La Relativité générale

Une histoire d'espace, de temps, de matière, de lumière et de mouvement

André Gilloire Club Astro Trégor 17 Juin 2016



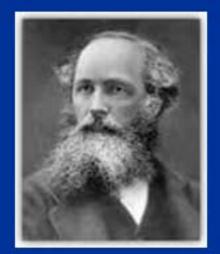
Eléments bibliographiques

- La Recherche, hors série n° 16 « Einstein: de la relativité générale à la physique du XXIème siècle, Décembre 2015
- Sciences et Avenir, hors série n° 180, « Einstein aujourd'hui: 1915 2015, 100 ans de relativité générale, Janvier 2015
- L'Astronomie n° 94: « les ondes gravitationnelles enfin détectées », Mai 2016
- Eric Gourgoulhon: « L'espace-temps relativiste et les trous noirs », conf. à la Sté Astro. de Bourgogne, 11/12/2015 visible sur YouTube. Transparents conférence "Nouveau regard sur les trous noirs" aux RCE 2014: http://www.luth.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon/fr/present_pub/ciel_espace14.pdf
- Posters de l'exposition sur la Relativité générale au Palais de la Découverte, XX/2015 au YY/2016 (conseiller scientifique Roland Lehoucq)
- Cours de l'ENS sur la Relativité restreinte (sur Google)
- Cours Eric Gourgoulhon sur la Relativité générale: http://luth.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon/fr/master/relat.html
- Richard Feynman: Lectures on Physics, vol. 1 chap. 15, et du même auteur: Leçons sur la gravitation, Odile Jacob, 2007

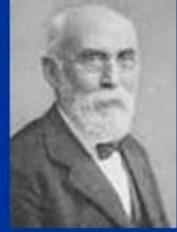
Une filiation prestigieuse

Galilée

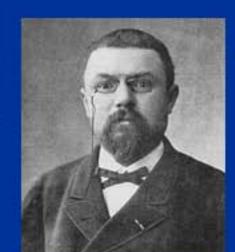
Newton



Maxwell



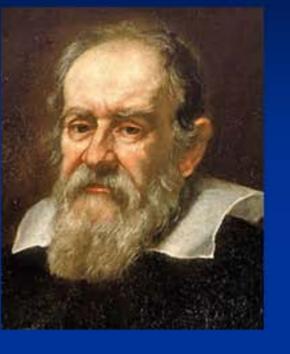
Lorentz

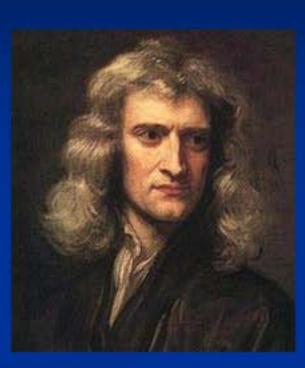


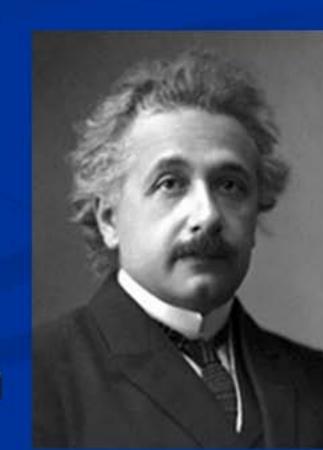
Poincaré

•••

Einstein

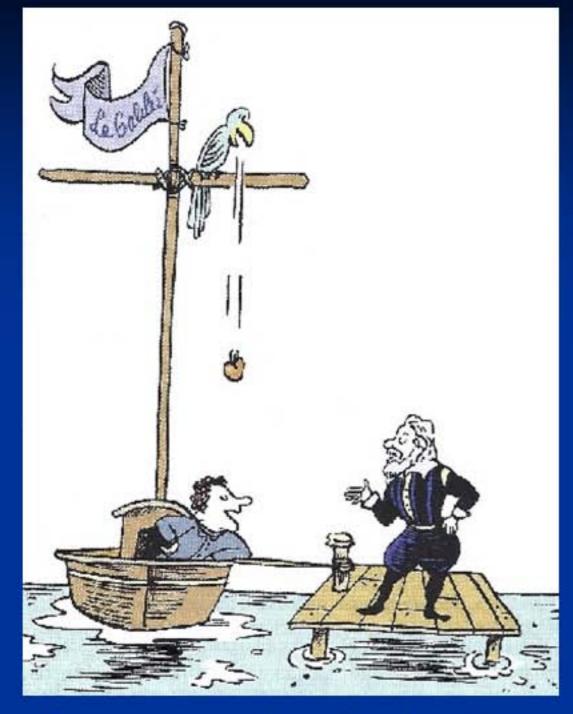


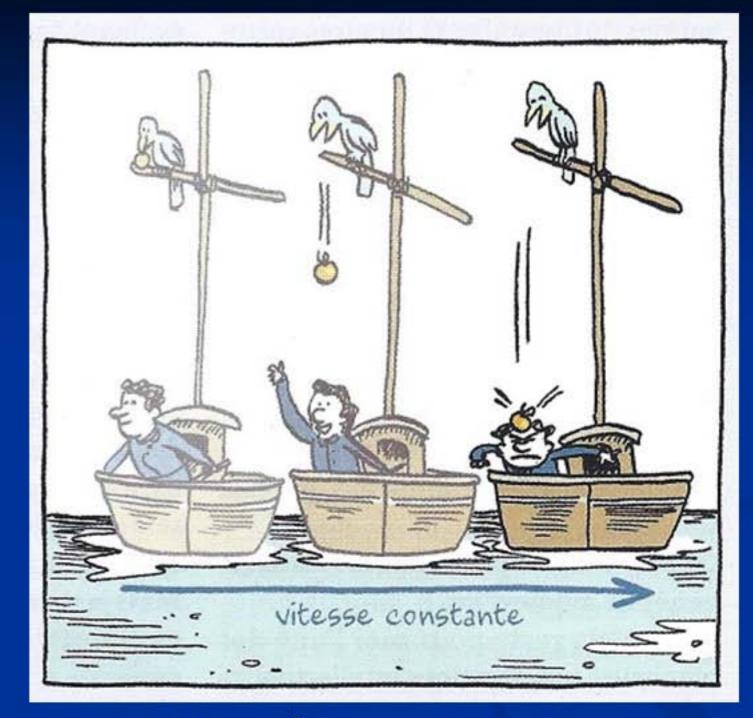




La Relativité galiléenne

- Galilée, premier physicien moderne, observe la nature, expérimente et construit une théorie du mouvement
- « Discours sur deux sciences nouvelles » (1638): le mouvement en ligne droite et à vitesse constante (référentiel galiléen) est « comme rien »
- Ce mouvement est relatif car tous les référentiels galiléens sont équivalents: les lois de la mécanique y sont les mêmes



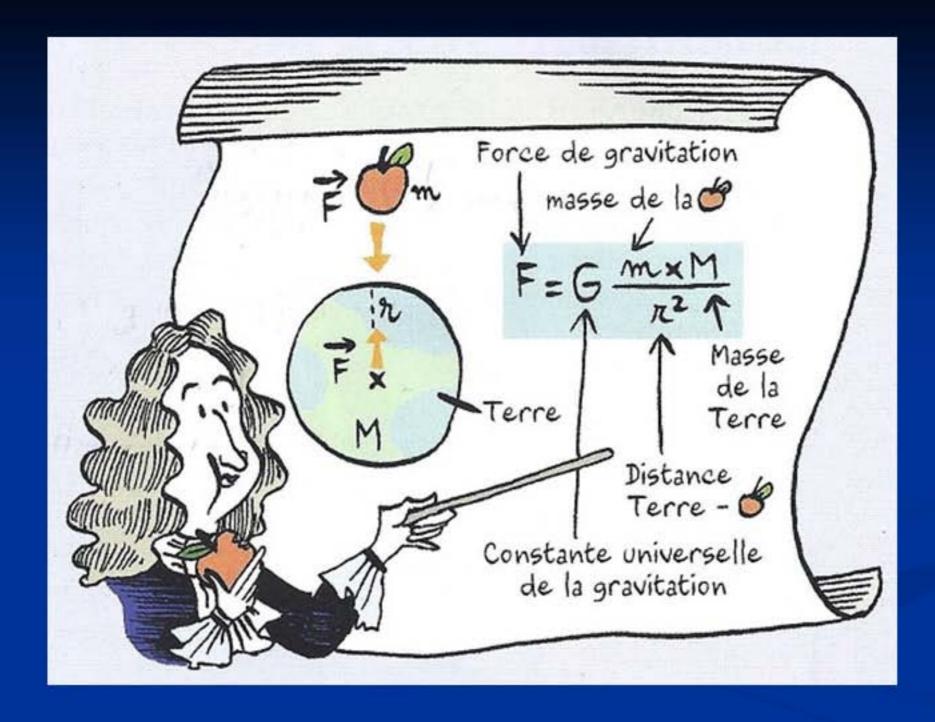


La pomme tombe toujours au pied du mât, que le bateau soit immobile ou qu'il navigue à vitesse constante

Les lois de la physique sont les mêmes, c'est le mouvement qui est relatif

Newton: la gravitation universelle

- Newton (fin XVIIe siècle) complète la mécanique de Galilée
- Le mouvement des corps est modifié par des forces
 -> △ vitesse = accélération
- L'accélération est proportionnelle à la force et inversement proportionnelle à la « masse inerte » du corps: loi fondamentale de la Dynamique
- Les corps pesants s'attirent mutuellement en proportion directe de leur « masse grave »
- Newton constate expérimentalement que masse inerte et masse grave sont égales



La Terre attire la pomme et la pomme attire la Terre avec la même force (*symétrie de l'interaction*)

La gravitation est une force qui s'exerce instantanément à distance

Espace, temps et mouvement selon Newton et Galilée

- Le temps est absolu, universel: tous les observateurs d'un phénomène mesurent le même temps
- Le temps et l'espace sont deux entités indépendantes
- Pour passer d'un référentiel galiléen à un autre, il suffit d'ajouter les vitesses:

$$v = v' + vref'$$

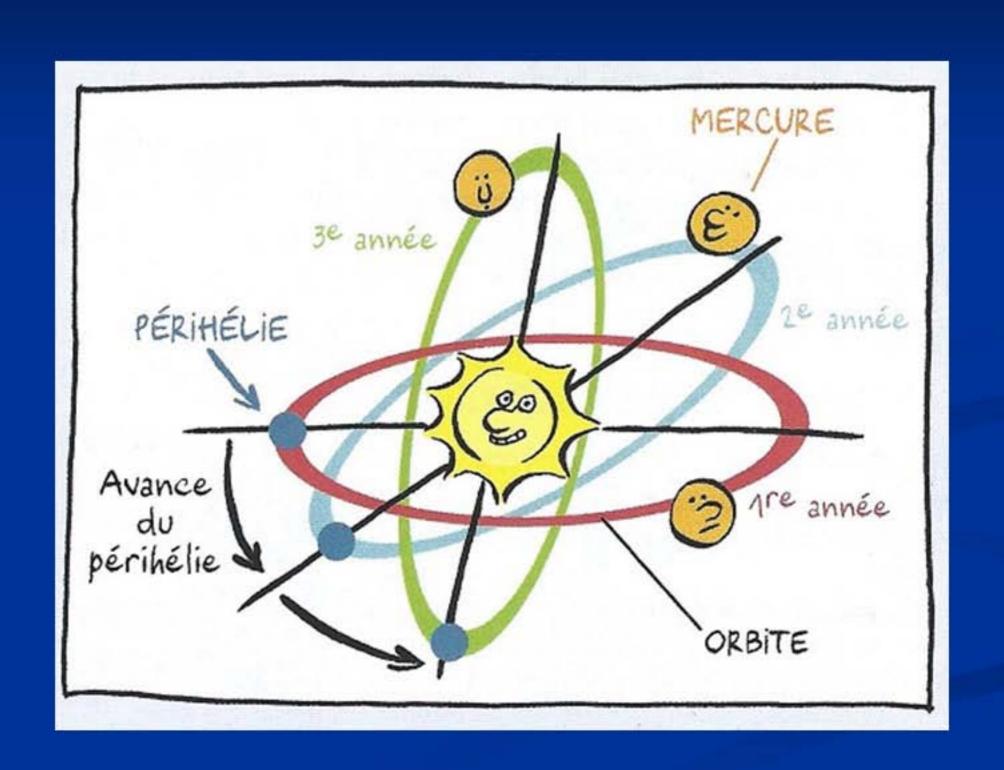
Vers 1850 tout est bien ainsi dans le meilleur des mondes galiléo-newtonien, la mécanique céleste fait des prouesses, mais deux problèmes importants de physique et d'astronomie vont bientôt se poser ...

La vitesse de la lumière est invariable

Maxwell formule en 1880 une théorie « définitive » de l'électromagnétisme où la vitesse de la lumière dans le vide est constante, indépendante de celle de la source:

 Les tentatives pour concilier ce résultat déroutant et la loi d'addition des vitesses sont un échec: l'expérience négative de Michelson et Morley (1887) détruit l'hypothèse de l'éther

L'avance inexpliquée du périhélie de Mercure



- Urbain Le Verrier (découvreur de Neptune par le calcul!) observe que l'avance du périhélie de Mercure n'est pas entièrement expliquée par l'influence des autres planètes (excès de 43 secondes d'arc par siècle!)
- Les tentatives d'explication par des « planètes cachées » ou des astéroïdes entre Mercure et le Soleil échouent car on n'observe rien de tel

... Crise dans le monde scientifique, comparable à celle causée par l'incapacité à expliquer le rayonnement du corps noir et l'effet photoélectrique et qui fut à l'origine de la physique quantique

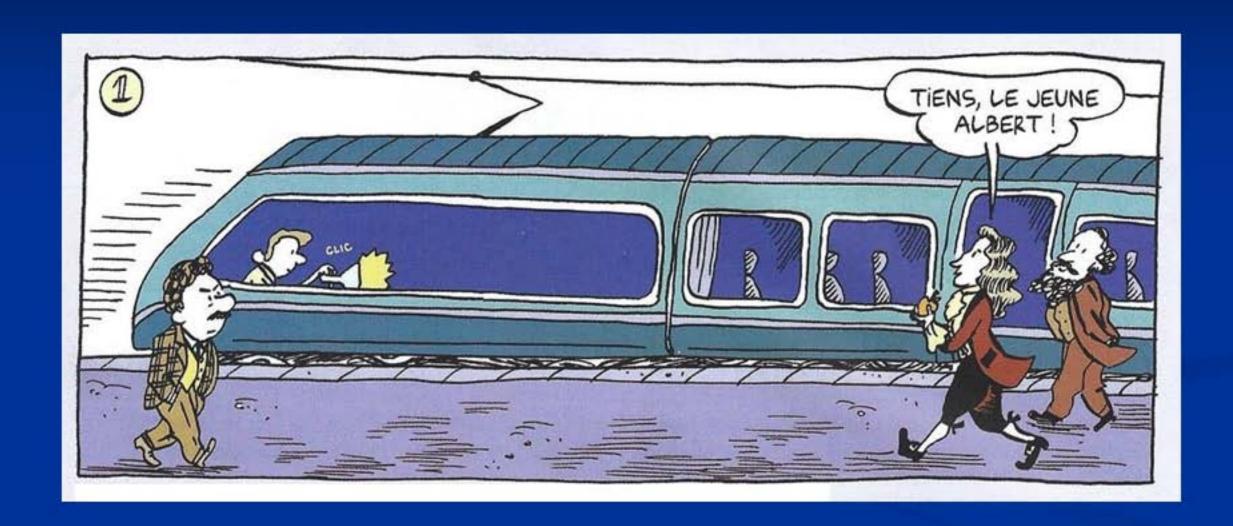
... Mais Albert Einstein est arrivé!

(avec quand même des précurseurs et des copains mathématiciens et physiciens pour l'aider)

La Relativité restreinte

- 1905: Einstein généralise la relativité galiléenne en y incluant les lois de l'électromagnétisme: l'invariabilité de la vitesse de la lumière est ainsi prise en compte
- Relativité restreinte » car limitée aux référentiels galiléens
- L'espace et le temps deviennent relatifs et se fondent en une entité homogène: l'espace-temps, dont la métrique est invariante par changement de référentiel galiléen (espace de Minkowski)
- Hendrik Lorentz et Henri Poincaré étaient sur la voie mais se sont arrêtés en chemin...

Une expérience « par la pensée »



Einstein observe depuis le quai le passager allumer sa lampe dans le train en mouvement



Pour chacun des observateurs, la lumière parcourt une distance différente jusqu'au fond du wagon.

Pour que la vitesse de la lumière reste la même dans les deux référentiels, il faut que le temps perçu par les observateurs soit différent: le temps est relatif.

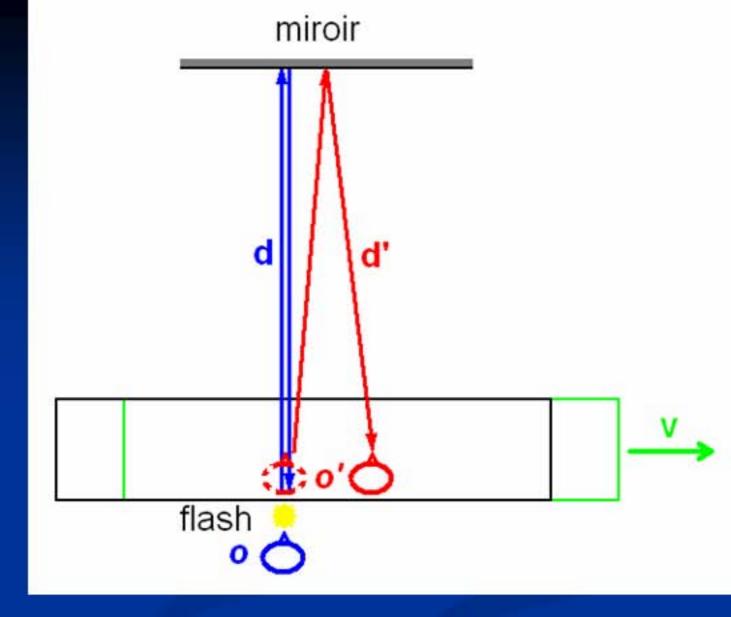
Comme l'espace, il dépend du point de vue de l'observateur.

Autre expérience:

Un observateur O est sur le quai.

Un autre observateur O' est dans le train animé d'une vitesse constante v.

Un flash est émis depuis le quai lorsque O' passe devant O.



Distance aller-retour parcourue par la lumière: pour l'observateur O: 2d pour l'observateur O': 2d'

Temps aller-retour:

Pour O: 2d/c pour O': $2d'/c = 2d/c \cdot 1 / \sqrt{(1-v^2/c^2)}$

- -> l'écoulement du temps est ralenti pour l'observateur O'
- -> la simultanéité des évènements est relative

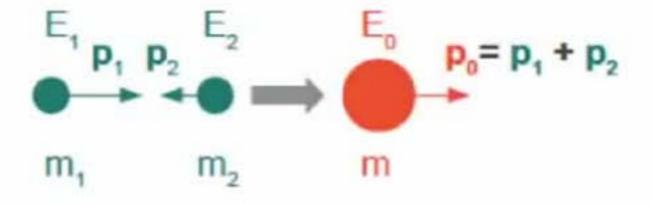
La Relativité restreinte met en évidence des phénomènes apparemment paradoxaux mais vérifiés expérimentalement, tels que la dilatation du temps et la contraction des longueurs dans un référentiel en mouvement par rapport à un autre (vérifié dans les accélérateurs de particules par exemple)

La vitesse de la lumière apparaît comme la limite supérieure des vitesses possibles pour tout corps matériel: il en résulte que tout accroissement d'énergie cinétique se traduit par un accroissement de la masse apparente, et que tout corps de masse m possède une énergie au repos E = mc²

Particules élémentaires et Relativité restreinte

Particule au repos: « énergie de masse » $E_0 = m_0 c^2$ Particule en mouvement à la vitesse v: énergie totale $E^2 = E_0^2 + p^2 c^2$ p = mv quantité de mouvement (conservée dans une interaction) -> transformation énergie cinétique <-> masse

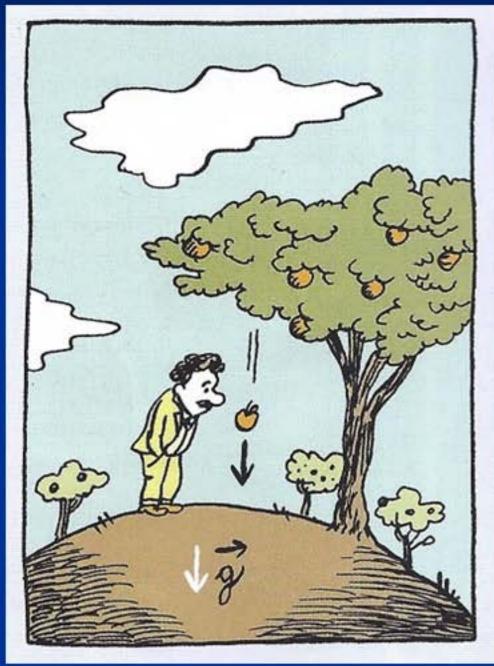
Création de particules «lourdes» lors de collisions de particules plus légères (réalisé dans les accélérateurs de particules) Désintégration de particules lourdes instables en particules plus légères (observé dans les détecteurs)



La Relativité générale

- 1915: Einstein présente une nouvelle théorie du temps, de l'espace et du mouvement qui généralise la Relativité restreinte en prenant en compte les mouvements accélérés
- Il base sa théorie sur le principe d'équivalence: le mouvement en chute libre entraîné par la gravité est équivalent au mouvement accéléré; en corollaire, masse inerte et masse grave sont équivalentes

Le principe d'équivalence

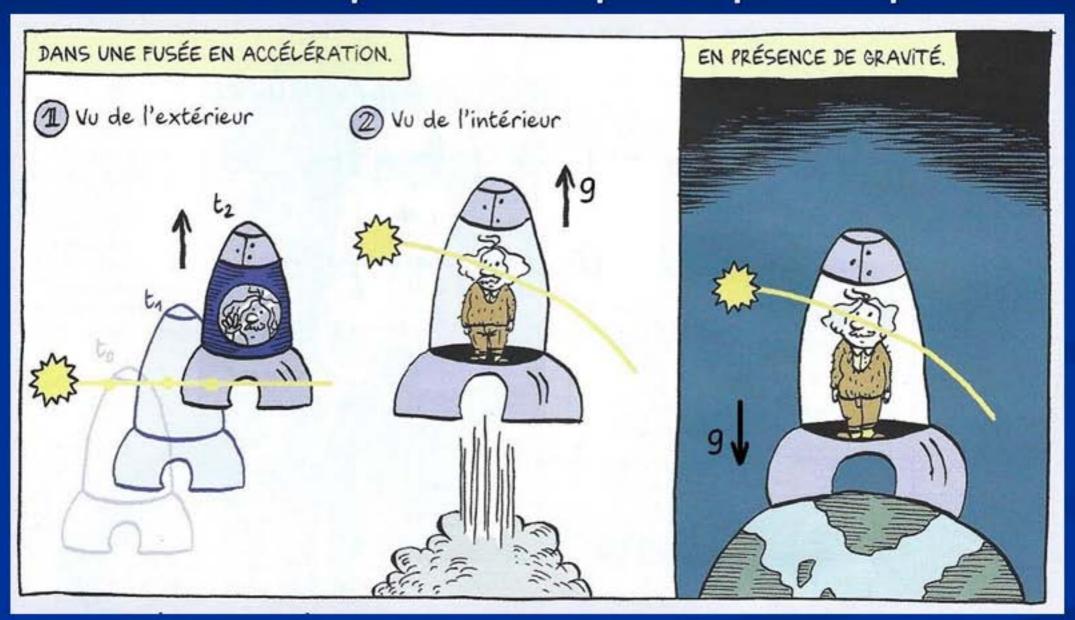




accélération et gravitation sont deux phénomènes équivalents

Gravitation et lumière

la gravitation courbe les rayons lumineux: c'est une conséquence du principe d'équivalence



Depuis l'intérieur de la fusée qui accélère (g), l'observateur voit un rayon lumineux courbé Soumis à la gravité g d'un corps massif, il observe la même courbure du rayon lumineux

La courbure de l'espace-temps

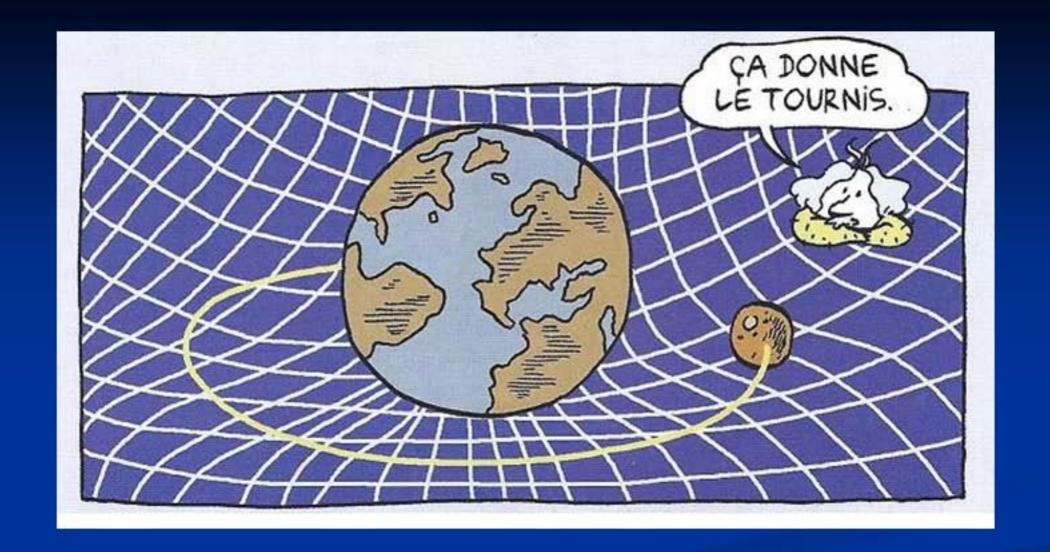
Raisonnement d'Einstein: Les rayons lumineux suivent le plus court chemin dans le vide. Si ce chemin est courbé par la gravité, c'est que l'espace-temps lui-même est courbe.

La Relativité générale: une théorie géométrique de la gravitation

Contrairement à la théorie de Newton qui représente la gravitation par une force, la Relativité générale décrit la gravitation comme la courbure de l'espace-temps

La courbure est imposée par les corps massifs (la matière), et en retour celle-ci influence le mouvement de la matière

Les objets se déplacent donc dans un espace-temps courbé par la matière, en suivant le plus court chemin entre deux points, appelé **géodésique**



En l'absence de matière, donc de courbure, les géodésiques sont des lignes droites.

En présence d'une masse, les géodésiques s'incurvent. Ainsi, la Lune « tombe » autour de la Terre en suivant une trajectoire quasi circulaire: ce n'est pas parce qu'elle est attirée par une force de gravitation mais parce qu'elle file tout droit dans un espace-temps courbe, comme des cyclistes sur la piste incurvée d'un vélodrome.

La gravitation influence l'écoulement du temps!

Effet prévu par la Relativité générale (non par la théorie de Newton) L'écoulement du temps est ralenti par la proximité d'objets massifs



Expérience de Hafele et Keating (1971)

Effet de la gravitation terrestre: une horloge atomique maintenue par avion à 9 km d'altitude pendant 48h a « vieilli » de 0,15 microseconde de plus qu'une horloge identique restée au sol

Les horloges optiques super-stables actuelles peuvent déceler un écart de temps sur une différence d'altitude de quelques dizaines de cm!

Prise en compte dans les systèmes de navigation par satellites (GPS...)

Altitude des satellites ~20000 km

Dérive temporelle due à l'effet de l'altitude par rapport au sol: 46 μ s par jour, soit une erreur de positionnement de 28 km!

Il faut donc appliquer la correction requise par la Relativité générale pour obtenir un positionnement correct.

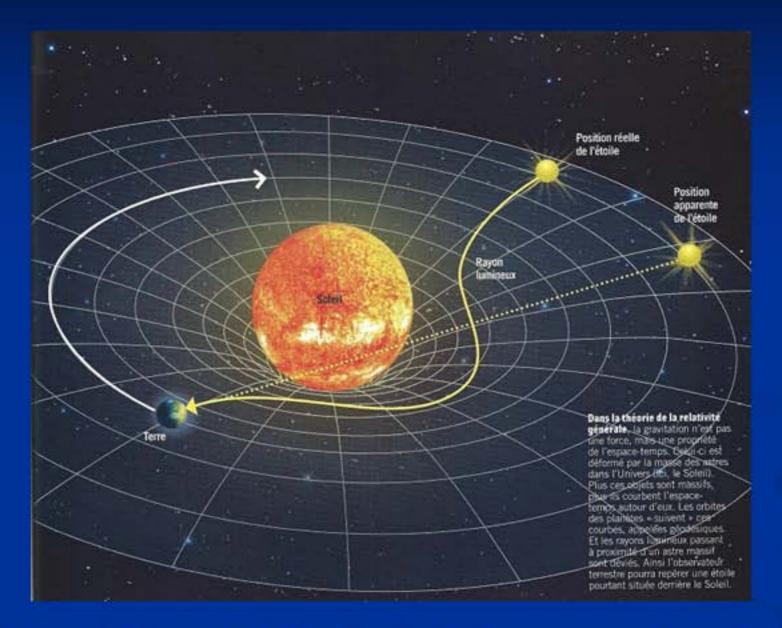


Relativité générale et astronomie: des implications fondamentales et multiples

Excès d'avance du périhélie de Mercure: problème (presque) résolu!

- Dans le système solaire, la courbure de l'espacetemps est maximale au voisinage du Soleil, astre de loin le plus massif
- Einstein démontre que la géodésique suivie par Mercure est une courbe non fermée dont l'excès d'avance séculaire est proche de 43 secondes d'arc
- On estime actuellement que la théorie d'Einstein explique 99% de cet excès d'avance. Mercure reste donc un sujet d'intérêt fort pour le test des nouvelles théories au-delà de la RG! (voir Sciences et Avenir Hors série n° 180 p.55-59)

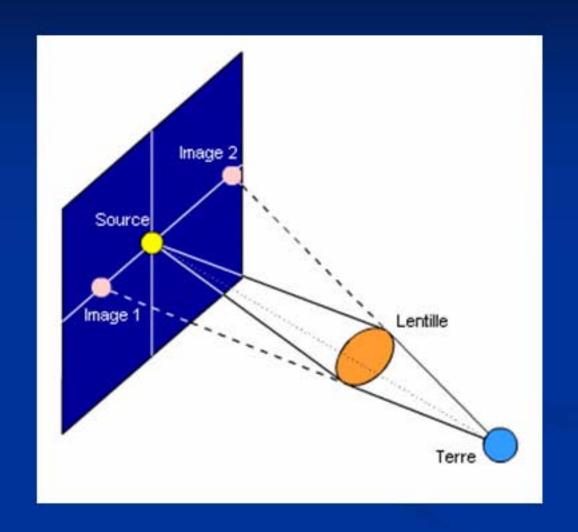
1919: la Relativité générale triomphe



Idée: profiter d'une éclipse totale du Soleil pour « voir » les étoiles cachées derrière celui-ci et dont la lumière est déviée par la courbure causée par sa masse

Prédiction de la théorie validée par les observations de Arthur Eddington à l'occasion de l'éclipse de Mai 1919: grand succès, Einstein devient un héros!

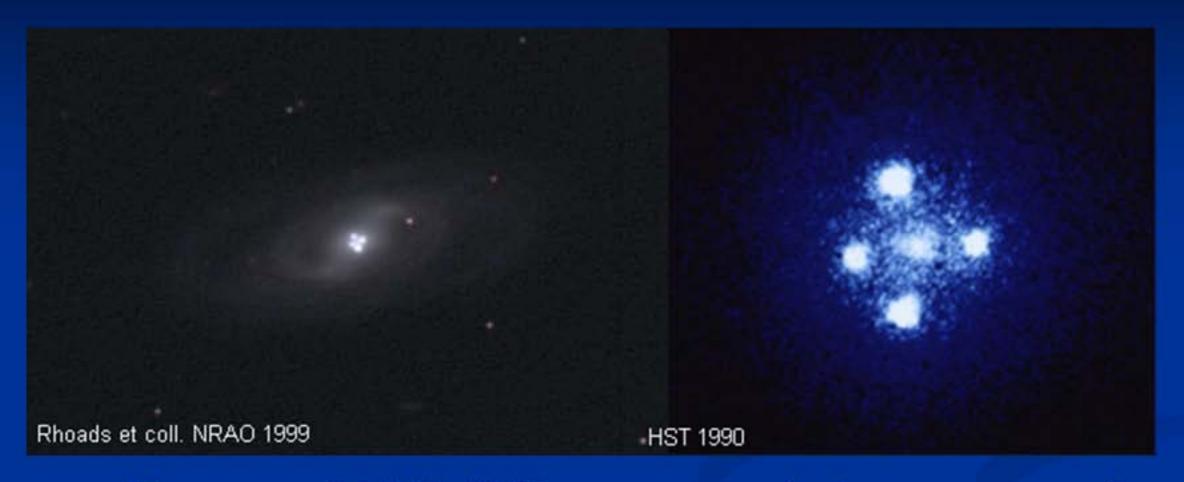
Mirages et lentilles gravitationnelles



La déviation de la lumière issue d'un objet lointain par les masses présentes dans l'Univers peut produire des « mirages gravitationnels »: image déplacée, déformée ou images multiples du même objet

Un objet massif (étoile, trou noir massif, galaxie...) entre l'objet lointain et l'observateur joue le rôle de lentille gravitationnelle

Exemple spectaculaire: la croix d'Einstein



La « croix d'Einstein » 62237+0305 est constituée de cinq images d'un même objet distant.

Ce que l'on observe ressemble à une galaxie de 15ème magnitude composée de deux objets ayant des redshifts respectifs Z=0,0039 et Z=1,695, donc situés à des distances différentes.

Le premier objet est une galaxie en avant-plan, et le second un quasar situé à 5 milliards d'années-lumière abritant un trou noir super-massif d'un milliard de masses solaires.

Sonder l'Univers pour détecter la matière noire

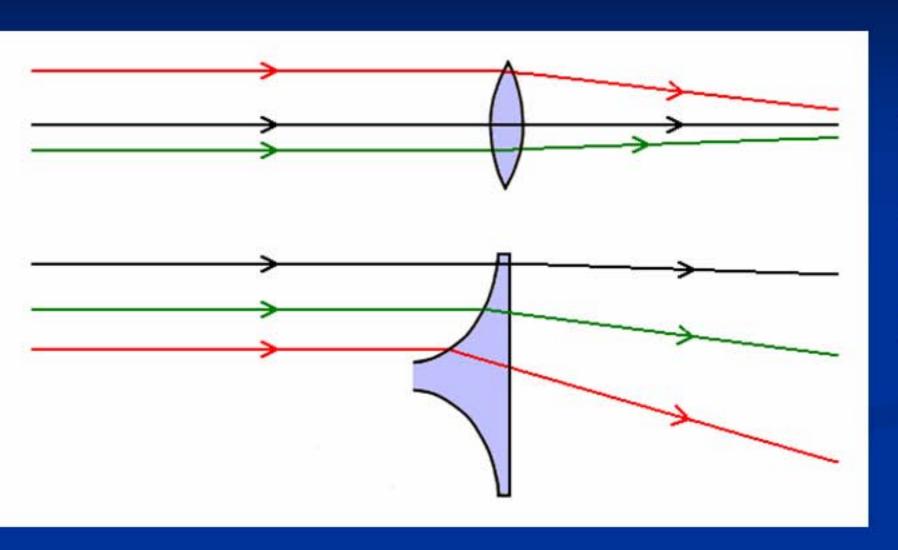
En arrière-plan: amas de galaxies Abell 2218, à 2,3 milliards d'annéeslumière



Les arcs sont les images déformées de galaxies de l'amas, dont la lumière est déviée par les masses en avant-plan, notamment les concentrations de matière noire

Le rayonnement de fond cosmologique est aussi affecté: les déformations de sa distribution spatiale renseignent sur la répartition de matière noire

Lentilles gravitationnelles: analogie optique

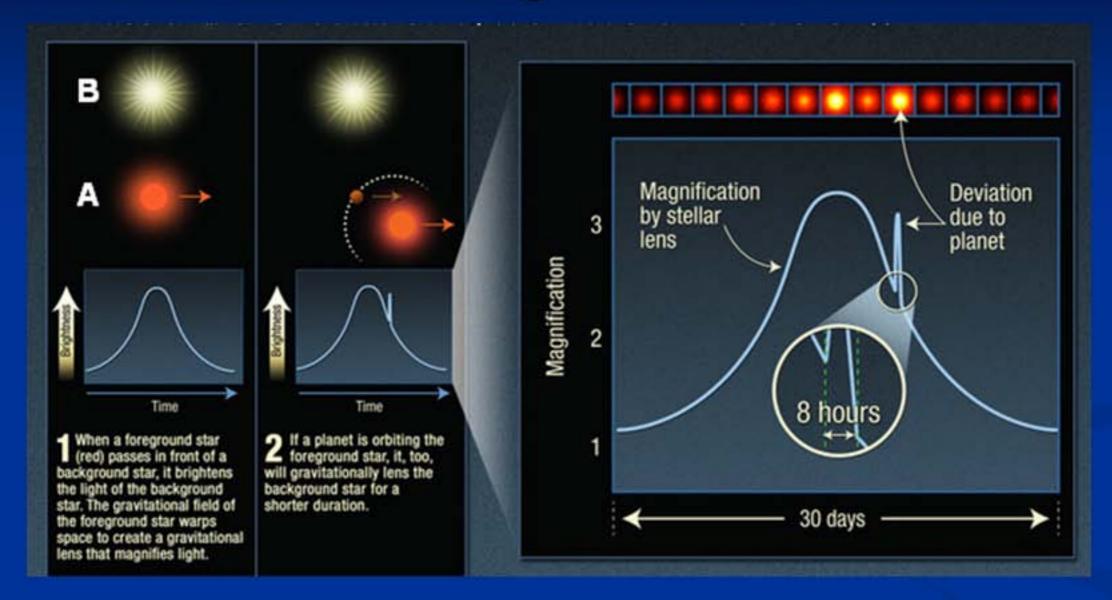


Un fond de bouteille ou le pied d'un verre agissent sur la lumière de façon analogue aux lentilles gravitationnelles

Image d'une flamme de bougie vue au travers d'un verre à pied, similaire à l'« anneau d'Einstein »



Détecter les exoplanètes grâce aux microlentilles gravitationnelles



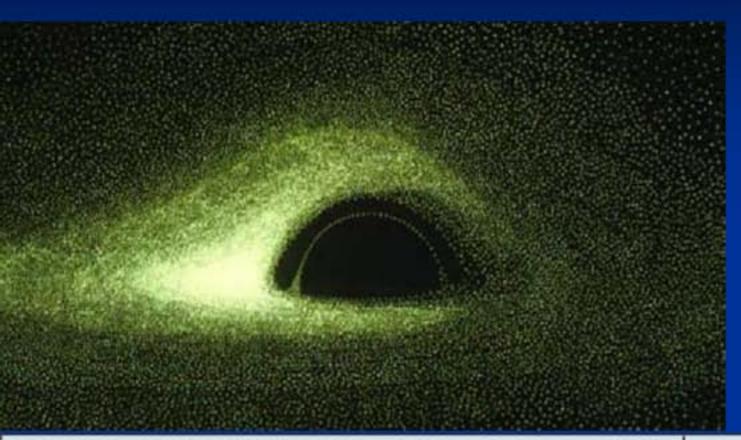
Lorsque l'étoile A passe devant l'étoile distante B, la lumière de celle-ci est amplifiée par effet de lentille. Si A possède une planète, un second pic (faible) de luminosité se produit par effet de microlentille de celle-ci.

Résultat de l'expérience OGLE. A: naine rouge de 0,2 MSoleil; planète: ~5 MTerre; distance planète-étoile: 3 UA, période: 10 ans

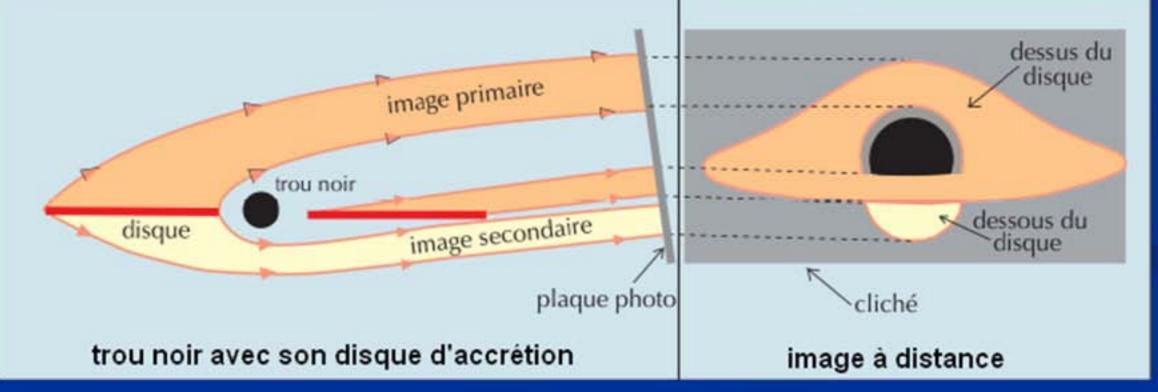
Trous noirs

- Un trou noir est un objet massif qui courbe l'espace-temps au point que lumière comme matière ne peuvent s'en échapper. Il se forme suite à l'effondrement d'une étoile massive en fin de vie, ou encore au cœur des galaxies
- Concept déjà imaginé par Mitchell et Laplace à la fin du XVIIIème siècle dans le cadre de la théorie newtonienne (vitesse de libération > c)
- La compacité C (différente de la densité) mesure la capacité d'un objet à retenir la lumière: si C = 0,5, vlib = c. Un trou noir possède une compacité égale ou supérieure à 0,5
- Dans le cadre de la RG, la frontière (immatérielle) entre l'intérieur du trou noir et le reste de l'Univers est appelée horizon des évènements. Le « centre » du trou noir est une singularité de l'espace-temps (courbure infinie)

A quoi ressemble un trou noir?



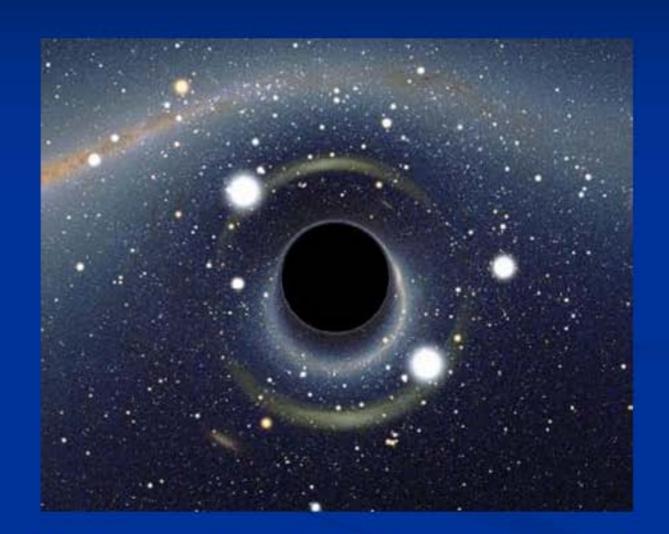
Silhouette d'un trou noir en rotation, calculée par J.P. Luminet en 1979



Autre vision: effets de lentille Simulations de Alain Riazuelo (CNRS/IAP)



Ciel dans l'hémisphère Sud: on observe des étoiles, les nuages de Magellan et la Voie Lactée



Un trou noir placé devant le grand nuage de Magellan donne une image déformée en arcs de celui-ci, et des images secondaires et des dédoublements des autres objets

Distorsion temporelle

- Très importante au voisinage d'un trou noir
- Un observateur éloigné voit un explorateur proche du trou noir vieillir beaucoup moins vite que lui!
- Si l'explorateur décide de franchir l'horizon, l'observateur éloigné le verra « se figer" tout près de l'horizon et ne jamais le traverser
- Par contre, du point de vue de l'explorateur, l'horizon est franchi sans encombre en un temps fini.. La suite est plus problématique!

Ondes gravitationnelles

- Les ondes gravitationnelles sont des oscillations de la courbure de l'espace-temps engendrées par des masses en mouvement accéléré, par exemple deux étoiles massives tournant l'une autour de l'autre
- De même que des ondes se propagent à la surface de l'eau ou le long d'une corde vibrante, les ondes gravitationnelles se propagent dans l'espace-temps, à la vitesse de la lumière, et perturbent sa courbure
- Si une onde gravitationnelle modifie l'espace-temps, la distance qui sépare deux points se met alors à osciller (très peu!), on peut donc la détecter (pas facile!)

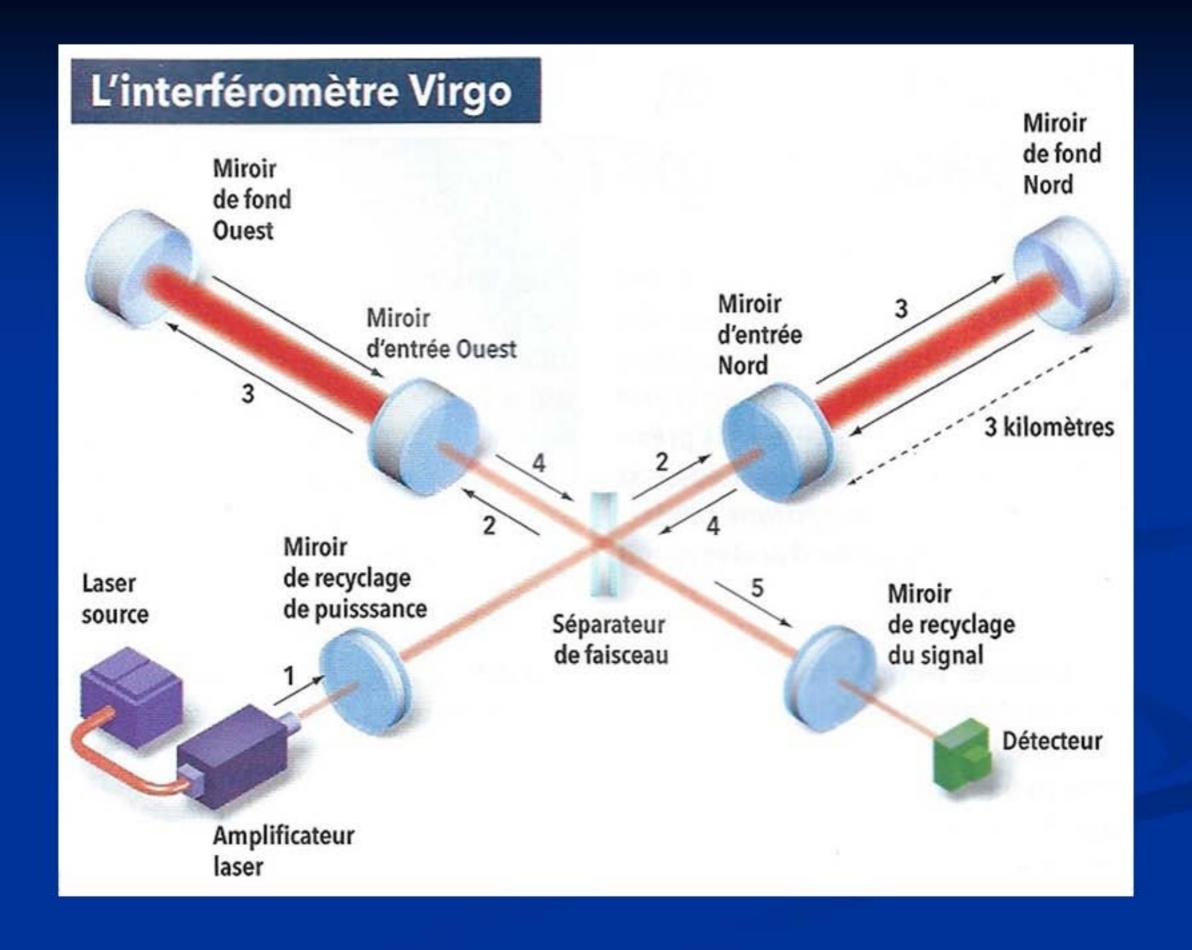
Détection indirecte via les pulsars

- Diminution de la période orbitale d'un couple de pulsars par perte d'énergie sous forme d'OG (76 µs par an): observation par Hulse et Taylor en 1974 (Prix Nobel 1993)
- Mesure de la variation apparente de la période (très stable) de pulsars milliseconde au passage d'une OG. L'observation simultanée de plusieurs pulsars permettrait de localiser la direction de la source
- Améliorer la capacité de détection: réseau
 IPTA de 7 radiotélescopes géants (Nançay, etc)

D'après la théorie d'Einstein, la fusion de deux trous noirs supermassifs dans une galaxie proche de la nôtre émet une onde gravitationnelle à travers l'espace. Celle-ci atteint, dans la Voie lactée, les astres très stables que sont les pulsars, les faisant changer de position. Pulsar Le trajet de la lumière qu'ils émettent alors (en jaune) parvient sur Terre avec-un léger retard par rapport au trajet habituel DES BOUÉES (pointillés blancs). C'est cette infime variation que cherchent à détecter les DANS L'ESPACE radiotélescopes comme celui de Nançay. Les astrophysiciens en déduiraient alors l'existence de l'onde gravitationnelle.

Détection directe par « antennes à OG »

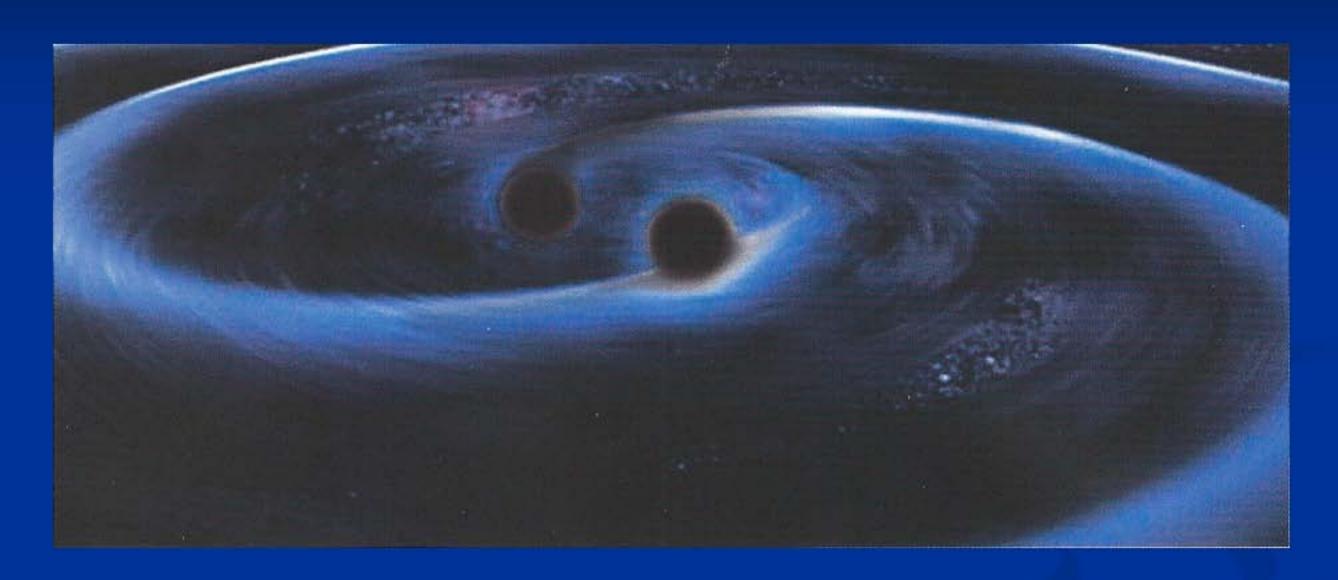
- Le passage d'une OG modifie momentanément la distance (la métrique) entre deux points de l'espace-temps: cette déformation (très faible) est détectable sur Terre par des « antennes » appropriées, basées sur le principe de l'interféromètre optique de Michelson, avec deux bras perpendiculaires de plusieurs km (sensibilité ~longueur)
- Trois grandes antennes en service: VIRGO (Italie) et deux interféromètres LIGO (USA), en collaboration
- Sensibilité à la micro-sismicité -> bande passante au-delà de 10 Hz
- Projet d'antenne spatiale: LISA (USA-Europe): plus de problème de micro-sismicité donc bande passante plus basse, et sensibilité très accrue: bras de ~1000 km





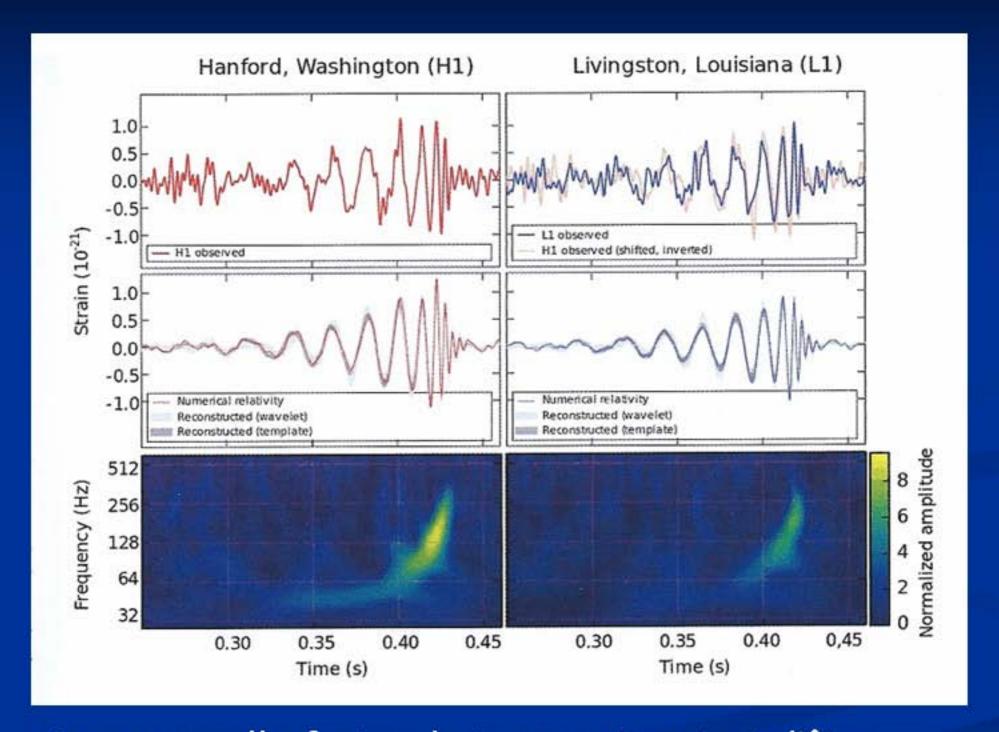
L'« antenne » VIRGO dans la campagne près de Pise

Première détection (LIGO): Septembre 2015



Evènement source (supposé): deux trous noirs spiralent l'un autour de l'autre et fusionnent brusquement (coalescence)

Première détection (LIGO): Septembre 2015



...et une nouvelle fusion de trous noirs vient d'être observée par la collaboration LIGO-Virgo ! (Juin 2016)

-> vers une nouvelle astronomie!

Implications pour la cosmologie

- Friedmann et Lemaître (années 1920) trouvent des solutions des équations de la RG correspondant à un univers en expansion -> modèle du Big Bang
- Interprétation du « Red Shift »: allongement de la métrique par l'expansion: les longueurs d'onde sont dilatées -> « rougissement » d'autant plus important que les objets sont éloignés de l'observateur
- La gravitation fait évoluer l'Univers à grande échelle. La RG est la théorie de la gravitation utilisée par les cosmologistes pour élaborer des modèles prédictifs et qui rendent compte des observations: par exemple la nucléosynthèse primordiale et le rayonnement de fond cosmologique
- Géométrie de l'Univers: suivant le rapport entre densité critique et densité de l'Univers, celui-ci est à courbure moyenne nulle (plat: hypothèse la plus probable), > 0 (sphérique) ou < 0 (hyperbolique) -> conséquences possibles pour son évolution

Histoire de l'Univers n ē ñ cosmic microwave radiation visible n 2 Inflation ñ ñ 909 ē 949 2 2 n n ā 10-44 10-378 1028 10-10_S 1015 n 10-5_S 1015 1012 1025 ñ ñ 3×105 10 9 n 10-4 3000 Today Key: 109 W. Z bosons 3×10-10 photon 12x109y (sec.yrs) meson quark star baryon gluon 2.3×10-13 galaxy (Kelvin) e electron Mnuon t tau black atom n neutrino hole Particle Data Group, LBNL, © 2000. Supported by DOE and NSF

Questions ouvertes en RG

- Quelle théorie quantique de la gravitation: théorie des cordes, gravitation quantique à boucles?
- Entropie décroissante des trous noirs: comment l'expliquer?
- Nature de la matière noire: explication dans le cadre de la RG ou faut-il construire une autre théorie de la gravitation ? (MOND ...)
- Energie noire (= accélération de l'expansion de l'Univers): pourrait s'expliquer par une « constante cosmologique » remise au goût du jour (~ énergie du vide)?