

Università degli Studi di Bari Aldo Moro  
Scuola di Dottorato di Ricerca in Fisica - XXIX Ciclo -  
**Metodi olografici per lo studio di sistemi  
fortemente interagenti**

**Relazione finale sulle attività svolte durante il secondo anno**

**Dottoranda:** Loredana Bellantuono

**Tutor:** Dott. Pietro Colangelo

4 dicembre 2015

**Publicazioni (primo e secondo anno)**

**Articoli di ricerca su riviste con *peer review***

- **Titolo:** Holographic Oddballs  
**Autori:** L. Bellantuono, P. Colangelo, F. Giannuzzi  
**Publicato in:** Journal of High Energy Physics **1510** (2015), 137
- **Titolo:** On thermalization of a boost-invariant non Abelian plasma  
**Autori:** L. Bellantuono, P. Colangelo, F. De Fazio, F. Giannuzzi  
**Publicato in:** Journal of High Energy Physics **1507** (2015), 053
- **Titolo:** Exotic  $J^{PC} = 1^{-+}$  mesons in a holographic model of QCD  
**Autori:** L. Bellantuono, P. Colangelo, F. Giannuzzi  
**Publicato in:** The European Physical Journal C **74** (2014), no.4 2830

**Contributi a *Proceedings* di conferenze su riviste e volumi con  
*peer review***

- **Titolo:** Thermalization of a boost-invariant non-Abelian plasma: Holographic approach with boundary sourcing  
**Autori:** L. Bellantuono, P. Colangelo, F. De Fazio, F. Giannuzzi  
**Publicato in:** Proceedings of Science (**EPS-HEP2015**) (2015), 217  
**Conferenza:** 2015 EPS Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2015), Vienna, 22-29 July 2015.

- **Titolo:** Hybrid exotic mesons in soft-wall AdS/QCD  
**Autori:** L. Bellantuono  
**Pubblicato in:** EPJ Web of Conferences **80** (2014), 00014

## Partecipazione a scuole e conferenze internazionali (secondo anno)

- **Titolo:** Light Cone 2015  
**Luogo:** Frascati (Italy)  
**Data:** 21–25 settembre 2015  
**Contributi:** Poster “Relaxation of a strongly coupled plasma: a holographic model”; poster “On  $J^{PC} = 0^{--}$  exotic glueball”
- **Titolo:** INTERNATIONAL SCHOOL OF SUBNUCLEAR PHYSICS –*53rd Course: The Future of our Physics including New Frontier*  
**Luogo:** Erice (Italy)  
**Data:** 24 giugno – 3 luglio 2015  
**Contributi:** Presentazione orale “Relaxation of a non Abelian plasma: a holographic model”; poster “Exotic mesons in a holographic approach to QCD”
- **Titolo:** XXVII SEMINARIO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE E SUBNUCLEARE “Francesco Romano”  
**Luogo:** Otranto (Italy)  
**Data:** 4–11 giugno 2015  
**Contributo:** Presentazione orale “Thermalization and isotropization of a non Abelian plasma”
- **Titolo:** International conference on Gauge/Gravity duality 2015  
**Luogo:** Galileo Galilei Institute, Firenze (Italy)  
**Data:** 13–17 aprile 2015
- **Titolo:** International workshop: Holographic Methods for Strongly Coupled Systems  
**Luogo:** Galileo Galilei Institute, Firenze (Italy)  
**Data:** 9–29 marzo 2015

## Riconoscimenti e premi

- Premio “Bruno Ferretti”, assegnato nell’ambito della sessione “Diplomas for the best new talents” della *53rd International School of*

*Subnuclear Physics* (direttori: Prof. Gerardus 't Hooft e Prof. Antonino Zichichi); Erice, 2 luglio 2015.

- Poster “On  $J^{PC} = 0^{--}$  exotic glueball” premiato alla conferenza **Light Cone 2015** con la pubblicazione nei *Proceedings*; Frascati, 25 settembre 2015.

## Risultati del lavoro scientifico

In questo secondo anno di dottorato ho proseguito la mia attività di ricerca, studiando ed elaborando metodi di calcolo olografici per descrivere sistemi fortemente interagenti. La corrispondenza AdS/CFT, alla base dell’approccio olografico, associa ad una teoria di campo conforme in regime di accoppiamento forte, una teoria di stringa nel limite semiclassico, definita su uno spazio curvo di dimensione superiore. Illusterò i risultati che ho ottenuto lavorando sull’applicazione della QCD olografica a due problematiche fisiche:

- Proprietà spettrali di stati esotici della QCD nel vuoto ed in presenza di fluttuazioni di temperatura e densità.
- Evoluzione e rilassamento di un plasma non Abelianamente fortemente accoppiato a seguito di una perturbazione nella geometria spazio-temporale.

Gli stati legati *esotici*, previsti dalla QCD ma non dal Modello Standard, sono i *multiquark*, gli *ibridi* e le *glueball*. Le glueball sono sistemi costituiti unicamente da gluoni legati da interazioni di colore. Le configurazioni denominate *oddball* sono glueball caratterizzate da un numero dispari di gluoni, e quindi da un valore negativo del numero quantico  $C$  di coniugazione di carica. Ho applicato l’approccio olografico allo studio della oddball a tre gluoni, i cui numeri quantici di momento angolare, parità e coniugazione di carica individuano la combinazione esotica  $J^{PC} = 0^{--}$ . Questo sistema viene descritto in QCD dall’operatore locale

$$J(x) = g^3 d_{abc} \left[ \left( \eta_{\alpha\beta} - \frac{\partial_\alpha \partial_\beta}{\partial^2} \right) \tilde{G}_{\mu\nu}^a(x) \right] [\partial_\alpha \partial_\beta G_{\nu\rho}^b(x)] [G_{\rho\mu}^c(x)], \quad (1)$$

dove  $g$  è la costante di accoppiamento,  $d_{abc}$  sono le costanti di struttura simmetriche del gruppo di gauge  $SU(3)_{\text{colore}}$ ,  $\eta_{\alpha\beta}$  è il tensore metrico di Minkowski, e  $\tilde{G}_{\mu\nu}^a(x) = \frac{1}{2} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} G_{\rho\sigma}^a(x)$ , con  $G_{\rho\sigma}^a(x)$  tensore di intensità del campo gluonico. La corrispondenza AdS/CFT definisce un insieme di regole che associano agli operatori gauge-invarianti della QCD sullo spazio di Minkowski opportuni campi duali definiti su uno spazio di anti-de Sitter in cinque dimensioni. Attraverso queste

	<b>Soft-Wall</b>	<b>Hard-Wall</b>	<b>Einstein-dilaton</b>
$m_{0^{--}}$ (GeV)	1.55, 1.74	2.80, 4.14	2.82, 4.07

Tabella 1: Masse delle oddball più leggere con numeri quantici  $J^{PC} = 0^{--}$ , ricavate in tre modelli di QCD olografica.

prescrizioni, ho identificato il campo duale all'operatore gauge-invariante (1) che rappresenta la oddball, e ne ho determinato lo spettro di massa. L'analisi è stata effettuata in tre modelli di AdS/QCD, che si differenziano l'uno dall'altro per il modo in cui viene implementata la rottura della simmetria conforme, effetto indispensabile per riprodurre la proprietà del confinamento e le scale di energia tipiche della QCD. I risultati che ho determinato sono riassunti nella Tabella 1 e sono ottenuti utilizzando i parametri fissati, in ciascun modello, da altri settori (masse dei mesoni vettoriali). Lo spettro di massa del modello Soft-Wall segue la *traiettoria di Regge*, una relazione di diretta proporzionalità tra la massa al quadrato e il numero quantico radiale, che risulta verificata sperimentalmente per i mesoni vettori e scalari del Modello Standard. I valori ottenuti nei casi Hard-Wall e Einstein-dilaton, d'altra parte, risultano in buon accordo tra loro e con le previsioni fornite da altri modelli della QCD.

L'analisi è stata generalizzata al caso di oddballs in un bagno termico di quark. Gli effetti di temperatura e densità finite vengono implementati nei modelli olografici modificando la geometria dello spazio di anti-de Sitter. Per i sistemi deconfinati si adotta la metrica *anti-de Sitter Reissner-Nordström* (AdS/RN), caratterizzata dalla presenza di un buco nero carico, le cui proprietà definiscono la temperatura  $T$  ed il potenziale chimico  $\mu$  del mezzo. Ho valutato la stabilità delle oddballs rispetto alle fluttuazioni studiando il profilo della funzione densità spettrale: come mostrato nei grafici di Figura 1, all'aumentare della temperatura e della densità la massa al quadrato di ciascuno stato legato decresce, e la sua larghezza aumenta. Questo effetto si riscontra anche per gli altri stati legati della QCD, tuttavia per le oddballs esso sembra indicare una maggiore instabilità, poiché la scomparsa dei picchi della funzione spettrale avviene a temperature e densità inferiori. La descrizione della fase confinata in presenza di un bagno termico si ottiene attraverso la geometria *thermal-charged AdS* (tcAdS). In questo caso il potenziale chimico  $\mu$  entra direttamente nell'espressione della metrica, mentre la temperatura  $T$  viene implementata attraverso la periodicità di un'opportuna coordinata temporale Euclidea. Dalla risoluzione delle equazioni del moto emerge che nella fase confinata la oddball risponde alle fluttuazioni del mezzo in modo diverso: la sua massa aumenta con la densità e non dipende dalla temperatura. Lo studio delle oddballs è stato completato identificando i possibili processi di produzione (Tabella 2) e decadimento (Tabella 3) sulla base delle regole di selezione per i numeri quantici.

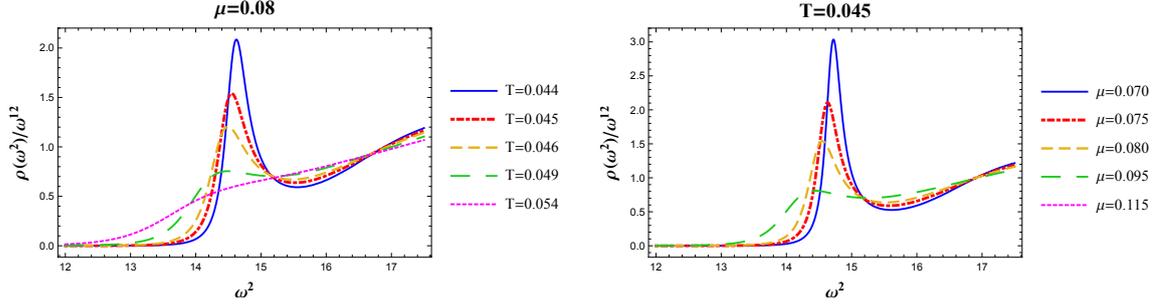


Figura 1: Funzione densità spettrale  $\rho(\omega^2)/(\omega^2)^6$  a fissato  $\mu = 0.08$  per diversi valori della temperatura (a sinistra), e a fissata  $T = 0.045$  per diversi valori del potenziale chimico (a destra).

Nel corso dell'anno ho anche proseguito uno studio che riguarda l'evoluzione di un plasma deconfinato e fortemente accoppiato a partire condizioni iniziali molto lontane dall'equilibrio. Poiché il sistema d'interesse è deconfinato, è possibile impiegare la corrispondenza AdS/CFT senza introdurre una scala di energia per la rottura dell'invarianza conforme. Questa problematica risulta interessante perché nei recenti esperimenti di collisione di ioni pesanti al Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) e ad LHC, è stata riscontrata la produzione di un plasma di quark e gluoni (QGP) deconfinato e fortemente accoppiato. Dalle osservazioni sperimentali si evince che subito dopo la collisione il sistema comincia ad espandersi e a raffreddarsi, e dopo un tempo dell'ordine del fm/c si instaura il regime idrodinamico. Descrivere e comprendere la dinamica del plasma nello stadio pre-idrodinamico dell'evoluzione al momento è difficile, poiché la natura degli accoppiamenti tra i costituenti non consente l'utilizzo di approssimazioni perturbative. Molti recenti studi di QCD olografica cercano di dare una risposta a questo problema, e il mio lavoro si colloca tra questi.

Per simulare il processo di produzione del plasma occorre definire uno stato iniziale molto lontano dall'equilibrio, nel quale la geometria dello spazio-tempo risulta dipendente dal tempo e fortemente anisotropa. Questo effetto si realizza modificando la metrica di Minkowski con l'introduzione di una deformazione impulsiva, detta *quench*, che modella gli effetti di uno o più eventi di collisione. Quando il quench diventa nullo o costante, ha inizio il processo di rilassamento verso l'equilibrio termico. L'evoluzione del sistema viene studiata attraverso la teoria definita sullo spazio duale in cinque dimensioni (*bulk*), dove gli accoppiamenti risultano deboli e l'approssimazione perturbativa può essere applicata correttamente. In particolare, nel mio lavoro ho ottenuto informazioni sul raffreddamento e sulla termalizzazione del plasma risolvendo le equazioni di Einstein per la metrica di bulk.

radiative transition	
$\chi_{c1}(3510) \rightarrow \gamma G(0^{--})$ $X(3872) \rightarrow \gamma G(0^{--})$	$\chi_{b1}(9892) \rightarrow \gamma G(0^{--})$ $\chi_{b1}(10255) \rightarrow \gamma G(0^{--})$
$\chi_{c2}(3556) \rightarrow \gamma G(0^{--})$ $\chi_{c2}(3927) \rightarrow \gamma G(0^{--})$	$\chi_{b2}(9912) \rightarrow \gamma G(0^{--})$ $\chi_{b2}(10269) \rightarrow \gamma G(0^{--})$
hadronic transition	
$X(3872) \rightarrow \omega G(0^{--})$	$\chi_{b1}(10255) \rightarrow (\omega, \phi, J/\Psi) G(0^{--})$ $\Upsilon(nS) \rightarrow (f_1(1285), \chi_{c1}, X(3872)) G(0^{--})$
$h_c(3525) \rightarrow \pi\pi (I=0) G(0^{--})$	$h_b(9899) \rightarrow f_0(980) G(0^{--})$ $h_b(10260) \rightarrow f_0(980) G(0^{--})$ $h_b(9899) \rightarrow G(0^{++}) G(0^{--})$ $h_b(10260) \rightarrow G(0^{++}) G(0^{--})$

Tabella 2: Modi di produzione della glueball con numeri quantici  $J^{PC} = 0^{--}$  e massa  $m_{0^{--}} = 2.8$  GeV.

mode
$G(0^{--}) \rightarrow \gamma f_1(1285)$
$G(0^{--}) \rightarrow \omega f_1(1285)$
$G(0^{--}) \rightarrow \rho a_1(1260) (I=0)$
$G(0^{--}) \rightarrow h_1(1270) f_0(980)$
$G(0^{--}) \rightarrow \rho \pi (I=0)$
$G(0^{--}) \rightarrow K^* K (I=0)$
$G(0^{--}) \rightarrow (\eta, \eta')(\omega, \phi)$

Tabella 3: Modi di decadimento della glueball con numeri quantici  $J^{PC} = 0^{--}$  e massa  $m_{0^{--}} = 2.8$  GeV.

Dai risultati si deduce che questa geometria, a tempi elevati, assume la forma di uno spazio di anti-de Sitter con un buco nero, il cui orizzonte dipende dal tempo. In accordo con le prescrizioni del principio olografico e con gli studi di Bekenstein e Hawking, temperatura e densità di entropia del sistema sono legate rispettivamente alla posizione dell'orizzonte e all'area del buco nero. La loro evoluzione descrive il processo di raffreddamento del plasma, ed esse raggiungono la forma prescritta dalle equazioni idrodinamiche appena il quench diventa stazionario. La corrispondenza olografica permette inoltre di definire il tensore energia-impulso

della teoria di campo in quattro dimensioni, in termini della metrica dello spazio duale. Le componenti di questo tensore sono la densità di energia e le pressioni nelle direzioni longitudinale e trasversa all'asse di collisione. Ho calcolato queste quantità, e confrontato i risultati numerici ottenuti con le rispettive espressioni idrodinamiche. Il confronto ha consentito di definire il tempo di termalizzazione, a cui la densità di energia raggiunge la forma idrodinamica, e il tempo di isotropizzazione, a cui le pressioni diventano uguali tra loro. Per i profili di quench studiati, il tempo di termalizzazione è risultato praticamente coincidente con l'istante in cui la perturbazione diventa stazionaria, mentre l'isotropia tra le pressioni si instaura dopo un tempo di ordine  $1 \text{ fm}/c$ . Questo risultato appare compatibile con le scale temporali osservate negli esperimenti. In Figura 2 sono mostrati alcuni risultati relativi alla termalizzazione nel caso di un quench a due picchi.

Negli ultimi mesi sto studiando il fenomeno del rilassamento del plasma impiegando sonde di tipo nonlocale, come la funzione di correlazione tra due punti dello spazio-tempo e il valore di attesa del Wilson loop, che possono essere definite e analizzate in ambito olografico. Questo lavoro è in fase di completamento, e potrà contribuire a caratterizzare i processi di termalizzazione.

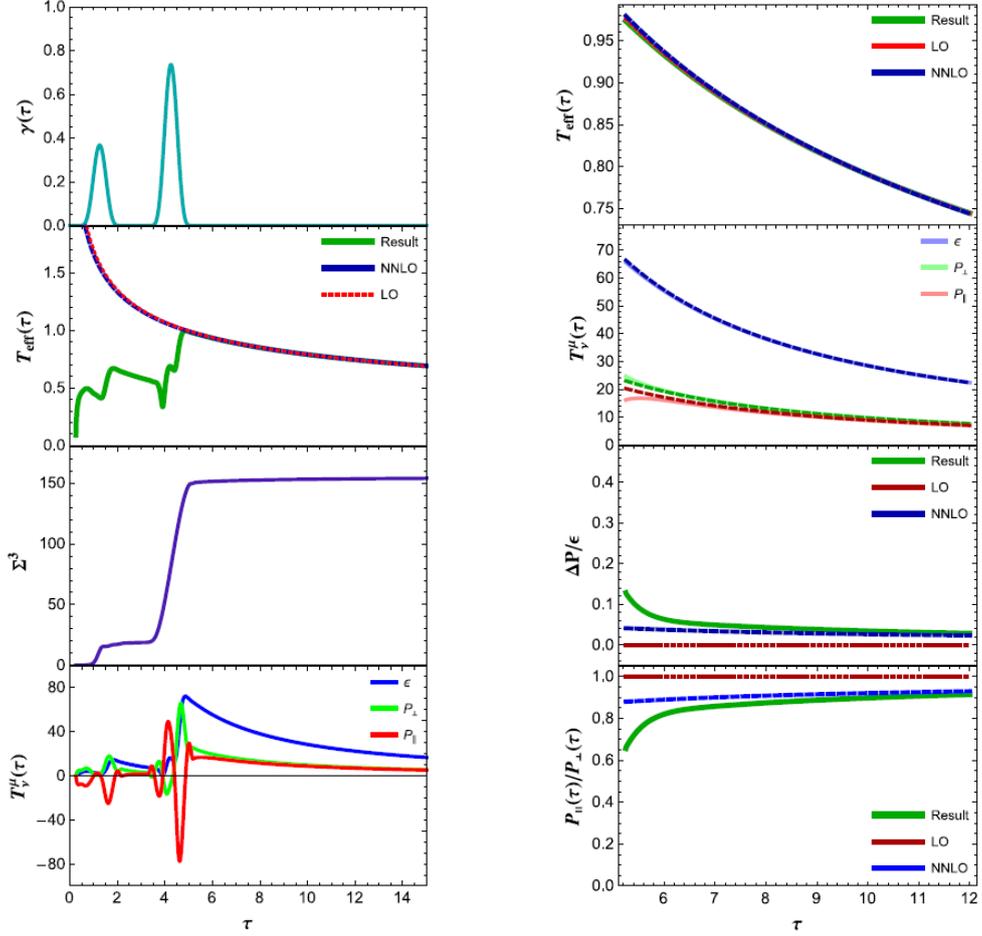


Figura 2: A sinistra: profilo del quench  $\gamma(\tau)$  che descrive come il fluido viene portato fuori dall'equilibrio, e delle quantità fisiche di interesse: temperatura, densità di entropia, densità di energia e pressioni. A destra: comportamenti a tempi lunghi della temperatura, della densità di energia, delle pressioni e delle anisotropie di pressione, e confronto col regime idrodinamico.