

Der sanfte Druck des Lichtes



Links: John Henry Poynting (1852–1914).
Rechts: Howard Percy Robertson (1903–1961).

Licht, das auf einen Körper trifft, übt Druck auf ihn aus und einen Rückstoß, wenn er es wieder abstrahlt. Das merken wir im täglichen Leben nicht. Sind die Kraftwirkungen des Lichtes deshalb unbedeutend?

Licht verhält sich, als ob es Masse besitzt, die beim Auftreffen eine Kraft ausübt. Die Masse hängt mit der Energie des Lichtes so zusammen, wie es die Einsteinsche Formel $E = mc^2$ angibt. Der Druck des Lichtes folgt aus der klassischen Elektrizitätslehre, wie sie ein halbes Jahrhundert vor Einstein aufgestellt wurde. Was unser Auge als Licht empfindet, sind elektrische und magnetische Felder, die durch den Raum eilen. Treffen sie auf ein Hindernis, so erzeugen sie in diesem elektrische Ströme, auf die das magnetische Feld des Lichtes eine Kraft ausübt. Das ist der Strahlungs- oder Lichtdruck.

Bei Planeten wie der Erde ist das Verhältnis der nach außen drückenden Kraft des Sonnenlichtes zu der in Richtung Sonne ziehenden Schwerkraft klein, erst an der 13. Stelle hinter dem Komma erscheint eine von null verschiedene Ziffer.

Sterne unter Druck

In Sternen verhindert der Druck des eingeschlossenen Gases, dass es von seiner eigenen Schwerkraft zum Mittelpunkt gezogen wird, genauso wie der Gasdruck beim Kinderluftballon dem Zug der Gummihaut entgegenwirkt. Aber auch die eingeschlossene Strahlung übt einen Druck aus. In der Sonne ist er unbedeutend, weniger als ein Zehntel Prozent des Gasdruckes. Je massereicher ein Stern aber ist, umso wichtiger wird der Strahlungsdruck. Bei Sternen von etwa 50 Sonnenmassen sind beide gleich wichtig.

Der Druck der Strahlung setzt auch der Strahlungsleistung der Sterne eine Grenze. Hätte zum Beispiel die Sonne das 40000fache ihrer jetzigen Leuchtkraft, der Strahlungsdruck würde sie zerreißen.

Der schwache Druck des Lichtes der Sonne ist aber nicht für alle die Sonne umkreisenden Körper so harmlos wie für die Erde. Je kleiner ein Planet, umso wichtiger die Strahlung, die ihn nach außen drückt. Die Kraft, mit der die Sonne sie anzieht, hängt von der Masse der Ku-

gel ab. Deshalb sinkt sie mit schrumpfendem Durchmesser schneller als die Kraft der Sonnenstrahlen, die von der das Sonnenlicht auffangenden Fläche abhängt. Bei halbem Durchmesser ist die Querschnittsfläche ein Viertel, die Masse aber nur ein Achtel. Für Kügelchen mit Durchmessern von Zehntausendstel Millimetern halten der abstoßende Lichtdruck und die Schwerkraft der Sonne einander die Waage. Kleinere Körper werden nach außen geblasen.

Der Staub, der in die Sonne fällt

Licht drückt Körper, welche die Sonne umkreisen, nicht nur nach außen. Es kann sie auch bremsen. Nehmen wir an, ein kugelförmiger Körper bewege sich auf einer Kreisbahn um die Sonne. Er sei groß genug, um nicht vom Lichtdruck nach außen geblasen zu werden. Während er umläuft wird er von der Sonne erwärmt, gleichzeitig strahlt er aber die aufgenommene Sonnenenergie wieder ab. Betrachten wir den Vorgang von einem System aus, das nach den Fixsternen ausgerichtet ist und in dem die Sonne ruht.

In ihm bewegt sich der Körper quer zur Verbindungslinie Körper–Sonne (vgl. Abb. 1). In seiner Bewegungsrichtung ist die wieder abgegebene Strahlung wegen des Dopplereffektes kurzwelliger und damit energiereicher als in der entgegengesetzten Richtung. Der Rückstoß der in Bewegungsrichtung ausgesandten Strahlung ist stärker als der in die Gegenrichtung. Der Körper wird gebremst, die Fliehkraft seiner Bewegung wird schwächer, die unverändert starke Schwerkraft zieht ihn nach innen. Langsam nähert sich der Körper in einer Spiralbahn der Sonne. Das ist der nach seinen Entdeckern benannte Poynting-Robertson-Effekt, der umso wirksamer ist, je kleiner der die Sonne umlaufende Körper ist.

Im Raum zwischen den Planeten kreisen zahllose kleine Staubkörner um die Sonne. Als Zodiakallicht leuchten sie

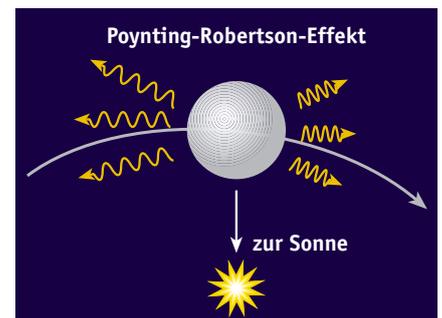
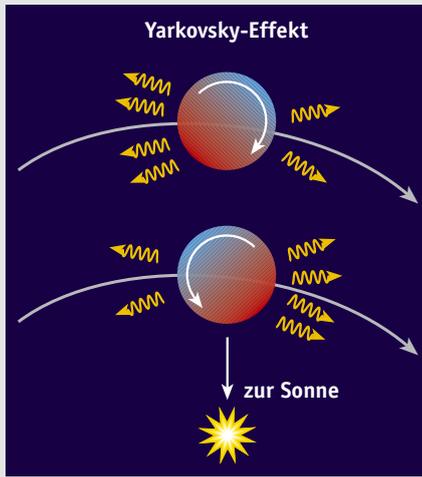


Abb. 1: Ein Staubkorn (grau) strahlt die von der Sonne aufgenommene Energie nach allen Richtungen ab. Die in Flugrichtung ausgesandte Energie ist größer (kurzwelliger) als die in die Gegenrichtung abgestrahlte. Der Rückstoß bremst die Umlaufbewegung. (In der Zeichnung ist der Vorgang in einem System dargestellt, das an der Umlaufbewegung nicht teilnimmt.)

Abb. 2: Die Staubscheibe um den Stern Beta Pictoris von der Seite gesehen. Der Stern selbst sitzt links unten und ist durch eine Blende verdeckt, damit sein Licht nicht das Bild überstrahlt. Trotz Strahlungsdruck und Poynting-Robertson-Effekt sind die Staubteilchen nicht verschwunden. Ein Zeichen, dass dort ständig neuer Staub erzeugt wird?





▲ Abb. 3: (Oben) Ein Asteroid rotiert im gleichen Drehsinn wie seine Umlaufbewegung. Seine Temperatur ist schematisch durch Farbe dargestellt (rot = warm, blau = kalt). Da seine Oberfläche bei Sonnenuntergang wärmer ist (im Bild seine linke Seite), strahlt er mehr in Flugrichtung. Der Rückstoß der Strahlung bremst ihn. Der Asteroid driftet nach innen. (Unten): Die Rotation erfolgt entgegen dem Umlaufssinn. Bei Sonnenuntergang ist es kälter. Die Abstrahlung entgegen der Flugrichtung und der Rückstoß in Flugrichtung sind stärker. Der Asteroid driftet nach außen. (Die Verkürzung der Wellenlänge in Bewegungsrichtung ist hier nicht angedeutet, da der Poynting-Robertson-Effekt bei größeren Körpern keine Rolle spielt.)

nach Sonnenuntergang im Westen und vor Sonnenaufgang im Osten jeweils als schwache Lichtkegel. Die von der Sonne beleuchteten Staubkörner haben Durchmesser von einigen Zehntel Millimetern und darunter. Aufgrund der Bremsung des Poynting-Robertson-Effektes kann ein Staubkorn von einem Tausendstel Millimeter Durchmesser aus dem Bereich des Jupiter in einer engen Spiralbahn innerhalb von Zehntausend Jahren in die Sonne driften. Das ist bei den Jahrmilliarden, die das Sonnensystem besteht, eine kurze Zeit. In jeder Sekunde müssen Tonnen von Staub in die Sonne fallen. Längst müssten die Teilchen des Zodiakallichtes verschwunden sein, würde nicht ständig neuer Staub von Kometen und von zusammenstoßenden Kleinplaneten nachgeliefert werden.

Wir beobachten in unserem Milchstraßensystem Sterne, die von Staubscheiben umgeben sind. Vermutlich handelt

es sich um Vorstadien von Planetensystemen. Der Stern Beta Pictoris in Abb. 2 mit seiner Staubscheibe ist etwa 12 bis 20 Millionen Jahre alt. In dieser Zeit müsste der Strahlungsdruck die kleinsten Staubkörner längst in den Raum geblasen haben, während die etwas größeren Körner wegen des Poynting-Robertson-Effekts in den Stern gefallen sein müssten. Da aber dort auch heute noch Staub leuchtet, muss er ständig nachgeliefert werden. Haben sich dort für uns nicht erkennbare Kleinplaneten gebildet, die sich nur durch den Staub verraten, der entsteht, wenn sie aneinander stoßen?

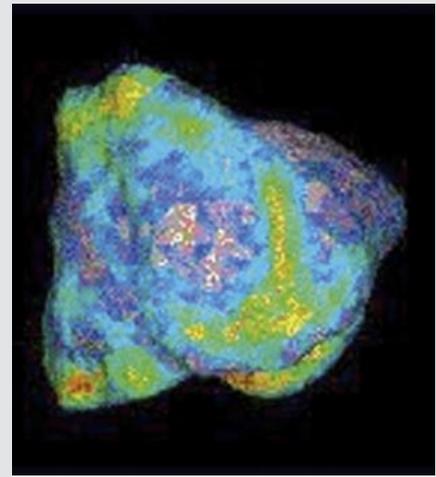
Der Effekt, den kaum einer kennt

Der Rückstoß des Lichtes beeinflusst aber nicht nur die Bewegung winziger Staubkörner, er kann auch größere Körper beeinflussen. Nehmen wir an, der Drehsinn eines Planeten, der um seine Achse rotiert, sei der gleiche wie der Sinn seiner Umlaufbewegung um die Sonne (Abb. 3, oben). Der Tag auf ihm sei kürzer als die Umlaufszeit. Tagsüber heizt sich seine Oberfläche im Sonnenlicht auf. Da die Temperaturverteilung der wechselnden Einstrahlung nur langsam folgt, ist es auf ihm, wie meist auch auf der Erde, bei Sonnenuntergang wärmer als bei Sonnenaufgang. Der Körper strahlt also mehr in die Gegenrichtung seiner Umlaufbewegung als in seine Flugrichtung, er wird durch den Rückstoß beschleunigt. Die Fliehkraft seiner Bahnbewegung steigt, er wird nach außen gedrängt.

Rotiert der Körper entgegen dem Drehsinn seines Umlaufs (vgl. Abb. 3, unten), so ist seine Oberfläche bei Sonnenaufgang wärmer als bei Sonnenuntergang, der Rückstoß der Abstrahlung bremst den Umlauf, der Körper nähert sich in einer Spiralbahn der Sonne.

Es ist nicht leicht, den Effekt quantitativ zu berechnen. Er hängt auch von der Wärmeleitfähigkeit des Körpers ab. Bei

▶ Abb. 4: Ein computergeneriertes Bild des Asteroiden Golevka. Das Bild wurde mit Radardaten, die vom Arecibo-Observatorium gewonnen wurden, erstellt. Der Name dieses Asteroiden erinnert an die multinationalen Radar-Beobachtungen im Juni 1995. Die 70-m-Goldstone Antenne sendete die Funkimpulse aus und die Radarechos wurden von der russischen 70-m-Antenne in Evpatoria und der japanischen 30-m-Antenne in Kashima empfangen. Daher der Name Goldstone-Evpatoria-Kashima. (Bild: NASA)



sehr guter Wärmeleitung gleichen sich Temperaturunterschiede in der Zeit zwischen Sonnenauf- und -untergang aus, der Effekt verschwindet. Auch die geometrische Form des Körpers beeinflusst den Temperaturengleich. Den Effekt hat zuerst der polnische Ingenieur Ivan Osipovitch Yarkovsky (1844–1902) vorhergesagt. Deshalb spricht man vom Yarkovsky-Effekt. Als ich kürzlich las, dass er selbst die Bahnen von Körpern von hundert Metern merklich verändern kann, wollte ich das nicht glauben. Doch dann rechnete ich nach. Ein kugelförmiger Asteroid von 100 Metern Durchmesser, der alle aufgefangene Sonnenstrahlung in die Richtung seiner Bahnbewegung (oder in seine Gegenrichtung) abstrahlt, kann seit dem Beginn unseres Planetensystems merklich nach innen (oder nach außen) getrieben worden sein.

Wahrscheinlich erklärt der Yarkovsky-Effekt das Rätsel des 500 Meter großen Asteroiden Golevka (Abb. 4). Die amerikanischen Astronomen Steve Chesley und Steve Ostro, beide vom *Jet Propulsion Laboratory* in Pasadena, haben seit 1991 mit dem Arecibo-Teleskop in Puerto Rico Radiopulse zu diesem Kleinplaneten geschickt. Die Echos zeigen, dass er während der letzten 14 Jahre der Sonne um 15 Kilometer näher gerückt ist.

Die meisten Astronomen haben noch nie etwas vom Yarkovsky-Effekt gehört und lassen wahrscheinlich auch keinen Studenten in der Prüfung durchfallen, wenn er davon nichts weiß. □



Rudolf Kippenhahn,
Astronom und Schriftsteller.