

Le Grand Métier

« Et puis, il y a les hommes. Ceux des voiliers, passant des heures à boîter des kilomètres de lignes et des milliers d'hameçons, des heures à souquer sur les avirons d'un doris que les lames se renvoient comme un bouchon, pour aller les poser, ces lignes, à deux ou trois milles du bord ; des heures à dériver dans de l'ouate opaque sans retrouver le navire.

Dur, effroyable métier, pour un maigre pain. Trente-cinq ou quarante hommes bloqués sur un pont gluant et mouvant, l'inquiétude du retour, la fatigue, l'éloignement de la famille, en faut-il plus pour que la moindre querelle, la maladie, le cafard engendrent les rongeanes idées noires ? »

Abbé YVON, *Les bagnards de la mer*

La pêche de la morue était difficile et dangereuse. Avant leur départ, les marins demandaient la protection des saints et de la Vierge, et les églises bretonnes sont ornées des multiples offrandes des marins qui ont

été épargnés et sont revenus des Bancs de Terre-Neuve.

Le recrutement se faisait dans les campagnes ; les mousses étaient embarqués vers 15 ans, corvéables à merci. Ces souffredouleur devenaient matelots après quelques campagnes de pêche. L'armateur payait à chacun une avance avant le départ et, au retour, une part proportionnelle à la valeur de la pêche. À bord, on mangeait du biscuit, du pain, du lard gras, des pommes de terre ; on embarquait aussi de l'eau et de l'eau-de-vie. La morue apportait des protéines et l'huile de foie, source de vitamines.

Le travail était pénible, la moindre écorchure se transformait en crevasse et en plaie en raison du froid et du sel. Le rythme de travail ne permettait aucun repos. Pour déjeuner, on s'arrêtait au plus une vingtaine de minutes. Les marins, harassés, manquaient de sommeil. Ils n'étaient pas soignés. L'alcool atténuait l'angoisse de se perdre dans les brumes.

se multiplient ; aucun morutier ne part de Saint-Malo entre 1793 et 1800.

Au XIX^e siècle, le nombre de ports morutiers diminue encore, bien que le nombre total des terre-neuviers continue à croître. Ce siècle est moins perturbé que le précédent par les guerres, exception faite de la Révolution de 1848 et de la guerre de 1870. Les bateaux ont de meilleures caractéristiques techniques. Certains ports cessent définitivement la pêche de la morue (Le Havre ou Nantes). En revanche, dans l'ensemble des ports de la Manche, l'activité morutière est intense.

Les six principaux ports morutiers sont Dunkerque, Saint-Malo, Granville, Saint-Brieuc, Fécamp et Paimpol. Saint-Malo est le deuxième port morutier du XIX^e siècle, avec plus de 5 400 départs répertoriés.

Entre 1830 et 1842, 90 terre-neuviers, en moyenne, quittent Saint-Malo. Ensuite, selon les années, le nombre des bateaux en partance varie de 31 (en 1847) à 141 (en 1852). À partir de 1860 et jusqu'à la fin du siècle, on compte une moyenne de 75 bateaux par an. Les meilleures campagnes sont celles de 1867 avec 119 morutiers en pêche et celles de 1874 avec 85 bateaux. La guerre de 1870 semble avoir eu peu d'influence sur l'activité morutière de Saint-Malo. La pêche fléchit irréver-

siblement au cours des 15 dernières années du XIX^e siècle, mais les Malouins continuent à aller pêcher sur les Bancs, sur les côtes de Terre-Neuve et à Saint-Pierre-et-Miquelon.

En 1904, à la suite d'accords avec la Grande-Bretagne, la France est contrainte d'abandonner ses droits de pêche sur la côte de Terre-Neuve. Les seules zones encore accessibles restent Saint-Pierre-et-Miquelon, les Bancs, l'Islande et la mer du Nord. Les voiliers sont progressivement remplacés par les bateaux à vapeur, puis à moteur mécanique, même si, en 1912, les voiliers sont encore majoritaires.

Jusqu'en 1914, l'activité reste prospère à Saint-Malo : 56 bateaux partent en 1904 et 146 en 1912. La Première Guerre mondiale ralentit l'activité du port, mais la reprise a lieu dès 1919 : on dénombre 91 terre-neuviers en 1923. À la veille de la Seconde Guerre mondiale, plusieurs ports, naguère prospères, abandonnent cette activité. Dunkerque, Dieppe, Granville, Cancale arrêtent la pêche à la morue dès 1940. Trois ports reprennent leur commerce morutier après 1944 : Fécamp, Bordeaux et Saint-Malo, qui reste le premier port morutier de la première moitié du XX^e siècle. Seuls huit à dix morutiers partent encore chaque année, pour les Terres-Neuves

L'irréversible disparition des terre-neuviers

Activité pionnière au XVI^e siècle, la pêche de la morue a été florissante aux XVII^e et XVIII^e siècles. Les techniques de pêche ont notablement changé au cours des siècles, et les rendements ont été améliorés : sous l'Ancien Régime, il fallait 350 navires et 10 000 hommes pour pêcher 56 000 tonnes de morue ; vers 1950, 29 navires et 1 600 hommes y parvenaient.

La pêche de la morue a influé sur l'architecture des navires, sur le recrutement des marins et sur le développement des ports. Les pêcheurs de morue de Terre-Neuve étaient des marins expérimentés et étaient recrutés par la Marine royale en cas de guerre ; on les incitait à partir sur les morutiers pour rapporter du poisson, mais aussi pour servir sur les navires du roi, le cas échéant.

Sur la cinquantaine de ports morutiers du XVI^e siècle, seuls quatre ports poursuivent cette activité, en 1950 : Saint-Malo, qui a la plus longue tradition terre-neuvienne, Fécamp, Bordeaux et La Rochelle. Au début des années 1990, Saint-Malo a été le dernier port morutier français, avec les deux derniers chalutiers de l'armateur Pleven. Aujourd'hui, l'un s'est reconverti vers une autre pêche, l'autre va devenir un bateau-musée à Lorient.

On n'entendra plus la chanson des terre-neuvas citée en début d'article.

Jacqueline HERSART DE LA VILLEMARQUÉ est chargée de recherches au Laboratoire d'écologie halieutique, au Centre IFREMER de Nantes.

Ch. de LA MORANDIÈRE, *Histoire de la pêche française de la morue dans l'Atlantique septentrional*, éditions Maisonneuve et Larose, 3 volumes, 1962.

J. HERSART de LA VILLEMARQUÉ, *Les pêches françaises du XVI^e au XVIII^e siècle. Relations avec le climat*, in *Équinoxe* – IFREMER n° 33, pp. 35-41, n° 34 (1^e partie), 1990.

J. HERSART de LA VILLEMARQUÉ, *Les pêches françaises du XVI^e au XVIII^e siècle. Relations avec le climat*, in *Équinoxe* – IFREMER, n° 34, pp. 37-43 (2^e partie), 1991.

J. HERSART de LA VILLEMARQUÉ, *La pêche morutière française de 1550 à 1950. Statistique, climat, société*, in *Repères océan*, n° 11, IFREMER, 134 pages, 1995.

Einstein, père des trous noirs malgré lui

JEREMY BERNSTEIN

Les équations de la relativité générale sont les fondements de la théorie moderne des trous noirs. Pourtant Albert Einstein voulait les utiliser pour démontrer que ces étranges objets célestes ne peuvent exister.

Les grandes avancées scientifiques ont parfois des conséquences qui dépassent non seulement l'imagination de leurs créateurs, mais aussi leurs intentions. La relativité générale a ainsi contribué à établir le concept de trou noir, malgré Albert Einstein. En 1939, Einstein publie un article au titre décourageant : *Sur un système stationnaire à symétrie sphérique composé de plusieurs masses liées par la gravitation*. Avec cet article, Einstein pensait prouver l'inexistence des trous noirs, objets célestes si denses que leur gra-

vitité empêche même la lumière de s'en échapper.

Pour cette démonstration, il utilisa la théorie de la relativité générale, qu'il avait publiée en 1916... et qui est aujourd'hui utilisée pour démontrer que les trous noirs sont non seulement possibles, mais aussi, l'état final inéluctable de nombreux corps célestes. D'ailleurs, quelques mois après la parution de cette tentative de réfutation, Robert Oppenheimer et Hartland Snyder publièrent un article intitulé *Sur la poursuite de la contraction gravita-*

tionnelle, où ils utilisaient la théorie de la relativité générale pour montrer comment les trous noirs pourraient se former.

Comble de l'ironie, l'étude moderne des trous noirs et, plus généralement, de l'effondrement des étoiles s'appuie sur un aspect différent de l'héritage d'Einstein : la physique statistique. Sans les effets décrits par cette physique, toutes les étoiles finirait par s'effondrer en un trou noir, ce qui conduirait à un univers très différent de celui où nous vivons.



POUR ET CONTRE : en 1939, Robert Oppenheimer (à droite) avança que les trous noirs pourraient se former, alors qu'Albert Einstein essayait de réfuter leur existence. Leurs carrières se croisèrent à l'Institut d'études avancées de Princeton, à la fin des années 1940, lorsque cette photographie fut prise, mais l'on ignore s'ils discutèrent jamais de trous noirs.

Bose, Einstein et la physique statistique

L'introduction par Albert Einstein de la mécanique quantique en physique statistique fut inspirée par une lettre qu'il reçut en juin 1924 d'un jeune physicien indien alors inconnu, Satyendra Nath Bose. Cette lettre était accompagnée d'un manuscrit qui avait été refusé par un journal scientifique britannique. Après avoir lu le manuscrit, Einstein le traduisit lui-même en allemand et s'arrangea pour le faire publier dans la prestigieuse revue *Zeitschrift für Physik* (Revue de physique).

Pourquoi Einstein pensait-il que ce manuscrit était important ? Pendant 20, il s'était interrogé sur la nature des rayonnements électromagnétiques, surtout lorsqu'ils sont piégés dans un récipient chauffé et en équilibre thermodynamique avec les parois du récipient, ce qu'on nomme le corps noir. Au début du xx^e siècle, le physicien allemand Max Planck avait découvert la fonction mathématique qui

décrivait l'intensité des divers rayonnements de ce corps en fonction de leur longueur d'onde (ou couleur). Il avait trouvé que le spectre du corps noir ne dépend pas du matériau de la paroi du récipient, mais seulement de sa température. Par exemple, lorsque l'on chauffe un morceau de fer, sa couleur passe successivement du rouge au blanc puis au bleu à mesure que la température s'élève : la couleur du fer, son spectre d'émission, dépend uniquement de sa température.

Bose avait utilisé la physique statistique pour étudier le rayonnement du corps noir, et il avait retrouvé la loi de Planck à partir des principes de la mécanique quantique. Fidèle à lui-même, Einstein généralisa le procédé : il utilisa la même méthode pour calculer le comportement d'un gaz de molécules massives qui obéissent au même type de loi que celle que Bose avait utilisées pour les photons. Il en déduisit l'analogue de la loi de Planck pour ce cas et prédit un phénomène remarquable : lorsque l'on refroidit, à une température critique, le gaz de particules qui obéissent à la statistique dite de Bose-Einstein (les bosons), toutes les particules se retrouvent soudain dans un même état quantique «dégé-

né». Cet état de la matière est aujourd'hui nommé le condensat de Bose-Einstein (bien que Bose n'ait rien à y voir directement).

L'hélium 4 subit une telle condensation. Cet isotope de l'hélium a un noyau composé de deux protons et de deux neutrons. À la température de 2,18 kelvins ($-272\text{ }^{\circ}\text{C}$), ce gaz devient un liquide aux propriétés troublantes, s'écoulant notamment sans frottement (superfluidité).

Toutes les particules ne se condensent pas ainsi. En 1925, juste après les publications d'Einstein sur la condensation, le physicien autrichien Wolfgang Pauli identifia une seconde classe de particules qui se comportent différemment. L'électron, le proton ou le neutron sont des exemples de ces particules nommées fermions. Pauli découvrit que deux fermions identiques – par exemple deux électrons – ne peuvent jamais être dans le même état : cette propriété est aujourd'hui le principe d'exclusion de Pauli. Puis, en 1926, Enrico Fermi et Paul Dirac établirent les lois statistiques du comportement de ces particules, parallèle à la statistique de Bose-Einstein.

En raison du principe d'exclusion de Pauli, les fermions ne se condensent

pas à basse température. Lorsque l'on refroidit et que l'on comprime un gaz d'électrons, ces derniers sont forcés de s'approcher si près qu'ils commencent par empiéter sur l'espace des voisins. Toutefois, comme ils ne peuvent être dans le même état quantique, ils s'évitent en s'enfuyant à des vitesses proches de celle de la lumière. Pour les électrons et pour les autres fermions, la pression créée par la dispersion de ces particules rapides, la pression d'un gaz dégénéré, persiste même si le gaz est refroidi jusqu'au zéro absolu. Elle ne doit rien au fait que les électrons se repoussent mutuellement par leur charges électriques identiques : les neutrons, qui ne sont pas chargés électriquement, ont le même comportement : la pression d'un gaz dégénéré est purement d'origine quantique.

Statistique quantique et naines blanches

Quel est le rapport entre la physique statistique et les étoiles ? Au XIX^e siècle, les astronomes avaient identifié une catégorie d'étoiles particulières, petites et peu lumineuses : les naines blanches. Ainsi Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel, a un compagnon dont la masse est

L'histoire des trous noirs



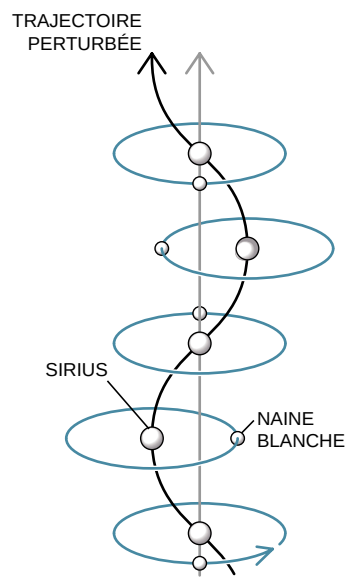
1900

Max Planck découvre le rayonnement du corps noir.



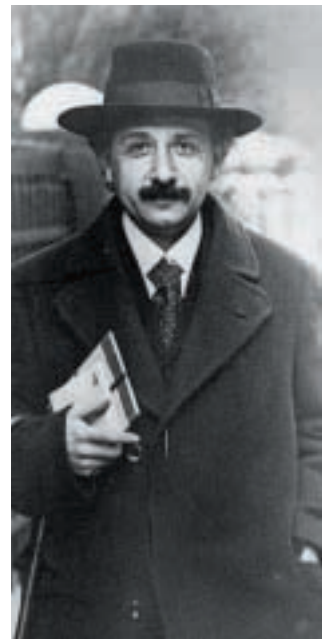
1905

Dans un article sur le rayonnement du corps noir, Albert Einstein montre que la lumière peut être considérée comme un flux de particules (les photons).



1915

Walter Adams observe le compagnon qui donne à Sirius sa trajectoire perturbée. C'est une petite étoile dense et chaude, une naine blanche.



1916

Einstein publie sa théorie de la relativité générale, dont les équations décrivent la gravitation.

voisine de celle du Soleil, mais dont le rayonnement est 360 fois inférieur. Quand on divise la masse d'une naine blanche par son volume, on obtient une densité considérable : un centimètre cube du centre du compagnon de Sirius pèse 61 tonnes. Que sont donc ces objets bizarres ? C'est Arthur Eddington qui le dira.

Lorsque j'ai commencé à étudier la physique, à la fin des années 1940, Eddington était l'un de mes héros, mais pour de mauvaises raisons. Je ne savais rien de son remarquable travail en astronomie, mais j'admirais ses livres de vulgarisation. Eddington, qui mourut en 1944, croyait que toutes les choses importantes de l'Univers pouvaient être étudiées par la seule force de l'esprit. De la fin des années 1910, où Eddington dirigea l'une des deux expéditions qui confirmèrent que le Soleil courbe le trajet des rayons lumineux, comme Einstein l'avait prévu, jusqu'à la fin des années 1930, Eddington était l'un des géants de la science du XX^e siècle. Il est un de ceux qui créèrent la discipline qui conduisit à la compréhension de la constitution interne des étoiles, titre de son livre de 1926, devenu un classique. Les naines

blanches étaient un affront que le ciel lui faisait, au moins du point de vue esthétique, ce qui ne l'empêcha pas de les étudier et d'avoir la bonne idée.

En 1924, Eddington imagina que la force gravitationnelle qui comprime une naine blanche pouvait arracher quelques-uns de leurs électrons aux atomes. Ces derniers perdaient ainsi leur frontière électronique, et la pression du gaz d'électrons dégénéré aurait agglutiné les noyaux en un amas petit et dense. L'effondrement de la naine blanche aurait cessé lorsque la force exercée par la pression du gaz dégénéré d'électrons (quand le principe d'exclusion de Pauli force les électrons à s'écarter les uns des autres) aurait compensé la force de gravitation.

La masse limite

La compréhension des naines blanches progressa à nouveau en juillet 1930, grâce à Subrahmanyan Chandrasekhar, âgé de 19 ans seulement. Ayant lu le livre d'Eddington sur les étoiles et le livre de Fowler sur la mécanique quantique, Chandrasekhar avait été fasciné par les naines blanches. Invité à l'Université de Cambridge (où se trou-

vait Eddington) par le physicien britannique Ralph Fowler, Chandrasekhar avait pris un bateau pour relier Madras à Southampton. Pour passer le temps au cours de la traversée, il se demanda s'il existait une limite supérieure à la masse d'une naine blanche avant qu'elle ne s'effondre sous sa propre gravité. Sa réponse déclencha une révolution.

Comme une naine blanche dans son ensemble est électriquement neutre, tous les électrons ont un proton correspondant. Le proton étant 2 000 fois plus massif que l'électron, les protons de la naine blanche engendrent l'essentiel de la compression gravitationnelle. Si la naine blanche ne s'effondre pas, c'est que la pression du gaz dégénéré d'électrons et la force de gravité des protons s'équilibrent. Cet équilibre limite le nombre de protons et, par suite, la masse de la naine. Aujourd'hui nommée la limite de Chandrasekhar, cette masse maximale est égale à 1,4 fois la masse du Soleil. Les naines blanches plus massives sont instables.

Le résultat de Chandrasekhar troubla Eddington. Que se passe-t-il si la masse est supérieure à 1,4 fois celle du Soleil ? À moins qu'un mécanisme ne limite la masse des étoiles ou que



1916

Karl Schwarzschild montre que, dans les équations qui décrivent la gravitation d'une quantité de matière concentrée en un point, il existe un rayon ou une singularité apparaît.



1924

Einstein publie le travail de Satyendra Bose sur le rayonnement du corps noir et décrit le comportement statistique de particules nommées bosons (tels les photons).



1924

Arthur Eddington propose que, dans une naine blanche, la gravitation dissocie les noyaux atomiques séparant les électrons des protons.



1925

Wolfgang Pauli formule le principe d'exclusion, qui stipule que certaines particules ne peuvent se trouver dans le même état quantique.

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.

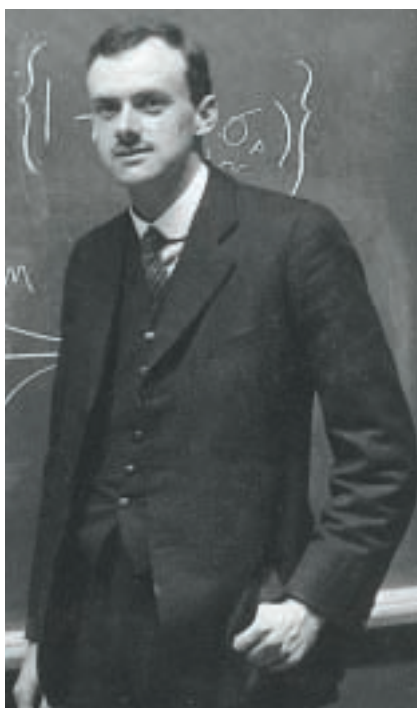
Dans son article de 1939, Einstein attribue son regain d'intérêt pour le rayon de Schwarzschild à des discussions avec l'astrophysicien Howard Robertson, de l'Université de Princeton. Avec cet article, Einstein voulait venir à bout de la singularité de Schwarzschild. À la fin de son texte, il écrivait : «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.

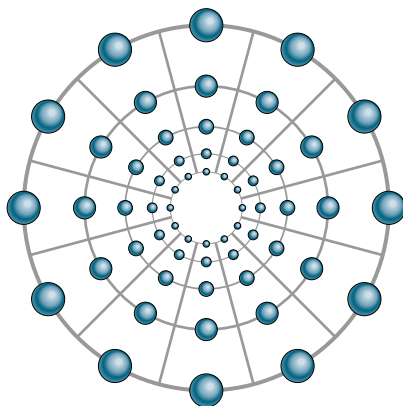
Oppenheimer conseilla quelques hypothèses simplificatrices : il proposa de négliger la pression du gaz dégé-



1932

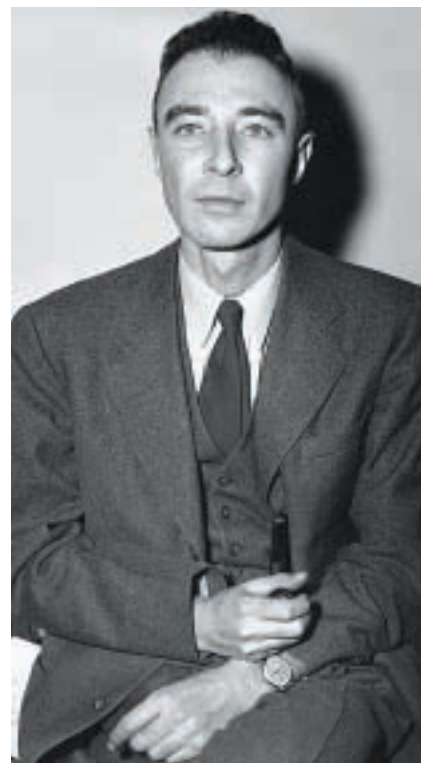
James Chadwick découvre le neutron. Son existence conduit les astrophysiciens à se demander si les «étoiles à neutrons» ne pourraient être une solution au problème des naines blanches.

«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



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 rivié 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.
