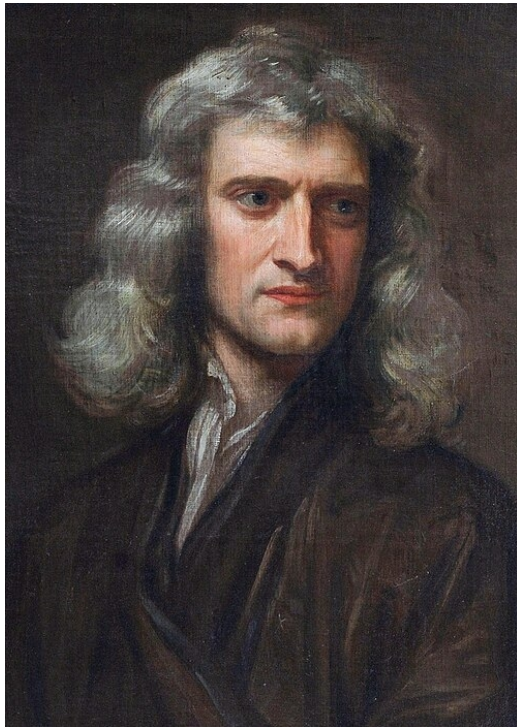


LA GRAVITATION: DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE A LA GRAVITÉ QUANTIQUE

Philippe Jetzer
Institute de Physique
Université de Zurich

Paris, 8 Juillet 2025 (COST ACTION 23130)

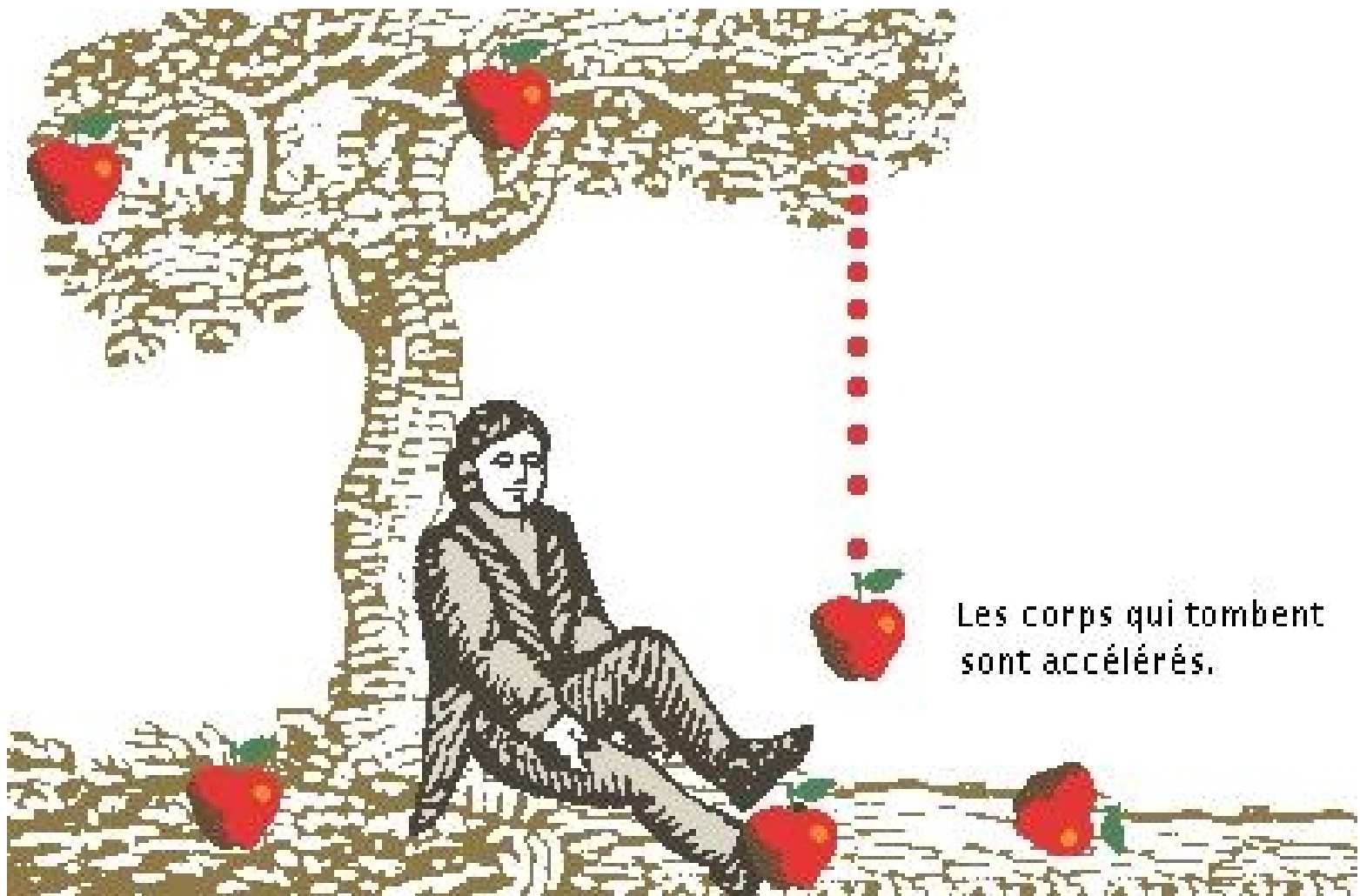
La loi universelle de la gravitation découverte par Isaac Newton (1687)



La gravitation est une force responsable de la chute des corps, du mouvement des corps célestes, et de l'attraction entre des corps ayant une masse.

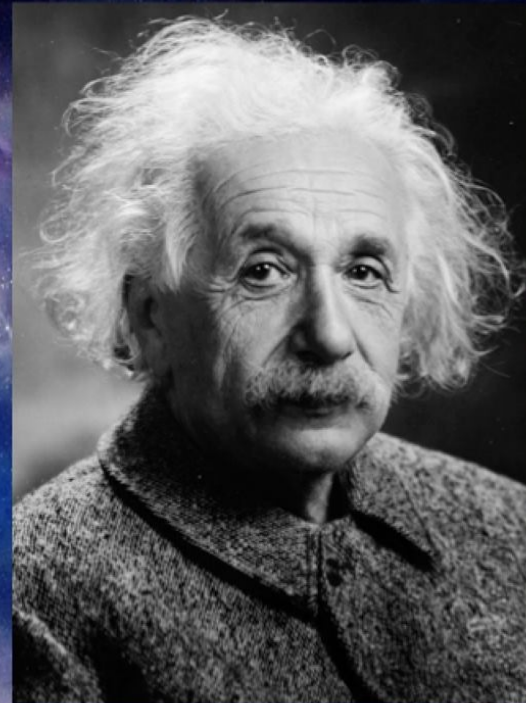
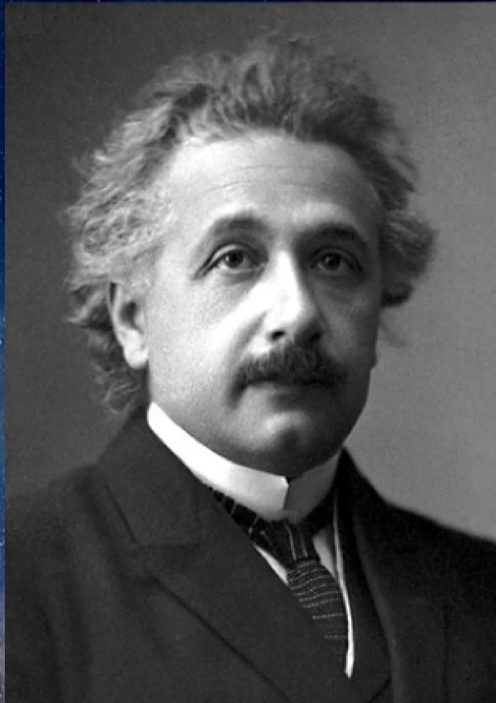
La force agit immédiatement a distance!

Newton (1689)

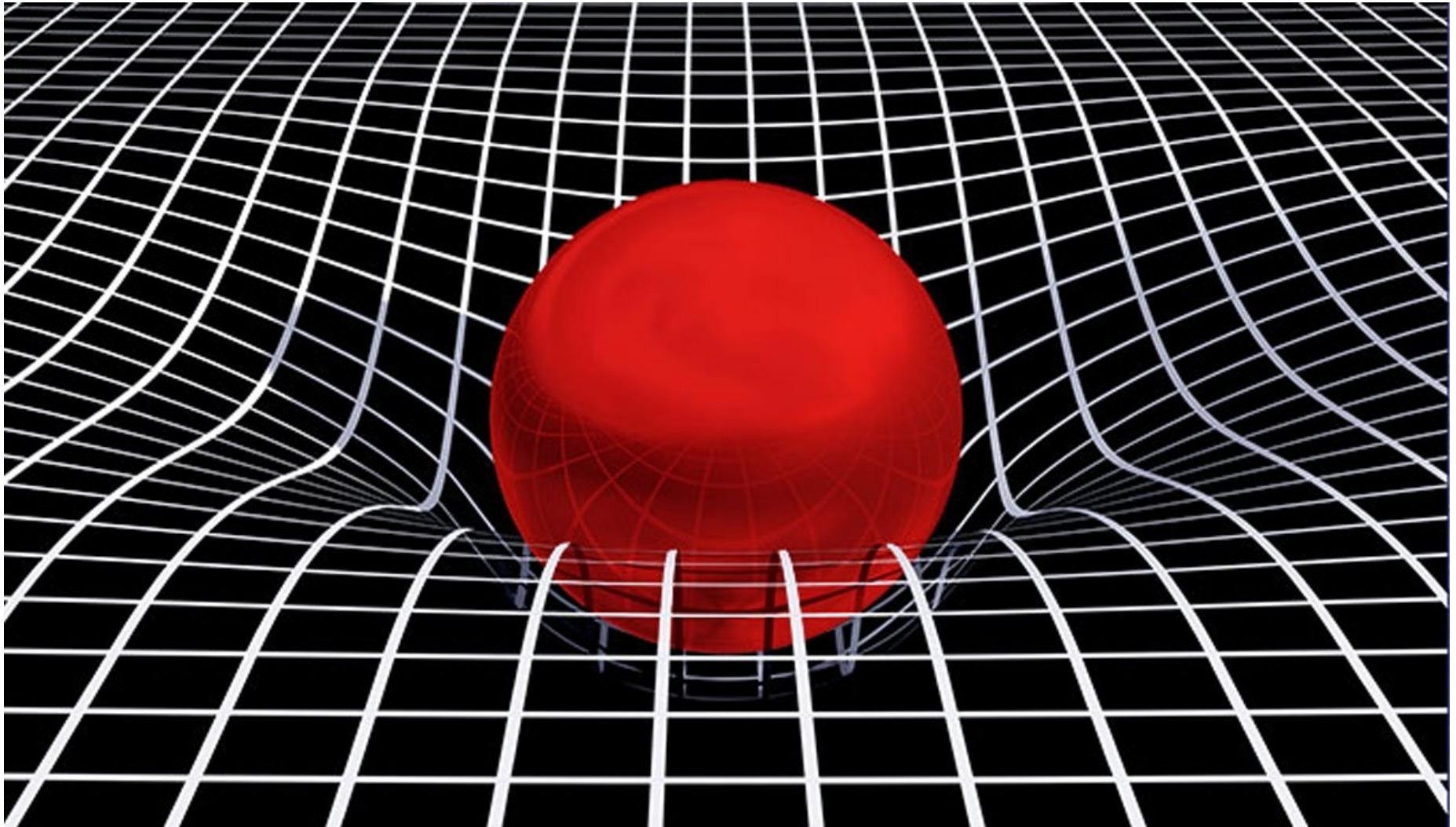


Les corps qui tombent
sont accélérés.

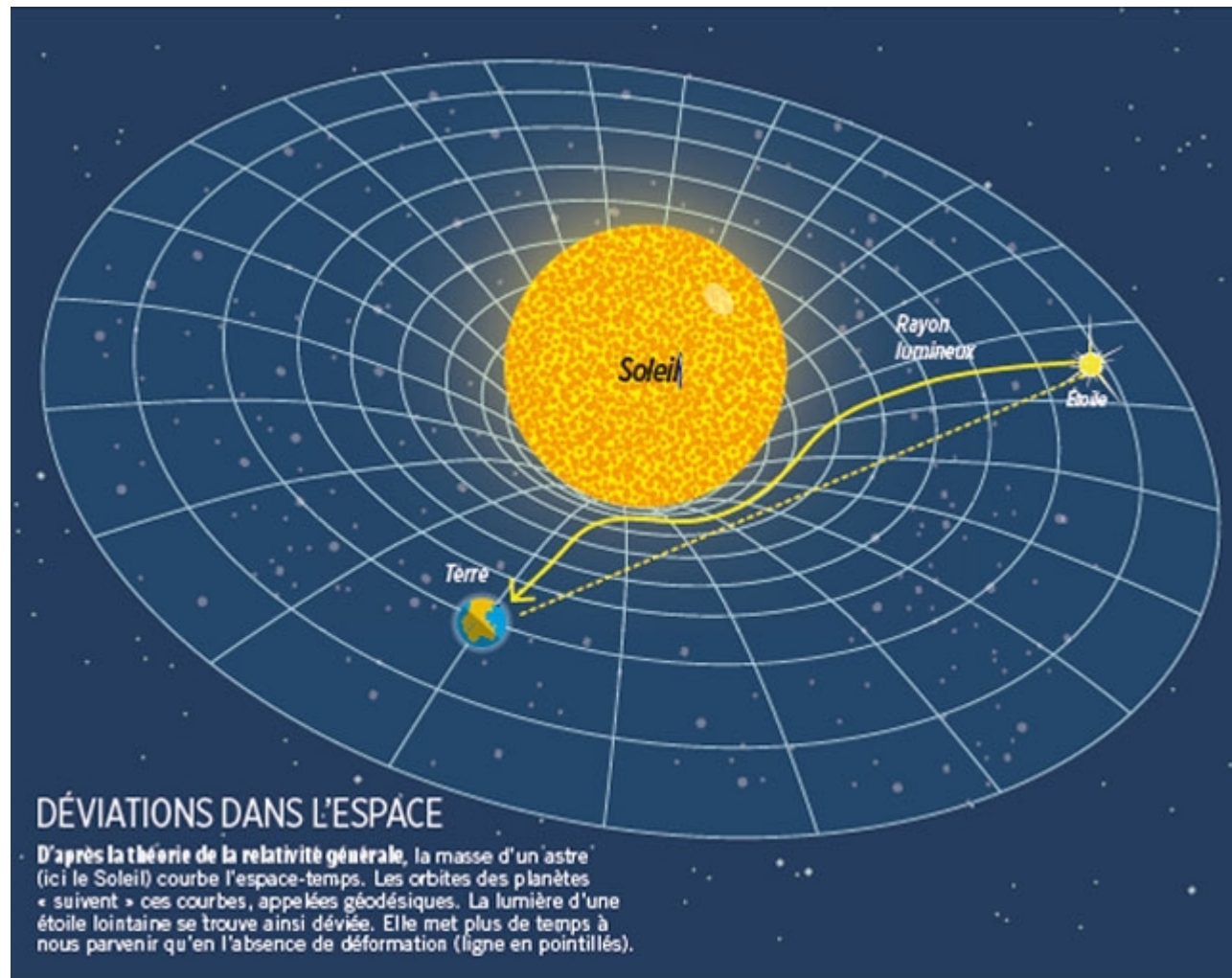
EINSTEIN: RELATIVITÉ GÉNÉRALE 1915

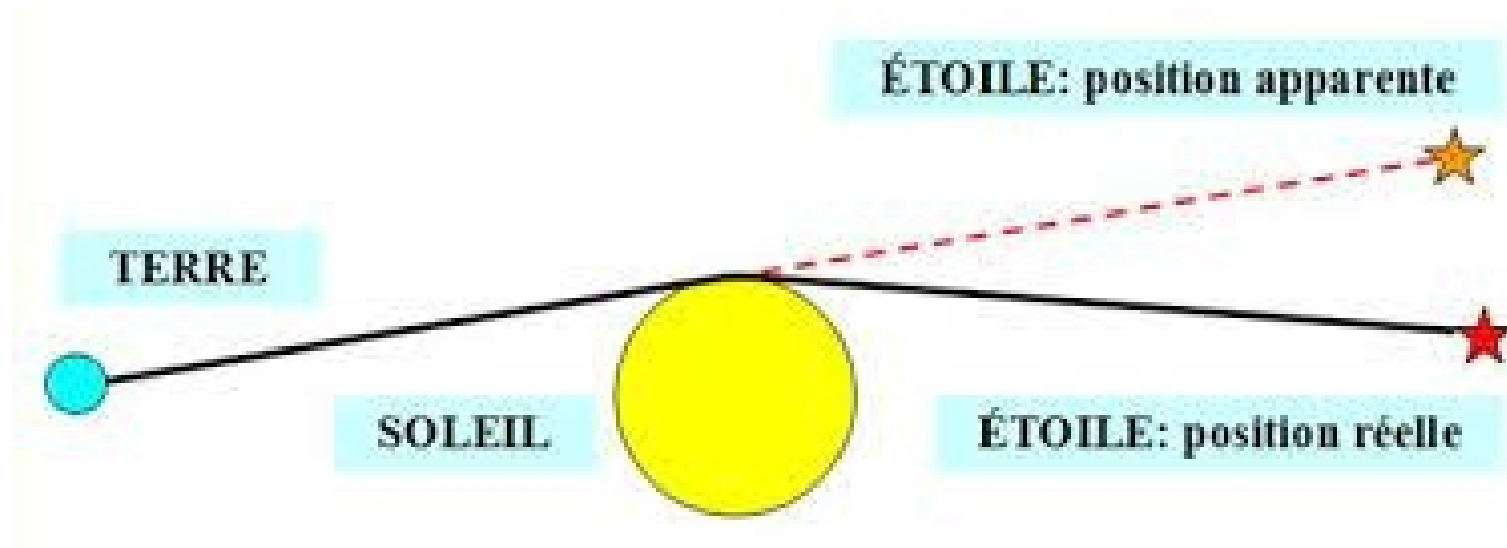


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = (8\pi G/c^4) T_{\mu\nu}$$

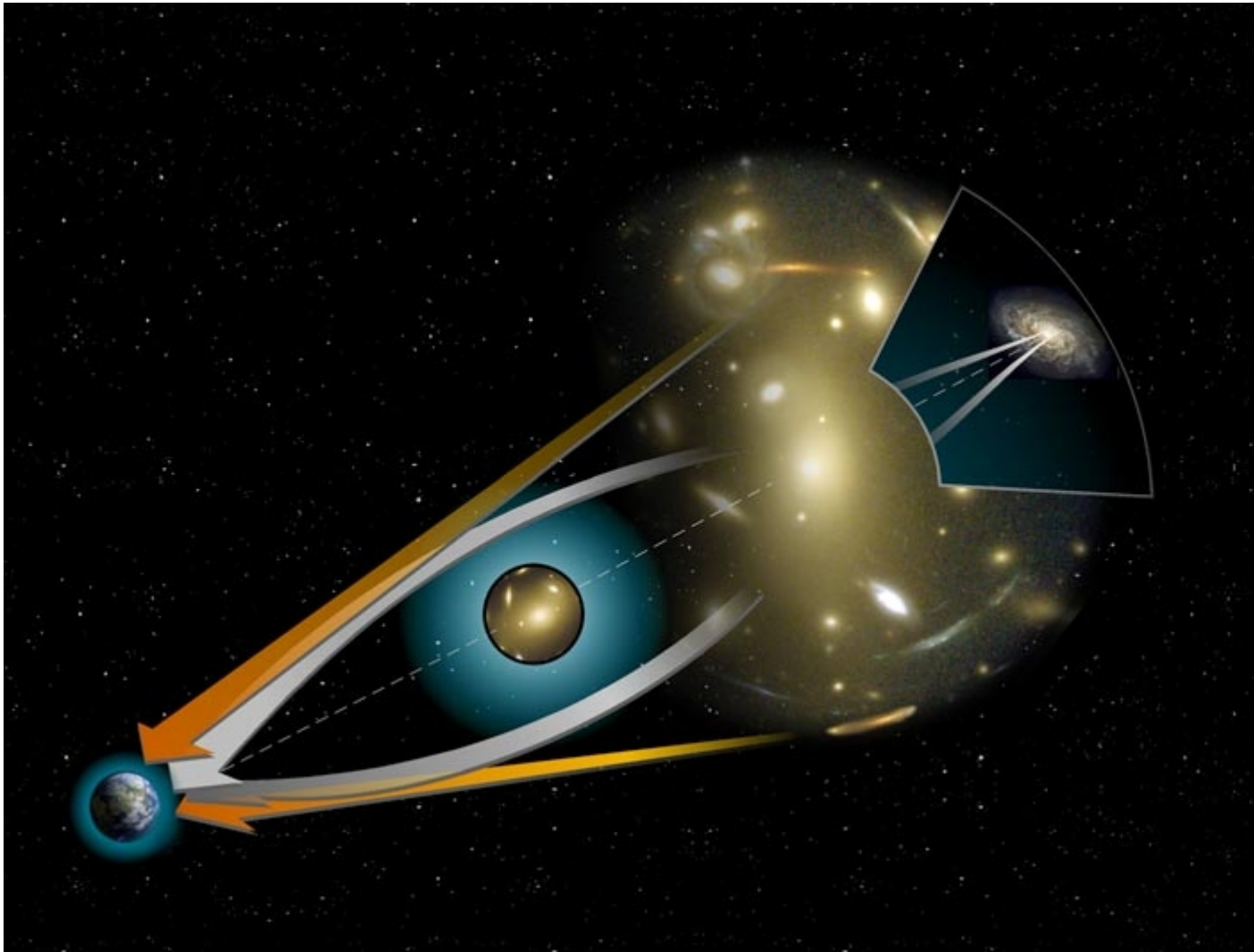


La gravitation n'est pas une force, mais une propriété de l'espace-temps. L'espace n'est pas rigide mais est déformé par les masses.

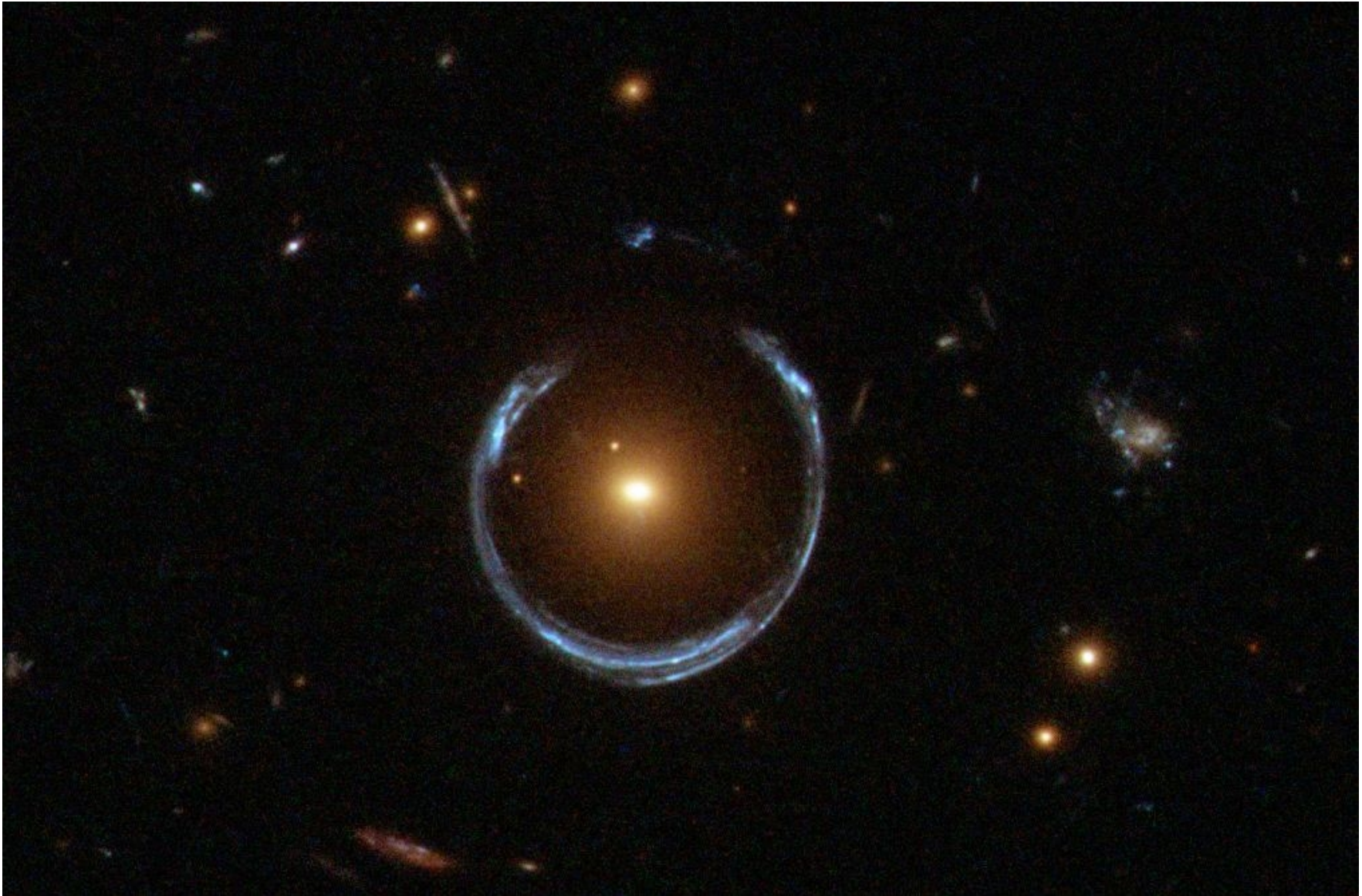




1919: lors d'une éclipse totale du Soleil la déviation des positions apparentes des étoiles a été vérifiée en accord avec la relativité générale.



Lentille gravitationnelle: déformation des images



Anneau d'Einstein en fer à cheval vu par Hubble



Galaxies RCS2 032727-132623 entouré d'un arc gravitationnel prise par le télescope Hubble. L'amas de galaxie se trouve à cinq milliards d'années-lumière de nous. L'arc gravitationnel provient de la lumière d'une galaxie qui se trouve derrière l'amas à dix milliards d'années-lumière de nous.

Ondes gravitationnelles

Decembre 1915:

Einstein publie la theorie
de la relativité générale.

Janvier 1918:

sur les ondes gravitationnelles

Über Gravitationswellen.

VON A. EINSTEIN.

(Vorgelegt am 31. Januar 1918 [s. oben S. 79].)

Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiarbeit von mir behandelt worden¹. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

Wie damals beschränke ich mich auch hier auf den Fall, daß das betrachtete zeiträumliche Kontinuum sich von einem »galileischen« nur sehr wenig unterscheidet. Um für alle Indizes

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

setzen zu können, wählen wir, wie es in der speziellen Relativitätstheorie üblich ist, die Zeitvariable x_4 rein imaginär, indem wir

$$x_4 = it$$

setzen, wobei t die »Lichtzeit« bedeutet. In (1) ist $\delta_{\mu\nu} = 1$ bzw. $\delta_{\mu\nu} = 0$, je nachdem $\mu = \nu$ oder $\mu \neq \nu$ ist. Die $\gamma_{\mu\nu}$ sind gegen 1 kleine Größen, welche die Abweichung des Kontinuums vom feldfreien darstellen; sie bilden einen Tensor vom zweiten Range gegenüber LORENTZ-Transformationen.

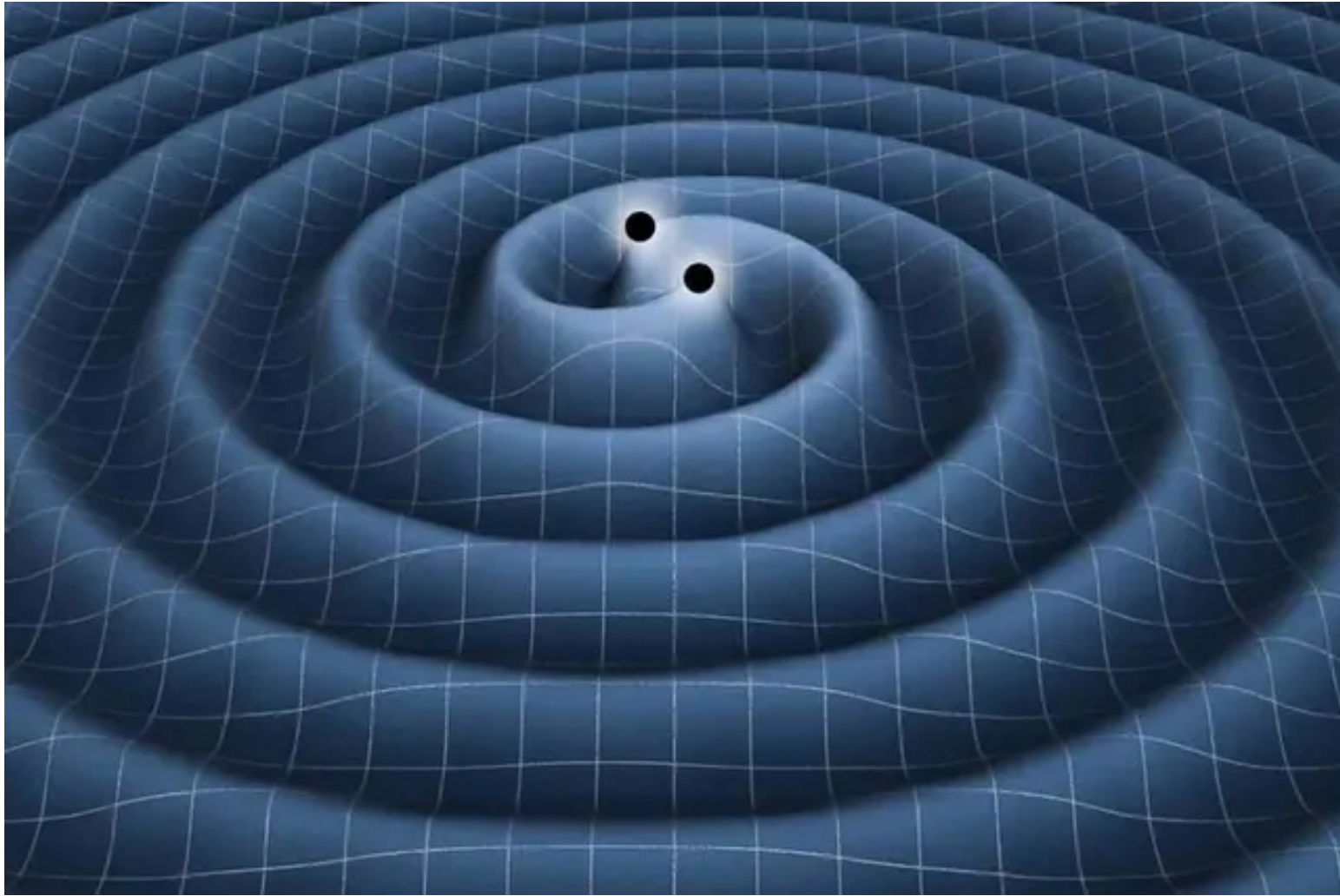
§ 1. Lösung der Näherungsgleichungen des Gravitationsfeldes durch retardierte Potentiale.

Wir gehen aus von den für ein beliebiges Koordinatensystem gültigen² Feldgleichungen

$$-\sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left\{ \frac{\mu\nu}{\alpha} \right\} + \sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_{\nu}} \left\{ \frac{\mu\alpha}{\alpha} \right\} + \sum_{\alpha\beta} \left\{ \frac{\mu\alpha}{\beta} \right\} \left\{ \frac{\nu\beta}{\alpha} \right\} - \sum_{\alpha\beta} \left\{ \frac{\mu\nu}{\alpha} \right\} \left\{ \frac{\alpha\beta}{\beta} \right\} \quad (2)$$
$$= -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right).$$

¹ Diese Sitzungsber. 1916, S. 688 ff.

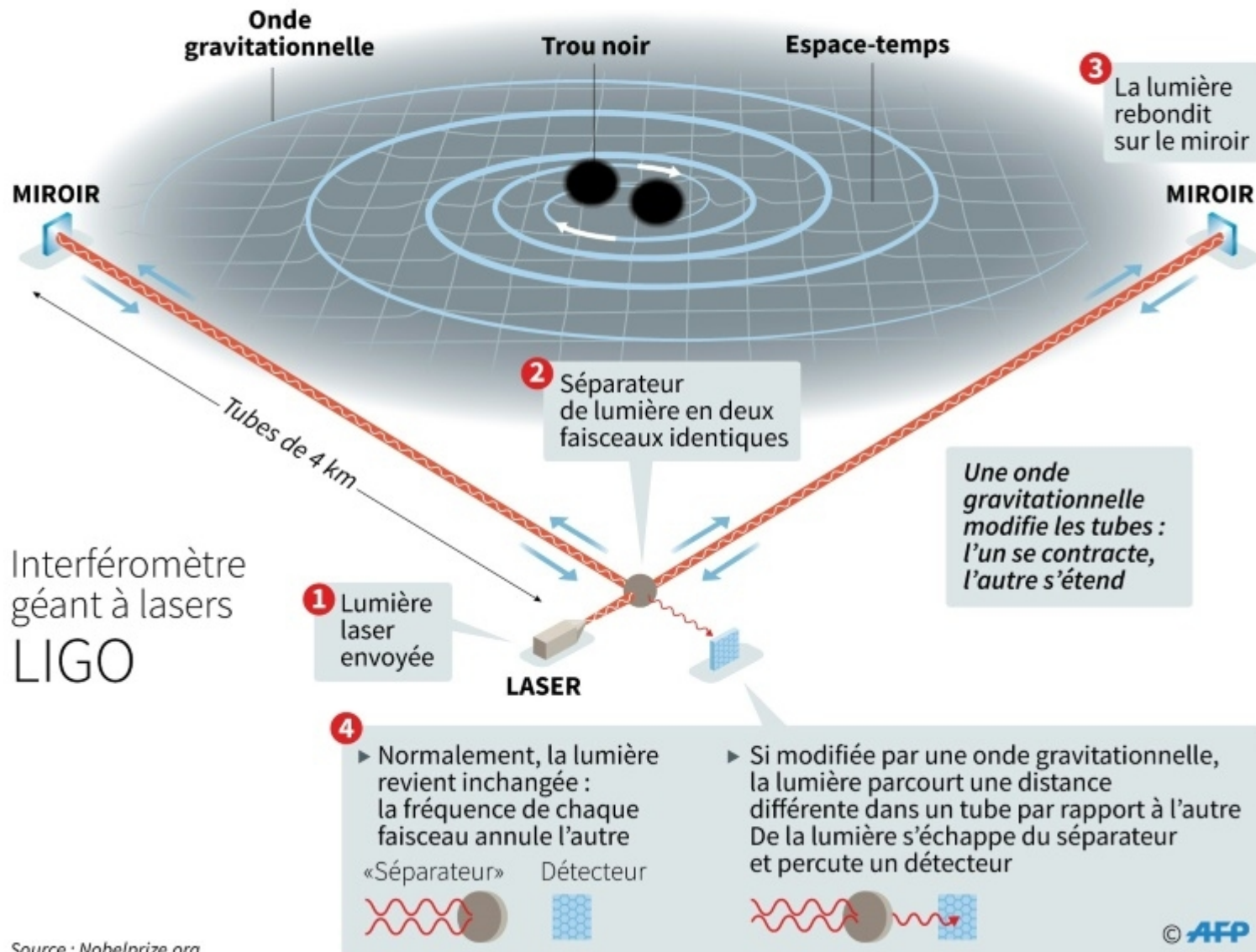
² Von der Einführung des »2-Gliedes« (vgl. diese Sitzungsber. 1917, S. 142) ist dabei Abstand genommen.



Les ondes gravitationnelles sont des déformations de l'espace-temps qui se propagent à la vitesse de la lumière (par exemple un système binaire de deux trous noirs ou deux étoiles à neutrons). Première observation faite le 14 septembre 2015.

Le détecteur d'ondes gravitationnelles

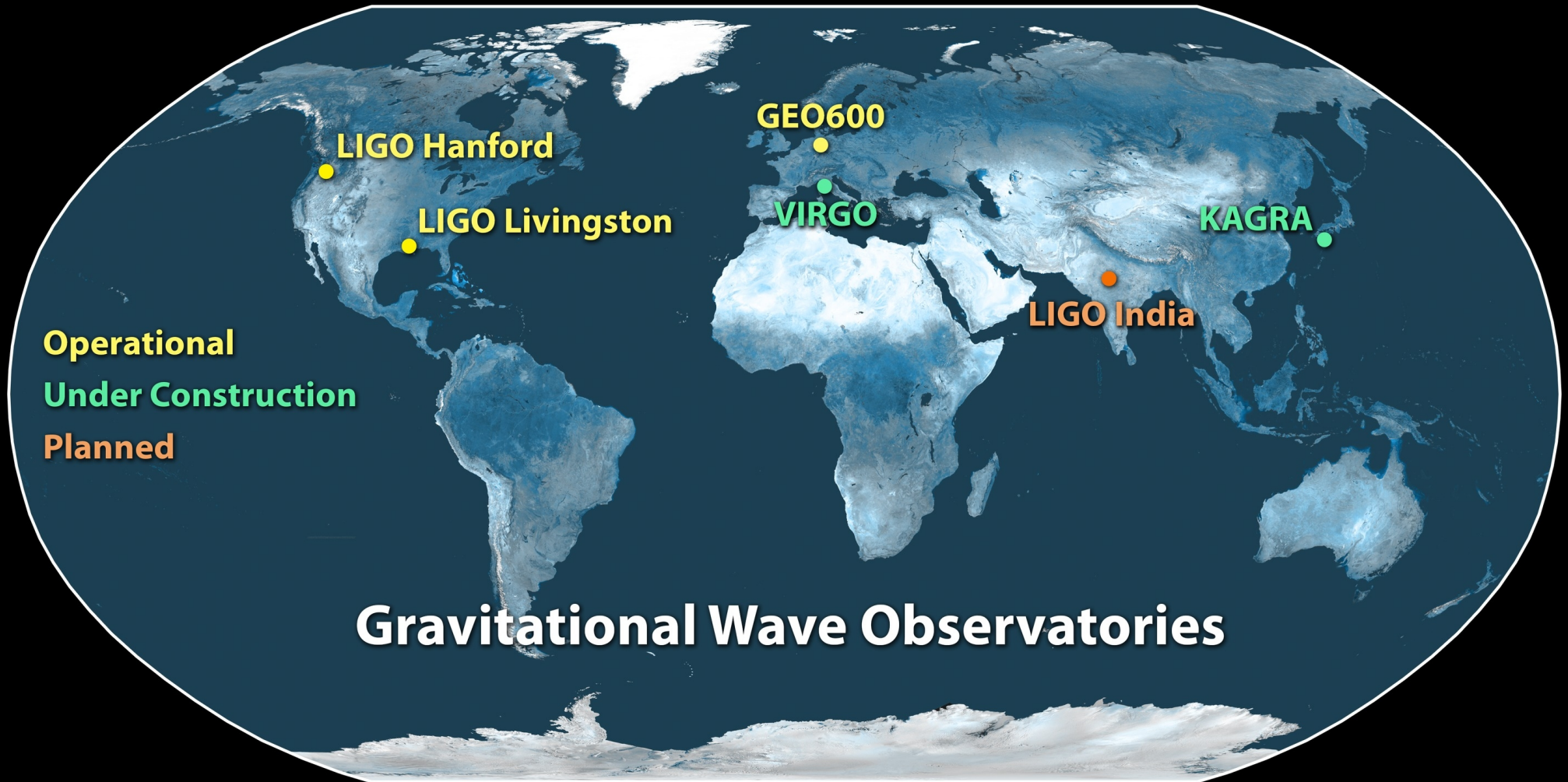
Pour sa conception et ses résultats, les astrophysiciens
Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne récompensés

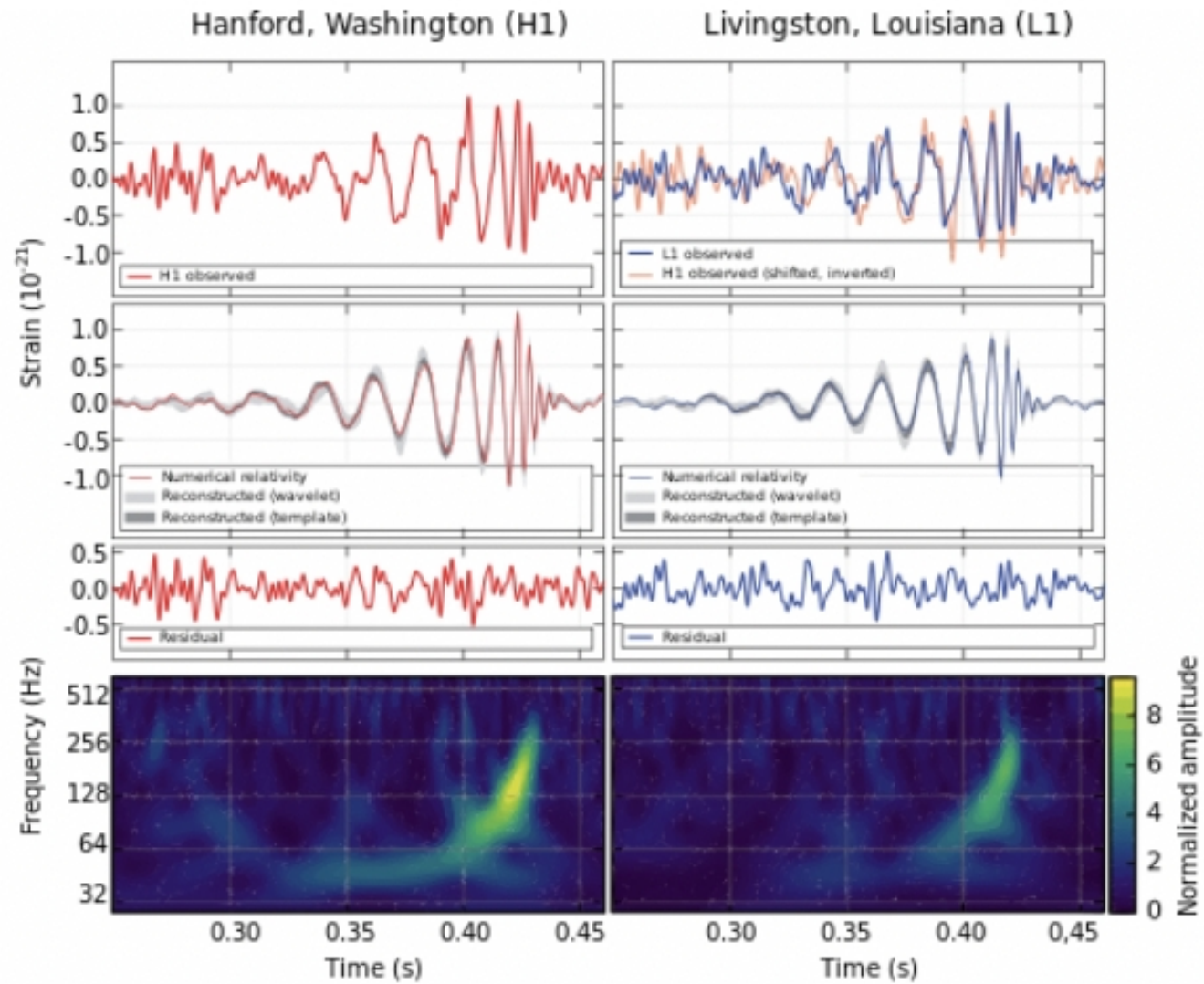




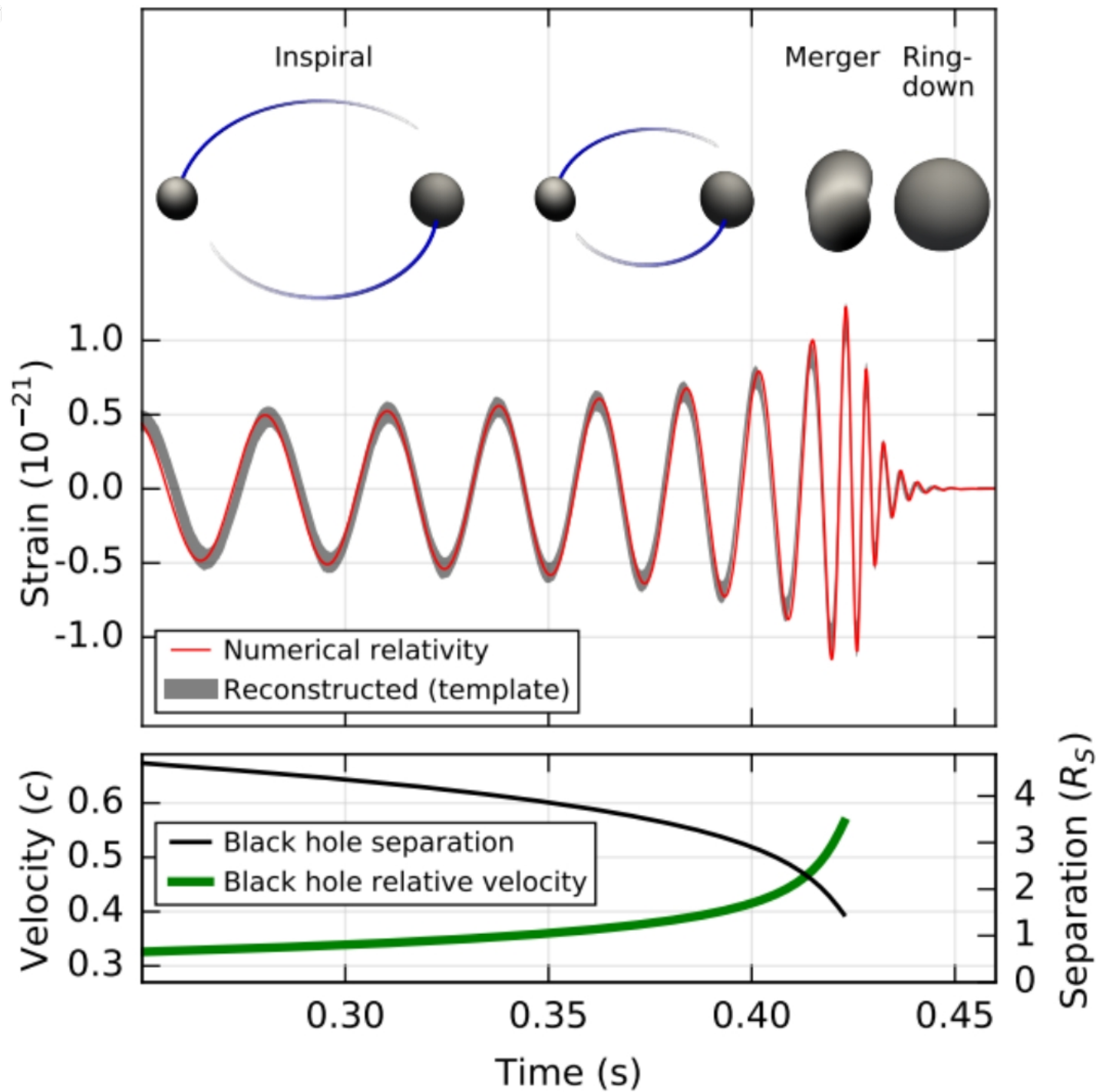
Détecteur Virgo en Italie (collaboration entre l'Italie et la France)

Détecteurs d'ondes gravitationnelles

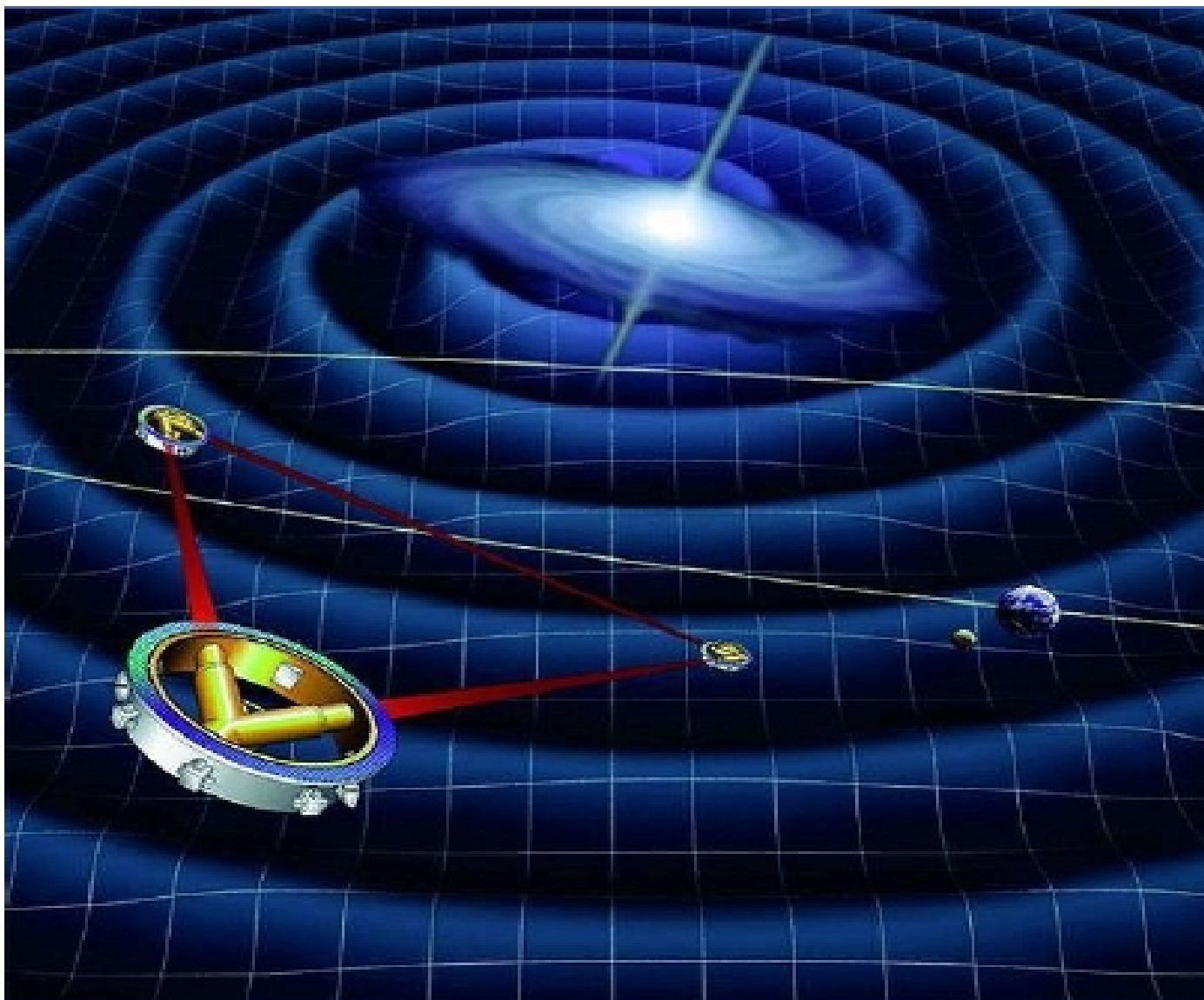




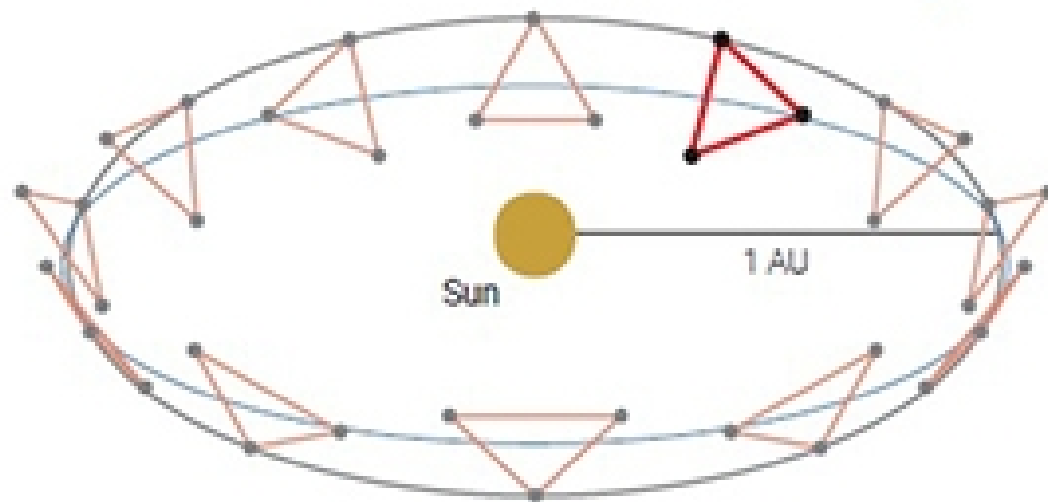
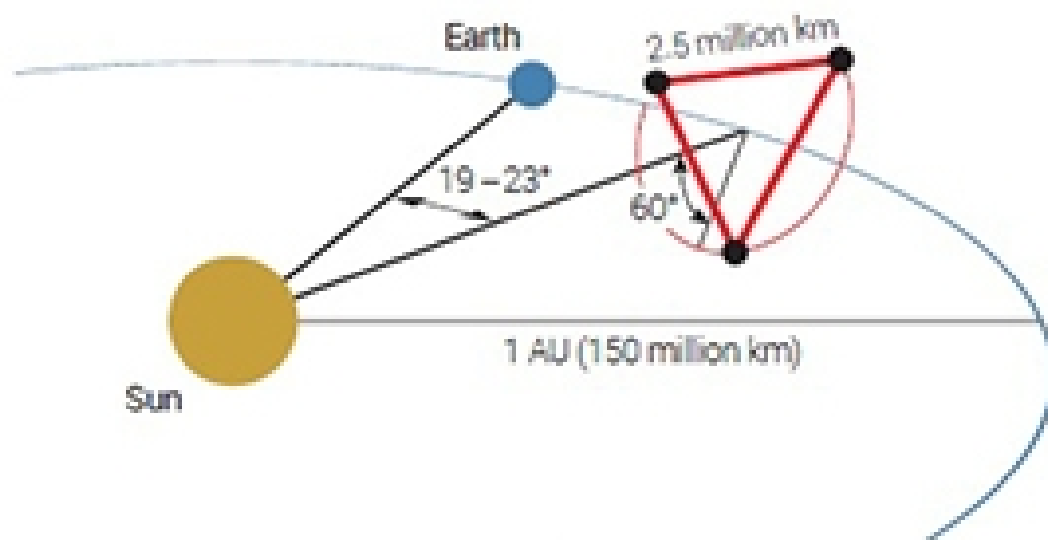
Signal du premier événement du 14 septembre 2015



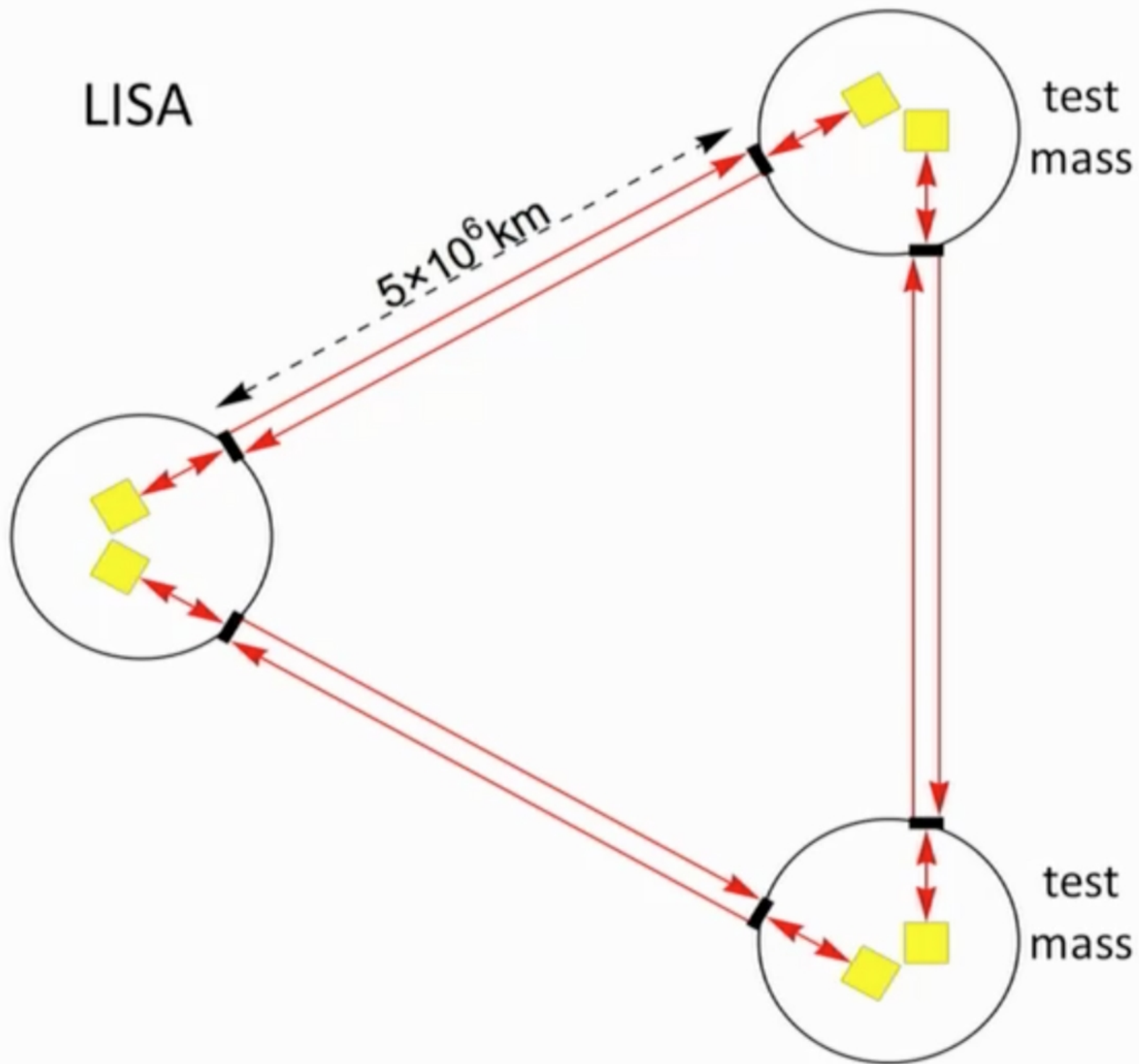
Event	GW150914	GW151226	LVT151012
Signal-to-noise ratio ρ	23.7	13.0	9.7
False alarm rate FAR/yr ⁻¹	$< 6.0 \times 10^{-7}$	$< 6.0 \times 10^{-7}$	0.37
p-value	7.5×10^{-8}	7.5×10^{-8}	0.045
Significance	$> 5.3 \sigma$	$> 5.3 \sigma$	1.7σ
Primary mass $m_1^{\text{source}}/\text{M}_\odot$	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	23^{+18}_{-6}
Secondary mass $m_2^{\text{source}}/\text{M}_\odot$	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	13^{+4}_{-5}
Chirp mass $\mathcal{M}^{\text{source}}/\text{M}_\odot$	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$15.1^{+1.4}_{-1.1}$
Total mass $M^{\text{source}}/\text{M}_\odot$	$65.3^{+4.1}_{-3.4}$	$21.8^{+5.9}_{-1.7}$	37^{+13}_{-4}
Effective inspiral spin χ_{eff}	$-0.06^{+0.14}_{-0.14}$	$0.21^{+0.20}_{-0.10}$	$0.0^{+0.3}_{-0.2}$
Final mass $M_{\text{f}}^{\text{source}}/\text{M}_\odot$	$62.3^{+3.7}_{-3.1}$	$20.8^{+6.1}_{-1.7}$	35^{+14}_{-4}
Final spin a_{f}	$0.68^{+0.05}_{-0.06}$	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$	$0.66^{+0.09}_{-0.10}$
Radiated energy $E_{\text{rad}}/(\text{M}_\odot c^2)$	$3.0^{+0.5}_{-0.4}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$1.5^{+0.3}_{-0.4}$
Peak luminosity $\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	$3.6^{+0.5}_{-0.4} \times 10^{56}$	$3.3^{+0.8}_{-1.6} \times 10^{56}$	$3.1^{+0.8}_{-1.8} \times 10^{56}$
Luminosity distance D_{L}/Mpc	420^{+150}_{-180}	440^{+180}_{-190}	1000^{+500}_{-500}
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.20^{+0.09}_{-0.09}$
Sky localization $\Delta\Omega/\text{deg}^2$	230	850	1600



LISA (Laser Interferometer Space Antenna): Satellites pour la détection d'ondes gravitationnelles (lancement prévu ~ 2035)

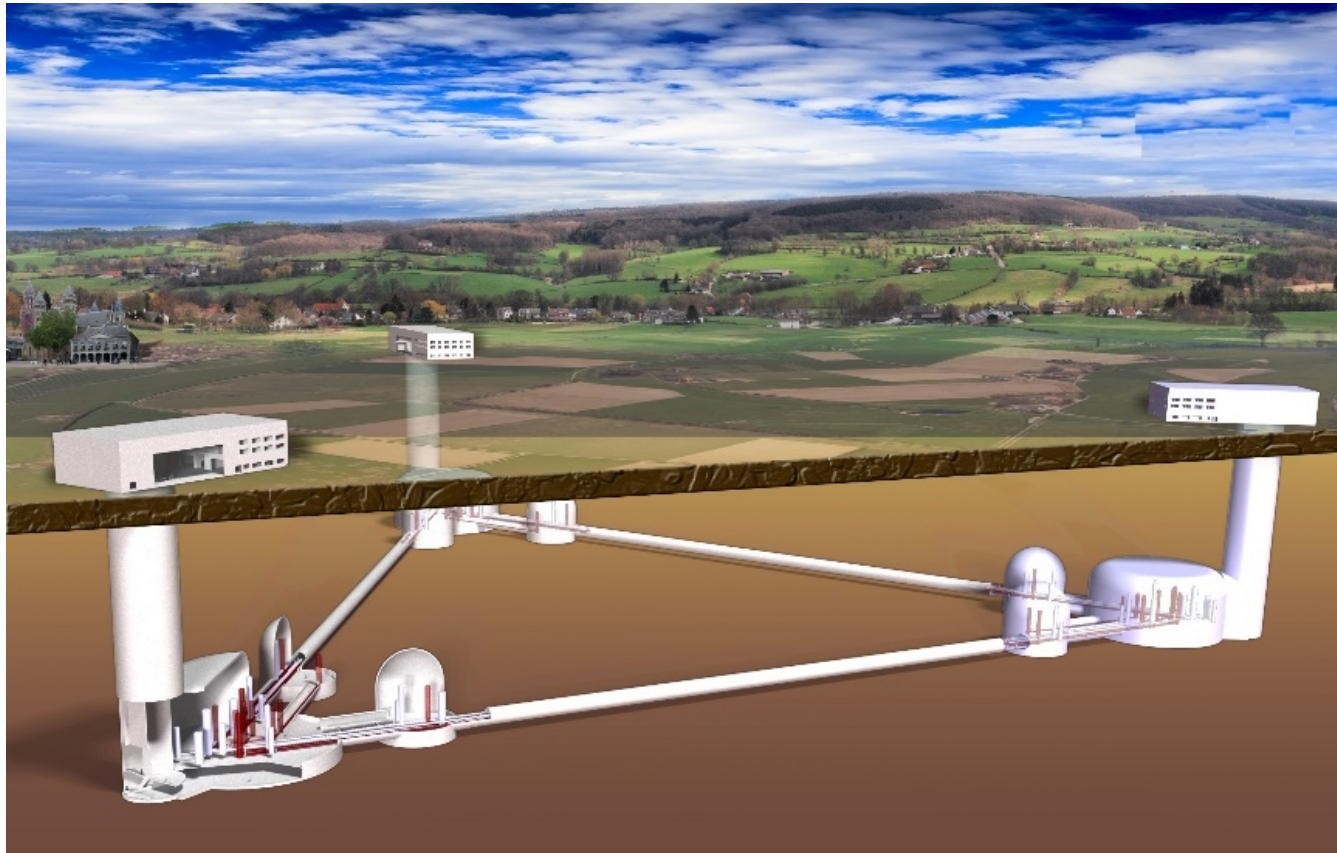


LISA

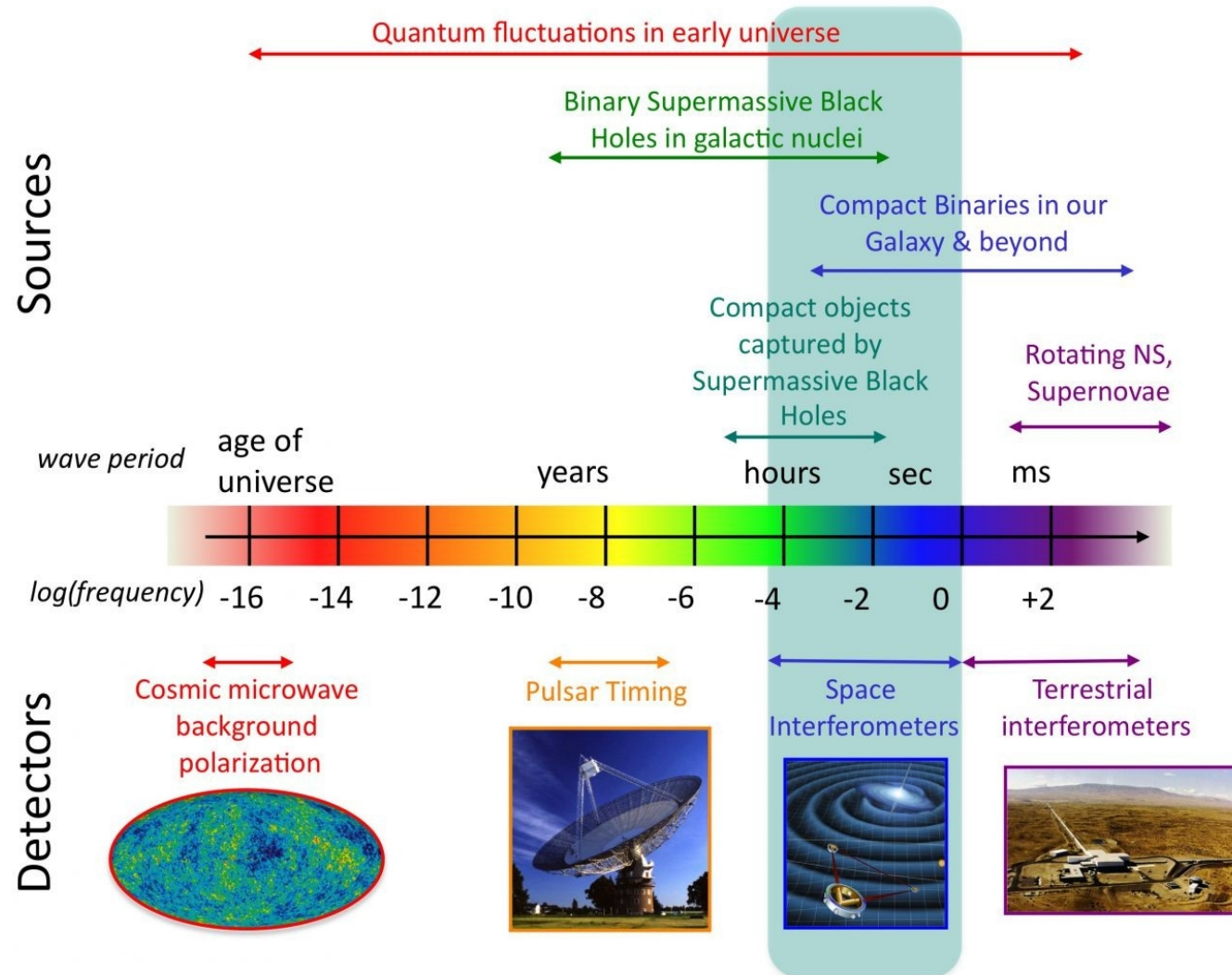




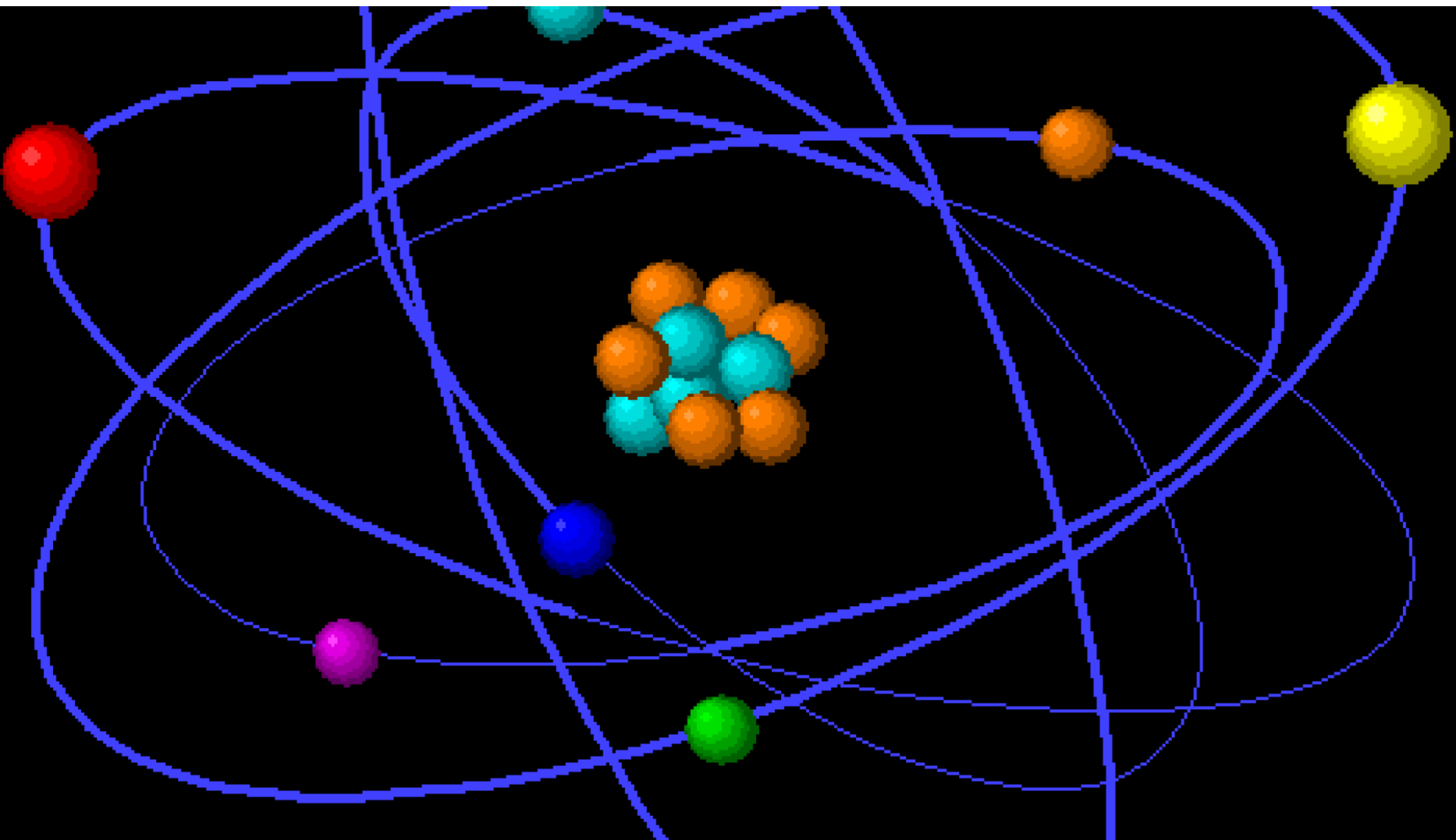
Einstein Telescope (Projet)



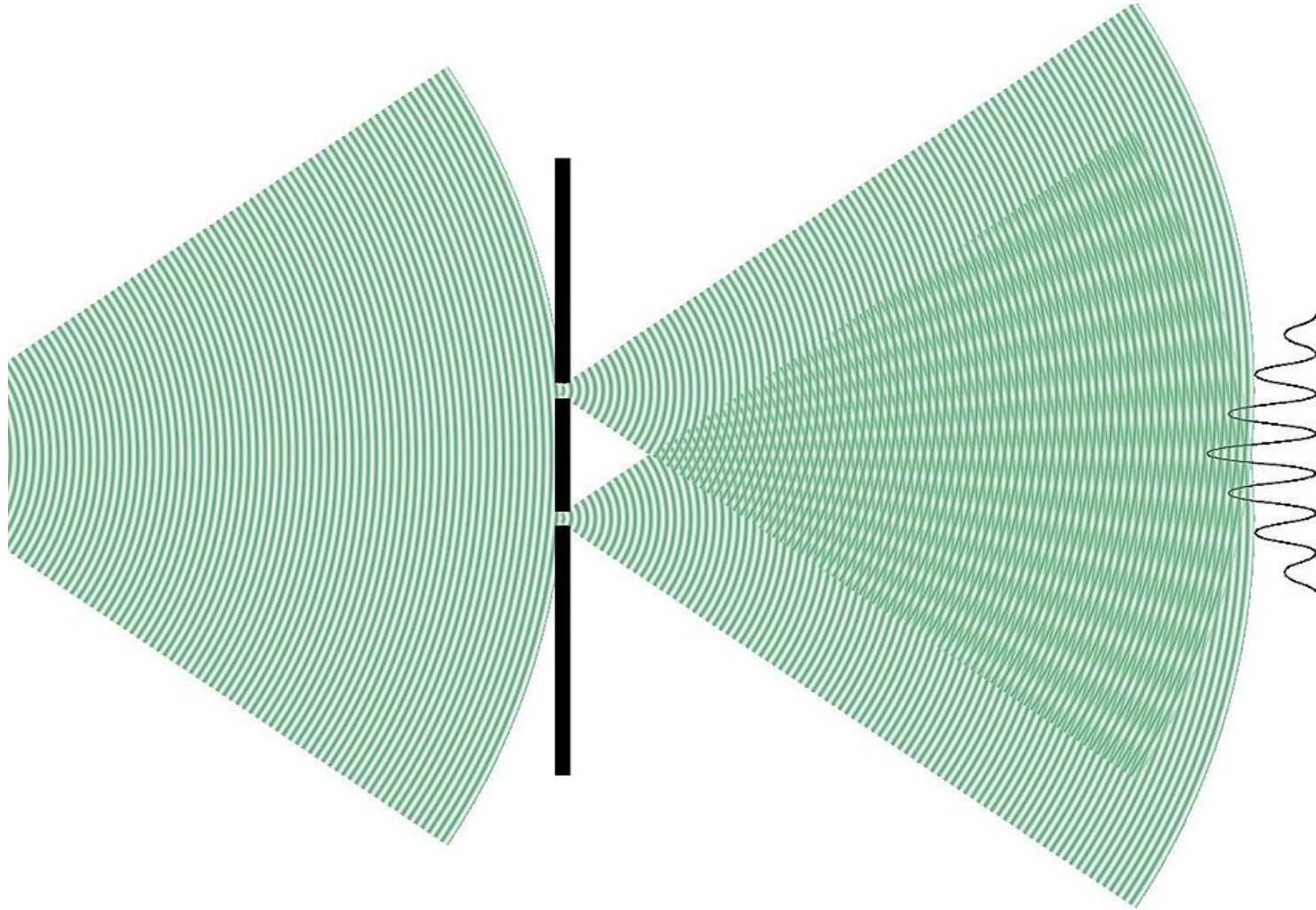
The Gravitational Wave Spectrum



Mécanique quantique

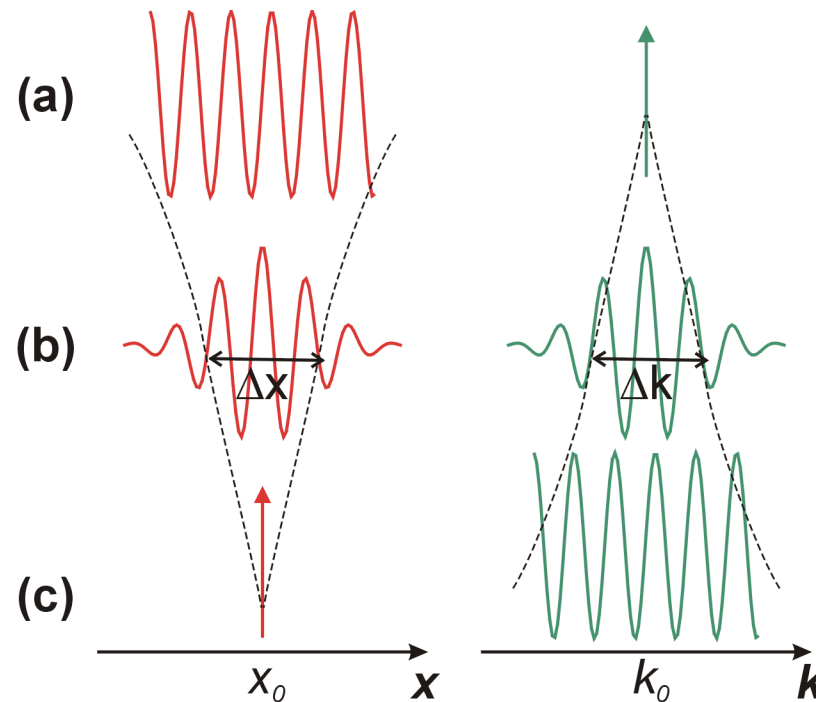


Dualité onde-corpuscule (De Broglie 1924)

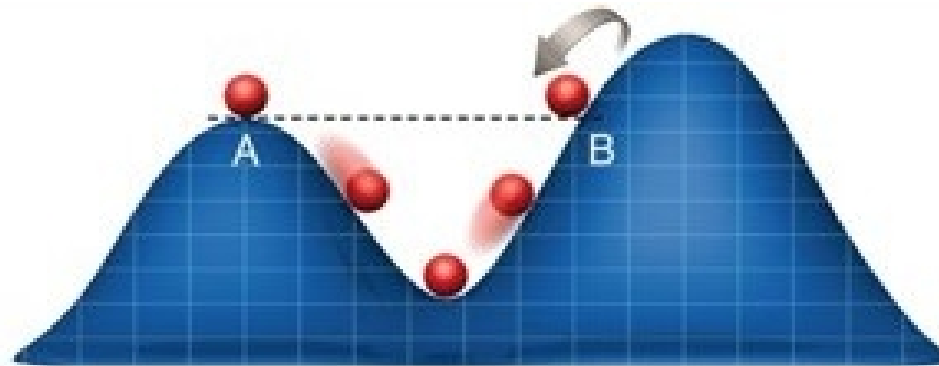


La dualité onde-corpuscule est un principe selon lequel tous les objets physiques peuvent présenter parfois des propriétés d'ondes et parfois des propriétés de particules.

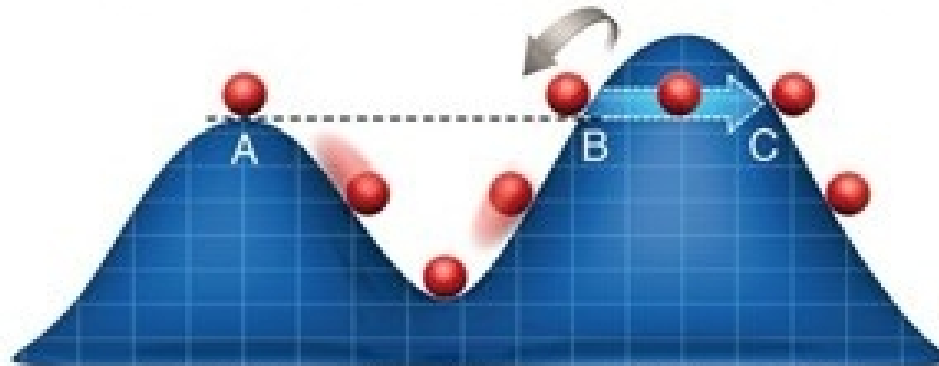
Principe d'indétermination de Heisenberg (1927)



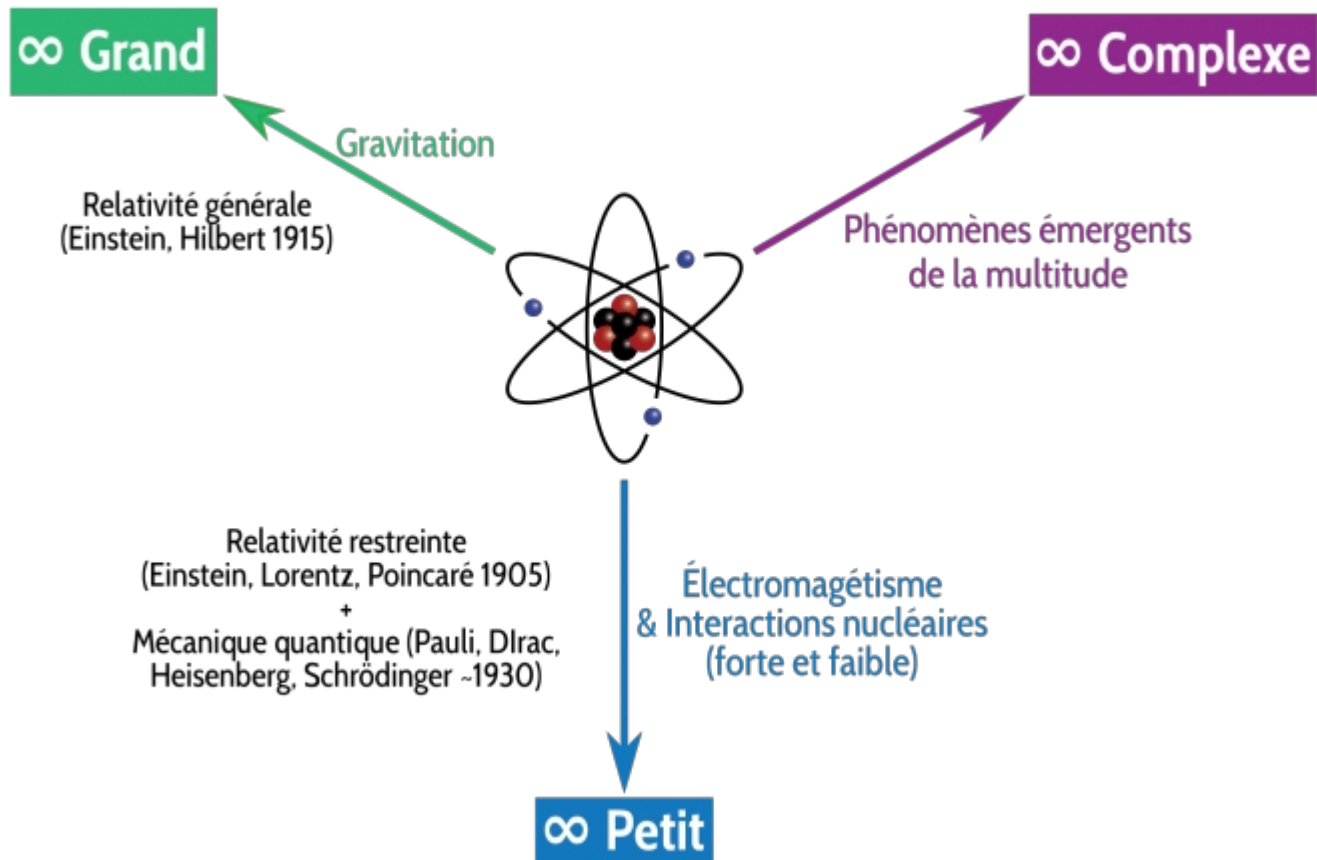
Vue des fonctions d'onde décrivant la position (x_0) ou la quantité de mouvement (k_0) de (a) une onde pure, (b) un paquet d'onde et (c) un corpuscule parfaitement localisé. L'onde étant de fréquence pure, son énergie est parfaitement définie mais elle n'est pas localisée dans l'espace. Inversement, le corpuscule est parfaitement localisé mais n'a pas de fréquence déterminée. Le cas général est celui du paquet d'onde qui est distribué en fréquence comme en espace.



En physique classique, le ballon lâché depuis le point A ne peut monter plus haut que le point B (loi de la dynamique).

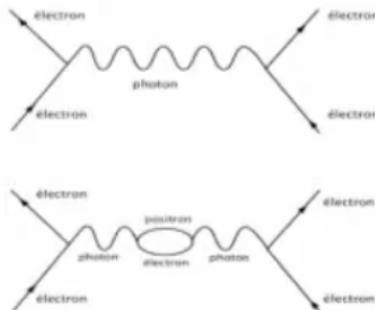


En physique quantique, l'électron, arrivé au point B, peut, par effet tunnel, atteindre le point C situé de l'autre côté de la colline.

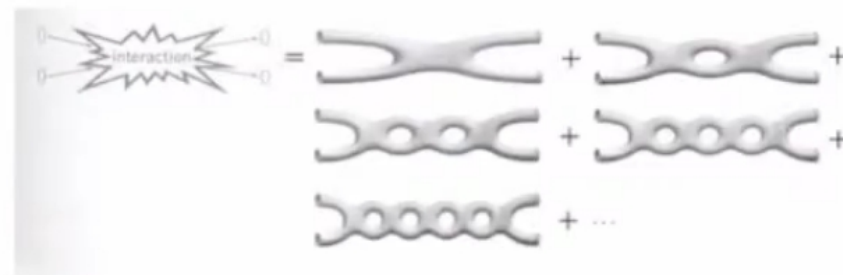


Deux conceptions du monde: Relativité générale / Mécanique quantique

- Chacune est **incomplète**
- Cadres mathématiques **différents**
- La gravitation n'est pas **quantifiable** comme les autres interactions



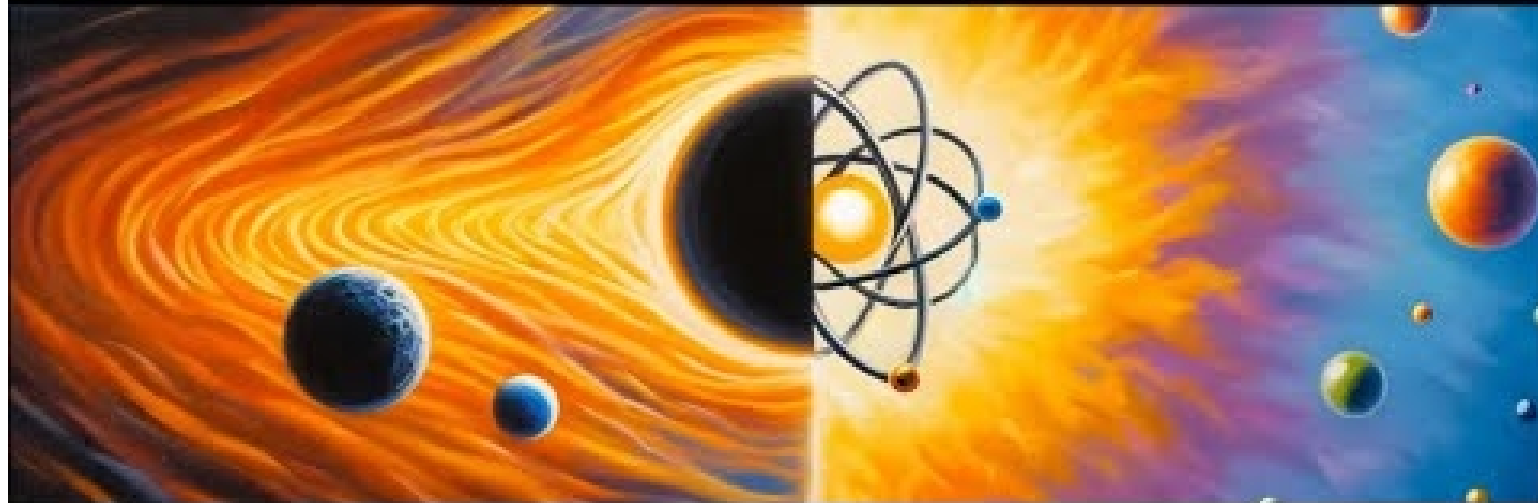
Renormalisation



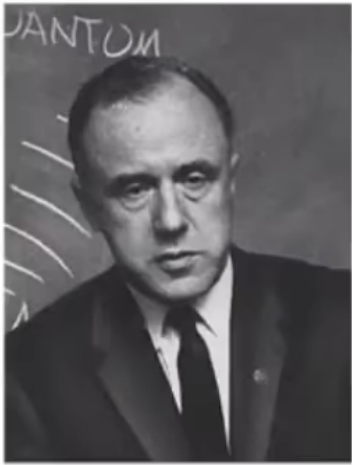
Graviton : non renormalisable

Gravité Quantique

Une incompatibilité fondamentale?



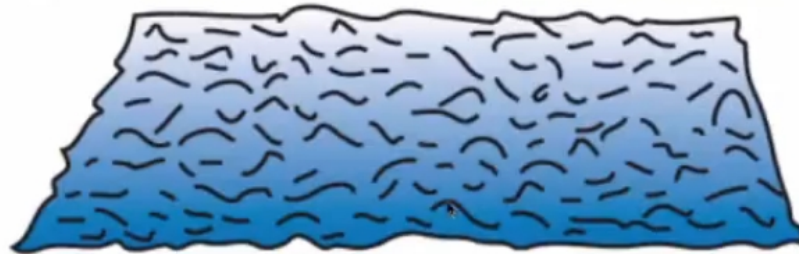
Géomérodynamique



John Wheeler



10^{-13} cm

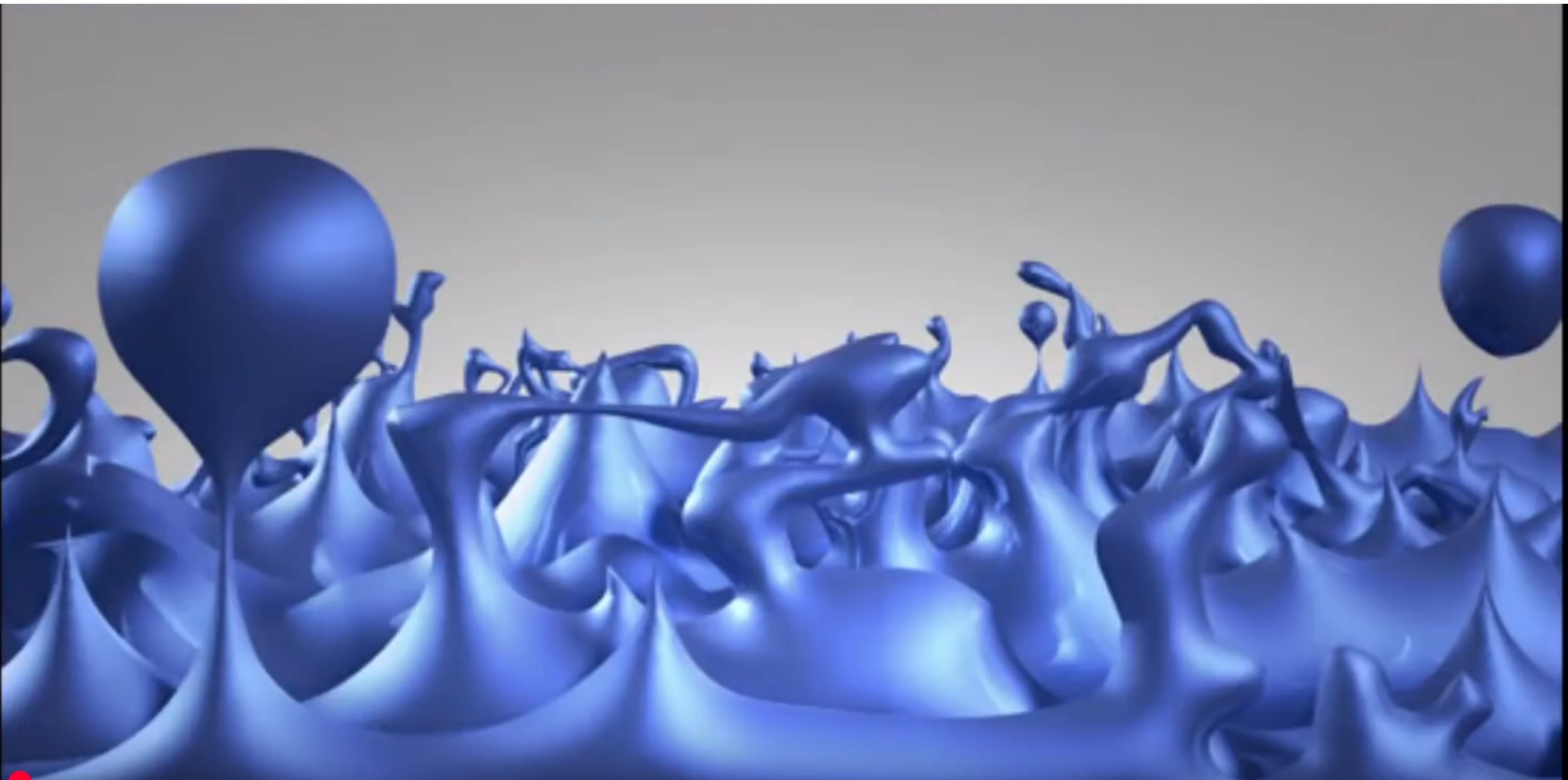


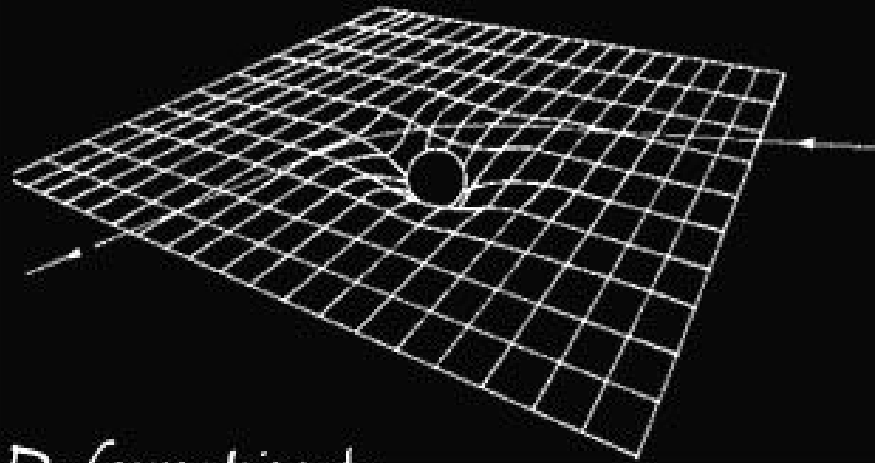
10^{-30} cm



10^{-33} cm

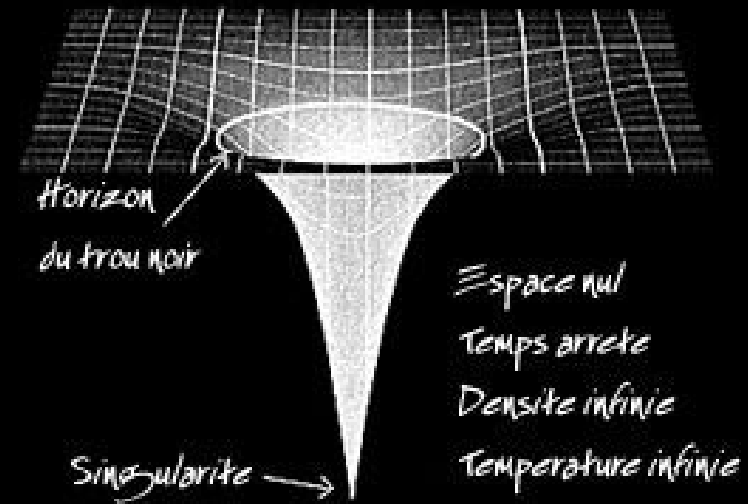
Turbulence spatio-temporelle



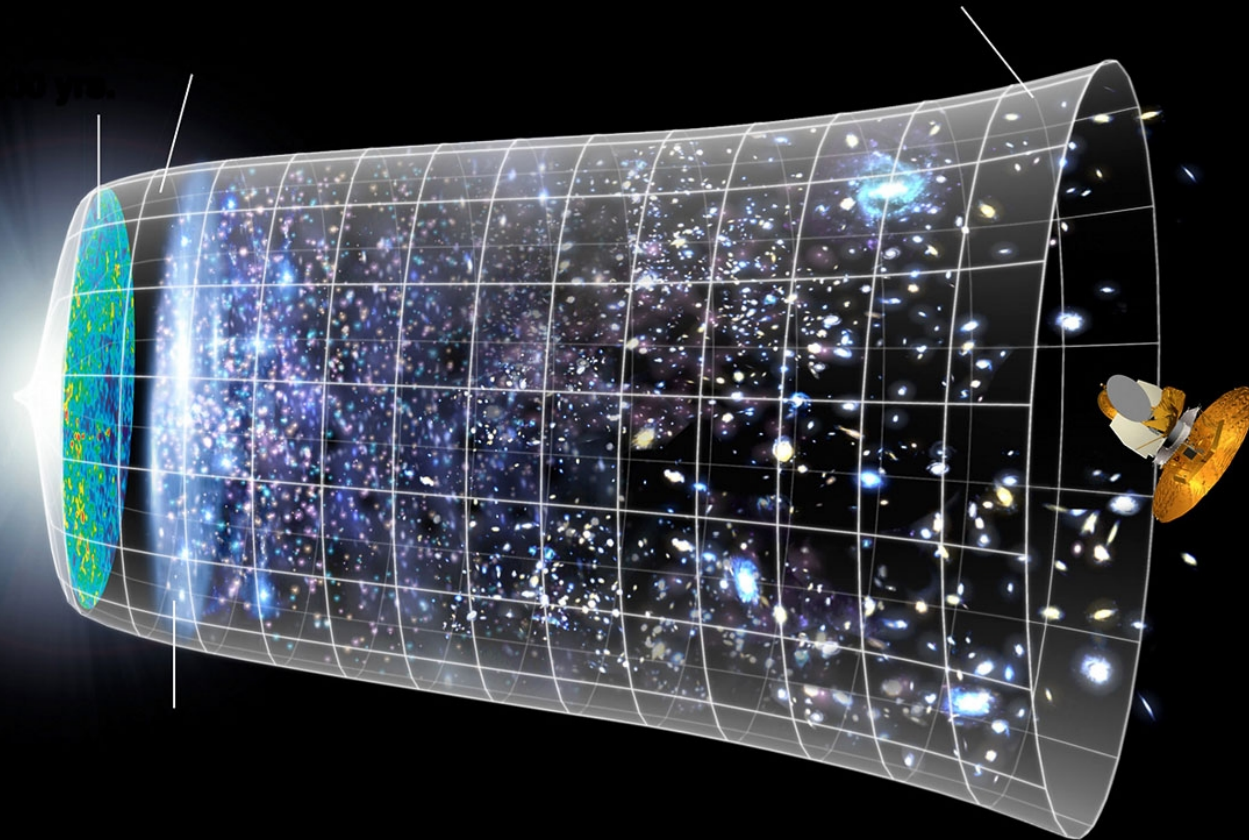


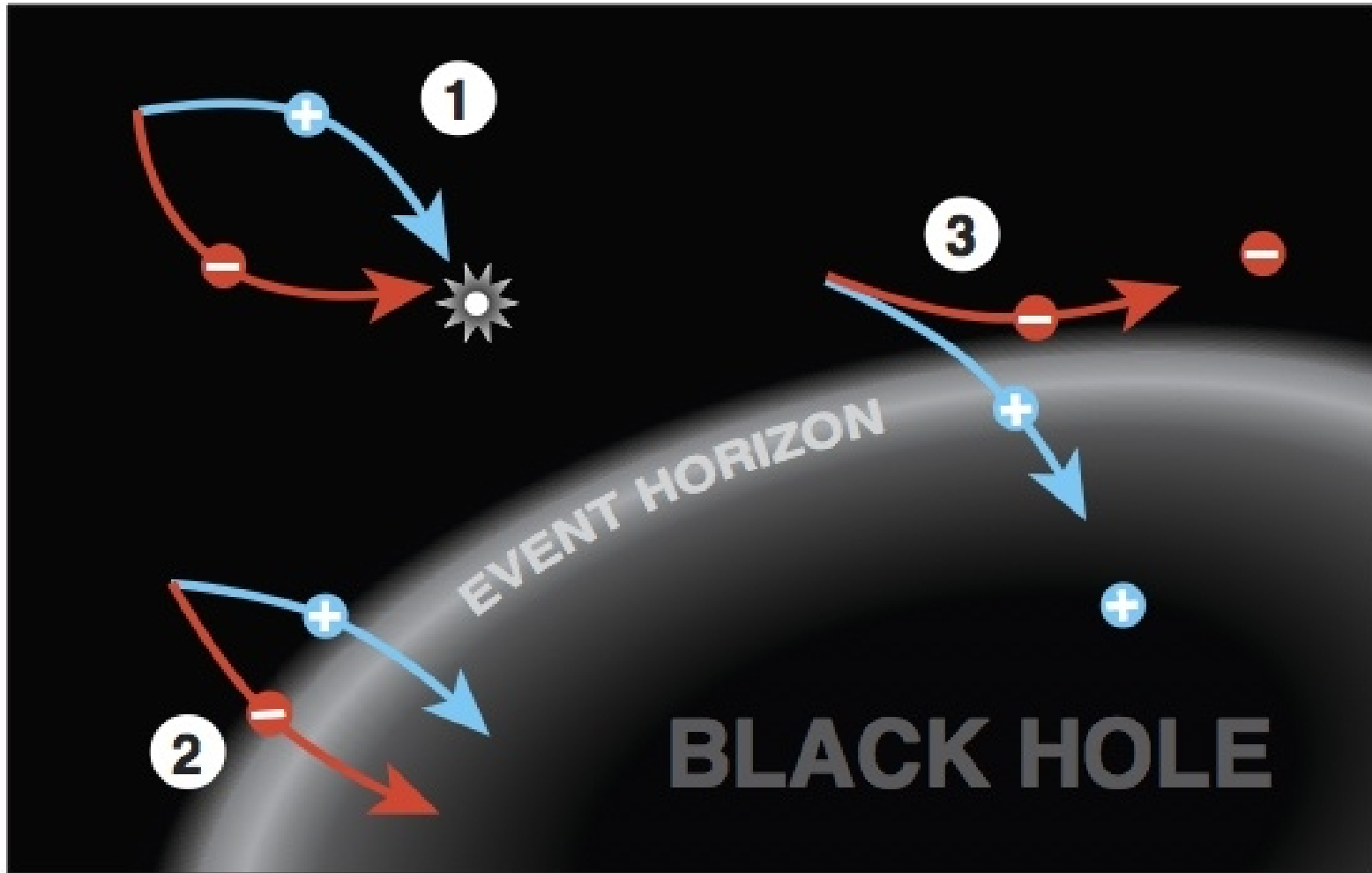
Deformation de

l'espace-temps du à la masse d'une étoile, puis à celle d'un trou noir ...



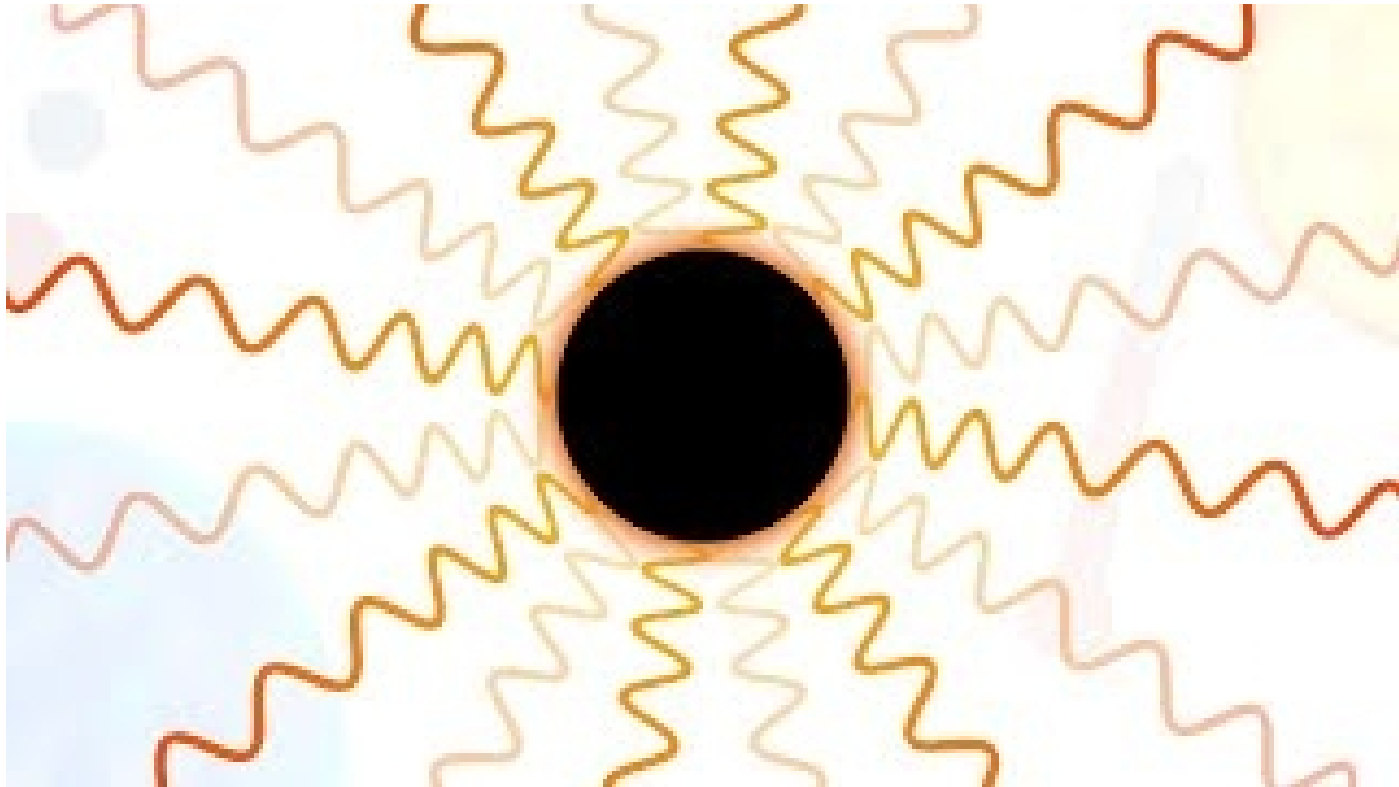
Evolution de l'Univers





Cosmic refugees. Virtual particles that escape destruction near a black hole (case 3) create detectable radiation but can't carry information.

Des couples de particules virtuelles sont produites à proximité d'un trou noir (c'est un effet quantique). Dans certains cas une particule entre dans le trou noir et l'autre s'éloigne. Radiation de Hawking.



Radiation de Hawking des trous noirs