Addiert sich die Geschwindigkeit des Lichtes zu derjenigen der Lichtquelle? Dafür sprechende Beweise aus den Phänomenen der „veränderlichen Sterne“.

Von **M. La Rosa** in Palermo.

Mit drei Abbildungen. (Eingegangen am 20. Oktober 1923).

Es ist bekannt, daß die Relativitätstheorie ein wesentliches Postulat zum Angelpunkt hat, das „die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“, d. h. ihre Unabhängigkeit von den Bewegungsverhältnissen der Lichtquelle und des Beobachters behauptet.

Zwei Jahre nach Erscheinen der ersten Abhandlung Einsteins hatte Ritz[1]) gezeigt, daß man denselben von Einstein verfolgten Zweck [Ausdehnung des Relativitätsprinzips von der Mechanik auf alle physikalischen Erscheinungen[2])] erreichen konnte, indem man auf dem festen Boden der klassischen Mechanik verblieb und nur annahm, daß sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes von einer bewegten Quelle mit der Geschwindigkeit der Lichtquelle, nach der Regel Galileis (ballistische Hypothese) addiert.

Comstock[3]) und Castelnuovo[4]) dachten an die Möglichkeit, einen entscheidenden Beweis für eine der zwei entgegengesetzten Hypothesen durch geeignete Beobachtungen an den „Doppelsternen“ zu erhalten.

Während aber Comstock selbst zu versuchen begann, seine (unrichtige) Voraussage durch nicht leichte Beobachtungen zu prüfen, gelang es De Sitter[5]) durch wenige Betrachtungen überzeugend darzutun, daß die Beobachtungen an den „Doppel“sternen[6]) und des

[1]) Ritz, Ann. chim. phys. **13**, 145, 1908.

[2]) Eine kritische Darstellung des physikalischen Ursprungs der „Relativität“ wird man in einem Aufsatz von mir finden, der demnächst in „Scientia“ erscheinen wird. (Oktober 1923).

[3]) Phys. Rev. **30**, 267, 1910.

[4]) Scientia **9**, 71, 1911.

[5]) Phys. ZS. **14**, 429, 1913.

[6]) Die erste Entdeckung von Sternenpaaren, die durch analoge Beziehungen wie Sonne und Erde untereinander verbunden sind, nämlich durch gegenseitige Anziehung und von einer Rotationsbewegung in bezug auf das gemeinsame Massenzentrum belebt, geschah durch Herschell, dem es gelang, die von dem einen der beiden Sterne um den anderen beschriebene elliptische Trajektorie zu beobachten und zu zeigen, daß diese elliptische Bewegung in Gemäßheit des zweiten Keplerschen Gesetzes über die Bewegung der Planeten folgt. Diese äußerst wichtige Entdeckung erlaubte die Ausdehnung des Newtonschen Gesetzes

Gesetzes ihrer Bewegung den klarsten und stärksten Beweis für die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Lichtquelle lieferten.

Wenn in der Tat, so sagt ungefähr De Sitter, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes sich mit der Rotationsgeschwindigkeit des Sternes addiert, so würden die in der ersten Quadratur (Stellung A von Fig. 1) ausgesandten Lichtstrahlen, die sich angenommen mit der Geschwindigkeit $c - v$[1]) in bezug auf den (in M stehenden) Beobachter fortpflanzen, sich schließlich überlagern und mit den in der anderen Quadratur ausgesandten, die sich mit der Geschwindigkeit $c + v$ fortpflanzen, verschmelzen, so daß es unmöglich wäre, die verschiedenen Stellungen des Sternes zu unterscheiden und zeitlich zu trennen, und das Gesetz der Bahnbewegung zu erkennen.

Nur ist diese Ausführung De Sitters unvollständig und wirft Fälle, für die die Endfolgerung richtig ist, mit Fällen (ohne Zweifel die Mehrheit) zusammen, auf die die Folgerung selbst durchaus nicht paßt.

Eine vollständigere Analyse dessen, was der Beobachter M bei der ballistischen Hypothese sehen müßte, erlaubt uns leicht, den Irrtum in den Folgerungen De Sitters zu erkennen, insofern, als sie uns zeigt, daß Beobachtungen wie diejenigen Herschells über das Bewegungsgesetz von Doppelsternen in weitem Maße und sicher vor jedem Übelstand, der auf Lichtüberlagerung beruht, möglich sind; doch das nicht allein, diese Analyse führt uns auch zu einer deutlichen und einfachen Erklärung — was von höchster Wichtigkeit ist — einer ausgedehnten Gruppe der interessantesten und dunkelsten astronomischen Erscheinungen, indem sie uns lehrt, daß die ballistische Hypothese sich bei der Erklärung der astronomischen Erscheinungen ungleich fruchtbarer an Resultaten erweist und den natürlichen Erscheinungen näher kommt als die Einsteinsche.

Nehmen wir also an, daß sich die Geschwindigkeit des Lichtes zu der es aussendenden in Bewegung befindlichen Lichtquelle addiert.

Stellen wir uns einen Stern S vor, der sich um ein Zentrum nach einer der Einfachheit halber als kreisförmig angenommenen

---

außerhalb unseres Sonnensystems mit dem bekannten Ertrag jener Kenntnisse, die wir über die Sternmassen besitzen.

[1]) Es wird hier stillschweigend angenommen, daß die Bahnebene etwas gegen den Visionsradius geneigt und v die Projektion der tangentialen Geschwindigkeit auf die durch die Visionslinie selbst und die in der Bahnebene liegende Normale zu ihr bestimmte Ebene ist.

Bahn $ADBC$ in der Pfeilrichtung mit der Geschwindigkeit v dreht, und einen Beobachter M, der in der Ebene des Kreises längs der Richtung DC in einem Abstand d von dem Kreiszentrum O steht (d äußerst groß in bezug auf den Kreishalbmesser r). Wenn wir mit t die Abgangszeit der Lichtstrahlen von dem Stern bezeichnen und mit T die Ankunftszeit beim Beobachter und wir als gemeinsamen Ausgangspunkt den Augenblick eines Durchganges des Sternes durch die Stellung A wählen, so finden wir leicht, daß der Beobachter die von einer beliebigen Stellung S ausgesandten Strahlen im Augenblick T empfangen wird, der gegeben wird durch

$$T = t + \frac{d}{c - v\cos\omega t} = t + \frac{a}{1 - b\cos\omega t}, \tag{1}$$

wo $\omega = \frac{2\pi}{\tau_0}$ die Winkelgeschwindigkeit des Sternes, τ_0 die Zeit eines Umlaufes, $a = d/c$, $b = v/c$ ist.

Die periodische Größe, die in T enthalten ist, gewinnt von Fall zu Fall eine sehr verschiedene Bedeutung, je nach den relativen Werten der drei Größen a, b, τ_0, die im Konkreten sehr weite Grenzen der Veränderlichkeit aufweisen.

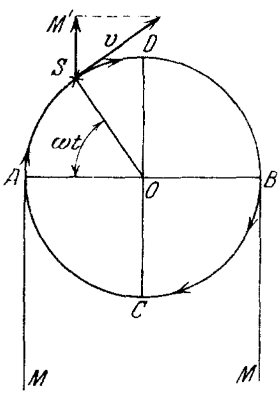

Fig. 1.

Man kennt in der Tat Beispiele von Doppelsternen, bei denen die Umlaufszeit τ_0 gut 400 Jahre beträgt (l Carinae, γ Leonis), und man kennt viele, bei denen dieselbe Zeit nur einen Tag und sogar weniger beträgt.

Infolgedessen müssen sich auch die Tangentialgeschwindigkeiten v (und damit die Werte von b) als sehr verschieden erweisen. Man kennt Zahlen für sie, die von einem Minimum von 6 bis 8 km/sec (dem Minimum, das durch die spektroskopische Beobachtung erreicht werden kann) bis zu einem nicht genau bestimmten Maximum gehen, das 300 km/sec erreichen zu können scheint (β Aurigae 240 km/sec).

Weite Grenzen der Veränderlichkeit zeigen sich uns auch in den Werten von a, da sich neben Doppelsternen wie α Centauri — der, wie man weiß, den kleinsten Abstand von uns hat $\left(\frac{d}{c} = \sim 4{,}5 \text{ Jahre}\right)$ und Sirius $\left(\frac{d}{c} = 9 \text{ Jahre}\right)$, τ Vulpis und δ' Lyrae finden, die fast an der Grenze der Sichtbarkeit mit bloßem Auge stehen (5,5 Größe), bei denen das Verhältnis d/c nahe an 130 Jahre herankommt, um bei den Sternen, die bisher sicher als Doppelsterne bekannt sind, stehenzubleiben.

Wenn wir also eine klare Kenntnis von der Bedeutung erlangen wollen, die die in T enthaltene periodische Größe in den verschiedenen Fällen gewinnen kann, so müssen wir uns auf einen konkreten Boden begeben, indem wir gewisse besondere Fälle erörtern, um uns die verschiedenen Typen von Phänomenen zu konstruieren, die uns bei so bunter Vielfältigkeit der Bedingungen entgegentreten können.

Indem wir somit $a = K\tau_0$ setzen, schreiben wir die Gleichung (1) folgendermaßen:

$$T = t + \tau_0 (K + Kb \cos \omega t - Kb^2 \cos^2 \omega t + Kb^3 \cos^3 \omega t (- \cdots) \quad (1')$$

und bemerken, daß, da b in Wirklichkeit immer sehr klein ist (kaum 10^{-3} erreicht), wenn K nicht sehr groß ist, die Gleichung (1') für die konkreten Zwecke, die wir im Auge haben, auf die drei ersten Glieder allein beschränkt werden und man setzen kann:

$$T = t + K\tau_0 + Kb\,\tau_0 \cos \omega t. \quad (2)$$

Ja allemal, wo das Produkt Kb z. B. kleiner als 10^{-2} ist, erweist sich der Einfluß selbst des dritten Gliedes, des periodischen, als sehr schwach; denn die gefürchtete Überlagerung von aus verschiedenen Stellungen ausgesandten Lichtstrahlen (d. h. die Gleichheit des T unter in verschiedenen Augenblicken t abgegangenen Strahlen) kann bei um kleine Bogengrade entfernten Stellungen (kleiner z. B. als ein Hundertstel der Länge der Trajektorie) stattfinden. Diese Überlagerung kann einem Beobachter keine praktisch wahrnehmbaren Störungen verursachen, der von Zeit zu Zeit die sukzessiven Stellungen des Gestirns aufzeichnet, und dieser wird demnach die Projektion der Bahn auf die Himmelskugel bestimmen und ohne Hindernisse erkennen können, ob das zweite Keplersche Gesetz auf die beobachtete Bewegung anwendbar ist oder nicht [1]).

[1]) Für den, der wissen möchte, ob die oben vorausgesetzten Verhältnisse auf diejenigen Sterne anwendbar sind oder nicht, für die die direkte Nachprüfung des Keplerschen Gesetzes erfolgt ist, werde ich einige Beispiele erwähnen. Der am besten bekannte Doppelstern, an dem die besten Beobachtungen über die Gültigkeit des Keplerschen Gesetzes gemacht worden sind, ist der uns am meisten benachbarte Stern α Centauri. Bei ihm haben wir: $a = 1640$ Tage; $\tau_0 = 81{,}19$ Tage; $v = 24$ km/sec, d. h. $b = 8 \cdot 10^{-5}$ und demnach $Kb = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$. Ein anderer gut studierter Doppelstern, weil sehr nahe, ist Sirius, bei dem wir haben: $a = 9$ Jahre, $\tau_0 = 48{,}84$ Jahre, d. h. $K = 0{,}18$; $v = 8$ km/sec und demnach $b = 2{,}7 \cdot 10^{-5}$; daher $Kb = 5 \cdot 10^{-5}$. Bei α Aurigae $a = 4000$ Tage in runder Zahl; $\tau_0 = 104$, K in runder Zahl 40; $v = 30$ km/sec; $b = 10^{-4}$, $Kb = 4 \cdot 10^{-3}$ usw.

Die Wirkungen der Überlagerung werden beträchtlich in den Fällen, in denen das Produkt Kb der Eins nahekommt.

Auch zur Untersuchung dieser Fälle können wir uns praktisch der einfacheren Formel (2) bedienen, denn, da Kb nahezu gleich 1 ist, wird die Größe des dritten Gliedes von derselben Ordnung wie τ_0 sein (d. h., daß Überlagerung von Strahlen eintritt, die in mit der Periode vergleichbaren Zeitabständen und deshalb von untereinander

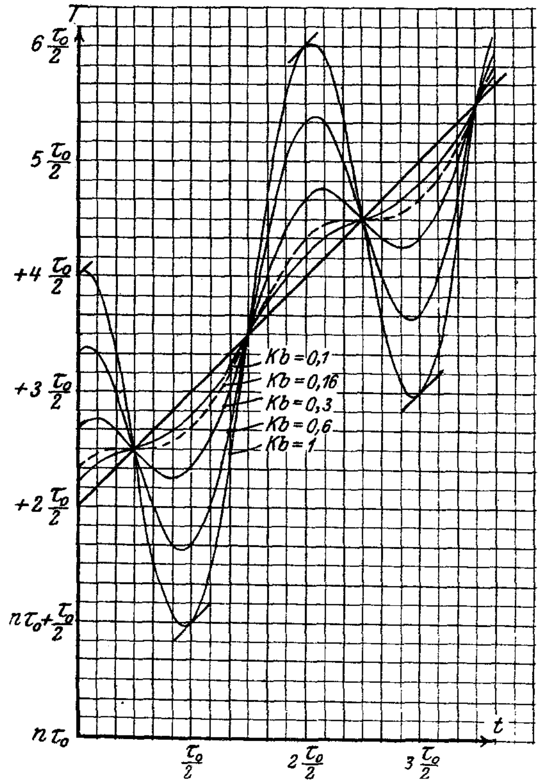

Fig. 2.

sehr weit entfernten Punkten der Trajektorie ausgesandt werden), während die des vierten Gliedes[1]) wegen der Kleinheit von b von

[1]) Beispielsweise können wir $v = 60$ km/sec annehmen, was dem Durchschnittswert der an den bisher bekannten Doppelsternen gemessenen v sehr nahe kommt; d. h. $b = 2 \,.\, 10^{-4}$. Kommt das Produkt Kb der 1 nahe, so besagt dies, daß K von der Ordnung $0{,}5 \,.\, 10^{-4}$ ist, und die Formel (1′) gibt bei Annahme von $K = 0{,}5 \,.\, 10^{-4}$:

$$T = t + \tau_0 \; (0{,}5 \,.\, 10^4 + \cos \omega t - 2 \,.\, 10^{-4} \cos^2 \omega t + \ldots),$$

einer viel kleineren Größenordnung sein wird (d. h., daß diese sekundäre Wirkung der Überlagerung auf Strahlen, die von ganz wenig entfernten Stellungen längs der Trajektorie ausgesandt werden, beschränkt und deshalb wenig beachtenswert ist).

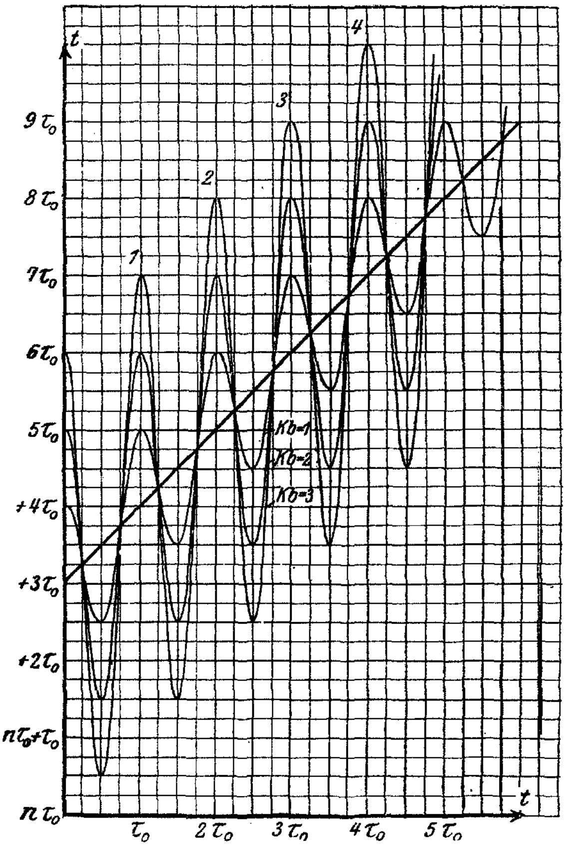

Fig. 3.

Um unsere Betrachtungen zu erleichtern, werden wir uns auf die Kurven von Fig. 2 und 3 beziehen, die graphische Darstellungen des Gesetzes (2) sind, konstruiert[1]) für gewisse interessantere konkrete

d. h. schon das vierte Glied würde Überlagerung von Strahlen mit sich bringen, die innerhalb eines Zeitabstandes $2 \cdot 10^{-4}\ \tau_0$ nämlich aus $^1/_{5000}$ der Länge der Trajektorie entfernten Stellungen ausgesandt werden.

[1]) Aus naheliegenden Gründen haben wir in den Figuren die Achse der t parallel zu sich selbst um eine zur Zeichnung passende Größe nach oben verlagert angenommen.

Fälle, und zwar für folgende Werte des Produktes Kb: 0,1; 0,16; 0,30; 0,60 und 1; 2; 3.

Betrachten wir nun den Gang einiger dieser Kurven aus der Nähe und beziehen wir uns z. B. auf die durch $Kb = 1$ definierte.

Indem wir die Dinge in dem Augenblick zu betrachten beginnen, wo der Beobachter das von dem Stern zur Zeit $t = 0$ abgegangene Licht empfängt, werden wir folgende wichtige Umstände ersehen:

a) Die Helligkeit des Sternes wird als einem Maximum zustrebend erscheinen (was wir gleich besser erklären werden);

b) in diesem Moment hat der Beobachter schon alles Licht empfangen, das der Stern in den während wenig mehr als dreiviertel des ersten Umlaufes eingenommenen Stellungen ausgesandt hatte.

Von diesem Augenblick an — oder genauer von dem Maximum an — empfängt der Beobachter gleichzeitig in jedem Augenblick das von dem Stern aus drei verschiedenen Stellungen ausgesandte Licht: die erste, dem Ende des ersten Umlaufes zugehörig und längs eines Bogens liegend, der jenseits von dreiviertel der Trajektorie (nach der ersten Konjunktion) beginnt; die andere enthalten zwischen der zweiten Opposition und der vierten Quadratur, also dem zweiten Viertel des zweiten Umlaufes angehörig; die dritte enthalten zwischen dieser Quadratur und der zweiten Konjunktion (dem dritten Viertel des zweiten Umlaufes angehörig).

1. Es ist zu bemerken, daß die drei Abschnitte der Kurve, die zwischen den durch die Punkte $T_0 = (2n + 4)\tau_0/2$, $T_1 = (2n + 5)\tau_0/2$ geführten Parallelen zur Achse t enthalten sind, stark gegen diese Achse geneigt sind, was uns besagt, daß, während die Abgangszeiten der Lichtstrahlen innerhalb eines sehr engen Intervalls variieren, die Ankunftszeiten sich in einem viel größeren Intervall ausbreiten.

Infolgedessen erweist sich das Licht, das der Beobachter von dem beweglichen Gestirn für jede Zeiteinheit in diesem Intervall empfängt, kleiner als das, das er empfangen hätte, wenn das Gestirn unbeweglich geblieben wäre.

Sobald T ungefähr den Wert T_1 erreicht, kommt zu dem Licht der unmittelbar daraus folgenden Stellungen das von dem Stern im Moment der sechsten Quadratur, in welchem T durch ein Maximum geht, ausgesandte Licht hinzu, so daß in dem sehr kurzen Intervall $\varDelta T$ der Beobachter überdies das von dem beweglichen Gestirn in einer etwas größeren Zeit als $\varDelta T$ ausgesandte Licht empfangen wird; d. h. die scheinbare Helligkeit des Gestirns muß rasch zu einem Maximum ansteigen, bei dem das angekommene Licht mehrere Male stärker ist, als es bei stillstehendem gewesen wäre.

Von diesem Moment an muß die Helligkeit abnehmen, ohne zu jenen zuerst betrachteten sehr kleinen Werten zurückzukehren, weil der Beobachter Licht aus fünf verschiedenen Stellungen des Sternes empfangen wird, und weil diese Stellungen Bogen unserer Kurve entsprechen, in denen $\Delta T/\Delta t$ stets geringeren Wert als längs der vorausgehenden Abschnitte annimmt. Kurz nach dem Augenblick $T_2 = (2n + 5{,}5)\tau_0/2$, in dem die zweite Konjunktion stattfindet, wird die Helligkeit durch ein zweites Minimum von etwas größerem Wert als das erste hindurchgehen, um gleich wieder zu wachsen und ein zweites Maximum gleich nach der Zeit $T_3 = (2n + 6)\tau_0/2$ zu erreichen [1]).

Schließlich wird die Helligkeit rasch zu dem anfangs gesehenen geringsten Wert zurückkehren, um sogleich wieder denselben periodischen Zyklus zu beginnen.

Kurz zusammengefaßt: Wenn ein Stern um ein Zentrum rotiert und der von uns angenommenen Bedingung ($Kb = 1$) genügt, so müßte er Helligkeitswechsel aufweisen, die sich uns als eine periodische Veränderung seiner scheinbaren Größe zu erkennen geben würden, d. h. der Stern muß uns „veränderlich“ (mit doppelter Periodizität) erscheinen [2]).

---

[1]) Um uns einen Begriff von dem mittleren Wert der scheinbaren Helligkeit zu machen, die der Stern in diesen verschiedenen Phasen zeigen wird, können wir an der Figur die mittleren Werte abschätzen, die ihnen entsprechend das Verhältnis $\Delta T/\Delta t$ annimmt.

In bezug auf ersteren finden wir, daß ungefähr in einer Zeitdauer $\Delta T = \tau_0/4$ der Beobachter das Licht empfängt, das der Stern längs der drei Bogen MN, PQ, RS aussendet, die in einer Zeit (Summe der Projektionen der drei Bogen auf die Achse t) von etwa $\tau_0/10$ durchlaufen werden. Im Durchschnitt wird also die scheinbare Helligkeit des Sternes in diesem Intervall um die Hälfte geringer sein als die, die er gezeigt hätte, wenn er unbeweglich wäre. In bezug auf das Maximum finden wir, daß in einer Zeitdauer $\Delta T = {}^2/_{80}\,\tau_0$ der Beobachter in einer mehr als viermal größeren Zeit ausgesandtes Licht empfängt, und somit wird das Gestirn einen viermal größeren Glanz zeigen, als es unbeweglich gezeigt hätte. Im ganzen genommen variiert die Helligkeit vom ersten Minimum zum ersten Maximum ungefähr von 1 auf 8; und daraus ergibt sich ein Sprung des Sternes um zwei Klassen in der Skale der scheinbaren Größen (weil man bekanntlich rechnet, daß das Verhältnis zwischen den Helligkeiten zweier aufeinander folgenden Klassen angehöriger Sterne etwa 2,5 ist). Beim zweiten Minimum erweist sich die scheinbare Helligkeit im Durchschnitt gleich derjenigen, die dem unbeweglichen Gestirn entsprechen würde, die wir aus der Figur $\Delta T = {}^{28}/_{80}\,\tau_0$ und $\Delta t = {}^{20}/_{80}\,\tau_0$ entnehmen.

[2]) Weiter unten werden wir sehen, wie diese Schlußfolgerung zu ergänzen ist, wenn angenommen wird, daß das feste Zentrum ein anderer Stern ist, der mit dem ersten ein um das gemeinsame Massenzentrum rotierendes System

Wesentlich analoge, obwohl in den Einzelheiten abweichende Resultate bekommen wir, wenn wir die anderen konstruierten Kurven analysieren.

Bei $Kb = {}^1/_2$ kann der Einfluß des periodischen Gliedes auf die Werte von T als am besten entwickelt bezeichnet werden.

Beginnt man die Analyse bei dem gewöhnlichen Maximum, das sofort auf den Moment folgt, in dem der Beobachter das von dem Stern im Augenblick $t = 0$ [d. h. $T_0 = K\tau_0(1+b)$] ausgesandte Licht empfängt, so wird die Kurve während eines ganzen Intervalls $\Delta T = \frac{\tau_0}{2}$ nur an einer Stelle von den Parallelen zur Achse t durchschnitten und zeigt in dieser Gegend ein sehr großes und nahezu konstantes Verhältnis $\Delta T/\Delta t$.

Kurz nach dem Augenblick $T_0 + \tau_0/2$ erreicht die Helligkeit rasch ein Maximum, da zu dem Licht aus den (auf die bereits betrachteten) folgenden Stellungen des ersten Umlaufs, bei denen das Verhältnis $\Delta T/\Delta t$ kleiner wird, plötzlich das in dem Moment der zweiten Quadratur des zweiten Umlaufs ausgesandte Licht hinzukommt, bei dem $\Delta T/\Delta t$ sehr klein ist; darauf nimmt die Helligkeit bis zu einem neuen Minimum, das etwas höher ist als das erste, ab und geht schließlich wieder durch ein neues dem ersten gleiches Maximum.

Im ganzen genommen wird der Beobachter den Stern während einer Hälfte der Periode als von geringster Intensität (größte Größenordnung) sehen, in der darauffolgenden Hälfte wird er ihn durch zwei aufeinanderfolgende, durch ein — äquidistantes — Minimum, das etwas höher liegt als das anfängliche, getrennte Maxima hindurchgehen sehen [1]).

Bei $Kb = 0{,}16$ bekommen wir eine höchst interessante Kurve, die aus langen, fast geradlinigen Abschnitten resultiert und abwechselnd sehr wenig und zu viel gegen die Achse t geneigt ist.

---

bildet. Vorläufig begnügen wir uns damit zu behaupten, daß, wenn bei einem der zwei Sterne unsere Bedingung zutrifft, der Anschein der Veränderlichkeit, obwohl in abgeschwächtem Maße, fortbestehen muß.

[1]) Will man — an der Figur selbst — eine Schätzung der relativen Intensität der Maxima und der beiden Minima vornehmen, so findet man, daß in der Nähe der Maxima die mittlere Helligkeit fünf- bis sechsmal größer werden muß als die Helligkeit x — wo x die entsprechende Intensität des unbeweglichen Sternes ist —; beim sekundären Minimum muß sie auf ungefähr 4 oder $5\,x$, beim Hauptminimum auf ${}^1/_5\,x$ herabgehen. Der Gesamtumfang des Lichtwechsels ist also größer als 25 : 1, was einen scheinbaren Größensprung von gut 3,5 Klassen bedeutet.

Unter diesen Bedingungen werden wir also starke Lichtschwankungen bekommen, bestehend aus sehr intensiven und kurz dauernden Maxima, auf die mit raschem Wechsel langdauernde Minima mit fast gleichmäßiger Helligkeit folgen [1]).

Solange $Kb > 1/2\pi$, zeigen sich uns noch die Überlagerungserscheinungen des von dem Sterne an etwas voneinander entfernten Stellen der Trajektorie ausgesandten Lichtes (eine Parallele zur Achse t kann dreimal die Kurve schneiden) und die vorhergesagte doppelte Periodizität mit zwei nahezu gleichen Maxima und zwei stark abweichenden Minima.

In dem Maße, wie das Produkt weiter abnimmt, wird die Änderungsamplitude von T immer kleiner, und die Kurve wird nur an einer Stelle von den Parallelen zur Achse t geschnitten; nichtsdestoweniger werden wir noch Schwankungen in der beobachteten Helligkeit bekommen, weil das Verhältnis $\Delta T/\Delta t$ stets merkliche Änderungen erfährt. Jedoch angesichts der Schwierigkeit und der geringen Genauigkeit der photometrischen Messungen überhaupt und derjenigen, die in der Astrophysik ausgeführt werden können und ausgeführt worden sind, begreift man, daß recht bald diese leichten Schwankungen unwahrnehmbar werden. Praktisch kann man vielleicht annehmen, daß das bei $Kb < {}^1/_{10}$ geschieht.

Ein immer geringeres Interesse zeigen die Kurven, die Werten von Kb entsprechen, die immer größer als Eins sind. Die Lichtüberlagerung erfolgt bei einer immer größeren Anzahl von Stellungen, die immer verschiedeneren Perioden und Phasen angehören, und alles, was unser Beobachter verzeichnen können wird, werden kleine Schwankungen der Helligkeit in den Augenblicken sein, in denen die Werte von T die Maxima und Minima der betreffenden Kurve berühren.

Man begreift somit leicht, daß recht bald, d. h. bei Werten von Kb, die nicht viel höher als 10 liegen, jede Schwankung in der Helligkeit unwahrnehmbar werden wird; der Stern wird unfähig werden, uns durch Veränderungen der scheinbaren Größe seine periodische Bewegung, d. h. seine Eigenschaft als „Satellit“ eines „Doppel“-sternes oder eines komplexeren Systems zu offenbaren [2]).

---

[1]) Nach einer an der Figur vorgenommenen Schätzung geht das Intensitätsverhältnis zwischen den einen und den anderen wenigstens von einem Maximum von mehreren $100\,x$ zu einem Minimum von ${}^1/_2\,x$, so daß sich die Amplitude der totalen Helligkeitsschwankung gleichwertig mit einem Sprung von wenigstens sieben Größenklassen erweist.

[2]) Es verlohnt sich nicht, den Fall zu erörtern, in dem das Produkt Kb so groß ist, daß Kb^2 ungefähr gleich Eins wird. In diesem Falle würde die Amplitude der auf dem vierten Gliede beruhenden Variation in die Ordnung τ_0

Die bisher angestellten Betrachtungen erlauben uns, eine bestimmte Antwort auf unsere erste Frage zu geben.

Ist die Hypothese der Addition der Geschwindigkeit des Lichtes und derjenigen der Lichtquelle mit den an den Doppelsternen angestellten Untersuchungen vereinbar oder nicht?

Bei den teleskopisch trennbaren Doppelsternen (die sodann die einzigen sind, auf die die Anwendbarkeit des zweiten Keplerschen Gesetzes wirklich anerkannt und kontrolliert worden ist) wird der zu jenem Zweck von unserer Analyse geforderten Bedingung $Kb = 10^{-1}$ in weitem Maße genügt. Ihre Beobachtung beweist nichts gegen unsere Hypothese.

Bei den anderen „Doppelsternen", den spektroskopisch trennbaren, ist die Anwendung des zweiten Keplerschen Gesetzes nicht durch die Messungen erfordert worden, sondern sie geschah aus vernunftmäßiger Verallgemeinerung.

Die spektroskopische Beobachtung lieferte nur die Kenntnis der Umlaufszeit und die der Geschwindigkeit der vermuteten Komponenten; auf Grund dieser Daten und an der Hand der Keplerschen Gesetze (die daher als anwendbar vorausgesetzt wurden) wurden die übrigen Elemente der Bewegung (die Bahndimensionen) und die Massen der Komponenten abgeleitet.

Perioden und Geschwindigkeit werden mit Hilfe der periodischen Verschiebungen der Spektrallinien abgeleitet, so daß nur noch folgender Punkt zu untersuchen ist: Werden die Messungen dieser Verschiebungen durch die Lichtüberlagerungen, die unsere Hypothese voraussieht, gestört oder nicht?[1]).

Wir haben bereits zu Beginn dieser Abhandlung gesehen, daß, wenn das Produkt Kb klein ist, keine Lichtüberlagerung eintreten wird, außer aus wenig voneinander entfernten Punkten der Trajektorie,

kommen, d. h. sie ließe Lichtüberlagerung aus etwas entfernten von dem Stern auf der Trajektorie eingenommenen Stellungen voraussehen. Da aber das dritte Glied eine etwa 1000 mal größere Amplitude hat, so resultiert als Breite des Streifens, innerhalb dessen die Kurve enthalten ist, etwa $2000\,\tau_0$, d. h. eine Parallele zur Achse t wird ungefähr 4000 mal die Kurve $T = f(t)$ treffen, und somit wird aus all diesen mannigfaltigen differenten Stellungen in jedem Augenblick eine praktisch konstante Lichtsumme aufgenommen werden.

[1]) Hier setzen wir stillschweigend eine schwerwiegende Frage als gelöst voraus, die nämlich, wie der Dopplereffekt im Falle der ballistischen Hypothese zu betrachten ist. Indem ich mir vorbehalte, diese Frage besonders zu behandeln, beschränke ich mich hier auf die Bemerkung, daß die Schwierigkeiten dieser wichtigen Erscheinung sich nur auf Grund der Betrachtung der Wellenlängen erheben. Diese Vorstellung ist jedoch nicht wesentlich zur Feststellung der periodischen Natur des Lichtphänomens, sondern hängt nur von dem Bilde des Lichtäthers ab, das mit der ballistischen Hypothese unvereinbar ist.

das bedeutet, daß zu dem Spektroskop alsdann gleichzeitig Strahlen mit wenig abweichenden Geschwindigkeiten gelangen werden: wir werden also, wenn überhaupt in wahrnehmbarem Maße, eine geringe periodisch mit der Rotationsperiode des Sternes variable Verbreiterung der Linien bekommen, die sich der auf Grund der gewöhnlichen Hypothesen vorausgesehenen periodischen Verschiebung überlagert. Es besteht also keine Schwierigkeit für die Messung dieser Verschiebung.

Dieselbe Schlußfolgerung gilt auch dann, wenn sich das Produkt Kb der Eins nähert. Und zwar wird, bis die Kurve $T = f(t)$ nur an einer Stelle von den Parallelen zur Abszissenachse geschnitten wird, was beim Wachsen von Kb erfolgt, das Resultat eine Vergrößerung der Verbreiterung der Linie sein und die Evidenz der periodischen Breitenänderung.

Sobald Kb derartige Werte erreicht, daß ($Kb > 1/2\pi$) die Kurve dreimal von einigen Parallelen durchschnitten werden kann, werden wir aufgespaltene Linien bekommen können, wenn den Stellungen, aus denen das Licht zur gleichen Zeit ankommt, etwas abweichende Geschwindigkeiten entsprechen, oder einfach verbreiterte mit einem Charakter vollkommen regelmäßiger Periodizität, so daß die Bestimmung der Periode ermöglicht wird und durch Messung des Abstandes der Komponenten oder der Breite der Linie auch die Bestimmung der augenblicklichen dem umlaufenden Körper in den verschiedenen Stellungen zukommenden Geschwindigkeit, d. h. jener Elemente, die zur Ableitung des Bahnradius und der Masse des Körpers auf Grund der (bereits als anwendbar vorausgesetzten) Keplerschen Gesetze notwendig sind.

Ja die Dissymmetrie unserer Kurven in bezug auf die Parallelen zur Ordinatenachse läßt uns leicht voraussehen, daß die Komponenten einer Linie alsdann nicht in gleicher Weise in bezug auf die normale Lage verschoben erscheinen werden (zwei verschmelzen in der Nachbarschaft der Maxima und Minima der Kurve $T = f(t)$ zu einer einzigen Linie), so daß wir dahin geführt sein werden, der Geschwindigkeit der Lichtquelle zwei verschiedene Werte beizumessen; Werte, die, bei der gegenwärtig üblichen Weise das Phänomen zu erklären, zwei verschiedenen Körpern zugeschrieben werden, den zwei Komponenten des Doppelsternes, die deshalb untereinander vergleichbare Helligkeit, Größe und Geschwindigkeit haben müßten; während bei der von uns vorgeschlagenen Erklärungsweise die zwei Werte verschiedenen Momenten desselben und einzigen (um ein großes und wenig bewegliches Zentrum) kreisenden Körpers angehören würden.

Beim Wachsen des Produktes Kb wächst die Zahl der Treffpunkte unserer Kurve mit den Parallelen zur Achse t; solange diese Punktzahl klein ist (3,5), werden wir im allgemeinen verbreiterte Linien bekommen, die in irgend einem Moment sich zerlegen und zwei oder mehr distinkte Komponenten aufweisen können, wie es in gewissen Fällen beobachtet, aber nicht erklärt worden ist (Mira Ceti)[1]), während wir, wenn diese Zahl groß wird, Überlagerung von Licht aus vielen verschiedenen Stellungen mit verschiedenen Geschwindigkeiten und demnach konstant verbreiterte Linien bekommen werden, bei denen nämlich die Breite nur kleine Veränderungen zeigt, die allmählich verschwinden werden.

Nur also wenn das Produkt Kb größer als 10 geworden sein wird, erlaubt die auf das Studium der periodischen Änderungen der Linien gegründete spektroskopische Beobachtung uns nicht mehr, die „Doppelstern"natur der Sterne zu konstatieren.

Nur für diese Fälle also würden die Befürchtungen De Sitters begründet sein!

Aber nichts Schlimmes ist dabei, wenn man glaubt, daß es der astrophysikalischen Forschung noch nicht gelungen ist, die wahre Natur einer gewissen Anzahl komplexer Sterne zu enthüllen. Unsere Hypothese wird uns sehr nützlich sein, sie zu entdecken.

Sichergestellt ist der Zustand konstanter Verbreiterung, den die Spektrallinien vieler Sterne aufweisen[2]); im Lichte unserer Hypothese gedeutet, wird sie uns gestatten, deren Natur als „Doppelsterne" oder komplexere Systeme zu erkennen.

Die nachfolgenden statistischen Betrachtungen stützen in eindrucksvoller Weise diese unsere Meinung über die Existenz vieler noch nicht aufgelöster komplexer Systeme.

Die Zahl der bekannten spektroskopischen Doppelsterne wächst zuerst rasch mit dem Wachsen ihrer scheinbaren Größe, erreicht bald ein Maximum und nimmt jäh ab, so daß nur ganz wenige von über 5,5 Größe bekannt sind.

In nachstehender Tabelle haben wir der Größe nach — Stufenfolge von halber Größe — die in einem Katalog von Campbell, dem

---

[1]) Häufig ist der Fall der gleichzeitigen Beobachtung der scharfen Linie an normaler Stelle und von zwei seitlich verbreiterten Komponenten. Man sieht sofort, wie dieser Fall vollkommen mit dem übereinstimmt, was man auf Grund unserer Kurven voraussehen kann.

[2]) Die Sterne der ersten Spektralklasse sind charakterisiert durch die Anwesenheit der stark verbreiterten Wasserstofflinien.

einzigen mir zugänglichen — aufgeführten Doppelsterne zusammengestellt:

Scheinbare Größe	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Zahl der bekannten Doppelsterne . . .	3	3	6	9	16	21	29	32	13	5	0

Ein Verhalten dieser Art — es ist fast überflüssig es hervorzuheben — steht in schreiendem Gegensatz zu dem, was man auf Grund der gewöhnlichen „Wahrscheinlichkeits“kriterien voraussehen müßte, wenn man berücksichtigt, daß die Zahl der einem jeden dieser Größenintervalle angehörigen Sterne mit dem Wachsen der Ordnungszahl des Intervalls mit ungeheurer Schnelligkeit wächst.

Es entsteht somit von selbst der Verdacht, daß irgend eine wohldefinierte und konstante Ursache die Möglichkeit der Beobachtung von (sicher existierenden) „Doppelsternen“ mit Hilfe des Studiums der Verdopplungen und der wechselnden und periodischen Verbreiterungen der Linien beschränkt und schließlich verhindert; und auf eine Ursache dieser Art werden wir gerade durch unsere Erörterung hingewiesen.

Werte von $Kb > 10$ können wegen der notwendigen Kleinheit, die das Verhältnis $b = \frac{v}{c}$ behalten muß, um so leichter auftreten, je größer die Distanz c, d. h. je größer K ist. Mit anderen Worten, es besteht nur eine geringe Wahrscheinlichkeit, daß die entfernten Sterne uns ihre komplexe Natur durch periodische Veränderungen ihrer Spektrallinien offenbaren.

Ist K groß, so werden immer kleinere Werte von b notwendig sein, damit die Schwelle ($Kb \geq 10$) nicht überschritten werde; und bei kleinen Werten von b werden die Beobachtungen aus einem anderen Grunde unmöglich, nämlich wegen der Kleinheit der Linienverbreiterung.

Die Brauchbarkeit der spektroskopischen Methode für die Entdeckung komplexer Sterne muß also meines Erachtens rasch entschwinden in dem Maße, wie die Entfernung der Sterne, d. h. die Ordnung der Klasse wächst.

Unsere Hypothese steht also auch bei dieser merkwürdigen Eigentümlichkeit in vollkommenem Einklang.

Es sei uns deshalb erlaubt zu behaupten:

1. 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 Postulats der Einsteinschen Theorie bestätigen;

2. daß die ballistische Hypothese eine gute Erklärung der merkwürdigen Anhäufung der bekannten Doppelsterne um die vierte und fünfte Stufe der Skale der scheinbaren Größen liefert;

3. daß dieselbe Hypothese auch einen festen und wesentlichen Grund für eine gute theoretische Erklärung eines ausgedehnten und überaus anziehenden Gebietes astronomischer Erscheinungen liefern kann: das ist das Gebiet der durch die „Veränderlichen Sterne“ und „Neuen Sterne“ gebotenen Phänomene.

Auf diesen interessanten Punkt werde ich in einer späteren Arbeit zurückkommen.