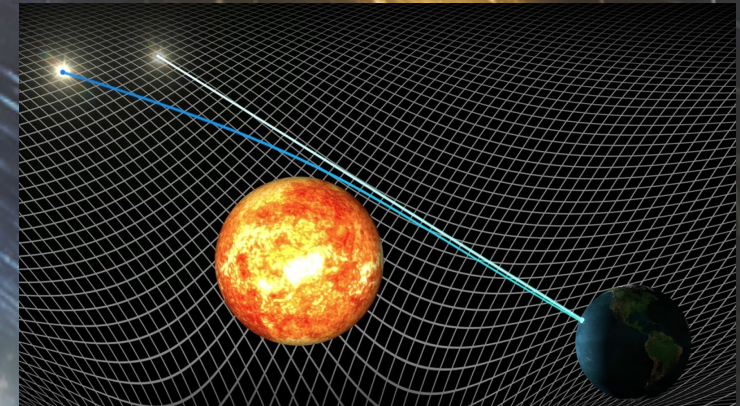


Qu'est-ce que le temps pour les physiciens ?

Est-il le même pour un habitant de Besançon et de Cuzco ?

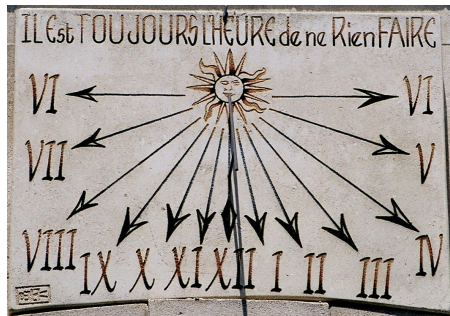
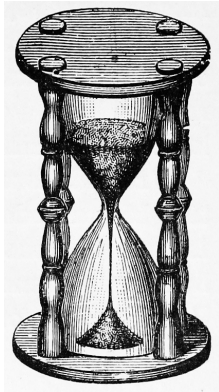
Jérôme Margueron,
Institut de Physique Nucléaire
Lyon, France



Comment mesure t-on le temps ? Avec quelle précision ?

Aristote liait déjà le temps et le mouvement

Antiquité: **sablier** et **cadran solaire**



Saint-Rémy de provence

Horloges hydriques



Importée du moyen orient.
Utilisée dans les monastères
au moyen âge.

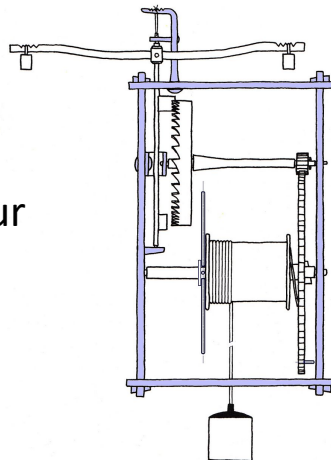
Horloge de Charlemagne (806)

Les premières **horloges mécaniques**

Fin du XIII^{ème} siècle

Horloge à foliot

Précision: 10min par jour



Horloges à pendule

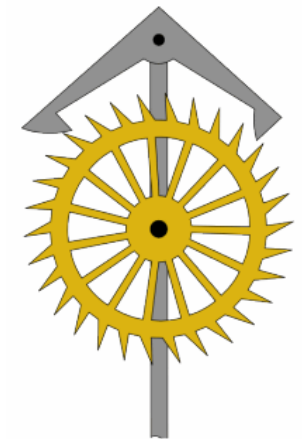
XVI^{ème} siècle: Galilée, Huygens, etc...

Précision: 10s par jour

Horloges à quartz

XX^{ème} siècle, oscillateur à quartz

Précision: 1s tous les 6 ans



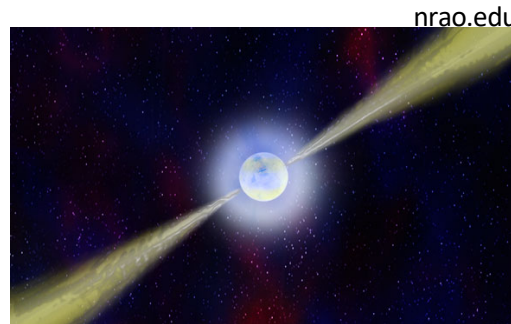
Les horloges les plus précises

Horloges atomiques



Horloge atomique de la NASA

Basé sur les transitions électroniques.
Dérive de 1s tous les 100 millions d'années (10^{-16} ss^{-1}).

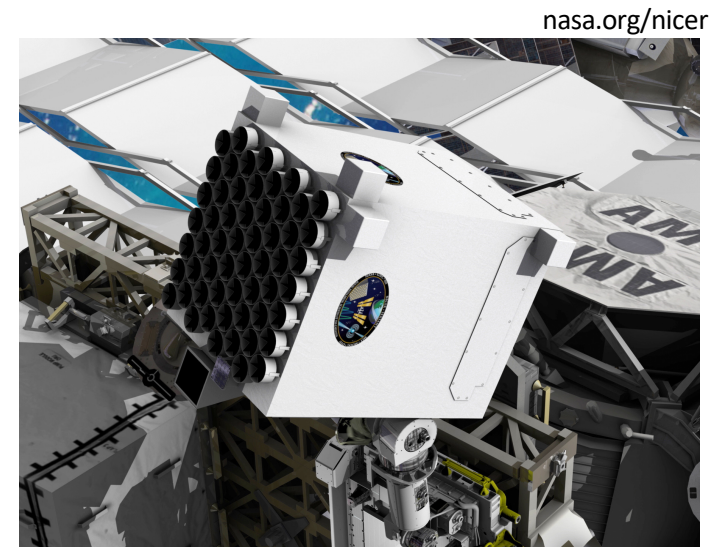


Les pulsars

Observatoire NICER-SEXTANT embarqué sur la station spatiale internationale.

Utiliser les pulsars (fréquence des rayons X) comme équivalent GPS pour navigation spatiale.

Précision: 10^{-10} s .



Horloges nucléaires

Projet en cours basé sur un isomère du thorium.

Précision: 1s tous les 10 milliards d'années (10^{-19} ss^{-1}).

Des horloges précises pour quoi faire ?

Voyager, déterminer sa position, se repérer dans l'espace, communiquer, systèmes électroniques, ordinateurs, etc...

Les explorateurs au XVIème siècle ont contribué au développement d'horloges précises et stables embarquées pour déterminer leur position et cartographier le monde.

Système GPS (Global Positioning System)
HOW GPS WORKS

1 GPS satellites broadcast radio signals providing their locations, status, and precise time $\{t_1\}$ from on-board atomic clocks.

2 The GPS radio signals travel through space at the speed of light $\{c\}$, more than 299,792 km/second.

3 A GPS device receives the radio signals, noting their exact time of arrival $\{t_2\}$, and uses these to calculate its distance from each satellite in view.

4 Once a GPS device knows its distance from at least four satellites, it can use geometry to determine its location on Earth in three dimensions.

GPS
IS A CONSTELLATION OF 24 OR MORE SATELLITES FLYING 20,350 KM ABOVE THE SURFACE OF THE EARTH. EACH ONE CIRCLES THE PLANET TWICE A DAY IN ONE OF SIX ORBITS TO PROVIDE CONTINUOUS, WORLDWIDE COVERAGE.

To calculate its distance from a satellite, a GPS device applies this formula to the satellite's signal:
distance = rate x time
where **rate** is $\{c\}$ and **time** is how long the signal traveled through space.

The signal's travel **time** is the difference between the time broadcast by the satellite $\{t_1\}$ and the time the signal is received $\{t_2\}$.

The Air Force launches new satellites to replace aging ones when needed. The new satellites offer upgraded accuracy and reliability.

How does GPS help farmers? Learn more about the Global Positioning System and its many applications at www.gps.gov

<http://gps.org> A global public service brought to you by the U.S. government.

www.gps.gov

This poster is a product of the National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing, an official body of the United States Government. Rocket image courtesy of DLA.

À ces échelles, le temps est-il le même que celui que nous percevons dans la vie quotidienne ?

En d'autres termes, est-ce que ces nouvelles technologies sur la mesure du temps ont renouvelé les concepts des physiciens ?

A l'inverse, est-ce que la précision atteinte grâce aux horloges atomiques ont permis d'effectuer des mesures ou des expériences qui étaient impossibles auparavant ?

Pour répondre à ces questions, nous allons aborder les sujets suivants:

Le temps est-il absolu ?

Qu'est-ce que le concept d'espace-temps ?

La simultanéité de 2 événements est-elle absolue ?

Existe t-il une vitesse maximale ?

Peut-on voyager dans le temps ?

Qu'est-ce que la gravité ?

Qu'elles sont les applications de ces nouveaux concepts ?

Le temps est-il absolu ?

Newton: oui, il l'est, ainsi que l'espace.

On peut définir l'espace de façon absolue avec le mètre.

On peut définir le temps de façon absolue avec les horloges.

Einstein (1905): non, le temps et l'espace sont relatifs.

Si l'on se déplace vite par rapport à la Terre, le temps se ralentit.

Avec la vitesse, on observe une contraction des longueurs et une dilatation du temps.

Exemple:



Barre au repos.



La même barre à 10% de la vitesse de la lumière (c).



La même barre à 90% de la vitesse de la lumière.

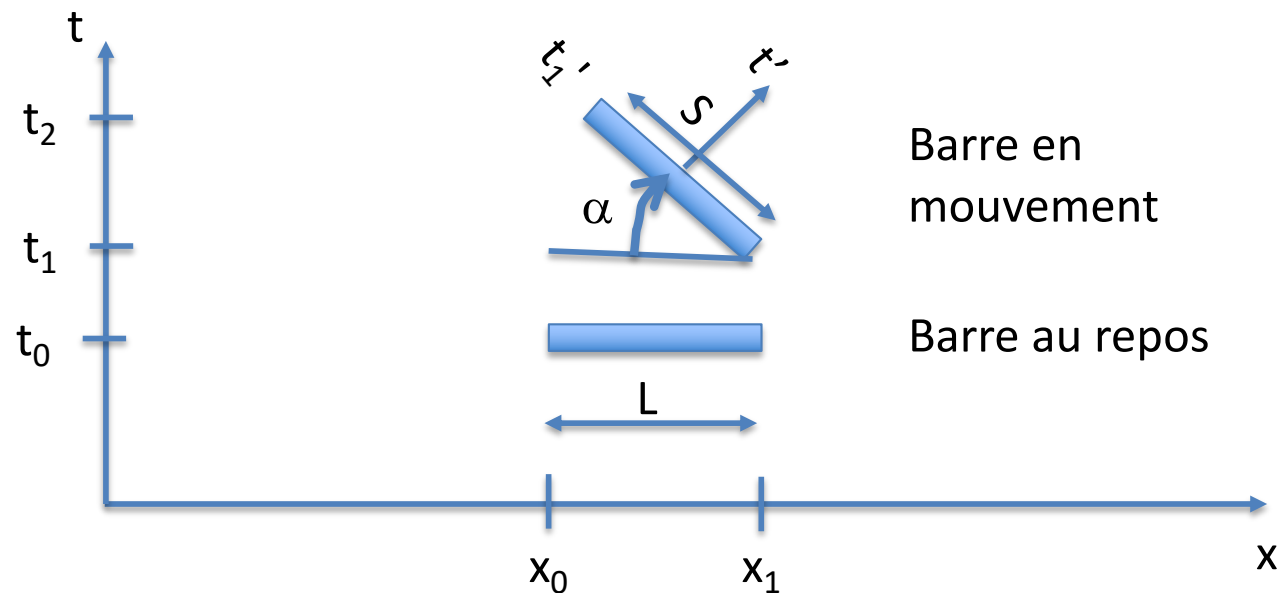
L'espace et le temps sont relatifs, mais l'espace-temps est absolu.

Un nouveau concept: l'espace-temps

Espace 3D + temps : espace-temps 4D → Difficile à représenter.

Nous pouvons cependant représenter facilement 1 dimension d'espace et 1 dimension de temps → représentation 2D.

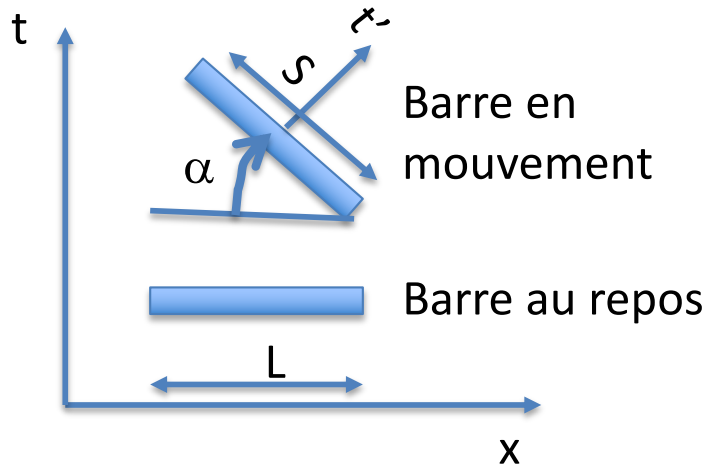
Exemple:



Donner une **vitesse** à la barre consiste à la faire **tourner dans l'espace-temps**,
tout en conservant sa longueur.

→ C'est le même phénomène que la **perspective** dans l'espace.

Un nouveau concept: l'espace-temps



Donner une **vitesse** à la barre consiste à la faire **tourner dans l'espace-temps**, tout en conservant sa longueur.
→ C'est le même phénomène que la **perspective** dans l'espace.

La longueur de la barre (L) n'est pas conservée, mais sa norme dans l'espace-temps (S) l'est !

Nous ne sommes sensible qu'à l'espace, donc nous voyons une contraction de la longueur.

En transportant une horloge sur la barre en mouvement, nous constaterions que le temps se ralenti.

Exemple: Supposons $L=10\text{m}$ et un voyage de 1 année, alors

voyager à 10% de c , longueur 9,9m, il se passe 1 an et 2 jours sur Terre.

voyager à 50% de c , longueur 8,7m, il se passe 1 an et 2 mois sur Terre.

voyager à 90% de c , longueur 4,4m, il se passe 2 ans sur Terre.

voyager à 99% de c , longueur 1,4m, il se passe 7 ans sur Terre.

...

Le paradoxe des jumeaux de Langevin

On propose un voyage à une vitesse très rapide à l'un des 2 jumeaux. Il revient sur Terre après un voyage qui a duré pour lui 1 année à la vitesse 99% c .

Sur Terre, le temps ne s'est pas ralenti, donc le jumeau resté à vieilli de 7 ans.

Ok, très bien, mais où est le paradoxe ?

Pour la fusée, c'est la Terre qui s'est éloignée à la vitesse de 99% de c . Donc le temps sur Terre s'écoule plus lentement que dans la fusée.

Donc c'est le jumeau resté sur Terre qui est le plus jeune.

Hum...

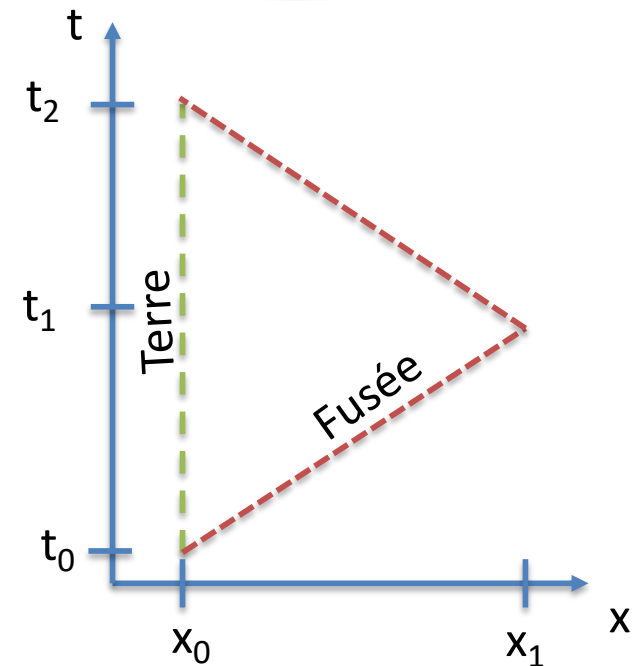
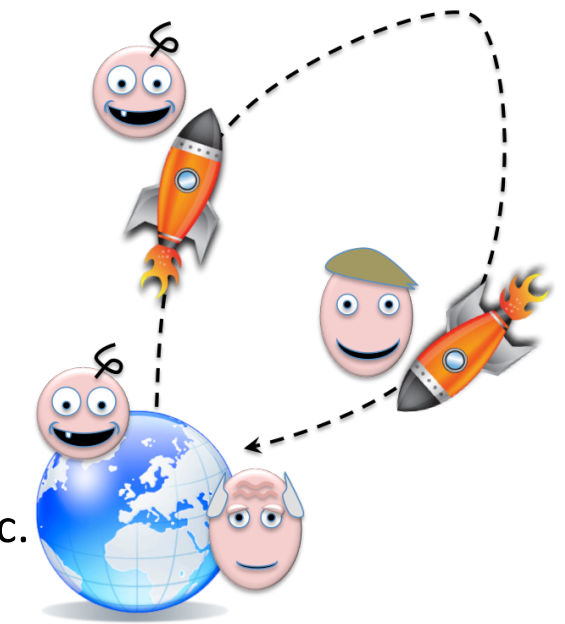
Dessignons les trajectoires dans l'espace-temps.

La situation est-elle vraiment symétrique ?

La longueur des segments verts et rouges est différente:

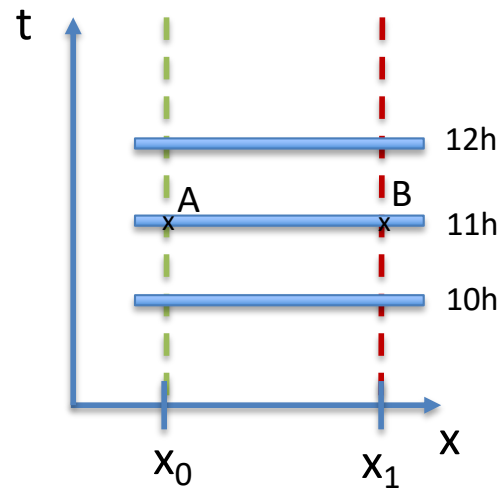
→ Dans l'espace-temps, la situation n'est pas symétrique !

→ 1 des 2 jumeaux est donc vraiment plus jeune.

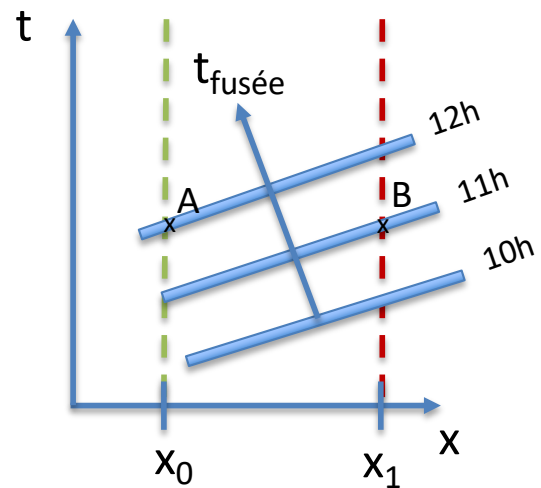


La simultanéité de 2 événements est relative

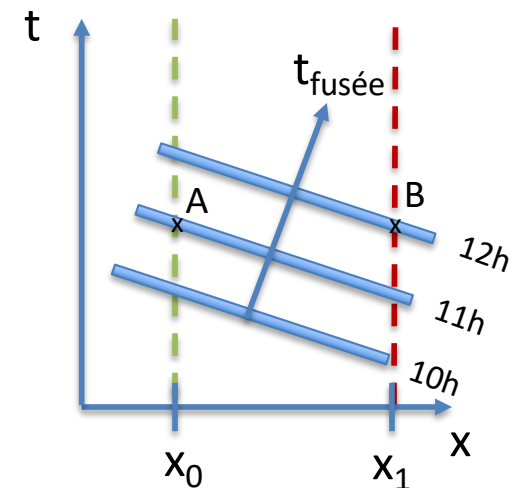
2 lignes d'univers
(vues depuis la Terre)



2 lignes d'univers
(vues depuis une fusée)



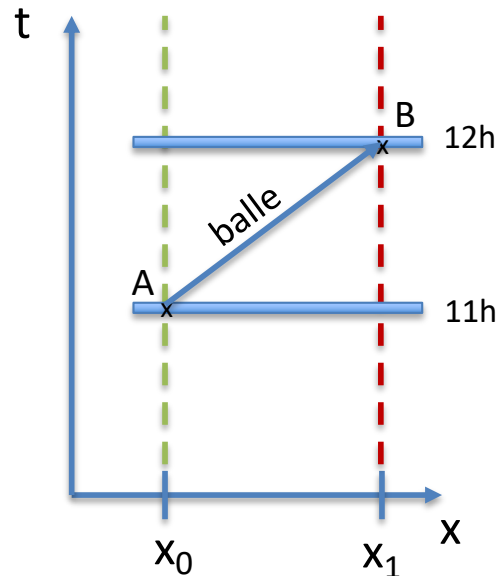
2 lignes d'univers
(vues depuis une autre fusée)



La simultanéité et la causalité: vitesse maximale

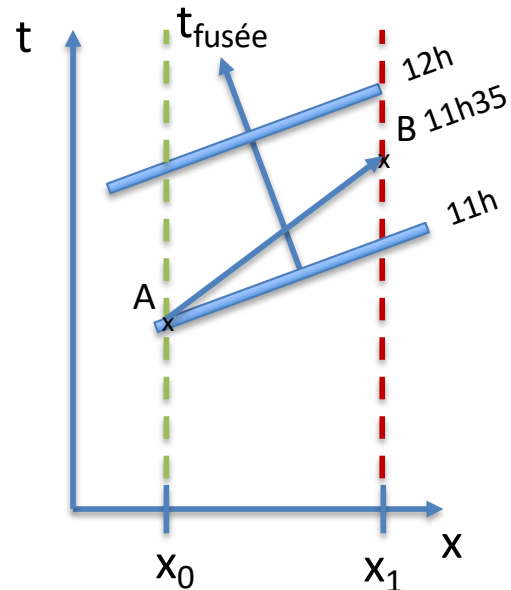
Une expérience de pensée: A tire sur B.

vue depuis la Terre



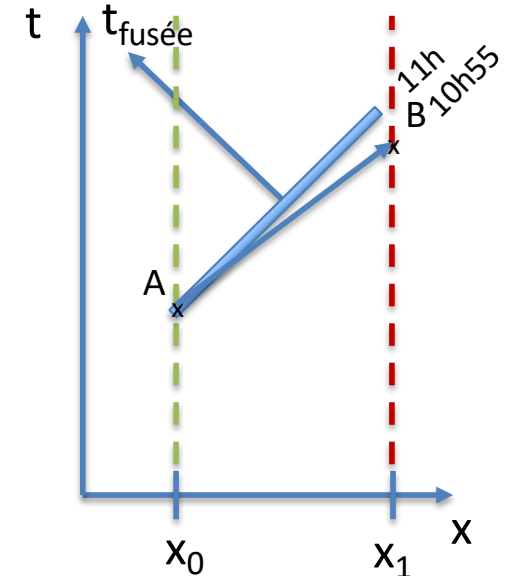
La balle met 1h pour atteindre B.

vue depuis une fusée



La balle atteint B plus rapidement

vue depuis une fusée encore plus rapide !



La balle arrive avant d'être partie.

→ Violation du **principe de causalité** !!

Une rotation trop grande dans l'espace-temps inverserait cause et conséquence.

Solution: Il existe donc une rotation maximale autorisée.

→ on ne peut pas voyager à n'importe quelle vitesse.

→ Il existe une **vitesse maximale** infranchissable.

Peut-on voyager dans le temps ?

Voyages dans l'avenir ?

Oui, il suffit de prendre une fusée très rapide, puis de revenir sur Terre après un très long voyage. Comme le jumeau de Langevin.

Voyage dans le passé ?

Oui, on peut voyager dans le passé de l'Univers: il suffit de voir loin, très loin. En regardant loin, nous voyons l'Univers à un âge plus jeune qu'aujourd'hui.

Ok, mais peut-on voyager dans notre propre passé ?

D'après vous, est-ce envisageable ?

Est-ce que cela créerait des paradoxes ?

Supposons que nous voyagions dans le passé et que nous tuons nos parents... Nous disparaîtrions... et donc nous ne pourrions pas tuer nos parents... Et donc nous réapparaitrons...

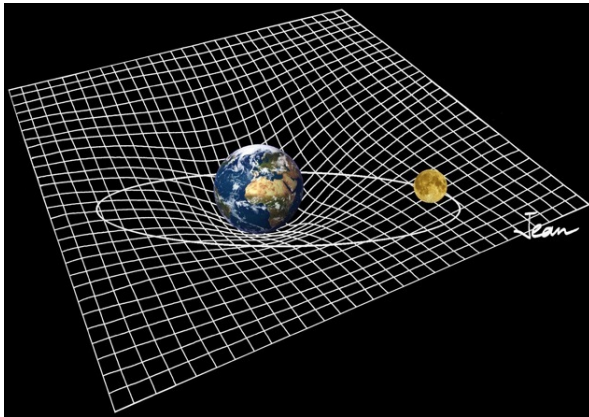
→ Problème de la causalité: on ne peut pas inverser la cause et la conséquence.

Qu'est-ce que la gravité ?

<http://s3.e-monsite.com/>

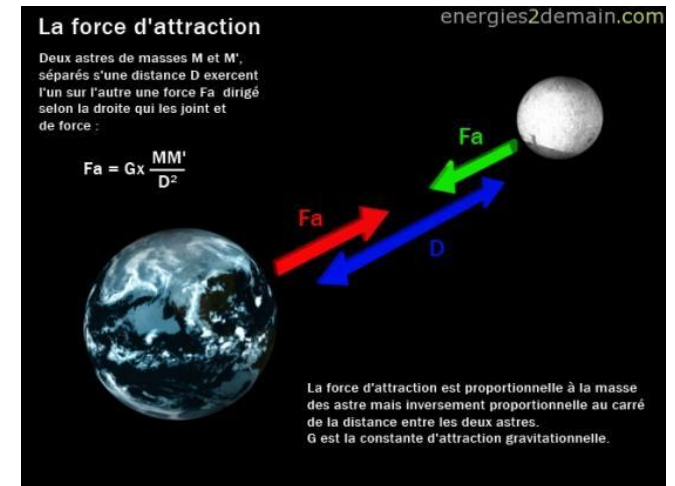
Newton: la Terre et la lune exercent mutuellement une force attractive.

<http://www.jeanduperrex.ch>



Einstein: La lune suit une trajectoire rectiligne dans un espace temps courbé par l'énergie de la Terre et de la Lune.

Il n'y a plus de force, mais un espace-temps courbé qui modifie les trajectoires.



Si l'espace-temps est courbé, le temps ne s'écoule pas identiquement à la surface de la Terre, sur une montagne très élevée (à Cuzco par exemple), ou dans un satellite en orbite autour de la Terre.

**L'énergie-matière
courbe l'espace.**

Relativité générale

**La courbure de l'espace
met l'énergie-matière en
mouvement.**

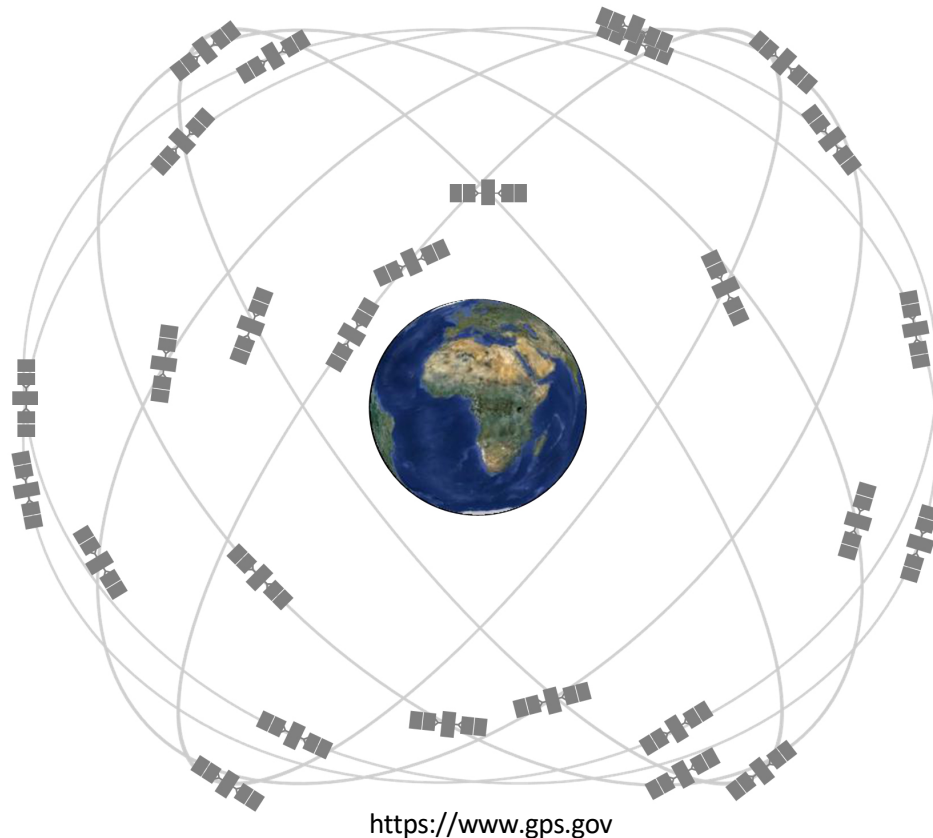
Les applications de la relativité

- Le GPS,

et couplé à la physique nucléaire :

- Étoiles à neutrons,
- Ondes gravitationnelles,
- Origine des éléments lourds,
- ...

Les applications de la relativité : le GPS



Au moins 24 (31 en 2019) satellites tournent autour de la Terre à 20 000 km qui permettent de voir au minimum **4** satellites depuis n'importe quelle position à la surface de la Terre.

Les satellites transmettent leur temps à l'utilisateur sur Terre. Des bases terrestres suivent la position des satellites.

Par triangulation de l'espace: il faut au moins 3 satellites pour localiser n'importe quel point sur Terre.

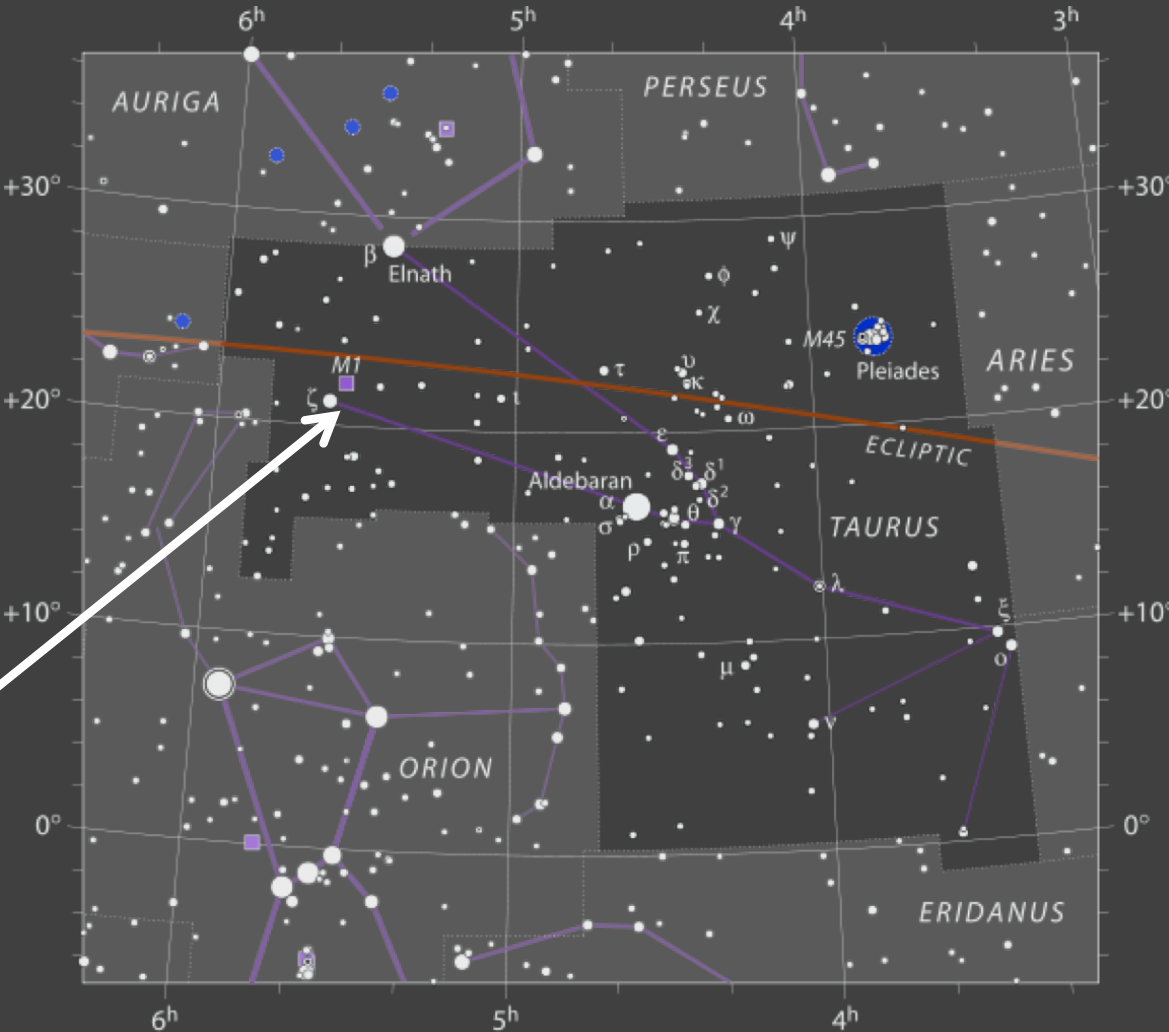
→ *Pourquoi 4 satellites ?*

Dans un espace-temps à 4 dimensions, il faut donc 4 satellites !

La gravité est différente dans les satellites et sur Terre.

La relativité générale permet de tenir compte de cet effet.

Les applications de la relativité : étoiles à neutrons



Crab Nebula
(Messier 1)
hosts a pulsar



Les applications de la relativité : étoiles à neutrons

M1 : Crab nebula

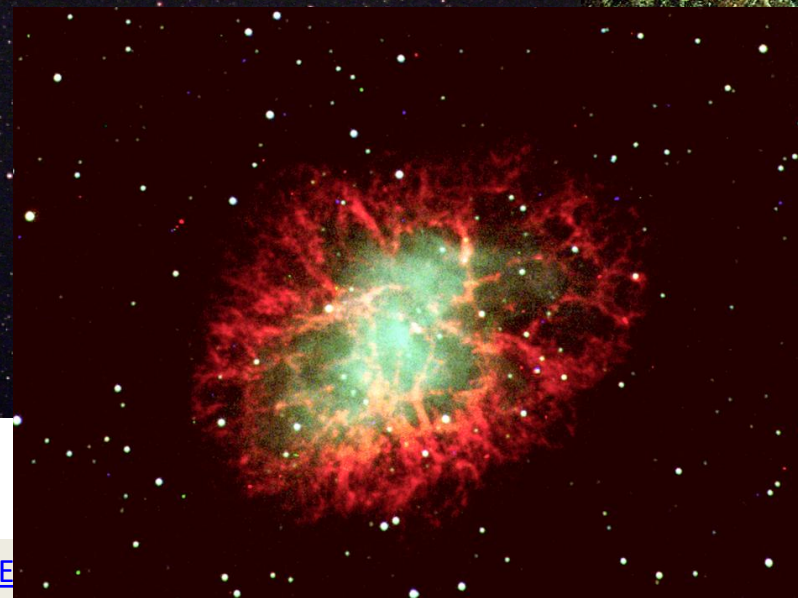
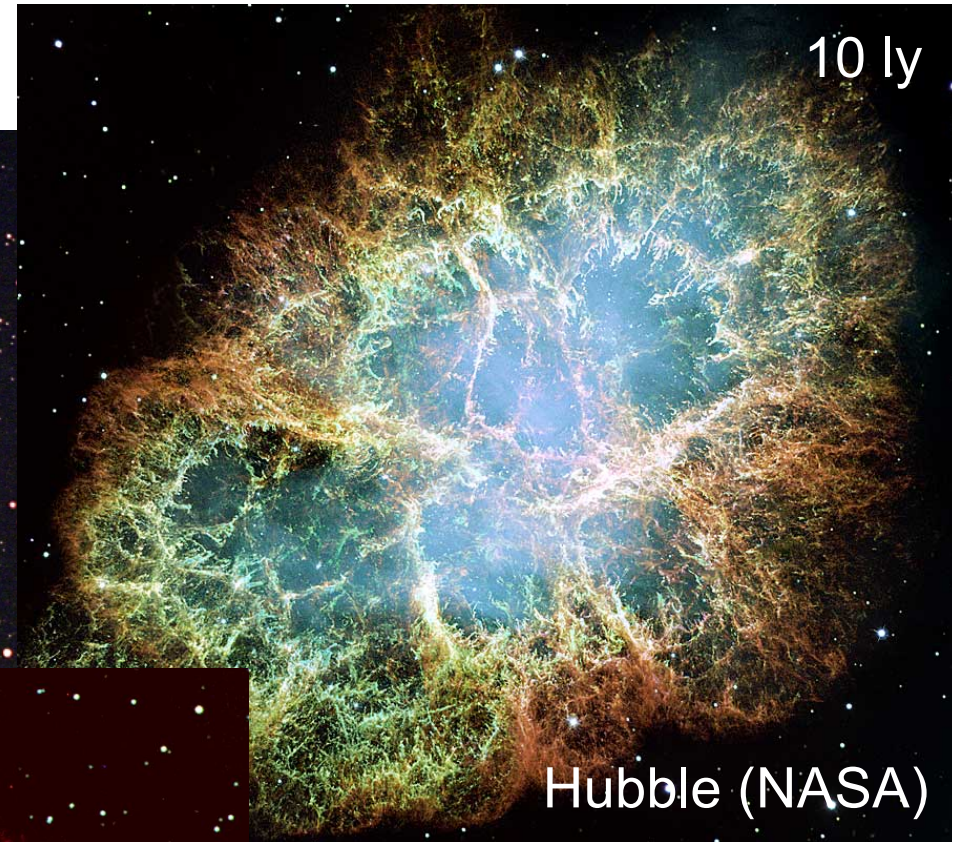
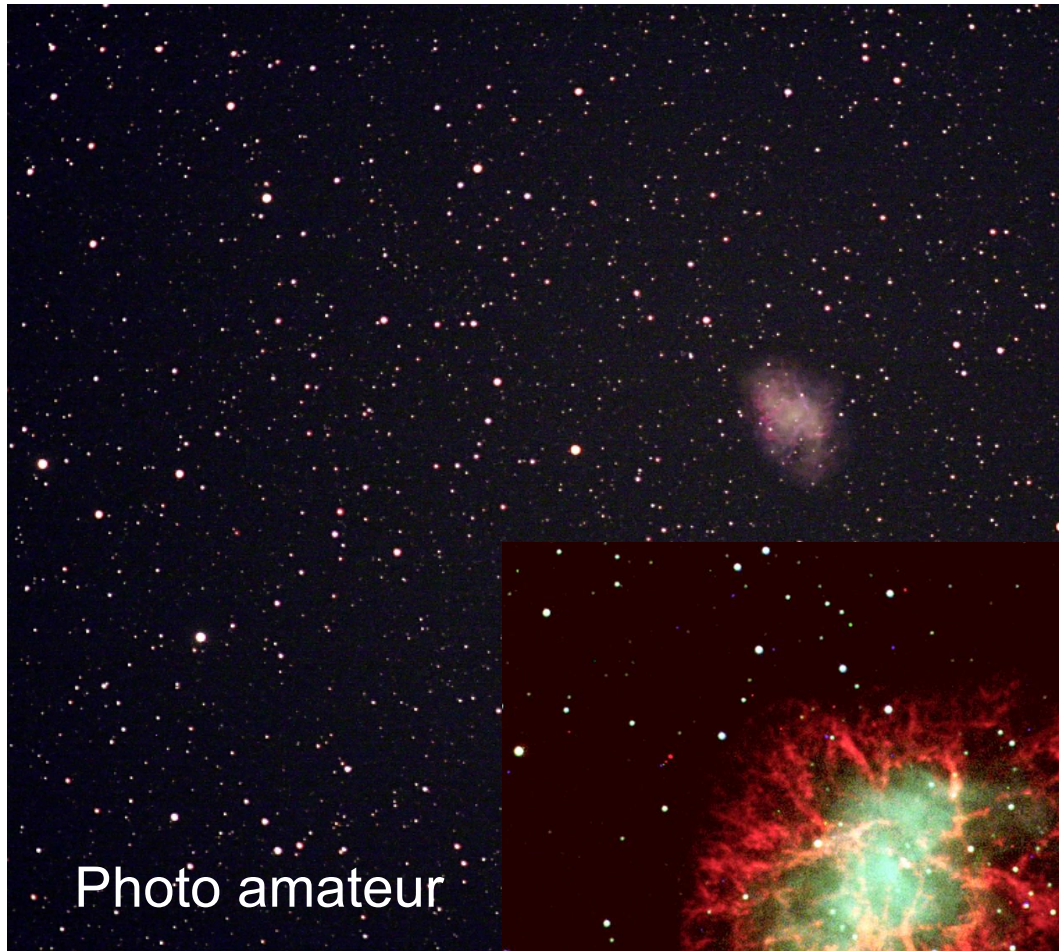
Supernova remnant first observed and recorded by chinese astronomers on July, 4th 1054 AJC



Photo amateur

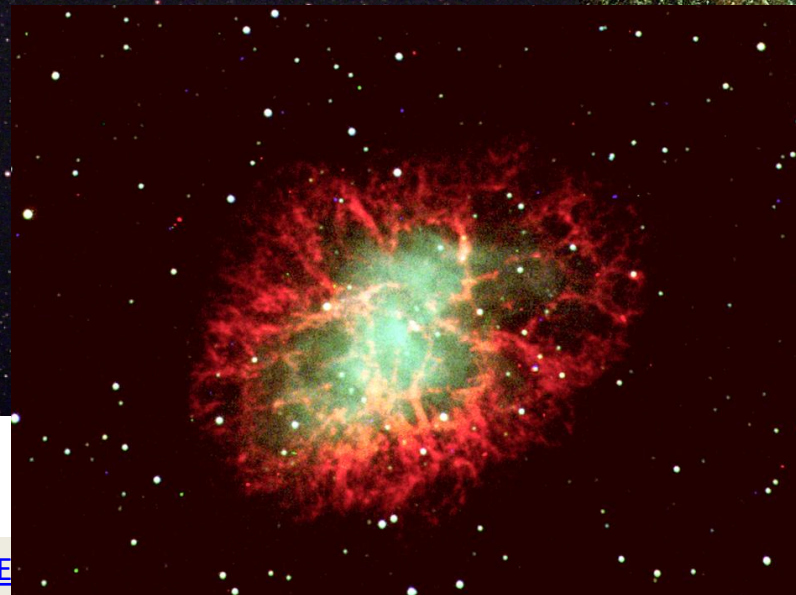
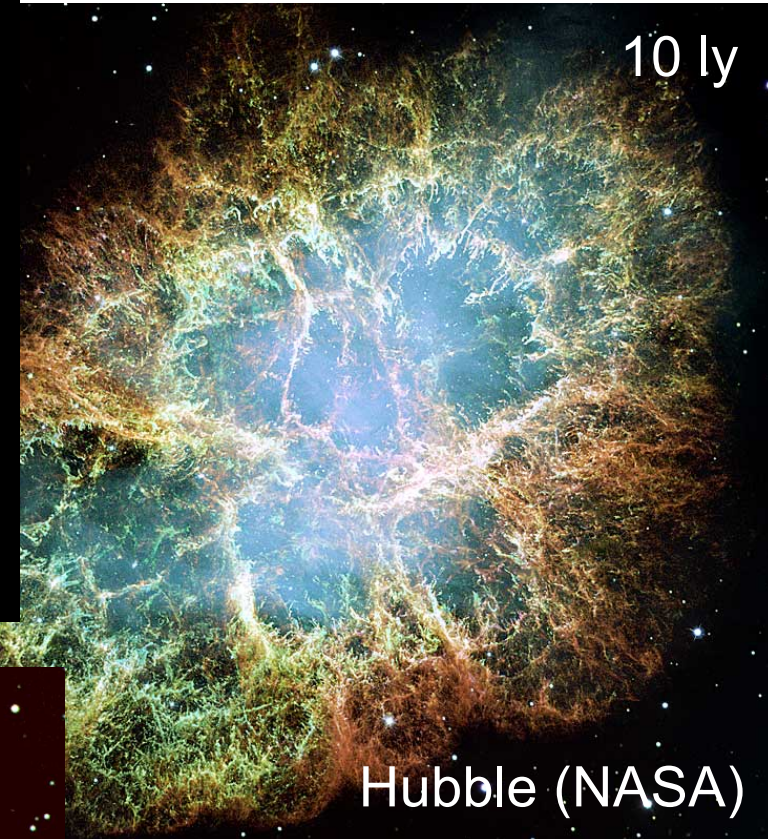
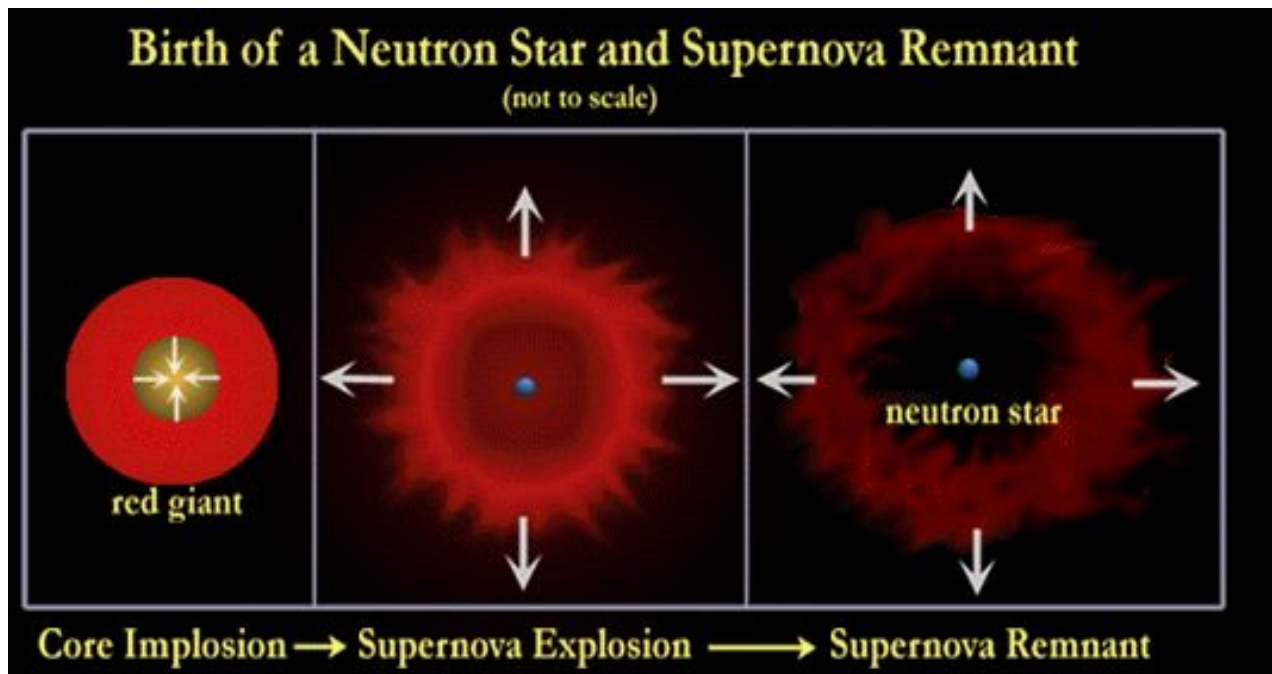
Les applications de la relativité : étoiles à neutrons

M1 : Crab nebula



Les applications de la relativité : étoiles à neutrons

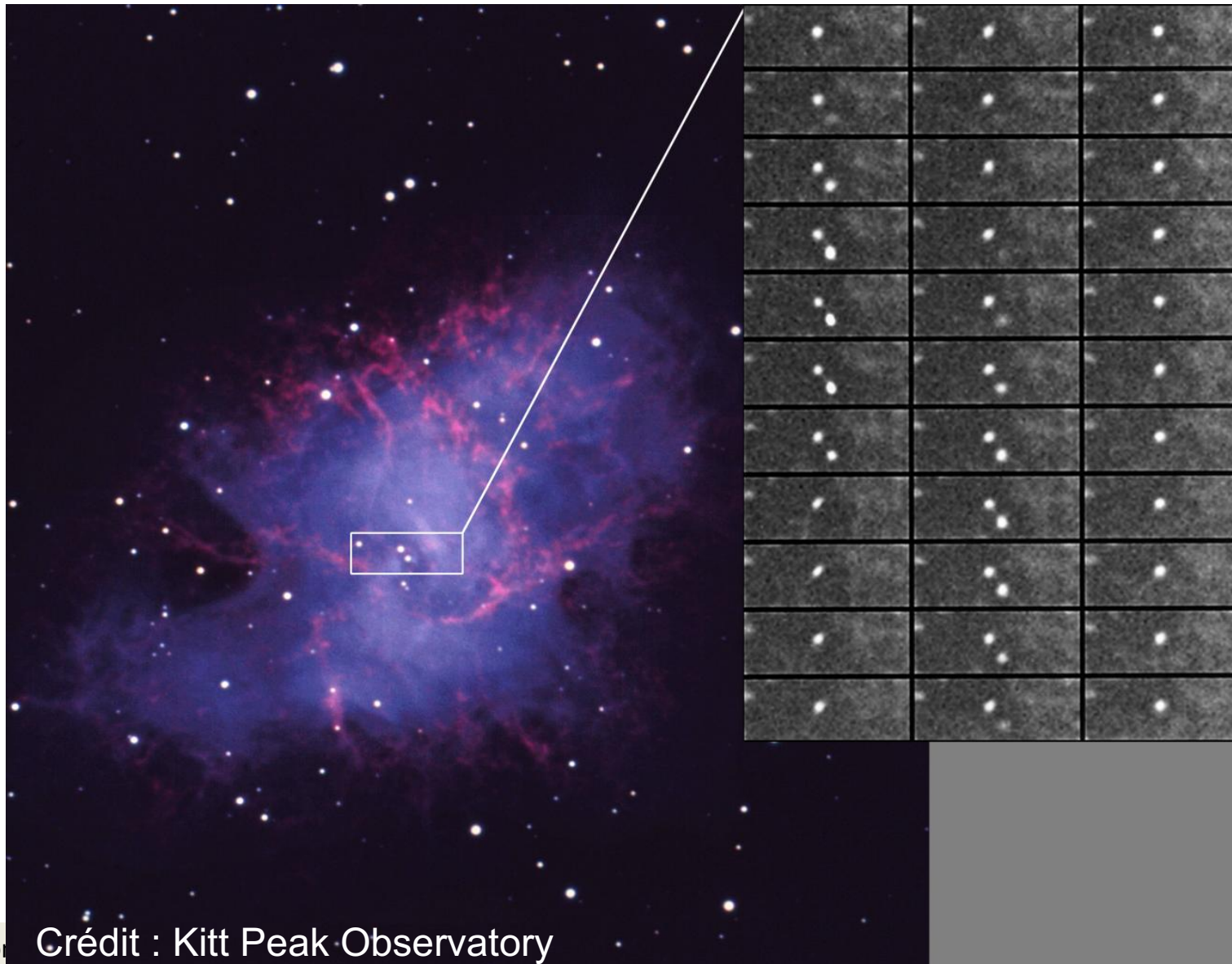
M1 : Crab nebula



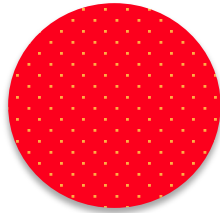
Les applications de la relativité : étoiles à neutrons

Crab pulsar

L'éclat en lumière visible varie au même rythme qu'en radio, 30 fois par seconde.



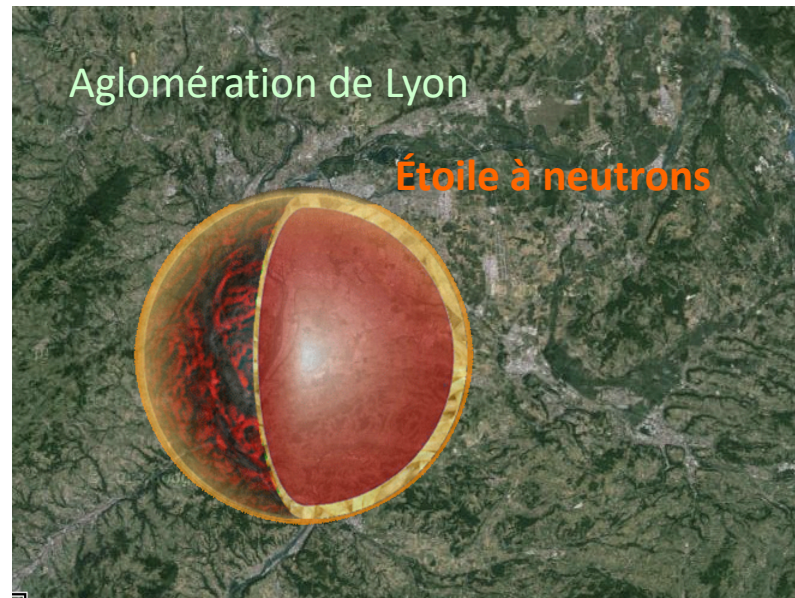
Les applications de la relativité : étoiles à neutrons



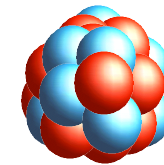
Nom	Super-Géante rouge	Géante bleue	Étoile normale	Naine blanche	Étoile à neutrons
Exemple	<i>Aldebaran</i>	<i>Alcyone</i>	<i>Soleil</i>	<i>SiriusB</i>	<i>crabe</i>
R (R_{\odot})	44	9	1	0,008	10^{-5} (10km)
M (M_{\odot})	1,16	6	1	1,03	1,4
Densité (g/cm^3)	2×10^{-5}	10^{-2}	1.4	2×10^6	6×10^{14}

Étoile à neutrons : astre le plus compact connu.

Nombre de particules	$\sim 10^{57}$
Rayon	10-15 km
Masse	1-2 M_{\odot}
Densité	$\sim 10^9 \text{ T/cm}^3$



Le noyau de l'atome



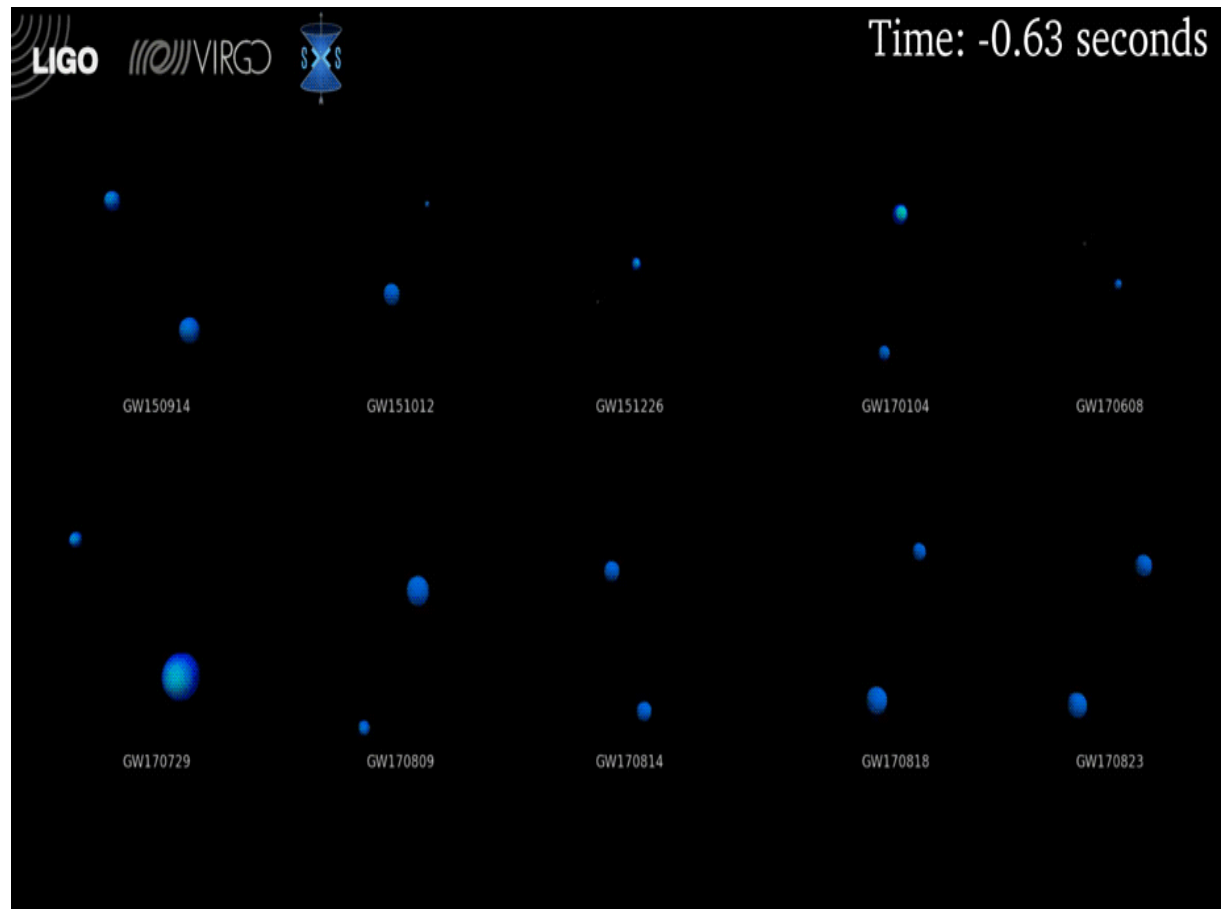
Rayon	5 fm ($5 \times 10^{-13} \text{ cm}$)
Masse	$\sim 100 M_{n/p}$ $= 1,67 \times 10^{-22} \text{ g}$
Densité	$\sim 3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$

Les applications de la relativité : les ondes gravitationnelles

À la recherche de murmures aux confins de l'espace

Vers une nouvelle astronomie

- Un tour de force instrumental, 100 ans après leur prédiction.
- Une nouvelle fenêtre sur l'univers, porteuse de nouveaux résultats pour la physique et l'astrophysique.



Visualizations of the 10 black hole collisions detected by LIGO so far, along with the gravitational-wave signals they produced.

[Teresita Ramirez, Geoffrey Lovelace, SXS Collaboration, and LIGO Virgo Collaboration](#)

14 septembre 2015: la première détection d'OG issues de la coalescence de 2 trous noirs

PRL 116, 061102 (2016)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410_{-180}^{+160} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ and $29_{-4}^{+4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$, with $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

+ 3000 citations

Prix Nobel 2017: Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne.



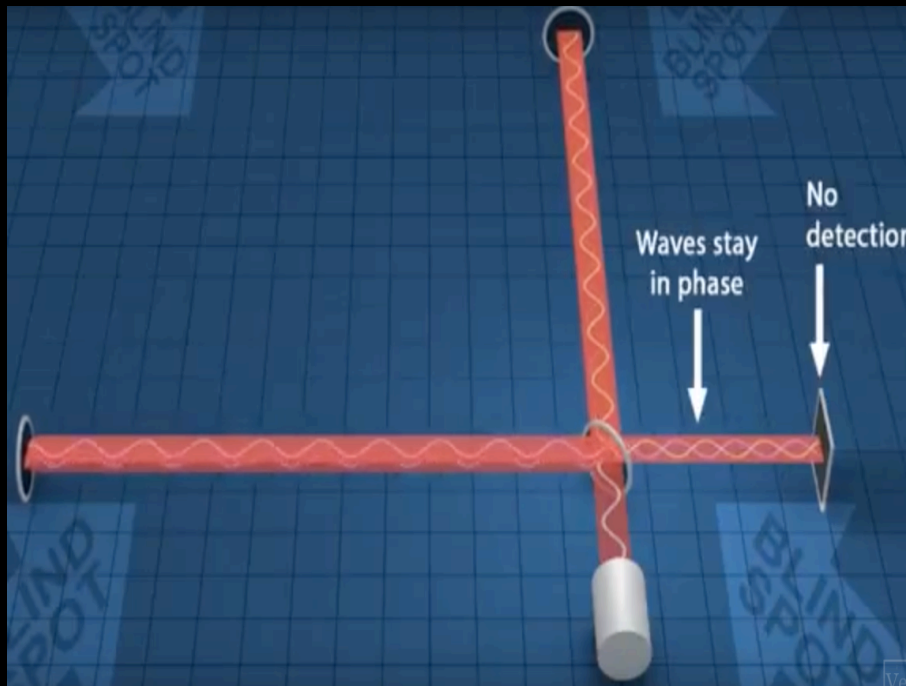
Retentissement mondial.

Prouesse technique d'une
mesure d'extrême précision
équivalente à
1/1000 diamètre du proton
(10^{-18} m).

Février 2016: publication des
résultats et conférence de
presse

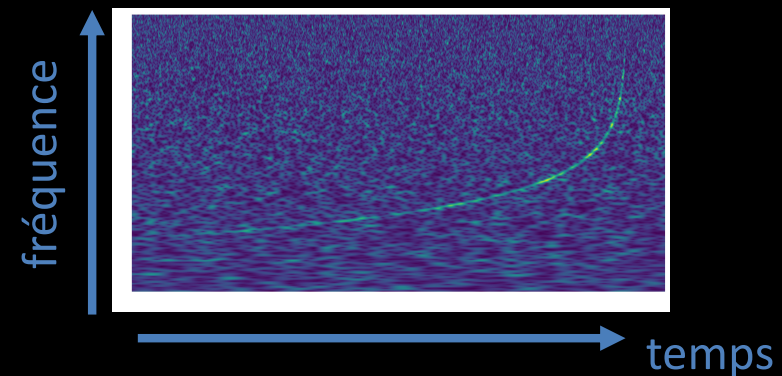
[https://www.youtube.com/watch?v=mtL
PKYI4AHs](https://www.youtube.com/watch?v=mtLPKYI4AHs)

La detection d'une onde gravitationnelle (OG)



Quand une OG secoue l'interféromètre

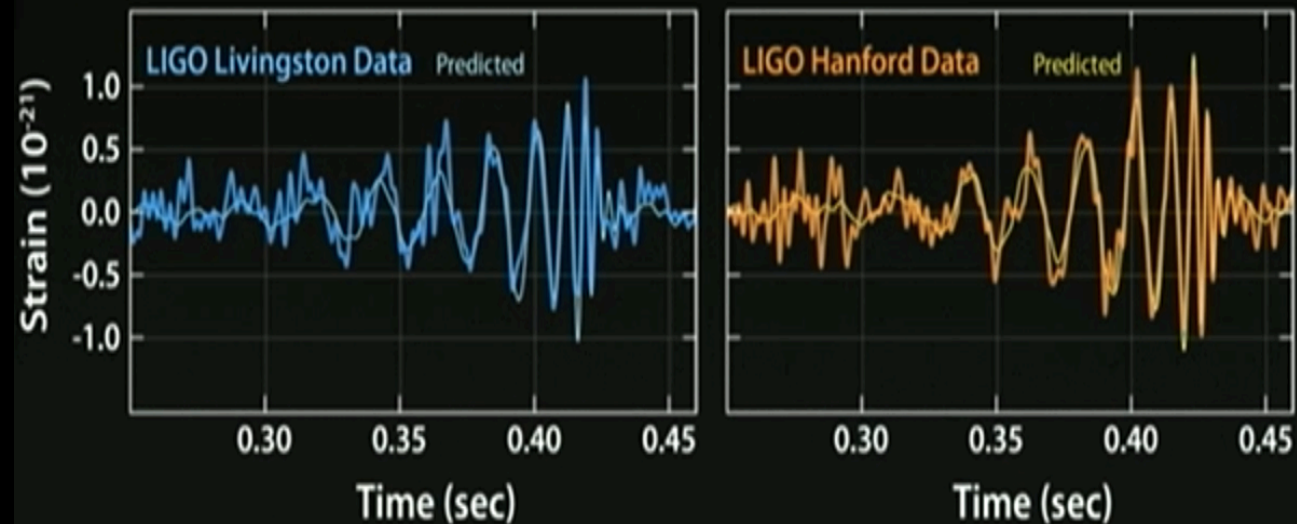
→ un gasouillement (chirp)!



Le signal comparé au modèle

Jusqu'à présent nous regardions l'univers, maintenant nous pouvons l'entendre murmurer!

https://youtu.be/_SQbaLIpjY



FIRST COSMIC EVENT OBSERVED IN
GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT

La naissance de l'astronomie multi-messagers



L'astronomie multi-messagers

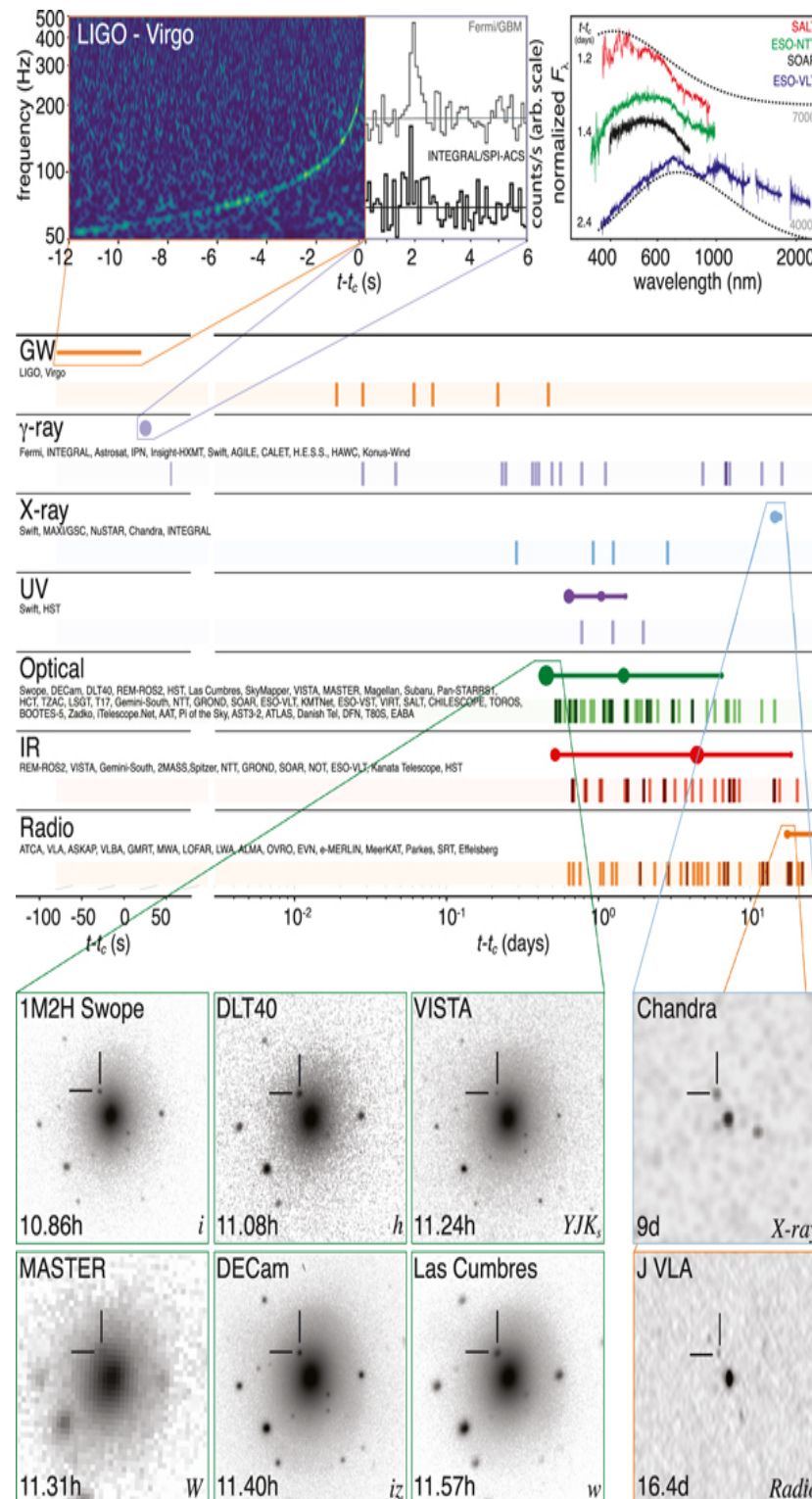
Abbott et al., ApJL 848 (2017) L12

+ 70 instruments
Several weeks

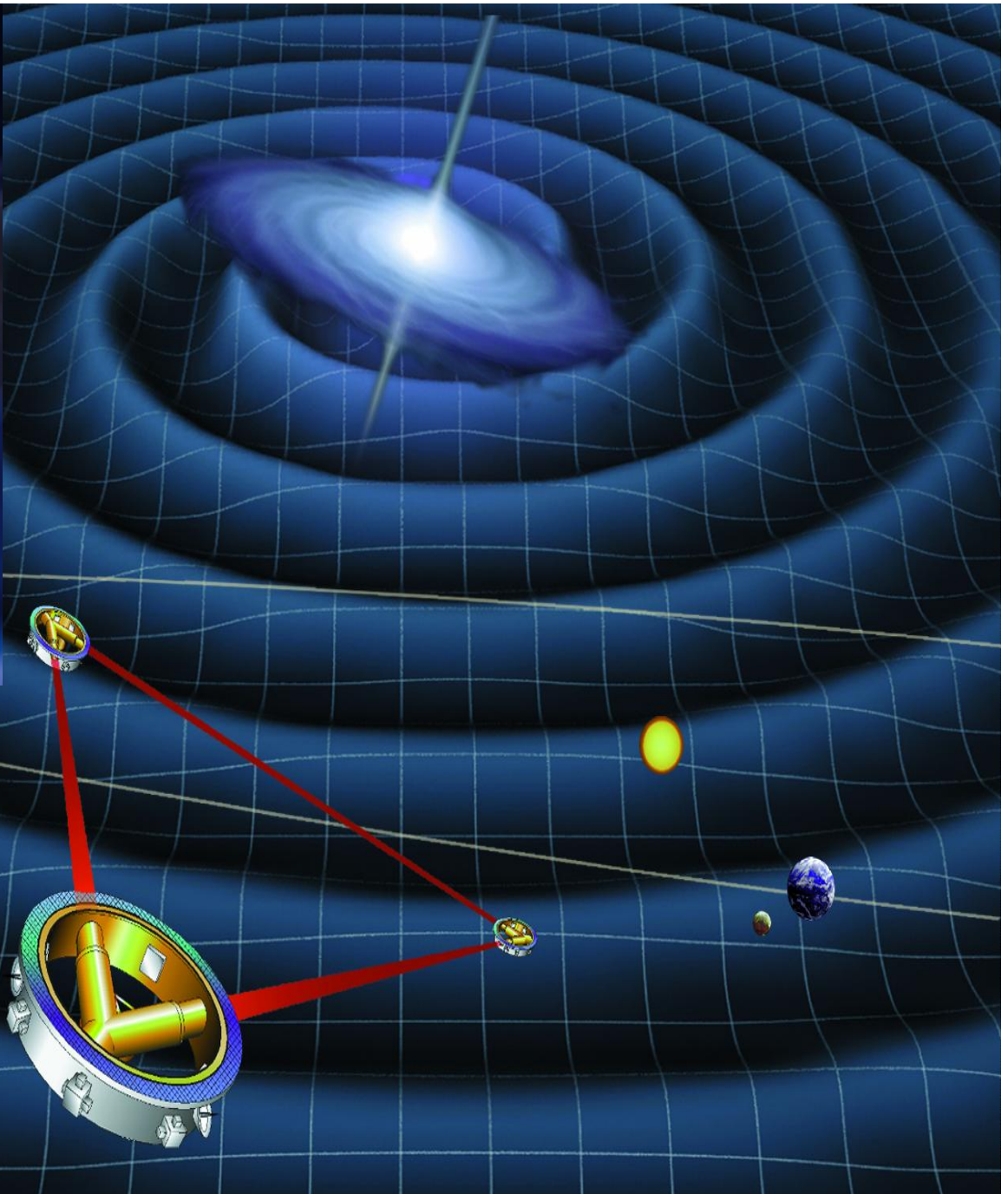
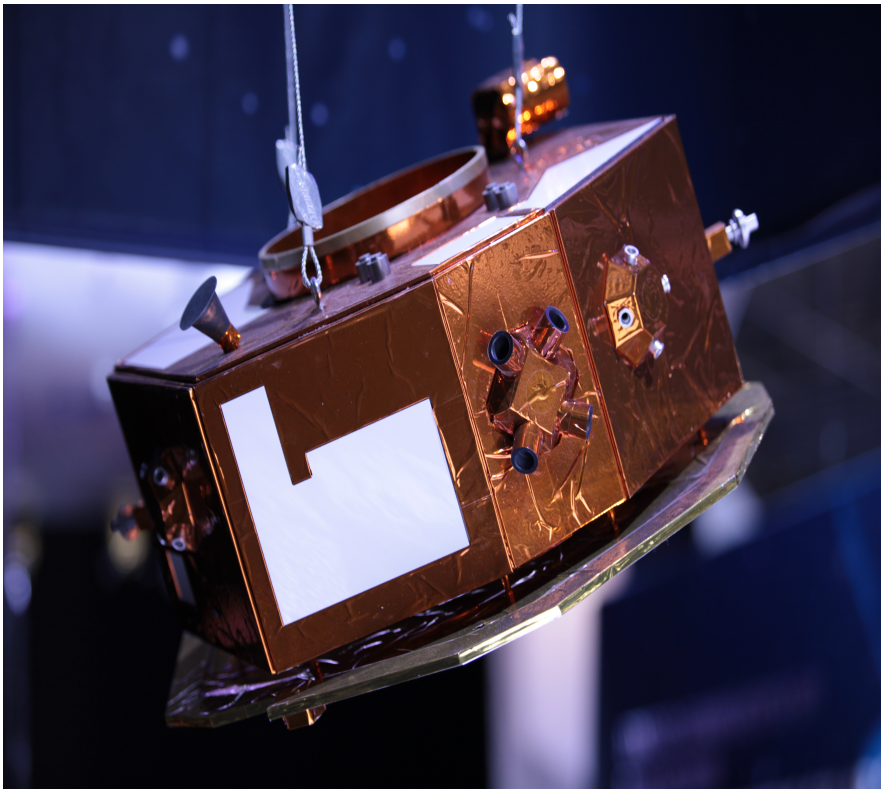
Multi-messagers:

- GW (interferometers)
- GRB, X (satellites)
- UV, Optical, IR (telescopes)
- Radio (radio-telescopes)

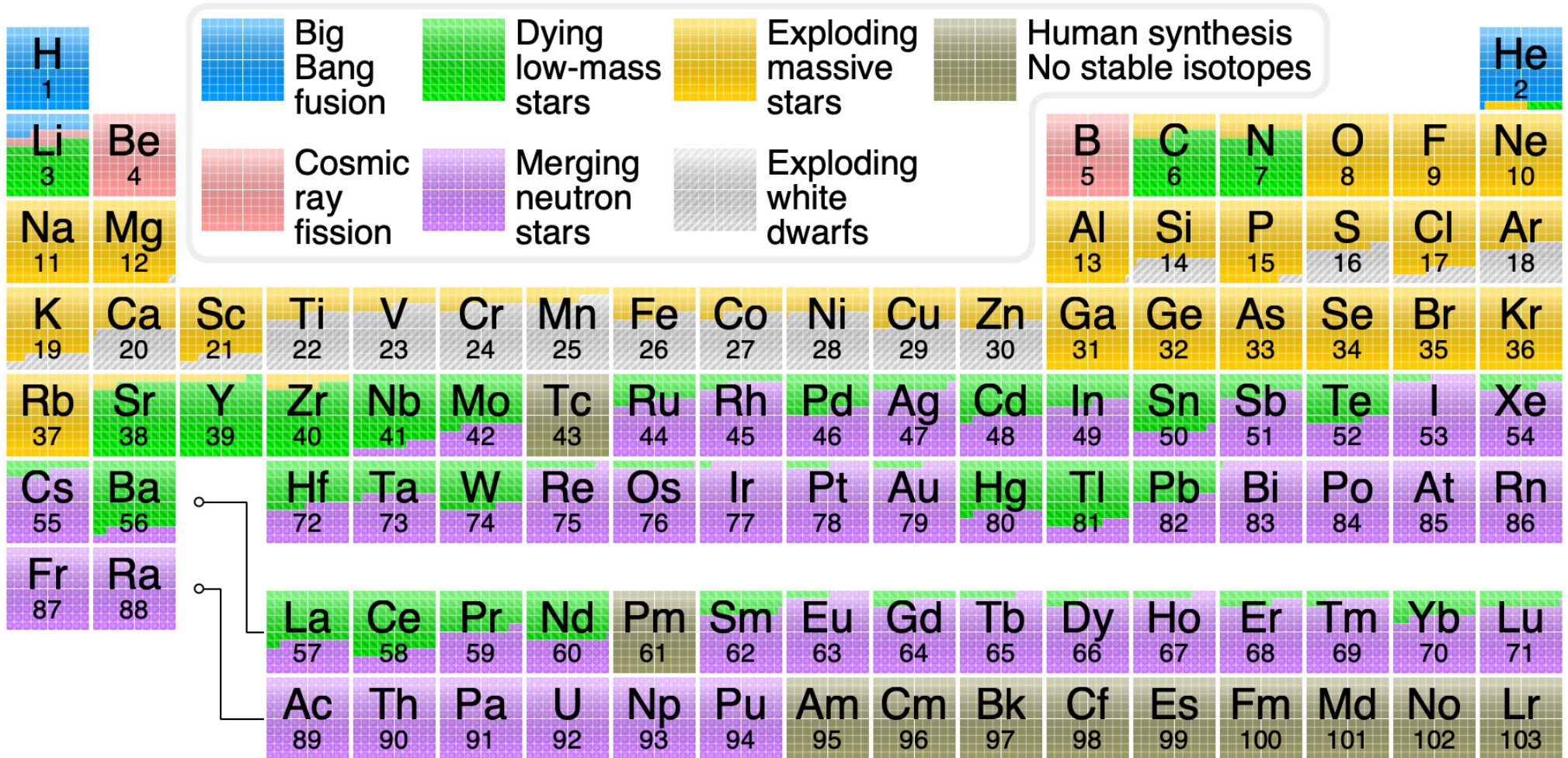
59-page "letter" (!)
More than 2000 authors,
~70 collaborations
+500 citations



LISA Pathfinder et eLISA: détecteur d'OG dans l'espace



L'origine de l'or et des autres atomes



Conclusions

L'espace et le temps ne sont pas absolus, mais l'espace-temps est absolu: la mesure dans l'espace-temps est conservée.

La causalité implique l'existence d'une vitesse maximale. Jusqu'à preuve du contraire, cette vitesse maximale est celle de la lumière (c).

La relativité conduit à de réelles applications de nos jours:

- **Le GPS ne fonctionnerait pas avec autant de précision sans les effets de relativité.**
- **RG + physique nucléaire: les étoiles à neutrons.**
- **RG + physique nucléaire: l'origine des éléments lourds.**