

Photonen, Gluonen, W - und Z -Bosonen: Von den Kräften, die die Welt zusammenhalten

Marc Wagner

Goethe-Universität Frankfurt am Main, Institut für Theoretische Physik

mwagner@itp.uni-frankfurt.de

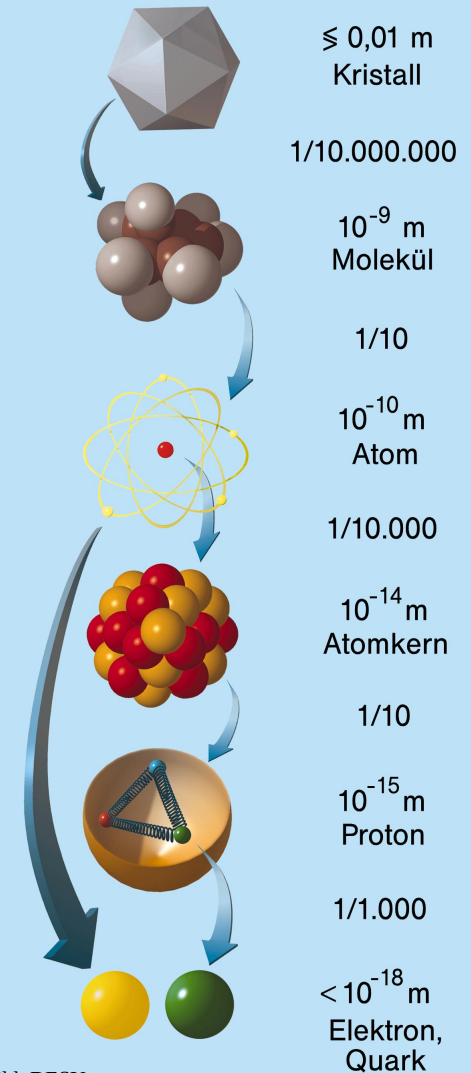
<http://itp.uni-frankfurt.de/~mwagner/>

03. Juni 2020



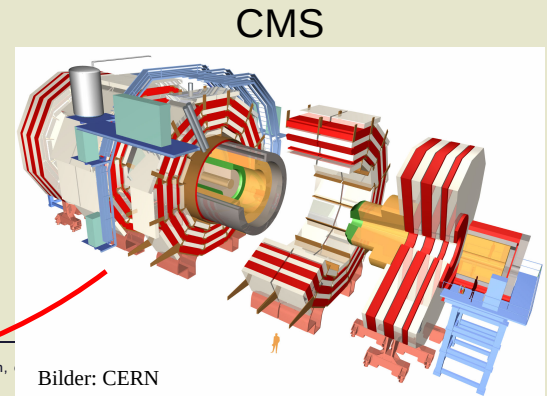
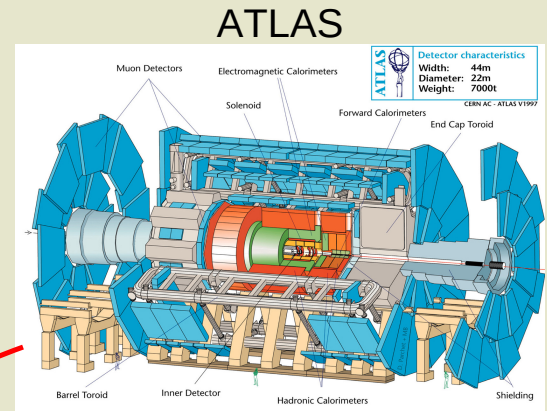
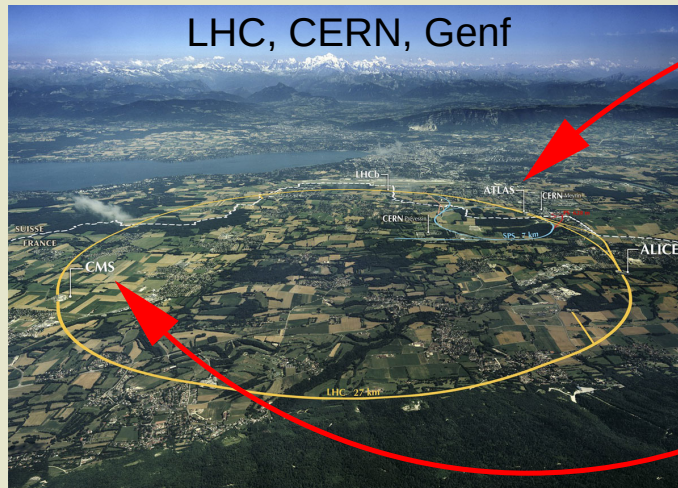
Skalen von Bindungszuständen und Elementarteilchen

- Skalen von Bindungszuständen und Elementarteilchen:
 - Von mit bloßem Auge sichtbaren Kristallen ...
 - ... bis zu den mit “Riesenmikroskopen” gerade noch auflösbaren kleinsten Teilchen.



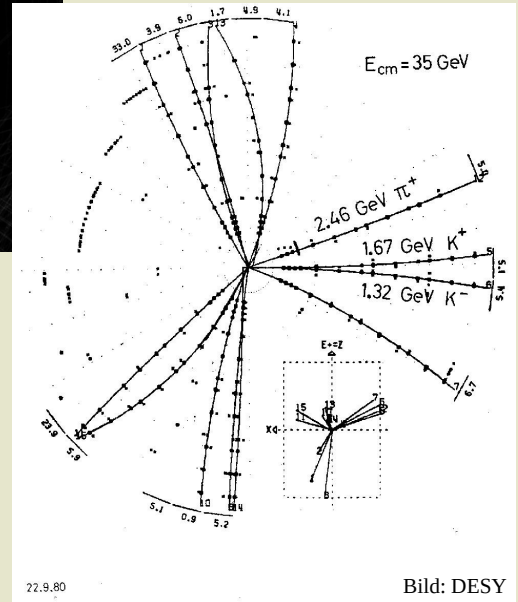
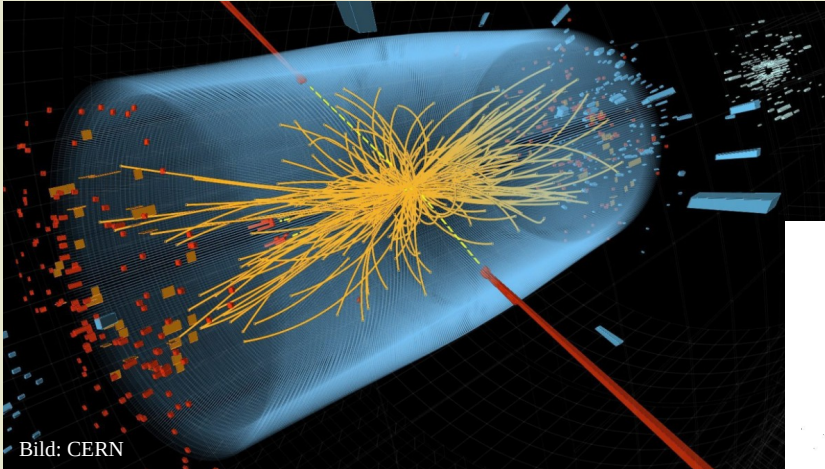
Unsere Riesenmikroskope: Teilchenbeschleuniger

- Gegenseitiger Beschuss von Teilchen (z.B. Proton-Proton-Kollisionen) liefert Informationen über die Struktur von zusammengesetzten Teilchen (z.B. Protonstruktur) und über fundamentale Kräfte.



Bilder: CERN

Teilchenspuren im Detektor



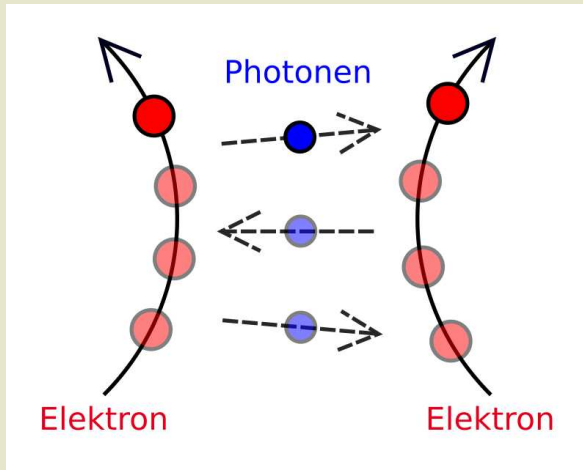
Wechselwirkungen = Kräfte (1)

- **Es gibt vier fundamentale Wechselwirkungen:**
 - **Gravitation:**
 - * Erdanziehung, Bewegung von Planeten, Sternen und Galaxien, Entwicklung des Universums, ...
 - * Sehr schwach, aber ausschließlich anziehend (die anderen Kräfte können auch abstoßend sein).
 - **Elektromagnetische Kraft:**
 - * Elektrizität, Licht, Bildung von Atomen, ...
 - **Starke Wechselwirkung:**
 - * Bildung von Protonen, Neutronen, Atomkernen (Kernkräfte), ...
 - **Schwache Wechselwirkung:**
 - * Radioaktiver Zerfall ($\text{Neutron} \rightarrow \text{Proton} + \text{Elektron}, \dots$).

Wechselwirkungen = Kräfte (2)

- **Wie wirken Kräfte?**

- **Materieteilchen** wirken Kräfte aufeinander aus, indem sie **Bosonen** austauschen (Teilchen die Kräfte übertragen).
- Z.B. stoßen sich zwei elektrisch geladene **Elektronen** ab, indem sie **Photonen** austauschen.



Wechselwirkungen = Kräfte (3)

- Die Gesamtheiten aller ausgetauschten Bosonen werden durch Kraftfelder beschrieben:
 - Z.B. bilden die Photonen das elektromagnetische Feld.
 - Analog bilden Gluonen, W - und Z -Bosonen und Gravitonen die Felder der starken und schwachen Wechselwirkung und der Gravitation.
 - Während es experimentell nicht ganz einfach ist, einzelne Bosonen zu studieren (z.B. ein einzelnes Photon), können Felder (insbesondere das elektromagnetische Feld) vergleichsweise leicht beobachtet werden.
 - Felder besitzen sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften
→ **Welle-Teilchen-Dualismus** (analog für Materieteilchen/-felder).

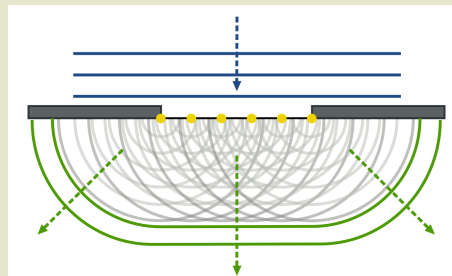
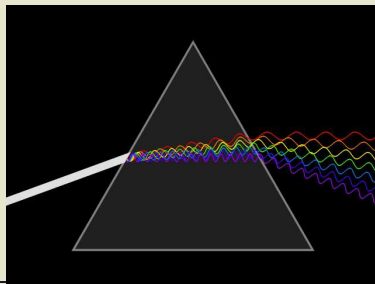
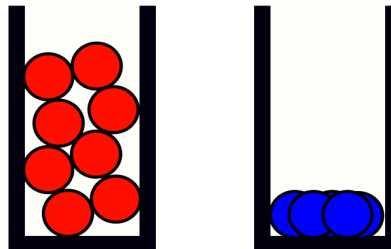


Bild (links): public domain

Bild (rechts): Arne Nordmann, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1944668>

Fermionen und Bosonen

- Ein Teilchen ist entweder ein **Fermion** (materielle Teilchen, z.B. Elektronen, Protonen) oder ein **Boson** (Quanten der Kraftfelder, z.B. Photonen).
- **Fermionen** und **Bosonen** zeigen von Grund auf verschiedene Verhaltensweisen:
 - **Fermionen** (Teilchen mit halbzahligem Eigendrehimpuls [Spin]): Gehen einander aus dem Weg; “können nicht beide am gleichen Ort sein” (besser: Im gleichen Zustand).
 - **Bosonen** (Teilchen mit ganzzahligem Eigendrehimpuls [Spin]): Neigen dazu, zusammenzuklumpen; “wollen alle im gleichen Zustand sein”.



Fermionen Bosonen

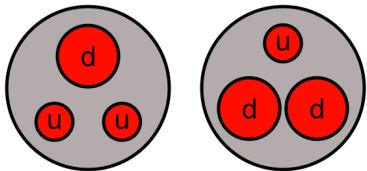
Fermionen, die “Materieteilchen”: Ihre Massen und elektrischen Ladungen (1)

- Quarks und Antiquarks:

Ladung	$+2/3 e$	$-1/3 e$
	$m_{\text{up}} = 1.5 \dots 3.3 \text{ MeV}/c^2$	$m_{\text{down}} = 3.5 \dots 6.0 \text{ MeV}/c^2$
	$m_{\text{charm}} = 1160 \dots 1340 \text{ MeV}/c^2$	$m_{\text{strange}} = 70 \dots 130 \text{ MeV}/c^2$
	$m_{\text{top}} = 169100 \pm 173300 \text{ MeV}/c^2$	$m_{\text{bottom}} = 4130 \dots 4370 \text{ MeV}/c^2$

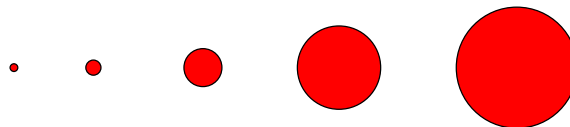
(e : Elementarladung; $1 \text{ MeV}/c^2 = 1.79 \times 10^{-30} \text{ kg}$).

- Quarks finden sich immer in 2er oder 3er Gruppen zusammen und bilden **Hadronen**, z.B. **Proton**=up-up-down, **Neutron**=up-down-down, ...

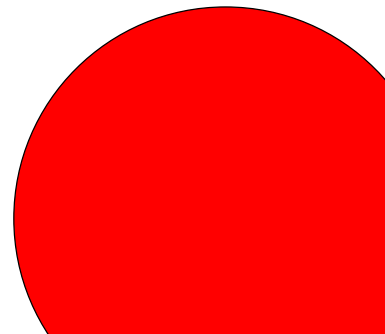


Proton Neutron

Marc Wagner, "Photo



$u \rightarrow d \rightarrow s \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow t$

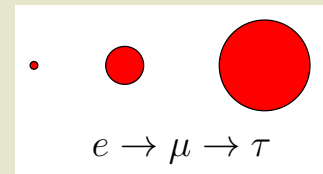
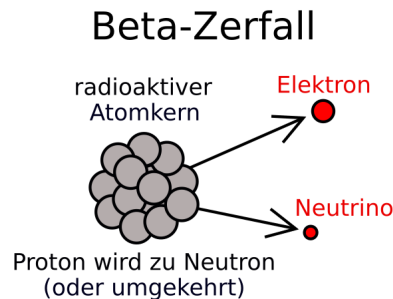
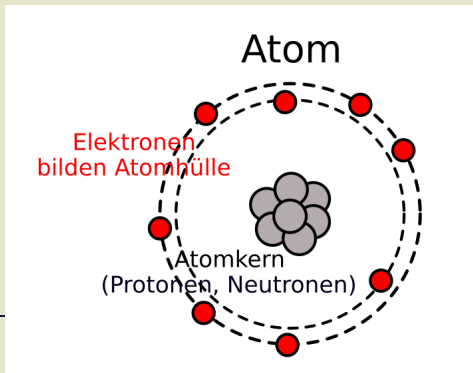


Fermionen, die “Materieteilchen”: Ihre Massen und elektrischen Ladungen (2)

- Leptonen und Antileptonen:**

Ladung	$-e$	0
	Elektron: $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$	Neutrino: $m_{\nu_e} < 2 \times 10^{-6} \text{ MeV}/c^2$
	Myon: $m_\mu = 105.66 \text{ MeV}/c^2$	Neutrino: $m_{\nu_\mu} < 0.19 \text{ MeV}/c^2$
	Tauon: $m_\tau = 1777 \text{ MeV}/c^2$	Neutrino: $m_{\nu_\tau} < 18.2 \text{ MeV}/c^2$

- Elektronen bilden z.B. die Hülle von Atomen.
- Neutrinos treten z.B. in radioaktiven Zerfällen auf, $n \rightarrow p + e + \nu_e$.

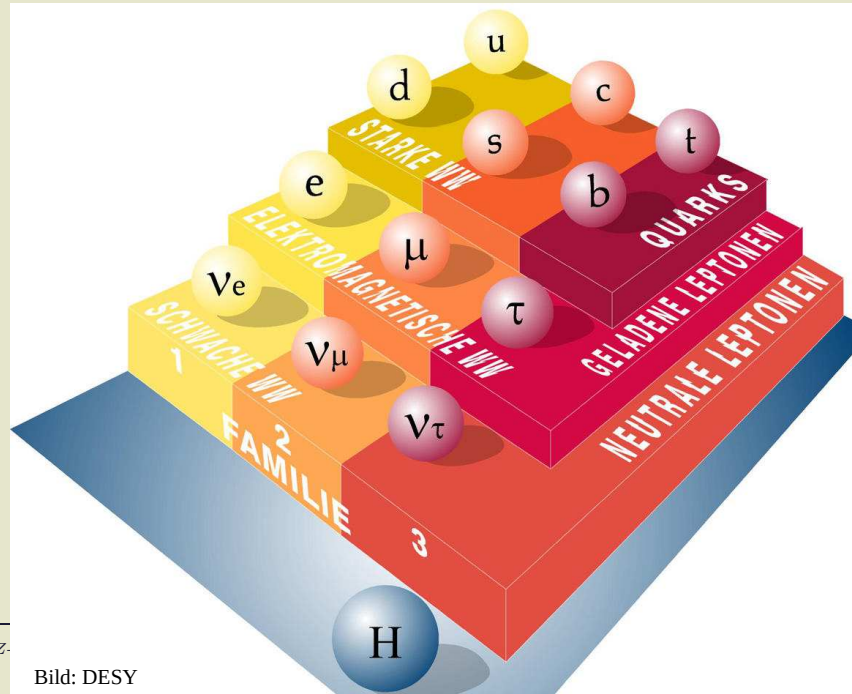


Bosonen, die “Träger der Kräfte”: Ihre Reichweiten und relative Stärken

Kraft	Phänomen	Reichweite	relative Stärke	Austauschbosonen
Starke WW	bindet Quarks zu Nukleonen und diese zu Kernen	sehr kurz ($\approx 10^{-15}$ m)	1	Gluonen
Elektromagnetische WW	Elektrizität, Licht, Atomkräfte, ...	unendlich	1/137	Photonen
Schwache WW	radioaktiver Zerfall	extrem kurz ($\approx 10^{-18}$ m)	10^{-13}	W- und Z-Bosonen
Gravitative WW	Erdanziehung, Planetenbewegung, Kosmologie, ...	unendlich	10^{-38}	Gravitonen

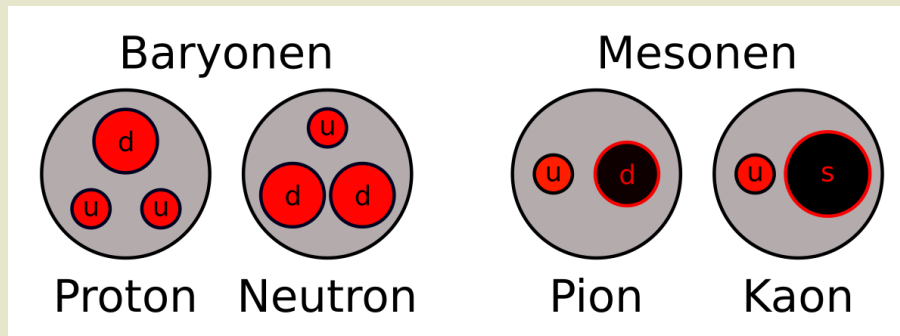
Standardmodell der Teilchenphysik

- Gültig bis zu Abständen von $\approx 10^{-18}$ m.
- **Higgs-Teilchen**: Ein Boson, verantwortlich für Quark- und Leptonmassen.
- Abstände $< 10^{-18}$ m: Physik jenseits des Standardmodells (Stringtheorie, Supersymmetrie, Quantengravitation, extra Dimensionen, ...) ...?



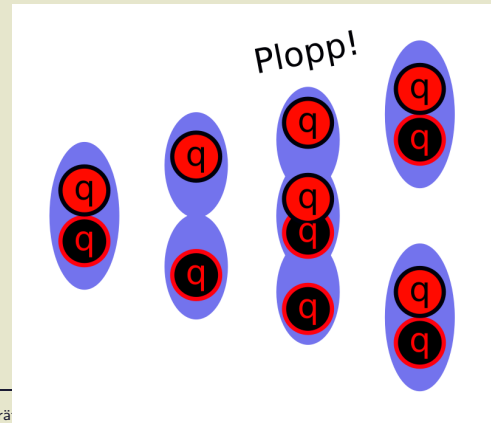
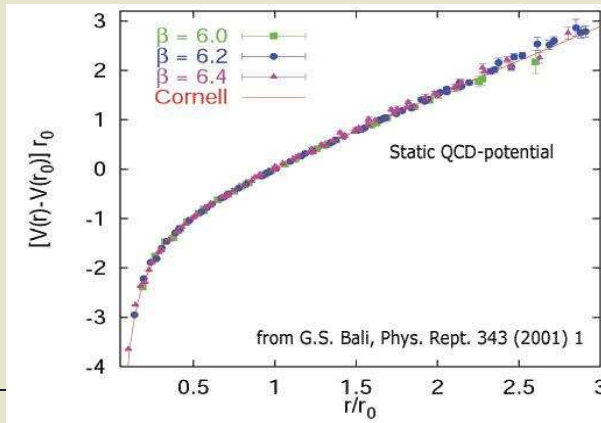
Starke Wechselwirkung, QCD (1)

- **Starke Wechselwirkung: Quarks und Antiquarks binden sich zu Hadronen (durch Gluonaustausch).**
 - **Baryonen** (drei Quarks oder drei Antiquarks):
Proton (uud), Neutron (udd), Σ^+ (uus), Σ^- (dds), ...
 - **Mesonen** (ein Quark und ein Antiquark):
 π^+ ($u\bar{d}$), π^- ($\bar{u}d$), K^+ ($u\bar{s}$), K^- ($\bar{u}s$), ...
 - Sechs verschiedene Quarks (u, d, s, c, t, b) $\rightarrow$ "Teilchen-Zoo".
- Zu Grunde liegende Theorie: **Quantenchromodynamik (QCD)**.



Starke Wechselwirkung, QCD (2)

- Quarks bei “großen Abständen”, $\gtrsim 10^{-15} \text{ m} \approx$ Ausdehnung des Protons:
 - Starke anziehende Kraft zwischen zwei Quarks, die auch bei wachsendem Abstand nicht schwächer wird.
 - $E = mc^2$ (Energie kann in Masse umgewandelt werden und umgekehrt):
→ Neues Quark-Antiquark-Paar, wenn Abstand $\gtrsim 1.25 \times 10^{-15} \text{ m}$.
 - **Quarks können im Experiment nicht isoliert beobachtet werden.**
 - **Quarks bleiben in Hadronen eingeschlossen (“Confinement”).**

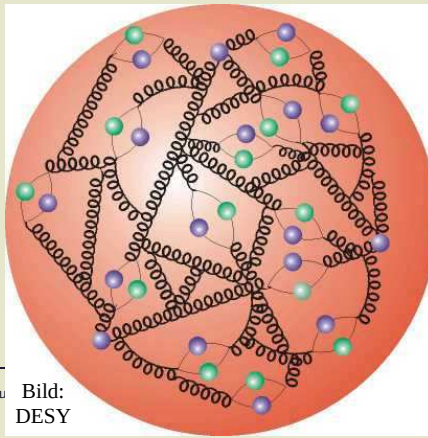


Computersimulationen der QCD (1)

- Das **Proton** besteht aus **drei Quarks, up, up und down**.
- Die Summe der Quarkmassen beträgt nur etwa 1% der Protonmasse:

$$m_{\text{up}} + m_{\text{up}} + m_{\text{down}} \approx 10 \text{ MeV}/c^2 \quad \leftrightarrow \quad m_{\text{Proton}} = 938 \text{ MeV}/c^2.$$

- **Woher kommen die verbleibenden 99% der Protonmasse?**
→ Die zwischen den Quarks ausgetauschten Gluonen und im Rahmen dessen erzeugte kurzlebige Quark-Antiquark-Paare tragen zur Protonmasse bei.



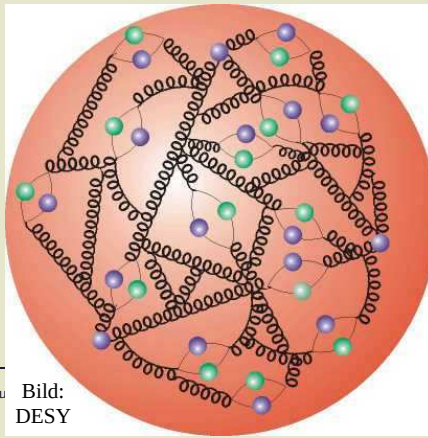
Computersimulationen der QCD (2)

- Die Quantenchromodynamik, definiert durch

$$S = \int d^4x \left(\sum_{f \in \{\text{up,down},\dots\}} \bar{\psi}^{(f)} \left(\gamma_\mu \left(\partial_\mu - i A_\mu \right) + m_f \right) \psi^{(f)} + \frac{1}{2g^2} \text{Tr} \left(F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} \right) \right)$$
$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - i [A_\mu, A_\nu],$$

beschreibt **Quarks**, **Gluonen** und deren Wechselwirkungen.

- Ausgehend von dieser Definition und den **Quarkmassen** m_{up} und m_{down} sollte es also im Prinzip möglich sein, die Masse des Protons zu berechnen.



Computersimulationen der QCD (3)

- Konkret ergibt sich die Protonenmasse durch Berechnung eines Integrals über viele Millionen Integrationsvariablen:

$$C(t) = \langle \Omega | O^\dagger(t) O(0) | \Omega \rangle = \\ = \frac{1}{Z} \int \left(\prod_f D\psi^{(f)} D\bar{\psi}^{(f)} \right) D A_\mu O^\dagger(t) O(0) e^{-S[\psi^{(f)}, \bar{\psi}^{(f)}, A_\mu]}$$

$$O \equiv \int d^3r \epsilon^{abc} u(\mathbf{r})^a \left(u(\mathbf{r})^b \mathcal{C} \gamma_5 d(\mathbf{r})^c \right).$$

- Dieses Integral kann mit Hilfe moderner Hochleistungscomputer berechnet werden (oft mehrere Monate Rechenzeit auf hunderten oder tausenden von Prozessoren notwendig) ... am Ende erhält man sehr präzise die experimentell gemessene Protonenmasse.

→ **Bestätigung der
Quantenchromodynamik.**

LOEWE-CSC, Goethe-Universität

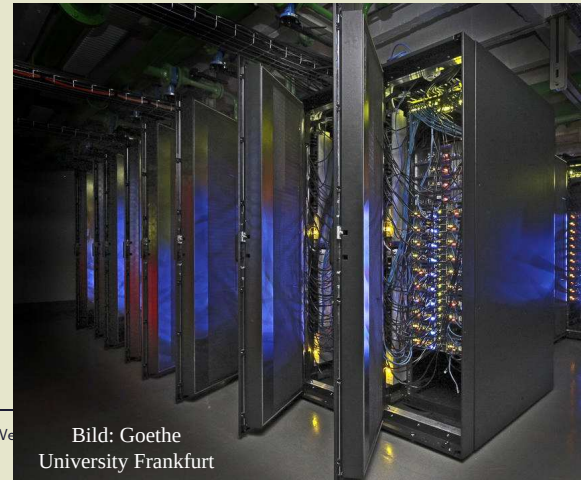
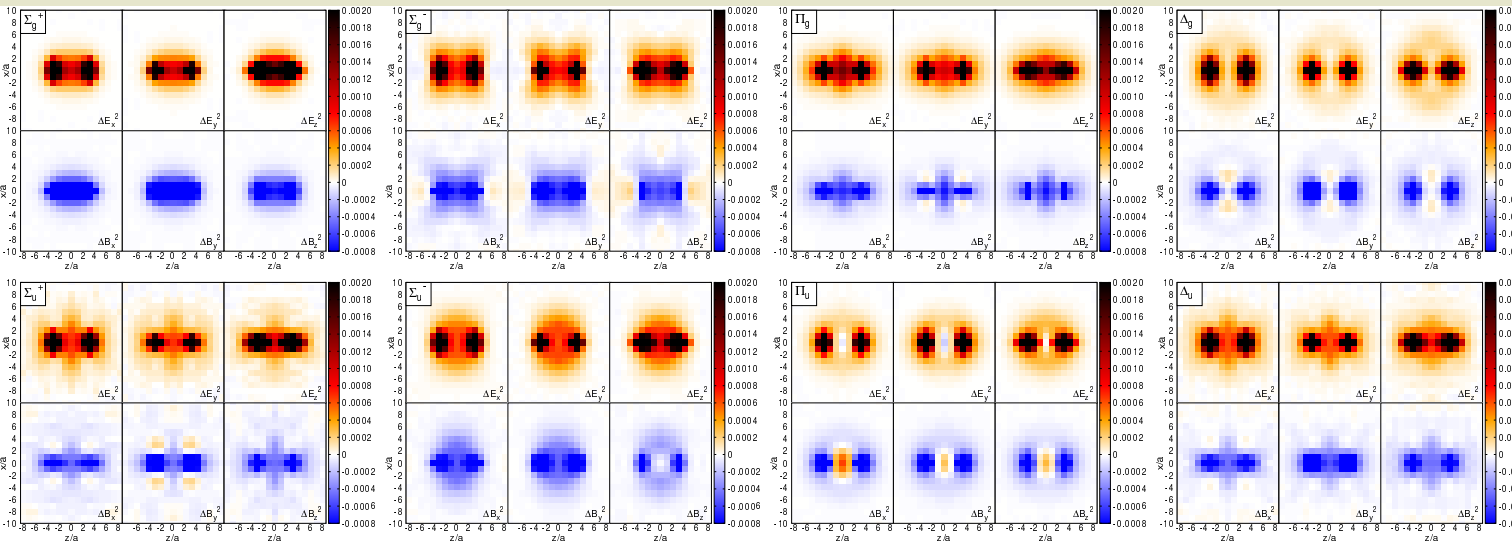


Bild: Goethe
University Frankfurt

Computersimulationen der QCD (4)

- Konkretes Beispiel (aktuelles Forschungsprojekt aus unserer Arbeitsgruppe):
 - Berechnung der gluonischen Feldstärken und Energiedichten in exotischen (hybriden) Mesonen (“Blick ins Innere spezieller Mesonen”).
 - 8 unterschiedliche Typen hybrider Mesonen, dunkle Flecken entsprechen Quarks, jeweils 3 chromoelektrische und 3 chromomagnetische Feldstärkekomponenten.

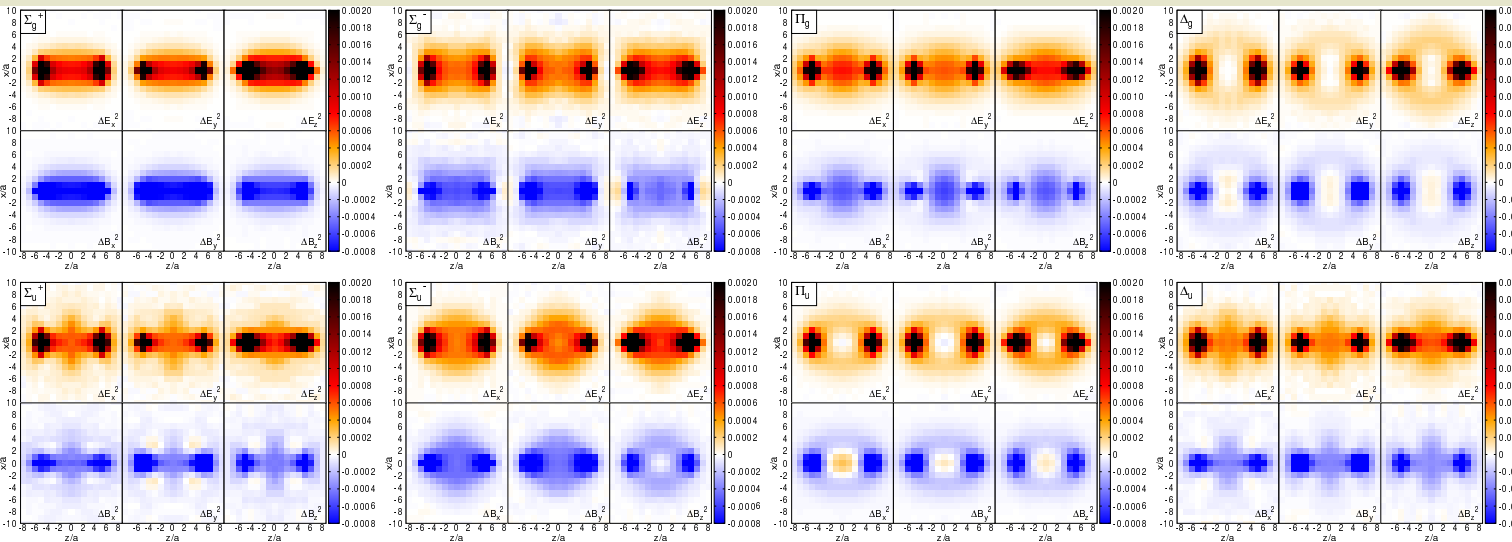
[L. Müller, Masterarbeit, Goethe-Universität Frankfurt (2019)]



Computersimulationen der QCD (5)

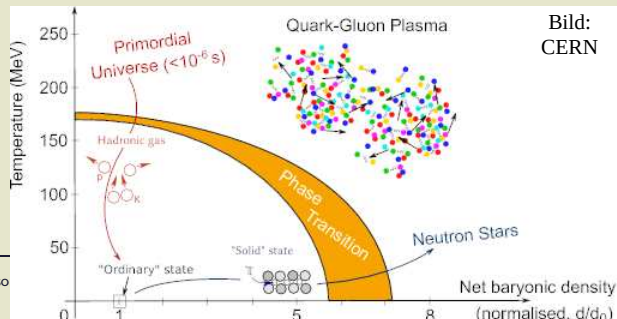
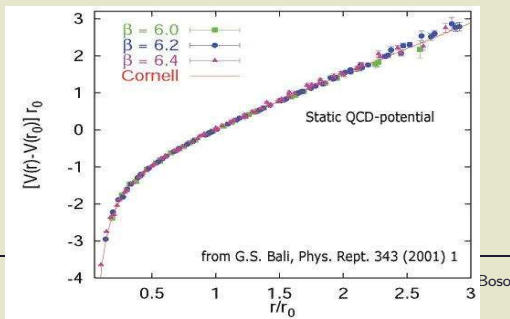
- Konkretes Beispiel (aktuelles Forschungsprojekt aus unserer Arbeitsgruppe):
 - Berechnung der gluonischen Feldstärken und Energiedichten in exotischen (hybriden) Mesonen (“Blick ins Innere spezieller Mesonen”).
 - 8 unterschiedliche Typen hybrider Mesonen, dunkle Flecken entsprechen Quarks, jeweils 3 chromoelektrische und 3 chromomagnetische Feldstärkekomponenten.

[L. Müller, Masterarbeit, Goethe-Universität Frankfurt (2019)]



Computersimulationen der QCD (6)

- Ähnliche numerische Rechnungen können auch für andere QCD-Observablen ausgeführt werden.
- Ziele:
 - **Bestimmung von Hadronmassen, -zerfallskonstanten, ...**
 - **Vergleich mit Experimenten zur Bestätigung der Quantenchromodynamik.**
 - **Vorhersage experimentell noch nicht beobachteter Hadronen.**
 - **Verstehen physikalischer Phänomene (z.B. Confinement).**
 - **Computersimulation von Experimenten unter extremen Bedingungen (hohe Temperatur, große Dichte, ...).**



Zusammenfassung

- Standardmodell bewährt sich für Abstände $\gtrsim 10^{-18}$ m.
- Computersimulationen auf Hochleistungsrechnern liefern zunehmend Präzisionsaussagen zu Hadronmassen und anderen Observablen der QCD und des Standardmodells.
- Dennoch viele offene Fragen:
 - Struktur exotischer Hadronen (Tetraquarks, hybride Mesonen, ...) ...?
 - Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie ...?
 - Physik jenseits des Standardmodells:
Stringtheorie, Supersymmetrie,
Quantengravitation, extra Dimensionen, ...
 - ...

