

Zur Interpretation der Messungen der Lichtablenkung am Sonnenrand

F. SCHMEIDLER, München

(Eingegangen 1984 April 24)

Die Übereinstimmung der radioastronomischen Messungen der Lichtablenkung am Sonnenrand mit der Relativitätstheorie widerspricht nicht der von der Mehrzahl der optischen Beobachter gefundenen Tatsache, daß die Ablenkung den relativistischen Betrag übersteigt. Der im optischen Bereich vorliegende Exzess beruht auf Sternen, die in solcher Nähe der Sonne standen, daß dort radioastronomische Messungen undurchführbar sind. Die in beiden Bereichen vorliegenden Messungen deuten darauf hin, daß zusätzlich zu der mit der ersten Potenz des Sonnenabstandes abfallenden Lichtablenkung ein Zusatzterm besteht, der mit einer höheren Potenz abfällt und deswegen die radioastronomischen Messungen nur schwach beeinflusst. Nach Resultaten von BOUET bestehen Indizien, daß es sich um einen solaren Effekt handelt.

The agreement between radioastronomical measurements of the gravitational deflection of light at the solar limb and the theory of relativity is compatible with the excess found by most optical observers. The optical excess is caused by stars so near to the Sun that radioastronomical observations are impossible. Optical and radioastronomical measurements both make it likely that there is an additional term inversely proportional to a power higher than the first of the distance from the Sun. Results found by BOUET indicate that this additional term is of solar origin.

1. Unterschiede der Lichtablenkung in verschiedenen Wellenlängen

Die Frage der experimentellen Prüfung der von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Ablenkung des Lichts am Sonnenrand ist bis heute insofern unbefriedigend geklärt, als die Mehrzahl der bei Sonnenfinsternissen ausgeführten Messungen im optischen Bereich Werte ergeben haben, die den theoretischen Betrag von $1''.75$ überschreiten. Allerdings war in den meisten Fällen die Unsicherheit des Resultats so groß, daß die Differenz zwischen dem empirischen und dem theoretischen Wert nicht verbürgt werden konnte. Außerdem haben die seit 1969 ausgeführten Messungen der Lichtablenkung im Bereich der Radiowellen durchweg gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Wert ergeben.

Auch wenn man die Ansicht vertreten würde, daß durch die gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung im Bereich der Radiowellen eine unanfechtbare Bestätigung der Relativitätstheorie in der Teilfrage der Lichtablenkung gegeben sei, bleibt die Frage offen, warum im optischen Bereich eine Diskrepanz auftritt. Diese Frage ist auch deswegen von Bedeutung, weil TREDER und GOTTLÖBER (1977) darauf hingewiesen haben, daß die allgemeine Relativitätstheorie so modifiziert werden kann, daß sich die Lichtablenkung im Bereich der optischen Wellen anders verhält als im Bereich der Radiowellen.

Die vorliegende Arbeit will darauf hinweisen, daß die Messungen im Bereich der Radiowellen nicht im Widerspruch zu den Ergebnissen der optischen Messungen stehen. Falls wirklich die radioastronomischen Messungen mit einem etwas zu großen Wert der Lichtablenkung verträglich sind, wäre die Einheitlichkeit des Verhaltens dieses Effekts in beiden einer Nachprüfung zugänglichen Spektralbereichen wiederhergestellt. Unberührt davon bleibt aber auch die Möglichkeit bestehen, daß sich die im optischen Bereich gefundene Diskrepanz als Meßfehler erweisen kann; allerdings müßte dann für einen solchen noch ein überzeugender Grund gefunden werden. Auch die Möglichkeit, daß die Diskrepanz im optischen Bereich zwar reell, aber ein solarer Effekt ist, bleibt bestehen; eine Stütze für diese Auffassung ist der Hinweis von BOUET (1980), daß zwischen den Werten der Lichtablenkung im optischen Bereich und der Sonnenaktivität eine schwache Korrelation besteht.

2. Die Lichtablenkung im optischen Bereich

Zusammenfassende Diskussionen der damals vorliegenden Messungen der Lichtablenkung am Sonnenrand im optischen Bereich haben vor mehr als zwei Jahrzehnten MICHAÏLOV (1959) und v. KLÜBER (1960) veröffentlicht. Aus beiden Bearbeitungen ergab sich, daß die optischen Messungen etwas besser mit einem Wert von etwa $2''.0$ als mit dem theoretischen Wert $1''.75$ verträglich waren, daß aber diese Differenz bei den Ergebnissen der meisten Expeditionen nicht verbürgt werden konnte.

Seitdem sind drei neue Messungen der Lichtablenkung im optischen Bereich veröffentlicht worden, deren Resultate waren:

SCHMEIDLER (1962)	$L = 2''.17 \pm 0''.34$
JONES (1976)	1.66 ± 0.19
SCHMEIDLER (1984)	1.98 ± 0.46

Das Gesamtbild ist unverändert so, daß ein Überschuß über den theoretischen Wert zwar angedeutet, aber nicht verbürgt ist. Demgegenüber ergeben die radioastronomischen Messungen gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Wert (FOMALONT und SRAMEK 1976).

Es darf aber nicht übersehen werden, daß die radioastronomischen Messungen der Lichtablenkung der Beschränkung unterliegen, daß sie in nächster Nähe der Sonne nicht ausgeführt werden können. Wegen der im Bereich der Radiowellen erheblichen Störungen durch die Korona sind Messungen an Punkten, die weniger als etwa 5 Sonnenradien vom Sonnenmittelpunkt entfernt sind, unmöglich. Nimmt man die Tatsache hinzu, daß die graphischen Darstellungen (v. KLÜBER 1960) den Eindruck erwecken, daß bei den optischen Messungen hauptsächlich die in nächster Sonnennähe stehenden Sterne zu große Ablenkungseffekte zeigen, dann stellt sich die Frage, welches Resultat sich ergeben hätte, falls auch die optischen Messungen auf den Bereich $r > 5$ Sonnenradien beschränkt gewesen wären.

Diese Frage wurde durch Abzählung der Meßpunkte geprüft, die in den graphischen Darstellungen der Ergebnisse der einzelnen Expeditionen über bzw. unter der mit dem theoretischen Wert $L = 1''.75$ konstruierten Kurve liegen. Zu allen Messungen, die vor 1959 publiziert wurden, hat v. KLÜBER (1960) solche Darstellungen gegeben; die Autoren späterer Messungen haben ihre Ergebnisse ebenfalls in dieser Form dargestellt. In diesen Darstellungen wurde gezählt

die Anzahl p der Meßpunkte im Bereich $r < 5r_{\odot}$, die über der theoretischen Kurve lagen und die Anzahl q der Meßpunkte im Bereich $r < 5r_{\odot}$, die unter der theoretischen Kurve lagen;

außerdem die entsprechenden Anzahlen p' und q' für den Bereich $r > 5r_{\odot}$.

Meßpunkte, die genau auf der theoretischen Kurve lagen, wurden weder bei den Zahlen p (bzw. p') noch bei den Zahlen q (bzw. q') berücksichtigt. Die Ergebnisse der Zählungen sind in Tabelle 1 mitgeteilt.

Tabelle 1.
Die Anzahlen p und q

Jahr der Messung	p	q	p'	q'	Quelle
1919	5	0	0	1	v. KLÜBER 1960
1922	2	1	6	5	v. KLÜBER 1960
1922	7	6	13	39	v. KLÜBER 1960
1922	4	5	34	24	v. KLÜBER 1960
1929	12	0	5	1	v. KLÜBER 1960
1936	5	10	0	13	v. KLÜBER 1960
1936	1	2	4	1	v. KLÜBER 1960
1947	5	6	9	27	v. KLÜBER 1960
1952	1	2	3	5	v. KLÜBER 1960
1959	3	0	5	3	SCHMEIDLER 1962
1961	1	3	5	3	SCHMEIDLER 1985
1976	2	2	16	17	JONES 1976

Bildet man in allen Spalten der Tabelle 1 die Summe, dann ergibt sich

$$\begin{aligned} \sum p &= 48 & \sum q &= 37 \\ \sum p' &= 100 & \sum q' &= 139 \end{aligned} \quad (1)$$

und damit das eindeutige Resultat, daß in Sonnennähe ($r < 5r_{\odot}$) Ablenkungsbeträge überwiegen, die den theoretischen Wert überschreiten, im Gebiet größerer Entfernungen ($r > 5r_{\odot}$) hingegen Werte, die kleiner sind als der theoretische Wert. Daraus kann geschlossen werden:

Wenn die optischen Messungen der Lichtablenkung ebenso wie die radioastronomischen Messungen auf den Bereich $r > 5r_{\odot}$ beschränkt gewesen wären, hätte sich aus ihnen nicht ein Betrag des Effekts ergeben, der den relativistischen Wert überstieg.

3. Die radioastronomischen Messungen der Lichtablenkung

Die im vorhergehenden Abschnitt abgeleiteten Ergebnisse beweisen, daß in dem den radioastronomischen Messungen zugänglichen Bereich keine merkliche systematische Differenz gegenüber den Resultaten der optischen Messungen der Lichtablenkung besteht. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Frage zu prüfen, ob radioastronomische Messungen ähnlich wie die optischen Messungen zu große Werte der Lichtablenkung ergeben würden, falls sie auch in unmittelbarer Sonnennähe ($r < 5r_{\odot}$) ausgeführt werden könnten. Offensichtlich können über diese Frage nur indirekte Indizien ermittelt werden, weil radioastronomische Messungen der Lichtablenkung in unmittelbarer Sonnennähe wegen der starken Koronastrahlung unmöglich sind.

Zunächst kann festgestellt werden, daß auch die radioastronomischen Messungen den theoretischen Wert der Lichtablenkung geringfügig übersteigen. Das geht aus Tabelle 2 hervor, in der die bisher bekannt gewordenen radioastronomischen Messungen der Lichtablenkung am Sonnenrand zusammengestellt sind; die Ergebnisse sind in der letzten Spalte in der Einheit des theoretischen Wertes $1''.75$ angegeben.

Tabelle 2.
Die bisherigen radioastronomischen Messungen der Lichtablenkung

Autor		$L/1''75$
G. A. SEIELSTAD et al.	1970	1.01 ± 0.11
D. O. MUHLEMAN et al.	1970	1.04 ± 0.10
J. M. HILL	1971	1.07 ± 0.17
R. A. SRAMEK	1971	0.90 ± 0.05
J. M. RILEY	1973	1.04 ± 0.08
K. W. WEILER et al.	1974	0.96 ± 0.05
C. C. COUNSELMAN et al.	1974	0.99 ± 0.03
K. W. WEILER et al.	1975	1.038 ± 0.033
E. B. FOMALONT	1975	1.015 ± 0.011
E. B. FOMALONT	1975	1.007 ± 0.009

Man erkennt aus den Angaben der Tabelle 2 unmittelbar, daß Werte von L überwiegen, die größer als der theoretische Wert sind; sieben Werten, die größer als 1 sind, stehen nur drei gegenüber, die kleiner als 1 sind. Bildet man aus den Zahlen der Tabelle 2 das arithmetische Mittel ohne Gewichte, dann ergibt sich

$$L/1''75 = 1.010 \pm 0.015 ; \quad (2)$$

erteilt man den einzelnen Resultaten Gewichte, die umgekehrt proportional zum Quadrat des mittleren Fehlers sind, dann ergibt sich der gleiche Wert, weil in diesem Fall das Mittel praktisch durch die beiden letzten Werte der Tabelle 2 allein bestimmt wird.

Es ergeben also auch die radioastronomischen Messungen einen Wert der Lichtablenkung, der größer ist als der aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgende Wert; ebenso wie bei den optischen Messungen ist die Abweichung nicht verbürgbar, abweichend von den optischen Messungen ist der Betrag der Abweichung nicht 10%, sondern nur 1%. Letztere Tatsache kann erklärt werden, wenn das Ergebnis des vorhergehenden Abschnitts berücksichtigt wird, daß die Abweichung im optischen Gebiet allein durch Sterne in nächster Sonnennähe verursacht wird. Analytisch kann das nur so aufgefaßt werden, daß der von der Einsteinschen Theorie behaupteten Lichtablenkung ein Zusatzterm überlagert ist, der mit einer höheren Potenz des Abstandes von der Sonne als der ersten abfällt. Nimmt man an, daß dieser Zusatzterm proportional zu r^{-2} verläuft und daß er, wie es die optischen Messungen wahrscheinlich machen, am Sonnenrand den Wert 0''3 annimmt, dann wäre die gesamte Lichtablenkung durch den Ausdruck

$$\delta r = \frac{1''75}{r} + \frac{0''3}{r^2} \quad (3)$$

gegeben. Dieser Ausdruck ist bei $r = 5r_{\odot}$ um etwa 3%, bei $r = 10r_{\odot}$ um etwa 2% und bei $r = 15r_{\odot}$ um etwa 1% größer als derjenige Wert, der sich bei alleiniger Berücksichtigung des ersten Terms in (3) ergibt. Messungen der Lichtablenkung innerhalb des Bereiches zwischen 5 und 15 Sonnenradien Abstand von der Sonne würden also im Mittel einen um 2% zu großen Wert gegenüber der allgemeinen Relativitätstheorie ergeben, was mit dem empirischen Wert (2) gut vereinbar ist. Wenn der Zusatzterm in (3) mit einer höheren Potenz von r als 2 abfällt, ist sein Einfluß auf die gemessene Lichtablenkung im Bereich der Radiowellen noch kleiner.

Es kann noch darauf hingewiesen werden, daß FOMALONT und SRAMEK (1976) aus der Analyse der radioastronomisch gemessenen Ablenkungsbeträge gefunden haben, daß sie etwas besser durch den Exponenten -1.02 ± 0.03 von r statt den Exponenten -1 von r dargestellt werden konnten. Obgleich die Abweichung des Exponenten von -1 nicht verbürgt ist, kann sie doch als schwacher Hinweis darauf gedeutet werden, daß auch bei den radioastronomischen Messungen in großer Sonnennähe Ablenkungsbeträge auftreten, die den theoretischen Wert übersteigen. Das stimmt mit dem in Abschnitt 2 der vorliegenden Arbeit festgestellten Verhalten der Meßwerte im optischen Bereich überein.

4. Zusammenfassung

Zwischen den Messungen der Lichtablenkung im optischen Bereich, die überwiegend Werte erbracht haben, die den theoretischen Wert übersteigen, und den radioastronomischen Messungen, die mit der Theorie übereinstimmen, besteht kein Widerspruch. Da die großen optischen Ablenkungsbeträge in unmittelbarer Nähe der Sonne auftreten, können alle Messungen dadurch erklärt werden, daß ein Zusatzterm zu der von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Ablenkung existiert; dieser Term verläuft umgekehrt proportional zur zweiten oder einer noch höheren Potenz des Abstandes von der Sonne und macht sich aus diesem Grund in den radioastronomischen Messungen fast nicht bemerkbar, weil diese in unmittelbarer Sonnennähe unmöglich sind. Die Möglichkeit, daß die Diskrepanzen zwischen dem gemessenen und dem theoretischen Wert der Lichtablenkung Meßfehlern zur Last fällt, bleibt unabhängig bestehen. Falls die Diskrepanz reell ist, ist sie nach den Resultaten von BOUET (1980 und 1982) mit großer Wahrscheinlichkeit ein solarer Effekt. Für die endgültige Klärung dieser Fragen sind weitere Beobachtungen sowohl im optischen Bereich als auch im Bereich der Radiowellen notwendig.

Literatur

- BOUET, J.: 1980, C.R. Acad. Sc. Paris 280, 91–93.
BOUET, J.: 1982, Solar physics 78, 185–187.

- COUNSELMAN, C. C. et al.: 1974, Phys. Review Letters 33, 1621—1623.
FOMALONT, E. B. and SRAMEK, R. A.: 1975, Astroph. J. 199, 749—755.
FOMALONT, E. B. and SRAMEK, R. A.: 1976, Phys. Review Letters 36, 1475—1478.
HILL, J. M.: 1971, Monthly Notices RAS 153, 7P.
JONES, B. F.: 1976, Astron. J. 81, 455—463.
KLÜBER, H. VON: 1960, Vistas in astronomy 3, 47—77.
MICHAILOV, A. A.: 1959, The Observatory 79, 80—86.
MUHLEMAN, D. O. et al.: 1970, Phys. Review Letters 24, 1377—1380.
RILEY, J. M.: 1973, Nature 254, 289.
SCHMEIDLER, F.: 1959, Astron. Nachr. 287, 7—16.
SCHMEIDLER, F.: 1985, Astron. Nachr. 306, 69—72.
SEIELSTAD, G. A. et al.: 1970, Phys. Review Letters 24, 1373—1376.
SRAMEK, R. A.: 1971, Astrophys. J. 167, L55—L60.
TREDER, H.-J. und GOTTLÖBER, S.: 1977, Astron. Nachr. 298, 133—136.
WEILER, K. W. et al.: 1974, Astron. and Astroph. 30, 241—248.
WEILER, K. W. et al.: 1975, Phys. Review Letters 35, 134—137.

Adresse des Autors:

F. SCHMEIDLER
Universitätssternwarte
D-8000 München
Scheinerstr. 1
Bundesrepublik Deutschland