

УДК 524.8, 533.9, 620.9

© Измайлов Г. Н., Озолин В. В., 2023

ИМИТАЦИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ КЕРРА–НЬЮМАНА

Измайлов Г. Н.^{a,1}, Озолин В. В.^{a,2}

^a Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, 125993, Россия.

Рассматриваются некоторые теоретические и экспериментальные методы исследования преобразования кинетической энергии черной дыры в энергию релятивистских струй ионизованного газа, генерируемых заряженной вращающейся черной дырой после поглощения ею звездного вещества. Показан аналог эффекта увлечения системы отсчета при ее поступательном движении, который связан с явлением гравитомagnetизма при вращении массы. Сопоставлены уравнения Максвелла для электромагнитного поля и уравнения гравитационного поля, создаваемого не только поступательным движением массы, но и ее вращением. Показана экспериментальная достоверность эффекта Лензе – Тирринга в случае медленных вращений. Обращено внимание на эффекты влияния быстрых вращений массивных объектов (черных дыр) на движение пробных частиц. Представлены различные механизмы преобразования, в которых эффективность преобразования высока, и отсутствуют побочные отходы. Указана аналогия энергетики преобразования потенциальной энергии водяной струи в кинетическую энергию вращения гидротурбины энергетике исследуемых космических процессов. Отмечена как теоретическая, так и практическая значимость исследований.

Ключевые слова: Гравитомagnetизм, черная дыра, метрика Керра–Ньюмана, релятивистские струи, плазма, эффективность трансформации энергии.

SIMULATION OF KINETIC ENERGY EXTRACTION FROM A KERR – NEWMAN BLACK HOLE

Izmailov G. N.^{a,1}, Ozolin V. V.^{a,2}

^a Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoye sh., 4, Moscow, 125993, Russia.

This synopsis presents theoretical and experimental methods for studying the conversion of the kinetic energy of black holes into the energy of relativistic jets of ionized gas developing after the absorption of stellar matter by a rotating black hole. An analogue between the drag effect of the reference system during its translational motion and the phenomenon of gravitomagnetism during mass rotation is shown. Maxwell's equations for the electromagnetic field are compared with the equations for the gravitational field created not only by the translational motion of the mass, but also by its rotation. It is pointed out the Lense–Thirring effect experimental reliability in the case of slow rotations. Attention is drawn to the effects of rapid rotations of massive objects (black holes) on the motion of test particles. The high efficiency and lack of side waste for such transformation is noted. Various transformation mechanisms are discussed. An analogy is indicated between extracting the kinetic energy of a rotating black hole and converting it into the energy of a relativistic jet and converting the potential energy of a water jet into the kinetic energy of rotation of a hydraulic turbine (Francis turbine). The presented innovative methods are under development.

Keywords: Gravitomagnetism, black hole, Kerr–Newman metric, relativistic jets, plasma, magnetic reconnection, conversion energy efficiency.

PACS: 04.70-s, 95.30 Qd, 95.30 Sf

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2023.3-4.133-146

¹E-mail: izmailov@mai.ru

²E-mail: ozolinvv@mai.ru

Введение

Различие классической и современной точек зрения на природу гравитации привело к постановке современных прецизионных экспериментов и открытию принципиально новых возможностей передачи кинетической энергии. Вначале обсудим эти точки зрения.

И.Ньютон писал: *"Гравитация должна быть врожденной, присущей и существенной для Материи, чтобы одно тело могло воздействовать на другое на расстоянии через Вакуум, без посредства какой-либо другой вещи, через которую их Действие и Сила могут быть переданы от одного тела к другому"*. Таким образом, в теории гравитации Ньютона источником является только неподвижная масса. Напротив, А. Эйнштейн отрицал, что существует какая-либо фоновая евклидова система отсчета, простирающаяся по всему пространству. Нет и такой вещи, как сила гравитации, есть только структура самого пространстввремени. В общей теории относительности источником кривизны пространстввремени кроме *плотности массы (определяемой через полную энергию)* служит *плотность импульса, потоки энергии и импульса, давление и напряжения в среде*. То, что энергия гравитационного поля возвращается в виде создания добавки в гравитационное поле указывает на нелинейность уравнения в сильных гравитационных полях. На элементарном языке это звучит как "гравитация порождает гравитацию". [1, 2]. Общая теория относительности определяет несколько источников искривления пространстввремени в дополнение к массе, что отражено в уравнении поля Эйнштейна

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} . \quad (0.1)$$

В уравнении $R_{\mu\nu}$ - тензор Риччи, определяемый симметричным метрическим тензором $g_{\mu\nu}$, R - скаляр, образованный из $R_{\mu\nu}$, λ - космологическая постоянная (поправка А.А. Фридмана), $T_{\mu\nu}$ - тензор энергии-импульса материи; c - скорость света в вакууме, G - гравитационная постоянная Ньютона. В ОТО тензор $g_{\mu\nu}$ соответствует присутствию гравитационных масс, что выражается в отличие от единиц диагональных элементов матрицы и неравенству нулю недиагональных. *Правая часть уравнения* — соответствует мере плотности энергии, импульса и наличия давления в среде — всего того, что создает гравитацию.

Включение импульса в качестве источника гравитации в предположении, что для слабой гравитации пространстввремя можно разбить на 3+1 пространство и время, приводит к предсказанию, что движущиеся или вращающиеся массы могут генерировать поля, аналогичные магнитным полям, создаваемым движущимися зарядами. Это явление известно как гравитомагнетизм. При этом, расщепление $4D$ пространстввремени на 3+1 предполагает, что трехмерное пространство искривлено, а не евклидово; его метрика g_{jk} (в соответствующей системе координат) — это просто пространственная часть метрики $4D$ пространстввремени $g_{\alpha\beta}$. В этом искривленном $3D$ - пространстве определены два гравитационных потенциала: "гравитоэлектрический" скалярный потенциал Φ , который по сути является время-временной частью g_{00} пространстввременной метрики; и "гравитомагнитный" векторный потенциал \vec{J}_g , который по сути - времяпространственная часть g_{0j} пространстввременной метрики, что аналогично разделению электромагнитного четырех-вектора потенциала на электрический потенциал $\Phi = -\mathbf{A}_0$ и магнитный векторный потенциал $\vec{A} = A_j$. В адекватном приближении можно показать, что материя, движущаяся через гравитомагнитное поле, подвержена так называемым эффектам увлечения системы отсчета, что аналогично явлению действия электромагнитной индукции между движущимися зарядами.

Для демонстрации эффекта рассмотрим две неподвижные массивные пластины (продольные линии), между которыми на равных расстояниях расположена частица — центральная крупная точка посередине) (рис.1). Из-за симметрии установки результирующая сила, действующая на центральную частицу, равна нулю. Теперь предположим, что вместо неподвижных пластин есть потоки массивных частиц, которые имеют равные и противоположно направленные скорости $-\vec{v}$ и $+\vec{v}$ относительно покоящейся пробной частицы, находящейся посередине (рис.1).

Положим также, что скорости частиц малы ($v \ll c$). Опять же, вследствие зеркальной симметрии пробная частица останется неподвижной.

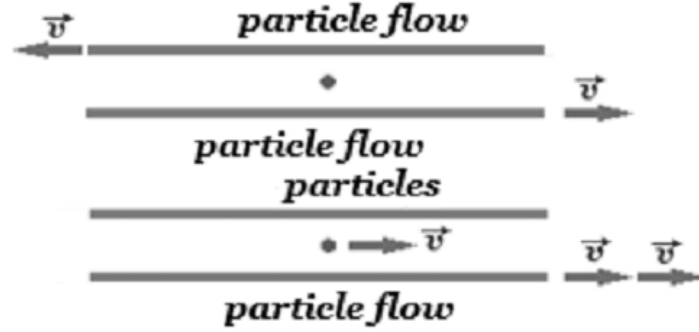


Рис. 1. Действие двух параллельных бесконечно протяженных потоков массивных частиц на пробную частицу.

Если наблюдатель расположил свою систему отсчета в верхнем потоке, то пробная частица имеет скорость $+\vec{v}$ вправо, а частицы нижнего потока имеют скорость $+2\vec{v}$. Поскольку теперь частицы нижнего потока движутся быстрее, то их массовая энергия стала больше, а у верхнего потока — меньше. Вследствие лоренцевого сокращения длины вдоль движения плотность частиц в нижнем потоке увеличилась. Возросло также и давление между частицами в нижнем потоке. В результате увеличилась активная масса частиц нижнего потока, их гравитационное поле увеличилось, и пробная частица должна сдвинуться вниз. Однако, хотя изменилась произвольно введенная система отчета, ситуация физически не изменилась. Поэтому пробная частица не притягивается к нижнему потоку из-за дополнительной, зависящей от скорости, силы, которая служит для отталкивания частицы, движущейся в том же направлении, что и нижний поток. Ситуация подобна действию силы Лоренца. Новая сила — сила Лензе – Тирринга имеет вид

$$\vec{F}_{LT} = m\vec{E}_g + m\vec{v} \times 2\vec{B}_g. \quad (0.2)$$

Этот зависящий от скорости гравитационный эффект называется гравитомagnetизмом [3]. Аналогичная логика была использована для демонстрации происхождения электромагнетизма [4]. Хорошо известно, что для статического гравитационного поля существует подобие - уравнение Пуассона потенциала электростатического поля

$$\nabla^2\Phi = -\frac{1}{\epsilon_0}\rho, \quad (0.3)$$

где ϵ_0 электрическая постоянная, ρ плотность заряда в точке наблюдения.

Изменения электромагнитных полей связаны. Если изменяется магнитное поле (или его поток), то создается вихревое электрическое поле (закон Фарадея). При изменении электрического поля возникает магнитное поле (закон Ампера - Максвелла). Трансформация полей объясняется в СТО использованием преобразования Лоренца. Р. Фейнман [4] (том II, в главах 13-6 его "Лекций по физике", доступных в Интернете) показал, как можно вывести магнитное поле, применяя преобразования Лоренца специальной теории относительности к движущимся зарядам.)

Согласно ОТО, гравитационное поле, создаваемое вращающимся объектом (или любой вращающейся массой-энергией), в частном предельном случае может быть описано уравнениями, которые имеют тот же вид, что и в классическом электромагнетизме. Исходя из основного уравнения ОТО, уравнения поля Эйнштейна, и предполагая слабое гравитационное поле или достаточно плоское пространство-время, можно вывести гравитационные аналоги уравнений Максвелла для электромагнетизма, называемые "уравнениями ГЕМ". Сопоставим уравнения ГЕМ (гравитоэлектромагнетизма) с уравнениями Максвелла: [11] [12]

1. Уравнения гравитоэлектродинамики и электродинамики

Таблица 1

Уравнения гравито-магнетизма	Уравнения Максвелла
$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}_g = -4\pi G \rho_g$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = (1/\epsilon_0)\rho$
$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}_g = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
$\vec{\nabla} \times \vec{E}_g = -\frac{\partial \vec{B}_g}{\partial t}$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\vec{\nabla} \times \vec{B}_g = -\frac{4\pi G}{c^2} \vec{J}_g$	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t}$
$\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_g + \frac{\partial \rho_g}{\partial t} = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

- \vec{E}_g — напряженность гравитостатического поля (g — обычного гравитационного поля), в системе СИ $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
- \vec{E} — напряженность электрического поля, в системе СИ $(\text{кг}/\text{Кл}) \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
- \vec{B}_g "индукция" гравитомагнитного поля, в системе СИ с^{-1}
- \vec{B} — индукция магнитного поля, в системе СИ $(\text{кг}/\text{Кл}) \cdot \text{с}^{-1}$
- ρ_g — плотность массы, в системе СИ $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
- ρ — плотность заряда, в системе СИ $\text{Кл} \cdot \text{м}^{-3}$
- \vec{J}_g плотность тока массы или поток массы ($\vec{J}_g = \rho_g \vec{v}$, где \vec{v} — скорость потока массы), в системе СИ $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
- \vec{J} — плотность электрического тока, в системе СИ $\text{Кл} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
- G — гравитационная постоянная ($G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-2}$)
- ϵ_0 — электрическая постоянная вакуума ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot (10^{-12} \cdot \text{кг}^{-1} \text{с}^2)$)
- c — скорость распространения гравитации и скорость света в вакууме ($c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$).

2. Экспериментальные подтверждения эффектов гравитоэлектродинамики

Таким образом, гравитация вокруг вращающегося тела (например, Земли) имеет три аспекта: поле \vec{g} , поле \vec{B}_g и кривизна пространства — уравнения (4), (5), (6); каждый можно определить по прецессии гироскопа относительно далеких звезд.

1. Монопольный гравитоэлектрический момент определен массой тела M

$$\vec{g} = -\frac{GM}{r^2} \cdot \vec{e}_r. \quad (2.1)$$

2. Момент гравитомагнитного диполя — его угловым моментом вращения \vec{L}

$$\vec{B}_g = \frac{2G}{c^2} \frac{[\vec{L} - 3(\vec{L} \cdot \vec{e}_r) \cdot \vec{e}_r]}{r^3}. \quad (2.2)$$

3. Кривизна пространства вокруг сферического тела постоянна во времени и может быть описана в пределе слабого поля Шварцшильда. Его пространственная метрика

$$ds^2 = (1 + \frac{r_g}{r}) dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2), \quad r_g := \frac{2GM}{c^2} \ll r. \quad (2.3)$$

Аналогия гравитация \iff электромагнетизм особенно замечательна по своим достоинствам в случае систем со слабой гравитацией и малых скоростей ($v \ll c$): эксперименты LAGEOS [5], GRAVITY PROBE B [6], GINGER [7]. Для таких систем существенную роль играет "гравито-электрическое" поле \vec{g} и "гравитомагнитное" поле \vec{B}_g , которое может быть образовано из \vec{v} и \vec{J}_g способом, похожим на разделение полей в электромагнетизме:

$$\vec{g} = -\vec{\nabla}\Phi, \quad \vec{B}_g = \vec{\nabla} \times \vec{J}_g, \quad \Phi = -\frac{1}{2}(1 + g_{00})c^2, \quad J_{g_j} = g_{0j}. \quad (2.4)$$

В эксперименте *GravityProbeB* измерялась прецессия спутника под действием гравитомагнитного поля — эффект Лензе - Тирринга с точностью лучшей, чем 1% [6]. Заметим, что если рассматривать гравитомагнитный эффект, испытываемый Землей при ее движении вокруг Солнца, то \vec{g}_\odot - ньютоново ускорение свободного падения, создаваемое Солнцем, \vec{B}_g — силовое поле, созданное вращением Солнца на орбите Земли, о котором Ньютон не догадывался, поскольку в динамике Солнечной системы его влияние на движение Земли в 10^9 раз меньше, чем гравитостатическое влияние Солнца и примерно в 10^{12} меньше ньютонова ускорения свободного падения на Земле \vec{g}_\oplus .

3. Астрофизические подтверждения новых гравитационных эффектов

Этот подтвержденный гравитационный эффект достаточно слаб в поле Земли, тем не менее он должен проявляться в астрофизике как источник энергии и соответствующих сил для объяснения недавно обнаруженных струй из квазаров и ядер галактик. Примерами могут служить также слияние нейтронных звезд, слияния галактик, поглощение черной дырой (ЧД) галактики, излучение вращающейся ЧД. Для объяснения большинства астрофизических эффектов (таких как слияние нейтронных звезд и результирующее излучение струй - джетов; джетов релятивистских газов из черных дыр; струй релятивистского газа из эллиптической галактики Hercules A, причем измеренный размер джета около двух солнечных систем; анализ данных второго гравитационно-волнового события LIGO (GW 151226), показавший, что сверхновая может оказать сильное воздействие на созданную ею черную дыру (удар при коллапсе со скоростью $v_k \sim 50$ км/с) [8], — нужно новое понимание энергетики процессов генерации джетов. Опуская технические детали, отметим, что одним из последних ярких примеров истока кинетической энергии из черной дыры явилось исторически первое изображение центральной сверхмассивной черной дыры M87, масса которой в 6,5 миллиардов раз больше солнечной и расположенной на расстоянии 55 миллионов световых лет от Земли, и изображение мощных струй, выходящих из сверхмассивной ЧД в центре галактики Мессье 87 (рис.2) [9, 10]. Чтобы понять, что струи питаются гравитационной энергией сверхмассивной ЧД в ядре эллиптической галактики потребовались значительные усилия со стороны теоретиков.

Метрика вращающейся и заряженной черной дыры в координатах Керра-Линдквиста [1] имеет вид

$$ds^2 = -\frac{\Delta}{\rho^2} (dt - a \sin^2 \theta d\phi)^2 + \frac{\sin^2 \theta}{\rho^2} ((r^2 + a^2)d\phi - ac dt)^2 + \frac{\rho^2}{\Delta} + \rho^2 d\theta^2, \quad (3.1)$$

где (r, θ, ϕ) - система обычных сферических координат, $a := J/Mc$; $\rho^2 := r^2 + a^2 \cos^2 \theta$, $\Delta := r^2 - r_S r + a^2 + r_Q^2$; $r_S := 2GM/c^2$; $r_Q^2 := MQ^2/4\pi\epsilon_0 c^4$. c - скорость света, G - гравитационная постоянная, ϵ_0 - электрическая постоянная вакуума, Q - заряд ЧД, J - угловой момент ЧД, M - масса ЧД. Все три параметра — Q , M , r_S имеют размерность длины. При этом соблюдается условие $a^2 + r_Q^2 \leq r_S^2$, т.е. ЧД не имеет большого электрического заряда, а ее вращение незначительно. В дальнейшем все эффекты рассматриваются в этой метрике.

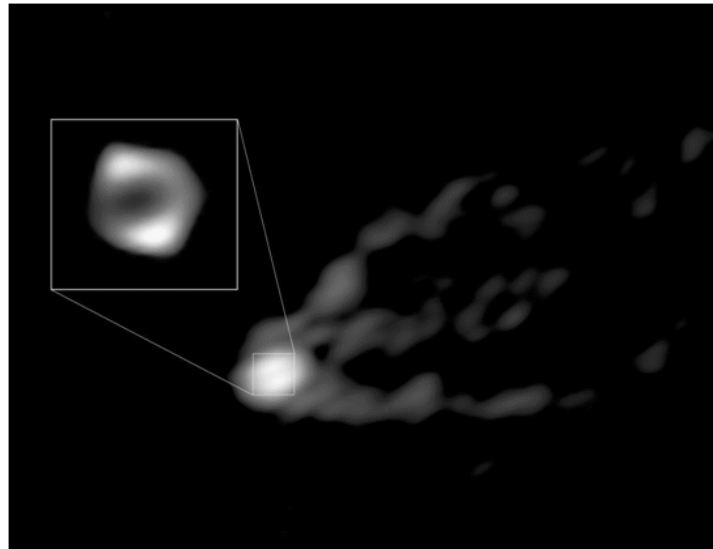


Рис. 2. рис. 2 Изображение мощных струй, выходящих из сверхмассивной черной дыры в центре галактики Мессье 87 (масса ЧД в 6,5 миллиардов раз больше M_{\odot}) (Image credit: R.-S. Lu (SHAO), E. Ros (MPIFR), S. Dagnello (NRAO/AUI/NSF))

Рассмотрим теперь гравитоманнитные эффекты высшего порядка. Некоторые гравитоманнитные эффекты более высокого порядка могут воспроизводить эффекты, напоминающие взаимодействия более обычных поляризованных зарядов. Например, если два колеса вращаются вокруг общей оси, взаимное гравитационное притяжение между двумя колесами будет больше, если они вращаются в противоположных направлениях, чем в одном направлении. Это может быть выражено как притягивающий или отталкивающий гравитоманнитный компонент.

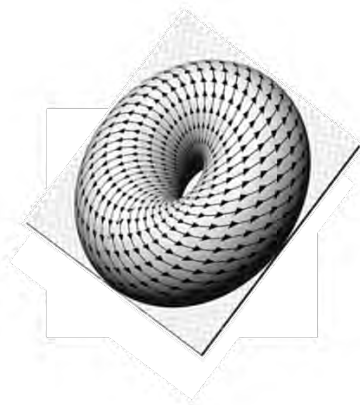


Рис. 3. Тор Клиффорда

Гравитоманнитные аргументы также предсказывают, что гибкая или жидкая тороидальная масса, подвергающаяся ускорению вращения вокруг малой оси (ускоряющее вращение "дымового кольца"), будет стремиться тянуть внешнюю массу через горловину (случай увлечения вращающейся системы отсчета, действующей через горловину) (рис. 3, 4). Теоретически эту конфигурацию можно использовать для ускорения объектов (через горловину) без воздействия на такие объекты каких-либо перегрузок.[11]

Рассмотрим тороидальную массу с двумя степенями вращения (вращение как по большой оси - синяя стрелка, так и по малой оси - красная стрелка, обе выворачиваются наизнанку и вращаются) (рис. 4). Это представляет собой "особый случай", в котором гравитоманнитные эффекты

создают вокруг объекта киральное гравитационное поле, похожее на "кривой штопор". Обычно ожидается, что силы реакции на торможение на внутреннем и внешнем экваторе будут равными и противоположными по величине и направлению соответственно в более простом случае, включающем вращение только по малой оси. Когда оба вращения применяются одновременно, можно сказать, что эти два набора сил реакции возникают на разных глубинах в радиальном поле Кориолиса, которое простирается поперек вращающегося тора, что затрудняет установлению компенсации сил реакции вращений.

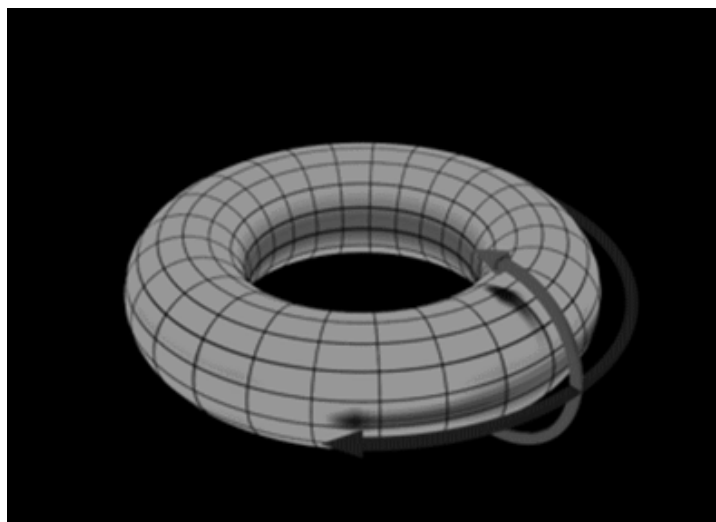


Рис. 4. Степени вращения вокруг тора

Моделирование этого сложного поведения как проблемы искривленного пространства-времени еще предстоит сделать, и считается, что это объясняет истечение релятивистских струй частиц из жерла вращающихся черных дыр (рис. 3-5). В работах [9, 10, 11, 12,] было высказано предположение, что такие гравитомагнитные силы лежат в основе генерации релятивистских струй (рис. 4), испускаемых некоторыми вращающимися сверхмассивными черными дырами [14].

4. Механизмы трансформации энергии вращающейся черной дыры

Согласно механизму Пенроуза [9] (рис.5, 6), если частица делится в эргосфере ЧД на два осколка, один из них упадет за горизонт событий, а второй, наоборот, будет выброшен за предел статичности в область, где тела уже не вращаются вокруг ЧД. При этом энергия выброшенного осколка будет больше, чем энергия изначальной частицы.

На рис.5 показано как рабочее тело падает (черная жирная линия) в эргосферу (серая область). В самой нижней точке орбиты тело делится на два осколка, причем выбрасывает один осколок назад, служа аналогом выброса топлива ракеты; однако для удаленного наблюдателя кажется, что оба осколка продолжают двигаться вперед из-за увлечения системы отсчета (хотя и с разной скоростью). "Топливо", замедляясь, падает (тонкая серая линия) на горизонт событий ЧД (черный диск). А второй осколок, разогнавшись, улетает (тонкая черная линия) с избытком энергии (что с лихвой компенсирует потери первого осколка и энергии,

затраченной на его выброс) (процесс аналогичен космическому маневру, использующему гравитационную энергию Солнца или массивных планет для разгона космических аппаратов при полетах к дальним планетам) [15]. Астрономы могут определить, находится ли в центре аккреционного диска ЧД или нейтронная звезда. Если спектр в излучении обнаруживается особенно горячую составляющую, она, вероятно, исходит от поверхности нейтронной звезды, нагретой уда-

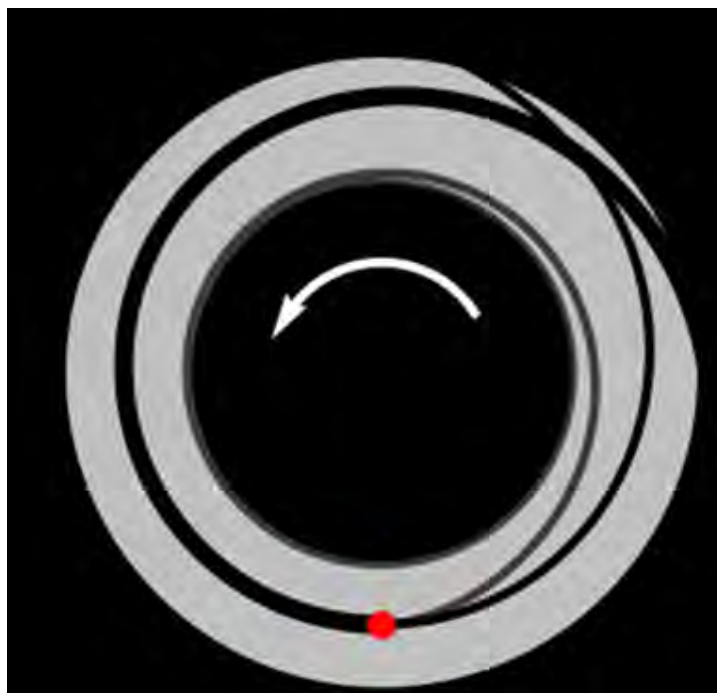


Рис. 5. Траектории частиц в процессе Пенроуза

ром аккрецирующего вещества. Если этого компонента нет, то, вероятно, поверхности вообще нет: газ падает перпендикулярно горизонту (см. рис 6).

Процесс Пенроуза указывает на возможность получения энергии из ЧД, но его нельзя назвать хорошим практическим методом. Для его реализации необходимо, чтобы две новорожденные частицы обладали скоростью, превышающей половину скорости света. Ожидаемая частота таких событий настолько редка, что не позволит получить значительное количество энергии излучаемых частиц. Поэтому идет активный поиск других механизмов. Например, Стивен Хокинг показал, что черные дыры могут высвобождать энергию за счет теплового излучения. Еще одним способом извлечения энергии является процесс Блэнфорда-Знаека, основанный на электромагнитном взаимодействии. [16] Л. Комиссо из Колумбийского Университета и Ф. Асенхо из Университета А. Ибаньеса описали в своей статье [17] еще одну из альтернатив процессу Пенроуза. Черные дыры окружены горячей плазмой, частицы которой обладают магнитным полем. Основа нового механизма получения энергии из вращающихся ЧД - пересоединение силовых линий магнитного поля внутри эргосферы. Черная дыра при этом должна находиться во внешнем магнитном поле, иметь большой спин ($a \approx 1$) и окружающую ее плазму с сильной намагниченностью. Нужными свойствами обладают, например, черные дыры, образовавшиеся в результате длинных и коротких гамма-всплесков и сверхмассивные ЧД в активных ядрах галактик. Магнитное пересоединение [18] ускоряет часть плазмы в направлении вращения дыры. Другая часть ускоряется в обратном направлении и падает за горизонт событий. Выделение энергии, как и в механизме Пенроуза, происходит, если поглощаемая плазма имеет отрицательную энергию, а ускоренная - "ускользает" из эргосферы. Отличие состоит в том, что для образования частиц с отрицательной энергией требуется диссипация энергии магнитного поля. В процессе, описанном Пенроузом, роль играет только инерция частиц.

Магнитное пересоединение - характерный процесс, который влияет на плазму, и этот процесс - причина вспышек на Солнце. Л. Комиссо и Ф. Асенхо считают, что магнитное пересоединение может быть также причиной вспышек рентгеновского излучения от черных дыр. [19] Девятичасовые вспышки зафиксировали в 2019 году. [20]

По оценкам ученых Колумбийского университета (США, Columbia), прирост энергии опи-

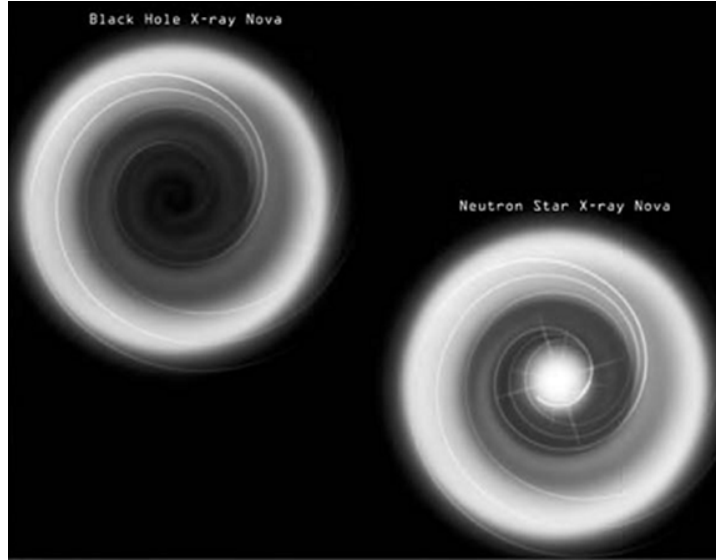


Рис. 6. Fig. 6. Показано отличие излучения рентгеновской новой, которая похожа на своего белого карлика за исключением того, что масса перетекает на компактный объект. Эти системы идеально подходят для необходимых здесь наблюдений, так как их можно сравнивать во время вспышки и в периоды затишья. Рисунок предоставлен NASA/CXC/М. Вайс.

санного процесса - 150 процентов. Это значит, что процесс позволяет получить в полтора раза больше энергии, чем нужно затратить на его реализацию. Достижение прироста больше 100 процентов возможно, потому что кинетическая энергия высвобожденных из эргосферы частиц плазмы увеличивается за счет энергии ЧД (подобно увеличению энергии КА при маневре в гравитационном поле планеты или звезды). Открытие нового механизма извлечения энергии из ЧД позволит астрономам лучше оценить их вращательный момент и понять, как они излучают энергию. До практического применения открытия еще далеко: необходимо выяснить, как долететь до черной дыры и разместить что-то в ее эргосфере, не угодив за горизонт событий. Максимальное количество энергии, возможное для распада одной частицы в результате исходного (или классического) процесса Пенроуза, составляет 20.7% от ее массы в случае незаряженной ЧД (при условии, что это лучший случай максимального вращения ЧД). Энергия берется из вращения черной дыры, поэтому существует ограничение на количество энергии, которую можно извлечь с помощью процесса Пенроуза и аналогичных стратегий (для незаряженной ЧД не более 29% ее первоначальной массы; большая эффективность возможна для заряженных вращающихся ЧД). Выяснено, что квазары и экстрагалактические компактные радиоисточники (массы $10^7 M_{\odot}$) подпитываются струями газа из их ядер и магнитные поля (с мощностью $\sim 10^{44}$ Вт) [12-14]. На влияние энергии гравитомагнитного поля B_g указывает, что происходит искажение плоскости вращения окружающего ядро газа. Оценка определяет период прецессии плоскости примерно в 10^4 лет, коррелирующей с периодом прецессии гироскопа на орбите вокруг Земли (эффект Бардина – Петерсона) [14]. Нормальная компонента гравитомагнитного поля $B_{g\perp}$ (~ 1 Тл), взаимодействуя с векторным потенциалом гравитомагнитного поля \vec{J}_g , за пределами черной дыры вдоль ее горизонта создает электропотенциал гравитомагнитной батареи $E_{||}$ [1, 16, 22]

$$\Delta U = \oint \vec{E}_{||} \cdot d\vec{l} = \oint \vec{J}_g \times \vec{B}_{g\perp} \cdot d\vec{l},$$

где $E_{||}$ is the tangential component of the electric field, which is not terminated at the horizon. Эта разность потенциалов толкает токи частиц до ультрарелятивистских скоростей вдоль замкнутого контура, опирающегося на горизонт черной дыры и простирающегося в область слабого B_g поля. Передача энергии частицам подобна потоку энергии электромагнитного поля с помощью вектора

Умова-Пойнтинга. Для типичной модели черной дыры энергия, извлекаемая из черной дыры дже-том оценивается величиной $W = 10^{37} \text{ Дж} \cdot \left[\frac{L}{L_{max}} \right] \cdot \left[\frac{M}{10^9 M_{\odot}} \right]$, где L/L_{max} - угловой момент черной дыры ("гравитомагнитный дипольный момент") в единицах максимально возможного углового момента GM^2 с ЧД, $M/(10^9 M_{\odot})$ - масса дыры в единицах 10^9 масс Солнца [16]. Таким образом, наряду с высокой мощностью процесса извлечения энергии из ЧД, его характерная эффективность высока; понимаются условия стабильности плазмы; кроме того, с прагматической точки зрения, отсутствуют необратимые отходы процесса – шлаки, угар, при сгорании ископаемого топлива; дополнительный нагрев рабочего механизма; радиоактивные отбросы и т.п. С другой стороны, есть прямая аналогия с гидротехническим устройством - гидротурбиной (Francis turbine) [23, 24], давно используемой для преобразования гравитационной энергии падающей воды в кинетическую энергию вращения турбины и последующего преобразования механической энергии в электрическую энергию в генераторе тока. Такие гидродинамические устройства широко используются в мировой практике создания гидроэлектростанций различной мощности от нескольких киловатт до сотен мегаватт с коэффициентом полезного действия более 95%. Конечно, для расчета потоков в гидротурбине используются уравнения гидродинамики. В данном случае важны уравнения магнитной гидродинамики.

5. Постановка современных лабораторных экспериментов

Встает вопрос о возможности реализации механизма передачи энергии в лабораторном эксперименте. Принципиально, малые девиации могут быть замечены либо с помощью интерферометрии (точность $\sim 10^{-22}$ отн. ед.), либо с помощью часов (точность $\sim 10^{-19}$ отн. ед.). Схемы обсуждаются в работах [25, 26, 27, 28]. Измерение энергии в лабораторном эксперименте более проблематично. Так гравитомагнитный дипольный момент L - угловой момент вращающегося маховика $= 10$ т (момент инерции ~ 20 т \cdot м²), с угловой скоростью 63 1/с равен $\sim 0.8 \cdot 10^9$ кг \cdot м² \cdot с⁻². Оцениваемая энергия в экваториальной плоскости при использовании описанного механизма в лаборатории $W_{lab} \sim 10^{-42}$ Дж за 1 секунду. Это безусловно мало, даже если сравнить с энергией квадрупольной гравитационной волны, регистрируемой интерферометрами LIGO – VIRGO – KAGRA (10^{-3} Вт/м²). Возможно проведение более длительных экспериментов, или усложнение схемы эксперимента с использованием струй частиц, проходящих через тело со спином, может помочь поглотить большую часть энергии вращения. Моделирование сложного поведения потоков частиц как проблемы искривленного пространствoвремени сложная научно-инженерная задача, начавшаяся с 2000-х годов. Предлагаются разные методы [17, 18, 29, 30]. Отметим последние работы [29, 30].

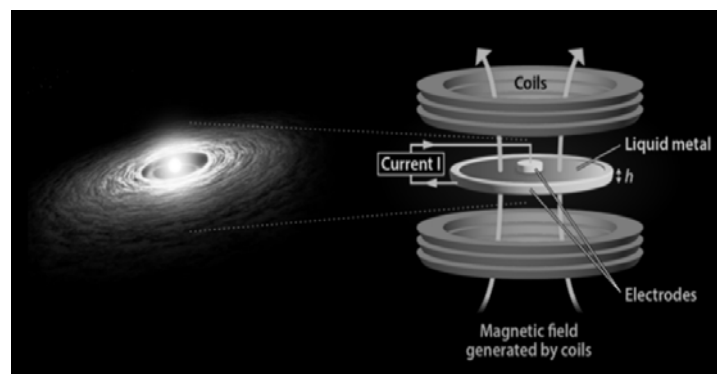


Рис. 7. Схема моделирования вращающейся черной дыры.

В одной из них [29] группа исследователей из Парижского университета Сорбонны сообщает

о новом способе имитации ЧД и звездных аккреционных дисков. В своей статье, опубликованной в PRL, группа описывает использование магнитных и электрических полей для создания вращающегося диска из жидкого металла для имитации поведения материала, окружающего черные дыры и звезды, что приводит к развитию аккреционных дисков. Предыдущие исследования показали, что массивные объекты имеют гравитационное воздействие, которое притягивает газ, пыль и другие материалы. И поскольку такие массивные объекты вращаются, то материя, которую они притягивают, имеет тенденцию закручиваться вокруг объекта по мере своего приближения. Когда это происходит, гравитация, создаваемая веществом в закручивающейся массе, приводит к образованию единой структуры, то есть к возникновению тенденции образования аккреционного диска. Выявлены два вклада в локальный перенос углового момента: один от полоидальной рециркуляции, вызванной наличием границ, и другой от турбулентных флуктуаций в объеме. Последнее обеспечивает эффективный перенос углового момента независимо от молекулярной вязкости жидкости. В этой новой работе исследователи разработали метод создания аккреционного диска из частиц жидкого металла, вращающихся в воздухе. Чтобы имитировать действие реального аккреционного диска, исследователи применили радиальное электрическое поле к массе жидкого металла. Поле создавалось пропусканием тока между цилиндром и окружающим круглым электродом. Этот процесс удерживает металлические кусочки в плену, когда они вращаются вокруг центральной точки. В эксперименте, когда электромагнитная сила, приложенная к жидкому металлу, достаточно велика, соответствующая объемная инжекция углового момента создает турбулентный поток, характеризующийся усредненной по времени кеплеровской скоростью вращения $\Omega \sim r^{-3/2}$. Конечно, нет центрального тела, имитирующего звезду или черную дыру, - вместо этого действие управляется с помощью катушек выше и ниже заданной плоскости. Используя свой подход, исследователи смогли контролировать как степень турбулентности, так и скорость вращения диска. Они также добавили зонды, чтобы узнать больше об угловом моменте, и обнаружили, что он движется от внутренних частей диска к внешним краям турбулентными потоками, как предполагают некоторые ученые.

В другом эксперименте [30] более точно моделируется то, что происходит в этих плазменных дисках, что может помочь исследователям понять, как растут черные дыры и как коллапсирующее вещество образует звезды.

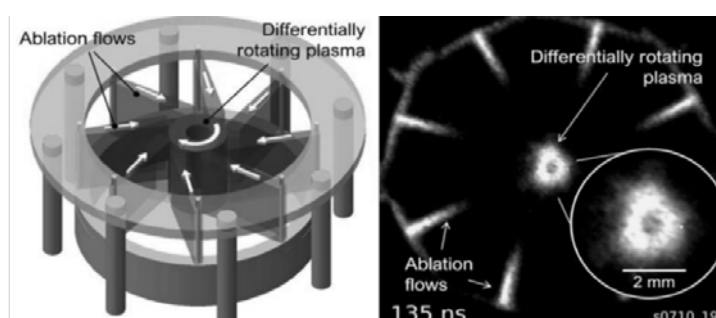


Рис. 8. Моделирование всасывания горячей плазмы в черную дыру и формирования аккреционного диска. Рисунок из [30].

Когда вещество приближается к черным дырам, она нагревается, превращаясь в плазму - четвертое состояние материи, состоящее из заряженных ионов и свободных электронов. Она также начинает вращаться в структуре, называемой аккреционным диском. Вращение вызывает центробежную силу, выталкивающую плазму наружу, которая уравновешивается гравитацией ЧД, втягивающей ее вовнутрь. Эти светящиеся кольца орбитальной плазмы создают проблему: как растет ЧД, если материя застревает на орбите, а не падает в дыру? Ведущая теория состоит в том, что нестабильность магнитных полей в плазме вызывает трение, заставляющее ее терять энергию и падать в черную дыру. Основным способом проверки этого было использование жидких металлов,

диск которых можно вращать, и наблюдение за тем, что происходит при приложении магнитных полей. Однако, поскольку металлы должны находиться внутри труб, они не являются истинным представлением свободно текущей плазмы. Теперь исследователи из Imperial College использовали свой мегаамперный генератор для экспериментов по плазменной имплозии (*MAGPIE*) для вращения плазмы с целью более точного представления аккреционного диска.

6. Ускоряемая плазма

Первый автор исследования [30], В. Валенсуэла-Вильясека отметил: "Понимание того, как ведут себя аккреционные диски, поможет нам не только увидеть причину роста черных дыр, но также и то, как газовые облака коллапсируют, образуя звезды, и даже как мы могли бы лучше создавать наши собственные звезды, повышая стабильность плазмы в термоядерных экспериментах". Команда из Империял Колледж использовала машину *MAGPIE*, чтобы разогнать восемь плазменных струй и столкнуть их, образуя вращающийся столб [27]. Они обнаружили, что плазма во вращающемся кольце столба двигалась тем быстрее, чем ближе она находилась к внутренней части кольца, также подобно зависимости усредненной по времени кеплеровской скорости вращения $\Omega \sim r^{-3/2}$. А это является важной характеристикой аккреционных дисков во Вселенной. *MAGPIE* производит короткие импульсы плазмы, то есть был возможен только один оборот диска. Однако этот экспериментальный эксперимент показывает, как число оборотов можно увеличить с помощью более длинных импульсов, что позволит лучше охарактеризовать свойства диска. Более длительное время проведения эксперимента также позволит применить магнитные поля, чтобы проверить их влияние на трение в системе.

7. Заключение

Выше были рассмотрены различные подходы к объяснению и моделированию релятивистских струй, генерируемых вращающихся черных дыр при захвате приграничного вещества. Значимость исследований — не только в улучшении теории и конструкции термоядерного реактора, но и в определении возможности создания нового типа двигателя вещества, обладающего как высокой эффективностью, так и отсутствием продуктов, не используемых далее. С точки зрения создания теории таких двигателей, процитируем одного из исследователей в Принстонском университете ? В. Валенсуэла-Вильясеку [30]: "Мы только что начали смотреть на эти аккреционные диски [вокруг черных дыр] совершенно по-новому, включая наши эксперименты и снимки черных дыр с помощью Event Horizon Telescope. Это позволит нам проверить наши теории и посмотреть, совпадают ли они с астрономическими наблюдениями".

Список литературы/References

1. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. *Гравитация*. М.: Изд. Мир. Редакция литературы по физике. Т. 3. С. 218. 510 с.; 1977. Misner C.W., Thorne K.S. and Wheeler J.A., *Gravitation*. San Francisco: W. H. Freeman and Co.; 1973.
2. Фейнман Р.Ф., Мориниго Ф.Б., Вагнер У.Г. *Фейнмановские лекции по гравитации*. под ред. Б. Хатфилда. Введение Дж. Прескилла и К.С. Торна, пер. с англ. А.Ф. Захарова М.: Янус-К; 2000. ISBN 5-8037-0049-5; Feynman R.P., F.B. Morinigo, W.G. Wagner, B. Hatfield (ed.) with foreword by J. Preskill and K.S. Thorne. *Feynman Lectures on Gravitation*. Addison Wesley Publishing Company. Advanced Book Program.
3. B.Schutz. *Gravity from the Ground Up: An Introductory Guide to Gravity and General Relativity*

- (Reprint ed.). Cambridge: Cambridge University Press; 2004. ISBN 0-521-45506-5.
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. *Фейнмановские лекции по физике. т.4 Электродинамика*. М.: Изд. АСТ; 2022. ISBN 9785171130121; Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M.L. *The Feynman Lectures on Physics*. Addison-Wesley revised and extended edition in 2005. ISBN 978-0-465-02529-9.
 5. Iorio, L. A comment on "A test of general relativity using the LARES and LAGEOS satellites and a GRACE Earth gravity model. Measurement of Earth's dragging of inertial frames," by I. Ciufolini et al. *The European Physical Journal C*. 2017; 77 (2): p.73. arXiv:1701.06474. Bibcode:2017EPJC...77...73I. doi:10.1140/epjc/s10052-017-4607-1. S2CID 118945777
 6. Everitt, C.W.T. et al. Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity. *Physical Review Letters*. 2011; 106 (22): p. 221101. arXiv:1105.3456. Bibcode:2011PhRvL.106v1101E. doi:10.1103/PhysRevLett.106.221101. PMID 21702590. S2CID 11878715.
 7. Cartlidge, E. Underground ring lasers will put general relativity to the test. Physicsworld.com. Institute of Physics. 2016; Retrieved 2 July 2017.
 8. O'Shaughnessy R., Gerosa D., and Wysocki D. Inferences about Supernova Physics from Gravitational-Wave Measurements: GW151226 Spin Misalignment as an Indicator of Strong Black-Hole Natal Kicks. *Phys Rev Lett*. 2017;119: p. 011101.
 9. First M87 Event Horizon Telescope results. *The Astrophysical Journal Letters*. 2019; 875 (1).
 10. *Black Hole Unmasked: Astronomers Capture First Image of Accretion Ring and Relativistic Jet*. *SciTechDaily*. 2023; CAS.
 11. Penrose R. and Floyd R. M., Extraction of Rotational Energy from a Black Hole. *Nature Physical Science*. 1971; 229: p.177-185.
 12. Begelman M. C., Blandford R. D. and Rees M. J., Theory of extragalactic radio sources. *Rev. Mod. Phys*. 1984; 56: p. 255-68. doi:https://doi.org/10.1103/RevModPhys.56.255.
 13. R.K. Williams. Collimated escaping vortical polar e^+e^- jets intrinsically produced by rotating black holes and Penrose processes. *The Astrophysical Journal*. 2004; 611 (2): p. 952-963. arXiv:astro-ph/0404135. Bibcode:2004ApJ...611..952W. doi:10.1086/422304. S2CID 1350543.
 14. Bardeen J. M. and Petterson J. A., The Lense-Thirring Effect and Accretion Disks around Kerr Black Holes. *Astrophys. J. Letter*. 1975;195: p. 65-77. doi: 10.1086/181711.
 15. Бобошина С.Б., Измайлов Г.Н.. Физические основы механики с приложениями к аэрокосмическим задачам.- М. : ЛЕЛАНД, 2020, 202 с. ISBN 978-5-97106740-5. Boboshina S.B., G.N. Izmailov. *Fizicheskie osnovy mehaniki s prilozheniyami k aerokosmicheskim zadacham*. Moscow: URSS; 2019. (in RUSSIAN).
 16. Hartle, J.D. *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. San Francisco: Addison Wesley; 2003. 582 p. ISBN 0-8053-8662-9.
 17. Comisso L. and Asenjo F. A.. Magnetic reconnection as a mechanism for energy extraction from rotating black holes. *Phys. Rev. D*. 2002; 103: 023014.
 18. Прист Э., Форбс Т. *Магнитное пересоединение. Магнитогидродинамическая теория и приложения*. М: ФИЗМАТЛИТ; 2005. - 592 с. ISBN 5-9221-0502-74; Priest E., Terry Forbes. *Magnetic Reconnection. MHD Theory and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press; 2000. ISBN 0-521-48179-1.
 19. Liu, T. Massive black holes flaring up time and again. *Nat Astron*. 2021; 5: S.438-439. <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01366-4>.
 20. Miniutti, G., Saxton, R.D., Giustini, M. et al. Nine-hour X-ray quasi-periodic eruptions from a low-mass black hole galactic nucleus. *Nature*. 2019; 573: S. 381-384. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1556-x>.
 21. Hertog Th. *On the Origin of Time: Stephen Hawking's Final Theory*. Bantam, ISBN-13:978-

- 0593128442.
22. Shatskii, A.A. Unipolar induction of a magnetized accretion disk around a black hole. *Astron. Lett.* 2003; 29: S. 153-157. <https://doi.org/10.1134/1.1558153/>
 23. <https://en.wikipedia.org/wiki/Francis-turbine/>
 24. <https://testbook.com/mechanical-engineering/francis-turbine/> .
 25. Abramowicz M. A. and Fragile P. Chris. Foundations of Black Hole Accretion Disk Theory. *Living Rev. Relativity.* 2013: 16. <http://www.livingreviews.org/lrr-2013-1>.
 26. Головашкин А.И., Жерихина Л.Н., Цховребов А.М., Измайлов Г.Н., Озолин В.В. Обычные СКВИД-интерферометры и интерферометры на волнах материи в сверхтекучем гелии: роль квантовых флуктуаций. *ЖЭТФ.* 2010: 138. вып. 2(8). С.373-380. Golovashkin A.I., Zherikhina L.N., Tskhovrebov A.M., Izmailov G.N., Ozolin V.V. Obychnye SKVID-interferometry i interferometry na volnakh materii v sverkh tekuchem helii: rol'kvantovykh fluktuatsii, *JETPh.* 2010:138. iss. 2(8). S.373-380.
 27. Izmailov G.N. To the possibility of using clocks in gravitational antenna network. *J. Phys.: Conf. Series.* 2019. 1348 P.012005 doi:10.1088/1742-6596/1348/1/012005.
 28. Жерихина Л.Н., Измайлов Г.Н., Озолин В.В. Возможности использования эффектов ОТО в космической навигации. *Альманах современной метрологии.* 2020: No 4 (24). С.24-35. Zherikhina L.N., Izmailov G.N., Ozolin V.V. Vozmozhnosti ispolzovaniya effectov OTO v kosmicheckoi navigatsii. *Almanakh sovremennoi metrologii.* 2020: №4 (24). S. 24-35.
 29. Vernet M. et al, Angular Momentum Transport by Keplerian Turbulence in Liquid Metals. *Physical Review Letters.* 2022. doi: 10.1103/PhysRevLett.129.074501.
 30. Valenzuela-Villasaca V. et al, Characterization of Quasi-Keplerian, Differentially Rotating, Free-Boundary Laboratory Plasmas. *Physical Review Letters.* 2023; 130: S. 195101. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.195101>.

Авторы

Измайлов Георгий Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, 125993, Россия.
E-mail: izmailov@mai.ru

Озолин Владимир Викторович, к.ф.-м.н., доцент, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, 125993, Россия.
E-mail: ozolinvv@mai.ru

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Измайлов Г. Н., Озолин В. В. Имитация извлечения кинетической энергии из черной дыры Керра-Ньюмана. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия.* 2023. № 3-4. С. 133-146.

Authors

Izmailov George Nikolaevich, Dr. Sci., Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoye sh., 4, Moscow, 125993, Russia.
E-mail: izmailov@mai.ru

Ozolin Vladimir Victorovich, Ph.D., Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoye sh., 4, Moscow, 125993, Russia.
E-mail: ozolinvv@mai.ru

Please cite this article in English as:

Izmailov G. N., Ozolin V. V. Simulation of kinetic energy extraction from a Kerr – Newman black hole. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2023, no. 3-4, pp. 133-146.