

ИСПАРЕНИЕ ЧЕРНЫХ ДЫР (ХОКИНГОВСКОЕ ИСПАРЕНИЕ) СПЕЦИАЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

От Редакции

DOI: 10.31857/S0044451026110011

Более 50 лет назад и учениками Якова Зельдовича, и Стивеном Хокингом с коллегами было замечено, уравнение закона сохранения для черной дыры имеет вид, аналогичный первому началу термодинамики. Продолжение аналогии привело к идентификации площади горизонта черной дыры как энтропии, а соответствующий коэффициент был интерпретирован как температура. Так возникла идея черной дыры с ненулевой температурой. Она соответствует предложенной еще в начале XX века модели абсолютно черного тела, в которой нагретое тело обменивается с окружающим пространством потоком энергии. То есть появляется излучение черной дыры: поток энергии от «теплого» тела в окружающее холодное пространство. В научной литературе началось активное обсуждение этой идеи, получившей название испарения Хокинга. Многие важные работы по этой тематике были опубликованы в ЖЭТФ, в частности, особое значение имеет работа Я. Б. Зельдовича и А. А. Старобинского [1], в значительной мере стимулировавшая активность физиков в этом направлении. Предварительные итоги вошли в опубликованную 50 лет назад в ЖЭТФ работу И. Д. Новикова [2].

Специальный раздел данного выпуска ЖЭТФ посвящен физике черных дыр, процессу Хокинга и родственным явлениям. Мы благодарим всех авторов, которые приняли участие в создании этого раздела.

А. И. Смирнов, главный редактор ЖЭТФ

С. О. Алексеев, выпускающий редактор

ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРНЫХ ДЫР И РОЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ

В 70-е годы в СССР в области астрофизики и гравитации работали научные группы известных ученых, к публикациям и выступлениям которых относились с особым вниманием. К их числу относилась и группа Я. Б. Зельдовича, которая состояла из совсем еще молодых ученых, многим из которых не было еще и 30 лет.

Главным экспертом в вопросах теории гравитации в этой группе был И. Д. Новиков. В те годы они с Я. Б. Зельдовичем были заняты написанием книги «Строение и эволюция Вселенной», которая на десятилетие стала учебником и справочником по космологии. В те времена не было интернета, и новости науки лучше всего можно было узнать на научной конференции или на семинаре. Поучаствовать в такой конференции, проходившей в Москве, приехал и Стивен Хокинг. Одним из докладов, на которых он присутствовал, был доклад Я. Б. Зельдовича, в котором тот утверждал, что черная дыра может излучать энергию, но только в том случае, если она вращается. Интересно отметить, что представление о том, что метрика черной дыры нестационарна под горизонтом событий, уже существовало в это время [3] — понятия о T- и R-областях уже были сформулированы, но, по-видимому, понимание того, что нестационарность гравитационного поля неизбежно приводит к генерации частиц, еще не оформилось как глобальная концепция, вылившаяся чуть позднее в описание механизма рождения космологических гравитационных волн и возмущений плотности.

Собственное излучение черных дыр — и безмассовых, и массивных частиц — заняло особое место в современной физике. Оно имеет серьезное теоретическое обоснование, но до сих пор не обнаружено экспериментально, а без этого некоторая тень сомнения неизбежно будет приводить к попыткам пересмотра выводов о возможности такого излучения.

Ближе всех к открытию излучения черной дыры подошли Я. Б. Зельдович и Я. Бекенштейн, но совершил его С. Хокинг. Я. Б. Зельдович, занимаясь проблематикой рождения частиц с рубежа 60-70-х гг. [4], знал, что частицы не рождаются из вакуума в постоянном гравитационном поле (и часто говорил об этом как о теореме), но полагал, что частицы не рождаются и в черной дыре, поскольку гравитационное поле вдали от

черной дыры действительно статично, как у планеты. Я. Бекенштейн увидел эту ситуацию с другой стороны и доказал, что черная дыра имеет ненулевую энтропию, которая пропорциональна площади горизонта событий [5], но коэффициента этой связи не дал (он знал ОТО, но не дошел до квантовой механики).

Вышедшую в 1974 г. работу С. Хокинга Я. Б. Зельдович на семинаре ГАИШ назвал ошибочной. В зале были люди, которые знали, что внутри горизонта событий метрика черной дыры зависит от времени, но промолчали (по-видимому, авторитет Зельдовича работал и в науке). А вот Р. Пенроуз, который тогда тоже был в зале и к которому Зельдович обратился напрямую, ответил так: «Статью Хокинга читал и она правильна». На следующем семинаре ГАИШ (через неделю) Я. Б. Зельдович «посыпал голову пеплом» и признал правоту Хокинга. В науке это нормально (случается) и дает правильные решения, на чем наука и стоит.

Эффект рождения частиц в нестационарном гравитационном поле остался красной линией космологии. Вначале в качестве причины рождения частиц рассматривали анизотропию гравитационного поля [1]. Это направление в ОТО считалось в 70-е годы основным, и открытие излучения Хокинга усилило его позиции, поскольку внутренность черной дыры описывалась пространственно анизотропной однородной космологической моделью. Однако никуда не ушла главная причина рождения частиц из вакуума в нестационарном гравитационном поле: именно зависимость фридмановской модели от времени привела к появлению космологических возмущений плотности в ранней Вселенной, из которых эволюционно возникли галактики и вся наблюдаемая космология [6].

Рождение частиц из вакуума неизбежно связано с поляризацией вакуума¹⁾. Причина у них одна — вакуум во внешнем силовом поле. В данном случае внешним полем является гравитация самого вакуума, а реакция его на внешнюю силу дает поляризацию (ненулевые плотность и энтропию вакуума) и рождение частиц (скалярные и тензорные флуктуации метрики, приводящие к космологическим возмущениям плотности и гравитационным волнам). Этот эффект стоит и сегодня в основе каскадной релаксации вакуума как генератора всей наблюдаемой космологии [7]. В те эволюционные эпохи, когда вакуум доминирует в полной плотности материи, масштабный фактор растет с ускорением во времени, и область пространства, в которой идет инфляция, растет, приближаясь к фридмановской симметрии. Парадоксально, но само явление космологической инфляции не есть панацея для решения многих проблем космологии, а лишь следствие медленной релаксации физического вакуума (основного состояния всех полей, $|\epsilon + p| \ll \epsilon$).

В. Н. Лукаш, Е. В. Михеева

Астрокосмический Центр ФИАН им. П. Н. Лебедева РАН

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, А. А. Старобинский, *Рождение частиц и поляризация вакуума в анизотропном гравитационном поле*, ЖЭТФ **61**, 2161 (1971).
2. И. Д. Новиков, *Процесс Хокинга на границе и внутри черной дыры*, ЖЭТФ **71**, стр. 393 (1976).
3. И. Д. Новиков, *Заметка о метрике пространства-времени внутри шварцшильдовской особой сферы*, Астрон. Ж. **38**, 564 (1961).
4. Я. Б. Зельдович, *Рождение частиц в космологии*, Письма в ЖЭТФ **12**, 443 (1970).
5. J. D. Bekenstein, *Black Holes and Entropy*, Phys. Rev. D **7**, 2333 (1973).
6. В. Н. Лукаш, *Рождение звуковых волн в ранней Вселенной*, Письма в ЖЭТФ **31**, 631 (1980); *Рождение звуковых волн в изотропной Вселенной*, ЖЭТФ **79**, 1601 (1980).
7. В. Н. Лукаш, Е. В. Михеева, *Каскадная релаксация гравитирующего вакуума как генератор эволюционирующей Вселенной*, Письма в ЖЭТФ **121**, 421 (2025).

¹⁾ Их можно развести только при малой константе связи. В данном случае эта константа имеется, 10^{-5} — малая амплитуда первичных возмущений плотности.

BLACK HOLE EVAPORATION (HAWKING EVAPORATION)

SPECIAL SECTION

Editorial

More than 50 years ago, both Yakov Zel'dovich's students and Stephen Hawking with his colleagues noticed that the conservation law equation for a black hole has a form similar to the first law of thermodynamics. Pursuing the analogy further led to the identification of the horizon area of a black hole with its entropy, while the corresponding coefficient was interpreted as a temperature. Thus the idea of a black hole with a non-zero temperature arose. It corresponds to the blackbody model, proposed at the beginning of the 20th century, in which a heated body exchanges with an energy with the surrounding space. That is, black hole radiation appears: a flow of energy from the «warm» body into the surrounding cold space. The idea, which came to be known as Hawking evaporation, was actively discussed in the scientific literature. Many important papers on this subject were published in JETP; of particular significance is the paper by Ya. B. Zel'dovich and A. A. Starobinsky [1], which to a large extent stimulated the activity of physicists in this direction. Preliminary results were summarized in the paper by I. D. Novikov [2], published in JETP 50 years ago.

The Special Section of this issue of JETP is devoted to the physics of black holes, the Hawking process, and related phenomena. We are grateful to all the authors who contributed to this section.

A. I. Smirnov, *Editor-in-Chief of JETP*

S. O. Alexeyev, *Managing Editor*

BLACK HOLE RADIATION AND PARTICLE CREATION IN A GRAVITATIONAL FIELD

In the 1970s, in the USSR research groups led by prominent scientists were working in astrophysics and gravitation, and their publications and talks were followed with particular attention. Among them was the group of Ya. B. Zel'dovich, made up of very young scientists, many of whom were not yet 30 years old.

The leading expert on the theory of gravitation in this group was I. D. Novikov. At that time, he and Ya. B. Zel'dovich were writing the book «The Structure and Evolution of the Universe», which for a decade served as the textbook and reference book on cosmology. There was no internet in those days, and the best way to learn about scientific news was at a conference or a seminar. Stephen Hawking also came to Moscow to take part in such a conference. Among the talks he attended was one by Ya. B. Zel'dovich, who argued that a black hole can radiate energy, but only if it rotates. It is interesting to note that the idea that the black hole metric is nonstationary beneath the event horizon already existed at that time [3] — the concepts of T- and R-regions had already been formulated. But, apparently the understanding that a nonstationary gravitational field inevitably leads to particle production had not yet taken shape as a general concept, that somewhat later developed into a description of the mechanism for generating cosmological gravitational waves and density perturbations.

The intrinsic radiation of black holes — of both massless and massive particles — has taken a special place in modern physics. It has a serious theoretical foundation but has not yet been detected experimentally, and without such a detection, some shadow of doubt will inevitably continue to prompt attempts to revise the conclusions about the possibility of such radiation.

Ya. B. Zel'dovich and J. Bekenstein came closest to discovering black hole radiation, but it was S. Hawking who discovered it. Ya. B. Zel'dovich, who had been working on particle production since the turn of the 1960s and 1970s [4], knew that particles can not be created from the vacuum in a static gravitational field (and often referred to this as a theorem), but he believed that particles can not be created in a black hole either, since the gravitational field far from a black hole is indeed static, as it is for a planet. J. Bekenstein looked at the situation from a different point of view and proved that a black hole has nonzero entropy proportional to the area of its event horizon [5], but he did not derive the coefficient of this proportionality (he knew general relativity but did not go as far as quantum mechanics).

At a seminar at the Sternberg Astronomical Institute (SAI), Ya. B. Zel'dovich called Hawking's 1974 paper erroneous. There were people in the audience who knew that inside the event horizon the black hole metric depends

on time, but they kept silent (apparently, Zel'dovich's authority worked in science as well). R. Penrose, however, who was also in the audience and whom Zel'dovich addressed directly, replied: «I have read Hawking's paper, and it is correct.» At the next SAI seminar (a week later), Ya. B. Zel'dovich «put on sackcloth and ashes» and acknowledged that Hawking was right. This is normal in science (it does happen), and it leads to correct answers — which is what science rests upon.

The effect of particle creation in a nonstationary gravitational field has remained a common thread running through cosmology. Initially, the anisotropy of the gravitational field was regarded as the cause of particle creation [1]. In the 1970s, this way of research was considered the main one in general relativity, and the discovery of Hawking radiation strengthened its position, since the interior of a black hole is described by a spatially anisotropic homogeneous cosmological model. Yet the principal cause of particle creation from the vacuum in a nonstationary gravitational field has not gone away: it is precisely the time dependence of the Friedmann model that gave rise to the cosmological density perturbations in the early Universe, from which galaxies and all of observational cosmology evolved [6].

Particle creation from the vacuum is inevitably associated with vacuum polarization²⁾. They share a single cause: the vacuum in an external force field. In the present case, the external field is the gravity of the vacuum itself, and the response of the vacuum to the external force produces both polarization (nonzero vacuum density and entropy) and particle creation (scalar and tensor metric fluctuations giving rise to cosmological density perturbations and gravitational waves). Today, this effect underlies the cascade relaxation of the vacuum as a generator of the whole of observational cosmology [7]. During the evolutionary epochs when the vacuum dominates the total matter density, the scale factor grows with acceleration in time, and the region of space undergoing inflation grows, approaching Friedmann symmetry. Paradoxically, cosmological inflation itself is not a panacea for solving many problems of cosmology, but merely a consequence of the slow relaxation of the physical vacuum (the ground state of all fields, $|\epsilon + p| \ll \epsilon$).

V. N. Lukash, E. V. Mikheeva

Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences

REFERENCES

1. Ya. B. Zel'dovich and A. A. Starobinsky, *Particle Production and Vacuum Polarization in an Anisotropic Gravitational Field*, Sov. Phys. JETP **34**, 1159 (1972).
2. I. D. Novikov, *The Hawking Process at the Boundary and in the Interior of a Black Hole*, Sov. Phys. JETP **44**, 207 (1976).
3. I. D. Novikov, *Note on the Space-Time Metric Inside the Schwarzschild Singular Sphere*, Sov. Astron. **5**, 423 (1961).
4. Ya. B. Zel'dovich, *Particle Production in Cosmology*, JETP Lett. **12**, 307 (1970).
5. J. D. Bekenstein, *Black Holes and Entropy*, Phys. Rev. D **7**, 2333 (1973).
6. V. N. Lukash, *Production of Sound Waves in the Early Universe*, JETP Lett. **31**, 596 (1980); *Production of Phonons in an Isotropic Universe*, Sov. Phys. JETP **52**, 807 (1980).
7. V. N. Lukash and E. V. Mikheeva, *Cascade Relaxation of the Gravitating Vacuum as a Generator of the Evolving Universe*, JETP Lett. **121**, 399 (2025).

²⁾ The two can be separated only when the coupling constant is small. In the present case, such a constant exists: 10^{-5} , the small amplitude of primordial density perturbations.