Werk

Titel: Zur Prüfung der allgemeinen Relativitätstheorie

Autor: Freundlich, Erwin

Ort: Berlin

Jahr: 1919

PURL: https://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?34557155X_0007|log415

Kontakt/Contact

Digizeitschriften e.V.
SUB Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen

info@digizeitschriften.de

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

WOCHENSCHRIFT FÜR DIE FORTSCHRITTE DER NATURWISSENSCHAFT, DER MEDIZIN UND DER TECHNIK

HERAUSGEGEBEN VON

DR. ARNOLD BERLINER UND PROF. DR. AUGUST PÜTTER

Siebenter Jahrgang. 29. August 1919. Heft 35.

Zur Prüfung der allgemeinen Relativitätstheorie[1]).

Von Dr. Erwin Freundlich, Berlin-Babelsberg.

Es liegen zurzeit zwei Möglichkeiten vor, die allgemeine Relativitätstheorie auf astronomischem Wege zu prüfen, erstens durch den Nachweis der Ablenkung eines Lichtstrahles beim Durchgang durch ein Gravitationsfeld und zweitens durch den Nachweis der relativen Verschiebung der Spektrallinien zweier Lichtquellen, die ihr Licht in verschiedenen Gravitationsfeldern emittieren. Der erste dieser beiden Effekte konnte möglicherweise vor wenigen Tagen anläßlich der totalen Sonnenfinsternis festgestellt werden. Während aber sein Auftreten in der Theorie noch wesentlich bedingt ist durch die spezielle Gestalt der Feldgleichungen für das Gravitationsfeld, welche man der Theorie zugrunde legt, fußt der zweite Effekt, die Gravitationsverschiebung der Spektrallinien, unmittelbar in der fundamentalen Hypothese der neuen Gravitationstheorie von *Einstein*, der sog. Äquivalenzhypothese und bildet somit einen der Grundpfeiler der neuen Theorie. Der nächstliegende Weg, um diese Gravitationsverschiebung der Spektrallinien nachzuweisen, ist natürlich der, die Sonnenlinien mit den entsprechenden Linien einer irdischen Lichtquelle zu vergleichen. Nach der Äquivalenzhypothese müßten die Linien im Sonnenspektrum gegenüber den entsprechenden irdischen Linien um das $2 \cdot 10^{-6}$-fache der Wellenlänge nach dem roten Ende des Spektrums hin verschoben sein, d. h. also eine Linie bei 4000 Å um den Betrag von 0,008 Å = 0,6 km, wenn diese Verschiebung als Dopplereffekt interpretiert würde. Ein solcher Effekt liegt zurzeit an und für sich durchaus im Bereiche unserer Meßgenauigkeit. Und trotzdem ist es bis heute nicht gelungen festzustellen, weder daß ein solcher Effekt vorliegt, noch daß er unzweifelhaft nicht vorliegt. Die Ursache dieses Mißerfolges ist wohl hauptsächlich darin zu suchen, daß die leuchtenden Dämpfe in der Sonnenatmosphäre Eigengeschwindigkeiten besitzen, deren Dopplereffekte anscheinend von der gleichen Größenordnung sind wie der erwartete Gravitationseffekt. Dazu kommt, daß die Wellenlängen in der Bogenlampe, die bei diesen Vergleichungen als irdische Lichtquelle benutzt wird, vermutlich noch durch unerforschte Fehlerquellen verfälscht sind, so daß möglicherweise die gesuchte Rotverschiebung der Sonnenlinien in diesen verschiedenen systematischen Verfälschungen verschwindet. Nur ein genaues Studium der Emissionsverhältnisse auf der Sonnenoberfläche und die Wahl einer besonders geeigneten irdischen Vergleichslichtquelle wird wohl auf diesem Wege zum gewünschten Ziele hinführen.

Bei dieser Sachlage erschien es dringend notwendig, neue Methoden zur Prüfung dieser Frage zu entwickeln. Da aber nur bei einem ziemlich beträchtlichen Potentialgefälle diese Linienverschiebungen meßbar groß werden können — das Potentialgefälle zwischen Sonne und Erde ist gerade hinreichend, um einen meßbar großen Effekt hervorzurufen —, so kommen nur Fixsterne außer der Sonne zur Prüfung dieser Frage in Betracht. Da dieselben überdies beträchtlich größer als die Sonne sein können, so sind um ein Vielfaches größere Beträge der gesuchten Linienverschiebung zu erwarten als bei der Sonne, so daß möglicherweise die bei der Sonne so stark verfälschenden Faktoren von geringerem Einfluß sind. Dafür tritt allerdings eine Schwierigkeit zutage, die anfangs diesen Weg ganz ungangbar erscheinen ließ. Bei den Sternen treten starke Linienverschiebungen der Spektrallinien sowohl nach dem Roten als auch nach dem Violetten auf, und zwar Dopplereffekte, hervorgerufen durch die Bewegungen der Sterne in Richtung der Visionslinie. Diese Dopplereffekte nehmen, da Geschwindigkeiten der Sterne relativ zur Erde im Werte von 20 bis 30 km fast die Regel sind, solche Beträge an, daß andere Linienverschiebungen in ihnen zu verschwinden drohen. Und da wir nur in diesen Dopplereffekten ein Kriterium für die vorhandenen Radialgeschwindigkeiten der Sterne besitzen, so haben wir ohne weiteres gar keine Handhabe zu entscheiden, ob eine bei irgend einem Stern gemessene Linienverschiebung ϱ sich zum Teil aus einem wirklichen Dopplereffekt d, zum Teil aber aus einer Linienverschiebung anderen Ursprungs, z. B. einer Gravitationsverschiebung K zusammensetzt, so daß $\varrho = d + K$ ist. Bisher hat man eine jede beobachtete Linienverschiebung im vollen Betrage als kinematischen Dopplereffekt interpretiert und aus ihr die Radialgeschwindigkeit des Sternes abgeleitet.

Will man also auch die Erscheinungen bei den Fixsternen zur Prüfung der allgemeinen Relativitätstheorie heranziehen, so wird man versuchen müssen, an der Hand von geeigneten Hilfshypothesen aus dem komplexen Bild, welches uns die Gesamtheit der Fixsterne darstellt, einen Effekt

[1]) Nach einem Vortrag, gehalten in der Sitzung der Dtsch. Physik. Gesellschaft am 13. Juni 1919. Eine ausführliche Darstellung der hier mitgeteilten Resultate folgt in der Physik. Zeitschrift.

wie die vermutete Gravitationsverschiebung der Spektrallinien herauszuschälen.

Bevor ich jedoch auf die bisher vorliegenden Resultate in dieser Richtung eingehe, möchte ich einige rein astronomische Dinge behandeln, damit die späteren Ausführungen verständlich werden.

Wenn wir an die Aufgabe herantreten, einen Gravitationseffekt bei den Fixsternen festzustellen, müssen wir natürlich Kenntnisse über die Gravitationsfelder auf den Oberflächen der Sterne zu gewinnen suchen; das erfordert die Kenntnis der durchschnittlichen *Massen und Dichten der Sterne*. Bis jetzt wissen wir aber außerordentlich wenig über diese beiden Elemente, und damit fehlen uns die Hauptbestimmungsstücke zur Berechnung des Potentialgefälles zwischen Stern und Erde, auf welches es bei dem vermuteten Gravitationseffekt in erster Linie ankommt.

Wir besitzen aber immerhin schon ziemlich zuverlässige Kriterien, um zu entscheiden, ob wir es bei gewissen Sterntypen mit sehr großen massigen Systemen zu tun haben oder nicht. Da sind insbesondere die Sterne höchster effektiver Temperatur, d. h. also höchster Oberflächentemperatur, die sog. Heliumsterne (B-Typ), in deren Spektren die Heliumlinien die hervorstechendste Rolle spielen, und die ihnen nahestehenden wenig zahlreichen weißen Sterne, in deren Spektren neben den Absorptionslinien noch helle Emissionslinien auftreten (O-Typ). Nicht allein der unmittelbare Augenschein lehrt, daß diese besonders hellen Sterne sehr groß sein müssen; denn trotz der großen Helligkeit sind ihre Parallaxen außerordentlich klein. Auch das Studium der spektroskopischen Doppelsterne unter ihnen hat sichere Hinweise dafür erbracht, daß die Massen dieser Sterne diejenigen der sonnenähnlichen Sterne wesentlich übersteigen. Und wenn wir den Gedankengang verfolgen, daß die Energie des Gravitationsfeldes der Sternmaterie hinreichen muß, um bei der Kontraktion des Sternes seine Materie zu höchster Weißglut zu erhitzen, kommen wir zu der Auffassung, daß die weißesten Sterne am Himmel, also die B- und O-Sterne, eine gewisse Minimalmasse übersteigen müssen[1]). Wir haben also allen Grund zu vermuten, daß die weißesten Sterne am Himmel besonders große Systeme sind und darum möglicherweise einen merklich großen Gravitationseffekt offenbaren werden. Bei der Ausdehnung solcher Betrachtungen auf die Sterne anderen Spektralcharakters zeigen sich aber kompliziertere Verhältnisse. Es sind nämlich sicherlich nicht die Mehrzahl der roten Sterne, die wir am Himmel sehen, kleine Objekte verglichen mit den ungefähr gleich hellen weißen Sternen. Denn die Mehrzahl der ganz besonders hellen Sterne, die dem unbewaffneten Auge am Himmel auffallen, sind rote Sterne, ich nenne nur α Orionis, α Tauri, α Bootis. Diese erscheinen uns aber bei ihrer niedrigen Oberflächenhelligkeit nicht deshalb so helleuchtend, weil sie der Sonne besonders nahe sind, sondern weil sie offenbar außerordentlich große Oberflächen haben. Denn ihre Parallaxen sind im Mittel kaum größer als die der oben erwähnten B-Sterne. Darum müssen wir auch diese absolut hellen roten Sterne als sehr große Systeme ansehen. Neben ihnen treten dann noch in unzweifelhaft überwiegend großer Zahl kleine rote Sterne auf, deren Spektralcharakter von dem der absolut hellen nicht wesentlich abweicht. Zu ihnen z. B. gehört 61 Cygni, ein roter Stern, der wegen seiner auffallend großen Parallaxe von 0,3″. den Astronomen früh auffiel und zu den uns am nächsten stehenden Himmelskörpern gehört, der aber nicht heller als 7.—8. Größe ist und nur im Fernrohr beobachtet werden kann.

Man ist darum zu der Einsicht gelangt, daß die Reihe der weißen, gelben und roten Sterne keine eindeutige Entwicklungsreihe der Sterne darstellt, wie man anfangs glaubte. Es ist ziemlich sicher nicht so, daß ein Stern aus Nebelmaterie als weißer Stern geboren wird, um durch Abkühlung und Kontraktion schließlich als dunkelroter Stern in Dunkelheit unterzutauchen. Wir haben es vielmehr nach dem heutigen Stand unserer Kenntnisse mit folgenden verschiedenen Typen zu tun:

$$\left.\begin{matrix} M^{(1)} \\ K^{(1)} \end{matrix}\right\} \text{ rot } \left\{\begin{matrix} M^{(2)} \\ K^{(2)} \end{matrix}\right.$$

$$\left.\begin{matrix} G^{(1)} \\ F^{(1)} \end{matrix}\right\} \text{ gelb } \left\{\begin{matrix} G^{(2)} \\ F^{(2)} \end{matrix}\right.$$

$$A^{(1)} \quad \text{weiß} \quad A^{(2)}$$

$$\overbrace{B^{(1)}, O, B^{(2)}}$$

Diese Zweiteilung der Sterne ist durch folgende Erfahrungstatsachen nahe gelegt. Denken wir uns alle Sterne in eine irgendwie vereinbarte Einheitsentfernung gebracht, so lehrt die Erfahrung an den Sternen, deren Entfernungen uns ungefähr bekannt sind, daß wir es anscheinend mit zwei verschiedenen Arten von roten Sternen zu tun haben. Ein Teil derselben wird uns in der Einheitsentfernung — man wählt für dieselbe gewöhnlich diejenige Entfernung, in welcher der Stern eine Parallaxe von 1″ aufweisen würde — als heller Stern etwa 1. Größe, wie der Sirius in seinem wahren Abstand von der Erde, erscheinen, andere dagegen um 5—6 Größenklassen schwächer. Man unterscheidet diese beiden Typen durch die Bezeichnung Giganten- und Zwergsterne, und zählt die einen zum Spektraltyp $M^{(1)}$ bezw. $K^{(1)}$, die anderen zum Typ $K^{(2)}$ bezw. $M^{(2)}$[1]). Ebenso unterscheidet man auch bei den gelben, sonnenähnlichen Sternen vom F- und G-Typ zwei Klassen nach der absoluten Helligkeit, doch ist hier die Spaltung schon nicht mehr so ausgesprochen und bei den Sternen vom A-Typ, die zwi-

[1]) Siehe den Aufsatz von *A. Kohlschütter* „Der innere Aufbau der Sterne" diese Zeitschrift 1919, Heft 5 und 6.

[1]) Eine genaue Beschreibung des Unterschiedes in den Spektren der so durch Buchstaben charakterisierten Sterne findet man in jeder populären Astronomie.

schen den sonnenähnlichen und den weißen B-Sternen liegen, wie auch bei diesen letzteren selbst, noch nicht sichergestellt. Eine ausgezeichnete Rolle unter diesen verschiedenen Typen spielen die B-Sterne, bei denen man schon seit langem vermutet, daß sie besonders massige Systeme sind, und desgleichen die Giganten unter den roten Sternen, die trotz ihrer anscheinend niedrigen Oberflächentemperatur doch außerordentlich hell erscheinen, so daß wir ihnen riesige Oberflächen zusprechen müssen.

Ob zwischen diesen verschiedenen Typen verwandtschaftliche Verhältnisse bestehen, d. h. ob wir sie als Etappen einer einheitlichen Entwicklungsgeschichte der Sterne auffassen müssen, ist heute noch eine offene Frage. Man vertritt zwar vielfach die Auffassung, daß ein Stern sich aus kosmischer Staubmaterie zusammenballend und langsam erhitzend zuerst ein $M^{(1)}$-Stern wird, von großem Volumen, niedriger Temperatur und geringer Dichte. Durch Kontraktion sich weiter erhitzend durchläuft er die Stadien $K^{(1)}$, $G^{(1)}$, $F^{(1)}$, $A^{(1)}$, um schließlich, falls überhaupt seine Gesamtmasse ausreichte, als B-Stern die höchst effektive (Oberflächen-) Temperatur von 13 000°—15 000° zu erreichen. Von da soll er dann sich weiter verdichtend und abkühlend die Stadien als $A^{(2)}$-, $F^{(2)}$-, $G^{(2)}$-, $K^{(2)}$-, $M^{(2)}$-Stern in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen. So verlockend einfach in mancher Hinsicht diese Auffassung der Dinge wirken mag, so scheinen doch die wahren Verhältnisse des Universums viel komplexer zu sein. Eine so einfache Entwicklungslinie der Sterne würde überzeugend wirken, wenn die verschiedenen Sterntypen miteinander gut vermischt wären und das Ganze als ein in statistischem Gleichgewicht befindliches Gebilde aufgefaßt werden könnte. Doch davon scheint gar keine Rede zu sein. Sowohl nach ihrer Gesamtanordnung am Himmel als auch nach ihren Bewegungsgesetzen stellen anscheinend die B-Sterne und ebenso die Giganten unter den roten Sternen voneinander und der übrigen Schar von Sternen unabhängige Gebilde dar. Die B-Sterne offenbaren eine unzweifelhafte Konzentration nach der Ebene der Milchstraße und beteiligen sich nicht an den Strombewegungen, die man bei der großen Schar der die Sonne umgebenden Sterne hat feststellen können. Die absolut hellen M-Sterne ihrerseits zeigen im wesentlichen eine kugelsymmetrische Anordnung. Für beide Systeme von Sternen ist dagegen die Geschwindigkeit der Sonne relativ zum Schwerpunkt des betreffenden Systems die gleiche, aber, nach den bisherigen Ergebnissen, wesentlich größer als relativ zum Schwerpunkt der großen Zahl von A-, F- und G-Sternen, welche den bisherigen statistischen Untersuchungen zugrunde liegen. Diese Hinweise dokumentieren, daß wir es anscheinend mit den Sternen am Himmel nicht mit einem einheitlichen System zu tun haben, wodurch alle statistischen Untersuchungen ungemein erschwert werden. Vorerst kann man nur auf jede dieser Spektralklassen für sich statistische Betrachtungen anwenden und wenn man hoffen will, etwas zugunsten der Frage nach der von der allgemeinen Relativitätstheorie geforderten Gravitationsverschiebung der Spektrallinien aus ihnen abzuleiten, so liegen bisher nur die zwei Fingerzeige vor, daß die B-Sterne vermutlich an Masse die sonnenähnlichen Sterne wesentlich übersteigen und die absolut hellen K- und M-Sterne sich von ihnen durch ihre riesigen Oberflächen unterscheiden, also vermutlich auch im Mittel viel massigere Systeme darstellen.

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen wollen wir uns wieder konkret der Frage nach dem Vorhandensein einer Gravitationsverschiebung der Spektrallinien zuwenden und zuerst speziell *an den B-Sternen untersuchen, was sich für oder wider die allgemeine Relativitätstheorie aus ihnen folgern läßt.*

Setzen wir einmal voraus, daß diese Sterne eine mittlere Gravitationsverschiebung ihrer Spektrallinien im Betrage von $+K$ Kilometern aufweisen — man kann jede Linienverschiebung durch die ihr als Dopplereffekt entsprechende Geschwindigkeit in Kilometern messen —, dann mißt ein Astronom bei diesen Sternen nicht den reinen Dopplereffekt ihrer Radialgeschwindigkeiten $\pm d$ in der Visionslinie, sondern er mißt als vermeintliche Radialgeschwindigkeit ϱ die Summe $\pm d + K$. Sind die eigentlichen Dopplereffekte nach dem Zufall verteilt, so ist die Häufigkeitskurve der Radialgeschwindigkeiten eine Fehlerkurve. Man wird dies vorerst immer voraussetzen können, da ohne weiteres nichts dafür spricht, daß die Sonne mit der Erde eine irgendwie ausgezeichnete Rolle spielt, so daß nicht gleich viele Sterne sich von uns fort als auf uns zu bewegen. Wenn sich aber über diese reinen Dopplereffekte noch eine konstante mittlere Verschiebung $+K$ lagert, so hätte diese zur Folge, daß die Häufigkeitskurve der Radialgeschwindigkeiten nicht um den Wert Null sich symmetrisch ausbreitet, sondern um die positive Geschwindigkeit $+K$. In der folgenden Tabelle sind nun die durch Abzählung gewonnenen Werte für die Häufigkeit positiver und negativer Radialgeschwindigkeiten der B-Sterne in verschiedenen Geschwindigkeitsintervallen niedergelegt. Es offenbart sich in diesen 212 Radialgeschwindigkeiten ein ausgesprochenes Überwiegen der positiven Werte. Trägt man diese Häufigkeiten als Ordinaten zu den mittleren Geschwindigkeiten jedes Intervalls als Abszissen ab, so schmiegen sich diese Punkte be-

Geschw.-Intervalle	Anzahl der Radialgeschw.	
	>0	<0
0—10 km	54	31
10—20 „	56	18
20—30 „	40	11
>30 „	10	2

friedigend einer nach den positiven Geschwindigkeiten hin verschobenen Fehlerkurve an. Um den Betrag dieser Verrückung zu bestimmen, kann man folgendermaßen vorgehen:

Die bei den B-Sternen beobachteten Radialgeschwindigkeiten $V_{beob.}$ rühren hauptsächlich daher, daß das Sonnensystem sich mit großer Geschwindigkeit relativ zum Schwerpunkt dieses Sternsystems bewegt. Nennt man V_0 die Geschwindigkeit des Sonnensystems, λ den Winkelabstand eines Sternes von dem Zielpunkt der Sonnenbewegung an der Himmelssphäre und V_* die von der Sonnenbewegung befreite Radialgeschwindigkeit des Sterns, dann gilt:

$$V_* = V_{beob.} - V_0 \cos \lambda.$$

Lagert sich aber über die Dopplereffekte eine mittlere Gravitationsverschiebung der Linien im Betrage von K Kilometern, so hat man anzusetzen:

$$V_* + K = V_{beob.} - V_0 \cos \lambda.$$

Diese Gleichungen lassen sich nicht ohne weiteres ausgleichen, da wir ja die V_* nicht kennen. Faßt man aber die Sterne in größeren Gruppen zusammen, so kann man annehmen, daß sich unter ihnen gleich viele von uns fort als auf uns zu bewegen, so daß in der aus obigen Gleichungen sich ergebenden Mittelwertsgleichung für jede Gruppe $V_* = 0$ ist. Man hat dann ein System von Gleichungen der Gestalt:

$$K = V_{beob.} - V_0 \cos \lambda$$

nach der Methode der kleinsten Quadrate auszuwerten. Auf diesem Wege hat man in der Tat für die B-Sterne einen Wert für $K = +4{,}3$ km $\pm$ 0,5 km abgeleitet, wie er sich kund tun müßte, wenn die B-Sterne einen mittleren Gravitationseffekt von + 4,3 km anzeigten. Will man dagegen auf der Auffassung beharren, daß jede Linienverschiebung als kinematischer Dopplereffekt zu deuten sei, so hieße das Auftreten der Größe K, daß die B-Sterne eine allgemeine Expansion von dem durchschnittlichen Betrage von + 4,3 km offenbaren. Dieser Standpunkt wird in der Tat von verschiedenen Astronomen vertreten, obwohl sehr unwahrscheinliche Hilfshypothesen herangezogen werden müssen, um diese Expansion des Systems der B-Sterne zu erklären. Verläßt man aber den Standpunkt, daß alle gemessenen Linienverschiebungen Dopplereffekte sind, so gelangt man zu der Erkenntnis: in den Linienverschiebungen der Spektren der B-Sterne steckt neben den nach dem Zufall verteilten Dopplereffekten der Radialgeschwindigkeiten eine vermutlich konstante allgemeine Rotverschiebung der Linien im Betrage von + 4,3 km, wie sie wirklich zutage treten müßte, wenn die von der allgemeinen Relativitätstheorie geforderte Gravitationsverschiebung der Spektrallinien existierte und die B-Sterne im Durchschnitt viel massiger wären als die Sonne, worauf auch unsere sonstige Erfahrungen an ihnen hinweisen.

Führt man die gleichen Überlegungen auch bei den anderen Sterntypen durch, so gelangt man zu folgenden Resultaten: die Giganten unter den K- und M-Sternen offenbaren auch eine deutlich ausgeprägte Rotverschiebung ihrer Spektrallinien, und zwar ist dieselbe[1])

bei den $K^{(1)}$-Sternen: $= +3{,}2$ km $\pm$ 0,8,
bei den $M^{(1)}$-Sternen: $= +4{,}7$ km $\pm$ 1,5.

Bei den übrigen Typen läßt sich ein solcher Effekt nicht nachweisen. Da ja alles darauf hindeutet, daß die Sterne vom Spektraltyp $K^{(1)}$ und $M^{(1)}$ außerordentlich große Systeme sind, so ist das Auftreten einer merklichen Rotverschiebung vom Standpunkt der allgemeinen Relativitätstheorie durchaus zu erwarten. Immerhin darf man nicht vergessen, daß es bei dem fraglichen Gravitationseffekt auf das Gravitationspotential an der Oberfläche des Sternes ankommt und daß dieses trotz großer Oberfläche und Gesamtmasse bei geringer mittlerer Dichte nicht so stark von dem an der Sonnenoberfläche abzuweichen braucht, um eine so ausgesprochene Rotverschiebung zu erklären. Man kann darum das Resultat der statistischen Untersuchung nicht als einen Beweis, sondern nur als einen Hinweis für die Existenz einer Gravitationsverschiebung der Spektrallinien auffassen.

Man hat natürlich versucht, auch auf anderem Wege das Auftreten einer allgemeinen Rotverschiebung der Spektrallinien bei den B-Sternen und den absolut hellen roten Sternen zu erklären So nahm man an, daß bei der großen Masse der B-Sterne die Linien durch Druckeinflüsse verschoben seien oder daß nahe Begleiter der Linien deren Schwerpunkte scheinbar nach dem Roten hin verlagerten. Sehr wahrscheinlich sind diese Erklärungen nicht, weil es schwer verständlich ist, wie sie alle Linien, und zwar auch die ganz verschiedenen Linien, die bei einem B-Stern und einem M-Stern vermessen werden, in gleicher Weise beeinflussen sollten. Doch bedarf dieser Punkt noch einer eingehenden Prüfung.

Schließlich ist auch die naheliegende Auffassung vertreten worden, daß es sich bei dieser Rotverschiebung um einen ganz gewöhnlichen Dopplereffekt handele, daß also tatsächlich die Systeme der B-Sterne und absolut hellen K- und M-Sterne einer allgemeinen Expansion unterlägen, welche kosmogonischen Ursprungs sei. Gerade weil sich diese Sterntypen auch sonst anders als unsere Umgebung verhalten, wie oben betont wurde, ist diese Auffassung an sich möglich und würde den gefährlichsten Einwand gegen den hier vertretenen Standpunkt darstellen, wenn es nicht möglich wäre, ziemlich eindeutig zu erweisen, daß es sich bei dieser Rotverschiebung der Spektrallinien um keinen Dopplereffekt handelt, sondern um einen physikalischen Effekt bei der Lichtemission auf der Oberfläche des Sternes. Dieser Nachweis kann folgendermaßen erbracht werden.

Wenn es, wenigstens für einige B-Sterne, möglich wäre, die Radialgeschwindigkeit unverfälscht von einem etwaigen Gravitationseffekt zu messen, so wäre ja die Trennung der gemessenen Linienverschiebung in die zwei Summanden: $\varrho = \pm d + K$ nach Dopplereffekt $\pm d$ und Gravita-

[1]) *W. Gyllenberg:* Lund Medd. Ser. II Nr. 13.

tionseffekt K durchführbar. Dies wäre nun in der Tat der Fall, wenn ein Stern von einer sehr ausgedehnten Atmosphäre umgeben ist bzw. in einem weiten helleuchtenden Nebel schwimmt. Bei der unzweifelhaft vorhandenen engen Beziehung der B-Sterne zu der am Himmel sichtbaren Nebelmaterie konnte man hoffen, solche Konstellationen zu finden. Bei einer solchen wären die Absorptionslinien der weiten Sternatmosphäre bzw. die Emissionslinien des Nebels vermutlich durch einen Gravitationseffekt kaum verfälscht, da die Gravitationsfelder in den weiten interstellaren Räumen, die die fein verteilte Nebelmaterie ausfüllt, viel schwächer als an der Oberfläche der Sterne sind. Aus der mit dem Stern bewegten Atmosphäre bezw. Nebelmaterie müßte man demgemäß den reinen Dopplereffekt des betrachteten Systems ableiten können und die Frage wäre nun, ob das *Sternspektrum gegenüber den Nebellinien* dieselbe *Rotverschiebung* aufweist, die sich statistisch kundgetan hatte.

Ein außerordentlich günstiges Objekt für eine solche Untersuchung bietet sich uns im Orionnebel, zugleich auch bisher das einzige dieser Art. Dieser Nebel ist der hellste am Himmel und umgibt eine auffallend starke Anhäufung heller B-Sterne, die unzweifelhaft miteinander als auch mit dem Nebel eine organische Einheit bilden. Darauf deutet einerseits die äußere Struktur des Nebels hin, andrerseits bei den Sternen die Gleichheit der Spektren, der Eigenbewegungen und Radialgeschwindigkeiten.

In der nachfolgenden Tabelle sind alle Sterne der sogenannten Orion-Nebelgruppe angeführt, ferner die beobachtete Radialgeschwindigkeit ϱ_b, die von der Sonnenbewegung befreite ϱ_* und schließlich die Differenz: $\varrho_* - \varrho_N$, wo ϱ_N die Radialgeschwindigkeit des Nebels bedeutet.

Stern	Spekt.	ϱ_b km	ϱ_* km	$\varrho_* - \varrho_N$ km
τ Orionis...	B_5	+20,8	+ 2,8	+ 3,5
o „ ...	B_3	+28,0	+10,6	+11,4
Boss 1295 ..	B_3	+22,4	+ 5,4	+ 6,1
η Orionis...	B_1	+35,5	+17,9	+18,6
ψ „ ...	B_2	+12,0	− 4,7	− 4,0
Boss 1332 ..	B_3	+21,6	+ 5,2	+ 5,9
δ Orionis...	B_0	+23,1	+ 5,7	+ 6,4
36 „ ...	B_0	+17,0	− 1,5	− 0,8
Boss 640 ...	O_5	+20,0	+ 2,4	+ 3,1
Boss 619 ...	B_2	—	—	—
Θ Orionis ..	O_5	+19,0	+ 1,4	+ 2,1
τ „ ..	B_3	—	—	—
ι „ ..	O_5	+21,5	+ 3,5	+ 4,2
ε „ ..	B_0	+24,5	+ 6,9	+ 7,6
A. G. C. 6471	B_1	+29,0	+10,7	+11,4
ζ Orionis...	B_0	+18,3	+ 0,6	+ 1.3
A. G. C. 6616	B_2	+26,1	+ 8,5	+ 9,2

Mittel $+6{,}0 \pm 1{,}0$ km

Wie die Tabelle zeigt, ist eine allgemeine Rotverschiebung der Sternspektren gegenüber dem Nebelspektrum deutlich ausgeprägt. Nur zwei Sterne fallen aus dem Rahmen, und zwar ψ Orionis und 36 Orionis. Zu diesen ist aber folgendes zu bemerken. Während die sphärischen Eigenbewegungen der Sterne in der Tabelle durchweg sehr klein und kaum nachweisbar sind — sie liegen in Deklination unterhalb 0,01″ —, sind die Eigenbewegungen der beiden Sterne ψ- und 36 Orionis die einzigen, für welche die Eigenbewegungen in Deklination größer als 0,01″ nach den bisherigen Katalogbeobachtungen herauskommen. Dieser Umstand zugleich mit dem, daß die Radialgeschwindigkeiten ϱ_b merklich kleiner sind als das Mittel aus den übrigen, spricht dafür, daß die beiden Sterne nicht zur engeren Orion-Nebelgruppe gehören, sondern sich nur in dieses Gebiet der Sphäre projizieren. Möglicherweise sind bei ihnen auch die Radialgeschwindigkeiten durch unbekannte Bahnbewegungen verfälscht, denn ein ungewöhnlich hoher Prozentsatz der B-Sterne sind spektroskopische Doppelsterne mit großen Bahngeschwindigkeiten. Dieser verfälschende Einfluß der Bahngeschwindigkeit ist besonders noch bei dem Stern η Orionis zu befürchten, der nach der anderen Seite merklich aus dem Mittel herausfällt. Dieser Stern stellt nach den Untersuchungen über die spektroskopischen Doppelsterne eines der größten Systeme dar, die man bisher gefunden hat. Die besonders auffallende Rotverschiebung könnte also möglicherweise reell sein. Doch ist bei den großen Bahngeschwindigkeiten, welche bei diesem System auftreten, und den noch unaufgeklärten systematischen Abweichungen, die sich in der errechneten Bahn zeigen und die vermutlich von weiteren Massen in diesem System herrühren, die Unsicherheit in der Bestimmung der Radialgeschwindigkeit des Schwerpunktes noch so groß, daß der obige Wert um 10 und mehr Kilometer falsch sein kann. Ich habe darum diesen Stern zugleich mit ψ- und 36 Orionis aus der Mittelbildung ausgeschlossen.

Wir gelangen damit durch den Vergleich der Linienverschiebungen bei den Sternen und dem Nebel im Orion zu der Erkenntnis, daß die allgemeine Rotverschiebung, die sich bei den B-Sternen statistisch offenbarte, sich auch wieder zwischen Stern- und Nebelspektrum zu erkennen gibt. *Dies weist wohl unzweifelhaft darauf hin, daß die Rotverschiebung kein Dopplereffekt* ist, sondern in den besonderen Bedingungen der Lichtemission auf den Sternen ihren Ursprung hat. Vom Standpunkt der allgemeinen Relativitätstheorie ist eine solche Rotverschiebung der Spektren der Sterne gegenüber demjenigen des Nebels durchaus als Folge der Gravitationszustände auf den Oberflächen der Sterne zu erwarten. Darum spricht auch dieses Ergebnis sehr gewichtig zugunsten der neuen Theorie. Daß die Rotverschiebung der Sterne im Orion im Betrage von +6 km merklich größer herauskommt als nach der statistischen Methode, ist

vielleicht nicht allein durch die Unsicherheiten bedingt, die beiden Werten anhaftet, sondern möglicherweise ein Hinweis dafür, daß wir es im Orion mit besonders großen Sternmassen zu tun haben.

Leider gibt es außer dem Orionnebel keinen weiteren für eine solche Untersuchung geeigneten Fall, da die Nebel, welche sich noch in Verbindung mit Heliumsternen finden, zu schwach leuchten, als daß man ihre Radialgeschwindigkeiten messen könnte. Doch zeigen die Spektren der B-Sterne eine Anomalie, die im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen besonders an Interesse gewinnt, weil sie den dritten Hinweis für die Existenz der Gravitationsverschiebung bei den Heliumsternen abgibt.

Bekanntlich ist unter den B-Sternen ein ungewöhnlich hoher Prozentsatz von spektroskopischen Doppelsternen, bei denen also die Linien in den Sternspektren infolge der Bahngeschwindigkeiten periodische Schwankungen um eine Mittellage ausführen. Nun fiel zum ersten Male bei dem Stern δ Orionis die merkwürdige Erscheinung auf, daß in seinem Spektrum die beiden schwachen Absorptionslinien des Calciums *H* und *K* an diesen periodischen Schwankungen nicht teilnehmen. Die ursprüngliche Auffassung, daß diese Linien durch Absorption in interstellaren Calciumwolken erzeugt seien, hat an Wahrscheinlichkeit eingebüßt, seitdem man eine ganze Reihe solcher Sterne gefunden hat, bei einigen von diesen aber auch die Calciumlinien periodische Schwankungen zeigen, wenn auch mit geringerer Amplitude. Vielmehr spricht alles dafür, daß diese Linien von weiten Calciumatmosphären herrühren, welche die Sterne umgeben. Für diese Auffassung spricht ferner, daß unter den B-Sternen sich manche von direkt sichtbarer nebelhafter Struktur zeigen. Eine weitere Stütze hat diese Auffassung gefunden, seitdem die grundlegenden Untersuchungen von *Eddington* über den inneren Aufbau der Sterne, über welche Herr *A. Kohlschütter* vor kurzem in dieser Zeitschrift berichtet hat, zu dem Resultat führten, daß bei hoher effektiver Temperatur und großer Masse infolge des Strahlungsdruckes eine gewisse Instabilität der Sternmaterie entstehen kann. Infolge derselben wird möglicherweise Materie sich vom Sterne ablösen und als weite Atmosphäre sich um den Stern legen. Daß gerade die Sterne höchster effektiver Temperatur, nämlich die B- und O-Sterne, Anzeichen solcher weiten Atmosphären aufweisen, bedeutet also wiederum einen Hinweis darauf, daß sie besonders große Massen haben. Auch die besondere Rolle, die hierbei dem Calcium zufällt, ist nach unseren Erfahrungen über die überwiegende Bedeutung des Calciums in den äußersten Schichten der Sonnenatmosphäre durchaus verständlich.

Man wird darum erwarten, daß, wenn diese Auffassung richtig ist, sich wiederum eine Rotverschiebung der Sternlinien gegenüber den ruhenden Calciumlinien offenbaren wird. Denn die beiden Calciumlinien entspringen nach dieser Auffassung Gebieten, die so weit von der eigentlichen Oberfläche des Sternes abliegen, daß das Gravitationspotential wesentlich anders ist als dort, wo die eigentlichen Sternlinien emittiert werden. Dieses Gefälle des Gravitationspotentials müßte eine scheinbare Verschiebung der Sternlinien nach dem Roten hin erzeugen gegenüber den Linien der weiten Atmosphäre. Daß sich in der Tat ein Effekt dieser Art bemerkbar macht, lehrt die nachfolgende Tabelle. In ihr sind alle diejenigen Sterne verzeichnet, bei denen die Calciumlinien vermessen sind und die Schwerpunktsgeschwindigkeit aus den bewegten Sternlinien abgeleitet ist. Bei einigen konnte ich nur einen Vermerk finden, in welchem Sinne die Radialgeschwindigkeit aus den Sternlinien von der aus den Calciumlinien folgenden Radialgeschwindigkeit abweicht; in allen diesen Fällen ist der Unterschied im Sinne einer Rotverschiebung der Sternlinien

In der Tabelle bedeutet ϱ_* die Schwerpunktsgeschwindigkeit, wie sie aus den periodisch schwankenden Sternlinien folgt, ϱ_K die Radialgeschwindigkeit nach den Calciumlinien. Auch diese ist in einem Falle, wie bei 9 Camelopardalis, wo die Calciumlinien nicht ruhen, der an diese Linien anknüpfenden Bahnuntersuchung entnommen.

Stern u. Spekt.	ϱ_* km	ϱ_K km	$\varrho_* - \varrho_K$ km	
o Persei B_1	+ 18,5	+ 12,4	+ 6,1	
ξ „ Oe_5	> 30	+ 15,4		starke Rotverschiebung angedeutet
9 Camelop. B..	+ 6,4	— 2,2	+ 8,6	
η Orionis B_1 ...	+ 35,5			starke Rotverschiebung angedeutet
δ Orionis B ...	+ 23,1	+ 17,2	+ 5,9	
V V Orionis B_2 .	+ 20,8	+ 16,7	+ 4,1	
ε Orionis B ...	+ 24,8	+ 15,6	+ 8,9	
β Scorpii B_1 ...	— 9,5	— 12,6	+ 3,1	
σ Aquilae B_8 ...	— 5,0	— 12,6	+ 7,6	
ν Geminorum B_5	—	—		Rotverschiebung angedeut.

Bei diesen Sternen ist ausnahmslos eine Verschiebung in dem erwarteten Sinne angezeigt. Allerdings sind es vorerst nur 10 Systeme, für die Messungen vorliegen. Weiteres, speziell im Hinblick auf diese neue Hypothese diskutiertes Material soll entscheiden, ob der hier vertretene Standpunkt der richtige ist. Immerhin liegt hier wieder *ein ganz ausgesprochener Hinweis für eine Gravitationsverschiebung der Spektrallinien* bei den B-Sternen vor. Daß man es bei dieser Erscheinung mit dem gleichen Effekt zu tun hat wie bei

dem Orionnebel, dafür spricht folgendes. Unter den Sternen in der letzten Tabelle finden sich drei, welche auch zu der Orionnebelgruppe gehören, nämlich η, δ und ε Orionis. Bei δ und ε Orionis liegen vollkommene Messungen vor, und zwar ist bei:

δ Orionis: $\varrho_* - \varrho_N = +6{,}4$ km; $\varrho_* - \varrho_K = +5{,}9$ km

ε Orionis: $\varrho_* - \varrho_N = +7{,}6$ km; $\varrho_* - \varrho_K = +8{,}9$ km

Die Übereinstimmung ist so gut, als man bei der Unsicherheit der Einzelwerte nur erwarten kann und spricht dafür, daß es sich in beiden Fällen um den gleichen Effekt handelt.

Diese drei voneinander unabhängigen Überlegungen weisen übereinstimmend darauf hin, daß bei den Spektrallinien der B-Sterne ein Effekt nach Art des von der allgemeinen Relativitätstheorie geforderten Gravitationseffektes sich bemerkbar macht. Daß es sich dabei nicht um einen Dopplereffekt handeln kann, geht wohl ziemlich zwingend aus der Untersuchung am Orionnebel und den Calciumlinien hervor. Wenn es eindeutig dargetan sein wird, daß es sich hier nicht um Druckeffekte oder die Wirkung naher Begleiter der Linien handelt, so können diese Resultate zwar nicht als quantitative, so doch als qualitative Prüfungen der allgemeinen Relativitätstheorie gelten, falls weiteres speziell im Hinblick auf diese Hypothesen diskutiertes Material im gleichen Sinne entscheiden sollte.

Eine quantitative Prüfung der allgemeinen Relativitätstheorie auf diesem Wege zu erbringen, wird vorerst nicht möglich sein, solange wir über die Massen und Dichten der Sterne so wenig Bescheid wissen. Man kann nur die Probe anstellen, ob die Hypothese, daß die bei den B-Sternen sich äußernde Rotverschiebung der Spektrallinien im Betrage von 4 bis 6 km ein Gravitationseffekt sei, nicht quantitativ zu Werten für die Massen der Sterne führt, die absurd erscheinen. Da jedoch der Gravitationseffekt nur etwas über das Gravitationspotential an der Sternoberfläche aussagt, so ermöglicht er auch nicht die Massen der Sterne zu berechnen, sondern nur miteinander verträgliche Werte für Massen und mittlere Dichten, die ja vereint das Gravitationspotential bestimmen. Über die mittleren Dichten der Sterne sind wir nun ebenso schlecht unterrichtet wie über ihre Massen. Nimmt man die mittlere Dichte der B-Sterne zu $^1/_{10}$ Sonnendichte an, ein Wert, den man zurzeit für den wahrscheinlichen hält, so liefert ein Gravitationseffekt von 4—6 km Massen von 40—100 Sonnenmassen. Das ist bedeutend mehr, als man auf Grund des Studiums der spektroskopischen Doppelsterne für die B-Sterne annehmen zu müssen glaubte. Doch leiten sich diese unsere Kenntnisse aus ganz wenigen Systemen ab und sind noch mit einer großen Unsicherheit behaftet. Daß solche Massenwerte aber durchaus möglich sind, erhellt aus folgendem. Die Kenntnis des Gravitationspotentials an der Oberfläche des Sternes, d. h. also die Kenntnis der Gravitationsverschiebung der Spektrallinien erlaubt das Verhältnis: $\frac{\text{Masse}}{\text{Dichte}}$ für einen Stern zu berechnen. Fassen wir den Stern als schwarzen Strahler auf, was bei den B-Sternen durchaus zulässig zu sein scheint, so ist die von seiner Oberfläche emittierte Strahlung proportional seiner Oberfläche und der vierten Potenz seiner Oberflächentemperatur T, d. h. also proportional dem Produkt: $\left(\frac{M}{d}\right)^{2/3} T^4$. Bezeichnet man mit m_* die *absolute* Helligkeit des Sternes, das ist seine scheinbare Helligkeit in Größenklassen für die Entfernung 1, $m_\odot$ die absolute Helligkeit der Sonne, so gilt die Beziehung:

$$m_* = m_\odot - 2{,}5 \log \frac{\left[\left(\frac{M}{d}\right)^{\frac{2}{3}} T^4\right]_*}{\left[\left(\frac{M}{d}\right)^{\frac{2}{3}} T^4\right]_\odot}$$

Die Kenntnis des Gravitationseffektes zugleich mit derjenigen der effektiven Temperatur, die durch direkte Messungen gewonnen wird und für T bei den B-Sternen einen Wert von 13 000 ° bis 15 000 ° liefert, ermöglicht es uns also, die absolute Helligkeit des Sternes zu berechnen. Ist diese bekannt, so folgt, nach Umrechnung der bolometrischen Helligkeiten in visuelle, aus ihr und der scheinbaren visuellen Helligkeit des Sternes — das ist derjenigen Helligkeit, in welcher er uns wirklich erscheint — unmittelbar seine Entfernung oder Parallaxe.

Führt man diese Rechnung für die Sterne der Orion-Nebelgruppe durch unter der Annahme eines Gravitationseffektes von 4—6 km, so erhält man für die Parallaxe

$$\pi = 0{,}003'' - 0.005''.$$

Diesen Wert kann man nun mit den aus direkten Parallaxenuntersuchungen gewonnenen Beträgen vergleichen. Den wohl am sichersten fundierten Wert für die Parallaxe der Orion-Nebelgruppe hat *Kapteyn* abgeleitet und findet

$$\tau = 0{,}0054''.$$

Einzeluntersuchungen von *Hertzsprung*, *Stebbins* und anderen führten für verschiedene Mitglieder der Gruppe zu Werten, die zwischen 0,003″ und 0,008″ schwanken. Wie man sieht, steht der obige Wert mit den rein astronomisch gewonnenen in ausgezeichneter Übereinstimmung und beweist, daß ein Gravitationseffekt von 4—6 km nicht zu astronomisch absurden Folgerungen vorerst Veranlassung gibt. Wenn auch das hier herangezogene Kriterium nicht sehr empfindlich ist, so muß man sich doch vor Augen halten, daß hier ein ganz neuartiges Hilfsmittel zur Berechnung der Parallaxe hinzugezogen wurde und im voraus nicht ausgemacht werden konnte, ob diese Berechnungsart nicht Beträge von anderer Größenordnung liefern würde. Schon eine Parallaxe von einigen Hundertsteln von Bogensekunden wäre bei den Orionsternen im höchsten Grade unwahrscheinlich gewesen.