

Vorhersagen sind schwierig – insbesondere, wenn sie sich auf die Zukunft beziehen.

Niels Bohr (1885–1962)

Liebe Leserin, lieber Leser,

aus dem Chemieunterricht mag das Massenwirkungsgesetz hängengeblieben sein. Sind auf- wie abbauende Reaktionen im Gleichgewicht, gilt für die Konzentrationen c der an der Reaktion $A + B \rightleftharpoons AB$ beteiligten Stoffe $c(AB) = K \cdot c(A) \cdot c(B)$, wobei K von den Gegebenheiten abhängt, im wesentlichen von der Temperatur. Man kann die Massenwirkungskonstante in Tabellenwerken nachschlagen, bzw. aus Bindungsenergie und Temperatur berechnen. Während die Bindungsenergie bei Elektronenhüllen typischerweise Elektronenvolt (eV) beträgt, liegen jene der Atomkerne im MeV-Bereich. Der Unterschied ist rein graduell! Da 1 eV etwa einer Temperatur von 10 000 Grad entspricht – Temperatur ($k \cdot T$) ist ein Energiemaß! –, erwartet man Kernreaktionen des reversiblen Typs $A + B \rightleftharpoons AB$ bei Milliarden Grad. Thermodynamisch betrachtet sind Kernreaktionen auch nur Reaktionen – allerdings bei unvorstellbaren Temperaturen.

Dieser Vergleich mag vor 75 Jahren den britischen Astrophysiker Fred Hoyle (1915–2001) bewogen haben, nach einer einfachen Erklärung für die beobachteten Konzentrationsverhältnisse unter den schwereren chemischen Elemente im Kosmos Ausschau zu halten. Gesucht ist ein höllisch heißer Ort – das Innere von Sternen kurz vor deren Ableben. Bei Milliarden Grad und Dichten von Tonnen pro Kubikzentimeter geht es dort selbst Atomkernen an den Kragen. Die diversen Gleichgewichts-Konstanten der reversiblen Kernreaktionen kann man berechnen. Das Problem: Die „heiße“ Gleichgewichtsmischung muss beim Wechsel zu gängigen Temperaturen und Dichten quasi „eingefroren“ bleiben. Der Übergang von höllisch-heiß zu himmlisch-kühl muss sehr schnell erfolgen. Hoyle dachte in diesem Zusammenhang an Supernovaexplosionen.

Am 25. Oktober 1671, vor 350 Jahren, entdeckte Giovanni Domenico (Jean Dominique) Cassini (1625–1712) den Saturnmond Iapetus. Drei weitere sollten folgen: Rhea (1672), Dione und Tethys (1684). Der größte, Titan, war

16 Jahre zuvor von Christiaan Huygens (1629–1695) aufgefunden worden. Erst 1789 kamen mit Mimas und Enceladus zwei weitere Monde hinzu. Angemerkt sei, dass G. D. Cassini den Iapetus immer nur westlich des Saturn sah, wandte ihm dieser seine Rückseite zu (wenn man als Vorderseite diejenige bezeichnet, die in Bewegungsrichtung weist). Die Erklärung für dieses sonderbare Gebahren: Der Mond führt (a) eine gebundene Rotation aus und weist (b) sowohl eine eishelle als auch kohlrabenschwarze Hemisphäre (Cassini Regio) auf. Der Helligkeitsunterschied ist beträchtlich – nach Berliner Messungen 1,8 Größenklassen.

Der für den 31. Oktober angesetzte Start des Hubble-Nachfolgers, des James-Webb-Weltraum-Teleskops (JWST), ist nun für den 18. Dezember fest eingeplant. Für die Infrarot-Astronomie dürfte mit einem 6 1/2-m-Spiegel im All – mit zehnjähriger Verspätung – eine neue Ära beginnen.

Äußert sich ein Kosmologe zur Zukunft, stößt dies verständlicherweise auf Skepsis, weil derlei Aussagen schwerlich nachprüfbar sind. Und doch gibt es jetzt zumindest einen Fall, einen Glücksfall, wo sich schon in 1 1/2 Dezennien der Wahrheitsgehalt einer derartigen Vorhersage erweisen wird.

Interesse an Gravitationslinsen geweckt? Darüber freute sich
Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im Oktober

In der zweiten Oktoberhälfte gibt es für Frühaufsteher eine Morgensichtbarkeit des Merkur. Die Elongation erreicht am 25. maximale 18 1/2 Grad. Vier Tage darauf geht Venus mit 47° auf maximale östliche Distanz zur Sonne. Das ist etwas für den frühen Abend. Am Monatsende verschwindet der Abendstern gegen 20 Uhr. Eine Begegnung mit Antares (α Scorpii) steht am 16. an, eine mit dem jungen Mond am 19.

Jupiter und Saturn beenden beide ihre Oppositionsphase und sind am 18. bzw. 11. stationär. Danach geht's regulär, sprich rechtläufig, unter den Fixsternen weiter. Beide Riesenplaneten ziehen sich vom Morgenhimmel zurück.

Einsteins Kreuz nun auch mit Supernova

Licht nimmt immer den schnellsten Weg, wie bereits 1658 Pierre de Fermat¹ (1601 oder 1607–1665) wusste. Wenn möglich bereitet es sich geradlinig aus². Das gilt auch in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Dort verschwindet sogar der vier-dimensionale Ereignisabstand zwischen dem Aussenden eines Photons und dessen Empfang. Die Null-Geodäte, ein ev. verschlungener Lichtpfad, ersetzt dort den geraden Lichtstrahl.

Den Gravitationslinseneffekt hatte 1936 Albert Einstein (1879–1955) untersucht – rein theoretisch. Befinden sich Punktlichtquelle, „Linse“ und Beobachter auf einer Geraden, so sieht dieser anstatt des Lichtpunkts einen leuchtenden Ring um den ablenkenden Himmelskörper. Ein Lichtstrahl wird durch die Raum-Zeit-Krümmung in der Nähe jeder Masse verbogen³, bloß, dass dies normalerweise niemandem auffällt⁴. Einstein selbst glaubte nicht, ein *E i n s t e i n r i n g* werde sich jemals beobachten lassen. 1987, ein halbes Jahrhundert später, hatten Radioastronomen mit 4C 05.51 den ersten Einsteinring entdeckt. Ist die Symmetrie gebrochen, liegen also Quelle, Linse und Astronom nicht exakt auf einer geraden Linie, entstehen Mehrfachabbildungen der Quelle. Bekannte Beispiele sind der Kleeblatt-Quasar QSO J1415+1129 im Bootes und Einsteins Kreuz QSO J2240+0321 im Pegasus. Schon 1979 war man in der Großen Bärin auf einen Doppelquasar gestoßen: QSO 0957+561AB. A und B entpuppten sich als zwei Ansichten des selben Quasars in sechs Bogensekunden Abstand! Anders als bei einem Einsteinring kommt es wegen unterschiedlich langer Lichtwege zu zeitlichen Versetzungen von Wochen, Monaten und Jahren zwischen den einzelnen Abbildungen. Man erblickt zur gleichen Zeit dieselbe Quelle mehrfach, aber die einzelnen Abbilder sind nicht gleichaltrig.

1964 hatte der norwegische Astrophysiker Sjur Refsdal (1935–2009) eine brillante Idee: Mit einer Supernova als Hintergrundquelle und einer Galaxie bzw.

¹Fermat leitete das Brechungsgesetz aus einem Extremalprinzip her. Das Gesetz war u. a. von Willebrord Snel(lius) (1580–1626) 1621 gefunden worden. Das ist 400 Jahre her!

²... sofern man nicht durch Hindernisse alternative Lichtwege unterbindet. Geradlinigkeit entsteht, löschen sich alle denkbaren Umwege durch destruktive Interferenz aus. Erst der Wegfall von Umwegen führt zur Beugung!

³Formal ließe sich der Lichtweg durch Lichtbrechung in einem hypothetischen Medium beschreiben, dessen Brechungsindex vom Gravitationspotential abhängt.

⁴Die Lichtablenkung im Schwerefeld der Sonne war 1919 bei einer Sonnenfinsternis gemessen worden und hatte den Ruhm Einsteins begründet.

einem Galaxienhaufen als Gravitationslinse könne man aus den Laufzeitunterschieden rein geometrisch⁵ sowohl die Expansionsrate des Universums als auch die Masse der Linse ermitteln. Der Vorteil: Man misst die Gesamtmasse, also inklusive der unsichtbaren Materie!

2015 ergab sich die seltene Gelegenheit, das umzusetzen: Eine tiefe Aufnahme mit dem Hubble-Weltraum-Teleskop (HST) vom November 2014 zeigte das Einsteinkreuz einer Supernova (SN)! SN „Refsdal“ war vor 9,3 Milliarden Jahren im Spiralarm eines kosmologisch fernen Spiralnebels explodiert und eigentlich viel zu unscheinbar, als dass man sie hätte wahrnehmen können. Doch ein davor gelegener⁶ Galaxienhaufen (MACS J1149.6+2223) mit einer Haufengalaxie als weiterem „Vergrößerungsglas“ machten es möglich. Die Gravitationslinsen auf halbem Wege zur SN verstärkten deren Licht durch die fokussierende Wirkung der Schwerkraft und bescherten uns gleich [vier Abbilder](#) (Quelle: NASA/ESA/APOD) von „Refsdal“. Man beachte: Dessen Heimatgalaxie, ein bläulicher Spiralnebel, taucht auf dem Bild an zumindest drei Orten auf – gravitativ verzerrt! Im November 2015 schließlich explodierte (höchstwahrscheinlich) dieselbe SN in einem anderen Abbild des Spiralnebels (im mittleren roten Kreis) vor unseren Augen ein fünftes Mal! Der Lichtausbruch und das Abklingen der Helligkeit vollzieht sich wegen der enormen Rotverschiebung ($z = 1,49$) der SN in Zeitlupe. Alles dauert $2\frac{1}{2}$ Mal länger als hier und heute ($z = 0$).

Am Studium der SN „Refsdal“ im Löwen waren weltweit Observatorien mit Großteleskopen und, von Seiten der Theorie, Arbeitsgruppen beteiligt, die anhand der Daten die Verfeinerung von Massemodellen des Haufens zur Berechnung von Lichtwegen betrieben. Als hilfreich erwies sich, dass die Heimatgalaxie von SN Refsdal nicht die einzige Hintergrundgalaxie war, die mehrfach erscheint.

Dadurch, dass sich, von uns aus gesehen, ein Teil des Inventars des Galaxienhaufens vor der Hintergrundquelle vorbei bewegt, darunter Einzelsterne, kann sich durch diverse Gravitationslinseneffekte deren Helligkeit binnen Tagen erratisch ändern⁷.

Nun zum jüngsten Fall: SN „Requiem“ im Walfisch (Cetus). Sie explodierte

⁵Aus den gemessenen Winkelverschiebungen am Himmel ergeben sich nur die *r e l a t i v e n* Längen der Lichtwege. Der Maßstab des Ganzen ist zunächst unbekannt. Aus einer einzigen Laufzeitdifferenz aber folgt sofort der *a b s o l u t e* Weglängenunterschied, ausgedrückt in, sagen wir, Lichtjahren. Damit ist die wahre Dimension der Gravitationslinse, ihre Masse und Entfernung, bekannt.

⁶Rotverschiebung $z = 0,54$

⁷Beim Queren einer Kaustik würde die Helligkeit einer Punktquelle formal unendlich!

vor rund zehn Milliarden Jahren in einer E-Galaxie (MRG-M0138) mit einer Rotverschiebung von $z = 1,95$. Die gravitative Lichtablenkung besorgt wieder ein Vordergrundhaufen (MACS J0138.0-2155, $z = 0,338$). Er ist nur vier Milliarden Lichtjahre weit weg. Auf [Archivaufnahmen](#) (Quelle: NASA/ESA) des HST, aufgenommen im Juli 2016, hat man bei drei der vier total verzerrten Abbildungen der Galaxie eine Punktquelle ausmachen können, welche auf einer späteren Aufnahme fehlen.

Anders als im Refsdal-Fall vermutet man eine Typ-Ia-SN. Supernovae dieses Typs sind unter Kosmologen besonders beliebt, weil sie als „Standardkerzen“ gelten, d. h., ihre scheinbare Maximalhelligkeit⁸ kann – einmal geeicht – als Entfernungsmaß dienen.

Die Laufzeitunterschiede zwischen den drei Abbildungen machen weniger als 200 Tage aus, d. h., die Lichtwege differieren um höchstens 200 Lichttage oder fünf Milliarden Kilometer. Die glücklichen Finder behaupten nun, im Jahre 2037 ± 2 werde im vierten Abbild der Galaxie, dieselbe Supernova nochmals auftauchen. Sogar ein fünftes Auferstehn der Supernova wird prognostiziert. So etwas gibt's nur in der Astronomie: Wo sonst hat man die Chance, eine verpasste Gelegenheit nachzuholen? – Da nimmt man den kleinen Umweg von 21 Lichtjahren gerne in Kauf.

⁸Bei einer Ia SN handelt es sich vermutlich um einen thermonuklear explodierenden weißen Zwerg, welcher einem engen Doppelsternsystem angehört. Durch überströmende Materie vom Begleitstern nimmt seine Masse zu. Wird die kritische Grenzmasse von 1,4 Sonnenmassen erreicht, kommt's zur Detonation, der vollständigen Auflösung des Unglückssterns. Man baut darauf, dass sich mehr oder weniger alle SN vom Typ Ia unabhängig von der Vorgeschichte im Ausbruchverhalten ähneln.