

# Geocoronium - Geokorona

Von A. R o s s b a c h , Oberpfaffenhofen \*)

**Zusammenfassung:** In Überlegungen zur Natur der obersten Atmosphärenschichten hat A. Wegener ein hypothetisches Gas eingeführt, dem er den Namen „Geocoronium“ gab. Nach seiner Vorstellung sollte dieses Gas den gesamten interplanetaren Raum ausfüllen. Es sollte leichter sein als Wasserstoff und die äußere Erdatmosphäre mit der Sonnenkorona kontinuierlich verbinden. Aus dem Begriff des Geocoroniums hat sich die heutige Vorstellung über die Geokorona entwickelt. Die Geokorona-Modelle, ihre Zusammensetzung, ihr Aufbau und Einfluß auf die Hochatmosphäre werden beschrieben. Die neuen Ergebnisse von Satellitenmessungen über die Wasserstoffverteilung werden diskutiert.

**Summary:**

In his work concerning the nature of the upper atmosphere A. Wegener proposed a hypothetical gas to be termed as „Geocoronium“. Following his conception this gas should fill completely the interplanetary space. It should be lighter than hydrogen, connecting the outer part of the earth's atmosphere with the sun-corona. Out of this definition given at that time our knowledge about the nature of the geocorona has developed. The geocorona models, their complexity and structure as well as their influence on the formation of the upper atmosphere will be described. Some of the late satellite measurements concerning the hydrogen distribution will be discussed.

## 1. Historischer Überblick

In der „Thermodynamik der Atmosphäre“ schreibt A. Wegener (1911) in einem Abschnitt über die Zusammensetzung der Luft in großen Höhen im Zusammenhang mit Betrachtungen zur Wasserstoffosphäre:

„In einer neueren Arbeit, welche zugleich einen Überblick über den ganzen Gegenstand gibt, habe ich endlich, namentlich auf Grund der Polarlichterscheinungen, die Hypothese aufgestellt, daß an der Zusammensetzung der höchsten Luftschichten außer Wasserstoff noch ein anderes unbekanntes Gas beteiligt ist, für welches ich den Namen „Geocoronium“ vorgeschlagen habe (A. Wegener 1911); dies Gas, welches etwa von 200 km ab, freilich ohne scharfe Grenze, die Oberhand gewinnt, und also leichter ist als Wasserstoff, erzeugt die grüne Linie im Spektrum des Polarlichts und ist trotz der Verschiedenheit der Spektren wahrscheinlich mit dem Coronium der Sonnenkorona identisch. Auch ist es nicht unwahrscheinlich, daß es das von Mendelejeff vorausgesagte Gas vom Atomgewicht 0,4 repräsentiert. Den interplanetarischen Weltraum hat man sich mit diesem Gase in entsprechender Verdünnung erfüllt zu denken, so daß die Sonnenkorona mit der Sphäre des Geocoronium kontinuierlich verbunden ist“.

Berücksichtigt man die zu dieser Zeit noch sehr unvollständige Kenntnis des Atombaus und der Emission von Spektrallinien, so erscheinen diese Schlußfolgerungen verständlich. Immerhin konnte erst 12 Jahre später, nachdem Wegener diese Zeilen schrieb, die grüne Polarlichtlinie einem verbotenen Übergang der Emission von atomarem Sauerstoff zugeordnet werden. Einige seiner Gedanken, mehr qualitativer Art, über die Natur der obersten Atmosphärenschichten haben auch heute noch Gültigkeit. Aus den Folgerungen des Dalton'schen Gesetzes ergab sich, daß bei Abwesenheit einer Durchmischung die verschiedenen atmosphärischen Bestandteile unabhängig voneinander verteilt sein müssen. Das leichteste Gas muß dann konsequenterweise von einer bestimmten Höhe ab den Raum erfüllen und die Erde in Analogie zur Sonne wie eine Korona umgeben. Diese Überlegungen mögen wohl Wegener dazu veranlaßt haben, den Begriff „Geocoronium“ für die obersten Atmosphärenschichten einzuführen. Das von Mendelejeff geforderte Gas mit dem Atomgewicht 0,4 wurde bald darauf als nicht haltbar aufgegeben. Die grundlegenden Arbeiten auf dem Gebiet der kinetischen Gastheorie (Hum-

\*) Dr. A. Rossbach, Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Physik der Atmosphäre, 8031 Oberpfaffenhofen

phreys 1920, Jeans 1925) ließen erkennen, daß der Wasserstoff der Hauptbestandteil der höchsten Schichten der Erdatmosphäre sein mußte. Die Entdeckung der OH-Strahlung im Nachthimmelsleuchten (Meinel 1950) gab den ersten Hinweis, daß atomarer und nicht molekularer Wasserstoff vorhanden ist. Bei der Untersuchung dieser OH-Strahlung erkannten Bates und Nicolet (1950) die Photodissoziation von Wasserdampf und Methan in Höhe der Mesopause als Quelle des atmosphärischen Wasserstoffs. Sie errechneten einen mittleren Transport von etwa  $10^8$  Wasserstoff-Atomen  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ , der, ohne weitere chemische Reaktionen einzugehen, von 80 km an in die Exosphäre diffundiert. Den ersten direkten Beweis für die Anwesenheit von atomarem Wasserstoff in der hohen Atmosphäre brachte ein Raketen-Experiment von Friedman und Mitarbeitern (1957) zur Untersuchung des Nachthimmelsleuchtens im Spektralbereich des fernen Ultraviolett. Mit diesem Experiment begann ein neuer Abschnitt in der Erforschung der Geokorona.

## 2. Das Geokorona-Phänomen in heutiger Sicht

Dieser Raketenanstieg vom November 1955 zeigte im Nachthimmel eine gleichmäßig verteilte Ultraviolett-Strahlung mit einer Wellenlänge  $\lambda \leq 1240 \text{ \AA}$ . Die gemessene Intensität lag um mehr als eine Größenordnung über der möglichen Gesamtintensität aller Ultraviolett emittierenden Himmelskörper, die im Gesichtsfeld der Photometer waren. Bei einer Wiederholung des Aufstiegs mit spektralselektiven Detektoren im März 1957 konnte die Strahlung mit einer Wellenlänge  $\lambda = 1216 \text{ \AA}$  als die Lyman-H $\alpha$ -

Einheiten in  $10^{-3} \text{ erg/cm}^2/\text{sec/steradian}$

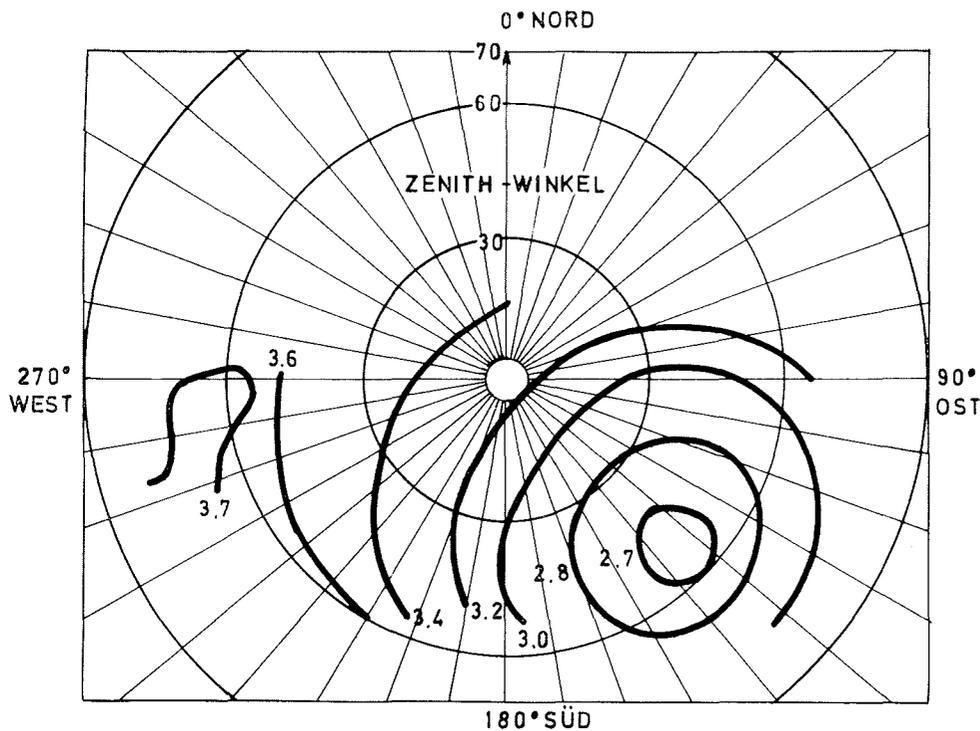


Bild 1 Linien gleicher Lyman- H $\alpha$  -Intensität im Nachthimmel nach Friedmann (1957)  
Lyman- H $\alpha$  -radiation isophots in the nightsky (Friedmann 1957)

Emission des neutralen atomaren Wasserstoffs nachgewiesen werden. Das quantitative Ergebnis war ein gleichförmiges Lyman- $H\alpha$ -Leuchten des Nachthimmels mit einer mittleren Intensität von  $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ sterad}^{-1}$ . Die Taumelbewegungen der Rakete erlaubten, ein weites Gesichtsfeld zu erfassen. Die Meßwerte sind in Abb. 1 in einer Isophotendarstellung gezeichnet und stellen die Linien gleicher Lyman- $H\alpha$ -Intensität als Funktion des Zenit-Winkels während der Aufstiegsphase dar. Das kreisförmige Intensitätsminimum — eine Folge der Spinbewegung der Rakete — liegt in entgegengesetzter Richtung zur Sonne. Bemerkenswerterweise fällt es nicht mit dem anti-solaren Punkt zusammen. Die Auswertung des Höhenprofils der Leuchtdichte zeigt eine Intensitätszunahme im Bereich von 80 bis 120 km. Bis 140 km bleibt die Intensität nahezu konstant, um dann bis etwa 1000 km mit sehr großer Skalenhöhe langsam abzunehmen. Später durchgeführte Messungen in Nadir-Richtung ergaben für die Wasserstoff-Strahlung eine Albedo von etwa 42 % aus der 80 km Schicht.

Bis heute wurden etwa 10 Raketenaufstiege und mehrere Satellitenexperimente zur Erforschung der Geokorona-Strahlung durchgeführt. Eine phänomenologische Betrachtung zeigt folgende Merkmale:

- a) Die Geokorona ist eine relativ kalte Wasserstoffatmosphäre. Ihre mittlere Temperatur beträgt etwa 1500 °K. Ihre Untergrenze beginnt bei 80 km Höhe. Hier liegt auch das Maximum des Wasserstoffleuchtens.
- b) Auf der Tag- und Nachtseite wird das Leuchten der Geokorona durch Resonanz-Streuung von Lyman- $H\alpha$ -Strahlung aus der Sonne angeregt. Die Streu-Intensitäten im 120 km Niveau sind auf der Tagseite um den Faktor 10 höher als auf der Nachtseite. Dieses Intensitätsverhältnis ist charakteristisch und wurde durch zahlreiche Messungen bestätigt (Fastie, Crosswhite und Heath 1964).
- c) Nach Thomas (1963) kann man die Geokorona in 3 Hauptbereiche unterteilen. Der unterste in 80 bis 120 km ist optisch dick und wird als Albedobereich bezeichnet. In ihm wird die Dichteverteilung vorwiegend durch turbulente Durchmischung und photochemische Reaktionen bestimmt. Für die Lyman- $H\alpha$ -Strahlung aus größeren Höhen hat er eine Albedo von etwa 42 %. Es wird angenommen, daß diese Schicht für den Strahlungstransport von der Tagseite in die Nachtseite eine Art Spiegelwirkung hat.

Bis zur Untergrenze der Exosphäre bei  $\sim 500$  km Höhe ist die Geokorona zum überwiegenden Teil aus atomarem Wasserstoff zusammengesetzt. Die Dichteverteilung wird hier durch thermische Diffusion bestimmt.

In der äußeren Geokoronaschicht haben die Wasserstoffatome eine hohe kinetische Temperatur. Diese Zone hat eine Ausdehnung bis zu einer Entfernung von mehreren Erdradien. Eine scharfe äußere Grenze zum interplanetaren Wasserstoff ist nicht mehr erkennbar. Die geringe Masse der Wasserstoff-Atome bewirkt, in Verbindung mit der erwähnten hohen kinetischen Temperatur, einen ständigen Transport in den interplanetaren Raum. Dopplermessungen von Raumsonden aus haben für nahezu ein Viertel dieser Wasserstoff-Atome im äußeren Bereich Radial-Geschwindigkeiten in der Größenordnung von  $> 11 \text{ km} \cdot \text{sec}^{-1}$  ergeben.

- d) Die globale Verteilung der Geokorona-Strahlung weist zeitliche Schwankungen auf. Diese Variationen lassen sich mit dem 27-Tage- und möglicherweise mit dem 11-Jahres-Zyklus der Sonnenaktivität korrelieren. Für den elfjährigen Wiederholungszyklus dürften die Satellitenmessungen aus den Jahren 1969 und 1970 die ersten Ergebnisse bringen.

### 3. Messungen und Überlegungen zur Bildung von Geokoronamodellen

Alle Erkenntnisse über das Wasserstoffleuchten mußten bisher aus optischen Beobachtungen abgeleitet werden. Die wenigen massenspektrometrischen Messungen (Reber 1967) zur Konzentrationsbestimmung des atmosphärischen Wasserstoffs lieferten Werte, die um den Faktor 100 über den Ergebnissen liegen, die sich aus optischen Meßmethoden ableiten lassen. Der stets vorhandene Wasserstoff-Untergrund in jedem Massenspektrometer kann die Ursache hierfür sein. Dies erschwerte eine gleichzeitige, voneinander unabhängige Meßmethodik für Wasserstoffdichtebestimmung der oberen Atmosphäre.

Die durchgeführten optischen Beobachtungen zur Gewinnung von Daten für ein atmosphärisches Wasserstoffmodell lassen sich im Prinzip auf folgende Messungen zurückführen:

- a) Satellitenbeobachtungen der Lyman- $H\alpha$ -Strahlung als Funktion des Detektor-Zenitwinkels. Gleichzeitige Registrierung der Nadir-Intensität und Errechnung des Zenit/Nadirverhältnisses.
- b) Die Vermessung des  $\sim 1 \text{ \AA}$  breiten Lyman- $H\alpha$ -Profils der Sonnenstrahlung und Bestimmung des Betrags der Selbstumkehr (Purcell und Tousey 1960), der durch atmosphärischen Wasserstoff auf dem Ausbreitungsweg hervorgerufen wird. Dieser Betrag ist eine Funktion der Meßhöhe des Detektors.
- c) Photometermessungen der vom Erdboden aus sichtbaren Wasserstoffemissionen, insbesondere der Balmer  $\alpha$ -Linie bei  $\lambda = 6563 \text{ \AA}$  (Tinsley 1968).

Der nächste Schritt, um zu einer Modellvorstellung der Geokorona zu kommen, ist, aus den gemessenen Intensitätswerten eine Wasserstoff-Dichteverteilung zu errechnen. Dies erfordert die Lösung der Strahlungs-Transportgleichungen für ein optisch dickes Streumedium von sphärischer Konfiguration. Unter bestimmten Vereinfachungen haben Thomas (1963) und Meier (1969) eine Näherungsmethode hierfür entwickelt.

Unabhängig von der Interpretation optischer Messungen wurden verschiedene Wasserstoff-Modelle vorgeschlagen, die von thermodynamischen Überlegungen ausgehen. Allen ist gemeinsam, über die Temperaturvariation einer Basisfläche, meist der Thermopause, die Wasserstoffverteilung zu berechnen. Vergleicht man die Ergebnisse dieser gaskinetischen Betrachtungen mit den Konzentrationswerten aus der Streurechnung, so liefern diese Modellrechnungen zu niedrige Dichten. In der Abb. 2 sind diese Überlegungen graphisch dargestellt. Es sind Ergebnisse des Modells von Kockartz und Nicolet (1963), die für die meisten Rechnungen verwendet werden. Diese Betrachtungen gelten für den mittleren Geokoronabereich mit der Thermopause als Untergrenze. Die Vorgänge der turbulenten Durchmischung und des photochemischen Reaktionsmechanismus aus der darunterliegenden Albedo-Schicht gehen in die Ansätze nicht ein. Mit dieser zulässigen Vereinfachung ist die Temperatur der Thermopause die bestimmende Zustandsgröße für die Wasserstoff-Dichte. Abb. 2 beschreibt die funktionelle Abhängigkeit der Dichte von der Thermopausentemperatur. Man hat sich dabei den integrierten Wasserstoff-Inhalt über einer Einheitsfläche von  $1 \text{ cm}^2$  beginnend vom Thermopausenniveau bis zu einer angenommenen Obergrenze von 2000 km zu denken. Das wesentliche Ergebnis dieses Modells ist die geringe Änderung der Wasserstoff-Dichte bei einer Abkühlung der Thermopausen-Temperatur von  $2000^\circ\text{K}$  auf  $1000^\circ\text{K}$ .

Im deutlichen Gegensatz hierzu steht die Dichteänderung im Temperaturbereich  $< 1000^\circ\text{K}$ . Eine — extrapolierte — Verringerung der Thermopausentemperatur auf

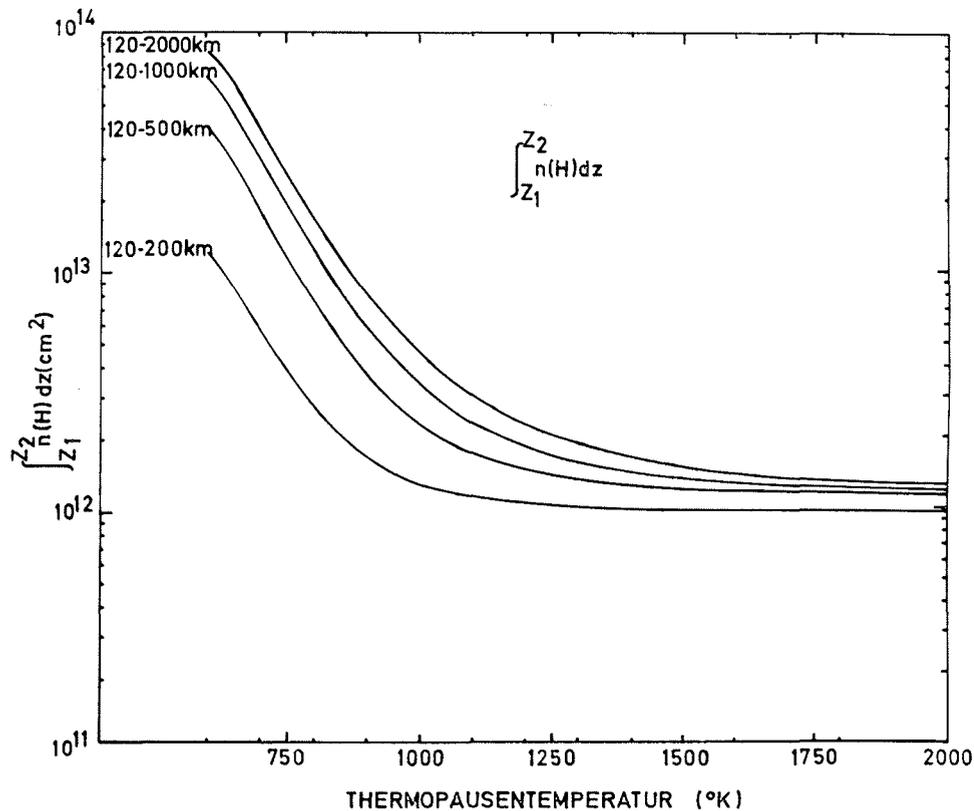


Bild 2 Berechneter Wasserstoff-Inhalt über einer Einheitsfläche als Funktion der Thermopausentemperatur nach dem Modell Kockartz und Nicolet (1963)  
 Hydrogen content per  $\text{cm}^2$  column as a function of the temperature at the thermopause level calculated according to the model of Kockartz and Nicolet (1963)

650°K zeigt einen steilen Dichteanstieg und würde eine nahezu 10fache Konzentrations-erhöhung bedeuten.

Dieser ausgeprägte Wechsel im Dichteverhalten ist geeignet, die Tag/Nacht-Asymmetrie zu erklären. In guter Näherung trifft dies aber nur für eine Periode geringer Sonnenaktivität zu. Man kann dann als mittlere Thermopausentemperatur auf der Tagseite  $\sim 750^\circ\text{K}$  und auf der Nachtseite  $\sim 1100^\circ\text{K}$  annehmen. Hieraus ließe sich dann eine Dichtevariation von  $\sim 1:5$  noch gut erklären.

Betrachtet man die numerischen Werte, die sich aus der Kurvenschar in Abb. 2 ergeben, so kann man für eine Schichtdicke von der Thermopausengrenze bis in 2000 km Höhe etwa  $4,5 \cdot 10^{12}$  Wasserstoffatome  $\cdot \text{cm}^{-2}$  ablesen. Ein quantitativer Vergleich mit Konzentrationswerten, aus optischen Messungen abgeleitet, wurde von Meier (1969) durchgeführt. Unter der Annahme einer Exosphären-Temperatur von  $1100^\circ\text{K}$  und einem Integrationsbereich von 650 km bis 2000 km wurde ein Basiswert von  $7 \cdot 10^{12}$  Wasserstoffatomen  $\cdot \text{cm}^{-2}$  errechnet.

Unübersichtlich werden alle thermischen Modellrechnungen für die Zeiten erhöhter Sonnenaktivität. Neben den starken Schwankungen der Strahlungsanteile im fernen

solaren Ultraviolett und ihrem schwer erfassbaren Einfluß auf die Wärmebilanz der Hochatmosphäre, kommt noch die starke Protonenanreicherung aus dem Strahlungsgürtel hinzu. Dieser Einfluß kann, je nach geomagnetischer Breite, bis zu einer Höhe von 800 km wirksam werden.

#### *Schlußbetrachtung*

Das gegenwärtige Wissen über die Geokorona ist aus verschiedenartigen Beobachtungsergebnissen und daraus abgeleiteten Modellvorstellungen zusammengesetzt. Als gesicherte Erkenntnis für den Anregungsmechanismus gilt die Streuung von Lyman- $H\alpha$ -Strahlung aus der Sonne am atmosphärischen Wasserstoff. Andere Anregungsursachen sind, zumindest für den erdnahen Bereich, auszuschließen. Die beschriebenen Ergebnisse sind für mittlere Breiten gültig. Die Auswirkungen der Geokorona-Strahlung auf die nächtliche Hochatmosphäre wurden von Tohmatsu (1969) untersucht. Eine quantitative Deutung ist noch nicht möglich.

Für eine globale Synopsis des Wasserstoffleuchtens liegen noch zu wenig kontinuierliche Messungen über die Dauer eines geschlossenen Sonnenzyklus vor. Diese Untersuchungen sollten vornehmlich von Satelliten mit streng polaren und äquatorialen Umlaufbahnen durchgeführt werden. Es ist zu hoffen, daß der deutsche Satellit DIAL, dessen Hauptaufgabe die Messung der Geokoronastrahlung in der äquatorialen Hochatmosphäre ist (Rossbach 1969), zusätzliche Erkenntnisse über die Breitenabhängigkeit bringen wird.

Die Geokorona, ein Begriff, der von Wegener vor 60 Jahren wohl mehr intuitiv in die Betrachtungen der oberen Atmosphärenschichten eingeführt wurde, wird in ihrer verschiedenartigen Erscheinungsform die geophysikalische Forschung in den nächsten Jahren beschäftigen. Die technischen Möglichkeiten der Weltraumforschung bieten hierfür die besten Voraussetzungen.

#### Literatur:

- Bates, D. R., Nicolet, M.: The Photochemistry of Atmospheric Water Vapor, *J. Geophys. Res.* 55, 1950, p. 301—327.
- Byram, E. T., Chubb, T. A., Friedmann, H., Kupperian, J. E.: The Threshold of Space, Ed. M. Zelickoff (Pergamon Press, London), 1957, p. 203—210.
- Fastie, W. G., Chrosswhite, H. M., Heath, D. F.: Rocket Spectrometer Airglow Measurements in the Far Ultraviolet, *J. Geophys. Res.* 69, 1964, p. 4129—4140.
- Humphreys, W. J.: *Physics of the Air*, Philadelphia: J. B. Lippincott Co., 1920, p. 68.
- Jeans, J. H.: *Dynamical Theorie of Gases*, 4th Ed. Cambridge: Cambridge University Press 1925, p. 341.
- Meier, R. R.: Observations of Lyman-Alpha and the Atomic Hydrogen Distribution in the Thermosphere and Exosphere. Paper presented at XII COSPAR-Meeting, Prague, May 1969.
- Meinel, A. B.: OH-Emissionsbands in the Spectrum of the Nightsky. *Astrophys. J.* 111, 1950 p. 433—434.
- Purcell, J. D., Tousey, R.: The Profile of Solar Hydrogen-Lyman, *J. Geophys. Res.*, 65, 1960, p. 370—372.
- Rossbach, A.: Die Geokorona und ihre Bedeutung für die Hochatmosphäre. *Z. f. Geophys.*, 35, 1969, S. 557—564.
- Thomas, G. E.: Lyman-Alpha-Scattering in the Earth's Hydrogen Geocorona. *J. G. R.* 9, 1963, p. 2639—2660.
- Tinsley, B. A.: Temporal Variations in Geocoronal Balmer-Alpha *J. Geophys. Res.* 73, 1968, p. 4139.
- Reber, C. A., Coaley, J. E., Harpold, P. N.: Upper Atmospheric Composition and its Variations by Direct Measurements from the Explorer 32, *Transac. Am. Geophys.*, 48, 1967, p. 75.
- Tohmatsu, T.: The Hydrogen and Helium Ultraviolet Glow, its Origins and Aeronomical Significance, Paper presented at XII COSPAR-Meeting, Prague, May 1969.
- Wegener, A.: *Thermodynamik der Atmosphäre*, Verlag J. A. Barth, 1911, Leipzig.
- Wegener, A.: Untersuchungen über die Natur der obersten Atmosphärenschichten, *Physikal. Zeitschr.* XII, 1911, Nr. 5 und 6.