

Experimente und Ergebnisse zum Protonzerfall

Scheinseminar Teilchenphysik und Astrophysik
Physikalisches Institut Erlangen

Liwen Li

23.Mai.2011

Gliederung

- 1 **Einleitung:**
Eigenschaften von Proton
- 2 **Theoretischer Hintergrund:**
Standardmodell, GUT, (SUSY, SUGRA, Strings...)
- 3 **Experimente und Ergebnisse:**
KGF, NUSEX, Fréjus, Soudan, IMB, **Superkamiodande**, ICARUS
- 4 **Fazit und Ausblick:**
Proposals, Zukunft des Detektors
- 5 **Quellen:**
Links zu verwendeten Papers, Homepages

Einleitung

Eigenschaften von Proton

- Baustein der Atomen mit Ladung $+1$ und Masse 938MeV
- unterliegt allen vier fundamentalen Wechselwirkungen
- Quark-System: Up-Up-Down(uud)
- Das **leichteste Baryon**
- Proton ist sehr stabil $\hat{=}$ *extrem* lange Lebensdauer

Zerfallskanäle

Channel	τ_p in 10^{30} a (experimental lower bounds, CL 90%, <i>PDG 2010</i>)
$p \rightarrow e^+ \pi^0$	1600
$p \rightarrow \mu^+ \pi^0$	473
$p \rightarrow \nu \pi^+$	25
$p \rightarrow e^+ K^0$	150
$p \rightarrow \mu^+ K^0$	120
$p \rightarrow \nu K^+$	670
$p \rightarrow e^+ \gamma$	670
$p \rightarrow \mu^+ \gamma$	478
...	...

Vgl: Alter des heutigen Universums: $\sim 10^{10}$ a

Zerfallskanäle

Channel	τ_p in 10^{30} a (experimental lower bounds, CL 90%, <i>PDG 2010</i>)
$p \rightarrow e^+ \pi^0$	1600
$p \rightarrow \mu^+ \pi^0$	473
$p \rightarrow \nu \pi^+$	25
$p \rightarrow e^+ K^0$	150
$p \rightarrow \mu^+ K^0$	120
$p \rightarrow \nu K^+$	670
$p \rightarrow e^+ \gamma$	670
$p \rightarrow \mu^+ \gamma$	478
...	...

Vgl: Alter des heutigen Universums: $\sim 10^{10}$ a

Standardmodell der Teilchenphysik

- etablierte Theorie, bestätigt durch LEP, SLC, Tevatron...
- beschreibt alle bisher bekannten Teilchen(Antiteilchen):
6 (Anti-)Quarks + 6 (Anti-)Leptonen
- beinhaltet drei Eichgruppen(stark, schwach und elektromagnetisch):
 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$
- Kräfte übermittle durch die virtuellen
Austauschteilchen(Eichbosonen, Generatoren der Eichgruppe)
- LHC: Nachweis von Higgs-Boson

Bausteine des Modells

Three Generations
of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)

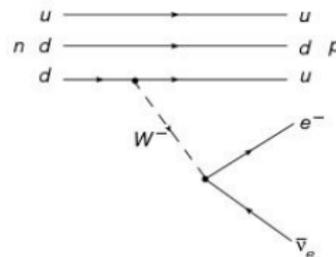
Bausteine des Modells

Three Generations
of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force

Bosons (Forces)

- Baryonenzahl und Leptonenzahl **für sich erhalten!**
- Beispiel: Zerfall eines freien Neutrons $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



Minimal SU(5) in GUT

- Georgi und Glashow in 1974: $SU(5) \supset SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
- $SU(3)_C \times U(1)_{em} \xrightarrow[M_W]{>100 \text{ GeV}} SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \xrightarrow[M_{GUT}]{>10^{15} \text{ GeV}} SU(5)$
- $5^2 - 1 = 24 = \underbrace{(8, 1)}_{\text{Gluonen}} \oplus \underbrace{(1, 3) \oplus (1, 1)}_{W^\pm, Z, \gamma} \oplus \underbrace{(3, 2) \oplus (\bar{3}, 2)}_{X, Y}$

Minimal SU(5) in GUT

- Georgi und Glashow in 1974: $SU(5) \supset SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
- $SU(3)_C \times U(1)_{em} \xrightarrow[M_W]{>100 \text{ GeV}} SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \xrightarrow[M_{GUT}]{>10^{15} \text{ GeV}} SU(5)$
- $5^2 - 1 = 24 = \underbrace{(8, 1)}_{\text{Gluonen}} \oplus \underbrace{(1, 3) \oplus (1, 1)}_{W^\pm, Z, \gamma} \oplus \underbrace{(3, 2) \oplus (\bar{3}, 2)}_{X, Y}$

•

$$\left[\begin{array}{ccc|cc}
 g_{r\bar{r}} - \frac{2}{\sqrt{30}} B & g_{r\bar{g}} & g_{r\bar{b}} & X_1 & Y_1 \\
 g_{g\bar{r}} & g_{g\bar{g}} - \frac{2}{\sqrt{30}} B & g_{g\bar{b}} & X_2 & Y_2 \\
 g_{b\bar{r}} & g_{b\bar{g}} & g_{b\bar{b}} - \frac{2}{\sqrt{30}} B & X_3 & Y_3 \\
 \hline
 \bar{X}_1 & \bar{X}_2 & \bar{X}_3 & \frac{1}{\sqrt{2}} W^3 + \frac{3}{\sqrt{30}} B & W^+ \\
 \bar{Y}_1 & \bar{Y}_2 & \bar{Y}_3 & W^- & \frac{1}{\sqrt{2}} W^3 + \frac{3}{\sqrt{30}} B
 \end{array} \right]$$

Darstellungen der SU(5)

- SM Familie I: $\bar{d}_R^{color} \oplus (\nu_e, e^-)_L \oplus \bar{u}_R^{color} \oplus (u^{color}, d^{color})_L \oplus e_R^+ = 15$
- SU(5) Familie I: $\underbrace{(\bar{3}, 1) \oplus (1, 2)}_{\bar{5}} \oplus \underbrace{(\bar{3}, 1) \oplus (3, 2) \oplus (1, 1)}_{10} = 15$
- $\bar{5} = \bar{d}_R \oplus l_L$, $10 = \frac{25-5}{2}$: antisymmetrisches Tensor-Produkt zweier 5

$$\bullet \quad \bar{5} = \begin{pmatrix} \bar{d}_R^r \\ \bar{d}_R^g \\ \bar{d}_R^b \\ e^- \\ -\nu_e \end{pmatrix}_L, \quad 10 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\begin{array}{ccc|cc} 0 & \bar{u}_R^b & -\bar{u}_R^g & -u_L^r & -d_L^r \\ -\bar{u}_R^b & 0 & \bar{u}_R^r & -u_L^g & -d_L^g \\ \bar{u}_R^g & -\bar{u}_R^r & 0 & -u_L^b & -d_L^b \\ \hline u_L^r & u_L^g & u_L^b & 0 & e_R^+ \\ d_L^r & d_L^g & d_L^b & -e_R^+ & 0 \end{array} \right]_L$$

- $\bar{5} \oplus 10$ komplex und anomaliefrei (renormierbar)
- \Rightarrow Erzeugeroperator linkshändiger Teilchen in einer Familie

Verletzung der Baryonenzahl und Erhaltung der $B - L$

Übergang Lepton-Quark (*Leptoquark*)
 Übergang Quark-Antiquark (*Diquark*) } **B - L Erhaltung**

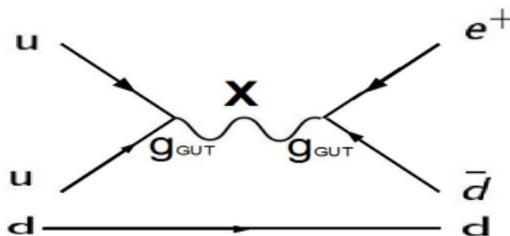
$$\begin{aligned} \Delta_{B-L} \mathcal{L}_{\bar{5} \oplus 10} &= \frac{g_{GUT}}{\sqrt{2}} \bar{X}_\mu^\alpha (\epsilon_{\alpha\beta\gamma} \bar{u}_L^{C\gamma} \gamma^\mu u_L^\beta + \bar{d}_{\{L,R\}\alpha} \gamma^\mu e_{L,R}^+) \\ &+ \frac{g_{GUT}}{\sqrt{2}} \bar{Y}_\mu^\alpha (\epsilon_{\alpha\beta\gamma} \bar{u}_L^{C\gamma} \gamma^\mu d_L^\beta - \bar{d}_{R\alpha} \gamma^\mu \nu_{eR}^C - \bar{u}_{L\alpha} \gamma^\mu e_L^+) + \left[\begin{array}{l} \text{hermitian} \\ \text{conjugate} \end{array} \right] \end{aligned}$$



$$B-L \mathcal{L}_{\bar{5}} \sim \bar{5} \cdot M \cdot 5 = \left[\begin{array}{ccccc} \bar{d}_r & \bar{d}_g & \bar{d}_b & e^- & -\nu_e \end{array} \right] \left[\begin{array}{cc|cc} \cdot & \cdot & \cdot & X_1 & Y_1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & X_2 & Y_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & X_3 & Y_3 \\ \hline \bar{X}_1 & \bar{X}_2 & \bar{X}_3 & \cdot & \cdot \\ \bar{Y}_1 & \bar{Y}_2 & \bar{Y}_3 & \cdot & \cdot \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} d_r \\ d_g \\ d_b \\ e^+ \\ -\bar{\nu}_e \end{array} \right]$$

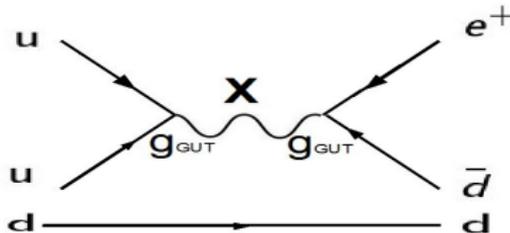
Protonzerfall nach GUT

- $\left. \begin{array}{l} \text{Spur}(Q_5) = 0 \Rightarrow Q_d = \frac{1}{3}Q_{e^-} \\ \text{Spur}(Q_{10}) = 0 \Rightarrow Q_u = -2Q_d \end{array} \right\} \text{Quantisierung der Ladung}$
- $\Delta B \neq 0$ fordert eine *endliche* Lebensdauer des Protons
- vorhergesagte τ_p in $p \rightarrow e^+ \pi^0$: $\tau_p = \frac{1}{\Gamma} = \alpha_{GUT}^{-2} \frac{m_p^5}{M_{GUT}^4} \sim 10^{30 \pm 1.5} a$



Protonzerfall nach GUT

- $\left. \begin{array}{l} \text{Spur}(Q_5) = 0 \Rightarrow Q_d = \frac{1}{3} Q_{e^-} \\ \text{Spur}(Q_{10}) = 0 \Rightarrow Q_u = -2 Q_d \end{array} \right\} \text{Quantisierung der Ladung}$
- $\Delta B \neq 0$ fordert eine *endliche* Lebensdauer des Protons
- vorhergesagte τ_p in $p \rightarrow e^+ \pi^0$: $\tau_p = \frac{1}{\Gamma} = \alpha_{GUT}^{-2} \frac{m_p^5}{M_{GUT}^4} \sim 10^{30 \pm 1.5} a$



- ...leider um 10^3 kleiner als heute gemessener Grenzwert

Weitere Theorien

Theorie	Zerfallskanal	Lebensdauer(Jahren)
Minimal GUT SO(10)	$p \rightarrow e^+ \pi^0$	$10^{30} - 10^{40}$
GUT G(224)	$p \rightarrow e^+ \pi^0$ (mit Parität)	$2 \cdot 10^{32 \pm 2}$
GUT G(2213)	$p \rightarrow e^+ \pi^0$ (ohne Parität)	$7 \cdot 10^{37 \pm 2}$
Minimal SUSY SU(5)	$p \rightarrow \nu K^+$	$\leq 10^{30}$ excluded!
Flipped SUSY SU(5)	$p \rightarrow e^+ \pi^0$	$10^{31} - 10^{35}$
Minimal SUSY SO(10)	$p \rightarrow \nu K^+$	$10^{32} - 10^{34}$
SUGRA SU(5)	$p \rightarrow \nu K^+$	$10^{32} - 10^{34}$
Extra Dimensions(6D)	$p \rightarrow e^+ \pi^0$	10^{35}
Quantum Gravity	$p \rightarrow \bar{q} + l + \dots$	$10^{45} (M_{QG} = M_{PL})$
...

Bestimmung der τ_p {
 Erforschung der Planck-Skala
 Entwicklung moderner Theorien

Detektorbeschaffenheit

- sehr viele Samples (1kton enthält ca 6×10^{32} Nukleonen)
- sehr gute Ortsauflösung
- Abschirmung, Signal/Untergrund-Trennung, Event Rekonstruktion
- $\tau_i = \bar{\tau}/B_i$ vom Zerfallskanal i im Idealfall (**lower bound**, CL 90%):

$$\tau_i > \eta \cdot M \cdot T \cdot 10^{32} \text{ Jahren}$$

$B_i = \Gamma_i/\Gamma$: Verzweigungsverhältnis

η : Detektoreffizienz

M : *Sensitive* Masse in kton

T : Messzeit in Jahren

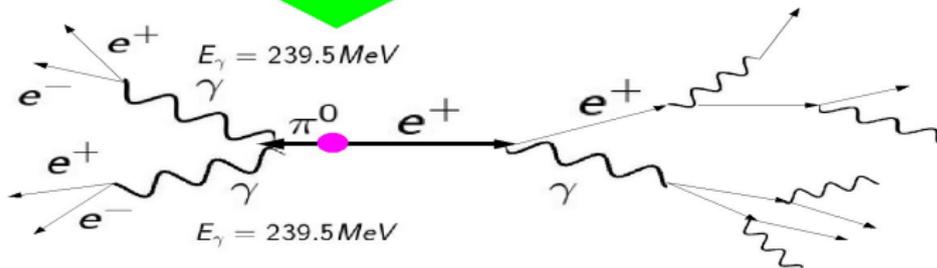
$M \cdot T$: **Exposure** [kton · years]

Signatur des Zerfalls

$$p \rightarrow e^+ \pi^0 \rightarrow e^+ 2\gamma$$

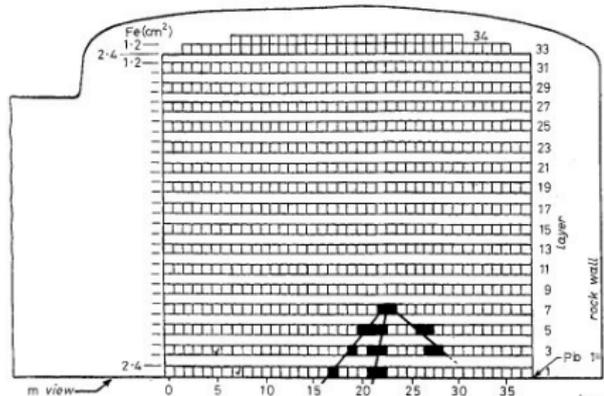
$E_{\pi^0} = 479 \text{ MeV}$	$M_{\pi^0} = 135 \text{ MeV}$	π^0	p	e^+	$E_{e^+} = 459 \text{ MeV}$	$M_{e^+} = 0.5 \text{ MeV}$
$p_{\pi^0} = -459 \text{ MeV}$		\longleftrightarrow			$p_{e^+} = 459 \text{ MeV}$	
			$M_p = 938 \text{ MeV}$			

$$\tau_{\pi^0} = 8.4 \cdot 10^{-17} \text{ s}$$



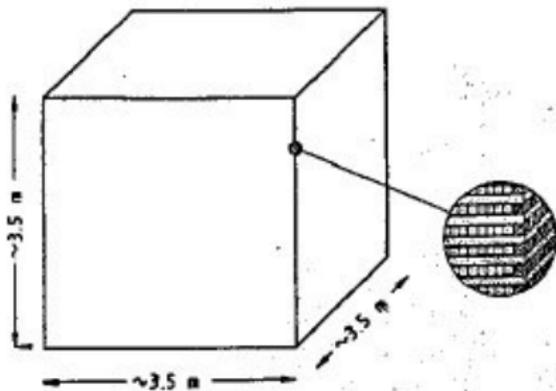
\vec{P}_{Fermi} von Proton ist nicht zu vernachlässigen!

KGF



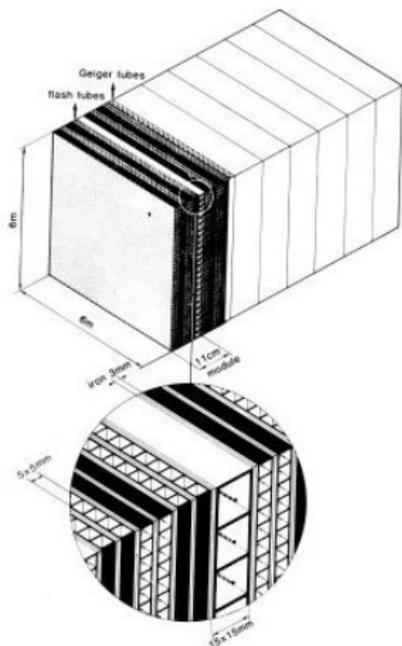
- Kolar Gold Field
- 2300m untererdisch
- Masse: 0.14kton
- 34 Eisenplatten(60% der M_{ges})
- 1594 Proportionalzähler
- Exposure: 126 ton·year
- Grenzwert: $\sim 10^{30}$ Jahre

NUSEX



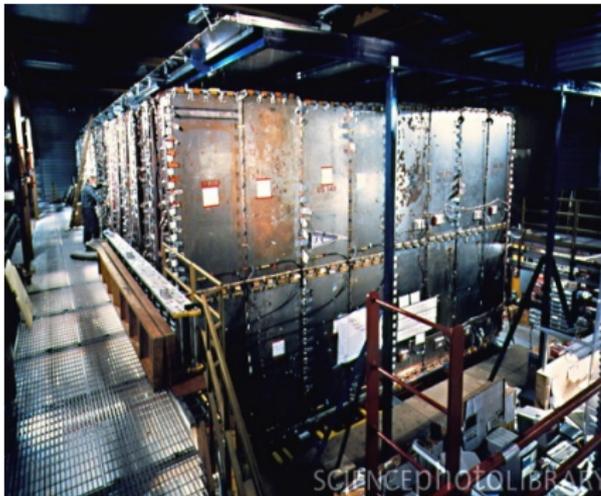
- **NU**cleon **S**tability **EX**periment
- 1850m untererdisch
- Masse: 0.15kton
- 134 Eisenplatten
- 42880 Streamertubes
- Exposure: 130 ton-year
- Grenzwert: $\sim 10^{31}$ Jahren

Fréjus



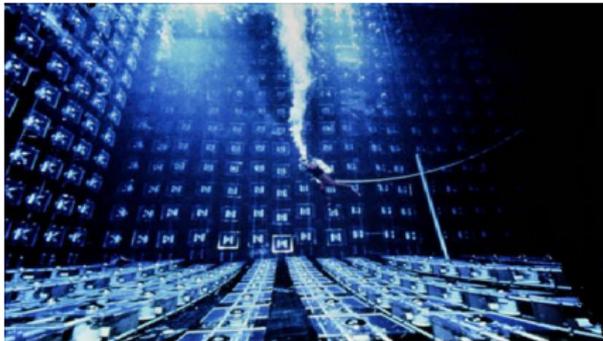
- 1780m unterirdisch
- Masse: 0.9kton
- 912 Eisenplatten
- 10^6 Blitzkammer
- Geigerzähler Triggerung
- Exposure: 2 kton·year
- Grenzwert: $\sim 10^{32}$ Jahren

Soudan II



- 760m untererdisch
- Masse: 0.96kton
- 224 Wellbleche
- $2 \cdot 10^6$ Drifttubes
- Exposure: 4.4 kton-year
- Grenzwert: $\sim 10^{32}$ Jahren

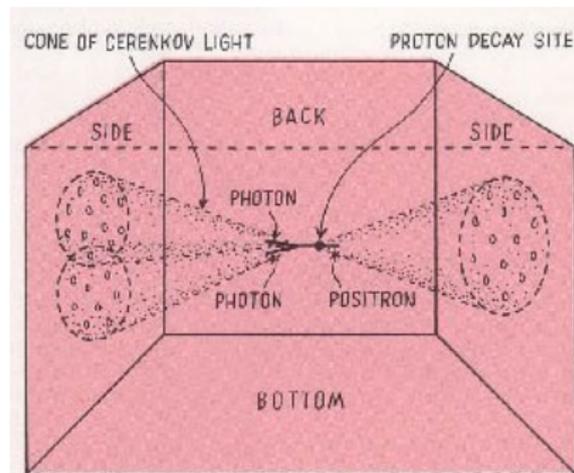
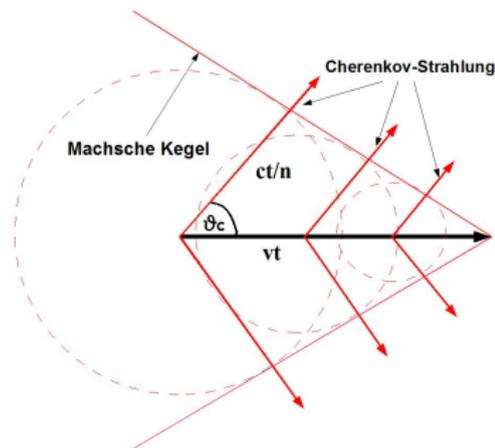
IMB-3



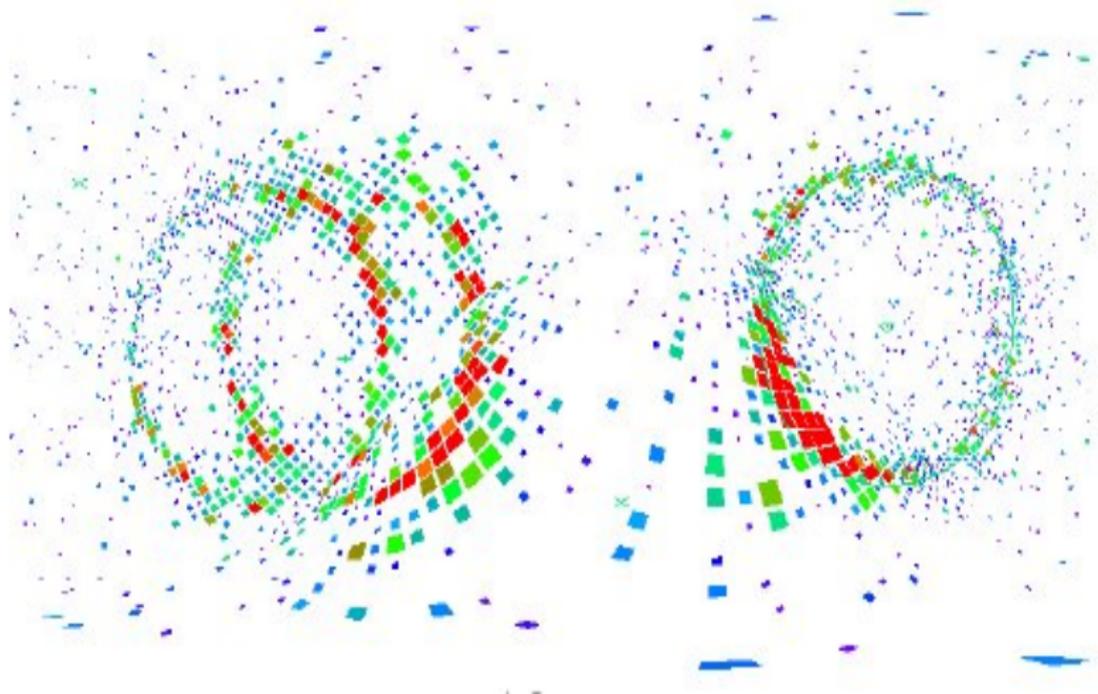
- **Irvine Michigan Brookhaven**
- 600m untererdisch
- 8ktons hoch reines Wasser, davon 3.3ktons sensitiv
- 2048 20cm-PTM-Tubes, 4% Bedeckung
- Exposure: 7.6 kton-year
- Grenzwert: $\sim 10^{32}$ Jahren

Cherenkov Strahlung

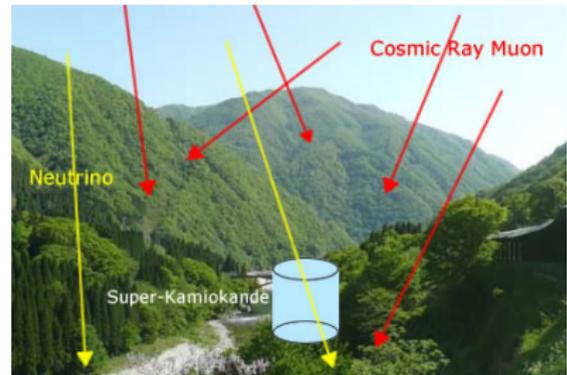
- **Geladenes** Teilchen fliegt im optisch **dichten** Medium mit $v > c/n$
- \Rightarrow Emission der **Cherenkov-Strahlung**: $\frac{d^2N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha Z^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right)$
- $\cos \vartheta_c = \frac{c/n}{v} \sim \frac{1}{\beta}$, $n_{\text{Wasser}} = 1.33 \Rightarrow 0^\circ < \vartheta_c < 42^\circ$



Monte-Carlo-Simulation

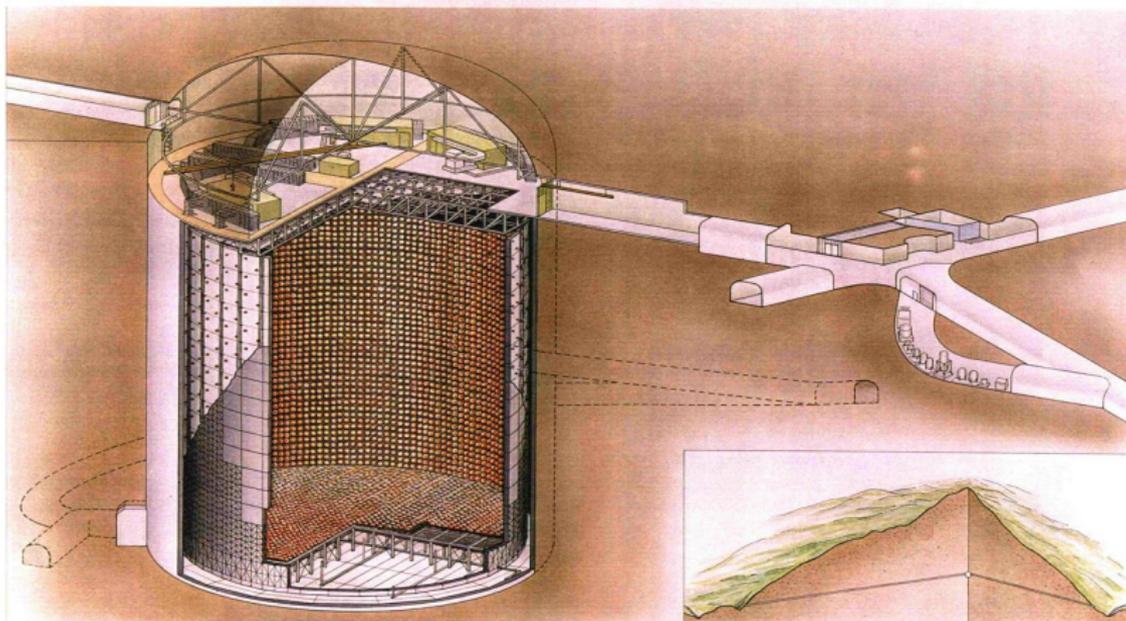


Superkamionande



- 1000m unter den Felsen(1.88 Muon/s)
- 50ktons hochreines Wasser in $897m^2 \times 36.2m$ (davon 22.5ktons sensitiv)
- SK-I: 11146 0.5m-PMT-Tubes, 40% Bedeckung
- SK-II: 5183 PMTs, 20% Bedeckung(nach dem Unfall am 12.11.2001)
- SK-III: Reinstallation des PMTs 2006

Skizze des Detektors

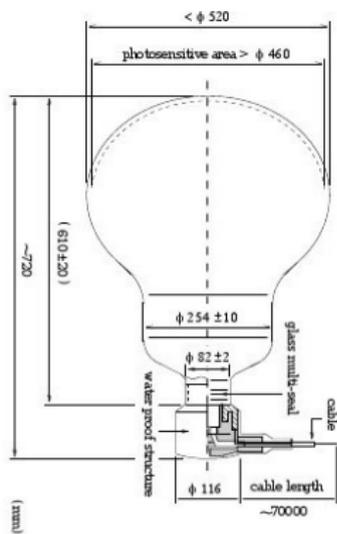


SUPERKAMIOKANDE

INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO

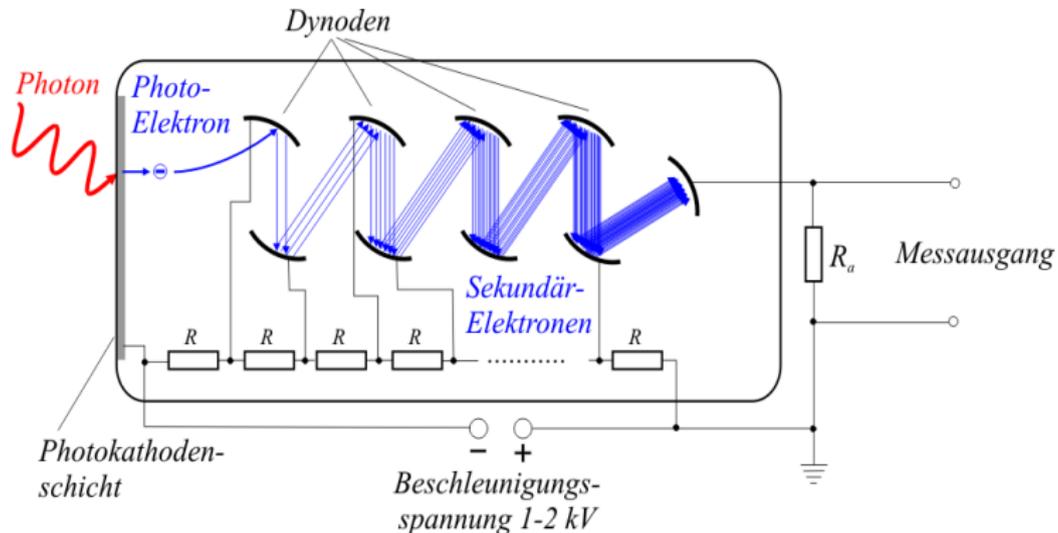
(c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo
NIKKEN SEKKI

Skizze des SK-PMTs

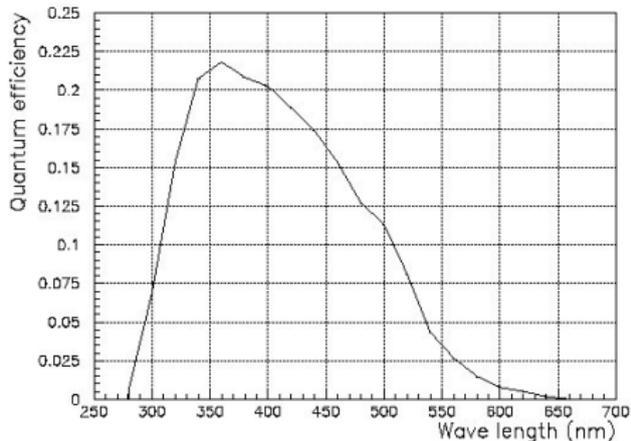


Funktionsweise eines PMTs

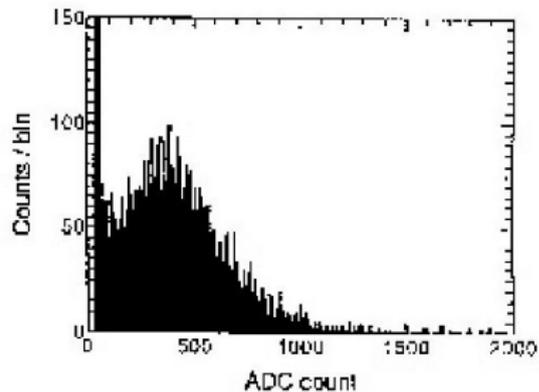
- Photokathoden(Photoeffekt)
- Dynoden
- Spannungsteiler



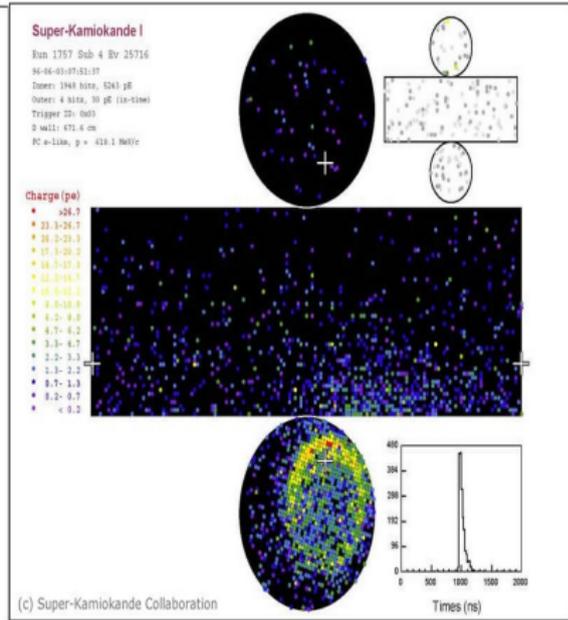
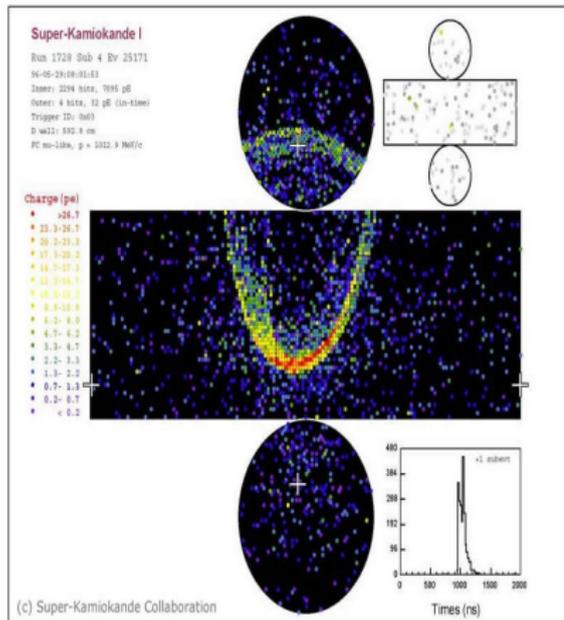
Charakteristische PMT-Spektren



Single Photon Electron Peak



Muon- und Elektron-Ring



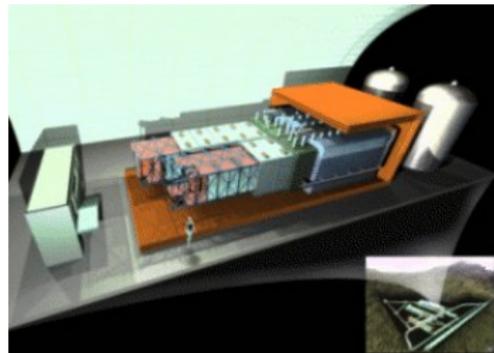
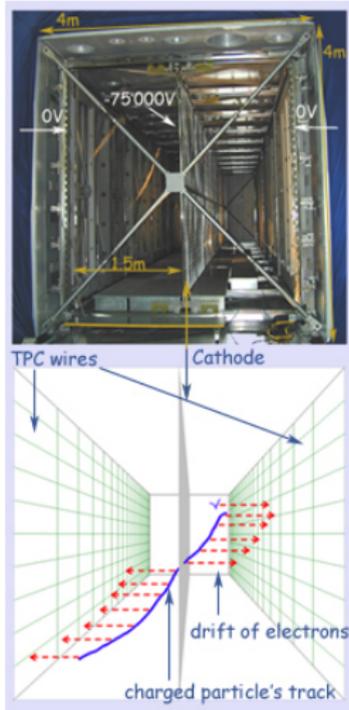
Auswahlkriterien des Signals $p \rightarrow e^+ \pi^0$

- Photoelektronen: $6000 < Q_{tot} < 9500$
- 2 oder 3 Elektron-Ringe(Schauer)
- Falls 3 Ringe: $85 MeV/c^2 < M_{inv,\pi^0} < 185 MeV/c^2$
- $800 MeV/c^2 < M_{inv,tot} < 1050 MeV/c^2$
- $p_{tot} = |\sum \vec{p}_i| < 250 MeV/c$

Auswahlkriterien des Signals $p \rightarrow e^+ \pi^0$

- Photoelektronen: $6000 < Q_{tot} < 9500$
- 2 oder 3 Elektron-Ringe(Schauer)
- Falls 3 Ringe: $85 MeV/c^2 < M_{inv, \pi^0} < 185 MeV/c^2$
- $800 MeV/c^2 < M_{inv, tot} < 1050 MeV/c^2$
- $p_{tot} = |\sum \vec{p}_i| < 250 MeV/c$
- **Bis heute kein Protonzerfall beobachtet(172.8kton·year)**
- **Ab 25.Nov.09 auf SK-Homepage: $\tau_p > 1.01 \cdot 10^{34} a$**

Imaging-Cosmic-And-Rare-Underground-Signals

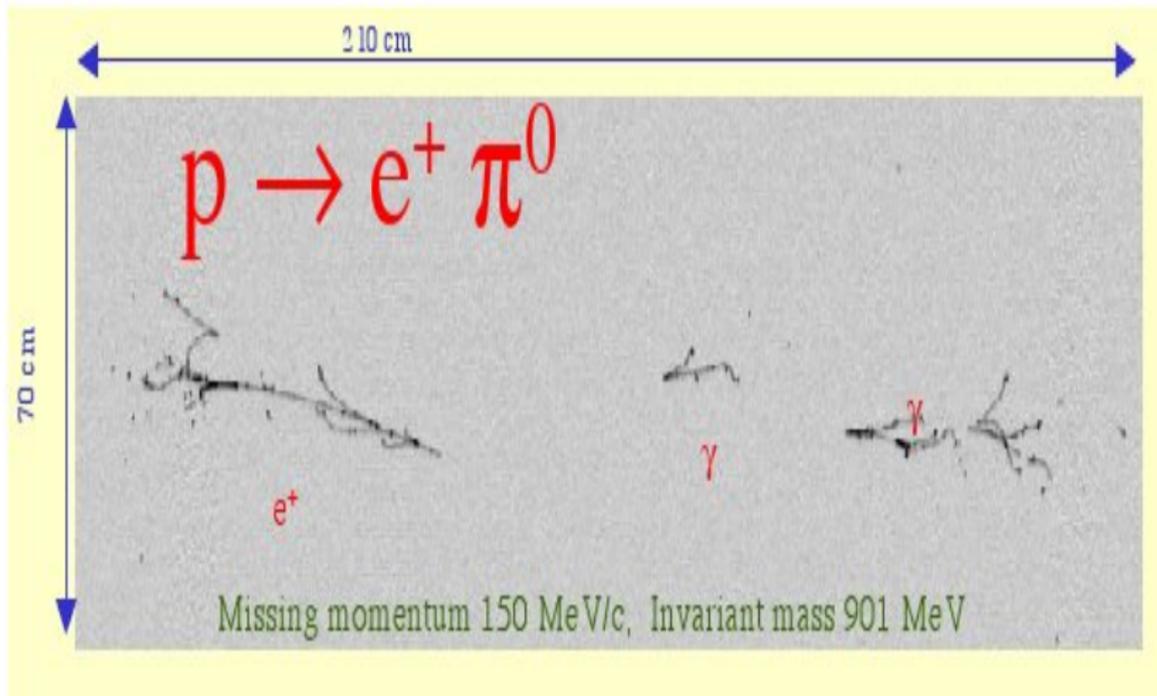


- Spurendriftkammer
- wenige Masse
- wenige Ausleser
- wenige Kosten
- **mehr "Gewinn"**

Wasser vs Liquid Argon

	Water	Liquid Argon
Density (g/cm ³)	1	1.4
Radiation length (cm)	36.1	14.0
Interaction length (cm)	83.6	83.6
dE/dx (MeV/cm)	1.9	2.1
Refractive index (visible)	1.33	1.24
Cerenkov angle	42°	36°
Cerenkov d ² N/dEdx (β=1)	≈ 160 eV⁻¹ cm⁻¹	≈ 130 eV⁻¹ cm⁻¹
Muon Cerenkov threshold (p in MeV/c)	120	140
Scintillation (E=0 V/cm)	No	Yes (≈ 50000 γ/MeV @ λ=128nm)
Free electrons mobility	0.002 cm²/Vs	500 cm²/Vs
Boiling point @ 1 bar	373 K	87 K

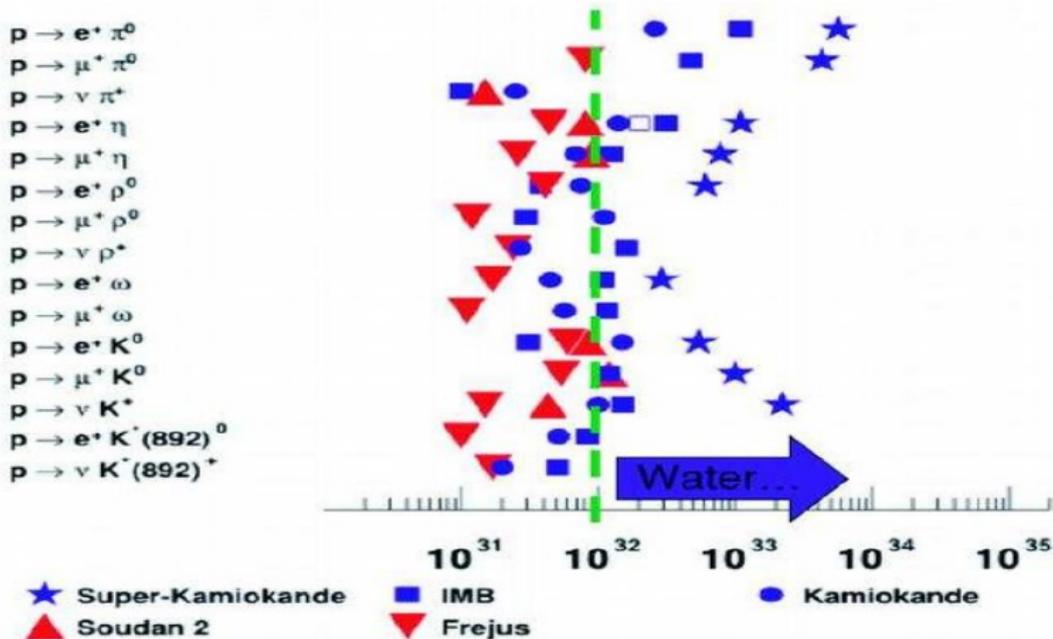
Monte-Carlo-Simulation in ICARUS



Detektoren im Überblick

Detektor	Laufzeit	Typ	Standort	M_{tot} in kton
KGF	1980-1992	Eisen-Kalorimeter	Kolar Goldmine, Indien	0.14
NUSEX	1982-1998	Eisen-Kalorimeter	Mont Blanc, Frankreich	0.15
Fréjus	1984-1998	Eisen-Kalorimeter	Fréjus, Frankreich	0.9
Soudan II	1989-2001	Eisen-Kalorimeter	Minnesota, USA	0.96
IMB-3	1986-1991	Wasser Cherenkov	Ohio, USA	8
SK	1996-?	Wasser Cherenkov	Gifu, Japan	50
ICARUS	2010-?	Liquid Argon TPC	Gran Sasso, Italien	0.6

Gemessene Grenzwerte im Überblick



Wasser-Cherenkov vs LAr-TPC

Proposals	Typ	M_{tot} in kton
LENA	Liquid Scintillator	50
UNO	Wasser Cherenkov	650
HyperK	Wasser Cherenkov	1000
3M	Wasser Cherenkov	1000
MEMPHYS	Wasser Cherenkov	1000
Glacier	Liquid Argon TPC	100
LANNDD	Liquid Argon TPC	100

LAGUNA

Large Apparatus for Grand Unification & Neutrino Astrophysics

1 Protonzerfall

Planck-Skala, Materie-Antimaterie Asymmetrie

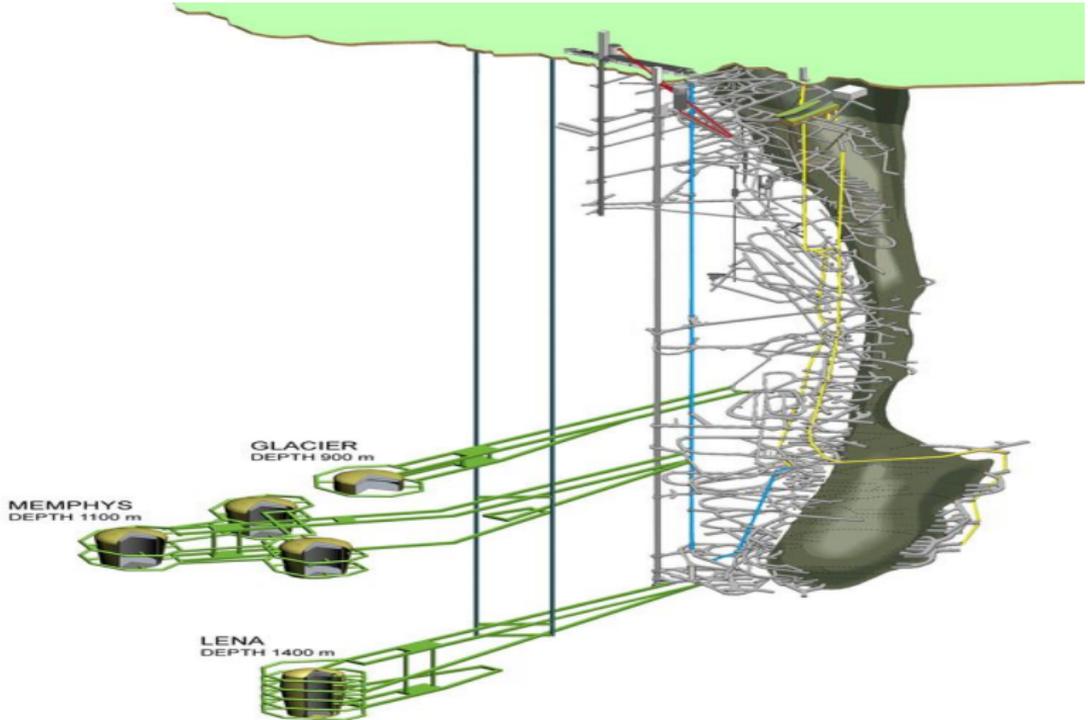
2 Niederenergetische Neutrino-Astrophysik

Neutrino burst aus Supernova, diffuser Supernova-Neutrino Hintergrund, Geo- & Solarneutrinos

3 Eigenschaften von Neutrino

Neutrinooszillation, Neutrinomasse, See-Saw Mechanismus, dunkle Materie, dunkle Energie

Technologie



Quellen

Proton stability in grand unified theories, in strings, and in branes, P. Nath, P.F. Perez

Searches for proton decay with the Super-Kamiokande detector, Scott T. Clark

Very massive underground detectors for proton decay searches, A. Rubbia

The Liquid Argon Time Projection Chamber, A. Rubbia

Superkamiokande Official Homepage

ICARUS Official Homepage

LAGUNA Homepage