

extraterrestrische Neutrinos

Das IceCube Experiment

Aaron Schneider

Pflichtseminar im Wintersemester 2017/18, 10.11.2017



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386

Gliederung

- 1 Was sind extraterrestrische Neutrinos?
 - extraterrestrische Neutrinos
 - Quellenanalyse
- 2 Vom Neutrino zum Photon
 - Vom Neutrino zum geladenen Teilchen
 - Vom geladenen Teilchen zum Photon
- 3 Das IceCube Experiment
 - Entstehung und Aufbau des Experiments
 - Vom Photon zum Ereignis im Detektor
- 4 Ausblick und Zusammenfassung
- 5 Quellen

Gliederung

- 1 Was sind extraterrestrische Neutrinos?
 - extraterrestrische Neutrinos
 - Quellenanalyse
- 2 Vom Neutrino zum Photon
 - Vom Neutrino zum geladenen Teilchen
 - Vom geladenen Teilchen zum Photon
- 3 Das IceCube Experiment
 - Entstehung und Aufbau des Experiments
 - Vom Photon zum Ereignis im Detektor
- 4 Ausblick und Zusammenfassung
- 5 Quellen

Was steckt dahinter?

Wortbedeutung von extraterrestrisch

extraterrestrisch, *außerhalb der Erde, außerirdisch*. Neben der extraterrestrischen Physik wird der Begriff vor allem im Zusammenhang mit Leben außerhalb der Erde (Kosmobiologie, außerirdische Intelligenz) verwendet. [5]

Was steckt dahinter?

Neutrino

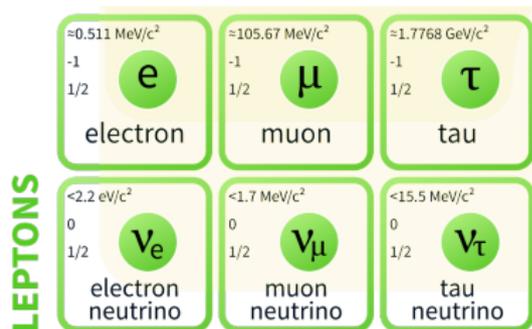


Abbildung: Die Familie der Leptonen[4]

Wortbedeutung von extraterrestrisch

extraterrestrisch, *außerhalb der Erde, außerirdisch*. Neben der extraterrestrischen Physik wird der Begriff vor allem im Zusammenhang mit Leben außerhalb der Erde (Kosmobiologie, außerirdische Intelligenz) verwendet. [5]

Eigenschaften von Neutrinos

Wiederholung PEP IV

Geschichtliches

- β^- -Zerfall
kontinuierliches Spektrum
 \Rightarrow dritter Konstituent
für Energieerhaltung
notwendig

Eigenschaften

Eigenschaften von Neutrinos

Wiederholung PEP IV

Geschichtliches

- β^- -Zerfall
kontinuierliches Spektrum
 \Rightarrow dritter Konstituent
für Energieerhaltung
notwendig
- 1930: Pauli postuliert
Teilchen. Fermi nennt es
"Neutrino" (ital.
Verniedlichung von
Neutron)

Eigenschaften

Eigenschaften von Neutrinos

Wiederholung PEP IV

Geschichtliches

- β^- -Zerfall
kontinuierliches Spektrum
 \Rightarrow dritter Konstituent
für Energieerhaltung
notwendig
- 1930: Pauli postuliert
Teilchen. Fermi nennt es
"Neutrino" (ital.
Verniedlichung von
Neutron)
- 1956: erste Beobachtung

Eigenschaften

Eigenschaften von Neutrinos

Wiederholung PEP IV

Geschichtliches

- β^- -Zerfall
kontinuierliches Spektrum
 \Rightarrow dritter Konstituent
für Energieerhaltung
notwendig
- 1930: Pauli postuliert
Teilchen. Fermi nennt es
"Neutrino" (ital.
Verniedlichung von
Neutron)
- 1956: erste Beobachtung

Eigenschaften

- Masse: $\bar{\nu}_e < 2.2eV/c^2$

Eigenschaften von Neutrinos

Wiederholung PEP IV

Geschichtliches

- β^- -Zerfall
kontinuierliches Spektrum
 \Rightarrow dritter Konstituent
für Energieerhaltung
notwendig
- 1930: Pauli postuliert
Teilchen. Fermi nennt es
"Neutrino" (ital.
Verniedlichung von
Neutron)
- 1956: erste Beobachtung

Eigenschaften

- Masse: $\bar{\nu}_e < 2.2eV/c^2$
- Neutrinos haben Masse
 \Rightarrow Neutrinos sind langsamer als
Licht im Vakuum!

Eigenschaften von Neutrinos

Wiederholung PEP IV

Geschichtliches

- β^- -Zerfall
kontinuierliches Spektrum
 \Rightarrow dritter Konstituent
für Energieerhaltung
notwendig
- 1930: Pauli postuliert
Teilchen. Fermi nennt es
"Neutrino" (ital.
Verniedlichung von
Neutron)
- 1956: erste Beobachtung

Eigenschaften

- Masse: $\bar{\nu}_e < 2.2eV/c^2$
- Neutrinos haben Masse
 \Rightarrow Neutrinos sind langsamer als
Licht im Vakuum!
- nur schwache WW

Eigenschaften von Neutrinos

Wiederholung PEP IV

Geschichtliches

- β^- -Zerfall
kontinuierliches Spektrum
 \Rightarrow dritter Konstituent
für Energieerhaltung
notwendig
- 1930: Pauli postuliert
Teilchen. Fermi nennt es
"Neutrino" (ital.
Verniedlichung von
Neutron)
- 1956: erste Beobachtung

Eigenschaften

- Masse: $\bar{\nu}_e < 2.2eV/c^2$
- Neutrinos haben Masse
 \Rightarrow Neutrinos sind langsamer als
Licht im Vakuum!
- nur schwache WW
- mögliche Detektoren:
indirekt: Čerenkov-Strahlung
direkt: inv. β [$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$]

Eigenschaften von Neutrinos

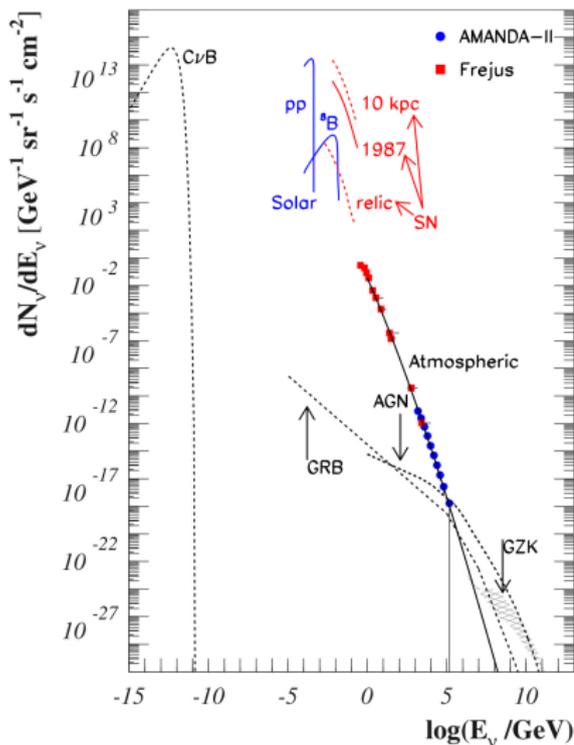
Wiederholung PEP IV

Geschichtliches

- β^- -Zerfall
kontinuierliches Spektrum
 \Rightarrow dritter Konstituent
für Energieerhaltung
notwendig
- 1930: Pauli postuliert
Teilchen. Fermi nennt es
"Neutrino" (ital.
Verniedlichung von
Neutron)
- 1956: erste Beobachtung

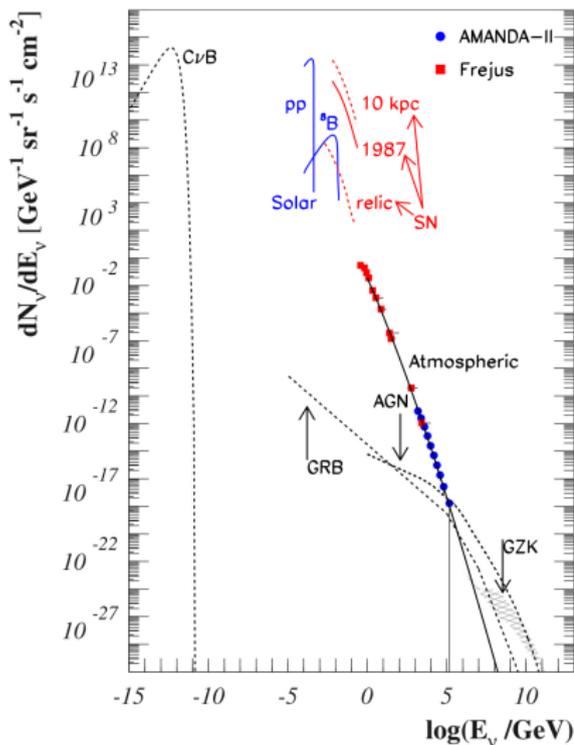
Eigenschaften

- Masse: $\bar{\nu}_e < 2.2eV/c^2$
- Neutrinos haben Masse
 \Rightarrow Neutrinos sind langsamer als
Licht im Vakuum!
- nur schwache WW
- mögliche Detektoren:
indirekt: Čerenkov-Strahlung
direkt: inv. β [$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$]
- häufigstes Elementarteilchen



Quellen:

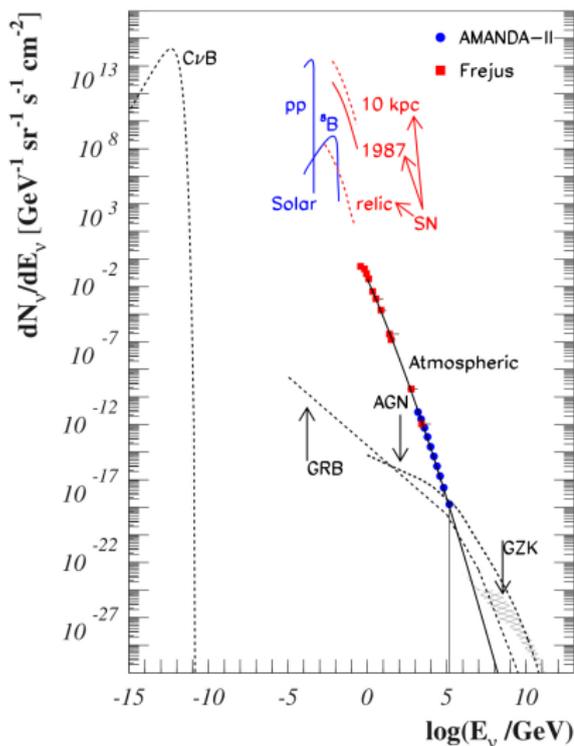
Abbildung: Quellen von extraterrestrischen Neutrinos (“Review Article“, 2010 [8])



Quellen:

- CνB (Cosmic Neutrino Background)

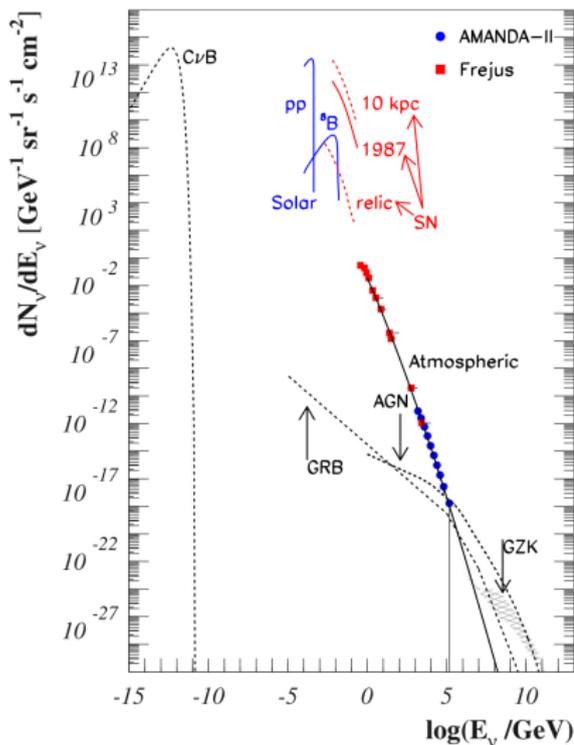
Abbildung: Quellen von extraterrestrischen Neutrinos ("Review Article", 2010 [8])



Quellen:

- C ν B (Cosmic Neutrino Background)
- Solar (Kernfusion in der Sonne/stern)

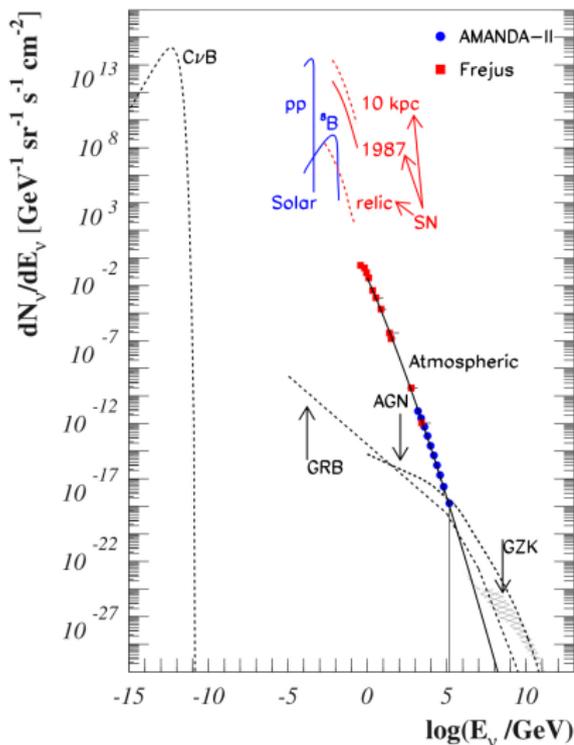
Abbildung: Quellen von extraterrestrischen Neutrinos ("Review Article", 2010 [8])



Quellen:

- CνB (Cosmic Neutrino Background)
- Solar (Kernfusion in der Sonne/stern)
- SN (Supernova)

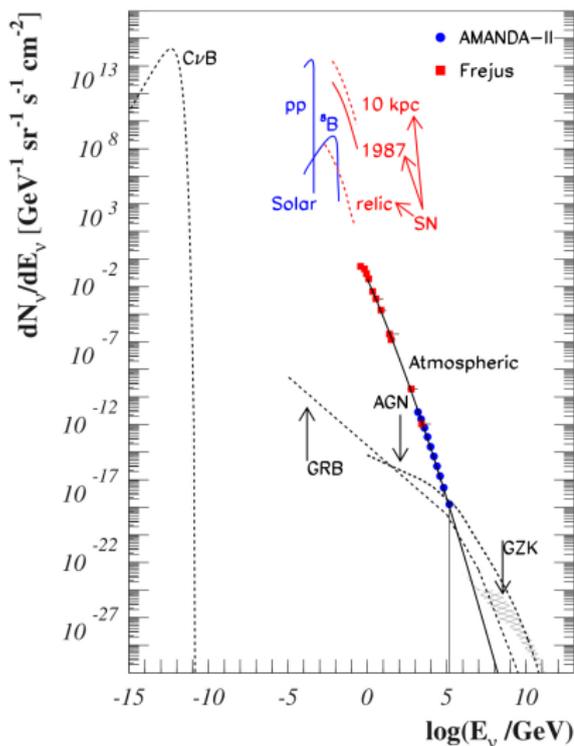
Abbildung: Quellen von extraterrestrischen Neutrinos (“Review Article“, 2010 [8])



Quellen:

- CνB (Cosmic Neutrino Background)
- Solar (Kernfusion in der Sonne/stern)
- SN (Supernova)
- Atmosphärische Neutrinos

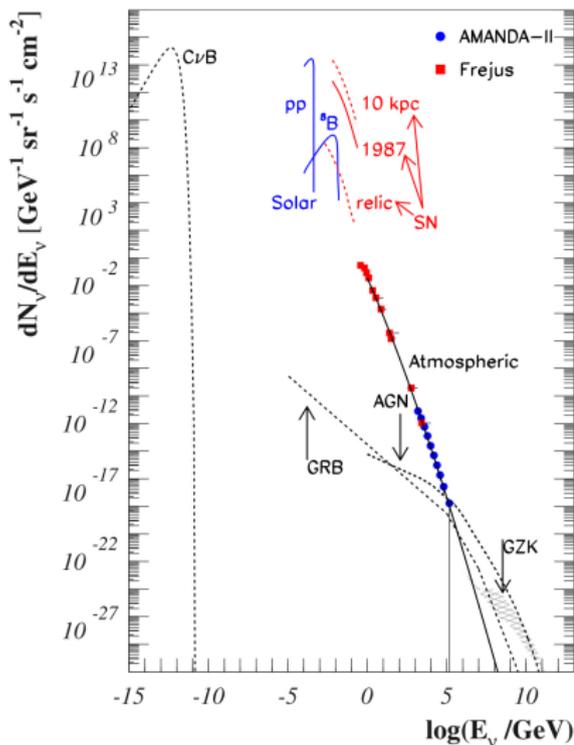
Abbildung: Quellen von extraterrestrischen Neutrinos ("Review Article", 2010 [8])



Quellen:

- CνB (Cosmic Neutrino Background)
- Solar (Kernfusion in der Sonne/stern)
- SN (Supernova)
- Atmosphärische Neutrinos
- GRB (Gamma Ray Bursts)

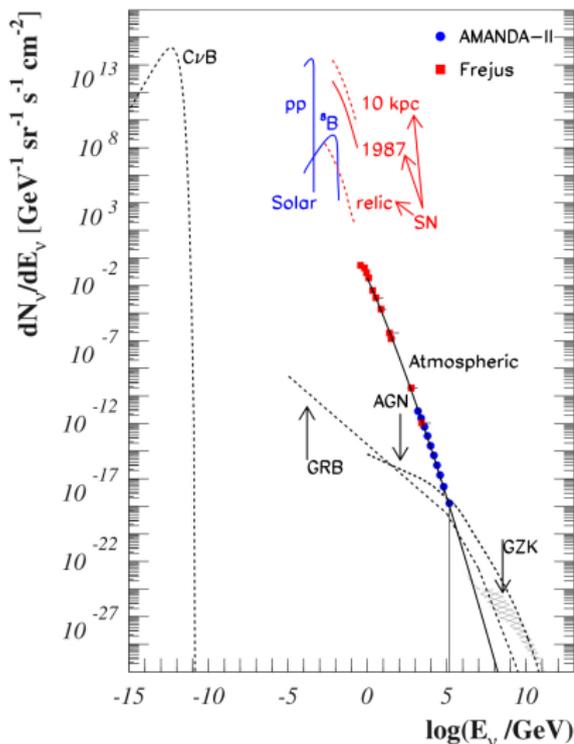
Abbildung: Quellen von extraterrestrischen Neutrinos ("Review Article", 2010 [8])



Quellen:

- CνB (Cosmic Neutrino Background)
- Solar (Kernfusion in der Sonne/stern)
- SN (Supernova)
- Atmosphärische Neutrinos
- GRB (Gamma Ray Bursts)
- AGN (Active Galactic Nuclei)

Abbildung: Quellen von extraterrestrischen Neutrinos ("Review Article", 2010 [8])



Quellen:

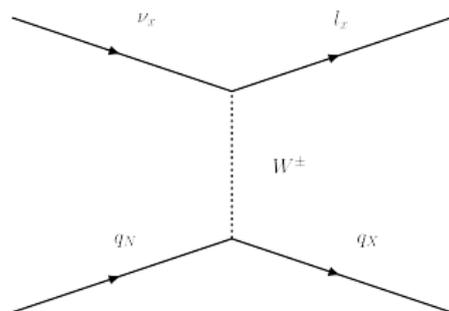
- CνB (Cosmic Neutrino Background)
- Solar (Kernfusion in der Sonne/stern)
- SN (Supernova)
- Atmosphärische Neutrinos
- GRB (Gamma Ray Bursts)
- AGN (Active Galactic Nuclei)
- GZK Limit: Δ CMB
 $p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$

Abbildung: Quellen von extraterrestrischen Neutrinos ("Review Article", 2010 [8])

Gliederung

- 1 Was sind extraterrestrische Neutrinos?
 - extraterrestrische Neutrinos
 - Quellenanalyse
- 2 Vom Neutrino zum Photon
 - Vom Neutrino zum geladenen Teilchen
 - Vom geladenen Teilchen zum Photon
- 3 Das IceCube Experiment
 - Entstehung und Aufbau des Experiments
 - Vom Photon zum Ereignis im Detektor
- 4 Ausblick und Zusammenfassung
- 5 Quellen

Erzeugung geladener Teilchen



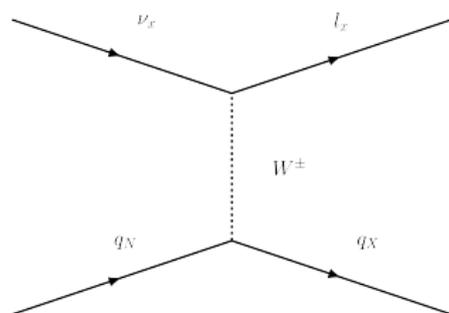
- Neutrino stößt mit H_2O

Abbildung: Neutrinowechselwirkung.

Diagramm erzeugt mit:

<https://feynman.aivazis.com>

Erzeugung geladener Teilchen



- Neutrino stößt mit H_2O
- geladenes Teilchen erhält 50-80% der kompletten Energie

Abbildung: Neutrinowechselwirkung.

Diagramm erzeugt mit:

<https://feynman.aivazis.com>

Erzeugung geladener Teilchen

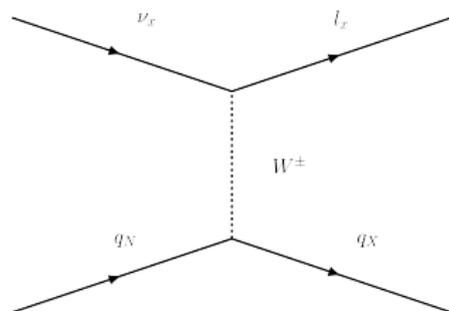


Abbildung: Neutrinowechselwirkung.
Diagramm erzeugt mit:
<https://feynman.aivazis.com>

- Neutrino stößt mit H_2O
- geladenes Teilchen erhält 50-80% der kompletten Energie
- Energieübertrag hängt von Energie des Neutrinos ab

Čerenkov-Strahlung

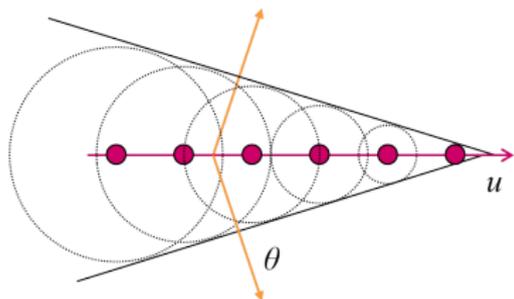


Abbildung: schematische Darstellung der Čerenkov-Strahlung

<http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/alaean2/> [3]

- Eis transparenter als Wasser!
Antarktis: \approx Faktor 13
- Geladene Teilchen mit $v > c_{\text{medium}}$
→ Čerenkov-Strahlung
- Analog zum Überschallknall:
Machscher Kegel

Formeln

$$\cos(\theta) = \frac{1}{n\beta}$$

Eis: $n = 1.33 \Rightarrow \beta_{\min} = 0.75$

$\Rightarrow E_{e^-, \min} = 1.168 \text{ MeV}$

Čerenkov-Strahlung

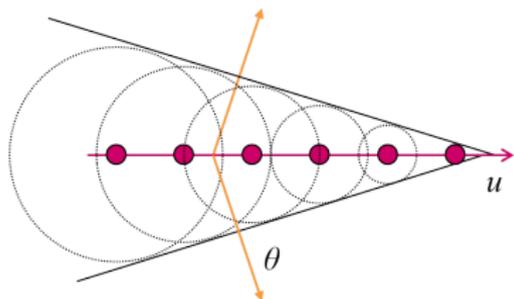


Abbildung: schematische Darstellung der Čerenkov-Strahlung

<http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/alaeeian2/> [3]

- Eis transparenter als Wasser!
Antarktis: \approx Faktor 13
- Geladene Teilchen mit $v > c_{\text{medium}}$
→ Čerenkov-Strahlung
- Analog zum Überschallknall:
Machscher Kegel
- $4000\text{\AA} < \lambda < 7000\text{\AA}$

Formeln

$$\cos(\theta) = \frac{1}{n\beta}$$

Eis: $n = 1.33 \Rightarrow \beta_{\min} = 0.75$

$\Rightarrow E_{e^-, \min} = 1.168\text{MeV}$

Čerenkov-Strahlung

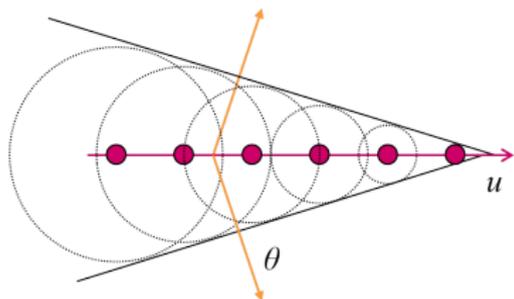


Abbildung: schematische Darstellung der Čerenkov-Strahlung

<http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/alaeeian2/> [3]

Formeln

$$\cos(\theta) = \frac{1}{n\beta}$$

Eis: $n = 1.33 \Rightarrow \beta_{\min} = 0.75$

$\Rightarrow E_{e^-, \min} = 1.168 \text{ MeV}$

- Eis transparenter als Wasser!
Antarktis: \approx Faktor 13
- Geladene Teilchen mit $v > c_{\text{medium}}$
 \rightarrow Čerenkov-Strahlung
- Analog zum Überschallknall:
Machscher Kegel
- $4000 \text{ \AA} < \lambda < 7000 \text{ \AA}$
- $E_{e^-, \min}$ klein gegen IceCube
Neutrino Energie (TeV bis PeV)

Čerenkov-Strahlung

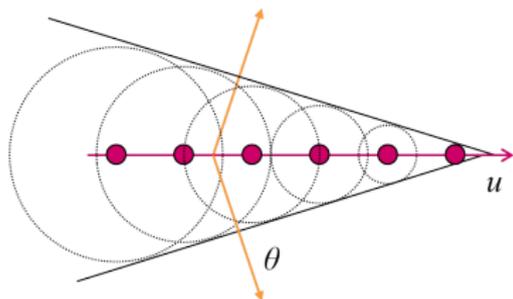


Abbildung: schematische Darstellung der Čerenkov-Strahlung

<http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/alaean2/> [3]

Formeln

$$\cos(\theta) = \frac{1}{n\beta}$$

Eis: $n = 1.33 \Rightarrow \beta_{\min} = 0.75$

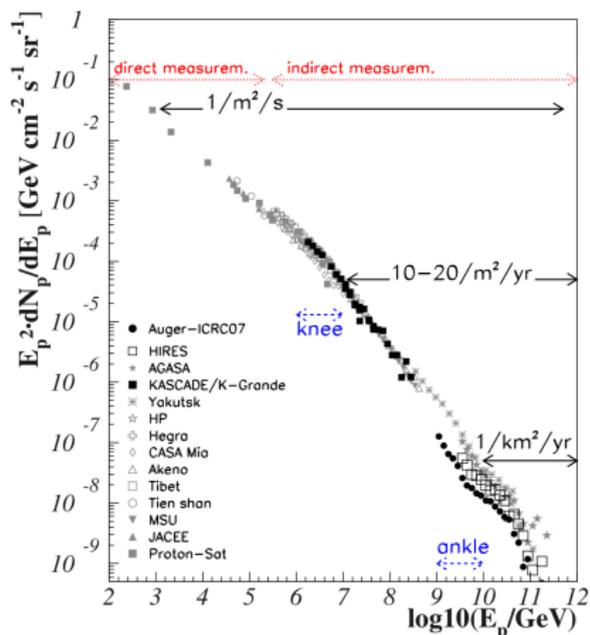
$\Rightarrow E_{e^-, \min} = 1.168 \text{ MeV}$

- Eis transparenter als Wasser!
Antarktis: \approx Faktor 13
- Geladene Teilchen mit $v > c_{\text{medium}}$
 \rightarrow Čerenkov-Strahlung
- Analog zum Überschallknall:
Machscher Kegel
- $4000 \text{ \AA} < \lambda < 7000 \text{ \AA}$
- $E_{e^-, \min}$ klein gegen IceCube
Neutrino Energie (TeV bis PeV)
- Messung von E durch
Öffnungswinkel nicht möglich.
 $\theta = 41.2^\circ$

Gliederung

- 1 Was sind extraterrestrische Neutrinos?
 - extraterrestrische Neutrinos
 - Quellenanalyse
- 2 Vom Neutrino zum Photon
 - Vom Neutrino zum geladenen Teilchen
 - Vom geladenen Teilchen zum Photon
- 3 Das IceCube Experiment**
 - Entstehung und Aufbau des Experiments
 - Vom Photon zum Ereignis im Detektor
- 4 Ausblick und Zusammenfassung
- 5 Quellen

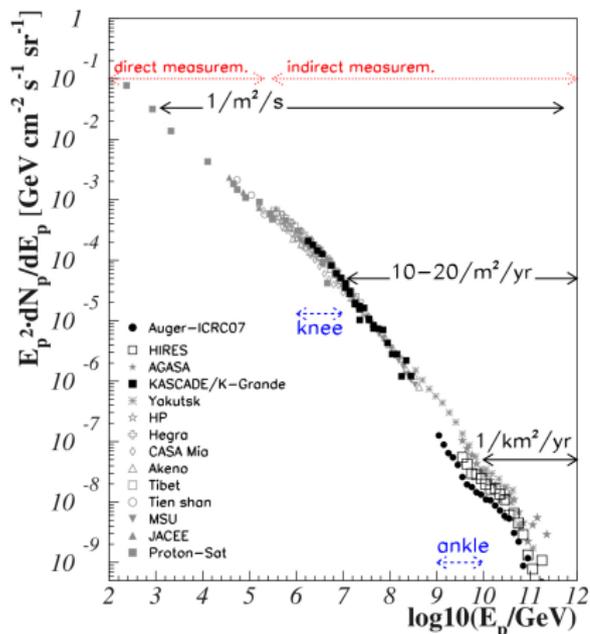
Warum braucht man einen km^3 Detektor?



- Neutrinos treten in ähnlicher Häufigkeit wie kosmische Strahlung auf

Abbildung: Fluss der kosmischen Strahlung
 ("Review Article", 2010 [8])

Warum braucht man einen km^3 Detektor?



- Neutrinos treten in ähnlicher Häufigkeit wie kosmische Strahlung auf
- Bekannte Erzeugung von Neutrinos (auch für Atmosphärische):

$$\begin{aligned}
 p + \gamma &\rightarrow \pi^+ + n, \\
 \pi^+ &\rightarrow \nu_\mu + \mu^+ \\
 \Rightarrow \frac{dN_\nu}{dE} &\approx \frac{1}{20} \frac{dN_p}{dE}
 \end{aligned}$$

Abbildung: Fluss der kosmischen Strahlung (“Review Article“, 2010 [8])

Warum braucht man einen km^3 Detektor?

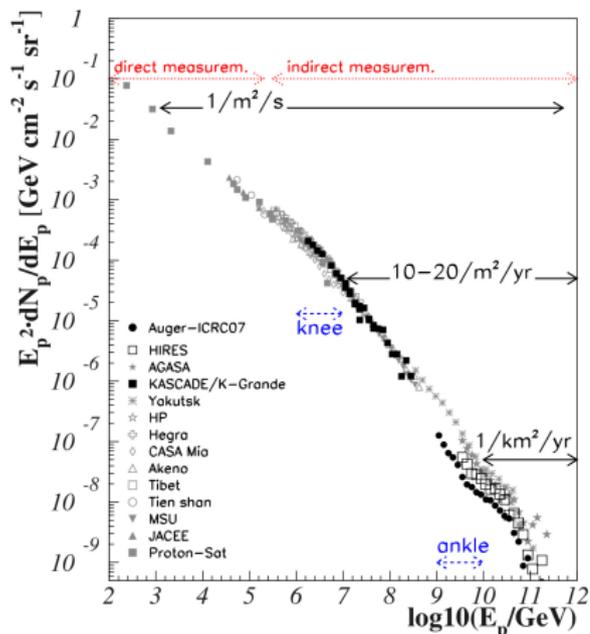


Abbildung: Fluss der kosmischen Strahlung (“Review Article“, 2010 [8])

- Neutrinos treten in ähnlicher Häufigkeit wie kosmische Strahlung auf
- Bekannte Erzeugung von Neutrinos (auch für Atmosphärische):

$$\begin{aligned}
 p + \gamma &\rightarrow \pi^+ + n, \\
 \pi^+ &\rightarrow \nu_\mu + \mu^+ \\
 \Rightarrow \frac{dN_\nu}{dE} &\approx \frac{1}{20} \frac{dN_p}{dE}
 \end{aligned}$$

- Neutrinos wechselwirken nur schwach

Warum braucht man einen km^3 Detektor?

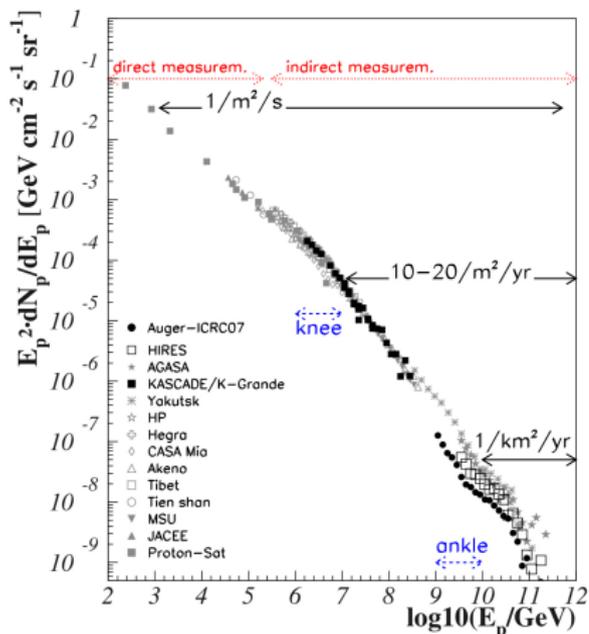


Abbildung: Fluss der kosmischen Strahlung (“Review Article“, 2010 [8])

- Neutrinos treten in ähnlicher Häufigkeit wie kosmische Strahlung auf
- Bekannte Erzeugung von Neutrinos (auch für Atmosphärische):

$$\begin{aligned}
 p + \gamma &\rightarrow \pi^+ + n, \\
 \pi^+ &\rightarrow \nu_\mu + \mu^+ \\
 \Rightarrow \frac{dN_\nu}{dE} &\approx \frac{1}{20} \frac{dN_p}{dE}
 \end{aligned}$$

- Neutrinos wechselwirken nur schwach
- μ -Tracks sind km lang!

Entwicklung

Größe

“Neutrino Astronomy beyond the Sun was first imagined in the late 1950s: by the 1970s, it was realized that kilometer-scale neutrino detectors were required.”[7, S.1]

Entwicklung

Größe

“Neutrino Astronomy beyond the Sun was first imagined in the late 1950s: by the 1970s, it was realized that kilometer-scale neutrino detectors were required.”[7, S.1]

- 1 erste Versuche mit natürlichem Wasser

Entwicklung

Größe

“Neutrino Astronomy beyond the Sun was first imagined in the late 1950s: by the 1970s, it was realized that kilometer-scale neutrino detectors were required.”[7, S.1]

- 1 erste Versuche mit natürlichem Wasser
- 2 Experiment DUMAND, Hawaii (1976-1995): Einstellung nach 2 Jahrzehnten Entwicklung

Entwicklung

Größe

“Neutrino Astronomy beyond the Sun was first imagined in the late 1950s: by the 1970s, it was realized that kilometer-scale neutrino detectors were required.”[7, S.1]

- 1 erste Versuche mit natürlichem Wasser
- 2 Experiment DUMAND, Hawaii (1976-1995): Einstellung nach 2 Jahrzehnten Entwicklung
- 3 Experiment AMANDA, Antarktis (1997-2009): Beweis, dass Eis eine gute Lösung ist

Entwicklung

Größe

“Neutrino Astronomy beyond the Sun was first imagined in the late 1950s: by the 1970s, it was realized that kilometer-scale neutrino detectors were required.” [7, S.1]

- 1 erste Versuche mit natürlichem Wasser
- 2 Experiment DUMAND, Hawaii (1976-1995): Einstellung nach 2 Jahrzehnten Entwicklung
- 3 Experiment AMANDA, Antarktis (1997-2009): Beweis, dass Eis eine gute Lösung ist
- 4 18.12.2010: Ausbau von AMANDA zu IceCube abgeschlossen

Entwicklung

Größe

“Neutrino Astronomy beyond the Sun was first imagined in the late 1950s: by the 1970s, it was realized that kilometer-scale neutrino detectors were required.”[7, S.1]

- 1 erste Versuche mit natürlichem Wasser
- 2 Experiment DUMAND, Hawaii (1976-1995): Einstellung nach 2 Jahrzehnten Entwicklung
- 3 Experiment AMANDA, Antarktis (1997-2009): Beweis, dass Eis eine gute Lösung ist
- 4 18.12.2010: Ausbau von AMANDA zu IceCube abgeschlossen
- 5 2013: Beobachtung von extraterrestrischen Neutrinos

Das Experiment

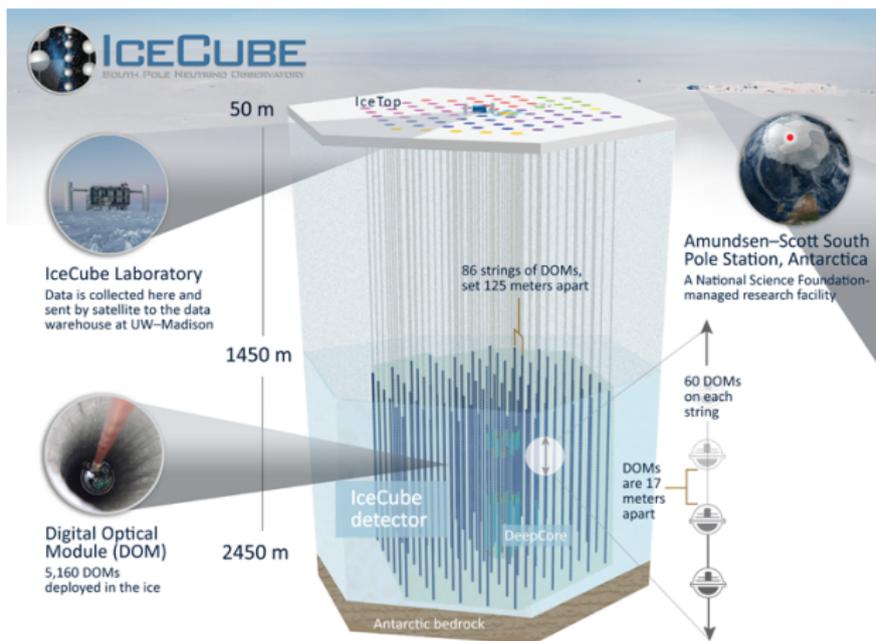


Abbildung: Aufbau des Experiments laut Webseite von IceCube [13]

Daten zu IceCube laut *Webseite von IceCube* [13]

Wissenschaft

Detektor

- Gesamtgröße: 1 km^3

Daten zu IceCube laut *Webseite von IceCube* [13]

Wissenschaft

Detektor

- Gesamtgröße: 1 km^3
- 86 Kabel mit jeweils 60 DOMs (DOM: digital optical modules), weitere 324 DOMs als Oberflächendetektoren (IceTop)

Daten zu IceCube laut *Webseite von IceCube* [13]

Wissenschaft

Detektor

- Gesamtgröße: 1 km^3
- 86 Kabel mit jeweils 60 DOMs (DOM: digital optical modules), weitere 324 DOMs als Oberflächendetektoren (IceTop)
- 5160 DOMs bestehen aus Photomultipliern mit Minicomputern

Daten zu IceCube laut *Webseite von IceCube* [13]

Wissenschaft

Detektor

- Gesamtgröße: 1 km^3
- 86 Kabel mit jeweils 60 DOMs (DOM: digital optical modules), weitere 324 DOMs als Oberflächendetektoren (IceTop)
- 5160 DOMs bestehen aus Photomultipliern mit Minicomputern
- DOMs zwischen -1450m und -2450m

Daten zu IceCube laut *Webseite von IceCube* [13]

Detektor

- Gesamtgröße: 1 km^3
- 86 Kabel mit jeweils 60 DOMs (DOM: digital optical modules), weitere 324 DOMs als Oberflächendetektoren (IceTop)
- 5160 DOMs bestehen aus Photomultipliern mit Minicomputern
- DOMs zwischen -1450m und -2450m

Wissenschaft

- 10^{12} Neutrinos durchdringen menschl. Körper pro Sekunde

Daten zu IceCube laut *Webseite von IceCube* [13]

Detektor

- Gesamtgröße: 1 km^3
- 86 Kabel mit jeweils 60 DOMs (DOM: digital optical modules), weitere 324 DOMs als Oberflächendetektoren (IceTop)
- 5160 DOMs bestehen aus Photomultipliern mit Minicomputern
- DOMs zwischen -1450m und -2450m

Wissenschaft

- 10^{12} Neutrinos durchdringen menschl. Körper pro Sekunde
- Suche nach Neutrinos im PeV Bereich

Daten zu IceCube laut *Webseite von IceCube* [13]

Detektor

- Gesamtgröße: 1 km^3
- 86 Kabel mit jeweils 60 DOMs (DOM: digital optical modules), weitere 324 DOMs als Oberflächendetektoren (IceTop)
- 5160 DOMs bestehen aus Photomultipliern mit Minicomputern
- DOMs zwischen -1450m und -2450m

Wissenschaft

- 10^{12} Neutrinos durchdringen menschl. Körper pro Sekunde
- Suche nach Neutrinos im PeV Bereich
- Hochenergiebereich:
Menschengroßer Detektor findet 1 Neutrino alle 100.000 Jahre

Daten zu IceCube laut *Webseite von IceCube* [13]

Detektor

- Gesamtgröße: 1 km^3
- 86 Kabel mit jeweils 60 DOMs (DOM: digital optical modules), weitere 324 DOMs als Oberflächendetektoren (IceTop)
- 5160 DOMs bestehen aus Photomultipliern mit Minicomputern
- DOMs zwischen -1450m und -2450m

Wissenschaft

- 10^{12} Neutrinos durchdringen menschl. Körper pro Sekunde
- Suche nach Neutrinos im PeV Bereich
- Hochenergiebereich: Menschengroßer Detektor findet 1 Neutrino alle 100.000 Jahre
- ca. 300 Wissenschaftler, 48 Institute, 12 Länder

Daten zu IceCube laut *Webseite von IceCube* [13]

Detektor

- Gesamtgröße: 1 km^3
- 86 Kabel mit jeweils 60 DOMs (DOM: digital optical modules), weitere 324 DOMs als Oberflächendetektoren (IceTop)
- 5160 DOMs bestehen aus Photomultipliern mit Minicomputern
- DOMs zwischen -1450m und -2450m

Wissenschaft

- 10^{12} Neutrinos durchdringen menschl. Körper pro Sekunde
- Suche nach Neutrinos im PeV Bereich
- Hochenergiebereich: Menschengroßer Detektor findet 1 Neutrino alle 100.000 Jahre
- ca. 300 Wissenschaftler, 48 Institute, 12 Länder
- 1TB ungefilterte Daten nimmt Experiment täglich auf, 100GB werden nach Wisconsin gesandt

Beispiel zweier Events

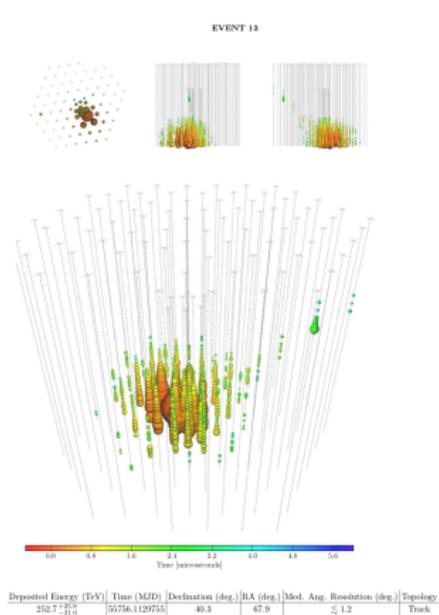


Abbildung: Track [1]

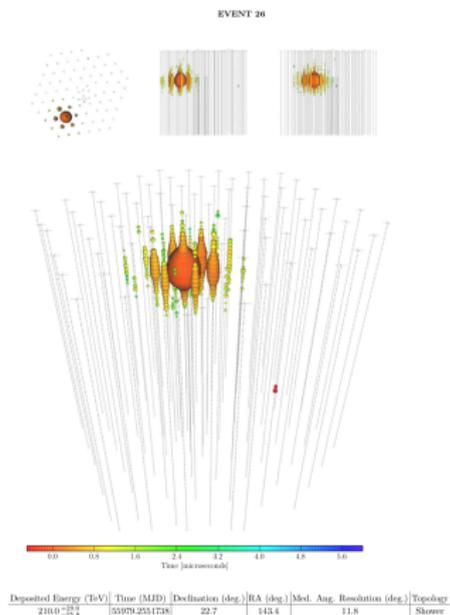


Abbildung: Shower [1]

Energierекonstruktion

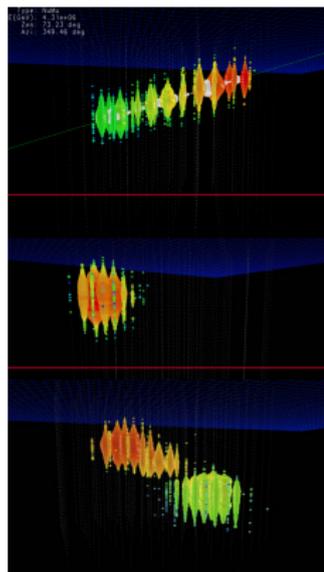


Abbildung:

Teilchenidentifizierung [8].

Oben: ν_μ , Mitte: ν_e , Unten: ν_τ

N_{Phot} skaliert \approx linear mit E

ν_μ

- lange Tracks \sim km

ν_e

ν_τ

Energierекonstruktion

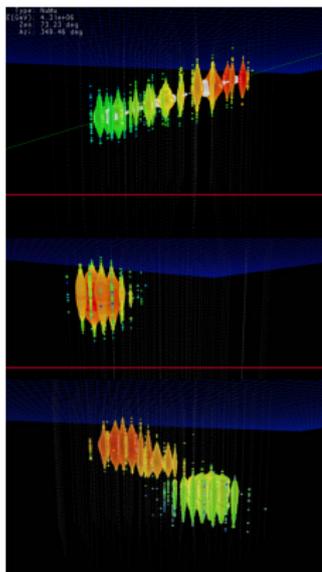


Abbildung:
Teilchenidentifizierung [8].
Oben: ν_μ , Mitte: ν_e , Unten: ν_τ

N_{Phot} skaliert \approx linear mit E

ν_μ

- lange Tracks \sim km
- Energieverlust im Eis $\propto E \propto N_{\text{Phot}}$

ν_e

ν_τ

Energierückrekonstruktion

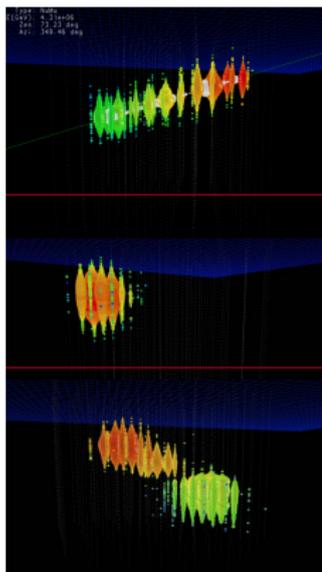


Abbildung:

Teilchenidentifizierung [8].

Oben: ν_μ , Mitte: ν_e , Unten: ν_τ

N_{Phot} skaliert \approx linear mit E

ν_μ

- lange Tracks \sim km
- Energieverlust im Eis $\propto E \propto N_{\text{Phot}}$
- Aber: $-\frac{dE}{dx}$ fluktuiert! (BS, TR)

ν_e

ν_τ

Energierückbau

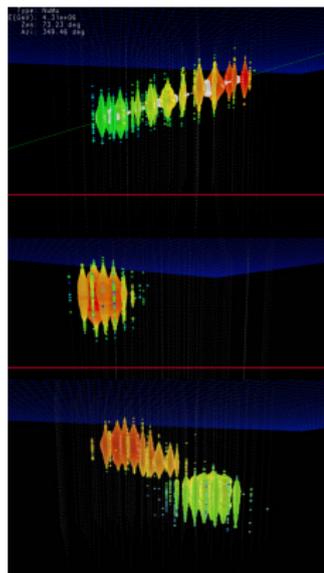


Abbildung:

Teilchenidentifizierung [8].

Oben: ν_μ , Mitte: ν_e , Unten: ν_τ

N_{Phot} skaliert \approx linear mit E

ν_μ

- lange Tracks \sim km
- Energieverlust im Eis $\propto E \propto N_{\text{Phot}}$
- Aber: $-\frac{dE}{dx}$ fluktuiert! (BS, TR)

ν_e

- kurze Tracks \sim 10m

ν_τ

Energierückbau

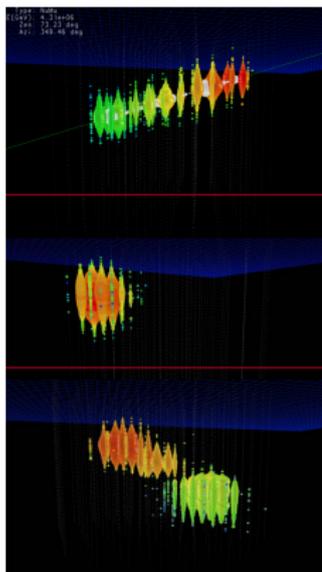


Abbildung:

Teilchenidentifizierung [8].

Oben: ν_μ , Mitte: ν_e , Unten: ν_τ

N_{Phot} skaliert \approx linear mit E

ν_μ

- lange Tracks \sim km
- Energieverlust im Eis $\propto E \propto N_{\text{Phot}}$
- Aber: $-\frac{dE}{dx}$ fluktuiert! (BS, TR)

ν_e

- kurze Tracks \sim 10m
- EM Schauer \rightarrow Kalorimetrie $\Rightarrow E$

ν_τ

Energierückbau

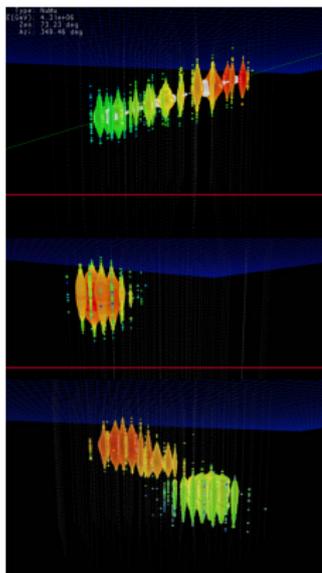


Abbildung:

Teilchenidentifizierung [8].

Oben: ν_μ , Mitte: ν_e , Unten: ν_τ

N_{Phot} skaliert \approx linear mit E

ν_μ

- lange Tracks \sim km
- Energieverlust im Eis $\propto E \propto N_{\text{Phot}}$
- Aber: $-\frac{dE}{dx}$ fluktuiert! (BS, TR)

ν_e

- kurze Tracks \sim 10m
- EM Schauer \rightarrow Kalorimetrie $\Rightarrow E$

ν_τ

- "double bang":
erste: $\nu_\tau \rightarrow \tau$, zweite: τ zerfällt

Energierückrekonstruktion

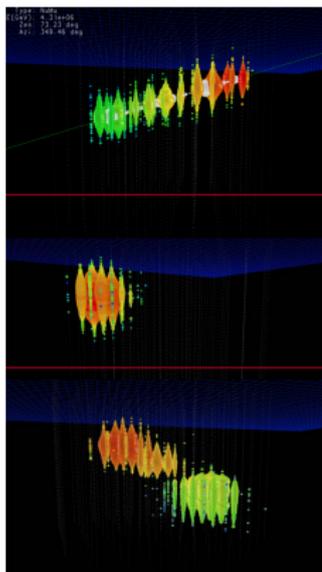


Abbildung:

Teilchenidentifizierung [8].

Oben: ν_μ , Mitte: ν_e , Unten: ν_τ

N_{Phot} skaliert \approx linear mit E

ν_μ

- lange Tracks \sim km
- Energieverlust im Eis $\propto E \propto N_{\text{Phot}}$
- Aber: $-\frac{dE}{dx}$ fluktuiert! (BS, TR)

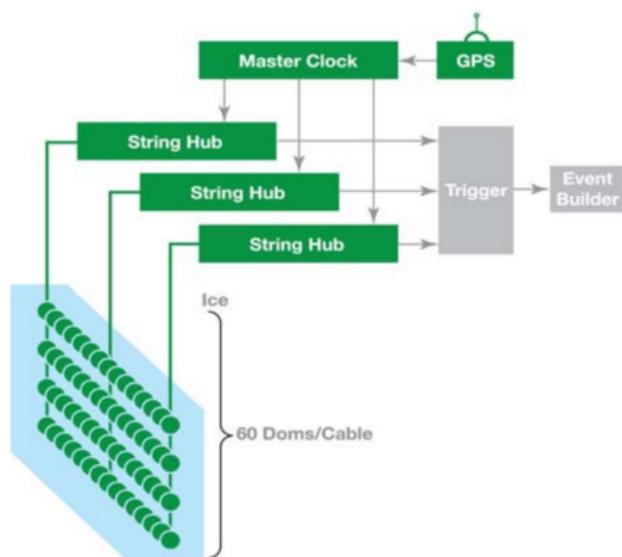
ν_e

- kurze Tracks \sim 10m
- EM Schauer \rightarrow Kalorimetrie $\Rightarrow E$

ν_τ

- "double bang":
erste: $\nu_\tau \rightarrow \tau$, zweite: τ zerfällt
- $L = \gamma c \tau$

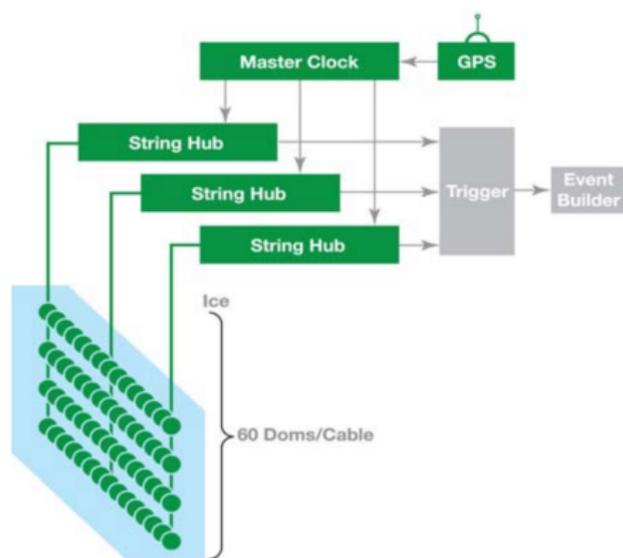
Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs



- Rekonstruktion der Quelle aus Zeitmessung

Abbildung: Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs ("Review Article", 2010 [8])

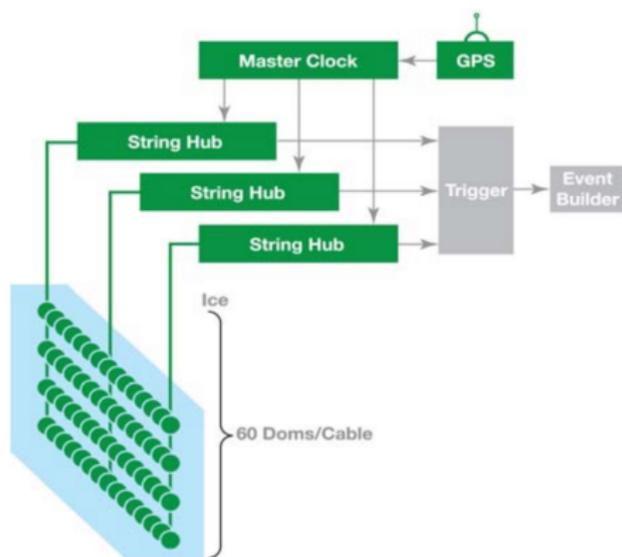
Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs



- Rekonstruktion der Quelle aus Zeitmessung
- Zeit in DOM's ist synchronisiert

Abbildung: Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs ("Review Article", 2010 [8])

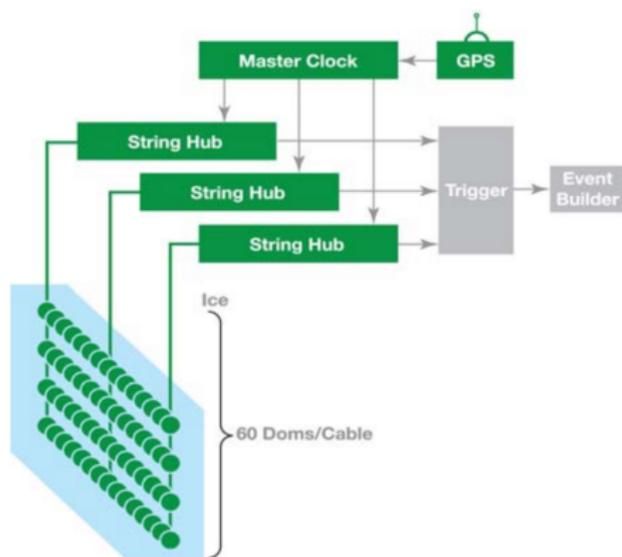
Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs



- Rekonstruktion der Quelle aus Zeitmessung
- Zeit in DOM's ist synchronisiert
 - Ereignisse in DOM's haben Time Stamp

Abbildung: Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs ("Review Article", 2010 [8])

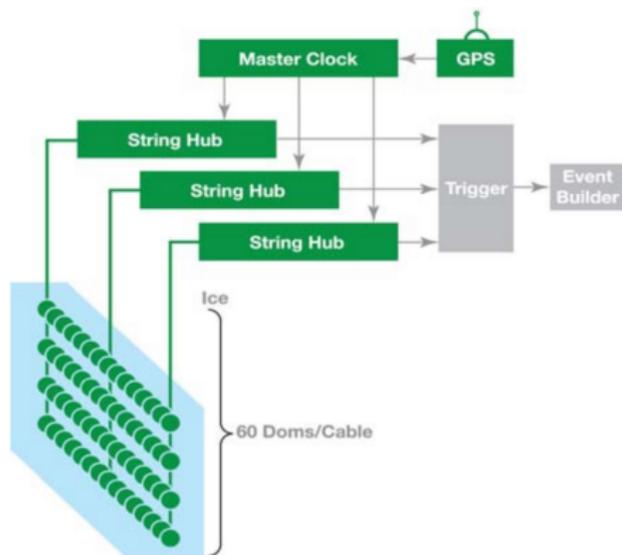
Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs



- Rekonstruktion der Quelle aus Zeitmessung
- Zeit in DOM's ist synchronisiert
 - Ereignisse in DOM's haben Time Stamp
 - GPS synchronisiert Master Clock

Abbildung: Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs ("Review Article", 2010 [8])

Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs



- Rekonstruktion der Quelle aus Zeitmessung
- Zeit in DOM's ist synchronisiert
 - Ereignisse in DOM's haben Time Stamp
 - GPS synchronisiert Master Clock
 - String Hubs werden von Masterclock synchronisiert

Abbildung: Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs ("Review Article", 2010 [8])

Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs

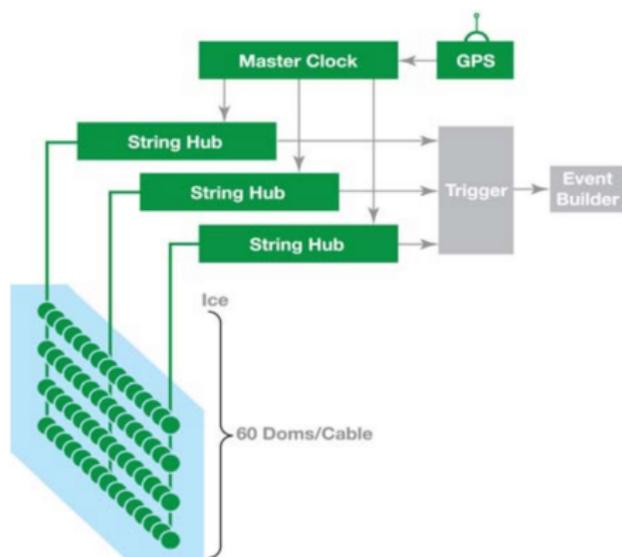


Abbildung: Rekonstruktion des zeitlichen Verlaufs ("Review Article", 2010 [8])

- Rekonstruktion der Quelle aus Zeitmessung
- Zeit in DOM's ist synchronisiert
 - Ereignisse in DOM's haben Time Stamp
 - GPS synchronisiert Master Clock
 - String Hubs werden von Masterclock synchronisiert
 - String Hubs konvertieren Timestamp der Ereignisse und triggern

Die Entdeckungen zwischen 2010 und 2012

- 28 Ereignisse gefunden

ID	Dep. Energy (TeV)	Time (MJD)	Decl. (deg.)	R.A. (deg.)	Med. Angular Error (deg.)	Event Type
1	$47.6^{+6.5}_{-5.4}$	55351	-1.8	35.2	16.3	Shower
2	117^{+15}_{-15}	55351	-28.0	282.6	25.4	Shower
3	$78.7^{+10.8}_{-6.7}$	55451	-31.2	127.9	$\lesssim 1.4$	Track
4	165^{+20}_{-15}	55477	-51.2	169.5	7.1	Shower
5	$71.4^{+9.0}_{-9.0}$	55513	-0.4	110.6	$\lesssim 1.2$	Track
6	$28.4^{+2.7}_{-2.9}$	55568	-27.2	133.9	9.8	Shower
7	$34.3^{+3.5}_{-4.3}$	55571	-45.1	15.6	24.1	Shower
8	$32.6^{+10.3}_{-11.1}$	55609	-21.2	182.4	$\lesssim 1.3$	Track
9	$63.2^{+7.1}_{-8.0}$	55686	33.6	151.3	16.5	Shower
10	$97.9^{+10.4}_{-12.4}$	55695	-29.4	5.0	8.1	Shower
11	$88.4^{+12.5}_{-10.7}$	55715	-8.9	155.3	16.7	Shower
12	104^{+13}_{-13}	55739	-52.8	296.1	9.8	Shower
13	253^{+29}_{-22}	55756	40.3	67.9	$\lesssim 1.2$	Track
14	1041^{+132}_{-144}	55783	-27.9	265.6	13.2	Shower
15	$57.5^{+8.3}_{-7.8}$	55783	-49.7	287.3	19.7	Shower
16	$30.6^{+3.9}_{-3.5}$	55799	-22.6	192.1	19.4	Shower
17	200^{+27}_{-27}	55800	14.5	247.4	11.6	Shower
18	$31.5^{+4.6}_{-3.3}$	55924	-24.8	345.6	$\lesssim 1.3$	Track
19	$71.5^{+7.0}_{-7.2}$	55926	-59.7	76.9	9.7	Shower
20	1141^{+143}_{-133}	55929	-67.2	38.3	10.7	Shower
21	$30.2^{+3.5}_{-3.3}$	55937	-24.0	9.0	20.9	Shower
22	220^{+21}_{-21}	55942	-22.1	293.7	12.1	Shower
23	$82.2^{+8.6}_{-8.4}$	55950	-13.2	208.7	$\lesssim 1.9$	Track
24	$30.5^{+3.2}_{-2.6}$	55951	-15.1	282.2	15.5	Shower
25	$33.5^{+4.9}_{-5.0}$	55967	-14.5	286.0	46.3	Shower
26	210^{+29}_{-26}	55979	22.7	143.4	11.8	Shower
27	$60.2^{+5.6}_{-5.6}$	56009	-12.6	121.7	6.6	Shower
28	$46.1^{+7.7}_{-4.4}$	56049	-71.5	164.8	$\lesssim 1.3$	Track

Abbildung: Liste der Ereignisse zw. 2010 und 2012 (“Evidence“, 2013 [1])

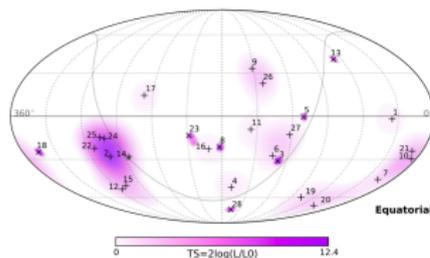


Abbildung: Äquatoriale Darstellung und Teststatistik [1]

Die Entdeckungen zwischen 2010 und 2012

- 28 Ereignisse gefunden
- 21 Shower, 7 Tracks

ID	Dep. Energy (TeV)	Time (MJD)	Decl. (deg.)	R.A. (deg.)	Med. Angular Error (deg.)	Event Type
1	$47.6^{+6.5}_{-5.4}$	55351	-1.8	35.2	16.3	Shower
2	117^{+15}_{-15}	55351	-28.0	282.6	25.4	Shower
3	$78.7^{+10.8}_{-6.7}$	55451	-31.2	127.9	$\lesssim 1.4$	Track
4	165^{+20}_{-15}	55477	-51.2	169.5	7.1	Shower
5	$71.4^{+9.0}_{-9.0}$	55513	-0.4	110.6	$\lesssim 1.2$	Track
6	$28.4^{+2.7}_{-2.9}$	55568	-27.2	133.9	9.8	Shower
7	$34.3^{+3.5}_{-4.3}$	55571	-45.1	15.6	24.1	Shower
8	$32.6^{+10.3}_{-11.1}$	55609	-21.2	182.4	$\lesssim 1.3$	Track
9	$63.2^{+7.1}_{-8.0}$	55686	33.6	151.3	16.5	Shower
10	$97.9^{+10.4}_{-12.4}$	55695	-29.4	5.0	8.1	Shower
11	$88.4^{+12.5}_{-10.7}$	55715	-8.9	155.3	16.7	Shower
12	104^{+13}_{-13}	55739	-52.8	296.1	9.8	Shower
13	253^{+29}_{-22}	55756	40.3	67.9	$\lesssim 1.2$	Track
14	1041^{+132}_{-144}	55783	-27.9	265.6	13.2	Shower
15	$57.5^{+8.3}_{-7.8}$	55783	-49.7	287.3	19.7	Shower
16	$30.6^{+3.9}_{-3.5}$	55799	-22.6	192.1	19.4	Shower
17	200^{+27}_{-27}	55800	14.5	247.4	11.6	Shower
18	$31.5^{+4.6}_{-3.3}$	55924	-24.8	345.6	$\lesssim 1.3$	Track
19	$71.5^{+7.0}_{-7.2}$	55926	-59.7	76.9	9.7	Shower
20	1141^{+143}_{-133}	55929	-67.2	38.3	10.7	Shower
21	$30.2^{+3.5}_{-3.3}$	55937	-24.0	9.0	20.9	Shower
22	220^{+21}_{-21}	55942	-22.1	293.7	12.1	Shower
23	$82.2^{+8.6}_{-8.4}$	55950	-13.2	208.7	$\lesssim 1.9$	Track
24	$30.5^{+3.2}_{-2.6}$	55951	-15.1	282.2	15.5	Shower
25	$33.5^{+4.9}_{-5.0}$	55967	-14.5	286.0	46.3	Shower
26	210^{+29}_{-26}	55979	22.7	143.4	11.8	Shower
27	$60.2^{+5.6}_{-5.6}$	56009	-12.6	121.7	6.6	Shower
28	$46.1^{+7.7}_{-4.4}$	56049	-71.5	164.8	$\lesssim 1.3$	Track

Abbildung: Liste der Ereignisse zw. 2010 und 2012 (“Evidence“, 2013 [1])

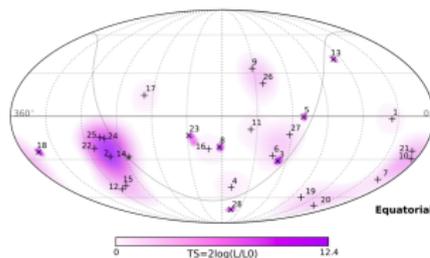


Abbildung: Äquatoriale Darstellung und Teststatistik [1]

Die Entdeckungen zwischen 2010 und 2012

- 28 Ereignisse gefunden
- 21 Shower, 7 Tracks
- Zu wenig Daten für Statistik bzgl. Isotropie

ID	Dep. Energy (TeV)	Time (MJD)	Decl. (deg.)	R.A. (deg.)	Med. Angular Error (deg.)	Event Type
1	$47.6^{+6.5}_{-5.4}$	55351	-1.8	35.2	16.3	Shower
2	117^{+15}_{-15}	55351	-28.0	282.6	25.4	Shower
3	$78.7^{+10.8}_{-6.7}$	55451	-31.2	127.9	$\lesssim 1.4$	Track
4	165^{+20}_{-15}	55477	-51.2	169.5	7.1	Shower
5	$71.4^{+9.0}_{-9.0}$	55513	-0.4	110.6	$\lesssim 1.2$	Track
6	$28.4^{+2.7}_{-2.9}$	55568	-27.2	133.9	9.8	Shower
7	$34.3^{+3.5}_{-4.3}$	55571	-45.1	15.6	24.1	Shower
8	$32.6^{+10.3}_{-11.1}$	55609	-21.2	182.4	$\lesssim 1.3$	Track
9	$63.2^{+7.1}_{-8.0}$	55686	33.6	151.3	16.5	Shower
10	$97.9^{+10.4}_{-12.4}$	55695	-29.4	5.0	8.1	Shower
11	$88.4^{+12.5}_{-10.7}$	55715	-8.9	155.3	16.7	Shower
12	104^{+13}_{-13}	55739	-52.8	296.1	9.8	Shower
13	253^{+29}_{-22}	55756	40.3	67.9	$\lesssim 1.2$	Track
14	1041^{+132}_{-144}	55783	-27.9	265.6	13.2	Shower
15	$57.5^{+8.3}_{-7.8}$	55783	-49.7	287.3	19.7	Shower
16	$30.6^{+3.9}_{-3.5}$	55799	-22.6	192.1	19.4	Shower
17	200^{+27}_{-27}	55800	14.5	247.4	11.6	Shower
18	$31.5^{+4.6}_{-3.3}$	55924	-24.8	345.6	$\lesssim 1.3$	Track
19	$71.5^{+7.0}_{-7.2}$	55926	-59.7	76.9	9.7	Shower
20	1141^{+143}_{-133}	55929	-67.2	38.3	10.7	Shower
21	$30.2^{+3.5}_{-3.3}$	55937	-24.0	9.0	20.9	Shower
22	220^{+21}_{-21}	55942	-22.1	293.7	12.1	Shower
23	$82.2^{+8.6}_{-8.4}$	55950	-13.2	208.7	$\lesssim 1.9$	Track
24	$30.5^{+3.2}_{-2.6}$	55951	-15.1	282.2	15.5	Shower
25	$33.5^{+4.9}_{-5.0}$	55967	-14.5	286.0	46.3	Shower
26	210^{+29}_{-26}	55979	22.7	143.4	11.8	Shower
27	$60.2^{+5.6}_{-5.6}$	56009	-12.6	121.7	6.6	Shower
28	$46.1^{+7.7}_{-4.4}$	56049	-71.5	164.8	$\lesssim 1.3$	Track

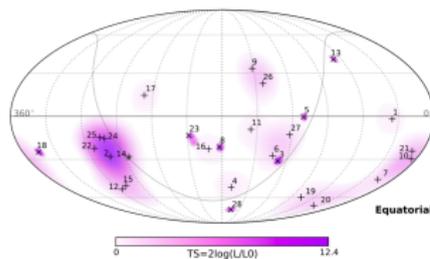


Abbildung: Liste der Ereignisse zw. 2010 und 2012 (“Evidence“, 2013 [1])

Abbildung: Äquatoriale Darstellung und Teststatistik [1]

Die Entdeckungen zwischen 2010 und 2012

ID	Dep. Energy (TeV)	Time (MJD)	Decl. (deg.)	R.A. (deg.)	Med. Angular Error (deg.)	Event Type
1	$47.6^{+6.5}_{-5.4}$	55351	-1.8	35.2	16.3	Shower
2	117^{+15}_{-15}	55351	-28.0	282.6	25.4	Shower
3	$78.7^{+10.8}_{-6.7}$	55451	-31.2	127.9	$\lesssim 1.4$	Track
4	165^{+20}_{-15}	55477	-51.2	169.5	7.1	Shower
5	$71.4^{+9.0}_{-9.0}$	55513	-0.4	110.6	$\lesssim 1.2$	Track
6	$28.4^{+2.7}_{-2.5}$	55568	-27.2	133.9	9.8	Shower
7	$34.3^{+3.5}_{-4.3}$	55571	-45.1	15.6	24.1	Shower
8	$32.6^{+10.3}_{-11.1}$	55609	-21.2	182.4	$\lesssim 1.3$	Track
9	$63.2^{+7.1}_{-8.0}$	55686	33.6	151.3	16.5	Shower
10	$97.9^{+10.4}_{-12.4}$	55695	-29.4	5.0	8.1	Shower
11	$88.4^{+12.5}_{-10.7}$	55715	-8.9	155.3	16.7	Shower
12	104^{+13}_{-13}	55739	-52.8	296.1	9.8	Shower
13	253^{+29}_{-22}	55756	40.3	67.9	$\lesssim 1.2$	Track
14	1041^{+132}_{-144}	55783	-27.9	265.6	13.2	Shower
15	$57.5^{+8.3}_{-7.8}$	55783	-49.7	287.3	19.7	Shower
16	$30.6^{+3.6}_{-3.5}$	55799	-22.6	192.1	19.4	Shower
17	200^{+27}_{-27}	55800	14.5	247.4	11.6	Shower
18	$31.5^{+4.6}_{-3.3}$	55924	-24.8	345.6	$\lesssim 1.3$	Track
19	$71.5^{+7.0}_{-7.2}$	55926	-59.7	76.9	9.7	Shower
20	1141^{+143}_{-133}	55929	-67.2	38.3	10.7	Shower
21	$30.2^{+3.5}_{-3.3}$	55937	-24.0	9.0	20.9	Shower
22	220^{+21}_{-21}	55942	-22.1	293.7	12.1	Shower
23	$82.2^{+8.6}_{-8.4}$	55950	-13.2	208.7	$\lesssim 1.9$	Track
24	$30.5^{+3.2}_{-2.6}$	55951	-15.1	282.2	15.5	Shower
25	$33.5^{+4.9}_{-5.0}$	55967	-14.5	286.0	46.3	Shower
26	210^{+29}_{-26}	55979	22.7	143.4	11.8	Shower
27	$60.2^{+5.6}_{-5.6}$	56009	-12.6	121.7	6.6	Shower
28	$46.1^{+7.7}_{-4.4}$	56049	-71.5	164.8	$\lesssim 1.3$	Track

- 28 Ereignisse gefunden
- 21 Shower, 7 Tracks
- Zu wenig Daten für Statistik bzgl. Isotropie
- Energien zwischen $28.4^{+2.7}_{-2.5}$ TeV und 1141^{+143}_{-133} TeV

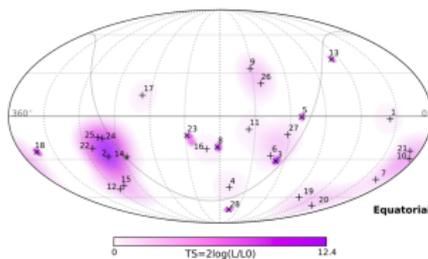
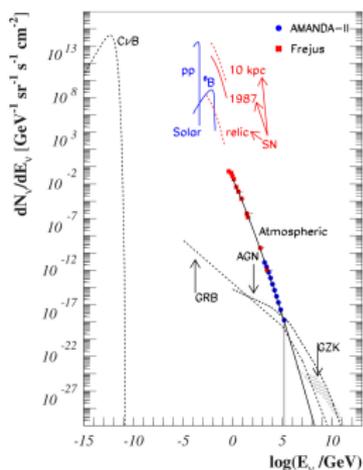


Abbildung: Liste der Ereignisse zw. 2010 und 2012 (“Evidence“, 2013 [1])

Abbildung: Äquatoriale Darstellung und Teststatistik [1]

Background



- größte Störquelle: Atmosphärische Neutrinos
→ Übergang zu hohen Energien (siehe Abb.)

Abbildung:
Neutrinoquellen
("Review Article", 2010
[8])

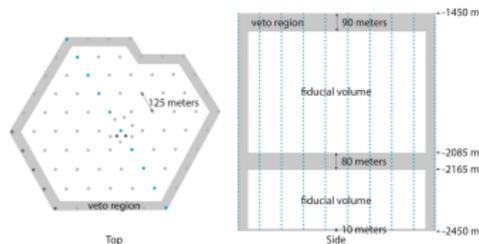
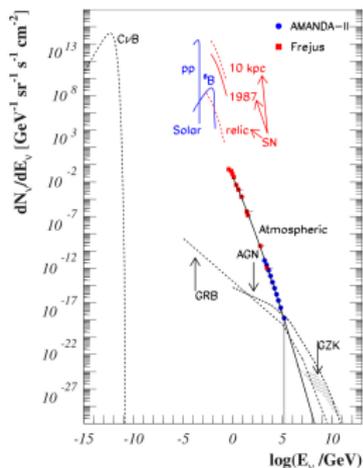


Abbildung: veto
regions von IceCube
[1]

Background



- größte Störquelle: Atmosphärische Neutrinos
→ Übergang zu hohen Energien (siehe Abb.)
- IceCube wertet nur Ereignisse mit mehr als 6000 p.e. aus

Abbildung:
Neutrinoquellen
("Review Article", 2010
[8])

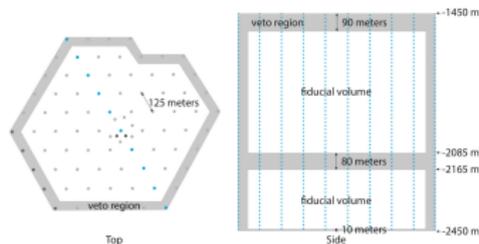
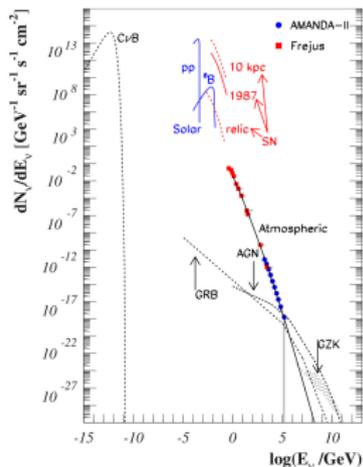


Abbildung: veto
regions von IceCube
[1]

Background



- größte Störquelle: Atmosphärische Neutrinos
→ Übergang zu hohen Energien (siehe Abb.)
- IceCube wertet nur Ereignisse mit mehr als 6000 p.e. aus
- Dustlogger messen Effekt des Staubs im Eis

Abbildung:
Neutrinoquellen
("Review Article", 2010
[8])

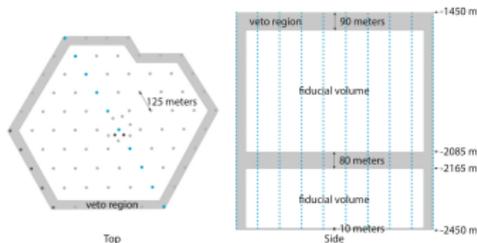
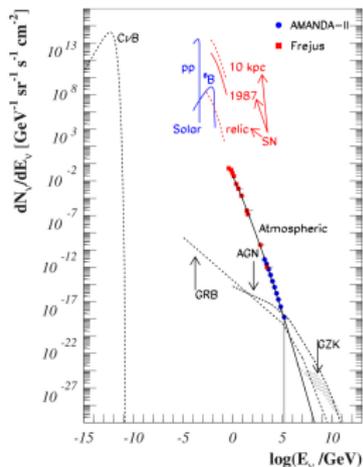


Abbildung: veto
regions von IceCube
[1]

Background



- größte Störquelle: Atmosphärische Neutrinos
→ Übergang zu hohen Energien (siehe Abb.)
- IceCube wertet nur Ereignisse mit mehr als 6000 p.e. aus
- Dustlogger messen Effekt des Staubs im Eis
- Staubschicht im Eis zwischen -2085m und -2165m: veto region

Abbildung:
Neutrinoquellen
("Review Article", 2010
[8])

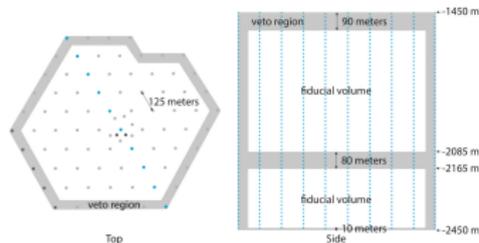
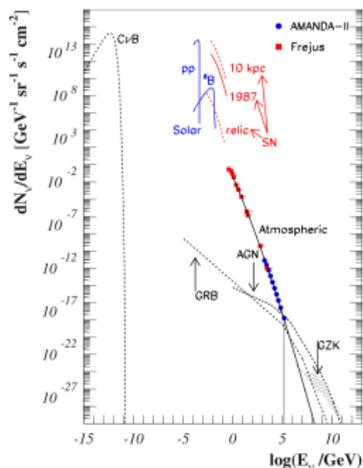


Abbildung: veto
regions von IceCube
[1]

Background



- größte Störquelle: Atmosphärische Neutrinos
→ Übergang zu hohen Energien (siehe Abb.)
- IceCube wertet nur Ereignisse mit mehr als 6000 p.e. aus
- Dustlogger messen Effekt des Staubs im Eis
- Staubschicht im Eis zwischen -2085m und -2165m: veto region
- Ausschluss: Teilchen mit mehr als 250 p.e. in veto region

Abbildung:
Neutrinoquellen
("Review Article", 2010
[8])

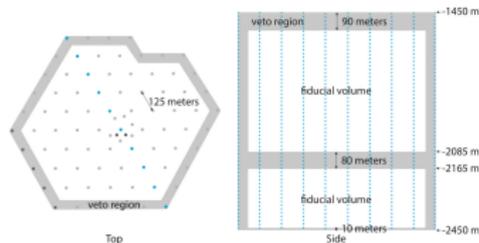


Abbildung: veto
regions von IceCube
[1]

Gliederung

- 1 Was sind extraterrestrische Neutrinos?
 - extraterrestrische Neutrinos
 - Quellenanalyse
- 2 Vom Neutrino zum Photon
 - Vom Neutrino zum geladenen Teilchen
 - Vom geladenen Teilchen zum Photon
- 3 Das IceCube Experiment
 - Entstehung und Aufbau des Experiments
 - Vom Photon zum Ereignis im Detektor
- 4 **Ausblick und Zusammenfassung**
- 5 Quellen

Ausblick

Größere Detektoren

- IceCube Gen 2
 - Verdopplung der DOM's
 - Messbereich soll auf 10km^3 erweitert werden

Ziele

Ausblick

Größere Detektoren

- IceCube Gen 2
 - Verdopplung der DOM's
 - Messbereich soll auf 10km^3 erweitert werden
- KM3Net
 - Zusammenschluss mehrerer Detektoren im Mittelmeer
 - 3 Standorte: Italien, Griechenland, Frankreich

Ziele

Ausblick

Größere Detektoren

- IceCube Gen 2
 - Verdopplung der DOM's
 - Messbereich soll auf $10km^3$ erweitert werden
- KM3Net
 - Zusammenschluss mehrerer Detektoren im Mittelmeer
 - 3 Standorte: Italien, Griechenland, Frankreich

Ziele

- Karte von Hochenergiequellen im Universum
- Untersuchung von Dunkler Materie
- Untersuchung der Erzeugungsmechanismen
- Neutrino Oszillationen, weitere Eigenschaften von Neutrinos

Zusammenfassung

- extraterr. Neutrinos schwer zu detektieren! → große Detektoren

Zusammenfassung

- extraterr. Neutrinos schwer zu detektieren! → große Detektoren
- IceCube ergänzt die Himmelskarte um einen weiteren “Filter“

Zusammenfassung

- extraterr. Neutrinos schwer zu detektieren! → große Detektoren
- IceCube ergänzt die Himmelskarte um einen weiteren “Filter“
- IceCube kann alle Neutrino flavor detektieren!

Zusammenfassung

- extraterr. Neutrinos schwer zu detektieren! → große Detektoren
- IceCube ergänzt die Himmelskarte um einen weiteren “Filter“
- IceCube kann alle Neutrino flavor detektieren!
- Neutrinos erzeugen Leptonen gleicher Sorte

Zusammenfassung

- extraterr. Neutrinos schwer zu detektieren! → große Detektoren
- IceCube ergänzt die Himmelskarte um einen weiteren “Filter“
- IceCube kann alle Neutrino flavor detektieren!
- Neutrinos erzeugen Leptonen gleicher Sorte
- hochenergetische Leptonen erzeugen Čerenkov-Strahlung im Eis

Zusammenfassung

- extraterr. Neutrinos schwer zu detektieren! → große Detektoren
- IceCube ergänzt die Himmelskarte um einen weiteren “Filter“
- IceCube kann alle Neutrino flavor detektieren!
- Neutrinos erzeugen Leptonen gleicher Sorte
- hochenergetische Leptonen erzeugen Čerenkov-Strahlung im Eis
- Čerenkov-Strahlung wird detektiert und analysiert

Zusammenfassung

- extraterr. Neutrinos schwer zu detektieren! → große Detektoren
- IceCube ergänzt die Himmelskarte um einen weiteren “Filter“
- IceCube kann alle Neutrino flavor detektieren!
- Neutrinos erzeugen Leptonen gleicher Sorte
- hochenergetische Leptonen erzeugen Čerenkov-Strahlung im Eis
- Čerenkov-Strahlung wird detektiert und analysiert
- ν_μ bessere Richtungsauflösung, schlechtere Energieauflösung als ν_e, ν_τ

Gliederung

- 1 Was sind extraterrestrische Neutrinos?
 - extraterrestrische Neutrinos
 - Quellenanalyse
- 2 Vom Neutrino zum Photon
 - Vom Neutrino zum geladenen Teilchen
 - Vom geladenen Teilchen zum Photon
- 3 Das IceCube Experiment
 - Entstehung und Aufbau des Experiments
 - Vom Photon zum Ereignis im Detektor
- 4 Ausblick und Zusammenfassung
- 5 Quellen

Literaturnachweise

Publikationen

- [1] M. G. Aartsen u. a. „Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector“. In: *Science* 342 (2013), S. 1242856. arXiv: 1311.5238 [astro-ph.HE].
- [2] M. G. Aartsen u. a. „IceCube-Gen2: A Vision for the Future of Neutrino Astronomy in Antarctica“. In: (2014). arXiv: 1412.5106.
- [7] Francis Halzen und Spencer R. Klein. „Invited Review Article: IceCube: An instrument for neutrino astronomy“. In: *Review of Scientific Instruments* 81.8 (2010), S. 081101. DOI: 10.1063/1.3480478.
- [12] Yolanda Sestayo. „Search strategies for discovering extraterrestrial neutrinos with IceCube“. In: *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* 626 (2011), S196–S199.

Bücher

- [6] Christian Gerthsen und Dieter Meschede. *Gerthsen Physik*. Springer Berlin, 2015.

Literaturnachweise (cont.)

weitere Online Ressourcen

- [5] „extraterrestrisch“ auf Spektrum online. URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/extraterrestrisch/4668>.
- [13] Webseite von IceCube. URL: <http://icecube.wisc.edu>.

Bilder

- [3] Hadiseh Alaeian. *An Introduction to Cherenkov Radiation*. 2014. URL: <http://large.stanford.edu/courses/2014/ph241/alaelian2/>.
- [4] Amber Case. *Übersicht der Leptonen*. URL: <https://goo.gl/images/btvQqZ>.
- [9] *How does Icecube work*. URL: http://icecube.wisc.edu/icecube/static/science/images/how_does_icecube_work.png.
- [10] *IceCube Detector*. URL: http://icecube.wisc.edu/icecube/static/science/images/icecube_detector_sm.png.
- [11] *Logo der Universität Heidelberg*. URL: <https://www.uni-heidelberg.de/einrichtungen/rektorat/kum/corporatedesign/logo.html>.