

ՊԱՇՏՈՆԱԿԱՆ ԸՆԴԴԻՄԱԽՈՍԻ ԿԱՐԾԻՔ

Տիգրան Պետրոսյանի «Որոշ քվանտային երևույթներ կոսմոլոգիական մոդելներում» ատենախոսության վերաբերյալ, ներկայացված ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման Ա.04.02 - «Տեսական ֆիզիկա» մասնագիտությամբ

Արտաքին գրավիտացիոն դաշտերում նյութական դաշտերի քվանտային երևույթների հետազոտումը դաշտի քվանտային տեսության առավել հետաքրքիր ուղղություններից է: Այս կիսադասական մոտեցման շրջանակներում ստացվել են մի շարք հետաքրքիր երևույթներ: Այդ երևույթները կարևոր դեր են խաղում կոսմոլոգիայում, սև խոռոչների ֆիզիկայում և լրացուցիչ տարածական չափողականություններով տեսություններում: Վերջիններս ներառում են Կալուզա-Քլեյնի տիպի և բրան-աշխարհների մոդելները: Այդ մոդելներում քվանտային երևույթները կարող են ապահովել լրացուցիչ չափողականությունների կայունացման և կոսմոլոգիական հաստատունի գեներացման մեխանիզմներ: Դաշտի քվանտային տեսության երևույթները կոր ֆոններում կարող են կարևոր նշանակություն ունենալ նաև կոնդենսացված միջավայրերի համակարգերը նկարագրող դաշտի տեսության արդյունարար մոդելներում: Այդպիսի համակարգերի օրինակներ են գրաֆենատիպ նյութերը, որոնց երկարալիքային խոտորումները նկարագրվում են Դիրակի հավասարմամբ:

Տիգրան Պետրոսյանի ատենախոսությունը ներկայացնում է կոսմոլոգիական ֆոններում սկալյար և ֆերմիոնային դաշտերի համար քվանտային վակուումային երևույթների վերաբերյալ օրիգինալ հետազոտական աշխատանք: Այն ներկայացնում է թեմայի բավական համապարփակ ուսումնասիրություն և բաղկացած է ներածությունից հեղինակի կողմից ստացված նյութը ներառող երեք գլուխներից:

Ատենախոսության բովանդակությանը վերաբերող իմ դիտողությունները հետևյալն են.

1. Սկալյար դաշտին առնչվող խնդիրներում, որպես առաջին քայլ, որոշված են Վայթմանի կամ Հադամարի ֆունկցիաները: Այդ ֆունկցիաները բնութագրում են տարածա-ժամանակի տարբեր կետերում վակուումային ֆլուկտուացիաների կորելյացիաները: Ատենախոսությունում դրանք կիրառվել են դաշտի քառակուսու և

Էներգիա-իմպուլսի թենզորի վակուումային միջինների հետազոտման համար: Վայթմանի ֆունկցիան կարող է կիրառվել նաև Ունրու-դե Վիտտի տիպի մասնիկային դետեկտորի արձագանքի ուսումնասիրման նպատակով: Ցանկալի կլիներ, թեկուզ հակիրճ, անդրադառնալ այդ հարցին:

2. Ինչպես դե Սիտտերի տարածա-ժամանակի դեպքում, Միլնի տիեզերքում նույնպես առկա է վակուումային վիճակների մեկ-պարամետրային ընտանիք: Կարևորագույն մասնավոր դեպքերը համապատասխանում են կոնֆորմ և ադիաբատ վակուումներին: Ատենախոսությունում լուրջ բնութագրերի հետազոտումն իրականացվել է կոնֆորմ վակուումի համար: Ադիաբատ վակուումը համապատասխանում է քվանտային սկալյար դաշտի մի վիճակի, որը բերվում է Մինկովսկու վակուումին տարածական հիպերմակերևույթների կորության շառավղի անվերջության ձգտելու սահմանում: Հետաքրքիր կլիներ քննարկել ադիաբատ վակուումի հատկությունները:
3. Հաստատուն բացասական կորությամբ տարածական տիրույթներով շերտավորված դե Սիտտերի տարածա-ժամանակում սկալյար դաշտի խնդրում որպես վակուումային վիճակ դիտարկված է հիպերբոլական վակուումը: Քննարկումն ավելի ամբողջական կլիներ, եթե արդյունքները համեմատվեին ստատիկ և Բանչ-Դևիսի վակուումային վիճակներում համապատասխան վակուումային միջինների հետ:

Վերը նշված մեկնաբանությունները կարող են դիտարկվել որպես առաջարկություններ հետագա հետազոտությունների համար: Ատենախոսությունը ներառում է քվանտային վակուումի հատկությունների վրա գրավիտացիոն դաշտի և սահմանների համակցված ազդեցության վերաբերյալ ստացված հետաքրքիր արդյունքներ: Կիրառված մեթոդները և հնարները համապատասխանում են թեմային: Ատենախոսությունը բավարարում է Հայաստանի Հանրապետության Բարձրագույն Որակավորման Կոմիտեի կողմից ֆիզիկականաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման համար ատենախոսություններին ներկայացվող պահանջներին: Ատենախոսությունում ստացված արդյունքները ամբողջությամբ ներկայացված են հրատարակված աշխատանքներում:

Հիմք ընդունելով վերը նշվածը, եզրակացնում եմ, որ Տիգրան Պետրոսյանն արժանի է Ա.04.02 - «Տեսական ֆիզիկա» մասնագիտությամբ ֆիզիկամաթեմատիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի շնորհման: Սեղմագիրն ամբողջությամբ արտացոլում է ատենախոսության բովանդակությունը:

Ս. Դ. Օդինցով /առկա է ստորագրություն/

Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր

ICREA Հետազոտող պրոֆեսոր,

Իսպանիայի Գիտական հետազոտությունների բարձրագույն խորհուրդ

Թարգմանությունը հաստատում եմ.

ԵՊՀ Ֆիզիկայի ֆակուլտետի դեկան,

Ֆիզ. մաթ. գիտ. դոկտոր, պրոֆեսոր



Ռ.Ս. Հակոբյան

12 ապրիլի, 2022թ.



MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Prof. Dr. Sergey Odintsov
INSTITUTE OF SPACE SCIENCES

Campus UAB, c. Can Magrans s/n, 08193, Barcelona

Phone: +34 937 379 788 - odintsov@ieec.uab.es

<http://www.ice.csic.es>

Barcelona, 8th April, 2022

Report

on the thesis by Tigran Petrosyan titled "Some quantum effects in cosmological models" presented for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences
in Specialization **01.04.02-Theoretical Physics**

The investigation of quantum effects of matter fields in external gravitational fields is among the most interesting directions of quantum field theory. A number of interesting effects has been obtained within the framework of this semiclassical approach. Those effects play an important role in cosmology, in black hole physics and in theories with extra spatial dimensions. The latter include the Kaluza-Klein type and braneworld models. The quantum effect in those models may provide mechanisms for stabilization of extra dimensions and for generation of cosmological constant. The quantum-field theoretical effects in curved backgrounds may also be important in effective field-theoretical models describing condensed matter systems. Examples of the latter are graphene-type materials with long-wavelength excitations described by Dirac equation.

The thesis by Tigran Petrosyan presents original research results on quantum vacuum effects for scalar and fermionic fields in cosmological backgrounds. It provides a sufficiently comprehensive study of the topic and consists of Introduction and three chapters containing the original material.

The **Introduction** section gives a short review of the literature related to the topic of the thesis. The list of references is rather large: it contains 209 citations. After the literature review the author

presents the practical importance and the summary of basic results. Then, the contents of separate chapters are briefly described.

In Chapter 1 the local characteristics of quantum scalar vacuum are investigated for the Milne universe. The latter is the future attractor of a large class of Friedmann-Robertson-Walker cosmological models. In the first part the boundary-free geometry is considered. The expression for the Wightman function is obtained assuming that the scalar field is prepared in the conformal vacuum. The corresponding expression contains two contributions. The first one presents the Wightman function for the Minkowski vacuum and the second one describes the difference of the properties of the conformal and Minkowski vacua. Taking the coincidence limit of the arguments of the Wightman function, the vacuum expectation values of the field squared and energy-momentum tensor are investigated. Having the decomposed expression for the Wightman function, the renormalization of the divergences in the expectation values is reduced to the corresponding procedure for the Minkowski vacuum. In the second part of Chapter 1 the influence of a spherical boundary on the local properties of the conformal vacuum state in the Milne universe is discussed. For the general case of Robin boundary condition on the sphere and for both exterior and interior regions, the Hadamard function is decomposed into boundary-free and sphere-induced contributions. In the interior region that is done by using a variant of the generalized Abel-Plana formula. The sphere-induced contributions to the vacuum expectation values of the field squared and energy-momentum tensor are studied. It is shown that the vacuum energy-momentum tensor in addition to the diagonal components has an off-diagonal component that corresponds to the energy flux along the radial directions. The flux can be either positive or negative depending on the coefficient in the Robin boundary condition.

In **Chapter 2**, boundary-induced effects on the properties of the vacuum state for a scalar field are investigated for the background geometry described by the Friedmann-Robertson-Walker line element with scale factor being a linear function of the synchronous time coordinate. As boundaries, two parallel plates with Robin boundary conditions are considered. The complete sets of the mode functions are specified for the adiabatic and conformal vacua. The expressions for the corresponding Hadamard functions are presented. The further consideration is specified for the conformal vacuum. In the region between the plates the corresponding Hadamard function is presented in the form where the contribution induced by the plates is explicitly separated. With this separation, the renormalization of the vacuum expectation values in the coincidence limit of the arguments of the Hadamard function is reduced to the renormalization for the geometry where the plates are absent. As local characteristics of the conformal vacuum the expectation values of the field squared and energy-momentum tensor are investigated. Similar to the problem in the previous chapter, the nonzero off-diagonal component of the energy-momentum tensor is present. It describes an energy flux along the direction perpendicular to the plates.

By using the expression for the normal stress, the Casimir forces acting on the plates are investigated as well. For the special case of Dirichlet boundary conditions on the plates the forces are attractive. In the case of Neumann boundary condition the Casimir forces can be either attractive or repulsive. Here the situation is different from that for two parallel plates in the Minkowski bulk where the Casimir forces for Neumann boundary condition are attractive.

Chapter 3 is devoted to the investigation of quantum vacuum effects for scalar and fermionic field in de Sitter spacetime. In the discussion of dynamics for a scalar field the hyperbolic spatial foliation of de Sitter spacetime is used. The corresponding mode functions are specified for the hyperbolic vacuum. The Hadamard functions for the hyperbolic and Bunch-Davies vacua are compared and the differences in the expectation values for the field squared and energy-momentum tensor in those vacuum states are investigated. The corresponding results are compared with the relations for the expectation values of Minkowski and Fulling-Rindler vacua. Further, the problem for a scalar field on background of de Sitter spacetime is considered in the presence of a spherical boundary. The Hadamard functions for the hyperbolic vacuum in the regions inside and outside the sphere are decomposed into boundary-free and sphere-induced contributions. Similar representations are derived for the expectation values of the field squared and energy-momentum tensor. Detailed asymptotic and numerical analysis are presented for the vacuum characteristics in those regions. An interesting effect induced by the sphere is the appearance of the energy flux along the radial direction. The direction of the flux depends on the value of the coefficient entering in the boundary condition on the sphere. In the last paragraph of the chapter the renormalized fermion condensate is investigated for a massive fermion field in $(D+1)$ -dimensional de Sitter spacetime, assuming that the field is prepared in the Bunch-Davies vacuum state. The renormalization ambiguity is fixed by imposing a condition that requires vanishing of the condensate in the infinite mass limit.

Summarizing the description given above, the thesis provides a sufficiently comprehensive study and the candidate shows familiarity with and understanding of the topic. The thesis makes an original contribution to the subject of quantum field theory in curved spacetime.

My comments related to the content of the thesis are as follows.

1. In the problems related to the scalar field, as the first step, the Wightman or Hadamard functions are evaluated. These functions characterize the correlations of vacuum fluctuations at different spacetime points. In the thesis, they are used for the investigation of the expectation values of the field squared and energy-momentum tensor. The Wightman function can also be used for the study of the response of the Unruh-de Witt type particle detector. It would be desirable, at least briefly, to address this issue.

2. Similar to the case of de Sitter spacetime, in the Milne universe there is a one-parameter family of vacuum states. The most important special cases correspond to the conformal and adiabatic vacua. In the thesis, the investigation of the local characteristics is done for the conformal vacuum. The adiabatic vacuum corresponds to the state of quantum scalar field that is reduced to the Minkowski vacuum in the limit when the curvature radius for spatial hypersurfaces goes to infinity. It would be interesting to discuss the properties of the adiabatic vacuum.
3. In the problem for a scalar field on background of de Sitter spacetime, foliated by spatial sections having a constant negative curvature, as a vacuum state the hyperbolic vacuum is taken. The discussion would be more complete if the results were compared with the corresponding expectation values for the static and Bunch-Davies vacuum states.

The comments given above can be considered as suggestions for the further research. The thesis contains interesting results on the combined effects of the gravitational field and boundaries on the properties of quantum vacuum. The methods and techniques applied are appropriate to the subject matter. The thesis satisfies the requirements of the Supreme Certifying Committee of the Republic of Armenia for theses seeking the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences. The results obtained in the thesis are fully presented in the publications.

Based on the above, I conclude that Tigran Petrosyan deserves to be awarded the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in the specialization 01.04.02 - "Theoretical Physics". The abstract completely reflects the content of the thesis.

Prof. Dr. Sergey D. Odintsov
ICREA Research Professor,
National Higher Research Council of Spain

