

Über die empirische Grundlage des Prinzips der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

Von Hans Thirring in Wien.

(Eingegangen am 10. Dezember 1924.)

An Hand des neueren Beobachtungsmaterials wird gezeigt, daß die Ritzsche Theorie der Lichtausbreitung unhaltbar ist und daß die astronomischen Beweise für die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Bewegungszustand der Lichtquelle zu Recht bestehen.

Herr M. La Rosa hat in einer in dieser Zeitschrift unlängst erschienenen Arbeit¹⁾ den interessanten Versuch gemacht, eine Theorie der veränderlichen Sterne auf Grund der Ritzschen Hypothese aufzustellen, wonach die Geschwindigkeit der Lichtquelle sich der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes überlagert („ballistische Hypothese“). Bekanntlich hatte De Sitter im Jahre 1913 einen Gegenbeweis gegen die Ritzsche Theorie aus einer überzeugend einfachen Betrachtung über die Bewegung der Doppelsterne hergeleitet²⁾ und einen empirischen Beweis für das Einsteinsche Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gegeben. La Rosa behauptet nun, daß die Ausführungen von De Sitter unvollständig seien und Fälle, für die die Endfolgerung richtig sei, mit Fällen zusammenwerfe, auf die die Folgerung selbst durchaus nicht passe. Er erklärt ferner, „daß die Beobachtungen an den bekannten Doppelsternen der eventuellen Richtigkeit der ballistischen Hypothese über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes keinen Eintrag tun und um so weniger die Wahrheit des zweiten Postulates der Einsteinschen Theorie bestätigen“.

Obwohl sich unterdessen De Sitter an einer anderen Stelle selbst schon zu dieser Frage geäußert hat³⁾, sei es gestattet, auch hier einige aufklärende Bemerkungen zu machen und das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit durch weitere Argumente zu erhärten.

Wenn die Bewegung der Lichtquelle sich der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen überlagert, so kann es sich bei einer ungleichförmigen Bewegung der Lichtquelle ereignen, daß später ausgesendete Wellen die

¹⁾ M. La Rosa, ZS. f. Phys. 21, 333, 1924.

²⁾ De Sitter, Phys. ZS. 14, 429, 1267, 1913.

³⁾ Bnl. of the Astron. Institutes of the Netherlands 2, 121, 163, 1924.

früher ausgesendeten einholen. Bei der Beobachtung eines hinreichend weit entfernten Doppelsternes könnte es also nach dieser Hypothese vorkommen, daß Lichtstrahlen, die in verschiedenen Bewegungsphasen des Sternes ausgesendet werden, gleichzeitig beim Beobachter anlangen, und dieser Umstand würde, wie La Rosa näher ausführt, eine Erklärung für die Helligkeitsschwankungen der Doppelsterne liefern können.

Wie nun De Sitter l. c. andeutet, würde dieses Nachlaufen der später ausgesendeten Wellen auch zu seiner Art Dopplereffekt höherer Ordnung Anlaß geben und diese Erscheinung wollen wir hier etwas näher ins Auge fassen.

Wir betrachten ein leuchtendes Atom, das eine beschleunigte Bewegung in der Richtung des Visionsradius ausführt. Der gewöhnliche „Geschwindigkeits“-Dopplereffekt, sagen wir in der Richtung nach Violett, kommt nun dadurch zustande, daß die später emittierten Wellen einen kürzeren Weg zurückzulegen haben. Der hier in Frage kommende „Beschleunigungs“-Dopplereffekt rührt hingegen daher, daß die später ausgesendeten Wellen nach der Ritzschen Theorie mit größerer Geschwindigkeit laufen würden.

Das Atom emittiere zwischen den Zeitmomenten t und $t + dt$ einen kohärenten Wellenzug. Die Geschwindigkeit des Atoms relativ zum Beobachter habe zur Zeit t den Wert u und zur Zeit $t + dt$ den Wert $u + du$. Bezeichnen wir den Abstand Lichtquelle—Beobachter mit Δ , so sind die Ankunftszeiten von Beginn und Ende des Wellenzuges, T und $T + dT$, gegeben durch:

$$T = t + \frac{\Delta}{c + u}; \quad T + dT = t + dt + \frac{\Delta}{c + u + du}.$$

Wir setzen Δ als sehr groß gegenüber $u dt$ voraus und erhalten dann aus beiden Gleichungen unter Vernachlässigung von Gliedern höherer Ordnung:

$$dT = dt - \frac{\Delta du}{c^2}.$$

De Sitter faßte nun lediglich jene periodischen Beschleunigungen ins Auge, die ein Doppelstern während seines Umlaufes als ganzer erfährt. Die daraus resultierenden Geschwindigkeitsänderungen du während der kurzen Kohärenzzeit dt sind aber sehr gering. Um viele Zehnerpotenzen größer sind die Geschwindigkeitsänderungen, die ein einzelnes Atom infolge der Zusammenstöße nach der kinetischen Gastheorie erleidet. Da der Stoßakt geringere Zeit in Anspruch nimmt als die Emission eines

kohärenten Wellenzuges nach der klassischen Auffassung der Lichterzeugung, kann innerhalb dt die Geschwindigkeit der ungeordneten Bewegung des Atoms ihr Vorzeichen wechseln. Es wäre also schon bei Zimmertemperatur für Wasserstoff $du > 10^5 \text{ cm sec}^{-1}$ und für Sterntemperaturen im Verhältnis der Wurzel der absoluten Temperatur höher. Es können also jedenfalls innerhalb der Kohärenzzeit Geschwindigkeitsänderungen von der Größenordnung 10^5 cm sec^{-1} und mehr vorkommen. Setzen wir für Δ die Entfernung Sonne—Erde, also $\Delta = 1,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}$ und $du = \pm 10^5 \text{ cm sec}^{-1}$, so kommt

$$dT = dt \mp \frac{1,5 \cdot 10^{13} \cdot 10^5}{9 \cdot 10^{20}} = dt \mp 1,66 \cdot 10^{-3} \text{ sec.}$$

Das Vorzeichen hängt davon ab, ob die Beschleunigung in der Visionsrichtung oder entgegengesetzt erfolgt. Die Kohärenzzeit dt selbst ist von der Größenordnung 10^{-8} sec .

Die ballistische Hypothese führt also in ihrer konsequenten Fassung zu folgendem Resultat: Wenn ein Atom auf der Sonne während des Emissionsaktes durch einen thermischen Zusammenstoß eine Änderung der Geschwindigkeitskomponente in der Visionsrichtung erfährt, dann wird der von ihm emittierte Wellenzug von etwa 3 m Gesamtlänge auf dem Wege zur Erde zunächst auf die Länge Null zusammenschrumpfen, wird sich dann gewissermaßen überschlagen und schließlich, mit dem Hinterende voraus, auf eine Gesamtlänge von 500 km auseinandergezogen, beim irdischen Beobachter anlangen, der die Strahlung als Radiowelle von einigen Zentimetern Wellenlänge empfängt.

Die ballistische Hypothese wird also in ihrer konsequenten Fassung allein schon durch die Tatsache widerlegt, daß die Sonnenstrahlung ein sichtbares Spektrum mit scharfen Spektrallinien besitzt.

Eine inkonsequente Fassung der ballistischen Hypothese könnte die hier gezogenen Folgerungen durch die Hilfsannahmen vermeiden, daß sich nicht die Bewegung des einzelnen Atoms der Lichtgeschwindigkeit überlagert, sondern nur die mittlere Bewegung der umgebenden Gasmassen, oder daß der Emissionsprozeß eines kohärenten Wellenzuges sich in unendlich kurzer Zeit vollzieht. Für diese letztere Hypothese könnte man sogar unter Heranziehung der Quantentheorie gewisse experimentelle Argumente anführen (Starkeffekt in inhomogenen Feldern); man darf aber nicht vergessen, daß diese Annahme dem Geiste einer Feldtheorie völlig zuwiderliefe und daß man mit ihr viel mehr unanschauliche und

dem „gesunden Menschenverstand“ unbequeme Vorstellungen in Kauf nehmen würde als mit der Relativitätstheorie.

Es zeigt sich aber weiter, daß man auch unter Zuhilfenahme der eben genannten Hypothesen das ballistische Prinzip nicht aufrechterhalten kann gegenüber einer Reihe von einwandfreien astronomischen Beobachtungen. Um dies zu erweisen, wollen wir die eingangs zitierten Behauptungen La Rosas einer genaueren Kritik unterziehen.

Es sei wieder t die Zeit der Aussendung eines von einem Doppelstern emittierten Lichtstrahles, T die Zeit seiner Ankunft auf der Erde, τ die Umlaufszeit des Doppelsternes, Δ sein Abstand von der Erde, v seine Bahngeschwindigkeit, ω die zugehörige Winkelgeschwindigkeit,

$$b = \frac{v}{c} \quad \text{und} \quad K = \frac{\Delta}{c\tau}.$$

Dann gilt nach La Rosa die Entwicklung

$$T = t + \tau(K + Kb \cos \omega t - Kb^2 \cos^2 \omega t + Kb^3 \cos^3 \omega t - \dots) \quad (1)$$

und bei Vernachlässigung von höheren Potenzen in v/c

$$T = t + K\tau + Kb\tau \cos \omega t. \quad (2)$$

La Rosa behauptet nun, daß bei allen jenen Doppelsternen, deren Bahnen genau genug bekannt sind, der Koeffizient Kb so klein sei, daß das Nichtauftreten des für die ballistische Hypothese charakteristischen dritten Gliedes in Gleichung (2) nichts gegen diese Hypothese beweisen kann. (Beispiel: Kb für Sirius: $5 \cdot 10^{-5}$, für α Cen: $1,6 \cdot 10^{-3}$, für α Aur: $4 \cdot 10^{-3}$.) Hingegen seien Doppelsterne, für die Kb einen entsprechend großen Wert annimmt, nicht genau genug bekannt, als daß man sie als Beweismaterial verwenden dürfte.

La Rosa ignoriert dabei das von De Sitter angegebene Beispiel β Aur, ein Doppelstern, für den Kb ungefähr gleich 2 wird: Seine Behauptung wird aber vollends schlagend widerlegt durch das gegenwärtig vorliegende Beobachtungsmaterial. Der soeben erschienene Third Catalogue of Spectroscopic Binary Stars, Lick Obs. Bull., No. 355 enthält ungefähr 50 Doppelsterne, für die $Kb > 1$ ist. Von diesen sind in der nachfolgenden Tabelle jene ausgewählt, für die Kb von der Größenordnung 10 und darüber ist¹⁾. Die hier angegebenen Sterne sind durchweg Bedeckungsveränderliche, deren Doppelsterncharakter durch

¹⁾ Dem Assistenten der Wiener Universitätssternwarte Herrn Dr. W. Bernheimer bin ich für seine wirksame Unterstützung bei der Auswahl des Beobachtungsmaterials zu bestem Dank verpflichtet.

übereinstimmende spektroskopische und photometrische Messungen einwandfrei erwiesen ist und deren Bahnelemente hinreichend genau bekannt sind.

Tabelle kurzperiodischer Doppelsterne.

| Stern | R Z Cas | W W Aur | S Ant | W U Ma | u Her |
|-----------------------------|----------|----------|------------|-----------|-----------|
| R. A. 1900 | 2h 39m 9 | 6h 25m 9 | 9h 27m 9 | 9h 36m 7 | 17h 13m 6 |
| Deklination | 69° 13' | 32° 32' | — 28° 11' | 56° 25' | 33° 12' |
| τ in Tagen | 1,19525 | 2,5248 | 0,64833872 | 0,3336392 | 2,05102 |
| v in Hauptstern . | 69,30 | 115,6 | 81 | 134 | 99,5 |
| km/sec Begleiter . . | — | 135,1 | 148 | 188 | 253 |
| Parallaxe | 0'' 029 | 0'' 012 | 0'' 07 | 0'' 010 | — 0'' 023 |
| Δ in Lichtjahren . . | 112,2 | 270 | 465 | 326 | > 300 |
| Kb Hauptstern . | 7,9 | 15 | 70 | 159 | > 18 |
| Begleiter . . | — | 17,5 | 128 | 224 | > 45 |

Aus den in der Tabelle angegebenen Werten für Kb und aus Fig. 3 der Arbeit von La Rosa ist zu ersehen, daß nach der ballistischen Hypothese ein irdischer Beobachter vom Hauptstern von $WU Ma$ in jedem Zeitmoment Lichtstrahlen empfangen würde, die in 600 verschiedenen Bewegungsphasen ausgesendet wurden; von seinem Begleiter sogar aus 900 Bewegungsphasen; bei $S Ant$ aus 300 bzw. 500 Bewegungsphasen, bei $WW Aur$ aus 60 bzw. 70 usw. Es dürften daher nach Ritz und La Rosa die Linien dieser Sterne — auch abgesehen von der durch den „Beschleunigungs“-Dopplereffekt verursachten Komplikation — überhaupt nur eine konstante Verbreiterung aufweisen, während sie in Wirklichkeit eine periodische Dopplerverschiebung zeigen, deren Periode mit jener der photometrischen Messungen völlig übereinstimmt. Man braucht also gar nicht erst die von La Rosa in Zweifel gesetzte Gültigkeit der Keplerschen Gesetze für Doppelsterne annehmen, um einzusehen, daß die ballistische Hypothese sich mit den Beobachtungstatsachen nicht in Einklang bringen läßt.

Die Zahl der Beispiele ließe sich noch bedeutend vermehren, wenn man jene kurzperiodischen Doppelsterne wie $U Oph$ hinzunehmen wollte, bei denen die aus Größenklasse und Spektraltyp geschätzte Minimalentfernung Δ , in Kb eingesetzt, Werte zwischen 10 und 100 liefert.

Zu diesen hier angeführten Argumenten tritt, wie De Sitter l. c. S. 122 hervorhebt, noch ein weiteres, unabhängiges hinzu. Es sei angenommen, daß die Geschwindigkeit der Lichtquelle sich nicht mit ihrem

vollen Betrage, sondern nur mit einem Bruchteile κ zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen addiere. Also

$$c' = c + \kappa u,$$

wobei κ ein echter Bruch ist. ($\kappa = 1$ würde der Ritz-La Rosaschen Theorie entsprechen.) Dann läßt sich zeigen¹⁾, daß für $\kappa \neq 0$ eine Phasenverschiebung zwischen dem spektroskopisch und dem photometrisch beobachteten Umlauf der Bedeckungsveränderlichen auftreten müßte. Und zwar ist der Winkel ε dieser Phasenverschiebung gegeben durch

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \kappa \frac{\omega \Delta}{c}.$$

Aus den Beobachtungen an Algol und β Aur ergibt sich nun nach Zurhellen: $\kappa < 0,000\,001$.

Man kann daher wohl sagen, daß die Tatsache der Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Bewegungszustand der Lichtquelle zu den am besten fundierten Ergebnissen der Physik überhaupt gehört.

¹⁾ Zurhellen, *Astron. Nachr.* 198, 1, 1914, Nr. 4927.
