

Gitter-QCD: Überblick und typische Forschungsprojekte

Marc Wagner

Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Physik

Emmy Noether-Nachwuchsgruppe

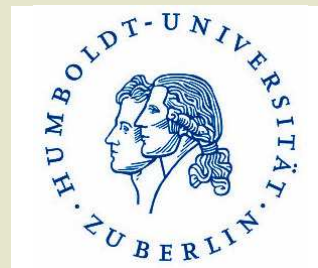
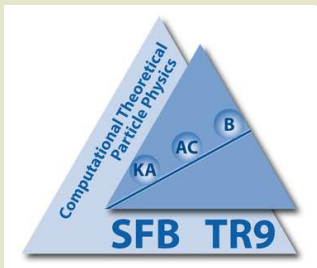
“Gitter-QCD mit 2+1+1 dynamischen Quarkflavors”

mcwagner@physik.hu-berlin.de

<http://people.physik.hu-berlin.de/~mcwagner/>

“Deine Perspektive in der Physik”

April 29, 2011



QCD / Gitter-QCD

- QCD:

- QCD = Quantenchromodynamik.
- Physikalische Theorie, die die Wechselwirkung von **Quarks** und **Gluonen** und damit den Aufbau, die Masse und mögliche Zerfälle von zusammengesetzten Teilchen, z.B. Proton oder Neutron, beschreibt.

- Gitter-QCD:

- Eine numerische Methode, mit der man die komplizierten Gleichungen der QCD unter Zuhilfenahme von Computern lösen kann.

QCD: Quarks und Gluonen (1)

- **QCD**: Physikalische Theorie, die die Wechselwirkung von **Quarks** und **Gluonen** und damit den Aufbau, die Masse und mögliche Zerfälle von zusammengesetzten Teilchen, z.B. Proton oder Neutron, beschreibt.
- Die zugehörige Kraft wird als **starke Wechselwirkung** bezeichnet.
- **Quarks und Antiquarks**:
 - 6 Flavors ... **up, down, strange, charm, bottom, top** (unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrer Masse).
 - 3 Farben ... **rot, grün, blau** (eine Art Ladung, ähnlich der elektrischen Ladung in der Elektrodynamik).

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

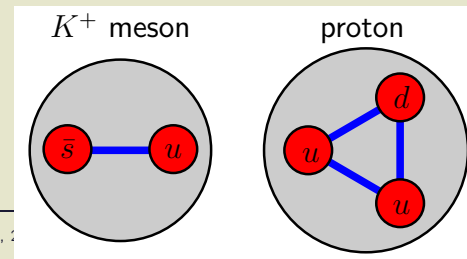
(e : Elementarladung; $1 \text{ MeV}/c^2 = 1.79 \times 10^{-30} \text{ kg}$.)

QCD: Quarks und Gluonen (2)

- **QCD**: Physikalische Theorie, die die Wechselwirkung von **Quarks** und **Gluonen** und damit den Aufbau, die Masse und mögliche Zerfälle von zusammengesetzten Teilchen, z.B. Proton oder Neutron, beschreibt.
- **Gluonen**:
 - Masselose Austauschteilchen der starken Wechselwirkung (ähnlich den Photonen in der Elektrodynamik), vermitteln also Kräfte zwischen Quarks.
 - Tragen selbst (Farb-)Ladung (im Gegensatz zu den Photonen in der Elektrodynamik), was zu “eigenartigen” Phänomenen führt (gemessen an unserer Alltagserfahrung mit Gravitation und Elektromagnetismus), insbesondere Confinement.

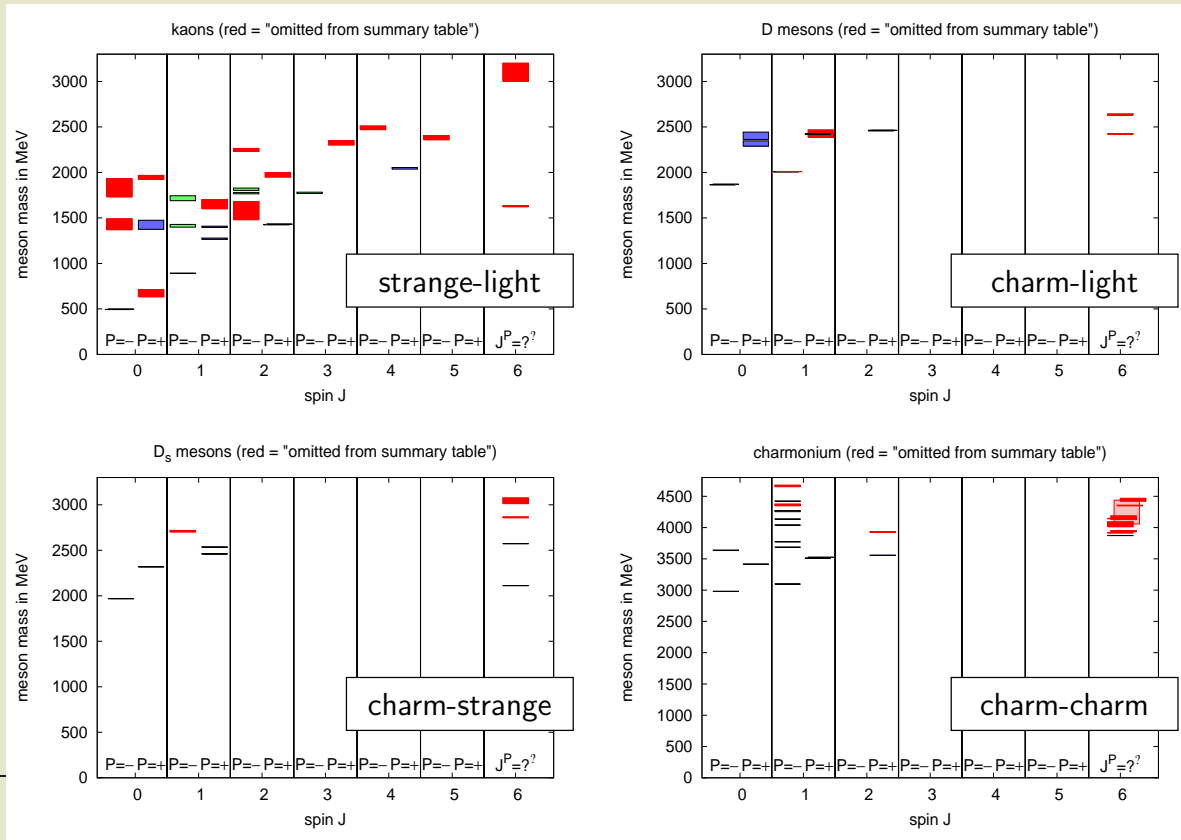
QCD: Hadronen

- Quarks und Gluonen treten “niemals” isoliert auf, sondern “immer” in Zweier- oder Dreiergruppen, sogenannten **Hadronen**.
 - **Hadronen:**
 - **Mesonen:** Gebundene Quark-Antiquark-Paare.
Beispiele: Pion = $u\bar{d}$, Kaon = $u\bar{s}$, ...
 - **Baryonen:** Drei gebundene Quarks oder drei gebundene Antiquarks.
Beispiele: Proton = uud , Neutron = udd , ...
 - Es wurden bereits hunderte von Mesonen und Baryonen in Experimenten beobachtet; diese unterscheiden sich durch
 - * 6 Flavor-Möglichkeiten für jedes Quark/Antiquark (u, d, s, c, b, t),
 - * Quantenzahlen ähnlich zum Wasserstoffatom (radiale Quantenzahl, Gesamtdrehimpuls, Parität, ...).
- “Teilchenzoo”.



QCD: Strange- und Charm-Mesonen

- Experimenteller Status (Particle Data Group): 73 bekannte s/c -Mesonen.



Gitter-QCD: Pfadintegrale

- Die Gleichungen der QCD können in Form sogenannter **Pfadintegrale** geschrieben werden (nicht zu verwechseln mit “primitiven” Wegintegralen):

$$\text{QCD-Observable} = \int \left(\prod_f D\psi^{(f)} D\bar{\psi}^{(f)} \right) DA_\mu \dots$$

- Integration über Funktionenräume (alle möglichen **Quarkfelder** $\psi^{(f)}(\mathbf{x}, t)$ und **Gluonfelder** $A_\mu(\mathbf{x}, t)$), nicht über einzelne Variablen
→ Integral über unendlich viele Variablen.
- **Gittermethoden**: Approximieren solcher Pfadintegrale durch hochdimensionale endliche Integrale (typisch $\approx 10^7$ Integrationsvariablen)
→ Spezielle Algorithmen erforderlich
→ Hochleistungscomputersysteme erforderlich.

Gitter-QCD: Typisches Vorgehen (1)

- Typisches Vorgehen bei einem Gitter-QCD-Projekt, z.B. Berechnung der Protonmasse:

(1) Definition und theoretisches Verständnis der Problemstellung, Formulierung in Form von Gleichungen:

$$S = \int d^4x \left(\sum_{f \in \{u,d,s,c,t,b\}} \bar{\psi}^{(f)} \left(\gamma_\mu \left(\partial_\mu - igA_\mu \right) + m^{(f)} \right) \psi^{(f)} + \frac{1}{2} \text{Tr} \left(F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} \right) \right)$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ig[A_\mu, A_\nu]$$

$$\langle \mathcal{O}(\psi^{(f)}, \bar{\psi}^{(f)}, A_\mu) \rangle = \frac{1}{Z} \int \left(\prod_f D\psi^{(f)} D\bar{\psi}^{(f)} \right) DA_\mu \mathcal{O}(\psi^{(f)}, \bar{\psi}^{(f)}, A_\mu) e^{-S[\psi^{(f)}, \bar{\psi}^{(f)}, A_\mu]}$$

(erfordert [offensichtlich] **umfassende analytische Fähigkeiten**, sowie **fundierte Kenntnisse der theoretischen Physik**, insbesondere Quantenfeldtheorie, theoretische Elementarteilchenphysik und Relativitätstheorie).

Gitter-QCD: Typisches Vorgehen (2)

- Typisches Vorgehen bei einem Gitter-QCD-Projekt, z.B. Berechnung der Protonmasse:
 - (2) Schreiben eines entsprechenden Computerprogramms, in der Regel zugeschnitten auf HPC-Systeme (erfordert **Neigung zu Computational Physics**).
 - (3) Starten (Eingabeparameter sind Quarkmassen) und Betreuen des Programms auf einem HPC-System (kann Tage, Wochen, teilweise sogar Monate an Rechenzeit benötigen; erfordert **Freude am Umgang mit HPC-Systemen**).
 - (4) Programm liefert die gewünschte QCD-Observable, z.B. die Protonmasse.

Gitter-QCD: Ziele

- Mit Gitter-QCD-Rechnungen verfolgt man eine Reihe von Zielen:
 - Verifikation bzw. Falsifikation von QCD durch Vergleich von Gitter-QCD-Resultaten mit experimentellen Messergebnissen (Suche nach neuer, bisher unbekannter Physik).
 - Vorhersagen von bisher nicht in Experimenten beobachteten Mesonen oder Baryonen (→ wertvoller Input für Experimente).
 - Berechnung von experimentell schwer bzw. nicht zugänglichen QCD-Observablen (z.B. QCD bei extremen Temperaturen).
 - Auflösen von momentan existierenden Widersprüchen zwischen experimentellen Ergebnissen und theoretischen Modellrechnungen.
 - ...

Gegenwärtige/zukünftige Projekte

- Berechnung von Massen von b -Baryonen (C. Wiese, Bachelor).
- String-Breaking in QCD (A. Nagy, Diplom).
- Simulation von Ensembles wechselwirkender Dyonen (B. Maier, Bachelor).
- Effiziente Berechnung von Quarkpropagatoren mit Hilfe von Destillation (J. Siefert, Bachelor).
- Kinematische Faktoren von Zerfällen $B \rightarrow D^{**}$ (C. Riha, Bachelor).
- Berechnung von Massen von D -Mesonen und D_s -Mesonen (C. Wiese, Master).
- Berechnung von Massen von Charmonium-Zuständen.
- Simulation von QCD bei fixierter Topologie.
- ...