

Mésons vetoriais pesados em QCD holográfica

Saulo Diles

Universidade Federal do Pará - Campus Salinópolis

14 de outubro de 2021

VII CICLO DE SEMINÁRIOS DE FÍSICA - UESB -
ITAPETINGA - BA



Faculdade de Física
UFPA - Campus Salinópolis

Sumário

- 1 Introdução
- 2 QCD Holográfica e o espectro de mésons
- 3 O caminho para descrever mésons pesados
- 4 O modelo de Contreras, Diles e Vega
- 5 Comentários Finais

Sumário

- 1 Introdução
- 2 QCD Holográfica e o espectro de mésons
- 3 O caminho para descrever mésons pesados
- 4 O modelo de Contreras, Diles e Vega
- 5 Comentários Finais

Breve história do Quarkonium

- Na década de 60 temos o modelo de quarks: a princípio haveria os quarks up (u) e down (d), além do quark strange (s).
- Modelo de quarks exige parceiro para o quark s , foi então especulado um novo quark: o charm (c).
- Em 1971 o méson associado ao quark charm é descoberto, sendo chamado de charmonium ou J/Ψ , que é mais de três vezes mais pesado que o ϕ .
- Em 1974 é descoberto o méson associado Υ , quase três vezes mais pesado que o J/Ψ , associado a um novo e ainda mais pesado quark: o bottom ou beauty (b).
- O parceiro do quark bottom é o quark top (t), muito mais pesado. Não forma mesons estáveis.

Spectroscopia do Charmonium

Charmonium (J/ψ , ψ' , ...)

<i>Estado</i>	Massa(MeV)		$\Gamma_{V \rightarrow e^+e^-}$ (KeV)		Cte de Dec. (MeV)
1S	3096.91 ± 0.01		5.547 ± 0.046		416 ± 2
2S	3686.11 ± 0.01		2.359 ± 0.114		296 ± 7
3S	4040 ± 1		0.86 ± 0.23		187 ± 22
4S	4421 ± 4		0.58 ± 0.07		160 ± 9

Spectroscopia do Bottomonium

Bottomonium ($\Upsilon, \Upsilon', \dots$)					
<i>Estado</i>	Massa(MeV)		$\Gamma_{V \rightarrow e^+e^-}$ (KeV)		Cte de Dec. (MeV)
1S	9460.3 ± 0.26		1.2856 ± 0.09		715 ± 2
2S	10023.26 ± 0.32		0.62 ± 0.02		497 ± 2
3S	10355.2 ± 0.5		0.443 ± 0.008		430 ± 2
4S	10579.4 ± 1.2		0.25 ± 0.03		370 ± 9

Por que holografia?

- 1 Em baixas energia a QCD é fortemente acoplada.
- 2 QCD na rede é uma boa alternativa, mas existem problemas em temperatura finita.
- 3 A dualidade AdS/CFT (1997) permite cálculos analíticos em sistemas fortemente acoplados.
- 4 O cálculo de η/s (2001) indica que a dualidade pode sim ser aplicada à “problemas do mundo real”.

Sumário

- 1 Introdução
- 2 QCD Holográfica e o espectro de mésons**
- 3 O caminho para descrever mésons pesados
- 4 O modelo de Contreras, Diles e Vega
- 5 Comentários Finais

Modelos AdS/QCD consolidados

- **Hard Wall:** Polcinsk/Strassler, Braga/Boschi-Filho → corte IR na direção Holográfica $z \in (0, z_{HW})$, onde usamos as coordenadas de Poincaré do AdS:

$$ds^2 = \frac{R^2}{z^2} (\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu + dz^2).$$

- Hardwall descreve: espalhamento profundamente inelástico, glueball, estado fundamental de mésons leves.
- **Softwall:** 2006-Karch, Katz, Son, Stephanov → acopla os campos do AdS com dilaton $\phi(z) = k^2 z^2$.
- Softwall descreve bem: espectro de massas das excitações radiais de mésons leves.
- O que os modelos não descrevem: mésons pesados. Limitado para massas, falha com **constantes de decaimento**.

Detalhes matemáticos

O operador de interesse é o produto de correntes $\langle J^\mu(x)J^\nu(0)\rangle$, onde $J^\mu = \bar{q}\gamma^\mu q$ é dual ao campo vetorial em 5 dimensões:

$$A_m = (A_\mu, A_z) \leftrightarrow J_c^\mu(x) = \bar{c}\gamma^\mu c$$

Ação do campo dual no AdS_5 :

$$S[A] = -\frac{1}{2g_5^2} \int d^4x dz F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}. \quad (1)$$

Função de partição da teoria da fronteira:

$$Z_{CFT}[A^0] = e^{-S_{onshell}[A^0]}, \quad A^0(x^\mu) = \lim_{z \rightarrow 0} A(x^\mu, z). \quad (2)$$

O produto de correntes é obtido por

$$\langle J^\mu(x)J^\nu(y)\rangle = \frac{\delta}{\delta A_\mu^0(x)} \frac{\delta}{\delta A_\nu^0(y)} Z_{CFT}[A^0] \quad (3)$$

Espectro de méson no modelo Soft-Wall

Tomamos a função de correlação no espaço de momentos:

$$\int d^4x e^{iq \cdot x} \langle J_\mu(x) J_\nu(0) \rangle = \left(\eta_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{q^2} \right) \Pi(-q^2). \quad (4)$$

No modelo de parede macia obtém-se

$$\Pi(-q^2) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2k^2/g_5^2}{-q^2 - 4k^2 n^2} = \sum_n \frac{f_n^2}{(-q^2) - m_n^2}. \quad (5)$$

Dai segue que:

$$m_n^2 = 4k^2 n, \quad f_n = \frac{k}{\pi\sqrt{2}}. \quad (6)$$

O modelo soft-wall prevê espectro de **massas Regge linear** e **constantes de decaimento degeneradas**.

Sumário

- 1 Introdução
- 2 QCD Holográfica e o espectro de mésons
- 3 O caminho para descrever mésons pesados**
- 4 O modelo de Contreras, Diles e Vega
- 5 Comentários Finais

Escalas de energia

- A principal limitação do modelo de parede macia se dá por termos uma única escala de energia k .
- Massas e constantes de decaimento requerem ao menos **duas escalas de energia**: massas no infra-vermelho ($z \rightarrow \infty$), constantes de decaimento no ultra-violeta ($z \rightarrow 0$).
- O primeiro trabalho a discutir estas escalas de energia em holografia se deve a Grigoryan, Hohler and Stephanov: [arXiv:1003.1138](https://arxiv.org/abs/1003.1138).
- Este trabalho motivou uma sequência de investigações sobre o uso da holografia para o estudo da espectroscopia de mésons pesados.

Parede macia com corte UV

- Uma proposta interessante é introduzir um corte ultravioleta no modelo de parede macia. A ação do modelo fica

$$\mathcal{S}[A] = -\frac{1}{2g_5^2} \int d^4x \int_{z_0}^{\infty} dze^{-k^2 z^2} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}. \quad (7)$$

- Este tipo de proposta foi considerada pela primeira vez por Evans e Tedder em 2006: [arXiv:hep-ph/0609112](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0609112).
- Em 2014, este modelo foi proposto por Braga, Contreras e Diles como um modelo para mésons pesados: [arXiv:1507.04708](https://arxiv.org/abs/1507.04708)
- O trabalho de 2006 não era de nosso conhecimento. Posteriormente, verificamos que os resultados de Evans e Tedder tinham um problema e com o dicionário holográfico. .

Parede macia com corte UV

$$\Pi(-q^2) = \frac{e^{-k^2 z_0^2} U\left(1 + \frac{q^2}{4k^2}, 0, k^2 z_0^2\right)}{2g_5^2 U\left(\frac{q^2}{4k^2}, 0, k^2 z_0^2\right)}. \quad (8)$$

- Os polos de $\Pi(-q^2)$ em $-q^2 = \chi_n$ determina o espectro de massa enquanto que as constantes de decaimento são obtidas pelos resíduos

$$m_n^2 = 4k^2 \chi_n, \quad f_n^2 = \lim_{-q^2 \rightarrow m_n^2} (-q^2 - m_n^2) \Pi(-q^2), \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- A escolha de parâmetros que melhor descreve os dados observados é:

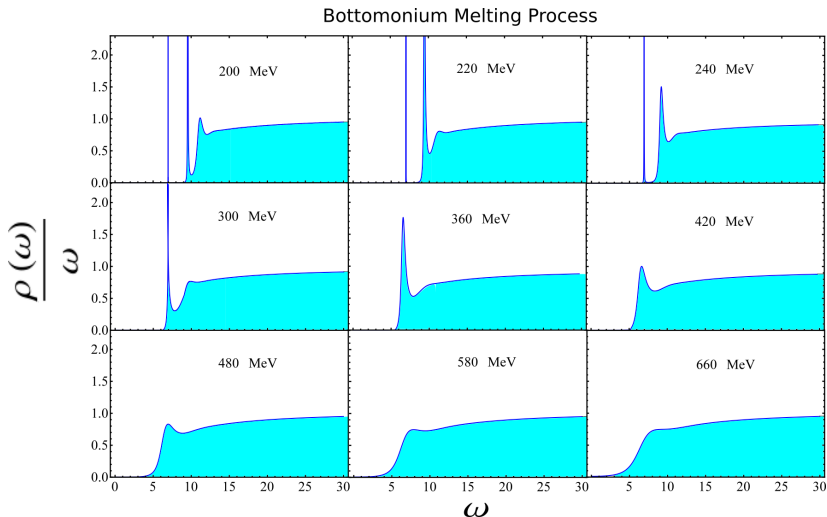
$$k_c = 1.2 \text{ GeV}; \quad k_b = 3.4 \text{ GeV}; \quad \frac{1}{z_0} = 12.5 \text{ GeV}. \quad (9)$$

Resultados: espectro à temperatura zero

Bottomonium ($\Upsilon, \Upsilon', \dots$)		
Estado	Massa	Cte de decaimento
1S	7011	627
2S	9883	574
3S	12077	538
4S	13923	512

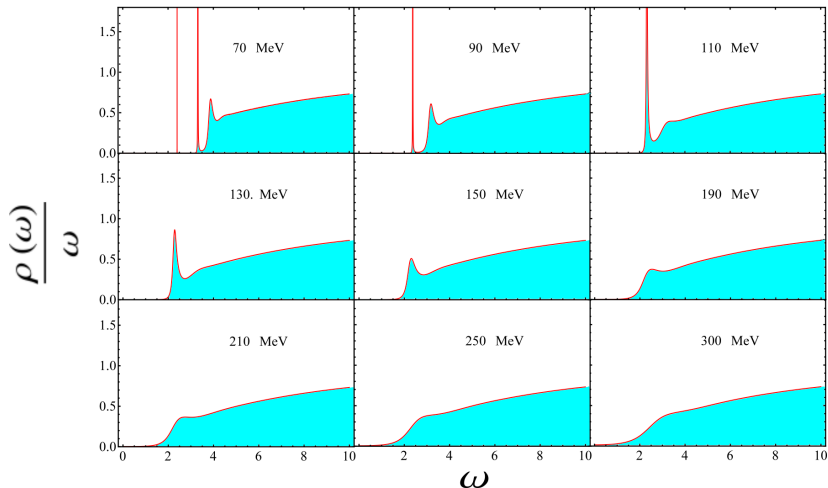
Charmonium ($J/\psi, \psi', \dots$)		
Estado	Massa	Cte de decaimento
1S	2410	258.8
2S	3409	251.7
3S	4174	245.9
4S	4819	241.0

Resultados: Temperatura Finita



Resultados: Temperatura Finita

Charmonium Melting Process



Dilaton Modificado

- Charmonium: sobrevive à altas temperaturas, o modelo apresentado prevê charmonium dissociado em “baixas temperaturas”.

Dilaton Modificado

- Charmonium: sobrevive à altas temperaturas, o modelo apresentado prevê charmonium dissociado em “baixas temperaturas”.
- Guia para o modelo à temperatura finita: $T_{melting} \sim f_1 S$.

Dilaton Modificado

- Charmonium: sobrevive à altas temperaturas, o modelo apresentado prevê charmonium dissociado em “baixas temperaturas”.
- Guia para o modelo à temperatura finita: $T_{melting} \sim f_1 S$.
- Proposta de N. Braga, L. Ferreira e A. Vega: modelo de softwall modificado pela adição de um termo extra no dilaton ([arXiv:1709.05326](#) e [arXiv:1802.02084](#)).

Dilaton Modificado

- Charmonium: sobrevive à altas temperaturas, o modelo apresentado prevê charmonium dissociado em “baixas temperaturas”.
- Guia para o modelo à temperatura finita: $T_{melting} \sim f_{1S}$.
- Proposta de N. Braga, L. Ferreira e A. Vega: modelo de softwall modificado pela adição de um termo extra no dilaton ([arXiv:1709.05326](#) e [arXiv:1802.02084](#)).
- Dilaton proposto:

$$\Phi(z) = k^2 z^2 + Mz + \tanh\left(\frac{1}{Mz} - \frac{k}{\sqrt{\Gamma}}\right), \quad z \in (0, \infty). \quad (10)$$

Espectro do modelo de Braga, Ferreira e Vega

Fixando os parâmetros do modelo como

$$k = 1.2\text{GeV}, \quad M = 2.7\text{GeV}, \quad \sqrt{\Gamma} = 0.75\text{GeV}, \quad (11)$$

obtém-se o espectro:

Charmonium ($J/\psi, \psi', \dots$)		
Estado	Massa	Cte de decaimento
1S	2943	399
2S	3959	255
3S	4757	198
4S	5426	169

Temperatura Finita: Pico do Charmonium sobrevive à temperaturas da ordem de $360 \sim 420\text{MeV}$.

Sumário

- 1 Introdução
- 2 QCD Holográfica e o espectro de mésons
- 3 O caminho para descrever mésons pesados
- 4 O modelo de Contreras, Diles e Vega**
- 5 Comentários Finais

Massas e a escala não-linear

- O espectro de massas dos mésons leves são bem aproximados por trajetórias tipo Regge linear.
- O espectro de massas dos mésons pesados NÃO é do tipo Regge linear.
- Espectro de massas está associado com o comportamento do dilaton no IR.
- A solução deste problema foi discutida por Contreras e Vega em 2020 ([arXiv:2004.10286](https://arxiv.org/abs/2004.10286)).
- Essencialmente, o espectro de massas de mesons constituídos de quarks pesados é bem descrito pelo dilaton $\Phi(z) = (kz)^{2-\alpha}$, com $0 \leq \alpha < 1$.

Montando o quebra-cabeças

- O dilaton que descreve as massas dos mésons pesados é uma modificação do dilaton quadrático: $(kz)^2 \rightarrow (kz)^{2-\alpha}$.
- Por outro lado, o termo $Mz + \tanh\left(\frac{1}{Mz} - \frac{k}{\sqrt{\Gamma}}\right)$ nos permite uma descrição das constantes de decaimento.
- A primeira modificação é dominante no IR, enquanto a segunda é dominante no UV.
- Juntando as duas propostas de modificação, obtemos um modelo completo para o espectro dos mésons pesados com o dilaton:

$$\Phi(z) = (\kappa z)^{2-\alpha} + Mz + \tanh\left[\frac{1}{Mz} - \frac{\kappa}{\sqrt{\Gamma}}\right]. \quad (12)$$

- Este modelo foi proposto por Contreras, Diles e Vega em [arXiv:2101.06212](https://arxiv.org/abs/2101.06212).

Espectro do Charmonium

Charmonium States $I^G(J^{PC}) = 0^+(1^{--})$							
Parameters:		$\kappa = 1.8 \text{ GeV}$, $M = 1.7 \text{ GeV}$, $\sqrt{\Gamma} = 0.53 \text{ GeV}$ and $\alpha = 0.54$					
n	State	$M_{\text{Exp}} \text{ (MeV)}$	$M_{\text{Th}} \text{ (MeV)}$	$\%M$	$f_{\text{Exp}} \text{ (MeV)}$	$f_{\text{Th}} \text{ (MeV)}$	$\%f$
1	J/ψ	3096.916 ± 0.011	3140.1	1.42	416.16 ± 5.25	412.4	1.4
2	$\psi(2S)$	3686.109 ± 0.012	3656.9	0.9	296.08 ± 2.51	272.7	8.0
3	$\psi(4040)$	4039 ± 1	4055.7	0.4	187.13 ± 7.61	201.8	7.8
4	$\psi(4415)$	4421 ± 4	4376	0.9	160.78 ± 9.70	164.1	2.0
Nonlinear Regge Trajectory:				$M_n^2 = 8.097(0.39 + n)^{0.58} \text{ GeV}^2$ with $R^2 = 0.999$			

Figure: Espectro das excitações radiais do Charmonium

Espectro do Bottomonium

Bottomonium States $I^G(J^{PC}) = 0^+(1^{--})$							
Parameters:		$\kappa = 9.9 \text{ GeV}$, $M = 2.74 \text{ GeV}$, $\sqrt{\Gamma} = 1.92 \text{ GeV}$ and $\alpha = 0.863$					
n	State	M_{Exp} (MeV)	M_{Th} (MeV)	%M	f_{Exp} (MeV)	f_{Th} (MeV)	%f
1	$\Upsilon(1S)$	9460.3 ± 0.26	9506.5	0.5	714.99 ± 2.40	718.8	0.5
2	$\Upsilon(2S)$	10023.26 ± 0.32	9892.9	1.0	497.37 ± 2.23	575.7	16
3	$\Upsilon(3S)$	10355.2 ± 0.5	10227.2	1.2	430.11 ± 1.94	413.0	4.0
4	$\Upsilon(4S)$	10579.4 ± 1.2	10497.5	0.8	340.65 ± 9.08	324.3	4.8
5	$\Upsilon(10860)$	$10889.9^{+3.2}_{-2.6}$	10721.5	1.5	–	–	–
6	$\Upsilon(11020)$	$10992.9^{+10.0}_{-3.1}$	10912.7	0.7	–	–	–
Nonlinear Regge Trajectory:					$M_n^2 = 7.376(1.31 + n)^{0.24} \text{ GeV}^2$ with $R^2 = 0.999$		

Figure: Espectro das excitações radiais do Bottomonium

Função Espectral do Charmonium

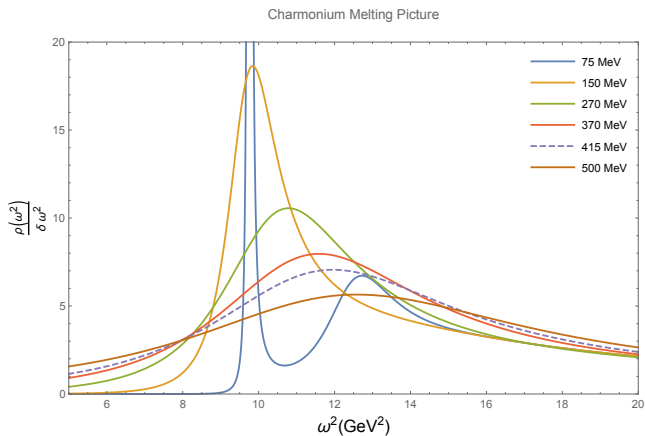


Figure: Função espectral do Charmonium em diferentes temperaturas, a curva tracejada corresponde a temperatura de derretimento.

Função Espectral do Bottomonium

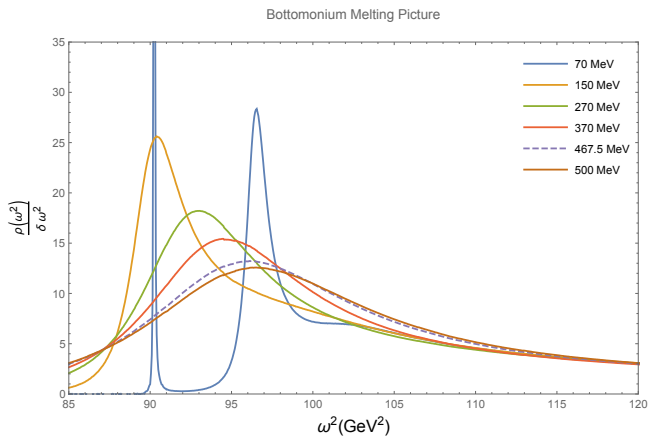


Figure: Função espectral do Bottomonium em diferentes temperaturas, a curva tracejada corresponde a temperatura de derretimento.

Potencial holográfico do Charmonium

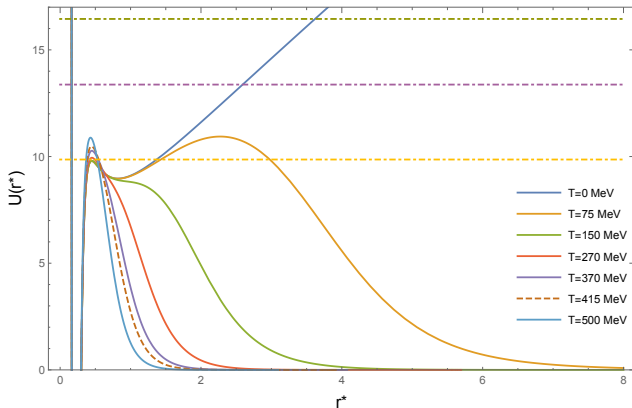


Figure: Potencial holográfico (Liouville) do Charmonium. As retas horizontais tracejadas correspondem às massas quadráticas dos três primeiros estados excitados (J/ψ , ψ' , ψ'')

Subtração de Fundo: J/ψ

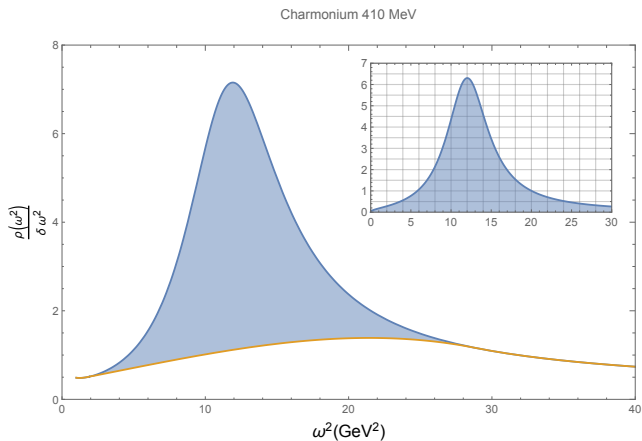


Figure: Subtração de fundo da função espectral do estado fundamental (1S) do Charmonium.

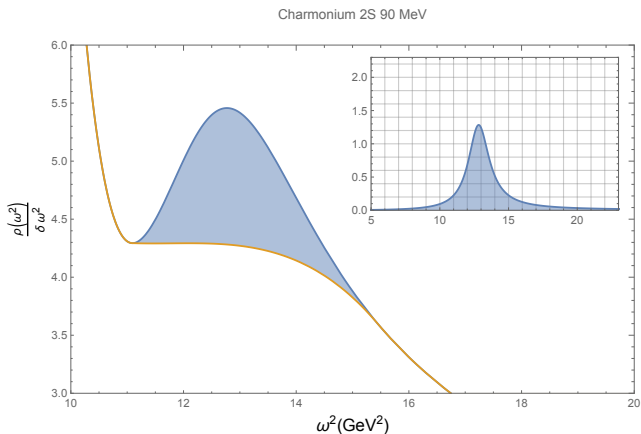
Subtração de Fundo: Ψ' 

Figure: Subtração de fundo da função espectral do primeiro estado excitado (2S) do Charmonium.

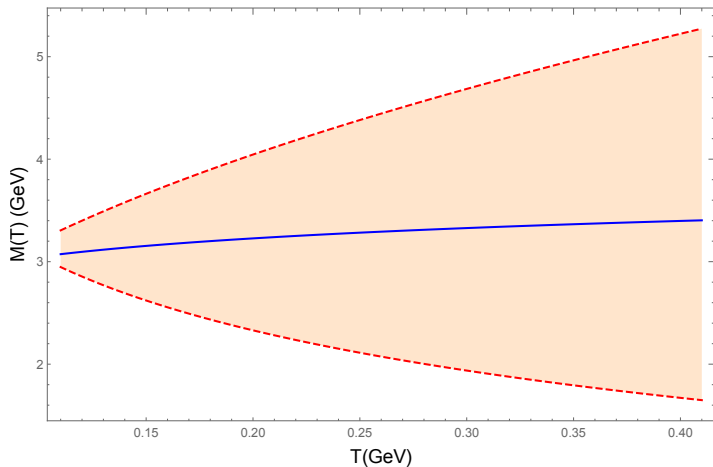
Massa térmica do J/ψ 

Figure: Massa e amplitude de decaimento como função da temperatura

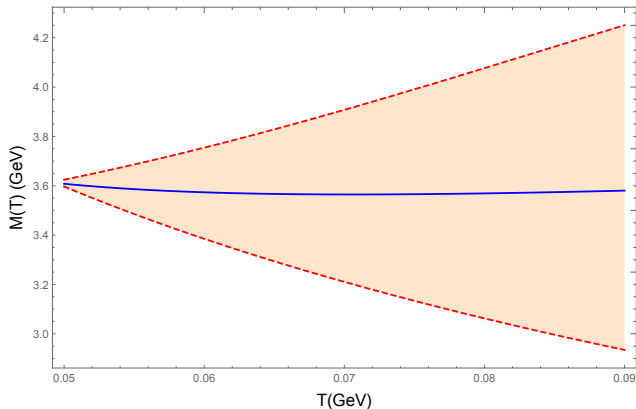
Massa térmica do Ψ' 

Figure: Massa e amplitude de decaimento como função da temperatura para do primeiro estado excitado (2S) do Charmonium.

Sumário

- 1 Introdução
- 2 QCD Holográfica e o espectro de mésons
- 3 O caminho para descrever mésons pesados
- 4 O modelo de Contreras, Diles e Vega
- 5 Comentários Finais**

Conclusões





- Para o Charmonium verificamos que de fato

$$T_{melting} \sim f_{1S},$$

já para o Bottomonium esta temperatura fica abaixo do valor numerico da constante de decaimento.

- Usando holografia podemos fazer uma análise minuciosa da espectroscopia de mésons pesados.
- A análise quantitativa da dissociação das partículas requer uma subtração apropriada dos efeitos de fundo na função espectral.
- O modelo a 4 parâmetros também pode ser aplicado em outros mésons como o ϕ ou até mesmo os leves como o ρ ou o ω . Porém, a falta de dados das constantes de decaimento desses mésons mascara as vantagens reais dos parâmetros

Referências

-  H. R. Grigoryan, P. M. Hohler and M. A. Stephanov, Phys. Rev. D **82** (2010), 026005 [arXiv:1003.1138 [hep-ph]].
-  N. R. F. Braga, M. A. Martin Contreras and S. Diles, Phys. Lett. B **763** (2016), 203-207 [arXiv:1507.04708 [hep-th]].
-  N. R. F. Braga, M. A. Martin Contreras and S. Diles, Eur. Phys. J. C **76** (2016) no.11, 598 [arXiv:1604.08296 [hep-ph]].
-  N. R. F. Braga, L. F. Ferreira and A. Vega, Phys. Lett. B **774** (2017), 476-481 [arXiv:1709.05326 [hep-ph]].
-  M. A. Martin Contreras and A. Vega, Phys. Rev. D **102** (2020) no.4, 046007 [arXiv:2004.10286 [hep-ph]].
-  M. A. Martin Contreras, S. Diles and A. Vega, Phys. Rev. D **103** (2021) no.8, 086008 [arXiv:2101.06212 [hep-ph]].

Muito Obrigado

