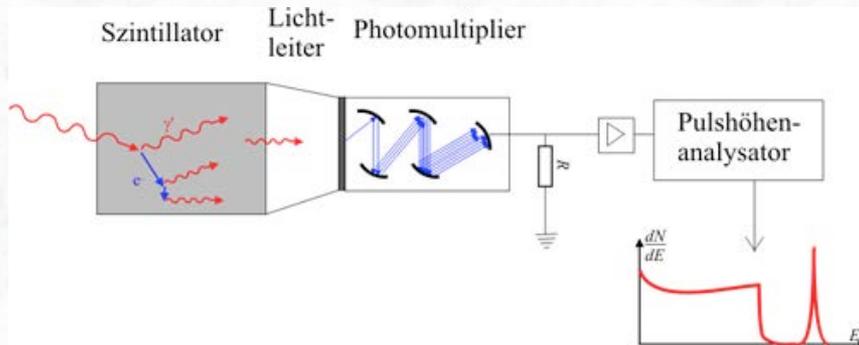
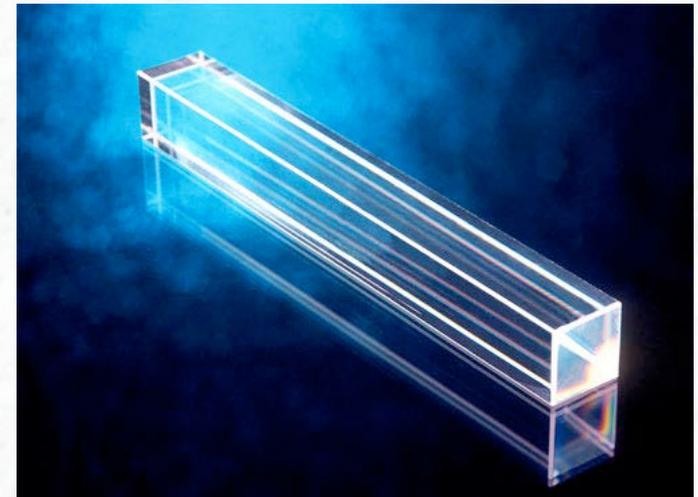
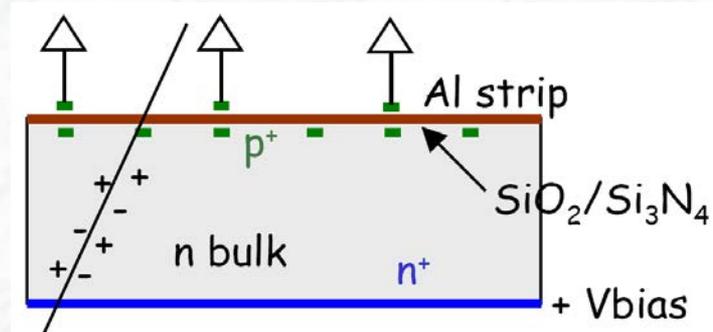
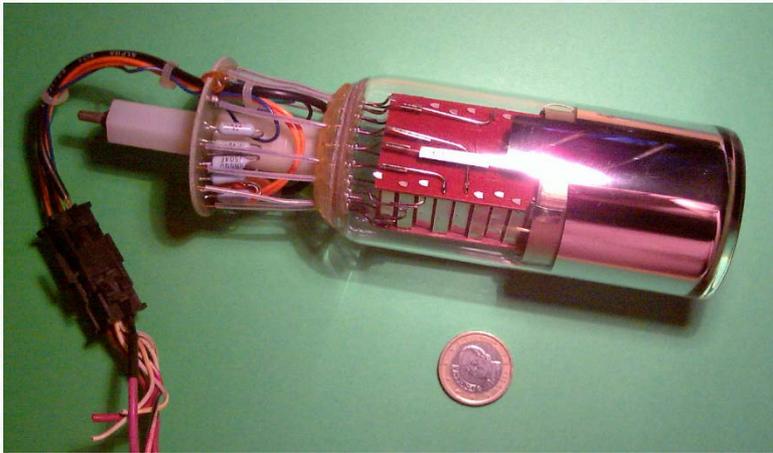


Experimentelle Methoden



1. Einführung

1.1 Anwendungsgebiete von Detektoren

1.2 Messgrößen

1.3 Bedeutung von Statistischen Methoden

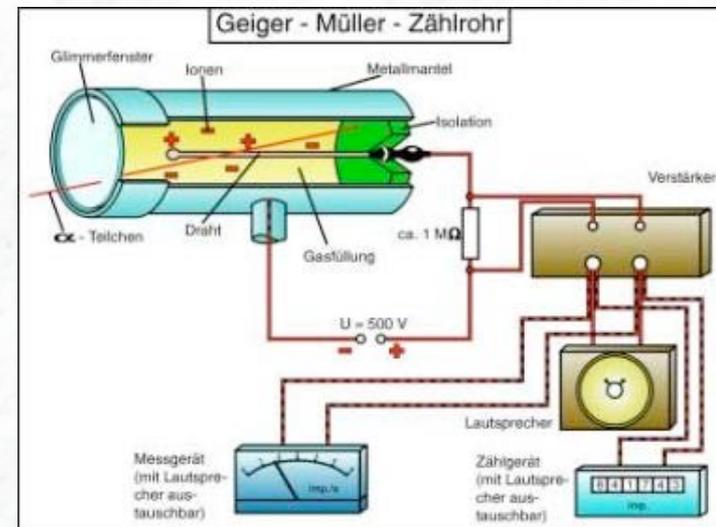
1.4 Strahlungsquellen

1.5 Einheiten der Strahlungsmessung

1.1 Anwendungsgebiete von Detektoren

- Detektoren haben vielfältige Anwendungen in Wissenschaft und Technik
- Um experimentelle Messungen in der Physik durchzuführen, müssen Instrumente eingesetzt werden
 - Nachweis von Photonen (Licht) → Photovervielfacher (Photoeffekt)
→ elektrisches Signal → Elektronik (Verstärkung, Signal für Auslese, Zählung)
 - Nachweis von direkten elektrischen Signalen, z.B. durch Ionisation von Gasen (Ar, Xe,..), Flüssigkeiten (z.B. flüssiges Argon) oder Festkörper (Halbleiter: Si, Ge, GaAs, ...)

→ Nachweis ionisierender Strahlung (α , β)



Anwendungsgebiete von größeren Detektorsystemen

- Elementarteilchenphysik

Nachweis von Teilchenreaktionen an Beschleunigern

Vermessung wichtiger Größen der entstandenen Teilchen
(Impulse, Energien, Identität der Teilchen,...)

Energiebereich: $\sim 1 \text{ GeV} - 5 \text{ TeV}$ (hohe Energien \rightarrow Hochenergiephysik)

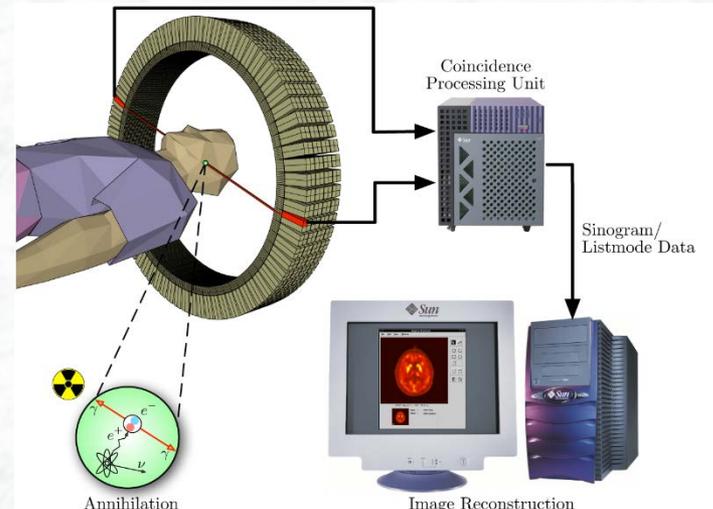
- Astrophysik und Astroteilchenphysik

- Vermessung der kosmischen Höhenstrahlung
- Röntgenstrahlung (ROSAT-Detektor)
- Hochenergetische Photonen (γ -ray bursts)
- Hochenergetische Neutrinos (Sonne, extragalaktische Quellen)
- Kosmische Hintergrundstrahlung (Planck-Satellit)

Energiebereich: $\sim 100 \mu\text{eV} - 1000 \text{ TeV}$

- **Medizin**

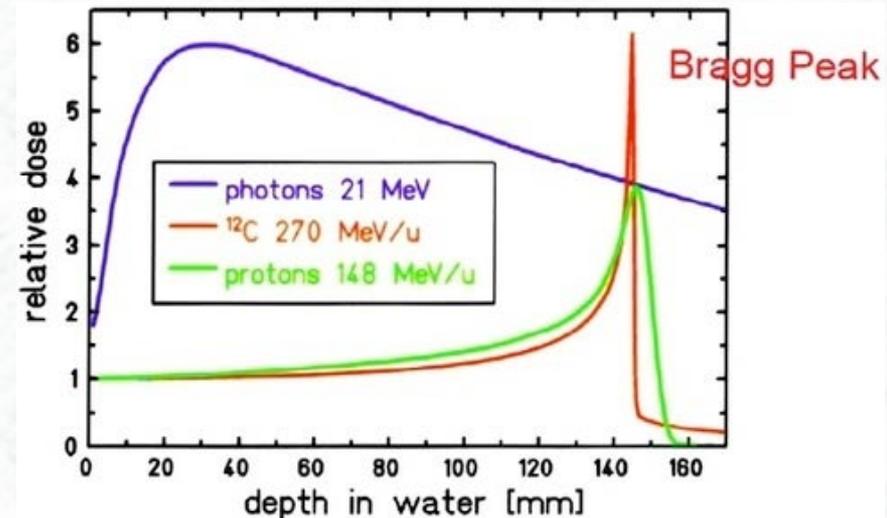
- Röntgenuntersuchungen (γ -Strahlen, Photoplatten, mittlerweile digitales Röntgen)
- Nuklearmedizin (Nachweis von γ -Strahlung, z.B. nach Anreicherung von entsprechenden radioaktiven Isotopen in Organen (z.B. Schilddrüse))
- Positronen-Emissions-Tomographie (Bildgebendes Verfahren, Sichtbarmachung der Verteilung von radioaktiven Substanzen (Radiopharmaka, β^+ -Strahler) im Organismus über die Vernichtungsreaktion $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
→ Rückschlüsse auf biochemische und physiologische Reaktionen)



- Tumorthherapie mit Hadronen (π^+ oder p) oder Ionen

Energiedeposition am Ort des Tumors;

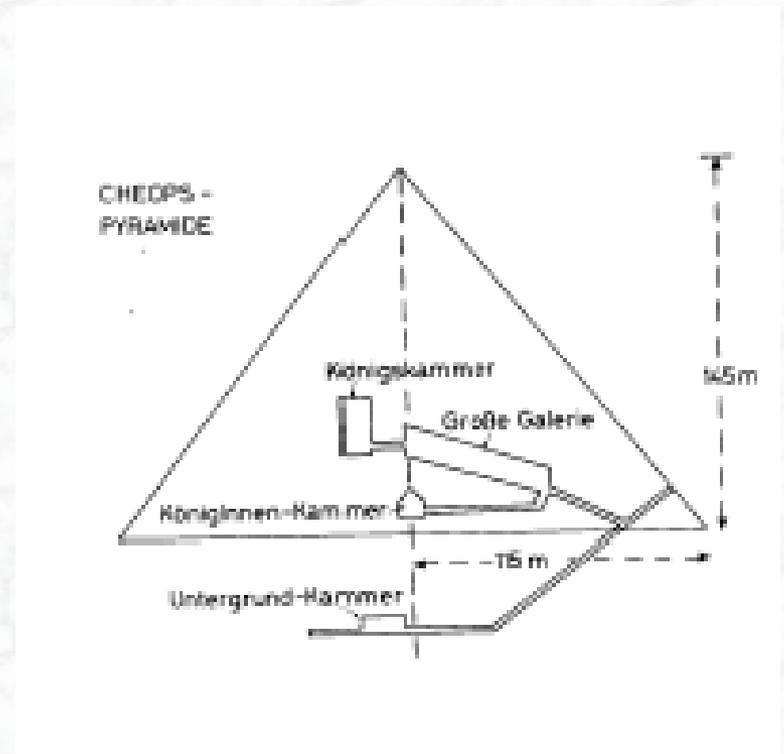
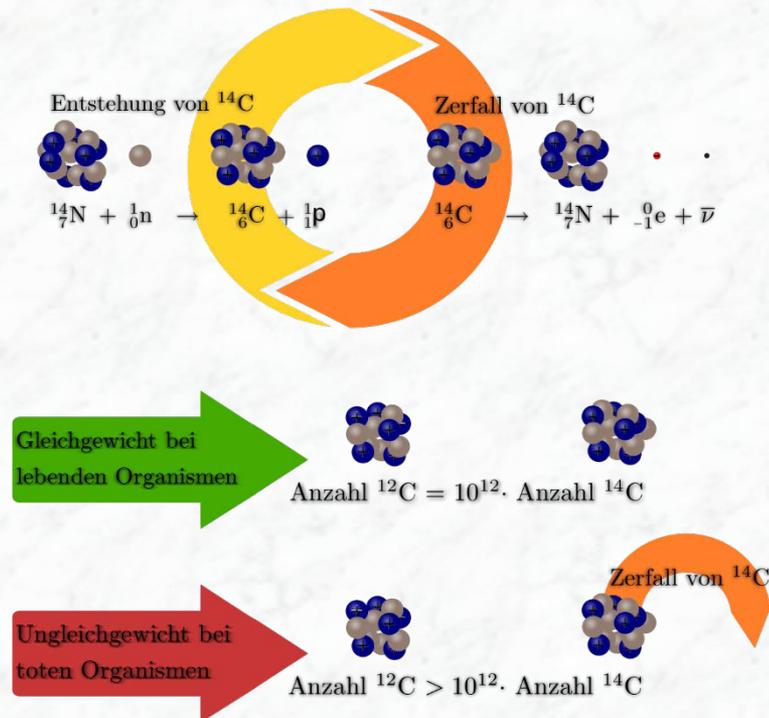
Erfordert Beschleuniger, die Strahlen geeigneter Energie zur Verfügung stellen



- Archäologie

- Altersbestimmung über die C¹⁴-Methode

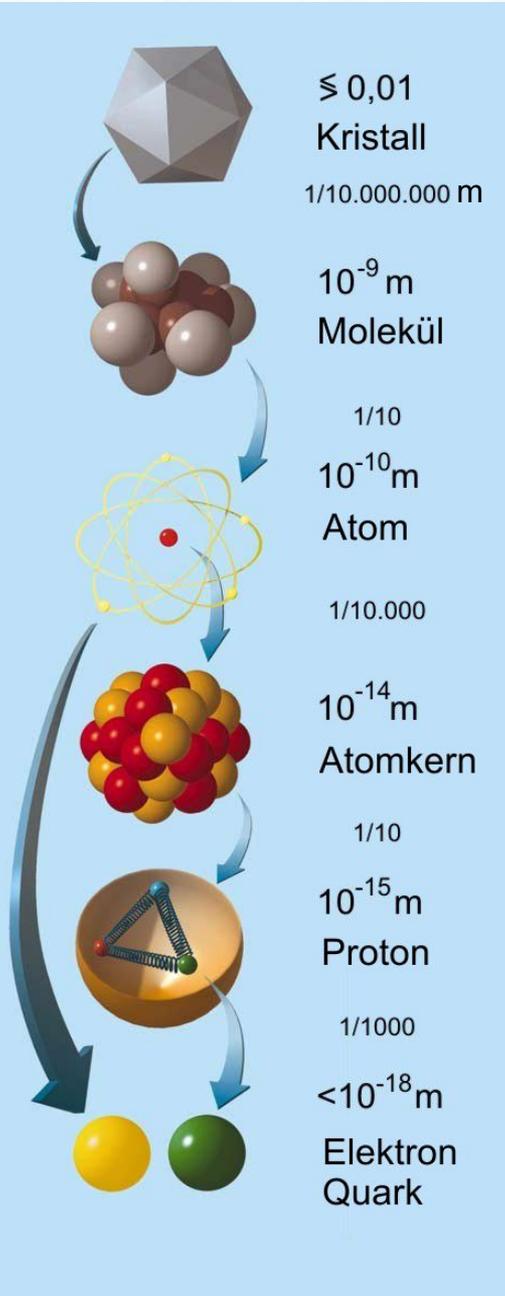
- „Röntgen“ der Pyramiden im „Lichte kosmischer Myonen“



Exkurs:

- Einführung Teilchenphysik (E1)
- Kosmische Strahlung (E2)
- Nachweis von Neutrinos (E3)

E1: Erforschung der Materie



Auge, Mikroskop
(Licht)

Elektronenmikroskop
(Elektronen)

Teilchenbeschleuniger
(Synchrotron-Strahlung)

Teilchenbeschleuniger
(Teilchen hoher Energie)

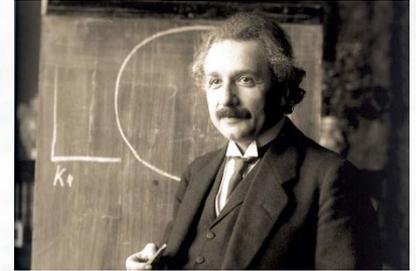
höhere Energie / Impuls

höhere Auflösung

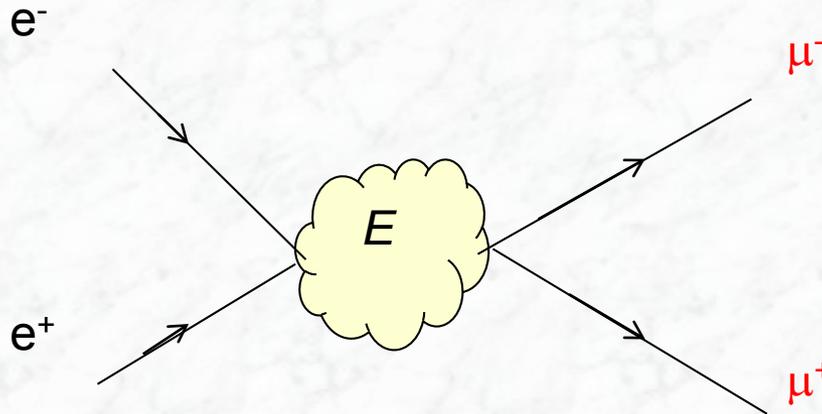
$$\Delta x \propto \frac{1}{p}$$

Neue Teilchen aus hohen Energien?

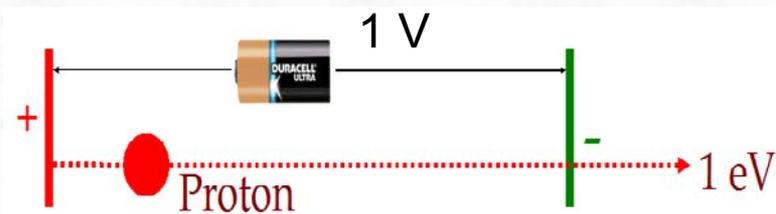
$$E = mc^2$$



bekannte
Teilchen



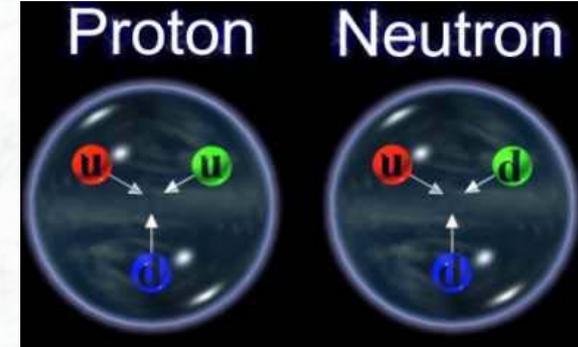
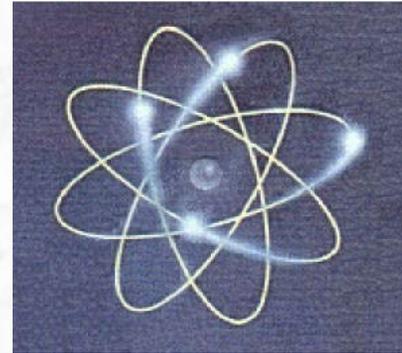
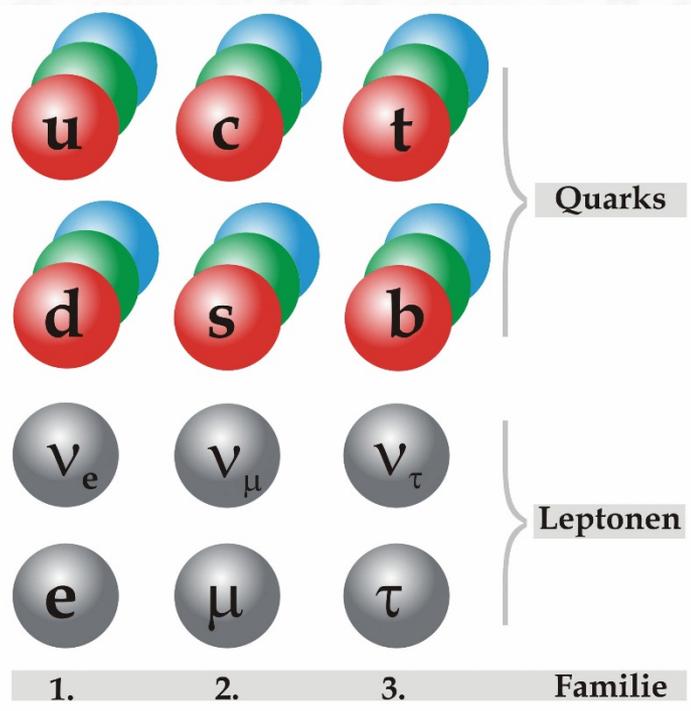
neue
Teilchen



$m_{\text{Elektron}} = 511 \text{ keV} = 511\,000 \text{ eV}$
 $m_{\text{Proton}} = 938 \text{ MeV} = 938\,000\,000 \text{ eV}$
 üblicherweise wird $c=1$ gesetzt

$E_{\text{LHC}} = 8 \text{ TeV} = 8\,000\,000\,000\,000 \text{ eV}$

Die Bausteine der Materie: Quarks und Leptonen

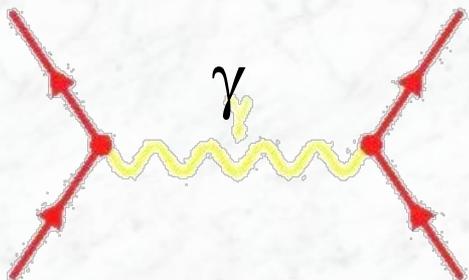


Materie, die uns umgibt: Bausteine der 1. Familie

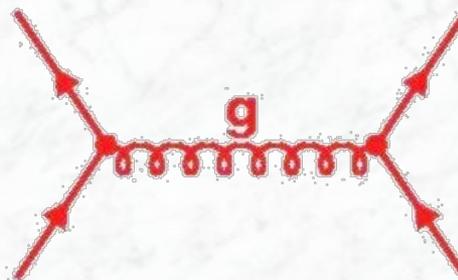
$m_p = 0.938 \text{ GeV}$
(Konstituenten + Bindungsenergie)

- Quarks und Leptonen scheinen punktförmig zu sein, Ausdehnung $< 10^{-18} \text{ m}$ (Elementarteilchen)
- Die Masse der Quarks und Leptonen steigt mit der Familienzahl an
 $m_\mu \approx 200 m_e$ $m_\tau \approx 3.500 m_e$
Das schwerste Elementarteilchen: das Top-Quark $m_t \approx 340.000 m_e \approx m_{\text{Gold-Atom}}$

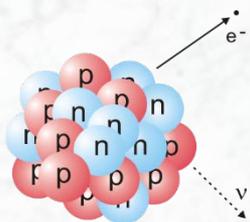
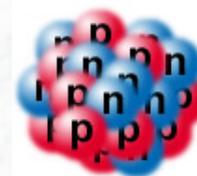
Die fundamentalen Kräfte



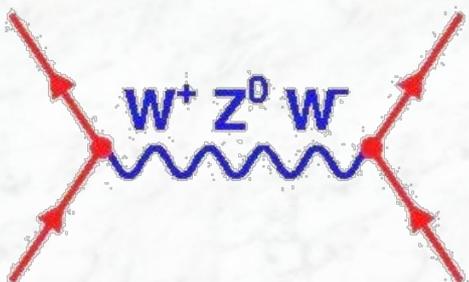
elektromagnetische Kraft



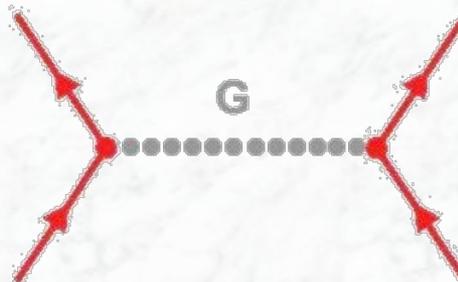
starke Kraft



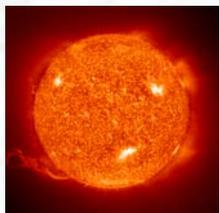
β -Zerfall



schwache Kraft



Gravitation



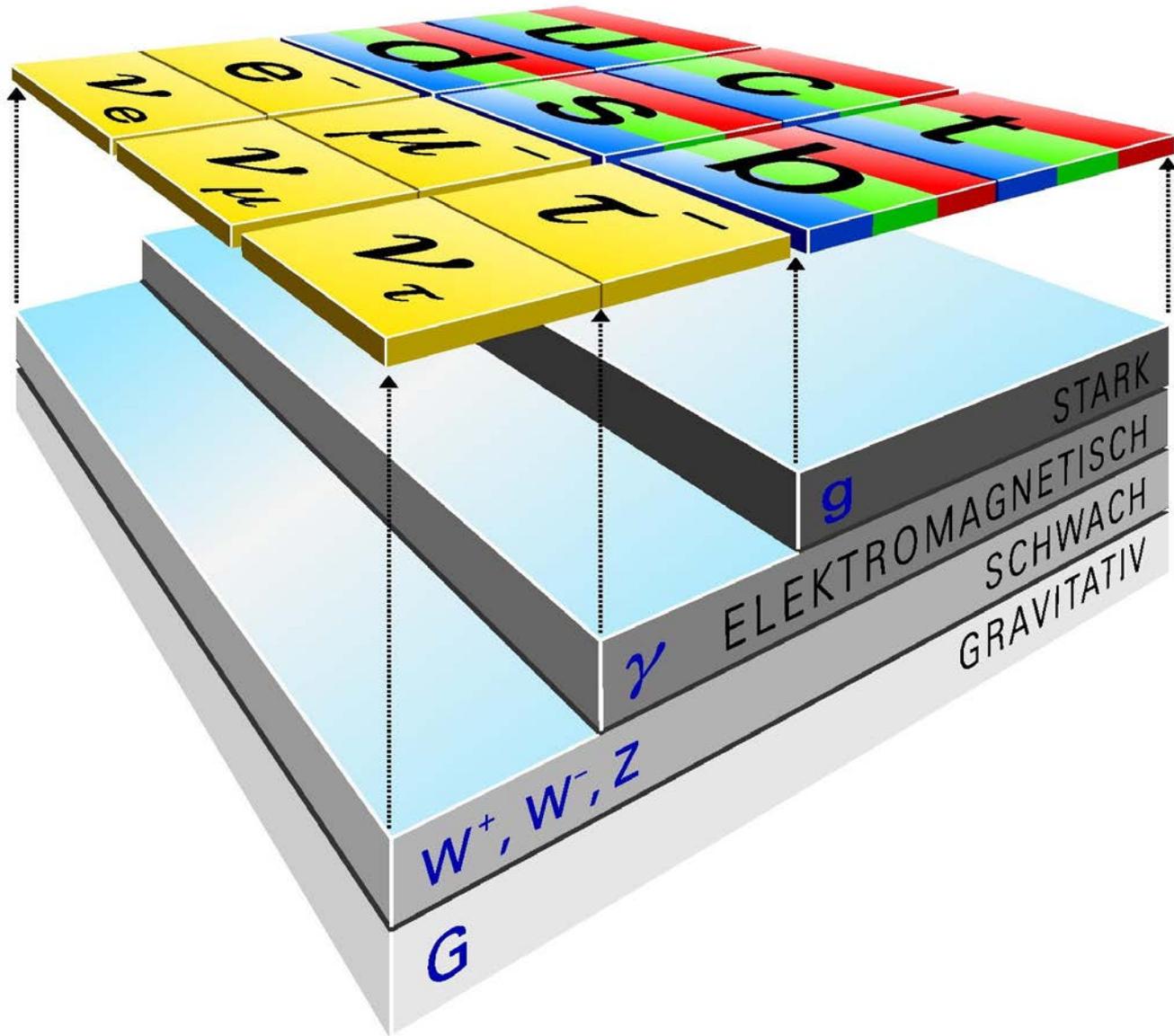
Austauschteilchen: **Photon (γ), Gluonen (g), W- und Z-Teilchen**

(Im Bild der Quantenfeldtheorie: Wechselwirkung durch Austausch dieser Teilchen)

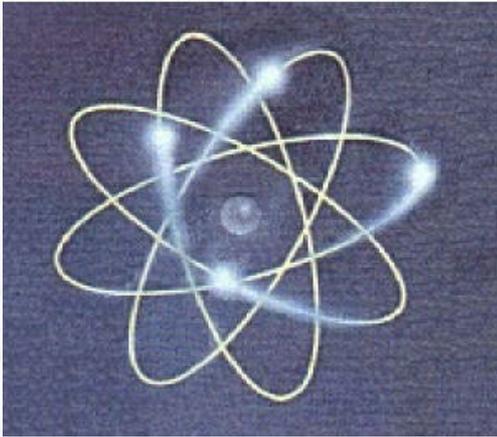
Quantenfeldtheorie fordert masselose Austauschteilchen !

- Photon und Gluonen sind masselos: $m_\gamma = 0$, $m_g = 0$

- W- und Z-Teilchen sind sehr schwer: $m_W = 80.4 \text{ GeV}$, $m_Z = 91.2 \text{ GeV}$



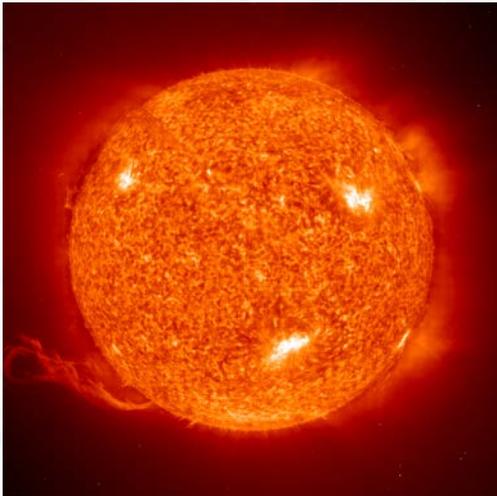
Bedeutung der Massen der Elementarteilchen



Masse von Elektronen und Protonen

→ Längenskala unserer Welt

$m_e = 0$ → keine Atombindung

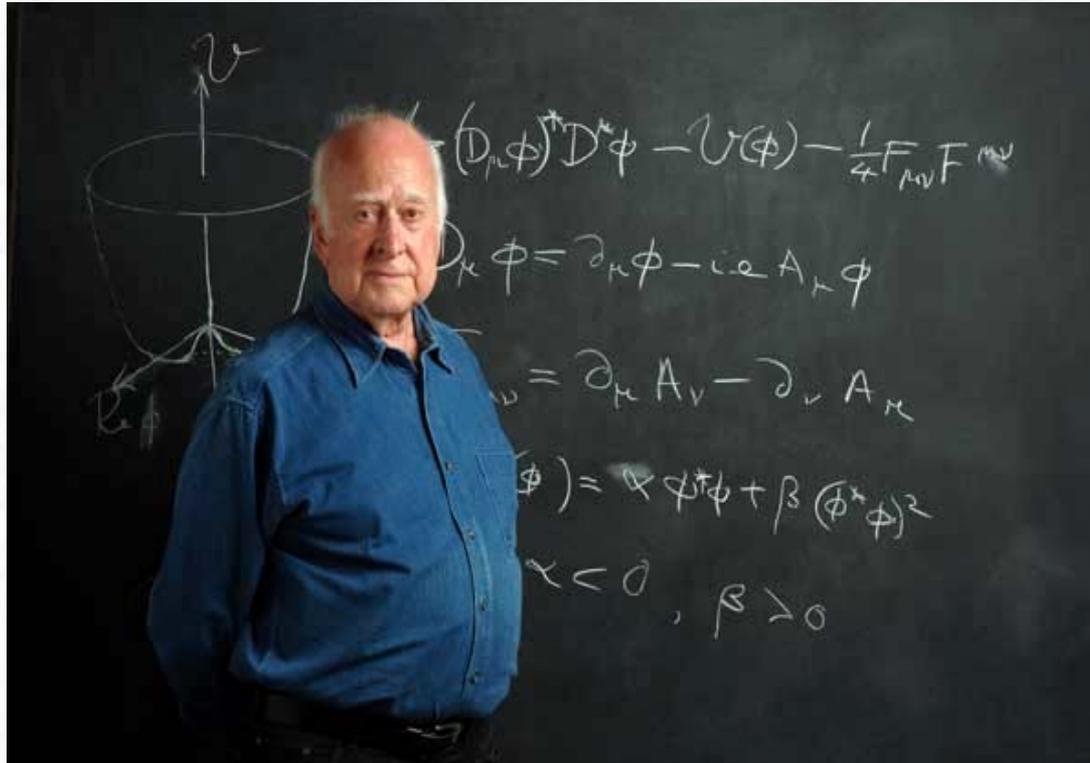


Keine/kleine Masse des W-Austauschteilchens

→ Kürzere Brennzeit der Sonne,
andere Temperaturverhältnisse

→ Keine Menschen / Leben auf der Erde

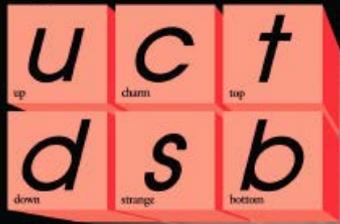
Der Brout-Englert-Higgs Mechanismus



F. Englert and R. Brout. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 321;
P.W. Higgs, Phys. Lett. 12 (1964) 132, Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 508;
G.S. Guralnik, C.R. Hagen, and T.W.B. Kibble. Phys. Rev. Lett. 13 (1964) 585.

Der Brout-Englert-Higgs-Mechanismus

Quarks



Forces



Leptons

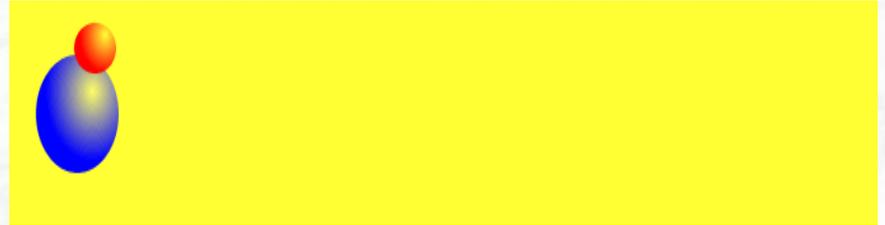


- Ein neues Teilchenfeld (Higgs-Feld) wird postuliert, durchdringt das Vakuum
- Masse wird erzeugt durch Wechselwirkung der Teilchen mit diesem Feld
- Vorhersage: Neues Teilchen, das sog. **Higgs-Teilchen**

Prinzip der Massenerzeugung

Leeres Vakuum

Alle Teilchen sind masselos und bewegen sich mit derselben Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit.



Higgs-Hintergrundfeld

Teilchen wechselwirken mit dem Higgs-Hintergrundfeld und bewegen sich langsamer.

Sie erhalten effektiv eine Masse. Die Masse hängt von der Stärke der Wechselwirkung mit dem Hintergrundfeld ab.



Das Higgs-Teilchen: Anregung des Higgs-Feldes



The Large Hadron Collider



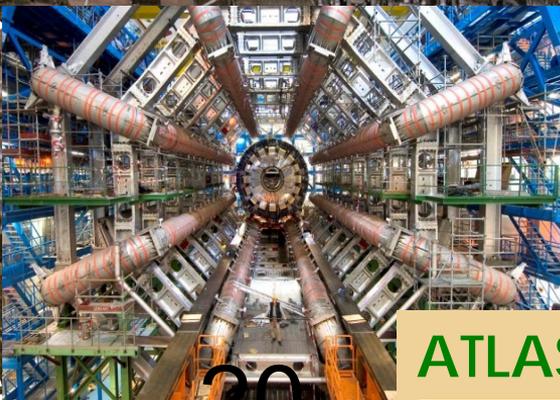
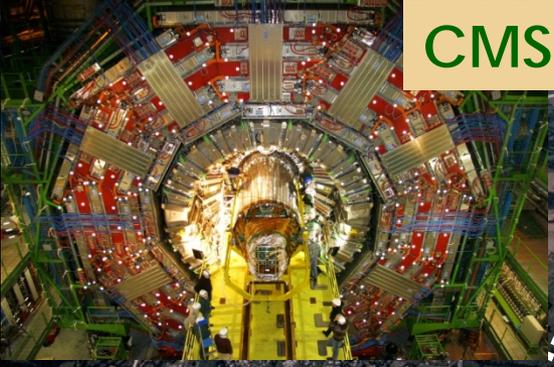
Ein Blick in den Beschleunigertunnel des LHC



Inbetriebnahme 2009
nach ~15 Jahren Entwicklungs- und Bauzeit

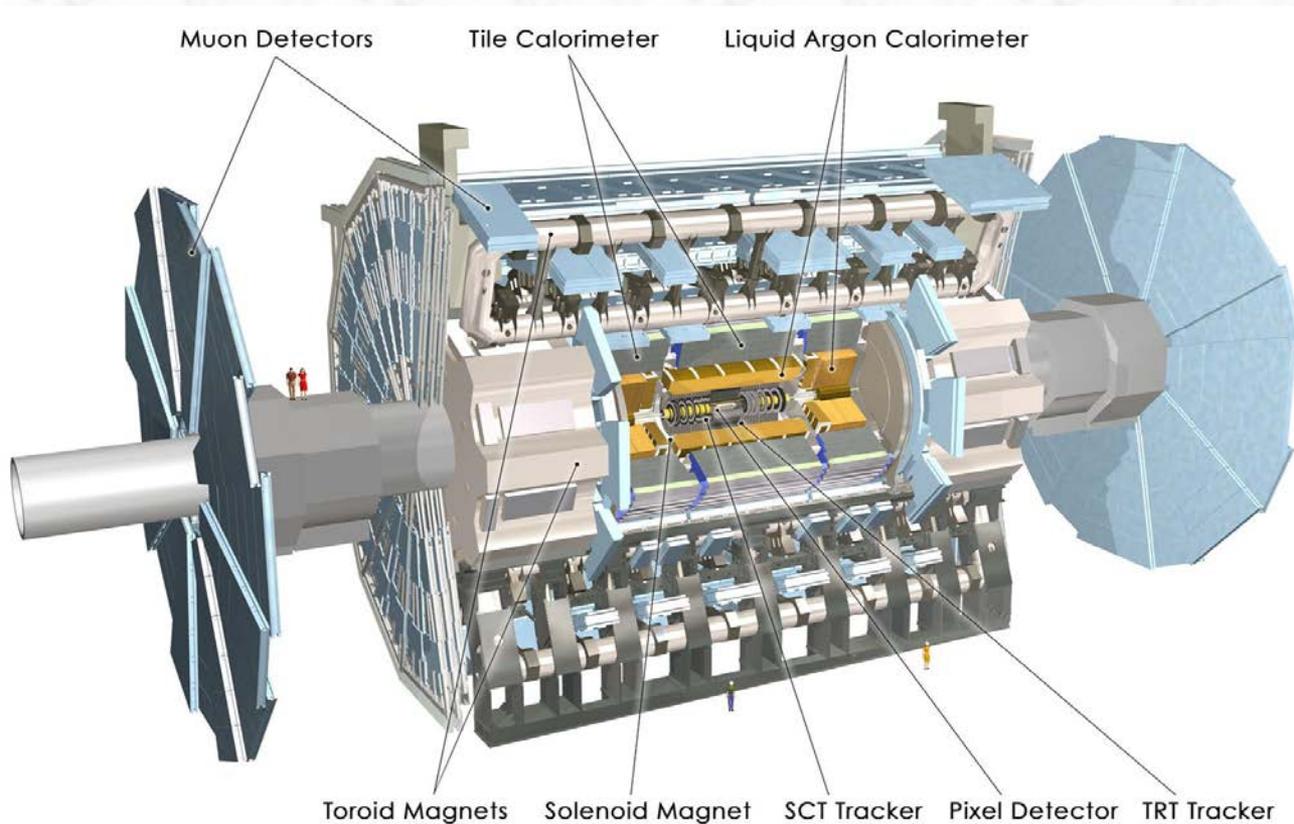


CMS



ATLAS

The ATLAS experiment

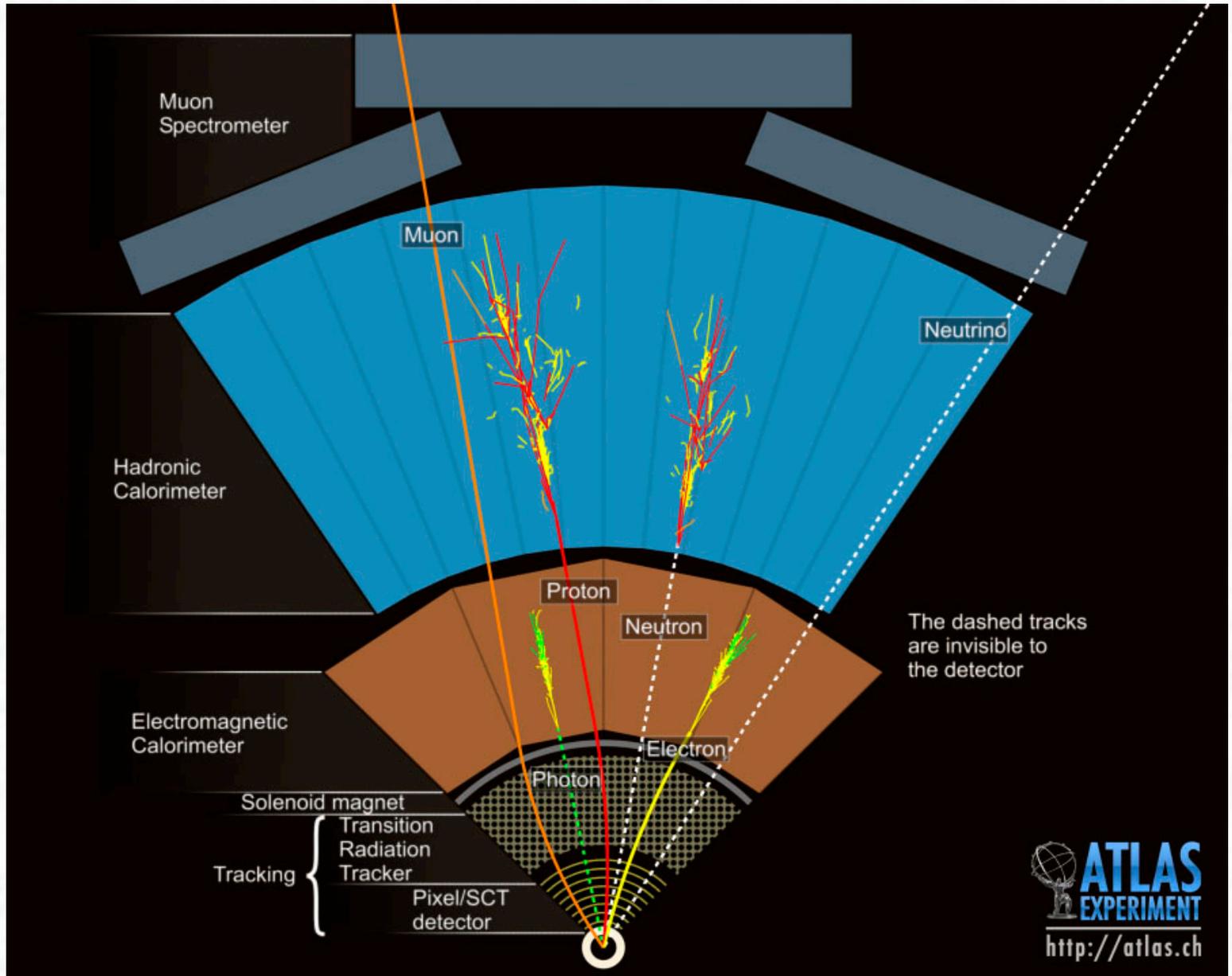


- Solenoidal magnetic field (2T) in the central region (momentum measurement)
- Independent muon spectrometer (supercond. toroid system)
- High resolution silicon position detectors:
 - 6 Mio. channels (80 μm x 12 cm)
 - 100 Mio. channels (50 μm x 400 μm)space resolution: $\sim 15 \mu\text{m}$
- Liquid argon calorimeter (high granularity)
Energy measurement down to 1° to the beam line

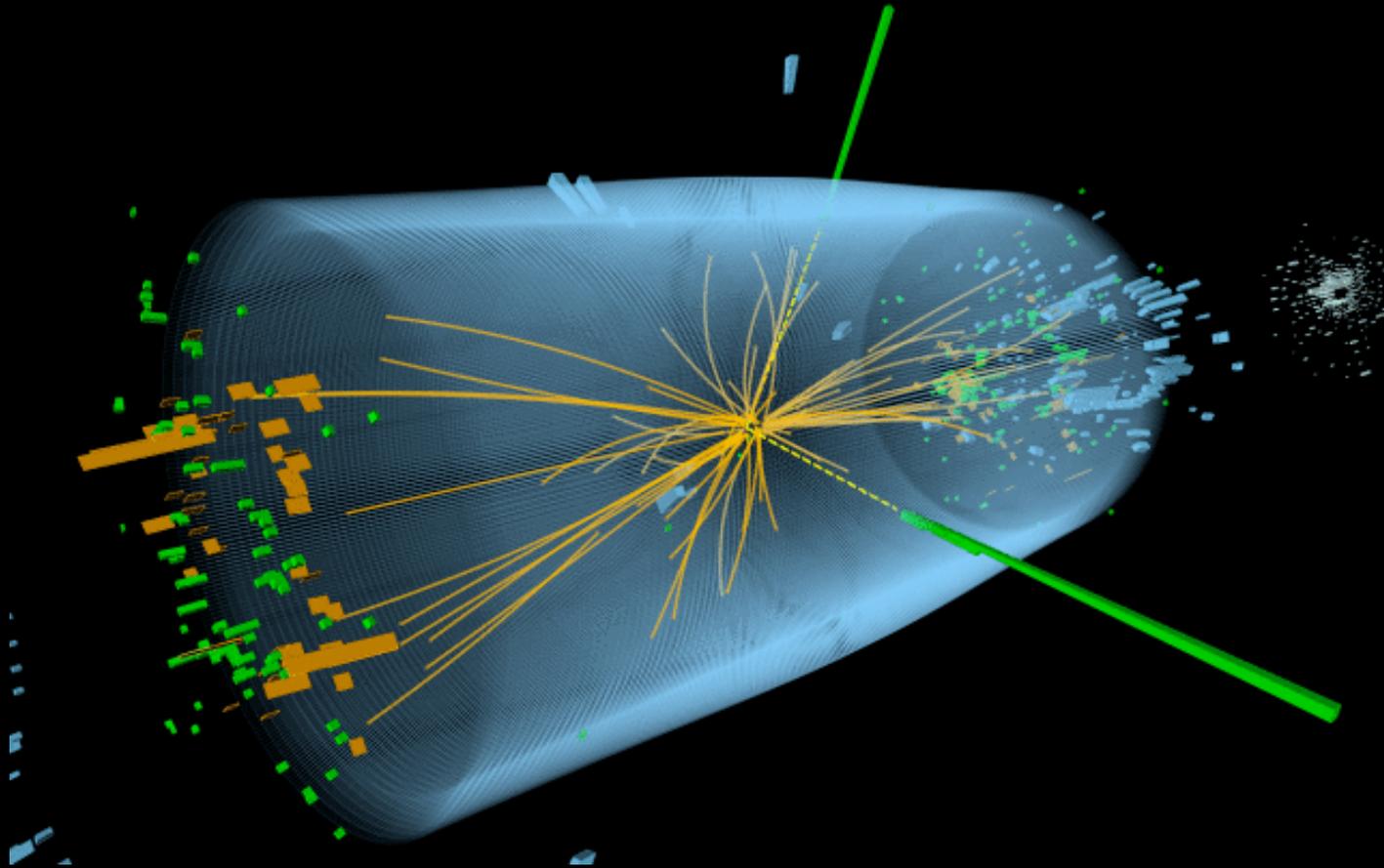
Diameter	25 m
Barrel toroid length	26 m
End-cap end-wall chamber span	46 m
Overall weight	7000 Tons

More than 200 Mio electronic readout channels

Layers of the ATLAS detector



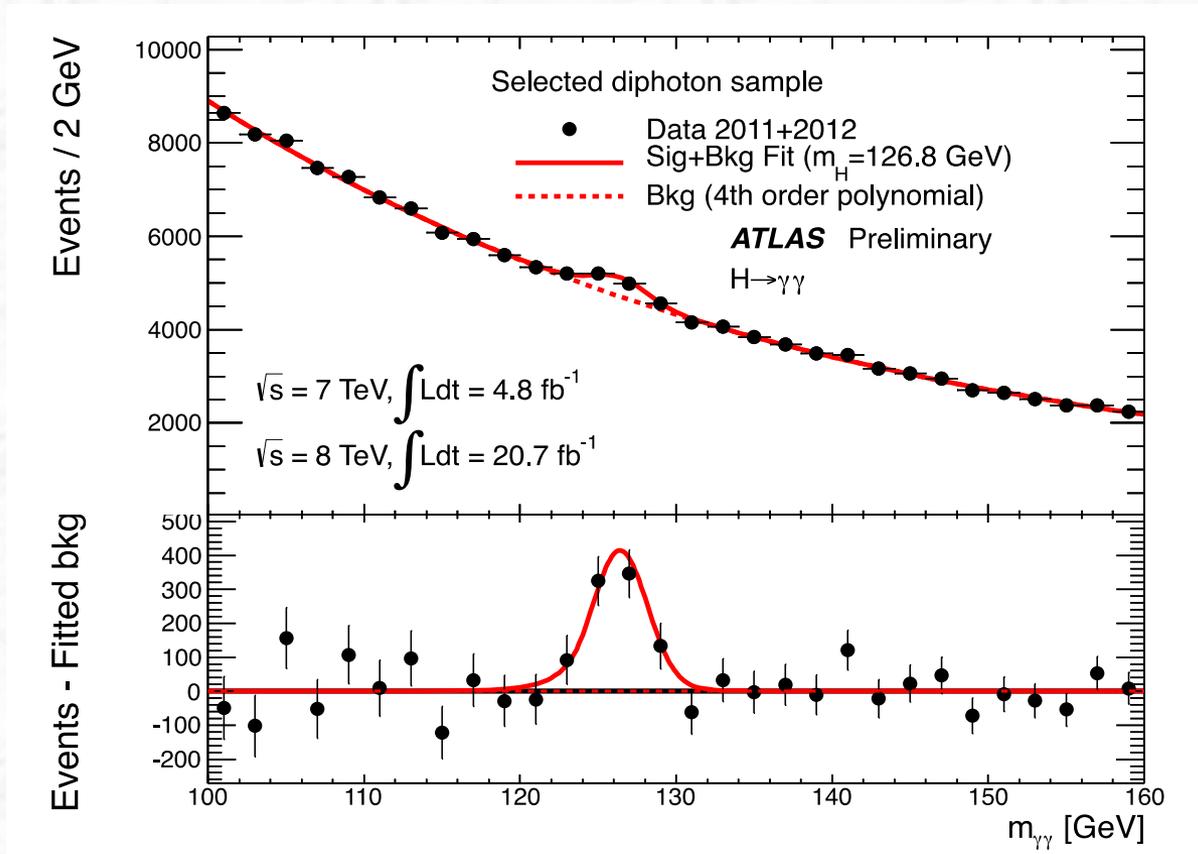
Entdeckung des Higgs-Teilchens



Erwartete Anzahl von Zerfällen in den Daten:
 $m_H = 125 \text{ GeV}$

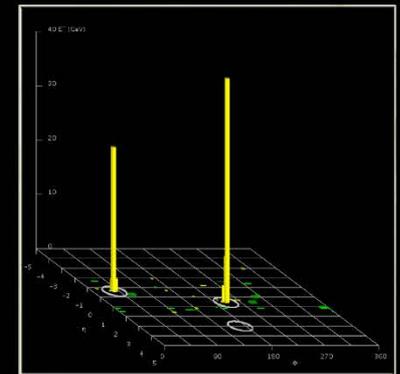
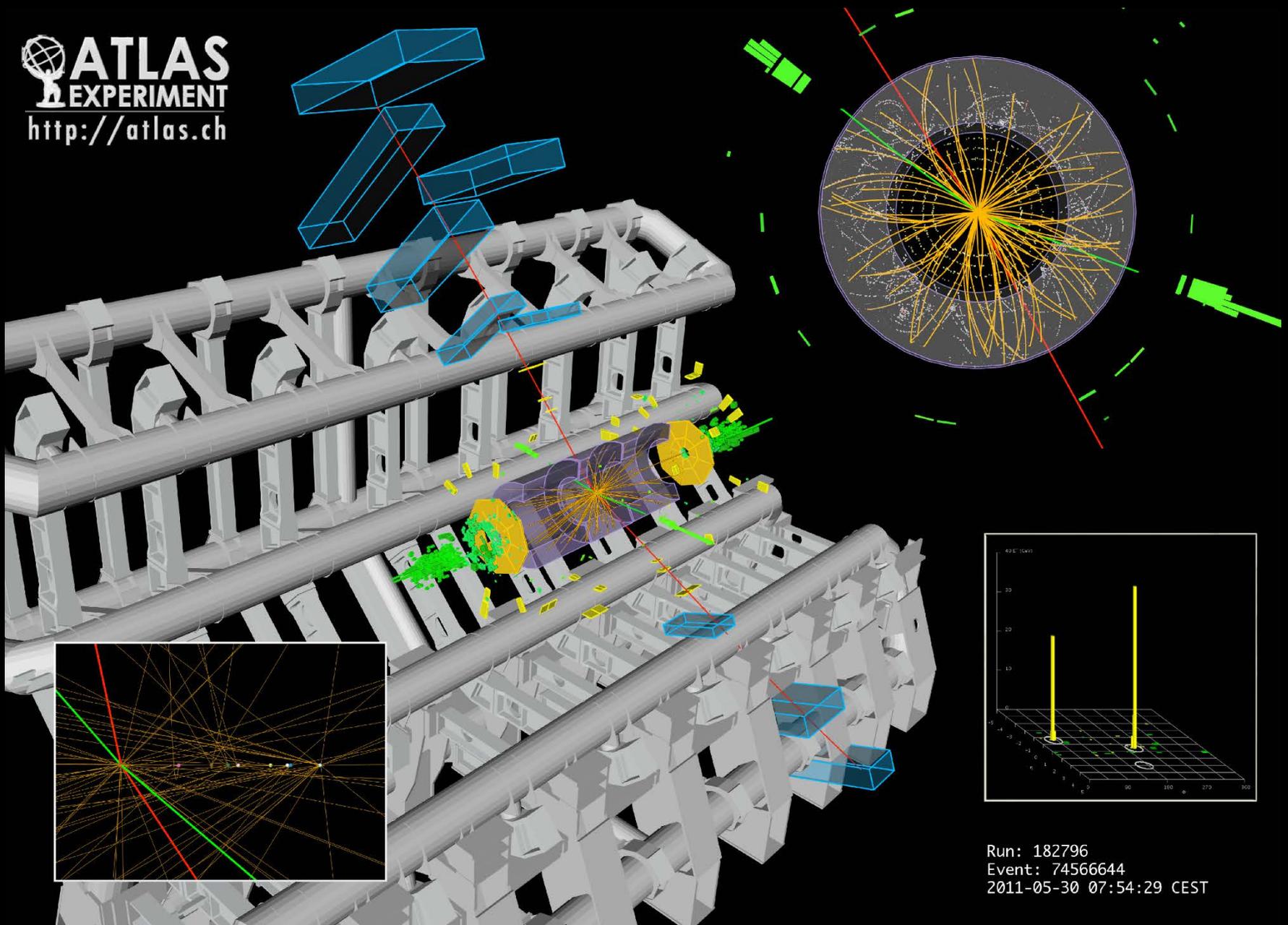
- $\sim 950 \text{ H} \rightarrow \gamma\gamma$
- $\sim 60 \text{ H} \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \ell$
- $\sim 9000 \text{ H} \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu \ell\nu$

Ergebnis der ATLAS-Suche für $H \rightarrow \gamma\gamma$



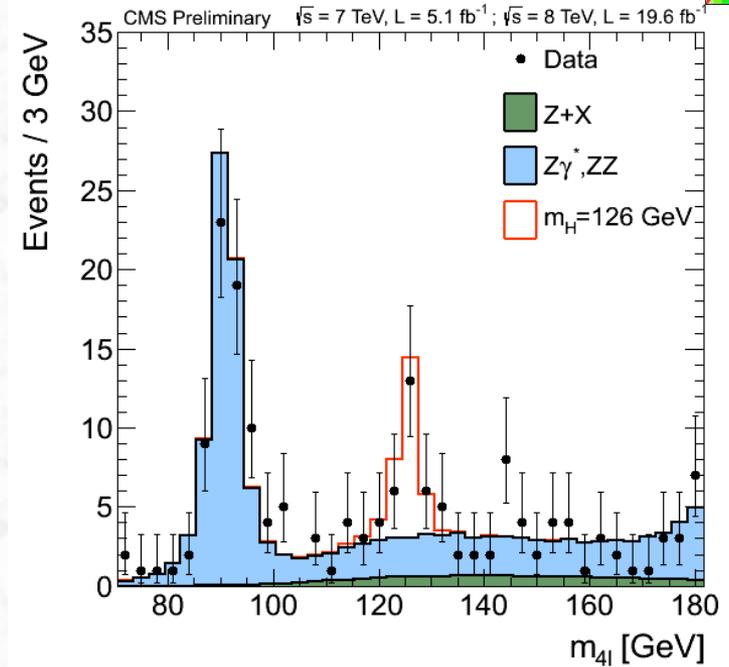
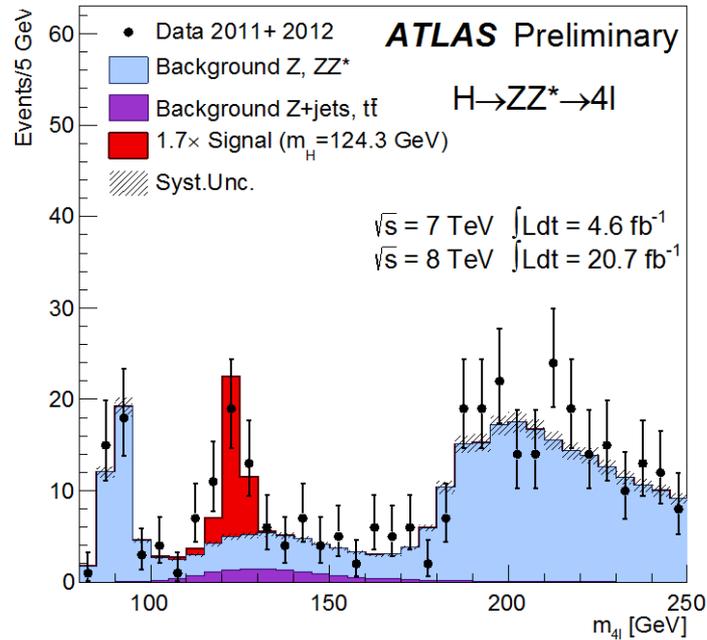
Kandidat für einen $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^- \mu^+ \mu^-$ Zerfall

ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

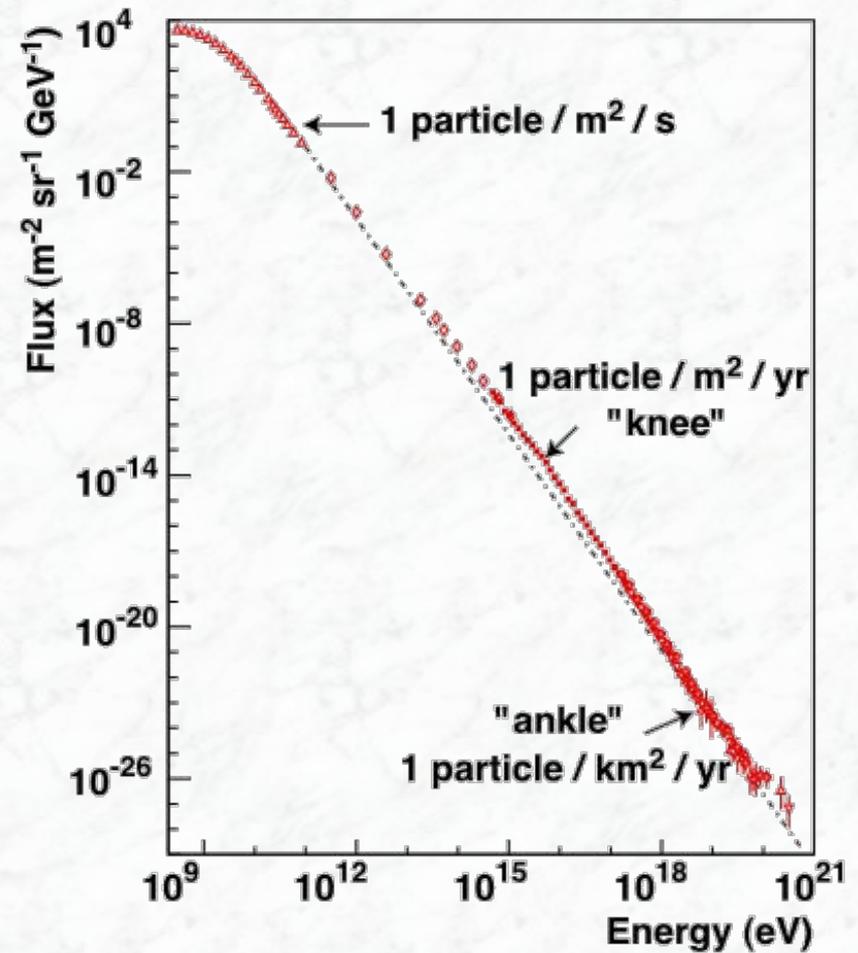
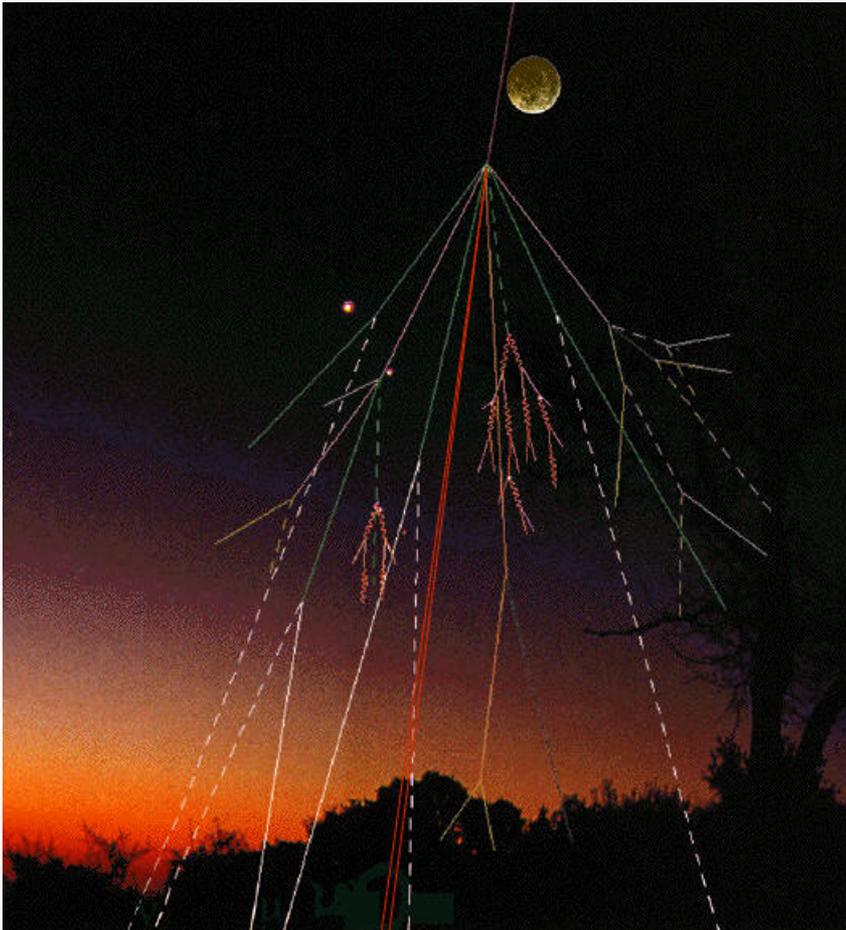


Run: 182796
Event: 74566644
2011-05-30 07:54:29 CEST

Ergebnis der Suche nach dem $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$ Zerfall



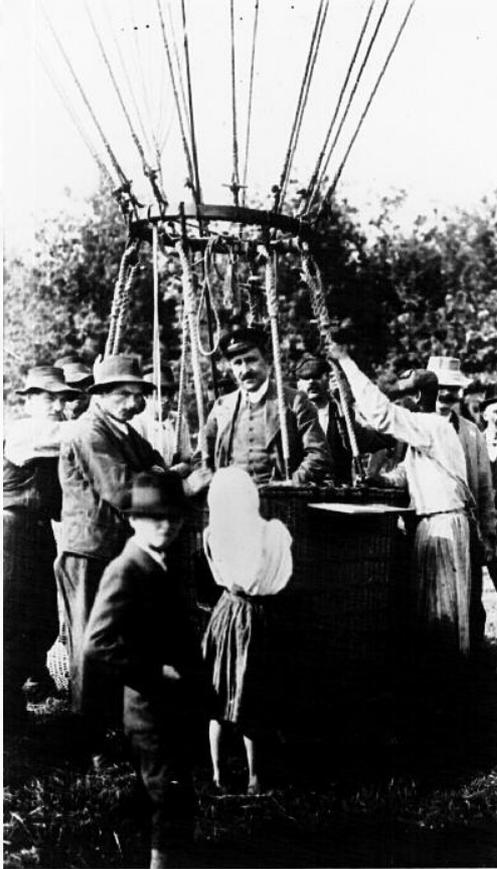
E2: Kosmische Strahlung



Energiespektrum der kosmischen Strahlung

$$E_{\text{max}} = 3.2 \cdot 10^{20} \text{ eV} = 50 \text{ J} !$$

Kosmische Strahlung

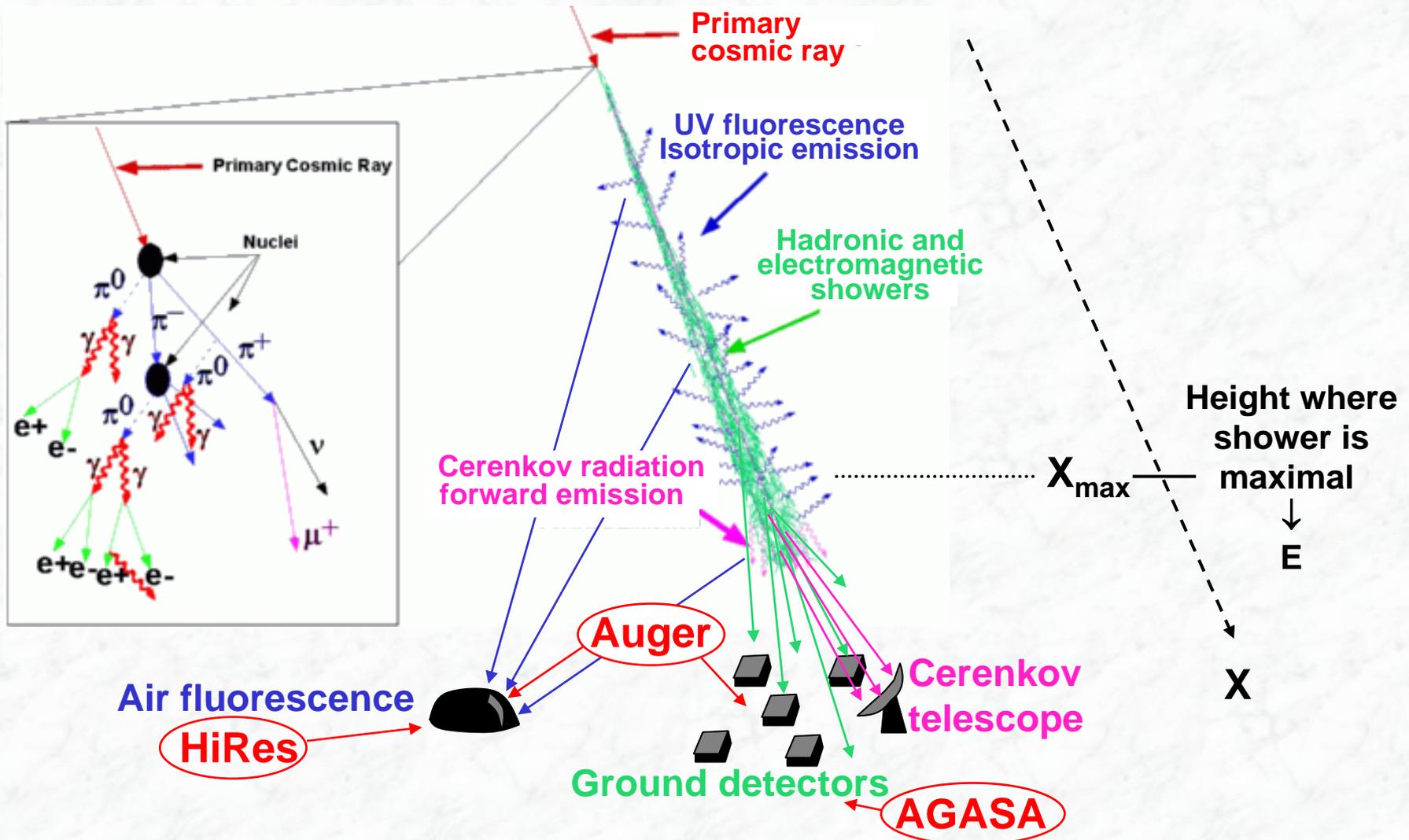


Victor Hess, 1912
Entdeckung und Untersuchung
der kosmischen Strahlung

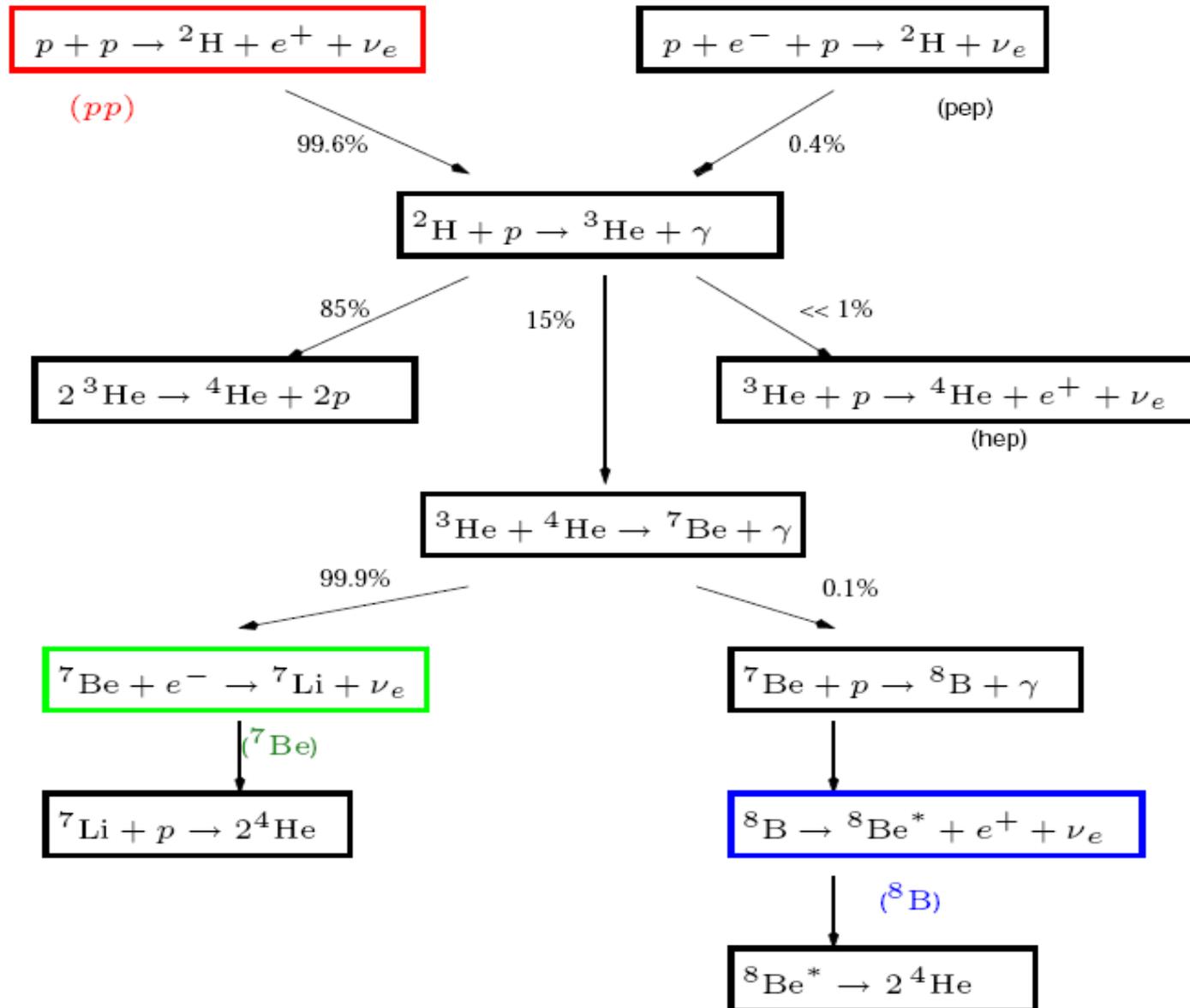


Das HESS-Experiment, Namibia
Max-Planck-Institut für Physik, Heidelberg u.A.
Untersuchung der kosmischen Strahlung heute

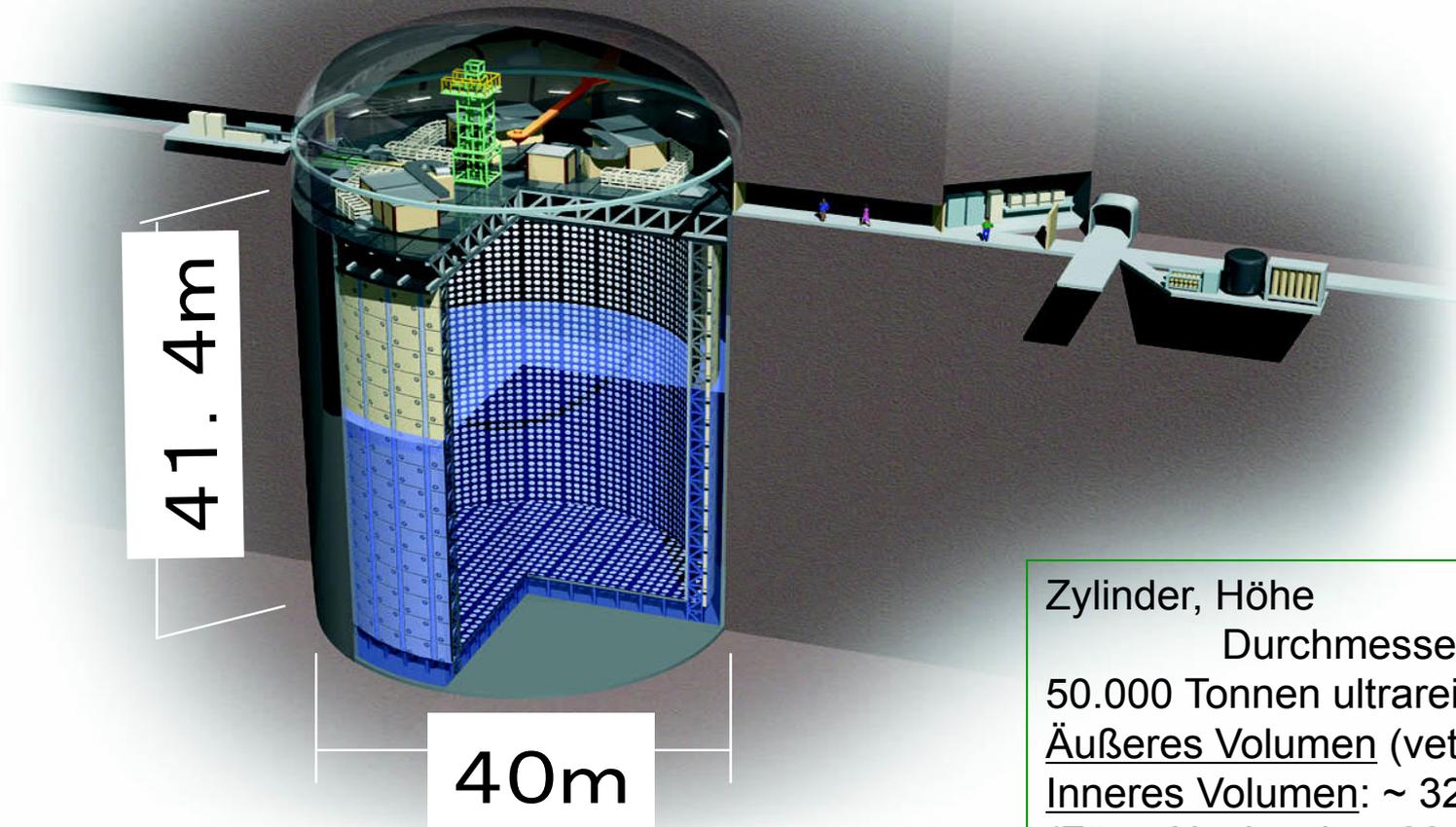
Nachweismethoden



E3: Energieproduktion in der Sonne, Neutrinos



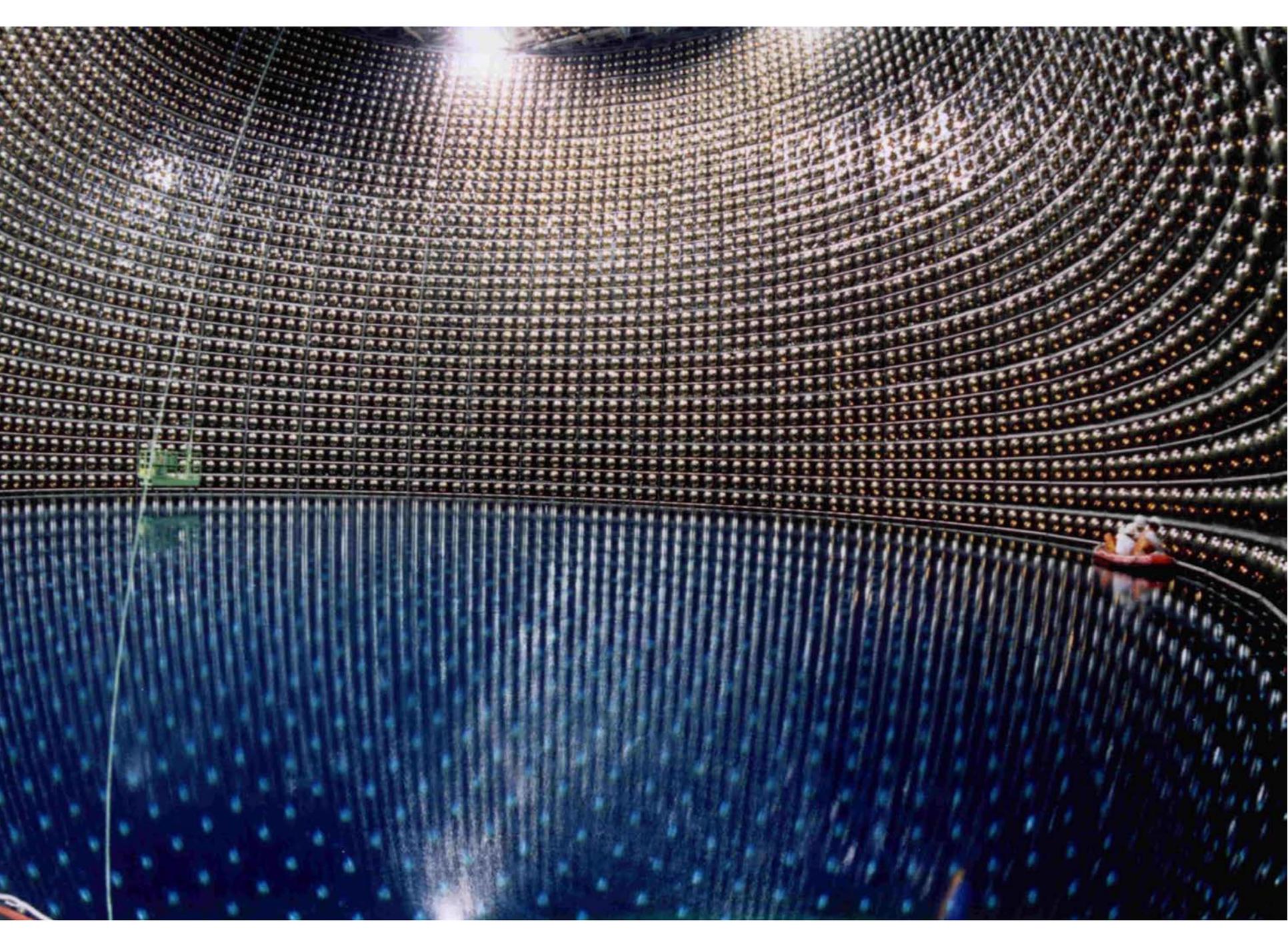
Superkamiokande-Detektor (Japan)

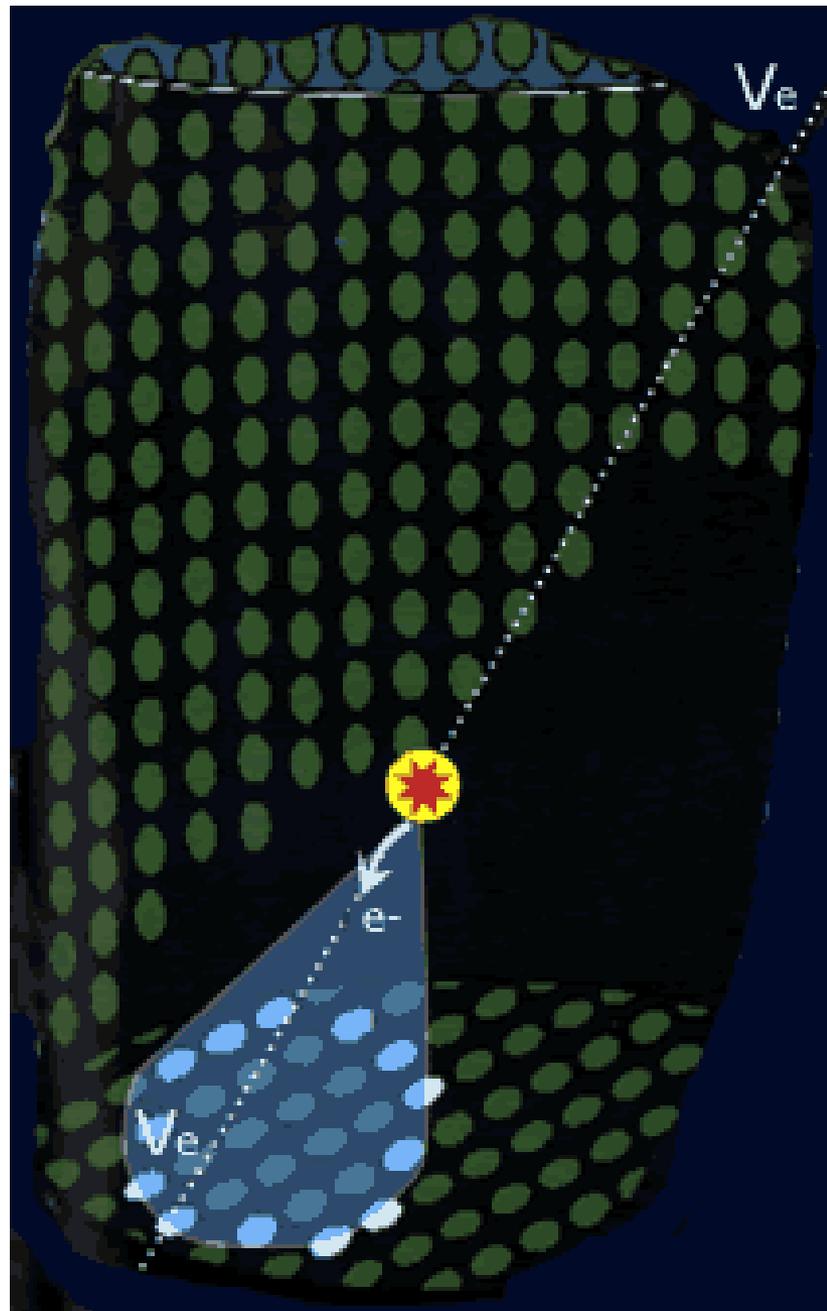
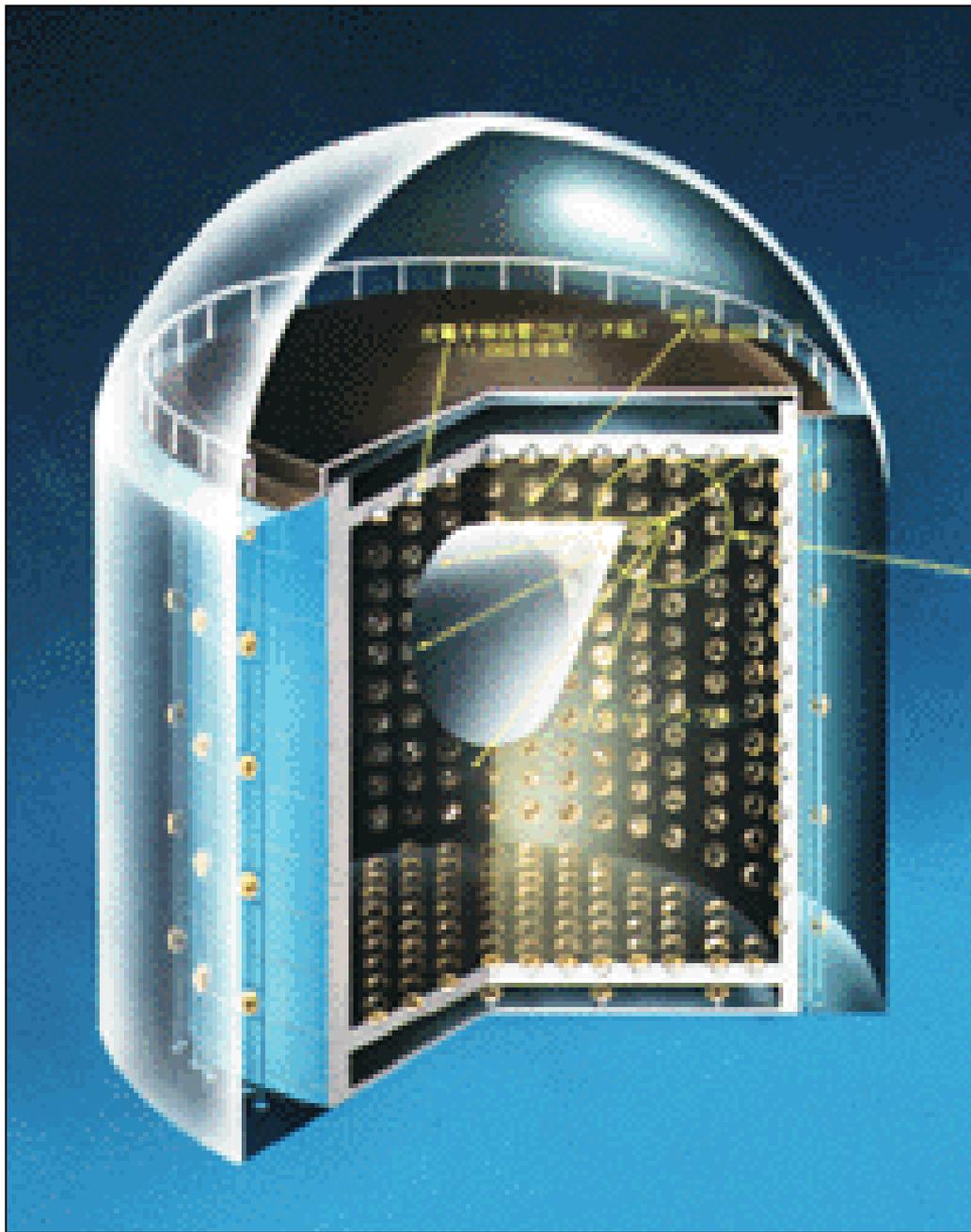


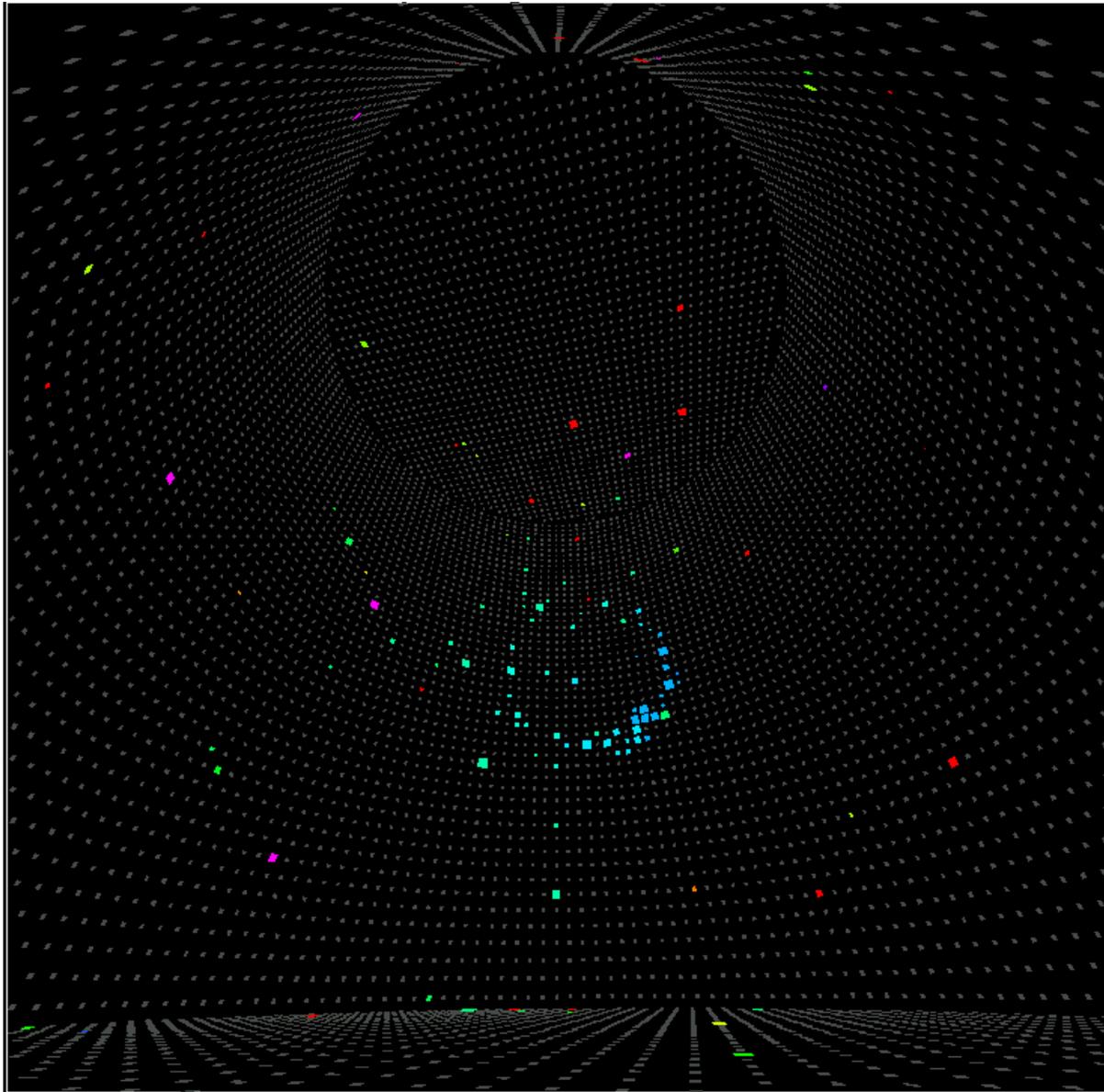
41.4m

40m

Zylinder, Höhe = 41.4 m
Durchmesser = 40 m
50.000 Tonnen ultrareines Wasser
Äußeres Volumen (veto) ~2.7 m dick
Inneres Volumen: ~ 32.000 Tonnen
(Für ν -Nachweis: 22.500 Tonnen)
11.200 Photomultiplier
Durchmesser = 50 cm

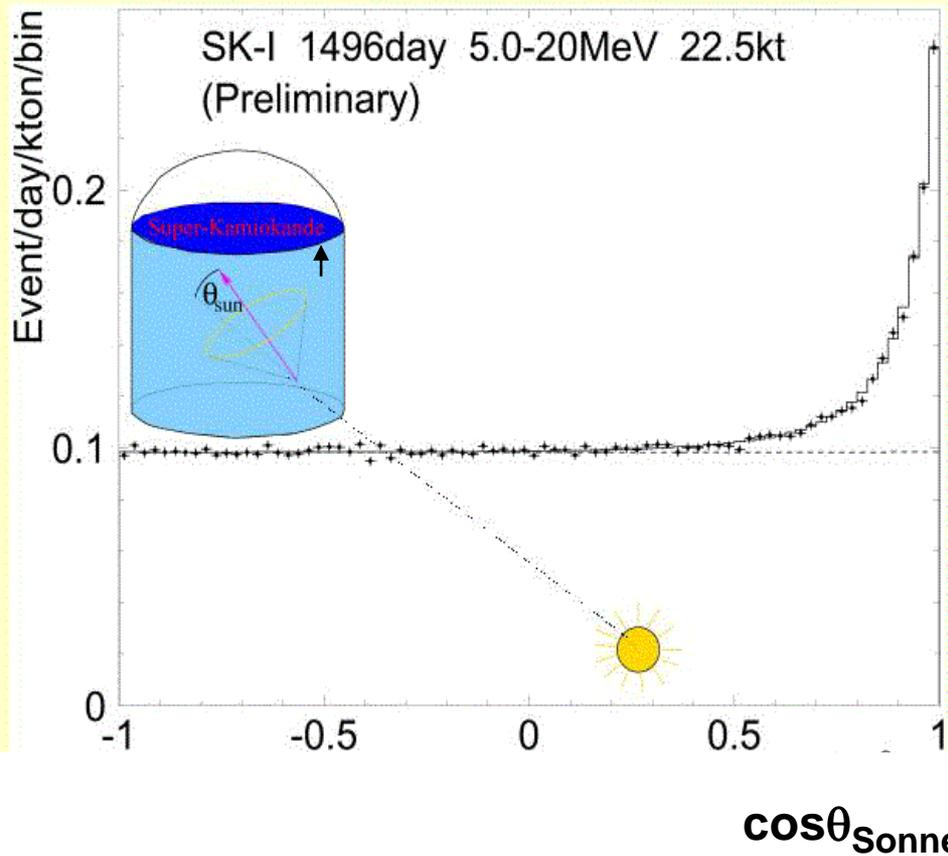






12 MeV
Neutrino
von der Sonne
im SK-Detektor

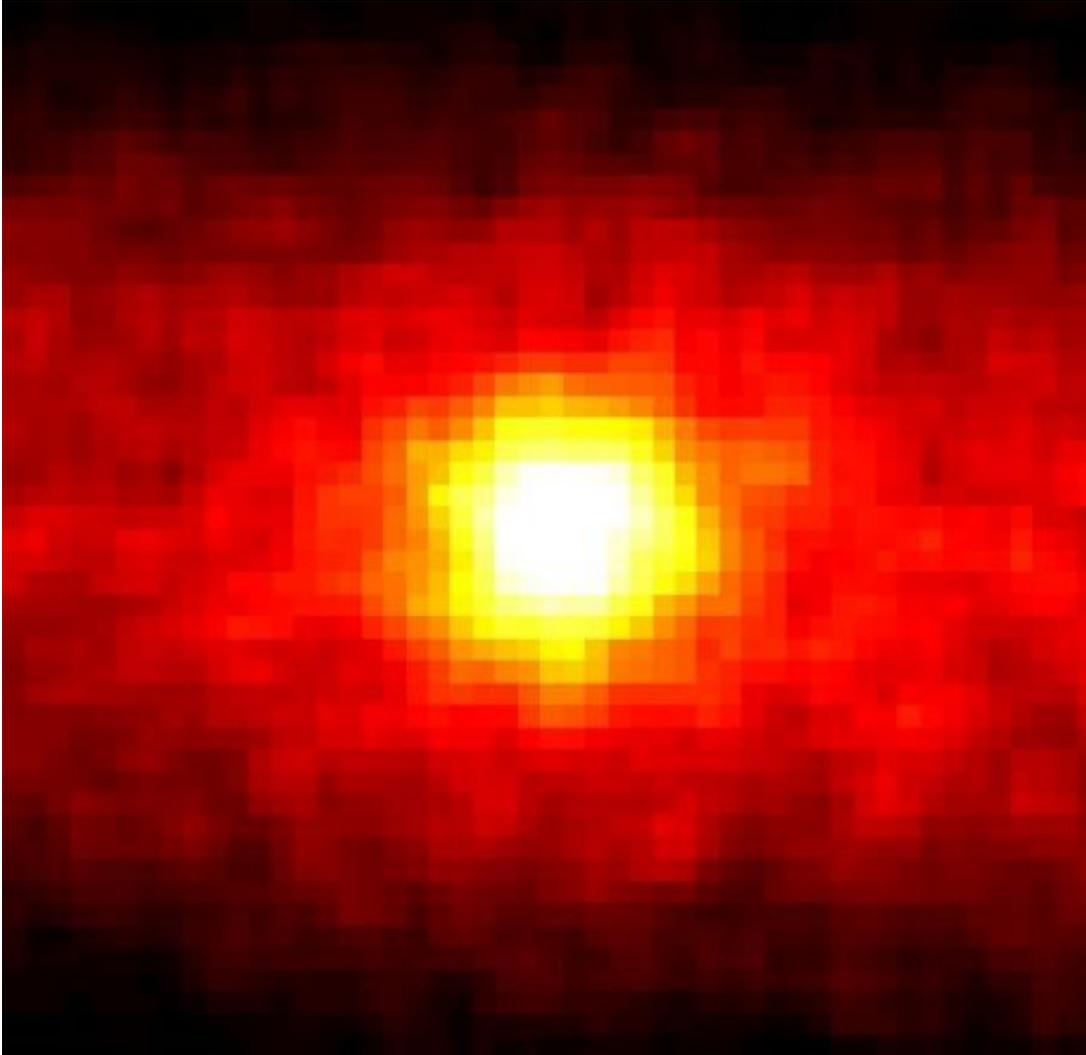
Solar Peak above 5 MeV



Bestätigung des solaren Ursprungs der nachgewiesenen Neutrinos:

Winkelkorrelation zwischen der Neutrino-Richtung und der Richtung des gestreuten Elektrons

Die Sonne im „Neutrino-Licht“ (“fotografiert” von Super-Kamiokande)



1.2 Wichtige Messgrößen

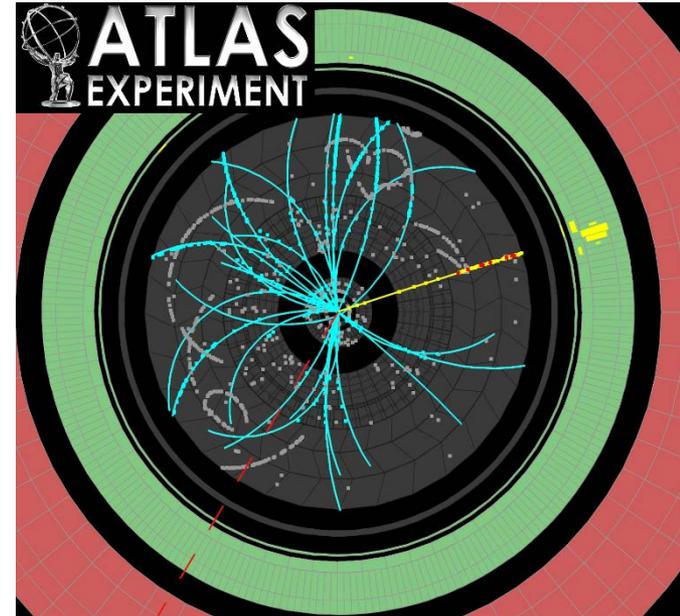
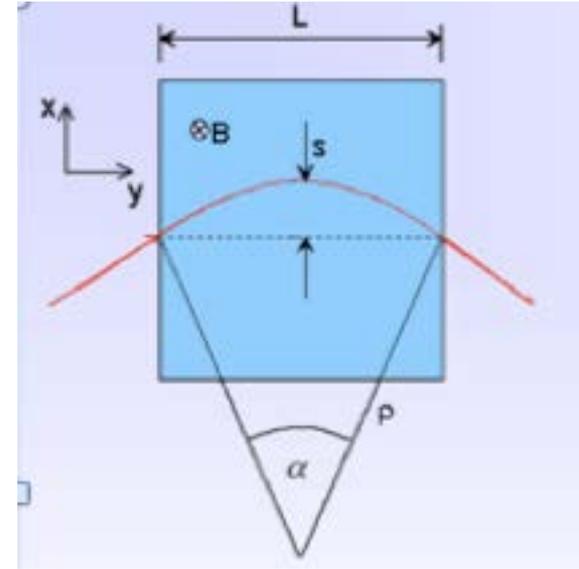
- Impuls von Teilchen:

Vermessung der Bahnkurve **elektrisch geladener** Teilchen in einem bekannten Magnetfeld

Lorentzkraft: $F = q (v \times B)$

Spezialfall: homogenes Magnetfeld \rightarrow Helix-Bahn
Ortsinformation (Bahnkurve) \rightarrow Krümmungsradius ρ

\rightarrow Impuls $p = 0.3 B \rho$
(Einheiten: p in GeV/c, B in Tesla und ρ in m)



•Energie:

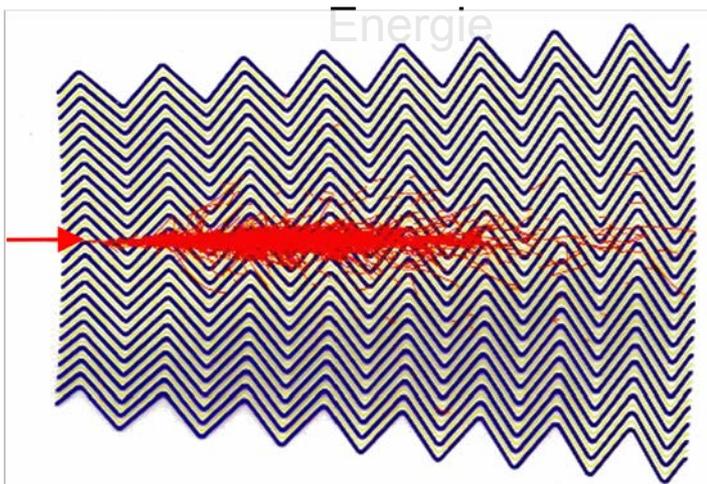
Deposition der totalen Energie in einem sensitiven (Detektormedium)

z.B. Szintillator, Halbleiter (Ge), flüssiges Argon, ...

Energie \rightarrow Wechselwirkung des Teilchens mit dem Medium (vollständige Absorption des Teilchens)
Anregungsenergie eines Mediums \rightarrow messbares Signal

Physikalischer Prozess (Ionisation u. Anregung, ..) \rightarrow z.B. Licht, Ionisationsladung

\sim Signal_{Detektor}



• Identität der Teilchen

Die Identität der Teilchen ist durch ihre Masse (und Ladung) eindeutig bestimmt

Exkurs: Bausteine der Materie

Die wichtigsten Teilchen (relevant für FP):

Leptonen: Elektron / Positron $m_e = 0,000511 \text{ MeV}/c^2$
Myon $m_\mu = 105,7 \text{ MeV}/c^2$

Aus Quarks aufgebaute **Hadronen (nicht fundamental):**

Baryonen: Proton (u,u,d) $m_p = 938,3 \text{ MeV}/c^2$
Neutron (u,d,d) $m_n = 939,6 \text{ MeV}/c^2$

(Schwere Teilchen, Bindungszustände aus drei Quarks)

Mesonen: Pionen (π -Mesonen) $m(\pi^\pm) = 139,6 \text{ MeV}/c^2$
 $m(\pi^0) = 135,0 \text{ MeV}/c^2$

(Bindungszustände aus einem Quark und einem Antiquark)

In der Elementarteilchenphysik müssen aufgrund der hohen Impulse / Energien relativistische Energie-Impulsbeziehungen benutzt werden:
($\hbar = c = 1$)

$$\Rightarrow m = \sqrt{E^2 - p^2}$$

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{p}{E} = \frac{1}{\sqrt{1 + m^2/p^2}}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{E}{m} = \sqrt{1 + p^2/m^2}$$

Identifizierung / Massenbestimmung ist möglich durch:

-Messung zweier Größen, z.B. Impuls und Geschwindigkeit β
Impuls und γ -Faktor

Benötigt werden physikalische Prozesse, die sensitiv auf β und γ sind und Detektoren, die diese Signaturen nachweisen können.

(Flugzeitmessung, Cherenkov- und Übergangsstrahlungssignatur)

-Kombination der Signaturen aus verschiedenen Detektoren

→ komplexe Detektorsysteme (z.B. Spurdetektor und Kalorimeter)

•Zeitmessung:

Für viele Physikalische Prozesse ist eine direkte Zeitmessung erforderlich

Zeitauflösungen: ns \rightarrow ps

Schnelle Signale (Szintillatoren, Halbleiterzähler) und schnelle Elektronik erforderlich !

1.3 Zur Bedeutung von Statistischen Methoden

Statistische Methoden werden eingesetzt zur Beschreibung und Auswertung von in physikalischen Experimenten gewonnenen Messdaten

(a) Beschreibung von Daten (Deskriptive Statistik)

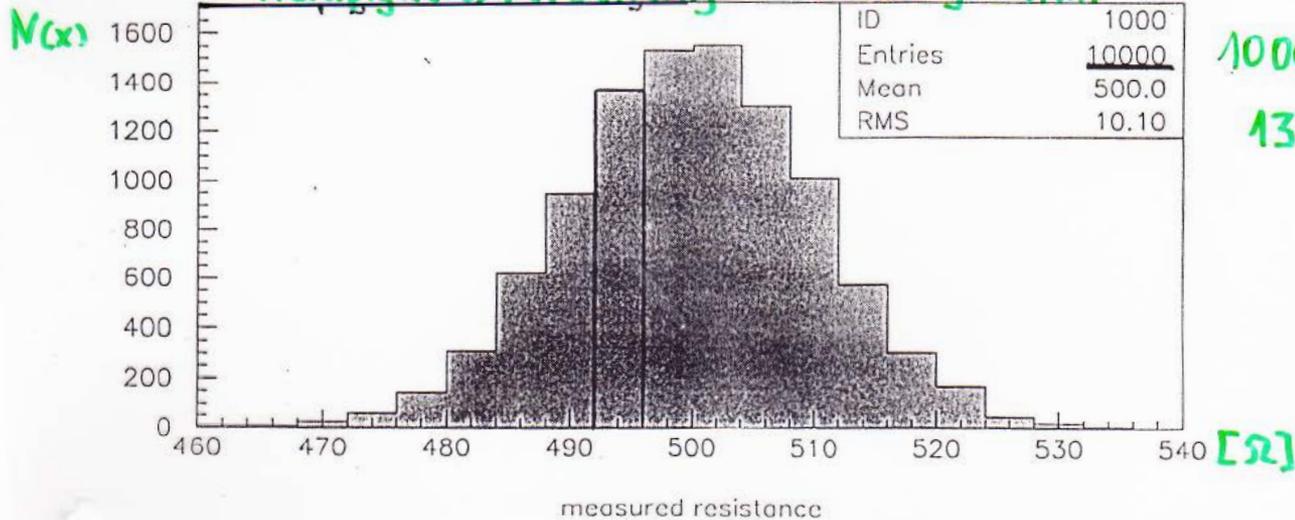
- Beschreibung, ohne Rücksicht auf die Erklärung möglicher Ursachen
- Daten werden durch wenige, aussagekräftige Parameter charakterisiert

Beispiel: Wiederholte Messung einer Größe, z.B. elektrischer Widerstand

Block of data: *Meßwerte (el. Widerstände)*

505.43	487.30	491.94	499.78	521.37	494.36	512.02	512.26	517.57	494
503.44	505.54	492.76	505.66	495.54	506.99	499.85	480.63	495.16	498
493.68	506.28	499.33	517.24	500.61	495.30	491.51	499.76	511.15	505
479.62	492.39	489.60	490.10	511.28	499.35	515.29	488.60	491.66	511
488.42	494.07	498.12	496.88	486.72	494.87	499.28	514.86	481.87	508
510.62	505.71	483.03	502.24	494.78	512.13	506.34	498.06	498.24	485
494.87	502.96	496.43	503.18	517.63	497.85	501.23	486.20	502.59	507
495.36	495.22	498.31	486.73	489.93	506.61	504.34	508.97	502.17	492
493.09	507.16	515.78	506.86	518.10	499.88	502.25	510.12	506.10	492
496.29	506.24	529.11	503.30	489.62	490.96	496.68	496.92	495.89	488
508.22	507.67	504.99	493.12	501.83	491.35	500.76	493.36	487.70	486
498.11	512.23	498.09	503.71	488.06	508.81	499.09	484.99	517.49	479
507.67	493.75	504.78	494.82	506.33	514.90	489.18	497.20	491.68	508
507.61	489.08	507.87	501.44	501.73	492.90	503.01	495.91	497.07	490
512.17	491.95	497.17	493.57	489.25	505.13	494.61	493.42	486.40	493
518.59	493.24	494.19	494.49	512.69	517.68	513.76	505.54	484.86	494
495.07	506.42	486.97	480.57	509.46	507.11	491.63	500.41	490.90	471
510.18	503.65	504.11	490.66	492.81	475.86	512.20	508.57	500.59	518
501.99	491.46	503.44	502.64	494.99	488.04	517.64	489.11	498.09	506
496.54	495.76	497.30	485.76	497.29	487.12	491.24	508.52	497.27	509
496.72	487.03	489.50	505.15	489.76	491.52	498.74	491.10	489.33	498

Häufigkeitsverteilung (Histogramm)

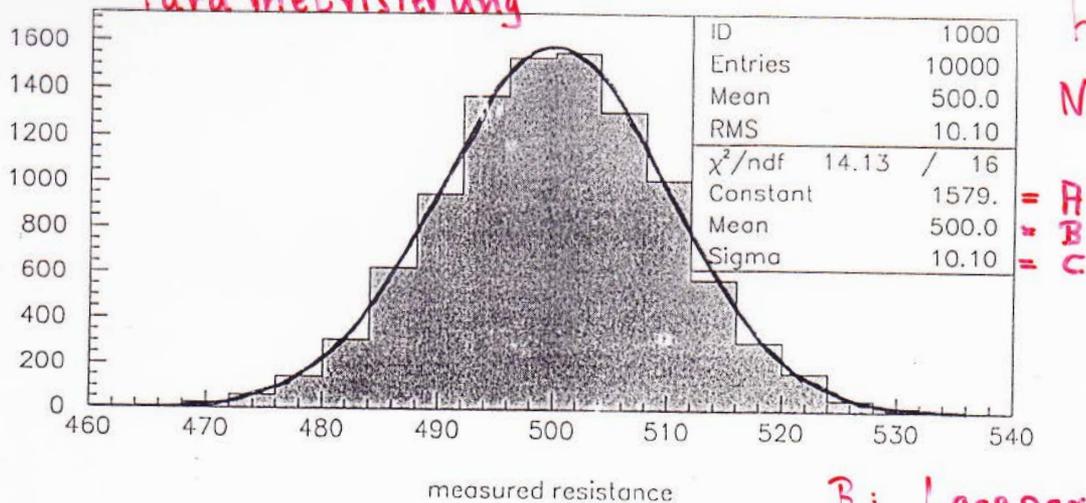


10000 Messungen

1380 Werte im Intervall

$492 < x < 496$

Parametrisierung



hier: $\frac{1}{\sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-B}{\sigma} \right)^2}$

$N(x) = A \cdot e$

B: Lageparameter

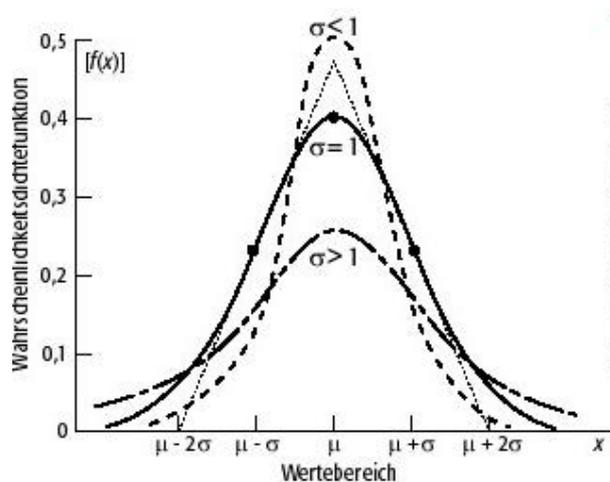
C: Dispersionsparameter

A: Normierungsparameter

(b) Physikalische Messung

Jede physikalische Messung ist mit einer Ungenauigkeit (Fehler) behaftet; Dieser resultiert z.B. aus der experimentellen Auflösung der Messapparatur

- Das Messergebnis ist eine *Zufallsgröße*
- Einzelergebnisse sind entsprechend einer *Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion* (i. Allg. einer Gaußschen Verteilungsfunktion) verteilt;



$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

- Der Mittelwert der Verteilung ist ein Schätzwert für den wahren Wert
- Die Breite der Kurve ist ein Maß für die experimentelle Auflösung

(b) Physikalische Messung (cont.)

- **N Messungen**

Diese entsprechen einer Stichprobe entsprechend der zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung

- Die **Stichprobe** muss benutzt werden, um eine Schätzung (Messung) des wahren Wertes zu erhalten.

→ Messwert + Fehler

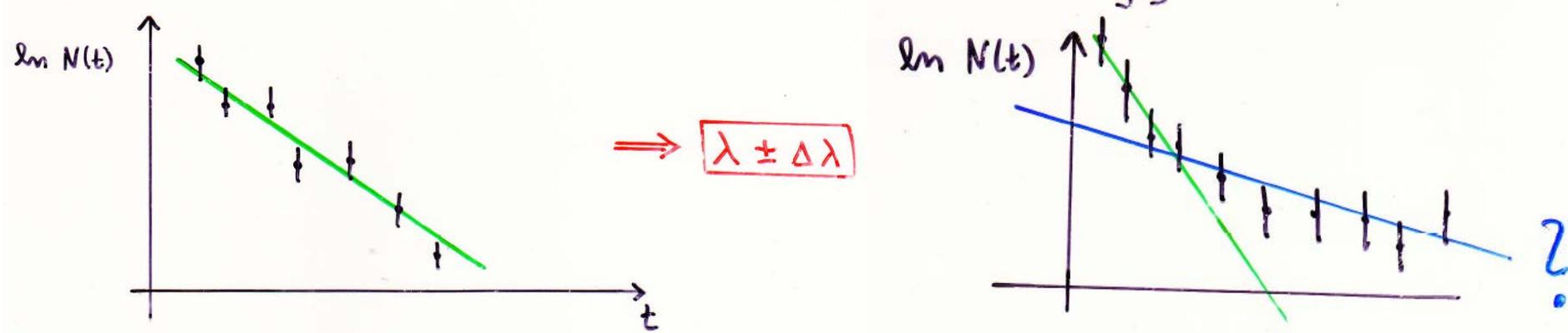
→ Es können **Konfidenzintervalle** angegeben werden, die den *wahren Wert* mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit enthalten

(c) Parameterbestimmung

- Experimentelle Messung → Bestimmung physikalisch relevanter Parameter (erfordern ein theoretisches Modell)

z.B. Messung der Lebensdauer radioaktiver Isotope

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$



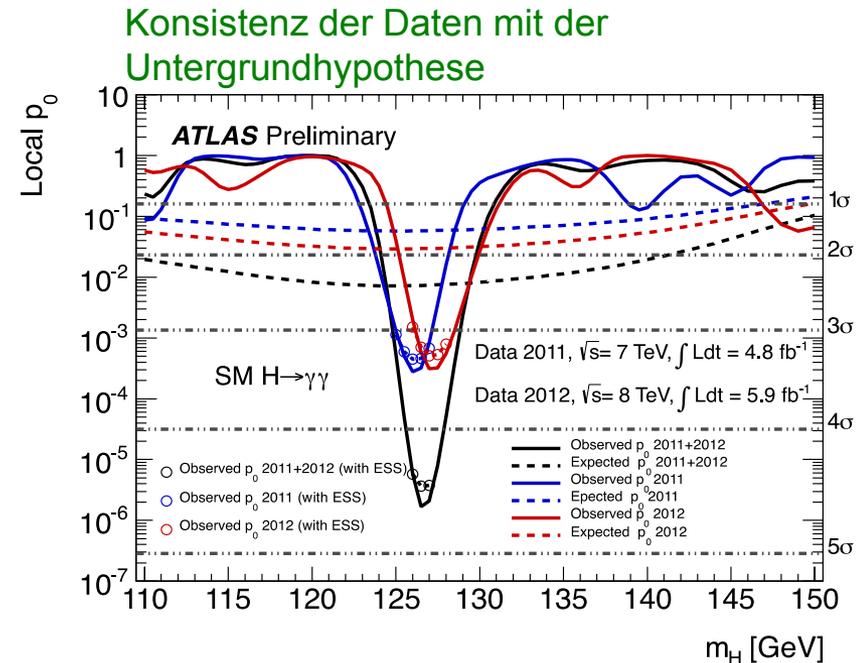
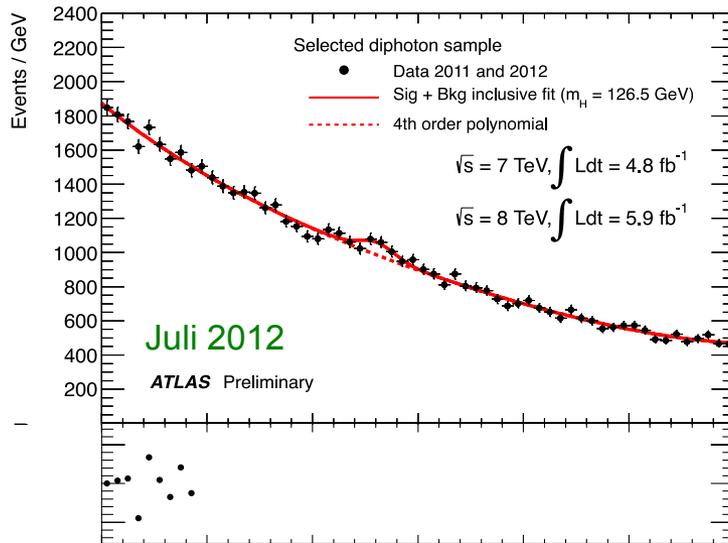
wichtig: Die Parameter können nur dann bestimmt werden, wenn das Modell die Daten beschreibt;

→ zusammen mit dem bestimmten Parameterwert muss ein Maß für die **Güte der Anpassung** angegeben werden

(d) Hypothesentests

Suche nach Abweichungen von einem vorgegebenen Modell, bzw. Test wie gut dieses Modell (Hypothese) die Daten beschreibt;

Beispiel: Suche nach einem neuen Teilchen (Elementarteilchenphysik)



Statistische Fluktuation des Untergrunds?
oder: Evidenz für ein neues Teilchen ?

(e) Monte Carlo Simulationen

Komplexe Vorgänge mit Zufallseinflüssen müssen simuliert werden
→ Monte Carlo Methoden

Beispiel: Wechselwirkungen von einem Teilchen in einem Detektor
zahlreiche Wechselwirkungsprozesse für el. geladene Teilchen möglich:

- Ionisation und Anregung (Energieverlust, statistischer Prozess)

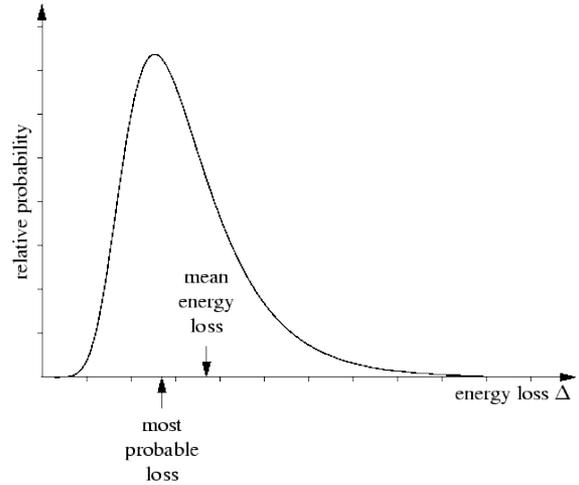
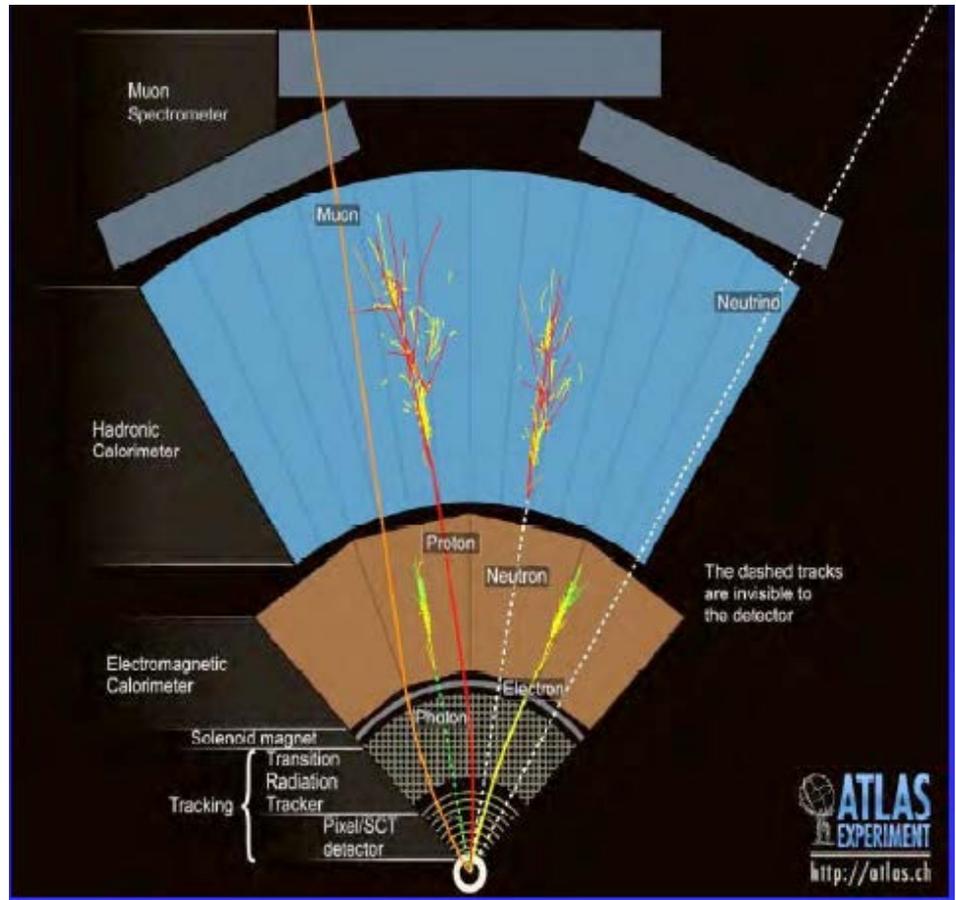


Abb. 3.4: Fluktuationen im Energieverlust: Landau-Verteilung

- Coulomb-Vielfachstreuung
- Bremsstrahlung
- Emission von Cherenkov-Strahlung



Zu Kap. 1.4: α und β -Quellen

Table 1.2. Characteristics of some **alpha emitters**

Isotope	Half-life	Energies [MeV]	Branching
^{241}Am	433 yrs.	5.486	85%
		5.443	12.8%
^{210}Po	138 days	5.305	100%
^{242}Cm	163 days	6.113	74%
		6.070	26%

Tabelle 1.1. Reine β -Quellen

Isotop	Endpunktsenergie (keV)	Halbwertszeit $t_{1/2}$
^3H	18.6	12.26 a
^{14}C	156.0	5730.0 a
^{33}P	248.0	24.4 d
^{90}Sr	546.0	27.7 a
^{90}Y	2270.0	64.0 h
^{99}Tc	292.0	2.1×10^5 a

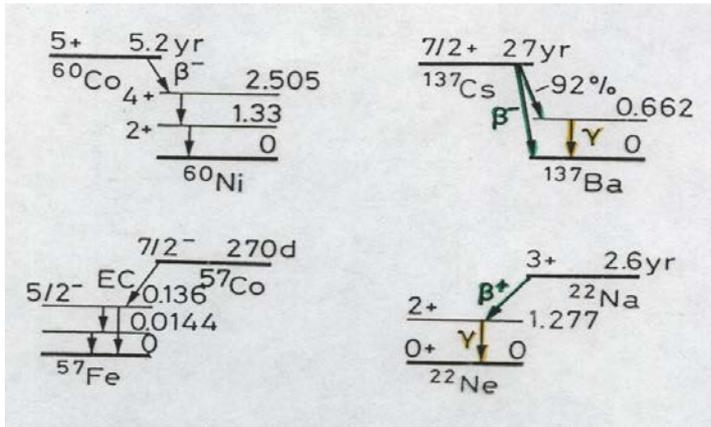


Tabelle 1.2. γ -Quellen

Mutterkern des β -Zerfalls	$t_{1/2}$	Tochterkern	E_γ (keV)
^{22}Na	2.60 a	^{22}Ne	1274.0
^{57}Co	272.00 d	^{57}Fe	14.4
		^{57}Fe	122.1
^{60}Co	5.27 a	^{60}Ni	1173.2
^{137}Cs	30.00 a	^{137}Ba	661.6
		^{137}Ba	1120.4
^{55}Fe	2.70 a	^{55}Mn	5.89X
^{207}Bi	32.20 a	^{207}Pb	6.49X
		^{207}Pb	570.0

Zu Kap. 1.4: Gebräuchliche Präparate für Detektortests

Gas-
detektoren

hohe
 β -Energie
→ große
Reichweite
(4mm Al)

Radio- nuklid	Zerfallsart/ Häufigkeit	$T_{1/2}$	Strahlenenergie	
			β, α	γ
$^{22}_{11}\text{Na}$	β^+ (89 %) K (11 %)	2.6 a	β_1^+ 1.83 MeV (0.05 %) β_2^+ 0.54 MeV (90 %)	1.28 MeV
$^{55}_{26}\text{Fe}$	K	2.7 a		Mn Röntgen- strahlung 5.89 keV (24 %) 6.49 keV (2.9 %)
$^{57}_{27}\text{Co}$	K	267 d		14 keV (10 %) 122 keV (86 %) 136 keV (11 %)
$^{60}_{27}\text{Co}$	β^-	5.27 a	β^- 0.316 MeV (100 %)	1.173 MeV (100 %) 1.333 MeV (100 %)
$^{90}_{38}\text{Sr}$ → $^{90}_{39}\text{Y}$	β^- β^-	28.5 a 64.8 h	β^- 0.546 MeV (100 %) β^- 2.283 MeV (100 %)	
$^{106}_{44}\text{Ru}$ → $^{106}_{45}\text{Rh}$	β^- β^-	1.0 a 30 s	β^- 0.039 MeV (100 %) β_1^- 3.54 MeV (79 %) β_2^- 2.41 MeV (10 %) β_3^- 3.05 MeV (8 %)	0.512 MeV (21 %) 0.62 MeV (11 %)
$^{109}_{48}\text{Cd}$	K	1.27 a	monoenergetische Konversionselektronen 63 keV (41 %) 84 keV (45 %)	88 keV (3.6 %) Ag Röntgen- strahlung
$^{137}_{55}\text{Cs}$	β^-	30 a	β_1^- 0.514 MeV (94 %) β_2^- 1.176 MeV (6 %)	0.662 MeV (85 %)
$^{207}_{83}\text{Bi}$	K	32.2 a	monoenergetische Konversionselektronen 0.482 MeV (2 %) 0.554 MeV (1 %) 0.976 MeV (7 %) 1.048 MeV (2 %)	0.570 MeV (98 %) 1.063 MeV (75 %) 1.770 MeV (7 %)
$^{241}_{95}\text{Am}$	α	433 a	α 5.443 MeV (13 %) α 5.486 MeV (85 %)	60 keV (36 %) Np Röntgen- strahlung

Zu Kap. 1.5:

Tabelle 40.3 Strahlungseinheiten

Größe	Alte bzw. gebräuchliche Einheit		SI-Einheit		Umrechnung
	Name	Symbol	Name	Symbol	
Energie	Elektronenvolt	eV	Joule	J	$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Ionendosis	Röntgen	R	Coulomb pro Kilogramm	C/kg	$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$
Energiedosis	rad	rad	Gray	Gy = J/kg	$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J/kg} = 10^{-2} \text{ Gy}$
Äquivalentdosis	rem	rem	Sievert	Sv	$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$
Aktivität	Curie	Ci	Becquerel	Bq = 1/s	$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Zerfälle/s}$ $= 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

Art der Strahlung	q
Photonen < 4 MeV	1
Photonen > 4 MeV	1
Elektronen < 30 keV	1
Elektronen > 30 keV	1
langsame Neutronen	5
schnelle Neutronen	15
Protonen	10
α -Teilchen	20
schwere Ionen	20

Tabelle 40.2 Qualitätsfaktor q (RBW-Faktor) zur Berücksichtigung der unterschiedlichen biologischen Wirksamkeit verschiedener Strahlungsarten. (Die Werte für Protonen und schwere Ionen hängen von der Teilchenenergie ab; die angegebenen Werte sollen nur die Größenordnung zeigen.)