

Backup Session



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG

Sebastian Fabianski, Philipp Lindenau, Dr. Claudia Behnke
Hamburg DESY | 11./12.02.2019



NETZWERK
TEILCHENWELT

Spezielle unitäre Gruppe

- ▶ Die spezielle unitäre Gruppe $SU(n)$
- ▶ $SU(n)$ besteht aus den unitären $n \times n$ -Matrizen mit komplexen Einträgen, deren Determinante 1 beträgt.
- ▶ Sie ist eine kompakte, einfache Lie-Gruppe der reellen Dimension $n^2 - 1$, insbesondere auch eine differenzierbare Mannigfaltigkeit.
- ▶ Die Anzahl der unabhängigen Drehungen im Ladungsraum sagt die Anzahl an Botenteilchen voraus
- ▶ Für $SU(2)$ existieren 3 unabhängige Drehung
- ▶ Für $SU(3)$ 8 Stück

Higgs Feld

► Symmetriebrechung

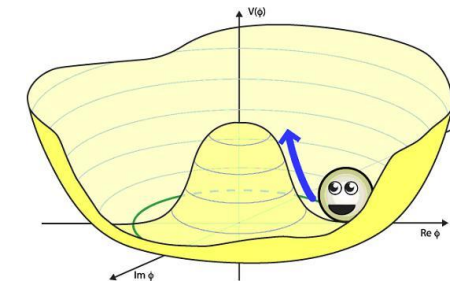
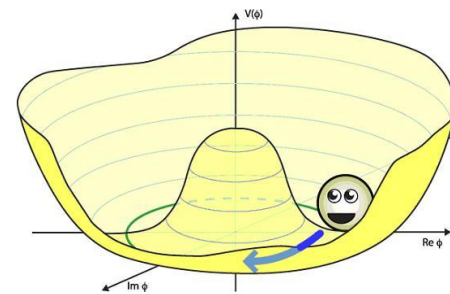
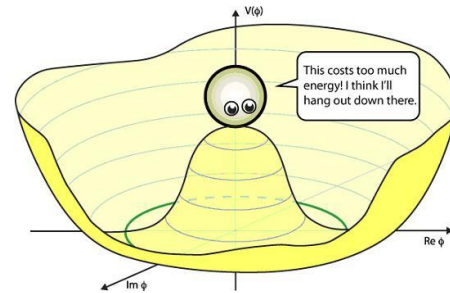
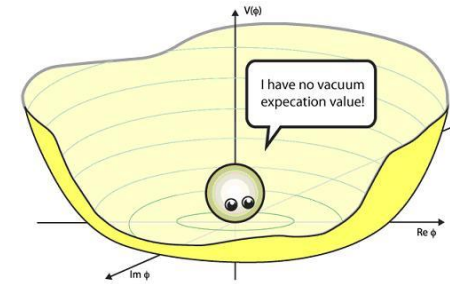
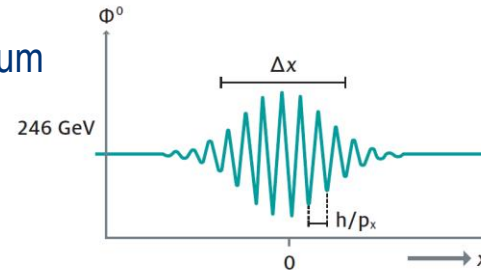
- Symmetrisches Potential
Grundzustand symmetrisch
- Symmetrisches Potential
Grundzustand nichtsymmetrisch

► Klassisch analog Dielektrikum : Abschirmung der Feldlinien

- Abschirmung „schwacher Felder“
durch BEHiggs-Hintergrundfeld
= unendlicher See schwacher Ladung
- Abschirmendes Feld
Duplett in schw. Ladung
Komponente $v = 246$ GeV im Vakuum
- Anregung = Higgs-Teilchen

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix}$$

$$\Phi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v + H \end{pmatrix}$$



Ausgangspunkt: Elektromagnetische Wechselwirkung

▶ Botenteilchen (Photon) ist

- masselos
- ungeladen

▶ Vergleich schwach: $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_{\text{W}} \frac{I_1 I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_{\text{W}}}}$

▶ Grund: Massereiche Botenteilchen (W- und Z-Teilchen) verursachen kurze Reichweite

- Compton-Wellenlänge $\lambda_{\text{W}} = \frac{\hbar}{m_{\text{W}} c} \approx 0,0024 \text{ fm}$
- Exakte Argumentation schwierig. Mathematische Herleitung möglich, liegt außerhalb der hier behandelten Themen

Bisher ignoriert: Zustandsmischung

- ▶ Makroskopisch messbare Teilchen: immer **Massen-Eigenzustände**
- ▶ Wechselwirkungen: immer **Ladungs-Eigenzustände**
- ▶ Umwandlungen nur innerhalb der Ladungs-Dupletts möglich
 - Die Multipletts sind daher *nur* für **Ladungs-Eigenzustände** definiert
- ▶ Konsequenz des BEHiggs Feldes:
 - die Masseneigenzustände von Quarks sind nicht identisch mit den schwachen Ladungs-Eigenzuständen, sondern eine Mischung aus diesen!
 - → Masseneigenzustände haben i.a. keine definierte schwache Ladung
 - → Schwache Ladungs-Eigenzustände haben i.a. keine definierte Masse

$$\begin{array}{ccc} & \begin{array}{c} \nearrow \\ \text{Schwache Ladungs-} \\ \text{Eigenzustände} \end{array} & \begin{array}{c} \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cabibbo-} \\ \text{Kobayashi-} \\ \text{Maskawa Matrix} \\ \text{(CKM Matrix)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \\ \begin{array}{c} \nwarrow \\ \text{Massen} \\ \text{Eigenzustände} \end{array} \end{array} \end{array}$$

Also: Ladungs-Multipletts eigentlich $\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$

Zustandsmischung

- Die Quadrate der Elemente $V_{qq'}$ der unitären CKM Matrix bestimmen die Wahrscheinlichkeit der Umwandlungen.

z.B. $s \rightarrow u + W^-$ wird möglich wegen des $|d'\rangle$ -Anteils in $|s\rangle$

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{also } |s'\rangle &= V_{cd}|d\rangle + V_{cs}|s\rangle + V_{cb}|b\rangle \\ |s\rangle &= V_{us}^*|d'\rangle + V_{cs}^*|s'\rangle + V_{ts}^*|b'\rangle \end{aligned}$$

- Die Mischungen der Quarks in der schwachen Wechselwirkung sind eher klein, d.h. die Mischungsmatrix ist „fast“ die Einheitsmatrix)

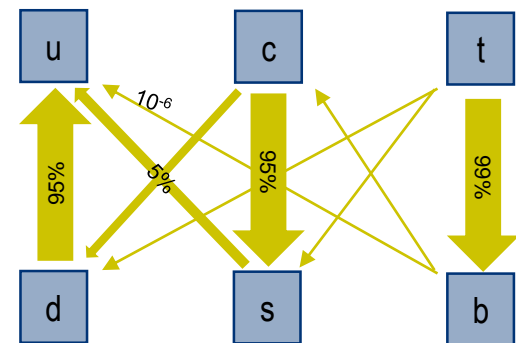
$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0,975} & 0,225 & 0,003 \\ 0,225 & \mathbf{0,974} & 0,041 \\ 0,009 & 0,040 & \mathbf{0,999} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{pmatrix}$$

Schwache Ladungs-Eigenzustände

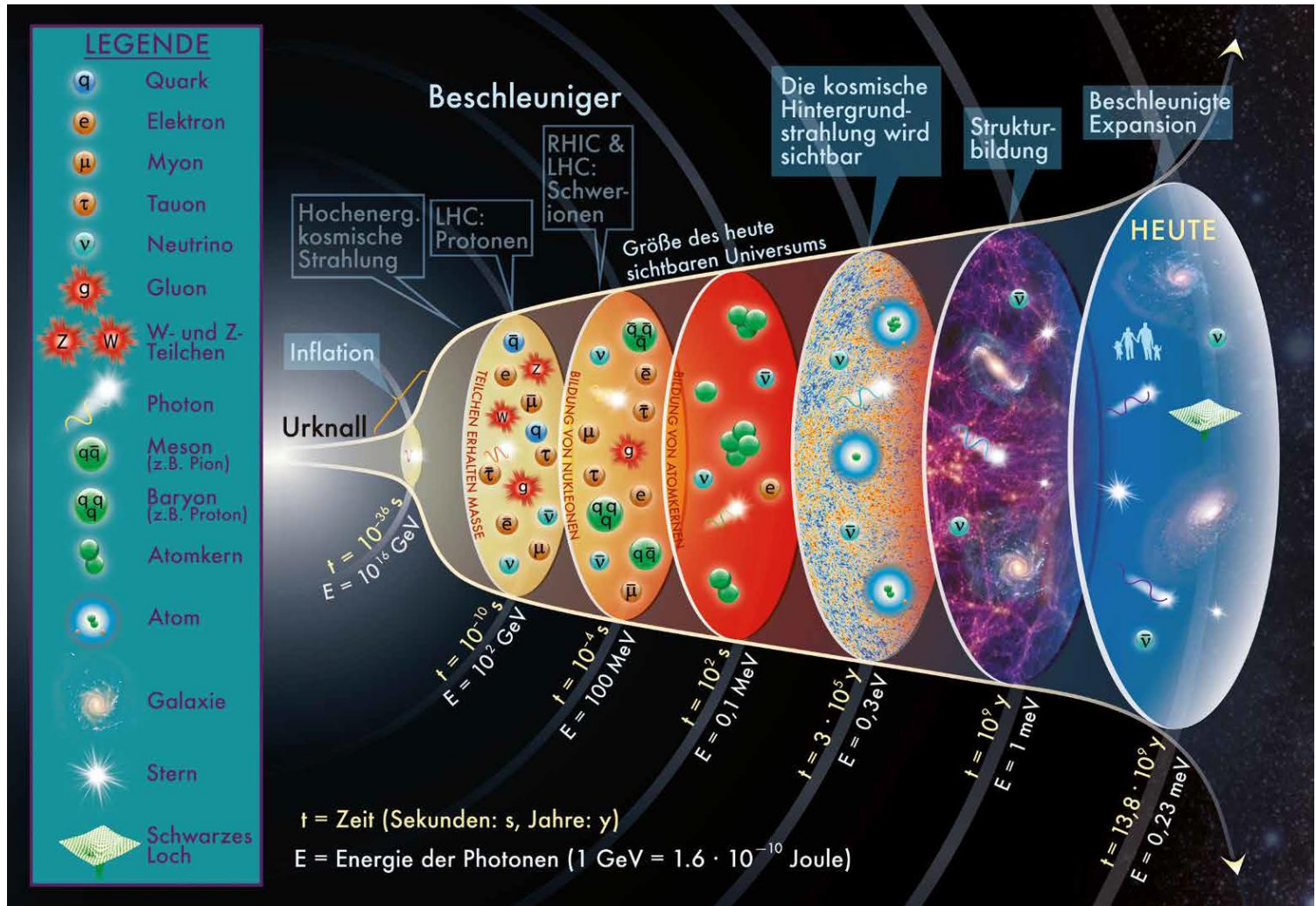
Massen Eigenzustände

Quark-Umwandlungen

- ▶ Beispiel: Wandelt sich ein c-Quark in einem schwachen Prozess um, entsteht daraus **immer** ein s' Ladungs-Eigenzustand, den man mit Wahrscheinlichkeit $|V_{cd}|^2=0,05$ aber als ein d-Quark Masse-EZ beobachtet
- ▶ Die Mischungsmatrix ist fast diagonal
 - Jeweils schwerere Massen-EZ (d,c,t) wandeln sich >95% innerhalb derselben Teilchen-Generation um
 - Für s- und b-Quarks sind nur Umwandlungen in die leichteren Generationen möglich, unterdrückt um Faktoren 40 ($s \rightarrow u$), 600 ($b \rightarrow c$) und 100.000 ($b \rightarrow u$), ihre Lebensdauern sind entsprechend verlängert
 - Der Term $|V_{ud}|^2=0,95$ verlängert z.B. die Lebensdauern von freien Neutronen und elektr. geladenen Pionen um 5%



Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“



Yukawa Kopplung

▶ $E_{\text{Pot}}(r) = \hbar c \alpha_w \frac{I_1 I_2}{r} \cdot e^{\frac{-r}{\lambda_w}}$

▶ Yukawa Kopplung die Interaktion zweier Fermionen durch Botenteilchen

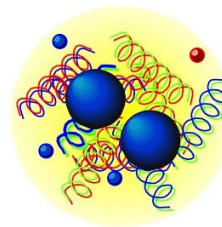
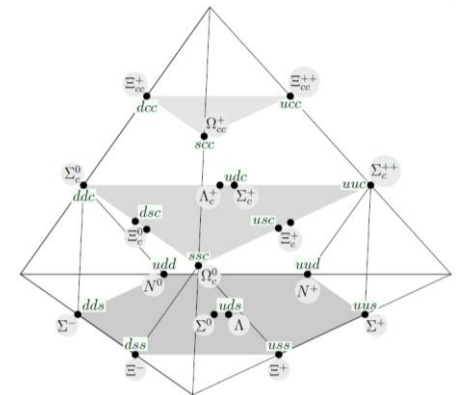
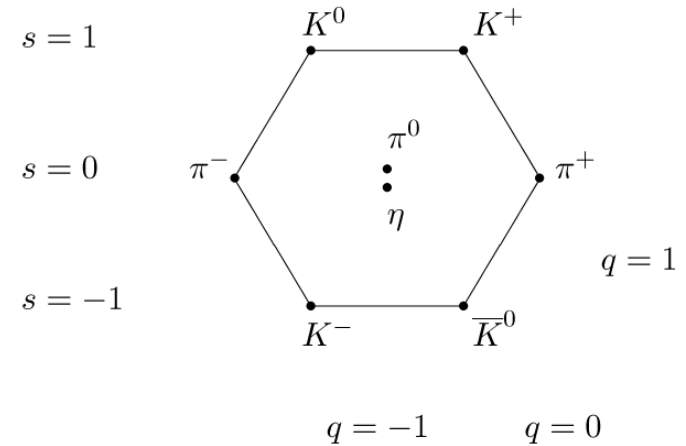
▶ Das Potential ist die Fouriertransformation des Propagators des Botenteilchens

- Masse des Botenteilchens ist Teil der Propagators
- Propagator ergibt sich durch Lösung der Klein Gordon Gleichung mit vorgegebene Randbedingung (Greensche Funktion)

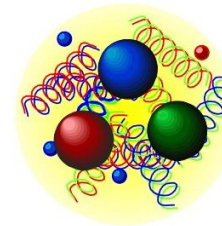
Hadronen

► Zusammengesetzte Zustände von Quarks und Antiquarks

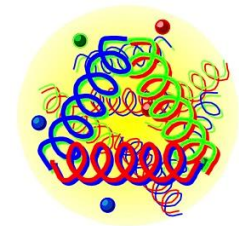
- Baryonen: 3 Quarks
 - Proton
 - Neutron
 -
- Mesonen: Quark Antiquark
 - Pion
 - Kaon
 -
- Weitere Zustände
 - Pentaquarks
 - Tetraquarks
 - Glue Balls



meson



baryon



glueball?

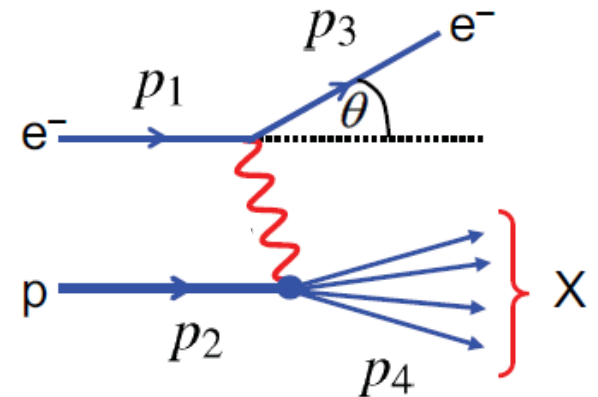
Proton Vermessung

► Streuung von e^- am Proton

- Messung der Streuung an einem Punktteilchen ist bekannt (Mott Streuung („Rutherford Streuung an Spin $\frac{1}{2}$ Teilchen“))

► Form Faktor:

- Gemessener Unterschied zwischen Mott Streuung und gemessener Streuung bei bestimmtem Impulsübertrag
- Entspricht der Fouriertransformierten der Ladungsverteilung
- Formfaktor von 1 = Punktteilchen



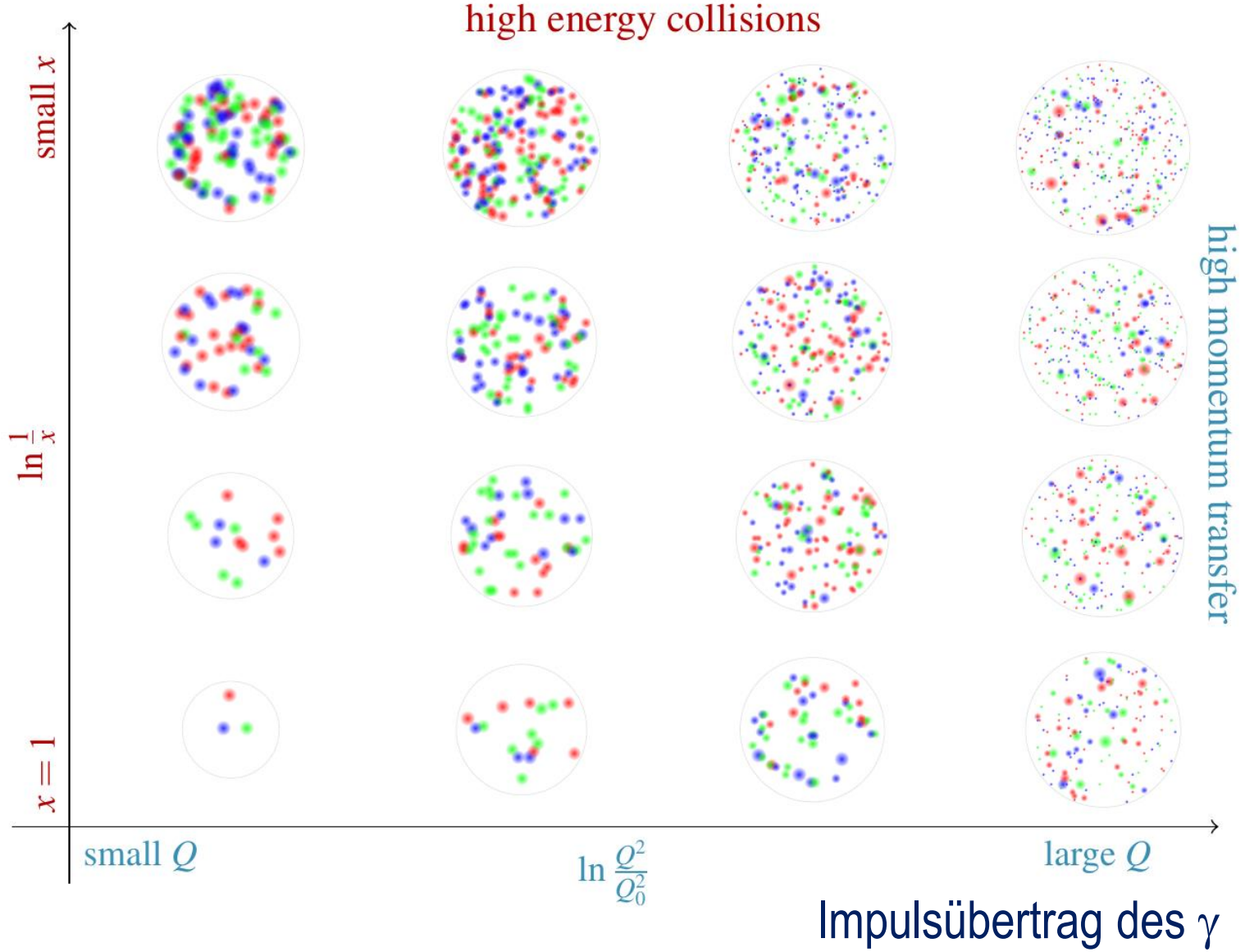
Impulsübertrag des γ

$$Q^2 = -q^2$$

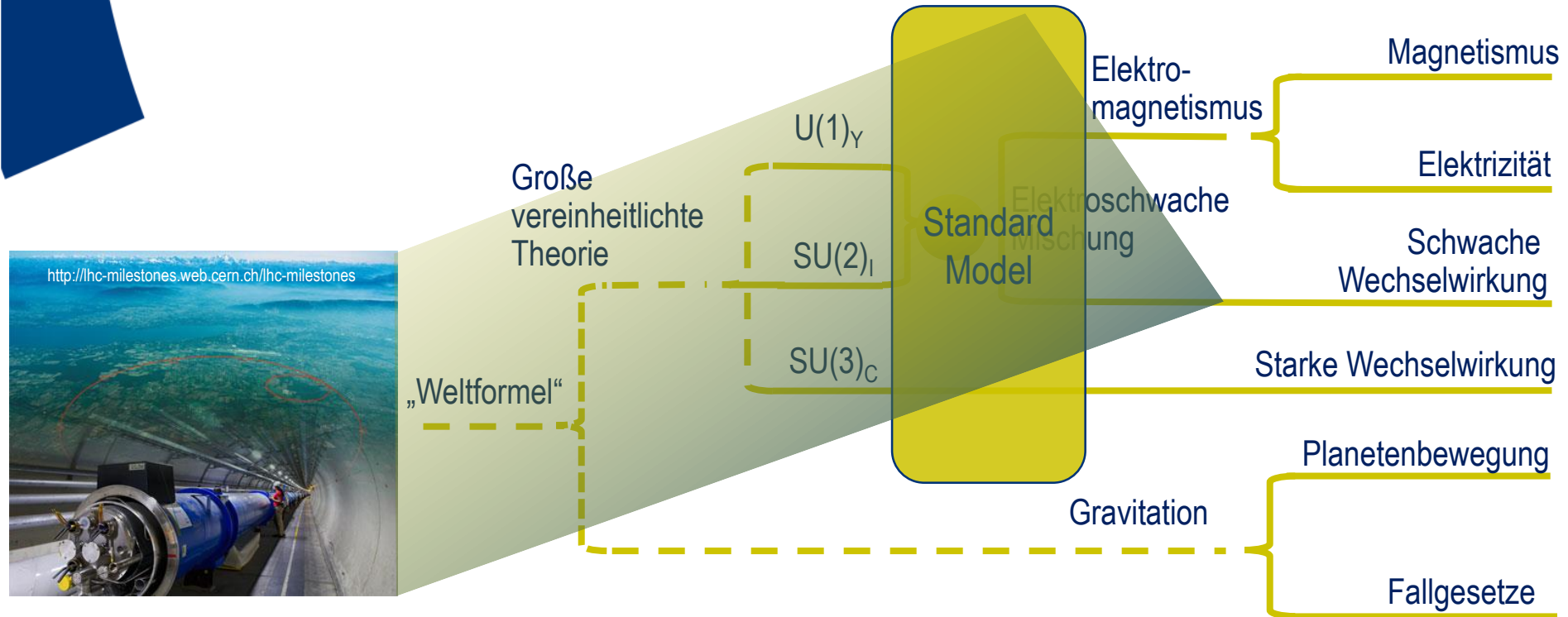
Auflösungsvermögen der Probe

$$\chi = \frac{Q^2}{2p_2 q}$$

Auflösungsvermögen der Probe



Bedeutung der Teilchenphysik für das „große Bild“



Evaluation



H.E.S.S. telescopes

- ▶ High Energy Stereoscopic System
- ▶ H.E.S.S. is a system of Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes that investigates cosmic gamma rays in the energy range from 10s of GeV to 10s of TeV.



Vielen Dank &
Gute Heimreise

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



DR. HANS RIEGEL-STIFTUNG



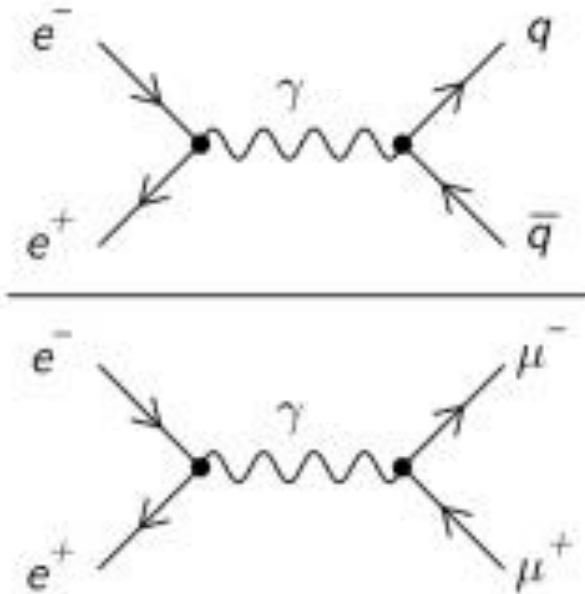
NETZWERK
TEILCHENWELT

Anzahl der Farben

- ▶ Idee: Messung des Verhältnisses von qq zu $\mu^+ \mu^-$

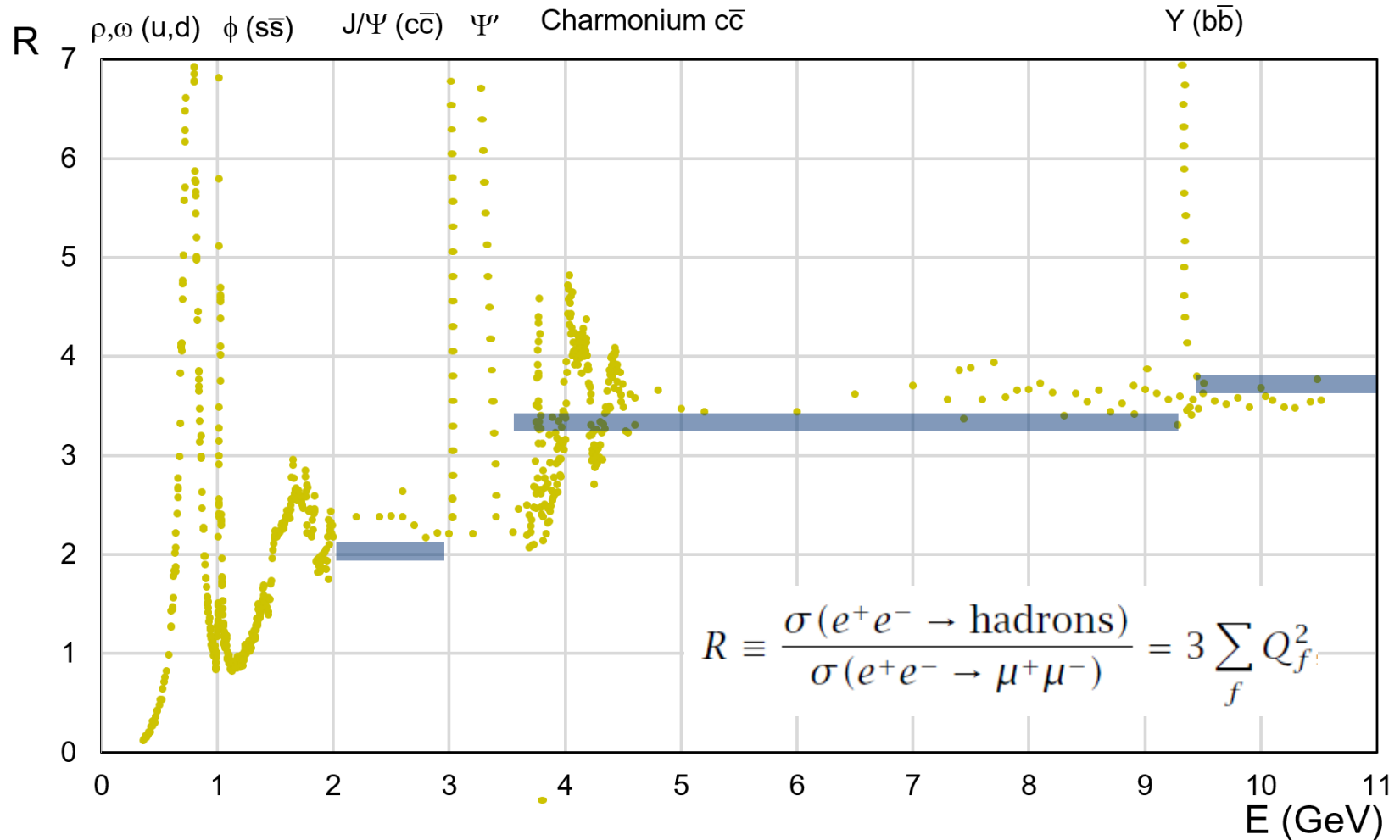
$$R = \frac{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+)}$$

\approx



$$\begin{aligned}
 R &= 3[(2/3)^2 + (1/3)^2 + (2/3)^2] = 2 \text{ for } u, d, s \\
 &= 2 + 3(2/3)^2 = 10/3 \text{ for } u, d, s, c, \\
 &= 10/3 + 3(1/3)^2 = 11/3 \text{ for } u, d, s, c, b.
 \end{aligned}$$

Anzahl der Farben



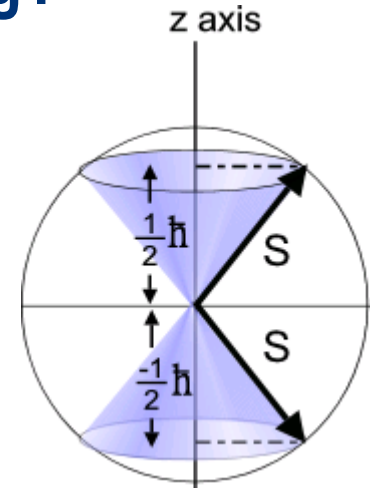
Einschub:

- ▶ Alle Kraftgesetze beinhalten den Abstand r
 - Bei kleinen Abständen $F \sim 1/r^2$
- ▶ Reichweiten sind Konsequenzen dieser Kraftgesetze
 - Unendlich: im Alltag spürbar
 - Endlich: nur subatomar
- ▶ Reihenfolge der Stärken
 - Kann für Kräfte nicht definiert werden wegen $F(r)$
 - Kann nur für Wechselwirkungen definiert werden: α !
- ▶ Stärken aller **Wechselwirkungen sehr** ähnlich (außer für Gravitation)

Basiskonzept:
Wechselwirkung
= Kraft + Umwandlung +
Erzeugung + Vernichtung

Exkurs: warum schwache „Isospin“-Ladung?

- ▶ Zugrundeliegende Symmetrie genau dieselbe wie bei Spin
- ▶ Jeweils Vektor mit 3 Komponenten
 - Spin $\mathcal{S} = (S_x, S_y, S_z)$ im Ortsraum
 - Schwacher Isospin $\mathbf{I}^W = (I_1^W, I_2^W, I_3^W)$ im abstrakten schwachen Isospinraum
- ▶ Messbar bei beiden nur:
 - Gesamter Betrag und eine Komponente (meist gewählt: die 3.)
 - die beiden anderen Komponenten sind „unscharf“ (Heisenberg)
- ▶ Wir sprechen daher nur von schwacher Ladungszahl $I := I_3^W$
- ▶ Ordnung in Multipletts von $I := I_3^W$

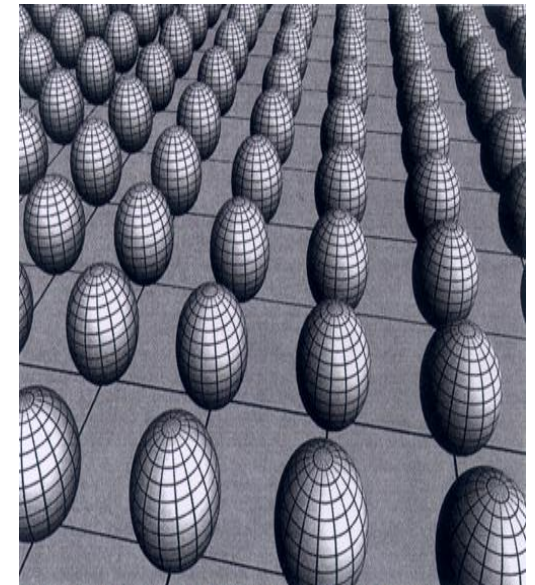
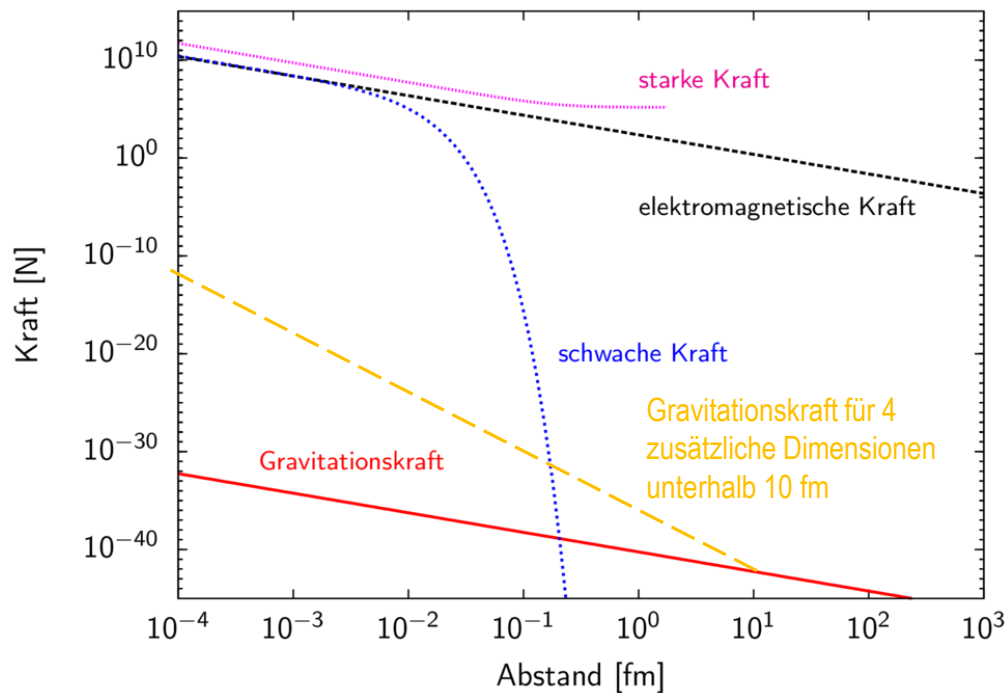


<http://de.wikipedia.org/wiki/Stern-Gerlach-Versuch>

$$\begin{pmatrix} I_3^W \\ +\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} : \left(\begin{matrix} \nu_e \\ e^- \end{matrix} \right), \left(\begin{matrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{matrix} \right), \dots, \left(\begin{matrix} u \\ d \end{matrix} \right), \dots, \left(\begin{matrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{matrix} \right), \dots, \left(\begin{matrix} \bar{d} \\ \bar{u} \end{matrix} \right), \dots, \left(\begin{matrix} \Phi^+ \\ \Phi^0 \end{matrix} \right) = \left(\begin{matrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{v} + H(\mathbf{x}) \end{matrix} \right) \quad \begin{pmatrix} I_3^W \\ +1 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} : \left(\begin{matrix} W^+ \\ Z^0 \\ W^- \end{matrix} \right)$$

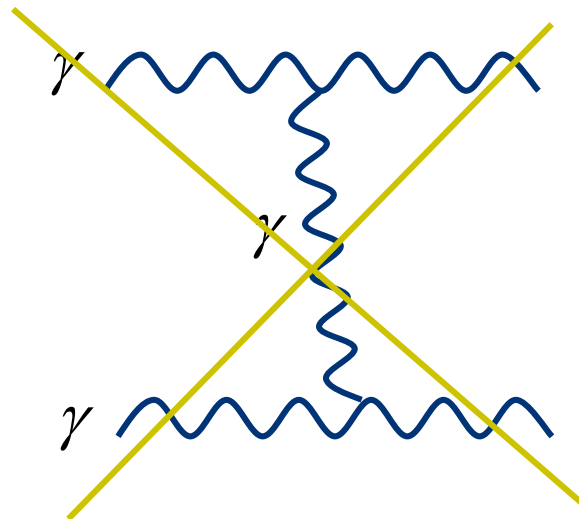
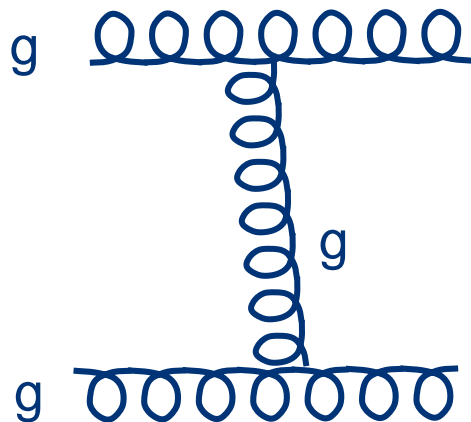
Spekulationen

- ▶ Zusätzliche Dimensionen für Gravitation könnten die Kräfte „vereinigen“



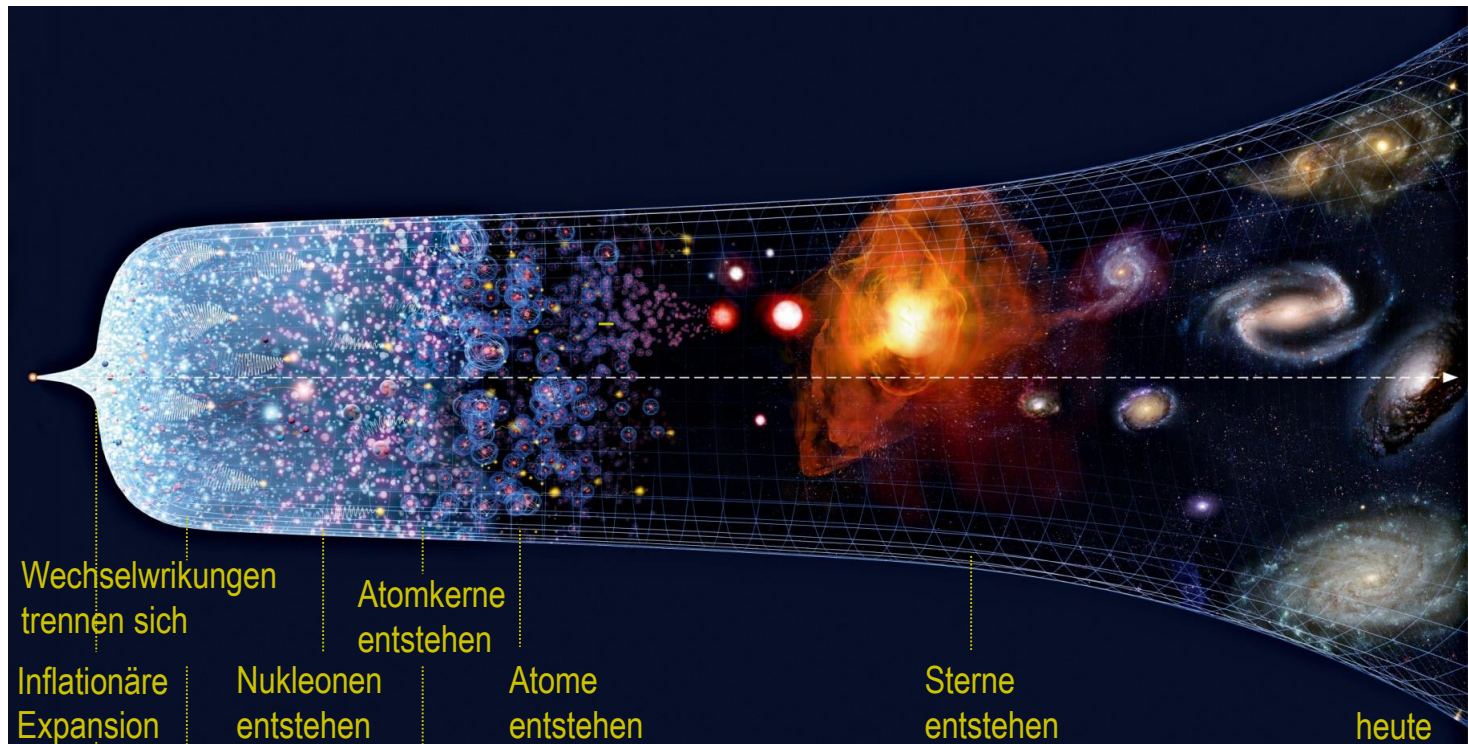
Glukon Selbstwechselwirkung

- ▶ Glukonen besitzen selbst starke Ladung
 - Glukonen können selbst Glukonen abstrahlen



Erzeugung extremer Bedingung

Urknall



Zeit



Energie



1202..2019 LHC-Energie

Forschung trifft Schule - Lehrerfortbildung Teilchenphysik - Hamburg DESY

Zustandsmischung

- ▶ **Die Mischungen der Quarks** in der schwachen Wechselwirkung **sind eher klein**
 - Größte Wahrscheinlichkeit für Umwandlung „innerhalb“ des jeweiligen Multipletts
- ▶ **Die Mischungen der Neutrinos** in der schwachen Wechselwirkung **sind dagegen fast maximal**
 - Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata-(PMNS)-Matrix
 - → Möglichkeit der „Neutrino Flavor-Oszillation“ $\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,82 & 0,55 & -0,15 \\ -0,33 & 0,60 & 0,73 \\ 0,46 & -0,58 & 0,67 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Schwache Ladungs-Eigenzustände

Massen Eigenzustände



Proton

- ▶ <https://physics.stackexchange.com/questions/81190/whats-inside-a-proton>