

13. Державний архів Одеської області [Текст]. – Ф. 1220, оп. 2, спр. 518.
14. **Плешенко, В. І.** Загальна гідрохімія [Текст] / В. І. Плешенко, В. К. Хільчевський. – К.: Либідь, 1997. – 382 с.
15. **Спицын, Викт. И.** Владимир Иванович Спицын [Текст] / В. И. Спицын, Н. К. Ламан. – М., 1981. – 168 с.
16. Труды экспедиции по исследованию Южно-русских лечебных местностей [Текст] / Ежегодник Одесского отдела Всероссийского общества для развития и усовершенствования русских лечебных местностей. – О., 1916. – Т. 1–128 с.

Надійшла до редколегії 12.12.2014

УДК 530.1 (09)

И. М. Бормотова

Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара

ОТТАЛКИВАЮЩАЯ СИЛА КАЗИМИРА

Проведено историко-научное исследование отталкивающей силы Казимира. Показаны момент и причины возникновения отталкивающей силы Казимира на примерах моделей и конфигураций систем.

Ключевые слова: эффект Казимира, конфигурации, граничные условия, квантовые флуктуации.

Проведено історико-наукове дослідження відштовхувальної сили Казимира. Показано момент і причини виникнення відштовхувальної сили Казимира на прикладах моделей і конфігурацій систем.

Ключові слова: ефект Казимира, конфігурації, граничні умови, квантові флуктуації.

We present a historical-scientific study of the repulsive Casimir force. We provide the circumstances and causes of the emergence of the repulsive Casimir force in various examples of models and system configurations.

Key words: Casimir effect, configuration, boundary conditions, the quantum fluctuations.

Введение. Эффект Казимира

В 1948 г. голландский физик Хендрик Казимир (*Hendrik Casimir*, 1909–2000) сделал предсказание о притягивающей силе, возникающей между проводящими незаряженными пластинами под действием квантовых флуктуаций в вакууме, в котором постоянно рождаются и исчезают виртуальные частицы и античастицы. Возникающая сила притяжения между пластинами имеет вид [8]

$$F = -\frac{\partial E}{\partial a} = -A \frac{\pi^2 \hbar c}{240 a^4},$$

где A – площадь пластин (объектов); a – расстояние между ними; E – энергия Казимира.

На протязенні многих лет область приложений эффекта Казимира в физике значительно расширилась – от теории межмолекулярных взаимодействий до моделей мешков в квантовой хромодинамике [4; 27; 46] и взаимодействий элементарных частиц, предсказанных в рамках супергравитации и суперсимметрии [11; 32]. Важную роль в определении силы Казимира играет геометрическая конфигурация объектов и пространственная топология системы. Ниже приведем примеры зависимости возникновения отталкивающей силы Казимира в различных типах конфигураций объектов и систем.

Эффект Казимира–Лифшица. Современный эксперимент

Уже через несколько лет (в 1956 г.) после открытия явления Казимиром Евгений Лифшиц обнаружил [23], что эффект Казимира – это проявление межмолекулярных сил (ван-дер-ваальсовское взаимодействие) на больших расстояниях, когда становится существенным учет запаздывания электромагнитного взаимодействия; показал, что сила Казимира может проявляться не только между металлическими пластинами с разделяющим их вакуумным пространством, но и между объектами с произвольными значениями диэлектрической проницаемости. Этот эффект получил название «эффект Казимира–Лифшица». Из эффекта следует, что при определенных соотношениях диэлектрических проницаемостей объектов, а также материала, заполняющего пространство между ними, на смену силам притяжения возникает отталкивание. В 1958 г. в работе Е. М. Лифшица, Б. В. Дерягина, И. И. Абрикосовой были установлены условия, при которых сила Казимира-Лифшица, действующая между двумя пластинами, является отталкивающей [38]

$$F_{\text{Lifshitz}} = \frac{\hbar}{2\pi^2 c^3} \int_0^\infty p^2 \zeta^3 \varepsilon_3^{3/2} \left\{ \left[\frac{(s_1 + p)(s_2 + p)}{(s_1 - p)(s_2 - p)} e^\beta - 1 \right]^{-1} + \left[\frac{(s_1 + p\varepsilon_1/\varepsilon_3)(s_2 + p\varepsilon_2/\varepsilon_3)}{(s_1 - p\varepsilon_1/\varepsilon_3)(s_2 - p\varepsilon_2/\varepsilon_3)} e^\beta - 1 \right]^{-1} \right\} dp d\zeta,$$

где p – давление жидкой среды между телами; ζ – переменная интегрирования, для которой дискретное значение $\zeta_n = 2\pi n k T / \hbar$, k – постоянная Больцмана; T – температура; n – дискретное значение; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – диэлектрические проницаемости твердых тел 1 и 2 и жидкой среды 3, которые также являются функциями мнимой частоты $s_2 = \sqrt{\varepsilon_2/\varepsilon_3 - 1 + p^2}$; $s_1 = \sqrt{\varepsilon_1/\varepsilon_3 - 1 + p^2}$, $s_2 = \sqrt{\varepsilon_2/\varepsilon_3 - 1 + p^2}$; l – ширина щели между телами; $\beta = \frac{2p\zeta}{c} l \sqrt{\varepsilon_3}$. Положительные значения F_{Lifshitz} соответствуют притяжению, а отрицательные – отталкиванию тел. Если тела имеют одинаковую диэлектрическую проницаемость ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$), то они притягиваются друг к другу при любой прослойке между ними, причем сила притяжения убывает с ростом расстояния. Это утверждение справедливо и для двух тел с разной диэлектрической проницаемостью, разделенных вакуумом (для $\varepsilon_3 = 1$). Формула F_{Lifshitz} для вакуума была впервые получена Лифшицем методом функции Грина, без применения методов квантовой теории поля [41].

Прямое обобщение теории Лифшица для диэлектрических пластин показал Тимоти Бойер (*Timothy Boyer*) в 1974 г. [6], обнаружив эффект отталкивания между идеально проводящей пластиной и параллельной ей пластиной, имеющей идеальную магнитную проницаемость. А в 2009 г. впервые были проведены детальные измерения отталкивающей силы Казимира–Лифшица для достаточно малых расстояний от 20 до 300 нм, когда на эффект не влияет вклад межмолекулярных сил. Эксперимент группы Капассо (*Capasso*) заключался в следующем: в жидкий бромбензол поместили вместе со сферой диаметром 40 микрон, покрытой тонким слоем золота, кварцевую пластину [10]. Чтобы устранить точность настраивания параллельности друг к другу объектов ученые использовали сферу вместо второй пластины, также силу отталкивания стало возможно определить по скорости движения сферы, где скорость измеряется по смещению отраженного от сферы луча света. Измеренная сила отталкивания сферы от кремниевой пластины находится в хорошем согласии с теоретическими результатами Лифшица.

Модель сферы

В 1953 г. Казимир предложил статическую модель электрона как проводящую сферическую оболочку радиуса R и зарядом e [9] и рассчитал зоммерфельдовскую постоянную тонкой структуры α для своей модели, т.е. нашел баланс между отталкивающей силой Кулона и притягивающей силой Казимира:

$$\frac{e^2}{2R} - A \frac{\hbar c}{R} = 0 \rightarrow \alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = 2A.$$

Мотивируясь этой работой, Т. Бойер продемонстрировал (1968), что в электромагнитном поле с идеально проводящей сферической оболочкой нулевой толщины возникают силы отталкивания, для которой энергия равна положительному значению [5], т.е. происходит расширение сферической оболочки, а не сжатие, как предполагал Казимир (далее полагаем $\hbar = c = 1$)

$$E_{\text{sp}} = \frac{0.09236}{2a},$$

где a – радиус сферы. Более точно этот результат был подсчитан Дэвисом (*Davies*) [12], а затем подтвержден методом функции Грина Бэйлианом (*Balian*) и Дюплантье (*Duplantier*) в 1978 г. [2]. В 1990-х гг. Лезедуартом (*Leseduarte*) и Ромео (*Romeo*) с помощью метода дзета-функции Римана также получен результат для E_{sp} [20; 21]. То же отталкивание было рассчитано для собственной энергии сферы Дирихле, в которой флуктуации происходили в скалярном поле, а не в электромагнитном. Показано, что существует систематическое поведение гиперсфер любой размерности [3; 25]. Для поперечно электрических колебаний действуют силы отталкивания в любой размерности пространства, лежащей в интервале $2 < D < 4$, и при этом поперечное магнитное колебание меняет знак при $D = 2.6$, будучи с силами притяжения в интервале $2.6 < D < 4$ [28].

Кроме того, модель сферы стали применять для модели мешков в квантовой хромодинамике, где кварки удерживаются в адроне при помощи нулевого значения тока через поверхность мешка, это условие приводит к возникновению энергии Казимира кварковых и глюонных полей. Численные расчеты для модели мешков были проделаны в работах [7; 13; 25].

Революційним толчком для дослідження різних конфігурацій і топологій систем стали роботи Казимира, Полдера (*Polder*), Лифшица, Бойера, а також інших учених, які внесли немалый вклад в вивчення ефекта Казимира. В наступних статтях розглядався ефект Казимира для квантових полів з граничними умовами, заданими на поверхні сфери, циліндра, параллелепіпеда, двугранного кута [15; 37] і т.д. [4; 27; 29; 36; 46]. Крім того, розглядалися випадки ідеальних і напівпрозорих стінок [45], стінок з шорховатостями [4], динамічні задачі з рухомими границями [30] і температурні залежності системи [24; 40]. Дослідницька група Кеннета (*Kenneth*) показала на прикладі (2002), що між діелектричними матеріалами з нетривіальною магнітною чутливістю при високих температурах завжди є сили притягання. Таким чином, зміна знака сили Казимира залежить від підвищення/зниження температури в системі [18].

Приклади простих конфігурацій.

Прямокутник

Покажемо на прикладі робіт С. Г. Мамаєва і Н. Н. Трунова (1979) значення енергії Казимира простих систем. Найбільш наочною характеристикою ефекта Казимира є середні значення тензора енергії-імпульсу розглянутого квантованого поля в вакуумному стані. Мамаєв і Трунов провели дослідження характеру залежності тензора енергії-імпульсу вакуума двовимірної прямокутної області при зміні співвідношень її сторін a і b [43; 44]. Отримали для квадрата ($a = b$):

$$E_{\text{sq}} = \frac{0.0411}{a}$$

і знайшли інтервал $0.365 < b/a < 0.365^{-1}$, в якому енергія Казимира додативна (відштовхування); поза інтервалом, а також при витягуванні прямокутника в смугу – енергія від'ємна. Таким чином, очевидно, що при деформації області енергія Казимира змінює знак.

Циліндр. Лист М'єбіуса

Для отримання конфігурації циліндра необхідно прямокутник склеїти вздовж однієї сторони, для нього можна задати періодичні граничні умови по координаті x і нульові на сторонах $y = 0$ і $y = b$, в свою чергу, енергія Казимира

$$E_{\text{cyl}} = \begin{cases} \frac{\pi}{24a} \left[-\frac{12\zeta(3)}{\pi^2} \frac{b}{a} + 2 - \frac{a}{b} \right], & \frac{b}{a} > \frac{1}{2} \\ -\frac{\zeta(3)}{16\pi a} \frac{a^2}{b^2}, & \frac{b}{a} < \frac{1}{2}, \end{cases}$$

де $\zeta(s)$ – дзета-функція Римана.

Якщо цей же прямокутник склеїти вздовж ширини b з перпендикулярним перекручуванням на пів-оборота, то отримаємо лист М'єбіуса, для якого енергія Казимира дорівнює

$$E_{\text{Möbius}} = \begin{cases} \frac{\pi}{24a} \left[-\frac{3\zeta(3)}{2\pi^2} \frac{b}{a} - 1 + \frac{a}{b} \right], & \frac{b}{a} > 1 \\ -\frac{\zeta(3)}{16\pi a} \frac{a^2}{b^2}, & \frac{b}{a} < 1. \end{cases}$$

Енергія Казимира для всіх значень b/a являється від'ємною для E_{cyl} і $E_{\text{Möbius}}$. Суттєво, що E_{cyl} і $E_{\text{Möbius}}$ збігаються при достатньо невеликому значенні співвідношення сторін a і b , т.е. різниця топологій в разі вузької замкнутої смуги вже не сказується на значенні енергії Казимира. Таким чином, ефект Казимира не являється чисто топологічним [44].

Інтересний факт, що для циліндра проводилися розрахунки різними способами [14; 17; 26], і завжди була отримана енергія притягання, але І. Г. Пироженко і В. В. Нестеренко [31] показали, що для циліндра в безмасовому скалярному полі з граничними умовами Дирихле виникають малі по значенню сили відштовхування Казимира:

$$E_{\text{cyl}} = \frac{0.000606}{a^2}.$$

Куб. Резонатор

Розглянемо конфігурацію куба. Маємо енергію для куба зі стороною a в 3-просторі

$$E_{\text{cub}} = -\frac{k}{a},$$

де $k = 0.0154$ при умові обертання поля в нуль на гранях [43] і $k = 0.838$ при періодичних граничних умовах [47]. При будь-якій деформації куба в прямокутний паралелепіпед знак E_{cub} зберігається. Якщо розглянути більш реалістичний випадок – електромагнітне поле, в якому знаходиться резонатор розмірами $a \times b \times c$, то покажемо, як зміниться E_{res} при деформації резонатора. Для квадратного сечення $a = b$ будемо варіювати співвідношення c/a :

$$E_{\text{res}} = \begin{cases} \frac{1}{a} \left[\frac{\pi}{24} - \left(\frac{\pi^2}{720} + \frac{\zeta(3)}{16\pi} \right) \frac{c}{a} \right], & \frac{c}{a} > 1 \\ \frac{1}{a} \left[\left(\frac{\pi}{48} - \frac{\zeta(3)}{16\pi} \right) + \frac{\pi}{48} \frac{a^2}{c^2} - \frac{\pi^2}{720} \frac{a^3}{c^3} \right], & \frac{c}{a} < 1. \end{cases}$$

Дослідження показали, що для виражень E_{res} енергія Казимира додативна в інтервалі $0.408 < c/a < 3.48$ і від'ємна поза нього. Для випадку куба ($a = c$) вакуумна енергія дорівнює

$$E_{\text{res(cub)}} = \frac{0.0932}{a},$$

для якої чисельний коефіцієнт близький до коефіцієнту енергії Казимира для сфери E_{sp} діаметра $a = 2r$.

В предельном случае $c/a \ll 1$ геометрия резонатора соответствует геометрии двух бесконечных пластин, находящихся на расстоянии c друг от друга, что совпадает с результатом Казимира.

Симметрия и зеркальная копия. Идеальная геометрия системы

Недавно, в 2006 г., исследовательская группа Кеннета обнаружила доказательство, что силы отталкивания не возникают между симметричными телами, зеркальными копиями друг друга [19]. При этом выяснили, что для притяжения симметричных тел не важны ни размеры, ни форма, ни влияние электрических полей. К тому же, оказалось, что отталкивание не может быть между телом и его «электромагнитным изображением», которое возникает вблизи металлических или диэлектрических плоскостей.

Перед учеными возник вопрос: какая же должна быть геометрия объектов с хорошей металлической проводимостью и вакуумным промежутком между ними, чтобы возникла отталкивающая сила Казимира. Уже в 2010 г. группами исследователей из Массачусетского технологического института и Гарвардского университета экспериментально найдена геометрия этих объектов [22]. Основываясь на идее классической задачи о силе взаимодействия между незаряженной плоскостью и диполем, ученые провели аналогию для своей системы, которая представляет собой металлическую частицу в форме сфероида, расположенной над центром отверстия в металлической пластине, а затем упростили задачу до рассмотрения взаимодействия цилиндра (предельный случай сжатого сфероида) с бесконечно тонкой пластиной. Исследователи показали, что взаимодействие частицы в виде цилиндра и сфероида с пластиной на малых расстояниях приводит к силам отталкивания, а с увеличением расстояния между объектами – к притяжению.

Космология

Эволюция квантовой теории в космологии дала возможность исследования вакуумных эффектов в пространствах с неевклидовой топологией и геометрией. Значительную роль в развитии современных космологических представлений сыграла модель инфляционной стадии эволюции Вселенной, предложенная Алексеем Старобинским [33; 48]. На ранних стадиях своей эволюции Вселенная, которая описывается решением де Ситтера с учетом квантовых поправок в виде энергии Казимира, находилась в неустойчивом максимально симметричном квантовом состоянии с кривизной порядка планковской. Из-за флуктуаций вакуума кривизна падает, после чего за конечное время Вселенная де Ситтера перейдет в горячую Вселенную Фридмана, при этом происходит компактификация пространства-времени. Старобинский в работе [48] указал на факт того, что квантовые поправки вообще не описываются эффективным уравнением состояния вакуума, так что первоначальная гипотеза Глинера о $p = -\varepsilon$ не проходит [35]. Более подробно космологическая постоянная, характеризующая свойства вакуума, и квантовые поправки описаны в статье С. Вайнберга (*S. Weinberg*) «Проблема космологической постоянной» [34].

Аналогичный вывод, что для инфляционных моделей Вселенной к тензору энергии-импульса вакуума необходимо делать учет казимировских добавок, показан в работах [16; 39; 42; 49] для случаев безмассовых частиц:

$$T_{00} = \frac{1}{480\pi^2 a^2}$$

и безмассового спинорного поля:

$$T_{00} = \frac{17}{960\pi^2 a^2}.$$

Эти добавки в составе полного вакуумного тензора энергии-импульса играют важнейшую роль при построении самосогласованных моделей Вселенной с поляризованным вакуумом, так как тензор энергии-импульса вакуума является источником гравитационного поля и, в свою очередь, вакуум поляризуется этим же гравитационным полем. В связи с возникновением инфляционной стадии эволюции Вселенной в космологических теориях типа Калуцы-Клейна объяснение спонтанной компактификации дополнительных пространственных измерений производится так же за счет эффекта Казимира [1; 50].

Выводы

В предложенной статье мы рассмотрели различные модели, граничные условия и конфигурации, для которых свойственна отталкивающая сила Казимира. Уникальность эффекта Казимира заключается в том, что на макроскопическом уровне проявляется структура вакуума квантовых полей, и в том, что он не зависит от постоянной связи системы (ни от массы, ни от зарядов и т.д.). Энергия Казимира обуславливается в основном граничными условиями рассматриваемой геометрии/топологией системы. Изменение граничных условий приводит к изменению спектра вакуумных колебаний и к появлению сил Казимира, действующих на границы. Поэтому этот эффект применяется в различных областях физики. Благодаря современным экспериментам мы можем продемонстрировать и оценить ядро эффекта Казимира. Несомненно, уже в недалеком будущем именно эффект Казимира станет верификацией для предсказаний фундаментальных теорий.

Библиографические ссылки

1. **Appelquist, T.** Quantum dynamics of Kaluza-Klein theories [Text] / T. Appelquist, A. Chodos // Phys. Rev. D – 1983. – Vol. 28. – P. 772.
2. **Balian, R.** Electromagnetic waves near perfect conductors. II. Casimir effect [Text] / R. Balian, B. Duplantier // Ann. Phys. – 1978. – Vol. 112. – P. 165.
3. **Bender, C. M.** Scalar Casimir effect for a D-dimensional sphere [Text] / C. M. Bender, K. A. Milton // Phys. Rev. D – 1994. – Vol. 50. – P. 6547.
4. **Bordag, M.** New Developments in the Casimir Effect [Electronic resource] / M. Bordag, U. Mohideen, V. M. Mostepanenko. – Mode in access: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0106045>.
5. **Boyer, T. H.** Quantum Electromagnetic Zero-Point Energy of a Conducting Spherical Shell and the Casimir Model for a Charged Particle [Text] / T. H. Boyer // Phys. Rev. – 1968. – Vol. 174. – P. 1764.
6. **Boyer, T. H.** Van der Waals forces and zero-point energy for dielectric and permeable materials [Text] / T. H. Boyer // Phys. Rev. A. – 1974. – Vol. 9. – PP. 2078–2084.
7. **Brown, G. E.** The nucleon as a topological chiral solution [Text] / G. E. Brown, A. D. Jackson, M. Rho, V. Vento // Phys. Lett. B – 1984. – Vol. 140. – P. 285.
8. **Casimir, H. B. G.** On the attraction between two perfectly conducting plates [Text] / H. B. G. Casimir // Proc. K. Ned. Akad. Wet. – 1948. – Vol. 51. – P. 793.
9. **Casimir, H. B. G.** Introductory remarks on quantum electrodynamics [Text] / H. B. G. Casimir // Physics – 1953. – Vol. 19. – P. 846.
10. **Capasso, F.** Measured long-range repulsive Casimir-Lifshitz forces [Text] / F. Capasso, J. N. Munday, V. A. Parsegian // Nature. – 2009. – Vol. 457. – PP. 170–173.
11. **Chen, P.** Casimir Effect in a Supersymmetry-Breaking Brane-World as Dark Energy [Electronic resource] / P. Chen, J. – A. Gu. – Mode in access: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0409238>.
12. **Davies, B. J.** Quantum electromagnetic zero-point energy of a conducting spherical shell [Text] / B. J. Davies // Math. Phys. – 1972. – Vol. 13. – P. 1324.

13. **De Francia, M.** Free energy of a four-dimensional chiral bag [Text] / M. De Francia, H. Falomir, E. M. Santangelo // *Phys. Rev. D* – 1992. – Vol. 45. – P. 2129.
14. **DeRaad, Jr. L. L.** Casimir self-stress on a perfectly conducting cylindrical shell [Text] / Jr. L. L. DeRaad, K. A. Milton // *Ann. Phys. (NY)*. – 1981. – Vol. 136. – PP. 229–242.
15. **Deutsch, D.** Boundary effects in quantum field theory [Text] / D. Deutsch, P. Candelas // *Phys. Rev. D* – 1979. – Vol. 20. – P. 3063.
16. **Ford, L. H.** Quantum vacuum energy in general relativity [Text] / L. H. Ford // *Phys. Rev. D* – 1975. – Vol. 11. – P. 3370.
17. **Gosdzinsky, P.** Energy of the vacuum with a perfectly conducting and infinite cylindrical surface [Electronic resource] / P. Gosdzinsky, A. Romeo // *Phys. Lett. B* – 1998. – Vol. 441. – P. 265. – Mode in access: <http://arxiv.org/abs/hep-th/9809199>.
18. **Kenneth, O.** Repulsive Casimir forces [Electronic resource] / O. Kenneth, I. Klich, A. Mann, M. Revzen. – Mode in access: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0202114>.
19. **Kenneth, O.** Opposites Attract – A Theorem About The Casimir Force [Text] / O. Kenneth, I. Klich. – Mode in access: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0601011>.
20. **Leseduarte, S.** Complete zeta-function approach to the electromagnetic Casimir effect for sphere [Text] / S. Leseduarte, A. Romeo // *Europhys. Lett.* – 1996. – Vol. 34. – P. 79.
21. **Leseduarte, S.** Complete zeta-function approach to the electromagnetic Casimir effect for spheres and circles [Electronic resource] / S. Leseduarte, A. Romeo // *Ann. Phys. (NY)*. – 1996. – Vol. 250. – PP. 448–484. – Mode in access: <http://arxiv.org/abs/hep-th/9605022>.
22. **Levin, M.** Casimir repulsion between metallic objects in vacuum [Electronic resource] / M. Levin [et al]. – Mode in access: <http://arxiv.org/abs/1003.3487>.
23. **Lifshitz, E. M.** The Theory of Molecular Attractive Forces Between Solids [Text] / E. M. Lifshitz // *Soviet Physics* – 1956. – Vol. 2. – P. 73.
24. **Lim, S. C.** Repulsive Casimir force at zero and finite temperature [Electronic resource] / S. C. Lim, L. P. Teo. – Mode in access: <http://arxiv.org/abs/0812.0426>.
25. **Milton, K. A.** Vector Casimir effect for a D-dimensional sphere [Text] / K. A. Milton // *Phys. Rev. D* – 1997. – Vol. 55. – P. 4940.
26. **Milton, K. A.** Mode-by-mode summation for the zero point electromagnetic energy of an infinite cylinder [Text] / K. A. Milton, A. V. Nesterenko, V. V. Nesterenko // *Phys. Rev. D* – 1999. – Vol. 59. – P. 105009.
27. **Milton, K. A.** The Casimir Effect: Physical Manifestations of Zero-Point Energy [Text] / K. A. Milton // World Scientific. – 2001.
28. **Milton, K. A.** Repulsive Casimir and Casimir-Polder Forces [Electronic resource] / K. A. Milton, E. K. Abalo, P. Parashar, N. Pourtolami. – Mode in access: <http://arxiv.org/abs/1202.6415>.
29. **Milton, K. A.** Casimir-Polder repulsion: Polarizable atoms, cylinders, spheres, and ellipsoids [Electronic resource] / K. A. Milton, P. Parashar, N. Pourtolami, I. Brevik. – Mode in access: <http://arxiv.org/abs/1111.4224>.
30. **Moore, G. T.** Quantum Theory of the Electromagnetic Field in a Variable-Length One-Dimensional Cavity [Text] / G. T. Moore // *J. Math. Phys.* – 1970. – Vol. 11. – P. 2679.
31. **Nesterenko, V. V.** Spectral zeta-functions for a cylinder and a circle [Text] / V. V. Nesterenko, I. G. Pirozhenko // *J. Math. Phys.* – 2000. – Vol. 41. – P. 4521.
32. **Obousy, R. K.** Supersymmetry Breaking Casimir Warp Drive [Electronic resource] / R. K. Obousy. – Mode in access: <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0512152>.
33. **Starobinsky, A. A.** A new type of isotropic cosmological models without singularity [Text] / A. A. Starobinsky // *Phys. Lett. B* – 1980. – Vol. 91. – Iss. 1. – PP. 99–102.
34. **Вайнберг, С.** Проблема космологической постоянной [Текст] / С. Вайнберг // *УФН*. – 1989. – Вып. 158. – С. 639–678.
35. **Глинер, Э. Б.** Алгебраические свойства тензора энергии-импульса и вакуумоподобные состояния вещества [Текст] / Э. Б. Глинер // *ЖЭТФ*. – 1965. – Вып. 49. – С. 542.
36. **Гриб, А. А.** Квантовые эффекты в интенсивных внешних полях [Текст] / А. А. Гриб, С. Г. Мамаев., В. М. Мостепаненко. – М.: Атомиздат. – 1980.
37. **Гриб, А. А.** Вакуумные квантовые эффекты в сильных полях [Текст] / А. А. Гриб, С. Г. Мамаев., В. М. Мостепаненко. – М.: Энергоатомиздат. – 1988.
38. **Дерягин, Б. В.** Молекулярное притяжение конденсированных тел [Текст] / Б. В. Дерягин, И. И. Абрикосова, Е. М. Лифшиц // *УФН*. – 1958. – Вып. 64. – С. 493–528.

39. **Зельдович, Я. Б.** Вселенная с нетривиальной топологией и возможность ее квантово-рождения [Текст] / Я. Б. Зельдович, А. А. Старобинский // Письма в Астрон. журн.– 1984.– Вып. 10.– С. 323–328.
40. **Левин, М. Л.** Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике [Текст] / М. Л. Левин, С. М. Рытов.– М.: Наука, 1967.
41. **Лифшиц, Е. М.** Теория молекулярных сил притяжения между твердыми телами [Текст] / Е. М. Лифшиц // ЖЭТФ.– 1955.– Вып. 29.– С. 94.
42. **Мамаев, С. Г.** Рождение частиц из вакуума вблизи однородной изотропной сингулярности [Текст] / С. Г. Мамаев, В. М. Мостепаненко, А. А. Старобинский // ЖЭТФ.– 1976.– Вып. 70.– С. 1577–1591.
43. **Мамаев, С. Г.** О зависимости вакуумных средних тензора энергии-импульса от геометрии и топологии многообразия [Текст] / С. Г. Мамаев, Н. Н. Трунов // ТМФ.– 1979.– Вып. 38.– С. 345–354.
44. **Мамаев, С. Г.** Вакуумные средние тензора энергии-импульса квантованных полей на многообразиях различной топологии и геометрии [Текст] // С. Г. Мамаев, Н. Н. Трунов // Изв. вузов. Сер. физ.– 1979.– Вып. 7.– С. 88.
45. **Мамаев, С. Г.** Вакуумные средние тензора энергии-импульса квантованных полей на многообразиях различной топологии и геометрии [Текст] / С. Г. Мамаев, Н. Н. Трунов // Изв. вузов. Сер. физ.– 1981.– Вып. 2.– С. 78.
46. **Мостепаненко, В. М.** Эффект Казимира и его приложения [Текст] / В. М. Мостепаненко, Н. Н. Трунов // УФН.– 1988.– Вып. 156.– С. 385.
47. **Старобинский, А. А.** Классическая и квантовая теория гравитации [Текст] / А. А. Старобинский.– Минск. Изд-во АН БССР.– 1976.
48. **Старобинский, А. А.** Спектр реликтового гравитационного излучения и начальное состояние Вселенной [Текст] / А. А. Старобинский // Письма в ЖЭТФ.– 1979.– Вып. 30.– Т. 11.– С. 719–723.
49. **Старобинский, А. А.** Многокомпонентные де-ситтеровские (инфляционные) стадии и генерация возмущений [Текст] / А. А. Старобинский // Письма в ЖЭТФ.– 1985.– Вып. 42.– Т. 3.– С. 124–127.
50. **Ходос, А.** Теории Калуцы-Клейна: общий обзор [Текст] / А. Ходос // УФН.– 1985.– Вып. 146.– С. 647–654.

Надійшла до редколегії 27.12.2014

УДК 377.3 (001)

В. В. Кушлакова

Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара

ДІЯЧІ ПЕДАГОГІЧНОЇ СЕКЦІЇ ХАРКІВСЬКОГО НАУКОВОГО ТОВАРИСТВА: ДІЯЛЬНІСТЬ І ДОЛЯ

Досліджено життя та долю членів педагогічної секції Харківського наукового товариства (ХНТ). Визначено їх загальний внесок у науку того часу. Проаналізовано участь членів секції в громадсько-науковому житті Харкова та в розвитку педагогічних наук в Україні.

Ключові слова: педагогіка, педологія, педагогічна секція ХНТ, Харківське наукове товариство, художнє виховання, методика й дидактика .

Исследована жизнь и судьба членов педагогической секции Харьковского научного общества (ХНО). Определен их общий вклад в науку того времени. Проанализировано участие членов секции в общественно-научной жизни Харькова и в развитии педагогических наук в Украине.

Ключевые слова: педагогика, педология, педагогическая секция ХНТ, Харьковское научное общество, художественное воспитание, методика и дидактика.