

Reiseziel: Schwarzes Loch

Visualisierungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie

VON UTE KRAUS

Eine Reise fast bis an den Horizont eines Schwarzen Lochs – die Computersimulation macht's möglich und zeigt, was wir von dort aus sehen würden.

Die Visualisierung ermöglicht Reisen, die der aufkeimende Weltraumtourismus sicher noch lange nicht und wahrscheinlich überhaupt nie anbieten wird. Eine der interessantesten ist die Reise in die unmittelbare Nähe eines Schwarzen Lochs. Wenn wir uns dort aufhalten und uns einfach mal umschauen könnten, was würden wir sehen?

Als Ziel dieser virtuellen Reise wählen wir ein Schwarzes Loch von zehn Sonnenmassen. Es ist aus einem Stern von weit größerer Masse entstanden, der seine Entwicklung mit einer Supernovaexplosion beendet hat. Dabei wurde die äußere Gashülle in den Raum hinausgeschleudert, während der Kern zu einem Schwarzen Loch kollabierte. Das Milchstraßensystem mit seinen hundert Milliarden Sternen enthält schätzungsweise eine Milliarde solcher stellarer Schwarzer Löcher.

Anflug

Unsere Reise führt in Richtung des Sternbilds Schwan (Abb. 1a); der Blick nach vorne zeigt, waagrecht im Bild, das leuchtende Band der Milchstraße. Die compu-

tergenerierten Bilder sind für einen horizontalen Kameraöffnungswinkel von 90 Grad berechnet. Den richtigen Eindruck bekommt man, wenn man die Bilder auch unter diesem Öffnungswinkel ansieht – für einen bequemen Augenabstand von 30 Zentimetern müsste das einzelne Bild dazu auf 60 Zentimeter Breite vergrößert werden, was etwa dem Format DIN A2 quer entspricht.

Wir nähern uns zunächst bis auf 150 Millionen Kilometer, das heißt bis auf den Abstand der Erde zur Sonne. Auf unserer Weitwinkelaufnahme ist von dem Schwarzen Loch (immerhin mit der zehnfachen Masse der Sonne!) noch nichts zu sehen. Auch mit dem bloßen Auge könnte man es aus dieser Entfernung nicht erkennen: Der Bereich innerhalb des Horizonts, aus dem weder Materie noch Licht entkommen kann, hat einen Umfang von nur 185 Kilometern und erscheint am Himmel als schwarze Scheibe mit 0,2 Bogensekunden Öffnungswinkel, weit kleiner als das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges von ein bis zwei Bogeminuten.

Erst wenn wir dem Schwarzen Loch wesentlich näher gekommen sind, ist das

erwartete schwarze Scheibchen deutlich zu erkennen. Abb. 1b zeigt den Anblick aus 3000 Kilometern Entfernung. Dieses Bild ist, wie auch die folgenden Bilder, bei Geschwindigkeit null relativ zum Schwarzen Loch aufgenommen. Das heißt das Raumschiff beschleunigt gerade so stark, dass es die Anziehung durch das Schwarze Loch kompensiert. Die erforderliche Beschleunigung ist hier bereits immens: 15 Millionenfache Erdbeschleunigung. Aber schließlich haben wir ein Objekt von zehn Sonnenmassen vor uns, in einem Abstand von nur einem halben Erdradius beziehungsweise einem halben Prozent des Sonnenradius.

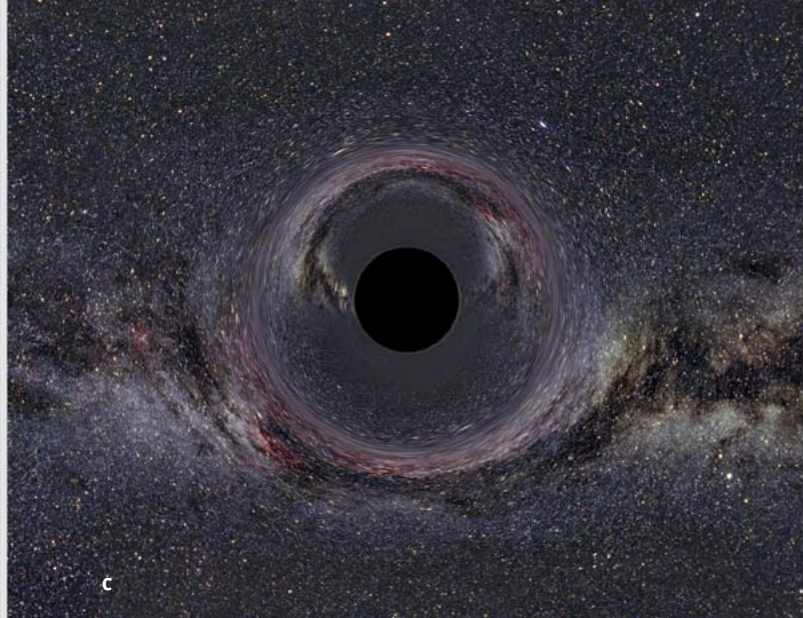
Die schwarze Scheibe ist von einer ringförmigen Struktur umgeben. Aus 600 Kilometern Entfernung (Abb. 1c, 400 millionenfache Erdbeschleunigung) ist die Struktur ganz deutlich zu sehen und lässt sogar einen erheblichen Teil der Milchstraße verzerrt erscheinen. Diese Verzerrungen kommen dadurch zustande, dass Licht in der Nähe des Schwarzen Lochs abgelenkt wird.

Dass Massen Licht ablenken, war einer der ersten Tests von Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Für Licht, das nahe am Rand der Sonne vorbeikommt, sagte Einstein eine Ablenkung um 1,75 Bogensekunden voraus, die durch Beobachtungen inzwischen mit hoher Genauigkeit bestätigt ist. Im Ge-



Wissenschaft in die Schulen!

Didaktisches Material zu
diesem Beitrag:
www.wissenschaft-schulen.de



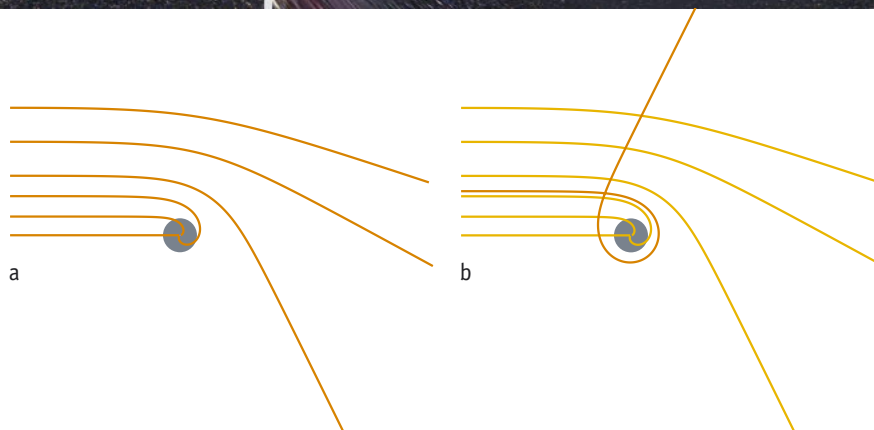
▲ Abb. 1: Blick auf ein Schwarzes Loch von zehn Sonnenmassen aus einem Abstand von 150 Mio. Kilometern (a), 3000 Kilometern (b), 600 Kilometern (c), 150 Kilometern (d). Die Bilder entstehen, während das Raumschiff einen konstanten Abstand zum Schwarzen Loch hält (Relativgeschwindigkeit null, gilt für alle Simulationen außer Abb. 7).

gensatz zu dieser winzigen Abweichung ist die Lichtablenkung in der Nähe eines Schwarzen Lochs dramatisch groß, wie Abb. 2 illustriert: Von links einfallendes Licht nähert sich einem Schwarzen Loch (der Bereich innerhalb des Horizonts ist grau dargestellt). Je nachdem wie nahe ein Lichtstrahl dem Schwarzen Loch kommt, wird er es treffen oder entweichen.

Die Grenze zwischen den entweichenden und den eingefangenen Lichtstrahlen ist eine Kreisbahn: Licht, das genau im richtigen Abstand eintrifft, schwenkt auf diese Kreisbahn ein und umkreist das Schwarze Loch für immer. In einem kleinen Bereich ganz in der Nähe der Kreisbahn ist die Ablenkung besonders groß (Abb. 2b); Licht umrundet dort das Schwarze Loch u. U. viele Male, bevor es entweicht (oder durch den Horizont nach innen gelangt).

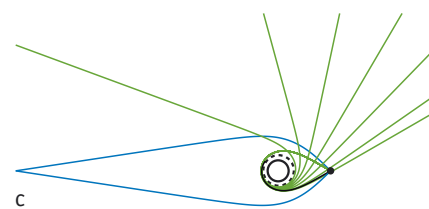
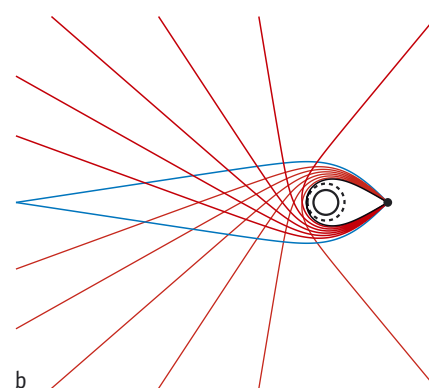
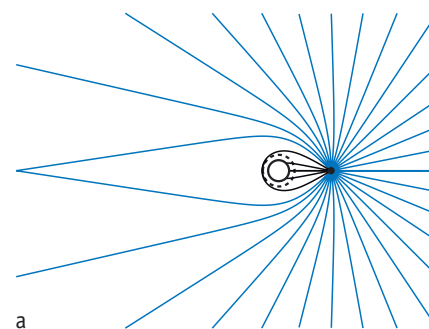
Dass Lichtstrahlen ein Schwarzes Loch beliebig oft umrunden können, führt dazu, dass ein Beobachter in der Nähe des Schwarzen Lochs den ganzen Himmel im Prinzip unendlich oft sieht. In Abb. 1 c erkennt man einen rosafarbenen Kreis um das Schwarze Loch. Außerhalb davon sieht man den ganzen Himmel; innerhalb sieht man den ganzen Himmel ein zweites Mal.

Abb. 3 illustriert, wie das zustandekommt: Licht von einem Objekt genau hinter dem Schwarzen Loch kann um

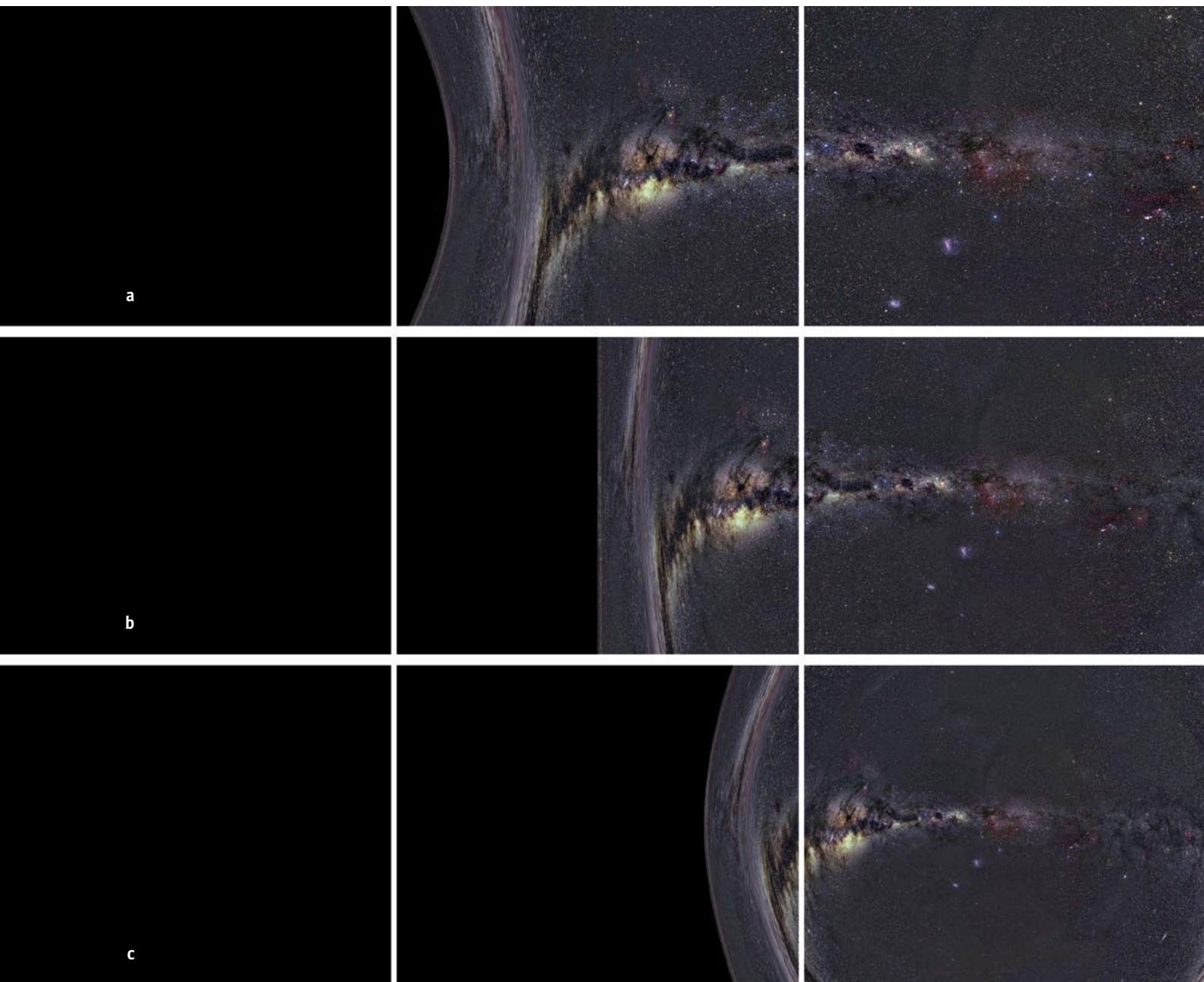


▲ Abb. 2: Lichtablenkung in der Nähe eines Schwarzen Lochs (der Bereich innerhalb des Horizonts ist grau dargestellt).

▶ Abb. 3: Ein Beobachter in der Nähe eines Schwarzen Lochs sieht den ganzen Himmel im Prinzip unendlich oft. Die blauen Strahlen (a) decken alle Richtungen ab, die roten Strahlen (b) ebenso und die grünen Strahlen (c, nur eine Hälfte der Strahlen ist eingezeichnet) ein weiteres Mal. Durchgezogener Kreis: Horizont des Schwarzen Lochs, gestrichelter Kreis: Kreisbahn des Lichts, schwarze Scheibe: Beobachterposition.



das Schwarze Loch herumgelenkt werden und so den Beobachter erreichen. In der Abbildung sind zwei solche Lichtstrahlen eingezeichnet. Die beiden liegen in der Zeichenebene; Lichtstrahlen oberhalb und unterhalb der Zeichenebene werden aber auf die gleiche Weise um das Schwarze Loch herumgelenkt, so dass der Beobachter das Objekt insgesamt als Ring sieht. Der rosafarbene Ring in Abb. 1 c entsteht auf diese Weise und ist das Abbild einer Gaswolke, die sich von uns aus gesehen genau hinter dem Schwarzen Loch befindet.



a

b

c

Licht, das der Beobachter außerhalb des Rings sieht (Abb. 3 a, blaue Strahlen), kommt aus allen denkbaren Richtungen – wir sehen also außerhalb den gesamten Himmel. Lichtstrahlen, die der Beobachter innerhalb des Rings empfängt (Abb. 3 b, rote Strahlen), sind näher am Schwarzen Loch vorbeigekommen als die blauen Strahlen und wurden dabei so stark abgelenkt, dass der Beobachter beim Blick nach unten den oberen Teil des Himmels sieht etc. Auch die roten Lichtstrahlen decken alle Richtungen ab – wir sehen also den gesamten Himmel ein zweites Mal, allerdings invertiert und zu einem Ring verzerrt. In Abb. 1 c ist innerhalb des Rings die gesamte Milchstraße zu erkennen.

Lichtstrahlen, die noch näher an der Kreisbahn liegen (Abb. 3 c, grüne Strahlen), werden noch stärker abgelenkt. Auf diese Weise sehen wir in einem weiteren, Ring den gesamten Himmel ein drittes

Mal, wobei beim Blick nach oben wieder der obere Teil des Himmels erscheint. Das dritte Bild ist allerdings ein so schmaler Streifen, dass es in Abb. 1 c nicht aufgelöst ist. In Abb. 1 d kann man es am Rand der schwarzen Scheibe gerade erahnen.

Im Prinzip entstehen auf diese Weise unendlich viele Abbilder des gesamten Himmels in der Form von ineinandergeschachtelten, immer schmaler werdenden Ringen.

Schritt für Schritt immer näher an den Horizont

Wir nähern uns dem Horizont auf 90 Kilometer (Abb. 4 a) und halten mit der 30-milliardenfachen Erdbeschleunigung den Abstand konstant. Beim Blick nach vorne füllt die zentrale schwarze Scheibe das gesamte Blickfeld (links). Nur durch das Seitenfenster (Mitte) und das Rückfenster (rechts) sehen wir den Sternenhimmel. Je-

▲ Abb. 4: Blick nach vorne (links), zur Seite (Mitte) und nach hinten (rechts) in einer Höhe von 90 Kilometern über dem Horizont (a), (b) 45 Kilometer Höhe. (c) 30 Kilometer Höhe. Auch diese Bilder entstehen, während das virtuelle Raumschiff einen konstanten Abstand zum Schwarzen Loch hält.

Erratum

In meinem Beitrag »Bewegung am kosmischen Tempolimit« (SuW 8/2005, S. 40-46) wurde in Abb. 3 links oben statt der Ruhelänge des Stabes, fälschlicherweise die auf 44 % kontrahierte Länge eingetragen.

des Fenster bietet einen Blickwinkel von 90 Grad, so dass die drei Fenster sich zu einem Panoramabild über 270 Grad zusammensetzen.

45 Kilometer über dem Horizont (Abb. 4b) nimmt das Schwarze Loch exakt die halbe Himmelskugel ein; in 30 Kilometern Abstand (Abb. 4c) überdeckt es sogar mehr als die Hälfte des Himmels. Es scheint sich um uns herum zu wölben – dabei befinden wir uns nach wie vor außerhalb des Horizonts!

Wenn wir diese Bilder sehen, befinden wir uns in der Nähe der Kreisbahn des Lichtes. Ein Beobachter, der genau auf der Kreisbahn sitzt (Abb. 5a) sieht beim Blick zur Seite den eigenen Hinterkopf (roter Strahl). Licht von den Sternen erreicht ihn nur von weiter außen (blauer Strahl), so dass der Sternenhimmel genau die eine Hälfte eines kompletten Panoramas einnimmt. Licht von weiter innen müsste vom Schwarzen Loch kommen (schwarzer Strahl), da aus dem Horizont aber kein Licht entweicht, ist die vordere Hälfte des Panoramas schwarz.

Ein Beobachter innerhalb der Kreisbahn (Abb. 5b) muss den Blick noch weiter nach außen richten, um Licht von der Außenwelt zu empfangen (blauer Strahl), so dass der Himmel beim Rundumblick weniger als die Hälfte des Panoramas einnimmt.

In 13 Kilometern Abstand (Abb. 6a) ist auch im Seitenfenster nur noch der schwarze Zentralbereich zu sehen. Erst beim Blick nach hinten wird die Außenwelt sichtbar – wobei wir nach wie vor den gesamten Himmel im Prinzip unendlich oft sehen. Dieses »Guckloch« auf den Rest der Welt wird beliebig klein, wenn wir nur nahe genug an den Horizont vordringen. Letzte Station der virtuellen Rei-

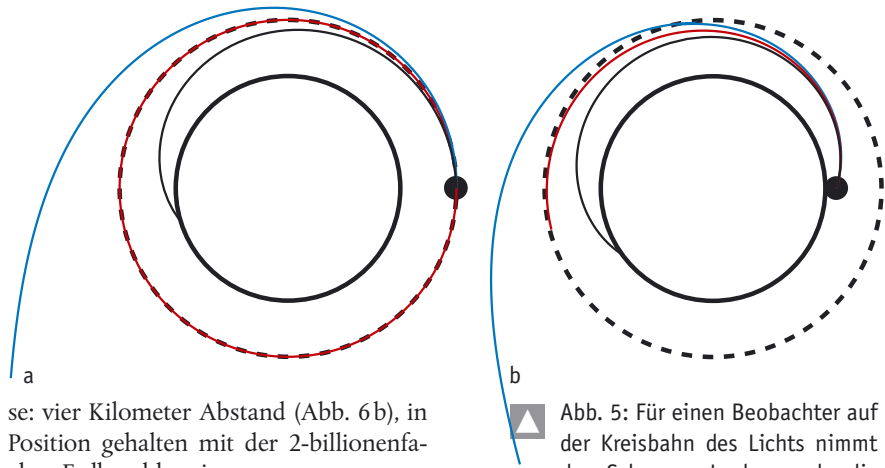


Abb. 5: Für einen Beobachter auf der Kreisbahn des Lichtes nimmt das Schwarze Loch gerade die halbe Himmelskugel ein (a). Noch größer erscheint es einem Beobachter innerhalb der Kreisbahn (b). Durchgezogener Kreis: Horizont des Schwarzen Lochs, gestrichelter Kreis: Kreisbahn um das Schwarze Loch, schwarze Scheibe: Beobachterposition. Blau: Lichtstrahlen von außen; Rot: von der Kreisbahn; Schwarz: von innen.

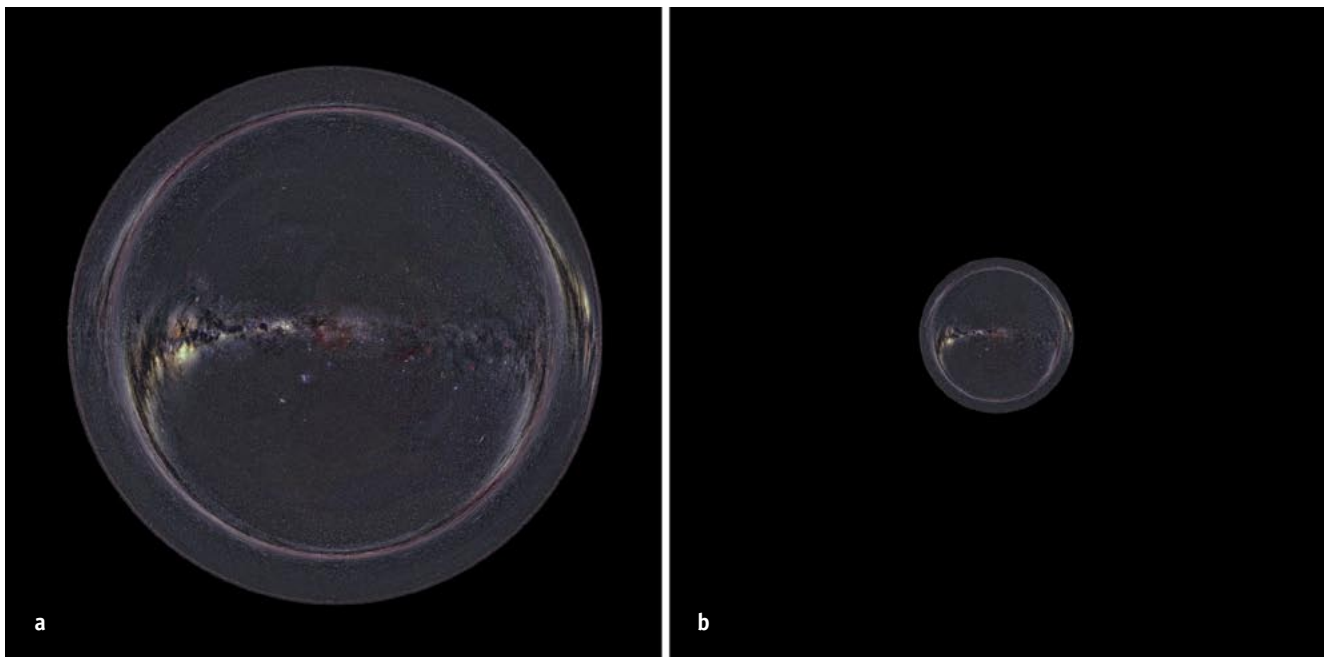
se: vier Kilometer Abstand (Abb. 6b), in Position gehalten mit der 2-billionfachen Erdbeschleunigung.

Übrigens lassen sich dieselben optischen Effekte auch bei geringeren Beschleunigungen beobachten, wenn man sich einem Schwarzen Loch mit größerer Masse nähert. Um das letzte Bild, Abb. 6b, bei Erdbeschleunigung vor Augen zu haben, bräuchten wir ein hypothetisches Schwarzes Loch mit 20 Billionen Sonnenmassen. Das überträfe bei weitem die Massen der supermassereichen Schwarzen Löcher in den Zentren von Galaxien, die Millionen bis Milliarden Sonnenmassen aufweisen.

Im freien Fall nach innen

Die hohen Beschleunigungen kann man natürlich auch dadurch vermeiden, dass man sich einfach frei fallen lässt. Nehmen wir einen Beobachter an, der in großer Entfernung vom Schwarzen Loch aus der Ruhe startet und im freien Fall radial nach innen stürzt. Während wir an der letzten Station in vier Kilometern Abstand zum Horizont verharren, kommt er mit 99,75 Prozent der Lichtgeschwindigkeit an uns vorbei. Wenn er in diesem Augenblick ein Panoramabild macht, entsteht Abb. 7:

Abb. 6: Blick nach hinten aus 13 Kilometern Höhe (a) und aus 4 Kilometern Höhe (b), während das virtuelle Raumschiff bewegungslos über dem Schwarzen Loch steht. Der horizontale Öffnungswinkel der Kamera beträgt 72 Grad.





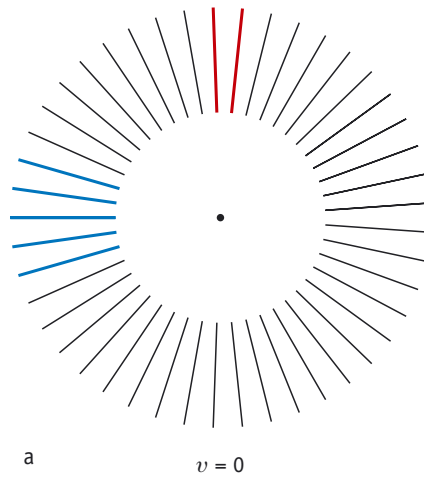
▲ Abb. 7: Rundumblick eines frei fallenden Beobachters, der momentan bei 99.75 % der Lichtgeschwindigkeit vier Kilometer Abstand zum Horizont hat. (Bild: F. Grave 2005)

Blick nach vorne auf das Schwarze Loch, zur Seite und nach hinten auf den Sternenhimmel.

Dieses Bild entsteht am selben Ort wie Abb. 6b – warum also sieht es völlig anders aus? Der Grund dafür ist das Phänomen der Aberration. Im Alltag können wir Aberration zum Beispiel bei Schneefall beobachten: An einem windstillen Tag fallen die Schneeflocken senkrecht nach unten. Aus dem fahrenden Auto heraus sieht man sie aber schräg von vorne kommen, um so flacher, je schneller man fährt. Ebenso bei Regen; so kann man im offenen Cabrio durch den Regen fahren und dabei trocken bleiben, einfach indem man schnell genug fährt. Denn dann treffen die Regentropfen flach genug ein und die Windschutzscheibe fängt sie ab.

Allgemein gilt, dass die Richtung einer Bewegung je nach dem eigenen Bewegungszustand unterschiedlich beurteilt wird. Auch bei Licht: Zwei Beobachter, die sich relativ zueinander bewegen, schreiben demselben Lichtstrahl verschiedene Richtungen zu. (Abb. 8). Licht, das den ruhenden Beobachter von oben erreicht (Abb. 8a, rote Strahlen), kommt dem bewegten Betrachter schräg von vorne entgegen (Abb. 8b, rote Strahlen). Wenn wir im stationären Raumschiff den Sternenhimmel als kleinen runden Fleck hinter uns sehen (Abb. 8a, blaue Strahlen), dann muss er dem hineinstürzenden Beobachter größer erscheinen (blaue Strahlen in Abb. 8b). Tatsächlich nimmt er in Abb. 7 den größten Teil der Himmelskugel ein.

Man kann nachrechnen, dass der frei fallende Beobachter sogar in dem Augenblick, in dem er den Horizont durch-

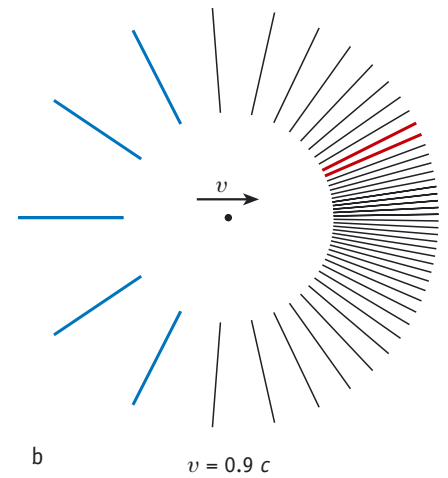


quert, das Schwarze Loch mit weniger als 90 Grad Durchmesser sieht. Das heißt im freien Fall sehen wir das Schwarze Loch auch dann noch vor uns, wenn wir bereits drin sind. Bei der schrittweisen Annäherung dagegen meinen wir schon drin zu sitzen, wenn wir tatsächlich noch draußen sind.

Ausblick

Nicht berücksichtigt ist in diesen Computersimulationen die gravitative Frequenzverschiebung. Strahlung, die einem stationären Beobachter in der Nähe eines Schwarzen Lochs als sichtbares Licht erreicht, ist von weit entfernten Sternen als Infrarotstrahlung emittiert worden. Unterhalb einer Höhe von etwa 45 Kilometern über dem Horizont würde ein Beobachter deshalb die Milchstraße so sehen, wie sie sich uns im Infraroten darbietet: Dort sind Staub- und Gaswolken weitgehend durchsichtig und man sieht eine dichte Ansammlung von Sternen in der Milchstraßenebene.

Für den frei fallenden Betrachter fällt die Frequenzverschiebung wegen des Doppler-Effekts anders aus und hängt von der Blickrichtung ab. Was er in der Nähe des Schwarzen Lochs von vorne als



▲ Abb. 8: a) Lichtstrahlen erreichen einen Beobachter aus verschiedenen Richtungen. Jeder Strich markiert einen Lichtstrahl, der Punkt gibt die Position des Beobachters an. (b) Ein Beobachter, der sich gegenüber dem ersten mit 90 Prozent der Lichtgeschwindigkeit nach rechts bewegt, ordnet denselben Lichtstrahlen andere Richtungen zu. In beiden Skizzen sind jeweils dieselben zwei Lichtstrahlen rot und dieselben fünf Lichtstrahlen blau markiert.

sichtbares Licht empfängt, wurde als Infrarotstrahlung emittiert; von hinten jedoch erreicht ihn rotverschobene Ultraviolettstrahlung. □

Danksagung: Frank Grave hat Abb. 7 zum freien Fall in das Schwarze Loch zur Verfügung gestellt. Das Hintergrundbild der Computersimulation ist das All-Sky Milky Way Panorama von Axel Mellinger [2]. Ich danke Corvin Zahn, Hanns Ruder und Frank Grave für hilfreiche Diskussionen. Diese Arbeiten wurden vom MPI für Gravitationsphysik, Golm, ermöglicht und teilweise von der DFG gefördert (SFB 382).

Literaturhinweise

- [1] Ute Kraus, Corvin Zahn: <http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/>
 [2] Axel Mellinger: Die Milchstraße im Computer. SuW 2-3/2000, S. 174–179, und im Internet: <http://home.arcor-online.de/axel.mellinger/>

Weitere Computersimulationen zur Relativitätstheorie sind im Internet zugänglich unter <http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de>



Ute Kraus ist Privatdozentin am Institut für Theoretische Astrophysik der Universität Tübingen. Ihre Arbeitsgebiete sind relativistische Astrophysik, Visualisierung und Fachdidaktik.