

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



Christian Boily / Observatoire de Strasbourg / Amphi Fresnel

Ondes & Cosmos

Contenu, objectifs



Une locomotive à vapeur (mon rêve)

- Cours 2 : Les ondes et la thermodynamique
 - ✓ Revenir sur l'expérience de Young et l'interférométrie
 - Interférométrie et observations astronomiques
 - Résoudre la surface (= horizon) du trou noir de la galaxie M87
 - ✓ Définitions, revue de quelques concepts clés de la thermodynamique
 - le rayonnement électromagnétique comme porteur d'énergie E, B
 - bain de chaleur, ~~statistique de Boltzmann~~, entropie
 - ✓ Le rayonnement du corps noir, thermodynamique à l'équilibre
 - ✓ Etre invisible : une question d'équilibre ou .. d'imagination ?

Interférences

Expérience de T. Young

- Une perturbation (= source) ponctuelle : front d'onde symétrique
- Double perturbation (= 2 sources) : front d'onde intègre des franges



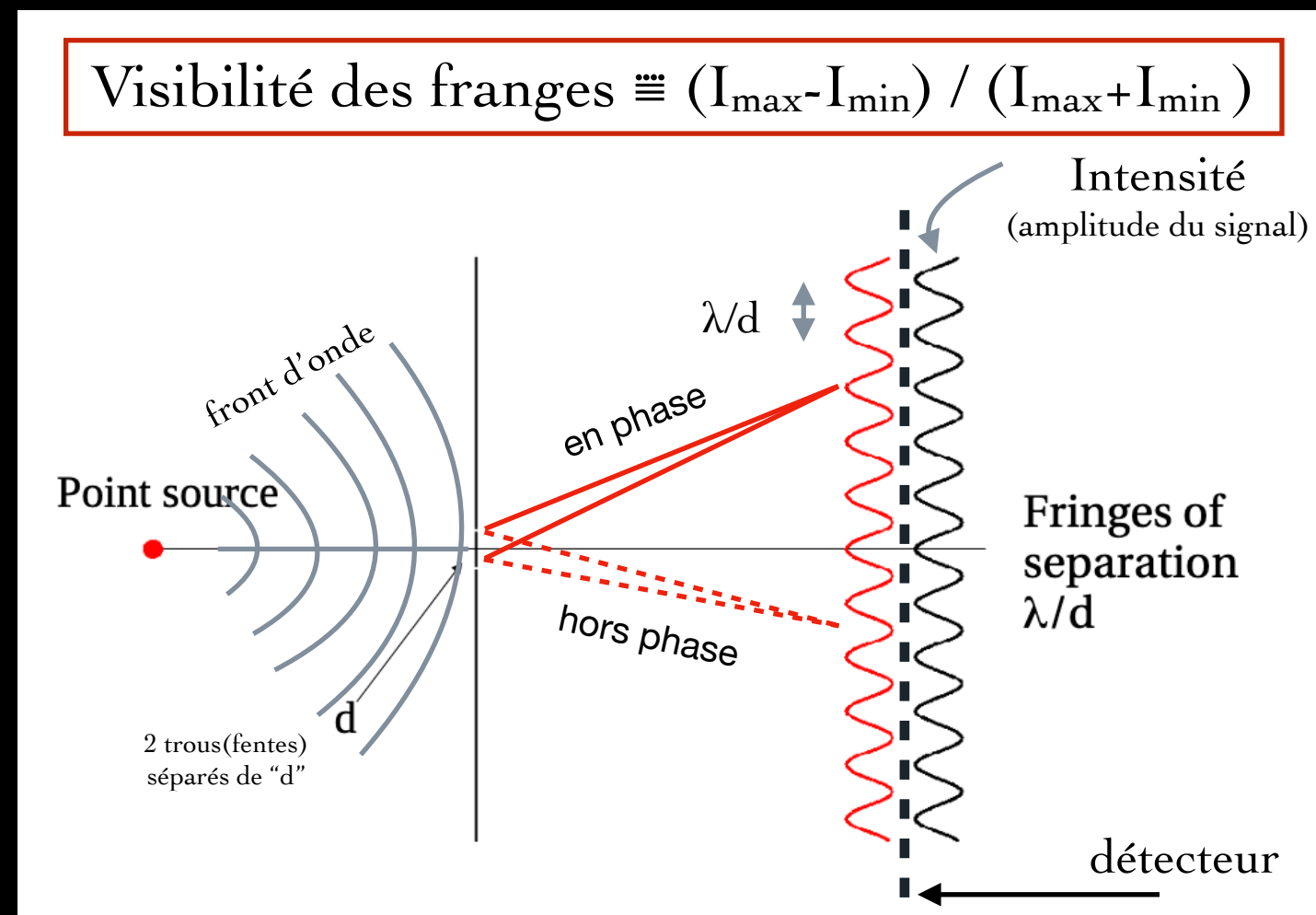
Question : comment contrôler la phase des deux signaux ? Idée de Young : faire passer l'onde (de lumière) par deux fentes (trous) et mesurer l'intensité sur un plan étendu.

Interférences appliquées à l'astronomie

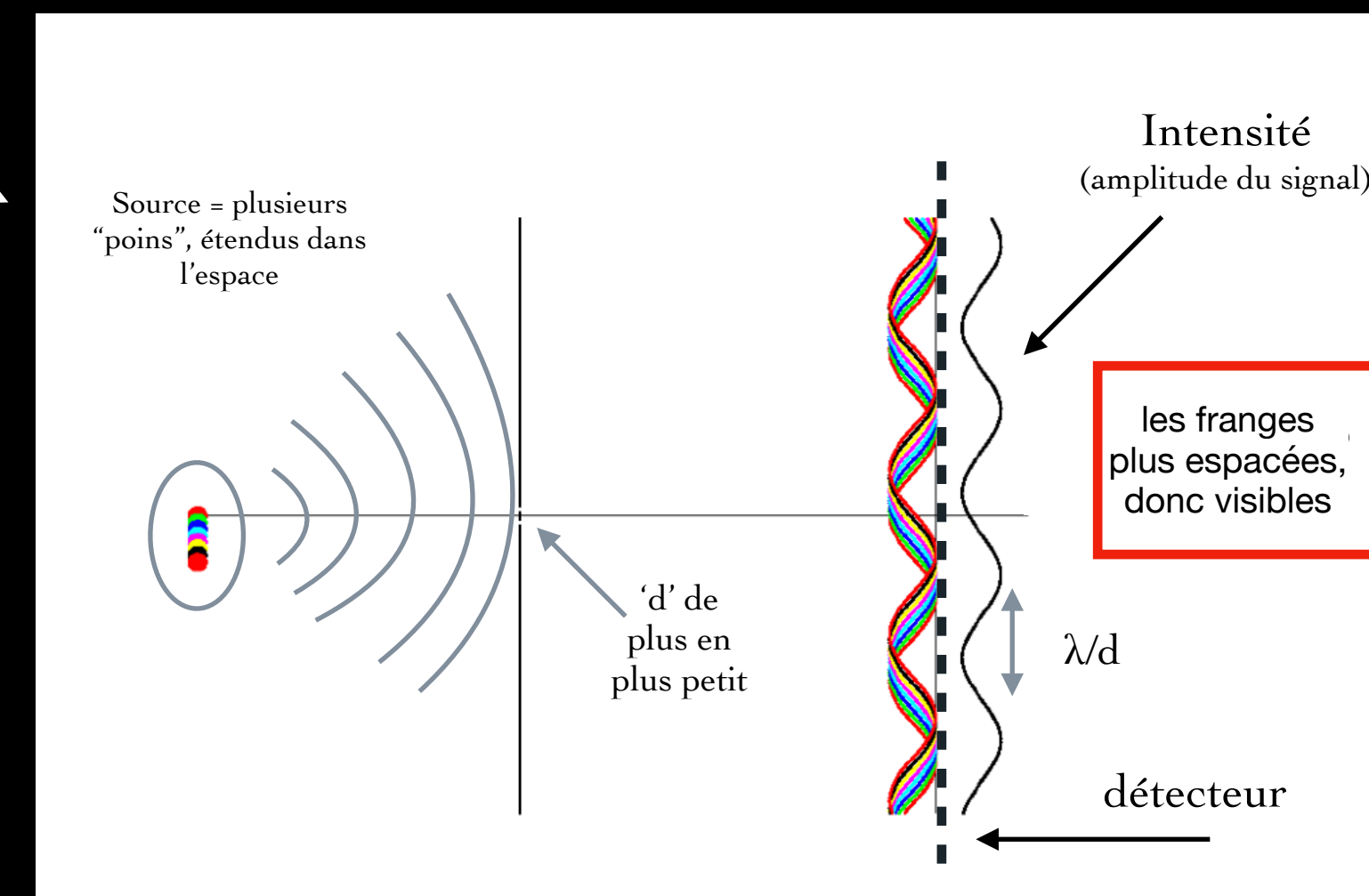
Onde électromagnétique & interférométrie

- Les franges : visibilité nulle pour une source étendue ($d = \text{constant}$)
- Réduire d : cela permet de faire apparaître les franges à nouveau (visibilité grande si $d \ll 1$)
- Analogie avec la transformée de Fourier (le spectre de)

Source compacte, séparation des fentes $d \gg 1$



Même dispositif, mais source étendue, et $d \ll 1$



- Analogie avec la transformée de Fourier (le spectre de)
- Petites structures dans l'espace (x) requiert / permet une grande valeur de séparation d (ou nombre d'onde, k)
- Grandes structures (étendues) dans l'espace (x) requiert une toute petite valeur de d (ou nombre d'onde, k)

Interférences appliquées à l'astronomie

Onde électromagnétique & interférométrie

- Analogie avec la transformée de Fourier (le spectre de)
- Petites structures dans l'espace (x) requiert / permet une grande valeur de séparation d (ou nombre d'onde, k)
- Grandes structures (étendues) dans l'espace (x) requiert une toute petite valeur de d (ou nombre d'onde, k)

The same,
with maths

for a multiplying
interferometer i.e.

$$R = \langle E_1^* E_2 \rangle = E_1 E_2 e^{ikx}$$

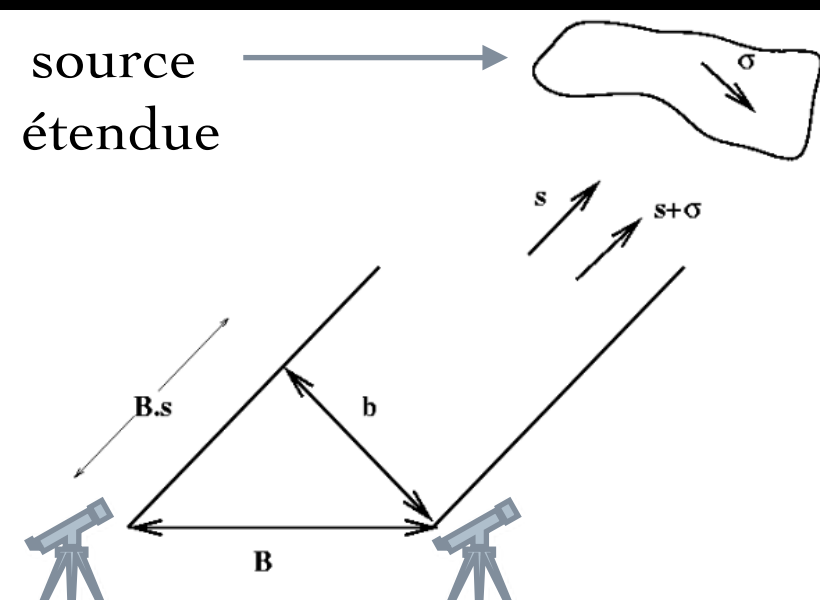
R = visibilité des franges

$$dR = dI(\sigma) e^{ik\mathbf{B} \cdot (\mathbf{s} + \sigma)}, \text{ but } \mathbf{B} \cdot \sigma = \mathbf{b} \cdot \sigma$$

$$R = e^{ik\mathbf{B} \cdot \mathbf{s}} \int I(\sigma) e^{ik\mathbf{b} \cdot \sigma} d\sigma$$

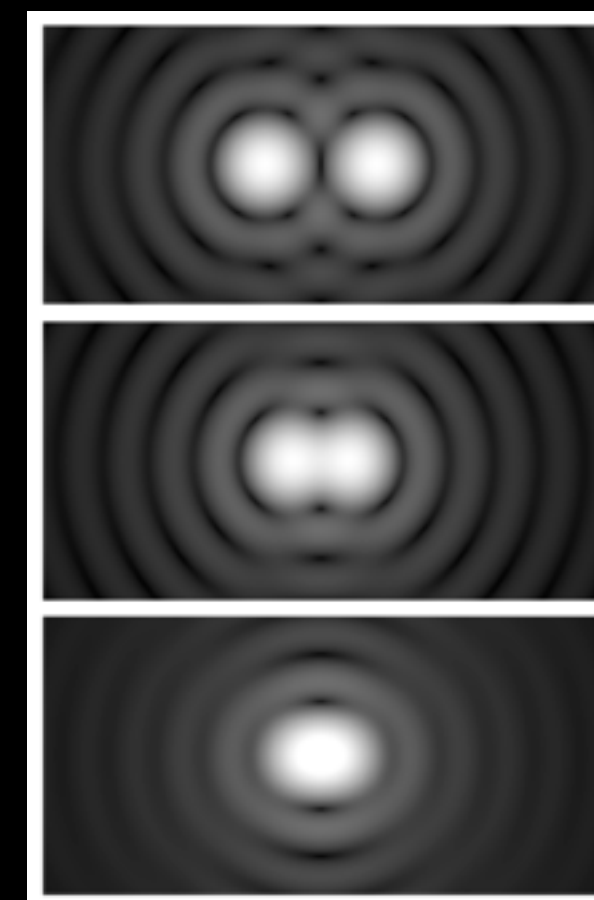
Can write $\sigma = \sigma(x, y)$, $\mathbf{b} = \mathbf{b}(u, v)$

$$R(u, v) = e^{ik\mathbf{B} \cdot \mathbf{s}} \int I(x, y) e^{2\pi i(ux + vy)} dx dy$$



- Spectre électromagnétique : longueur d'onde λ couvre toutes les valeurs $0 \rightarrow \infty$
- Résolution angulaire $\theta_R \approx 6/5 \lambda / D$ (D = diamètre)
- Chaîne de télescopes : $D \rightarrow L$ (séparation linéaire se substitue au diamètre D)
 - combiner les signaux, synchronisation du front d'onde
 - plus la longueur d'onde est petite, plus cela devient difficile (haute précision)

Source : Wiki



Interférences appliquées à l'astronomie

Onde électromagnétique & interférométrie

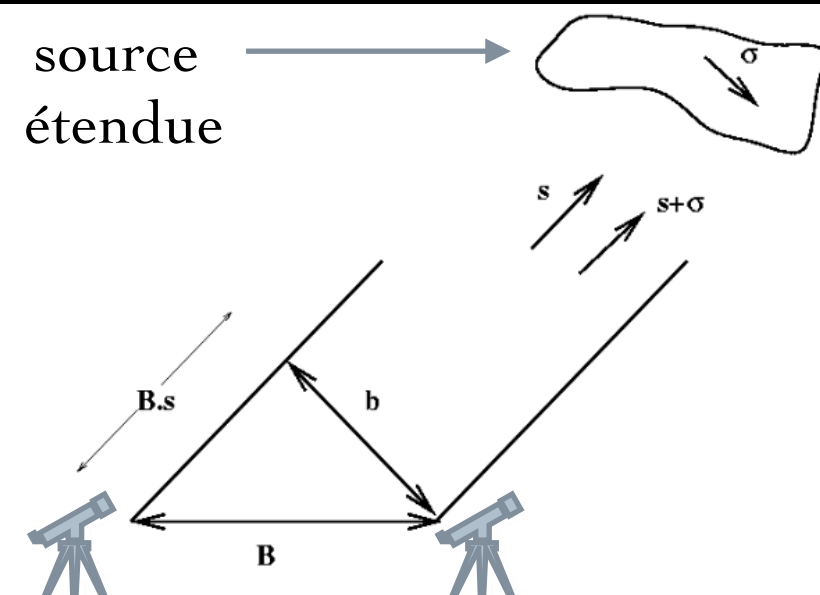
- Analogie avec la transformée de Fourier (le spectre de)
- Petites structures dans l'espace (x) requiert / permet une grande valeur de séparation d (ou nombre d'onde, k)
- Grandes structures (étendues) dans l'espace (x) requiert une toute petite valeur de d (ou nombre d'onde, k)

The same,
with maths

for a multiplying
interferometer i.e.

$$R = \langle E_1^* E_2 \rangle = E_1^* E_2 e^{ikx}$$

R = visibilité des franges



$$dR = dI(\sigma) e^{ik\mathbf{B} \cdot (\mathbf{s} + \sigma)}, \text{ but } \mathbf{B} \cdot \sigma = \mathbf{b} \cdot \sigma$$

$$R = e^{ik\mathbf{B} \cdot \mathbf{s}} \int I(\sigma) e^{ik\mathbf{b} \cdot \sigma} d\sigma$$

Can write $\sigma = \sigma(x, y)$, $\mathbf{b} = \mathbf{b}(u, v)$

$$R(u, v) = e^{ik\mathbf{B} \cdot \mathbf{s}} \int I(x, y) e^{2\pi i(ux + vy)} dx dy$$

Observer dans le
radio : 1 antenne
 $\theta_R \sim 1 \text{ cm} / 100 \text{ m} \sim 10^{-4}$

Plusieurs antennes
interférométrie :



Effelsberg, Allemagne
1972

FAST, Chine 2016



VLA, New Mex, 1 - 100 cm



GMRT, Inde, 1 m ++



Nancay, France Inde, 10 m



Interférences appliquées à l'astronomie

Le Event Horizon Telescope (EHT)

- Programme d'observation en cours : "horizon" des trous noirs (@ehtlescope sur Twitter)
- Les trous noirs super-massifs ont $M > 10^6 M_{\odot}$
- Résolution angulaire sans précédent : $22\mu''$, jusqu'à l'horizon d'un SMBH dans la galaxie M87 ;
- voir <https://eventhorizontelescope.org/science>

SMB = Supermassive Black Hole
ou
Trou Noir Super-massif

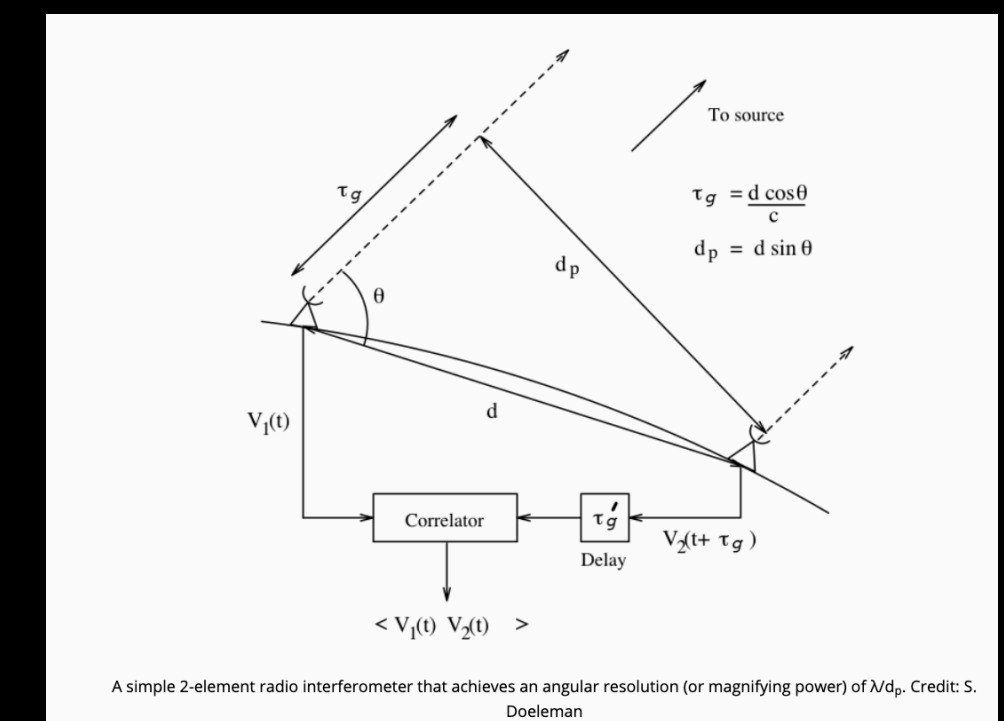
- Travail à $\lambda \sim 1,3 \text{ mm}$
- Enorme distance $L \sim 5000 \text{ km}$
- Sout Pole Telescope, VLA, ALMA ...
- IRAM / NOEMA (Pi. de Burre, France)
- Prendre en compte la courbure de la Terre (surface)



Two VLBI arrays that link radio dishes across the globe. The GMVA observes at a wavelength of 3mm, and the EHT observes at a wavelength of 1.3mm. The EHT reaches angular resolution (λ/d_p) of about 35 micro arcseconds, equivalent to standing in New York and being able to read the date on a quarter in Los Angeles. Credit: ESO/O. Furtak



L'interféromètre ALMA



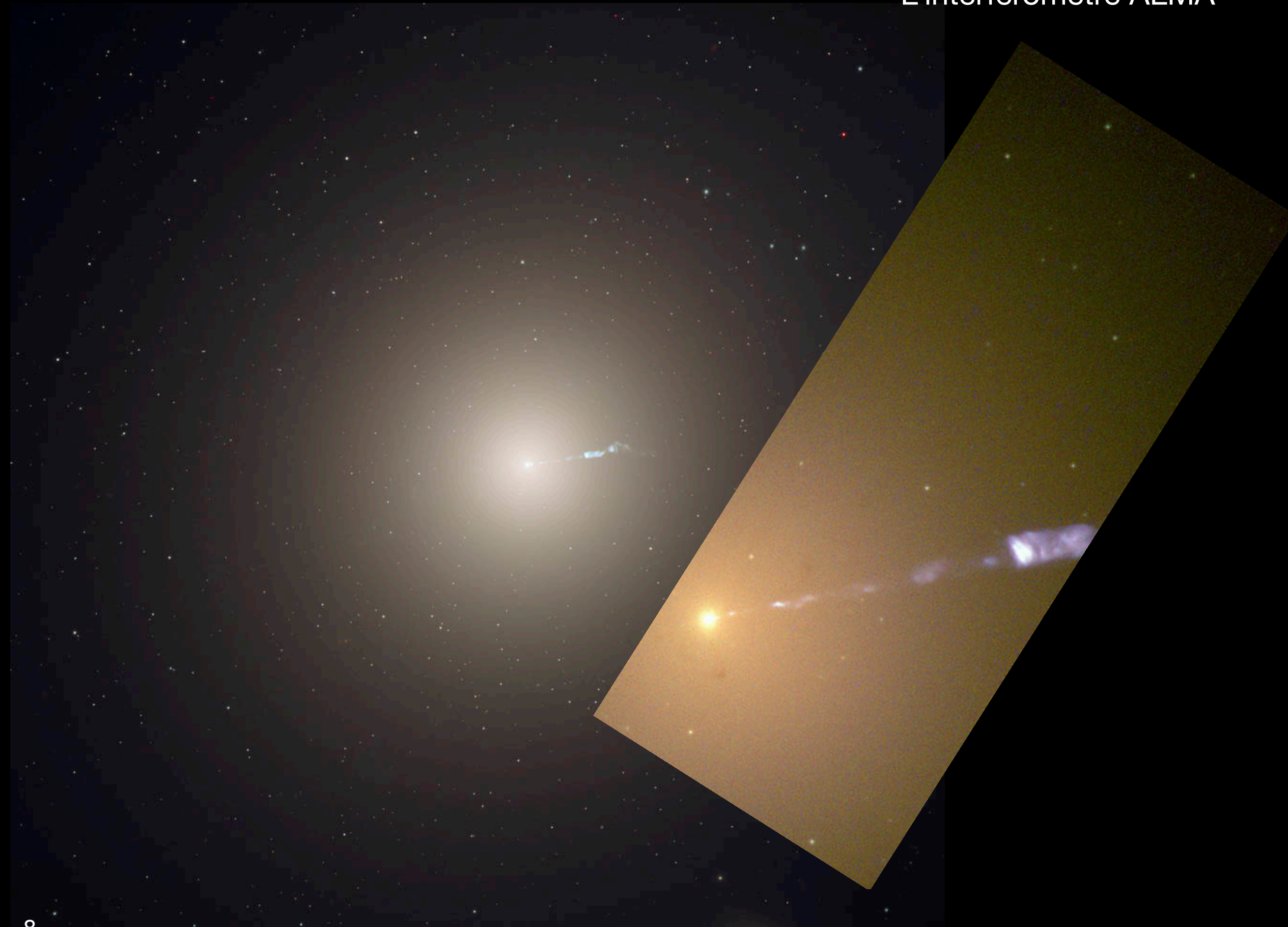
Observer le coeur d'une galaxie

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



L'interféromètre ALMA



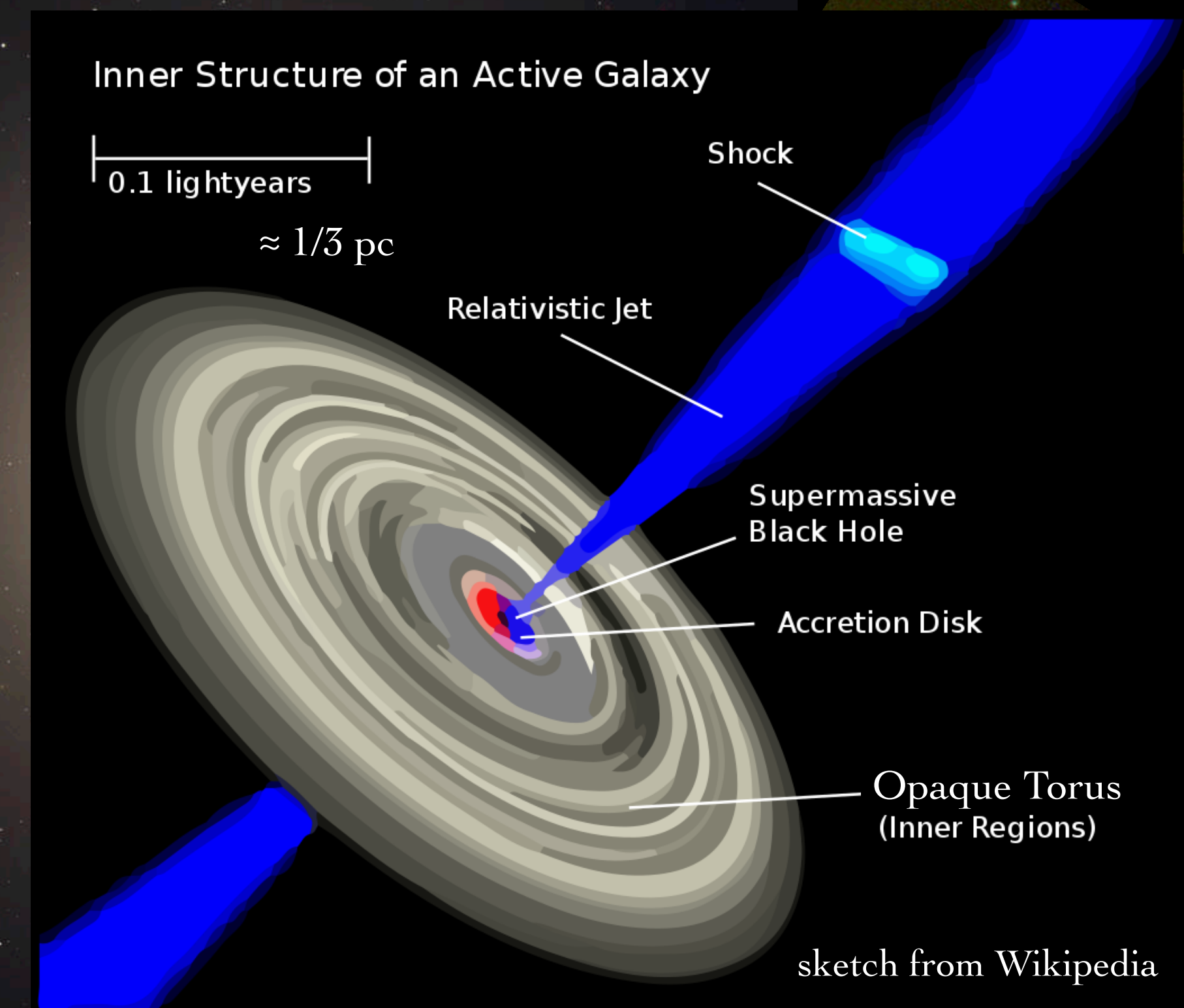
Observer le coeur d'une galaxie

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



L'interféromètre ALMA



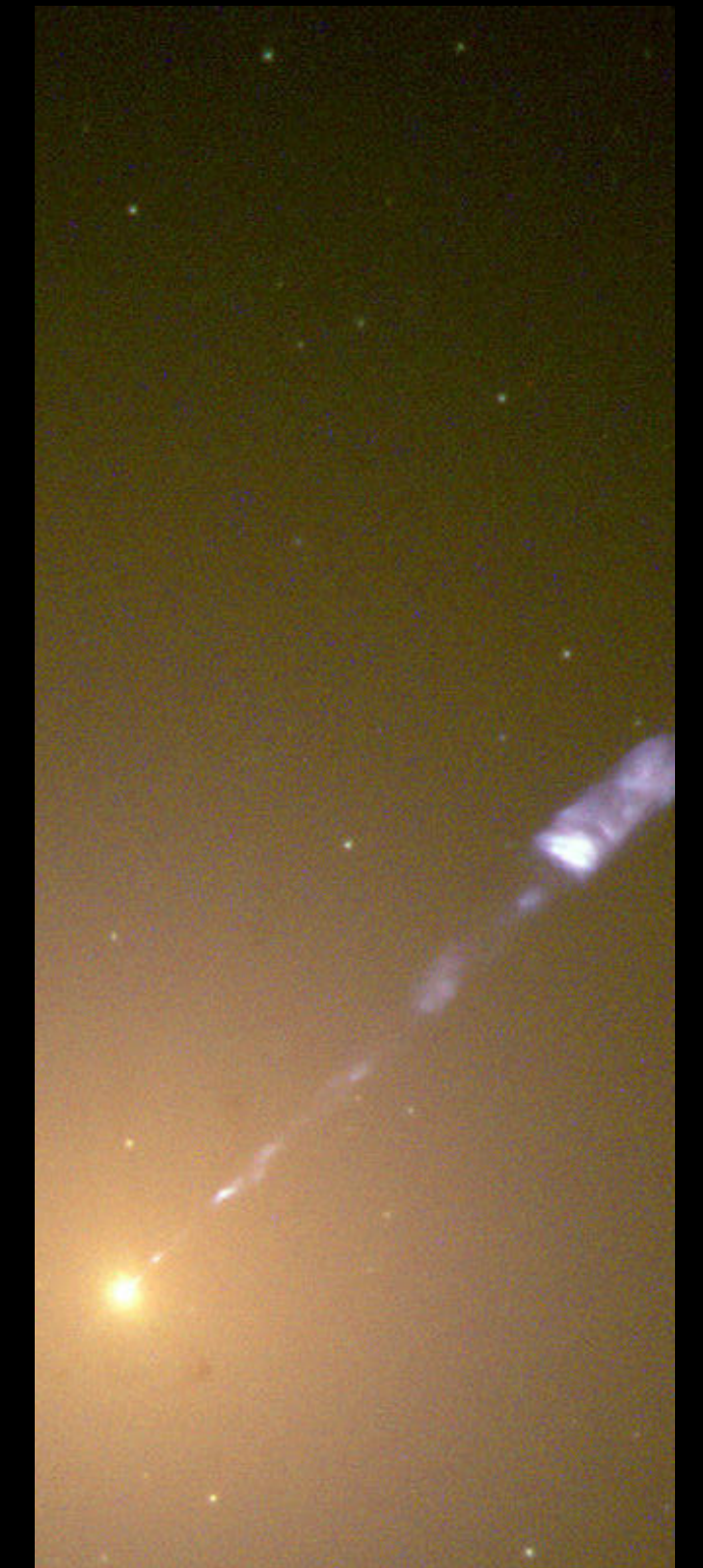
Observer le coeur d'une galaxie

M87 & son trou noir super-massif

- $M_{\text{BH}} \sim 6 \times 10^9 M_{\odot}$
- distance ≈ 15 Mpc (qq 50 millions an-lum)
- Observations radio passées : jet étendu, très fin
- Observations “fictives” en émulant la présence d'un jet
- Image plus facilement reconstruite en X, mais signal attendu de faible amplitude !



L'interféromètre ALMA



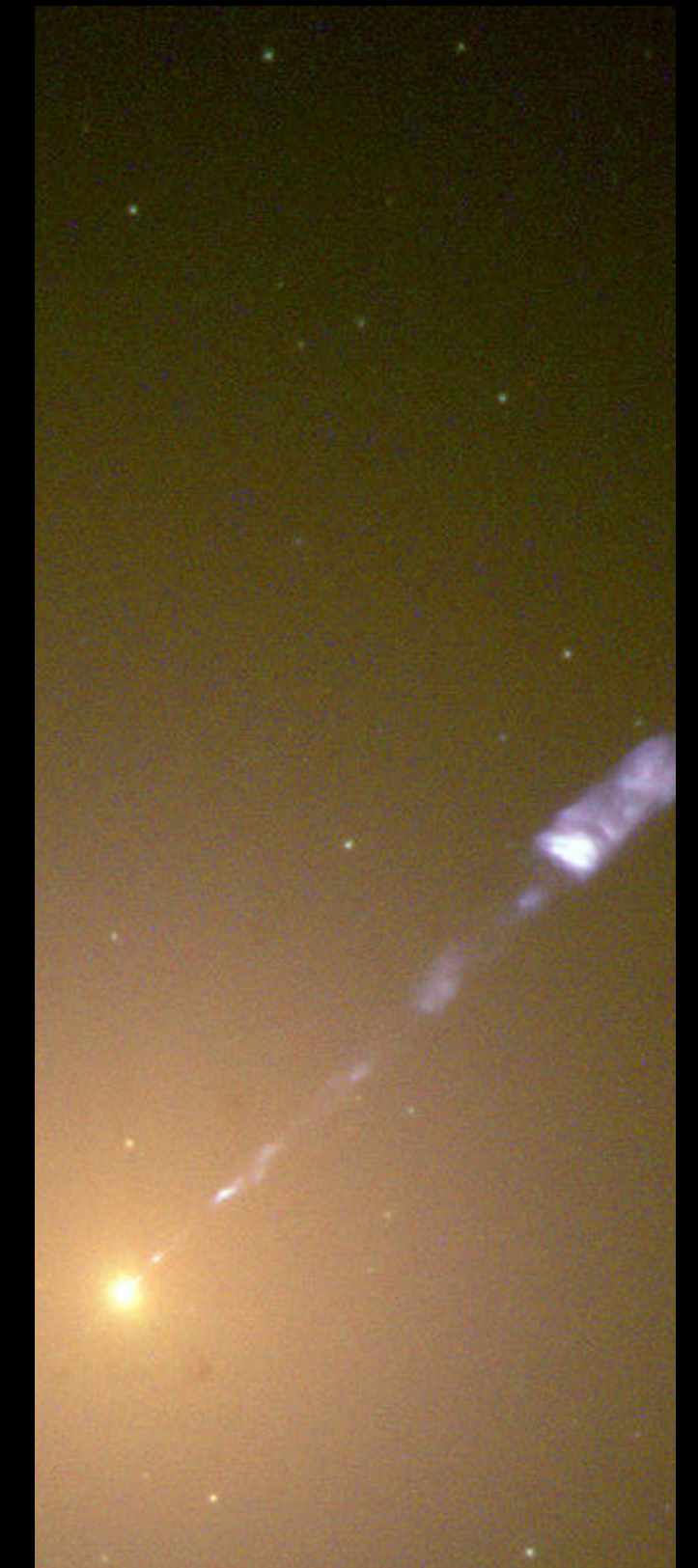
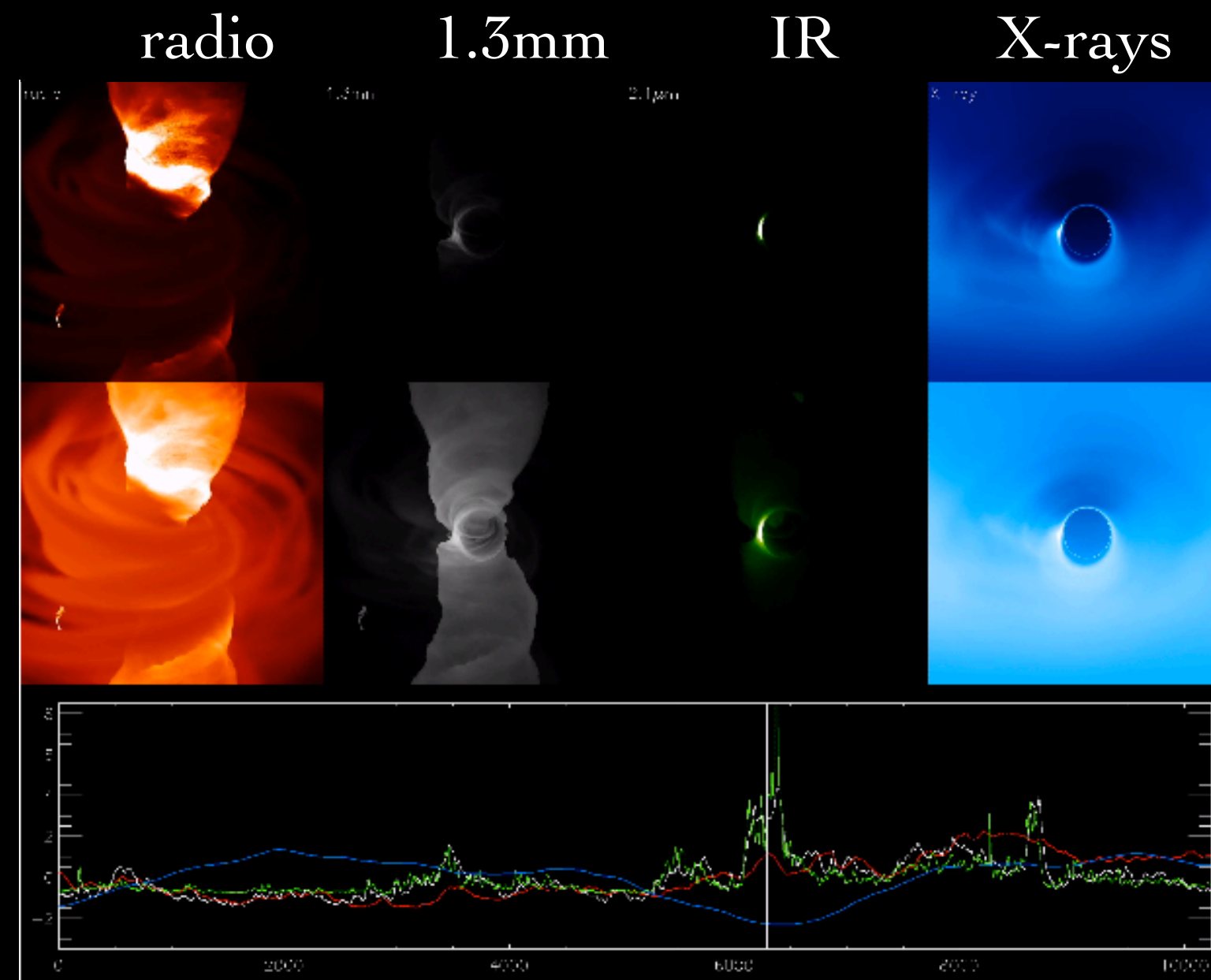
Observer le coeur d'une galaxie

M87 & son trou noir super-massif

- $M_{\text{BH}} \sim 6 \times 10^9 M_{\odot}$
- distance ≈ 15 Mpc (qq 50 millions an-lum)
- Observations radio passées : jet étendu, très fin
- Observations “fictives” en émulant la présence d'un jet
- Image plus facilement reconstruite en X, mais signal attendu de faible amplitude !

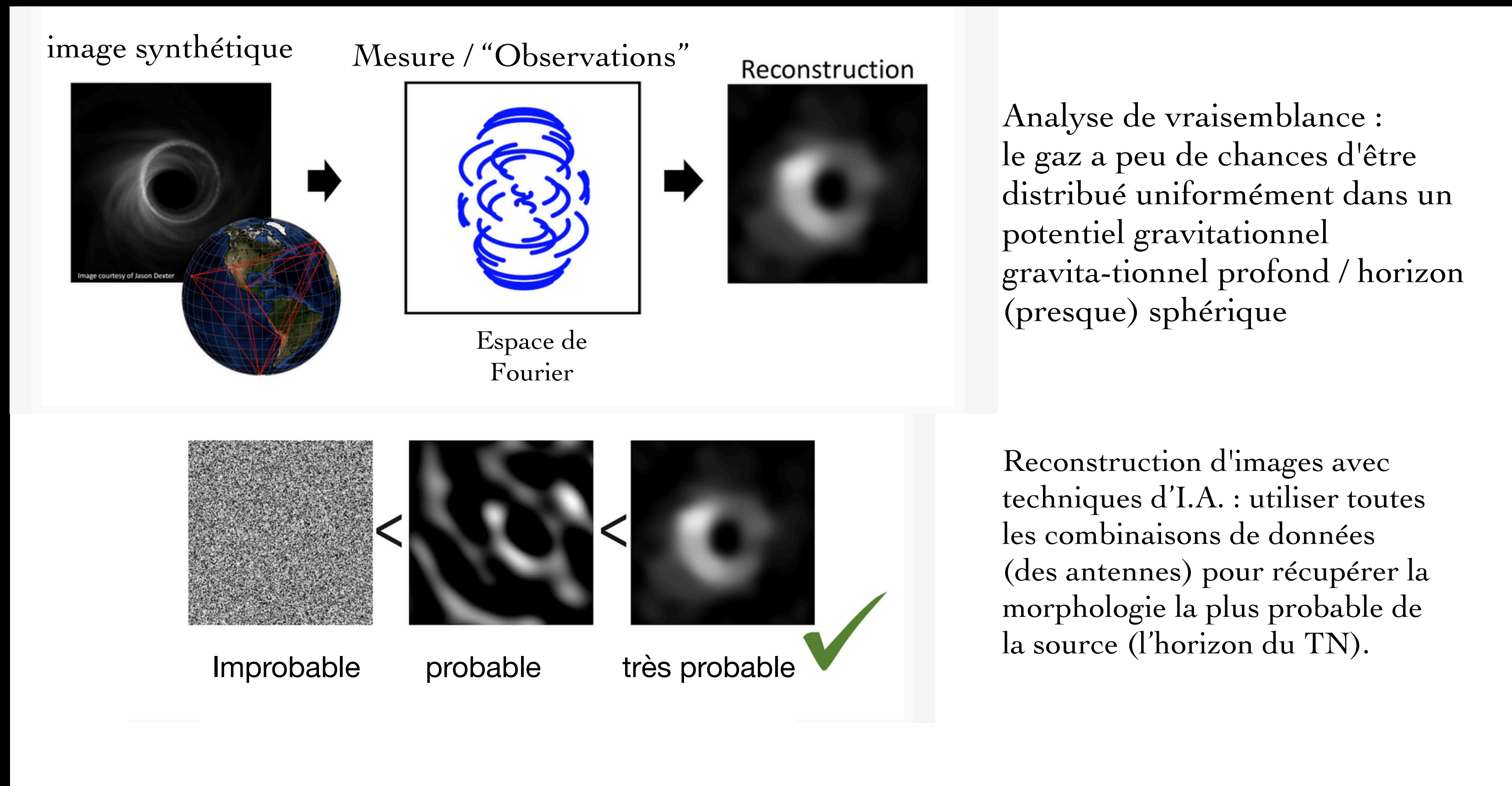


L'interféromètre ALMA



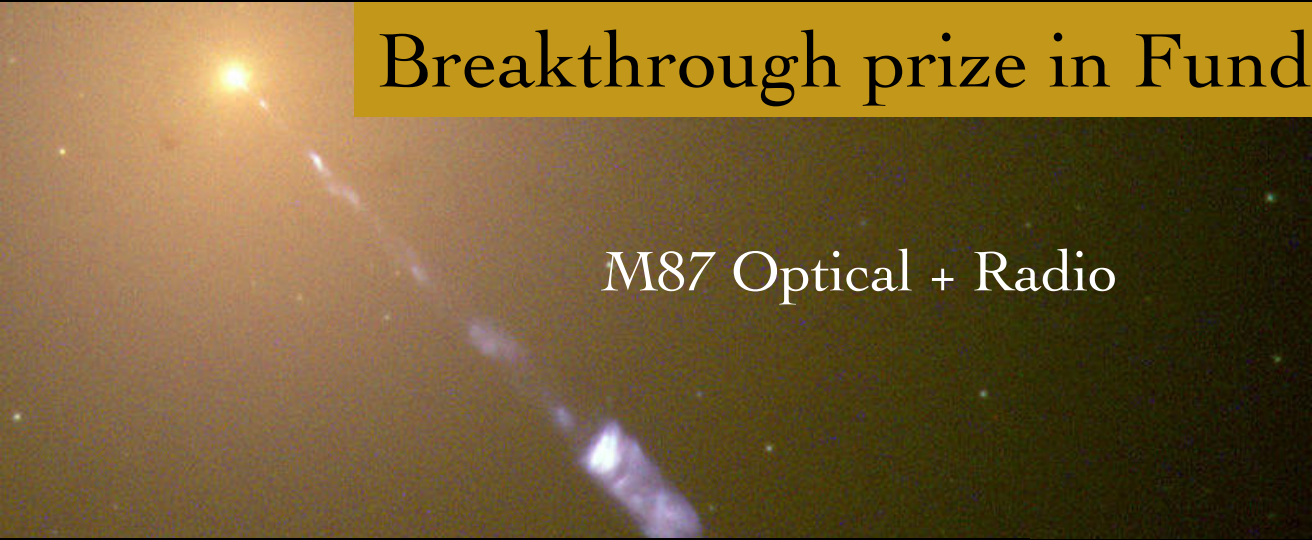
Interférences appliquées à l'astronomie

Le Event Horizon Telescope (EHT)



Interférences appliquées à l'astronomie

Le Event Horizon Telescope (EHT)

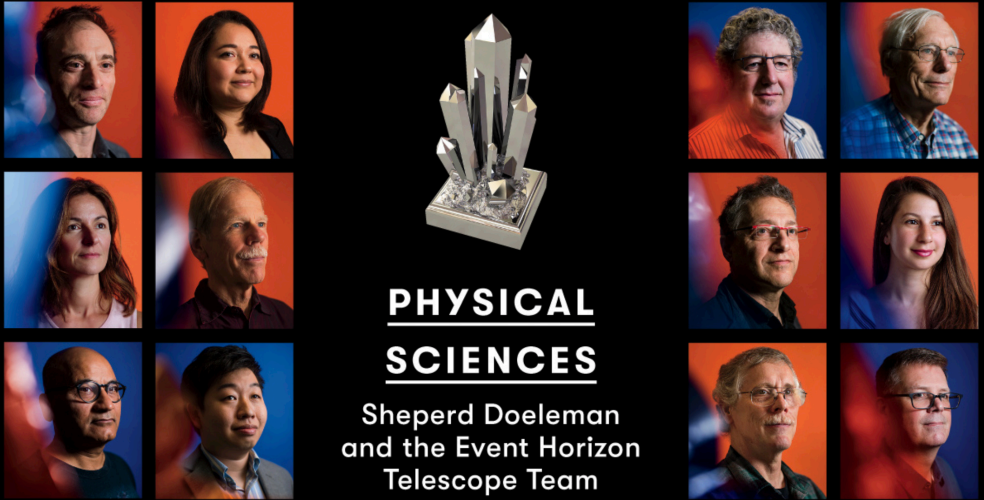


M87 Optical + Radio

Breakthrough prize in Fundamental Physics 2020



**PHYSICAL
SCIENCES**
Sheperd Doeleman
and the Event Horizon
Telescope Team





10 / 04
2019

Scientists have obtained the first image of a black hole, using Event Horizon Telescope observations of the center of the galaxy M87. The image shows a bright ring formed as light bends in the intense gravity around a black hole that is 6.5 billion times more massive than the Sun. This long-sought image provides the strongest evidence to date for the existence of supermassive black holes and opens a new window onto the study of black holes, their event horizons, and gravity. Credit: Event Horizon Telescope Collaboration

Ondes & Cosmos

Contenu, objectifs



Une locomotive à vapeur (mon rêve)

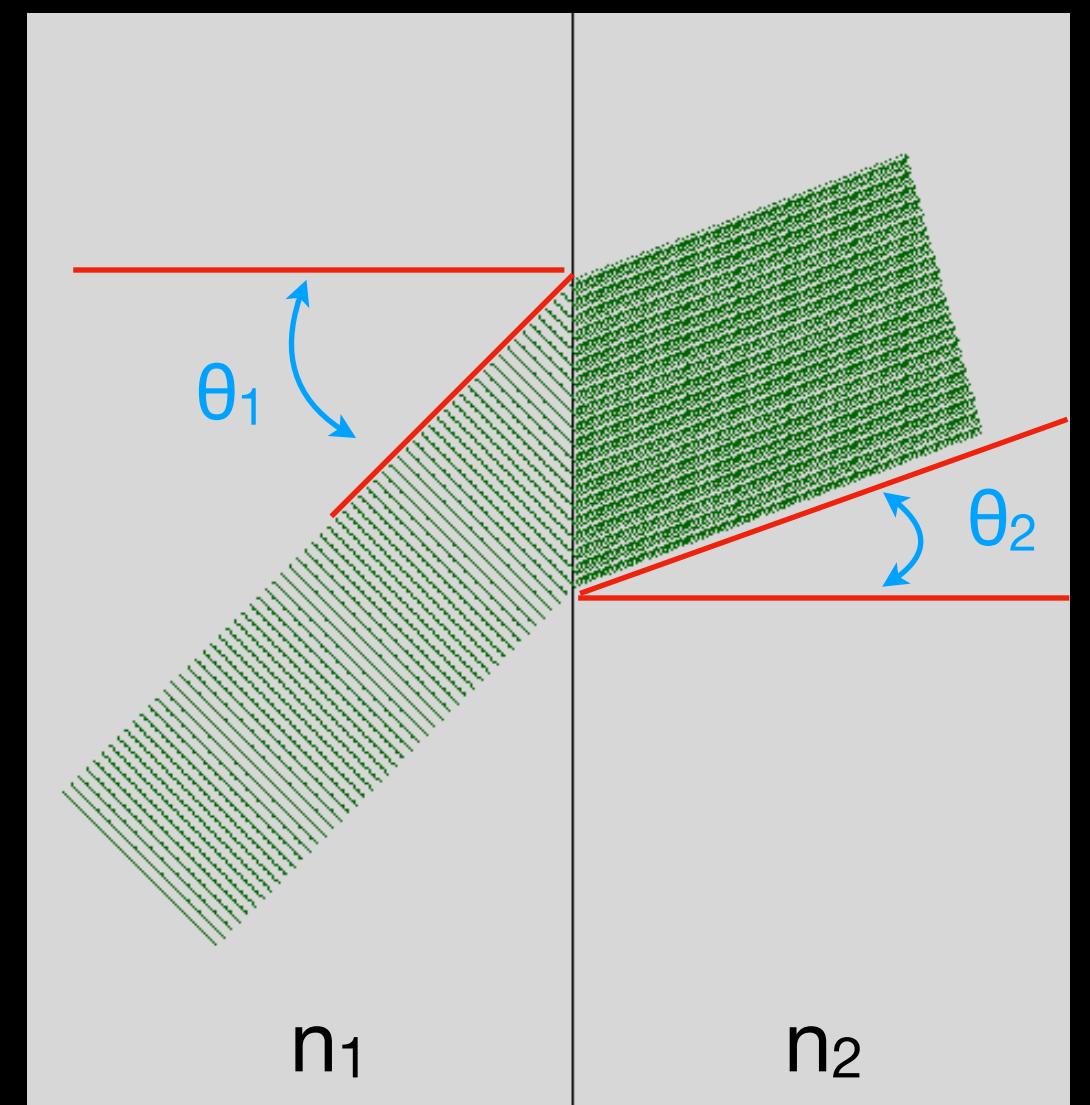
- Cours 2 : Les ondes et la thermodynamique
 - ✓ Revenir sur l'expérience de Young et l'interférométrie
 - Interférométrie et observations astronomiques
 - ✓ Définitions, revue de quelques concepts clés de la thermodynamique
 - le rayonnement électromagnétique comme porteur d'énergie
 - bain de chaleur, ~~statistique de Boltzmann~~, entropie
 - ✓ Le rayonnement du corps noir, thermodynamique à l'équilibre
 - ✓ Etre invisible : une question d'équilibre ou .. d'imagination ?

Le couple rayonnement - matière

Modes de vibration et thermodynamique



- Une onde vibre parce qu'une quantité d'énergie (mécanique, ..) y a été investie ;
- Pour la lumière : la propagation dans le vide à la vitesse c est affectée lorsqu'elle traverse une paroi de matière opaque ou translucide ;
- Réflexion et réfraction de l'onde : n = indice de réfraction
 - Loi de Descartes - Snell : deux milieux $n_1 < n_2$
 - $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ (soit $n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2$ si θ_1 est petit)
 - L'indice n change avec λ (milieu dispersif)



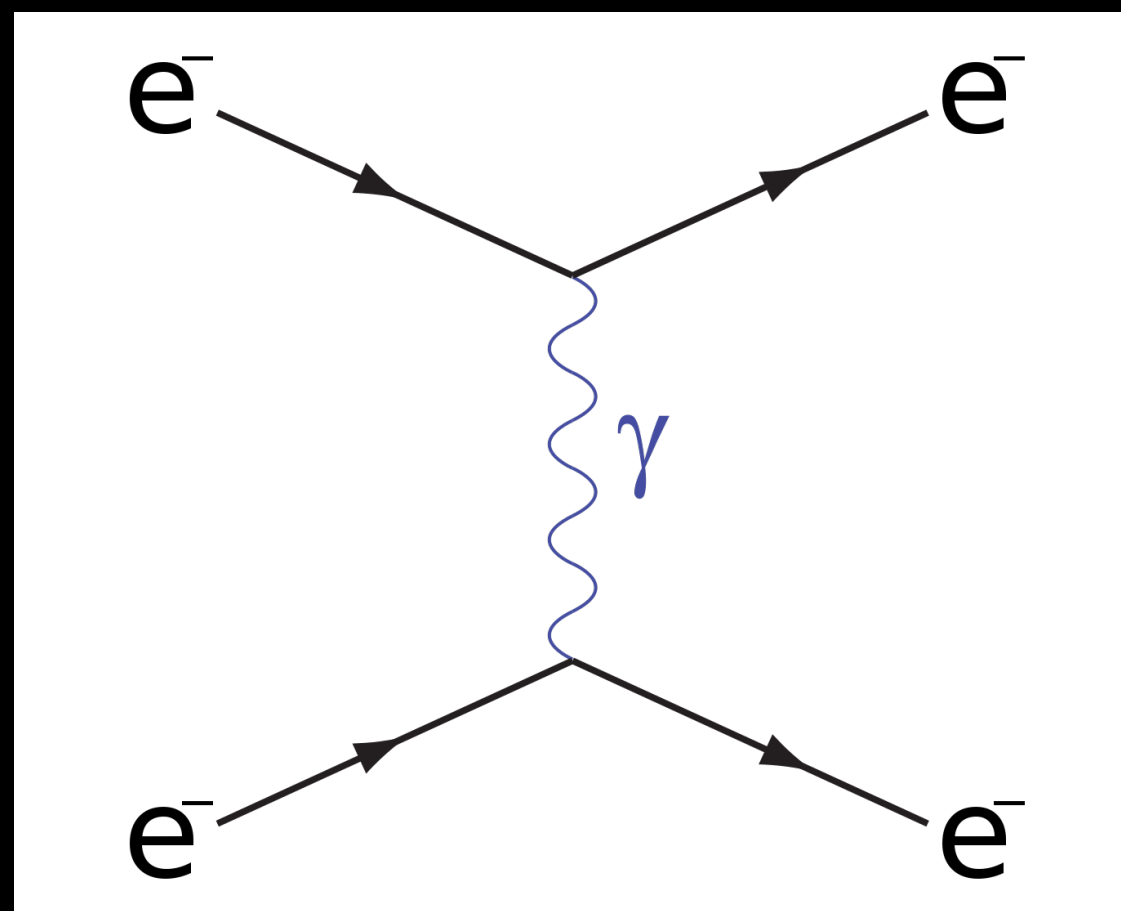
Le couple rayonnement - matière

Modes de vibration et thermodynamique

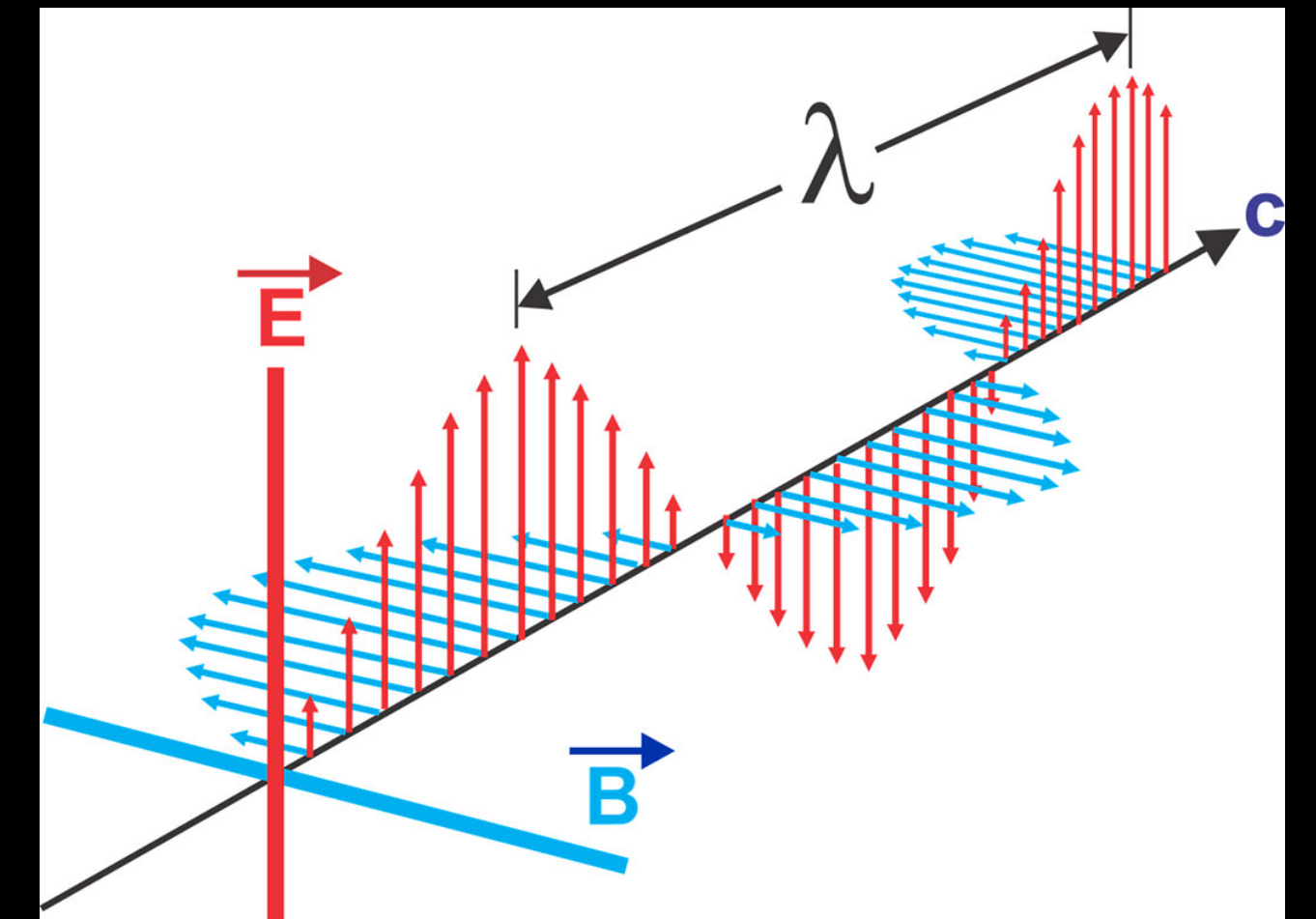
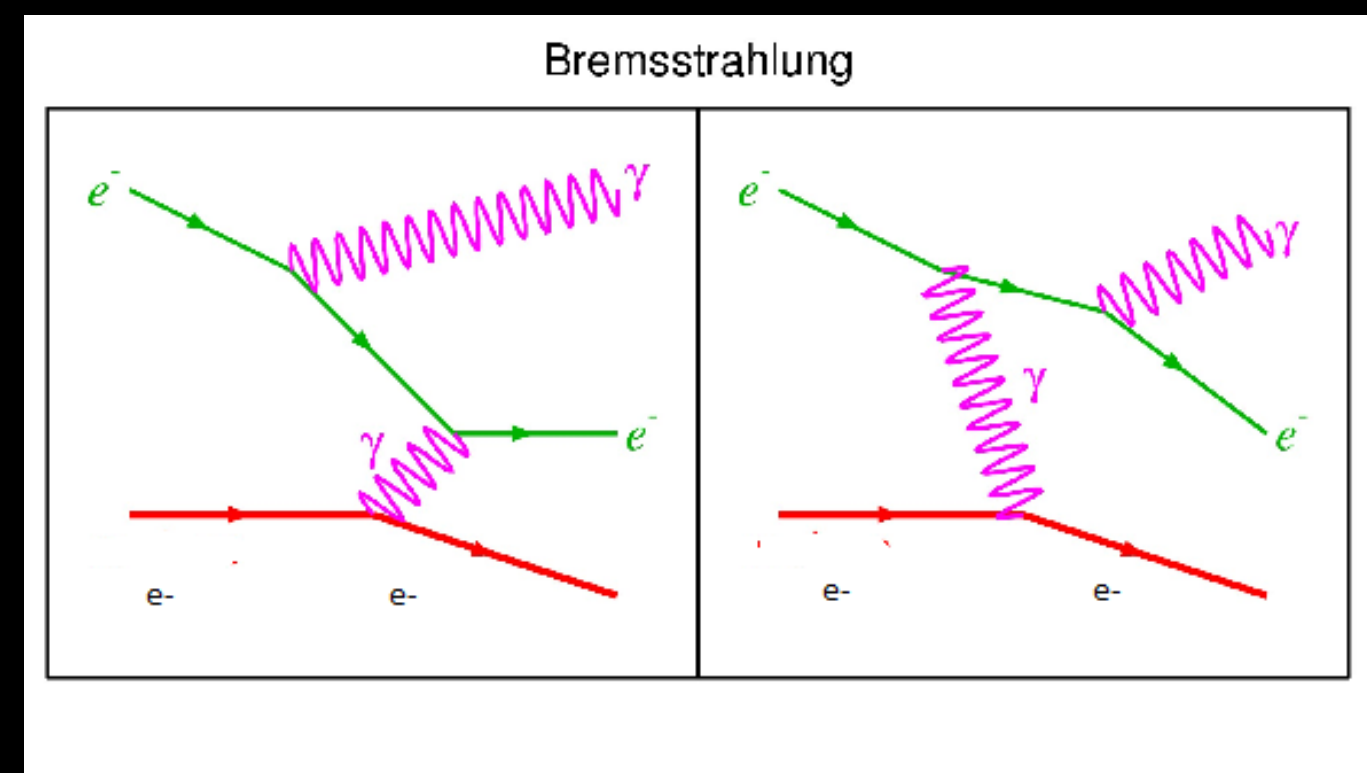


- Composante électromagnétique de la lumière : E et B
- onde transverse au sens de la propagation
- vecteur de force entre les particules chargées

Répulsion $e^- e^-$: échange de γ



Accélération des e^- : émission de γ

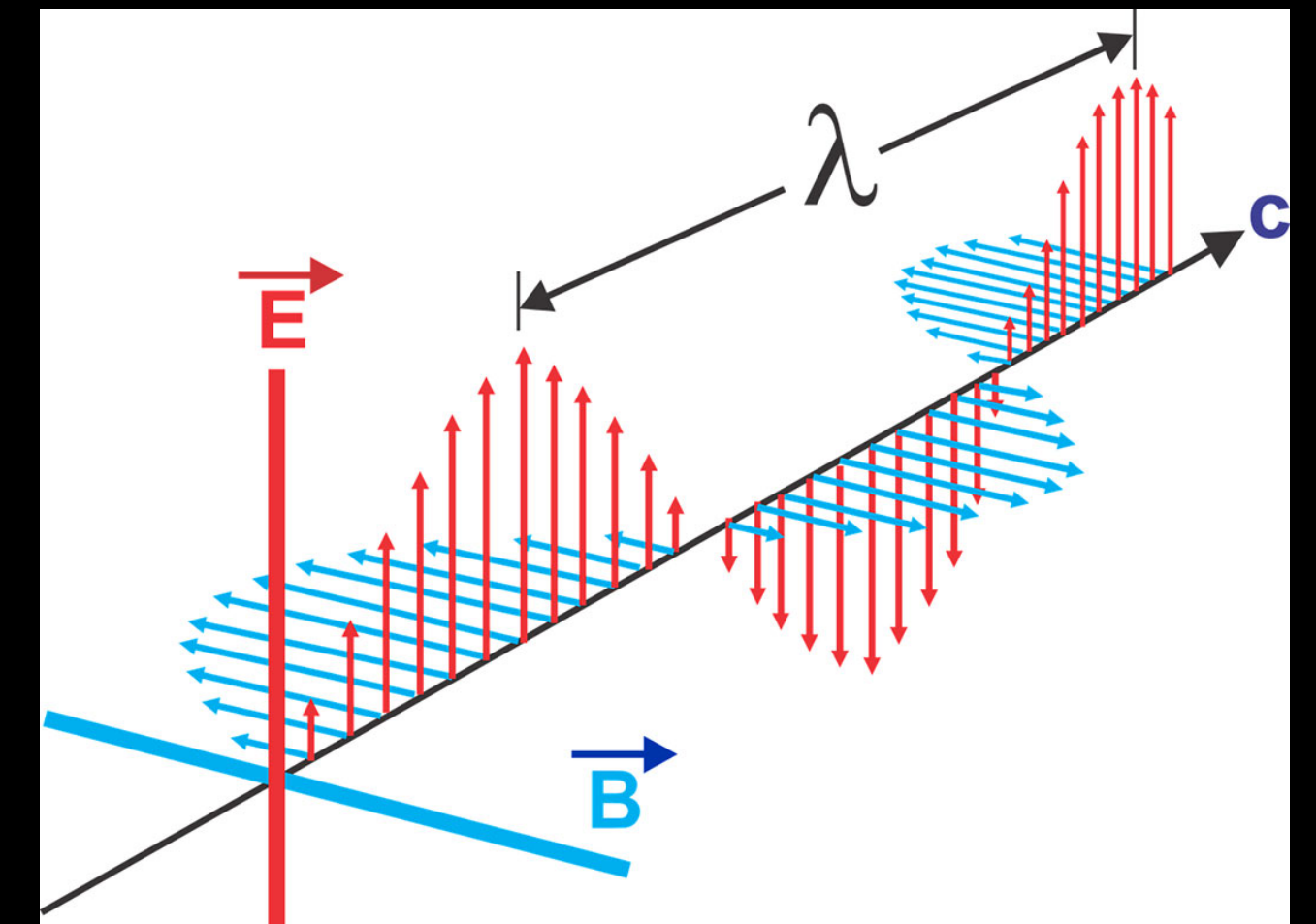
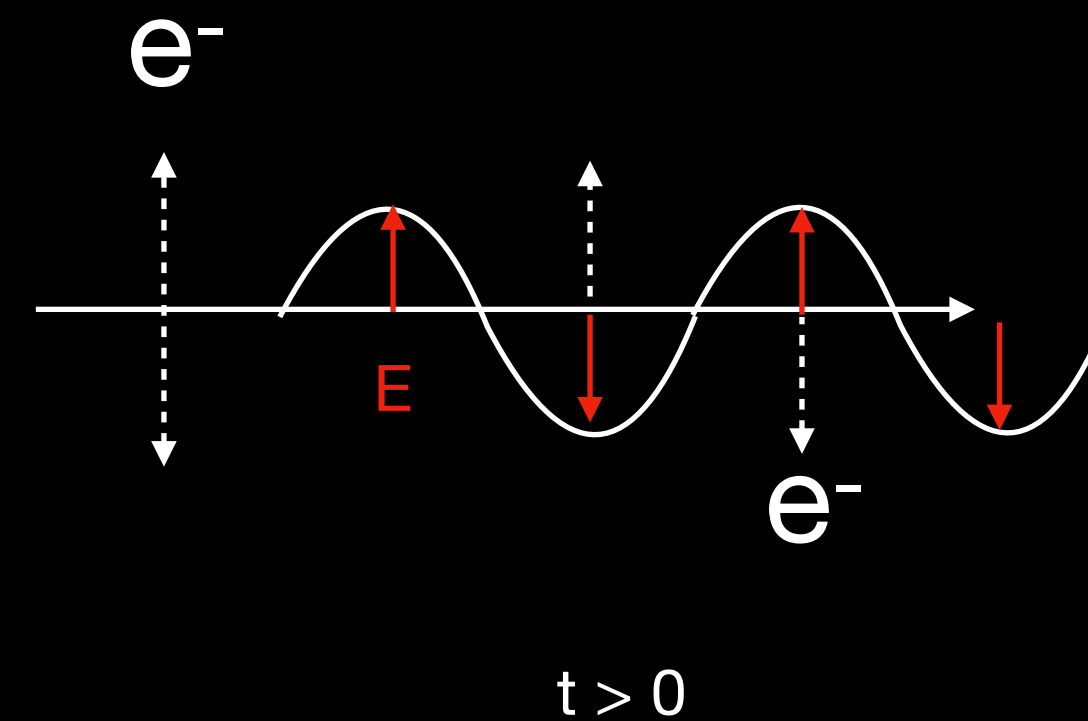
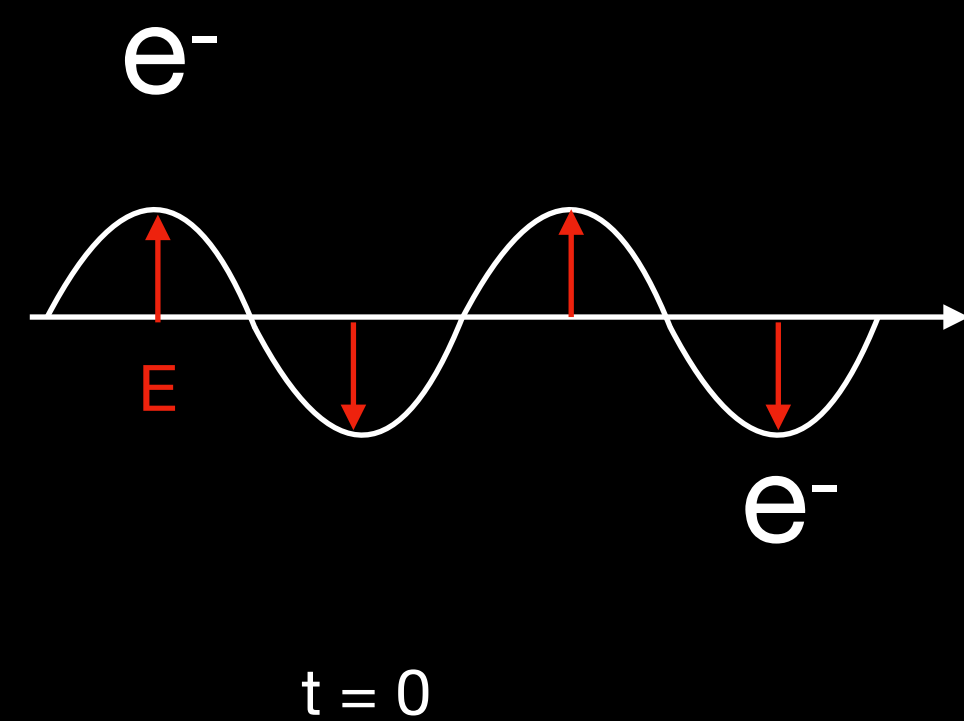


Le couple rayonnement - matière

Modes de vibration et thermodynamique



- Composante électromagnétique de la lumière : E et B
- onde transverse au sens de propagation
- vecteur de force entre l'onde et les particules chargées



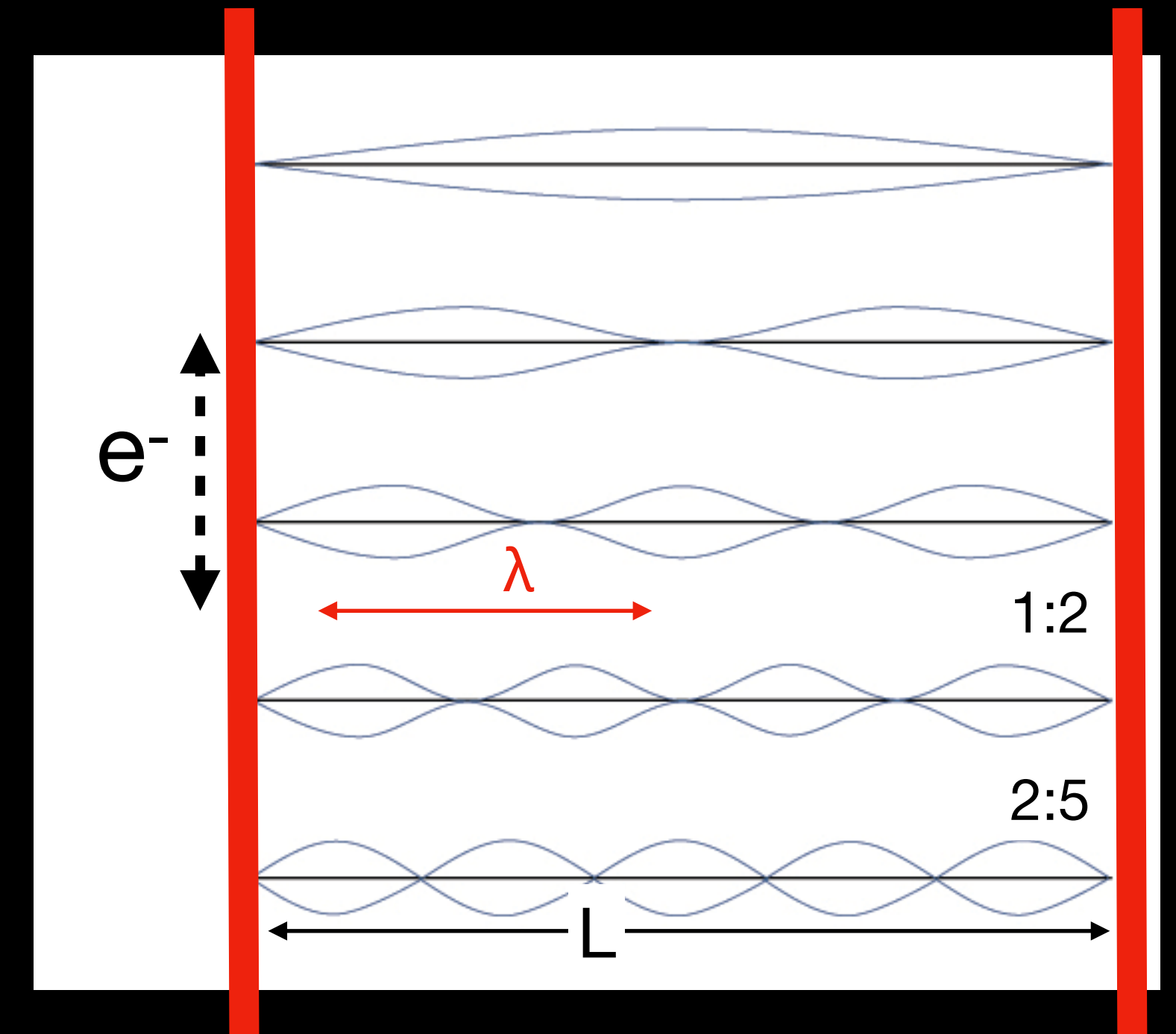
:: Le mouvement des électrons compense / annule l'onde électromagnétique::

Le couple rayonnement - matière

Modes de vibration et thermodynamique



- Paroi d'un métal (fer, ..) : électron libre (courant)
- onde s'annule sur les parois (noeuds)
- réflexion parfaite : capture de l'énergie de l'onde
- LaSer : trappe + émission stimulée (insertion d'énergie)
—> amplification, signal en phase
- Four micro-ondes (cage de Faraday)
- Mouvement des électrons : émission de lumière
- Tous les modes possibles : tendance vers l'équilibre

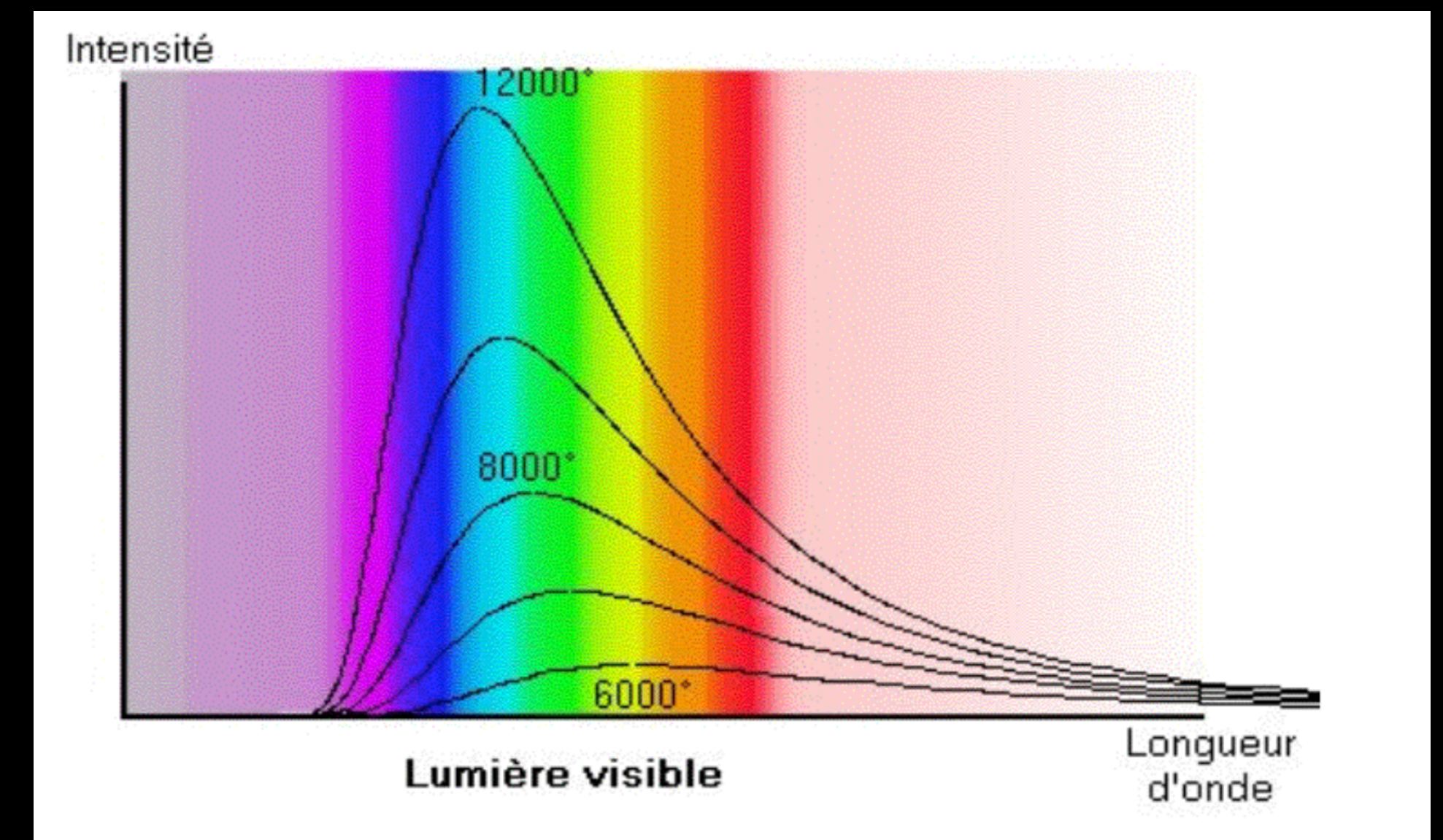


Le couple rayonnement - matière

Modes de vibration et thermodynamique

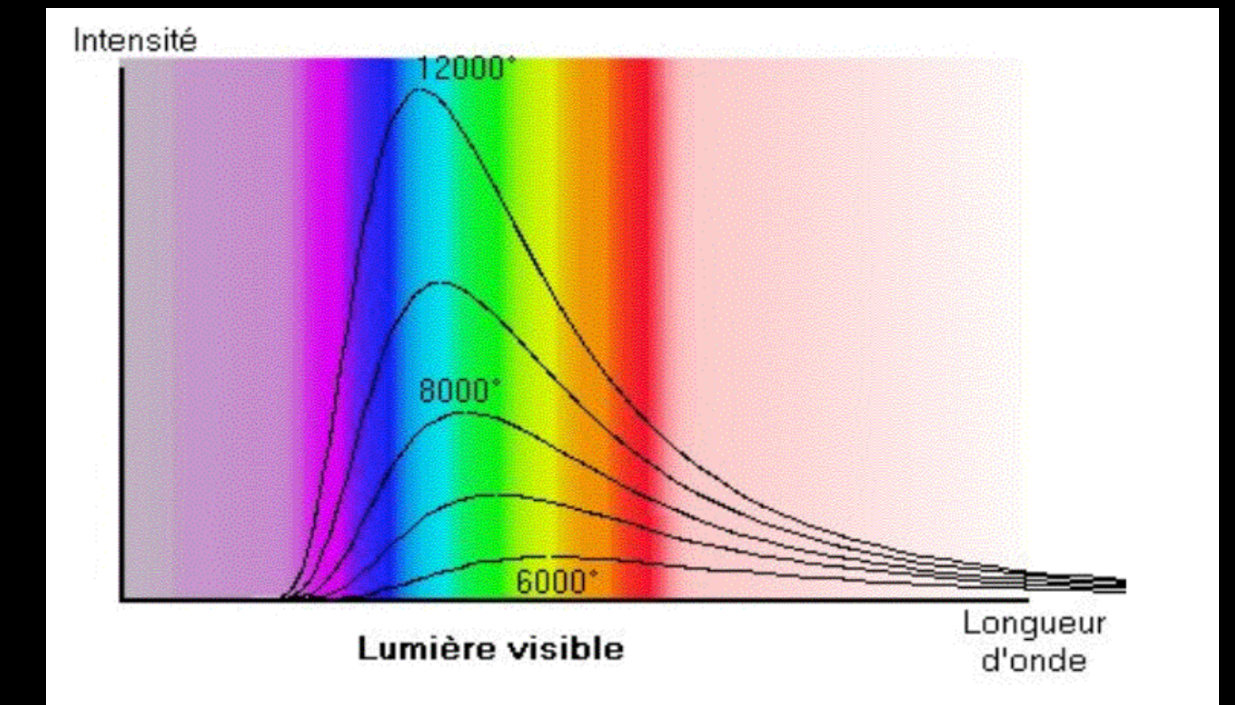


- Tous les modes possibles : tendance vers l'équilibre *thermodynamique*
- *Spectre de Planck* : la cavité confine toute l'énergie électromagnétique
- Aucun échange avec le monde extérieur (four : diffusion très lente)
- Situation idéale : λ court de 0 $\rightarrow$ ∞



Le couple rayonnement - matière

Equilibre thermique et corps noir



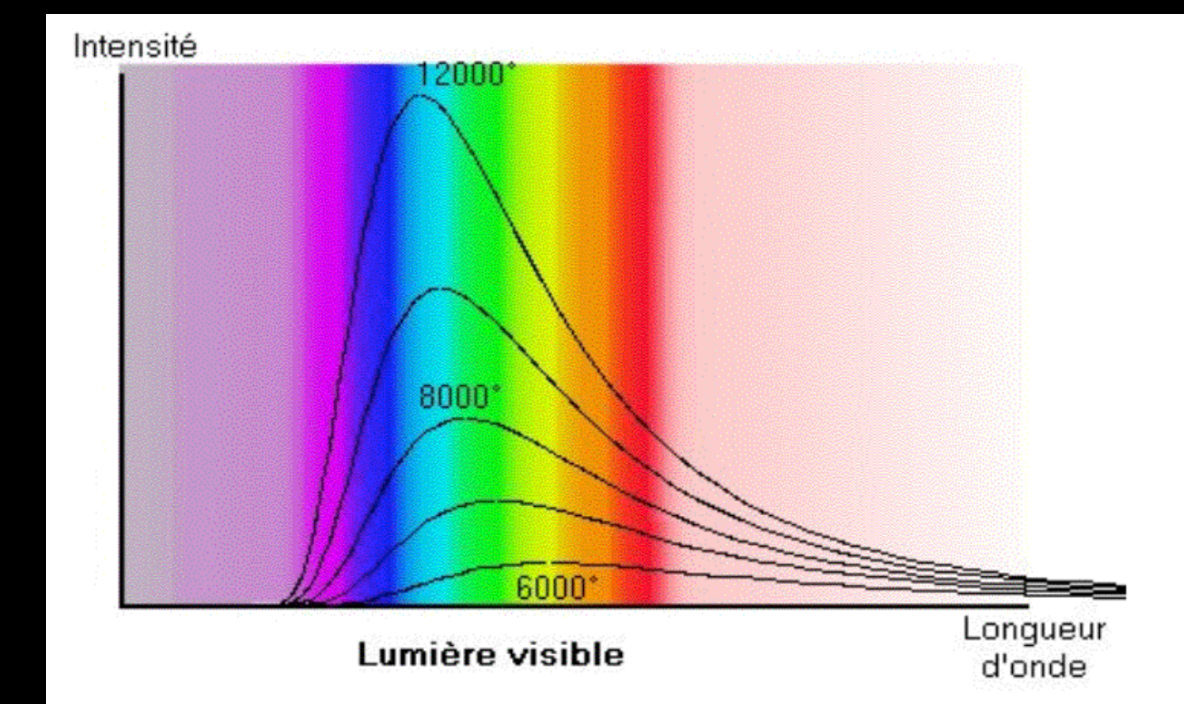
- Tous les modes possibles : tendance vers l'équilibre *thermodynamique*
- *Couleur* du rayonnement en relation directe avec la température T *rigoureusement uniforme*
- Concept de bain thermique : les détails disparaissent .. définition d'invisibilité ?
- Principe de Carnot : équilibre thermique entre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



Thermes Gellert, Budapest

Le couple rayonnement - matière

Equilibre thermique et corps noir

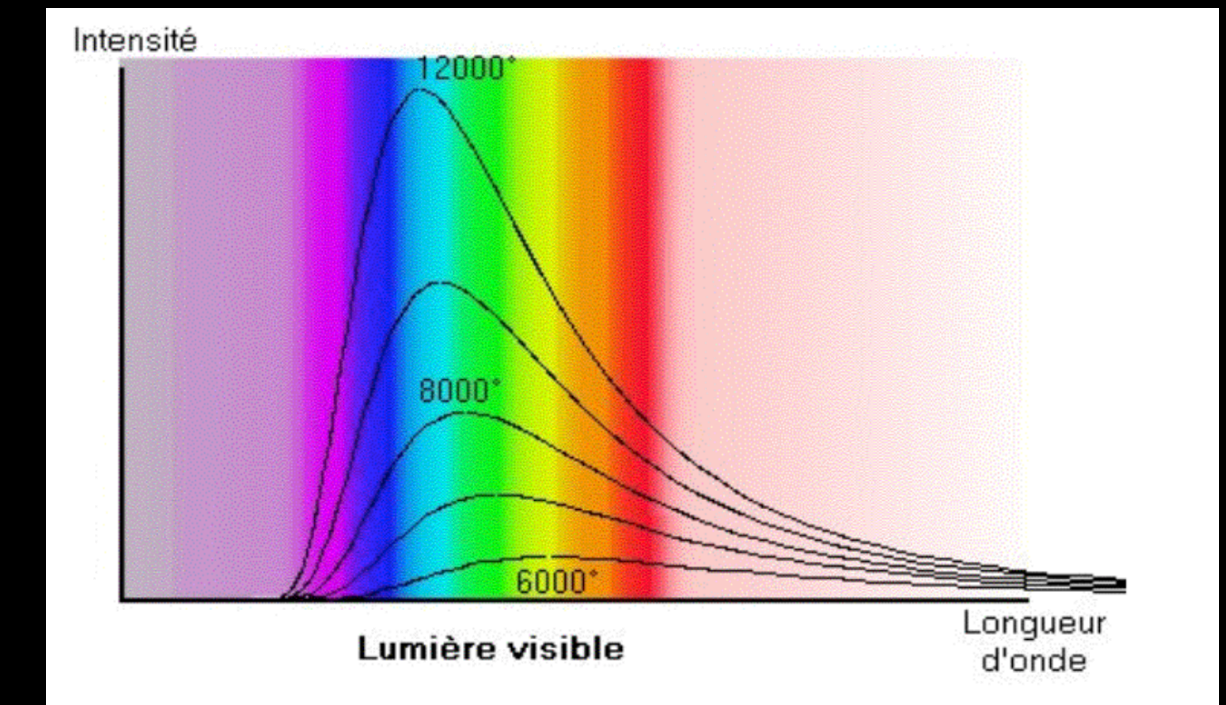


- Tous les modes possibles : tendance vers l'équilibre *thermodynamique*
- *Couleur* du rayonnement en relation directe avec la température T *rigoureusement uniforme*
- Concept de bain thermique : les détails disparaissent .. définition d'invisibilité ?
- Principe de Carnot : équilibre thermique entre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



Le couple rayonnement - matière

Equilibre thermique et corps noir

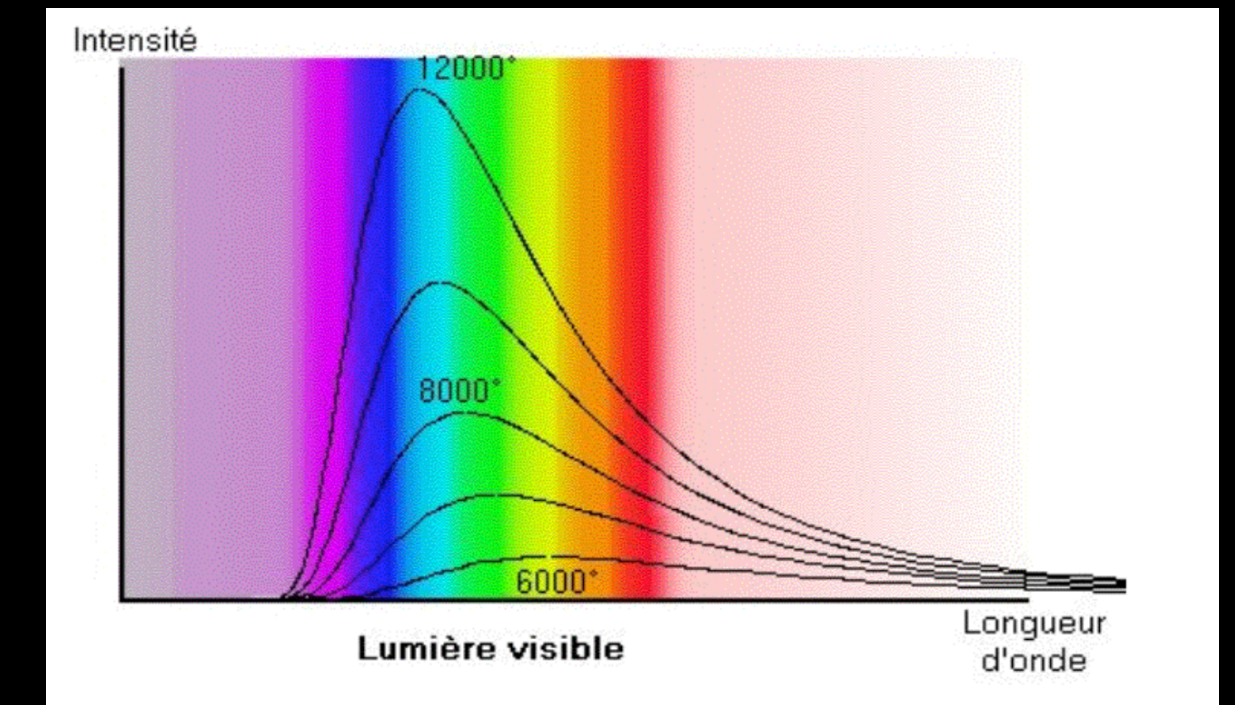


- Tous les modes possibles : tendant vers l'équilibre *thermodynamique*
- *Couleur* du rayonnement en relation avec la température T rigoureusement univoque
- Concept de bain thermique : les corps disparaissent .. définition d'invisibilité
- Principe de Carnot : équilibre thermique entre deux corps

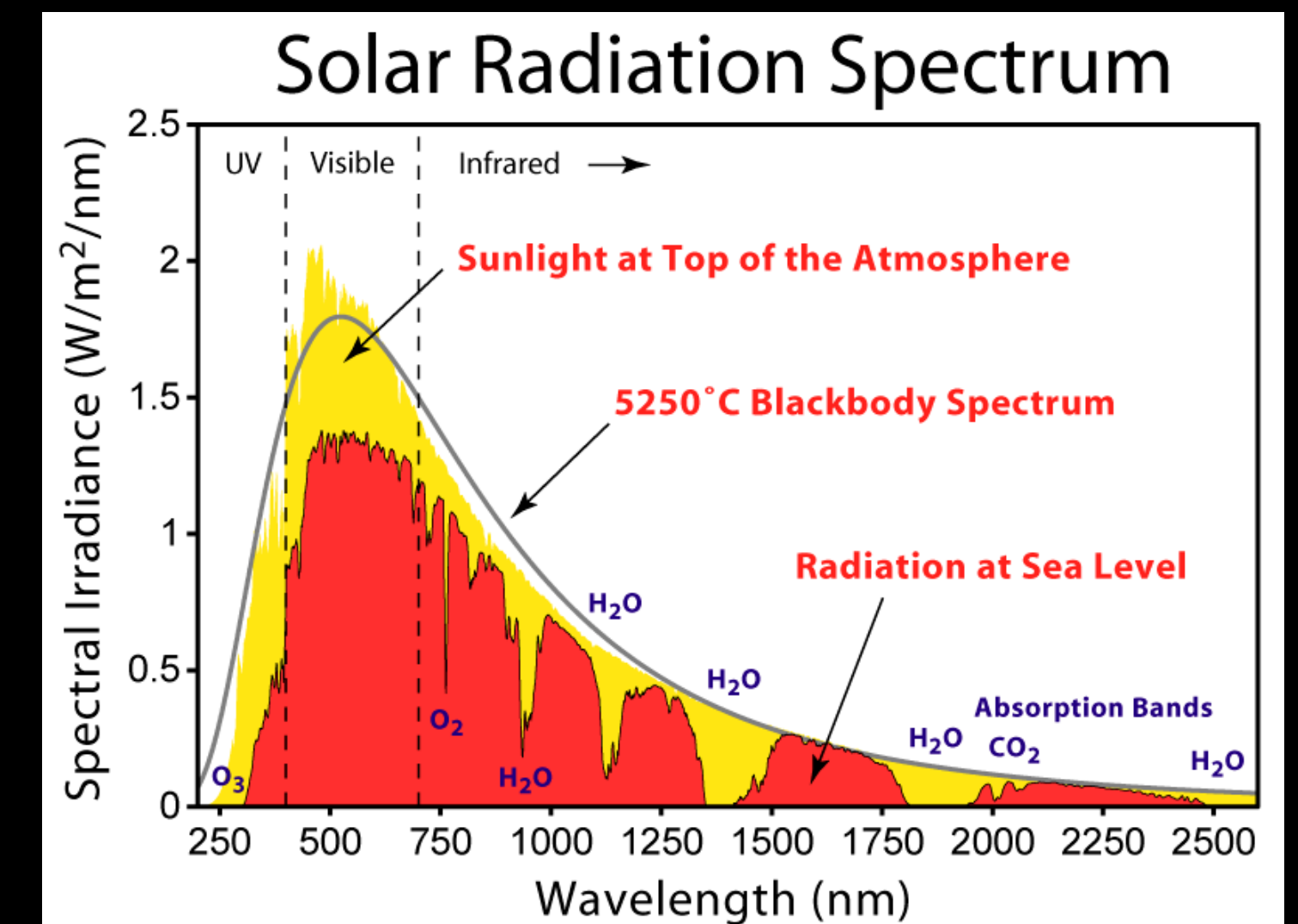


Le couple rayonnement - matière

Le Soleil comme “corps noir”

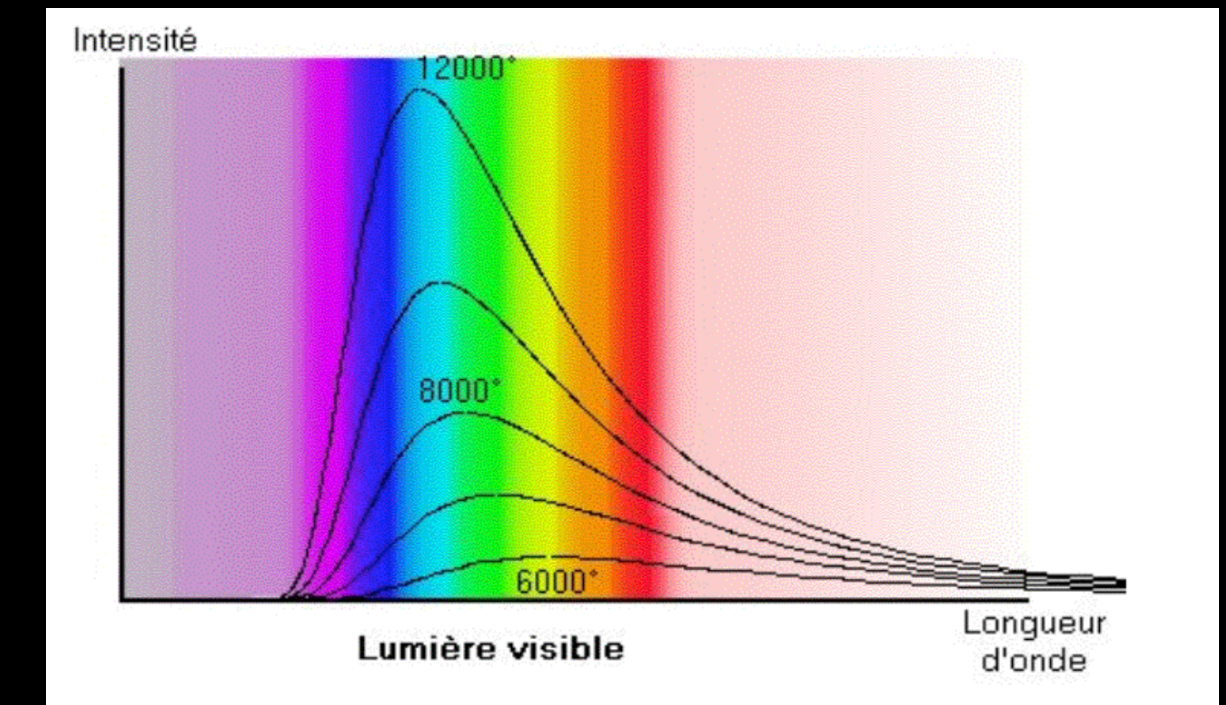


- Atmosphère à $\approx 5800^\circ \text{K}$
- Plasma chaud, ionisé : électrons libres
- Lente diffusion de la lumière vers la surface (la photosphère)
- Ejections, taches solaires : déséquilibre thermique, processus physiques (MHD, ..)

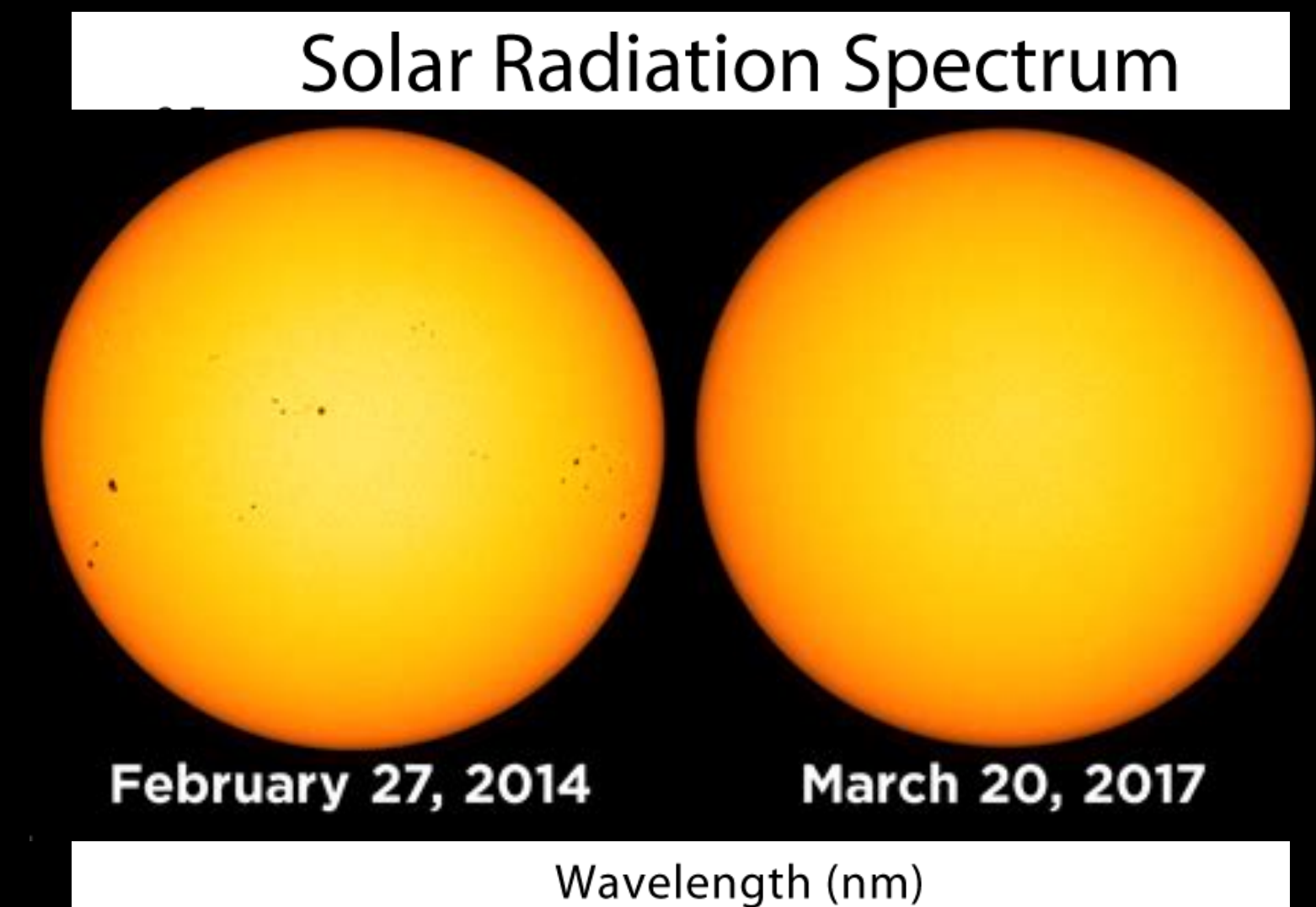


Le couple rayonnement - matière

Le Soleil comme “corps noir”

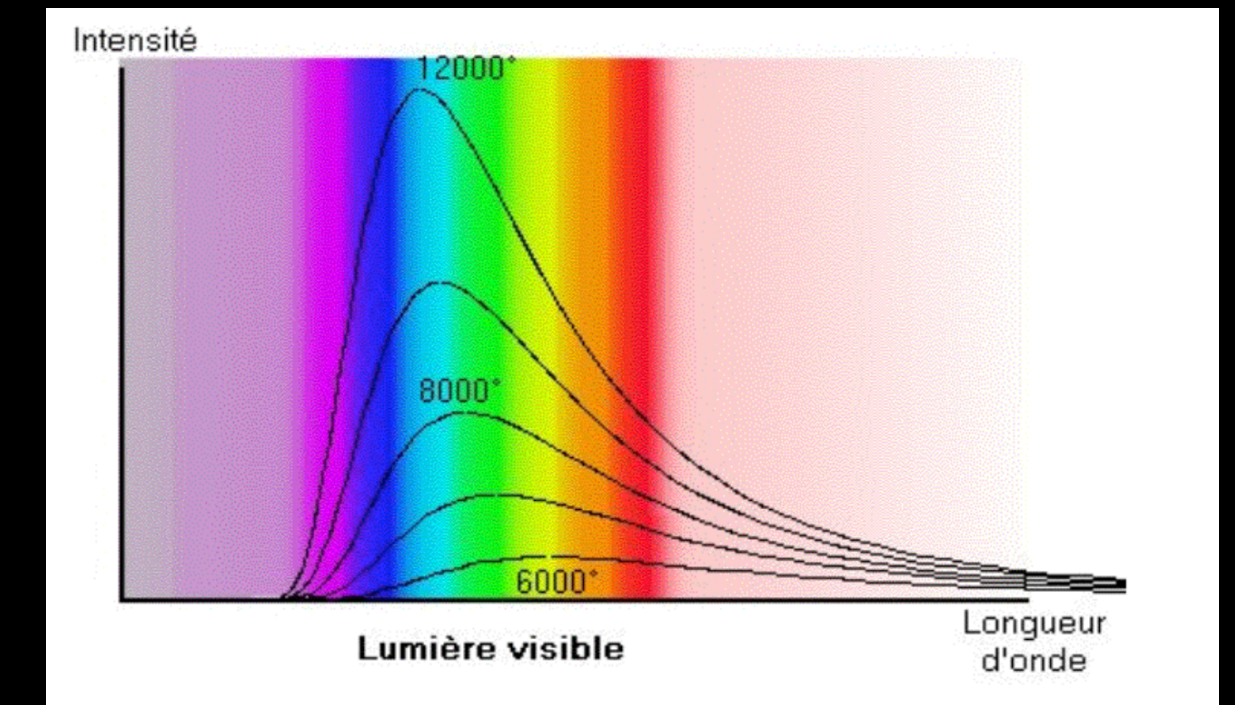


- Atmosphère à $\approx 5\,800^\circ\text{K}$
- Plasma chaud, ionisé : électrons libres
- Lente diffusion de la lumière vers la surface (la photosphère)
- Ejections, taches solaires : déséquilibre thermique, processus physiques (MHD, ..)



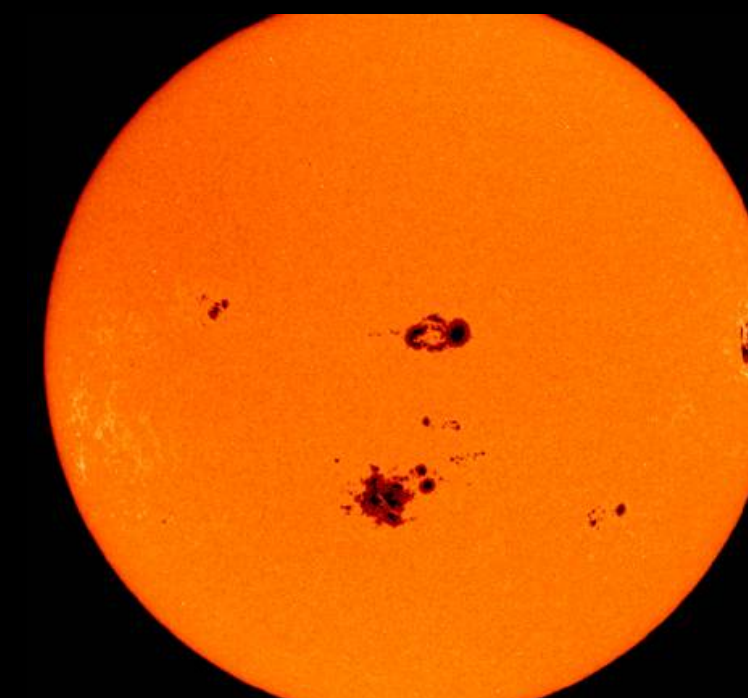
Le couple rayonnement - matière

Le Soleil comme “corps noir”

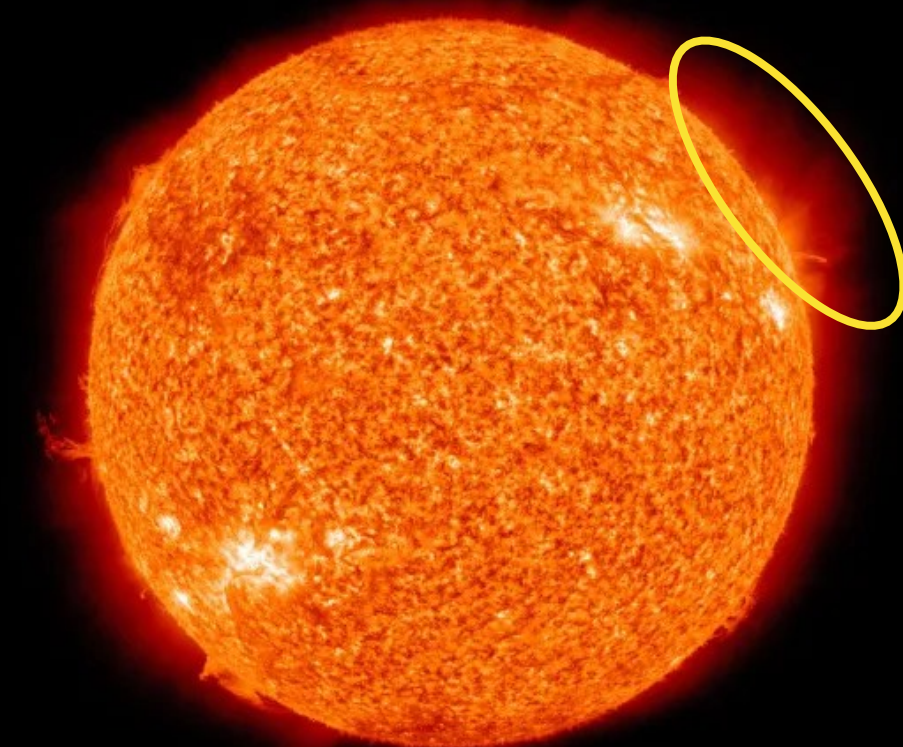


- Atmosphère à $\approx 5\,800^\circ\text{K}$
- Plasma chaud, ionisé : électrons libres
- Lente diffusion de la lumière vers la surface (la photosphère)
- Ejections, taches solaires : déséquilibre thermique, processus physiques (MHD, ..)
- Les étoiles sont en *quasi* équilibre thermique !

Taches Solaires
 $\Delta T \approx 1\,000^\circ\text{K}$

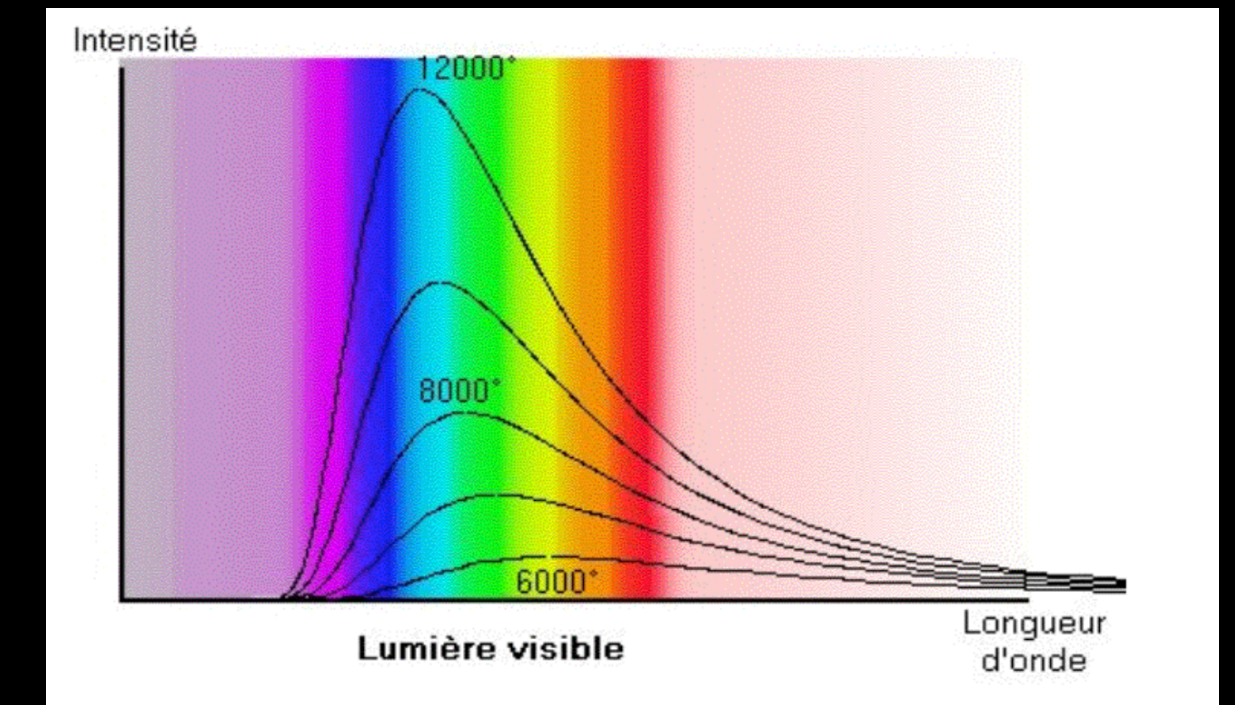


Le Soleil
en bande X

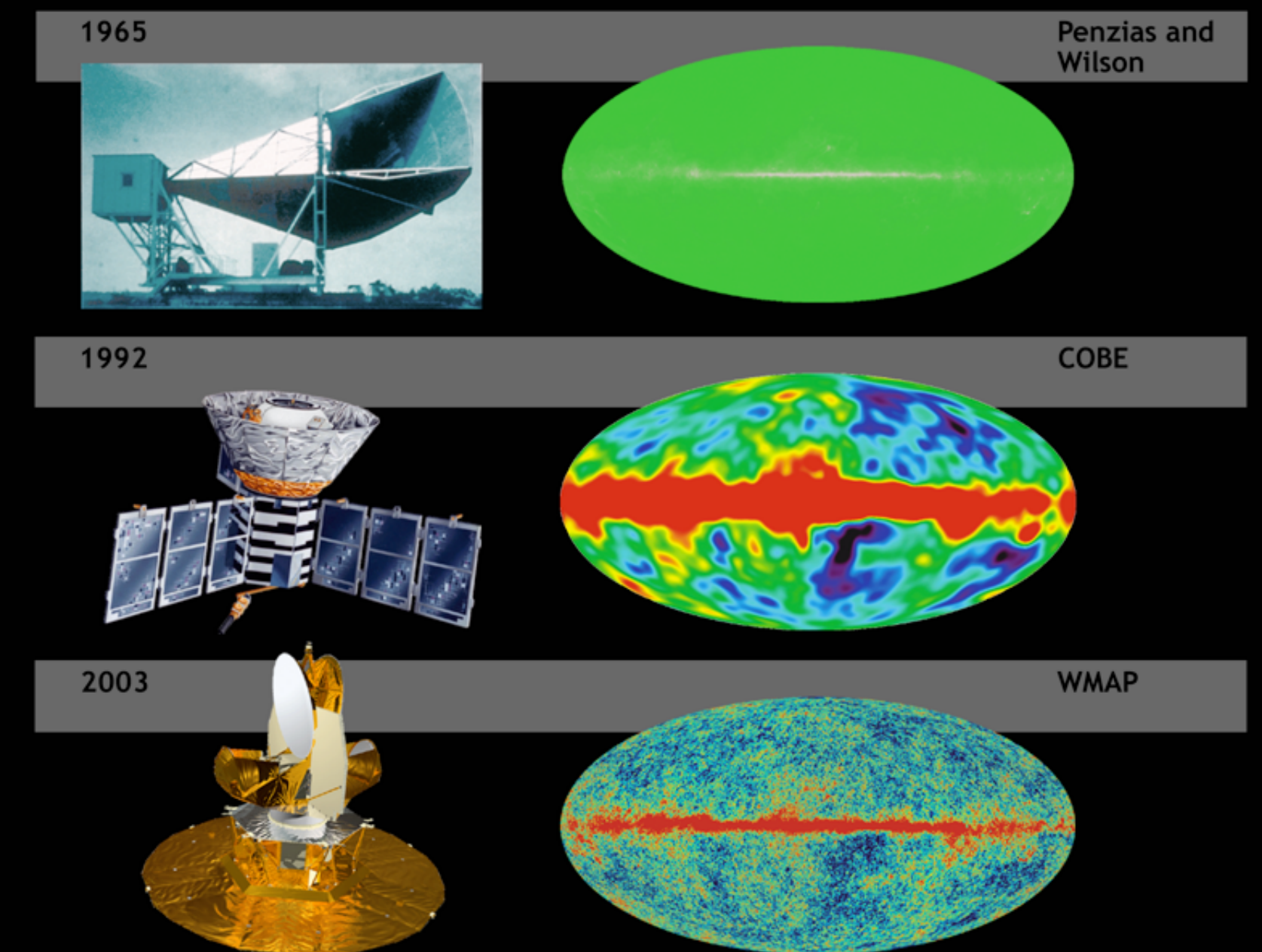


Le couple rayonnement - matière

Le cosmos tout entier comme “corps noir” !!

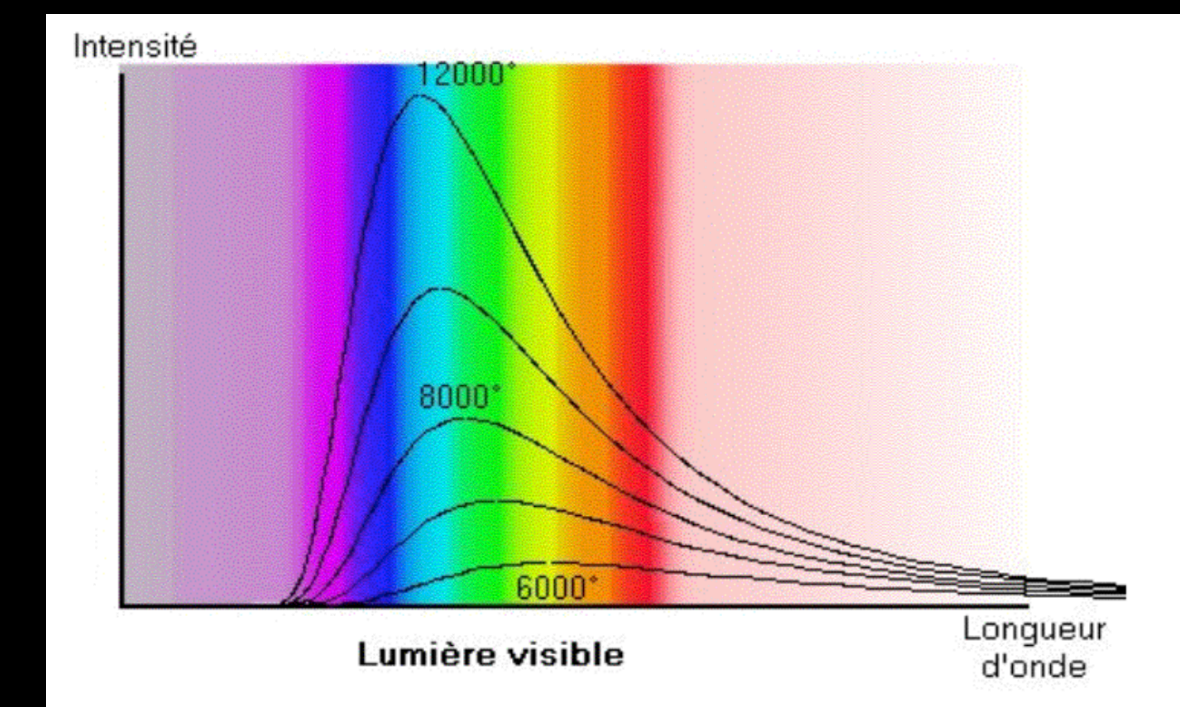


- Fond cosmique diffus $T \approx 2,73^\circ \text{ K}$
- *Origine de l'évolution dynamique du Cosmos*
- Couple fort entre le rayonnement électromagnétique et les électrons libres ;
- Fluctuations de température (couleurs) de l'ordre de $5 \times 10^{-6}^\circ \text{ K}$
- Découverte en 1965 ; missions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

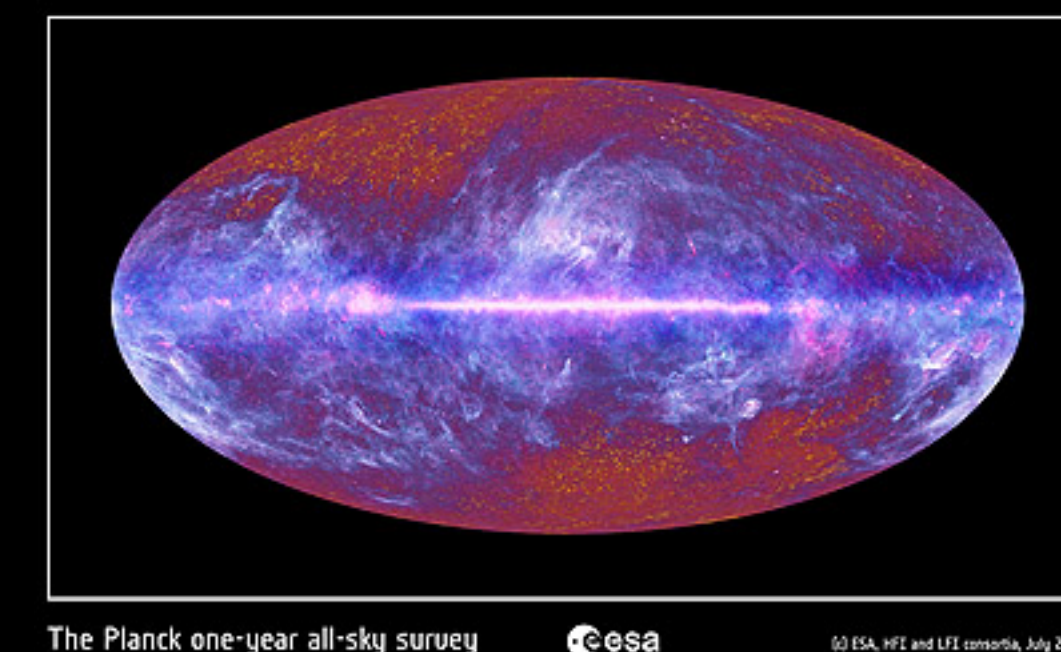


Le couple rayonnement - matière

Le cosmos tout entier comme “corps noir” !!

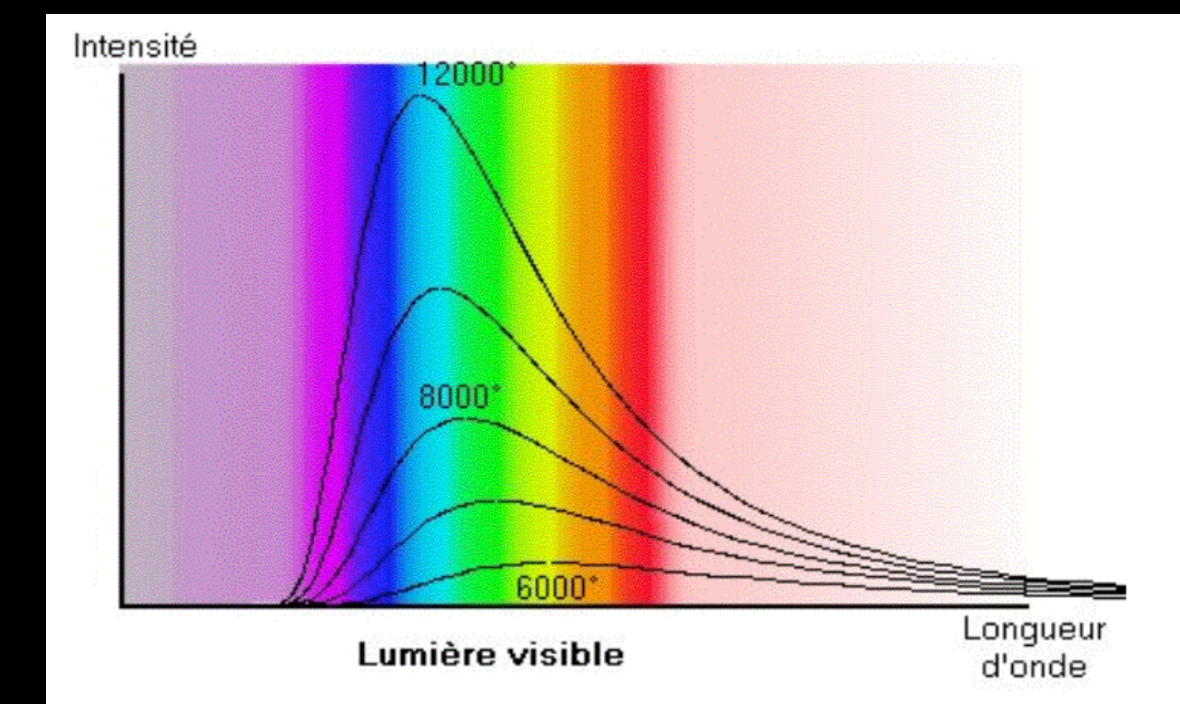


- Fond cosmique diffus $T \approx 2,73^\circ \text{ K}$
- *Origine de l'évolution dynamique du Cosmos*
- Couple fort entre le rayonnement électromagnétique et les électrons libres ;
- Fluctuations de température (couleurs) de l'ordre de $5 \times 10^{-6}^\circ \text{ K}$: Mission Planck 2009-2013 (2019)
- Cours 3 : le rôle des ondes (électromagnétiques et acoustiques) dans la structuration de l'Univers

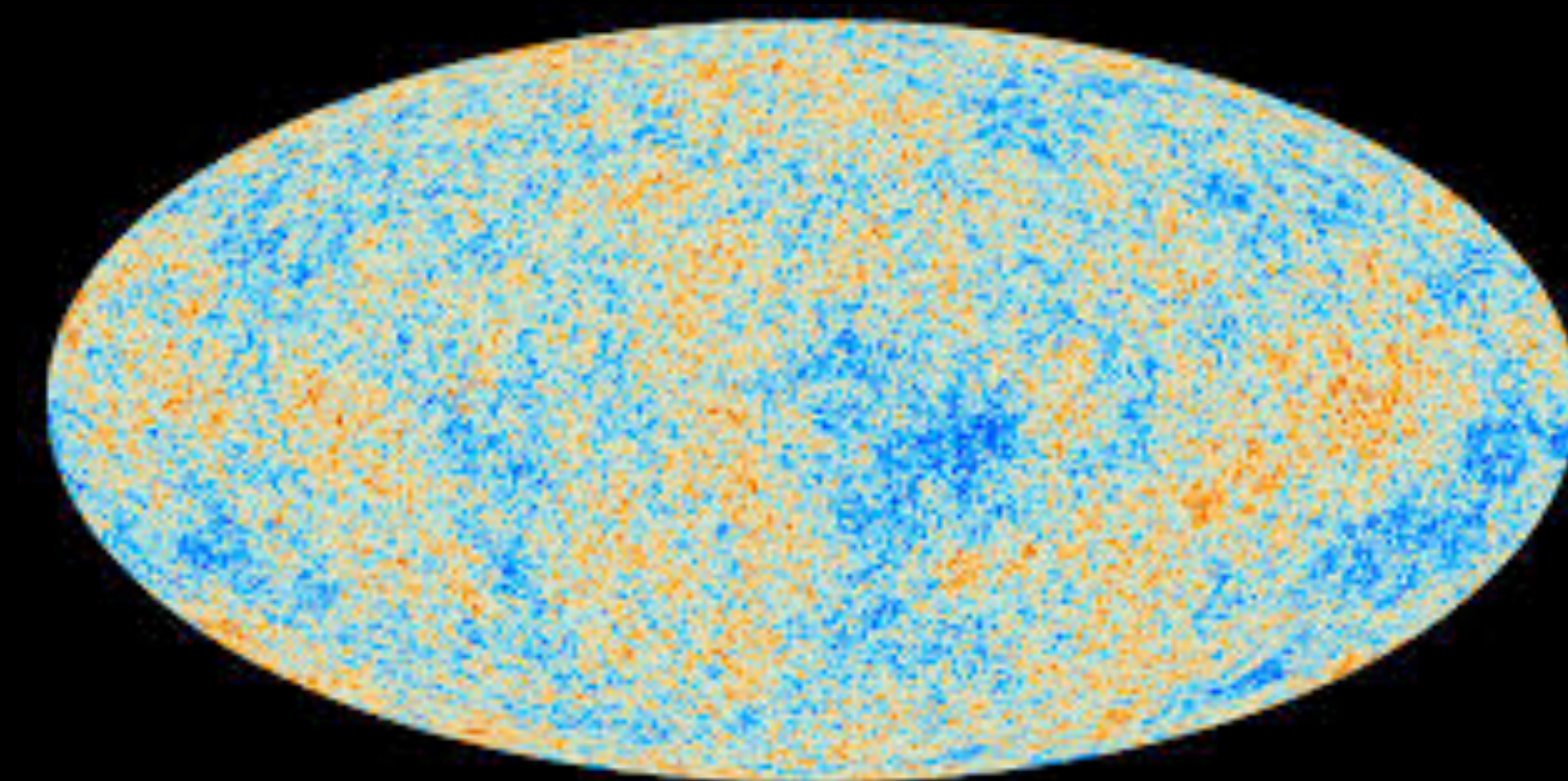
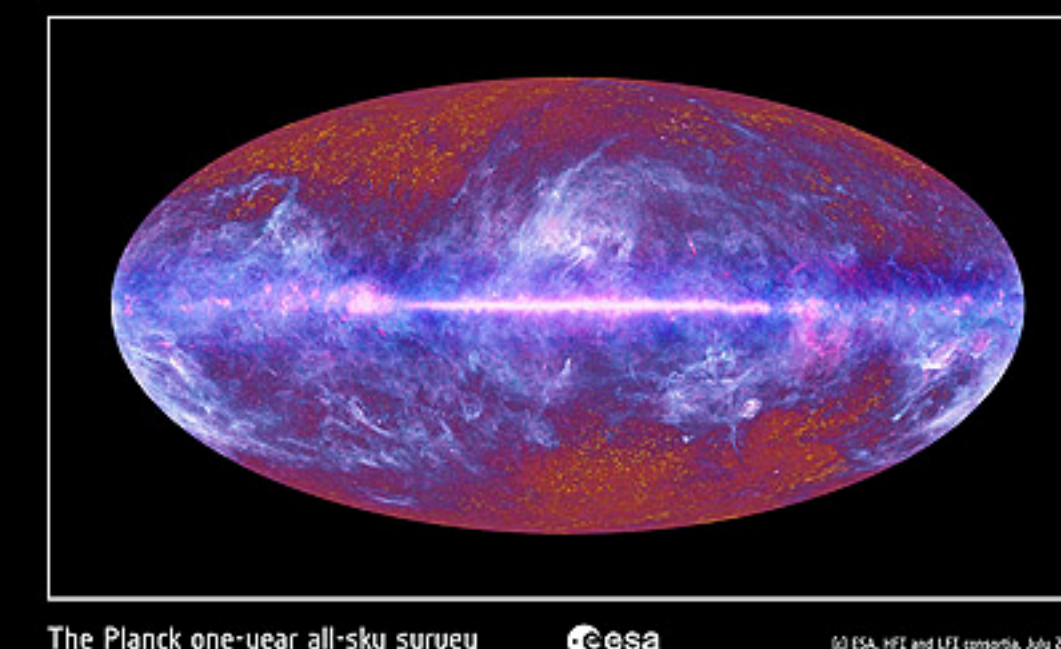


Le couple rayonnement - matière

Le cosmos tout entier comme “corps noir” !!



- Fond cosmique diffus $T \approx 2,73^\circ \text{ K}$
- *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 $5 \times 10^{-6}^\circ \text{ K}$: Mission Planck 2009-2013 (2019)
- Cours 3 : le rôle des ondes (électromagnétiques et acoustiques) dans la structuration de l'Univers

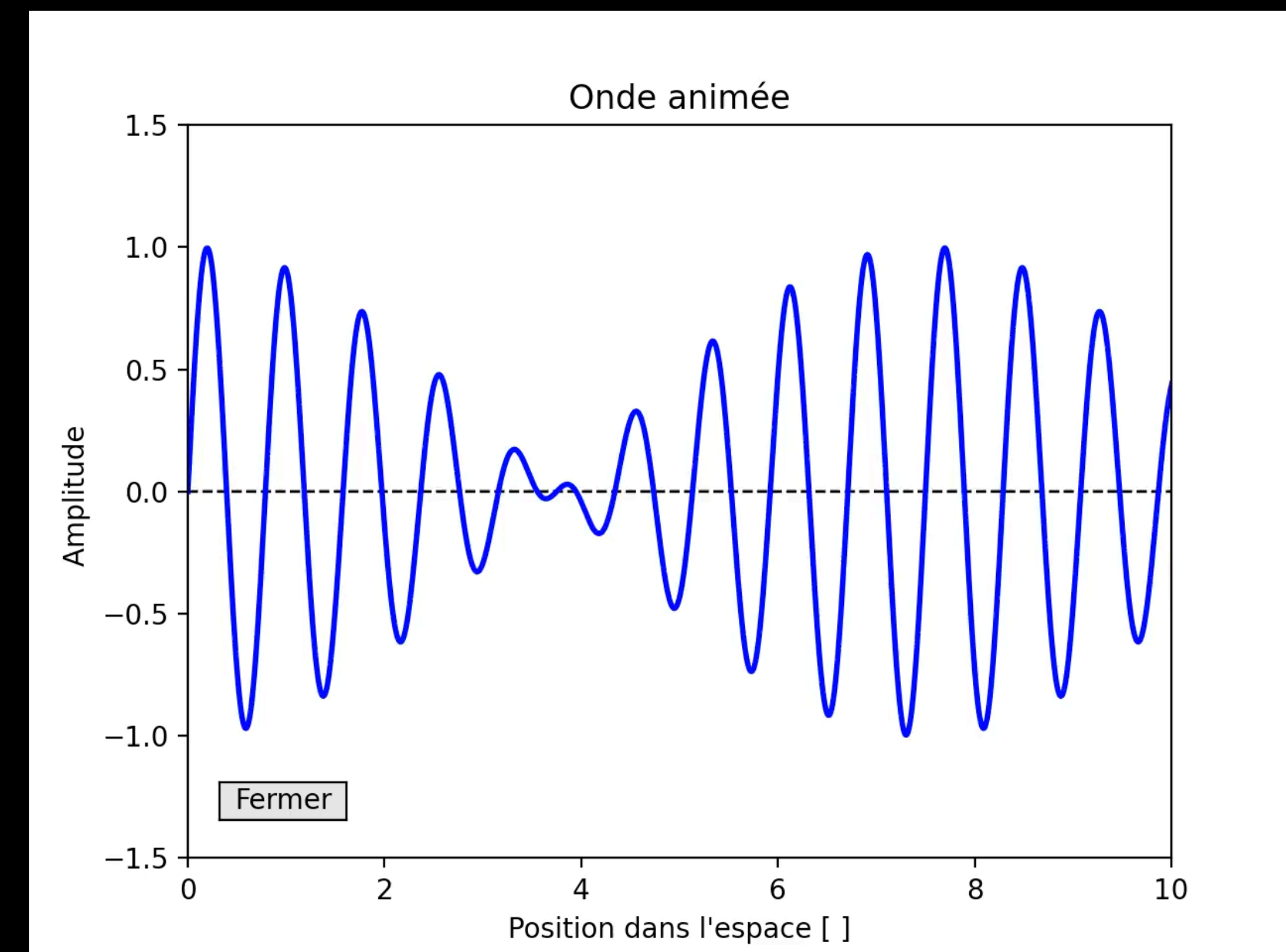


Paquet d'ondes, confinement du signal

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 nombre d'onde k , $k+\Delta k$ avec Δk petit devant k , 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

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

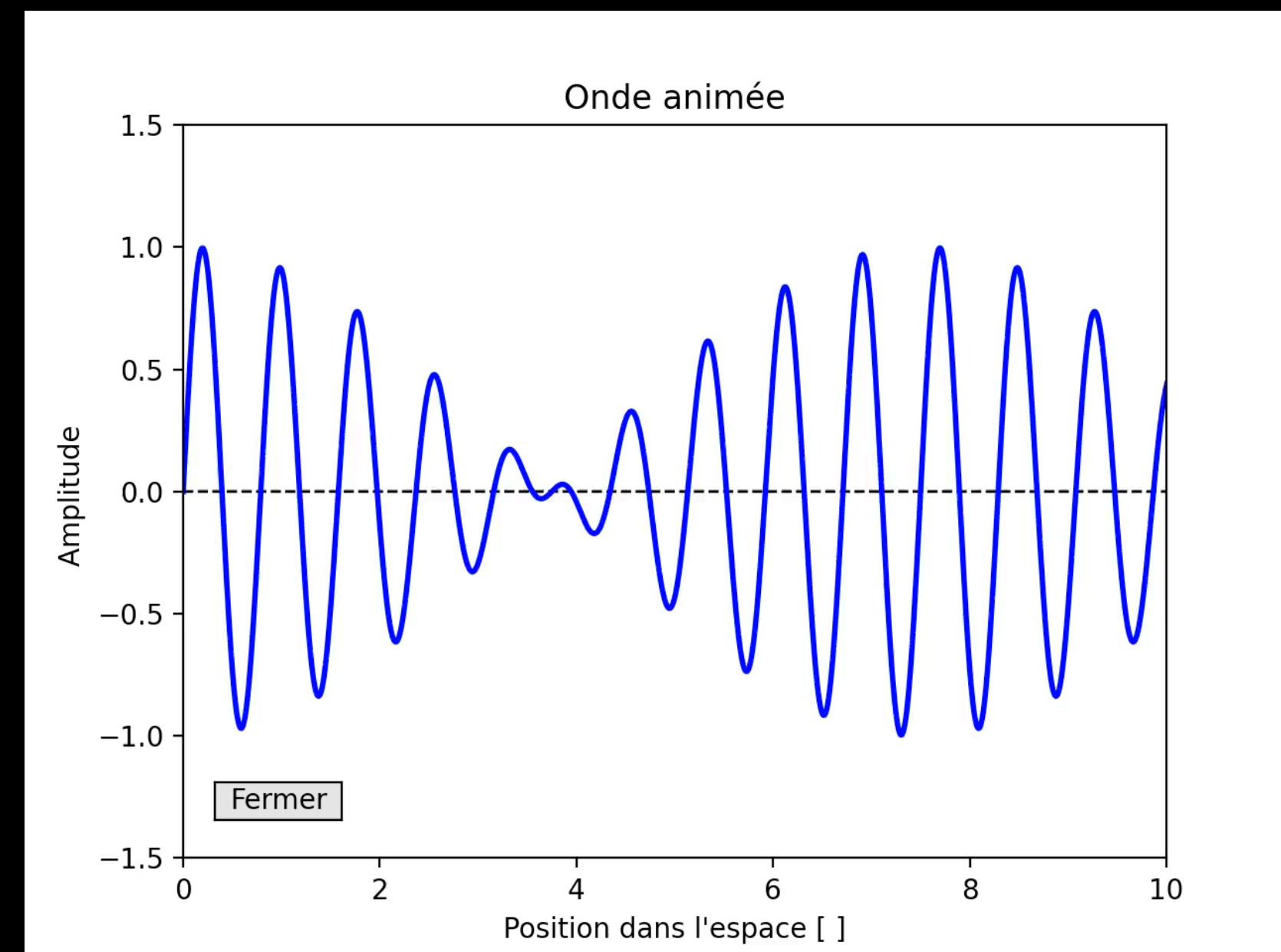


Paquet d'ondes, confinement du signal

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 nombre d'onde k , $k+\Delta k$ avec Δk petit devant k , 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

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

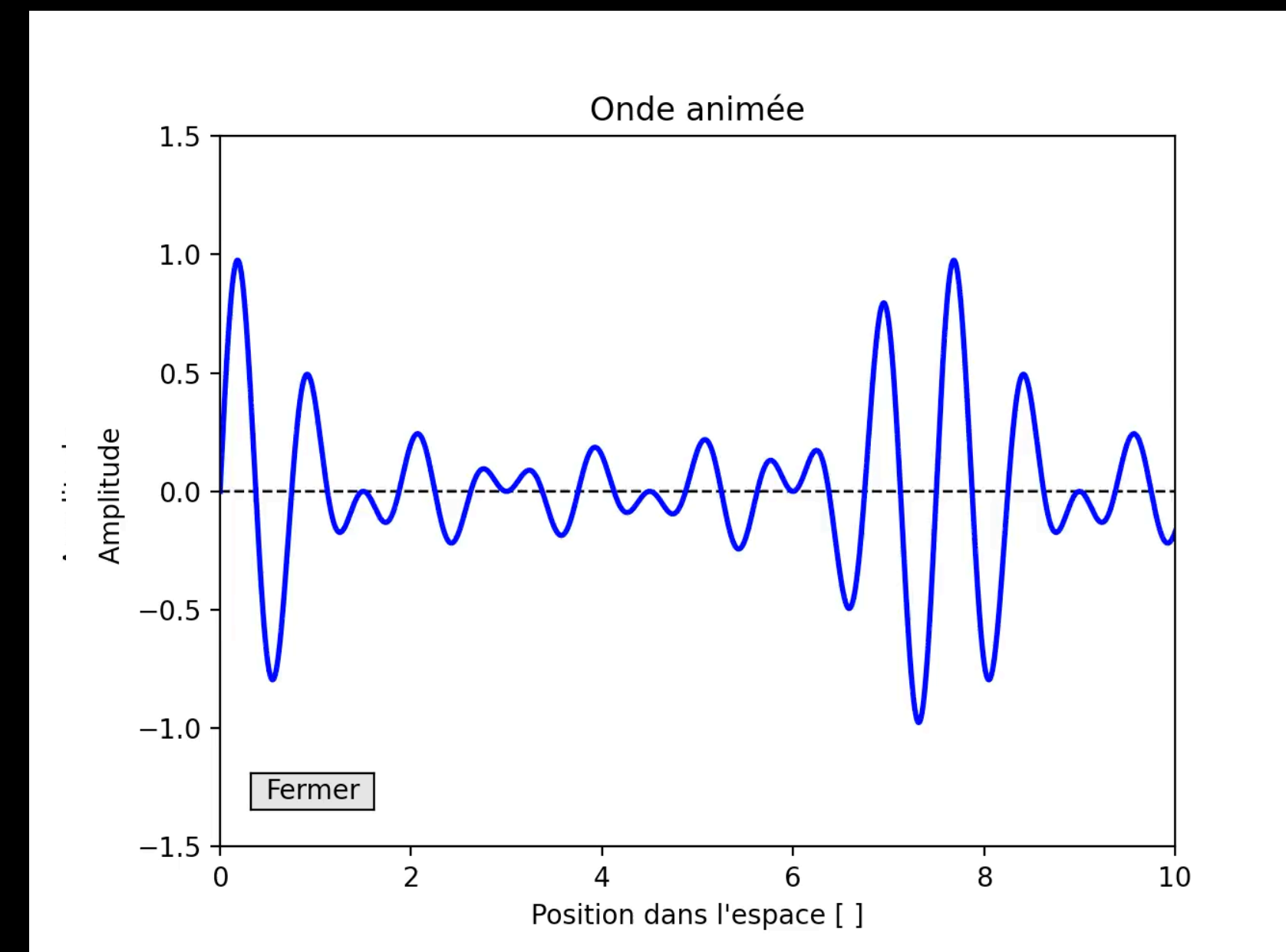


Paquet d'ondes, confinement du signal

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 nombre d'onde k , $k+\Delta k$ avec Δk petit devant k , 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

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

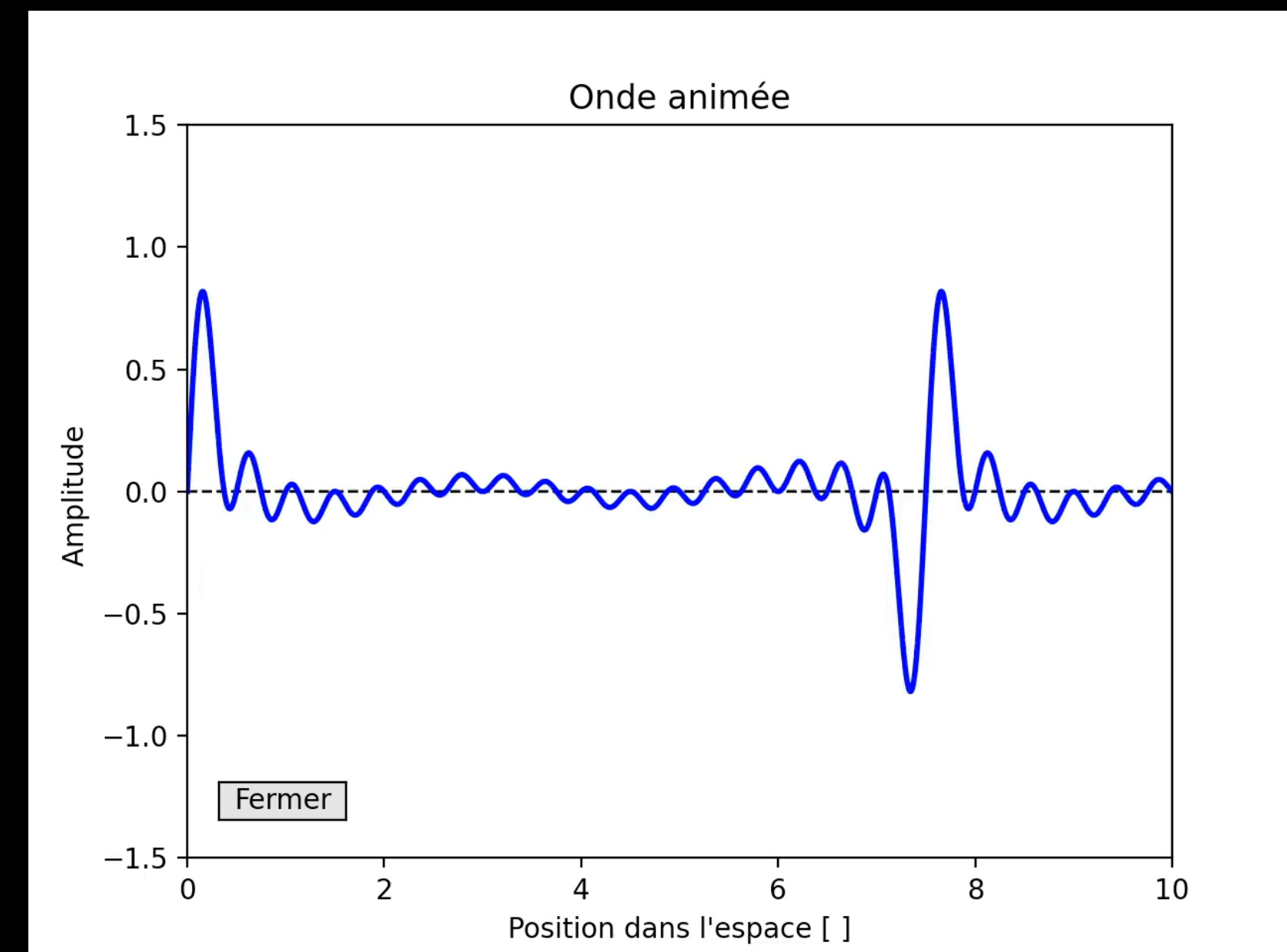


Paquet d'ondes, confinement du signal

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 nombre d'onde k , $k+\Delta k$ avec Δk petit devant k , 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

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

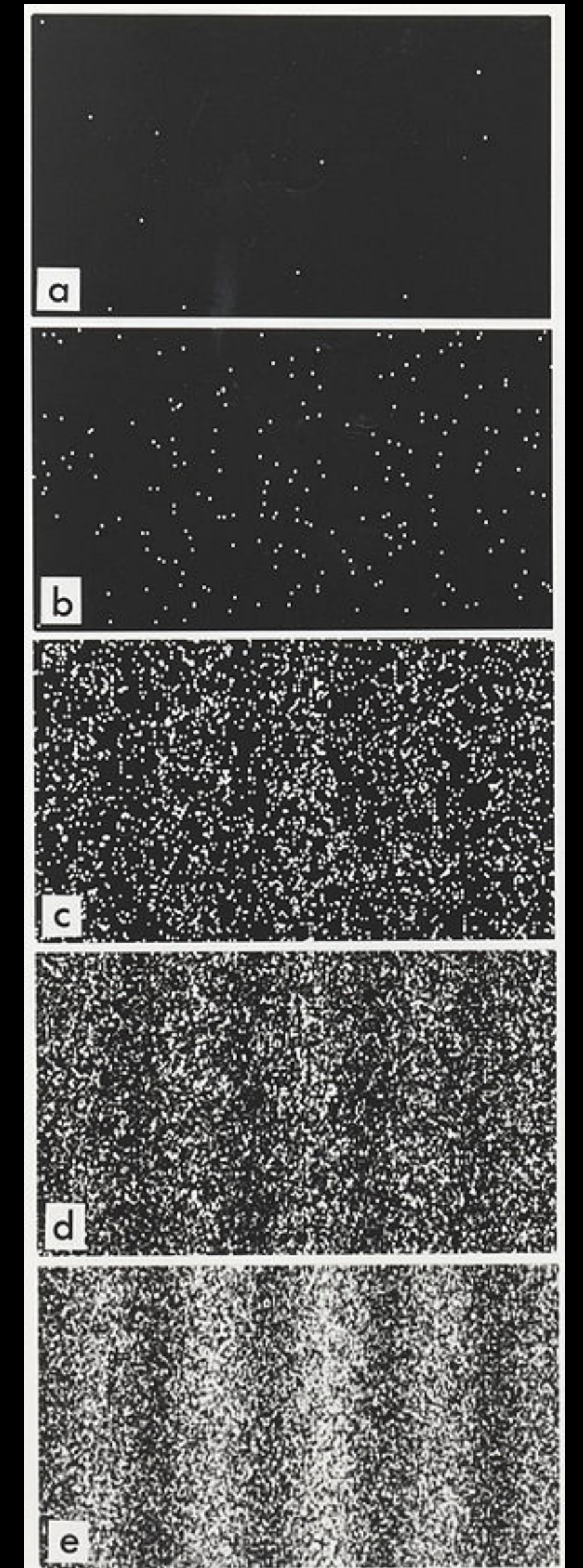


Paquet d'ondes, confinement du signal

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
- Il faut pour cela étendre la couverture dans l'espace de Fourier à $\pm \infty$
- C'est la dualité *onde-corpuscule* : une particule de quantité de mouvement $p = mv$ se comporte comme un paquet d'onde telle que $p = h k$ (quantités vectorielles)
- Interprétation probabiliste : fonction d'onde et équation de Schrödinger

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



Ondes & Cosmos

Contenu, objectifs

- Cours 3 : Le cosmos et la gravitation
 - ✓ 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 lentilles G, courbure de l'espace~~
 - ✓ ~~Reconstruire la tranche d'un trou noir~~
 - ✓ Les ondes gravitationnelles : principes, recensement, l'avenir
 - ✓ 10 mai @ 18h15



Le beignet de la galaxie M87

christian.boily@astro.unistra.fr