

N° 29 - TRIMESTRIEL NOVEMBRE 2007

LES DOSSIERS

DE **La** RECHERCHE

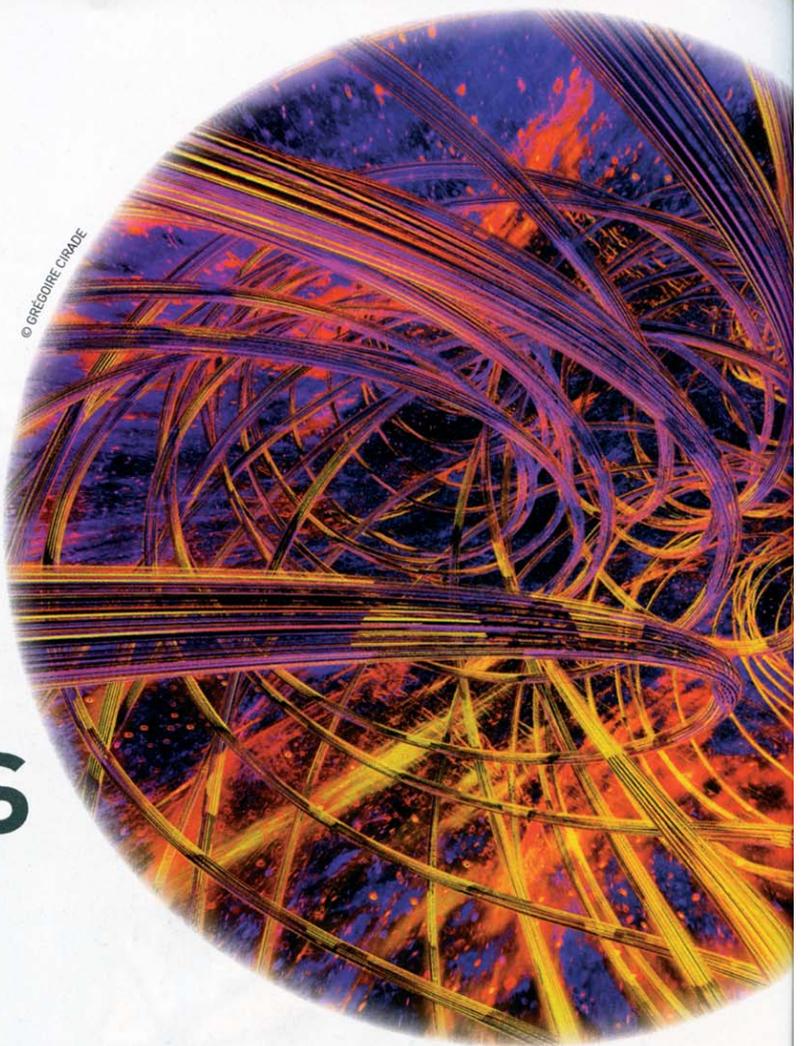
Le monde quantique

Les nouvelles frontières
de la physique

T 02751 - 29 - F: 6,60 € - RD



ALL 7,90 € - BEL 7,50 € - ESP 7,00 € - GR 7,00 € - ITA 7,00 € - LUX 7,50 € - PORT CONT 7,00 € - CH 12,30 FS - TUN 5900 TND - MAR 57 DH - CAN 9,95 \$ CAN - DOM 7,00 € - TOM SURFACE 1170 XPF - TOM AVION 2120 XPF ■ ISSN 1772-3809



© GRÉGOIRE CHAUDE

L'atelier du cosmos

Tous les ans, Peyresq, village des Alpes-de-Haute-Provence, accueille les Rencontres de cosmologie. En cette année 2007, les spécialistes confrontent leurs idées sur la structure microscopique et macroscopique de l'espace-temps. En toile de fond, une question récurrente : comment concilier gravitation et physique quantique ?

Nicolas Constans
est journaliste scientifique.

Printemps 2007, vallée de la Vaire. Au volant, le physicien Edgard Gunzig. Entre deux virages serrés et trois coups de klaxon, il évoque avec enthousiasme les Rencontres de cosmologie de Peyresq qu'il a fondées voilà douze ans. « *Tout a commencé un peu par hasard, à la fin d'un congrès sur la Côte d'Azur. Avec des collègues argentins et brésiliens, on s'est dit : "Pourquoi arrêter là nos discussions ? pourquoi ne pas les continuer quelque part ?"* » Moi, j'avais ma petite idée », explique Edgard Gunzig. Il leur parle de Peyresq, un hameau

perché à 1 500 mètres d'altitude qui fut le domaine d'un humaniste du xvij^e siècle, ami de Gassendi. Quand, en 1952, Georges Lambeau, le directeur de l'Académie des beaux-arts de Namur, le découvre en ruines, il propose à des amis bruxellois, Toine et Mady Smets, d'y créer un « Foyer d'humanisme ». Tous trois se lancent alors dans sa restauration, secondés par les enseignants et les étudiants de l'Université libre de Bruxelles. Edgard Gunzig, professeur – aujourd'hui émérite – dans cette université, connaît bien les lieux : « *On y est allés et on a télé-*

phoné à deux, trois collègues de Paris qui nous ont rejoints. » Les Rencontres de cosmologie étaient nées, pérennisées l'année suivante par la création d'une association. Le physicien aime à décrire le caractère si particulier de ces Rencontres, un lieu « *à la fois créateur et intimiste...* » « *Ici, c'est l'isolement assuré. Il n'y a jamais plus de vingt personnes, tout le monde est logé dans les maisons en pierre du village et chacun peut exposer ses travaux le temps qui lui convient. Pendant cinq jours, les chercheurs ont enfin le temps de bavarder ensemble.* »



Un concept éloigné des grands colloques internationaux. À Peyresq, le choix des participants se fait en collégialité : « *Il y a toujours des jeunes, et deux ou trois têtes nouvelles tous les ans.* »

Cette année, entre deux exposés, Brandon Carter, le père du principe anthropique*, Bei Lok Hu, spécialiste des liens entre cosmologie et physique quantique, ou encore Don Page, un proche collaborateur de Stephen Hawking, discutent sur la terrasse, face à la vallée ensoleillée. Mais sur quoi portent les débats ? En toile de fond, toujours la même interrogation : comment concier

lier la théorie de la relativité générale, élaborée par Einstein en 1915, et la physique quantique. La première est une façon radicalement nouvelle de décrire la gravitation : dans l'Univers, la présence des masses et des rayonnements se traduit par une courbure de l'espace et du temps. La seconde expose comment atomes, noyaux et particules interagissent. Toutes deux s'accordent extrêmement bien avec les tests expérimentaux – les observations astronomiques, principalement, pour l'une et les processus microscopiques pour l'autre.

La nécessité d'unifier ces deux approches est apparue en particulier avec la découverte de l'expansion de l'Univers par Vesto Slipher puis par Edwin Hubble, entre 1912 et 1929. Tout laisse à penser, en effet, que les éléments qu'il contient ont été, dans le passé, extrêmement proches les uns des autres. Ainsi, aux premières minutes de son existence,

il était suffisamment dense et chaud pour que des éléments comme l'hydrogène ou l'hélium soient formés : leurs proportions actuelles dans l'Univers concordent exactement avec cette hypothèse, comme l'ont montré George Gamow et Ralph Alpher, en 1948. Mais, aux toutes premières fractions de seconde, la concentration de masse était telle que, pour décrire ce qui s'y est alors produit, il faut disposer d'une théorie qui unifie relativité générale et physique quantique, soit une gravitation quantique.

Impossible d'échapper à cette unification. « *Cantonner la relativité générale et la physique quantique aux domaines respectifs où leurs prédictions sont vérifiées entraîne trop d'incohérences* », explique Bill Unruh, professeur à l'université de la Colombie-Britannique au Canada. Et de citer le cas des étoiles à neutrons, sortes de noyaux atomiques géants, larges d'une vingtaine de kilomètres et composés à 90 % de neutrons. Leur existence

Depuis les années 1930, les recherches suivent un chemin essentiellement spéculatif

s'explique par un équilibre entre la gravitation, qui tend à rapprocher les neutrons les uns des autres, et une force d'origine quantique, qui tend à les éloigner. De telles étoiles ne peuvent donc pas être décrites sans faire appel à la physique quantique. Problème : certaines de ses manifestations disparaissent dès lors qu'intervient la relativité générale. Ainsi, « *l'étoile à neutrons n'est jamais complètement au repos : il y a toujours des fluctuations quantiques qui la font vibrer. Or – nous dit la relativité générale – cette vibration produit des ondes gravitationnelles**, qui en épuisent l'énergie. Donc, rapidement, les fluctuations quantiques disparaissent : l'étoile ne vibre plus ».

Autre point épineux, les trous noirs. En 1974, Stephen Hawking a montré qu'à cause d'un mécanisme quantique un trou noir émet un rayonnement constitué de particules élémentaires. En conséquence, il s'évapore peu à peu jusqu'à disparaître complètement au bout d'un temps très long. « *Le problème, indique Bill Unruh, est qu'à ce moment-là toute information sur ce qu'il avait avalé auparavant est irrémédiablement perdue. Ce qui contredit la physique connue jusqu'ici, où l'on peut, au moins en principe, retrouver quel a été l'état initial d'un système à partir de son état final.* » Certains pensent qu'il doit exister tout de même un moyen de récupérer cette information, d'autres qu'elle a définitivement disparu ou, encore, qu'elle est piégée dans une région de l'espace-temps qui nous est inaccessible. Toute théorie de la gravité quantique devra donc éclairer ce paradoxe.

Mais pour le moment ni les données astronomiques ni les expériences de laboratoire ne contraignent fortement ce que doit être cette gravité quantique. De fait, depuis les années 1930, les

recherches ont suivi un chemin essentiellement spéculatif.

Pour commencer, les physiciens se sont tournés vers les procédures mathématiques utilisées avec succès par le passé pour adapter au cadre de la physique quantique les théories qui décrivent les trois autres interactions fondamentales*. En particulier, elles permettent de supprimer des quantités infinies qui apparaissent dans les calculs. Seulement voilà : cela ne fonctionne pas avec la gravitation ! Les valeurs infinies subsistent dans les équations et empêchent de faire la moindre prédiction.

Par ailleurs, « *toutes les théories utilisant le cadre de la physique quantique considèrent le temps comme* ▷

* Le **principe anthropique** énonce que les lois de la nature et les caractéristiques de l'Univers doivent être telles qu'elles permettent l'existence de l'homme.

* Les **interactions fondamentales** autres que la gravitation sont : l'électromagnétisme, l'interaction faible et l'interaction forte.

* Les **ondes gravitationnelles** sont des vibrations de l'espace-temps qui se propagent.



**La Recherche
a publié**

[I] Dossier :
« Faut-il en finir
avec la théorie
des cordes ? »,
411, 30,
septembre 2007.
[II] J.-O. Baruch,
« Et pourtant il
accélère ! »,
361, 34,
février 2003.



PEYRESQ est un hameau perché à 1 500 mètres d'altitude dans les Alpes-de-Haute-Provence. Des universitaires belges l'ont restauré pour en faire un « Foyer d'humanisme ». Les chercheurs viennent y trouver isolement et temps pour bavarder. © MONIQUE GABRIEL-PEYRESQ FOYER D'HUMANISME

▷ *quelque chose qui est à l'arrière-plan, à partir duquel on décrit les objets et leurs changements* », poursuit Unruh. Or, en relativité générale, la gravitation résulte de la courbure de l'espace, mais aussi de celle du temps. « *Donc, soudainement, ce temps qu'on utilisait pour décrire les phénomènes se met à prendre part à l'action !* », ajoute-t-il.

Aucune théorie n'a aujourd'hui résolu le problème posé par le temps, pas même celle qui a la faveur d'une grande partie de la communauté des chercheurs, la théorie des cordes. Ce terme introduit dans les années 1970 par Yoichiro Nambu, Holger Nielsen et Leonard Susskind, regroupe en fait un ensemble de théories quantiques, dont le dénominateur commun est de considérer les particules élémentaires comme les vibrations de cordes – des objets mathématiques réduits à

une seule dimension **[II]**. En 1974, Joël Scherk et John Schwarz, en Californie, et Tamiaki Yoneya, au Japon, ont montré que la gravitation apparaissait naturellement dans ces théories, pour peu qu'on les rende compatibles avec les principes de la relativité restreinte. Ce fut le début des espoirs fondés dans cette approche.

Gravité quantique à boucles

Seulement, « *dans ces théories, explique Bill Unruh, l'espace-temps est aussi un arrière-plan dans lequel sont plongées les cordes.* » Qui plus est, les espaces-temps utilisés ne sont pas réalistes, car, « *alors, les équations seraient beaucoup trop difficiles à résoudre* ». En fait, les chercheurs espèrent un jour démontrer que les théories des cordes actuelles découlent toutes d'une autre, plus fondamentale, où l'espace-temps ne serait plus à l'arrière-plan, mais,

cette fois, vraiment conforme à la relativité générale. Un problème un peu différent se pose à l'une des alternatives les plus connues à la théorie des cordes, la gravité quantique à boucles. Proposée en 1987 par Carlo Rovelli, Lee Smolin et Abhay Ashtekar, cette théorie met en jeu une équation où est décrit ce que devrait être la relativité générale si elle était quantique, en la reformulant complètement. « *Les tenants de la gravité quantique à boucles, explique Bill Unruh, insistent sur le fait qu'eux n'opèrent pas sur un espace-temps situé à l'arrière-plan.* » « *D'accord, ajoute Ted Jacobson, professeur à l'université du Maryland, mais, pour rendre quantique leur théorie, ils sont obligés, pour des raisons techniques, de traiter séparément espace et temps [donc de violer les principes de la relativité générale]. Ce n'est pas un problème s'ils montrent à la fin que cette séparation est temporaire... Or cette étape très importante n'est pas du tout achevée.* »

La théorie possède pourtant un atout de taille : l'espace y est formé

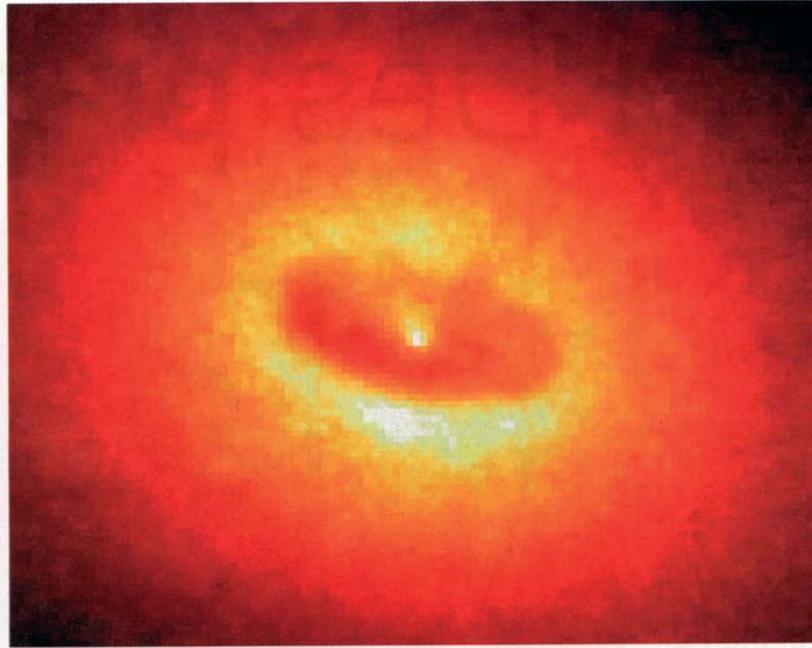


de boucles, des courbes fermées extrêmement petites, enchaînées les unes aux autres. Mesurer un volume dans cet espace revient à compter les intersections entre les boucles : le volume ne peut prendre que certaines valeurs, il est « quantifié », comme les niveaux d'énergie d'un atome.

Manque d'observations

Une idée séduisante à plus d'un titre. « Nombre de problèmes viennent du fait qu'en relativité générale l'espace-temps est continu », souligne Jacobson. Par exemple, l'apparition de valeurs infinies dès lors qu'on essaie de rendre quantique la gravitation ou, encore, l'impossibilité de décrire le centre infiniment courbe d'un trou noir.

« Les théories avec un espace-temps continu montrent leurs limites, poursuit Jacobson. Et d'ailleurs rien ne nous dit que la continuité est réellement présente dans la nature. » Le chercheur tente actuellement de déterminer comment cette non-continuité pourrait se manifester, par des écarts aux prédictions de la relativité générale



© W. JAFFE/LEIDEN OBSERVATORY, HOLLAND FORD/JHU/STSC, AND NASA

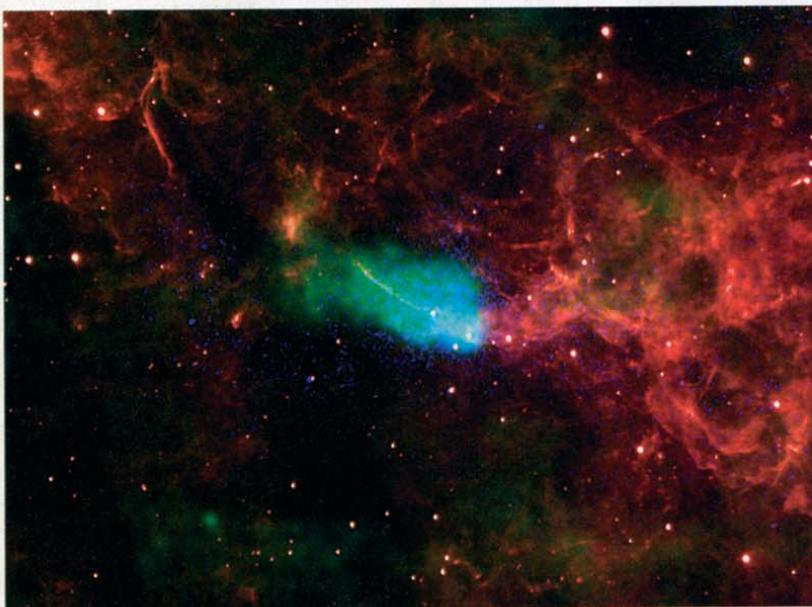
LE CŒUR DE LA GALAXIE NGC4261 pourrait abriter un trou noir qui serait alimenté par le disque de gaz froid et de poussière visible ici. L'évaporation des trous noirs conduit à la disparition de l'information sur ce qu'ils ont avalé, ce qui est contraire aux principes de notre physique.

par exemple dans les trous noirs. Car c'est bien là que le bât blesse. Toutes les théories de la gravitation quantique manquent cruellement de confrontation avec les observations et les expériences. Elles

ne fournissent pas, pour l'instant, de prédictions testables dans les accélérateurs de particules. Qui plus est, en 1998, elles n'ont pas prévu une découverte majeure : l'accélération de l'expansion de l'Univers [III].

La solution viendra peut-être, comme certains l'espèrent, de ce reliquat lumineux du Big Bang qu'on appelle le fond diffus cosmologique*. Ce rayonnement, globalement uniforme dans toutes les directions du ciel, comporte quelques irrégularités : ce sont les « traces » imprimées par la physique quantique aux tout premiers temps de l'Univers. Leur analyse très précise pourrait indiquer quelle théorie de la gravitation quantique est la plus plausible. C'est ce que va tenter de faire le satellite *Planck*, de l'Agence spatiale européenne, qui sera lancé en 2008. Nul doute que ses conséquences seront décortiquées en détail par les physiciens et les cosmologistes. Rendez-vous l'an prochain à Peyresq. ■ N. C.

* Le **fond diffus cosmologique** est une lumière émise quand l'Univers avait 380 000 ans : emprisonnée jusque-là dans un « brouillard » causé par les électrons libres, elle s'est échappée quand ceux-ci ont formé les premiers atomes avec les protons et les neutrons.



© CHANDRA X-RAY : NASA/CXC/B. GAENSLENER ET AL., RADIO NRAO/VLA/OPTICAL : DSS

JO617, UNE ÉTOILE À NEUTRONS, est visible dans la constellation des Gémeaux. L'existence de telles étoiles s'explique par un équilibre entre la gravitation et une force quantique. Il faut donc mêler relativité générale et physique quantique pour les étudier.