Sommes-nous dans un trou noir? = Sind wir in einem Schwarzen Loch?

Autor(en): **Fischer, G.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **54 (1996)**

Heft 275

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-898138

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Sommes-nous dans un trou noir?

G. FISCHER

Lorsqu'on parle de «trous noirs» on insiste généralement sur le fait qu'aucune information ne peut en sortir et sans qu'on s'en rende compte, on sous-entend souvent que rien ne peut trahir leur présence; cela, bien sûr, est totalement faux. D'abord, un trou noir se manifeste par sa gravité; ainsi, il est fort probable que certains partenaires d'étoiles doubles sont en fait des trous noirs. Ensuite, un trou noir situé au coeur d'une masse de gaz va attirer ce gaz et fortement l'accélérer; cela produira une émission de lumière, soit parce que les molécules neutres du gaz s'entrechoquent, soit parce que les parties ionisées émettent de la radiation de Cerenkov.

S'il est bien vrai qu'un trou noir, s'il existe effectivement, ne pourra pas passer inaperçu, il est tout aussi vrai que les signes par lesquels il se manifeste ne permettent pas, en général, d'affirmer que seul un trou noir aurait pu les produire. Ceci explique pourquoi certains cosmologistes refusent, aujourd'hui encore, d'accepter la réalité des trous noirs. Après la réparation du télescope spatial de Hubble on a pourtant mis en évidence, par effet Doppler, une concentration de quelques 2 milliards de masses solaires à l'intérieur d'un rayon de seulement 60 années-lumière au coeur de la galaxie M87, distante de quelques 70 millions d'années-lumière. Bien que ce petit volume central soit très brillant, il ne contient de loin pas un nombre suffisant d'étoiles lumineuses pour expliquer une telle masse. La présence d'un trou noir, qu'on soupçonnait d'ailleurs depuis longtemps au coeur de nombreuses galaxies, y compris la nôtre, est la seule façon de comprendre ces observations d'effet Doppler (voir Collins, 1994).

Un observateur extérieur est donc manifestement sensible à la présence d'un trou noir. Par contre, un observateur situé à l'intérieur d'un trou noir ne pourra jamais rien percevoir du monde extérieur à ce trou. Nous reviendrons sur ce point plus bas.

Un trou noir particulier est caractérisé par sa masse M et c'est cette masse qui détermine ce qu'on peut appeler la grandeur r_s du trou, c.-à-d. son rayon de Schwarzschild (1916). Ce rayon est une grandeur critique, en ce sens que seuls des signaux émis depuis des points plus éloignés du centre que r_s peuvent se propager vers l'extérieur. Pour un trou qui ne tourne pas, r_s est donné par

$$r_s = 2GM/c^2 , \quad (1)$$

où G est la constante gravitationnelle et c la vitesse de la lumière. Pour un trou noir en rotation rapide, les forces centrifuges viennent s'opposer aux forces gravitationnelles et cela diminue un peu la grandeur de r_s. Dans ce qui suit nous négligeons de telles rotations.

Puisque aucune information ne peut nous parvenir depuis l'intérieur de la sphère de rayon r_s, il sera difficile de parler avec assurance de la structure interne des trous noirs. Cela a tout de même été tenté par des spécialistes (voir Thorne, 1994). Ici nous allons nous intéresser aux très grands trous, pour lesquels de simples arguments de densité vont nous permettre de jeter quelque lumière sur le sujet. Dans ce but nous faisons la supposition un peu osée, que la masse est

Sind wir in einem Schwarzen Loch?

G. FISCHER

Spricht man von «schwarzen Löchern», dann wird i. a. gleich auf die Tatsache hingewiesen, dass diese niemals irgendwelche Information ausstrahlen können. Oft geht der implizite Gedanke mit, dass solche Löcher nicht wahrgenommen werden können, was natürlich niemals stimmen kann. Ein schwarzes Loch wird sich vor allem durch seine Trägheit offenbaren; so sind bestimmt viele Partner von Doppelsternen in der Tat schwarze Löcher. Ist ein schwarzes Loch mitten in einer Gasmasse, so wird es dieses Gas anziehen und stark beschleunigen. Das Gas leuchtet dann auf, sei es weil die beschleunigten Moleküle zusammenstossen, oder weil ionisierte Fragmente Cerenkov-Strahlung aussenden.

Wenn es auch stimmt, dass ein schwarzes Loch immer wahrnehmbare Effekte hervorruft, so muss man doch zugestehen, dass es bislang noch nicht möglich war auszuschliessen, dass die aufgeführten Effekte auch eine andere Ursache haben könnten. Das ist der eigentliche Grund, weshalb gewisse Kosmologie-Experten auch heute noch die Realität schwarzer Löcher bezweifeln. Nachdem das Hubble Weltraumfernrohr repariert wurde, hat man jedoch mittels Dopplereffekt zeigen können, dass es im Zentrum der 70 Millionen Lichtjahre entfernten M87 Galaxie, in einem Radius von nur 60 Lichtjahren, eine Anhäufung von etwa 2 Milliarden Sonnenmassen geben muss. Obwohl das Zentrum dieser Galaxie besonders hell erscheint, enthält es bei weitem nicht genügend leuchtende Sterne, um diese Masse zu erklären. Damit wird der Verdacht, dass sich im Herz vieler Galaxien, u. a. auch der unsrigen, ein schwarzes Loch befindet, doch stark bekräftigt (siehe Collins, 1994).

Ein aussenstehender Beobachter wird also die Gegenwart eines schwarzen Loches sehr gut feststellen können. Steht er jedoch im Innern des Lochs, so kann er von der Aussenwelt nichts wahrnehmen. Wir kommen später nochmals auf diesen Punkt zurück.

Die Masse eines schwarzen Loches bestimmt, was man als seine Ausdehnung bezeichnen kann, d. h. seinen Schwarzschild- Radius r_s (1916). Signale können das Schwarze Loch nur dann verlassen, wenn sie ausserhalb von diesem Radius ausgestrahlt worden sind. Für ein nicht-rotierendes Loch ergibt sich r_s zu

$$r_s = 2GM/c^2 , \quad (1)$$

wo G die Gravitationskonstante und c die Lichtgeschwindigkeit sind. Bei einem schnell rotierenden Loch wird die gravitative Anziehung um die Zentrifugalkraft vermindert und der Radius r_s etwas verkleinert. Im folgenden vernachlässigen wir solche Rotationen.

Da vom Innern eines schwarzen Loches keine Information gewonnen werden kann, wird es schwierig sein, über deren innere Struktur genaue Aussagen zu machen. Das haben jedoch einige Spezialisten gemacht (siehe Thorne, 1994). Bei sehr grossen Löchern verhelfen Betrachtungen über deren mittlere Dichte doch zu gewissen Schlüssen. Mit

répartie de façon uniforme à l'intérieur de la sphère de rayon r_s, avec une densité dont la moyenne serait ρ_m. De la relation (1) on obtient immédiatement

$$\rho_m = 3c^2/8\pi G r_s^2 \quad (2)$$

Ce qui ne peut manquer de frapper, dans cette équation, est que la densité moyenne diminue comme le carré du rayon r_s. Les petits trous noirs auront donc forcément une densité absolument énorme: indépendamment de la façon exacte dont la masse y est effectivement distribuée, elle sera du type des plus fortes densités permises par la nature, peut-être même en violation des lois de la physique que nous connaissons. Pour les très grands trous, par contre, nous verrons que la densité moyenne requise devient incroyablement faible et que la distribution de masse pourrait y devenir très inhomogène, avec d'immenses espaces d'un vide presque parfait.

Une propriété très intéressante des petits trous a été révélée par Hawking (1974) et fournit un superbe exemple d'effets de quantification gravitationnelle. En effet, s'il est vrai qu'aucun signal porteur d'information ne peut s'échapper de ces trous, des particules telles que des neutrinos et des photons peuvent en sortir par l'effet tunnel quantique bien connu. Si ces trous ne sont pas entourés d'une importante concentration de gaz, ce qui leur permettrait de croître par absorption, ils perdront leur masse par évaporation. Cette évaporation ira en s'accélérant à mesure que le trou devient plus petit et finira par une véritable explosion. Un tel trou aura donc une durée de vie qui dépend de sa masse initiale, et bien sûr, aussi de son environnement gazeux. Hawking (1974) a postulé que de tels petits trous ont probablement été créés en grand nombre lors du «big bang», mais tous ceux dont la masse est inférieure à environ 10^{12} kg ont explosé depuis longtemps. Par contre, ceux dont la masse est de l'ordre de celle du Soleil ($\approx 2\cdot10^{30}$ kg), ou même simplement de la Terre ($\approx 6\cdot10^{24}$ kg), ont une durée de vie bien supérieure à l'âge de l'Univers. D'un point de vue astronomique les explosions de trous noirs sont de petits événements; ils libéreraient pourtant une énergie d'environ un million de mégatonnes de TNT au cours du seul dernier dixième de seconde avant leur totale disparition.

Il est peu probable que nous puissions maintenant encore assister à l'explosion d'un trou noir, car ceux dont la durée de vie initiale aurait été à peu près égale à l'âge actuel de l'Univers ont probablement tous été entourés de suffisamment de gaz. Au lieu de disparaître par évaporation ils se sont au contraire stabilisés par accrétion de matière. Au dessous d'une certaine masse, par contre, les petits trous finissent toujours par disparaître.

Pour les grands trous noirs il est intéressant de passer à la limite d'un rayon de Schwarzschild r_s égal au rayon de notre horizon observable R. Pour notre propos il suffira d'admettre que l'expansion de l'Univers suit une loi de Hubble indépendante du temps, soit

$$v = H \cdot d, \quad (3)$$

où H est la constante de Hubble. Si $d = R$ on a bien sûr $v = c$, de sorte que notre rayon observable est simplement

$$R = c/H. \quad (4)$$

Avec $R = r_s$ la relation (2) devient alors :

$$\rho_m = 3H^2 / 8\pi G = \rho_c. \quad (5)$$

Comme on le voit, la densité d'un trou noir aux dimensions de l'horizon visible est exactement égale à celle admise pour la densité critique ρ_c de l'Univers, densité pour laquelle l'expansion de l'Univers finira par s'arrêter au bout d'un temps infiniment long. Cette densité est extrêmement faible,

dieser Absicht machen wir die gewagte Annahme, dass die Masse innerhalb des Radius r_s gleichförmig verteilt ist. Die mittlere Massendichte ρ_m können wir dann mit (1) gleich berechnen:

$$\rho_m = 3c^2/8\pi G r_s^2 \quad (2)$$

In dieser Gleichung fällt auf, dass sich die Massendichte wie $1/r_s^2$ verhält. Kleine Löcher haben deshalb enorm grosse Massendichten: unabhängig davon, wie diese Masse tatsächlich verteilt ist, wird sie Werte erreichen, die so hoch sind, wie es die Natur überhaupt zulässt, wo möglicherweise die uns bekannten Gesetze der Physik gar nicht mehr gültig sind. Bei sehr grossen Löchern dagegen ist die erforderliche Dichte erstaunlich klein; so klein, dass in dem schwarzen Loch die Massenverteilung sehr inhomogen sein könnte, mit riesigen Regionen, wo ein praktisch perfektes Vakuum herrschen könnte.

Eine besonders interessante Eigenschaft kleiner Löcher wurde von Hawking (1974) gefunden und bietet ein wunderbares Beispiel gravitativer Quantenmechanismen. Wir haben gesehen, dass kein Information tragendes Signal von einem Loch ausgesendet werden kann. Teilchen wie Neutrinos und Photonen können jedoch durch den bekannten quantenmechanischen Tunneleffekt aus einem Loch heraustreten. Sitzt ein kleines Loch nicht mitten in einer dichten Gaswolke, wo es durch Absorption der umgebenden Materie schnell wachsen könnte, wird es im Gegenteil nach und nach verdampfen. Dieser Verdampfungsprozess ist anfänglich sehr langsam, beschleunigt sich aber, derweil das Loch kleiner wird, und führt schliesslich zu einer wahren Explosion. Ein kleines Loch hat also eine begrenzte Lebensdauer, die von seiner anfänglichen Masse abhängt und natürlich auch von der Dichte der umgebenden Gaswolke. Hawking (1974) hat die Vermutung geäussert, beim Urknall, dem sog. «Big Bang», seien sehr viele kleine Löcher entstanden, dass aber diejenigen, deren Masse kleiner als etwa 10^{12} kg war, durch Explosion schon längst verschwunden sind. Löcher mit etwa der Masse unserer Sonne ($\approx 2\cdot10^{30}$ kg), oder sogar nur der Erde ($\approx 6\cdot10^{24}$ kg), haben eine Lebensdauer, die viel grösser ist als das Alter des Universums. Vom astronomischen Standpunkt ist die Explosion eines schwarzen Loches ein kleines Ereignis; in der letzten Zehntelssekunde vor dem gänzlichen Verschwinden würde es jedoch eine Energie von etwa einer Million Megatonnen TNT frei lassen.

Dass wir heute noch das Verschwinden eines schwarzen Loches beobachten könnten, ist höchst unwahrscheinlich. Diejenigen mit einer anfänglichen Lebensdauer etwa gleich dem heutigen Alter des Universums waren schon recht gross und sind durch Absorption weiterer Materie sicher noch gewachsen. Anstatt zu verschwinden, haben sie sich somit eher stabilisiert. Unterhalb einer gewissen Masse dagegen können kleine Löcher nur verschwinden.

Für die grossen Löcher ist es interessant, zur Grenze eines Schwarzschild- Radius r_s überzugehen, der gleich dem Radius R des überhaupt beobachtbaren Weltalls ist. Bei den folgenden Überlegungen wird es genügen, für die Expansion des Universums ein zeitunabhängiges Hubble Gesetz anzunehmen,

$$v = H \cdot d, \quad (3)$$

wo H die Hubble- Konstante ist. Wenn $d = R$ ist natürlich $v = c$, sodass

$$R = c/H. \quad (4)$$

Mit $R = r_s$ wird Gleichung (2) zu

$$\rho_m = 3H^2 / 8\pi G = \rho_c. \quad (5)$$

de l'ordre de 10^{-26} kg/m^3 (en général exprimée $p_c \approx 10^{-29}$ g/cm^3, avec un facteur d'incertitude qui va d'environ 0.5 à 2). Comme on le sait, cette densité est environ cent fois plus grande que celle qu'on déduit de la masse visible ou lumineuse de l'Univers, mais bien des arguments font penser que la densité de l'Univers est effectivement égale à cette densité critique.

Il est donc raisonnable de considérer qu'en étant dans l'Univers, nous sommes en fait dans un trou noir. Cela est equivalent avec l'affirmation selon laquelle il nous est impossible de savoir ce qui se trouve au-delà de l'horizon visible, puisque cet horizon est un rayon de Schwarzschild. Il vaut la peine d'insister sur le fait que cette présentation d'un horizon limite ne fait pas explicitement appel au fait que la vitesse de la lumière est finie et que nous ne pouvons donc pas espérer voir au-delà d'une distance donnée par le produit de cette vitesse et de l'âge de l'Univers. L'autre point intéressant, déjà mentionné, est qu'à l'intérieur des grands trous noirs la distribution de masse peut être très inhomogène, avec de grandes régions où la densité de matière n'est peut-être que de l'ordre du vide inter-galactique, soit de 10^{-29} - 10^{-28} kg/m^3 (environ un centième à un dixième de nucléon par m^3!). Dans d'autres régions la densité de masse pourrait être très grande. En effet, on ne peut exclure qu'à l'intérieur d'un tel trou noir aux immenses dimensions, ne s'en trouvent de nombreux petits.

Références/Referenzen

COLLINS, G. P. (1994): «*Repaired Hubble sees strong evidence of a supermassive black hole in M87*», *Physics Today*, August, Vol. 47, pp. 17-20.

HAWKING, S. W. (1974): «*Black hole explosions*?», *Nature*, 1 March, Vol. 248, pp. 30-31.

SCHWARZSCHILD, K. (1916): «*On the gravitational field of a point mass according to Einstein's theory*», translated by Helga and Roger Stuewer from *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss., Physik. Math. Kl.*, Vol. 189, pp.189-196.

THORNE, KIP S. (1994): «*Black Holes and Time Warps, Einstein's Outrageous Legacy*», W. W. Norton & Co., Inc., New York, ISBN 0-330-33162-0. Voir en particulier le Chapitre 13.

Die mittlere Dichte eines schwarzen Loches, dessen Schwarzschild-Radius so gross ist wie die Abmessungen des beobachtbaren Weltalls, ist also identisch mit der Dichte, die man als kritische Dichte ρ_c bezeichnet, oberhalb welcher die Expansion des Universums schliesslich zum Stillstand kommt, um dann wieder zusammenzubrechen. Diese Dichte ist extrem klein, nur etwa 10^{-26} kg/m^3 (i. a. als $\rho_c \approx 10^{-29}$ g/cm^3 ausgedrückt und mit einer Unsicherheit, die sich mit einem Faktor zwischen 0.5 und 2 ausdrücken lässt). Bekanntlich ist diese Dichte jedoch etwa hundert mal grösser als die Dichte, die sich aus der sichtbaren oder leuchtenden Masse des Weltalls ableiten lässt. Viele Argumente deuten jedoch darauf hin, dass die Dichte des Universums in der Tat gleich dieser kritischen Dichte ρ_c ist

Es gibt somit gute Grunde anzunehmen, dass wir als Bewohner des Weltalls eigentlich in einem schwarzen Loch sind. Das ist mit der Aussage äquivalent, dass wir darüber nichts aussagen können, was in grösserer Entfernung als R liegt, dem beobachtbaren Horizont, denn dieser Horizont ist ein Schwarzschild- Radius. Es lohnt sich zu betonen, dass diese neue Weise, einen Grenzhorizont abzuleiten, sich nicht direkt darauf stützen muss, dass die Lichtgeschwindigkeit eine Grenzgeschwindigkeit ist, dass wir niemals hoffen können, über Distanzen schauen zu können, die grösser sind als das Produkt zwischen dieser Geschwindigkeit und dem Alter des Universums. Ein anderer interessanter Punkt, den wir schon angedeutet haben, ist, dass die Massenverteilung in diesen grossen Löchern sehr ungleichförmig sein kann, mit grossen Bereichen, wo die Massendichte nur etwa gleich der intergalaktischen Dichte ist, also 10^{-29} - 10^{-28} kg/m^3 (etwa ein Hundertstel bis ein Zehntel eines Nukleons pro m^3!). Anderswo, in kleinen Bereichen, könnte die Massendichte enorm sein. In der Tat, es ist nicht auszuschliessen, dass es innerhalb eines solchen riesigen schwarzen Loches viele kleinere Löcher geben kann.

GASTON FISCHER
Rue de Rugin 1a
CH-2034 Peseux

Courrier des lecteurs

Monsieur

Permettez-moi de me présenter. Depuis 1970 je suis membre d'une section de la SAS. J'habite Männedorf au bord nord du Lac de Zurich et je me rends souvent à un endroit en pleine campagne où j'installe mon Celestron C5 pour observer des étoiles variables.

Récemment je me suis aperçu d'un rayon de lumière laser, qui passait de temps en temps sur le ciel nocturne, comme le rayon d'un phare au bord de la mer. La portée du rayon laser était d'environ 5 à 8 kilomètres.

Je vous écris à ce sujet, car je redoute que ce soit l'avènement d'un problème qui pourrait toucher beaucoup d'amateurs au cours des prochaines années. Il est possible, qu'il sera bientôt indispensable pour toute sorte de «rave», de boîte de nuit, de dancing etc. d'attirer sa clientèle par le jeu de rayons laser dans le ciel nocturne.

Je serais très heureux, de voir la SAS observer l'évolution des choses en Suisse, en particulier

- au niveau des autorités fédérales pour la protection de l'environnement (sont-elles conscientes du fait, que le ciel nocturne original représente une richesse naturelle?)
- peut-être aussi au niveau d'une future collaboration entre la SAS et quelques organisations privées pour la protection de la nature, puisque ces organisations ont souvent l'expérience d'observer le développement des lois et de contester des décisions prises par les autorités.

Il me semble que les rayons laser ne soient que la première sorte de menaces pour le ciel nocturne. La technologie progresse vers d'autres menaces, comme par exemple des panneaux de publicité (Marlboro, TOSHIBA, Heineken etc.) mis en orbite terrestre et des satellites destinés à fournir de la lumière solaire à l'agriculture.

En espérant que de tels projets resteront de la science-fiction, je vous prie de croire, Monsieur, à mes sentiments les meilleurs.

JEAN-MARIE WITTWER
Löwengässli 4, CH-8708 Männedorf