

**Zeitschrift:** Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft  
**Herausgeber:** Schweizerische Astronomische Gesellschaft  
**Band:** 63 (2005)  
**Heft:** 328

**Artikel:** Un gros trou noir au centre de notre galaxie = Ein grosses schwarzes Loch im Zentrum unserer Galaxie  
**Autor:** Fischer, Gaston  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-897761>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 26.12.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



# Un gros trou noir au centre de notre galaxie

GASTON FISCHER

Dans un précédent article (Fischer, 1996) l'auteur a rapporté l'observation de la présence d'un très gros trou noir au centre de la galaxie M87 (Collins, 1994) ainsi que la suggestion que de tels trous noirs étaient probablement fréquents au centre de nombreuses galaxies, y compris la nôtre. Grâce à la mise en œuvre des techniques de l'optique adaptative (que l'auteur a décrites dans ORION en 1994) par l'ESO (European Southern Observatory au Mont Paranal dans les Andes chiliennes) sur ses télescopes VLT de 8 m de diamètre, il a été possible de révéler la présence d'un trou noir d'environ 3.6 millions de masses solaires au centre de notre galaxie. Bien que ce trou soit quelques cinq cent fois moins massif que celui rapporté par Collins au centre de M87, on a pu confirmer sa présence par le parcourt d'une étoile en orbite autour de ce trou.

On savait que le centre de la Voie Lactée est situé dans la direction de la constellation du Sagittaire. Dans cette constellation on observe une source compacte d'émissions radio à laquelle on a donné le nom de SgrA\* (où S signifie Sagittaire). Cette source se trouve au centre de l'image, obtenue dans la bande infrarouge de  $3.7 \mu\text{m}$  représentée à la Fig. 1 (Rouan, 2004). Cette vue a une largeur de 3.2 al (années-lumière). Une série de clichés de cette région, obtenus

entre 1992 et 2003 ont révélé la présence d'une étoile qui gravite autour de SgrA\* avec une période de 15.56 ans (Eisenhauer et al., 2003). Cette étoile, qui a reçu le nom de S2, est visible sur le cliché de la Fig. 2, tout comme la source radio SgrA\*, et la Fig. 3 représente les positions successives de S2 par rapport à SgrA\*. Cette dernière figure donne aussi la meilleure ellipse képlérienne satisfaisant aux positions observées pour S2, telles qu'indiquées avec leurs

marges d'erreur. L'ellipse, représentée à la Fig. 3, se manifeste par une importante excentricité de 0.881. Il vaut la peine de noter que cette figure est vue sous un angle inhabituel, de sorte que ses axes ne correspondent pas aux axes de la projection représentée. Ainsi le foyer, indiqué par le petit cercle au bas de la figure, ne se trouve pas sur l'axe vertical de l'orbite dessinée. La grandeur de ce petit cercle exprime la marge d'erreur de seulement quelques mas (millièmes d'arc-secondes), alors que le cercle nettement plus grand au même endroit donne la position estimée de la source SgrA\*. La grandeur de ce second cercle représente l'incertitude de 10 mas pour cette position, ce qui permet aussi d'évaluer les incertitudes sur les mesures données par les croix attribuées aux positions successives de S2. Comme on le voit, la source radio compacte SgrA\* semble bien correspondre au trou noir central de la Voie Lactée.

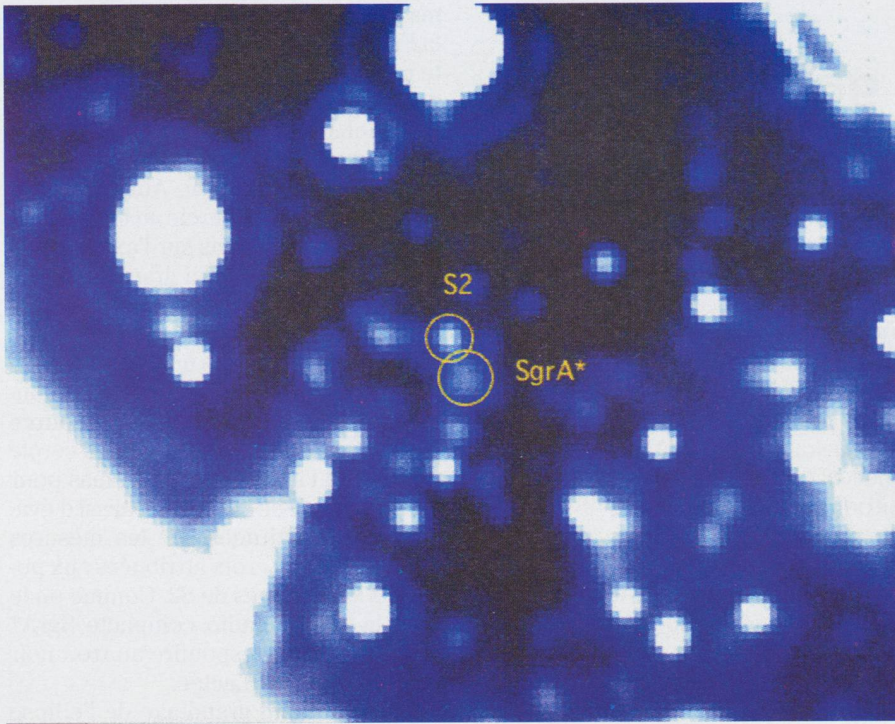
Pour le demi grand-axe de l'ellipse parcourue par S2 autour de SgrA\* Eisenhauer et al. (2003) donnent la valeur de  $0,1203''$  (arc-secondes). Avec la nouvelle valeur plus précise de la distance du système solaire au centre de la Voie Lactée, obtenue elle aussi par Eisenhauer et al., soit  $7.94 \pm 0.42$  kiloparsecs ou  $(25.9 \pm 1.4) \cdot 10^3$  al, ce demi grand-axe correspond à 132.3 hl (heures-lumière). Avec l'excentricité de 0.881 cela signifie que pour l'approche minimale on trouve le fait remarquable que cette distance n'est que de 15.75 hl, soit seulement trois fois le rayon de l'orbite solaire de Pluton! Quant au trou noir central, son rayon de Schwarzschild se calcule comme indiqué par l'auteur (1996) et ne vaut que 35.4 sl (secondes-lumière). C'est tout de même quinze fois plus que le rayon du Soleil (2.322 sl). Mais la densi-



Fig. 1. Photographie infrarouge à  $3.7 \mu\text{m}$  en direction du centre de la Voie Lactée. La largeur du champ de vision est d'environ 3.2 années lumière à cet endroit. Dans cette région la densité des étoiles est si grande que ce cliché ne montre qu'un pour-cent des plus brillantes d'entre elles. Une zone de même grandeur au voisinage de notre Soleil ne ferait guère apparaître qu'une seule étoile.

Abb. 1. Infrarotes Bild bei einer Wellenlänge von  $3.7 \mu\text{m}$  in Richtung des Milchstrassen-Zentrums. Die Breite der Aufnahme beträgt an dieser Stelle etwa 3.2 Lichtjahre. Dort ist die Sternendichte so gross, dass die Aufnahme nur etwa ein Hundertstel der hellsten Sterne wiedergibt. Eine ähnliche Aufnahme in der Umgebung der Sonne, würde nur etwa einen einzigen Stern zeigen. (Cliché tiré de Rouan, 2004)





té moyenne de ce trou noir n'est que de  $1.426 \cdot 10^6 \text{ kg/m}^3$ , densité qu'on peut comparer à celle d'une étoile à neutrons ( $\approx 1.4 \cdot 10^{18} \text{ kg/m}^3$ ) ou à la densité moyen-

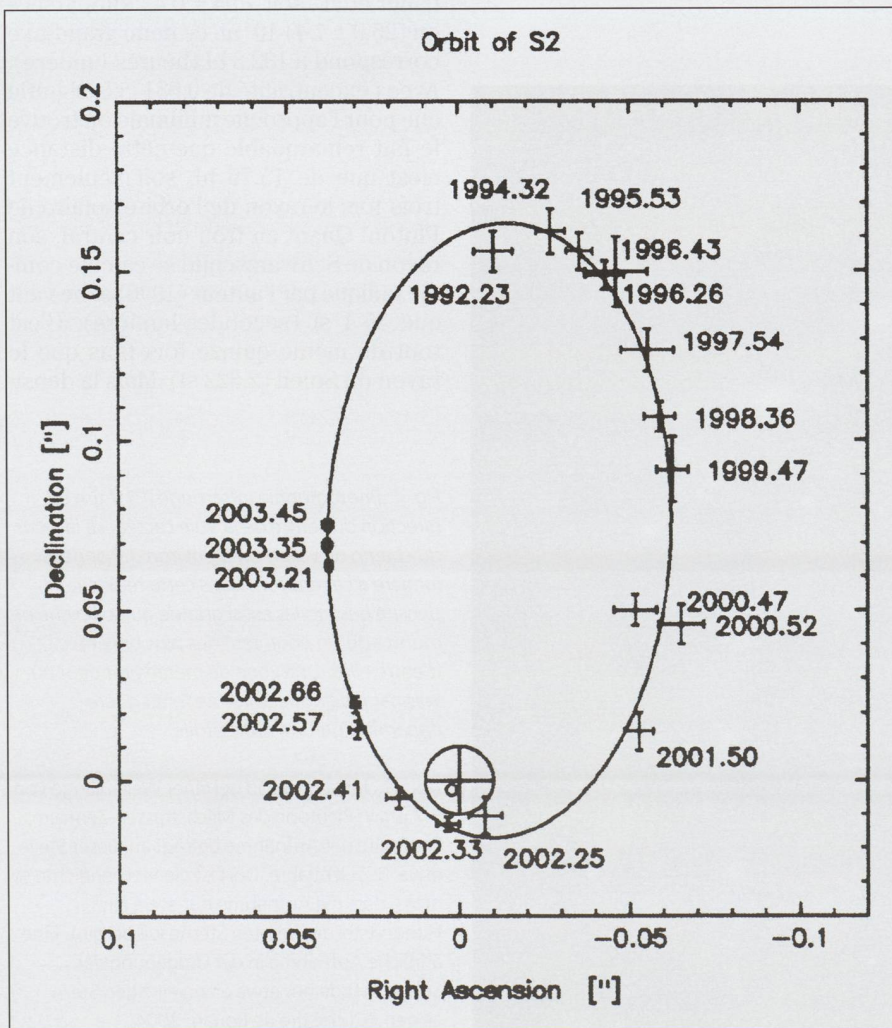
ne du Soleil ( $1.408 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ). Comme on peut le montrer (voir Fischer, 1996) la densité moyenne des trous noirs diminue comme le carré de leur masse.

Fig. 2. Agrandissement de la partie centrale de la Fig. 1, correspondant à une largeur d'environ une demi année-lumière. A cause du trou noir de près de 4 millions de masses solaires à l'emplacement de la source radio compacte SgrA\*, l'étoile S2 orbite cette source en 15.56 ans. On peut comparer cette période avec celle du Soleil autour du centre de la Voie Lactée en 240 millions d'années environ.

Abb. 2. Vergrößerung der zentralen Zone von Abb. 1, mit einer entsprechenden Breite von etwa einem halben Lichtjahr. Die kompakte Radioquelle SgrA\* erweist sich als schwarzes Loch im Zentrum der Milchstrasse. Um dieses Loch kreist der Stern S2 mit einer Periode von 15.56 Jahren auf einer elliptischen Bahn. Diese kurze Periode kann mit den 240 Millionen Jahren, die unsere Sonne braucht, um in der Milchstrasse einmal herum zu kommen, verglichen werden. (Cliché tiré de Rouan, 2004)

Fig. 3. Orbite de S2 autour de la source radio compacte SgrA\*. Les années sont les dates d'observation et les croix représentent les marges d'erreur d'une déviation standard. La courbe est la meilleure approximation d'une orbite képlérienne pour S2. Le foyer de l'ellipse est le petit cercle au bas de l'orbite et la position de la source radio compacte est le cercle plus grand à cet endroit, dont le rayon représente la marge d'erreur de 10 millièmes d'arc-secondes. Ce chiffre permet de calibrer les marges d'erreur sur les positions de S2. Il vaut la peine de noter que cette orbite n'est pas vue selon la perpendiculaire au plan de l'ellipse. Cet angle inhabituel fait que le foyer n'est pas sur le grand-axe de l'ellipse du dessin. Avec une période orbitale de 15.56 ans et une excentricité de 0.881 on calcule qu'à son périhélie S2 n'est qu'à 15.75 heures-lumière de SrgA\*.

Abb. 3. Umlaufbahn des S2 Sternes um die kompakte Radioquelle SgrA\*. Die aufgeführten Jahre verweisen auf die beobachteten Lagen von S2 mit den entsprechenden S<standardfehlern. Die Kurve ist die beste Annäherung an eine Kepler-Bahn, die aus den Messdaten abgeleitet werden kann. Einer der Brennpunkte der Ellipse ist der kleine Kreis am unteren Rande, und die Lage der Radioquelle SgrA\* ist der grössere Kreis fast am gleichen Ort. Der Radius des zweiten Kreises entspricht einer Unsicherheit von 10 Tausendstel einer Bogensekunde, was es erlaubt, die Fehler der einzelnen Messungen abzuschätzen. Es ist erwähnenswert, dass die Abbildung der Ellipse diese unter einem ungewöhnlichen Winkel zeigt, recht verschieden vom üblichen senkrechten Anblick in Bezug auf die Ebene, wo die Ellipse sich abspielt. Dieser spezielle Winkel hat zur Folge, dass der Brennpunkt nicht auf der Hauptachse der abgebildeten Ellipse liegt. Mit einer Bahnperiode von 15.56 Jahren und einer Exzentrizität von 0.881 kann leicht gezeigt werden, dass am Perigäum der Stern S2 nur noch 15.75 Lichtstunden von der Radioquelle SgrA\* entfernt ist. (Diagramme tiré de Eisenhauer et al., 2003)





Pour ceux que les mathématiques intéressent un peu, nous allons dériver la relation entre densité moyenne  $\rho_m$  et masse d'un trou noir, car cette relation a une structure assez étonnante. Nous commençons par rappeler la formule qui donne le rayon de Schwarzschild  $r_s$  d'un trou noir qui n'est pas soumis à une rotation rapide (voir, p. ex. Fischer, 1996):

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad (1)$$

où  $G$  est la constante de la gravitation,  $M$  la masse du trou noir et  $c$  la vitesse de la lumière. D'autre part, la densité moyenne d'un trou noir en termes de sa masse et de son rayon est simplement celle qui vaut pour une sphère homogène en général, soit:

$$\rho_m = \frac{3M}{4\pi r_s^3}. \quad (2)$$

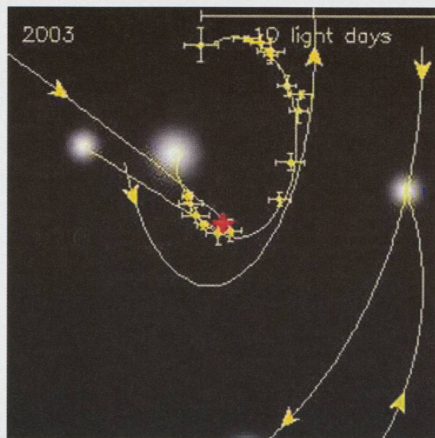
Lorsqu'on remplace  $r_s$  dans l'Eq. (2) par sa valeur donnée en (1), on obtient une relation des plus intéressantes par sa structure:

$$\rho_m = \frac{3c^6}{32\pi G^3 M^2}. \quad (3)$$

On ne peut manquer d'être frappé, pas seulement par la dépendance au carré de l'inverse de la masse  $M$ , mais encore par l'apparition au dénominateur du cube de la constante de la gravitation  $G$  et la puissance six de la vitesse de la lumière  $c$  au numérateur.

Il est alors instructif de calculer la grandeur du rayon du trou noir au centre de la galaxie M87 ainsi que sa densité moyenne. Admettant pour M87 une masse de 2 milliards de masses solaires

Fig. 4. Après l'enregistrement de la trajectoire de l'étoile S2, reproduite à la Fig. 3, plusieurs autres étoiles sur une grande variété d'orbites autour de la source radio compacte SgrA\* ont été observées, comme le montre le diagramme de cette figure, aimablement mise à notre disposition par le Dr ROLAND WALTER de l'Observatoire de Genève. (ce cliché est tiré d'une animation qui peut être trouvée sous <http://www.mpe.mpg.de/lir/GC/index.php>, réalisée par les Drs THOMAS OTT du «Max Planck Institut für Extraterrestrische Physik», Garching et RAINER SCHÖDEL de l'Université de Cologne)



on trouve pour le rayon de son trou noir la valeur de  $5.9 \cdot 10^{12}$  m, ce qui correspond à environ 5.5 heures-lumière et pour sa densité la valeur de seulement  $4.6 \text{ kg/m}^3$ , soit moins d'un millième de la densité moyenne de la Terre! Nous avons là une superbe démonstration que la densité moyenne des grands trous noirs décroît rapidement lorsque leur

Abb. 4. Nach Registrierung der Bahn des Sternes S2 nach Abb. 3, wurden weitere Sterne auf recht verschiedenen Bahnen um die kompakte Radioquelle SgrA\* gefunden, wie im obigen Diagramm dargestellt, das wir Dr ROLAND WALTER vom Observatoire de Genève verdanken. (Diagramm aus einer Simulation, die unter <http://www.mpe.mpg.de/lir/GC/index.php> gefunden werden kann, realisiert von Dr THOMAS OTT vom «Max Planck Institut für Extraterrestrische Physik», Garching und Rainer Schödel von der Universität Köln)

masse totale augmente. En effet, nous avons vu que le rapport de masse des deux trous noirs considérés est d'environ 500 et nous trouvons que le rapport de leurs densités moyennes est bien le carré de ce chiffre.

GASTON FISCHER  
Rue de Rugin 1A, CH-2034 Peseux

### Bibliographie

- COLLINS, G. P. (1994): *Repaired Hubble sees strong evidence of a supermassive black hole in M87*, Physics Today, August, Vol. 47, pp. 17-20.
- EISENHAEUER, F. (2003): *A geometric determination of the distance to the galactic center*, The Astronomical Journal, November 10, Vol. 597: L121-L124.
- FISCHER, G. (1996): *Somme-nous dans un trou noir / Sind wir in einem schwarzen Loch*, ORION N° 275, août, pp. 185-187.
- FISCHER, G. (1994): *Une retombée pacifique de la guerre des étoiles / Eine friedliche Nebenerscheinung des Kriegs der Sterne*, ORION N° 262, juin, pp. 131-134.
- ROUAN, DANIEL (2004): *A massive black hole at the very centre of our galaxy*, Europhysics News, September/October, pp. 141-144.

## Ein grosses schwarzes Loch im Zentrum unserer Galaxie

GASTON FISCHER

In einem früheren Artikel (Fischer, 1996) hat der Autor die Beobachtung eines massiven schwarzen Lochs im Zentrum der M87 Galaxie erwähnt (Collins, 1994) und auch den Verdacht geäussert, dass sich ähnliche massive Löcher im Zentrum vieler Galaxien befinden, insbesondere in der Milchstrasse. Mit der Realisierung der Methode der adaptiven Optik (vom Autor im Jahr 1994 in ORION beschrieben) durch die ESO (European Southern Observatory, ein Konsortium europäischer Staaten, dem auch die Schweiz angehört) an einem der grossen 8 m VLT (für Very Large Telescope) Fernrohre, ist es möglich geworden zu beweisen, dass sich im Zentrum unserer Galaxie ein schwarzes Loch befindet, dessen Masse etwa 3.6 Millionen Sonnenmassen beträgt. Wenn auch dieses Loch etwa 500 mal weniger massiv ist als dasjenige der M87 Galaxie, konnte der Beweis seiner Existenz durch Verfolgung der Bahn eines Sternes im Umlauf dieses Lochs erbracht werden.

Es ist allgemein bekannt, dass das Zentrum der Milchstrasse sich in der Konstellation des Schützen befindet. In dieser Konstellation beobachtet man

eine kompakte Radioquelle, der man den Namen SgrA\* gegeben hat (wo S für Schütze oder Sagittarius steht). Diese Radioquelle befindet sich im Zentrum

der Abb. 1, die im Infrarotbereich bei  $3.7 \mu\text{m}$  aufgenommen wurde (Rouan, 2004). Im Zentrum der Milchstrasse erstreckt sich diese Aufnahme über 3.2 Lj (Lichtjahre). Eine Reihe solcher Bilder, aufgenommen zwischen den Jahren 1992 und 2003, haben gezeigt, dass ein Stern sich auf einer elliptischen Bahn um SgrA\* befindet, mit einer Periode von nur 15.56 Jahren (Eisenhauer et al., 2003). Dieser Stern, dem man den Namen S2 gegeben hat, ist zusammen mit SgrA\* auf Abb. 2 zu sehen. Auf Abb. 3 ist die Reihenfolge der Lagen von S2 gezeichnet, mit den geschätzten Unsicherheiten, sowie die Bahn, die einer bestmöglichen Anpassung zu einer Kepler-Ellipse entsprechen. Die Ellipse von Abb. 3 hat eine grosse Exzentrizität von 0.881. Es ist erwähnenswert, dass man diese Ellipse unter einem recht ungewöhnlichen Winkel betrachtet, sodass deren wahre Brennpunkte nicht auf die Achsen der gezeichneten Ellipse fallen.



Der eine Brennpunkt ist der kleine Kreis am unteren Ende der Bahn. Seine Grösse entspricht der abgeschätzten Unsicherheit seiner berechneten Lage, d.h. nur einige TB (Tausendstel einer Bogensekunde). Der grössere Kreis am fast gleichen Ort gibt die Lage der Radioquelle SgrA\* wieder. Der Radius dieses grösseren Kreises entspricht der Unsicherheit von 10 TB für diese Lage und erlaubt es auch, die Unsicherheiten der verschiedenen Beobachtungen abzuschätzen. Was auffällt ist, dass SgrA\* tatsächlich mit dem Brennpunkt der S2-Bahn zusammenfällt und damit einen klaren Beweis dafür erbringt, dass das Zentrum der Milchstrasse ein massives Schwarzes Loch beherbergt.

Für die halbe Hauptachse der elliptischen S2-Bahn um den Brennpunkt bei SgrA\* finden Eisenhauer et al. (2003) einen Wert von 0.123" (Bogensekunden). Mit dem genaueren Wert für den Abstand der Sonne zum Milchstrassenzentrum von  $0.794 \pm 0.42$  kiloparsec, also  $(25.9 \pm 1.4) \cdot 10^3$  Lj, der auch von Eisenhauer et al. ermittelt wurde, ergibt sich diese halbe Hauptachse zu 132.3 Ls (Lichtstunden). Mit einer Exzentrizität von 0.881 führt dies zu einem minimalen Abstand beim Perigäum von nur 15.75 Ls zwischen S2 und SgrA\*. Das ist nur etwa dreimal soviel wie der mittlere Radius der Bahn Plutos im Sonnensystem! Was das zentrale schwarze Loch angeht, so beträgt sein

Schwarzschild-Radius, den wir z.B. nach den Vorgaben des Autors (1996) berechnen, nur 35.4 Ls (Lichtsekunden). Das ist immerhin etwa 15 mal soviel wie der Sonnenradius (2.322 Ls). Die mittlere Dichte dieses schwarzen Loches ergibt sich aber nur zu  $1.426 \cdot 10^6$  kg/m<sup>3</sup>, einen Wert, den wir mit der mittleren Dichte eines Neutronensternes vergleichen können ( $\approx 1.4 \cdot 10^{18}$  kg/m<sup>3</sup>) oder mit derjenigen der Sonne ( $1.408 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>). Wie wir gezeigt haben (Fischer, 1996), fällt die mittlere Dichte grosser schwarzen Löcher wie das Quadrat ihrer gesamten Masse.

Für Leser mit einem Interesse an der Mathematik leiten wir die Beziehung zwischen mittlerer Dichte  $\rho_m$  und Gesamtmasse  $M$  eines schwarzen Loches ab, denn diese weist eine besonders interessante Struktur auf. Wir wiederholen zuerst die Beziehung, die den Schwarzschildradius eines nicht-rotierenden schwarzen Loches gibt (siehe z.B. Fischer, 1996):

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad (1)$$

wo  $G$  die Gravitationskonstante,  $M$  die Masse des Loches und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit bedeuten. Die Beziehung zwischen mittlerer Dichte eines schwarzen Loches und seinem Radius  $r_s$  ist natürlich die gleiche wie für eine homogene Kugel:

$$\rho_m = \frac{3M}{4\pi r_s^3}. \quad (2)$$

Ersetzt man das  $r_s$  in Gl. (2) mit dem aus Gl. (1) abgeleiteten Wert, so erhält man die recht erstaunliche Beziehung:

$$\rho_m = \frac{3c^6}{32\pi G^3 M^2}. \quad (3)$$

Besonders interessant ist nicht nur die inverse quadratische Abhängigkeit von der gesamten Masse  $M$ , sondern auch die kubische Abhängigkeit von der Gravitationskonstante  $G$  im Nenner und die sechsfache Potenz der Lichtgeschwindigkeit  $c$  im Zähler

Es lohnt sich jetzt den Schwarzschild-Radius des Lochs im Zentrum der M87 Galaxie zu berechnen, sowie dessen mittlere Dichte. Mit einer Gesamtmasse von 2 Milliarden Sonnenmassen erhält man einen Radius von  $5.9 \cdot 10^{12}$  m, oder ungefähr 5.5 Ls, und für die mittlere Dichte kommt ein Wert von nur 4.6 kg/m<sup>3</sup> heraus, also weniger als ein Tausendstel der mittleren Dichte der Erde! Dies ist ein klares Beispiel, dass die mittlere Dichte von schwarzen Löchern sehr schnell abnimmt, wenn ihre Gesamtmasse zunimmt. Bei den zwei hier betrachteten Löchern erhält man ein Massenverhältnis von nahezu 1 zu 500, und ihre mittleren Dichten stehen somit fast im Quadrat dieser Zahl.

GASTON FISCHER

Rue de Rugin 1a, CH-2034 Peseux

**Calsky**  
"der umfangreichste astronomische Beobachtungskalender- und Informations-Rechner im Internet"

www.Calsky.com

## ASTRO-LESEMAPPE DER SAG

Die Lesemappe der Schweizerischen astronomischen Gesellschaft ist die ideale Ergänzung zum ORION.

Sie finden darin die bedeutendsten international anerkannten

Fachzeitschriften:

**Sterne und Weltraum**

**Astronomie heute**

**Ciel et Espace**

**Spektrum der Wissenschaft**

**Forschung SNF**

**Der Sternbote**

Kostenbeitrag: nur 30 Franken im Jahr!

Rufen Sie an: 071 966 23 78

CHRISTOF SAUTER, Weinbergstrasse 8  
CH-9543 St. Margarethen

## KLEIN-INSERTAT / PETITE ANNONCE

• Zu verkaufen günstig  
**Newton 250/1500 1:6**; Lichtenknecker, Okular + Filtersatz; Refraktor für manuelle Nachführ-Korrektur. Nachführsteuerung und Koordinatenautomat. Montierung AOK Swiss inkl. Winkelencoder. Eingehende Unterlagen bei 031 921 76 56 (tagsüber).