



## Observation of black holes and extreme gravitational events/Observation des trous noirs et des évènements gravitationnels extrêmes

## Foreword

Among the most intriguing objects in modern physics, Black Holes (BH in the following) keep a solid position. The field covered by their physics ranges from powering quasars and other active galactic nuclei, to providing new insights into quantum gravity. Since the popularization of the name and concept of *Black Hole* by John Archibald Wheeler in the late sixties, the fascination exercised by the bothersome properties of this strange object, predicted by physics but elusive when one wants to observe it, has not ceased to grow. First derived by Schwarzschild as an inescapable solution of the equations of General Relativity – only a few weeks after they have been published by Einstein in 1915 – the concept of what was not yet a *black hole* but rather a puzzling singularity, first experienced quite a long idle childhood during fifty years. The community of physicists, with surprisingly Einstein himself at its head (he used the term *disaster* to qualify the horizon of a BH), could hardly accept the reality of “*a magic circle which no measurement can bring us inside*”, as stated by Sir Arthur Eddington. During this long youth of the paradigm, there were meanwhile some fundamental progress: the works of Chandrasekhar (1931) – and independently of Landau (1932) – on an upper limit to the mass which a cold star could have whilst continuing to support itself against gravity, and the computation of Snyder and Oppenheimer in 1939 on the “continuous gravitational contraction”. However, it is only in the late sixties that the true fame of the black hole concept began, both among physicists and the public. This was linked, on one hand, to the discovery of Quasars and of their incredibly high luminosity,<sup>1</sup> and, on the other hand, to the work of a few theoreticians (among them: Carter, Wheeler, Hawking, Ellis) who demonstrated the troubling simplicity of the parameter space describing a black hole (“*a black hole has no hair*”, as picturesquely formulated by John Wheeler, to summarize that mass, charge and spin characterize fully a BH) and the close relationship of its properties with classical thermodynamics.

However, the luminosity of Quasars constitutes only an observational clue not a definite proof, whatever the solidity of the theoretical grounds on which the BH paradigm has been built. Performing unquestionable observations demonstrating that BH do exist in the Universe became then the quest a Holly Grail for many astronomers around the world, during several decades.<sup>2</sup>

When I was asked, months ago, if I would accept to be the invited Editor-in-Chief of a special issue of the Comptes Rendus dealing with *Observations of black holes and extreme gravitational events*, my first reaction was surprise since I am clearly not a member of the small club of theoreticians who manipulate with ease the tools pertaining to the physics of these strange objects. Actually, I am rather the kind of astronomer who develops instruments and uses them at telescopes to practise astrophysics through observational constraints. What prompted me to accept the task of Editor is that, as an observer, I crossed the road of Black Holes several times in the last few years; indeed, Active Galactic Nuclei – the fainter brothers of quasars – are among the objects I use to study thanks to high angular resolution techniques, and the BH, at the centre of the Milky Way, our galaxy, is the favourite targets of the European team I belong to, who have lately obtained some spectacular results.

<sup>1</sup> Retrieving the potential energy of matter reaching the horizon of a super-massive black hole (a few billions of the solar mass) was proposed by Rees and Van del Bel as an efficient mechanism to convert mass in energy and thus account for the huge luminosity ( $10^{40}$  W) of these extremely compact objects: in principle, it allows one to extract up to  $1/2 mc^2$ , i.e. a yield of 50%, compared to the 1% of nuclear fusion.

<sup>2</sup> The reader familiar with French language must not miss a remarkable and captivating panorama of the BH paradigm, written by one of the best worldwide specialists of the question, Jean-Pierre Luminet: this is *Le destin de l'univers – trous noirs et énergie sombre*, recently published by Fayard. Several historical quotations in this foreword have been found in this superb book.

At a first glance, considering strictly this well deserved nickname, *Black Hole*, any attempt to observe such an object may appear as a paradox, as we obviously cannot *see* black holes. “*The true mystery of the world is the visible, not the invisible*” wrote Oscar Wilde; in the articles that follow, we will see that recent years have brought much evidence, based on theoretical aspects, but even more on observational results, that the barrier is definitely not a true one. A first key is the gravitational signature left by a BH on the dynamics of its neighbours (stars, gas): it should give a solid set of constraints, provided that the probed distance scale is pertinent with respect to the horizon of the considered BH. The need for an excellent angular resolution then becomes crucial. Another key is to examine the matter that a BH swallows. This matter forms an accretion disk – generally associated with a relativistic jet – which, due to viscous dissipation, becomes hot enough to emit energetic radiation as gamma and X-rays, or at longer wavelengths that are then shifted towards the infrared domain through an inverse Compton interaction on the plasma. These, in turn, can be detected, and provide us with information on the environment and energetics of the BH. A third key for success in this paradoxical quest of observing BH, is to look for gravitational waves since, as members of the club of extremely dense objects, BH are choice candidates for producing these waves.

In the seven papers that follow, the reader will meet those different aspects of the observation of BH and extreme gravitational events, in a purely astrophysical context (the question of the quantum BH and its peculiar physics is not approached in this issue). A first part gathers several reviews of recent observational evidences of the presence of BH: this concerns the class of stellar BH called micro-quasars, as well as the very massive BH found at the heart of galaxies, with a peculiar emphasis on the closest one which is sitting at the centre of our Milky Way. In a second part, some recent theoretical developments in the field of prediction/interpretation of black hole dynamics and emission are discussed. The volume ends with a review of the new machines that are currently in construction, or in project, to tackle the problem of gravitational wave detection.

- In the article *Microquasars*, F. Mirabel delivers the most recent views and results on this peculiar class of stellar BH. The collapse of the heart of a massive star leads to the formation of a neutron star, but when the core is beyond  $3 M_{\odot}$ , even the repulsive forces of the degenerated matter (electrons and neutrons) cannot resist the huge pressure of gravity and a stellar black hole eventually forms. Microquasars are such compact objects (stellar-mass BH or neutron stars) found in our Galaxy, with the peculiarity that they exhibit several of the phenomena seen in Quasars, their much brighter cousins. They are now considered as laboratories to understand the physics of several classes of other astronomical objects: (a) relativistic jets and their coupling with accretion disk; (b) ultraluminous X-ray sources observed in external galaxies; (c) gamma-ray bursts of long duration; (d) test of General Relativity in the limit of the strong gravitational fields. This is today a very active area, interesting the high energy physicist as well as the astrophysicist.
- In the article *Supermassive black holes in local galaxies*, R. Bender and R.P. Saglia show how the long standing question of the suspected presence of super massive black holes (typically  $10^9$  solar masses) at the very centre of galaxies, made recently wonderful progress thanks to the combination of Doppler velocity measurements and high angular resolution imaging. Those SMBH are indeed there, in probably all elliptical galaxies or bulges, and their mass correlates closely with the bulge mass. On the other hand, pure disk galaxies most generally do not exhibit SMBH. The inescapable conclusion is that there is a direct link between SMBH and the formation and evolution of galaxies in the Universe. The mechanisms that can explain this link are discussed, with a clear inclination to put forward the regulating feedback on star formation exercised by the powerful SMBH.
- In the article *The Galactic Centre at infrared wavelengths: towards the highest spatial resolution*, Y. Clénet, D. Rouan, P. Léna, E. Gendron and F. Lacombe review the very recent set of outstanding results on Sgr A\*, the BH at the Galactic Center, obtained at infrared wavelengths: they have definitely demonstrated that our Galaxy does harbour at its centre a super-massive BH of  $3.6 \times 10^6 M_{\odot}$ . Adaptive optics, which allows diffraction-limited infrared observations and enhanced sensitivity, is actually the major breakthrough, that has lead to orbital measurements of stars gravitationally bound to the BH, and to the discovery of flashes emitted by the plasma in the accretion disk, when swallowed by the monster. Showing how the superb performances of future facilities will soon allow us to explore the physics of extreme gravity concludes the paper.
- In the article *High energy activity of the super-massive black hole at the Galactic Center*, A. Goldwurm also considers the BH at the Center of the Milky Way, but now from the perspective of high energy tracers. He shows that it is only recently that the new generation of telescopes, have succeeded in detecting high energy radiation from the matter accreting on the BH. Special emphasis is put on the discovery of X-ray flares with the

satellites Chandra and XMM-Newton, and on the gamma-ray (soft and TeV) emission detected with the satellite INTEGRAL and the ground-based telescope HESS.

- In the article *Physics of accretion flows around compact objects*, J.P. Lasota addresses the physics and modeling of accretion onto black holes and neutron stars. Thanks to constraints set by specific characteristics of quiescent Soft X-ray transients, he reviews the status of the non-standard objects, suggested as alternatives to BH. The paper is concluded with new results and research paths about the nature of the jet activity in Active Galactic Nuclei.
- In the article *General relativistic dynamics of compact binary systems*, L. Blanchet details one of the tools recently developed by theoreticians to produce high-accuracy templates for the future data analysis of the gravitational-wave detectors LIGO and VIRGO. One important result is the establishment of the equations of motion of compact binaries in a post-Newtonian framework. The stability of the innermost circular orbits is discussed in the second part.
- In the article *Optical detection of gravitational waves*, J.-Y. Vinet, introduces the basis of gravitational wave antennas, both in the high frequency domain (ground based detectors) and in the low frequency domain (space antenna). He reviews then the status of the systems presently in development, their main technological challenges and the fundamental limits.

I hope that the reader will have the same pleasure that I had when reading these different articles. They give a precise and synthetic view of a field where authentic breakthroughs have been made recently and where the next steps, promised by the future generation of instruments, are extremely exciting. Obviously, the era of observational physics of Black Holes has definitely begun.

## *Avant-propos*

*Parmi les objets les plus intrigants de la physique moderne, les trous noirs (TN dans ce qui suivra) détiennent une place de choix. Leur champ d'intérêt couvre potentiellement un immense domaine, depuis le cœur ultra-lumineux des Quasars lointains et autres noyaux actifs de galaxies, jusqu'aux nouvelles perspectives ouvertes en gravité quantique.*

*Commencée vers la fin des années 60, avec la popularisation par John Archibald Wheeler de la dénomination Trou Noir et du concept qui y est attaché, la fascination exercée par les propriétés troublantes de cet objet étrange, prédit par la physique mais insaisissable quand il s'agit de l'observer, n'a cessé de croître. D'abord déduit par Schwarzschild comme une solution inévitable des équations de la Relativité générale – seulement quelques semaines après qu'elles aient été publiées par Einstein en 1915 – le concept de ce qui n'était pas encore un Trou Noir mais plutôt une singularité dérangeante, vécut une jeunesse plutôt discrète durant une cinquantaine d'années. La communauté des physiciens, avec étonnement à sa tête Einstein lui-même (il a employé le mot de désastre pour qualifier l'horizon d'un TN), pouvait difficilement accepter la réalité d'un « cercle magique à l'intérieur duquel aucune mesure peut nous conduire », comme l'a écrit Sir Arthur Eddington. Pendant cette longue adolescence du paradigme, des progrès fondamentaux se font pourtant, comme les travaux de Chandrasekhar (1931) – et indépendamment de Landau (1932) – sur la limite supérieure de masse d'une étoile froide qui doit soutenir sa propre gravité, et les calculs de Snyder et d'Oppenheimer en 1939 sur la « contraction gravitationnelle continue ». Ce n'est que vers la fin des années 60 que commence la véritable renommée du concept du Trou Noir, tant au sein de la communauté des physiciens que du public. On le doit d'une part à la découverte des Quasars et de leur luminosité incroyablement élevée,<sup>3</sup> et d'autre part au travail de quelques théoriciens (entre autres : Carter, Wheeler, Hawking, Ellis) qui démontrent l'étonnante simplicité de l'espace des paramètres décrivant un trou noir (« un trou noir n'a pas de poils », pour reprendre l'expression pittoresque de John Wheeler pour résumer que seuls la masse, la charge et le spin caractérisent complètement un TN) et le lien étroit de ses propriétés avec la thermodynamique classique.*

<sup>3</sup> Récupérer l'énergie potentielle de la matière atteignant l'horizon d'un trou noir supermassif (quelques milliards de fois la masse solaire) a été proposé par Rees et Van del Bel comme un mécanisme efficace pour convertir de la masse en énergie et ainsi expliquer l'énorme luminosité ( $10^{40}$  W) de ces objets extrêmement compacts : en principe, ce mécanisme permet d'extraire une énergie atteignant  $1/2 mc^2$ , c'est à dire un rendement de 50%, à comparer au 1% de la fusion nucléaire.

*L'indice observationnel que constitue la luminosité des quasars n'est cependant pas une preuve irréfutable, quel que soit la solidité des bases sur lesquelles la théorie du TN a été élaborée. L'obtention d'observations incontestables démontrant que les TN existent effectivement dans l'univers devient alors, durant plusieurs décennies, la quête d'un nouveau Graal pour beaucoup d'astronomes dans le monde.*<sup>4</sup>

*Il y a quelques mois, quand m'a été demandé si j'accepterais d'être rédacteur en chef invité d'une numéro spécial des Comptes Rendus traitant du sujet Observations des trous noirs et d'événements gravitationnels extrêmes, ma première réaction a été la surprise puisque je n'appartiens pas au club restreint des théoriciens qui manipulent couramment les outils de la physique propre à cet étrange objet. Je fais plutôt partie des astronomes qui développent des instruments, les utilisent sur les télescopes et pratiquent l'astrophysique par le biais de l'observation. Ce qui m'a cependant incité à accepter cette responsabilité de rédacteur est le fait qu'en tant qu'observateur, j'ai plusieurs fois croisé la route des TN dans les années récentes. En effet, les noyaux actifs de galaxies, les petits frères plus chétifs des quasars, sont parmi les objets que j'étudie grâce aux techniques de haute résolution angulaire, et le TN au centre de notre galaxie constitue la cible favorite de l'équipe européenne à laquelle j'appartiens, et qui a obtenu plusieurs résultats assez spectaculaires récemment.*

*Au premier regard, si on prend à la lettre le surnom bien mérité de Trou Noir, toute tentative pour observer un tel l'objet peut apparaître comme paradoxale : on ne peut évidemment pas voir un trou noir. « Le vrai mystère du monde est le visible, non l'invisible » a écrit Oscar Wilde : dans la série d'articles qui suivent, nous verrons que ces dernières années ont apporté plusieurs preuves, basées sur des aspects théoriques mais bien plus encore plus sur des résultats d'observation, que cette barrière n'est pas réelle. L'une des premières clefs est donnée par la signature que le champ gravitationnel d'un TN doit imprimer sur la dynamique de ses voisins (étoile, gaz) : elle fournit un ensemble de contraintes fortes, à condition que l'échelle de distance soit en rapport avec l'horizon du TN considéré : le besoin d'une excellente résolution angulaire est alors crucial. Une autre clef est d'examiner la matière qu'un trou noir engloutit régulièrement. Cette matière forme un disque d'accrétion – généralement lié à un jet relativiste –, qui, en raison de la dissipation visqueuse, devient assez chaud pour émettre un rayonnement à haute énergie comme des rayons gamma et des rayons X, ou encore à plus grandes longueurs d'onde, mais avec un décalage vers le domaine infrarouge, via l'interaction Compton inverse sur le plasma du disque. La détection de ce rayonnement fournit une information directe sur l'environnement immédiat du TN et les échanges d'énergie entre eux. Une troisième clef pour espérer réussir dans cette quête paradoxale de l'observation d'un trou noir, consiste à chercher à détecter des ondes gravitationnelles, dans la mesure où, comme membres du club des objets extrêmement denses, les TN sont les candidats de choix pour produire de telles ondes.*

*Dans les sept articles qui suivent, le lecteur rencontrera ces différents aspects de l'observation des TN et des événements gravitationnels extrêmes, examinés dans un contexte purement astrophysique (la question des TN quantiques et de leur physique particulière n'est pas abordée dans ce numéro spécial). Une première partie rassemble plusieurs revues des très forts indices observationnels récemment établis (oserais-je dire preuves ?), que les TN sont bien là ! Cela concerne la classe de TN stellaires appelée micro-quasars mais également celle des TN extrêmement massifs nichés au coeur des galaxies, avec un accent particulier mis sur le plus proche des ces objets, qui se trouve au centre de notre propre Galaxie. Dans une deuxième partie, des développements théoriques récents dans le domaine de la prédiction/interprétation de la dynamique des trous noirs et de l'émission du disque d'accrétion sont examinés et discutés. Enfin, un panorama des nouvelles machines actuellement en construction ou en projet pour s'attaquer au problème de la détection des ondes gravitationnelles termine le volume.*

- *Dans l'article Microquasars, F. Mirabel fait le point sur les résultats récents concernant cette classe particulière de TN stellaires. L'effondrement du coeur d'une étoile dont la masse initiale est grande, mène à la formation d'une étoile à neutron, mais quand le noyau est au delà de  $3 M_{\odot}$ , les forces répulsives de la matière dégénérée (des électrons et des neutrons) ne peuvent résister à l'énorme pression de la gravité et un trou noir stellaire se forme. Les Microquasars sont de tels objets compacts (soit TN, soit étoile à neutrons) de notre galaxie qui ont la particularité supplémentaire d'exhiber plusieurs des phénomènes observés dans les Quasars, leurs cousins beaucoup plus lumineux. Ils sont maintenant considérés comme des laboratoires pour comprendre la physique de*

<sup>4</sup> Le lecteur de langue française ne devrait pas manquer le panorama remarquable et captivant sur le concept du Trou Noir, écrit par un des meilleurs spécialistes mondiaux de la question, Jean-Pierre Luminet : il s'agit de *Le destin de l'univers – trous noirs et énergie sombre*, récemment publié chez Fayard. Plusieurs citations historiques de cet avant-propos ont été dénichées dans ce superbe ouvrage.

plusieurs classes d'autres objets astronomiques : (a) jets relativistes et leur couplage avec le disque d'accrétion ; (b) sources ultra-lumineuses de rayons X observées dans les galaxies ; (c) sursauts de rayons gamma de longue durée ; (d) test de la relativité générale dans la limite des champs forts de gravité. C'est aujourd'hui un secteur très actif, intéressant le physicien des hautes énergie aussi bien que l'astrophysicien.

- Dans l'article *Supermassive black holes in local galaxies*, R. Bender et R.P. Saglia montrent comment la question de la présence fortement suspectée au centre des galaxies de trous noirs super massifs (TNSM), de typiquement  $10^9$  masses solaires, a connu récemment des progrès décisifs grâce à la combinaison de mesures de vitesse Doppler et de l'imagerie à haute résolution angulaire. Ces TNSM sont en effet bien présents, dans probablement toutes les galaxies elliptiques et les galaxies à bulbes, et leur masse se corrèle très étroitement avec la masse du bulbe. D'un autre côté, les galaxies purement disque n'ont pas de TNSM. La conclusion inévitable est qu'il y a un lien direct entre la présence d'un TNSM et la formation et l'évolution des galaxies dans l'histoire de l'Univers. Les mécanismes pouvant expliquer ce lien sont discutés, en particulier la rétroaction régulatrice par le flux énergétique du TNSM sur la formation stellaire.
- Dans l'article *The Galactic Centre at infrared wavelengths: towards the highest spatial resolution*, Y. Clénet, D. Rouan, P. Léna, E. Gendron et F. Lacombe passent en revue l'ensemble des résultats récents et uniques sur Sgr A\*, le TN au centre de notre Galaxie, obtenus dans le domaine infrarouge : ils démontrent de façon quasi-irréfutable que la Galaxie héberge en son centre un TNSM de de  $3.6 \times 10^6 M_{\odot}$ . C'est l'optique adaptative qui, en fournissant des observations à la limite de diffraction et une sensibilité très accrue, a constitué la percée principale. Elle a permis la mesure d'orbites d'étoiles liées gravitationnellement au TN et la découverte des flashes émis par le plasma du disque d'accrétion, au moment de son ingestion par le monstre. L'article se conclut en montrant comment les superbes performances des futurs équipements nous permettront bientôt d'explorer la physique de la gravité extrême.
- Dans l'article *High energy activity of the super-massive black hole at the Galactic Center*, A. Goldwurm considère également le TN au centre de la Voie Lactée, mais ici dans le cadre de la physique des hautes énergies. Il montre que ce n'est que tout récemment, avec la nouvelle génération des télescopes spatiaux, qu'on a enfin pu réussir à détecter le rayonnement à haute énergie de la matière s'accrétant sur le TN. Un accent particulier est mis sur la découverte des sursauts de rayonnement X détectés par les satellites Chandra et MMX-Newton, et sur l'émission de rayons gamma (mou et TeV) détectée grâce au satellite INTEGRAL et au télescope HESS.
- Dans l'article *Physics of accretion flows around compact objects*, J.P. Lasota, nous donne un panorama de la physique et des modèles actuellement développés pour décrire l'accrétion sur les trous noirs et les étoiles à neutron. En s'appuyant sur les contraintes imposées par des caractéristiques spécifiques des sursauts de rayon X mou, il passe en revue le statut des objets non standards, proposés comme alternative au TN. L'article se conclut par de nouveaux résultats et pistes de recherches sur la nature de l'activité des jets dans les noyaux actifs de galaxies.
- Dans l'article *General relativistic dynamics of compact binary systems*, L. Blanchet détaille un des outils développés récemment par les théoriciens pour produire des modèles les plus réalistes possible des signaux attendus des détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO et VIRGO. Un résultat important est l'établissement des équations de mouvement dans un cadre post-newtonien d'un système de binaires compactes. La stabilité des orbites circulaires les plus internes est discutée dans la deuxième partie.
- Dans l'article *Optical detection of gravitational waves*, J.-Y. Vinet présente les bases de la détection d'ondes gravitationnelles par des antennes, dans les deux domaines, celui des hautes fréquences (depuis le sol) et celui des basses fréquences (depuis l'espace). Il passe ensuite en revue les systèmes actuellement à l'étude (VIRGO, LIGO, LISA), les défis technologiques qu'ils induisent et les limites fondamentales.

J'espère que le lecteur aura le même plaisir que moi en découvrant et en se plongeant dans ces différents articles. Ils donnent une vue précise et synthétique d'un champ où d'authentiques percées ont été faites récemment et où les promesses des prochaines étapes, grâce aux performances de la génération future d'instruments, sont vraiment enthousiasmantes.

*On peut, sans crainte réelle de se tromper, affirmer que nous sommes désormais entrés dans l'ère de la physique observationnelle des trous noirs.*

Daniel Rouan  
*Observatoire de Paris, LESIA,  
5, place Jules Janssen,  
92195 Meudon cedex, France  
E-mail address: [daniel.rouan@obspm.fr](mailto:daniel.rouan@obspm.fr)  
Available online 10 January 2007*