

# L'astrophysique gamma, physique de l'extrême

AURÉLIEN BARRAU  
CÉCILE RENAULT

*L'astrophysique gamma, c'est une façon nouvelle et très prometteuse de regarder l'Univers. Elle fait intervenir des technologies extrêmement sophistiquées pour nous offrir des lumières nouvelles, notamment sur les noyaux actifs de galaxie. Deux jeunes chercheurs du Laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies de Paris nous en expliquent les rouages.*

**E**n prenant conscience du caractère ondulatoire de la lumière, l'homme a dû se résoudre à une nouvelle blessure narcissique : ses yeux ne lui révèlent qu'une part infime des messages livrés par l'Univers. Pour tenter d'atteindre une vision plus objective et plus complète de notre environnement, il est indispensable de se souvenir que la lumière visible est une fraction dérisoire de l'ensemble du spectre électromagnétique. Et cette contingence quantitative se double d'une déficience qualitative puisqu'en plus de leur nombre « réduit », les photons (ou grains de lumière) optiques ne présentent aucun aspect privilégié pour répondre à la plupart des interrogations de l'astrophysique moderne.

Les physiciens ont, depuis longtemps, développé des instruments leur permettant d'atteindre des longueurs d'onde plus grandes (infrarouge, micro-ondes, radio...) ou plus petites (ultraviolet, rayons X...) que celles de la lumière visible. A ces longueurs d'onde sont associées des énergies d'autant plus élevées qu'elles sont courtes. En parcourant le spectre, il est ainsi possible de sonder diverses énergies et, selon la thermodynamique, différentes températures. La longueur d'onde des photons peut donc révéler directement la « chaleur » associée aux objets cosmiques à condition qu'ils se trouvent dans un état d'équilibre. Mais l'Univers est un laboratoire très exotique pour le physicien et la stabilité thermique n'y est pas toujours rencontrée. Les rayonnements sont alors plus délicats à interpréter et nécessi-

tent le recours à une modélisation détaillée des astres émetteurs. Qui plus est, leur détection est souvent très difficile et plusieurs fenêtres béantes demeurent inexplorées. Les rayonnements gamma de très haute énergie, médiateurs des phénomènes astrophysiques extrêmes, se révèlent depuis quelques années, offrant une vision nouvelle et surprenante du cosmos.

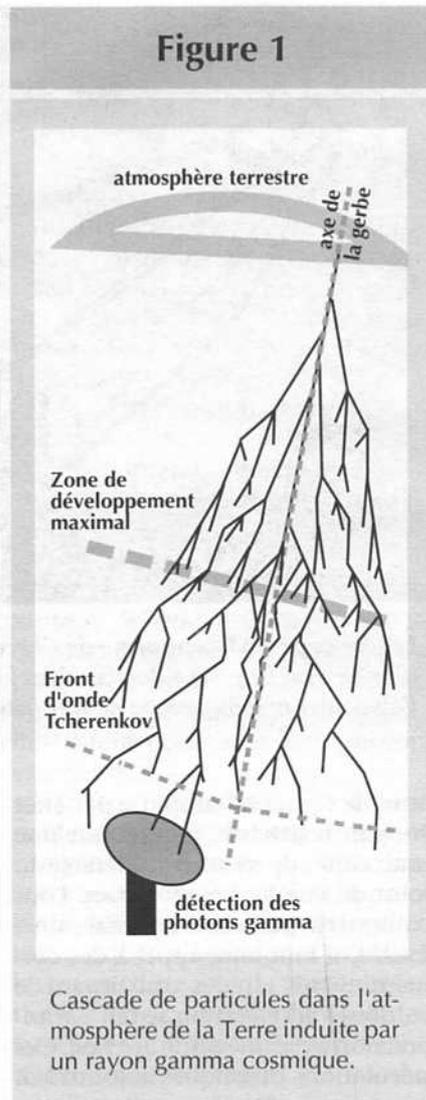
## Des rayonnements très particuliers

Les photons gamma, dont l'énergie est environ mille milliards de fois supérieure à celle de la lumière visible, sont très riches d'informations sur de nombreux aspects cachés du ciel profond mais restent, sur le plan expérimental, d'un accès particulièrement difficile. Les interactions qu'ils développent avec l'atmosphère terrestre interdisent, en effet, tout espoir de les détecter directement au niveau du sol. Face à une telle difficulté, il semble raisonnable de s'affranchir de cette « barrière naturelle » qui entoure la Terre en allant chercher les rayonnements là où ils sont, c'est-à-dire dans l'espace. Différentes expériences en satellites ont ainsi été menées et voient encore le jour pour accéder directement aux photons cosmiques. Toutefois, elles doivent faire face à une lacune fondamentale qui leur interdit l'accès aux très hautes énergies : la petite dimension de leur surface de détection. Typiquement de l'ordre du dixième

de mètre carré, les détecteurs spatiaux ne couvrent pas une aire suffisante pour révéler les faibles taux des gamma de très haute énergie.

Il est donc nécessaire d'étudier plus en détail les phénomènes physiques qui prennent naissance lorsqu'un photon gamma d'origine cosmique pénètre dans l'atmosphère de la Terre, de façon à tenter d'exploiter toute l'information virtuellement disponible au niveau du sol. L'énergie engagée dans la réaction étant très grande, le photon peut se matérialiser dans le milieu atmosphérique en donnant naissance à une paire de particules : électron et positon (antiparticule associée à l'électron). Chacune de ces particules va rayonner de l'énergie suite au freinage très important imposé par la présence des atomes et molécules sur leur parcours. Ces rayonnements vont à leur tour se matérialiser en paires d'électrons et de positons. Ces derniers vont induire d'autres rayonnements et une gigantesque cascade de particules au développement exponentiel va pouvoir ainsi se développer. Le nombre de particules (qui ne peut croître infiniment car l'énergie totale disponible est limitée par celle du photon initial) se trouve maximum autour de 7 kilomètres d'altitude. C'est grâce à ces particules, que l'on qualifie de secondaires, que l'information physique contenue dans le photon gamma cosmique primaire peut être transmise jusqu'au sol. Encore faut-il s'assurer que cette information est bien contenue dans la cascade et qu'il est possible de l'en extraire expérimentalement !

Ces particules chargées (négativement pour les électrons et positivement pour les positons) ne sont pas directement détectables au sol dans la gamme d'énergies à laquelle on s'adresse ici, c'est-à-dire dans le domaine de  $10^{12}$  électronvolts, car elles sont « réabsorbées » par les constituants atmosphériques. Mais leur énergie considérable permet une vitesse de propagation plus grande que celle de la lumière et crée, par conséquent, une *onde de choc*. Cet effet, appelé Tcherenkov du nom du physicien russe qui l'a découvert, ne viole en rien le principe de relativité : la vitesse dépassée est celle de la lumière dans le milieu atmosphérique qui est elle-même plus faible que dans le vide. Analogue au « bang » sonore qui suit le passage d'un avion super-



sonique, il y a ici émission d'un « flash » de lumière bleue qui suit le passage des particules ultrarelativistes, comme présenté à la **figure 1**.

Le point fondamental réside dans le fait que les deux informations physiques primordiales, à savoir la direction du gamma cosmique et son énergie, sont bien véhiculées par cette lumière Tcherenkov. Il est ainsi possible de remonter aux caractéristiques du rayon cosmique primaire à partir de l'étude de l'éclair bleu induit par celui-ci. Pour ce faire, il faut avoir recours à des instruments conçus spécialement pour traquer ce signal ténu, noyé dans le bruit de fond considérable des photons diffus (lumière des étoiles, des nébuleuses, de la Voie lactée, des éclairages urbains...). Moyennés sur un laps de temps important, les photons de fond de ciel dominant très largement les photons Tcherenkov. Typiquement, on peut considérer que le bruit est 100.000 fois supérieur au signal ! Mais

le signal possède la propriété très importante de présenter un isochronisme quasi parfait. La méthode consiste donc à mesurer la lumière pendant un temps extrêmement bref (de l'ordre de quelques milliardièmes de seconde) centré sur l'arrivée des photons Tcherenkov : ils dominent alors largement le bruit dont la contamination est aléatoire.

Le télescope CAT (acronyme de Cherenkov Array at Themis) récemment construit près de Font-Romeu, dans les Pyrénées-Orientales, est dédié à l'étude des rayons gamma de très haute énergie. Il prend une sorte de photographie de la cascade de particules se développant dans l'atmosphère. Des algorithmes mathématiques sont ensuite appliqués aux images ainsi obtenues pour reconstruire les caractéristiques physiques du gamma initial. Fondée sur une technique extrêmement indirecte, l'astronomie gamma est aujourd'hui devenue une science fiable dont les résultats, validés par les simulations informatiques et la cohérence des différents instruments, ne sont plus sujets à caution.

## Astres étranges

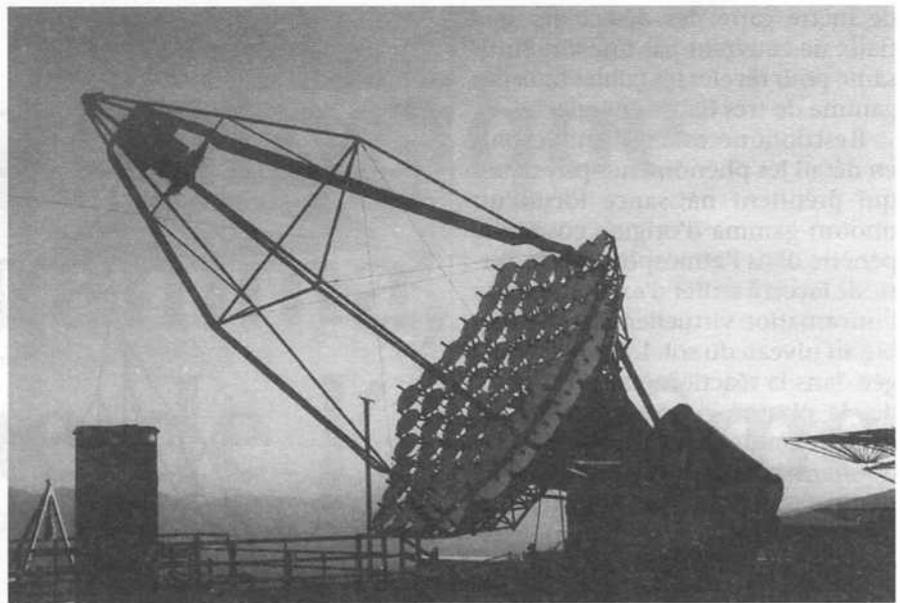
Les sources astrophysiques de rayons gamma de très haute énergie ne sont pas nombreuses. La première à avoir été mise expérimentalement en évidence est la nébuleuse du Crabe. Ce pulsar en rotation rapide, reste de l'explosion d'une supernova en l'an 1054, et son environnement constituent effectivement un intense générateur gamma considérable aujourd'hui comme une « chandelle standard ». Véritable étalon des hautes énergies, la nébuleuse du Crabe a ouvert la voie de l'astrophysique observationnelle des énergies cosmiques extrêmes. Des mécanismes physiques complexes d'interaction entre champ électromagnétique et particules chargées ont ainsi pu être mis en évidence.

C'est aujourd'hui vers des astres plus lointains et plus étranges encore que se tournent les télescopes gamma. Véritables phares du ciel profond, les noyaux actifs de galaxie sont devenus la cible privilégiée de détecteurs de photons de très haute énergie. Ces objets sont vraisemblablement le siège des phénomènes les

plus énergétiques de l'Univers. Ils constituent un laboratoire exceptionnel pour les mécanismes physiques les plus variés, alliant l'énergie nucléaire, l'énergie gravitationnelle, les particules accélérées à des vitesses proches de celle de la lumière, les champs magnétiques, les rayonnements électromagnétiques de toutes longueurs d'onde, l'hydrodynamique et la physique des plasmas ainsi que la relativité générale.

La luminosité considérable des noyaux actifs de galaxie ne peut s'expliquer à l'aide de réactions thermonucléaires analogues à celles ayant lieu dans les étoiles. A titre de comparaison, pour certains quasars, la puissance rayonnée est équivalente à celle de 10.000 galaxies comme la nôtre ou encore à l'explosion de 1000 supernovæ par an ! Même en imaginant des étoiles très brillantes (de type O par exemple) se touchant, il est impossible de dépasser quelques pour cent de la luminosité observée. Il faut avoir recours à un processus plus efficace et un seul candidat est aujourd'hui viable : la conversion d'énergie gravitationnelle en rayonnement grâce à la présence d'un astre suffisamment massif et compact — vraisemblablement un trou noir. C'est le meilleur moteur connu à l'heure actuelle car une fraction importante de l'énergie de masse (considérable selon la fameuse relation  $E = mc^2$ ) peut ainsi se trouver émise sous forme de photons par les corps présents dans le champ d'action du trou noir. La matière environnante est alors accrétée, disloquée et soumise à des frictions considérables dans un fin disque de poussière. Une grande partie de la masse peut se « libérer » sous forme d'énergie dans le voisinage de l'attracteur central. Deux jets symétriques de particules ultrarapides prennent alors naissance de part et d'autre du plan, comme le montre la **figure 2**.

Un intense signal gamma en provenance de deux noyaux actifs de galaxie a été mis en évidence par les télescopes au sol. La détection de ces objets (Mrk421 et Mrk501) jusqu'à des énergies de l'ordre de  $10^{13}$  électronvolts, c'est-à-dire au-delà de ce que peuvent produire les plus puissants accélérateurs terrestres en fonctionnement, apporte de nombreuses informations sur les phénomènes physiques qui se déroulent dans les jets. Lorsque ceux-ci pointent vers la



Le télescope CAT (acronyme de Cherenkov Array at Themis) récemment construit près de Font-Romeu, dans les Pyrénées-Orientales, est dédié à l'étude des rayons gamma de très haute énergie.

Terre, le signal est amplifié par effet Doppler relativiste, permettant une luminosité apparente considérable du point de vue de l'observation. Pour expliquer la puissance colossale ainsi révélée, il faut faire appel à des corpuscules très rapides constituant le jet, dont l'accélération se fait par interaction avec une onde de choc. Ces spéculations théoriques aujourd'hui largement confirmées par l'expérien-

ce font appel à des outils mathématiques très élaborés et encore en développement. Le scénario standard de génération des rayons gamma consiste alors à supposer que ces particules ultrarelativistes vont « cogner » les photons diffus et leur communiquer une grande partie de leur énergie : c'est l'effet Compton *inverse*.

Pendant, l'observation des noyaux actifs de galaxie dans ce domaine de longueurs d'onde a offert une autre surprise de taille : non seulement le signal gamma peut être très intense, mais il est en plus très rapidement variable. Des échelles de temps inférieures à la journée sont effectivement apparues, ce qui est particulièrement court pour des objets astrophysiques de ce type. Cela permet de donner une limite supérieure sur la taille de la zone active lors de l'émission. Si l'on imagine une variation intrinsèque extrêmement rapide, l'observateur ne pourra en effet la percevoir qu'avec un certain étalement dans le temps correspondant précisément à la taille de l'émetteur divisée par la vitesse de la lumière, étant donné que cette dernière n'est pas infinie. Il convient, dans le cas présent, de nuancer ce schéma simpliste par le caractère relativiste des astres étudiés mais l'idée reste valide. Les processus mis en œuvre lors de l'accélération sont aussi concernés par ces observations. La composition exacte des jets de parti-

Figure 2

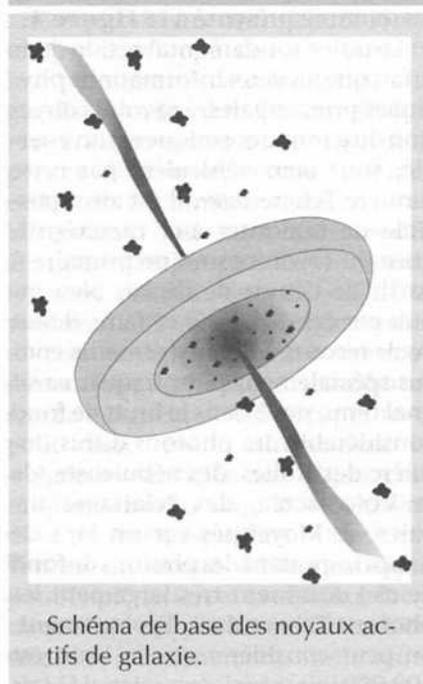


Schéma de base des noyaux actifs de galaxie.

cules, la vitesse et la dimension des nodules où prend naissance l'émission sont ainsi fortement contraintes.

La clef de l'énigme de l'émission de très haute énergie de noyaux actifs de galaxie se trouve certainement dans leur observation conjointe par des instruments aux capacités de détection différentes. L'obtention du spectre d'émission, c'est-à-dire de la puissance rayonnée en fonction de la fréquence, sur une gamme très étendue, est indispensable à la compréhension globale du phénomène. L'ordre dans lequel les variabilités de cette émission se présentent, toujours selon leur fréquence, est également très important pour la modélisation de la géométrie de la source. Les observations réalisées jusqu'alors tendent à montrer, dans les différentes gammes de longueurs d'onde, un comportement analogue dans le temps mais d'amplitude différente. C'est vraisemblablement la signature d'une même population d'électrons à l'origine d'une grande partie de l'émission gamma des objets en question.

## Questions ouvertes

Les implications théoriques des données expérimentales de l'astronomie gamma sur les noyaux actifs sont très importantes. Elles permettent de mieux cerner la nature de ces objets qui demeurent parmi les plus énigmatiques de l'Univers. Mais si le modèle standard du trou noir accréant de façon dissymétrique de grandes quantités de matière pour éjecter des constituants élémentaires sous forme de jets bipolaires devient très plausible, un grand nombre d'interrogations demeurent. Il est même très clair que les nouvelles données de l'astronomie gamma posent autant de questions qu'elles apportent d'éléments de réponse.

La nature exacte des corpuscules constituant les jets reste mystérieuse. Il est délicat d'expliquer les courtes variabilités avec des protons, il est délicat d'expliquer les plus hautes énergies avec des électrons. L'origine des photons diffus qui deviendront des gamma par interaction avec ces particules n'est pas connue. Ils peuvent être rayonnés par les corpuscules eux-mêmes, provenir du disque d'accrétion, de nuages de gaz exté-

rieurs, d'étoiles environnantes ou de bien d'autres sources encore...

Dans ce dédale d'interrogations, les récentes observations (en particulier sur Mrk501) permettent néanmoins de commencer à voir s'affirmer un scénario cohérent fondé en particulier sur le modèle dit d'émission « synchrotron self-Compton ». Dans une telle description, les jets des noyaux actifs de galaxie sont supposés être constitués d'électrons rayonnant très fortement, suite à la présence de champs magnétiques intenses courbant les trajectoires. Ces rayons réinteragissent alors avec la population de particules qui leur a donné naissance et se trouvent portés jusqu'à des énergies très élevées. Si cette description se révèle séduisante et se trouve favorisée par les derniers résultats, elle n'exclut pas pour autant d'autres modélisations fondées sur des jets de protons ou sur des interactions avec des photons extérieurs.

D'autres points délicats incontournables doivent également être pris en compte : l'objet est lointain (environ 500 années-lumière) et il est impossible de différencier à coup sûr les effets intrinsèques d'émission d'éventuelles interactions avec le champ galactique. Cette nouvelle physique doit faire face à une quantité considérable d'inconnues en regard du nombre relativement restreint de données disponibles ! Il est pourtant possible d'essayer de tirer profit de telles difficultés et de tourner le problème à notre avantage en utilisant précisément ces gamma pour sonder l'espace intergalactique. La densité du fond diffus infrarouge constitue l'une des inconnues majeures de la cosmologie observationnelle et sa détermination possible via l'absorption des photons gamma pourrait fortement aider à comprendre l'évolution des galaxies. Le déficit de signal gamma devient alors une signature de la présence de ces photons de basse énergie et, par là même, une mesure de l'énergie émise lors des phases initiales de l'Univers (ces rayonnements sont aujourd'hui essentiellement dans la gamme infrarouge par suite d'un double effet de décalage spectral dû à l'expansion et de réémission par les nuages de poussières). Cette voie nouvelle est en développement et permet déjà de poser des limites plus sévères que les expériences en satellite.

Le ciel gamma présente également un aspect particulièrement mystérieux lié à la détection de nombreux « sursauts ». Ces bouffées d'énergie d'intensité considérable sont pour l'instant observées par les satellites et leur cause est totalement inconnue. Elles se répartissent de façon uniforme sur la voûte céleste. Jusqu'à présent, les télescopes au sol n'ont pas été en mesure de mettre en évidence ces sursauts. Des informations importantes sur la nature de ces sources et la puissance totale rayonnée sont ainsi virtuellement disponibles. L'observation de tels phénomènes (tout au moins la tentative) au rythme de quelques-uns par an est prévue par les différentes expériences au sol.

Mais l'enjeu fondamental des prochaines années sera vraisemblablement centré sur la compréhension des sites accélérateurs des rayons cosmiques. Les restes de supernovæ, qui constituent le lieu présumé de ces processus, sont pour la plupart invisibles dans le domaine des très hautes énergies. L'énigme des particules cosmiques demeure donc entière et la mise en évidence expérimentale des astres initiateurs serait indispensable. La vision habituelle, fondée sur une accélération par onde de choc dans le voisinage des vestiges d'explosions d'étoiles, est aujourd'hui mise en difficulté par l'absence d'information gamma. L'amélioration de sensibilité des détecteurs qui devrait bientôt avoir lieu donnera un éclairage nouveau à la question de l'origine des rayons cosmiques dans notre galaxie.

Les noyaux actifs de galaxie et la nébuleuse du Crabe ne sont donc pas les seuls astres virtuellement en mesure d'émettre des photons gamma de très haute énergie. D'autres sources, muettes pour l'instant, sont également scrutées par les télescopes. Les développements théoriques et expérimentaux, en pleine effervescence dans ce domaine, devraient permettre, dans les prochaines années, de mieux cerner l'univers des très hautes énergies. Nouvelle brique indispensable à la construction d'une image cohérente de notre environnement cosmique, l'astrophysique gamma révélera certainement des phénomènes insoupçonnés, dans un premier temps incompréhensibles, mais sans aucun doute passionnants. ■