

Pour la petite histoire, le 10 avril, j'étais en Ouzbékistan. Avec le faible wifi de l'hôtel, j'ai suivi la conférence de presse de l'EHT. C'était un peu frustrant de ne pas pouvoir répondre aux nombreuses sollicitations.

Les trous noirs sont aussi au centre d'une découverte majeure, la détection d'ondes gravitationnelles en septembre 2015. Qu'est-ce que cela vous inspire ?

Jean-Pierre Luminet : Là encore, c'était attendu, puisque parfaitement prévu par la théorie. D'autre part, de nombreux progrès instrumentaux et techniques laissaient penser qu'on y arriverait. Mais peut-être pas aussi vite... La détection a eu lieu dès que le niveau de sensibilité nécessaire a été atteint. Et, depuis, les événements s'accumulent. Déjà dix ont été confirmés, et l'on compte une trentaine de candidats en attente de validation.

Est-ce étonnant qu'il y en ait autant ?

Jean-Pierre Luminet : C'est en effet une surprise. Il y a beaucoup plus de fusions de trous noirs, et donc de trous noirs, qu'on ne le pensait. En outre, les estimations de masses données correspondent à des trous noirs plus massifs qu'on ne l'imaginait. Le plus souvent, la masse des trous noirs dits « électromagnétiques », ceux des sources X binaires détectés, ne dépasse pas 10 fois la masse du soleil. Là, elles sont de l'ordre de 30 masses solaires, et vont jusqu'à 60 ! On doit affiner nos modèles pour l'expliquer.

On pense alors à la matière noire...

Jean-Pierre Luminet : Les trous noirs sont de fait des candidats naturels pour l'expliquer. Mais il y en a toujours beaucoup trop peu pour rendre compte d'une partie significative de cette matière noire. Même les trous noirs primordiaux, nés peu après le Big Bang, sont insuffisants.

Avec ces ondes gravitationnelles, le plus intéressant est ailleurs : dans la détection de celles nées de la fusion de deux étoiles à neutrons, comme ce fut le cas le 17 août 2017, car on dispose également du signal électromagnétique qui accompagne le phénomène, notamment le sursaut gamma. On peut en suivre la décroissance grâce à tout un arsenal de télescopes dans les longueurs d'onde différentes (voir *À l'écoute des ondes gravitationnelles*, par D. Buskulic, page 22). Tous les modèles de coalescences peuvent alors être testés et contraints.

Il y a beaucoup plus de fusions de trous noirs, et donc de trous noirs, qu'on ne le pensait

On entend dire que ces ondes gravitationnelles sont une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Qu'en pensez-vous ?

Jean-Pierre Luminet : C'est bien le cas. Avec les ondes gravitationnelles, on est débarrassé de toute autre forme d'interaction, car l'Univers y est totalement transparent. La totalité de l'Univers devient accessible, même la période datant d'avant le fond diffus cosmologique, c'est-à-dire les 380 000 premières années de l'histoire cosmique pour lesquelles on ne dispose d'aucun signal électromagnétique (l'Univers était opaque).

Reste néanmoins le problème de l'amplitude. Seules les ondes gravitationnelles émises par les systèmes binaires dont nous avons parlé sont détectables à ce jour par *Virgo* et *Ligo*. Pour espérer « entendre » par exemple les ondes gravitationnelles dites « primordiales », prédites par certains modèles, les appareils doivent gagner en sensibilité. C'est le sens de *Lisa*, un projet d'interférométrie spatiale de l'Agence spatiale européenne (ESA), une mission phare de l'astrophysique du XXI^e siècle.

Les fréquences sont aussi un paramètre important. *Lisa* aura accès à des gammes correspondant cette fois à la fusion de deux trous noirs supermassifs, un événement consécutif à la fusion de galaxies.

Autre avantage de *Lisa*, l'anticipation. Avec les détecteurs au sol, on ne recueille le signal que des quarante dernières secondes de la fusion. Le futur dispositif (une constellation de trois satellites formant un triangle équilatéral de 2,5 millions de kilomètres de côté) détectera quasiment dix ans avant la fusion les trous noirs en orbite et émettant déjà des ondes gravitationnelles. Débarrassée de toutes les complications électromagnétiques, neutriniques... l'astronomie gravitationnelle sera tellement précise qu'elle pourrait prédire à l'heure près, plusieurs années à l'avance, le moment de la fusion !

Revenons à la matière noire, cette autre entité obscure de l'Univers. Pouvez-vous nous rappeler d'où vient cette idée ?

Jean-Pierre Luminet : Rappelons pour commencer que le modèle standard de la cosmologie est noté Λ CDM. Son écriture même met en avant deux problèmes ! Le Λ est associé à celui de l'énergie sombre, nous y reviendrons, tandis que CDM renvoie à la matière noire, car ces lettres signifient *cold dark matter*, soit « matière noire froide ». Ce modèle n'est pas forcément le bon, mais il est celui qui, pour l'instant et vraiment de loin, explique le maximum d'observations.

L'idée de matière noire est née des observations de Fritz Zwicky en 1933. Dans l'amas de Coma, il a constaté que les vitesses de dispersion des galaxies étaient bien trop élevées par rapport à ce que laissait supposer la matière visible. Il devait donc y avoir une « masse manquante », une matière noire. C'est un principe très général ! La détection de tout ce qui est noir a procédé de la même façon, par des détectations indirectes. Ce fut aussi le cas pour Neptune, découverte à partir des perturbations d'Uranus.

Puis dans les années 1950, des astrophysiciens se sont intéressés aux courbes de rotation des galaxies spirales. En s'en tenant à la seule matière visible, les vitesses des étoiles au sein d'une galaxie devraient décroître à mesure qu'on s'éloigne du centre. Ce n'est pas le cas ! Les vitesses atteignent en fait un plateau. Pour l'expliquer, on a imaginé là aussi une « matière noire » qui dans un vaste halo sphérique autour de la galaxie et y change le potentiel gravitationnel.

Ces deux arguments expérimentaux, déjà assez forts, laissaient soupçonner qu'il y avait au moins de l'ordre de dix fois plus de matière noire que de matière visible. On pensait néanmoins à une matière noire ordinaire, dite « baryonique », semblable à celle qui constitue justement la matière lumineuse. ➤

> Mais des arguments théoriques ont changé la donne ?

Jean-Pierre Luminet : Oui. Grâce à la nucléosynthèse primordiale, on sait désormais que la matière baryonique, plus précisément sa densité, atteint au maximum 5 % de la densité critique (l'ensemble des constituants de l'Univers), cette densité théorique qui ferait que l'Univers serait globalement euclidien (plat), comme le suggèrent les observations.

Un deuxième élément théorique absolument fondamental est venu avec l'idée d'inflation développée dans les années 1980. Selon ce modèle, d'une part l'Univers a enflé considérablement dans ses premiers instants, mais d'autre part, sa densité est très proche de la densité critique. Donc, pas de doute, énormément de choses manquent à l'appel.

Enfin, un troisième élément théorique est apparu avec l'élaboration des théories au-delà du modèle standard des particules. Par exemple, la supersymétrie (SUSY) postule l'existence de partenaires dits « supersymétriques » à toutes les particules déjà connues, des « sparticules », parmi lesquelles se trouvent des candidats pour la matière noire non baryonique. D'autres théories ont vu le jour, chacune venant avec ses particules de matière noire non baryonique, comme les axions (voir *L'axion, une idée qui a la cote*, par L. Rosenberg, page 56). Mais tous ces modèles restent extrêmement spéculatifs et tiennent de moins en moins bien la route.

En fin de compte, quelles sont les hypothèses ?

Jean-Pierre Luminet : On se retrouve avec trois types de matière noire : la chaude, la tiède et la froide, respectivement notées HDM, WDM et CDM. Ce n'est pas une question de température, mais plutôt de vitesse. Les particules de matière noire chaude seraient, comme les neutrinos, des particules animées de vitesses relativistes. La matière noire tiède serait constituée de particules intermédiaires plus lentes, comme les neutrinos stériles. Et la froide, qui a fini par devenir le modèle standard de la cosmologie, serait soit des axions, soit les neutralinos, des particules prédites par la supersymétrie.

En quoi consistent les neutrinos stériles ?

Jean-Pierre Luminet : Le modèle standard au sens strict prédit trois espèces

de neutrinos dont on a découvert en 1998 les oscillations : ils passent d'un type à un autre. Pour ce faire, ils doivent avoir une masse. Cependant, elle est si faible qu'elle interdit aux neutrinos de rendre compte de la matière noire. C'était le sujet d'une de mes premières publications en cosmologie en 1981 peu après celle sur les trous noirs.

Mais les neutrinos ordinaires sont des particules étranges. Normalement, les particules peuvent avoir deux hélicités (une propriété liée au spin), soit droite

contient de nombreux paramètres libres que l'on peut adapter pour la repousser toujours plus loin. Ce que fait David Gross et quelques autres tenants de la supersymétrie, qui ne veulent pas abandonner l'idée, au départ, avouons-le, assez jolie.

Donc David Gross n'honorera jamais son pari ?

Jean-Pierre Luminet : Il y a peu de chances ! Rappelons l'histoire. En 1994, au cours d'un dîner bien arrosé, en

On distingue trois matières noires : la chaude, la tiède et la froide. Ce n'est pas une question de température, mais de vitesse

soit gauche. Pourtant, on ne connaît aucun neutrino droit. L'une des explications possibles est, sur la base des travaux du physicien italien Ettore Majorana, d'imaginer une nouvelle particule, une quatrième espèce de neutrino, dit « stérile » parce que, contrairement aux autres (dits « actifs »), il n'interagirait que *via* la gravité. En principe, ces neutrinos stériles pourraient être suffisamment massifs pour rendre compte de tout ou partie de la matière noire.

Comment trancher ?

Jean-Pierre Luminet : Deux solutions. Examiner les prédictions astrophysiques liées à chacun des types de matière noire et comparer avec des observations, ou bien détecter les particules associées. Cette dernière option a été peu concluante, malgré tous les efforts déployés (voir *La grande quête inachevée* par A. Riazuelo, page 50). Si la détection a échoué, peut-on fabriquer artificiellement les particules à haute énergie ? Le LHC, et quelques autres accélérateurs, s'y sont essayés, mais en vain, même pour les neutralinos qui, normalement, dans les théories de supersymétrie les plus simples, seraient dans la gamme de masse et d'énergie accessibles. Mais la supersymétrie, comme beaucoup de théories,

Sicile, les physiciens Kenneth Lane et David Gross font un pari sur le LHC, encore au stade de plans. Prouvera-t-il la théorie Susy en détectant une des particules prédites ? Kenneth Lane pense que non. L'enjeu est un repas chez Frédy Girardet, sacré « Cuisinier du siècle » par Gault et Millau, dans son restaurant près de Lausanne.

Aujourd'hui, Frédy Girardet n'officie plus (le restaurant, très réputé, existe toujours), mais le LHC a collecté plus de $1,5 \times 10^{25}$ données (trois fois plus que ne le préoyaient les termes du pari) sans donner le moindre signe d'une « sparticule ». Selon Kenneth Lane, il est temps pour David Gross, qui entre-temps a obtenu le prix Nobel de physique en 2004, de payer. Aux dernières nouvelles, le gagnant s'impatience...

Qu'en est-il alors des aspects astrophysiques des différentes théories ?

Jean-Pierre Luminet : En l'absence de particule détectée, les astrophysiciens peuvent tester les conséquences qu'imposent les différentes théories sur la structure et l'évolution de l'Univers. Ils s'intéressent le plus souvent à la formation des grandes structures (étoiles, galaxies, amas de galaxies, superamas...), aux lentilles gravitationnelles