
Von der Entdeckung der kosmischen Strahlung bis zu modernen Luftschauerexperimenten

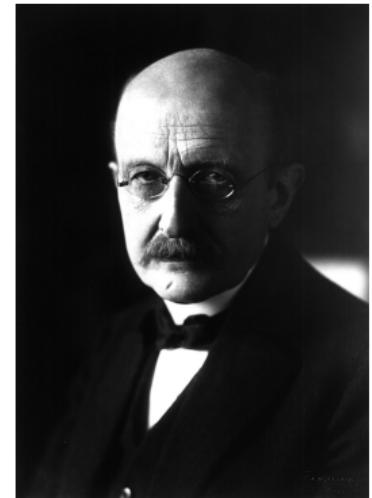
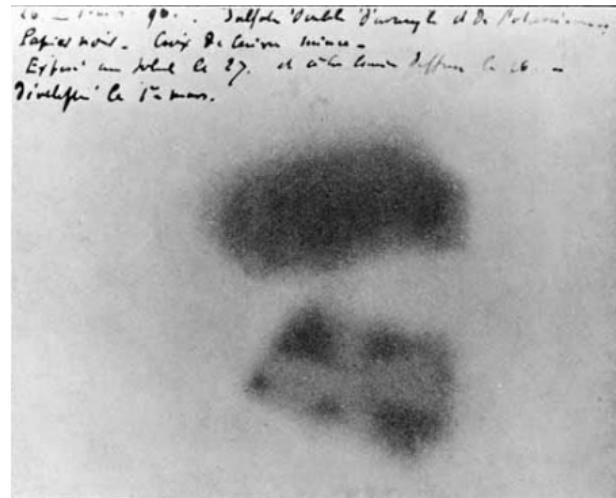
Jean-Marco Alameddine

18. Januar 2019

Lehrstuhl E5b
Fakultät Physik

Ende 19. Jahrhundert: "Die Physik ist als Wissenschaft abgeschlossen..."

Ende 19. Jahrhundert: "Die Physik ist als Wissenschaft abgeschlossen..."



Der Weg zur kosmischen Höhenstrahlung...

- Bereits früh bekannt (Coulomb, 1785): Ein isolierter elektrischer Leiter verliert mit der Zeit seine Ladung
 - Leitfähigkeit der Luft?
- **1900:** Elster und Geitel mit der Hypothese:
 - Kleinste Mengen radioaktiver Substanzen in der Luft und in der Erde, welche der Luft ihre Leitfähigkeit verleihen
- Erste Untersuchungen von Ionisation außerhalb von Laboren (Höhlen, Salzminen...)

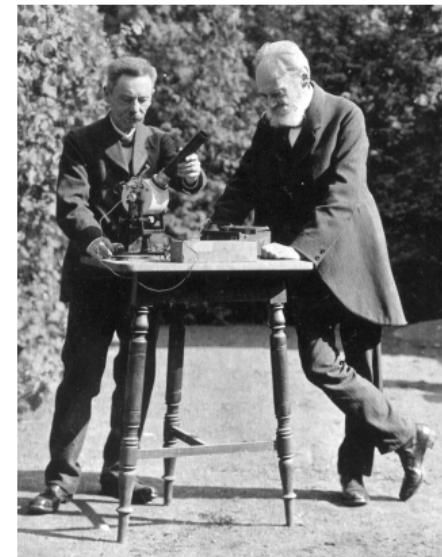


Abbildung: Julius Elster und Hans Geitel [4]

Erste Untersuchungen der Ionisation in der Höhe

- Erste Messungen der Ionisation (mithilfe eines Elektroskopes) in der Höhe:
 - **1910:** Theodor Wulf, Messung auf dem Eiffelturm ($h \approx 300$ m)
 - **1909-1911:** Albert Gockel, Ballonflüge in der Schweiz ($h \lesssim 4500$ m)
- ⇒ Deutlich geringere Abnahme der Ionisationsstärke mit der Höhe als angenommen

- Victor Hess, arbeitete ab 1910 am "Institut für Radiumforschung" in Wien
- Untersuchung der Absorption von γ -Strahlung (aus Radium) in Luft
- Schlussfolgerung aus Messungen: In 500 m Höhe würde die Strahlung der Erde auf wenige Prozent abgefallen sein



Abbildung: Viktor Hess im Jahre 1915 [5]

- **1911:** Erste Ballonflüge durch Hess 1911 ($h \approx 1000$ m)
- Bestätigung der Resultate von Gockel
- **1912, erste Hälfte:** Sechs weitere Ballonflüge, zu verschiedenen Tageszeiten ($h \lesssim 2100$ m)
- Keine Korrelation der Ionsationrate mit Sonnenaktivitäten
- Bestätigung: Ionisationsrate nimmt nicht signifikant stark mit der Distanz zur Erde ab

Ziel von Hess: Untersuchung der Ionsationsrate in größeren Höhen



Abbildung: Victor Hess in einem Ballon um 1912 [6]

- **7. August 1912:** Ballonflug von Hess auf bis zu $h \approx 5350$ m
- Gemessener Anstieg der Ionisationsrate von $h \approx 3000$ m auf $h \approx 5200$ m um Faktor vier!
- Hess: Es muss sich um eine "durchdringende Strahlung" handeln, die die Atmosphäre von oben trifft (und nicht von der Sonne stammt)
- **1913, 1914:** Bestätigung der Ergebnisse, Ballonflüge von Werner Kolhörster ($h \approx 9300$ m)
- Anfangs bestand bei vielen Forschern Zweifel, dass die entdeckte "Strahlung" tatsächlich kosmischen Ursprungs war

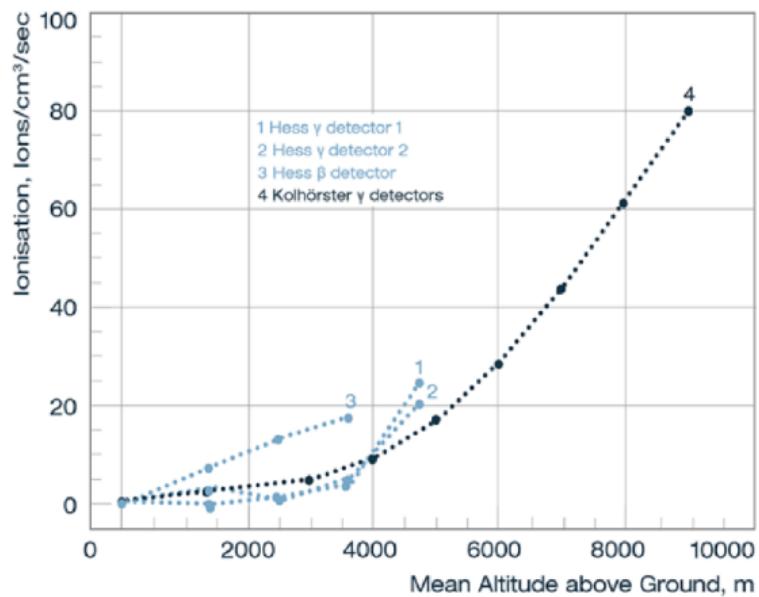


Abbildung: Ergebnisse des siebten Ballonfluges von Hess und des Ballonfluges von Kolhörster [7]

Die Identifikation als Teilchenstrahlung

- Große Durchdringtiefe der "kosmischen Strahlung" \Rightarrow Identifikation als γ -Strahlung
- Kolhörster: Absorptionskoeffizient der kosmischen Strahlung in Luft um Faktor 4,4 kleiner als Koeffizient von bekannten radioaktiven Quellen
 - Härteres Spektrum?
- Andere experimentelle Methoden lösten Elektrometer ab:
 - Nebelkammer (1911, Wilson)
 - Geiger-Müller-Zählrohr (1928, Geiger, Müller), Möglichkeit von Koinzidenzmessungen!

Die Identifikation als Teilchenstrahlung - Bothe und Kolhörster

- **1929:** Koinzidenzmessungen von Bothe und Kolhörster mit Geiger-Müller-Zählrohren
- Ziel: Nachweis, dass kosmische Strahlung aus γ -Strahlung besteht
- Idee: γ -Strahlung lösen Elektronen aus, welche beide Koinzidenzen durchqueren
- Beobachtung des Einflusses eines Absorbers auf die Koinzidenzen

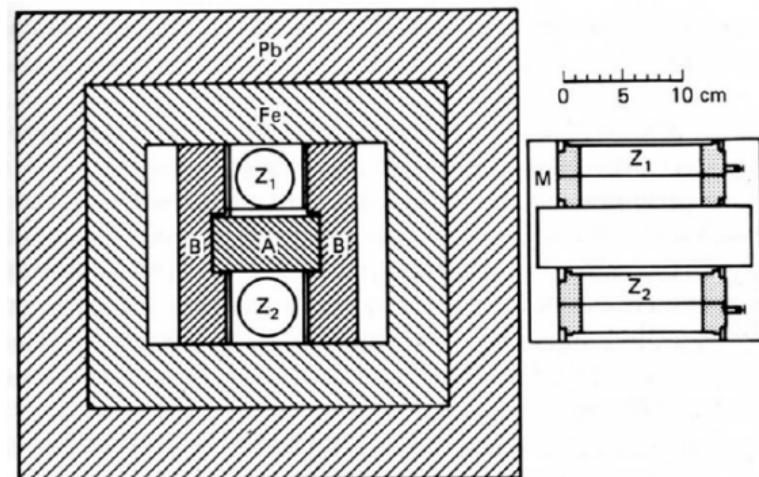


Abbildung: Experiment von Bothe und Kolhörster [8]

Die Identifikation als Teilchenstrahlung - Bothe und Kolhörster

- Mit 4 cm Goldbarren konnten entgegen der Erwartung nur 25 % der Koinzidenzen entfernt werden
- Die detektierten Teilchen sind so durchdringend wie die kosmische Strahlung selbst
- Keine γ -Strahlung sondern geladene Teilchen!

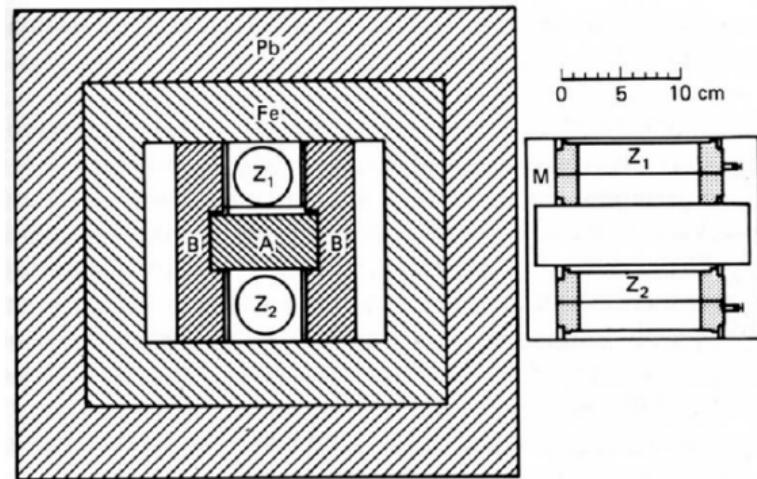


Abbildung: Experiment von Bothe und Kolhörster [8]

Die Identifikation als Teilchenstrahlung - Breitengradeffekt

- **1919:** Kolhörster: Erster Vorschlag, die Breitengradabhängigkeit der Ionisationsrate zu untersuchen
- **1932, 1933:** Nachweis der Abhängigkeit der Intensität der kosmischen Strahlung vom Breitengrad
 - Intensität folgt dem geomagnetischen Feld
 - Eindeutiger Nachweis, dass kosmische Strahlung aus geladenen Teilchen besteht

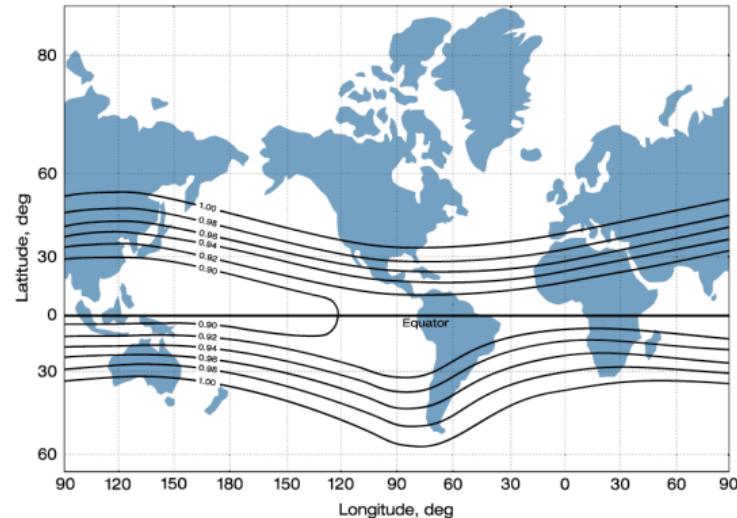


Abbildung: Breitengradabhängigkeit der kosmischen Strahlung [9]

Teilchenphysikalische Entdeckungen - Positron

■ **1931:** Carl Anderson: Untersuchung der kosmischen Strahlung über eine Nebelkammer mit starkem Magnetfeld

→ Entdeckung von positiv geladenen Teilchen

■ **August 1932:** Weitere Untersuchungen mit 6 mm Bleiplatte (Flugrichtung)

→ Eindeutiger Nachweis des Positrons

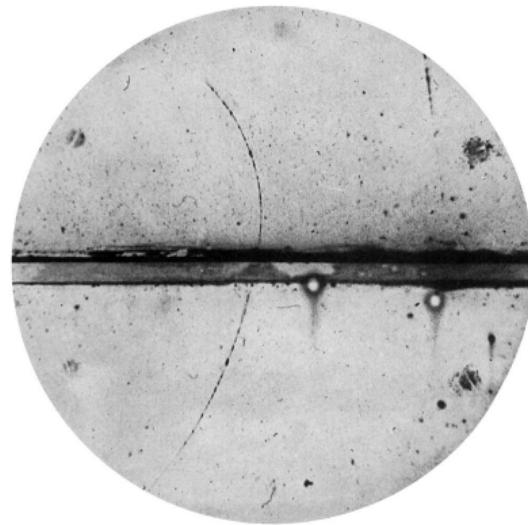


Abbildung: Nebelkammeraufnahme des ersten entdeckten Positrons, publiziert 1933 [10]

Teilchenphysikalische Entdeckungen - Myon und Pion

- **1934:** Anderson: Entdeckung von Teilchenspuren in Nebelkammern mit deutlich geringerer Absorption als Elektronen aber kleinerer Masse als Protonen
- **1937:** Neddermeyer, Anderson: Nach genaueren Untersuchungen Bekanntgabe der Entdeckung eines neuen Teilchens (Myon)
- **1947:** Perkins, erster Nachweis von Pionen in der Höhenstrahlung (Yukawa-Teilchen)
- **1948:** Bestimmung der Lebensdauer der geladenen Pionen, erstmals über Beschleunigerexperiment

Entdeckung Teilchenschauer

- 1933: Experiment von Rossi
- Nutzung von drei in Koinzidenz geschalteten Geiger-Müller-Zählern
- Absorber oberhalb von Experiment
- Ergebnis: Bei Verdickung des Absorbers zunächst Vergrößerung der Koinzidenzrate, erst danach Abnahme
- Interpretation Rossi: Erzeugung von Sekundärteilchen durch kosmische Strahlung, wenn diese den Absorber treffen

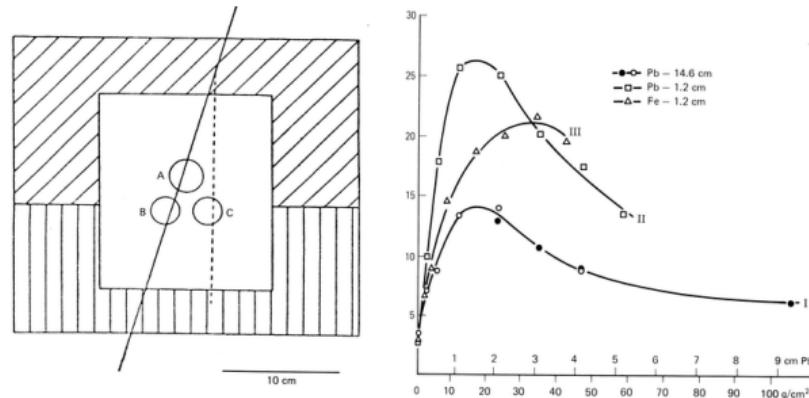


Abbildung: Experiment von Rossi (1933) zur Entdeckung von Teilchenschauern [9]

Entdeckung Teilchenschauer

- **1938:** Schmeiser und Bothe vermuten, dass Rossis Beobachtung auch "Luftschauer" impliziert
- **1938:** Schmeiser, Kolhörster: Messung von Koinzidenzen von zwei Geigerzählern in Abhängigkeit ihres Abstandes
- **1939:** Auger: Ebenfalls abstandsabhängige Messung der Koinzidenzen
- ⇒ Schätzung der Primärenergie durch Auger auf 10^{15} eV!

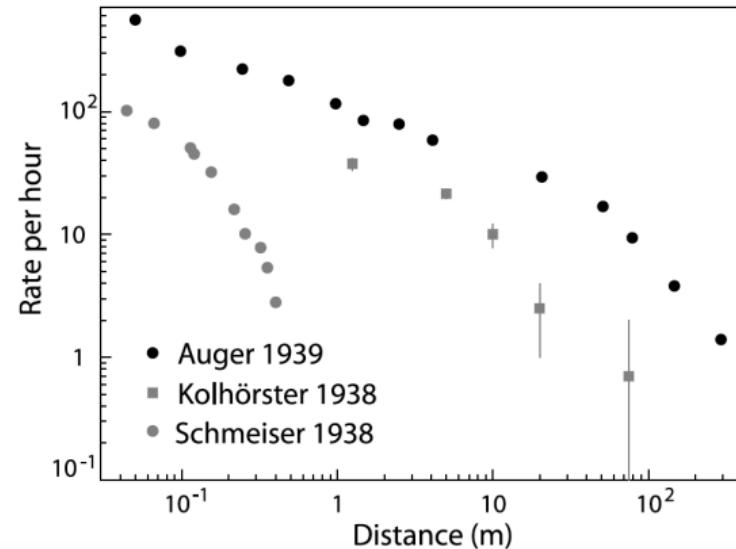


Abbildung: Experiment von Rossi (1933) zur Entdeckung von Teilchenschauern [9]

Erste Schauerexperimente

- Durchführung erster Beobachtungen unter Nutzung von Geigerzählern
- Experimente der Größenordnung $d \approx 10$ m zur Untersuchung von Primärteilchenenergien 10^{14} eV bis 10^{16} eV
- **≈ 1950:** Entwicklung von Szintillatoren ermöglichen, zusammen mit Photomultipliern, Nutzung zur Schauerdetektion
- **1954 bis 1957:** "Agassiz Astronomical Station", Harvard
- **1959:** Entdeckung des "Knies" im kosmischen Spektrum (10^{15} eV) in Russland

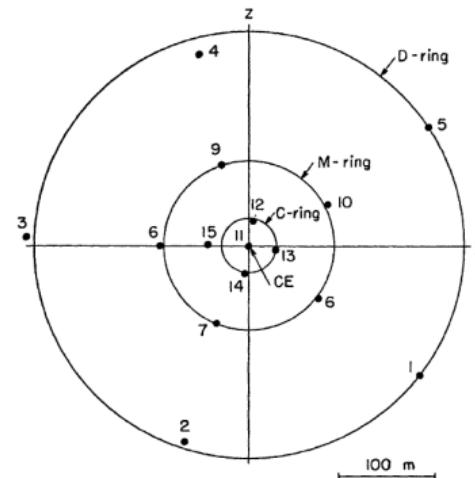


Abbildung: Schematische Anordnung des Agassiz Arrays, Nutzung von 15 Szintillatoren [9]

- **1958:** Porter: Langfristige Unterdrückung des bakteriellen Wachstums im Wasser
- Ermöglichte die Nutzung stabiler Wasser-Čerenkov-Detektoren
- Prinzipieller Aufbau der Detektoren bis heute identisch

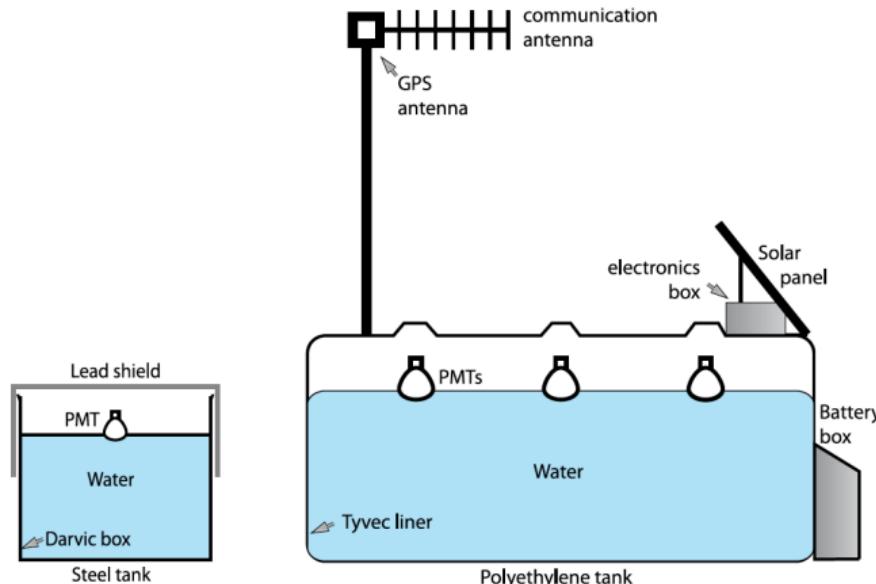


Abbildung: Links: Wasser-Čerenkov-Detektoren nach Porter. Rechts: Prototyp der Wasser-Čerenkov-Detektoren von Pierre Auger [9].

- Große Fortschritte beim Verständnis von Luftschauern durch die Arbeitsgruppe rund um Bruno Rossi am MIT
- Entwicklung neuer Analysemethoden
- **1959:** Bau des Volcano Ranch Arrays (New Mexico) durch John Linsley (MIT)
- Erstes (von 7) erbauten Arrays mit einer Fläche von mehr als 1 km^2
- 19 Plastiksintillatoren (je $3,3 \text{ m}^2$) mit PMT's
- Erste Messung von Ereignissen über 10^{18} eV
- **1963:** Erste Hinweise auf den "Ankle" bei 10^{18} eV



Abbildung: John Linsey am Volcano Ranch Experiment auf der Suche nach Klapperschlangen [11]

Entdeckung des CMB

- **1965:** Entdeckung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes (Penzias, Wilson)
- **1966:** Hinweis auf eine mögliche Abschwächung des Spektrums durch Wechselwirkung von Protonen mit CMB-Photonen (Greisen, Zatsepin, Kuzmin → GZK-Effekt)
- Planung für mehrere riesige Arrays begann bereits vor der CMB-Entdeckung
- Trotzdem sollte keines der zu diesen Zeitpunkt geplanten Arrays groß genug sein um den Effekt des GZK-Cutoffs eindeutig zu bestätigen oder zu widerlegen

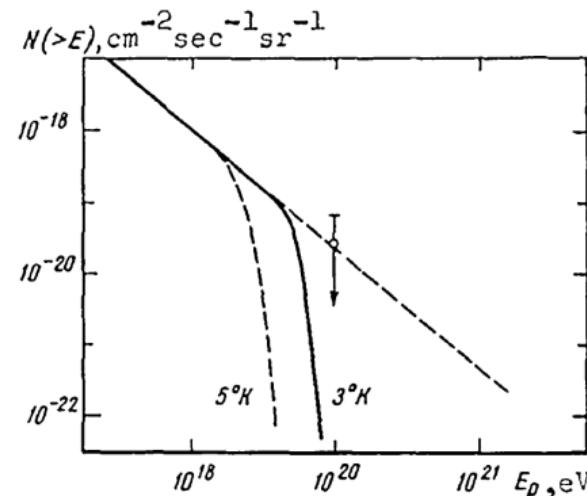


Abbildung: Vorhersage des GZK-Cutoffs nach Zatsepin und Kuzmin (1966) [9]

Schauerexperimente mit Flächen über 1 km²

- **1964 bis 1987:** Haverah Park Experiment, Großbritannien (12 km²)
 - Wasser-Čerenkov-Detektoren und Myondetektoren
- **1970 bis heute:** Yakutsk Array, Sibirien (18 km²)
 - Messung Čerenkovlicht in der Luft
- **1968 bis 1979:** The Sydney University Giant Air Shower Recorder (SUGAR) (70 km²)
 - 54 Wasserszintillatoren unter der Erde
 - Erstmals wurden die einzelnen Messstationen autonom betrieben!
 - Erste Messungen eines Arrays dieser Größe in der südlichen Hemisphäre
- **1990 bis 2004:** Akeno Giant Air Shower Array (AGASA), Japan (100 km²)
 - 111 Szintillatordetektoren
 - Messung von 11 Ereignissen über 10^{20} eV (kein Anzeichen einer Cutoffs)

Nutzung der Fluoreszenz zur Schauerdetektion

- **1969:** Erstmals erfolgreiche Detektion von Luftschauern durch Fluoreszenzlicht in der Luft in Japan
- **≈ 1970** Beginn des Baus eines großen Luft-Fluoreszenz-Detektors ("Fly's Eye")
- 67 "Augen", je 1,5 m Spiegel zur Überwachung eines $5^\circ \times 5^\circ$ Teil des Himmels
- **1986:** Betriebsbeginn von "Fly's Eye II", 3,4 km entfernt um stereoskopische Aufnahmen durchführen zu können
- **1991:** Aufnahme eines Teilchens mit einer Energie von $3,2 \cdot 10^{20}$ eV (OMG-Teilchen)

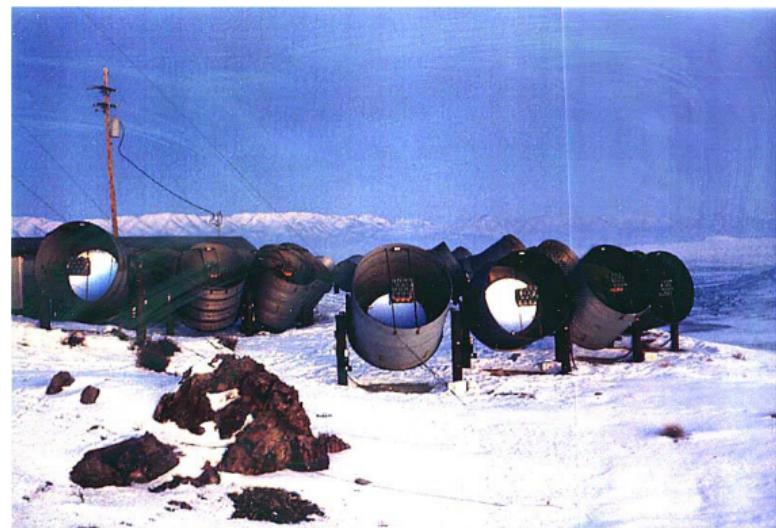


Abbildung: Detektor "Fly's Eye" in der Wüste von Utah [12]

Nutzung der Fluoreszenz zur Schauerdetektion

- **1997 bis 2006:** Nachfolger von Fly's Eye: HiRes Detektor
 - Verbesserte Auflösung
 - Deutliche Anzeichen für einen GZK-Cutoff im Energiespektrum



Abbildung: HiRes Detektor in der Wüste von Utah [13]

Cygnus X-3 und seine Konsequenzen

- Cygnus X-3: Röntgendifoppelsternsystem
- Entfernung 11 kpc, Periodizität 4,8 h
- **1983:** Haverah Park und Kiel Array detektieren hochenergetische Photonen ($2 \cdot 10^{15}$ eV) von Cygnus X-3
- Viele neue Experimente zur Untersuchung von Cygnus X-3 und ähnlichen Objekten
- CASA-MIA, EAS-TOP, KASCADE, u.v.m.



Abbildung: Luftaufnahme von CASA-MIA [14]

KASCADE-Grande

- KArlsruhe Shower Core and Array DEtector,
Datennahme ab 1996
- Jede Station mit e/γ -Detektor und myonischen
Detektor
- Zentraldetektor: 320 m² Kalorimeter
- 2003: Erweiterung zu KASCADE-Grande
- Beobachtung eines "Knies" bei $8 \cdot 10^{16}$ eV für
schwerere Komponenten der kosmischen
Strahlung
- Ursprung von CORSICA



Abbildung: Die 252 Detektorstationen von KASCADE [15]

Telescope Array

- Zusammenschluss aus Mitgliedern von AGASA und HiRes
- **2008:** Start der Datennahme von **Telescope Array**
- Standort: Wüste von Utah
- 570 Szintillatordetektoren am Boden, Fläche von 730 km²
- 38 Fluoreszenzteleskope



Abbildung: Fluoreszenzteleskop am TA [16]

Pierre-Auger-Observatorium

- Idee zum Bau eines 1000 km²-Arrays bereits in den 80er Jahren
- Cronin, 1991: "You're not nearly ambitious enough: We should build 5000 km²!"
- Cronin und Alan Watson: Kollaboration zum Bau von zwei identischen 3000 km² Detektoren
- Giant Air-Shower Project (GAP), später Pierre Auger Observatory
- **2004:** Datennahme mit 150 Wasser-Čerenkov-Detektoren und 6 Fluoreszenz-Teleskopen in Argentinien
- **2008:** Fertigstellung mit 1600 Bodenstationen und 24 Teleskopen



Abbildung: Aufnahme einer Bodenstation des Pierre-Auger-Observatoriums [17]

Ergebnisse

- Eindeutige Bestätigung der Flussunterdrückung für hohe Energien
- **2007:** Hinweise auf Korrelation von hochenergetischen Events mit AGN's
- **2015:** Auswertung weiterer Daten kann diese Ergebnisse nicht bestätigen
- **2017:** Hinweise, dass hochenergetische Events extraterrestrischen Ursprungs sind
- Hinweise auf Veränderung der Massenzusammensetzung mit der Primärteilchenenergie

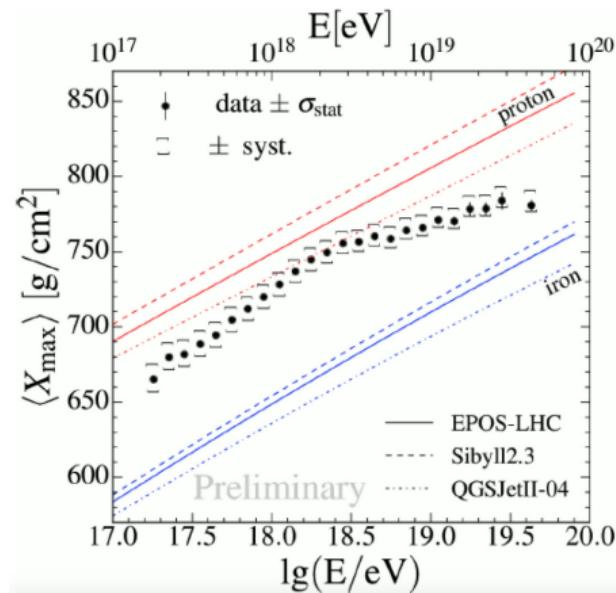


Abbildung: X_{\max} in Abhängigkeit der Energie [18]

Cosmic Ray Spektrum

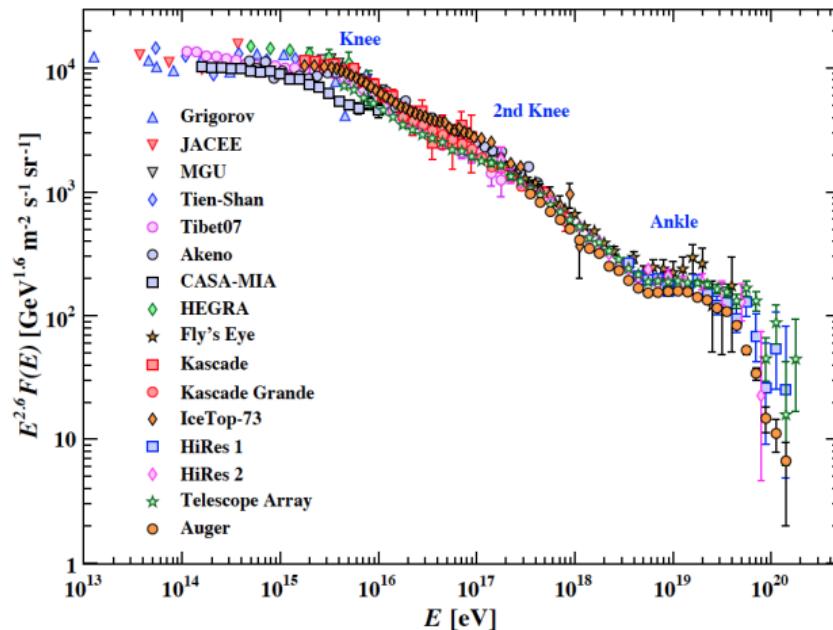


Abbildung: Aktuelles Energiespektrum der kosmischen Strahlung, PDG [19]

Pierre-Auger-Observatorium - Erweiterungen

- Auger Engineering Radio Array (AERA)
 - Messung von durch Luftschauder verursachte Radiopulse
 - 2010 bereits 24 Radioantennen, heute 124 Antennen
- AugerPrime
 - Ziel: Besseres Verständnis der Massenzusammensetzung bei höheren Energien
 - Plastiksintillatoren auf jeder Bodenstation
 - Verbesserte Elektronik
 - Installation von 61 Myondetektoren ("AMIGA project")

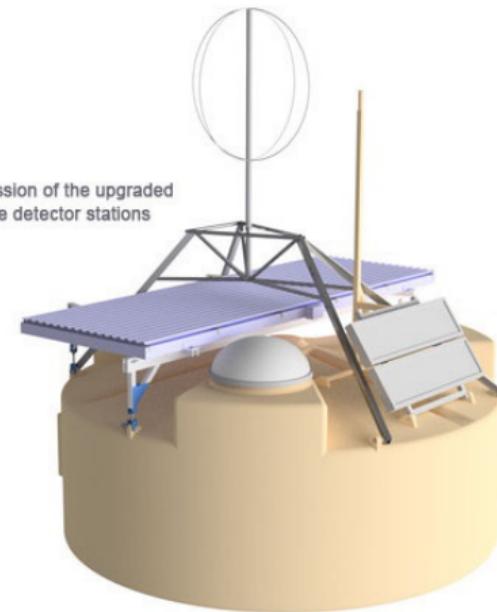


Abbildung: Geplante Bodenstation nach dem Upgrade [20]

Quellen I

- [1] *The bones of a hand with a ring on one finger, viewed through x-ray. Photoprint from radiograph by W.K. Röntgen, 1895.* URL: <https://wellcomecollection.org/works/wjc8ejn2>.
- [2] *Wikimedia Commons. Photographic plate made by Henri Becquerel showing effects of exposure to radioactivity.* 2015. URL: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Becquerel_plate.jpg&oldid=182024382.
- [3] *Portrait of Max Planck.* URL: <https://library.si.edu/image-gallery/73553>.
- [4] *Rudolf G. A. Fricke und Kristian Schlegel.* "Julius Elster and Hans Geitel – Dioscuri of physics and pioneer investigators in atmospheric electricity". In: *History of Geo- and Space Sciences* 8 (Jan. 2017), S. 2. DOI: [10.5194/hgss-8-1-2017](https://doi.org/10.5194/hgss-8-1-2017).
- [5] *Viktor Hess im Jahr 1915.* URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:X-HESS-2140.jpg>.
- [6] *V. F. Hess Society, Schloss Pöllau.* URL: https://www.br.de/themen/wissen/victor-hess-kosmische-strahlung100~-image-1_-424a0b220e98478431a9be2b537569a28f3d7ec0.html.
- [7] *Victor Hess.* "On the Observations of the Penetrating Radiation during Seven Balloon Flights". In: (2018). arXiv: [1808.02927 \[physics.hist-ph\]](https://arxiv.org/abs/1808.02927).

Quellen II

- [8] *Walther Bothe and Bruno Rossi: the birth and development of coincidence methods in cosmic-ray physics - Scientific Figure on ResearchGate.* URL:
https://www.researchgate.net/figure/The-experiment-of-Bothe-and-Kolhoerster-in-Ref-48-Coincidences-between-counters-Z-1_fig1_51927779.
- [9] Wolfgang Rhode Brigitte Falkenburg. *From Ultra Rays to Astroparticles: A Historical Introduction to Astroparticle Physics.* Springer, 2012. URL:
<https://www.amazon.com/Ultra-Rays-Astroparticles-Introduction-Astroparticle-ebook/dp/B00BLS4UEC?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=B00BLS4UEC>.
- [10] via Wikimedia Commons Carl D. Anderson. URL:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PositronDiscovery.jpg>.
- [11] RAZELE COSMICE ȘI NUCLEELE GALACTICE ACTIVE. URL:
<http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/prezentare.pdf>.
- [12] *The Particle That Broke a Cosmic Speed Limit.* URL: <https://www.quantamagazine.org/ultrahigh-energy-cosmic-rays-traced-to-hotspot-20150514/>.

Quellen III

- [13] *High Resolution Fly's Eye (HiRes) Project.* URL:
<http://www.physics.adelaide.edu.au/astrophysics/hires/index.html>.
- [14] *Ultra High Energy Cosmic Ray Research with CASA-MIA.* URL:
<http://www.astro.ucla.edu/~rene/talks/Cronin-Fest-Ong-Writeup.pdf>.
- [15] *KASCADE - Grande.* URL: <https://web.ikp.kit.edu/KASCADE/welcome.html>.
- [16] *one of the FD sites for the Telescope Array Project.* URL:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BRM-FD-open.jpg>.
- [17] *Back view of a surface detector station.* URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Observatorio_Pierre_Auger_Tanque_Rayos_C%C3%B3smicos.jpg
- [18] Mario Buscemi. "The Pierre Auger Observatory: latest results and future perspectives". In: *EPJ Web Conf.* 182 (2018), S. 02023. DOI: [10.1051/epjconf/201818202023](https://doi.org/10.1051/epjconf/201818202023).
- [19] M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), *Phys. Rev. D* 98, 030001 (2018). URL:
pdg.lbl.gov/2018/figures/cosmicray/figures/cr_AllParticle_17.eps.
- [20] *AugerPrime.* URL: <https://www.auger.org/index.php/observatory/augerprime>.