

Нагревая вакуум

М. Гуд (США)

Сокращенный перевод М.Х. Шульмана (shulman@dol.ru)

<http://www.unc.edu/~mgood/research/Unruh.pdf>

Thermalizing the Vacuum

Michael R.R. Good

The University of North Carolina at Chapel Hill

December 3, 2006

1 Объединение представлений

Не следует недооценивать роль объединения представлений теории относительности, квантовой теории и термодинамики, осуществленного Хокингом. Последствия открытий Хокинга позволили физикам понять наиболее глубокие корни природы квантовой гравитации. Эффект Унру – это аналог эффекта Хокинга в плоском пространстве. Наблюдатель, который ускоряется относительно обычного пространства Минковского, обладающего вакуумным состоянием с нулевой температурой, будет наблюдать тепловой спектр частиц с характерной температурой

$$T = \frac{\hbar}{2\pi c k} a$$

Этот результат открыли Дэвис [1], Фуллинг [2] и Унру [3]. Он говорит о температуре, подобной температуре Хокинга $T_H = (\hbar/2\pi c k)\sigma$, где σ – поверхностный гравитационный заряд для черной дыры Шварцшильда.

Эффект Унру был использован для подтверждения того, что тепловое излучение в присутствии горизонта черной дыры действительно существует. Этот эффект является более фундаментальным, чем эффект Хокинга, и более доступным для экспериментальной проверки [4] [5] [6]. Для многих физиков эффект Унру стал причиной радикального изменения представлений о вакууме и крушением идеи о том, что ‘частицы’ являются фундаментальными сущностями в квантовой теории поля.

2 Загадочное излучение

Это простое соотношение, не такое знаменитое, как $E = mc^2$, хотя и не менее важное, играет большую роль в исследовании противоречий, связанных с формулой Эйнштейна. Большинство физиков согласны с тем, что эффект Унру вполне реален, т.е. что вакуум нагревается до определенной температуры (температуры Унру) для систем, испытывающих равномерное ускорение. Разногласия возникают, когда физики обсуждают вопрос, излучают ли такие системы на самом деле, или нет.

Таким образом, существует определенное различие между ‘излучением Унру’ и ‘эффектом Унру’. Эффект Унру состоит в том, что ускоренный наблюдатель /детектор/осциллятор, обнаруживает себя в тепловой ванне,

несмотря на то, что это ускорение происходит в вакууме плоского пространства Минковского. То есть, когда вы ускоряетесь, вам становится горячо. Но излучение Унру для многих является результатом потока энергии от горячего тела к холодному. Это и есть предложенное излучение, исходящее от системы при погружении в тепловую ванну. Существование излучения Унру является гипотетическим.

3 История спора

Только 10 лет спустя после открытия эффекта Унру встал вопрос о том, существует ли в реальности излучение системы. Grove [7] был первым, кто выступил против доминирующего мнения и доказывал, что излучение отсутствует. Развернулась полномасштабная дискуссия, поддержанная позднее Raine и др. [8]. Возражавшие против него, такие как Barut и др. [9], заявили, что тепловые фотоны не имеют реального существования вне ускоряющегося детектора. Ни и др. [10] из Мэрилэнда, участвовавшие в дебатах очень активно, указали, что 'не существует абсолютно никакого излучения от равномерно ускоренного осциллятора в условиях равновесия'. С другой стороны, русские ученые – Нарочный и др. [11] – опубликовали как минимум семь статей, в которых они стремились показать, отсутствие теоретических оснований для существования 'излучения ускорения' [12]. Совсем недавно Ford и др. [13], в попытке преодолеть противоречие, опубликовали педагогическую статью с солидными, хорошо понятными аргументами против существования излучения.

Но гораздо больше тех, кто считает, что излучение Унру действительно существует [14], [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22]. Многие другие также уверены, что вскоре это может быть проверено с помощью лазеров (например, Chen[4] и Schutzhold[5]) или в условиях микроволновой полости [23]. Вероятно, наиболее верующим показал себя сам Унру, заявивший: "Излучение настолько реально, что с его помощью можно поджарить стейк" [24].

4 Сюрпризы эксперимента

Для проверки существования излучения Унру могут быть использованы лазеры [4] [5]. Лазеры, работающие в сверхсильных электрических полях, мощность которых составляет петаВатты, сейчас интенсивно развиваются и могут быть использованы для изучения трех очень интересных эффектов: излучения Унру, предела Швингера и двойного лучепреломления в вакууме.

Считается, что использование высокоэнергетических лазеров в настоящее время является наиболее обещающим путем для обнаружения излучения Унру. Это в основном связано с преодолением фоновых шумов, характерных для других экспериментальных установок [25]. Утверждается, что излучение Унру будет обладать поляризацией и угловым распределением, чем в таких установках.

Habs [5] указывает, что при работе с сильными электрическими полями необходимо учитывать предел Швингера. Если наши лазеры генерируют слишком сильные поля, то начинается рождение электронно-позитронных пар в вакууме. Это интуитивно понятно: мы знаем, что поля несут энергию, так что при достаточной энергии действительно могут рождаться частицы. То есть плотность энергии пропорциональна квадрату напряженности электрического поля. Этот автор напоминает нам, что величина поля не может быть заметно меньше предела Швингера, иначе излучение Унру будет слишком трудно обнаружить.

Предел Швингера – это максимальная величина поля, возможного в вакууме, при котором еще не рождаются электронно-позитронные пары. Разрушение вакуума происходит при выполнении условия:

$$eE_{max} \approx \frac{mc^2}{\lambda} = \frac{mc^2}{\hbar/(mc)} = \frac{m^2 c^3}{\hbar}$$

Однако предел Швингера еще не был достигнут в лабораторных условиях. Так что простой факт достижения этого предела уже будет огромным шагом в понимании квантового вакуума.

Квантовый вакуум оказывается более таинственным явлением, чем это можно себе представить. Существует и другая причина для выполнения эксперимента этого типа: квантовая электродинамика вакуума предсказывает двойное лучепреломление [26] и эффекты десинхронизации в сильных электрических полях [27]. То есть свет, проходящий через вакуум в таком поле, будет разложен в зависимости от поляризации подобно тому, как возникает двойное изображение в кристалле кальцита. Эксперимент такого типа дает нам возможность исследовать природу квантового вакуума.

5 Пара простых примеров физического вывода

Здесь я хочу предложить вам два очень простых физических вывода формулы для эффекта Унру, чтобы вы чувствовали себя более комфортно и по-домашнему.

5.1 Игра с размерностью

Начнем с простой игры с размерностью. Вообразим себе ‘лифт Эйнштейна’. На его вершине я помещу несколько электронов, которые начнут ускоряться вместе с лифтом. По мере этого ускорения энергия, поглощаемая каждым электроном, будет равна

$$\Delta E = ma\Delta x$$

Потребуем, чтобы эта энергия была равна энергии, необходимой для рождения (e^-e^+) – пары

$$\Delta E = 2mc^2$$

Если координата электрона изменяется на величину Δx , то потребуется работа $2mc^2 = ma\Delta x$, т.е. мы имеем

$$\Delta x = \frac{2c^2}{a}$$

Положение электронно-позитронной пары ограничена амплитудой Δx . Существует также внутренняя неопределенность, связанная с энергией одиночного электрона. Используя соотношение $\Delta E \Delta t = \hbar/2$, где $\Delta t = \Delta x/c$, эту неопределенность энергии можно представить в виде:

$$\Delta E = \frac{\hbar c}{2\Delta x} = \frac{\hbar a}{4c}$$

Теперь эту энергию будем рассматривать в качестве классической величины. Если допустить, что тепловое действие энергии обусловлено вышеуказанной неопределенностью, то одиночный электрон будет характеризоваться энергией $E = 3/2 kT$, так что:

$$\frac{3}{2}kT = \frac{\hbar a}{4c} \rightarrow T = \frac{\hbar a}{6ck}$$

Легко видеть, что

$$T = \frac{\hbar a}{6ck} \approx \frac{\hbar a}{2\pi ck}$$

5.2 Вывод, основанный на эффекте Доплера

Следующий вывод уже не так прост, но вполне доступен для подготовленных аспирантов.

<Этот раздел при переводе опущен>

Ссылки

- [1] P. C. W. Davies. Scalar particle production in schwarzschild and rindler metrics. J. Phys., A8:609–616, 1975.
- [2] Stephen A. Fulling. Nonuniqueness of canonical field quantization in riemannian space-time. Phys. Rev. D, 7(10):2850–2862, May 1973.
- [3] W. G. Unruh. Notes on black hole evaporation. Phys. Rev., D14:870, 1976.
- [4] Pisin Chen and Toshi Tajima. Testing unruh radiation with ultra-intense lasers. Phys. Rev. Lett., 83:256–259, 1999.
- [5] Ralf Schutzhold, Gernot Schaller, and Dietrich Habs. Signatures of the unruh effect from electrons accelerated by ultra-strong laser fields. 2006.
- [6] Haret C. Rosu. Hawking-like and unruh like effects: Toward experiments? Grav. Cosmol., 7:1–17, 2001.
- [7] P. G. Grove. On an inertial observer's interpretation of the detection of radiation by linearly accelerated particle detectors. Class. Quant. Grav., 3:801–809, 1986.
- [8] D. J. Raine, D. W. Sciama, and P. G. Grove. Does a uniformly accelerated quantum oscillator radiate? SISSA-49-91-A.
- [9] A. O. Barut and J. P. Dowling. Quantum electrodynamics based on selffields: on the origin of thermal radiation detected by an accelerating observer. Phys. Rev., A41:2277–2283, 1990.
- [10] B. L. Hu and Alpan Raval. Is there emitted radiation in unruh effect? 2000.
- [11] N. B. Narozhny, A. M. Fedotov, B. M. Karanov, V. D. Mur, and V. A. Belinskii. Reply to 'comment on 'boundary conditions in the unruh problem' '. Phys. Rev., D70:048702, 2004.
- [12] V. A. Belinski Journal-ref, Physics Letters A354, and 249. On the existence of black hole evaporation yet again. 2006.
- [13] G. W. Ford and R. F. O'Connell. Is there unruh radiation? Phys. Lett., A350:17–26, 2006.

- [14] Paul M. Alsing and Peter W. Milonni. Simplified derivation of the hawking-unruh temperature for an accelerated observer in vacuum. *Am. J. Phys.*, 72:1524–1529, 2004.
- [15] A. Higuchi, G. E. A. Matsas, and D. Sudarsky. Bremsstrahlung and fulling-davies-unruh thermal bath. *Phys. Rev.*, D46:3450–3457, 1992.
- [16] William G. Unruh and Robert M. Wald. What happens when an accelerating observer detects a rindler particle. *Phys. Rev. D*, 29(6):1047–1056, Mar 1984.
- [17] Daniel A. T. Vanzella and George E. A. Matsas. Decay of accelerated protons and the existence of the fulling-davies-unruh effect. *Phys. Rev. Lett.*, 87:151301, 2001.
- [18] W. G. Unruh. Thermal bath and decoherence of rindler space-times. *Phys. Rev.*, D46:3271–3277, 1992.
- [19] R. Parentani. The recoils of the accelerated detector and the decoherence of its fluxes. *Nucl. Phys.*, B454:227–249, 1995.
- [20] B. Reznik. Unruh effect with back-reaction: A first quantized treatment. *Phys. Rev.*, D57:2403–2409, 1998.
- [21] K. T. McDonald. Hawking-unruh radiation and radiation of a uniformly accelerated charge. Prepared for 15th Advanced ICFA Beam Dynamics Workshop on Quantum Aspects of Beam Physics, Monterey, California, 4-9 Jan 1998.
- [22] Timothy H. Boyer. Thermal effects of acceleration for a classical dipole oscillator in classical electromagnetic zero-point radiation. *Phys. Rev. D*, 29(6):1089–1095, Mar 1984.
- [23] Marlan O. Scully, Vitaly V. Kocharovsky, Alexey Belyanin, Edward Fry, and Federico Capasso. Enhancing acceleration radiation from ground-state atoms via cavity quantum electrodynamics, 2003.
- [24] Marlan O. Scully, Vitaly V. Kocharovsky, Alexey Belyanin, Edward Fry, and Federico Capasso. Scully et al. reply:. *Physical Review Letters*, 93(12):129302, 2004.
- [25] H. C. Rosu. On the estimates to measure hawking effect and unruh effect in the laboratory. *Int. J. Mod. Phys.*, D3:545–548, 1994.
- [26] Thomas Heinzl et al. On the observation of vacuum birefringence. 2006.
- [27] Jeremy S. Heyl and Lars Hernquist. Birefringence and dichroism of the qed vacuum. *J. Phys.*, A30:6485–6492, 1997.