

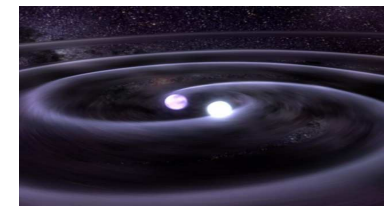
Détection et caractérisation des ondes gravitationnelles par l'interféromètre spatial LISA



Observatoire
de la CÔTE d'AZUR



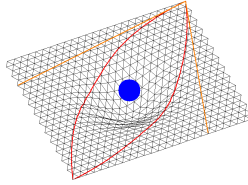
[N. Douillet]



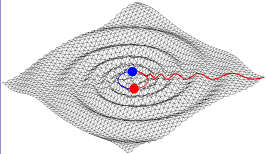
I Ondes gravitationnelles et relativité

Depuis la théorie de la relativité générale d'Einstein, nous savons que la gravitation est une force engendrée par la géométrie de l'espace-temps qui se courbe en présence de matière.

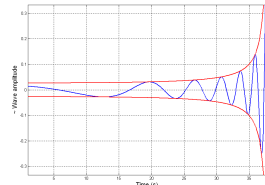
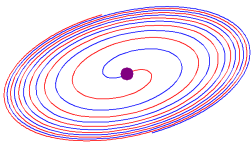
Le champ gravitationnel est dynamique: il se propage dans l'espace à la vitesse de la lumière ($c = 300\,000\,000\text{ km/s}$). D'où la notion d'ondes de gravitation qui consistent en une déformation propagative de la métrique de l'espace-temps.



De telles ondes sont émises par des couples de corps célestes massifs animés d'une grande vitesse de rotation, telles que des binaires d'étoiles à neutrons ou de trous noirs.



Ils commencent par orbiter l'un autour de l'autre suivant une trajectoire spirale en émettant un rayonnement gravitationnel. Cette dissipation donne lieu à une perte d'énergie potentielle induisant ainsi une décroissance orbitale annonciatrice de la fusion des deux astres.

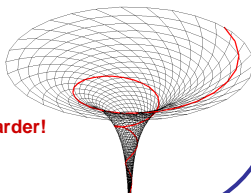


L'amplitude et la fréquence de l'onde émise sont fonctions exponentielles/puissances du temps. L'onde est transverse: la déformation induite se produit dans la direction orthogonale au plan de rotation de la binaire. Cette déformation est difficile à détecter car très faible: 10^{-21} m/m . La physique moderne n'en possède que des preuves indirectes.

L'enjeu est de les détecter directement pour les caractériser et identifier des événements cosmologiques majeurs telles que les coalescences de trous noirs super-massifs, invisibles pour les télescopes actuels.

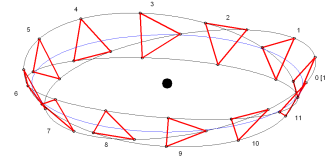
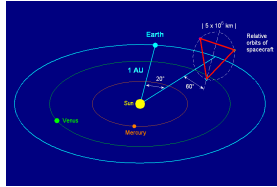
Ceci ouvrira bientôt une nouvelle fenêtre d'observation et de compréhension de notre univers :

«écouter» ses vibrations en plus de le regarder!



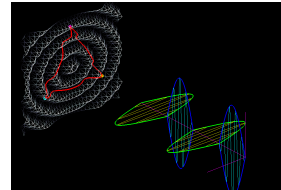
II LISA : Principe de fonctionnement

LISA (Antenne Interférométrique Laser Spatiale) est un projet conjoint ESA-NASA, prévu pour être lancé en 2020, et dont l'objectif est la détection des ondes gravitationnelles basses fréquences.

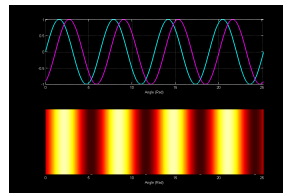


Le vide spatial permet de s'affranchir des perturbations (bruits) terrestres et garantit une sensibilité de mesure maximum. La 'constellation' LISA consiste en **trois satellites** disposés en **triangle équilatéral**, sur orbites héliocentriques. Elle suit la Terre, décalée d'environ 20 jours.

La lumière se propage suivant un principe de moindre espace-temps. Les rayons lumineux suivent les géodésiques (chemins les plus courts) de l'espace. Au passage d'une onde gravitationnelle, l'espace se courbe localement : les géodésiques ne sont alors plus des lignes droites.



La distance, et donc le temps de parcours de la lumière laser d'un satellite à son voisin est donc modulé.



En mesurant cette modulation du temps de propagation il est possible d'estimer la variation de distance subit par chacun des trois 'bras' de LISA au passage de l'onde; on en déduit ses paramètres.

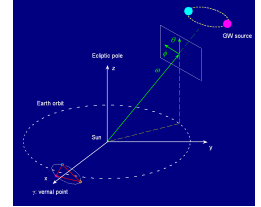
La mesure s'effectue par **interférométrie** : en recombinant la lumière laser provenant du satellite voisin avec celle du laser local de référence on obtient une figure d'interférence (alternance de franges claires et sombres)

Lorsque deux ondes lumineuses arrivent simultanément sur un détecteur optique (photodiode), elles créent de telles interférences lumineuses, selon qu'elles soient en phase (constructives: frange claire) ou en opposition de phase (destructives: frange sombre). L'intensité lumineuse mesurée permet de déduire le déphasage entre les faisceaux lasers, qui est lui-même fonction de la variation de distance due au passage de l'onde gravitationnelle.

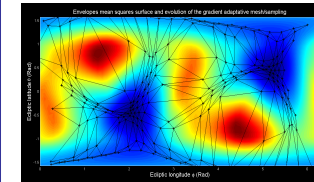
III Analyse des données de l'onde

Une onde gravitationnelle se définit analytiquement par une expression mathématique dépendant d'une dizaine de paramètres dont les principaux sont:

- sa fréquence
- son amplitude
- ses coordonnées de provenance géospaciales (latitude, longitude).



La communauté scientifique internationale travaille actuellement avec des modèles théoriques d'ondes et de bruits, afin de simuler numériquement les signaux de LISA. Le but est de se préparer au futur travail d'analyse des données de LISA, tâche aussi intéressante qu'ardue.



L'analyse des données de LISA est du type « problème inverse » : retrouver les paramètres d'entrée à partir des mesures.

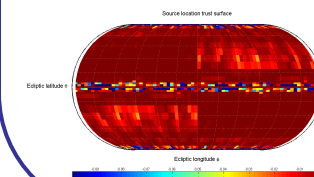
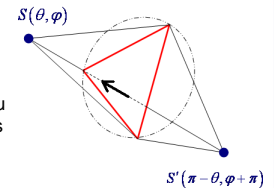
Connaissant un modèle théorique de l'onde, on peut -algorithmiquement- en faisant varier les paramètres chercher ceux qui produiront le

maximum de corrélation entre les courbes des données mesurées et du modèle théorique.

Nous échantillons d'abord l'espace des paramètres par un maillage triangulaire puis nous faisons évoluer ces points en fonction du gradient (pente) local: on obtient ainsi d'avantage de points là où la correspondance est la meilleure (zones bleues sur la figure). On converge ensuite vers le maximum absolu par un algorithme classique d'optimisation.

Les nombreuses symétries du système (LISA) se retrouvent dans l'espace des paramètres:

Le jeu de paramètres correspondant au point obtenu est alors une **estimation** (perturbée par le bruit) des **caractéristiques de la source**.



A l'issue de cette thèse, nous avons en particulier eu l'occasion d'établir cette **carte de sensibilité de LISA** en fonction des coordonnées de la source.