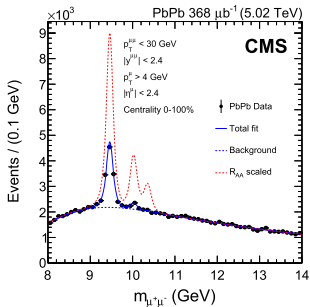


クォーコニウム

赤松 幸尚 (大阪大学)

チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理」
2019年8月19-21日@理化学研究所



クォーコニウムに関する基本的なこと

クォーコニウム：重クォーク対の束縛状態

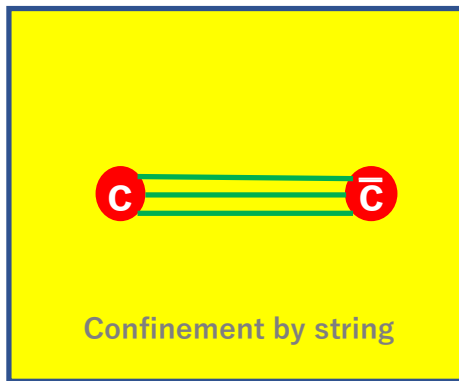
発見の歴史

- ▶ 1974年 J/ψ 粒子 ($p + \text{Be}/e^+ + e^-$) → チャームクォークの発見
- ▶ 1977年 Υ 粒子 ($p + \text{Cu}, \text{Pt}$) → ボトムクォークの発見

$J^P = 1^-$ のクォーコニウム [Particle Data Group (16)]		
	質量	束縛エネルギー *
J/ψ	3.097 GeV	~ 0.6 GeV
$\psi(2S)$	3.686 GeV	~ 0.05 GeV
$\Upsilon(1S)$	9.460 GeV	~ 1 GeV
$\Upsilon(2S)$	10.023 GeV	~ 0.5 GeV
$\Upsilon(3S)$	10.355 GeV	~ 0.2 GeV

* $2m_{D^\pm} = 3.739$ GeV、 $2m_{B^\pm} = 10.559$ GeV から計算した

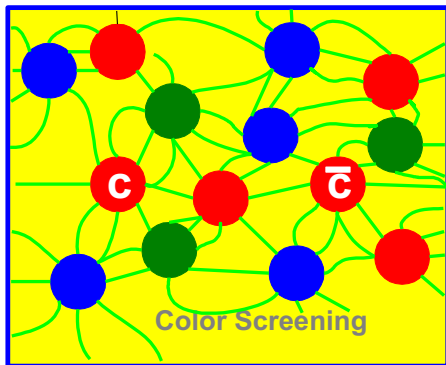
重クォークの間に働く力



$$T=0$$

離しすぎると紐を伸ばすよりも軽いクォーク対を生成する方が得になる (string breaking)

クォークoniumを QGP 環境中に置いたら？



$$T > T_c$$

クォークやグルーオンが自由に動けるようになり、重クォークのカラー電荷が遮蔽される

ちょっと雑に量子力学

具体的なポテンシャルで考えてみる

$$V(r; T = 0) = \underbrace{-\frac{\alpha}{r}}_{\text{クーロン}} + \underbrace{\sigma r}_{\text{紐}} \rightarrow V(r; T > T_c) = -\frac{\alpha}{r} \underbrace{\exp[-m_D r]}_{\text{遮蔽}}$$

ポテンシャルが弱いと束縛状態がなくなる

$$E(r) = \underbrace{2m}_{\text{質量}} + \underbrace{\frac{1}{2mr^2}}_{\text{運動エネルギー}} + \underbrace{V(r)}_{\text{ポテンシャル}}, \quad \left. \frac{\partial E(r)}{\partial r} \right|_{r=r_{Q\bar{Q}}} = 0$$

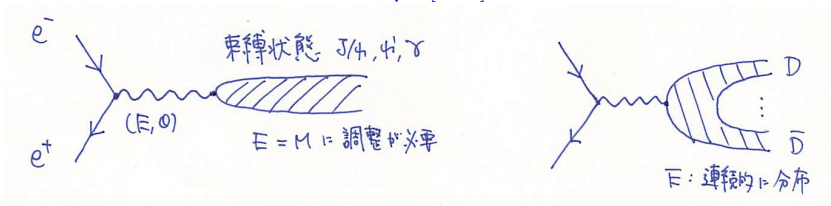
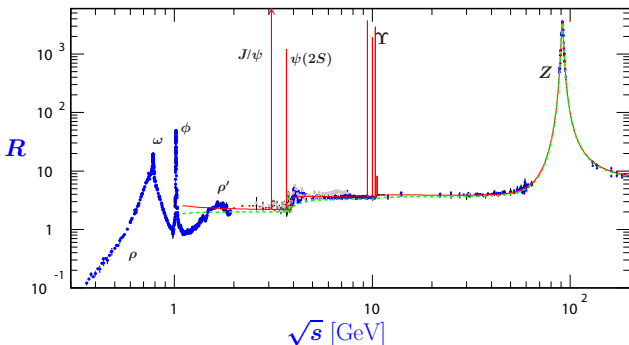
- ▶ 変分法で解 $r_{Q\bar{Q}}$ が見つかるのは $m_D \leq 0.84m\alpha$
- ▶ $m_D(T) \sim T$ なので、高温になると束縛状態は存在しない
- ▶ 重クォークの質量が重いほど、束縛状態は高温まで生き残る

J/ψ の収量は $T \sim (1.2 - 1.5)T_c$ を境に急減するはず (J/ψ suppression) [Matsui-Satz (86)]

スペクトル関数とは何か？

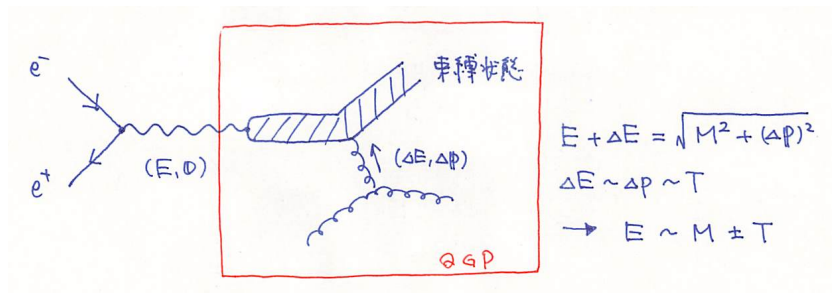
物質から、ある量子数やエネルギー・運動量を持った励起を起こせる度合い

真空のスペクトル関数 [Particle Data Group (16)]



QGP 中のスペクトル関数で何がわかるか？

QGP 中の粒子とエネルギー・運動量のやりとりが起こる



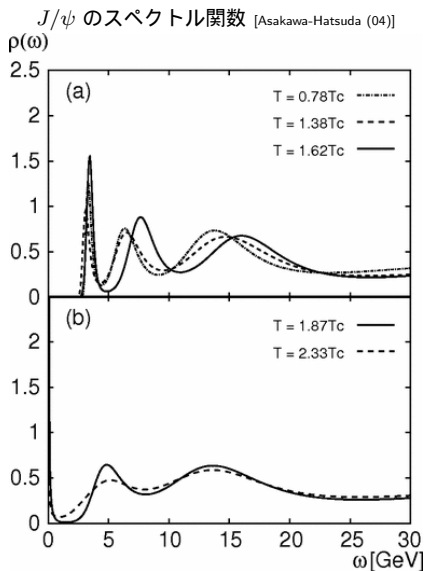
$$E + \Delta E = \sqrt{M^2 + (\Delta p)^2}$$

$$\Delta E \sim \Delta p \sim T$$

$$\rightarrow E \sim M \pm T$$

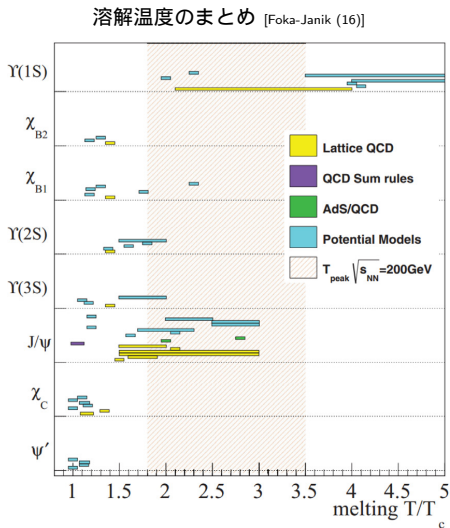
- ▶ 熱的環境ではスペクトル関数がぼやける
- ▶ 多少ぼやけてもピーク構造があると、束縛状態は生き残っている
- ▶ 連続的なスペクトルになると、束縛状態は消滅している

格子 QCD 計算 + 最大エントピー法



なるほど $1.7T_c$ くらいまで J/ψ は生き残っていそう

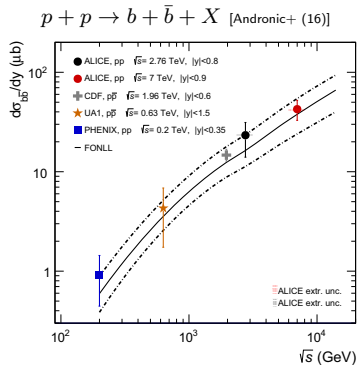
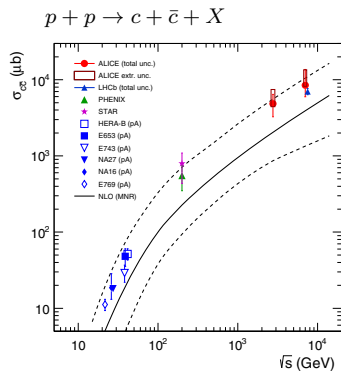
他にもいろんな計算がある



深い束縛状態ほど高温まで生き残りそう
しかし、相転移のように明確な溶解温度の定義は存在しない

重イオン衝突での重クォーク対生成

重クォーク対生成の数 (≫ クォークoniumの数) をグラウバー模型で見積もってみよう

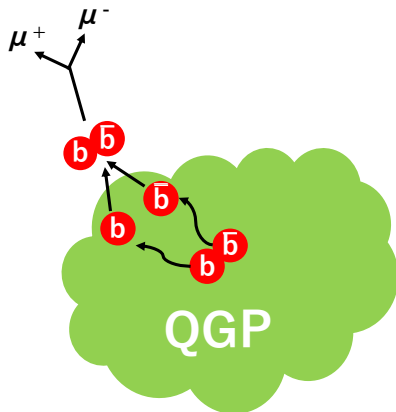


▶ Au + Au の中心衝突で $N_{\text{coll}}/\sigma_{NN}^{\text{in}} \simeq 30/\text{mb}$ [Yagi-Hatsuda-Miake Fig.10.11] なので

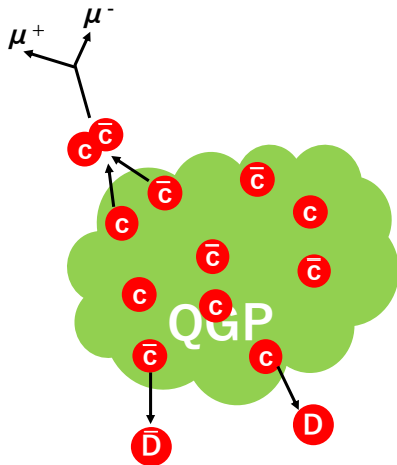
	$\sqrt{s_{NN}}$	$N_{c\bar{c}}$	$N_{b\bar{b}}$
RHIC	200 GeV	24	0.03
LHC	5500 GeV	240	1

重イオン衝突でのクォーコニウム生成

束縛状態の生き残り



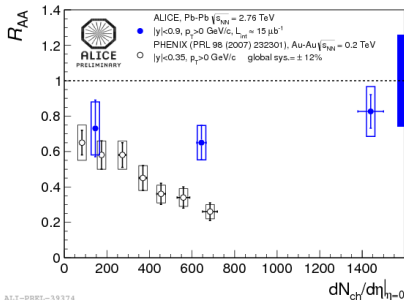
無相関な対の再結合



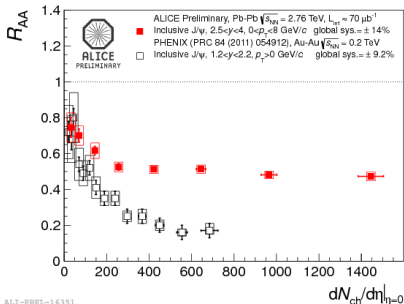
重クォーク対 \gg クォーコニウムなので LHC で $c\bar{c}$ の再結合は無視できないかもしれない

J/ψ のデータ

中心ラピディティの J/ψ



前方ラピディティの J/ψ [ALICE (13)]

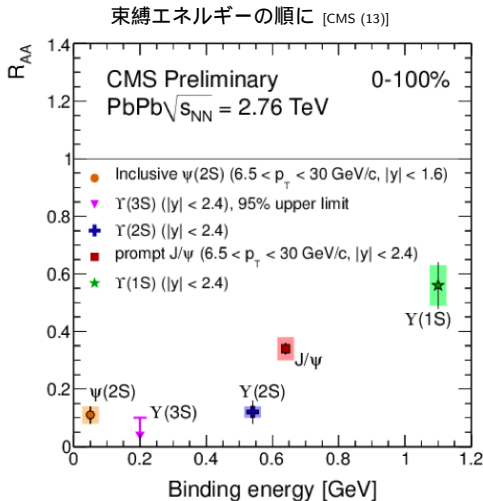


束縛状態の生き残りだけを考えた場合、 $R_{AA} \simeq J/\psi$ の存在確率

- ▶ High multiplicity の方が高温の QGP ができるので、 R_{AA} は下がるだろう
- ▶ LHC の方が RHIC よりも高温の QGP ができるので、 R_{AA} は下がるだろう

RHIC の J/ψ は束縛状態の生き残りだけで説明できそう
 LHC の J/ψ 生成には再結合が無視できない

Υ のデータ



LHC の Υ と high p_T の $J/\psi, \psi'$ は束縛状態の生き残りだけで説明できそう

おわりに

理論家は考えてみよう

- ▶ QGP 中のクォークoniumのスペクトル関数=観測されるレプトン対のスペクトル?
- ▶ ポテンシャルとスペクトル関数の関係はどうなっているか?

最先端へのキーワード

- ▶ ポテンシャルの定義：自由エネルギー、内部エネルギー、実時間ポテンシャル
- ▶ 量子開放系概念：Lindblad 形式、Stochastic unravelling

個人的な未解決問題

- ▶ 量子開放系でエントロピー力をどう記述するか?
- ▶ Gluo-dissociation の適切な記述 / 時間スケール