



Diese Veranstaltung wird aufgezeichnet und als Medien-Cast über KIT - ILIAS bereit gestellt

Nur zur KIT-internen vorlesungsbegleitenden Nutzung, Weitergabe & anderweitige Verwendung ist untersagt

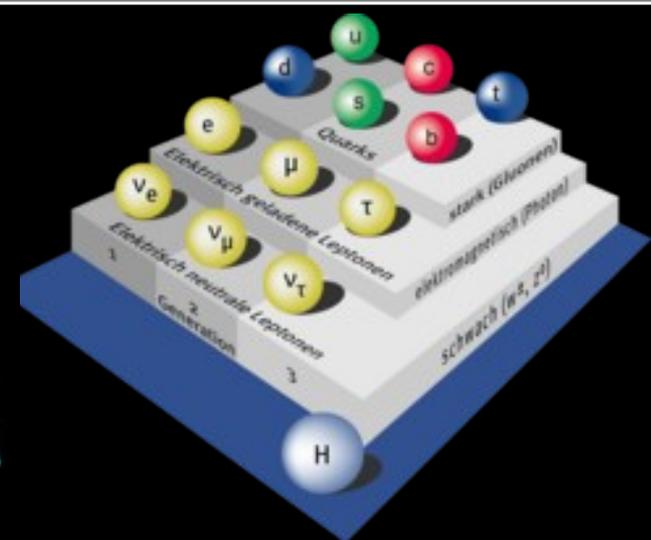
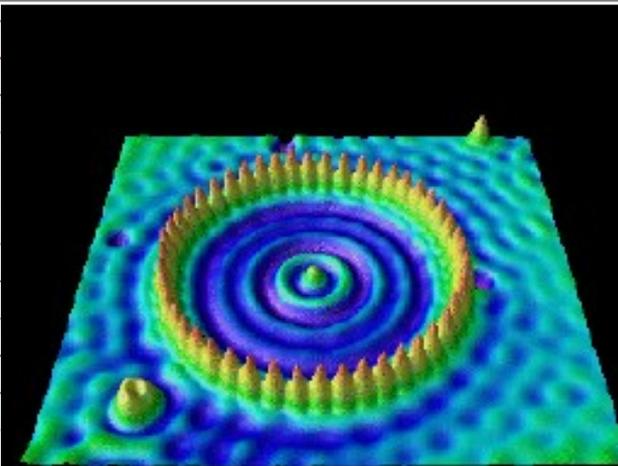
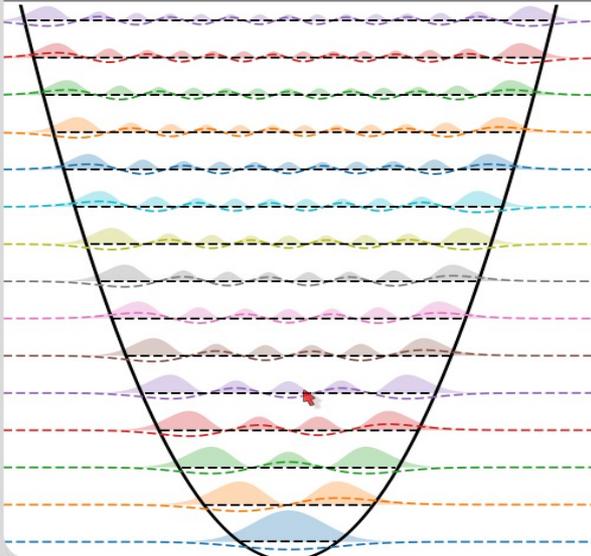
Vorlesung 25 **Moderne Physik (L)**

Fundamentale Kräfte

Günter Quast

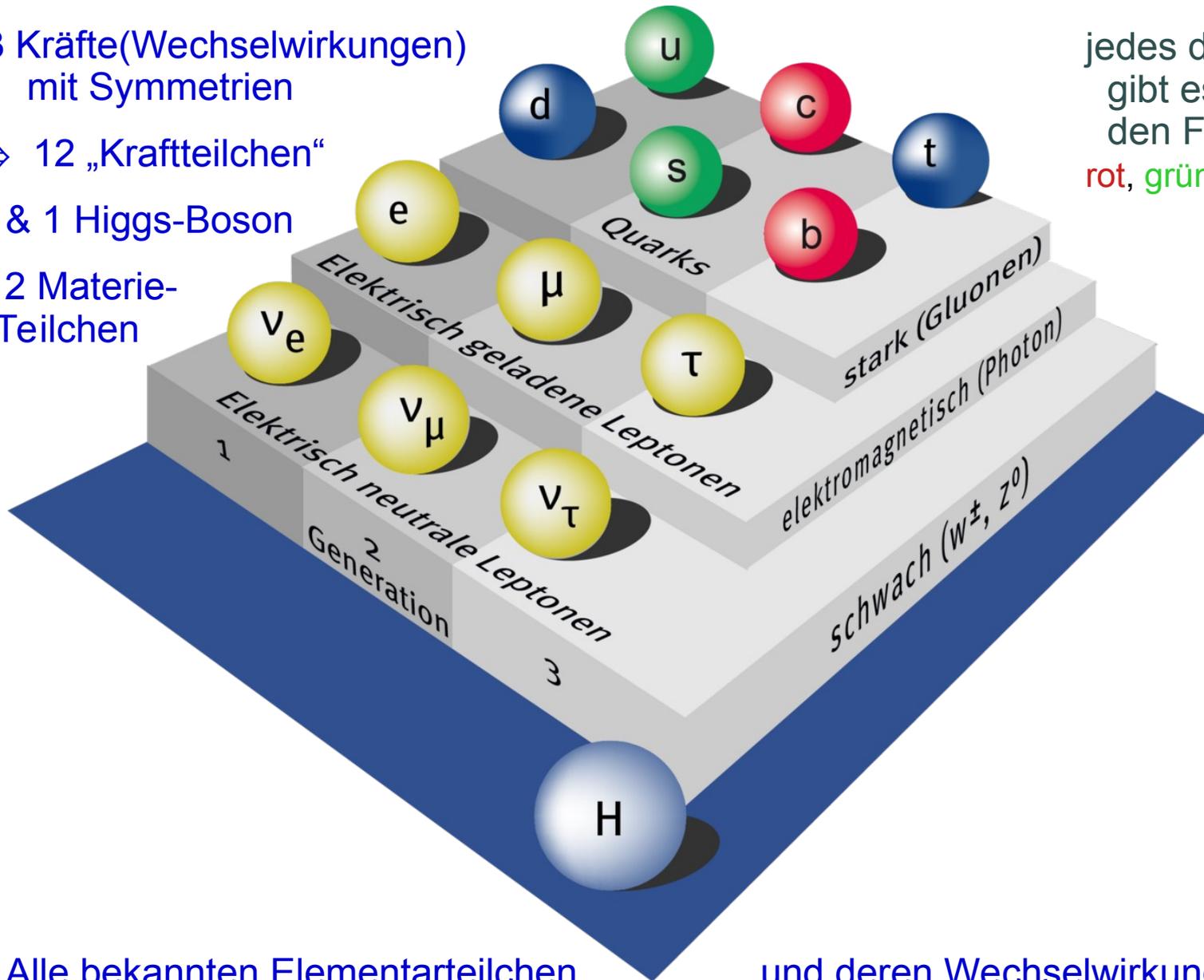
Fakultät für Physik
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

SS '20



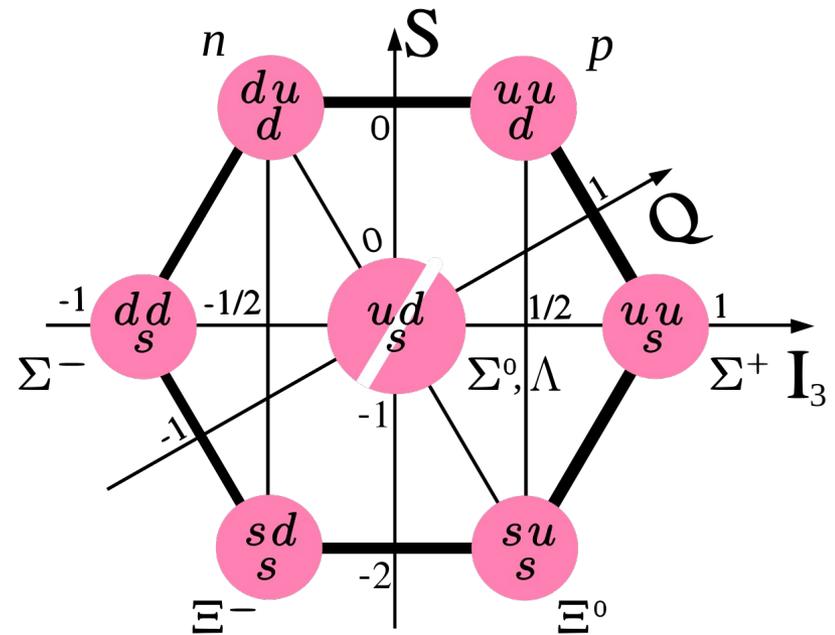
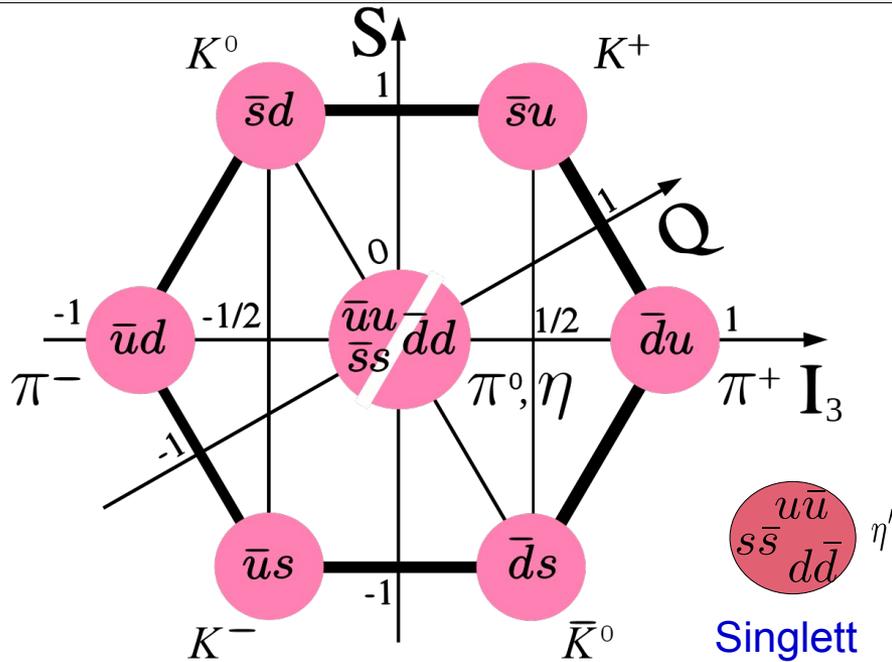
- 3 Kräfte(Wechselwirkungen) mit Symmetrien
- ⇒ 12 „Kraftteilchen“ & 1 Higgs-Boson
- 12 Materie-Teilchen

jedes der Quarks gibt es in den Farben rot, grün und blau



Alle bekannten Elementarteilchen

und deren Wechselwirkungen



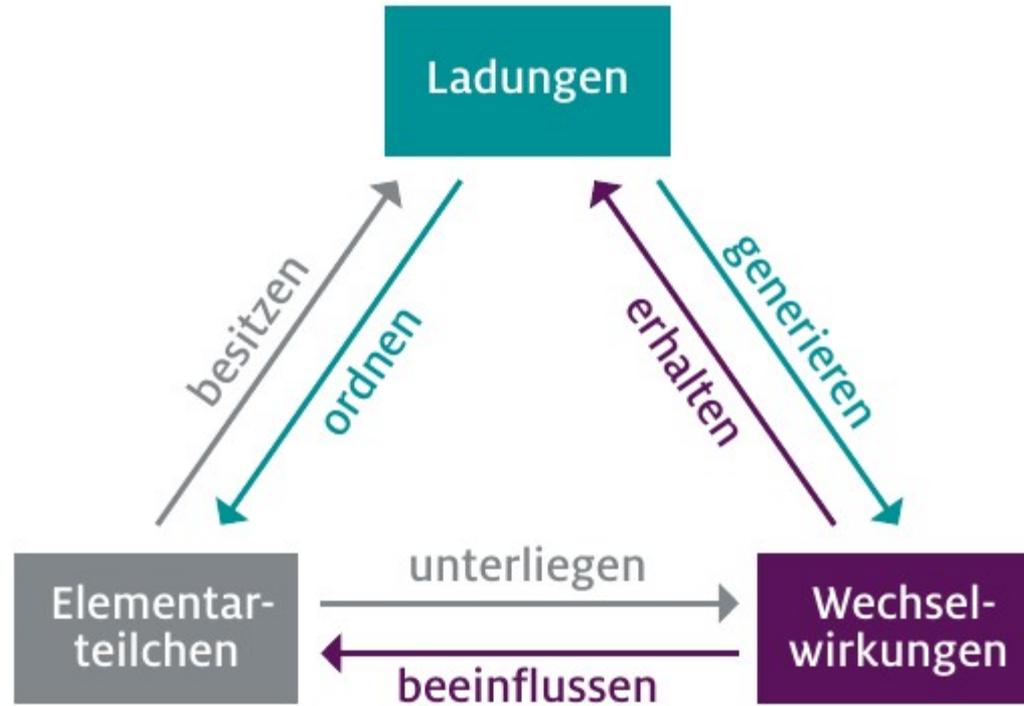
Grundzustände von Mesonen mit u, d und s- Quarks

und **Baryonen**

- Hadronen bestehen aus Quarks
 - Zustände aus einem Quark und einem Antiquark nennt man „Mesonen“
 - Zustände mit drei Quarks nennt man „Baryonen“
- Prinzip beim Aufbau:
 - Hadronen sind „farbneutral“ (Farb-Antifarb-Ladung oder drei verschiedene Farbladungen)
 - Gesamtwellenfunktion (Ort, Quarktyp, Spin, Farbeladung) symmetrisch unter Quarkaustausch für Mesonen und antisymmetrisch für Baryonen

Inhaltsübersicht VL Moderne Physik

- 1) Einführung
- 2) Wiederholung wichtiger Konzepte der klassischen Physik
- 3) Spezielle Relativitätstheorie
- 4) Schlüsselexperimente und Grundlagen der Quantenphysik
- 5) Die Schrödingergleichung
- 6) Anwendungen der Schrödingergleichung
- 7) Das Wasserstoff-Atom
- 8) Atome mit mehreren Elektronen
- 9) Wechselwirkung von Licht und Materie
- 10) Grundlagen der Festkörperphysik
- 11) Kernphysik
- 12) **Teilchenphysik**
- 13) Astrophysik und Kosmologie



Wir kennen **vier fundamentale Kräfte**,
die auf die elementaren Teilchen wirken

- die **Gravitation**

wirkt auf alle Teilchen; sie wird nicht abgeschirmt und hat
daher eine unendliche Reichweite

Wir kennen **vier fundamentale Kräfte**,
die auf die elementaren Teilchen wirken

- die **Gravitation**

wirkt auf alle Teilchen; sie wird nicht abgeschirmt und hat daher eine unendliche Reichweite

- die **Elektromagnetische Wechselwirkung**

bestimmt unseren Alltag; alle mechanischen Kräfte werden auf die elektromagnetische Wechselwirkung (s. Atom-, Molekül- und Festkörperphysik).

Wir kennen **vier fundamentale Kräfte**,
die auf die elementaren Teilchen wirken

- die **Gravitation**

wirkt auf alle Teilchen; sie wird nicht abgeschirmt und hat daher eine unendliche Reichweite

- die **Elektromagnetische Wechselwirkung**

bestimmt unseren Alltag; alle mechanischen Kräfte werden auf die elektromagnetische Wechselwirkung (s. [Atom-, Molekül- und Festkörperphysik](#)).

- die **Schwache Wechselwirkung**

ist wegen ihrer sehr kurzen Reichweite nur auf sub-nuklearen Skalen wirksam

Wir kennen **vier fundamentale Kräfte**,
die auf die elementaren Teilchen wirken

- die **Gravitation**

wirkt auf alle Teilchen; sie wird nicht abgeschirmt und hat daher eine unendliche Reichweite

- die **Elektromagnetische Wechselwirkung**

bestimmt unseren Alltag; alle mechanischen Kräfte werden auf die elektromagnetische Wechselwirkung (s. Atom-, Molekül- und Festkörperphysik).

- die **Schwache Wechselwirkung**

ist wegen ihrer sehr kurzen Reichweite nur auf sub-nuklearen Skalen wirksam

- die **Starke Wechselwirkung** hat eine Reichweite bis zur nuklearen Skala; sie sorgt für die Stabilität der Atomkerne und führt zu gebundenen Zuständen von Quarks, die eine Vielzahl von Teilchen bilden, die Hadronen, zu denen auch das Proton und das Neutron gehören.

Teilchen und ihre Wechselwirkungen

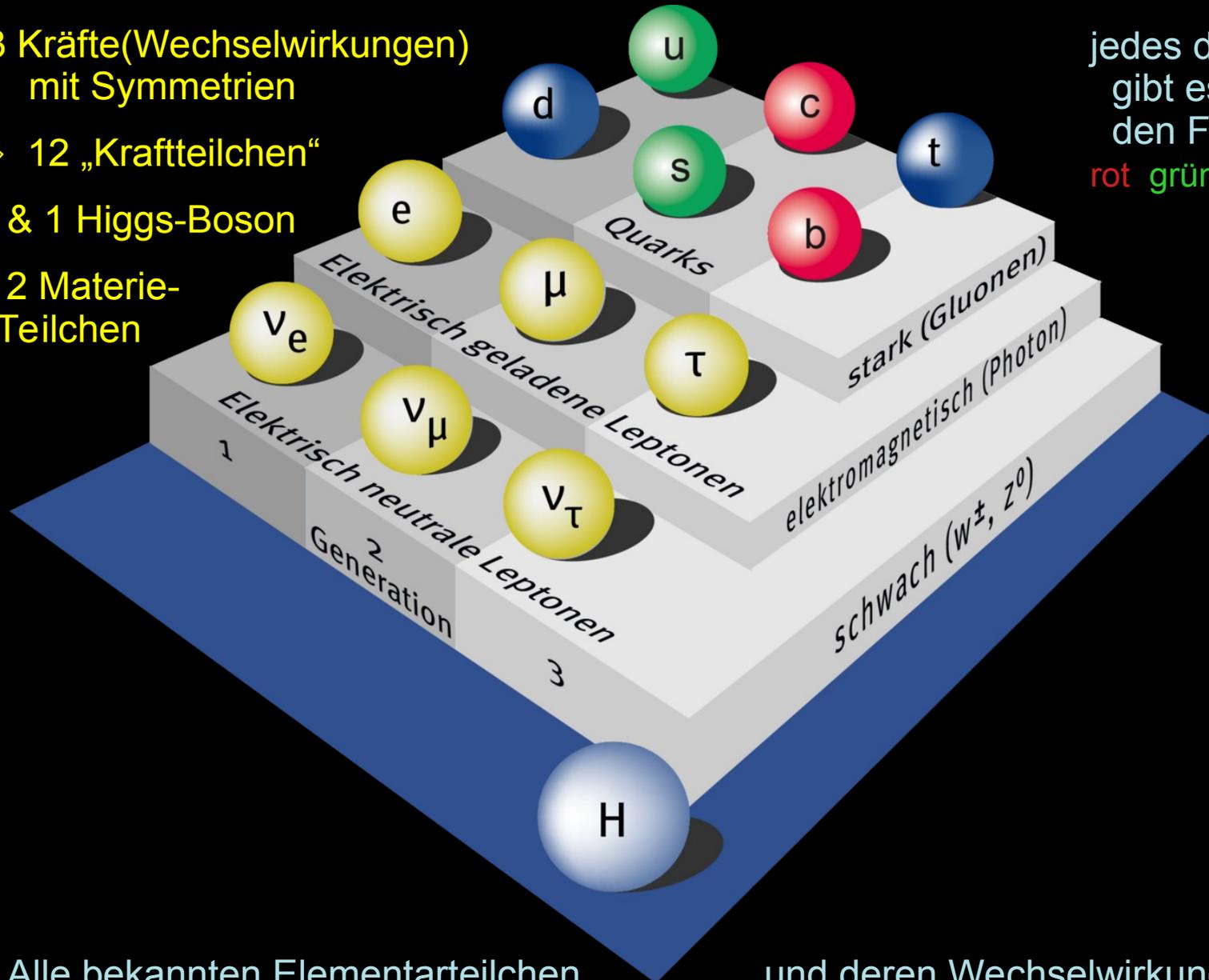
– 3 Kräfte (Wechselwirkungen)
mit Symmetrien

⇒ 12 „Kraftteilchen“

& 1 Higgs-Boson

– 12 Materie-
Teilchen

jedes der Quarks
gibt es in
den Farben
rot grün und blau



Alle bekannten Elementarteilchen

und deren Wechselwirkungen

Teilchen und ihre Wechselwirkungen

jedes der Quarks
gibt es in
den Farben
rot, grün und blau

		Drei Generationen der Materie (Fermionen)			Wechselwirkungen (Bosonen)	
		I	II	III		
QUARKS	Masse	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
	Ladung	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
	Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
		u Up	c Charm	t Top	g Gluon	H Higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		d Down	s Strange	b Bottom	γ Photon	
LEPTONEN	Masse	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	Ladung	-1	-1	-1	0	
	Spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		e Elektron	μ Muon	τ Tau	Z Z-Boson	
		$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	± 1	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		ν_e Elektron-Neutrino	ν_μ Muon-Neutrino	ν_τ Tau-Neutrino	W W-Boson	

SKALARBOSONEN

EICHBOSONEN
VEKTORBOSONEN

Alle bekannten Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen
(alternative Darstellung)

Die Dirac-Gleichung

Als eine Version einer relativistischen Wellengleichung hatten wir in Vorl. 22 die **Klein-Gordan-Gleichung** kennen gelernt, die Mesonen beschreibt:

relativistische Energie-Impulsbeziehung: $p^2 c^2 + m^2 c^4 = E^2$

$$\text{mit } \hat{\mathbf{p}} = -i\hbar\vec{\nabla} \text{ und } \hat{\mathbf{E}} = i\hbar\frac{\partial}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\Phi(\vec{r}, t) = \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2\Phi(\vec{r}, t)$$

Ausgehend von der Beziehung $\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} = E$ hat Paul Dirac schon 1928 eine Wellengleichung abgeleitet

Die Dirac-Gleichung

Als eine Version einer relativistischen Wellengleichung hatten wir in Vorl. 22 die **Klein-Gordan-Gleichung** kennen gelernt, die Mesonen beschreibt:

relativistische Energie-Impulsbeziehung: $p^2 c^2 + m^2 c^4 = E^2$

$$\text{mit } \hat{\mathbf{p}} = -i\hbar\vec{\nabla} \text{ und } \hat{\mathbf{E}} = i\hbar\frac{\partial}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Phi(\vec{r}, t) = \left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \Phi(\vec{r}, t)$$

Ausgehend von der Beziehung $\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} = E$ hat Paul Dirac schon 1928 eine Wellengleichung abgeleitet

Die Dirac-Gleichung

Als eine Version einer relativistischen Wellengleichung hatten wir in Vorl. 22 die **Klein-Gordan-Gleichung** kennen gelernt, die Mesonen beschreibt:

relativistische Energie-Impulsbeziehung: $p^2 c^2 + m^2 c^4 = E^2$

$$\text{mit } \hat{\mathbf{p}} = -i\hbar\vec{\nabla} \text{ und } \hat{\mathbf{E}} = i\hbar\frac{\partial}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Phi(\vec{r}, t) = \left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \Phi(\vec{r}, t)$$

Ausgehend von der Beziehung $\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} = E$ hat Paul Dirac schon 1928 eine Wellengleichung abgeleitet

Die Dirac-Gleichung

Als eine Version einer relativistischen Wellengleichung hatten wir in Vorl. 22 die **Klein-Gordan-Gleichung** kennen gelernt, die Mesonen beschreibt:

relativistische Energie-Impulsbeziehung: $p^2 c^2 + m^2 c^4 = E^2$

$$\text{mit } \hat{\mathbf{p}} = -i\hbar\vec{\nabla} \text{ und } \hat{\mathbf{E}} = i\hbar\frac{\partial}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\Phi(\vec{r}, t) = \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2\Phi(\vec{r}, t)$$

Ausgehend von der Beziehung $\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} = E$ hat Paul Dirac schon 1928 eine Wellengleichung abgeleitet

Dabei handelt es sich um eine Gleichung für eine **vierkomponentige Wellenfunktion**, einen sog. Dirac-Spinor:

$$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \left(\vec{\alpha} \cdot \hat{\mathbf{p}} \cdot c + \beta mc^2\right)\Psi, \quad \vec{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \text{ und } \beta \text{ sind } 4 \times 4\text{-Matrizen}$$

Die Dirac-Gleichung

Als eine Version einer relativistischen Wellengleichung hatten wir in Vorl. 22 die **Klein-Gordan-Gleichung** kennen gelernt, die Mesonen beschreibt:

relativistische Energie-Impulsbeziehung: $p^2 c^2 + m^2 c^4 = E^2$

$$\text{mit } \hat{\mathbf{p}} = -i\hbar\vec{\nabla} \text{ und } \hat{\mathbf{E}} = i\hbar\frac{\partial}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\Phi(\vec{r}, t) = \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2\Phi(\vec{r}, t)$$

Ausgehend von der Beziehung $\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} = E$ hat Paul Dirac schon 1928 eine Wellengleichung abgeleitet

Dabei handelt es sich um eine Gleichung für eine **vierkomponentige Wellenfunktion**, einen sog. Dirac-Spinor:

$$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = \left(\vec{\alpha} \cdot \hat{\mathbf{p}} \cdot c + \beta mc^2\right)\Psi, \quad \vec{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \text{ und } \beta \text{ sind } 4 \times 4\text{-Matrizen}$$

Die vier Komponenten von ψ entsprechen den je zwei Spin-Zuständen eines Spin- $\frac{1}{2}$ -Fermions und seines Antiteilchens

→ **g-Faktor des Elektrons und Vorhersage von Antimaterie**

Die Dirac-Gleichung

Als eine Version einer relativistischen Wellengleichung hatten wir in Vorl. 22 die **Klein-Gordan-Gleichung** kennen gelernt, die Mesonen beschreibt:

relativistische Energie-Impulsbeziehung: $p^2 c^2 + m^2 c^4 = E^2$

$$\text{mit } \hat{\mathbf{p}} = -i\hbar\vec{\nabla} \text{ und } \hat{\mathbf{E}} = i\hbar\frac{\partial}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \Phi(\vec{r}, t) = \left(\frac{mc}{\hbar} \right)^2 \Phi(\vec{r}, t)$$

Ausgehend von der Beziehung $\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} = E$ hat Paul Dirac schon 1928 eine Wellengleichung abgeleitet

Dabei handelt es sich um eine Gleichung für eine **vierkomponentige Wellenfunktion**, einen sog. Dirac-Spinor:

$$i\hbar\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left(\vec{\alpha} \cdot \hat{\mathbf{p}} \cdot c + \beta mc^2 \right) \Psi, \quad \vec{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \text{ und } \beta \text{ sind } 4 \times 4\text{-Matrizen}$$

Die vier Komponenten von ψ entsprechen den je zwei Spin-Zuständen eines Spin- $\frac{1}{2}$ -Fermions und seines Antiteilchens

→ **g-Faktor des Elektrons und Vorhersage von Antimaterie**

moderne Schreibweise mit vier „ γ -Matrizen“ und der relativistischen Ableitung

$$\partial_\mu = \left(\frac{\partial}{\partial t}, \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \text{ mit } \hbar = c = 1 : \quad (i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\Psi = 0 \quad \text{Dirac-Gleichung}$$

Quantenfeldtheorie

In der Quantenfeldtheorie („**QFT**“) werden die **Felder** selbst zu **Operatoren**, so wie Observablen in der (einfachen) Quantenmechanik Operatoren entsprechen

Quantenfeldtheorie

In der Quantenfeldtheorie („**QFT**“) werden die **Felder** selbst zu **Operatoren**, so wie Observablen in der (einfachen) Quantenmechanik Operatoren entsprechen

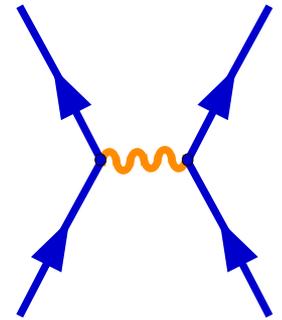
Teilchen sind quantisierte Anregungen dieser Felder („**zweite Quantisierung**“)
(wie das Phonon in der Festkörperphysik als quantisierte Anregung einer Gitterschwingung)

Quantenfeldtheorie

In der Quantenfeldtheorie („**QFT**“) werden die **Felder** selbst zu **Operatoren**, so wie Observablen in der (einfachen) Quantenmechanik Operatoren entsprechen

Teilchen sind quantisierte Anregungen dieser Felder („**zweite Quantisierung**“)
(wie das Phonon in der Festkörperphysik als quantisierte Anregung einer Gitterschwingung)

Quantenfeldtheoretische Rechnungen mit Näherungsmethoden („**Störungstheorie**“) sind Grundlage der den Feynman-Diagrammen entsprechenden Formeln für die Wahrscheinlichkeiten der Abstrahlung oder Aufnahme eines Feldquants, also für Erzeugung und Vernichtung von Teilchen.

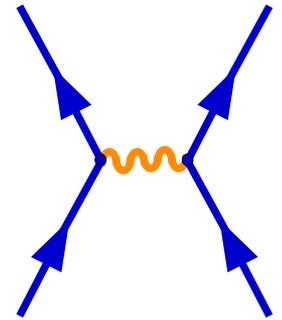


Quantenfeldtheorie

In der Quantenfeldtheorie („**QFT**“) werden die **Felder selbst zu Operatoren**, so wie Observablen in der (einfachen) Quantenmechanik Operatoren entsprechen

Teilchen sind quantisierte Anregungen dieser Felder („**zweite Quantisierung**“)
(wie das Phonon in der Festkörperphysik als quantisierte Anregung einer Gitterschwingung)

Quantenfeldtheoretische Rechnungen mit Näherungsmethoden („**Störungstheorie**“) sind Grundlage der den Feynman-Diagrammen entsprechenden Formeln für die Wahrscheinlichkeiten der Abstrahlung oder Aufnahme eines Feldquants, also für Erzeugung und Vernichtung von Teilchen.



Diskrete Symmetrien der QFT:

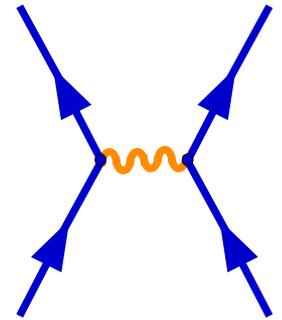
- **P**: Parität = Punktspiegelung $\vec{r} \leftrightarrow -\vec{r}$, $\vec{p} \leftrightarrow -\vec{p}$, $\vec{L} \leftrightarrow \vec{L}$ wegen $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$,
- **C**: C-Parität = Ladungsumkehr (Teilchen \leftrightarrow Antiteilchen)
- **T**: Zeitumkehr $t \rightarrow -t$

Quantenfeldtheorie

In der Quantenfeldtheorie („**QFT**“) werden die **Felder selbst zu Operatoren**, so wie Observablen in der (einfachen) Quantenmechanik Operatoren entsprechen

Teilchen sind quantisierte Anregungen dieser Felder („**zweite Quantisierung**“) (wie das Phonon in der Festkörperphysik als quantisierte Anregung einer Gitterschwingung)

Quantenfeldtheoretische Rechnungen mit Näherungsmethoden („**Störungstheorie**“) sind Grundlage der den Feynman-Diagrammen entsprechenden Formeln für die Wahrscheinlichkeiten der Abstrahlung oder Aufnahme eines Feldquants, also für Erzeugung und Vernichtung von Teilchen.



Diskrete Symmetrien der QFT:

- **P**: Parität = Punktspiegelung $\vec{r} \leftrightarrow -\vec{r}$, $\vec{p} \leftrightarrow -\vec{p}$, $\vec{L} \leftrightarrow \vec{L}$ wegen $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$,
- **C**: C-Parität = Ladungsumkehr (Teilchen \leftrightarrow Antiteilchen)
- **T**: Zeitumkehr $t \rightarrow -t$
- C, P, und T einzeln erhalten in der elektromagnetischen und starken Wechselwirkung
- P maximal verletzt in der schwachen Wechselwirkung
- CP schwach verletzt in der schwachen Wechselwirkung
- CPT in allen Wechselwirkungen erhalten.

- die in unserem Alltag wichtigste Kraft, die **Gravitation**, spielt in der Teilchenphysik keine Rolle
 - Masse von Elementarteilchen ist viel zu klein;Dominiert das Universum auf großen Skalen, weil sie unendliche Reichweite hat und nicht abgeschirmt wird.

beschrieben durch
allgemeine Relativitätstheorie,
keine funktionierende Quantentheorie

WOW?
Graviton
hypothetisch

Gravitation
keine Quantentheorie
der Schwerkraft



NASA, Hubbel Space Telescope,
Galaxienclulster RXC J0142.9+4438

Fundamentale Kräfte: Elektromagnetische WW

Im sog. Standardmodell der Teilchenphysik legen **Symmetrien der Ladungen** die **Struktur der Kräfte** vollständig fest.

- **Elektromagnetische Wechselwirkung**
eine elektrische Ladung,

Physik invariant,
wenn die Wellenfunktion mit einer
Phase $\exp(i\alpha(x))$ multipliziert wird ($U(1)$)

Teilchen mit **elektrischer Ladung** tauschen **Photonen** aus

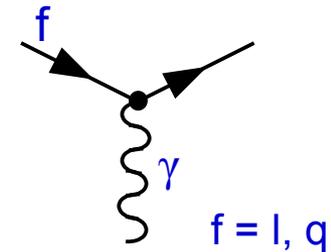
- alle Kräfte zwischen Atomen und Molekülen
lassen sich auf die elektromagnetische
Wechselwirkung zurückführen.

- alle Messprozesse für Teilchen nutzen die
elektromagnetische Wechselwirkung von
Teilchen mit Materie

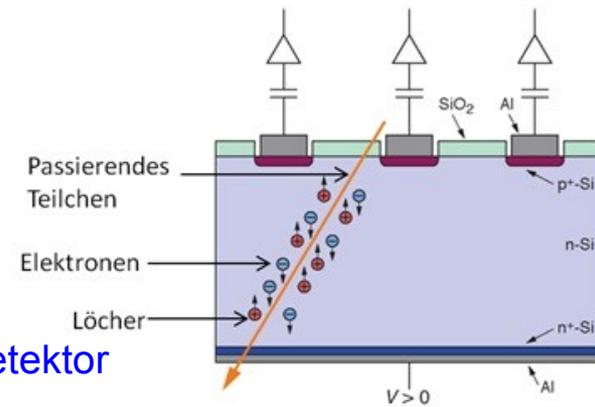


Photon

elektromagnetisch
Atom, Molekül, Festkörper,
alle „mechanischen“ Kräfte



Beispiel
Halbleiterdetektor



Pause

und Zeit für Fragen ?

■ Schwache Wechselwirkung

zwei Ladungen (schwacher Isospin $I, I_3 = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$)

Physik invariant unter (komplexen) Drehungen
im Ladungsraum ($SU(2)_L$)

(diese Symmetrie ist „spontan gebrochen“ – s. u.)



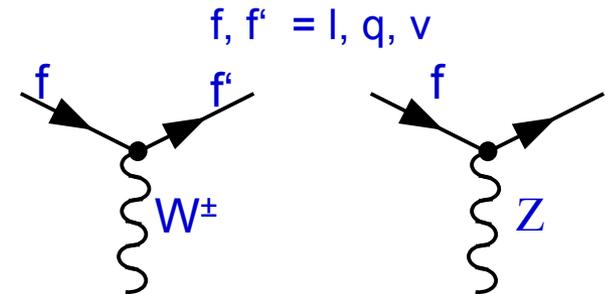
W-Boson



Z-Boson

Schwache Kernkraft

Kern-Zerfälle und -Fusion



■ Schwache Wechselwirkung

zwei Ladungen (schwacher Isospin $I, I_3 = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$)

Physik invariant unter (komplexen) Drehungen
im Ladungsraum ($SU(2)_L$)

(diese Symmetrie ist „spontan gebrochen“ – s. u.)

$$I_3 = \begin{array}{l} +\frac{1}{2} : u, c, t, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau \\ -\frac{1}{2} : d, s, b, e^-, \mu^-, \tau^- \end{array}$$



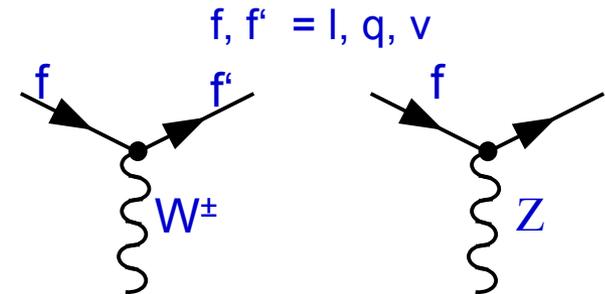
W-Boson



Z-Boson

Schwache Kernkraft

Kern-Zerfälle und -Fusion



■ Schwache Wechselwirkung

zwei Ladungen (schwacher Isospin $I, I_3 = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$)

Physik invariant unter (komplexen) Drehungen
im Ladungsraum ($SU(2)_L$)

(diese Symmetrie ist „spontan gebrochen“ – s. u.)

$$I_3 = \begin{array}{l} +\frac{1}{2} : u, c, t, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau \\ -\frac{1}{2} : d, s, b, e^-, \mu^-, \tau^- \end{array}$$

Teilchen mit „**schwacher Ladung**“

(das sind alle elementaren Fermionen)

tauschen **W^\pm** - und **Z- Bosonen** aus,

die **große Massen** haben und selbst

elektrische bzw. schwache Ladungen tragen



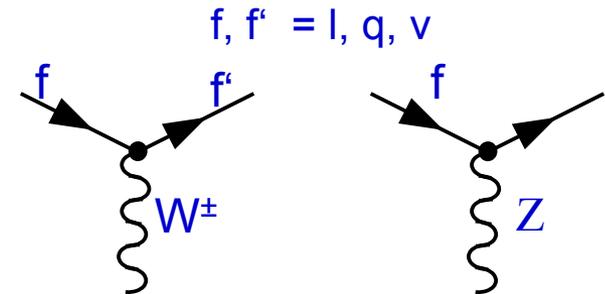
W-Boson



Z-Boson

Schwache Kernkraft

Kern-Zerfälle und -Fusion



■ Schwache Wechselwirkung

zwei Ladungen (schwacher Isospin $I, I_3 = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$)

Physik invariant unter (komplexen) Drehungen
im Ladungsraum ($SU(2)_L$)

(diese Symmetrie ist „spontan gebrochen“ – s. u.)

$$I_3 = \begin{array}{l} +\frac{1}{2} : u, c, t, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau \\ -\frac{1}{2} : d, s, b, e^-, \mu^-, \tau^- \end{array}$$

Teilchen mit „**schwacher Ladung**“

(das sind alle elementaren Fermionen)

tauschen **W^\pm** - und **Z- Bosonen** aus,

die **große Massen** haben und selbst

elektrische bzw. schwache Ladungen tragen



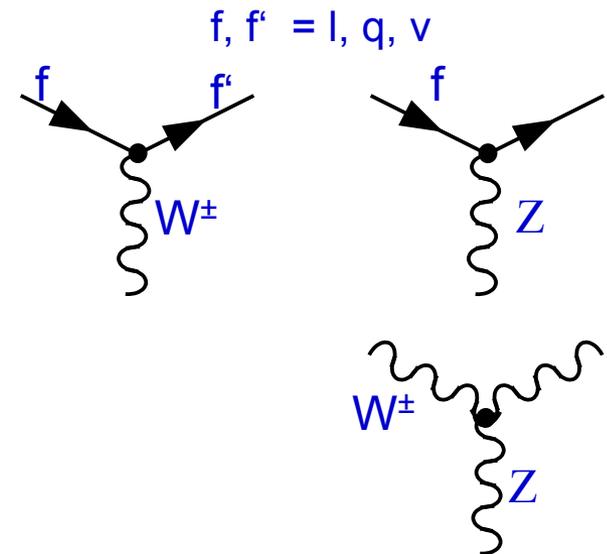
W-Boson



Z-Boson

Schwache Kernkraft

Kern-Zerfälle und -Fusion



■ Schwache Wechselwirkung

zwei Ladungen (schwacher Isospin $I, I_3 = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$)

Physik invariant unter (komplexen) Drehungen im Ladungsraum ($SU(2)_L$)

(diese Symmetrie ist „spontan gebrochen“ – s. u.)

$$I_3 = \begin{cases} +\frac{1}{2} : u, c, t, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau \\ -\frac{1}{2} : d, s, b, e^-, \mu^-, \tau^- \end{cases}$$

Teilchen mit „**schwacher Ladung**“

(das sind alle elementaren Fermionen)

tauschen **W^\pm** - und **Z- Bosonen** aus,

die **große Massen** haben und selbst

elektrische bzw. schwache Ladungen tragen

Die schwache Wechselwirkung verletzt die Parität

(s. Wu-Experiment, Kernphysik, Vorl. 22)

- Die schwache Kraft wirkt nur auf linkshändige Teilchen (d.h. Spin antiparallel zur Impulsrichtung) und rechtshändige Antiteilchen



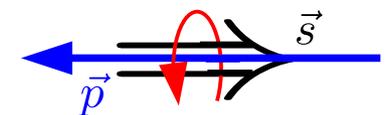
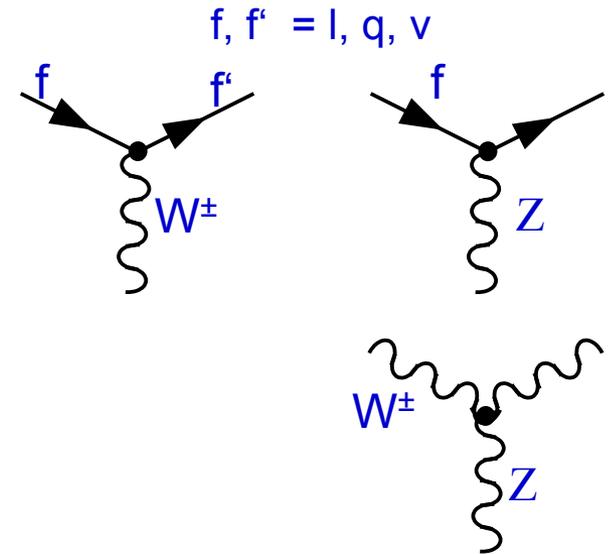
W-Boson



Z-Boson

Schwache Kernkraft

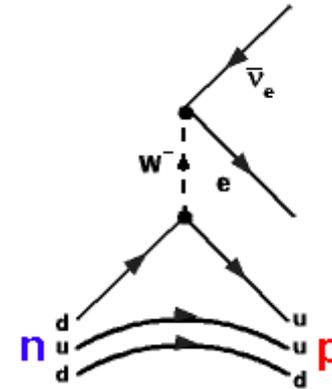
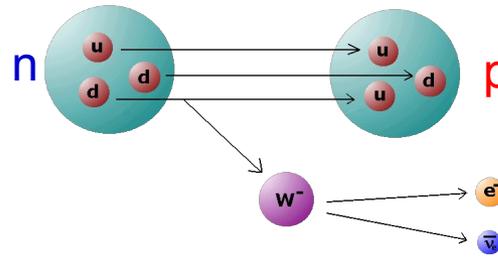
Kern-Zerfälle und -Fusion



Grund für Symmetrie $SU(2)_L$

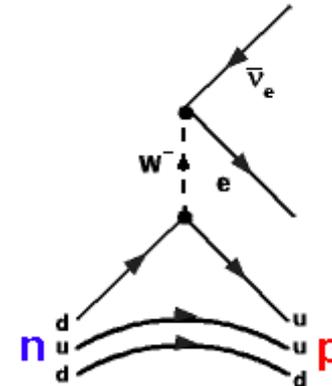
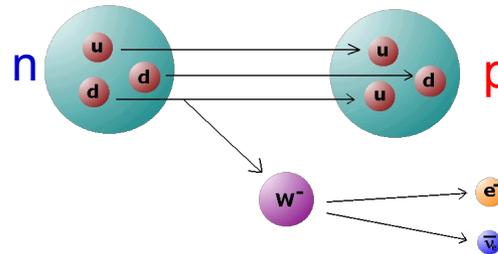
- Die schwache WW ermöglicht Übergänge zwischen Teilchen mit $I_3 = +\frac{1}{2}$ und $-\frac{1}{2}$

Beispiel Neutron-Zerfall (s. Vorl. 22, Kernphysik)

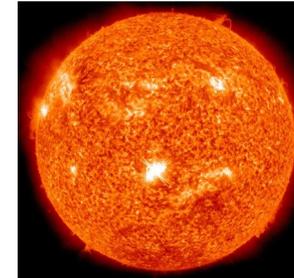


- Die schwache WW ermöglicht Übergänge zwischen Teilchen mit $I_3 = +\frac{1}{2}$ und $-\frac{1}{2}$

Beispiel Neutron-Zerfall (s. Vorl. 22, Kernphysik)



- Die geringe Stärke der schwachen Wechselwirkung (bei Energien $\ll M_W, M_Z$) sorgt für die langsame Kernfusion in Sternen



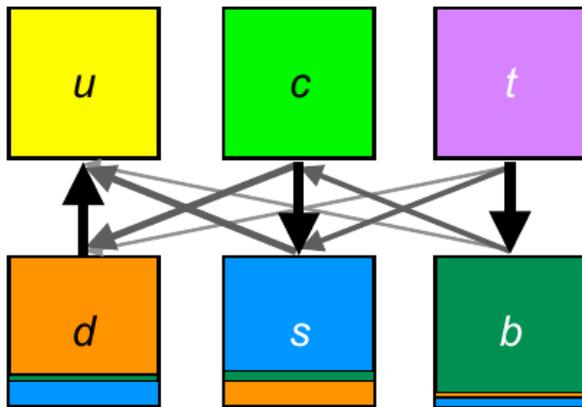
Bei Austausch von W-Bosonen wird der Fermion-Typ (sog. „flavour“) geändert:

$$e \leftrightarrow \nu_e, \quad \mu \leftrightarrow \nu_\mu, \quad \tau \leftrightarrow \nu_\tau, \quad u \leftrightarrow d, \quad c \leftrightarrow s, \quad t \leftrightarrow b$$

Bei Austausch von W-Bosonen wird der Fermion-Typ (sog. „flavour“) geändert:

$$e \leftrightarrow \nu_e, \quad \mu \leftrightarrow \nu_\mu, \quad \tau \leftrightarrow \nu_\tau, \quad u \leftrightarrow d, \quad c \leftrightarrow s, \quad t \leftrightarrow b$$

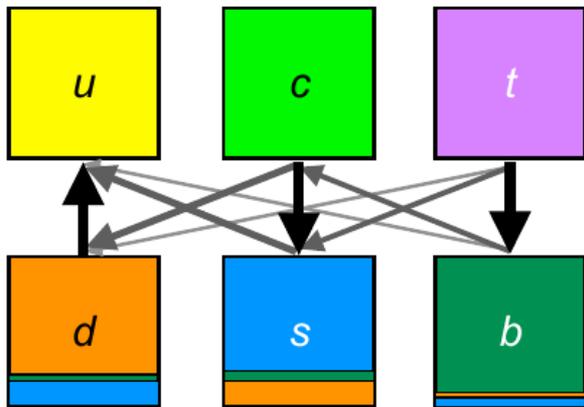
Man beobachtet aber auch schwächere
Übergänge zwischen den Quarks
verschiedener Generationen



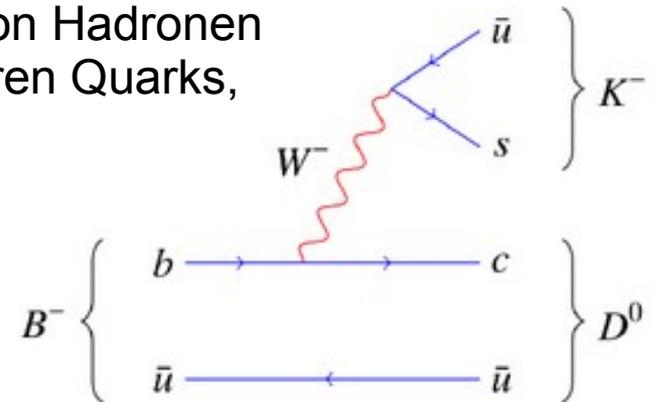
Bei Austausch von W-Bosonen wird der Fermion-Typ (sog. „flavour“) geändert:

$$e \leftrightarrow \nu_e, \quad \mu \leftrightarrow \nu_\mu, \quad \tau \leftrightarrow \nu_\tau, \quad u \leftrightarrow d, \quad c \leftrightarrow s, \quad t \leftrightarrow b$$

Man beobachtet aber auch schwächere
Übergänge zwischen den Quarks
verschiedener Generationen



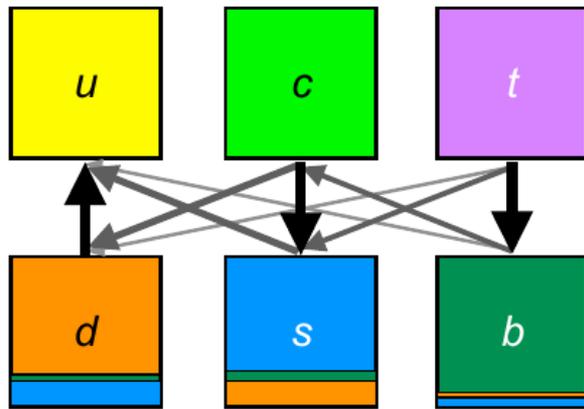
Diese Übergänge führen zu schwachen
Zerfällen von Hadronen
mit schweren Quarks,
z. B.



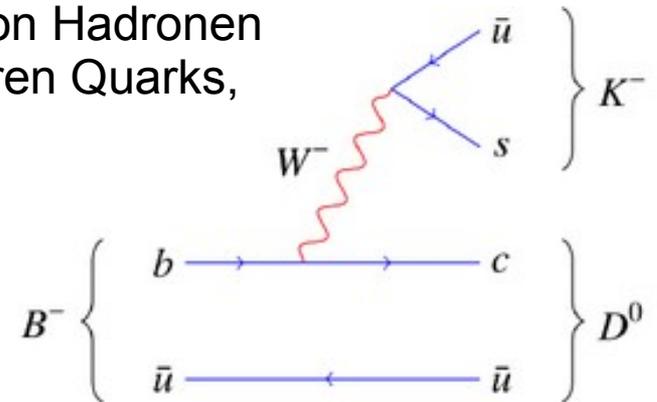
Bei Austausch von W-Bosonen wird der Fermion-Typ (sog. „flavour“) geändert:

$$e \leftrightarrow \nu_e, \quad \mu \leftrightarrow \nu_\mu, \quad \tau \leftrightarrow \nu_\tau, \quad u \leftrightarrow d, \quad c \leftrightarrow s, \quad t \leftrightarrow b$$

Man beobachtet aber auch schwächere
 Übergänge zwischen den Quarks
 verschiedener Generationen



Diese Übergänge führen zu schwachen
 Zerfällen von Hadronen
 mit schweren Quarks,
 z. B.



→ Einführung der „**Quark-Mischungsmatrix**“
 für down-typ Quarks

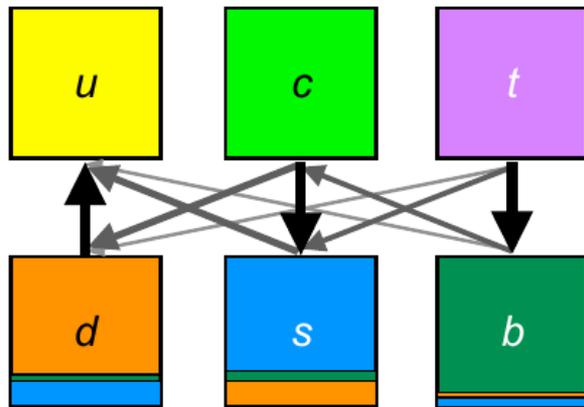
$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{bmatrix}$$

Elemente der Matrix experimentell bestimmt

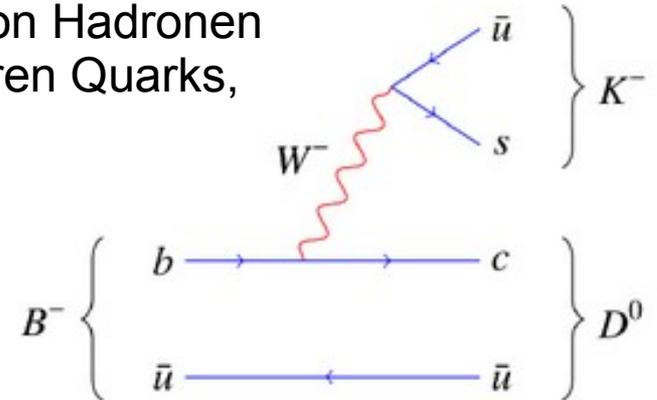
Bei Austausch von W-Bosonen wird der Fermion-Typ (sog. „flavour“) geändert:

$$e \leftrightarrow \nu_e, \quad \mu \leftrightarrow \nu_\mu, \quad \tau \leftrightarrow \nu_\tau, \quad u \leftrightarrow d, \quad c \leftrightarrow s, \quad t \leftrightarrow b$$

Man beobachtet aber auch schwächere
Übergänge zwischen den Quarks
verschiedener Generationen



Diese Übergänge führen zu schwachen
Zerfällen von Hadronen
mit schweren Quarks,
z. B.



→ Einführung der „**Quark-Mischungsmatrix**“
für down-typ Quarks

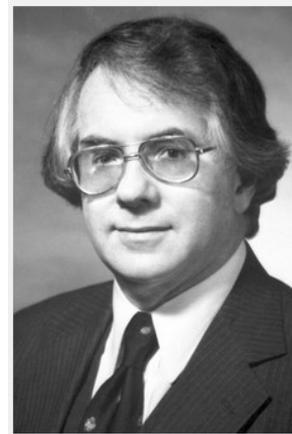
$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \\ |b\rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \\ |b'\rangle \end{bmatrix}$$

Elemente der Matrix experimentell bestimmt

Die schwache Wechselwirkung
mischt die Quark-Generationen

Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen WW

In den 60er Jahren erkannten S.L. Glashow, A. Salam und S. Weinberg, dass man im Rahmen einer sog. **Eichtheorie** die schwache mit der elektromagnetischen WW zusammenführen kann.



Sheldon Lee
Glashow



Abdus Salam



Steven Weinberg

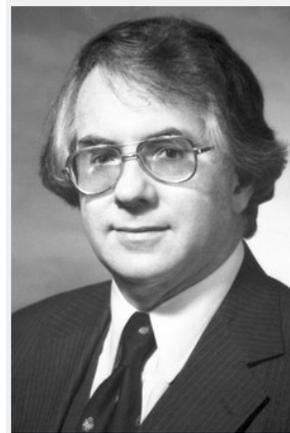
Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen WW

In den 60er Jahren erkannten S.L. Glashow, A. Salam und S. Weinberg, dass man im Rahmen einer sog. **Eichtheorie** die schwache mit der elektromagnetischen WW zusammenführen kann.

Ladungssymmetrie:

$$U(1) \times SU(2)_L$$

d.h. eine Ladung wie em,
und zwei Ladungen für
linkshändige Teilchen



Sheldon Lee
Glashow



Abdus Salam



Steven Weinberg

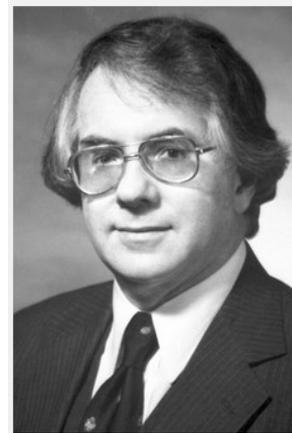
Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen WW

In den 60er Jahren erkannten S.L. Glashow, A. Salam und S. Weinberg, dass man im Rahmen einer sog. **Eichtheorie** die schwache mit der elektromagnetischen WW zusammenführen kann.

Ladungssymmetrie:

$$U(1) \times SU(2)_L$$

d.h. eine Ladung wie em,
und zwei Ladungen für
linkshändige Teilchen



Sheldon Lee
Glashow



Abdus Salam



Steven Weinberg

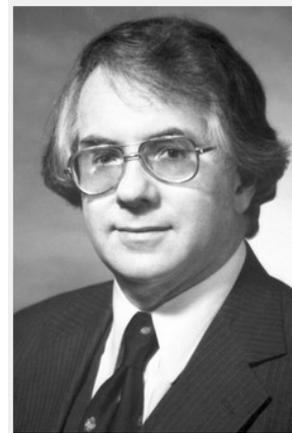
Ladungen: schwache Hyperladung $Y = 2(Q - I_3)$, elektr. Ladung Q

Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen WW

In den 60er Jahren erkannten S.L. Glashow, A. Salam und S. Weinberg, dass man im Rahmen einer sog. **Eichtheorie** die schwache mit der elektromagnetischen WW zusammenführen kann.

Ladungssymmetrie:
 $U(1) \times SU(2)_L$

d.h. eine Ladung wie em,
und zwei Ladungen für
linkshändige Teilchen



Sheldon Lee
Glashow



Abdus Salam



Steven Weinberg

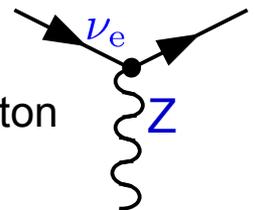
nobelprize.org

Ladungen: schwache Hyperladung $Y = 2(Q - I_3)$, elektr. Ladung Q

→ Vorhersage eines weiteren, bis dahin unbekanntes dritten Austauschteilchens, des **Z-Bosons** mit Eigenschaften ähnlich zum Photon

wichtiger experimenteller Test: Streuung von Neutrinos,

- beobachtet 1973 in der Gargamelle-Blasenkammer am CERN

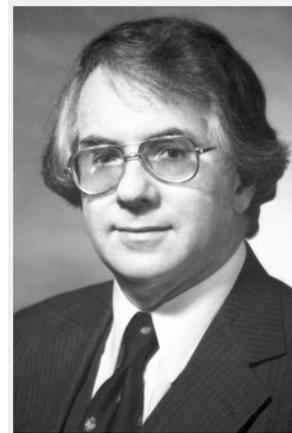


Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen WW

In den 60er Jahren erkannten S.L. Glashow, A. Salam und S. Weinberg, dass man im Rahmen einer sog. **Eichtheorie** die schwache mit der elektromagnetischen WW zusammenführen kann.

Ladungssymmetrie:
 $U(1) \times SU(2)_L$

d.h. eine Ladung wie em,
und zwei Ladungen für
linkshändige Teilchen



Sheldon Lee
Glashow



Abdus Salam



Steven Weinberg

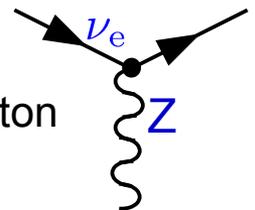
nobelprize.org

Ladungen: schwache Hyperladung $Y = 2(Q - I_3)$, elektr. Ladung Q

→ Vorhersage eines weiteren, bis dahin unbekanntes dritten Austauschteilchens, des **Z-Bosons** mit Eigenschaften ähnlich zum Photon

wichtiger experimenteller Test: Streuung von Neutrinos,

- beobachtet 1973 in der Gargamelle-Blasenkammer am CERN
- Entdeckung der W- und Z-Bosonen 1983 (Experimente UA1 und UA2 am CERN)



Es gibt ein Problem in Eichtheorien: alle Austauschteilchen müssen masselos sein !

Widerspruch zur kurzen Reichweite der schwachen WW
und zu den beobachteten großen Massen der W- und Z-Bosonen

François Englert Peter W. Higgs

Es gibt ein Problem in Eichtheorien: alle Austauschteilchen müssen masselos sein !

Widerspruch zur kurzen Reichweite der schwachen WW
und zu den beobachteten großen Massen der W- und Z-Bosonen

**gelöst durch den Brout-Englert-Higgs-Mechanismus
und das Higgs-Teilchen**

Higgs-Boson entdeckt von den Experimenten ATLAS und CMS
am CERN im Jahr 2012, Nobelpreis für die (noch lebenden)

Theoretiker 2013



François Englert

Peter W. Higgs

Es gibt ein Problem in Eichtheorien: alle Austauscheteilchen müssen masselos sein !

Widerspruch zur kurzen Reichweite der schwachen WW
und zu den beobachteten großen Massen der W- und Z-Bosonen

**gelöst durch den Brout-Englert-Higgs-Mechanismus
und das Higgs-Teilchen**

Higgs-Boson entdeckt von den Experimenten ATLAS und CMS
am CERN im Jahr 2012, Nobelpreis für die (noch lebenden)

Theoretiker 2013



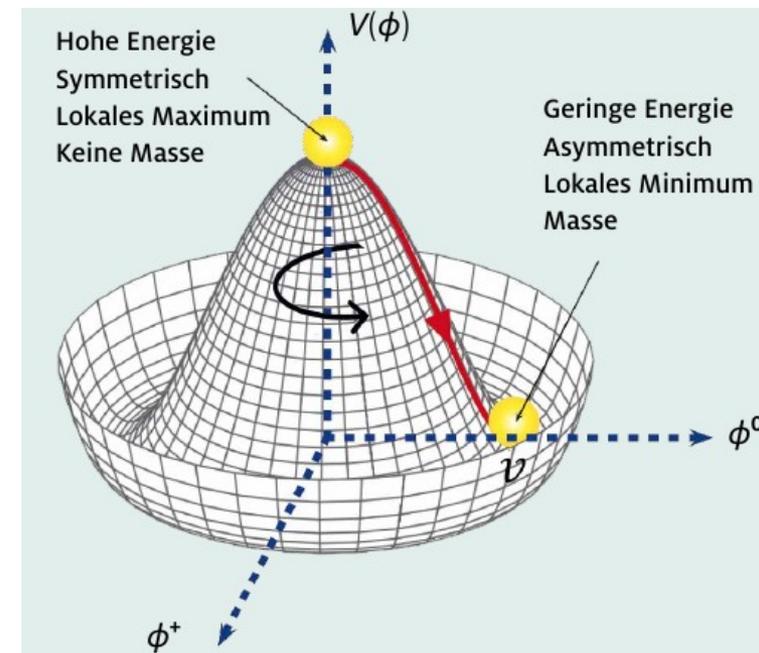
nobelprize.org

François Englert Peter W. Higgs

- Ein neues Quantenfeld mit speziellem Potential
(Minimum nicht beim Wert 0 !), das Higgs-Feld,
führt zusammen mit der Eichsymmetrie für die
Ladungen zu einem Massenterm für die
W-und Z-Bosonen, das Photon bleibt masselos
- das gleiche Higgs-Feld kann durch Wechselwirkung
mit den Fermionen auch Massenterme für
für alle Materie-Teilchen erzeugen

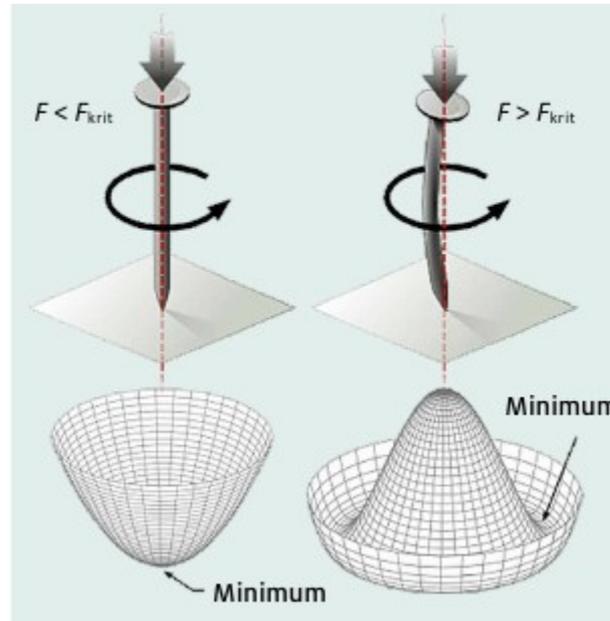
experimenteller Test:

- Nachweis des Higgs-Bosons
- Kopplungen an Fermionen proportional zur Masse



Spontane Symmetriebrechung

Zustand niedrigster Energie hat nicht die Symmetrie des Potentials



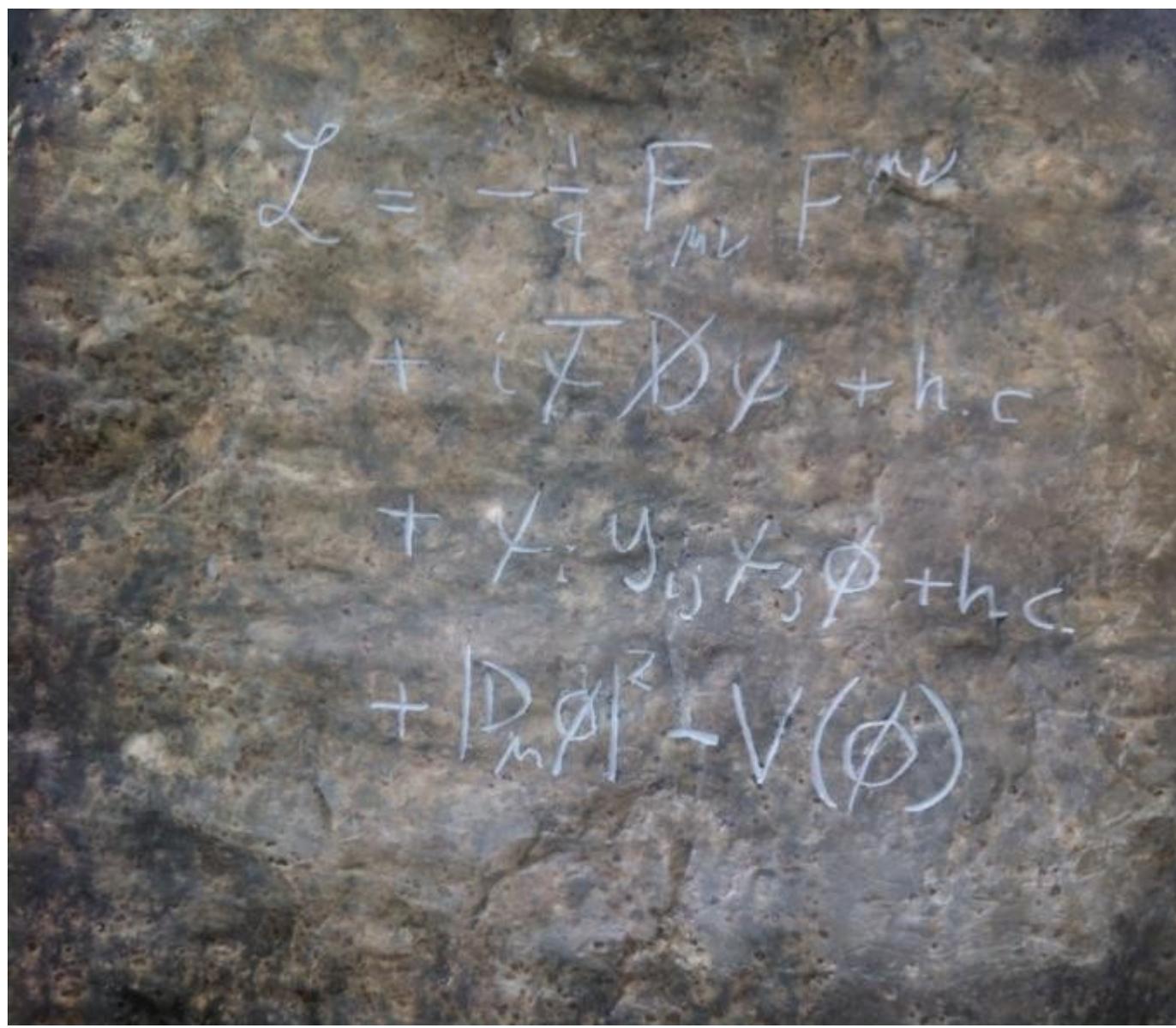
Analogie elastischer Nagel:

links: rotationssymmetrisch

rechts: eine (zufällige) Richtung ausgezeichnet

Die potenzielle Energie bleibt in beiden

Fällen rotationssymmetrisch.



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$+ (\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c)$$

$$+ \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c$$

$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c. \\ & + \Psi_i Y_{ij} \Psi_j \Phi + h.c. \\ & + |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c. \\ & + \Psi_i Y_{ij} \Psi_j \Phi + h.c. \\ & + |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)\end{aligned}$$

die Kräfte ...

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c. \\ & + \Psi_i Y_{ij} \Psi_j \Phi + h.c. \\ & + |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)\end{aligned}$$

die Kräfte ...

... ihre Wechselwirkung
mit Materie

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c. \\ & + \Psi_i Y_{ij} \Psi_j \Phi + h.c. \\ & + |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)\end{aligned}$$

die Kräfte ...

... ihre Wechselwirkung
mit Materie

Masse durch Wechsel-
wirkung mit Higgs-Boson

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + h.c. \\ & + \Psi_i Y_{ij} \Psi_j \Phi + h.c. \\ & + |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi)\end{aligned}$$

die Kräfte ...

... ihre Wechselwirkung
mit Materie

Masse durch Wechsel-
wirkung mit Higgs-Boson

„enabling“ Higgs-Potential

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{GWS} = & \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) \Psi_f - eQ_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) + \\
 & + \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}_L^i \gamma^\mu b_L^i W_\mu^+ + \bar{b}_L^i \gamma^\mu a_L^i W_\mu^-) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu (I_f^3 - 2s_w^2 Q_f - I_f^3 \gamma_5) \Psi_f Z_\mu + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 - \frac{1}{2} |\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+ + \\
 & - ie(W_\mu^+ A_\nu - W_\nu^+ A_\mu) + ig' c_w (W_\mu^+ Z_\nu - W_\nu^+ Z_\mu)|^2 + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 + \\
 & - \frac{1}{2} M_\eta^2 \eta^2 - \frac{g M_\eta^2}{8M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M_\eta^2}{32M_W} \eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2} \eta W_\mu^+|^2 + \\
 & + \frac{1}{2} |\partial_\mu \eta + iM_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta
 \end{aligned}$$

- konsistente theoretische Beschreibung der fundamentalen Teilchen und der Kräfte zwischen ihnen **AUSNAHME: Gravitation !**
- beruht auf grundlegenden Symmetrien – **elegant und schön !**
- Grundlagen in den frühen 70er Jahren – und bis heute alle Präzisionstests bestanden !
- Teilchenmassen durch **„Higgs-Mechanismus“**

(ein) **Higgs-Teilchen** 2012 gefunden

$$-\frac{1}{4}|\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig'c_w(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 +$$

$$-\frac{1}{2}M_\eta^2\eta^2 - \frac{gM_\eta^2}{8M_W}\eta^3 - \frac{g'^2M_\eta^2}{32M_W}\eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2}\eta W_\mu^+|^2 +$$

$$+\frac{1}{2}|\partial_\mu\eta + iM_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w}\eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta$$

- konsistente theoretische Beschreibung der fundamentalen Teilchen und der Kräfte zwischen ihnen **AUSNAHME: Gravitation !**
- beruht auf grundlegenden Symmetrien – **elegant und schön !**
- Grundlagen in den frühen 70er Jahren – und bis heute alle Präzisionstests bestanden !
- Teilchenmassen durch **„Higgs-Mechanismus“**

(ein) **Higgs-Teilchen** 2012 gefunden

- viele weitere **offene Fragen** (Gravitation, dunkle Materie & Energie, ...) erfordern allerdings auch

„neue Physik“ jenseits des Standardmodells

- „**Chromodynamik**“ (starke Kraft):
drei (Farb-) Ladungen
Physik invariant unter (komplexen)
Drehungen im Farbraum ($SU(3)$)



8 Gluonen

Starke Kraft

hält Kerne und
Quarks zusammen

- „**Chromodynamik**“ (starke Kraft):
drei (Farb-) Ladungen
Physik invariant unter (komplexen)
Drehungen im Farbraum ($SU(3)$)



8 Gluonen

Starke Kraft

hält Kerne und
Quarks zusammen

Es gibt die **drei Farbladungen**, **rot**, **grün** und **blau**;
alle drei Farbladungen zusammen ergeben einen farb-ungeladenen Zustand;
ebenso neutralisieren sich Farb- und Antifarbladungen

- „**Chromodynamik**“ (starke Kraft):
drei (Farb-) Ladungen
Physik invariant unter (komplexen)
Drehungen im Farbraum ($SU(3)$)



8 Gluonen

Starke Kraft

hält Kerne und
Quarks zusammen

Es gibt die **drei Farbladungen**, **rot**, **grün** und **blau**;
alle drei Farbladungen zusammen ergeben einen farb-ungeladenen Zustand;
ebenso neutralisieren sich Farb- und Antifarbladungen

Quarks mit einer der **drei Farbladungen**

tauschen Austauscheteilchen der starken Kraft,
sog. **Gluonen** („Klebeteilchen“) aus,

Gluonen tragen selbst eine Farb- und ein Antifarbladung,
d.h. ein Gluon wandelt die Farbladung eines Quarks um.

Bei drei Farben gibt es neun Paarungen – eine davon ist
farbneutral, die andern acht entsprechen den 8 Gluonen
der starken Wechselwirkung.

Gluonen wechselwirken – anders als das Licht – auch mit
anderen Gluonen (Gluon-Selbstwechselwirkung).

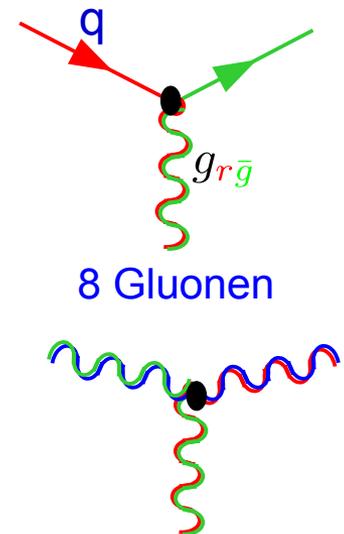
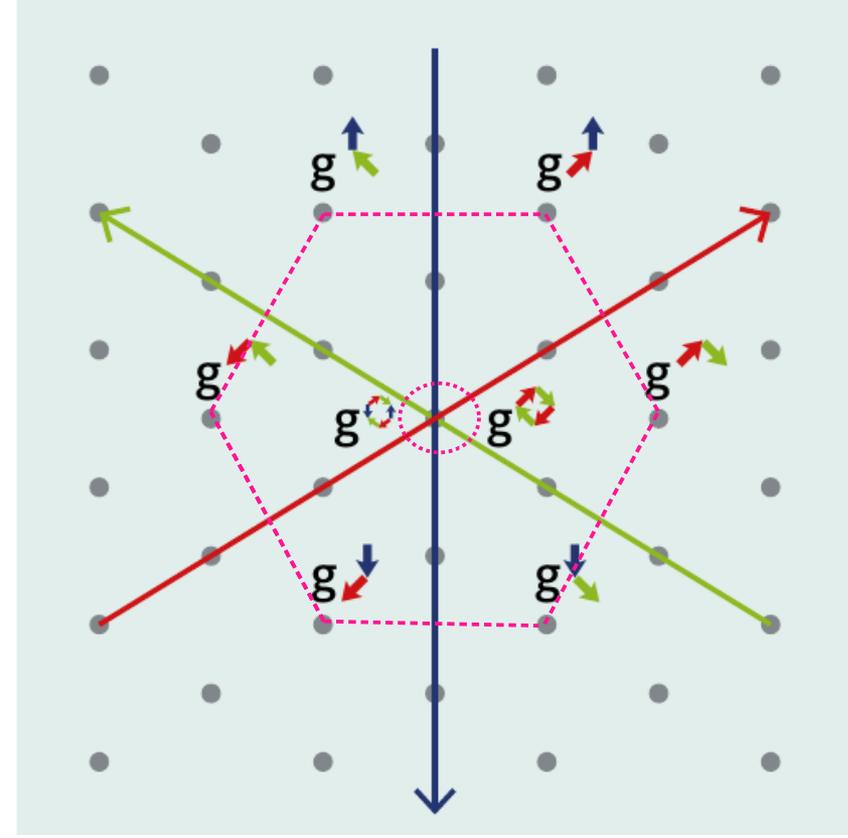
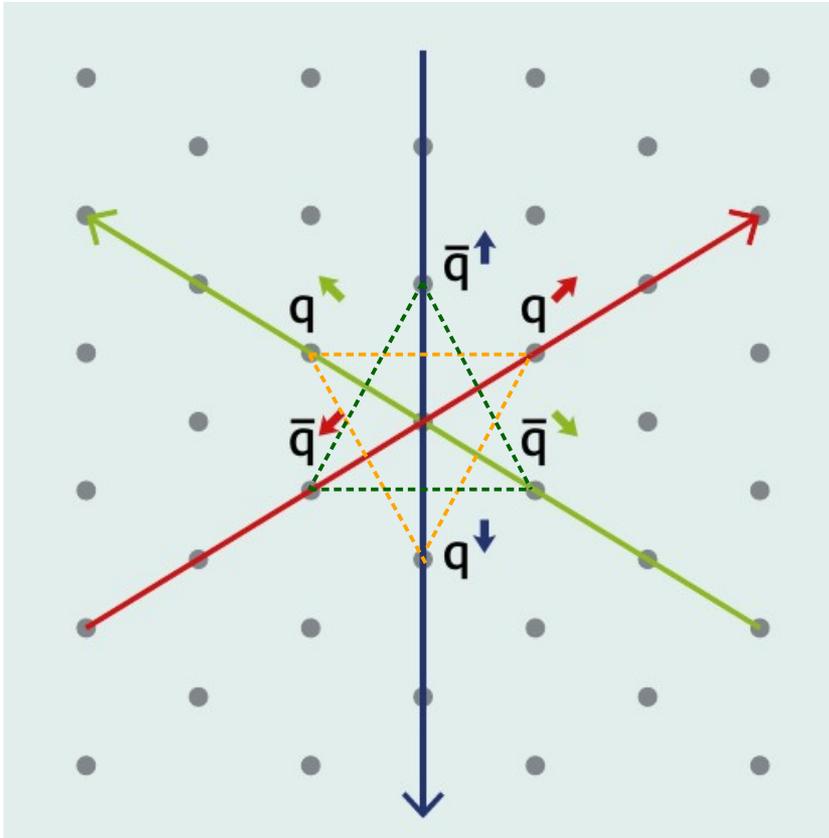


Illustration der Farbladungen als „Farbvektoren“ in der Eben mit drei um je 120° gedrehten Farbachsen.



Lage der Farben der
Quarks und Anti-Quarks
auf dem Farbgitter

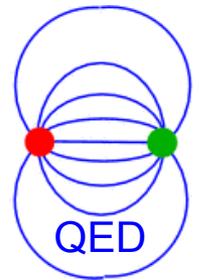
sowie

der Gluonen

Die eingezeichneten geometrischen Strukturen entsprechen der
Triplet-, **Anti-Triplet-** und **Oktett-**Darstellung der Symmetriegruppe SU(3)

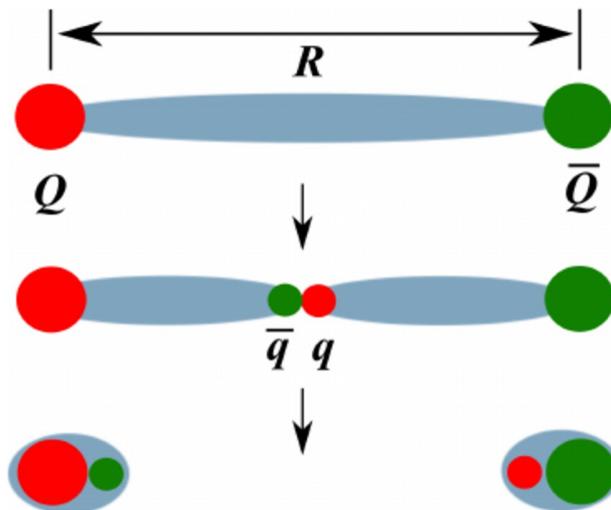
Besonderheit der Starken WW

Austauschteilchen der starken Wechselwirkung tragen selbst eine Farbladung



Besonderheit der Starken WW

Austauschteilchen der starken Wechselwirkung tragen selbst eine Farbladung



→ **Confinement der Quarks**

Wenn man zwei Quarks voneinander entfernt, bleibt das Gluonfeld wegen der Selbstwechselwirkung auf einen Schlauch begrenzt.

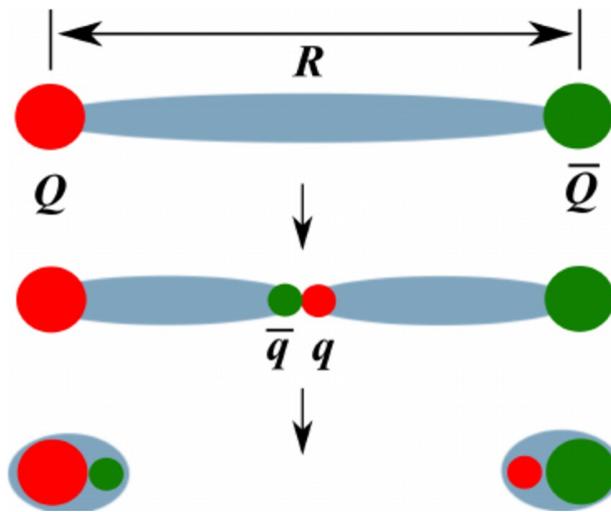
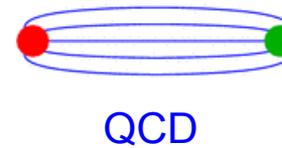
Die potentielle Energie wird so groß, dass neue Quark-Antiquark-Paare entstehen.

Diese bilden Mesonen oder auch Baryonen, deren Farbladungen sich ausgleichen (Farbe-Antifarbe oder rot-grün-blau bzw. anti-rot, anti-grün, anti-blau)

Die so entstandenen freien Objekte sind also farb-neutral.

Besonderheit der Starken WW

Austauschteilchen der starken Wechselwirkung tragen selbst eine Farbladung



→ **Confinement der Quarks**

Wenn man zwei Quarks voneinander entfernt, bleibt das Gluonfeld wegen der Selbstwechselwirkung auf einen Schlauch begrenzt.

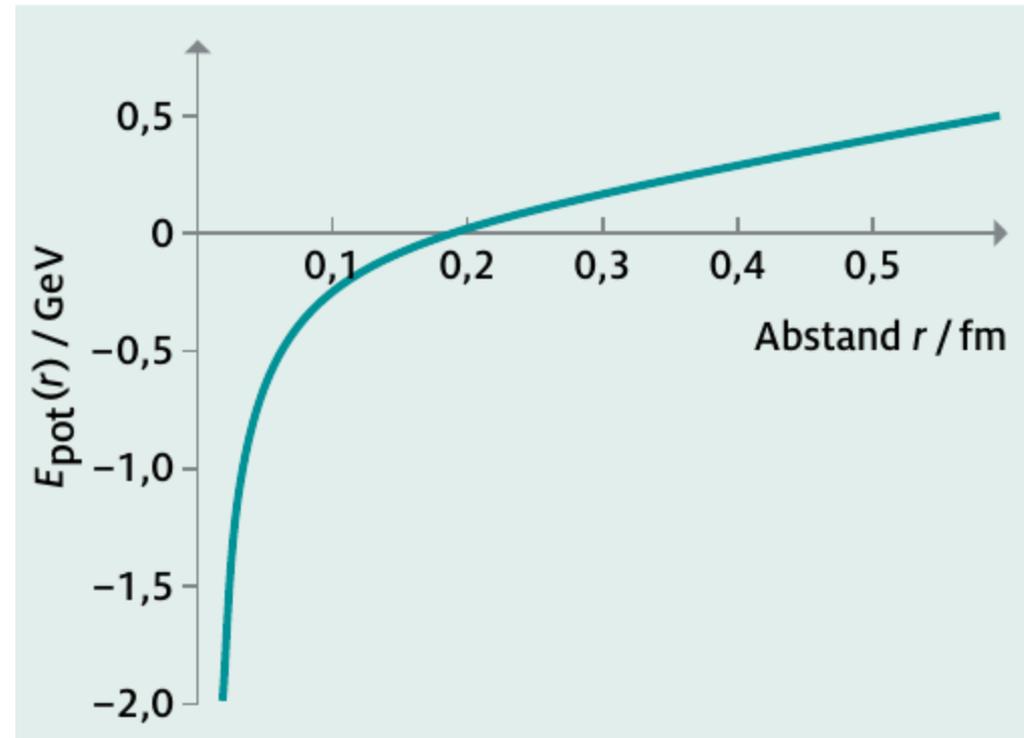
Die potentielle Energie wird so groß, dass neue Quark-Antiquark-Paare entstehen.

Diese bilden Mesonen oder auch Baryonen, deren Farbladungen sich ausgleichen (Farbe-Antifarbe oder rot-grün-blau bzw. anti-rot, anti-grün, anti-blau)

Die so entstandenen freien Objekte sind also farb-neutral.

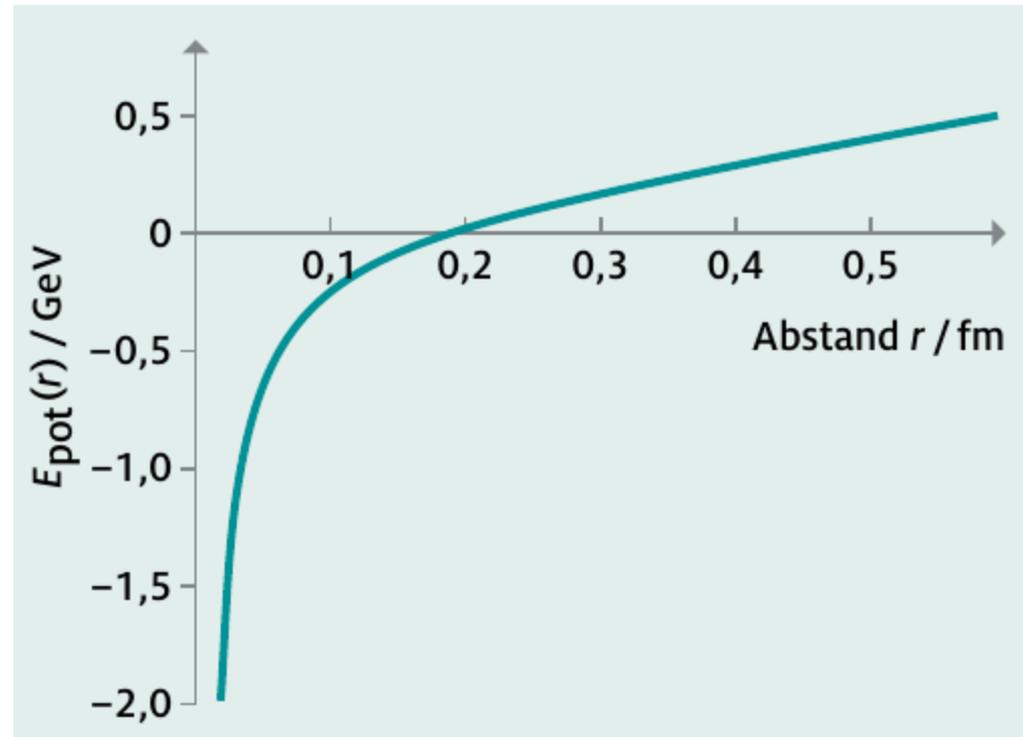
- Es werden **keine freien Quarks** beobachtet, sondern immer **farbneutrale Hadronen**
- **Austauschteilchen zwischen Nukleonen** sind **farb-neutrale π -Mesonen**; die Kernkraft ist also eine „Restwechselwirkung“ der Farbkraft

Die potentielle Energie zwischen zwei Quarks erreicht keinen maximalen Wert, sondern steigt für große Abstände immer weiter an.



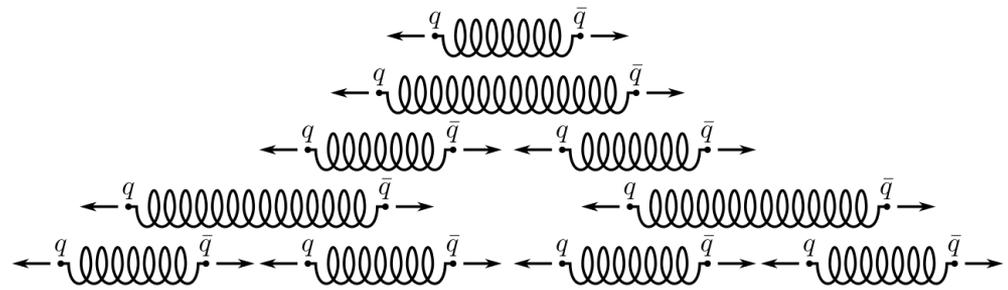
Potenzielle Energie eines Quarks und eines Anti-Quarks in Abhängigkeit ihres Abstandes.

Die potentielle Energie zwischen zwei Quarks erreicht keinen maximalen Wert, sondern steigt für große Abstände immer weiter an.

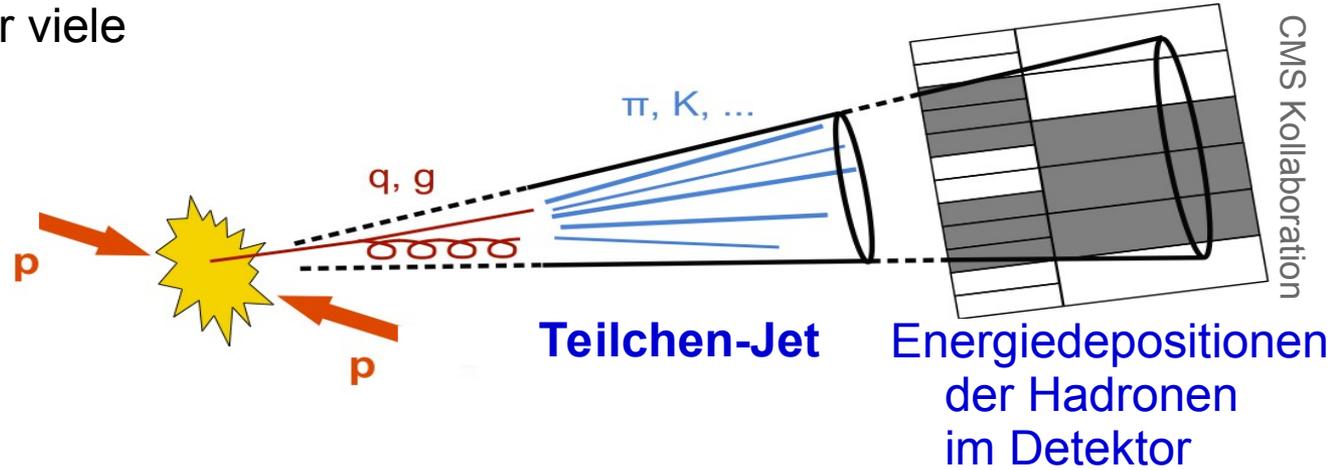


Potenzielle Energie eines Quarks und eines Anti-Quarks in Abhängigkeit ihres Abstandes.

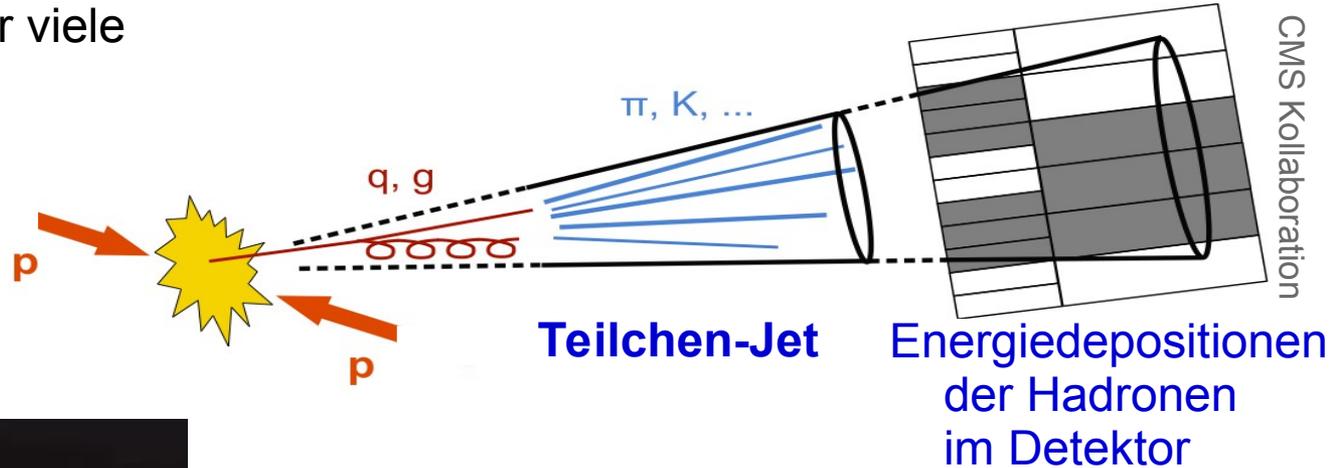
Wenn die potentielle Energie größer wird als die Masse eines Quark- Antiquark-Paares, entstehen neue Paare, die den Abstand verkürzen und die potentielle Energie verringern.



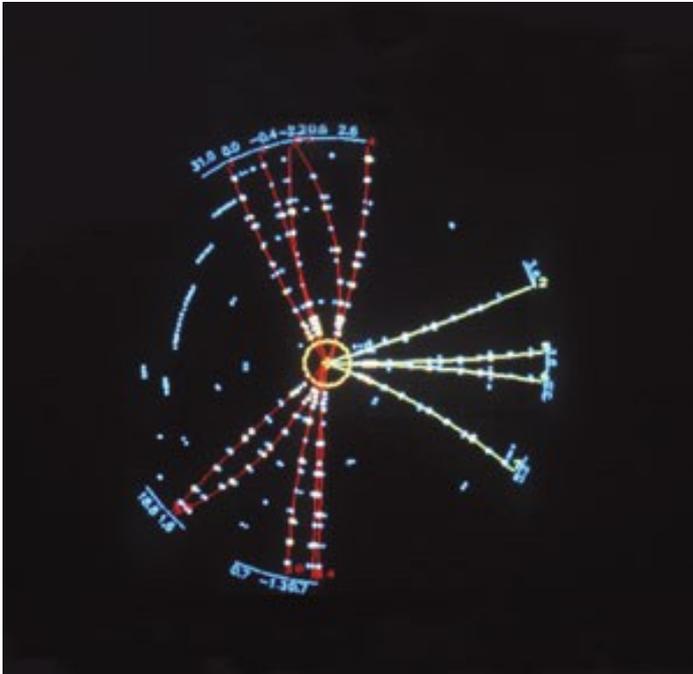
Als Konsequenz der **Erzeugung von Quark-Antiquark-Paaren aus dem Farbfeld** treten im Endzustand sehr viele Teilchen auf, die alle farblos sind (**Hadronen**)



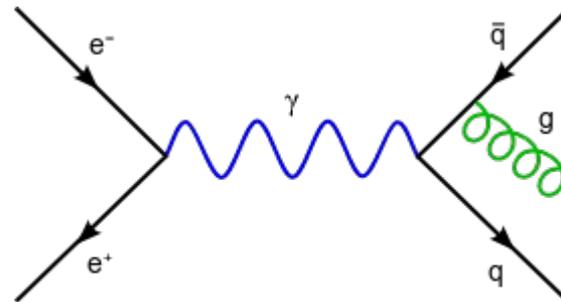
Als Konsequenz der **Erzeugung von Quark-Antiquark-Paaren aus dem Farbfeld** treten im Endzustand sehr viele Teilchen auf, die alle farblos sind (**Hadronen**)



DESY Hamburg



Teilchenjets in $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$
TASSO-Experiment (1979), Petra, DESY

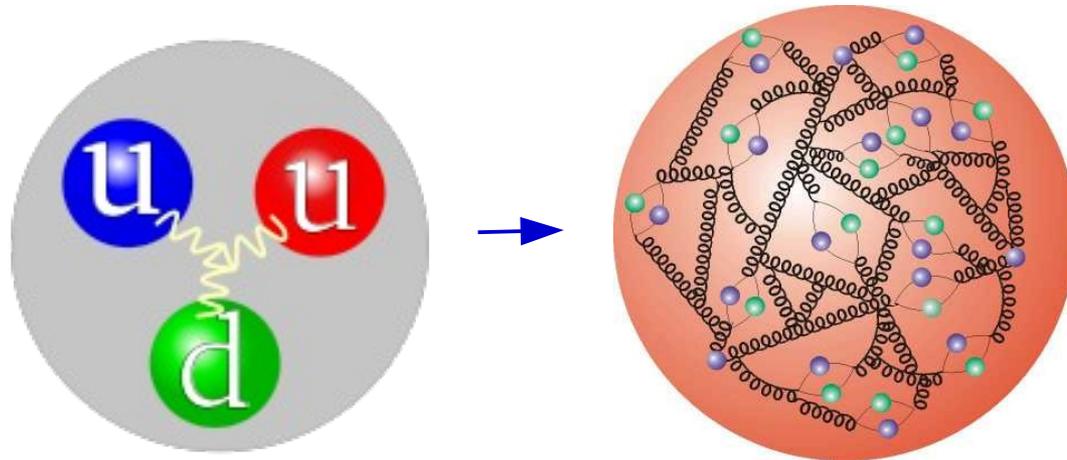


Der dritte Jet im Ereignis entspricht einem abgestrahlten Gluon; das war (zusammen mit anderen Ereignissen in weiteren Experimenten) ein erster Hinweis auf die **Existenz des Gluons**

Unsere jetzigen Kenntnisse der starken Wechselwirkung zwingen uns auch, unser bisheriges einfaches Bild des Protons zu revidieren.

Außer den Quarks gibt es im Proton

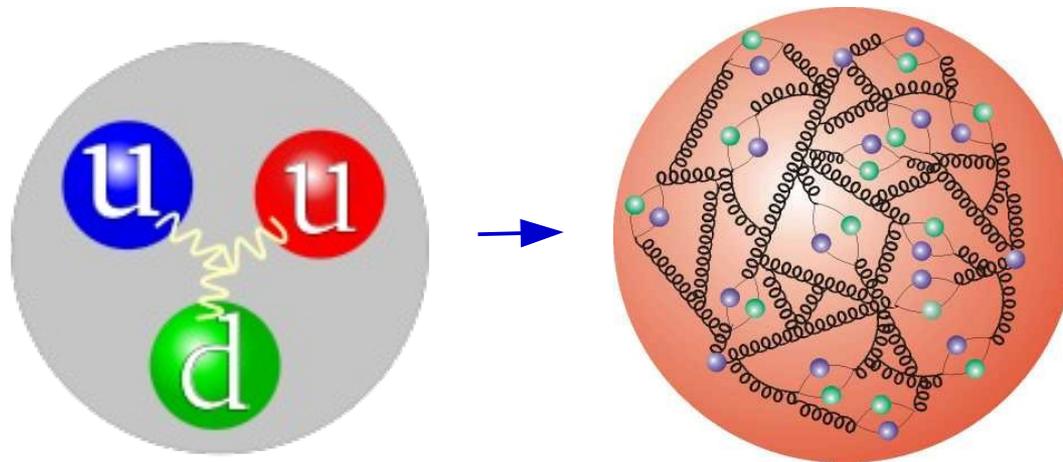
- sehr viele **Gluonen**,
- die starke Wechselwirkung sorgt für die ständige Erzeugung (und Vernichtung) von **Quark-Antiquark-Paaren**.



Unsere jetzigen Kenntnisse der starken Wechselwirkung zwingen uns auch, unser bisheriges einfaches Bild des Protons zu revidieren.

Außer den Quarks gibt es im Proton

- sehr viele **Gluonen**,
- die starke Wechselwirkung sorgt für die ständige Erzeugung (und Vernichtung) von **Quark-Antiquark-Paaren**.



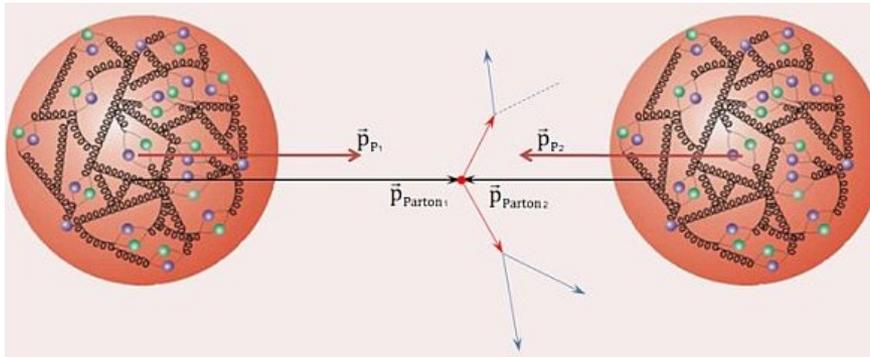
Die Quantenzahlen des Protons werden bestimmt durch die drei **Valenzquarks** u , u , und d .

Ein großer Anteil des Proton-Impulses wird von den Gluonen und von Quarks und Antiquarks den sog. **Seequarks** getragen.

Bei **Streuexperimenten mit Protonen** wird also

mit einer **bestimmten Wahrscheinlichkeit** ein

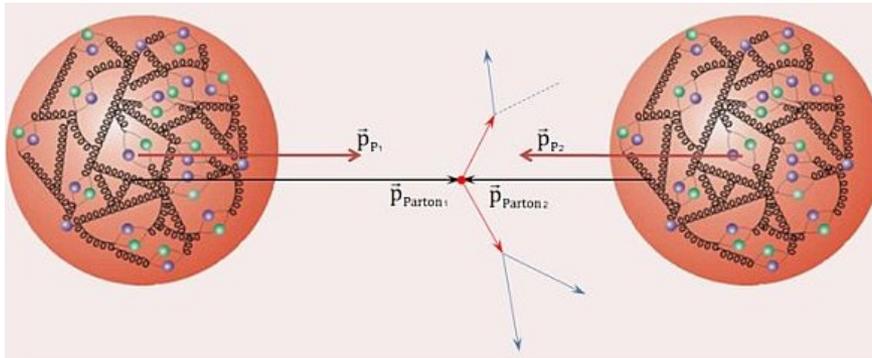
- **Valenzquark**
- **Glueon**
- oder **Seequark** getroffen:



Bei **Streuexperimenten mit Protonen** wird also

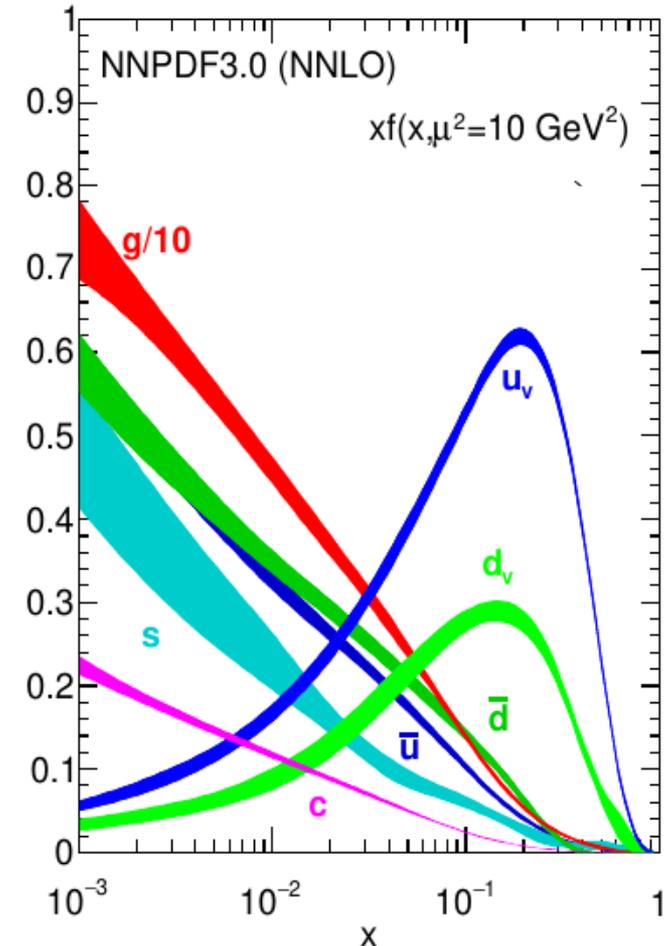
mit einer **bestimmten Wahrscheinlichkeit** ein

- **Valenzquark**
- **Gluon**
- oder **Seequark** getroffen:



Die genaue Zusammensetzung hängt von der Energieskala des Streuprozesses ab.

Die Verteilung der Partonen im Proton kann nicht theoretisch vorhergesagt werden, sondern muss experimentell bestimmt werden

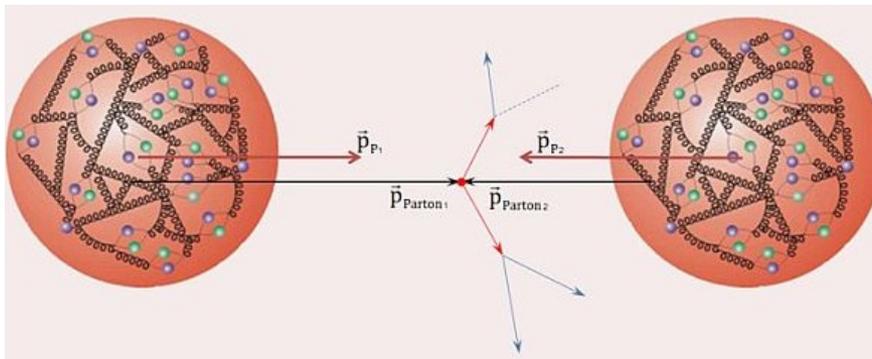


Verteilung der Impulsanteile x der Partonen im Proton

Bei **Streuexperimenten mit Protonen** wird also

mit einer **bestimmten Wahrscheinlichkeit** ein

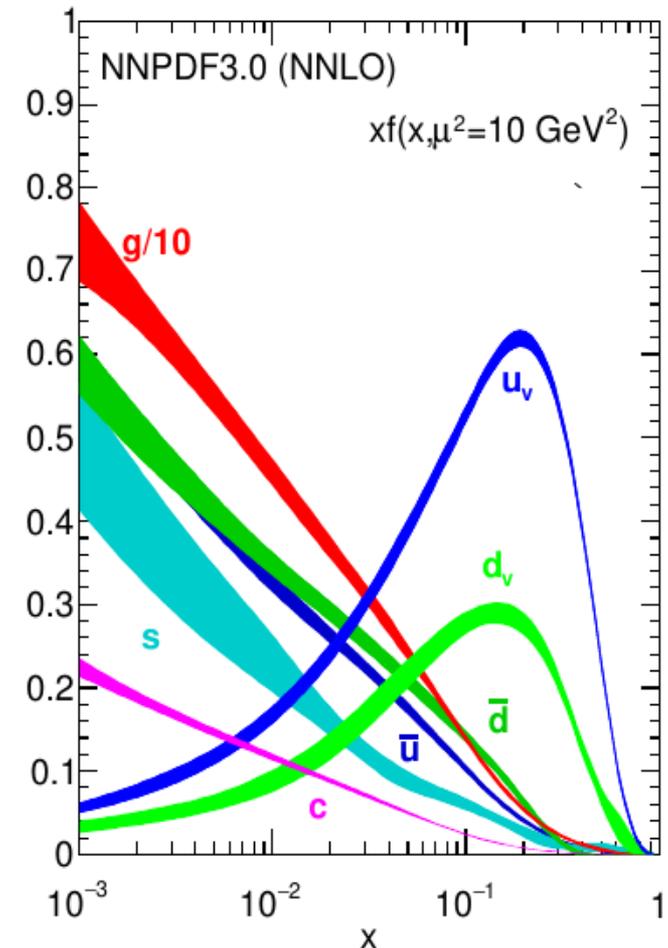
- **Valenzquark**
- **Gluton**
- oder **Seequark** getroffen:



Die genaue Zusammensetzung hängt von der Energieskala des Streuprozesses ab.

Die Verteilung der Partonen im Proton kann nicht theoretisch vorhergesagt werden, sondern muss experimentell bestimmt werden

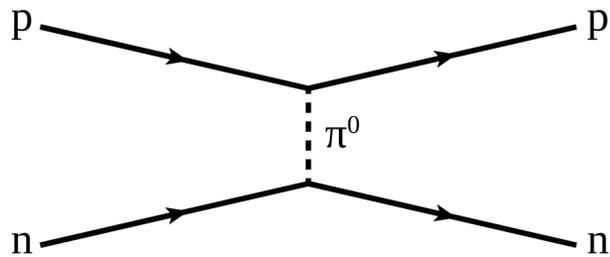
Die häufigsten Reaktionen in Proton-Proton-Kollisionen am LHC sind Gluon-Gluon; eigentlich ist der LHC also ein „Gluon-Kollider“



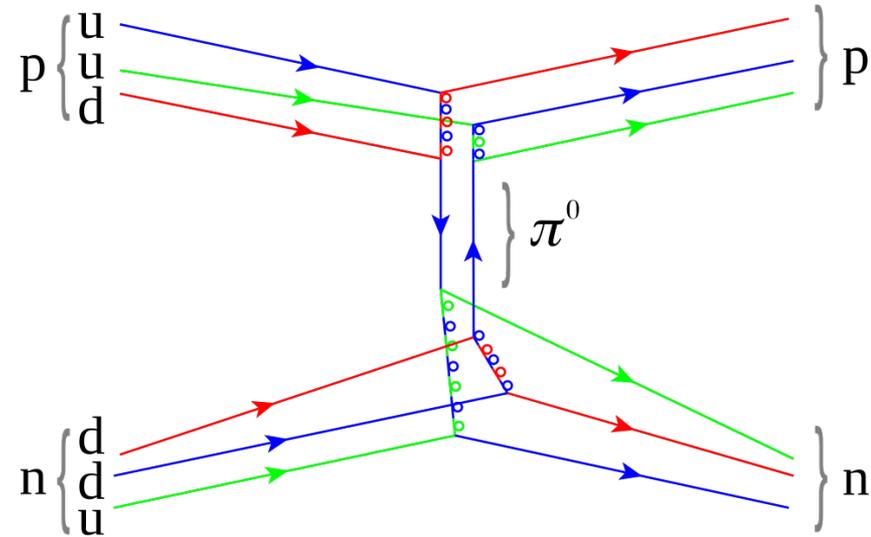
Verteilung der Impulsanteile x der Partonen im Proton

In der Kernphysik (Vorl. 22) hatten wir Pionen als die Austauscheteilchen der starken Kernkraft kennengelernt.

Wie hängt diese Beschreibungsweise mit der fundamentalen Farbkraft zusammen ?

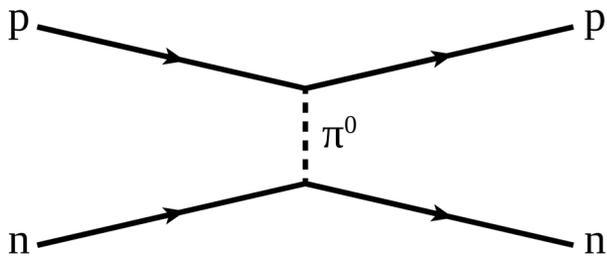


|||

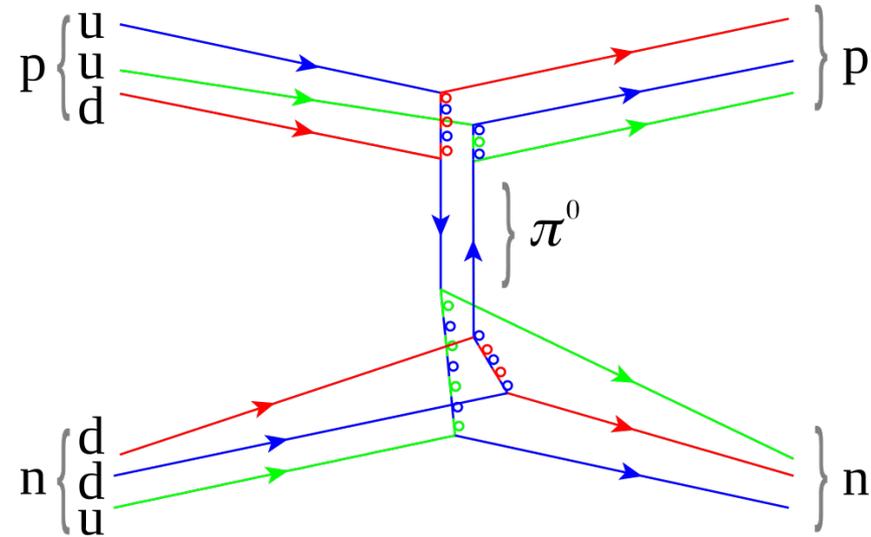


In der Kernphysik (Vorl. 22) hatten wir Pionen als die Austauscheteilchen der starken Kernkraft kennengelernt.

Wie hängt diese Beschreibungsweise mit der fundamentalen Farbkraft zusammen ?



\equiv



Natürlich gibt es viele weitere mögliche Diagramme,
vor allem auch solche (in höherer Ordnung) mit sehr viel mehr Gluonen

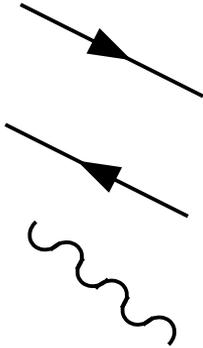
→ eine vollständige Beschreibung der Kernkraft
mit der Quantenchromodynamik ist bisher nicht gelungen

Ende Vorlesung 25

und Zeit für Fragen ?

Feynman-Diagramme sind aus einzelnen Komponenten aufgebaut:

Einlaufende



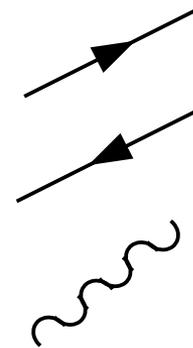
und

Fermion

Anti-Fermion

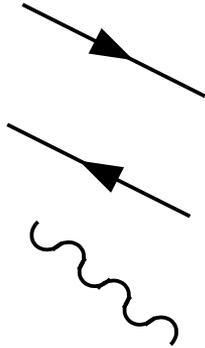
Photon

auslaufende Teilchen



Feynman-Diagramme sind aus einzelnen Komponenten aufgebaut:

Einlaufende



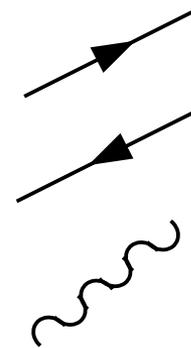
und

Fermion

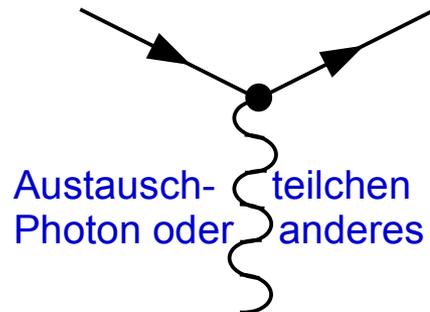
Anti-Fermion

Photon

auslaufende Teilchen



Vertizes mit Wechselwirkung

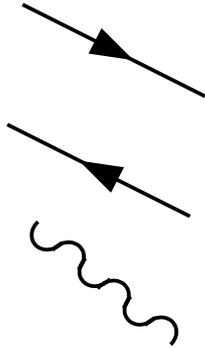


Austausch-
Photon oder
teilchen
anderes

Streuung

Feynman-Diagramme sind aus einzelnen Komponenten aufgebaut:

Einlaufende



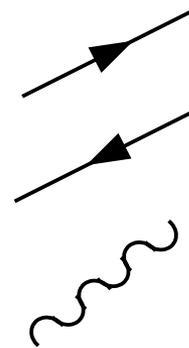
und

Fermion

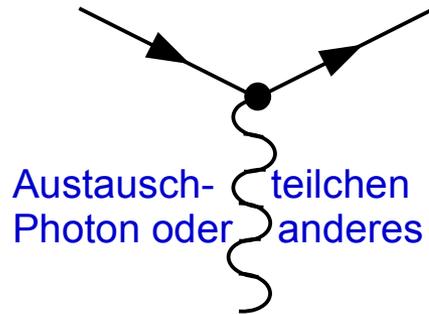
Anti-Fermion

Photon

auslaufende Teilchen

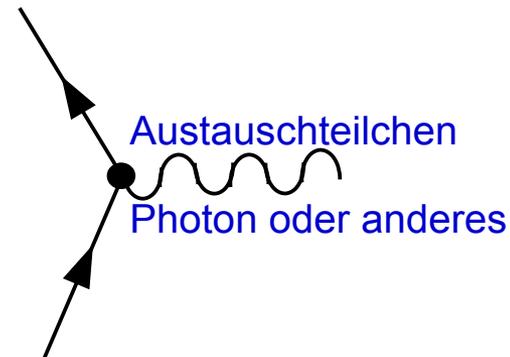


Vertizes mit Wechselwirkung



Austausch-
Photon oder
teilchen
anderes

Streuung

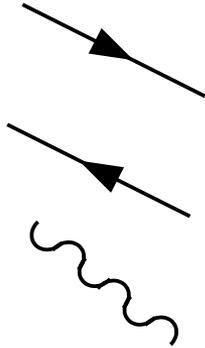


Austauschteilchen
Photon oder anderes

Paarvernichtung

Feynman-Diagramme sind aus einzelnen Komponenten aufgebaut:

Einlaufende



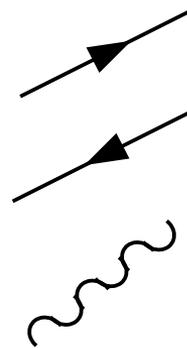
und

Fermion

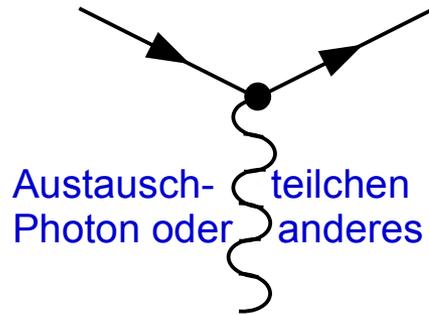
Anti-Fermion

Photon

auslaufende Teilchen

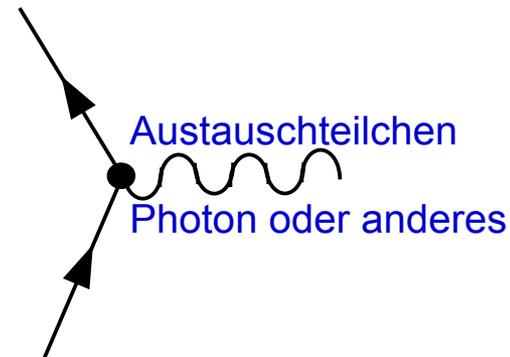


Vertizes mit Wechselwirkung



Austausch-
teilchen
Photon oder
anderes

Streuung

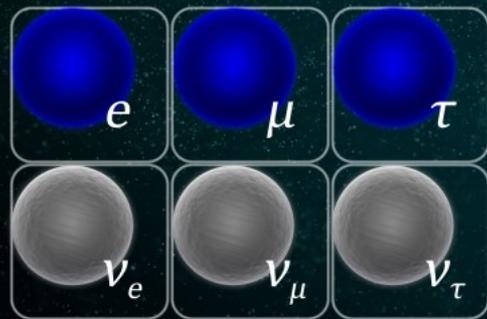
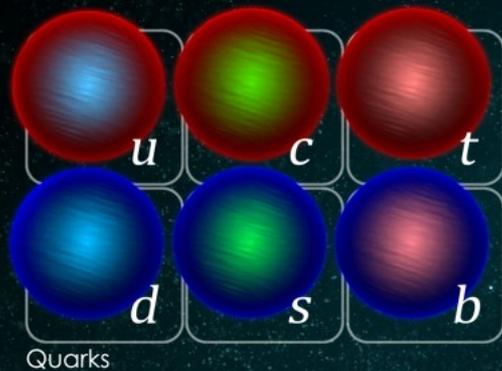


Austauschteilchen
Photon oder anderes

Paarvernichtung

Vertizes spiegeln die **Struktur der Wechselwirkungen** wider

$e^+, e^- \rightarrow \gamma$; $n, p \rightarrow \pi^\pm$; $n, n \rightarrow \pi^0$; $p, p \rightarrow \pi^0$; $e^\pm, \nu \rightarrow W^\pm$



Higgs boson



Pause

und Zeit für Fragen ?