

Liebe Leserin, lieber Leser,

vor 200 Jahren, am 10. April des Jahres 1813, starb in Paris der wohl berühmteste Mathematiker des 18. Jh.: Joseph-Louis de Lagrange (1736–1813). 1766 hatte ihn Friedrich II. als Nachfolger von Leonhard Euler (1707–1783) an die Preußische Akademie der Wissenschaften geholt. Des Königs Liebling blieb, obwohl er das Wetter abscheulich fand – er war unter südlichen Himmeln, in Turin, geboren –, zwanzig Jahre. Als Himmelsmechaniker schlug sich Lagrange, wie jeder, der etwas auf sich hielt damals, mit dem Drei-Körper-Problem herum. Zwei Körper, die sich gegenseitig gravitativ anziehen, bewegen sich, wie von Kepler beschrieben. Ab dreien wird's kompliziert. Bisher sind nur wenige exakte Lösungen bekannt. Lagrange beschränkte sich auf den Fall, dass des dritten Körpers Masse geringfügig ist.

Liest man in der Zeitung, der Raumflugkörper XYZ befinde sich im L_2 -Punkt des Systems Sonne-Erde, so ist damit der zweite von den fünf Librationspunkten in diesem Zwei-Körper-System gemeint. Die Umlaufzeit um die Sonne ist in jedem dieser fünf Punkte genau ein Jahr, auch wenn sich L_2 1,5 Millionen Kilometer außerhalb der Erdbahn befindet. Man spricht von einer 1:1 Resonanz mit dem Erdumlauf.

Dass die Librations- oder Lagrange-Punkte mehr als eine mathematische Kuriosität sind, wurde 1906 offenbar. Max Wolf (1863–1932) aus Heidelberg entdeckt einen Planetoiden mit der Jupiter Umlaufzeit. Achilles eilt Jupiter auf dessen Bahn 60° voraus. Es war der erste – pardon! – Trojaner im System Sonne-Jupiter, der gefunden wurde. Er befindet sich beim L_4 -Punkt. Inzwischen kennt man über 5000 Helden des Trojanischen Kriegs, welche die Gegenden um L_4 und L_5 unsicher machen. Die Griechen haben ihr Lager bei L_4 aufgeschlagen, die Trojanischen Helden das ihre bei L_5 . Die Gesamtanzahl der wenigstens einen Kilometer großen Himmelskörper wird auf eine Million geschätzt. Sie sind dort himmelsmechanisch kaserniert, sie können nur schlecht weg.

Durch Lagrange und die Chaos-Theorie wird der Lastentransport durchs All bezahlbar! Stellt man es geschickt an, indem man in einem „neutralen Punkt“, beispielsweise im L_1 -Punkt des Erde-Mond-Systems, den sog.

„Schmetterlingseffekt“ ausnutzt, kann man fast ohne Treibstoff durchs Sonnensystem manövrieren. Zeit muss man allerdings mitbringen, viel Zeit.

Inzwischen ist man auf Trojaner sogar in hochangeregten Atomen gestoßen, sog. Rydberg-Atomen von geradezu makroskopischen Ausmaßen. (Das muss nicht wundern, gilt doch auch dort ein $1/r^2$ -Kraftgesetz, wie in der Newtonschen Himmelsmechanik.)

Kürzlich überraschte die Meldung, dank acht Bedeckungsveränderlicher könne man endlich den Abstand zum Zentrum der Großen Magellanschen Wolke (LMC) auf 2,2% genau: $162\,900 \pm 3700$ Lj. Auch wenn dies vielleicht noch nicht das letzte Wort ist, die Präzision lässt aufhorchen. Wieso kann man so genau messen?

Willkommen bei der Präzisionsastronomie!

Ihr Hans-Erich Fröhlich

Der Himmel im April

Jupiter verabschiedet sich am Abend von uns. Seine Zeit ist vorüber. Dafür steht am 28. April sein mythischer Vorläufer, der Saturn, der Sonne genau gegenüber. Opposition! Also ran an die Fernrohre! Besser wird's nimmer, jedenfalls nicht zu dieser Jahreszeit!

Drei Tage zuvor ist Vollmond. Doch fällt der diesmal nicht ganz so prächtig aus. Der Grund: Vom Monde aus betrachtet ist die Sonnenscheibe nicht rund und schön. Die Erde deckt einen Teil der Sonne ab. Eine partielle Sonnenfinsternis auf dem Mond ist eine Halbschatten-Mondfinsternis auf der Erde. Der Erdschatten streift nur den Mondrand. Man muss schon genau hinschauen, um es zu bemerken.

Bedeckungssterne

Der Himmel ist zwei-dimensional. Um die Position eines Sterns am Firmament anzugeben, reichen zwei Zahlenangaben. Der Kosmos aber ist dreidimensional. Die vornehmste Aufgabe des Astronomen besteht darin, die Entfernung der Himmelskörper zu messen, was nicht einfach ist. Versuchen Sie einmal, beim Blick aus dem Flugzeug die Entfernung einer Wolke zu schätzen! Da Sie nicht wissen, ob Ihre Wolke nicht bloß ein Wölkchen ist, dürfte Ihnen das schwerfallen.

Es sprengte den Rahmen, hier darzustellen, wie es der Astronom anstellt, mit wenigen Sprüngen vom Urmeter in Paris bis zum „Rand“ des Universums zu gelangen. Es dürfte aber klar sein, dass, da es meist mehrerer Schritte bedarf, sich der Fehler beim Weiterhangeln von Stufe zu Stufe vergrößert. Je mehr Zwischenschritte es braucht, um zum Ergebnis zu gelangen, desto unsicherer ist es. Da wäre es hochwillkommen, über ein Verfahren zu verfügen, das in *einem* Schritt wenigstens den Abgrund zu den beiden benachbarten Welteninseln, den Magellanschen Wolken, überwinden kann. Wieso gerade die Magellanschen Wolken? Nun, insbesondere der Großen Magellanschen Wolke (LMC) kommt eine Schlüsselrolle zu bei der Ermittlung extragalaktischer Entfernungen. Werfen wir einen Blick in die Vergangenheit. Vor gut einhundert Jahren, 1912, hatte Henrietta Swan Leavitt (1868–1921) von der Harvard-Sternwarte beim Studium von Veränderlichen in den Magellanschen Sternwolken die berühmte Perioden-Helligkeits-Beziehung der δ -Cepheide-Sterne gefunden gehabt: Die Leuchtkraft dieser pulsierenden Sterne hängt von ihrer Pulsationsperiode ab. Da alle Sterne ungefähr gleich weit entfernt sind, ist ihre scheinbare Helligkeit ein Maß für die absolute. Kennt man die wahre Entfernung der Magellanschen Wolken, kann man diese Beziehung zwischen Periode und Leuchtkraft eichen und mit einem Schlage die Entfernungen *aller* Sternsysteme angeben, in denen mindestens ein solcher Pulsationsveränderlicher gefunden und sein Lichtwechsel aufgezeichnet wurde.

Die Entfernung der LMC ist eine Art Urmeter im Großen. Ein Fehler wirkte sich auf alle extragalaktischen Entfernungen aus und damit auch auf die gegenwärtige Expansionsrate des Universums, die Hubble-Zahl! Insbesondere hängt die maximale Leuchtkraft der Supernovae vom Typ Ia davon ab. Diese eindrucksvollen Sternexplosionen sind wichtig für die Entfernungsbestimmung im kosmologischen Rahmen, kann man sie doch noch im entlegendsten Winkel des Universums ausmachen. Unter der plausiblen Annahme, dass alle Ia-Supernovae die gleiche Absolutelligkeit erreichen, kann, einmal geeicht, deren Entfernung ermittelt werden. Diese thermonuklear detonierenden Weißen Zwerge sind die besten „Standard-Kerzen“, die es gibt! Da der Blick in die Ferne zugleich einer in die Vergangenheit ist, lässt sich mittels Ia-Supernovae sogar die frühere Expansionsrate des Universums rekonstruieren, was uns unlängst die dunkle Energie beschert hat. (Die Expansion erfolgt anscheinend nicht gebremst, wie naiverweise erwartet, sondern unerwarteterweise beschleunigt.) Man darf natürlich die Voraussetzung nicht vergessen, die Annahme, urzeitliche Ia-Supernovae, solche, die vor Jahrmilliarden aufgeflammt

sind, seien genauso hell gewesen wie es gegenwärtige sind.

Halten wir fest: Der Abstand zur LMC legt die Größe des Universums fest. Dass man *einem* Stern seine Entfernung schwerlich ansieht, hat das Wolkenbeispiel verdeutlicht. Es kann sich ja bei dem Stern um eine leuchtschwache nahe Funzel handeln oder aber um einen leuchtstarken Riesen ganz weit draußen. Zwei Sternen hingegen, kreisen sie nach den Gesetzen der Himmelsmechanik umeinander, kann man ihre Entfernung ansehen – falls der Himmel mitspielt.

Das Prinzip ist einfach und einleuchtend, weshalb Entfernungsangaben, die auf sog. Bedeckungsveränderlichen beruhen, vertrauenswürdig sind.

Zwei Kugeln, leuchtende, umkreisen einander. Stellen Sie sich vor, die Bahnebene des Systems gehe zufälligerweise durch Sie hindurch. Weiterhin bewege sich die eine Kugel bezüglich der anderen auf einer Kreisbahn. Beide Sterne seien im übrigen so weit von Ihnen entfernt, dass sie selbst durchs Teleskop nicht als Einzelsterne mehr erkennbar sind. Was sehen Sie? *Einen* Lichtfleck, dessen Helligkeit periodisch einbricht. Die beiden Komponenten schatten einander ab – und das mit völliger Regelmäßigkeit. Sind beide Sterne gleich hell, verringert sich die Gesamthelligkeit während der totalen Bedeckung um die Hälfte, also um 0,75257... Größenklassen. Marschierst vom Betrachter aus gesehen die kühlere Doppelsternkomponente vor der heißeren vorüber, ist die Helligkeitseinbuße (wegen der höheren Flächenhelligkeit des heißeren Sterns) stärker als eine halbe Umlaufperiode später (oder zuvor), wenn die kühlere von der heißeren bedeckt wird. Die Gesamtdauer der Helligkeitsminderung, vom Anfang bis zum Ende, ist, wie man sich unschwer überlegen kann, gleich der Summe beider Sterndurchmesser dividiert durch die Umlaufgeschwindigkeit. Die Dauer der totalen Phase hingegen ist gegeben durch deren Differenz dividiert durch die Umlaufgeschwindigkeit. Die Umlaufgeschwindigkeit kann man über den Dopplereffekt aus der periodischen Verschiebung der Spektrallinien der beiden Sterne gegeneinander mit hoher Genauigkeit messen. Das hatte vor 1 1/4 Jh. Hermann Carl Vogel (1841–1907) vom Astrophysikalischen Institut Potsdam erstmals beim „Teufelsstern“ Algol (β Persei) vorgeführt gehabt. Eine genau vermessene Lichtkurve und eine einzige Spektralbeobachtung reichen im Prinzip aus, die Ausdehnung zweier Sterne in herkömmlichen Einheiten zu bestimmen – von Sternen, die gar nicht als Einzelsterne wahrnehmbar sind!

Haben Sie erst einmal die Radien in Metern, kennen Sie die Oberflächen in Quadratmetern. Multiplizieren Sie diese mit der Flächenhelligkeit, al-

so der Strahlungsleistung pro Quadratmeter, haben Sie die beiden Leuchtkräfte. Durch Vergleich mit dem, was pro Quadratmeter Teleskopfläche davon hier ankommt, können Sie sich sofort die Entfernung ausrechnen. Natürlich müssen Sie die Flächenhelligkeit jeder Doppelsternkomponente kennen. Und da wären wir auch schon bei der Schwachstelle des Verfahrens. Die Flächenhelligkeit ergibt sich aus der Oberflächentemperatur, genauer der *effektiven* Oberflächentemperatur. Da Ihr Arm nicht hinreicht, mit einem Thermometer die Temperatur zu messen, müssen sie mit der Sternfarbe als Temperaturersatz vorlieb nehmen. Je heißer eine Sternoberfläche ist, desto bläulicher ihr Licht, je kühler, desto röter. Die Umrechnung von gemessener Sternfarbe in Oberflächentemperatur wäre ein Leichtes, strahlten Sterne wie Plancksche Strahler. Ein Sternenspektrum wäre dann allein durch die Temperatur charakterisiert. Leider strahlen Sterne nur näherungsweise¹ Plancksch . . .

Es gibt weitere Komplikationen: Der Betrachter befindet sich natürlich nicht genau in der Bahnebene, die Sternscheibchen zeigen – man kennt das von der Sonne – einen Helligkeitsabfall zum Rande² hin, die beiden Sterne strahlen einander an, was sie gerade zu dem Zeitpunkt am hellsten erscheinen ließe, an dem sie sich bedecken.

Auf dem Weg zu uns lauern weitere Gefahren: Eine interstellare Staubwolke vermag nicht nur das Sternenlicht zu schwächen, sie verrötet es auch, was die Temperaturabschätzung durcheinander bringt, die ja auf der Eigenfarbe beruht.

Wir sprachen immer von Kugeln. Auch das ist ggf. zu hinterfragen. Rücken die beiden Sterne eines Paares einander zu sehr auf die Pelle, werden sie durch die Gezeiten deformiert. Eventuell kommt es sogar zum Überströmen von Material von einem Stern zum anderen.

Aber all diese Komplikationen sind letztlich beherrschbar und schmälern nicht den ungeheuren Vorteil des Verfahrens: eine (fast) hypothesenfreie Entfernungsbestimmung!

Im Falle der LMC stützen sich die Messungen auf Riesensternpärchen. Zwergsternpärchen sind in 160 000 Lj leider nicht hell genug. Man nimmt in Kauf,

¹Ein Stern ist nicht im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung. Er strahlt mehr ab als er von außen erhält. Nur im Falle des Strahlungsgleichgewichts wäre das Spektrum ein Planckspektrum. (Gott-sei-dank ist dem nicht so! Es gäbe dann keine Spektralanalyse.)

²Die Randverdunklung versinnbildlicht, wie problematisch der Temperaturbegriff im Falle des Nichtgleichgewichts ist. Die Photosphärentemperatur wird tiefenabhängig. Vom Rande erreicht uns Licht aus höheren und mithin kühleren Schichten der Photosphäre.

dass die Umlaufzeiten Monate bis Jahre betragen. Das Fotometrieren und Spektroskopieren erfordert außer Geduld den Einsatz großer Teleskope. Ruhm kann man auch nicht ernten. Es ist reine Fleißarbeit, uninteressant und ungeheuer wichtig. Durch sie werden extragalaktische Astronomie und beobachtende Kosmologie auf eine sichere Basis gestellt, eine, auf die man bauen kann.