

**KRITISCHE BEMERKUNGEN ZU S. ROSSELANDS
UND W. GROTRIANS ANSICHTEN ÜBER
DIE SONNENKORONA**

VON

WILHELM ANDERSON

TARTU 1937

Es wird jetzt allgemein angenommen, daß das Licht der Korona (jedenfalls dasjenige der inneren Korona) an freien Elektronen reflektiertes Sonnenlicht sei. Eine aus reinem Elektronengas bestehende Korona müßte aber eine ungeheure elektrostatische Ladung besitzen, was zu unmöglichen Konsequenzen führen würde. Man nimmt daher an, daß außer den Elektronen auch eine entsprechende Anzahl positiver Ionen (z. B. Protonen) in der Korona vorhanden sei. Nun entsteht jedoch eine neue Schwierigkeit. Es läßt sich zeigen, daß in einer solchen Korona der Strahlungsdruck nur einen kleinen Bruchteil der Gravitationskraft aufwiegen kann. Ist aber die Gravitationskraft nicht wesentlich verringert, so muß dies zu einem derartigen Dichtegradienten führen, daß bereits in ganz kleinen Entfernungen vom Sonnenrande die Korona unsichtbar wäre. Dies widerspricht jedoch der Beobachtung.

Rosseland nimmt nun an, daß die Gravitationswirkung durch ein Bombardement von Korpuskularstrahlung aufgewogen werde, die von der Sonnenoberfläche ausgehe¹⁾. Er stellt sich den Prozeß folgendermaßen vor. Durch eine harte γ -Strahlung, die aus dem Inneren der Sonne herausströmt, werden schnelle Elektronen losgelöst, die die Sonne verlassen. Dadurch muß die positive Sonnenladung wachsen, kann dies aber nicht unbegrenzt tun, denn schließlich müssen ja die positiven Ionen von der Sonne abgestoßen werden. Im stationären Zustande verliert die Sonne gleiche Mengen positiver und negativer Elektrizität. Hauptsächlich durch den Strom der positiven Ionen soll nach Rosseland die Gravitationswirkung der Sonne aufgewogen werden, so daß die große Ausdehnung der Korona möglich wird.

1) S. Rosseland, Avhandlingar utgitt av det Norske Videnskaps-Akademi i Oslo 1933, Mat.-Naturv. Kl., Nr. 1.

Die Energie des die Sonne verlassenden Elektronenstroms schätzt Rosseland auf 10^8 Erg pro Sekunde und Quadratcentimeter der Photosphärenoberfläche, bemerkt aber dazu: „It seems to be very difficult to explain the corpuscular flux of energy of this amount on the basis of known properties of the solar atmosphere“²⁾. Auch das Aufsteigen der Protuberanzen erklärt Rosseland durch die Wirkung von Korpuskularstrahlung.

Kiepenheuer sagt: „Was die Natur der emportreibenden Kräfte angeht, so schließt sich der Verfasser weitgehend den Rosselandschen Überlegungen über den Aufbau der Chromosphäre und der Korona an. Ausgehend von dem Widerspruch, den jede *statische* Theorie der Chromosphäre und der Korona... mit sich bringt, nimmt Rosseland eine, von der Sonnenoberfläche ausgehende, schnelle Korpuskularstrahlung (vielleicht radioaktiven Ursprungs) an, die durch dauernde Impulsabgabe an die Chromosphäre und an die Korona diese in einem *dynamischen* Gleichgewicht erhält... Chromosphäre, Protuberanzen und Korona sind bei dieser Annahme also als ein komplexes dynamisches Phänomen aufzufassen“³⁾. Kiepenheuer weist darauf hin, daß die Geschwindigkeit einer und derselben Protuberanz sprungweise von einem Werte zu einem anderen übergehe, als ob sich im kräftefreien Raume Gasmassen bewegten, die von Zeit zu Zeit kurzdauernde Stöße empfangen. Kiepenheuer erklärt dies durch kurzdauernde Korpuskularbombardements⁴⁾.

Untersuchen wir die von Kiepenheuer ausgesprochene Vermutung, daß die Korpuskularstrahlung radioaktiven Ursprungs sei. Wir wollen dabei übertrieben günstige Annahmen machen: 1) die radioaktiven Stoffe befinden sich dicht unter der Photosphärenoberfläche; 2) sämtliche beim radioaktiven Prozeß freiwerdende Energie verwandelt sich in translatorische Energie der β -Strahlung; 3) jedes β -Teilchen bewegt sich auf dem kürzesten Wege (d. h. längs dem entsprechenden Sonnenradius) zur Photosphärenoberfläche, und 4) der Massenabsorptionskoeffizient dieser β -Strahlung ist konstant und phantastisch klein: $k=0,0001$. Wir nehmen an, daß 1 Gramm Photosphärgas durch radioak-

2) Ebenda, S. 37.

3) K. O. Kiepenheuer, ZS. f. Astrophys. 10, 264, 1935.

4) Ebenda, S. 277 f.

tive Prozesse ε Erg pro Sekunde entwickelt. Wir wollen eine unendlich dünne Schicht von dx g.cm⁻² ins Auge fassen, welche sich in einer Tiefe von x g.cm⁻² unter der Photosphärenoberfläche befindet. Diese unendlich dünne Schicht entwickelt εdx Erg.cm⁻².sec⁻¹ Energie, welche, unserer (übertrieben günstigen) Annahme gemäß, sich restlos in translatorische Energie der β -Strahlung verwandelt. Letztere Strahlung erreicht die Photosphärenoberfläche (nach unserer übertrieben günstigen Annahme) auf dem kürzesten Wege, d. h. nach Passieren einer Schicht von x g.cm⁻², wodurch sich die Intensität der Strahlung (gemeint ist Erg.cm⁻².sec⁻¹) vermindern muß. Sie beträgt jetzt $\varepsilon dx \cdot e^{-kx}$. Der Einfachheit halber sei ε eine konstante Größe. Es ist klar, daß der gesamte Energiefluß, der aus dem Sonneninneren an die Photosphärenoberfläche gelangt (und diese passiert), kleiner als

$$\int_0^{\infty} \varepsilon e^{-kx} dx = \frac{\varepsilon}{k} \text{ Erg . cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$$

sein muß. Damit der die Photosphärenoberfläche passierende Energiefluß 10^8 Erg.cm⁻².sec⁻¹ betrage, muß die Bedingung:

$$\frac{\varepsilon}{k} > 10^8,$$

oder:

$$\varepsilon > k \cdot 10^8$$

erfüllt sein. Da nach unserer Annahme $k = 0,0001$ ist, erhalten wir:

$$\varepsilon > 10^4 \text{ Erg . g}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}.$$

Unsere radioaktive Oberschicht muß natürlich dünner als $6,3 \cdot 10^6$ g.cm⁻² sein⁵⁾. Die einzelnen Photosphärogase, aus denen diese radioaktive Oberschicht besteht, sind sicherlich zum weitaus größten Teile nicht radioaktiv (eine Radioaktivität des Wasserstoffs wäre sogar aus rein theoretischen Gründen unmöglich). Wir müßten also annehmen, daß den Photosphärogasen eine kleine Menge eines besonders stark radioaktiven Stoffes beigemischt sei, wobei diese Menge so klein wäre, daß sie der direkten Beobach-

⁵⁾ Sonst würde durch innere Absorption der β -Strahlung mehr Wärme frei werden, als die Sonne in den Weltenraum ausstrahlt.

tung unzugänglich bliebe. Wenn nun die Photosphärengase dank dem beigemengten radioaktiven Stoff mehr als $10^4 \text{ Erg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$ produzieren, so wird die spezifische Energieproduktion des erwähnten radioaktiven Stoffes in reinem Zustande noch sehr viel intensiver sein. Einer Energieerzeugung von $10^4 \text{ Erg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$ würde eine „Halbwertzeit“ von etwa 500000 Jahren entsprechen. Somit muß die Halbwertzeit unseres radioaktiven Stoffes viel kürzer als 500000 Jahre sein. Eine solche Halbwertzeit ist aber sehr kurz im Vergleich mit der Existenzdauer der Sonne (selbst vom Standpunkt der „kurzen“ Zeitskala aus). Wir müßten daher annehmen, daß der erwähnte radioaktive Stoff eine langlebige „Vatersubstanz“ habe. Aber auf welche Weise soll sich unser radioaktiver Stoff von seiner Vatersubstanz abtrennen und in einer dünnen Oberschicht (dünner als $6,3 \cdot 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$) konzentrieren? Etwa durch Diffusion? Letzteres ist unmöglich anzunehmen, weil ein solcher Diffusionsprozeß bekanntlich viel zu große Zeiträume verlangt (Zeiträume, die selbst vom Standpunkt der „langen“ Zeitskala aus groß wären). Außerdem ist anzunehmen, daß Konvektionsströme eine merkliche Entmischung durch Diffusion überhaupt verhindern würden.

Sollte der Massenabsorptionskoeffizient der β -Strahlung größer als 0,0001 sein, so werden die erwähnten Schwierigkeiten natürlich noch größer. Sollte er aber kleiner als 0,0001 sein, so entstehen Schwierigkeiten anderer Art. In einem solchen Falle nämlich müßte die β -Strahlung dermaßen hart sein, daß sie wenig geschwächt und vom irdischen Magnetfeld wenig abgelenkt die Erdoberfläche erreichen würde, was der Beobachtung nicht entgehen könnte⁶⁾.

Nach Rosseland wird die β -Strahlung nicht durch einen unmittelbaren radioaktiven Prozeß, sondern durch eine aus dem Sonneninneren kommende γ -Strahlung hervorgerufen. Es bedeute $J \text{ Erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ die Intensität dieser γ -Strahlung an der Photosphärenoberfläche. Der Massenabsorptionskoeffizient der γ -Strahlung k_1 ist offenbar sehr viel kleiner als der Massenabsorptions-

⁶⁾ Wenn von der Photosphärenoberfläche $10^8 \text{ Erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ als β -Strahlung ausgeht (wie Rosseland annimmt), so fällt über $2000 \text{ Erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ auf die sich senkrecht zu dieser Strahlung befindenden Teile der Erdoberfläche. Eine solche Strahlung wäre etwa 600000 mal intensiver als die bekannte Höhenstrahlung, könnte also unmöglich unbemerkt bleiben.

koeffizient der sekundären β -Strahlung k . Wir können daher J bis zu einer Tiefe, aus der noch eine merkliche β -Strahlung an die Photosphärenoberfläche gelangt, als konstant betrachten. Die unendlich dünne Schicht $dx \text{ g.cm}^{-2}$ absorbiert $J k_1 dx \text{ Erg.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$ der γ -Strahlung. Im ideal günstigsten Falle verwandelt sich diese absorbierte Energie in translatorische Energie der sekundären β -Strahlung, welche auf dem kürzesten Wege (also nach Passieren einer Schicht von $x \text{ g.cm}^{-2}$) die Photosphärenoberfläche erreicht, mit der Intensität $J k_1 e^{-kx} dx \text{ Erg.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$. Ohne großen Fehler kann man die Intensität der gesamten die Photosphärenoberfläche passierenden β -Strahlung gleich

$$\int_0^{\infty} J k_1 e^{-kx} dx = J \frac{k_1}{k} \text{ Erg.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$$

setzen. Wenn letztere Intensität gleich $10^8 \text{ Erg.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}$ ist, so können wir schreiben:

$$J \frac{k_1}{k} = 10^8,$$

oder:

$$J = 10^8 \cdot \frac{k}{k_1}.$$

Der Massenabsorptionskoeffizient einer γ -Strahlung ist (in roher Annäherung) etwa 100 mal kleiner als derjenige der entsprechenden β -Strahlung⁷⁾. Ist aber $\frac{k}{k_1} = 100$, so erhalten wir:

$$J = 10^8 \cdot 100 = 10^{10} \text{ Erg.cm}^{-2}.\text{sec}^{-1}.$$

Eine solche γ -Strahlung würde in kürzester Zeit alles Leben auf der Erde und auf den Planeten vernichten⁸⁾.

Auch gegen Rosselands Ansicht, daß als Folge der β -Strahlung eine Bewegung positiver Ionen durch die Korona eintreten

⁷⁾ Wenigstens bei gewöhnlichen radioaktiven Stoffen ist dies mehr oder weniger richtig.

⁸⁾ Wenn diese γ -Strahlung imstande ist aus großen Tiefen an die Photosphärenoberfläche zu gelangen, so wird sie auch imstande sein die Sonnenatmosphäre und die irdische Atmosphäre ohne beträchtliche Abschwächung zu durchqueren.

müsse, läßt sich streiten. Wenn durch den Verlust an β -Strahlen die Photosphäre eine positive Ladung erhält, so werden die in der Korona befindlichen positiven Ionen abgestoßen und die Elektronen angezogen. Da letztere dank ihren kleinen Massen sehr viel beweglicher sind, so erfolgt die ganze Elektrizitätsverschiebung fast ausschließlich durch die Elektronen, während die positiven Ionen der Korona beinahe unbeweglich bleiben. Durch die Elektronenverschiebung wird die positive Ladung der Photosphäre neutralisiert, dafür entsteht aber dieselbe positive Ladung in der äußersten Oberflächenschicht der Korona⁹⁾. Übersteigt diese Ladung einen bestimmten Wert, so werden positive Ionen zwar abgestoßen, aber nicht von der Photosphärenoberfläche, sondern nur von der äußersten Oberflächenschicht der Korona. Im Inneren der Korona hingegen wird eine nach innen (d. h. zur Photosphäre) gerichtete Driftbewegung der leichten Elektronen stattfinden, keinesfalls eine nach außen (d. h. von der Photosphäre weg) gerichtete Driftbewegung der schweren positiven Ionen.

Wenn man die plötzlichen Geschwindigkeitsänderungen der Protuberanzen durch Impuls von Korpuskularstrahlen erklären will, so muß man konsequenterweise annehmen, daß auch alle anderen Gasmassen, die sich auf dem Wege dieser Korpuskularstrahlen befinden, einen Impuls erhalten. Dies widerspricht aber Bobrovnikoffs Beobachtungen. „In some cases . . . not the slightest trace of a disturbance could be detected under the prominence, although the neighboring regions were carefully examined . . . It is difficult to imagine any change in the photosphere that would not affect the portions of the prominence between the crest and the base, but would change the motion of the crest very considerably“¹⁰⁾.

* * *

Bekanntlich sind in der äußeren Korona dunkle Fraunhofersche Linien zu sehen, die in der inneren Korona zu fehlen scheinen. Dabei ist es aber sehr bemerkenswert, daß die Fraun-

⁹⁾ Die Korona ist ja ein guter Elektrizitätsleiter, und in einem guten Leiter wird jede innere Ladung durch Elektronenverschiebung sofort an die Oberfläche übertragen.

¹⁰⁾ N. T. Bobrovnikoff, *Astrophys. Journ.* **74**, 187, 1931.

hoferschen Linien der Korona praktisch dieselbe Breite haben wie diejenigen der Photosphäre.

Grottrian teilt die Gesamtintensität J_S des Koronakontinuums in die streng kontinuierliche Intensität J_K und die Fraunhofer'sche Intensität J_F ein, und gibt entsprechende Zahlenwerte für verschiedene Entfernungen vom Sonnenrande. Wir reproduzieren hier einige dieser Zahlenwerte (für die Ostseite)¹¹⁾:

Entfernung vom Sonnenrande in Bogenminuten	J_S	J_F	J_K
3,2	97,4	15,8	81,6
4,4	64,6	11,3	53,3
5,6	46,3	8,8	37,5
9,0	16,9	4,3	12,6
11,4	9,3	2,8	6,5
14,8	4,6	1,8	2,8

Den Anteil J_K deutet Grottrian als Streulicht an freien Elektronen, den Anteil J_F hingegen als Streulicht an kosmischem Staube, dessen Partikeln größer als 3μ seien. Da kein kosmischer Staub näher als ein Sonnenradius von der Photosphäre existieren kann, so versetzt Grottrian seine kosmische Staubwolke in größere Entfernungen.

Gegen Grottrians Annahme läßt sich der Einwand erheben, daß in einem solchen Falle die Abnahme der Fraunhoferschen Intensität J_F erst in der Entfernung eines Sonnenradius (etwa $16'$) vom Sonnenrande beginnen müßte, und nicht bereits in einer Entfernung von $3',2$. Vom Sonnenrande bis zur Entfernung von $16'$ wäre sogar ein kleines Ansteigen von J_F zu erwarten, wie dies aus geometrischen Überlegungen ersichtlich ist.

Es drängt sich auch die Frage nach der eventuellen chemischen Zusammensetzung des erwähnten kosmischen Staubes auf. Am nächstliegenden wäre es, eine ähnliche chemische Zusammensetzung anzunehmen wie bei den Meteoriten. In erster

¹¹⁾ W. Grottrian, ZS. f. Astrophys. 8, 134, 1934.

Linie könnte man daher an Eisen denken. Nach Jones, Langmuir und Mackay verdampft $3,08 \cdot 10^{-4} \text{ g. cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ Eisen bei 1800° abs. ¹²⁾. Dann muß aber bei 1800° abs. eine Eisenkugel von 3μ Durchmesser in etwa 3,8 Sekunden verdampfen, was eine unzulässig kurze Lebensdauer bedeutet. Da 1800° abs. einer Entfernung von etwa 4 Sonnenradien von der Photosphäre entspricht, so müßte der kosmische Staub in noch größere Entfernungen verlegt werden, wenn er aus Eisen bestehen sollte. In der Entfernung eines Sonnenradius von der Photosphäre hingegen könnte nur ein solcher kosmischer Staub existieren, der aus einem sehr viel weniger flüchtigen Stoffe als Eisen besteht. Man könnte etwa an Wolfram, an Molybden, an Zirkonium-Carbid oder gar an Hafnium-Carbid denken. Leider sind diese Stoffe in den Meteoriten nicht entdeckt worden¹³⁾. Dagegen sind die in Steinmeteoriten vorkommenden Substanzen Al_2O_3 und SiO_2 viel zu flüchtig¹⁴⁾. Der Dampfdruck des in Steinmeteoriten ebenfalls vorkommenden CaO läßt sich durch

$$\log_{10} p \text{ (mm)} = - \frac{27400}{T} + 10,13$$

darstellen¹⁵⁾. Für $T = 2000^\circ$ erhalten wir:

$$p = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ mm.}$$

Unter solchen Umständen steht aber zu erwarten, daß eine Kugel von 3μ Durchmesser bereits in wenigen Minuten verdampfen werde. Nun entspricht $T = 2000^\circ \text{ abs.}$ einer Entfernung von ungefähr 3 Sonnenradien von der Photosphäre. Soll also kosmischer Staub aus CaO längere Zeit bestehen, so muß er sich weiter als 3 Sonnenradien von der Photosphäre befinden. Nicht

¹²⁾ H. A. Jones, I. Langmuir and G. M. J. Mackay, Phys. Rev. (2) **30**, 212, 1927.

¹³⁾ Vgl. G. P. Merrill, „The present condition of knowledge of the composition of meteorites“, Proc. Amer. Philos. Soc. (Philadelphia) **65**, 119, 1926.

¹⁴⁾ Al_2O_3 siedet unter Atmosphärendruck bei 2980° C ($= 3253^\circ \text{ abs.}$) und SiO_2 bei 2590° C ($= 2863^\circ \text{ abs.}$) [vgl. Landolt-Börnstein, Phys.-chem. Tabellen, 5. Auflage, 1. Ergänzungsband, SS. 724 u. 728, Berlin 1927].

¹⁵⁾ Vgl. 3. Ergänzungsband, S. 2441, Berlin 1936.

viel anders wird sich auch kosmischer Staub aus MgO verhalten¹⁶⁾.

In meiner Untersuchung über die Existenzmöglichkeit von kosmischem Staube in der Sonnenkorona hatte ich die Partikelchen als aus Kohlenstoff bestehend angenommen, wobei ich die Sublimationsdrucke nach Wertenstein und Jędrzejewski berechnete¹⁷⁾. Nach diesen Forschern liegt der Siedepunkt des Kohlenstoffs (unter Atmosphärendruck) bei 5100° abs. Diese hohe Zahl stimmt aber nicht mit anderen Untersuchungen überein. Nach Kohn u. Guckel siedet Kohlenstoff unter 1 Atmosphäre bei 4200° abs. und unter 0,5 Atm. bei 4083° abs.¹⁸⁾. Nach Warmuth liegt der Siedepunkt des Kohlenstoffs unter Atmosphärendruck bei 3740° abs.¹⁹⁾. Außerdem darf nicht außer acht gelassen werden, daß Kohlenstoff nur als sehr geringe Beimischung in den Meteoriten auftritt [Steinmeteorite enthalten durchschnittlich nur 0,15% und Eisenmeteorite sogar nur 0,03% (elementaren) Kohlenstoff²⁰⁾]. Es wäre daher schwer sich vorzustellen, auf welche Weise Kohlenstoff eine dominierende Rolle im (hypothetischen) kosmischen Staube der Sonnenkorona spielen könnte.

Ich finde, daß die an kosmischen Staub in der Sonnenkorona glaubenden Forscher sich doch mehr für die mögliche chemische Zusammensetzung dieses Staubes interessieren sollten, als sie es bis jetzt getan haben. Es wäre auch sehr nützlich, die Verdampfungsgeschwindigkeit einer Meteoritensubstanz im Vakuum experimentell zu beobachten. Zu diesem Zwecke könnte man z. B. das Verfahren von Tiede und Birnbräuer wählen, wonach der zu untersuchende Körper im hohen Vakuum durch Kathodenstrahlen erhitzt wird²¹⁾.

Bis jetzt haben wir von sehr kleinen Partikelchen gesprochen, deren Durchmesser von der Größenordnung von 3 μ ist. Natur-

¹⁶⁾ Nach etwas älteren Untersuchungen von Ruff (aus dem Jahre 1921) siedet (unter Atmosphärendruck) Al₂O₃ bei 2210° C, CaO bei 2850° C, MgO bei 2800° C und SiO₂ bei 2230° C. [Hauptband, SS. 334, 339, 348 und 357, Berlin 1923].

¹⁷⁾ W. Anderson, ZS. f. Phys. **28**, 305, 1924.

¹⁸⁾ 1. Ergänzungsband, S. 183.

¹⁹⁾ 2. Ergänzungsband, S. 231, Berlin 1931.

²⁰⁾ Vgl. G. P. Merrill, l. c. S. 124 f.

²¹⁾ ZS. f. anorg. Chem. **87**, 129, 1914.

lich werden bedeutend größere Körper auch eine bedeutend längere Lebensdauer in der Korona haben. Doch das Gewicht eines solchen größeren Körpers kann nicht durch Strahlungsdruck merklich beeinflußt werden, weshalb diese Körper mit Geschwindigkeiten von mehreren Hunderten km. sec^{-1} (in verschiedensten Richtungen natürlich) um die Sonne rotieren müßten, um nicht auf letztere zu fallen. Das an solchen Körpern reflektierte Sonnenlicht würde keine merklichen Fraunhoferschen Linien enthalten, da letztere durch den Doppler-Effekt bis zur Unkenntlichkeit verbreitert wären. Dies widerspricht aber den Beobachtungen. Somit kann J_F (s. oben S. 9) nicht durch Reflexion des Photosphärenlichts an größeren Partikeln erklärt werden.

Nach den Beobachtungen von J. H. Moore zeigen die Fraunhoferschen Koronalinien eine Rotverschiebung. Nach Grotrians Theorie muß daraus gefolgert werden, daß der die äußere Korona bildende kosmische Staub sich von der Sonne entfernt. Unter solchen Umständen ist aber ein stationärer Zustand nur dann denkbar, wenn in den tieferen Schichten der äußeren Korona ein ununterbrochener Nachschub von neuentstandenen Partikelchen stattfindet. Könnten diese Partikelchen vielleicht durch Kondensation von Koronadämpfen entstehen? — Ich glaube, dies ist ausgeschlossen. Es ist allerdings wahr, daß sowohl positive Ionen als auch Elektronen (die doch in großer Menge in der Korona vorhanden sind) die Eigenschaft besitzen Dämpfe zu kondensieren, aber nur dann, wenn der Raum an diesen Dämpfen übersättigt ist. So z. B. erfolgt nach Wilson die Kondensation von Wasserdampf durch negative Ionen bei vierfacher Übersättigung und durch positive bei sechsfacher²²⁾. Wir haben oben gesehen, daß der Dampfdruck von CaO bei 2000° abs. (was einer Entfernung von etwa 3 Sonnenradien von der Photosphäre entspricht) $2,7 \cdot 10^{-4}$ mm beträgt, oder $3,6 \cdot 10^{-7}$ Atm. Unter solchen Umständen kann eine Kondensation offenbar nur dann eintreten, wenn der Partialdruck des CaO -Dampfes größer als $3,6 \cdot 10^{-7}$ Atm. ist. Die Annahme eines so hohen Partialdruckes des CaO -Dampfes in 3 Sonnenradien Entfernung von der Photosphäre ist natürlich völlig indiskutabel. Auch eine

²²⁾ C. T. R. Wilson, Proc. Roy. Soc. London **65**, 289, 1899.

Kondensation anderer in Betracht kommender Stoffe scheint indiskutabel zu sein. Dann ist es aber auch nicht möglich anzunehmen, daß bei der ununterbrochenen Zerstreung des (hypothetischen) Koronastaubes der Nachschub durch Kondensation der Koronadämpfe bestritten werde. Es bleibt also nur die Annahme übrig, daß der Nachschub durch Meteorite bestritten wird, die von außen kommen und bis in die tieferen Schichten der äußeren Korona vordringen. Man müßte annehmen, daß der anfängliche Durchmesser eines jeden Meteorits von der Größenordnung eines Millimeters sei (wie dies bei den gewöhnlichen Sternschnuppen der Fall ist). Mit der Annäherung an die Sonne verdampft ein solcher Meteorit mehr und mehr, bis schließlich sein Durchmesser die Größenordnung einiger 10^{-4} cm erreicht hat und der Strahlungsdruck die Gravitationskraft überwiegt. Jetzt beginnt der Meteorit sich von der Sonne zu entfernen, was zur beobachteten Rotverschiebung der Fraunhoferschen Linien führen soll. Nun ist aber dagegen einzuwenden, daß bis zum erwähnten „Umkehrmoment“ der Meteorit sich von etwa 0,1 cm bis auf etwa $3 \cdot 10^{-4}$ cm, nach dem „Umkehrmoment“ von $3 \cdot 10^{-4}$ cm bis (im äußersten Falle) auf Null verkleinert. Jeder Koronameteorit wird also nach seinem „Umkehrmoment“ nur noch eine relativ kurze Zeit existieren können. Außerdem ist Durchmesser und Oberfläche eines Koronameteorits nach dem „Umkehrmoment“ entsprechend kleiner als vorher. Daraus müssen wir schließen, daß das an Koronameteoriten gestreute Licht zum weitaus größten Teile an jenen Meteoriten gestreut ist, die sich der Sonne nähern. Dagegen können die sich von der Sonne entfernenden Meteorite nur einen unmerklichen Beitrag zur Streustrahlung liefern.

Ich finde daher, daß die Erklärung der Rotverschiebung durch eine von der Sonne weg gerichtete Bewegung fester oder flüssiger Partikelchen auf große Schwierigkeiten stößt.

* * *

Wenn die (innere) Korona ein makroskopisch elektrisch neutrales Gemisch von Elektronen und positiven Ionen darstellt, so kann sie sich nicht im Gravitationsgleichgewicht befinden, es sei denn, daß Positronen die Rolle der positiven

Ionen spielen. Ein makroskopisch elektrisch neutrales Gemisch von Elektronen und Positronen im Gravitationsgleichgewicht würde einen durchaus vernünftigen Dichtegradienten der Korona ergeben²³⁾. Da ein merklicher Prozentsatz der Elektronen und Positronen der Korona „Molekulargeschwindigkeiten“ von über 600 km. sec^{-1} besitzen wird, so muß dies eine merkliche (und ununterbrochene) Zerstreuung der Koronamaterie zur Folge haben. Über heißeren Stellen der Photosphäre (z. B. über Fackeln) wird die Zerstreuung der Koronamaterie natürlich intensiver sein als über kälteren (z. B. über Flecken). Durch eine solche ungleichmäßige Zerstreuung könnte die strahlenförmige Struktur der Korona erklärt werden. Es taucht ferner die Frage auf, ob nicht die sich zerstreuende Elektronen-Positronen-Mischung auch eine gewisse Anzahl Atome mit sich reißen könnte. — Ein gewisser Teil der Elektronen und Positronen wird sich unter Bildung einer harten γ -Strahlung vereinigen („zerstrahlen“). Durch die Wirkung einer solchen γ -Strahlung könnte vielleicht erklärt werden, warum der Ionisationszustand der Chromosphären- und Protuberanzengase in mancher Hinsicht der Erwartung nicht entspricht.

Wir sehen also, daß eine Elektronen-Positronen-Theorie der Korona sehr verlockend zu sein scheint; sie bietet aber auch manche Schwierigkeiten. Wenn die Koronamaterie sich ununterbrochen zerstreut, so muß ein ununterbrochener Nachschub von Elektronen und Positronen stattfinden. Die Elektronen bieten dafür keine Schwierigkeit, wohl aber die Positronen. Die Entstehung von Positronen im tiefen Inneren der Sonne ist möglich, sogar wahrscheinlich. Kann aber von diesen Positronen eine genügende Anzahl an die Sonnenoberfläche gelangen? (Wer übrigens mit S. Rosseland eine harte γ -Strahlung von über $10^8 \text{ Erg. cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ an der Sonnenoberfläche für möglich hält, müßte konsequenterweise auch eine reichliche Positronenerzeugung durch „Paarbildung“ dort für möglich halten.) Vom Standpunkt unserer neuen Koronatheorie sind auch die hohen durchschnittlichen „Molekulargeschwindigkeiten“ der Elektronen ($4 \cdot 10^8 \text{ cm. sec}^{-1}$), die Grotrian beobachtet zu haben glaubt, unverständlich. Auch das beobachtete Verhalten der Fraunhofer-

²³⁾ Vgl. auch W. Anderson, Obs. 57, 196, 1934.

schen Linien der Korona wird durch unsere Elektronen-Positronen-Theorie nicht erklärt.

Alles Gesagte zwingt uns, unsere Kenntnisse über die Natur der Sonnenkorona sehr pessimistisch zu beurteilen.
