الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا للأساتذة بالقبّة - الجزائر-

أطروحة دكتوراه العلوم

قسم: الفيزياء
تخصص: فيزياء نظرية

تقديم:
لبة غنام

العنوان

انتقال الطور التحرري للكروموديناميكا الكمية في حجم منته

(*QCD deconfinement phase transition in a finite volume*)

نوقشت يوم 26 نوفمبر 2016

أعضاء لجنة المناقشة:

جمال قنديل	**أستاذ**	**المدرسة العليا للأساتذة بالقبة**	**رئيسا**
آمال آيت الجودي	**أستاذة محاضرة**	**المدرسة العليا للأساتذة بالقبة**	**مشرفة**
عبد الصمد عبادة	**أستاذ**	**جامعة العين- الإمارات العربية**	**ممتحنا**
نور الدين بوعياد	**أستاذ محاضر**	**جامعة سعد دحلب-البليدة**	**ممتحنا**
سماعين كواديك	**أستاذ**	**جامعة المدية**	**ممتحنا**
أحمد العاطف	**أستاذ**	**المدرسة العليا للأساتذة بالقبة**	**ممتحنا**

- رقم الترتيب 2016/ DPGRS/78 -

الفهرس

المقدمة **8**

1 عموميات عن بلازما الكواركات والغليونات **12**

1-1 الجسيمات الأولية والقوى الكونية الأربعة. 12

2-1 الكروموديناميكا الكمية ("*Quantum chromo-dynamics*" *QCD*). 15

3-1 الحرية المقاربة والانحباس. 17

4-1 الكواركات والحقل اللوني. 19

5-1 الكروموديناميكا الكمية الشبكية (*Lattice QCD*). 20

6-1 الكروموديناميكا الكمية الشبكية وحسابات منتيكارلو. 21

7-1 بلازما الكواركات والغليونات. 22

1-7-1 الدراسة التجريبية لبلازما الكواركات والغليونات. 23

2-7-1 دلائل تشكل بلازما الكواركات والغليونات. 24

3-7-1 التدفق البيضاوي v_2 (*the elliptic flow*). 27

4-7-1 نتائج حديثة. 29

5-7-1 تنبؤات الكروموديناميكا الكمية الشبكية. 30

8-1 نموذج الكيس (*Bag model*). 36

2 عموميات عن انتقالات الطور **38**

1-2 عموميات. 38

2-2 تصنيفات انتقالات الطور. 40

1-2-2 تصنيف إرنفست (*Ehrenfest*). 41

2-2-2 تصنيف لاندو (*Landau*). 45

3-2 الظواهر الحرجة. 46

4-2 الأسس الحرجة. 49

5-2 العالمية (*universality*) والسلمية (*scaling*). . . . . 50.

6-2 العلاقة بين الأسس الحرجة. . . . . 52.

7-2 تحليل سلمية الحجم المنتهي (*finite size scaling analysis*). 56

3 انتقال الطور التحرري في حجم منته وبجسيمات ذات كتلة غير معدومة 62

1-3 من المادة الهدرونية إلى الـ *QGP* في إطار نموذج الكيس. 63

3-1-1 مخطط الأطوار في المستوي (T,μ) 64

3-1-2 الطاقة الداخلية 67

3-1-3 كثافة الأنتروبيا. 67

3-1-4 كثافة الطاقة 69

3-1-5 كثافة الحرارة النوعية . . . . . 70.

2-3 نموذج تعايش الأطوار (*phase coexistence model*). 72

3-3 التدوير الناتج عن الحجم المنتهي. . . . . 73.

3-3-1 انتقال الطور التحرري الحراري (*thermally driven DPT*) . . . . . 75.

3-3-1-1 معامل الرتبة، كثافتا الطاقة والأنتروبيا. . . . . 75.

3-3-1-2 الحساسية وكثافة الحرارة النوعية . . . . . 76.

3-3-1-3 الضغط وسرعة الصوت. . . . . 79.

3-3-2 انتقال الطور التحرري الذي يتحكم فيه الكمون الكيميائي (*density driven DPT*).. 80

3-3-2-1 معامل الرتبة، كثافتا الطاقة والأنتروبيا. . . . . 82.

3-3-2-2 الحساسية وكثافة الحرارة النوعية . . . . . 82.

3-3-3 آثار محدودية الحجم 84

4-3 تأثيرات الكتلة المنتهية على انتقال الطور التحرري الحراري 86

4 انتقال الطور التحرري في حجم منته وبإدخال شرط انعدام اللون 91

1-4 دالة التجزئة منعدمة اللون وطريقة الإسقاط (*The projection method*). 91

2-4 معامل الرتبة وكثافتا الطاقة والأنتروبيا. 98

3-4 الحساسية وكثافة الحرارة النوعية. 101

4-4 الضغط وسرعة الصوت. 106

الخاتمة 113

الملحق 118

المراجع 127

قائمـــة الأشكـــال

1-1 تمثيل تخطيطي لمراحل تشكل الـ QGP حسب سيناريو بيوركن (*Bjorken*)، وهذا من خلال تصادم أيونات ثقيلة 24

2-1 " إخماد الفيض " (*jet quenching*) في التصادم الرأسي نواة-نواة. يعاني كواركان من تشتت صلب (*hard scattering*)، فيخرج كوارك مباشرة إلى الفراغ ويشع بضع غليونات ويتحول إلى هدرون. أما الثاني فيمر عبر البلازما الكثيفة المنتجة (مميز بمعامل النقل $\hat{q}$، كثافة الغليونات dN^g/dy ودرجة الحرارة T)، حيث يعاني من فقدان للطاقة بسبب الاشعاع الانكباحي للغليونات، وأخيرا تخرج الشظايا (*fragments*) ضمن الفيض المخمّد (*quenched jet*). 27

3-1 تمثيل لتصادم واسقاط في المستوي xy. 29

4-1 تغيرات كثافة الطاقة المنظمة إلى T^4 $\left(\varepsilon/T^4\right)$ والضغط المنظم إلى T^4 $\left(3P/T^4\right)$ بدلالة درجة الحرارة لجملة مكونة من ثلاث نكهات ($N_f = 3$): كواركان خفيفان (u,d) وكوارك أثقل (s) حيث $m_{q=u,d} = 0.1m_s$، وهذا بالاعتماد على الـ *LQCD*. حيث أعطيت النتائج في هذا الشكل من أجل نوعين من الأفعال (*asqtad and p4 actions*). الشريط العمودي يشير إلى منطقة الانتقال. 33

5-1 تغيرات كثافة الطاقة إلى T^4 $\left(\varepsilon/T^4\right)$ بدلالة درجة الحرارة لجملة مكونة من عدد مختلف من النكهات (2 أو 3 نكهات خفيفة أو 2 نكهات خفيفة + 1 نكهة ثقيلة). وهذا بالاعتماد على الـ *LQCD*. يشير السهم المُعلَّم بـ ε_{SB}/T^4 إلى نهاية ستيفان-بولتزمان المحققة من أجل غاز مثالي بدون تفاعلات متبادلة. كثافات الطاقة المحققة في مختلف المسرعات والمصادمات (*SPS, RHIC, LHC*) في اللحظات الأولى بعد التصادم كذلك مشار إليها في هذا الشكل. 34

6-1 طبيعة (رتبة) انتقال الطور بدلالة كتلة الكواركات 35

1-2 مخطط أطوار في المستوي (ضغط – درجة حرارة) يبين مناطق تواجد الأطوار الثلاثة (ص، س، غ) 40

2-2 أ- مخطط أطوار في المستوي (حقل مغناطيسي- درجة حرارة) لجسم يملك انتقال طور فيرومغناطيسي، ب- تغيرات المغنطة M بدلالة الحقل المغناطيسي H ، وهذا عند درجات حرارة مختلفة 40

3-2 تغيرات الضغط P بدلالة درجة الحرارة T لجملة ترموديناميكية 42

4-2 تغيرات الحرارة النوعية c_v بدلالة درجة الحرارة T لغاز مثالي من البوزونات. 44

5-2 جسم فيرومغناطيسي يملك مناطق محلية منظمة، وهذا خلال مدة زمنية معينة. 48

1-3 مخطط الأطوار في المستوي (T,μ). 66

2-3 تغيرات ضغط الطورين الهدروني والبلازمي بدلالة درجة الحرارة T (الأعلى) وبدلالة T^4 (الأسفل) 68

3-3 تغيرات كثافة الأنتروبيا للطورين الهدروني و البلازمي بدلالة النسبة (T/T_C). 69

4-3 تغيرات كثافة الطاقة منظمة إلى T^4 للطورين الهدروني والبلازمي بدلالة T^4. 70

5-3 تغيرات كثافة الحرارة النوعية للطورين الهدروني والبلازمي بدلالة النسبة (T/T_C). . .71

6-3 تغيرات معامل الرتبة (الأعلى)، كثافة الطاقة المنظمة إلى T^4 (الوسط) وكثافة الأنتروبيا المنظمة إلى T^3 (الأسفل) بدلالة درجة الحرارة وحجم الجملة، وهذا عند كمون كيميائي معدوم $\mu = 0$. 77

7-3 تغيرات الحساسية (الأعلى) وكثافة الحرارة النوعية (الأسفل) بدلالة درجة الحرارة وحجم الجملة، وهذا عند كمون كيميائي معدوم $\mu = 0$. 78

8-3 تغيرات القيمة المتوسطة للضغط $< P >$ (الأعلى)، النسبة $< P > / < \varepsilon >$ (الوسط) ومربع سرعة الصوت (الأسفل) بدلالة القيمة المتوسطة لكثافة الطاقة $< \varepsilon >$، وهذا من أجل قيم مختلفة لحجم الجملة. 81

9-3 تغيرات معامل الرتبة (الأعلى)، كثافة الطاقة (الوسط) وكثافة الأنتروبيا (الأسفل) بدلالة الكمون الكيميائي وحجم الجملة، وهذا عند درجة حرارة ثابتة $T = 99 MeV$. 83

10-3 تغيرات الحساسية (الأعلى) وكثافة الحرارة النوعية (الأسفل) بدلالة الكمون الكيميائي وحجم الجملة، وهذا عند درجة حرارة ثابتة $T = 99 MeV$. 85

11-3 تغيرات مربع سرعة الصوت بدلالة درجة الحرارة وحجم الجملة، وهذا من أجل كمون كيميائي معدوم $\mu = 0$. 87

12-3 تغيرات كثافة الطاقة المنظمة إلى T^4 (الأعلى) وكثافة الأنتروبيا المنظمة إلى T^3 (الأسفل) بدلالة درجة الحرارة ومن أجل قيمتين للحجم $V = 150 fm^3$ (الخط المتقطع)

و $V = 1000\,fm^3$ (الخط المستمر) وكمون كيميائي معدوم $\mu = 0$، وهذا باعتبار ثلاث حالات للجملة ((a), (b), (c)). 89

13-3 تغيرات مربع سرعة الصوت بدلالة درجة الحرارة ومن أجل قيمة واحدة للحجم $V = 1000\,fm^3$ وكمون كيميائي معدوم $\mu = 0$، وهذا باعتبار ثلاث حالات للجملة ((a), (b), (c)). 90

1-4 تغيرات كل من معامل الرتبة (الأعلى) والقيم المتوسطة لكل من كثافة الطاقة المنظمة إلى T^4 (الوسط) وكثافة الأنتروبيا المنظمة إلى T^3 (الأسفل) بدلالة درجة الحرارة ومن أجل قيم مختلفة لحجم الجملة، وهذا عند كمون كيميائي معدوم $\mu = 0$ وقيمة $B^{1/4} = 145MeV$ لثابت الكيس 102

2-4 تغيرات كثافة الحرارة النوعية (الأعلى) والحساسية (الأسفل) بدلالة درجة الحرارة ومن أجل قيم مختلفة لحجم الجملة، وعند كمون كيميائي معدوم $\mu = 0$ وقيمة $B^{1/4} = 145MeV$ لثابت الكيس 106

3-4 تغيرات القيمة المتوسطة للضغط بدلالة درجة الحرارة ومن أجل قيم مختلفة لحجم الجملة، وهذا عند كمون كيميائي معدوم $\mu = 0$ وقيمة $B^{1/4} = 145MeV$ لثابت الكيس. . . . 108

4-4 تغيرات مربع سرعة الصوت $c_s^{\,2}$ بدلالة درجة الحرارة ومن أجل قيم مختلفة لحجم الجملة، وهذا عند كمون كيميائي معدوم $\mu = 0$ وقيمة $B^{1/4} = 145MeV$ لثابت الكيس 111

5-4 تغيرات القيمة المتوسطة للضغط $< P >$ (الأعلى)، النسبة $< P > / < \varepsilon >$ (الوسط) ومربع سرعة الصوت (الأسفل) بدلالة القيمة المتوسطة لكثافة الطاقة $< \varepsilon >$، وهذا من أجل قيم مختلفة لحجم الجملة، عند كمون كيميائي معدوم $\mu = 0$ وقيمة $B^{1/4} = 145MeV$ لثابت الكيس 112

قائمـــة الجـــداول

1-1 خصائص الكواركات. . . . . 13.

2-1 بعض خصائص التفاعلات الأساسية. . . . . 15.

1-2 الأسس الحرجة. . . . . 49.

الملخص

تتناول هذه الأطروحة بالدراسة انتقال الطور التحرري (*Deconfining phase transition*) بين طور الغاز الهدروني المشكل من بيونات ذات كتلة غير معدومة، وطور بلازما الكواركات والغليونات (*Quark-Gluon Plasma "QGP"*) المشكل من الغليونات، الكواركات العلوية u والسفلية d عديمة الكتلة والكواركات الغريبة s ذات كتلة غير معدومة، والكواركات المضادة. وقد اعتبرنا في دراستنا أن الطورين متواجدان في حجم منته، واستعملنا نموذجا لتعايش الأطوار في هذا الحجم، حيث قمنا بدراسة آثار محدودية الحجم في حالة انتقال الطور الذي تتحكم فيه درجة الحرارة وذلك عند كمون كيميائي معدوم، وكذا في حالة انتقال الطور الذي يتحكم فيه الكمون الكيميائي وذلك عند درجة حرارة معينة. كما قمنا كذلك باختبار تأثيرات الكتل المنتهية للجسيمات المكونة للنظام على انتقال الطور التحرري الحراري، ثم قمنا في المرحلة الأخيرة بإدخال شرط انعدام اللون (*color singletness*) لطور بلازما الكواركات والغليونات، وإعادة اختبار هذه الآثار وذلك بدراسة سلوك العديد من المقادير الترموديناميكية (مثل معامل الرتبة، كثافتي الطاقة والأنتروبيا، الحساسية، كثافة الحرارة النوعية، الضغط وسرعة الصوت...) التي تصف سلوك النظام أو الجملة عند انتقال الطور.

توصلنا في عملنا إلى نتائج عديدة يمكن تلخيص أهمها في فكرتين رئيسيتين: الأولى، هي أنّ سلوك المقادير الترموديناميكية المميزة لانتقال الطور التحرري بوجود جسيمات ذات كتل غير معدومة في نموذج تعايش الأطوار المستعمل، مشابه لسلوك مثيلاتها بوجود جسيمات ذات كتل معدومة كما في أعمال سابقة، مما يعني أنّ إدخال جسيمات ذات كتل غير معدومة لم يؤثر على رتبة الانتقال، التي هي رتبة أولى. أما الفكرة الثانية، فهي أن وجود جسيمات ذات كتل غير معدومة له كآثار تحويل درجة حرارة الانتقال إلى قيم أصغر وخفض عدد درجات الحرية في الطور البلازمي، كما أنه يتسبب في إبطاء سرعة الصوت عند درجات الحرارة المنخفضة (عندما تكون نسبة درجة الحرارة على كتلة البيون صغيرة)، أي في الطور الهدروني، ويمنع بلوغها القيمة 1/3 المألوفة من أجل غاز مثالي فائق النسبية.

Abstract

This thesis deals with the study of the deconfining phase transition (DPT) from a hadronic gas phase (HG) consisting of massive pions to a Quark-Gluon Plasma phase (QGP) containing gluons, massless up and down quarks and massive strange quarks, and antiquarks. The two phases are supposed to coexist in a finite volume, and the finite size effects are studied, in the case of a thermally driven phase transition at vanishing chemical potential as well as in that of a density driven deconfining phase transition at finite temperature. Finite-mass effects are also examined, then the color singletness condition for the QGP is taken into account and finite size effects are investigated in this case also, by examining the variations of several physical quantities, as the order parameter, the energy and entropy densities, the susceptibility, the specific heat density, the pressure and the sound velocity, allowing to probe the behavior of the system at the phase transition.

Several interesting results are obtained, and the main ones can be summarized in the two following points: First, that the behavior of thermodynamic quantities characterizing the deconfinement phase transition in a finite volume within the phase coexistence model, in the presence of massive particles, is similar to the case of massless particles, signaling a first order character of the transition. Second, the presence of massive particles has as effects to shift the transition temperature to smaller values, to lower the number of degrees of freedom in the QGP phase as well as to slow down the sound velocity at low temperatures, where the temperature over pion mass ratio is small, i. e., in the hadronic phase, preventing it from attaining the value $c_s^{\,2} = 1/3$ for an ultra-relativistic ideal gas.