

Qualitative Aspekte des Standardmodells der Teilchenphysik

H. Leutwyler
Universität Bern

Eröffnungsveranstaltung DFG-Graduiertenkolleg

”Quanten- und Gravitationsfelder”

Jena, 18. Mai 2009

Standardmodell

Das Standardmodell ist ein Wunder:

- Seit langem ist bekannt, dass im Mikrokosmos drei verschiedenartige Kräfte am Werk sind:
starke, elektromagnetische, schwache Wechselwirkung
- Haben qualitativ völlig verschiedene Eigenschaften

Standardmodell

Das Standardmodell ist ein Wunder:

- Seit langem ist bekannt, dass im Mikrokosmos drei verschiedenartige Kräfte am Werk sind:
starke, elektromagnetische, schwache Wechselwirkung
- Haben qualitativ völlig verschiedene Eigenschaften

Alle drei werden durch gleichartige Felder erzeugt !

Eichfelder

Inserat der IG Physik, Gesellschaft mit besonderer Haftung, 1973

**Im Falle eines Falles
klebt ein EICHFELD
wirklich alles !**

Bezugsquellennachweis

J.C.Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford (1873)

H.Weyl, Z.Phys.56 (1929) 330

C.N.Yang and R.Mills, Phys.Rev.96 (1954) 191

Eichfelder

- Prototyp: elektromagnetisches Feld, Maxwell \sim 1860
überlebte sowohl die Relativitätstheorie als auch die Quantentheorie ohne jeden Schaden
- Quanten des Felds: Photonen, Einstein 1905

Eichfelder

- Prototyp: elektromagnetisches Feld, Maxwell \sim 1860
überlebte sowohl die Relativitätstheorie als auch die
Quantentheorie ohne jeden Schaden
- Quanten des Felds: Photonen, Einstein 1905
- Quelle des Felds: Ladung
Teilchensprache: $e^- \rightarrow e^- + \gamma$

Eichfelder

- Prototyp: elektromagnetisches Feld, Maxwell \sim 1860 überlebte sowohl die Relativitätstheorie als auch die Quantentheorie ohne jeden Schaden
- Quanten des Felds: Photonen, Einstein 1905
- Quelle des Felds: Ladung
Teilchensprache: $e^- \rightarrow e^- + \gamma$
- Feld erzeugt Kraft zwischen geladenen Teilchen
Wechselwirkungsenergie zwischen zwei Elektronen:

$$V = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \alpha_{em} \frac{\hbar c}{r}$$

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137.035999679(94)}$$

⇒ Stärke der e.m. Wechselwirkung \leftrightarrow reine Zahl

Eichfeld der starken Wechselwirkung

- Die starke Wechselwirkung beruht auf einem Eichfeld
- Quanten des Felds: “Gluonen” (glue = Klebstoff)

Eichfeld der starken Wechselwirkung

- Die starke Wechselwirkung beruht auf einem Eichfeld
- Quanten des Felds: “Gluonen” (glue = Klebstoff)
- Quarks haben eine innere Quantenzahl

treten in 3 “Farben” auf:

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

$$d = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix}$$

- Gluonen können Übergänge machen: $u_1 \rightarrow u_2 + G$

Eichfeld der starken Wechselwirkung

- Die starke Wechselwirkung beruht auf einem Eichfeld
- Quanten des Felds: “Gluonen” (glue = Klebstoff)
- Quarks haben eine innere Quantenzahl

treten in 3 “Farben” auf: $u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$ $d = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix}$

- Gluonen können Übergänge machen: $u_1 \rightarrow u_2 + G$
- Die Farbe ist die Quelle des Gluonfelds
Quarks tragen Farbe \Rightarrow erzeugen ein Gluonfeld
 \Rightarrow Quarks nehmen an der starken Wechselwirkung teil
- Elektronen und Photonen tragen keine Farbe
 \Rightarrow beteiligen sich nicht an der starken Wechselwirkung

Eichfeld der schwachen Wechselwirkung

- Die schwache Wechselwirkung beruht auf einem Eichfeld
- Quanten des Felds: W^+ , W^- , Z

Eichfeld der schwachen Wechselwirkung

- Die schwache Wechselwirkung beruht auf einem Eichfeld
- Quanten des Felds: W^+ , W^- , Z
- Innere Quantenzahl in diesem Fall: Flavour

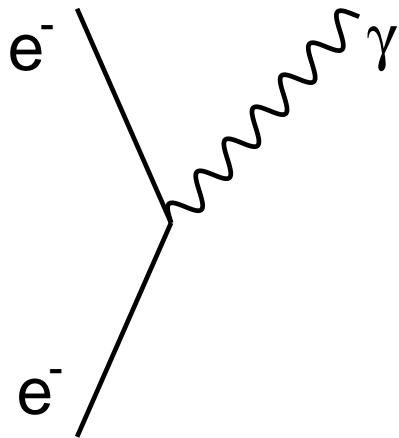
flavour = Geruch, Geschmack \rightarrow Eichfeld des Geruchs ?

e_L und ν_L bilden ein Dublett:
$$\begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$$

W, Z können Übergänge machen: $\nu_L \rightarrow e_L + W^+$

- Der Flavour ist die Quelle des schwachen Eichfelds
Quarks, Elektronen, Neutrini, ... alle tragen Flavour
 \Rightarrow beteiligen sich an der schwachen Wechselwirkung

Eichfelder in der Teilchensprache

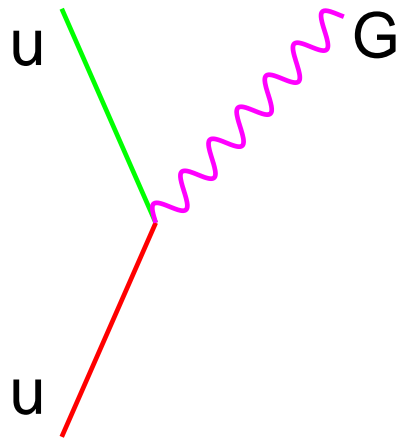


elektromagnetisch

QED

Ladung

Photon

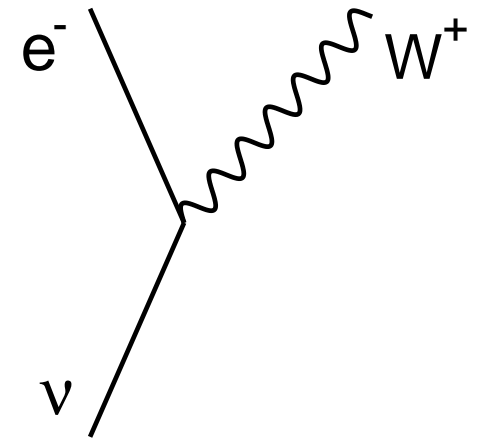


stark

QCD

Farbe

Gluonen



schwach

QFD

Flavour

W, Z

Verhalten bei kleinem Abstand

- Bei kleinem Abstand ($1 \text{ TeV} \leftrightarrow 2 \cdot 10^{-19} \text{ m}$)

sind alle Kräfte proportional zu $\frac{1}{r^2}$

$$V = \text{Konstante} \times \frac{\hbar c}{r} \quad \text{Wechselwirkungsenergie}$$

- Die Konstante ist eine reine Zahl
- ⇒ Stärke der Wechselwirkungen durch 3 Zahlen bestimmt

Verhalten bei kleinem Abstand

- Bei kleinem Abstand ($1 \text{ TeV} \leftrightarrow 2 \cdot 10^{-19} \text{ m}$)
sind alle Kräfte proportional zu $\frac{1}{r^2}$

$$V = \text{Konstante} \times \frac{\hbar c}{r} \quad \text{Wechselwirkungsenergie}$$

- Die Konstante ist eine reine Zahl
- ⇒ Stärke der Wechselwirkungen durch 3 Zahlen bestimmt

elektromagnetisch

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$$

stark

$$\frac{g_s^2}{4\pi}$$

schwach

$$\frac{g_w^2}{4\pi}$$

- ⇒ Natur verwendet lauter Felder vom Typ des e.m. Felds !
- Möglicherweise sind die 3 Wechselwirkungen bei ganz kleinen Abänden (10^{-30} m) sogar gleich stark (GUT)

Warum sind die 3 Wechselwirkungen so verschieden ?

- stark \simeq schwach ??
- $\frac{1}{r}$ – Gesetz beschreibt Kraft mit langer Reichweite
Sowohl die starke als auch die schwache Wechselwirkung haben kurze Reichweite !
- Photonen sieht man von Auge, Gluonen nicht etc. etc. etc.

Warum sind die 3 Wechselwirkungen so verschieden ?

- stark \simeq schwach ??
- $\frac{1}{r}$ – Gesetz beschreibt Kraft mit langer Reichweite
Sowohl die starke als auch die schwache Wechselwirkung haben kurze Reichweite !
- Photonen sieht man von Auge, Gluonen nicht etc. etc. etc.

Hat zwei Gründe

- Transparenz des Vakuums
- Photonen tragen keine Ladung, Gluonen tragen Farbe

Transparenz des Vakuums

- Zur Zeit von Torricelli (1608–1647), war das Vakuum ein angsterregender Zustand: **horror vacui**

Transparenz des Vakuums

- Zur Zeit von Torricelli (1608–1647), war das Vakuum ein angsterregender Zustand: **horror vacui**
- Das Nichts nichtet.

M. Heidegger

Transparenz des Vakuums

- Zur Zeit von Torricelli (1608–1647), war das Vakuum ein angsterregender Zustand: **horror vacui**
- Das Nichts nichtet. M. Heidegger
- Das Vakuum ist der Zustand mit der tiefsten Energie
Die Energie bleibt erhalten
- ⇒ Das Vakuum ist stabil. Physik

Transparenz des Vakuums

- Zur Zeit von Torricelli (1608–1647), war das Vakuum ein angsterregender Zustand: **horror vacui**
- Das Nichts nichtet. M. Heidegger
- Das Vakuum ist der Zustand mit der tiefsten Energie
Die Energie bleibt erhalten
⇒ Das Vakuum ist stabil. Physik
- Eigenschaften des Grundzustands werden durch die Dynamik bestimmt $H|0\rangle = 0$
- ⇒ Das Vakuum ist ein komplizierter Zustand
- Der Zustand mit der tiefsten Energie ist transparent für Photonen, aber opak für W,Z
- Warum ?

Standardmodell

Vakuum = Kondensat von Higgsteilchen

Standardmodell

Vakuum = Kondensat von Higgsteilchen

- Die Higgsteilchen **tragen keine Ladung**
- ⇒ Photonen bemerken diese gar nicht
- ⇒ Vakuum ist transparent für Photonen

Standardmodell

Vakuum = Kondensat von Higgsteilchen

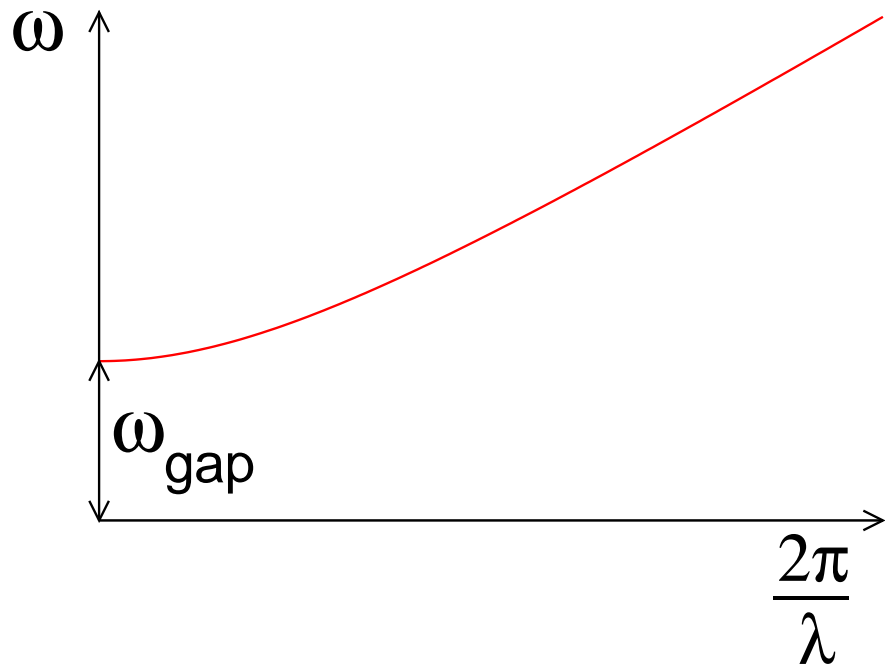
- Die Higgsteilchen **tragen keine Ladung**
 - ⇒ Photonen bemerken diese gar nicht
 - ⇒ Vakuum ist transparent für Photonen
- Die Higgsteilchen **tragen keine Farbe**
 - ⇒ Gluonen bemerken diese gar nicht
 - ⇒ Vakuum ist transparent für Gluonen

Standardmodell

Vakuum = Kondensat von Higgsteilchen

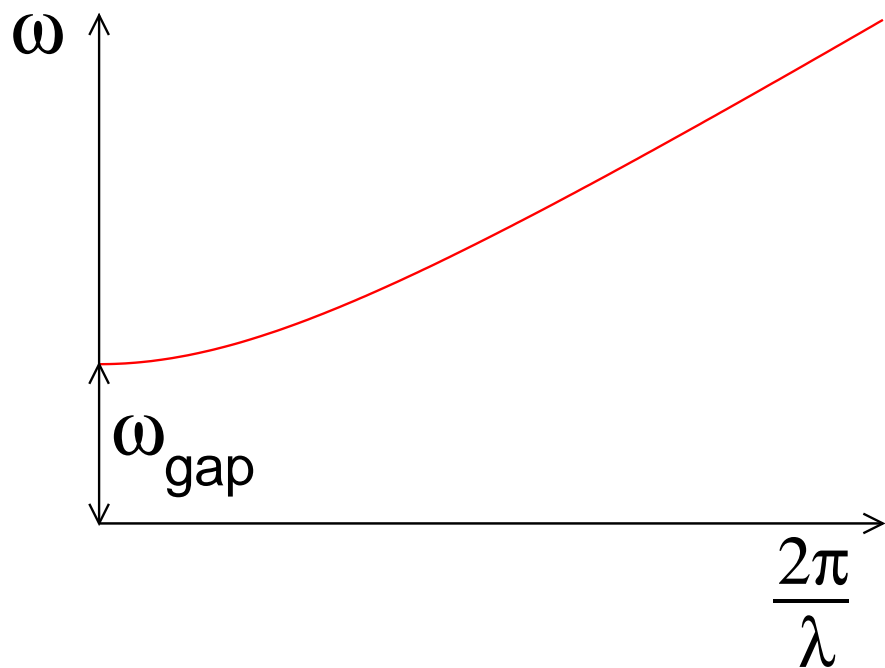
- Die Higgsteilchen **tragen keine Ladung**
 - ⇒ Photonen bemerken diese gar nicht
 - ⇒ Vakuum ist transparent für Photonen
- Die Higgsteilchen **tragen keine Farbe**
 - ⇒ Gluonen bemerken diese gar nicht
 - ⇒ Vakuum ist transparent für Gluonen
- Die Higgsteilchen **tragen Flavour**
 - ⇒ W,Z bemerken sie
 - ⇒ W,Z-Wellen tiefer Frequenz können sich im Vakuum nicht ausbreiten
 - ⇒ Für solche Wellen ist das Vakuum opak

Frequenz als Funktion der Wellenzahl



$$\hbar\omega_{\text{gap}} = E_{\text{gap}} = Mc^2$$

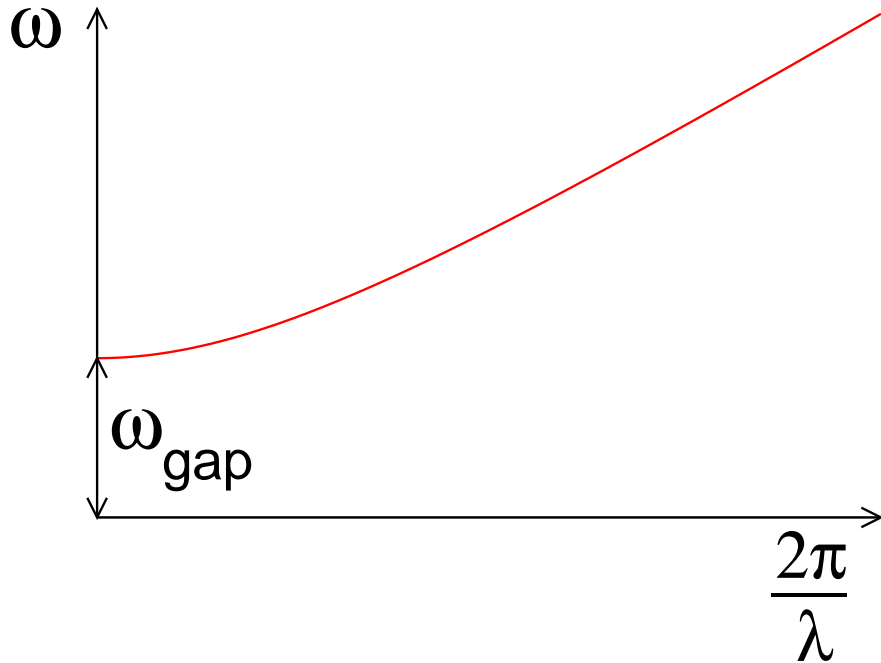
Frequenz als Funktion der Wellenzahl



$$\hbar\omega_{\text{gap}} = E_{\text{gap}} = Mc^2$$

- $M_\gamma, M_G = 0 \Rightarrow \gamma, G$ bewegen sich mit $v = c$
- $M_W, M_Z \neq 0 \Rightarrow W, Z$ bewegen sich mit $v < c$

Frequenz als Funktion der Wellenzahl



$$\hbar\omega_{\text{gap}} = E_{\text{gap}} = Mc^2$$

- $M_\gamma, M_G = 0 \Rightarrow \gamma, G$ bewegen sich mit $v = c$
- $M_W, M_Z \neq 0 \Rightarrow W, Z$ bewegen sich mit $v < c$
- Eindringtiefe bei tiefer Frequenz:

$$d = \frac{\hbar}{Mc} \quad d_W, d_Z \sim 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$$

Konsequenz für Stärke der schwachen Wechselwirkung

- Wechselwirkung wird für $r \gtrsim d$ reduziert:

$$\frac{g_w^2}{4\pi r} \Rightarrow \frac{g_w^2}{4\pi r} \cdot e^{-\frac{r}{d}}$$

- Eindringtiefe der schwachen Wechselwirkung ist klein:

$$d = \frac{\hbar}{M_W c} = 2.4542(9) \times 10^{-18} \text{ m}$$

⇒ Schwache Wechselwirkung hat sehr kurze Reichweite

Konsequenz für Stärke der schwachen Wechselwirkung

- Wechselwirkung wird für $r \gtrsim d$ reduziert:

$$\frac{g_w^2}{4\pi r} \Rightarrow \frac{g_w^2}{4\pi r} \cdot e^{-\frac{r}{d}}$$

- Eindringtiefe der schwachen Wechselwirkung ist klein:

$$d = \frac{\hbar}{M_W c} = 2.4542(9) \times 10^{-18} \text{ m}$$

⇒ Schwache Wechselwirkung hat sehr kurze Reichweite

- Effektive Stärke bei kleinen Energien:

$$\int d^3 r \frac{g_w^2}{4\pi r} \cdot e^{-\frac{r}{d}} = g_w^2 d^2$$

⇒ Darum ist die schwache Wechselwirkung schwach

Fermikonstante

- Die erste Formulierung der schwachen Wechselwirkung stammt von Fermi, 1933/34
- Die Fermikonstante gibt ihre effektive Stärke an

Im Standardmodell :

$$G_F = \frac{\hbar c}{4\sqrt{2}} g_w^2 d^2 = \frac{\hbar^3}{4\sqrt{2} c} \frac{g_w^2}{M_W^2}$$

Fermikonstante

- Die erste Formulierung der schwachen Wechselwirkung stammt von Fermi, 1933/34
- Die Fermikonstante gibt ihre effektive Stärke an

Im Standardmodell :

$$G_F = \frac{\hbar c}{4\sqrt{2}} g_w^2 d^2 = \frac{\hbar^3}{4\sqrt{2} c} \frac{g_w^2}{M_W^2}$$

- Experimentelle Werte für G_F und M_W \Rightarrow

$$\frac{g_w^2}{4\pi} = \frac{1}{29.461(21)}$$

Charakterisiert die schwache Wechselwirkung

Fermikonstante

- Die erste Formulierung der schwachen Wechselwirkung stammt von Fermi, 1933/34

- Die Fermikonstante gibt ihre effektive Stärke an

Im Standardmodell :

$$G_F = \frac{\hbar c}{4\sqrt{2}} g_w^2 d^2 = \frac{\hbar^3}{4\sqrt{2} c} \frac{g_w^2}{M_W^2}$$

- Experimentelle Werte für G_F und $M_W \Rightarrow$

$$\frac{g_w^2}{4\pi} = \frac{1}{29.461(21)}$$

schwach

Charakterisiert die schwache Wechselwirkung

- Ist etwa 5 mal grösser als die Feinstrukturkonstante

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137.035999679(94)}$$

elektromagnetisch

Konsequenz für Leptonen und Quarks

- Leptonen, Quarks bemerken das Higgskondensat auch
⇒ erhalten eine Masse, wie W, Z
- t -Quark wechselwirkt sehr stark mit den Higgsteilchen
Elektronen, Neutrini bemerken sie kaum
⇒ $m_t \gg m_e, m_\nu$

Konsequenz für Leptonen und Quarks

- Leptonen, Quarks bemerken das Higgskondensat auch
⇒ erhalten eine Masse, wie W, Z

- t -Quark wechselwirkt sehr stark mit den Higgsteilchen
Elektronen, Neutrini bemerken sie kaum

⇒ $m_t \gg m_e, m_\nu$

- Das beobachtete Spektrum ist bizarr:

$$m_t = 171.2(2.1) \text{ GeV}/c^2$$

$$m_s \simeq 100 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_d \simeq 5 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_u \simeq 2.5 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_e = 0.510998910(13) \text{ MeV}/c^2$$

PDG 2008 ($\overline{\text{MS}}, \mu = 2 \text{ GeV}$)

Neutrini noch leichter, um Größenordnungen

- Die Massen der Leptonen und Quarks sind völlig unverstanden

Grösse der Atome

$$a_{\text{Bohr}} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar c}{e^2} \times \frac{\hbar}{m_e c}$$

- Elektron-Higgs Wechselwirkung ist schwach
⇒ Elektronen erhalten nur wenig Masse

Grösse der Atome

$$a_{\text{Bohr}} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar c}{e^2} \times \frac{\hbar}{m_e c}$$

- Elektron-Higgs Wechselwirkung ist schwach
⇒ Elektronen erhalten nur wenig Masse
- e ist eine der 3 Grundkonstanten

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \simeq \frac{1}{137} \quad \text{ist klein}$$

- ⇒ Vom Standardmodell her gesehen sind die Atome riesig

Grösse der Atome

$$a_{\text{Bohr}} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{e^2 m_e} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar c}{e^2} \times \frac{\hbar}{m_e c}$$

- Elektron-Higgs Wechselwirkung ist schwach
- ⇒ Elektronen erhalten nur wenig Masse
- e ist eine der 3 Grundkonstanten

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \simeq \frac{1}{137} \quad \text{ist klein}$$

- ⇒ Vom Standardmodell her gesehen sind die Atome riesig
- Myonen reagieren 200 mal stärker auf das Kondensat
- ⇒ Myonische Atome sind 200 mal kleiner aber leben nur 2 Mikrosekunden lang

Unterschied elektromagnetische \leftrightarrow starke Wechselwirkung

Habe bis hier nur einen der beiden Gründe diskutiert, die zu einem unterschiedlichen Verhalten der Eichfelder führen: Transparenz des Vakuums

In dieser Beziehung gibt es gar keinen Unterschied zwischen Photonen und Gluonen

Wo kommt der Unterschied zwischen der starken und der e.m. Wechselwirkung her ?

Unterschied elektromagnetische \leftrightarrow starke Wechselwirkung

Habe bis hier nur einen der beiden Gründe diskutiert, die zu einem unterschiedlichen Verhalten der Eichfelder führen: Transparenz des Vakuums

In dieser Beziehung gibt es gar keinen Unterschied zwischen Photonen und Gluonen
Wo kommt der Unterschied zwischen der starken und der e.m. Wechselwirkung her ?

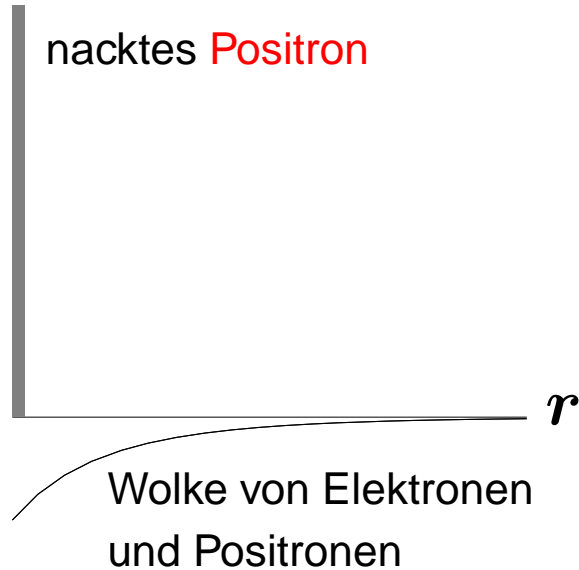
- Photonen tragen keine Ladung

- Gluonen tragen Farbe

⇒ Die starke Wechselwirkung verhält sich zwar bei kleinem Abstand gleich wie die elektromagnetische, aber bei grossem Abstand unterscheiden sich die beiden wie Tag und Nacht

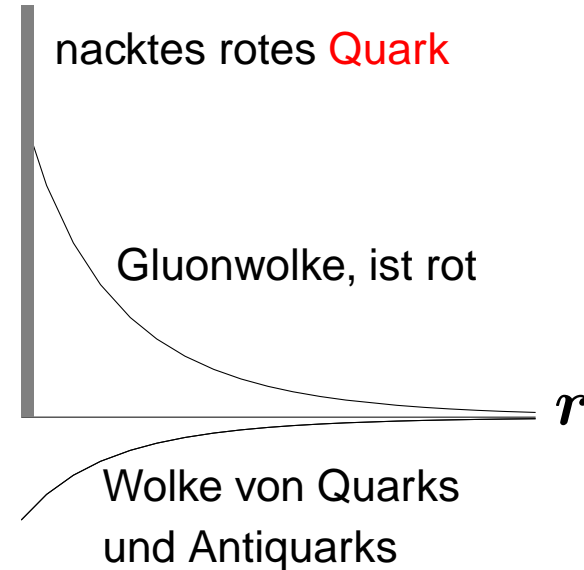
Vakuumpolarisation

QED
Ladungsdichte



$$e < e^0$$

QCD
Farbdichte



$$g_s > g_s^0$$

Vakuum schirmt Ladung ab

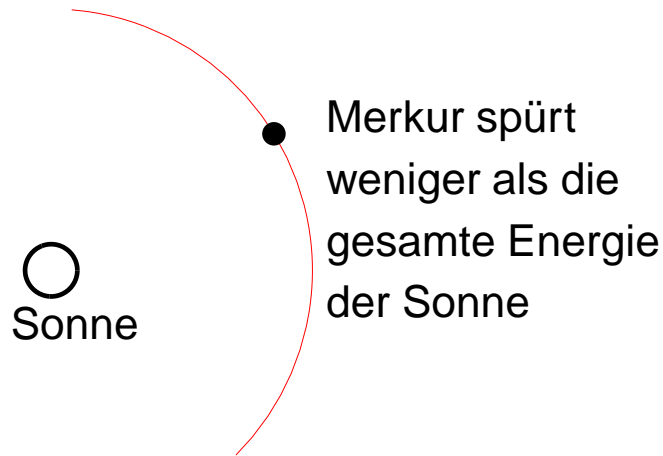
Vakuum verstärkt Farbe

⇒ Die starke Wechselwirkung polarisiert das Vakuum anders als die elektromagnetische

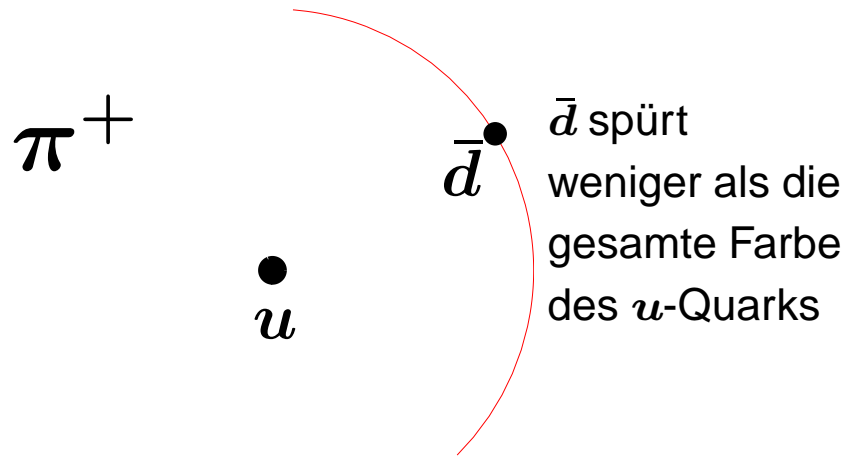
Vergleich mit der Gravitation

- Quelle des Gravitationsfelds: **Energie**
Gravitationsfeld trägt selbst **Energie**
- Quelle des Gluonfelds: **Farbe**
Gluonfeld trägt selbst **Farbe**
- Quelle des elektromagnetischen Felds: **Ladung**
elektromagnetisches Feld trägt **keine Ladung**

Gravitation



starke Wechselwirkung



Perihelverschiebung : $43'' = 50'' - 7''$ pro J.h.



Konsequenz der Abschirmung/Verstärkung

- Vakuum verstärkt das Gluonfeld
Vakuum schirmt das elektrische Feld ab
- Der Unterschied hat dramatische Konsequenzen: obschon die LagrangeFunktionen von QCD und QED sehr ähnlich sind, verhalten sich die starken und elektromagnetischen Wechselwirkungen bei grossem Abstand ganz verschieden

Konsequenz der Abschirmung/Verstärkung

- Vakuum verstärkt das Gluonfeld
Vakuum schirmt das elektrische Feld ab
- Der Unterschied hat dramatische Konsequenzen: obschon die LagrangeFunktionen von QCD und QED sehr ähnlich sind, verhalten sich die starken und elektromagnetischen Wechselwirkungen bei grossem Abstand ganz verschieden
- Feldenergie eines isolierten Quarks = ∞
nur farbneutrale Zustände haben endliche Energie
- ⇒ Farbe wird eingesperrt
"confinement", "infrared slavery"
- Feldenergie eines geladenen Teilchens ist endlich
- ⇒ Ladungen werden nicht eingesperrt
- Kernkraft = van-der-Waals-Kraft der QCD

Wechselwirkung bei grossen Abständen, kleinen Energien

QED bleibt schwach

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \simeq \frac{1}{137}$$

Photonen, Leptonen
hängen fast ab

QCD wird stark

$$\frac{g_s^2}{4\pi} \simeq 1$$

Gluonen, Quarks
werden eingesperrt

Wechselwirkung bei grossen Abständen, kleinen Energien

QED bleibt schwach

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$$

Photonen, Leptonen
hängen fast ab

QCD wird stark

$$\frac{g_s^2}{4\pi} \simeq 1$$

Gluonen, Quarks
werden eingesperrt

- QED: Spektrum der physikalischen Zustände an der Lagrangefunktion abzulesen: Photonen, Elektronen

Wechselwirkung bei grossen Abständen, kleinen Energien

QED bleibt schwach

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \simeq \frac{1}{137}$$

Photonen, Leptonen
hängen fast ab

QCD wird stark

$$\frac{g_s^2}{4\pi} \simeq 1$$

Gluonen, Quarks
werden eingesperrt

- QED: Spektrum der physikalischen Zustände an der Lagrangefunktion abzulesen: Photonen, Elektronen
- QCD: Gluonen, Quarks in \mathcal{L} , aber weder Gluonen noch Quarks im Spektrum, sondern Mesonen, Baryonen

Wechselwirkung bei grossen Abständen, kleinen Energien

QED bleibt schwach

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \simeq \frac{1}{137}$$

Photonen, Leptonen
hängen fast ab

QCD wird stark

$$\frac{g_s^2}{4\pi} \simeq 1$$

Gluonen, Quarks
werden eingesperrt

- QED: Spektrum der physikalischen Zustände an der Lagrangefunktion abzulesen: Photonen, Elektronen
- QCD: Gluonen, Quarks in \mathcal{L} , aber weder Gluonen noch Quarks im Spektrum, sondern Mesonen, Baryonen

O. Klein und W. Pauli hatten für die starke Wechselwirkung schon sehr früh nichtabelsche Eichfelder in Betracht gezogen, aber die Idee bald fallen lassen, weil sie glaubten, sie widerspreche dem Experiment: masselose Gluonen (analog γ) werden nicht beobachtet.

Kleine Distanzen, hohe Energien

- Bei kleinen Abständen ist die Störungstheorie auf die QCD anwendbar: tief inelastische Streuung, quark jets, gluon jets
- Formel für das Potential zwischen u und \bar{u} (führende Ordnung der Störungstheorie):

$$V = -\frac{4}{3} \frac{g_s^2}{4\pi r}, \text{ mit } \frac{g_s^2}{4\pi} = \frac{2\pi}{7 |\ln(r\Lambda_{\text{QCD}})|}$$

Gilt nur bei kleinem Abstand: $g_s \rightarrow 0$ für $r \rightarrow 0$

"asymptotische Freiheit"

Logarithmus muss gross sein

- Experimenteller Wert bei $r = \frac{\hbar}{M_Z c} \simeq 2 \cdot 10^{-18}$ m:

$$\frac{g_s^2}{4\pi} = \frac{1}{8.50 \pm 0.15} \Rightarrow |\ln(r\Lambda_{\text{QCD}})| \simeq 8$$

Vergleich der Kopplungskonstanten

- Vergleich bei $r = \frac{\hbar}{M_Z c} \simeq 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$

- Starke Kopplungskonstante : $\frac{g_s^2}{4\pi} = \frac{1}{8.50 \pm 0.15}$

- Feinstrukturkonstante : $\frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{128.922 \pm 0.049}$

- Ausgezeichnete experimentelle Evidenz für Skalenabhängigkeit (nicht nur g_s , auch e und g_w)

⇒ Vakuumpolarisation spielt eine zentrale Rolle in unserem Verständnis der Naturgesetze

Beispiel: Magnetisches Moment des Myons

$$\mu = \frac{e \hbar}{2 m_{\mu}} \quad \text{Dirac}$$

Beispiel: Magnetisches Moment des Myons

$$\mu = \frac{e \hbar}{2 m_\mu} \quad \text{Dirac}$$

- Quantenfluktuationen erzeugen Korrekturen

$$\mu = \frac{e \hbar}{2 m_\mu} \{1 + a\}$$

$2(1 + a)$ heisst auch " g -Faktor" des Myons

Beispiel: Magnetisches Moment des Myons

$$\mu = \frac{e \hbar}{2 m_{\mu}} \quad \text{Dirac}$$

- Quantenfluktuationen erzeugen Korrekturen

$$\mu = \frac{e \hbar}{2 m_{\mu}} \{1 + a\}$$

$2(1 + a)$ heisst auch " g -Faktor" des Myons

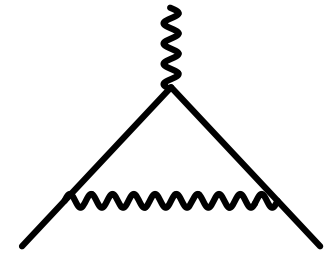
- Standardmodell legt den Wert von a fest, aber die Vorhersage ist nur approximativ auswertbar
- μ ist zu fantastischer Präzision gemessen:

$$a_{\text{exp}} = (11\,659\,208.0 \pm 6.3) \times 10^{-10}$$

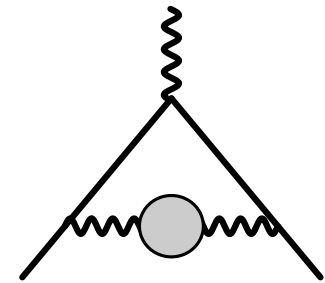
Beitrag der Vakuumpolarisation

- Führende Korrektur:

$$a = \frac{\alpha_{em}}{2\pi} + O(\alpha_{em}^2) \quad \text{Schwinger}$$



- Die Beiträge der $O(\alpha_{em}^2)$ sind auch explizite bekannt, mit Ausnahme des Effekts der hadronischen Vakuumpolarisation



- Beitrag der hVp kann durch den Wirkungsquerschnitt für $e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen}$ ausgedrückt werden

$$\Rightarrow a_{hVp} = (690.9 \pm 3.9_{\text{exp}} \pm 2.0_{\text{theo}}) \times 10^{-10}$$

Eidelman, Workshop on τ Lepton Physics (Novosibirsk, 2008), arXiv : 0904.3275

Vergleich mit der Theorie

● Theoretische “Vorher”sage

Jegerlehner, *The muon g-2: Status and perspectives*, Lect. Notes Phys. 745 (2008) 9

Jegerlehner and Nyffeler, arXiv:0902.3360

$$1 + a_{\text{theo}} = 1.001\,165\,918\,03(56)$$

$$1 + a_{\text{exp}} = 1.001\,165\,920\,80(63)$$

⇒ Experiment und Theorie stimmen auf 8 Stellen überein !

Vergleich mit der Theorie

● Theoretische “Vorher”sage

Jegerlehner, *The muon g-2: Status and perspectives*, Lect. Notes Phys. 745 (2008) 9

Jegerlehner and Nyffeler, arXiv:0902.3360

$$1 + a_{\text{theo}} = 1.001\,165\,918\,03(56)$$

$$1 + a_{\text{exp}} = 1.001\,165\,920\,80(63)$$

⇒ Experiment und Theorie stimmen auf 8 Stellen überein !

● Unterschied zwischen Theorie und Experiment:

$$|a_{\text{exp}} - a_{\text{theo}}| = 27.7 \pm 8.4 \times 10^{-10}$$

Macht 3.3 Standardabweichungen aus

Andere Autoren erhalten etwas andere Werte, aber alle liefern eine Diskrepanz von etwa 3σ

⇒ Standardmodell stimmt zwar bemerkenswert gut mit der Beobachtung überein, aber ganz richtig ist es nicht

Energielücke der QCD

- Energielücke: Differenz zwischen der Energie des Grundzustands und des ersten angeregten Zustands
Massgebend für das Verhalten bei kleinen Energien
- Teilchenphysik: (Masse des leichtesten Teilchens) $\times c^2$
QCD: Energielücke = M_π ($\hbar = c = 1$ gesetzt)

Energielücke der QCD

- Energielücke: Differenz zwischen der Energie des Grundzustands und des ersten angeregten Zustands
Massgebend für das Verhalten bei kleinen Energien
- Teilchenphysik: (Masse des leichtesten Teilchens) $\times c^2$
QCD: Energielücke = M_π ($\hbar = c = 1$ gesetzt)
- M_π etwa $7 \times$ kleiner als M_{Proton}
- ⇒ Energielücke der QCD ist erstaunlich klein
- ⇒ Reichweite der Kernkräfte ist viel grösser als die Reichweite der schwachen Wechselwirkung

Warum ist die Energielücke der QCD so klein ?

- 1960 entdeckte Nambu den Grund Nobelpreis 2008
 - Die starke Wechselwirkung hat eine versteckte approximative Symmetrie
 - Hamiltonoperator ist näherungsweise symmetrisch, aber der Zustand mit der tiefsten Energie ist es nicht
- ⇒ Symmetrie versteckt, "spontan gebrochen"
- Phänomen wurde in der Festkörperphysik entdeckt: Spontane Magnetisierung

Spontane Magnetisierung

- Heisenbergmodell eines Ferromagneten
 - Gitter von Teilchen, Wechselwirkung zwischen Spins
 - Hamiltonoperator ist drehinvariant
 - Im Zustand mit der tiefsten Energie zeigen alle Spins in dieselbe Richtung: Spontane Magnetisierung
- ⇒ Grundzustand nicht drehinvariant
 - Symmetrie gegenüber Drehungen gar nicht sichtbar
Symmetrie ist versteckt, spontan gebrochen
- Nambu realisierte, dass auch in der Teilchenphysik Symmetrien spontan zusammenbrechen können

Wo ist Nambu's approximative Symmetrie in der QCD ?

- Die drei Quarks u, d, s haben nur wenig Masse

Wo ist Nambu's approximative Symmetrie in der QCD ?

- Die drei Quarks u, d, s haben nur wenig Masse
- Theoretikerparadies:

$$m_u = m_d = m_s = 0$$

$$m_c = m_b = m_t = \infty$$

QCD mit 3 masselosen Quarks

Wo ist Nambu's approximative Symmetrie in der QCD ?

- Die drei Quarks u, d, s haben nur wenig Masse
- Theoretikerparadies:

$$m_u = m_d = m_s = 0$$

$$m_c = m_b = m_t = \infty$$

QCD mit 3 masselosen Quarks

- Ideal einer Theorie: durch Λ_{QCD} charakterisiert
Enthält keinen einzigen dimensionslosen Parameter
- ⇒ Alle dimensionslosen Größen sind im Prinzip berechenbar. Wirkungsquerschnitte, Masse des Protons etc. lassen sich in Einheiten von Λ_{QCD} angeben

Es wäre fabelhaft schön, wenn sich die Naturgesetze so erfassen liessen

Symmetrien der masselosen QCD

- QCD: Kräfte entstehen ausschliesslich durch Kopplung an die Gluonen
- u, d, s haben dieselbe Kopplung
- ⇒ Für $m_u = m_d = m_s$ gibt es überhaupt keinen Unterschied zwischen u, d, s
- ⇒ Theorie invariant unter "Drehungen" im Flavourraum:

$$q = \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix} \quad q' = V \cdot q \quad V \in \text{SU}(3)$$

Chirale Symmetrie

● Masselose Quarks: Linke reden nicht mit den Rechten

⇒ Masselose QCD ist invariant unter unabhängigen "Drehungen" der linken und rechten Quarkflavours:

$$q_R = \frac{1}{2}(1 + \gamma_5) q, \quad q_L = \frac{1}{2}(1 - \gamma_5) q$$

$$q'_R = V_R \cdot q_R \quad q'_L = V_L \cdot q_L$$

Exakte chirale Symmetrie: $SU(3)_L \times SU(3)_R$

Chirale Symmetrie ist spontan gebrochen

- Aussage über die Dynamik: Zustand mit der tiefsten Energie ist nicht invariant unter chiralen "Drehungen"
- Beweis ?
 - Analytisches Verständnis des Vakuums bescheiden
 - Gitterrechnungen liefern sehr gute Evidenz für den spontanen Zusammenbruch der chiralen Symmetrie
 - Sehr schöne experimentelle Bestätigungen der theoretischen Vorhersagen, die aus dem Symmetriezusammenbruch folgen
 - Eine der theoretischen Konsequenzen: Goldstone theorem

Goldstone, Salam, Weinberg 1962

Goldstone-Bosonen

- Goldstone theorem:

Spontan gebrochene exakte Symmetrie \Rightarrow Spektrum enthält masselose Teilchen, "Goldstone-Bosonen"

Goldstone-Bosonen

- Goldstone theorem:
Spontan gebrochene exakte Symmetrie \Rightarrow Spektrum enthält masselose Teilchen, "Goldstone-Bosonen"
- QCD mit 3 masselosen Quarks: 8 GB, mit den Quantenzahlen von $\pi^+, \pi^0, \pi^-, K^+, K^0, \bar{K}^0, K^-, \eta$
- In der Tat haben die 8 leichtesten Hadronen diese Q.z.

Goldstone-Bosonen

- Goldstone theorem:
Spontan gebrochene exakte Symmetrie \Rightarrow Spektrum enthält masselose Teilchen, "Goldstone-Bosonen"
- QCD mit 3 masselosen Quarks: 8 GB, mit den Quantenzahlen von π^+ , π^0 , π^- , K^+ , K^0 , \bar{K}^0 , K^- , η
- In der Tat haben die 8 leichtesten Hadronen diese Q.z.
... aber masselos sind sie nicht !

Welt \neq Paradies

Welt \neq Paradies

● m_u, m_d, m_s sind zwar klein, aber $\neq 0$

Welt \neq Paradies

- m_u, m_d, m_s sind zwar klein, aber $\neq 0$
Quarkmassen verletzen die chirale Symmetrie
- ⇒ QCD hat nur näherungsweise eine chirale Symmetrie
- ⇒ Goldstone-Bosonen nicht masselos, nur leicht

Welt \neq Paradies

- m_u, m_d, m_s sind zwar klein, aber $\neq 0$
Quarkmassen verletzen die chirale Symmetrie
- \Rightarrow QCD hat nur näherungsweise eine chirale Symmetrie
- \Rightarrow Goldstone-Bosonen nicht masselos, nur leicht

- Wie hängen M_π oder M_K von m_u, m_d, m_s ab ?

$$M_{\pi^+}^2 = (m_u + m_d)B$$

Gell-Mann, Oakes, Renner 1968

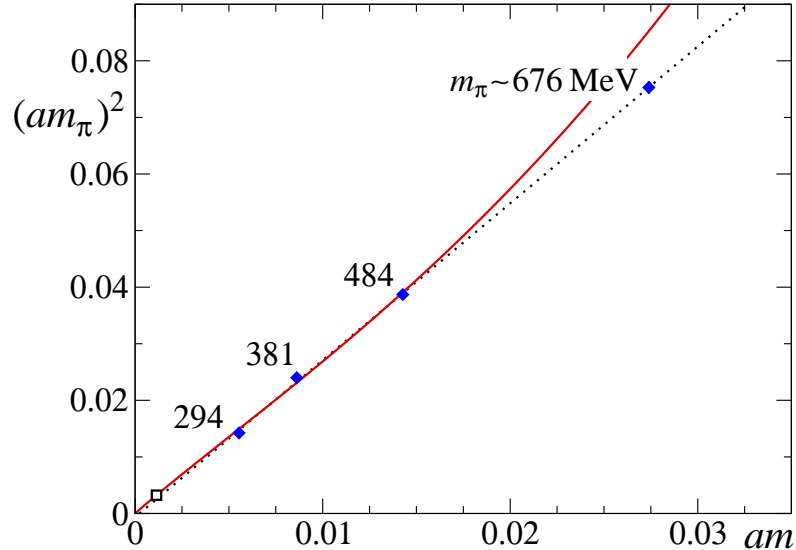
$$M_{K^+}^2 = (m_u + m_s)B$$

- $m_q \rightarrow 0 \Rightarrow$ exakte Symmetrie $\Rightarrow M_{\text{GB}} \rightarrow 0$ ✓
- $M_{\text{GB}}^2 \propto m_q$
- $m_u, m_d \ll m_s \Rightarrow M_\pi \ll M_K$
- m_u, m_d besonders klein $\Rightarrow \text{SU}(2)_L \times \text{SU}(2)_R$ fast exakt
- $\Rightarrow \pi$ -Meson besonders leicht

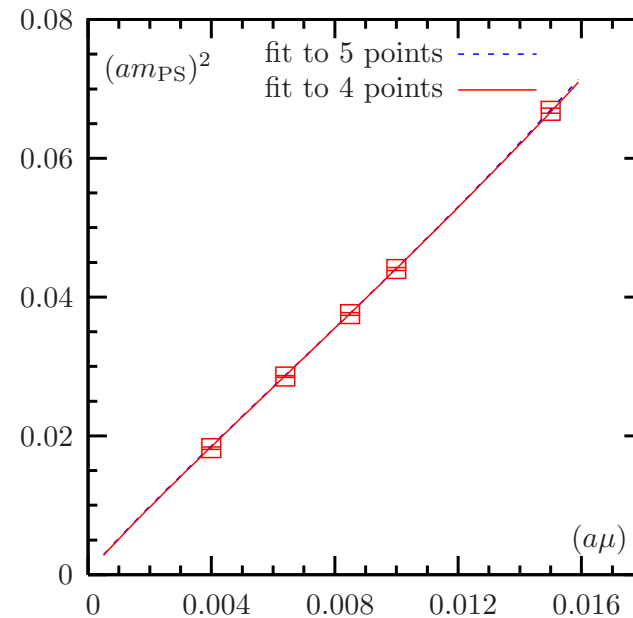
Nambu 1960 ✓

Ab-initio-Rechnung auf dem Gitter

- In Gitterrechnungen können die Quarkmassen variiert werden. Es ist sehr aufwändig, m_u, m_d kleiner zu machen als in natura, aber grösser machen geht gut



Lüscher, Lattice conference 2005



ETM collaboration, hep-lat/0701012

- $M_\pi^2 \propto (m_u + m_d)$

GMOR ✓

Zusammenfassung

1. Eichfelder

- Mit Ausnahme der Gravitation beruhen alle Kräfte, von denen wir bisher Kenntnis haben, auf Eichfeldern
- Prototyp: elektromagnetisches Feld, QED, γ
- schwache Wechselwirkung: QFD, W , Z
- starke Wechselwirkung: QCD, G

2. Transparenz des Vakuums

- W , Z reagieren auf die Higgsteilchen im Vakuum
 γ , G bemerken sie nicht
- ⇒ W , Z haben den **horror vacui**

2. Transparenz des Vakuums

- W , Z reagieren auf die Higgsteilchen im Vakuum
 γ , G bemerken sie nicht
- ⇒ W , Z haben den **horror vacui**
- Leptonen und Quarks auch
einige schrecken mehr davor zurück als andere

2. Transparenz des Vakuums

- W , Z reagieren auf die Higgsteilchen im Vakuum
 γ , G bemerken sie nicht
- ⇒ W , Z haben den **horror vacui**
- Leptonen und Quarks auch
einige schrecken mehr davor zurück als andere
- Die Atome sind riesig, weil sich die Elektronen nicht
stark einschüchtern lassen

2. Transparenz des Vakuums

- W , Z reagieren auf die Higgsteilchen im Vakuum
 γ , G bemerken sie nicht
- ⇒ W , Z haben den **horror vacui**
- Leptonen und Quarks auch
einige schrecken mehr davor zurück als andere
- Die Atome sind riesig, weil sich die Elektronen nicht
stark einschüchtern lassen
- Rätsel: Gravitationsfeld reagiert auf alle Formen von
Energie, warum nicht auf das Higgskondensat ?

3. Unterschied zwischen QED und QCD

- Photonen tragen keine Ladung
- Gluonen tragen Farbe

3. Unterschied zwischen QED und QCD

- Photonen tragen keine Ladung
- Gluonen tragen Farbe
- ⇒ Photonen und Gluonen polarisieren das Vakuum ganz unterschiedlich
- Das magnetische Moment des Myons belegt, dass sich das Vakuum **fast** genau so verhält, wie die Feldtheorie dies vorhersagt

4. Energielücke der QCD

- Weil m_u und m_d sehr klein sind, hat die QCD eine approximative chirale Symmetrie
- Diese Symmetrie ist versteckt: das Vakuum ist nicht symmetrisch, auch nicht approximativ

4. Energielücke der QCD

- Weil m_u und m_d sehr klein sind, hat die QCD eine approximative chirale Symmetrie
- Diese Symmetrie ist versteckt: das Vakuum ist nicht symmetrisch, auch nicht approximativ
- Systeme mit versteckten Symmetrien enthalten Goldstone-Bosonen
- In der QCD spielen die π -Mesonen diese Rolle

4. Energielücke der QCD

- Weil m_u und m_d sehr klein sind, hat die QCD eine approximative chirale Symmetrie
 - Diese Symmetrie ist versteckt: das Vakuum ist nicht symmetrisch, auch nicht approximativ
 - Systeme mit versteckten Symmetrien enthalten Goldstone-Bosonen
 - In der QCD spielen die π -Mesonen diese Rolle
 - Im Grenzfall $m_u = m_d = 0$ wird die Symmetrie exakt: QCD wird invariant unter $SU(2)_L \times SU(2)_R$
- ⇒
- $M_\pi = 0$
 - keine Energielücke
 - π -Wellen haben ∞ Eindringtiefe
 - Kernkräfte haben ∞ Reichweite

4. Energielücke der QCD

- In natura sind $m_u, m_d \neq 0$
- Für kleine Werte von m_u, m_d gilt näherungsweise

$$M_\pi^2 = (m_u + m_d)B$$

Gell-Mann, Oakes, Renner 1968

4. Energielücke der QCD

- In natura sind $m_u, m_d \neq 0$
- Für kleine Werte von m_u, m_d gilt näherungsweise
$$M_\pi^2 = (m_u + m_d)B$$

Gell-Mann, Oakes, Renner 1968
- Gitterrechnungen: die Näherung gilt bis hinaus zu Quarkmassen, die $10\times$ grösser sind als in der Natur
- ⇒ Energielücke der QCD ist verstanden
- M_π ist $575\times$ kleiner als M_W
- ⇒ Reichweite der Kernkräfte ist $575\times$ grösser als die Reichweite der schwachen Wechselwirkung