

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



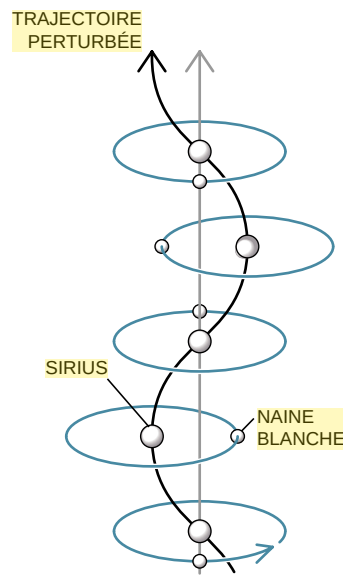
1900

Max Planck découvre le rayonnement du corps noir.



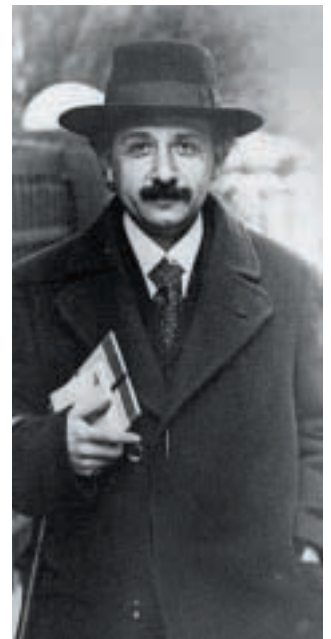
1905

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.

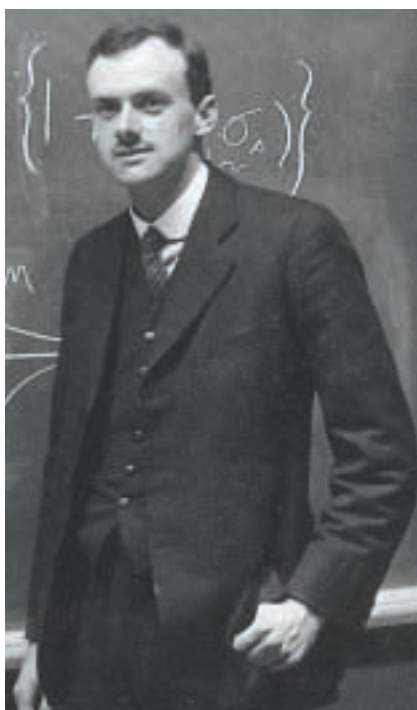
Dans son article de 1939, Einstein attribue son regain d'intérêt pour le rayon de Schwarzschild à des discussions avec l'astrophysicien Howard Robertson, de l'Université de Princeton. Avec cet article, Einstein voulait venir à bout de la singularité de Schwarzschild. À la fin de son texte, il écrivait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