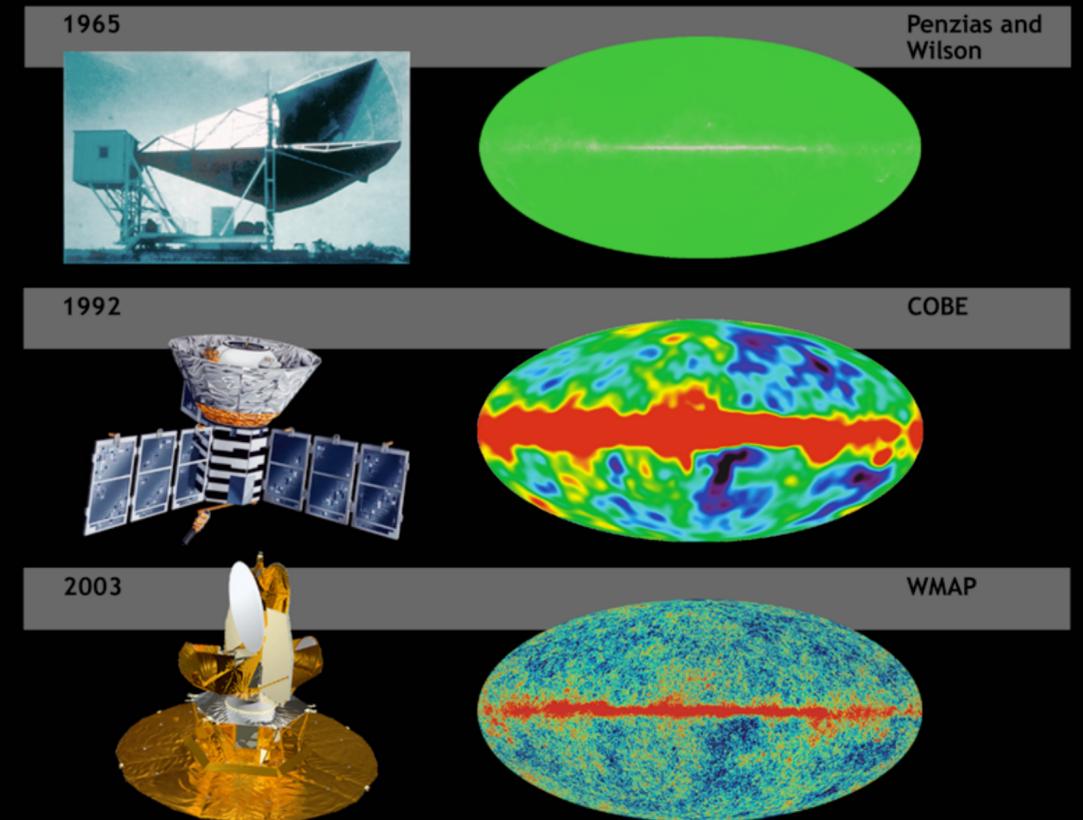


Le couple rayonnement - matière, bis

Le cosmos tout entier comme “corps noir” !!

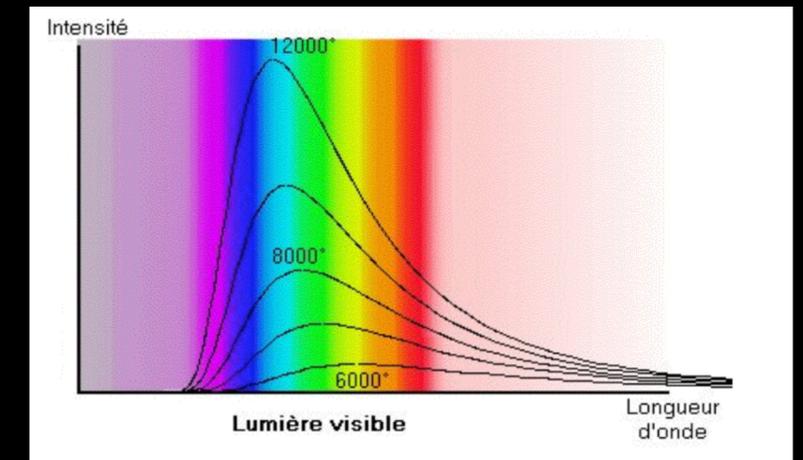


- Fond cosmique diffus aujourd’hui $T \approx 2,73^\circ \text{K}$
- *Origine de l’évolution dynamique du Cosmos*
- Couple fort entre le rayonnement électromagnétique et les électrons libres
- Fluctuations de température (couleurs) de l’ordre de $5 \times 10^{-6} \text{K}$
- Découverte en 1965 ; missions COBE, WMAP

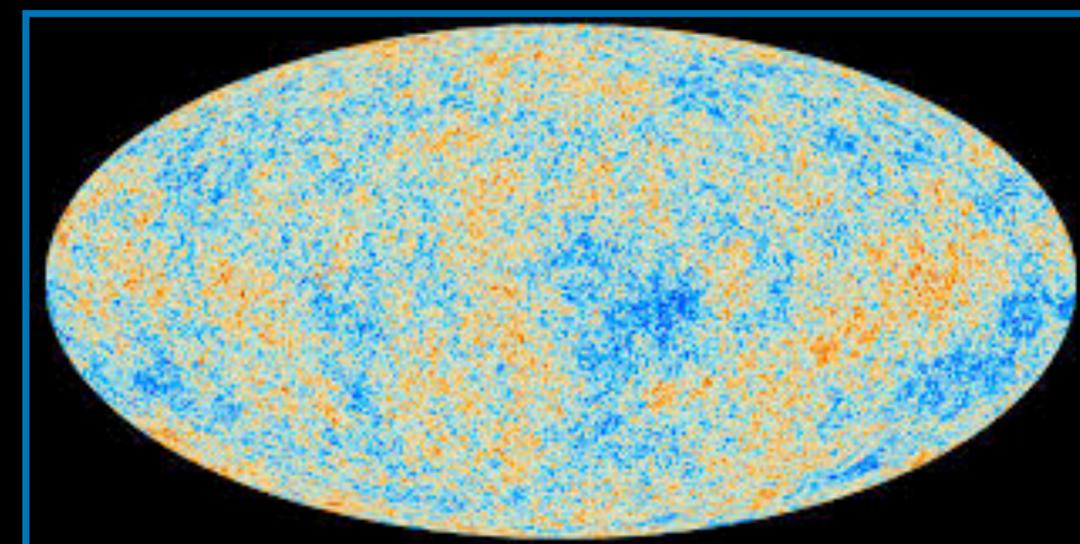
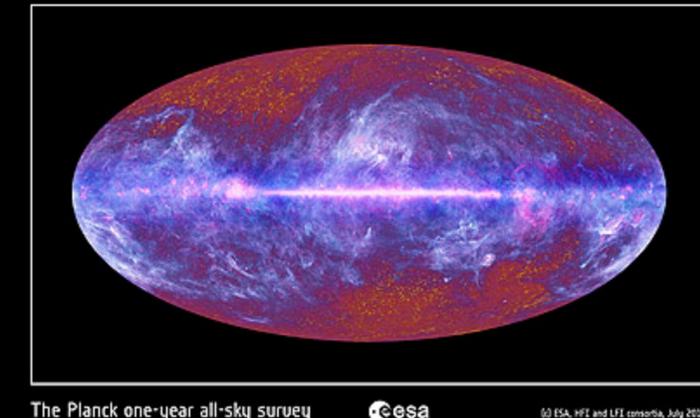


Le couple rayonnement - matière, bis

Le cosmos tout entier comme “corps noir” !!

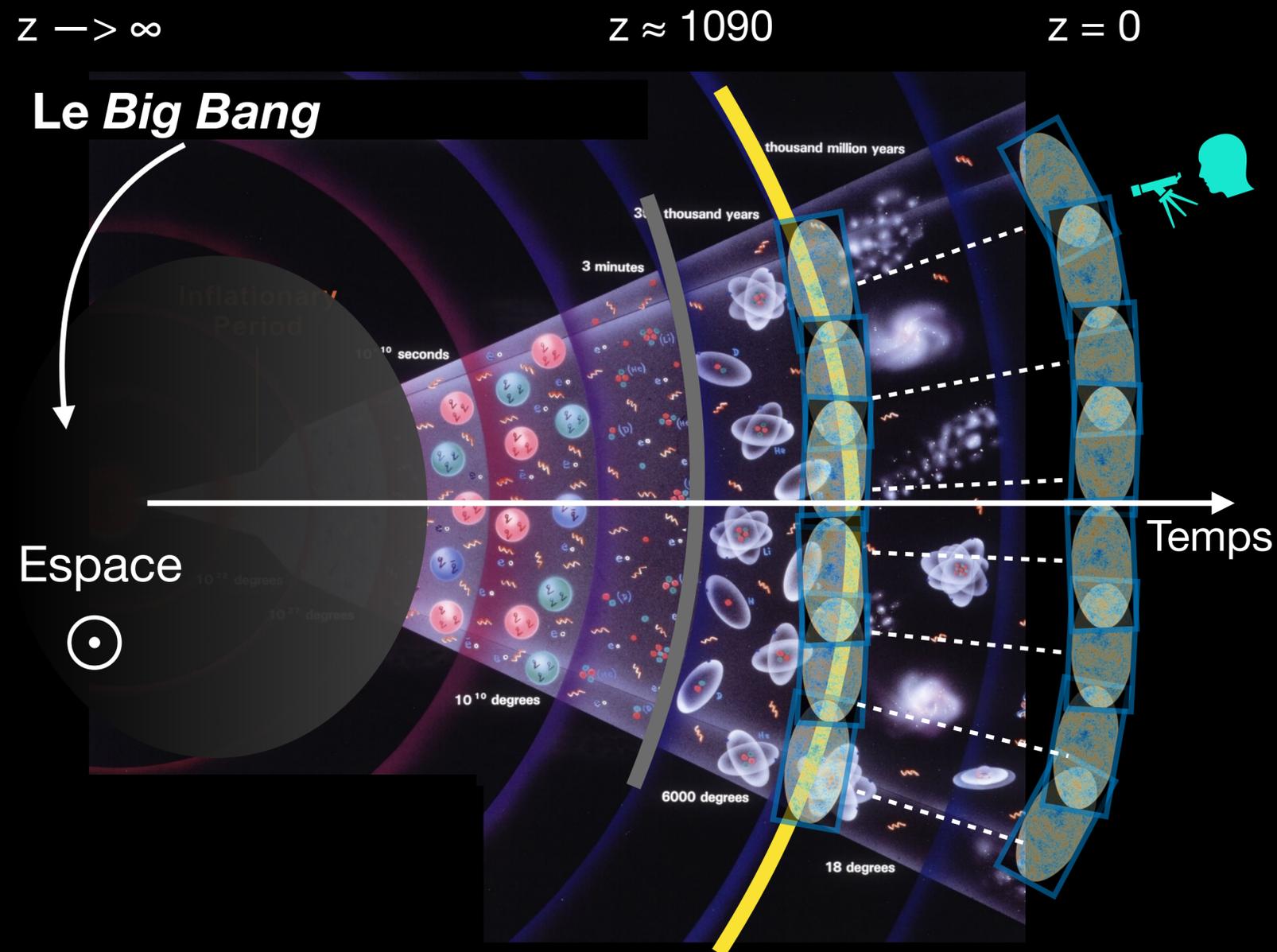


- Fond cosmique diffus aujourd'hui $T \approx 2,73^\circ \text{K}$
- *Origine de l'évolution dynamique du Cosmos*
- Fluctuations de température (couleurs) de l'ordre de $5 \times 10^{-6}^\circ \text{K}$: Mission Planck 2009-2013 (2019)
- Fluctuations de la densité de la matière = fluctuations de la température
- La carte de la mission Planck : représentation dans l'espace de Fourier ...

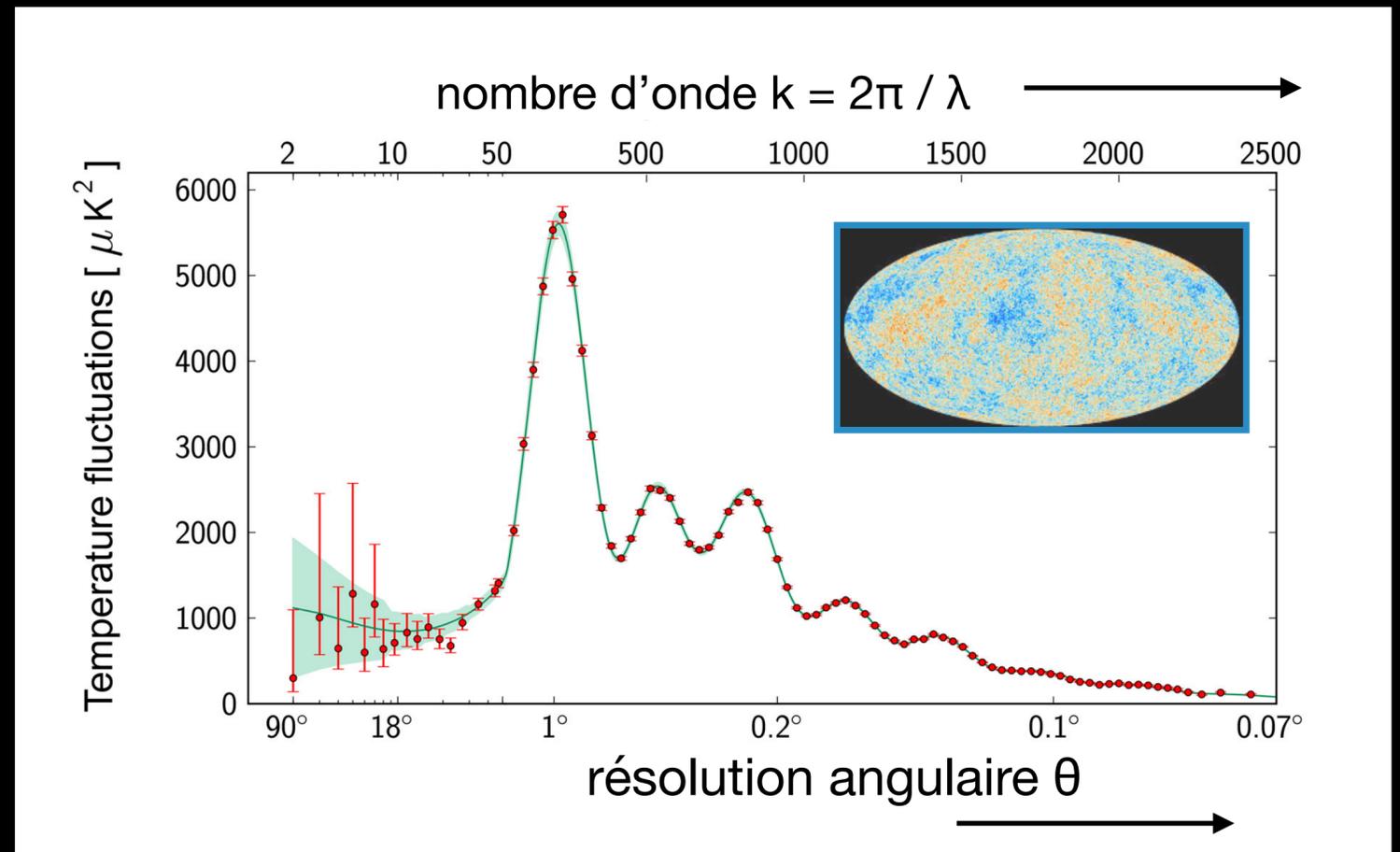


Le rayonnement fossile : décomposition harmonique

L'amplitude des modes pour identifier les modes acoustiques



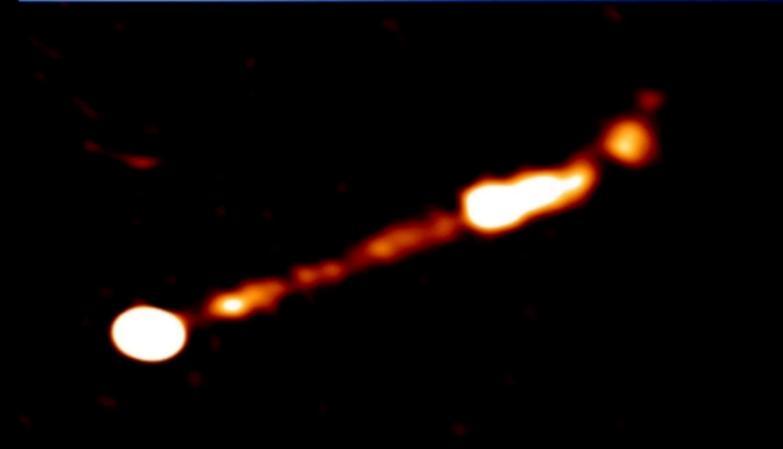
- Amplitude au carré = énergie investie



Le rayonnement fossile : décomposition harmonique

Convertir le CMB en “son” cosmique

- Projet de *sonification* de la NASA
- Une carte convertie en son musicaux
- implications artistiques (instruments, registre ..)
- Pour le CMB : il faut recaler les fréquences de quelque 48 octaves !
- Exemples : [Le centre de la Voie Lactée \(hyperlien\)](#)



Le rayonnement fossile : décomposition harmonique

Convertir le CMB en “son” cosmique

- Projet de *sonification* de la NASA
- Une carte convertie en son musicaux
- implications artistiques (instruments, registre ..)
- Pour le CMB : il faut recalibrer les fréquences de quelque 48 octaves !
- Exemples : [Le centre de la Voie Lactée \(hyperlien\)](#)

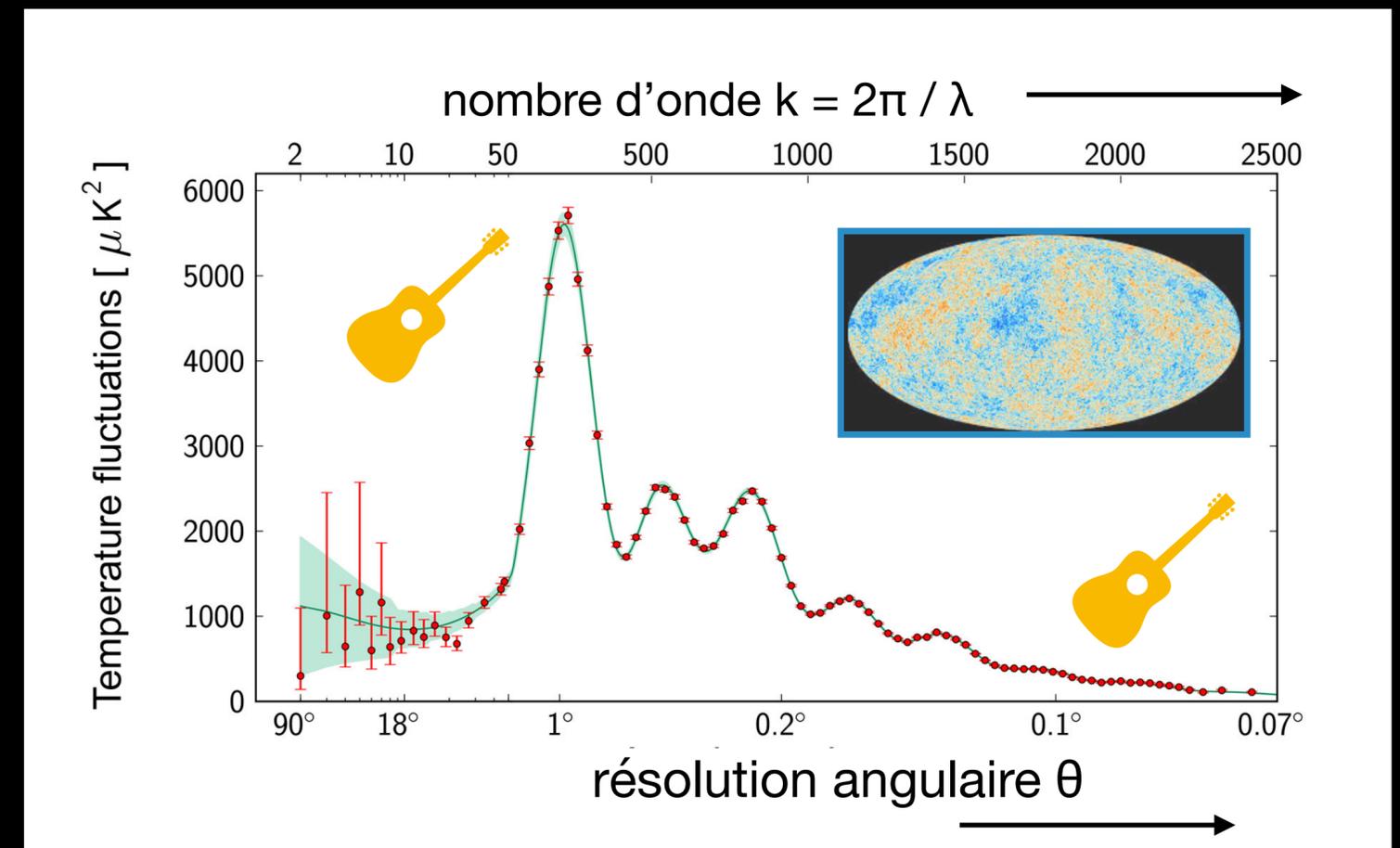


Le rayonnement fossile : décomposition harmonique

Convertir le CMB en “son” cosmique ..



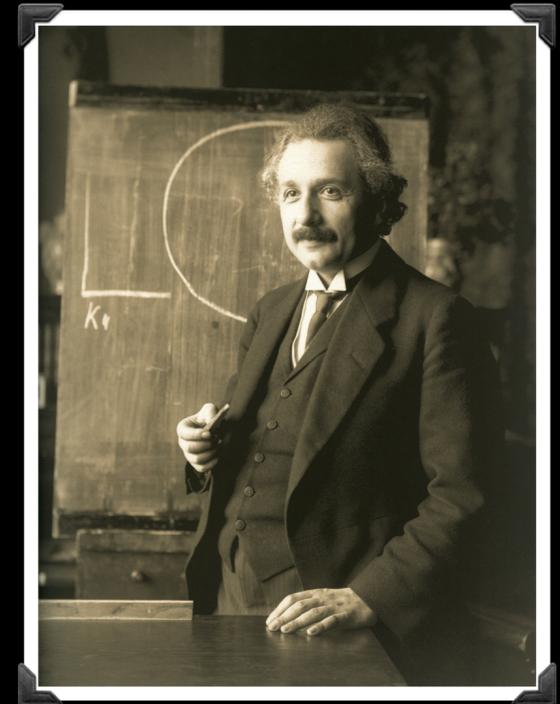
- Projet de *sonification* de la NASA
- Une carte convertie en son musicaux
- implications artistiques (instruments, registre ..)
- Pour le CMB : il faut recaler les fréquences de quelque 48 octaves !
- Exemples : [Le centre de la Voie Lactée \(hyperlien\)](#)



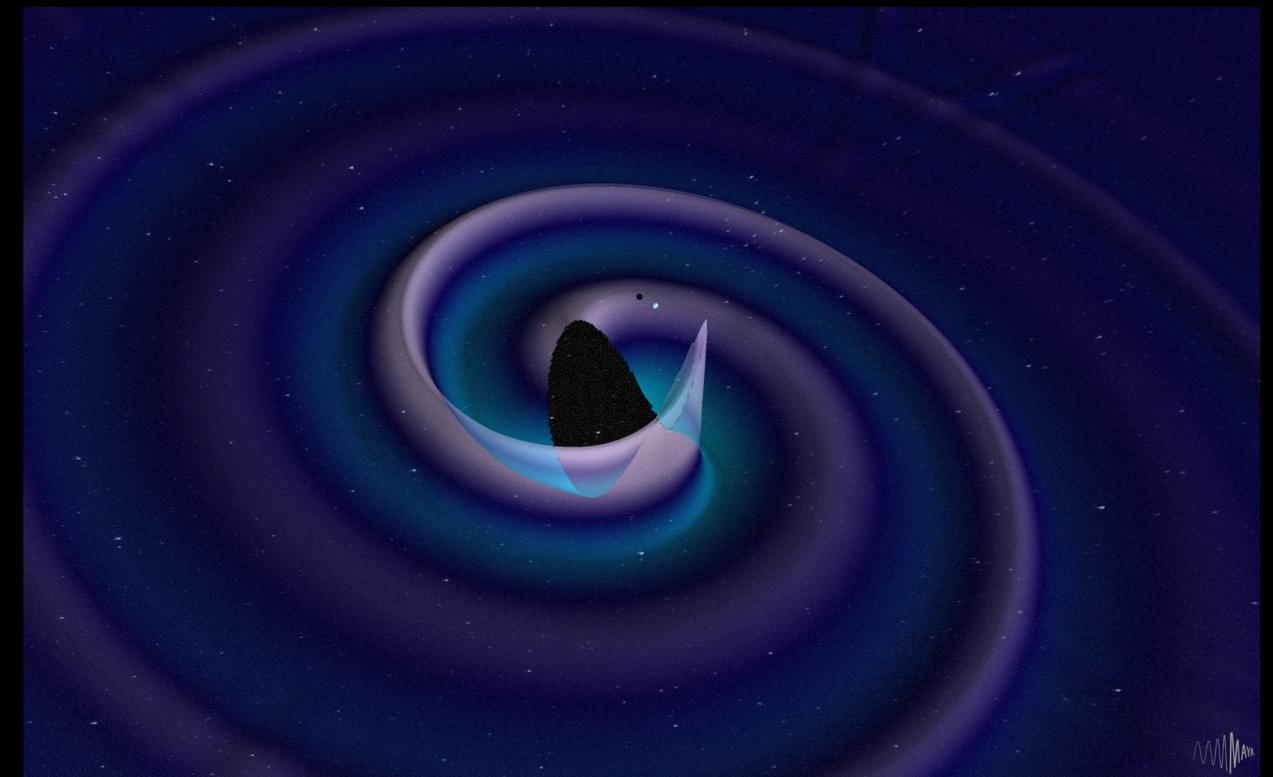
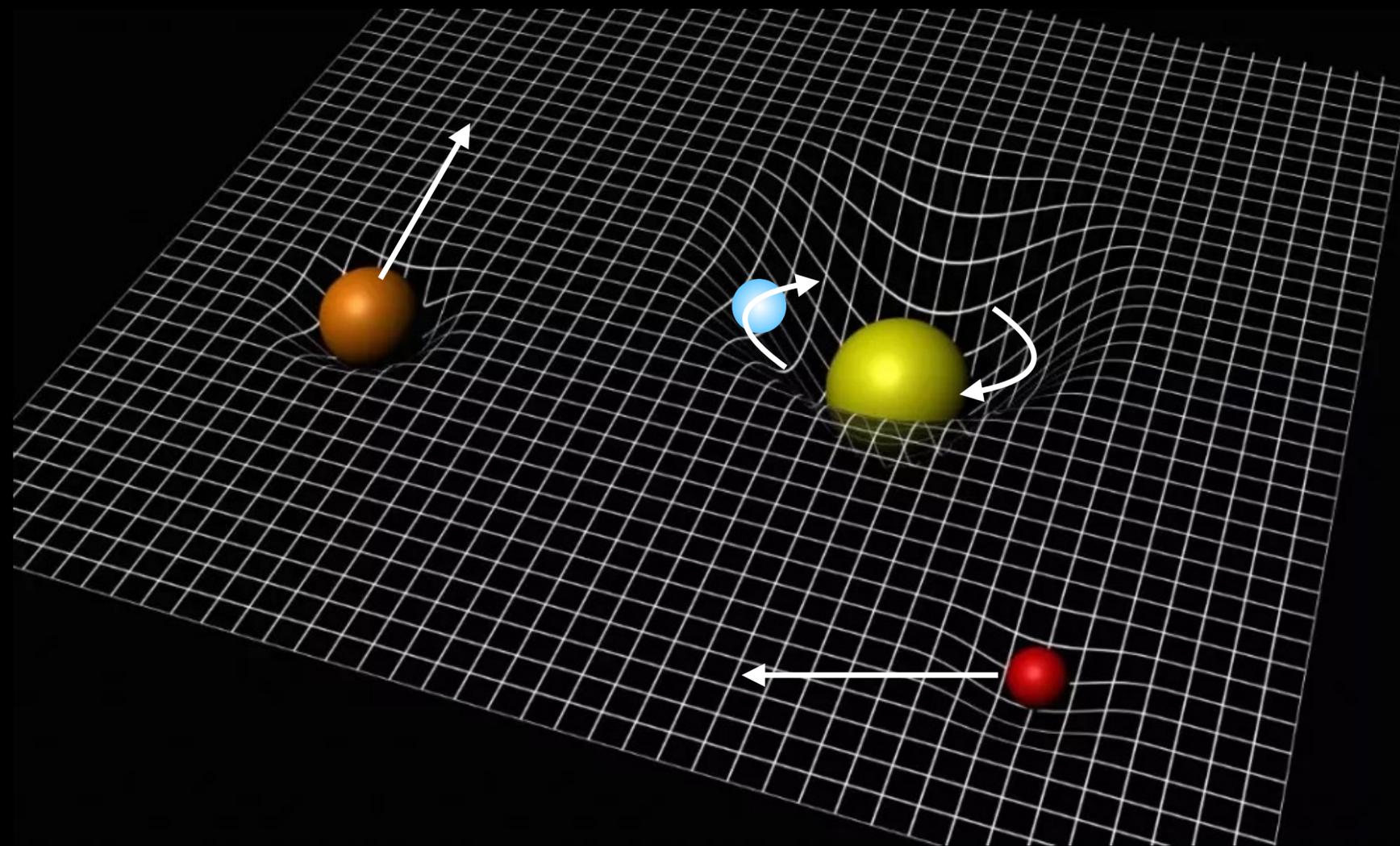
Les ondes gravitationnelles

Couple énergie - espace-temps

- Gravitation = déformation de l'espace-temps (champ fort/faible)



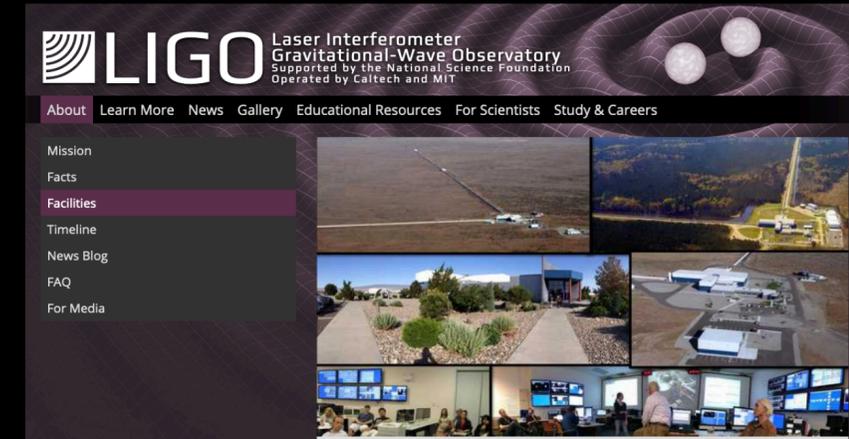
Albert Einstein en 1921



Les ondes gravitationnelles

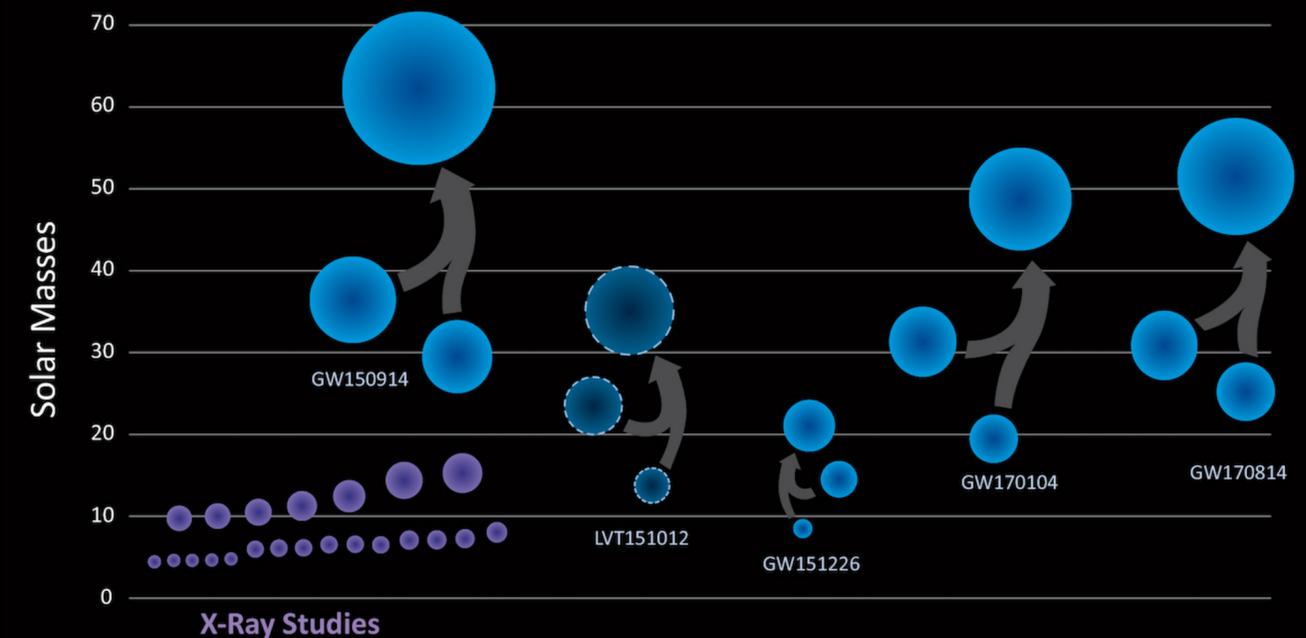
Fusion de deux corps massifs : régime "relativiste"

- Interféromètre *Ligo* : 1^{re} détection 09/2015
- Collaboration Ligo-Virgo : 1^{re} détection 14/08/2017
- Fusion de Trous Noirs (BH) : de 20-30 masses solaires
- Objets compacts : les étoiles à neutrons (nombreuses)



Deux antennes : Hanford, Livingston (USA)

Masses mesurées des Trous Noirs

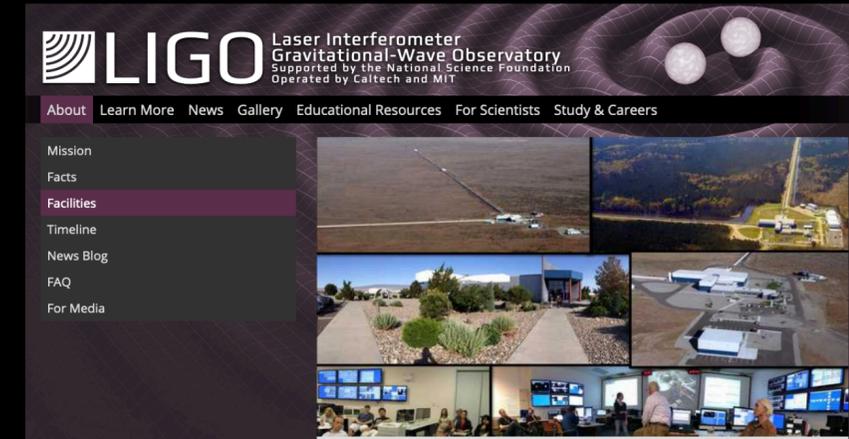


LIGO/VIRGO

Les ondes gravitationnelles

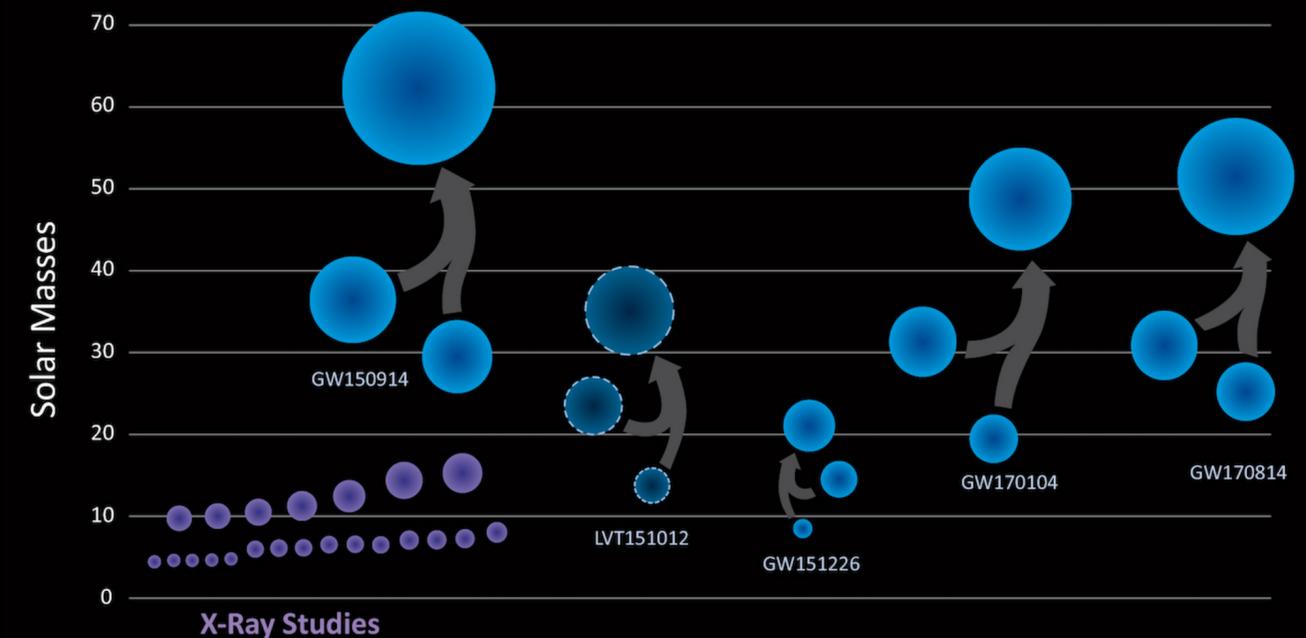
Fusion de deux corps massifs : régime "relativiste"

- Interféromètre *Ligo* : 1^{re} détection 09/2015
- Collaboration Ligo-Virgo : 1^{re} détection 14/08/2017
- Fusion de Trous Noirs (BH) : de 20-30 masses solaires
- Objets compacts : les étoiles à neutrons (nombreuses)



Deux antennes : Hanford, Livingston (USA)

Masses mesurées des Trous Noirs



LIGO/VIRGO

Principe d'interférométrie

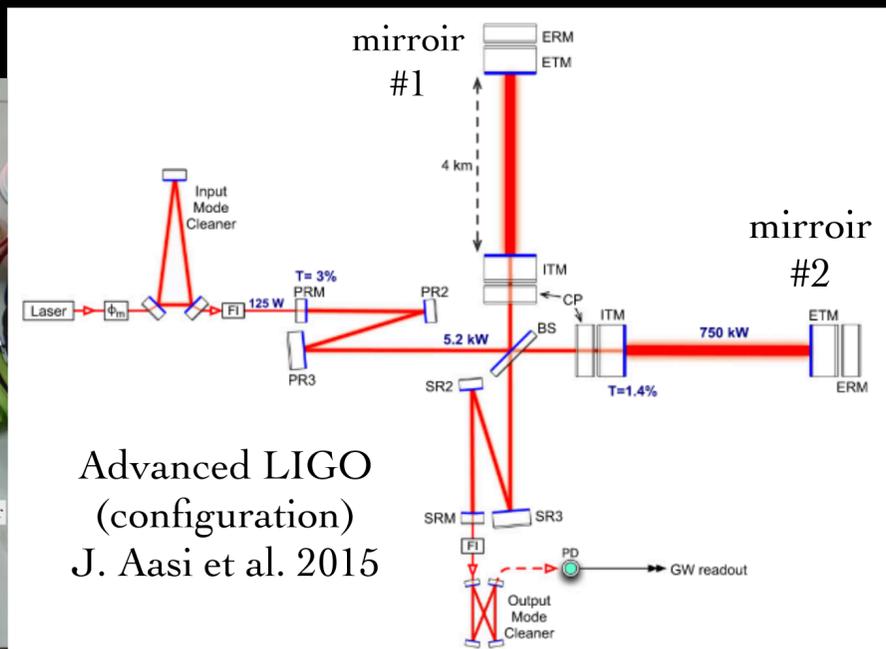
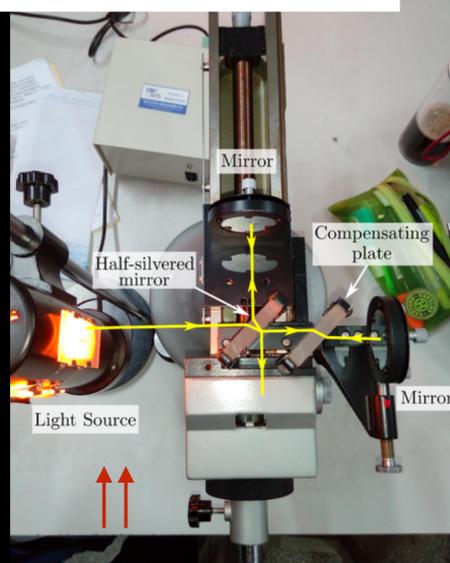
Il faut trois points pour définir un plan ..

- LIGO : deux antennes
- Orientation 3D : ajout de l'antenne Cascina (Pisa), Italie
- Depuis 2018 : LIGO/Virgo Consortium
<https://www.virgo-gw.eu/#home>



2 + 1 antennes = orientation du front d'onde

Michelson-Morley Interféromètre
 crédit: Wikimedia



LIGO's Extreme Engineering

LIGO exemplifies extreme engineering and technology. LIGO consists of:

- Two "blind" L-shaped detectors with 4 km long vacuum chambers...
- situated 3000 kilometers apart operating in unison...
- to measure a motion 10,000 times *smaller* than an atomic nucleus (the smallest measurement *ever* attempted by science)...
- caused by the most violent and cataclysmic events in the Universe...
- occurring tens-of-millions or billions of light years away!

A few of LIGO's most remarkable engineering facts are listed below.

Most sensitive: At its most sensitive state, LIGO will be able to detect a change in distance between its mirrors *1/10,000th the width of a proton!* This is equivalent to measuring the distance to the nearest star (some 4.2 **light years** away) to an accuracy smaller than the width of a human hair.

World's third-largest vacuum chambers: Encapsulating 10,000 m³ (350,000 ft³), the air removed from *each* of LIGO's vacuum chambers could inflate 2.5 million footballs, or 1.8 million soccer balls. LIGO's vacuum volume is the third largest in the world, surpassed only by the **Large Hadron Collider (LHC)** in Switzerland, and NASA's "Space Simulation Vacuum Chamber".

Ultra-high vacuum: LIGO's vacuum chambers may be the third largest of all vacuum chambers, but they are the second largest "Ultra High" vacuum chambers (the first being the LHC). The pressure inside LIGO's vacuum tubes is *one-trillionth* of an atmosphere (10⁻⁹ torr)--in other words, one trillionth the air pressure that you would encounter at sea level. It took 40 days to remove all 10,000 m³ (353,000 ft³) of air and other residual gases from each of LIGO's vacuum tubes. This process was only conducted once. LIGO's vacuum tubes have endured this pressure for over 20 years.

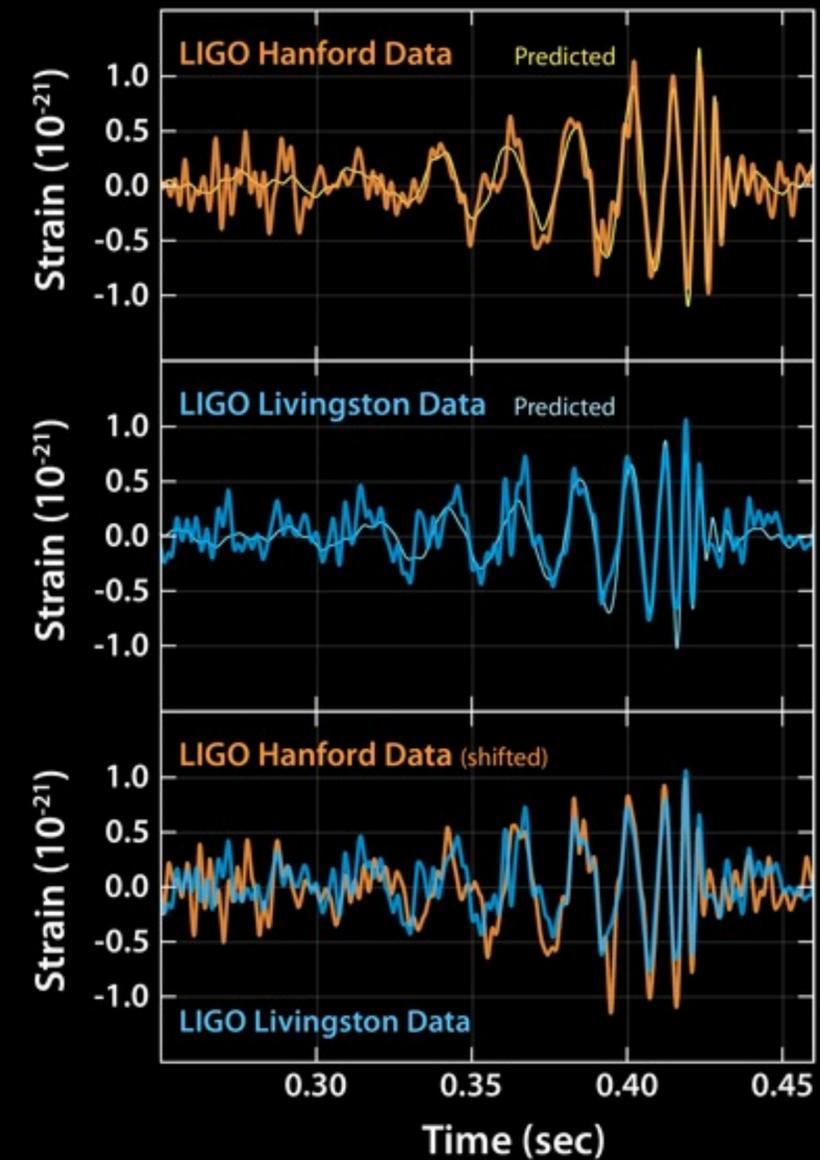
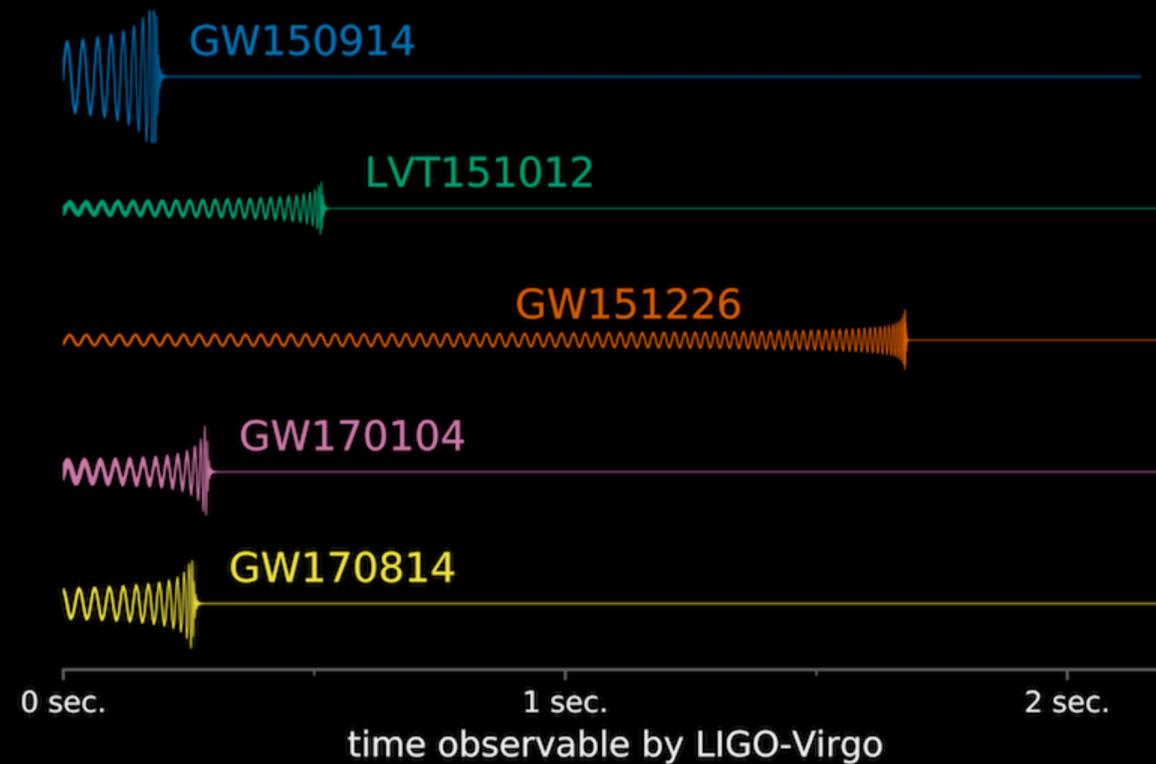
Air pressure on the vacuum tubes: 155-million kg (341-million pounds) of air press down on each 4 km length of vacuum tube. Remarkably, the steel tubes that hold all that air at bay are only 3 mm (0.12 inches) thick.

Curvature of the Earth: LIGO's arms are long enough that the curvature of the Earth was a factor in their construction. Over the 4 km length of each arm, the Earth curves away by nearly a meter! Precision concrete pouring of the path upon which the beam-tube is installed was required to counteract this curvature.

Les ondes gravitationnelles

Signaux détectés : exemples

- Interféromètre *Ligo* : 1^{re} détection 09/2015
- Collaboration Ligo-Virgo : 1^{re} détection 14/08/2017
- Fusion de Trous Noirs (BH) : de 20-30 masses solaires
- Objets compacts : les étoiles à neutrons (nombreuses)



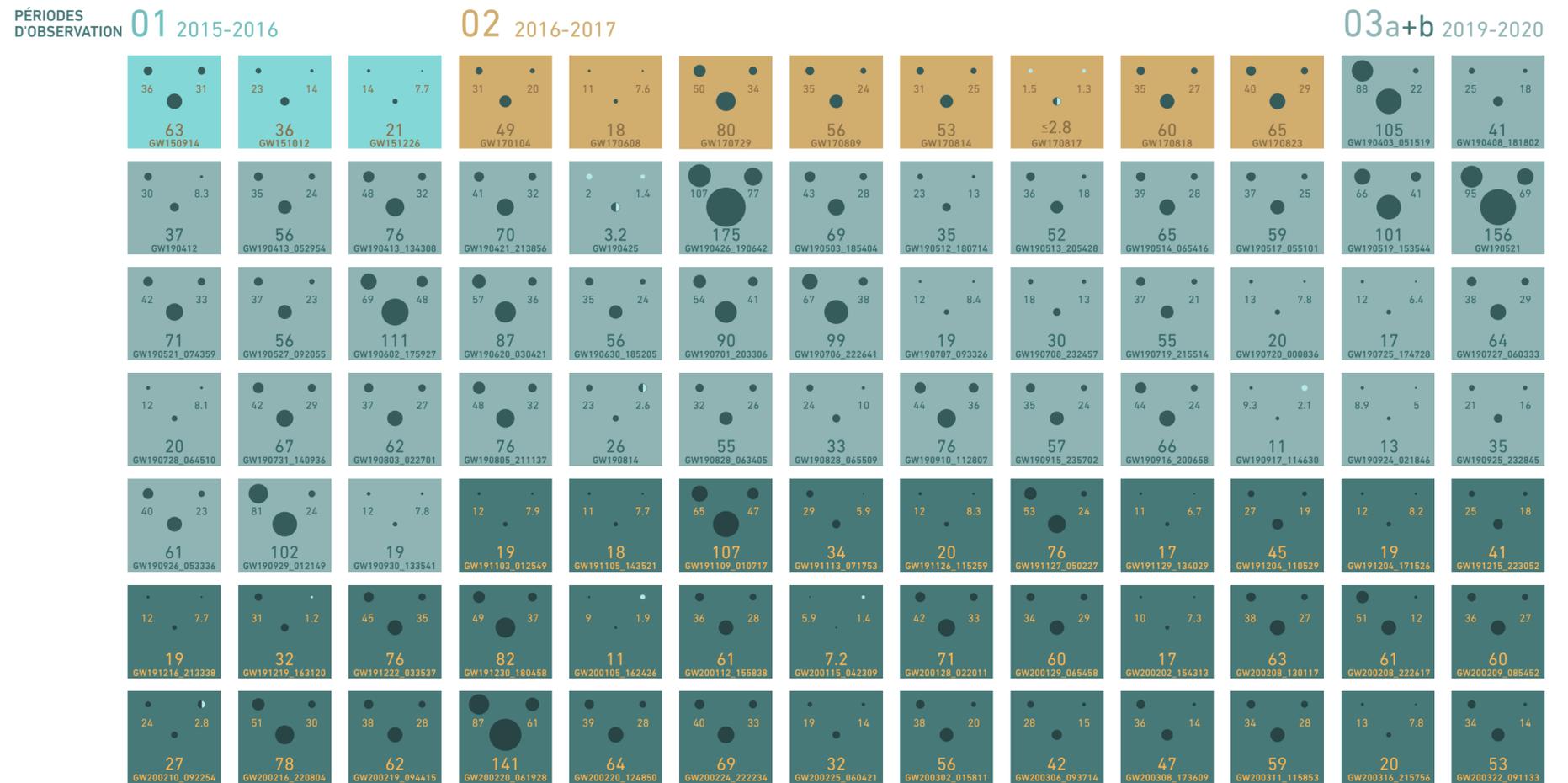
Les ondes gravitationnelles

bilan, novembre 2021 (site Virgo, Italie)

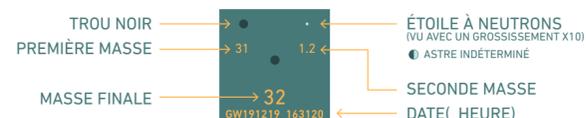
- La Table : chaque vignette est un événement
- les deux points dans la partie haute sont la masse + nature des progéniteurs
- Le cercle au centre : masse du trou noir final
- A venir : Ligo/Virgo + Kagra (Japon, fin 2022)

Virgo (en) : (constellation de la) Vierge

DÉTECTIONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES DEPUIS 2015



LÉGENDE



LES UNITÉS SONT EN MASSE SOLAIRE
1 MASSE SOLAIRE = 1.989×10^{30} KG

L'estimation des masses n'inclut pas les incertitudes de mesure. C'est pourquoi la masse finale peut parfois être supérieure à la somme des masses des astres qui ont fusionné. En réalité, la masse finale reste toujours inférieure à la somme des masses des astres qui ont fusionné.

Les événements recensés ici ont passé un des 2 critères de détection suivants : ils ont soit une probabilité de plus de 50% d'être d'origine astrophysique, soit un taux de fausse alarme inférieur à 1 tous les 3 ans.



Les ondes gravitationnelles

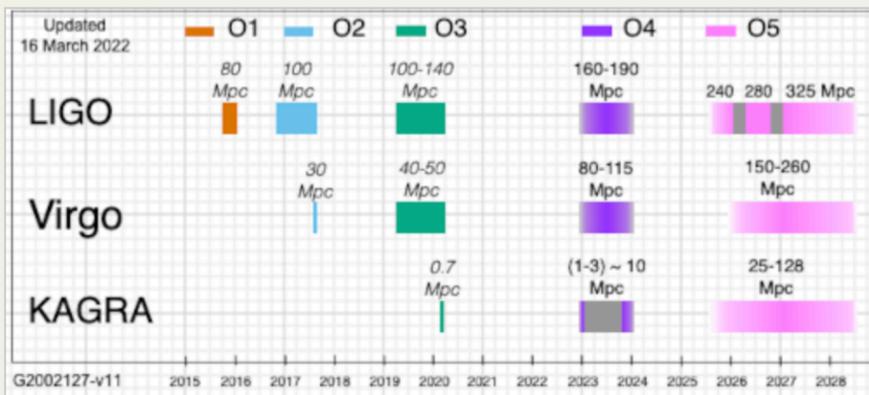
bilan, novembre 2021 (site Virgo, Italie)

DÉTECTIONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES DEPUIS 2015

PÉRIODES D'OBSERVATION: 01 2015-2016, 02 2016-2017, 03a+b 2019-2020

News

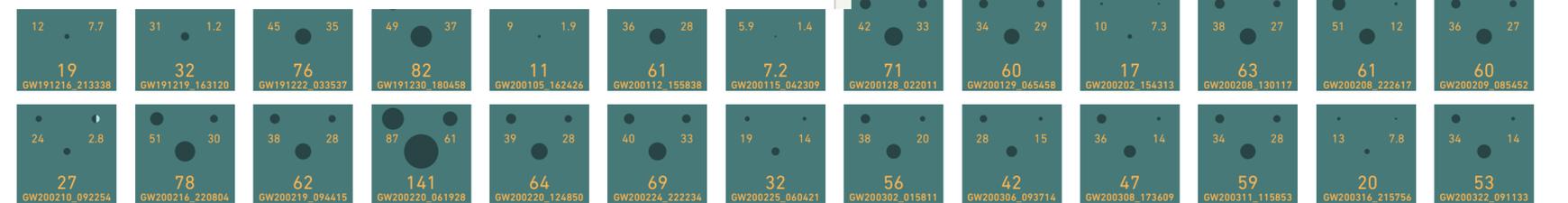
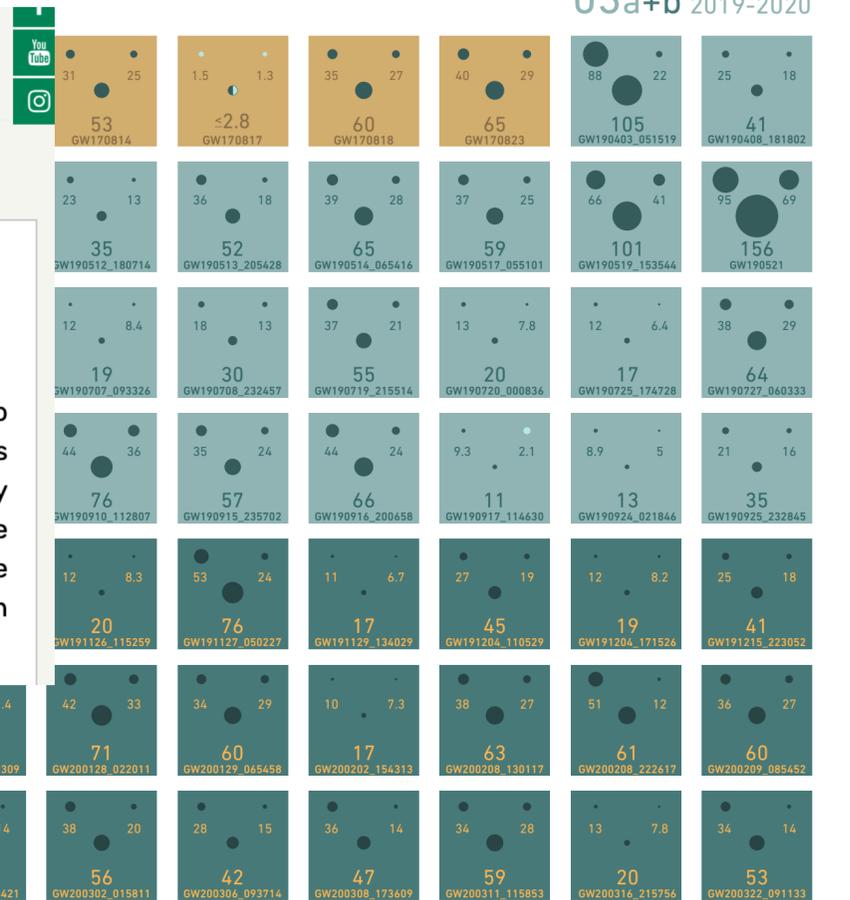
View the News Archive here.



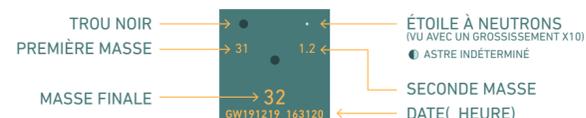
LIGO, VIRGO AND KAGRA OBSERVING RUN PLANS

15 March 2022 update; next update by 15 May 2022

LIGO, Virgo, and KAGRA are closely coordinating to start the O4 Observing run together. We plan to start the O4 Observing run in mid-December 2022, though we are still working through delays resulting from the pandemic. An Engineering Run is planned to start in mid-November; low-latency alerts for candidate events identified during engineering time may be released, both to exercise the system and to preserve the scientific value. We are planning a webinar for late April to update the community about the status of work on the detectors and to discuss the remaining challenges in our current schedule.



LÉGENDE



LES UNITÉS SONT EN MASSE SOLAIRE
1 MASSE SOLAIRE = 1.989×10^{30} KG

L'estimation des masses n'inclut pas les incertitudes de mesure. C'est pourquoi la masse finale peut parfois être supérieure à la somme des masses des astres qui ont fusionné. En réalité, la masse finale reste toujours inférieure à la somme des masses des astres qui ont fusionné.

Les événements recensés ici ont passé un des 2 critères de détection suivants : ils ont soit une probabilité de plus de 50% d'être d'origine astrophysique, soit un taux de fausse alarme inférieur à 1 tous les 3 ans.



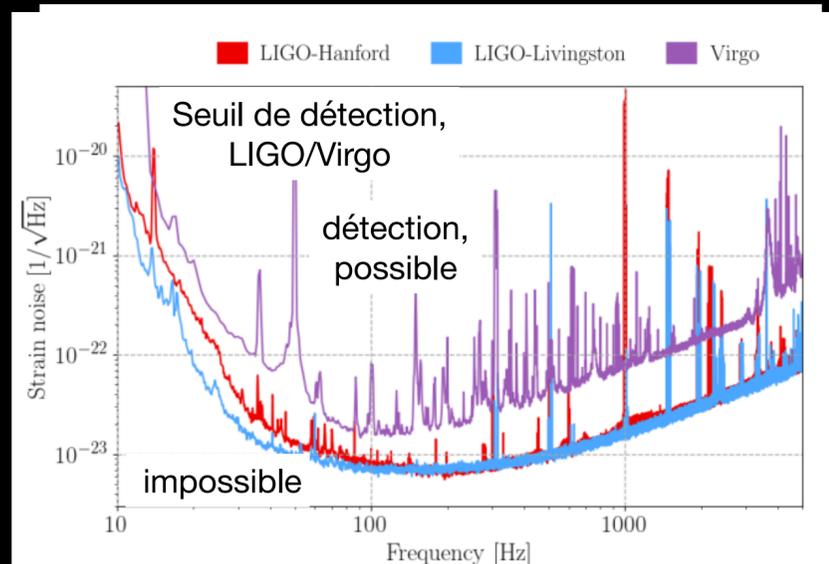
- A venir : Ligo/Virgo + Kagra (Japon, fin 2022)

Virgo (en) : (constellation de la) Vierge

L'avenir des ondes G

La détection d'onde à basses fréquences - eLISA

- basé dans l'espace
- Trous noirs massifs : horizon étendu, longue période orbitale (→ basse fréquence comparé @ Ligo/ Virgo)
- trois détecteurs : pointage
- mise en orbite : 2034



LISA
Laser Interferometer Space Antenna

LISA is a space-based gravitational wave observatory building on the success of LISA Pathfinder and LIGO. Led by ESA, the LISA mission is a collaboration of ESA, NASA, and an international consortium of scientists.

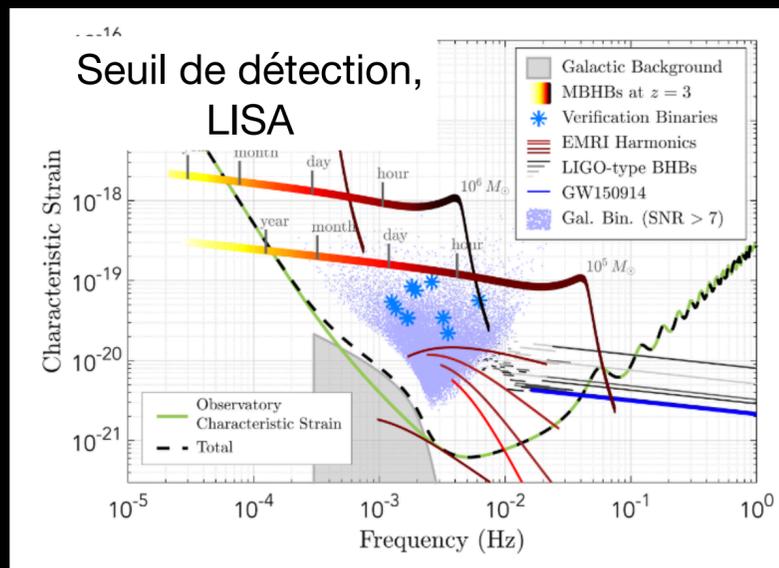
WHY LISA? WHAT is LISA? WHO'S Involved?

Announcements

L'avenir des ondes G

La détection d'onde à basses fréquences - eLISA

- basé dans l'espace
- Trous noirs massifs : horizon étendu, longue période orbitale (\rightarrow basse fréquence comparé @ Ligo/ Virgo)
- trois détecteurs : pointage
- mise en orbite : 2034



NASA ESA

LISA

Laser Interferometer Space Antenna

LISA is a space-based gravitational wave observatory building on the success of LISA Pathfinder and LIGO. Led by ESA, the LISA mission is a collaboration of ESA, NASA, and an international consortium of scientists.

WHY LISA? WHAT is LISA? WHO'S Involved?

Announcements

Ondes & Cosmos

Contenu, objectifs

- Cours 3 : Le cosmos et la gravitation
 - ✓ lumière comme porteuse d'information
 - ✓ équivalence mass-énergie, dualité ondes-corpules
 - ✓ couple matière-lumière : rayonnement électromagnétique, le fond diffus
 - ✓ l'Univers acoustique / l'acoustique d'un trou noir
 - ✓ Les ondes gravitationnelles : principes, recensement, l'avenir
- ✓ la dualité onde-particule
 - ✓ l'Univers primordiale, l'inflation ..

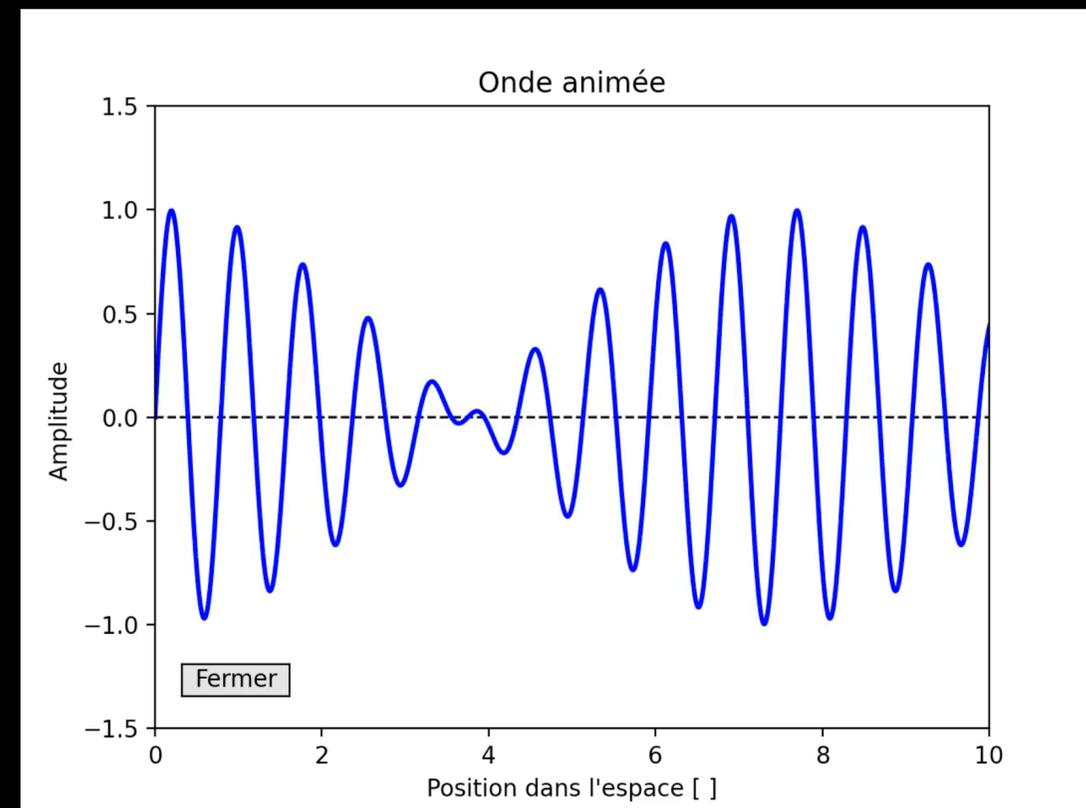
Paquet d'ondes, confinement du signal

Décrire un signal avec un continuum de modes

- Pour un spectre continu de longueur d'onde λ , il est possible d'exploiter une propriété des fonctions trigonométriques \sin , $\cos \theta$
- La somme de deux modes sinus de longueur d'onde λ , $\lambda + \Delta\lambda$ avec $\Delta\lambda$ petit devant λ , permet de voir apparaître un *ventre* dans le signal
- Le ventre se superpose aux signal et se déplace à la vitesse de groupe v_g

Rappel : $k = 2\pi / \lambda$

Exemple pour deux, .. modes
avec chaque fois $\Delta k/k = 1/10$



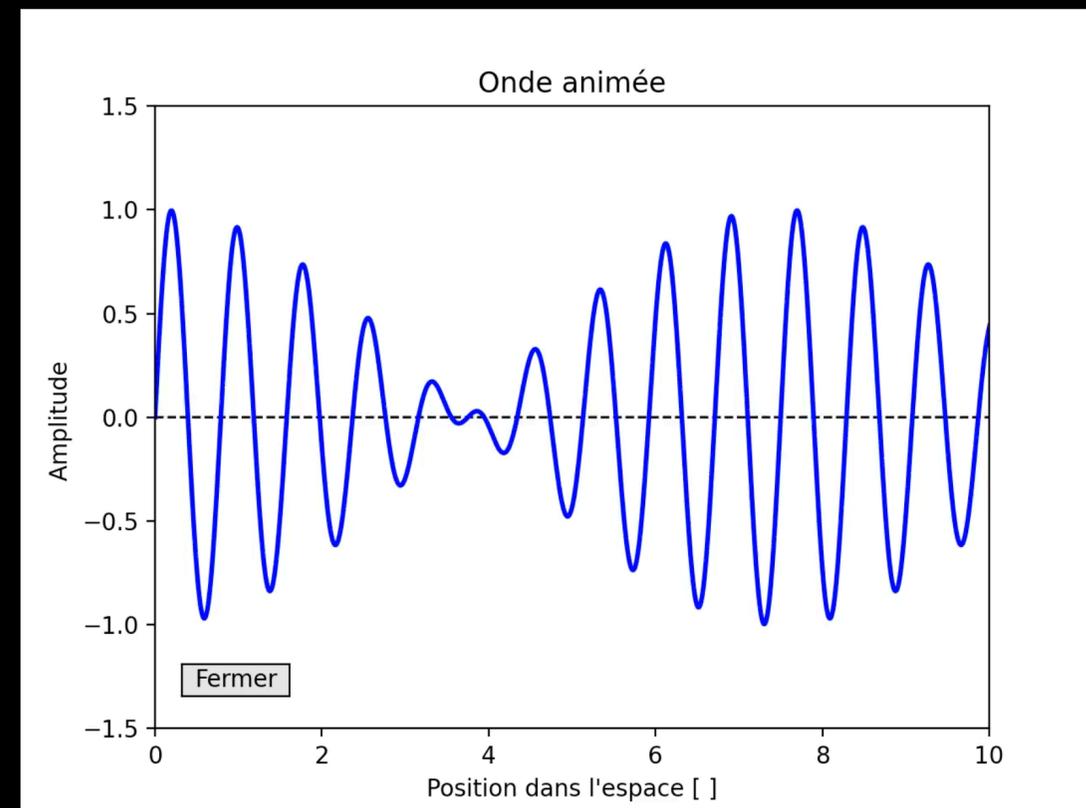
Paquet d'ondes, confinement du signal

Décrire un signal avec un continuum de modes

- Pour un spectre continu de longueur d'onde λ , il est possible d'exploiter une propriété des fonctions trigonométriques \sin , $\cos \theta$
- La somme de deux modes sinus de longueur d'onde λ , $\lambda + \Delta\lambda$ avec $\Delta\lambda$ petit devant λ , permet de voir apparaître un *ventre* dans le signal
- Le ventre se superpose aux signal et se déplace à la vitesse de groupe v_g

Rappel : $k = 2\pi / \lambda$

Exemple pour deux, .. modes
avec chaque fois $\Delta k/k = 1/10$



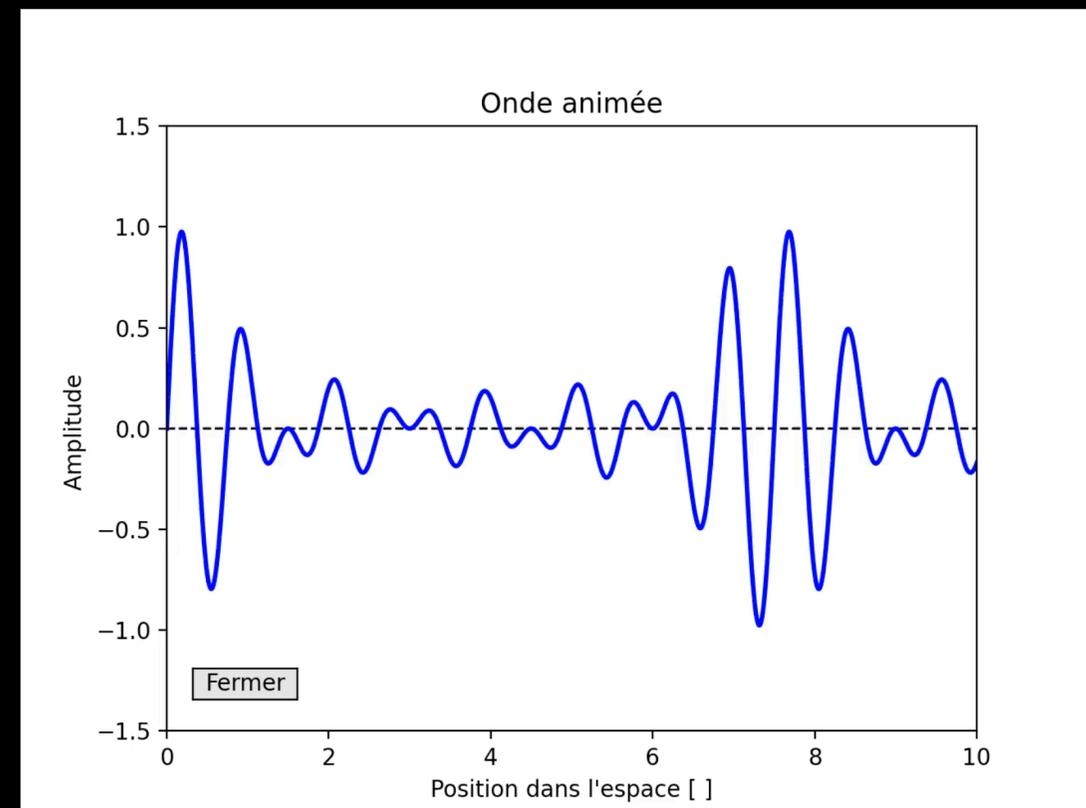
Paquet d'ondes, confinement du signal

Décrire un signal avec un continuum de modes

- Pour un spectre continu de longueur d'onde λ , il est possible d'exploiter une propriété des fonctions trigonométriques \sin , $\cos \theta$
- La somme de deux modes sinus de longueur d'onde λ , $\lambda + \Delta\lambda$ avec $\Delta\lambda$ petit devant λ , permet de voir apparaître un *ventre* dans le signal
- Le ventre se superpose aux signal et se déplace à la vitesse de groupe v_g

Rappel : $k = 2\pi / \lambda$

Exemple pour deux, .. modes
avec chaque fois $\Delta k/k = 1/10$



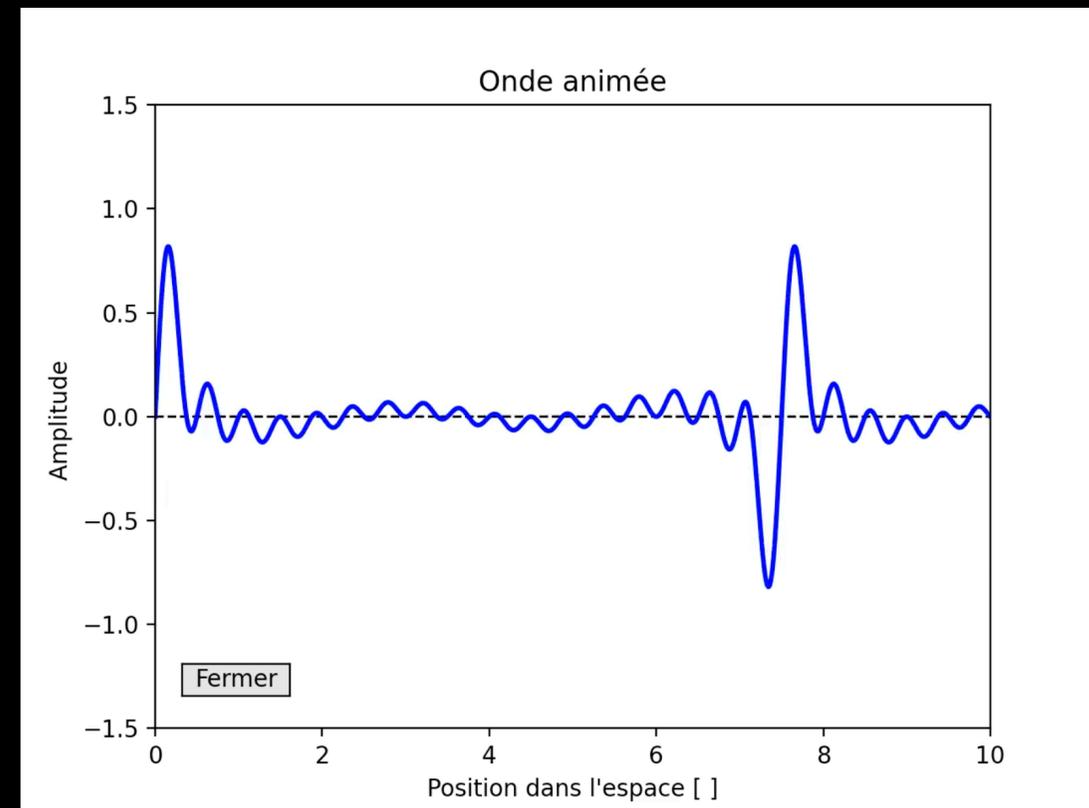
Paquet d'ondes, confinement du signal

Décrire un signal avec un continuum de modes

- Pour un spectre continu de longueur d'onde λ , il est possible d'exploiter une propriété des fonctions trigonométriques \sin , $\cos \theta$
- La somme de deux modes sinus de longueur d'onde λ , $\lambda + \Delta\lambda$ avec $\Delta\lambda$ petit devant λ , permet de voir apparaître un *ventre* dans le signal
- Le ventre se superpose aux signal et se déplace à la vitesse de groupe v_g

Rappel : $k = 2\pi / \lambda$

Exemple pour deux, .. modes
avec chaque fois $\Delta k/k = 1/10$

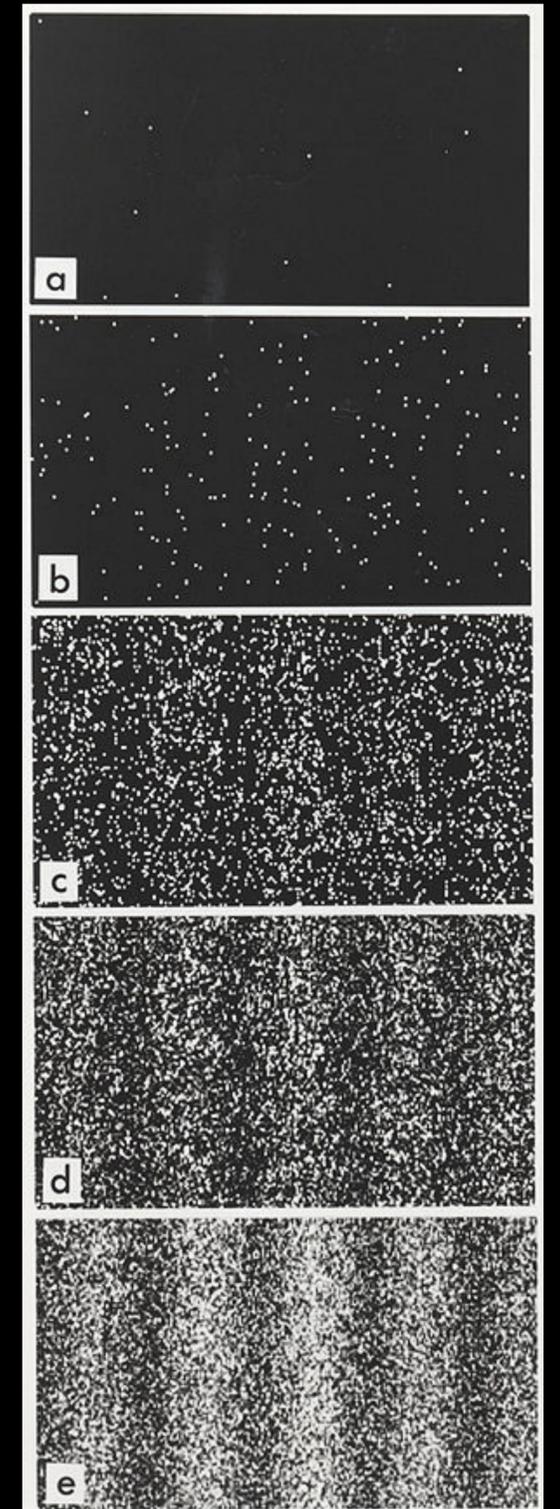


Paquet d'ondes, confinement du signal

Idée maitresse de la physique quantique

- Louis de Broglie (c. 1924) : On peut construire un paquet d'ondes d'amplitude non-nulle dans un éléments de volume de plus en plus petit
- C'est la dualité onde-particule : une particule de quantité de mouvement $p = mv$ se comporte comme un paquet d'ondes tel que $p = h / \lambda$ (quantités vectorielles : $m =$ masse, $v =$ vitesse ; $h =$ constante de Planck)
- Il faut pour cela étendre la couverture dans l'espace de Fourier à $k: \pm \infty$
- Interprétation probabiliste : fonction d'onde et équation de Schrödinger
 - ▶ la probabilité est décrite par une *onde* qui occupe tout l'espace
 - ▶ la *mesure* de la position révèle une particule, un point-masse
 - ▶ C'est la *décohérence* de la fonction d'onde

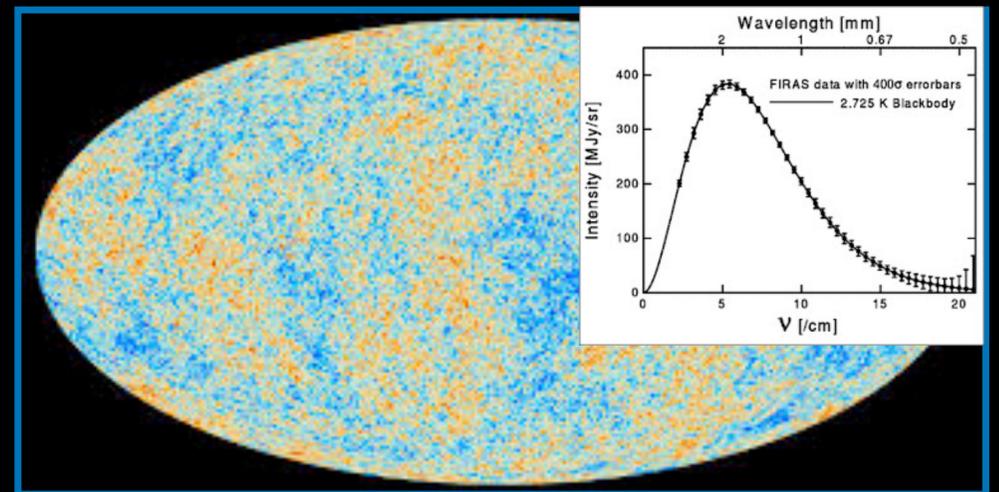
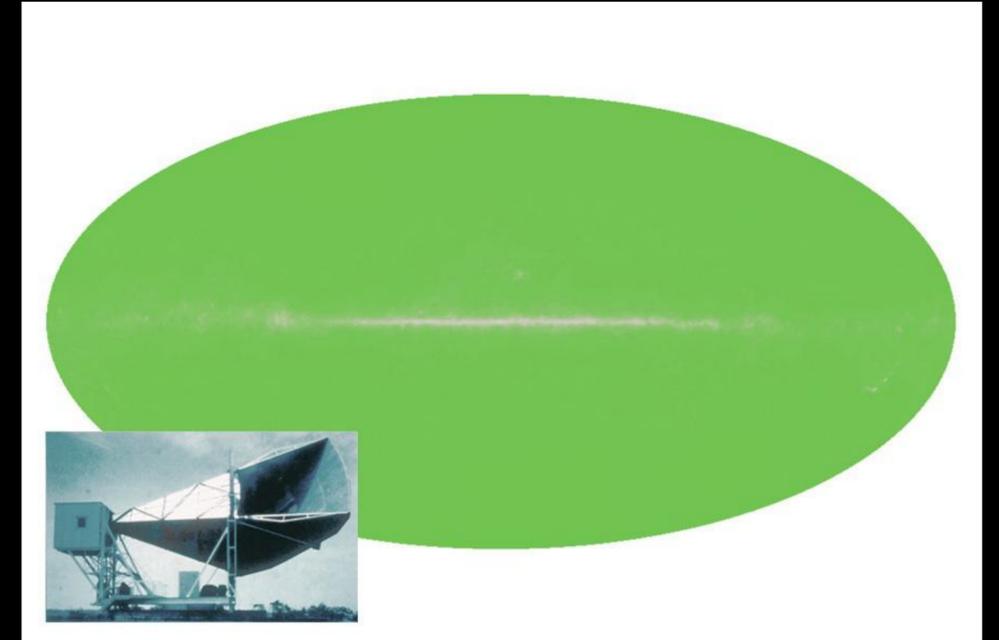
Expérience des fentes de Young avec des électrons libres. Les électrons sont injectés un à un et la mesure prise au seul détecteur. Crédits : Wiki



Paquet d'ondes, confinement du signal

Particules : interférence, chevauchement

- Si une particule peut être décrite comme une onde ..
- .. alors deux particules distinctes doivent être séparées dans l'espace d'une distance $\sim \lambda$ (sinon, chevauchement des ondes et interférences mutuelles)
- Que se passe-t-il alors au moment du Big Bang ??
- Problème plus simple : pourquoi le CMB est-il uniforme ?
- Situation ouvre la porte à un état intriqué pour l'ensemble des particules / ondes de l'Univers .. !! (speculatif)



Le rayonnement diffus (CMB) : tel que détecté par Penzias & Wilson en 1965 (en haut) ; en par la sonde Planck en 2013+ (fluctuations autour d'une valeur moyenne à 2.73 °K)

Petite bifurcation : état intriqué

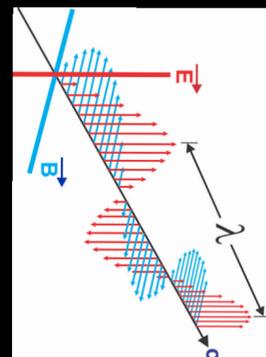
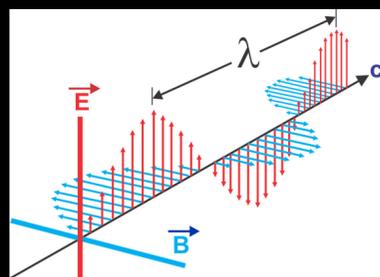
La mécanique quantique prédit des corrélations entre deux particules que ne s'explique pas par l'échange d'information

EPR : Einstein, Podolski & Rosen

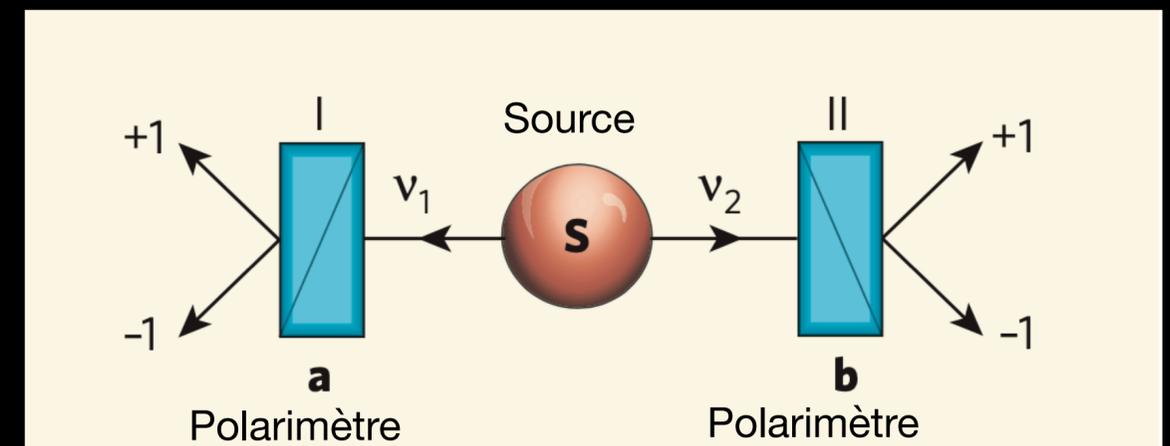
- Paradoxe EPR (1935): les états de polarisation sont complémentaires, connaître l'état d'un photon = connaître l'état de l'autre photon (ou électron, ..)
 - si l'expérience confirme cela, alors l'interprétation d'onde de "probabilité" (particules ou polarisation d'une onde) est fausse
 - idée de variables cachées, inconnues car pas d'effet de causalité ($v < c$)
- Physique quantique : fonction d'onde n'est plus cohérente qu'au moment de la mesure seulement, des corrélations persistent

Deux états de polarisation linéaires (Stokes S)

+1 (vertical)



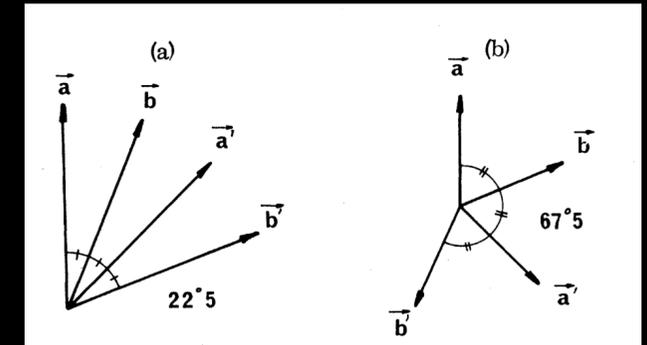
→
-1 (horizontal)



Petite bifurcation : état intriqué

La mécanique quantique prédit des corrélations entre deux particules que ne s'explique pas par l'échange d'information

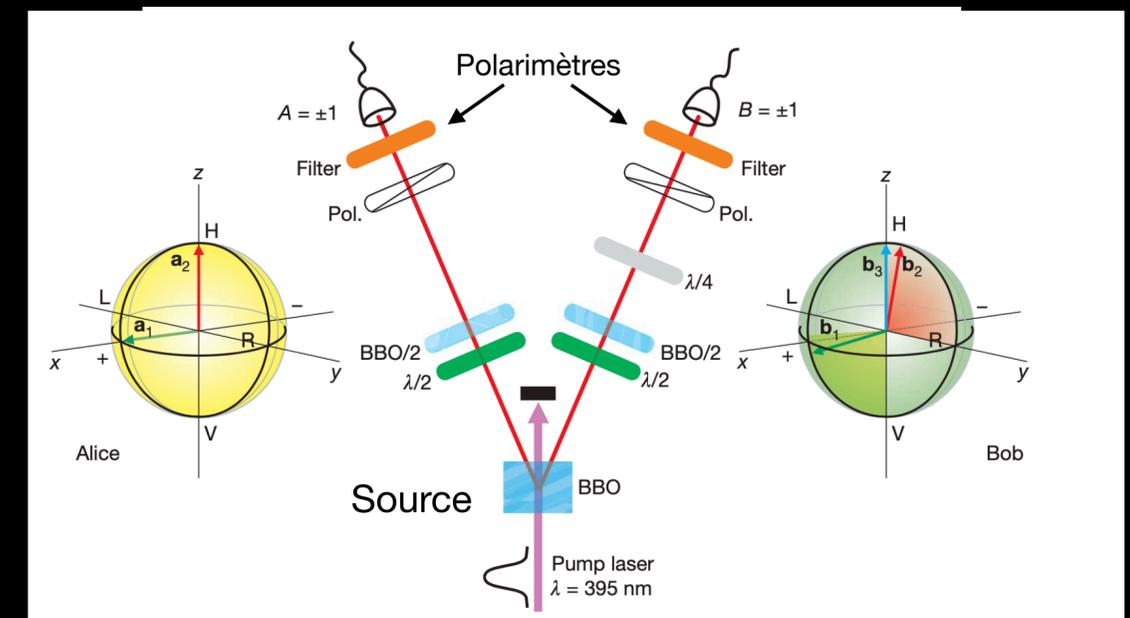
A. Aspect et al. 1982



$$E(\vec{a}, \vec{b}) = P_{++}(\vec{a}, \vec{b}) + P_{--}(\vec{a}, \vec{b}) - P_{+-}(\vec{a}, \vec{b}) - P_{-+}(\vec{a}, \vec{b})$$

$$S = E(\vec{a}, \vec{b}) - E(\vec{a}, \vec{b}') + E(\vec{a}', \vec{b}) + E(\vec{a}', \vec{b}')$$

- Inégalités de Bell : si les corrélations (E) entre points de mesures sont dues à paramètres inconnus alors : $-2 \leq S \leq 2$
- On trouve des configurations d'instruments (filtres, ..) pour lesquelles $S > 2$
- Inégalités de Leggett : $S_{NLHV} < 4 - 4/\pi \sin(\Phi/2)$



Un DIY pour construire un polarimètre :

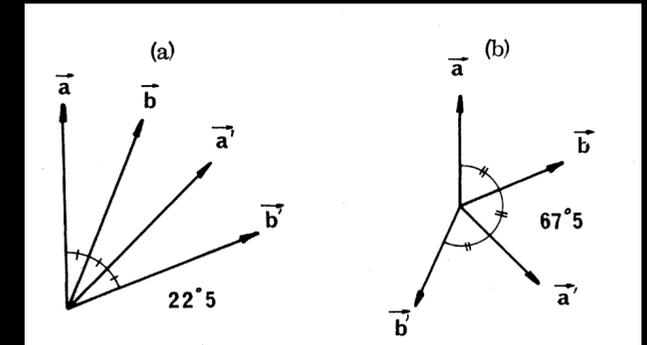


Crédits : Golbacher et al. 2007, Nature

Petite bifurcation : état intriqué

La mécanique quantique prédit des corrélations entre deux particules que ne s'explique pas par l'échange d'information

A. Aspect et al. 1982

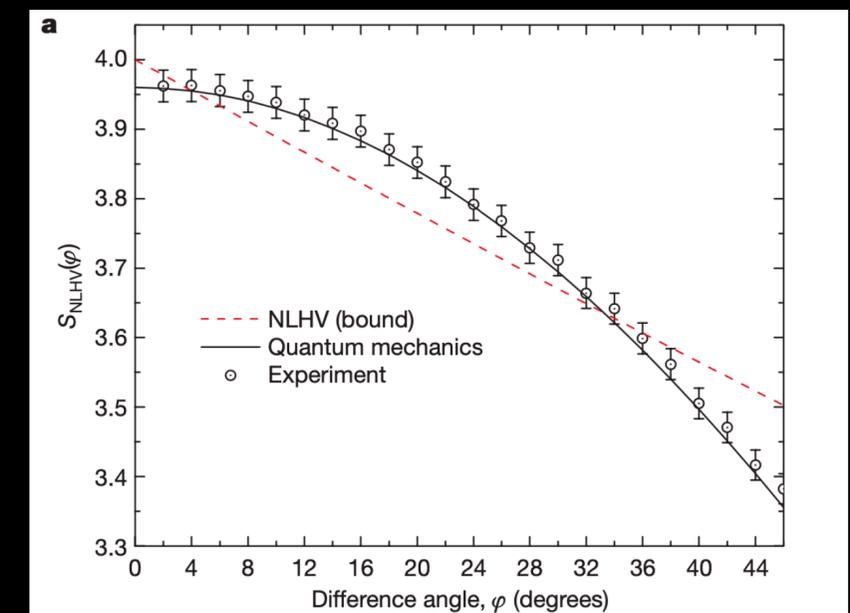


- Inégalités de Bell : si les corrélations (E) entre points de mesures sont dues à paramètres inconnus alors : $-2 \leq S \leq 2$

$$E(\vec{a}, \vec{b}) = P_{++}(\vec{a}, \vec{b}) + P_{--}(\vec{a}, \vec{b}) - P_{+-}(\vec{a}, \vec{b}) - P_{-+}(\vec{a}, \vec{b})$$

$$S = E(\vec{a}, \vec{b}) - E(\vec{a}, \vec{b}') + E(\vec{a}', \vec{b}) + E(\vec{a}', \vec{b}')$$

- On trouve des configurations d'instruments (filtres, ..) pour lesquelles $S > 2$
- Inégalités de Leggett : $S_{NLHV} < 4 - 4/\pi \sin(\Phi/2)$



Un DIY pour construire un polarimètre :

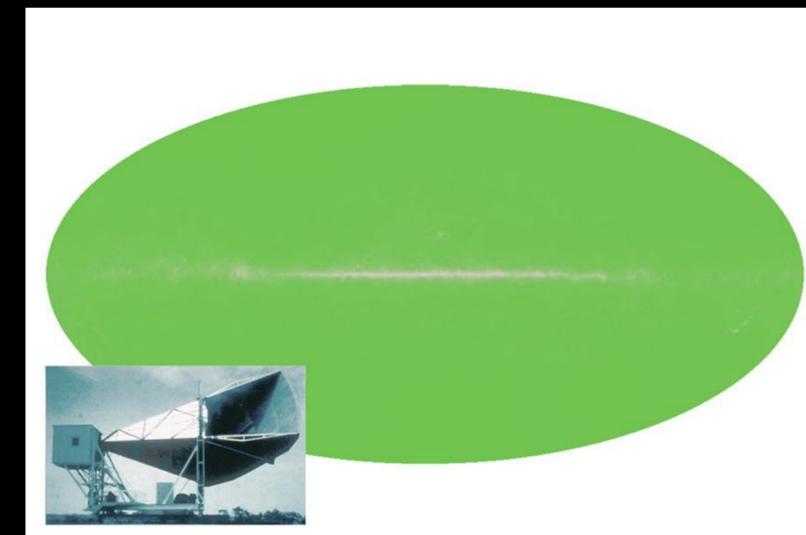


Crédits : Golbacher et al. 2007, Nature

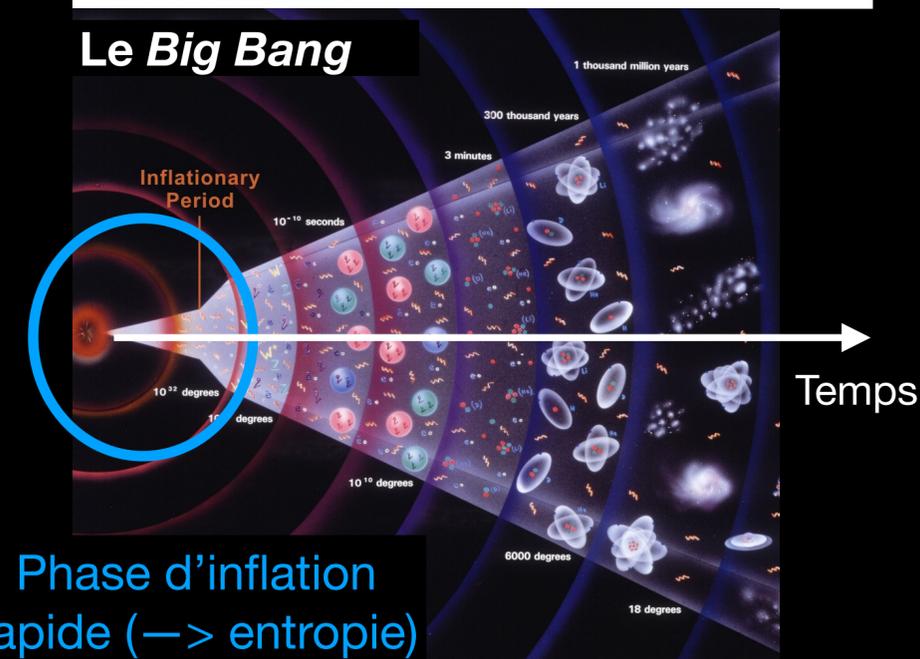
L'homogénéité du CMB sans causalité

Il faut générer de l'entropie pour T uniforme

- Transition de phase hypothétique (champ scalaire inconnu)
- Petit volume amplifié exponentiellement pendant un temps de l'ordre de $\sim 10^{-34}$ secondes (temps de Planck)
- Croissance \rightarrow explosion, création de matière sous forme de *plasma*
- L'entropie du système augmente avec le volume du plasma
- Haut niveau d'entropie = état macroscopie à T uniforme
- Scénario dit ***inflationniste*** pour la formation du cosmos, une onde de choc (A. Guth 1980)



Le **Big Bang**



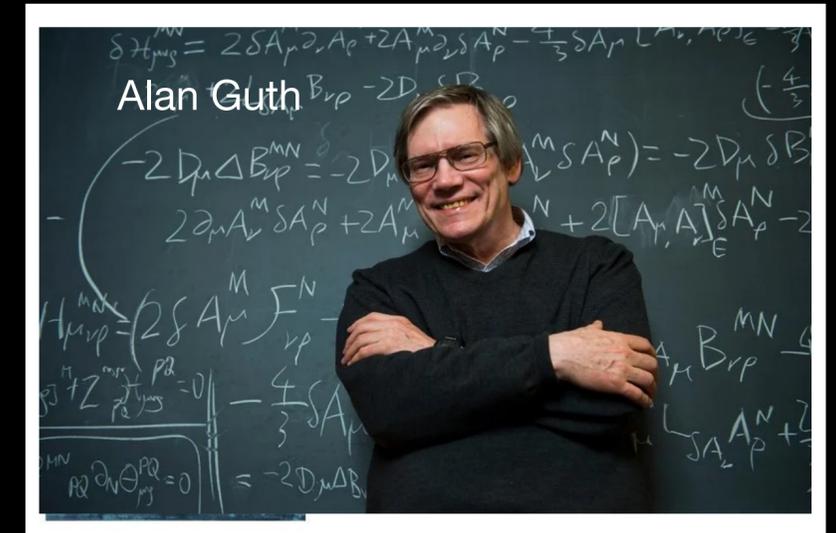
Phase d'inflation rapide (\rightarrow entropie)

Le rayonnement diffus (CMB) : tel que détecté par Penzias & Wilson en 1965 (en haut) ; schéma de l'évolution de l'Univers avec une phase d'expansion rapide : l'inflation (en bleu)

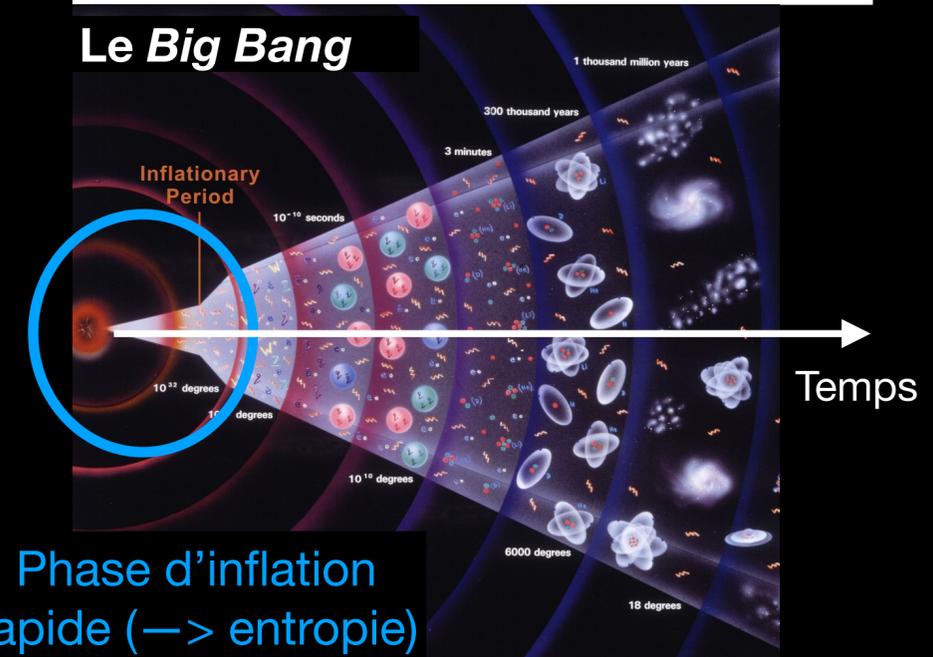
L'homogénéité du CMB sans causalité

Il faut générer de l'entropie pour T uniforme

- Transition de phase hypothétique (champ scalaire inconnu)
- Petit volume amplifié exponentiellement pendant un temps de l'ordre de $\sim 10^{-34}$ secondes (temps de Planck)
- Croissance \rightarrow explosion, création de matière sous forme de *plasma*
- L'entropie du système augmente avec le volume du plasma
- Haut niveau d'entropie = état macroscopie à T uniforme
- Scénario dit ***inflationniste*** pour la formation du cosmos, une onde de choc (A. Guth 1980)

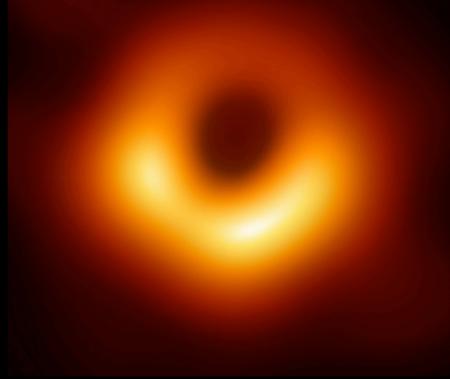


Le **Big Bang**



Phase d'inflation rapide (\rightarrow entropie)

Le rayonnement diffus (CMB) : tel que détecté par Penzias & Wilson en 1965 (en haut) ; schéma de l'évolution de l'Univers avec une phase d'expansion rapide : l'inflation (en bleu)



Ondes & Cosmos

Récapitulatif

- Cours 1 : Les ondes c'est quoi ? (26 avril)
 - ✓ Définition et exemples : mouvement périodique, explosion (choc) ..
 - ✓ Onde comme perturbation d'un milieu à l'équilibre, principe de Fourier
 - ✓ Ondes mécaniques (séisme, ..)
 - ✓ La lumière (électromagnétisme), interférences (franges), expérience de Young
 - ✓ Interférométrie : application à l'astronomie
- Cours 2 : Les ondes et la thermodynamique (3 mai)
 - ✓ Retour sur l'interférométrie, les grands télescopes
 - ✓ M87 : le trou noir central, second regard
 - ✓ Le couple rayonnement-matière
 - ✓ Le rayonnement du corps noir, équilibre thermodynamique parfait
 - ✓ Etre invisible : une question d'équilibre ...
 - ✓ Le cosmos vu comme un four "parfait"
- Cours 3 : Le cosmos et la gravitation (10 mai)
 - ✓ Définitions, revue de quelques concepts clés de la relativité :
 - lumière comme porteuse d'information
 - équivalence mass-énergie, dualité onde-corpuscules
 - couple matière-lumière : rayonnement électromagnétique, le fond diffus
 - l'Univers acoustique / l'acoustique d'un trou noir
 - ✓ Les ondes gravitationnelles : principes, recensement, l'avenir
 - ✓ Ouverture : onde-particule, chevauchement et état intriqué, Univers inflationniste