

FORTSCHRITTE IN DER PHYSIK DER HOHEN ATMOSPHÄRE

WALTER DIEMINGER

Direktor, Max-Planck-Institut für Aeronomie, Germany

EINLEITUNG

Als Teisserence de Bort im Jahre 1902 bei Ballonaufstiegen feststellte, dass die Temperaturabnahme in einer Höhe von rd. 10 km aufhört und einem isothermen Verlauf Platz macht, war dies der erste direkte Hinweis auf unerwartete Erscheinungen in der hohen Atmosphäre. Die 6 Jahrzehnte, die seither vergangen sind, haben in immer schnellerer Folge eine Fülle neuer Erkenntnisse gebracht, die für Fachleute und Laien gleich überraschend waren. Noch können wir von einem vollen Verständnis der Vorgänge in der Ionosphäre und im interplanetarischen Raum nicht sprechen; aber immerhin zeichnen sich einige Grundtatsachen ab, die umso wichtiger sind, als wir uns gerade anschicken, diese Gebiete mit unbemannten und bemannten Fahrzeugen zu bevölkern. Es ist aus Zeitgründen nicht möglich, in einem Vortrag alle einschlägigen Probleme abzuhandeln; ich will aber versuchen, diejenigen Erscheinungen herauszustellen, die Sie vermutlich am meisten interessieren.

AUFBAU DER HOHEN ATMOSPHERE

Beginnen wir beim Luftdruck. Der Druck nimmt bekanntlich für 18 km Höhendifferenz um 1 Zehnerpotenz ab. Damit kommen wir in rd. 100 km Höhe auf ein Millionstel des Bodendruckes, also auf $1/1,000$ mb. Die Zahl der Moleküle pro cm^3 sinkt damit von rd. 10^{19} in Bodennähe auf 10^{13} und ist damit noch immer unvorstellbar hoch. Wenn man nach oben extrapoliert, so müsste die Masszahl für jede weiteren 100 km um rd. 6 Zehnerpotenzen fallen. Damit würde z.B. die Teilchendichte in 300 km Höhe nur mehr rd. 10 pro cm^3 betragen. Das ist mit modernen Beobachtungen unverträglich. Wie wir aus Raketen- und Satellitenbeobachtungen mit Sicherheit wissen, wird die Dichteabnahme mit

zunehmender Höhe immer geringer [Fig. 1]. Die beiden Kurven beziehen sich auf verschiedene Tageszeiten, nämlich Mittag und kurz vor Sonnenaufgang. Auf diese zeitlichen Schwankungen werden wir gleich noch zurückkommen.

Zunächst soll aber untersucht werden, woher die Änderung des Dichtegradien-ten kommt. Die Formel für die Dichteabnahme lautet bekanntlich

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp \left(- \frac{m \cdot g}{k \cdot T} \cdot h \right)$$

mit

- ζ_0 = Dichte am Erdboden
- M = Molekülgewicht
- g = Erdbeschleunigung
- k = Boltzmann-Konstante
- T = abs Temperatur
- h = Höhe in km

Die Abnahme der Erdbeschleunigung g mit der Höhe ist zu gering, um den Effekt allein zu erklären. Es muss also eine Änderung des mittleren Molekül- gewichtes m oder der Temperatur T oder beider vorliegen. Tatsächlich ändern sich beide. Die Zusammensetzung der Luft, die bis etwa 120 km infolge der Durchmischung konstant bleibt, ändert sich oberhalb durch Diffusion. Und zwar streben die schweren Gase Sauerstoff, Stickstoff und Argon nach unten, die leichten Gase, Helium und Wasserstoff, nach oben. Ausserdem ist der Sauerstoff oberhalb 140 km im wesentlichen durch das ultraviolette Sonnenlicht dissoziiert. An Stelle des O_2 mit dem Atomgewicht 32 tritt also O mit dem Atomgewicht 16. Insgesamt nimmt also das mittlere Molekülgewicht ab [Fig. 2]. Dies genügt jedoch nicht. Zusätzlich muss eine Temperaturzunahme ange- nommen werden, wie sie ebenfalls in Fig. 2 dargestellt ist. Die Gastemperatur liegt demnach für Höhen um 200 km in der Grössenordnung von 1,000°K. Diese Werte sind allerdings nicht direkt gemessen, sondern aus dem gemessenen Dichteverlauf unter Annahme eines bestimmten Verlaufs des mittleren Molekül- gewichtes berechnet. Da letzteres jedoch nur ungefähr bekannt ist, sind die Temperaturbestimmungen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

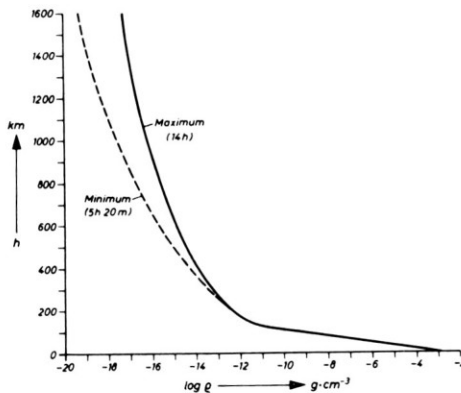


Fig. 1. Dichte der Luft bis 1,600 km Höhe (CIRA 1961).

[Figur 2] zeigt darüber hinaus, dass die Zustandsgrößen der hohen Atmosphäre einem erheblichen zeitlichen Wechsel unterworfen sind. Diese Veränderungen nehmen mit der Höhe zu. Z.B. ändert sich die Dichte zwischen Nacht und Tag in 210 km Höhe wie 1 : 1,2 [Fig. 3], dagegen in 660 km Höhe wie 1:9 [Fig. 4]. Daneben existiert eine weniger ausgeprägte jahreszeitliche Komponente sowie eine langsame Variation im Rhythmus des 11 jährigen Sonnenfleckenzyklus. Die Breitenabhängigkeit ist noch nicht völlig geklärt. Offenbar ist aber im Sommer über den Polargebieten die Luftdichte und die

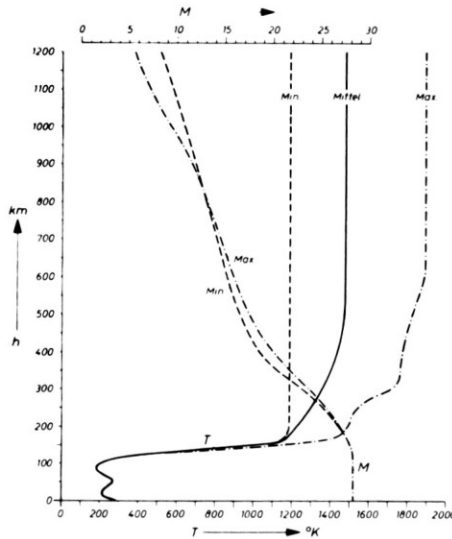


Fig. 2. Temperatur und Molekulargewicht der Atmosphäre bis 1,200 km Höhe (CIRA 1961).

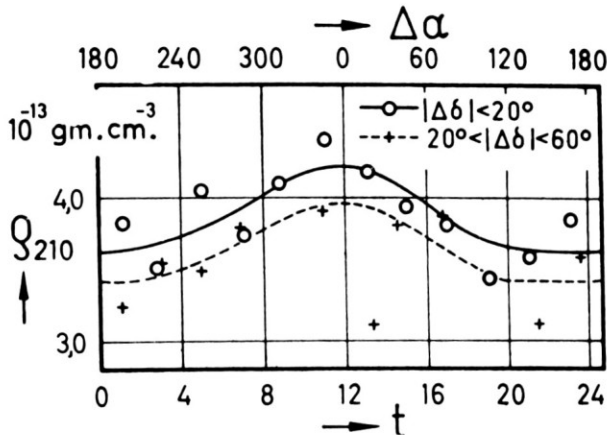


Fig. 3. Tageszeitliche Änderung der Luftdichte in 210 km Höhe für verschiedene Breitenbereiche $\Delta\delta$ (nach Priester).

Temperatur höher als in niederen Breiten. Man kann das als eine Folge der dauernden Sonneneinstrahlung während des langen Polartages deuten. Jedenfalls sind die Zustandsgrößen der hohen Atmosphäre sehr viel variabler als man früher annahm. Auch sind die Schwankungen prozentual viel grösser als die meteorologisch bedingten Änderungen in Bodennähe.

Hinsichtlich der Zusammensetzung bietet sich folgendes Bild: Die Atmosphäre besteht bis zu 120 km im wesentlichen aus Stickstoff und Sauerstoff im Mischungsverhältnis 4:1. Oberhalb wird der Sauerstoff in zunehmendem Masse dissoziiert. Gleichzeitig tritt mit zunehmender Höhe eine Anreicherung der leichteren Gase ein, so dass ab 1,000 km Höhe Helium und Wasserstoff dominieren. Oberhalb 1,500 km verschiebt sich das Verhältnis immer mehr zu Gunsten des Wasserstoffs. Schliesslich geht die irdische Atmosphäre kontinuierlich in den ebenfalls mit Wasserstoff gefüllten interplanetarischen Raum über. Ein wesentlicher Unterschied scheint allerdings darin zu bestehen, dass der Wasserstoff der höchsten Atmosphäre vorwiegend neutral, der Wasserstoff im interplanetarischen Raum dagegen vollständig ionisiert ist. Aber auch hier besteht keine scharfe Grenze, so dass es nicht möglich ist, die Grenze der Erdatmosphäre von der Gaszusammensetzung her zu definieren.

Welche Bedeutung haben diese Erscheinungen für die Raumfahrt? Die Änderung in der Zusammensetzung der Luft dürfte belanglos sein, da wahrscheinlich jedes Raumfahrzeug ein in sich abgeschlossenes System darstellt. Man könnte vielleicht auf den Gedanken kommen, den Luftsauerstoff beim Flug des Fahrzeuges aufzusammeln und nach Kompression zur Atmung oder zur Oxydation von Brennstoffen zu verwenden. Dies ist nur in relativ geringen Höhen diskutabel. Oberhalb 1,000 km überwiegen die leichten Gase Helium und Wasserstoff derartig, dass die Ausbeute an Sauerstoff viel zu gering ist.

Bedenklich erscheint im ersten Augenblick die hohe Temperatur. Wir wissen aber inzwischen aus der Praxis, dass diese gänzlich ungefährlich ist. Diese Erfahrung entspricht durchaus den theoretischen Voraussagen. Die Temperatur

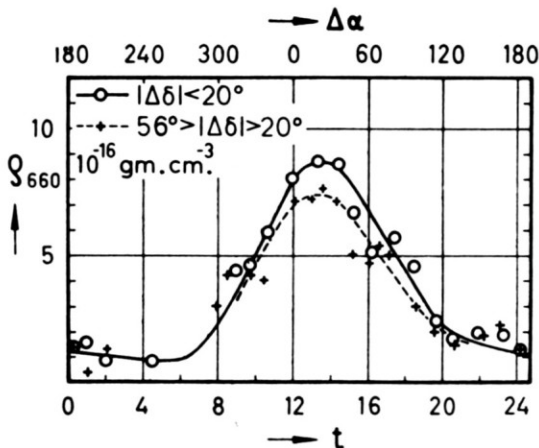


Fig. 4. Tageszeitliche Änderung der Luftdichte in 660 km Höhe für verschiedene Breitenbereiche $\Delta\delta$ (nach Priester).

verliert nämlich bei so geringen Gasdichten ihren bürgerlichen Sinn; sie beschreibt nur noch die mittlere kinetische Energie der einzelnen Moleküle. Für die auf einen Körper übertragene Wärme ist aber das Produkt aus kinetischer Energie der einzelnen Teilchen und der Zahl der auftreffenden Teilchen massgebend. Sinkt also die Dichte auf ein Millionstel, so kann die kinetische Energie auf das millionenfache ansteigen, bis die gleiche Energiemenge übertragen wird. Mit anderen Worten, in so verdünnten Gasen wie in der hohen Atmosphäre spielt die Konvektion gegenüber der Strahlung überhaupt keine Rolle mehr. Die Temperatur, die sich in einem Fahrzeug einstellt, hängt nur noch von der Strahlungsbilanz ab. Der alte Trick, die eine Hälfte einer Ballongondel schwarz, die andere glänzend zu machen und die Innentemperatur durch entsprechende Orientierung bezüglich der Sonne zu regulieren ist die technische Konsequenz aus diesen theoretischen Überlegungen. Das Erwärmungsproblem beim Wiedereintritt hat ja mit der Umgebungstemperatur in erster Näherung nichts zu tun.

DIE IONISATION DER HOHEN ATMOSPHERE

Wir wenden uns jetzt der Erscheinung zu, die der Ionosphäre ihren Namen gegeben hat, der Ionisierung. Diese entsteht bekanntlich dadurch, dass kurzwellige Sonnenstrahlung im Ultravioletten und im langwelligen Röntgengebiet in der hohen Atmosphäre absorbiert wird. Die Energie der einfallenden Photonen trennt aus den Atomen Elektronen ab, die bis zu ihrer Wiedervereinigung mit den Restionen oder ihrer Anlagerung an neutrale Teilchen sich frei bewegen können. Dieser Vorgang ist in doppelter Hinsicht bedeutungsvoll. Einerseits wird dabei die kurzwellige Strahlung verbraucht und damit von der Erdoberfläche abgeschirmt. Bei ungehindertem Eindringen würde sie das Leben auf der Erde in seiner jetzigen Form unmöglich machen. Wahrscheinlich gab es in der Frühzeit der Erde, und zwar vor etwa 450 Millionen Jahren, eine Periode, in der sich noch keine Sauerstoffhülle gebildet hatte und deshalb ein Leben ausserhalb des Wassers nicht nur wegen des Sauerstoffmangels, sondern auch wegen der Ultraviolettstrahlung nicht möglich war. Die Atmosphäre wirkt also als Schutzpanzer gegen biologisch schädliche Strahlung. Verlässt ein Lebewesen diesen schützenden Gürtel, so muss es sich durch besondere Massnahmen gegen diese Strahlungen schützen. Die dazu nötigen Schichtdicken sind, da es sich um nicht sehr durchdringende Strahlung handelt, jedoch gering. Die Wandstärke des Fahrzeuges, die aus Festigkeitsgründen ohnehin erforderlich ist, genügt völlig zur Abschirmung. Ein Sonnenbad im Weltraum würde aber zweifellos katastrophale Folgen haben.

Andererseits haben ionisierte Gase für Radiowellen einen Brechungsindex, der umso mehr von 1 abweicht, je grösser die Zahl der Elektronen pro Volumeneinheit und je niedriger die Frequenz der elektrischen Welle ist. Das führt zu einer Brechung der Radiowellen, die so stark sein kann, dass die Welle zur Erde zurückkehrt. Die ionisierten Schichten der hohen Atmosphäre wirken also als Reflektor. Auf dieser Tatsache beruht bekanntlich der drahtlose Weitverkehr mittels Kurzwellen. Da sich die reflektierenden Eigenschaften mit dem Wechsel der Sonnenstrahlung zwischen Tag und Nacht, Sommer und Winter, Sonnen-

fleckenmaximum und Sonnenfleckenminimum ändern, ist auch die Kurzwellenausbreitung starken zeitlichen Schwankungen unterworfen, auf die jedoch hier nicht eingegangen werden soll.

Für den Weltraumfahrer wirkt der ionosphärische Spiegel wie eine Trennwand, die jeden Nachrichtenverkehr zwischen Erde und Weltraum in einem weiten Bereich des Radiowellenspektrums unterbindet. Betroffen sind von dieser Wirkung die Wellenlängen zwischen einigen Kilometern und einigen zehn Metern, wobei die kurzwellige Grenze erheblichen Schwankungen unterworfen ist. Rundfunkempfang auf Mittelwellen im Raumfahrzeug ist jedenfalls in allen Fällen ausgeschlossen. Der Nachrichtenverkehr muss sich daher auf Wellenlängen abspielen, die mit Sicherheit die Ionosphäre durchdringen. Diese Grenze liegt bei etwa 100 MHz = 3 m. Tatsächlich benutzt man aus technischen Gründen meist noch wesentlich kürzere Wellen. Bekanntlich werden derartige Wellenlängen gelegentlich auch von der Sonne als Rauschen mit beträchtlicher Intensität ausgestrahlt. Man kann sich jedoch durch entsprechende Bündelung der Antennensysteme meistens gegen diese Strahlung schützen, es sei denn, Erde, Raumfahrzeug und Sonne befinden sich zufällig gerade auf einer Geraden.

Auf die Verteilung der Ionisation soll hier nicht in einzelnen eingegangen werden. Es mag genügen zu erwähnen, dass sie in etwa 60–80 km Höhe merklich wird, in 200–300 km Höhe ein Maximum erreicht und oberhalb dieses Maximums nur sehr langsam abfällt [Fig. 5]. Die letzte Tatsache ist erst seit wenigen Jahren bekannt. Vor dem Einsatz von Raketen und Satelliten war es nicht möglich, vom Boden aus "hinter" das Maximum der Ionisierung in 200–300 km Höhe zu schauen.

Die Tatsache, dass die Gase in der hohen Atmosphäre ionisiert sind, hat eine weitere wichtige Konsequenz. Die Leitfähigkeit ionisierter Luft ist bekanntlich viel höher als die neutraler. Es existieren daher in der hohen Atmosphäre leitfähige Schichten, in denen u.U. erhebliche elektrische Ströme fließen können. Solche Ströme entstehen z.B. durch die regelmässige Gezeitenbewegung der

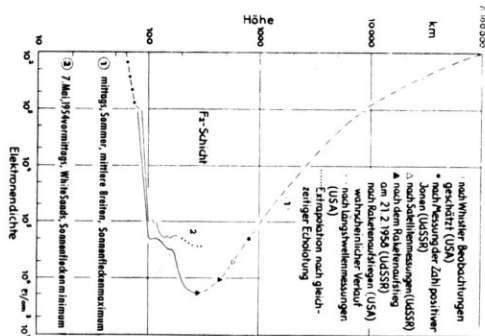


Fig. 5. Elektronendichte als Funktion der Höhe.

leitfähigen Schichten im Magnetfeld der Erde. Viel stärker, und zwar von der Grössenordnung 1 Million Ampere, sind die Ströme, die bei Polarlichterscheinungen in einem wenige 100 km breiten Gürtel, der sog. Polarlichtzone, fliessen. Man könnte vermuten, dass sich solch starke Ströme in Raumfahrzeugen sehr unangenehm bemerkbar machen. Tatsächlich ist das aber nicht der Fall, da wegen der grossen flächenhaften Ausdehnung die Stromdichte sehr gering ist. Auch die elektrischen Felder, die notwendigerweise mit den Stromsystemen verbunden sind, haben nur so kleine Feldstärken, dass irgend ein schädlicher Einfluss auf ein Raumfahrzeug nicht zu befürchten ist.

KORPUSKELN IN DER HOHEN ATMOSPHERE UND IM INTERPLANETARISCHEN RAUM

Bisher wurde nur die elektromagnetische oder Wellenstrahlung und ihre Wirkung in der hohen Atmosphäre betrachtet. Genau so wichtig, wenn nicht sogar wichtiger, ist die Korpuskularstrahlung im extraterrestrischen Raum. Zwei Arten dieser Korpuskularstrahlung sind seit geraumer Zeit bekannt, nämlich die solare Strahlung, die für das Polarlicht und die damit verbundenen Effekte verantwortlich ist, und die sogenannte kosmische Ultrastrahlung. Die Untersuchung der Polarlichterscheinungen ist mit den Namen Birkeland, Störmer und Vegard aufs engste verbunden. Dass es sich auch bei der kosmischen Strahlung um Materie, und zwar um die energiereichste überhaupt bekannter Teilchen handelt, wurde vor etwa 25 Jahren entdeckt. Seit dem Beginn der Raumforschung sind weitere Strahlungen entdeckt worden, von denen vor allem diejenige, die in den van-Allen-Gürteln eingefangen ist, niemand vermutet hätte.

In Anbetracht der Vielfalt der Erscheinungen ist es nicht ganz einfach, eine systematische Übersicht zu geben. In [Fig. 6] ist ein Versuch in dieser Richtung gemacht. Im unteren Teil sind die beobachteten oder vermuteten Energiebereiche der einzelnen Strahlungen in eV angegeben, im oberen Teil die Intensitätsverteilung, soweit sie z.Z. bekannt ist, also die Zahl der Teilchen, die pro Zeiteinheit durch die Flächeneinheit treten.

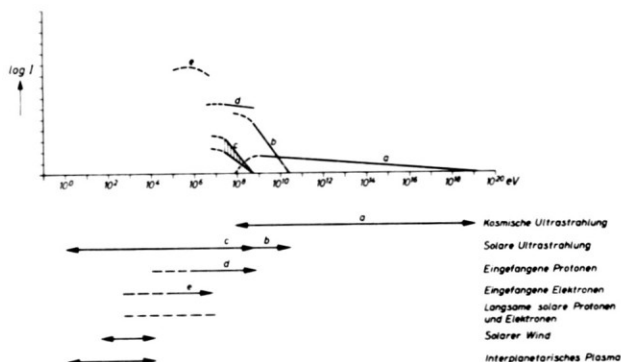


Fig. 6. Spektrale Intensitätsverteilung und Energiebereiche verschiedener Korpuskularstrahlungen (nach Simpson).

Von oben nach unten folgen aufeinander:

- Kosmische Ultrastrahlung (Kurve *a*)
- Solare Ultrastrahlung (Kurve *b* und *c*)
- Eingefangene Protonen (Kurve *d*)
- Eingefangene Elektronen (Kurve *e*)
- Langsame solare Protonen und Elektronen
- Sonnenwind

und zum Vergleich der Energiebereich des interplanetarischen Plasmas.

Diese Teilchen sollen im Folgenden besprochen werden, wobei ich mich bei der Ultrastrahlung und bei den eingefangenen Protonen und Elektronen kurz fassen kann, da diese Erscheinungen im folgenden Vortrag hinsichtlich ihres Spektrums und ihrer Flussdichte eingehender besprochen werden.

KOSMISCHE ULTRA STRAHLUNG

Die kosmische Ultrastrahlung ist die energiereichste Strahlung, die wir überhaupt kennen. Sie besteht zu ca. 97% aus Wasserstoff und Helium, der Rest sind schwere Kerne und Elektronen. Das Energiespektrum reicht bis 10^{19} eV. Sie fällt isotrop aus dem Weltraum ein und bewirkt eine Reihe von Sekundär- und Tertiärprozessen, sobald sie mit der Atmosphäre oder Materie in Wechselwirkung tritt. Sie alle kennen die schönen Bilder [Fig. 7], die entstehen, wenn z.B. ein Atom, das sich in einer fotografischen Emulsion befindet, von einem einfallenden Partikel getroffen wird. Die Trümmer und Folgeprodukte spritzen

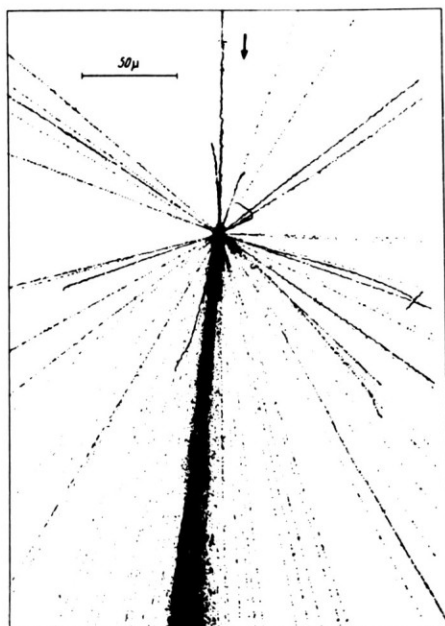


Fig. 7. Kerntreffer in einer Kernemulsionsplatte (Aufnahme Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik).

nach allen Seiten auseinander und aus der Spur, die sie in der Emulsion hinterlassen, kann man auf die Natur der primären und der entstehenden Teilchen schliessen. In der Atmosphäre entsteht aus einem primären Teilchen ein ganzer Schauer von Sekundärteilchen, die teils als Mesonen, teils als Neutronen auf dem Erdboden nachgewiesen werden können. Die Intensität der Teilchen, die auf dem Erdboden registriert werden, hängt wegen des erdmagnetischen Feldes von der magnetischen Breite ab. Wegen ihrer Ladung—Protonen sind ja positiv geladen—werden die Teilchen umso mehr vom Erdmagnetfeld abgelenkt, je energieärmer sie sind. Am Äquator können deshalb nur die relativ wenigen, sehr energiereichen Teilchen beobachtet werden, während in höheren Breiten auch Teilchen mit geringer Energie eindringen können. Die totale Intensität nimmt also gegen den Äquator ab.

Neben den örtlichen Unterschieden beobachtet man auch zeitliche Änderungen, die nur zum Teil durch den Einfluss der Erdatmosphäre erklärt werden können. Die stärkeren Schwankungen, wie z.B. die Abnahme der Intensität bei magnetischen Stürmen, können nur durch eine Art Modulation im interplanetarischen Raum hervorgerufen werden [Fig. 8]. Dies geht deutlich daraus hervor, dass die Schwankungen gleichzeitig am Erdboden und in Höhen von 100.000 km in Raumsonden beobachtet wurden. Der Ursprung der kosmischen Ultrastrahlung, ihr Erzeugungsmechanismus und ihre Modulation im interplanetarischen Raum sind Gegenstand zahlreicher Hypothesen. Auf sie einzugehen, würde den Rahmen dieser Übersicht sprengen.

SCHNELLE SOLARE PROTONEN

Seit etwa 15 Jahren weiss man, dass unter besonderen Umständen kosmische Strahlung auch von der Sonne ausgehen kann. Es sind das die berühmten Effekte, in denen im Anschluss an eine besonders starke Eruption in der Chromosphäre der Sonne eine deutliche Zunahme der Ultrastrahlung auf dem Erdboden beobachtet wurde; in einem Fall, nämlich am 23 Februar 1956, stieg dabei die Intensität der kosmischen Strahlung in unseren Breiten auf das 30 fache an. Insgesamt kennt man bis jetzt 16 derartige Fälle.

Man weiss heute, dass neben diesen seltenen Fällen, bei denen noch am Boden der Effekt nachzuweisen ist, viel häufiger Protonen von etwa 10^7 eV Energie

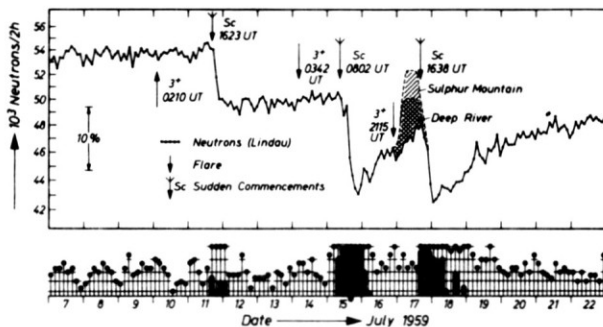


Fig. 8. Variation der Neutronenkomponente der kosmischen Strahlung bei magnetischen Stürmen (nach Pfozter). Untere Zeile: Planetarische magnetische Kennziffern.

emittiert werden, die wegen ihrer geringen Energie nur noch in den Polarkappen bis etwa 50 km Höhe vorzudringen vermögen. Sie rufen dort eine zusätzliche Ionisierung hervor, die eine verstärkte Absorption elektrischer Wellen, die sogenannte Polar Cap Absorption, hervorruft. Sie macht sich z.B. dadurch bemerkbar, dass die Rauschstrahlung aus dem interstellaren Raum auf m-Wellen erheblich geschwächt wird. Diese Effekte können unter Umständen mehrere Tage anhalten.

EINGEFANGENE PROTONEN UND ELEKTRONEN

Wohl die grösste Überraschung im Intern. Geophys. Jahr war die Entdeckung der sog. Van-Allen-Gürtel. Sie bestehen aus Protonen und Elektronen, die unter der Wirkung der Lorentzkraft in Spiralen um die magnetischen Kraftlinien des Erdfeldes laufen, dabei mit einer Periode von 1/sec zwischen Nord- und Südhalbkugel oszillieren und gleichzeitig in äquatorialer Richtung um die Erde wandern. Damit füllen die Partikel einen torusförmigen Raum, der in der Äquatorebene etwa in 500 km Höhe beginnt und sich bis zu mehreren Erdradien Abstand erstreckt. Die bisherigen Messungen gestatten noch nicht, ein genaues Bild der Strahlungsgürtel zu entwerfen. Offenbar variiert die Partikeldichte und ihr Spektrum umso stärker, je grösser der Abstand von der Erde ist. Über die Eigenschaft der Teilchen und ihre vermutliche Herkunft wird Herr Fichtel im folgenden Vortrag berichten.

LANGSAME SOLARE KORPUSKELN

Bei der nächsten Gruppe handelt es sich ebenfalls um Partikel, die von der Sonne stammen. Ihre Wirkung, das Polarlicht, ist sicher bereits den Menschen in grauer Vorzeit bekannt gewesen. Ihr direkter Nachweis ist jedoch erst in jüngster Zeit gelungen. Die charakteristischen Eigenschaften dieser relativ langsamen Strahlung gehen vielleicht am deutlichsten aus einer Art graphischer Fahrplan hervor [Fig. 9].

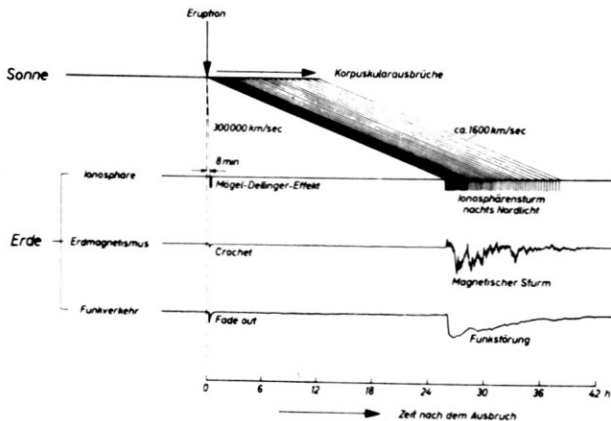


Fig. 9. Schematische Darstellung der solar-terrestrischen Vorgänge bei einer Sonneneruption mit folgendem Korpuskularsturm.

Man beobachtet gelegentlich auf der Sonne eine sog. chromosphärische Eruption, einen lokalen Lichtausbruch von einigen Minuten Dauer, der besonders deutlich in der Wasserstofflinie H_{α} zu erkennen ist. Gleichzeitig mit der Lichtemission geht Ultraviolett- und Röntgenstrahlung von der Sonne aus und erreicht nach 8 min die Erde. Die Röntgenstrahlung dringt bis etwa 60 km Höhe ein und erhöht die Ionisierung im unteren Teil der Ionosphäre so stark, dass kurze elektrische Wellen absorbiert werden. Der Kurzwellenfunkverkehr wird dadurch auf einige Minuten bis zu einigen Stunden unterbrochen. Man nennt diesen Effekt im deutschen Sprachgebrauch nach den Entdeckern Mögel-Dellinger-Effekt, im angelsächsischen Sudden Ionospheric Disturbance. Wegen der Zunahme der Leitfähigkeit steigt gleichzeitig der elektrische Strom, der in der Ionosphäre fließt, an. Den magnetischen Effekt, der sich dem permanenten Magnetfeld der Erde überlagert, nennt man Crôchet oder Solar Flare Effekt. In vielen Fällen markiert die Eruption auf der Sonne den Zeitpunkt, an dem ein Strom geladener Teilchen beginnt, die Sonne zu verlassen. Die Eruption ist sozusagen das Mündungsfeuer einer Salve, die erst wesentlich später, nämlich nach 20–40 Stunden, auf der Erde ankommt. Weil die ankommenden Partikel elektrisch geladen sind, werden sie von dem Erdmagnetfeld zu sehr merkwürdigen Bahnen gezwungen, und zwar können sie nur in zwei ringförmigen Zonen, den sogenannten Polarlichtzonen, in die Atmosphäre eindringen. Dort erzeugen sie auf der Nachtseite Polarlicht. Die magnetische Wirkung der gleichzeitig erzeugten elektrischen Ströme bleibt freilich nicht auf diese Zonen beschränkt; ein magnetischer Sturm ist auf der ganzen Erde zu beobachten, wenn auch seine Wirkungen in den Polarlichtzonen am stärksten sind. Auch die ionosphärische Wirkung reicht weit in die gemässigten Zonen hinein. Dass die erzeugende Strahlung aus Protonen und Elektronen besteht, hat man seit langem vermutet. Neuerdings hat man sie mit Raketen, die man in sichtbare Polarlichter hinein gestartet hat, direkt nachweisen können. Dabei wurde festgestellt, dass offenbar die Elektronen für die Erregung des sichtbaren Polarlichtes verantwortlich sind. Bei ihrer Abbremsung entstehen übrigens auch Röntgenstrahlen, die bis etwa 50 km Höhe in die Atmosphäre eindringen. Die Wirkung in der Ionosphäre ist sehr vielgestaltig. Im Polarlichtgürtel tritt durch die Röntgenbremsstrahlung eine Zunahme der Ionisation in Höhen unterhalb 100 km auf. In mittleren Breiten ist die auffallendste Begleiterscheinung eine starke Abnahme der Elektronenkonzentration in der F -Schicht. In niederen Breiten ist der Einfluss auf den Zustand der Ionosphäre gering.

Die Energie dieser Strahlung liegt etwa zwischen 10^2 und $5 \cdot 10^6$ eV. Sie ist damit viel energieärmer als die bisher besprochenen Strahlungen. Immerhin ist sie energiereicher, als man aus ihrer Reisegeschwindigkeit von der Sonne zur Erde annehmen sollte. Sie werden vermutlich durch einen noch nicht geklärten Mechanismus unterwegs beschleunigt. Es ist sehr wahrscheinlich, dass bei der Emission starke örtliche Magnetfelder auf der Sonne eine wichtige Rolle spielen und dass ein Teil dieser Magnetfelder in der Gaswolke mitgeführt wird. Sie liefern möglicherweise die Energie zur Nachbeschleunigung.

SONNENWIND

Es gibt gute Gründe für die Annahme, dass neben dieser gelegentlichen wolkenhaften Emission ein mehr oder weniger konstanter Strom von Partikeln von der Sonne ausgeht. Die Geschwindigkeit dieses sogenannten Sonnenwindes wird zu rd. 500 km/sec geschätzt. Das entspricht einer Energie von $10-10^4$ eV je nach der Masse der Teilchen. Offenbar hat der Sonnenwind eine interessante Konsequenz: Er nimmt sozusagen die Kraftlinien des Sonnenmagnetfeldes mit in den interplanetarischen Raum. Daher hat das Magnetfeld der Sonne nicht den Charakter eines Dipolfeldes, sondern ist vorwiegend radial gerichtet. [Fig. 10] zeigt, wie es vermutlich in einem Meridionalschnitt aussieht. In der äquatorialen Ebene hat es vermutlich spiralförmige Struktur [Fig. 11], da der Sonnenwind hinter der Drehung der Sonne zurückbleibt, ähnlich wie Wasserstrahlen aus einem Rasensprenger. Längs dieser Feldlinien bewegen sich wahrscheinlich auch die schnelleren Korpuskeln, von denen vorhin die Rede war; dabei wird das Magnetfeld lokal unter Umständen stark verzerrt. Es bilden sich magnetische "Flaschen," in denen die Teilchen einige Zeit gespeichert werden. Für das magnetische Feld im interplanetarischen Raum schält sich allmählich folgendes Bild heraus: In der Entfernung der Erdbahn hat es einen Wert von 10^{-3} und 10^{-5} T, der relativ stabil ist, solange keine Korpuskularströme auftreten. Innerhalb der Korpuskelwolken ist sein Wert merklich kleiner, ausserdem

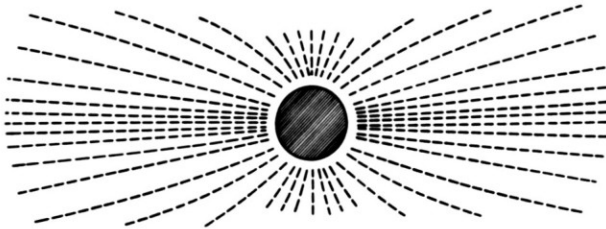


Fig. 10. Meridionalschnitt durch das Magnetfeld der Sonne (schematisch).

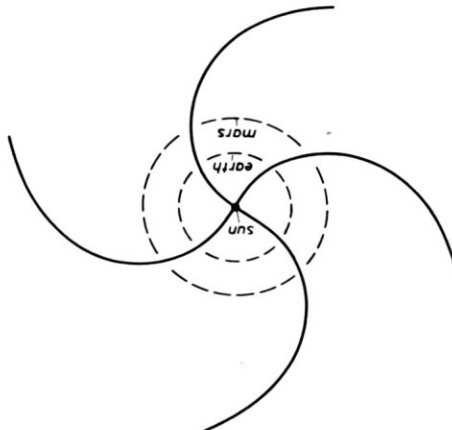


Fig. 11. Magnetfeld der Sonne in der Ebene der Planetenbahnen (schematisch).

schwankt es stark in seiner Amplitude und Richtung. Auch die Aussenbezirke des erdmagnetischen Feldes werden unter der Wirkung der Korpuskularwolke erheblich verzerrt.

WIRKUNG AUF LEBEWESSEN

Zum Schluss soll noch die Frage angeschnitten werden, welchen Einfluss die besprochenen Magnetfelder und Partikelströme auf ein Lebewesen haben, das sich in einem Raumschiff ausserhalb des schützenden Mantels der Atmosphäre befindet. Bei den magnetischen Feldern lässt sich diese Frage schnell beantworten. Die Felder im interplanetarischen Raum sind so schwach, dass man Mühe hat, sie überhaupt genau zu messen. Für die Raumfahrt sind sie bestimmt ungefährlich. Ihre Ausnutzung zu Navigationszwecken ist wegen ihrer Unregelmässigkeit undiskutabel.

Anders sieht es bei den Korpuskularstrahlungen aus. Sie stellen, abgesehen von den sehr unwahrscheinlichen Volltreffern grösserer Meteoriten, offenbar die grösste Gefahr für die Raumfahrt dar. Um es gleich vorweg zu nehmen: Es lässt sich beim derzeitigen Stand des Wissens noch nicht mit Sicherheit beantworten, wie gross diese Gefahr ist. Leider gestattet es die begrenzte Zeit nicht, ausführlich auf diese sehr interessanten Probleme einzugehen. Ich muss mich daher auf einige wenige Ergebnisse beschränken.

Die Wirkung durchdringender Strahlung misst man bekanntlich durch die Energie, die der Masseneinheit einer Substanz durch die Strahlung zugeführt wird, die sogenannte Dosis; sofern es sich um Luft handelt, ist die entsprechende Masseinheit das Röntgen. Die in einer beliebigen Substanz absorbierte Dosis misst man in rad; das ist die Abkürzung für Radiation absorbed dose. 1 rad entspricht 100 erg/g des bestrahlten Stoffes. Die biologische Wirkung im lebenden Gewebe wird in rem (Röntgen equivalent man) gemessen. 1 rem ist gleich 1 rad mal der biologischen Wirksamkeit der Strahlung bezogen auf Röntgenstrahlung. Die Toleranzdosis, die man für Menschen zulässt, die berufsmässig mit durchdringender Strahlung zu tun haben, ist in U.S.A. 5 rem/Jahr im Durchschnitt und 12 rem/Jahr im Maximum.

Welche Beträge sind nun von den verschiedenen Korpuskularstrahlungen, die in [Fig. 6] dargestellt sind, zu erwarten? Sobald wir uns vom Grunde des Luftozeans, unter dem wir normalerweise leben, erheben, steigt die Intensität der kosmischen Ultrastrahlung an und erreicht in ca. 30 km Höhe einen Wert, der nach oben hin konstant bleibt. Er erzeugt im Sonnenfleckenminimum eine Dosis von etwa 10 rem/Jahr. Im Sonnenfleckenmaximum nimmt sie etwa auf die Hälfte ab. Diese Dosis entspricht etwa der berufsmässig zulässigen Normaldosis in den U.S.A. Sie ist also nicht besorgniserregend. Zu dieser Grundbelastung, die überall im Aussenraum vorhanden ist, kommen nun weitere Dosen, die an bestimmte Räume oder Perioden gebunden sind. So ist bei einer einmaligen Durchquerung des van-Allen-Gürtels mit der aus ballistischen Gründen nötigen Geschwindigkeit mit weiteren 5 rem zu rechnen. Auch das ist noch tragbar, wenn man die Zahl der Durchquerungen auf einige wenige pro Jahr beschränkt. Ein dauerndes Verweilen im Maximum des Gürtels dürfte bereits nach 24 h zu einer Dosis führen, die in 50% der Fälle tödlich ist.

Am gefährlichsten sind zweifellos die Protonenstürme, die im Sonnenfleckenmaximum durchschnittlich 1–2 mal pro Monat auftreten. Nimmt man z.B. an, dass die Protonen Energien zwischen 30 und 400 MeV haben und dass das Energiespektrum wie $1/E^5$ abfällt, so überträgt ein Proton durchschnittlich 6 MeV auf 1g biologisches Gewebe. Bei einer integrierten Flussdichte von 10^5 Protonen pro cm^2 und sec in der Anfangsphase eines Sturmes führt dies zu Dosen von 80 rem/h. Selbst wenn man berücksichtigt, dass die Flussdichte zeitlich rasch abfällt, so ergeben sich bei starken Stürmen Dosen, die mit Sicherheit tödlich sind. Andererseits ergaben Registrierungen im Discoverer XVII, der 7 h nach dem Beginn des ausserordentlich starken Sturmes vom 12–16 November 1960 gestartet wurde, in 50 h nur eine akkumulierte Dosis von ca. 38 rep entsprechend 70–80 rem.

Es ist naheliegend, diese Gefahr durch Abschirmung abzumindern. Eine wirksame Abschirmung ist aber gar nicht einfach, da bei der Abbremsung im Schirm u.U. Röntgen- und γ -Strahlen entstehen, die schlimmer sind als die Primärstrahlung. Ausserdem sind die Gewichte für einen wirksamen Schutz erheblich. So schätzt van Allen, dass für den November 1960—Sturm eine Abschirmung von mindestens 2, 5 cm Aluminum erforderlich ist; das entspricht einer Metallmasse von 1 t Gewicht für den Schutz eines Menschen. Es gehört nicht allzuviel Phantasie dazu, sich die wahrscheinliche Lösung des Problems in der Zukunft vorzustellen: Das Raumfahrzeug wird mit Detektoren für energiereiche Protonen ausgerüstet sein, deren Ansprechen die Besatzung veranlasst, Schutzräume aufzusuchen, die aus Gewichtsgründen recht klein sein müssen. Eine wirksame Abschirmung des gesamten Fahrzeuges erscheint nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnis utopisch.

SCHLUSS

Zusammenfassend kann wohl gesagt werden, dass von den Umweltbedingungen aus gesehen die energiereichen Partikel im Augenblick das grösste Problem für eine bemannte Raumfahrt darstellen. Bevor man nicht genau Bescheid weiss über Energiespektrum sowie räumliche und zeitliche Verteilung der hochenergetischen Strahlungen in der hohen Atmosphäre und im interplanetarischen Raum, kann man nicht daran denken, einen Menschen den darin ruhenden Gefahren auszusetzen. Der weiteren Erforschung dieser Erscheinungen sollte meines Erachtens daher eine höhere Priorität eingeräumt werden, als den bemannten Erdumkreisungen in einigen 100 km Höhe, umso mehr, als die wissenschaftliche Ausbeute dieser Flüge recht bescheiden im Vergleich zu den Kosten ist.

REFERENCES

1. Ratcliffé, J. A., *Physics of the Upper Atmosphere*, New York, Academic Inc., 1960.
2. *Space Research, Proc. of 1st Internat. Space Science Symposium*, Nice, 1960, H. K. Kallmann-Bijl (Ed.), North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1960.

3. *Space Research II, Proc. of 2nd Internat. Space Science Symposium*, Florence, 1961, H. C. van de Hulst, C. de Jager, and A. F. Moore, (Eds.); North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1961.
4. *Science in Space*, Chap. VII in *Physics of Fields and Energetic Particles in Space*, Washington, D.C., National Academy of Science, National Research Council, 1960.
5. Otis O. Benson, Jr., and H. Strughold (Eds.), *Physics and Medicine of the Atmosphere and Space*, New York, Wiley, 1960.
6. Campbell, Paul A. (Ed.), *Medical and Biological Aspects of the Energies of Space*, New York, Columbia U. P., 1961.