QUARK E GLUONI SU RETICOLO

Marco Mariti

Congressino del Dipartimento di Fisica

23/04/2015

OUTLINE

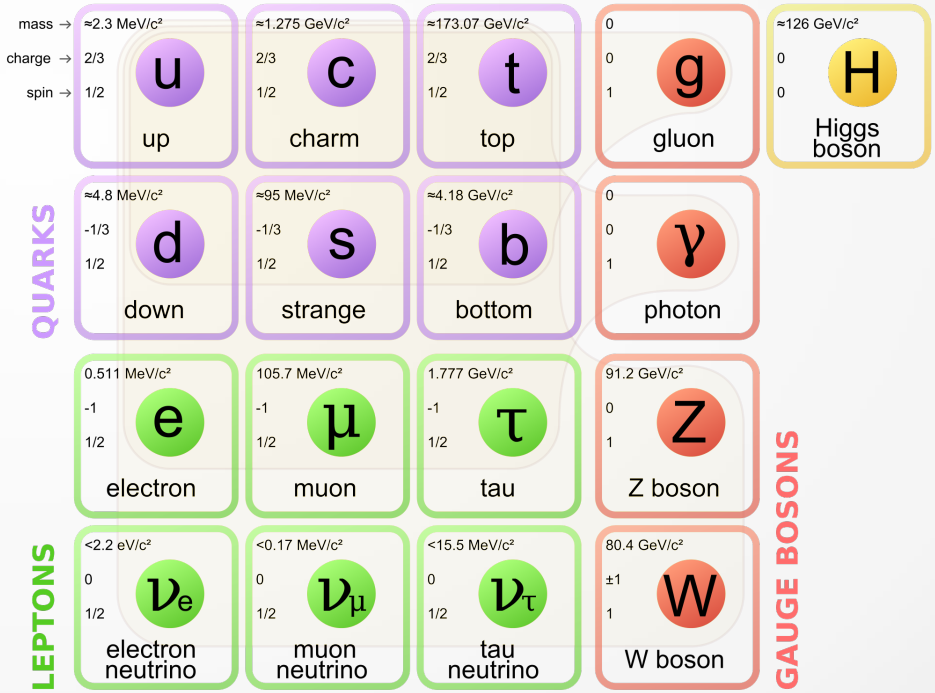
- Introduzione generale: le interazioni forti e la QCD
- Cosa vuol dire Lattice QCD?
- Approccio numerico: simulazioni Monte Carlo
- Cosa si può studiare su reticolo
- Maggiori dettagli sull'attività di ricerca $\rightarrow$ Poster Session A. Rucci

CROMODINAMICA QUANTISTICA

Modello Standard: Interazioni forti ed elettrodeboli.
Settore forte $\rightarrow$ QCD.

$$\mathcal{L}_{QCD} = \sum_f \bar{\psi}_i^f (i(\gamma_\mu D^\mu)_{ij} - m_f \delta_{ij}) \psi_j^f - \frac{1}{4} G^a_{\mu\nu} G_a^{\mu\nu}$$

- QCD: come propagano e interagiscono tra loro quark e gluoni.
- Gruppo di simmetria non abeliano $SU(3)$
- Quark: spin $\frac{1}{2}$, tre stati di carica di colore (oltre carica elettrica e debole)
- Gluoni: spin 1

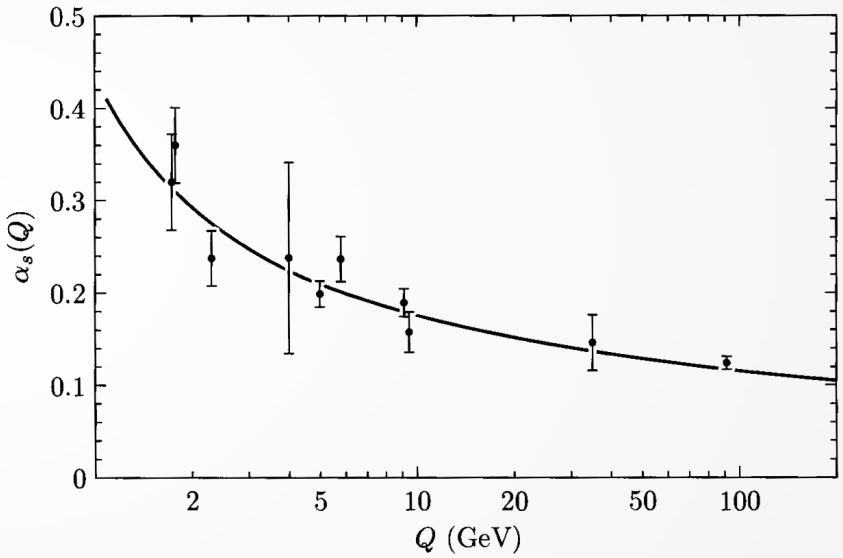


Quark e gluoni $\rightarrow$ Confinati negli adroni

CROMODINAMICA QUANTISTICA

L'accoppiamento dipende dall'energia del sistema.

- La carica di colore è schermata in modo inverso nel vuoto $\rightarrow$ sempre più piccola avvicinando i quark (alte energie)
- Libertà asintotica



Due limiti:

- Alta energia ($E \gtrsim O(10)$ GeV): teoria delle perturbazioni OK
- Bassa energia ($E \simeq 100$ MeV): regime non perturbativo

LIMITE BASSA ENERGIA

Bassa energia $\rightarrow$ “Grande” distanza
dove “grande” è la scala del fm (10^{-15}m)

Rilevante per:

- Materia adronica: spettri dei mesoni e barioni.
- Confinamento dei quark
- Diagramma di fase della QCD

Come studiare la QCD oltre la teoria delle perturbazioni?

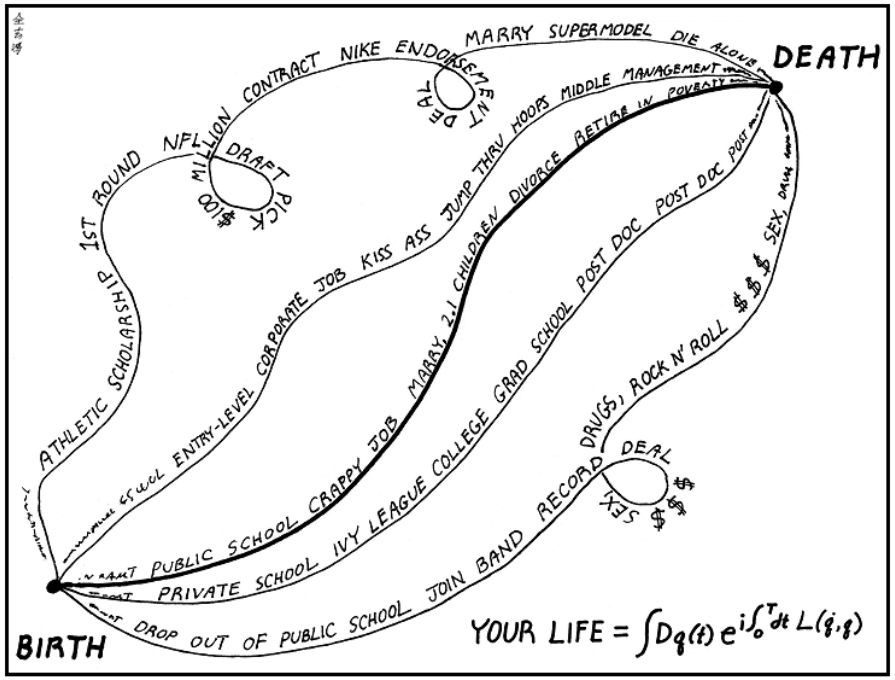
LATTICE QCD

Path Integral

- QM 1D. Formulazione Euclidea: $t \to it$ $(\hbar = c = 1)$

$$\langle q_1(t_1)|q_2(t_2)\rangle = \int_{q_1(t_1)}^{q_2(t_2)} Dq(t) e^{-S[q]}$$

$e^{-S[q]}$ “pesa” i cammini



The Path Integral Formulation of Your Life

- QFT. $\hat{q} \to \hat{\phi}(x)$ operatore campo

$$\langle 0|\mathcal{O}|0\rangle = \frac{\int D\phi\, e^{-S[\phi]}\mathcal{O}[\phi]}{\int D\phi\, e^{-S[\phi]}}$$

∞ *d.o.f* $\to$ non calcolabili senza teoria delle perturbazioni

LATTICE QCD

Monte Carlo

Idea base:

- Distribuzione di probabilità per i campi $\phi(x)$

$$\langle 0|\mathcal{O}|0\rangle = \frac{\int D\phi\, e^{-S[\phi]}\mathcal{O}[\phi]}{\int D\phi\, e^{-S[\phi]}} = \int D\phi\, P[\phi]\mathcal{O}[\phi]$$

- Algoritmo Monte Carlo:
  Campiono configurazioni di ϕ richiedendo:
  - Distribuzione di probabilità $P[\phi]$ (importance sampling)
  - Spazio delle configurazioni connesso (ergodicità)

$$\bar{\mathcal{O}} = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N}\mathcal{O}_i \qquad \langle 0|\mathcal{O}|0\rangle \simeq \bar{\mathcal{O}} \pm O\left(\sqrt{\frac{1}{N}}\right)$$

Errore $O\left(\sqrt{\frac{1}{N}}\right)$ a prescindere dalle dimensioni del sistema!

LATTICE QCD

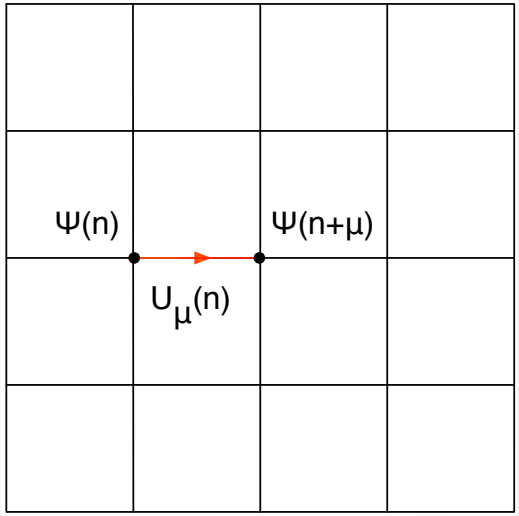
Implementazione numerica

Ci serve un numero finito di *d.o.f*

- Discretizzare spazio-tempo Euclideo $\rightarrow$ lattice spacing a
- Reticolo finito con condizioni al bordo (es. periodiche) $\rightarrow$ size L

Discretizzare la teoria su reticolo: $S_{QCD}(\psi, A_\mu) \rightarrow S_{lat}(\hat{\psi}, U_\mu)$

- $\hat{\psi}(n)$: campi dei quark, definiti sui siti
- $U_\mu(n) = e^{igaA_\mu(n)}$: trasporti paralleli sul reticolo, fasi aquisite dai quark spostandosi da un sito all'altro (link)



$$P[U] = \frac{e^{-S_g[U]} \det M}{\int D[U] e^{-S_g[U]} \det M}$$

Positiva? $\longrightarrow$ distribuzione di probabilità OK

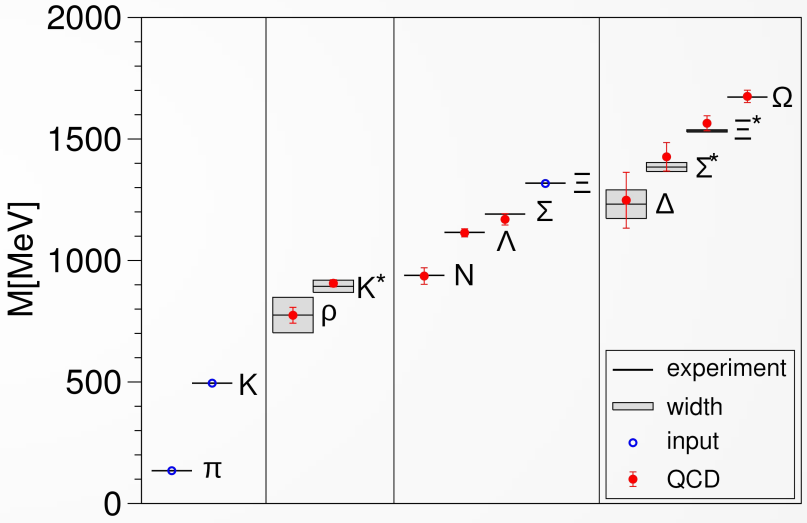
SIMULAZIONI

A cosa stare attenti:

- Limite continuo ($a \to 0$) $\quad a \lesssim 0.1$ fm
- Effetti taglia finita ($L \gg \frac{1}{m_\pi}$) $\quad L \gg 1$ fm

Stato dell'arte

- Simulazioni $2+1$ quarks con masse fisiche, $m_\pi = 135$MeV
- $La \simeq 5$fm
- Precisione sulle masse $\simeq O(1)\%$



Durr et al, 2008

Potenza richiesta $\simeq 100$ Tflop $\cdot$ year $\longrightarrow$ Indispensabili supercomputer!

Supercomputer
O(10) Pflops

Vs

Desktop
O(10) Gflops

SIMULAZIONI

$\longrightarrow$ Cosa si fa in pratica? $\longleftarrow$
Domanda: cosa voglio studiare?

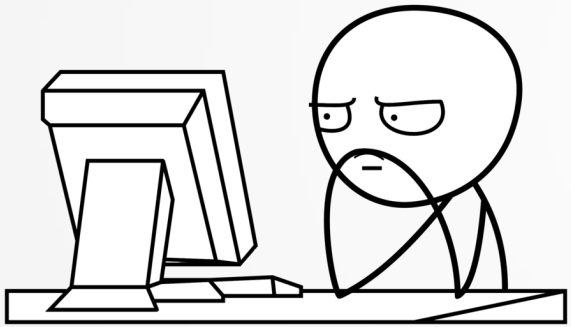
- Determinare una grandezza d'equilibrio del sistema (potenziali termodinamici, suscettività magnetica, ...)
- Confermare una previsione teorica (proprietà del vuoto, ...)
- Misurare costanti della teoria (spettro mesonico, tensione di stringa, ...)
- Cercare nuovi effetti

Simulazioni Monte Carlo $\rightarrow$ strumento d'indagine

SIMULAZIONI

$\longrightarrow$ Cosa si fa in pratica? $\longleftarrow$

Come per gli esperimenti, occorre progettare le simulazioni:



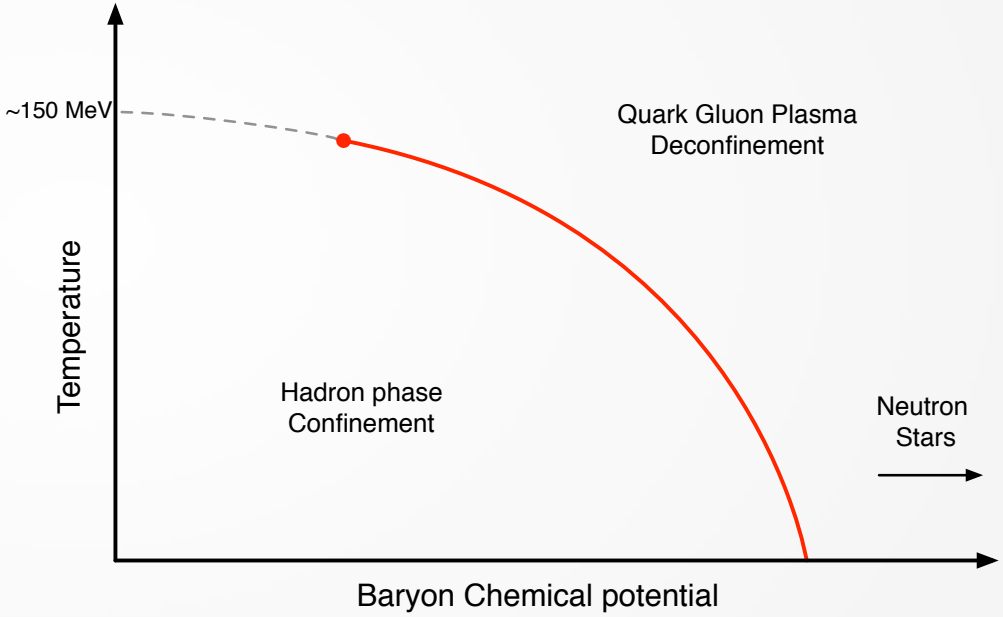
- Programmazione
  - Algoritmi simulazione
  - Osservabili da misurare
- Simulazione
  - Capire di che reticolo si ha bisogno
  - Fissare i parametri della teoria
  - Valutare il tempo macchina necessario
- Analisi
  - Analisi statistica dei dati, ...

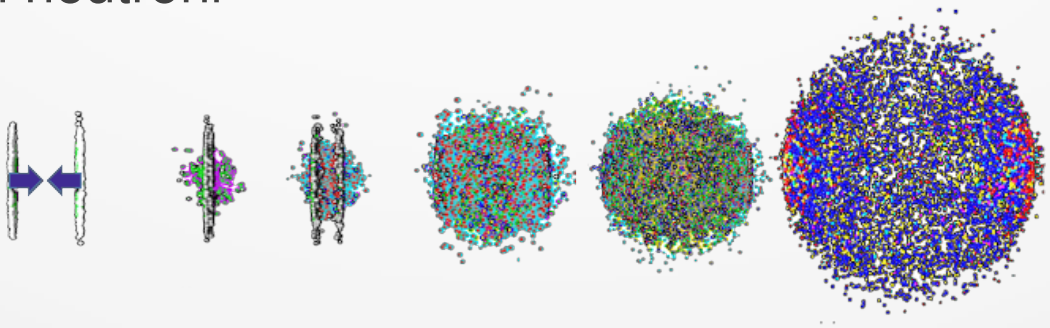
Sedersi alla scrivania e decidere con calma le strategie migliori

DIAGRAMMA DI FASE DELLA QCD

Quark e gluoni non sono sempre confinati nella materia adronica
Per $\varepsilon \simeq 1\text{GeV/fm}^3 \rightarrow$ Transizione di fase

- $\mu_B = 0$: Deconfinamento a $T \simeq 150\text{MeV} \simeq 1.8 \cdot 10^{12}\text{K}$
- $\mu_B \neq 0$: problema del segno $\rightarrow$ difficoltà nelle simulazioni!
- Rilevante per:
  - Heavy ion collisions
  - Prime fasi cosmologiche
  - Stelle di neutroni





VUOTO DELLA QCD

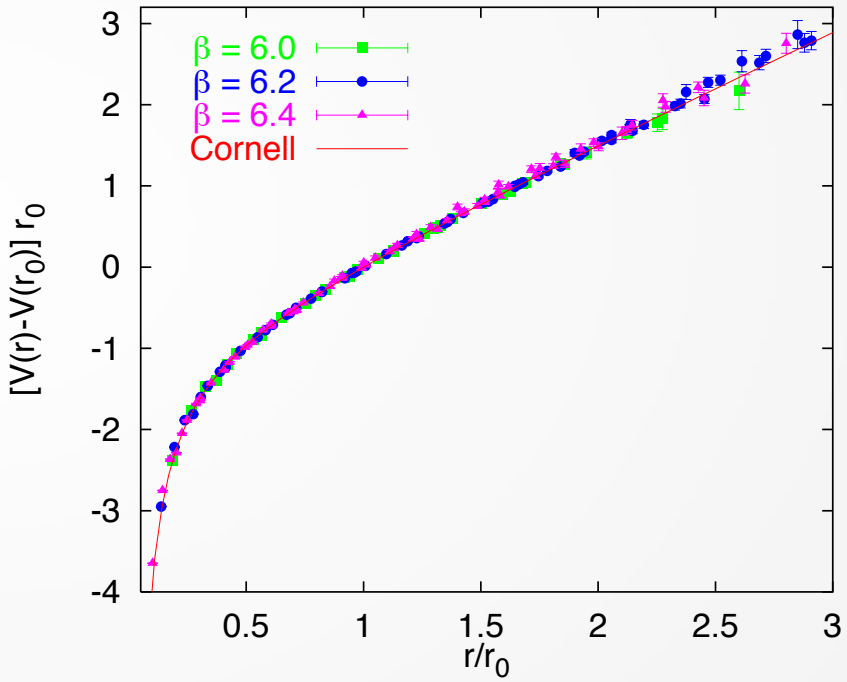
- Potenziale statico $Q\bar{Q}$

$$V(r) = \sigma r + \frac{\alpha}{r} + c$$

  - Fenomenologia dei mesoni
  - Simulazioni su reticolo

- Masse adroniche: riprodotti spettri mesonici-barionici

- Topologia: struttura non banale del vuoto (istantoni)
  - Carica topologica
  - Suscettività topologica

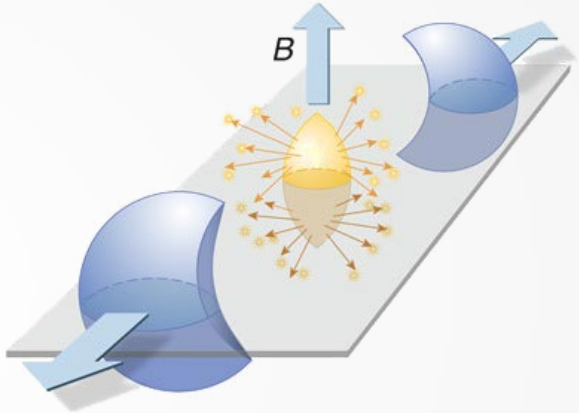


Bali et al., 2000

CAMPI MAGNETICI IN QCD

QCD in presenza di forti campi magnetici
$eB \simeq 10^{15}$ T $\simeq 0.06$ GeV^2 $\simeq 3.3 m_\pi^2$.

- Collisioni heavy ions non centrali ($eB \simeq 10^{15}$T)
- Prime fasi cosmologiche ($eB \simeq 10^{16}$T)
- Magnetars ($eB \simeq 10^{10}$T)



Cosa si studia?

- Modifica diagramma di fase
- Modifica del potenziale statico quark-antiquark
- Proprieta magnetiche della materia fortemente interagente