Die Erforschung der obersten Atmosphärenschichten.

Von

ALFRED WEGENER.

Mit 1 Figur im Text.

In allerjüngster Zeit haben sich eine Reihe interessanter Untersuchungen entsponnen, welche über den Forschungsbereich der aerologischen Experimente¹ noch hinausgreifen und sich mit der Natur der obersten, mit Ballonen nicht mehr erreichbaren Atmosphärenschichten beschäftigen. Es ist bekannt, daß die Aerologie namentlich durch die überraschende Entdeckung der jetzt als „Stratosphäre“ bezeichneten isothermen Schichten oberhalb etwa 11 km Höhe unsere Vorstellungen über den Aufbau der Atmosphäre auf eine ganz neue Basis gestellt hat. Nicht minder überraschend sind aber die Resultate, zu denen die Erforschung der höchsten Schichten gelangt; denn es ergibt sich hier, daß diese eine ganz andere chemische Zusammensetzung haben müssen wie die Luft am Erdboden, daß sie nämlich lediglich aus den leichtesten uns bekannten Gasen bestehen. Im folgenden soll über diese Arbeiten kurz berichtet werden.

Schon im Jahre 1875 hat HANN² darauf hingewiesen, daß die obersten Atmosphärenschichten nach den Gasgesetzen, speziell dem DALTONschen Gesetz, aus reinem Wasserstoff bestehen müßten, wenn der Nachweis dieses Gases in der Luft am Erdboden, den BOUSSINGAULT geführt hatte, richtig sei. Nachdem später die Existenz des Wasserstoffs in der Atmosphäre, wenn auch nur in sehr geringen und unsicher bestimmten Mengen, von GAUTIER bestätigt war, führte HANN³ nochmals im Jahre 1903 die Berechnung durch. Der Gedankengang ist folgender: Der Zustand des Diffusionsgleichgewichts in dem Gasgemisch der Atmosphäre, welcher jedenfalls stets angestrebt wird und oberhalb 11 km Höhe bei dem Mangel an vertikalen

¹ Der bisher höchste Registrierballonaufstieg erreichte 29 km Höhe

² J. HANN, Das DALTONsche Gesetz und die Zusammensetzung der Luft in großen Höhen. *Zeitschr. d. Österr. Ges. f. Meteorologie* 1875, 22.

³ J. HANN, Die Zusammensetzung der Atmosphäre. *Meteorolog. Zeitschr.* 1903, 122.

Mischungen auch sicherlich nahezu erreicht ist, wird nicht etwa dadurch charakterisiert, daß die Zusammensetzung in allen Höhen die gleiche ist, sondern dadurch, daß der Partialdruck einer jeden Komponente nach den Gasgesetzen mit der Höhe abnimmt. Um also die Zusammensetzung in einer bestimmten Höhe zu erhalten, müssen wir die dortigen Partialdrucke einzeln berechnen und deren Verhältnis zur Summe der Partialdrucke, d. h. zum gesamten Luftdruck, ansetzen. Die Berechnung der einzelnen Partialdrucke für größere Höhen, wenn diejenigen am Boden bekannt sind, geschieht nach der bekannten barometrischen Höhenformel:

$$\log \text{ nat. } \left(\frac{p_0}{p} \right) = \frac{h}{H(1 + \alpha t)}$$

(p_0 = Druck in der Ausgangshöhe, p = Druck in der um h größeren Höhe, $\alpha = \frac{1}{273}$ der Ausdehnungskoeffizient der Gase, t = Mitteltemperatur der Luftsäule h in Celsiusgraden). Nur muß hierbei für die Konstante H , die sog. „Höhe der homogenen Atmosphäre“, die für Luft schlechtweg 7991 m beträgt, die charakteristische Konstante des betreffenden Einzelgases eingesetzt werden, die von dessen spezifischem Gewicht abhängt. Wegen des Faktors t ist allerdings noch weiter eine Annahme über die Temperatur dieser Luftschichten nötig, doch macht selbst ein starker Fehlgriff in derselben nur wenig für das Resultat aus. HANN führte auf diese Weise die Berechnung für die Stufen 10, 20, 50 und 100 km aus; das wesentlichste Ergebnis war, wie schon erwähnt, daß der am Erdboden nur in minimalen Spuren nachweisbare Wasserstoff in der Höhe von 50 km bereits 14 Volumprocente erreicht, in 100 km aber 99, so daß hier und noch mehr oberhalb dieser Höhe die Luft praktisch nur noch aus Wasserstoff bestehen müßte. Obwohl HANN die Bedeutung dieser Beziehungen keineswegs verkannte, war er doch damals noch nicht in der Lage, die Realität dieses zunächst rein rechnerischen Ergebnisses zu prüfen, welches also einstweilen noch ganz hypothetisch blieb.

Auch die nochmalige Durchrechnung mit verbesserten Annahmen über die Temperatur, welche HUMPHREYS¹ im Jahre 1909

¹ HUMPHREYS, Distribution of gases in the atmosphere. Bull. of the Mount Weather Observatory II, 2. H. zitiert FERREL, Recent advances in meteorology 1886, 37 und DEWAR, Proc. Roy. Inst., Lond. 17 (1902), 223. Auch JEANS hat die Verteilung der Gase berechnet in: The upper atmosphere. Bull. of the Mount Weather Obs. II, p. 374, 1910.

vornahm, ließ die Frage der Realität ganz unberührt. Zur Veranschaulichung des Rechnungsergebnisses bediente sich HUMPHREYS einer graphischen Darstellung nach Art der weiter unten gegebenen.

Schon im selben Jahre 1909 war ich ganz unabhängig von diesen Berechnungen der Zusammensetzung bei der Diskussion derjenigen Erscheinungen, welche sich in diesen Höhen abspielen, zu folgendem Schluß gekommen: „Schon jetzt kann man mit einiger Wahrscheinlichkeit die Vermutung aufstellen, daß sich ein solcher Sprung in der Dichte etwa bei 70–80 km Höhe befindet, namentlich weil hier die Krakatau-Wolken ihr Aufsteigen beendet haben und weil zugleich diese Höhe ungefähr dieselbe ist, bis zu welcher noch diffuse Reflexion (des Lichts) bemerkt wird.“¹

Diese Vermutung wurde fast zur Gewißheit, als ich im folgenden Jahre bei einer Wiederholung der Rechnungen von HANN mit engeren Intervallen zu dem Resultat kam, „daß der plötzliche Umschlag der Zusammensetzung gerade in derjenigen Höhe eintritt, in welcher wir aus ganz anderen Gründen eine Schichtgrenze vermuteten.“² Es ist für das Folgende nicht ohne Interesse, daß ich schon damals auf die Analogie mit der Sonnenatmosphäre mit folgenden Worten hinwies: „Die Annahme einer solchen Wasserstoffatmosphäre mit scharfer Begrenzung eröffnet auch interessante Analogien mit der Sonnenatmosphäre, die ja in der Chromosphäre gleichfalls eine solche scharf begrenzte Wasserstoffhülle besitzt. Vielleicht wird man später die Analogie noch weiter treiben können und über der Wasserstoffatmosphäre noch eine Atmosphäre aus einem noch leichteren Gase, dem Coronium der Sonnencorona entsprechend, annehmen, innerhalb welcher sich die höchsten Polarlichter abspielen, und welche, wie das Coronium die grüne Spektrallinie bei $532\text{ }\mu\mu$, die bekannte Nordlichtlinie bei $557\text{ }\mu\mu$ gibt.“

Noch im selben Jahre 1910 kam von anderer, gänzlich unerwarteter Seite eine Bestätigung für die Realität der oberen Wasserstoffzone, und zwar auf Grund der höchst merkwürdigen Schallerscheinungen, welche sich bei Gelegenheit der großen Dynamit-

¹ A. WEGENER, Probleme der Aerologie. „Das Wetter“, 1909, Heft 11.

² A. WEGENER, Über eine neue fundamentale Schichtgrenze der Erdatmosphäre. *Beitr. z. Phys. d. freien Atm.* III, 4, 1910. — Ich kannte damals noch nicht die schon im Vorjahre erschienene Arbeit von HUMPHREYS, mit Rücksicht auf welche die ausführliche Mitteilung der Berechnung bei mir überflüssig erscheint. Der Kern meiner Arbeit, nämlich die Verknüpfung des Rechnungsergebnisses mit den Beobachtungstatsachen, wird dadurch natürlich nicht berührt.

explosion an der Jungfraubahn am 15. November 1908 zeigten und durch die sorgfältige Bearbeitung DE QUERVAIN¹ in weiteren Kreisen bekannt wurden. Das Wesentliche bei diesen Erscheinungen ist, daß außer einem die Explosionsstelle unmittelbar umgebenden Gebiet normaler Hörweite noch ein zweites, viel ausgedehnteres Gebiet abnormer Hörweite vorhanden war, welches von ersterem durch eine rund 100 km breite „Zone des Schweigens“ getrennt war. Während man nun früher geneigt war, derartige Erscheinungen auf die Windänderung mit der Höhe zurückzuführen, hat v. DEM BORNE² in sehr scharfsinniger Weise die Hypothese aufgestellt, daß es sich um eine Reflexion der Schallstrahlen an der oberen Wasserstoffosphäre handelt, und es läßt sich nicht leugnen, daß seine exakten rechnerischen Resultate die Erscheinung viel vollkommener darstellen als die früheren Erklärungsversuche. Im Prinzip beruht diese Rechnung auf folgender Überlegung:

Da die Schallgeschwindigkeit in gewöhnlicher Luft nur etwa 330 m p. Sek., in Wasserstoff aber 1280 m p. Sek. beträgt, so müßte, falls eine scharfe Schichtgrenze vorhanden wäre, schon bei einem Einfallswinkel von 15° Totalreflexion eintreten, und der Strahl würde, wenn er im übrigen geradlinig verlief, in 40 km Abstand von der Schallquelle wieder die Erde erreichen. Von hier ab nach außen zu läge eine zweite Hörbarkeitszone ohne scharfe äußere Begrenzung. Indem v. DEM BORNE nun einmal die Krümmung berücksichtigte, welche die Schallstrahlen innerhalb der Troposphäre wegen der hier herrschenden Temperaturabnahme mit der Höhe erleiden müssen, und indem er andererseits in Rechnung zog, daß die beiden Gase an der Schichtgrenze nicht scharf getrennt sind, so daß auch keine eigentliche Reflexion, sondern nur ein allmähliches Herumbiegen der Schallstrahlen erfolgen kann, gelang es ihm zu zeigen, daß hierdurch der vorerwähnte Abstand von 40 km auf etwa 120 km hinausgeschoben wird. Die folgende Tabelle gibt die von ihm berechneten Zahlenwerte.

¹ A. DE QUERVAIN, Die Erdbeben der Schweiz im Jahre 1908 und die Schallverbreitung der Dynamitexplosion an der Jungfraubahn am 15. Nov. *Ann. d. Schweiz. Mët. Zentralanstalt* (Jahrg. 1908). (Die von DE QUERVAIN gegebene Kartenskizze ist auch reproduziert in meiner *Thermodynamik d. Atmosphäre*, Leipzig 1911, S. 49 und in ABDERHALDENS *Fortschritte der naturw. Forschung*, Bd. III).

² v. DEM BORNE, Schallverbreitung bei Explosionskatastrophen. *Physik. Zeitschr.* 11 (1910), Nr. 11, S. 483.

Zenitdistanz des Schallstrahles an der Schallquelle	Die Schallbahn wird horizontal in einer Höhe von . . . km	Die Schallbahn er- reicht die Erdober- fläche . . . km von der Schallquelle
80°	56	290
70	58	210
60	62	142
50	65	126
40	69	120
30	75	116
20	89	126
17° 20'	∞	∞

Nach den sorgfältigen Ermittlungen DE QUERVAINs betrug der wahre Abstand des Innenrandes der Zone abnormer Hörbarkeit vom Explosionsherde etwa 140 km; auch war deutlich zu erkennen, daß dieser Innenrand, wie die Theorie verlangt, verhältnismäßig scharf markiert war, während sich nach außen die Hörbarkeit allmählich verlor. Die Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Theorie ist also eine recht befriedigende, und so geben diese Erscheinungen ein weiteres Argument für die Realität der oberen Wasserstoffzone.

Nachdem so die früher vage Vermutung in überraschend kurzer Zeit sich zu einer sehr brauchbaren Arbeitshypothese entwickelt hatte, hielt ich es für im höchsten Grade wünschenswert, die Gesamtheit aller jener Erscheinungen, die sich in den höchsten Atmosphärenschichten abspielen, kritisch auf die Frage hin zu untersuchen, ob sie uns etwas über die Existenz der Wasserstoffzone auszusagen imstande sind. Noch am 30. November 1910 konnte ich der Gesellschaft zur Beförderung der gesamten Naturwissenschaften zu Marburg das Ergebnis meiner Studien vorlegen,¹ welche in extenso im folgenden Jahre unter dem Titel „Untersuchungen über die Natur der obersten Atmosphärenschichten“ publiziert wurden.² Das Resultat war ein doppeltes: einmal zeigte sich überall mit Deutlichkeit die Realität der Wasserstoffzone, zweitens aber deuteten verschiedene Dinge darauf hin, daß an der Zusammensetzung der äußersten Schichten außer Wasserstoff noch ein anderes unbekanntes Gas beteiligt ist, das noch leichter als ersteres ist, und

¹ A. WEGENER, Untersuchungen über die Natur der obersten Atmosphärenschichten. (Vorläufige Mitteilung.) Sitzungsber. d. Ges. z. Bef. d. ges. Naturwissenschaften zu Marburg 1911, Nr. 1.

² *Phys. Zeitschr.* 12 (1911), 170–178 und 214–222.

welches ich Geocoronium zu nennen vorgeschlagen habe. Im folgenden sollen die Hauptpunkte dieser Arbeit, ergänzt durch die Heranziehung einiger inzwischen erschienenen Arbeiten anderer Forscher, zur Darstellung gelangen. Zunächst ergab sich, daß die schon im vorangehenden erwähnten Dämmerungserscheinungen trotz der Schwierigkeit scharfer Beobachtung sogar in noch weitgehendem Maße, als bis dahin angenommen wurde, uns ein Bild von den Hauptschichten der Atmosphäre geben können und in Zukunft bei zweckmäßig angelegter Beobachtung wohl noch mehr geben werden. Es ist ja einleuchtend, daß durch Dichtigkeitssprünge in der Atmosphäre Lichtsprünge am Dämmerungshimmel hervorgerufen werden müssen. Wir haben also die Möglichkeit, durch Beobachtung der letzteren auf Dichtigkeitssprünge, also Schichtgrenzen zu schließen und deren Höhe zu bestimmen. Z. B. ist der sogen. erste Dämmerungsbogen offenbar identisch mit der durchstrahlten Troposphäre. MIETHE und LEHMANN¹ fanden den Depressionswinkel der Sonne beim Verschwinden dieses ersten Dämmerungsbogens zu 8°, woraus sich bei Berücksichtigung der Refraktion die Höhe des Dichtigkeitssprunges zu ca. 11 km, also durchaus übereinstimmend mit der Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre, ergibt.

Die meisten Beobachtungen dieser Art sind aber am Hauptdämmerungsbogen ausgeführt und ergeben, wie schon früher erwähnt, als Höhe der hier in Betracht kommenden Schichtgrenze etwa 70 km. Die Einzelwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt; die Zahlen geben den Depressionswinkel der Sonne für den Augenblick, in welchem der Dämmerungsbogen gerade unter dem Horizont versinkt bzw. auftaucht:²

SCHMIDT (Athen)	15.9°
BEHRMANN (Atlantik)	15.6°
BRAVAIS (Frankreich)	16.0°
HELLMANN (Spanien).	15.6°
LIAIS (Atlantik)	17.8°
MÖLLER (Atlantik)	17.5°
BAILEY (Arequipa, Peru)	17.5°
MIETHE u. LEHMANN (Assuan)	16.1°
CARLHEIM-GYLLENSKJÖLD (Spitzbergen)	17.7°

¹ MIETHE und LEHMANN, Dämmerungsbeobachtungen in Assuan im Winter 1908. *Meteorolog. Zeitschr.* 1909, 97.

² PERNTER-EXNER, *Meteorologische Optik*, IV. Abschnitt. Wien u. Leipzig 1910, S. 767.

Bei einer kritischen Betrachtung dieser Zahlen wird es sehr wahrscheinlich, daß die meisten von ihnen mit einem nicht unerheblichen systematischen Fehler behaftet sind, indem nämlich die dunsterfüllten, im Schatten liegenden untersten Luftschichten den Oberrand des Dämmerungsbogens verdecken, auch wenn dieser noch über dem Horizont steht. Es ist in dieser Beziehung sehr lehrreich zu sehen, daß die Morgenbeobachtungen, bei denen die unteren Schichten durchsichtiger zu sein pflegen als bei den Abendbeobachtungen, viel übereinstimmendere Werte liefern als die letzteren, wie die folgende Tabelle zeigt:

	Abend	Morgen
Spanien	15° 20'	17° 52'
Assuan	14° 54'	17° 21'
Atlantik	18° 18'	17° 22'

Nehmen wir hiernach etwa 17.4° als den wahrscheinlichsten Wert an, so würde sich bei angenäherter Rechnung für die obere Grenze der lichtreflektierenden Schichten eine Höhe von 74 km ergeben.

Auch nach diesem „Ende der Dämmerung“ läßt sich indessen über dem westlichen Horizont nach Sonnenuntergang noch ein sehr schwaches, bläuliches Licht erkennen, aus dessen Beobachtung SEE die Grenze der betreffenden lichtreflektierenden Schichten in 214 km Höhe ermittelte. Wie später zu zeigen ist, stellt diese Höhe wahrscheinlich die Grenze zwischen der Sphäre des Wasserstoffs und der des Geocoroniums dar.

Ein zweites, gleichfalls schon erwähntes Phänomen, das in Frage kommt, stellen die seit 1885 ab beobachteten, aber erst von 1887 ab photogrammetrisch von JESSE und STOLZE verfolgten leuchtenden Nachtwolken dar. Ihre Höhe ergab sich stets zwischen 70 und 83 km.¹ Über die Natur dieser eigentümlichen Wolkengebilde sehen wir auch wohl gegenwärtig noch nicht völlig klar. Bisher scheint allgemein angenommen worden zu sein, daß sie auf den genannten Ausbruch des Vulkans Krakatau in der

¹ O. JESSE, Untersuchungen über die sogen. leuchtenden Nachtwolken. Sitzungsber. d. Kgl. Preuß. Akad. d. Wiss. in Berlin, Mai 1891 (eine frühere Arbeit ebendort 1890), sowie namentlich *Astron. Nachr.* 140 (1896), 3347, 161. (Vgl. auch *Meteorolog. Zeitschr.* 1891, 306.) Die geplante zusammenfassende Abhandlung in den Publikationen der Berliner Sternwarte ist durch JESSEs Tod bisher verhindert worden.

Sunda-Straße zurückzuführen seien.¹ Dies wird auch durch theoretische Erwägungen nahegelegt, da bei der Konstanz der Temperatur in allen Höhen der Stratosphäre die relative Feuchtigkeit hier mit der Höhe langsam abnehmen und etwa die folgenden Werte aufweisen muß, wenn Diffusionsgleichgewicht herrscht:²

Höhe km . .	11	15	20	25	30	35	40	45	50
Rel. Feucht. ‰	50	34	21	13	8	5	3	1.8	1.1

Ohne Zufluß von Wasserdampf müßte also in der Höhe der leuchtenden Nachtwolken eine so große Trockenheit herrschen, daß an Wolkenbildung nicht zu denken wäre, wenn nicht etwa, was auch schon vermutet, aber doch wohl unwahrscheinlich ist, diese Wolken gar nicht aus Kondensationen des Wasserdampfes, sondern irgend eines anderen Gases bestehen sollten. Deshalb ist es theoretisch sehr plausibel, daß in diesen Höhen eine starke Ansammlung von Wasserdampf durch eine Vulkaneruption stattgefunden hat. Die Schwierigkeit, wie eine Durchbrechung der stabilen Schichtung der Stratosphäre für die vulkanische Rauchsäule möglich gewesen sein soll,³ kann man durch die Annahme umgehen, daß in dem vorliegenden Falle die vulkanischen Gase einen hohen Prozentsatz Wasserstoff enthielten, wie es z. B. bei den Gasen der isländischen Fumarolen (25 ‰ Wasserstoff nach BUNSEN) und denen des Mt. Pelée auf Martinique bei der Eruption von 1902 (23.3 ‰ nach MOISSAN) der Fall war. Gerade beim Krakatau wäre ein hoher Prozentsatz Wasserstoff plausibel, da er durch die Dissoziation des Meerwassers an der glühenden Lava freigeworden sein könnte, analog dem Versuch von GROVE, bei welchem durch Hineinbringen eines geschmolzenen, weißglühenden Platintröpfchens in Wasser Knallgas erhalten wird.

Es soll an dieser Stelle aber nicht verhehlt werden, daß die jüngsten Erscheinungen leuchtender Nachtwolken (im Sommer 1909, 1910 und 1911 sollen solche beobachtet sein) doch zu Bedenken gegen die Auffassung ihres Zusammenhanges mit dem Krakatau-

¹ KIESSLING zögerte doch noch 1888, diese Erklärung anzunehmen. Siehe: KIESSLING, Untersuchungen über Dämmerungserscheinungen. Hamburg und Leipzig 1888.

² A. WEGENER, Über Temperaturinversionen. Beitr. z. Phys. d. freien Atm. IV, 1, 55, 1910.

³ Die bisher gemessenen Rauchsäulen der Vulkanausbrüche breiten sich alle in der Höhe von ca. 11 km aus, dringen also nicht in die Stratosphäre ein.

Ausbruch Anlaß geben, und es wird aufs neue die Frage zu diskutieren sein, ob der Zusammenhang auch in den achtziger Jahren nicht nur ein scheinbarer war, der dadurch hervorgerufen wurde, daß man eben erst seit den prächtigen, durch vulkanische Asche erzeugten Dämmerungserscheinungen ein Auge für diese Dinge gewann und auf diese Weise auch die leuchtenden Nachtwolken entdeckte. Die Frage ihrer Herkunft und Natur wäre dann noch als offen zu betrachten. Gleichwohl aber würden sie durch ihre Ausbreitung in Stratusform und die Konstanz ihrer Höhenlage von einer in ca. 80 km Höhe liegenden Schichtgrenze Zeugnis ablegen.

Ein drittes, sehr wichtiges Phänomen, das hier in Frage kommt, bilden die Sternschnuppen und Meteore. Die Lichterscheinung der ersteren spielt sich vollständig in der Wasserstoffsphäre ab. BREZINA hat für das Aufleuchten und Verlöschen folgende Zusammenstellung gegeben:¹

Es fanden:	Höhe des Aufleuchtens		Höhe des Erlöschens	
	km	Zahl d. Beob.	km	Zahl d. Beob.
AL. HERSCHEL aus BRANDES' und BENZENBERGS Beob.	113	178	87	210
H. A. NEWTON aus Beob. von 1798—1863 (mit Inbegriff der v. HERSCHEL verwendeten)	118	234	81	290
SECCHI aus seinen eigenen Beob.	120	27	80	27
Im besonderen fanden:				
WEISS für die Perseiden (Augustmeteore) Europa	114.6	49	87.9	49
NEWTON für die Perseiden, Amerika	112.4	39	90.1	39
NEWTON für die Leoniden (Novembermeteore) . .	154.9	78	97.8	78
WEISS für die Leoniden	132.5	4	79.8	4
„ „ „ „	151.4	6	95.1	6

Auch die Beobachtungen von BESSEL, SCHMIDT und HEIS, DENNING und der Berliner Sternwarte geben ähnliche Werte. Je schneller die Meteoriten bewegt sind, desto größer ist ihre Helligkeit, und in desto größerer Höhe leuchten sie auf; daher geben z. B. die schnelleren Leoniden in unserer Tabelle eine etwas größere Höhe als die langsameren Perseiden. Im Mittel kann man annehmen, daß die Sternschnuppen bei etwa 150 km aufleuchten und

¹ BREZINA, Die Meteoriten vor und nach ihrer Ankunft auf der Erde. Vorträge d. Vereins z. Verbreitung naturw. Kenntnisse in Wien. Wien 1893.

bei etwa 80 km verlöschen; sie spielen sich also ganz in der Wasserstoffosphäre ab, in welcher der Sauerstoffgehalt noch ganz verschwindend ist, können also nicht verbrennen, sondern nur verdampfen.

Die Leuchterscheinung selber ist offenbar auf die nahezu adiabatische Kompression des Gases vor den Meteoriten zurückzuführen; bei der großen Geschwindigkeit (Größenordnung: 50 km pro Sekunde), mit welcher diese in die Atmosphäre eintreten, ist bereits der Wasserstoff zu träge, um auszuweichen, und wird daher bis zur Glühtemperatur komprimiert. Dies glühende Gas wirkt dann auf den Meteoriten wie eine Gebläseflamme und bringt ihn zunächst an der Oberfläche zum Schmelzen oder Verdampfen, was meist bis zur vollständigen Auflösung und Zerstreuung seiner Materie längs seiner Bahn in der Atmosphäre führt.

Da die Stärke der Lichtentwicklung offenbar in erster Linie von der Trägheit der Gase abhängt, so ist es einleuchtend, daß beim Übertritt in die Stickstoffosphäre die Lichtintensität des Meteoriten sehr erheblich anschwellen muß. Damit stimmt überein, daß auch sehr helle Meteore anfangs durchaus das Aussehen von Sternschnuppen bieten, und die starke Lichtentfaltung erst von einem bestimmten Punkte der Bahn ab aufzutreten pflegt. In der Stickstoffosphäre endigt das Meteor meist mit einer Explosion, welche wohl auf den immer stärker anwachsenden Druck der an seiner Vorderseite komprimierten Gase zurückzuführen ist, wodurch schließlich eine Zersprengung des Meteoriten durch Überschreitung der Druckfestigkeit herbeigeführt wird. Jedenfalls aber zeigt die folgende, von G. v. NIESSL¹ gegebene Tabelle der Explosionshöhen, daß die Meteoriten mindestens 20 km tief in die Stickstoffosphäre eingedrungen waren, bevor die Explosion erfolgte.

Explosionshöhen bei Meteoritenfällen.

12. Febr. 1875, Homestead, Nordamerika . .	3.7 km
5. Mai 1869, Krähenberg, Bayern	8.2 „
3. Febr. 1882, Mócs, Siebenbürgen,	
und zwar über Mócs	8.4 „
Gynlatelke	14.4 „
13. Dez. 1807, Weston, Nordamerika . . .	11.1 „

¹ Sitzungsber. d. Wiener Akad. d. Wiss. 89 (1884), 2. Abt., 283.

9. Juni 1866, Knyahinya, Ungarn	11.9 km
13. Juli 1847, Braunau, Böhmen	unter 14.8 „
15. Juli 1878, Tieschitz, Mähren	beiläufig 20.0 „
14. Mai 1864, Orgueil, Frankreich	23.0 „
19. Juni 1876, Ställdalen, Schweden	40.8 „
30. Jan. 1868, Pultusk, Polen	41.5 „
26. Mai 1751, Hraschina, Agram, Kroatien .	46.7 „

Von großer Bedeutung ist die spektroskopische Untersuchung der Meteore, da die Leuchterscheinung ja außer von dem glühenden Kern, der ein kontinuierliches Spektrum gibt, wesentlich von glühender Luft herrührt. PICKERING¹ erhielt mit dem Objektivprisma ein Spektrogramm, welches folgende Linien erkennen ließ (die Intensitäten sind in Klammern beigefügt):

486 (10) = H_{β}
464 (10) = ?
434 (13) = H_{γ}
420 (2) = ?
412 (100) = H_{δ}
395 (40) = H_{ϵ}

Es waren also, der Theorie entsprechend, hauptsächlich die Wasserstofflinien vorhanden.

Zwei andere Spektrogramme erhielt BLAŽKO;² sie zeigen beide eine außerordentlich starke Linie, das eine Mal bei 393, das andere Mal bei 389, welche ich für identisch mit der Stickstofflinie 391 halte, die auch im photographischen Nordlichtspektrum außerordentlich hervortritt. Anscheinend handelte es sich also hier um Meteore, die bereits in die Stickstoffsphäre eingedrungen waren.

Diesem Unterschied in der Höhenlage scheinen auch die Farben zu entsprechen, indem die Sternschnuppen meist eine etwas grünliche Farbe zeigen (wohl von der Wasserstofflinie 486 $\mu\mu$ herrührend), während die großen Feuerkugeln während des letzten, hellsten Teils ihrer Bahn als rot (wohl Stickstofflinie 631 $\mu\mu$; die eben angeführte bei 391 ist nur photographisch wirksam) beschrieben werden, wobei oft ausdrücklich hervorgehoben wird, daß sie anfangs grünlich und wenig leuchtend wie eine Sternschnuppe waren.

Bevor wir zu der letzten, wichtigsten Erscheinung, dem Polar-

¹ *Astrophys. J.* 6 (1897), 461.

² *Astrophys. J.* 26 (1907), 341.

licht, übergehen, ist noch an einige Dinge zu erinnern, die möglicherweise mit der oberen Wasserstoffsphäre in Zusammenhang zu bringen sind. Von Interesse sind hier namentlich die Versuche von COEHN,¹ welche zeigen, daß die ultraviolette Sonnenstrahlung imstande ist, den Wasserdampf zu einem merklichen Prozentsatz zu dissoziieren, womit eine stets wirksame Quelle des Wasserstoffs in der Atmosphäre nachgewiesen ist. Ferner sind noch die Gaseinschlüsse in Meteoriten zu erwähnen, die sich durch Erhitzen derselben austreiben lassen. Namentlich die Eisenmeteoriten enthalten nach COHEN² bedeutende Mengen Wasserstoff, dessen Ursprung noch wenig aufgeklärt ist. Indessen muß wegen der großen Ähnlichkeit, welche diese Meteoritengase mit denen der Kometenschweife besitzen, wohl angenommen werden, daß dieselben nicht erst in der Erdatmosphäre aufgenommen sind, sondern bereits vorher in den Meteoriten enthalten waren.

Gleichfalls nur ganz kurz kann auf die Versuche hingewiesen werden, die Änderung der Zusammensetzung der Luft mit der Höhe direkt durch Analyse von Luftproben zu ermitteln, die mit Hilfe von Ballons herabgebracht sind. Obwohl man innerhalb der Troposphäre wegen der hier herrschenden vertikalen Durchmischung noch keine Änderung in der Zusammensetzung erwarten sollte, scheinen die genauesten Messungen doch auch hier bereits Abweichungen nach der Richtung des Diffusionsgleichgewichtes hin zu ergeben. So hat nach HANN³ die von MILLER ausgeführte Analyse der von WELSH gesammelten Luftproben folgende Werte des Sauerstoffgehaltes gegeben:

Erdoberfläche	20.92 %
4100 m	20.89 %
5500 m	20.75 %
5680 m	20.89 %

Der Ballon l'Aérophile brachte aus ca. 15 $\frac{1}{2}$ km Höhe 6 Liter Luft herab, deren Zusammensetzung nach MÜNTZ folgende war:

O	20.79 %
N	78.27 %
Argon	0.93 %

¹ A. COEHN, Photochemische Vorgänge in Gasen. *Jahrb. d. Radioaktiv. u. Elektronik* 7 (1910), 4, 577.

² COHEN, Meteoritenkunde Heft 1 (Untersuchungen und Charakteristik der Gemengteile), Stuttgart 1894, S. 178.

³ J. HANN, Lehrbuch der Meteorologie, 2. Aufl., Leipzig 1906, S. 8.

Die Werte für O und N am Erdboden sind 20.90 bzw. 78.06.¹ Zu etwas abweichenden Resultaten ist 1908 TEISSERENC DE BORT gekommen,² doch muß wohl erst das definitive Ergebnis seiner inzwischen noch fortgesetzten Versuche abgewartet werden.

Endlich sind die soeben von TETENS veröffentlichten Beobachtungsergebnisse des Aeronautischen Observatoriums zu Lindenberg zu nennen,³ welche auf Anregung des Direktors ASSMANN anlässlich des Durchganges der Erde durch den Schweif des HALLEYSchen Kometen in der Nacht vom 18. bis 19. Mai 1910 gewonnen wurden. Durch Mitwirkung zahlreicher Luftfahrervereine Deutschlands wurden Luftproben in verschiedenen Seehöhen bis zu 8000 m gesammelt, deren Analysen von HUGO ERDMANN, nach dessen Tode von seinem Bruder ERNST ERDMANN ausgeführt wurden. Das Resultat war: „Mit der Höhe der Luftschicht steigt der Gehalt an Helium, Neon und Wasserstoff. Die Gesamtheit dieser drei Gase beträgt in niederster Luftschicht 26.2 cmm und wächst bei 8000 m Seehöhe auf 37.7 cmm pro Liter Luft“. Die schweren Edelgase Krypton und Xenon konnten dagegen nicht nachgewiesen werden. Zu denselben Ergebnissen gelangte HUGO ERDMANN auch durch eine von ihm selber am gleichen Termin ausgeführte Verflüssigung etwa eines Kubikmeters Luft in 4000—4500 m Höhe (l. c.). Es scheint hieraus hervorzugehen, daß auch schon in der Troposphäre trotz der hier vorhandenen vertikalen Mischungen der Luft ihre Zusammensetzung nicht konstant ist, sondern sich den Gasgesetzen entsprechend mit der Höhe ändert.

Die größte und wichtigste Gruppe von Erscheinungen, denen der Hauptteil meiner oben genannten Arbeit gewidmet ist, bilden aber die Polarlichter. Die von BIRKELAND gegebene und von STÖRMER zu einer detaillierten Theorie entwickelte Erklärung für dies seit alters her problematische Phänomen ist erst vor so kurzer Zeit aufgestellt worden, daß sie gegenwärtig noch keineswegs überall als bekannt betrachtet werden darf.⁴ Deshalb müssen wir, wenn

¹ Bei Diffusionsgleichgewicht nimmt der Gehalt an N noch bis 40 km Höhe zu, derjenige an O fortgesetzt ab; vgl. weiter unten.

² *Compt. rend.* 147 (1908), 219.

³ TETENS, Aerologische Beobachtungen während des am 18./19. Mai 1910 erwarteten Durchganges der Erde durch den Schweif des HALLEYSchen Kometen, *Ergebn. d. kgl. Aeronaut. Obs. Lindenberg* 1911.

⁴ TRABERTS 1911 erschienenes Lehrbuch der kosmischen Physik kennt sie z. B. noch nicht. Vgl. dagegen z. B. NIPPOLDTS Referat über BIRKELANDS gleich zu nennendes großes Expeditionswerk, *Beitr. z. Geophysik* 10, Heft 2.

auch nur ganz kurz, dabei verweilen. Bereits ÅNGSTRÖM und PAULSEN vermuteten, daß das Polarlicht auf Kathodenstrahlen zurückzuführen sei, welche in der Atmosphäre absorbiert würden und dabei diese zum Leuchten erregen. BIRKELAND war aber der erste, welcher die Vermutung aussprach, daß diese Strahlen von der Sonne ausgesandt würden. Bekanntlich bestehen solche Kathodenstrahlen aus kleinsten, elektrisch geladenen Teilchen, den sogen. Elektronen, welche mit außerordentlicher Geschwindigkeit von der Kathode in der CROOKSchen Röhre abgeschleudert werden. Auch weißglühende Körper entsenden freiwillig Kathodenstrahlen, und dies scheint bei der Sonne zuzutreffen. Freilich werden diese Kathodenstrahlen in den meisten Fällen von der Sonnenatmosphäre selber absorbiert und also zurückgehalten, aber in den Fällen, wo die glühenden Massen besonders weit emporsteigen, in den als „Fackeln“ bezeichneten hellen Gebieten, vermögen sie anscheinend zuzeiten diese Schwierigkeit zu überwinden und frei in den Weltenraum hinauszueilen. Nun gibt es bekanntlich auch noch andere materielle Strahlen ähnlicher Art. Z. B. bestehen auch die sogen. β -Strahlen des Radiums ebenso wie die Kathodenstrahlen aus winzigen, negativ elektrischen Partikeln, nur ist die Geschwindigkeit, mit der sie abgeschleudert werden, noch viel größer als bei jenen (sie kann nahe an die Lichtgeschwindigkeit herankommen). Auch die α -Strahlen des Radiums stellen ähnliche, außerordentlich schnell bewegte materielle Partikel dar, doch ist ihre elektrische Ladung positiv. Es darf aber keineswegs als ausgeschlossen gelten, daß es noch andere Strahlen gleicher Art gibt, die wir bisher noch nicht haben erzeugen können, und die vielleicht gerade beim Polarlicht die Hauptrolle spielen. Vor allem ist wohl anzunehmen, daß es sich hier nicht nur um eine einzelne Strahlenart handelt, sondern daß sämtliche oder doch wenigstens verschiedene derartige Strahlengattungen in Frage kommen. Dies darf man nicht aus dem Auge verlieren, wenn wir im folgenden der Kürze halber nur von Kathodenstrahlen sprechen.

Durch eine Reihe interessanter Versuche machte BIRKELAND seine Hypothese glaubhaft.¹ Er brachte in einer großen CROOKSchen Röhre einen kugelförmigen Elektromagneten an, der die Erde

¹ BIRKELAND, Expédition norvégienne 1899—1900 pour l'étude des aurores boréales. Videnskabs Selskabets Skrifter, Christiania 1902, S. 39 u. 74; ferner in seinem großen Werk: The Norwegian Aurora Polaris Expedition 1902 bis 1903 (1909), siehe auch: Orages magnétiques et aurores polaires. *Arch. d. scienc. phys. et nat.* 31, Genève 1911.

repräsentierte, und exponierte diesen den Kathodenstrahlen. Die Kugel war mit Platinbariumcyanür überzogen, welches bekanntlich an den Stellen, wo es von Kathodenstrahlen getroffen wird, aufleuchtet. Er erhielt hiermit Erscheinungen, die dem Polarlicht ganz entsprachen.

Die entscheidenden Berechnungen, welche meines Erachtens alle Zweifel an der Richtigkeit dieser Hypothese beseitigen, verdanken wir indessen STÖRMER. In einer langen Reihe von Abhandlungen¹ führte dieser die sehr mühsame numerische Auswertung des Strahlenganges für eine große Anzahl von Fällen aus und konnte so zeigen, daß sich alle charakteristischen Erscheinungen des Polarlichts vollständig erklären lassen. Auf die Berechnungen im einzelnen einzugehen, würde hier zu weit führen; es sei nur erwähnt, daß sich die Differentialgleichungen für die Bewegung der Elektronen nicht streng integrieren lassen, so daß man nicht die Gleichung ihrer Bahnkurve hinschreiben kann. Man kommt aber wie in vielen anderen Fällen so auch hier zum Ziel durch die numerische Integration. Um die erhaltenen räumlichen Bahnen zu Anschauung zu bringen, hat STÖRMER eine große Zahl von Drahtmodellen konstruiert, die er zum Teil in Stereoskopaufnahmen in seinen Abhandlungen reproduziert. Nur ein kleiner Teil der Strahlen trifft die Erde selbst und erzeugt das Polarlicht. Die anderen umkreisen die Erde in der Äquatorebene und stellen in ihrer Gesamtheit einen erheblichen elektrischen Strom dar, dessen gelegentliches Anschwellen magnetische

¹ C. STÖRMER, Sur le mouvement d'un point matériel portant une charge d'électricité sous l'action d'un aimant élémentaire. Vid. Selsk. Skrifter, Christiania 1904; ferner *Compt. rend.* 1906, 25 juin, 9 juillet, 10 septembre, 1 octobre; derselbe: Sur les trajectoires des corpuscules électrisés dans l'espace sous l'action du magnétisme terrestre avec application aux aurores boréales. *Arch. d. scienc. phys. et nat.*, Genève 1907 (Hauptabhandlung); derselbe: Les équations explicites de la trajectoire d'un corpuscule électrique dans le champ d'un seul pôle magnétique. Vid. Selsk. Skrifter, Christiania 1909; derselbe: Sur les trajectoires etc. (Titel wie oben). Atti del IV Congresso Internazionale dei Matematici, Roma 1909; derselbe: On the trajectories of electric corpuscles in space under the influence of terrestrial magnetism, applied to the aurora borealis and to magnetic disturbances. *Arch. for Math. og Naturvidenskab* 28, p. 2; ferner *Compt. rend.* 24 octobre 1910, sowie: Sur une classe de trajectoires remarquables dans le mouvement d'un corpuscule électrique dans le champ d'un aimant élémentaire. *Arch. for Math. og Naturvidenskab* 31 (1911), 11; eine populäre Darstellung in deutscher Sprache gibt STÖRMER in *Das Weltall* 9 (1909), 9 u. 10, sowie der Verfasser in: Neuere Forschungen auf dem Gebiete der atmosphärischen Physik, im 3. Band von ABDERHALDENS Fortschritte der naturw. Forschung (1911).

Störungen verursacht und die Zone der Polarlichter in niedrigere geographische Breiten herabzieht, so daß hier an ungewohnten Orten Polarlichter gesehen werden. Auch diejenigen Strahlen, welche in immer engeren Spiralwindungen um die Kraftlinien des Erdmagnetismus herum sich der Erde so weit nähern, daß sie in die Atmosphäre eintreten, haben stets einen Umkehrpunkt, nach dessen Überschreitung sie sich in einer analogen Kurve wieder entfernen, doch kann dieser theoretische Umkehrpunkt schließlich im Mittelpunkt der Erde zu liegen kommen. Hieran habe ich die Vermutung geknüpft, daß der charakteristische Unterschied der beiden Hauptklassen von Polarlichtern, nämlich derjenigen strahliger Struktur und der sogen. homogenen Bögen, darauf beruht, daß letztere aus solchen umkehrenden Strahlen gebildet werden, während bei den ersteren der Umkehrpunkt unterhalb der Höhe zu denken ist, wo alles absorbiert wird.¹ Bekanntlich müssen Crooksche Röhren auf weniger als 0.1 mm Quecksilberdruck evakuiert werden, um noch Kathodenstrahlen zu zeigen; bei höherem Druck wird das Gas ganz undurchlässig für sie. Dementsprechend muß auch in der Atmosphäre die Lichtentfaltung in einer Höhe plötzlich aufhören, die diesem Luftdruck entspricht (ca. 60 km). LENARD² wies darauf hin, daß sich hierdurch der scharfe Unterrand der Draperien erklären lasse, der in der Tat besonders häufig etwa in dieser Höhe gefunden worden ist; doch zeigt das Vorkommen auch noch bei Höhen von 40 km, daß, wie schon erwähnt, auch noch schnellere Strahlen als Kathodenstrahlen am Polarlicht beteiligt sein müssen.

Von noch größerer Wichtigkeit ist eine zweite Abhandlung von LENARD,³ welche einen neuen, ganz unabhängigen Beweis für das Vorhandensein sehr leichter Gase in den höchsten Atmosphärenschichten erbringt. Ausgehend von experimentellen Studien über die Druckgrenzen, welche sich für teilweise und totale Absorption der Kathodenstrahlen ergeben, zeigt LENARD, daß sich für konstante Zusammensetzung der Luft, also nach der gewöhnlichen barometrischen Höhenformel, z. B. für 370 km Höhe ein Wert des Luftdruckes ergibt, bei dem unmöglich auch nur die geringste Spur von Absorption bemerkbar sein, also auch keine Lichterscheinung auf-

¹ Thermodynamik der Atmosphäre, Leipzig 1911, S. 11.

² LENARD, Über die Strahlen der Nordlichter, Sitzungsber. d. Heidelberger Akad. d. Wiss. 1910, 17. Abhandl.

³ LENARD, Über die Absorption der Nordlichtstrahlen in der Erdatmosphäre, Sitzungsber. d. Heidelberger Akad. d. Wiss. 1911, 12. Abhandl.

treten kann. Ändert sich dagegen die Zusammensetzung im Sinne der eingangs erwähnten Berechnung von HANN nach den Gasgesetzen, so resultiert für die großen Höhen ein erheblich höherer Luftdruck, der zur Erklärung der Absorption wahrscheinlich genügt. LENARD schließt: „Es kann also die Beobachtung von Nordlicht in Höhen über 300 km als ein besonderer Nachweis der Anhäufung leichtester Gase in diesen obersten Schichten der Atmosphäre angesehen werden“. Diese Höhen sind nun in der Tat vor kurzem unter den 150 photogrammetrischen Höhenmessungen STÖRMERS¹ vertreten, wenn auch der weitaus größte Teil zwischen 40 und 200 km zu liegen kommt (Extreme: 37 und 370 km). Während allen früheren Messungen durch Okularbeobachtung wegen der Schwierigkeit des Identifizierens gleicher Punkte von den zwei Stationen aus eine große Unsicherheit anhaftet, ist es STÖRMER gelungen, die von BASCHIN und BRENDL zuerst versuchte Photographie so zu vervollkommen, daß er sie zur photogrammetrischen Höhenmessung verwenden konnte, und auf diese Weise zum ersten Male ein einwandfreies Beobachtungsmaterial zu liefern.

Dasjenige Kapitel aber, welches die meisten Aufschlüsse über die Natur der obersten Atmosphärenschichten zu geben vermag, und in welches andererseits durch die vorliegenden Untersuchungen am meisten Licht gebracht wird, ist das des Polarlichtspektrums. Schon im Jahre 1906 hat W. FÖRSTER darauf hingewiesen, daß durch gleichzeitige Höhenmessung und spektroskopische Untersuchung des Polarlichts eine Änderung in der Zusammensetzung der Luft mit der Höhe erkannt werden könnte.² In meiner oben genannten Arbeit habe ich nun einen ersten, sicherlich noch sehr unvollkommenen Versuch gemacht, die vorliegenden Betrachtungen in die Deutung des Polarlichtspektrums einzuführen, und ich glaube, daß dadurch zum ersten Male die Möglichkeit gegeben wird, in das bisher nicht zu entwirrende Chaos der widerstreitendsten Beobachtungen und Meinungen Ordnung zu bringen. Es geht ohne weiteres aus den Messungen STÖRMERS hervor, daß die Polarlichter

¹ Methode siehe C. STÖRMER, Photographies des aurores boréales et nouvelle méthode pour mesurer leur altitude, *Compt. rend.* 1910, 13 juin; Zusammenfassung der Resultate: C. STÖRMER, Résultats des mesures photogrammétriques de l'altitude de l'aurore boréale à Bosekop aux mois de février et de mars 1910, *Compt. rend.* 1911, 1 mai; die ausführliche Publikation erscheint in den Schriften der Gesellschaft d. Wiss. in Christiania.

² In der sehr lesenswerten populären Schrift: Von der Erdatmosphäre zum Himmelsraume. Berlin und Leipzig 1906.

sowohl in der hypothetischen Geocoroniumsphäre, wie in der Wasserstoffsphäre und der des Stickstoffs auftreten können, und vielfach werden die Strahlen von der einen in die andere Sphäre hineinreichen, so daß eine außerordentliche Mannigfaltigkeit von vornherein zu erwarten ist.

Im hellsten, untersten Teil der Draperien treten die Stickstofflinien in den Vordergrund, namentlich im photographischen Spektrum, da sie hauptsächlich am violetten Ende des Spektrums liegen. Hierher gehören die starken Linien 631, 530, 471 und 428 $\mu\mu$. Die letztere, und namentlich die bereits unsichtbare, aber photographisch sehr intensive Linie 391 wurden bereits von WESTMANN, PAULSEN u. a. photographiert. Den Arbeiten des letzteren ist es zu verdanken, daß die Stickstofflinien als einwandfrei nachgewiesen betrachtet werden können.¹

Für die Wasserstofflinien sind wir auf die Okularbeobachtungen angewiesen, da sie zu den weniger hellen Linien zählen und deshalb im photographischen Spektrum nicht mehr abgebildet werden. Auch sie sind in den Beobachtungen deutlich zu erkennen. Die folgende Tabelle gibt die umfangreichste derartige Messungsreihe, nämlich diejenige von CARLHEIM-GYLLENSKJÖLD.² Die Beobachtungen wurden mit zwei verschiedenen Spektroskopen ausgeführt. Die Anzahl der Fälle, in denen eine bestimmte Linie beobachtet wurde, kann hierbei als Maß für die Intensität gelten.

Am deutlichsten ausgeprägt ist die Linie H_β (486). Bei der Aufzählung sämtlicher Okularbeobachtungen, welche H. KAYSER in seinem Handbuch der Spektroskopie Bd. V (Leipzig 1910, S. 47) gibt, ist sie in 41 Beobachtungsreihen 15 mal vertreten. Gerade diese Linie soll aber nach FRANKLAND und LOCKYER bei so niedrigen Drucken, wie sie hier in Frage kommen, die größte Helligkeit unter den Wasserstofflinien besitzen. Daher kann das Wasserstoffspektrum wohl im Gesamtspektrum des Polarlichts als nachgewiesen gelten.

Von großem Interesse ist auch die folgende Zusammenstellung bei CARLHEIM-GYLLENSKJÖLD, nach welcher sich der Fuß der

¹ Von besonderem Interesse ist das zeitweilige Auftreten der genannten Linie 631, welches stets mit auffälliger Rotfärbung der Strahlen verbunden ist (VOGEL). Während nämlich die meisten übrigen Linien dem Kathodenspektrum angehören, ist 631 die Hauptlinie des Anodenspektrums des Stickstoffs.

² Observations faites au Cap Thordsen, Spitzberg, par l'Expédition Suédoise (Internationale Polarforschung 1882—1883), Tome II, 1, Aurores Boréales Stockholm 1886.

Spektroskop I		Spektroskop II	
Well.-Länge	Zahl d. Beob.	Well.-Länge	Zahl d. Beob.
657	1		 $H\alpha$
645	1		
631	11		
612	7		
604	4		
594	3	595	1
578	14	575	1
566	12		
557	19	558	1 (Hauptlinie)
554	3		
551	8	547	5
548	6		
545	3		
541	5	541	7
538	6		
535	9	535	9
530	8		
526	9	530	16
523	14	524	13
518	5		
515	6	513	5
504	2	505	5
500	1	500	3
		493	7
487	1	484	6 . . . $H\beta$
480	2		
470	1	471	16
464	1	464	8
		458	3
		{445}	3
		{424}	2} . . . ($H\gamma$)
		411	2 . . . $H\delta$

Strahlen von den oberen Partien derselben spektroskopisch unterscheidet:

Spektrum	Zahl der Linien	
	im Gipfel der Strahlen	im Fuß der Strahlen
Luftspektrum	9	8
Spektrum des Stickstoffs aus der Anode .	2	4
„ „ „ „ „ Kathode	10	14
„ „ „ Wasserstoffs	3	1
Unbekannt	8	4

Während also die Zahl (und damit die Intensität) der Stickstofflinien mit wachsender Höhe abnimmt, nimmt diejenige der Wasserstofflinien zu, genau wie es nach der Theorie sein sollte. Auch die unbekannten Linien nehmen mit der Höhe zu.

Von der größten Bedeutung aber sind die Resultate, welche sich für die Hauptlinie des ganzen Spektrums, die sogen. Polarlichtlinie ($557\text{ }\mu\mu$) ergeben, die nach der oben genannten Hypothese dem Geocoronium angehört. In dieser Hinsicht verdient die als homogene Bögen bezeichnete Klasse der Polarlichter, welche keine strahlige Struktur erkennen lassen, eine eingehende Untersuchung. Diese Bögen, die sich durch große Ruhe auszeichnen, liegen offenbar in viel größeren Höhen als die Draperien, und sind anscheinend von STÖRMER nicht mitgemessen worden. PAULSEN hat in Gemeinschaft mit LA COUR während einer Überwinterung in Akureyri auf Island einen Versuch gemacht, die Höhe dieser homogenen Bögen trigonometrisch durch Okularbeobachtung zu bestimmen; es ergab sich, daß man „auch bei Zulassung von Einstellungsfehlern, die sicher nicht zu klein sind, dieser Art des Polarlichts mindestens Höhen von 400—500 km über dem Erdboden zuerkennen muß“.¹ Das Spektrum dieser Bögen ist bisher noch niemals Gegenstand einer gesonderten Behandlung gewesen. Indessen geht aus LA COURs Beobachtungen² deutlich hervor, daß es im wesentlichen nur aus der einen Linie bei $557\text{ }\mu\mu$, eben der „Polarlichtlinie“, besteht. Auch die sorgfältigen Beobachtungen von CARLHEIM-GYLLENSKJÖLD zeigen, wie ich nachweisen konnte, dieses Gesetz auf das Deutlichste. Damit ist aber erwiesen, daß die Entstehung dieser Polarlichtlinie gerade in den obersten Schichten der Atmosphäre zu suchen ist. Aus diesem Grunde muß z. B. auch die Hypothese von HUGGINS, RAMSAY, SCHUSTER u. a.³ abgelehnt werden, daß diese Linie mit der Hauptlinie des Kryptons identisch sei, mit der sie allerdings innerhalb der Fehlergrenze zusammenfällt. Denn das Krypton muß ja vermöge seines außerordentlich hohen spezifischen Gewichts auf die allerunterste Schicht der Atmosphäre beschränkt sein.

Die Vermutung, daß die Polarlichtlinie auf ein unbekanntes, sehr leichtes Gas zurückzuführen sei, ist bereits von SCHEINER aus-

¹ A. PAULSEN, Sur les récentes théories de l'aurore polaire. *Bull. de l'Académie R. des Sciences de Danmark* 2 (1906), 132.

² Nach freundlicher brieflicher Mitteilung desselben.

³ Vgl. W. RAMSAY, Die Gase der Atmosphäre und die Geschichte ihrer Entdeckung. Deutsch von HUTN, Halle 1907, S. 146.

gesprochen worden.¹ Eine besondere Stütze findet diese Hypothese in den Spekulationen, welche MENDELEJEFF an das von ihm aufgestellte periodische System der Elemente knüpft. Er kommt dabei nämlich zu dem Schluß, es müsse noch ein Gas geben, das leichter als Wasserstoff ist, etwa von dem Atomgewicht (einatomig) 0.4.² Bei der glücklichen Hand, welche dieser Forscher namentlich bei dem auf gleiche Weise vorausgesagten Element Germanium bewiesen hat, erscheint diese Hypothese sehr beachtenswert.

Um nun wenigstens eine erste, orientierende Berechnung der Zusammensetzung der Luft in den verschiedenen Höhen zu ermöglichen, habe ich diesen MENDELEJEFFSchen Wert für das Molekulargewicht angenommen, und außerdem die Annahme gemacht, daß das neue Gas von ca. 200 km Höhe ab der vorherrschende Bestandteil der Atmosphäre wird, so daß sein Partialdruck in der angegebenen Höhe gerade gleich dem des Wasserstoffs ist. Diese letztere Annahme wird einmal durch die Dämmerungsbeobachtungen von SEE, die bei 214 km Höhe eine neue Schichtgrenze vermuten lassen, und andererseits auch durch die Erscheinung der Sternschnuppen nahegelegt, deren Aufglühen unterhalb 200 km erfolgt.

Nimmt man mit diesen Annahmen das Geocoronium bei der Berechnung mit, so erhält man unter Zugrundelegung der in der ersten der beiden folgenden Tabellen gegebenen Ausgangswerte am Erdboden eine Zusammensetzung in den verschiedenen Höhen, wie sie in der zweiten Tabelle angegeben ist und durch die auf Seite 129 folgende Figur erläutert wird.

Will man aus der Figur die Zusammensetzung in einer bestimmten Höhe entnehmen, so legt man durch dieselbe eine Horizontale; die auf die verschiedenen Felder entfallenden Abschnitte stellen dann die Volumprocente der betreffenden Gase dar.

Die Zahlenwerte haben natürlich unter den obwaltenden Umständen lediglich orientierenden Wert. Doch ist leicht ersichtlich, daß selbst starke Fehler in den Ausgangswerten das Bild als Ganzes nicht zu ändern vermögen. Speziell ist die Langsamkeit der zweiten Hauptänderung, des Übergangs vom Wasserstoff zum Geokoronium, ein Ergebnis, das ganz unabhängig von unseren vielleicht wenig zutreffenden numerischen Annahmen ist; denn es ist wesentlich dadurch bedingt, daß das spezifische Gewicht des Wasserstoffs bereits

¹ Spektralanalyse der Gestirne. Leipzig 1890, S. 341.

² *Chem. Centrbl.* 1904, I, 137; *Prometheus* 15 (1903), Nr. 735—738.

Zusammensetzung der Luft am Erdboden.

	Mol.-Gew.	Volumprocente
Geokoronium (eiatomig) . . .	ca. 0.4	ca. 0.00058 (hypothetisch)
Wasserstoff H_2	2.02	0.0033 (GAUTIER-RAYLEIGH)
Helium He	4.0	0.0005 (CLAUDE)
Wasser H_2O	18.02	variabel 0—4
Neon Ne.	20.0	0.0015 (CLAUDE)
Stickstoff N_2	28.02	78.06 (LEDUC)
Sauerstoff O_2	32.00	20.90
Argon Ar	39.9	0.937
Kohlensäure CO_2	44.0	0.029 (var.)
Ozon O_3	48.0	Spuren (THIERRY)
Krypton Kr	83.0	ca. 0.0001
Xenon X	130.7	ca. 0.000005

Zusammensetzung der Luft in der Höhe (in Volumprozenten).

Höhe km	Luftdruck mm	(Geo- koronium)	Wasser- stoff	Helium	Stick- stoff	Sauer- stoff	Argon
0	760	0.00058	0.0033	0.0005	78.1	20.9	0.937
20	41.7	0	0	0	85	15	0
40	1.92	0	1	0	88	10	—
60	0.106	5	12	1	77	6	
80	0.0192	19	55	4	21	1	
100	0.0128	29	67	4	1	0	
120	0.0106	32	65	3	0	—	
140	0.00900	36	62	2	—		
200	0.00581	50	50	1			
300	0.00329	71	29	—			
400	0.00220	85	15				
500	0.00162	93	7				

einen so geringen Wert hat. Daraus erklären sich aber gerade manche Einzelheiten des Polarlichtspektrums. Da jetzt gar keine reine Wasserstoffsphäre mehr vorhanden ist, so wird es sehr plausibel, daß die Wasserstofflinien im Spektrum verhältnismäßig wenig deutlich sind. Und da das Geokoronium erst unterhalb 60 km Höhe verschwindet, so erklärt sich damit, daß selten oder nie ein Polarlicht beobachtet wird, welches die Hauptlinie nicht zeigt.

Zum Schluß sei noch kurz der aus dem Vorangegangenen sich ergebenden kosmischen Beziehungen gedacht, wenn es sich dabei auch mehr um Ausblicke handelt als um Resultate, denen man be-

reits Realität zusprechen könnte. Schon früher war auf die nunmehr stattfindende Analogie zur Sonnenatmosphäre hingewiesen worden. Auch bei ihr sehen wir oberhalb einer beiderseits scharf begrenzten Wasserstoffzone ein anderes, offenbar leichteres Gas, das Coronium, dessen sehr ausgedehnter Bereich, die Corona, nur bei totalen Sonnenfinsternissen sichtbar wird. Auch bei diesem Gase ist die Trägheit außerordentlich gering, denn bekanntlich sind die Kometen 1680, 1843 I, 1880 I, 1882 II und 1887 I durch die Corona hindurchgegangen, ohne daß sich ein Widerstand nachweisen ließ, ebenso wie die Sternschnuppen ohne Widerstand das Geocoronium durchdringen und erst im Wasserstoff aufleuchten.

Wegen dieser vollkommenen Analogie ist es naheliegend, das unbekannte irdische Gas mit dem gleichfalls unbekannten Element der Sonnencorona zu identifizieren. Der Hinblick auf diese Möglichkeit war auch ausschlaggebend bei der Wahl des provisorischen Namens „Geocoronium“. Einstweilen stößt diese Identifizierung noch auf Schwierigkeiten, da die Spektren verschieden sind. Das Coronium der Sonne ist durch eine grüne Linie bei 532 charakterisiert, während die Polarlichtlinie bei 557 μ liegt. Berücksichtigt man aber, daß alle Elemente über mehrere, oft viele verschiedene Spektren verfügen, welche je nach den Versuchsbedingungen aus unbekannten Ursachen miteinander abwechseln, daß speziell Bogenspektrum, Funkenspektrum, Flammenspektrum und das Spektrum in der GEISSLER-Röhre im allgemeinen verschieden voneinander sind, so darf man offenbar aus diesem Unterschied der Spektren noch nicht schließen, daß auch die Gase verschieden sind, zumal wenn man beachtet, daß es sich beim Polarlicht offenbar um elektrisches Glühen, in der Sonnencorona aber wohl um Temperaturglühen handelt. Die vollkommen parallele Art des Auftretens in der Sonnen- und Erdatmosphäre, sowie das ihnen zuzuschreibende außer-

Mutmaßliche Zusammensetzung der oberen Luftschichten.

Der Hinblick auf diese Möglichkeit war auch ausschlaggebend bei der Wahl des provisorischen Namens „Geocoronium“. Einstweilen stößt diese Identifizierung noch auf Schwierigkeiten, da die Spektren verschieden sind. Das Coronium der Sonne ist durch eine grüne Linie bei 532 charakterisiert, während die Polarlichtlinie bei 557 μ liegt. Berücksichtigt man aber, daß alle Elemente über mehrere, oft viele verschiedene Spektren verfügen, welche je nach den Versuchsbedingungen aus unbekannten Ursachen miteinander abwechseln, daß speziell Bogenspektrum, Funkenspektrum, Flammenspektrum und das Spektrum in der GEISSLER-Röhre im allgemeinen verschieden voneinander sind, so darf man offenbar aus diesem Unterschied der Spektren noch nicht schließen, daß auch die Gase verschieden sind, zumal wenn man beachtet, daß es sich beim Polarlicht offenbar um elektrisches Glühen, in der Sonnencorona aber wohl um Temperaturglühen handelt. Die vollkommen parallele Art des Auftretens in der Sonnen- und Erdatmosphäre, sowie das ihnen zuzuschreibende außer-

ordentlich geringe spezifische Gewicht scheinen dagegen schwerwiegende Argumente für die Identität zu bilden.

Die Annahme liegt außerordentlich nahe, daß auch diese letzte Schicht der Erdatmosphäre, das Geocoronium, noch einen Dämmerungsbogen verursacht, und daß dieser Dämmerungsbogen mit dem wesentlichsten Teil des Zodiakallichtes identisch ist.¹ Die charakteristische Pyramidenform, in welcher dies erscheint, würde die Annahme nötig machen, daß die Massenverteilung in der Sphäre des Geocoroniums bereits Unregelmäßigkeiten unterliegt; doch gerade dies führt zu einer neuen Analogie mit der Sonnenatmosphäre, da ja auch die Sonnencorona eine sehr eigenartige, noch unerklärte Massenverteilung zeigt.

Dies gilt zunächst allerdings nur für die Haupterscheinung. Um auch die schwache Lichtbrücke, die sich über den ganzen Himmel zieht, sowie die Lichtverstärkung im Gegenpunkt der Sonne (den „Gegenschein“) zu erklären, müßte man annehmen, daß der interplanetarische Raum mit diesem leichtesten Gase in höchster Verdünnung angefüllt wäre, und man käme — die Identität des Coroniums mit dem Geocoronium vorausgesetzt — auf diese Weise dazu, die Gesamterscheinung auf eine zur Sonne gehörige, den ganzen Raum des Planetensystems erfüllende Coroniumatmosphäre zurückzuführen, von welcher die Sonnencorona und die Geocoroniumsphäre nur lokale Verdichtungen darstellen.

Es muß dabei dahingestellt bleiben, ein wie großer Teil der Lichtreflexion auf die Beleuchtung kleinster, in diesem Raume verstreuter fester Massenteilchen zurückzuführen ist, denen SEELIGER sogar die Hauptrolle zuteilt.²

Es sind indessen neuerdings namentlich von BIRKELAND³ sehr beachtenswerte Versuche gemacht worden, das Zodiakallicht auf die Kathodenstrahlung der Sonne zurückzuführen, in ähnlicher Weise, wie STÖRMER auch seine Theorie zur Erklärung der Struktur der Sonnencorona verwenden will.⁴ Über diese Fragen können wohl

¹ Zu diesem Resultat kommt namentlich F. SCHMID, Neue Beobachtungen über das Zodiakallicht. *Beitr. z. Geophysik* 11 (1911), 1, 112—131: vgl. auch ebendort 9 (1908), 113.

² Über kosmische Staubmassen und das Zodiakallicht. Sitz.-Ber. München 31, 265; SEELIGERS Schüler K. SCHWEND vertritt dieselbe Ansicht in seiner Arbeit: Zur Zodiakallichtfrage (Inaug.-Diss. München 1904), welche viel Literatur enthält.

³ BIRKELAND, Sur la lumière zodiacale. *Compt. rend.* 6 février 1911.

⁴ STÖRMER, Sur la structure de la couronne du soleil. *Ibidem* 20 février

gegenwärtig die Akten noch nicht geschlossen werden, doch gewinnt die früher von RESPIGHI, VOGEL und WRIGHT gemachte Beobachtung, daß bisweilen im Spektrum des Zodiakallichts auch die Nordlichtlinie auftritt, nunmehr an Bedeutung. Auch die von BRENDL und WIECHERT gemachte Wahrnehmung, daß die Nordlichtlinie mitunter überall am Nachthimmel zu beobachten ist, gehört hierher.

Bei einer konsequenten Durchführung dieser Gedanken wird man zu einer sehr weittragenden Anwendung hingeleitet, für welche bereits ZÖLLNER und ROGOWSKI, freilich ausgehend von den unvollkommenen älteren Ansichten, die ersten Anfänge geliefert haben; es ergibt sich nämlich die Frage, ob nicht die Atmosphären der verschiedenen Himmelskörper in unserem Sonnensystem untereinander nach den Gasgesetzen im Gleichgewicht sind. Man könnte sie als lokale Verdichtungen einer das ganze Sonnensystem umspannenden Sonnenatmosphäre auffassen, so daß Druck und Zusammensetzung an jeder Planetenoberfläche eine einfache Funktion des Sonnenabstandes und der Schwerkraft des Planeten wären. Natürlich könnte dieser Satz nur für solche Gase gelten, die weder verbraucht noch erzeugt werden. Da diese Bedingung streng wohl nirgends zutrifft, so wird man auch nur eine näherungsweise Gültigkeit des Satzes erwarten.

Eine Behandlung dieser Frage würde uns hier aber allzuweit von unserer Aufgabe entfernen.

1911 und: *La structure de la couronne du soleil dans la théorie d'Arrhenius.*
Ibidem 6 mars 1911.

Marburg, Physikalisches Institut der Universität.

Bei der Redaktion eingegangen am 15. März 1912.