kaum größer zu sein als T_e , soll die Ionisation bei allen Ionisationsenergien durch Sterne erfolgen. Mit dem Wert $T_*/T_e = 4$ für die H II-Regionen nach Strömgren ist die Voraussetzung der Photoionisation also gerechtfertigt. Der Crabnebel mit seiner höheren Elektronendichte und seinem kleineren Verdünnungsfaktor nach Wurm liegt dagegen für kleine Ionisationsenergien nicht mehr im Gültigkeitsbereich der Ionisationsgleichung (22).

Da abgesehen vom Sterninnern die Dreierstoßrekombinationen vernachlässigt werden können, kann für alle übrigen Fälle ein Ausdruck angegeben werden, der einfacher ist als die allgemeinen Formeln (18) und (19), aber den Übergang zwischen dem Fall der Ionisation durch Photonen und durch Elektronen enthält. Unter der Bedingung $Q_{21}/n_e S_{21} \gg 1$ lautet nämlich das Korrekturglied zur Saha-Gleichung (21) im Falle beliebiger Intensitätsverteilung

$$\frac{n_e S_{21}}{Q_{21}} + \frac{S_{21}}{S_{12}} \frac{Q_{12}}{Q_{21}} = \frac{u_i}{u_{i+1}} \frac{\zeta_n}{2n} \frac{h_2}{g} \left\{ \frac{(3\pi)^{3/2} a_0^3}{2\alpha^3} \frac{f_2}{f_1} n_e \left(\frac{\chi_n}{kT_e} \right)^{1/2} \left(\frac{\chi_H}{\chi_n} \right)^{7/2} + \frac{1}{8\pi} \frac{h_1}{h_2 G_1 \left(\frac{\chi_n}{kT_e} \right)} \frac{1}{n} \frac{\chi_n}{kT_e} e^{\chi_n/kT_e} c^2 \int_{\nu_n}^{\infty} \frac{I_\nu}{h\nu} \frac{d\nu}{\nu^3} \right\},$$

im Fall verdünnter Hohlraumstrahlung

$$\frac{u_i}{u_{i+1}} \frac{\zeta_n}{2n} \frac{h_2}{g} \left\{ \frac{(3\pi)^{3/2} a_0^3}{2\alpha^3} \frac{f_2}{f_1} n_e \left(\frac{\chi_n}{kT_e} \right)^{1/2} \left(\frac{\chi_H}{\chi_n} \right)^{7/2} + W \frac{1}{n} \frac{T_*}{T_e} e^{\frac{\chi_n}{kT_e}} \left(1 - \frac{T_e}{T_*} \right) \frac{G_1 \left(\frac{\chi_n}{kT_*} \right)}{G_1 \left(\frac{\chi_n}{kT_e} \right)} \frac{h_1}{h_2} \right\}.$$

Das letztere Korrekturglied enthält noch die Verbindung zwischen der Ionisationsgleichung der Sonnenkorona und derjenigen der Gasnebel, die ihrerseits die Saha-Gleichung für reine Photoprozesse enthält. Dieser Übergang von der Stoßionisation zur Photoionisation vollzieht sich z. B. bei der

Sonne beim räumlichen Übergang von der Korona zur Photosphäre.

Herrn Prof. Siedentopf möchte ich für sein förderndes Interesse an der vorliegenden Untersuchung herzlich danken.

Zur Lokalisierung der Bartels'schen M-Gebiete

Von A. BRUZEK

Aus dem Sonnenobservatorium Kanzelhöhe, Kärnten

(Z. Naturforsch. 7a, 708–711 [1952]; eingegangen am 17. Juli 1952)

Für die drei ausgeprägtesten mittelstarken wiederkehrenden erdmagnetischen Stürme der Jahre 1943–1950 wird gezeigt, daß das zugehörige solare M-Gebiet mit einem Koronagebiet stark unterdurchschnittlicher Intensität in λ 5303 Å bzw. λ 6374 Å koinzidiert. Die mittlere Intensität während der Lebensdauer des Sturmes bleibt in einem Bereich von etwa 40 Grad heliographischer Länge mal 60 Grad heliographischer Breite unter 60% der mittleren Linienintensität der entsprechenden heliographischen Breite. Das Zentrum dieses Gebietes passiert $0,43 \pm 0,46$ vor Sturmbeginn und rund $3,4 \pm 1,45$ vor Sturmmitte den Zentralmeridian der Sonne.

Die erdmagnetischen Stürme lassen sich bekanntlich in zwei wesentlich verschiedene Gruppen einteilen: a) die „großen“ Stürme, welche statistisch mit dem Meridiandurchgang großer Fleckengruppen zusammenhängen, plötzlich einsetzen und sich nur selten nach einer Sonnenrotation wiederholen; b) die

„mittleren“ Stürme, welche nicht mit Sonnenflecken verknüpft sind, langsam einsetzen und eine ausgesprochene Neigung zur Wiederkehr nach ein, zwei, drei und auch noch mehr Rotationen zeigen. Als auslösende solare Ursache der großen Stürme wurden große chromosphärische Eruptionen (Klasse

3 und 3+) erkannt, welche im Mittel 25 Stunden vor Sturmbeginn in einem Abstand ≤ 40 Grad vom scheinbaren Sonnenzentrum auftreten¹. Bei den mittleren Stürmen sind die Verhältnisse dagegen noch recht unklar. Die sie verursachende Strahlung entstammt jedenfalls, wie aus der häufigen Wiederkehr der Störungen nach jeweils einer Sonnenrotation zu schließen ist, einer sehr beständigen Quelle, welche aber bisher noch nicht mit Sicherheit identifiziert werden konnte. Die wichtigsten Ergebnisse der bisherigen Versuche, diese als „M-Gebiete“ bezeichneten Quellen auf der Sonne näher zu lokalisieren, sind folgende: Nach Allen² weist die Häufigkeit der „M-Störungen“ 3 Tage nach dem Meridiandurchgang einer großen Fleckengruppe ein Minimum auf, woraus zu schließen ist, daß die Emission der „M-Partikel“ durch die Flecken behindert wird, und daß ihre Laufzeit von der Sonne zur Erde 3 Tage beträgt. Diese Störung der M-Partikel-Emission hatte Waldmeier schon früher bemerkt³. Dieser wies weiter darauf hin⁴, daß die langlebige M-Störung des Jahres 1943 (welche später in dieser Mitteilung als M 1943/a bezeichnet wird) mit einem fleckenfreien Gebiet zusammenhing und schloß auf eine Laufzeit der Partikel von 2–3 Tagen. — Ferner fanden Waldmeier⁵ und Kiepenheuer⁶ einen deutlichen statistischen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der Protuberanzen bzw. Filamente und dem Auftreten von M-Störungen mit einer Phasendifferenz von 6 bzw. 3 bis 4 Tagen. — Auch die Beziehungen zwischen der Intensität der grünen Koronalinie λ 5303 Å und den erdmagnetischen Störungen wurde untersucht, und zwar von Waldmeier³, Kiepenheuer⁶, Shapley und Roberts⁷ sowie Lincoln und Shapley⁸. Übereinstimmung aller Autoren ergab sich darin, daß 3–4 Tage nach dem Durchgang eines in der grünen Koronalinie hellen Gebietes durch den Zentralmeridian so wie bei den großen Flecken ein Minimum an erdmagnetischen Störungen auftritt.

Es liegt auf der Hand, daß die langlebigen, regelmäßig nach einer Rotation wiederkehrenden M-Störungen nur von einer ebenso beständigen solaren

Erscheinung hervorgerufen werden können. Die M-Gebiete müßten daher durch eine während der ganzen Lebensdauer der M-Störungen beständige, individuelle Erscheinung auf der Sonne angezeigt werden oder mit einer solchen identisch sein. Von dieser Überlegung ausgehend wurde ein weiterer, in der vorliegenden Mitteilung behandelter Versuch unternommen, die M-Gebiete auf der Sonne zu lokalisieren. Hierbei wurden die Beziehungen zwischen einzelnen langlebigen M-Störungen und der Intensitätsverteilung der grünen und roten Koronalinie (λ 5303 Å und λ 6374 Å) als einer der beständigsten solaren Erscheinungen untersucht. Gleichzeitig wurde auch das Verhältnis zu den langlebigen Filamenten festgestellt.

M-Gebiete und monochromatische Korona

Für die Untersuchungen wurden nur gut ausgeprägte, langlebige M-Störungen herangezogen, da diese die etwa vorhandenen Beziehungen besonders gut erkennen lassen sollten. Aus den „Täglichen Charakterzahlen“ von Bartels⁹ und den diese laufend monatlich ergänzenden Berichten wurden für den Zeitraum, für welchen ausreichende Koronabeobachtungen vorliegen, drei solche M-Störungen festgestellt, und zwar:

1. M 1943/a Beginn 1943, Juni 8 (Rot. 1507—14)
2. M 1943/b „ 1943, März 29 („ 1509—11)
3. M 1950 „ 1950, Aug. 7 („ 1603—09)

(Die Zahlen in Klammern bezeichnen jene Rotationen Bartels'scher Zählung, für welche auf Grund des vorhandenen Korona-Beobachtungsmaterials die Untersuchung durchgeführt werden konnte.) Für das Jahr 1943 wurden die C_p , für 1950 die Tagessummen ΣK_p als tägliche Charakterzahl verwendet.

Die Unvollständigkeit der Koronabeobachtungen eines einzelnen Observatoriums zwingt zur Kombination der Meßreihen mehrerer. Wegen der Schwierigkeiten bei der Reduktion der mit verschiedenen Instrumenten und Meßmethoden gewonnenen Resultate¹⁰, leidet dabei aber die Homo-

¹ H. W. Newton, Monthly Notices Roy. astronom. Soc. **103**, 244 [1943]; **104**, 4 [1944].

² C. W. Allen, Monthly Notices Roy. astronom. Soc. **104**, 13 [1944].

³ M. Waldmeier, Z. Astrophysik **21**, 275 [1942].

⁴ M. Waldmeier, Z. Astrophysik **27**, 42 [1950].

⁵ M. Waldmeier, Terrest. Magnetism atmospher. Electr. **51**, 537 [1946].

⁶ K. O. Kiepenheuer, Astrophysic. J. **105**, 408 [1947].

⁷ A. H. Shapley u. W. Roberts, Astrophysic. J. **103**, 257 [1946].

⁸ J. V. Lincoln u. A. H. Shapley, Trans. Amer. geophysic. Union **29**, 849 [1948].

⁹ J. Bartels, Tägliche Erdmagnetische Charakterzahlen 1884—1950, Göttingen 1951.

¹⁰ Vgl. A. Behr, Z. Astrophysik **28**, 296 [1950].

genität des Materials erheblich. Um nun die größtmögliche Homogenität bei befriedigender Vollständigkeit des Materials zu gewährleisten, wurden jeweils nur die Meßergebnisse jener zwei Observatorien herangezogen, welche für das betreffende M-Gebiet die beiden vollständigsten Reihen lieferten. Dies waren für 1943 Arosa¹¹ und Wendelstein¹², für 1950 Climax und Sacramento Peak¹³. Bei der angewandten Auswertungsmethode erwies sich dann eine ganz rohe Reduktion als hinreichend. Es wurden die Werte vom Wendelstein mit dem Faktor 1,6 auf jene von Arosa, die Werte von Sacramento Peak mit 0,7 auf jene von Climax reduziert. Wenn an einem Tage von beiden zusammengefaßten Observatorien Messungen vorlagen, wurde nach erfolgter Reduktion das Mittel aus beiden Werten genommen.

Um die M-Gebiete möglichst genau lokalisieren zu können, wurde — im Gegensatz zu älteren Untersuchungen — die Intensitätsverteilung in der Korona sowohl nach heliographischer Breite als auch nach heliographischer Länge berücksichtigt. Erstere wird in der Regel durch Messungen von 5 zu 5 Grad längs des E- und W-Randes der Sonne für jeden Tag einmal bestimmt. Durch Aneinanderreihung der einzelnen täglichen Messungen etwa des E-Randes erhält man dann angenähert die Verteilung in heliographischer Länge (1 Tag = 13,2 Grad). (Angenähert deswegen, weil 1. die zeitliche Aufeinanderfolge der am Sonnenrand gemessenen Intensitäten der örtlichen Aufeinanderfolge auf der Scheibe gleichgesetzt wird, was aber wegen der im allgemeinen langsamen Veränderlichkeit der Intensitäten bei bescheidenen Genauigkeitsansprüchen erlaubt ist, und 2. bei den Randbeobachtungen die Intensität nicht an einer heliographischen Länge längs eines radialen Sehstrahls gemessen wird, sondern entlang eines die Korona tangential durchsetzenden Strahls, wodurch eine gewisse Ausgleichung über einen größeren Bereich in heliographischer Länge erfolgt.) Da nun die während der ganzen Lebenszeit der M-Störung gleichbleibenden oder zumindest dominierenden Besonderheiten der Intensitätsverteilung festgestellt werden sollten, wurde die mittlere Intensitätsverteilung während dieses Zeitraums bestimmt. In den einzelnen Rotationen wurde die heliographische Länge in Tagen vom Zentralmeridian des Sturmbeginns nach beiden Seiten gezählt und jeweils die Messungen der $(i - 7)$ -ten Tage

¹¹ M. Waldmeier, Die Sonnenkorona I, Basel 1951.

¹² Unveröffentlichte Beobachtungen.

¹³ Ionospheric Data, CRPL Washington 1950.

Abb. 1—3. Mittlere relative Intensitätsverteilung der grünen Koronalinie λ 5303 Å um den Zentralmeridian der Sonne am Tage des Beginns der M-Störungen 1943/a, 1943/b und 1950. Weiß: Intensität < 60%, schraffiert: 60—120% (in Abb. 2 140%), kariert: > 120 (140)% des Intensitätsmittels in jeder Breite. In den zentralen Intensitätsminima verbindet die strichlierte Linie die Position der relativ niedrigsten Intensitäten. — Die stark ausgezogenen Linien stellen schematisch die während der Lebensdauer der M-Störung vorhandenen langlebigen Filamente dar. — Am Ober- und Unter-Rand der Abbildungen sind die Mittelwerte der C_g bzw. jene der Tagessummen K_p aufgetragen.

des E-Randes und der $(i + 7)$ -ten Tage des W-Randes überlagert ($i = 0$ ist der Tag des Sturmbeginns). Dies wurde für den Bereich $i = -10$ bis $i = +9$ durchgeführt; das negative Zeichen bedeutet, daß das entsprechende Koronagebiet am Tag des Sturmbeginns bereits den Zentralmeridian der Sonne passiert hat.

Die so gewonnene mittlere Intensitätsverteilung der „grünen“ Korona zeigt bei jeder der drei M-Störungen um den Zentralmeridian des Sturmbeginns herum ein Gebiet auffällig geringer mittlerer Intensität. Dieses tritt besonders klar hervor, wenn man die der Längenverteilung überlagerte Breitenverteilung der Intensität eliminiert, indem man anstatt der Absolutintensität in jeder Breite die Werte in Prozent des Intensitätsmittels dieser Breite angibt. Die Abb. 1–3 zeigen in einer Art Isophotendarstellung die so erhaltenen Kurven gleicher relativer Intensität für 60 und 120 (Abb. 2 140)% der mittleren Breitenintensität für die drei M-Störungen. Darüber sind die über den gleichen Zeitraum und in gleicher Weise gemittelten C_9 - bzw. ΣK_p -Werte dargestellt.

Das übereinstimmende Auftreten eines Gebietes relativ (und auch absolut) geringer Linienintensität um den Zentralmeridian des Nulltages (= Tag des Sturmbeginns) zeigt, daß das gesuchte M-Gebiet damit identisch oder zumindest in ihm enthalten ist. Beachtenswert ist die erhebliche Ausdehnung dieses koronalen Intensitätsminimums in heliographischer Breite von 10° – 20° der einen Halbkugel bis zu 60° der andern Halbkugel reichend. Es hat damit auch, insbesondere bei M 1943/b und M 1950 (Abb. 2 und 3), annähernd jene Form und Lage, welche die Quelle der M-Partikel haben muß. Denn aus den charakteristischen Eigenschaften der M-Störungen läßt sich schließen, daß es sich bei dem sie verursachenden Korpuskularstrom „um ein dünnes, sehr ausgedehntes und sehr stabiles Band handelt, das wie ein Flügel mit der Sonne rotiert und mehr oder weniger senkrecht zur Ekliptik

steht“¹⁴. Bei der Betrachtung der Tiefe und Breite dieser Koronaminima darf nicht übersehen werden, daß bei den derzeit allein möglichen Randmessungen infolge der schon erwähnten Ausgleichung der Intensität über einen größeren Bereich in heliographischer Länge eine Verflachung und Verbreiterung eintritt, durch welche selbst sehr scharfe und tiefe Intensitätsminima relativ breit erscheinen können.

— Aus der zeitlichen Verschiebung der Mitte der M-Störungen gegenüber dem Meridiandurchgang des solaren M-Gebietes entnimmt man aus den Abbildungen eine mittlere Laufzeit der Partikelstrahlung von $3^d \pm 1,5^d$ in Übereinstimmung mit dem Resultat älterer Arbeiten. Die Zeitdifferenz Sturmbeginn — Meridiandurchgang des M-Gebietes beträgt demgegenüber $0,3^d \pm 0,6^d$ mit deutlich geringerer Streuung. Sollte sich in weiteren Fällen bestätigen, daß der Zusammenhang Meridiandurchgang des M-Gebietes — Sturmbeginn enger ist als jener zur Sturmmitte, wäre dies ein wichtiger Hinweis für die Struktur des Partikelstromes. — Für die M-Störung M 1950 konnte die Untersuchung auch an der roten Koronalinie $\lambda 6374 \text{ \AA}$ mit den Meßergebnissen von Climax und Sacramento Peak¹³ durchgeführt werden und brachte im wesentlichen das gleiche Resultat wie bei der grünen Linie.

M-Störungen und langlebige Filamente

In den Abb. 1–3 sind jene Filamente eingezeichnet, welche während der ganzen oder zumindest während des größten Teils der Lebensdauer der M-Störungen auf der Sonne vorhanden waren. Als Grundlage hierfür dienten für das Jahr 1943 die „Cartes synoptiques“ von Meudon¹⁵, für 1950 die Chromosphärenbeobachtungen des Sonnenobservatoriums Kanzelhöhe. Ein gleichbleibender zeitlicher Zusammenhang zwischen dem Meridiandurchgang der einzelnen festgestellten langlebigen Filamente und dem Beginn der M-Störungen ist offensichtlich nicht vorhanden, so daß keine der M-Störungen einem dieser Filamente zugeordnet werden kann.

¹⁴ K. O. Kiepenheuer, Z. Naturforschg. **6a**, 627 [1951].

¹⁵ L. d'Azambuja u. R. Servajean, Cartes synoptiques de la chromosphère solaire, Vol. I, Fasc. IX (1952).