

## La saga des trous noirs

Jérôme Perez – Décembre 2009

### Histoire d'un concept

Si dès le début du XVII<sup>ème</sup> siècle, Johannes Kepler comprit que le mouvement des planètes était porté par des ellipses et trouva de façon heuristique sa fameuse loi des aires, il fallut attendre la fin de ce même siècle pour que le grand Newton en apporte l'explication dans ses principia. Sa solution s'applique à toutes les situations possibles et classe en deux catégories le mouvement de deux corps en interaction gravitationnelle : selon que l'énergie totale du système est positive ou négative, les trajectoires sont ouvertes (parabole ou hyperbole) ou fermées (cercle ou ellipse). Cette distinction s'illustre assez bien à travers divers problèmes de balistique. L'obus émis par un canon atteindra un point de plus en plus éloigné en fonction de sa vitesse initiale (en conservant un angle de tir constant...). À la limite, il tombera « plus loin » que la terre, si le canon était suffisamment puissant pour satelliser l'obus, il quitterait même le champ de gravitation terrestre si sa vitesse initiale était supérieure à une certaine vitesse dite de libération. L'énergie potentielle due à la gravité terrestre étant toujours négative et l'énergie cinétique de l'obus étant toujours positive, la vitesse de libération est exactement celle qui permet à l'obus d'avoir une énergie totale nulle ! Cette remarque permet d'ailleurs d'obtenir une expression de cette vitesse : dans le cas où le corps attracteur est sphérique et homogène, on obtient  $v = (GM/R)^{1/2}$  où  $M$  est la masse de l'objet attracteur et  $R$  son rayon.



*Isaac Newton*

Outre ses contributions à la mécanique, Newton « éclaira » aussi l'optique en comprenant la nature composite de la lumière du soleil. Son interprétation de ce phénomène le conduisit à imaginer l'existence de corpuscules de lumière. Un siècle plus tard, alors que la finitude de la vitesse de la lumière avait été établie (notamment par les expériences de Römer en 1676), le français

Pierre-Simon de Laplace (en 1796), mais surtout quelques années avant lui l'anglais John Mitchell(en 1783), firent les raisonnements suivants :

Mitchell : « *Si comme l'a proposé Newton la lumière est un courant de corpuscules, ces derniers devraient être affectés par la gravitation ... la lumière ne devrait donc pas pouvoir s'échapper d'un corps ayant la même densité que le soleil mais un rayon 500 fois plus grand* »

Laplace : « *Il existe donc dans l'espace célestes, des corps obscurs aussi considérables et peut être en aussi grand nombre que les étoiles. Un astre lumineux de même densité que la terre dont le diamètre serait 250 fois plus grand que celui du soleil ne laisserait en vertu de son attraction, parvenir jusqu'à nous, aucun de ses rayons. Il est donc possible que les plus grands corps de l'Univers soient pour cela même invisibles.* »

Les raisonnements sont en tous points identiques et ne diffèrent que par les valeurs numériques des objets utilisés :

	Masse, $M$ [kg]	Rayon, $R$ [km]	Densité moyenne, $D$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Soleil	$2 \cdot 10^{30}$	$6,9 \cdot 10^5$	1,41
Terre	$5,9 \cdot 10^{24}$	6 378	5,12

Avec leurs rayons différents et la relation  $V=4\pi R^3/3$ , le volume considéré par Mitchell est donc 8 fois supérieur à celui imaginé par Laplace. Ils considèrent cependant des corps de densité différente, et donc des masses différentes. Attendu que  $M=D.V$  et que la densité de la terre est environ 4 fois supérieure à celle du soleil, la masse considérée par Laplace est donc le double de celle considérée par Mitchell. Notons finalement que le rayon de Mitchell est aussi le double de celui de Laplace et l'on retombe sur ses pieds : la vitesse de libération est la même dans les deux cas et vaut approximativement 290 000 km/s, soit une excellente approximation de la valeur moderne de la vitesse de la lumière (alors que la première valeur expérimentale précise est l'œuvre de Fizeau en 1849 qui trouvera 315 000 km/s ...). Les résultats sont d'ailleurs à ce point semblables que l'on se demande bien comment Laplace n'a pas pu faire référence aux travaux de Mitchell ... Le raisonnement est donc simple, si un corps possède des

caractéristiques  $M$  et  $R$  telles que sa vitesse de libération est supérieure à celle de la lumière, les rayons lumineux qu'il émettra finiront par lui revenir ou se satelliseront dans son voisinage mais ne pourront pas, à l'instar de l'obus, atteindre un point suffisamment éloigné de ce corps !

Bien que ces résultats inquiétants eussent pu effrayer la communauté des scientifiques de l'époque, il n'en fut rien. Ceci est sans doute dû au fait que la lumière devint une onde au début du XIX<sup>ème</sup> siècle notamment à l'issue des célèbres expériences des fentes d'Young. Elle va d'ailleurs le rester durant tout ce siècle jusqu'au couronnement par Maxwell en 1870. Il n'en sera plus de même après la révolution de 1905. Tour à tour, l'effet photo-électrique, la notion de photon et la relativité restreinte viendront jeter l'opprobre sur toutes ces considérations lumineuses et ouvrir de nouvelles voies, notamment celle de la relativité générale.

À la lueur des nouvelles théories quantique et relativiste, on constatera bien vite que le raisonnement « classique » rend nulle et non avenue sa conclusion. Tout d'abord, l'inertie d'un corps augmente avec sa vitesse, c'est donc la notion même de vitesse de libération qui s'effondre ... Ensuite, la notion de trajectoire est remplacée par celle de géodésique : les corps ne se déplacent plus dans un champ de gravitation, mais selon des courbes minimisant la distance dans un espace temps dont la géométrie s'adapte à leur présence ... Tout est à revoir !

### **L'épopée des petits**

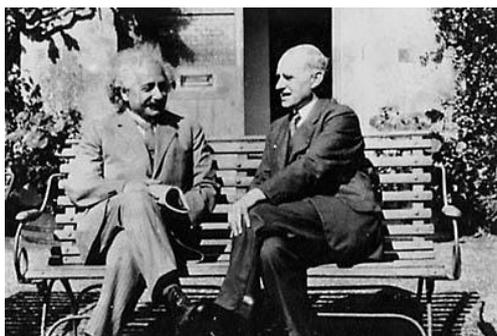
Les problèmes vont cependant réapparaître bien vite. Avec la solution de Schwarzschild en 1916 la relativité générale se voit dotée d'un modèle décrivant l'espace temps à l'intérieur et à l'extérieur d'une boule homogène de rayon fixé. Si ce qui se passe à l'intérieur reste compréhensible, un problème survient dans certains cas lorsque l'on regarde de près des configurations extérieures particulières.



*Karl Schwarzschild*

Tant que la boule n'est pas trop dense, tout se passe sans trop de problèmes, par contre au-delà d'une certaine densité une « sphère magique », selon les mots d'Eddington, apparaît autour de la boule séparant l'espace-temps en deux régions bien différentes. Le point de contact d'une de ces lignes minimales reliant ces deux régions

semble très singulier puisque les horloges s'y arrêtent et toute mesure de longueur doit utiliser des étalons infinis ... Un colloque, organisé à Paris en 1922, est d'ailleurs consacré à l'étude de cet « horizon singulier » auquel participeront les plus grands spécialistes de l'époque emmenés par Einstein. Du point de vue physique, les caractéristiques de la boule façonnant un tel scandale sont telles (le soleil enfermé dans une sphère de  $3 \text{ km}$  !), que nombreux sont ceux qui rejettent la possibilité de son existence ! À la tête de ces conservateurs, Eddington redouble d'efforts pour prouver que même les objets les plus denses connus à l'époque (certains cadavres d'étoiles appelés naines blanches) ne pourraient jamais arriver à de telles valeurs de la densité. L'histoire mérite d'ailleurs qu'on lui consacre quelques lignes. Elle débute vers 1844 lorsque Bessel, qui étudie le mouvement propre de l'étoile Sirius de la constellation du grand chien, soupçonne l'existence d'un compagnon invisible à cette étoile lui tournant autour en environ  $50 \text{ ans}$ . Une vingtaine d'années plus tard, utilisant sa toute nouvelle lunette de  $50 \text{ cm}$ , Clark découvre effectivement Sirius B qu'il nomme affectueusement le Chiot en référence à la constellation qui l'abrite. Il faut alors attendre 1915 et le télescope du Mont Wilson pour qu'Adams puisse enregistrer le spectre du chiot révélant sa température de surface. Sa valeur, qu'il estime à  $27\,000^\circ$ , est bien supérieure aux  $9\,000$  de Sirius. Cette valeur pose un énorme problème car elle attribue à ce chiot un rayon de l'ordre de celui de la Terre ! Sa masse étant déjà connue, Adams déduit que sa densité avoisine la tonne par centimètre cube !



*Albert Einstein & Arthur Eddington*

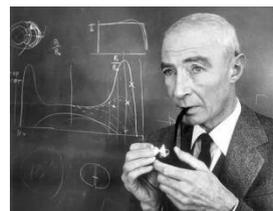
En cherchant à comprendre cette valeur extravagante, Eddington et Fowler en 1925 s'accordent sur une théorie qui, en incorporant la toute récente



*Subrahmanyan  
Chandrasekhar*

mécanique quantique (à travers la pression de dégénérescence des électrons...), leur permet de conclure que ce type d'étoile très dense est contraint par une condition qui impose au produit de leur masse par leur rayon d'être constant. Selon Eddington cette relation empêche ces étoiles, que l'on croyait ultimes, d'atteindre la densité faramineuse requise pour créer le fameux cercle magique. En effet, si le produit de  $M$  par  $R$  est constant pour ces étoiles extrêmes, une valeur de quelques kilomètres pour  $R$ , requise par le cercle magique, impliquerait une masse équivalant à 1000 soleils. Or, il est difficile d'imaginer, même aujourd'hui, la possibilité de former un tel monstre ! Dans l'esprit d'Eddington, la physique se préservait donc toute seule de ce scandale qui ne semblait donc que mathématique ! L'histoire aurait pu en rester là si le jeune Chandrasekhar, lors du voyage en bateau entre son Inde natale et l'Angleterre où l'attendait son futur directeur de thèse Eddington, n'avait pas trouvé une faille dans le raisonnement de Fowler ! Si la pression de dégénérescence des électrons interdit à ces derniers de s'interpénétrer (principe d'exclusion de Pauli), la gravité les conduit cependant à se « coller » les uns contre les autres, ils deviennent donc de mieux en mieux localisables. Chandrasekhar a alors beau jeu d'invoquer le principe, tout aussi quantique, d'indétermination d'Heisenberg pour affirmer que leur vitesse augmente et se rapproche inexorablement de celle de la lumière. Le calcul de Fowler s'il est quantique n'est cependant pas relativiste ! En le refaisant dans ce nouveau contexte, notre jeune indien trouve une condition bien différente de celle obtenue par nos anglais : il existe une masse maximale (de l'ordre d'une fois et demi la masse du soleil...) au-delà de laquelle la pression de dégénérescence des électrons ne peut plus supporter la gravité engendrée par l'étoile. Cette nouvelle est très fraîchement accueillie par un Eddington sur ce point bien conservateur... Après quelques années de joutes farouches l'étudiant dépasse le maître et reçoit l'assentiment de la communauté scientifique ! Qu'advient-il donc des étoiles massives lorsqu'elles arrivent en fin de vie ? En ces années folles précédant la seconde guerre mondiale, le débat s'enflamme et s'anime de l'Amérique à l'Union des soviétiques. Alors que Chadwick découvre le neutron en 1932,

cette nouvelle particule ne va pas tarder à être utilisée par les physiciens qui vont comprendre qu'elle peut proposer une pression de dégénérescence plus grande que celle des électrons. On imagine alors que la gravité pourrait finir par « pousser » les électrons dans les protons présents dans l'étoile afin de former des neutrons qui résistent à une plus forte compression ! Nous voilà rendus à la densité colossale d'étoiles contenant quelques masses solaires dans quelques dizaines de kilomètres. Ce sont les fameuses étoiles à neutron imaginées par Zwicky ou Landau mais toujours pas en deçà de la densité critique conduisant au cercle magique...



*Robert Oppenheimer*

Le coup fatal théorique sera porté par Oppenheimer et Volkoff en 1938 qui montrent que le résultat électronique de Chandrasekhar se généralise aux neutrons et qu'au-delà d'une certaine masse (de l'ordre de 3 masses solaires cette fois-ci) rien ne peut plus arrêter la gravité. Cette idée trouve sa consécration un an plus tard lorsque Oppenheimer et Snyder, intégrant cette fois-ci la relativité générale dans leur approche, montrent que l'effondrement d'une étoile à neutron conduit à une singularité de Schwarzschild ... Le cercle magique pourrait donc bien apparaître dans le destin des étoiles massive !

Dès la fin de la guerre, les progrès en physique, associés aux différents programmes nucléaires russes ou américains, permettent de mieux appréhender les conditions ultimes présentes au sein de ces cadavres stellaires. La controverse fait cependant toujours rage : en 1950 c'est



*John Archibald  
Wheeler*

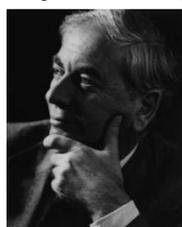
Wheeler, dans la lignée d'Eddington, qui reproche à la solution d'Oppenheimer et Snyder son cadre trop théorique. Pour pouvoir mener à bien leurs calculs analytiques ces derniers ont en effet idéalisé le problème en considérant une étoile à neutron sphérique, sans réaction nucléaire, sans éjection de masse ni onde de choc. Wheeler met donc en avant le fait que la singularité pourrait être le fruit de ces simplifications et

invente le terme ironique de « trou noir ». Quelques années plus tard, avec le développement des premiers calculs numériques, Colgate, White et May (1960) simulent un tel effondrement en incorporant tous les raffinements suggérés par Wheeler. Leur résultat est sans équivoque : rien n'est changé !

Wheeler rend les armes et se range dans le camp des convaincus qui regroupe désormais la quasi-totalité des physiciens de cette époque ... C'est le début de l'âge d'or de la relativité générale : les trois grandes écoles de physique du moment sous l'impulsion de trois mentors se lancent dans l'étude de cette discipline vieille de 50 ans et que l'on croyait cantonnée à de fumeux raisonnements théoriques sans grande réalité physique. Wheeler aux Etats-unis, Sciamia en Angleterre et Zeldovitch en Russie dirigent tous les bataillons de chercheurs et d'étudiants vers la physique des trous noirs. Dès 1963, une nouvelle solution, incorporant la possibilité d'une rotation pour la sphère considérée par Schwarzschild, voit le jour grâce aux travaux du mathématicien australien Kerr. De 1964 à 1968, c'est toute une série de travaux menés



*Yakov Borissovitch Zeldovitch*



*Dennis Sciama*

conjointement par le russe Ginzburg, les anglais Carter et Hawking ou le canadien Israel, qui se concluent par l'étrange affirmation que les trous noirs n'ont pas de cheveux. Par cette conclusion scabreuse, ils entendent que la plupart des propriétés physiques de l'objet sont « évacuées » par l'effondrement conduisant au trou noir : le champ électromagnétique, les écarts à la sphéricité ou toute autre quantité physique distincte de la masse  $M$ , du moment cinétique total  $L$  et de la charge totale  $Q$  disparaissent sous forme de rayonnement dans la phase d'effondrement. Un trou noir est donc un objet physique très simple, semblable à une particule élémentaire, définit par seulement les trois nombres  $M$ ,  $L$  et  $Q$ . Avec l'introduction de la rotation, décrite par  $L$ , le cercle magique se voit entouré d'une ergosphère propice à de nombreuses utilisations physiques... C'est ainsi qu'en 1969, l'anglais Penrose note la possibilité d'extraire de l'énergie en freinant la rotation du trou noir. L'idée est fort simple et se trouve matérialisée dans une machine hypothétique. Imaginez une civilisation capable de construire autour d'un trou noir en rotation, une sphère de quelques centaines de kilomètres. Dotons cette dernière d'une atmosphère et construisons une ville à sa surface... Aménagez deux trous astucieusement positionnés sur cette surface, puis jetez les ordures produites par cette civilisation dans le premier des deux trous en les enfermant dans un container dont l'ouverture est pilotable à distance. Le container entrera dans un mouvement de chute libre créé par le

trou noir. Déclenchez l'ouverture en un point déterminé de sa trajectoire situé dans l'ergosphère du trou noir et les déchets tomberont sur celui-ci alors que le container sera mis, par réaction, sur une trajectoire le conduisant vers le deuxième orifice aménagé dans la sphère, avec au passage une augmentation considérable de sa vitesse. Rien n'étant gratuit en physique, l'augmentation d'énergie cinétique du container correspond à une perte d'énergie cinétique de rotation du trou noir... Il suffit donc d'installer un « moulin à container » au niveau de l'orifice de remontée pour que le choc entraîne une rotation des pales et fabrication de l'électricité ... Le tour est joué, il n'y a aucun problème théorique ...

Cette petite digression montre l'intensité des recherches de cette époque dans ce domaine et indique aussi le degré d'imagination des physiciens. Ce type de machine théorique s'inscrit d'ailleurs dans un rapprochement progressif entre la physique des trous noirs et la mécanique quantique. En remplaçant le container par une fluctuation du vide quantique suffisante pour créer une paire particule-antiparticule, Hawking imagine à la fin des années 60 la possibilité pour les trous noirs de s'évaporer ! Dans ce contexte, il semble théoriquement possible que ces derniers rayonnent un peu d'énergie à un rythme qui devrait laisser la singularité nue en un peu plus de  $10^{66}$  ans pour un trou noir de masse solaire... mais beaucoup moins pour des masses bien plus faibles emprisonnées dans leur cercles magiques !

Si les trous noirs rayonnent, on doit pouvoir leur attribuer une température. C'est l'argument que va utiliser l'Israélien Beckenstein pour construire de 1972 à 1980, la fameuse thermodynamique des trous noirs : si l'on remplace le concept d'entropie par l'aire de l'horizon du trou noir et la notion de température par la gravité de surface sur l'horizon, les lois fondamentales de la thermodynamique « classique » se transposent à l'identique dans le contexte de ces singularités habillées que forment les étoiles massives en terminant leur vie... Si Eddington, qui a toute sa vie cherché des arguments physiques pour éliminer ces monstres, avait pu lire ces derniers développements il aurait sans doute eu bien des regrets...

Bien des choses restent à comprendre dans la physique des trous noirs, et nombreux sont toujours les physiciens qui s'y évertuent ! Du côté du ciel, les astronomes confortés par les arguments théoriques n'ont jamais abdicé. Même s'ils sont a priori invisibles par nature, l'effet des trous noirs sur leurs

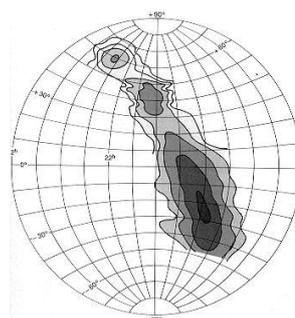
environnements est traqué et sans doute observé dans de nombreux cas comme la fameuse étoile *Cygnus XI* qui réunit toutes les conditions pour être le plus solide candidat trou noir observé indirectement. Mais il restera, comme la vingtaine d'autre un candidat ...

### L'avènement des géants

Alors qu'il travaillait pour la *Bell Telephone*, en 1932 Jansky découvrit fortuitement, grâce à son détecteur destiné à l'étude des parasites dans les liaisons téléphoniques transatlantiques, qu'un « sifflement » provenait du centre de notre galaxie dans le domaine des ondes radio (quelques dizaines de mètres de longueur d'onde). La diffusion de ces résultats laisse la communauté scientifique de l'époque absolument indifférente, Janski proposa bien à sa hiérarchie de construire une antenne de 30 mètres pour confirmer son résultat, mais devant son refus (pas rentable ...) et tant d'indifférence, l'affaire aurait pu en rester là sans la pugnacité d'un jeune

collaborateur de Janski. Agé de 26 ans, radioamateur et résidant toujours chez sa maman dans les faubourgs de Chicago, Reber construisit à ses frais en 1937 dans le jardin de celle-ci une antenne parabolique d'une dizaine de mètres de diamètre. Le premier véritable radiotélescope était construit ! Armé de cet outil, et après de longues et obstinées séances d'observation, il obtint la première véritable carte du ciel dans cette gamme de longueur d'ondes. Il devait travailler la nuit,

non pas à cause de la lumière du soleil peu gênante à ces fréquences, mais bien plus à cause du « bruit » électromagnétique engendré par les moteurs des voitures qui commençaient à envahir les routes américaines en ce milieu du XX<sup>ème</sup> siècle... Outre la confirmation du résultat de Janski dans la région du centre galactique (*Sagittaire*), Reber découvre deux autres régions émettant autour de quelques centaines de MHz dans les constellations du Cygne et de Cassiopée. L'annonce de la découverte des sources *CygA* et *CasA* est envoyée par Reber au très sérieux *Astrophysical Journal* dont le rédacteur n'était autre que le fameux Chandrasekhar en poste à l'observatoire Yerkes... L'article sera publié en 1944, rare sont les amateurs pouvant se vanter d'un tel exploit ! Chandrasekhar est à ce point intrigué par



*La carte radio de Reber*

le résultat qu'il envoie une délégation de professionnels inspecter l'observatoire de fortune. Ces derniers revinrent impressionnés, la radioastronomie était née ! Reber le casanier continue ses travaux tout seul dans le jardin de sa mère, mais, dès la fin de la guerre, récupérant l'ensemble des matériels désormais inutiles aux militaires, les astronomes vont de leur côté tourner les radars vers le ciel !

En la matière les anglais sont royalement dotés ! Pour résister au harcèlement aérien des forces nazies, ils s'étaient en effet équipés d'une armada d'antennes devenues inutiles. Deux équipes d'astronomes vont se constituer l'une à Manchester où le Jodrell Bank Observatory est dirigé par Lowell et l'autre à l'Université de Cambridge supervisée par Ryle. Ils vont même faire des émules en Australie où Bolton et Pawsey se mettent eux aussi à traquer les sources radio. Les techniques se développent à toute

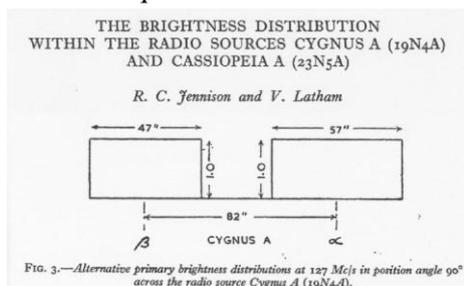


FIG. 3.—Alternative primary brightness distributions at 327 Mc/s in position angle 90° across the radio source Cygnus A (19N4A).

**Extrait de l'article de 1959 confirmant la gémellité de la source CygA**

vitesse et Ryle invente l'interférométrie qui permet d'augmenter la résolution de ces antennes en les déplaçant. Grâce à ces méthodes, et dès 1953, les astronomes de Jodrell Bank montrent que la source CygA est en fait double : les ondes radio ne viennent pas du centre mais de

deux régions gigantesques et symétriques !

Le feu est mis aux poudres... La communauté des astro-nomes va se tourner vers Cygnus A ! Le bricolage et la récupération sont terminés : les états se lancent dans la construction d'antennes gigantesques. En 1958 et 1965 aux Etats-Unis, ce sont les observatoires de Green Bank en Virginie Occidentale

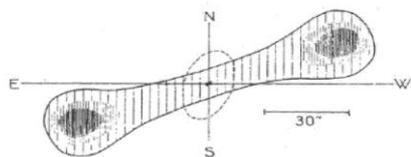


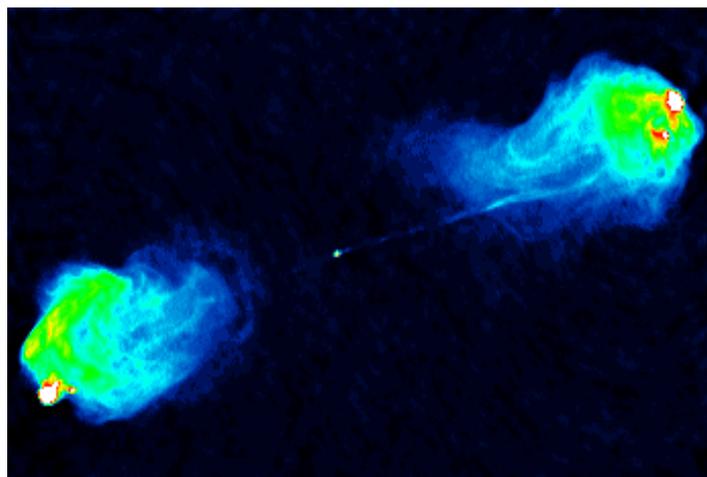
FIG. 24. — Schéma de la structure de Cygnus A. Au centre, l'aspect optique.

**L'observation de CygA avec Radiotélescope de Nancay en 1962**

et d'Owens Valley près de Caltech qui se voient dotés d'antennes dont les diamètres respectifs sont 26 m et 100 m. La France n'est pas en reste !

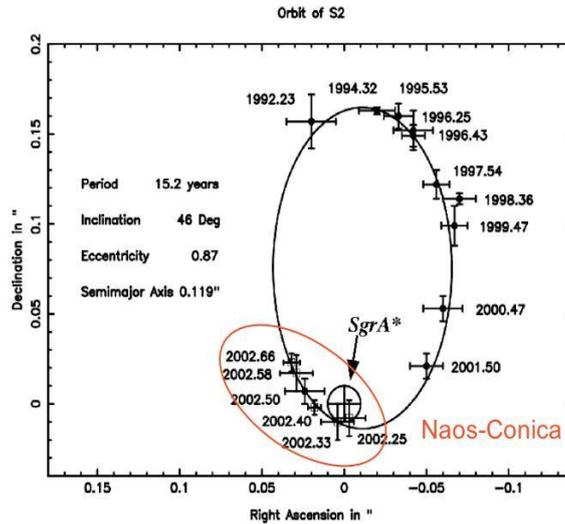
Sous l'impulsion de Steinberg et Rocard, le gouvernement français débloque dès 1952, plus de 25

millions de francs de l'époque pour financer un programme visant à doter les astronomes français d'un radio observatoire. Effort qui va se poursuivre pendant plus d'une dizaine d'années et qui va atteindre son point d'orgue avec l'inauguration par le Général de Gaulle en 1965 du radiotélescope décimétrique. Avec ses deux miroirs métalliques de *40 mètres* de hauteur sur *200 et 300 mètres* de largeur, la résolution de cet instrument permet de dévoiler plus finement la structure de la mystérieuse source et de la comparer avec sa contrepartie optique observée par Baade dès 1951. Quatre ans plus tard, c'est la surprise ! En utilisant le radiotélescope d'*un mile* récemment implanté à Cambridge, Mitton et Ryle obtiennent une carte à haute résolution de *CygA* : que ce soit à *5* ou à *2 GHz*, cette source apparaît composée de deux énormes lobes séparé par une distance correspondant à une bonne dizaine de fois la taille caractéristique d'une galaxie. Ces lobes sont eux-mêmes d'une taille gigantesque par rapport à l'extension d'une galaxie dans le domaine des longueurs d'ondes visibles. Comble de tout, ces lobes ne possèdent pas de contrepartie dans ce même visible ... De mieux en mieux ! Les américains décident de frapper un grand coup en construisant à Socorro dans le désert du nouveau Mexique, le *Very Large Array (VLA)*, un radio télescope dont le miroir possède une surface équivalant à *36 km<sup>2</sup>*... Après une dizaine d'années de mise au point délicate les résultats tombent. Perley, Dreher et Cowan montrent en 1984 qu'un filament très fin et 1000 fois moins lumineux que les deux lobes relie ces gigantesques protubérances au centre de l'objet !



*La carte radio de CygA obtenue par le VLA en 1984*

La seule explication désormais possible est l'existence d'un objet central évacuant de la matière à la manière d'un jet d'eau symétrique. Le seul problème est que ce jet possède une vitesse caractéristique de l'ordre de 80% de celle de la lumière. C'est pour cela qu'il reste cohérent sur de telles distances ! Quel objet physique pourrait bien être capable d'accélérer autant de particules jusqu'à de telles vitesses ? Les théoriciens entrent en jeu et l'explication proposée est à la hauteur des observations : un trou noir en rotation aspire la matière de son environnement qui forme un disque d'accrétion autour de lui. Un astucieux couplage entre ce disque et certaines propriétés magnétiques permet d'éjecter une partie de la matière aspirée avant qu'elle ne franchisse le cercle magique dans des directions orthogonales au plan du disque... Le seul petit souci est que la masse du trou noir responsable des ces gigantesques jets doit être de l'ordre du million de fois celle des trous noirs dont nous avons retracé l'épopée précédemment ! Ces trous noirs « supermassifs » s'imposent comme la seule explication raisonnable capable de produire un tel phénomène ... Mais tout ceci est-il bien raisonnable ? Comment de tels objets peuvent-ils se former ? Beaucoup de questions se posent et nombreux sont les astronomes sceptiques ! Une partie de la réponse est pourtant venue d'une étude réalisée par une équipe européenne pilotée par Genzel et s'étalant sur une dizaine d'années. Leur conclusion en 2002 conduit à la présence d'un de ces trous noirs supermassifs au centre de notre galaxie, son nom : *SrgA\** ! Vue de loin, l'idée de l'expérience est simple : fixez avec le meilleur instrument possible (le *Very Large Telescope - VLT*) une toute petite région très proche du centre de notre galaxie. Faites une photo. Renouvelez l'expérience tous les mois, pendant 10 ans. Superposez enfin toutes les photos obtenues afin d'en faire un film. Sur une si petite période une étoile ne devrait pas avoir de mouvement propre, sauf si elle se trouve dans le champ gravitationnel d'un objet aux caractéristiques exotiques. C'est ce qu'on vu les membres de cette équipe :



*L'observation de l'équipe de Genzel*

Une étoile appelée *S2* tourne autour d'un point en *15,5 années* sur une orbite elliptique dont le demi grand axe vaut *129 années lumière*, le périastre se situant à *17,5 heures lumière* du foyer. En appliquant les fameuses lois de Kepler dont nous parlions en introduction de ce document, on trouve que l'objet attracteur, à l'origine de ce mouvement elliptique, possède une masse environ 3 millions de fois supérieure à celle du soleil. La boucle est bouclée ! D'autres observations plus récentes semblent indiquer que la plupart des galaxies recèleraient de tels monstres.

Si une galaxie contient un cœur très encombré, rempli de poussières par exemple, elle développera un disque d'accrétion et sera cataloguée comme galaxie active à l'instar de *CyGA*. Si, comme c'est le cas de la voie lactée, le cœur galactique est plus « propre », seules quelques étoiles très proches du centre pourront trahir la présence du monstre tapi dans l'ombre comme l'ont fait nos patients européens ...

Une question reste posée : comment se forment les trous noirs galactiques qui semblent fort différents de leurs cousins stellaires ? J'ai bien mon idée sur cette affaire, mais ceci est une autre histoire...