

Das Weltall als Labor – Aktuelles aus der Astroteilchenphysik

Die Darsteller

Teilchen und ihre
Wechselwirkungen

Ulrich F. Katz
Universität Erlangen
12. Oktober 2002

Kosmische Strahlung

Protonen, Kerne, Photonen

Teilchenquellen im Weltraum

Nicht erwähnt:

Axionen
Doppel- β -Zerfall
Gravitationswellen
 ν -Massenmessungen

Neutrinos

wie man sie misst und
was sie uns sagen

Dunkle Materie

der Schlüssel zu Astro-
und Teilchenphysik?



Bitte:

- **Unterbrechen Sie den Vortrag jederzeit mit Fragen, Kommentaren oder Widerspruch!**
- **Sagen Sie, wenn es zu schnell oder zu langsam geht!**

Danke!

Womit beschäftigt sich Astroteilchenphysik?

Was wird gemessen?

- Hochenergetische Teilchen aus dem Weltraum
 - Energie, Richtung, Ankunftszeit
 - Teilchenidentifizierung
 - Fluss (wieviele Teilchen pro Zeit, Fläche, Energieintervall)
 - Zusammenhang mit astronomischen Beobachtungen
- Reaktionen der Primärteilchen in Atmosphäre und Erde
 - Sekundärteilchen
 - Untersuchung des Erdinneren

Was wird erforscht?

- Hochenergetische Prozesse in astrophysikalischen Objekten
 - Aktive Galaktische Kerne, Gamma Ray Bursts, (Mikro)quasare, Supernovae, Sterne, ...
 - Beschleunigungsmechanismen
- Ausbreitung der Teilchen im interstellaren Raum
- Teilcheneigenschaften, z.B.
 - Suche nach neuen Teilchen und Wechselwirkungen
 - Neutrino-Oszillationen

Die Darsteller: "Materieteilchen"

Leptonen:



Ladung 0

Masse > 0, aber sehr klein

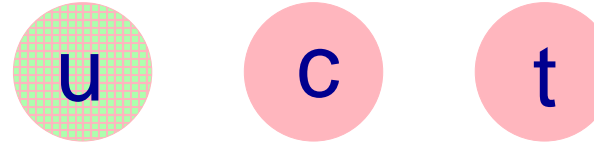


Ladung -1e

0.00054 M/M_{Proton} 0.113 1.894

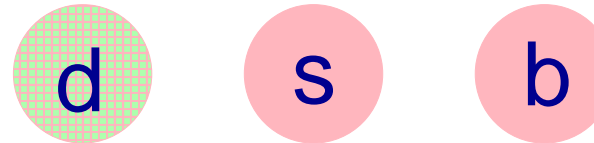
Leptonen kommen als freie Teilchen vor.

Quarks:



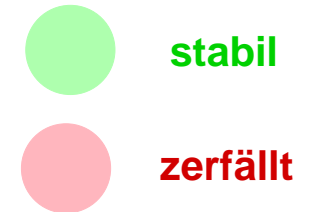
Ladung +2/3 e

~0.003 M/M_{Proton} ~1.33 ~185.8



Ladung -1/3 e

~0.006 M/M_{Proton} ~0.13 ~4.5



Quarks kommen nur in "Hadronen" gebunden vor:

Baryonen (qqq)

Proton p (uud)
Neutron n (udd)
...



Atomkerne

Mesonen (q \bar{q})

z.B. Pionen:
 π^+ (u \bar{d}), π^- ($\bar{u}d$)
 π^0 (d \bar{d} , u \bar{u})

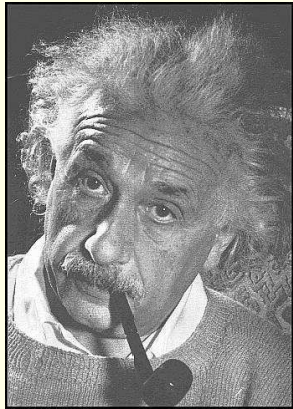
... und viele andere

Die Darsteller: "Wechselwirkungsteilchen"

Wechselwirkung	Quanten	Bemerkungen
Elektromagnetisch	Photonen (γ) Ladung = 0 Masse = 0	Radiowellen, Mikrowellen, Licht, Röntgenstrahlen, Gamma-Strahlen
Stark ("Kernkraft")	Gluonen (g) Ladung = 0 Masse = 0	Gluonen kommen nicht als freie Teilchen vor
Schwach	W^{\pm} – und Z^0 – Bosonen $M_W/M_p=85.7$ $M_Z/M_p=97.2$	Extrem massiv und instabil, in Labor- Experimenten erzeugt

... und dann war da noch: Das Higgs-Teilchen (spielt hier keine entscheidende Rolle)

Energien, Reaktionen, Beschleuniger



$$E = Mc^2$$

Zur Erzeugung schwerer Teilchen ist Energie nötig

Quantenmechanik:

- De Broglie: Teilchen sind Materiewellen mit $\lambda \propto 1/p \xrightarrow{E \gg Mc^2} c/E$.
- Auflösungsvermögen $\Delta x \gtrsim \lambda$.

Untersuchung kleiner Objekte erfordert hohe Energie.

Teilchenreaktionen in Beschleunigern

- **Schwerpunktenergie E_{cms} :** gemessen in GeV = 10^9 eV. (Protonmasse: $M_p c^2 \approx 0.938$ GeV)

- **Fixed-Target:**



$$E_{\text{cms}} \approx \sqrt{2E_{\text{Strahl}} M_{\text{Target}} c^2}$$

- **Collider:**



$$E_{\text{cms}} \approx 2\sqrt{E_1 E_2}$$

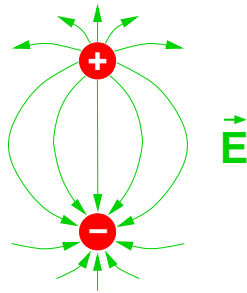
- **Höchste Energien (2002):**

Beschleuniger	E_{cms}
HERA/DESY, ep	320 GeV
LEP/CERN, e^+e^-	90–210 GeV
TeVatron/USA, $p\bar{p}$	2000 GeV

Achtung: für TeVatron-Energie in Fixed-Target-Modus bräuchte man eine Strahlenergie 2 000 000 GeV

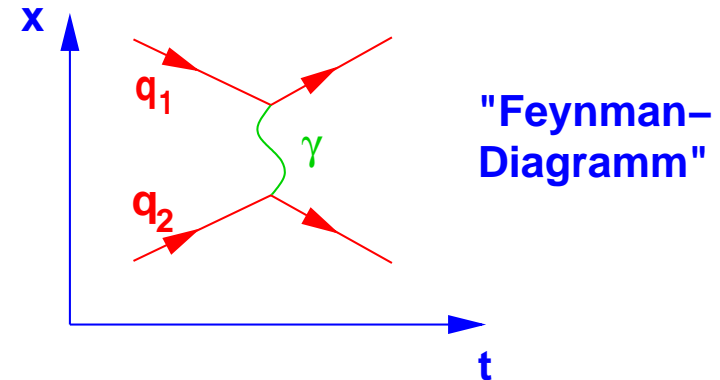
Elektromagnetische Wechselwirkung

... wirkt auf alle geladenen Teilchen!



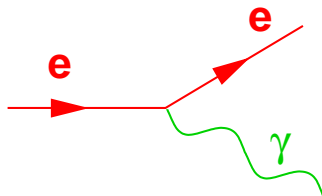
Klassisch: Kraftwirkung durch elektrisches Feld

Quantenelektrodynamik (QED)

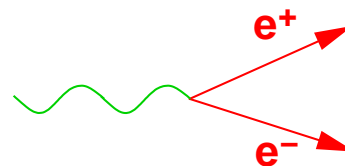


QED: Wechselwirkung durch Photon-Austausch; ergibt hochpräzise Beschreibung der Wechselwirkungsdynamik

Beispiele:

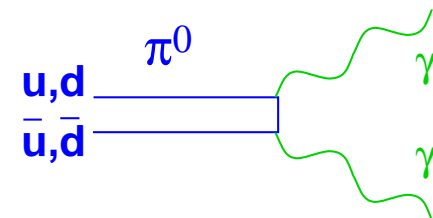


Synchrotronstrahlung:
Beschleunigte Elektronen
(in E- oder B-Feld !)
strahlen Photonen ab.



Paarerzeugung (z.B. im
Feld eines Atomkerns):

$$\gamma A \rightarrow e^+ e^- A$$



π^0 -Zerfall in zwei
Photonen:

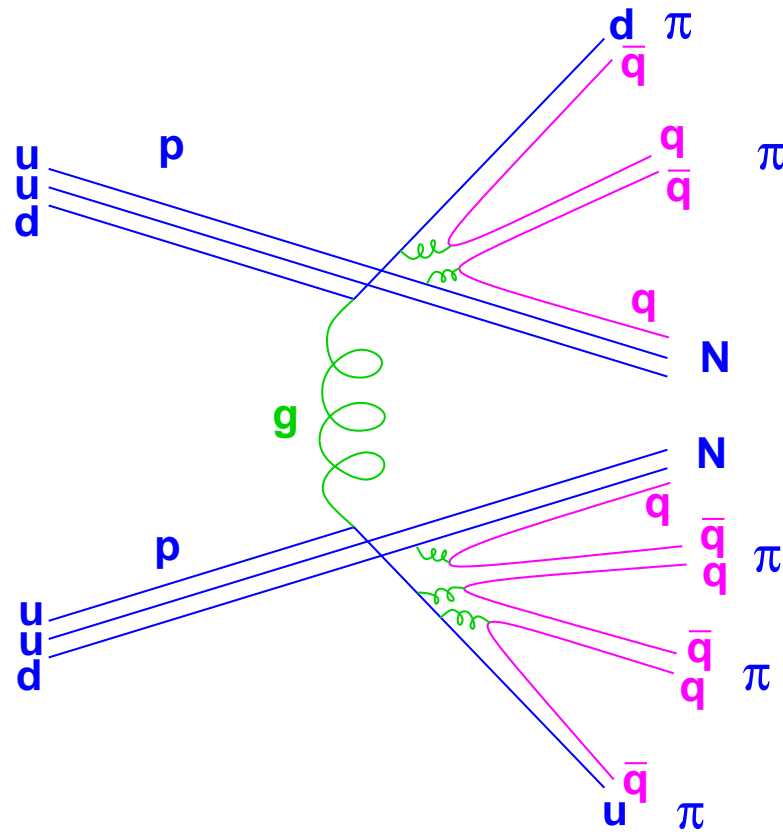
$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

Starke Wechselwirkung

... wirkt auf Quarks und Gluonen.

Die starke Wechselwirkung ist dominant bei Reaktionen von Hadronen miteinander.

Typisches Beispiel:



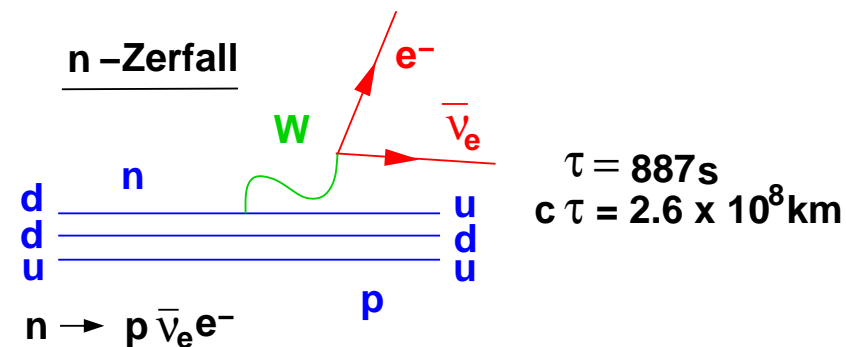
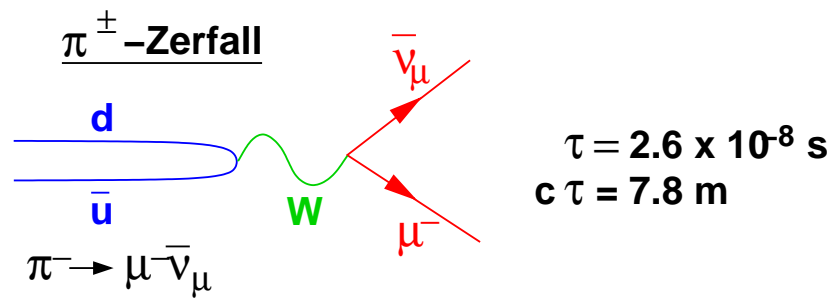
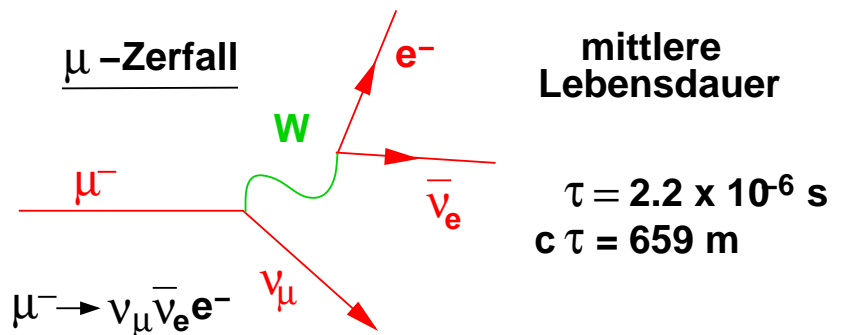
Charakteristische Merkmale:

- Viel stärker als elektromagnetische Wechselwirkung.
- Aber: erfordert kleine Abstände der Reaktionspartner ($\lesssim 10^{-15} \text{ m}$).
- Quarkzahl $N(q) - N(\bar{q})$ konstant.
 \Rightarrow Baryonen-Zahl bleibt erhalten.
 \Rightarrow Mesonen können erzeugt werden.
- Neutronen (n) und π 's werden durch die starke Wechselwirkung erzeugt aber zerfallen elm. oder schwach.
- Theorie der starken Wechselwirkung: Quantenchromodynamik (QCD)

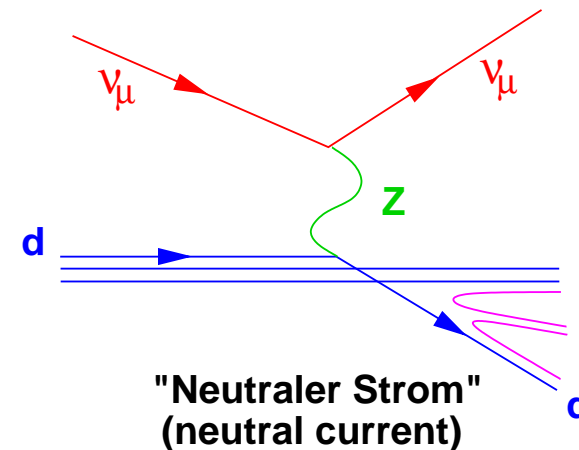
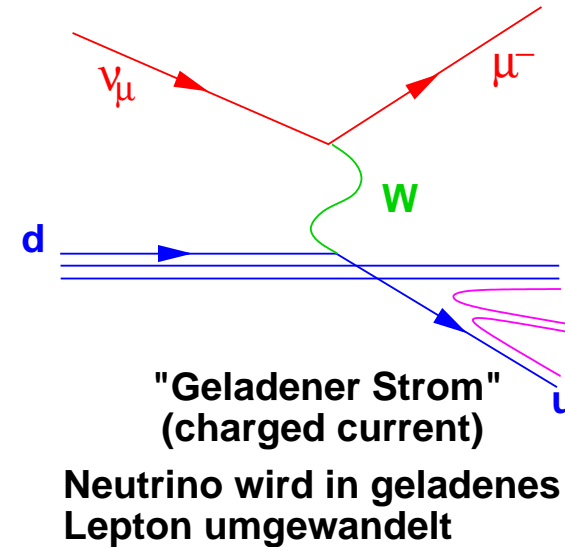
Schwache Wechselwirkung

... wirkt auf alle Leptonen und Quarks,
einzige Wechselwirkung der Neutrinos!

Zerfälle:

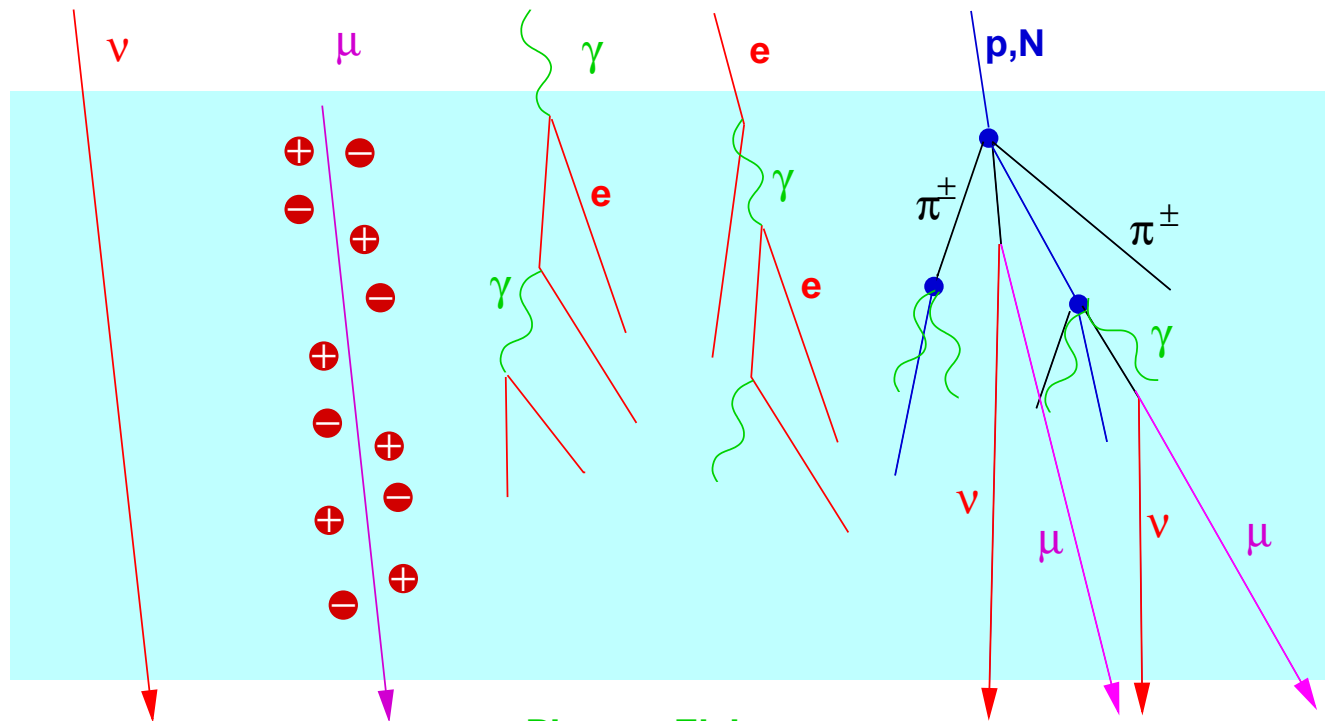


Reaktionen:



Wechselwirkung von Teilchen mit der Atmosphäre

Vereinfachte, schematische Darstellung:

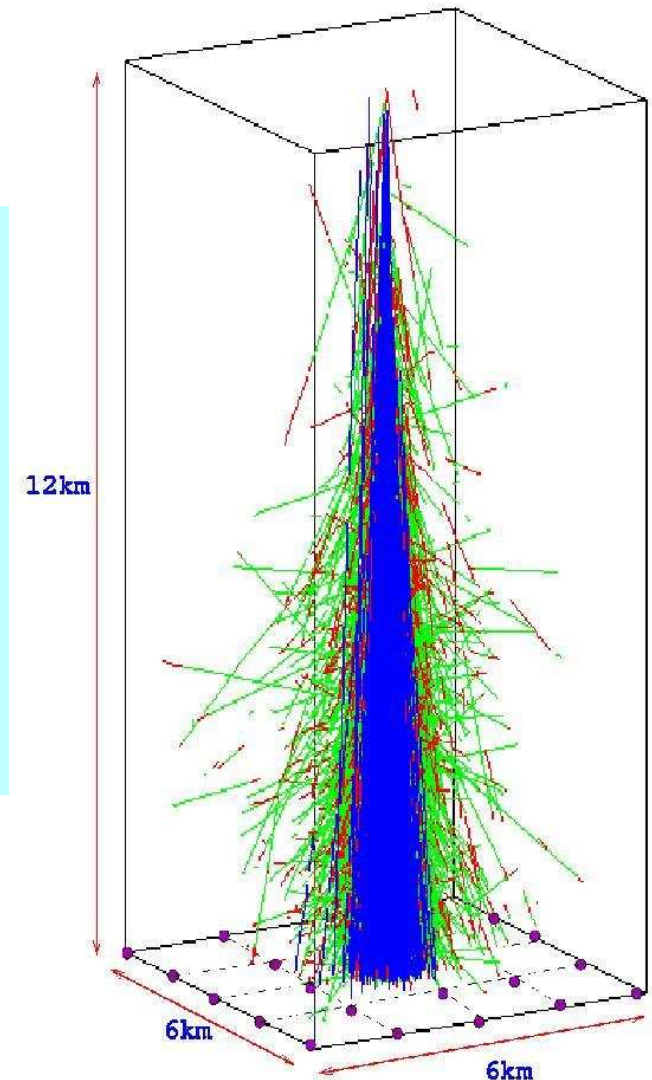


Neutrino: seltene Wechselwirkung (kann Lichtjahre Blei durchqueren)

Photon, Elektron: elektromagnetische Kaskade durch Paarerzeugung und Bremsstrahlung

Myon: verliert Energie durch Ionisation, aber hat große Reichweite (bis mehrere km in H_2O)

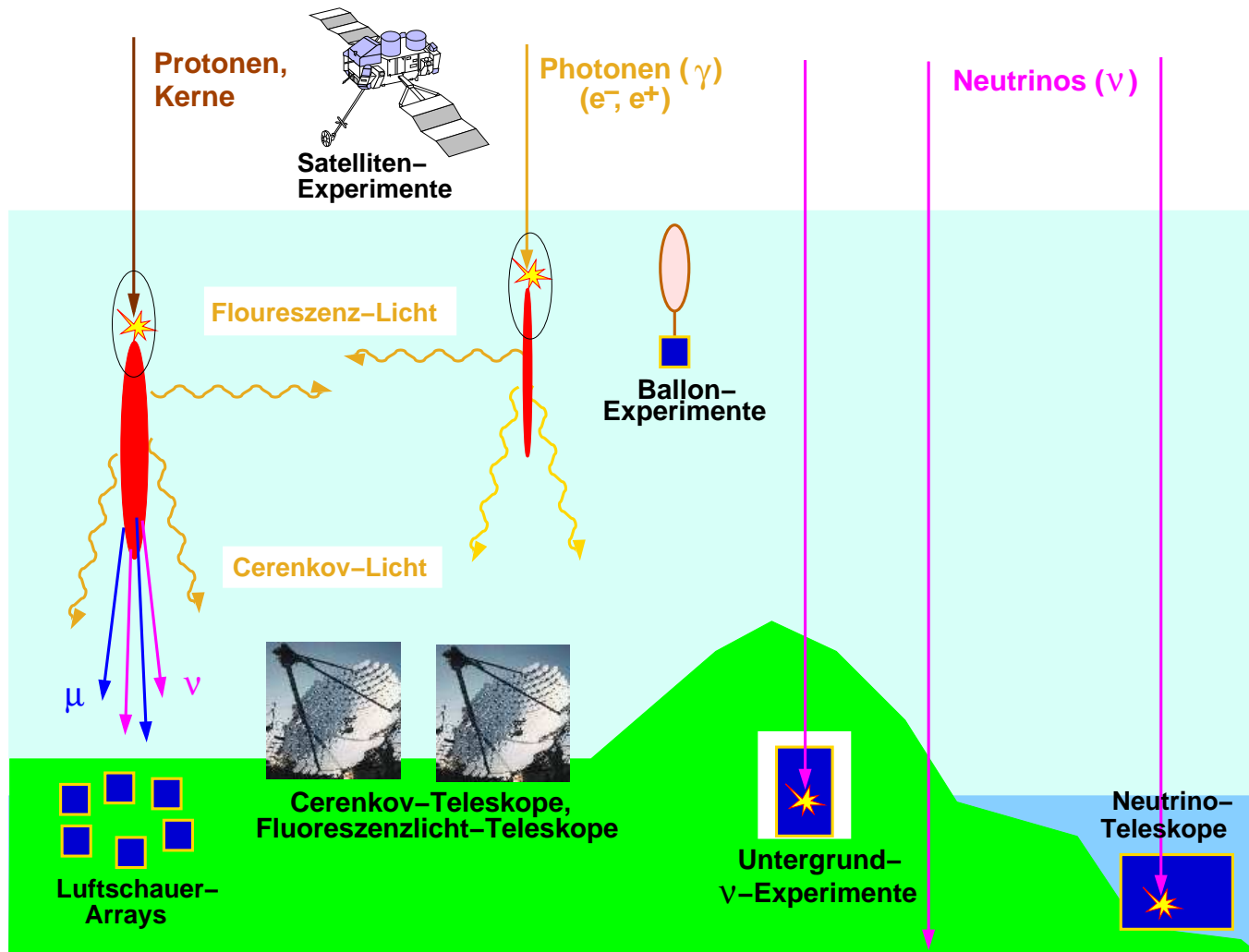
Protonen, Kerne: hadronische Kaskade mit Myonen und Neutrinos (π^\pm -Zerfälle) und Photonen / elm. Kaskaden (von π^0 -Zerfällen)



Simulierter hadronischer Schauer mit $E = 10^{10}$ GeV (10^{11} Sekundärteilchen auf Meereshöhe)

Kosmische Strahlung

aus dem Weltall



Protonen, Kerne

- Ablenkung in Magnetfeldern
→ Quelle unbekannt.
- Hadronischer Schauer in Atmosphäre.

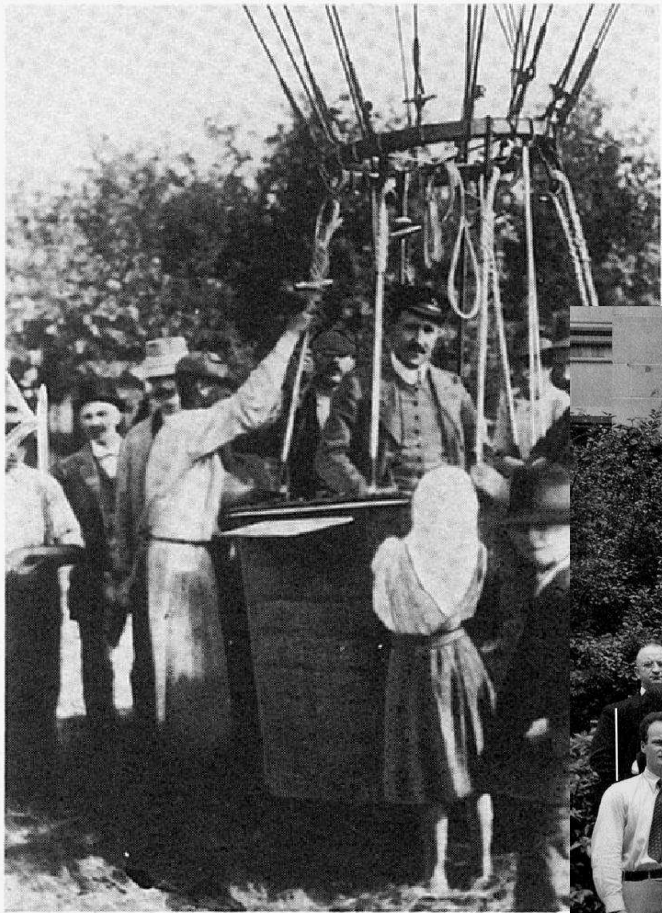
Photonen (γ)

- Keine Ablenkung.
- Niedrige Energie: Radio, Licht, Röntgen.
- Hohe Energie: teilchenartig, elektromagnetischer Schauer.

Neutrinos (ν)

- Keine Ablenkung.
- Reaktionswahrscheinlichkeit sehr klein.
- Massive Detektoren, dicke Abschirmung.

Wie alles anfang . . .



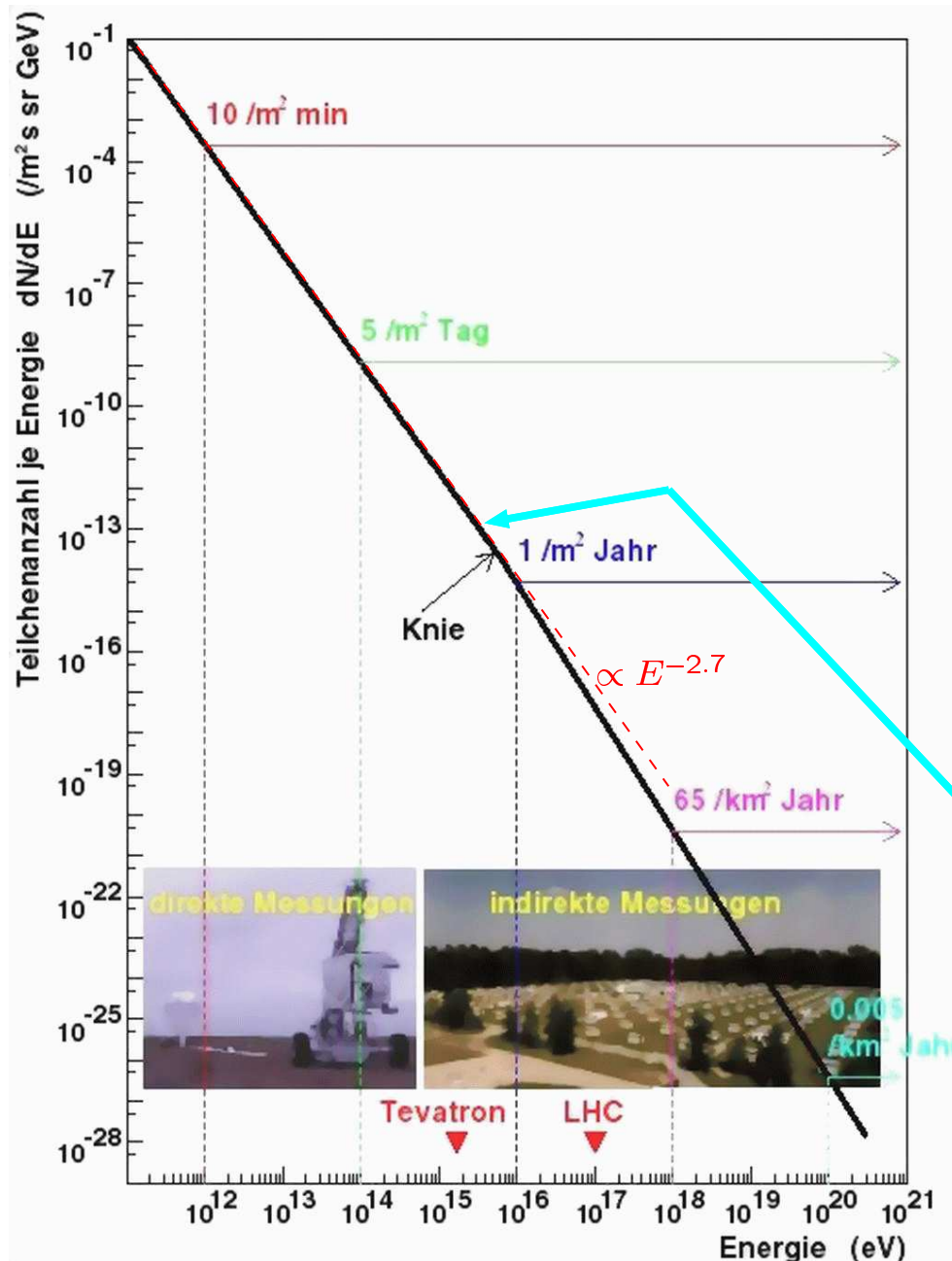
Hess bei Ballonlandung (1912).

1912:
Entdeckung der
kosmischen
Strahlung durch
Victor Hess

1939:
Teilnehmer am *Symposium on Cosmic Rays*, Chicago



Geladene Primärteilchen: Energiespektrum und Fluss



Einige Ergebnisse:

- Der kosmische Teilchenfluss (Zahl der Teilchen pro Zeit, Fläche und Raumwinkel) variiert über **27 Größenordnungen** im Energiebereich $10^2 - 10^{12}$ GeV.
- Überwiegend Protonen/Kerne.
- Es wurden Teilchen mit bis zu 3×10^{12} GeV gemessen (kinetische Energie eines Tennisballs mit 180 km/h!).
- Schwerpunktennergien bei Wechselwirkung in Atmosphäre weit über heutigen Beschleunigern.

Knie

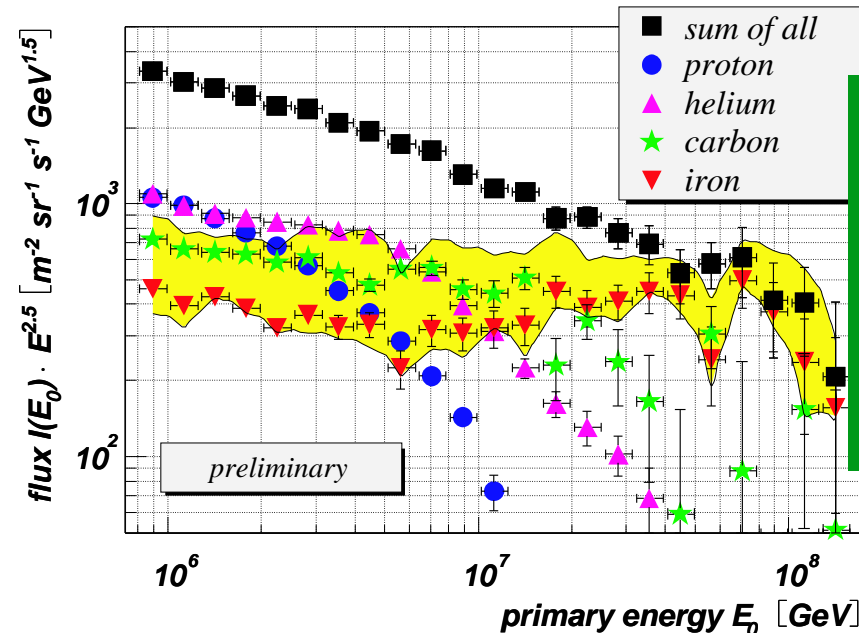
- Änderung des spektralen Index: $\Phi(E) \propto E^{-2.7} \rightarrow \Phi(E) \propto E^{-3}$.
- Vermutete Ursache: Bahnradius im galaktischen Magnetfeld wird $\sim \mathcal{O}(\varnothing_{\text{Galaxie}})$.

Messung im Bereich des Knies: Beispiel KASCADE



KASCADE:

- Luftschauder-Array im Forschungszentrum Karlsruhe
- Misst Schauer im Energiebereich des Knies
- Laterales Schauerprofil und Myon-Spektrum lassen Rückschluss auf Art des Primärteilchens zu.



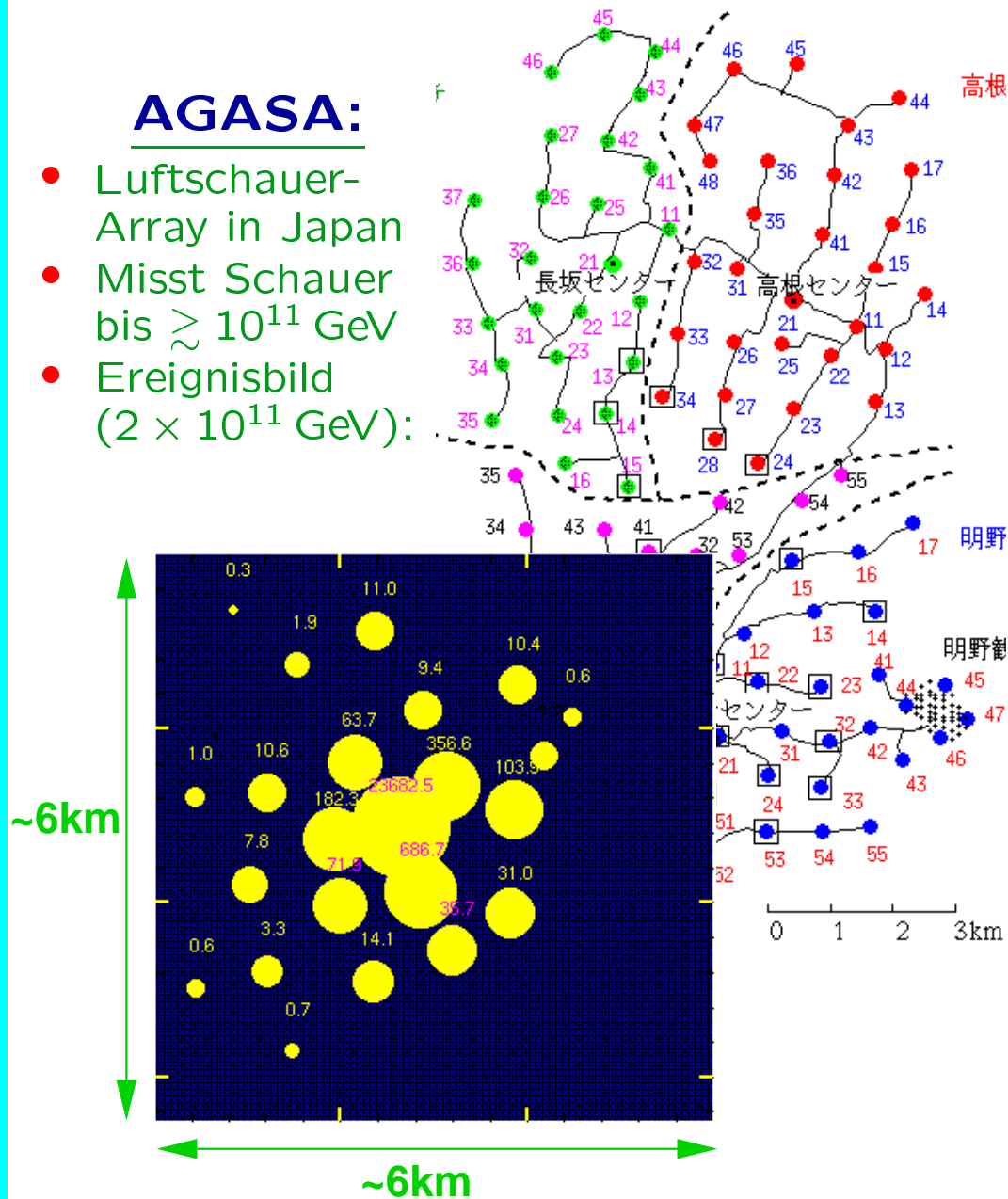
Im
galaktischen
Magnetfeld:

$$R \propto \frac{E}{Z}$$

Messung bei höchsten Energien

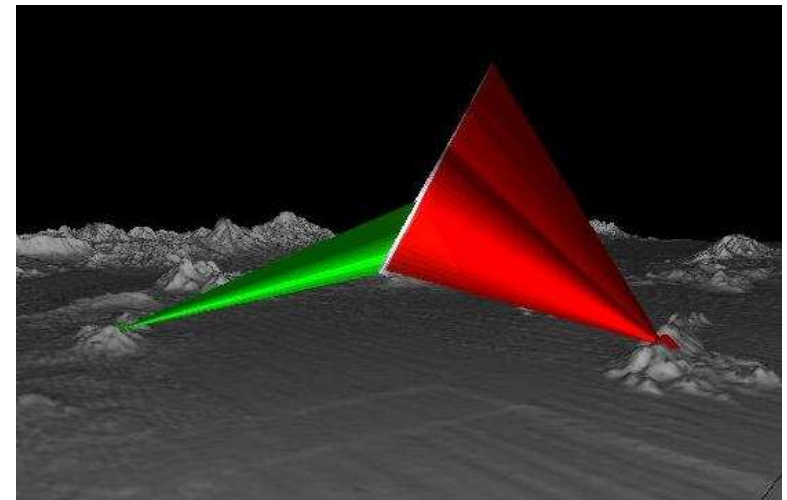
AGASA:

- Luftschauder-Array in Japan
- Misst Schauer bis $\gtrsim 10^{11}$ GeV
- Ereignisbild (2×10^{11} GeV):



HiRes:

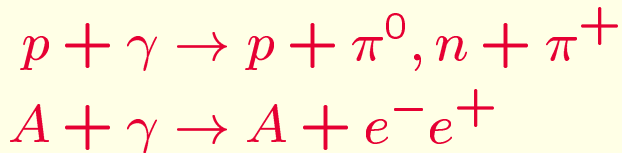
- Messung des Fluoreszenz-Lichts, das bei Anregung von N_2 durch Schauer-Teilchen entsteht.
- Zwei Messstationen in Utah, 13 km entfernt, decken 3000 km^2 ab.
- Stereoskopische Ereignis-Rekonstruktion erlaubt Energie- und Winkelmessung.
- Ereignisbild:



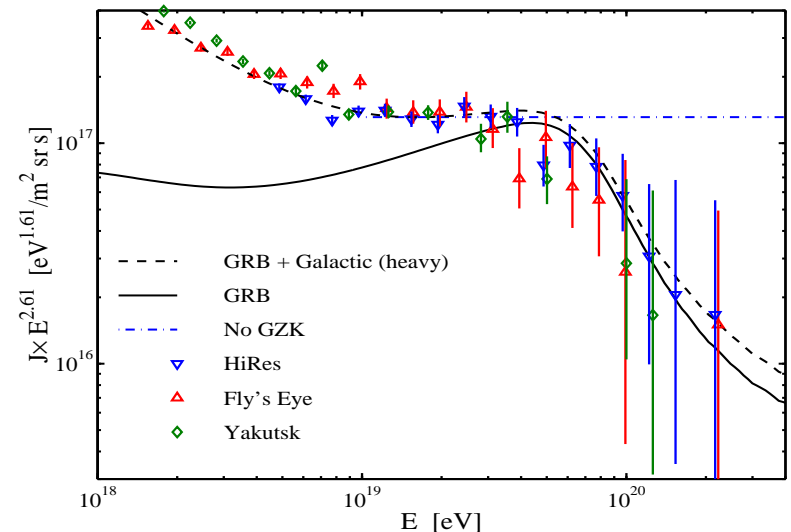
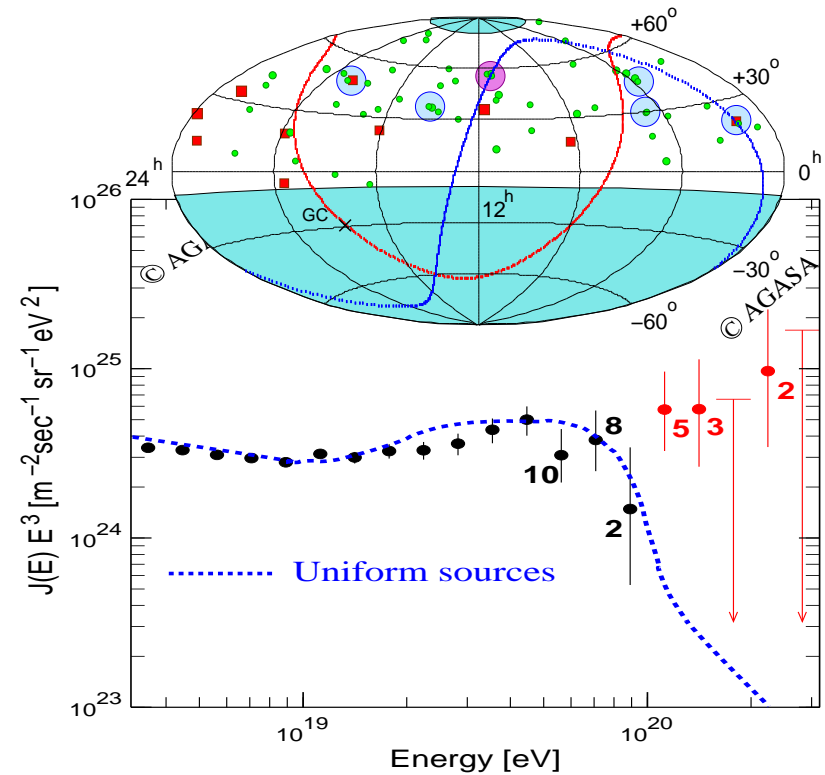
Das Rätsel der höchstenergetischen Strahlung

Der Greizen-Zatsepin-Kuzmin-Cutoff (GZK)

- Reaktionen von Protonen und Kernen mit der kosmischen Hintergrundstrahlung:



- Schwellenenergie einige 10^{10} GeV.
- Reduktion des Teilchenflusses für $E \gtrsim 10^{11}$ GeV erwartet (GZK-Cutoff).
- Ereignisse bei 10^{11} GeV (AGASA): entweder aus unserer Galaxis (keine möglichen Quellen, zu isotrop) oder Widerspruch zu GZK.
- Experimentelle Klärung erwartet:
Pierre-Auger-Observatory in Argentinien: 3000 km²-Array sowie Fluoreszenz-Teleskope, im Aufbau



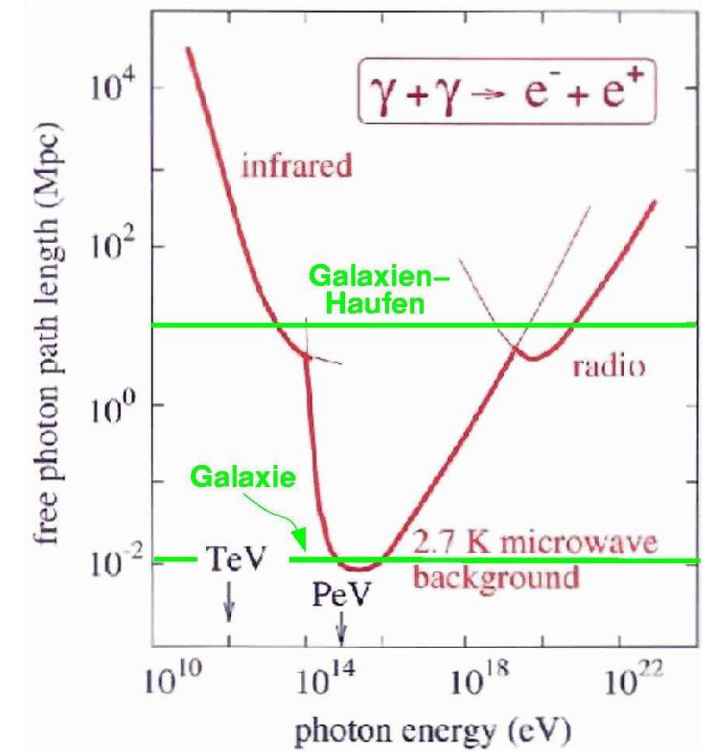
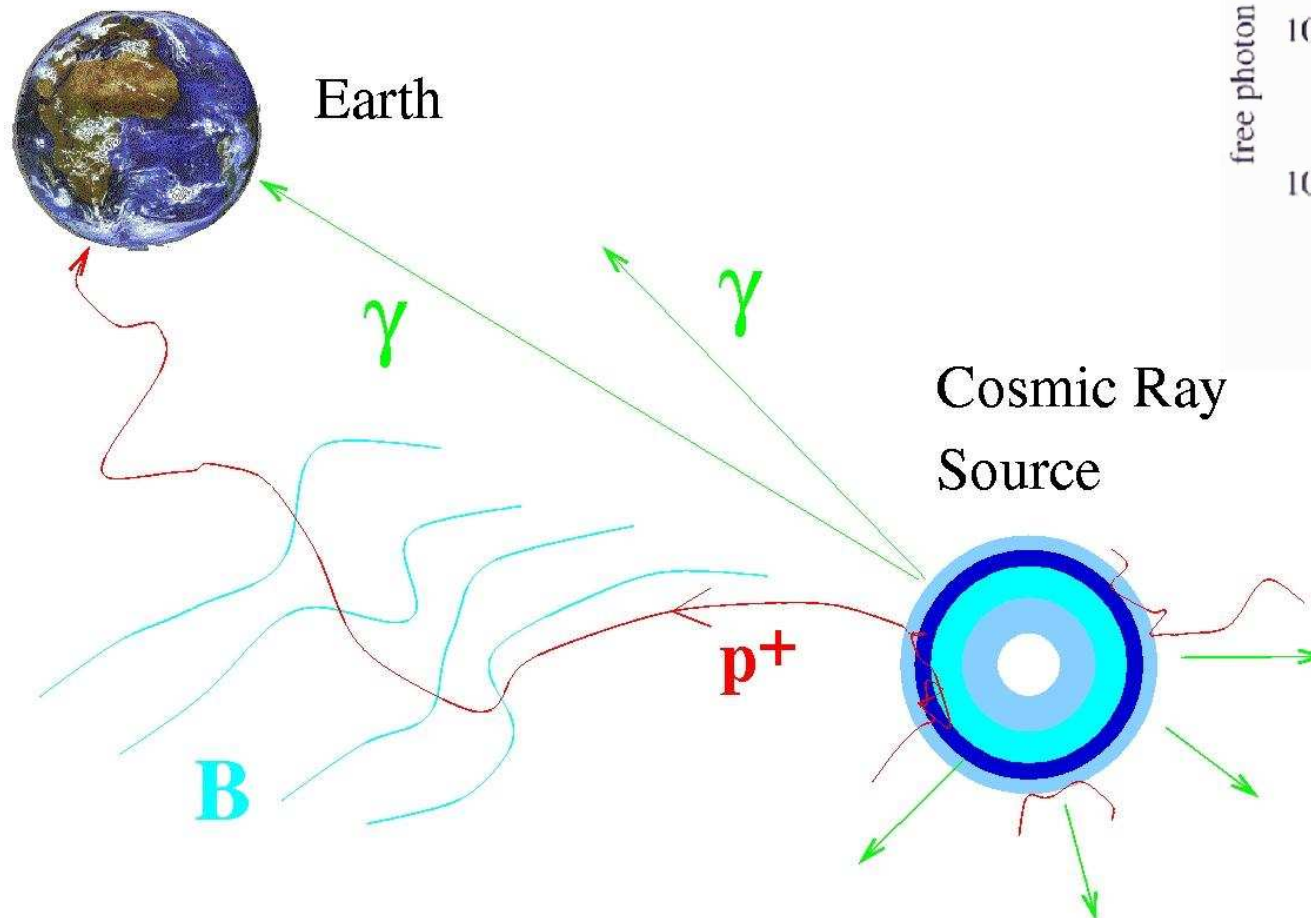
Gamma-Astronomie

Vorteil:

Geradlinige Ausbreitung der Photonen



Quellenidentifikation möglich

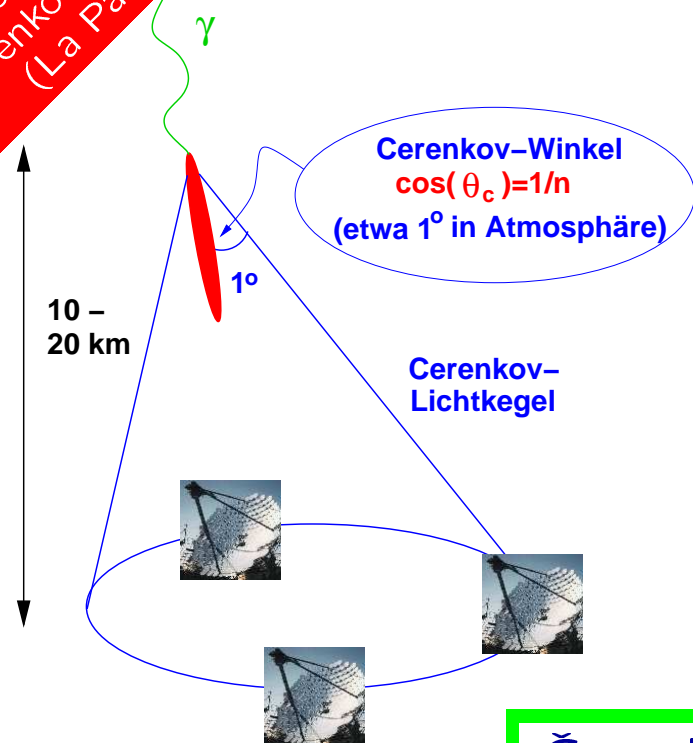


Nachteil:

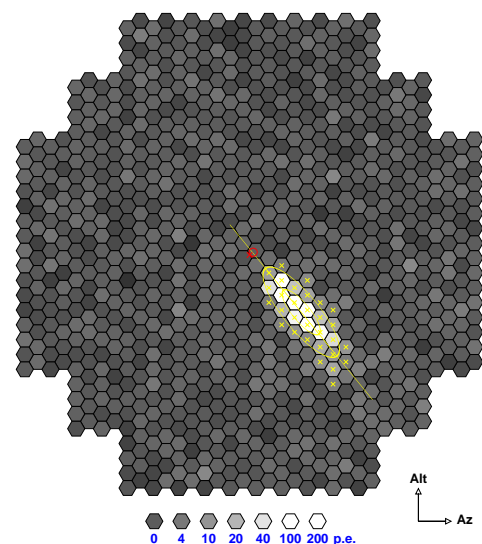
“Kleine”
Reichweite,
insbesondere
bei hohen
γ-Energien

MAGIC:
Zweites großes
Čerenkov-Teleskop
(La Palma)

Čerenkov-Teleskope (Beispiel: H.E.S.S.)



H.E.S.S. = High Energy Stereoscopic System
(Namibia, erstes Teleskop am 3.9.2002 eingeweiht)

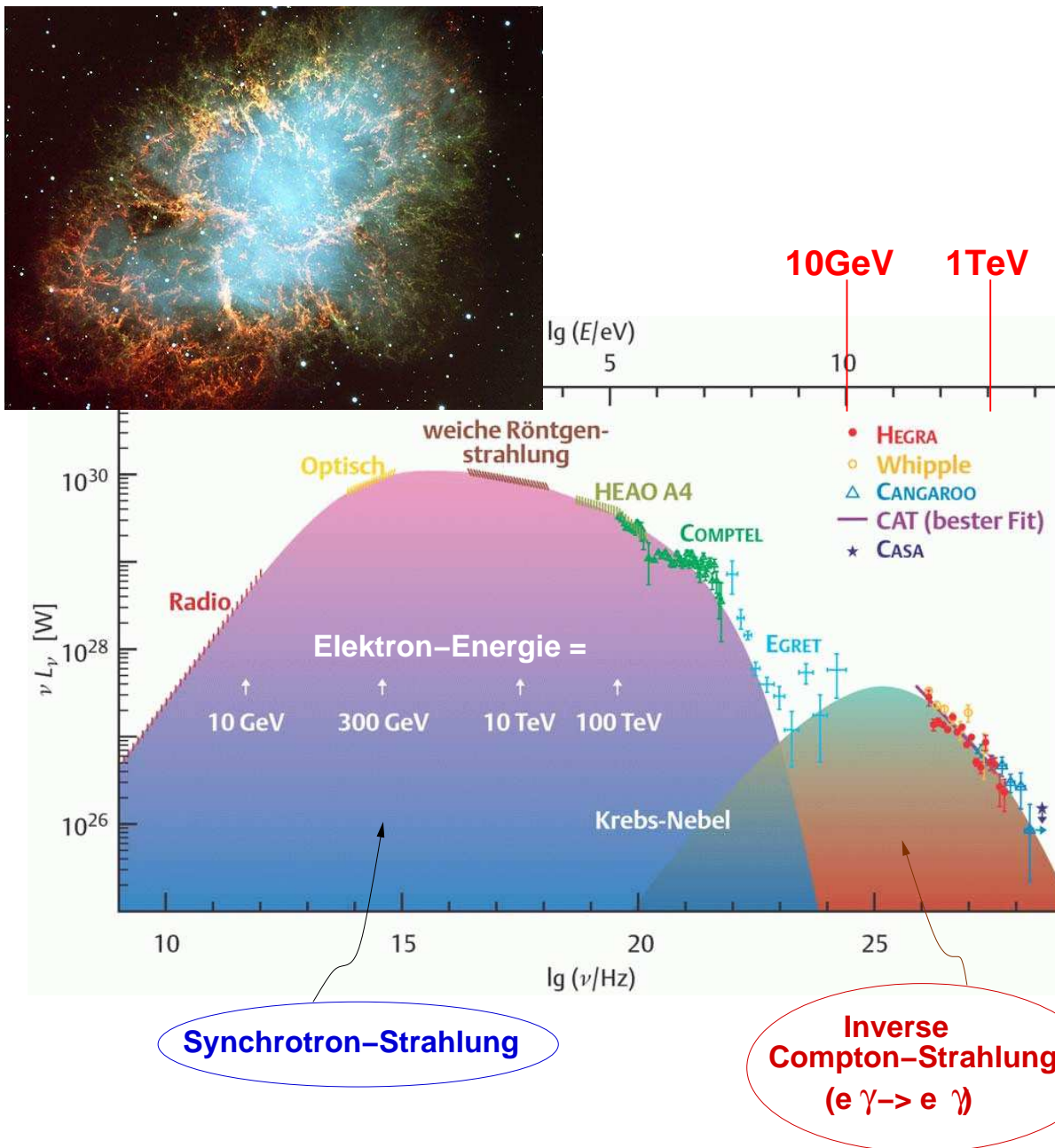


Čerenkov-Teleskope

- Čerenkov-Licht aus Luftschauern.
- Energiebereich $\gtrsim 10 - 50$ GeV.
- Photonen und Protonen/Kerne durch Schauerform unterscheidbar.



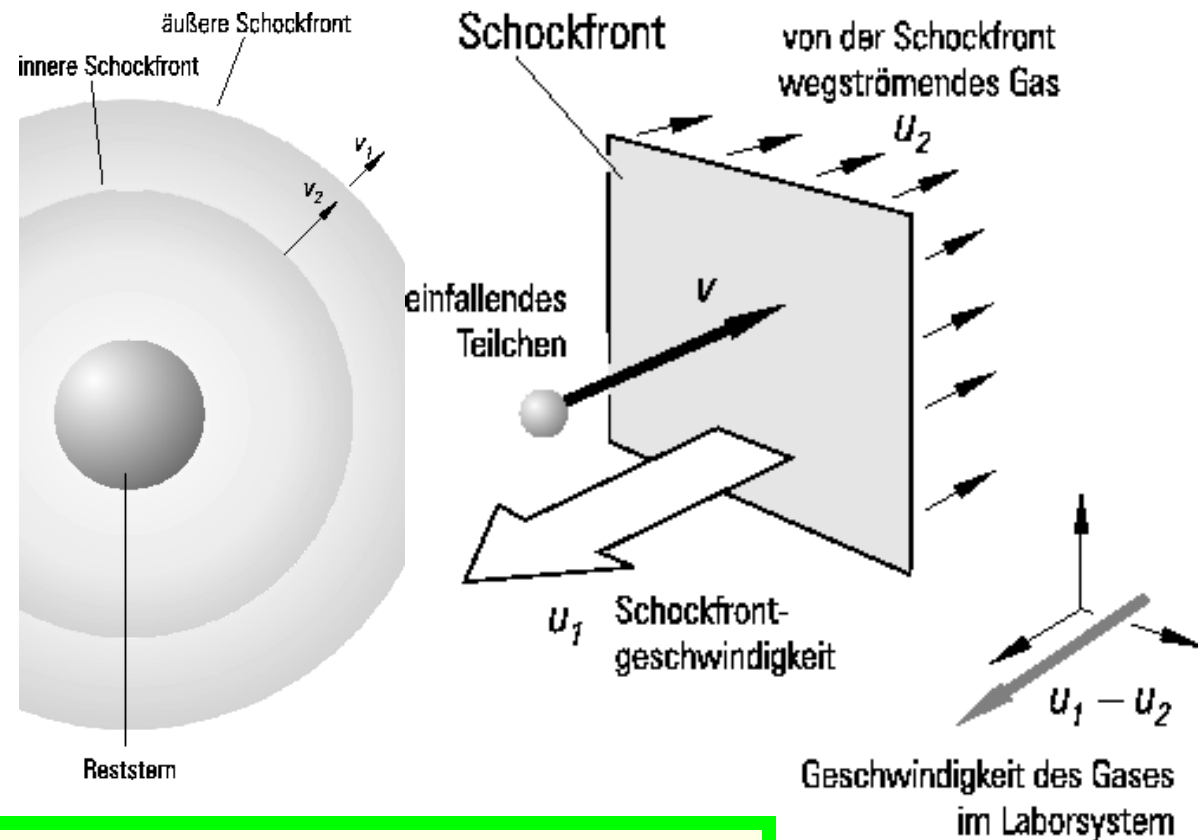
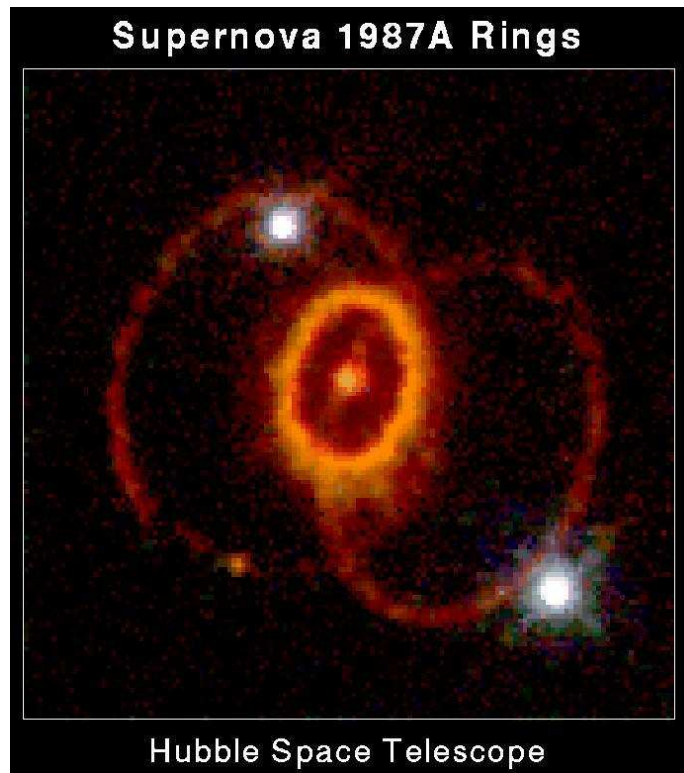
Gamma-Spektrum (Beispiel: Krebs-Nebel)



Beobachtungen und Fragen

- **Krebs-Nebel:**
 - Rest einer Supernova-Explosion 1054 n.Chr.
 - Ausgedehnte Materiewolke mit zentralem Pulsar.
 - Intensivste γ -Quelle.
- **Weitere γ -Quellen** beobachtet, auch extragalaktisch.
- **Fragen:**
 - Verstehen wir Spektrum und Zeitstruktur?
 - Gibt es hadronische γ -Quellen ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)?
- **Neue Daten:** Evidenz für π^0 -Zerfälle in Supernova-Rest RX J1713.7-3946 (Cangaroo-Koll.)

Kosmische Beschleuniger: Supernovae



Supernovae

- Sternexplosionen, wenn der Kerbrennstoff aufgebraucht ist.
- Kern: Neutronenstern oder schwarzes Loch, äußere Schichten: werden in Weltraum geschleudert, dabei entstehen Schockfronten.
- Reflexion von Teilchen zwischen Schockfronten führt zu Beschleunigung (Fermi-Mechanismus).
- Extreme elektromagnetische Felder (10^8 T , 10^{15} V/m).
- Supernovae erklären das Teilchenspektrum bis etwa 10^6 GeV .

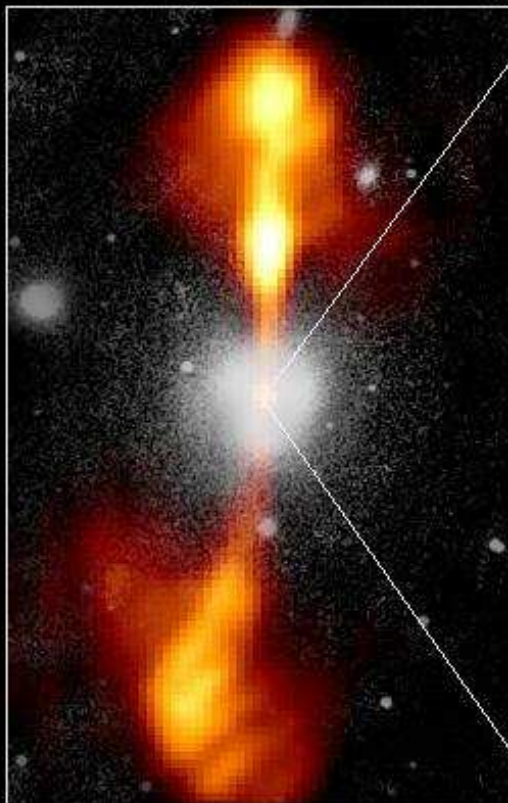
Aktive galaktische Kerne (AGNs)

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope
Wide Field / Planetary Camera

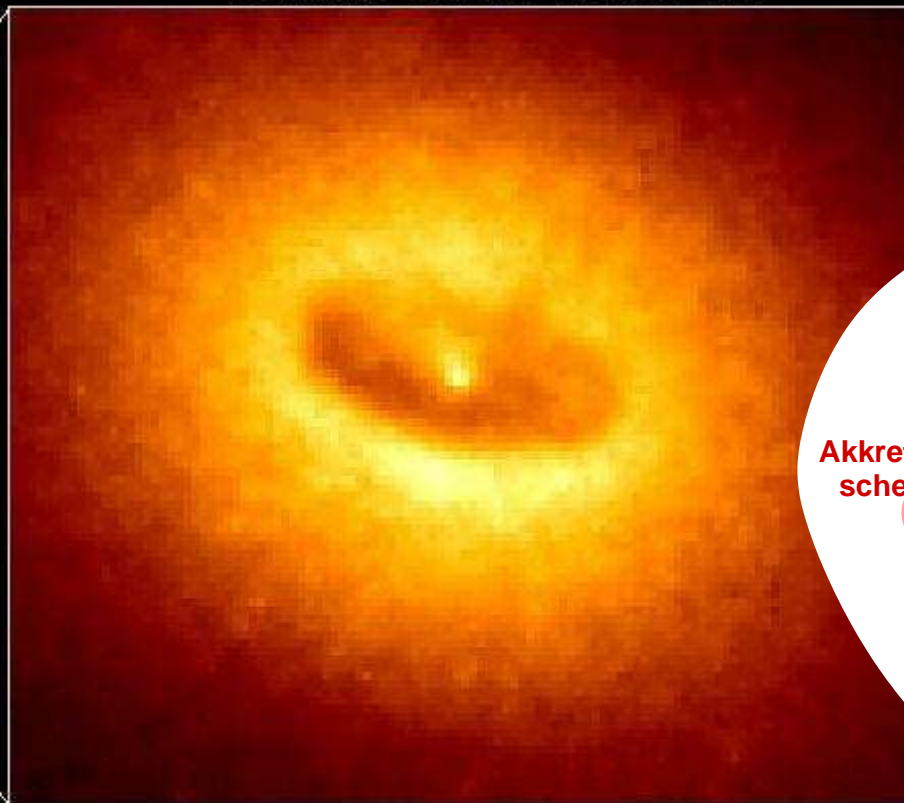
AGNs gehören zu den energie-reichsten bekannten Phänomenen

Ground-Based Optical/Radio Image

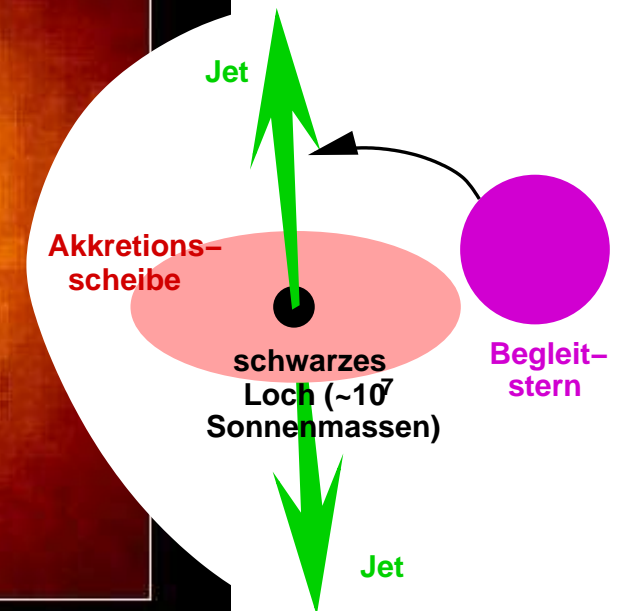


380 Arc Seconds
88,000 LIGHT-YEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



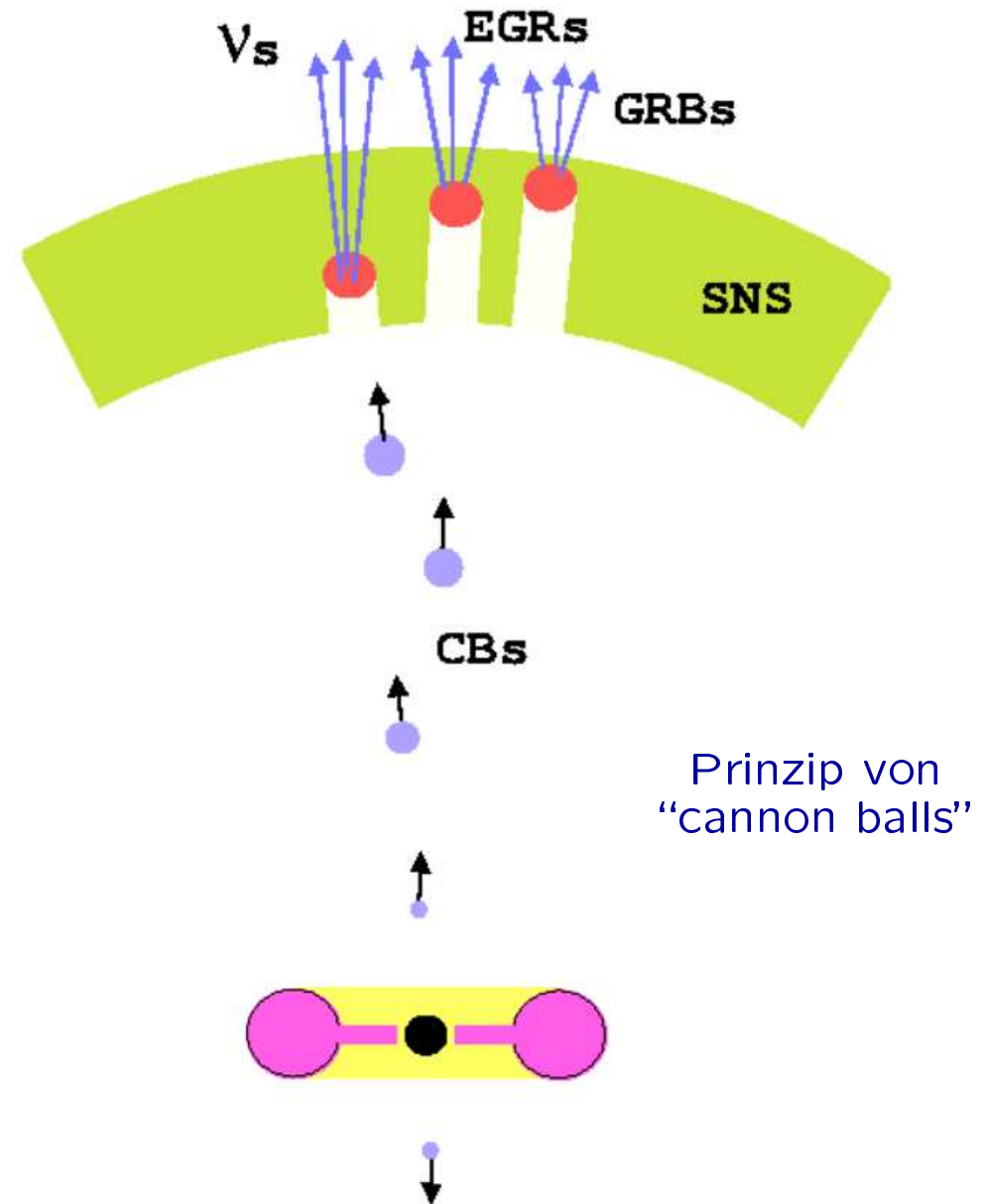
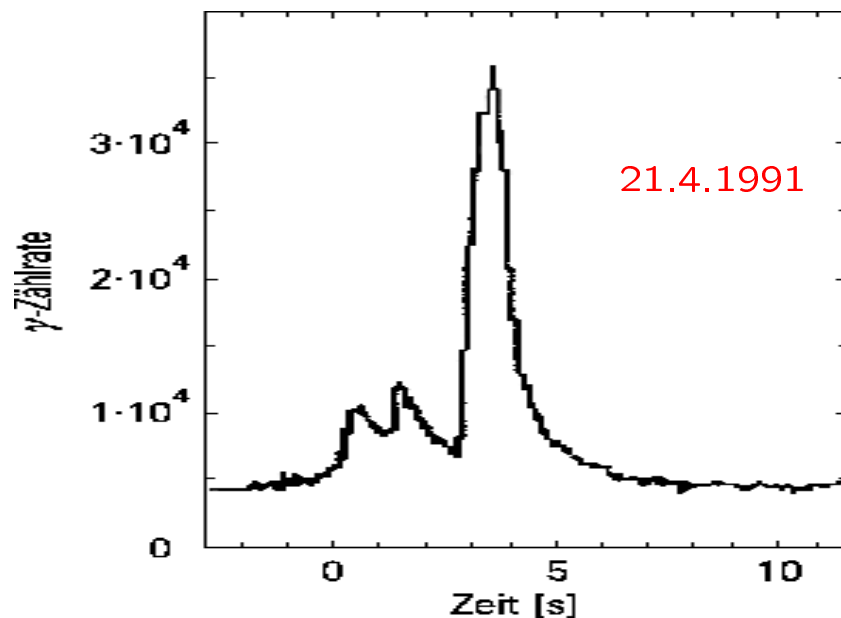
17 Arc Seconds
400 LIGHT-YEARS



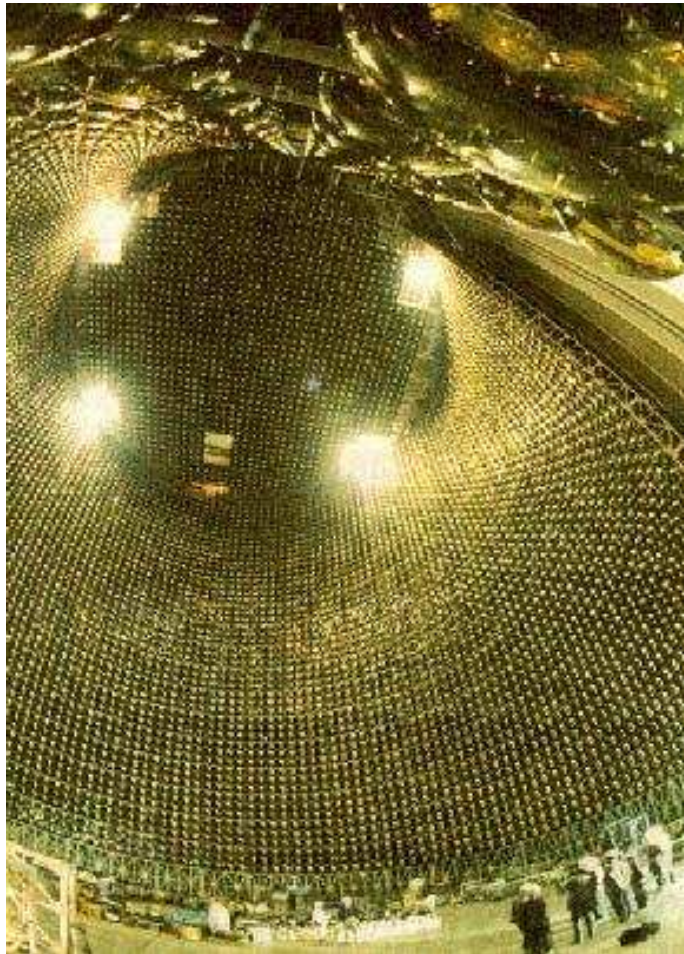
Gamma Ray Bursts (GRBs)

Was ist das?

- Kurze, extrem heftige Ausbrüche von hochenergetischer Gamma-Strahlung (einige MeV).
- Isotrope Richtungsverteilung, Rotverschiebung der "Gegenstücke" im sichtbaren Spektrum
⇒ extragalaktische Objekte.
- Energiereichste bekannte Prozesse.
- Entstehung unbekannt, verschiedene Hypothesen, z.B. "cannon balls".



Niederenergetische Neutrinos: Sonne und Supernovae



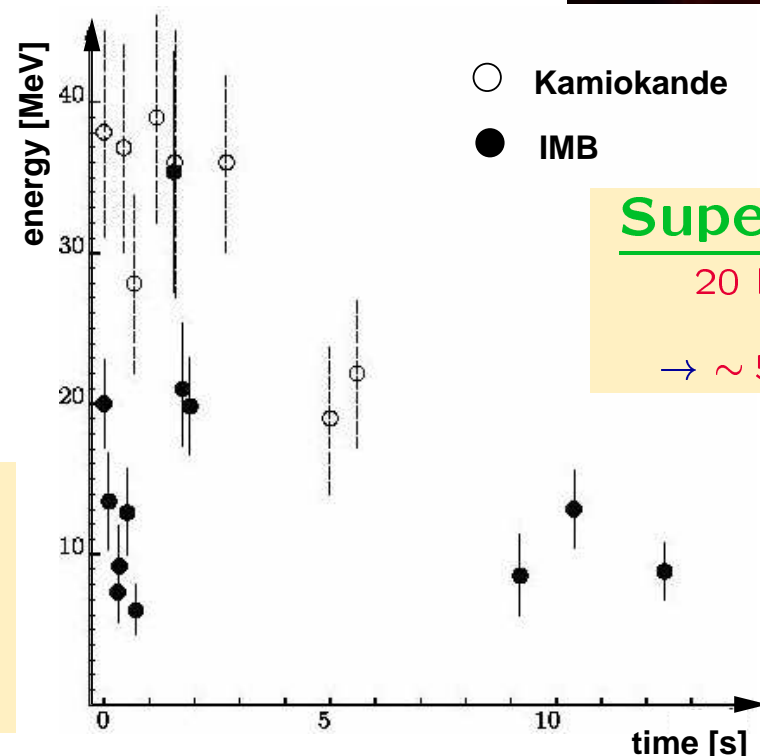
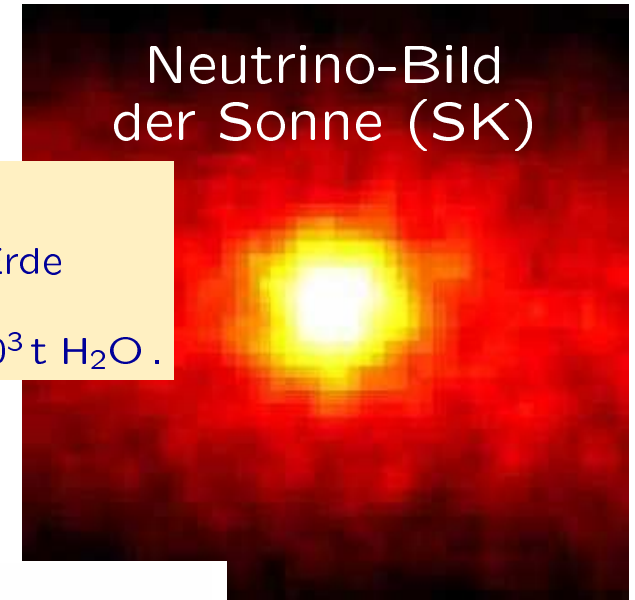
Experimente:

Super-Kamiokande (SK)
und viele andere
(Homestake, IMB, Gallex,
Sage, GNO, **SNO**, Borexino, ...)

Sonne:

- $\sim 3 \times 10^{10} \nu/\text{s}/\text{cm}^2$ auf Erde
($E \sim 0.1 \dots 10 \text{ MeV}$).
- SK: $\lesssim 1$ Ereignis/Tag/ $10^3 \text{ t H}_2\text{O}$.

Neutrino-Bild
der Sonne (SK)



Supernova SN1987a:

20 Ereignisse beobachtet
($E = 5 \dots 40 \text{ MeV}$)
→ ~ 500 Veröffentlichungen.

Nobel-Preis 2002 (www.nobel.se)



The Nobel Prize in Physics 2002

"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

"for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"



Raymond Davis Jr.

🏆 1/4 of the prize

USA

University of Pennsylvania
Philadelphia, PA,
USA

b. 1914



Masatoshi Koshiha

🏆 1/4 of the prize

Japan

University of Tokyo
Tokyo, Japan

b. 1926



Riccardo Giacconi

🏆 1/2 of the prize

USA

Associated Universities Inc.
Washington, DC,
USA

b. 1931
(in Genoa, Italy)

Neutrino-Nachweis in Super-Kamiokande und SNO

Solare Neutrinos:

Super-Kamiokande:

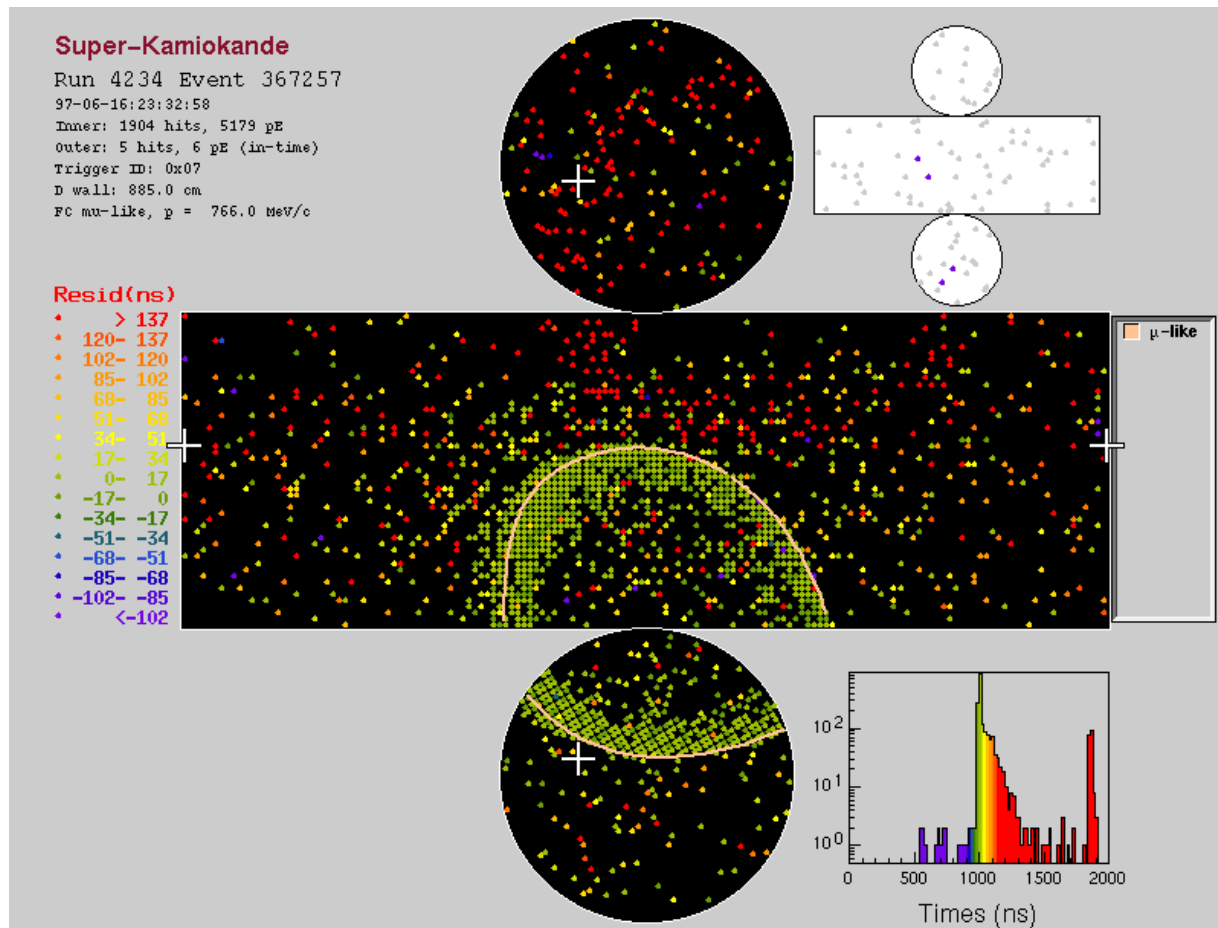
- Nachgewiesen wird das Čerenkov-Licht des gestreuten Elektrons bei elastischer Streuung:
 $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$.
- Schwelle: $E_\nu \gtrsim 5 \text{ MeV}$.
- Gestreutes Elektron hat Neutrino-Richtung.
- Fast "blind" für ν_μ, ν_τ .

SNO:

- Ähnlich wie SK, aber mit schwerem Wasser (D_2O).
- Zusätzliche Reaktionen:
 $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ (CC)
 $\nu_x + d \rightarrow n + p + \nu_x$ (NC)
- (NC) erlaubt den Nachweis von ν_e, ν_μ und ν_τ !
- Schwelle: $E_\nu \gtrsim 5 \text{ MeV}$.

Atmosphärische Neutrinos in SK:

- Energiebereich etwa $0.1 - 10 \text{ GeV}$.
- Nachweis über CC-Streuung:
 $\nu_e + N \rightarrow e + X, \nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$.
- Beispielereignis: Myon mit $E_{\text{rek.}} \approx 0.8 \text{ GeV}$



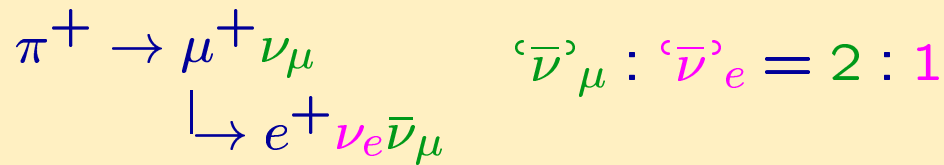
SNO NC-Messungen:
die fehlenden ν_e kommen als ν_μ oder ν_τ an.

Neutrino-Oszillationen

Solare Neutrinos (ν_e)

- Exp. Fluss/Vorhersage $\sim 0.3 - 0.6$ (hängt von E_ν -Bereich ab).
- "Anpassung" der Vorhersage schwierig bis unmöglich.

Atmosphärische Neutrinos



Quantenmechanische Mischung

ν -Masseneigenzustände
 \leftrightarrow ν -Flavor-Eigenzustände

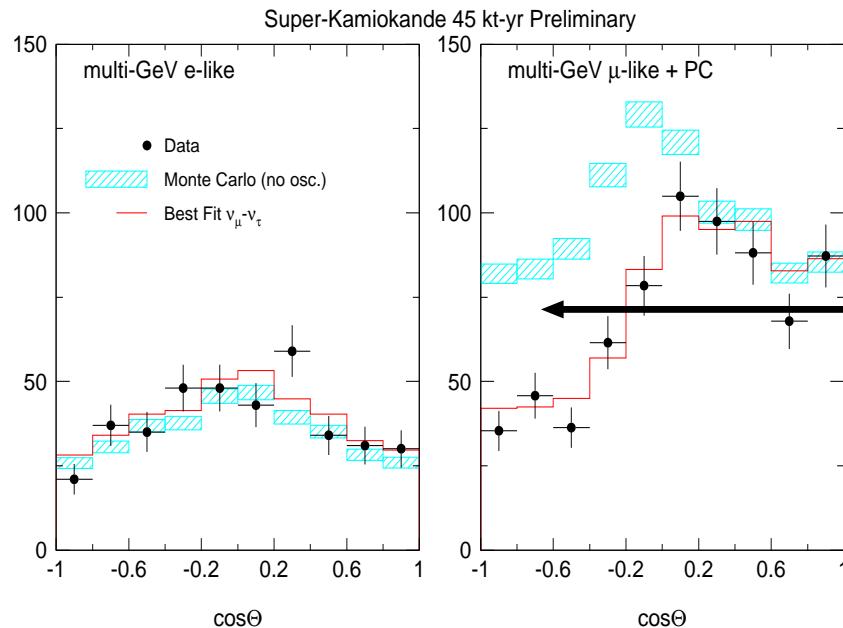
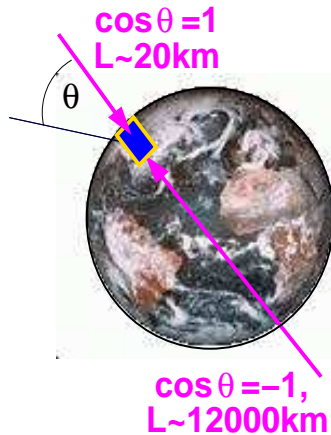
\Rightarrow ν -Oszillationen

$$P_{a \rightarrow b} = \sin^2(2\theta_{ab}) \sin^2 \frac{1.27 L [\text{km}] \Delta m_{ab}^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]}$$

Mischungswinkel

Massen²-Differenz

SK:
 $E_\nu \sim 0.1 \dots 10 \text{ GeV}$

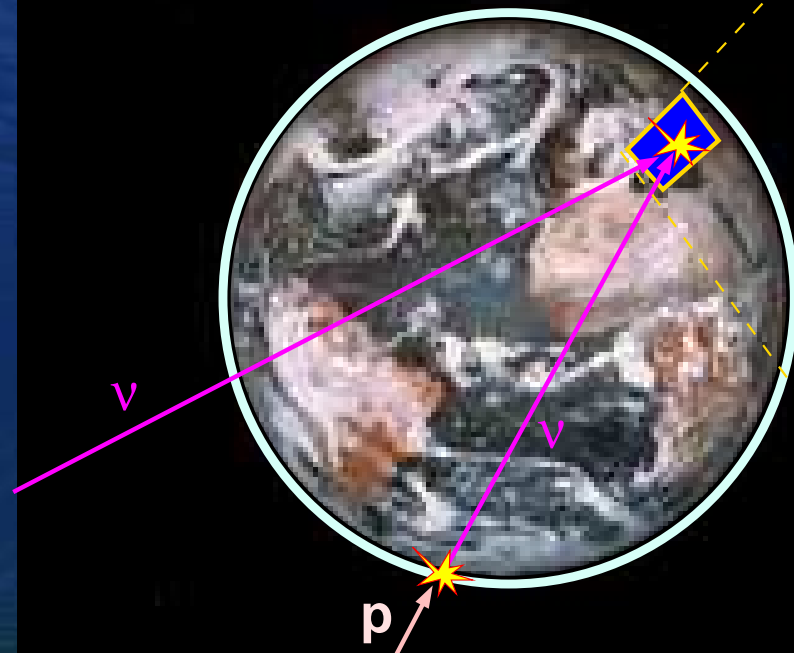


Interpretation

- $(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau)$ -Oszillationen.
- Bester Fit:
 $\Delta m^2 \sim 0.0025 \text{ eV}^2$,
 $\sin^2(2\theta) = 1$.

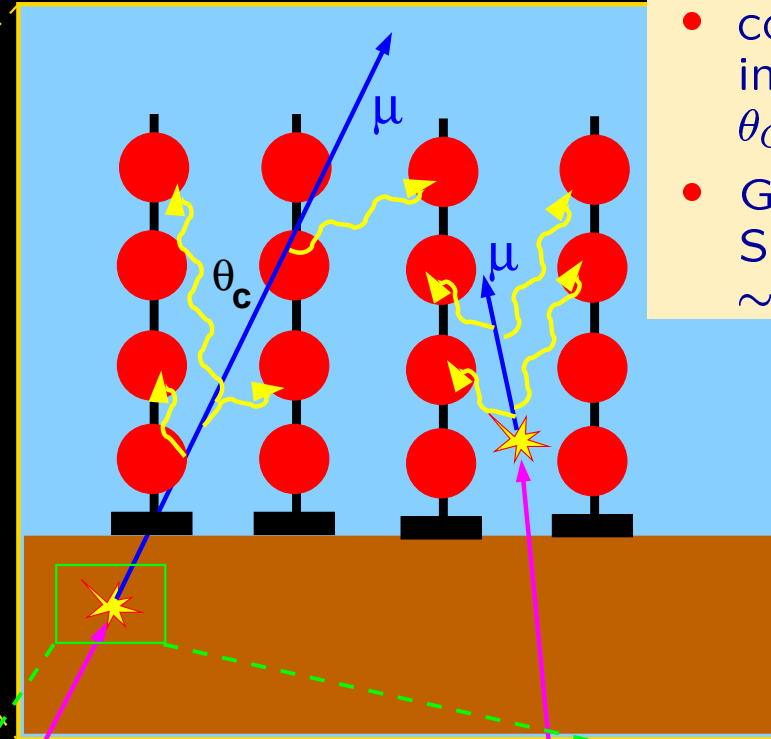
Neutrinooteleskope

- Baikal (Süßwasser)
- AMANDA/IceCube (Südpol, Eis)
- ANTARES/NEMO (Mittelmeer)
- DUMAND, NESTOR (Meer)



Rolle der Erde:

- Abschirmung gegen alle bekannten Teilchen außer ν 's.
- Atmosphäre = Target für Erzeugung sekundärer ν 's (atmosphärische ν 's).



Čerenkov-Licht:

- $\cos \theta_C \approx 1/n$;
in Wasser:
 $\theta_C = 42^\circ$.
- Genutzter Spektralbereich
 $\sim 350 - 500 \text{ nm}$.

Neutrino-Reaktionen:

- In Beschleuniger-Experimenten genau untersucht (insbesondere bei HERA).
- Extrapolation auf höchste Energien $\gtrsim 10^5 \text{ GeV}$ unsicher.
- Hauptsächlich: $\nu_\mu N \rightarrow \mu X$ (ν_μ CC).

Der ANTARES-Detektor

Künstlerische
Darstellung
(nicht detailgetreu)

Messziele:

- Neutrino-Fluss;
- Neutrino-Energie;
- Neutrino-Richtung;
- Neutrino-Flavor;
- Ankunftszeit.

Optisches Modul

- Ankunftszeit (± 1 ns)
- Signalthöhe
- Signalform

elektro-optischer
Tiefseekabel

String

Ferngesteuertes U-Boot
(Kabelverbindungen)

Verbindungskabel

Junction Box

String-Verankerung

12 m

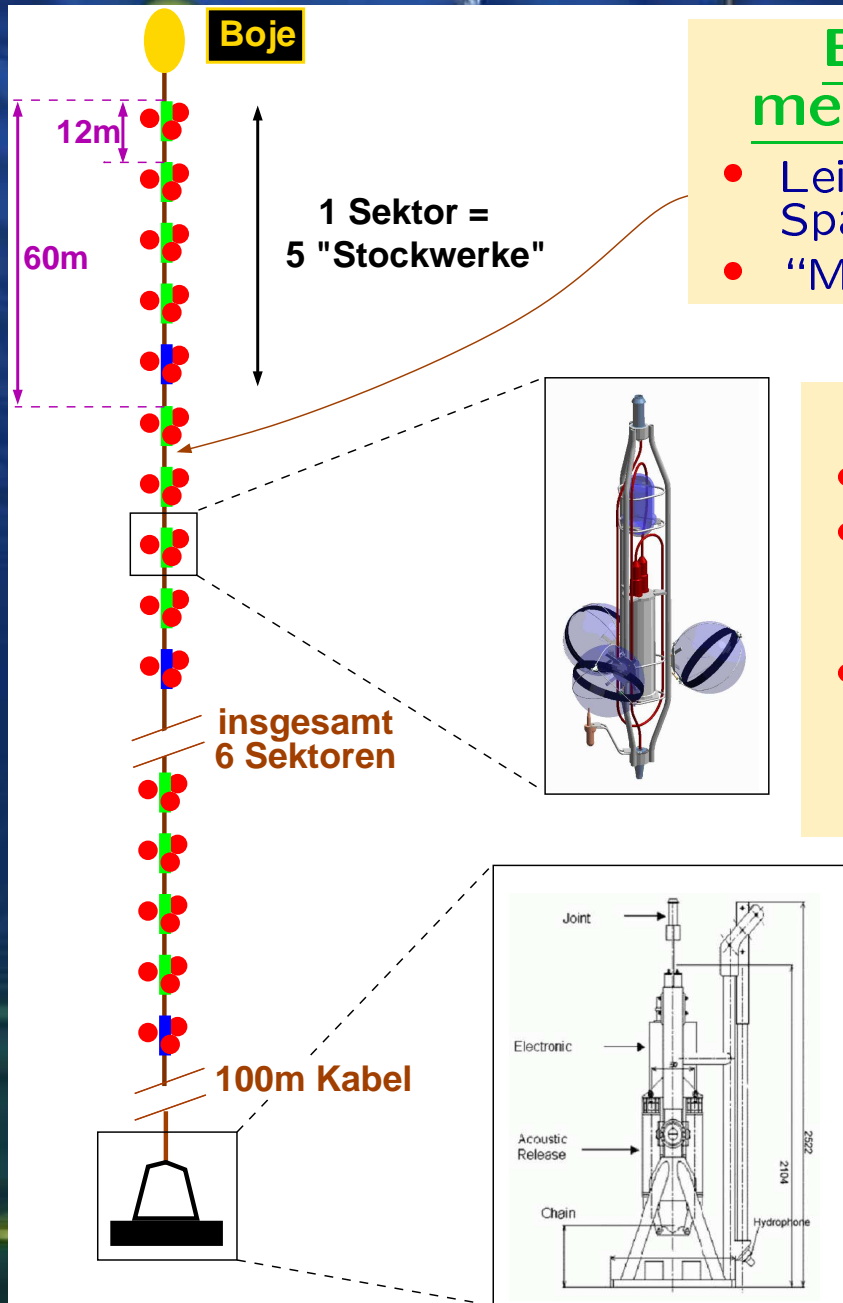
100 m

60 m

460 m

Boje

Detektor-Strings

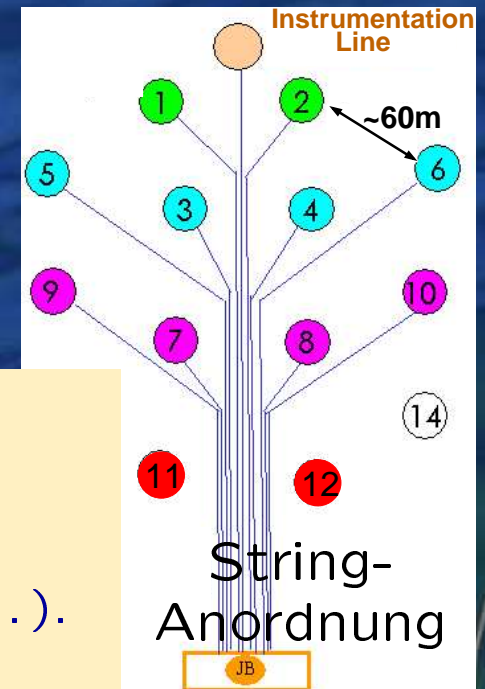


Elektro-optisch-mechanisches Kabel:

- Leitungen für Datentransfer, Spannungsversorgung, ...
- "Mechanisches Rückgrat".

Pro Stockwerk:

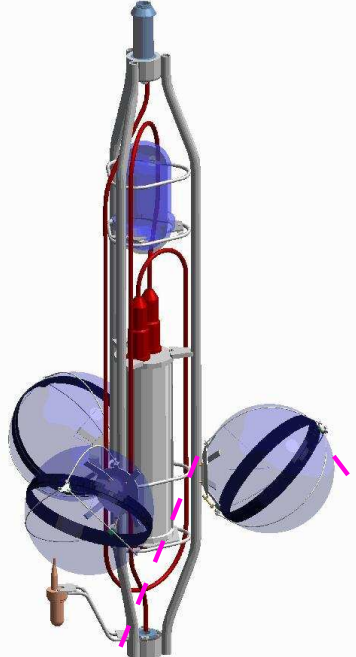
- 3 optische Module.
- Ausleseelektronik (Signal-Digitalisierung, Datentransfer, Trigger, ...).
- Kalibrationsinstrumente (Kompass, Neigungsmesser, optische und akustische Sender/Empfänger).



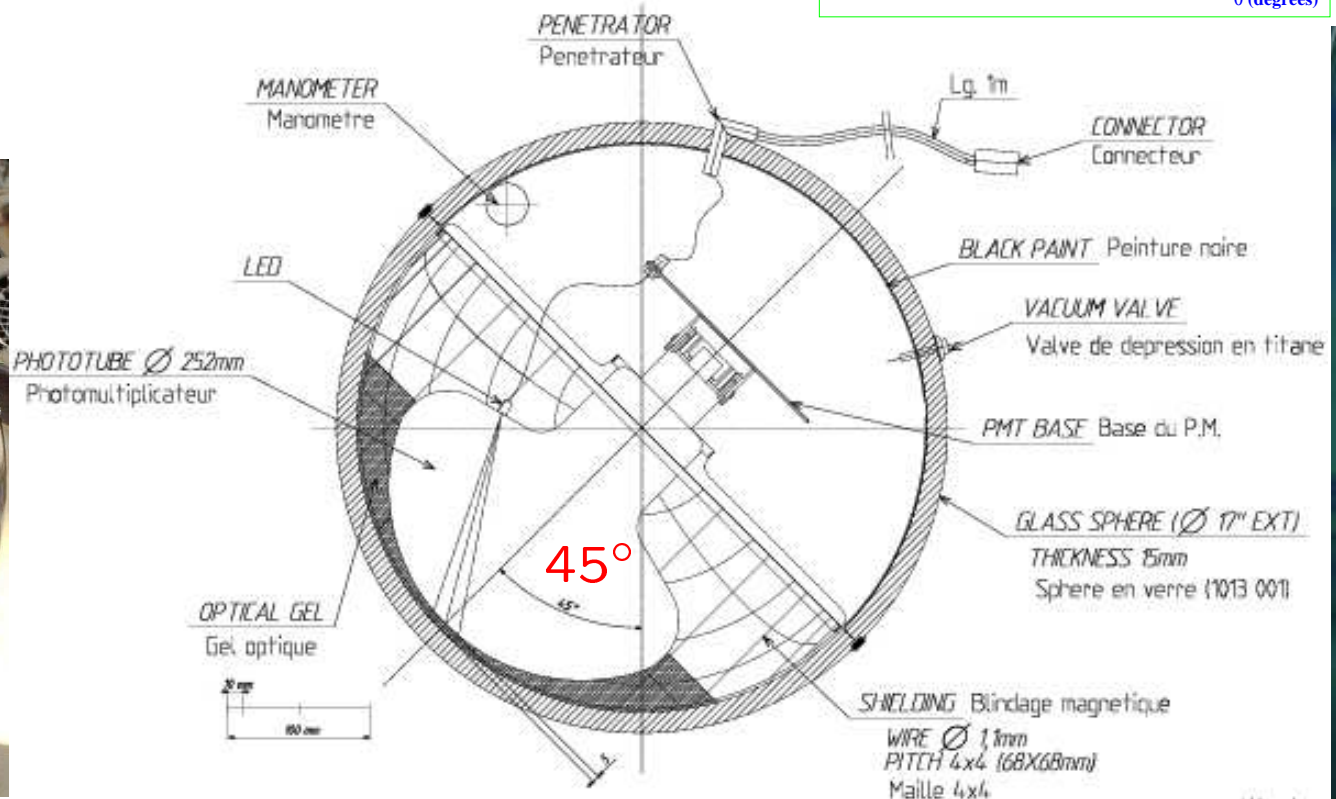
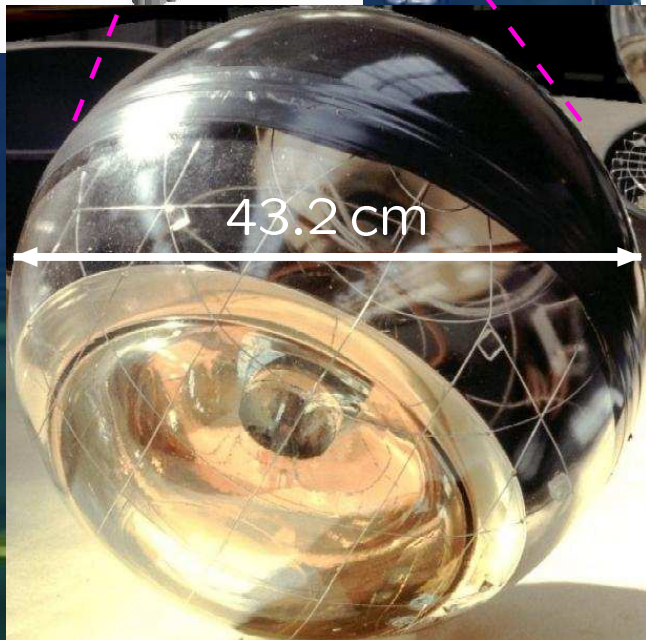
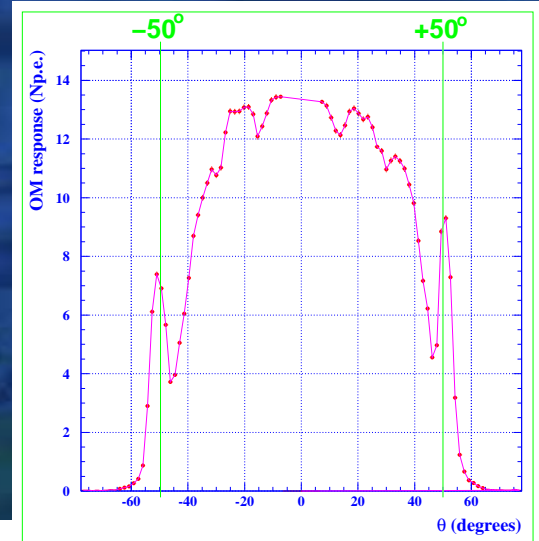
Am Boden:

- Elektronik.
- Schallgeschwindigkeits- und Druckmessung.
- Auslösemechanismus für String, akustisch gesteuert.
- Verbindung zur Junction Box.

Die optischen Module



- **Photomultiplier-Röhren:**
 - Hamamatsu, 10", 550 cm²-Kathoden.
 - Quanteneffizienz > 20% @ 1760 V für 330 nm $\lesssim \lambda \lesssim$ 460 nm.
 - Transfer Time Spread 2.6 ns.
 - Winkel-Akzeptanzbereich: $\theta \lesssim 50^\circ$.
- **Glaskugeln:**
 - Getestet bis 600 bar.
 - Lichtverlust (Transmission) $\lesssim 5\%$.



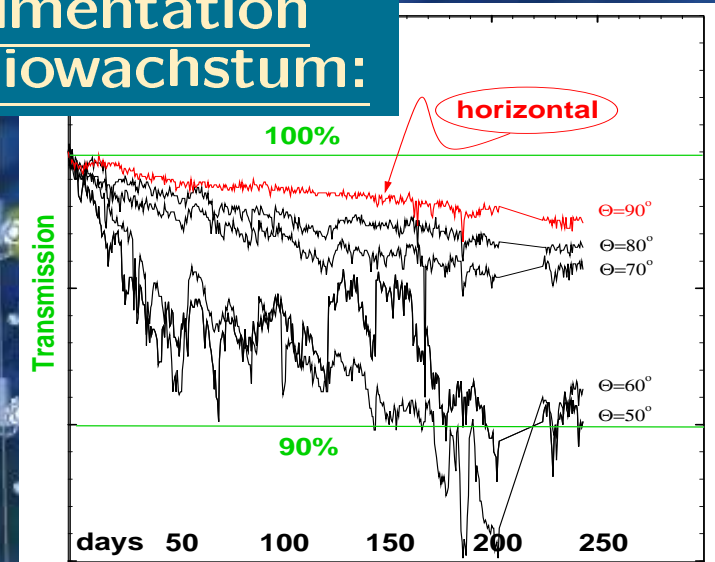
Umweltbedingungen und deren Kontrolle

Kontrollmessungen

Ständige höhenabhängige Messungen, u.a. in Instrumentierungs-String:

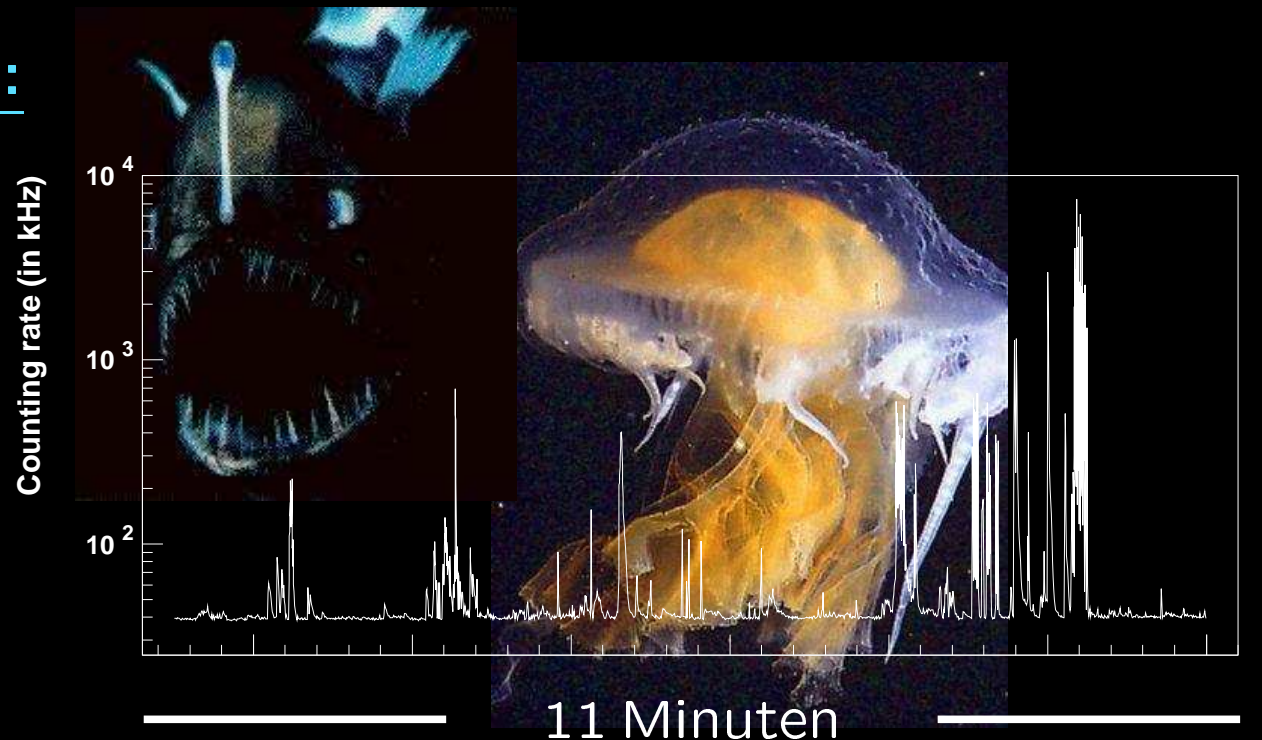
- Lichtabsorption;
- Strömungsgeschwindigkeit;
- Schallgeschwindigkeit;
- Salinität;
- Temperatur, Druck.

Sedimentation und Biowachstum:

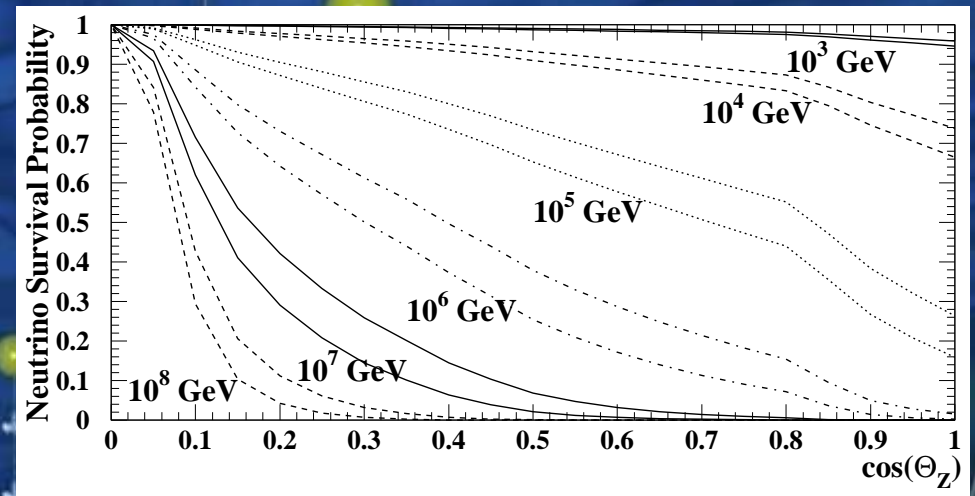
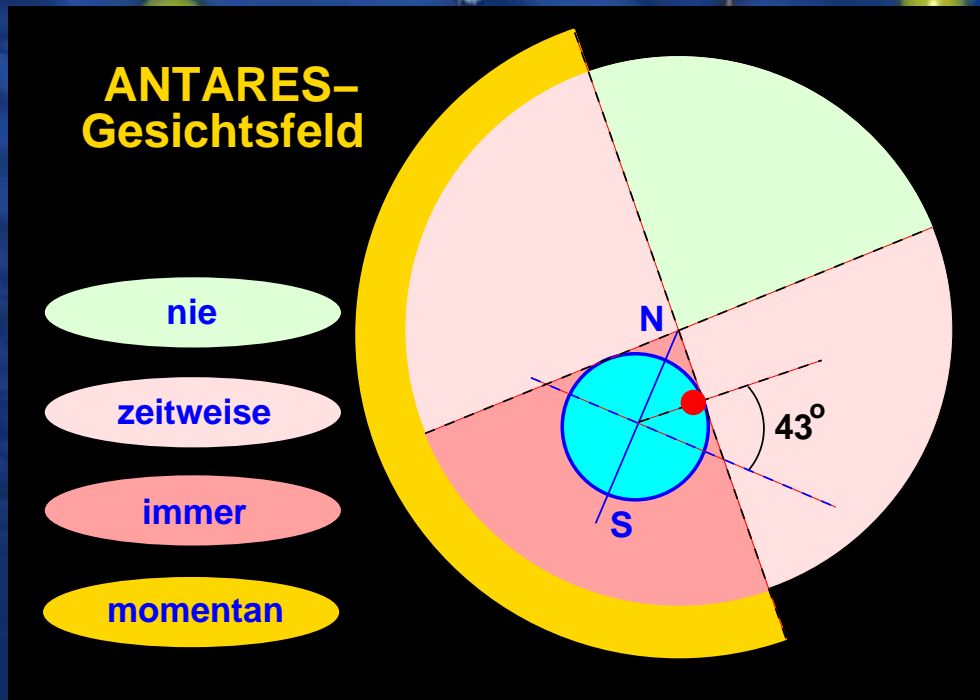


Optischer Untergrund:

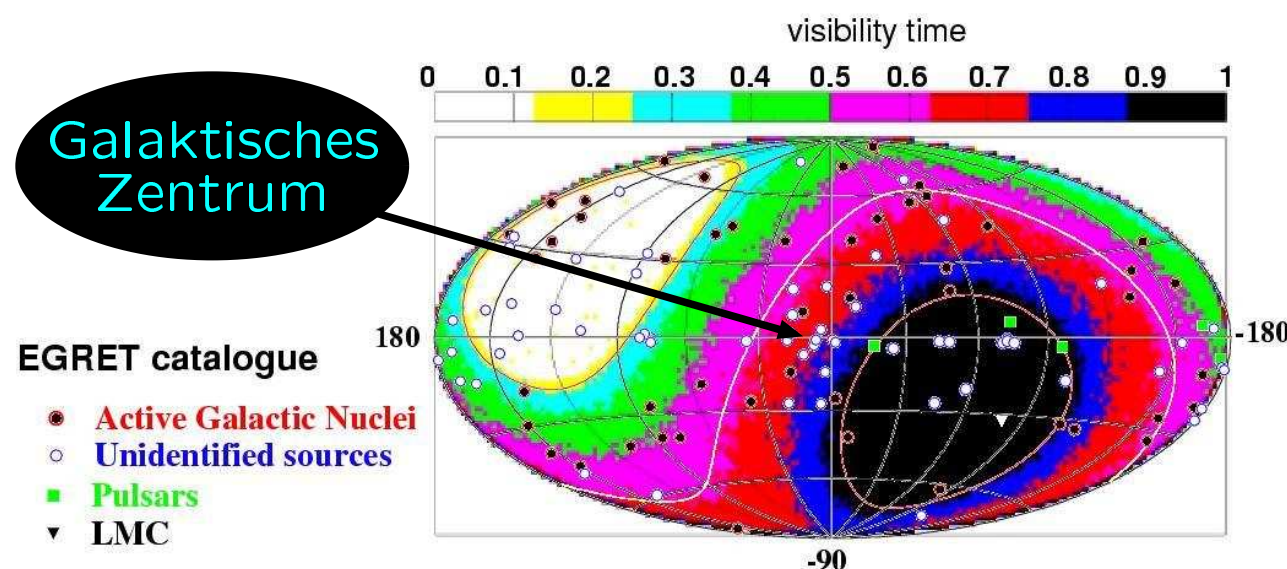
- Ständig etwa 70 kHz/PM von ^{40}K -Zerfällen, zeitlich konstant.
- Kurzzeitige lokale Raten im MHz-Bereich durch Biolumineszenz (Bakterien, Gallerten, Krebse, Fische, ...)
→ Totzeit/PM $\sim 5\%$.



Das Gesichtsfeld von ANTARES



- 3.5π Gesichtsfeld, davon 0.5π ständig.
- Komplementär zu AMANDA/IceCube, 1.5π Überlapp.
- Galaktisches Zentrum und viele Punktquellen im Blickfeld.
- $E_\nu \gtrsim 100 \text{ TeV} \dots 10 \text{ PeV}$: Erde schirmt ν 's ab \Rightarrow Eingeschränktes Gesichtsfeld (nur horizontale ν 's).

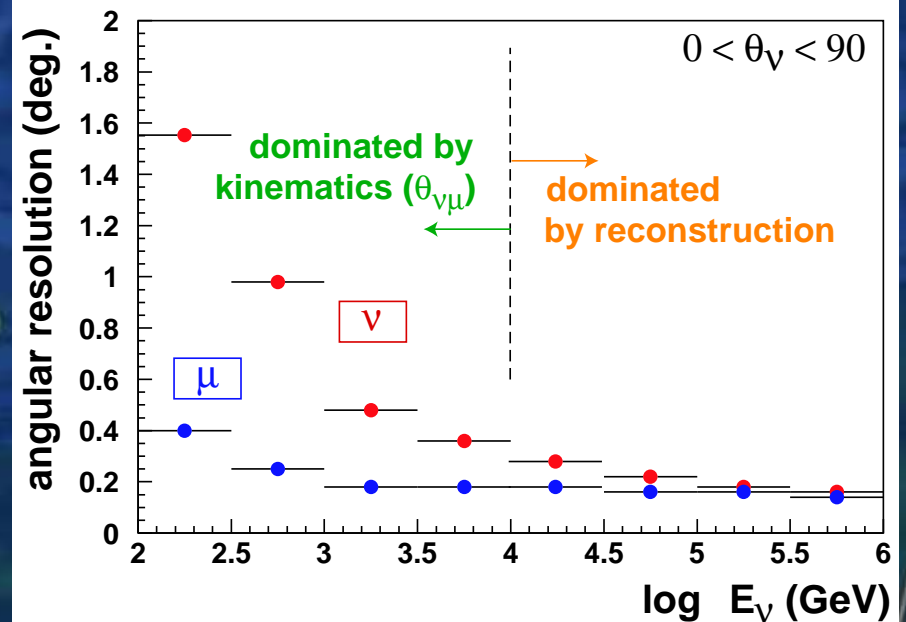
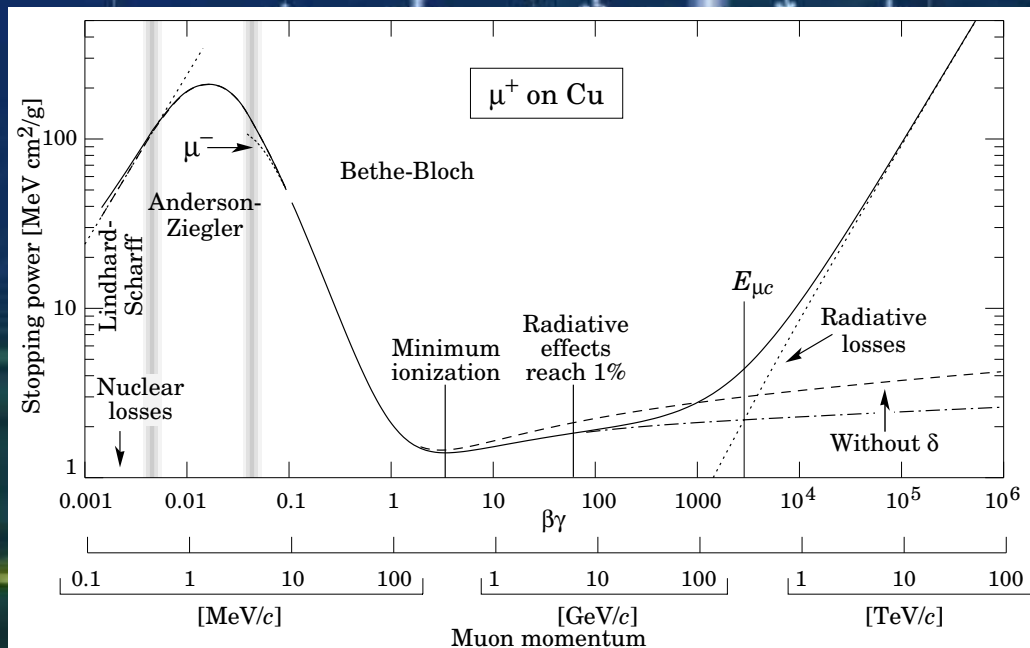


Winkel- und Energierekonstruktion (ν_μ CC)

Winkelauflösung

- Mittlerer Winkel $\theta_{\nu\mu}$ ist E_ν -abhängig:

$$\langle \theta_{\nu\mu} \rangle \approx 0.7^\circ / E_\nu [\text{TeV}]$$
- Unsicherheit des Myon-Winkels:
 - Detektorkalibration (Position, Zeit);
 - Vielfachstreuung.
- Suche nach ν -Punktquellen: $S/B \propto 1/\Delta\theta^2$
 \Rightarrow großer Vorteil von ANTARES vgl. mit Eis-Experimenten ($\Delta\theta_{\text{AMANDA}} \sim 3^\circ$).



Energiebestimmung

- $E_\mu \lesssim 100 \text{ GeV}$: μ -Reichweite.
- $E_\mu \gtrsim 1 \text{ TeV}$ (kosmische Quellen): Energie aus dE/dx (Signalhöhe).
- Auflösung:
 Etwa Faktor 2–2.5 in E_μ
 für $E_\mu \sim 1 \text{ TeV} - 1 \text{ PeV}$.
- Neutrino-Energie E_ν :
 - $E_\nu > E_\mu$;
 - $\text{RMS}(E_\mu/E_\nu) < 1/\sqrt{12}$.

Astroteilchenphysik mit ANTARES

- Was lehrt uns die kosmische Strahlung über Astrophysik?
- Was lehrt uns die kosmische Strahlung über Teilchenphysik?
- Was lehren uns Teilchenphysik-Experimente über den Kosmos?

Teilchenphysik

Neutrino-
Oszillationen

$$\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$$



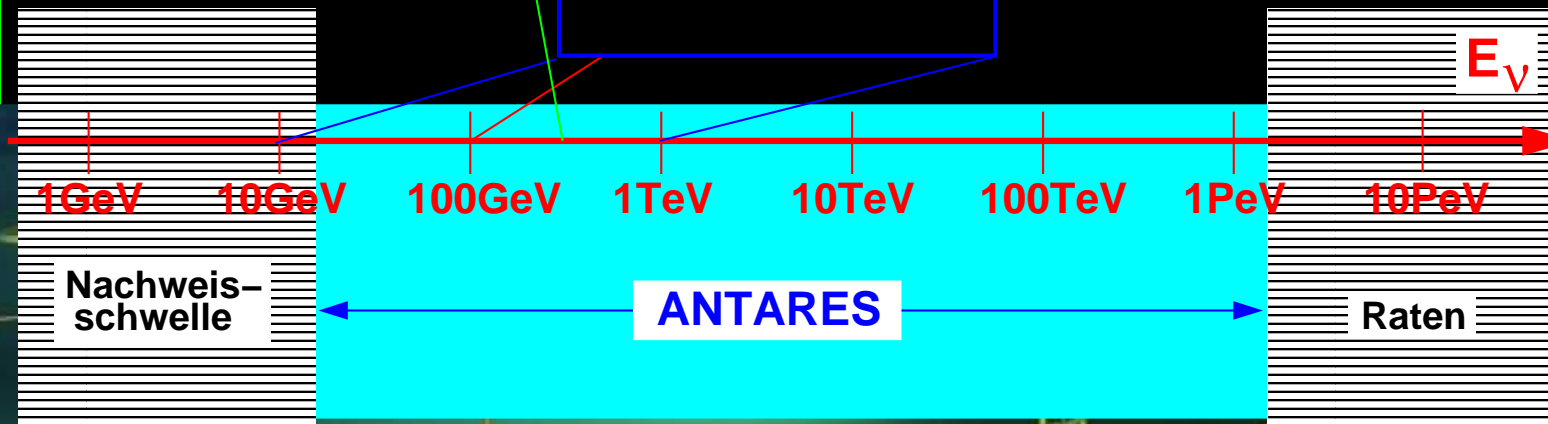
Suche nach
dunkler Materie

$$\chi^0 \chi^0 \rightarrow \nu \bar{\nu} X$$

Neutrino-
Astronomie

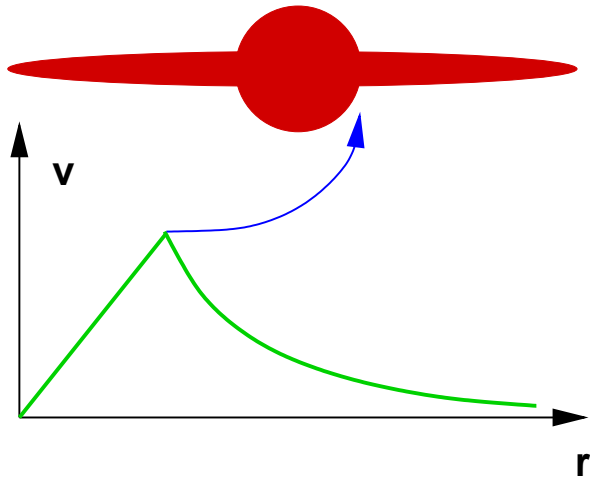


Astrophysik



Dunkle Materie: Galaxierotation, ...

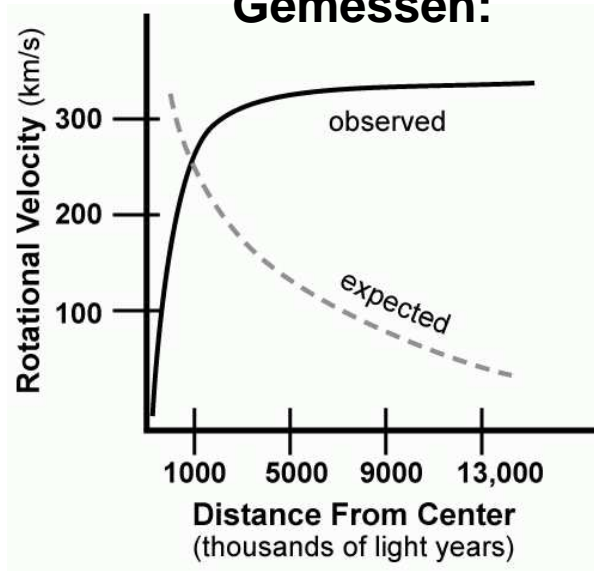
Erwartet:



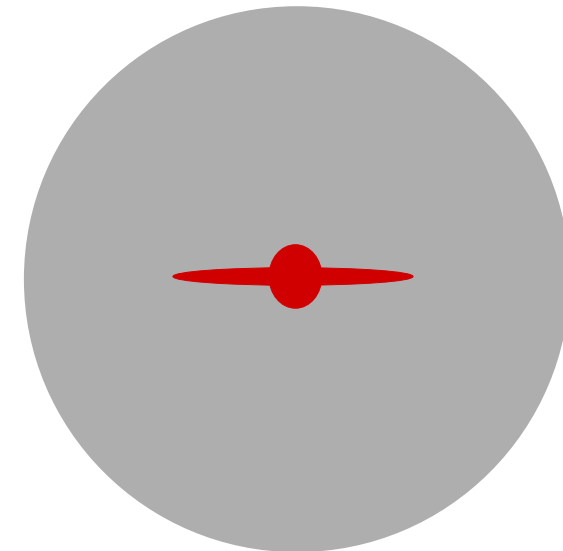
Bahngeschwindigkeiten von Sternen in Spiralgalaxien

- Messung: Dopplerverschiebung von Spektrallinien.
- Ergebnis: $v \approx \text{const.}$ bis zu größten Radien.
- Masse der “sichtbaren” Materie zu klein, um Geschwindigkeiten zu erklären.
- Interpretation: Halo unsichtbarer (“dunkler”) Materie umhüllt sichtbare Teile der Galaxien (auch bei der Milchstraße!).
- Ähnliche Beobachtung bei Geschwindigkeiten von Galaxien in Galaxienhaufen (Fritz Zwicky, 1933)

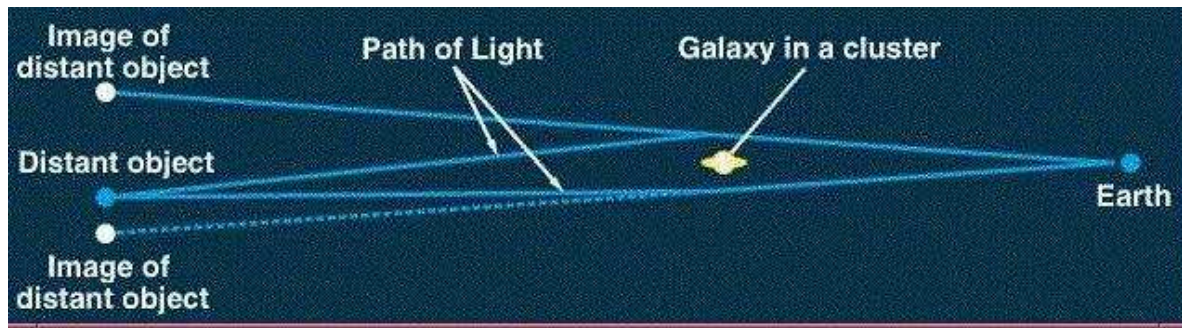
Gemessen:



$2R = ?$

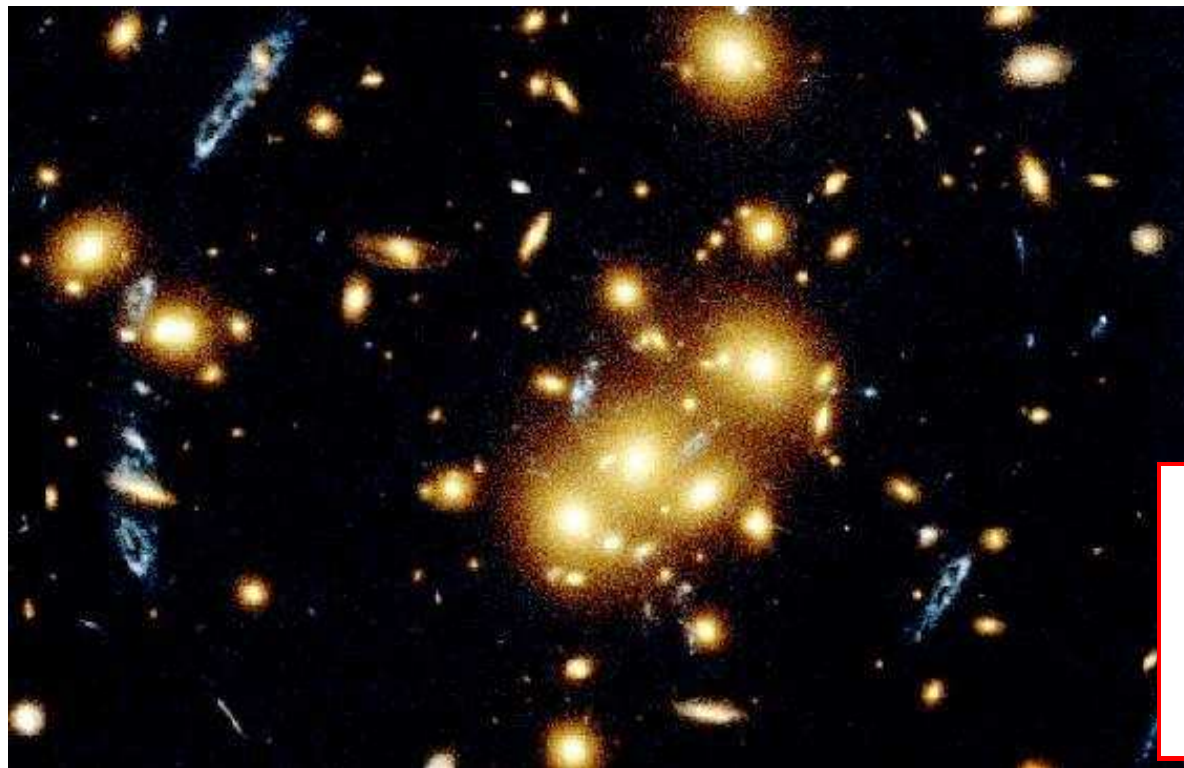


... , Gravitationslinseneffekt, ...



Gravitationslinsen- effekt

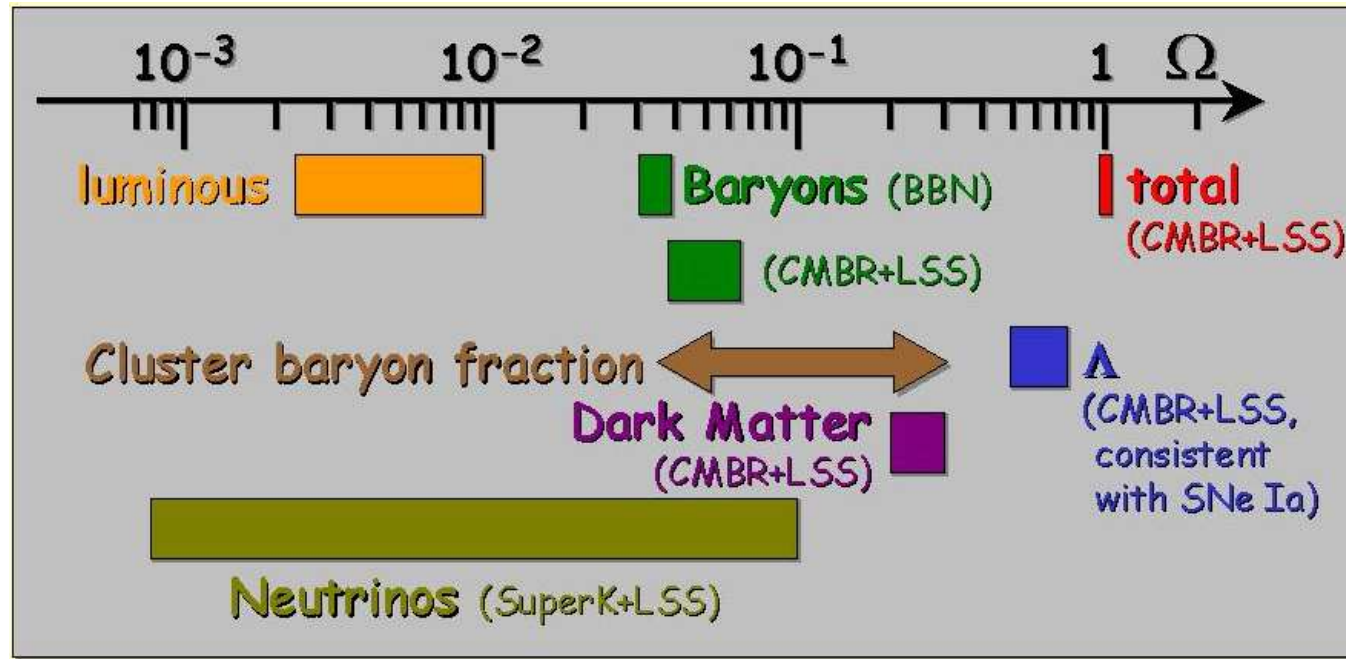
- Licht entfernter Quellen wird von massiven Objekten "im Vordergrund" gravitativ abgelenkt.
- Erlaubt präzise Bestimmung der Massenverteilungen.
- Wieder: mehr Masse als sichtbar!



Aufnahme vom Hubble Space Teleskop (1994)

- Vordergrund: Galaxien-Cluster
- Hintergrund: ringförmige Galaxis

... und Kosmologie



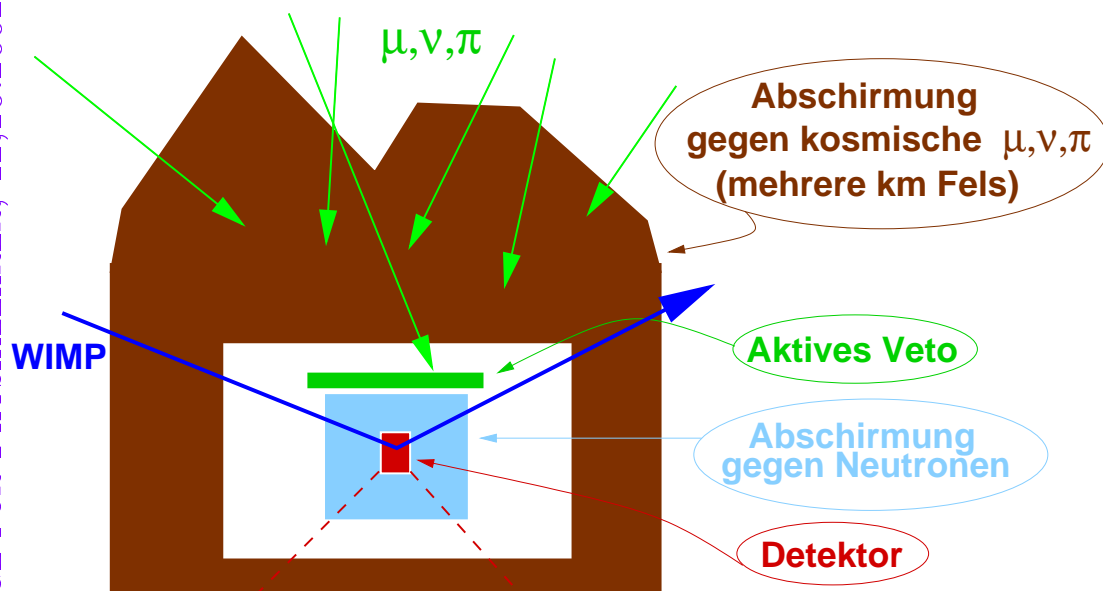
Weitere Argumente

- Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung (Cosmic Microwave Background Radiation, CMBR)
- Großräumige Strukturen im Kosmos (Large scale structures, LSS)
- Elementenstehung im Urknall (Big Bang Nucleosynthesis, BNN)
- Helligkeiten entfernter Supernovae

Schlußfolgerungen

- Dunkle Materie bildet etwa 30% der "kritischen Massendichte" des Universums
- Sichtbare bzw. baryonische Materie bringen es nur auf max. 1% bzw. 4%
- Die dunkle Materie wird nicht von Neutrinos gebildet.
- **Es muss sich um eine neue, uns bisher unbekannte Art von Materie handeln!**

Direkte Suche nach WIMPs



CDMS-Detektoren

Was sind WIMPs?

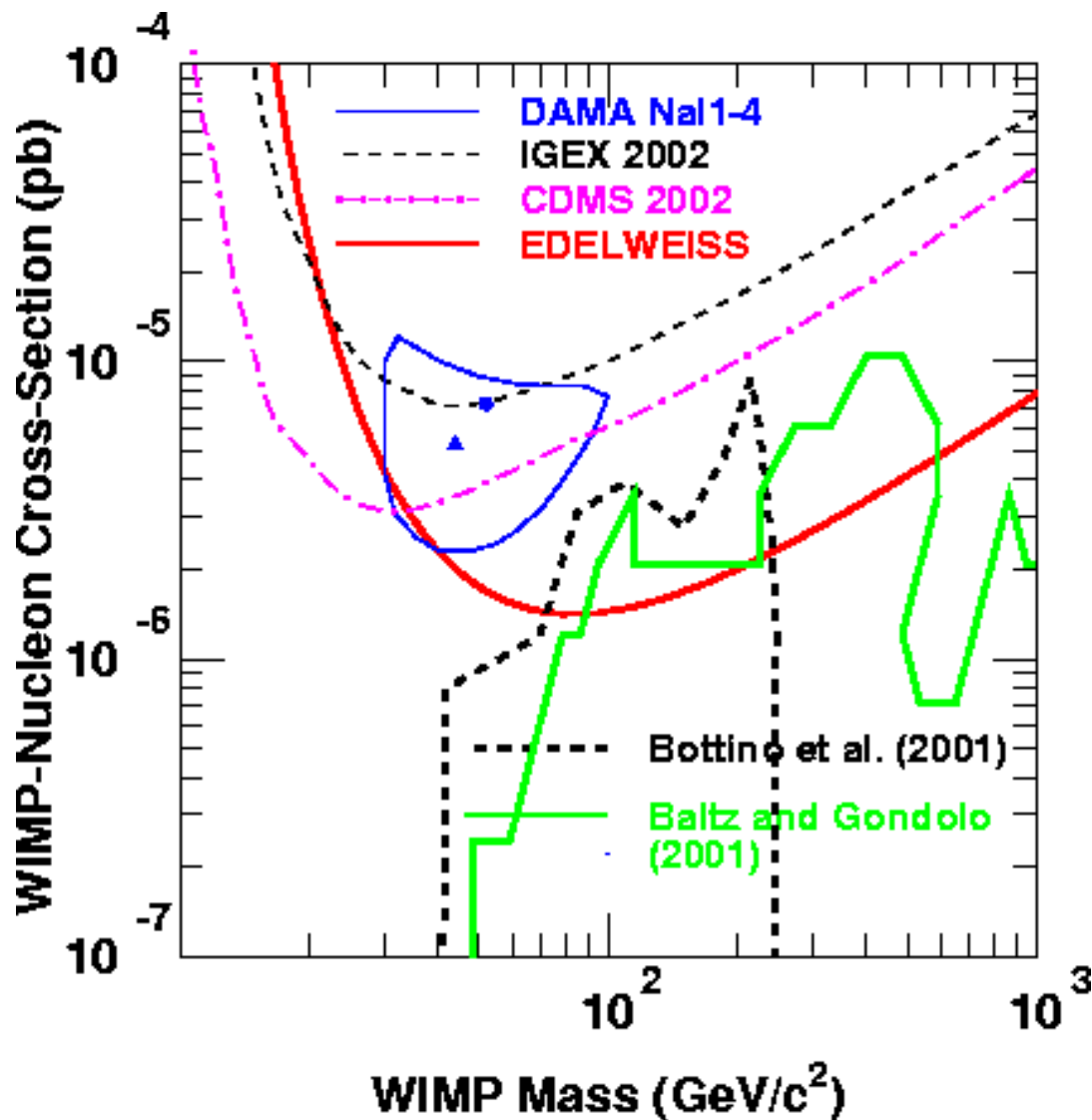
- **WIMP = Weakly Interacting Massive Particle** (hypothetisch!)
- Masse: 10 GeV ... einige TeV.
- Reaktionswahrscheinlichkeit ("Wirkungsquerschnitt") ähnlich schwacher Wechselwirkung.
- **Hypothese:** WIMPs bilden Galaxie-Halo (**dunkle Materie**), Geschwindigkeit ≈ 0 .
- Erde fliegt durch Halo
⇒ **WIMP-Kern-Stöße**.
- Experimenteller Nachweisversuch über Rückstoßkerne.

Silizium- oder Germanium-Detektoren, messen Kernrückstöße

- (1) durch Ionisation
- (2) durch Temperaturerhöhung
(dünne supraleitende Schichten auf Oberfläche, nahe Sprungtemperatur)
→ Hervorragende Untergrundunterdrückung

Tiefe Temperaturen, Vermeidung radioaktiver Materialien, Untergrund-Laboratorien

Direkte Suche nach WIMPs



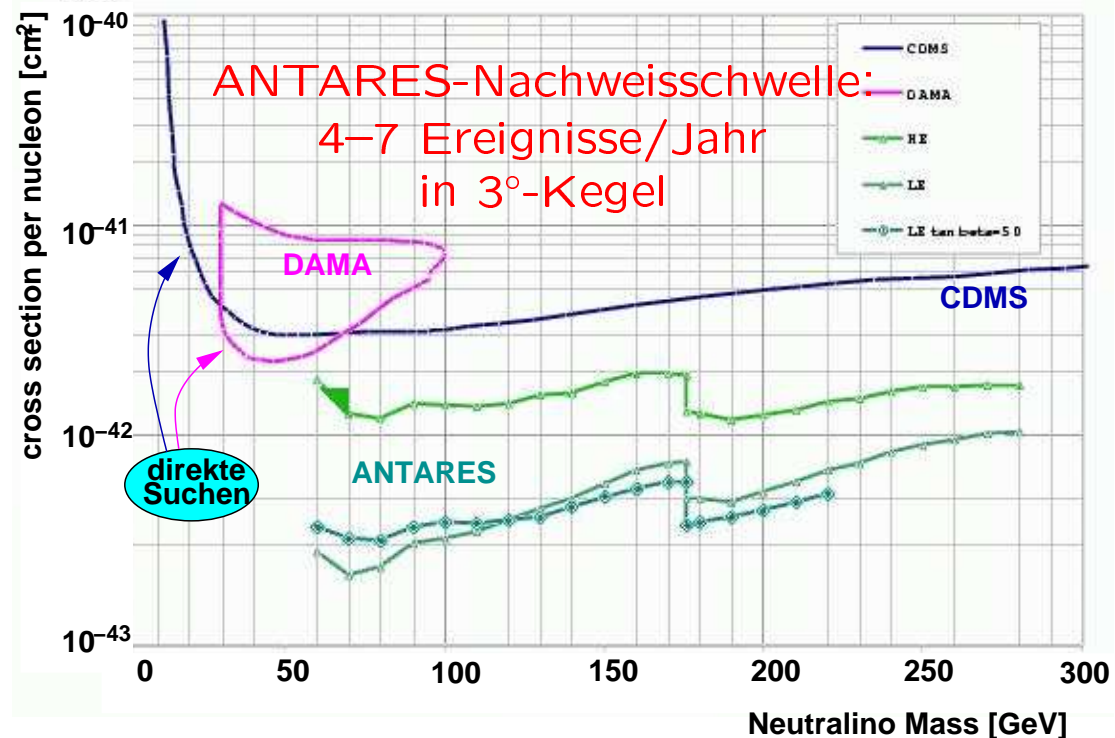
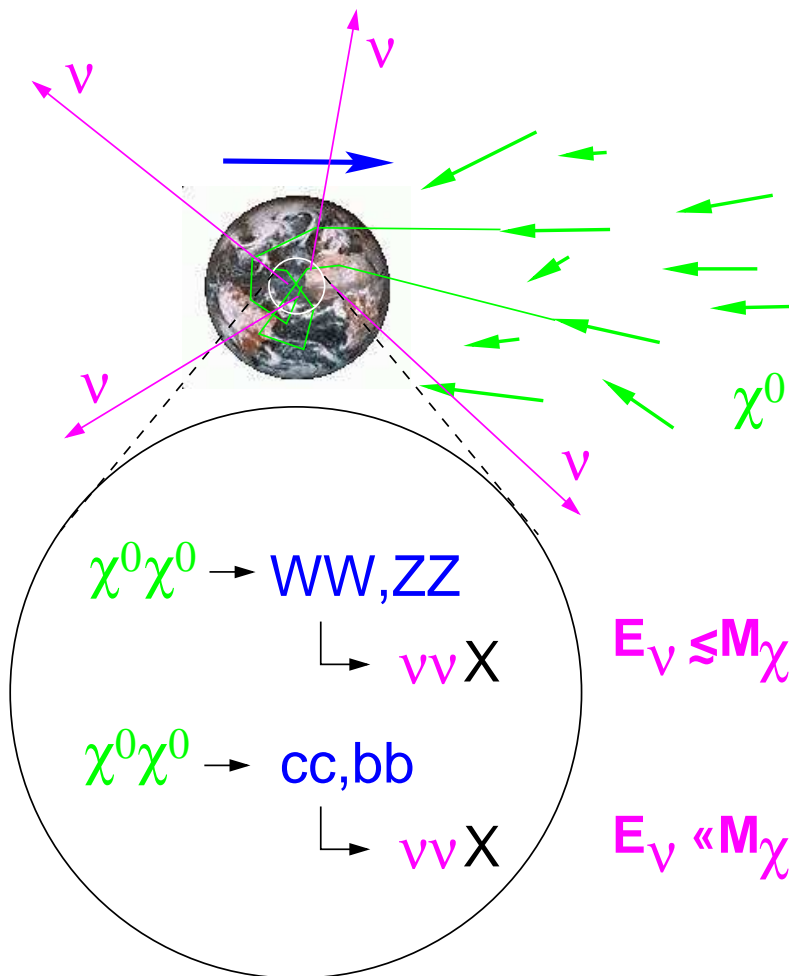
Ergebnisse und Ausblick

- **DAMA-Experiment**
(NaI-Szintillator, Gran Sasso): jahreszeitliche Signalmodulation, wird als WIMP-Evidenz gewertet.
Aber: Kein bolometrischer Nachweis, hoher Untergrund, systematische Effekte möglich.
- **Alle anderen Experimente:**
kein positives Signal.
- Darstellung: “Ausschlusskurven” in Ebene $M_{\text{WIMP}} / \sigma_{\text{WIMP}}$ (σ_{WIMP} = Wirkungsquerschnitt).
- Zukünftige Experimente mit noch größerer Empfindlichkeit, erreichen Parameterbereich der **Supersymmetrie (SUSY)** (hypothetische Theorie, sagt “Neutralinos” (χ) mit den richtigen Eigenschaften voraus).

Indirekte Suche: Neutralino-Annihilation

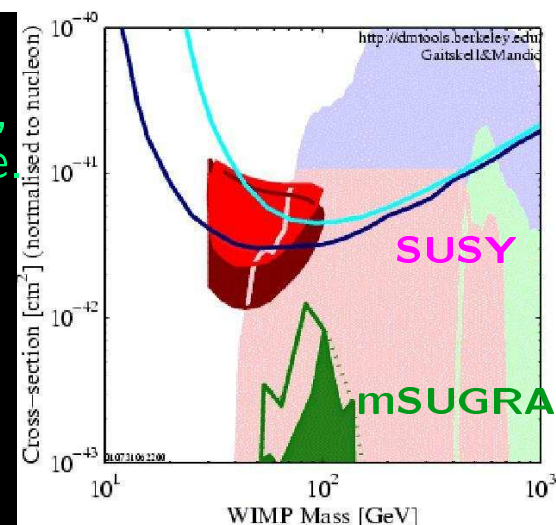
Gravitativer Einfang in ...

- Erde;
- Sonne;
- Galaktischem Zentrum (schwarzes Loch !?)



ANTARES-Suche:

- Gal. Zentrum, Sonne, Erde als ν -Punktquelle.
- Von lokaler χ -Dichte unabhängig.
- Interpretation modellabhängig.
- Ähnliche Sensitivität wie direkte Suche.



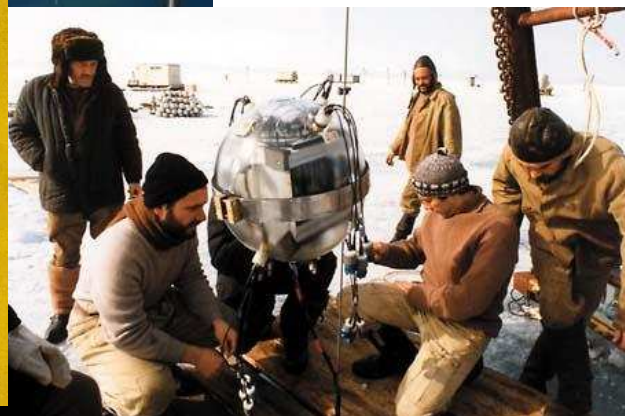
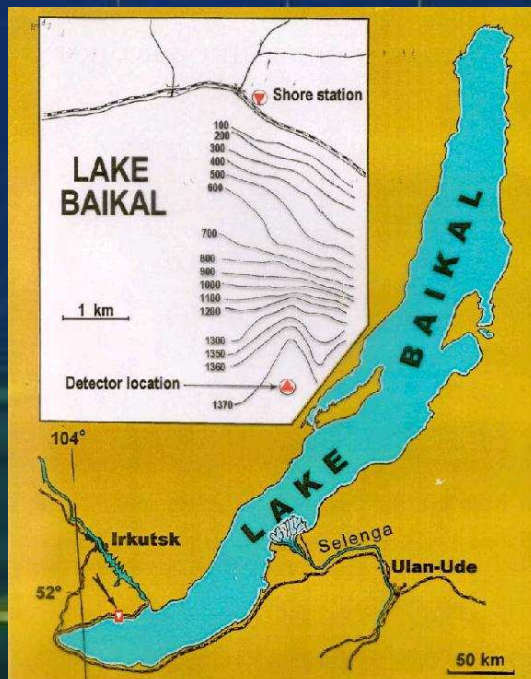
Information auf dem Web:

www.astroteilchenphysik.de

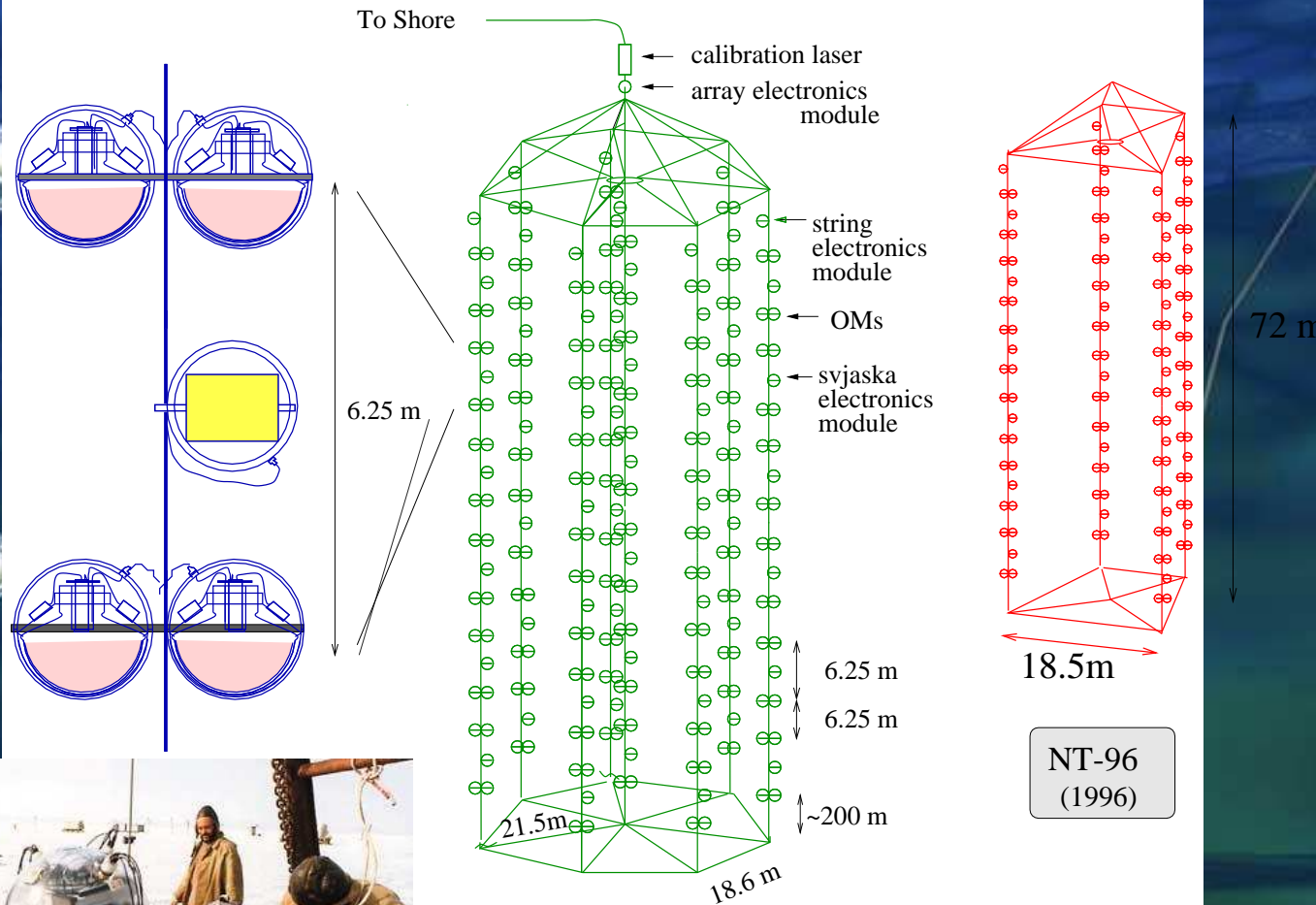
(deutsches Astroteilchenphysik-Portal)

Baikal: Ein Neutrino-teleskop im Süßwasser

- Pioniere der Unterwassertechnik für Neutrino-teleskope.
- Beobachtung atmosphärischer ν 's.
- Erste Tests von akustischen Nachweismethoden.
- **Aber:** Trotz geplanter weiterer Ausbaustufe klein, Skalierung auf km^3 schwierig.



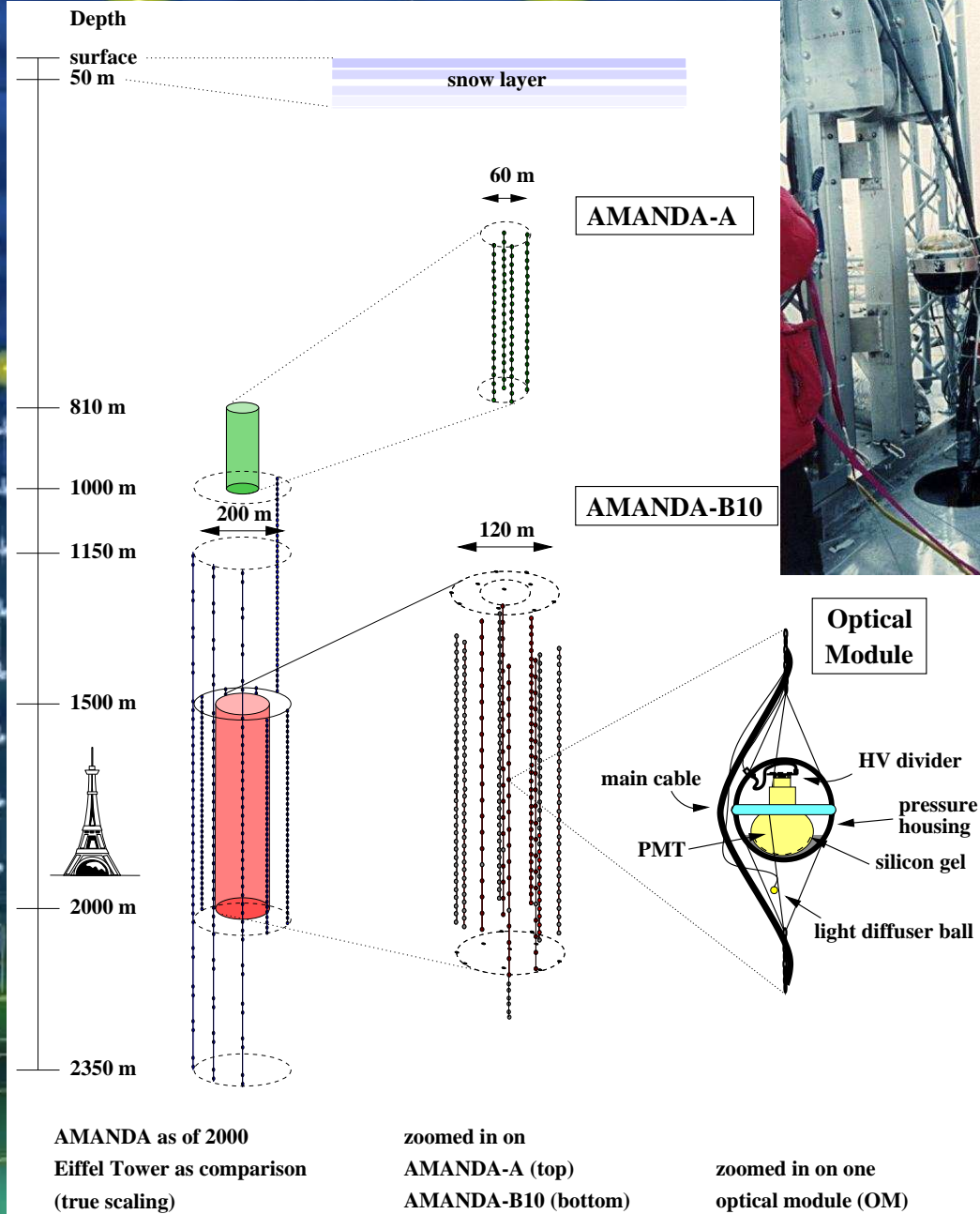
The BAIKAL NT-200 Neutrino Telescope



Winter:
Zugang über's Eis.

AMANDA/IceCube: am Südpol im Eis

- AMANDA-Datennahme seit '97.
- Komplementär zu ANTARES: sieht **nördliche Hemisphäre**.
- **Ergebnisse**: atmosphär. ν 's, Grenzen auf kosm. ν 's, WIMPs.
- Erweiterung auf **km³** in Vorbereitung (**IceCube**).
- Eis und Wasser bieten sehr unterschiedliche Experimentierbedingungen: Untergrund, optische Eigenschaften, Zugang, Stabilität, ...



Dunkle Materie: WIMPs und Supersymmetrie

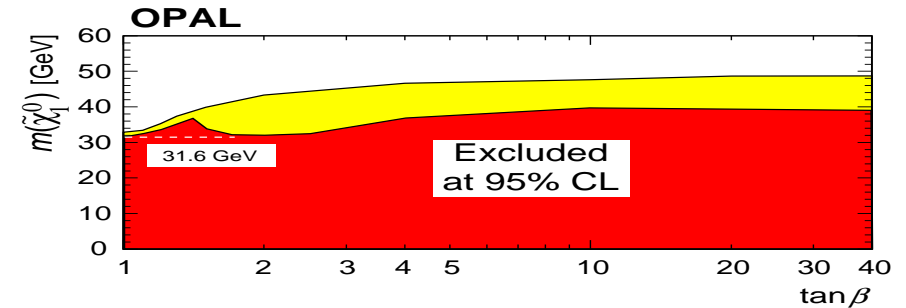
Supersymmetrie (SUSY)

- “Beliebtestes theoretisches Modell” jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik.
- Ordnet jedem SM-Teilchen einen SUSY-Partner zu:
Fermion \leftrightarrow Boson .
- Neue Quantenzahl R -Parität:

$$R_P = \begin{cases} 1 & \text{für SM-Teilchen} \\ -1 & \text{für SUSY-Teilchen} \end{cases}$$
- WIMP-Kandidat: **Neutralino** χ_1^0 (Mischung der Z -, γ und Higgs-Partner):
 - ✓ schwach wechselwirkend;
 - ✓ stabil (wenn R_P erhalten ist und χ_1^0 leichtestes SUSY-Teilchen ist);
 - ✓ massiv
- Bis jetzt kein direkter experimenteller Hinweis auf SUSY ...

LEP: Suche nach $e^+e^- \rightarrow \chi_1^0 \chi_2^0$

OPAL: Masse $M_{\chi_1^0} > 31.6 \text{ GeV}$.



HERA: Suche nach R_P -SUSY

Wenn R_P verletzt: $eq \rightarrow \tilde{q}$;
kein Anzeichen dafür gefunden.

HERA Leptoquark Limits ($e^+ p$) $\tilde{S}_{1/2,L} (F=0)$

