Les ondes gravitationnelles , qu'est ce que c'est ?

Retour sur la découverte de GW150914

G. Henri, IPAG

Pour commencer … quelques mots sur les « ondes électromagnétiques »

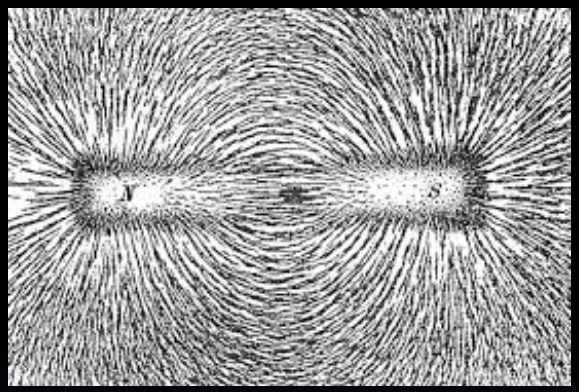






1865 : James C. Maxwell unifie les lois de l'électricité et du magnétisme en écrivant ses « équations de Maxwell »

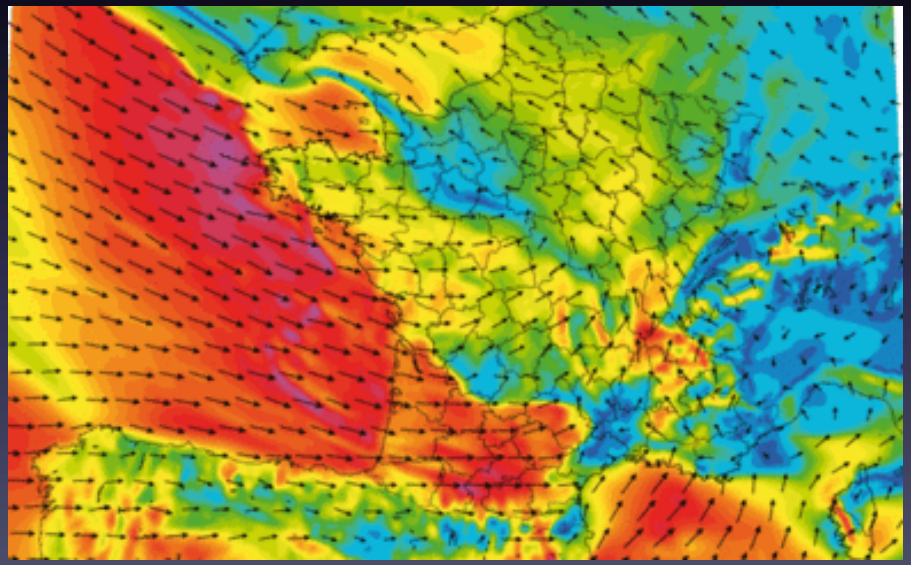
Sur la notion de « champ » ….



Introduit par Faraday qui « visualise » le champ magnétique autour d'un aimant



Un champ scalaire : la température



Un champ vectoriel : la vitesse du vent

Le « champ électromagnétique »

En présence de charges et de courants (mouvement de charges), l'espace se « remplit » d'un champ électrique (***E***) et d'un champ magnétique (***B***)

- Un champ magnétique variable produit un champ électrique (phénomène d'induction , Faraday)



Centrale géothermique en Islande

- Un champ électrique variable produit un champ magnétique (Maxwell)

Et Dieu dit ….

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

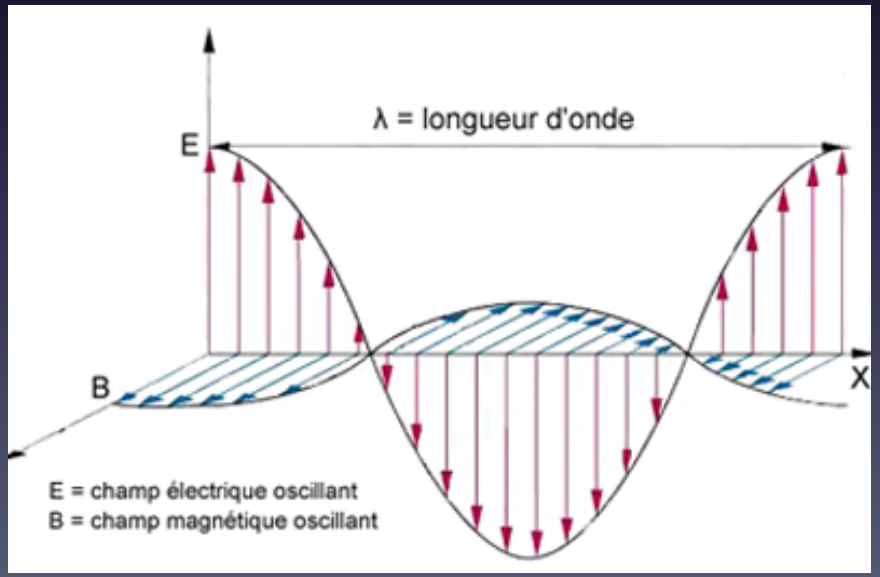
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Et la lumière fut !!

Les solutions décrivant des champs variables dans le vide correspondent à la propagation **d'ondes électromagnétiques** se propageant à c = 299 792, 458 km/s

C'est la même vitesseque celle mesurée pour la lumière !

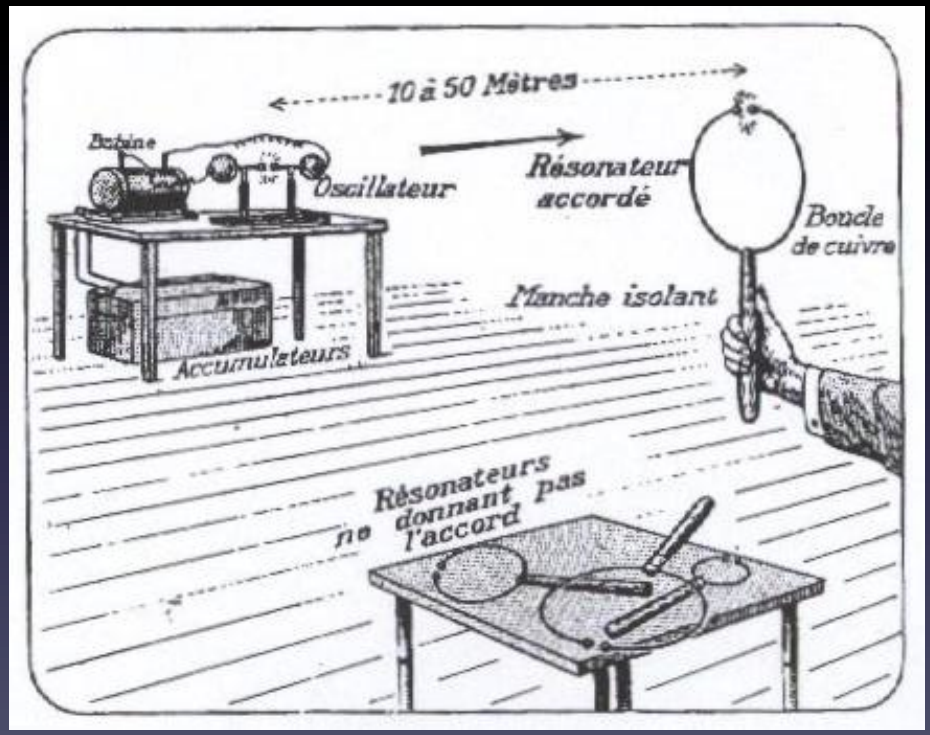
-> La lumière est une onde électromagnétique !



Onde vectorielle et transversale

Une onde électromagnétique sera produite par des charges en mouvement

Expérience de Hertz : le « dipole oscillant » (1885)



Confirme l'existence d'ondes électromagnétiques se déplaçant à c
Ouvre la voie aux transmissions « radio » (Marconi ….)

Un problème de fond : la lumière se déplace à la vitesse « c » mais … par rapport à quoi ??

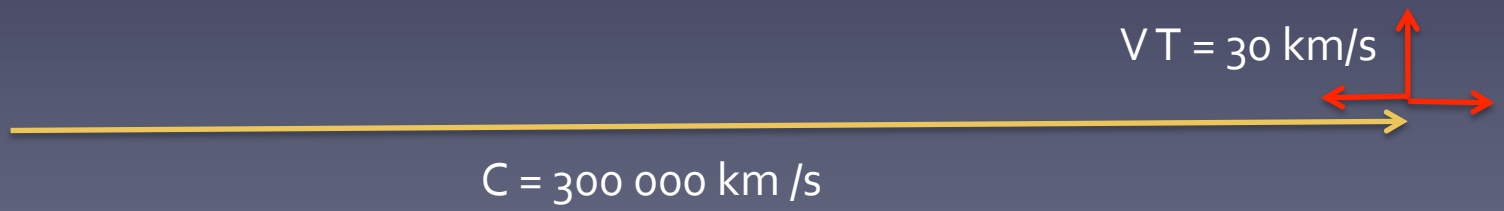
Il n'y a pas de « vitesse absolue » en physique classique !!

Il n'y a que des vitesses relatives !

Si la lumière se déplace à « c » dans un certain milieu (l'éther ?)… elle devrait se déplacer à une vitesse différente quand on bouge soi même par rapport à ce milieu !!

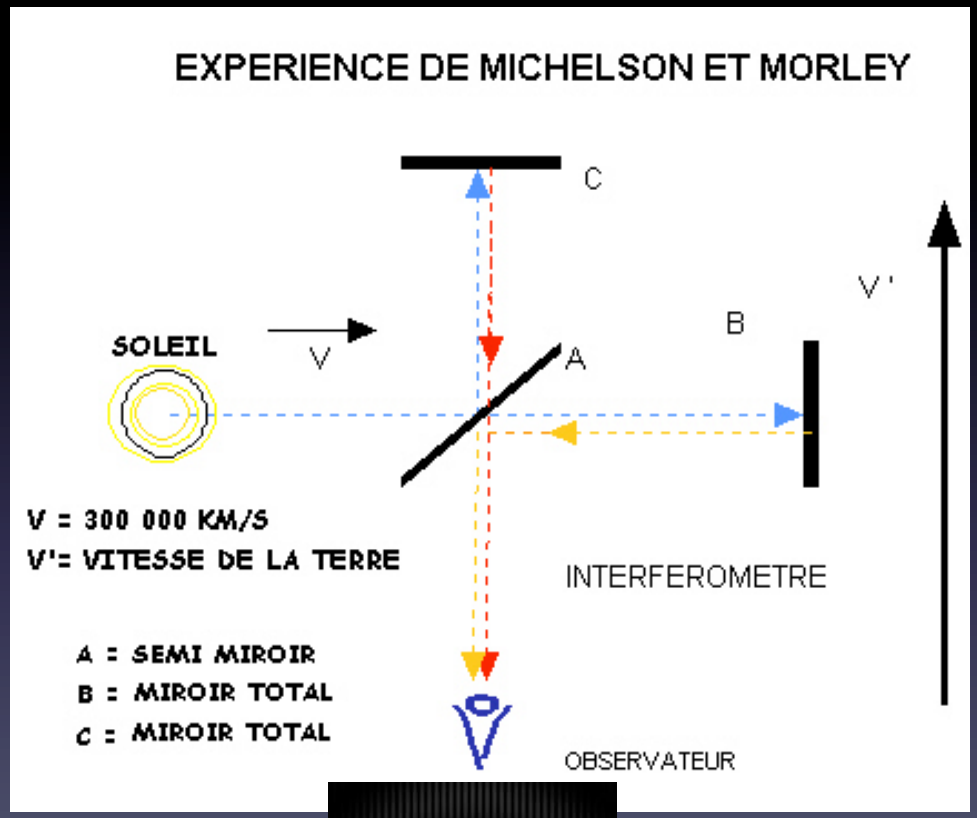
Peut-on « mesurer » la vitesse de la Terre par rapport à l'éther en mesurant la variation apparente de la vitesse de la lumière suivant la direction de propagation ?

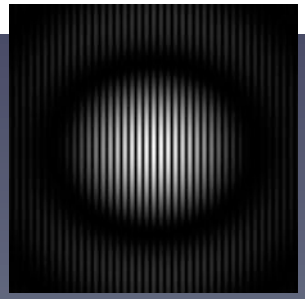




Variation attendue de ~ 30 /300000 = 1/10 000e (soit 0,01 %

Difficile … mais pas impossible selon Michelson et Morley!
Grâce à la technique d'interferométrie !





Coup de tonnerre dans le ciel de la physique :

Aucun déplacement des franges n'est observé, quelle que soit la position de l'interféromètre, l'heure, la saison …

La lumière semble se déplacer invariablement à c dans TOUS les référentiels !!

La loi d'addition des vitesses n'est plus valable pour la lumière !

(NB : déjà noté par Fizeau qui a mesuré la vitesse de la lumière dans l'eau en mouvement : on n'a pas non plus addition stricte des vitesses).

Premières explications « compliquées » (Lorentz , Poincaré):

Le déplacement par rapport à l'éther produirait des effets sur les horloges et sur les règles modifiant le temps et les longueurs « apparentes »… exactement de la façon qu'il faut pour que le déplacement soit inobservable !

Il faudrait distinguer un « temps apparent », perturbé par l'éther, d'un temps réel … ?

Einstein propose simplement de modifier le concept de temps : contrairement à ce que disait la physique classique, le temps n'est pas « absolu » mais « relatif » à l'observateur

-> Théorie de la Relativité (restreinte) (1905)

Quelques conséquences étranges de la théorie de la Relativité:

- Le temps devient relatif, la simultaneité dépend de l'observateur (2 évènements simultanés pour un observateur ne le seront pas pour un autre, en mouvement par rapport au premier).

- L'écoulement du temps dépend de la vitesse : une horloge en mouvement semble battre « moins vite » qu'une horloge identique au repos.

- « temps propre » $d\tau^2 = dt^2 - dl^2/c^2$ (invariant relativiste)

- Inversement une règle en mouvement paraitra plus courte

- Toute masse M peut etre associée à une énergie $E=mc^2$

Problème de la gravitation :

La Relativité Restreinte ne traite que des observateurs se déplaçant à vitesse constante l'un par rapport à l'autre (référentiels inertiels ou galiléens) : les objets laissés à eux mêmes ont aussi des trajectoires à vitesse constante (principe de Galilée).

La gravitation est une force universelle, qui donne à TOUS les objets la même accélération :

Si il n'y avait que la gravitation, tous les objets tomberaient à la même vitesse !



Pour la gravitation, l'accélération est indépendante de la masse !

Elle agit même si la masse est nulle, et donc même sur la lumière !

La théorie de la Relativité restreinte est alors inapplicable … sauf … si on se débrouille pour faire disparaître la force de pesanteur !



la gravitation peut apparemment disparaître localement… si le référentiel est lui même en chute libre comme l'observateur !!

(C'est le Principe d'équivalence)

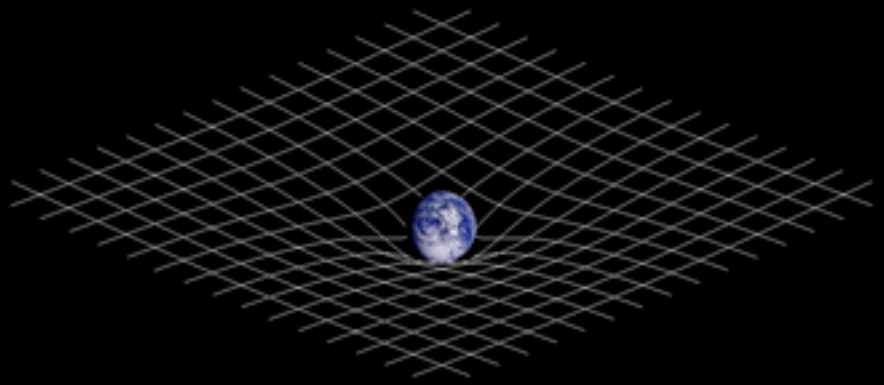
Les effets de la gravitation sont identiques à ceux d'un changement de référentiel accéléré , donc NON galiléen

-> Extension de la Relativité restreinte , pour donner la

Théorie de la Relativité Générale (1915)

Le formalisme mathématique est identique à celui développé par les mathématiciens du XIXe siècle pour décrire des géométries sur des espaces courbes (ou géométrie non euclidienne) :

C'est une théorie géométrique de l'espace-temps : la gravitation produit une courbure de l'espace-temps qui agit sur tous les objets de la même façon.



Le « temps propre » est donné par une formule plus générale

$$d\tau^2 = -g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

Où les $g_{\mu\nu}$ (« tenseur métrique ») décrivent la géométrie (courbe) de l'espace-temps

Sans gravitation (Relativité Restreinte) :

$$[g_{\mu\nu}] = [\eta_{\mu\nu}] = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

En champ faible : $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$

Cas extrême : le trou noir

Concentration de masse dans un volume très faible : la gravité devient si importante que la lumière ne peut plus s'en échapper !

Pour une masse de la Terre,il faut un rayon de R= 1 cm

Pour une masse du Soleil, R = 3 km

Pour 30 masses solaires , R = 100 km

Les trous noirs les plus massifs connus ont une masse d'environ ~ 10 milliards de masses solaires donc ~ 30 milliards de km (taille du système solaire environ).

Cas extrême : le trou noir



Déformation des rayons lumineux autour d'un trou noir (Crédit A. Riazuelo, IAP)

Bon, et les ondes gravitationnelles alors ?

Je voudrais poser une question à monsieur Einstein, à savoir : dans votre théorie, à quelle vitesse l'action de la gravitation se propage-t-elle ?
Max Born, 1913

Tout comme les équations de Maxwell décrivent le champ électromagnétique produit par une distribution de charges en mouvement, les équations d'Einstein décrivent un champ gravitationnel (la courbure de l'espace-temps) produit par une distribution de masse (ou d'énergie) en mouvement.

Elles possèdent aussi des solutions sous forme d'un champ oscillant se propageant à la vitesse de la lumière :

Les ondes gravitationnelles

Contrairement à ce que pensait Newton, la gravité n'agit pas instantanément à distance mais se propage aussi à la vitesse c.`

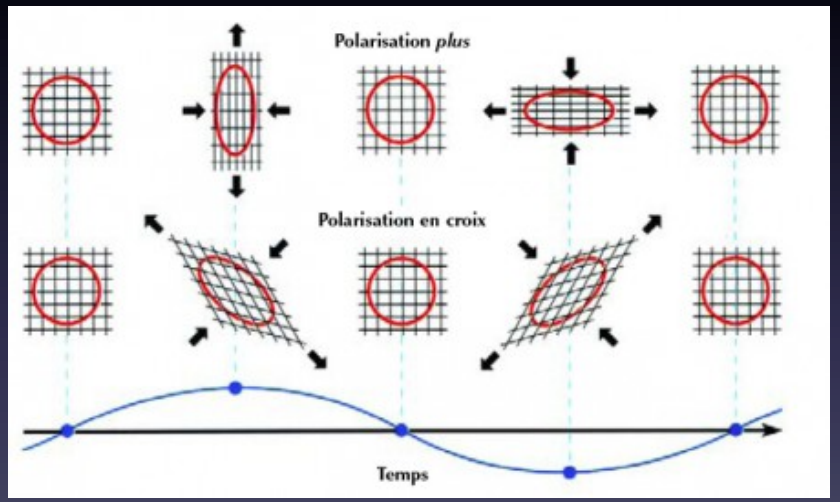
Prédites par Einstein en 1916 mais ne croyait pas lui même à la possibilité de les détecter !

Comment se propagent-elles ?

Analogies et différences avec les ondes é.m.

- Se propagent à c
- Ondes « transversales » (déformation à la direction de déplacement)

- Ondes « tensorielles » et non « vectorielles » : déforme l'espace-temps en « croix » en raccourcissant les distances dans une direction et les allongeant dans l'autre



Crédit JP Luminet

Interagissent très faiblement avec les masses : très pénétrantes mais très difficile à intercepter , donc à mesurer !

- -> un défi depuis 100 ans !!!

Comment produire les ondes gravitationnelles ?

Les ondes électromagnétiques sont produites par le mouvement des charges électriques

De même les ondes gravitationnelles sont produites par le mouvement des masses. (NB un seul « signe » de masse-> pas de « dipole » mais un « quadrupole » tournant)

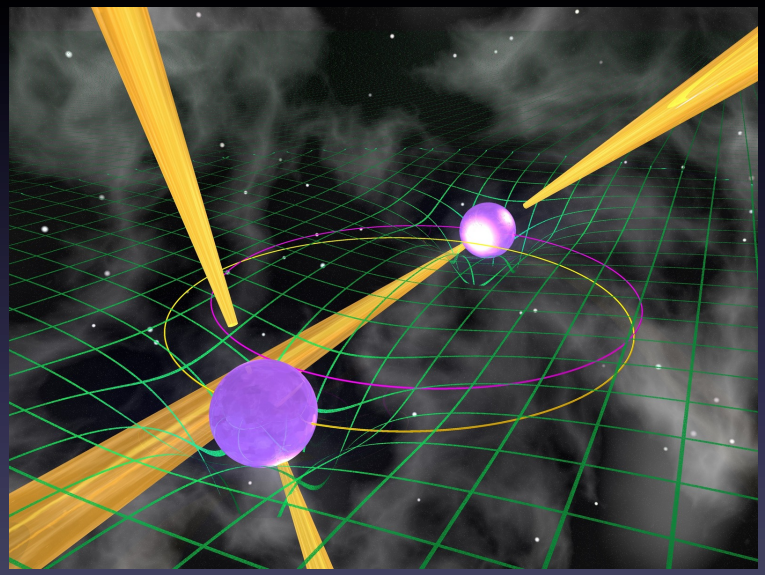
Néanmoins la gravitation est une force très faible par rapport à la force électrique
(pour 2 protons, $F_{grav} = 10^{-36} F_{elec}$!!)

Il faut des masses très grandes et des champs très importants, non accessibles au laboratoire.

-> seuls des objets astrophysiques très massifs et très denses donnent des effets observables.

Perte d'énergie d'un pulsar binaire (PSR B 1913+16)

Système de deux étoiles à neutron (dernier stade avant un trou noir) orbitant l'une autour de l'autre.



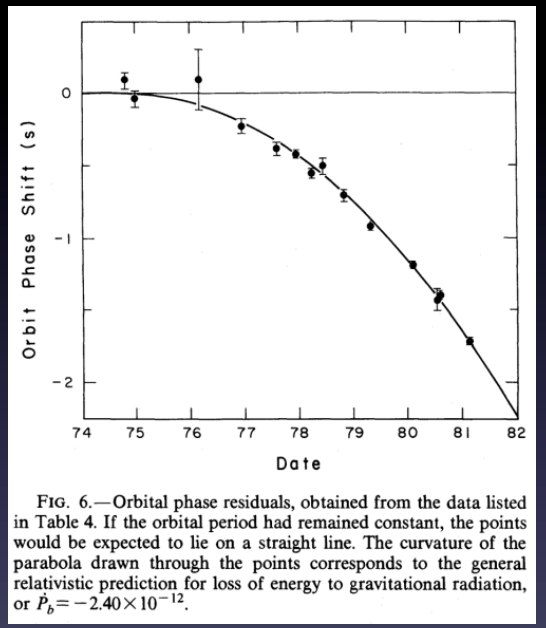


FIG. 6.—Orbital phase residuals, obtained from the data listed in Table 4. If the orbital period had remained constant, the points would be expected to lie on a straight line. The curvature of the parabola drawn through the points corresponds to the general relativistic prediction for loss of energy to gravitational radiation, or $\dot{P}_b = -2.40 \times 10^{-12}$.

Les deux pulsars se rapprochent lentement l'un de l'autre en tournant de plus en plus vite (Hulse & Taylor, Prix Nobel 1993)
-> mise en évidence indirecte de l'émission d'O. G. par la perte d'énergie

Meilleurs candidats pour une détection directe :

- Explosions d'étoiles massives : Supernova, ou mieux hypernova

- Fusion (coalescence) de deux étoiles à neutrons (cf Pulsars binaires), ou d'une étoile à neutrons et d'un trou noir, ou de deux trous noirs.

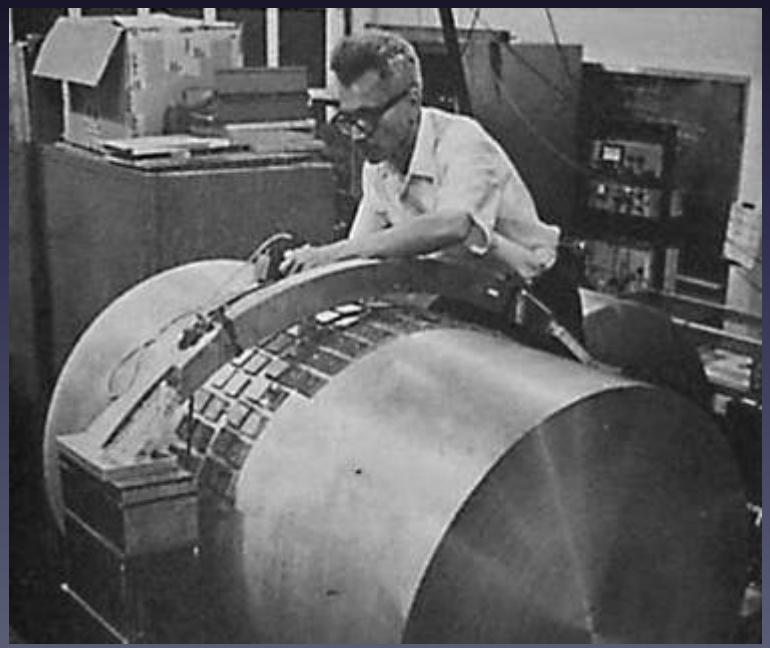
Ces évènements sont aussi probablement la source des sursauts gammas (« flash » électromagnétique intense vu en rayons gammas), sauf le dernier qui ne donne que de l'émission d'ondes gravitationnelles !!



Comment les détecter ?

- Peuvent faire « vibrer » un corps massif

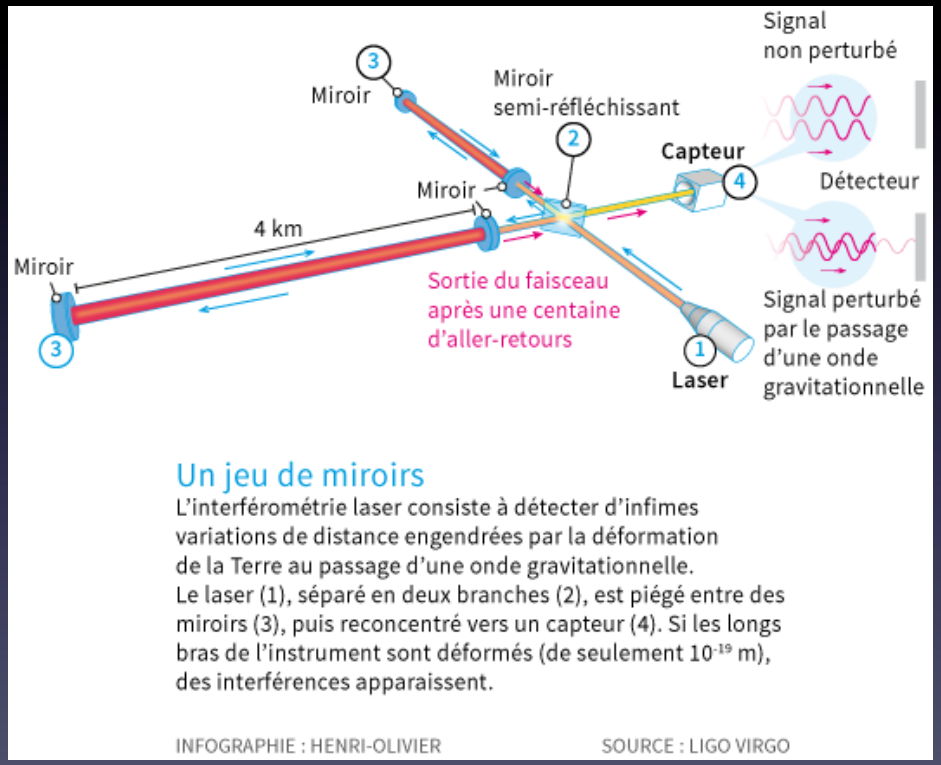
- -> premières tentatives par Weber en utilisant un gros cylindre d'aluminium



Détection prétendue mais jamais confirmée …

Utilisation de l'interférométrie

- Proposée par R. Weiss dans les années 70, soutenue par K. Thorne et R. Drever
  - Meme principe que l'interféromètre de Michelson : détecte la variation du temps de parcours dans deux bras perpendiculaires du au passage de l'onde.
  - 2 projets : LIGO aux US (2 interféromètres en Louisiane et dans l'état de Washington) et VIRGO en Europe (Italie).

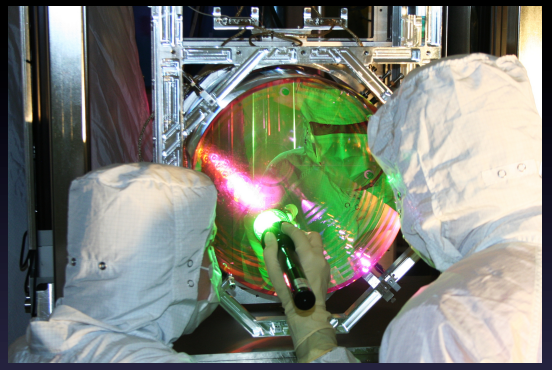


L'instrument le plus sensible jamais construit par l'homme !

- Bras d'environ 4 km
- Trajet amplifié par des réflexions successives (Fabry Perot) environ 400 fois
- Miroirs polis au 10 millionième de mm , environ 500 000 $ pièce

(100 fois meilleurs qu'au VLT), suspendus à des fils de silice de 0.4 mm

- N'absorbent qu'un photon sur 3 millions
- Vide extrêmement poussé (10^{-12} atm)
- Amortissement très poussé des vibrations
- Capable de mesurer des variations de longueur de 10^{-19} m (plus petit qu'un proton !)

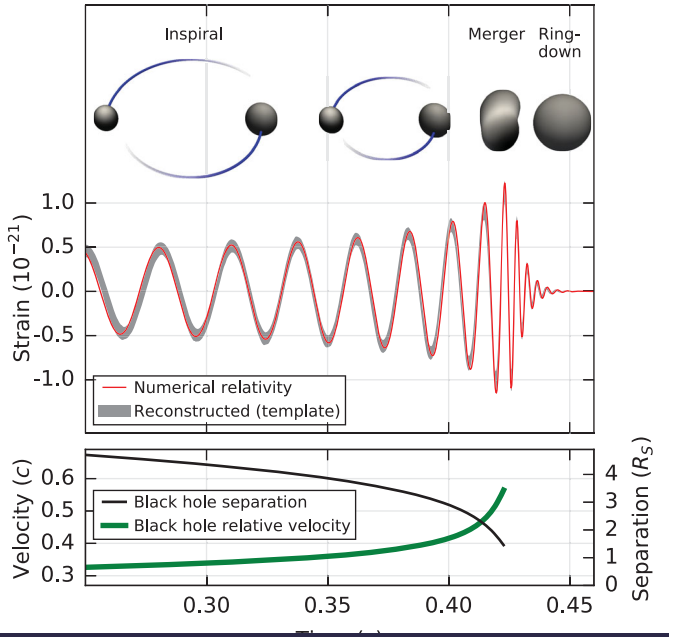


Un spectacle fantastique : la coalescence de deux trous noirs …

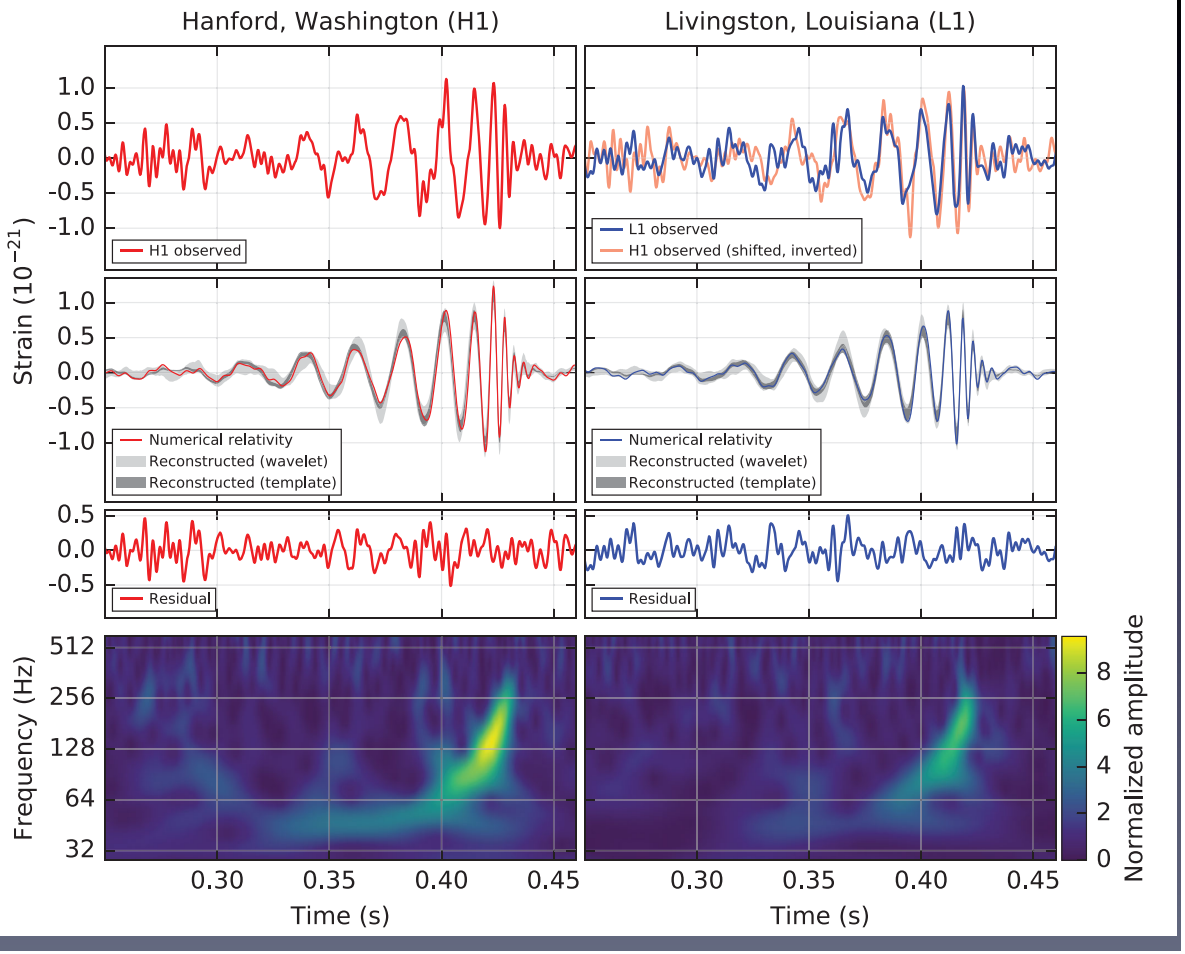
La même devant un fond d’étoiles ….

(Crédit LIGO, Futurasciences)

Le signal attendu … et observé … !



Phys. Rev. Lett. 116 (2016)



Les données déduites de la forme du signal

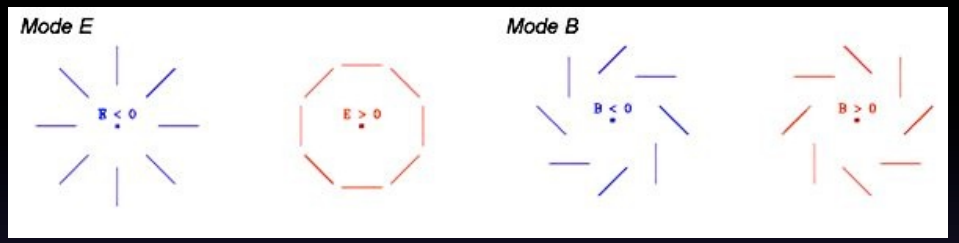
- Fusion de deux trous noirs de masses 36 ±4 et 29 ± 4 masses solaires, produisant une masse finale de 62 ± 4 masses solaires (paramètre de rotation a=0,67)
- Conversion totale de 3 Msol en énergie par ondes gravitationnelles
- Decalage vers le rouge z=0.1 (1,3 milliards d'années lumière), position connue dans ~ 600 deg^2
- Énergie libérée E = 5,4 10^{54} ergs
- Pmax = 10 à 50 fois celle de toutes les étoiles de l'Univers visible !

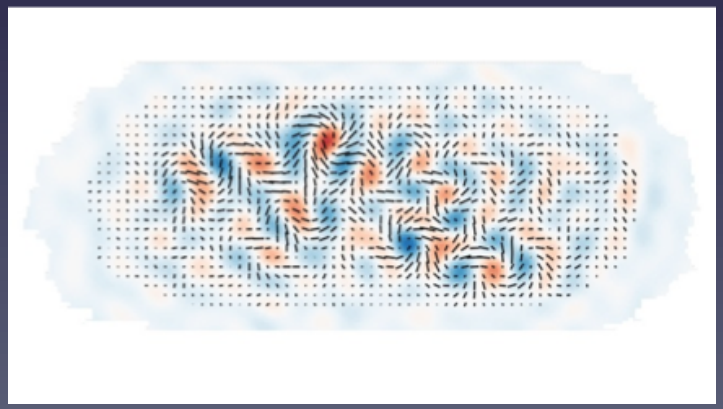
Importance de la découverte

- Test de la relativité générale
- Première preuve directe de l'existence d'un trou noir (et mesure directe de sa masse)
- Astronomie non photonique (cf neutrinos)
- Ces évènements doivent etre assez fréquents-> nombreux autres évènements attendus
- Ondes gravitationnelles sondent des conditions invisibles par les photons (trous noirs, milieux très denses, Big Bang …)

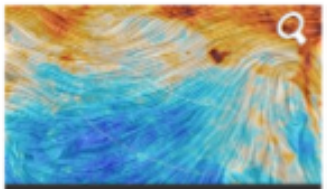
Retour sur une « fausse » détection : les ondes gravitationnelles primordiales vues sur le fond cosmologique à 2,7 K par BICEP2







ONDES GRAVITATIONNELLES: PLANCK DÉMOLIT BICEP-2



La vision de Planck de la zone étudiée par Bicep-2

Les ondes gravitationnelles du Big-Bang n'ont toujours pas été détectées. Et l'annonce à ce sujet de l'équipe américaine utilisant le télescope Bicep-2, installé en Antarctique, à la station Amundsen-Scott, était donc plus que prématurée. Elle est aujourd'hui réfutée et *«la recherche continue»*, explique François Bouchet, de l'Institut d'Astrophysique de Paris.

C'est ce qu'affirment ce matin les deux équipes dans un article publié par la revue Physical

Futur de l'astronomie gravitationnelle ?

La détection rapide d'un événement donne l'espoir d'un taux assez élevé de coalescences -> contraintes sur l'évolution des étoiles massives

Confirmations et meilleure localisation attendues avec Advanced Virgo (2016)

Contraintes fortes sur la validité de la Relativité Générale en champ fort, la masse du graviton , la nature des trous noirs …

Projet LISA dans l'espace : 3 satellites réalisant un interferomètre sur des millions de km

-> accès aux ondes gravitationnelles de très basses fréquences émises par des trous noirs supermassifs

L'espoir de détecter des ondes gravitationnelles primordiales existe encore !

-> L'astronomie est , encore une fois, source de nouvelles découvertes et de possibles révolutions de la physique !