

Des records de distance battus avec le télescope Hubble

Notre compréhension de la formation et de l'évolution des galaxies dans les premières phases de l'Univers a été révolutionnée ces dernières années grâce à la spectrophotométrie à larges bandes de la caméra WFC3 du télescope spatial Hubble, combinée avec l'imagerie profonde du télescope infra-rouge Spitzer. Un record en distance vient d'être battu, et il annonce des surprises à venir.

Les astronomes cherchent activement à observer des galaxies très lointaines pour comprendre quelle a été leur évolution dans les premiers âges de l'univers. Cette recherche commence à porter ces fruits, grâce en particulier au télescope spatial Hubble. Nous avons mentionné à plusieurs reprises dans ces actualités la découverte de galaxies de plus en plus éloignées.

Les résultats préliminaires obtenus au cours des dernières années dans l'infrarouge proche à l'aide de Hubble et concernant des galaxies de redshift compris entre 9 et 10¹ viennent d'être publiés par une équipe essentiellement américaine (arXiv:1512.05363v1, V. Calvi et al., décembre 2015). Les observations ont été effectuées avec la caméra grand champ numéro 3 muni d'un grisme (un prisme équipé d'un réseau, « grating » en anglais, d'où le « g ») qui permet d'obtenir un petit spectre de chaque galaxie du champ. Le but est de détecter dans les spectres des galaxies une discontinuité due à l'absorption par l'hydrogène intergalactique atomique situé sur la ligne de visée. Elle se traduit par une disparition de presque tout le rayonnement de longueur d'onde inférieure à 91,2 nanomètres. L'hydrogène atomique est en effet abondant dans l'Univers jeune, car il n'a pas encore été complètement réionisé. La position de cette discontinuité (« Lyman break »), située à 91,2 nanomètres au moment de l'émission, est à la réception repoussée dans le visible et même dans l'infrarouge proche par le décalage spectral. La mesure de ce décalage indique la distance.

Un relevé appelé HST/WFC3Borg (pour « Brightest Of Reionizing Galaxies ») a été entrepris avec le télescope Hubble pour repérer des candidats galaxies ayant des décalages spectraux compris entre 8 et 10, c'est-à-dire existant lorsque l'Univers avait environ 500 millions d'années. L'équipe a déjà trouvé une dizaine de candidats. Mais pour des redshifts aussi élevés, les galaxies apparaissent brillantes dans l'infrarouge et presque invisibles dans l'optique. Il faut donc s'assurer que ce sont bien des galaxies très lointaines, et non pas une nouvelle population de galaxies infrarouges proches qui n'aurait pas encore été observée.

Au cours de cette étude, la découverte d'une galaxie très lointaine a été confirmée par une observation très profonde effectuée avec la caméra infrarouge IRAC du télescope

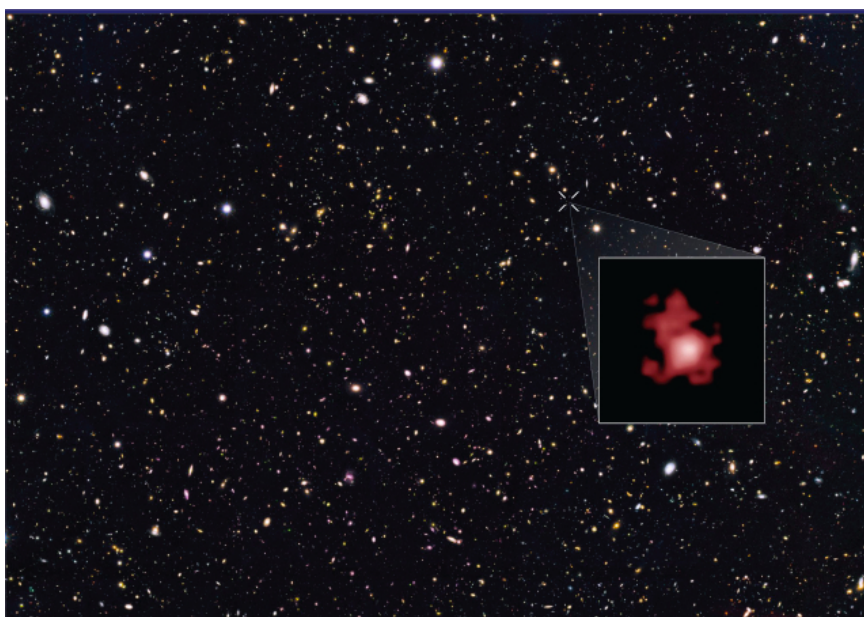
¹ Le redshift (z) est le décalage spectral vers le rouge dû à l'expansion de l'Univers. Il est mesuré par la différence de longueur d'onde entre l'émission et la réception, divisée par la longueur d'onde à l'émission. Un redshift égal à 10 correspond, dans le modèle standard de la cosmologie, à un objet dont la lumière a mis 13,3 milliards d'années à nous parvenir, que l'on voit donc tel qu'il était 400 millions d'années après le Big-Bang.

spatial Spitzer (arXiv:1603.00461v, P. A. Oesch et al., à paraître dans *Astrophysical Journal*). Il s'agit de l'objet GN-z11, en direction de la constellation de la Grande Ourse. Cette fois la découverte n'est pas ambiguë. Le spectre présente une discontinuité à 1,47 microns, ce qui implique un redshift $z_{\text{grism}} = 11,1$, correspondant à 400 millions d'années après le Big-Bang.

Les chercheurs ont pu déterminer que cette galaxie est 25 fois plus petite que notre Voie lactée, et que sa masse est environ un milliard de fois celle du Soleil (à comparer aux 200 milliards de la Voie Lactée). C'est donc une galaxie encore minuscule comme on l'aurait prédit, mais ce qui la rend étrange c'est quelle est bien plus brillante que prévu pour cette période précoce. Sa luminosité ultraviolette (attention, à l'émission !) est environ trois fois plus grande que celle de galaxies moins anciennes, ayant des redshifts voisins de 7. Il se forme dans cette galaxie environ 25 étoiles nouvelles chaque année. Or elle a vécu à peine 200 millions d'années après la formation des premières étoiles, et 150 millions d'années avant la réionisation de l'Univers (qui a eu lieu au redshift 8). Il est donc possible qu'une formation intense d'étoiles et de galaxies ait déjà eu lieu à cette époque sans pour autant affecter profondément la matière intergalactique.

Il est peu probable que le record de GN-z11 soit battu avec le télescope Hubble, mais on attend beaucoup du nouveau télescope spatial JWST, (pour James Webb Space Telescope), dont le lancement est prévu fin 2018. Il sera capable de détecter des dizaines de galaxies semblables à GN-z11 situées peut-être à des distances encore plus grandes. Il nous renseignera enfin sur les étapes de la formation des premières étoiles et galaxies.

L'image est extraite du sondage GOODS north (Great Observatories Origins Deep Survey North) réalisé avec le télescope spatial Hubble. L'encadré montre la galaxie GN-z11, distante de 13,4 milliards d'années-lumière. On voit que sa structure est très perturbée, et qu'elle est loin de présenter la forme caractéristique d'une galaxie. Crédit Nasa, Esa, P. Oesch (Yale University).



Le trou noir supermassif de la Voie Lactée est-il un accélérateur de rayons cosmiques à des énergies insoupçonnées ?

Le télescope HESS pour les rayons gamma de très haute énergie a dressé depuis plus de dix ans une cartographie des régions centrales de la Voie lactée. L'analyse de ces résultats a permis de conclure que le trou noir supermassif au centre de la Galaxie est une source de rayons cosmiques d'une énergie inégalée.

HESS (pour « High Energy Stereoscopic System ») est un réseau de télescopes pour l'étude des rayons gamma compris entre quelques dizaines de Giga-électrons-volts (un milliard d'eV) et quelques téra-électrons-volts (mille milliards d'eV)². Il est installé en Namibie et fonctionne depuis 11 ans³. C'est actuellement le plus puissant au monde dans son domaine. Une dizaine de laboratoires français participent activement à cette collaboration. HESS a découvert de nombreuses sources de rayonnement gamma extragalactiques et galactiques.

Lors de ses trois premières années de fonctionnement, HESS avait aussi observé au centre galactique une source ponctuelle puissante de rayons gamma, entourée d'une émission diffuse d'environ 250 années-lumière de rayon. Cette région correspond à une couronne de nuages moléculaires entourant le trou noir supermassif de la Galaxie, Sgr A*. Lorsqu'ils sont bombardés par des rayons cosmiques (voir encadré) de haute énergie, ces nuages émettent du rayonnement gamma.

On pourrait invoquer une origine différente au rayonnement observé dans les nuages moléculaires que le bombardement par des cosmiques : un bombardement par des particules plus légères, les électrons. Ceux-ci seraient créés autour du trou noir par des chocs ou des reconnections magnétiques, et génèreraient des rayons gammas par « effet Compton inverse » (les électrons perdent leur énergie au bénéfice des photons). Cependant les pertes radiatives subies par de tels électrons les empêcheraient d'atteindre les nuages moléculaires.

On en déduit donc naturellement qu'il existe à l'intérieur des nuages moléculaires une source de rayons cosmiques de forte énergie, mais laquelle ?

Les observations accumulées par HESS entre 2004 et 2013 permettent de répondre à cette question. En effet, on peut maintenant mesurer de façon détaillée la répartition spatiale des protons et leur distribution en énergie, et localiser l'origine de ces rayons cosmiques à une minute d'arc près. Il s'agit d'une source située au centre exact de la Voie Lactée, capable d'accélérer des protons jusqu'à des énergies voisines du pétaélectronvolt, c'est-à-dire 10 à la puissance 15 électrons volt, un million de milliards d'électrons-volts !

² L'électron-volt est l'énergie d'un électron placé dans un champ électrique de 1 volt. Cette énergie correspond à celle d'un photon de longueur d'onde voisine d'un micron.

³ Le nom a été choisi en l'honneur du physicien allemand Victor Hess qui a découvert l'existence des rayons cosmiques.

Quel est donc ce « pévatron », comme l'appellent les chercheurs de la collaboration HESS, qui ont publié en mars un article dans la revue Nature ?

Tous les modèles proposés jusqu'à maintenant pour l'accélération de rayons cosmiques dans la Galaxie rencontrent des difficultés pour expliquer les énergies supérieures à 10^{13} électron-volts. En effet, la distribution spectrale observée du rayonnement gamma ne présente aucune coupure vers une dizaine de téraélectron-volt, comme elle devrait le faire si elle était due à des restes de supernovae par exemple, objets les plus souvent invoqués pour rendre compte de l'existence des rayons cosmiques.

Les chercheurs proposent donc que le trou noir supermassif Sgr A* soit à l'origine des ces cosmiques. Il faut pour cela qu'il ait été plus actif qu'actuellement dans le passé. Mais ce n'est pas un problème, car on sait qu'il l'a été effectivement puisque le satellite Fermi a montré qu'il avait créé une immense bulle de rayons gammas correspondant à un phénomène s'étendant sur plusieurs millions d'années (elle a été mentionnée à plusieurs reprises dans ces actualités, mais il faut rappeler qu'elle pourrait être aussi être produite par les supernovae de la Galaxie). On sait aussi qu'il a une activité variable, puisqu'il présente des flashes de rayons X en provenance de l'environnement proche du trou noir.

En résumé, les observations accumulées par HESS montrent qu'il existe au centre de la Galaxie, à l'intérieur d'une région d'une trentaine d'années-lumière, un « pévatron », ou accélérateur de rayons cosmiques atteignant le péta-électron-volt. Il est plus que probable que ces cosmiques ont été produits dans le passé par le trou noir supermassif central. Jusqu'à maintenant, il existait une forte controverse concernant l'origine du rayonnement gamma de grande énergie autour des trous noirs supermassifs. Certains prônaient la décroissance de rayons cosmiques (des particules « lourdes », que l'on nomme des hadrons), d'autres l'effet Compton inverse dû à des électrons (des « leptons »). Cette découverte pourrait donner la préférence à la première hypothèse et ouvrir un champ d'exploration nouveau pour la physique des trous noirs.

Par ailleurs, l'activité actuelle de Sgr A* ne permet pas d'expliquer à elle seule l'intensité du rayonnement cosmique observé sur Terre. Mais si le trou noir central produit effectivement des rayons cosmiques et s'il a été plus actif dans le passé, comme le montre le rayonnement gamma des nuages moléculaires du centre galactique, il a pu produire à lui seul la quasi-totalité du rayonnement cosmique observé à ces énergies. Ce qui résoudrait le problème de l'identification de l'origine du rayonnement cosmique, l'un des plus grands défis posés à la science depuis un siècle !

Les rayons cosmiques sont des particules, essentiellement des protons, accélérés à des vitesses voisines de celle de la lumière. Il en provient du Soleil et de nombreuses sources dans la Galaxie. On les appelle traditionnellement « rayons cosmiques » bien que ce ne soit pas du rayonnement électromagnétique. La Terre est bombardée en permanence par ces particules. Comme elles sont chargées électriquement, elles sont déviées par les champs magnétiques du milieu interstellaire de la Galaxie et il est impossible d'identifier directement les sources responsables de leur production. Mais heureusement, les particules cosmiques interagissent avec la lumière et le gaz au voisinage de leur source et produisent alors des rayons gamma qui, eux, se déplacent en ligne droite, permettant de remonter à leur origine. Ceux d'entre eux qui atteignent la Terre, au contact de la haute atmosphère, produisent une gerbe de particules secondaires émettant une lumière très brève et ténue, celle qui est observée par le télescope HESS et d'autres semblables.

Le réseau de télescopes HESS en Namibie tel qu'il est actuellement Depuis deux ans, il a été complété par le grand télescope que l'on voit au centre, et il se nomme maintenant HESS II.



Image du centre galactique en rayons gamma observé par HESS. L'échelle de couleur donne l'intensité du rayonnement. Les lignes noires montrent les régions observées et les contours blancs indiquent la densité des nuages moléculaires. L'étoile noire donne la position de Sgr A*. La figure de droite montre la région où a été mesurée l'émission gamma diffuse. Crédit Collaboration HESS.

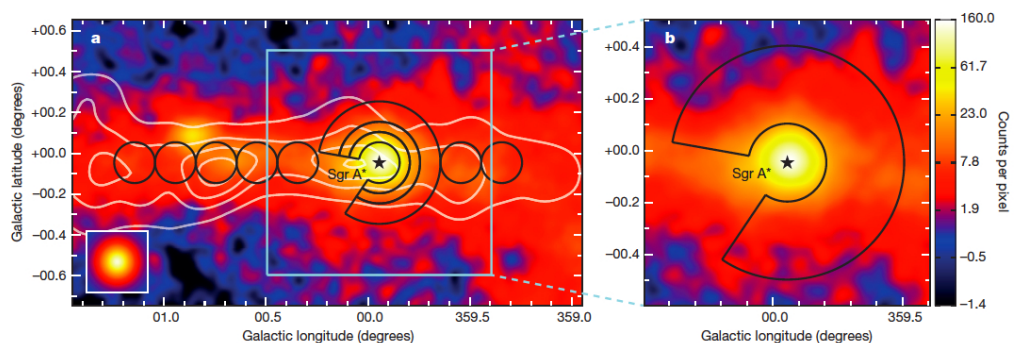
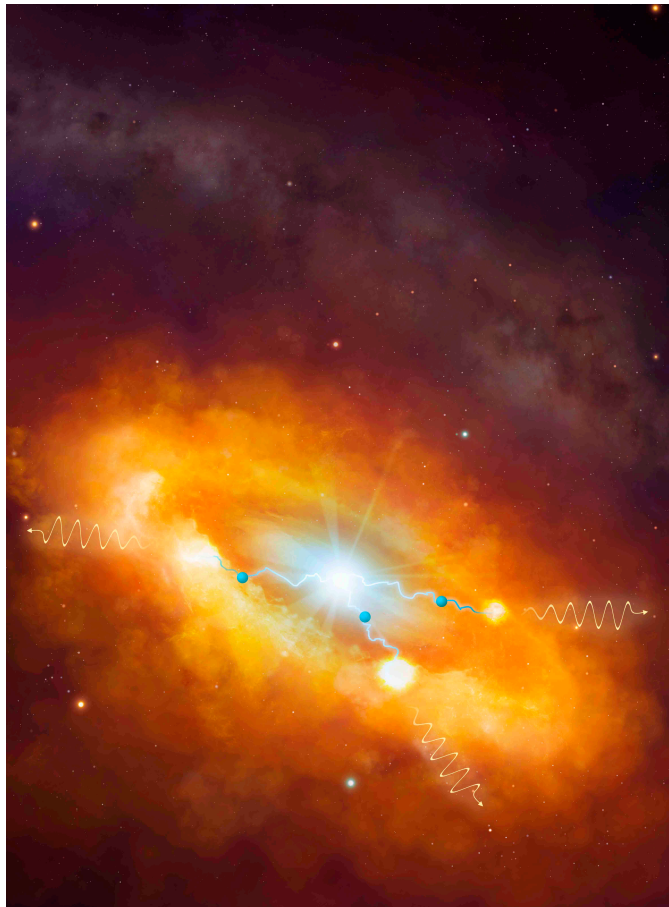
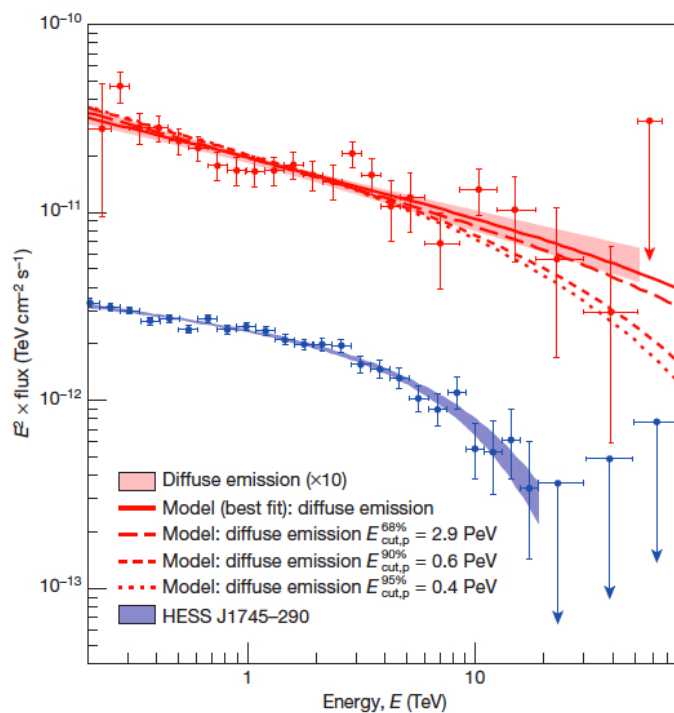


Image d'artiste montrant le processus de rayonnement des nuages. Ils sont bombardés par des rayons cosmiques en provenance du trou noir central. Ceux-ci produisent alors les photons gamma observés.



Cette figure montre la distribution spectrale du rayonnement gamma de l'émission diffuse (en haut) et celle d'une source gamma dont on ignore encore si elle est liée au trou noir, HESS J1745-290. Crédit Collaboration HESS.



La relativité générale prévoit les sursauts du blazar OJ 287 au jour près !

Une énorme campagne d'observation a été lancée pour observer le blazar OJ 287 pendant les mois de novembre et de décembre 2015. Elle a mis en œuvre plusieurs télescopes, et a obtenu l'aide d'astronomes amateurs. En effet, le modèle de trou noir binaire avait prédit une éruption majeure en décembre 2015. Celle-ci s'est bien produite à la date attendue, avec un pic de magnitude 13 le 5 décembre, et elle a confirmé les prédictions de la relativité générale.

Les « blazars » sont des quasars dont le jet et l'axe de rotation du disque d'accrétion⁴ ont une direction proche de la ligne de visée. Le rayonnement du jet est amplifié dans notre direction par un effet relativiste et présente par conséquent de fortes variations. OJ 287 est l'un des blazars les plus étudiés depuis cinquante ans. En fait, il l'est depuis un siècle et demi, car on en trouve des photographies datant du dix-neuvième siècle et montrant ses variations d'éclat. Superposées à des variations assez faibles et lentes, il présente des flashes de plusieurs magnitudes. On dit qu'il est « quasi-périodique » car il semble que ces flashes ont une périodicité d'environ 12 ans. Un point important est que les flashes sont doubles.

On a suggéré dès les années 1990 qu'il s'agissait d'un couple de trous noirs supermassifs très proches, dont le trou noir le plus léger traversait le disque d'accrétion entourant le plus lourd. Cette hypothèse vient d'être confirmée par les observations récentes d'une équipe internationale d'une centaine de chercheurs comprenant des astronomes amateurs, conduite par l'astronome finlandais qui avait proposé cette hypothèse vingt ans plus tôt (arXiv:1603.04171v, Valtonen et al.). Le modèle est très précis. C'est un système binaire composé d'un trou noir de 18 milliards de masses solaires autour duquel gravite un autre bien plus petit, de 100 millions de masses solaires. Ce dernier traverse le disque d'accrétion du gros trou noir en créant deux flashes : le premier lorsqu'il pénètre dans le disque et le second lorsqu'il en ressort, car il produit dans les deux cas l'expulsion d'une bulle de gaz chaud qui rayonne. La périodicité de 12 ans n'est pas exacte, car le système fait intervenir des champs gravitationnels élevés, et l'émission d'ondes gravitationnelles doit être particulièrement forte. Donc l'orbite du petit trou noir varie continuellement. Cependant, en combinant les effets de la théorie relativiste des disques d'accrétions autour des trous noirs et celle de l'émission d'ondes gravitationnelles, on pouvait prédire à quelques jours près la date des deux pics de lumière.

Et c'est ce qui a été réalisé. L'équipe a montré que l'éruption de novembre-décembre 2015 est en parfait agrément avec l'hypothèse d'un trou noir binaire. C'est un résultat remarquable qui apporte une **confirmation supplémentaire à l'émission d'ondes**

⁴ Le disque d'accrétion est la structure par laquelle le trou noir est alimenté en matière. En effet, la probabilité pour que celle-ci tombe directement sur le trou noir est faible à cause de sa vitesse initiale, et elle s'écoule vers le centre en spiralant de nombreuses fois et en formant un disque dans lequel elle perd une partie de son énergie par viscosité. Il se forme le long de l'axe de rotation du disque un jet de gaz animé d'une très grande vitesse. Son mécanisme de formation n'est pas encore complètement établi.

gravitationnelles par un trou noir binaire. Par ailleurs des mesures par le satellite Swift observant en rayons X et des données de polarisation ont fourni une estimation précise pour la rotation du trou noir primaire, très proche de la rotation maximum. C'est la première fois que la rotation d'un trou noir est mesurée avec cette méthode. Malheureusement, cet objet est tout à fait exceptionnel, et l'on ne peut espérer refaire une mesure semblable sur d'autres quasars, au moins dans un futur proche.

Courbe de lumière récente de OJ287 dans la bande V. Les précurseurs sont marqués par des flèches, et les maximum des flashes par des lignes verticales.

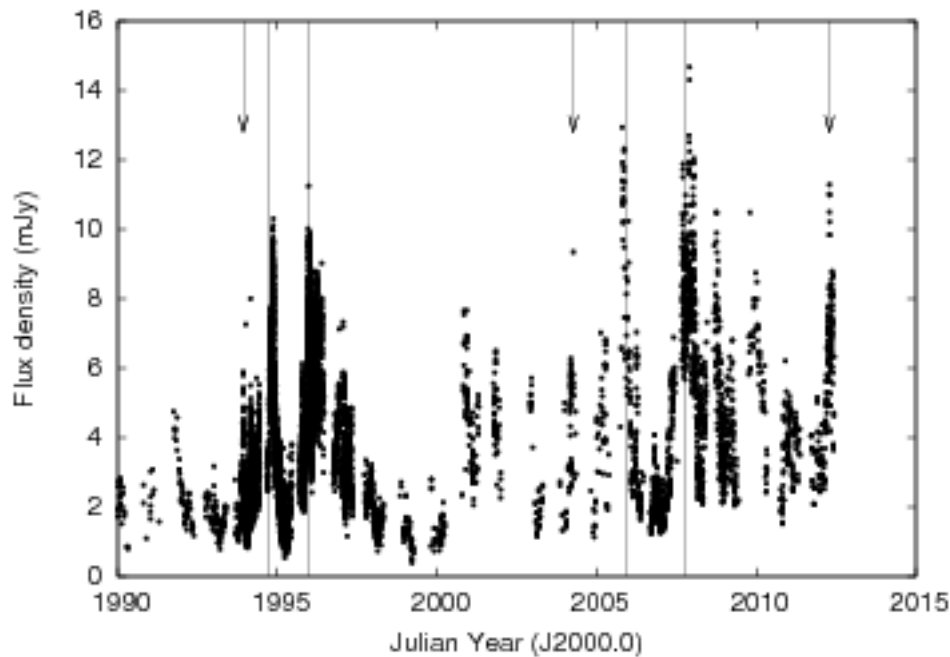


Schéma du modèle pour OJ287. En blanc, les deux pics de luminosité causés par la pénétration du petit trou noir dans le disque d'accrétion du second. L'orbite du petit trou noir est prédite jusqu'en 2023. Crédit : Tuorla Observatory.

