

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<sup>e</sup> 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



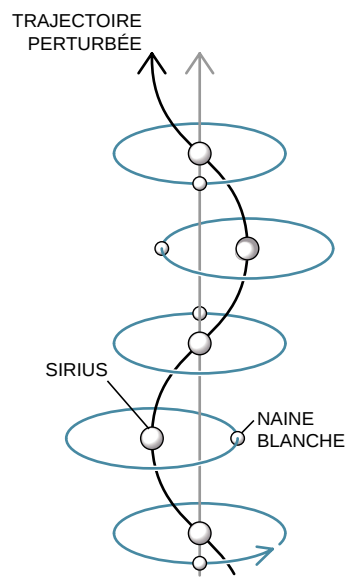
1900

Max Planck découvre le rayonnement du corps noir.



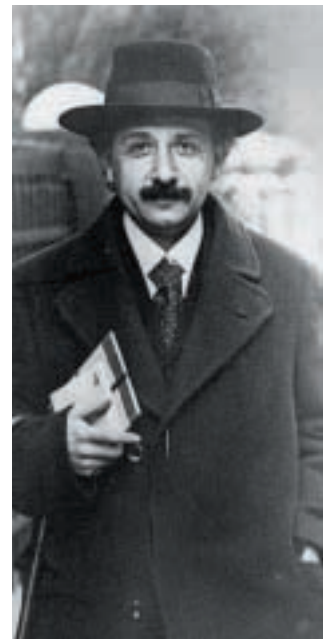
1905

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.