

Schwarze Löcher sind, wo Gott durch Null dividiert hat.

Steven Wright (geb. 1955)

Liebe Leserin, lieber Leser,

wer konnte das ahnen: ein Nobelpreis für schwarze Löcher! Geehrt werden der theoretische Physiker Roger Penrose (geb. 1931) sowie die Astrophysiker Andrea Ghez (geb. 1965) und Reinhard Genzel (geb. 1952), letztere für ihre Erforschung des 4-Millionen-Sonnenmassen-Lochs im Zentrum des Milchstraßensystems. Penrose hatte 1965 mathematisch bewiesen, dass Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie nicht frei von Singularitäten ist, ja, dass Unendlichkeiten (wo die Theorie versagt) unter recht allgemeinen Voraussetzungen zwangsläufig entstehen. Schwarze Löcher sind damit keine mathematische Kuriosität, sie sind Realität! Tröstlich nur, dass wir von der Raum-Zeit-Singularität im Inneren nichts mitbekommen. Sie verbirgt sich hinter einem Ereignishorizont und stört nicht die Geschäfte der physikalischen Welt.

Eigentlich sollte der Kosmos-Bote im November 2020 von Exoplaneten berichten. Anlass: Die Entdeckung des ersten „richtigen“¹ Exoplaneten vor 25 Jahren. In der Ausgabe vom 23. November 1995 konnte man im Wissenschaftsjournal *Nature* von einem Riesenplaneten lesen, einem *hot Jupiter*, der in nur 4,23 Tagen seinen Mutterstern umkreist. Darauf gestoßen waren zwei Genfer Spektroskopiker, Michel Mayor (geb. 1942) und Didier Queloz (geb. 1966), welche die Radialgeschwindigkeiten (RG) von sonnenähnlichen Sternen, darunter 51 Pegasi, 1 1/2 Jahre lang mit einem Präzisionsspektrographen überwacht hatten. Aus der periodischen RG-Schwankung mit einer Halbamplitude von 59 m/s schlossen die beiden Glückspilze auf die Existenz eines Jupiter-großen Planeten in nicht einmal 8 Millionen Kilometer Entfernung von 51 Peg. Vor einem Jahr wurden sie dafür mit dem Physik-Nobelpreis geehrt.

¹Die drei Jahre zuvor von Radioastronomen entdeckten Pulsarplaneten werden wegen ihres ungewöhnlichen Milieus von optischen Astronomen nicht für voll genommen. Kürzlich wurde übrigens erstmals ein Exoplanet, welcher einen Weißen Zwerg umkreist, anhand seines Schattenwurfs dingfest gemacht.

Der allererste Physik-Nobelpreis ging übrigens 1901 an Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) für die Entdeckung der sog. X-Strahlen, womit wir bei einem weiteren Novemberjubiläum wären. Dies geschah nämlich vor 125 Jahren, am 8. November 1895, im Physikalischen Institut der Universität Würzburg. Die Geburtsstunde der Röntgenastronomie schlug spät erst: 1949. Damals wurde von einem Röntgendetektor an Bord einer hochfliegenden Rakete die Röntgenstrahlung der Sonnenkorona registriert. Da die Erdatmosphäre für extrem kurzwellige Strahlung undurchsichtig ist, operiert ein Röntgenteleskop stets außerhalb der Lufthülle. Aus der Umgebung des schwarzen Lochs im Zentrum der Galaxis, Sagittarius A*, erreicht uns neben Radio- auch Röntgen- und sogar γ -Strahlung.

Wenn man will, reicht die Geschichte der schwarzen Löcher zurück ins Jahr 1783. In einem Schreiben an die Royal Society spekulierte der englische Geistliche John Michell (1724–1793), ein Hobbygeologe und Amateurastronom, über „Dunkelsterne“. Ein Stern von der Dichte der Sonne, bloß 500-mal größer, wäre unsichtbar, weil selbst Licht nicht geschwind genug wäre, ihn zu verlassen. Nun, dieses Etwas von $500^3 = 125$ Millionen Sonnenmassen hätte in der Tat einen Schwarzschildradius von 500 Sonnenradien! Heute bezeichnet man so etwas als supermassereiches schwarzes Loch².

Mehr zu schwarzen Löchern im Allgemeinen und über das im Zentrum der Galaxis im Besonderen erfahren Sie in dieser Ausgabe!

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im November

Im zweiten und dritten Monatsfünftel zeigt sich Merkur eine Stunde vor Sonnenaufgang am Osthorizont. In den Morgenstunden des 13. steht die Sichel des alten Mondes zwischen Venus und Merkur. Mit von der Partie ist Spica, die „Ähre“ der Jungfrau. Seinen größten Winkelabstand zur Sonne erreicht Merkur mit 19° am 10. November.

Morgenstern Venus nähert sich der Sonne, was der Dauer ihrer Morgensichtbarkeit unzutraglich ist.

Mars, der rote Planet, beherrscht den Planetenhimmel. Am 15. November beendet er seine Oppositionsphase mit dem Stillstand. Danach bewegt er

²Das schwarze Loch in M87, dessen Konterfei es bis in die Wissenschaftsspalten der Tageszeitungen geschafft hat, wiegt $6\frac{1}{2}$ Milliarden Sonnenmassen.

sich wieder entgegen dem Uhrzeigersinn unter den Sternen.

Jupiter und Saturn kommen einander näher. Das ungleiche³ Paar ist des Abends im Westen zu sehen. Zum Monatsende verschwinden beide bereits vor 20 Uhr.

Zwei Teams, ein Ergebnis

Zwei Forschergruppen, eine angesiedelt an der Universität Kalifornien (Los Angeles), die andere am Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (Garching), haben seit den Neunziger Jahren die Bewegung von Sternen⁴ nahe dem galaktischen Zentrum akribisch kartiert. Spektroskopische Messungen liefern darüber hinaus die Geschwindigkeiten in Blickrichtung. Ein Stern, der berühmte „S2“, schafft es, in nur 16 Jahren das galaktische Zentrum zu umrunden⁵. (Ein drei Größenklassen lichtschwächerer Stern hat gar eine Umlaufzeit von nur 12,8 Jahren.) „S2“ kam am 19. Mai 2018 dem schwarzen Superloch wieder einmal auf 120 AE (Astronomische Einheiten) nahe. Das ist der vierfache Sonnenabstand des Neptun. Des Sterns Bahngeschwindigkeit kletterte im Perigalaktikum auf 7650 km/s. Man konnte von hier aus, 26 700 Lj vom Ort des Geschehens entfernt, die Ortsveränderung messen – von einem Tag zum anderen!

Aus der Bewegung dieses Einzelsterns schließt man – unter Berufung auf Keplers drittes Gesetz – auf das Vorhandensein einer Massenkonzentration im entsprechenden Brennpunkt der Umlaufbahn. Es geht um etwas mehr als vier Millionen Sonnenmassen, die an „S2“ zerren. Ein kompakter Sternhaufen scheidet aus. Die plausibelste Erklärung ist ein schwarzes Loch.

Was einfach klingt, ist schwer getan. Der Blick auf den Ort der Handlung wird verstellt durch interstellare Staubwolken, welche sichtbares Licht um wenigstens 25 Größenklassen schwächen. Nur eines von 10 Milliarden Lichtteilchen erreicht uns! Im nahen Infraroten sieht man mehr, allerdings verwischener. Dort ist das Auflösungsvermögen der Teleskope (bei gleicher Größe) schlechter als im Optischen. Und auf die Winkelauflösung kommt es an. Der Ereignishorizont eines schwarzen Lochs von vier Millionen Sonnenmassen er-

³Mythologisch steht Jupiter für das Neue, Saturn für das Alte.

⁴Erstaunlicherweise handelt es sich um ausgesprochen junge Sterne vom Spektraltyp B.

⁵Erdlinge benötigen dazu rund 240 Millionen Jahre. Als wir das letzte Mal „hier“ waren, hatte gerade das Mesozoikum begonnen, das Erdmittelalter.

scheint, von hier aus betrachtet, unter einem Winkel von 0,02 Millibogensekunden bzw. 5,3 Milliardstel Grad. Dank adaptiver Optik sehen die Forscher mit bodenständigen Großteleskopen der 10-m Klasse 20-mal schärfer als ohne diese geniale Technik. Durch Kombination mehrerer Teleskope zu einem Interferometer lässt sich das Auflösungsvermögen nochmals steigern: 0,02 Millibogensekunden. Damit lassen sich die Bahnen zentrumsnaher Sterne um das schwarze Loch hinreichend genau bestimmen.

„S2“ steht seit 1992 auf dem Beobachtungsprogramm. Inzwischen ist der Bahnverlauf so genau bekannt, dass man nach relativistischen Effekten Ausschau halten kann, ja sogar muss. Immerhin schießt der Stern auf seiner exzentrischen Bahn mit $1/40$ der Lichtgeschwindigkeit am schwarzen Loch vorbei. Da macht sich die relativistische Zeitdilatation bereits als transversaler Dopplereffekt bemerkbar: S2's Atomuhren ticken langsamer als unsere. Legt man den Schwarzschildradius des schwarzen Lochs – 0,08 AE bzw. 12 Millionen Kilometer – als Maßstab an, ist „S2“ im günstigsten Falle (im Perigalaktikum) immer noch 1400 Schwarzschildradien von dem zentralen Monstrum entfernt. Dennoch ist die Einstein'sche Gravitationsrotverschiebung bereits vergleichbar mit der aus dem transversalen Dopplereffekt. Beide Effekte sind messbar. Hinzu kommt die langsame Drehung der großen Halbachse, das galaktische Pendant zur Periheldrehung der Merkurbahn. Sie ist messbar! (Jede Abweichung vom $1/r^2$ -Gesetz führt zwangsläufig zu einer Rosettenbahn.) Wir halten fest: Die Messungen an „S2“ sind bei Berücksichtigung aller Umstände nicht mehr rein Newtonisch erklärbar! Alles spricht für ein schwarzes Loch!

Und das ist ein „Ding ohne Eigenschaften“, erschöpfend beschreibbar durch Masse, Drehimpuls und Ladung. Nehmen wir den Ort hinzu und lassen die Ladung weg, wären das sieben Zahlenangaben. Mehr kann man über das galaktische Superloch nicht in Erfahrung bringen.

Drehimpuls bedeutet immer auch Rotationsenergie. Letztere kann man einem schwarzen Loch entziehen, wie Penrose 1969 herausfand. (Ja, ein schwarzes Loch kann auch wieder etwas hergeben!) Das Anzapfen der Rotationsenergie schien damals eine Möglichkeit, die enormen Leuchtkräfte von Quasaren zu erklären, den „sternförmigen“ Kernen jugendlicher Galaxien. Vermutlich aber handelt es sich um Energie, welche bei der Akkretion von Materie aus der unmittelbaren Umgebung eines schwarzen Lochs durch Reibung freigesetzt wird. Dazu bedarf es freilich einer differentiell rotierenden, irgendwie „klebrigen“ Akkretionsscheibe. Das kleine Vier-Millionen-Sonnenmassen-Monster im Herzen unserer Galaxis strahlt z. Z. kaum. Es hungert.

Nun zu den Aussichten. Mit verbesserter astrometrischer und spektrosko-

pischer Technik, sprich größeren Teleskopen, wird man zu lichtschwächeren Sternen vordringen und sich den Sternenreichtum nahe dem galaktischen Zentrum zunutze machen. Es gibt gewiss Sterne mit kürzeren Umlaufzeiten als „S2“, Sterne, die dem schwarzen Loch viel näher kommen. Die Region dürfte sich schnell zu einem Testlabor für Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie und konkurrierende Theorien mausern.

Hochgeschwindigkeitssterne findet man nicht bloß nahe dem galaktischen Zentrum. Vor einem Jahr konnte man von einem $2\frac{1}{2}$ -Sonnenmassen-Stern im Sternbild Kranich lesen, der mit 1755 ± 50 km/s durch die Galaxis eilt. Das übersteigt bei weitem die galaktische Entweichgeschwindigkeit von ≈ 500 km/s, d.h., er wird die Galaxis verlassen. Die rückwärtige Verlängerung der Bahn von S5-HVS1, sie weist – zum galaktischen Zentrum! Vor nicht einmal fünf Millionen Jahren kam er offenbar dem schwarzen Loch dort zu nahe und wurde hinweg geschleudert. Doch dazu gehören drei, wie der Himmelsmechaniker weiß. Vermutlich war S5-HVS1 Teil eines Doppelsterns. Sein Partner wurde bei der nahen Begegnung vom schwarzen Loch eingefangen, er selbst entkam.

Penrose und die Vorgeschichte

Stellen Sie sich eine homogene Kugel vor, gefüllt mit einem Stoff der Dichte ρ . Der Druck p sei Null. Denken Sie an eine Staubwolke! Nun schalten Sie die Schwerkraft an. Unter deren Wirkung wird die Kugel beginnen, in sich zusammenzufallen, anfangs bedächtig, dann immer schneller. Das Ergebnis der Kollapsrechnung: Gleichgültig, wie groß die Kugel anfänglich war, sie schnurrt binnen einer Frei-Fall-Zeit $t_{\text{ff}} = \sqrt{3\pi/(32G\rho)}$, wobei $G = 6,674 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-2}$ die Newton'sche Gravitationskonstante bezeichnet, zu einem Punkt **u n e n d l i c h e r** Dichte zusammen. Man spricht von einer Singularität.

Setzen wir spaßeshalber in die Formel die mittlere Dichte der Sonne ein, $\rho = 1,4 \text{ g/cm}^3$, (und nehmen den Druck aus der Sonne 'raus) ergibt sich eine Kollapszeit von $29\frac{1}{2}$ Minuten. Da die Dichte in der Sonne zum Zentrum hin zunimmt, kollabiert der Sonnenkern schneller. Bereits nach $2\frac{3}{4}$ Minuten bildete sich die Singularität. Die äußeren Schichten folgten nach. Es brauchte $\frac{1}{2}$ Stunde nur, aus einer druckfreien Sonne Mathematik zu machen – einen Punkt!

Was dann passiert, „steht in den Sternen“. Mit Unendlichkeiten vermag ein Physiker nichts anzufangen. Vielleicht fällt ja die Kugel quasi mit unendlicher Geschwindigkeit durch sich hindurch, so dass nach zwei Frei-Fall-Zeiten unsere Anfangskugel wieder erstet, wie ein Phönix aus der Asche, bloß um erneut zu kollabieren, vielleicht kommt der Kollaps in Anbetracht der Dichte zum Stillstand, wobei Energie freigesetzt würde, **u n e n d l i c h** viel ...

Dass es nach endlicher Zeit zu einer punktförmigen Singularität kommt, ist sicherlich der Kugelsymmetrie geschuldet. Was aber geschieht, wird die Kugel etwas deformiert, zu einem zusammengedrückten Ellipsoid bzw. einem gestreckten (eine Art American Football)? Nun, derartige Gebilde fallen bevorzugt parallel der kürzesten Achse in sich zusammen. Im Verlaufe des Kollaps weichen sie immer stärker von der Kugelgestalt ab. Die Exzentrizität geht gegen Eins. Was herauskommt (falls die kollabierenden Ellisoide nicht zuvor fragmentieren), ist ein Stück Fläche bzw. eine Strecke (eine unendlich dünne Spindel) u n e n d l i c h e r Dichte. Anstatt eines Punktes bilden sich Kaustiken. Es ist, als würden „Dinge“ aus Platons Welt der Ideen, eine Fläche bzw. eine Linie, plötzlich in die reale (Newtonische) Welt versetzt!

Sie wenden ein, das sei doch bloß der angenommenen Drucklosigkeit geschuldet. Entsinnen Sie sich des Eddington'schen Modellsterns aus der Oktoberausgabe? Der steht unter Druck, und dennoch kann man ihn, wie seltsam, ohne Anstrengung nach Belieben Verkleinern und Vergrößern. (Und er gab ein erstes brauchbares Sonnenmodell ab!) Er verliert allerdings Energie durch Abstrahlung. Es kommt lediglich darauf an, wie stark der Druck mit zunehmender Dichte anwächst. Ist der Sternstoff „weicher“ als der von Eddingtons Stern, kommt's unvermeidlich⁶ zum Kollaps. Und das passiert tatsächlich: Eine Typ-II-Supernova wird durch das Zusammensacken des Sternkerns ausgelöst. Der quantenmechanische Entartungsdruck kann den ultimativen Kollaps nicht verhindern.

Wie Einstein uns 1915 gelehrt hat, ist Newtons Gravitationsgesetz nicht das letzte Wort (aber eine recht brauchbare Näherung). Wie hält es seine Theorie mit dem Kollaps? Die Antwort drängte. Man wusste, dass erkaltete „Sternleichen“, also Weiße Zwerge und Neutronensterne, höchstens 1,4 bzw. um zwei Sonnenmassen schwer sein können, die Vorgängersterne aber um ein Vielfaches schwerer sind. Was geschieht, bricht ein 10- oder 20-Sonnenmassen-Stern am Ende seines Lebens in sich zusammen und schafft es nicht, sich rechtzeitig eines Großteils seiner Masse zu entledigen?

⁶Eine Materiekugel kollabiert, unterschreitet der Exponent n in der Zustandsgleichung $p \propto \rho^n$ den kritischen Wert von $4/3$. Dann ist der Stoff zu „weich“, als dass er den Zusammenbruch noch verhindern könnte. Die Zustandsgleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen Druck p und Dichte ρ . Die „ $4/3$ “ werden u. a. bei relativistischer Entartung erreicht, weshalb es keine Neutronensterne oberhalb einer Grenzmasse von, sagen wir, zwei, drei Sonnenmassen geben kann. Es sei angemerkt, dass Druck nicht nur nicht dem Kollaps hinderlich, er befördert ihn sogar, weil p (und nicht nur ρ) zur Gravitationsanziehung beitragen. Deshalb das „Weichwerden“ bei hohen Drücken.

1939 haben Robert Oppenheimer (1904–1967) und sein Student Hartland Snyder (1913–1962) den kugelsymmetrischen Kollaps im Rahmen von Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie untersucht. Das Ergebnis ist bekannt. Der Zusammenbruch endet in einem schwarzen Loch. (Damals sprach man noch vom „Dunkelstern“ oder „eingefrorenem⁷“ Stern.) Einstein soll nicht amüsiert gewesen sein, hatte er doch gerade bewiesen, dass schwarze Löcher unmöglich sind. Dass seine Theorie derartigen physikalischen Unfug erlaubt, wurmte ihn.

Jedermann glaubte, es handele sich um eine mathematische Kuriosität, geschuldet der hohen Symmetrie. Eine winzige Abweichung von der Kugelsymmetrie, ein Quäntchen Rotation, und die Welt wäre wieder in Ordnung . . .

Es kam anders. 1965 bewies Roger Penrose aus Oxford, dass Singularitäten, gefürchtete Unendlichkeitsstellen in der gekrümmten Raum-Zeit, in Einsteins Gravitationstheorie nicht nur möglich, sondern sogar unvermeidlich sind! Sein Beweis stützt sich auf die Topologie, einem Gebiet der Mathematik, für das Physiker immer schon ein Faible hatten, und ist rigoros. Hochgradige Symmetrie ist keineswegs vonnöten, damit es dazu kommt, und Rotation (in Maßen) verhindert sie nicht. Ist beim Gravitationskollaps ein gewisser Punkt erreicht, ist eine Umkehr ausgeschlossen. Grund ist eine Raum-Zeit-Falle, aus der kein Entrinnen möglich.

Im Innern der Falle (*closed trapped surface*) müsste man, bloß um stehen zu bleiben, schneller vom Zentrum wegrennen als es das Licht vermag! (Der gesamte Zukunftsteil des sog. Lichtkegels weist zum Zentrum.) Und bevor die Quantenphysik dem Unendlichen Einhalt gebieten könnte, hat die Gravitation vollendete Tatsachen geschaffen. Was der Bildung eines perfekten schwarzen Lochs *à la* Kerr⁸ entgegen stünde, beispielsweise Berge, wird über Gravitationswellen abgestrahlt. Jegliche Erinnerung an das Aussehen des Vorgängerobjekts wird getilgt. Tröstlich ist, die Singularität stört unsere Kreise nicht. Sie versteckt sich hinter einem Ereignishorizont. Eine „nackte“ Singularität, also ohne was drumrum, ist undenkbar. Stephen Hawking (1942–2018) glaubt, die Natur habe einen Horror davor. Und selbst wenn ein wissbegieriger Wissenschaftler sich wagemutig ins schwarze Loch stürzte, er bekäme sie nie zu Gesicht. Sie ist stets Zukunft. Und lange bevor die Reise des forschenden Forschers in ihr endete, machten Gezeitenkräfte ihm den Garaus.

Für Einsteins Erben führt am „schwarzen Loch“ kein Weg vorbei. Der Beweis eines *point of no return* in der besten Theorie der Gravitation, die wir haben, hätte mehr als einen halben Nobelpreis verdient.

⁷Das Wort vom „schwarzen Loch“ prägte 1967 John Archibald Wheeler (1911–2008).

⁸Roy Patrick Kerr (geb. 1934) entdeckte 1963 die Lösung für rotierende schwarze Löcher. Die für nicht rotierende geht zurück auf den Potsdamer Astronomen Karl Schwarzschild (1873–1916).