

# *B*-Physik mit Hilfe von Gitter-QCD

Antrittsvorlesung Goethe-Universität Frankfurt am Main

Marc Wagner

Goethe-Universität Frankfurt am Main, Institut für Theoretische Physik

[mwagner@th.physik.uni-frankfurt.de](mailto:mwagner@th.physik.uni-frankfurt.de)

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

November 9, 2011



# Gliederung

Dem Vortragstitel gerecht werden: “*B*-Physik mit Hilfe von Gitter-QCD” ...

- (1) Prinzip von Gitterrechnungen (am einfachen Beispiel des quantenmechanischen harmonischen Oszillators).
- (2) Grundlegendes über QCD (Quantenchromodynamik) und Gitter-QCD.
- (3) Aktuelle (Gitter-)Ergebnisse aus dem Bereich der *B*-Physik:
  - Massen von (angeregten) *B*-Mesonen und *b*-Baryonen.
  - Kräfte zwischen *B*-Mesonen.
  - Semileptonische Zerfälle  $B \rightarrow D^{**}$ .

Eine Antrittsvorlesung dient auch der Vorstellung ...

- (4) Gegenwärtige und zukünftige Forschungsinteressen, aktuelle und geplante Vorlesungen, Ziele in der Lehre, etc. ...

# Teil 1: Prinzip von Gitterrechnungen.

# Gitterrechnungen in der QM (1)

- Gitter (Lattice): Numerische Methode für Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie.
- Grundprinzip wird im Folgenden erläutert anhand eines einfachen Beispiels, dem 1D quantenmechanischen harmonischen Oszillators.
- (Euklidische) Wirkung des harmonischen Oszillators:

$$S[x] = \int dt \left( \frac{m}{2} \dot{x}(t)^2 + \frac{m\omega^2}{2} x(t)^2 \right).$$

- Ziel: Berechne die mittlere quadratische Auslenkung  $x^2$  im Grundzustand  $|0\rangle$ , d.h.  $\langle 0|x^2|0\rangle$ , mit Hilfe einer Gitterrechnung.

# Gitterrechnungen in der QM (2)

- Ausgangspunkt: Pfadintegralformulierung der Quantenmechanik (äquivalent zur Schrödinger-Gleichung),

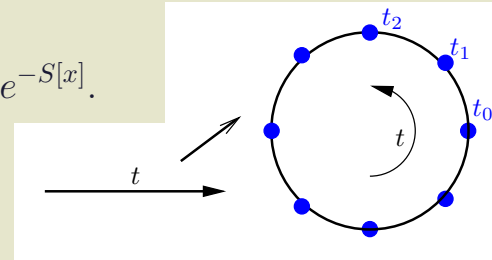
$$\langle 0|x^2|0\rangle = \frac{1}{Z} \int Dx x^2 e^{-S[x]} \quad , \quad Z = \int Dx e^{-S[x]}.$$

- $\int Dx$ : Integral über alle denkbaren Bahnkurven (= Pfade)  $x(t)$ , d.h. ein Integral über einen Funktionenraum (= “Integral über unendlich viele Variablen”).
- $e^{-S[x]}$ : Gewichtungsfaktor, der die Wirkung des harmonischen Oszillators enthält.
  - \* Pfade nahe klassischer Bahnkurven ( $\rightarrow$  Minima von  $S[x]$ ) tragen stark zu quantenmechanischen Observablen bei.
  - \* Pfade weit entfernt von klassischen Bahnkurven ( $\rightarrow$  sehr großes  $S[x]$ ) tragen kaum zu quantenmechanischen Observablen bei.

# Gitterrechnungen in der QM (3)

- Ausgangspunkt: Pfadintegralformulierung der Quantenmechanik (äquivalent zur Schrödinger-Gleichung),

$$\langle 0|x^2|0\rangle = \frac{1}{Z} \int Dx x^2 e^{-S[x]}, \quad Z = \int Dx e^{-S[x]}.$$



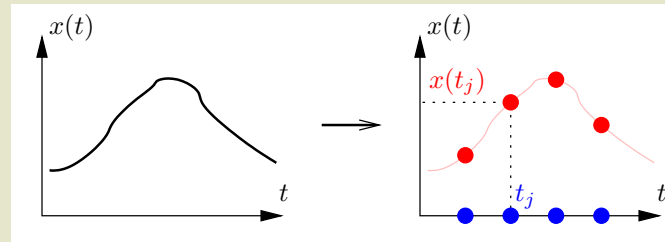
- Diskretisiere und kompaktifiziere die Zeit:

$$t \in \mathbb{R} \rightarrow t_j = j \times \Delta t, \quad j = 0, 1, \dots, N-1$$

→ Pfadintegral reduziert auf ordinäres endlichdimensionales Integral,

$$\int Dx e^{-S[x]} \rightarrow \int \left( \prod_{j=0}^{N-1} dx(t_j) \right) e^{-S[x(t_0), \dots, x(t_{N-1})]}.$$

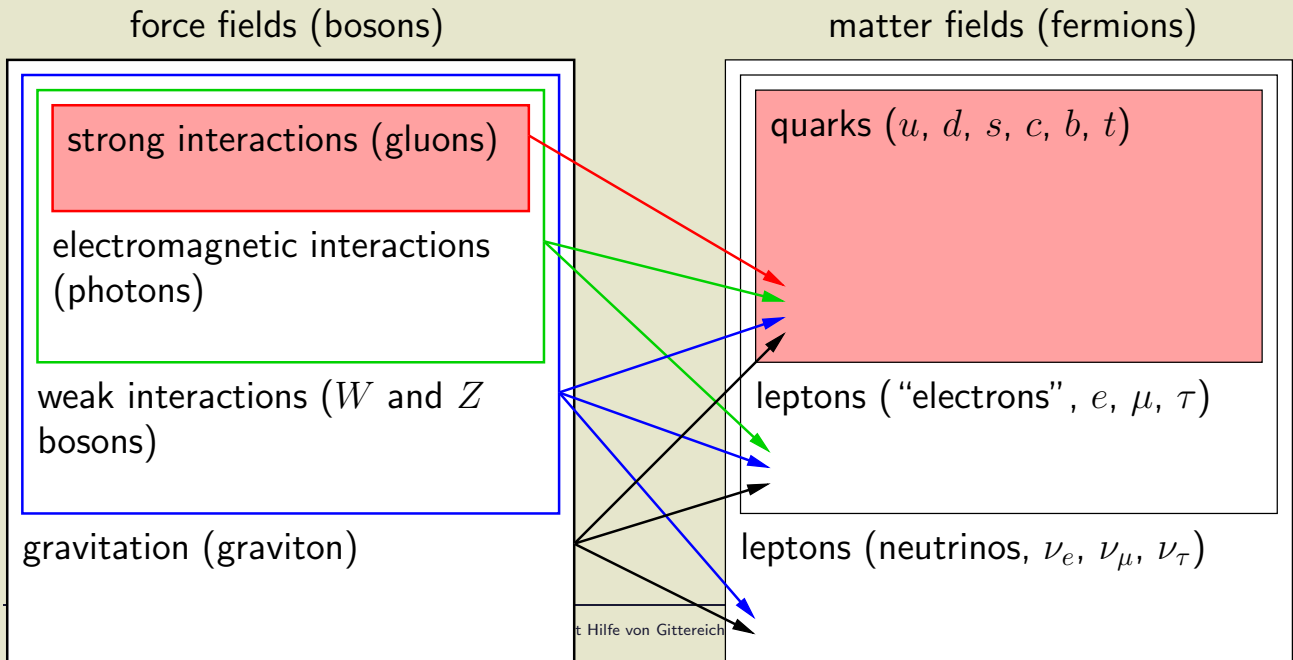
- Löse dieses Mehrdimensionale Integral mit Hilfe eines (High-Performance-) Computers.



**Teil 2: Grundlegendes über QCD  
(Quantenchromodynamik) und  
Gitter-QCD.**

# “Das Standardmodell der Teilchenphysik”

- Vier fundamentale Kräfte, vermittelt durch Eichbosonen.
- Materie: Sechs Sorten von Quarks, sechs Sorten von Leptonen.
- QCD: Quarks und Gluonen und ihre Wechselwirkungen.





# 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/Systemen, z.B. Proton oder Neutron, beschreibt.
- **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;  $1 \text{ MeV}/c^2 = 1.79 \times 10^{-30} \text{ kg}$ .)

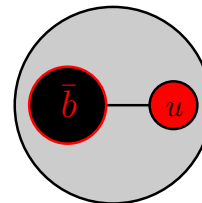
# QCD: Quarks und Gluonen (2)

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

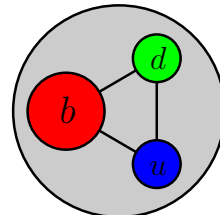
# QCD: Confinement, Hadronen

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

$B$ -Meson



$\Lambda_b$  (ein  $b$ -Baryon)



# QCD: Definition

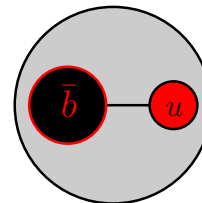
- Definition von QCD einfach:

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

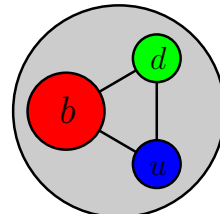
$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - i[A_\mu, A_\nu].$$

- Jedoch keine analytischen Lösungen für Niederenergie-Observablen, z.B. Hadronmassen, bekannt, da kein kleiner Parameter vorhanden (d.h. Störungstheorie i.A. nicht anwendbar).
- Numerische Methode erforderlich  
→ Gitter-QCD.

B-Meson



$\Lambda_b$  (ein  $b$ -Baryon)



# Gitter-QCD (1)

- Ziel: Berechnung von QCD-Observablen, z.B. Hadronmassen, von Grundprinzipien (QCD-Wirkung) ausgehend.
- Ausgangspunkt: Pfadintegralformulierung von QCD,

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

- $\langle \dots \rangle$ : Grundzustands-/Vakuums-Erwartungswert.
- $\mathcal{O}(\psi^{(f)}, \bar{\psi}^{(f)}, A_\mu)$ : Observable (Funktion der Quark- und Gluonfelder), z.B. für  $B$ -Meson-Masse  $\mathcal{O} = (\bar{\psi}^{(b)} \gamma_5 \psi^{(u)}(t_2))^\dagger \bar{\psi}^{(b)} \gamma_5 \psi^{(u)}(t_1)$
- $\int (\prod_f D\psi^{(f)} D\bar{\psi}^{(f)}) DA_\mu$ : Integral über alle denkbaren Quark- und Gluonfeldkonfigurationen  $\psi^{(f)}(\mathbf{x}, t)$  und  $A_\mu(\mathbf{x}, t)$ .
- $e^{-S[x]}$ : Gewichtungsfaktor, der die QCD-Wirkung enthält.

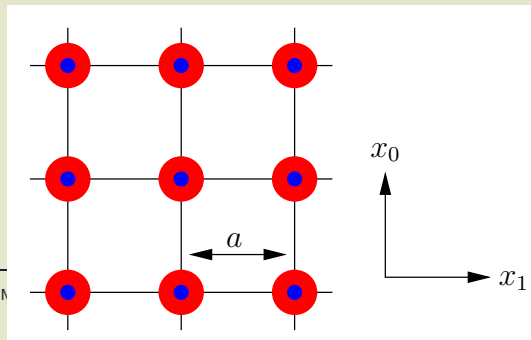
Die Struktur ist identisch zum quantenmechanischen Beispiel,

$$\langle 0 | x^2 | 0 \rangle = \frac{1}{Z} \int Dx x^2 e^{-S[x]}.$$

# Gitter-QCD (2)

- Numerische Umsetzung des Pfadintegralformalismus für QCD:
  - Diskretisiere die Raumzeit mit hinreichend kleinem Gitterabstand  $a \approx 0.05 \text{ fm} \dots 0.10 \text{ fm}$   
→ “Kontinuumsphysik”.
  - Kompaktifiziere die Raumzeit mit hinreichend großer Ausdehnung  $L \approx 2.0 \text{ fm} \dots 4.0 \text{ fm}$  (4-dimensionaler Torus)  
→ “Keine Finite-Size-Effekte”.
  - Pfadintegral reduziert auf ordinäres endlichdimensionales Integral,

$$\int \left( \prod_f D\psi^{(f)} D\bar{\psi}^{(f)} \right) DA_\mu \rightarrow \prod_{x_\nu} \left( \prod_f d\psi^{(f)}(x_\nu) d\bar{\psi}^{(f)}(x_\nu) \right) dU_\mu(x_\nu).$$



# Gitter-QCD (3)

- Numerische Umsetzung des Pfadintegralformalismus für QCD:

– Pfadintegral reduziert auf ordinäres endlichdimensionales Integral,

$$\int \left( \prod_f D\psi^{(f)} D\bar{\psi}^{(f)} \right) DA_\mu \rightarrow \prod_{x_\nu} \left( \prod_f d\psi^{(f)}(x_\nu) d\bar{\psi}^{(f)}(x_\nu) \right) dU_\mu(x_\nu).$$

– Typische heutige Dimension eines QCD-Pfadintegrals:

- \*  $x_\nu$ :  $32^4 \approx 10^6$  Gitterplätze.
- \*  $\psi = \psi_A^{a,(f)}$ : 24 Quarkfreiheitsgrade pro Flavor  
( $\times 2$  Teilchen/Antiteilchen,  $\times 3$  Farbe,  $\times 4$  Spin), 2 Flavors.
- \*  $U_\mu = U_\mu^{ab}$ : 32 Gluonfreiheitsgrade ( $\times 8$  Farbe,  $\times 4$  Spin).
- \* Insgesamt:  $32^4 \times (2 \times 24 + 32) \approx 83 \times 10^6$  dimensionales Integral.

→ Standardtechniken für numerische Integration nicht anwendbar

→ Speziell entwickelte Algorithmen erforderlich

→ Hochleistungscomputersysteme erforderlich

(→ Zusammenschluss zu Kollaborationen).



# 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.
  - ...

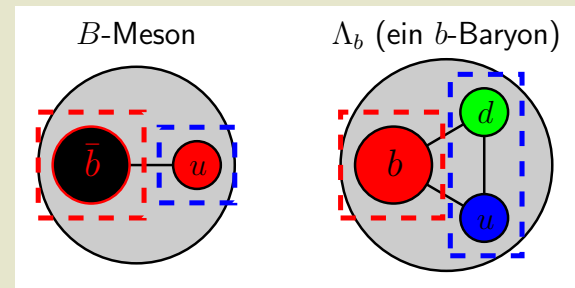


## Teil 3: Aktuelle (Gitter-)Ergebnisse aus dem Bereich der $B$ -Physik.

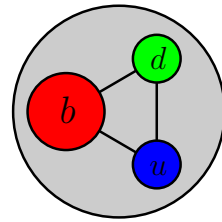
# *B*-Physik, *B*-Mesonen, *b*-Baryonen

- *B*-Physik, typische Fragestellungen: Eigenschaften von *B*-Mesonen und *b*-Baryonen, z.B. ihre Massen, Untersuchung ihrer Zerfälle, ...
  - ***B*-Mesonen**: Gebundene Quark-Antiquark-Paare, ein schweres *b* Quark, ein leichtes *u*, *d* oder *s* Quark.
  - ***b*-Baryonen**: Gebundene Systeme von drei (Anti-)Quarks, ein schweres *b* Quark, zwei leichte *u*, *d* oder *s* Quarks.

quark	mass in MeV/ $c^2$	electrical charge
up	1.5 ... 3.3	$+2/3e$
down	3.5 ... 6	$-1/3e$
strange	$104_{-34}^{+26}$	$-1/3e$
charm	$1270_{-11}^{+70}$	$+2/3e$
bottom	$4200_{-70}^{+170}$	$-1/3e$
top	$170900 \pm 1800$	$+2/3e$



# $B$ -Mesonen, $b$ -Baryonen: Massen (1)



- $B/B_s$ -Meson:

- Gebundenes Quark-Antiquark-Paar, das “Wasserstoff-Atom der QCD”: Ein leichtes Teilchen ( $u$ ,  $d$ , oder  $s$ ) “umkreist” ein schweres Teilchen ( $\bar{b}$ ).
- Zunächst Näherung: Betrachte das  $b$ -Quark als unendlich schwer.
- Zustände charakterisiert durch folgende Quantenzahlen:

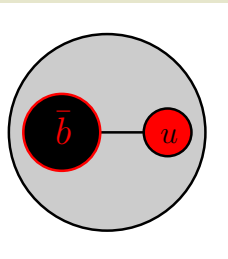
- \* **Halbzahliger Gesamtdrehimpuls der leichten Freiheitsgrade  $j$**  (leichte Quarks und Gluonen); Hyperfeinaufspaltung durch schweren Quarkspin wird erst am Ende eingebaut.

- \* **Parität  $\mathcal{P}$** .

- \* **Radiale Quantenzahl**; meistens jedoch Grundzustände in den entsprechenden  $j^{\mathcal{P}}$  Sektoren.

→ Zustände charakterisiert durch  $j^{\mathcal{P}}$ .

- $b$ -Baryon: Analog, zwei leichte Teilchen ( $u$ ,  $d$ , oder  $s$ ) “umkreisen” ein schweres Teilchen ( $\bar{b}$ ), ebenfalls charakterisiert durch  $j^{\mathcal{P}}$ , wobei  $j$  ganzzahlig.



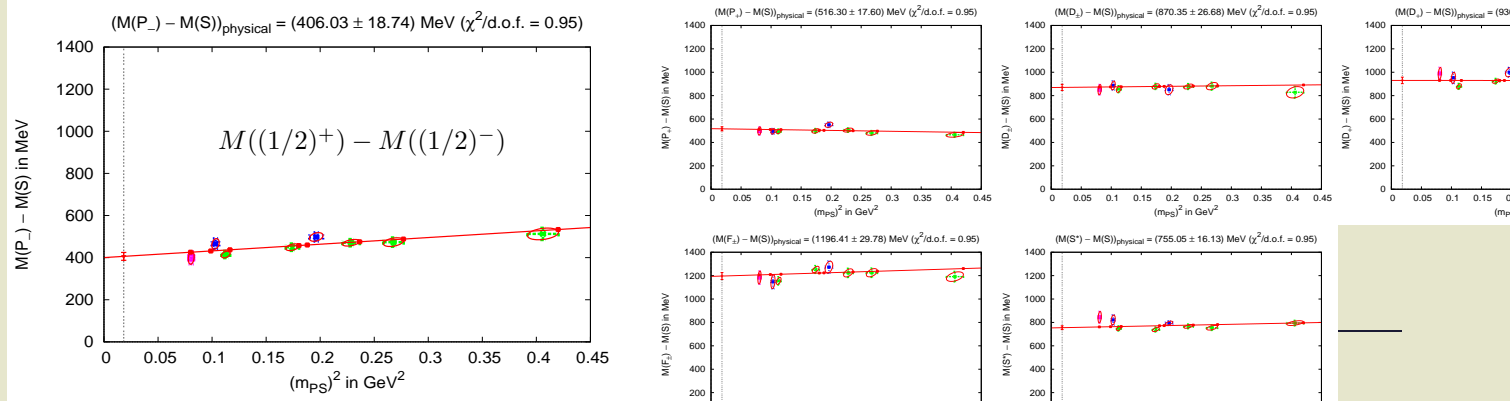
# $B$ -Mesonen, $b$ -Baryonen: Massen (2)

- Berechne mit Hilfe von Gitter-QCD  $B$ -Meson- und  $b$ -Baryon-Massen für

- (1) verschiedene Werte des Gitterabstands,
- (2) verschiedene Volumina des Raumzeitgitters,
- (3) verschiedene (unphysikalisch schwere)  $u/d$  Quarkmassen

... dann Extrapolation (1) ins Kontinuum, (2) zu unendlich ausgedehnter Raumzeit, (3) physikalischen  $u/d$  Quarkmassen.

- Kleine Korrekturen aufgrund endlicher  $b$ -Quark-Masse mit Hilfe von Heavy Quark Effective Theory und experimentellen Ergebnissen für  $D$ -Mesonen.



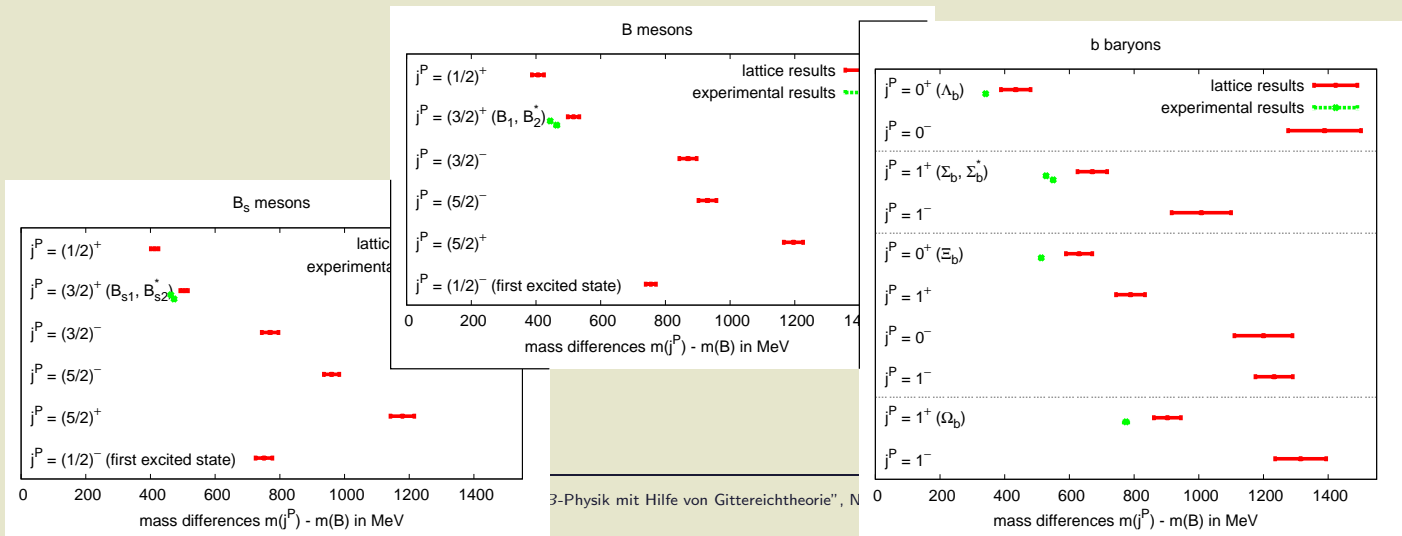
# B-Mesonen, *b*-Baryonen: Massen (3)

- Vergleich von Gitterergebnissen (rot) und experimentellen Ergebnissen (grün):
  - (+) Gitter-QCD erlaubt Berechnung zahlreicher nicht-gemessener Zustände.
  - (-) Systematische Abweichung  $\approx 10\%$  ... Skalensetzungsproblem ...?!

[K. Jansen, C. Michael, A. Shindler and M.W. [ETM Collaboration], JHEP **0812**, 058 (2008)]

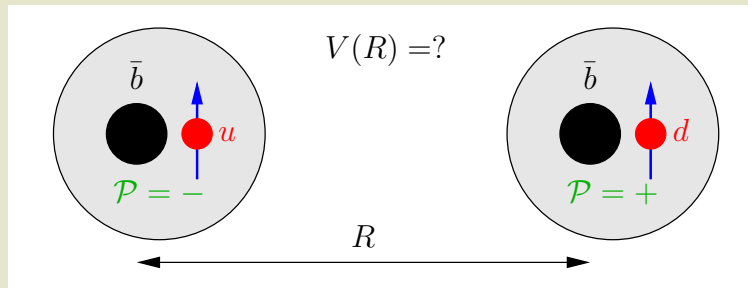
[C. Michael, A. Shindler and M.W. [ETM Collaboration], JHEP **1008**, 009 (2010)]

[M.W. and C. Wiese [ETM Collaboration], JHEP **1107**, 016 (2011)]



# Kräfte zwischen $B$ -Mesonen (1)

- Ziel: Berechne das Potential (äquivalent die Kraft) zwischen zwei  $B$ -Mesonen:
  - Näherung: Betrachte das  $b$ -Quark als unendlich schwer.
  - Betrachte ausschließlich die beiden leichtesten  $B$ -Mesonen, pseudoskalare ( $j^{\mathcal{P}} = (1/2)^-$ ) und skalare ( $j^{\mathcal{P}} = (1/2)^+$ )  $B$ -Mesonen.
  - Berechne das mesonische Potential  $V(R)$  abhängig von
    - \* den leichten Quarkflavors  $u$  und/oder  $d$  (Isospin),
    - \* den leichten Quarkspins (die schweren Quarkspins sind irrelevant),
    - \* der Art der Mesonen, d.h.  $j^{\mathcal{P}} = (1/2)^-$  und/oder  $j^{\mathcal{P}} = (1/2)^+$ .

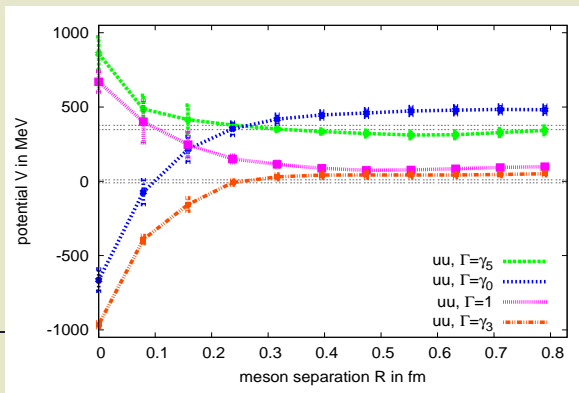


# Kräfte zwischen $B$ -Mesonen (2)

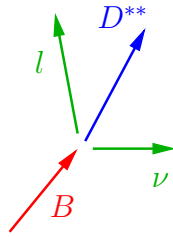
- Motivation:
  - Berechnung einer Kraft zwischen Hadronen, also Kernphysik aus Elementarteilchen und ihren Wechselwirkungen.
  - Das erste Mal mit dynamischen Quarks (bis jetzt immer ohne Seaquarks).
  - Das erste Mal Kräfte auch für  $j^P = (1/2)^+$ -Mesonen (bis jetzt immer nur  $j^P = (1/2)^-$ -Mesonen).

[M. W. [ETM Collaboration], PoS **LATTICE2010**, 162 (2010)]

[M. W. [ETM Collaboration], Acta Phys. Pol. B Proceedings Supplement, Vol. 4, No. 4, 2011, page 747]



# Semileptonische Zerfälle $B \rightarrow D^{**}$ (1)



- Die schwache WW verändert Quarkflavors, z.B.  $b \rightarrow c + l + \nu$ .
- Betrachte die speziellen schwachen Zerfälle

$$B \rightarrow D^{**} + l + \nu.$$

–  $B$ :  $j = (1/2)^-$   $B$ -Meson (das leichteste  $B$ -Meson).

–  $D^{**}$ :

\* Orbital angeregtes  $D$ -Meson ( $\bar{c}u$ ) mit Parität  $\mathcal{P} = +$ .

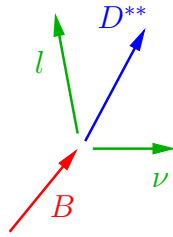
\* Kopplung des Drehimpulses  $L = 1$  und der Spins liefert vier mögliche Zustände:

- Zwei  $1/2$   $D^{**}$  ( $L = 1$  und leichter Quarkspin  $1/2$  zu Gesamtdrehimpuls  $j = 1/2$  gekoppelt).
- Zwei  $3/2$   $D^{**}$  ( $L = 1$  und leichter Quarkspin  $1/2$  zu Gesamtdrehimpuls  $j = 3/2$  gekoppelt).

–  $l + \nu$ : Lepton und zugehöriges Neutrino.

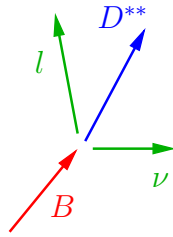


# Semileptonische Zerfälle $B \rightarrow D^{**}$ (2)



- Es gibt Konflikte zwischen Theorie und Experiment:
    - **Theorie** (operator product expansion, sum rules):
      - \* Zerfall von  $B$  in  $3/2 D^{**}$  ist deutlich wahrscheinlicher.
      - \* Jedoch:
        - Aussagen gelten nur im Limes  $m_B \rightarrow \infty$ .
        - Annahme: Angeregte Zustände in sum rules vernachlässigbar.
        - Aussagen gelten nur wenn  $B$  und  $D^{**}$  die gleiche Geschwindigkeit haben (zero recoil).
    - **Experiment:**
      - \* Zerfall von  $B$  in  $1/2 D^{**}$  ist deutlich wahrscheinlicher.
      - \* Jedoch:
        - Das gemessene Signal für  $1/2 D^{**}$  ist sehr vage.
        - Annahme: Keine Beiträge von Zuständen oberhalb von  $D^{**}$ .
- Gitterrechnungen können helfen, diesen Konflikt aufzulösen.

# Semileptonische Zerfälle $B \rightarrow D^{**}$ (3)



- Gitterergebnis:

$$\tau_{1/2} = 0.30(3) \quad , \quad \tau_{3/2} = 0.53(2)$$

(“ $|\tau_{1/2}|^2$  ist proportional zur Zerfallsrate in  $1/2 D^{**}$ ”; ...).

[B. Blossier, M.W. and O. Pene [ETM Collaboration], JHEP **0906**, 022 (2009)]

[B. Blossier, M.W. and O. Pene [ETM Collaboration], PoS **LATTICE2009**, 253 (2009)]

- Theorieergebnis (sum rules):

$$\left| \tau_{3/2} \right|^2 - \left| \tau_{1/2} \right|^2 \approx \frac{1}{4}$$

(Vergleich mit dem Gitterergebnis:  $0.53^2 - 0.30^2 = 0.19 \approx 1/4$ ; sum rule zu etwa 80% erfüllt).

- Experimentelles Ergebnis (Belle):

$$\tau_{1/2} \approx 1.28 \quad , \quad \tau_{3/2} \approx 0.75.$$

# Zusammenfassung (Teil 1 bis 3)

- Gitter-QCD ist eine Methode, ausgehend von Grundprinzipien QCD-Observablen zu berechnen; systematische Fehler können kontrolliert und durch geeignete Extrapolationen entfernt werden.
- Gitter-QCD ist ein schlagkräftiges Werkzeug im Bereich der  $B$ -Physik.
- Ziele:
  - Präzisionsrechnungen, dann Vergleich mit experimentellen Ergebnissen (Suche nach neuer Physik)
    - Notwendige Genauigkeit in der  $B$ -Physik noch nicht erreicht.
  - Berechnung von Observablen, die schwer bzw. gar nicht experimentell zugänglich sind
    - Beispiel: Massen von angeregten  $B$ -Mesonen jenseits  $j = (3/2)^+$ ;
    - Beispiel: Isospin-, spin, paritätsabhängige  $BB$ -Kräfte.
  - Qualitatives Verständnis
    - Beispiel: Ordnung der Zustände, z.B. keine Umkehr von  $P_-$  und  $P_+$ ;
    - Beispiel: Zerfall von  $B$  in  $3/2-D^{**}$  wahrscheinlicher als in  $1/2-D^{**}$ .

Teil 4: Gegenwärtige und zukünftige  
Forschungsinteressen, aktuelle und  
geplante Vorlesungen, Ziele in der  
Lehre, etc. ...

# Pläne/Ziele in der Forschung (1)

- Schwere  $b$ -Quarks (erst mal) verlassen ...
- ... stattdessen z.B. ähnliche Fragestellungen (Hadronmassen, hadronische Zerfälle, Kräfte zwischen Hadronen) mit leichteren  $s$ - und  $c$ -Quarks.
- Warum gerade  $s$ - und  $c$ -Quarks?  
→ Zwei gewichtige Gründe:
  - (1) Die European Twisted Mass Collaboration (ETMC) ist unter den ersten Kollaborationen, die  $s$ - und  $c$ -Quarks nicht nur als Valenzquarks betrachten sondern gegenwärtig auch in Form von Seequarks simulieren.
  - (2) FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) wird in absehbarer Zukunft qualitativ hochwertige Daten im Bereich der Hadron-Spektroskopie liefern, mit besonderem Augenmerk auf z.B. Charmonium,  $D$ - und  $D_s$ -Mesonen.



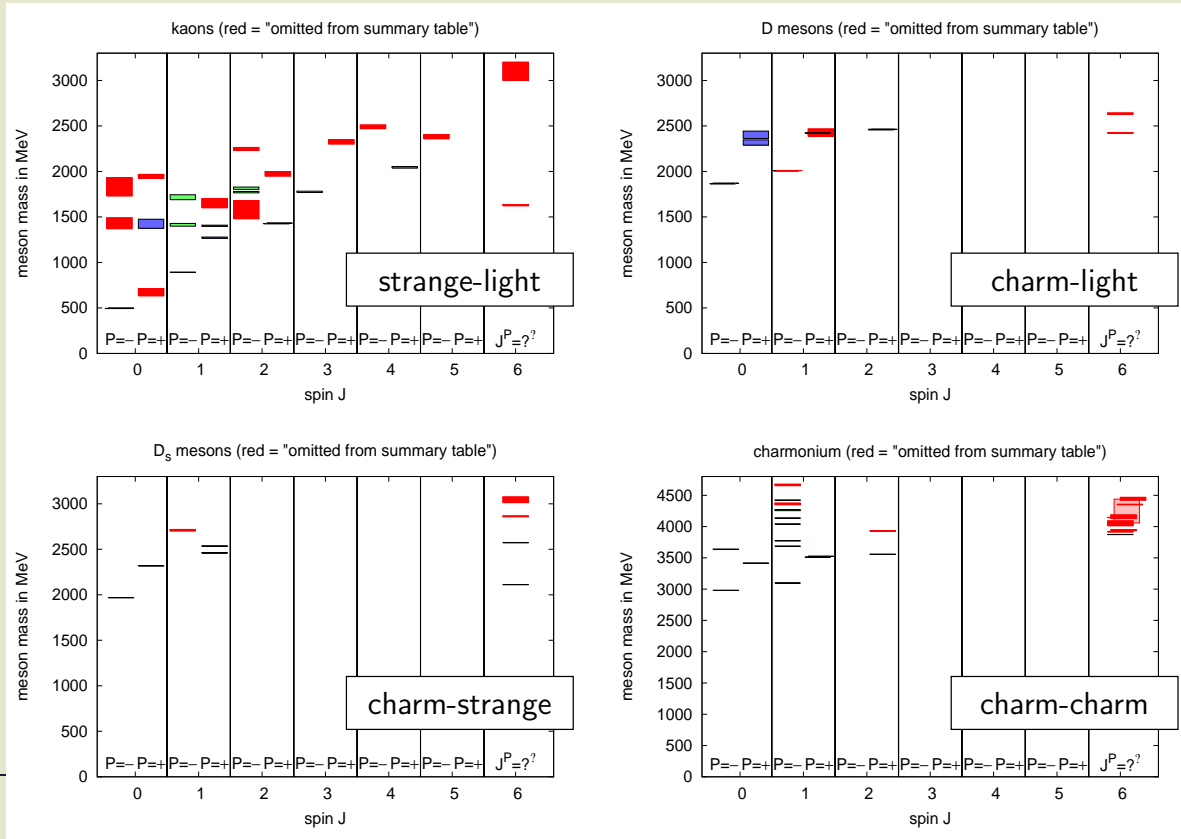
# Pläne/Ziele in der Forschung (2)

- Ein konkretes Ziel: “Vollständige” Berechnung des  $s$  und  $c$  Mesonspektrums.
  - Betrachtet werden alle Mesonen, mit mindestens einem  $s$  oder  $c$  Valenzquark, d.h.
    - \* Kaonen (strange-leichte Mesonen), [light =  $u$  oder  $d$ ]
    - \*  $D$ -Mesonen (charm-leichte Mesonen), [light =  $u$  oder  $d$ ]
    - \*  $D_s$ -Mesonen (charm-strange Mesonen),
    - \* Charmonium (charm-charm Mesonen),
    - \* “Strangeonium” (strange-strange Mesonen).
  - Betrachtet werden Parität  $\pm$ , Ladungskonjugation  $\pm$ , radiale und orbitale Anregungen.



# Pläne/Ziele in der Forschung (3)

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



# Pläne/Ziele in der Forschung (4)

- Weitere Forschungsinteressen:
  - **Bestimmung von  $\Lambda_{\overline{MS}}$**  (Verbindung zwischen Gitter-QCD und Störungstheorie herstellen).
  - **String-Breaking** in adjungierter Yang-Mills-Theorie und in QCD (theoretische Aspekte und numerischer Nachweis).
  - **Topologie auf dem Gitter, Simulationen bei fixierter Topologie** (Vorbereitende Schritte für Mixed-Action-Setups, Verwendung chiral symmetrischer Overlap-Valenzquarks).
  - **Modelle basierend auf topologischen Anregungen** für Yang-Mills-Theorie/QCD sowohl bei verschwindender als auch endlicher Temperatur (Meronen, Instantone, Dyonen) ... qualitatives Verständnis vor allem von Confinement.
  - ...



# Pläne/Ziele in der Lehre

- Naheliegender wären Vorlesungen in Gitter-Eichtheorie/Gitter-QCD/QFT ...
  - ... sicher wichtig, aber nicht ausschließlich.
  - Gute Physiker zeichnen sich aus durch
    - breites physikalisches Wissen,
    - die Fähigkeit, Zusammenhänge zwischen scheinbar verschiedenen physikalischen Phänomenen/Gebieten zu erkennen.
- Vorlesungen anbieten, die ein breites Publikum ansprechen, die (innerhalb der Physik) “fächerübergreifend” sind:
- Numerische Methoden der Physik (momentan).
  - Symmetrien in der Physik.
  - Topologische Objekte in Eichtheorien (z.B. “Verständnis” von Supraleitung einerseits, Confinement andererseits).
  - ...

# Schlussbemerkungen

- Falls Sie Fragen haben, diskutieren möchten, etc. ... besuchen Sie mich jeder Zeit (2.103, 2. Stock, direkt über diesem Hörsaal)!
- Vielen Dank für die freundliche Aufnahme hier an der Goethe-Universität, die zahlreiche Tipps und Hilfestellungen gerade bei administrativen/nicht-physikalischen Problemen!
- Jetzt, vor dem Hörsaal: Ein kleiner Imbiss mit Wein, Bier, etc. zu dem alle Anwesenden herzlich eingeladen sind!