

# Die kosmische Strahlung

HANSRUEDI VÖLKLE  
Physikdepartement der Universität Freiburg/Schweiz

## *Zusammenfassung*

*Es sind gerade 100 Jahre her, seit die kosmische Strahlung entdeckt wurde. Daran beteiligt waren nebst vielen andern die Physiker ALBERT GOCKEL von der Universität Freiburg (1860-1927), der deutsche Jesuit THEODOR WULF (1868-1946), der Österreicher VIKTOR FRANZ HESS (1883-1964), der Deutsche WERNER KOHLHÖRSTER (1887-1946), der Amerikaner ROBERT MILLIKAN (1868-1953) und der Franzose PIERRE AUGER (1899-1993).*

*HESS stellte als erster eine eindeutige Zunahme der Strahlung mit der Höhe fest, deutete diese richtig und nannte seine Entdeckung **Höhenstrahlung**. Er erhielt 1936 hierfür den Nobelpreis. Im Artikel wird das Phänomen der kosmischen Strahlung in seinen Ursachen und Wirkungen auf die Erde beschrieben sowie die Geschichte von deren Entdeckung zusammengefasst.*

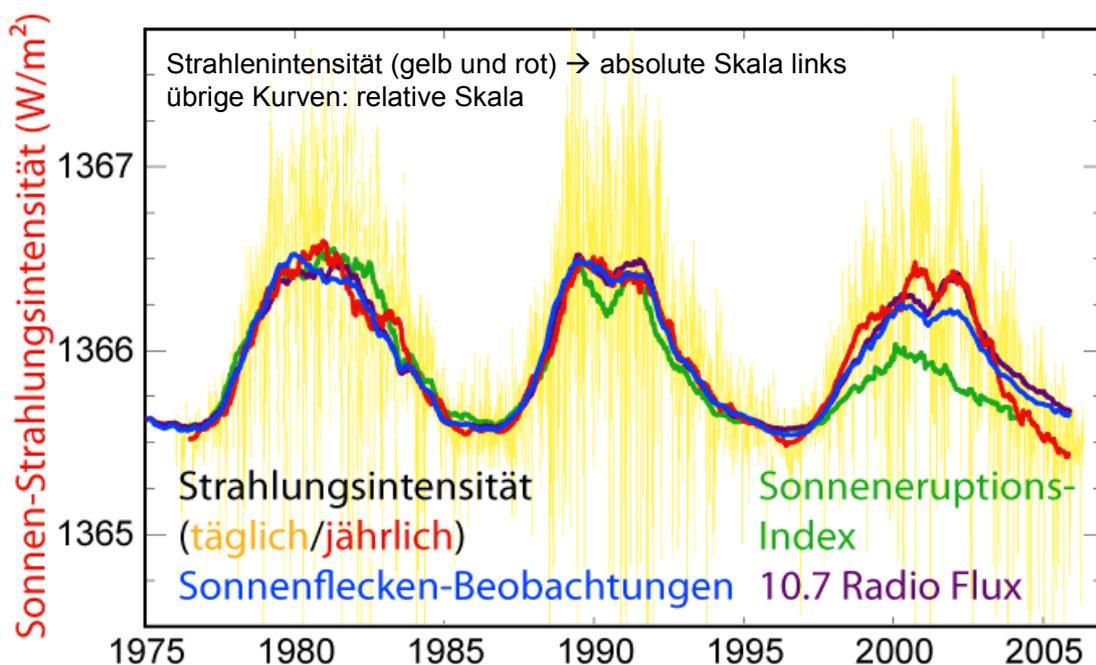
*Für eine ausführlichere Darstellung des Standardmodells der Elementarteilchen sei auf einen separaten Artikel in diesem Heft verwiesen [Vö2].*

## **1. Zwei Quellen für die kosmische Strahlung: Sonne und Weltall**

Die kosmischen Strahlung, oder Höhenstrahlung wie sie von ihrem Entdecker, dem Österreicher VIKTOR FRANZ HESS zuerst genannt wurde, hat ihren Ursprung ausserhalb unserer Erde. Das Maximum des Teilchenflusses auf die Erdatmosphäre von  $1/\text{cm}^2\text{s}$  liegt im Energiebereich  $10^8 - 10^9$  eV. Ein Teil dieser Strahlung – derjenige mit Energien von  $10^7$  bis  $10^{10}$  eV – kommt als **Solar Cosmic Ray SCR** oder auch **Solar Energetic Particles SEP** von unserer Sonne.

Der **Sonnenwind**, hingegen wird nicht zur kosmischen Strahlung gerechnet da dessen Energie zu klein ist um zur Dosis auf der Erde beizutragen. Man unterscheidet zwei Komponenten: Teilchen von 400 km/s und solche von 800

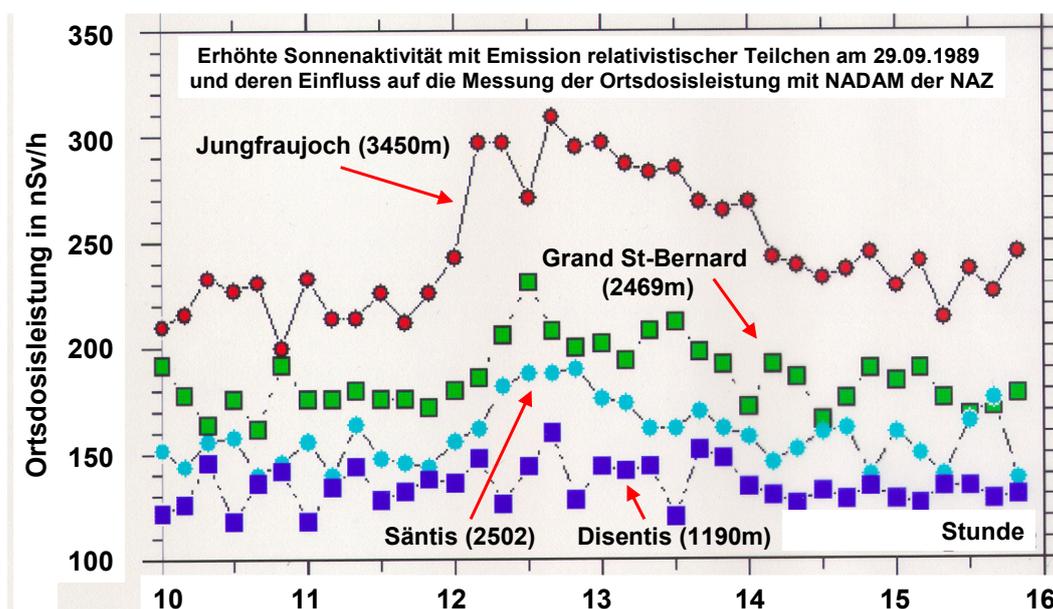
– 900 km/s, die an den koronalen Löchern (Sonnenflecken) austreten. Die Energie der Protonen beträgt bis einige keV (1000 eV), jene der Elektronen etwa 10 eV. Pro Sekunde verliert die Sonne dadurch etwa eine Million Tonnen ihrer Masse in Form von Protonen, Elektronen und wenig Heliumkernen, also Alpha-Teilchen, was viel erscheinen mag, jedoch nur  $5 \cdot 10^{-20}$  Prozent der Sonnenmasse ausmacht. Durch die in der Sonne ablaufende thermonukleare Fusion von Wasserstoff zu Helium verliert die Sonne pro Sekunde weitere 4.3 Millionen Tonnen ihrer Masse. Dieser Prozess läuft bereits seit 4.5 Milliarden Jahren ab, und die Sonne hat noch Wasserstoff für weitere 4.5 – 5 Milliarden Jahre [Al, Ga, Gr, Ha, Ka]. In Erdnähe beträgt der Teilchenfluss  $10^7$  bis  $10^9$  pro  $s \cdot cm^2$  und die Dichte einige Millionen pro Kubikmeter. Als Strom von geladenen Teilchen ist der Sonnenwind ein Plasma aus Elektronen und Ionen. Er deformiert sowohl das Magnetfeld der Sonne, wie auch jenes der Erde. Das Erdmagnetfeld wird auf der sonnenzugewandten Seite zusammengestaucht und auf der sonnenabgewandten Seite in die Länge gezogen oder „geblasen“ (Abb. 10) [Al, Ga, Ha, Ka, WIK].



**Abb. 1:** Der 11-jährige Sonnenzyklus 1975 – 2006; nächstes Maximum ca. 2012 – 14  
**Quelle:** <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenaktivit%C3%A4t>

Die **Intensität** dieses solaren Teilchenstroms wird durch den 11-jährigen Sonnenzyklus (Abb. 1) moduliert. Dieser wird an Hand der Anzahl der Son-

nenflecken (*Zurich Sunspot Number* oder *Wolf Number*) beobachtet und variiert zwischen 9 und 14 Jahren. Er hat aber auch schon mehrmals über längere Zeit, aus bisher unbekanntem Gründen ausgesetzt, beispielsweise während der als *Maunder-Minimum* bezeichneten Periode von 1645 bis 1715. Die Sonnenflecken erscheinen dunkler, weil hier die unter der Korona liegende Schicht der Sonnenoberfläche sichtbar wird. Diese ist um etwa 2000 °C weniger heiss als die Korona selbst mit rund 6000 °C. Letztere ist die wesentliche Strahlenquelle der Sonne. Das Maximum der spektralen Verteilung liegt bei 500 nm im grün-gelben Bereich des sichtbaren Lichtes. Die Leuchtkraft der Sonne beträgt  $3.846 \cdot 10^{26}$  Watt [Al, Ga, Gr, Ha, Ka, WIK].

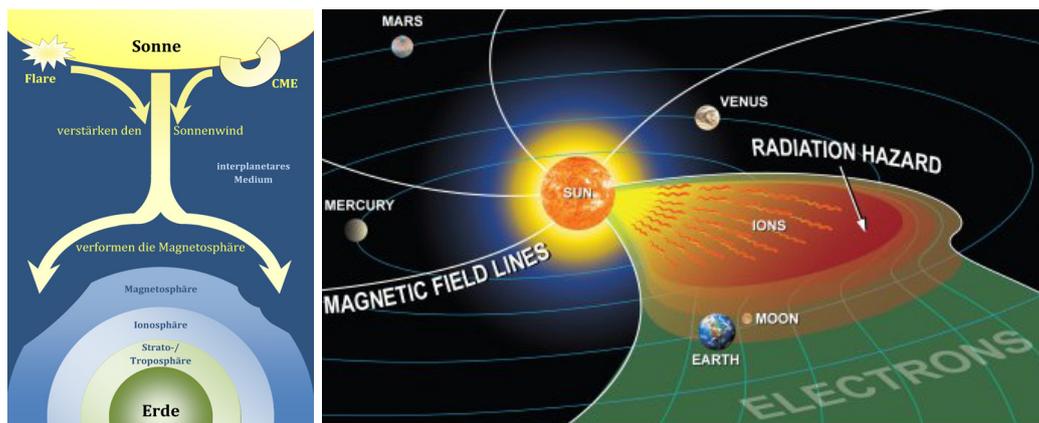


**Abb. 2:** Die Zunahme der Ortsdosisleistung während erhöhter Sonnenaktivität im September 1989, bei der hochenergetische Teilchen (SEP: Solar Energetic Particles) emittiert wurden, war bei den NADAM-Bergstationen am deutlichsten [KÜR]

## 2. Die aktive Sonne und das «Space Weather» (Weltraumwetter)

Bei den als **Flares** und **koronale Massenauswürfe (CME)** bezeichneten **Sonneneruptionen** werden, zusätzlich zum normalen Sonnenwind, an den Sonnenflecken grosse Mengen – bis einige Milliarden Tonnen – an Protonen, aber auch Elektronen und schwerere Kerne mit Geschwindigkeiten bis über 2000 km pro Sekunde ausgestossen, wobei grosse Energiemengen und auch

Röntgenstrahlen frei werden. Wenn diese Ereignisse auf die Erde gerichtet sind, kommt es zu ausgeprägtem Auftreten von Polarlichtern aber auch zu Schäden an Satelliten und aufgrund der erhöhten Elektronendichte in der Ionosphäre auch zu Störungen der Telekommunikation und von Rundfunkübertragungen. In diesen Fällen können kurzzeitig, also während Stunden bis Tagen, Teilchen mit Energien bis 10 MeV und Dichten von 100 Millionen bis 10 Milliarden pro Quadratzentimeter und Sekunde auf die Erde auftreffen. Bei minimaler Sonnenaktivität rechnet man mit weniger als einem Ereignis pro Tag, bei maximaler mit 5 – 6. Das nächste Maximum der Sonnenaktivität wird für Mitte 2012 erwartet [Al, Ha, Ga, Ka, WIK]. Im weiteren kommen selten – im Schnitt einmal pro Jahr – auch relativistische Teilchen (genannt Solar Energetic Particles **SEP**) mit Energien bis einige GeV ( $10^9$  eV) auf der Erde an und führen zu sogenannten Ground Level Enhancements (**GLE**). Diese beeinflussen die Strahlung auf der Erdoberfläche: So wurde jenes vom 29. 9. 1989 vom Schweizer Dosis-Messnetzes NADAM (Abb. 2) [KUER], betrieben durch Meteoschweiz und NAZ, sowie dem Neutronendetektor der Forschungsstation auf dem Jungfraujoch erfasst [FI].



**Abb. 3:** Links: *Interaktion zwischen Flares bzw. koronaren Massenauswürfen der Sonne (CME) und der Magnetosphäre der Erde.* Rechts: *Ausstoss eines solaren Teilchenschwarms der eine entsprechende Space-Weather - Warnmeldung erfordert*

<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Weltraumwetter.png&filetimestamp=20070704182930> und: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/Ionensturm-Voraussage.jpg>

Veränderungen im Weltraumwetter sind eine Folge der Variabilität der Sonnenkorona. Die bei Flares und koronalen Massenauswürfen (CME) freigesetzten Teilchen verstärken den Sonnenwind. Solche Erscheinungen treten vor allem bei maximaler Sonnenaktivität auf, das nächste Mal vermutlich

Mitte 2012-14. Dieses «*Space Weather*» (Weltraumwetter) wird daher von verschiedenen Organisationen (NASA; NOAA = *National Oceanic and Atmospheric Administration*; ESA, etc.) kontinuierlich überwacht; diese stellen entsprechende Informationen laufend auf ihre WEB-Seiten und veröffentlichten gegebenenfalls diesbezügliche Warnmeldungen (Abb. 3) [WIK].

Diese Interaktion zwischen Sonnenaktivität und Erdmagnetfeld und der dabei erzeugte Teilchenfluss beeinflusst die Strahlung sowohl in der Stratosphäre, im Erd-nahen Umfeld, in der Atmosphäre aber auch auf der Erde selbst. Die Erde verfügt zwar über gute natürliche Schutzmechanismen wie Magnetfeld, Ionosphäre und Atmosphäre; bei starken Einflüssen genügt dieser Schutz jedoch nicht mehr und solche externen Ereignisse machen sich auch auf der Erdoberfläche bemerkbar. Es kann kurzzeitig zu erhöhten Strahlendosen am Boden kommen, vor allem aber bei der Luft- und Raumfahrt, sowie zu Schäden der Bordelektronik bei Satelliten, zu Störungen der Telekommunikation, von GPS-Referenzdiensten, sogar zur Beschädigung von Halbleiterkomponenten auf der Erde [WIK].

### 3. Sonnenneutrinos

Von der Sonne werden bei der Fusion von Wasserstoff zu Helium auch **Neutrinos** ( $\nu_e$ ) in grossen Mengen mit Energien von 0.3 bis 20 MeV emittiert. Neutrinos haben keine elektrische Ladung und – wenn überhaupt – dann nur eine extrem kleine Masse ( $< 0.2 \text{ eV}/c^2$ ). Die Haupt-Energiequelle der Sonne ist die **pp-Reaktion**:  $4\text{p} + 2\text{e}^- \rightarrow 1\text{He} + 2\nu_e + 25 \text{ eV}$  [Ha, Ka]. Die Sonne besteht zu 81 Prozent aus Wasserstoff. Sie verbrennt pro Sekunde 564 Millionen Tonnen Wasserstoff, also rund  $3.37 \cdot 10^{38}$  H-Atome. Das entspricht einer Leistung von  $3.6 \cdot 10^{26}$  J. Bei diesem Prozess werden  $1.7 \cdot 10^{38}$  Neutrinos mit rund 500 keV emittiert. Auf die Erde in 149 Millionen km Entfernung treffen pro Sekunde und  $\text{cm}^2$  noch rund 60 Milliarden Neutrinos auf. Eine Supernova erzeugt bis  $10^{20}$ -mal mehr Neutrinos, so etwa die Supernova «SN1987A» von 1987. Dieses Ereignis fand in einer Entfernung von 157'000 Lichtjahren statt. Der Neutrinofluss am Ort der Erde war deshalb nur schwach erhöht, konnte jedoch von mehreren Laboratorien festgestellt werden (s. [WIK]: SN1987A). Seit man weiss, dass Neutrinos oszillieren, also sich zwischen den drei Familien umwandeln können ( $\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$ ), ist auch das Rätsel der Sonnenneutrinos geklärt [WIK].

**Tab. 1: Teilchen, deren Herkunft und Eigenschaften**

<b>Strahlung</b>	<b>Geschwindigkeit (v) Energie (E)</b>	<b>Teilchenfluss (Φ)</b>	<b>Bemerkungen</b>
<b>Sonnenwind</b> p, e <sup>-</sup> , α und + wenig schwerere Kerne	Zwei Komponenten: - v ≈ 400 km/s - v ≈ 800-900 km/s <b>E<sub>p</sub> ≈ 10<sup>3</sup> eV</b> (Elektronen bis 10 eV)	<b>Φ ≈ 10<sup>7</sup>/cm<sup>2</sup>s</b> Dichte ≈ 5/cm <sup>3</sup> Massenverlust der Sonne 10 <sup>6</sup> Tonnen/s ≈ 1.3x10 <sup>36</sup> Teilchen/s	Wird nicht zur kosmischen Strahlung gerechnet; Energie der Teilchen zu niedrig; keinen Dosisbeitrag auf der Erde. Moduliert mit dem 11jährigen Sonnenzyklus, dieser beeinflusst das Eindringen der kosmischen Strahlung
<b>Sonnen- flares und CME (Coro- nal Mass Ejection)</b>	v bis über 3000 km/s <b>E<sub>p</sub> bis ≈ 10<sup>8</sup> eV</b>	<b>Φ ≈ 10<sup>8</sup>-10<sup>10</sup>/cm<sup>2</sup>s</b> Dichte bis 50/cm <sup>3</sup> Massenverlust der Sonne 10 <sup>9</sup> Tonnen pro Ereignis	Häufigkeit: - Solar Maximum: 5 - 6/Tag - Solar Minimum: < 1/Tag - Dauer Stunden – Tage - nächstes Maximum ca. 2012-14
<b>anomale + SEP (Solar Energetic Particles)</b>	<b>E<sub>p</sub> bis einige 10<sup>9</sup> eV</b>	Im Mittel 1 Ereignis/Jahr; bisher stärkstes am 29.9.1989. Beschleunigung an Schockfront der Heliosphäre durch Wech- selwirkung Sonnenwindes mit lokaler interstellarer Materie	
<b>galaktisch</b>	<b>E<sub>p</sub> ≈ 10<sup>8</sup> bis 10<sup>18</sup> eV</b>	Fluss nimmt stark mit zunehmender Energie ab; Beschleu- nigung durch Schockfronten von Supernovae-Explosionen sowie aus schwarzen Löcher oder Pulsaren	
<b>extra- galaktisch</b>	<b>E<sub>p</sub> &gt; 10<sup>19</sup> eV</b>	Teilchen mit Höchstenergien; durch GZK-Cutoff auf <b>E ≈ 6·10<sup>19</sup> eV</b> begrenzt; Flussdichten unter <b>Φ ≈ 10<sup>-20</sup>/m<sup>2</sup>s</b> Quellen vermutlich andere Galaxien und Quasare	

#### 4. Die galaktische kosmische Strahlung

Der überwiegende Teil der kosmischen Strahlung, insbesondere die Teilchen mit mehr als 100 MeV ( $10^8$  eV), kommen als galaktische (**Galactic Cosmic Ray: GCR**) und extragalaktische Strahlung (jene mit mehr als  $10^{19}$  eV) von ausserhalb unseres Sonnensystems. Sie treffen aus allen Richtungen auf die Erde auf, ihr Teilchenfluss ist somit isotrop, im Gegensatz zum Sonnenwind. 98 Prozent davon sind Nukleonen und 2 Prozent Elektronen; bei den Nukleonen sind rund 9/10 Protonen, rund 1 Zehntel He-Kerne und etwa ein Prozent sind schwerere Atomkerne (Tab. 1) [Am, Ga, Un].

**Tab. 2: Primärer Teilchenfluss bei 40° Breite und bei solarem Minimum [Al]**

Ladungszahl [Z]	Teilchenfluss [pro m <sup>2</sup> s sr]	Anteil [%]
1	610 ± 30	86
2	90 ± 2	12.7
3 - 5	2 ± 0.2	0.28
6 - 9	5.6 ± 0.2	0.8
10 - 19	1.4 ± 0.2	0.2
20 - 29	0.4 ± 0.1	0.05

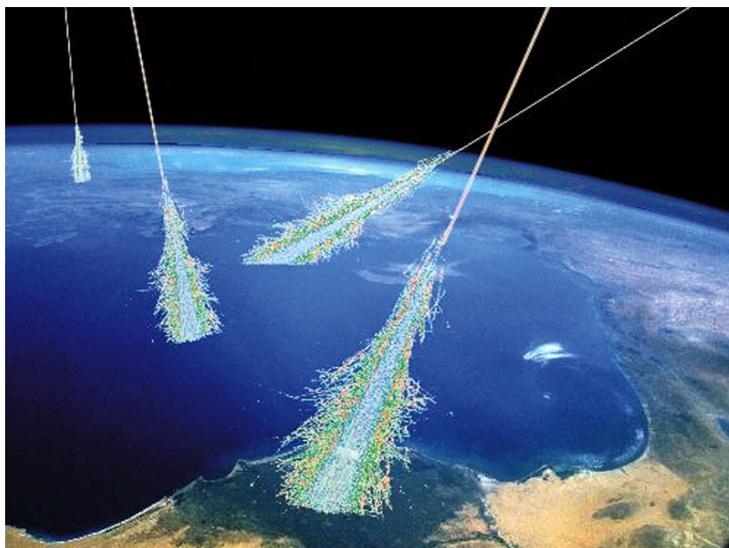
Die Elementverteilung weicht bei Lithium, Beryllium und Bor etwas von derjenigen unseres Sonnensystems ab. Die Energie der Teilchen ist mit bis zu  $10^{20}$  eV mehr als zehn Millionen mal höher, als was der aktuell stärkste Beschleuniger LHC des CERN je erreichen wird. Der Teilchenfluss (Abb. 6): lässt sich durch folgende Potenzfunktion beschreiben [Am, WIK]:

$$I_N(E) \approx 1.8 \cdot 10^4 \cdot E^{-\gamma} [\text{GeV}] \text{ in } [\text{N}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{GeV}]$$

E [GeV] =	< 4·10 <sup>6</sup>	4·10 <sup>6</sup> – 5·10 <sup>9</sup>	> 10 <sup>9</sup>	> 10 <sup>11</sup>
γ ≈	2.7	3	< 3	>> 3

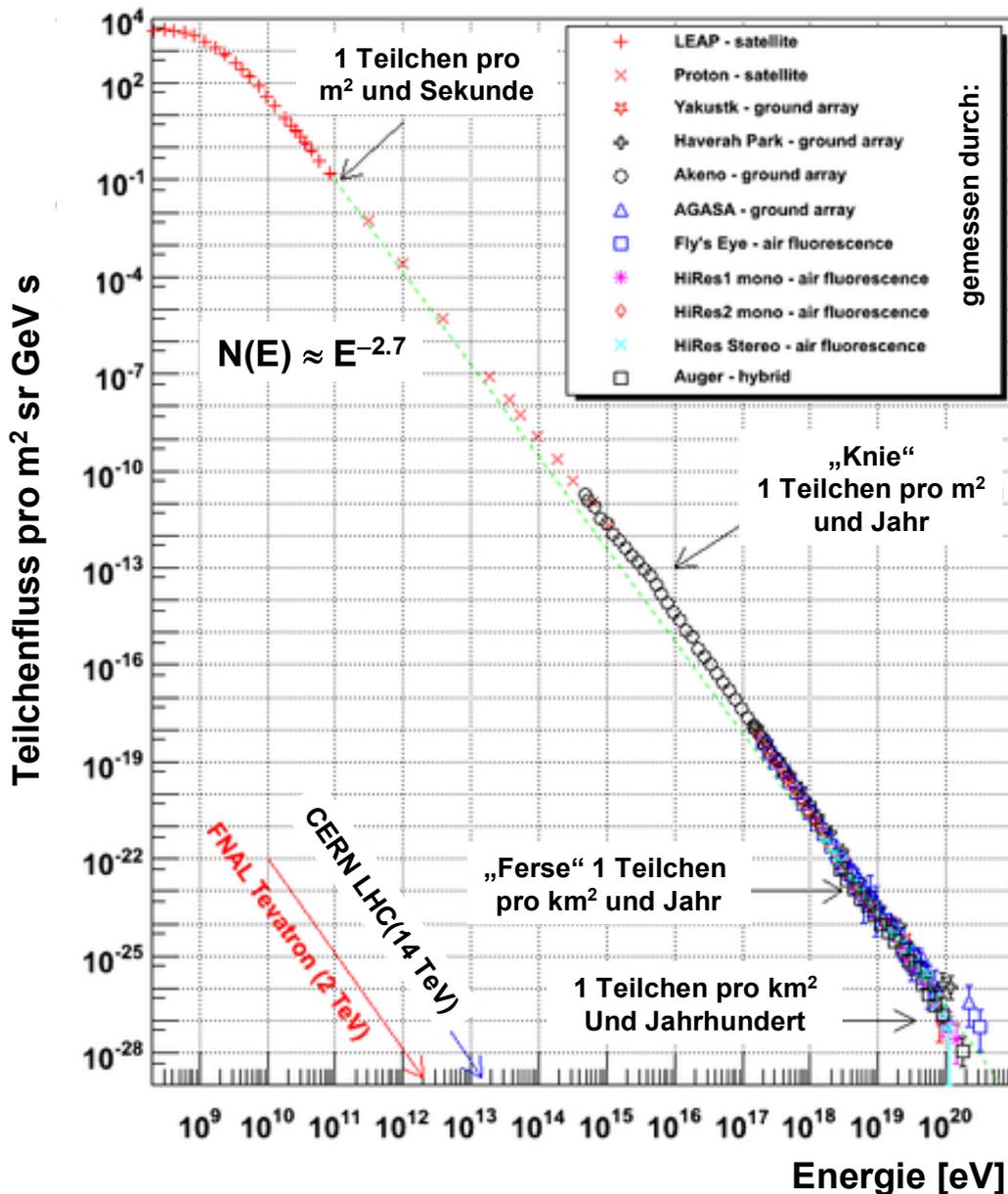
Durch den **GZK-Cutoff** (KENNETH GREISEN, GEORGIY ZATSEPIN und VADIM KUZMIN, s. **Anhang**) werden die hochenergetische Teilchen durch Wechselwirkung mit der kosmischen Hintergrundstrahlung von 2.7 K auf  $6 \cdot 10^{19}$  eV abgebremst. Selten wurden auch schon Teilchen mit  $> 10^{20}$  eV beobachtet. Ein solches (ein Proton ?) mit  $3 \cdot 10^{20}$  eV wurde am 15.10.1991 im Staat Utah

(USA) nachgewiesen. Seine Geschwindigkeit war nur  $(1 - 5 \cdot 10^{-24})$  mal geringer als die Lichtgeschwindigkeit. Die kinetische Energie (50 Joules) entsprach derjenigen eines 142 g schweren und 100 km/h schnellen Baseballs. Ereignisse dieser Art sind aber extrem selten: bei  $10^{20}$  eV nur eines pro  $\text{km}^2$  und Jahrhundert, umgerechnet auf die gesamte Erdoberfläche eines alle 6 Sekunden. Diese extrem hochenergetische Protonen («*Oh-My-God Particle*») sind mit einer relativistischen Masse von etwa  $5 \cdot 10^{-16}$  kg rund 400 Milliarden Mal schwerer als ein ruhendes Proton mit  $1.67 \cdot 10^{-27}$  kg. Dagegen beträgt der Teilchenfluss bei 100 GeV ( $10^{11}$  eV) rund ein Teilchen pro Quadratmeter und Sekunde an der Erdoberfläche [WIK].



**Abb. 4: Wie man sich Luftschauer durch kosmischen Teilchen bildhaft vorstellt**  
**Quelle:** [http://www.newscientist.com/blog/technology/uploaded\\_images/cosmic\\_rays-715634.jpg](http://www.newscientist.com/blog/technology/uploaded_images/cosmic_rays-715634.jpg)

Über den **Ursprung** der kosmischen Strahlung und vor allem wie die Teilchen auf so hohe Energie beschleunigt werden gibt es nur Hypothesen. Thermische Prozesse kommen hierfür nicht in Frage. ENRICO FERMI (1901–1954) vermutet als Mechanismus die Reflexion an Plasmawolken im All und an Stosswellen aus der Explosion von Supernovae. Diese und Pulsare könnten die Ursache für die Strahlung aus unserer Galaxie sein (Energien  $< 10^{16}$  eV), während die Teilchen mit noch höheren Energien vermutlich extragalaktischen Ursprungs sind. Sie kommen von Galaxien mit einem aktiven, massereichen schwarzen Loch im Zentrum.

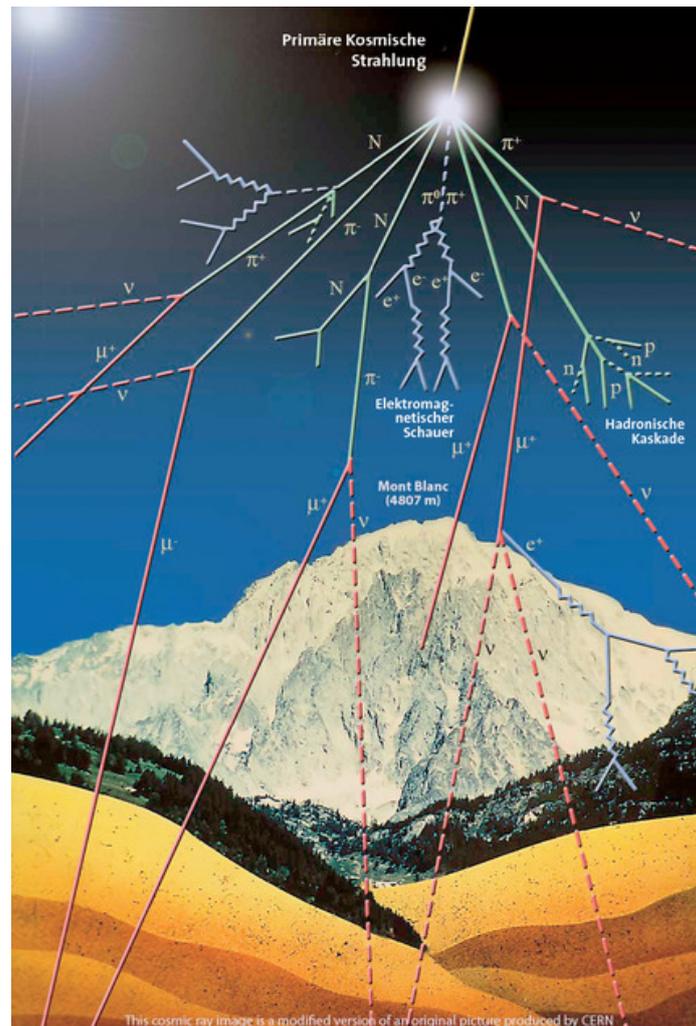


**Abb. 5:** Energieverteilung der primären kosmischen Strahlung: (versch. Experimente)  
**Quelle:** <http://www.physics.utah.edu/~whanlon/spectrum1Small.png>

## 5. Wechselwirkung zwischen kosmischer Strahlung und Atmosphäre

In etwa 20 km Höhe entsteht aus der Primärstrahlung durch Wechselwirkung mit den Atomen und Molekülen der Luft die kosmische Sekundärstrahlung: Eine Reihe verschiedener Teilchen, die auf die Erde herunterprasseln. Aus einem einzigen Primärproton mit einer Energie von  $10^{15}$  eV können in Form

von elektronischen und hadronischen Kaskaden – genannt **Luftschauer** – bis eine Million Sekundärteilchen erzeugt werden. Von diesen sind 80 Prozent Photonen – also Gamma-Strahlen – 18 Prozent Elektronen und Positronen, 1.7 Prozent Myonen und die restlichen 0.3 Prozent Hadronen. Letztere sind aus Quarks zusammengesetzte Teilchen wie etwa Protonen, Neutronen, Pionen und Kaonen (Abb. 7, 8, 9) [Un, Vö2].



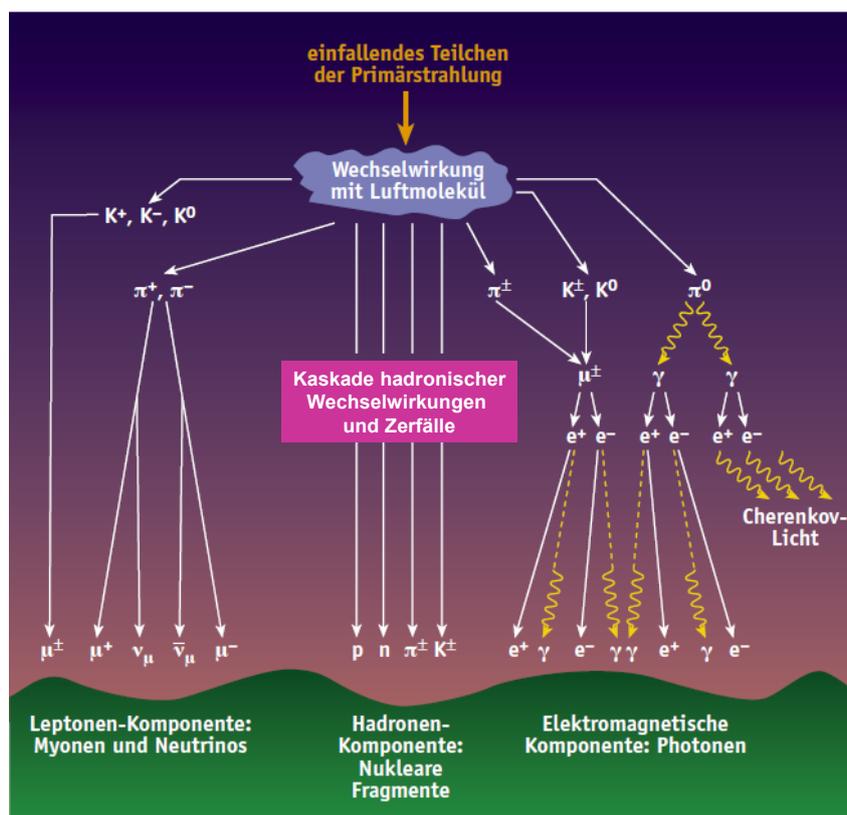
**Abb.6: Wechselwirkung der Primärstrahlung mit der Atmosphäre (Luftschauer)**

Quelle: [http://www-zeuthen.desy.de/exps/physik\\_begreifen/frederiq/Kosmische\\_Strahlung/Teilchenschauer.jpg](http://www-zeuthen.desy.de/exps/physik_begreifen/frederiq/Kosmische_Strahlung/Teilchenschauer.jpg)

Diese **Luftschauer** wurde vom französischen Physiker PIERRE AUGER (1899 – 1993) durch Messungen in der hochalpinen Forschungsstation auf dem

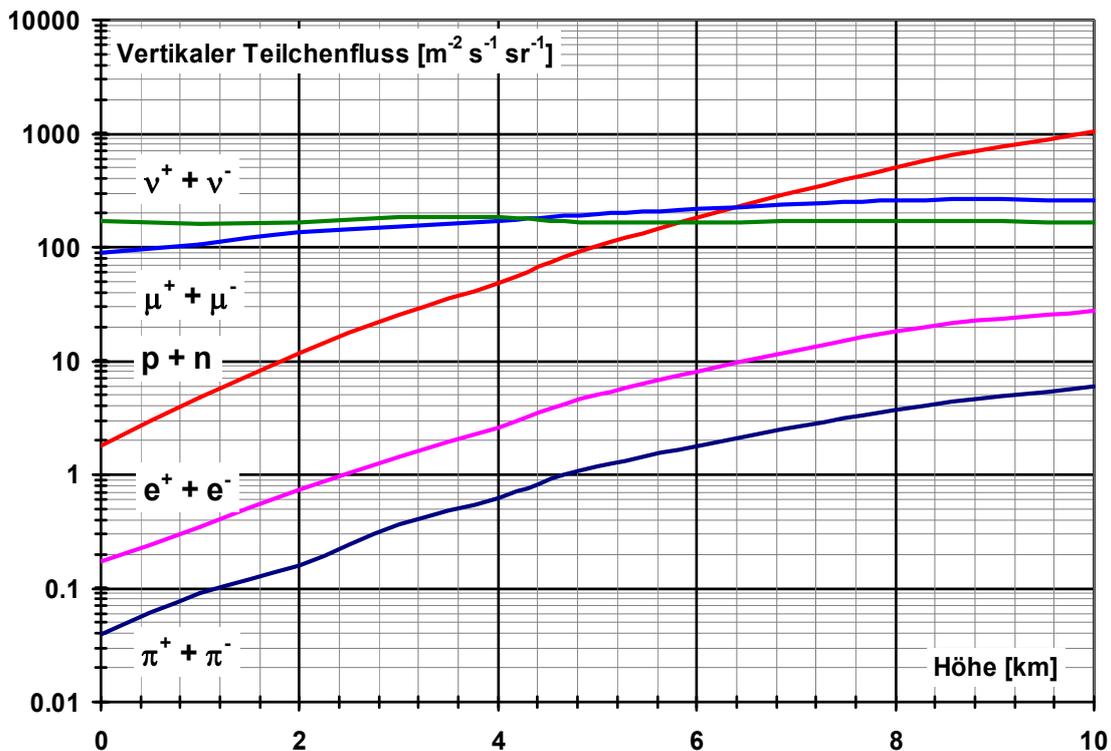
Jungfrauoch in 3500 m Höhe erstmals 1938 nachgewiesen und als deren Ursache die kosmische Primärstrahlung identifiziert [WIK, Fl].

Von der grossen Anzahl der bis heute bekannten Elementarteilchen sind nur das Elektron ( $e$ ) und das Proton ( $p$ ) stabil. Alle andern Teilchen, so das freie Neutron ( $n$ ), zerfallen, letzteres beispielsweise mit einer mittleren Lebensdauer von 881.5 s:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  (unterstrichene Teilchen sind Antiteilchen). Neutrale Kaonen ( $K^0$ ) mit einer Lebensdauer von 51.2 ns, sowie geladene Kaonen ( $K^\pm$ ) mit 12.4 ns Lebensdauer können auf verschiedene Arten zerfallen: in Pionen ( $\pi$ ), Myonen ( $\mu$ ), Elektronen ( $e^-$ ), Neutrinos ( $\nu$ ) und Gamma-Quanten ( $\gamma$ ). Neutrale Pionen ( $\pi^0$ ) wiederum haben eine extrem kurze Lebensdauer von  $8.4 \cdot 10^{-17}$  s und zerfallen meist in zwei Gamma-Quanten, seltener ( $\approx 1\%$ ) auch in ein Elektron-Positron-Paar ( $e^- e^+$ ) und ein Gamma-Quant. Für Elementarteilchen  $\rightarrow$  [Vö2].



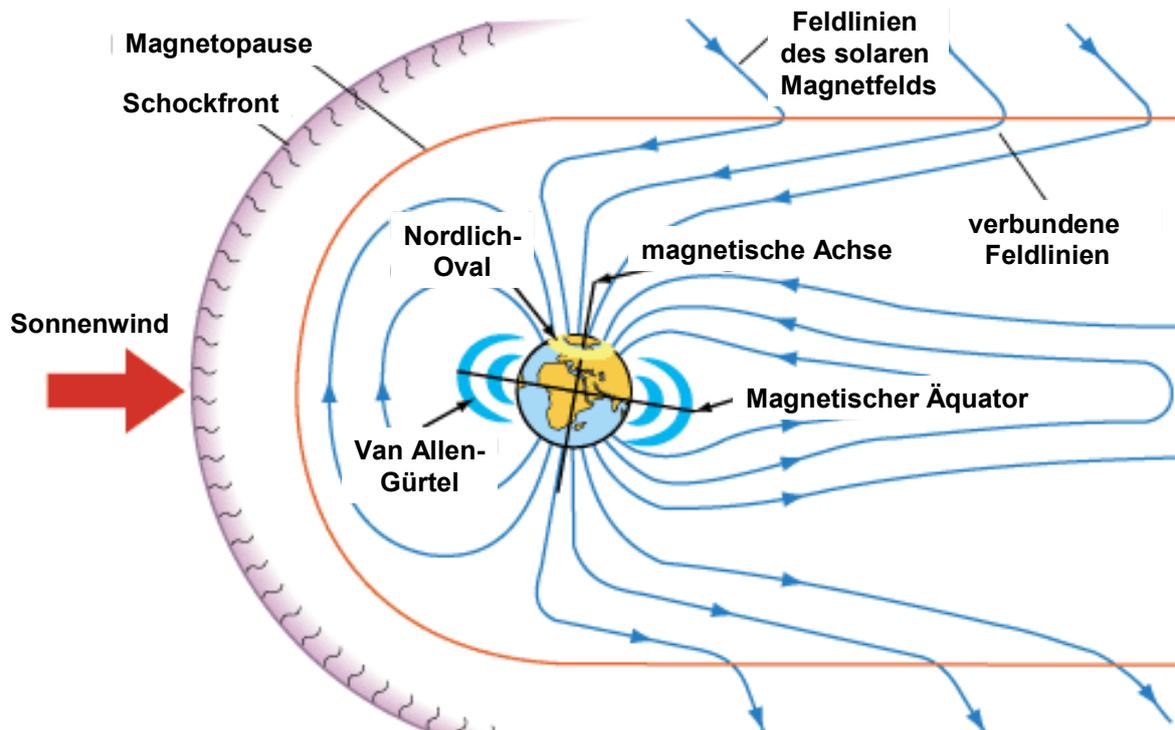
**Abb. 7:** Wechselwirkung der Primärstrahlung mit der Atmosphäre (Luftschauer)  
**Quelle:** [http://www.wissenschaft-online.de/artikel/833074&\\_wis=1](http://www.wissenschaft-online.de/artikel/833074&_wis=1)

Geladene **Pionen** ( $\pi^\pm$ ) haben eine mittlere Lebensdauer von 26 ns und zerfallen nach folgender Reaktion:  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  oder  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ . Die Lebensdauer der dabei entstandenen **Myonen** beträgt 2.2  $\mu\text{s}$ . Diese zerfallen gemäss:  $\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e$  oder  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$ . Berücksichtigt man ihre kurze Lebensdauer, dürften sie eigentlich die Erdoberfläche gar nicht erreichen und müssten bereits nach wenigen hundert Metern zerfallen. Infolge der relativistischen Zeitdehnung läuft aber ihre Eigenzeit wegen ihrer hohen Geschwindigkeit langsamer ab, als diejenige eines ruhenden Beobachters. Deshalb erreicht ein Teil der in 9 bis 12 km Höhe erzeugten Myonen trotzdem die Erdoberfläche. Im Weiteren entstehen durch die kosmische Strahlung über Neutroneneinfang und durch Spallationsreaktionen auch kosmogene Radionuklide, unter anderem etwa Kohlenstoff-14, das man bei der Altersbestimmung von organischem Material benutzt. Für kosmogene Radionuklide s. Kapitel 7.



**Abb. 8:** Teilchenfluss der sekundären kosmischen Strahlung. Daten aus [Am, Un]

Die kosmische Strahlung kann einen **Einfluss auf das Klima** haben, beispielsweise auf die Wolkenbildung [Us, NZZ]. Die Strahlung ionisiert Luftatome und trägt indirekt zur Bildung von Kondensationskeimen bei. Diese können auch als Trigger für Blitzentladungen bei Gewittern eine Rolle spielen.



**Abb. 9:** Der Sonnenwind und dessen Einfluss auf die Magnetosphäre der Erde

**Quelle:** [http://phyworld.ed.hkedcity.net/iq/aurora/magnetopause\\_e.gif](http://phyworld.ed.hkedcity.net/iq/aurora/magnetopause_e.gif)

## 6. Polarlichter - Nordlichter

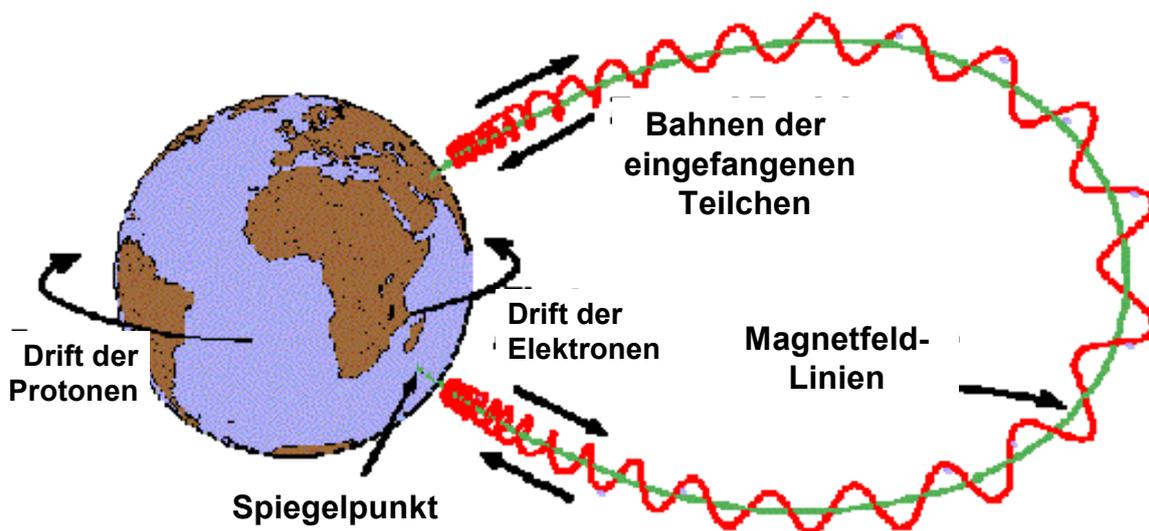
Wenn geladene Teilchen wie Elektronen oder Protonen der kosmischen Strahlung auf die oberen Schichten der Erdatmosphäre der Polarregionen treffen, regen sie dort die Luftmoleküle zum Leuchten an. Es entstehen die Polarlichter. Diese nennt man im Norden **Aurora borealis** und im Süden **Aurora australis**. Sie werden vom Magnetfeld der Erde eingefangen, rotieren gemäss der Lorentzkraft um dessen Feldlinien und werden zu den magnetischen Polen hingelenkt.

Setzt man die Lorentzkraft der Zentripetalkraft gleich, so erhält man:

$$|\vec{F}_{\text{Lorentz}}| = e|\vec{v} * \vec{B}| = \frac{m|\vec{v}^2|}{r} \rightarrow r = \frac{m|\vec{v}|}{eB} ; \text{Rotationsfrequenz: } \nu \propto B \left( \frac{e}{m} \right).$$

Gegen die Pole nimmt die Feldstärke zu – die Feldlinien liegen näher beieinander – wodurch die Teilchen, nach dem Prinzip der magnetischen Flasche, eine rücktreibende Kraft spüren, was dazu führt, dass sie zwischen den Polen hin- und herpendeln (Abb. 10). Da die Magnetfeldlinien gegen die Pole senkrecht auf die Erdoberfläche auftreffen, können die Teilchen dort in die Erdatmosphäre eindringen und Moleküle und Atome der Luft anregen. Dies hat ein Fluoreszenzlicht zur Folge (Abb. 11). **Polarlichter** haben verschiedene Farben: An Sauerstoffatomen in 100 km Höhe entsteht grünes Fluoreszenzlicht, an Sauerstoffatomen in 200 km Höhe rotes, an Stickstoffatomen violette bis blaues. Ausserhalb der Polarregionen können die Teilchen nur selten tief in die Atmosphäre eindringen. Deshalb sind Polarlichter in den gemässigten Zonen, also auch in Europa, eher selten und dann vor allem rot [WIK].

Ungeladenen Teilchen wie Photonen, Neutronen oder Neutrinos werden hingegen durch das Magnetfeld der Erde nicht beeinflusst.



**Abb. 10:** Vom Magnetfeld der Erde eingefangene geladene Teilchen

**Quelle:** <http://www.spennis.oma.be/help/background/traprad/motion.gif>



**Abb. 11: Polarlichter oder Nordlichter**

**Quelle:** [http://jednosdruhym.com/wp-content/uploads/2008/02/polarlicht\\_2\\_640.jpg](http://jednosdruhym.com/wp-content/uploads/2008/02/polarlicht_2_640.jpg)

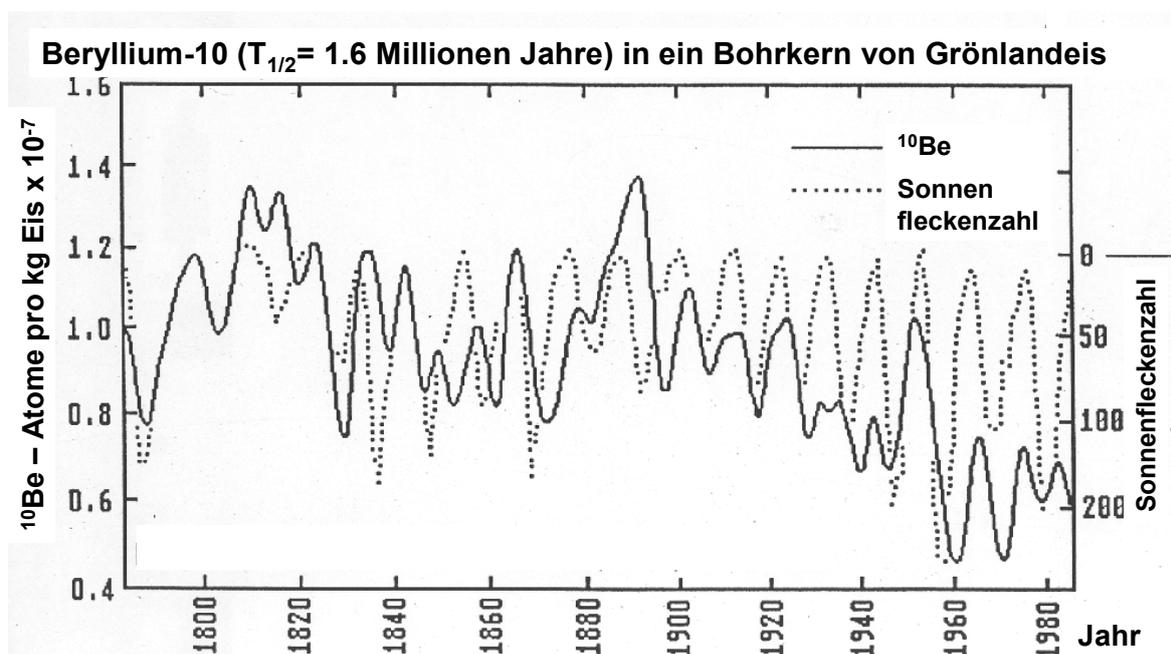
## 7. Kosmogene Radionuklide

Eine weitere mögliche Reaktion hochenergetischer Protonen der primären kosmischen Strahlung mit Atomkernen der Atmosphäre ist die so genannte **Spallation**. Dabei wird der von einem solchen Teilchen getroffene Atomkern zerschmettert: Er zerfällt in mehrere Bruchstücke, wobei auch Neutronen freigesetzt werden. Primäre Protonen oder sekundäre Neutronen können durch **Kernreaktionen** kosmogene Radionuklide erzeugen, so z.B. Kohlenstoff-14 an Stickstoffatomen der Luft über die Reaktion:  $^{14}\text{N} (\text{n}, \text{p}) ^{14}\text{C}$ .

**Tabelle 3: Einige der produzierten kosmogenen Radionuklide [Ma]**

Isotop	physikalische Halbwertszeit	Produktion [Atome/m <sup>2</sup> s]	Gleichgewichts-Inventar
Tritium ( <sup>3</sup> H)	12.3 Jahre	2600	≈ 4 kg
<sup>7</sup> Be	53 Tage	260	≈ 0.1 kg
<sup>10</sup> Be	1.6·10 <sup>6</sup> Jahre	263	≈ 120 Tonnen
<sup>14</sup> C	5730 Jahre	19'000	≈ 60 Tonnen
<sup>36</sup> Cl	300'000 Jahre	14	≈ 6 Tonnen

Diese Nuklide sind radioaktiv und zerfallen was in der Biosphäre zu einem Gleichgewicht zwischen Produktion und Zerfall führt (Tab. 2). Lebende Pflanzen zeigen das natürliche  $^{14}\text{C}/\text{C}$ -Verhältnis von 226 Bq  $^{14}\text{C}/\text{kg C}$  [KÜR]. (Bq ist Einheit für die Aktivität mit 1 Becquerel = 1 Zerfall/s): Stirbt die Pflanze oder wird der betreffende Baum gefällt, nimmt dessen  $^{14}\text{C}$ -Gehalt entsprechend seiner Halbwertszeit ab. Bei der  $^{14}\text{C}$ -Altersbestimmung an einem Stück Holz wird aus dem  $^{14}\text{C}/\text{C}$ -Verhältnis das verfllossene Zeitintervall bestimmt, seit der betreffende Baum gefällt wurde.



**Abb. 12:** Die  $^{10}\text{Be}$ -Konzentration in einem Bohrkern aus Grönlandeis zeigt eine Antikorrelation zur Sonnenaktivität ( $T_{1/2} \approx 1.6$  Millionen Jahre) [Be]

Die Produktion der kosmogenen Radionuklide hängt vom Sonnenwind ab und steht zu diesem in Antikorrelation. Abb. 12 zeigt dies am Beispiel des langlebigen  $^{10}\text{Be}$ , gemessen an einen Bohrkern aus Grönland-Eis durch JÜRGEN BEER von der EAWAG in Dübendorf [Be]. Tritium und  $^{14}\text{C}$  wurden auch bei den **Kernwaffentests** der 50er- und 60er-Jahren freigesetzt. Deshalb war damals die Konzentration von  $^{14}\text{C}$  in der Atmosphäre doppelt, beim Tritium gar rund 2000-mal so hoch wie der natürliche Wert. Seither hat dieser Anteil wieder abgenommen und die Konzentration von  $^{14}\text{C}$  und  $^3\text{H}$  liegt heute nur noch knapp über dem natürlichen Wert. Schliesslich werden  $^3\text{H}$  und  $^{14}\text{C}$  in

geringeren Mengen, auch aus Kernkraftwerken und bei der Anwendung von Radioisotopen in Forschung, Medizin und Technik freigesetzt [KÜR].

## 8. Strahlendosis durch die kosmische Strahlung

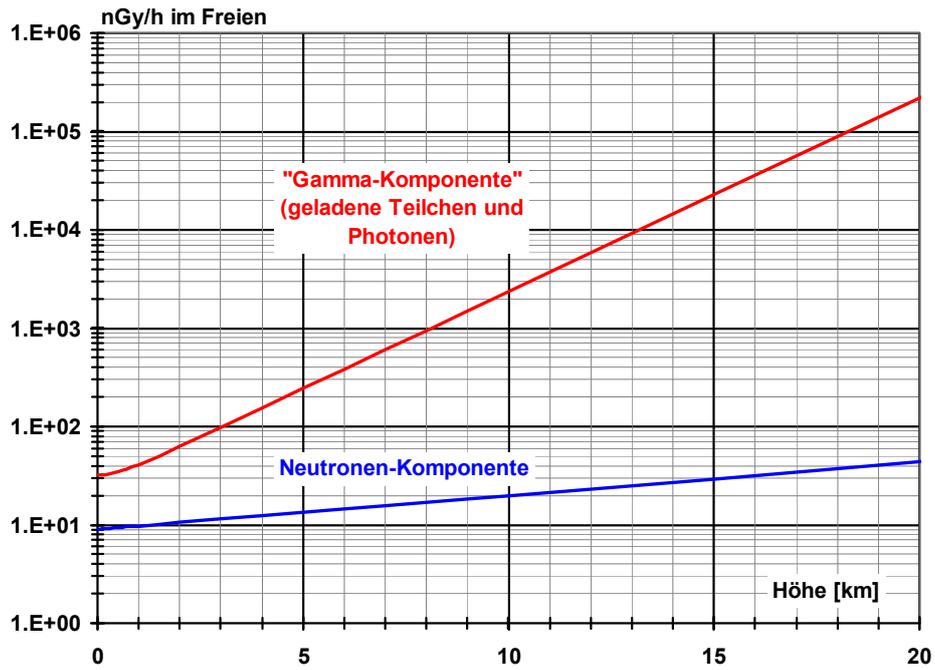
Die auf der Erdoberfläche ankommende kosmische Sekundärstrahlung macht etwa einen Drittel unserer **natürlichen Strahlenexposition** aus. Glücklicherweise ist der Mensch und auch die übrige Biosphäre gut geschützt: Zum einen durch das **Magnetfeld** der Erde, das die Teilchen ablenkt (Abb. 9 & 10) und in der Nähe der Pole einfängt (wodurch die Nordlichter entstehen), zum andern durch die **Atmosphäre** selbst, welche die Intensität der Strahlung in Bodennähe auf wenige Prozent gegenüber 10 km Höhe abschwächt [Un].

In Bodennähe stammt die durchschnittliche natürliche Strahlenexposition des Menschen zu etwa einem Drittel (0.35 mSv pro Jahr) von der natürlichen terrestrischen Radioaktivität der Erdkruste und zu einem weiteren Drittel (0.33 mSv pro Jahr) von den natürlichen Radionukliden im Körper, 60 Prozent davon vom natürlichen  $^{40}\text{K}$  (mit  $^{40}\text{K}_{\text{nat}}/\text{K} \approx 0.012$  Prozent), der Rest von den übrigen natürlichen Radionukliden in Körper. Die kosmische Strahlung ist verantwortlich für das letzte Drittel von rund 0.38 mSv pro Jahr [KSR].

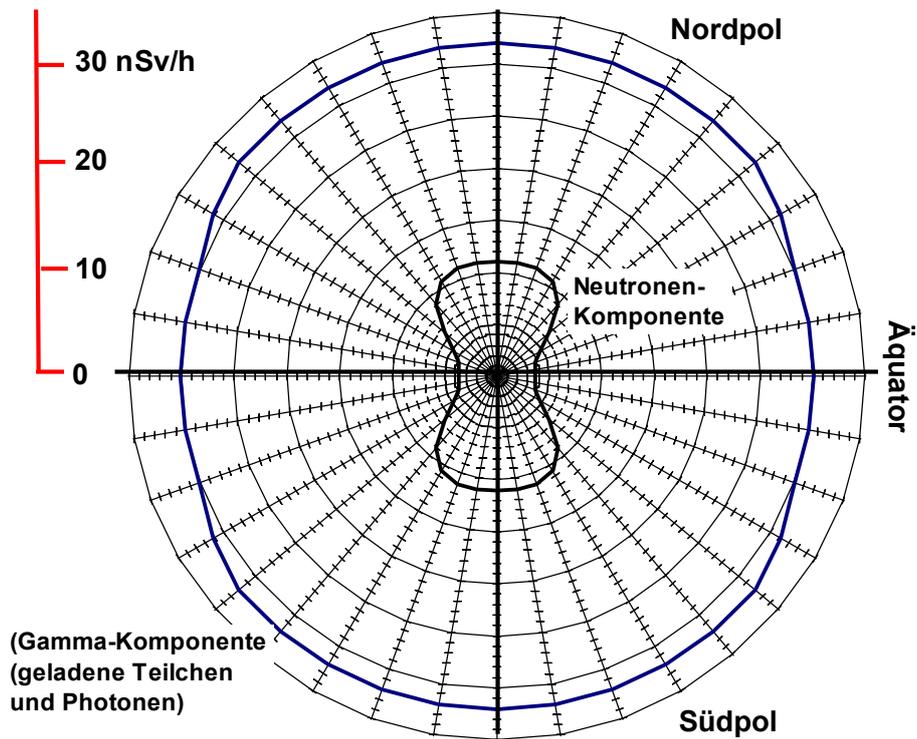
Die KSR nimmt für die Berechnung des ersten und dritten Beitrages an, dass sich der Mensch 80 Prozent der Zeit im Hausinnern aufhält. Dort ist die terrestrische Strahlung infolge der Radionuklide in den Baustoffen um 40 Prozent höher als im Freien, jene der kosmischen Strahlung wird durch die Wände hingegen um 20 Prozent abgeschwächt. 80 Prozent der kosmischen Strahlendosis kommen von der ionisierenden Komponente ( $E_c$ ) (Myonen, Elektronen und  $\gamma$ -Quanten), der Rest von den Neutronen ( $E_n$ ). Beide Komponenten [mSv/Jahr] nehmen bis ca. 10 km annähernd exponentiell zu. Die angegebenen Koeffizienten gelten für eine mittlere nördliche Breite:

$$\boxed{E_{c,n} \approx E_{c,n}(0) \cdot e^{f_{c,n} \cdot Z}} \quad E_c(0) \approx 0.24; E_n(0) \approx 0.066; f_c \approx 0.38; f_n \approx 0.78; Z[\text{km}]$$

Die Dosis wird schwach durch den 11-jährigen Sonnenzyklus moduliert. Solare Ereignisse führen zu einer Abnahme des kosmischen Teilchenflusses. Die kosmische Strahlendosis ist also zur Sonnenaktivität in Antikorrelation, ist somit etwas stärker bei geringer und schwächer bei hoher Sonnenaktivität. Sie nimmt zudem gegen die Pole leicht zu (Abb. 13 und 14) [KSR, WIK].



**Abb. 13:** Intensität der Dosis in Funktion der Höhe über Meer für eine mittlere nördliche Breite. Daten aus: [Un]

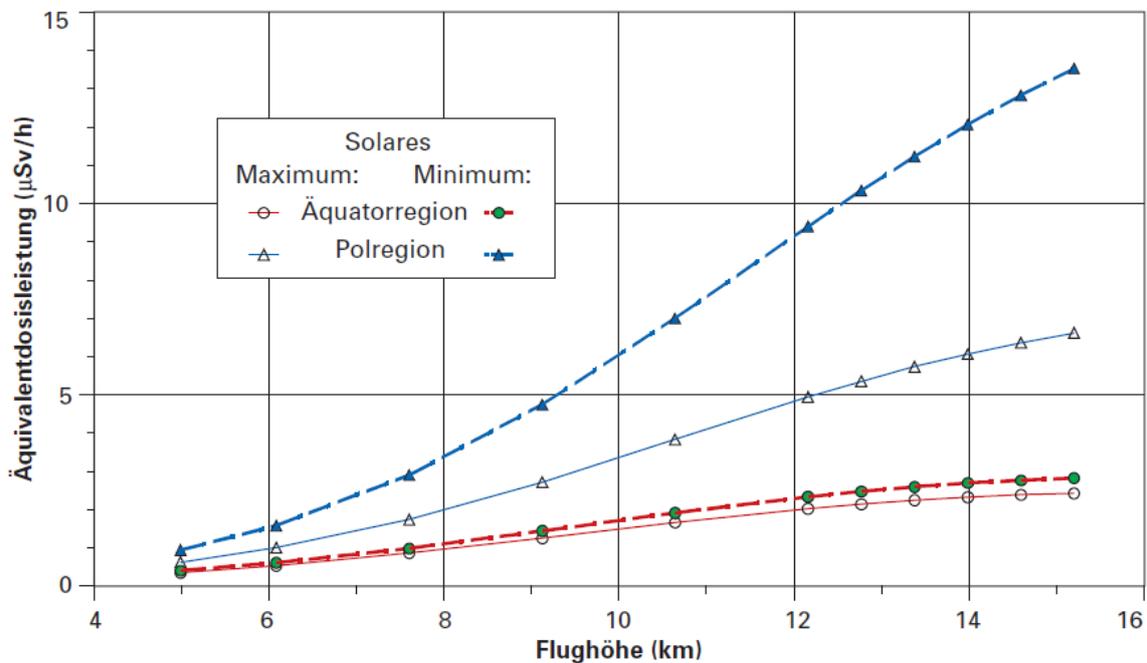


**Abb. 14:** Dosisverteilung am Erdboden in Funktion der geographischen Breite. Daten aus: [Un]

## 9. Erhöhte Strahlendosen bei der Zivilluftfahrt

Aus der Sicht des Strahlenschutzes ist die erhöhte kosmische Strahlendosis in 10 bis 15 km Höhe vor allem bei der **Zivilluftfahrt** und beim **fliegenden Personal** nicht zu vernachlässigen. Dabei sind auch Vielflieger und Kurierere betroffen. Da es sich um teilweise hochenergetische Teilchen handelt, bedeutet dies eine zusätzliche Herausforderung an die Messtechnik.

Das fliegende Personal gehört zur am stärksten strahlenexponierten Personengruppe. Abschirmungen sind in den Flugzeugen nicht möglich (Abb. 15). Beeinflusst werden kann diese Strahlendosis nur durch geeignete Wahl von Flughöhe und Flugroute [Schr, Un]. Der Link zum EPCARD-Programm zur Berechnung von Flugdosen ist bei der Referenz [Schr] angegeben.



**Abb. 15:** Diagramm zur überschlägigen Abschätzung der Umgebungs-Äquivalentdosisleistung für den Flughöhenbereich zwischen 5 und 15 km für den Polar- und den Äquatorbereich jeweils für hohe und niedrige Sonnenaktivität [Schr]

Ein **Überseeflug** (hin und zurück) ergibt im Mittel eine Dosis von etwa 0.06 mSv [KSR]. In [BMU] wird darauf hingewiesen, dass 2009 die mittlere Dosis des fliegenden Personals in Deutschland bei 2.35 mSv pro Jahr lag, mit

einem Wertebereich zwischen 0.2 und 7 mSv. Diese Dosiskomponente hat in den letzten Jahren infolge des aktuellen Sonnenzyklus zugenommen und lag 2009 etwa 20 Prozent höher als 2004. Bei schwacher Sonnenaktivität können kosmische Teilchen leichter in's Innere des Magnetfeldes der Erde eindringen, die Dosen somit etwas höher; bei hoher Sonnenaktivität ist es gerade umgekehrt. Minima der Sonnenaktivität (und Maxima der Dosis) waren im Sommer 1986, 1996 und 2008; Maxima waren Anfangs 1981, 1990 und 2001. Das nächste Maximum wird für Mitte 2012 erwartet.

## 10. Die Entdeckung der kosmischen Strahlung

1936 erhielt der österreichische Physiker VIKTOR FRANZ HESS den Nobelpreis für die Entdeckung der kosmischen Strahlung durch seine Messungen der Luftionisation bei Ballonfahrten in den Jahren 1910 – 1913 (Abb. 17-20).

Dass die Strahlung der natürlichen Radioaktivität der Erdkruste zur Ionisation der Luft und damit zu deren Leitfähigkeit beiträgt, war schon länger bekannt [Go5-6]. Die Leitfähigkeit der Luft ermittelt man aus der Zeit, die es braucht, bis ein Elektrometer entladen ist. Bereits ERNEST RUTHERFORD (1871-1937) stellte 1900 fest, dass diese durch eine Bleiabschirmung um das Messgerät verzögert wird. Der Jesuitenpater und Physiker THEODOR WULF machte 1910 Messungen in verschiedenen Höhen. Er stellte fest, dass die Ionisation nicht in dem Ausmass mit der Höhe abnahm, wie aufgrund der Entfernung zum Boden zu erwarten wäre.

Solche Messungen erforderten auch ein entsprechendes **Instrument**. Dieses wurde 1909 von THEODOR WULF als **Wulf'sches Zweifaden-Elektroskop** entwickelt, das bald bei den Physikern zum Standardgerät für die Messung von Luftelektrizität und Radioaktivität wurde. Es war einfach zu transportieren, leicht einsetzbar und verfügte über einen grossen Messbereich.

Schon früh vermute man, dass für die **Luftionisation** nebst der bereits bekannten, von der natürlichen Radioaktivität der Erdkruste ausgehenden Gamma-Strahlung eine weitere, noch durchdringendere Strahlung aus einer unbekanntem Quelle verantwortlich sein müsse. WULF ging dieser Frage nach und machte zahlreiche Messungen in verschiedener Höhe, die spektakulärste 1910 auf dem Eiffelturm. Dies animierte auch andere Physiker dazu, solche Messungen durchzuführen. Einige benutzten dazu auch Gasballone: ALBERT

GOCKEL von der Universität Freiburg stieg bereits ab 1909 bis auf 4500 m Höhe, VIKTOR FRANZ HESS in den Jahren 1910-1913 bis auf 5350 m, WERNER KOHLHÖRSTER 1913/1914 sandte seine Geräte bis auf 9000 m und schliesslich mass AUGUSTE PICCARD die Strahlung bis auf rund 16'000 m.

Heute wissen wir, dass der terrestrische Anteil der Strahlendosis in der freien Atmosphäre nur bis etwa 1000 m über den Erdboden reicht und in dieser Höhe weniger als ein Prozent beträgt. Die in dieser Höhe gemessene Luftionisation oder Strahlendosis kommt somit ausschliesslich von der ionisierenden Komponente der kosmischen Sekundärstrahlung. Bereits GOCKEL stellte fest, dass die Strahlung mit zunehmender Höhe nicht in dem Ausmass abnahm, wie zu erwarten gewesen wäre, wenn die Strahlung nur vom Erdboden her kommen würde. Bei späteren Messungen vermutete er gar eine Zunahme mit der Höhe [Bod, Bot, Fe, De, Go1-6, Heg, He1-2, Mi, Schn, St, Vö1].



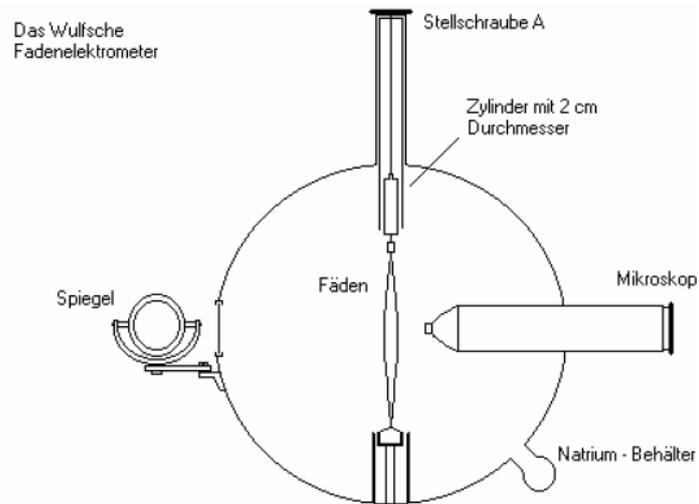
**Abb. 16:** Viktor F. Hess 1883-1964, Theodor Wulf 1868-1946, Albert Gocke: 1860-1927

**Quellen:** Links: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cc/Hess.jpg/220px-Hess.jpg> un

Mitte: <http://www.rudolf-fricke.de/Wulf-Dateien/image001.jpg> ; Rechts: Universität Freiburg/Schweiz

GOCKEL berichtet im Bulletin der Freiburger Naturforschenden Gesellschaft von 1910: „Um zu erforschen, wie sich die Intensität dieser Strahlung mit der Höhe ändert, hat der Vortragende bei zwei Ballonfahrten die Intensität dieser Strahlung gemessen. Das Resultat war, dass selbst in Höhen von 4500m die Abnahme der Strahlung nur sehr gering ist.“ ... und er kommt zum entscheidenden Schlusssatz: „*Es muss diese Strahlung daher zum Teil*

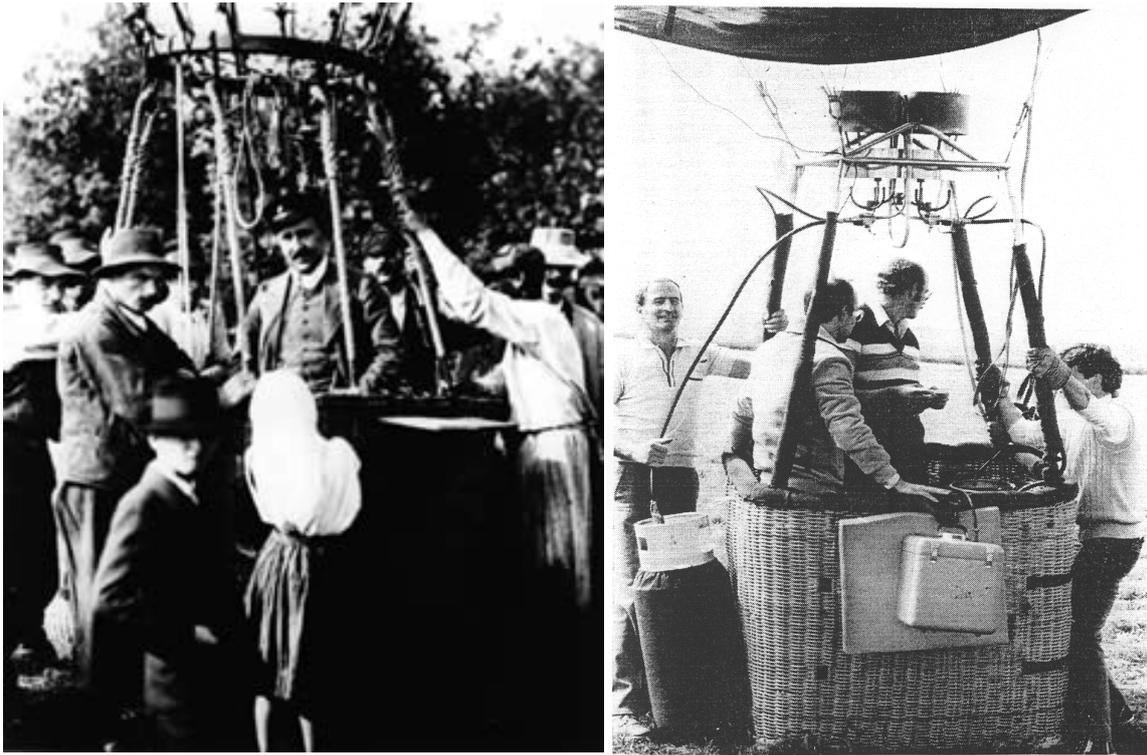
*entweder aus der Atmosphäre oder von einem Gestirn ausserhalb der Erde kommen“.* [De, Go1-6, Heg, Schn, Vö1].



**Abb. 17: Der Wulf'sche Strahlungsapparat: ein Zweifadenelektroskop [Fe]**



**Abb. 18: Elektroskop aus der Sammlung der Universität Freiburg / Schweiz; Hersteller: «Société Cent<sup>le</sup> de Prod<sup>ts</sup> Chimiques»; 44, Rue des Ecoles, Paris; (Jahr unbekannt)**

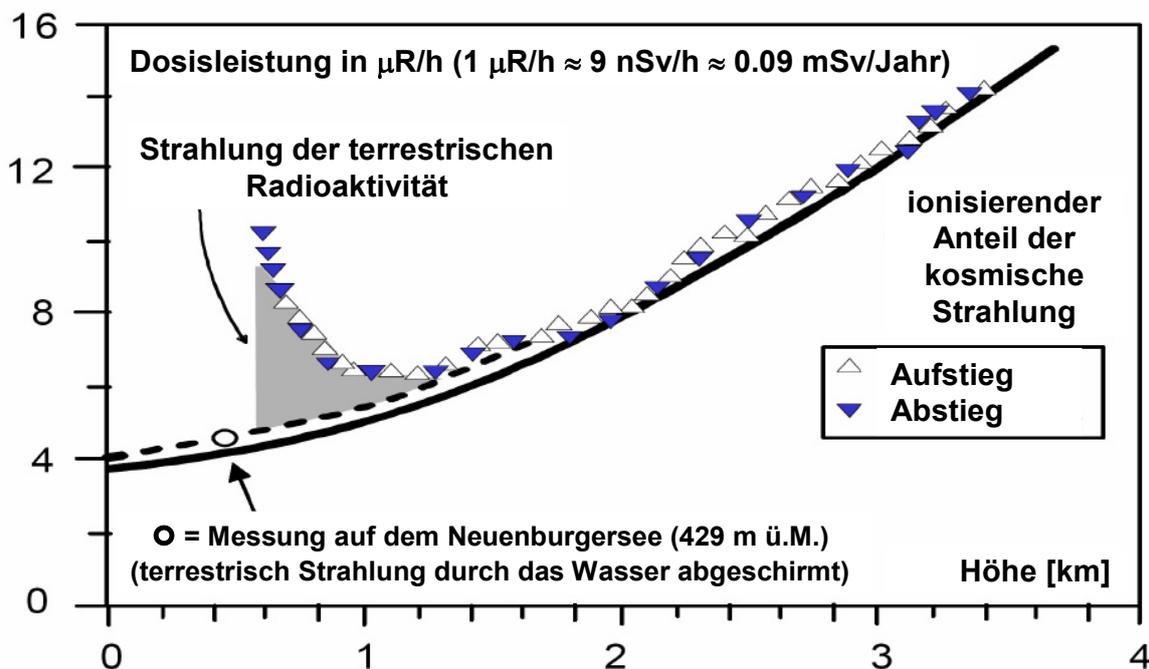


**Abb. 19: Ballonfahrten zur Messung der kosmischen Strahlung einst und jetzt**

**Links:** Viktor F. Hess bei einer seiner Ballonfahrten zwischen 1910 und 1913. **Quelle:** Internet. **Rechts:** Die Messung von Christophe Murith und dem Autor mit einem Heissluftballon Mitte der 70er-Jahre: Eine Reuter&Stokes-Ionisationskammer ist vorne am Korb befestigt. **Quelle:** «La Liberté»

Ein eindeutiger Anstieg der Dosis mit zunehmender Höhe wurde erst von HESS (er berechnete als erster die Abnahme der terrestrischen Strahlung mit der Höhe) und KOHLHÖRSTER festgestellt. ALBERT GOCKEL verwendet zwar in der Physikalischen Zeitschrift von 1915 bereits das Wort *kosmisch*, setzt es aber in Klammern und ein Fragezeichen dahinter [Go6]. Offiziell wird diese Strahlung erst seit 1924 durch ROBERT MILLIKAN **kosmische Strahlung** genannt [Mi]. Dass die Sonne als Quelle nicht in Frage kommen konnte, wurde von GOCKEL und anderen schon recht früh durch Messungen in der Nacht und bei Sonnenfinsternissen festgestellt. Auch wenn Gockel in seiner Interpretation noch sehr vorsichtig ist und zudem Zweifel an der Zuverlässigkeit seiner Instrumente äusserte, darf man ihn doch, zusammen mit HESS, KOHLHÖRSTER und MILLIKAN, zu den Entdeckern der kosmischen Strahlung rechnen. Er hat zu den Arbeiten von HESS, mit dem er im Briefwechsel stand,

und denjenigen anderer Forscher wesentliche Impulse gegeben. Er starb 1927, also neun Jahre vor der Verleihung des Nobelpreises an HESS [VÖ1].



**Abb. 20:** Messung der Universität Freiburg (Schweiz) aus dem Jahren 1974 mit einer Reuter & Stokes - Hochdruck-Argon-Ionisationskammer in einem Heissluftballon [Mu]  
Ausgezogene Kurve: Approximation durch eine Exponentialfunktion;  $Z$  [km] Höhe:  
**Dosisleistung:  $D[\mu\text{R/h}] \approx 3.7 \times e^{0.38 Z}$**

Viele wichtige Erkenntnisse über die kosmische Strahlung wurden in der Forschungsstation auf dem **Jungfraujoch** auf 3500 m gewonnen. Und zwar durch WERNER KOHLHÖRSTER und WALTER NERNST in den 20er-Jahren, durch PIERRE AUGER gegen Ende der 30er-Jahre (Entdeckung der Luftschauer) und durch P. M. S. BLACKETT, der 1950 dort die erste Nebelkammer einrichtete. Mittels Photoplatten konnten durch die kosmische Strahlung erzeugte Sekundärteilchen wie  $\pi^\pm$  nachgewiesen werden. Ein wichtiger Forschungsbereich auf dem Jungfraujoch ist die Neutronenmessung. Dazu wurde in den 50er-Jahren dort ein erster Neutronendetektor in Betrieb genommen (G. HOUTERMANS, H. DEBRUNNER und E. FLÜCKIGER). Mit diesen Detektoren konnte 1982 erstmals der Einfall solarer Neutronen auf die Erdatmosphäre nachgewiesen werden. Da diese vom Magnetfeld im interplanetaren Raum oder demjenigen der Erde nicht beeinflusst werden, gelangen sie direkt zur

Erde und liefern Informationen über die Beschleunigung von Teilchen auf der Sonne [F1].

Der Schreibende hat zusammen mit CHRISTOPH MURITH von der Universität Freiburg in den 70er-Jahren des letzten Jahrhunderts eine Ballonfahrt bis auf 3500 Meter durchgeführt und dabei mit einer Argon-gefüllten REUTER & STOKES Hochdruck-Ionisationkammer die Strahlendosis in  $\mu\text{R}/\text{h}$  registriert (Abb. 20). Sowohl beim Auf- wie auch beim Abstieg ist klar zu erkennen, dass der terrestrische Anteil der Strahlung (schraffierte Fläche) mit zunehmender Distanz zum Boden abnimmt und ab etwa 1200 Meter nur noch der kosmische Anteil messbar ist, der ab dieser Höhe exponentiell ansteigt [Mu].

## 11. Messung der kosmischen Strahlung

Bei einer Messung wird entweder die **Dosis** bestimmt, also die Anzahl Ionenpaare [ $\text{C}/\text{kg}=\text{As}/\text{kg}$ ] oder die Energiemenge [ $\text{J}/\text{kg}$ ], die durch die Strahlung im Messvolumen erzeugt bzw. deponiert wird, oder es werden **Teilchen** [ $\text{s}^{-1}$ ] gezählt. Je nach Messverfahren kann zusätzlich auch noch Art ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , ...), Ladung und Energie [ $\text{MeV}$ ] dieser Teilchen bestimmt werden. Entsprechend der Fragestellung kommen unterschiedliche Nachweisverfahren zum Einsatz, sei es für die Messung von Gamma- und Röntgen-Quanten (Photonen), oder von Elektronen (**e**), Protonen (**p**), Neutronen (**n**), Alpha-Teilchen ( $\alpha$ ), Myonen ( $\mu$ ), Neutrinos (**v**) oder geladenen Kernen.

Vor hundert Jahren verfügten die Physiker nur über ein sehr einfaches Messgerät, nämlich das **Elektrometer** oder **Elektroskop** (Abb. 18 und 19). Diese Instrumente basieren auf den Prinzipien der Elektrostatik und messen die Leitfähigkeit der Luft. Zwei dünne am einen Ende aufgehängte Gold- oder Aluminiumplättchen stoßen sich gegenseitig ab, wenn sie elektrisch geladen sind. Der Abstand zwischen den beiden Plättchen ist ein Mass für die elektrische Ladung des Gerätes. Ein Fernrohr mit eingeblendeter Skala ermöglicht die Messung dieser Distanz. Ionen, die sich in der Luft im Gerät befindenden oder durch Strahlung erzeugt werden, entladen dieses. Die Geschwindigkeit, mit der die beiden Plättchen durch Feder- oder Schwerkraft wieder zusammenfallen ist somit ein Mass für die Leitfähigkeit der Luft. Daraus wird die Intensität der ionisierenden Strahlung am Ort des Gerätes berechnet.

Andere schon früh benutzte Nachweisverfahren waren **photographische Emulsionen** und **Szintillation** mit Zinksulfid (ZnS). Heute verwendet man verschiedene anorganische und organische Szintillatoren in fester und flüssiger Form. Ein wichtiger Durchbruch kam mit der Erfindung des **Geiger-Müller-Zählrohrs** durch HANS GEIGER (1882–1945) und seinem Assistenten WALTHER MÜLLER (1905–1979) in den 20er-Jahren. Bei diesem Detektor sind alle Impulse am Ausgang des Zählrohres gleich gross, unabhängig von der Energie des einfallenden Teilchens. Beim Proportionalzählrohr besteht dagegen Proportionalität zwischen der Grösse der Impulse und der Energie des Teilchens, was eine einfache Spektrometrie ermöglicht. Zählrohre mit dünnem Eintrittsfenster können auch Alpha-Teilchen nachweisen. In Verbindung mit einem Photomultiplier ist mit einem **NaI(Tl)**-Szintillationsdetektor eine Spektrometrie bei Gamma-Strahlen mit bescheidener Energieauflösung möglich. Eine 40 Mal bessere Energieauflösung erreicht man seit den 70er-Jahren bei der Gamma-Spektrometrie mit **Ge-Halbleiterdetektoren**. Diese erfordern allerdings eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff. Für die Spektrometrie von Alpha-Strahlern werden Si-Sperrschicht-Dioden verwendet. Die **Flüssigszintillationsmesstechnik** wird immer häufiger auch beim Nachweis von niederenergetischen Beta- sowie von Alpha-Strahlern eingesetzt. Schliesslich sei noch das **Kalorimeter** erwähnt, bei dem die durch die Strahlung erzeugte Wärme gemessen wird, und damit indirekt die Dosis.

In der **Teilchenphysik** wird vielfach die **Nebelkammer**, auch Wilsonkammer genannt nach CHARLES THOMSON REES WILSON (1869–1959), die **Blasenkammer** (ab 1960) nach DONALD A. GLASER (\* 1926) sowie die Drahtkammer oder **Funkenkammer** verwendet. Da bei diesen Geräten zusätzlich ein Magnetfeld erzeugt wird und Teilchenbahnen sichtbar werden, kann Art der Teilchen, sowie deren Ladung und Masse bestimmt werden. In der Teilchenphysik und vor allem bei Grossbeschleunigern werden viel komplexere Detektorsysteme, etwa mit Anti-Koinzidenzschaltung, Pixeldetektoren, etc. verwendet. Dabei kann auch die Richtung, aus der die Teilchen kommen, bestimmt werden, sowie der Ort und Zeitpunkt wo ein Teilchen entsteht bzw. vernichtet wird oder eine Reaktion mit einem andern Teilchen stattfindet.

**Cerenkov-Detektoren** erfassen geladene Teilchen hoher Geschwindigkeit. Sie bestehen aus einem Material mit hohem Brechungsindex  $n$ , in dem die Lichtgeschwindigkeit mit  $c_n=c/n$  tiefer ist als im Vakuum. Die Teilchen erzeugen, ähnlich dem Mach'scher Kegel beim Überschallflug, einen Licht-

kegel, dessen Front elektromagnetischer Wellen mittels Photomultiplier erfasst wird (nach PAWEL ALEXEJEWITSCH TSCHERENKOW 1904-1990).

**Neutronen** haben keine Ladung und treten nicht mit den Elektronen eines Atoms in Wechselwirkung. Sie spüren auch die Coulomb-Barriere der Atomkerne nicht. Langsame Neutronen können daher in einen Kern eindringen und dort eine Kernreaktion auslösen. Die dabei im Zählgas (z.B. mit  $^{10}\text{B}$  angereichertem Bortrifluorid:  $^{10}\text{B} + \text{n} \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha$ ) oder Detektormaterial erzeugten sekundären  $\alpha$ -Teilchen oder Protonen werden mit einem Zählrohr erfasst.

**Neutrinos** haben ebenfalls keine Ladung und eine – wenn überhaupt – extrem kleine Masse. Entsprechend klein ist ihr Wirkungsquerschnitt, was Detektoren mit extrem grossen Volumina bzw. Massen von Dutzenden bis hunderterten von Tonnen erfordert und dazu meist tief unter der Erdoberfläche (zur Abschirmung der andern Strahlen und Teilchen). Neutrinos können beispielsweise durch elastische Streuung an einem Elektron ( $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ ), durch inversen Beta<sup>+</sup>-Zerfall ( $\bar{\nu}_e + \text{p} \rightarrow \text{n} + e^+$ ) oder Beta<sup>-</sup>-Zerfall ( $\nu_e + ^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar}^* + e^-$ ) oder mittels einer Reaktion am Deuterium ( $\nu_e + ^2\text{H} \rightarrow \text{p} + \text{p} + e^-$ ) nachgewiesen werden. Im letzteren Fall ist ein Detektor mit 1000 Tonnen schwerem Wasser ( $^2\text{H}_2\text{O}$ ) erforderlich, wie beispielsweise beim *Sudbury Neutrino Observatory* in der Nähe von Sudbury (Ontario/Kanada) [WIK].

## 12. Ausblick und Ergänzungen

Die kosmische Strahlung hat auch 100 Jahre nach ihrer Entdeckung nichts von ihrer Faszination eingebüsst. Einerseits bleiben noch zahlreiche offene Fragen zu klären, wie etwa betreffend ihrer Entstehung oder der Beschleunigungsmechanismen. Auf der andern Seite fasziniert die Menschen seit jeher die Schönheit des Naturschauspiels der Polarlichter. In verschiedenen Kulturen nordischer Völker wurden diese mit Göttern und Geistern in Verbindung gebracht oder galten, wie Kometen, als Vorboten kommenden Unheils. Für andere Völker wiederum waren sie ein Zeichen kommenden Glückes.

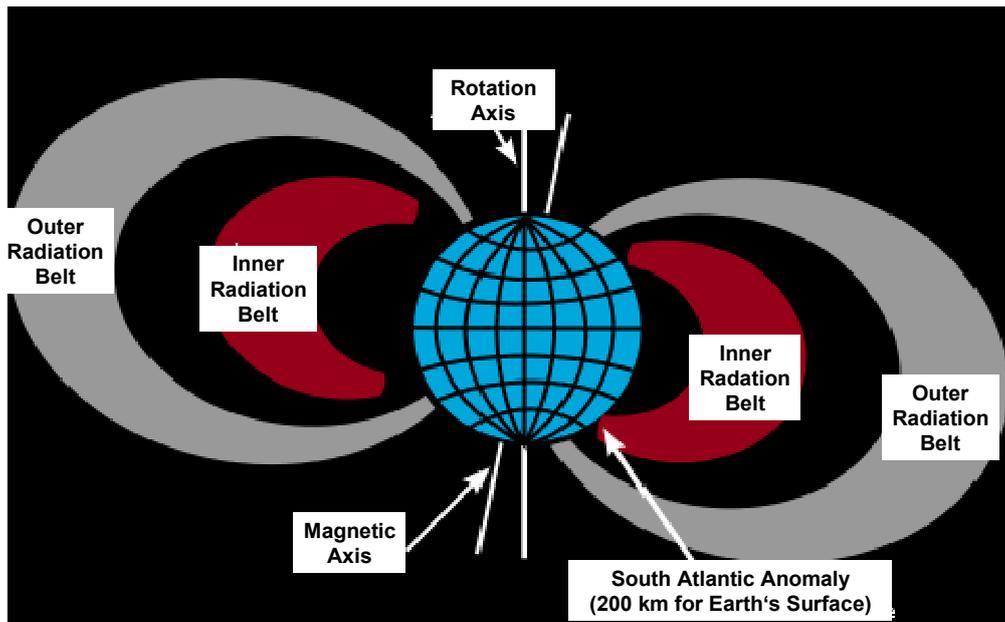
Lange Zeit, bevor man über leistungsfähige Beschleuniger verfügte, war die kosmische Strahlung die Hauptquelle für hochenergetische Teilchen zum Studium der elementaren Bausteine der Materie. Die Erforschung der kosmischen Strahlung hat zudem auch wesentliche Erkenntnisse für die Astrophysik und die Sonnenforschung erbracht.

Nicht vergessen sei, dass die kosmische Strahlung für einen nicht geringen Teil der **Strahlenexposition** verantwortlich ist, der wir dauernd ausgesetzt sind. Zusammen mit den andern Komponenten der natürlichen Strahlendosis hat sie damit, durch Erzeugung von Mutationen in Verbindung mit natürlichen Selektionsprozessen, zur Evolution der Arten beigetragen.

Noch mehr Bedeutung bekommt die Dosis durch die kosmische Strahlung bei der **Raumfahrt**, insbesondere wenn diese ausserhalb des schützenden Magnetfeldes der Erde oder während solarer Ereignisse stattfindet. Sie könnte Auswirkungen auf die Gesundheit der Astronauten aber auch auf die Elektronik von Raumfahrzeugen und Satelliten haben. Bei Astronauten befürchtet man Gedächtnisstörungen, Lernschwierigkeiten und plötzliche Ängste in Stresssituationen sowie eine Beschleunigung des Alterungsprozesses. Mögliche Auswirkungen der Strahlen auf das Gehirn dürften eine ernst zu nehmende Gefahr in der Raumfahrt bedeuten, vor allem bei längerem Aufenthalt im Weltraum [WIK].

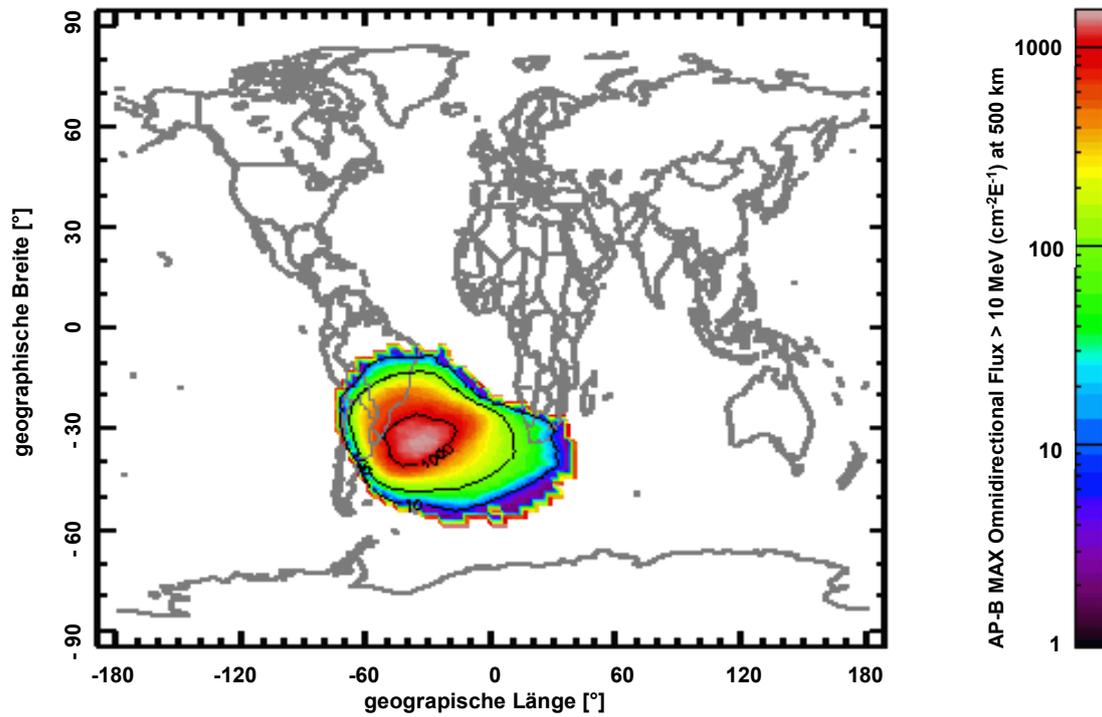
Ein besonderes Phänomen ist die «*South Atlantic Anomaly*» (SAA), ein Gebiet mit erhöhter kosmischer Strahlung vor der Küste Brasiliens, ungefähr bei 40° West und 30° Süd (Abb. 21 und 22). Dort kommt der innere der beiden Van-Allen-Strahlungsgürtel (benannt nach dem amerikanischen Astrophysiker JAMES VAN ALLEN, 1914 – 2006) der Erde deutlich näher, was, zusammen mit der Exzentrizität, in diesem Gebiet zu einem erhöhten Teilchenfluss und einer erhöhten Strahlung führt. Dies liegt daran, dass der magnetische Nord- bzw. Südpol nicht exakt mit der Rotationsachse der Erde, also den geometrischen Polen, übereinstimmen. Da die Magnetpole sich im Verlauf der Zeit verschieben, driftet dieser Bereich mit ca. 0.3° pro Jahr nach Westen. In Abb. 22 sind der äussere und innere Van-Allen-Strahlungsgürtel dargestellt. In Abb. 10 sind die Bahnen geladener Teilchen dargestellt, die um die Feldlinien rotieren und dabei gleichzeitig zwischen Nord und Süd hin- und herpendeln. Bei den Spiegelpunkten (*Mirrorpoints*) werden sie umgelenkt oder können in die Atmosphäre eindringen [WIK].

Das **Magnetfeld** der Erde wurde im Lauf der Zeit mehrmals **umgepolt**: allein in den letzten 83 Millionen Jahren 184-mal. Ob es während diesen Umpolphasen, infolge schlechterer Abschirmung, zu erhöhten kosmischen Strahlendosen kommt oder gekommen ist und diese für das Leben auf der Erde eine Gefahr darstellen, kann nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden [WIK].



**Abb. 21: die beiden Van-Allen Strahlungsgürtel**

**Quelle:** [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6d/South\\_Atlantic\\_Anomaly.svg/474px-South\\_Atlantic\\_Anomaly.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/6d/South_Atlantic_Anomaly.svg/474px-South_Atlantic_Anomaly.svg.png)



**Abb. 22: The South Atlantic Anomaly: Teilchenfluss /  $cm^2 s > 1000 MeV$  in 500 km**

**Quelle:** <http://www.paranormal-encyclopedia.com/s/south-atlantic-anomaly/images/Van-Allen-Belt.gif>

## Anhang: Der GZK-Cutoff

Durch den GZK-Cutoff werden die hochenergetischen Protonen durch Wechselwirkung mit der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMB) von 2.7 K auf unter  $6 \cdot 10^{19}$  eV abgebremst. Sowohl der Protonenfluss wie auch jener der CMB-Strahlung ist isotrop; letztere hat im Mittel eine Frequenz von 160 GHz und das All ist erfüllt mit rund 400 CBM-Photonen pro  $\text{cm}^3$ . Da die Protonen der kosmischen Strahlung fast Lichtgeschwindigkeit haben, «sehen» sie die Photonen der CBM-Strahlung wegen des Dopplereffektes mit einer starken Blauverschiebung und einer Erhöhung der Frequenz  $\nu'/\nu$  von rund  $10^{16}$ , d.h. von etwa 1 meV auf über 10'000 GeV, also vom Mikrowellenbereich in denjenigen sehr harter Röntgenstrahlung. Deren Streuung an den Protonen erzeugt aus diesen  $\Delta^+$ -Baryonen-Resonanzen. Diese bestehen wie die Protonen aus den Quarks **uud**, haben aber Spin 3/2, eine etwas höhere Masse von 1232 MeV (gegenüber den Protonen mit 938 MeV und Spin 1/2) sowie eine extrem kurze Halbwertszeit von  $6 \cdot 10^{-24}$  s (diese wird zwar hier durch die relativistischen Zeitdehnung stark verlängert). Die  $\Delta^+$  zerfallen entweder in ein Neutron (**n**) und ein  $\pi^-$  oder ein Proton (**p**) und ein  $\pi^0$ . Das hier neu entstandene Proton hat etwa 20 Prozent weniger Energie als das primäre, da das  $\pi^0$  einen Teil der Energie wegträgt. Falls das Proton nach diesem Prozess immer noch zu viel Energie hat, findet eine weitere Streuung an einem CBM-Photon statt. Auf die etwas trickreiche Überprüfung von Energie- und Impulserhaltung, woraus sich die Grenzenergie von  $6 \cdot 10^{19}$  eV ergibt, sei hier verzichtet. Die Erhaltung anderer Quantenzahlen wie Ladung, Spin, Baryonenzahl, Isospin, etc. lässt sich leicht überprüfen.

## Verdankung

Der Autor dankt den Proff. ERWIN FLÜCKIGER (Universität Bern) und LUKAS SCHALLER (Universität Freiburg) für die wertvolle Diskussion und die Hilfe bei der Korrektur des Manuskriptes.

## Quellen- und weiterführende, bzw. verwendete Fachliteratur

[A1] OTTO C. ALLKOFER: «INTRODUCTION TO COSMIC RADATION». Verlag Karl Thiemig München 1975, ISBN 3-521-06098-5

- [Am] C. AMSLER et al: «Chapter 24: Cosmic Rays». Physics Letters B667, 1, (2008); by the Particle Data Group (<http://pdg.lbl.gov/>)  
<http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-rev-cosmic-rays.pdf>
- [Be] JÜRIG BEER et. al.: in Nature 347 (1990), p. 164.
- [BMU] BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTOR-SICHERHEIT BMU. Pressemitteilung vom 18.8.2011: «Strahlenbelastung des Flugpersonals gestiegen»; BMU Berlin
- [Bod] CHRISTOPH BODEN: «Die kosmische Strahlung als Fenster zum Universum». Jan. 2004, <http://tmpberlin.tripod.com/temp.htm>
- [Bot] W. BOTHE & W. KOHLHÖRSTER: «Das Wesen der Höhenstrahlung»; Zeitschr. für Physik 1929, pp. 751-777
- [De1] FRIEDRICH DESSAUER: «Über die Weltraumstrahlung: *In Memoriam* Albert Gockel»; Bulletin der Freiburger Naturforschenden Gesellschaft Vol. XXXVI (1943), pp. 9-19
- [De2] FRIEDRICH DESSAUER: «Über die Weltraumstrahlung – *In Memoriam* Albert Gockel»; in «Schweizer Rundschau» (1940/41), pp. 610-624; *Nach einem am 12. Dezember 1940 zum Andenken an den Physiker Prof. A. Gockel in der Naturwissenschaftlichen Gesellschaft gehaltenen Vortrag.*
- [Fe] GEORG FEDERMANN: «Viktor Hess und die Entdeckung der kosmischen Strahlung», Diplomarbeit am Institut für Radiumforschung und Kernphysik der Universität Wien (2003)  
<http://www.federmann.co.at/vfhess/downloads.html>
- [Fl] ERWIN O. FLÜCKIGER und ROLF BÜTIKOFER: «Untersuchungen der kosmischen Strahlung auf Jungfraujoch – 50 Jahre Neutronenmonitore». [http://www.ngbe.ch/upload/pdf/123-141\\_Flueckiger.pdf](http://www.ngbe.ch/upload/pdf/123-141_Flueckiger.pdf)
- [Ga] THOMAS K. GAISSER: «Cosmic Rays and Particle Physics». Cambridge University Press (1990). ISBN: 0-521-33931-6 paperback

- [Gr] PETER K. F. GRIEDER: «Cosmic Rays at Earth». Elsevier (2001), ISBN 0-444-50710-8.
- [Go1] ALBERT GOCKEL: «Luftelektrische Untersuchungen». Kommissionsverlag der Universitätsbuchhandlung (B. Veith), Fribourg (1902)
- [Go2] ALBERT GOCKEL: «Die Luftelektrizität – Methoden und Resultate der neueren Forschung». Verlag von S. Hitzel, Leipzig (1908)
- [Go3] ALBERT GOCKEL: «Luftelektrische Beobachtungen bei einer Ballonfahrt». Physikal. Zeitschr. Vol. XI (1910), p. 280
- [Go4] ALBERT GOCKEL: «Luftelektrische Messungen bei einer Ballonfahrt». Bulletin de la Société Fribourgeoise des Sciences Naturelles, Vol. XIX (1911), pp. 28-20
- [Go5] ALBERT GOCKEL: «Die Radioaktivität von Boden und Quellen». Sammlung Vieweg Braunschweig, 1914.
- [Go6] ALBERT GOCKEL: «Beiträge zur Kenntnis der in der Atmosphäre vorhandenen durchdringenden Strahlung». Physikal. Zeitschrift, Nr. 19 (1915), pp. 345-352
- [Ha] ARNOLD HANSMEIER: «Einführung in die Astronomie und Astrophysik». Spektrum Akademischer Verlag 2007, ISBN 978-3-8274-1846-3
- [Heg] W. HEGERT: «Physik im Freiballon». Phys. Bl. Vol. 49 (1993), Nr. 11, pp.1007-1010
- [He1] VIKTOR F. HESS: «Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten». Physikal. Zeitschr. Vol. XIII, (1912), pp. 1084-1091.
- [He2] VIKTOR F. HESS: «Über den Ursprung der durchdringenden Strahlung». Physikal. Zeitschr. Vol. XIV, (1913), p. 610ff.
- [Ka] KARTTUNEN, KRÖGER, OJA, POUTANEN, DONNER: «Astronomie». Springer Lehrbuch, 1987; ISBN 0-387-52339-1

- [KSR] EIDGENÖSSISCHE KOMMISSION FÜR STRAHLENSCHUTZ UND ÜBERWACHUNG DER RADIOAKTIVITÄT (KSR): «Analyse der Beiträge zur Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung in 2004». Veröffentlicht im BAG-Jahresbericht «Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 2006», p. 140ff; Bern November 2007.
- [Ma] JOZEF MASARIK & ROBERT C. REEDY: «Terrestrial cosmogenic-nuclide production systematic calculated from numerical simulations». *Earth and Planetary Science Letters* 136 (1995), pp. 381-395
- [Mi] ROBERT A. MILLIKAN: «Der Ursprung der kosmischen Strahlung». *Nachrichtenblatt der deutschen Wissenschaft und Technik*, 7. Jahrgang, Berlin 1. und 10. August 1931, Nr. 22/23, p. 305ff
- [Mu] CH. MURITH, L. RIBORDY, H. SURBECK, H. VÖLKLE, J. CZARNECKI UND J. SCHULER: «Environmental in-situ Gamma-Spectrometry in Switzerland». *Environment International*, Vol. 14 (1988) p. 353ff
- [NZZ] SVEN TITZ: «Klimaexperiment mit Teilchenbeschleuniger trägt Früchte: Wie kosmische Strahlung und Spurengase bei der Entstehung von Aerosolen und Wolken mitmischen». In *NZZ* vom 31. August 2011, p. 60 (nach «Nature» 476 (2011), pp. 429-433)
- [Schn] HUBERT SCHNEUWLY: «Albert Gockel et la découverte de rayon cosmique» in *Défis et Dialogue / Herausforderung und Besinnung*; Vol. 13, Editions Universitaires Fribourg (1991), p. 135
- [Schr] HANS SCHRAUBE: «Wie stark sind Piloten, Flugpersonal und andere häufig fliegende Personen der kosmischen Strahlung exponiert? How great is the exposure of pilots, air crew and other frequent flyers to cosmic radiation?». Institut für Strahlenschutz; Deutschland  
[http://www.helmholtz-muenchen.de/epcard2/aktuelle\\_Themen.pdf](http://www.helmholtz-muenchen.de/epcard2/aktuelle_Themen.pdf)
- WEB-Seite EPCARD-Programm zur Berechnung der Flugdosen:  
<http://www.helmholtz-muenchen.de/epcard-portal/epcard-home/index.html>
- [St] CHRISTIAN STEGMANN: «Kosmische Strahlung – Die Suche nach den Quellen». *Aus Sterne und Weltraum*, März 2006, pp. 24-34

- [Un] UNSCEAR-Berichte 2000 und folgende: «Sources and Effects of Ionizing Radiation» by the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Report to the General Assembly with Scientific Annexes; United Nations, New York
- [Us] ILYA G. USOSKIN, LAURENT DESORGHIER, PETER VELINOV, MARISA STORINI, ERWIN O. FLÜCKIGER, ROLF BÜTIKOFER, and GENNADY A. KOVALTSOV: «Ionization of the Earth's Atmosphere by Solar and Galactic Cosmic Rays».  
[http://cc.oulu.fi/~usoskin/personal/Usoskin\\_AG\\_2009.pdf](http://cc.oulu.fi/~usoskin/personal/Usoskin_AG_2009.pdf)
- [Vö1] HANSRUEDI VÖLKLE: «Albert Gockel und die kosmische Strahlung». Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg, Bull. Soc. Frib. Sc. Nat. – Vol. 97/98 (2008-09), pp. 105-114; ISSN 0366-3256
- [Vö2] HANSRUEDI VÖLKLE: «Das Standardmodell der Elementarteilchen». Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg, Bull. Soc. Frib. Sc. Nat. – Vol. 100 (2010) (dieses Heft) pp. XX-XX; ISSN 0366-3256
- [Wu] THEODOR WULF: «Über die in der Atmosphäre vorhandene Strahlung von hoher Durchdringungsfähigkeit». Physikal. Zeitschr. Vol. X, Nr. 5 pp. 152-157
- [KÜR] Betreffend natürliche und künstliche Umweltradioaktivität und Strahlendosen der Bevölkerung in der Schweiz sei auf die Jahresberichte der **KUER** (EIDGENÖSSISCHE KOMMISSION ZUR ÜBERWACHUNG DER RADIOAKTIVITÄT, bis 1988) bzw. des **BUNDESAMT FÜR GESUNDHEIT BAG** (ab 1989) hingewiesen. Diese Berichte sind beim Bundesamt für Gesundheit, 3003 Bern, erhältlich. Für die letzten Jahre sind sie als PDF auch auf dem Internet abrufbar unter:  
<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00045/11472/index.html?lang=de>
- [WIK] Im Weiteren wurden teilweise Informationen aus dem Internet (meistens aus Wikipedia), meist in bearbeiteter (gekürzt oder ergänzt) Form verwendet, ohne dass dabei jedes Mal auf die entsprechende Quelle verwiesen wurde. Einige der wichtigsten Links zu den betreffenden Stichworten sind im Folgenden aufgelistet:

- Aurora: [http://en.wikipedia.org/wiki/Aurora\\_\(astronomy\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Aurora_(astronomy))
- Cosmic Ray: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic-ray>
- Coronal Mass Ejection: [http://en.wikipedia.org/wiki/Coronal\\_mass\\_ejection](http://en.wikipedia.org/wiki/Coronal_mass_ejection)
- Electroweak Interaction:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Electroweak\\_interaction](http://en.wikipedia.org/wiki/Electroweak_interaction)
- Elementary Particles: [http://en.wikipedia.org/wiki/Elementary\\_particle](http://en.wikipedia.org/wiki/Elementary_particle)
- Earth's Magnetic Field:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s\\_magnetic\\_field](http://en.wikipedia.org/wiki/Earth%27s_magnetic_field)
- Fermi Acceleration: [http://en.wikipedia.org/wiki/Fermi\\_acceleration](http://en.wikipedia.org/wiki/Fermi_acceleration)
- Maunder Minimum: [http://en.wikipedia.org/wiki/Maunder\\_Minimum](http://en.wikipedia.org/wiki/Maunder_Minimum)
- Neutrino detector : [http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino\\_detector](http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_detector)
- Solar cycle: [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cycle)
- Solar Neutrinos: [http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_neutrinos](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_neutrinos)
- Solar Energetic Particles:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energetic\\_particles](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energetic_particles)
- South Atlantic Anomaly:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/South\\_Atlantic\\_Anomaly](http://en.wikipedia.org/wiki/South_Atlantic_Anomaly)
- Space Weather: [http://en.wikipedia.org/?title=Space\\_weather](http://en.wikipedia.org/?title=Space_weather)  
<http://www.spaceweather.com/>  
<http://www.swpc.noaa.gov/>  
<http://esa-spaceweather.net/>
- Sun: <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>
- Sunspots: <http://en.wikipedia.org/wiki/Sunspot>
- Supernovae SN 1987A: [http://en.wikipedia.org/wiki/Sn\\_1987](http://en.wikipedia.org/wiki/Sn_1987)
- Ultra-High-Energy Cosmic Ray Particles:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high-energy\\_cosmic\\_ray](http://en.wikipedia.org/wiki/Ultra-high-energy_cosmic_ray)