

S. Chandrashekhar et l'évolution des étoiles



Le trou noir - une région de l'espace où les forces gravitationnelles sont si grandes que même la lumière n'est pas capable d'échapper, est sûrement l'un des phénomènes les plus spectaculaires de l'astrophysique moderne.

Le mot est devenu une métaphore pour quelque chose de définitif, inexorable, d'où on ne pouvait pas penser de revenir. L'astronomie moderne, utilisant les rayons X, qui ne peut être détectée qu'au-dessus de l'atmosphère terrestre, a trouvé des preuves de véritables trous noirs cachés dans les galaxies lointaines. Mais ce qui est remarquable, c'est que bien avant qu'ils étaient détectés dans l'expérience, les trous noirs ont été conçus en théorie pure, résultat de la persistance, face à beaucoup d'opposition, de Subramanian Chandrashekhar, alors à peine un étudiant post-doctoral à Cambridge.

Les étoiles sont censées d'être nées lorsque le matériau dans de vastes nuages de gaz, composés principalement de l'hydrogène, a commencé à s'effondrer sur eux-même en raison de l'attraction de la gravité. Lorsque le nuage a diminué en dimension, il a réchauffé, tout comme l'air dans la pompe de bicyclette se réchauffe en étant comprimé. Les températures se sont élevées à des millions de degrés et les réactions nucléaires, principalement des noyaux d'hydrogène se combinant pour former de l'hélium, ont été déclenchées. Cela a résulté en plus de chaleur. La chaleur a augmenté la pression, qui a commencé à résister, et à surmonter la force de gravité intérieure. Le nuage s'est ensuite étendu, sous la force due au feu dans le centre, et a continué à s'étendre jusqu'à ce que les réactions nucléaires dans le noyau commençait s'arrêter. Lorsque cela s'est produit, la pression interne a commencé à tomber et la gravité a repris. Dans la compression qui suivit, des réactions nucléaires plus énergiques ont eu lieu, pour produire de la chaleur et des éléments plus lourds encore. Cela a encore conduit à l'expansion, suivie par la compression, et ainsi de suite.

Lorsque l'étoile est à sa plus grande taille, et que le centre ne brûle pas fortement, la température de l'étoile est faible et l'étoile semble grande et rougeâtre, en tant que géant rouge. Lorsque l'étoile est comprimée avec le centre en train de brûler vigoureusement, l'étoile est plus petite et plus chaude, avec sa couleur plus sur le côté bleu du spectre. La plupart des étoiles dans les cieux, comme notre soleil, sont à ce stade. Notre propre soleil aussi, deviendra un géant rouge un jour, quand ses dimensions engloberont l'orbite de Saturne, maintenant à une distance de 1,4 milliard de km du soleil.

Après plusieurs cycles de ce genre, le combustible nucléaire est dépensé et il n'y a rien pour contrer la force gravitationnelle et l'étoile s'effondre. L'étoile devient plus petite et la force de gravité à la surface de l'étoile devient plus forte. Mais l'étoile, devient-elle plus petite sans limite et se réduit-elle à la dimension d'un point ? Quelle serait la densité de toute la matière dans l'étoile ainsi compressée ? Et est-ce que ceci le destin d'une étoile, finalement, à disparaître ?

Au moment où ces questions ont été posées, heureusement, la nature quantique de l'énergie et la nature ondulatoire de la matière ont été comprises et on a découvert un moyen de sortir de ce contradiction d'un « effondrement à un point ». Une conséquence de la théorie quantique est qu'il y a une limite à la précision avec laquelle on peut mesurer simultanément la position et le mouvement d'une particule. Par exemple, si nous détectons et localisons un électron stationnaire, nous détectons l'électron à l'aide d'un photon ou d'une particule de lumière qui rebondit sur l'électron. Maintenant, dans ce rebondissement du photon, l'électron recule et se met en mouvement. Nous avons alors la position de l'électron, mais l'électron n'est plus stationnaire. Une façon de réduire le recul serait d'utiliser un photon «à faible énergie». Mais les lois de l'optique sont telles qu'avec des photons à faible énergie, nous n'obtenons pas une image nette, seulement floue, ce qui laisse la position incertaine. Ainsi, la mesure de la position et de la vitesse d'une particule dans la nature est toujours un compromis dans la précision de l'une ou l'autre mesure.

L'implication de ce « principe d'incertitude », pour l'étoile qui s'effondre, est que, lorsque les particules se rapprochent, la nature leur impose une amplitude de mouvement, en raison de la réduction de l'incertitude de position. Dans un gaz, c'est le mouvement des molécules qui entraîne la pression du gaz. Dans le cas d'une étoile effondrée aussi, cette motion imposée par le principe d'incertitude donne lieu à une pression - même après que toute la chaleur soit dissipée. Cette pression contrebalance la pression de la gravité. Ce concept explique pourquoi l'étoile qui s'écroule ne subit pas une réduction physiquement intenable à un point géométrique. Au lieu de cela, l'étoile survit comme une entité très comprimée, donc très chaude. L'étoile mourante brille ainsi avec une lumière presque blanche, comme ce qu'on appelle la naine blanche.



C'est là que l'évolution des étoiles s'est tenue lorsque S.Chandrasekhar a terminé ses études universitaires, du Presidency College, Chennai, en 1929. Chandrasekhar est le neveu du célèbre C V Raman et était un étudiant phénoménal. Tout en étant un étudiant de premier cycle, il s'était enseigné des sujets bien au-delà de la compréhension de ses professeurs.

Le sujet des étoiles et leur développement ont attiré son attention très tôt et il a déjà lu le classique, *The Internal Constitution of the Stars*, d'Eddington. Sir Arthur Eddington, considéré comme le fondateur de l'astrophysique est connu pour son travail sur l'évolution stellaire et pour son exposé sur la théorie générale de la relativité d'Einstein.

Même en tant qu'étudiant universitaire, Chandrashekhar s'était enseigné la nouvelle mécanique applicable au monde des entités très petites, où les effets quantiques devinrent importants. Chandrashekhar avait appris ce sujet à partir de 'La Structure Atomique et de Lignes Spectrales', le livre d'Arnold Sommerfeld, qui avait appliqué les méthodes de la mécanique quantique à l'atome. En 1918, Chandrashekhar a également eu la fortune de rencontrer Sommerfeld, qui a conseillé à Chandrashekhar de quoi d'autre à lire. Chandrashekhar a publié deux articles de recherche tout en étant un étudiant de premier cycle!

En 1930, Chandrashekhar partit pour l'Angleterre pour étudier à Cambridge. Et pendant les deux semaines de voyage, il a fait une grande partie du travail qui l'a amené à une découverte extraordinaire !

La pression à l'intérieur d'une étoile est liée à de nombreuses caractéristiques de l'étoile, comme la taille, le taux de réactions nucléaires dans le noyau, la luminosité de l'étoile, la couleur. Ce n'est que les deux dernières caractéristiques, la luminosité et la couleur, qui suggèrent la température, qui peuvent être vues de la terre. La pression doit ensuite être calculée à partir d'une relation théorique entre les paramètres.

En 1930, les scientifiques avaient recueilli une grande masse de données sur la couleur et la luminosité des étoiles, tracée dans des tableaux différents dans le but de trouver des motifs. Les méthodes de la physique mathématique avaient considéré ce qui pourrait être le comportement de l'intérieur des étoiles, pour trouver une relation adaptée aux faits. Et le travail était toujours en cours.

Et, pendant le voyage en Angleterre, Chandrashekhar ne put s'empêcher de penser au problème des nains blancs.

Les atomes qui forment une étoile normale consistent en un noyau positif, entouré d'électrons chargés négativement. Les atomes sont donc électriquement neutres et se comportent comme des boules de billard en mouvement, se déplaçant plus vite lorsque le gaz de l'étoile est comprimé ou chauffé. Mais aux pressions fantastiques des nains blancs, cette image d'atomes neutres comme les boules de billard ne se tiendrait pas, car les atomes s'auraient tous divisés en noyaux positifs et électrons négatifs. Il y aurait alors deux gaz, des particules chargées positivement et des particules chargées négativement, avec d'énormes forces d'attraction et de répulsion, et avec leur énergie totale réparties entre elles selon les nouvelles règles de la mécanique quantique.

Au cours de son voyage, Chandrashekhar a tenté une application rigoureuse de tout cela au cas de la naine blanche et a proposé une solution qui a brisé avec des problèmes ! Si les équations ont été appliquées à une naine blanche de faible masse, elles se sont bien comportées et elles ont donné des solutions qui correspondent bien aux données. Mais quand la masse de l'étoile a augmenté au-delà d'un point, les équations elles-mêmes sont devenues insolubles! Quelque chose dans le problème ou dans la manière dont la solution a été tentée a conduit à des fonctionnalités que l'on ne pouvait pas comprendre!

Les questions soulevées au cours des deux semaines sur le navire sont restées avec Chandrashekhar pendant de nombreuses années. À Cambridge, il a montré ses calculs au professeur Fowler, dont il avait lu les oeuvres en Inde. Le Professeur Fowler, en fait, a été la première personne qui a remarqué que les effets mécaniques quantiques apparaîtraient dans des nains blancs, mais il n'avait pas considéré la façon dont les choses changent au-delà d'un point pour être significatives. Chandrashekhar ne pouvait pas deviner où le problème pouvait se trouver, mais il n'y a pas de doute qu'il ne pouvait pas laisser tomber la conviction qu'il y avait quelque chose de remarquable caché là-bas !

Chandrashekhar a reçu son doctorat En 1933 et aussi une fraternité au Trinity College. Il a continué son travail sur des nains blancs. Il croyait maintenant que, outre les effets quantiques, les résultats de la théorie de la relativité d'Einstein seraient également pertinents pour le problème. La théorie spéciale d'Einstein, exposée en 1905, a montré que nos idées sur l'espace et le temps, qui fonctionnent assez bien dans la vie quotidienne, se décomposent à des vitesses approchant la vitesse de la lumière. À ces vitesses, le temps semble bouger plus lentement et les longueurs semblent se contracter, la masse semble augmenter et les vitesses ne s'accumulent pas de la manière habituelle. La théorie montre que l'énergie et la masse sont équivalentes, l'une à l'autre, et que les choses deviennent plus massives à mesure qu'elles se déplacent plus vite ... Chandrashekhar a vu que, à la densité des nains blancs, les vitesses impliquées seraient presque celles de la lumière. Donc, il a introduit les implications de la théorie de la relativité dans les calculs.

Chandrashekhar a élaboré une expression mathématique pour la pression dans l'étoile, en fonction des différents paramètres, après prise en compte attentivement des effets quantiques mécaniques et relativistes. L'expression qui en résulte avait des différences importantes par rapport à celles obtenues par Fowler et Chandrashekhar lui-même. Ces résultats antérieurs avaient bien fonctionné lorsque la densité était faible et que les effets de la relativité n'étaient pas significatifs. La nouvelle formulation de Chandrashekhar a également donné les mêmes résultats dans le scénario de faible densité. Pour examiner rapidement comment la relation s'est comportée dans le cas de haute densité, Chandrashekhar a fait un test de ce qui s'est passé lorsque la densité était considérée comme infiniment élevée. Normalement, les relations mathématiques n'aboutissent pas à des résultats significatifs si un paramètre est mis à l'infini. Par exemple, l'accélération d'un objet sous la gravité est donnée par la force de gravité divisée par sa masse. Maintenant, si la masse est mise à l'infini, la force de la gravité devient aussi infinie et l'accélération, quotient de deux infinités, est assez incertaine. Mais ce que Chandrashekhar a trouvé, c'est que même avec une densité fixée à l'infini, la relation qu'il avait développée avait du sens, à condition que la masse de l'étoile soit au moins 1,4 fois la masse du soleil. C'était incroyable. Comme la densité infinie signifie zéro volume, il suggère que lorsqu'une étoile avec une masse 1,4 fois la masse du soleil consomme tout son carburant, elle se réduirait jusqu'à un point.

Chandrashekhar a travaillé sur ce résultat pendant des mois et il a présenté son travail à plusieurs de ses collègues illustres. Aucun d'entre eux ne semblait penser qu'il y avait

quelque chose. Mais Chandrashekhar s'est bientôt convaincu que les énormes nains blancs de masse haute ne pourraient pas exister. L'état de nain blanc de masse faible était un équilibre entre les forces gravitationnelles et la pression due à la compression des particules chargées. Si de masses extérieures, comme d'astéroïdes, ou de comètes qui s'écrasent, provoquent une augmentation progressive de la masse de l'étoile, la force de gravité augmente également et la pression change d'une façon complexe. À mesure que la masse augmente, l'équilibre entre les deux forces devient moins stable, jusqu'à ce que, à la limite de masse limite, une limite qui est connue actuellement sous le nom de limite de Chandrashekhar, la balance se décompose, après la façon qu'un camion bascule lorsque la plate-forme sur laquelle elle est installée est progressivement inclinée !

Le résultat pourrait également être compris dans le contexte d'une conclusion tirée de la théorie générale de la relativité d'Einstein. Dans ce cas, Einstein n'a considéré pas le monde comme une série d'images tridimensionnelles qui changent avec le temps, mais en tant qu'entité en 4 dimensions, où le temps est une mesure liée à la longueur, à la largeur et à la profondeur, tout comme ces mesures sont liées l'un à l'autre, et aussi au temps. Dans cette vue, il y a une équivalence entre la masse et l'énergie et la gravité causée par des objets qui ont de la masse réduit à une courbure dans le monde spatio-temporel en 4 dimensions. Et, en outre, les choses affectées par la gravité ne sont pas en mouvement vers l'attracteur ou dans des orbites, mais tout simplement qu'ils bougent dans un espace qui a été déformé par la présence de l'objet massif !

Une implication de ceci est que même la route suivie par une raie de la lumière devrait incurver autour d'une grande masse. Cela a été vérifié lors de l'éclipse solaire lorsque les étoiles juste derrière le disque du soleil devraient être bloquées. Mais on constate que les étoiles en périphérie du disque sont encore visibles comme si la lumière nous parvenait en se courbant autour du soleil.

En poursuivant cette ligne de pensée, le physicien allemand et l'astronome, Karl Schwarzschild, ont expliqué que, si un objet devait se rétrécir assez petit, il pourrait être si dense de courber l'espace à proximité, de sorte qu'aucune lumière ne puisse y échapper. La taille à laquelle cela s'est produit pour un objet a été appelée le « rayon Schwarzschild » de l'objet. Et pour l'étoile effondrée de Chandrashekhar, une vue pourrait être que l'étoile avait réduit à son rayon Schwarzschild.

Pour tout cela, le résultat de Chandrashekhar il était si incroyable et difficile à digérer, que personne en tout le monde qui importait pendant les années 1930 n'était disposé à y prêter aucune attention. La force de gravité à la surface de l'entité que Chandrashekhar a prédit serait si grande que les objets qui y tombent auraient la vitesse presque égale à celle de la lumière. Le bord d'attaque de l'objet accélérerait plus rapidement que sa fin et l'objet serait étiré. Et pourtant, quand un objet atteint les vitesses énormes, le temps se ralentirait et cela prendrait une éternité avant qu'il n'arrive à la surface. Eddington a ouvertement attaqué le jeune Chandrashekhar et beaucoup d'autres collègues sympathiques ont essayé de « raisonner » avec lui. Mais la lecture de commentaires et de

critiques de ces savants révèle de déclarations qui n'ont guère la logique solide nécessaire pour contrer le raisonnement sans émotion de la mathématique. "Je pense qu'il devrait y avoir une loi de la nature pour empêcher une étoile de se comporter de cette manière absurde", a déclaré Eddington. "Il est clair que la matière ne peut pas se comporter comme vous prédire", a déclaré E A Milne, scientifique et ami de Chandrashekhar. Même le physicien russe, Lev Landau, qui, deux ans plus tard, est parvenu de manière indépendante à la même expression que Chandrashekhar, ne pouvait pas accepter que la matière pouvait se réduire à zéro dimensions et il a déclaré : "les étoiles plus lourdes que la limite (que la théorie a montré) devraient avoir des régions où les lois de la mécanique quantique soit violées !

Plutôt que se taper la tête contre les murs, Chandrashekhar déposa ses découvertes sur la structure des étoiles dans un livre qui influencerait, plus que les remarques d'Eddington, le développement ultérieur du champs. Chandrashekhar est allé travailler sur une nouvelle zone, la dynamique stellaire. Après un certain temps, il a écrit un tome complet à ce sujet et a attiré son attention sur d'autres domaines. Et il continuait, laissant une marque indélébile sur chaque champ, d'une manière que peu de gens ont égalé.

Le livre de Chandrashekhar sur la structure des étoiles, « Introduction à l'étude des structures stellaires », a été publié en 1937. Au cours des années qui ont suivi, l'évolution des étoiles a été intensément étudiée, en utilisant des calculs minutieux. Dans certains cas, mais seulement quelques-uns, les calculs ont amené les étoiles à exploser avant de s'effondrer jusqu'à un certain point. Mais il était clair que le monde scientifique commençait à accepter la possibilité d'un effondrement.

En 1967 est venue la découverte des pulsars. Les pulsars étaient de sources de pulsations radio régulières qui provenaient souvent du centre des nébuleuses brillamment éclairées, ou des nuages, des soldes d'étoiles qui avaient explosé violemment. Ceux-ci ont d'abord été considérés comme des signaux provenant d'êtres intelligents dans l'espace extra-atmosphérique, mais ils ont été rapidement reconnus comme venant d'un effondrement de naines blanches. Lorsque l'étoile s'est effondrée, le noyau a été écrasé si fortement que les électrons et les protons se sont fusionnés pour former des neutrons, avec une libération d'énergie. L'énergie a soufflé les parties extérieures de l'étoile alors que l'âme neutronique s'est effondrée à devenir de matière la plus dense connue. La gravité énorme ainsi que les champs magnétiques au voisinage du noyau ont accéléré la matière, qui émettait de la lumière et des rayons X, ce qui a illuminé les débris environnants de l'explosion. La réduction rapide du diamètre de l'étoile était comme un patin à glace tournante qui attire ses bras. Le noyau de neutrons commence à tourner rapidement, alors qu'il émettait des ondes radio ou des rayons X, plutôt comme un phare, et une impulsion a été détectée chaque fois que le faisceau tournait vers nous.

La découverte de ce noyau de neutrons d'une étoile effondrée était une première instance passionnante d'une entité qui proposait des prédictions pour les étoiles plus lourdes. Mais qu'en est-il du trou noir ? C'est là où une étoile à plusieurs fois la masse du soleil a

terminée quand son carburant était fini, contrairement aux étoiles plus petites qui se sont terminées en naines blanches ou ont explosé et ont laissé un noyau de neutrons. Quelle pourrait être la méthode de découvrir une chose de quelques kilomètres et qui n'émettait pas de la lumière?

C'était l'astronomie des rayons X qui permettait de détecter les étoiles neutroniques. L'astronomie de rayons X, menée au-dessus de l'atmosphère à l'aide de roquettes et de satellites, a révélé une richesse étonnante d'images dans les rayons X qui se répandent dans les cieux. Parce que l'atmosphère de la terre est opaque aux rayons X (et une bonne chose, ça !), toute cette zone d'astronomie a été bloquée jusqu'à ce que nous ayons appris à lancer des télescopes au-dessus de l'atmosphère. Un certain nombre d'étoiles de neutrons ont été détectées, rayonnant en impulsions, mais dans la région de X-Ray. Beaucoup d'entre eux ont été associés à une étoile plus grande et régulière, la paire tournant ensemble, comme un haltère roulant! Ces couples sont connus sous le nom d'étoiles binaires. Ceci, en fait, a été détecté parce que la fréquence de la lumière des impulsions a augmenté et tombé, alors que l'étoile à neutrons s'éloignait de nous ou bougeait vers nous, alors qu'elle tournait autour avec son compagnon.

Si le partenaire le plus lourd de la paire est un trou noir, cependant, le compagnon sent à une attraction tellement grande que les forces de marée commencent à sucer et retirer la matière. Et si vite, cette affaire se déplace, alors que la matière se précipite vers le trou noir, que la matière chauffe à des millions de degrés et commence à rayonner des rayons X. C'est en recherchant ces rayons X, dans les endroits où de telles paires sont attendues, avec les effets décisifs du vacillement de la source des rayons X, mais sans impulsions, que la présence d'un trou noir peut être déduit.



L'astronomie à rayons X et l'étude de l'intérieur des étoiles sont actuellement poursuivies par des centaines de scientifiques, avec un énorme financement. Des centaines de nains blancs, des nains bruns, des nébuleuses, toutes sortes de sources de rayons X, ont été photographiés et étudiés. Dans les années 1960 et 1970, des centaines de « trous noirs candidats » ont été détectés, et dans de nombreux cas, aujourd'hui, les preuves montrent clairement que ce sont en fait de trous noirs authentiques.

Chandrashekar a reçu 20 diplômes honorifiques, a été élu à 21 sociétés savantes et a reçu de nombreux prix, y compris le prix Nobel en 1982 pour son travail sur l'évolution des étoiles, qui avait d'abord reçu tant de ridicules de pairs et de revues en Angleterre. D'autres honneurs comprenaient la médaille d'or de la Royal Astronomical Society de Londres, La Médaille Rumford de l'Académie américaine des arts et des sciences, La Médaille royale de la Royal Society à Londres, La Médaille nationale de la science, et la médaille Henry Draper de l'Académie nationale des sciences.

Pendant toute sa vie, il a travaillé dans le domaine de la dynamique stellaire, et était un enseignant dévoué. Plusieurs de ses étudiants, en fait, ont reçu le Prix Nobel avant lui !

Il était un homme d'intérêts divers, en particulier la littérature, la musique et la philosophie de la science. Il a donné des conférences fréquentes sur la relation entre les arts et les sciences, un sujet qu'il a également exposé longuement dans son livre, *Truth and Beauty - Aesthetics and Motivation in Science*. Il est mort à Chicago en 1995. En tant que marque de respect, l'observatoire de rayons X le plus sophistiqué à ce jour, lancé par Columbia en 1999, s'appelait ***Chandra***.
