

né ou la rotation éventuelle de l'étoile. Son intuition lui soufflait que ces hypothèses ne changeraient pas fondamentalement le résultat : bien plus tard, des physiciens d'une autre génération, armés d'ordinateurs rapides, ont montré qu'il avait raison. Snyder trouva alors que la vision d'une étoile qui s'effondre dépend de la position de l'observateur de manière spectaculaire.

Deux points de vues

Commençons par un observateur au repos, à une distance prudente de

l'étoile. Supposons aussi qu'un autre observateur, à la surface de l'étoile, accompagne son effondrement et envoie des signaux lumineux à son collègue stationnaire. À mesure que l'étoile se contracte, l'observateur stationnaire voit les signaux de son homologue mobile qui se décalent progressivement vers l'extrémité rouge du spectre électromagnétique (par l'effet Doppler, qui fait paraître plus aiguë la sirène d'une ambulance qui approche que lorsque cette ambulance s'éloigne). Comme la fréquence d'un signal est assimilable au rythme d'une

montre, l'observateur stationnaire verra la montre de l'observateur mobile ralentir progressivement.

Lorsque le rayon de l'étoile sera égal à son rayon de Schwarzschild, la montre semblera s'arrêter complètement. L'observateur stationnaire affirmera que l'étoile a mis un temps infini pour se contracter jusqu'à son rayon de Schwarzschild, et il ne pourra pas savoir ce qui se passe après, puisqu'il n'existera pas d'après. Du point de vue de cet observateur, l'effondrement s'arrête lorsque le rayon de l'étoile est égal à son rayon de

Les erreurs d'Einstein

Avant les années 1960, la plupart des spécialistes de la relativité générale pensaient que le champ gravitationnel à l'extérieur d'une concentration sphérique de matière (étoile ou atome) était proche de celui que prévoyait la théorie de Newton. Ce champ était même si proche de celui prédit par la théorie newtonienne, qu'il était difficile de trouver des tests qui permettraient de savoir si la gravitation s'accordait plutôt avec la théorie de Newton ou avec celle d'Einstein.

On pouvait toutefois poser un cas d'école : quel était le champ gravitationnel d'une énorme sphère de matière supposée concentrée en un point afin de bien en étudier le champ gravitationnel ? Très près du centre, apparaissait une limite étrange : le rayon de Schwarzschild (égal à $r = 2GM/c^2$, où G est la constante de gravitation, M la masse de la sphère et c la vitesse de la lumière). Beaucoup de travaux ont alors été consacrés à l'étude des propriétés de cette sphère. L'opinion répandue – entre 1915 et les années 1960 – était qu'il s'agissait bel et bien d'une *singularité* qui semblait impénétrable, d'une «sphère magique», pour reprendre le terme d'Eddington.

Un tel objet stellaire ne pouvait se former ; d'une part, parce qu'il n'existait pas de matériau assez dense pour cela, mais aussi parce que la limite de Schwarzschild était infranchissable. Ainsi, la singularité de Schwarzschild ne pouvait-elle pas exister dans la réalité physique, et la question restait un cas d'école. Bref, on avait l'esprit tranquille. C'est cette tranquillité d'esprit que menacent les travaux d'Oppenheimer et de ses élèves, mais que défend Einstein avec quelque entêtement.

La même question posée par Oppenheimer et Snyder et par Einstein aura – ainsi qu'y insiste J. Bernstein – deux réponses opposées. L'origine de cette différence se situe sans doute dans l'opinion d'Einstein, qui croit et veut l'impénétrabilité. Cette croyance se traduit par le choix d'un modèle particulier pour étudier la possibilité de l'effondrement d'une étoile : tandis qu'Oppenheimer et Snyder choisissent une symétrie radiale (on accepte que cela tombe !), Einstein assujettit les particules constituant son modèle à suivre des cercles (on est loin de la chute !)... C'est un peu comme si vous tentiez de compri-

mer un ressort non pas normalement mais latéralement, en essayant d'en réduire le diamètre. Bref, Einstein a fait entrer dans son modèle une contrainte qui le conduit inévitablement à sa conclusion.

En fait, plusieurs travaux – qu'Einstein n'a probablement pas lus – réalisés dans les années 1930, montrent que la limite de Schwarzschild n'est pas singulière ; notamment des travaux de Robertson, qu'Einstein remercie dans son article. Mais il n'est pire sourd que celui qui ne veut pas entendre...

C'est qu'il s'agit d'une question essentielle qui concerne la cohérence de la théorie. Einstein est, depuis toujours, opposé à ce qu'une solution physique puisse exhiber une singularité, car, ainsi qu'il l'écrit quelques années plus tôt dans un article déjà consacré à cette question, «une singularité apporte tant d'arbitraire à la théorie qu'elle en invalide les lois.» Si une singularité existe en un point, la physique en ce point de l'espace-temps n'est plus déterminée ; mais, dans la mesure où la physique de la relativité générale modèle l'espace-temps lui-même, une singularité représente une discontinuité de l'espace.

On comprendra mieux les difficultés d'Einstein si l'on sait que le vaste problème des singularités en relativité générale n'est toujours pas bien résolu, même si, dans les années 1960, l'on a répondu à la question précise sur laquelle Einstein a achoppé.

Toutefois, en 1939, il n'était pas question de trous noirs ni pour Einstein ni pour quiconque. Pour des raisons qui tiennent à la conception que l'on avait alors de la relativité générale, ces objets étranges n'ont pu être imaginés avant les années 1960 ; ils ne seront acceptés que plus tard, et leur existence (astrophysique) n'est pas encore claire. Étrangement, les «corps obscurs», des objets proches des trous noirs par plusieurs aspects, ont été imaginés assez facilement dès le XVIII^e siècle dans le cadre de la théorie de la gravitation de Newton.

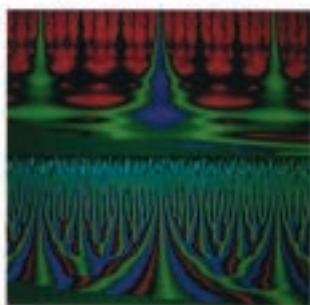
Jean EISENSTAEDT,
Laboratoire gravitation et cosmologie relativistes, Paris

SCIENCES D'AVENIR

BARBARA BURKE HUBBARD

ONDES ET ONDELETTES

LA SAGA D'UN OUTIL MATHÉMATIQUE



PRIX D'ALEMBERT 1996

ONDES ET ONDELETTES

B. Burke Hubbard

L'élaboration des ondelettes est une saga moderne. Fourier a inventé la décomposition d'un signal en éléments simples ; pour les besoins de l'analyse du signal, physiciens et mathématiciens ont inventé une nouvelle décomposition en ondelettes. Celle-ci est utile dans de nombreuses applications et ses richesses ne sont pas toutes exploitées.

Barbara Burke Hubbard est écrivain scientifique : elle retrace avec simplicité et chaleur comment les scientifiques pensent et hésitent avant que n'écluse une idée, et comment ils coopèrent. Voir bon de commande p. 98

POUR LA
SCIENCE
DIFFUSION BELIN

Schwarzschild : l'étoile est «gelée» dans l'état de Schwarzschild.

Jusqu'à ce que le physicien John Wheeler invente le nom «trou noir» lors d'un cours en décembre 1967, ces objets étaient souvent surnommés des étoiles gelées. Comme Oppenheimer et Snyder l'observèrent dans leur article, l'étoile qui s'effondre «tend à se fermer à toute communication avec un observateur distant ; seul persiste son champ gravitationnel». Autrement dit, un trou noir s'est formé.

Que voit, d'autre part, l'observateur rivé à l'étoile qui se contracte ? Pour lui, le rayon de Schwarzschild n'a pas de signification spéciale. Il le traverse et, en l'espace de quelques heures à sa montre, il atteindra le centre. Cependant, quelques temps après cette traversée, il subira des forces de marées considérables qui le mettront en pièces.

En 1939, le monde était lui-même sur le point d'être mis en pièces. Oppenheimer partit bientôt construire l'arme la plus destructive jamais conçue par l'homme, et il ne retravailla jamais plus sur les trous noirs. À ma connaissance, Einstein non plus. En 1947, la paix revenue, Oppenheimer devint directeur de l'Institut des études avancées de Princeton, où Einstein était encore professeur. Parfois ils discutaient, mais rien n'indique qu'ils aient parlé de trous noirs. Les progrès devront attendre les années 1960, où la découverte des quasars, des pulsars et des sources compactes de rayons X ravivèrent la réflexion sur le destin mystérieux des étoiles.

Jeremy BERNSTEIN est professeur de physique à l'Institut de technologie Stevens.

A. PAIS, *Albert Einstein : la vie et l'œuvre*, InterÉditions, 1993.

K. WALI, *Chandra : A Biography of S. Chandrasekhar*, University of Chicago Press, 1991.

J.-P. LUMINET, *Les trous noirs*, Seuil, 1992.

J. EISENSTAEDT, *Trajectoires et impasses de la solution de Schwarzschild*, in *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 37, p. 275; 1987.

J. EISENSTAEDT, *La préhistoire des trous noirs*, *Pour la Science*, février 1990.

K. SUGIMOTO, *Albert Einstein, biographie illustrée*, Belin, 1990.

J. SCHWINGER, *L'héritage d'Einstein*, Belin, 1988.