

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Band: 8 (1963)
Heft: 79

Artikel: Beobachtung und Deutung des Zodiakallichtes
Autor: Haug, U.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-900185>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.10.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BEOBACHTUNG UND DEUTUNG DES ZODIAKALLICHTES

Von U. HAUG, Tübingen

Man kann kaum ein ernsthafter Beobachter des Sternhimmels sein, ohne dem Zodiakallicht zu begegnen. Es gehört mit zu den schönsten Reiseerinnerungen, es in niedrigen geographischen Breiten als schmalen, hellen Lichtkegel steil vom Horizont aufsteigen zu sehen; und sein Name wird augenfällig, wenn der Tierkreis so gut markiert ist, wie dies z. B. im Juni 1962 der Fall war, als Saturn, Jupiter, Mars, die Mondsichel und Merkur gleichzeitig das Morgenzodiakallicht schmückten. Doch auch in europäischen Breiten ist es eine bemerkenswerte Erscheinung, wenn es im Frühjahr nach Ende der Dämmerung oder im Herbst vor Morgenrauen seine steilste Stellung erreicht. Schwieriger ist es, seine Fortsetzung in grösserem Sonnenabstand zu erkennen. Es erfordert einen günstigen Beobachtungsort ohne irdisches Störlicht, aber auch eine lange Adaptionszeit, um von der Spitze des Kegels aus die Lichtbrücke entlang der Ekliptik bis hin zu der schwachen Aufhellung im Gegenpunkt der Sonne, dem Gegenschein, verfolgen zu können.

Noch bis in unsere Tage haben genaue Beobachtungen der Punkte grösster Helligkeit und visuelle Helligkeitsmessungen den Hauptbeitrag zur Erforschung dieser Erscheinung geliefert. Es ist das Ziel dieses Berichtes zu zeigen, wie moderne Hilfsmittel auch auf diesem Gebiet neue Möglichkeiten erschlossen haben. Unsere Kenntnisse der Helligkeit und Farbe, vor allem aber der Polarisation des Zodiakallichtes haben sich verbessert, und auch aus dem Spektrum konnten wesentliche Aussagen gewonnen werden. Neue Ansätze zur Deutung haben das Zodiakallicht verknüpft mit einer ganzen Anzahl anderer Erscheinungen des Planetensystems. Das bedeutet einen ganz wesentlichen Fortschritt für die theoretischen Vorstellungen. Doch sind damit und mit dem Einsatz moderner Rechanlagen die Forderungen an die Konsistenz der Theorie gestiegen. So konnte auch in wesentlichen Punkten noch keine Übereinstimmung der Anschauungen erzielt werden.

DIE BEOBACHTUNG DES ZODIAKALLICHTES

Die Messungen von BLACKWELL aus Flugzeugen in grosser Höhe und auf der Höhenstation Chacaltaya (5130 m) in den bolivianischen Anden haben gezeigt, dass es auch mit photographischen Methoden möglich ist, gute Absolutwerte der Helligkeit und der Polarisation des

Zodiakallichtes zu erhalten. Günstig ist dabei, dass sich die auftretenden Maximal- und Minimalhelligkeiten wegen des Himmelsuntergrundes um weniger als einen Faktor 10 unterscheiden.

Im allgemeinen zieht man jedoch seit der bahnbrechenden Arbeit von ELVEY und ROACH (1937) die lichtelektrische Methode vor, weil sie es erlaubt, sehr grosse Teile des Himmels in kurzer Zeit zu überstreichen. Für die Photometer genügt in der Regel ein Objektiv von etwa 10 cm Durchmesser. Die Oeffnung der Gesichtsfeldblende pflegt am Himmel einem Feld von 0.2 bis 1.0 \square° zu entsprechen; sie darf nicht zu gross sein, damit auch an den Stellen grösserer Sterndichte auf der Registrierung zwischen den Spitzen der helleren Sterne das Kontinuum der Flächenhelligkeit gut erkennbar ist. Hinter der Gesichtsfeldblende folgen Feldlinse, Filter, bei Polarisationsmessungen noch

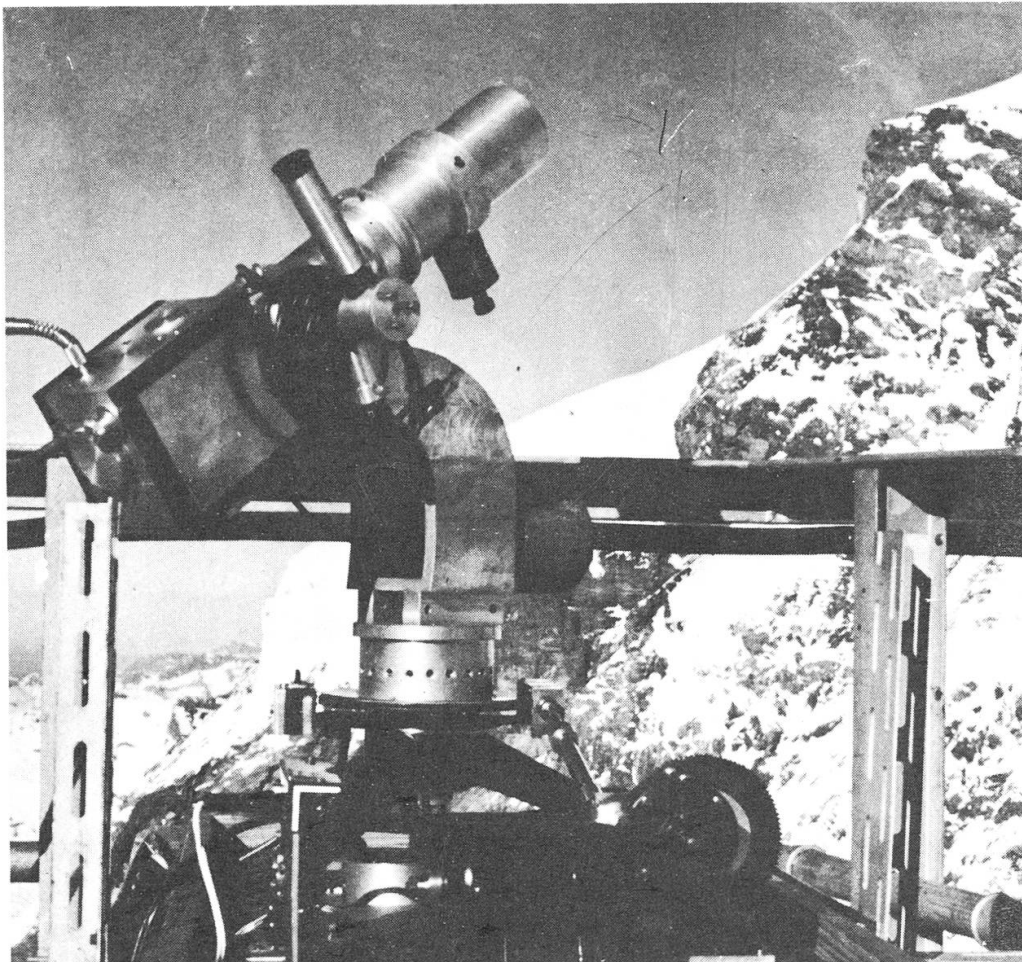


Abbildung 1 — Flächenphotometer für die Registrierung der Nachthimmelshelligkeit auf der Sphinx-Terrasse der Hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch.

ein rotierbarer Polarisator und der Sekundärelektronenvervielfacher. Man montiert die Instrumente azimuthal und tastet den Himmel durch Drehung um die vertikale Achse ab. Die Zeitkonstante des Verstärkers sowie des Schreibers, mit dem die Aufzeichnung erfolgt, und die Drehgeschwindigkeit des Photometers müssen aufeinander abgestimmt sein. Bei Drehgeschwindigkeiten um 1° pro Sekunde braucht man etwas schnellere Schreiber als sie für Sternphotometrie üblich sind. Die Höhe kann nach jedem «Schnitt» neu eingestellt werden. Oft fährt man aber auch in der gleichen Höhe immer hin und her, und das Zodiakallicht wird durch die tägliche Bewegung des Himmels durchregistriert. Messungen von helleren Einzelsternen mit dem gleichen Instrument liefern die Eichung der Schreiberausschläge und das Farbsystem. — Abbildung 1 zeigt ein Flächenphotometer auf der Sphinx-Terrasse der Hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch, wo schon eine Reihe von flächenphotometrischen Arbeiten gemacht wurde.

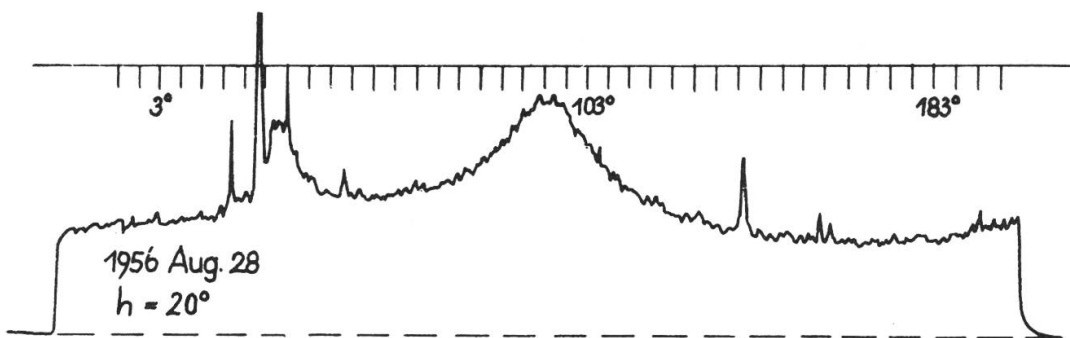


Abbildung 2 — Zodiakallicht-Registrierung am Boyden Observatory in Südafrika.

Abbildung 2 zeigt als Beispiel eine Zodiakallichtregistrierung am Boyden Observatory in Südafrika mit Gelbfilter in 20° Höhe. Das Azimut wird von 5 zu 5° durch eine Marke angezeigt, insgesamt wurden 205° überstrichen. Die Registrierung beginnt (links) zwischen dem südlichen Himmelspol und der Grossen Magellanschen Wolke, geht über die als Zacken sichtbaren Sterne ω und θ Car zur Milchstrasse, deren Aquator bei $l = 257.6^\circ$ (alte gal. Länge) geschnitten wird. Die Helligkeit an dieser Stelle beträgt rund 350 Sterne 10^m pro Quadratgrad. Dann führt sie fast senkrecht auf das Zodiakallicht zu; die Ekliptik wird etwa in einem Winkelabstand von 40° von der Sonne («in 40° Elongation») nach Norden überschritten. Das Ende liegt im Sternbild Herkules ($\alpha = 17^h$, $\delta = 38^\circ$). Noch bei 50° ekliptikaler Breite ist ein deutlicher Helligkeitsbeitrag des Zodiakallichts zu

erkennen. Charakteristisch ist der im Vergleich zur Milchstrasse sehr stetige Helligkeitsverlauf im Zodiakallicht. – Bei Polarisationsmessungen (Abbildung 3) enthält die Aufzeichnung eine Schwingung von der doppelten Umdrehungsfrequenz des Polarisators, deren Amplitude den polarisierten Anteil der Strahlung ergibt; die obere Einhüllende zeigt also die gesamte Strahlung I_g , die untere Einhüllende den unpolarisierten Anteil I_u an. Der abgebildete Ausschnitt ist zum Teil mit schnellem Papiervorschub gemacht, so dass man aus der Phasenlage der Schwingung noch die Polarisationsrichtung bestimmen kann.

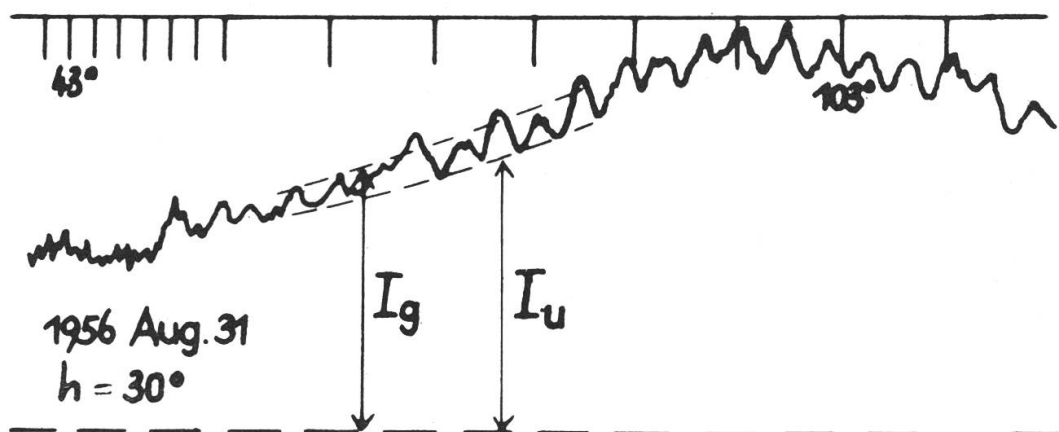


Abbildung 3 – Registrierung des Polarisationsgrades.

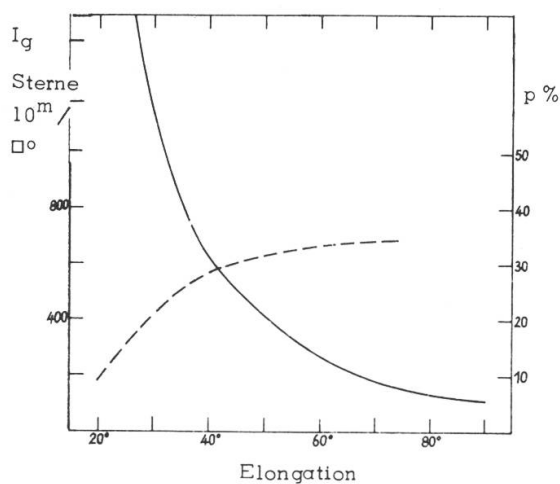
Die eigentlichen Schwierigkeiten solcher Messungen liegen in der Auswertung. Es handelt sich dabei hauptsächlich um die Berücksichtigung der atmosphärischen Extinktion und um die Trennung des Zodiakallichtes von den Beiträgen des Sternlichtes, d.h. vor allem der Milchstrasse, und des Nachthimmelsleuchtens (Airglow).

Zodiakallichtbeobachtungen erfolgen meist nahe am Horizont, sodass der Einfluss der Atmosphäre beträchtlich ist. Man darf aber Flächenhelligkeiten nicht mit einem aus Sternmessungen gewonnenen Extinktionskoeffizienten auf extraterrestrische Helligkeiten umrechnen. Denn von dem in der Atmosphäre gestreuten Licht fällt ein wesentlicher Bruchteil wieder in Richtung des Beobachters, so dass dieser Bruchteil nur zu einer Verschmierung der Flächenhelligkeit, nicht zu einer Abschwächung führt. Dies lässt sich rechnerisch berücksichtigen, und es ist günstig, dass dadurch der Unterschied zwischen Atmosphären von verschiedenem Dunstgehalt vermindert wird. Trotzdem bringt dieser Schritt eine Unsicherheit in das Ergebnis, und es wäre wünschenswert, die Abschwächung von Flächenhelligkeiten in Abhängigkeit von der Zenitdistanz auch direkt zu messen.

Wie entscheidend eine richtige Trennung der verschiedenen Helligkeitskomponenten ist, zeigt schon Abbildung 2. Der grösste Teil des Untergrundes weit weg von Zodiakallicht und Milchstrasse ist dem Airglow zuzuschreiben. Weil sich die Helligkeit der Emissionslinien dieser Strahlung nicht parallel ändern, kann dieser Anteil bisher nicht unabhängig bestimmt werden, sondern muss für jede Beobachtungsnacht aus den Registrierungen selbst gefunden werden. Dabei nimmt man an, dass für eine bestimmte Höhe seine Helligkeit nach allen Richtungen dieselbe ist, obwohl man weiss, dass Schwankungen bis zu 20% auftreten. Solange man das Airglow nicht durch Messungen von künstlichen Erdsatelliten aus überhaupt ausschaltet, erhält man brauchbare Helligkeiten von Zodiakallicht und Milchstrasse nur durch Mittelung einer Reihe von Beobachtungen aus verschiedenen Nächten. Die beiden nach Abzug des Airglow übrig bleibenden Komponenten muss man durch einen Iterationsprozess trennen. Beobachtungen zu verschiedenen Jahreszeiten sind dabei wesentlich. — Besonders kritisch ist die Aufspaltung für den Polarisationsgrad $p = (I_g - I_u) / I_g$ des Zodiakallichts. Der polarisierte Anteil im Zähler lässt sich verhältnismässig sicher angeben, wenn man alle Polarisation dem Zodiakallicht zuschreibt, dagegen wird die Gesamthelligkeit im Nenner des Ausdrucks mit zunehmender Elongation (und auch mit zunehmender ekliptikaler Breite) kleiner und unsicherer.

Abbildung 4 — Gesamte Flächenhelligkeit (ausgezogene Kurve, linke Skala) und Polarisationsgrad (gestrichelte Kurve, rechte Skala) längs der Zodiakallichtachse.

Die folgenden Abbildungen sollen nun einen Überblick über die Ergebnisse vermitteln. Die Verhältnisse auf der Zodiakallichtachse zeigt Abbildung 4. Die gesamte Flächenhelligkeit (linke Skala, ausgezogene Kurve) nimmt zwischen 20° und 90° Elongation um mehr als eine Zehnerpotenz ab, dagegen steigt der Polarisationsgrad erst rasch, dann langsamer von 10% auf 33% in 70° Elongation an. Unter normalen Bedingungen erhält man wegen der Dämmerung brauchbare Zodiakallichtmessungen nur für Elongationen grösser als 30° . BLACKWELL konnte jedoch von der erwähnten Höhenstation aus sowohl die Helligkeit als auch die Polarisation bis zu 20° Elongation messen. Die Unsicherheit der Gesamthelligkeit ist auch in



40° Elongation, also an der Stelle, an der die Messungen am sichersten sein sollten, noch $\pm 10\%$; der Polarisationsgrad dürfte nach den neuesten Messungen von ELSÄSSER und BLACKWELL wenigstens im Bereich von 30° bis 65° etwa ebenso genau sein.

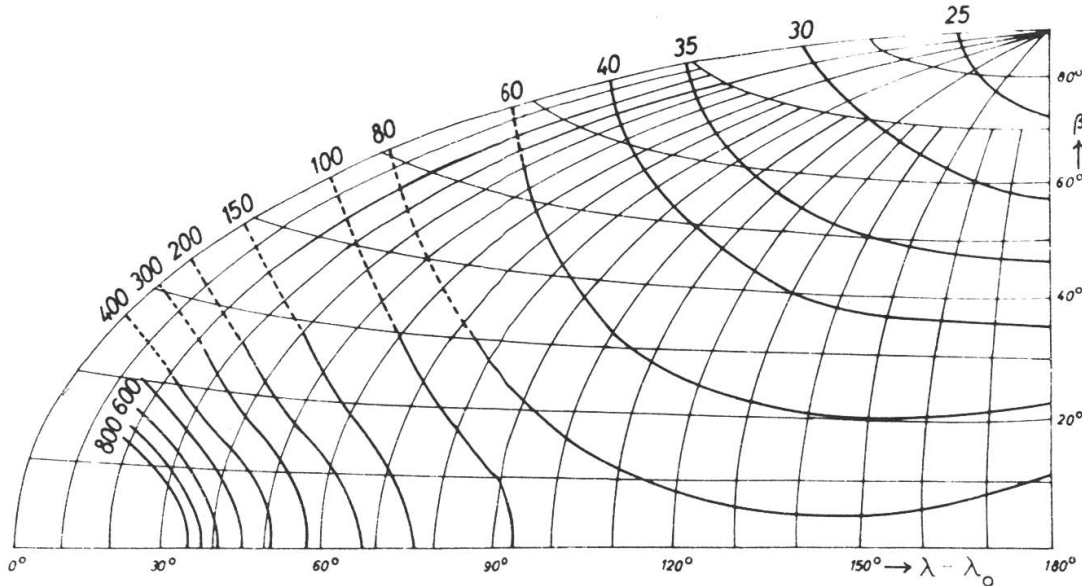


Abbildung 5 – Linien gleicher Helligkeit des Nachthimmels (Zodiakallicht), in ekliptikalischen Koordinaten.

Abbildung 5 zeigt die Linien gleicher Helligkeit, wie man sie als Mittel aus einer Reihe neuerer Beobachtungen erhält. Es ist nur ein Viertel der Sphäre gezeichnet, da im Rahmen der Beobachtungsgenauigkeit Morgen- und Abendzodiakallicht als gleich angesehen werden dürfen und Symmetrie zur Ekliptik angenommen werden kann. Der Ort der Sonne ist natürlich bei $\lambda - \lambda_0 = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$; die an die Isophoten angeschriebenen Zahlen geben die visuellen Helligkeiten in Sternen 10^m pro Quadratgrad an. Die Isophoten in der Nähe des ekliptikalischen Pols sind mit Hilfe der allgemein üblichen Annahme gewonnen, dass am Pol selbst die Helligkeit noch etwa 20 Sterne 10^m pro Quadratgrad beträgt. Die starke Neigung der Isophoten gegen die Ekliptik im Gebiet des Zodiakallichtkegels steht etwas im Widerspruch zum visuellen Eindruck eines schmalen Kegels. Das hängt wohl damit zusammen, dass das unbewaffnete Auge Helligkeiten vergleicht und die Grenzlinie von den Isophoten aus in Richtung der Linien verdreht, die man als «Linien gleichen Kontrastes» bezeichnen könnte. Damit sind die Verbindungslinien der Punkte gemeint, an denen die Helligkeit zu der auf der Zodiakallichtachse bei gleicher Elongation in einem festen Verhältnis steht. – Der Gegenschein ist im visuellen Spektralbereich etwa 20%

heller als die Lichtbrücke. Die Isophoten sind hart am Gegenpunkt der Sonne fast kreisförmig und werden mit grösserem Abstand immer langgezogener in Richtung der Ekliptik (die Intervallgrösse in Abbildung 4 ist zu gross, um dies zu zeigen!). Neuere Daten über die Helligkeit der Lichtbrücke (und damit für den Anschluss des Gegenscheins an den Zodiakallichtkegel) wären dringend erwünscht.

Zodiakallicht und Gegenschein haben die Farbe eines G-Sterns der Hauptreihe. Sie sind vielleicht ein klein wenig röter als das Licht der Sonne.

Einige speziellere Fragen sind viel untersucht worden, aber trotzdem noch nicht mit Sicherheit zu beantworten. Abweichungen der Zodiakallichtachse von der Ekliptik deuten darauf hin, dass für die Zodiakallichtpartikel die Gravitationsanziehung der Planeten von Einfluss ist. — Ältere Beobachtungen von Schwankungen der Zodiakallichthelligkeit sind als unsicher anzusehen; in neuester Zeit konnte BLACKWELL eine Zunahme der Helligkeit nach einer kräftigen Eruption der Sonne wahrscheinlich machen.

Spektren des Zodiakallichts sind selten. Gute Spektren stammen von HOFFMEISTER und besonders von BLACKWELL und INGHAM. Man findet ein Kontinuum, in dem mehrere, im Sonnenspektrum kräftige Linien erkennbar sind (H und K vom ionisierten Kalzium, die Kalziumlinie bei 4227 \AA , die Wasserstofflinien $H\gamma$ und $H\delta$, die Eisenlinien bei 4326 und 4384 \AA , sowie die G-Bande). Dem überlagern sich die Emissionslinien des Nachthimmelslichtes mit ähnlicher Stärke wie an den vom Zodiakallicht entfernten Stellen des Himmels.

INTERPLANETARE TEILCHEN

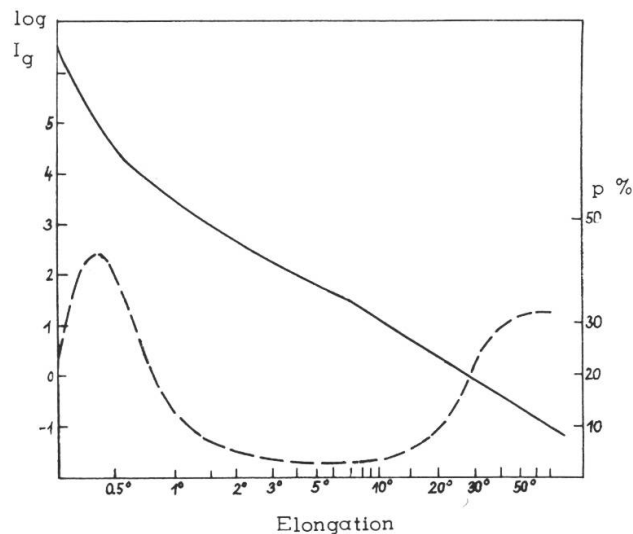
Die Lage des Zodiakallichtes legt den Gedanken nahe, dass an seiner Entstehung interplanetare Partikel beteiligt sind. Was weiss man aus anderen Beobachtungen über die Materie im interplanetaren Raum?

Eine wichtige Informationsquelle ist die Korona der Sonne. Ihre kontinuierliche Strahlung ist kräftig polarisiert und zeigt im Spektrum die von der Sonne her bekannten Absorptionslinien, jedoch mit geringerer Linientiefe. Dies lässt sich am einfachsten verstehen durch die Streuung des Sonnenlichts an zwei verschiedenen Arten von Partikeln: Staubteilchen zwischen Sonne und Erde streuen das Licht, ohne die Linien zu verändern, Elektronen hoher Temperatur in Sonnennähe liefern als Ergänzung ein durch den Dopplereffekt verschmiertes Spektrum

und auch eine Polarisierung der beobachteten Richtung. Die rechnerische Behandlung der Beobachtungen nach dieser Vorstellung ergibt die Elektronendichte in Abhängigkeit von der Sonnenentfernung und die Größenverteilung der Staubteilchen. — Beim Zodiakallicht wie bei der Korona beobachtet man Flächenhelligkeit und Polarisation als Funktion der Elongation. Man wird deshalb versuchen, die Daten miteinander in Verbindung zu bringen. Dies wurde erleichtert durch Messungen im Übergangsgebiet (zwischen 2° und 15° Elongation), die BLACKWELL bei einer Sonnenfinsternis aus dem Flugzeug gewinnen konnte.

Abbildung 6 — Flächenhelligkeit (ausgezogene Kurve, linke Skala; Einheit: 10^{-12} gemittelte Sonnenhelligkeiten) und Polarisationsgrad (gestrichelte Kurve, rechte Skala) der Sonnenkorona bei einer Sonnenfinsternis (nach INGHAM).

Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Flächenhelligkeit und des Polarisationsgrades vom Sonnenrand bis zu 70° Elongation nach INGHAM.



Es wird deutlich, dass die Zodiakallichtergebnisse in Abbildung 4 nur ein Ausschnitt aus einem grösseren Zusammenhang sind. Besonders charakteristisch erscheint der Gang des Polarisationsgrades mit dem Minimum zwischen 1° und 20° Elongation; seine Erklärung wird ein wesentliches Kriterium für die Brauchbarkeit einer Theorie bilden müssen.

Es gibt noch weitere Indizien sowohl für Elektronen als auch für Staub im interplanetaren Raum. Schwankungen des Erdmagnetfeldes und hohe Teilchenbeschleunigungen in Kometenschweiften zeigen, dass bei Eruptionen Gaswolken mit Dichten von rund 1000 Teilchen pro cm^3 von der Sonne ausgehen. Die Schlüsse aus direkten Beobachtungen von Elektronen in Erdnähe sind noch unsicher, weil der Einfluss der lokalen Verhältnisse, vor allem des Magnetfeldes der Erde, sehr stark ist. Aus dem Auffall von Meteoren auf die Erde lässt sich die Dichte grösserer Teilchen im interplanetaren Raum abschätzen. Die Extrapolation zu den für die Streuung interessanten Staubteilchen ist jedoch fragwürdig, weil man für Meteore (aus der Verteilung der Helligkeiten) und für den Staub (aus dem Helligkeitsverlauf in der Korona) verschiedene Gesetze der Radienverteilung findet. Durch Raketen, Erdsatelliten und

Raumsonden kann man den Staub heute direkt nachweisen. Sichere Werte für die Dichte erhält man jedoch auch hier nicht, solange die Deutung der beobachteten Dichtezunahme zur Erde hin umstritten ist. Nach der Vorstellung, dass die festen Teilchen hauptsächlich durch die allmähliche Auflösung der Kometen entstehen, lässt sich aber so viel sagen, dass man in der Nähe der Ekliptik die grössten Staubbichten finden sollte.

DEUTUNG DES ZODIAKALLICHTS DURCH STREUUNG DES SONNENLICHTS AN INTERPLANETAREN PARTIKELN

Es sind also Teilchen im interplanetaren Raum vorhanden. Die Streuung des Sonnenlichts an ihnen muss zu Erscheinungen auf der Erde führen. Es fragt sich nur, ob mit dieser Vorstellung alle mit dem Zodiakallicht zusammenhängenden Beobachtungen gedeutet werden können. Und es interessiert natürlich auch, welche Aussagen über die interplanetare Materie aus dieser Vorstellung gewonnen werden können. Deshalb soll in diesem Abschnitt der Zusammenhang zwischen Ort, Dichte und Streueigenschaften der Teilchen einerseits und der Flächenhelligkeit andererseits erläutert und dann über einige Ergebnisse seiner Untersuchung berichtet werden.

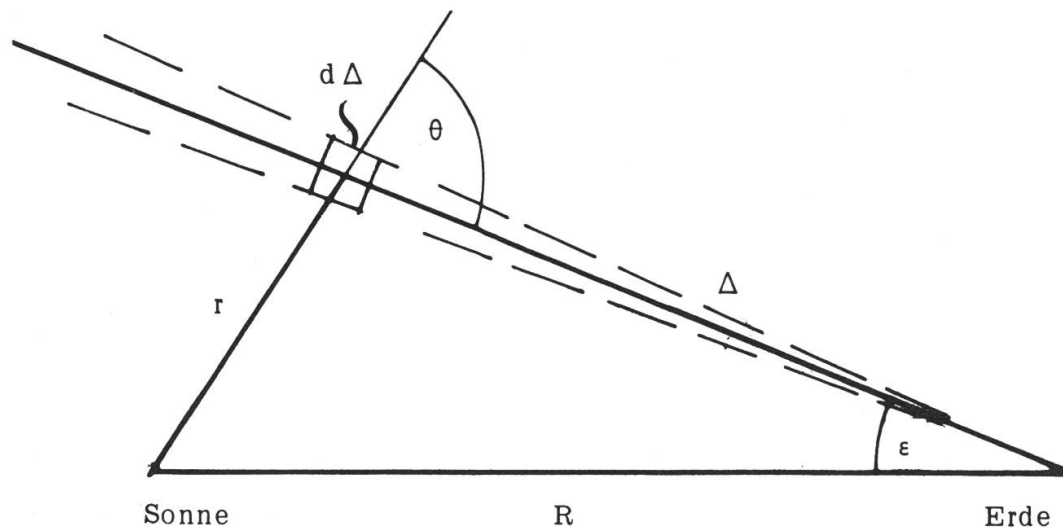


Abbildung 7 – Zur Berechnung der Flächenhelligkeit interplanetarer Materie.

Die Flächenhelligkeit $I(\varepsilon)$ in einem Winkelabstand ε von der Sonne – die betrachtete Richtung muss nicht mit der Ekliptik oder mit der Zodiakallichtachse zusammenfallen! – setzt sich aus den Beiträgen der Teilchen in verschiedenem Abstand Δ von der Erde zusammen. Man betrachtet die Verhältnisse zweckmässigerweise in der durch den Seh-

strahl und die Sonne festgelegten Ebene (Abbildung 7) und beschränkt sich zunächst auf nur eine Teilchensorte. Ist J die Beleuchtung durch die Sonne im Erdabstand R , so ist sie am Ort eines Teilchens im Abstand Δ von der Erde (und damit r von der Sonne) JR^2/r^2 . Das Verhalten des Teilchens wird durch eine Streufunktion $\sigma(\theta)$ beschrieben; von der auf seinen Querschnitt q fallenden Strahlung wird in die Richtung θ (und in den Raumwinkel 1) der Bruchteil $\sigma(\theta)$ geworfen. Damit erhält man auf der Erde die Beleuchtung $JR^2/r^2 \cdot q \sigma(\theta) / \Delta^2$. Die Zahl der Teilchen, die in dieser Weise zur Flächenhelligkeit beitragen, folgt aus der Teilchendichte $N(r)$ durch Multiplikation mit dem Volumen, das mit einem Instrument vom Gesichtsfeld 1 zwischen der Entfernung $\Delta - d\Delta/2$ und $\Delta + d\Delta/2$ betrachtet wird, ist also $N(r)\Delta^2 d\Delta$. Nimmt man nun die Beiträge aller Teilchen in verschiedenen Entfernungen zusammen, so folgt die gesuchte Flächenhelligkeit

$$I(\varepsilon) = JR^2 \int_{\Delta=0}^{\infty} N(r) / r^2 \cdot q \sigma(\theta) d\Delta .$$

(Will man die Polarisation berechnen, so muss man bei der gestreuten Strahlung die beiden Polarisationsrichtungen getrennt betrachten und erhält für jede ein Integral der angegebenen Art.) Man hat dann Teilchen verschiedener Grösse q und verschiedene Materialien zu berücksichtigen. Dabei ändert sich vor allem die Streufunktion, eventuell aber auch die Dichteverteilung. Man hat also viele Variationsmöglichkeiten um die Beobachtungen, nämlich Flächenhelligkeiten und Polarisation, darzustellen. Schon aus der oben abgeleiteten einfachsten Form kann man einige Eigenschaften des betrachteten Zusammenhangs ablesen:

1. Das Gewicht der Beiträge aus verschiedenen Entfernungen Δ ist unabhängig von dieser Entfernung. (Die Strahlung vom einzelnen Teilchen nimmt ab, die Zahl der Teilchen wächst mit dem Quadrat von Δ). Dies ist eine wichtige Eigentümlichkeit von Flächenbeobachtungen.

2. Die Abnahme der Teilchenbeleuchtung mit dem Quadrat des Sonnenabstandes gibt dem sonnennächsten Teil des Sehstrahls das grösste Gewicht. Das bedeutet gleichzeitig, wie man sofort sieht, dass für Elongationen kleiner als 90° das Streuverhalten der Teilchen bei $\theta = 90^\circ$ für die Flächenhelligkeiten ziemlich bestimmend ist, sofern die Dichteverteilung «normal» ist.

3. Die Dichteverteilung hängt im allgemeinen Fall von den drei Koordinaten des Raumes ab. (Dies wurde oben nicht betont, weil ja nur ein Sehstrahl betrachtet werden sollte.) Beschränkt man sich auf die Symmetrieebene des Zodiaklichts und setzt hier Rotationssymmetrie bezüglich der Sonne voraus, dann gilt die obige Gleichung allgemein.

4. Dichte und Streufunktion lassen sich nicht gleichzeitig aus den Flächenhelligkeiten bestimmen. Man wird deshalb versuchen, mit bekannten Streufunktionen Dichteverteilungen abzuleiten und allenfalls durch Änderung der Teilchenzusammensetzung die Lösungen zu variieren. — Streufunktionen kennt man theoretisch für freie Elektronen, die bei einem Streuwinkel von 90° die Strahlung vollständig polarisieren — was hier natürlich besonders interessiert! —, und für kugelförmige Teilchen auf Grund der MIESchen Theorie. Modellversuche zeigen aber, dass die Streufunktionen unregelmässiger Teilchen mit denen der Kugeln entsprechender Grösse wesentliche Eigenschaften gemeinsam haben. Darum hat die numerische Berechnung zahlreicher Kugelstreu-funktionen mit elektronischen Rechenanlagen einen wichtigen Fortschritt in der Deutung des Zodiakallichtes gebracht.

Es ist nun wohl klar, dass die Schwierigkeit bei dem eingeschlagenen Weg nicht darin besteht, überhaupt Lösungen zu finden, sondern darin, möglichst plausible Lösungen anzugeben, oder noch besser: einen möglichst umfassenden Überblick über die Lösungen zu gewinnen. Unabhängige Gesichtspunkte (Spektrum, physikalische Bedingungen im interplanetaren Raum u.a.) können dann wirkungsvoll bei der Auswahl unter diesen Lösungen eingesetzt werden.

Bis vor kurzem wurden zwei Lösungen viel diskutiert. Bei der einen wird mit Modellstreu-funktionen für Staubteilchen die Abhängigkeit der Staubdichte von der Sonnenentfernung aus dem Helligkeitsverlauf berechnet. Der beobachtete Polarisationsgrad ergibt dann eine Aussage über die bei der Streuung an den Teilchen entstehende Polarisation. Da die angenommene Form der Streufunktion nicht sehr zwingend und die gefundene Polarisation von 45% für Staubteilchen unverhältnismässig hoch ist, kann diese Lösung von vornherein nicht recht befriedigen. — Solange man über die Polarisation durch Staub kaum etwas aussagen konnte, schien es demgegenüber konsequenter, alle Polarisation interplanetaren Elektronen zuzuschreiben, wie es bei der zweiten Lösung geschah. Dann findet man in Erdnähe eine Elektronendichte von einigen 100 Elektronen / cm^3 und einen gleichmässigen Dichteanstieg zur Sonne hin. Bei der Staubkomponente zur Deutung der Resthelligkeit ergibt sich eine konstante Dichte in der Ekliptik bis zu 0.5 astronomischen Einheiten Sonnenabstand; näher an der Sonne wird die Dichte kleiner. Auch bei dieser Lösung sind die Annahmen über die Streufunktionen dielektrischer und metallischer Teilchen heute überholt.

GIESE und SIEDENTOPF haben jetzt Rechnungen durchgeführt, bei denen konsequent nur theoretisch bekannte Streufunktionen verwendet wurden, und die eine ganze Reihe von Lösungen ergeben haben. Das

interessanteste, wenn auch bei der Höhe des Polarisationsgrades im Zodiakallicht nicht unerwartete Resultat ist dies: Neben dielektrischen und absorbierenden Kugeln sind Elektronen unbedingt nötig. Ihre Häufigkeit ist vom betrachteten Gemisch abhängig, aber nie kleiner als $300 \text{ Elektronen/cm}^3$ in der Nähe der Erde. Die Dichteverteilungen hängen ziemlich stark vom gewählten Teilchengemisch ab und sind deshalb noch recht unsicher. Ein Hauptargument gegen die Elektronendichten waren die Linientiefen im Zodiakallichtspektrum, die sich von denen im Sonnenspektrum nur unwesentlich unterscheiden. Nach einer ähnlichen Betrachtung wie beim Spektrum der Korona sollte dies einen Beitrag der Elektronen ausschliessen. Eine genauere Diskussion der Ergebnisse durch SCHMIDT und ELSÄSSER hat aber erwiesen, dass bis zu $400 \text{ Elektronen/cm}^3$ mit den Beobachtungen verträglich sind. Elektronendichten über 1000 pro cm^3 scheinen dagegen ausgeschlossen.

Die Deutung des Gegenscheins ist im Rahmen dieser Vorstellungen kein Sonderproblem mehr: Wie zuerst SIEDENTOPF zeigte, lässt er sich durch die schwache Zunahme der Streuung dielektrischer Partikel im Gebiet der Rückwärtsstreuung ($\theta = 180^\circ$) zwangslos verstehen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass eine einheitliche Deutung des Zodiakallichtes auf dem beschriebenen Wege heute möglich und wahrscheinlich erscheint, auch wenn noch viele Einzelfragen offen sind. Die Flächenhelligkeiten reichen nicht aus, um über alle in die Rechnungen eingehenden Parameter zu entscheiden. Direkte Beobachtungen der interplanetaren Materie werden vermutlich bald wichtige Information über die Zusammensetzung und die Grössenverteilung beim Staub liefern. Die optischen Beobachtungen werden ihre Bedeutung behalten, da sie einen Überblick über den ganzen interplanetaren Raum gewähren. Dies wird um so mehr der Fall sein, je mehr ihre Genauigkeit durch Messungen von künstlichen Erdsatelliten aus erhöht werden kann.

LITERATUR

Eine Zusammenfassung der Arbeiten über interplanetare Materie bis 1957 findet man in:

H. ELSÄSSER, Interplanetare Materie, Mitt. Astron. Gesellsch. 1957 II, 61,
= Mitt. Tübingen N° 35.

Einige neuere Arbeiten:

D. E. BLACKWELL und M. F. INGHAM, M. N. 122, 113 (1961).

R. H. GIESE und H. SIEDENTOPF, Z. Astrophys. 54, 200 (1962).

Th. SCHMIDT und H. ELSÄSSER, Z. Astrophys. 56, 31 (1962).

Eingegangen am 18. Dezember 1962.

Adresse des Verfassers: Astronomisches Institut der Universität Tübingen.