

Quantenchromodynamik (QCD)

Die Theorie der starken Wechselwirkung

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{\psi}(i\not{D} - m_q)\psi - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$$

- ▶ beschreibt die Wechselwirkungen zwischen Quarks und Gluonen,

Quantenchromodynamik (QCD)

Die Theorie der starken Wechselwirkung

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{\psi}(i\not{D} - m_q)\psi - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$$

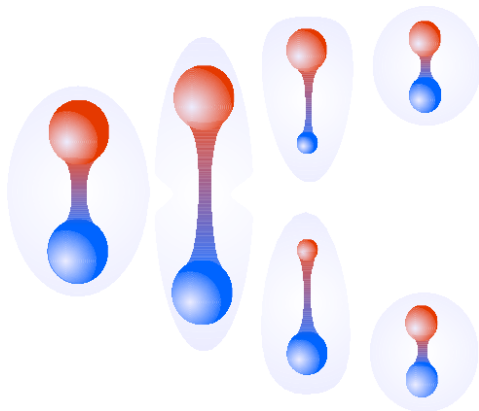
- ▶ beschreibt die Wechselwirkungen zwischen Quarks und Gluonen,
- ▶ Parameter sind die Quarkmassen m_q und die dimensionslose Eichkopplung,

Quantenchromodynamik (QCD)

Die Theorie der starken Wechselwirkung

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{\psi}(i\not{D} - m_q)\psi - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$$

- ▶ Quarks existieren nicht als einzelne Teilchen:



Quantenchromodynamik (QCD)

Die Theorie der starken Wechselwirkung

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{\psi}(i\not{D} - m_q)\psi - \frac{1}{4}G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}$$

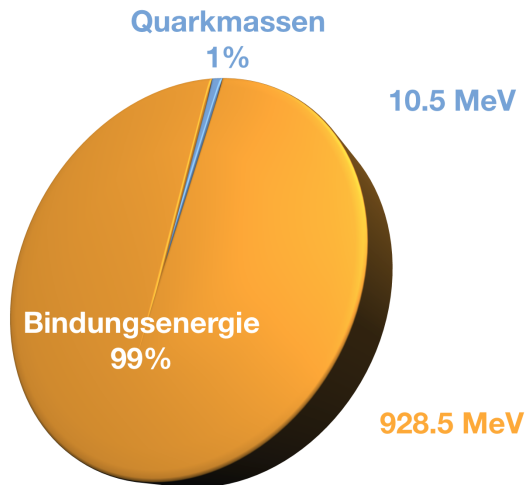
- ▶ Quarks existieren nicht als einzelne Teilchen:



Anziehungskraft ist **enorm stark!**

Quark confinement

- ▶ Die **Bindungsenergie** zwischen den Quarks im Proton ist **enorm gross**:



Quantenchromodynamik (QCD)

- ▶ Eigenschaften der QCD:
 - ▶ Farbbindung (colour confinement)
 - ▶ asymptotische Freiheit

Quantenchromodynamik (QCD)

- ▶ Eigenschaften der QCD:
 - ▶ Farbbindung (colour confinement)
 - ▶ asymptotische Freiheit
- ▶ Nobelpreis der Physik in 2004:



D. Gross



F. Wilczek

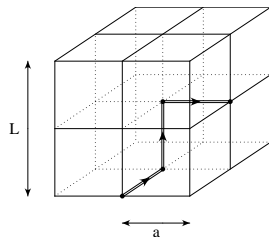


D. Politzer

QCD auf dem Gitter

Gitter-Regularisierung: diskretisiere die Euklidische Raum-Zeit:

- ▶ hyperkubisches L^4 -Gitter mit Gitterabstand a
- ▶ Gluonen leben auf den Verbindungen \longleftrightarrow
- ▶ Quarks auf den Gitterpunkten \bullet



⇒ erfordert die Berechnung einer $100M \times 100M$ Matrix!

Benutze den Computer. . .



Benutze den Computer. . .

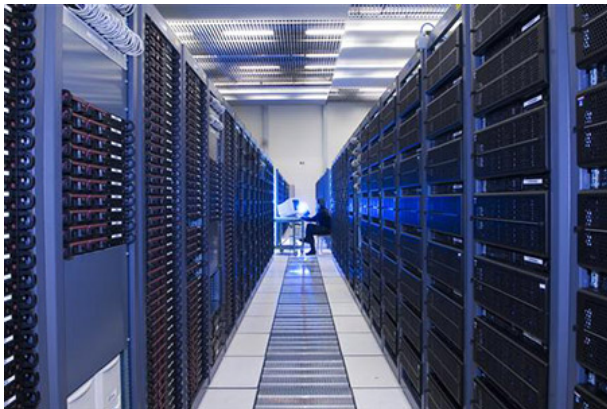


Benutze den Computer. . .



Benutze den Computer. . .

. . . grössere Computer . . .



. . . allerdings dauern die Rechnungen immer noch mehrere Monate und Jahre.

⇒ *Bessere Algorithmen* sind nötig.

European Twisted Mass Collaboration (ETMC)

Kombination von theoretischem Fachwissen und Rechenkraft:

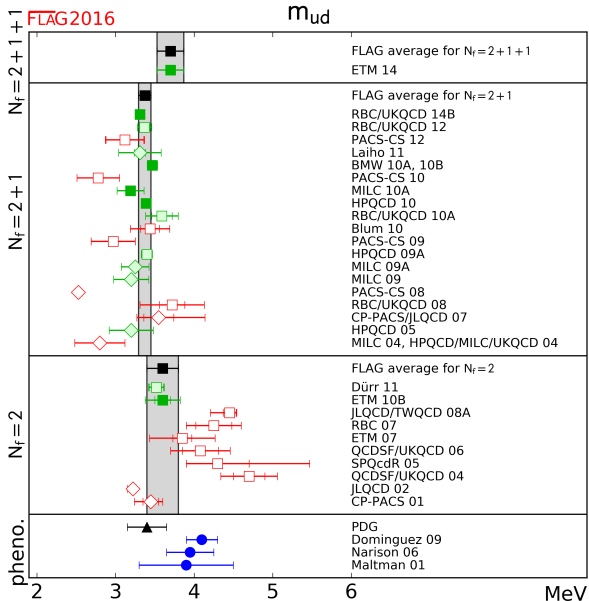


Institutionen in Deutschland, Italien,
Dänemark, Frankreich, Spanien,
England, Zypern, Holland, Schweiz.



Simulation der Energiedichte in der QCD:

Was ist der momentan beste Wert für m_{ud} ?



Was ist FLAG?

FLAG: Flavour Lattice Averaging Group

- ▶ Weltumspannende Kollaboration zur Beantwortung von
 - ▶ Was ist der momentan beste Wert für Grösse X ?
 - ▶ Wie verlässlich ist der abgeschätzte systematische Fehler?
 - ▶ Sammlung aller Resultate in gebrauchsfreundlicher Form:

Review of lattice results concerning low energy particle physics

March 12, 2015

FLAG Working Group

S. Aoki¹, Y. Aoki^{2,3}, C. Bernard⁴, T. Blum^{5,3}, G. Colangelo⁶, M. Della Morte⁷, S. Dürr⁸,
A. X. El-Khadra⁹, H. Fukaya¹⁰, R. Horsley¹¹, A. Jüttner¹², T. Kaneko¹³, J. Laiho¹⁴,
L. Lellouch^{15,16}, H. Leutwyler⁶, V. Lubicz^{17,18}, E. Lunghi¹⁹, S. Necco⁶, T. Onogi¹⁰, C. Pena²⁰,
C. T. Sachrajda¹², S. R. Sharpe²¹, S. Simula¹⁸, R. Sommer²², R. S. Van de Water²³, A. Vladikas²⁴,
U. Wenger⁶, H. Wittig²⁵

Was ist FLAG?

FLAG: Flavour Lattice Averaging Group

- ▶ Weltumspannende Kollaboration zur Beantwortung von
 - ▶ Was ist der momentan beste Wert für Grösse X ?
 - ▶ Wie verlässlich ist der abgeschätzte systematische Fehler?
 - ▶ Sammlung aller Resultate in gebrauchsfreundlicher Form:



Review of lattice results concerning low energy particle physics

March 12, 2015

FLAG Working Group

Aoki^{2,3}, C. Bernard⁴, T. Blum^{5,3}, **G. Colangelo**⁶, M. Della Morte⁷, S. Dürr⁸,
F. Gladyshev⁹, H. Fukaya¹⁰, R. Horsley¹¹, A. Jüttner¹², T. Kaneko¹³, J. Laiho^{*14},
H. Leutwyler⁶, V. Lubitz^{17,18}, E. Lunghi¹⁹, S. Necco⁶, T. Onogi¹⁰, C. Pena²⁰,
S. R. Sharpe²¹, S. Simula¹⁸, R. Sommer²², R. S. Van de Water²³, **A. Vladikas**²⁴,
U. Wenger⁶, H. Wittig²⁵

Was ist FLAG?

FLAG: Flavour Lattice Averaging Group

- ▶ Weltumspannende Kollaboration zur Beantwortung von
 - ▶ Was ist der momentan beste Wert für Grösse X ?
 - ▶ Wie verlässlich ist der abgeschätzte systematische Fehler?
 - ▶ Sammlung aller Resultate in gebrauchsfreundlicher Form:

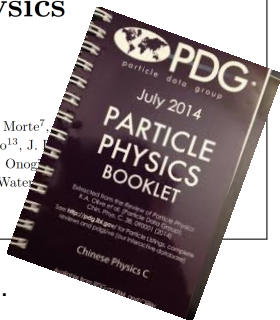
Review of lattice results concerning low energy particle physics

March 12, 2015

FLAG Working Group

Aoki^{2,3}, C. Bernard⁴, T. Blum^{5,3}, G. Colangelo⁶, M. Della Morte⁷,
Hadra⁹, H. Fukaya¹⁰, R. Horsley¹¹, A. Jüttner¹², T. Kaneko¹³, J.
H. Leutwyler⁶, V. Lubitz^{17,18}, E. Lunghi¹⁹, S. Necco⁶, T. Onogi²⁰,
S. R. Sharpe²¹, S. Simula¹⁸, R. Sommer²², R. S. Van de Water²³,
U. Wenger⁶, H. Wittig²⁵

Ähnlich den Bemühungen des PDG...



Wie viel wiegt ein Proton?

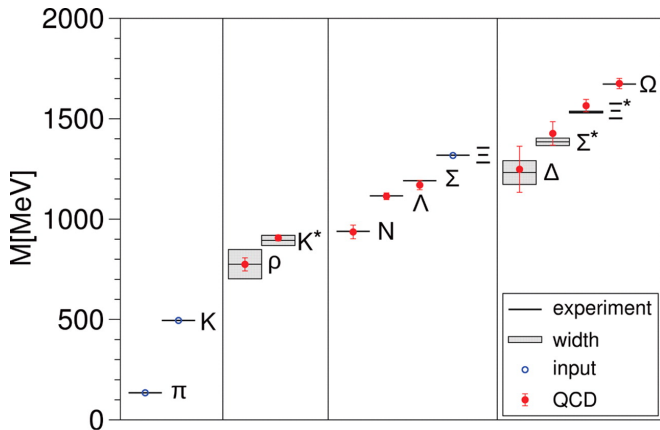
Ach ja, das **Proton**...

... wie viel wiegt das denn jetzt?

Wie viel wiegt ein Proton?

Ach ja, das **Proton**...

... wie viel wiegt das denn jetzt? $\Rightarrow m_p = 933(18) \text{ MeV}$



Zusammenfassung

- ▶ Bedeutung einer **Messung**.
- ▶ Rolle der **Konstanten** bei Wahl der Einheiten.
- ▶ Masse des Protons durch das Standardmodell bestimmt:
 - ▶ nur 1% durch das Higgs-Teilchen erzeugt,
 - ▶ restliche 99% als Bindungsenergie zwischen

Quarks und Gluonen

durch starke Wechselwirkung der QCD beschrieben.

- ▶ Computersimulationen auf dem Raum-Zeit-Gitter:

⇒ präzise *ab-initio* Berechnungen der QCD

Und wie schwer ist das Universum?

