

**Proposta di Use case per il
WP1 del CN-HPC del PNRR**

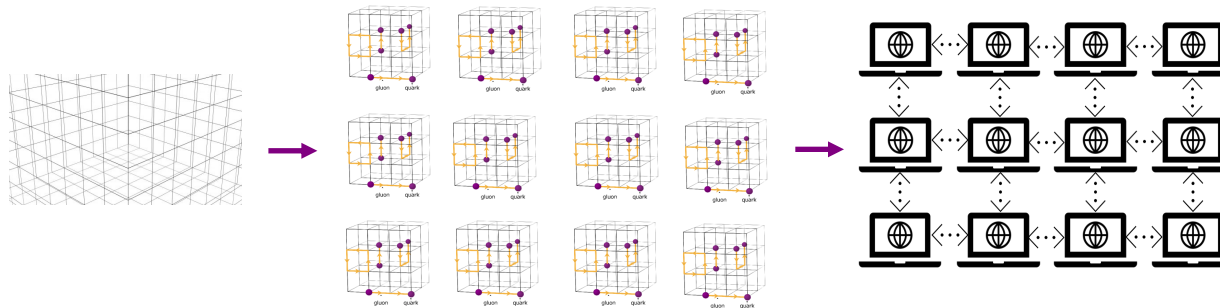
MICHELE PEPE
INFN Sez. Milano – Bicocca

Studio di QCD in condizioni estreme

- Temperatura finita (obiettivo principale)
- Campo cromo-magnetico di background
- Densità finita

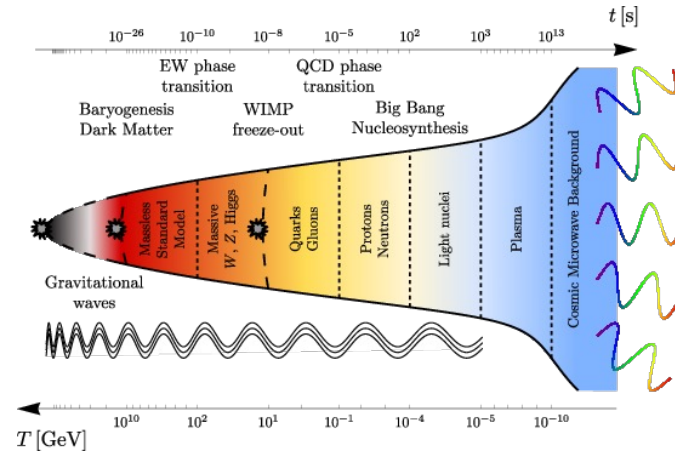
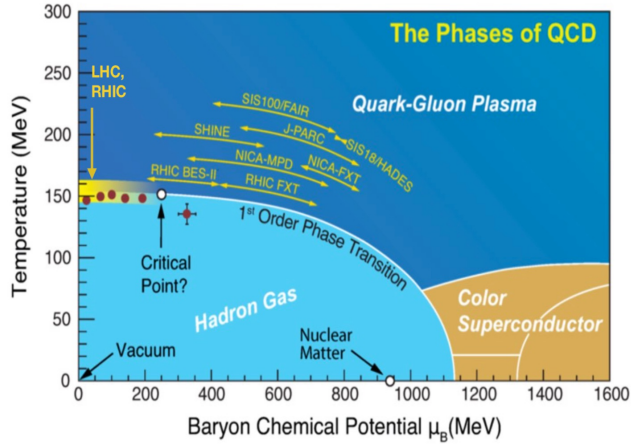
Contesto

- La regolarizzazione su reticolo è l'unica formulazione nota di QCD che permette il suo studio non-perturbativo a partire da principi primi
- La discretizzazione dei gradi di libertà consente di applicare metodi numerici per la soluzione di QCD tramite calcolatori
- Le simulazioni Monte Carlo rappresentano una formidabile sfida computazionale: calcolo parallelo (HPC)

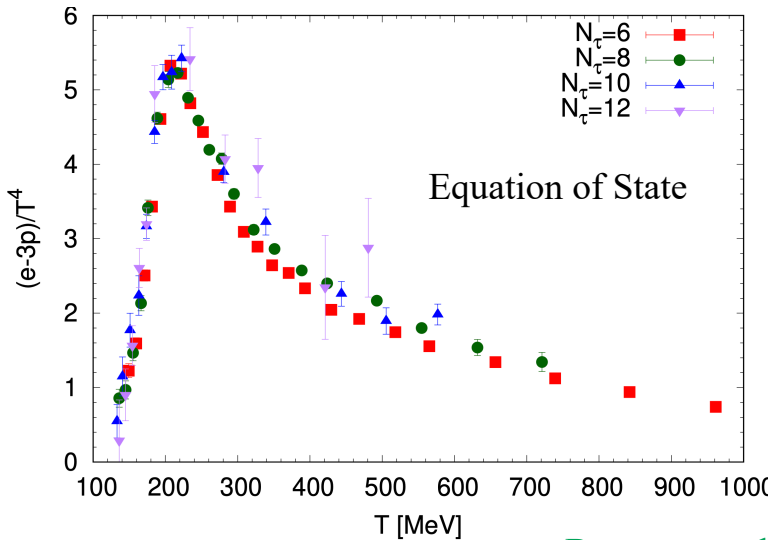


- La potenza di calcolo non basta: sviluppo di nuovi algoritmi e metodi di calcolo
- QCD in condizioni estreme: temperatura e densità finite, campi esterni

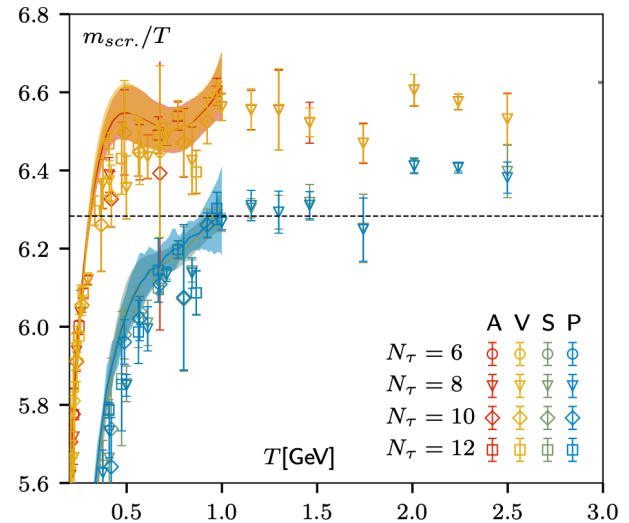
QCD ad alta temperatura



- Fisica molto importante per l'astrofisica (stelle di neutroni, early universe, etc.) e QGP
- Lo studio non-perturbativo di QCD a T finita è computazionalmente oneroso, $T_{\text{max}} \sim 1 \text{ GeV}$: due scale di energia molto diverse, T e $T=0$, devono essere simulate contemporaneamente (!)



Bazavov et al. (2021)



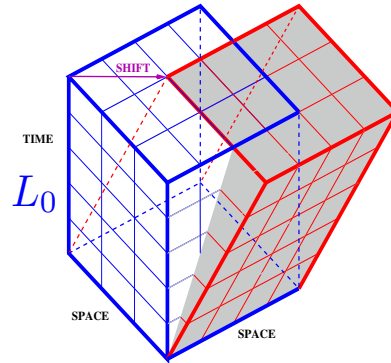
Mesonic screening masses

Bazavov et al. (2019)

QCD ad alta temperatura

- soluzione: formulazione della QCD in un sistema di riferimento in moto

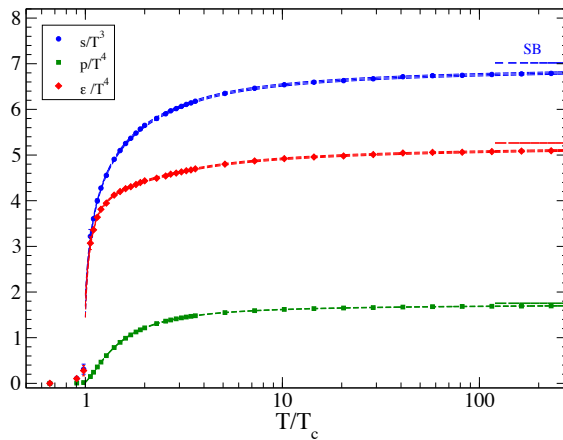
Shifted boundary conditions



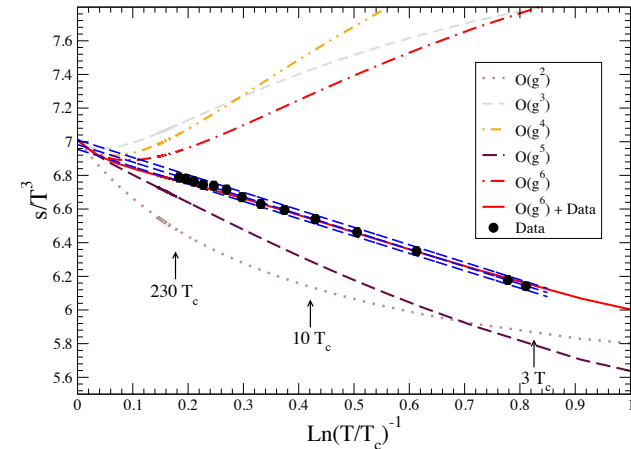
Si considera solo la temperatura T di interesse

$$\frac{s}{T^3} = Z_G \langle T_{0k}^G \rangle + Z_F \langle T_{0k}^F \rangle$$

- Elementi di matrice del tensore energia -impulso
- Costanti di rinormalizzazione



Yang-Mills SU(3)



- Sia l'approccio teorico sia la sua implementazione computazionale risultano molto efficaci.
- Teoria effettiva di QCD ad altissima T : sarebbe interessante fare un matching con lattice QCD per valutarne il range di validità

QCD ad alta temperatura: Use case

- È necessario lo sviluppo di un codice parallelo Monte Carlo efficiente per lo studio di QCD a temperatura finita con shifted boundary conditions con l'obiettivo di raggiungere 100 GeV.
- Soluzioni algoritmiche per il calcolo non-perturbativo delle costanti di rinormalizzazione e degli elementi di matrice del tensore energia-impulso

$$\frac{s}{T^3} = Z_G \langle T_{0k}^G \rangle + Z_F \langle T_{0k}^F \rangle$$

- Il codice deve avere uno strong scaling molto buono per poter scalare all'utilizzo di un numero elevato di core di calcolo: ordine 5000 -10000 cores.
- Il codice deve simulare i quark nella formulazione di Wilson O(a)-improved e sarà una evoluzione del codice open source OpenQCD.
- Questo studio è l'obiettivo principale dello Use case su QCD in condizioni estreme

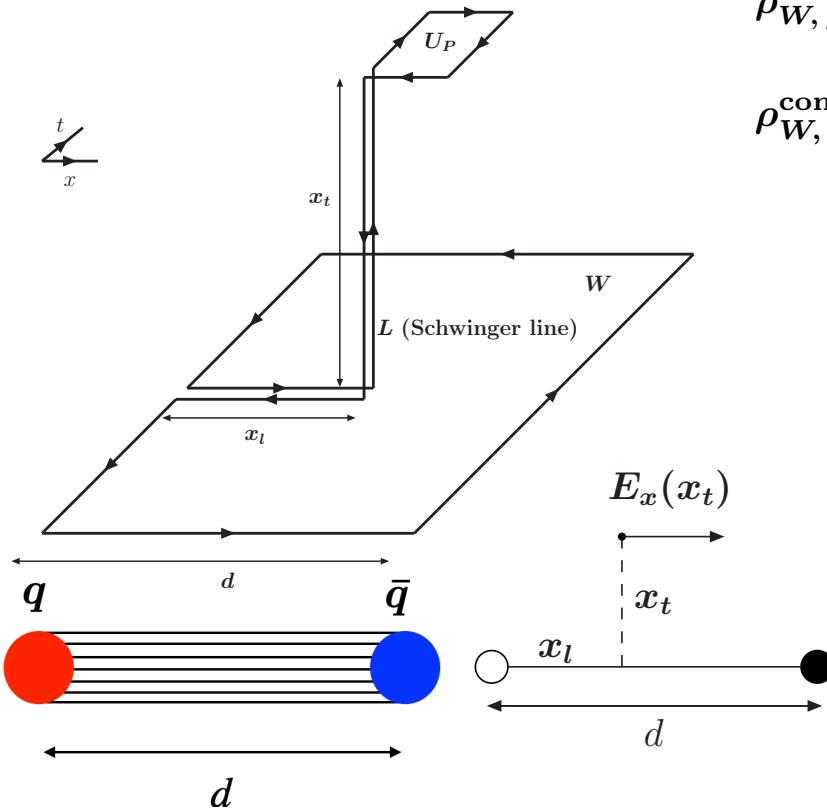
Confinamento del Colore in QCD

- Studio della formazione di tubi di flusso cromoelettromagnetici in QCD:
 - $T=0$
 - $T \neq 0$

correlatore connesso per la misura del tensore di campo cromoelettromagnetico

$$\rho_{W, \mu\nu}^{\text{conn}} = \frac{\langle \text{tr}(W L U_P L^\dagger) \rangle}{\langle \text{tr}(W) \rangle} - \frac{1}{N} \frac{\langle \text{tr}(U_P) \text{tr}(W) \rangle}{\langle \text{tr}(W) \rangle}$$

$$\rho_{W, \mu\nu}^{\text{conn}} \xrightarrow{a \rightarrow 0} \alpha^2 g \left[\langle F_{\mu\nu} \rangle_{q\bar{q}} - \langle F_{\mu\nu} \rangle_0 \right]$$



Modifiche al codice pubblico MILC per inserire:

- Misura del tensore di campo cromoelettromagnetico
- Smoothing delle configurazioni di gauge con HYP3d

Preparazione dei codici e degli script per analizzare i dati.

QCD in condizioni estreme

- QCD in presenza di campi di background
- Campi cromomagnetici di background in QCD e confinamento:
 - ✓ Studio del diagramma di fase della QCD in presenza di campi cromomagnetici di background.
 - ✓ Modifica al codice pubblico MILC per tenere conto nella dinamica delle condizioni al contorno corrispondenti al campo di background.
 - ✓ Codici e script per analisi dati, anche con implementazione di tecniche Multihistogram
- QCD a densità finita
- Equazione di stato della QCD a temperatura e densità finite:
 - ✓ Studio del diagramma di fase della QCD in presenza di potenziale chimico.
 - ✓ Modifica del codice pubblico MILC per introdurre il potenziale chimico nella dinamica.
 - ✓ Codici e script per analisi dei dati.

QCD in condizioni estreme: Use case

Richieste

- Accesso ad un cluster di taglia medio-piccola per la fase di sviluppo (start&stop) con connessione infiniband: CNAF. 3 Mch
- Accesso ad un sistema di HPC per test avanzati e studio di performance su sistemi di taglia realistica: Cineca. 20 Mch

Interazioni con attività di WP5

- Creazione di una repository di configurazioni una volta avviata la fase di produzione

Sedi e personale coinvolti

- INFN sezione di Milano-Bicocca

M. Pepe (staff)

- INFN sezione di Bari

L. Cosmai (staff)

- Università della Calabria

A. Papa (staff)

- Università di Milano-Bicocca

L. Giusti (staff), M. Bresciani (PhD), D. Laudicina (PhD), P. Rescigno (PhD)