

Moderne Experimentalphysik III: Kerne und Teilchen (Physik VI)

Günter Quast, Roger Wolf, Pablo Goldenzweig
27. Juli 2017

INSTITUTE OF EXPERIMENTAL PARTICLE PHYSICS (IEKP) – PHYSICS FACULTY



Kapitel 10.3: Astroteilchenphysik



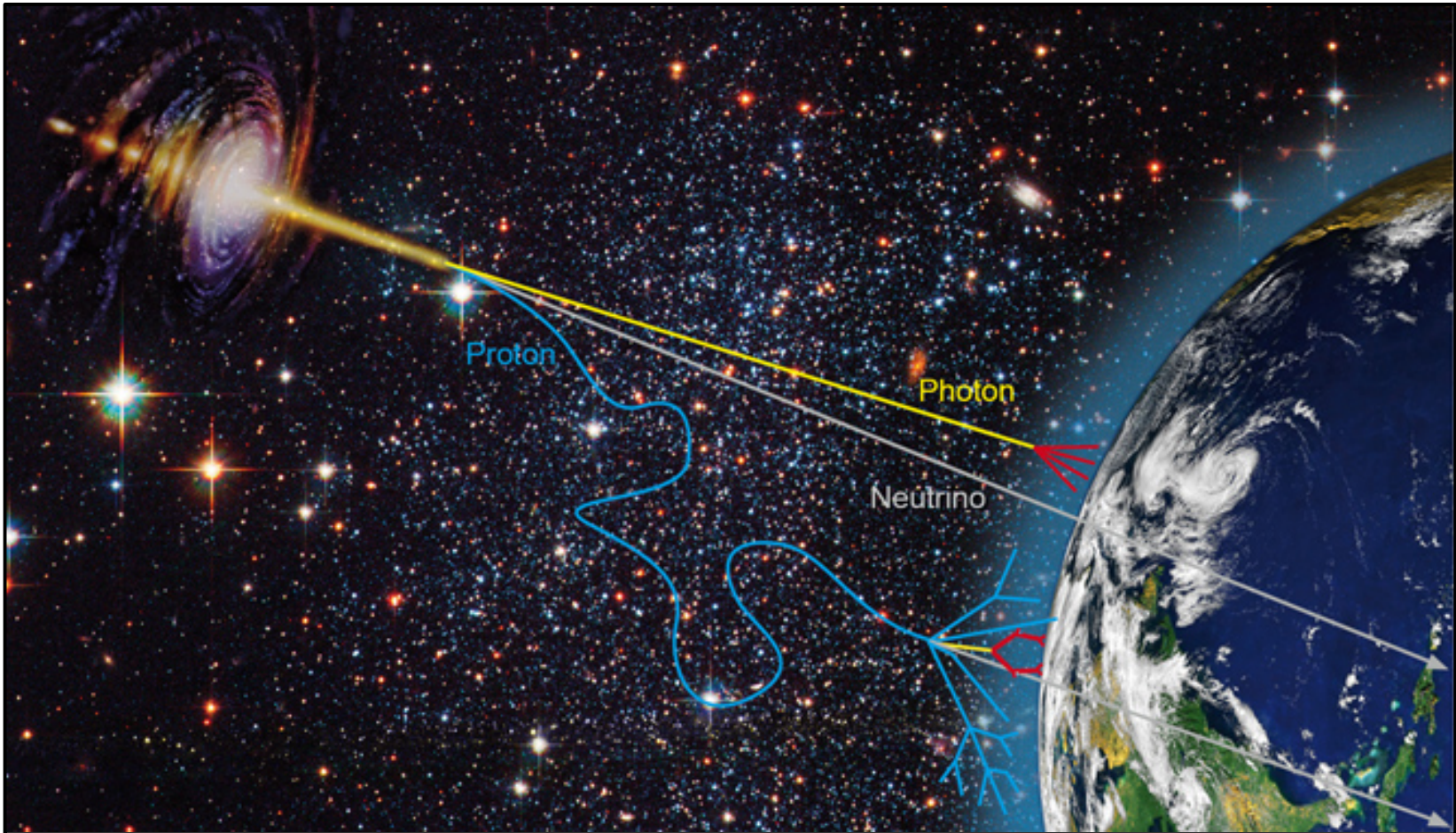
Entdeckung kosmischer Strahlung

- Messung radioaktiver Strahlung als Funktion der Entfernung vom Erdboden ([Victor Hess](#), 1912)
- Radioaktive Strahlung nimmt mit zunehmendem Abstand vom Erdboden zu und nicht ab, wie erwartet
- Entdeckung zahlreicher neuer Teilchen in kosmischer Strahlung

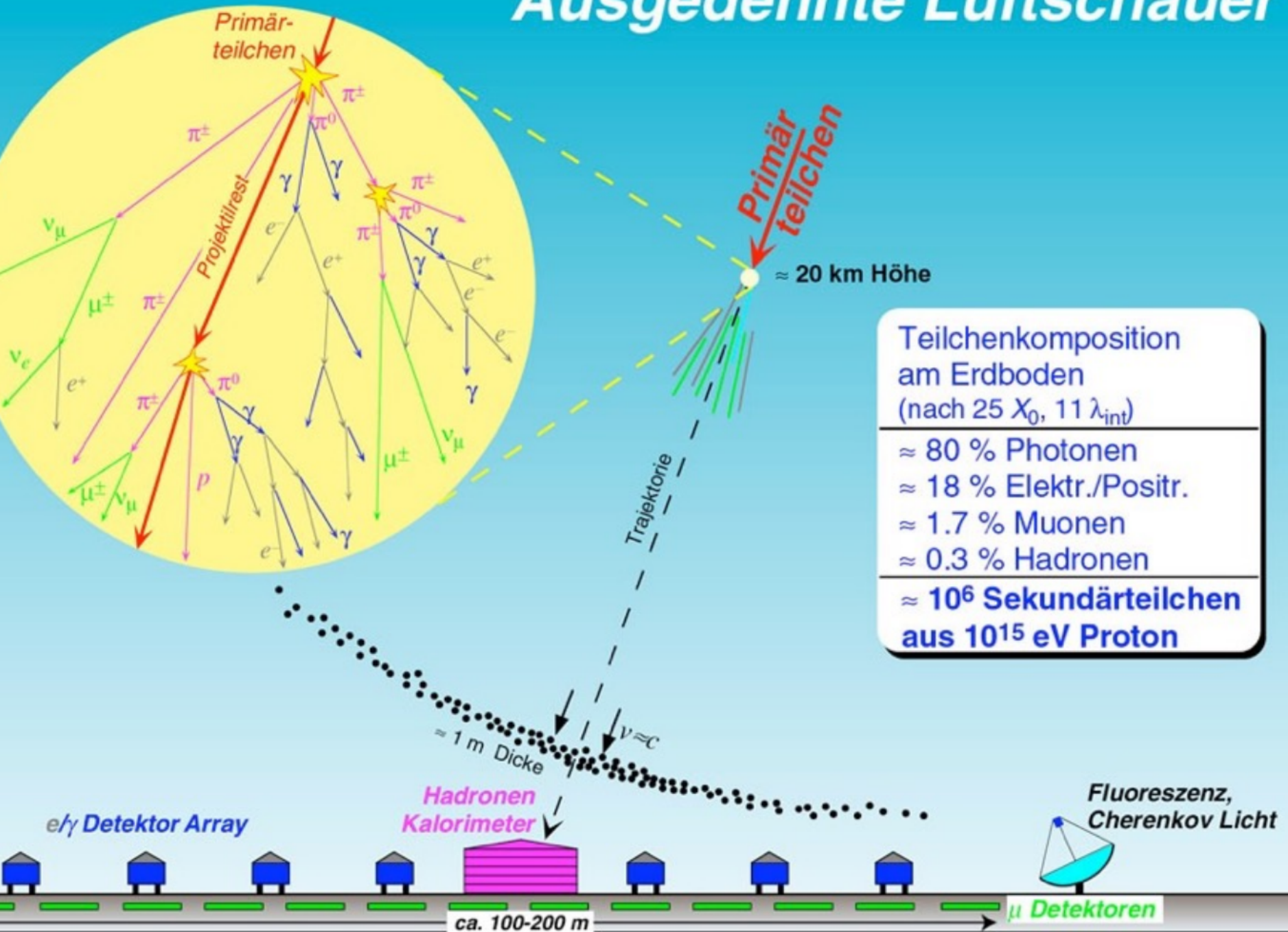


Kosmische Primärstrahlung

- Klassisch: Hochenergetische **Protonen** ($\langle E_p \rangle \approx 10^{10}$ eV) ——
- Heutzutage ebenfalls: **Photonen** —— , **Neutrinos** ——

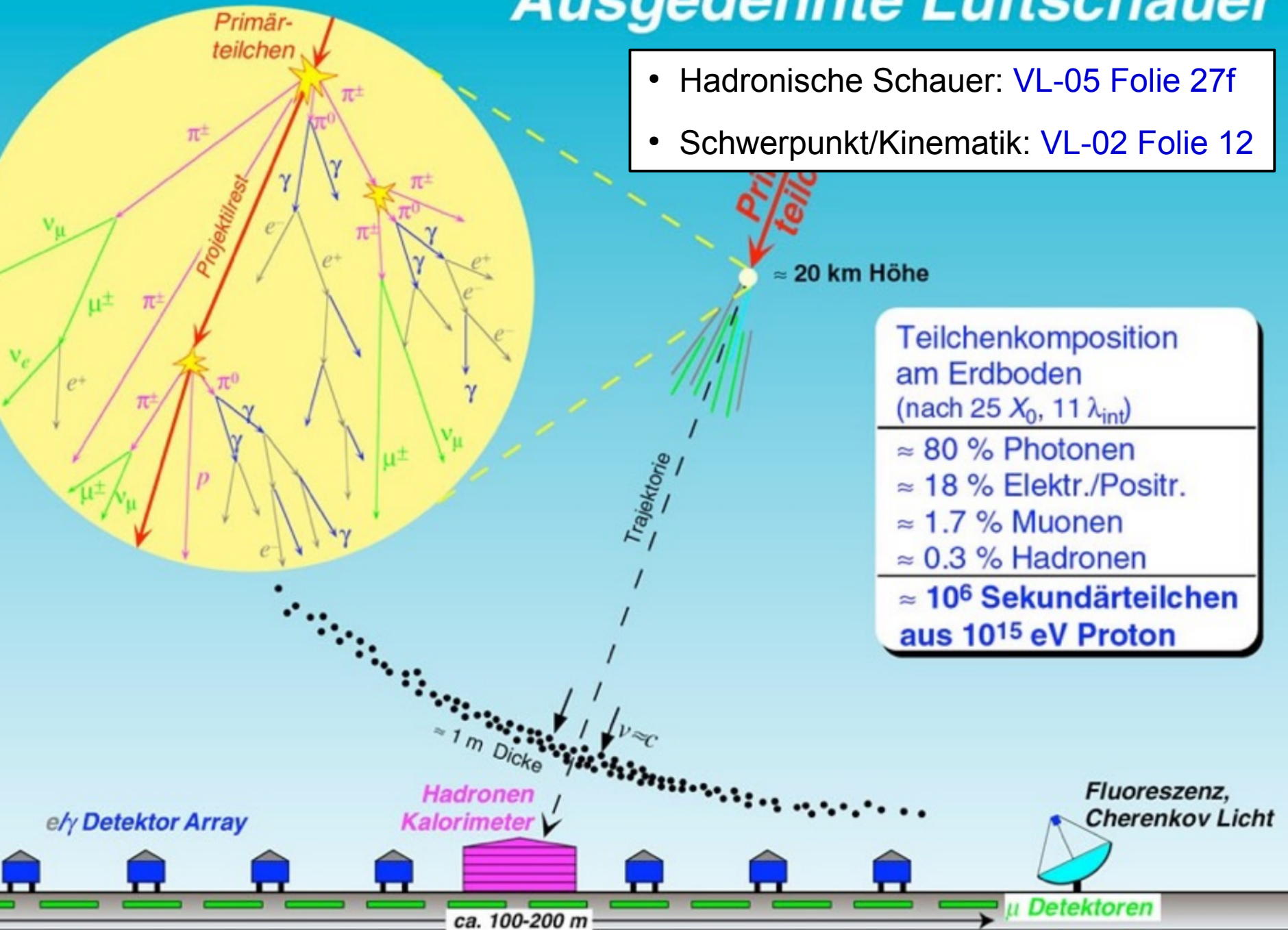


Ausgedehnte Luftschauer



Ausgedehnte Luftschauer

- Hadronische Schauer: VL-05 Folie 27f
- Schwerpunkt/Kinematik: VL-02 Folie 12



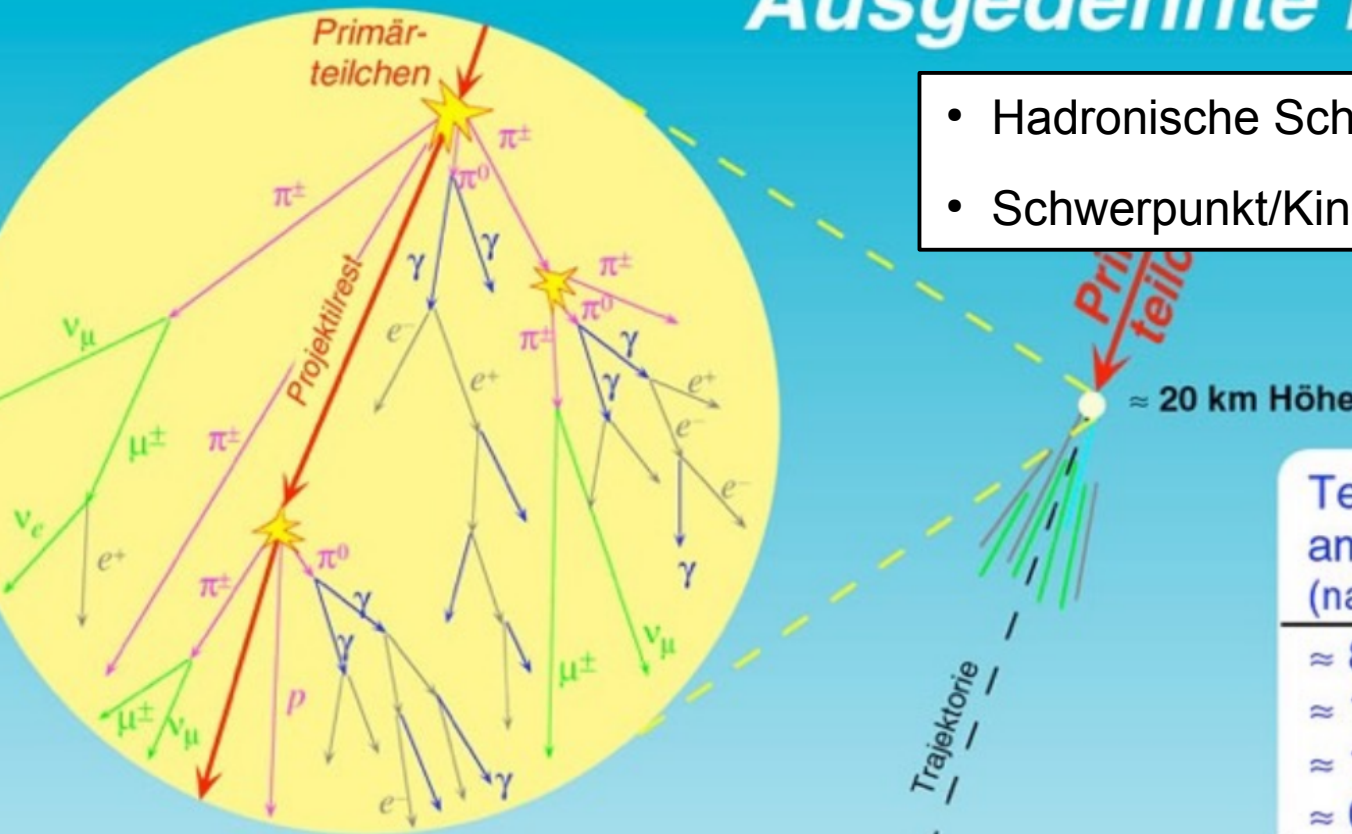
Teilchenkomposition
am Erdboden
(nach $25 X_0, 11 \lambda_{int}$)

$\approx 80\%$ Photonen
 $\approx 18\%$ Elektr./Positr.
 $\approx 1.7\%$ Muonen
 $\approx 0.3\%$ Hadronen

$\approx 10^6$ Sekundärteilchen
aus 10^{15} eV Proton

Ausgedehnte Luftschauer

- Hadronische Schauer: VL-05 Folie 27f
- Schwerpunkt/Kinematik: VL-02 Folie 12



Teilchenkomposition
am Erdboden
(nach $25 X_0$, $11 \lambda_{int}$)

≈ 80 % Photonen

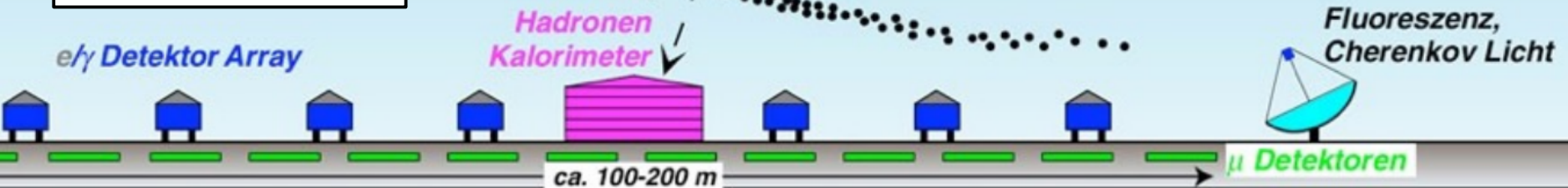
≈ 18 % Elektr./Positr.

≈ 1.7 % Muonen

≈ 0.3 % Hadronen

≈ **10^6 Sekundärteilchen**
aus **10^{15} eV Proton**

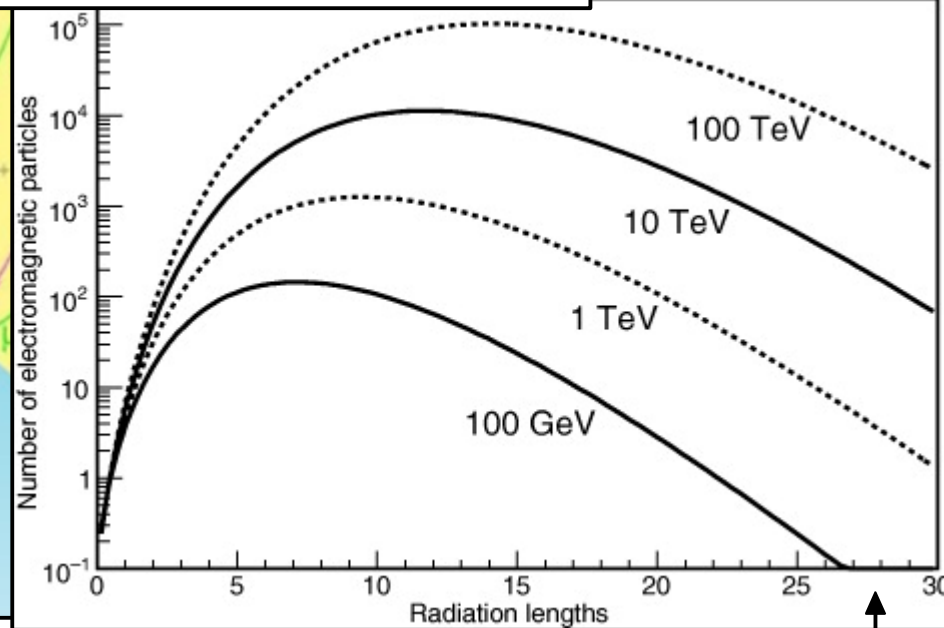
- Schauerdicke:
VL-04 Folie 11



Ausgedehnte Luftschauer

- Übergang hadr. \rightarrow em/ μ
Energie $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu, \pi \rightarrow \gamma\gamma$
(em Teil dominiert)
- Longitudinale Schauerentwicklung:

- Hadronische Schauer: VL-05 Folie 27f
- Schwerpunkt/Kinematik: VL-02 Folie 12

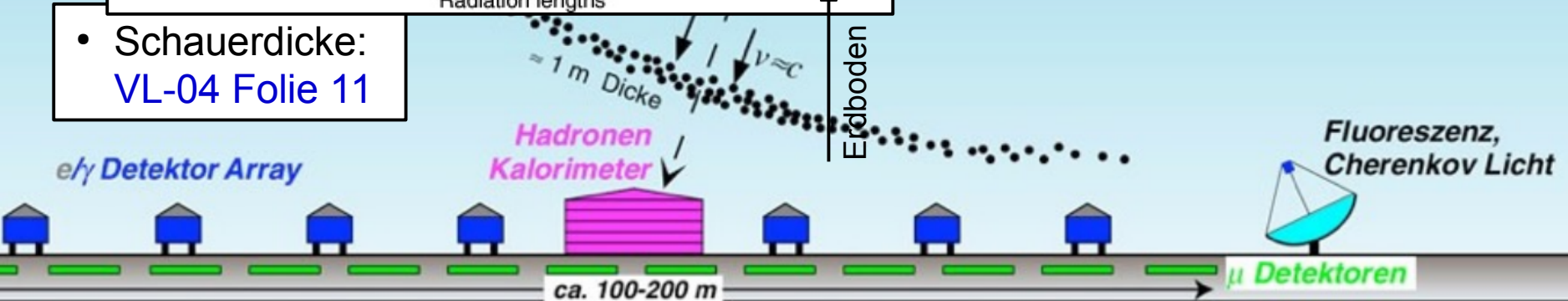


- Schauerdicke:
VL-04 Folie 11

Teilchenkomposition
am Erdboden
(nach $25 X_0, 11 \lambda_{int}$)

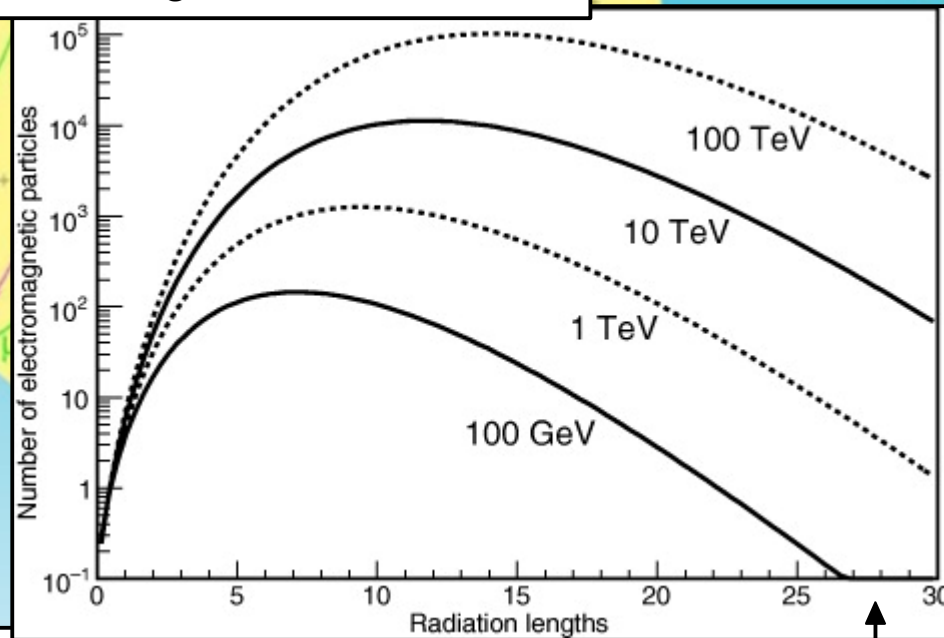
$\approx 80\%$ Photonen
 $\approx 18\%$ Elektr./Positr.
 $\approx 1.7\%$ Muonen
 $\approx 0.3\%$ Hadronen

$\approx 10^6$ Sekundärteilchen
aus 10^{15} eV Proton



Ausgedehnte Luftschauer

- Übergang hadr. \rightarrow em/ μ
Energie $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu, \pi \rightarrow \gamma\gamma$
(em Teil dominiert)
- Longitudinale Schauerentwicklung:

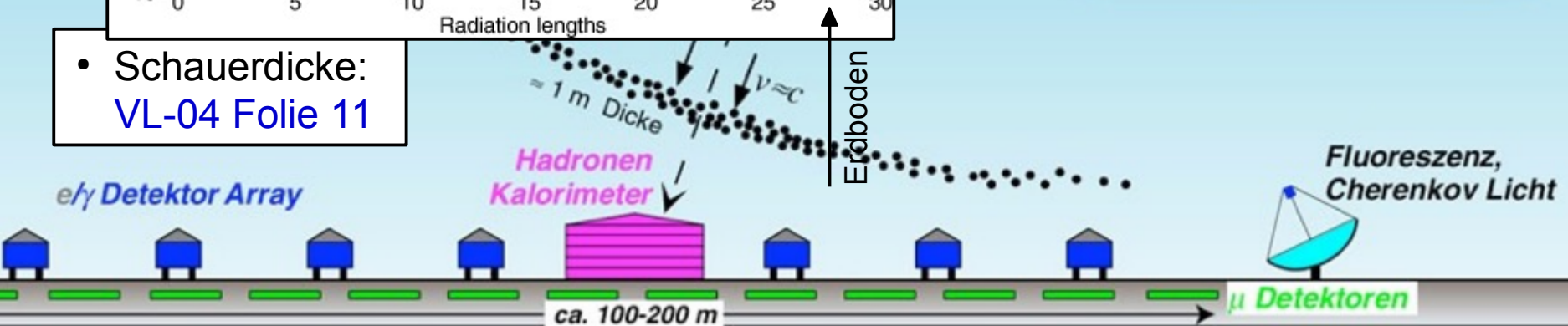


- Hadronische Schauer: VL-05 Folie 27f
- Schwerpunkt/Kinematik: VL-02 Folie 12

- Absorption elektromagnetischer Teilchen in Atmosphäre:
VL-04 Folie 16, VL-05 Folie 21ff
- Dicke der Atmosphäre $28 X_0$:
 $X_0 \approx 37 \text{ g/cm}^2$
- Energie Primärteilchen:
 $E_p \approx 10 \cdot N [\text{GeV}]$

$\approx 10^6$ Sekundärteilchen
aus 10^{15} eV Proton

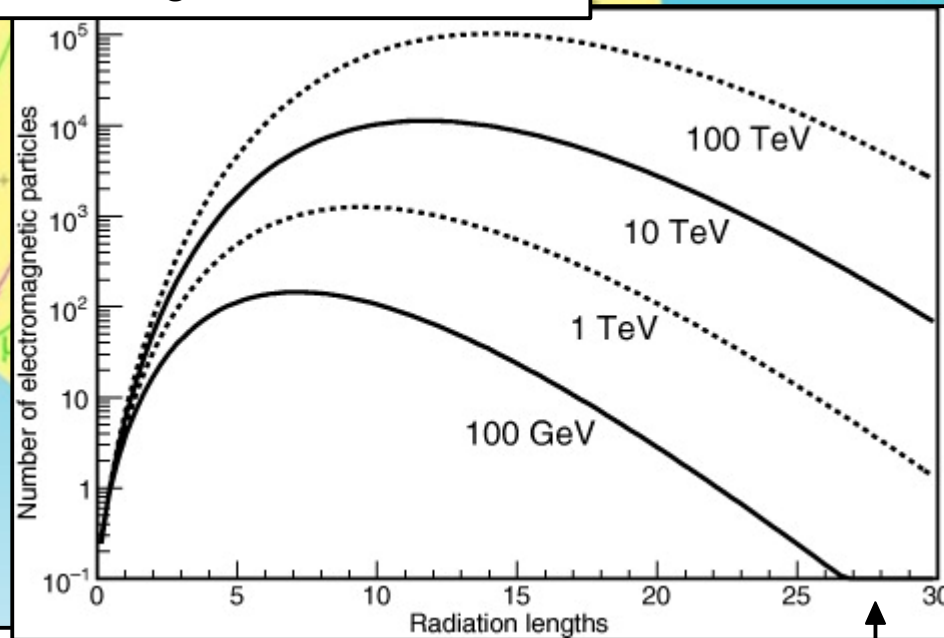
- Schauerdicke:
VL-04 Folie 11



Ausgedehnte Luftschauer

- Übergang hadr. \rightarrow em/ μ
Energie $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu, \pi \rightarrow \gamma\gamma$
(em Teil dominiert)
- Longitudinale Schauerentwicklung:

- Hadronische Schauer: VL-05 Folie 27f
- Schwerpunkt/Kinematik: VL-02 Folie 12

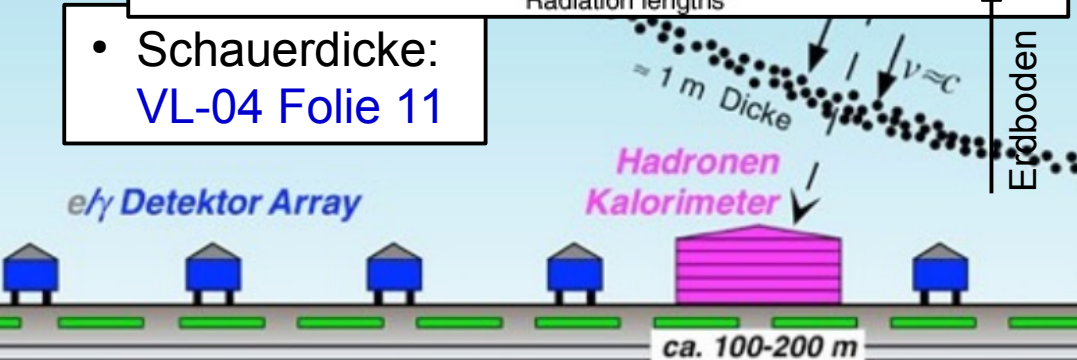


- Schauerdicke:
VL-04 Folie 11

- Absorption elektromagnetischer Teilchen in Atmosphäre:
VL-04 Folie 16, VL-05 Folie 21ff
- Dicke der Atmosphäre $28 X_0$:
 $X_0 \approx 37 \text{ g/cm}^2$
- Energie Primärteilchen:
 $E_p \approx 10 \cdot N \text{ [GeV]}$

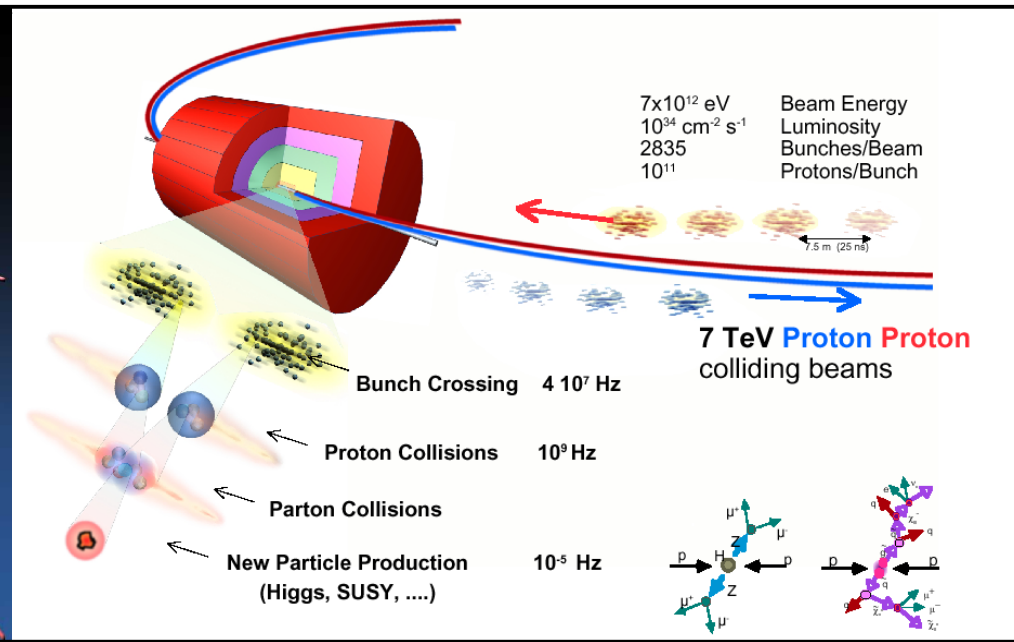
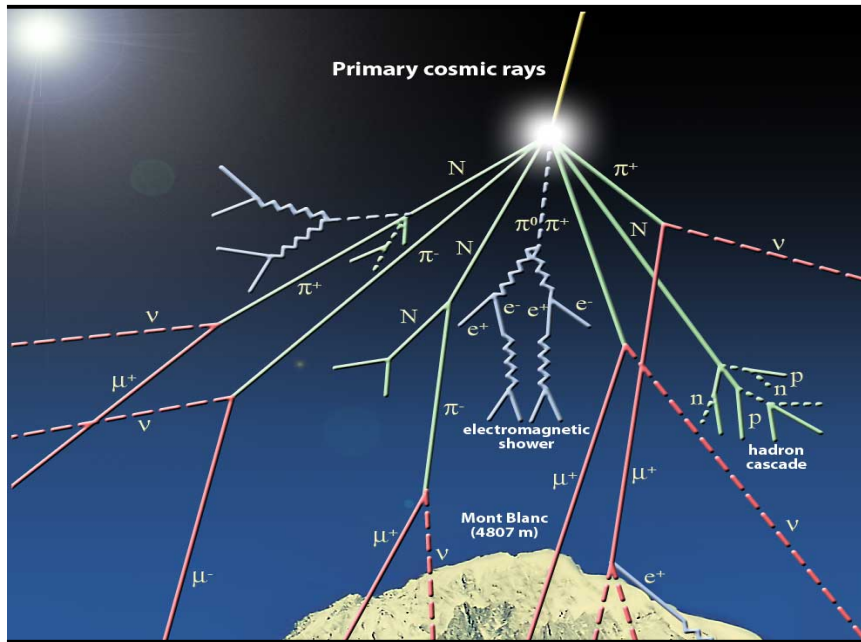
$\approx 10^6$ Sekundärteilchen

- Myonen aus unkorrelierter Höhenstrahlung \rightarrow Überreste absorbiertes Schauer
- Fluß: $\phi(\mu) \approx 100 - 160 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Mittlere Energie: $\approx 1 \text{ GeV}$



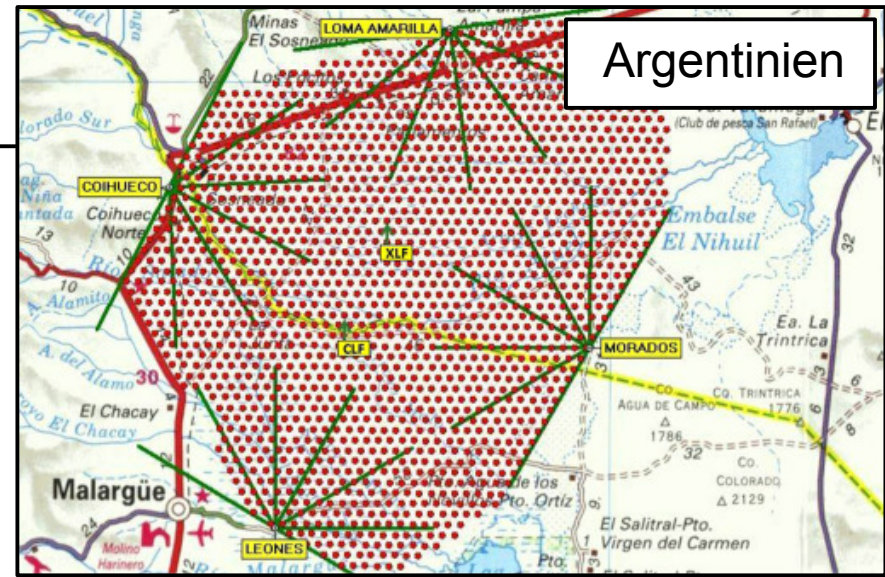
Astroteilchen vs. Teilchenphysik (an Beschleunigern)

- Höchste Strahlenergien (bis zu 10^{21} eV \rightarrow fixed target)
- Kompliziertes Nachweismedium (\rightarrow Atmosphäre)
- Großflächige Detektoren erforderlich
- Maximale Kontrolle über Anfangszustand unter Laborbedingungen
- Kompakte, "maßgefertigte", teure Detektordesigns

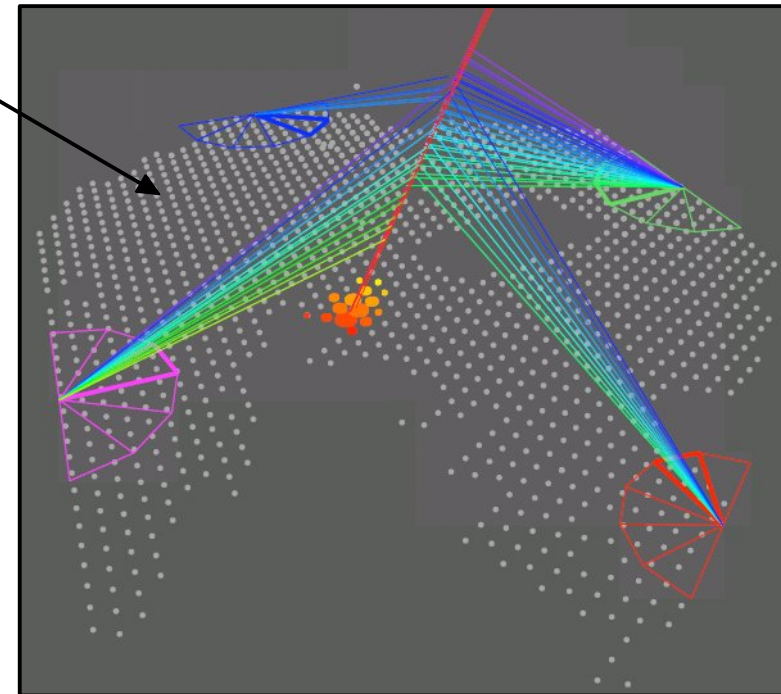
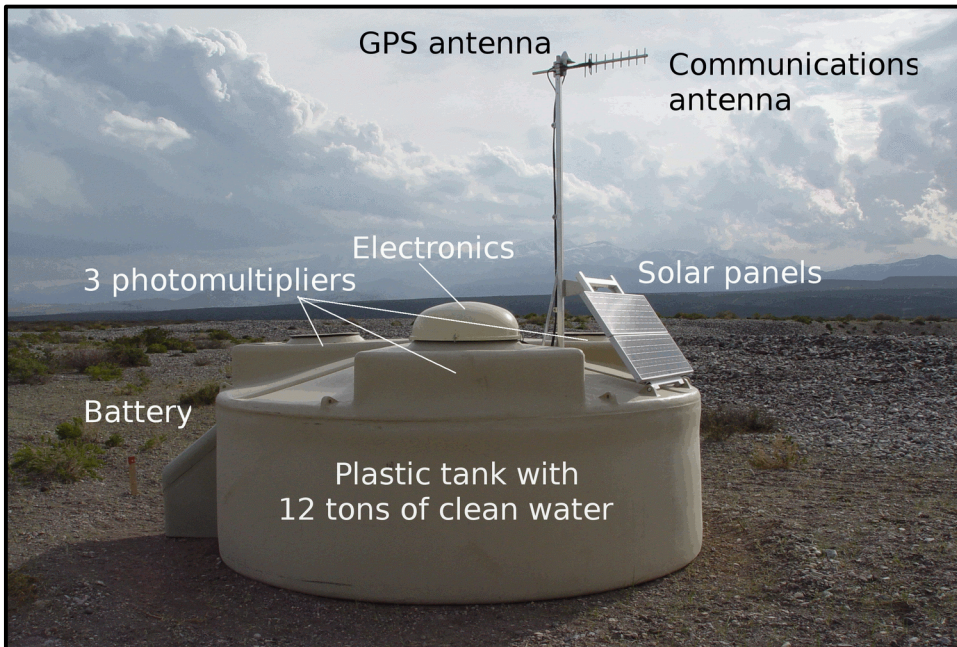


Pierre-Auger-Observatorium

- Ziel: Nachweis kosmischer Schauer mit $E_p > 10^{20}$ eV
- 1600 Wasser Cherenkov Detektoren (→ 1.5 km Abstand, 3000 km²)

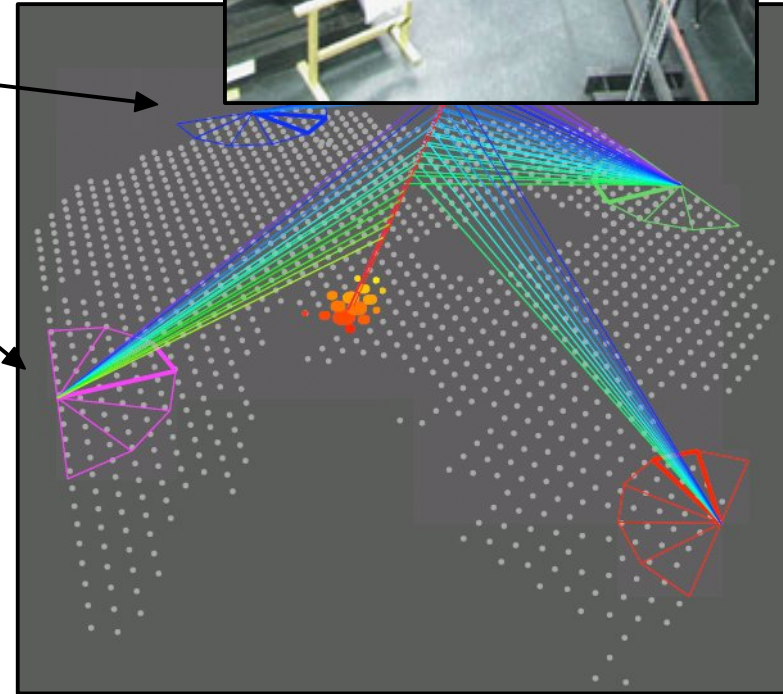
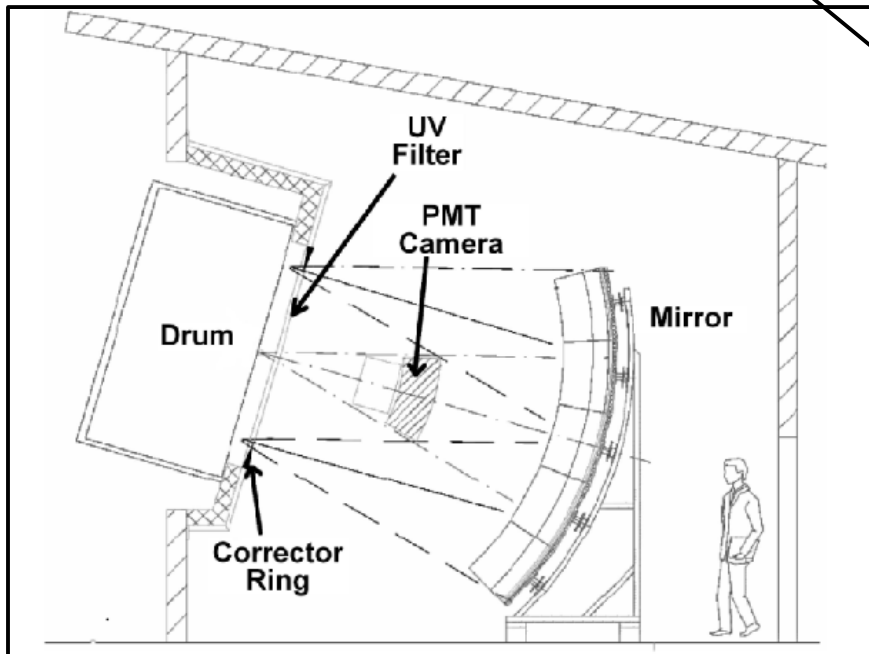
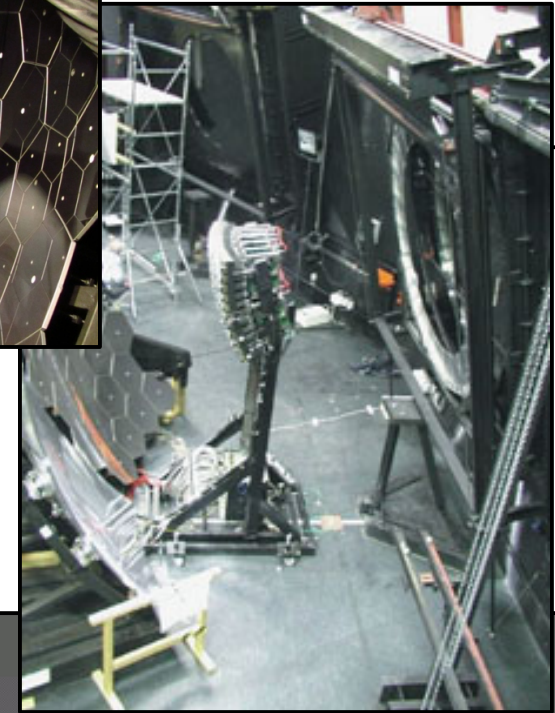
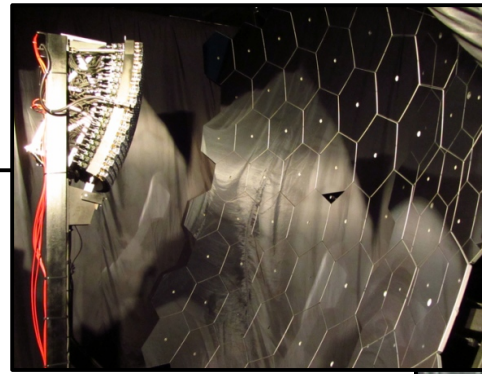


Argentinien



Pierre-Auger-Observatorium

- Ziel: Nachweis kosmischer Schauer mit $E_p > 10^{20}$ eV
- 1600 Wasser Cherenkov Detektoren (→ 1.5 km Abstand, 3000 km²)
- 4 Stationen mit Detektoren für Fluoreszenzlichtmessung aus Luftschauder



H.E.S.S.

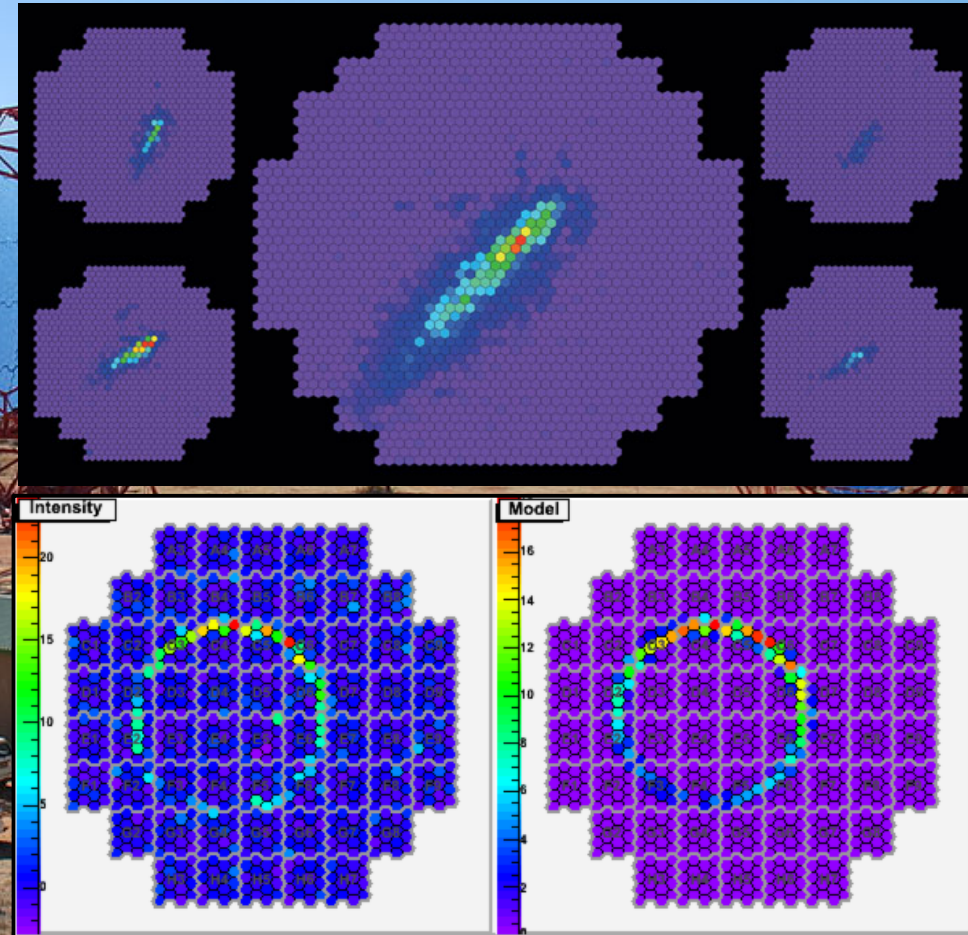
- Nachweis **kosmischer Gammastrahlen** zwischen 30 GeV und 10 TeV (Namibia)
- Abbildende Cherenkov-Teleskope (vgl [VL-05 Folie 5](#))



H.E.S.S.

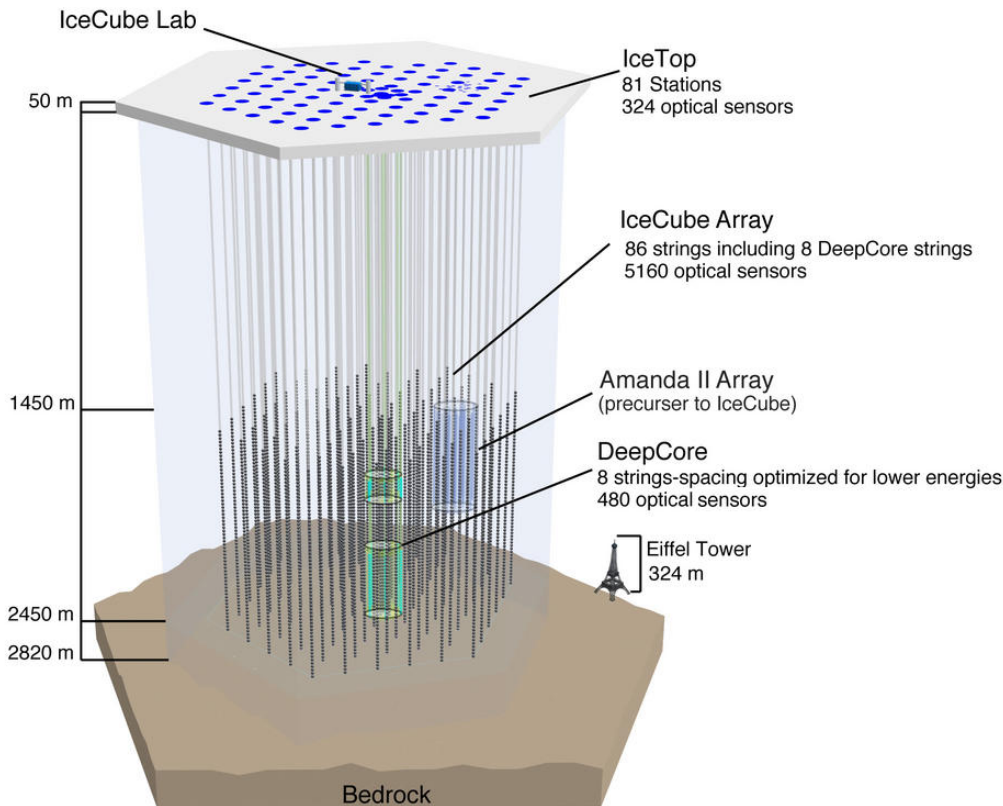
- Nachweis **kosmischer Gammastrahlen** zwischen 30 GeV und 10 TeV
- Abbildende Cherenkov-Teleskope (vgl [VL-05 Folie 5](#))

- Bestimmung Schauerrichtung
 $\sigma_d \approx 0.1^\circ$, Aufpunkt $\sigma_x \approx 10 - 20$ m
- Schauerenergie aus Abstand und Photonenintensität $\sigma_E \approx 15\%$
- Nachweis von 10γ 's/m² für ein einfallendes Photon von 100 GeV (für einige ns meßbar)
- Entferne Untergrund aus unkorrelierter Höhenstrahlung in einzelnen Teleskopen durch Koinzidenz



IceCube

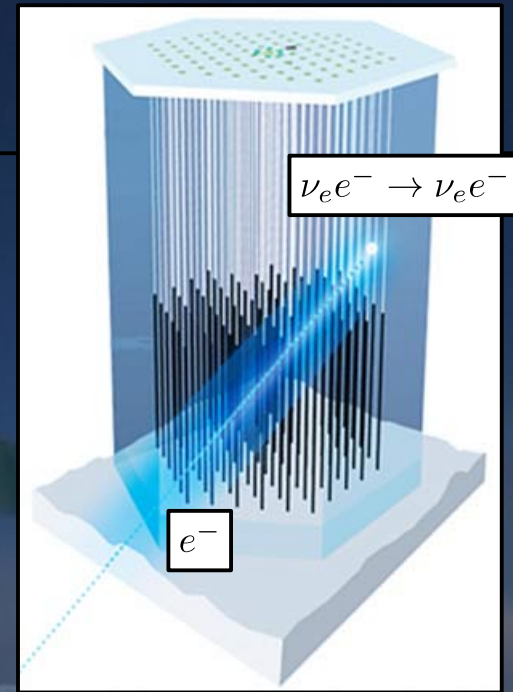
- Nachweis **kosmischer Neutrinostrahlen** im PeV-Bereich (Antarktis)
- Elastische Neutrinostreuung im Eis der Antarktis (→ Nachweis durch Cherenkovstrahlung)



Neutrino-Nachweis

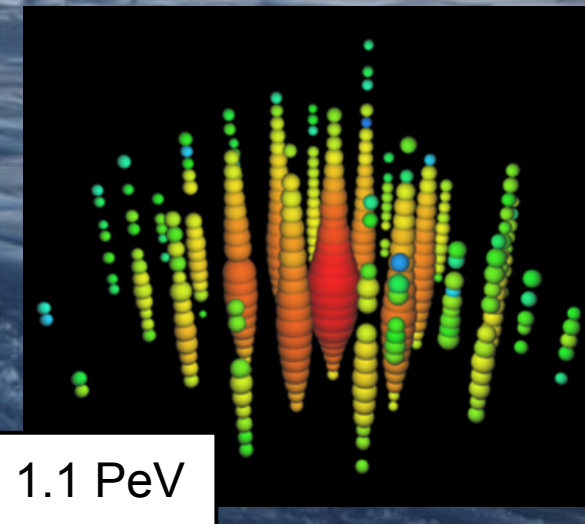
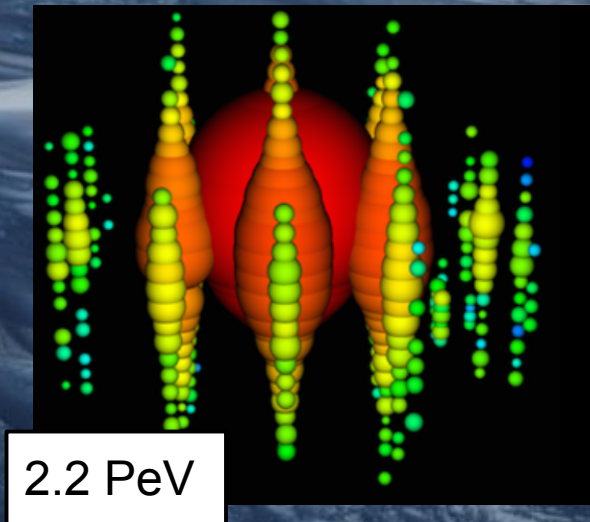
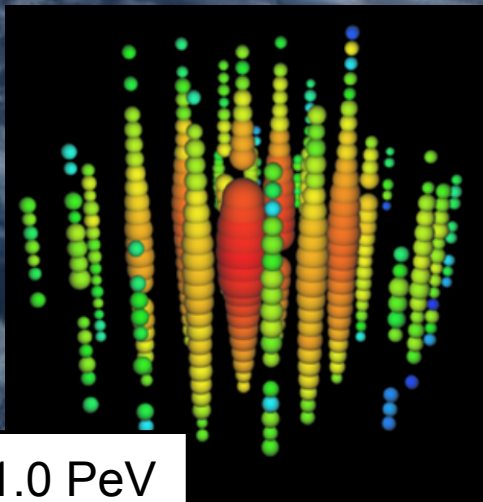
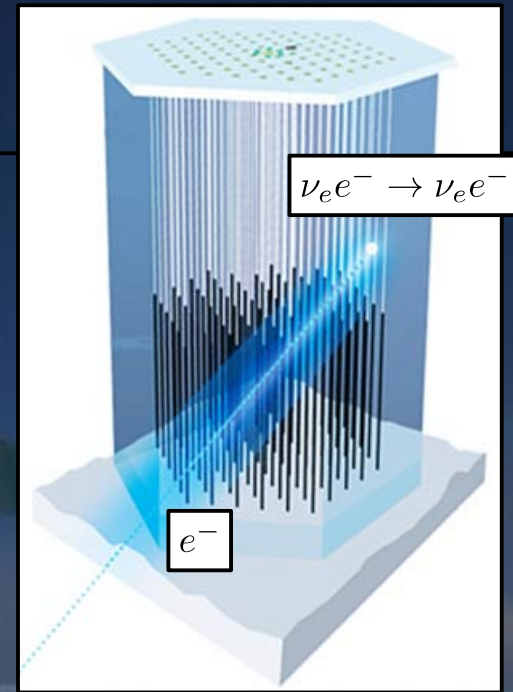


Neutrino-Nachweis

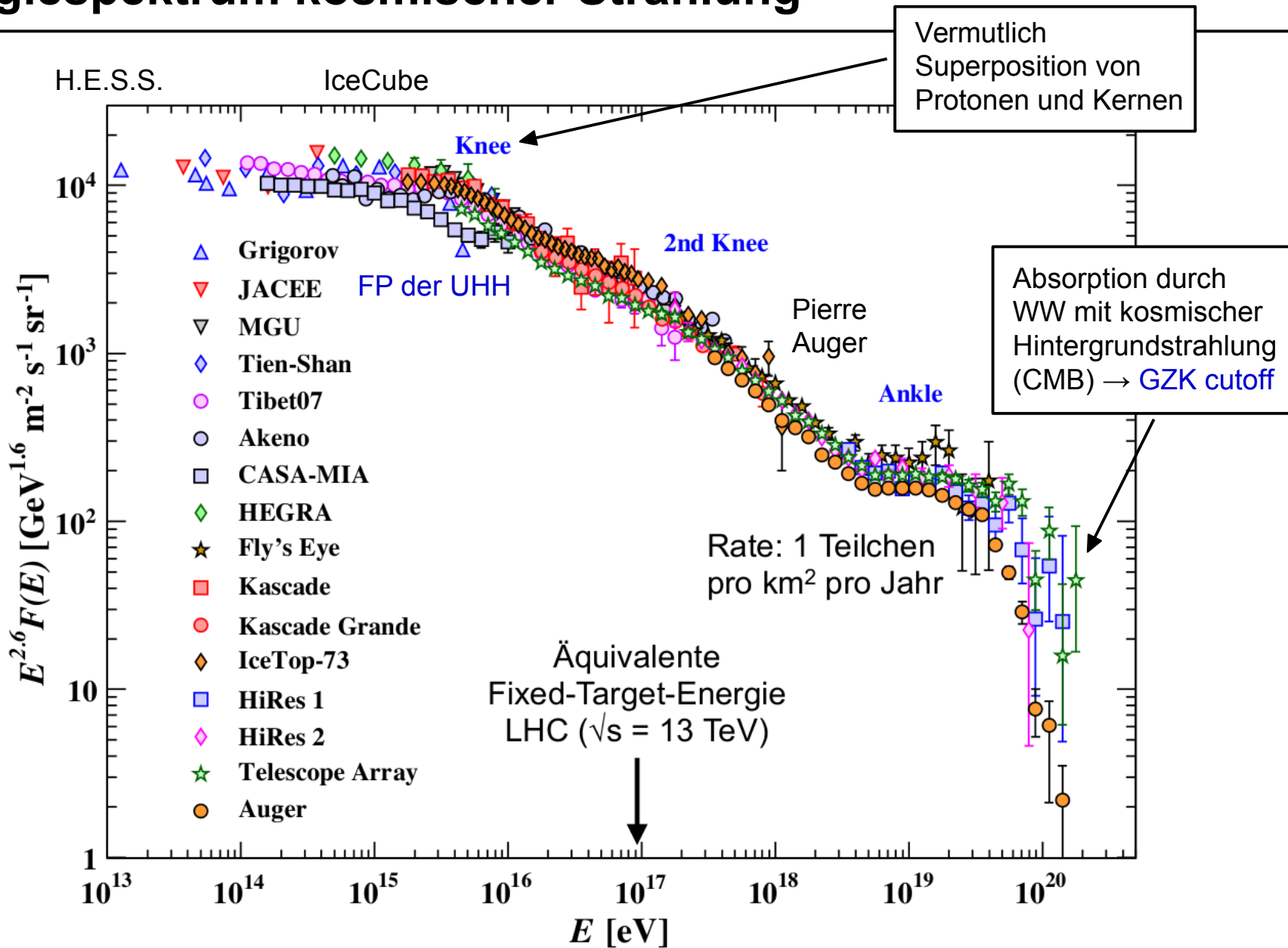


Neutrino-Nachweis

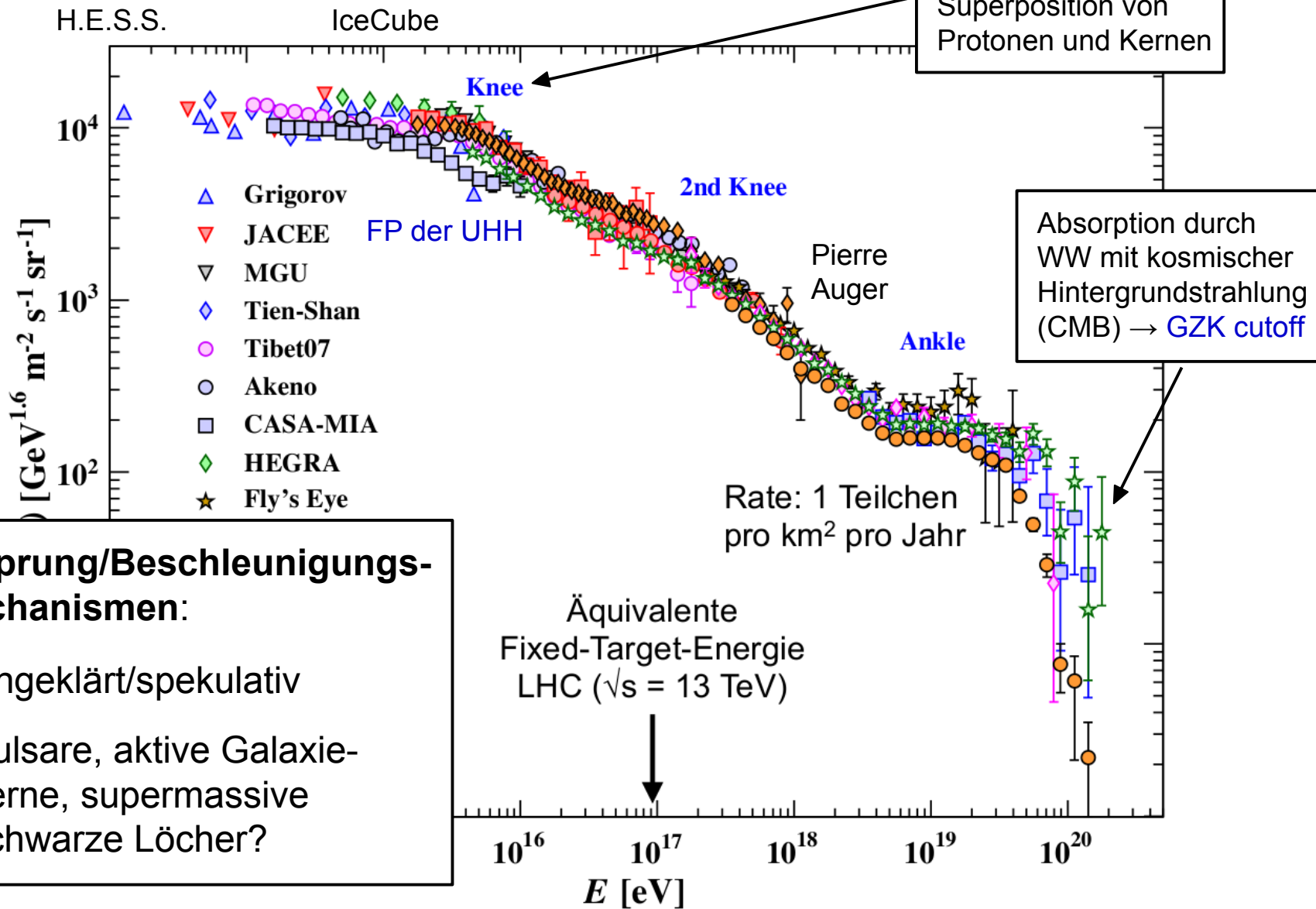
- Farbkodierung:
rot → frühes Signal,
blau → spätes Signal
- Größe des Blobs ~ Intensität



Energiespektrum kosmischer Strahlung



Energiespektrum kosmischer Strahlung



Ursprung/Beschleunigungsmechanismen:

- Ungeklärt/spekulativ
- Pulsare, aktive Galaxiekerne, supermassive schwarze Löcher?

Kapitel 11: Offene Fragen der Teilchenphysik



Kapitel 11.1: Grenzen des Standardmodells



Was wir gelernt haben...

- Wir hatten 14 Wochen lang das **Vergnügen**
- 26 Vorlesungen, 11+1 Übungsblätter
- 103 Querverweise
- 997 Folien
- 68 Verständnisfragen/ Aufgaben während VL
- 52 Kontrollfragen (auf Webseite)

Vorlesung:

VL-01 Einführung, Organisation
 VL-02 Kinematik, Streuexperimente
 VL-03 Rutherfordstreuung
 VL-04 WW geladener Teilchen mit Materie
 VL-05 WW von Photonen mit Materie
 VL-06 Detektorsysteme (Fragen)
 VL-07 Struktur der Kerne (Movie)
 VL-08 Struktur der Nukleonen
 VL-09 Fundamentale Teilchen und Kräfte
 Vorlesung fällt aus
 VL-10 Kernmodelle
 VL-11 Instabile Kerne, Gamma-Zerfall
 VL-12 Instabile Kerne, Alpha/Beta-Zerfall
 VL-13 Spaltung, Fusion, Anwendungen
 VL-14 Nukleare Thermodynamik und Astrophysik
 Vorlesung fällt aus
 VL-15 Symmetrien/Erhaltungssätze ((1), (2))
 VL-16 Diskrete Symmetrien (Fragen)
 VL-17 QCD: Quarkmodell der Hadronen
 VL-18 Farbladung und Partonmodell (Fragen)
 VL-19 Elektroschwache WW
 VL-20 Theorie der schw. WW
 VL-21 Higgsmechanismus
 VL-22 Quarksektor (Fragen)
 VL-23 Vermessung von W/Z
 VL-24 Higgs und CP (CP-Artikel)
 VL-25 Neutrinophysik (Fragen)
 VL-26 Derzeitige Grenzen des Verstehens

Vorlesungstag:

Di 25.04.2017
 Do 27.04.2017
 Di 02.05.2017
 Do 04.05.2017
 Di 09.05.2017
 Do 11.05.2017
 Di 16.05.2017
 Do 18.05.2017
 Di 23.05.2017
 Do 25.05.2017
 Di 30.05.2017
 Do 01.06.2017
 Di 06.06.2017
 Do 08.06.2017
 Di 13.06.2017
 Do 15.06.2017
 Di 20.06.2017
 Do 22.06.2017
 Di 27.06.2017
 Do 29.06.2017
 Di 04.07.2017
 Do 06.07.2017
 Di 11.07.2017
 Do 13.07.2017
 Di 18.07.2017
 Do 20.07.2017
 Di 25.07.2017
 Do 27.07.2017

Übungsblatt:

-
 -
 Blatt-01
 -
 Blatt-02
 -
 Blatt-03
 -
 -
 -
 Blatt-04
 -
 Blatt-05
 -
 Blatt-06
 -
 Blatt-07
 -
 Blatt-08
 -
 Blatt-09
 -
 Blatt-10
 -
 Blatt-11
 -
 -

(1) Skript zu Symmetrien in der Physik

(2) Hall: Lie Groups, Lie Algebras, and Representations

VL auf die am meisten
verwiesen wurde:

Was wir gelernt haben...

- Wir hatten 14 Wochen lang das **Vergnügen**
- 26 Vorlesungen, 11+1 Übungsblätter
- 103 Querverweise
- 997 Folien
- 68 Verständnisfragen/ Aufgaben während VL
- 52 Kontrollfragen (auf Webseite)

Vorlesung:

VL-01 Einführung, Organisa**12**
 VL-02 Kinematik, Streuexperimente
 VL-03 Rutherfordstreuung
 VL-04 WW geladener Teilchen mit Materie
 VL-05 WW von Photonen mit Materie
 VL-06 Detektorsysteme (Fragen)
 VL-07 Struktur der Kerne (Movie)
 VL-08 Struktur der Nu**9**
 VL-09 Fundamentale **9** und Kräfte
 Vorlesung fällt aus
 VL-10 Kernmodelle
 VL-11 Instabile Kerne, Gamma-Zerfall
 VL-12 Instabile Kerne, Alpha/Beta-Zerfall
 VL-13 Spaltung, Fusion, Anwendungen
 VL-14 Nukleare Thermodynamik und As**9**isik
 Vorlesung fällt aus
 VL-15 Symmetrien/Erhaltungssätze ((1)(2))
 VL-16 Diskrete Symmetrien (Fragen)
 VL-17 QCD: Quarkmodell der Hadronen
 VL-18 Farbladung und Partonmodell (Fragen)
 VL-19 Elektroschwache WW
 VL-20 Theorie der schw. WW
 VL-21 Higgsmechanismus
 VL-22 Quarksektor (Fragen)
 VL-23 Vermessung von W/Z
 VL-24 Higgs und CP (CP-Artikel)
 VL-25 Neutrinophysik (Fragen)
 VL-26 Derzeitige Grenzen des Verstehens

Vorlesungstag:

Di 25.04.2017
 Do 27.04.2017
 Di 02.05.2017
 Do 04.05.2017
 Di 09.05.2017
 Do 11.05.2017
 Di 16.05.2017
 Do 18.05.2017
 Di 23.05.2017
 Do 25.05.2017
 Di 30.05.2017
 Do 01.06.2017
 Di 06.06.2017
 Do 08.06.2017
 Di 13.06.2017
 Do 15.06.2017
 Di 20.06.2017
 Do 22.06.2017
 Di 27.06.2017
 Do 29.06.2017
 Di 04.07.2017
 Do 06.07.2017
 Di 11.07.2017
 Do 13.07.2017
 Di 18.07.2017
 Do 20.07.2017
 Di 25.07.2017
 Do 27.07.2017

Übungsblatt:

-
 -
 Blatt-01
 -
 Blatt-02
 -
 Blatt-03
 -
 -
 -
 Blatt-04
 -
 Blatt-05
 -
 Blatt-06
 -
 Blatt-07
 -
 Blatt-08
 -
 Blatt-09
 -
 Blatt-10
 -
 Blatt-11
 -
 -

(1) Skript zu Symmetrien in der Physik

(2) Hall: Lie Groups, Lie Algebras, and Representations

Was wir nicht wissen...

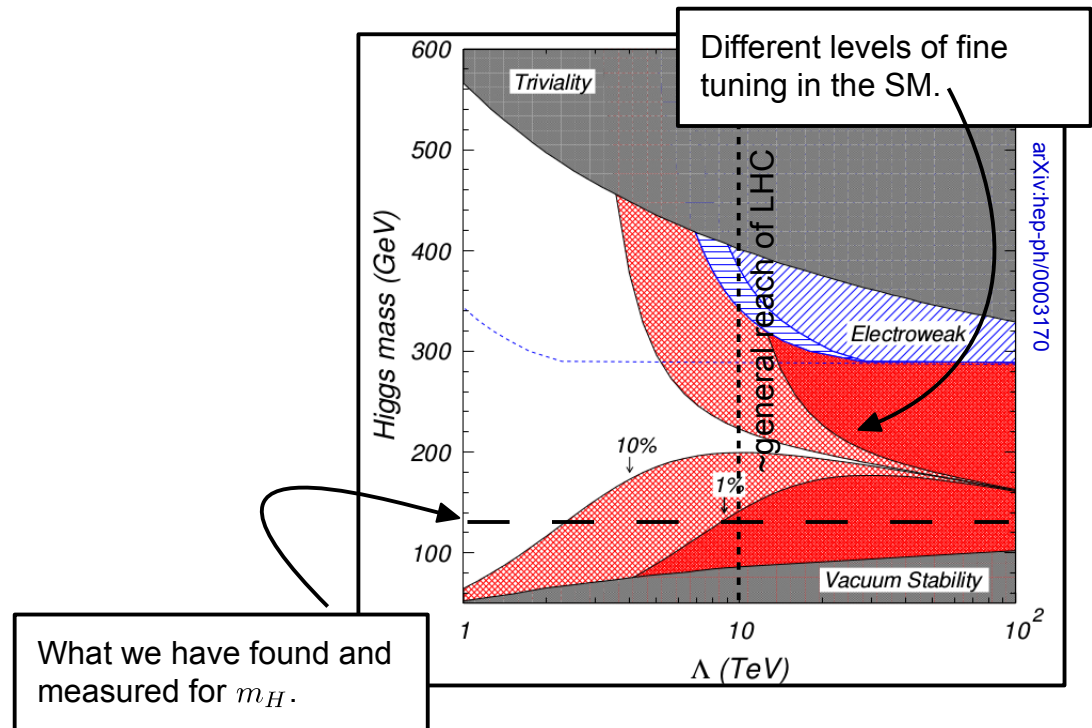
- Das SM besteht aus über 18 freien Parametern, deren Ursprung wir nicht kennen
- Warum unterscheidet die schwache WW zwischen links- und rechtshändigen Teilchen?
- Warum ist die schwache WW CP-verletzend? Ist auch CPT verletzt?
- Warum gibt es gerade drei Fermion-Generationen?
- Wie kommt es zu den Massenhierarchien zwischen den Fermionfamilien?
- Warum gerade eine $U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_c$ -Symmetrie zur Beschreibung der fundamentalen WW? Gibt es eine übergeordnete Symmetrie (z.B. $SU(5)$)?
- Warum ist die $SU(2)_L$ -Symmetrie im Quantenvakuum gebrochen und wie kommt es zu dieser Symmetriebrechung?
- Wir wissen nur wenig über das Verhalten des SM in nicht-perturbativen Regimen z.B. in der QCD

Was wir nicht wissen...

- Wie läßt sich die Gravitation als QFT in das SM einfügen? Warum ist die Gravitation so schwach im Vgl zu allen anderen WW?
- Neutrinos haben Masse – wo sind die rechtshändigen Neutrinos und welcher Natur sind sie?
- ...

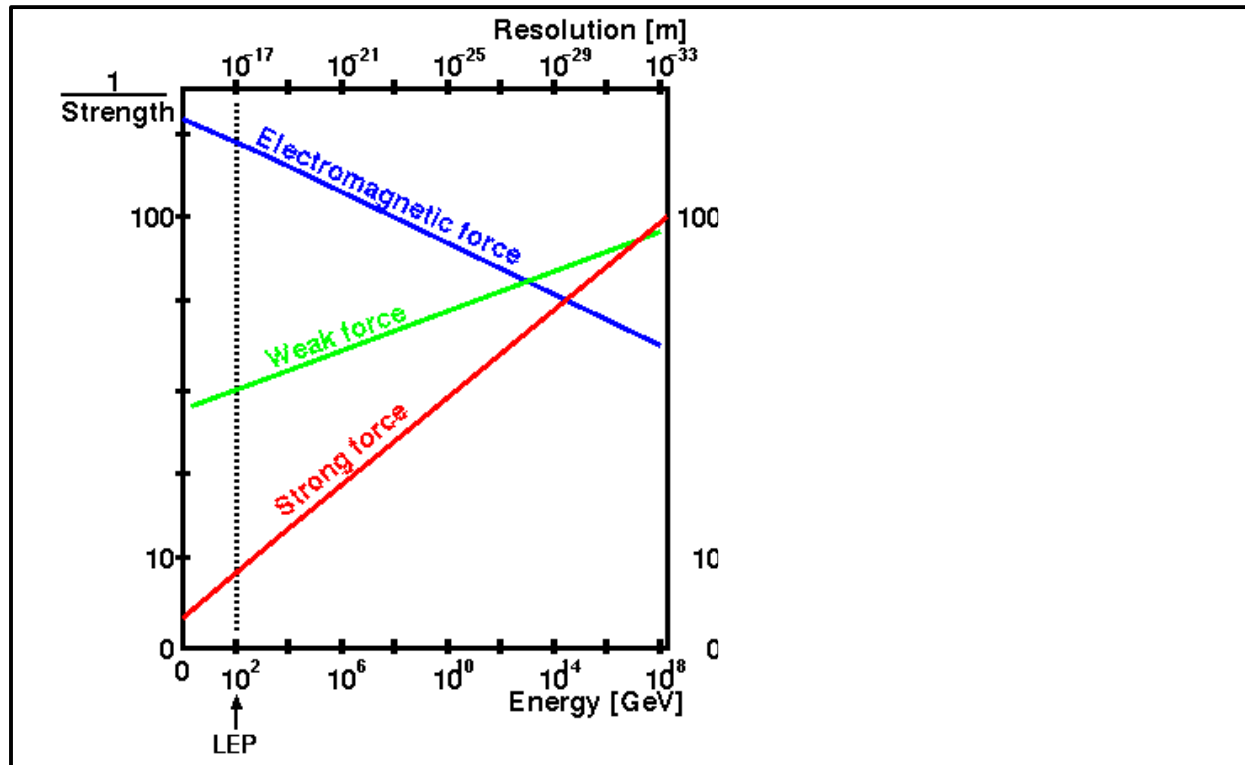
Hierarchie-Problem des SM

- Höhere **Korrekturen zur Higgsmasse** enorm groß (z.B. 100 mal größer als gemessene Higgsmasse)
- D.h. “nakte” Higgsmasse und higher-order Korrekturen müssen sich bis auf 1% auslöschen, um gemessene Higgsmasse zu ergeben (→ fine-tuning problem)



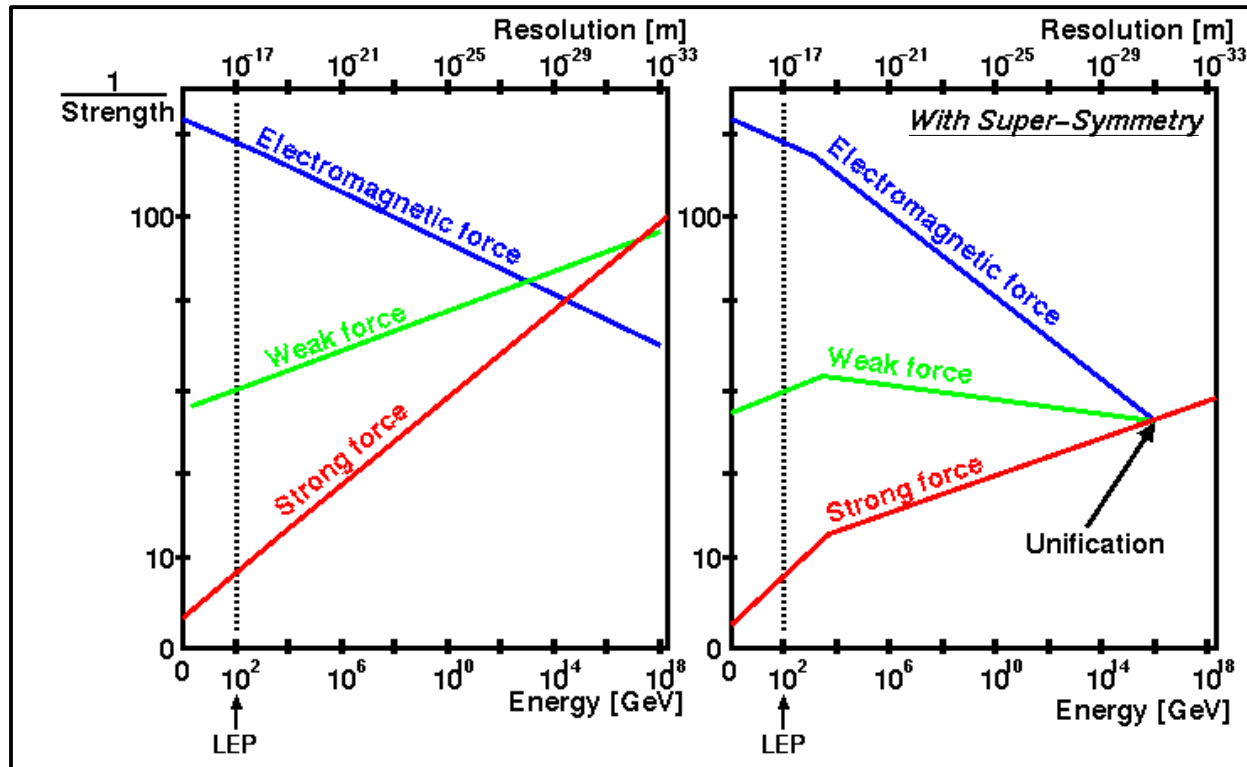
Grand Unified Theories (GUT)

- Wir beobachten, dass sich **die laufenden Kopplungen** bei hohen Skalen fast treffen
- Wir interpretieren diesen Umstand als mögliches Indiz für eine Vereinheitlichung aller Kräfte bei großen Skalen
- Aber warum treffen sich die Kopplungen nur fast?



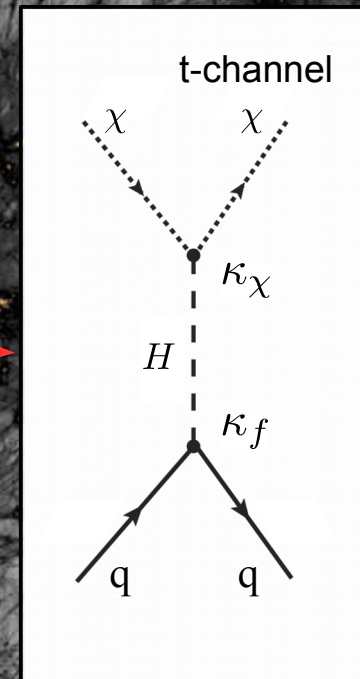
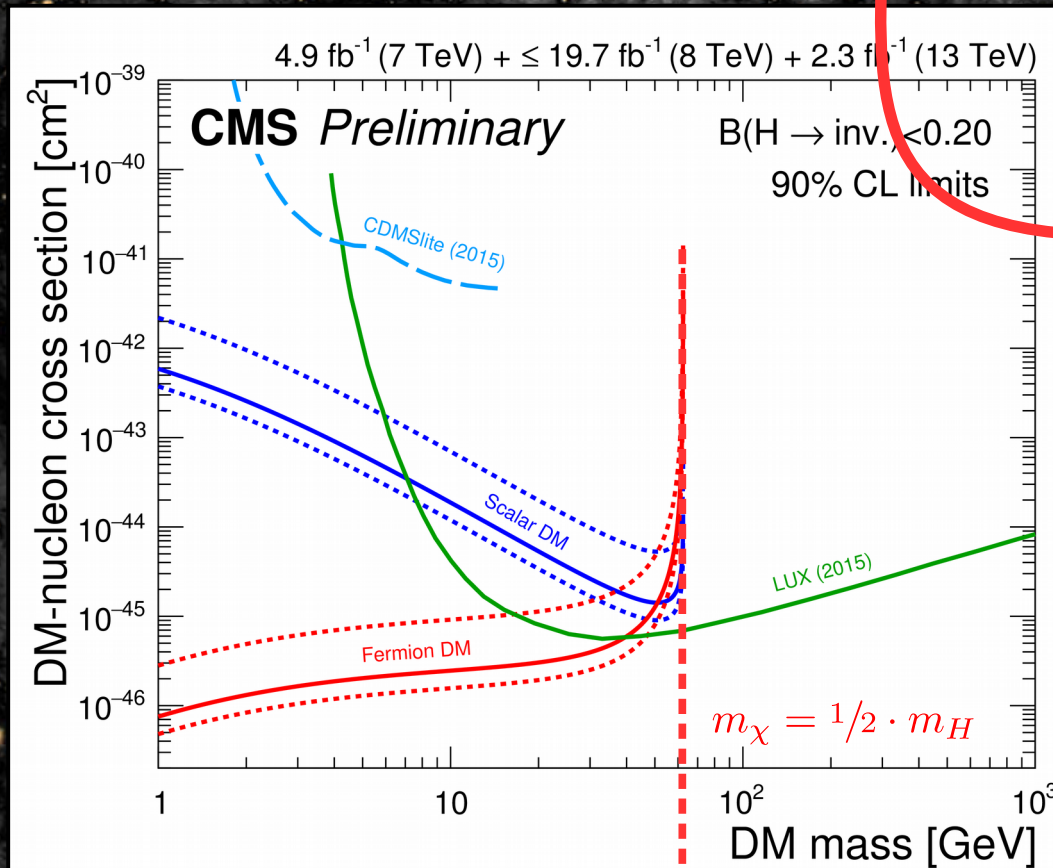
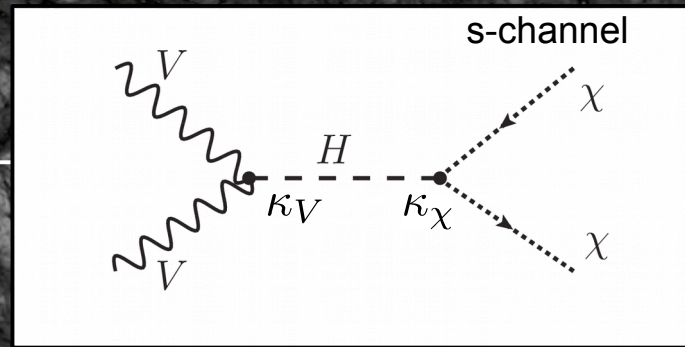
Grand Unified Theories (GUT)

- Wir beobachten, dass sich **die laufenden Kopplungen** bei hohen Skalen fast treffen
- Wir interpretieren diesen Umstand als mögliches Indiz für eine Vereinheitlichung aller Kräfte bei großen Skalen
- Aber warum treffen sich die Kopplungen nur fast?



Dunkle Materie

- Das Universum besteht zu **20% aus dunkler Materie**, die wir nicht kennen und die auf eine uns nicht bekannte Art und Weise (nur durch seine Masse?) mit sichtbarer Materie in Wechselwirkung tritt



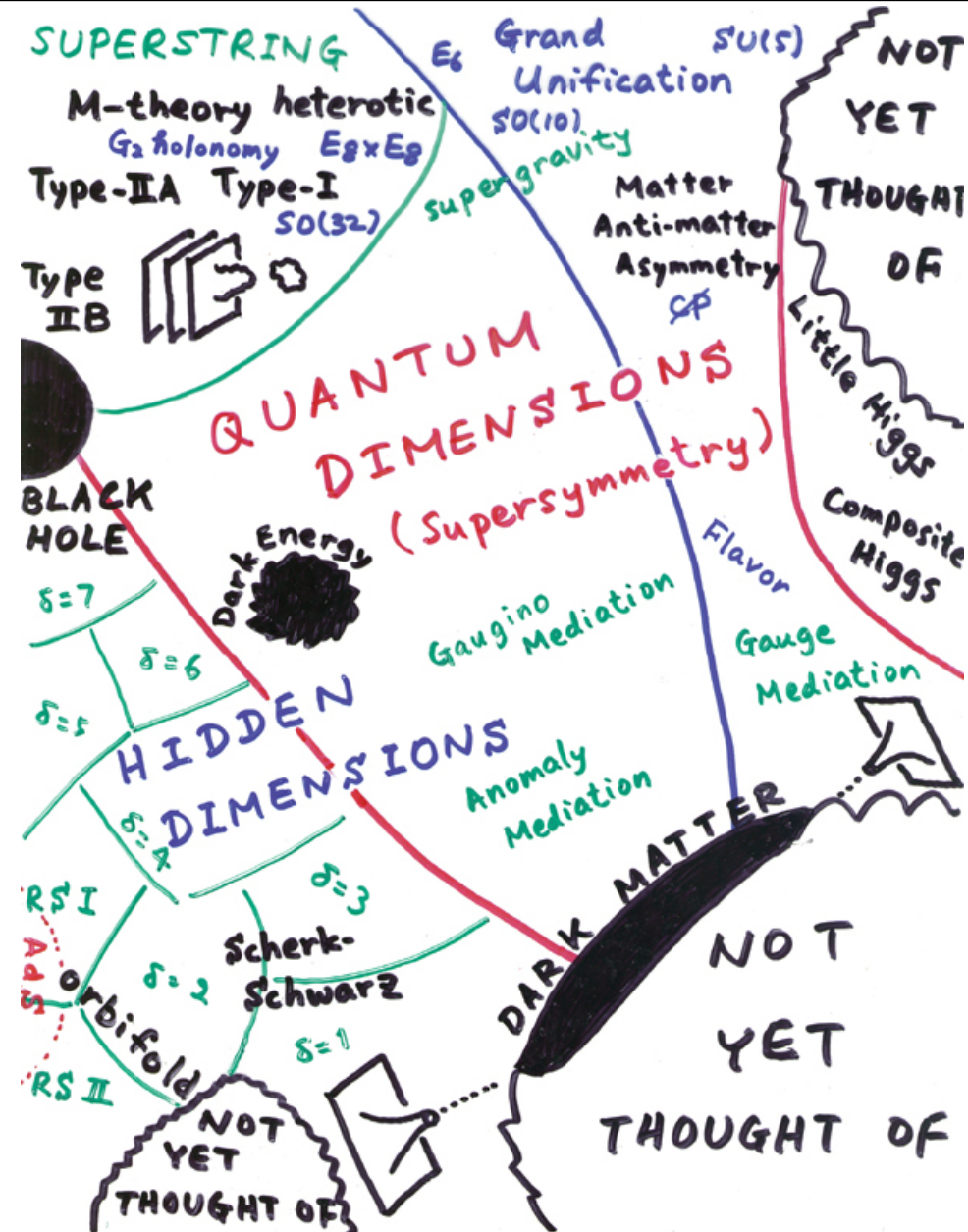
Materieuniversum

- Das Universum (das wir kennen) besteht aus **Materie und nicht aus Antimaterie**
- Es gibt CP-Verletzung im SM, die notwendig ist, um Materie-Antimaterie Asymmetrie erklären zu können, aber wo ist das Maß an CP-Verletzung, das das Ausmaß der beobachteten Asymmetrie erklären kann?



Es gibt (Teilchen-)Physik jenseits des SM

- Die Frage ist nur: **bei welcher Skala** setzt sie ein und ist sie für uns erreichbar?
- **Direkte Beobachtung** neuer Physik bei höchsten erreichbaren Energien
- **Indirekte Auswirkungen** neuer Physik bei unerreichbaren Skalen durch Präzisionmessungen

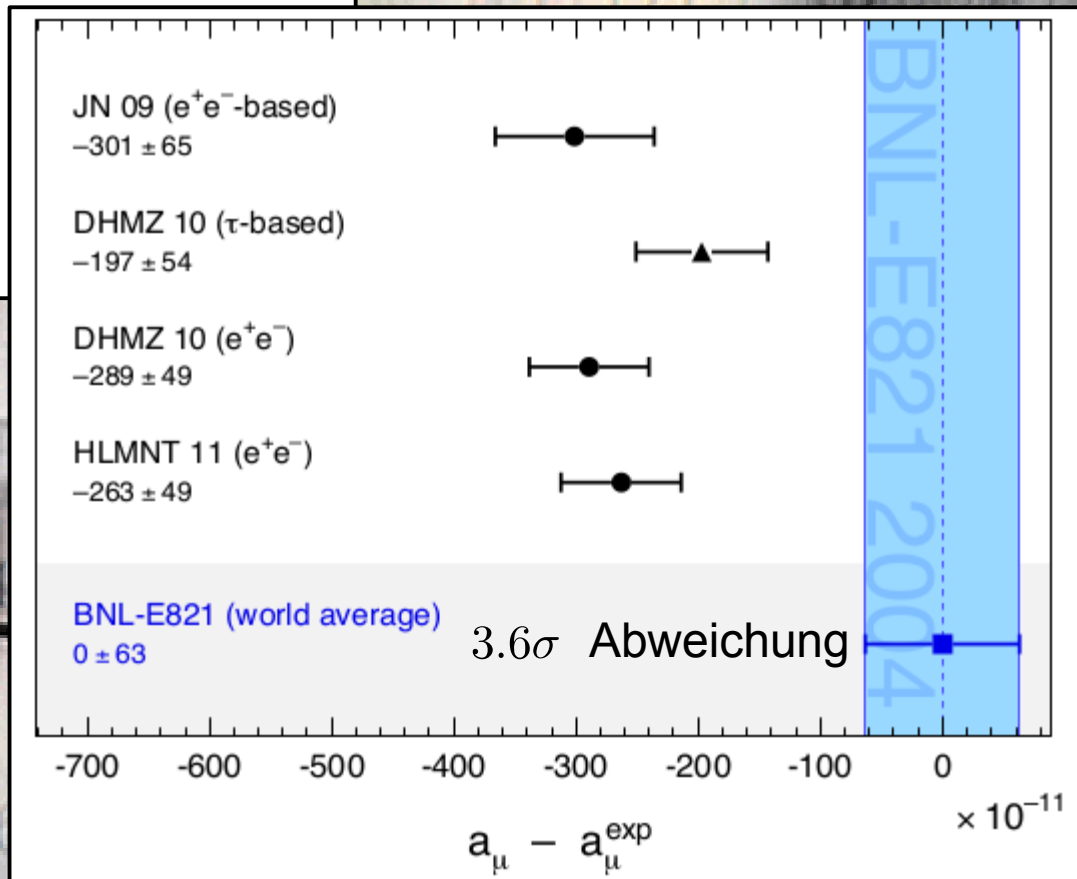


g_μ

- Magnetisches Moment des Myons: $g_\mu \equiv 2$
(aus Dirac-GL für Spin- $\frac{1}{2}$ Teilchen)
- Im SM (als QFT) \rightarrow Korrekturen höherer Ordnung
- Möglicher Vergleich extrem präziser Messung mit extrem präziser Berechnung

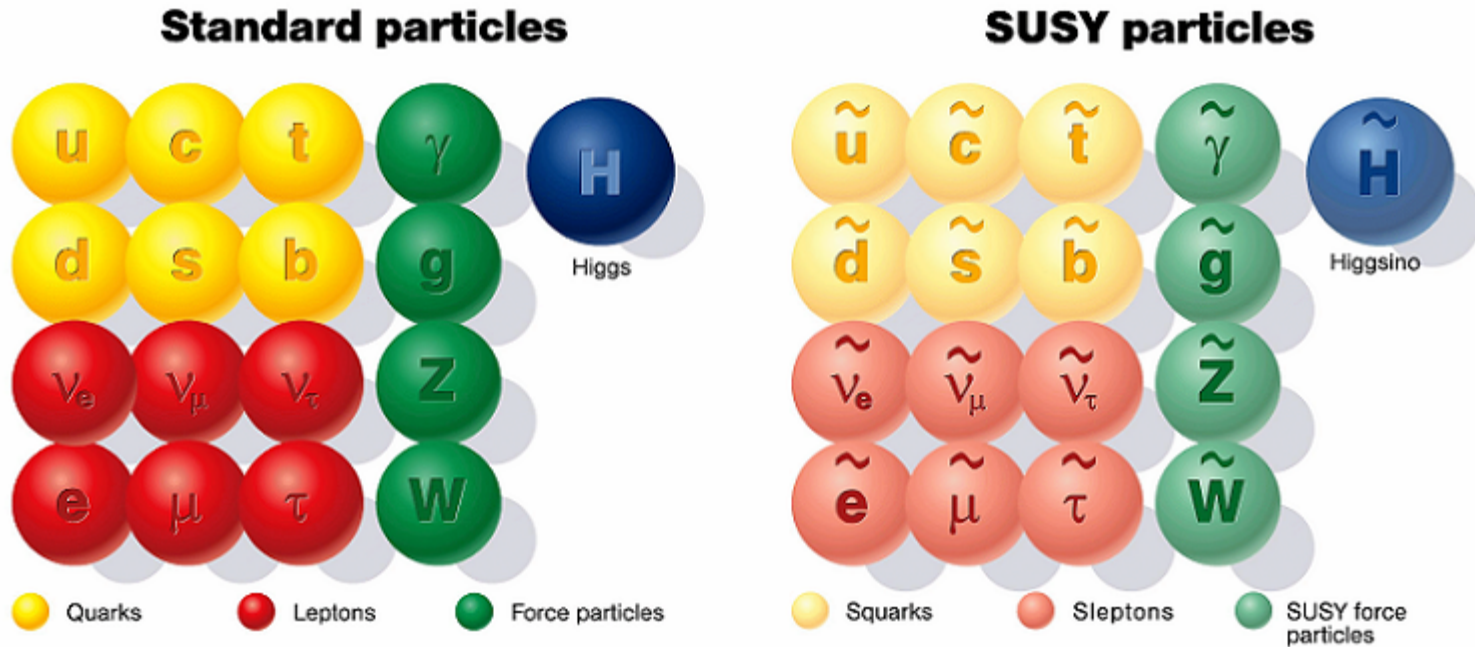
$$1 + \frac{\mu_p^{\text{experimentell}}}{\mu_e^{\text{experimentell}}} - \frac{\alpha}{2\pi} + 1 \approx 2 \approx g_e$$

- Magnetisches Moment des Myons: $g_\mu \equiv 2$
(aus Dirac-GL für Spin- $\frac{1}{2}$ Teilchen)
- Im SM (als QFT) \rightarrow Korrekturen höherer Ordnung
- Möglicher Vergleich extrem präziser Messung mit extrem präziser Berechnung



Supersymmetrie (SUSY)

- Erweitere SM um letzte nicht-triviale **Symmetrie-Operation** (Boson \leftrightarrow Fermion)



- Erlaubt Implementierung der Gravitation in SM (ursprüngliche Motivation)
- Kann spontane Symmetriebrechung im SM erklären
- Löst Hierarchieproblem im Higgs-Sektor des SM
- Öffnet neue Quellen für CP-Verletzung
- Bietet Kandidaten für dunkle Materie

NB: Adressiert jedes
Problem von Folie 18 – 21

Higgs Bosons in the MSSM ⁽¹⁾

(1) Minimal Supersymmetrisches SM

- Any 2 Higgs Doublet Model (2HDM) predicts **five Higgs bosons**:

$$\phi_u = \begin{pmatrix} \phi_u^0 \\ \phi_u^+ \end{pmatrix}, \quad Y_{\phi_u} = +1, \quad v_u : \text{VEV}_u$$

$$\phi_d = \begin{pmatrix} \phi_d^- \\ \phi_d^0 \end{pmatrix}, \quad Y_{\phi_d} = -1, \quad v_d : \text{VEV}_d$$

$$N_{\text{ndof}} = 8 \quad - \quad \underbrace{3}_{W, Z} = \underbrace{5}_{H^\pm, H, h, A}$$

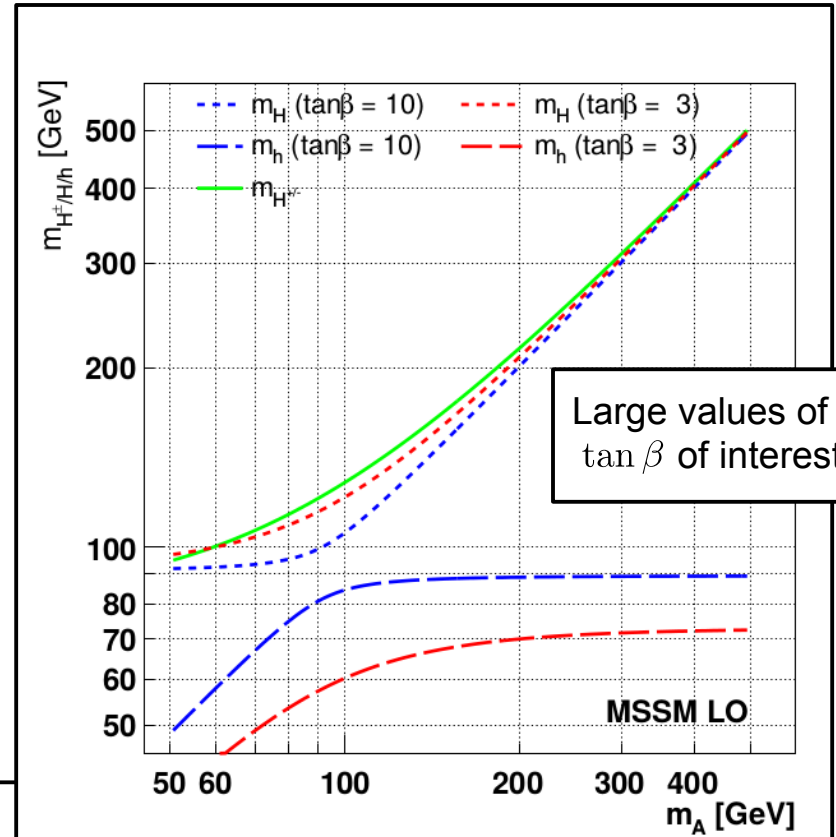
- Strict mass requirements at tree level:

two free parameters: m_A , $\tan \beta = v_u/v_d$

$$m_{H^\pm}^2 = m_A^2 + m_W^2$$

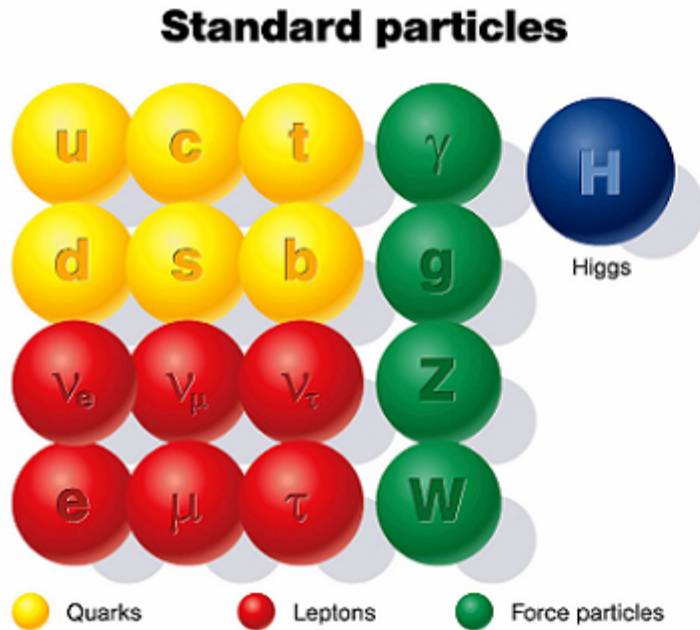
$$m_{H, h}^2 = \frac{1}{2} \left(m_A^2 + m_Z^2 \pm \sqrt{(m_A^2 + m_Z^2)^2 - 4m_A^2 m_Z^2 \cos^2 2\beta} \right)$$

$$\tan \alpha = \frac{-(m_A^2 + m_Z^2) \sin 2\beta}{(m_Z^2 - m_A^2) \cos 2\beta + \sqrt{(m_A^2 + m_Z^2)^2 - 4m_A^2 m_Z^2 \cos^2 2\beta}}$$

(angle btw. v_u & v_d in isospace)

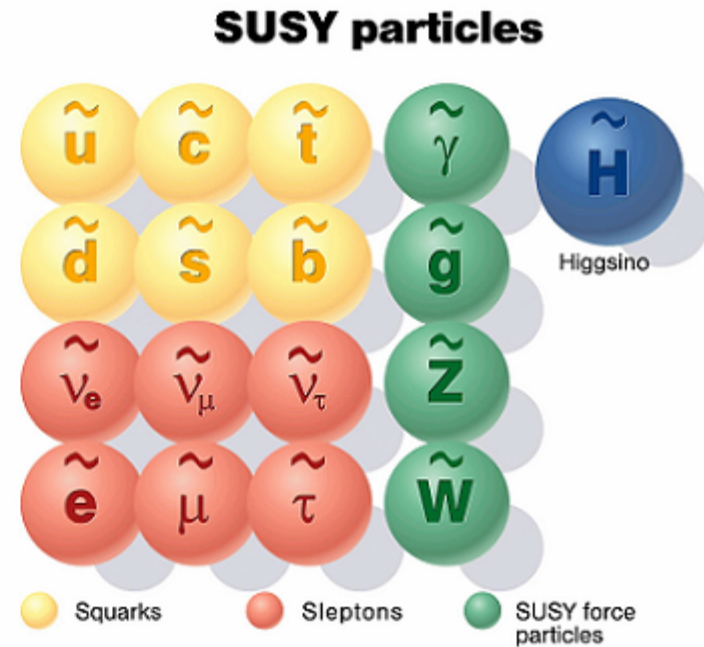
SUSY-Problem

- Supersymmetrie ist **selbst gebrochen**, denn...



SUSY-Problem

- Supersymmetrie ist **selbst gebrochen**, denn...
... **wo sind all die SUSY Teilchen?**
- In der Theorie: SUSY Teilchen exakt gleiche Eigenschaften, wie SM Teilchen nur einen anderen Spin
- Insbesondere → gleiche Masse
- Nichtbeobachtung kann heißen:
Massen der SUSY-Teilchen jenseits unserer (aktuellen) **experimentellen Reichweite** (→ **Symmetriebrechung**)



KW-26-28

9 Elektroschwache Physik

9.1 Eigenschaften der elektroschwachen Wechselwirkung

9.2 Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung

9.3 Quarkmischung und CP-Verletzung



KW-29

10 Moderne Teilchenphysik

10.1 Schlüsselexperimente der elektroschwachen Wechselwirkung an Collidern

10.2 Neutrino-physik

10.3 Astroteilchenphysik

KW-30

11 Offene Fragen der Teilchenphysik

11.1 Grenzen des SM

~~11.2 Teilchenphysik und Kosmologie~~

Das war's dann also

Aber Sie wissen ja...

KW-26-28

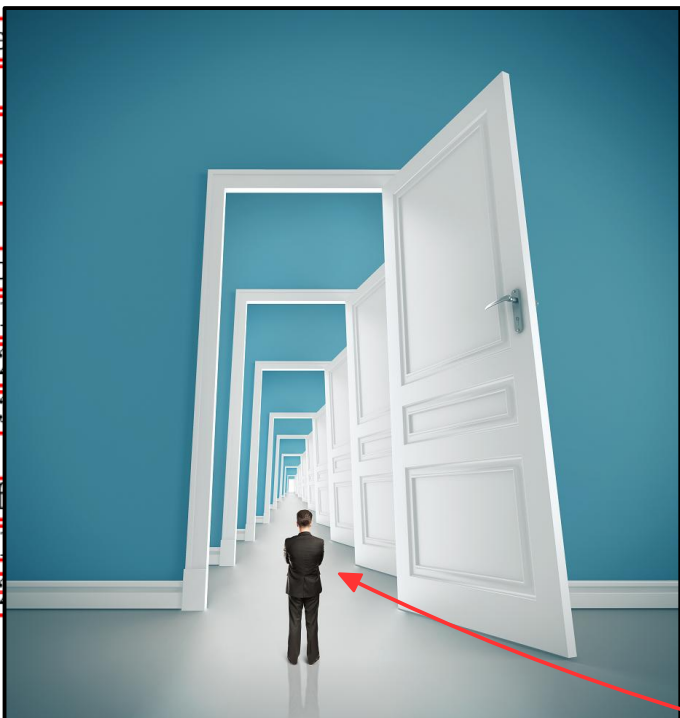
- 9 Ele
- 9.1
- 9.2
- 9.3

KW-29

- 10 Mo
- 10.1
- 10.2
- 10.3

KW-30

- 11 Off
- 11.1
- 11.2



Wechselwirkung

wirkung

ichen Wechselwirkung an Collidern



Das war's dann also

Aber Sie wissen ja...

... jedem Ende wohnt ein neuer Anfang inne

