

Radiodetektion von höchstenergetischen Teilchen

Vortrag von Johannes Köhler

01. Februar 2010

Scheinseminar zur Astro- und Teilchenphysik im WS 09/10

- 1 Eigenschaften der Kosmischen Strahlung
 - Entdeckung der Kosmischen Strahlung
 - Zusammensetzung der Kosmischen Strahlung
 - Spektrum der Kosmischen Strahlung
 - „Luftschauer“ in der Erdatmosphäre
- 2 Wichtige elektrodynamische Effekte
 - Cherenkov-Effekt
 - Synchrotron-Strahlung
- 3 Radiodetektion höchstenergetischer Teilchen
 - Übersicht über Experimente
 - LOPES/LOFAR
 - Radio@Auger
 - ANITA
- 4 Zusammenfassung und Ausblick

Entdeckung der Kosmischen Strahlung

durch Viktor Franz Hess (österreich. Physiker, 1883-1964)



Abbildung: V. Hess im
Leuchtgasballon [1]

- **Effekt:** Entladung eines gut isolierten Elektrometers an Luft
⇒ vermutete Ursache: **Luftionisation durch natürliche Radioaktivität**
- **Flug am 7.8.1912 im Leuchtgasballon:** Entladungsgeschwindigkeit zunächst mit steigender Flughöhe abnehmend, dann wieder zunehmend
⇒ **These widerlegt, stattdessen: Kosmische Strahlung als Ursache!**

Kosmische Strahlung („Cosmic Rays“, CR):

Teilchenstrahlung!

Zusammensetzung der *primären CR* (vor Auftreffen auf die Erdatmosphäre):

- **geladene Komponente:** etwa 85% Protonen, 12% α -Teilchen, 2% e^- , ca. 1% Elemente mit $Z \geq 3$
- **elektr. neutrale Komponente:** Neutrinos, Photonen (γ -Strahlung, Röntgenstrahlung)

großes Problem:

Intensität der Strahlung nimmt mit steigender Energie ab!

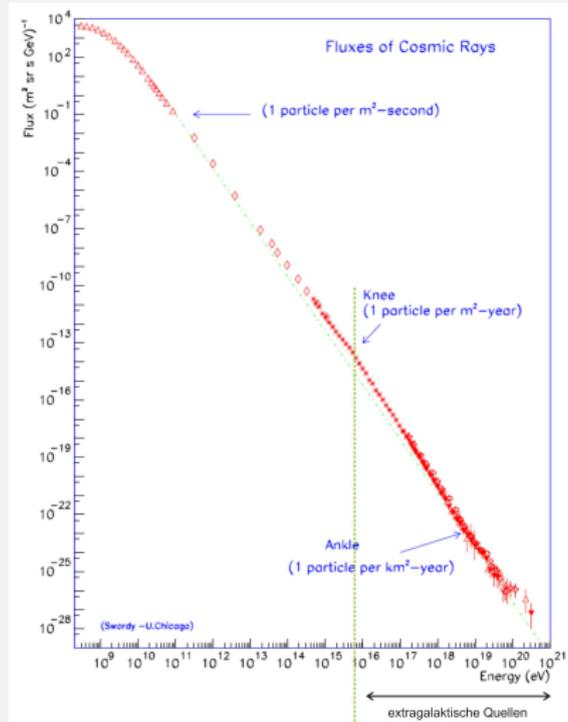
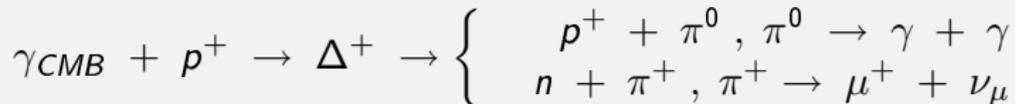


Abbildung: Fluss der geladenen CR-Komponente vs. Energie

Der Greisen-Zatsepin-Kuzmin-Effekt (GZK-Effekt)

- **1966:** Vorhersage einer Energiegrenze im Spektrum der CR-Protonen („GZK-Cutoff“)
- **Grund:** Δ -Anregung der p^+ durch WW mit den Photonen der Kosmischen Hintergrundstrahlung



- **Berechnung der unteren Energiegrenze $E_{p/th}$:**
mit Viererimpulserhaltung!

Viererimpuls: $q = \begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix}$; Betragsquadrat: $q^2 = E^2 - \vec{p}^2 = m^2$

\Rightarrow für Stoß: $E_{p/th} = \frac{m_\pi^2 + 2m_\pi m_p}{4E_\gamma}$

Wiensches Verschiebungsgesetz $T_{CMB} = 2,7K$: $E_\gamma \approx 1,1 \text{ meV}$

$$\Rightarrow \boxed{E_{p/th} \approx 6 \cdot 10^{19} \text{ eV}}$$

Auswirkungen des GZK-Effekts

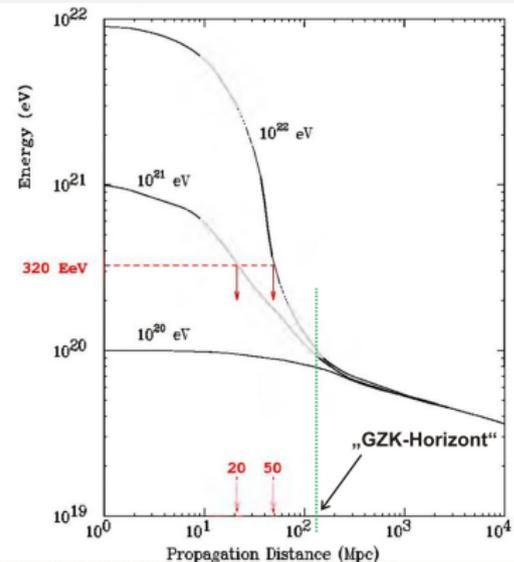
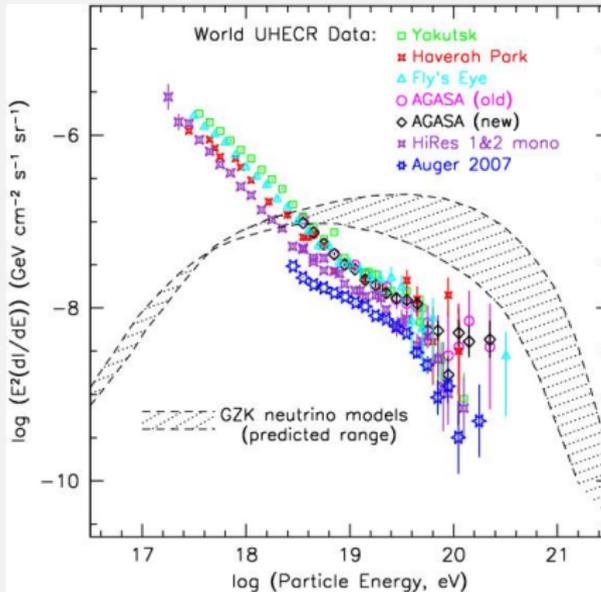


Abbildung: Teilchenfluss gewichtet mit E^2 vs. Energie, verschiedene Experimente [2]

Abbildung: mittlere Energie von registrierten UHE-Protonen vs. Flugstrecke [3]

erhöhter Neutrinofluss durch CR bei höchsten Energien erwartet!

sekundäre CR: „Luftschauer“ in der Erdatmosphäre

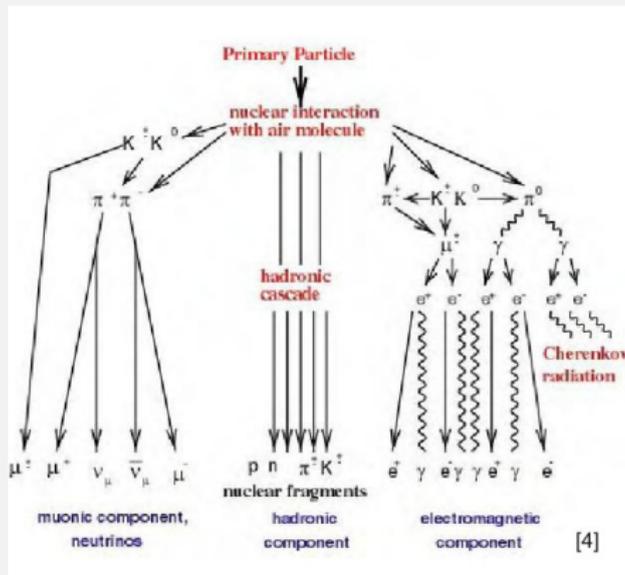
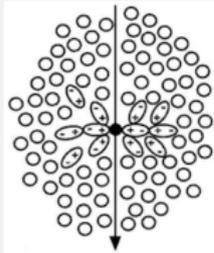


Abbildung: Auslösen einer Kaskade („Luftschauer“) an Sekundärteilchen [4]

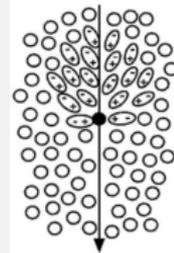
Der Cherenkov-Effekt

Situation: e^- (oder e^+) durchfliegt Dielektrikum mit $\vec{v} = c \vec{n}st$



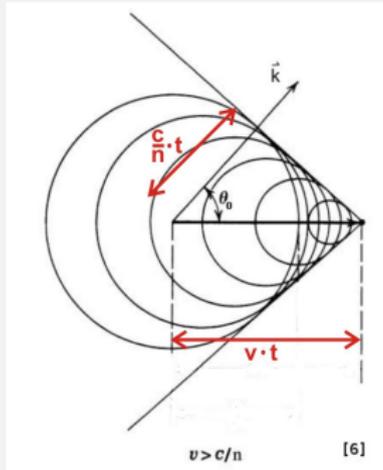
Fall 1: $v_{e^-} < v_{ph}[5]$

- *symmetrisches* Polarisationsfeld, schirmt Ladung nach außen hin ab
- in großer Entfernung: *verschwindende* resultierende Abstrahlung der einzelnen Dipole



Fall 2: $v_{e^-} > v_{ph}[5]$

- Polarisation vor e^- nicht mehr vorhanden
- resultierendes Dipolmoment $\parallel \vec{v}$ (zeitl. veränderlich) $\neq 0$
 \Rightarrow el-mag. Impulse



Abstrahlwinkel: $\cos(\theta_0) = \frac{c}{n v}$

dabei: k : Cherenkov-Wellenzahl,
 $\theta_0 = \angle(\vec{k}, \vec{v})$, n : Brechungsindex

Problem **rotationssymmetrisch** um
 \vec{v} -Achse \Rightarrow Strahlungskegel

Spektrum:
$$\frac{d^2 N}{dx \cdot d\lambda} = \frac{2\pi^2 (Z \cdot e)^2}{hc \lambda^2} \cdot \left(1 - \frac{c^2}{v^2 n(\lambda)^2} \right)$$

$\left(\frac{d^2 N}{dx \cdot d\lambda} \right)$: Anzahl der emitt. Photonen pro $d\lambda$ und
 Pfadlänge dx des Teilchens, $Z \cdot e$: Ladung)

Cherenkov-Effekt →

Der Askaryan-Effekt

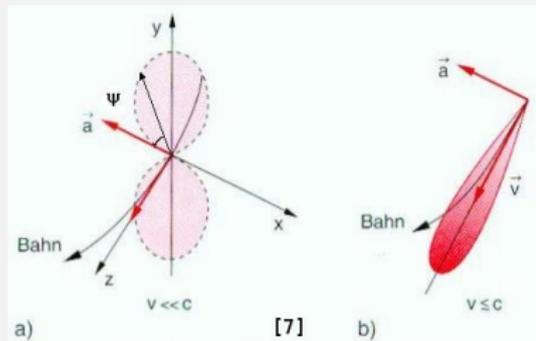
- **1962:** theoretische Vorhersage kohärenter el-mag. Strahlung bei Teilchenkaskaden im dichten Dielektrikum, z.B. Eis ⇒ dabei Erzeugung von e^+ und e^-
- **im weiteren Verlauf:** Positronenvernichtung ⇒ etwa 20% Überschuss relativistischer e^- (Anordnung: Scheibe) ⇒ **Emission von Cherenkov-Strahlung!**
- für $\lambda >$ Dicke d der Scheibe: kohärente Überlagerung der Cherenkov-Strahlung
- für Eis: $d \approx 10\text{cm} \Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda_{\text{grenz}}} = 3\text{GHz}$

Synchrotron-Strahlung

- **Maxwell:** beschleunigte Ladungen strahlen el-mag. Wellen ab
- **Bewegung von Ladungen im (hom.) B-Feld:**
⇒ Auftreten einer Radialbeschleunigungskomponente!
- **Vereinfachung:** Betrachtung einer Kreisbewegung
⇒ nichtrel.: diskretes Spektrum mit $\omega = \frac{qB}{m_0}$
- relativistisches Teilchen ⇒ sehr kurzer Puls
⇒ nach Fourier-Reziprozität: breites Spektrum

Fall a : $v \ll c$

- analog zum el. *Dipol*:
Abstrahlung senkrecht zur Beschleunigung \vec{a}
- Winkelverteilung $\propto \sin^2(\psi)$
(rotationssymmetrisch um \vec{a} -Achse)



Fall b : $v \lesssim c$

- Lorenz-Trafo der Dipol-Emission von SP- ins Laborsystem

- **Abschätzung:**

Abstrahlung $\perp \vec{a}$

\Rightarrow mittlerer Winkel

$$\theta = \sphericalangle(\vec{k}, \vec{v})$$

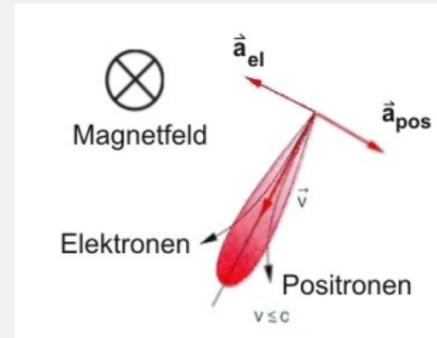
(Öffnungshalbwinkel des Strahlungskegels):

$$\tan(\theta) = \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} =$$

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{m}{E}$$

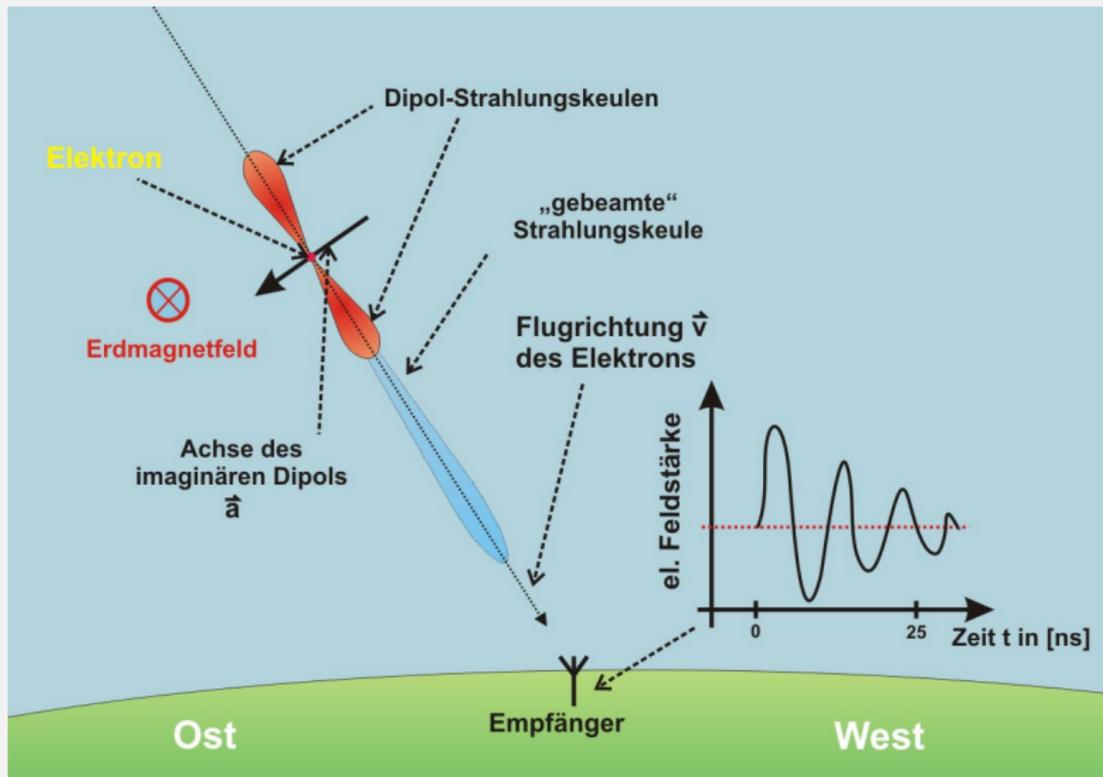
Der Geo-Synchrotron-Effekt

- Trennung der relativistischen e^- - e^+ -Paare im Erdmagnetfeld durch Lorentzkraft
- Summation der Abstrahlung beider Teilchenkomponenten
 $F_L(e^-) = -F_L(e^+)$
- experimentell in guter Übereinstimmung mit Elektrodynamik der Synchrotron-Strahlung:
Pulshöhe ϵ_ν (elektr. Feldstärke) bei Einbeziehen der Schauer-Geometrie



$$\epsilon_\nu = (11 \pm 1, 0) \left((1, 16 \pm 0, 025) - \cos \alpha \right) \cos(\theta) \cdot \exp \left(-\frac{R}{(236 \pm 81)m} \right) \cdot \left(\frac{E_p}{10^{17} \text{ eV}} \right)^{0,95 \pm 0,04} \frac{\mu \text{ V}}{m \cdot \text{ MHz}}$$

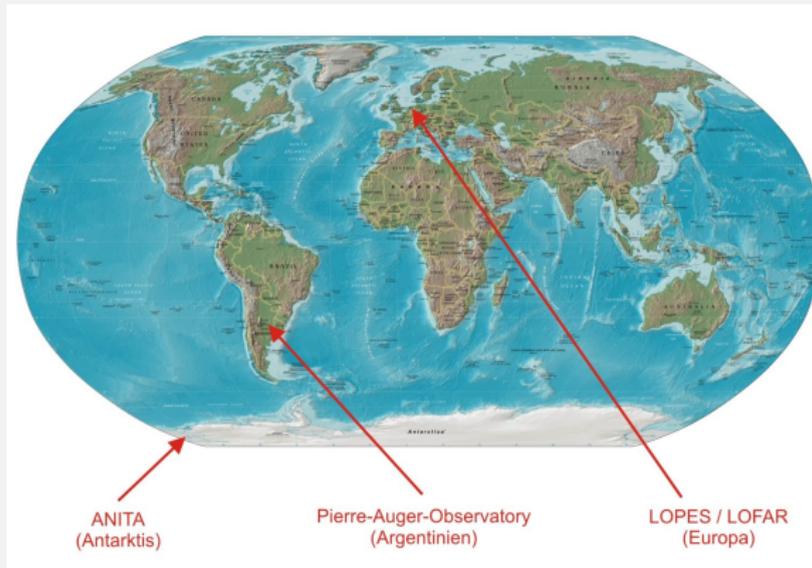
- Bevorzugung der Ost-West- gg. Nord-Süd-Polarisation



$$\Delta t \approx 25 \text{ ns} \Rightarrow \text{mit FT: } \Delta \nu = 40 \text{ MHz}$$

Übersicht über vorgestellte Experimente

- **LOPES / LOFAR** → Geosynchrotron-Effekt
- **Radio@Auger** → Geosynchrotron-Effekt
- **ANITA** → Askaryan-Effekt



LOPES: a LOFAR Prototype Station (seit 2003)

Standort:

Gelände des FZ Karlsruhe, bei KASCADE (Grande):



Abbildung: Anordnung des KASCADE-Arrays

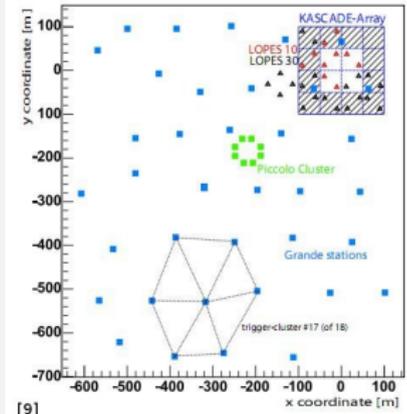


Abbildung: 1 von 252
KASCADE-
Detektorstationen

Station: Szintillationsdetektor für e^-/γ , μ -Detektor

Aufbau von LOPES:

- **Antennen:** dual polarisierte invertierte V-förmige Dipole (zunächst nur Ost-West-Polarisation)
- Frequenzbereich: 40-80 MHz
- **zunächst:** LOPES10 \rightarrow 10 Antennen innerhalb von KASCADE
- **danach:** LOPES30 \rightarrow 20 zusätzliche Antennen innerhalb von KASCADE Grande
- Triggern der Events mit KASCADE



Bedingungen für Auslösen eines LOPES-Events:

- Schauerrekonstruktion mit KASCADE erfolgreich, Kern innerhalb von KASCADE Grande
- Zenithwinkel $\theta < 50^\circ$, $E_p \geq 4 \cdot 10^{16} \text{ eV}$

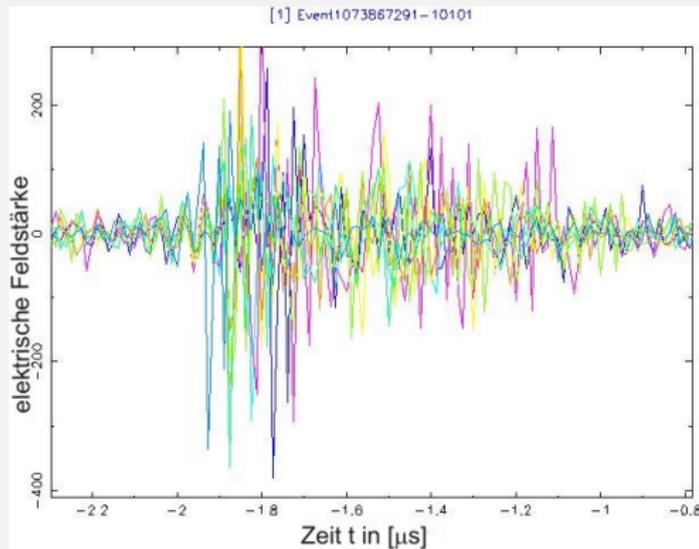


Abbildung: Beispiel-Event - Feldstärken der einzelnen Antennen (versch. Farben) vs. Zeit [10]

Vorgehen bei Datenanalyse eines Events:

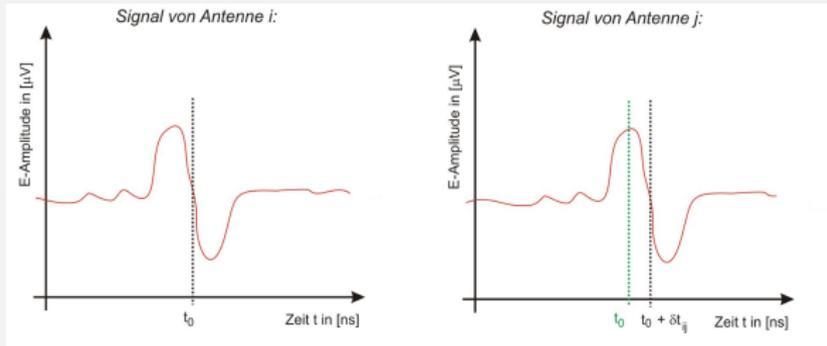
- Verzögerungskorrektur um Signal-Laufzeiten in Empfängern
- Verstärkungskorrektur für alle durchlaufenen Komponenten
- Herausfiltern von schmalbandigen Störungen
- Selektion der Antennen mit signifikanten Signalstärken
- **Digitales „Ausrichten“** des Arrays \Rightarrow mittels Software!
 \rightarrow **Einführen von Laufzeitdifferenzen** δt_{ij} der gemessenen

Amplituden von Antennen i & j

$$\text{Kreuzkorrelation } R_{ij} = \frac{\sum_m (\epsilon_i(t_m) - \bar{\epsilon}_i)(\epsilon_j(t_m + \delta t_{ij}) - \bar{\epsilon}_j)}{\sqrt{\sum_m (\epsilon_i(t_m) - \bar{\epsilon}_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_m (\epsilon_j(t_m + \delta t_{ij}) - \bar{\epsilon}_j)^2}}$$

\rightarrow Maximierung von R , mit Werten für α und θ nach

KASCADE $\Rightarrow \delta t_{ij/opt}$



- Berechnung der Wegdifferenzen $c \cdot \delta t_{ij}$ der Signale
- ⇒ **rekonstruierte Antennenkeule** in Schauerrichtung

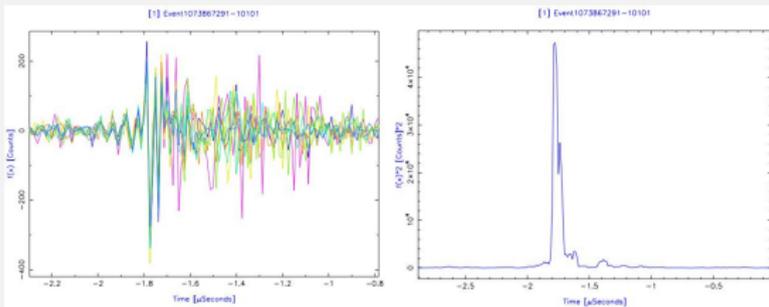
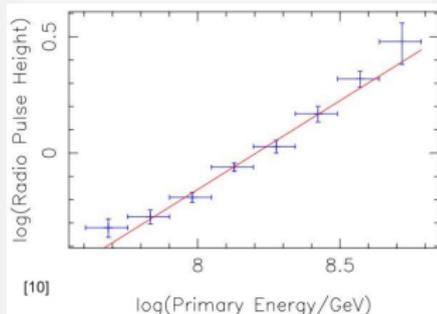
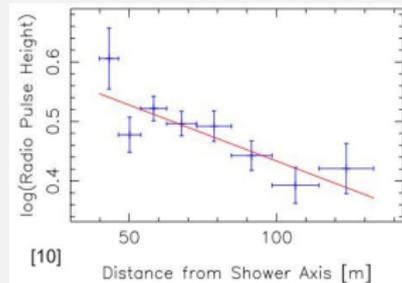
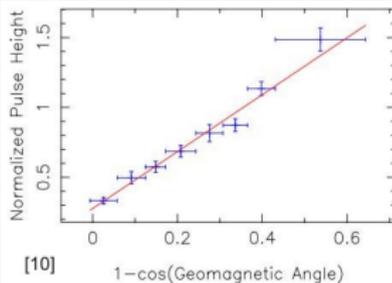


Abbildung: Beispiel-Event - links: Feldstärke der einzelnen Antennen, rechts: Leistung vs. t [10]

Ergebnisse von LOPES:

- Winkelauflösung der Schauerachse besser als 1°
- Radiopulsdauer ≤ 45 ns
- **außerdem:** Bestätigung des Geosynchrotron-Effekts



$$\epsilon_V \propto \mathbf{ca.}:$$

- $(1 - \cos(\alpha))$
- $\exp\left(-\frac{R}{R_0}\right)$
- $E_P^{0,95}$

Hauptprojekt: Low Frequency Array (im Bau)

Aufbau:

- multi-nationales Array aus > 40 Stationen, dichter Kern in Holland
- im Kern: Szintillator-Array zur Trigger-Kontrolle
- Station: 96 LOPES-Dipole, 10-90MHz (\Rightarrow „**Low Band Array**“)
- zusätzlich: kleineres „**High Band Array**“ aus Antennen mit Frequenzbereich 110-240MHz

Erwartungen / Ziele:

- Haupteinsatzgebiete: Kosmologie, Sonnenerforschung, etc.
 \Rightarrow **sehr vielseitige Nutzung möglich!**
- **damit evtl. möglich:** Messung des Askaryan-Effekts auf dem Mond

Momentaner Status von LOFAR



bisher insgesamt 16 Detektorstationen aufgebaut!

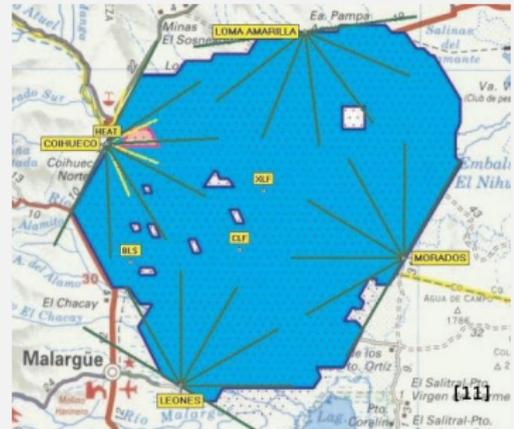
Radio@Auger (seit 2007)

Standort:

- gehört zum Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien
- dort: Array aus 1600 Oberflächen- u. 24 Fluoreszenzdetektoren auf einer Fläche von ca. 3000 km^2

Gründe für Aufbau eines Radio-Arrays:

- **Standort:** kaum besiedelt \Rightarrow wenig Störungen durch künstliche Radioquellen
- **Kombination** der Radiodetektion mit zwei „herkömmlichen“ Methoden



Radiodetektion mit Radio@Auger: 1. Projekt

Aufbau:

- 3 Antennen: Kombination aus LogPer- und LOPES-Antennen, Bandbreite: 30-80MHz
- Abstand untereinander: 100m
- externe Triggerung durch 2 SDs
- **Winkelauflösung:** ca. 5°

⇒ **Messung des Geosynchrotron-Effekts**

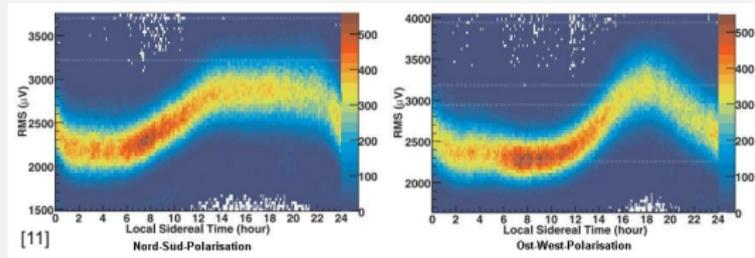


Messergebnisse:

- 27 Koinzidenz-Events mit SD-Array
- Vergleich der Ankunftsrichtungen: im Schnitt Abweichung von $8,8 \pm 1,0^\circ$



- interessanter Effekt: Transit des Galaktischen Zentrums



- Bestätigung des Geosynchrotron-Effekts:

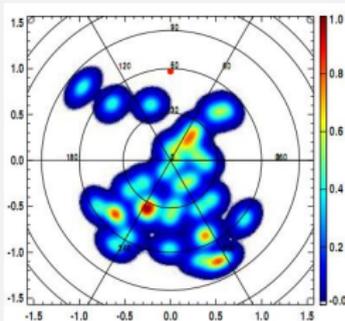


Abbildung: Winkelverteilung der gemessenen Events [11]

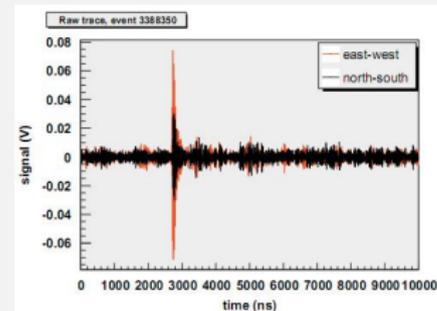
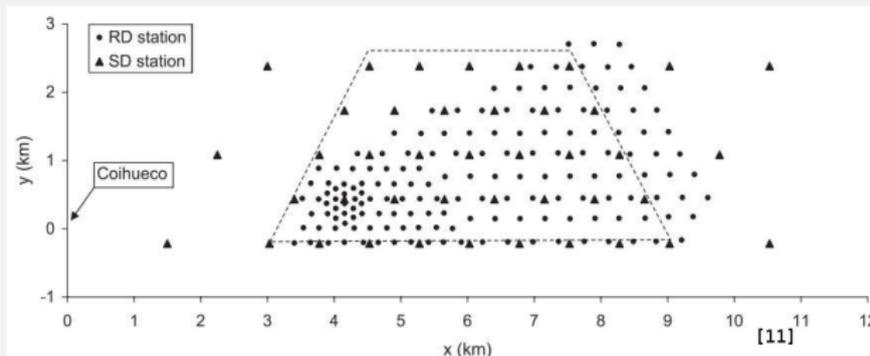


Abbildung: Vergleich der Pulshöhe beider Polarisationsrichtungen [12]

Radiodetektion mit Radio@Auger: 2. Projekt „AERA“ (=Auger Engineering Radio Array, in Planungsphase)

Aufbau:

- Fläche: ca. 20 km^2 , 156 selbst-triggernde Detektorstationen
- Beobachtungs-Bandbreite: von 30MHz bis 80MHz
- Platzierung in Abständen von 150m, 250m und 375m



Erwartungen an die Messungen:

- ca. 5000 Events, davon 1000 mit Energien $> 10^{18}$ eV pro Jahr (laut Simulationen)
- Untersuchung der Abhängigkeit der Schauer-Radioemission von Schauerparametern über Energiespektrum
- Eignung eines großen Arrays zur Bestimmung von E_{prim} , m_{prim} und Ankunftsrichtung des Schauers
- Kenntnisse über Energiespektrum / Massenzusammensetzung beim Übergang von galaktischen zu extragalaktischen Quellen

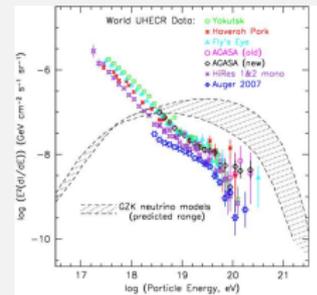
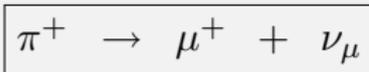
ANITA - Antarctic Impulsive Transient Antenna (2006-2007)

Motivation:

bereits erwähnt:

- GZK-Cutoff begrenzt Spektrum hochenergetischer Protonen
- Ausscheiden der meisten anderen CR-Komponenten für Nachweis

⇒ **Ausweg:** Zerfall der GZK-Pionen



Neutrinos: erfahren keine Ablenkung auf Reise zur Erde

⇒ direkter Rückschluss auf UHECR-Quelle möglich!

⇒ Detektion der entstehenden Neutrinos sinnvoll

Radiodetektion mit ANITA:

- Ausnutzen des **Askaryan-Effekts** im antarktischen Eis
⇒ riesiges Detektorvolumen
(ca. $1,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$)!
- Aufsteigen der Sonde an Ballon, Flughöhe ca. 37km
- gesamte Flugdauer: 35 Tage, im Bereich des Südpols
- an Bord: Array von 32 Hornstrahlern
- Askaryan-Pulsdauer ca. 1ns ⇒ Bandbreite:

$$200\text{MHz} \leq f \leq 1,2\text{GHz}$$



Abbildung:
ANITA-Sonde vor
Start [13]

Radiodetektion mit ANITA

Aufbau der Empfangstechnik:

- hoher Gewinn eines Strahlers sowohl für H-, als auch V-Polarisation
- Öffnungswinkel: ca. 45°
- 2 obere Ebenen mit je 8 Hornstrahlern
- 1 untere Ebene mit 16 Hornstrahlern

Prinzip der Quellenortung:

- **analog zur LOPES:** Laufzeitdifferenzen aus Kreuzkorrelationen bestimmen
- **damit:** Weglängendifferenzen berechnen \Rightarrow Richtung zum Quellort
- **Richtungsauflösung:** $0,3^\circ$ Elevation; $1,0^\circ$ Azimuth

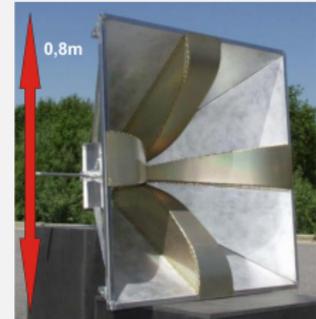


Abbildung: Hornstrahler [17]

ANITA: Auslösen und Auswerten eines Events

Auslösesystem („Trigger“) für Events nötig, weil:

- riesige Datenmengen von ca. $200 \frac{GB}{s}$ beim Digitalisieren (9bit)
- hoher Stromverbrauch der A-D-Wandler

Auswerten eines Events:

- Konvertieren der linearen in zirkulare Polarisation
→ keine Bevorzugung von H- bzw. V-Pol. beim Triggern
- Aufteilung der Bandbreite in 2×4 separate Bänder
→ künstliche Störsignale: meist schmalbandig → kein Auslösen des dreistufigen Triggers!
(Einzelantenne → Antennenpaar auf selber Ebene
→ zwei Antennenpaare im selben Azimuth-Sektor)

- bestimmter Ursprungsort: innerhalb eines Radius von ca. 50km um vorhergehendes Event / Station ⇒ **Verwerfen!**
- Signal horizontal polarisiert: **Verwerfen!**
 → Eis: höhere Transmission für vertikale als für horizontale Signale
 → Reflexion von Quellen oberhalb des Horizonts an Eis: bevorzugt horizontale Polarisation

unter den o.g. Kriterien: **keine Neutrinos nachgewiesen**

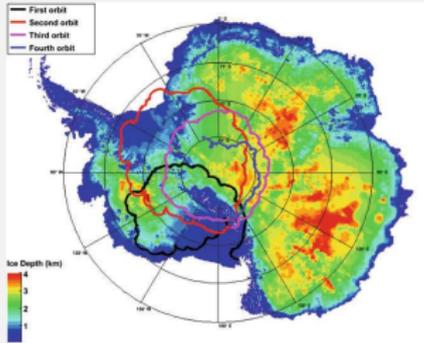


Abbildung: Flugbahn von ANITA [2]

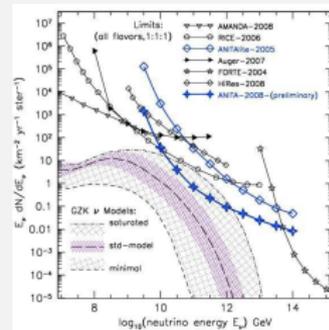


Abbildung: Neutrinofluss gewichtet mit E_ν vs. E_ν [2]

Allgemeine Vor- und Nachteile der Radiodetektion von CRs

Vorteile:

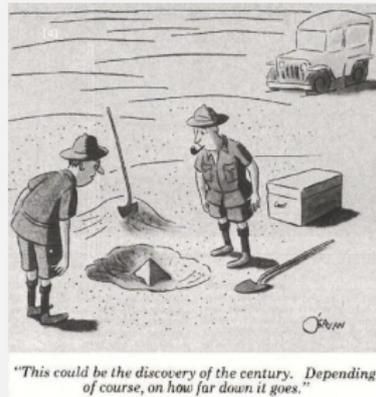
- Radiodetektion von Neutrinos: entweder über Askaryan-Effekt oder induz. Luftschauer (analog zu CRs)
- im Vergleich mit „herkömmlichen“ Methoden: nötige große Detektorflächen (Arrays) **deutlich günstiger** zu erreichen
- in einigen Medien: kaum Dämpfung der Radiowellen
- Radiobeobachtung kaum von Tageszeit / Wetter abhängig
- CR-induzierte Luftschauer: \vec{E} -Amplitude \propto Energie des Primärteilchens

Nachteil:

Störungen im Radiobereich: natürlich oder künstlich erzeugt

Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse

- Geosynchrotron-Effekt: durch LOPES und Radio@Auger bestätigt
- GZK-Cutoff von keinem weiteren Experiment neben AGASA widerlegt
- ANITA: obere Schranke für den Fluss hochenergetischer Neutrinos



Ausblick in die Zukunft

SKA („Square Kilometer Array“, geplant):

- Frequenzbereich: ca. 70MHz-30GHz
- Fläche des Arrays: bis zu $10^6 m^2$
- **Aufgaben:** Erforschung schwarzer Löcher, Sternentstehung etc.
- **Ort:** entweder Südafrika oder West-Australien
- **Stromverbrauch:** 50-80MW (Schätzungen)!

ANITA-2:

- gegenüber ANITA-1 verbessert: 8 zus. Antennen an der Unterseite
- Start im Dezember '08, 30 Tage Flugzeit
- Daten momentan in Auswertung; **Tendenz:** günstigere Flugroute
⇒ größeres beobachtetes Detektorvolumen
- **erwartet:** Faktor 3-8 in der Neutrino-Eventrate

Literaturverzeichnis

- (1) Viktor Hess im Ballon: www.pamela.physik.uni-siegen.de/pamela/bitmaps/viktorhess01.jpg
- (2) Gorham, P. (2008): *Radio Cherenkov searches for cosmogenic ultra high energy neutrinos & ANITA results*, www2.phys.canterbury.ac.nz/~jaa53/presentations/Gorham.pdf
- (3) M.Lemoine, G.Sigl (2002): *Physics and Astrophysics of Ultra High Energy Cosmic Rays*, Springer-Verlag.
- (4) Haungs, A. (2008): *ERASMUS lectures in Bucharest*, www-ik.fzk.de/haungs/AP-haungs-all.pdf
- (5) K.Bethge, G.Walter, B.Wiedemann (2007): *Kernphysik: Eine Einführung*, Springer-Verlag.
- (6) Jackson, J.D. (³1998): *Classical Electrodynamics*, Wiley-Verlag.
- (7) Demtröder, W. (⁴2005): *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*, Springer-Verlag.
- (8) Klages, H.O. (1997): *The Extensive Air Shower Experiment KASCADE - First Results*, www-ik.fzk.de/publication/Durban_highlight/Durban_highlight.ps
- (9) Haungs, A. et al. (2007): *KASCADE-Grande and LOPES Contributions*, www-ik.fzk.de/publication/ICRC_2007/ICRC_07.pdf
- (10) Gruppen, C. et al. (2006): *Radio Detection of Cosmic Rays with LOPES*, www.sbfisica.org.br/bjp/files/v36_1157.pdf
- (11) Huege, T. (2009): *Radio detection of cosmic rays in the Pierre Auger Observatory*, linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900209019172
- (12) Coppens, J. (2009): *Observation of radio signals from air showers at the Pierre Auger Observatory*, linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900209004732
- (13) Haungs, A. (2009): *Radio detection of particles from the cosmos*, linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900209005257
- (14) Wilhelmi, Emma Ona (2001): www.gae.ucm.es/~emma/docs/tesina/node4.html
- (15) Ginzburg, V.L. (1989): *Applications of Electrodynamics in Theoretical Physics and Astrophysics*, Gordon and Breach Science Publishers.
- (16) Wille, K. (1996): *Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen*, Teubner-Verlag.
- (17) Gorham, P. (2009): *The Antarctic Neutrino Impulsive Transient Antenna Ultra High Energy Neutrino Detector*, arxiv.org/abs/0812.1920
- (18) LOFAR (2009): www.lofar.org/sites/lofar.org/files/cms/images/LOFAR_EU_stationen_spektrum.png