

cure sont les mieux connus. Cependant certaines observations suggérées par nous ont été faites à Liége pendant la guerre.

GOFFART avait établi la concordance entre les observations de BACQ sur l'effet Lundsgaard (voir ci-dessous) et l'action des oxydants et du sublimé sur les groupes —SH de la peau humaine, étudiée histochimiquement grâce à la coloration au nitroprussiate; par exemple, l'iodate est beaucoup plus actif que le chlorate dans l'oxydation des —SH de la peau. D'autre part, LIEBECQ¹ a recherché l'action inhibitrice des oxydants sur la glycolyse par le muscle broyé de grenouille; il a comparé le pouvoir inhibiteur du chlorate et de l'iodate et observe que l'iodate inhibe déjà totalement à la concentration de 0,02%, alors que la concentration en chlorate doit atteindre 0,5% pour arrêter complètement la glycolyse. Ainsi donc les oxydants, comme les vésicants exercent un pouvoir antiglycolytique parallèle à leur intensité d'action sur les groupes —SH. Nous avons retrouvé un vieux travail de

THUNBERG¹ dans lequel l'auteur montre que l'iodate est plus actif que le chlorate dans l'oxydation de groupes thiols très importants pour la respiration cellulaire.

De même la glycolyse intense du cristallin de bœuf est inhibée par l'iodate de Na et l'eau oxygénée; cette action s'accompagne d'une disparition plus ou moins complète de la réaction au nitroprussiate ammoniacal caractéristique des groupes —SH (de la cystéine, du glutathion ou des protéines); le cristallin en survie, s'opacifie rapidement après addition d'iodate. R. WEEKERS² qui a observé ces faits, hésite cependant à admettre un rapport de cause à effet entre le blocage des fonctions thiols et l'inhibition de la glycolyse suivie inéluctablement de troubles de la transparence.

Il semble donc que l'on puisse affirmer, malgré de nombreuses lacunes faciles à combler, que toxiques de guerre, oxydants et métaux lourds inhibent les mêmes systèmes enzymatiques.

(A suivre)

¹ C. LIEBECQ, Acta biol. Belg. 1, 413 (1941).

¹ T. THUNBERG, Skand. Arch. Physiol. 24, 80 (1910).

² R. WEEKERS, Acta biol. Belg. 2, 48, 192 et 194 (1942); Arch. int. Physiol. 52, 369 (1942).

Sonnenflecken und ihre terrestrischen Wirkungen

Von M. WALDMEIER, Zürich

Immer wenn wieder größere und zahlreichere Flecken auf der Sonne erscheinen, dringt das Interesse für diese merkwürdigen Erscheinungen in weitere Kreise, besonders wegen ihrer terrestrischen Wirkungen, die sich bis in das tägliche Leben bemerkbar machen. Der vorliegende zusammenfassende Bericht verdankt seine Entstehung dem Umstand, daß die Sonnenaktivität gegenwärtig in starkem Anwachsen begriffen ist und schon im nächsten Jahr ein Maximum von außerdöntlicher Intensität erreichen wird.

Der Sonnenzyklus. Die an der Sonne beobachteten Erscheinungen lassen sich grundsätzlich in zwei verschiedene Gattungen trennen. Die der ersten sind stationär; zu ihnen gehören z.B. die Energieproduktion, die Wärme- und Lichtausstrahlung, die Rotation, der innere Aufbau und die mit der Konvektion zusammenhängenden Erscheinungen wie die Granulation. Zur zweiten Gattung, mit der wir uns hier allein beschäftigen, gehören die zeitlich veränderlichen Erscheinungen: Flecken, Fackeln, Protuberanzen, Eruptionen, Form und Emission der Korona. Alle diese veränderlichen Erscheinungen, die man treffend als die Witterung der Sonne bezeichnet, unterliegen einem elfjährigen Zyklus, der an den Flecken, als den am

längsten bekannten Witterungselementen am eingehendsten untersucht worden ist. Fig. 1 zeigt die Jahresmittel der sogenannten Zürcher oder WOLFSCHEN Fleckenrelativzahl für 1749 bis 1945. Man erkennt daraus, daß es sich nicht um eine strenge Periodizität handelt, indem die einzelnen Maxima sehr verschieden hoch und die einzelnen Perioden verschieden lang sind. Unzählige erfolglose Versuche wurden unternommen, diese Unregelmäßigkeiten durch Überlagerung einer reinen, ungefähr elfjährigen Hauptperiode mit einer größeren Anzahl von Nebenperioden zu interpretieren, bis 1935 durch die Eruptionshypothese des Verfassers die Sonnenfleckenkurve von den Fesseln der harmonischen Analyse befreit wurde¹. Danach stellt jeder elfjährige Zyklus einen in sich abgeschlossenen selbständigen Erscheinungskomplex dar. Diese Auffassung stützt sich außer auf die später zu erwähnenden magnetischen Eigenschaften und die zonale Verteilung der Sonnenflecken, auf die Feststellung, daß die die Fleckentätigkeit während eines einzelnen Maximums darstellenden Kurven, abgesehen von feinern Einzelheiten, in ihrer Gesamtheit

¹ M. WALDMEIER, Neue Eigenschaften der Sonnenfleckenkurve, Astron. Mitt. der Eidg. Sternwarte, Nr. 133 (1935).

eine einparametrische Kurvenschar darstellen. In Fig. 2 ist diese Kurvenschar durch 3 individuelle Kurven mit niedrigem, mittlerem und hohem Maximum dargestellt. Als Parameter wählt man zweckmäßig die

kommende Maximum gegeben¹; die daraus besonders interessierenden Daten über die Höhe und Epoche des Maximums sind: $R_M = 139$, $T_M = 1947.6$. Das nächste Jahr wird uns somit eine Sonnentätigkeit bringen,

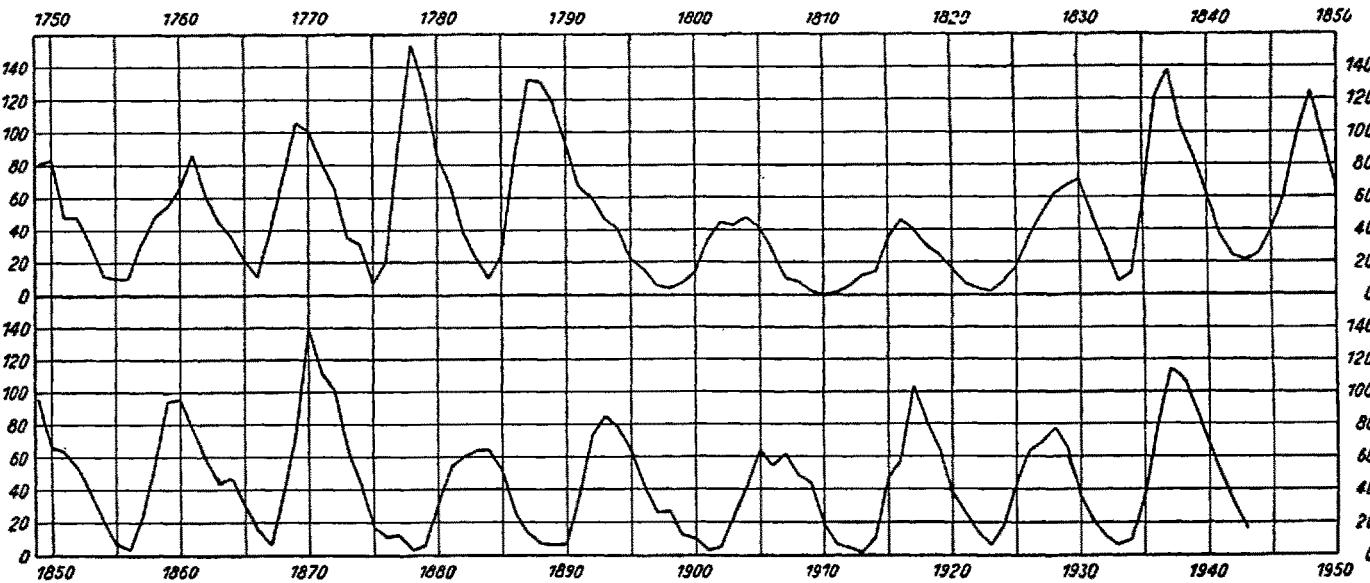


Fig. 1. Die Jahresmittel der Zürcher Sonnenfleckenrelativzahlen 1749—1944.

Maximumsordinate R_M , die größte ausgeglichene monatliche Relativzahl, oder die Anstiegzeit T vom Minimum bis zum Maximum. Zwischen beiden Größen besteht eine sehr enge Beziehung:

$$\log R_M = 2.58 - 0.14 T, \quad (1)$$

wobei T in Jahren gemessen ist. Durch R_M ist im wesentlichen der ganze Verlauf der Fleckenkurve bestimmt: je größer R_M , um so früher tritt das Maximum auf, und um so unsymmetrischer ist die Kurve. Infolge der Einparametrisitheit lässt sich zu irgendeiner Zeit vor oder nach dem Maximum die Flekentätigkeit R durch empirische Formeln als Funktion von R_M darstellen. Die Bestimmung des Parameters erfolgt auf Grund des Anstiegs der Flekentätigkeit nach dem Minimum: je rascher dieser einsetzt und je steiler er erfolgt, ein um so größerer R_M -Wert wird erreicht. Es ist somit möglich, jeweils kurze Zeit nach dem Einsatz eines neuen Zyklus den R_M -Wert abzuschätzen und daraus den Verlauf der Flekentätigkeit während des ganzen kommenden Zyklus zu berechnen. Nach dieser Methode konnte der Verfasser 1935 erstmals eine Prognose geben für den Verlauf der Flekentätigkeit im Zyklus 1933—1944, die sich sehr gut bewährt hat, insbesondere wurde die übernormale Intensität und das gegenüber dem elfjährigen Zyklus um volle zwei Jahre verfrühte Eintreten des Maximums richtig vorausgesagt. Kürzlich wurde auch die Prognose für das

wie sie seit 1870 nie mehr erreicht worden ist.

Sonnenmagnetismus. Im Jahre 1908 deutete G.E. HALE² die schon lange bekannte Aufspaltung der

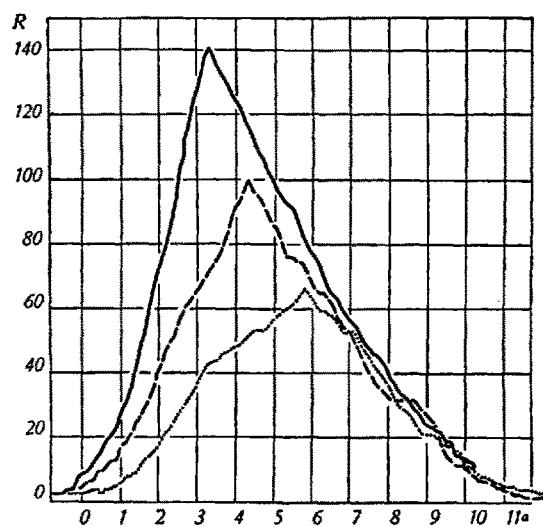


Fig. 2. Ausgeglichene Fleckenkurven für schwache, mittlere und intensive Zyklen.

Spektrallinien in den Sonnenflecken als Zeeman-Effekt, d.h. als Wirkung eines Magnetfeldes. Die

¹ M. WALDMEIER, A prediction of the next maximum of solar activity, Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity 51, 270 (1946).

² G. E. HALE, On the probable existence of a magnetic field in Sunspots, Contr. Mt. Wilson Obs., Nr. 30 (1908).

magnetischen Feldstärken in den Sonnenflecken erreichen Beträge bis zu 3000 Örsted (GAUSS). Die Sonnenflecken treten immer gruppen- oder scharenweise auf (Fig. 3). Der Prototyp einer solchen Gruppe besteht aus zwei Hauptflecken, von denen der in der



Fig. 3. Die große Sonnenfleckengruppe vom Februar 1946. Der schwarze Kreis in der Ecke stellt die Erde im gleichen Maßstab dar.
Aufnahme der Eidg. Sternwarte, 8. Februar 1946.

Rotationsrichtung der Sonne vorausgehende als *P-Fleck*, der nachfolgende als *F-Fleck* bezeichnet wird. Die magnetischen Untersuchungen haben gezeigt, daß *P*- und *F*-Fleck stets entgegengesetzte magnetische Polarität besitzen; auf diese Eigenschaft anspielend, spricht man von bipolaren Fleckengruppen. Die Polaritätsverteilung ist in allen Fleckengruppen der einen Halbkugel dieselbe und zu derjenigen der andern Halbkugel entgegengesetzt; z.B. sind gegenwärtig die *P*-Flecken der nördlichen Halbkugel magnetische Südpole, die *F*-Flecken Nordpole, auf der Südhalbkugel dagegen die *P*-Flecken N-Pole, die *F*-Flecken S-Pole. Diese Verteilung der magnetischen Polaritäten bleibt durch einen ganzen Zyklus erhalten. Jeweils beim Minimum wechselt die Polarität, so daß zwei aufeinanderfolgende Zyklen entgegengesetzte Polaritäten aufweisen und es sich beim Sonnenzyklus also streng genommen um eine 22jährige Doppelperiode handelt. Diese magnetischen Eigenschaften, die ausschließlich auf dem Mt.-Wilson-Observatorium erforscht worden sind, finden zusammen mit der von CARRINGTON 1856 gefundenen Wanderung der Fleckenzone in Fig. 4 ihren Ausdruck. Die ersten Flecken eines beginnenden Zyklus treten in etwa 30° vereinzelte Gruppen bis in über 40° Abstand vom Sonnenäquator

auf. Mit fortschreitender Phase verschiebt sich die Zone, in welcher die Flecken auftreten, zuerst rasch, später langsamer gegen den Äquator, und die letzten Flecken eines erlöschenden Zyklus treten in etwa 5° Abstand vom Äquator auf. Durch Doppelkreise sind schematisch bipolare Gruppen mit ihrer magnetischen Polarität dargestellt, wobei der Kreis rechts den in der Rotationsrichtung vorangehenden Fleck (*P-Fleck*) darstellen soll.

Den Bemühungen der Mt.-Wilson-Beobachter unter G. E. HALE ist es 1913 ferner gelungen, das allgemeine Magnetfeld der Sonne nachzuweisen, dessen Feldstärke an der Sonnenoberfläche am Pol 50 Örsted, am Äquator 25 beträgt, also 75mal stärker ist als das Magnetfeld an der Erdoberfläche¹. Das magnetische Dipolmoment, das für eine gleichförmig magnetisierte Kugel vom Radius a und der Äquatorfeldstärke H_0 den Betrag $H_0 a^3$ besitzt, beträgt somit für die Sonne $8,4 \cdot 10^{18}$, für die Erde $8,1 \cdot 10^{10}$ Örsted \cdot km 3 . Die Existenz des allgemeinen solaren Magnetfeldes wurde vielfach in Frage gezogen, so daß neuerdings am Institut für Sonnenphysik in Potsdam unter H. VON KLÜBER Versuche gemacht worden sind, mit verbesserten Methoden das Magnetfeld zu messen. Ferner werden zurzeit an der Hamburger Sternwarte von G. THIESSEN² Messungen des solaren Magnetfeldes vorgenommen, die bis jetzt die HALESchen Messungen im wesentlichen bestätigen, jedoch allgemein etwas größere Feldstärken liefern als jene.

Da uns im folgenden nur die Tatsache des allgemeinen Magnetfeldes interessiert, nicht aber seine Herkunft, mag der Hinweis genügen, daß man heute dasselbe auf Thermoströme im konvektiven Zentralkern der Sonne zurückführen kann³.

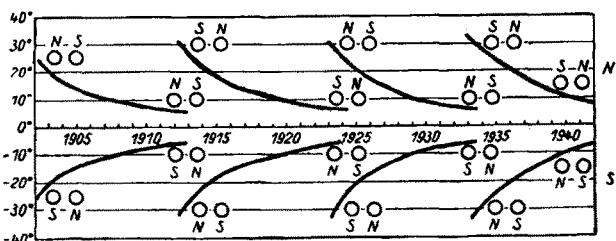


Fig. 4. Wanderung der Sonnenfleckenzone und magnetische Polaritäten der Sonnenflecken.

Die Natur der Flecken und des Fleckenzyklus ist bei weitem noch nicht abgeklärt; die hier gegebene Darstellung entspricht dem heutigen Stand und berück-

¹ G. E. HALE, Preliminary results of an attempt to detect the general magnetic field of the sun, Contr. Mt. Wilson Obs., Nr. 71 (1913).

² G. THIESSEN, Forschungsbericht Nr. 8 des Fraunhofer-Instituts, Freiburg im Breisgau, 1945, nicht gedruckt.

³ W. ELSASSER, Phys. Rev. 55, 489 (1939).

sichtigt hauptsächlich die neuen Untersuchungen von H. ALFVÉN¹ und C. WALÉN².

Ein Hauptproblem des Einzelflecks besteht in der Erklärung der gegenüber der ungestörten Photosphäre um etwa 2000° C niedrigeren Temperatur, derzufolge der Fleck viel weniger ausstrahlt als ungestörte Stellen und deshalb dunkel erscheint.

Im Gebiet eines lokalen Magnetfeldes der Stärke H sei der hydrostatische Druck p , außerhalb des gestörten Gebietes p_0 . Im Feld herrscht aber der zusätzliche magnetische Druck $\mu H^2/8\pi$, so daß im hydrostatischen Gleichgewicht im Falle $\mu=1$ zwischen den Gasdrücken innerhalb und außerhalb des Feldes die Beziehung besteht:

$$p + \frac{H^2}{8\pi} = p_0. \quad (2)$$

Für die in den Sonnenflecken beobachteten Feldstärken beträgt die Differenz der Gasdrücke innerhalb und außerhalb des Feldes größtenteils 10^5 dyn cm^{-2} , ist also von derselben Größenordnung wie die Gasdrücke selbst! Diese Druckverminderung erklärt nun nach ALFVÉN die Abkühlung in den Flecken. Hydrostatisches Gleichgewicht in der Sonnenatmosphäre kann nur bestehen, wenn überall im gleichen Niveau die Dichte ϱ dieselbe ist. Da man bei der Dichte der Sonnenatmosphäre unbedenklich mit der Gasgleichung rechnen kann, ergibt sich aus (2):

$$\frac{T}{T_0} + \frac{H^2}{8\pi p_0} = 1 \quad (3)$$

$$T = T_0 \left(1 - \frac{H^2}{8\pi p_0} \right) \quad (4)$$

Hydrostatisches Gleichgewicht zwischen Fleck und Photosphäre ist somit nur möglich, wenn die Temperatur T im Magnetfeld kleiner ist als die Temperatur T_0 außerhalb. Es ist allerdings fraglich, inwiefern ein Fleck mit einer Lebensdauer von Tagen oder Wochen als im statischen Gleichgewicht mit der Umgebung betrachtet werden darf. Jedenfalls würde eine solche einmal erzeugte Temperaturdifferenz durch Strahlung und Leitung und sekundär in Gang gebrachte Konvektion nach und nach ausgeglichen werden.

Nun handelt es sich darum, zu erklären, wie das Magnetfeld eines solchen Sonnenflecks als seine primäre und wesentliche Eigenschaft entsteht. Dieses Problem hängt aufs engste mit den von ALFVÉN hypothetisch eingeführten magneto-hydromechanischen Wellen zusammen. In einem elektrisch leitenden Gas, wie es die ionisierte Sonnenmaterie darstellt, in wel-

chem die Feldstärke \mathfrak{H} herrscht, erzeugt die Bewegung eines Volumenelements mit der Geschwindigkeit v die elektrische Polarisation:

$$\mathfrak{E} = \frac{1}{c} v \times \mathfrak{H} \quad (5)$$

Dieses elektrische Feld erzeugt einen Strom i , der im Feld \mathfrak{H} eine mechanische Kraft erfährt. Diese Kraft ist allgemein so gerichtet, daß sie die primäre Bewegung des Volumenelements verzögert, wobei die Bewegungsenergie auf die benachbarten Elemente übergeht und sich so die primäre Störung in Form einer Welle durch das Medium fortpflanzt. Aus den MAXWELLSchen Gleichungen:

$$\text{rot } \mathfrak{H} = \frac{4\pi i}{c} \quad (6)$$

$$\text{rot } \mathfrak{E} = - \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t} \quad (7)$$

mit den bekannten Beziehungen

$$\mathfrak{B} = \mu \cdot \mathfrak{H} \quad i = \sigma \left(\mathfrak{E} + v \times \frac{\mathfrak{B}}{c} \right) \quad (8)$$

und der hydrodynamischen Gleichung

$$\varrho \frac{dv}{dt} = \frac{1}{c} (i \times \mathfrak{B}) - \text{grad } p \quad (9)$$

folgt weiter:

$$\frac{d^2 H_v}{dt^2} = \frac{\mu H_0^2}{4\pi\varrho} \cdot \frac{d^2 H_v}{dz^2}. \quad (10)$$

Dabei bedeutet ϱ die Materiedichte, σ die hier als sehr groß angenommene Leitfähigkeit und c die Lichtgeschwindigkeit. Die Feldstärke \mathfrak{H} setzt sich zusammen aus der primären, in der z -Richtung gedachten konstanten Feldstärke H_0 und der von dem Strom herrührenden variablen H_v . Gleichung (10) stellt aber die Wellengleichung dar und aus dieser folgt unmittelbar für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der magneto-hydromechanischen Wellen:

$$V = H_0 \sqrt{\frac{\mu}{4\pi\varrho}}. \quad (11)$$

Mit dieser Geschwindigkeit, die im Inneren der Sonne größtenteils 1 m/sec beträgt, pflanzt sich irgendein Bewegungszustand parallel oder antiparallel längs den magnetischen Feldlinien fort. Schon G. E. HALE hatte die magnetische Bipolarität der Fleckengruppen als Schnitt der Sonnenoberfläche mit einem Wirbelring gedeutet. Deshalb hat C. WALÉN speziell die Bewegung eines im Sonnenzentrum erzeugten Wirbelringes untersucht. Ein solcher Ring wird aufgespalten, wobei die eine Hälfte sich in Richtung H_0 , die andere in entgegengesetzter Richtung bewegt (Fig. 5). Die beiden Wirbelhälfte erzeugen, wenn sie an der Sonnenoberfläche auftauchen, zwei Fleckengruppen zu beiden Seiten des Äquators auf demselben Meridian. Diese Forderung der Theorie wird durch die vom Verfasser schon früher festgestellte Tatsache¹, daß mit einer Fleckengruppe auf der einen

¹ H. ALFVÉN, On the existence of electromagnetic-hydrodynamic waves, Ark. Mat. Astron. Fys. 29B (1943); On the effect of a vertical magnetic field in a conducting atmosphere, Ark. Mat. Astron. Fys. 29A (1943); On sunspots and the solar cycle, Ark. Mat. Astron. Fys. 29A (1943); Magneto-hydrodynamic waves and sunspots, I und II M. N. 105, Nr. 1 und 5 (1945/46).

² C. WALÉN, On the theory of sunspots, Ark. Mat. Astron. Fys. 30A (1944).

¹ M. WALDMEIER, Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung, S. 132, Abb. 42, Leipzig 1941.

Halbkugel, weit häufiger als bei zufälliger Verteilung zu erwarten wäre, eine solche auf der entgegengesetzten Halbkugel in derselben Länge korrespondiert. Aus Fig. 5 ist unmittelbar ersichtlich, daß nach dieser Vor-

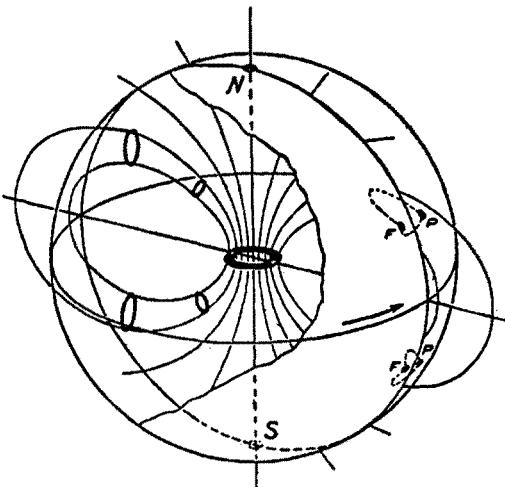


Fig. 5. Die im Sonnenzentrum gebildeten Wirbelringe wandern längs den magnetischen Feldlinien an die Sonnenoberfläche und bilden dort bipolare Fleckengruppen. (Nach C. WALÉN.)

stellung das Polaritätsgesetz, wonach die Flecken der N- und S-Halbkugel entgegengesetzte Polarität aufweisen, erfüllt ist.

Da H_0 aus der Annahme eines magnetischen Dipolfeldes und der beobachteten Feldstärke an der Sonnenoberfläche und ϱ aus der Theorie des inneren Aufbaues der Sonne für jeden Punkt im Innern der Sonne hinreichend bekannt ist, läßt sich die Laufzeit einer Störung vom Sonnenzentrum bis zur Oberfläche längs jeder Feldlinie berechnen. Diese Rechnung ergibt, daß die Wellenfront zuerst in höheren Breiten die Sonnenoberfläche erreicht, später in tieferen. Für die heliographische Breite 30° beträgt die Laufzeit rund 40 Jahre, fünf Jahre weniger als für die Breite $\sim 0^\circ$. Dadurch wird die Wanderung der Fleckenzone von höheren nach tieferen Breiten erklärt. Diese Interpretation der Zonenwanderung eröffnet auch eine Möglichkeit für die kurzfristige Prognose der Fleckentätigkeit, indem eine spezielle in der Breite φ auftretene Störung zu späterer Zeit in niedrigerer Breite auftreten müßte. Überhaupt sollte danach der Verlauf der Fleckentätigkeit in der Breite φ , abgesehen von einer Normierungsfunktion mit derjenigen in der Breite $\varphi + \Delta\varphi$ übereinstimmen, bis auf eine zeitliche Verschiebung, die durch die Laufzeitdifferenz der Breiten φ und $\varphi + \Delta\varphi$ gegeben ist. Nach Untersuchungen auf der Eidg. Sternwarte scheint eine solche Verschiebung festzustellen sein; immerhin zeigen die Beobachtungen den Effekt nicht in der erwarteten Deutlichkeit.

Die solaren Wirkungen der Sonnenflecken beruhen fast ausschließlich auf dem Magnetfeld der Flecken.

Hier sollen nur die wichtigsten kurz besprochen werden: die Korona, die Eruptionen und die Fackeln.

Während der Entstehung eines Sonnenflecks nimmt \mathfrak{H} in wenigen Tagen von 0 bis auf etwa 3000 Örsted zu. Während dieser Zeit ist der Fleck auch von einem elektrischen Feld E umgeben. Stellen wir uns das Magnetfeld durch einen Kreisstrom vom Radius r vor, wobei r ungefähr gleich dem Radius des Sonnenflecks anzunehmen ist, so ist bei $\mu = 1$:

$$\oint E \cdot ds = F \cdot \dot{\mathfrak{H}}, \quad (12)$$

$$E = \frac{r}{2} \dot{\mathfrak{H}}. \quad (13)$$

Rechnen wir mit einem Sonnenfleck der erwähnten Feldstärke, der in einigen Tagen die Größe der Erde erreicht, so ergibt sich aus (13) in der Umgebung des äußeren Randes des Flecks eine Feldstärke von einigen Volt/m. Die Gase der Sonnenatmosphäre sind weitgehend ionisiert und ihre Bestandteile werden in diesem elektrischen Feld beschleunigt. Der Betrag der akkumulierten Energie hängt wesentlich von der freien Weglänge ab und ist deshalb für die einzelnen Niveaus der Sonnenatmosphäre sehr verschieden. In der mittleren Photosphäre, bei einer Dichte von etwa 10^{-6} g/cm^3 ¹ kann keine nennenswerte Energieaufspeicherung erfolgen, wohl aber in deren höchsten

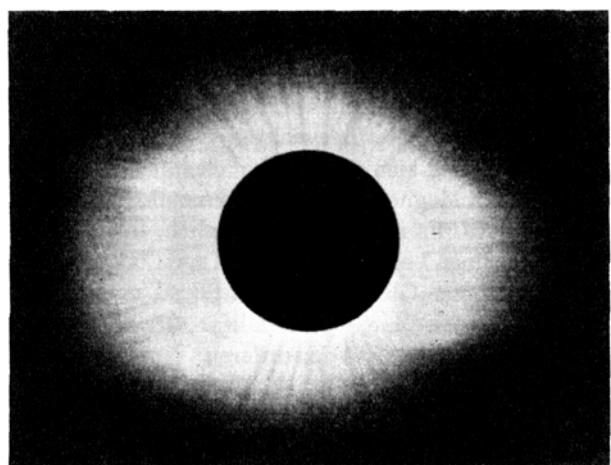


Fig. 6. Die Sonnenkorona während der Finsternis vom 9. Juli 1945. Aufnahme der Expedition des Stockholmer Observatoriums nach Brattås (N-Schweden).

Schichten, wo die freie Weglänge schon nach Dezimetern mißt. In diesem Sinne dürfen die in den obersten Photoshärenschichten in der Umgebung von Flecken als sogenannte Fackeln beobachteten Aufheizungen zu deuten sein. Obschon die freie Weglänge nach außen enorm zunimmt, verhindert zunächst die Anwesenheit des Magnetfeldes, das selbst in den äußersten Teilen des Sonnenflecks, die für die Be-

¹ M. WALDMEIER, Der Aufbau der Sonnenatmosphäre, Helv. phys. acta 15, 405 (1942).

schleunigung noch in Frage kommen, den Ionen Bahnradien aufzwingt, die nicht über einige Meter hinausgehen, eine größere Energieakkumulierung. Das Teilchen wird deshalb auch in der Chromosphäre, wo die freien Weglängen schon groß sind gegen die Bahnradien, nicht mehr als einige eV akkumulieren können, nämlich soviel wie bei einem halben Umlauf im Magnetfeld gewonnen werden kann, in Übereinstimmung mit der Beobachtung, daß die Umgebung der Flecken in der Chromosphäre auf etwa $10\,000^{\circ}\text{C}$ aufgeheizt ist und als chromosphärisches Fackelgebiet sich hell von der ungestörten Chromosphäre abhebt. Die äußerste Sonnenatmosphäre, die Korona (Fig. 6) hat aber eine nach verschiedenen Methoden bestimmte Temperatur von $1-2$ Millionen Grad¹. Gerade diese hohe Temperatur erklärt die gewaltige Ausdehnung, d.h. den kleinen Dichtegradienten der Korona. Die in der Korona beobachteten Elementarenergien betragen bis gegen 1000 eV, die an sich leicht akkumuliert werden könnten, falls kein ablenkendes Magnetfeld vorhanden wäre, denn selbst in der inneren Korona übersteigen die freien Weglängen 1 km. Die Beschleunigung der Koronateilchen kann somit nur an den Stellen, wo $\mathfrak{H}=0$, $\dot{\mathfrak{H}} \neq 0$ ist, erfolgen. Solche neutrale Punkte gibt es in den äußeren Teilen des Fleckenfeldes, wo daselbe durch das allgemeine Magnetfeld der Sonne kompensiert wird, ferner auch innerhalb aus mehreren Flecken zusammengesetzten Gruppen. Ein weiterer Spezialfall liegt vor, wenn das Teilchen sich durch die Achse des Magnetfeldes bewegt; dann wird es zu einer Spirale um dieselbe aufgerollt und kann in dem elektrischen Wirbelfeld, ähnlich wie im Zyklotron, beschleunigt werden, um so mehr, je größer die freie Weglänge ist. Allgemein wird man innerhalb einer zusammengesetzten Fleckengruppe an irgendeiner Stelle eine aus allen Einzelflecken resultierende Feldstärke \mathfrak{H} haben und einen resultierenden Vektor $\dot{\mathfrak{H}}$; diese werden nun aber im allgemeinen nicht mehr senkrecht zueinander stehen, so daß stets eine Komponente von \mathfrak{E} in Richtung von $\dot{\mathfrak{H}}$ liegt, und die dieser folgende Bewegung keine magnetische Ablenkung erfährt.

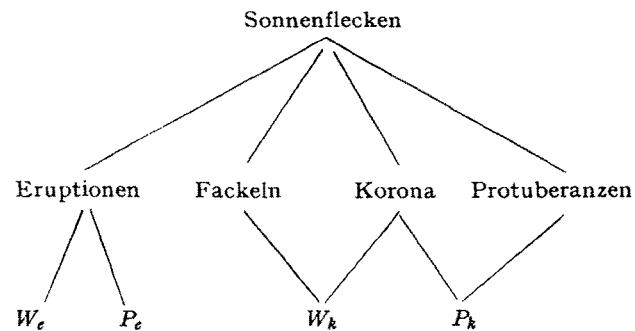
Diese Theorie der Aufheizung der Korona durch die Fleckenfelder erhält durch die Beobachtung, daß gerade über den Flecken die höchsten Temperaturen beobachtet werden, eine starke Stütze².

In prinzipiell ähnlicher Weise dürften auch die Eruptionen zu erklären sein, die in einem vorübergehenden Hellerwerden der chromosphärischen Fackelgebiete bestehen; jedenfalls dürfte das Fleckenfeld bei der Entstehung der Eruptionen, die vorzugsweise in

komplexen, sich rasch entwickelnden Fleckengruppen auftreten, maßgeblich beteiligt sein.

Die terrestrischen Wirkungen der Sonnenflecken sind indirekter Natur, übertragen durch die eben erwähnten Erscheinungen: Korona, Eruptionen, Fackeln und Protuberanzen. Diese letzteren sind isolierte Gasmassen, die weit über den Sonnenrand hinausragen; sie können ebenfalls als durch die Flecken bedingt betrachtet werden, indem sie vorwiegend, wenn auch nicht ausschließlich, aus Fleckenherden heraus entstehen, aber erst monatelang, nachdem der Fleck wieder verschwunden ist, ihre größte Entwicklung erreichen.

Die terrestrischen Wirkungen lassen sich in solche, die von einer Wellenstrahlung W , und solche, die von einer Partikelstrahlung P herrühren, unterteilen. Von jeder Strahlung läßt sich eine kontinuierliche und eine eruptive Form unterscheiden, so daß wir es mit vier Komponenten zu tun haben: W_k , W_e , P_k , P_e . Alle vier Komponenten besitzen geringes Durchdringungsvermögen und werden schon in den höchsten Schichten der Erdatmosphäre vollständig absorbiert. Der Zusammenhang der vier Komponenten mit den angeführten solaren Erscheinungen geht aus folgendem Schema hervor:



Die W_k -Strahlung stammt im wesentlichen von der Korona und nur zu einem untergeordneten Teil von den Fackelgebieten und liegt deshalb wegen der sehr hohen Koronatemperatur hauptsächlich im Gebiet $\lambda < 900 \text{ \AA}$; diese Strahlung ist aber fähig, die Luftbestandteile zu ionisieren und erzeugt damit die Ionosphäre. Fig. 7 zeigt die Variation der aus ionosphärischen Messungen erschlossenen Intensität dieser ionisierenden Strahlung ($600 < \lambda < 900 \text{ \AA}$) im Sonnenzyklus 1933–44; der sehr enge Zusammenhang mit der Sonnenfleckenrelativzahl R ist zu erwarten, nachdem wir die Aufheizung der Korona durch die Sonnenflecken erklärt haben. Wir können versuchen, ganz roh die Koronastrahlung durch eine graue Strahlung der Temperatur $T_k = 10^6$ darzustellen:

$$I_K(\lambda) = W \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_k}} - 1}, \quad (14)$$

wobei W den Verdünnungsfaktor bedeutet. Die Intensität der photosphärischen Strahlung dagegen ist:

¹ M. WALDMEIER, Probleme der Sonnenkorona, Naturwiss. 32, 51 (1944); Der physikalische Zustand der Sonnenkorona, Mitt. Aarg. Natf. Ges. XXII (1945).

² M. WALDMEIER, Das Verhalten der Koronalinie 5694 Å, Astron. Mitt. Eidg. Sternwarte Zürich, Nr. 146 (1945).

$$I_P(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_P}} - 1}. \quad (15)$$

Im visuellen Spektralgebiet mit $T_P = 6000^\circ\text{C}$ ist $I_K/I_P = 10^{-8}$, woraus sich $W = 2,5 \cdot 10^{-12}$ ergibt. Für den für die Ionisation der Erdatmosphäre in Frage kommen-

Strahlung hat eine ausgesprochene Tendenz, sich jeweils nach 27 Tagen, d.h. nach einer Umdrehung der Sonne zu wiederholen. Das bedeutet, daß jene zunächst nicht näher bezeichneten Gebiete eine lange Lebensdauer, oft bis zu einem Jahr, aufweisen. Diese Gebiete, die lange Zeit mit keiner Erscheinung der Sonnenober-

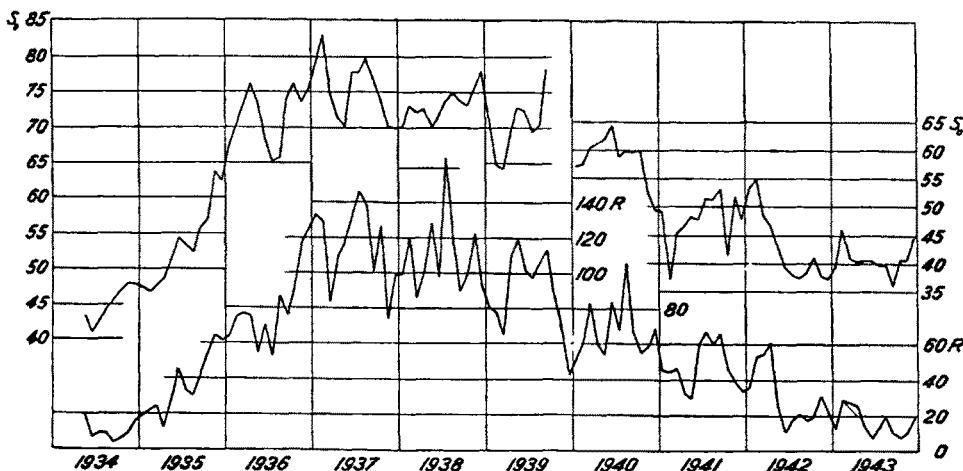


Fig. 7. Monatliche Mittelwerte S_0 der W_k -Strahlung und der Sonnenfleckenrelativzahl R .
Nach M. WALDMEIER und B. BECK.

den Spektralbereich (600–900 Å) folgt daraus: $I_K/I_P \sim 10^5$. Dies ist ein weiterer Hinweis, daß die ionisierende Strahlung von der Korona stammt, denn schon seit 10 Jahren ist bekannt, daß die einer Temperatur von 6000°C entsprechende thermische Strahlung der Sonne etwa 10^5 mal zu schwach ist, um die Existenz der Ionosphäre zu erklären.

Die W_e -Strahlung wird während des Ausbruches einer Eruption, also während 10 Minuten bis höchstens 2 Stunden, emittiert. Obwohl selbst große Eruptionen nur wenige Promille der Sonnenscheibe bedecken, ist ihre ionisierende Strahlung doch ebenso groß wie die der ganzen Korona; deshalb reicht während einer Eruption die Ionosphäre, die normalerweise in einer Höhe von etwa 100 km endigt, bis gegen 70 km herunter.

Große Eruptionen emittieren auch eine Korpuskularstrahlung P_e , die aus ionisierter, als Ganzes aber ungeladener Materie besteht. Die Geschwindigkeiten dieser Partikel betragen 1000–2000 km/s, so daß sie 1–2 Tage benötigen, um die Erde zu erreichen. In der sehr großen Fleckengruppe, die in der zweiten Julihälfte die Sonnenscheibe passierte, ereignete sich am 25. Juli zwischen 17^h und 19^h MEZ eine Eruption von außergewöhnlicher Größe; ihre Korpuskularwolke erreichte die Erde erwartungsgemäß in der Nacht vom 26. auf den 27. Juli und erzeugte ein intensives Nordlicht.

Die P_k -Strahlung schließlich ist eine Korpuskularstrahlung, die während längerer Zeit von begrenzten Gebieten der Sonnenoberfläche ausgeht. Die P_k -

fläche identifiziert werden konnten, wurden von BARTELS¹ 1932 als M-Regionen bezeichnet. Erst zu Beginn dieses Jahres konnten diese Quellgebiete der P_k -Strahlung durch die Arbeiten der Eidg. Sternwarte² mit den Protuberanzen identifiziert werden, nachdem schon früher ein Teil dieser Strahlung mit den sogenannten C-Gebieten der Sonne, Gebiete, in denen die Linienemission der Korona außergewöhnlich stark ist, ohne daß sich eine nennenswerte photosphärische Störung zeigt, in Zusammenhang gebracht worden ist³. In Fig. 8 ist zunächst durch Symbole die erdmagnetische Aktivität, die ein Maß ist für die einfallende Korpuskularstrahlung, für jeden Tag des Jahres 1930 dargestellt, so daß Tage, die durch ein Intervall von 27 Tagen voneinander getrennt sind, untereinander zu stehen kommen. Je stärker die magnetische Störung ist, um so schwärzer ist das Quadrat bezeichnet. Man erkennt in dem Diagramm zwei fast durch das ganze Jahr hindurchgehende Störungszonen, sogenannte M-Gebiete, die etwa auf den 11. und den 26. Tag fallen.

In einem zweiten Diagramm ist analog die Häufigkeit der Protuberanzen, die an dem betreffenden Tag im Zentralmeridian der Sonne standen, dargestellt. Die Übereinstimmung der beiden Diagramme ist evi-

¹ J. BARTELS, Terrestrial magnetic activity and relation to solar phenomena, Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity 37, 1 (1932).

² M. WALDMEIER, An Attempt to identify Bartel's M-Regions, Terrestrial Magnetism 51, fasc. 4 (1946).

³ M. WALDMEIER, Untersuchungen an der grünen Koronalinie 5303 Å, Z. Astrophys. 19, 37 (1939); Koronaintensität und Erdmagnetismus, Z. Astrophys. 21, 275 (1942).

dent; es muß allerdings darauf hingewiesen werden, daß das Protuberanzendiagramm gegenüber dem magnetischen um 6 Tage verspätet ist. Das würde bedeuten, daß die Korpuskularstrahlung, falls diese die

5–12 Tage bevor sie auf der Erde wirksam sind, zur Beobachtung gelangen; auch das Eintreffen der P_e -Strahlung läßt sich auf Grund einer beobachteten Eruption und der bekannten Laufzeit voraussagen, wie das z. B. bei dem Nordlicht vom 18./19. September 1941 und vom 26./27. Juli 1946 der Fall war. Die Eruptionen selbst entziehen sich noch einer individuellen Prognose; hingegen läßt sich die Tendenz angeben, ob in einem bevorstehenden Zeitabschnitt von etwa 10 Tagen viele oder wenige Eruptionen zu erwarten sind.

So hat die Sonnenforschung in den letzten Jahren in der Enträtselung der Vorgänge und Erscheinungen, die sich in und auf der Sonne abspielen, und die noch vor kurzem als merkwürdige Spiele der Natur erschienen, Fortschritte erzielt, die bereits zu einer ausgedehnten praktischen Nutzanwendung geführt haben.

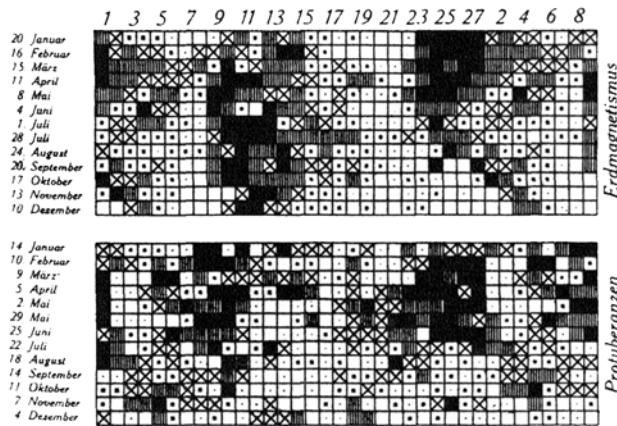


Fig. 8. Zusammenhang der erdmagnetischen Aktivität (oben) und der Protuberanzentätigkeit der Sonne (unten).

Sonne in radialer Richtung verläßt, eine Laufzeit Sonne-Erde von 5,6 Tagen hätte. Jedenfalls ist die Laufzeit der P_k -Strahlung wesentlich länger als die der P_e -Strahlung. Man kann deshalb statt von P_e - und P_k -Strahlung auch von schnellen und langsamem Korpuskeln sprechen.

Der weltumspannende Kurzwellenverkehr ist ganz auf die Ionosphäre angewiesen; diese wird durch die W_k -Strahlung erzeugt. Da man in der Lage ist, die Sonnenaktivität und damit die Intensität von W_k auf einige Monate vorauszusagen, läßt sich für diese Zeit auch der normale Ionosphärenzustand berechnen. Solche Prognosen, die die günstigste Frequenz angeben, mit welcher eine bestimmte Entfernung zu einer bestimmten Tageszeit der folgenden Monate überbrückt werden kann, werden von der Eidg. Sternwarte herausgegeben. Aber auch die Störungen des normalen, durch W_k bedingten Ionosphärenzustandes durch W_e einerseits und P_e und P_k andererseits können vorausgesagt werden, da die Emissionsgebiete der Korona und die Protuberanzen am E-Rand der Sonne schon

After a discussion of the 11-year solar-cycle as regarded from the standpoint of the "eruption-hypothesis," which offers a possibility to predict the solar activity for several years and after a review of the magnetic properties of the sun and the sunspots, the paper deals with the new theories of the spots and the solar-cycle as suggested by ALFVÉN and WALÉN.

The terrestrial effects of the phenomena associated with the solar cycle are classified into 4 groups: effects produced by a) a wave radiation W_k emitted continuously by the sun, b) a wave radiation W_e emitted from the chromospheric eruptions, c) a particle radiation P_k emitted by the so-called M-regions, and d) a particle radiation P_e ejected from the eruptions. The connection between the solar eruptions and the radiations P_e , W_e is a well established fact; on the other hand the radiations W_k , P_k could be connected by the author with the solar corona and the stationary solar prominences respectively.

To account for the intensity of the W_k -radiation a temperature of the solar corona of one million degree is required in agreement with the observed temperature. The heating of the corona occurs in the electric field around an increasing sunspot. As in the corona the mean free path amounts to several kilometers, particles may be accelerated up to 1000 eV, so far the condition $\hbar=0$ is fulfilled. Generally speaking acceleration is possible only in such regions where \hbar and $\tilde{\hbar}$ are not perpendicular to each other.

Summary