



Gravitational waves / Ondes gravitationnelles

Foreword

First-generation gravitational-wave detectors LIGO and Virgo have been in operation in recent years and have provided the first scientific results in this new domain: gravitational-wave astronomy.

The history of gravitational-wave (GW) astronomy is actually not so recent. We have to go back to the early sixties and remember the pioneer work of Joe Weber. Although the first detector he built was based on a totally different concept, he first proposed the Michelson interferometer as a possible basis for a sensitive detector of gravitational waves. This proposal has been published independently by two Russian physicists, Gertsenshtein and Pustovoit in 1963.

The real start came in 1972 when Rai Weiss performed the first deep feasibility study of a large interferometric detector while Forward was building the first prototype. Other prototypes were then built in Glasgow, Garching, and at Caltech.

Thanks to the progress in particular in laser and optics technologies, the idea of a kilometre-long interferometer with suspended mirrors became a realistic one. Several construction proposals then flourished around the world and led in particular to the birth of the US LIGO and Italian–French Virgo collaborations at the end of the eighties, soon followed by the funding from respective institutions (NSF and CNRS–INFN).

The sensitivity goal of these instruments was first commanded by the orders of magnitude given by astrophysics concerning promising sources of gravitational waves such as compact binary inspirals or gravitational supernovae. Despite there was a large uncertainty either for the rates or for the expected amplitudes, it was commonly admitted that gravitational-wave detectors should be at least sensitive to amplitudes $h \sim 10^{-21}$ for typical signal frequencies around a few hundreds of hertz.

The construction and then the commissioning of such new instruments took a while and the first long scientific data taken by LIGO interferometers with more or less design sensitivity started in 2005. Virgo joined the race in 2007 and the three detectors took data together in coincidence during several months. This can be seen as the beginning of a worldwide collaboration, in fact governed by a specific Motion of Understanding and implying a full data sharing and a concerted planning for runs and upgrades, as well as joint data analysis and joint publications. The second joint data taking took place in 2009 and 2010. The interferometers are now being upgraded to their advanced version (aLIGO and AdV). The detector network should be completed by the Japanese KAGRA interferometer. The goal of aLIGO and AdV is basically a gain in sensitivity of about one order of magnitude over the entire bandwidth. With such a gain the volume of the observable Universe should increase by a factor 1000, as well as the rate of detected events. The chance of detecting the first gravitational-wave signal will then shift from marginal to highly probable. After completion of the upgrades and a new round of commissioning, it is expected that the scientific data takings will resume in 2015.

In parallel, the construction and operation of LIGO and Virgo has motivated a lot of theoretical work concerning the modelling of gravitational-wave sources. One goal of course is to predict waveforms as accurately as possible in order to ease data analysis of interferometric detectors for detection and extraction of astrophysical parameters as well.

Indeed in particular when the gravitational-wave signal is well predicted, standard signal analysis methods (the so-called “matched filtering”) can be used to recover it in the noises of detectors. It is then of great importance if robust “templates” can be provided by theoretical and numerical groups.

In particular, impressive progresses have been made in the last years in the simulation of binary black hole mergers on the one hand and in the modelling and simulation of gravitational collapses of massive stars on the other hand.

The first simulations of black hole collisions appeared as a real tour de force. Different groups using different approaches and numerical methods managed to find close results and we have now a pretty clear picture of the phenomenon including the emission of gravitational waves.

The description of gravitational collapse of a massive (but less than ~ 100 solar masses) is not less difficult: it must ideally mix relativistic hydrodynamics equations in 3D and microphysics. At the beginning, people were concentrating on the extraction of gravitational waves during the prompt collapse itself, but the core-collapse is not the end of the story as subsequent evolution of the proto-neutron star can lead to substantial amounts of gravitational waves via different plausible mechanisms.

With the end of the first-generation interferometers and the progress in source modelling, and waiting for the promises of next detectors aLIGO, AdV and KAGRA to come, we think it is the right moment to give an overview of the domain, from sources and their modelling to the instruments and their last scientific results.

This dossier of the *Comptes rendus Physique* tries to present an exhaustive review of all these items. B.S. Sathyaprakash first makes a review of the main known sources of gravitational waves. Then P.R. Saulson presents the history, the principles and the state of the art of interferometric GW detectors. U. Sperhake, E. Berti and V. Cardoso describe the impressive results of numerical relativity and give recent results about black hole binaries simulations and GW estimations.

Kei Kotake then presents an exhaustive up-to-date review of gravitational supernovae, one of the emblematic sources of GW. M.-A. Bizouard and M.-A. Papa unfold the results obtained with the LIGO and Virgo data takings for the search of GW. J.-Y. Vinet finally gives a brief overview of the principles of a space mission (eLISA/NGO) for detecting low-frequency GW. Note that a test mission LISAPathFinder should be launched soon, with the goal of testing the technical choices for the full mission.

Gravitational waves are still undetected by terrestrial instruments, but it is only a matter of patience before the first direct detection, maybe by aLIGO and AdV.

Avant-propos

Les détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles (OG) LIGO et Virgo ont été en opération ces dernières années et ont fourni les premiers résultats scientifiques dans ce nouveau domaine qu'est l'astronomie des ondes gravitationnelles.

L'histoire de la recherche des OG remonte en fait au début des années 60 avec le travail de pionnier de Joe Weber. Bien que le premier détecteur qu'il ait construit soit basé sur un concept très différent, c'est lui qui proposa l'interféromètre de Michelson comme possible détecteur d'OG. Cette proposition a été publiée indépendamment par deux physiciens russes, Gertsenshtein et Pustovoit, en 1963.

Le véritable départ date de 1972 quand Rai Weiss entreprit la première étude de faisabilité d'un grand détecteur interféromètre pendant que Forward construisait le premier prototype. D'autres prototypes furent ensuite construits à Glasgow, Garching et Caltech.

Grâce aux progrès en particulier des sources laser et des technologies optiques, l'idée d'un détecteur kilométrique avec des miroirs suspendus devint réaliste. Plusieurs détecteurs furent alors proposés dans le monde, en particulier aux États-Unis, avec LIGO, et en France et en Italie, avec Virgo, à la fin des années 1980. Le feu vert des institutions respectives (NSF et CNRS-INFN) pour leur construction suivit rapidement ces *proposals*.

La sensibilité visée par ces instruments était dictée par les prédictions astrophysiques concernant les sources prometteuses d'OG comme les supernovae gravitationnelles et les coalescences de binaires d'étoiles compactes. Malgré l'incertitude sur les taux d'évènements ou les amplitudes attendues, il était admis par la communauté qu'un détecteur d'OG devait être sensible à des amplitudes d'au moins $h \sim 10^{-21}$ pour des signaux de fréquences aux alentours de quelques centaines de Hz.

La construction et la mise au point de ces détecteurs d'un type nouveau prit du temps et la première longue prise de données par les interféromètres de LIGO (à plus ou moins la sensibilité de design) commença en 2005. Virgo se joignit à LIGO en 2007 et les trois détecteurs prirent des données de concert pendant plusieurs mois. Ceci peut être vu comme le début d'une collaboration mondiale, en fait gouvernée par un *Motion of Understanding* spécifique, impliquant un partage total des données, un planning concerté pour les améliorations des détecteurs et les prises de données aussi bien que des groupes de travail communs et des publications communes. La seconde prise de données commune a eu lieu en 2009 et 2010. Les détecteurs sont désormais en phase d'amélioration vers la seconde génération (aLIGO et AdV pour Advanced LIGO et Advanced Virgo). Le réseau de détecteurs devrait être complété par l'interféromètre japonais KAGRA (anciennement LCGT). Le but de aLIGO et AdV est de gagner un ordre de grandeur en sensibilité sur toute la bande passante. Avec un tel gain, le volume d'Univers observable devrait augmenter d'un facteur 1000, tout comme le taux d'évènements astrophysiques. La chance de détecter le premier évènement d'OG passera donc de marginale à très probable ! Mais pas avant 2015, date attendue pour les prochaines prises de données scientifiques.

En parallèle, la construction et l'opération de LIGO et Virgo a suscité de nombreux développements concernant les modèles de sources d'ondes gravitationnelles. Un des buts est évidemment de prédire des formes d'ondes aussi précises que possible pour faciliter l'analyse de données et l'extraction des paramètres astrophysiques pertinents. En effet, en particulier quand le signal d'OG est bien prédit, des techniques standard de traitement du signal (filtrage adapté) peuvent être utilisées pour extraire le signal du bruit. Il est donc crucial que des études théoriques et numériques puissent fournir des « patrons » de forme d'ondes pour l'analyse des données.

Des progrès impressionnants ont ainsi eu lieu ces dernières années pour la simulation de fusion de couples de trous noirs ou pour la simulation d'effondrements gravitationnels d'étoiles massives. Les premières simulations de collisions de trous noirs sont un véritable tour de force. Divers groupes utilisant des approches et des méthodes numériques différentes ont trouvé des résultats concordants et une vision assez claire du phénomène astrophysique, incluant l'émission d'OG, a vu le jour. La description des supernovae gravitationnelles n'est pas moins difficile. Elle doit en toute rigueur mélanger l'hydrodynamique relativiste en 3D et la microphysique (en particulier le transport des neutrinos). Au début, seule l'extraction

de l'OG lors de l'effondrement proprement dit était considérée, mais on s'est rendu compte ensuite que l'évolution de la protoétoile à neutrons pouvait aussi produire des OG via différents mécanismes.

Avec la fin de la première génération de détecteurs interférométriques et les progrès dans les simulations des sources, nous pensons que le moment est propice pour proposer une vue d'ensemble du domaine, depuis les sources d'OG et leur modélisation jusqu'aux instruments et les derniers résultats des campagnes d'observation.

Ce dossier des *Comptes rendus Physique* essaye de présenter une revue exhaustive de tous ces points. B.S. Sathyaprakash commence par une revue des principales sources d'OG. Ensuite, P.R. Saulson présente un historique, puis les principes et enfin l'état de l'art des détecteurs interférométriques d'OG. Puis U. Sperhake, E. Berti et V. Cardoso décrivent les progrès impressionnants en relativité numérique et donnent les résultats récents concernant les simulations de trous noirs binaires et les estimations d'émission d'OG.

Kei Kotake présente ensuite une revue exhaustive des supernovae gravitationnelles, l'une des sources emblématiques d'ondes gravitationnelles. M.-A. Bizouard et M.-A. Papa exposent les principaux résultats des campagnes d'observation de LIGO et Virgo. J.-Y. Vinet, enfin, fait une revue des principes d'une mission spatiale (eLISA/NGO) destinée à observer les OG de basse fréquence. Notons qu'une mission de test, LISAPathFinder, dont le but est de tester les choix technologiques de eLISA/NGO, devrait être lancée prochainement.

Au jour d'aujourd'hui, les ondes gravitationnelles n'ont toujours pas été détectées directement, mais ce n'est qu'une question de temps, avec, peut-être, les futures observations de aLIGO et AdV.

Guest Editor/Rédacteur invité

Patrice Hello

Laboratoire de l'accélérateur linéaire, IN2P3, Orsay, France

E-mail address: hello@lal.in2p3.fr

Available online 9 February 2013