

BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

SITZUNGSBERICHTE

JAHRGANG

1965

MÜNCHEN 1966

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Sonnenkorona und interplanetarer Raum

Von Ludwig Biermann in München

Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik

Mit 16 Abbildungen

Vorgetragen in der gemeinsamen Sitzung beider Klassen am 19. Juni 1964

Die Erscheinung der Sonnenkorona ist aus vielen Beobachtungen und Aufnahmen, die während totaler Sonnenfinsternisse gewonnen worden sind, bekannt. Die als Abb. 1 gezeigte Aufnahme wurde während der Finsternis des Jahres 1918 aufgenommen. Das Aussehen der Korona entspricht etwa demjenigen bei direkter Betrachtung mit dem Auge. Die Erscheinung deutet auf eine sehr ausgedehnte äußere Atmosphäre der Sonne; ihr Licht ist überwiegend gestreutes Sonnenlicht, das wegen der Abdeckung der sehr viel helleren Sonnenscheibe durch den Mond gegen den dunklen Himmels hintergrund sichtbar wird.

Daß auch der Raum zwischen der Sonne und den Planeten, der interplanetare Raum, von einem sehr dünnen Gas erfüllt ist, welches wie ein Wind von der Sonne ausgeht, haben erst neuere Arbeiten – darunter solche zur Theorie der Kometenschweife – gezeigt (Abb. 2). Die Richtung der Plasmaschweife der Kometen zeigt unmittelbar wie eine Rauchfahne die Strömung des solaren Windes an. In den letzten Jahren haben direkte Messungen von Raumsonden aus die aus den Kometenbeobachtungen gezogenen Schlüsse weitgehend bestätigt.

In beiden Fällen ist das Gas so heiß, daß die Atome in positive Ionen und freie Elektronen zerfallen sind; das Gas ist „ionisiert“ und befindet sich, wie der Physiker sagt, im Plasmazustand, dessen charakteristische Eigenschaften auf der Gegenwart der leicht beweglichen freien negativen Elektronen beruhen.

Der hier verwendete Plasmabegriff ist eigentlich aus einer Verlegenheit heraus entstanden. Um 1928 arbeitete der amerikanische Physiker Irving Langmuir über Gasentladungen und Lichtbögen und fand, daß im Inneren derartiger Entladungen

Ionen und Elektronen überall in gleicher Anzahl vorhanden sind, während in der Nähe der Elektroden oder der Wände im allgemeinen eine der beiden elektrischen Ladungen im Überschuß vorkommt, zum Beispiel infolge Überwiegens der positiven Ionen. Langmuir hielt es für notwendig, den Zustand des inneren raumladungsfreien Teiles, in dem die Elektronen und die Ionen gleich häufig sind und der den normalen Zustand eines ionisierten Gases repräsentiert, durch eine neue Bezeichnung zu kennzeichnen. Die Wahl derselben bildete den Gegenstand einiger Bemühungen Langmuirs und seines jüngeren Mitarbeiters Lewi Tonks, dem ich die folgende Geschichte verdanke. Beide strengten sich tagelang an, einen passenden Namen zu finden, ohne daß ihnen etwas Rechtes einfiel. Eines Morgens stürmte Langmuir ins Laboratorium und sagte zu Tonks: "Well, we'll call it the 'plasma'" – Nennen wir es doch „Plasma“; Langmuir nahm dabei Bezug auf die Analogie, die er damals sah zwischen dem undifferenzierten Aussehen des inneren Teiles einer Gasentladung und dem ähnlich undifferenzierten flüssigen Blutplasma, wie es zu jener Zeit vermutlich von den Biologen beschrieben wurde. Der von Langmuir vorgeschlagene Name fand dann rasch Eingang in die wissenschaftliche Literatur, in den letzten Jahren auch weit darüber hinaus.

Inzwischen ist der Plasmabegriff der Physik viel differenzierter geworden, und ich vermute, daß dies auch für denjenigen der Biologie gilt; daß der erstere historisch auf den viel älteren Plasmabegriff der Biologie zurückgeht, würde man heute kaum vermuten, wenn es nicht durch das Zeugnis eines der Nächstbeteiligten sichergestellt wäre.

Lassen Sie mich aber in die Bezirke der Astrophysik zurückkehren und zunächst einige ganz allgemeine Bemerkungen zur astronomischen Plasmaphysik machen.

Fast die gesamte Materie, die es in der Welt gibt, befindet sich – soweit wir wissen – im Plasmazustand; der Plasmazustand ist also die gewöhnlichste aller Zustandsformen der Materie. Das Plasma im interplanetaren Raum ist das nächste Beispiel eines Plasmas von kosmischen Dimensionen und das einzige, das uns für direkte Messungen und sogar für Experimente, die wir in ihm anstellen können, zugänglich ist.

Ein besonderer Zug der Plasmaphysik besteht in ihrer nahen Beziehung zur Elektrodynamik. Da nämlich in einem Plasma sehr leicht elektrische Ströme und damit Magnetfelder entstehen, da ferner einmal entstandene Magnetfelder unter kosmischen Verhältnissen eine sehr große Lebensdauer haben, haben wir in den kosmischen Plasmen geringer Dichte regelmäßig mit einem merklichen Einfluß der Magnetfelder auf alle Bewegungsvorgänge zu rechnen – im Grenzfalle sind die Magnetfelder, wie man sagt, im Plasma eingefroren. Zudem werden bei raschen Änderungen der Magnetfelder einzelne geladene Teilchen – Ionen und Elektronen – sehr leicht auf hohe Energien beschleunigt. Dieser Vorgang trägt höchstwahrscheinlich wesentlich zur Erzeugung der Kosmischen Ultrastrahlung bei, die überwiegend aus energiereichen Atomkernen, vor allem Protonen und α -Teilchen, besteht und für welche die abgekürzte, eigentlich zu allgemeine Bezeichnung Kosmische Strahlung üblich geworden ist. Ein Teil unserer Vorstellungen über die Magnetfelder im interplanetaren Raum beruhte ursprünglich auf Rückschlüssen, die aus den Beobachtungen der Kosmischen Strahlung gezogen werden.

Eine auch nur einigermaßen vollständige Übersicht über diese Gegenstände würde einen wesentlichen Teil der neueren Astrophysik berühren. Heute nachmittag möchte ich mich auf diejenigen Erscheinungen beschränken, die sich im Raum zwischen der Sonnenoberfläche und den Planeten, also im Bereich der Sonnenkorona und im interplanetaren Raum, abspielen, um an ihnen einige allgemeine Züge dieser kosmischen Plasmaphysik aufzuzeigen.

Vorweg sei bemerkt, daß es viele Berührungspunkte mit der Laboratoriumsplasmaphysik gibt; die Physik, die der kosmischen Plasmaphysik zugrunde liegt, ist natürlich die gleiche wie diejenige, die bei Laboratoriumsversuchen über Plasmen sehr hoher Temperatur benutzt wird; ein Fernziel dieser Arbeiten, die Beherrschung der Verschmelzung oder Fusion leichter Atomkerne unter kontrollierten Bedingungen, ist ja der Gegenstand vieler Arbeiten geworden. Ein Teil der Untersuchungen auf diesem Gebiet ist tatsächlich aus astrophysikalischen Fragestellungen entstanden. Wenn ich also zum Schluß noch ganz kurz auf Arbeiten zum Problem der Fusion eingehen werde, so möchte

ich damit versuchen, wenigstens an einem Beispiel die engen Beziehungen deutlich zu machen, die auch zwischen der irdischen Plasmaphysik und der Astrophysik bestehen.

Wir wenden uns nun unserem eigentlichen Gegenstande zu und betrachten noch einmal ein Bild der Sonnenkorona (Abb. 3), diesmal von der Finsternis des Jahres 1952, einer Zeit geringer Sonnenaktivität (1918, vgl. Abb. 1, war ein Jahr maximaler Aktivität). Der größte Teil des sichtbaren Lichtes ist Sonnenlicht, welches gestreut wird an den freien Elektronen des Plasmas, aus dem die Sonnenkorona besteht. Ein kleiner Bruchteil des Lichtes wird aber beigetragen von der Strahlung hochionisierter Eisenatome und anderer Ionen, deren Gegenwart auf eine sehr hohe Temperatur des Plasmas deutet. Diese wird bestätigt auf anderen Wegen, etwa durch Beobachtung der Strahlung in den Radiofrequenzbereichen; alle diese Rechnungen und Messungen legen Werte zwischen etwa einer und zwei Millionen Grad als typische Temperatur der Sonnenkorona nahe.

Die Strukturen, die auf den Bildern zu sehen sind, entstehen sicher mindestens zum Teil durch die Kräfte, die von den Magnetfeldern auf der Sonnenoberfläche ausgeübt werden; ferner spielen eine wichtige Rolle die Regionen lokaler Aktivität der Sonne, die sich in einer Vielfalt von Erscheinungen, wie Eruptionen und Protuberanzen, äußert (Abb. 4).

Am Sonnenrand beobachtet man häufig schon im unzerlegten Licht langlebige Gebilde, die ruhenden Protuberanzen oder Filamente, die man im spektral zerlegten Licht auch auf der Sonnenscheibe erkennen kann. Diese Filamente bestehen aus Plasma, welches sehr viel dichter und weniger heiß ist als das der Sonnenkorona in gleicher Höhe. Daß dies dichte Plasma in so großer Höhe über der Sonnenoberfläche schwebend gehalten wird, ist höchstwahrscheinlich eine Wirkung der Magnetfelder in ihrer nächsten Umgebung (Abb. 5). Die Beobachtungen der Magnetfelder an der Sonnenoberfläche zeigen, daß am Ort einer Protuberanz die magnetischen Kraftlinien stets horizontal verlaufen. Das dichte Plasma drückt das Magnetfeld etwas zusammen; die elektrischen Ströme, welche nach den Gesetzen der Elektrizität bei dem Zusammendrücken des Magnetfeldes entstehen, ergeben mit diesem zusammen eine aufwärts gerichtete Kraft, die das

Plasma der ruhenden Protuberanz in der Schwebe hält. Dies Bild enthält sicher noch nicht alle Züge, welche die Erscheinung einer ruhenden Protuberanz bestimmen, es dürfte aber den beobachteten stationären Zustand wohl im wesentlichen richtig beschreiben.

Die im Vergleich zur Sonnenoberfläche hohe Temperatur der Sonnenkorona – 1 bis 2 Millionen Grad gegen nur etwa 5000 Grad der Oberfläche – bedeutet, daß ihr Zustand sehr verschieden sein muß von dem des thermischen Gleichgewichts. Die Abweichung ist, um ein Bild zu gebrauchen, gerade im umgekehrten Sinne wie in einem kalten Raum, in dem man vor einem offenen Kaminfeuer sitzt; dort ist die Temperatur, die man der Strahlung des offenen Feuers zuordnen kann, relativ hoch, viel höher als die Lufttemperatur im Raum, die vielleicht nur wenige Grade über Null beträgt. Daher kann man sich in der Strahlungswärme eines Kamins oder der Sonne wohlfühlen trotz winterlicher Lufttemperatur. In der Sonnenkorona ist dagegen gerade umgekehrt die Temperatur des Gases, welches der Luft der Erdatmosphäre entspricht, viel höher, als es dem Strahlungsfeld im ganzen entspricht.

Da diese Verhältnisse auch für den Zustand des interplanetaren Raumes von großer Tragweite sind, sei noch kurz darauf eingegangen, wie man sich die Aufrechterhaltung dieser hohen Temperatur wahrscheinlich zu denken hat. Nach einem vor fast 20 Jahren vorgeschlagenen Bild stammt die zur Aufrechterhaltung dieses Zustandes nötige Energie – vielleicht ein Millionstel der Wärmeenergie der Sonne – aus den turbulenten Schichten der Oberfläche und wird zunächst als mechanische Energie durch Wellen von der Art von Schallwellen oder Schwerewellen, die aber gleichzeitig die lokalen Magnetfelder mit erfassen, nach oben, d. h. außen, transportiert, um schließlich dort in Wärmeenergie verwandelt zu werden. Das Resultat ist eine Erwärmung der Korona. Dieser Zustand hat gleichzeitig die Folge, daß normalerweise das Plasma der Korona langsam in den interplanetaren Raum hinausströmt, und zwar mit nach außen zunehmender Geschwindigkeit, derart, daß die Koronamaterie nach einigen Tagen vollständig von unten her ergänzt sein muß. Die Abströmgeschwindigkeit sollte ininigem Abstand von der Sonne schließlich einige hundert km/sec erreichen.

Wir wenden uns nun den Beobachtungen und Messungen zu, welche uns Aufschluß über die Verhältnisse im interplanetaren Raum geben. Der erste Hinweis darauf, daß mindestens gelegentlich Plasma von der Sonne in Erdnähe gelangt, kam von der Theorie der magnetischen Stürme. Die Erscheinung dieser Stürme – ich zeige Ihnen Beobachtungen der Schwankungen des Erdmagnetfeldes an einer großen Zahl von Stationen aus dem Jahre 1840 (Abb. 6) – ist seit über 100 Jahren bekannt; erst um 1930 zeigten die englischen Physiker Chapman und Ferraro, daß sie zurückzuführen ist auf die Wirkung von Plasmawolken, die mit Geschwindigkeiten von der Ordnung 1000 km/sec von der Sonne ausgeschleudert werden und schon in großem Abstand von der Erde in Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld treten. Am Erdboden resultieren dann weltweite charakteristische Störungen des Erdmagnetfeldes, wie sie auf dem Bild zu erkennen sind.

Die magnetische Unruhe gibt offenbar nur Aufschluß über das Plasma, welches in der Nähe der Ebene der Ekliptik emittiert wird; die Ebene fällt bis auf einen Winkel von 7° zusammen mit der Äquator-Ebene der Sonne.

Eine besondere Art von Plasma läßt sich aber im interplanetaren Raum auch in großem Abstand von diesen Ebenen beobachten in den Schweifen vieler hellerer Kometen. Diese Plasmaschweife unterscheiden sich von den gewöhnlich außerdem vorhandenen Staubschweiften im Aussehen dadurch, daß die Plasmaschweife fast geradlinig von der Sonne weggerichtet sind, während die Staubschweife im allgemeinen mehr oder weniger stark gekrümmt sind (Abb. 7). Eine sichere Entscheidung darüber, welche Art von Schweifen vorliegt, läßt sich natürlich nur aus Beobachtungen der Spektren gewinnen; die Staubteilchen reflektieren als feste Körper das Sonnenlicht und ergeben demgemäß ein kontinuierliches Spektrum, d. h. eine breite Verteilung über die verschiedenen Spektralfarben; die Molekülonen der Plasmaschweife dagegen leuchten nur in bestimmten Wellenlängen, deren Lage eine chemische Analyse ermöglicht. Die Spektralanalyse der Kometenmaterie ist allerdings bis jetzt dadurch begrenzt, daß die wichtigsten Emissionen wahrscheinlich in den kurzwelligen Spektralbereichen liegen, die von der Erdatmosphäre ver-

schluckt werden. Hier werden aber Spektralaufnahmen von Raketen oder Satelliten aus in naher Zukunft Aufschlüsse über die bisher unbeobachtbaren Bestandteile geben.

Ein anderes Kennzeichen, welches oft schon für eine sichere Unterscheidung ausreicht, besteht in der reichen Strukturierung und der starken Variabilität der Plasmaschweife, ferner in den hohen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, die man durch Vergleich aufeinanderfolgender fotografischer Aufnahmen unmittelbar ableiten kann (Abb. 8, s. auch Abb. 2); die Staubschweife dagegen weisen keine vergleichbaren Erscheinungen auf.

Es wurde vor etwas über 10 Jahren gezeigt, daß die allgemeinen Eigenschaften der Plasmaschweife, insbesondere ihre hohen Geschwindigkeiten, ihre Richtung und ihre Variabilität zurückgeführt werden müssen auf die Wirkung solaren Plasmas, welches mit Geschwindigkeiten von mehreren 100 bis über 1000 km/sec sich radial durch den interplanetaren Raum bewegt. Das interplanetare Plasma muß demnach identisch sein mit der solaren Teilchenstrahlung, d. h. dem von der Sonne ausgesandten Plasma. Man kann daher die Kometen mit Plasmaschweiften auffassen als natürliche Sonden, welche uns das Vorhandensein und den Bewegungszustand von der Sonne stammenden interplanetaren Plasmas verraten.

Die Schlüsse, welche sich aus den Beobachtungen der Kometen hinsichtlich der Eigenschaften des interplanetaren Plasmas ziehen lassen, sind nun die folgenden: Das interplanetare Plasma strömt in den Entfernungen, in denen sich Kometen beobachten lassen, d. i. etwa von der Merkur-Bahn auswärts, in erster Näherung radial von der Sonne fort, wenn auch mit gelegentlichen Schwankungen. Eine genauere Analyse der Richtung der Kometenschweife deutet auf mittlere Plasma-Geschwindigkeiten um etwa 400 bis 500 km/sec. Ferner werden Kometen mit Plasmaschweiften nicht nur in der Nähe der Ekliptik beobachtet, sondern sie kommen auch in hohen Breiten, von der Sonne aus gesehen, vor; die Strömung scheint demgemäß den ganzen interplanetaren Raum zu erfüllen. Schließlich zeigen die Beobachtungen der Kometen keinen auffälligen Unterschied zwischen den Phasen niedriger Sonnenaktivität, die etwa durch geringere Häufigkeit von Sonnenflecken angezeigt werden, und Zeiten hoher

Sonnenaktivität. Nur diejenigen Ereignisse, die auf der Erde sich durch starke magnetische Unruhe oder magnetische Stürme anzeigen und die sich oft auch in den Kometenschweif nachweisen lassen, sollten bei geringer Sonnenaktivität entsprechend seltener sein. Allgemein gesprochen, scheint aber die von der Sonne fortgerichtete Plasmaströmung stets vorhanden zu sein und in alle Richtungen zu gehen. Dieser Befund hat Anlaß gegeben zu der schon erwähnten Bezeichnung des interplanetaren Plasmas als solarer Wind. Sie soll andeuten, daß das normalerweise im interplanetaren Raum vorhandene Plasma solaren Ursprungs ist – dies hatten die Beobachtungen der Kometenschweife gezeigt – und daß seine Entstehung – wie wir gesehen hatten – verknüpft ist mit der Hydrodynamik der äußeren Atmosphäre der Sonne.

Da es in den letzten Jahren möglich geworden ist, den solaren Wind wenigstens in der Ekliptik direkt zu messen, will ich auf andere indirekte Beobachtungsmethoden nicht weiter eingehen. Ich will aber die Hauptresultate der direkten Messungen kurz beschreiben und diskutieren.

Die meisten der bisher bekannt gewordenen Messungen verdanken wir der Venus-Sonde Mariner II (Abb. 9). Diese Raumsonde trug ein Meßinstrument, welches unmittelbar den Fluß der von der Sonne kommenden Teilchen anzeigte. Außerdem gab es Aufschluß über die Geschwindigkeitsverteilung dieser Teilchen, aus der sich durch eine weitere Analyse die mittlere Geschwindigkeit sowie die Temperatur und die Dichte der Ionen – nur diese wurden gemessen – ableiten ließen (Abb. 10). Die Messungen erstreckten sich über etwa 100 Tage; mit der Annäherung an die Venus wuchs leider die Temperatur in der Raumsonde so stark an, daß kurz nach der Begegnung mit dem Planeten die wichtigsten Meß- und Kontrollinstrumente an Bord der Raumsonde ausfielen.

Die Messungen zeigten einen Teilchenfluß, der im allgemeinen von der Größenordnung einiger 100 Millionen Ionen/cm²/sec war (Abb. 11). Die mittlere Geschwindigkeit während der ganzen Zeit betrug fast genau 500 km/sec, ihre Schwankungen waren korreliert mit der Unruhe des Magnetfeldes auf der Erde in der Weise, daß stärkere erdmagnetische Unruhe verknüpft war mit höherer Geschwindigkeit des solaren Windes. Die Temperatur

schien zwischen einigen 10000° und Werten oberhalb von 100000° zu schwanken; diese Werte sind allerdings eher als obere Grenze anzusehen. Die Dichte, die sich aus dem Ionenfluß und der mittleren Geschwindigkeit ableiten läßt, beträgt im Mittel mindestens einige Ionen/cm³; ihr Wert ist aber mit noch größerer Unsicherheit behaftet – neuere Messungen scheinen auf etwas höhere Werte zu deuten. Im Einklang mit der Erwartung wurde während der ganzen Meßperiode stets ein von der Sonne kommender Teilchenfluß beobachtet.

Für die Hydrodynamiker unter Ihnen möchte ich erwähnen, daß die sogenannte Mach-Zahl, die sich aus diesen Daten ergibt, d. i. das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit, unter ruhigen Verhältnissen zwischen etwa 5 und 10 liegt; es handelt sich bei dem solaren Wind also um eine ausgesprochene Überschallströmung.

Vor einigen Monaten haben die Amerikaner einen Satelliten mit ähnlichen Meßinstrumenten in eine Umlaufbahn gebracht, deren größte Entfernung von der Erde etwa der halben Mondentfernung entspricht. Dort ist der freie interplanetare Raum erreicht; die ersten Messungen haben bisher im ganzen die Schlüsse aus den Beobachtungen mittels der Venus-Sonde bestätigt; nur die Teilchendichte ergab sich, wie schon erwähnt, etwas höher. Die Reduktion der Messungen ist aber noch im Gange, ich kann daher keine weiteren Einzelheiten darüber mitteilen.

Andere Instrumente an Bord der Venus-Probe maßen Richtung und Stärke der Magnetfelder im interplanetaren Raum. Diese Messungen haben ergeben, daß fast immer Magnetfelder einer Stärke von einigen Gamma vorhanden sind; das Gamma ist die in der Geophysik übliche Einheit, die dem 100000-ten Teil eines Gauss entspricht (das Erdmagnetfeld besitzt in mittleren Breiten eine Stärke von 0.2 Gauss). Während kürzerer Zeiträume, sagen wir bis zu einigen Stunden, schwanken diese Felder beträchtlich. Faßt man aber die Werte für einen Tag zusammen, so ergeben sich für etwa 40% der Zeit Anzeichen für großräumige Spiralstrukturen, und zwar genau diejenigen, die man nach der Theorie aus der Überlagerung der Rotation der Sonne um ihre Achse und der radialen Bewegung des Plasmas von der Sonne weg erwarten würde, da ja die Magnetfelder in dem Plasma eingefroren

zu denken sind (Abb. 12). Die Rotationsdauer der Sonne beträgt 25 Tage, die etwa 14° Winkeldrehung pro Tag entsprechen. In Erdentfernung wiederum würde eine Bewegung entlang der Erdbahn mit 14° pro Tag etwa dem 14-fachen der Erdgeschwindigkeit um die Sonne herum entsprechen, das sind rund 440 km/sec. Da dieser Wert nahe dem der mittleren Strömungsgeschwindigkeit des solaren Windes ist, sollte der Winkel, der sich durch die Überlagerung der Rotation der Sonne und der radialen Ausströmung ergibt, um etwa 45° betragen.

Innerhalb der ziemlich großen Ungenauigkeit der Messungen der Magnetfelder entspricht dies auch etwa der Beobachtung, aber wie gesagt nur für einen Teil des Beobachtungszeitraumes. Wie die Messungen während der anderen Beobachtungszeiträume aufzufassen sind, ist zur Zeit noch unklar. Andere Messungen auch schon früherer Raumsonden bezogen sich auf die kosmische Ultrastrahlung im interplanetaren Raum und ihre Abhängigkeit von der Sonnenaktivität.

Sowohl hinsichtlich der Teilchendichte als auch der Stärke der Magnetfelder entsprechen die Verhältnisse im interplanetaren Raum ungefähr denen in den noch sehr viel weiter ausgedehnten Räumen zwischen den Sternen unseres Sternsystems, des Milchstraßensystems. In diesem entstehen auch heute noch Sterne durch Kondensation aus der interstellaren Materie, die aber in ihrer Zusammensetzung dem interplanetaren Medium in etwa gleichen wird. Ferner haben wir mit einer Wechselwirkung zwischen dem Plasma, den Teilchen der Kosmischen Strahlung und den Magnetfeldern, die beide aneinander koppelt, zu rechnen. Die allgemeinere Bedeutung der gegenwärtigen Messungen im interplanetaren Raum besteht also darin, daß sie uns erlauben, die Modellvorstellungen zu prüfen, welche für die Interpretation der Beobachtungen, die sich auf die Vorgänge im interstellaren Raum und in noch größeren Entfernungen beziehen, unentbehrlich sind.

Ich hatte schon angedeutet, daß man von Raketen aus auch Experimente im interplanetaren Raum anstellen kann. Von den verschiedenen Möglichkeiten, an die man hier denken kann, möchte ich nur eine kurz erwähnen, die durch unsere Arbeiten über die Kometen nahegelegt wurde. Die Dichte in den Kometen-

schweifen ist ungeheuer gering; dies führt auf die Frage, wieviel künstlich im interplanetaren Raum erzeugtes Plasma man von der Erde aus noch sollte beobachten können. Die Rechnung zeigt, daß mit geeigneten Mitteln Mengen von der Ordnung einiger Kilogramm noch in Entfernungen von etwa 100000 km beobachtbar sein sollten. Dies Experiment würde etwa auf die Erzeugung eines künstlichen Kometenschweifes herauslaufen; wir sind dabei, die hier bestehenden Möglichkeiten durch praktische Vorversuche, die bisher in ionosphärischen Höhen durchgeführt worden sind, zu klären (Abb. 13).

Die Messungen in Erdnähe mit Hilfe von Satelliten und Raumsonden haben schließlich Ergebnisse gebracht, die für die Geophysik von großer Bedeutung sind. Diese Messungen beziehen sich zunächst einmal auf die Wechselwirkung zwischen dem Erdmagnetfeld und dem solaren Wind. Nach der Theorie des Erdmagnetfeldes, das am Erdboden etwa dem einer homogen magnetisierten Kugel entspricht, sollte es in 10 Erdradien Abstand auf etwa $\frac{1}{1000}$ seiner Stärke an der Erdoberfläche abgesunken sein. Man kann damit leicht ausrechnen, daß in diesem Abstand von der Erde die Energiedichte des Erdmagnetfeldes etwa gleich der Energiedichte des solaren Windes ist, genauer gesagt, gleich der Dichte seiner Bewegungsenergie. Demgemäß wird man auf Grund der starken Wechselwirkung zwischen einem bewegten Plasma und einem gegebenen Magnetfeld, welche nach der Plasmaphysik und Magnetohydrodynamik erwartet wird, folgern, daß in Abständen oberhalb von 10 Erdradien das Erdmagnetfeld infolge seiner Wechselwirkung mit dem solaren Wind weitgehend abgeschirmt sein wird. Tatsächlich haben die Messungen ergeben, daß in etwa 10 Erdradien Abstand sich die Verhältnisse vollständig ändern in dem Sinne, daß außerhalb dieser Grenze der solare Wind sich als direkt gemessener Plasmafluß geltend macht, außerdem aber durch seinen Einfluß auf die Magnetfelder, die dort nicht mehr dem Erdmagnetfeld zugerechnet werden können.

Nach den bisher vorliegenden Messungen mit verschiedenen Raumsonden und Satelliten ergibt sich für die Struktur der Grenzfläche, von der ich eben gesprochen hatte, etwa folgendes Bild (Abb. 14). Die Gestalt der Magnetosphäre, das ist der im

wesentlichen vom Erdmagnetfeld beherrschte Teil der äußersten Erdatmosphäre, ist etwa eiförmig; allerdings läßt sich nicht sagen, ob die Erde etwa einen von der Sonne weggerichteten Schweif besitzt, der sozusagen dem Schatten der irdischen Magnetosphäre im solaren Wind entsprechen würde.¹ Gewisse Beobachtungen deuten darauf hin, daß der Mond eine ausgeprägte Störung in der Strömung des solaren Windes bewirkt, die noch weit hinter dem Mond, von der Sonne aus gesehen, gemessen wurde.

Aus der früher erwähnten Tatsache, daß der solare Wind eine Überschallströmung darstellt, läßt sich folgern, daß in etwas größerer Entfernung zur Sonne hin, bei etwa 14 Erdradien, noch eine weitere Diskontinuitätsfläche, eine Stoßfront in der Sprechweise der Hydrodynamiker, liegen sollte. Diese wäre etwa die Grenze, außerhalb derer der wirklich freie interplanetare Raum erreicht wird, in dem also die Nähe der Erde sich nicht mehr auswirkt. Auch für diese Übergangsfläche sind erste Anzeichen gefunden worden, die allerdings noch bestätigt werden müssen. Das Strömen des solaren Windes um die Erde herum scheint mit einer Energieübertragung verbunden zu sein, welche Schwankungen des Magnetfeldes in der äußersten Magnetosphäre zur Folge hat, ferner die Beschleunigung einzelner Ionen und Elektronen auf hohe Energien. Ein Teil der energiereichen Teilchen in den sogenannten Strahlungsgürteln der Erde, die mittels der ersten Erdsatelliten vor etwa 5 Jahren entdeckt wurden, dürfte auf diese Art entstehen. Durch diese Messungen ergeben sich ganz neue Gesichtspunkte für die Interpretation mancher geophysikalischer Erscheinungen, z. B. der Nordlichter.

Damit möchte ich den Bereich der kosmischen Plasmaphysik verlassen, um noch ganz kurz von den Laboratoriumsexperimenten zu sprechen, die sich ebenfalls auf Plasmen hoher Temperatur beziehen.

Das gegebene Mittel, um im irdischen Laboratorium ein Plasma hoher Temperatur zu erzeugen und von den Gefäßwänden, mit denen es natürlich nicht in Kontakt sein darf, fernzuhalten,

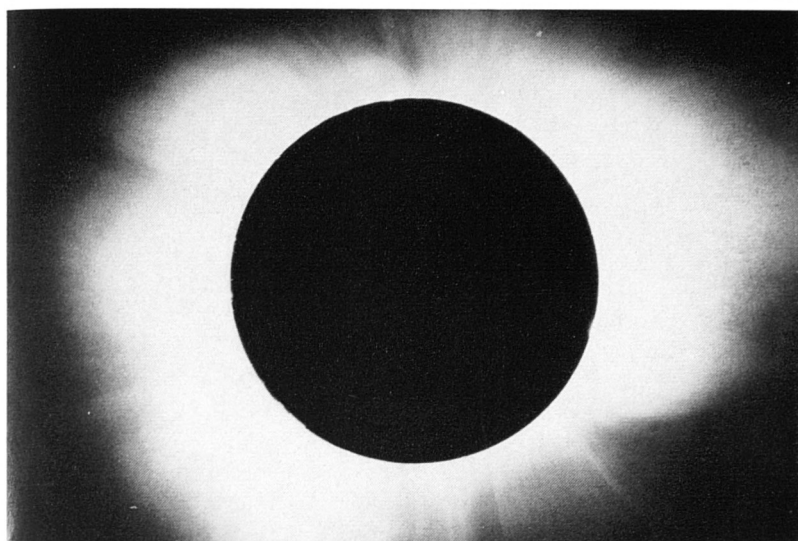
¹ Anmerkung Januar 1955: Messungen mit einem amerikanischen Satelliten, die soeben bekannt geworden sind, haben in der Tat die Existenz eines magnetischen Schweifes der Erde ergeben, der mindestens einige 100000 km in den interplanetaren Raum hinausreicht.

sind starke Magnetfelder. Ihre Wirkung entspricht qualitativ derjenigen des Erdmagnetfeldes, welches das solare Plasma daran hindert, sich der Erde auf weniger als 10 Erdradien zu nähern, oder der solaren Magnetfelder, welche die Filamente tragen. In allen diesen Fällen und im Laboratorium muß ein Magnetfeld vorhanden sein, dessen Druck mindestens so stark ist wie der des Plasmas, welches von den Magnetfeldern eingeschlossen oder getragen werden soll.

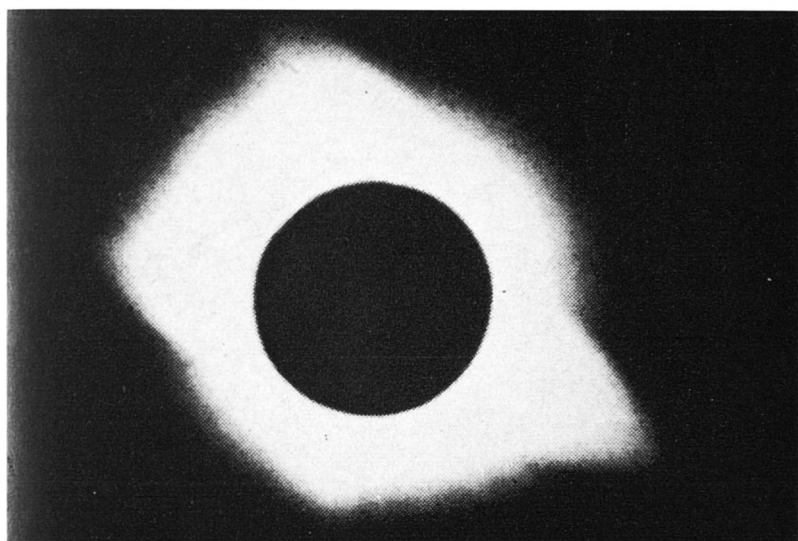
Als Beispiel dieser Experimente will ich nur eine einzige Art einer Entladung besprechen, deren Prinzip in dem folgenden Bild dargestellt ist (Abb. 15). Ein sehr starker elektrischer Strom, der aber nur für einen kleinen Bruchteil einer Sekunde andauert, wird um ein zylinderförmiges Gefäß so herumgeführt, daß im Innern ein parallel zur Achse des Zylinders gerichtetes Magnetfeld (B) entsteht. Die magnetische Energiedichte entspricht bei diesem Experiment einem Druck von bis zu einigen 100 Atmosphären. Dabei gelingt es, ein vorher auf andere Art in dem zylindrischen Gefäß erzeugtes Plasma so stark zusammenzudrücken, daß seine Temperatur um 10000000° beträgt, das ist etwa die Temperatur, die im Innern der Sonne herrscht (Abb. 16). Da diese Temperatur einige 10000-mal höher ist als die Temperatur unserer Atmosphäre, kann die Dichte trotz des hohen Druckes nur ein Bruchteil derjenigen der Erdatmosphäre sein. Diese Experimente haben es ermöglicht, Plasmen der angegebenen Temperatur über Zeiten von bis zu $1/50$ Millisek. festzuhalten, das ist immerhin etwa 10-mal mehr als der Zeit entsprechen würde, in der das Plasma durch die Wärmebewegung seiner Teilchen abströmen würde. Bei zukünftigen Experimenten hofft man durch Variation der Versuchsbedingungen noch höhere Temperaturen und längere Zeiten zu erreichen.

Das gegenwärtige Hauptziel aller dieser Arbeiten ist, die Physik der Plasmen im Bereich von $10-100000000^{\circ}$ Temperatur so zu beherrschen, daß man gleichzeitig über relativ lange Zeiten eine hohe Dichte aufrechterhalten kann. Die bisherigen Fortschritte auf diesem Wege gestatten die Hoffnung, daß man in der Beherrschung hoher Temperaturen und Dichten noch sehr viel mehr erreichen wird, als bisher erreicht worden ist. Eine Antwort auf die Frage, ob sich daraus wirtschaftlich interessante Möglichkeiten

ergeben, z. B. eine technische Beherrschung der Fusion, läßt sich im Augenblick nicht geben; vielmehr werden voraussichtlich noch für eine ganze Anzahl von Jahren die eigentlich physikalischen Fragen gegenüber denen der möglichen Anwendungen im Vordergrund stehen. Ganz sicher ist aber, daß die Astrophysik wie die Geophysik auch weiterhin reichen Gewinn von diesen Arbeiten haben werden.



1



2

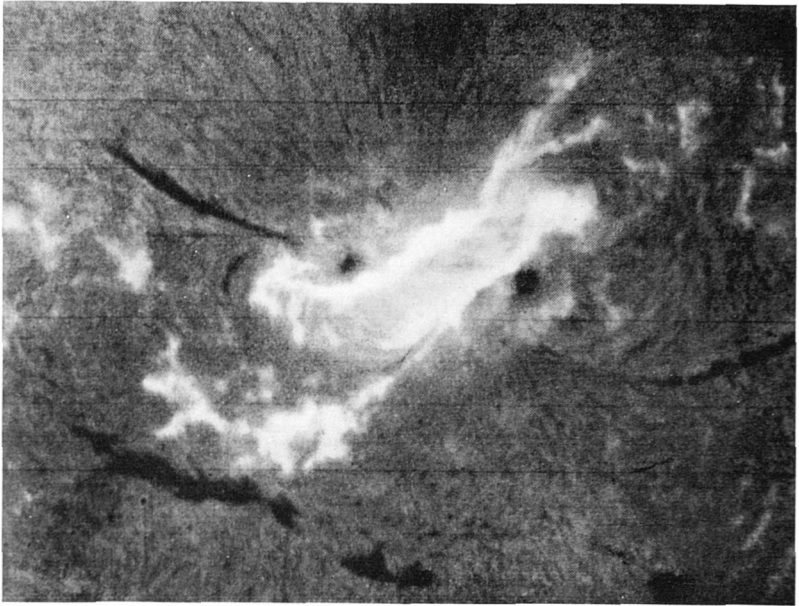
Abb. 1. Sonnenkorona-Aufnahme während der Finsternis des Jahres 1918.

Abb. 2. Sonnenkorona zur Zeit geringer Sonnenaktivität (aufgenommen am 25. 2. 1952).

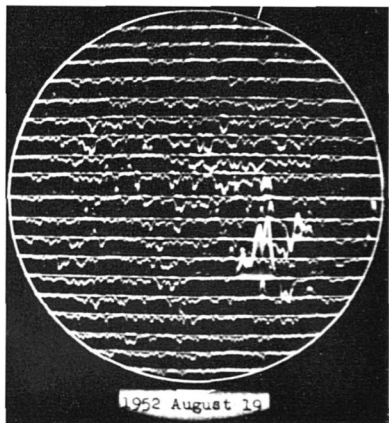
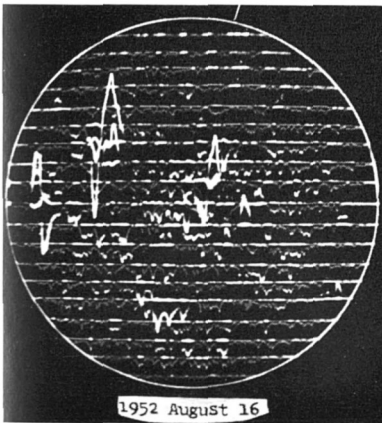
München Ak. SB. 1965 (Biermann)



Abb. 3. Komet Morehouse 1908 am 20. (oben) und 21. November mit von der Sonne weggerichtetem Plasmaschweif (Sterne strichförmig infolge der Eigenbewegung des Kometen während der Aufnahme).



4



5

Abb. 4. Chromosphärische Eruption über einer aktiven Fleckengruppe (hell) und ruhenden Protuberanzen (dunkel, filamentartig), aufgenommen im Licht der Linie $H\alpha$ am 25. 7. 1946.

Abb. 5. Registrierungen der lokalen Magnetfelder auf der Sonnenoberfläche. Die Abweichung von der jeweiligen Geraden gibt die Stärke und Richtung des Magnetfeldes an; eine Abweichung um einen Strichabstand entspricht dabei etwa 10 Gauß.

TAFEL IV

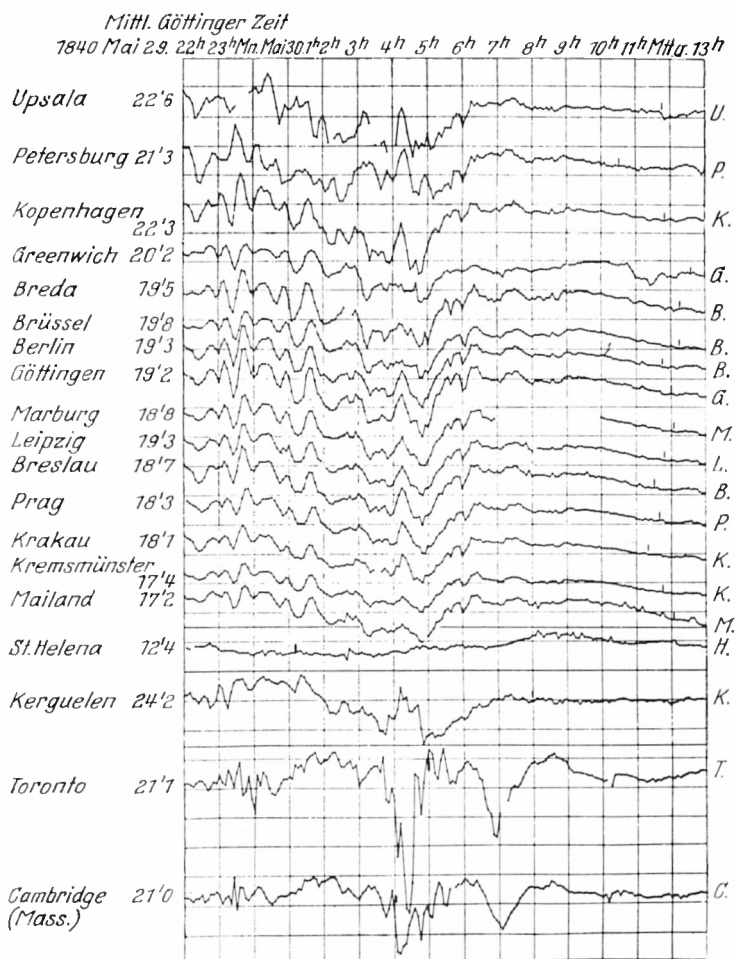
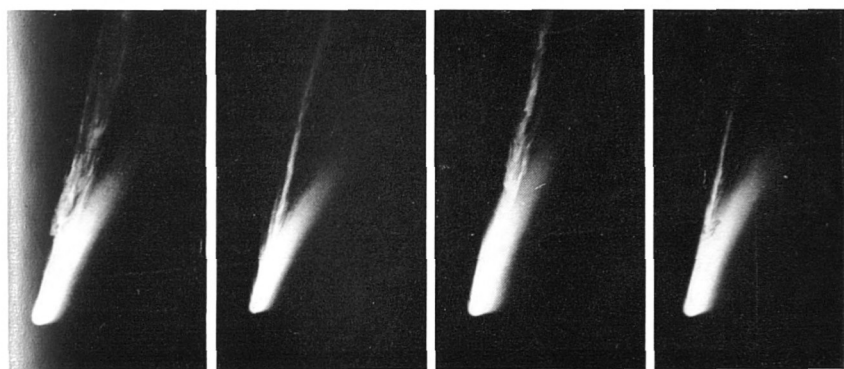


Abb. 6. Erdmagnetischer Sturm am 29./30. Mai 1840 nach den Registrierungen der Stärke des Erdmagnetfeldes an 19 Stationen.



7



August 22

August 24

August 26

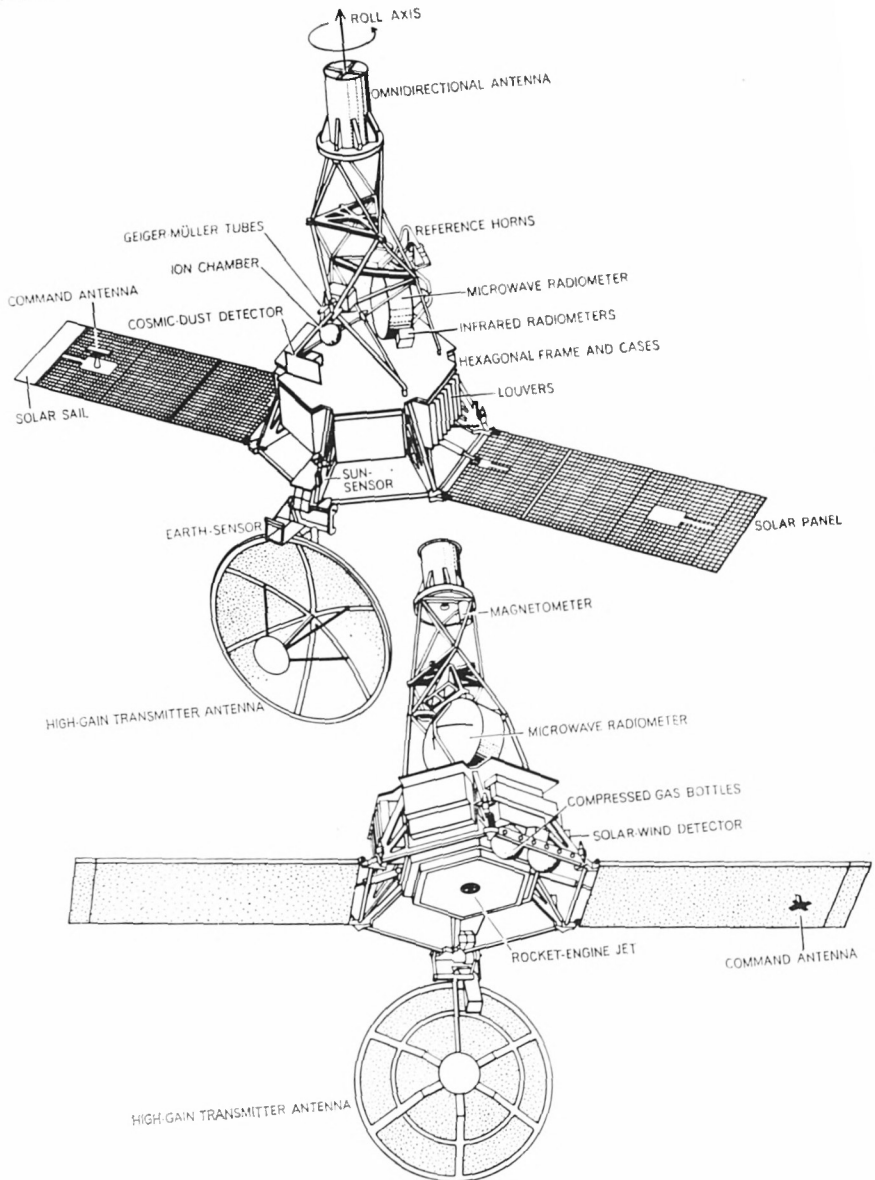
August 27

8

Abb. 7. Komet Mrkos 1956 mit Plasmaschweif (ungefähr gerade, strukturiert) und Staubschweif (stärker gekrümmt, diffus).

Abb. 8. Veränderungen im Plasmaschweif des Kometen Mrkos zwischen dem 22. und 27. August 1957 (die geringen Verschiedenheiten im Aussehen des stärker gekrümmten Staubschweifs sind aufnahmetechnisch bedingt).

TAFEL VI



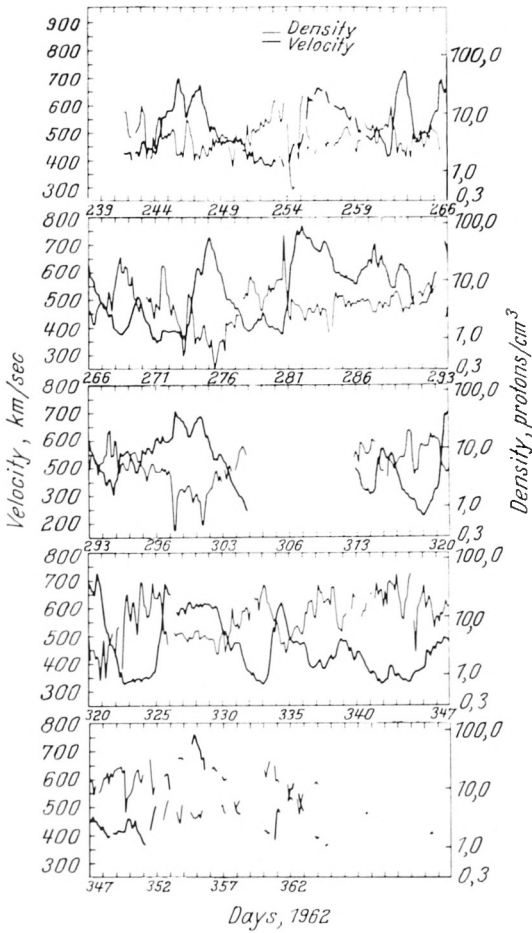


Abb. 9. Aufbau der Venus-Sonde Mariner II (ungefähre Querausdehnung 5 m) (aus „Scientific American“ 209, S. 70, 1963).

Abb. 10. Registrierungen der Dichte (schwächere Kurve, rechte Skala) und Geschwindigkeit (linke Skala) des solaren Plasmawindes während des Fluges zur Venus (September bis Dezember 1962).

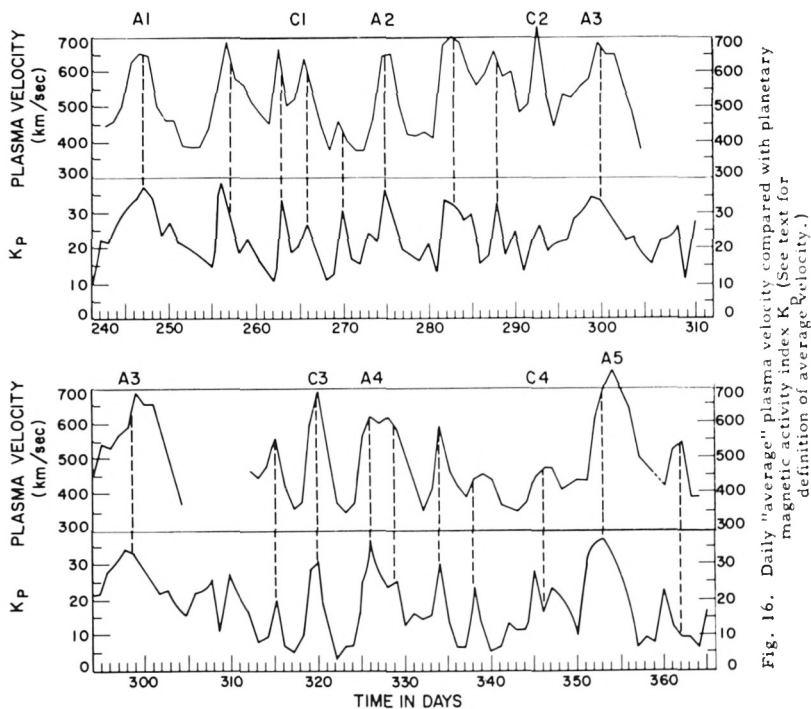


Fig. 16. Daily "average" plasma velocity compared with planetary magnetic activity index K_p (See text for definition of average velocity.)

Abb. 11. Korrelation zwischen der Plasmageschwindigkeit (Tagesmittel) und der Kennziffer der erdmagnetischen Aktivität K_p während des gleichen Zeitraumes.

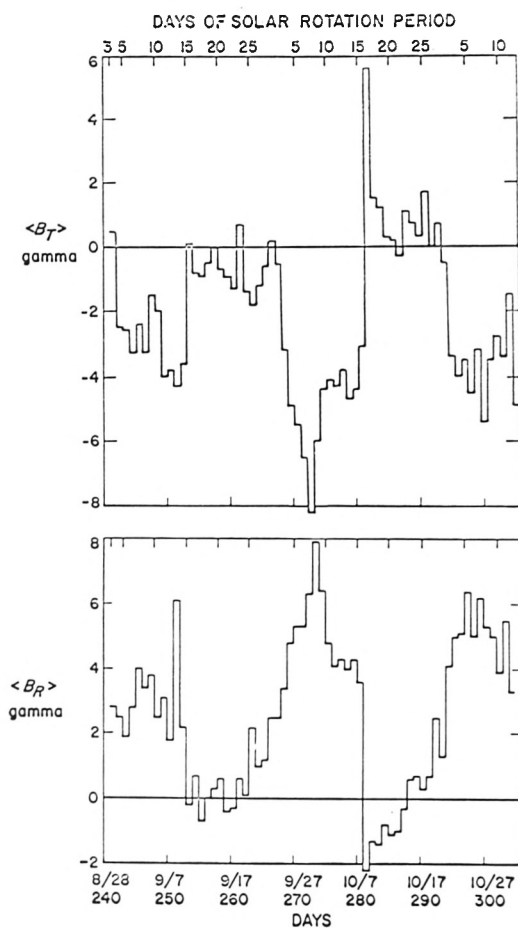
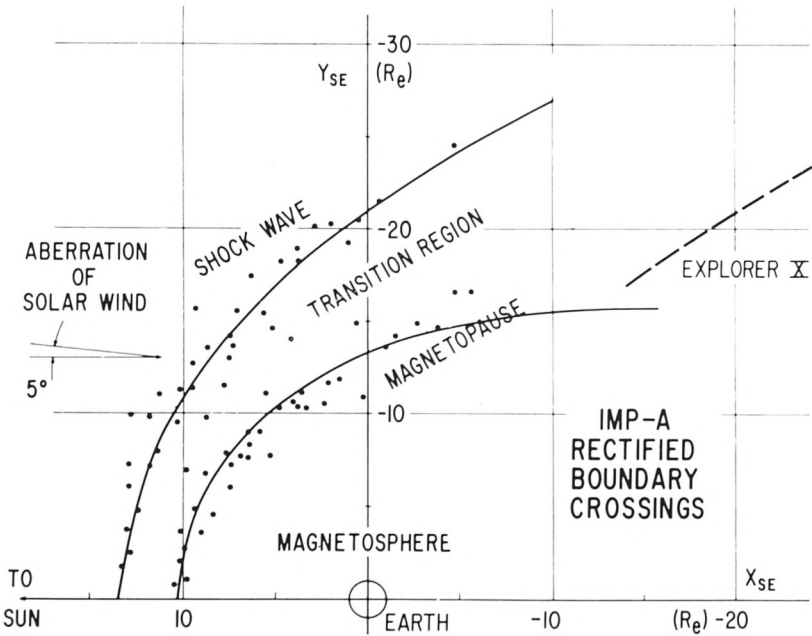
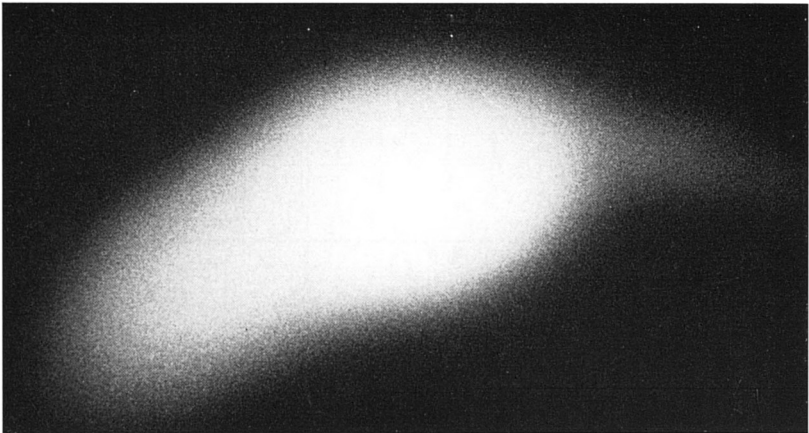


Abb. 12. Azimuthale (in der Ebene der Ekliptik) und radiale (parallel zur Verbindungslinie Sonne – Raumsonde) Komponente des interplanetaren Magnetfeldes im September und Oktober 1962.



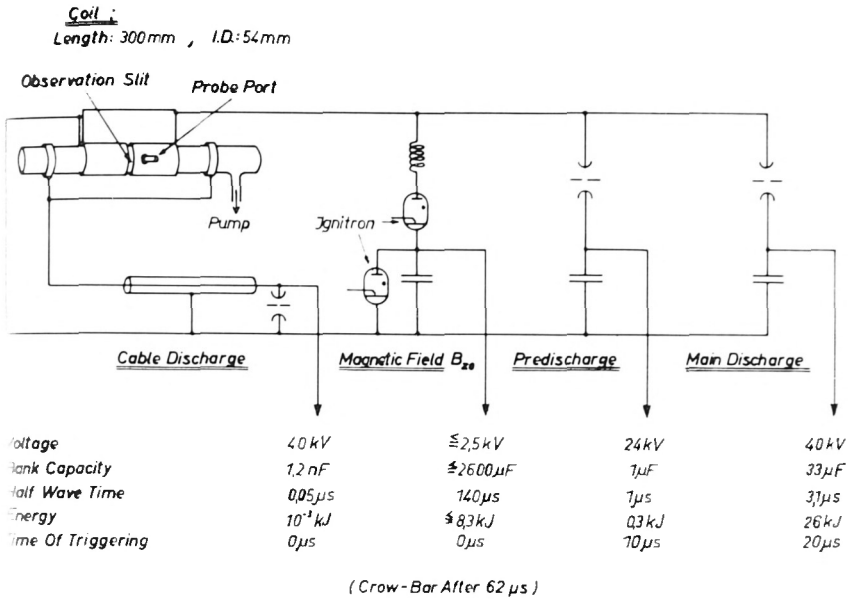
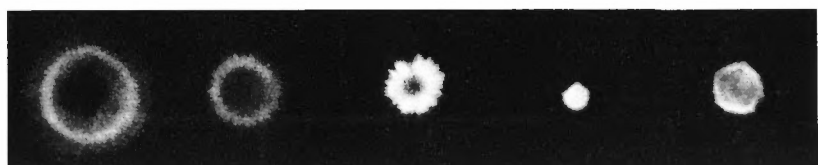


Abb. 13. Strontiumwolke in der oberen Ionosphäre (186 km), von einer Höhenrakete ausgestoßen (aufgenommen in der Sahara am 14. 2. 1964 mit Interferenzfilter 4607 Å von einer Arbeitsgruppe des Instituts für extra-terrestrische Physik im Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik.

Abb. 14. Grenzflächen zwischen Magnetosphäre und interplanetarem Plasma.

Abb. 15. Schema des Aufbaues einer elektrischen Entladung zur Erzeugung eines sehr heißen Plasmas (sog. Theta-Pinch, s. Text).



1

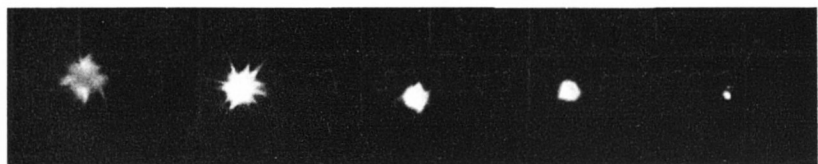
2

3

4

5

16a



6

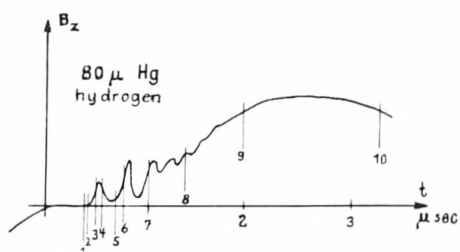
7

8

9

10

16b



16c

Abb. 16. Aufnahmen längs der Seele in verschiedenen Stadien der Entladung (B_z = Magnetfeld parallel zur Seele, t = Zeit in millionstel Sekunden).