

**Physics.** — *Selbstabsorption in den Sonnenprotuberanzen.* Von M. MINNAERT und C. SLOB. (Mitteilung aus dem Physikalischen Institut der Universität Utrecht.) (Communicated by Prof. L. S. ORNSTEIN.)

(Communicated at the meeting of January 25, 1930).

### *Problemstellung.*

Der Hauptzweck der vorliegenden Untersuchung ist die Bestimmung der absoluten Intensität von Protuberanzlinien, und die Vergleichung ihrer relativen Intensitäten. In dieser Abhandlung werden die Resultaten mitgeteilt von Messungen an den beiden Linien  $H_{\alpha}$  und Helium  $\lambda$  5876. Es wurde eine Linie des Heliums gewählt, weil dieses Gas in der Sonnenatmosphäre keine merkliche Absorption ausübt, wie sich ergibt aus dem Fehlen der Heliumlinien im gewöhnlichen Fraunhofer-Spektrum. Ausserdem ist seine Ionisationsspannung so hoch, dass nur bei extrem niedrigem Druck (etwa  $10^{-16}$  Atm.) Ionisation auftritt. Die Intensität der Heliumlinie ist also ein gutes Mass für die Gesamtmenge der Heliumatome in der Sehrichtung und für die optische Dicke der Schicht. Schon PEREPELKIN <sup>1)</sup> suchte durch visuelle Schätzungen näheres über diese selbe Linien zu erfahren und bekam interessante Resultate, welche weiter mit den unsrigen verglichen werden.

### *Messungen.*

Die Aufnahmen wurden gemacht mit dem Fernrohr der Heliophysikalischen Abteilung des Physikalischen Institutes an einem Sonnenbilde von 12 cm Durchmesser; der Spektrograph hat die Littrow-Konstruktion, flaches Rowland-Gitter, 4 Meter Brennweite, Dispersion ungefähr 4 A.E. pro Millimeter in der ersten Ordnung, die für diese Untersuchung ausschliesslich benutzt wurde. Die Linien  $H_{\alpha}$  und He 5876 konnten noch gerade auf derselben Platte aufgenommen werden.

Nachdem durch visuelle Durchmusterung des Sonnenrandes im  $H_{\alpha}$ -Lichte irgend eine ziemlich hohe und helle Protuberanz gefunden war, wurde der Stand des Sonnenbildes genau bezeichnet und später immer durch elektrische Feinregulierung in Stundenwinkel innegehalten.

Dann wurden auf derselben Platte und mit derselben Expositionszeit Aufnahmen gemacht vom Protuberanzspektrum und vom Spektrum der

---

<sup>1)</sup> E. J. PEREPELKIN, Zs. f. Phys. 49, 295, 1928.

Sonnenmitte ; diese letzte mit einem Stufenabschwächer und mit geeignetem allgemeinen Hilfsabschwächer um eine ausgedehnte Schwärzungsskala zu bekommen, in demselben Schwärzungsgebiete wie die Protuberanzlinie.

Es stellte sich bald heraus, dass die  $H_{\alpha}$ -Linie photographisch immer viel stärker war wie die Heliumlinie, so dass entweder die eine Linie zu schwarz oder die andere zu schwach wurde, was eine gute Intensitätsmessung erschwerte. Darum wurde vor den Spektrographen eine 1 cm dicke Schicht Kupfersulfatlösung eingeschaltet, deren Konzentration richtig bemessen war um beide Linien nahezu gleich stark zu erhalten. Weil das kontinuierliche Vergleichsspektrum mit derselben absorbierenden Flüssigkeit aufgenommen wurde, und alle Protuberanzlinien immer im Verhältnis zum Spektrum des Sonnenzentrums gemessen wurden, brauchte man die selektive Absorption des Kupfersulfats nicht gesondert zu bestimmen.

Immer wurden Ilford panchromatic Platten verwendet, während entwickelt wurde mit Rodinal. Die Aufnahmen wurden durchgemessen mit dem MOLL'schen Mikrophotometer, und alle Schwärzungen in Intensitäten umgerechnet nach den üblichen Methoden des Utrechter Laboratoriums. Eine Korrektion wurde eingeführt für das Himmelspektrum. Die Intensitätsverteilung innerhalb jeder Protuberanzlinie wurde gezeichnet und *die Stärke der Linie gemessen durch die integrierte Intensität, mit als Einheit die Energie innerhalb eines Angströms des benachbarten Spektrums der Sonnenmitte*. Die Zahlen für die Stärke der Linien geben also direkt „Aequivalentbreiten“ an; aber die Energie der  $H_{\alpha}$ -Linie ist gemessen in einer Einheit, welche energetisch nicht dieselbe ist wie die für die Heliumlinie, sondern nach den Messungen Abbots 0.83 mal so gross.

Die erste hier mitgeteilte Resultate beziehen sich auf drei Protuberanzen, deren jede in verschiedenen Höhen untersucht wurde. Die wirksame Länge des Mikrophotometerspaltes korrespondierte mit etwa 4000 à 5000 K.M. auf der Sonne, so dass ein genügendes „Höhenaufklärungsvermögen“ erreicht ist. Selbstverständlich sind die beobachteten Höhen nur scheinbare; die wahrscheinliche wirkliche Höhen sind berechnet nach der Methode PEREPEL'KIN's <sup>1)</sup>).

### *Resultate.*

In der Tabelle sind die Endresultate der Messungen zusammengefasst.

Die exakte Bestimmung der Intensität von Protuberanzlinien gelingt also ausgezeichnet auch ausserhalb der Finsternisse. Die absolute Zahlen der Tabelle möchten wir als Hauptergebnis unserer Arbeit bezeichnen.

Es zeigt sich, dass sie in guter Uebereinstimmung sind mit den von SCHWARZSCHILD gemessenen (Mitt. Sternw. Göttingen, 12, 52, 1906).

Die zwei Variablen welche die Intensitäten bestimmen sind die Höhe und die optische Schichtdicke, deren Mass die Intensität der  $He$ -Linie ist. Wir wollen also untersuchen in wieweit die Intensität der Wasserstofflinie

<sup>1)</sup> E. J. PEREPEL'KIN, Zs. f. Phys. 49, 299, 1928.

von beiden Variablen abhängt. Ausserdem ist das Verhältnis  $\frac{H\alpha}{He}$  sehr wichtig, denn jede Aenderung in diesem Quotient beweist dass sich entweder das Verhältnis der beiden Gase geändert hat, oder dass Selbstabsorption anfängt eine Rolle zu spielen.

Die Abhängigkeit des Verhältnisses  $H\alpha/He$  von *He-Intensität und Höhe* wurde untersucht nach den Methoden der Korrelationsrechnung für drei veränderliche Grössen <sup>1)</sup>. Aus einer vorläufigen Schätzung ergab sich, dass

TABELLE.  
Intensitäten (= Aequivalentbreiten) der Protuberanzlinien  $H\alpha$  und  $He$  5876.

| N <sup>o</sup> . | Scheinbare Höhe | Wahrsch. Höhe | Intens. $H\alpha$     | Intens. $He$ 5876     | Verhältn. $H\alpha/He$ |
|------------------|-----------------|---------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| I                | 11.500 KM.      | 20.500        | $8.4 \times 10^{-2}$  | $0.25 \times 10^{-2}$ | 33.6                   |
|                  | 15.000          | 24.000        | 9.3                   | 0.24                  | 39.0                   |
|                  | 17.500          | 26.500        | 9.7                   | 0.31                  | 31.8                   |
|                  | 20.500          | 29.500        | 8.9                   | 0.26                  | 34.2                   |
|                  | 23.000          | 32.000        | 7.2                   | 0.13                  | 56.0                   |
| II               | 17.000 KM.      | 27.000        | $16.2 \times 10^{-2}$ | $0.66 \times 10^{-2}$ | 24.4                   |
|                  | 20.000          | 30.000        | 18.4                  | 0.86                  | 21.4                   |
|                  | 23.000          | 33.000        | 19.4                  | 0.87                  | 22.4                   |
|                  | 26.000          | 36.000        | 17.1                  | 0.73                  | 23.2                   |
|                  | 29.000          | 39.000        | 12.9                  | 0.37                  | 35.2                   |
|                  | 32.000          | 42.000        | 10.6                  | 0.26                  | 40.1                   |
|                  | 34.000          | 44.000        | 9.1                   | 0.21                  | 44.3                   |
| III              | 4.500 KM.       | 13.500        | $4.29 \times 10^{-2}$ | $0.30 \times 10^{-2}$ | 14.3                   |
|                  | 8.500           | 17.500        | 3.88                  | 0.41                  | 9.5                    |
|                  | 11.100          | 20.100        | 5.30                  | 1.06                  | 5.0                    |
|                  | 14.800          | 23.800        | 7.12                  | 1.79                  | 4.0                    |
|                  | 16.900          | 25.900        | 5.14                  | 1.05                  | 4.9                    |
|                  | 22.400          | 31.400        | 3.08                  | 0.50                  | 6.2                    |

$\log \frac{H\alpha}{He}$  eine nahezu lineare Funktion ist von  $\log He$ -Intensität und von

<sup>1)</sup> Sehe z. B.: A. PÜTTER, Die Auswertung zahlenmässiger Beobachtungen in der Biologie. Hptst. III. — F. ZERNIKE, Hdbuch der Physik, Bd. III, 487, 1928.

der Höhe. Nennen wir diese drei Veränderlichen bzw. 1, 2, 3. Man findet dann die drei totale Korrelationskoeffizienten :

|            | I      | II     | III    |
|------------|--------|--------|--------|
| $r_{12} =$ | - 0.79 | - 0.84 | - 0.81 |
| $r_{13} =$ | + 0.48 | + 0.75 | - 0.57 |
| $r_{23} =$ | - 0.47 | - 0.71 | + 0.34 |

Diese Zahlen beweisen noch nicht, dass  $H_\alpha/He$  wirklich korreliert ist sowohl mit der Höhe als mit der Heliumintensität. Es könnte ja sein dass die Korrelation mit der Höhe z.B. nur eine scheinbare ist, weil Höhe und  $He$ -Intensität selbst untereinander korreliert sind. Die richtigen Beziehungen erhält man aus der Berechnung der partiellen Korrelationskoeffizienten zwischen zwei der Veränderlichen, bei konstant gehaltener dritten. Man findet :

|              | I                 | II                | III               |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $r_{12.3} =$ | - 0.66 $\pm$ 0.21 | - 0.73 $\pm$ 0.19 | - 0.80 $\pm$ 0.15 |
| $r_{13.2} =$ | + 0.40 $\pm$ 0.32 | - 0.02 $\pm$ 0.40 | - 0.53 $\pm$ 0.30 |
| $r_{23.1} =$ | - 0.22 $\pm$ 0.36 | + 0.02 $\pm$ 0.40 | - 0.25 $\pm$ 0.38 |

Das Ergebnis ist nicht zweifelhaft : *das Verhältnis  $H_\alpha/He$  ist deutlich abhängig von der  $He$ -Intensität, und zwar nimmt es ab mit zunehmender  $He$ -Intensität.* Die Korrelation mit der Höhe dagegen ist unmerkbar, oder (für die Protuberanzen I und III) kaum reell.

Man erhält eine leidliche Darstellung unserer Ergebnisse durch die Formeln :

$$H_\alpha = 0.81 He^{0.37} \dots \dots \dots (I)$$

$$H_\alpha = 1.53 He^{0.45} \dots \dots \dots (II)$$

$$H_\alpha = 0.31 He^{0.37} \dots \dots \dots (III)$$

wo die Intensitäten  $H_\alpha$  und  $He$  gleich in Äquivalentbreiten gemessen sind (Sehe Fig. 1 und 2).

Eine ähnliche Abhängigkeit von der  $He$ -Intensität wurde auch durch PEREPELKIN gefunden, aber *viel* weniger ausgesprochen. Seine Schätzungen sind insofern nicht direkt vergleichbar mit den unsrigen, dass er die Zahlen für 29 Protuberanzen alle zusammen verarbeitet hat, weil wir die Ergebnisse für jede Protuberanz gesondert untersuchen. Die Abhängigkeit von der Höhe welche PEREPELKIN findet, ist in unserem Material nicht anweisbar.

#### Diskussion.

Zur Vereinfachung wollen wir annehmen, dass das Verhältnis der Zahl  $He$ - und  $H$ -atomen in allen Teilen der Protuberanz dasselbe ist.

Nun gibt es drei Ursachen welche eine mögliche Korrelation zwischen dem Verhältnisse  $H_\alpha/He$  und der  $He$ -Intensität ergeben :

10. Die Ionisation ;
20. Die Auslöschung des Resonanzlichtes durch Stösse ;
30. Die Selbstabsorption.

10. Die Intensität der  $He$ -Linie, also die Zahl der  $He$ -Atome in der Sehrichtung, wird ein rohes Mass sein für den Druck in der Protuberanz ; während das Verhältnis  $H_\alpha/He$  dem nicht ionisierten Bruchteil  $H$ -atomen proportional sein wird.

In diesem Falle ist nach Saha :

$$\frac{x^2}{1-x^2} = \frac{1}{p}$$

wo  $x =$  ionisiertes Bruchteil,  $p =$  Druck. Die Abhängigkeit der Grösse  $1-x$  von  $p$  ist dargestellt durch Fig. 3. Ein Vergleich mit den Beobachtungen (Fig. 1) zeigt keine Spur von Aehnlichkeit. Während also die

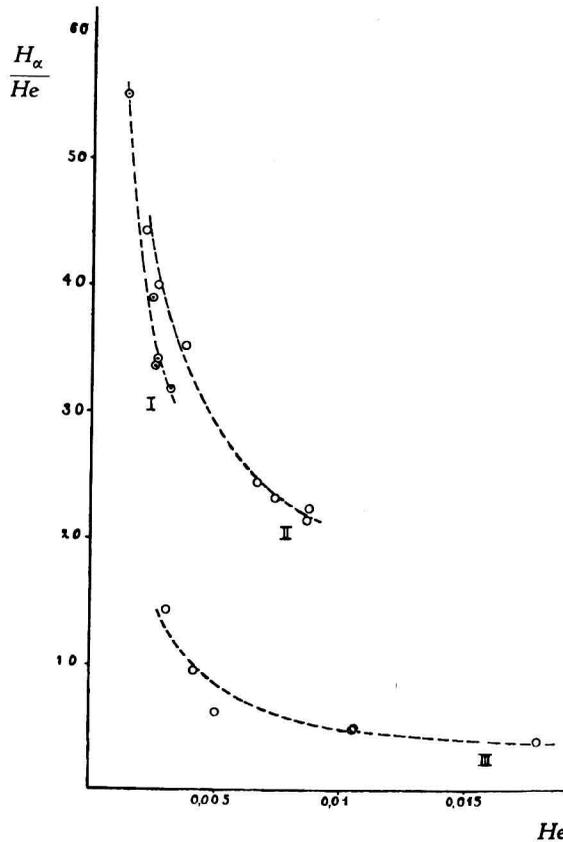


Fig. 1. Aenderung des Verhältnisses  $H_\alpha/He$  mit der Schichtdicke.

Abhängigkeit von der Höhe durch PEREPELKIN an Ionisation zugeschrieben wird, ist die Abhängigkeit von der  $He$ -Intensität sicher durch eine andere Ursache zu erklären.

20. Es könnte sein dass ein Bruchteil der angeregten *He*-Atome durch Stöße mit Wasserstoffatomen im Normalzustande strahlungslos zurückkehrt. Abgesehen von der Unwahrscheinlichkeit, dass Stöße eine wichtige Rolle spielen bei so geringer Dichte, wie sie in Protuberanzen herrscht, zeigt man leicht, dass bei dieser Hypothese die Intensität der Heliumlinie bei zunehmender Wasserstoffintensität immer langsamer anwachsen muss. Die Beobachtungen ergeben den Gegenteil. (Fig. 1 : bei wachsender *He*-Intensität, also auch bei wachsender *H*-Intensität, wird die *He*-Linie relativ stärker.)

30. Die Selbstabsorption, welche zu vernachlässigen ist bei der *He*-Linie, wird für die  $H_{\alpha}$ -Linie ein immer langsamer anwachsen der Intensität verursachen bei zunehmender Schichtdicke, was schon qualitativ zutreffend erscheint.

Eine quantitative Abschätzung erhalten wir nach der Methode A. PANNEKOEK's<sup>1)</sup>. Es wird angenommen dass die Spektrallinie nur durch

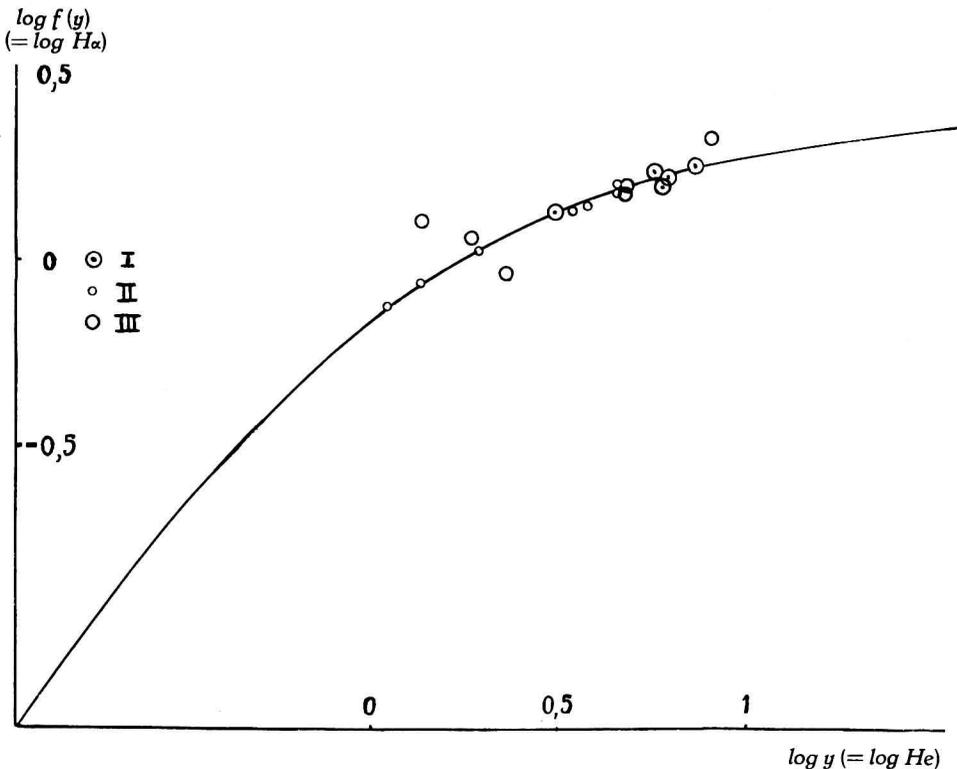


Fig. 2. Selbstumkehr in der Protuberanzlinie  $H_{\alpha}$ .

Doppler-Effekt verbreitert ist. Die Intensität, mit dem Einfluss der Selbst-

<sup>1)</sup> Bulletin Astron. Instit. of the Netherlands IV, N<sup>o</sup>. 158, S. 263, 1928.

absorption, wird für jede Wellenlänge gesondert berechnet und über die ganze Linie integriert. Man findet

$$i = Pb \int_{-\infty}^{\infty} \left( 1 - e^{-ye^{-\pi u^2}} \right) du,$$

wenn  $y = x \rho l$  die halbe optische Dicke der Protuberanz bezeichnet,  $e^{-\pi u^2}$  die Verbreiterung der Linie durch die Wärmebewegung,  $P$  die

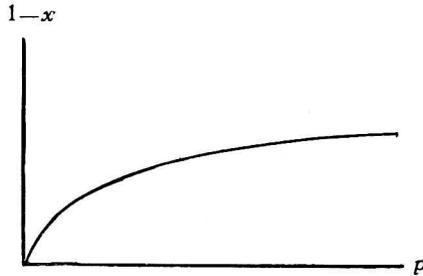


Fig. 3. Prozent nicht ionisierte Atome als Funktion des Druckes.

Plancksche Funktion,  $b$  die mittlere Linienbreite. Das Integral, welches PANNEKOEK  $f(y)$  nennt, wurde durch mechanische Integration berechnet und in Fig. 2 auf doppelt logarithmischer Skala gezeichnet. In derselben Figur sind die Beobachtungspunkte der drei Protuberanzen durch Translation nach beiden Koordinaten mit der theoretischen Kurve zur Deckung gebracht.

Die Uebereinstimmung ist genügend. Es ergibt sich also, dass die Intensität der  $H\alpha$ -Linie in Protuberanzen sehr merkbar beeinflusst ist durch Selbstabsorption; ohne diesen Effekt würde die Intensität der Linie je nach den Fällen 1 bis 8 mal so stark sein wie jetzt beobachtet wird.

In einer späteren Veröffentlichung hoffen wir über weitere Messungen zu berichten und aus den numerischen Werten weitere Schlüsse zu ziehen.

Herrn Professor Dr. L. S. ORNSTEIN danken wir herzlich für das Interesse das er dieser Arbeit entgegenbrachte.

*Anmerkung bei der Korrektur.* — Eine vierte Protuberanz, auf derselben Weise untersucht, ergab eine fast völlige Uebereinstimmung mit Protuberanz III.