

Liebe Leserin, lieber Leser,

nichts, was an Einfallsreichtum die Wirklichkeit überträfe. Sie ist so schön nicht. Nehmen Sie die „schwarzen Löcher“. Sie sind, von „Minilöchern“ abgesehen, makroskopisch und doch seltsam eigenschaftslos wie Dinge der Quantenwelt. Darauf muss man erst einmal kommen. Einstein hielt sie für Unfug – und unterband die Forschung auf diesem Gebiet „erfolgreich“ kraft seiner Autorität. (Die Bezeichnung „schwarzes Loch“ tauchte erstmals 1968 auf. Zu seiner Zeit sprach man von einem „gefrorenen Stern“.)

Inzwischen ist das schwarze Loch gleichsam zum Dreh- und Angelpunkt bei den Bemühungen um eine künftige einheitliche Physik avanciert. Manche sehen in diesem Allesfresser den „heiligen Gral“ der Physik. Nun ja. In der Formel für die Entropie eines schwarzen Lochs jedenfalls stehen schon ’mal traulich vereint drei Naturkonstanten aus allen drei Physiksparten nebeneinander: G , \hbar und k – Gravitationskonstante, Plancksches Wirkungsquantum und Boltzmannkonstante.

Und die Astronomen? Sie sind nicht untätig. Während ihre fundamentalistisch veranlagten Physikkollegen publikumswirksame Wetten zum Informationsparadoxon bei schwarzen Löchern gewinnen und verlieren, haben sie in jahrelanger Kleinarbeit das nächstgelegene Superloch, das im Zentrum des Milchstraßensystems, nach den Regeln ihrer Kunst „gewogen“.

Apropos „gewogen“, es würde mich freuen, blieben Sie auch im Jahre 2009 als Leserin bzw. Leser dem Kosmos-Boten gewogen und dürfte ich sie weiterhin mit Geschichten aus der Astronomie unterhalten!

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Januar

Das Jahr beginnt mit einem Stillstand: Saturn ist am 1. Januar gegen 20 Uhr für einen kurzen Augenblick ein Fix- und kein Wandelstern! Er hat dann den östlichsten Punkt seiner diesmaligen parallaktischen Schleife erreicht. Danach

gewinnt er an Fahrt und eilt, astronomisch rückläufig – also im Uhrzeigersinn –, der Opposition mit der Sonne am 8. März entgegen.

Saturn benötigt drei Jahrzehnte, einmal die Sonne zu umrunden. Aller 15 Jahre erblicken wir seine Ringe in Kantenstellung. 2009 ist es wieder einmal so weit. Am 11. August scheint die Sonne genau auf die Kante der nur wenige Meter starken Saturnringe. Kurze Zeit später, am 4. September, passiert die Erde die Ringebene, und wir blicken genau auf die Kante. Leider liegt dann die Saturnopposition schon Monate zurück und Saturn ist des Nachts nicht zu sehen. Aber bereits jetzt sind die Ringe kaum noch auszumachen. Ab Februar kommt es gar, wegen der geringen Neigung der Äquatorebene zur Sichtlinie, zu einer Serie von Vorübergängen und Verfinsterungen des Titan.

Am 4. Januar kommt die Erde der Sonne auf ihrer Jahresbahn am nächsten. Wer es genau wissen möchte: 16:29 Uhr. Der Licht- und Wärmespender und Motor allen Wettergeschehens steht dann in vollster Größe am Himmel. Dass die Erde gerade jetzt das Perihel ihrer Ellipsenbahn durchläuft – was nicht immer so war und auch nicht so bleibt –, kommt der Landwirtschaft auf der Nordhalbkugel der Erde zugute. Der Nordsommer ist dadurch um Tage länger als der gegenwärtige Südsommer und der Gegensatz zwischen Winter und Sommer merklich gemildert bei uns.

Wem es der merkantile Merkur angetan hat, sollte die Abende um den 4. Januar herum nach ihm Ausschau halten. Am 4. Januar erreicht der Götterbote mit $19,3^\circ$ den größten östlichen Winkelabstand zur Sonne. Die Gelegenheit ist günstig: Im Winter ragt die Ekliptik steil in den Abendhimmel, gute Chancen also, den Gott der Diebe und Börsianer (man verzeihe mir den Ausrutscher aus aktuellem Anlass) mal wieder zu erhaschen, denn schnell schießt er dahin. Er geht Anfang Januar 1 1/2 Stunden nach der Sonne unter.

Am Spätnachmittag des 7. Januar kommt es zu einer Bedeckung der Plejaden durch den Mond. Von derartigen Ereignissen war schon des öfteren die Rede. Die beiden Bedeckungen, am 7. Januar und am 18. Juli, sind aber für viele Jahre – 17, wie ich las – die letzten. (Die Mondbahn ist fünf Grad gegen die Ekliptik geneigt und präzessiert mit einer Periode von 18,6 Jahren. Die Plejaden stehen fünf Grad nördlich der Ekliptik, werden also gerade so vom Mond erreicht. Es kommt daher nur alle 18,6 Jahre zu einer Serie von Plejadenbedeckungen.) In früheren Zeiten wurde solchen Bedeckungen Bedeutung beigemessen, und vermutlich nicht nur kalendarische. Auf der Himmelscheibe von Nebra sind der Mond und die Plejaden abgebildet. Wie ich hörte, könnte in dem Märchen vom Wolf (Neumond) und den sieben

Geißlein (Plejaden) das himmlische Verschwinden und Wiederauftauchen des Siebengestirns verarbeitet worden sein.

Um 17 Uhr 30 wird der erste hellere Plejadenstern, 16 Tau, von der dunklen Mondseite verschluckt. Weitere Sterne folgen.

Das Gestirn des Abends ist die Venus. Am 14. Januar geht sie für dieses Mal auf maximale Distanz ($47,1^\circ$) zur Sonne, d. h. sie geht über vier Stunden nach ihr unter. Die Zeit ihrer höchsten Prachtentfaltung steht allerdings noch bevor: Am 19. Februar erreicht sie -4.6 Größenklassen. Dann ist zwar weniger als die Hälfte von ihr beleuchtet zu sehen, dafür hat sie an (scheinbarer) Größe gewonnen. Sie überholt uns ja auf der Innenspur und kommt uns derzeit immer näher. Am 23. Januar steht Venus nur $1\frac{1}{2}$ Grad nördlich vom Uranus, eine gute Gelegenheit also, den Uranus mit einem Fernglas aufzusuchen.

Nur am Rande sei die ringförmige Sonnenfinsternis am 26. Januar erwähnt. Sie spielt sich über dem Indischen Ozean ab und ist von hier aus nicht sichtbar. Ringförmig ist sie aus einleuchtendem Grund. Die Sonne steht im Januar, wie wir wissen, besonders groß am Himmel, und der Mond? – nun, er ist Ende Januar besonders klein. Am 23. Januar durchläuft er nämlich den erdfernsten Punkt seiner Monatsbahn. Der kleine Neumond ist am 26. nicht in der Lage, die Sonnenscheibe in Gänze zu verstecken. Ein Ring von Sonne bleibt.

Vom Dunkelstern zum schwarzen Loch

Gut einhundert Jahre nachdem bekannt wurde, dass Licht zwar geschwind, aber eben nicht instantan sich ausbreitet, spekulierte man bereits über Sterne, die nicht leuchten, weil ihr Leuchten nicht abheben kann. Sie seien derart kompakt, d. h. ihr Masse-zu-Radius-Verhältnis sei derart groß, dass die Entweichgeschwindigkeit die Lichtgeschwindigkeit übersteigt – so der englische Astronom und Kirchenman, John Michell. Er hatte 1784 als erster dieses Gerücht in die Welt gesetzt, das seit dem umgeht. Nun, was wir heutigen unter einem schwarzen Loch verstehen, hat wenig gemein mit Michells „Dunkelstern“. Ein schwarzes Loch ist ein genuines Gebilde der Allgemeinen Relativitätstheorie, ein Kind der Einsteinschen Gedankenwelt. Dessen Theorie einer gekrümmten Raum-Zeit hat Newtons Gravitationstheorie von 1687 ersetzt – die mit dem berühmten $1/r^2$ -Gesetz. Wenige Monate nachdem Albert Einstein 1915 mit seiner (damals ohne Not) die Grundlagen der Phy-

sik bis heute erschütternden Theorie der Schwere herausgerückt war, hatte ein Potsdamer Astrophysiker, der geniale Karl Schwarzschild, auch bereits eine Lösung der Einsteinschen Gravitationsgleichungen parat. Einstein war verblüfft ob der Schnelligkeit, mit der dies geschah – und hat sich bis zu seinem Lebensende vehement gegen eine seiner Meinung nach unsinnige Konsequenz seiner Gleichungen gewehrt, dem schwarzen Loch. Schwarzschilds Lösung nämlich bricht mit der Skalenfreiheit von Newtons $1/r^2$ -Gesetz. Ein kleinster Radius taucht auf, genannt Gravitations- oder Schwarzschildradius. Er ist der Masse proportional und stimmt formal exakt mit dem Radius überein, der sich rechnerisch ergibt, wird in der Newtonschen Formel für die Entweichgeschwindigkeit letztere der Lichtgeschwindigkeit gleichgesetzt. Michell wusste also bereits, wie groß ein schwarzes Loch ist (genauer: sein Ereignishorizont), auch wenn die Theorie, die dahinter steckte, letztlich dem Problem nicht angemessen war!

Muss man so etwas unastronomisch Winziges, wie den Schwarzschildradius ernst nehmen? Die Himmelskörper, mit denen man es normalerweise zu tun hat, sind sehr viel größer als ihr Gravitationsradius. Ihr äußeres Schwerefeld weicht deshalb auch kaum von dem gemäß der Newtonschen Theorie berechneten ab. Die Einsteinschen Korrekturen sind fast immer völlig belanglos. Beispiel Sonne: Ihr Radius misst 700 000 km und übertrifft damit ihren Gravitationsradius von 3 km um eine Viertelmillion! Lediglich der schnell dahinschießende Merkur durchläuft, nach Abzug aller Störungen durch die anderen Planeten, eine Bahn, die von einer in sich geschlossenen Keplerellipse um ein Kleines abweicht. Er ist der Sonne nahe genug und „spürt“, das $1/r^2$ -Gesetz könne nicht der Wahrheit letzter Schluss sein ...

Doch es gibt Kompakteres als die Sonne. Ein Neutronenstern übertrifft gerade mal so seinen Gravitationsradius. Sein Schwerefeld im Inneren und nahebei zu berechnen bedarf bereits des mathematischen Apparates der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie. Für ihn könnte die Frage, ob es etwas gibt, das kleiner als sein Gravitationsradius ist, gegebenenfalls von existentieller Bedeutung sein. Beispielsweise, wenn er, übergewichtig, als heißer und schnell rotierender Neutronenstern bei einer Supernovaexplosion geboren wird und nach wenigen Minuten der Abkühlung und des Verlustes von Drehimpuls durch Abstrahlung von Gravitationswellen erkennen muss, dass es kein Halten mehr gibt und der Kollaps zu einem Punkt, einer Singularität, unausweichlich ist.

Schwarze Löcher gibt es theoretisch in allen Größen. (Sie müssen lediglich

schwerer als 0,00002 Gramm sein, da ansonsten ihre quantenmechanische Unbestimmtheit, ihr Comptonradius, ihren Schwarzschildradius überstiege.) Massereiche Sterne, die trotz immenser Masseverluste durch Sternwinde am Ende ihrer Laufbahn schwerer als, sagen wir, zwei, drei Sonnenmassen sind, können durch nichts in der Welt stabilisiert werden. Ihr Untergang ist unaufhaltsam. Sie brechen unter der Schwerkraft Griff zu einem Gebilde unendlich hoher Dichte zusammen. Nur die Schwerkraft kündigt davon, dass eine Masse die Raum-Zeit derart deformiert haben muss, dass sie sich topologisch von der Außenwelt abgeschnürt hat.

Die Natur selbst, so scheint's, schreckt vor einer solchen Monstrosität zurück und erspart gnädig sich und uns Anblick und Auswirkung einer „nackten“ Singularität, indem sie das Mäntelchen des Ereignishorizonts darum breitet – im Falle eines nichtrotierenden Loches eine mathematisch *perfekte* Kugel. Der Physiker ist somit der vergeblichen Mühe enthoben, die schreckliche Singularität beschreiben zu müssen. Möchte er trotzdem mehr darüber erfahren, so ist es ihm unbenommen, sich in den Abgrund zu stürzen. (Der forsche Forscher sollte sich dazu ein supermassereiches Loch aussuchen. Da zerfetzen ihn die Gezeiten nicht bereits *vor* dem Durchfallen des Ereignishorizonts.) Bloß erzählen, was er geschaut, wird er nicht können. Aus einem (stellaren) schwarzen Loch ist noch nie – jedenfalls bis heute nicht – etwas zurückgekommen. Denn selbst innerhalb des Ereignishorizonts gibt's keinen Stillstand: Wollte man nur stehenbleiben, man müsste schneller als Licht von der Singularität in des Loches Mitte wegrennen. Das aber ist unmöglich.

Gibt es gar keinen „Ausweg“, eventuell durch das Hintertürchen der Quantenphysik? Sie haben sicherlich schon davon gehört. Hat Stephen Hawking recht, müssen schwarze Löcher von Sternenmasse nach langer langer Zeit, 10^{65} Jahre oder so, notgedrungen aus quantenmechanischen Gründen „verdampfen“. Ob dann die anscheinend vernichtete Information wieder an die Außenwelt zurückgeben wird, ist die Frage, die zu hitzigen Fundamentalismusdebatten Anlass gibt und zu der Physikkoryphäen in angelsächsischer Manier Wetten abschließen.

Ein schwarzes Loch wird gewogen

Schwarze Löcher gibt es, wie gesagt, in allen Größen, auch Übergrößen. Der Rest dieses Newsletters sei einem solchen supermassereichen „Loch“ gewidmet: dem Vier-Millionen-Sonnenmassen-„Loch“ im Herzen unserer Spiralga-

Galaxie, 27 000 Lichtjahre von uns entfernt im Sternbild Schütze (Sagittarius). Schwarzkraftmonster hausen in den Zentren fast aller großen Galaxien. Sie sind der Grund für die vielerorts zu beobachtende Kernaktivität. Das in unserer eigenen nimmt sich mit einem Schwarzschildradius von nur zwölf Millionen Kilometern (eine halbe Lichtminute!) noch bescheiden aus. Sein „Kugelmäntelchen“, welches uns das Schlimmste erspart, hätte noch innerhalb der Merkurbahn Platz, befände es sich an Stelle der Sonne. (Seine Anziehungskraft würde der Erde allerdings Beine machen: Frühjahr, Sommer Herbst und Winter, die Zeiten des Jahres, sie wechselten im Stundentakt!) Ansonsten ist das galaktische Zentrum (Quelle: NASA/ESA) eher harmlos. Aus unerfindlichen Gründen scheint das kleine hauseigene Monster derzeit zu schlafen. Möglicherweise hungert es, da der Nachschub irgendwie unterbunden oder gar versiegt ist.

Seit 16 Jahren observiert ein Astronomenteam vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik um Reinhard Genzel im Infraroten das galaktische Zentrum, insbesondere die Eigenbewegung von rund zwei Dutzend heller Sterne in unmittelbarer Nähe der Radioquelle Sagittarius A*. Diese Radio-punktquelle markiert den Kern der Galaxis. Die Observierung ist nur im Langwelligen möglich, weil der zwischen uns und dem galaktischen Zentrum gelegene interstellare Staub kein kurzwelliges sichtbares Licht passieren lässt. Bei den Infrarotsternen handelt es sich um junge, massereiche Sterne, blaue Überriesen vom Spektraltyp O und sogenannte Wolf-Rayet-Sterne. Sie sind nicht älter als sechs Millionen Jahre, gehören anscheinend einer scheibenförmigen Struktur an und kündigen von einer Episode intensiver Sternentstehung nahe dem galaktischen Zentrum. Wie dort, am Abgrund und angesichts dessen Gezeitenwirkung, überhaupt Sternentstehung möglich ist, ist eines der Rätsel, die uns das galaktische Zentrum aufgibt. Aber darum geht es in erster Linie nicht. Diese Sterne dienen zuvörderst nur als Testteilchen, Massepunkte, die sich unter der Wirkung des Schwerefeldes des zentralen schwarzen Lochs bewegen. Aus ihrer Ortsveränderung (Quelle: MPE), die dank adaptiver Optik mit der unglaublichen Präzision von 0,0003 Bogensekunden (entspricht dem Durchmesser einer Ein-Euro-Münze, betrachtet aus 15 000 km Entfernung) gemessen wird, kann man, übrigens ohne Einsteins Relativitätstheorie zu bemühen, rein Newtonisch also, auf die Masse und die Konzentration des zentralen Massenzusammenhalts schließen. Ein Stern, genannt „S2“, hat bereits einen vollen Umlauf um das schwarze Loch absolviert!

Alles deutet auf eine „Punkt“-masse von vier Millionen Sonnenmassen hin.

Nach allem, was man so weiß, kann es sich nur um ein schwarzes Loch handeln, zumal ein halbstündiger Infrarotausbruch von Sag A*, beobachtet am 9. Mai 2003, wegen seiner Kürze auf ein Gebiet von weniger als zehn Schwarzschildradien beschränkt gewesen sein muss. (Und wäre es etwas anderes, es müsste gar bald zu einem schwarzen Loch kollabieren.)

Ein Purist mag einwenden, es handele sich um einen Indizienbeweis, der ultimative Beweis stehe noch aus: die Vermessung der gekrümmten Raum-Zeit-Struktur in der Nähe des Ereignishorizonts. Da ein schwarzes Loch von einer geradezu gespenstischen Eigenschaftlosigkeit ist – schwarze Löcher hätten keine Haare, bemerkte einst dazu John Archibald Wheeler –, ist der Beweis im Grunde genommen simpel. Die Metrik, die Krümmung der Raum-Zeit, ist von nur vier Zahlenwerten eindeutig festgelegt, Masse und Drehimpuls. Mehr ist über ein schwarzes Loch nicht zu sagen.

Nun, davon ist man z. Z. noch meilenweit entfernt, was u. a. daran ersichtlich ist, dass die Bewegung der Teststerne durchaus noch mit den Mitteln der Schulphysik exakt beschreibbar ist. Mit den heutigen Beobachtungen kommt man bis auf Lichttage an das gravitative Etwas heran. Der Schwarzschildradius eines Vier-Millionen-Sonnenmassen-Lochs aber ist 100 000-mal kleiner! Doch die Entwicklung der Messtechnik geht mit schnellen Schritten voran und gibt Anlass zu allerhöchsten Erwartungen. Das Stichwort lautet Interferometrie. Mit dem VLTI der ESO, der phasenrichtigen Kombination der Strahlengänge von bis zu vier Teleskopen von jeweils 8,2 Metern Öffnung und einigen Hilfsteleskopen wird sich die astrometrische Genauigkeit nochmals drastisch verbessern.