



La détection des ondes gravitationnelles.

Le rôle des ondelettes.

Yves Meyer

CMLA (CNRS UMR 8536)
Ecole Normale Supérieure de Paris-Saclay

4 Mai 2017

Les ondes gravitationnelles

- Tous les deux mois environ, une **alerte** nous est envoyée. Elle vient du fond de l'Univers et nous annonce qu'un **événement gravitationnel cataclysmique** s'y est produit.
- Mais, jusqu'en septembre 2015, les scientifiques ne pouvaient pas **détecter** ces signaux.
- Tout changea le 14 septembre 2015 à 09:50:45 (UTC time): pour la première fois l'homme a détecté le passage d'une onde gravitationnelle et en a compris le message: **deux trous noirs avaient fusionné**.
- Cette détection n'a été annoncée que le 11 février 2016, car les scientifiques voulaient être rigoureusement sûrs de leur analyse des données.
- Une nouvelle astrophysique est née et notre connaissance de l'Univers en sera à jamais modifiée.

Les ondes gravitationnelles

- Tous les deux mois environ, une **alerte** nous est envoyée. Elle vient du fond de l'Univers et nous annonce qu'un **événement gravitationnel cataclysmique** s'y est produit.
- Mais, jusqu'en septembre 2015, les scientifiques ne pouvaient pas **détecter** ces signaux.
- Tout changea le 14 septembre 2015 à 09:50:45 (UTC time): pour la première fois l'homme a détecté le passage d'une onde gravitationnelle et en a compris le message: **deux trous noirs avaient fusionné**.
- Cette détection n'a été annoncée que le 11 février 2016, car les scientifiques voulaient être rigoureusement sûrs de leur analyse des données.
- Une nouvelle astrophysique est née et notre connaissance de l'Univers en sera à jamais modifiée.

Les ondes gravitationnelles

- Tous les deux mois environ, une **alerte** nous est envoyée. Elle vient du fond de l'Univers et nous annonce qu'un **événement gravitationnel cataclysmique** s'y est produit.
- Mais, jusqu'en septembre 2015, les scientifiques ne pouvaient pas **détecter** ces signaux.
- Tout changea le 14 septembre 2015 à 09:50:45 (UTC time): pour la première fois l'homme a détecté le passage d'une onde gravitationnelle et en a compris le message: **deux trous noirs avaient fusionné**.
- Cette détection n'a été annoncée que le 11 février 2016, car les scientifiques voulaient être rigoureusement sûrs de leur analyse des données.
- Une nouvelle astrophysique est née et notre connaissance de l'Univers en sera à jamais modifiée.

Les ondes gravitationnelles

- Tous les deux mois environ, une **alerte** nous est envoyée. Elle vient du fond de l'Univers et nous annonce qu'un **événement gravitationnel cataclysmique** s'y est produit.
- Mais, jusqu'en septembre 2015, les scientifiques ne pouvaient pas **détecter** ces signaux.
- Tout changea le 14 septembre 2015 à 09:50:45 (UTC time): pour la première fois l'homme a détecté le passage d'une onde gravitationnelle et en a compris le message: **deux trous noirs avaient fusionné**.
- Cette détection n'a été annoncée que le 11 février 2016, car les scientifiques voulaient être rigoureusement sûrs de leur analyse des données.
- Une nouvelle astrophysique est née et notre connaissance de l'Univers en sera à jamais modifiée.

Les ondes gravitationnelles

- Tous les deux mois environ, une **alerte** nous est envoyée. Elle vient du fond de l'Univers et nous annonce qu'un **événement gravitationnel cataclysmique** s'y est produit.
- Mais, jusqu'en septembre 2015, les scientifiques ne pouvaient pas **détecter** ces signaux.
- Tout changea le 14 septembre 2015 à 09:50:45 (UTC time): pour la première fois l'homme a détecté le passage d'une onde gravitationnelle et en a compris le message: **deux trous noirs avaient fusionné**.
- Cette détection n'a été annoncée que le 11 février 2016, car les scientifiques voulaient être rigoureusement sûrs de leur analyse des données.
- Une nouvelle astrophysique est née et notre connaissance de l'Univers en sera à jamais modifiée.

Ondes gravitationnelles

- Ondes gravitationnelles \neq ondes électromagnétiques.
- Ondes électromagnétiques: ondes radio, infra-rouge, lumière visible, ultraviolet, rayons X, rayons gamma.
- Les ondes acoustiques sont des vibrations de l'atmosphère et ne peuvent se propager dans le vide.

Ondes gravitationnelles

- Ondes gravitationnelles \neq ondes électromagnétiques.
- Ondes électromagnétiques: ondes radio, infra-rouge, lumière visible, ultraviolet, rayons X, rayons gamma.
- Les ondes acoustiques sont des vibrations de l'atmosphère et ne peuvent se propager dans le vide.

Ondes gravitationnelles

- Ondes gravitationnelles \neq ondes électromagnétiques.
- Ondes électromagnétiques: ondes radio, infra-rouge, lumière visible, ultraviolet, rayons X, rayons gamma.
- Les ondes acoustiques sont des vibrations de l'atmosphère et ne peuvent se propager dans le vide.

Ondes gravitationnelles

- This first detection is a spectacular discovery: the gravitational waves were produced during the final fraction of a second of the merger of two black holes to produce a single, more massive spinning black hole.
- This collision of two black holes had been predicted but never observed.
- Annonce du laboratoire LIGO de Caltech.

Ondes gravitationnelles

- This first detection is a spectacular discovery: the gravitational waves were produced during the final fraction of a second of the merger of two black holes to produce a single, more massive spinning black hole.
- This collision of two black holes had been predicted but never observed.
- Annonce du laboratoire LIGO de Caltech.

Ondes gravitationnelles

- This first detection is a spectacular discovery: the gravitational waves were produced during the final fraction of a second of the merger of two black holes to produce a single, more massive spinning black hole.
- This collision of two black holes had been predicted but never observed.
- Annonce du laboratoire LIGO de Caltech.

Ondes gravitationnelles

- **Nous entendons l'Univers.**
- Et nous entendons l'Univers grâce à des algorithmes qui ressemblent à ceux que l'on emploie depuis la fin des années 80 dans le son numérique Dolby (que l'on trouve dans tous les films récents).

Ondes gravitationnelles

- Nous entendons l'Univers.
- Et nous entendons l'Univers grâce à des algorithmes qui ressemblent à ceux que l'on emploie depuis la fin des années 80 dans le son numérique Dolby (que l'on trouve dans tous les films récents).

Ondes gravitationnelles

- Une onde gravitationnelle est une **vibration** de l'espace-temps, créant une modification **transitoire** de la géométrie de l'Univers.
- L'accélération d'un objet massif crée une onde gravitationnelle (trop faible, en général, pour être perçue).
- Ces déformations de la géométrie de l'espace-temps, de la forme géométrique de l'Univers, se propagent dans l'Univers, **à la vitesse de la lumière**, sous la forme d'une vibration dont la durée peut être de l'ordre de quelques secondes.

Ondes gravitationnelles

- Une onde gravitationnelle est une **vibration** de l'espace-temps, créant une modification **transitoire** de la géométrie de l'Univers.
- L'accélération d'un objet massif crée une onde gravitationnelle (trop faible, en général, pour être perçue).
- Ces déformations de la géométrie de l'espace-temps, de la forme géométrique de l'Univers, se propagent dans l'Univers, **à la vitesse de la lumière**, sous la forme d'une vibration dont la durée peut être de l'ordre de quelques secondes.

Ondes gravitationnelles

- Une onde gravitationnelle est une **vibration** de l'espace-temps, créant une modification **transitoire** de la géométrie de l'Univers.
- L'accélération d'un objet massif crée une onde gravitationnelle (trop faible, en général, pour être perçue).
- Ces déformations de la géométrie de l'espace-temps, de la forme géométrique de l'Univers, se propagent dans l'Univers, **à la vitesse de la lumière**, sous la forme d'une vibration dont la durée peut être de l'ordre de quelques secondes.

Cataclysmes

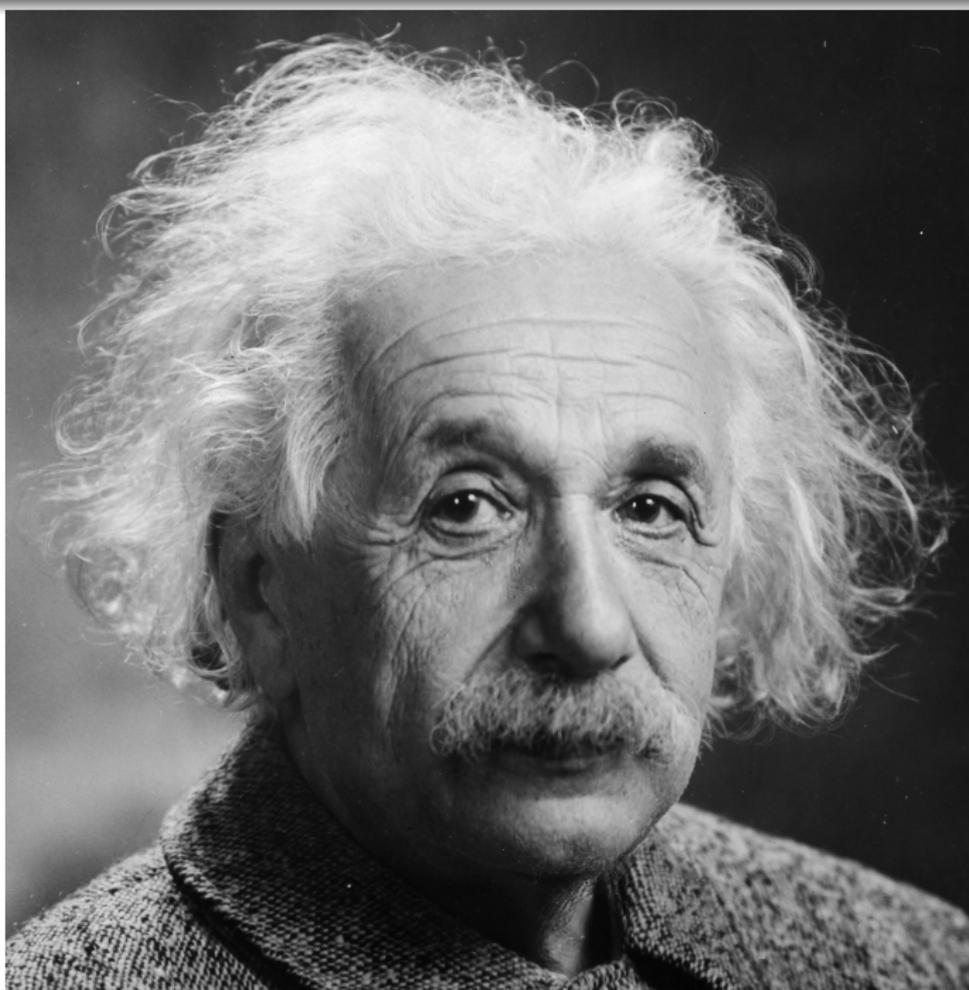
- Une onde gravitationnelle est déclenchée par un événement gravitationnel cataclysmique. Une **fusion entre deux trous noirs** s'est produite il y a un milliard trois cents millions d'années.
- Pendant quelques secondes l'énergie dissipée par cette fusion fut plus grande que toute l'énergie produite dans le reste de l'Univers.
- Cette fusion a déclenché l'onde gravitationnelle qui, après avoir traversé une grande partie de l'Univers à la vitesse de la lumière, a atteint, la terre le 14 septembre 2015 à 09:50:45 (temps UTC).

Cataclysmes

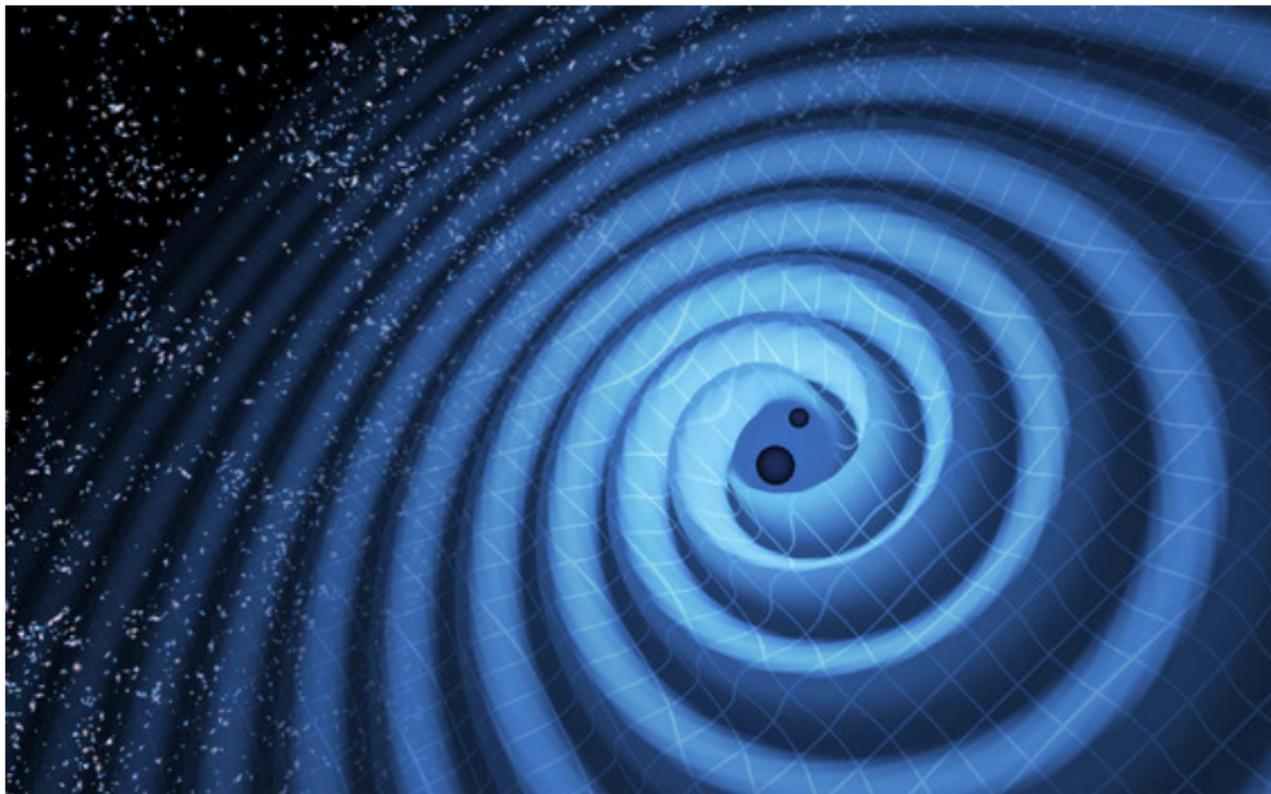
- Une onde gravitationnelle est déclenchée par un événement gravitationnel cataclysmique. Une **fusion entre deux trous noirs** s'est produite il y a un milliard trois cents millions d'années.
- Pendant quelques secondes l'énergie dissipée par cette fusion fut plus grande que toute l'énergie produite dans le reste de l'Univers.
- Cette fusion a déclenché l'onde gravitationnelle qui, après avoir traversé une grande partie de l'Univers à la vitesse de la lumière, a atteint, la terre le 14 septembre 2015 à 09:50:45 (temps UTC).

- Une onde gravitationnelle est déclenchée par un événement gravitationnel cataclysmique. Une **fusion entre deux trous noirs** s'est produite il y a un milliard trois cents millions d'années.
- Pendant quelques secondes l'énergie dissipée par cette fusion fut plus grande que toute l'énergie produite dans le reste de l'Univers.
- Cette fusion a déclenché l'onde gravitationnelle qui, après avoir traversé une grande partie de l'Univers à la vitesse de la lumière, a atteint, la terre le 14 septembre 2015 à 09:50:45 (temps UTC).

Einstein avait prédit l'existence des ondes gravitationnelles, mais pensait qu'elles sont trop ténues pour pouvoir être détectées. Par ailleurs Einstein ne croyait pas en l'existence des trous noirs.



La détection, le 14 septembre 2015, d'une onde gravitationnelle constitue la première **preuve directe de l'existence des trous noirs**.



Pulsars et ondes gravitationnelles

Les pulsars ont été découverts en 1967 de façon quelque peu fortuite par Antony Hewish et son étudiante Jocelyn Bell qui analysaient des phénomènes de scintillation réfractive dans le domaine radio. Les pulsars sont issus de l'explosion d'une étoile massive en fin de vie. Antony Hewish a obtenu, lui seul, le prix Nobel pour cette découverte.

Pulsars et ondes gravitationnelles

Le rétrécissement au cours du temps de l'orbite du pulsar binaire PSR B1913+16 **s'explique par l'existence du rayonnement gravitationnel** prédit par la relativité générale. Cette preuve indirecte de l'existence du rayonnement gravitationnel a été récompensée par le prix Nobel de physique (Russell Alan Hulse et Joseph Hooton Taylor, en 1993).

L'algorithme de Klimenko

- Le 14 septembre 2015 à 09:50:45, ce n'est pas l'homme qui a perçu la vibration de l'Univers, c'est un **algorithme** mis au point par **Sergey Klimenko** (University of Florida).
- Les nouveaux algorithmes qui ont permis la détection des ondes gravitationnelles font partie de l'**ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE**.
- L'algorithme de Klimenko n'utilise pas de connaissance a priori sur le signal recherché et permet donc la détection de toute une gamme de **gravitational-wave bursts** provenant d'autres événements cataclysmiques dans l'Univers.

L'algorithme de Klimentko

- Le 14 septembre 2015 à 09:50:45, ce n'est pas l'homme qui a perçu la vibration de l'Univers, c'est un **algorithme** mis au point par **Sergey Klimentko** (University of Florida).
- Les nouveaux algorithmes qui ont permis la détection des ondes gravitationnelles font partie de l'**ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE**.
- L'algorithme de Klimentko n'utilise pas de connaissance a priori sur le signal recherché et permet donc la détection de toute une gamme de **gravitational-wave bursts** provenant d'autres événements cataclysmiques dans l'Univers.

L'algorithme de Klimenko

- Le 14 septembre 2015 à 09:50:45, ce n'est pas l'homme qui a perçu la vibration de l'Univers, c'est un **algorithme** mis au point par **Sergey Klimenko** (University of Florida).
- Les nouveaux algorithmes qui ont permis la détection des ondes gravitationnelles font partie de l'**ANALYSE TEMPS-FRÉQUENCE**.
- L'algorithme de Klimenko n'utilise pas de connaissance a priori sur le signal recherché et permet donc la détection de toute une gamme de **gravitational-wave bursts** provenant d'autres événements cataclysmiques dans l'Univers.



Sergey Klimenko

Coherent Waveburst

- I develop a search algorithm Coherent WaveBurst together with my UF colleagues and collaborators from Germany (AEI Hannover) and Italy (Padova & Trento).
- On September 14, 2015 the Coherent WaveBurst algorithm discovered a signal from two colliding black holes three minutes after the data was collected from the LIGO instruments.
- The key features of Coherent WaveBurst are that by using WAVELETS it explores the TIME-FREQUENCY structure of the data and finds signals in the LIGO frequency band without restrictions to a particular source type listed above.

Coherent Waveburst

- I develop a search algorithm Coherent WaveBurst together with my UF colleagues and collaborators from Germany (AEI Hannover) and Italy (Padova & Trento).
- On September 14, 2015 the Coherent WaveBurst algorithm discovered a signal from two colliding black holes three minutes after the data was collected from the LIGO instruments.
- The key features of Coherent WaveBurst are that by using WAVELETS it explores the TIME-FREQUENCY structure of the data and finds signals in the LIGO frequency band without restrictions to a particular source type listed above.

Coherent Waveburst

- I develop a search algorithm Coherent WaveBurst together with my UF colleagues and collaborators from Germany (AEI Hannover) and Italy (Padova & Trento).
- On September 14, 2015 the Coherent WaveBurst algorithm discovered a signal from two colliding black holes three minutes after the data was collected from the LIGO instruments.
- The key features of Coherent WaveBurst are that by using WAVELETS it explores the TIME-FREQUENCY structure of the data and finds signals in the LIGO frequency band without restrictions to a particular source type listed above.

Coherent Waveburst

- Most of these sources are difficult to model, therefore, the search algorithms should use no or little assumptions on the source models.
- Coherent Waveburst was designed to cast the widest possible net for gravitational-wave bursts and extract their properties such as bandwidth, duration, sky location, polarization state and signal waveform.
- Also it can detect signal in real-time, minutes after a gravitational wave is recorded by detectors, which is important for the multi-messenger astronomy.

Coherent Waveburst

- Most of these sources are difficult to model, therefore, the search algorithms should use no or little assumptions on the source models.
- Coherent Waveburst was designed to cast the widest possible net for gravitational-wave bursts and extract their properties such as bandwidth, duration, sky location, polarization state and signal waveform.
- Also it can detect signal in real-time, minutes after a gravitational wave is recorded by detectors, which is important for the multi-messenger astronomy.

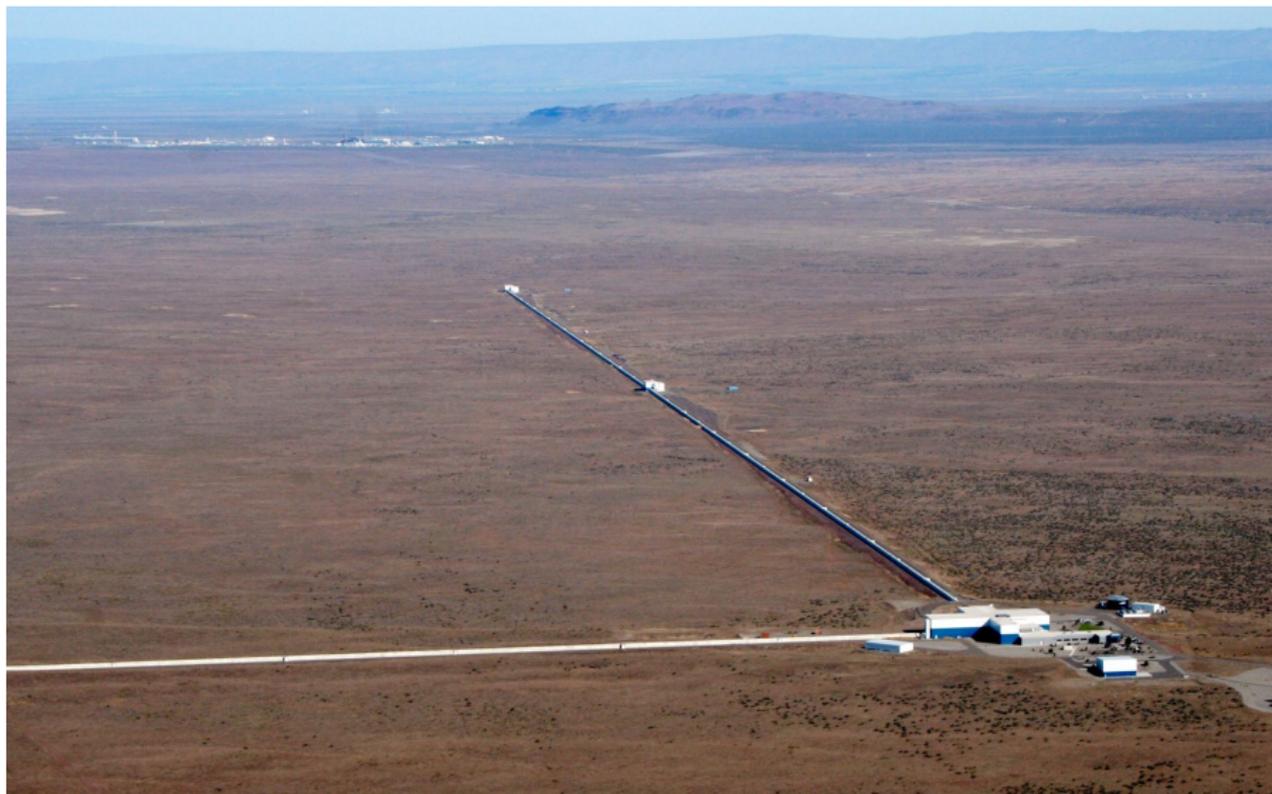
Coherent Waveburst

- Most of these sources are difficult to model, therefore, the search algorithms should use no or little assumptions on the source models.
- Coherent Waveburst was designed to cast the widest possible net for gravitational-wave bursts and extract their properties such as bandwidth, duration, sky location, polarization state and signal waveform.
- Also it can detect signal in real-time, minutes after a gravitational wave is recorded by detectors, which is important for the multi-messenger astronomy.

- La National Science Foundation avait construit à la fin des années 90 deux observatoires géants séparés de 3.002 Kms. L'un (Hanford) est situé près de Seattle (Etat de Washington), l'autre (Livingston) est situé en Louisiane.
- Ces observatoires ont fonctionné pendant 8 ans sans détecter la moindre onde gravitationnelle. Cela a conduit la NSF à remplacer les détecteurs par une version dont la sensibilité est très améliorée (Advanced LIGO, 2015).

- La National Science Foundation avait construit à la fin des années 90 deux observatoires géants séparés de 3.002 Kms. L'un (Hanford) est situé près de Seattle (Etat de Washington), l'autre (Livingston) est situé en Louisiane.
- Ces observatoires ont fonctionné pendant 8 ans sans détecter la moindre onde gravitationnelle. Cela a conduit la NSF à remplacer les détecteurs par une version dont la sensibilité est très améliorée (Advanced LIGO, 2015).

Hanford, Etat de Washington



Livingstone, Louisiane



Deux détecteurs

- Le 14 septembre 2015, un signal, présentant toutes les caractéristiques d'une onde gravitationnelle, a été détecté à Hanford.
- Le même signal a été détecté presque simultanément à Livingston.
- L'infime décalage temporel (7 millisecondes) séparant ces deux détections correspond au temps mis par l'onde gravitationnelle pour aller de Hanford à Livingston à la vitesse de la lumière.

Deux détecteurs

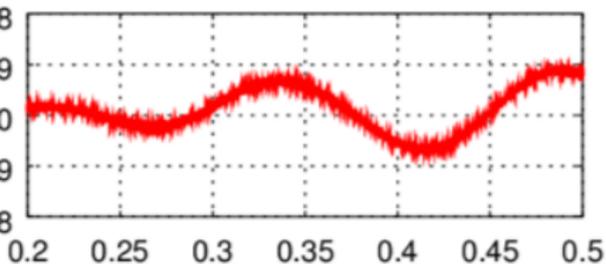
- Le 14 septembre 2015, un signal, présentant toutes les caractéristiques d'une onde gravitationnelle, a été détecté à Hanford.
- Le même signal a été détecté presque simultanément à Livingston.
- L'infime décalage temporel (7 millisecondes) séparant ces deux détections correspond au temps mis par l'onde gravitationnelle pour aller de Hanford à Livingston à la vitesse de la lumière.

Deux détecteurs

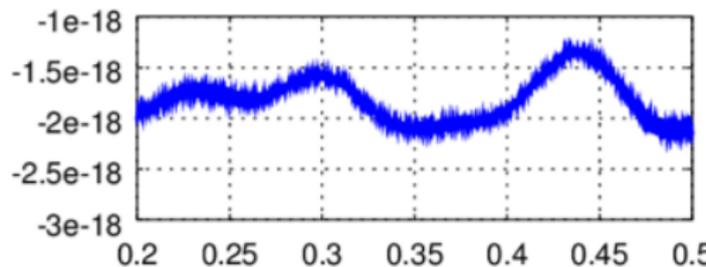
- Le 14 septembre 2015, un signal, présentant toutes les caractéristiques d'une onde gravitationnelle, a été détecté à Hanford.
- Le même signal a été détecté presque simultanément à Livingston.
- L'infime décalage temporel (7 millisecondes) séparant ces deux détections correspond au temps mis par l'onde gravitationnelle pour aller de Hanford à Livingston à la vitesse de la lumière.

Données brutes

Hanford H1: raw data

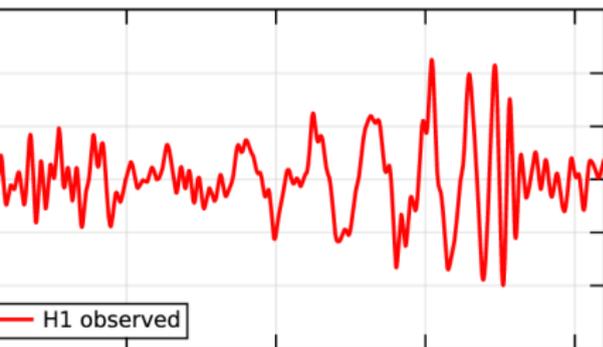


Livingston L1: raw data

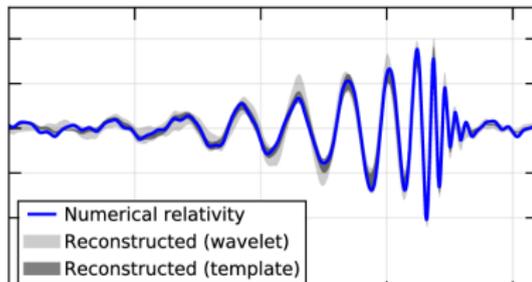
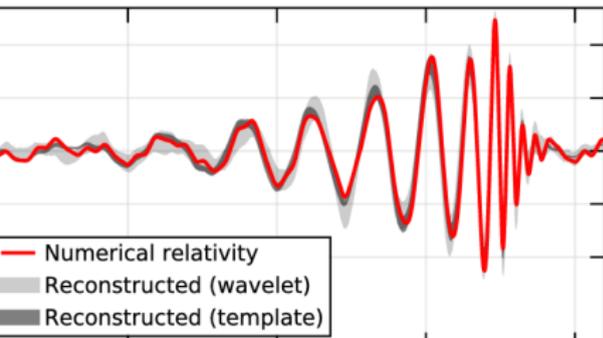
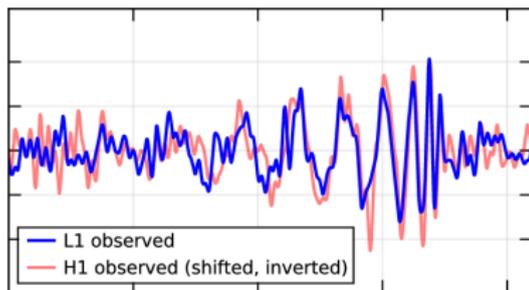


Signaux enregistrés par les deux détecteurs de Ligo durant le passage du chirp

Hanford, Washington (H1)



Livingston, Louisiana (L1)



Ondes gravitationnelles

- Onde gravitationnelle GW150914 enregistrée par les détecteurs LIGO de Hanford (H1, colonne de gauche) et de Livingston (L1, colonne de droite) le 14 septembre 2015 à 09:50:45 UTC. Le signal brut enregistré est la différence des longueurs des deux bras, mesurée par interférométrie laser.
- Les fréquences des séries temporelles sont filtrées pour ne conserver que la bande de fréquences la plus sensible du détecteur, et pour éliminer certaines “lignes spectrales” dues aux instruments de mesure.

Ondes gravitationnelles

- Onde gravitationnelle GW150914 enregistrée par les détecteurs LIGO de Hanford (H1, colonne de gauche) et de Livingston (L1, colonne de droite) le 14 septembre 2015 à 09:50:45 UTC. Le signal brut enregistré est la différence des longueurs des deux bras, mesurée par interférométrie laser.
- Les fréquences des séries temporelles sont filtrées pour ne conserver que la bande de fréquences la plus sensible du détecteur, et pour éliminer certaines “lignes spectrales” dues aux instruments de mesure.

- Par des calculs théoriques basés sur les travaux d'Einstein, Thibault Damour avait établi la forme analytique que devrait avoir une onde gravitationnelle produite par l'effondrement l'une sur l'autre de deux étoiles à neutrons en rotation rapide.
- C'est une fonction du temps définie par

$$s(t) = c|t - t_0|^{-\alpha} \cos(\omega|t - t_0|^\beta + \varphi)$$

où c est une constante, $\alpha = 1/4$, $\beta = 5/8$, $\omega \gg 1$ et t_0 est l'instant de la coalescence des deux étoiles à neutrons.

- Ce signal $s(t)$ est un exemple de signaux modulés en fréquence, un **chirp**.

- Par des calculs théoriques basés sur les travaux d'Einstein, Thibault Damour avait établi la forme analytique que devrait avoir une onde gravitationnelle produite par l'effondrement l'une sur l'autre de deux étoiles à neutrons en rotation rapide.
- C'est une fonction du temps définie par

$$s(t) = c|t - t_0|^{-\alpha} \cos(\omega|t - t_0|^\beta + \varphi)$$

où c est une constante, $\alpha = 1/4$, $\beta = 5/8$, $\omega \gg 1$ et t_0 est l'instant de la coalescence des deux étoiles à neutrons.

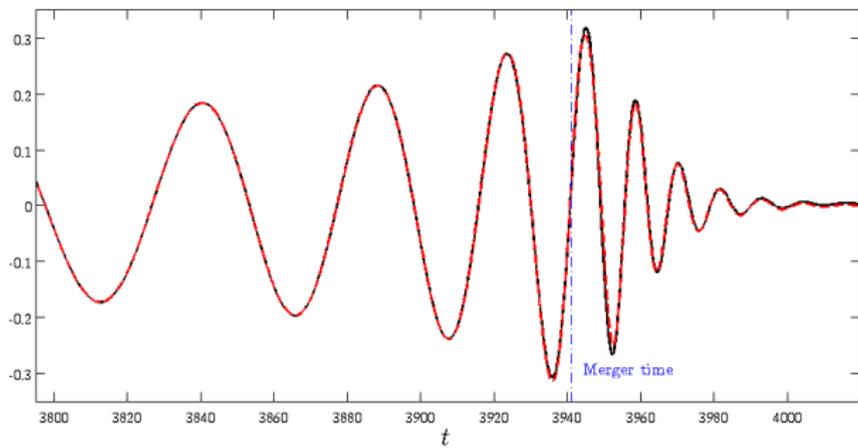
- Ce signal $s(t)$ est un exemple de signaux modulés en fréquence, un **chirp**.

- Par des calculs théoriques basés sur les travaux d'Einstein, Thibault Damour avait établi la forme analytique que devrait avoir une onde gravitationnelle produite par l'effondrement l'une sur l'autre de deux étoiles à neutrons en rotation rapide.
- C'est une fonction du temps définie par

$$s(t) = c|t - t_0|^{-\alpha} \cos(\omega|t - t_0|^\beta + \varphi)$$

où c est une constante, $\alpha = 1/4$, $\beta = 5/8$, $\omega \gg 1$ et t_0 est l'instant de la coalescence des deux étoiles à neutrons.

- Ce signal $s(t)$ est un exemple de signaux modulés en fréquence, un **chirp**.



- Le mot anglais **chirp** signifie le chant modulé d'un oiseau. En traitement du signal il s'agit d'un signal modulé en fréquence.
- Les chirps existent dans la Nature. Ils sont utilisés par les animaux pour s'orienter ou communiquer. Les oiseaux, les grenouilles et les baleines émettent des chirps. Une espèce particulière de chauve-souris (*Eptesicus fuscus*) utilise un sonar basé sur l'émission de chirps.

- Le mot anglais **chirp** signifie le chant modulé d'un oiseau. En traitement du signal il s'agit d'un signal modulé en fréquence.
- Les chirps existent dans la Nature. Ils sont utilisés par les animaux pour s'orienter ou communiquer. Les oiseaux, les grenouilles et les baleines émettent des chirps. Une espèce particulière de chauve-souris (*Eptesicus fuscus*) utilise un sonar basé sur l'émission de chirps.

The hunting of the chirp

- La déformation des longueurs n'est perceptible qu'au moment précis où l'onde gravitationnelle rencontre le détecteur. L'espace-temps se déforme alors pendant quelques secondes.
- La déformation des longueurs des bras de l'interféromètre ne dépasse pas le dix-millième du diamètre du proton. Cette déformation est une fonction $\sigma(t)$ du temps.
- Le signal observé $s(t) = \sigma(t) + r(t)$ n'est pas cette déformation. Il est corrompu par un bruit $r(t)$ (bruit mécanique dont les propriétés statistiques sont connues, bruit thermique et *glitches*).
- Ce bruit $r(t)$ est mille fois plus grand que le signal recherché $\sigma(t)$. Klimentko devait donc détecter un événement qui a toutes les chances de passer totalement inaperçu.

The hunting of the chirp

- La déformation des longueurs n'est perceptible qu'au moment précis où l'onde gravitationnelle rencontre le détecteur. L'espace-temps se déforme alors pendant quelques secondes.
- La déformation des longueurs des bras de l'interféromètre ne dépasse pas le dix-millième du diamètre du proton. **Cette déformation est une fonction $\sigma(t)$ du temps.**
- Le signal observé $s(t) = \sigma(t) + r(t)$ n'est pas cette déformation. Il est corrompu par un bruit $r(t)$ (bruit mécanique dont les propriétés statistiques sont connues, bruit thermique et *glitches*).
- Ce bruit $r(t)$ est **mille fois** plus grand que le signal recherché $\sigma(t)$. Klimentko devait donc détecter un événement qui a toutes les chances de passer totalement inaperçu.

The hunting of the chirp

- La déformation des longueurs n'est perceptible qu'au moment précis où l'onde gravitationnelle rencontre le détecteur. L'espace-temps se déforme alors pendant quelques secondes.
- La déformation des longueurs des bras de l'interféromètre ne dépasse pas le dix-millième du diamètre du proton. Cette déformation est une fonction $\sigma(t)$ du temps.
- Le signal observé $s(t) = \sigma(t) + r(t)$ n'est pas cette déformation. Il est corrompu par un bruit $r(t)$ (bruit mécanique dont les propriétés statistiques sont connues, bruit thermique et *glitches*).
- Ce bruit $r(t)$ est mille fois plus grand que le signal recherché $\sigma(t)$. Klimentko devait donc détecter un événement qui a toutes les chances de passer totalement inaperçu.

The hunting of the chirp

- La déformation des longueurs n'est perceptible qu'au moment précis où l'onde gravitationnelle rencontre le détecteur. L'espace-temps se déforme alors pendant quelques secondes.
- La déformation des longueurs des bras de l'interféromètre ne dépasse pas le dix-millième du diamètre du proton. Cette déformation est une fonction $\sigma(t)$ du temps.
- Le signal observé $s(t) = \sigma(t) + r(t)$ n'est pas cette déformation. Il est corrompu par un bruit $r(t)$ (bruit mécanique dont les propriétés statistiques sont connues, bruit thermique et *glitches*).
- Ce bruit $r(t)$ est mille fois plus grand que le signal recherché $\sigma(t)$. Klimentko devait donc détecter un événement qui a toutes les chances de passer totalement inaperçu.

The hunting of the chirp

- Dès lors les chercheurs se trouvaient devant un choix difficile: utiliser la technique du **filtre adapté** ou un algorithme générique.
- Le **filtre adapté** revient à chercher un petit morceau du signal qui, au réglage près des paramètres, soit identique à la solution trouvée par Thibault Damour. C'est pourquoi cette méthode est appelée paramétrique.
- Dans l'algorithme générique on oublie la solution explicite pour chercher tout ce qui dans le signal a la même allure qu'un chirp. C'est la méthode choisie par Klimenko. C'est elle qui a gagné.

The hunting of the chirp

- Dès lors les chercheurs se trouvaient devant un choix difficile: utiliser la technique du **filtre adapté** ou un algorithme générique.
- Le **filtre adapté** revient à chercher un petit morceau du signal qui, au réglage près des paramètres, soit identique à la solution trouvée par Thibault Damour. C'est pourquoi cette méthode est appelée paramétrique.
- Dans l'algorithme générique on oublie la solution explicite pour chercher tout ce qui dans le signal a la même allure qu'un chirp. C'est la méthode choisie par Klimenko. C'est elle qui a gagné.

The hunting of the chirp

- Dès lors les chercheurs se trouvaient devant un choix difficile: utiliser la technique du **filtre adapté** ou un algorithme générique.
- Le **filtre adapté** revient à chercher un petit morceau du signal qui, au réglage près des paramètres, soit identique à la solution trouvée par Thibault Damour. C'est pourquoi cette méthode est appelée paramétrique.
- Dans l'algorithme générique on oublie la solution explicite pour chercher tout ce qui dans le signal a la même allure qu'un chirp. C'est la méthode choisie par Klimenko. C'est elle qui a gagné.

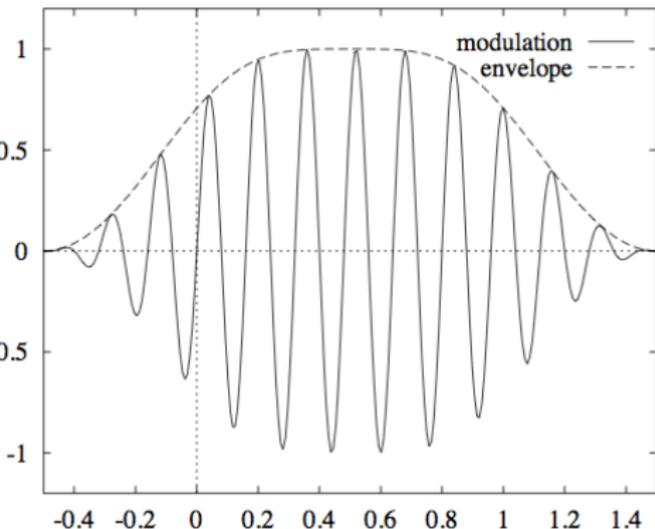
The hunting of the chirp

- Ce qui distingue l'algorithme de Klimenko d'une analyse temps-fréquence traditionnelle est l'introduction d'un paramètre d'échelle, un **zoom** que l'on doit effectuer sur le signal enregistré et convenablement filtré $s(t)$ pour percevoir enfin l'onde gravitationnelle $\sigma(t)$.
- La gamme d'échelles utilisée par Klimenko va de 1 à 10^4 correspondant à des durées d'événements transitoires allant d'une milli-seconde à dix secondes.

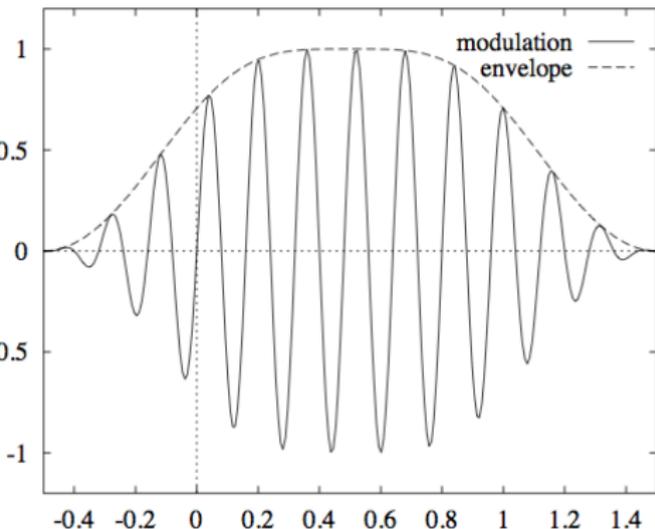
The hunting of the chirp

- Ce qui distingue l'algorithme de Klimenko d'une analyse temps-fréquence traditionnelle est l'introduction d'un paramètre d'échelle, un **zoom** que l'on doit effectuer sur le signal enregistré et convenablement filtré $s(t)$ pour percevoir enfin l'onde gravitationnelle $\sigma(t)$.
- La gamme d'échelles utilisée par Klimenko va de 1 à 10^4 correspondant à des durées d'événements transitoires allant d'une milli-seconde à dix secondes.

L'analyse temps-fréquence a pour but de décomposer un signal (acoustique ou autre) en éléments simples appelés atomes temps-fréquence. Voici un exemple d'atome temps-fréquence.



L'analyse temps-fréquence a pour but de décomposer un signal (acoustique ou autre) en éléments simples appelés atomes temps-fréquence. Voici un exemple d'atome temps-fréquence.



L'analyse temps-fréquence

- Plusieurs bases orthonormées d'atomes temps-fréquence ont été construites par Stéphane Jaffard et al.

- Voici la formule générale

$w_{(k,l)}(t) = g(t - k) \sin[(l + 1/2) \pi t]$, $k, l \in \mathbb{Z}$, où g est une fonction jouant le rôle d'une fenêtre dans l'analyse de Fourier à fenêtre.

- La modulation est fournie par l et elle permet d'être en résonance avec les oscillations du chirp, et donc de le détecter. La valeur de k sert alors à localiser le chirp.
- Ces bases sont l'instrument que Klimenko utilise pour détecter les chirps dans le signal enregistré par LIGO. Mais commençons par des exemples.

L'analyse temps-fréquence

- Plusieurs bases orthonormées d'atomes temps-fréquence ont été construites par Stéphane Jaffard et al.
- Voici la formule générale
 $w_{(k,l)}(t) = g(t - k) \sin[(l + 1/2) \pi t]$, $k, l \in \mathbb{Z}$, où g est une fonction jouant le rôle d'une fenêtre dans l'analyse de Fourier à fenêtre.
- La modulation est fournie par l et elle permet d'être en résonance avec les oscillations du chirp, et donc de le détecter. La valeur de k sert alors à localiser le chirp.
- Ces bases sont l'instrument que Klimenko utilise pour détecter les chirps dans le signal enregistré par LIGO. Mais commençons par des exemples.

L'analyse temps-fréquence

- Plusieurs bases orthonormées d'atomes temps-fréquence ont été construites par Stéphane Jaffard et al.
- Voici la formule générale
 $w_{(k,l)}(t) = g(t - k) \sin[(l + 1/2) \pi t]$, $k, l \in \mathbb{Z}$, où g est une fonction jouant le rôle d'une fenêtre dans l'analyse de Fourier à fenêtre.
- La modulation est fournie par l et elle permet d'être en résonance avec les oscillations du chirp, et donc de le détecter. La valeur de k sert alors à localiser le chirp.
- Ces bases sont l'instrument que Klimenko utilise pour détecter les chirps dans le signal enregistré par LIGO. Mais commençons par des exemples.

L'analyse temps-fréquence

- Plusieurs bases orthonormées d'atomes temps-fréquence ont été construites par Stéphane Jaffard et al.
- Voici la formule générale
 $w_{(k,l)}(t) = g(t - k) \sin[(l + 1/2) \pi t]$, $k, l \in \mathbb{Z}$, où g est une fonction jouant le rôle d'une fenêtre dans l'analyse de Fourier à fenêtre.
- La modulation est fournie par l et elle permet d'être en résonance avec les oscillations du chirp, et donc de le détecter. La valeur de k sert alors à localiser le chirp.
- Ces bases sont l'instrument que Klimenko utilise pour détecter les chirps dans le signal enregistré par LIGO. Mais commençons par des exemples.

L'analyse temps-fréquence

- Les motivations de Wigner, Gabor et Wilson n'étaient pas la détection des ondes gravitationnelles, mais (1) la mécanique quantique, (2) l'analyse du signal de parole et (3) la théorie de la renormalisation.
- Les idées de Gabor ont été amendées par Francis Low et Roger Balian (théorème de Low-Balian), puis reprises et améliorées par Henrique Malvar et par Martin Vetterli. Malvar et Vetterli ont élaboré la **Modified discrete cosine transform** utilisée dans le **son numérique Dolby**.

L'analyse temps-fréquence

- Les motivations de Wigner, Gabor et Wilson n'étaient pas la détection des ondes gravitationnelles, mais (1) la mécanique quantique, (2) l'analyse du signal de parole et (3) la théorie de la renormalisation.
- Les idées de Gabor ont été amendées par Francis Low et Roger Balian (théorème de Low-Balian), puis reprises et améliorées par Henrique Malvar et par Martin Vetterli. Malvar et Vetterli ont élaboré la **Modified discrete cosine transform** utilisée dans le **son numérique Dolby**.

L'analyse temps-fréquence

- Les algorithmes proposés par Wilson ont été précisés et validés par **Stéphane Jaffard** et ses collaborateurs (I. Daubechies et J-L. Journé).
- Ce sont les travaux de Jaffard qui ont été utilisés par Klimentko et ont contribué à la détection des ondes gravitationnelles.
- Klimentko a réglé l'un des algorithmes de Jaffard pour améliorer la détection des **chirps** et d'autres signaux de même nature.

L'analyse temps-fréquence

- Les algorithmes proposés par Wilson ont été précisés et validés par **Stéphane Jaffard** et ses collaborateurs (I. Daubechies et J-L. Journé).
- Ce sont les travaux de Jaffard qui ont été utilisés par Klimenko et ont contribué à la détection des ondes gravitationnelles.
- Klimenko a réglé l'un des algorithmes de Jaffard pour améliorer la détection des chirps et d'autres signaux de même nature.

L'analyse temps-fréquence

- Les algorithmes proposés par Wilson ont été précisés et validés par **Stéphane Jaffard** et ses collaborateurs (I. Daubechies et J-L. Journé).
- Ce sont les travaux de Jaffard qui ont été utilisés par Klimenko et ont contribué à la détection des ondes gravitationnelles.
- Klimenko a réglé l'un des algorithmes de Jaffard pour améliorer la détection des **chirps** et d'autres signaux de même nature.



- Ouvrir Google. Ensuite entrez simplement: LIGO.
- Ou bien, entrez: Sergey Klimenko.
- Pour les aficionados:
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/363/1/012032/meta>
- Bonnes lectures!

- Ouvrir Google. Ensuite entrez simplement: LIGO.
- Ou bien, entrez: Sergey Klimenko.
- Pour les aficionados:
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/363/1/012032/meta>
- Bonnes lectures!

- Ouvrir Google. Ensuite entrez simplement: LIGO.
- Ou bien, entrez: Sergey Klimenko.
- Pour les aficionados:
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/363/1/012032/meta>
- Bonnes lectures!

- Ouvrir Google. Ensuite entrez simplement: LIGO.
- Ou bien, entrez: Sergey Klimenko.
- Pour les aficionados:
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/363/1/012032/meta>
- Bonnes lectures!