

**Communication  
de Monsieur Claude Kevers-Pascalis**



**Séance du 16 janvier 2004**



**L'astronomie de l'invisible : les trous noirs**

Pendant des millénaires, les hommes ont jeté sur l'univers un regard qu'ils croyaient capable de leur en fournir une image fidèle, grâce aux rayons lumineux émis par les corps célestes. Or, comme chacun sait, les progrès de certaines de nos connaissances (réalisées depuis une époque assez récente : un peu plus d'un siècle) nous ont révélé que les rayonnements qui impressionnent notre rétine ne sont en réalité qu'une fraction extrêmement réduite, comme le montre cette image, de toute la gamme des rayonnements électromagnétiques qui parcourent l'espace. (Dessin n° 1).

Il est donc bien naturel qu'au XX<sup>ème</sup> siècle le monde scientifique se soit interrogé sur les sources émettrices des rayonnements invisibles qui voyagent à travers le cosmos, c'est à dire sur l'existence possible de corps célestes échappant à notre regard. Des instruments d'observation astronomique des plus élaborés ont été mis au point pour répondre à ces interrogations, et comme, en outre, certains rayonnements sont arrêtés par l'atmosphère terrestre, des télescopes sont véhiculés par des satellites situés sur des orbites parfois très lointaines. Tout cela permet de lever le voile sur ce qui est resté totalement inconnu de l'humanité pendant les millénaires qui nous ont précédés, donc d'accroître notre connaissance de l'univers.

L'objet de cette communication sera de présenter un bref historique du chemin parcouru dans ce domaine, ainsi que la contribution apportée par les principaux acteurs qui y ont participé, allant jusqu'à la détection de monstres pleins de mystère appelée «TROUS NOIRS».

Avant de commencer cet historique, il me paraît nécessaire de dire quelques mots sur ce qui se passe à cet égard en ce moment même. Il s'agit d'une importante mission astronomique de l'Agence Spatiale Européenne, dont l'objectif est une exploration approfondie de sites célestes qui émettent les rayons invisibles les plus difficiles à capter, les rayons gamma, grâce à un télescope qui a été lancé le 17 octobre 2002 sur une orbite très excentrique, à plus de 150 000 kilomètres de la terre. C'est un très beau succès européen et un très beau succès de la science française, car deux laboratoires français y ont joué un rôle de premier plan : le Centre d'Etudes Spatiales des Rayonnements de Toulouse et le Service d'Astrophysique du C.E.A. de Saclay, ce dernier ayant réalisé, entre autres, une caméra à rayons gamma de nouvelle génération qui est l'élément clé du télescope satellisé.

Ainsi, puisque nous pouvons aujourd'hui pousser nos investigations sur toute la gamme des rayonnements, l'Astrophysicien Jacques Paul, du C.E.A de Saclay, auteur d'un excellent ouvrage paru récemment (*«L'homme qui courait après son étoile»*, éd. Odile Jacob (1998) ), est-il bien placé pour écrire (je le cite) : *«Il s'agit là d'une révolution majeure, encore plus considérable que celle qui vit Galilée braquer une longue vue vers le ciel»*.



## LES ASTRES INVISIBLES

### Évolution des idées entre le XVI<sup>ème</sup> et le XIX<sup>ème</sup> siècle

Puisque l'objet de cette communication est de présenter un historique, il faut dire d'abord que l'idée qu'il puisse exister dans l'univers des astres invisibles ne date pas d'hier.

En effet, quand, au XVII<sup>ème</sup> siècle, l'astronome danois Römer eut démontré que la perception d'un objet lumineux n'est pas un phénomène instantané, mais que la lumière se propage à travers l'espace, Newton déclara qu'un rayon lumineux ne pouvait être qu'un flux de corpuscules matériels. Aussi, puisqu'il avait mis en évidence l'attraction universelle, qui s'exerce entre les corps proportionnellement à leur masse, certains hommes de science suggérèrent qu'il n'était pas absurde de penser qu'il existait peut-être des étoiles assez massives pour exercer une attraction capable d'empêcher les grains de lumière de s'en échapper.

Un siècle plus tard, en 1783, le savant anglais John Mitchel jugea, lui aussi, qu'un tel phénomène était plausible, puisque, fit-il remarquer, c'est ce qui se passe quand un boulet de canon lancé du sol ralentit, puis

retombe sous l'effet de l'attraction terrestre, et il en conclut qu'un grain de lumière s'éloignant d'une étoile se conduirait de la même manière qu'un boulet de canon si l'étoile était assez massive pour exercer sur lui une attraction capable de l'obliger à rebrousser chemin.

La même idée fut reprise en 1796 par le savant français Laplace, qui écrivit (je le cite) qu'il devait exister *«dans les espaces célestes des corps obscurs peut-être aussi nombreux que les étoiles»* qui *«en vertu de leur attraction ne laisseraient parvenir aucun de leurs rayons jusqu'à nous. Il est donc possible»*, concluait-il, *«que les plus grands corps lumineux de l'univers soient, par cela même, invisibles»*.

### Les XIX<sup>ème</sup> et XX<sup>ème</sup> siècles

Quand vint le XIX<sup>ème</sup> siècle, cette idée fut abandonnée, car la théorie corpusculaire de la lumière fut écartée quand tous les phénomènes qui lui sont liés semblèrent s'expliquer par le fait qu'elle est une onde, qui, de toute évidence, faute de l'existence d'une masse, pensait-on à cette époque, ne pouvait être affectée par la gravité.

Ensuite, quand vint le XX<sup>ème</sup> siècle, lorsque la science eut attribué à la lumière un double caractère, à la fois celui d'une onde et celui d'un corpuscule, le «photon», l'hypothèse de l'existence de corps célestes assez massifs pour retenir ces corpuscules aurait pu être réhabilitée. Mais, dans un premier temps, ce ne fut pas le cas, car Einstein attribua aux photons une masse nulle, ce qui rendait illusoire toute possibilité d'action de la force gravitationnelle, puisqu'elle n'agit qu'entre des corps doués d'une masse.

Puisqu'il en est ainsi, il est normal de se demander comment il se fait qu'aujourd'hui l'existence d'astres dont aucun rayonnement ne peut s'échapper, soit considérée comme une réalité. Eh bien, cela résulte du fait que les travaux d'Einstein ont permis de jeter un nouveau regard sur bien des phénomènes, et en particulier sur la gravité. C'est ce nouveau regard qui permet d'expliquer pourquoi celle-ci a une influence sur la lumière, comme le montrent les dessins que voici :

- celui-ci (dessin n° 2) fournit une image de la manière dont un corps massif influence l'espace qui l'entoure (il faut ici dire plutôt «l'espace-temps», car, depuis Einstein, ils ne peuvent être dissociés) : ce corps agit comme une boule pesante posée sur un tapis élastique dans lequel elle s'enfonce en y creusant une cavité, l'espace-temps «se courbe» sous l'influence de cette masse

- le dessin suivant (n° 3) fournit une image de la manière dont se comporte un rayon lumineux (un «photon») quand il s'approche de ce corps

massif : puisque celui-ci courbe «l'espace-temps», le plus court chemin que tend à suivre le photon n'est pas rectiligne, mais courbe, de même qu'est courbe toute trajectoire sur notre planète, puisqu'elle est sphérique : les photons suivent les «lignes géodésiques» de l'espace, qui sont cambrées par la présence du corps au voisinage duquel ils passent.

Cette déviation est vérifiée par l'expérience : quand (lors d'une éclipse totale du soleil pour éviter l'éblouissement) un observateur terrestre dirige sa lunette vers le bord du disque solaire, il arrive qu'il observe l'image virtuelle d'une étoile dont on sait fort bien qu'en réalité elle se trouve derrière le soleil, et non à l'endroit où l'on croit la voir : sa lumière a donc effectivement été déviée. Bien entendu, cette déviation est extrêmement faible, elle n'est perceptible qu'à très grande échelle, mais elle n'en est pas moins parfaitement réelle. (cf. dessin n°4)

Il en résulte que, si une étoile est extrêmement massive, la courbure qu'elle crée autour d'elle peut fort bien être d'une telle importance, que tout rayon qui passerait dans son voisinage serait irrésistiblement entraîné vers elle sans pouvoir poursuivre sa route, comme une boule qui roule vers un creux et y tombe, et que tout rayon susceptible d'y prendre naissance y resterait prisonnier : aucun photon ne pourrait en effet s'en échapper (cf. dessin n° 5), exactement comme un grimpeur qui tenterait en vain de sortir d'un trou aux parois presque verticales,

On peut donc dire que l'intuition des savants des XVII<sup>ème</sup> et XVIII<sup>ème</sup> siècles leur avait fait entrevoir la vérité, et aujourd'hui la certitude de l'existence de corps célestes dont aucun rayonnement ne peut s'échapper est telle qu'on leur a donné un nom : à la fin des années 1960, le savant américain John Wheeler les a baptisés «Black Hole», ce qui se traduit en français par «TROU NOIR». C'est la nature des «Trous Noirs» et la manière dont ils se forment et se manifestent, qui feront l'objet de la suite de cette communication, mais je dois au préalable ouvrir une parenthèse au sujet de l'existence de beaucoup d'autres astres qui échappent plus ou moins à notre regard, bien qu'ils émettent des rayonnements qui parviennent jusqu'à nous.

### **Les autres astres invisibles que les trous noirs**

Ces astres sont ceux dont les rayonnements se situent en dehors des longueurs d'onde et des fréquences auxquelles est sensible notre rétine, par exemple les rayons X, les rayons infrarouges ou les ondes radio. Pourtant, ces astres rayonnent aussi dans les longueurs d'onde qui sont perceptibles par notre œil, mais leur éclat dans le domaine visible est tellement faible, que les astronomes ont le plus grand mal à les détecter avec les télescopes optiques classiques.

La présence simultanée de rayons visibles, mais extrêmement faibles, et de rayonnements invisibles, mais plus intenses, s'explique par le fait que tout corps chaud rayonne dans une gamme plus ou moins large de longueurs d'ondes, mais l'éclat est le plus important dans une gamme bien particulière, qui dépend de la température de sa surface.

Par exemple, dans la constellation d'Orion, brillent deux étoiles dont l'une est très nettement rouge et l'autre très nettement bleue, parce que le rouge domine à la température de la première (3 000 degrés), alors que c'est le bleu qui domine à la température de la seconde (20 000 degrés).

Pour les astres encore plus chauds, le maximum d'éclat se situe dans les rayonnements de longueurs d'onde les plus courtes, de l'ultra-violet aux rayons X, et, pour les sources de rayonnement les plus chaudes, le domaine des rayons gamma.

Pour les observer, les télescopes optiques classiques sont remplacés par des télescopes spéciaux, dont la conception s'appuie largement sur les progrès réalisés dans les multiples activités humaines qui nécessitent de scruter l'invisible. Ainsi, les télescopes utilisés dans le domaine radio s'inspirent directement des radars, et beaucoup d'autres moyens d'observation s'inspirent des appareils utilisés par des professions qui ont besoin de regarder ce qui ne peut être vu : l'intérieur du corps d'un malade par un médecin, le contenu d'une valise fermée par un policier, ou encore le cœur d'une pièce d'acier par un contrôleur chargé de vérifier la qualité d'une soudure.

Aux difficultés d'observer les rayonnements inaccessibles à notre œil s'ajoute le fait que l'atmosphère terrestre constitue, pour certains rayonnements, une barrière infranchissable.

Mais, à partir des années 1960, la course à l'espace dans laquelle s'affrontaient les Etats-Unis et l'URSS a offert aux astronomes la possibilité de propulser des télescopes très au-delà de l'atmosphère. Une première génération de satellites astronomiques a vu le jour à la fin des années 60, et, depuis le début des années 90, les observatoires terrestres et spatiaux du monde entier se complètent pour scruter le cosmos depuis les ondes radio jusqu'aux rayons X et aux rayons gamma.

Mais cela ne suffit pas : encore faut-il pouvoir dessiner les contours des astres invisibles et dresser des cartes des continents du ciel nouvellement découverts. Dans ce but, les astronomes utilisent les techniques qui permettent, à partir des rayonnements captés, de générer des images colorées, pour lesquelles sont choisies des couleurs conventionnelles, ce qui fournit des images dites «en fausses couleurs».

Tous ces progrès, parmi lesquels je rappelle la réalisation de la mission européenne que j'ai signalée dans mon introduction, permettent donc des observations qui étaient naguère impossibles et qui doivent beaucoup à la France, non seulement à cause de la qualité de ses astrophysiciens, en particulier ceux de Saclay, mais encore parce qu'elle est le moteur du vieux continent en matière de lanceurs spatiaux.

Je ferme cette parenthèse en disant que, parmi les nombreux corps célestes invisibles qui peuplent l'univers, les plus obscurs et les plus spectaculaires sont ceux qu'on appelle les «Trous Noirs», à propos desquels Stephen Hawking (l'un des plus prestigieux cosmologues de notre temps, qui enseigne à Cambridge) écrit ceci : «*Pour comprendre comment un Trou Noir peut se former, il faut d'abord comprendre le cycle de vie d'une étoile*» (Cf. «*Une brève histoire du temps*», Flammarion 1989 et «*L'univers dans une coquille de noix*», Odile Jacob, 2001).

Penchons-nous donc sur ce cycle.



## NAISSANCE, VIE ET MORT D'UNE ÉTOILE

### Naissance et vie d'une étoile

Une étoile se forme quand une grande quantité de gaz (de l'hydrogène en majorité) commence à s'effondrer sur elle-même sous l'effet de sa propre gravité. Pendant cette contraction, les atomes de ce gaz, qui se rapprochent les uns des autres, se heurtent de plus en plus souvent, et à des vitesses croissantes, ce qui provoque un échauffement qui est d'autant plus grand que l'agitation est plus grande.

L'attraction gravitationnelle agit donc comme un piston qui comprime de plus en plus la masse gazeuse, et, quand la température atteint un niveau très important, les atomes se disloquent. À l'état normal, un atome d'hydrogène comprend un noyau constitué par une particule électrisée positivement (c'est un «proton») autour de laquelle gravite un « électron », particule électrisée négativement, qui, comme le montre le dessin n° 6, ne pèse pas davantage qu'un gramme multiplié par un nombre qui s'écrit avec un 1 précédé de 27 zéros après la virgule.

Or, à partir d'une température extrêmement élevée, les protons et les électrons se séparent, ils se dispersent, et le gaz se trouve alors dans un état nouveau, un mélange désordonné de particules qui s'agitent dans tous les sens. Cet état, qui fut appelé «plasma» dans les années 1920, est le quatrième état de la matière, les trois premiers étant, comme chacun sait, les états solide, liquide et gazeux.

Combien de temps faut-il pour qu'une étoile naissante en arrive là, et quelles sont alors sa pression et sa température ? A ce sujet, on trouve dans l'ouvrage de l'astrophysicien français que j'ai cité tout à l'heure, les ordres de grandeur suivants, qui sont relatifs à notre soleil : «*Cinquante millions d'années après sa naissance, écrasé par le piston gravitationnel, il n'est pas plus gros que le soleil actuel. En son centre, là où se trouve concentrée la moitié de sa masse en un volume qui est à peine le centième de son volume total*» règne une «*une pression de trois cents milliards de fois la pression atmosphérique. Ce faisant, la température de son centre s'est accrue dans des proportions considérables, pour atteindre une quinzaine de millions de degrés*». (cf. dessin n° 7).

Dans l'étroit espace où ils sont confinés, les noyaux d'hydrogène, qui sont des «protons», se rapprochent de plus en plus les uns des autres. Mais, comme ils sont chargés d'électricité de même signe, ils ont tendance à se repousser, comme se repoussent les extrémités de même signe des aimants. Cependant, la pression gravitationnelle, donc la température, continuant à croître, leur distance devient si faible qu'ils se trouvent soudain soumis, comme le montre le dessin n° 8, à une nouvelle force, appelée «interaction nucléaire forte», qui, elle, est attractive et beaucoup plus intense que la force répulsive qui, un instant auparavant, tendait à les écarter, de telle sorte qu'ils peuvent alors s'unir deux à deux.

C'est à partir de cet instant que va se produire la réaction appelée «fusion nucléaire» au cours de laquelle des paires de protons vont s'unir deux à deux pour former des noyaux d'hélium, dont chacun sera constitué de quatre particules.

J'ouvre une parenthèse pour préciser qu'au cours de la fusion nucléaire, dans les étoiles particulièrement massives, se créent aussi des noyaux de toute la gamme des corps lourds de notre univers. Mais je vais m'en tenir ici à la formation de l'hélium, qui constitue l'essentiel de la fusion nucléaire, pendant laquelle (cf. dessin n° 9) :

- deux des quatre protons d'origine perdent leur charge électrique et se transforment en particules électriquement neutres appelées «neutrons», ce qui donne naissance à deux nouveaux noyaux composés chacun d'un proton + un neutron
- ces deux nouveaux noyaux, qui sont des noyaux de «deutérium» ou «hydrogène lourd», fusionnent pour former un noyau d'hélium
- il se produit alors un dégagement de chaleur sous forme de «rayons gamma», car cette fusion s'accompagne d'une perte de masse qui est instantanément remplacée par de l'énergie, conformément au principe de l'équivalence, mise en évidence par Einstein, de toute masse avec de l'énergie.

Voyons à présent ce que deviennent les rayons gamma engendrés par la réaction de fusion nucléaire qui vient d'être décrite. Ils se dirigent vers la périphérie, mais, comme ils traversent un milieu rempli de particules auxquelles ils ne cessent de se heurter, ils suivent un chemin chaotique fait de perpétuels changements de direction, les chocs qu'ils subissent leur font perdre une partie de leur énergie et leur parcours dure très longtemps : ainsi, un «photon gamma» qui naît au cœur du soleil met des centaines de milliers d'années pour en atteindre la périphérie, de telle sorte que les rayonnements gamma, si féroces quand ils sortent des corps radioactifs, ont tout le temps de s'assagir, passant progressivement de leur domaine de fréquence très énergétique à celui, beaucoup plus sage, des rayons visibles.

L'abandon d'énergie par les photons pendant leur parcours accroît évidemment la température de l'étoile. Certes, chaque photon représente une énergie extrêmement faible, mais, comme la quantité d'hydrogène de l'étoile est très importante, la chaleur totale dégagée est énorme : à titre d'exemple, notre soleil convertit en hélium environ un demi milliard de tonnes d'hydrogène à chaque seconde.

L'accroissement de la température a, sur le gaz dont est constituée l'étoile, un effet de dilatation, ce qui y crée une pression centrifuge qui s'oppose à la contraction gravitationnelle, de telle sorte que l'étoile cesse de se contracter dès que les deux tendances antagonistes s'équilibrent. L'étoile commence alors à «vivre», dans un état de stabilité qui va durer jusqu'à tout son hydrogène se soit transformé en hélium. Cette durée est variable, elle dépend de la masse de l'étoile ; à titre d'exemple, notre soleil brille depuis environ cinq milliards d'années, et sa durée de vie restante est estimée à cinq autres milliards d'années.

Nous allons pouvoir maintenant passer à la mort de l'étoile, mais faisons auparavant un bref retour historique. Avant le XX<sup>ème</sup> siècle, l'origine de la chaleur et de la lumière émises par le soleil constituait une énigme à laquelle aucune réponse satisfaisante n'avait jamais pu être donnée. Les deux étapes qui ont mis la science sur la voie de la bonne réponse ont été les suivantes :

- d'abord, peu avant la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, la découverte, grâce à l'analyse de la lumière du soleil, de la présence dans celui-ci d'un nouveau gaz qui, pour cette raison, fut baptisé «hélium»
- puis, au cours des quarante premières années du XX<sup>ème</sup> siècle, les progrès de la science atomique qui aboutirent, à la veille de la seconde guerre mondiale, à la mise en évidence du phénomène de «fusion nucléaire », dont je rappelle qu'il est aussi celui qui se produit dans la bombe à hydrogène, dont le premier exemplaire fut fabriqué en 1952.

## Mort d'une étoile

Passons à présent à l'agonie, puis à la mort d'une étoile.

Une fois qu'elle a consommé tout son hydrogène, la réaction de «fusion nucléaire» cesse, par définition, et l'étoile se refroidit. Or nous avons vu que c'était la température considérable engendrée par la fusion nucléaire qui lui donnait une tendance à la dilatation suffisante pour s'opposer à l'attraction gravitationnelle. Celle-ci va donc commencer à l'emporter sur la tendance inverse, de telle sorte que l'étoile va recommencer à se contracter, comme lors de sa naissance, jusqu'à un effondrement qui va prendre des proportions considérables.

(J'ouvre ici une parenthèse pour dire que les étoiles très massives - plusieurs fois plus massives que notre soleil - atteignant ce stade, commencent par enfler, puis leurs couches périphériques se dispersent dans le milieu interstellaire, y répandant des noyaux de toute la gamme des éléments chimiques qui ont pris naissance pendant leur vie, au cours de laquelle la fusion nucléaire a été extrêmement active ; quant à l'effondrement dont nous allons parler, c'est le cœur de l'étoile qui le subit ; on appelle une telle étoile une «supernova», sur laquelle je n'insiste pas, car cela déborde du sujet traité).

Après cette parenthèse, revenons à la nouvelle contraction de l'étoile, pour dire que les atomes qui se sont formés pendant la fusion opposent à cette contraction une résistance, car les électrons et les noyaux des uns ont tendance à repousser les électrons et les noyaux des autres, phénomène que le physicien autrichien Wolfgang Pauli a appelé, en 1925, le «principe d'exclusion».

L'auteur que j'ai cité tout à l'heure présente ce phénomène de façon imagée en disant (je cite) que chaque «particule de matière a un espace vital à défendre», et il précise que, «pour contrebalancer efficacement la pression exercée par la gravité, il faut que la densité atteigne des valeurs qui dépassent l'entendement : une dizaine de tonnes par centimètre cube !» Or «une telle densité n'est obtenue qu'au prix d'un colossal effondrement, aboutissant à un conglomérat de matière» qui finit par retrouver un état d'équilibre dès que la résistance, qui n'a fait que croître pendant l'effondrement, atteint un niveau lui permettant de se stabiliser. L'étoile se trouve alors réduite à un volume qui peut être extrêmement faible, comme c'est le cas, par exemple, pour ce que les astronomes appellent des «naines blanches», qui ont «un rayon» de seulement «quelques milliers de kilomètres et une densité avoisinant une centaine de tonnes par centimètre cube». Dans certaines conditions, la dimension atteinte peut être encore plus faible : c'est le cas des étoiles dites «à neutrons» (cf dessin n° 10), qui ont «moins de vingt kilomètres de rayon» et

une densité «*de plusieurs centaines de millions de tonnes par centimètre cube*». (cf. Jacques Paul).

Mais ici se pose une question : puisque nous venons d'assister à l'effondrement d'étoiles qui se recroquevillent jusqu'à des volumes si réduits, n'est-il pas possible que cet effondrement aille encore plus loin ? Eh bien, c'est la réponse à cette question qui va nous conduire sur la voie des «Trous Noirs».

### Les trous noirs

Penchons-nous à nouveau sur l'Histoire.

Au cours des années 1930, un étudiant indien, qui s'appelait Chandrasékhar, déjà diplômé mais encore élève du grand astronome britannique Eddington, se mit à méditer sur la résistance qu'oppose une étoile à son effondrement.

Le cheminement de sa pensée peut être résumé comme suit :

- sous l'effet, se dit-il, de la gravitation, les distances des particules de matière diminuent ; or, selon Wolfgang Pauli, quand ces distances diminuent, leurs vitesses augmentent

- ainsi donc, la vitesse des particules intervient dans la résistance à la contraction de l'étoile ; or nous savons aujourd'hui que la vitesse d'une particule ne peut jamais dépasser la limite infranchissable qu'est vitesse de la lumière ; il en résulte que la résistance due au principe d'exclusion est obligatoirement limitée à une valeur maximale, et, en conséquence, rien n'interdit d'imaginer une étoile dont la masse serait telle que la pression de contraction qui s'exerce en son sein soit supérieure à la résistance maximale susceptible de s'y opposer.

- on peut donc en conclure que, si une étoile dépassait une telle masse, sa contraction ne pourrait pas être contrebalancée par une pression antagoniste suffisante, donc son volume diminuerait et sa densité augmenterait dans des proportions absolument colossales.

S'appuyant sur ces réflexions, il calcula que cela se produirait pour toute étoile ayant une masse supérieure à une fois et demi celle du soleil, masse qui porte le nom de «limite de Chandrasékhar». Puisque nous faisons de l'Histoire, précisons qu'à cette époque le monde scientifique se montra très sceptique sur une telle conclusion, qui suggérait que l'effondrement d'une étoile puisse être sans limite. Eddington et Einstein eux-mêmes partagèrent ce scepticisme, bien qu'un savant russe appelé Davidovitch Landau eût obtenu un résultat analogue à celui de Chandrasékhar. Aussi ce dernier abandonna-t-il cet axe de recherche, mais le temps a passé, bien des chercheurs se sont penchés sur le même

problème que lui, finalement ses réflexions cessèrent d'être contestées et il reçut le Prix Nobel en 1983. Parmi les savants qui contribuèrent à la compréhension de ce qui se produit quand une étoile extrêmement massive s'effondre, il faut citer l'Américain Oppenheimer, dont le nom est attaché aux recherches nucléaires et à la réalisation de la première bombe atomique. Oppenheimer avait suivi les traces de Chandrasékhar et de Landau en 1939, mais la seconde guerre mondiale l'écarta de cette voie, qu'il ne reprit que beaucoup plus tard : dans le courant des années 1960.

Aujourd'hui, grâce aux travaux d'un grand nombre de savants, parmi lesquels figurent beaucoup de Français, l'idée que l'on se fait de ce qui arrive quand se contracte une étoile extrêmement massive, est fondé sur le mécanisme de l'attraction universelle selon Einstein, mécanisme qui a été décrit tout à l'heure à l'aide de quelques dessins : je rappelle en effet, comme nous l'avons vu, que la présence «*d'une étoile modifie dans l'espace-temps les trajectoires des rayons lumineux*», qui sont «*déviés vers l'intérieur*» quand ces rayons passent «*près de sa surface*» (cf. Stephen Hawking). Or, si l'étoile est extrêmement massive, elle creuse dans «*le mol édredon de l'espace-temps*» (cf. Jacques Paul) un puits si profond que les rayons s'y précipitent et ne peuvent plus s'en échapper. Ce phénomène aboutit donc à l'existence de ce que nous appelons un «*Trou Noir*», dans lequel est recroquevillé un conglomérat de matière de «*quelques kilomètres de rayon*». (cf. Jacques Paul).



## LA RECHERCHE DES PREUVES

Tout ce qui a été dit jusqu'à présent nous a montré que la connaissance du cycle de vie d'une étoile et la connaissance du mécanisme de l'attraction universelle, selon Einstein, ont permis l'affirmation de l'existence des «*trous noirs*» par le monde scientifique. Mais celui-ci ne pouvait s'arrêter là : encore fallait-il que leur existence fût confirmée par des observations astronomiques.

Or, comment observer ces étranges résidus stellaires, qui, par définition, ne peuvent rien émettre et ne peuvent donc nous transmettre aucun message, puisqu'ils retiennent «*tout, y compris la preuve de leur propre existence*» ? (cf. Jacques Paul). A cet égard, Stephen Hawking écrit, non sans humour, que «*détecter un trou noir*» cela ressemble à la «*recherche d'un chat noir dans une cave à charbon*» !

Heureusement, il existe tout de même un moyen : en effet, puisqu'il s'agit de résidus stellaires extrêmement massifs, ils exercent sur leur en-

vironnement une action qui, elle, a pu être observée et a permis d'obtenir la preuve cherchée.

Voici comment ont été réalisées ces observations.

Les astronomes ont découvert un grand nombre de systèmes dans lesquels deux étoiles tournent l'une autour de l'autre sous l'effet réciproque que leur impose la gravité. Mais ils ont aussi observé que certaines étoiles se comportent exactement comme si elles tournaient autour d'une compagne, alors que celle-ci est invisible. On ne peut évidemment en conclure immédiatement que cette compagne est un trou noir : elle pourrait tout aussi bien être une étoile à l'éclat trop faible pour être vue.

Cependant, certains de ces systèmes sont de fortes sources de rayons X, ce qui s'explique, comme le montre le dessin n° 11, par le fait que de la matière est arrachée de la surface de l'étoile visible par l'attraction qu'exerce sa compagne invisible : cette matière s'enroule autour de cette dernière en un mouvement de spirale, ce qui l'échauffe et provoque l'émission de rayons X.

Pourtant, l'étoile invisible pourrait encore être autre chose qu'un trou noir : elle pourrait être une «naine blanche», ou une «étoile à neutrons», dont l'action gravitationnelle arracherait de la matière à sa compagne.

Mais, dans le cas très précis d'un couple «étoile visible / étoile invisible» appelé «Cygnus X-1» découvert en 1971 dans notre galaxie, on a pu déterminer, à partir de l'orbite de l'étoile visible, quelle devait être la masse minimale de sa compagne ; or on a calculé que cette masse était très supérieure à la limite à partir de laquelle l'effondrement d'une étoile en fin de vie va au delà d'une «naine blanche» ou d'une «étoile à neutrons». Puisqu'il en est ainsi, nous sommes en présence d'un «Trou Noir».

L'illustration du phénomène par un dessin d'artiste (cf. dessin n° 12) a paru dans un document édité par le Service d'Astrophysique de Saclay sous le titre «Trou noir en système binaire», avec le commentaire suivant : «La matière» (arrachée à l'étoile visible) «forme un disque dont le bord interne, porté à une température de plusieurs millions de degrés sous l'effet de formidables phénomènes de friction, rayonne en abondance dans les domaines des rayons X et des rayons gamma».

On dispose aujourd'hui de suffisamment d'observations en faveur de l'existence des trous noirs de ce type dans notre galaxie et les galaxies voisines, pour pouvoir penser que leur nombre est probablement très élevé, peut-être même plus élevé que celui des étoiles visibles, car, au cours de la longue existence de l'univers, beaucoup d'étoiles ont eu le temps de consommer toutes leurs réserves d'hydrogène et de s'effondrer.

En ce qui concerne notre galaxie, Stephen Hawking écrit que *«nous avons quelque preuve qu'il y a en son centre un trou noir bien plus grand»*, dont la masse, calculée en 1996 en Allemagne par l'Institut Max Planck est égale à 2,5 millions de fois celle du soleil. Cela explique, écrit Stephen Hawking, *«pourquoi notre galaxie tourne à la vitesse qui est la sienne»*.

Ajoutons enfin qu'il existe aussi des trous noirs dits «super massifs» au centre de presque toutes les autres galaxies, dont les masses sont comprises entre un million et un milliard de fois la masse du soleil.



## Conclusion

Il est temps à présent de conclure en remarquant que, quand la science fait avancer les connaissances humaines, elle nous fait découvrir simultanément de nouvelles lacunes s'ouvrant dans notre savoir. L'astronomie de l'invisible en est une illustration, puisque ce sont les progrès de nos connaissances dans l'électromagnétisme qui nous ont conduits à constater l'ignorance, dans laquelle se trouvait l'humanité depuis toujours, du contenu insoupçonné de notre univers.

Puisque je viens de prononcer les mots «contenu insoupçonné», il faut remarquer aussi que, quand on côtoie, comme nous venons de le faire, l'infiniment petit et l'infiniment grand, on constate que la science énonce des théories souvent déroutantes, qui mettent mal à l'aise ce que nous appelons le «sens commun». Par exemple, comme nous l'avons vu, la courbure de l'espace provoquée par la présence d'un corps, la double nature d'une particule, à la fois matérielle et ondulatoire, l'équivalence d'une masse et d'une énergie et bien d'autres sujets d'étonnement, à propos desquels, dans un ouvrage tout récent de John Maddox (rédacteur en chef de la prestigieuse revue scientifique britannique «Nature»), on lit ceci : *«Etranges notions, conçues pour ainsi dire pour éveiller le scepticisme, voire l'incrédulité»*.

Comment, en effet, ne pas provoquer une réaction instinctive d'incrédulité quand on déclare, par exemple, que tout objet, aussi compact soit-il, contient essentiellement du vide, puisque les espaces entre ses particules élémentaires sont gigantesques, comparables, à leur échelle, aux distances intersidérales ?

Toutes ces étrangetés ont été résumées par le philosophe Jean Guilton comme ceci : *«du savoir scientifique émerge une réalité qui entre en conflit violent avec la raison ordinaire»*.

La prise de conscience de l'existence de réalités qui échappent à notre entendement nous entraîne vers des réflexions qui sont à la limite entre la science et la philosophie, mais ceci débordant de notre sujet d'aujourd'hui, je n'en dis pas davantage, et je vous remercie, mes chers confrères, de votre attention.



## Discussion

Le Président remercie Monsieur Kevers-Pascalis qui nous a apporté les éléments nous permettant de mieux comprendre le fonctionnement de l'univers, comme d'échapper aux contingences du quotidien. Il rappelle que l'univers est dominé essentiellement par l'énergie et se pose la question du rôle et de la place de l'homme dans cet univers.

Monsieur Larcan, passionné par cet exposé de physique et surtout de la modification de la constance de l'espace, note que les choses se sont compliquées sur le plan de l'histoire des sciences surtout depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle avec la connaissance de l'existence de corps invisibles. Il demande si les trous noirs ont un rôle et dans quelle mesure ils peuvent conduire au mouvement perpétuel.

Monsieur Le Tacon estime qu'en continuant à évoluer, leur volume aboutit à un volume nul donc à rien.

Monsieur Kevers-Pascalis répond qu'il y aurait une évaporation des trous noirs mais on est presque dans la fiction.

Monsieur Greffe se pose la question de savoir si oui ou non les trous noirs existent et estime qu'on peut en avoir la suspicion mais pas la certitude, c'est comme l'existence de Dieu.

Monsieur Mainard affirme qu'il y a des choses qui sortent des trous noirs comme certaines particules qui peuvent être éjectées de ces trous noirs. Mais, en tout état de cause, c'est une recherche en devenir. En se référant à l'histoire, il estime que c'est un trou noir minuscule qui a pu traverser la Sibérie en 1908 et créer les immenses désordres que l'on a pu constater par la suite dans cette région.

Madame Créhange demande si l'on a fondé des éléments de théorie des trous noirs sur des notions d'entropie.

D'une manière générale, les intervenants ont estimé que la science se nourrit de ses ignorances et qu'il est donc difficile, pour l'instant, de discuter de ces problèmes.