

le résultat de Chandrasekhar ne soit faux, toutes les étoiles massives étaient condamnées à disparaître dans un effondrement gravitationnel. Eddington trouva cela intolérable et contesta l'usage par Chandrasekhar de la physique statistique – à la fois publiquement et en privé. Ces critiques accablèrent Chandrasekhar, mais il tint bon, soutenu par des physiciens tels que Niels Bohr, qui lui assura qu'Eddington se trompait et qu'il ne fallait pas s'en faire.

Une sensation singulière

Tandis que certains exploraient ainsi la physique statistique et les naines blanches, d'autres examinaient le travail d'Einstein sur la gravitation : sa théorie de la relativité générale. À ma connaissance, Einstein passa peu de temps à rechercher des solutions exactes à ses équations de la gravitation. Pourtant, des solutions approchées décrivaient avec une précision suffisante des phénomènes tels que la courbure de la lumière par les étoiles. Aussi fut-il impressionné quand, en 1916, l'astronome allemand Karl Schwarzschild trouva la solution exacte

décrivant le champ gravitationnel produit par un corps à symétrie sphérique dans le vide.

Durant ses calculs, Schwarzschild observa qu'à une certaine distance du centre de l'étoile, le champ de gravitation semble devenir infini. À cette distance, nommée aujourd'hui rayon de Schwarzschild, la variable temps s'élimine des équations et l'espace devient infini. Les équations possèdent ce que les mathématiciens nomment une «singularité». Le rayon de Schwarzschild est généralement bien inférieur au rayon de l'objet considéré. Pour le Soleil, par exemple, il est égal à trois kilomètres, et pour une boule d'acier de une tonne (60 centimètres de diamètre), il est égal à 10^{-24} mètre (un millième de milliardième de milliardième de millimètre).

Schwarzschild savait que sa formule n'était plus valable pour ce rayon, mais il décida que ça n'avait pas d'importance. Il construisit un modèle simplifié d'étoile et montra qu'il faudrait un gradient de pression infini pour la comprimer jusqu'à ce rayon. Cette singularité, pensa-t-il, était sans intérêt pratique.

Toutefois Einstein restait gêné, car le modèle stellaire de Schwarzschild ne satisfaisait pas certaines conditions

de la théorie de la relativité. Plusieurs physiciens montrèrent que l'on pouvait réécrire les solutions de Schwarzschild, afin d'éviter la singularité, mais celle-ci disparaissait-elle vraiment ? Le débat se poursuivit ainsi jusqu'en 1939 dans le petit cercle des physiciens qui s'intéressaient au sujet.

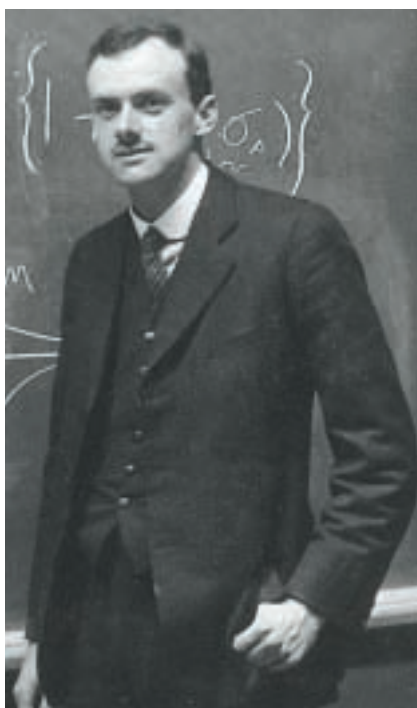
Dans son article de 1939, Einstein attribue son regain d'intérêt pour le rayon de Schwarzschild à des discussions avec l'astrophysicien Howard Robertson, de l'Université de Princeton. Avec cet article, Einstein voulait venir à bout de la singularité de Schwarzschild. À la fin de son texte, il écrivait : «Le résultat principal de cette recherche est la compréhension claire des raisons pour lesquelles les *singularités de Schwarzschild* n'existent pas dans la réalité physique», formulé en langage moderne : les trous noirs n'existent pas.

Pour sa démonstration, Einstein considéra un ensemble de petites particules qui se déplacent sur des orbites circulaires sous l'influence de leurs forces de gravitation mutuelles, un peu comme dans un amas sphérique d'étoiles. Puis il se demanda si une telle configuration pouvait s'effondrer sous l'effet de sa propre gravité en une



1926

Enrico Fermi et Paul Dirac édictent les lois statistiques qui décrivent les particules obéissant au principe d'exclusion de Pauli, les fermions (comme les électrons et les protons). Lorsqu'elles sont trop comprimées, ces particules s'éloignent les unes de l'autre ; ce mouvement crée une pression.



1930

En utilisant la physique statistique et le travail d'Eddington sur les étoiles, Subrahmanyan Chandrasekhar déduit que les naines blanches ne peuvent avoir une masse supérieure à 1,4 fois la masse du Soleil. Les étoiles plus massives devraient donc s'effondrer indéfiniment.

étoile stable de rayon égal à son rayon de Schwarzschild. Il conclut par la négative, car, à un rayon supérieur, les étoiles de l'amas auraient dû se déplacer plus vite que la lumière, afin de maintenir une configuration stable. Bien que le raisonnement d'Einstein soit correct, sa conclusion ne l'est pas : peu importe qu'une étoile devienne instable quand elle se contracte jusqu'au rayon de Schwarzschild, car l'étoile continuera de s'effondrer au-delà de ce rayon.

Des neutrons aux trous noirs

Pendant qu'Einstein poursuivait ces recherches, Robert Oppenheimer et ses étudiants bâtissaient la théorie moderne des trous noirs (voir *Robert Oppenheimer et la physique théorique*, par John Rigden, *Pour La Science*, septembre 1995). Si l'histoire des trous noirs est curieuse, celle de son origine ne l'est pas moins : cette théorie fut inspirée par une idée qui se révéla complètement fautive. En 1932, le physicien britannique James Chadwick découvrit le neutron, le composant neutre du

noyau atomique. Peu après, Fritz Zwicky, de l'Institut de technologie de Californie, et Lev Landau (à Moscou), imaginèrent que la présence de neutrons dans les naines blanches fournirait leur énergie aux naines blanches, alors que ce n'est pas le cas.

Lorsque la force gravitationnelle devient suffisamment forte au sein de l'étoile, avançaient-ils, les électrons peuvent interagir avec les protons et former des neutrons. L'étoile serait alors entièrement composée de neutrons. Au moment de ces travaux, le mécanisme qui produisait l'énergie au sein des étoiles ordinaires n'était pas connu, et l'on envisageait même la présence d'une étoile à neutrons au cœur des étoiles ordinaires, tout comme on suppose aujourd'hui que des trous noirs sont à l'origine de l'énergie des quasars.

Quel était alors l'équivalent de la masse de Chandrasekhar pour ces étoiles ? Cette question était bien plus difficile que dans le cas des naines blanches, car les neutrons interagissent par la force forte, dont nous ne comprenons toujours pas toutes les propriétés. Si l'étoile est suffisamment

massive, la gravitation finira par vaincre cette force, mais la détermination précise de la masse limite dépend naturellement de la force forte. En 1938, puis en 1939, Oppenheimer et ses étudiants Robert Serber et George Volkoff publièrent deux articles qui concluaient que la limite en masse, dans ce cas, était comparable à la limite de Chandrasekhar pour les naines blanches.

Oppenheimer se posa alors le même problème qu'Eddington à propos des naines blanches : que se passerait-il si une étoile de masse supérieure à l'une de ces limites s'effondrait ? Oppenheimer connaissait peut-être le travail d'Einstein puisqu'ils travaillaient à quelque 5 000 kilomètres de là. Toutefois ce travail ne répondant pas à la question d'Oppenheimer qui ne voulait pas construire une étoile stable de rayon égal à son rayon de Schwarzschild, mais voulait voir ce qui se passerait si on laissait l'étoile s'effondrer au-delà de son rayon de Schwarzschild. Il suggéra à Snyder d'étudier le problème.

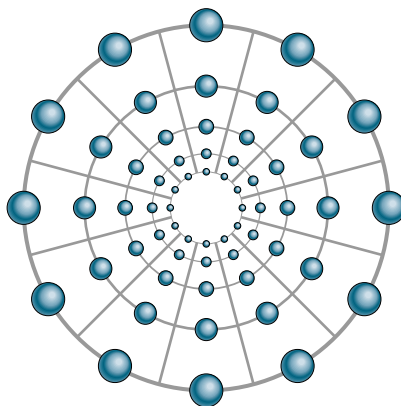
Oppenheimer conseilla quelques hypothèses simplificatrices : il proposa de négliger la pression du gaz dégé-



1932

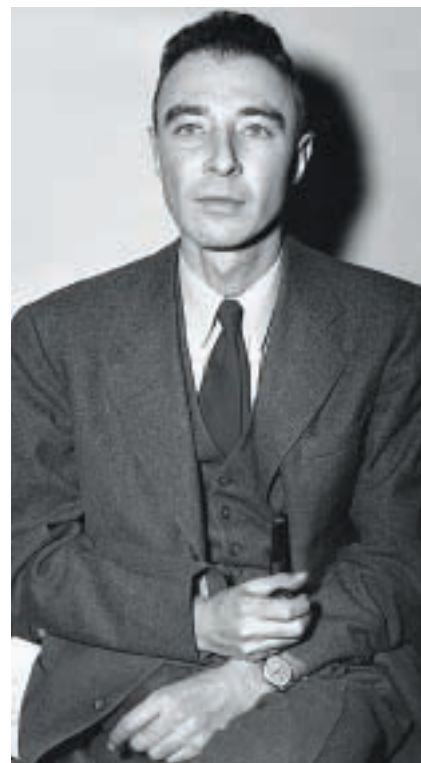
James Chadwick découvre le neutron. Son existence conduit les astrophysiciens à se demander si les «étoiles à neutrons» ne pourraient être une solution au problème des naines blanches.

«Sur un système stationnaire à symétrie sphérique composé de plusieurs masses liées par la gravitation» – Albert Einstein in *Annals of Mathematics*, 1939.



1939

Stimulé par des conversations avec des collègues, Einstein publie un article dans les *Annales des Mathématiques* pour montrer une fois pour toutes que le rayon de Schwarzschild est infranchissable.



1939

Utilisant des idées sur l'effondrement gravitationnel des naines blanches et des étoiles à neutrons, Robert Oppenheimer et Hartland Snyder montrent comment peut se former un trou noir.

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 comprimer 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