

Werk

Jahr: 1930

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:6

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0006

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0006

LOG Id: LOG_0012

LOG Titel: Die sonnenbelichteten Nordlichtstrahlen und die Konstitution der höheren Atmosphärenschichten

LOG Typ: article

Übergeordnetes Werk

Werk Id: PPN101433392X

PURL: <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

OPAC: <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Georg-August-Universität Göttingen
Platz der Göttinger Sieben 1
37073 Göttingen
Germany
Email: gdz@sub.uni-goettingen.de

Die sonnenbelichteten Nordlichtstrahlen und die Konstitution der höheren Atmosphärenschichten

Von L. Vegard — (Mit 2 Abbildungen)

Die von Störmer beobachteten sonnenbelichteten Nordlichtstrahlen werden unter dem Gesichtspunkt des vom Verfasser in 1923 gefundenen elektrischen Auftriebs der höchsten Atmosphärenschichten diskutiert. Die Existenz von hohen Abend- und Morgenstrahlen war vom Verfasser in 1923 vorausgesagt. — Die vom Verfasser in 1923 gefundene relative Abnahme der grünen Nordlichtlinie mit der Höhe wird näher beschrieben. Es wird gezeigt, daß die spektroskopischen Beobachtungen von Störmer und Moxnes keine Schlüsse betreffs der möglichen Einwirkung der Sonnenstrahlung auf die Intensitätsverteilung im Nordlichtspektrum gestatten.

§ 1. In einer Abhandlung, welche neulich in dieser Zeitschrift veröffentlicht worden ist*), hat C. Störmer eine Übersicht über seine während der letzten paar Jahre gesammelten, äußerst interessanten Ergebnisse über sonnenbelichtete Nordlichtstrahlen gegeben.

Seine Ergebnisse, welche teils Höhenbestimmungen von Nordlichtstrahlen, teils spektrographische Aufnahmen von dem Nordlichtspektrum umfassen, stehen in engster Beziehung zu Ergebnissen, welche ich im Jahre 1923 gewonnen habe. Störmer hat zwar die Ergebnisse einer kurzen Diskussion unterworfen, ich möchte jedoch den intimen Zusammenhang mit meinen Ergebnissen klar zum Ausdruck bringen.

Ich habe schon im Jahre 1923 die Entdeckung gemacht, daß die Intensität der Nordlichtlinie im Verhältnis zu derjenigen der Stickstoffbanden mit steigender Höhe abnimmt. Dieser Effekt ist an sich ausreichend, um die von Störmer beschriebenen spektrographischen Beobachtungen zu erklären. Wir kommen später noch auf diese Frage zurück.

Indem ich im folgenden versuchen werde, diesen Zusammenhang mit meinen früheren Ergebnissen geschichtlich klarzustellen, beabsichtige ich dadurch gleichzeitig, einen Beitrag zu der Deutung der Störmerschen Ergebnisse zu geben.

Über die sonnenbelichteten Nordlichtstrahlen. § 2. Was zuerst die sonnenbelichteten Nordlichtstrahlen betrifft, so habe ich schon in einem Anhang zu meinem Bericht über Nordlicht im Handb. d. exp. Phys. 25, 475, kurz erwähnt, daß eine von Störmer kurz vorher gemachte Beobachtung über sonnenbelichtete Nordlichtstrahlen eine interessante Bestätigung meiner früheren Ergebnisse betreffs des Zustandes der höheren Atmosphärenschichten geliefert hat.

Untersuchungen über das Spektrum des Nordlichtes, kombiniert mit anderen festgestellten Tatsachen über das Nordlicht, besonders über seine Lage im Raume, führten im Jahre 1923 zu dem Ergebnis, daß keines von den Gasen leichter als

*) C. Störmer: Zeitschr. f. Geophys. 5, 177 (1929).

Stickstoff einen merklichen Beitrag zum Leuchten des Nordlichtes lieferte. Man mußte deshalb annehmen, daß recht schwere Gase, vor allem der Hauptbestandteil Stickstoff, selbst in Höhen von mehreren hundert Kilometern in recht merklichen Mengen vorhanden sein müßten.

Eine Reihe von Überlegungen und Berechnungen, für die ich hier auf die veröffentlichten Arbeiten*) hinweisen muß, führte zu dem Ergebnis, daß die höchsten Atmosphärenschichten, die hauptsächlich aus Stickstoff bestehen, einen elektrischen Auftrieb erleiden.

Dieser elektrische Auftrieb wurde als eine Wirkung der Sonnenstrahlen erklärt, und in meiner Abhandlung in Zeitschr. f. Phys. **16**, 377 (1923) habe ich meine Anschauung folgendermaßen formuliert:

„In dieser Weise wird man, wie es mir scheint, mit Notwendigkeit zu der Ansicht geführt, daß die äußersten Atmosphärenschichten elektrisch geladen sind. Hierdurch entsteht ein elektrisches Feld, und der geladene Stickstoff wird also durch die Wirkung dieses Feldes in die Höhe getrieben.

Daß die oberen Grenzschichten der Atmosphäre elektrisch geladen sind, ist auch vom physikalischen Gesichtspunkte aus sehr wahrscheinlich, denn die Atmosphäre wird durch die photoelektrische Wirkung kurzwelliger Lichtstrahlen ionisiert. Elektronen werden mit einer Geschwindigkeit ausgeschossen, welche durch die Einsteinsche Gleichung

$$h \nu = \frac{1}{2} m v^2$$

bestimmt ist.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß die Sonne neben dem Licht auch Strahlen vom Röntgen- und γ -Strahlentypus emittiert.

Die Geschwindigkeit der lichtelektrischen Elektronen wird dann sehr groß. Die Größe des elektrischen Feldes wäre dadurch bestimmt, daß die Elektronen der größten Geschwindigkeit gerade genügten, um das Erdpotential gegenüber dem Weltraum zu überwinden, oder das Erdpotential V_E wäre durch die Gleichung

$$V_E e = h \nu_{\max}$$

gegeben.“

Verschiedene theoretische Überlegungen und besonders das Nordlichtspektrum führten mich weiter zu der Annahme, daß in den höchsten Atmosphärenschichten so tiefe Temperaturen herrschen, daß der Stickstoff teilweise in der Form kleiner Kristallkeime existiert. Diese Anschauung habe ich in einer Reihe von späteren Arbeiten behandelt, und es soll hier nicht auf die nähere Begründung eingegangen werden. In dieser Verbindung möchte ich nur erwähnen — was ich auch in früheren Arbeiten stark betont habe —, daß die Notwendigkeit eines elektrischen Auftriebs der höchsten Atmosphärenschichten davon gar nicht abhängt, ob man eine staubförmige Konstitution annehmen will oder nicht. In der Tat habe ich die Existenz des elektrischen Auftriebs erkannt, bevor ich zu der Auf-

*) Siehe z. B. Phil. Mag. **46**, 193 und 577 (1923); Zeitschr. f. Phys. **16**, 367 (1923).

fassung gelangte, daß in der Nordlichtregion der Stickstoff teilweise in mikrokristallinischer Form vorhanden sein dürfte*).

Ich möchte jedoch hinzufügen, daß es als eine festgestellte Tatsache anzusehen ist, daß in der Nordlichtregion eine äußerst tiefe Temperatur herrscht. Das kann man einwandfrei aus der Struktur der im Nordlichtspektrum vorhandenen Stickstoffbanden schließen. Diese Banden sind beinahe von Rotationslinien befreit. Versuche, welche ich andererseits bei der Temperatur von flüssigem Wasserstoff angestellt habe, zusammen mit Versuchen, welche neulich in unserem Institut von dem Herrn J. Aars**) bei Zimmertemperatur und bei der Temperatur von flüssiger Luft angestellt worden sind, zeigen ein allmähliches Verschwinden der „Rotationslinien“ bei Erniedrigung der Temperatur. Man muß in der Tat ungefähr bis zu der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs heruntergehen, um die Stickstoffbanden so frei von Rotationslinien zu bekommen, als man sie im Nordlichtspektrum beobachtet. Allein aus diesem Grunde ist es also zu erwarten, daß der Stickstoff in der Nordlichtregion teilweise in kondensierter Form vorhanden ist. Hierzu kommen noch die spektroskopischen Daten, welche aus den Versuchen über das Leuchten von verfestigtem Stickstoff zustande gebracht und in einer Reihe von Arbeiten eingehend beschrieben und diskutiert worden sind.

Einen zusammenfassenden Bericht findet man im Handb. d. exp. Phys. 25, 385 (1929), wo auch sonstige Literaturangaben zu finden sind.

Wie erwähnt, wurde der elektrische Auftrieb durch die lichtelektrische Wirkung der kurzwelligigen Sonnenstrahlen erklärt. Hieraus habe ich den Schluß gezogen, daß der elektrische Auftrieb desto größer ist, je mehr der betreffende Teil der Atmosphäre von der Sonne zu der Zeit bestrahlt wird.

Hierdurch erklärt sich die Tatsache***), daß die Nordlichtstrahlen viel größere maximale Höhen in niedrigeren Breiten als in der Nähe der Nordlichtzone erreichen.

Durch diese Aufwärtsbewegung von elektrisch geladenen Partikeln, zusammen mit der Wirkung des erdmagnetischen Feldes, könnte auch die Entstehung des Zodiakallichtes erklärt werden.

In der zitierten Abhandlung, Zeitschr. f. Phys. 16, 367 (1923), habe ich meine Auffassung in folgender Weise formuliert:

„Wegen der ungleichmäßigen Verteilung der Sonnenaktivität und der Wirkung der elektrischen und magnetischen Felder werden in der elektrischen Staubatmosphäre die Flächen gleicher Dichte nicht konzentrische Kugeln bilden. Es ist zu erwarten, daß sie höher an der Tagesseite als an der Nachtseite, und höher am Äquator als über den Polen sind. — Besonders interessant ist die Variation mit der geographischen Breite. Hier spielt das magnetische Feld der Erde gewiß eine große Rolle. Wenn die geladenen Staubkörnchen durch das elektrische

*) Phil. Mag. 46, 193 (1923).

**) Ann. d. Phys. 5, B. 1, 216 (1929).

***) Siehe z. B. Zeitschr. f. Phys. 16, 367 (1923); Handb. d. exp. Phys. 25, 385.

Feld in die Höhe getrieben werden, werden sie eine Neigung dazu haben, den magnetischen Kraftlinien zu folgen. Der Stickstoffstaub muß sich in der Nähe der Ebene des magnetischen Äquators akkumulieren.

Diese Konsequenz unserer Auffassung hat eine interessante Bestätigung bei den Höhenbestimmungen des Nordlichtes gefunden. Um eine merkbare Lichtintensität hervorzubringen, muß die Dichte der Atmosphäre eine gewisse Grenze überschreiten. Diesen Grenzwert sollte die größte Höhe der Nordlichtstrahlen bestimmen.

Die maximale Höhe von Nordlichtstrahlen in verschiedenen Breiten sollte dann Höhen ungefähr gleicher Dichte bestimmen. — Wie bekannt, ist die Häufigkeit der langen Strahlen in den mittleren Breiten größer als in der Nähe der Nordlichtzone.“

„Nun zeigt es sich aber, daß nicht nur die Häufigkeit, sondern auch die größte erreichbare Höhe mit der Polentfernung ganz beträchtlich zunimmt.“

Und weiter: „Besonders hoch geht die Staubatmosphäre in der Nähe des Äquators, und hier bildet sich gewissermaßen ein Staubring um die Erde. Wegen der großen Höhe sieht man diesen Staubring vom Sonnenlicht bestrahlt, längst nachdem die Sonne untergegangen ist, und man sieht den Staubring als, einen Lichtkegel am Himmel. In dieser Weise werden wir durch unsere elektrische Staubatmosphäre ganz natürlich zu einer Erklärung des Zodiakallichtes geführt.

Die mögliche Ausbreitung des Staubringes in der Ebene der Ekliptik läßt sich vielleicht als eine Wirkung des Strahlungsdruckes der Sonnenstrahlung erklären.“

Ich habe hier von Staubatmosphäre gesprochen, aber wie erwähnt, ist der elektrische Auftrieb von dieser Vorstellung unabhängig.

Wie man sieht, habe ich durch diese Erklärung des elektrischen Auftriebs durch die Sonnentätigkeit nicht nur die größeren maximalen Höhen der elektrischen Strahlen auf niedrigeren Breiten erklären können, ich habe auch vorausgesagt, daß man höhere Nordlichter an der Tagesseite als an der Nachtseite zu erwarten hat.

Nordlichtstrahlen an der Tagesseite wird man selbstverständlich nur am Abend eine Zeit nach dem Sonnenuntergang, morgens vor Sonnenaufgang und in polaren Gegenden Herbst und Frühling beobachten können, indem man dann eine Zeit noch die sonnenbestrahlten höchsten Atmosphärenschichten beobachten kann.

Diese Vorhersagung hat sich nun durch die Beobachtungen und Ergebnisse von Störmer über sonnenbelichtete Nordlichtstrahlen in schöner und schlagender Weise bestätigt.

Aus dem ausgedehnten Material, das Störmer jetzt gesammelt hat, und aus der außerordentlich schönen graphischen Zusammenstellung der Ergebnisse scheint hervorzugehen, daß der elektrische Auftrieb recht plötzlich eine ganz erhebliche Verminderung erleidet, sobald die höchsten Atmosphärenschichten in Sonnenschatten hineintauchen.

Unterhalb der Schattengrenze wird die Materie wegen des verminderten Auftriebs zusammensinken, während im Sonnenstrahlenbereich oberhalb der Schattengrenze die Materie sich noch durch den elektrischen Auftrieb schwebend hält. In dieser Weise kann man die sogenannte Schwanzbildung erklären.

Wie ich schon im Jahre 1923 bei der Erklärung des Zodiakallichtes erwähnt habe, wird auch der Strahlungsdruck der Sonne die Bewegung der oberen Atmosphärenschichten beeinflussen können, und dann wird man auch — wie Krogness meint — damit rechnen müssen, daß eine möglich vorhandene Schwanzbildung teilweise einer Wirkung des Strahlungsdruckes zuzuschreiben ist.

Störmer findet jedoch auf Grundlage seines Beobachtungsmaterials, daß eine merkliche Wirkung des Strahlungsdruckes zweifelhaft ist; er meint, daß die gefundenen Tatsachen durch eine Hebung der oberen Atmosphäre zu erklären sind. Das meint, daß die Störmerschen Ergebnisse — gerade wie vorausgesagt war — als eine Wirkung des elektrischen Auftriebs aufzufassen sind.

Störmers Hinweis zu der Kennelly-Heaviside-Schicht könnte nun die Auffassung erwecken, daß der elektrische Auftrieb schon in den Annahmen von Kennelly-Heaviside inbegriffen ist. Das ist aber nicht der Fall. Kennelly und Heaviside haben nur die Existenz einer leitenden Schicht irgendwo in der höheren Atmosphäre erkannt, aber der elektrische Auftrieb, oder die Hebung der höchsten Atmosphärenschichten durch die Sonnentätigkeit, ist zum ersten Male in meinen Arbeiten über das Nordlicht in die Literatur eingeführt, und seine Existenz ist auch zum ersten Male in meinen Arbeiten vom Jahre 1923 nachgewiesen.

Wie wir gesehen haben, braucht man für die Erklärung der Höhenverteilung der sonnenbelichteten Nordlichter, nach dem Störmerschen Befund, nur einen durch die Sonnenstrahlen hervorgerufenen elektrischen Auftrieb anzunehmen, und man kann wenigstens qualitativ die Erscheinungen verstehen, selbst wenn man damit rechnet, daß die Materie der höchsten Atmosphärenschichten in der Form von ionisiertem Gas, welches dazu noch eine gewisse Raumladung besitzt, vorhanden ist.

Die sehr plötzliche Herabsenkung der Materie bei der Entfernung des Sonnenlichtes ist jedoch in dieser Weise quantitativ schwer verständlich, denn wegen der äußerst geringen Dichte geht bekanntlich der gewöhnliche Rekombinationsprozeß der Gasionen nur sehr langsam vor sich, und man sollte nur ein allmähliches Herabsinken der Materie, wenn man von der Tages- bis Nachtseite der Erde übergeht, erwarten. Die Ergebnisse von Störmer — wie sie z. B. in Fig. 3 und 6 seiner Abhandlung*) und in den interessanten Photographien der geteilten Nordlichtstrahlen vom 15. bis 16. März 1929 zum Ausdruck kommen — deuten darauf hin, daß eine ganz erhebliche Herabsenkung der Materie gerade unterhalb der Schattengrenze stattgefunden hat, während gleichzeitig die sonnenbelichtete höchste Schicht am selben Ort durch die Sonnentätigkeit schwebend gehalten wird.

*) Zeitschr. f. Geophys. 5, 177 (1929).

Diese schnelle Herabsenkung der Materie nach Entfernung der Bestrahlung ist indessen, was vom Standpunkte der Staubhypothese zu erwarten ist. Nach dieser Hypothese sollte der Stickstoff sich in der Nordlichtregion teilweise zu kleinen Mikrokristallen kondensiert haben. Dieser Kondensationsprozeß sollte besonders stark eintreten, wenn die höchsten Atmosphärenschichten sich im Sonnenschatten befinden. In demjenigen Teil der Atmosphäre, welcher durch elektrischen Auftrieb emporgehoben worden ist, und welcher unterhalb der Schattengrenze liegt, wird bald Kondensation eintreten. Die einzelnen Partikeln werden viel vergrößert, und hierdurch muß der Senkungsprozeß der Materie beschleunigt werden.

Das von Störmer gesammelte, äußerst bemerkenswerte Beobachtungsmaterial betreffs der sonnenbelichteten Nordlichter ist nicht nur als eine weitere Bestätigung des im Jahre 1923 gefundenen elektrischen Auftriebs anzusehen, sondern diese Erscheinungen geben auch ein Argument zugunsten der Annahme, daß die Materie in der Nordlichtregion teilweise in mikrokristallinischer Form vorliegt.

Es ist von Interesse zu bemerken, daß, selbst wenn man — um die scharfe Grenze am Sonnenschatten und die gebildeten Nordlichtstrahlen zu erklären — den Strahlungsdruck heranziehen wird, man auch in dem Falle einen elektrischen Auftrieb annehmen und einen Kondensationsprozeß voraussetzen muß.

Wie ich schon in einer Abhandlung vom Jahre 1913*) nachgewiesen habe, wird der Druck von Sonnenlicht auf gewöhnlichen Gasarten nach den direkten Messungen von Lebedew**) nur etwa tausendmal kleiner sein als die anziehende Gravitationskraft der Sonne. Da sowohl die Gravitationskraft als die Strahlungsintensität nach demselben Gesetz mit der Entfernung abnehmen, gilt dies für alle Entfernungen von der Sonne. In der Erdatmosphäre hat man den Druck der Sonnenstrahlung mit der Anziehung der Erde zu vergleichen. Nun ist die Kraft (mg), mit welcher eine neutrale Partikel zur Erde angezogen wird, etwa tausendmal größer als die Kraft (mg_s), mit welcher dieselbe Partikel am selben Ort von der Sonne angezogen wird. Der Druck der Sonnenstrahlung auf einer gasförmigen Atmosphäre ist also etwa eine Million Mal kleiner als die Wirkung der Schwere.

Damit überhaupt der Strahlungsdruck eine Wirkung haben kann, muß also erstens die Anziehung der Erde größtenteils durch einen elektrischen Auftrieb aufgehoben sein. Aber selbst unter der Wirkung des elektrischen Auftriebs werden jedoch die oberen Atmosphärenschichten durchschnittlich von der Erde angezogen, und mit einer Kraft pro Masseneinheit, die jedenfalls von derselben Größenordnung ist wie die Anziehung, welche die neutrale Atmosphäre erleidet. Man kann deshalb auch nicht erwarten, daß der Strahlungsdruck einen merklichen Einfluß auf einer gasförmigen Schicht haben kann, selbst wenn ein elektrischer Auftrieb teilweise die Anziehung zur Erde herabsetzt.

Nun sollte indessen der Lichtdruck im Verhältnis zur Gravitationswirkung mit der Partikelgröße anwachsen, und um überhaupt eine merkbare Wirkung des

*) L. Vegard: Ann. d. Phys. 41, 625 (1913).

**) Lebedew: Ebenda 32, 411 (1910).

Strahlungsdruckes zu bekommen, müßte man annehmen, daß die Gase teilweise in kondensierter Form vorhanden seien*).

Die von Störmer nachgewiesene Höhenverteilung der Nordlichter im Vergleich mit denjenigen, die ganz im Sonnenschatten liegen, ist also primär durch den schon nachgewiesenen elektrischen Auftrieb der höchsten Atmosphärenschichten zu erklären, und man braucht überhaupt nicht die Wirkung des Druckes der Sonnenstrahlung heranzuziehen.

Die relative Intensitätsabnahme der Nordlichtlinie mit der Höhe. §3. Wie schon erwähnt, habe ich im Jahre 1923 nachgewiesen**), daß die Intensität der Nordlichtlinie im Vergleich mit derjenigen des negativen Stickstoffbandenspektrums mit der Höhe abnimmt. Das Ergebnis, welches man direkt aus den Platten ablesen konnte, wurde schon im Jahre 1923 veröffentlicht. Etwas später erhielt ich den für die Ausmessung nötigen Spektralphotometer, und die Intensitäten wurden ausgemessen und berechnet***).

Wie aus meinen Veröffentlichungen zu sehen ist, war diesen Versuchen für die Deutung des Nordlichtspektrums und für die Kenntnis der höheren Atmosphärenschichten eine große Bedeutung zugelegt. Die Versuche wurden deshalb sorgfältig vorbereitet sowohl in bezug auf Apparatur als spektralphotometrisches Verfahren.

Da es sehr wichtig war, die Exposition der oberen und unteren Grenze des Nordlichtes möglichst schnell nacheinander an demselben Abend vorzunehmen, habe ich einen sehr lichtstarken Spektrographen benutzt. Dagegen braucht man für derartige Intensitätsmessungen keine große Dispersion, denn im Nordlichtspektrum liegen die Linien einiger Stärke sehr weit voneinander getrennt.

Nun wissen alle, die sich mit spektralphotometrischen Arbeiten beschäftigt haben, daß man sich sehr leicht täuschen kann und zu falschen Ergebnissen gelangen kann, wenn man nicht eine Reihe von Vorsichtsmaßregeln berücksichtigt. Von den wichtigsten dieser Vorsichtsmaßregeln sind die folgenden zu erwähnen:

*) Diese Überlegungen gelten natürlich nur unter der Voraussetzung, daß die Sonnenstrahlung in der Nordlichtregion wesentlich dieselbe Zusammensetzung wie an der Erdoberfläche hat. In den obersten Atmosphärenschichten kommt sicher mehr kurzwelliges Licht hinzu, aber die Intensität dieses hinzukommenden Teiles im Vergleich mit der Gesamtintensität der Sonnenstrahlung ist sehr gering. Andererseits gelten die Lebedewschen Messungen nicht mehr für sehr kurzwelliges Licht und auch nicht für möglich vorhandene Korpuskularstrahlung. Man darf deshalb mit der Möglichkeit rechnen, daß derartige Strahlen durch Quantenstöße eine Bewegung der höchsten Atmosphärenmassen weg von der Sonne hervorrufen können. Eine derartige Strahlung, die teils aus großen Strahlungsquanten ($h\nu$) teils aus Korpuskularstrahlen großer Energie ($\frac{1}{2}mv^2$) besteht, ist wahrscheinlich für die Bildung der Kometenschwänze verantwortlich. Eine Schwanzbildung der höchsten Atmosphärenschichten wäre also der Bildung der Kometenschwänze ganz analog. Diese Analogie darf man aber nicht ohne weiteres durchführen, denn man muß erinnern, daß das lokale Schwerfeld der Kometen im Vergleich mit demjenigen der Erde verschwindend gering ist. Siehe L. Vegard: Arch. f. Math. u. Naturw., Bd. XXXI, Nr. 13 (1911).

) Siehe z. B. Phil. Mag. **46, 577 (1923); Zeitschr. f. Phys. **16**, 367 (1923).

***) Siehe „Das Nordlicht“, Handb. d. exp. Phys. **25**, 453.

1. Die zu vergleichenden Spektren sind auf derselben Platte aufzunehmen, denn es ist nicht sicher, daß zwei Platten genau dieselbe Empfindlichkeitsverteilung in bezug auf Farbe besitzen. Außerdem können sie — z. B. durch verschiedene Entwicklung — eine verschiedene Grundschwärzung bekommen, und dann ist es nicht möglich, vergleichbare Intensitäten auf den beiden Platten zu bekommen.

2. Die zu vergleichenden Spektren müssen so exponiert werden, daß die zu vergleichenden Spektrallinien eine möglichst gleiche Schwärzung bekommen, und die Schwärzung muß eine mittlere sein, oder man muß die steile Partie der Schwärzungskurve verwenden. Ist die Schwärzung zu groß, sind die Aufnahmen für Intensitätsschätzungen unbrauchbar, und ist die Exposition sehr schwach, wird der Schwellenwert der Schwärzung einen zu großen Einfluß auf die Linien haben. In dem Falle kann eine Linie, für welche die effektive Lichtmenge (it^p) gerade oberhalb des Schwellenwertes liegt, auf der Platte erscheinen, während eine nur ein wenig schwächere Linie gar nicht auftritt.

Am schlimmsten wäre es, wenn man ein überexponiertes Spektrum mit einem unterexponierten vergleichen würde.

3. Für quantitative Messungen der Intensitätsverschiebungen muß eine Schwärzungsskala auf derselben Platte aufgenommen werden. Wenn es sich um kleine Intensitätsvariationen handelt, kann man mit gewisser Vorsicht und Erfahrung auch eine Schwärzungsskala von einer ähnlich behandelten Platte derselben Plattensorte ausnutzen. Für große Intensitätsverschiebungen ist aber dieses Verfahren nicht empfehlenswert.

Bei den von mir im Jahre 1923 gemachten Messungen wurden diese Vorsichtsmaßregeln sorgfältig befolgt. Hauptsächlich um diese Intensitätsmessungen auszuführen, reiste ich selbst nach Tromsö und konnte selbst die Observationen ausführen. Bei diesen Aufnahmen waren die erwähnten Bedingungen für Vergleichbarkeit der Spektren genau erfüllt.

Außerdem ist zu erwähnen, daß eine Linse in einem Abstand gleich der Brennweite vor dem Spalt angebracht war, damit ein bestimmter Teil des Nordlichtes auf dem Spalt abgebildet werden konnte. Dadurch war sichergestellt, daß nur Licht von einem bestimmten kleinen Höhenintervall zur Platte gelangte*).

Es wurde gleichzeitig mit zwei lichtstarken Spektrographen gearbeitet. Mit dem einen, welchen wir mit *B* bezeichnen werden, erhielt ich zwei Platten, eine mit einem Spektrum vom oberen Rande, eine zweite mit zwei Spektren, wovon das eine dem unteren Rande, das andere der oberen Grenze entsprach (Fig. 2). Auf dem einen Spektrum war die Nordlichtlinie verhältnismäßig stark, auf dem Spektrum für die obere Grenze war wohl das negative Bandenspektrum recht stark, aber die Nordlichtlinie war nicht zu sehen. Da aber die negativen Banden auf dem Spektrum der unteren Grenze bedeutend stärker als auf dem Spektrum der oberen Grenze exponiert waren, kann man aus diesen Spektren keinen Schluß über die mögliche Änderung der relativen Intensität der Nordlichtlinie ziehen.

*) Der Spalt hatte eine horizontale Lage.

Mit dem zweiten Spektrographen *A* dagegen erhielt ich zwei gute Platten, wo die zu vergleichenden Spektren gerade den richtigen Schwärzungsgrad hatten. Auf jeder Platte waren zwei Aufnahmen des Nordlichtspektrums. Das eine Spektrum entsprach dem unteren Rande, das andere entsprach dem etwa 60 km höher liegenden oberen Rande.

Auf jeder Platte wurden von einer konstant gehaltenen Lichtquelle als Schwärzungsskala drei Spektren mit Expositionszeiten, die sich wie 1 : 2 : 4 verhielten, aufgenommen.

Beide Platten wurden mit einem Mollschen Mikrophotometer ausgewertet und die Intensitätsverhältnisse in üblicher Weise ausgerechnet.

Da ich eine Zeitlang sehr viel mit Versuchen über die Lichtemission von verfestigten Gasen beschäftigt war, wurden die Ergebnisse der quantitativen Ausmessungen erst in meiner Nordlichtübersicht im Handb. d. exp. Phys. 25, 453, gegeben.

Da ich hier nur die Zahlenergebnisse kurz erwähnt habe, aber nicht genauer das experimentelle Verfahren und die Vorsichtsmaßregeln beschrieben habe, habe ich es wegen der großen Bedeutung dieser Ergebnisse für richtig gefunden, in dieser Verbindung eine genaue Beschreibung der Versuche zu geben.

In Fig. 1 sind die Photometerkurven, welche den beiden Spektren auf der einen Platte entsprechen, reproduziert. Die obere und die untere Kurve entsprechen dem oberen bzw. dem unteren Rande des Nordlichtes. Die gerade Kurvenstrecke rechts und links, mit S_{∞} bezeichnet, entspricht totaler Undurchsichtigkeit (unendlicher Schwärzung). Man sieht daraus, daß die Linien eine passende Schwärzung haben.

Die Nordlichtlinie und die drei Hauptlinien des negativen Bandenspektrums sind auf der Figur angegeben und mit *abcd* bezeichnet. Die relative Abnahme der Intensität der Nordlichtlinie kann man direkt aus der Figur erkennen, indem man die Linien *a* und *b* vergleicht. In der unteren Kurve ist *a* stärker als *b*, in der oberen *b* stärker als *a*. Ein derartiges Verhalten ist das möglichst günstigste, das man für eine quantitative Ausmessung haben kann.

Die relativen Intensitäten der Spektrallinien *abcd*, wie sie von den beiden Platten bestimmt sind, sind in Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1.

Linie	Platte I		Platte II	
	Untere Grenze	Obere Grenze	Untere Grenze	Obere Grenze
a) 5577	36	26	53	41
b) 4708	52	54	49	49
c) 4278	100	100	100	100
d) 3914	46	47	52	56

Die Intensitäten der Linien jedes Spektrums sind mit einem Faktor multipliziert, so die Intensität der stärksten Linien den willkürlichen Wert 100 bekommt.

Es ist nun ausdrücklich darauf zu achten, daß nur die beiden Spektren auf derselben Platte untereinander vergleichbar sind. Das geht auch ohne weiteres

durch Betrachtung der Zahlen hervor. Vergleichen wir z. B. die Spektren der unteren Grenze der beiden Platten, so sind die relativen Intensitäten recht verschieden, obwohl die wirklichen Linienintensitäten wohl in beiden Fällen dieselben waren.

Man kann dieses Verhältnis so ausdrücken: Die gefundenen relativen Intensitäten sind nicht die wirklichen relativen Intensitäten, wie sie in der Lichtquelle vorhanden sind.

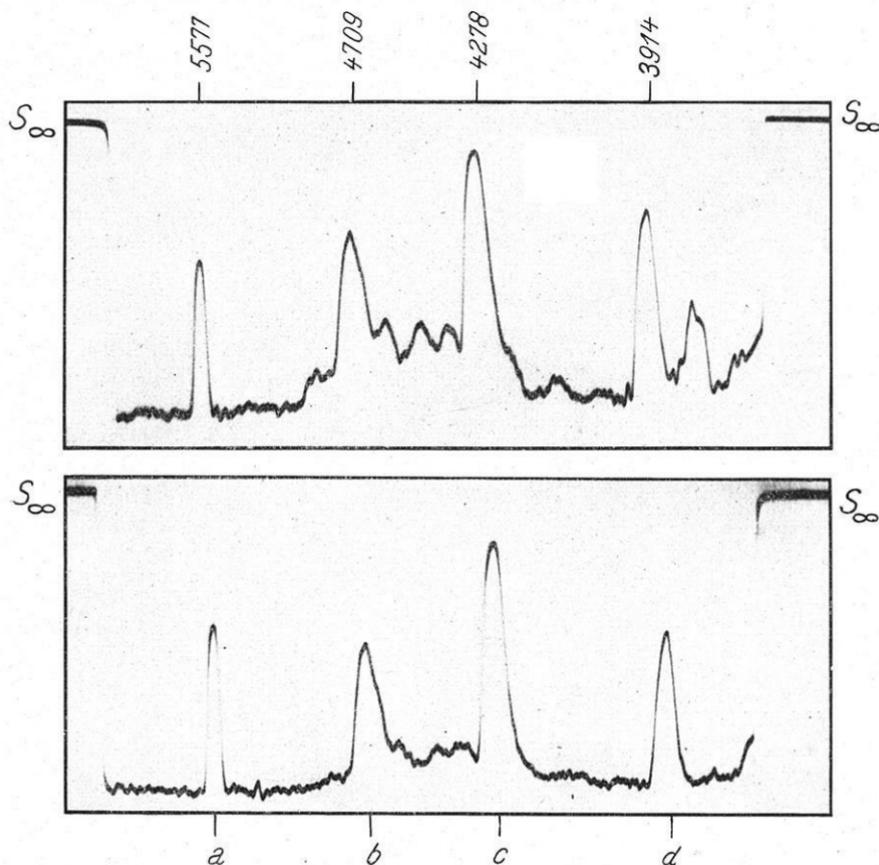


Fig. 1. Mikrophotometerkurven von Spektren.

Der obere und untere Teil des Nordlichts im März 1923 aufgenommen

Um die wirkliche relative Intensität (i) zu bekommen, muß man die aus der Platte gefundenen Relativzahlen mit einem Faktor k multiplizieren. Die Größe k ist eine Funktion der Farbe (Wellenlänge), welche von der Plattensorte und der Apparatur abhängt. Weiter wird praktisch auch k von der Plattenbehandlung und dem Expositionsgrad abhängen. Für zwei Spektren von ungefähr demselben Schwärzungsgrad auf derselben Platte aber, wo die Platten-

behandlung und die Apparatur für beide Platten als identisch angesehen werden dürfen, ist k als eine Funktion der Wellenlänge anzusehen.

Wollen wir z. B. das Intensitätsverhältnis der Linien a und b vergleichen, so hat man:

$$\frac{i_a}{i_b} = \frac{k_a \gamma_a}{k_b \gamma_b}.$$

Bildet man dieses Verhältnis für die beiden Spektren für obere bzw. untere Grenze, hat man:

$$\left(\frac{i_a}{i_b}\right)_{\text{obere}} = \frac{k_a}{k_b} \left(\frac{\gamma_a}{\gamma_b}\right)_{\text{obere}},$$

$$\left(\frac{i_a}{i_b}\right)_{\text{untere}} = \frac{k'_a}{k'_b} \left(\frac{\gamma_a}{\gamma_b}\right)_{\text{untere}}.$$

Wären nun die beiden Spektren auf verschiedenen Platten aufgenommen, so weiß man nicht, wie sich k' und k verhalten, und aus den Intensitätsverhältnissen der auf der Platte gefundenen Relativintensitäten γ kann man im allgemeinen nicht auf die wirklichen relativen Intensitätsverhältnisse schließen.

Für zwei Spektren auf derselben Platte, mit demselben Apparat und mit ausgefülltem Objektiv aufgenommen, hat man $k = k'$. Die Änderung der wirklichen relativen Intensitätsverteilung kann man durch das Doppelverhältnis D ausdrücken, wo

$$D = \frac{(i_a/i_b)_{\text{obere}}}{(i_a/i_b)_{\text{untere}}} = \frac{(\gamma_a/\gamma_b)_{\text{obere}}}{(\gamma_a/\gamma_b)_{\text{untere}}}.$$

Die unbestimmten und unbekanntenen Konstanten k und k' fallen aus, und man kann das Doppelverhältnis D mit Hilfe der aus der Photometerkurve und der Schwärzungsskala berechneten Intensitäten γ aus obenstehender Formel berechnen.

Aus den Zahlen der Tabelle 1 findet man:

$$\begin{aligned} D \text{ für Platte I} & \dots 0,695, \\ D \text{ „ „ II} & \dots 0,77. \end{aligned}$$

Der Unterschied der beiden Zahlen kann teilweise auf unvermeidlichem Messungsfehler beruhen. Der Unterschied ist doch wohl reell und darauf zurückzuführen, daß die beiden Platten Nordlichtern zu verschiedenen Zeiten mit etwas verschiedener durchschnittlicher Höhe der oberen Grenze entsprechen.

Vergleicht man in der Tabelle 1 die Zahlen für die zwei Spektren derselben Platte, finden wir, daß die relative Intensität der Linien des negativen Bandenspektrums sich nicht mit der Höhe ändert. Würde man aber Spektren von verschiedenen Platten miteinander vergleichen, so findet man, daß die beiden Platten verschiedene Relativzahlen der negativen Bandenlinien geben. Dieser Unterschied aber ist nicht reell, sondern beruht darauf, daß Spektren von verschiedenen Platten nicht vergleichbar sind.

Die gefundene relative Herabsetzung mit der Höhe von der Intensität der Nordlichtlinie im Verhältnis zu den negativen Stickstoffbanden entspricht einem

durchschnittlichen Höhenunterschied von etwa 60 km. Würde man annehmen, daß diese Herabsetzung sich unverändert bis zu den größten Nordlichthöhen fortsetzt, so würde man z. B. leicht die Abnahme der relativen Intensität der Nordlichtlinie mit der Höhe berechnen können.

Wir werden annehmen, daß wir ein Spektrum von der unteren Grenze mit einem aus der Höhe von 400 m vergleichen. Bezeichnet man das entsprechende Doppelverhältnis mit D_{100}^{400} , so bekommt man:

$$D_{100}^{400} = (D_{100}^{160})^5 = (3/4)^5 = 0,21.$$

Nach dem von mir nachgewiesenen und gemessenen Verschiebungseffekt sollte man also erwarten, daß die relative Intensität der Nordlichtlinie am unteren Rande etwa 300% größer ist als in einer Höhe von etwa 400 km.

Die von mir gefundene Höhenverschiebung entspricht den Verhältnissen innerhalb des Sonnenschattens (Nachtseite). Nun wäre es allerdings von großem Interesse zu wissen, ob für dieselbe Höhe eine Intensitätsverschiebung zwischen sonnenbelichteten und nicht sonnenbelichteten Strahlen stattfindet, oder man könnte die Intensitätsverschiebung der unteren Grenze eines Nordlichtes an der Nachtseite als Vergleichsspektrum anwenden. Denkt man sich, daß noch in einer bestimmten großen Höhe Spektren von nicht sonnenbelichteten Strahlen und von sonnenbelichteten Strahlen aufgenommen wurden, fragt es sich, ob die sonnenbelichteten Strahlen gegenüber dem Vergleichsspektrum der unteren Grenze eine größere Verschiebung geben als die von mir für die nicht sonnenbelichteten gefundene.

Die von Störmer veröffentlichten Spektren, welche von Moxnes aufgenommen sind, sollten sonnenbelichteten Strahlen entsprechen. Nun haben sie aber keine quantitative Messungen gemacht, so daß ein quantitativer Vergleich mit dem von mir gefundenen Effekt nicht möglich ist.

Nach dem schon früher nachgewiesenen Verschiebungseffekt sollte man für das große Höhenintervall, welchem die Störmerschen Aufnahmen entsprechen, eine sehr große Verschiebung erwarten.

Wenn man aber das spektrographische Material von Störmer näher betrachtet, so findet man, daß man daraus leider auch keine qualitativen Schlüsse über die Intensitätsvariationen mit der Höhe ziehen kann, denn keine der für die photometrischen Messungen der spektralen Intensitätsvariationen erwähnten notwendigen Bedingungen ist eben annähernd erfüllt.

Die zu vergleichenden Spektren sind nicht auf derselben Platte aufgenommen, und was noch schlimmer ist, die Spektren, welche den sonnenbelichteten Strahlen entsprechen, sind äußerst schwach exponiert, während das einzige Spektrum, welches Nordlichtern im Sonnenschatten entspricht, stark überexponiert ist.

Wie aus den vorangehenden Überlegungen hervorgeht, ist es klar, daß ein solches Material für Auswertung möglicher Intensitätsverschiebungen unbrauchbar ist.

Bei den schwach exponierten Spektren, welche der größeren Höhe entsprechen, findet er, daß die Nordlichtlinie beinahe verschwindend schwach ist. Da man hier

in der Nähe des Schwellenwertes der photographischen Wirkung ist, kann man eigentlich nicht sagen, wie sich die Intensität im Verhältnis zu derjenigen der Stickstoffbanden verhält, und man kann auch nicht sagen, ob dieses Verhältnis anders ist als bei den tiefer liegenden, nicht sonnenbestrahlten Nordlichtern.

Das geht ohne weiteres aus den folgenden Tatsachen hervor:

Die von Störmer mitgeteilten photometrischen Kurven zeigen, daß auch am unteren Rande die Nordlichtlinie eine geringere Schwärzung hat, als die drei stärkeren negativen Bandenlinien 4708, 4278, 3914.

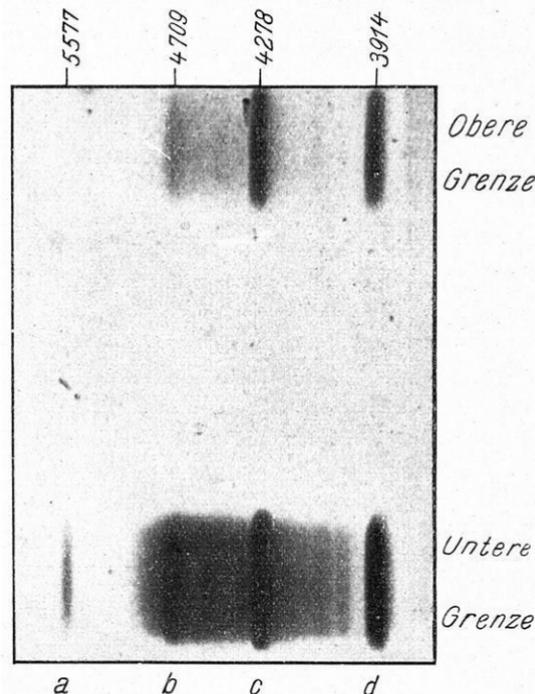


Fig. 2. Aufnahmen verschiedener Schwärzung.

Mit Spektrograph B am 25. März aufgenommen.
Höhenunterschied etwa 60 km

Nun ist bei den Aufnahmen, welche den hohen Strahlen entsprechen, das Nordlichtspektrum so schwach, daß eben die Stickstofflinie 4708, welche also am unteren Rand schon stärker als die Nordlichtlinie ist, so schwach ist, daß sie gerade sichtbar ist. Selbst wenn keine Intensitätsverschiebung mit der Höhe stattfand, müßte notwendigerweise die Nordlichtlinie an der Grenze oder unterhalb der beobachtbaren liegen.

In meinem Material aus 1923 habe ich auch, wie schon erwähnt, einen ähnlichen Fall gehabt. Mit dem einen Spektrographen erhielt ich für die untere Grenze ein sehr stark überexponiertes Spektrum (Fig. 2), während dasjenige für die obere

Grenze (Fig. 2) recht schwach war, und da auch in meinem Falle die Schwärzung der Nordlichtlinie kleiner war als diejenige der negativen Stickstoffbanden, so bekam ich am oberen Rand ein Spektrum, wo ein recht starkes Stickstoffspektrum zu beobachten war — die Nordlichtlinie aber war ganz verschwunden.

Obwohl beide Spektren auf derselben Platte aufgenommen waren und die Aufnahmen diese Forderung der Vergleichbarkeit erfüllten, so habe ich doch sofort eingesehen, daß die Spektren nichts in bezug auf eine mögliche Änderung der relativen Intensität der Nordlichtlinie aussagen können. Daß der anscheinend sehr große Effekt nicht reell ist, geht ohne weiteres daraus hervor, daß die beiden

Spektren zu derselben Zeit aufgenommen wurden, wie die schon beschriebene Platte 2, welche mit dem zweiten Spektrographen aufgenommen wurde. Diese Platte ergab richtig exponierte und auswertbare Spektren, und führte zu der schon erwähnten Intensitätsverschiebung von etwa 25%.

Aus den Störmerschen Aufnahmen kann man deshalb leider keinen Schluß betreffs einer Variation der Intensitätsverteilung im Nordlichtspektrum ziehen. Noch weniger kann man irgend etwas quantitatives aussagen. Nun ist jedoch — wie erwähnt — ein Effekt vorhanden, und wie meine Messungen zeigen, ist für das von Störmer untersuchte Höhenintervall eine große relative Intensitätsabnahme der Nordlichtlinie im Vergleich mit den Stickstoffbanden vorhanden. Hieraus folgt, daß selbst wenn man aus den Störmerschen Aufnahmen auf das Vorhandensein einer Intensitätsverschiebung schließen könnte, dies durch den von mir gefundenen Höheneffekt erklärbar wäre, und man könnte überhaupt nichts über die mögliche direkte Wirkung der Sonnenstrahlung auf die spektrale Intensitätsverteilung aussagen.

Nun ist es allerdings eine sehr interessante Aufgabe, den Verschiebungseffekt, welchen ich für geringere Höhenintervalle quantitativ festgelegt habe, auch für größere Intervalle zu messen.

Weiter wäre es von großem Interesse, wenn man Spektren von Nordlichtstrahlen an der Nachtseite und von sonnenbelichteten Strahlen für dieselbe Höhe aufnehmen und unter vergleichbaren Umständen in bezug auf Intensitätsverteilung messen könnte. Man würde dann die wichtige Frage beantworten können, ob die Sonnenstrahlung einen mehr direkten Einfluß auf die Intensität der Nordlichtlinie ausübt.

Die Bedeutung des Verschiebungseffekts für die Theorie der höheren Atmosphärenschichten. § 4. Wie schon in früheren Arbeiten erwähnt, ist der gefundene Verschiebungseffekt von großer Bedeutung für unsere Kenntnis an den höheren Atmosphärenschichten. Erstens konnte daraus der Schluß gezogen werden, daß die grüne Nordlichtlinie nicht von einem leichten Gase emittiert sein kann, wenn man annimmt, daß die Materie in der Form von Gasen in ideellem Gleichgewicht vorhanden ist.

Wenn man den Verschiebungseffekt im Lichte der verschiedenen Anschauungen über die Konstitution der höchsten Atmosphärenschichten betrachtet, so findet man, daß die Kristallstaubhypothese in gutem Einklang mit dem Effekt steht. Ja, man kann sagen, daß der Effekt als eine notwendige Folge dieser Hypothese anzusehen ist. Denn wenn man ein Gemisch von Gasmolekülen, Ionen, geladenen und ungeladenen Kristallkörnchen in den oberen Atmosphärenschichten vor sich hat, muß die relative Konzentration der kondensierten schwereren Kristallkörnchen, welche nach meiner Auffassung die grüne Nordlichtlinie gibt, mit der Höhe abnehmen.

Nach dieser Auffassung sollte man auch erwarten, daß die Intensität der grünen Nordlichtlinie, mit den Stickstoffbandenlinien verglichen, für sonnen-

belichtete Nordlichtstrahlen geringer ist, als sie für dieselbe Höhe eines an der Nachtseite auftretenden Strahles sein sollte.

Die Störmerschen Aufnahmen sind gewissermaßen auf die Beantwortung dieser Frage gerichtet, aber wie wir gesehen haben, kann man aus seinen Versuchen keinen Schluß ziehen.

Die Störmerschen Spektralaufnahmen von sonnenbelichteten Nordlichtern sind jedoch insofern von Interesse, als sie zeigen, daß es unter günstigen Umständen wohl möglich sein wird, so gute Spektren von sonnenbelichteten Nordlichtstrahlen aufzunehmen, daß man die Frage beantworten kann, ob die Sonnenstrahlen einen Einfluß auf die Intensitätsverteilung im Nordlichtspektrum haben. Könnte man zeigen, daß die relative Intensität der Nordlichtlinie für sonnenbelichtete Strahlen geringer ist als für Nordlichter im Erdschatten, so würde dies ein kräftiges Argument zugunsten meiner Stickstoffstaubhypothese liefern.

Andererseits ist die von MacLennan vorgeschlagene Deutung der Nordlichtlinie mit dem gefundenen Verschiebungseffekt schwer vereinbar. Er meint, die Linie stamme von Sauerstoffatomen. Diese Atome sind viel leichter als die sonstigen Gasmoleküle, und da den geladenen Ionen von geringer Masse von dem elektrischen Felde eine recht große aufwärts gerichtete Geschwindigkeit erteilt werden muß, sollte man notwendigerweise eine relative Zunahme der Intensität der Nordlichtlinie mit steigender Höhe erwarten.

Zu diesen Schwierigkeiten des MacLennanschen Deutungsversuchs kommt noch eine Reihe anderer, welche ich kurz in meiner Übersicht im Handbuch der Physik erwähnt habe. Eine Schwierigkeit ist, daß der Sauerstoff, welcher nur in relativ sehr kleinen Mengen vorhanden ist, die stärkste Linie im Spektrum geben sollte, ohne daß überhaupt andere Sauerstofflinien vom Nordlichtspektrum vorhanden sind.

Die MacLennansche Deutung begegnet auch der Schwierigkeit, daß mehrere andere Linien in Rot und Grün unerklärt bleiben.

Es ist auch in dieser Verbindung von Interesse, darauf aufmerksam zu machen, daß nach der MacLennanschen Deutung die relative Intensität der Nordlichtlinie in sonnenbestrahlter Materie größer sein dürfte als im Erdschatten, denn die Sonnenstrahlung muß ja in erster Linie die für die MacLennansche Deutung notwendige Spaltung der Sauerstoffmoleküle bewirken. Eine Herabsetzung der Intensität der Nordlichtlinie in sonnenbelichteter Atmosphäre läßt sich deshalb kaum mit der MacLennanschen Deutung in Einklang bringen.

Auf der Grundlage der Stickstoffstaubhypothese dagegen kann man mit Hilfe der vier typischen Banden des festen Stickstoffs N_1 , N_2 , N_3 , N_4 die typischen roten und grünen Linien und Banden des Nordlichtspektrums erklären.

Eine ausführlichere Diskussion dieser Frage muß für eine spätere Veröffentlichung in Verbindung mit meinen Versuchen über das Leuchten des festen Stickstoffs vorbehalten werden.

Oslo, Physikalisches Institut, November 1929.