

# EINSTEIN: SA CONTRIBUTION À LA SCIENCE

SAF : 01/2024, par : Jacques Fric, Université de Paris-cité

# BIOGRAPHIE

- ▶ Albert Einstein (14 Mars, 1879 - 18 Avril, 1955) est le physicien théoricien considéré comme le plus grand savant du 20ème siècle.
- ▶ Il est l'auteur de la théorie de la relativité générale et restreinte et a également fait d'importantes contributions au développement de la mécanique quantique, la mécanique statistique, et de la cosmologie.
- ▶ Il a reçu le prix Nobel de physique en 1921 pour son explication de l'effet photoélectrique et "pour ses services à la physique théorique".

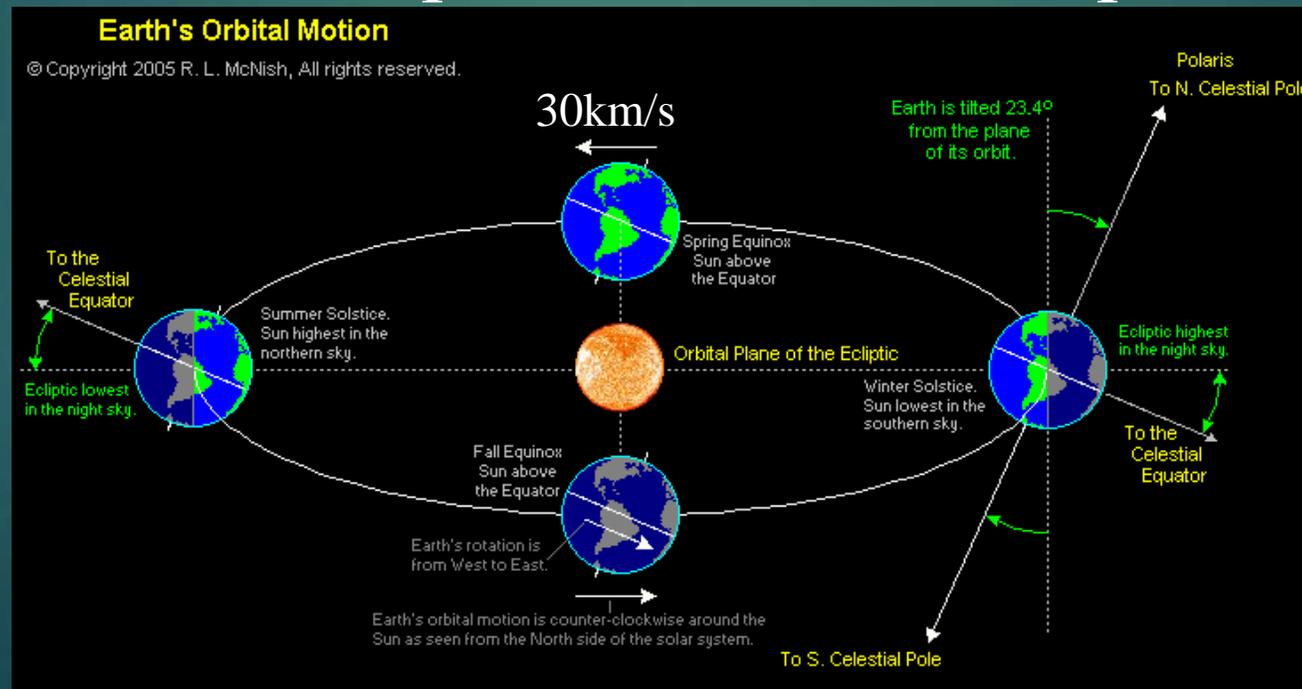
# LA SITUATION DE LA SCIENCE À LA FIN DU 19<sup>ÈME</sup> SIÈCLE

- ▶ Le 19<sup>ème</sup> siècle avait vu un développement sans précédent des techniques et des sciences. La mécanique, céleste en particulier, avait prédit l'existence et la position de Neptune, l'optique avait fait des progrès considérables fusionnant avec le magnétisme dans l'électromagnétisme de Maxwell, la chimie, la radioactivité et bien d'autres découvertes laissaient à penser que tout était dit.
- ▶ Les scientifiques se désolaient de rien avoir laissé à découvrir à leur postérité! Pourtant entre 1881-1887 le résultat d'une expérience semble défier ce bel édifice! En effet...

# EXPÉRIENCE DE MORLEY-MICHELSON



Cette expérience a été conçue par Michelson pour mesurer la vitesse de la Terre dans « l'éther » en se basant sur la loi classique d'addition des vitesses. La Terre, a une vitesse d'environ 30 km/s dans le système solaire. La mécanique classique devait permettre de mesurer cette vitesse. Le résultat de l'expérience resta désespérément négatif !!!



# EINSTEIN JEUNESSE ET ÉDUCATION



- ▶ Einstein est né à Ulm en Wurtemberg, Allemagne, environ 100 km à l'est de Stuttgart. Sa famille était juive (mais non pratiquante).
- ▶ En 1894, suite à des difficultés professionnelles, sa famille s'installe à Pavie, en Italie (près de Milan). Envoyé par sa famille en Suisse, il termine le cycle secondaire, et obtient son diplôme en 1896.
- ▶ En 1898, à 19 ans, Einstein rencontre Mileva Maric, une camarade de classe serbe (amie de Nikola Tesla) avec qui il aura un enfant (hors mariage: illégitime).
- ▶ En 1900, il obtient un diplôme d'enseignement par la Commission fédérale des « Technische Hochschule » et obtient la nationalité suisse en 1901.

### Signalement. — Connotati.

Age: *27*  
Alt: *1.75*  
Date: *14. März 1874*

Complexion: *fair*

Build: *1.75*  
Hair: *black*  
Eyes: *black*

Complexion: *schwarz, mittel*

Build: *hoch*

Hair: *schwarz*

Eyes: *blau*

Complexion: *schwarz*

Build: *normal*

Hair: *schwarz*

Eyes: *blau*

Complexion: *schwarz*

Build: *normal*

Hair: *schwarz*

Eyes: *blau*

Signature of person:  
Witnesses or Author: — Place and date:

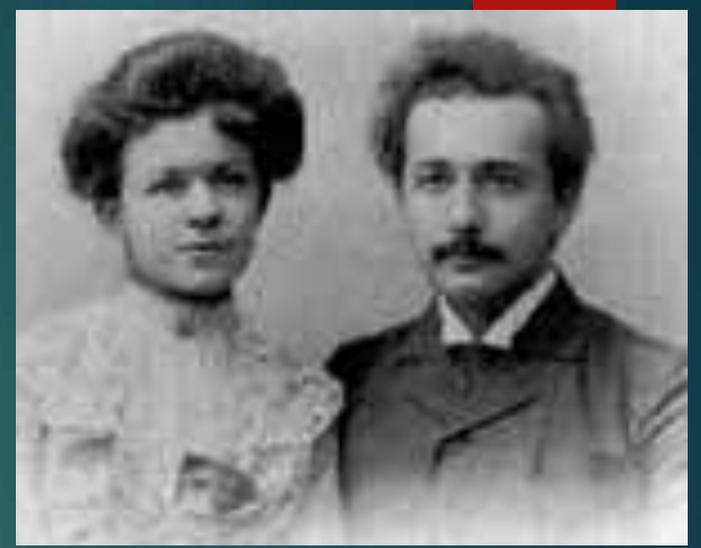
*A. G. ...*



Il sottoscritto, sottoscritto, con  
stato: *...* *...* *...*  
firmato: *...* *...* *...*  
data, del *...* *...* *...*  
del *...* *...* *...*

*F. Müller*

# TRAVAIL ET DOCTORAT



- ▶ Bien qu'ayant le diplôme requis , Einstein ne trouve pas de poste d'enseignant, et c'est grâce au père d'un camarade de classe qu'il obtient un emploi subalterne à l'Office des brevets suisses en 1902.
- ▶ En 1903, Il régularise sa situation familiale en épousant Milova, excellente mathématicienne.
- ▶ En 1904, il est titularisé à l'Office des brevets suisse. En 1905, Il obtient son doctorat, sa thèse portant " Sur une nouvelle détermination des dimensions moléculaires".

# SES PREMIÈRES CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES



- ▶ Cette même année (1905), à 26 ans, il écrit quatre articles fondamentaux en physique moderne. La plupart des physiciens reconnaissent que chacun de ces articles (sur le mouvement brownien, l'effet photoélectrique, et deux sur la relativité restreinte) aurait mérité à lui seul, un prix Nobel.
- ▶ Ironie du sort, Einstein célèbre pour la relativité, obtiendra le Nobel pour l'effet photoélectrique qui est un phénomène quantique, théorie qu'Einstein n'a vraiment jamais acceptée.
- ▶ Il soumet les articles correspondants à la revue "Annalen der Physik" qui les publie et qui ont un retentissement important, bien que ceux sur la relativité restreinte soient, en général, incompris.

# EFFET PHOTO-ÉLECTRIQUE



Application de l'effet photoélectrique  
Centrale photovoltaïque au Brésil

- ▶ C'est son deuxième article, il propose l'idée de «quanta de lumière» (photons) et montre comment cela pourrait être utilisé pour expliquer des phénomènes tels que l'effet photoélectrique. C'est cela qui lui vaudra le prix Nobel en 1921.

# RELATIVITÉ RESTREINTE

- ▶ Le troisième article d'Einstein de cette année 1905 a pour titre: "Sur l'électrodynamique des corps en mouvement».
- ▶ A propos de cet article, Einstein, dans sa lettre à Mileva, parle de "notre travail sur le mouvement relatif", ce qui a amené certains à se demander si Mileva a joué un rôle dans son développement.
- ▶ Cet article introduit la théorie de la relativité, une théorie de l'espace-temps, où la masse et l'énergie sont équivalentes qui inclut la mécanique et l'électromagnétisme, mais pas la gravitation.



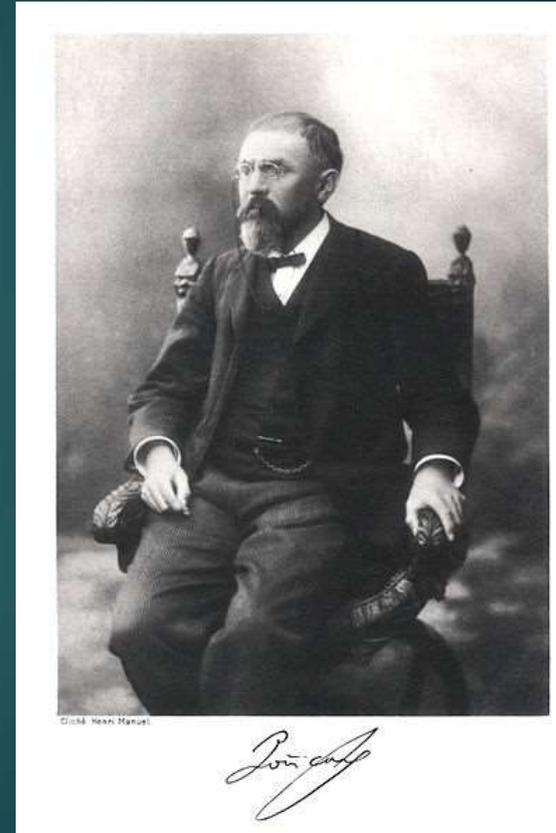
# RELATIVITÉ RESTREINTE



- ▶ La relativité restreinte explique le résultat négatif de l'expérience de Michelson-Morley, en montrant que les ondes lumineuses ne voyagent pas à travers un milieu, l'éther, contrairement à d'autres phénomènes connus qui nécessitent un milieu tel que l'eau ou l'air.
- ▶ La vitesse de la lumière est fixe, indépendante du mouvement de l'observateur (qui l'émet ou la mesure).
- ▶ Ce résultat contre-intuitif, impossible dans la mécanique classique de Newton, a eu du mal à s'imposer (encore aujourd'hui).

# RELATIVITÉ RESTREINTE

- ▶ En 1903, Hendrik Lorentz (à gauche), établit empiriquement les équations de transformation. En 1905 Henri Poincaré, (à droite), définit le groupe complet de symétrie associé à ces transformations, mais c'est Einstein qui a révélé les raisons profondes de cette étonnante propriété. On avait toutes les pièces du puzzle, mais c'est Einstein qui a réussi à l'assembler.



# RENCONTRES ENTRE SCIENTIFIQUES -1911



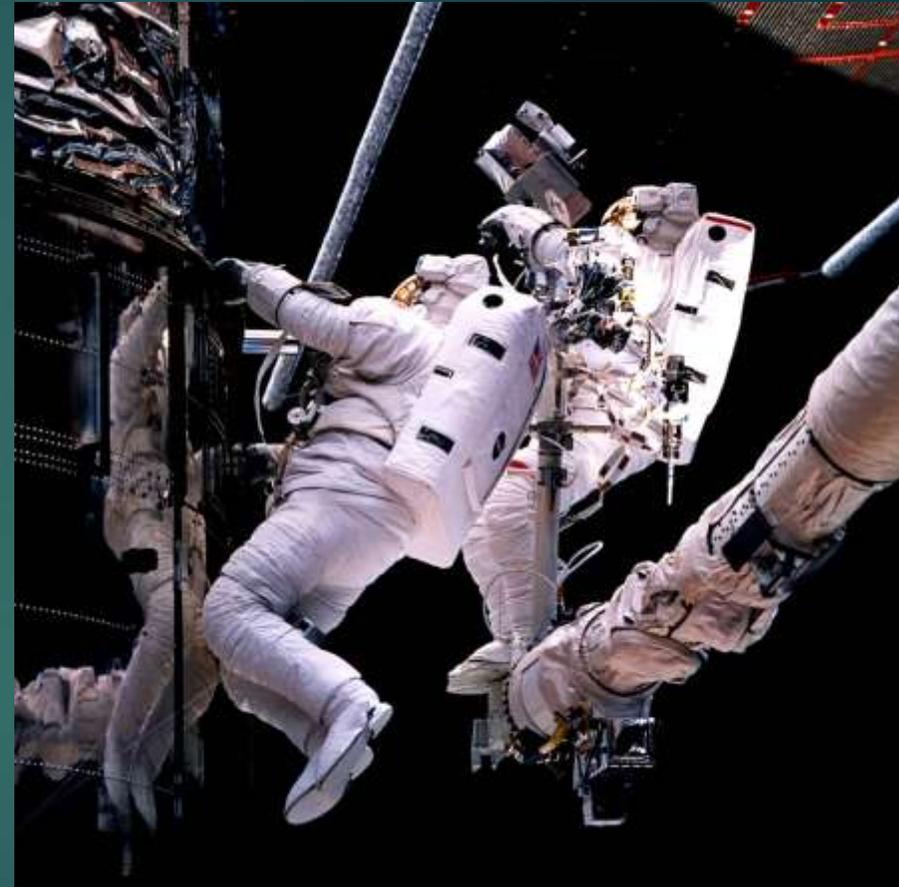
*Figure 2 : Sur cette photo du congrès Solvay de 1911 apparaissent les deux principales figures de la physique pré-relativiste : Lorentz (quatrième assis à partir de la gauche) et Poincaré (assis au premier plan et discutant avec Marie Curie). Einstein et Langevin sont debout à droite. Lieu : hôtel Métropole, Bruxelles ; photo Wikimedia Commons).*

# RELATIVITÉ RESTREINTE, UNE THÉORIE INCOMPRISE À L'ÉPOQUE

- ▶ A la suite de l'article d'Einstein, J. Stark directeur d'une célèbre publication dans ce domaine, en Allemagne, a demandé à Einstein s'il pouvait faire un article plus « pédagogique » que son article original que personne n'avait compris.
- ▶ Einstein publie donc une version plus « compréhensible » en 1907 en qualifiant sa contribution « d'idée la plus heureuse de ma vie ».
- ▶ Cela a permis à quelques uns de mieux comprendre sa théorie, qui bien qu'admise, est restée longtemps incomprise, y compris aujourd'hui.

# RELATIVITÉ RESTREINTE (PRINCIPES)

- ▶ Le principe de « relativité », stipule que les lois de la nature doivent être les mêmes pour tous les observateurs, appelés « galiléens », qui se déplacent à vitesse constante les uns par rapport aux autres. Autrement dit, il n'y a pas de référentiel « galiléen » absolu!
- ▶ Un référentiel galiléen est inertiel, un observateur dans un référentiel galiléen ne ressent aucune contrainte: il « flotte ». Les astronautes dans la station spatiale sont (à peu près) dans ce cas.

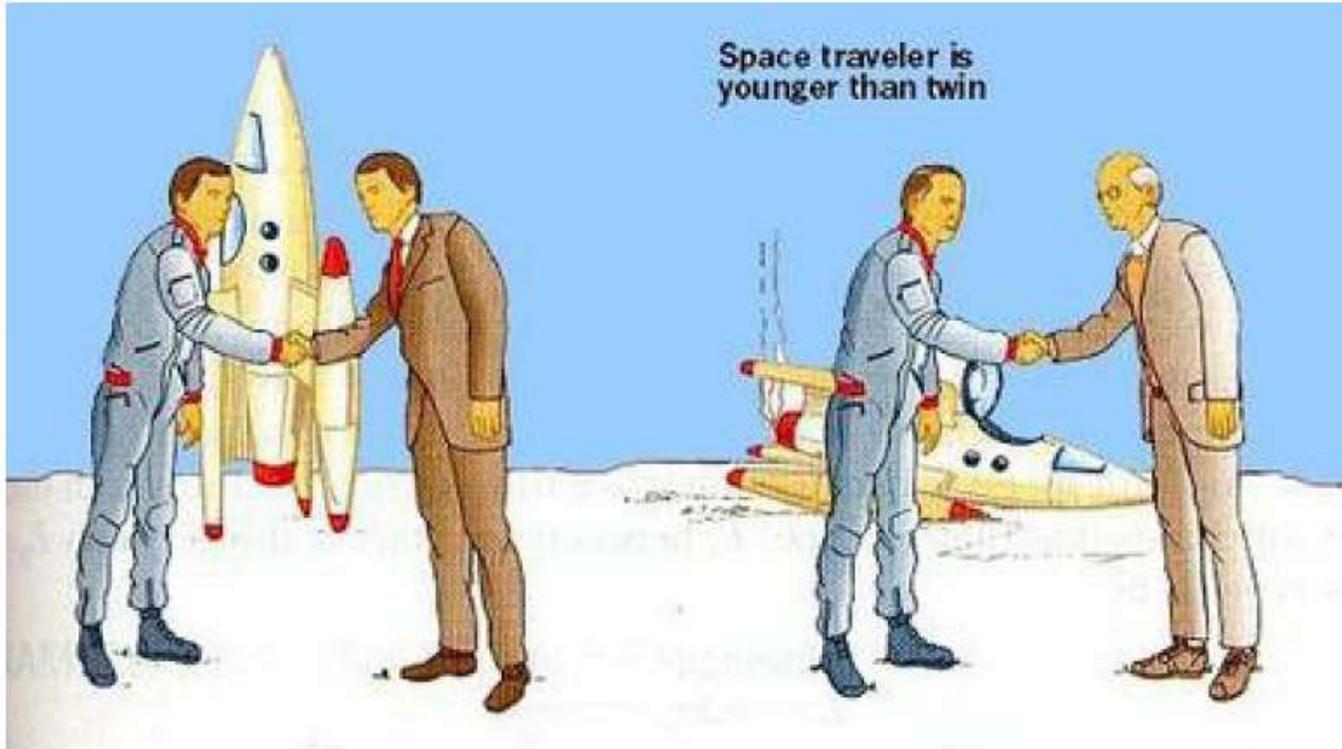


Réparation HUBBLE

# RELATIVITÉ RESTREINTE

- ▶ La constance de la vitesse de la lumière, la même pour tous les observateurs « galiléens », est un postulat nouveau.
- ▶ A noter que le principe de relativité invoque un invariant de vitesse mais n'en précise pas la valeur. La relativité restreinte a plusieurs conséquences surprenantes, car les concepts de temps et d'espace absolus sont abolis.
- ▶ La théorie est appelée « relativité restreinte » pour la distinguer de la théorie de la relativité générale qui viendra plus tard, la compléter en intégrant la gravitation.

# RELATIVITÉ RESTREINTE



Le paradoxe des jumeaux. © DR

- Une des conséquences les plus déroutantes est la disparition d'un temps universel, ne laissant place qu'à des temps propres individuels indépendants, qu'on illustre souvent par le paradoxe des «jumeaux». Après un long voyage, lorsqu'ils se retrouvent, celui qui a voyagé est plus jeune que celui resté sur Terre.

# EQUIVALENCE MASSE-ÉNERGIE: $E = MC^2$

► Le quatrième article, publié à la fin de 1905, montre une autre conséquence des axiomes de la relativité: l'énergie (potentielle) d'un corps « au repos » ( $E$ ) est égale à sa masse ( $m$ ) multipliée par la vitesse de la lumière ( $c$ ) au carré, soit:

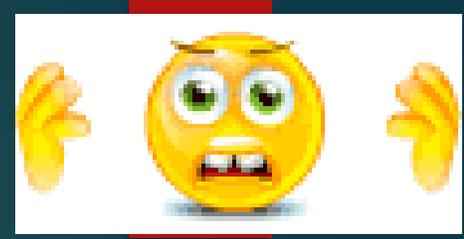
$$\text{► } E = mc^2.$$

► La démonstration d'Einstein est critiquable, mais des démonstrations ultérieures et l'expérience ont confirmé cette équation.

# EQUIVALENCE MASSE-ÉNERGIE: $E = MC^2$

- ▶ Elle est importante, car elle a montré qu'une particule massive possède une énergie, « potentielle » au repos (dans son référentiel), distincte de son énergie cinétique classique (mesurée dans un autre référentiel).
- ▶ De plus cette énergie est énorme car 1 kg de matière (du charbon par exemple) inclut une énergie similaire à celle résultant de la combustion de 10 milliards de kgs de ce même charbon!
- ▶ Ce résultat surprenant est une conséquence directe de la théorie. Qui se doutait au 19<sup>ième</sup> siècle que toute masse avait une telle énergie?

# COUP DE TONNERRE SUR LA SCIENCE



- ▶ Cette théorie, son extension à la gravitation (1915), et la mécanique quantique naissante, a fait table rase du bel édifice, que les scientifiques du 19<sup>ième</sup> siècle croyaient ultime, transformée en champ de ruine.
- ▶ Cela a provoqué un grand désarroi dans le monde scientifique.

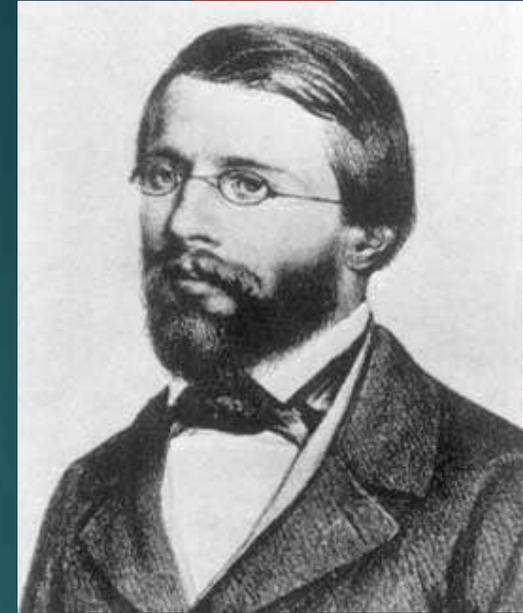
# SA CARRIÈRE UNIVERSITAIRE À PARTIR DE 1905

- ▶ En 1906, Albert Einstein est promu inspecteur technique de deuxième classe. En 1908, Einstein exerce à Berne, en Suisse comme professeur non rémunéré dans une université. Le second fils d'Einstein, Edouard, naît le 28 Juillet 1910.
- ▶ En 1911, Einstein devient professeur titulaire à l'Université de Prague.
- ▶ En 1914, juste avant le début de la Première Guerre mondiale, Einstein obtient un poste de professeur à l'université de Berlin et est admis à l'Académie des sciences de Prusse. Son pacifisme et ses origines juives irritent les nationalistes allemands.

# SA CARRIÈRE UNIVERSITAIRE À PARTIR DE 1905

- ▶ Sa célébrité suscite des jalousies nourrissant la haine nationaliste et il fait l'objet d'une campagne organisée pour discréditer ses théories.
- ▶ Il restera en poste à Berlin comme directeur de l'Institut Kaiser Wilhelm de physique jusqu'en 1933, poste qu'il quittera sous la pression de la montée du nazisme.
- ▶ A noter qu'un poste au collège de France lui a été proposé, mais trop tardivement pour qu'il l'occupe, avant d'aller à Princetown (USA).

# 1913- EINSTEIN-GROSSMANN: L'ENTWURF



- ▶ Depuis 1907, Einstein tente d'inclure, sans succès, la gravitation dans sa théorie. Il doute de plus en plus que la voie qu'il suit est la bonne. Il discute avec son ami Marcel Grossmann (à gauche), de la possibilité de résoudre son problème à l'aide de la « théorie de Riemann, (à droite) », en utilisant le concept d'invariance d'un élément de courbe dans un espace non euclidien.

# 1913- EINSTEIN-GROSSMANN: L'ENTWURF

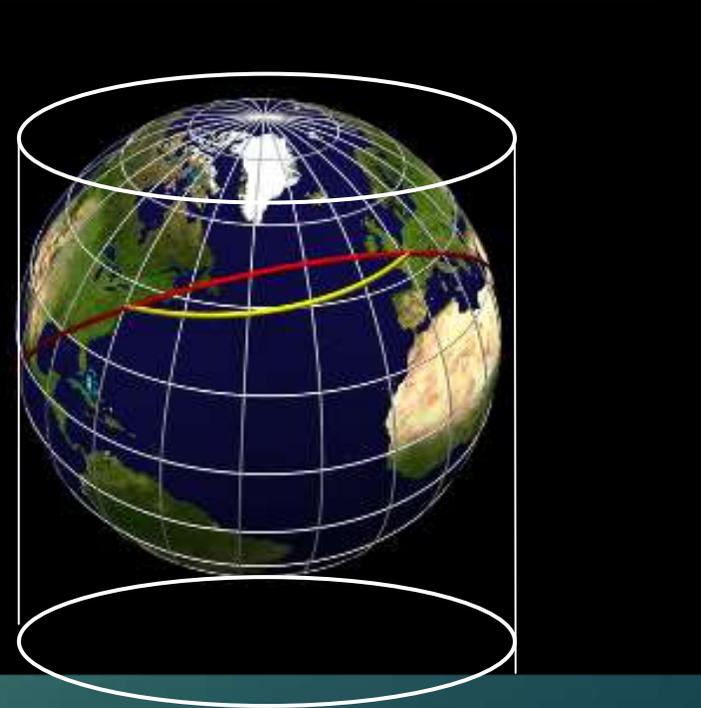
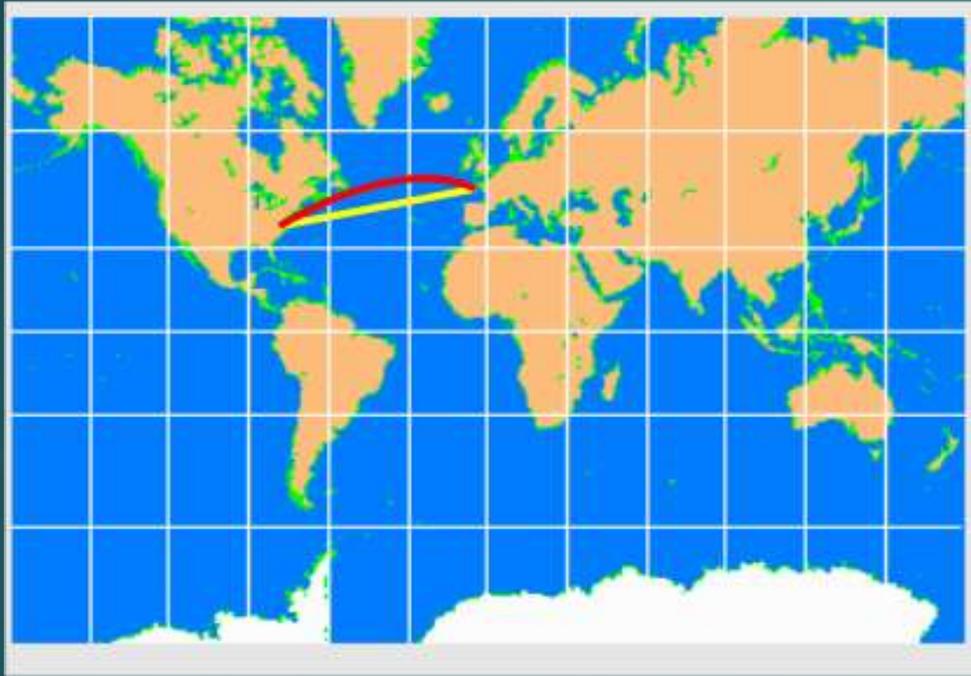
- ▶ Comment lui est venue cette idée qui n'apparait pas avant l'article de 1913 co-écrit avec Grossmann (l'Entwurf).
- ▶ Einstein dira plus tard (Glasgow 1933) qu'il lui est apparu que c'était la notion de **géodésique** qui était fondamentale, ce qui conduit à une approche géométrique, et que la droite inertielle (géodésique) en géométrie euclidienne de la relativité restreinte devait trouver son équivalent courbe en géométrie Riemannienne.

# 1913- EINSTEIN-GROSSMANN: L'ENTWURF

- ▶ Ceci va le conduire à introduire **le tenseur métrique ( $ds^2$ )**, qui caractérise la géométrie, comme élément fondamental de sa théorie!
- ▶ Notons que quand on consulte une carte on utilise une métrique sans le savoir (illustration diapo suivante)!

# Qu'est ce que le $ds^2$

C'est l'équivalent du théorème de Pythagore pour calculer l'élément de longueur, mais dans un espace courbe : Sur Terre par exemple !



Avec  $l$  = latitude et  $L$  = longitude et  $r$  = rayon de la Terre:  $ds^2 = r^2[dl^2 + \cos^2 l.dL^2]$

# LA COVARIANCE GÉNÉRALE (1915)

- ▶ En effet, début 1915, le travail d'Einstein n'est pas encore abouti car un certain nombre de problèmes ne sont pas encore résolus.
- ▶ La compatibilité requise avec la mécanique newtonienne en champ faible et stationnaire n'est pas évidente à établir.
- ▶ Einstein se rend compte qu'il a mal posé épistémologiquement le problème car ce ne sont pas les équations du champ qui convergent au premier ordre mais celles du mouvement.

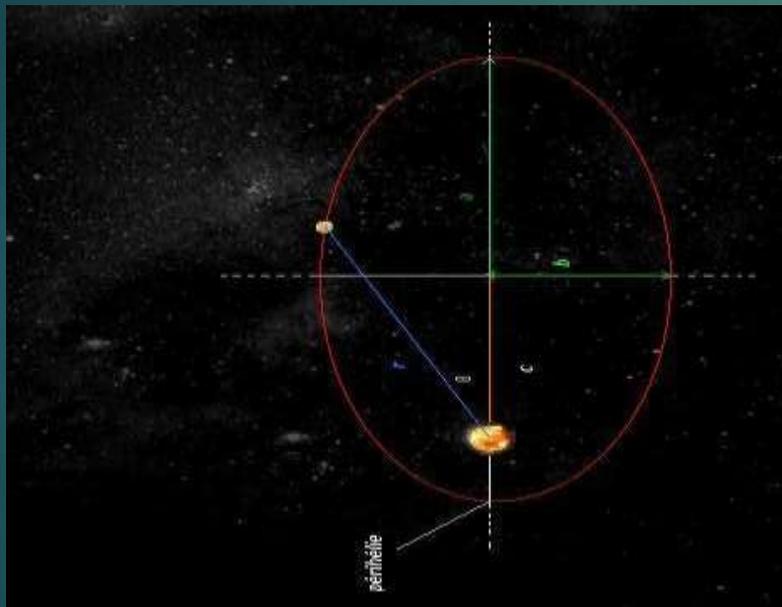
# LA COVARIANCE GÉNÉRALE (1915)

- ▶ Le problème du caractère non physique des coordonnées n'est pas encore très clair.
- ▶ Il va comprendre, fin 1915, que la difficulté est d'ordre conceptuel (les coordonnées n'ont aucun caractère physique) et que c'est la valeur très élevée de la vitesse de la lumière, qui permet de simplifier les équations d'Einstein pour les rendre compatibles avec celles de Newton dans ce cas.

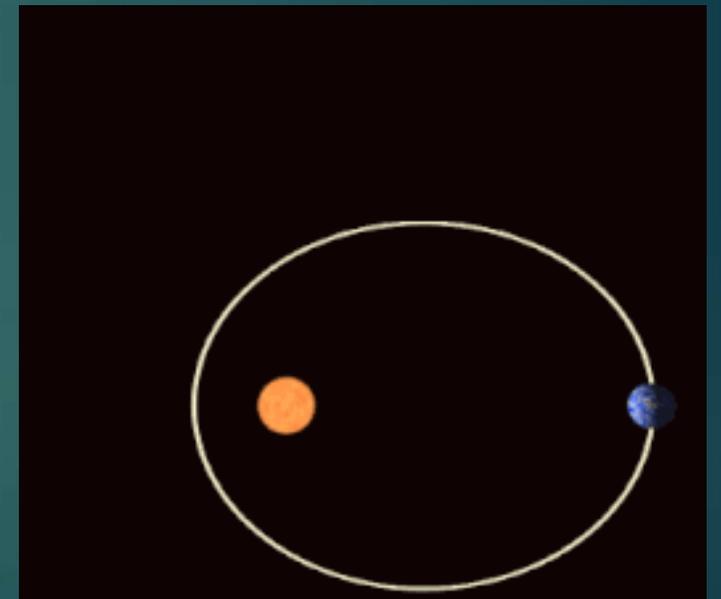
# L'ANOMALIE DE MERCURE PRÉDITE



- ▶ Le 18 novembre 1915, les premiers calculs confirment avec une excellente précision l'avance du périhélie de la planète Mercure, que la théorie de Newton était incapable d'expliquer.

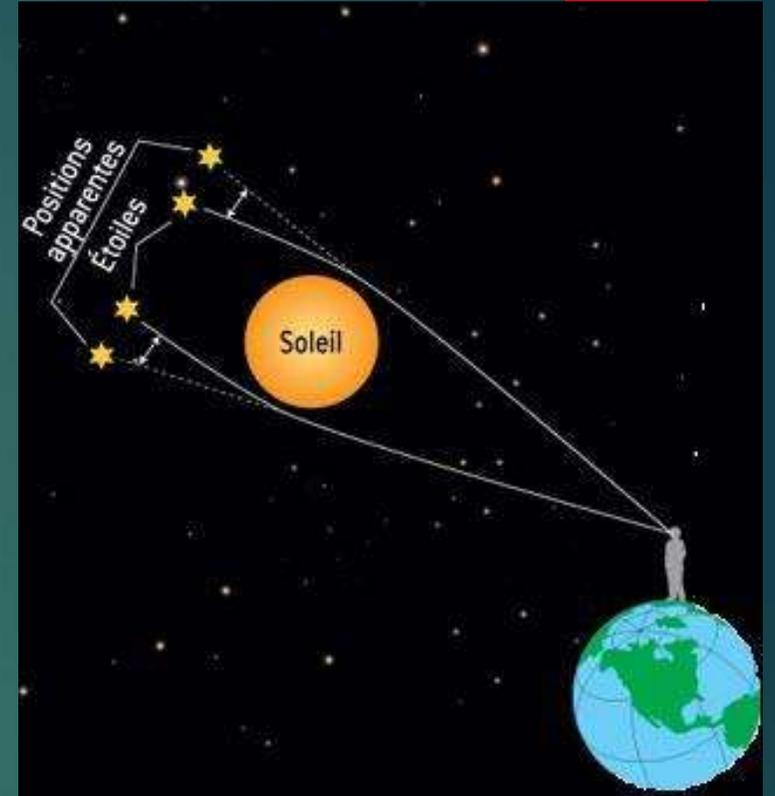
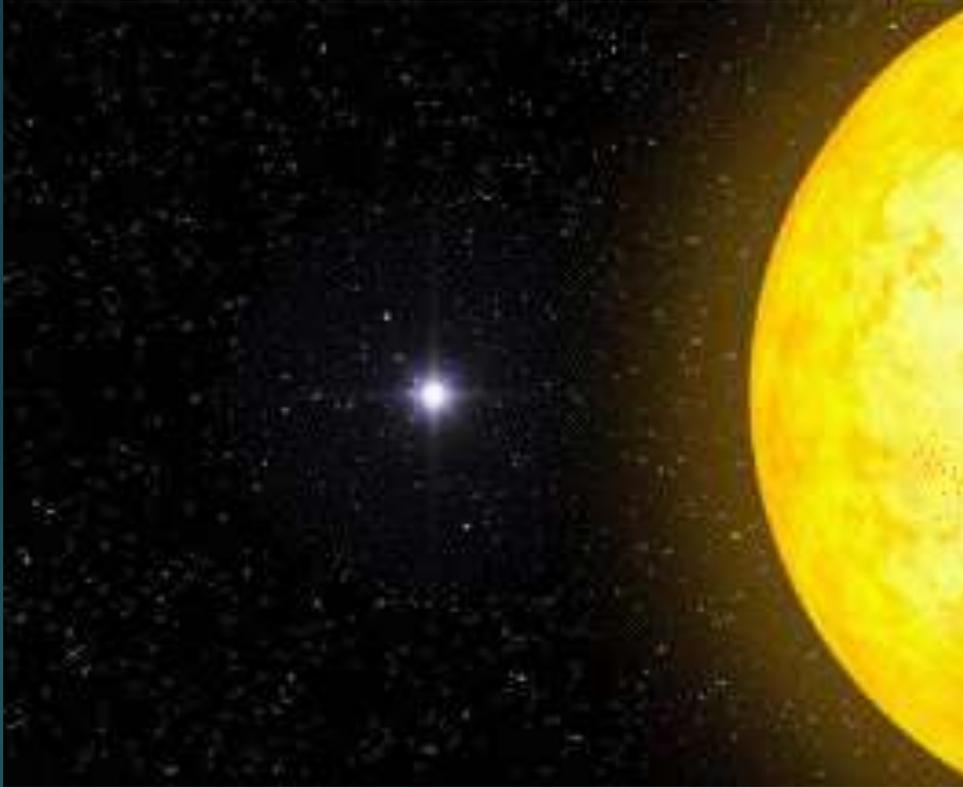


Prédiction de l'orbite de Mercure en mécanique newtonienne



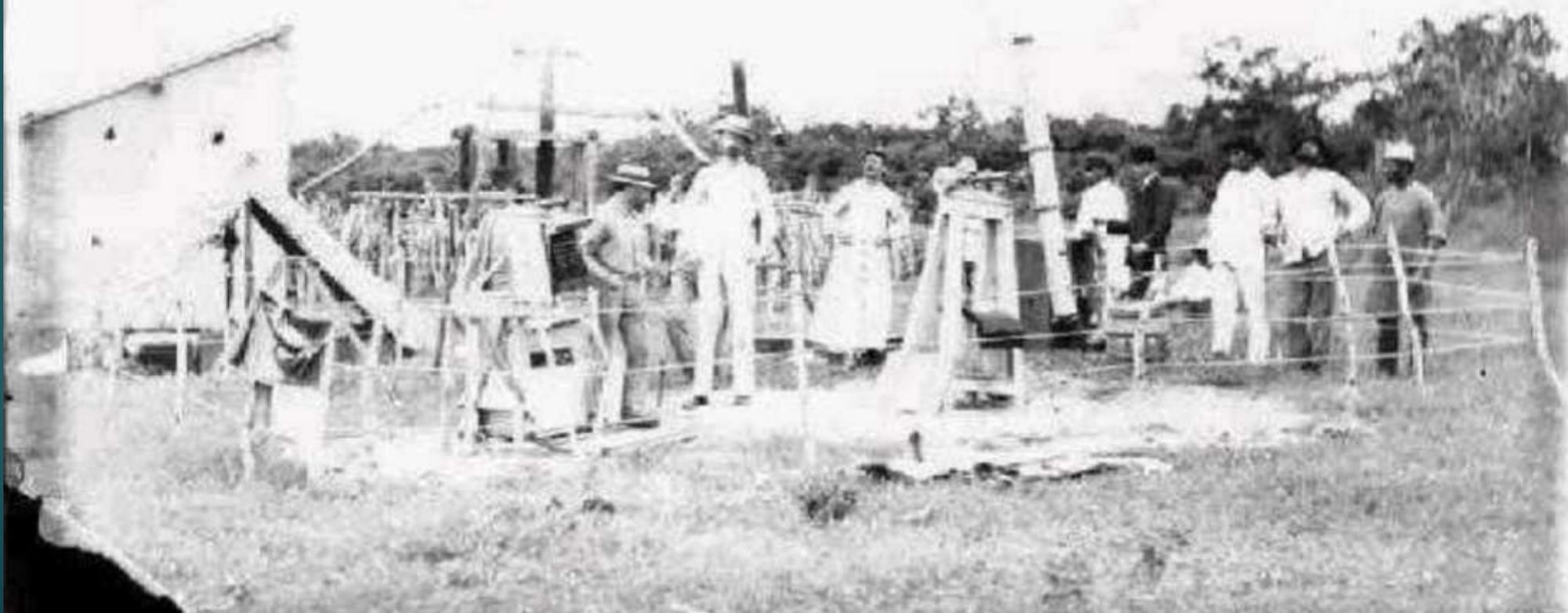
Prédiction de l'orbite de Mercure en mécanique relativiste

# DÉVIATION DE LA LUMIÈRE



Pour la déviation des rayons lumineux par le Soleil il faudra attendre que la mission dirigée par A. Eddington la constate (avec une bonne dose d'optimisme compte tenu des clichés peu convaincants liés à des conditions météorologiques médiocres) à l'éclipse de Sobral en 1919.

mai 1919  
expédition Eddington-Crommelin  
au Brésil et à l'île de Principe



# DÉVIATION DE LA LUMIÈRE PAR LE SOLEIL



ROYAL SOCIETY OF LONDON. - One of only two usable negatives from Eddington's Principe site. Squint at the dots between the horizontal reference lines to see how faint the star images are due to clouds.

24. IX. 19

Liebe Mutter!

Heute eine freundige Nachricht. H. A. Lovatt hat mir telegraphiert, dass die englischen Expeditionen die Lichtablenkung in der Sonne wirklich bewiesen haben. Maja schreibt mir leider, dass Du nicht nur viel Schmerzere heust, sondern dass Du Dir auch noch trübe Gedanken machest. Wie gern würde ich Dir wieder Gesellschaft leisten, dass Du nicht dem hässlichen Gefühls überlassen wärest! Aber ein Weilchen werde ich doch hier bleiben müssen und arbeiten. Auch nach Holland werde ich für einige Tage fahren, um mich überfest dankbar zu erweisen, obwohl der Zeitverlust recht schmerzhaft ist.

Lettre de Einstein à sa mère lui annonçant la confirmation de la relativité générale pour la déviation de la lumière par le Soleil suite aux observations lors de l'éclipse de Sobral par Eddington en 1919.

# LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu}$$



- ▶ En Novembre 1915, Einstein, à 36 ans, dans une série de conférences à l'Académie des sciences de Prusse, décrit sa théorie de la relativité générale.
- ▶ Dans la dernière conférence il introduit une équation qui remplace celle de la loi de la gravitation de Newton.

# LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu}$$



- ▶ Cette théorie s'appuie sur le principe d'équivalence et étend le principe de relativité à tous les observateurs .
- ▶ En relativité générale, la gravité n'est plus une force mais est une conséquence de la courbure de l'espace-temps par la matière et l'énergie qui « en retour » est soumise à cette courbure. Cette représentation géométrique de la gravitation a été difficile à être comprise et admise par la communauté scientifique.

# PREMIÈRES SOLUTIONS: PREMIERS PROBLÈMES

- ▶ Einstein pensait que compte-tenu de la complexité de son équation tensorielle, système de 10 équations aux dérivées partielles du deuxième ordre couplées et non linéaires, il serait difficile de la résoudre.
- ▶ Mais en 1916, Karl Schwarzschild, astronome allemand alors sur le front russe, intéressé par ce que cette théorie pourrait apporter à la mécanique du système solaire, trouve une solution (qui sera généralisée la même année par Droste ) au problème du corps unique à symétrie sphérique.

# PREMIÈRES SOLUTIONS: PREMIERS PROBLÈMES

- ▶ Mais cette solution cache en son sein une phénoménologie monstrueuse, une « singularité » de la métrique à une distance finie bien déterminée (l'horizon) qui jette un doute sur la théorie, que les relativistes tentent d'éluder par des arguments douteux.
- ▶ Ce problème ne sera incidemment formellement résolu qu'en 1921 par Painlevé, mais sa solution ne sera pas comprise et il faudra attendre Georges Lemaître (1932) pour une explication convaincante.

# SINGULARITÉ DE SCHWARZSCHILD



Karl Schwarzschild (1873-1916), astronome allemand. Lieutenant d'artillerie sur le front russe, il prend connaissance de la théorie de la relativité générale d'Einstein en novembre 1915. Einstein présente les résultats de Schwarzschild à l'Académie des sciences de Prusse le 13 janvier 1916.

Quelques mois plus tard en juin, Schwarzschild meurt à Potsdam des suites d'une maladie contractée au front.

# PREMIÈRES SOLUTIONS COSMOLOGIQUES

- ▶ Einstein propose la première solution cosmologique en 1918 sur la base de trois hypothèses:
- ▶ L'univers est homogène et isotrope (Copernic).
- ▶ L'univers est clos (principe de Mach).
- ▶ Il est statique (constat empirique à l'époque).

# PREMIÈRES SOLUTIONS COSMOLOGIQUES

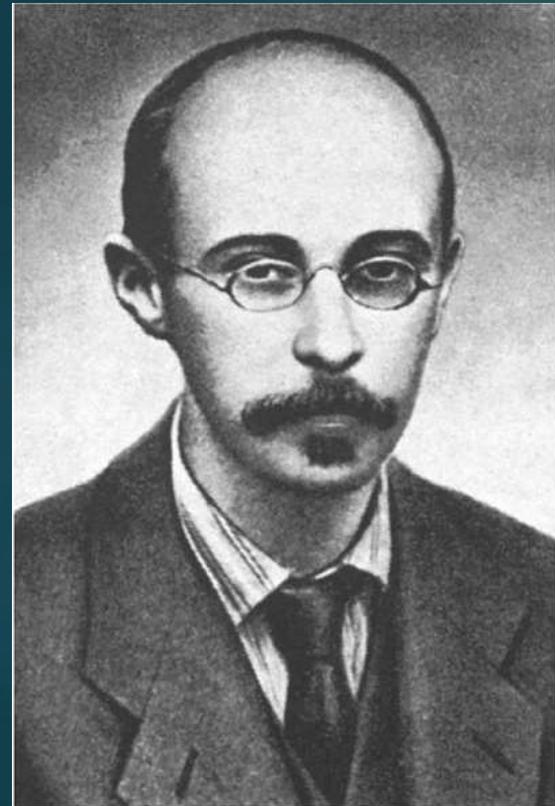
- ▶ Comme aucune solution ne satisfait à son équation, il va la modifier en introduisant une constante (constante cosmologique).
- ▶ Friedmann en 1922 montrera, que cette constante « ad hoc » n'est pas nécessaire si on n'impose pas que l'univers soit statique.
- ▶ Lemaître généralisera cette approche en 1932.
- ▶ La théorie a servi de base pour l'étude de la cosmologie et a donné aux scientifiques les outils nécessaires pour comprendre l'univers.

# MODÈLE DE FRIEDMANN

Il découvre que les équations d'Einstein permettent la description d'un univers en évolution et introduit pour la première fois l'idée d'un univers en expansion.

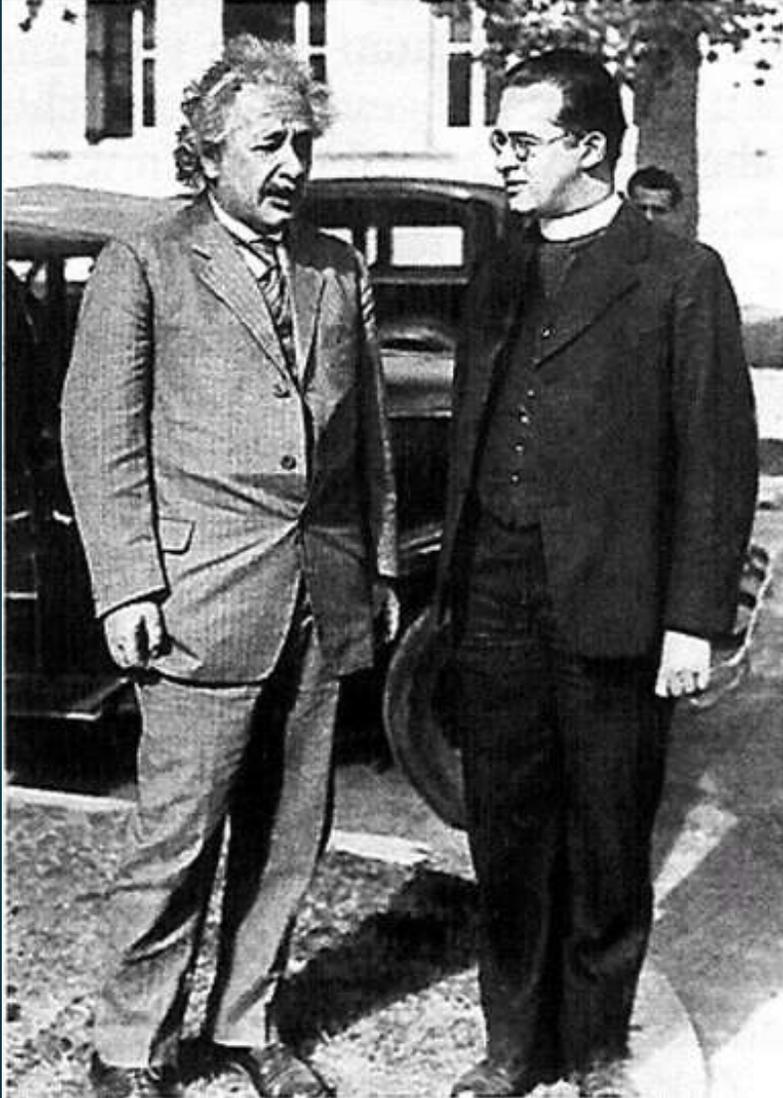
L'article fondateur de la cosmologie non-statique est publié en juin 1922. Friedmann y décrit trois types d'évolution dans le temps de l'Univers, impliquant notamment une singularité initiale.

Il poursuit son raisonnement dans un deuxième article publié en 1924. Une controverse oppose à distance Friedmann à Albert Einstein, qui refusera longtemps un univers non-statique.



*A. Friedmann*

# EINSTEIN ET LEMAÎTRE



En 1927, Lemaître publie le fruit de ses calculs et réflexions dans un article des “Annales de la société scientifique de Bruxelles”.

Il fait part de ses calculs à Einstein qu’il rencontre à Bruxelles la même année mais celui-ci lui est peu convaincu

Mais Lemaître, en janvier 1933, finit par obtenir une reconnaissance d’Einstein, qui déclare : “ C’est l’explication la plus belle et la plus satisfaisante de la création que j’ai entendue”.

# LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET L'ACADÉMIE DES SCIENCES (1921-1924)

- ▶ Einstein publie ses équations définitives en novembre 1915, en plein conflit mondial, alors qu'il est professeur à Berlin. Inutile de dire que dans ces conditions, l'Académie des Sciences, d'ailleurs mobilisée pour l'effort de guerre, se soucie peu de cette publication.
- ▶ La situation change en 1921, vu qu'Einstein est récompensé par le prix Nobel, même si ce n'est pas pour la relativité générale.
- ▶ En effet le comité Nobel, comme il n'avait rien compris à sa théorie, pour ne pas risquer un camouflet (au cas où elle serait fausse), a préféré le décerner pour l'effet photoélectrique, confirmé par ailleurs.

# LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET L'ACADÉMIE DES SCIENCES (1921-1924)

- ▶ Vis-à-vis de cette nouvelle théorie, l'Académie des Sciences va montrer une grande défiance qui va cependant évoluer dans le temps.
- ▶ Paul Langevin, convaincu que le temps de la réconciliation était venu, du moins entre scientifiques, est le premier, en novembre 1921, à prendre la défense de la théorie de la relativité générale.
- ▶ Un débat plutôt vif, mais non stérile, se développe, avec un grand nombre de contributions sur la relativité générale entre 1921-1923.
- ▶ Langevin, œuvrera à créer progressivement un courant favorable aux idées d'Einstein à l'Académie.

# LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET L'ACADÉMIE DES SCIENCES (1921-1924)

- ▶ Les académiciens ne savent que penser de cette théorie.
- ▶ Dans ce contexte, Paul Painlevé homme politique et scientifique éminent (il avait été ministre de la guerre puis président du conseil en 1917 et élu président de l'académie des sciences en 1918) se propose, dans un premier compte rendu à l'Académie des Sciences le 24 Octobre 1921 de faire un état des lieux et de comparer les deux théories, celle de Newton et celle d'Einstein.

# LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET L'ACADÉMIE DES SCIENCES (1921-1924)

- ▶ Ce premier article, assez critique, mais constructif est une annonce de son travail qu'il va présenter de manière plus détaillée dans un deuxième article, peu de temps après, le 14 novembre 1921 . Il en fera un troisième en mai 1922, après un débat avec Einstein et ses collègues, au Collège de France, pendant la visite d'Einstein à Paris (30 Mars - 7 avril 1922).
- ▶ Rappelé par sa carrière politique, il se retirera du débat après le 1<sup>er</sup> Mai 1922. Sa contribution innovante se sera faite sur une période limitée à 6 mois.

# EINSTEIN AU COLLÈGE DE FRANCE - AVRIL 1922

- ▶ En novembre 1921, Painlevé écrit à Einstein pour lui présenter ses critiques et sa solution et l'inviter à en débattre avec lui et ses collègues de l'Académie des Sciences. Dans une lettre du 7 décembre, Einstein répond aux critiques mais ayant des engagements explique qu'il ne peut pas se rendre à Paris rapidement.
- ▶ Il viendra au printemps 1922 et fera une série de conférences-débats du 31 mars au 7 avril. Charles Nordmann fera un compte-rendu des discussions : « Einstein expose et discute sa théorie » publié dans la *Revue des Deux Mondes*.

# EINSTEIN AU COLLÈGE DE FRANCE - AVRIL 1922



La foule se pressant aux portes du Collège de France pour assister à une conférence d'Einstein. À droite de la grille, on devine Painlevé filtrant les entrées (image Gallica BnF)

Les séances les plus techniques se dérouleront devant un public restreint mais très spécialisé dans le domaine et s'apparenteront plutôt à des groupes de travail. C'est ainsi qu'il faut considérer le débat avec Painlevé, en présence notamment de H. Becquerel, M. Brillouin, E. Cartan, T. De Donder, J. Hadamard, P. Langevin et C. Nordmann.

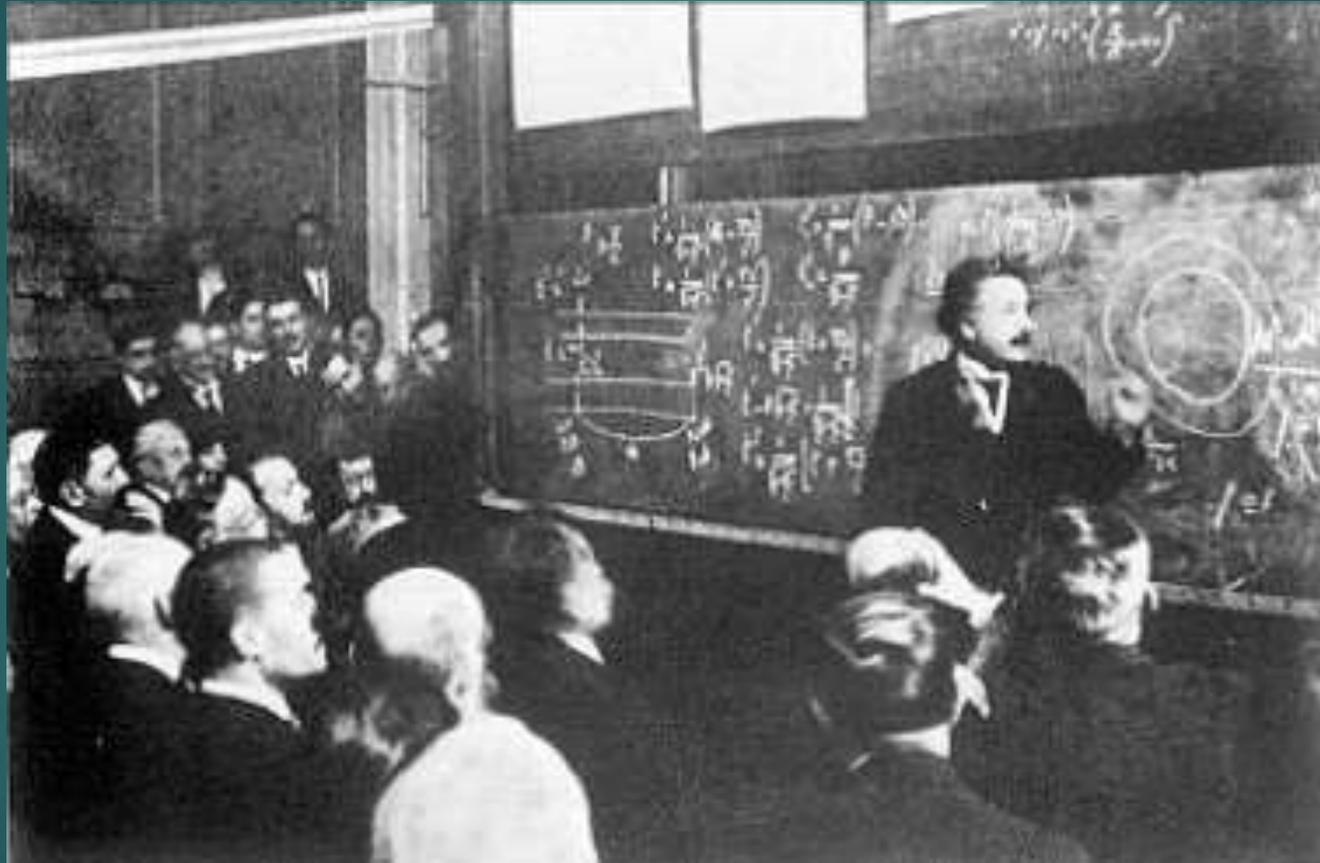
# EINSTEIN AU COLLÈGE DE FRANCE - AVRIL 1922



*Einstein et Painlevé (dessin de L'illustration à gauche, dessin de Lucien Jonas à droite).*

# EINSTEIN AU COLLÈGE DE FRANCE - AVRIL 1922

LE PROBLÈME DE L'HORIZON DANS LA SOLUTION DU CORPS UNIQUE À SYMÉTRIE SPHÉRIQUE



*Einstein exposant le problème de l'horizon devant une audience restreinte attentive. Painlevé est assis à côté de l'extrémité gauche du tableau.*

# EINSTEIN AU COLLÈGE DE FRANCE - AVRIL 1922

TRADITION FRANÇAISE OBLIGE, LE DÉBAT SE TERMINE PAR UN BANQUET!

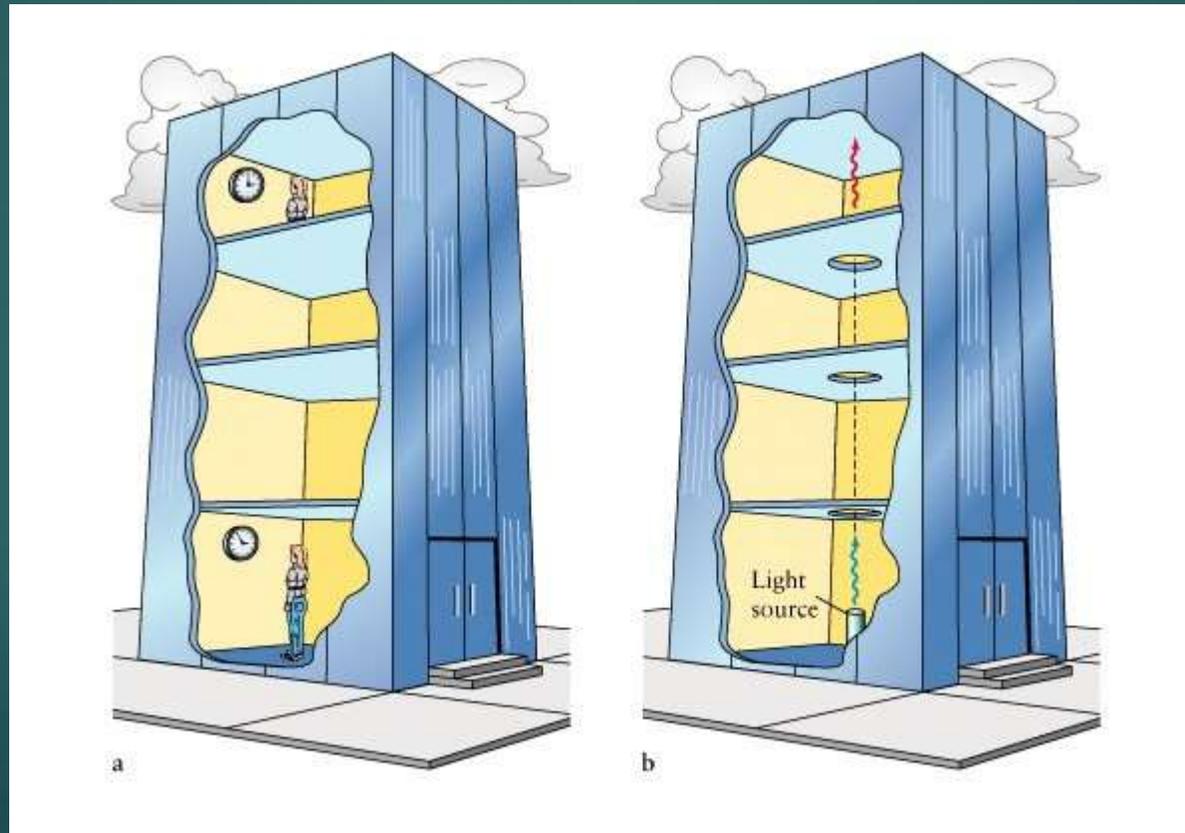


*Banquet à la maison des polytechniciens en l'honneur d'Einstein, lors de sa visite d'avril 1922. (photo droits réservés ESPCI).*

À la droite de Langevin, Charles Fabry, Charles-Édouard Guillaume puis deux personnes non identifiées puis Paul Appell. À la gauche d'Einstein, Louis Lapicque, Marie Curie, une personne non identifiée, Émile Picard. En bas à gauche de la photo, sous un fort éclairage, Émile Borel, Jean Becquerel.

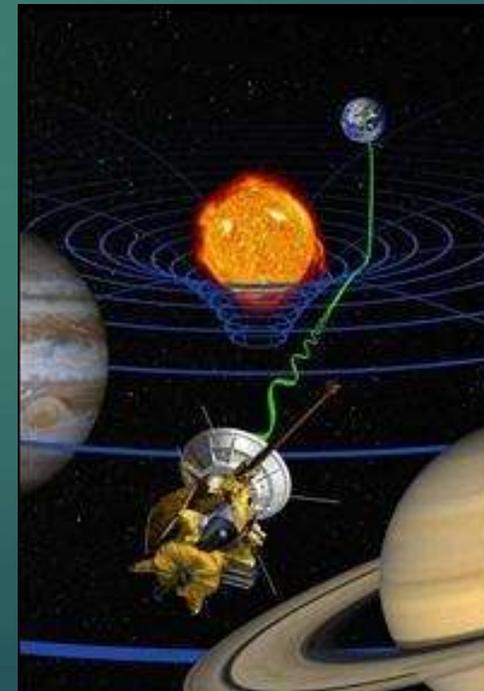
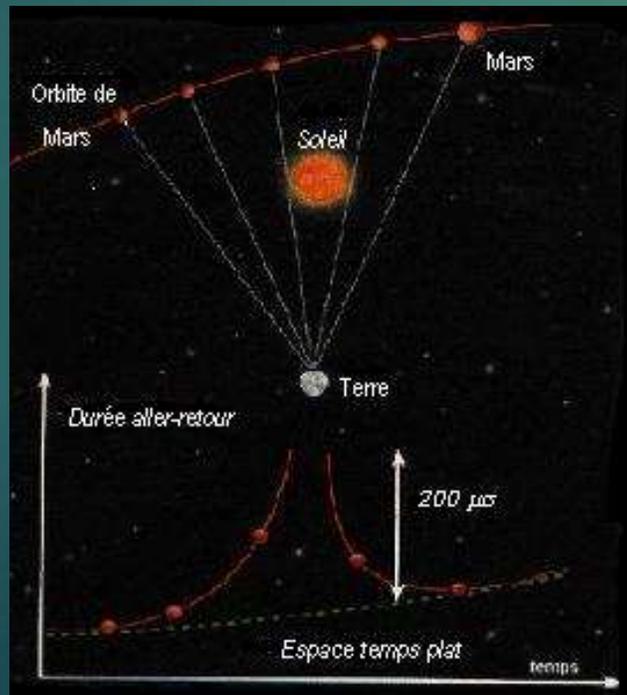
# AUTRES VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES

- a - Ralentissement des horloges par un champ gravitationnel
- b - Décalage spectral dans un champ gravitationnel (1959 à Harvard – Pound-Rebka)



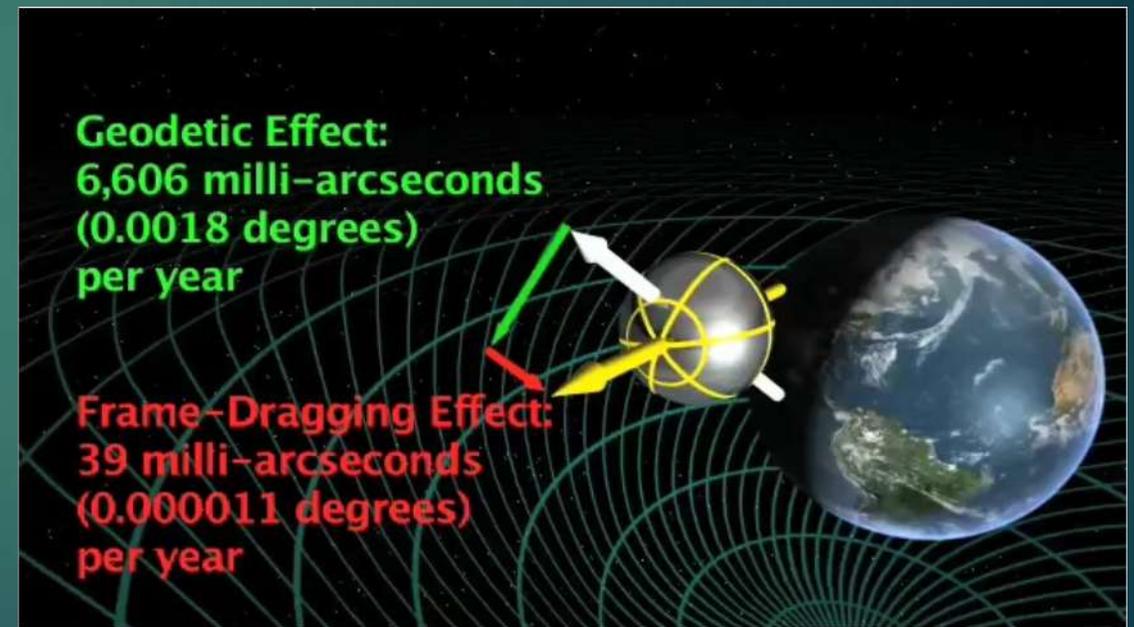
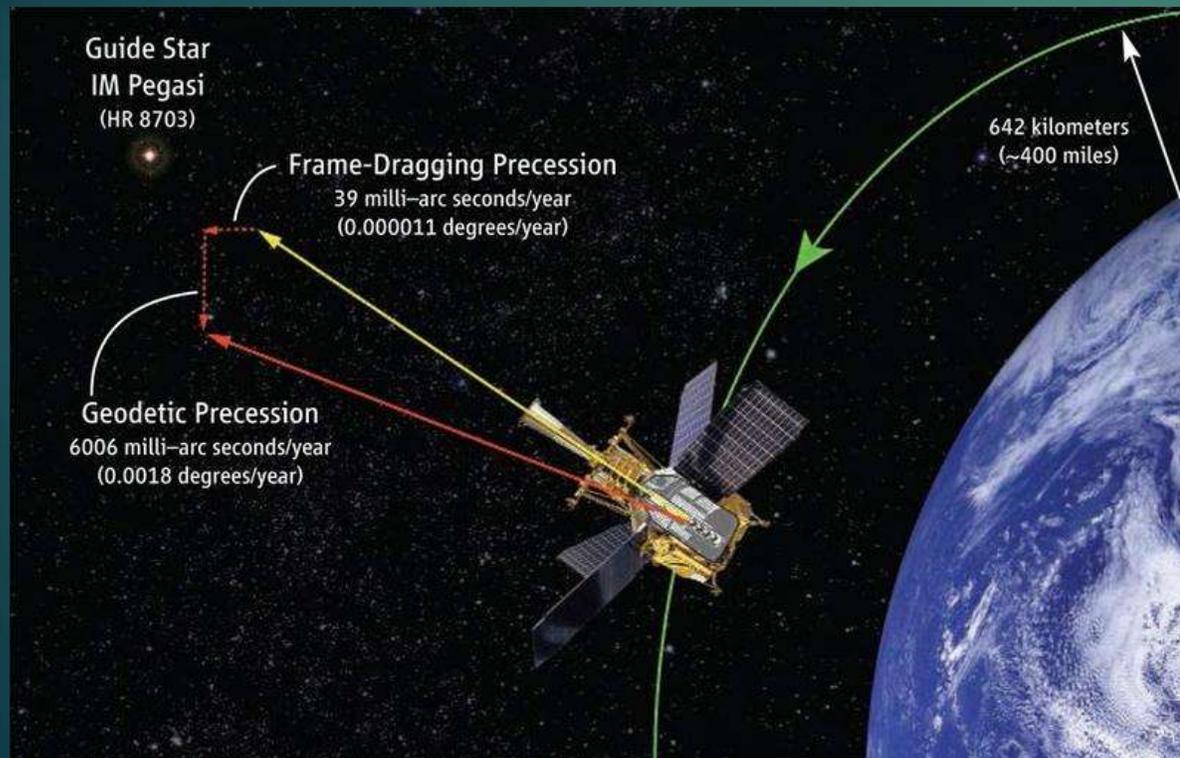
# AUTRES VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES

**Effet Shapiro:** En 1964, Shapiro démontra qu'un rayon lumineux n'était pas seulement dévié en passant près d'une masse, mais également que la durée de son trajet était allongée par rapport à une géométrie euclidienne. Il calcula que le retard devait atteindre environ 200 microsecondes, donc parfaitement mesurable, pour une ligne de visée rasant le Soleil



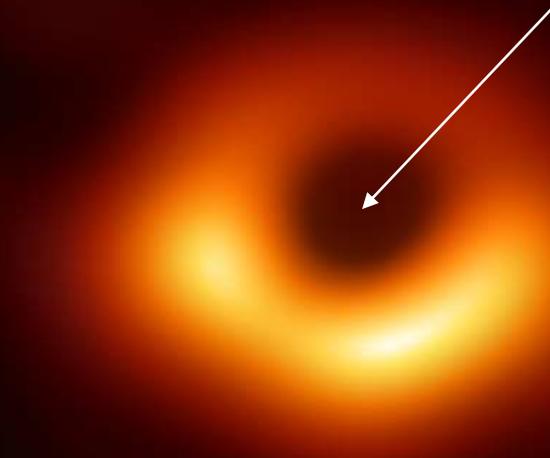
# AUTRES VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES

Précession de l'axe de rotation d'un gyroscope, - Précession géodétique lié à la courbure de l'espace par la Terre (effet De Sitter). - Entraînement en rotation de référentiel, lié à la rotation de la Terre. Ces deux effets très faibles ont été vérifiés par l'expérience Gravity Probe B



# TROUS NOIRS

Le trou noir est là



# LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Observation d'un pulsar binaire, source d'ondes gravitationnelles selon la relativité générale. L'observation sur 10 ans a permis de vérifier la conformité de ce mouvement avec celui prédit par la relativité générale, prix Nobel à (Hulse et Taylor) en 1973.



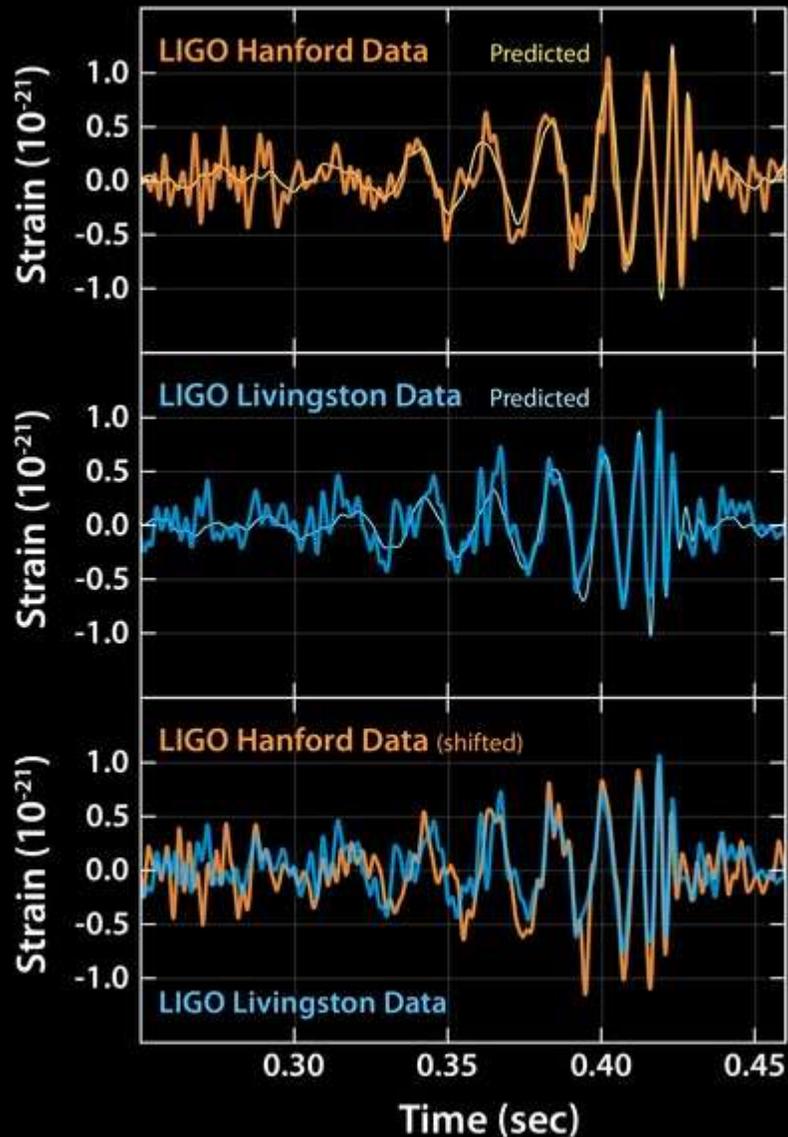
Ci contre, un trou noir perturbé par des ondes gravitationnelles

# LES ONDES GRAVITATIONNELLES



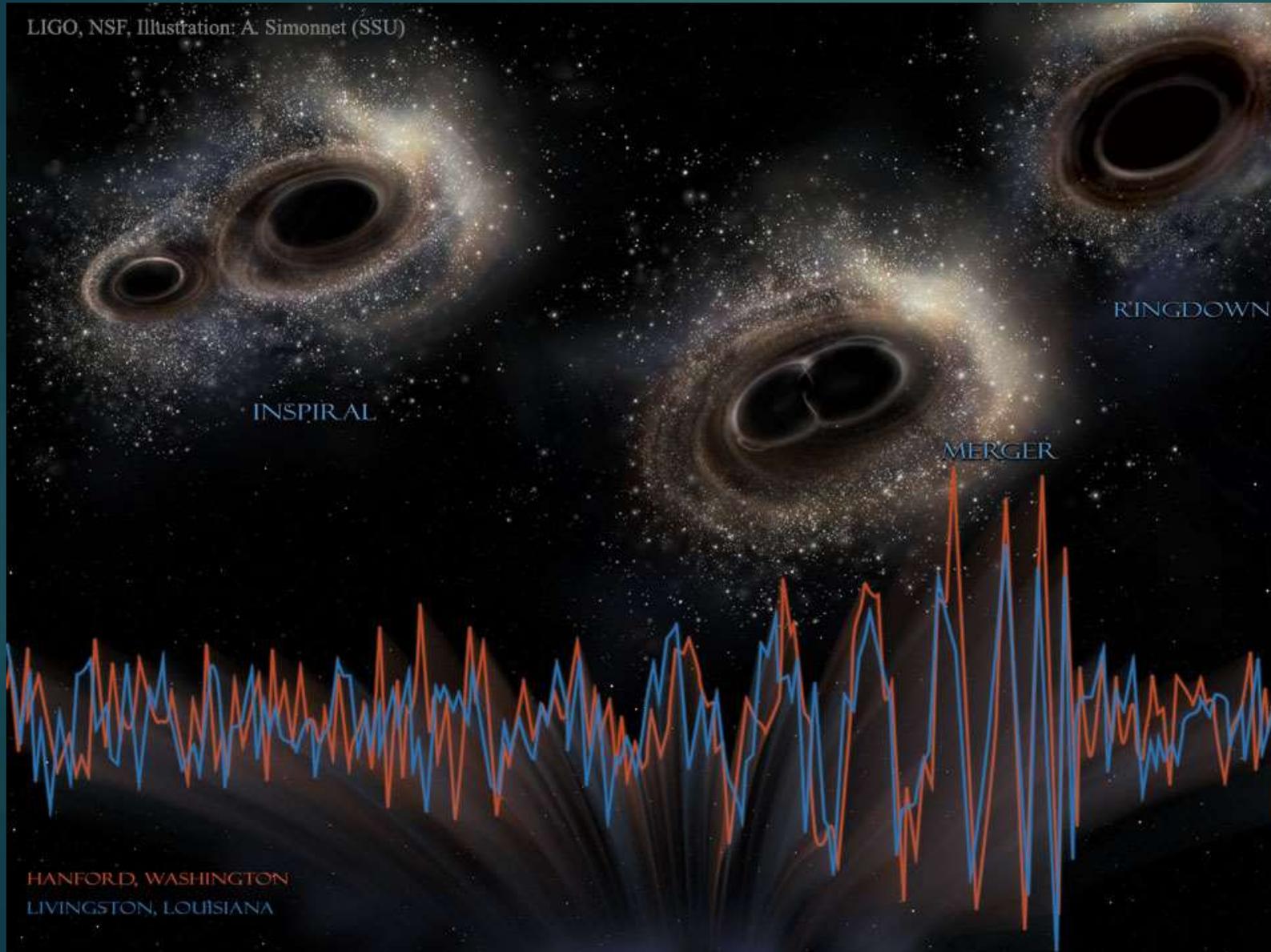
LIGO regroupe déjà 2 interféromètres (de 2 x 4 km), un à Livingston, (Louisiane) et un à Hanford, (Washington). VIRGO (en Italie) a un interféromètre de (2 x 3 km). les deux équipes partagent leur données.

© Caltech, MIT, *Ligo Lab*



L'événement date du 14/9/2015 à 9h51 GMT. Il s'agit de la fusion de deux trous noirs stellaires situés approximativement à 1,3 milliard d'années-lumière. Leurs masses respectives sont estimées respectivement à 36 et 29 masses solaires, le trou noir résultant étant d'une masse inférieure à la somme, la différence correspondant à ce qui est "parti" sous forme d'ondes gravitationnelles.

# LES ONDES GRAVITATIONNELLES

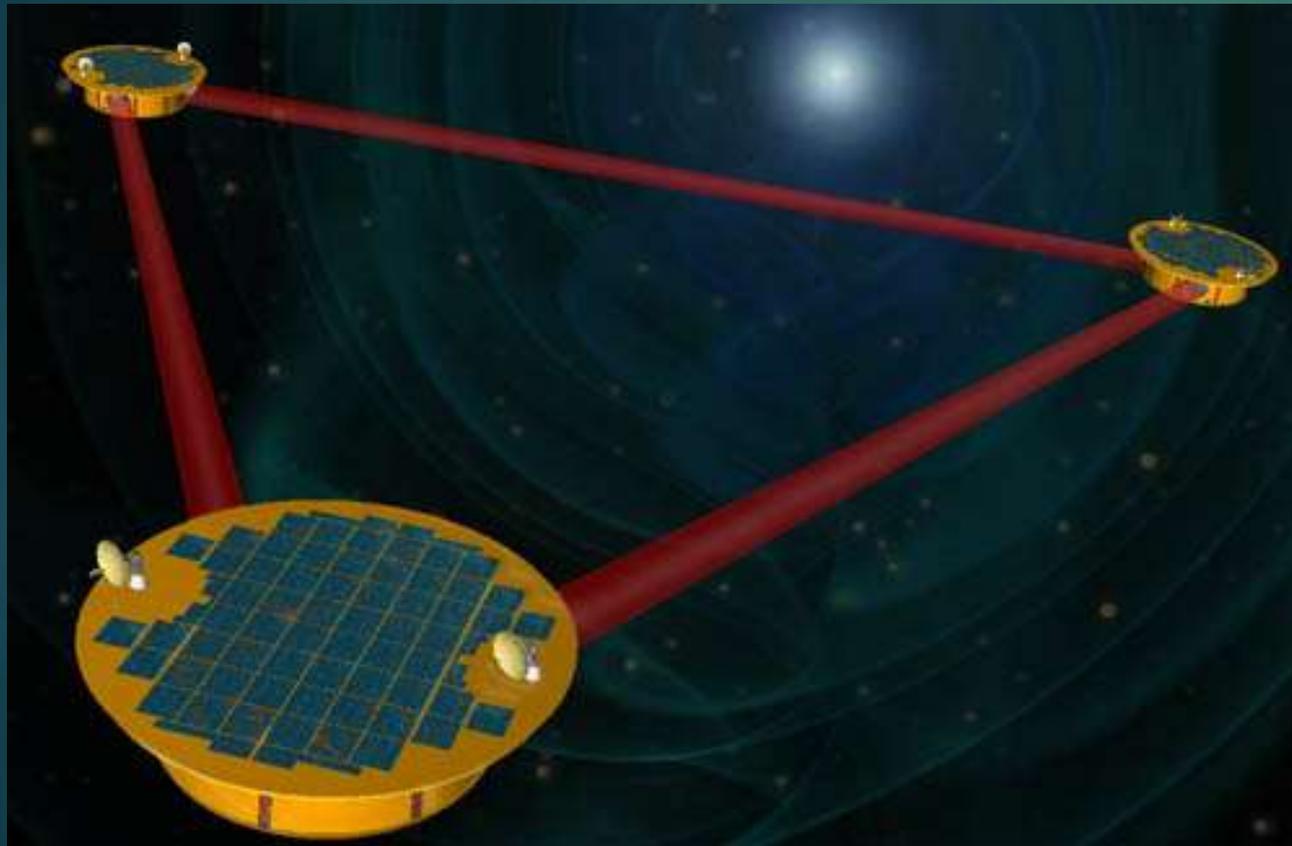


LIGO Observatory  
Caltech MIT LIGO  
Lab

Une vue d'artiste  
représentant la fusion  
des 2 trous noirs et les  
ondes  
gravitationnelles  
émises.

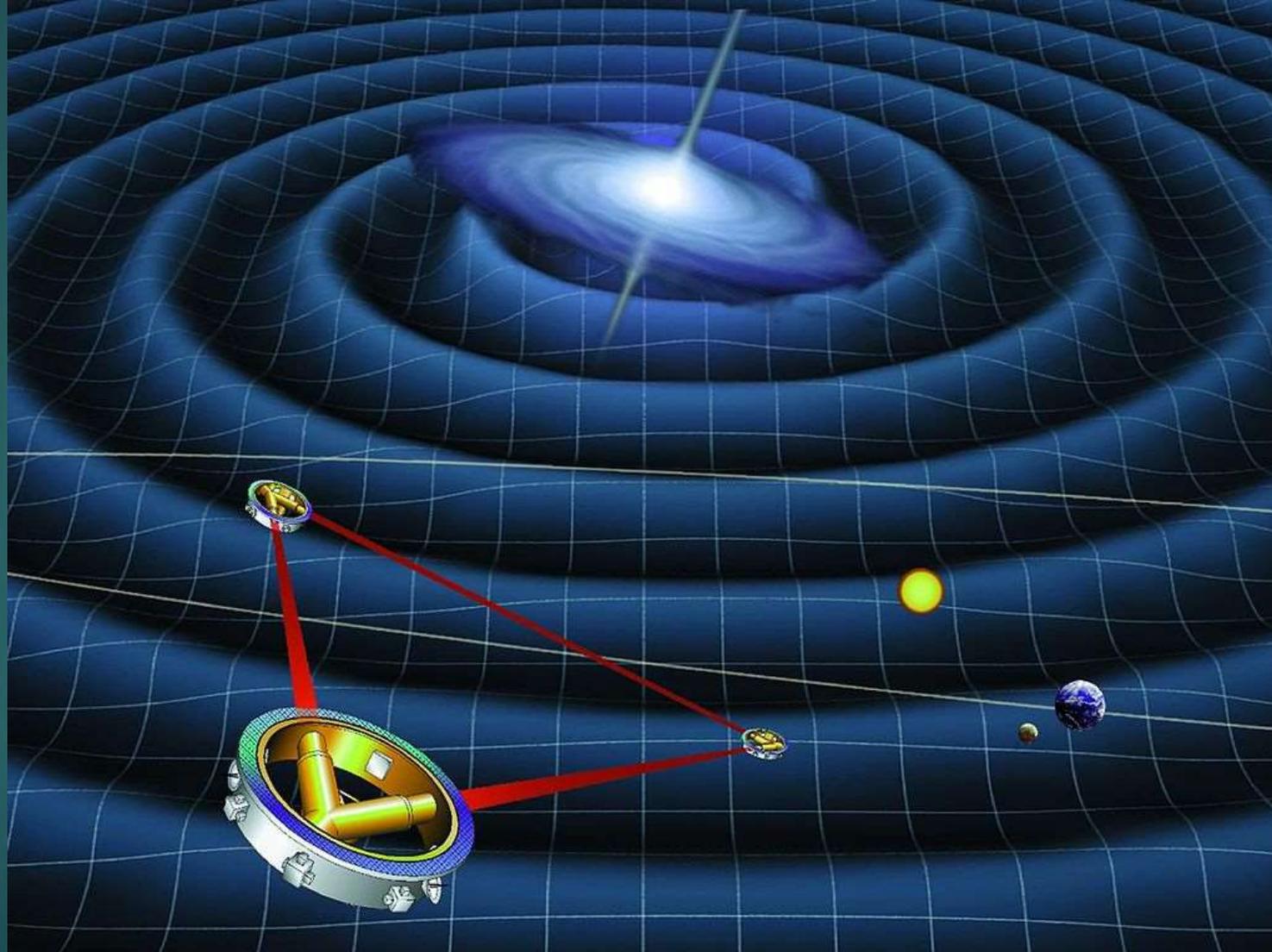
# eLISA: Evolved Laser Interferometer Space Antenna

Le Futur: Détection d'ondes gravitationnelles à très basses fréquences

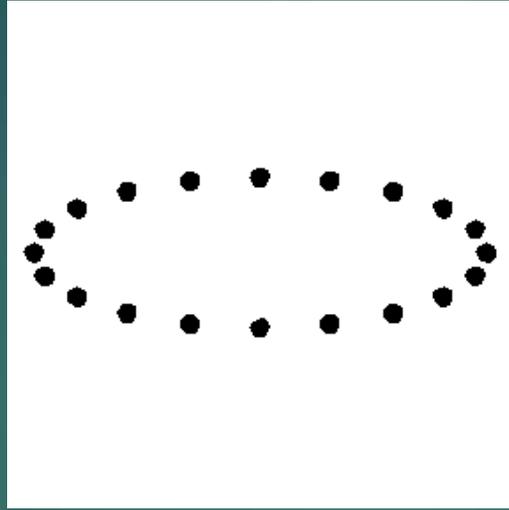
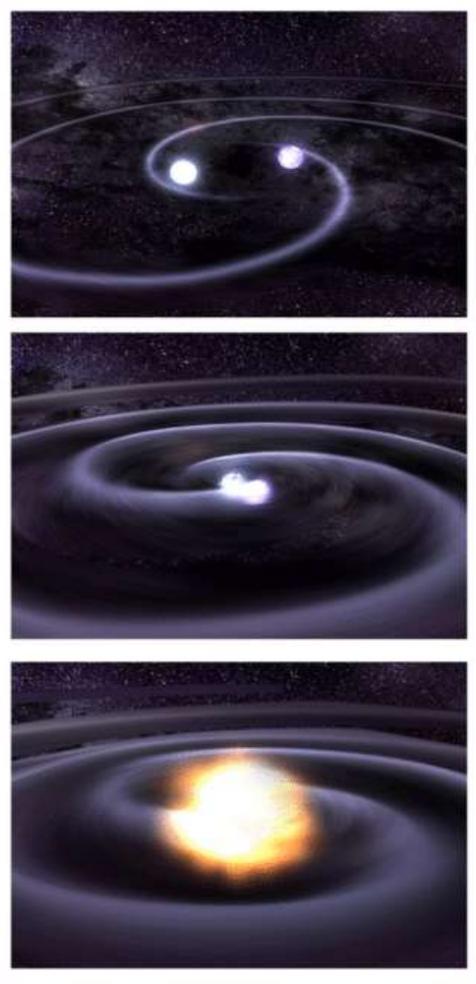


eLISA (2034) le premier détecteur d'ondes gravitationnelles dans l'espace. Il mesurera les ondes gravitationnelles directement par interférométrie laser. L'instrument est un ensemble de trois satellites formant un triangle équilatéral d'un million de kilomètres de côté. L'ensemble décrit une orbite héliocentrique de même période que la Terre.

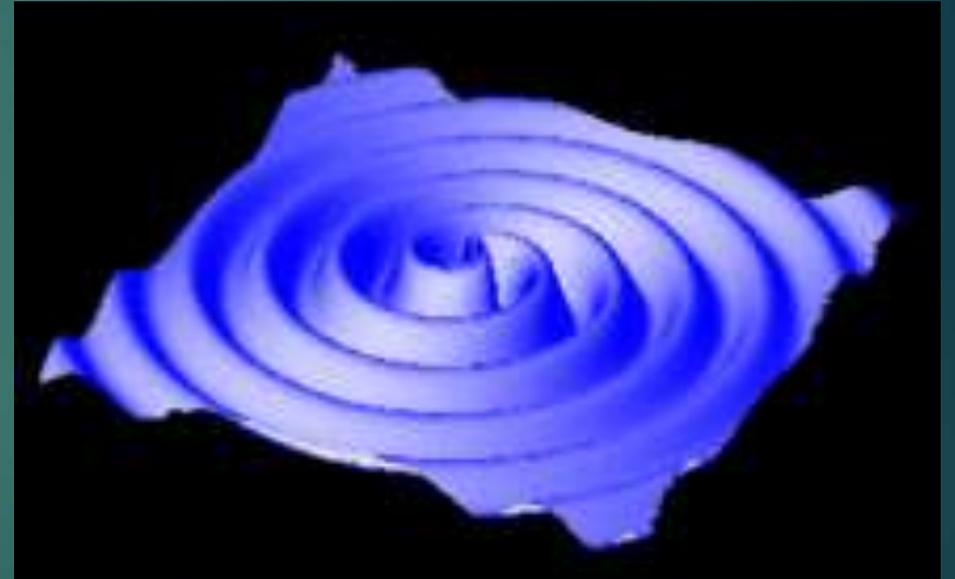
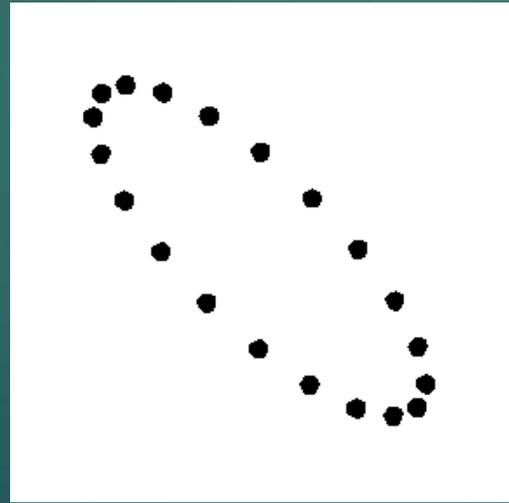
# MISSION LISA: VUE D'ARTISTE



# EFFETS DES ONDES GRAVITATIONNELLES

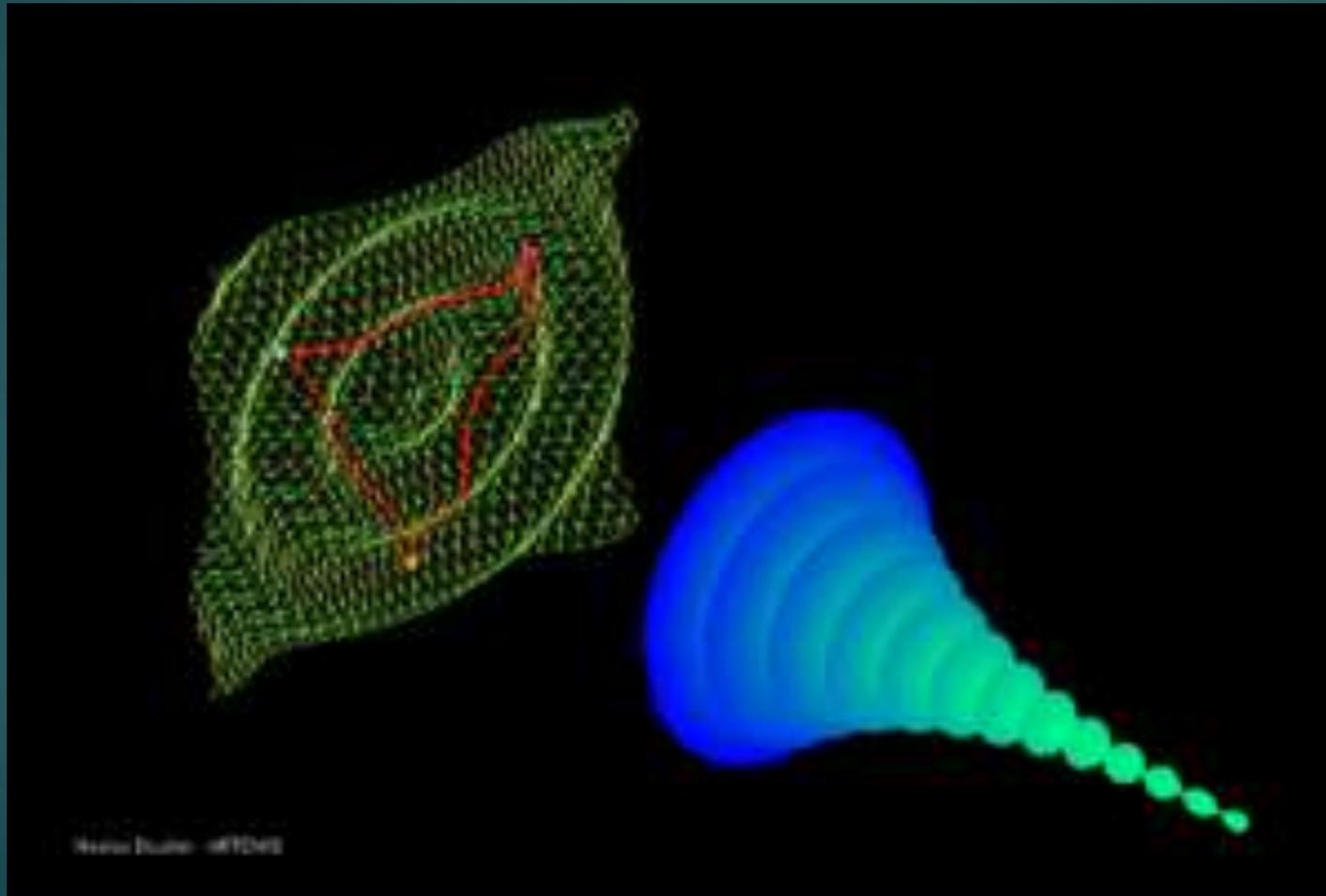


Polarisation type +

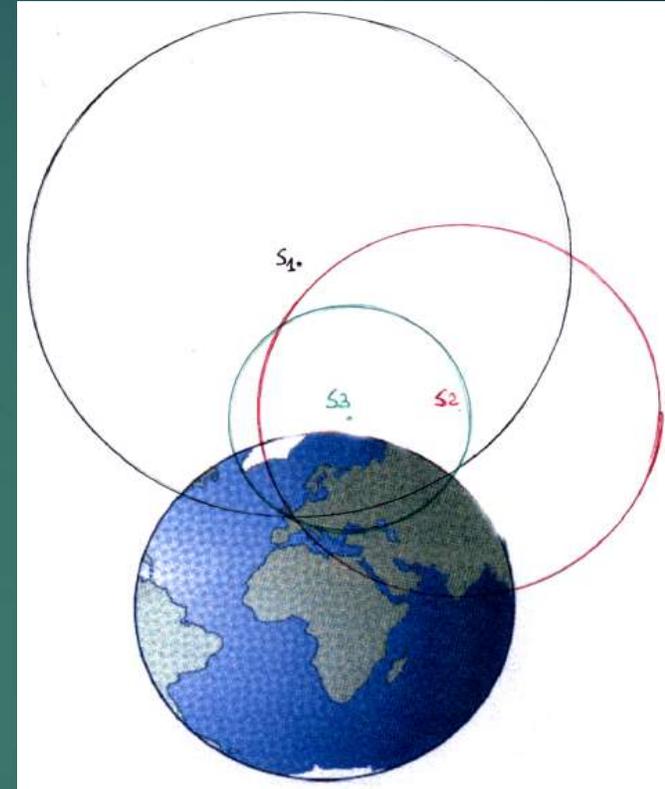
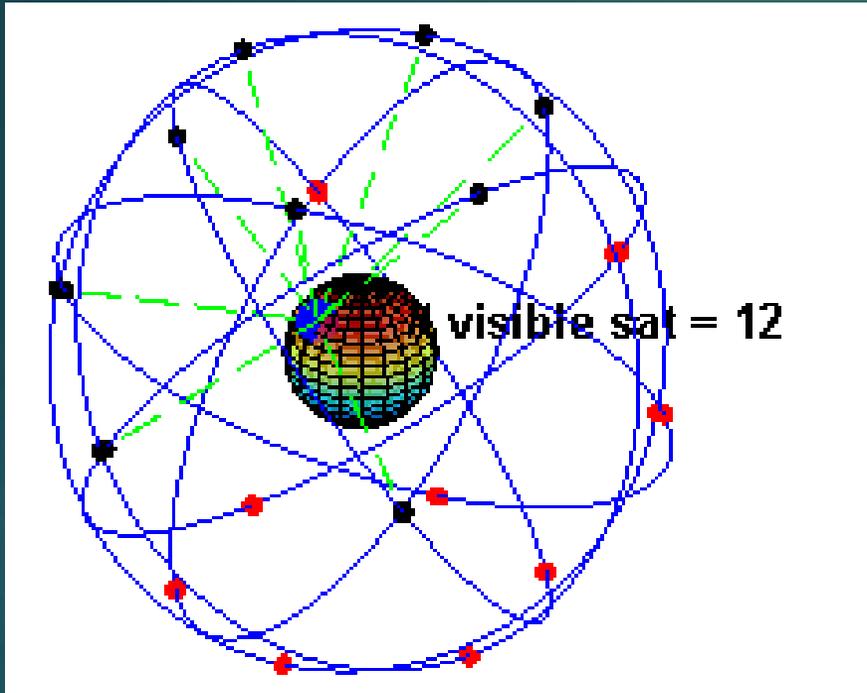


Source d'OG : Coalescence de binaires (pulsars par exemple). Polarisation type X

# EFFETS D'ONDES GRAVITATIONNELLES SUR ELISA



# Horloges atomiques embarquées: GPS



Les satellites sont à plus de 20 000km d'altitude. L'horloge atomique a une précision de  $10^{-10}$  (dérive d'environ  $1s$  par millénaire) ce qui permet une localisation, après corrections relativistes à mieux que 1m près (précision maximale). Sans les corrections relativistes le système dériverait de 11km par jour.

# CONCLUSION

- ▶ Sacralisé par certains, vilipendé par d'autres, Einstein restera, contre vents et marées, une figure incontournable de l'histoire de la science car, nonobstant quelques petites turpitudes, son œuvre restera, avec la mécanique quantique, un des deux monuments scientifiques de la science du 20<sup>ième</sup> siècle, et est toujours la théorie de référence de la gravitation, un siècle après.

# CONCLUSION

- ▶ Cependant, comme l'épisode avec Painlevé l'a montré, cela confirme que pour des découvertes d'une telle ampleur, leurs auteurs, s'ils ont été bien inspirés, réalisent rarement l'étendue de ce qu'ils ont révélé: L'œuvre dépasse le créateur!
- ▶ En particulier, la contribution de Painlevé et son rejet par la communauté scientifique nous offre un modèle d'un désastre scientifique dont il convient de tirer les enseignements pour faire face aux défis que nous pose la science contemporaine !

ET EINSTEIN, QU'AURAIT-IL PENSÉ DE TOUT  
CELA?

