

Status und Zukunft der Gitter-QCD

Gunnar Bali

Die starke QCD

Gluonische Anregungen und Diquarks

Spektroskopie

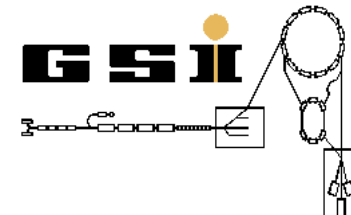
Endliche Temperatur

Nukleonstruktur

Wer ist wo ?

Ressourcen

Die Zukunft



25.10.07

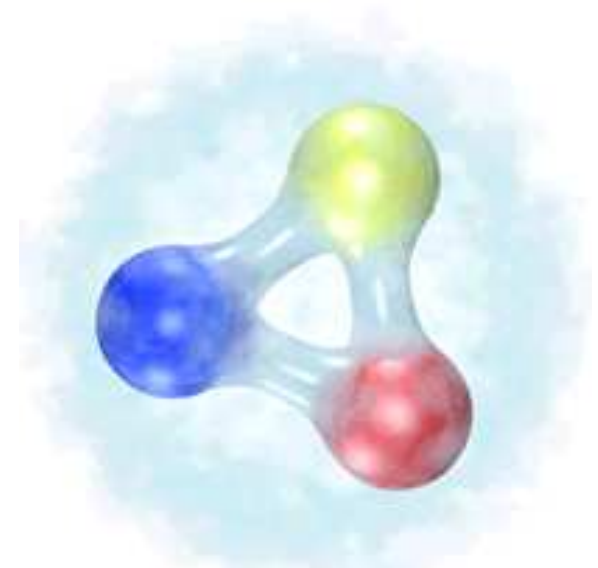
QCD (Fundamentale Theorie der starken Wechselwirkung)

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{16\pi\alpha_s} F F + \bar{\psi}_f (\not{D} + m_f) \psi_f$$

→ Asymptotische Freiheit: $\alpha_s(q) \xrightarrow{q \rightarrow \infty} 0$

? → Confinement

? → Chirale Symmetriebrechung

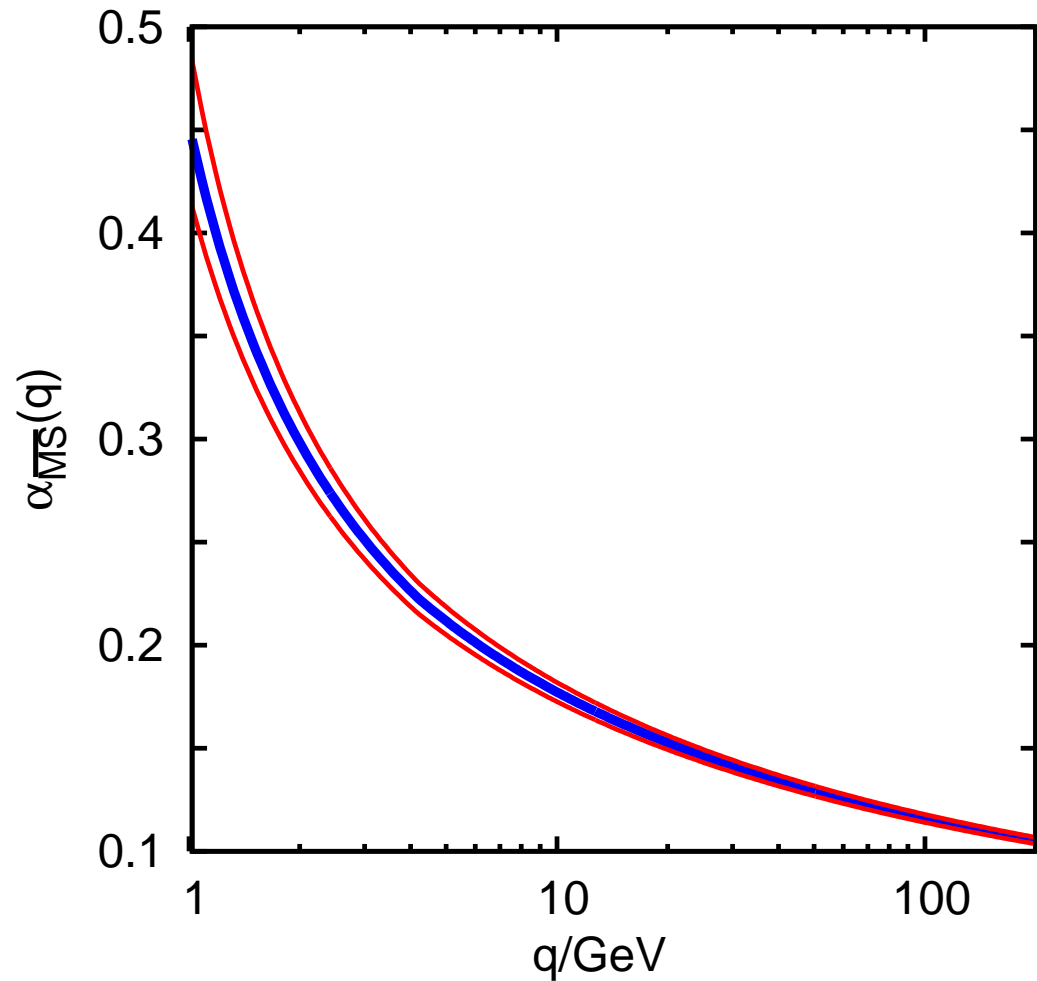


Proton (artist's impression)

Theoretisch wunderschön, aber quantitative Vorhersagen sind schwierig im Bereich der *starken QCD* !

⇒ Computer Simulationen

Die gleitende Kopplung



$$\alpha_{\overline{MS}}(m_Z) = 0.1174(20) \longrightarrow$$

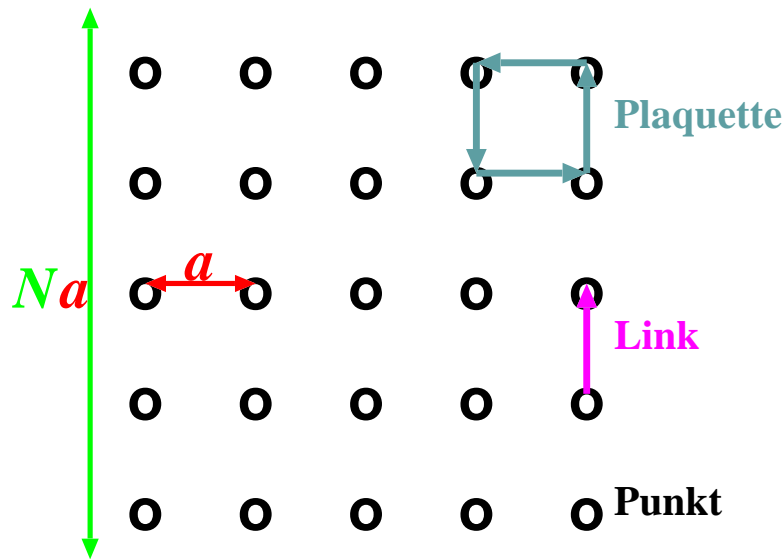
$$\alpha_{\overline{MS}}(1.5 \text{ GeV}) = 0.346^{+22}_{-21}$$

6.3 % Fehler bei 1.5 GeV \longrightarrow

1.7 % Fehler bei 91 GeV !

$$m_p = 0.93827203(8) \text{ GeV} !!!$$

Gittereichtheorie



Typische Werte:

$$a^{-1} = 1.5-4 \text{ GeV}, \quad Na = 1.5-4 \text{ fm}$$

Kontinuumsimes: $a \rightarrow 0$, Na fest

Unendliches Volumen: $Na \rightarrow \infty$

$$\langle O \rangle = \frac{1}{Z} \int [dU] [d\psi] [d\bar{\psi}] O[U] e^{-S[U, \psi, \bar{\psi}]}$$

Messung: Mittelung über *repräsentative* Gluonkonfigurationen $\{U_i\}$ mit

Wahrscheinlichkeiten $P(U_i) \propto \int [d\psi] [d\bar{\psi}] e^{-S[U, \psi, \bar{\psi}]}$:

$$\langle O \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O(U_i) + \Delta O$$

$$\Delta O \propto \frac{1}{\sqrt{n}} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

Input: $\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{16\pi\alpha_L} FF + \bar{q}_f (\not{D} + m_f) q_f$

$$m_p^{\text{latt}} = m_p^{\text{phys}} \longrightarrow a$$
$$m_\pi^{\text{latt}} / m_p^{\text{latt}} = m_\pi^{\text{phys}} / m_p^{\text{phys}} \longrightarrow m_u \approx m_d$$

...

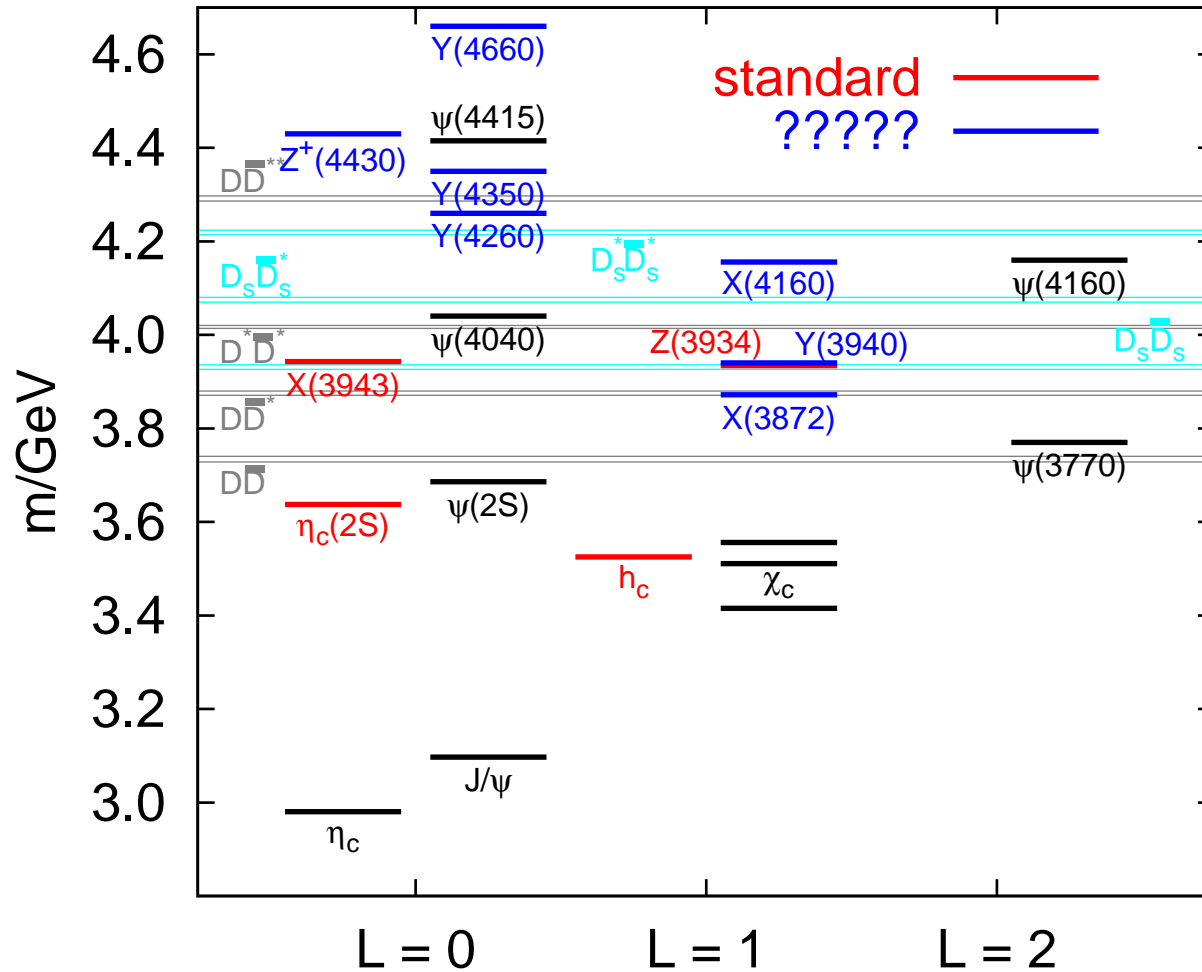
Output: Hadronmassen, Matrixelemente, Zerfallskonstanten, etc...

Extrapolationen:

1. $a \rightarrow 0$: Funktionale Form bekannt.
2. $aN \rightarrow \infty$: Harmlos, aber teuer.
3. $m_q^{\text{latt}} \rightarrow m_q^{\text{phys}}$: Chirale Störungstheorie (χ PT), aber m_q^{latt} muß hinreichend klein sein (üblicherweise der größte systematische Fehler).

1974 – 1977: 10 $c\bar{c}$ Resonanzen, 1978 – 2001: 0 $c\bar{c}$'s

2002 – 2007: ≤ 11 neue $c\bar{c}$'s entdeckt von BaBar, Belle, CLEO-c, CDF, D0



Neue Detektoren

Höhere Luminosität

Neue Kanäle:

B Zerfälle

$\gamma\gamma$

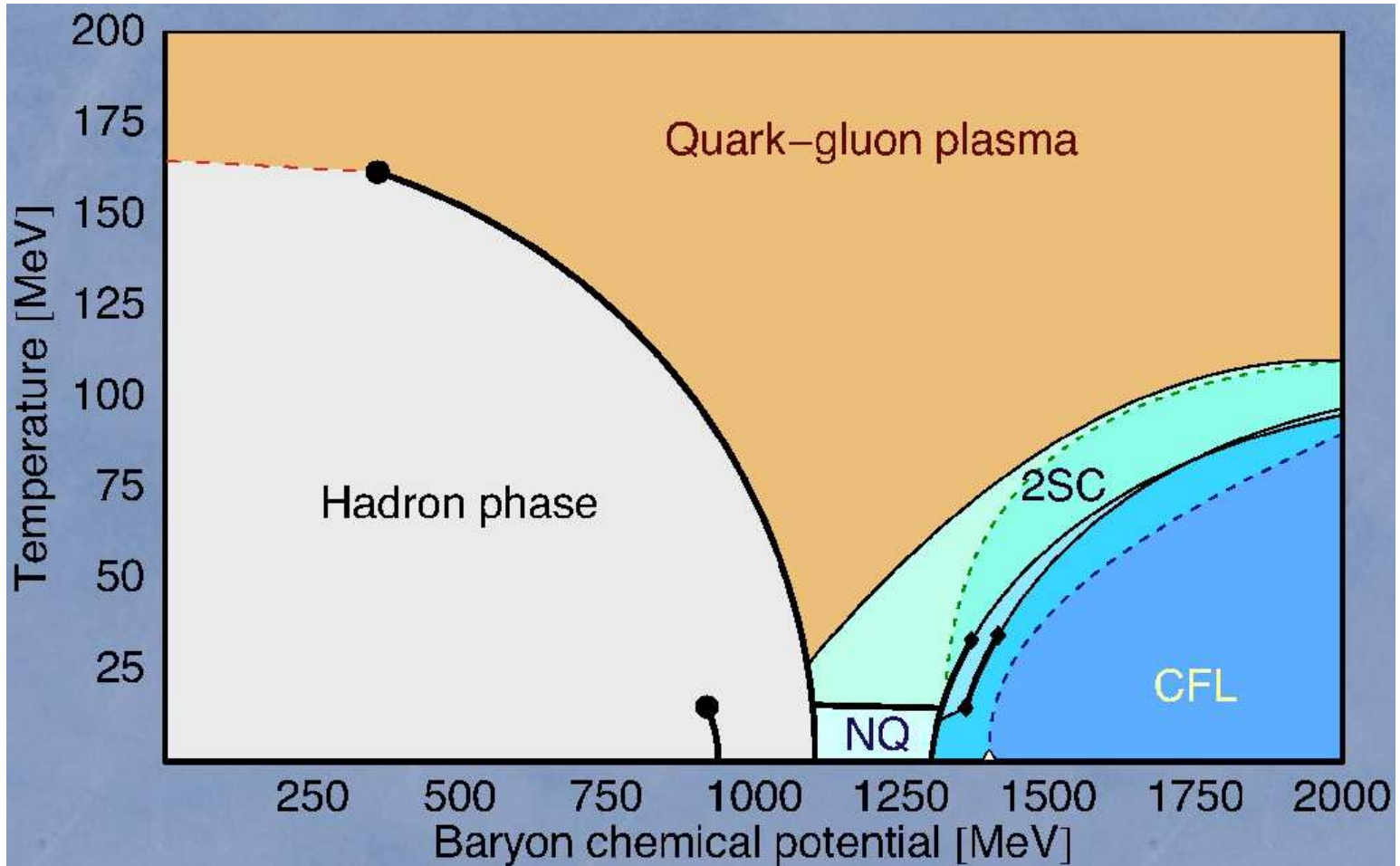
$\psi\psi$ -Produktion

gg in pp Kollisionen.

$c\bar{c}g$ Hybride ?

$cq\bar{q}c$ im $c\bar{c}$?

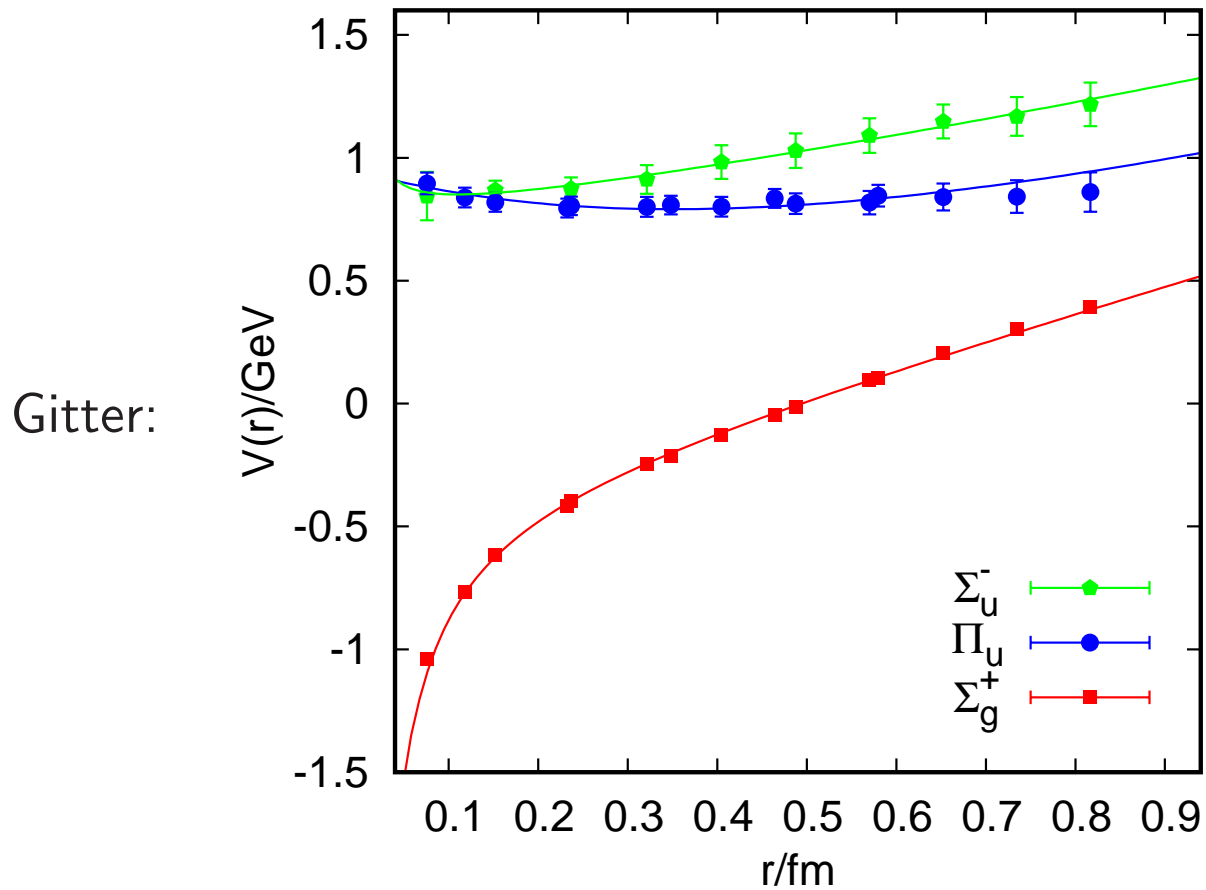
Mögliches QCD Phasendiagramm: Diquarks ?



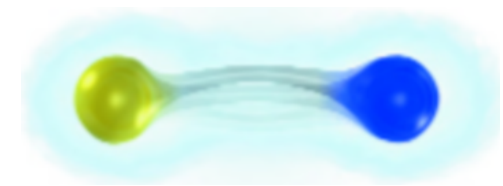
Hybridmesonen

$m_c \gg \Lambda_{\text{QCD}} \longrightarrow$ Adiabatische und nichtrelativistische Approximationen:

$$H\psi_{nlm} = E_{nl}\psi_{nlm} \quad , \quad H = 2m_c + \frac{p^2}{m_c} + V(r)$$

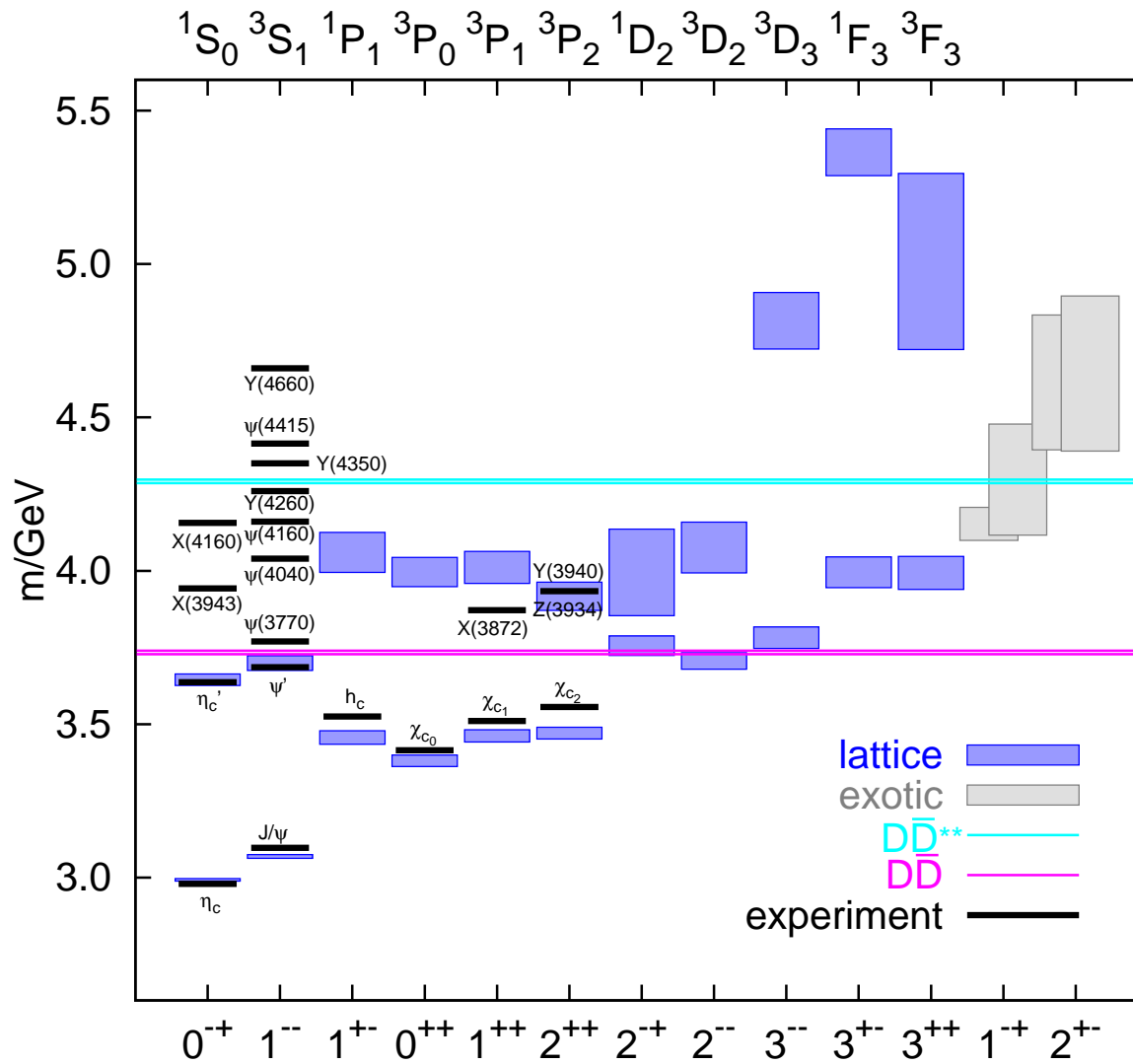


Hybridpotenziale



Charmoniumspektrum

C Ehmann, GB 07



$a \approx 0.11$ fm aus m_p

nur 1 Parameter:

m_c aus $\frac{1}{4}(m_{\eta_c} + m_{J/\psi})$

Aber:

★ $a \not\rightarrow 0$

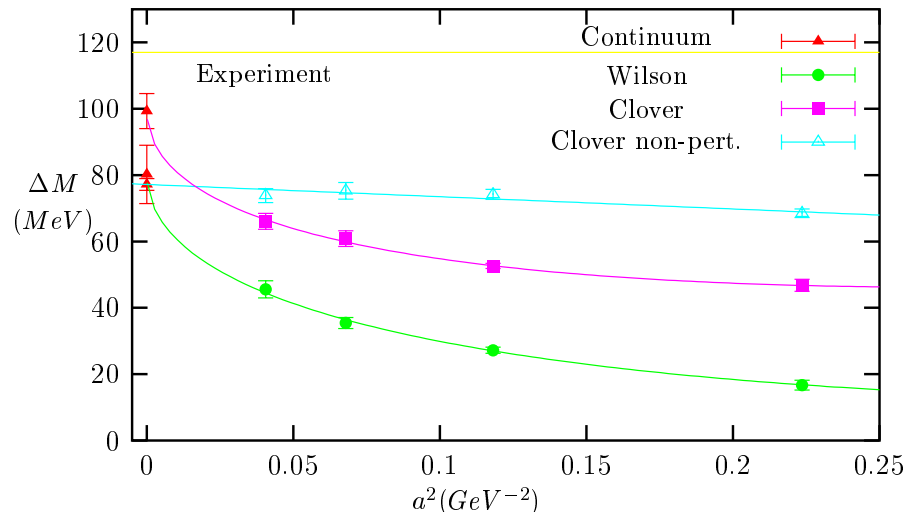
★ $n_f = 2 < 2 + 1 + 1$

★ $m_\pi \approx 1$ GeV $\gg m_\pi^{\text{phys}}$

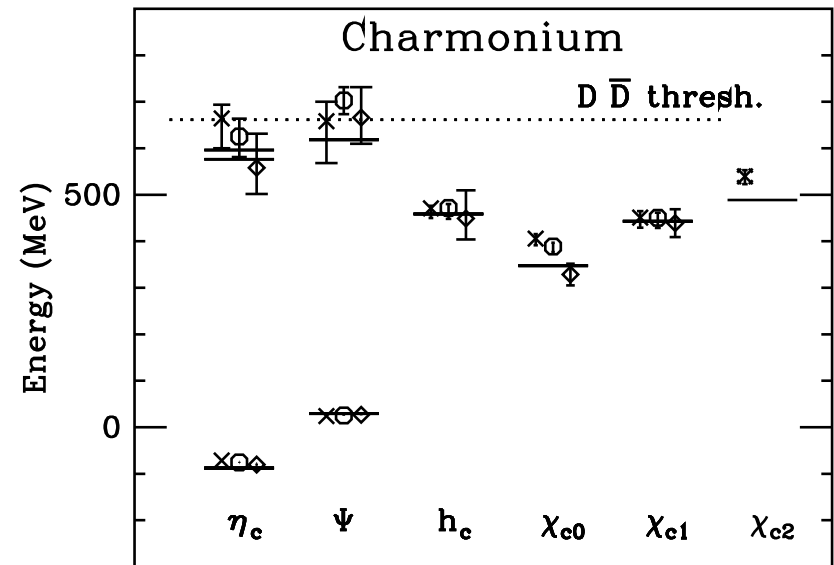
1S Hyperfinestrukturaufspaltung in perturbativer NRQCD (LO):

$$\Delta M = \frac{1}{6m_c^2} \langle \psi | V_4 | \psi \rangle, \quad V_4(r) = 8\pi C_F \alpha_s \delta^3(r).$$

QC DTARO ($n_f = 0$):



FNAL+MILC ($n_f \stackrel{?}{=} 2 + 1$)



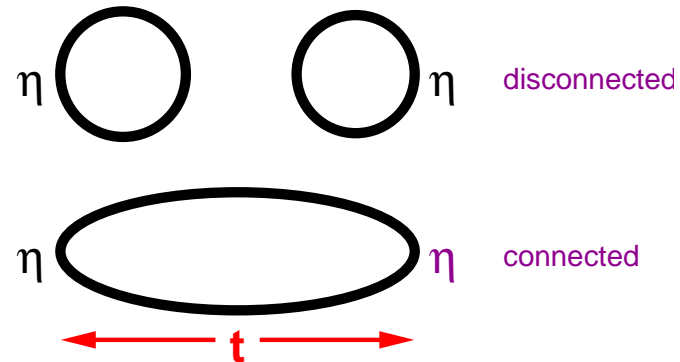
$a^{-1} \approx 1.1, 1.6, 2.3$ GeV.

Nächste Schritte:

$$a \rightarrow 0$$

$$n_f = 2 + 1 + 1$$

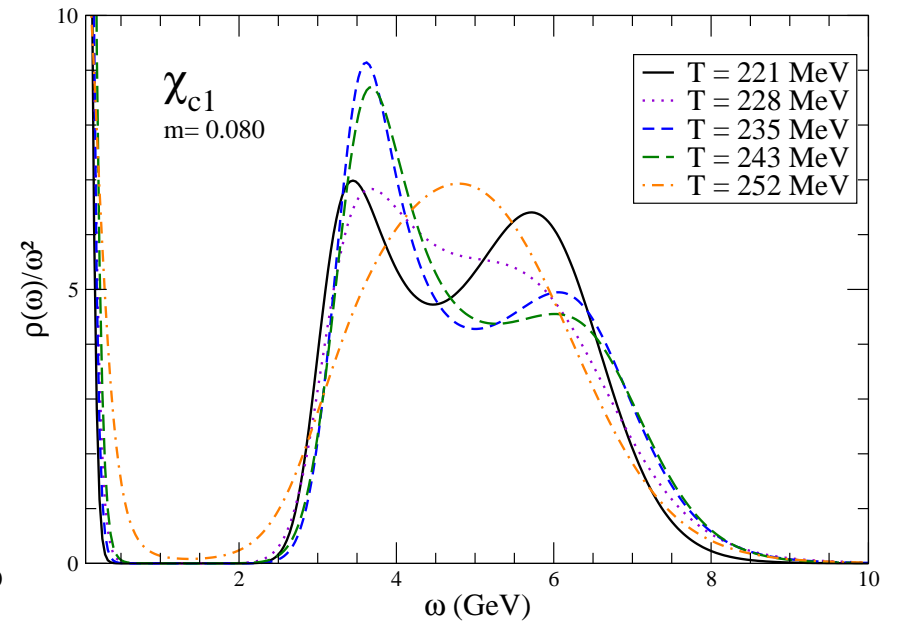
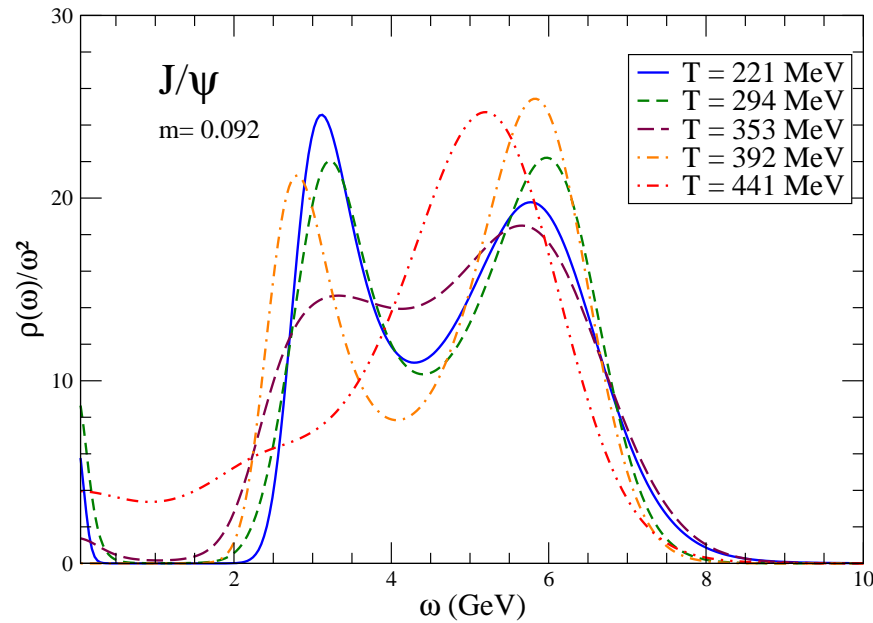
$$m_{\pi}^{\text{latt}} \rightarrow m_{\pi}^{\text{phys}}$$



$$c\bar{q}q\bar{c} \longleftrightarrow c\bar{c} \longleftrightarrow cg\bar{c}.$$

EM Übergangs/Zerfallsraten.

Charmonium-Dissoziation bei $T > T_c$

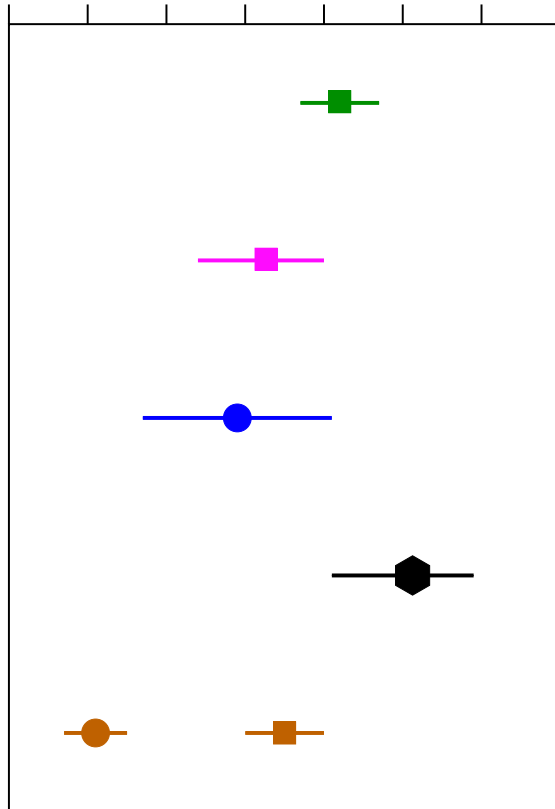


G. Aarts et al 07: $n_f = 2, m_q \approx m_s$

J/ψ "schmilzt" bei $1.4T_c < T < 2T_c$, χ_{c1} bei $T < 1.2T_c$.

Summary of recent results on T_c

T [MeV]
140 160 180 200



use T=0 scale: $r_0=0.469\text{fm}$

Nf=2:

V.G. Bornyakov et al, POS Lat2005, 157 (2006)
(improved Wilson, Nt=8, 10; input: $r_0=0.5\text{ fm}$)
(added Nt=12, Lattice'07) (rescaled to r_0)

Y. Maezawa et al., hep-lat/0702005 (QM'2006)
(improved Wilson, Nt=4, 6; input: m-rho)
(no cont. exp. yet)

Nf=2=1:

C. Bernard et al., Phys.Rev. D71, 034504 (2005)
(improved staggered (asqtad), Nt=4,6,8, input r_1)
(rescaled to r_0)

M. Cheng et al., Phys.Rev D74, 054507 (2006)
(improved staggered (p4), Nt=4,6; input r_0)

Y. Aoki et al., Phys. Lett. B643, 46 (2006)
(staggered (stout), Nt=4,6,8,10; input fK)
(converted to r_0)

● chiral ■ deconfinement ◆ chiral+deconfinement

Vortrag F Karsch bei Lattice 2007

QCD bei endlicher Temperatur (und Dichte)

Phasendiagramm ?

Kritische Temperatur und Universalitätsklasse ?

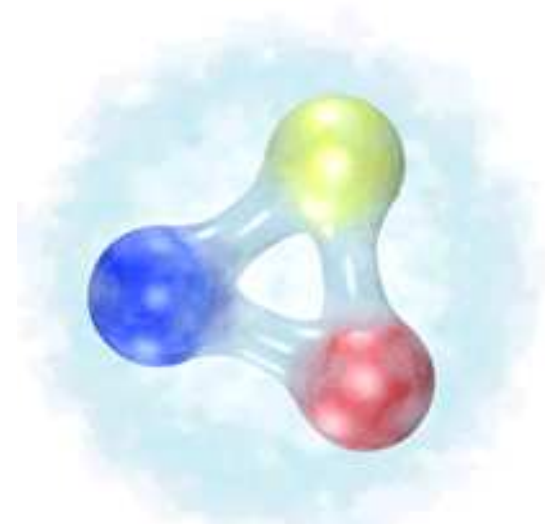
Zustandsgleichung.

Transport: Elektrische Leitfähigkeit, Viskosität etc.

Problem: Realistischer Seequarkinhalt, Kontinuumslimes.

“exotisch” \approx “nicht-Quarkmodell”
aber sogar

QCD Proton \neq Quarkmodell Proton



$< 2\%$ der Masse
 $< 40\%$ des Spins
 $< 75\%$ des Impulses

} durch die QCD Valenzquarks !

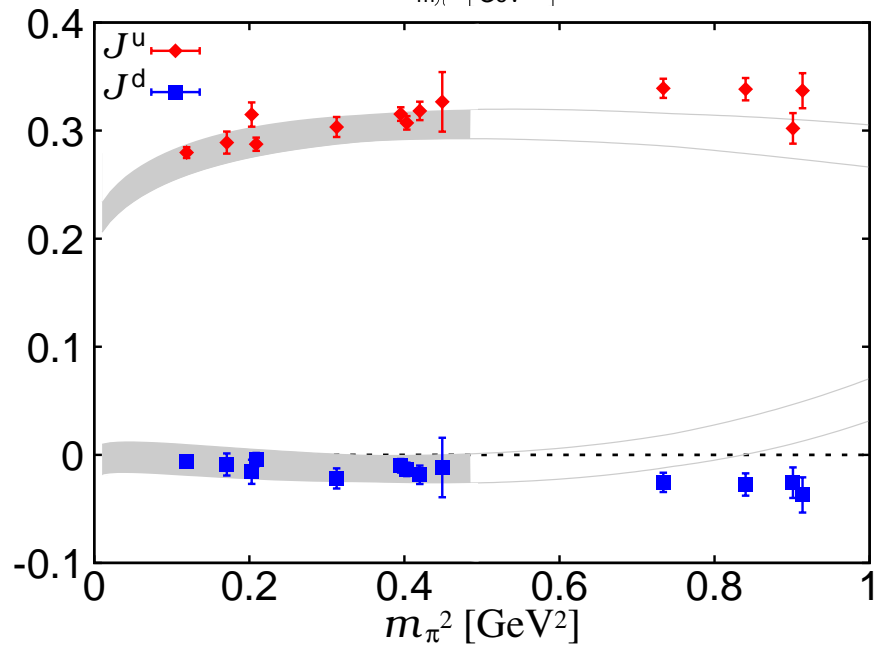
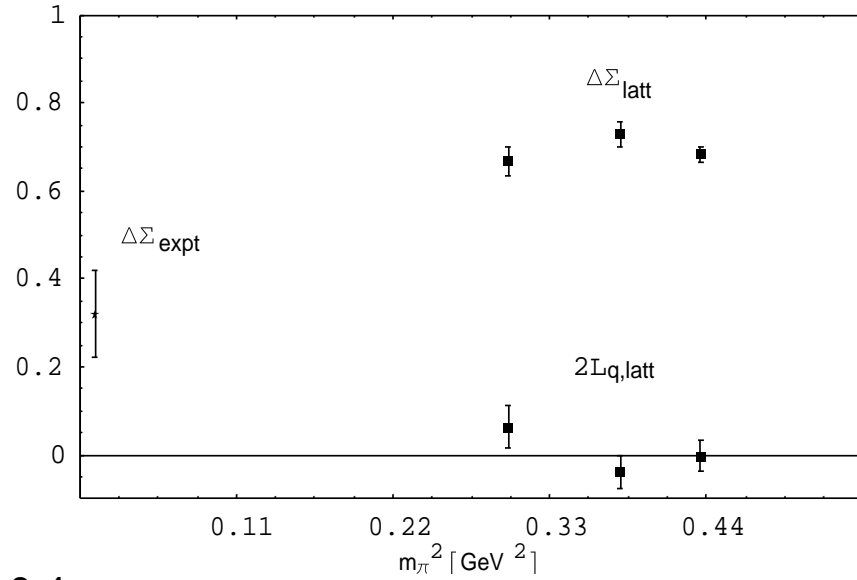
(Energieskalen/Impulstransfer-abhängige Aussage)

Protonspin

LHPC/SESAM: Negele et al '04

$$n_f = 2, m_\pi > 550 \text{ MeV}$$

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + L_q + J_g$$

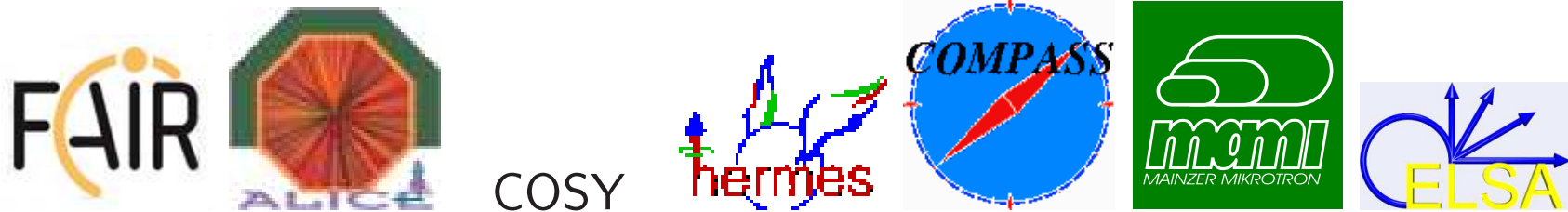


QCDSF: Brömmel et al '07

$$n_f = 2, m_\pi > 350 \text{ MeV}$$

$$\frac{1}{2} = J_q + J_g$$

Interpretation und Vorhersage experimenteller Daten:



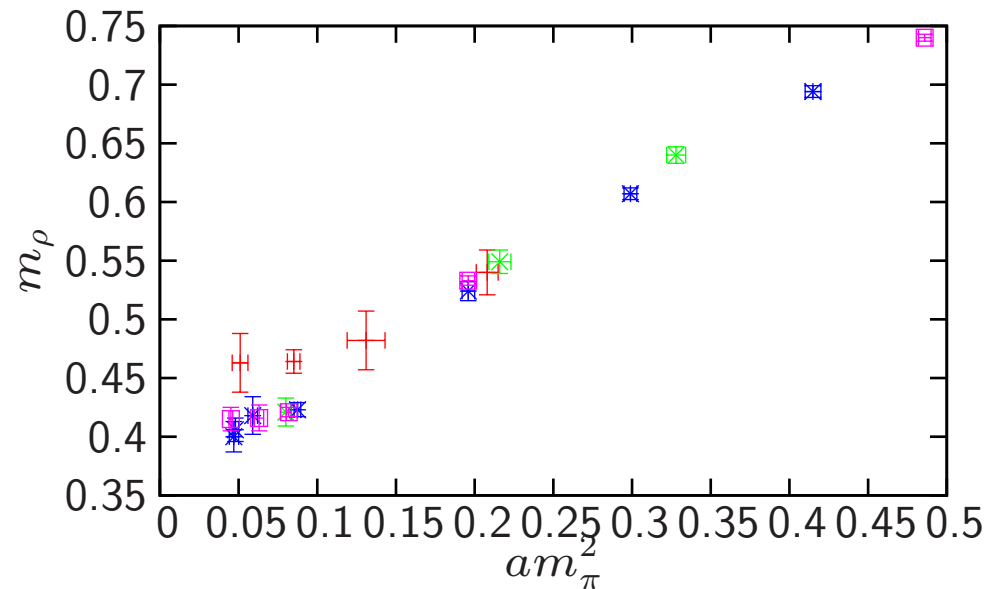
Virtuelle Welten für andere Theoretiker:

Im Experiment gibt es nur eine Welt. Auf dem Gitter lassen sich variieren:

$T, n_f, N_c, m_q, L = Na$ etc.

Beispiel: Mesonen in $SU(N_c)$

$N_c = 2, 3, 4, 5, 6$ F Bursa, GB 07



Experimentell nicht direkt zugängliche QCD-Observablen sind berechenbar.

Gitter-QCD in Deutschland: Permanente Stellen

Berlin (DESY/HU/ZIB)	B Bunk, K Jansen, M Müller-Preußker, D Pleiter, G Schierholz, H Simma, R Sommer, H Stüben, U Wolff
Bielefeld	O Kaczmarek, (F Karsch), E Laermann, M Laine
GSI Darmstadt	N.N.
Heidelberg	I-O Stamatescu
Jülich/Wuppertal	Z Fodor, C Hölbling, T Lippert, F Knechtli
Mainz	H Wittig
MPI Garching	P Weisz
Münster	O Philipsen, G Münster
Regensburg	G Bali, V Braun, M Göckeler, A Schäfer, T Wettig
Tübingen	H Reinhardt

Rechnerressourcen (peak performance)

Dedizierte Maschinen

	Tsukuba: 57 TFlops (BlueGene/L)
Bielefeld: 5 TFlops (APEnext)	BNL/DOE: 20 TFlops (2 QCDOCs)
DESY Zeuthen: 5 TFlops (APEnext)	JLAB: 2 TFlops (Clusters)
	FNAL: 2 TFlops (Clusters)
Wuppertal: 4 TFlops (ALICEnext)	Columbia: 1 TFlops (QCDOC)
	Edinburgh: 10 TFlops (QCDOC)

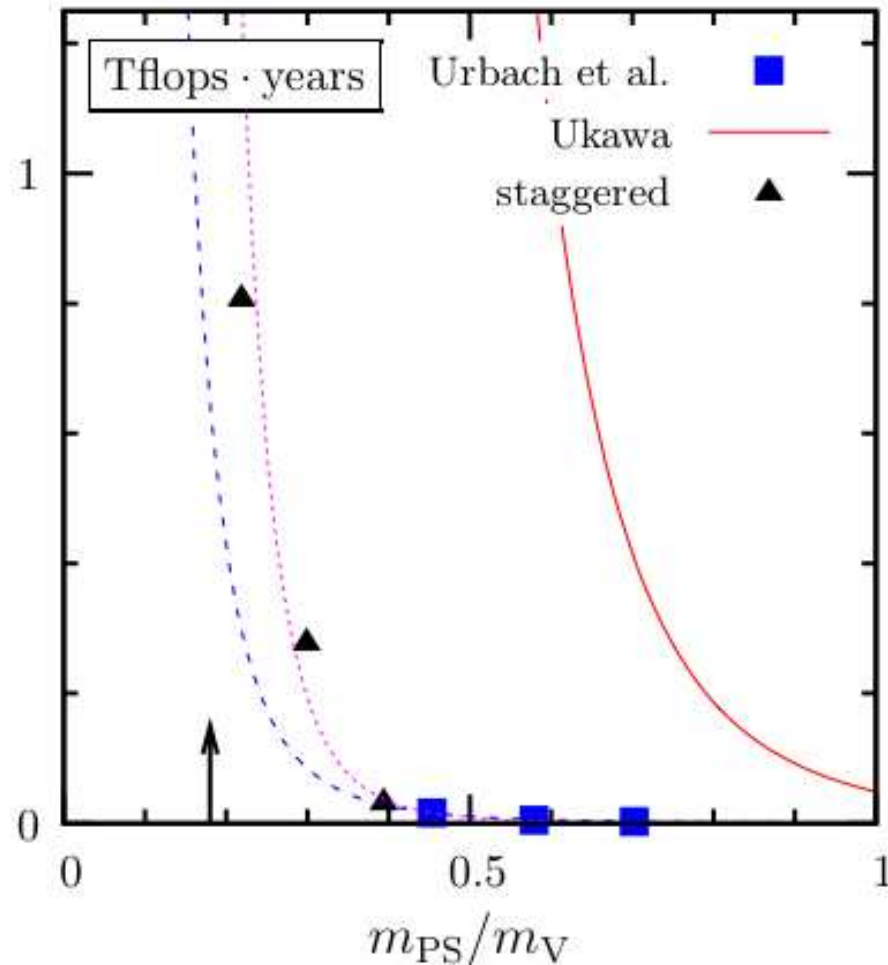
Supercomputerzentren (überbucht, wenig Planungssicherheit)

JSC Jülich: 46 TFlops (BlueGene/L) → 223 TFlops (BlueGene/P)

LRZ München: 62 TFlops (Altix)

LLNL California: 367 TFlops (BlueGene/L)

Möglich: Skalierbarer € 10/GFlops Low Power Computer 2009/10.



Berlin Wall: 7 Jahre später

Kosten bei konstantem $m_\pi L$:

$$\propto m_\pi^{-(7+\epsilon)} a^{-6} = m_\pi^{-(2+\epsilon)} L^5 a^{-6}$$

Riesiger algorithmischer Fortschritt!

Trotzdem brauchen wir PetaFlops.

Die Zukunft

QCD ist QCD und QCD is schwierig.

Dennoch große Fortschritte:

★ $n_f \rightarrow 2 + 1 + 1$

★ $m_\pi^{\text{latt}} \rightarrow m_\pi^{\text{phys}}$

★ Disconnected Diagramme

★ Effiziente Algorithmen

Aber: Wenig Rechnerressourcen, insbesondere für Hochschulgruppen.