

**Zeitschrift:** Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Bern  
**Herausgeber:** Naturforschende Gesellschaft in Bern  
**Band:** 65 (2008)

**Artikel:** Untersuchungen der kosmischen Strahlung auf Jungfrauojoch : 50 Jahre Neutronenmonitore  
**Autor:** Flückiger, Erwin O. / Bütikofer, Rolf  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-324049>

### **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:** 15.07.2025

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

ERWIN O. FLÜCKIGER UND ROLF BÜTIKOFER<sup>1</sup>

## Untersuchungen der kosmischen Strahlung auf Jungfraujoch – 50 Jahre Neutronenmonitore

### Zusammenfassung

Im Oktober 2008 sind es 50 Jahre her, dass die kontinuierlichen Intensitätsmessungen der kosmischen Strahlung auf Jungfraujoch mit Neutronenmonitoren aufgenommen wurden und die periodische Publikation der entsprechenden Messdaten begann. Die langjährige Erfolgsgeschichte der Untersuchung der kosmischen Strahlung auf Jungfraujoch begann jedoch bereits kurz nach der 1912 erfolgten Eröffnung der Jungfraubahn. Die Pionierarbeiten befassten sich vorerst mit den Eigenschaften der eben entdeckten Strahlung, der Identifikation von neuen Teilchen und deren Wechselwirkungen mit Materie. Seit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957/58 konzentrierte sich die Forschung auf solare und heliosphärische Phänomene, die mit erdgebundenen, in ein weltweites Netz von Beobachtungsstationen eingebundenen Detektoren untersucht werden. Diese Arbeiten, die ein besseres Verständnis der solaren und galaktischen kosmischen Strahlung zum Ziel haben, sind von allgemeinem astrophysikalischem Interesse. In jüngeren Jahren gewannen sie zunehmend an Bedeutung für die Abschätzung von Strahlungseffekten auf Technik, Umwelt und Lebewesen wie auch für die Untersuchung von Auswirkungen der kosmischen Strahlung auf die Chemie und Physik der Erdatmosphäre und somit auf Meteorologie und Klima («Weltraumwetter»).

### Einleitung<sup>2</sup>

Die Entdeckung der kosmischen Strahlung (HESS, 1912) erfolgte praktisch parallel zum Bau der Jungfraubahn, der mit der Eröffnung der Station Jungfraujoch 1912 abgeschlossen wurde. Da sich gezeigt hatte, dass die Intensität der neu entdeckten Strahlung mit der Höhe zunahm, wurde das Jungfraujoch dank seiner 3500 m Höhe über Meer und der guten Erreichbarkeit zu einem gefragten Beobachtungsstandort. Der spätere Nobelpreisträger Walther NERNST und sein Assistent Werner KOLHÖRSTER gehörten zusammen mit dem Schweizer Physiker Gubert VON SALIS zu

<sup>1</sup> Physikalisches Institut, Universität Bern, Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern; erwin.flueckiger@space.unibe.ch

<sup>2</sup> Auszug aus Debrunner, 1981

den ersten, die unter extremen hochalpinen Bedingungen 1925 und 1926 in der Jungfrauregion experimentelle Untersuchungen insbesondere zur Höhenabhängigkeit der kosmischen Strahlung durchführten. Mit der Eröffnung der Hochalpinen Forschungsstation Jungfraujoch im Jahr 1931 (BALSIGER und FLÜCKIGER, 2007) nutzten bald einmal Wissenschaftler aus ganz Europa die ausgezeichnete hochalpine Infrastruktur, um die Wechselwirkung zwischen den Teilchen der kosmischen Strahlung und den Atomkernen der Erdatmosphäre zu untersuchen. Diese Untersuchungen sind mit so berühmten Namen verbunden wie z.B. A.H. COMPTON, P. AUGER, und C.F. POWELL. Von 1950 bis 1957 betrieb die Universität Manchester unter der Leitung von P.M.S. BLACKETT eine riesige Nebelkammer. Die damit gewonnenen Forschungsergebnisse haben unsere Kenntnisse über neue Elementarteilchen entscheidend erweitert. Als schweizerischen Beitrag zum Internationalen Geophysikalischen Jahr (International Geophysical Year, IGY) 1957/58 hat dann das Physikalische Institut der Universität Bern unter der Leitung von F.G. HOUTERMANS in der Forschungsstation einen Neutronenmonitor für die kontinuierliche Intensitätsmessung der kosmischen Strahlung aufgebaut. Neutronenmonitore sind relativ einfache Detektoren, die wegen ihrer Robustheit auch über lange Zeitperioden ein stabiles Messverhalten aufweisen. Sie sind auf kosmische Strahlung in Erdnähe im Energiebereich von  $\sim 500$  MeV bis  $\sim 30$  GeV empfindlich. Neutronenmonitore ergänzen in idealer Weise Satellitenbeobachtungen, die vorwiegend geringere Teilchenenergien abdecken, und sind somit wertvolle Instrumente im Bereich «Weltraumwetter». Der erste auf Jungfraujoch installierte Neutronenmonitor ist auch heute noch in Betrieb, und seine Aufzeichnungen überdecken mehr als vier Sonnenfleckenzyklen. Das wichtigste, damit erzielte Forschungsergebnis ist der erste Nachweis von solaren Neutronen mit erdgebundenen Detektoren im Jahr 1982. Im Folgenden werden die Geschichte der Untersuchung der kosmischen Strahlung auf Jungfraujoch und einige Meilensteine mit wichtigen Ergebnissen zusammengefasst.

### Hintergrundinformation<sup>3</sup>

Unter dem Begriff «Kosmische Strahlung» versteht man den Teilchenfluss, der aus dem Weltall mit einer Intensität von ca. 1 Teilchen pro  $\text{cm}^2$  und Sekunde ununterbrochen auf die Erdatmosphäre einfällt. Die kosmische Strahlung besteht aus ca. 87% Protonen, 12% Heliumkernen, Kernen von schwereren Atomen, Elektronen, Gammastrahlen und weiteren Elementarteilchen. Der Energiebereich dieser Teilchen umfasst 14 Größenordnungen von  $\sim 10^6$  bis  $\sim 10^{20}$  eV. Ein grosser Teil der kosmischen Strahlungspartikel ist hoch relativistisch und bewegt sich somit praktisch mit Lichtgeschwindigkeit. Nach dem heutigen Wissensstand stammt der grösste Teil der kosmischen Strahlungsteilchen aus fernen Gebieten unserer Milch-

<sup>3</sup> Auszug aus Debrunner, 1981

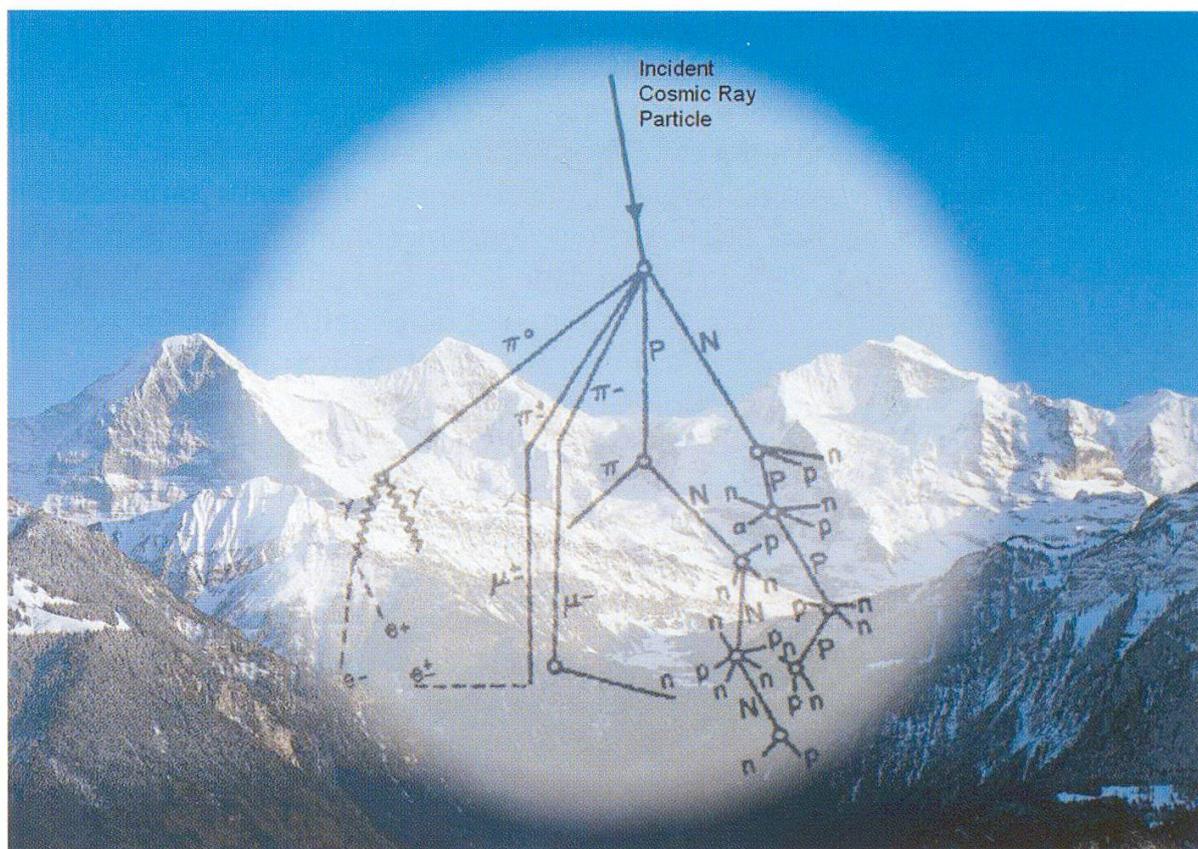


Abbildung 1: Die Kaskade der kosmischen Sekundärstrahlung in der Atmosphäre.

strasse, wo sie in hochenergetischen Prozessen z.B. in Schockwellen von Supernova-Überresten beschleunigt werden. Sie rasen während 100 000 bis zehn Millionen Jahren umher, bevor sie durch ein Hindernis wie die Erde gestoppt werden oder aus unserer Galaxie entweichen. Sporadisch wird auch in hochenergetischen Prozessen auf der Sonne kosmische Strahlung erzeugt. Beim Einfall auf die Erde kollidieren die galaktischen und solaren kosmischen Strahlungspartikel mit den Atomen der Atmosphäre und erzeugen dabei, wie in *Abbildung 1* illustriert, einen kaskadearartigen, kontinuierlichen Fluss von Sekundärteilchen (Müonen, Elektronen, Protonen, Neutronen, Pionen usw.). Diese kosmische Sekundärstrahlung hat eine Vielzahl von terrestrischen, biologischen und technologischen Auswirkungen.

### Die Jahre vor 1957<sup>4</sup>

Auf Jungfraujoch wurden die ersten Untersuchungen der kosmischen Strahlung 1923 ausgeführt. Der spätere Nobelpreisträger Walther NERNST sandte seinen Assistenten, Werner KOLHÖRSTER, nach Jungfraujoch, um dort die Möglichkeiten für

<sup>4</sup> Auszug aus Debrunner, 1981

eine Expedition zur Untersuchung der kosmischen Strahlung abzuklären. Zusammen mit dem Schweizer Physiker Gubert von SALIS, dem Enkel des Erbauers der Jungfraubahn, führte KOLHÖRSTER erste Strahlungsmessungen bei den Stationen Eigerwand und Eismeer und auf Jungfraujoch durch. Dabei konnte ein so umfangreiches Datenmaterial gesammelt werden, dass bereits eine gute Bestimmung der Veränderung der kosmischen Strahlung mit der atmosphärischen Tiefe möglich war. Angespornt durch den Erfolg haben dann KOLHÖRSTER und VON SALIS 1925 und 1926 je eine grosse Expedition im Jungfraugebiet durchgeführt. Bei der zweiten Expedition wurde sogar eine Messstation auf dem Mönchsgipfel errichtet (*Abb. 2*). Mit einer eigens gelegten Telefonleitung konnten die Forscher, die jeweils vier Tage auf dem Mönch auszuharren hatten, den Wetterbericht aus Zürich anhören. Die erzielten Messergebnisse hatten ein weltweites Echo und bildeten die Grundlage für viele spätere Arbeiten. Mit welchen Entbehrungen und Strapazen sie aber ertrugt werden mussten – die Forschungsstation war ja noch nicht gebaut –, geht aus der Bitte KOLHÖRSTERS an seine Frau hervor, nach Expeditionsende nicht zu ihm nach Jungfraujoch zu fahren: seit vier Tagen hätte er sich nicht gewaschen und in seinem unrasierten Gesicht seien auch die vielen Wollhaare der Schaffellbettsäcke, die sich an der Sonnencreme angeklebt hätten.

Dem Energiebetrag nach ist die kosmische Strahlung nicht besonders bedeutend. Ihr Energiefluss entspricht etwa dem von den Sternen eingestrahlt Lichtfluss, wie er in Neumondnächten beobachtet werden kann. Das grosse Interesse, das Physiker und Astrophysiker der kosmischen Strahlung entgegenbringen, ist vielmehr darauf zurückzuführen, dass diese aus Partikeln besteht, welche einzeln ausserordentlich grosse Energien mit sich führen, wie sie für Laborexperimente erst in neuester Zeit an grossen Teilchenbeschleunigern wie beispielsweise am CERN (European Organization for Nuclear Research) in Genf erzielt werden. Messungen der kosmischen Strahlung erlauben es deshalb, die Wechselwirkungen von hochenergetischen Teilchen mit Materie zu untersuchen. Bei diesen Wechselwirkungen treten neben den bekannten Elementarteilchen, wie sie das Proton, das Neutron, das Elektron und das Photon darstellen, auch andere, zum Teil äusserst kurzlebige Partikel auf, deren Untersuchung uns einen vertieften Einblick in den Aufbau der Materie und in die grundlegenden Gesetzmässigkeiten des Mikrokosmos ermöglichen. Schon kurz nach der Eröffnung der Forschungsstation haben Physiker aus den verschiedensten Ländern auf Jungfraujoch mit Untersuchungen der Wechselwirkungen zwischen den Teilchen der kosmischen Strahlung und den atmosphärischen Atomkernen begonnen und dabei von der ausserordentlichen Höhenlage Nutzen gezogen (*Abb. 3*). Diese Untersuchungen sind alle mit berühmten Namen verbunden wie A.H. COMPTON (Chicago), F. JOLIOT (Paris), Irène CURIE (Paris), C.W. GILBERT (Cambridge), P. AUGER (Paris), L. LEPRINCE-RINGUET (Paris), P. EHRENFEST (Paris), A. FRÉON (Paris), H. HOERLIN (Stuttgart), P. SCHERRER (Zürich), H. STAUB (Zürich), H. WÄFFLER (Zürich), G. HERZOG (Zürich), und C. POWELL (Bristol). Mit ihren Arbeiten begründeten diese Pioniere eine neue Studienrichtung der Physik, die heute Hochenergie- und Elementarteilchenphysik genannt wird. Die Exposition von Foto-



Abbildung 2: Die Schneehöhle auf dem Mönchsgipfel, die W. Kolhörster und G. von Salis bei der Expedition von 1926 als Labor diente.

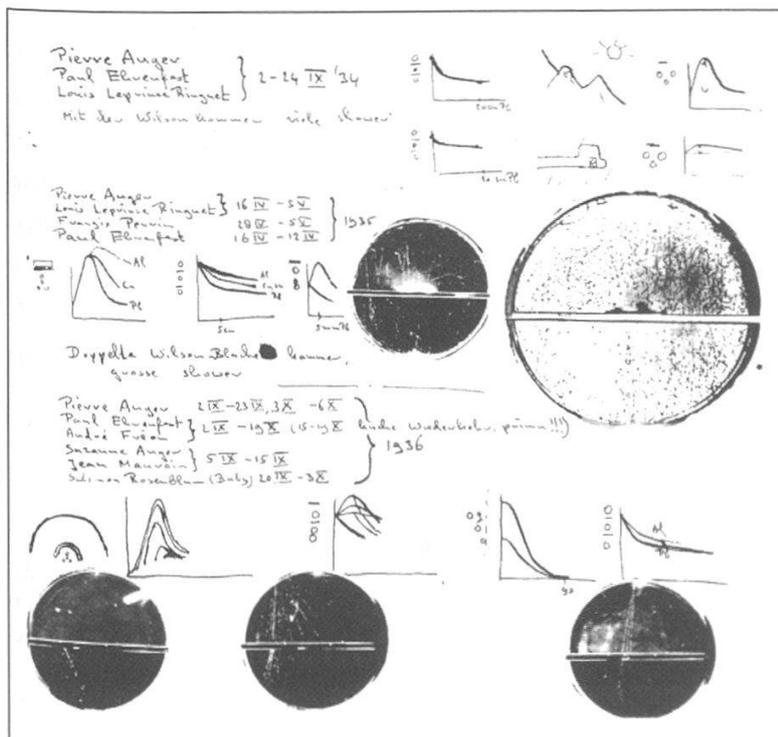


Abbildung 3: Eintrag von Pierre Auger, Paul Ehrenfest, Louis Leprince-Ringuet, und weiteren Mitarbeitern im Gästebuch der Forschungsstation Jungfrauoch, 1935.

platten auf Jungfrauoch durch die Universität von Bristol (*Abb. 4*) spielte eine Schlüsselrolle bei der Entdeckung des Pions 1947. Drei Jahre später baute die Universität Manchester unter der Leitung von P.M.S. BLACKETT im Sphinxgebäude eine mit einem 14 Tonnen schweren Elektromagneten ausgerüstete Nebelkammer auf (*Abb. 5*). In Nebelkammern hinterlassen die elektrisch geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung längs ihrem Weg eine Nebelspur, die fotografiert werden kann (*Abb. 6*). Mit der mächtigen Anlage, die nach 1957 vom CERN übernommen wurde, sind weit über 100 000 Aufnahmen von Hochenergiereaktionen gemacht worden, deren Auswertungen unsere Kenntnisse über neue Elementarteilchen wesentlich erweitert haben.

In den Folgejahren stand die kosmische Strahlung besonders deshalb im Blickfeld der Forschung, weil sie uns Kunde von Vorgängen im Kosmos bringt, die mit gewaltigen Energieumsetzungen verbunden sind, und sich mit ihr der interplanetare Raum im innern und äussern Sonnensystem sowie die äusseren Teile des Erdmagnetfeldes untersuchen lassen. Messungen zeitlicher Schwankungen der kosmischen Strahlungsintensität, die auf Veränderungen der elektromagnetischen Bedingungen im Sonnensystem und auf Veränderungen des Erdmagnetfeldes zurückzuführen sind, haben auf Jungfrauoch vorerst die Physikalischen Institute der ETH Zürich (P. SCHERRER), der Universität Zürich (H. WÄFFLER) und der Universität Lausanne (Ch. HAENNY) ausgeführt.

### Die Ära der Neutronenmonitore<sup>5</sup>

Im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres (IGY) 1957/58 errichtete die internationale Forschergemeinschaft ein weltweites Netz von Messstationen, mit denen koordiniert die zeitlichen Variationen der auf die Erde einfallenden kosmischen Strahlung registriert und analysiert werden konnten. Als Messgeräte wurde vorerst der sogenannte IGY-Neutronenmonitor (SIMPSON, 1955) und später der Neutronenmonitor-64 (NM-64; HATTON & CARMICHAEL, 1964) eingesetzt. Beide Detektoren, deren Aufbau schematisch in *Abbildung 7* wiedergegeben ist, sprechen hauptsächlich auf die sekundäre Nukleonenkomponente an, die bei der Wechselwirkung der primären kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre entsteht. In einem Absorber aus Blei lösen die in den Monitor einfallenden sekundä-

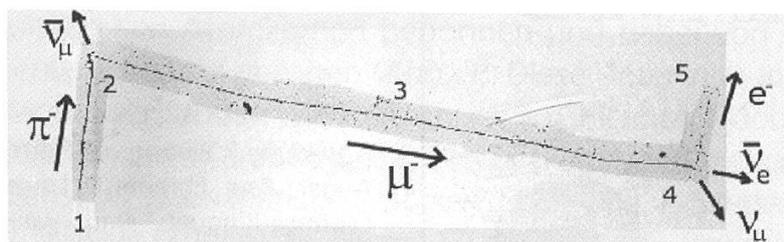


Abbildung 4: Zerfall eines Pions in einer fotografischen Emulsion.

<sup>5</sup> erster Abschnitt nach Debrunner, 1981

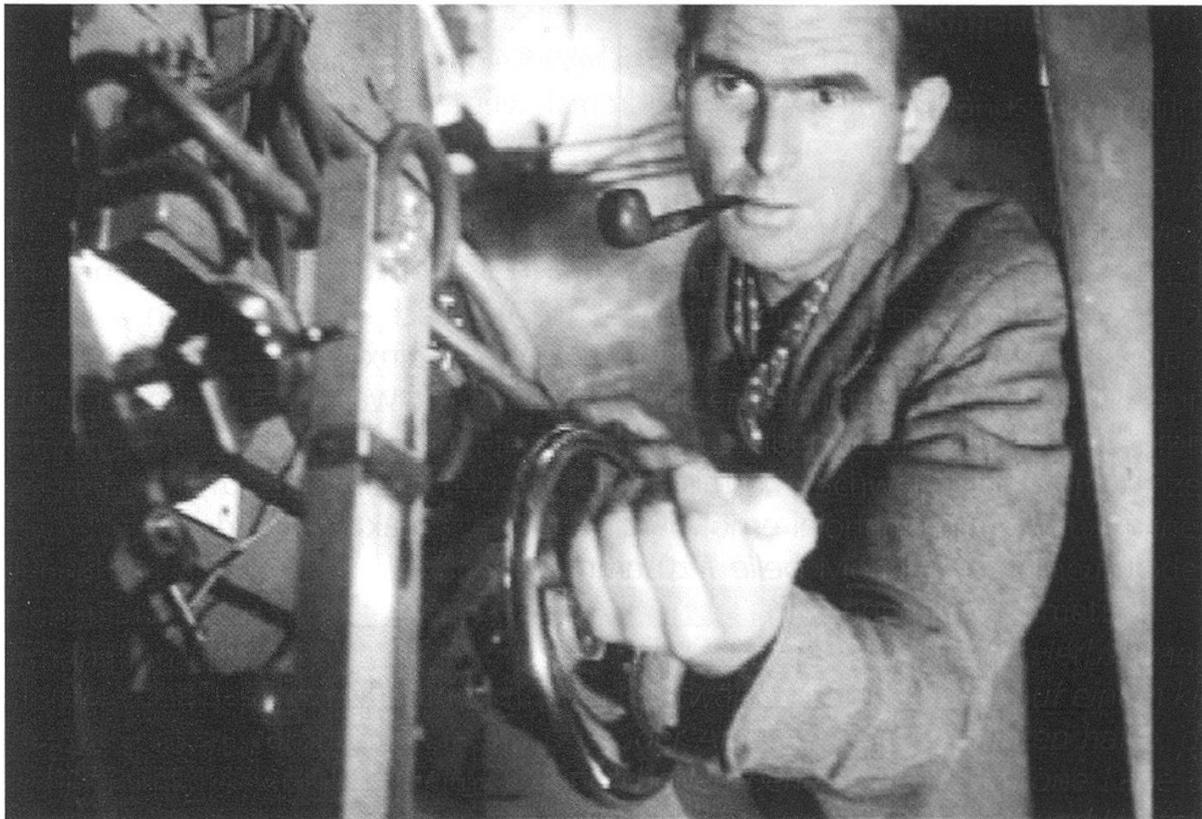


Abbildung 5: Wissenschaftler beim Bedienen der riesigen Nebelkammer der University of Manchester.



Abbildung 6: Erste Nebelkammeraufnahme eines neutralen V-Teilchens (Rochester & Butler, 1953).

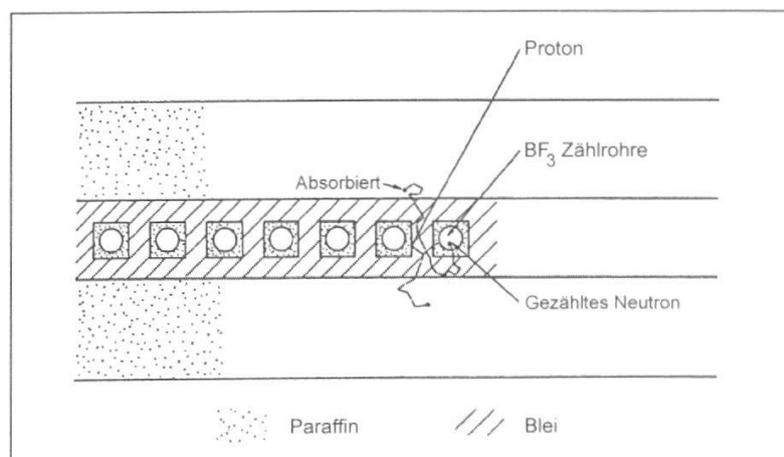


Abbildung 7: Schematischer Aufbau eines Neutronenmonitors (hier Beispiel des IGY-NM).

ren Neutronen und Protonen Kaskaden von Kernreaktionen aus. Dabei werden niederenergetische Neutronen ( $E \leq 50$  MeV) freigesetzt, die in einem Moderator aus Paraffin oder Polyäthylen abgebremst werden. Ein Teil dieser Neutronen gelangt durch Diffusion in  $\text{BF}_3$ -Zählrohre und wird auf Grund der Reaktion  $\text{B}^{10}(n, \alpha)\text{Li}^7$  nachgewiesen.

Auf Jungfrauoch wurde 1958 von Friedrich G. HOUTERMANS und Hermann DEBRUNNER, Physikalisches Institut der Universität Bern, auf dem Dach der Forschungsstation ein IGY-Neutronenmonitor aufgebaut. Anlässlich eines späteren Ausbaus wurde dieser Detektor dann auf die Terrasse des Sphinx-Observatoriums verlegt (*Abb. 8*). Am ursprünglichen Standort ist seit 1986 ein weiterer Detektor vom Typ NM-64 in Betrieb (*Abb. 9*). Mit der Inbetriebnahme dieses zweiten Monitors konnte die Zählstatistik der kosmischen Strahlungsmessungen auf Jungfrauoch um rund einen Faktor zwei erhöht werden. Die Charakteristika der beiden NM auf Jungfrauoch sind in *Tabelle 1* zusammengestellt.

Detektortyp	IGY	NM-64
Anzahl Zählrohre (Sektionen)	18 (3 x 6)	3 (3 x 1)
Geografische Breite	46.55° N	
Geografische Länge	7.98° E	
Höhe über Meer	3570 m	3475 m
Geomagnetische Grenzsteifigkeit (vertikal, Epoche 2000)	4.49 GV	4.49 GV
in Dauerbetrieb seit	1958	1986
Mittlere Zählrate pro Stunde (September 1986)	580 500	1 335 100

*Tabelle 1:* Charakteristika der Neutronenmonitore auf Jungfrauoch.

Die Zählrate eines Neutronenmonitors ist abhängig von seiner Geometrie und Beschaffenheit, von der atmosphärischen Tiefe und der geomagnetischen Breite seines Standorts sowie vom Primärspektrum der kosmischen Strahlung. Luftdruckschwankungen, die faktisch gleichbedeutend einer Höhenänderung sind, werden durch Umrechnung der Zählraten auf einen konstanten Standarddruck auskorrigiert. Für die Untersuchung von Intensitätsschwankungen der primären kosmischen Strahlung oberhalb der Atmosphäre mit Neutronenmonitoren spielt weiter das Magnetfeld der Erde eine entscheidende Rolle. In Erdnähe werden die geladenen Teilchen abgelenkt (wie in *Abbildung 10* illustriert), und zwar umso stärker, je geringer die Energie des Teilchens ist. Um einen bestimmten Ort der Erdatmosphäre aus einer vorgegebenen Richtung zu erreichen, muss ein kosmisches Strahlungsteilchen eine bestimmte Mindestenergie aufweisen. Diese sogenannte geomagnetische Grenzenergie (oder Grenzsteifigkeit<sup>6</sup>) ist an den

<sup>6</sup> Die Steifigkeit,  $R$ , ist definiert durch  $R=pc/q$ , wobei  $p$  der Impuls des Teilchens,  $q$  dessen elektrische Ladung, und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit darstellen. Die Steifigkeit ist eine zweckmässige Grösse zur Charakterisierung der Bewegung von geladenen Teilchen in Magnetfeldern. Teilchen mit gleicher Steifigkeit und gleichen Anfangsbedingungen beschreiben in einem gegebenen Magnetfeld gleiche Bahnen.

Abbildung 8: 18-IGY-NM auf dem Dach des Sphinx-Observatoriums auf Jungfrauoch.

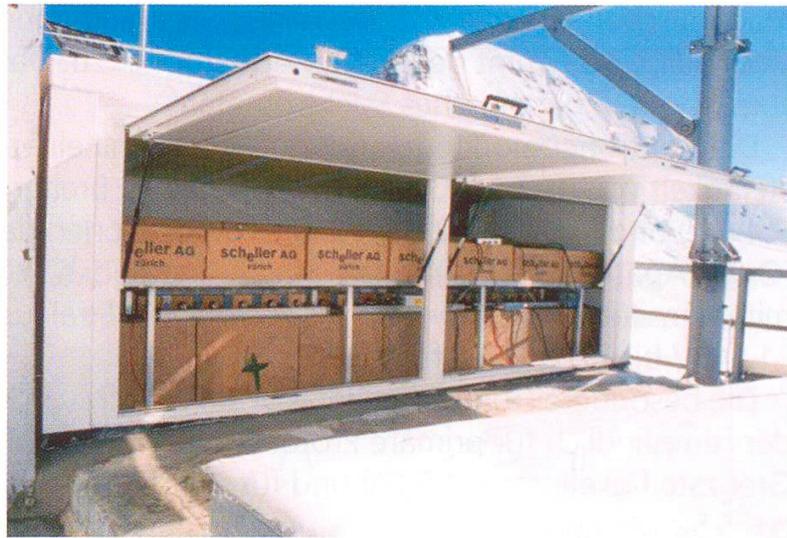
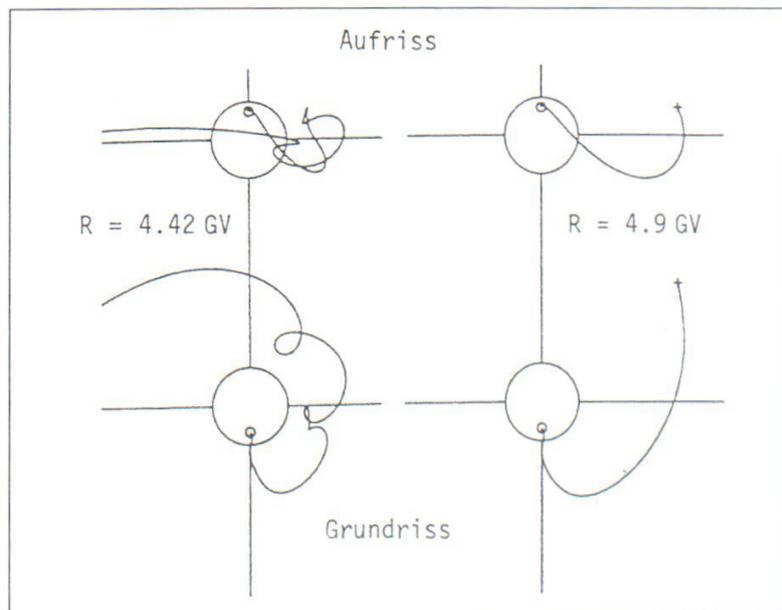


Abbildung 9: 3-NM-64 mit Messelektronik in der Messhütte auf dem Dach der Forschungsstation Jungfrauoch.



Abbildung 10: Trajektorien von kosmischen Strahlungspartikeln, die oberhalb Jungfrauoch aus vertikaler Richtung in die Atmosphäre einfallen.



magnetischen Polen, wo die Feldlinien des Erdmagnetfeldes gegen aussen offen sind, null, und nimmt gegen den Äquator hin zu. Das Magnetfeld der Erde wirkt somit wie ein gigantisches Spektrometer.

Die Neutronenmonitore auf Jungfraujoch mit einer effektiven vertikalen Grenzsteifigkeit von  $R_c \sim 4.5$  GV füllen die Lücke im Breitenbereich zwischen Rom ( $R_c \sim 6.4$  GV) und Kiel ( $R_c \sim 2.2$  GV). Die NM-Stationen des europäischen Netzwerkes (Oulu, Apatity, Kiel, Lomnický Štít, Jungfraujoch, Rom und Athen) können somit Intensitätsschwankungen der kosmischen Strahlung im Steifigkeitsbereich von  $\sim 1.5$  GV bis  $\sim 6.5$  GV erfassen.

Die besondere Höhenlage der NM auf Jungfraujoch macht diese zudem besonders empfindlich für primäre Protonen und Ionen nahe bei der geomagnetischen Grenzsteifigkeit von  $\sim 4.5$  GV und für solare Neutronen mit Energien bis hinunter zu  $\sim 250$  MeV.

Die Intensität der auf die Erde einfallenden galaktischen kosmischen Strahlung zeigt eine periodische Variation im Gegenteil zum Zyklus der Sonnenaktivität. *Abbildung 11* illustriert diese 11-Jahres-Variation und deren Korrelation mit der Sonnenfleckenanzahl anhand der Monatsmittelwerte des IGY-NM auf Jungfraujoch. Eine Zunahme der Sonnenaktivität bedeutet stärkere Turbulenzen im heliosphärischen Magnetfeld, welche die galaktische kosmische Strahlung beim Eindringen in die innere Heliosphäre behindern, und umgekehrt. Ein ausgezeichnetes Beispiel zur Illustration dieser Tatsache, wenn auch in einem kürzeren Zeitraum, konnte 1991 während der aktiven Phase des Sonnenfleckenzyklus 22 beobachtet werden. Die Zählraten des weltweiten NM-Netzwerkes zeigten plötzlich einen unüblichen, dramatischen Abfall, der mehr als einen Monat andauerte. Wie in *Abbildung 12* illustriert wird, verzeichnete der IGY-NM auf Jungfraujoch eine Abnahme von bis zu 30% in den Tagesmittelwerten. Dieses aussergewöhnliche, grosse und lange dauernde Ereignis war die Folge von mehreren heftigen Störungen im Sonnenwind, sogenannten Forbush-Abfällen (benannt nach dem amerikanischen Physiker Scott E. FORBUSH), welche die galaktische kosmische Strahlung ausserhalb der Erdbahn teilweise abschirmen.

Von speziellem Interesse bei der Untersuchung der kosmischen Strahlung mit NM sind sporadische kurzzeitige Intensitätszunahmen auf Grund des Einfalls solarer Partikel, d.h. von Teilchen, die auf oder in der Nähe der Sonne beschleunigt werden. Solare kosmische Strahlung entsteht bei energiereichen solaren Ausbrüchen in der unteren Sonnenkorona und/oder bei Schockwellen, die durch koronale Massenauswürfe (sogenannte CME, coronal mass ejections) von der Sonne weg in den interplanetaren Raum getrieben werden. Von ihrem Erzeugungsort breiten sich die solaren Protonen und Ionen entlang der Feldlinien des interplanetaren Magnetfeldes (IMF) in die Heliosphäre aus. Wenn der Quellort der Teilchen durch die Feldlinien des IMF magnetisch gut mit der Erde verbunden ist, und wenn die Energie der solaren Teilchen gross genug ist, können diese auf der Erde z.B. mit NM beobachtet werden. Ein derartiger Einfall relativistischer solarer Partikel auf die Erde wird als GLE bezeichnet (ground level enhancement).

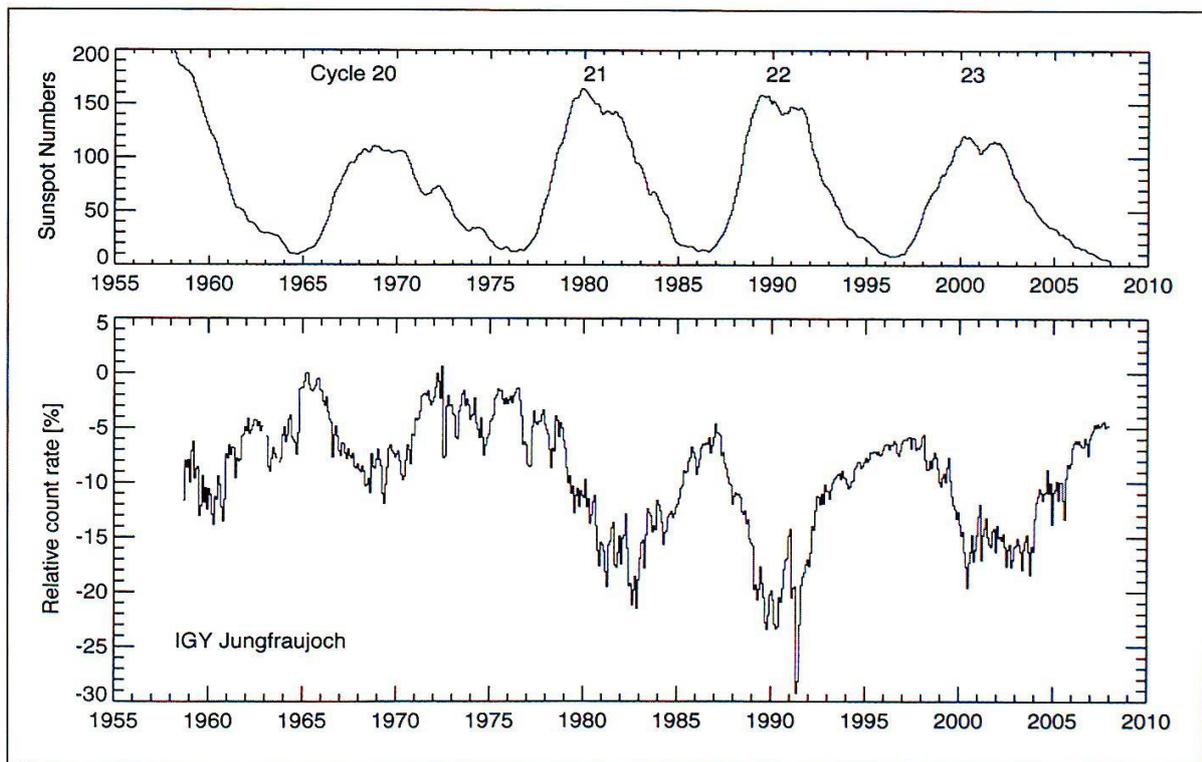


Abbildung 11: Geglättete Sonnenfleckenzahlen (oben) und Monatsmittelwerte des IGY-NM auf Jungfrauoch (unten) von 1958–2007. Die NM-Daten sind für Schwankungen des Luftdruckes korrigiert und in relativen Einheiten bezüglich Mai 1965 ausgedrückt.

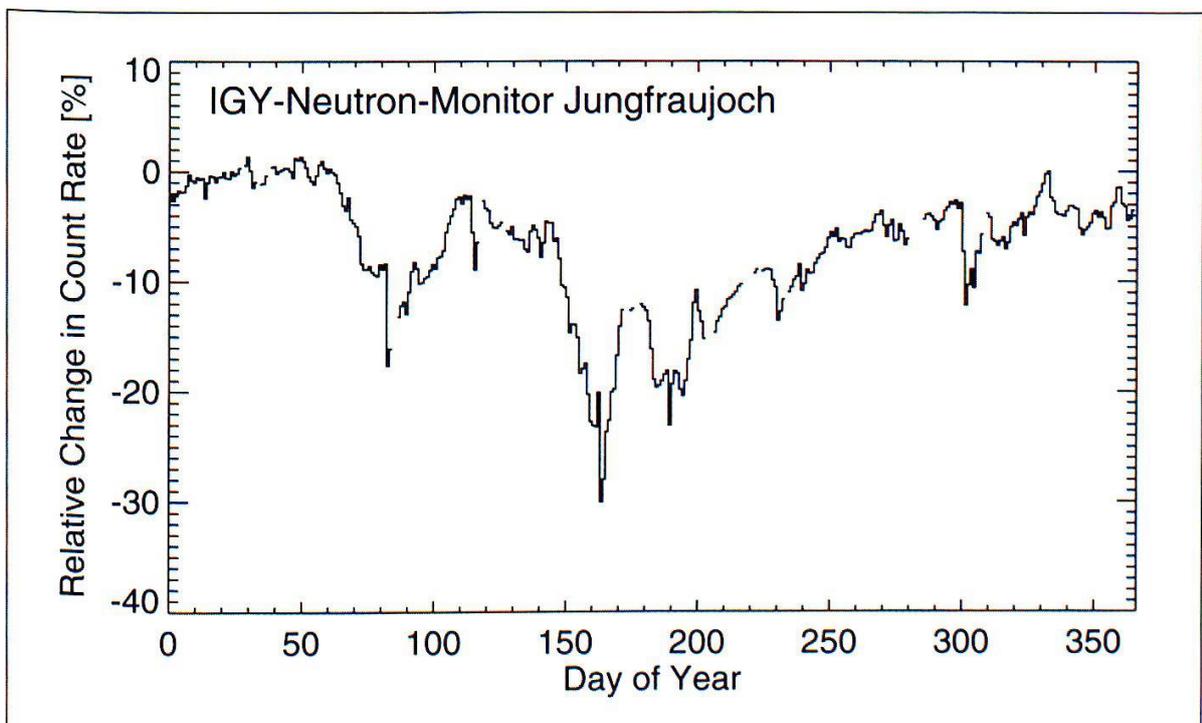


Abbildung 12: Der ungewöhnliche, dramatische Intensitätsabfall der kosmischen Strahlung von 1991, wie er mit dem IGY-NM auf Jungfrauoch festgehalten wurde. Die Kurve zeigt die relative Abweichung der Tageszählrate vom Monatsmittelwert für Februar 1991.

Das grösste solare Teilchenereignis in der 50-jährigen Geschichte der NM-Messungen auf Jungfraujoch konnte am 29. September 1989 festgehalten werden. Wie *Abbildung 13* zeigt, betrug der relative Zählratenanstieg in den 1-Minuten-Werten rund 150%. Aus der Analyse der weltweiten NM-Daten zusammen mit direkten Messungen aus dem Weltraum können die Wissenschaftler neue Erkenntnisse gewinnen über die physikalischen Prozesse, die bei der Beschleunigung von Teilchen auf der Sonne eine Rolle spielen, und über die Propagation der kosmischen Strahlung im interplanetaren und erdnahen Raum. Die erzielten Resultate sind dabei von allgemeinem astrophysikalischem Interesse.

Kurz nach den ersten Beobachtungen von solaren Teilchenereignissen postulierten BIERMANN et al. (1951), dass energiereiche solare Protonen bei der Wechselwirkung mit der Sonnenatmosphäre energetische Neutronen erzeugen könnten, und zwar in einer Anzahl, die einen Nachweis auf der Erde möglich machen sollte. Da die elektrisch ungeladenen solaren Neutronen bei ihrer Ausbreitung nicht durch das solare, interplanetare und terrestrische Magnetfeld abgelenkt werden, liefert die Untersuchung ihres Energiespektrums und ihres Intensität/Zeit-Profiles direkte Information über die Beschleunigung von Teilchen auf der Sonne. Trotz intensiver Suche konnten jedoch während über 30 Jahren keine Ereignisse mit solaren Neutronen gefunden werden. Der erste Nachweis eines solaren Neutroneneinfalls auf die Erdatmosphäre erfolgte erst während des solaren Teilchenereignisses vom 3. Juni 1982 mit den NM auf Jungfraujoch, Lomnický Štít (Slowakei) und Rom (DEBRUNNER et al., 1983). Zeitgleich konnten mit dem Gamma Ray Spectrometer (GRS) auf dem NASA-Satelliten Solar Maximum Mission (SMM) ebenfalls solare Neutronen beobachtet werden. In *Abbildung 14* sind die GRS-Daten in Abhängigkeit der Zeit für verschiedene Energiekanäle zusammen mit dem Zählratenanstieg des IGY-NM Jungfraujoch aufgetragen (CHUPP et al., 1987). Die 80–140 keV Röntgenstrahlung ist vorwiegend auf Elektron-Bremsstrahlung zurückzuführen. Die 4.1–6.4 MeV Photonenstrahlung stammt hauptsächlich von schmalen, nicht aufgelösten Gammastrahlungslinien, welche auf Wechselwirkungen von Ionen in der Sonnenatmosphäre hinweisen. Der Energiekanal  $>25$  MeV ist auf hochenergetische neutrale Strahlung (Photonen und/oder Neutronen) empfindlich. Auf Grund der SMM-GRS- und der Jungfraujoch-NM-Daten konnte geschlossen werden, dass während des Ereignisses vom 3. Juni 1982 auf der Sonne eine zeitlich ausgedehnte Emission von Neutronen mit Energien von  $\sim 100$  MeV bis gegen 2 GeV stattfand.

Das solare Neutronenereignis vom 3. Juni 1982 löste grosse theoretische Arbeiten über die Physik der Hochenergieprozesse auf der Sonne aus. Es hat auch zur Installation eines zweiten NM auf Jungfraujoch durch die Berner Gruppe geführt. Wegen seiner Höhenlage in nicht zu hoher geografischer Breite ist das Jungfraujoch ein idealer Standort für den Nachweis von solaren Neutronen.

Neben den astrophysikalischen Fragestellungen hat sich das wissenschaftliche Interesse in jüngeren Jahren vermehrt den Auswirkungen der kosmischen Strahlung auf das System Erde zugewandt. So hat man z.B. heute noch wenig gesi-

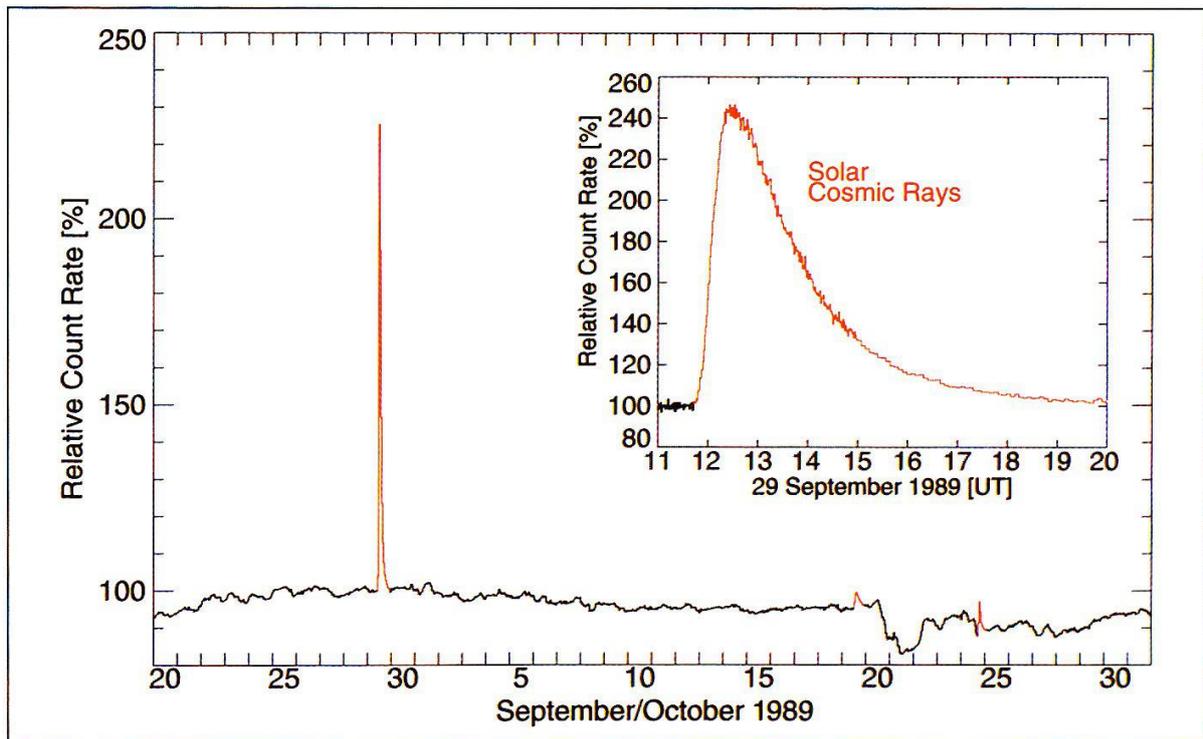


Abbildung 13: Das grösste, je auf Jungfraujoch beobachtete solare Teilchenereignis: 29. September 1989.

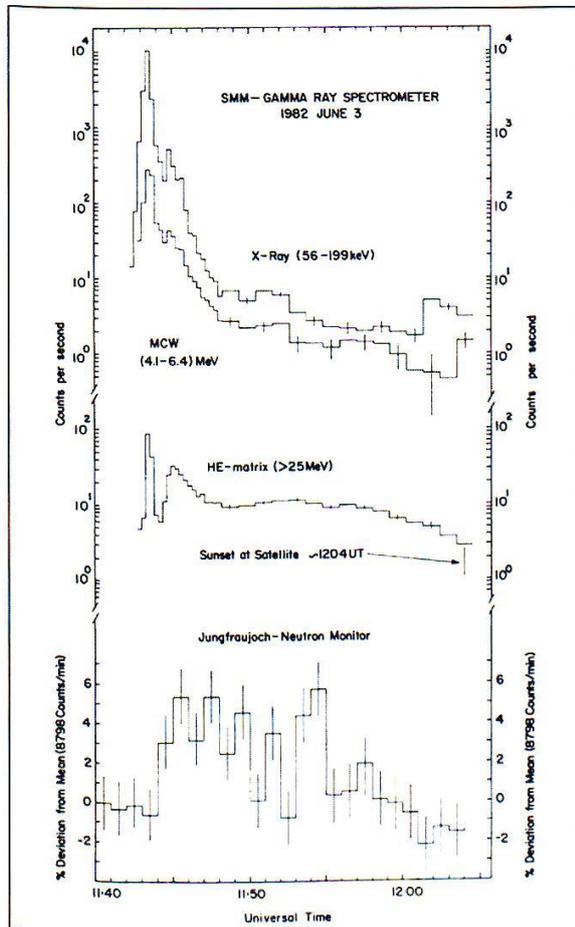


Abbildung 14: Der erste Nachweis von solaren Neutronen in Erdnähe durch erdgebundene Detektoren am 3. Juni 1982. Für Details siehe Text.

cherte Erkenntnisse über mögliche Zusammenhänge zwischen Intensitätsschwankungen der kosmischen Strahlung und Wetter- und Klimaphänomenen. Vor einigen Jahren wurde postuliert, dass die kosmische Strahlung möglicherweise das fehlende Bindeglied zwischen Sonnenaktivität und Wetter sowie Klima auf der Erde bilden könnte. Der Einfluss der kosmischen Strahlung auf die Ozonschicht und ein möglicher kausaler Zusammenhang zwischen Intensitätsvariationen der kosmischen Strahlung und Veränderungen der Wolkenbildung in der Troposphäre sind gegenwärtig Gegenstand intensiver und zum Teil kontroverser Untersuchungen. Detaillierte Kenntnisse über das Strahlungsumfeld der Erde im Energiebereich  $>10$  MeV ist heute ebenfalls von Bedeutung zur Abschätzung des Strahlungsrisikos nicht nur von Astronauten, sondern auch im Bereich der Luftfahrt. Das öffentliche Interesse sowie gesetzliche Regelungen, die in Europa seit Mai 2000 gelten, erfordern die Fähigkeit zur individuellen Abschätzung der Strahlendosis des fliegenden Personals, insbesondere auch während solaren Teilchenereignissen. Schliesslich können durch die kosmische Strahlung in elektronischen Komponenten Mikrodefekte, sogenannte «single event upsets», verursacht werden, die im Extremfall den Ausfall kritischer Steuerungselemente nach sich ziehen.

Die Aufzeichnungen der Jungfrauochmonitore, zusammen mit den Daten des weltweiten Netzes, erlauben die Bestimmung des zeitlichen Verlaufs der charakteristischen Grössen von solaren Teilchenflüssen in Erdnähe im Energiebereich 1–15 GeV. Diese Information ist nicht nur von Bedeutung für die Untersuchung der physikalischen Hochenergieprozesse auf der Sonne, sie ist auch unerlässlich für die quantitative Abschätzung der Einflüsse der solaren Teilchenstrahlung im erdnahen Raum, in der Atmosphäre, auf der Erdoberfläche und unter Grund.

Als Beispiel sollen hier exemplarisch die Ergebnisse einer Analyse des solaren Ereignisses vom 20. Januar 2005 (*Abb. 15* und *16*) vorgestellt werden. Bei diesem Ereignis handelt es sich um das zweitgrösste, welches durch erdgebundene kosmische Strahlungsdetektoren beobachtet werden konnte (das grösste GLE wurde am 23. Februar 1956 registriert). In *Abbildung 17* wird der solare Protonenfluss aus der Haupteinfallrichtung,  $J_{\parallel}$ , für Energien  $>1$  GeV gezeigt, wie er aus den Daten von ca. 40 NM des globalen NM-Netzes abgeleitet werden konnte. Im Energiebereich 15–500 MeV wird ebenfalls der auf dem Satelliten GOES-11 (Geostationary Operational Environmental Satellite) direkt gemessene Protonenfluss angegeben (ONSAGER et al., 1996). Die maximale Intensität der solaren Protonenstrahlung in Erdnähe betrug bei 1 GV  $J_{\parallel}(1 \text{ GV}, t_{\text{max}}) \approx 20 \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ MV}^{-1}$ . Zum Vergleich: während des grossen GLE vom 29. September 1989 betrug die maximale Protonenintensität nur  $J_{\parallel}(1 \text{ GV}, t_{\text{max}}) \approx 10^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ MV}^{-1}$ , doch war damals das Energiespektrum extrem hart ( $J_{\parallel}(R, t) \approx A(t) \cdot R[\text{GV}]^{-\gamma(t)}$ ,  $\gamma \sim 3$ ; LOCKWOOD et al., 2002). Während der maximalen Protonenintensität des GLE vom 20. Januar 2005 war  $\gamma \sim 8$  (BÜTIKOFER et al., 2007). Normalerweise weist der sogenannte Spektralindex,  $\gamma$ , der die Form des Steifigkeitsspektrums beschreibt, Werte im

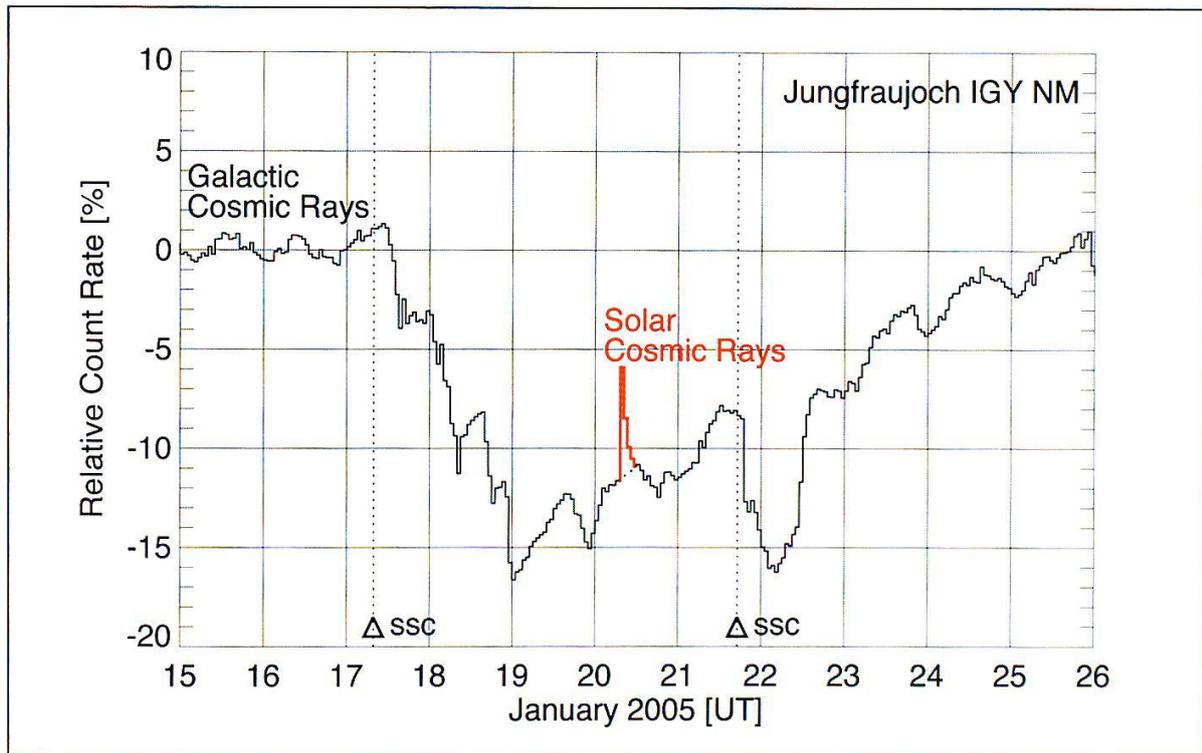


Abbildung 15: Relative, druckkorrigierte Stundenwerte des IGY-NM auf Jungfraujoch vom 15.–25. Januar 2005, mit dem GLE vom 20. Januar 2005.

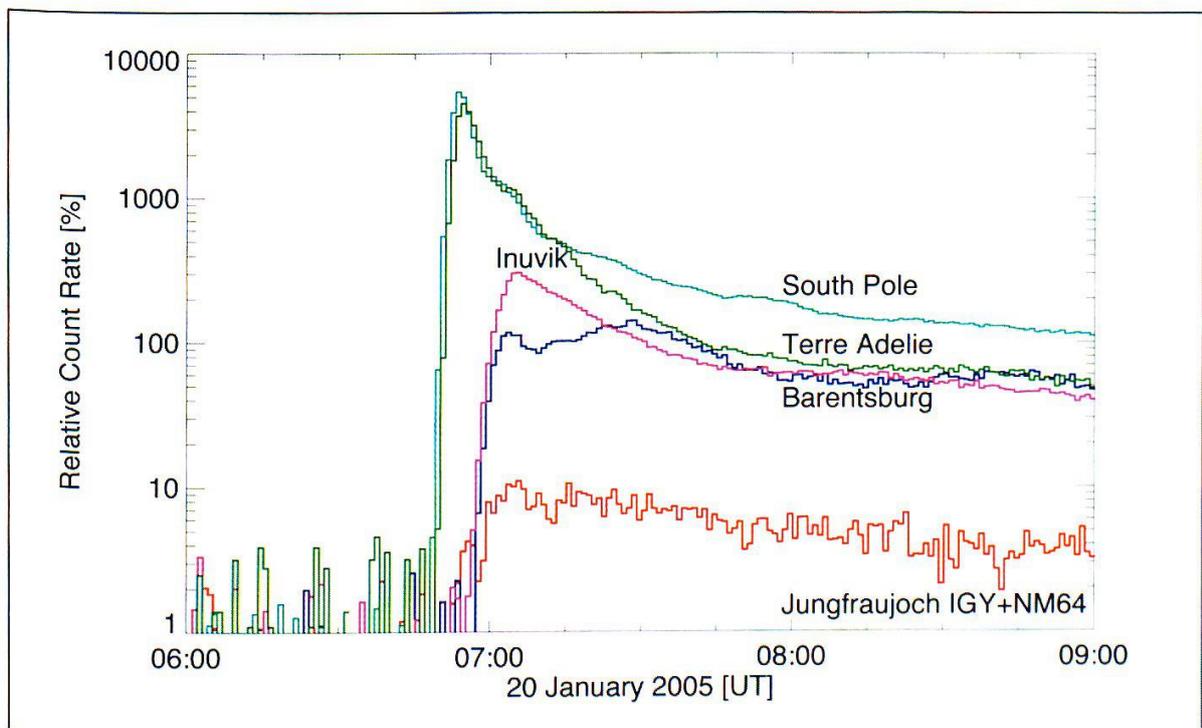


Abbildung 16: GLE vom 20. Januar 2005: Relative, druckkorrigierte 1-Minuten-Zählraten der NM-Stationen Südpol, Terre Adelie (Antarktis), Inuvik (Kanada), Barentsburg (Spitzbergen) und Jungfraujoch (IGY und NM-64 kombiniert) für das Zeitintervall 0600–0900 UT.

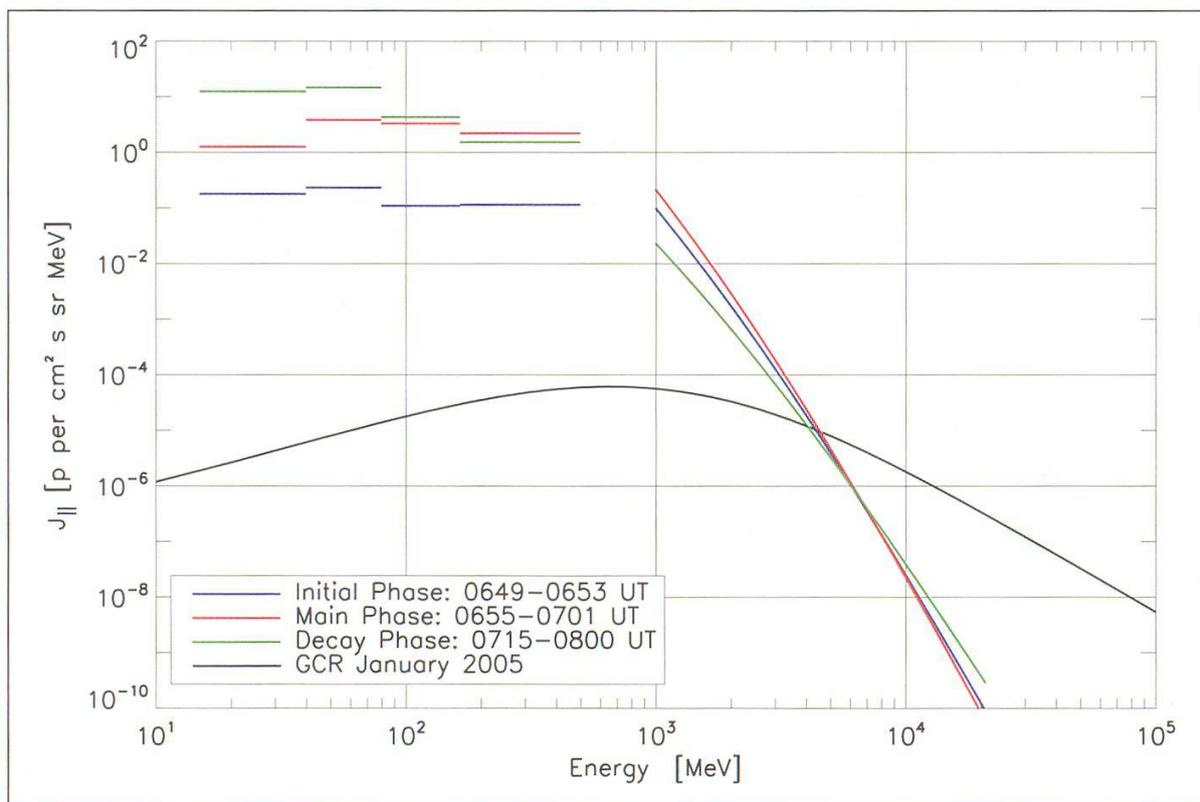


Abbildung 17: Solarer Protonenfluss  $>1$  GeV aus der Haupteinfallrichtung,  $J_{||}$ , für drei Zeitintervalle während des extremen solaren Teilchenereignisses vom 20. Januar 2005, zusammen mit dem Spektrum der galaktischen kosmischen Strahlung in Erdnähe im Januar 2005.

Bereich 4–6 auf. *Abbildung 18* zeigt die aus dem solaren Protonenfluss abgeleitete effektive Strahlendosisrate in einer typischen Flughöhe von  $\sim 9$  km während der Maximumsphase (0655–0657 UT) des GLE vom 20. Januar 2005 (BÜTIKOFER et al., 2007). Die beiden Panels enthalten die effektiven Dosisraten auf Grund der solaren und der galaktischen kosmischen Strahlung (oben), und auf Grund der galaktischen kosmischen Strahlung allein (unten). Die Erhöhung der Dosiswerte durch die solare kosmische Strahlung ist, wie für dieses sehr anisotrope solare Ereignis erwartet, stark ortsabhängig. In einer sehr begrenzten Region um  $70^\circ\text{S}$  und  $130^\circ\text{E}$  erreichte die effektive Dosisrate Werte von bis zu  $\sim 3.5$  mSv/h. Auf den Flughöhen des kommerziellen Luftverkehrs von 9–12 km beträgt die Dosisrate auf Grund der galaktischen kosmischen Strahlung üblicherweise  $5\text{--}10$   $\mu\text{Sv/h}$ , abhängig von der Höhe, der geomagnetischen Breite und der Sonnenaktivität (GOLDHAGEN, 2000).

Für viele der heute aktuellen Forschungsprojekte über die kosmische Strahlung in der Heliosphäre ist der Zugang zu NM-Daten in Echtzeit eine entscheidende Voraussetzung. Im Rahmen eines europäischen Projekts wird deshalb momentan eine Datenbank mit Echtzeitintegration der NM-Daten aufgebaut ([www.nmdb.eu](http://www.nmdb.eu)). Insbesondere für Anwendungen im Bereich Weltraumwetter werden die ohne Zeitverzug zur Verfügung stehenden Messdaten eine Schlüsselrolle einnehmen.

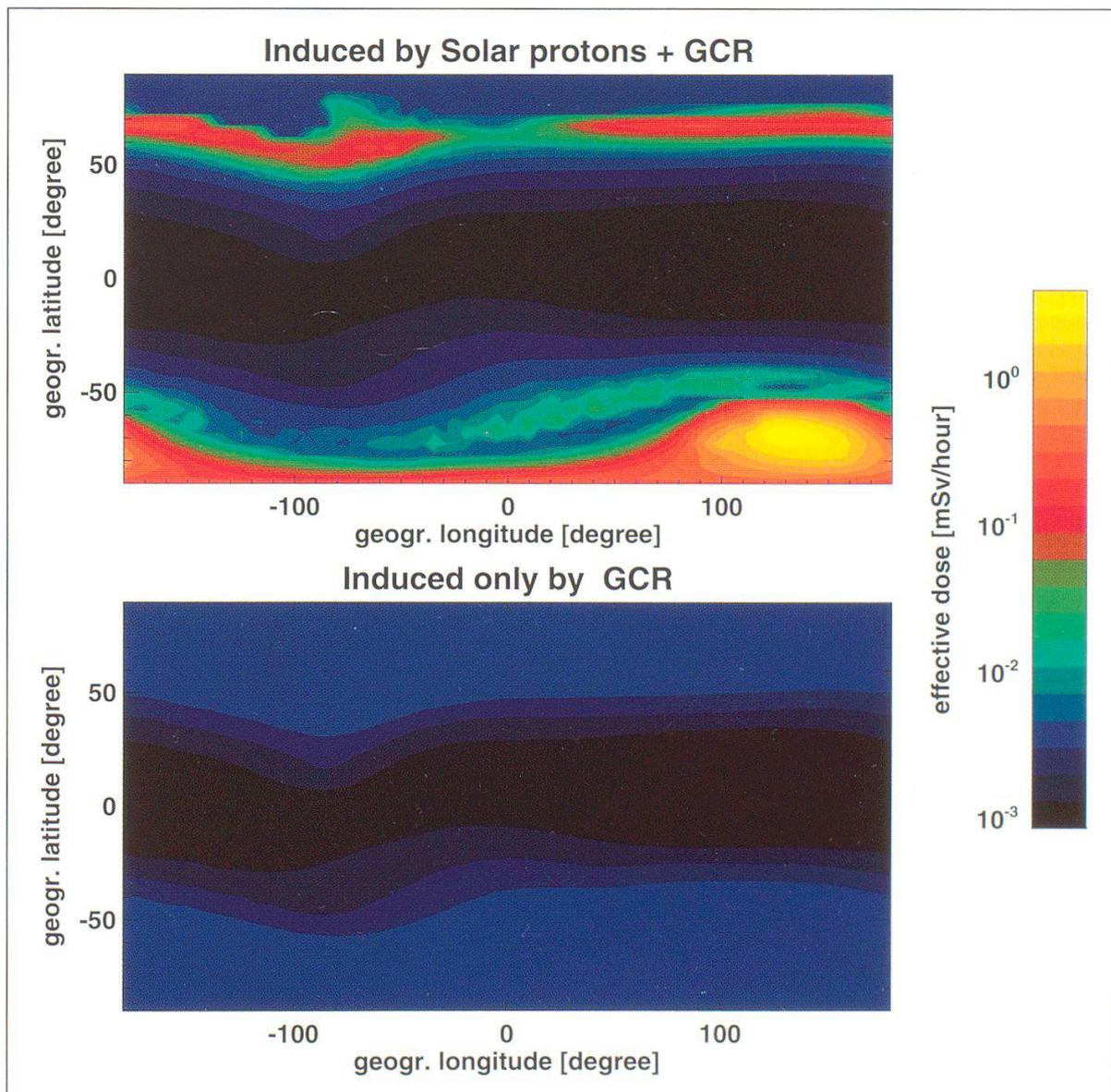


Abbildung 18: Berechnete effektive Dosisrate in einer typischen Flughöhe von  $\sim 9$  km während der Maximumphase (0655–0657 UT) des extremen solaren Teilchenereignisses vom 20. Januar 2005, auf Grund der solaren und der galaktischen kosmischen Strahlung (oben), und auf Grund der galaktischen kosmischen Strahlung allein (unten). Diese Berechnungen wurden mit dem PLANETO-COSMICS Code durchgeführt (Desorgher, 2006).

## Zusammenfassung und Ausblick

Während schon fast eines ganzen Jahrhunderts ist die Untersuchung der kosmischen Strahlung auf Jungfraujoch eines der Hauptforschungsgebiete. Seit 50 Jahren werden im Rahmen eines international koordinierten Messprogramms kontinuierliche Intensitätsregistrierungen der kosmischen Strahlung mit Neutronenmonitoren vorgenommen. Während sich das wissenschaftliche Interesse vorerst auf Themen der Teilchen- und Kernphysik konzentrierte, haben die Arbeiten der

jüngeren Jahre solar-terrestrische Effekte, Weltraumwetter, Einflüsse auf Technik, Umwelt und Lebewesen sowie mögliche Auswirkungen auf Wetter und Klima zum Gegenstand. Es ist zu erwarten, dass die Erforschung der kosmischen Strahlung in der typischen Kombination von angewandter und Grundlagenforschung auch weiterhin auf Jungfrauoch einen wichtigen Stellenwert einnehmen wird.

## Verdankungen

Über 50 Jahre wurden die Berner Forschungsprojekte zur kosmischen Strahlung auf Jungfrauoch durch die Universität Bern und den Schweizerischen Nationalfonds wohlwollend unterstützt (NF Kredit 200020-113704 und frühere). Die Internationale Stiftung Hochalpine Forschungsstationen Jungfrauoch und Gornergrat (HFSJG) ermöglichte den Aufbau und Betrieb der Experimente. Wir danken den zahlreichen Betriebswarten für die stete Unterstützung. Zum Schluss gedenken wir mit Anerkennung der herausragenden wissenschaftlichen und persönlichen Verdienste von Hermann Debrunner, dem langjährigen Leiter der Gruppe Kosmische Strahlung des Physikalischen Instituts der Universität Bern, und wir danken allen früheren und gegenwärtigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihren grossen Einsatz in einer durch Freundschaft und gegenseitige Achtung geprägten Zusammenarbeit.

## Literatur

- BALSIGER, H. & FLÜCKIGER, E. (2007): 75 Jahre Hochalpine Forschungsstation Jungfrauoch. Mitt. Natforsch. Ges. Bern NF Bd. 64, 81–99.
- BIERMANN, L., HAXEL, O. & SCHLÜTTER, A. (1951): Neutrale Ultrastrahlung von der Sonne. Z. Naturforsch. 6a, 47.
- BÜTIKOFER, R., FLÜCKIGER, E.O., DESORGHER, L. & MOSER, M.R. (2007): The extreme solar cosmic ray particle event on 20 January 2005 and its influence on the radiation dose rate at aircraft altitude. Sci. Total Environ., Special Issue, Int. Conference in celebration of the 75th anniversary of the High Altitude Research Station Jungfrauoch at Interlaken, Switzerland (September 11–13, 2006), doi:10.1016/j.scitotenv.2007.10.021.
- CHUPP, E.L., DEBRUNNER, H., FLÜCKIGER, E., FORREST, D.J., GOLLIEZ, F., KANBACH, G., VESTRAND, W.T., COOPER, J. & SHARE, G. (1987): Solar neutron emissivity during the large flare on 1982 June 3. The Astrophysical Journal. 318, 913.
- DEBRUNNER, H. (1981): Die Hochalpine Forschungsstation Jungfrauoch. In: 50 Jahre Hochalpine Forschungsstation Jungfrauoch. Kantonalbank von Bern, Bulletin Nr. 23, 7–26.
- DEBRUNNER, H., FLÜCKIGER, E., CHUPP, E.L. & FORREST, D.J. (1983): The solar cosmic ray neutron event on June 3, 1982. 18th International Cosmic Ray Conference, Bangalore, India, Conference Papers 4, 75–78.
- DESORGHER, L. (2006): User guide of the PLANETOCOSMICS code. <http://cosray.unibe.ch/~laurent/planetocosmics>.
- GOLDHAGEN, P. (2000): Overview of aircraft radiation exposure and recent ER-2 measurements. Health Phys. 79, 526–544.

- HATTON, C.J. & CARMICHAEL, H. (1964): Experimental Investigation of the NM-64 Neutron Monitor. *Can. J. Phys.* 42, 2443–2472.
- HESS, V.F. (1912): Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. *Physikalische Zeitschrift*, No. 21/22, 13. Jahrgang, 1084–1091, 1. November 1912.
- LOCKWOOD, J.A., DEBRUNNER, H., FLÜCKIGER, E.O. & RYAN, J.M. (2002): Solar proton rigidity spectra from 1 to 10 GV of selected flare events since 1960. *Solar Physics* 208, 1, 113–140.
- ONSAGER, T., GRUBB, R., KUNCHES, J., MATHESON, L., SPEICH, D., ZWICKL, R.W. & SAUER, H. (1996): Operational uses of the GOES energetic particle detectors. In: Edward R. Washwell, editor. *Proc. SPIE GOES-8 and Beyond*. 2812, 281–290.
- ROCHESTER, G.D. & BUTLER, C.C (1953): The new unstable cosmic ray particles. *Physical Society Progress Reports* 16, 364–407.
- SIMPSON, J.A. (1955): *Cosmic Radiation Neutron Intensity Monitor*, Special Report, Institute for Nuclear Studies, University of Chicago.

