Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 7 (1962)
Heft: 76

Artikel: Die Strahlungsgürtel der Erde
Autor: Frauenfelder, R.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-900008

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

DIE STRAHLUNGSGÜRTEL DER ERDE

Von R. FRAUENFELDER, Zürich

Das interessanteste Ergebnis, das sich bis jetzt aus der Erforschung der nächsten Nachbarschaft der Erde mit Hilfe der Raketen und künstlichen Erdsatelliten ergeben hat, ist zweifelsohne die Entdeckung des inneren und des äusseren Strahlungsgürtels der Erde. Diese Strahlungsgürtel bestehen aus elektrisch geladenen kosmischen Teilchen – zur Hauptsache aus Elektronen und Protonen – und erstrecken sich einige zehntausend Kilometer weit in den interplanetaren Raum hinaus.

Die Entdeckung der Strahlungsgürtel kam für die interessierten Fachleute nicht völlig überraschend. Schon im Jahre 1953 untersuchte eine Gruppe von Physikern von der Staatsuniversität Iowa unter der Leitung von van Allen die kosmische Strahlung im Gebiete der nördlichen Nordlichter, d. h. bei ungefähr 67° geomagnetischer Breite. Sie brachten mit Hilfe von Ballonen kleine Raketen bis in Höhen von 20 km, von wo aus diese aus eigenem Antrieb in noch grössere Höhen flogen. In den Raketen eingebaute Instrumente registrierten im Gebiete der nördlichen Nordlichter eine stark erhöhte Intensität kosmischer energiearmer Elektronen. Nördlich und südlich von 67° geomagnetischer Breite zeigte die Intensität der kosmischen Strahlung einen normalen Verlauf. Dieses lokale Maximum der kosmischen Strahlung konnte damals nicht erklärt werden und stand im Widerspruch mit der Theorie, welche ein Intensitätsmaximum der kosmischen Strahlung an den magnetischen *Polen* voraussagte, weil die kosmischen Teilchen die Erdoberfläche nur dort vom Erdmagnetfeld ungehindert erreichen können. 1957 wurde ein entsprechendes Intensitätsmaximum der energiearmen kosmischen Strahlung auch in der südlichen Nordlichterzone entdeckt und 1958 wurden in den Nordlichterzonen neben energiearmen Elektronen auch energiereiche Protonen gemessen.

Explorer I brachte am 31. Januar 1958 die Entdeckung des inneren Strahlungsgürtels. Als Messinstrument diente ein Geiger-Müller Zählrohr. Dieses registrierte eine ionisierende, d. h. aus elektrisch geladenen Teilchen bestehende Strahlung, welche bis in Höhen von 450 km die erwartete niedrige Zählrate lieferte. Zwischen 700 und 900 km Abstand von der Erdoberfläche stieg jedoch die Zählrate steil an, um oberhalb

900 km plötzlich auf null abzusinken. Versagten die Instrumente, oder wurde oberhalb 900 km die Zählapparatur durch eine unerwartet intensive Strahlung überlastet und dadurch blockiert? Durch Explorer III sollte diese Frage abgeklärt werden. Dazu wurde er mit zwei sehr kleinen Geiger-Müller Zählrohren mit sehr kleiner Totzeit ausgerüstet. Diese Zählrohre konnten auch sehr hohe Strahlungsintensitäten noch registrieren ohne überlastet zu werden. Explorer III zeigte dasselbe Bild wie Explorer I und bestätigte das Vorhandensein einer ausserhalb ungefähr 600 km Abstand von der Erdoberfläche ausserordentlich intensiven ionisierenden Strahlung.

Die folgenden Satelliten wurden nebst Geiger-Müller Zählrohren mit weiteren Registriergeräten wie Szintillationszählern, Kernphotoplatten, Geiger-Müller Zählrohr-Teleskopen und Magnetometern ausgestattet und ermöglichten eine genaue Ausmessung der Strahlungsgürtel. Pioneer III führte zur Entdeckung des zweiten, äusseren Strahlungsgürtels.

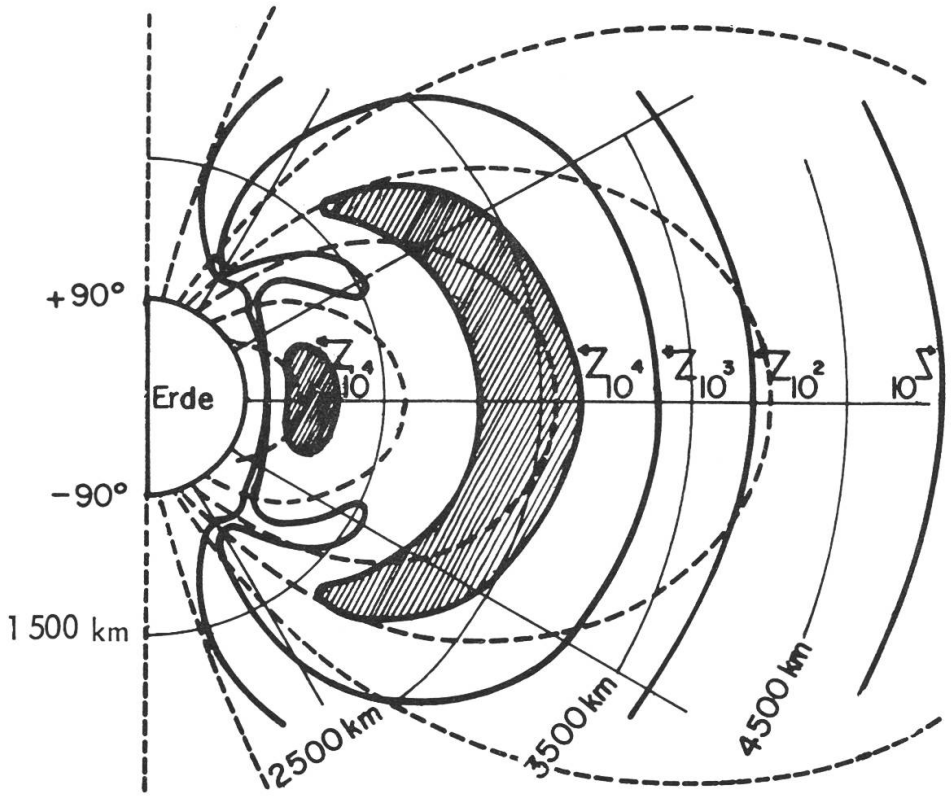

Abbildung 1 - Schnitt durch die Strahlungsgürtel.

Abbildung 1 zeigt die Intensitätsverteilung der Strahlungsgürtel in geomagnetischen Polarkoordinaten. Die dick ausgezogenen Kurven sind die Linien gleicher Zählrate in Stössen / sec. Die dick gestrichelten

Linien sind die Magnetfeldlinien des geomagnetischen Feldes. Das Intensitätsmaximum der äusseren, bananenförmigen Zone liegt in der Aequatorebene bei 3 Erdradien Abstand vom Erdmittelpunkt, dasjenige der inneren, nierenförmigen Zone bei 1,5 Erdradien Abstand. Bemerkenswert ist der steile Anstieg der Zählrate bei etwa 600 km Abstand von der Erdoberfläche. Zu beachten ist auch die Zunahme der Zählrate, wenn man sich auf einer Magnetfeldlinie von der Erdoberfläche gegen den Aequator bewegt. Von grosser Bedeutung sind, wie wir bald sehen werden, auch die weit gegen die Erdoberfläche herabreichenden Zipfel des äusseren Strahlungsgürtels, welche die Erdoberfläche bei ungefähr $\pm 60^{\circ}$ geomagnetischer Breite treffen.

An der intensivsten Stelle des inneren Strahlungsgürtels beträgt der Strom geladener Teilchen rund 40 000 Teilchen/cm^2 sec und die Dosisleistung 10 bis 100 röntgen/h. Die Dosisleistung ist ein Mass für die von der Strahlung im absorbierenden Medium in Form von Ionisation abgegebene Leistung. Der Strom geladener primärer kosmischer Teilchen in 30 km Höhe beträgt vergleichsweise nur rund 2 Teilchen/cm^2 sec und die Dosisleistung nur 0,0005 röntgen/h. (Die für wissenschaftliches Personal maximal zulässige, mittlere Dosisleistung beträgt 5 röntgen/Jahr.)

Nun drängen sich uns sicher eine ganze Reihe von Fragen auf, welche im folgenden beantwortet werden sollen: Wie erklärt man die Form, die Lage und die ausserordentlich hohe Intensität der Strahlungsgürtel? Aus welchen Teilchen bestehen diese, woher kommen sie und wie energiereich sind sie?

Aus Abbildung 1 ersehen wir, dass die Strahlungsgürtel einen ähnlichen Verlauf wie das Erdmagnetfeld haben, was uns einen Zusammenhang zwischen diesem und jenen vermuten lässt. Der Einfluss des Erdmagnetfeldes auf die kosmische Strahlung ist ja schon lange bekannt und äussert sich z. B. in der Breitenabhängigkeit und im cut-off der kosmischen Strahlung, sowie im West-Ost-Effekt. Chapman und Bartels sagten denn auch den Mechanismus des Teilcheneinfanges durch das Magnetfeld der Erde voraus. Was aber überraschte, ist die hohe Intensität der Strahlungsgürtel.

Um die Natur der Strahlungsgürtel zu verstehen, ist es daher nötig, das Erdmagnetfeld und die Bahnen geladener Teilchen in diesem kurz zu beschreiben. Das Erdmagnetfeld kann in guter Näherung durch ein Dipolfeld mit dem magnetischen Moment $8{,}1 \cdot 10^{25}$ Gauss $\cdot$ cm^3 beschrie-

ben werden. Die Achse des Dipols durchsetzt die Erdoberfläche bei den Punkten 80,1° N 277,3° E und 76,3° S 121,2° E. Sein Zentrum fällt nicht mit dem Zentrum der Erde zusammen, sondern befindet sich 342 km von diesem entfernt, in Richtung gegen den Punkt 6,3° N 161,8° E. Die Feldlinien haben den in Abbildung 1 gestrichelt eingezeichneten Verlauf. An der Erdoberfläche beträgt die Feldstärke an den magnetischen Polen 0,63 Gauss, am Aequator 0,315 Gauss. Sie ist umgekehrt proportional zum Kubus des Abstandes vom Dipolzentrum.

Die Bewegungstheorie geladener Teilchen in einem Dipolfeld ist ausserordentlich kompliziert. Ein von Alfvén gegebenes Näherungsverfahren besteht darin, dass man von der Bewegung im homogenen Magnetfeld ausgeht und die Inhomogenität als kleine Störung einführt.

In einem *homogenen* Magnetfeld beschreibt ein geladenes Teilchen eine Schraubenlinie, deren Krümmungsradius ρ durch die Beziehung Zentrifugalkraft = Lorentzkraft, in Formeln

$$\frac{m \cdot v_\perp^2}{\rho} = \frac{e}{c} \cdot v_\perp \cdot H$$

gegeben ist.

Darin bedeuten c die Lichtgeschwindigkeit, m die Masse, e die Ladung und $v_\perp$ die Geschwindigkeitskomponente des Teilchens senkrecht zum Magnetfeld H. Ein Proton von 10 Mev Energie hat z. B. am Aequator in 3000 km Höhe einen Krümmungsradius von 3 km *.

Im Falle eines *inhomogenen* Magnetfeldes ist die Teilchenbahn noch einigermassen übersichtlich, sofern sich das Magnetfeld längs der Teilchenbahn nur wenig ändert, d. h. sofern die folgende Beziehung erfüllt ist:

$$x \equiv \frac{\rho \cdot |\,\mathrm{grad}\,|\,\vec{H}\,|\,|}{|\,\vec{H}\,|} \ll 1 \,.$$

Eine von Alfvén ausgearbeitete Theorie zeigt, dass das Teilchen einen senkrecht zu den Magnetfeldlinien stehenden Kreis mit dem Krümmungsradius ρ beschreibt, dessen Mittelpunkt zudem gleichzeitig zwei überlagerte Bewegungen ausführt. Die erste ist eine Pendelbewegung längs einer magnetischen Feldlinie zwischen einem nördlichen und einem südlichen Umkehrpunkt.

---

* MeV ist die in der Kernphysik gebräuchliche Energieeinheit: 1 MeV = 10^6 eV = $1{,}602 \cdot 10^{-6}$ erg = Energie, die ein Elektron erhält, wenn es eine Spannung von 10^6 Volt durchläuft.

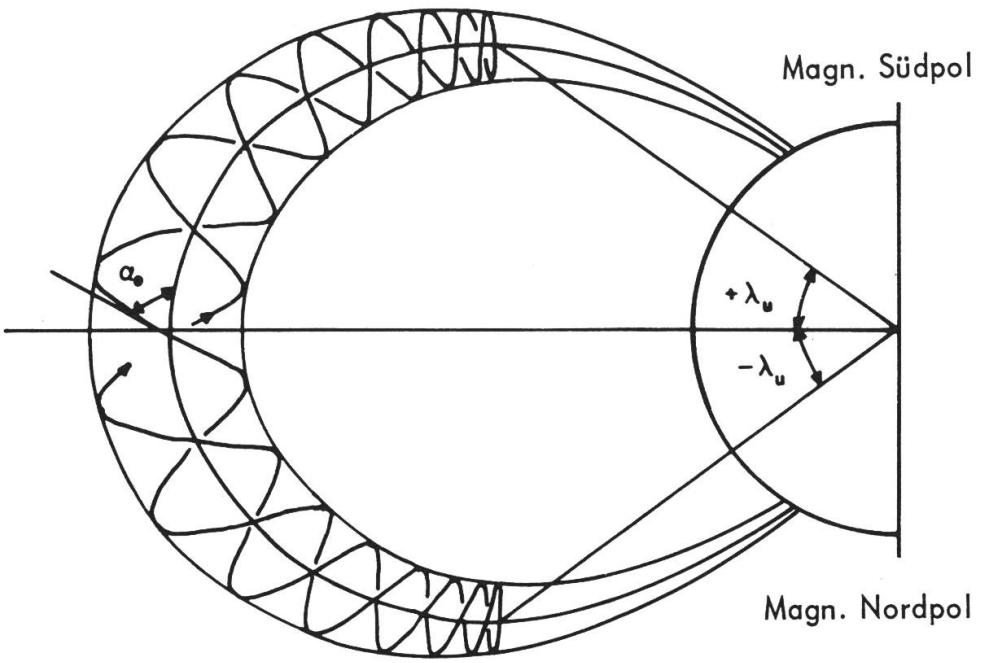

Abbildung 2 - Schraubenförmige Bahn eines geladenen Teilchens längs einer magnetischen Feldlinie.

Die Periode dieser Pendelbewegung hat die Grössenordnung einer Sekunde. Je kleiner α_0, der Inklinationswinkel der Teilchenbahn gegen die Magnetfeldlinie am Aequator, bei desto grösseren magnetischen Höhen λ_u liegen die Umkehrpunkte der Pendelbewegung. Während den magnetischen Aequator alle Teilchen im Laufe ihrer Pendelbewegung passieren, gelangen in grosse magnetische Breiten *nur* Teilchen mit einem *kleinen* Inklinationswinkel α_0. Deshalb ist längs einer magnetischen Feldlinie die Teilchenkonzentration am magnetischen Aequator am grössten, wie wir in Abbildung 1 gesehen haben. Die zweite dieser überlagerten Bewegungen ist eine longitudinale Bewegung der Teilchen um die Erde herum. Ihre Periode hat die Grössenordnung einer Stunde. Negative Teilchen wandern von Westen nach Osten, positive in umgekehrter Richtung.

Aus Messungen mit Kernphotoplatten weiss man heute, dass der innere Strahlungsgürtel zu 5 % aus Protonen mit Energien bis 700 MeV und zu 95 % aus Elektronen mit Energien bis 1 MeV besteht. Viele Argumente sprechen dafür, dass diese Protonen zur Hauptsache sogenannte Albedo-Protonen sind und nicht primäre Protonen solaren oder galaktischen Ursprungs. Was versteht man unter Albedo-Protonen? Die primäre kosmische Strahlung erzeugt bekanntlich in den oberen Schichten der Atmosphäre Kernverdampfungsprozesse und Kernreaktionen,

bei welchen u. a. Neutronen erzeugt werden. Ein Teil dieser Neutronen verlässt die Atmosphäre nach oben, daher der Name Albedo-Neutronen in Analogie zur Albedo der Erde. Da ein Neutron unstabil ist, zerfällt es in einer gewissen Höhe in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino. Die elektrisch geladenen Protonen und Elektronen werden vom Erdmagnetfeld eingefangen und führen die oben beschriebene Bewegung aus.

Das Schicksal der eingefangenen Teilchen wird alsdann durch folgende fünf Prozesse beschrieben :

1) Energieverlust durch Synchrotronstrahlung im geomagnetischen Feld. 2) Coulombstreuung am Restgas in grossen Höhen. Das Restgas besteht aus atomarem Stickstoff und atomarem Sauerstoff unterhalb ungefähr 1000 km und atomarem Wasserstoff darüber. 3) Energieverlust durch Ionisierung des Restgases. 4) Kernreaktionen mit den Stickstoff- und Sauerstoffatomkernen des Restgases. 5) Diejenigen Teilchen, welche beim Zerfall des Mutterneutrons sehr kleine Inklinationswinkel α_0 hatten, gelangen bei etwa $\pm 60°$ geomagnetischer Breite in die Ionosphäre und in die obere Mesosphäre und werden dort gebremst, gestreut und absorbiert. Rechnungen haben gezeigt, dass die beiden ersten Prozesse – Coulombstreuung und Synchrotronstrahlung – gegen die anderen drei Verlustmechanismen vernachlässigt werden können.

Die Protonen und Elektronen bleiben also so lange im Strahlungsgürtel eingefangen, bis sie durch einen oder mehrere dieser Verlustmechanismen aus ihm eliminiert werden.

Nun sind wir schon in der Lage, die erstaunlich hohe Teilchendichte in den Strahlungsgürteln zu erklären: Sei N die Teilchenkonzentration gemessen in Teilchen / cm^3, S die Injektionsrate neuer Teilchen in Teilchen / $cm^3 \cdot sec$ und T die mittlere Verweilzeit der Partikel im Strahlungsgürtel. Dann muss im Gleichgewichtsfalle die Beziehung

$$N = T \cdot S$$

bestehen, ganz unabhängig vom speziellen Injektionsmechanismus. Rechnungen ergeben, dass die Verweilzeit T zwischen einem Monat und einigen Jahren liegt, je nach Teilchenenergie und Teilchenart. Obwohl also die Rate der in den inneren Strahlungsgürtel injizierten Albedo-Protonen sehr klein ist, kann wegen der erstaunlich grossen Verweilzeit der Teilchen die hohe Teilchendichte erklärt werden.

Die Albedo-Protonentheorie wurde kurz nach der Entdeckung des inneren Strahlungsgürtels unabhängig voneinander von den drei Physikern Singer, Kellog und Vernov gegeben. Freden und White verbesserten die Theorie und berechneten den Protonenstrom im inneren Strahlungsgürtel in 1100 km Höhe am Aequator. Dabei benutzten sie das von Hess und Mitarbeitern in den oberen Atmosphärenschichten gemessene Neutronenspektrum. Ihr Resultat für den Protonenstrom lautet:

$$\phi = \frac{4{,}55 \cdot 10^{-17} \cdot e^{-\frac{E}{170}}}{\bar{\rho}} \text{ Protonen / MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sec.}$$

E ist die Protonenenergie in MeV und $\bar{\rho}$ ist die längs der Teilchenbahn gemittelte Dichte der Restgase in g/cm^3.

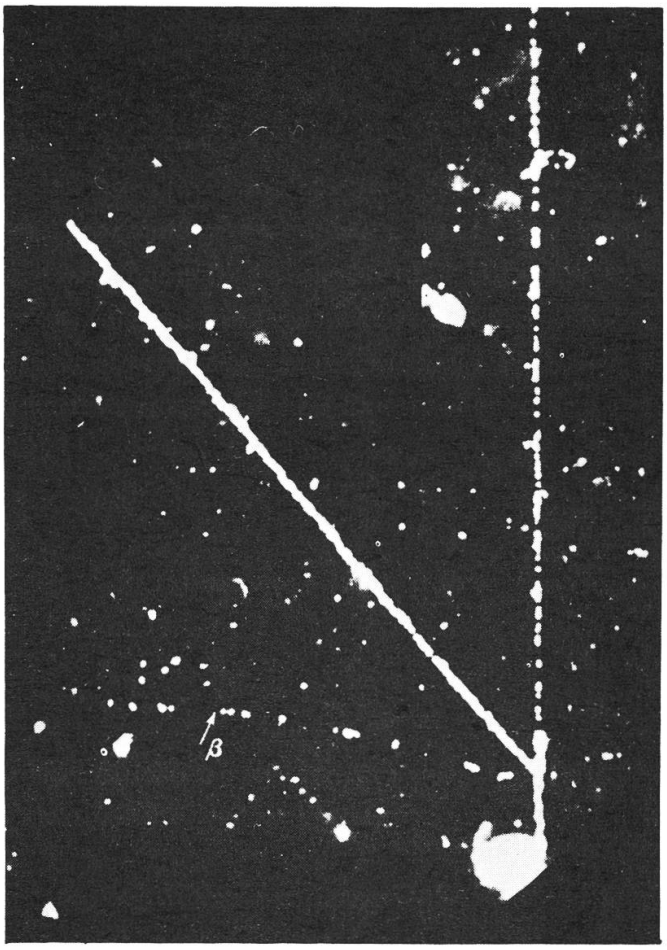

Abbildung 3 - Spuren geladener Teilchen in einer Kernphotoplatte.

Um dieses Resultat zu prüfen, massen Freden und White den Protonenstrom im inneren Strahlungsgürtel mit Hilfe von Kernphotoplatten. Am 7. April 1959 und am 21. Mai 1959 schossen sie von Cape Canaveral aus je eine ballistische Thor-Able Rakete bis in eine Höhe von 1230 km. Die Rakete befand sich während 15 min. oberhalb 1000 km Höhe in Breiten zwischen 20° N und 3° N.

Zehn Ilford $1\frac{3}{8}'' \times 1\frac{3}{8}'' \times 600\ \mu$ K 5 - Kernphotoplatten befanden sich in der Spitze der Rakete, eingeschlossen in einer wasserdichten Büchse aus rostfreiem Stahl. Da energiearme Teilchen in der 3,9 g / cm² starken Raketenwand abgebremst wurden, waren die Photoplatten nur empfindlich auf Protonen mit Energien grösser als 75 MeV und Elektronen mit Energien grösser als 12 MeV. Die Teilchenarten und deren Energien konnten durch Messung der Spurenlänge und der Spurendicke längs der ganzen Spur ermittelt werden.

Es wurden etwa 300 Protonenspuren, keine Elektronenspuren und einige Tritonenspuren gefunden. Tritium ist das dreifach schwere Wasserstoff-Isotop.

Abbildung 4 zeigt den berechneten Protonenfluss als Funktion der Protonenenergie, zusammen mit den experimentellen Punkten von Freden und White. In einem grossen Energiebereich besteht eine gute Uebereinstimmung zwischen Theorie und Experiment. Die theoretische Kurve ist bei 100 MeV an die experimentelle Kurve angepasst, da die Dichte der Gashülle der Erde in grossen Höhen nicht genau bekannt ist. Diese Anpassung ermöglicht andererseits die Bestimmung der Restgasdichte in 1100 km Höhe. Sie ergibt sich zu

$$\bar{\rho} = 5{,}5 \cdot 10^{-18}\ \mathrm{g/cm^3}$$

Vergleichen wir diesen Wert mit einer von Jastrov angegebenen Formel:

$$\rho = 6 \cdot 10^{-14} \cdot e^{-106\left(1 - \frac{r_e}{r}\right)}$$

r ist der Abstand vom Erdmittelpunkt, r_e der Erdradius. Jastrov leitete diese Formel aus der Analyse von Satellitenbahnen her.

Infolge Reibung an den Restgasen in grosser Höhe werden die Satelliten gebremst. Da die Dichte mit zunehmender Höhe sehr stark abnimmt, fällt praktisch nur die Reibung im Perigäum ins Gewicht. Wegen dieses Energieverlustes nähern sich die Satelliten der Erde, vergrössern ihre Geschwindigkeit und verkleinern ihre Umlaufperiode.

Aus der Abnahme der Umlaufperiode kann man daher die Dichte der Restgase in grosser Höhe berechnen. Die Formel liefert den Wert:

$$\rho_{1100} = 2{,}16 \cdot 10^{-20} \ g/cm^3$$

Die Uebereinstimmung ist nur scheinbar schlecht, denn die mittlere Dichte $\bar{\rho}$ kann für Teilchenbahnen, die weit gegen die Erde hinabreichen, leicht bis um einen Faktor 100 grösser sein als die Dichte ρ_{1100} am höchsten Punkt der Teilchenbahn.

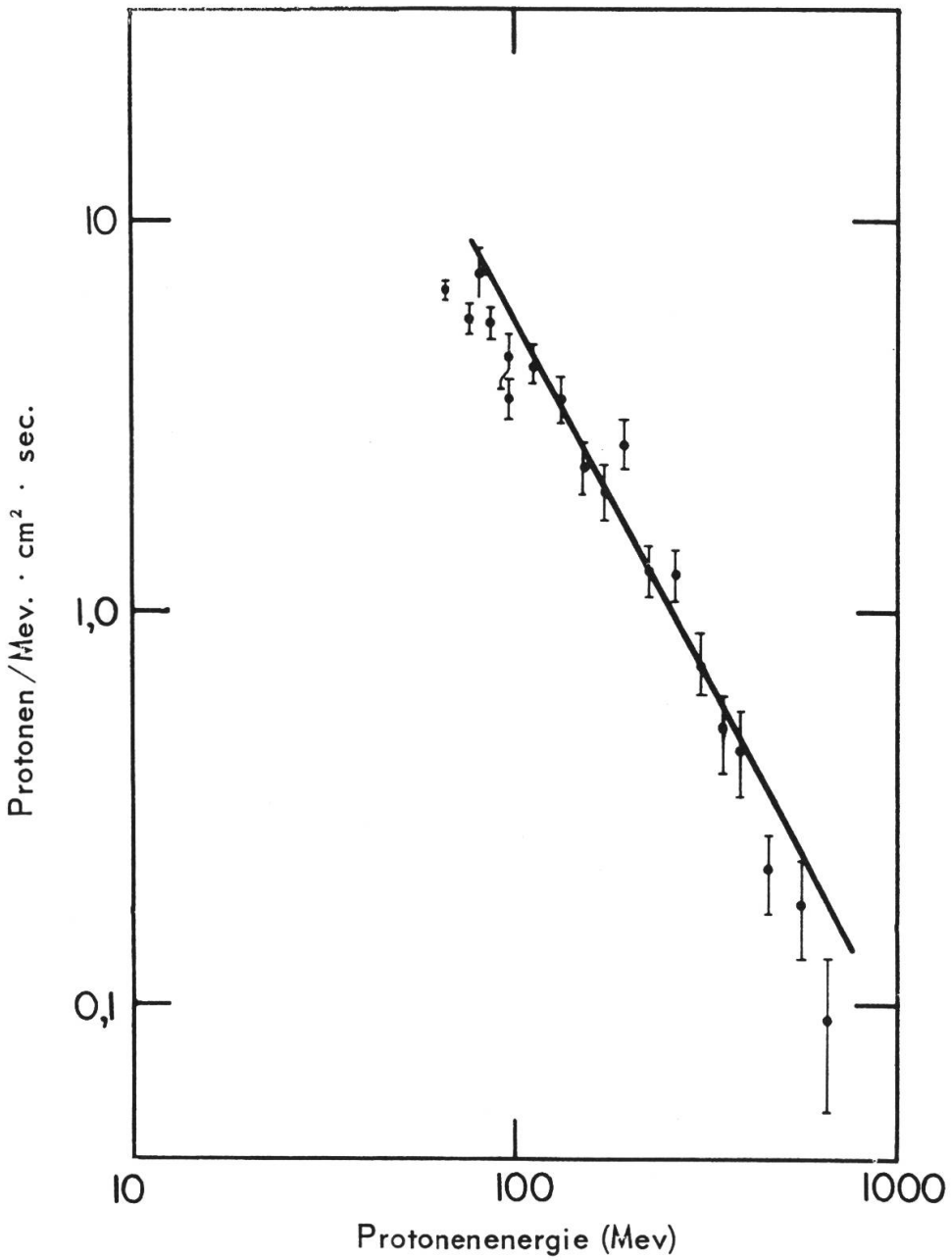

Abbildung 4 - Berechneter und gemessener Protonenfluss in 1100 km Höhe.

Zwischen den beiden Expositionen von Kernphotoplatten am 7. April und am 21. Mai 1959 zeigte am 10. Mai die Sonne eine starke Sonnenfleckentätigkeit, welche bekanntlich mit der Emission von Protonen mit Energien bis 10^{10} eV verbunden ist. Trotzdem änderte die Protonendichte in dieser Zeit im innersten Strahlungsgürtel nicht. Das Verhältnis der gemessenen Dichten vor und nach der Sonnenfleckentätigkeit betrug 0,8 ± 0,1. Dieses Resultat, sowie die gute Uebereinstimmung des berechneten mit dem gemessenen Protonenfluss ist eine starke Stütze für die Albedo-Protonentheorie.

Es bleibt noch die Form des inneren Strahlungsgürtels zu erklären, vor allem das Auftreten eines Maximums der Intensität bei *1,5 Erdradien* Entfernung vom Erdmittelpunkt. Die Höhenabhängigkeit der Protonendichte ist durch die Funktion

$$\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \left(\frac{r_e}{r}\right)^2 = \text{Konstante} \cdot \bar{r}^2 \cdot e^{-106 \frac{r_e}{r}}$$

gegeben. Dieser Ausdruck hat erst bei *53 Erdradien* Entfernung das Maximum. Zu diesem scheinbaren Widerspruch ist zu sagen, dass in kleinen Höhen die Intensität tatsächlich vorwiegend durch die Dichte der Erdhülle bestimmt wird, in grösseren Höhen aber, oder für sehr energiereiche Teilchen, wird die Verweilzeit im Strahlungsgürtel beschränkt, weil die sogenannte adiabatische Bedingung

$$x \equiv \frac{\rho \cdot |\,\text{grad}\,|\vec{H}|\,|}{|\vec{H}|} \ll 1$$

nicht mehr erfüllt ist. Das Teilchen bewegt sich dann nur eine gewisse Zeit lang auf einer unstabilen Bahn und verlässt nachher das Erdmagnetfeld. Verkleinert man bei der Berechnung des Teilchenstromes die Lebensdauer der Protonen um den Faktor

$$e^{-\frac{x^2}{b^2}},$$

so gibt die Theorie die Höhenabhängigkeit der Intensität gut wieder. Der Anpassungsparameter b ergibt sich zu 0,7.

Die adiabatische Bedingung ist mit zunehmender Höhe und zunehmender Teilchenenergie immer schlechter erfüllt. Daher muss die Strahlung mit zunehmender Höhe immer energieärmer werden.

Es ist zu bemerken, dass die Elektronen im äusseren Strahlungsgürtel wegen ihrer kleinen Masse die adiabatische Bedingung sehr wohl erfüllen und deshalb ihre Verweilzeit durch die Restgasdichte und nicht durch die schlechte Erfülltheit der adiabatischen Bedingung geregelt wird. Der äussere Strahlungsgürtel dehnt sich trotzdem nicht weiter als etwa 6 Erdradien aus, weil weiter aussen das magnetische Feld nicht mehr durch den Erddipol, sondern durch das unregelmässige Magnetfeld von interplanetaren Plasmawolken beschrieben wird.

Die Kernphotoplatten von Freden und White waren wegen der dicken Raketenwand für energiearme Protonen und Elektronen unempfindlich. Aus neuesten Messungen von Naugle und Kniffen, bei welchen die Kernphotoplatten in grosser Höhe aus der Rakete herausgeschwenkt werden konnten, weiss man heute, dass der innere Strahlungsgürtel zu 5 % aus Protonen mit einer Durchschnittsenergie von 100 MeV und zu 95 % aus energiearmen Elektronen mit Energien von höchstens 1 MeV besteht.

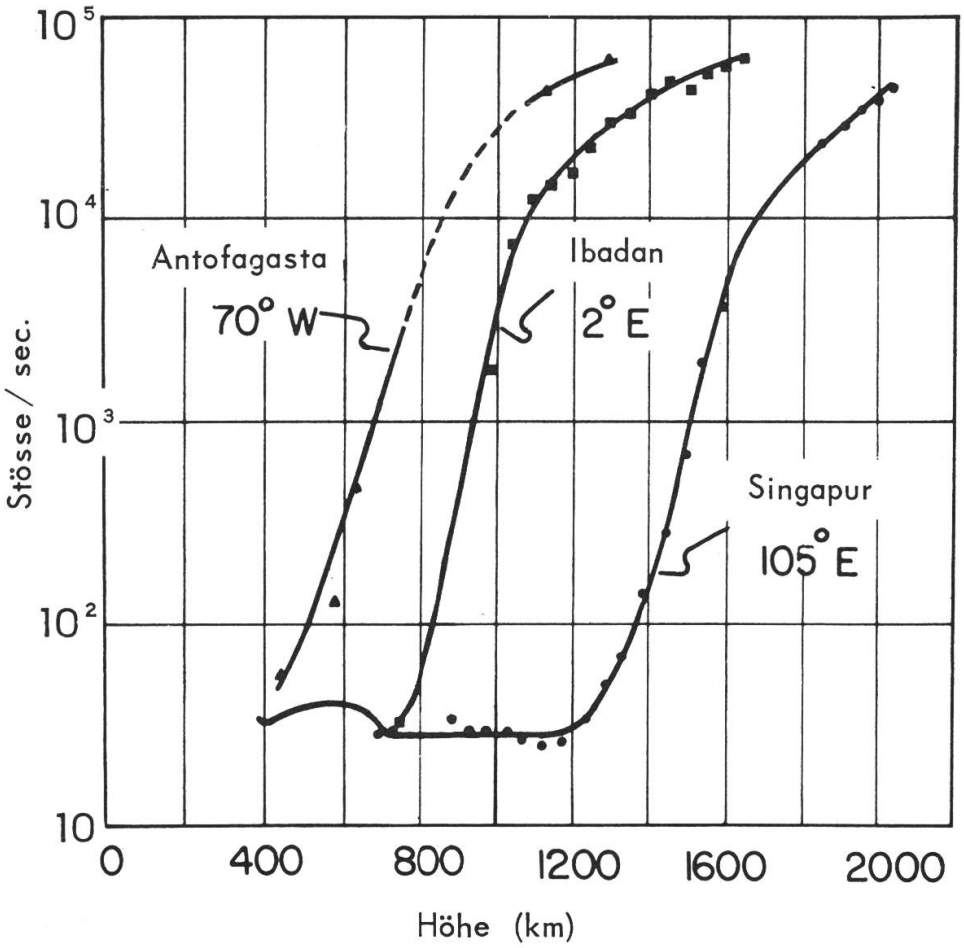

Abbildung 5 - Zählraten als Funktion der Höhe über Antofagasta, Ibadan und Singapur.

Wie innig die Strahlungsgürtel mit dem Erdmagnetfeld zusammenhangen und selbst Feinheiten des Dipolfeldes widerspiegeln, sehen wir aus der Analyse der Messresultate von Explorer I. Dabei wurden nur die Resultate der magnetisch ruhigen Tage zwischen dem 1. Februar und dem 15. März 1958 berücksichtigt.

Abbildung 5 zeigt die Zählraten als Funktion der Höhe über den drei Orten Antofagasta, Ibadan und Singapur. Die drei Orte haben verschiedene geographische Länge, hingegen liegen alle weniger als 10° vom magnetischen Aequator entfernt. Man würde erwarten, dass die Intensität des inneren Strahlungsgürtels längs des ganzen magnetischen Dipoläquators dieselbe Höhenabhängigkeit zeigt. Was man hingegen findet, ist eine ausgesprochene Längenabhängigkeit der Intensitätsverteilung im Strahlungsgürtel. Bei gleicher Höhe 1200 km stellt man z. B. Intensitätsunterschiede bis zu Faktoren 1000 fest.

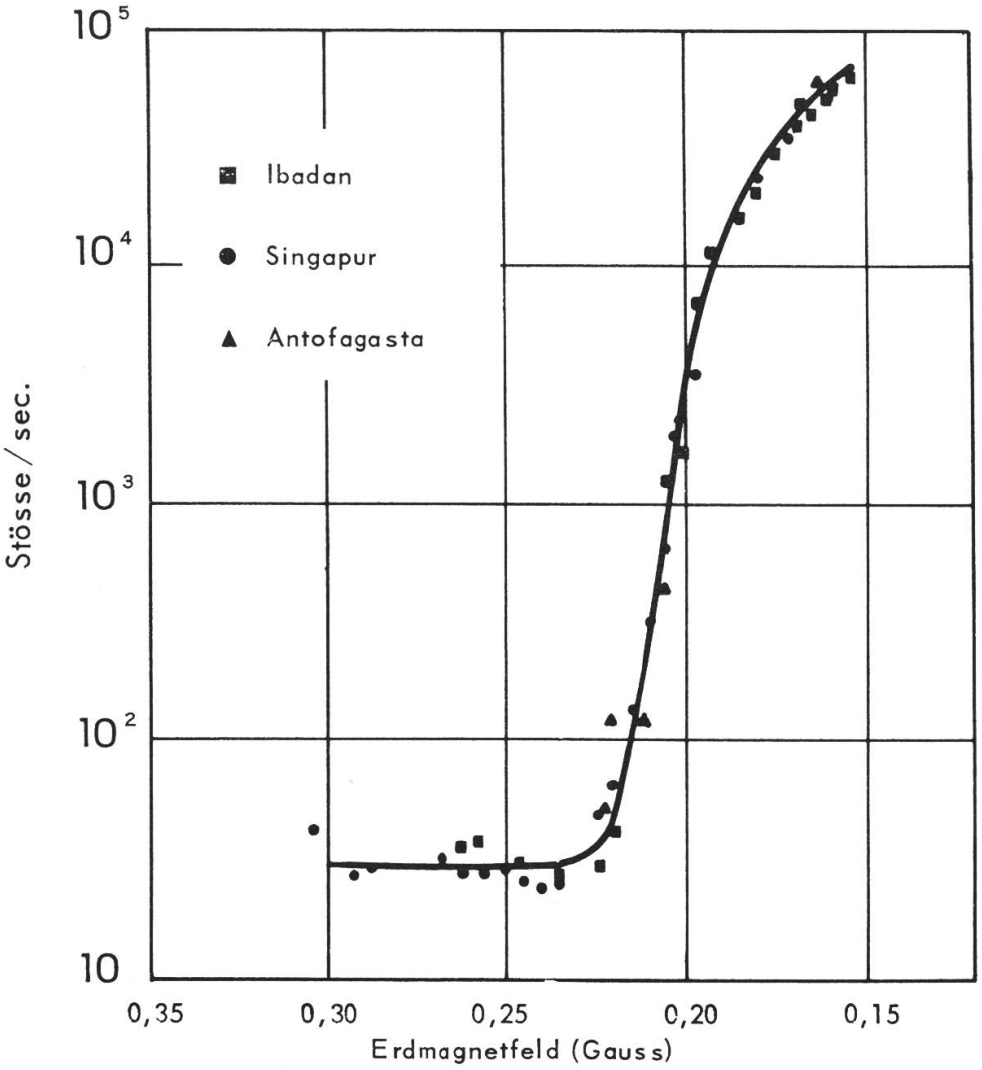

Abbildung 6 - Zählraten als Funktion der Erdmagnetfeldstärke.

Trägt man hingegen wie in Abbildung 6 die Zählrate über diesen drei Gebieten als Funktion der *Magnetfeldstärke H* auf, so sieht man, dass die Längenabhängigkeit verschwindet und die Intensität als Funktion von H allein dargestellt werden kann. Woher kommt dieser Effekt? Er wurde schon durch den ersten Satelliten von van Allen entdeckt und wird durch die Exzentrizität des geomagnetischen Dipols hervorgerufen.

Wenden wir uns nun dem äusseren Strahlungsgürtel zu! Den besten Ueberblick erhalten wir durch die Messungen von Explorer VI, welcher am 7. August 1959 in eine Ellipsenbahn mit 12 h Umlaufzeit, 6615 km Perigäum und 48 600 km Apogäum gebracht wurde. Der Satellit wurde von einer Gruppe der Universität Minnesota mit einem Geiger-Müller Zählrohr und einer nach dem pulsierenden Elektrometerprinzip arbeitenden Ionisationskammer ausgerüstet.

Die Zählraten der beiden Instrumente bei Bestrahlung mit einer Kobalt-60 Gammaquelle wurden als Funktion der Dosisleistung aufgenommen. Die Dosisleistung wurde mit geeichten Victoreen-Fadenelektrometern gemessen. Das Verhältnis der Zählraten der Ionisationskammer und des Geiger-Müller Zählrohres ist ein Mass für die durchschnittliche Ionisation der Teilchen und damit auch der Teilchenenergie, sofern die Art der Teilchen bekannt ist.

Explorer VI brachte folgende neue Resultate: Vom 7. bis 14. August 1959 war eine magnetisch ruhige Periode, und die Intensität des äusseren Strahlungsgürtels blieb in dieser Woche konstant. Verglichen mit früheren Messungen hatte er hingegen an Umfang und Intensität stark abgenommen.

Abbildung 7 zeigt die von verschiedenen Satelliten zu verschiedenen Zeiten gemessenen Zählraten. Die Bahnen all dieser Satelliten verlaufen in der Nähe des geomagnetischen Aequators. Die Zählraten stehen auf einer vergleichbaren Basis innerhalb ungefähr 25 % Genauigkeit. Man sieht, dass z. B. bei 40 000 km Entfernung in der Zeit vom 3. März bis 10. August 1959 die Zählrate um einen Faktor 10 000 abgenommen hat.

Aus der Ionisation der Strahlung konnte festgestellt werden, dass diese aus Elektronen besteht. Ihre mittlere Energie betrug nach Rechnungen der Autoren rund 50 000 eV, der Elektronenfluss 10^{11} Elektronen / $cm^2 \cdot sec$, er war also ausserordentlich hoch.

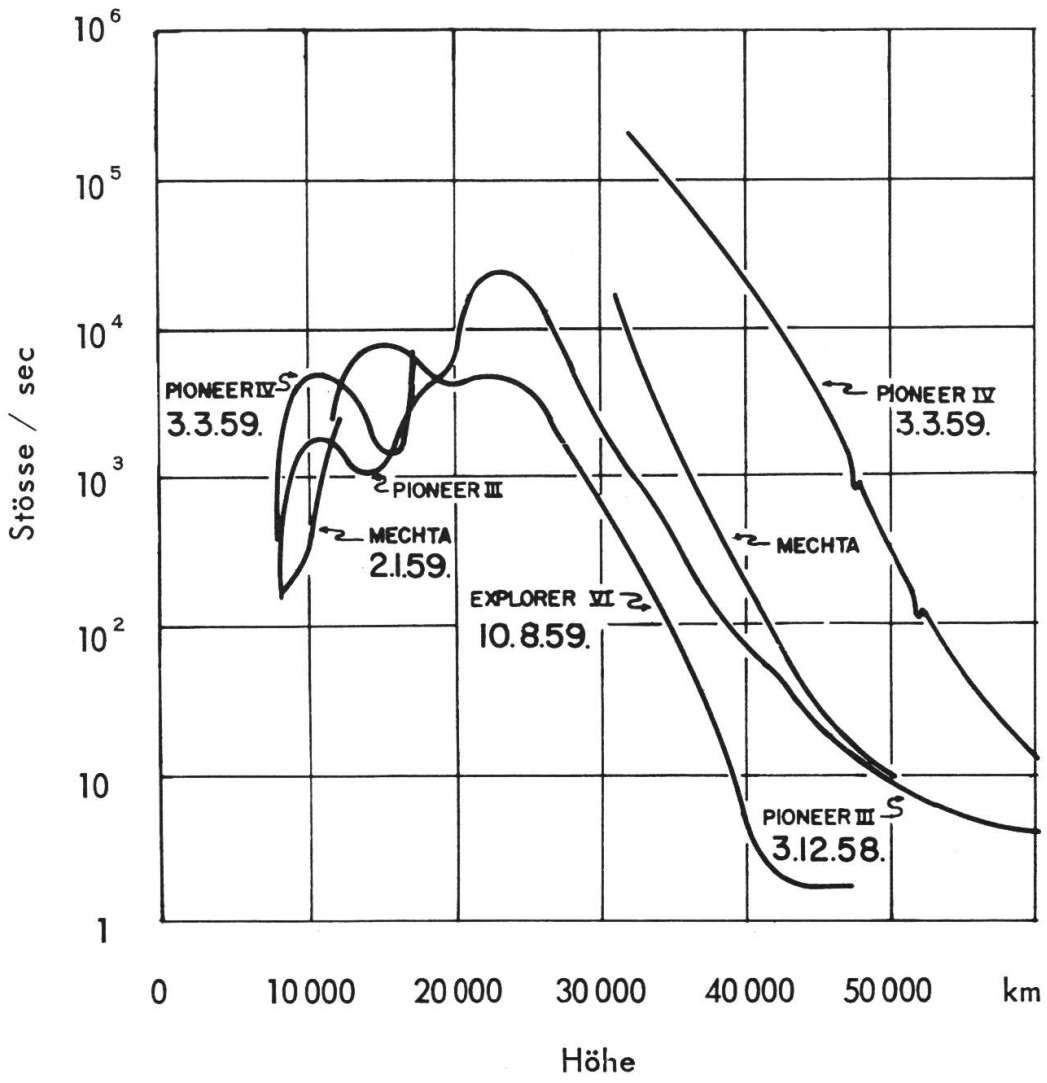

Abbildung 7 - Zählraten gemessen von verschiedenen Satelliten zu verschiedenen Zeiten.

Vom 16. bis 18. August 1959 herrschte ein starker geomagnetischer Sturm, der vielfältige Auswirkungen auf den äusseren Strahlungsgürtel hatte: Während der ersten 24 Stunden des Sturmes sank die Intensität um einen Faktor 4 ab und die Strahlung wurde zugleich bedeutend energiereicher. Zur gleichen Zeit, d. h. in der Nacht vom 16. auf den 17. August 1959, wurde über Minnesota bei 57° geomagnetischer Breite ein sehr starkes Nordlicht beobachtet. Nordlichter in dieser Breite sind selten. Häufiger sind sie in geomagnetischen Breiten von ungefähr 70°. In derselben geomagnetischen Breite waren bei Minneapolis anlässlich von Ballonflügen schon früher Röntgenstrahlen mit 50 000 eV Energie beobachtet worden. Die Frage ist, ob ein Zusammenhang zwischen

diesen Effekten besteht. Man nimmt an, dass die im äusseren Strahlungsgürtel verloren gegangenen Elektronen entlang den magnetischen Feldlinien bis zur Ionosphäre und den obern Schichten der Mesosphäre hinunter gewandert sind. Dort wurden sie absorbiert und erzeugten durch Anregung der Gasmoleküle die Nordlichter und die Röntgenstrahlungen. Dass die Nordlichter gerade bei der ungewöhnlichen Breite von 57° beobachtet wurden, ist kein Zufall, denn dort treffen diejenigen Feldlinien die Erdoberfläche, welche am Aequator durch die intensivsten Zonen des äusseren Strahlungsgürtels gehen. Nach Abschätzungen der Autoren entspricht die im Strahlungsgürtel verloren gegangene Energie der in den Nordlichtern beobachteten Röntgenstrahlenenergie.

Ueber den Verlustmechanismus der Elektronen ist man sich nicht ganz im klaren. Man nimmt an, dass Plasmawolken solaren Ursprungs die Erde erreichen und das Dipolfeld in den äusseren Zonen erheblich stören. Das gibt erstens Anlass zu den geomagnetischen Stürmen, und zweitens werden die Inklinationswinkel α_0 der Elektronen geändert, sodass ein Teil von ihnen die oberen Schichten der Gashülle der Erde erreichen kann. Dort werden sie absorbiert, wodurch erstens Nordlichter entstehen und zweitens die äussere Atmosphäre erwärmt wird, sodass diese sich ausdehnt und in die Höhe steigt, was dann Anlass zu vermehrter Absorption von Elektronen gibt.

Ein deutliches Indiz, dass geomagnetische Stürme, die Intensität im äusseren Strahlungsgürtel, Nordlichter und die Erwärmung und Ausdehnung der Exosphäre in der Nordlichterzone miteinander gekoppelt sind, brachte auch die Analyse der Satellitenbahnen des Sputnik III und des Vanguard Satelliten 1958 β . Während eines geomagnetischen Sturmes vom 4. September 1958 zeigte wegen der Ausdehnung der Exosphäre die Abnahme der Umlaufperiode des Sputnik III einen doppelt so grossen Wert wie vor und nach dem Sturm. Die Neigung der Bahn gegen die Aequatorebene betrug 65°, sie führte also durch die Nordlichterzone. Die Bahn des Vanguard Satelliten hatte hingegen eine Neigung gegen die Aequatorebene von nur 35°, sie führte also nicht durch die Nordlichterzone. Deshalb blieb seine Umlaufperiode während des Sturmes konstant. In Uebereinstimmung mit direkten Temperaturmessungen in den höheren Schichten der Gashülle der Erde schliesst man daraus, dass die Gashülle vorwiegend bei 57° geomagnetischer Breite erwärmt wird, weil dort der äussere Strahlungsgürtel in ihre tieferen Schichten hinabreicht.

Gegen Ende des geomagnetischen Sturmes stieg die Zählrate um einen Faktor 20 auf das Fünffache des Wertes vor dem Sturm an, und die Strahlung wurde zugleich energieärmer. Die erhöhte Intensität dauerte vom 18. August bis zum 3. September 1958 und war zwischen dem 20. und 29. August am grössten. Vom 22. August bis zum 4. September wurde andererseits von verschiedenen Sonnenobservatorien ein langanhaltender, intensiver Sturm solarer Radiowellen registriert. Es handelte sich um Synchrotronstrahlung von Elektronen, welche in sonnennahen Magnetfeldern Schraubenbewegungen ausführten. Man ist sich nicht im klaren, ob die Auffüllung des äusseren Strahlungsgürtels von einer unbeobachteten ersten Phase des solaren Radiosturmes herrührt, oder ob sie ein Nacheffekt des grossen magnetischen Sturmes zwischen dem 16. und 18. Oktober 1958 ist. Vielleicht wurden während des magnetischen Sturmes sehr langsame, daher unmessbare Elektronen durch lokale variable Stör-Magnetfelder auf höhere Energien beschleunigt. Jedenfalls steht fest, dass der äussere Strahlungsgürtel – im Gegensatz zum inneren – von der Sonnentätigkeit sehr stark beeinflusst wird. Er besteht aus Elektronen, welche mindestens teilweise von der Sonne kommen. Die Anwesenheit sehr energiearmer Protonen im äusseren Strahlungsgürtel ist nicht ausgeschlossen, doch konnten solche bis heute noch nicht nachgewiesen werden, weil sie in der Raketen- und in der Zählrohrwand absorbiert werden.

Ein weiteres Beispiel für die Beeinflussung des äusseren Strahlungsgürtels durch die Sonnentätigkeit sind die Beobachtungen von Polarlichtern in Alaska durch Rees und Reid. Die Autoren beobachteten die von den Nordlichtern emittierten Wasserstofflinien und stellten eine periodische Aenderung der geomagnetischen Breite der Nordlichter mit der Zeit fest.

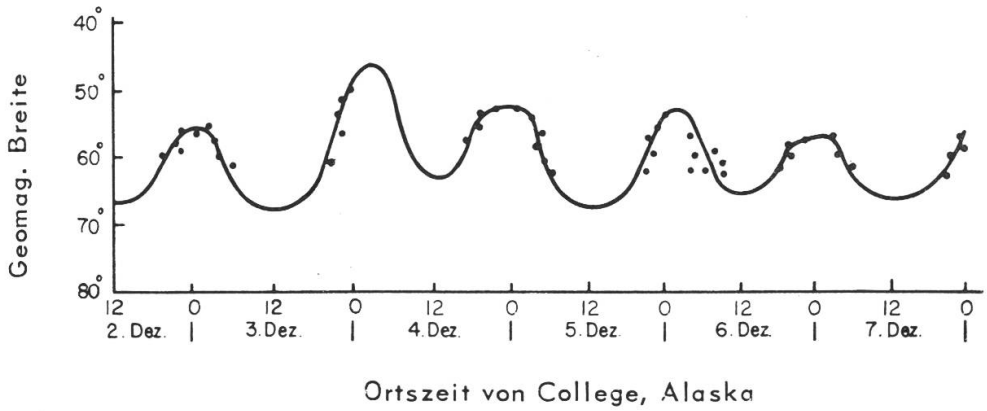

Abbildung 8 - Breitenschwankungen von Nordlichtern in College (Alaska).

Aus Abbildung 8 erkennt man, dass die Nordlichter am Abend von Norden her kamen, um Mitternacht befanden sie sich am weitesten südlich und am Morgen wanderten sie wieder nach Norden. Die periodische Breitenbewegung der Nordlichter kann durch den Einfluss von Plasmaströmen solaren Ursprungs auf den Strahlungsgürtel halbquantitativ erklärt werden. Diese Plasmaströme, auch Sonnenwind genannt, bestehen aus Protonen, welche mit einer Geschwindigkeit von rund 1000 km / sec von der Sonne weg fliegen. Sie wandern gegen die Erde, stören das Erdmagnetfeld und beeinflussen dadurch die Form des äusseren Strahlungsgürtels. Chapman und Ferraro zeigten, dass der magnetische Effekt eines solchen Partikelstromes in erster Näherung durch einen magnetischen Dipol beschrieben werden kann, welcher gleich weit hinter der Teilchenfront liegt, wie der Erddipol vor der Teilchenfront liegt.

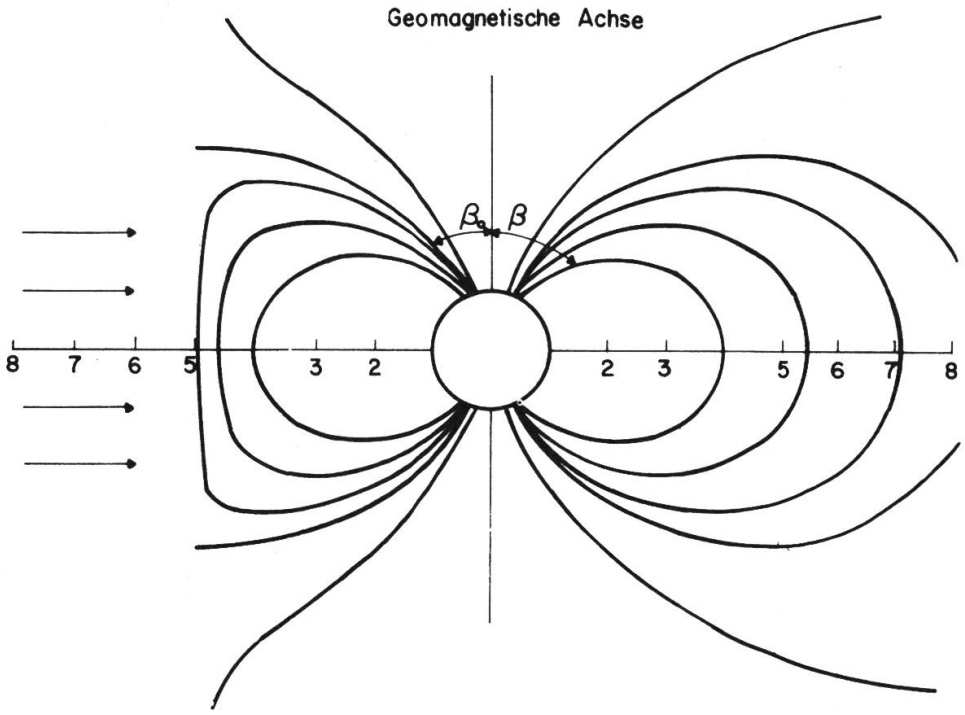

Abbildung 9 - Verformung des Erdmagnetfeldes auf der Tagseite infolge eines einfallenden Partikelstromes solaren Ursprunges.

Die resultierende Verformung des geomagnetischen Dipolfeldes wird in Abbildung 9 dargestellt: Das Feld auf der Tagesseite wird zusammengedrückt, auf der Nachtseite bleibt es beinahe ungeändert. Wie

schon erwähnt, führen die eingefangenen Teilchen eine longitudinale Bewegung um die Erde herum aus. Man kann zeigen, dass sie die Tendenz haben, in Gegenden konstanter Feldstärke zu bleiben. Daher schrauben sie auf der ungestörten Nachtseite um Magnetfeldlinien, welche die Erdoberfläche weiter südlich treffen als die entsprechenden Feldlinien auf der Tagesseite. Während die Erde also unter dem Muster der Abbildung 9, welches in Bezug auf die Sonne fest ist, rotiert, wird der nördliche Zipfel des äusseren Strahlungsgürtels vor Mitternacht nach Süden und nach Mitternacht wieder nach Norden rücken. Das hat die periodische Tag-Nacht-Breitenbewegung der Nordlichter zur Folge. Die Amplitude dieser Bewegung kann durch die aus anderen Effekten bekannte Sonnenwindstärke von rund 5 Protonen / cm^3 befriedigend erklärt werden.

Wie wir gesehen haben, ist der Strahlungsgürtel für das bürgerliche Leben auf der Erde von keiner Bedeutung. Für die Raumschiffahrt stellt er wegen seiner hohen Intensität hingegen ein ernst zu nehmendes Hindernis dar. Um Astronauten vor Strahlungsschäden zu bewahren, wird man in Zukunft bei Raumflügen die Erde bei den magnetischen Polen verlassen, weil dort die Intensität der Strahlungsgürtel verschwindet. Eine Abschirmung der Weltraumfahrzeuge gegen die Strahlung durch Bleiplatten kommt nicht in Frage, weil diese dadurch viel zu schwer würden. Eine um die Erde kreisende interplanetare «Raumfahrtstation» müsste sich entweder innerhalb oder ausserhalb der Strahlungsgürtel, d. h. entweder unterhalb 600 km oder ausserhalb 40 000 km befinden. Durch einen grossen, in geeigneter Höhe kreisenden Satelliten könnte man die Strahlungsgürtel sogar mit der Zeit ausradieren. Singer hat abgeschätzt, dass der innere Strahlungsgürtel durch einen kugelförmigen Satelliten mit einem Durchmesser von 10 m in einem Jahr zur Hälfte ausgeschöpft würde !

Für geophysikalische und astronomische Untersuchungen stellt der Strahlungsgürtel ein willkommenes Hilfsmittel dar. Der Fluss auf die Erde fallender, hochenergetischer solarer Neutronen kann z. B. nicht grösser als 0,1 Neutron / $cm^2 \cdot sec$ sein, weil andernfalls der innere Strahlungsgürtel intensiver sein müsste. Wir haben auch gesehen, wie der Strahlungsgürtel zur Untersuchung der Dichte, der Temperatur und der Zusammensetzung der terrestrischen Gashülle dienen kann. Ferner können in Zukunft Gashülle und Magnetfeld von Planeten und Monden aus deren Strahlungsgürtel untersucht werden. Ein Himmelskörper mit Strahlungsgürtel hat sicher ein Magnetfeld, ein solcher ohne Magnetfeld hat sicher keinen Strahlungsgürtel.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die beiden Strahlungsgürtel der Erde sehr verschiedener Art sind: Der innere, welcher sich am Aequator 1,5 Erdradien vom Erdmittelpunkt entfernt befindet, besteht aus Albedo-Protonen mit Energien bis 700 MeV und aus Elektronen mit Energien bis 1 MeV. Seine Form und seine Intensität werden von der Sonnentätigkeit und von magnetischen Stürmen nicht merklich beeinflusst. Der äussere Gürtel bei 3 Erdradien Entfernung besteht aus energiearmen Elektronen sehr grosser Dichte, deren Herkunft noch nicht genau bekannt ist. Er wird von der Sonnentätigkeit sehr stark beeinflusst: Bei magnetischen Stürmen wird die Konfiguration des Erdmagnetfeldes in grosser Entfernung gestört – vermutlich durch solare Plasmawolken – und ein Teil der Elektronen fliesst aus dem Strahlungsgürtel in die Ionosphäre bei ungefähr ± 60° geomagnetischer Breite. Dort werden die Elektronen absorbiert und erzeugen die Strahlungen der Nordlichter, sowie Erwärmung und Ausdehnung der Ionosphäre, was wiederum zu vermehrter Bremsung der Satelliten Anlass gibt. Die dauernde Absorption der Partikel des Strahlungsgürtels in grösseren Höhen – südlich der Nordlichterzone – ist vielleicht die Quelle des ganz schwachen Lichtes am Nachthimmel. Erst durch das Zusammenwirken von verschiedensten Naturphänomenen – Kosmische Strahlung, Gashülle der Erde, Erdmagnetfeld, Sonnentätigkeit – kommen die Strahlungsgürtel zustande und können befriedigend erklärt werden. Andererseits ermöglichte erst ihre Entdeckung das Verständnis verschiedener geophysikalischer Effekte.

LES CEINTURES DE RADIATION DE LA TERRE
(Résumé)

Les satellites artificiels (par exemple Explorer I en 1958) ont permis la découverte des ceintures de radiation dont on soupçonnait l'existence depuis 1953 (van Allen). La terre est entourée par deux anneaux de particules chargées (figure 1). Un premier anneau, formé de protons et d'électrons, se trouve à une distance de 1.5 rayons terrestres du centre de la terre. Il est à peine influencé par l'activité solaire et les tempêtes magnétiques. La ceinture extérieure, à trois rayons terrestres, renferme des électrons dont l'énergie est faible et dont on ne connaît pas encore la provenance. Elle subit les perturbations causées par l'activité solaire (vent solaire); une partie des électrons quittent alors la ceinture et pénètrent dans l'ionosphère où ils provoquent les aurores polaires.

La présence de ces ceintures «van Allen» est étroitement liée au rayonnement cosmique, à l'atmosphère et au champ magnétique terrestres et à l'activité solaire; d'autre part, leur étude constitue un moyen de comprendre de mieux en mieux un grand nombre de phénomènes géophysiques.

LITERATUR

VAN ALLEN, J. A.: The Scientific American, 200, März 1959, 39-47.

ALFVÉN: Cosmical Electrodynamics.

FREDEN, S.C. und R.S. WHITE: Journal of Geophysical Research, 65, Mai 1960, 1377-1378.

YOSHIDA, S., G.H. LUDWIG, J.A. VAN ALLEN: Journal of Geophysical Research, 65, März 1960, 807-813.

NAUGLE, J.E. und D.A. KNIFFEN: Physical Review Letters, 7, 1961, 3-6.

ARNOLDY, R.L., R.A. HOFFMANN, J.R. WINCKLER: Journal of Geophysical Research, 65, Mai 1960, 1361-1376.

ROTHWELL, P. und C.E. MAC ILLWAIN: Journal of Geophysical Research, 65, März 1960, 799-806.

REES, M.H. und G.C. REID: Nature London, 184, August 1959, 539-540.

In diesen Veröffentlichungen findet man zahlreiche weitere Literaturangaben über die Strahlungsgürtel der Erde.

(Eingegangen am 26. Februar 1962.)

Adresse des Verfassers:
Physikalisches Institut der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 7.