

Über eine bisher unbekannte Verschiebung der Fraunhoferschen Linien des Sonnenspektrums.

Von *J. Halm*.

In den folgenden zwei Abhandlungen erlaube ich mir, die Hauptergebnisse meiner im Jahre 1901 begonnenen und seitdem ununterbrochen fortgeführten Untersuchung über die Rotation der Sonne nach der von Herrn Prof. Dunér vorgeschlagenen und von ihm bereits früher erfolgreich benutzten spektroskopischen Methode kurz zu veröffentlichen. Obgleich ein endgültiges Urteil über einige der erhaltenen Resultate erst möglich sein wird nach Ausdehnung der Beobachtungen über mindestens einen vollen Sonnenfleckzyklus, scheint es mir dennoch wichtig, jetzt schon die Aufmerksamkeit auf einige merkwürdige und bislang unbekannte Erscheinungen zu lenken, deren Realität nunmehr durch die Beobachtungen festgestellt zu sein scheint, und die nach meiner Ansicht verdienen, einer fortgesetzten allgemeinen Prüfung unterworfen zu werden.

Dies bezieht sich in erster Linie auf eine von mir entdeckte Veränderlichkeit der Wellenlängen der Fraunhoferschen Linien des Sonnenspektrums. Aus den unten mitgeteilten Zahlenreihen ergibt sich, daß die Fraunhoferschen Linien des Sonnenrandes, nach Abzug der durch die Sonnenrotation und die Bewegung des Beobachters gemäß des Dopplerschen Prinzips veranlaßten Verschiebungen, noch unzweifelhafte Spuren einer aus sicher bekannten Ursachen nicht erklärbaren Verschiebung aufweisen, die periodisch veränderlich ist und höchst wahrscheinlich in näherem Zusammenhang mit der Sonnentätigkeit steht. Eines der wichtigsten Resultate meiner Untersuchung, an dessen Möglichkeit merkwürdigerweise bei Aufstellung des Programms gar nicht gedacht wurde, ist dieses, daß die bei den Messungen benutzten Absorptionslinien des Sonnenspektrums sich im Laufe der Untersuchung, d. h. also zwischen den Jahren 1901 und 1906, allmählich nach dem Rot verschoben haben, und in dieser Richtung gegenwärtig etwa 0.02 Ångström-Einheiten von den Stellungen abweichen, die sie im Jahre 1901 eingenommen hatten. Als weiteres Ergebnis zeigte sich, daß die Linien des Sonnenrandes, verglichen mit denen des Sonnenzentrums, eine bestimmt nachweisbare Verschiebung nach Rot zeigten, daß diese Verschiebung jedoch für verschiedene Linien nicht die gleiche ist, sondern höchst wahrscheinlich bestimmt wird durch das Niveau, in welchem sich die betr. Linien emittierenden Gase in der Sonnenatmosphäre befinden.

Der Nachweis dieser bisher nicht beachteten Erscheinungen aus den Beobachtungen soll der Zweck meiner ersten Abhandlung sein. Dabei möge man mir es zu gute halten, wenn ich am Schlusse nach einer möglichen Erklärung Um-

schau halte und einige allgemeine Bemerkungen über die Bedeutung einer fortgesetzten Erforschung dieser merkwürdigen Phänomene für die Sonnenphysik anfüge.

Auf eine Beschreibung des Instruments kann ich hier verzichten, da das Nötige darüber in meiner Arbeit »Spectroscopic Observations of the Rotation of the Sun, Trans. Royal Society of Edinburgh, vol. XLI«, erfahren werden kann. So viel mag hier Erwähnung finden, daß das von mir konstruierte Instrument sich von dem von Herrn Dunér benutzten prinzipiell dadurch unterscheidet, daß der spektroskopische Apparat auf festen Tischen unveränderlich montiert ist, wodurch eine hervorragende Stabilität des Meßapparats und dementsprechende größere Genauigkeit der Beobachtungen erzielt wurde. Eine mehr nebensächliche, jedoch die Messungen wesentlich erleichternde Einrichtung des Edinburger Instruments beruht auf der Anwendung eines Heliometers zur Trennung der Sonnenbilder und gleichzeitigen Projektion gegenüberliegender Sonnenränder auf den Spalt des Spektroskops.

Hinsichtlich der Beobachtungsmethode bin ich Herrn Dunér durchaus gefolgt, der klar erkannt hatte, daß hier nur auf streng differentiell Wege etwas zu erreichen ist, und deshalb an jedem Rande die ausgewählten Sonnenlinien mit benachbarten Linien des tellurischen Spektrums verglich. Bei dieser differentiellen Methode hat man es vollkommen in der Hand, die unvermeidlichen systematischen Fehler, die aus den optischen Mängeln des Apparats entspringen, zu eliminieren, was bei direkten Vergleichen der solaren Linien beider Ränder, ohne Vermittelung der tellurischen Vergleichslinien, wohl kaum erwartet werden darf.

Die Verwendung der tellurischen Linien als Vergleichslinien ist natürlich auf die Voraussetzung gegründet, daß die relativen Bewegungen der von dem Lichtstrahl durchsetzten Schichten der Erdatmosphäre gegen den Beobachter gering genug sind, um eine Vernachlässigung der dadurch veranlaßten Verschiebungen der tellurischen Linien zu rechtfertigen. Für die Messungen der Sonnenrotation würden, wie man leicht einsieht, derartige Verschiebungen überhaupt nicht in Betracht kommen, wohl aber für die in gegenwärtiger Arbeit diskutierten Resultate. Eine leichte Rechnung überzeugt jedoch, daß selbst unter den extremsten Annahmen hinsichtlich möglicher Luftbewegung gegen den Beobachter, die Verschiebung weniger als $\frac{1}{1000}$ einer A. E. beträgt, und gegen die nachgewiesenen Verschiebungen der Sonnenlinien, die, wie schon bemerkt, mehrere Hundertstel dieser Einheit betragen, nicht in Betracht kommt.

Herr Dunér hatte seine Untersuchung auf zwei Eisenlinien des Sonnenspektrums beschränkt, die sich in mäßiger Entfernung von zwei tellurischen Linien der α -Gruppe befinden. Für diese vier Linien gibt Rowland die folgenden Wellenlängen:

6301.718	Fe
6302.209	O (α -Gruppe)
6302.709	Fe
6302.975	O (α -Gruppe)

Es schien mir zunächst von Wichtigkeit, besonders für die Frage etwaiger Veränderungen des Rotationsgesetzes, die Untersuchung an den gleichen Linien fortzusetzen, und erst nachdem bestimmte Resultate erreicht sind, an eine Erweiterung des Programms zu denken. Die Beobachtung der gleichen Linien ermöglicht natürlich eine direkte Vergleichung der Edinburger Beobachtungen mit den vorhergegangenen Resultaten des schwedischen Astronomen.

Infolge der Anlage des Instruments erscheinen im Beobachtungsfernrohr die Spektren zweier gegenüberliegender Sonnenränder von bekannter heliographischer Breite gleichzeitig nebeneinander. In jedem dieser Spektren werden die Abstände der vier Linien mikrometrisch bestimmt. Angenommen, wir bezeichnen die Mikrometerablesungen dieser vier Linien an dem einen Rande mit $\alpha_1, s_1, \alpha_2, s_2$, die an dem andern Rande mit $\alpha_1, \sigma_1, \alpha_2, \sigma_2$, und bilden die Differenzen

$$\alpha_1 - s_1 \quad \alpha_2 - s_2 \quad \alpha_1 - \sigma_1 \quad \alpha_2 - \sigma_2$$

so stellen offenbar die Differenzen

$$[\alpha_1 - s_1] - [\alpha_1 - \sigma_1] \text{ und } [\alpha_2 - s_2] - [\alpha_2 - \sigma_2] \quad (1)$$

in Teilen der Mikrometerschraube die doppelte Verschiebung der zwei solaren Linien dar, welche durch die Rotation der Sonne verursacht werden. Man sieht leicht ein, daß diese Differenzen nicht beeinflußt werden von Linienverschiebungen, die für beide Ränder in derselben Richtung stattfinden. Man erhält somit aus den Differenzen (1) den Betrag der linearen Rotationsgeschwindigkeiten unabhängig von den Verschiebungen, welche durch die Bewegung des Beobachters nach und von der Sonne hervorgerufen werden, da diese offenbar die Linien s und σ um gleiche Beträge und in derselben Richtung verschieben und daher aus (1) eliminiert werden.

Man kann nun aber auch so mit den Beobachtungen verfahren, daß man die Summen statt der Differenzen bildet, also:

$$[\alpha_1 - s_1] + [\alpha_1 - \sigma_1] \text{ und } [\alpha_2 - s_2] + [\alpha_2 - \sigma_2] \quad (2)$$

Hieraus sind nun umgekehrt diejenigen Verschiebungen eliminiert, welche durch die Sonnenrotation hervorgerufen sind, d. h. welche die beiden Sonnenränder in entgegengesetzter Weise affizieren, während Verschiebungen infolge von Bewegungen des Beobachters gegen die Sonne mit vollem Betrage zur Erscheinung kommen. Die Summen (2) stellen offenbar die doppelten Abstände der Linien α_1, s_1 und α_2, s_2 dar, wie sie gefunden worden wären, wenn anstelle der gegenüberstehenden Sonnenränder die Sonnenmitte beobachtet worden wäre.

Während somit die Differenzen (1) dazu benutzt werden können, die synodische und daraus die siderische Umlauf-

zeit für verschiedene heliographische Breiten zu bestimmen, unabhängig von den Ortsveränderungen des Beobachters in bezug auf die Sonne, können die Summen (2) dazu dienen, letztere zu konstatieren und dadurch einen wertvollen Maßstab für die Leistungsfähigkeit des Instruments zu erlangen. In dieser Absicht wurde zunächst die Untersuchung begonnen, deren Resultate ich nachstehend mitteile, und die zur Entdeckung jener merkwürdigen Linienverschiebung führte, von der ich eingangs gesprochen habe.

Zur Messung der relativen Abstände der vier Linien an jedem Sonnenrande diente ein Fadenmikrometer mit zwei Paaren von parallelen Fäden, die in einem Abstand von $1\frac{1}{2}$ Schraubenrevolutionen eingezogen waren. Die Einstellung geschah in der bei Ablesungen von Kreisen üblichen Weise; jedes der beiden Fädenpaare wurde nacheinander auf jede der vier Absorptionslinien so eingestellt, daß letztere das Fadenintervall halbierten. Dabei wurde Sorge getragen, daß die Einstellungen genau auf den sehr scharf begrenzten jedesmaligen Sonnenrand erfolgten, was keinerlei Schwierigkeiten machte. Ein vollständiger Beobachtungssatz bestand aus 16 Einstellungen an jedem Sonnenrande, die mit beiden Fädenpaaren und in entgegengesetzten Richtungen vorschreitend gemacht wurden.

Der Wert einer Schraubenumdrehung in Wellenlängen mußte für jede Beobachtungsreihe besonders bestimmt werden. Derselbe basiert auf dem Abstand der beiden tellurischen Linien voneinander. Die Differenz der Wellenlängen dieser beiden Linien wurde nach einem Verfahren, auf das ich hier nicht näher eingehen möchte, mit möglichster Sorgfalt bestimmt und 0.763 A. E. gefunden. Dieser Wert, der mir innerhalb einer Einheit der letzten Dezimale verbürgt erscheint, wurde allen Rechnungen zugrunde gelegt, indem der Abstand der beiden tellurischen Linien als unveränderlich angenommen, und unter dieser Voraussetzung an jedem einzelnen Beobachtungstage zur Ermittlung des Schraubenswertes benutzt wurde. Ein kleiner Fehler in dem zugrunde liegenden Abstände wäre übrigens, wie man bald einsehen wird, ohne Einfluß auf die nachfolgenden Resultate.

Um das befolgte Reduktionsverfahren an einem Beispiel darzulegen, wähle ich einen Beobachtungssatz, der am 4. Juli 1906 erhalten wurde. Die heliographische Breite der beiden beobachteten Punkte des Sonnenrandes ist $80^\circ 2'$, die wahre Ortszeit der Beobachtung $21^h 45^m$.

Erster Sonnenrand.

$$\alpha_1 = 30.761 \quad s_1 = 31.478 \quad \alpha_2 = 33.369 \quad s_2 = 34.876 .$$

Zweiter Sonnenrand.

$$\alpha_1 = 30.760 \quad \sigma_1 = 31.727 \quad \alpha_2 = 33.376 \quad \sigma_2 = 35.134 .$$

Daraus

$$\begin{aligned} [\alpha_1 - s_1] + [\alpha_1 - \sigma_1] &= 1^R 684 \\ [\alpha_2 - s_2] + [\alpha_2 - \sigma_2] &= 3^R 265^* . \end{aligned}$$

Ferner

$$\begin{aligned} \alpha_2 - \alpha_1 &= 2^R 608 \\ \alpha_2 - \alpha_1 &= 2.616 \\ \text{Mittel} &= 2.612 . \end{aligned}$$

Folglich

$$1^R = \frac{0.763}{2.612} \text{ A. E.} = 0.2921 \text{ A. E.}$$

*) Das Vorzeichen kann natürlich hier vernachlässigt werden.

Demnach ist der beobachtete Abstand der Linien a_1 und s_1 , auf die Sonnenmitte reduziert:

$$0.842 \times 0.2921 = 0.2460 \text{ A. E.}$$

und der Abstand der Linien a_2 und s_2 :

$$1.6325 \times 0.2921 = 0.4769 \text{ A. E.}$$

Statt jedes dieser beiden Linienpaare einzeln zu untersuchen, sind die folgenden Rechnungen auf das arithmetische Mittel der beiden bezogen, welches in diesem Falle offenbar $\frac{0.2460 + 0.4769}{2} = 0.3614 \text{ A. E.}$ wäre.

Andererseits dienen zur Ermittlung der linearen Rotationsgeschwindigkeiten die Gleichungen:

$$[a_1 - s_1] - [\alpha_1 - \sigma_1] = 0.250$$

$$[a_2 - s_2] - [\alpha_2 - \sigma_2] = 0.251$$

Folglich ist die Verschiebung der solaren Linien infolge der Sonnenrotation $0.1252 \times 0.2921 = 0.03657 \text{ A. E.}$

Ich wende mich nun zur Diskussion der Werte, welche für die Ausdrücke (2) aus dem den ganzen Zeitraum der Beobachtungen umfassenden Material erhalten wurden. Beschränken wir uns einstweilen auf diejenigen Verschiebungen der solaren Linien, welche von einer Bewegung des Beobachters nach oder von der Sonne herrühren, so sind hier dreierlei Bewegungen zu berücksichtigen, nämlich:

1. Die tägliche Bewegung. Die hieraus entstehende Verschiebung in A. E. berechnet sich aus der Formel

$$0.0054 \cos \delta_{\odot} \sin t_{\odot}$$

wo δ_{\odot} die Deklination, t_{\odot} den Stundenwinkel der Sonne bedeutet. Die beobachteten Abstände as sind größer am Vormittag, kleiner am Nachmittag.

2. Die jährliche Bewegung, welche numerisch dargestellt wird durch den Ausdruck $0.0105 \sin (\odot - 281^{\circ}3)$. Die beobachteten Abstände erreichen Maxima im Herbst (Anfang Oktober) und Minima im Frühling (Anfang April).

3. Die Bewegung der Erde um den Schwerpunkt Erd-Mond. Diese Bewegung veranlaßt Verschiebungen, die im Maximum nur 0.0003 A. E. betragen. Sie könnten füglich hier außer acht gelassen werden, sind jedoch der Vollständigkeit halber berücksichtigt worden.

In der Behandlung des Materials bin ich in der Weise vorgegangen, daß ich mit der Sonnenlänge fortschreitende Gruppen der Werte

$$\frac{1}{4} [(a_1 - s_1) + (\alpha_1 - \sigma_1) + (a_2 - s_2) + (\alpha_2 - \sigma_2)]$$

bildete, die ungefähr 20-30 Einzelsätze umfaßten. An jeden dieser Gruppenwerte sind die Korrekturen angebracht worden, die den vorerwähnten drei Bewegungen des Beobachters entsprechen. Das endgültige Resultat dieser Rechnungen ist in der folgenden Tabelle I gegeben.

Tabelle I.

Epoche der Beob.	Beob. Abstand der solaren von den tell. Linien	Epoche der Beob.	Beob. Abstand der solaren von den tell. Linien	Epoche der Beob.	Beob. Abstand der solaren von den tell. Linien
1901.64	0.3840 A. E.	1903.43	0.3705 A. E.	1905.42	0.3717 A. E.
.68	0.3834	.63	0.3678	.45	0.3705
.83	0.3823	.72	0.3713	.48	0.3701
1902.17	0.3870	.79	0.3726	.54	0.3715
.26	0.3813	.84	0.3732	.78	0.3658
.48	0.3824	1904.16	0.3712	1906.11	0.3655
.67	0.3783	.27	0.3698	.14	0.3651
.80	0.3767	.41	0.3728	.29	0.3628
1903.19	0.3732	.50	0.3746	.42	0.3637
.31	0.3742	.71	0.3722	.44	0.3621
.40	0.3710	.75	0.3719	.55	0.3648

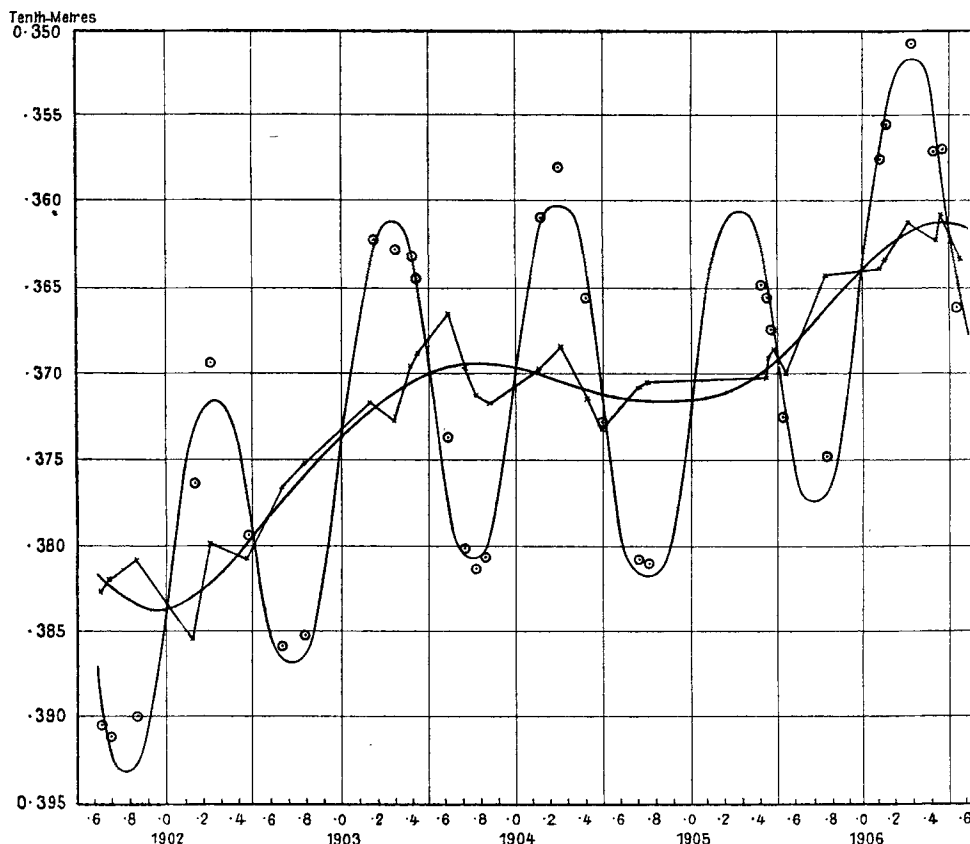
Ein Blick auf die Zahlenwerte dieser Tabelle zeigt, daß der Abstand zwischen den solaren und tellurischen Linien während des ganzen Zeitraums stetig abgenommen hat. Der Charakter dieser Veränderungen wird indessen viel deutlicher, wenn sie in Form einer Kurve dargestellt werden, wie dies in der beifolgenden Figur geschehen ist, woselbst die gebrochene Kurve die Zahlenwerte der vorstehenden Tabelle repräsentiert. Aus dieser Kurve geht hervor, daß die Verkleinerung des Abstandes nicht gleichförmig stattgefunden hat. Es scheint, als ob einer längeren Periode, deren Abschluß noch längst nicht erreicht ist, eine kürzere, etwa dreijährige Periode superponiert ist. Um gleichzeitig einen Begriff von der Genauigkeit zu geben, mit welcher die jährliche Bewegung von den Beobachtungen wiedergegeben wird, habe ich die Gruppenwerte, wie sie ohne Abzug der jährlichen Bewegung erhalten werden, in derselben Figur durch kleine Kreise dargestellt. Angesichts der vorzüglichen Wiedergabe dieser jährlichen Bewegung durch die Beobach-

tungen kann wohl an der Realität der vorerwähnten Verschiebung, deren Amplitude von derselben Größe ist, nicht gezweifelt werden.

Daß es sich hierbei nicht um Verschiebungen der tellurischen Linien handeln kann, wird ebenfalls ohne weiteres zugegeben werden müssen. Die Größe der Verschiebung schließt jeden Gedanken an eine solche Erklärung aus.

Von Interesse ist die Frage, ob beide solaren Linien sich um denselben Betrag gegen die tellurischen Linien verschoben haben. Die Beobachtungen geben auf diese Frage eine bejahende Antwort. Der Abstand betrug im Jahre 1901 0.9922 A. E. , im Jahre 1906 0.9915 A. E. Der Unterschied zwischen beiden Werten ist jedenfalls zu gering, um für reell erklärt zu werden.

Geben wir die Realität der nachgewiesenen Verschiebung zu, so sind wir zugleich genötigt, ihren Ursprung in Vorgängen auf der Sonne zu suchen. Dabei dürfen wir nicht aus dem Auge verlieren, daß die Untersuchung sich bis jetzt nur



auf Punkte des Sonnenrandes bezogen hat. Wir dürfen noch nicht den Schluß ziehen, daß das Phänomen sich in derselben Weise gezeigt haben würde, wenn statt der beiden Sonnenränder die Sonnenmitte beobachtet worden wäre. Es schien mir sogar von vornherein nicht nur wahrscheinlich, sondern notwendig, daß, falls es sich hier um ein wirkliches Sonnenphänomen handelt, dessen Äußerung am Rande und in der Mitte der Sonnenscheibe wesentlich verschieden sein müsse. Diese Überlegung bestimmte mich, die am Rande gemessenen Abstände zwischen den solaren und tellurischen Linien direkt mit den in der Mitte der Sonnenscheibe gemessenen zu vergleichen, um zu erfahren, ob ein Unterschied zwischen beiden bemerkbar sei. Ich führte demgemäß zwischen Mai und August dieses Jahres eine längere Beobachtungsreihe aus, indem ich zunächst, wie vorher beschrieben, die Abstände

für zwei gegenüber liegende Punkte des Sonnenrandes bestimmte und durch Mittelbildung den Einfluß der Rotation eliminierte, zugleich aber auch jedesmal das Spektroskop genau auf die Mitte der Sonnenscheibe richtete und den Abstand zwischen den solaren und tellurischen Linien für diesen Punkt bestimmte. Als Resultat ergab sich, daß der Abstand αs für den Sonnenrand jedesmal erheblich kleiner gefunden wurde als für die Sonnenmitte. Mit anderen Worten: verglichen mit der Sonnenmitte erschienen die beiden solaren Linien am Rande merklich gegen Rot hin verschoben. In der Tabelle II teile ich die Resultate dieser Beobachtungen mit, wobei ich bemerke, daß die angeführten Zahlen die Unterschiede der gemessenen Abstände in A. E. im Sinne Mitte — Rand darstellen.

Tabelle II.

1906	Mitte — Rand	Gew.	1906	Mitte — Rand	Gew.	1906	Mitte — Rand	Gew.
Mai 25	+0.012 A. E.	7	Juni 9	+0.009 A. E.	4	Juni 19	+0.013 A. E.	2
26	+0.015	3	10	+0.014	12	Juli 3	+0.011	5
27	+0.013	7	11	+0.014	15	4	+0.012	1
31	+0.010	2	12	+0.011	9	12	+0.009	1
Juni 1	+0.010	2	13	+0.011	5	19	+0.012	1
2	+0.012	2	15	+0.012	5	26	+0.012	3
4	+0.012	3	16	+0.014	3	Aug. 6	+0.012	3

Als Mittel ergibt sich +0.012 A. E. Um eine unabhängige Bestätigung dieser Messungen durch einen anderen Beobachter zu erhalten, habe ich Herrn Prof. Dyson gebeten,

einige Messungen anzustellen, die zu dem gleichen Resultat führten. Herr Dyson hat nämlich an zwei Tagen, Juni 1 u. 2, je vier Beobachtungen angestellt und die resp. Werte +0.013

und $+0.011$ A. E. erhalten. Der Betrag der Verschiebung hängt nicht merklich von der heliographischen Breite ab, und ist für die Pole wesentlich derselbe wie für den Äquator. Ferner habe ich mich des öfters überzeugt, daß die Weite des Spaltes keinen Einfluß auf die Erscheinung hat, sowie daß es gleichgültig ist, ob man mit radial oder tangential gerichtetem Spalt beobachtet.

Angesichts des interessanten Resultats der Tabelle II schien es von Wichtigkeit, zu untersuchen, ob andere Linien des Sonnenspektrums dasselbe Verhalten zeigen. Für drei solare Linien innerhalb der α -Gruppe fand ich Unterschiede von annähernd denselben Beträgen. Aus den wenigen Beobachtungen, die ich wegen anhaltend schlechten Wetters bis jetzt habe anstellen können, läßt sich nicht mit Sicherheit schließen, ob die geringen Schwankungen in den gemessenen Beträgen reell sind. Zu bemerken ist, daß alle diese Linien, ebenso wie die beiden Eisenlinien meiner obigen ausführlichen Untersuchung, in Sonnenflecken stark verbreitert erscheinen und daher wahrscheinlich einem niedrigen Niveau der Sonnenatmosphäre angehören.

In einem auffallenden Gegensatz zu diesen Resultaten steht das Verhalten der Linie $\lambda = 6516.31$, die nach den schönen Untersuchungen des Herrn Prof. Fowler in einem relativ hohen Niveau der Sonnenatmosphäre ihren Ursprung hat, was sowohl aus ihrem abweichenden Verhalten in den Sonnenflecken, als auch aus ihrer häufigen Anwesenheit in der Chromosphäre gefolgert wird. Wie aus den Zahlen der Tabell III hervorgeht, ist hier die Verschiebung nach Rot am Rande viel geringer als bei den vorigen Linien.

Entfernung von Sonnenmitte:	0	$\frac{1}{2}r$	$\frac{3}{4}r$	r (Rand)
Relative Verschiebung nach Rot:	0	$+0.002$	$+0.007$	$+0.012$ A. E.

Es zeigt sich somit, daß die Verschiebung nicht auf die unmittelbare Umgebung des Randes beschränkt ist, sondern schon in dem Abstand $\frac{1}{4}r$ vom Rande recht merklich ist. Um das Gesetz der Änderung von Mitte nach Rand hin festzustellen, bedarf es natürlich einer größeren Zahl von Zwischenpunkten. Eine eingehendere Untersuchung ist bereits in Angriff genommen.

Was nun die mögliche Ursache dieser von der Mitte nach dem Rande zunehmenden Verschiebung nach Rot betrifft, so liegt es auf den ersten Blick nahe, innerhalb des Bereiches des Dopplerschen Prinzips Umschau zu halten, d. h. die Verschiebung durch Bewegungen der emittierenden Gase der Sonnenatmosphäre erklären zu wollen. Die Annahme, daß die Sonnenmaterie in fortwährender radial gerichteter Strömung von und nach dem Sonnenzentrum begriffen sei, wird wohl noch immer von vielen Astronomen für wahrscheinlich gehalten. Auf dieser Annahme fußend, könnte man nun versucht sein, die erwähnte Verschiebung dadurch zu erklären, daß die absorbierenden Gase in den auswärts gerichteten, d. h. vom Sonneninnern aufsteigenden, Strömungen enthalten seien. In diesem Falle würde die Absorptionslinie in der Mitte der Sonnenscheibe nach dem Violett zu verschoben sein, am Rande dagegen sich in normaler Lage befinden. Es würde somit, den Beobachtungen entsprechend, eine scheinbare Verschiebung der Randlinien nach Rot hin wahrnehmbar sein.

Tabelle III.

Verschiebung der Linie $\lambda = 6516.31$ am Sonnenrande verglichen mit der Sonnenmitte. (+ Verschiebung nach Rot).

Juli 3	$+0.005$ A. E.	(6)
4	$+0.001$	(3)
5	-0.002	(2)
11	$+0.003$	(3)
12	0.000	(1)
19	0.000	(1)
26	0.000	(4)

Mittel: $+0.002$ A. E.

Diese Verschiedenheit in dem Verhalten der Linien niederen und hohen Niveaus scheint mir eingehender Beachtung wert, da sie wohl besonders geeignet ist, über die physikalische Ursache der entdeckten Verschiebung Aufklärung zu verschaffen.

Nachdem das Verhalten der beiden Eisenlinien in der Sonnenmitte und am Rande untersucht war, blieb noch die Frage übrig, wie sich diese Linien für zwischenliegende Punkte der Sonnenscheibe verhalten. Zu diesem Zwecke wurde ein beliebiger Sonnendurchmesser in den Entfernungen 0 , $\frac{1}{2}r$, $\frac{3}{4}r$ und r auf beiden Seiten vom Zentrum beobachtet und die Messungen der zum Sonnenzentrum symmetrischen Punkte in derselben Weise wie oben zu Mitteln vereinigt. Die außerhalb der Mitte gemachten Messungen wurden dann mit denen der Mitte verglichen. Auf diese Weise ergaben sich aus 19 Beobachtungssätzen die folgenden relativen Verschiebungen nach Rot:

Bei näherer Betrachtung scheint die Hypothese jedoch ganz unhaltbar. Zunächst ist die notwendig erforderliche Annahme, daß das emittierende Gas im aufsteigenden Strom kühler sei als im absteigenden — denn nur so würde sich eine Verschiebung der Absorptionslinien nach der gewünschten Seite erklären lassen — physikalisch schwer zu verteidigen. Aber selbst wenn wir uns über diese Schwierigkeit wegsetzen, bleibt die Hypothese zur Erklärung aller beobachteten Erscheinungen doch noch unzureichend. Man sieht ohne weiteres ein, daß sie die in der Figur so klar erwiesene Veränderlichkeit der Wellenlängen der Randlinien nicht zu deuten vermag. Denn wollte man annehmen, daß diese Veränderlichkeit von zeitlichen Schwankungen in der Geschwindigkeit der radialen Strömungen herrühre, so könnten doch davon die Linien am Sonnenrande nicht betroffen werden, da dort der Einfluß derartiger Strömungen auf die Lage der Spektrallinien gänzlich verschwindet.

Die Annahme tangentialer, d. h. längs der Sonnenoberfläche verlaufender Strömungen muß von vornherein verworfen werden, da vorauszusetzen wäre, daß in jedem Augenblick und für jeden Punkt der Sonnenscheibe die Bewegung längs der Sonnenoberfläche nach dem Rande zu gerichtet sein müßte.

Aus dieser Überlegung ergibt sich also, daß weder radiale noch tangentialer Bewegungen der Sonnenatmosphäre zur Erklärung der beobachteten Linienverschiebungen aus-

reichen, und demnach wohl allgemein von einem Versuch, letztere aus dem Dopplerschen Prinzip zu erklären, Abstand genommen werden muß.

Damit sind wir auf den einzigen noch möglichen Erklärungsversuch beschränkt, den unsere jetzige Kenntnis des Verhaltens der Spektrallinien zuläßt, nämlich die beobachteten Linienverschiebungen dem Drucke zuzuschreiben, unter welchem die emittierenden Gase der Sonnenatmosphäre sich befinden. Der Nachweis eines Einflusses des Druckes auf die Wellenlängen der Fraunhoferschen Linien ist schon vor längerer Zeit Herrn Jewell gelungen, der aus den Rowland'schen Aufnahmen zeigte, daß die Wellenlängen des Sonnenspektrums durchschnittlich um etwa $\frac{2}{100}$ A. E. nach dem Rot zu von den normalen Wellenlängen abwichen. Es scheint jedoch bis jetzt nicht aufgefallen zu sein, daß der Betrag dieser Verschiebung am Rande größer sein muß als in der Mitte. Der Unterschied zwischen Rand und Mitte rührt daher, daß am Rande die tiefer gelegenen, und daher unter höherem Druck stehenden, Schichten einen verhältnismäßig größeren Beitrag zur Erscheinung der Absorptionslinie liefern, und daher der Schwerpunkt der letzteren mehr nach dem Rot verschoben sein muß, als in der Mitte der Sonnenscheibe, Dies erhellt aus einer elementaren geometrischen Betrachtung.

Nehmen wir an, eine absorbierende Schicht von der Dicke Δh befinde sich im Abstände h von der Photosphäre; der Sonnenradius sei R . Dann ist der Weg, den ein von der Photosphäre ausgehender Lichtstrahl in dieser Schicht zu durchlaufen hat, im Zentrum der Sonnenscheibe Δh , am

Rande dagegen in hinreichender Annäherung $\Delta h \sqrt{\frac{R}{2h}}$. Das Verhältnis der beiden Wege ist also $\sqrt{\frac{R}{2h}}$, und in demselben

Verhältnis stehen auch die Mengen der von dem Lichtstrahl getroffenen absorbierenden Gasatome. Je näher der Photosphäre die betrachtete Schicht liegt, d. h. je kleiner h , um so intensiver wird die Absorptionswirkung am Rande, verglichen mit derjenigen in der Mitte.

Denken wir uns nunmehr die Gesamtschicht eines Gases, das eine bestimmte Absorptionslinie erzeugt, in engere Schichten gleicher Dicke zerlegt, so wird, z. B. in der Sonnenmitte, jede dieser Schichten, nach Maßgabe ihrer Temperatur und Dichte, einen bestimmten Beitrag zur gesamten Absorptionslinie liefern. Gehen wir aber von der Mitte nach dem Rande zu, so wird sich das Verhältnis dieser Beiträge stetig ändern, und zwar mehr und mehr zugunsten der tiefer gelegenen dichteren Schichten, in denen ja die Menge der absorbierenden Substanz ungleich rascher zunimmt als in den höheren.

Diese Überlegung scheint mir hinreichend, um die von der Mitte nach dem Rande zu beobachtete Verschiebung nach Rot zu erklären. Sie gibt auch zugleich darüber Aufschluß, warum die Linien, die einem niedrigen Niveau angehören, eine stärkere Verschiebung zeigen müssen, als die in einem höheren Niveau ihren Ursprung nehmenden Linien, eine Tatsache, die aus den angeführten Beobachtungen so deutlich hervorgeht.

Ferner sieht man ein, daß etwaige zeitliche Änderungen des Druckes der Sonnenatmosphäre sich besonders in den Linienverschiebungen des Randes anzeigen müssen, so daß

also die merkwürdigen Veränderungen der Lage der Sonnenlinien, welche durch die gewundene Kurve der beigegebenen Figur dargestellt sind, qualitativ wenigstens physikalisch deutbar werden. Von diesem Gesichtspunkte aus betrachtet würden demnach die Beobachtungen dahin auszulegen sein, daß von 1901 bis 1906, d. h. von einem Sonnenfleckenminimum zu einem Maximum, der Druck innerhalb der Sonnenatmosphäre stetig größer geworden sei. Dieses Resultat mag auf den ersten Blick befremdlich erscheinen. Bei näherer Betrachtung muß man aber doch wohl zugeben, daß derartige Änderungen in der Sonne zum mindesten möglich sind. Erwägt man, daß die Sonne ein wesentlich gasförmiger Körper ist, und daß nach Ansicht der Majorität der Astrophysiker die sogenannte Photosphäre diejenige Schicht darstellt, innerhalb welcher sich einige der Gase zu Flüssigkeiten kondensieren, so kann man sich sehr wohl die Frage vorlegen, ob das Niveau, in welchem diese Kondensation stattfindet, zu allen Zeiten unverändert dasselbe ist, oder ob nicht etwa infolge von periodischen Schwankungen in den Temperaturverhältnissen des Sonnenkörpers dieses Niveau der Photosphäre kleinen Veränderungen unterworfen ist. In letzterem Falle würde die Masse der über dieser Photosphäre lagernden absorbierenden Atmosphäre und damit der Druck auf die ersterer benachbarten Schichten ebenfalls veränderlich sein. Gegen diesen Erklärungsversuch scheint freilich die Tatsache zu sprechen, daß die sorgfältigen heliometrischen Messungen von Schur und Ambronn keine sicher nachweisbare Veränderlichkeit des Sonnendurchmessers ergeben haben. Man darf aber andererseits nicht vergessen, daß diese Messungen nicht innerhalb 0",1 verbürgt sind, so daß wir also noch nicht imstande sind, Niveauschwankungen von etwa 70–80 km heliometrisch nachzuweisen. Auf der Sonne mögen aber sehr wohl bereits derartigen Schwankungen merkliche Druckunterschiede entsprechen.

Ich bin natürlich weit davon entfernt, jetzt schon die hier vorgetragene Druckhypothese als begründet zu erachten. Dazu bedarf es weit eingehenderer Untersuchungen, als ich bis jetzt habe unternehmen können. Soviel dürfte aber aus den mitgeteilten Resultaten und den daran angeschlossenen Vermutungen hervorgehen, daß es sich hier um wichtige Fragen handelt, die eventuell für die Sonnenphysik von großer Bedeutung werden können. Denn falls durch fortgesetzte Untersuchungen der Beweis erbracht wird, daß es sich hier wirklich um Druckänderungen innerhalb der die Photosphäre umgebenden absorbierenden Schichten handelt, so ist damit zugleich dargetan, daß die Dichtigkeit dieser Hülle und somit ihr Absorptionsvermögen Schwankungen unterworfen ist. Es ist also damit die Aussicht eröffnet, auf eine der bedeutendsten Fragen der Sonnenphysik, deren Lösung die Aktinometrie bis jetzt nur mit geringem Erfolge angestrebt hat, eine entscheidende Antwort zu geben, nämlich auf die Frage, ob die Intensität der uns von der Sonne zugesandten strahlenden Energie konstant oder periodisch veränderlich ist.

In bezug auf die etwa 3-jährige Periode, welche sich in der Kurve erkennen läßt, bemerke ich, daß bereits Herr Dr. Lockyer auf die Existenz einer solchen Periode der solaren Erscheinungen in seinen Arbeiten über die Beziehungen zwischen Sonnentätigkeit und meteorologischen Phänomenen hingewiesen hat. Dieselbe scheint sich besonders deutlich

in der Häufigkeitskurve der Prominenz zu offenbaren, während sie in der Fleckenkurve kaum je deutlich zum Ausdruck kommt.

Es ist von Interesse darauf hinzuweisen, daß deutliche Spuren einer solchen Periode auch in den in der folgenden Arbeit diskutierten Jahresresultaten der Sonnenrotation zu finden sind. Merkwürdig ist ferner, daß auch in den Differenzen des äquatorialen und polaren Sonnendurchmessers, die Herr Poor aus den Schur-Ambronnischen Messungen abgeleitet hat (Astrophys. Journal, vol. XXII, p. 312), diese Periode recht deutlich hervortritt, obgleich ich keineswegs verkennen will, daß man wohl Ursache hat, die Realität dieser Resultate in Frage zu stellen.

Die Überlagerung dieser kurzen Periode auf dem ansteigenden Ast einer anderen längeren Schwankung hat zur Folge, daß während des Zeitraums von 1903-1905 der Abstand zwischen den solaren und tellurischen Linien ziemlich konstant derselbe geblieben ist. Ich habe diesen Umstand benutzt, um die jährliche und tägliche Verschiebung, die aus der Bewegung des Beobachters gegen die Sonne entsteht, aus den Beobachtungen rechnerisch abzuleiten. Eine derartige Untersuchung ist von Interesse, da sie einerseits einen vorzüglichen Maßstab bietet für die Genauigkeit der Beobachtungen, andererseits zwei neue bis jetzt noch nicht an Schärfe erreichte kosmische Bestätigungen der Gültigkeit des Dopplerschen Prinzips liefert.

Um zunächst die jährliche Periode zu erhalten, wurden alle Beobachtungen wegen des täglichen Gliedes korrigiert und nach der Sonnenlänge in Gruppen von gleichem Gewicht geordnet. Die so erhaltenen Werte wurden dann benutzt, um die Konstanten der Formel $A + a \sin(\odot - \alpha)$ nach der Methode der kleinsten Quadrate zu berechnen. Es wurde gefunden: $A = 0.3715$, $a = -0.01048 \pm 0.00032$, $\alpha = 281^\circ 4 \pm 1^\circ 9$. Wie oben bemerkt, sind die aus der Erdbewegung sich ergebenden Konstanten $a = 0.0105$ und $\alpha = 281^\circ 3$. Die in den Beobachtungen übrig bleibenden Fehler sind in der folgenden Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4.

\odot	Distanz in A. E.		B - R
	beobachtet	berechnet	
337°	0.3626	0.3628	-0.0002
0	0.3623	0.3612	+0.0011
8	0.3588	0.3610	-0.0022
24	0.3612	0.3613	-0.0001
48	0.3640	0.3631	+0.0009
61	0.3631	0.3647	-0.0016
65	0.3660	0.3653	+0.0007
70	0.3665	0.3660	+0.0005
73	0.3690	0.3665	+0.0025
77	0.3673	0.3672	+0.0001
81	0.3685	0.3679	+0.0006
83	0.3665	0.3682	-0.0013
88	0.3674	0.3691	-0.0017
93	0.3676	0.3700	-0.0024
95	0.3717	0.3703	+0.0014
103	0.3726	0.3718	+0.0008
120	0.3772	0.3749	+0.0023
151	0.3777	0.3795	-0.0018

\odot	Distanz in A. E.		B - R
	beobachtet	berechnet	
170°	0.3807	0.3813	-0.0006
176	0.3817	0.3816	+0.0001
183	0.3816	0.3819	-0.0003
197	0.3823	0.3819	+0.0004
201	0.3813	0.3819	-0.0006
214	0.3824	0.3817	+0.0007

Der mittlere Fehler eines Gruppenwerts ergibt sich zu ± 0.0013 A. E.

Wie der für a gegebene Fehler zeigt, läßt sich aus diesen spektroskopischen Beobachtungen die Exzentrizität der Erdbahn bis auf etwa drei Prozent genau ermitteln. Um umgekehrt die tägliche Verschiebung zu ermitteln, wurden die Beobachtungen in bezug auf das jährliche Glied korrigiert, und dann nach dem Stundenwinkel der Sonne in Gruppen geordnet. Wie die Formel zeigt, hängt der Betrag der Verschiebung von $\cos \delta_{\odot}$ ab. Da aber der mittlere Wert von $\cos \delta_{\odot}$ sich nicht viel von der Einheit unterscheidet und für alle Gruppen nahezu der gleiche ist, habe ich denselben nicht weiter bei der Gruppenbildung berücksichtigt, so daß die Rechnungen den Faktor $b \cos \delta_{\odot}$ ergeben, wo $\cos \delta_{\odot} = 0.957$ zu setzen ist. Stellt man nun die Gruppenwerte durch eine Formel $A + b \cos \delta_{\odot} \sin t_{\odot}$ dar, worin t_{\odot} den Stundenwinkel der Sonne bedeutet, so erhält man folgende Werte für die Unbekannten:

$$A = 0.3716, \quad b \cos \delta_{\odot} = -0.00502 \pm 0.00017 \text{ A. E.}$$

Daraus folgt für $b = 0.00525$ A. E., während der aus der Erdrotation für Edinburg berechnete Wert 0.0054 A. E. ist. Die beobachteten und berechneten Distanzen as sind in der folgenden Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5.

t_{\odot}	Distanz in A. E.		B - R
	beobachtet	berechnet	
-34°3	0.3742	0.3745	-0.0003
-23.1	0.3733	0.3736	-0.0003
-18.7	0.3742	0.3732	+0.0010
-13.7	0.3730	0.3728	+0.0002
-10.8	0.3715	0.3725	-0.0010
-7.4	0.3727	0.3722	+0.0005
-4.9	0.3718	0.3720	-0.0002
-1.9	0.3718	0.3718	0.0000
+0.9	0.3715	0.3715	0.0000
+3.9	0.3712	0.3712	0.0000
+6.7	0.3709	0.3710	-0.0001
+9.7	0.3706	0.3707	-0.0001
+13.2	0.3706	0.3704	+0.0002
+18.9	0.3691	0.3700	-0.0009
+32.7	0.3688	0.3688	0.0000
+38.1	0.3691	0.3685	+0.0006
+43.1	0.3682	0.3681	+0.0001
+48.6	0.3673	0.3678	-0.0005
+55.8	0.3679	0.3674	+0.0005
+69.0	0.3667	0.3668	-0.0001
+85.2	0.3664	0.3665	-0.0001

Der mittlere Fehler eines Gruppenwertes ist in diesem Falle ± 0.00049 , also erheblich kleiner als bei der jährlichen

Verschiebung. Dieser Unterschied mag wohl eine reelle Ursache haben, die vielleicht darin zu finden ist, daß außer den bemerkten periodischen Schwankungen kleine Verschiebungen von kurzer unregelmäßiger Periode die Werte der Tabelle 4 entstellen. Aus dem zuletzt mitgeteilten mittleren

Fehler, den wir wohl mit einigem Recht als den rein zufälligen Beobachtungsfehler eines Gruppenwertes ansehen dürfen, ergibt sich der mittlere Fehler eines einzelnen Beobachtungssatzes zu ± 0.0025 A. E.

Edinburgh, Royal Observatory, August 1906.

J. Halm.

Ein Beitrag zur Bestimmung der Rotation der Sonne.

Von *J. Halm.*

Die spektroskopischen Beobachtungen der Rotation der Sonne, deren vorläufige Resultate ich im folgenden mitteile, wurden in der Absicht unternommen, einen Beitrag zu der bis jetzt unbeantworteten Frage zu liefern, ob die Rotationsgeschwindigkeit der Oberflächenschichten des Sonnenkörpers, wie wohl bisher allgemein angenommen wurde, unveränderlich dieselbe sei, oder ob und in welchem Maße sie etwa von den sich innerhalb einer Sonnenfleckperiode abspielenden Vorgängen auf und in der Sonne beeinflußt werde.

Nachdem durch die ausgezeichneten Untersuchungen des Herrn Dunér die außerordentliche Leistungsfähigkeit der spektroskopischen Methode klargestellt war, und die optischen Hilfsmittel der hiesigen Sternwarte vermuten ließen, daß diese Leistungsfähigkeit noch gesteigert werden könne, erschien die Aufnahme einer derartigen Untersuchung in das Arbeitsprogramm des Instituts als ein zwar kühnes, aber doch keineswegs von vornherein hoffnungsloses Wagnis. Daß der Versuch nicht ergebnislos war, ist ja schon durch die interessanten »Nebenresultate« bewiesen, die ich in der vorhergegangenen Arbeit mitgeteilt habe. Aber auch hinsichtlich der soeben ausgesprochenen Hauptfrage haben, wie die folgende Mitteilung zeigen wird, die Beobachtungen zu Ergebnissen geführt, die eine Lösung derselben in nicht allzuferner Zukunft in Aussicht stellen. Ich muß mich hier auf bloße Anführung

der Resultate beschränken, indem eine eingehende Darlegung und Diskussion derselben einer bald zu veröffentlichen größeren Abhandlung vorbehalten bleibt.

Herr Dunér hat bekanntlich die Rotationsgeschwindigkeiten für nur sechs heliographische Breiten, nämlich 0° , 15° , 30° , 45° , 60° und 75° , bestimmt, die jedesmal am Instrument genau eingestellt wurden. Bei der hier befolgten Methode beziehen sich die Messungen auf alle möglichen, erst nachträglich aus den Instrumentalablesungen ermittelten Breiten. Dies ermöglicht, das Material in eine große Zahl von Gruppen von relativ geringen Breitenabständen zu zerlegen und dadurch eine kontinuierlichere Kurve zu erlangen.

Wie neuerdings (A. N. 3994) von Herrn Dunér erkannt worden ist, liefern die aus den Verschiebungen erhaltenen linearen Geschwindigkeiten die synodische, und nicht, wie zuerst von ihm angenommen, die siderische Umlaufszeit des beobachteten Sonnenpunktes. Um letztere direkt aus den Beobachtungen zu erhalten, hat er gewisse leicht zu ermittelnde Korrekturen an die gemessenen Geschwindigkeiten angebracht. Diese Umwandlung ist auch mit den nachstehend mitgeteilten Werten vorgenommen worden.

Zunächst folgen in Tabelle 1 die Werte der linearen Geschwindigkeiten und die daraus abgeleiteten täglichen Rotationswinkel für das Mittel der sechs Jahre 1901–1906.

Tabelle 1.

Heliogr. Breite	Lineare Geschw.	Anzahl d. Beob.	Tägl. Rotationsw.	Formel I	B — R	Dunér's Formel	B — R
2°3	2.042 km	103	872.9	2.037 km	+0.005	2.070 km	-0.028
6.6	2.032	69	873.8	2.022	+0.010	2.051	-0.019
9.4	2.002	65	866.4	2.004	-0.002	2.030	-0.028
12.4	1.972	44	862.3	1.977	-0.005	1.996	-0.024
15.6	1.952	55	865.2	1.940	+0.012	1.956	-0.004
18.4	1.907	64	858.4	1.903	+0.004	1.912	-0.005
21.4	1.856	43	851.2	1.856	0.000	1.858	-0.002
24.5	1.788	55	839.1	1.801	-0.013	1.795	-0.007
27.6	1.755	53	845.6	1.741	+0.014	1.726	+0.029
30.7	1.657	41	823.0	1.675	-0.018	1.652	+0.005
33.3	1.596	45	815.3	1.616	-0.020	1.585	+0.011
36.4	1.561	51	828.4	1.542	+0.019	1.503	+0.058
39.4	1.456	43	804.6	1.467	-0.011	1.420	+0.036
42.2	1.395	47	803.9	1.393	+0.002	1.340	+0.055
45.3	1.309	47	795.0	1.310	-0.001	1.250	+0.059
48.7	1.219	47	789.0	1.216	+0.003	1.150	+0.069
51.6	1.127	47	774.8	1.133	-0.006	1.065	+0.062
54.3	1.064	46	778.5	1.056	+0.008	0.985	+0.079
57.4	0.970	39	768.5	0.965	+0.005	0.893	+0.077
60.6	0.869	45	755.9	0.871	-0.002	0.800	+0.069