

Les trous noirs, source d'énergie

Un nouveau modèle d'explication des sursauts gamma vient d'être proposé. Ceux-ci seraient émis par des trous noirs dotés d'un champ électromagnétique et par l'annihilation de matière et d'antimatière. Ce modèle, le premier à décrire complètement le phénomène, explique tous les sursauts observés, les plus courts comme les plus longs.

Remo Ruffini

est professeur de physique à l'université La Sapienza de Rome et président du Centre international d'astrophysique relativiste (ICRA).
Ruffini@icra.it

She-Sheng Xue

est chercheur à l'université La Sapienza de Rome.

Carlo Luciano Bianco et Federico Fraschetti

sont doctorants.

Pascal Chardonnet

est chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTH-CNRS) et enseigne à l'université de Savoie.
Chardonnet@lapp.in2p3.fr

Lev Landau, prix Nobel de physique en 1962, remarquait « *l'énorme puissance de la science qui nous permet de découvrir et de comprendre des phénomènes que l'esprit humain ne serait pas capable d'imaginer* ». L'aventure des sursauts gamma nous en donne un exemple étonnant. En utilisant les concepts de la relativité générale d'Einstein et les connaissances de la théorie quantique des champs*, introduite par Werner Heisenberg, nous avons développé un modèle complet qui explique, avec une précision de quelques millisecondes, des phénomènes qui se déroulent à des milliards d'années-lumière de la Terre. Cette découverte a été possible, non seulement en utilisant le fleuron des théories physiques, mais aussi par un des plus grands efforts observationnels jamais accomplis : pas moins de six satellites, les plus grands observatoires terrestres et un réseau d'antennes radio y ont participé. Nous en concluons que les sursauts gamma, brusques flashes de lumière très énergétique provenant des galaxies lointaines, sont émis par des trous noirs en formation.

Un processus probable. Cette idée peut paraître *a priori* paradoxale. Comment un trou noir, gigantesque aspirateur à matière, peut-il émettre de l'énergie? C'est théoriquement possible. Si l'Anglais Stephen Hawking a démontré en 1974 que des trous noirs microscopiques peuvent s'évaporer, Demetrios Christodoulou et l'un d'entre nous (R. Ruffini) ont, dès 1971, émis l'hypothèse que des trous noirs plus massifs pouvaient transformer leur masse en énergie, selon une formule dite de masse-énergie⁽¹⁾. Cette transformation se traduit soit par une augmentation de leur énergie de rotation, soit par une amplification de leur champ électromagnétique. Ou les deux. Pour que les trous noirs puissent tourner plus vite, encore faut-il qu'ils tour-

nent. De même, pour amplifier leur champ électromagnétique, encore faut-il qu'ils possèdent à la fois un champ magnétique et un champ électrique. C'est le cas. Toutes les étoiles étant en rotation, le cœur d'une étoile massive qui s'effondre en trou noir va tourner plus vite, à la manière d'un patineur qui croise ses bras sur la piste. Pour le champ électromagnétique, le processus est presque identique. Les nuages moléculaires qui donnent naissance aux étoiles possèdent un champ magnétique et de la matière électriquement chargée, électrons et protons. Le nuage se contractant, le champ magnétique va se concentrer dans l'étoile naissante, dans laquelle les charges vont se répartir entre le cœur et l'enveloppe gazeuse. Or, comme Faraday l'a montré en 1831, tout corps en mouvement possédant un champ magnétique va engendrer un champ électrique d'autant plus fort que la rotation et le champ magnétique sont élevés. Le trou noir est cependant un cas particulier, extrême, où s'applique la théorie de la relativité générale. Elle indique que champ magnétique, charge électrique et rotation sont des paramètres liés, comme c'est le cas pour les particules élémentaires. Il est ainsi théoriquement possible que les trous noirs puissent tourner sur eux-mêmes et posséder un champ électromagnétique très puissant. La preuve tant recherchée est là, sous nos yeux : comme nous le montrons dans nos articles⁽²⁾, c'est l'extraction de l'énergie de ces trous noirs électromagnétiques qui crée les sursauts gamma, ainsi que les émissions de lumière X, visible et radio, observées plus tardivement, les *afterglows* (voir l'article de L. Piro et J.-O. Baruch, p. 25).

A l'aide du vide quantique. Depuis plus de trente ans, la plus grande difficulté était de décrire finement les processus physiques à l'œuvre dans une telle transformation de l'énergie d'un trou noir en énergie de rotation ou en amplification du champ électromagnétique. Roger Penrose, en 1970, avait tenté la première solution⁽³⁾. En 1975, à Princeton, le Français Thibault Damour, aujourd'hui à l'Institut des hautes études scientifiques, et l'un de nous (R. Ruffini) avaient montré l'autre voie : l'énergie électromagnétique peut être extraite par le processus quantique dit de polarisation du vide*, dans lequel sont créées,

*La théorie quantique des champs est le développement moderne de la mécanique quantique dont le but est l'explication des phénomènes de la microphysique. Le prototype en est l'électrodynamique quantique qui atteint des précisions de l'ordre d'un pour dix millions entre la théorie et l'expérience.

En deux mots

Des paires formées d'électron et de son antiparticule, le positron, créées par le vide, peuvent extraire l'énergie d'un trou noir possédant un champ électromagnétique. Ejecté à des vitesses proches de celle de la lumière, ce flot entre en collision avec les restes de l'étoile qui s'est effondrée, puis avec la matière interstellaire. Ce choc va générer les sursauts gamma. Ce modèle, qui explique à la fois les sursauts courts et longs, est en parfait accord avec les observations de l'événement du 16 décembre 1999.

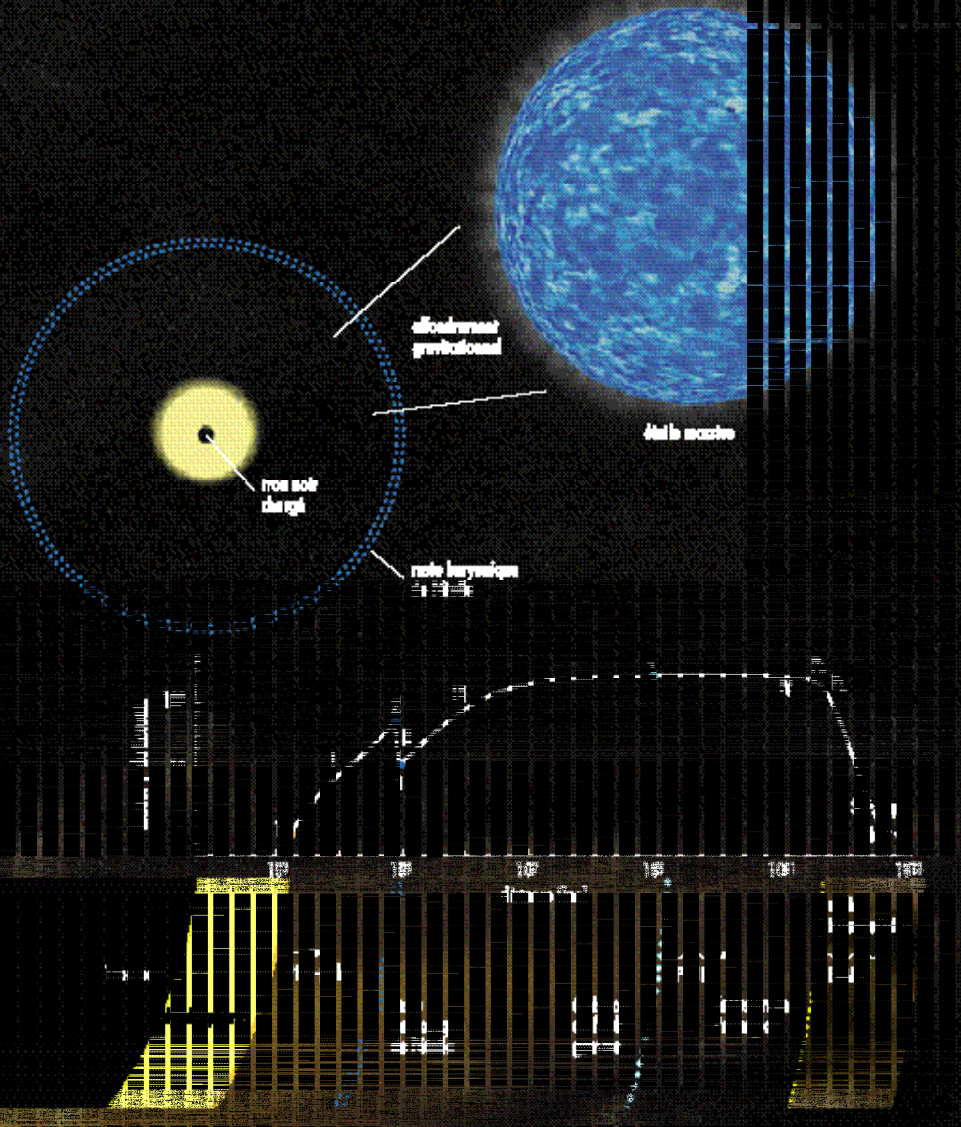


Figure 1. Quand une étoile très massive s'effondre en trou noir doté d'un champ électromagnétique puissant, la zone la plus proche de celui-ci se remplit d'électrons et de positrons qui vont s'échapper très rapidement, percuter le reste de l'étoile qui s'est effondrée et s'annihiler pour former un premier petit sursaut gamma (P-GRB). Le plasma va ensuite rencontrer la matière interstellaire et produire le long sursaut gamma, suivi par des émissions en lumière X, visible et radio. On notera les valeurs très élevées du facteur gamma de Lorentz, signe de la vitesse relativiste des particules.

Ce plasma va s'étendre à des vitesses proches de celle de la lumière, un peu à la manière d'une bombe thermonucléaire

* La polarisation du vide est un concept de mécanique quantique qui permet la formation, pendant un temps très court, de particules virtuelles. Un champ électromagnétique très intense peut les transformer en paires réelles d'électrons et de positrons, l'antiparticule de l'électron.

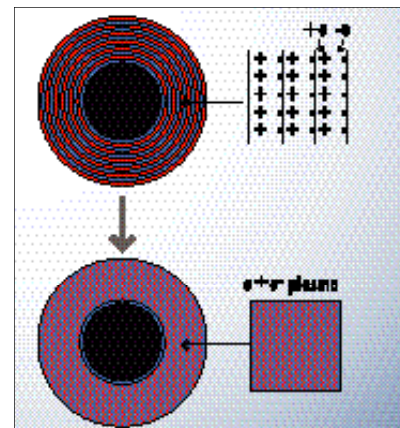
en un temps extrêmement court, des paires d'électron et de son antiparticule, le positron⁽⁴⁾. Mais le champ électromagnétique doit être puissant. C'est le cas dans une zone appelée « dyadosphère » (du grec *duas-duados*, paire), qui entoure l'horizon du trou noir, cette limite d'où rien ne peut s'échapper. Pour un trou noir de 10 fois la masse du Soleil, le rayon de l'horizon est de 10 km, celui de la dyadosphère étant de 1 000 km⁽⁵⁾ (fig. 1). Selon la formule de masse-énergie des trous noirs, l'énergie emmagasinée dans cette dyadosphère est exactement de l'ordre observé dans les plus puissants sursauts gamma (10^{54} ergs). En moins d'un cent milliardième de nanoseconde, par le processus de polarisation du vide, se créent des paires électron-positron qui vont être annihilées en photons gamma, ceux-ci se matérialisant à nouveau en paires électron-positron. Ce plasma d'électrons, positrons et photons va s'étendre à des vitesses relativistes, c'est-à-dire proches de celle de la lumière, un peu à la manière d'une bombe thermonucléaire où se produit un flash électromagnétique de photons,

l'EM pulse. A la différence que, dans le cas présent, le plasma possède une énergie plus grande, due à la présence supplémentaire des paires d'électron et de positron. C'est pourquoi nous avons choisi de nommer ce plasma en expansion rapide « PEM pulse », le P signifiant « paires ».

Deux sursauts. Afin de vérifier notre idée, Jim Wilson, le directeur du groupe de théorie des modèles de bombes atomiques du Livermore Radiation Laboratory, a pu simuler l'évolution de ce plasma sur son superordinateur⁽⁶⁾. Il apparaît que cette expansion peut effectivement se propager à une vitesse extrêmement proche de celle de la lumière. Son facteur de Lorentz, qui mesure, en relativité restreinte, les vitesses les plus grandes, peut atteindre 1 000, alors qu'un facteur de Lorentz de 100 correspond déjà à une vitesse équivalente, à 50 milliardièmes près, à celle de la lumière. Ces vitesses sont, pour une masse un milliard de milliards de milliards de milliards (10^{36}) plus grande, équivalentes à celles qui seront impulsées aux protons du futur Large Hadron Collider (LHC) du CERN. Nous sommes ainsi en présence des plus puissants accélérateurs cosmiques jamais observés. Cette obligation de prendre en compte les effets de la relativité restreinte et générale est un élément clé de la compréhension des sursauts gamma. C'est, de notre point de vue, la grande faiblesse de tous les modèles existants, y compris le modèle dit de la « boule de feu » de Martin Rees et de Peter Meszaros, qui n'ont pas pris rigoureusement en compte ces effets relativistes.

A cet instant de notre scénario, le sursaut gamma n'a pas encore eu lieu. Il ne va pas tarder. La gigantesque impulsion relativiste va heurter violemment les restes de l'étoile qui ne se sont pas effondrés en trou noir, et capturer des protons et des électrons. La nouvelle impulsion, formée d'électrons et de positrons qui s'annihilent, de photons et de protons, poursuit son expansion relativiste en se refroidissant et en s'étendant. Les photons perdent leur énergie et créent de moins en moins de paires électron-positron qui, elles, continuent toujours à s'annihiler. Les rencontres entre photons et particules se font plus rares, jusqu'au moment où les photons peuvent continuer leur route sans être absorbés : c'est l'émission d'un premier flash de photons, un sursaut gamma visible dans les obser-

Figure 2. Par le processus de polarisation du vide se crée une multitude de paires d'électrons et de positrons répartis en couches concentriques dans une zone proche de l'horizon du trou noir, la dyadosphère. Leur densité et la température sont telles qu'elles forment un plasma en équilibre thermique.



vations en tant que « précurseur » mais qui, dans notre modèle, est le véritable sursaut gamma ou P-GRB (*Proper Gamma Ray Burst*) (fig. 1). Cette prédiction totalement nouvelle par rapport aux autres modèles a été observée dans le sursaut GRB 991216, détecté par les trois satellites américains Compton GRO, Chandra et

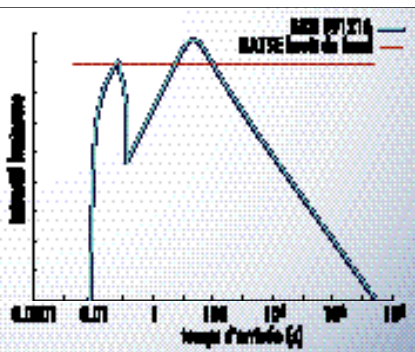


Figure 3. Notre modèle prédit l'apparition d'un premier sursaut, nommé précurseur dans les autres modèles. Souvent noyé dans le bruit de fond des instruments, il a été observé au moins une fois, lors du sursaut du 16 décembre 1999. Le sursaut lui-même n'est que le maximum des retombées.

Rossi-XTE, car, pour une fois, l'intensité de ce flash était supérieure au bruit de fond (fig. 3). La simulation de l'intensité de ce sursaut et de sa séquence temporelle sont en parfait accord avec les observations⁽⁷⁾.

Le reste du plasma, maintenant consti-

tué principalement de protons et d'électrons, poursuit sa course ultrarelativiste et rencontre le troisième acteur : le milieu interstellaire. Cette collision extrêmement violente produit un gigantesque feu d'artifice. Durant cette phase, notre modèle prévoit que l'émission augmente, passe par un pic, puis décroît en suivant la granularité du milieu interstellaire présent autour du trou noir, puisque la luminosité de l'*afterglow* est proportionnelle à la quantité de matière interstellaire rencontrée. Dans le cas de GRB 991216, cette émission retardée est bien plus importante que celle du P-GRB.

Le maximum de cette émission gamma ou E-APE (*Extended Afterglow Peak Emission*) est en fait le sursaut gamma que les différents modèles tentent d'expliquer. Les sursauts longs ne sont donc que des E-APE ! Leur similitude à un sursaut gamma est une conséquence de la sensibilité insuffisante des détecteurs (fig. 3). Il est suivi, à mesure que le flot de protons ralentit et refroidit, d'émissions de rayons X, visibles et radio : c'est l'émission tardive, ou *afterglow*, observée dans presque tous les sursauts...

Et cela fonctionne ! Notre modèle permet de suivre, seconde par seconde, l'évolution de cette impulsion et de chacun de ses paramètres physiques comme la température, la densité ou la vitesse de propagation, ainsi que le détail des ondes de choc. Nous sommes loin du modèle dit de la boule de feu (voir l'article de L. Piro et J.-O. Baruch, p.25), qui suppose l'existence de chocs internes et d'un mécanisme au niveau de la source qui génère ces différentes vagues. Par contre, notre modèle se rapproche de celui développé par Charles Dermer, du Naval Research Laboratory⁽⁸⁾, qui avait prévu la possibilité d'utiliser les sursauts gamma pour effectuer une tomographie du milieu interstellaire.

Il apparaît clair que toute explication du phénomène de l'*afterglow* passe par la nécessaire connaissance du phénomène depuis l'instant initial. Ce phénomène ne peut être dissocié de ce qui s'est passé dans la source et qui lui a donné naissance. Ce point de vue global d'explication du phénomène des sur-

sauts gamma nous permet, pour la première fois, d'établir les transformations spatio-temporelles relativistes correctes pour le décrire. Et cela ne dépend que de trois paramètres : la masse du trou noir, sa charge et la quantité de matière de l'étoile qui ne finit pas dans le trou noir. En outre, cette évolution se produit sur une échelle de temps de quelques millisecondes à plusieurs jours, comme les sursauts gamma observés. Les distances impliquées s'échelonnent du rayon de la dyadosphère, soit quelques milliers de kilomètres, à quelques dizaines de milliers de milliards de kilomètres où le plasma ralentit dans le milieu interstellaire. Là encore, les observations de GRB 991216 et la courbe théorique sont en parfait accord. Il est important de noter que notre analyse suppose une symétrie sphérique, alors que beaucoup de modèles penchent pour l'existence de jets focalisés. Ils sous-estiment ainsi la puissance énergétique des sursauts gamma.

D'autres phénomènes expliqués. Notre modèle permet d'aller plus loin dans la compréhension des observations disparates des sursauts. Il propose une explication naturelle à l'épineuse question de la distribution bimodale des sursauts classés courts (de quelques millisecondes à quelques secondes) et longs (au-delà de la seconde). Ils ne sont que deux manifestations d'un même phénomène. Les sursauts courts correspondent au premier sursaut précurseur (P-GRB), et les sursauts longs au maximum d'intensité de l'émission gamma de l'*afterglow* (E-APE). La présence ou non des sursauts longs dépend de la quantité de matière présente autour du trou noir. En effet, l'intensité relative du P-GRB et de l'E-APE dépend très fortement de celle-ci. Quand la matière interstellaire est très peu dense, l'E-APE est presque inexistant. Quasiment toute l'énergie extraite du trou noir est émise dans le P-GRB. Nous n'observons alors qu'un sursaut court. Nous pouvons aussi expliquer la présence de raies d'émission de fer, observées par le satellite X américain Chandra, par un mécanisme original. Ce nouveau concept suggère que l'immense flash gamma induit la formation d'une supernova lors de sa collision avec une étoile massive voisine en fin de vie. Il s'agirait alors d'un nouveau mécanisme de formation de supernova⁽⁹⁾. Contrairement à ce que nombre d'astrophysiciens pensent, ce ne serait pas les supernovae qui produisent les sursauts gamma, mais les sursauts gamma qui induisent cette nouvelle famille de supernovae... Les sursauts gamma sont-ils la première évidence de l'extraction d'énergie d'un trou noir ? La réponse est entre les mains des chasseurs de ces phénomènes ultra-énergétiques. L'enjeu est de taille car, si la réponse est positive, l'astrophysique relativiste des objets compacts en sera bouleversée. Après la naissance des trous noirs comme objet théorique dans les années 1930 et leur renaissance dans les années 1970 grâce à leur observation quand ils avalent la matière d'une étoile proche, nous assistons à une troisième révolution : la découverte d'une nouvelle source d'énergie.

R. R., S.-S. X., C. L. B., F. F., P. C. ■

(1) D. Christodoulou, R. Ruffini, *Phys. Rev.*, D4, 3552, 1971.

(2) R. Ruffini et al., *ApJL*, 555, L107, 2001 ; *ApJL*, 555, L113, 2001 ; *ApJL*, 555, L117, 2001.

(3) R. Penrose, *Rev. Nuovo Cimento*, 1, 252, 1969.

(4) Damour et R. Ruffini, *Phys. Rev. Lett.*, 35, 463, 1975.

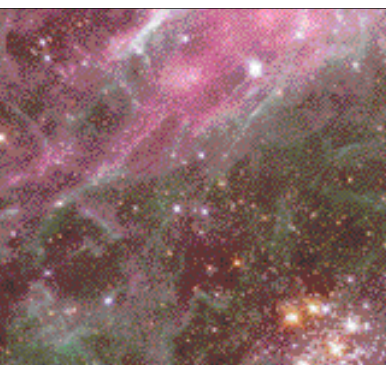
(5) G. Preparata, R. Ruffini et S.S. Xue, *A&A*, 338, L87, 1998.

(6) R. Ruffini, J.D. Salmonson, J.R. Wilson et S.-S. Xue, *A&A*, 350, 334, 1999 ; *A&A*, 359, 855, 2000.

(7) Halpern et al., *ApJ*, 543, 697, 2000.

(8) C.D. Dermer, K.E. Mitman, *ApJL*, 513, L5, 1999.

(9) R. Ruffini et al., *ApJL*, 555, L117, 2001.



De nombreux sursauts gamma sont situés dans des régions peuplées d'étoiles jeunes comme la région Hodge 301 de la nébuleuse de la Tarentule. Y sont sûrement présents des trous noirs provenant d'étoiles très massives qui se sont déjà effondrées, alors que la majorité des étoiles, plus petites, sont encore en pleine jeunesse. © HST/NASA/AURA