

➤ **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

et aux anisotropies du rayonnement fossile. Ce sont des tests assez forts ! À cette aune, la matière sombre chaude est quasiment éliminée, car le scénario qu'elle prévoit (la formation des superamas qui se fragmentent en amas, puis en galaxies...) n'est pas compatible avec ce qui est observé aujourd'hui : le film est inversé.

La matière noire froide résiste quant à elle assez bien. Elle explique à peu près correctement la hiérarchie des structures, et est compatible avec ce que l'on déduit des lentilles gravitationnelles et des anisotropies du fond diffus.

Reste la matière noire tiède, les neutrinos stériles. Elle a été un peu moins étudiée que les autres, mais parmi les variantes du modèle, les plus simples reproduisent les mêmes choses que la matière froide à grande échelle. Seuls des tests à l'échelle subgalactique distingueraient les deux théories, car elles font des prédictions différentes. Les travaux sont en cours. C'est par exemple le comptage de galaxies naines autour des galaxies, ou bien l'étude des courants stellaires que l'on observe dans des galaxies en interaction.

N'y a-t-il pas d'autre option ?

Jean-Pierre Luminet : Elle consiste à ne pas se casser la tête avec des particules de matière noire. On peut alors se tourner vers les théories de la gravitation modifiée, comme l'a fait en 1983 le physicien israélien Mordehai Milgrom avec *Mond* (pour *Modified Newtonian dynamics*). Schématiquement, l'idée consiste à dire que sur de grandes échelles, la gravité selon Newton est atténuée.

Le problème est que *Mond* ne fonctionne pas de la même façon selon les échelles. La théorie souffre d'un vrai problème d'universalité. Par ailleurs, de plus en plus d'observations la mettent en difficulté. On a découvert par exemple des galaxies, comme Dragonfly 44, constituées à 98% de matière noire. *Mond* est incapable de l'expliquer.

Autre possibilité, se tourner vers les fascinantes théories de gravité émergente. Le physicien Erik Verlinde s'est fait connaître depuis quelques années sur ce sujet, mais l'idée en revient au physicien américain Ted Jacobson. Il s'est inspiré dans les années 1990, des travaux de Jacob Bekenstein et Stephen Hawking sur l'entropie des trous noirs pour insister sur le fait qu'il y a une vraie corrélation entre la relativité générale et la thermodynamique. En quelques mots, la

structure intime de l'espace-temps serait constituée de bits quantiques intriqués d'où la gravité émergerait : elle ne serait plus une interaction fondamentale. Dans des zones plus ou moins bien intriquées se crée quelque chose qui ressemble à l'énergie sombre répulsive. Et d'interactions avec la matière baryonique, surgirait une force supplémentaire, attractive cette fois, simulant très bien la matière noire non baryonique. La matière noire est devenue un artefact.

Erik Verlinde a commencé à appliquer sa théorie pour expliquer les courbes de rotation des galaxies spirales. Et il y est parvenu ! La prochaine étape consistera à utiliser la théorie pour rendre compte des anisotropies du fond diffus et des lentilles gravitationnelles. Il y a encore beaucoup de travail, mais c'est assez joli, il faut le reconnaître.

Laquelle parmi toutes ces théories aurait votre préférence ?

Jean-Pierre Luminet : Difficile de répondre. Je travaille actuellement à mon prochain livre qui récapitule les différentes approches en gravité quantique et pèse le pour et le contre de chacune. Dès

partie intégrante de la relativité générale et explique correctement les choses. Mais comme dans le cas du modèle standard des particules, les astrophysiciens ont proposé de nombreuses théories, des extensions de la théorie des cordes, des adaptations de la théorie quantique des champs... C'est enthousiasmant, certes, et c'est important d'avoir de l'imagination, mais la physique actuelle ne souffre-t-elle pas d'un excès d'imagination par rapport au déficit de données expérimentales ?

James Peebles, Prix Nobel en 2019, n'est-il pas du même avis que vous ?

Jean-Pierre Luminet : En effet. Il a été l'un des premiers à reconnaître le travail de Georges Lemaître et à ressortir du « placard de la cosmologie » la constante dont on a bien besoin pour expliquer pourquoi la densité de l'Univers est quasiment proche de la densité critique alors que la matière baryonique noire n'en compose que 5%. Dès les années 1980 et la découverte de l'inflation, il a proposé de réintroduire la constante cosmologique. Mais il n'a pas été entendu.

Dans certaines théories, la structure intime de l'espace-temps serait constituée de bits quantiques intriqués

que j'en aborde une nouvelle, je suis séduit. Et puis, je passe à une autre...

Passons pour finir à l'énergie sombre, le fameux Λ . Que peut-on en dire ?

Jean-Pierre Luminet : Elle a été proposée pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers, en 1998. Cependant, bien avant d'« inventer » l'énergie sombre, on avait déjà la constante cosmologique, dans la version de Georges Lemaître (voir *Indispensable constante cosmologique*, par J.-P. Luminet, page 92). Je continue à penser qu'elle fait

Par ailleurs, je l'admire beaucoup. C'est vraiment, avec George Ellis, et deux ou trois autres, l'un des vrais grands cosmologistes encore vivants qui maîtrisent à la fois la théorie, les observations... à l'occasion de son Nobel, je lui ai adressé un bref courriel de félicitations. À ma grande surprise, il m'a vite répondu que les messages comme le mien, « venus du passé », étaient jusqu'ici la meilleure chose qu'il retirait de son prix...

PROPOS RECUEILLIS
PAR LOÏC MANGIN.