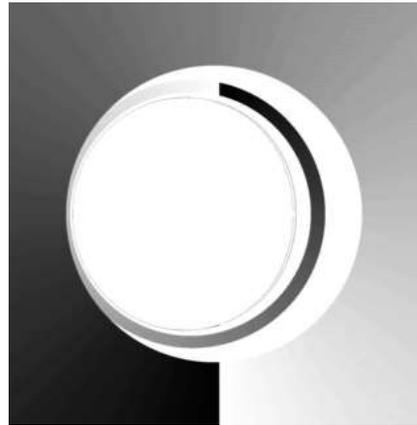
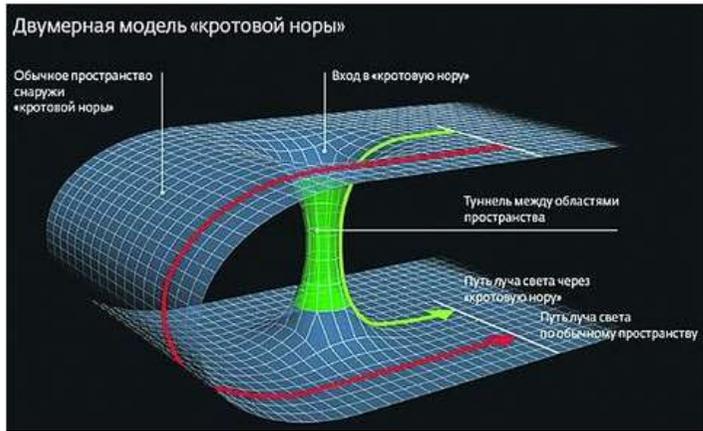


Энергетические условия в кротовых норах

# Кротовые норы

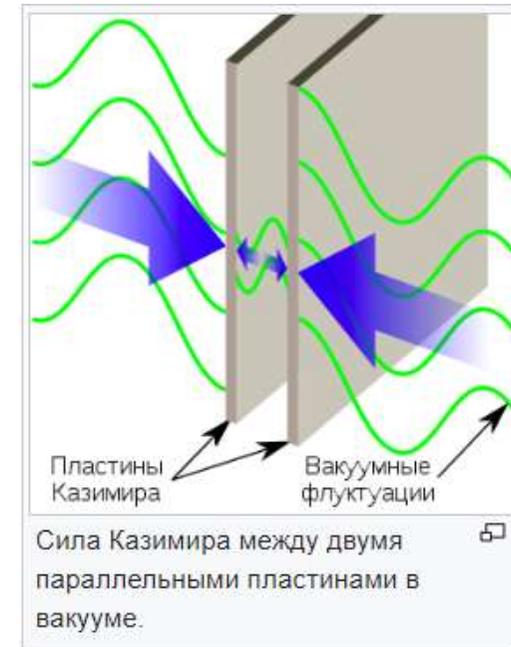


$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2rM(r)}{\Sigma}\right)dt^2 - \frac{4arM(r)\sin^2\theta}{\Sigma}dt d\phi + \frac{\Sigma}{\Delta}dr^2 + \Sigma d\theta^2 + \sin^2\theta\left(r^2 + a^2 + \frac{2a^2rM(r)\sin^2\theta}{\Sigma}\right)d\phi^2$$

$$\Sigma = r^2 + a^2\cos^2\theta, \Delta = r^2 - 2M(r)r + a^2, M(r) = m\frac{|r|^3}{|r|^3 + 2mb^2}$$

F. Lamy, et.al., Classical and Quantum Gravity, 35, 115009 (2018)

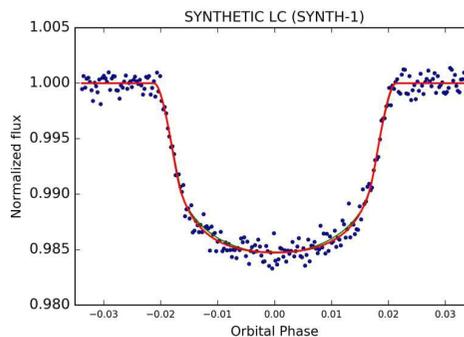
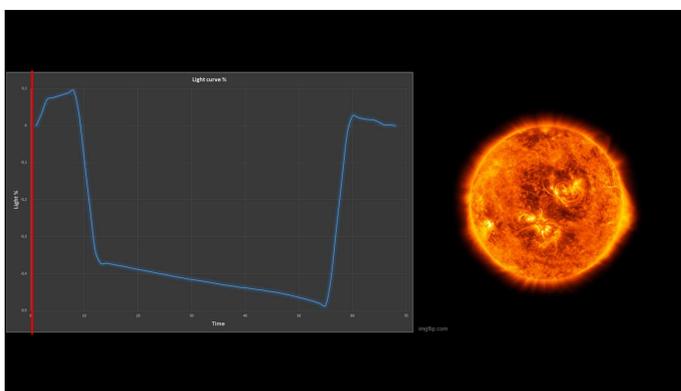
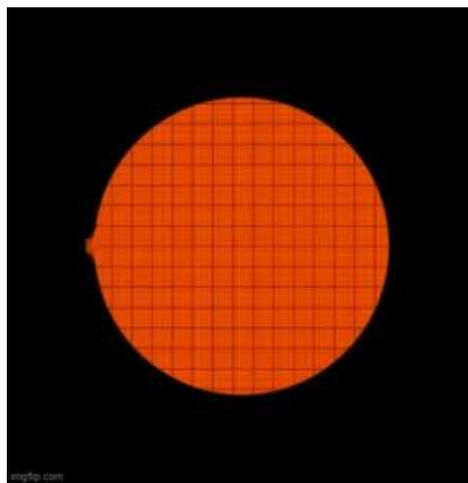
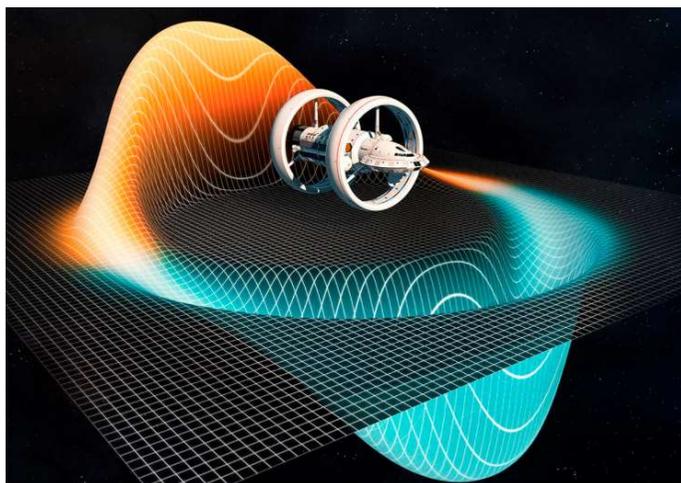
- Для существования проходимой кротовой норы (в рамках ОТО) нужна отрицательная масса
- Это касается всех известных решений кротовых нор (по крайней мере до 2023 года)



$$\frac{F_c}{A} = \frac{\hbar c \pi^2}{240d^4}$$

- Пока известен только один вид материи с  $M < 0$

# Варп-двигатель - Пузырь Алькубьерре (1994 г.)



$$ds^2 = -(\alpha^2 - \beta_i \beta^i) dt^2 + 2\beta_i dx^i dt + \gamma_{ij} dx^i dx^j$$

$$\alpha = 1,$$

$$\beta^x = -v_s(t)f(r_s(t)),$$

$$\beta^y = \beta^z = 0,$$

$$\gamma_{ii} = \delta_{ii},$$

$$v_s(t) = \frac{dx_s(t)}{dt},$$

$$r_s(t) = \sqrt{(x - x_s(t))^2 + y^2 + z^2},$$

$$f(r_s) = \frac{\tanh(\sigma(r_s + R)) - \tanh(\sigma(r_s - R))}{2 \tanh(\sigma R)},$$

- **Нужна отрицательная масса**
- Существуют попытки использовать вакуум Каземира для создания мини - пузыря Алькубьерре в эксперименте
- Астрофизическое обнаружение таких пузырей (как и кротовых нор) принципиально возможно
- **Степень физической достоверности такого решения ничем не отличается от кротовой норы.**
- **Если кротовые норы существуют, то что мешает существовать и сверхсветовым звездолетам?**

# Солитоны Ленца (2020 г.)

## Breaking the Warp Barrier: Hyper-Fast Solitons in Einstein-Maxwell-Plasma Theory

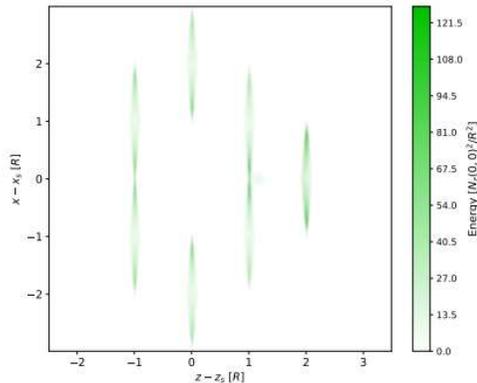
Erik W. Lentz

Institut für Astrophysik, Georg-August Universität Göttingen, Göttingen, Germany 37077

E-mail: erik.lentz@uni-goettingen.de

11 August 2020

**Abstract.** Solitons in space-time capable of transporting time-like observers at superluminal speeds have long been tied to violations of the weak, strong, and dominant energy conditions of general relativity. The negative-energy sources required for these solitons must be created through energy-intensive uncertainty principle processes as no such classical source is known in particle physics. This paper overcomes this barrier by constructing a class of soliton solutions that are capable of superluminal motion and sourced by purely positive energy densities. The solitons are also shown to be capable of being sourced from the stress-energy of a conducting plasma and classical electromagnetic fields. This is the first example of hyper-fast solitons resulting from known and familiar sources, reopening the discussion of superluminal mechanisms rooted in conventional physics.



**Figure 3.** Projection of the local energy density of Eqn. 17 along  $(x, 0, z)$ . Propagation direction of the soliton is from left to right along the  $z$ -axis. The energy density is dominated by those regions containing hyperbolic source  $\rho$ , but also extends weakly to the boundaries of the wavefronts. The energy density is everywhere positive and therefore satisfies the weak energy condition.

$$ds^2 = - (N^2 - N^i N_i) dt^2 - 2N_i dx^i dt + h_{ij} dx^i dx^j,$$

$$K_{ij} = -\frac{1}{2} (\partial_t h_{ij} + N^k \partial_k h_{ij} + \partial_i N^k h_{kj} + \partial_j N^k h_{ki})$$

$$\partial_x^2 \phi + \partial_y^2 \phi - \frac{2}{v_h^2} \partial_z^2 \phi = \rho,$$

$$K^2 - K_j^i K_i^j = 2\partial_x^2 \phi \partial_y^2 \phi + 2\partial_z^2 \phi \left( \frac{2}{v_h^2} \partial_z^2 \phi + \rho \right) - 2(\partial_y \partial_x \phi)^2 - 2(\partial_z \partial_x \phi)^2 - 2(\partial_y \partial_z \phi)^2.$$

$$E = \frac{1}{16\pi} \left( 2\partial_z^2 \phi \left( \rho + \frac{2}{v_h^2} \partial_z^2 \phi \right) - 4(\partial_z \partial_x \phi)^2 \right)$$

$$E \geq 2\rho \times \partial_z^2 \phi = \rho \times \frac{1}{2v_h} \int dx' \partial_r \rho(r, |x'| + |y|) |_{r=z-\Delta x/v_h}$$

- Сверхсветовое решение
- Не нарушает ОТО
- Не требует отрицательной массы по заявлению автора
- Не посчитана электродинамика, ничего нельзя сказать об устойчивости решения
- После проверки выяснилось, что существуют системы отсчета где отрицательная масса нужна ☹️
- Автор не согласен с критикой. Разобраться кто прав – трудоемкое занятие. Что же делать?

## Generic warp drives violate the null energy condition

Jessica Santiago<sup>1,2</sup>, Sebastian Schuster<sup>3</sup>, and Matt Visser<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mathematics and Statistics, Victoria University of Wellington, PO Box 600, Wellington 6140, New Zealand.

<sup>2</sup> Section of Astrophysics, Astronomy and Mechanics, Department of Physics, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki 54124, Greece.

<sup>3</sup> Institute of Theoretical Physics, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, V Holešovičkách 2, 180 00 Prague 8, Czech Republic.

E-mail: jessica.santiago@vuw.ac.nz, sebastian.schuster@utp.mff.cuni.cz, matt.visser@ms.vuw.ac.nz

**ABSTRACT:** Three recent articles have claimed that it is possible to, at least in theory, either set up positive energy warp drives satisfying the weak energy condition (WEC), or at the very least, to minimize the WEC violations. These claims are at best incomplete, since the arguments as presented only assert but do not prove the existence of one set of timelike observers, the co-moving Eulerian observers, who see relatively “nice” physics. While these particular observers might arguably see a positive energy density, the WEC requires *all* timelike observers to see positive energy density. Therefore, one should carefully revisit this issue. A more careful analysis shows that the situation is actually much grimmer than advertised — within the framework adopted by these three papers all physically reasonable warp drives will certainly violate the WEC, and both the strong and dominant energy conditions. Under plausible subsidiary conditions the null energy condition is also violated. While warp drives are certainly interesting examples of speculative physics, the violation of the energy conditions, at least within the framework of standard general relativity, is unavoidable. Even in modified gravity, physically reasonable warp drives will still violate the purely geometrical null convergence condition and the timelike convergence condition which, in turn, will place very strong constraints on any modified-gravity warp drive.

DATE: Saturday 26 February 2022; 15:13X-ed March 1, 2022  
(Closely resembles final version accepted and in press at PRD.)

**KEYWORDS:** warp drives; energy conditions; convergence conditions; Alcubierre warp drive; Natário generic warp drive; Natário zero-expansion warp drive; zero-vorticity warp drive.

# Warp factory (2024 г.)

## Analyzing Warp Drive Spacetimes with Warp Factory

Christopher Helmerich<sup>1,2</sup>, Jared Fuchs<sup>1,2</sup>, Alexey Bobrick<sup>2,3</sup>,  
Luke Sellers<sup>2,4</sup>, Brandon Melcher<sup>2</sup>, & Gianni Martire<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The University of Alabama in Huntsville, 301 Sparkman Drive, Huntsville, Alabama, 35899, U.S.

<sup>2</sup>Advanced Propulsion Laboratory at Applied Physics, 477 Madison Avenue, New York, 10022, U.S.

<sup>3</sup>Technion - Israel Institute of Technology, Physics Department, Haifa 32000, Israel

<sup>4</sup>UCLA Department of Physics & Astronomy, 475 Portola Plaza, Los Angeles, CA 90095, U.S.

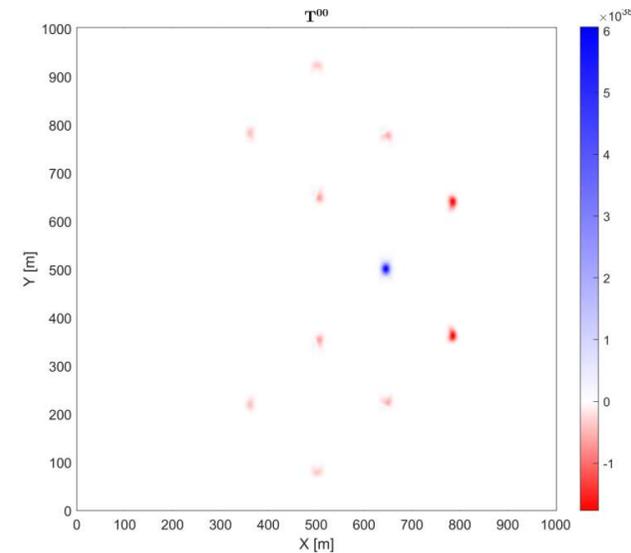
E-mail: cdh0028@uah.edu, christopher@appliedphysics.org, and christopher.d.helmerich@gmail.com

### Abstract.

The field of warp research has been dominated by analytical methods to investigate potential solutions. However, these approaches often favor simple metric forms that facilitate analysis but ultimately limit the range of exploration of novel solutions. So far the proposed solutions have been unphysical, requiring energy condition violations and large energy requirements. To overcome the analytical limitations in warp research, we introduce Warp Factory: a numerical toolkit designed for modeling warp drive spacetimes. By leveraging numerical analysis, Warp Factory enables the examination of general warp drive geometries by evaluating the Einstein field equations and computing energy conditions. Furthermore, this comprehensive toolkit provides the determination of metric scalars and insightful visualizations in both 2D and 3D, offering a deeper understanding of metrics and their corresponding stress-energy tensors. The paper delves into the methodology employed by Warp Factory in evaluating the physicality of warp drive spacetimes and highlights its application in assessing commonly modeled warp drive metrics. By leveraging the capabilities of Warp Factory, we aim to further warp drive research and hopefully bring us closer to realizing physically achievable warp drives.

*Keywords:* Numerical Relativity, General Relativity, Numerical Methods, Energy Conditions, Space Travel, Exotic Spacetimes, Warp Drives

Submitted to: *Class. Quantum Grav.*



**Figure 17.** Energy density for the Lentz-inspired metric. The motion of the bubble is in the +X direction.  $v_s = 0.1 c$ . Units are in  $J/m^3$ .

Численный код (реализованный на MATLAB) для проверки тензора энергии-импульса, соответствующего некоторой метрике на выполнение физически допустимых энергетических условий

<https://github.com/NerdsWithAttitudes/WarpFactory>

# Энергетические условия

**Нулевое (NEC)** – плотность энергии должна быть неотрицательна для любого наблюдателя движущегося со скоростью света

$$\Xi_N(X) = T_{\hat{\mu}\hat{\nu}}(X)k^{\hat{\mu}}k^{\hat{\nu}} \geq 0 \quad \forall k^{\hat{\mu}}$$

**Слабое (WEC)** – плотность энергии должна быть неотрицательна для любого наблюдателя движущегося со скоростью менее скорости света

$$\Xi_W(X) = T_{\hat{\mu}\hat{\nu}}(X)V^{\hat{\mu}}V^{\hat{\nu}} \geq 0 \quad \forall V^{\hat{\mu}}$$

**Сильное (SEC)** – нет антигравитации

$$\Xi_S(X) = \left( T_{\hat{\mu}\hat{\nu}}(X) - \frac{1}{2}T(X)\eta_{\hat{\mu}\hat{\nu}} \right) V^{\hat{\mu}}V^{\hat{\nu}} \geq 0 \quad \forall V^{\hat{\mu}}$$

**Доминантное(DEC)** – скорость материи меньше скорости света

$$\Upsilon^{\hat{\mu}}(X) = -T^{\hat{\mu}}_{\hat{\nu}}(X)V^{\hat{\nu}}$$

$$\xi_D(X) = \eta_{\hat{\mu}\hat{\nu}}\Upsilon^{\hat{\mu}}(X)\Upsilon^{\hat{\nu}}(X) \leq 0 \quad \forall V^{\hat{\mu}}$$

Solution Name	$g_{\mu\nu}$ (pseudo-Cartesian)	NEC	WEC	DEC	SEC
Alcubierre [1]	$\begin{pmatrix} -\alpha^2 + \beta_1^2 & \beta_1 \\ \beta_1 & \delta_{ij} \end{pmatrix}$	✗	✗	✗	✗
Van Den Broeck [16]	$\begin{pmatrix} -\alpha^2 + \gamma^{11}\beta_1^2 & \beta_1 \\ \beta_1 & \gamma_{ij} \end{pmatrix}$	✗	✗	✗	✗
Modified Time [2]	$\begin{pmatrix} -\tilde{\alpha}^2 + \beta_1^2 & \beta_1 \\ \beta_1 & \delta_{ij} \end{pmatrix}$	✗	✗	✗	✗
Lentz-Inspired [12]	$\begin{pmatrix} -\alpha^2 + \beta_{[1,2]}^2 & \beta_{[1,2]} \\ \beta_{[1,2]} & \delta_{ij} \end{pmatrix}$	✗	✗	✗	✗

## Дополнительные “практические” условия для варп-двигателя (или проходимой кротовой норы)

- Отсутствие разрывов в метрике или ее производных
- Отсутствие непреодолимых горизонтов между внутренним и внешним пространством
- Не должно быть нарушений причинности
- Реализуемые с инженерной точки зрения плотности (хотя бы нейтронная звезда или белый карлик, но лучше – обычное твердое тело), массы, величины электро-магнитных полей

# Динамические кротовые норы без отрицательной массы (2023 г.)

## Possible wormholes in a Friedmann universe

Kirill A. Bronnikov,<sup>a,b,c,1</sup> Pavel E. Kashargin,<sup>d,2</sup> Sergey V. Sushkov<sup>d,3</sup>

<sup>a</sup> Center of Gravitation and Fundamental Metrology, VNIIMS, Ozyornaya St. 46, Moscow 119361, Russia

<sup>b</sup> Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russia

<sup>c</sup> National Research Nuclear University "MEPhI", Kashirskoe sh. 31, Moscow 115409, Russia

<sup>d</sup> Institute of Physics, Kazan Federal University, Kremlovskaya St. 16a, Kazan 420008, Russia

We study the properties of evolving wormholes able to exist in a closed Friedmann dust-filled universe and described by a particular branch of the well-known Lemaître-Tolman-Bondi solution to the Einstein equations and its generalization with a nonzero cosmological constant and an electromagnetic field. Most of the results are obtained with pure dust solutions. It is shown, in particular, that the lifetime of wormhole throats is much shorter than that of the whole wormhole region in the universe (which coincides with the lifetime of the universe as a whole), and that the density of matter near the boundary of the wormhole region is a few times smaller than the mean density of matter in the universe. Explicit examples of wormhole solutions and the corresponding numerical estimates are presented. The traversability of the wormhole under study is shown by a numerical analysis of radial null geodesics.

## 1 Introduction

A wormhole is one of the types of strongly curved geometries, the one resembling a spatial tunnel between either different regions of the same universe or different universes. Such spatial geometries within solutions to the gravitational field equations were first discussed in [1–4], but those wormholes were not traversable for subluminal particles or even photons, which were unable to travel from one “end of the tunnel” to the other, to say nothing on the ability to return back. The first exact solutions describing traversable wormholes seems to have appeared in [5, 6] in 1973 in general relativity (GR) with a massless phantom scalar field (a hypothetical field with a wrong sign of kinetic energy) as a source. An evolving version of such scalar-vacuum solutions was also found [7] as well as examples of higher-dimensional static wormhole solutions [8, 9]. A large interest in these objects has been raised by the paper of Morris and Thorne [10] (1988) who showed that a static wormhole throat considered in the framework of GR requires the existence of so-called “exotic” matter, violating the Null Energy Condition (NEC). A phantom scalar field is a simple example of such matter.

By now, wormholes have been considered in different theories of gravity and in the presence of different kinds of matter. Thus, in [5] static, spherically symmetric wormhole solutions are presented both in GR and a class of scalar-tensor theories, with or without an electromagnetic field. Wormholes in the Einstein-Maxwell-dilaton theory have been described in [11–14]. Other sources in GR used for wormhole construction include a Chaplygin gas [15], various versions of phantom energy and quintessence, in particular, those with the stress-energy tensor (SET) of a perfect fluid [16–22]. It was shown [22] that static, spherically symmetric wormholes with two flat or AdS asymptotic regions are impossible in GR with any source possessing isotropic pressure, and, as a result, perfect-fluid wormholes can only contain their source in a bounded region of space surrounded by vacuum, with a thin shell on the boundary. It should also be mentioned that many authors consider wormhole models built using thin shells of exotic matter as the only (or main) source, the first of them being probably [23, 24]. In [25, 26], examples of static traversable wormholes are given in Einstein-Dirac-Maxwell theory, being obtained without explicitly introducing exotic matter, which means that the Dirac spinor fields themselves exhibit exotic properties [27].

<sup>1</sup>e-mail: kb20@yandex.ru

<sup>2</sup>e-mail: pkashargin@mail.ru

<sup>3</sup>e-mail: sergey\_sushkov@mail.ru

$$\begin{bmatrix} -\left(\frac{\partial t}{\partial \eta}\right)^2 & -\frac{\partial t}{\partial \eta} \frac{\partial t}{\partial R} & 0 & 0 \\ -\frac{\partial t}{\partial \eta} \frac{\partial t}{\partial R} & \frac{r'^2}{1-h(R)} - \left(\frac{\partial t}{\partial R}\right)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2 \sin^2(\theta) \end{bmatrix}$$

$$h(R) = \frac{1}{1+r^2}$$

$$\Delta = \sqrt{1 - \frac{q^2}{b^2(1+R^2)^{(2K+1)}}$$

$$t = b(1+R^2)^{(K+3/2)}(\eta - \Delta \sin(\eta))$$

$$r = b(1+R^2)^{(K+1)}(1 - \Delta \cos(\eta))$$

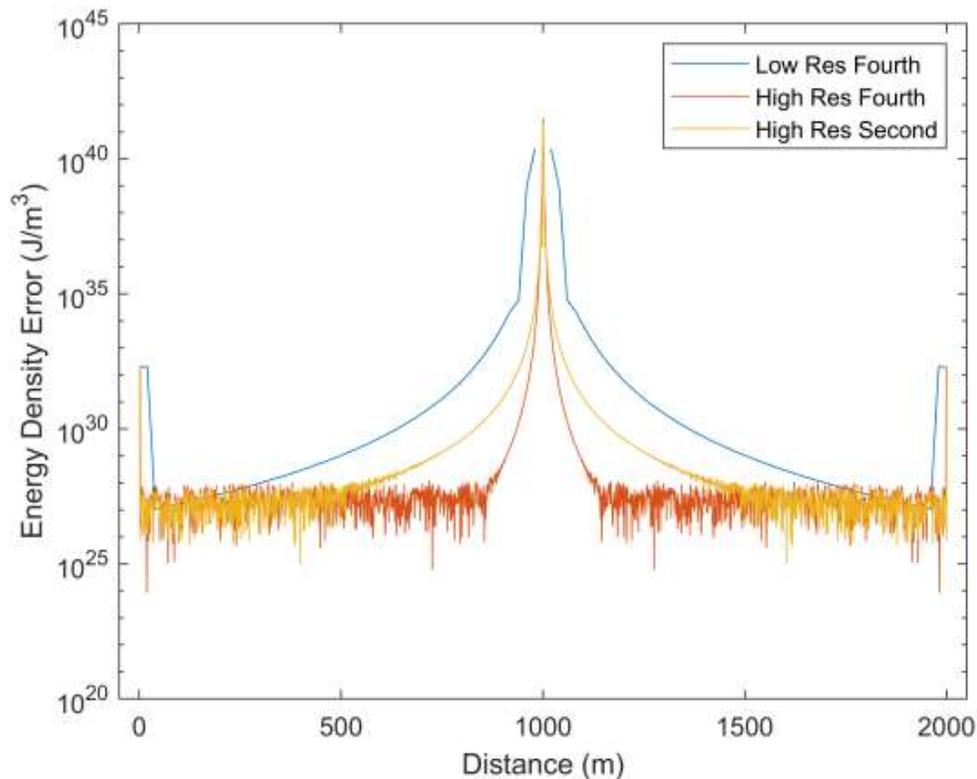
$$N_1 = \cos(\eta) - 3\Delta + 3\Delta^2(\eta \sin(\eta) + \cos(\eta)) + \Delta^3(-2 + \cos(\eta)^2)$$

$$N_2 = -\cos(\eta) + 2\Delta - \Delta^2(\cos(\eta) + \eta \sin(\eta))$$

$$r' = bR(1+R^2)^K \left( \frac{2KN_2 - N_1}{\Delta(1 - \Delta \cos(\eta))} \right)$$

- Время жизни конечно, но может быть большим
- Материя – пыль
- Нужно проверять. Простейший способ – warp factory?

# Проверка. Первые проблемы Warp Factory



**Figure B1.** Plots of errors of Warp Factory's numerical evaluations for a Schwarzschild solution. The error is computed by comparing the numerical  $T^{00}$  value to its true value which is zero. The low-resolution grid is 20 m, and the high-resolution grid is 1 m. The center of the Schwarzschild metric is at 1000 meters and its radius is 0.01 meters.

- Неправильный результат даже для Шварцшильда! Т.е. коду нельзя доверять (но сам подход правильный)
- Что делать? Конечно же написать свой код с автоматическим дифференцированием и символьными вычислениями

# Наш код

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad R \text{ — скалярная кривизна,} \quad R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$$

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} \text{ — тензор Эйнштейна} \quad R_{\mu\nu} \text{ — тензор Риччи,} \quad R_{\mu\nu} = R^{\lambda}_{\mu\lambda\nu}$$

## Риманов тензор кривизны

$$R^{\rho}_{\sigma\mu\nu} = \partial_{\mu} \Gamma^{\rho}_{\nu\sigma} - \partial_{\nu} \Gamma^{\rho}_{\mu\sigma} + \Gamma^{\rho}_{\mu\lambda} \Gamma^{\lambda}_{\nu\sigma} - \Gamma^{\rho}_{\nu\lambda} \Gamma^{\lambda}_{\mu\sigma} \quad \Gamma^i_{kl} = \frac{1}{2} g^{im} \left( \frac{\partial g_{mk}}{\partial x^l} + \frac{\partial g_{ml}}{\partial x^k} - \frac{\partial g_{kl}}{\partial x^m} \right)$$

### Шаг 1 (вычисление тензора Энергии-Импульса)

- Берем произвольную метрику, записанную в аналитическом виде
- При помощи библиотеки автоматического дифференцирования (jax, на GPU) символично вычисляются частные производные, символы Кристоффеля, тензоры и скаляры Римана, и, в конечном итоге получается аналитическое выражение для тензора энергии-импульса в точке (x)

### Шаг 2 (проверка энергетических условий)

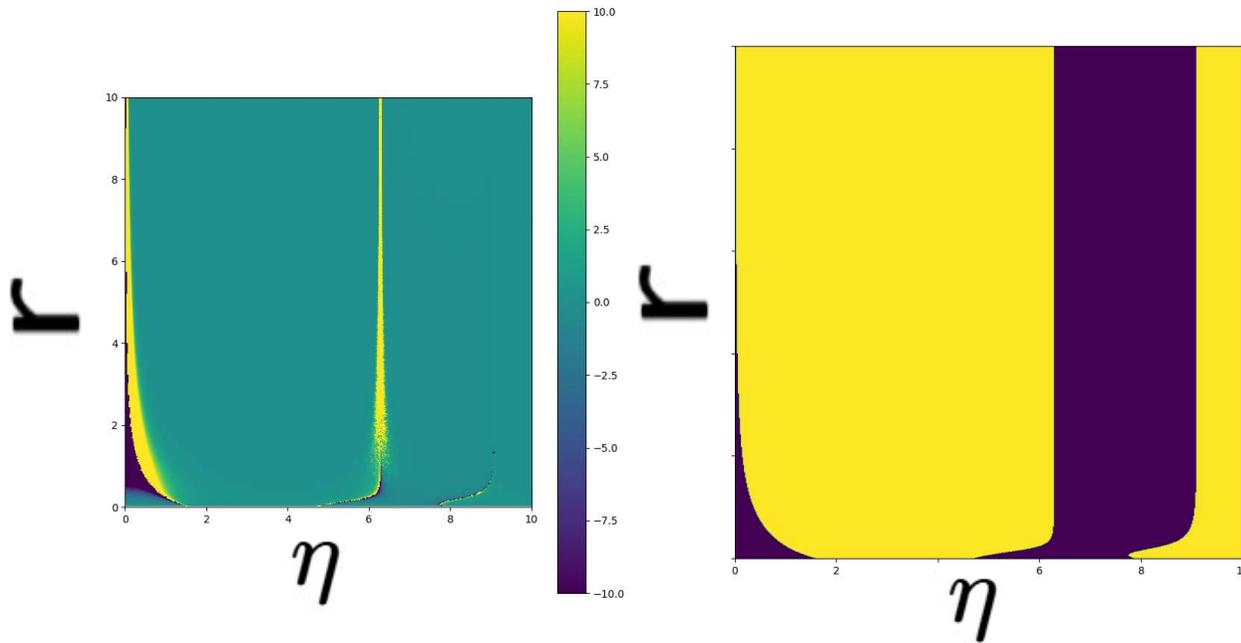
- Берем случайные наборы координат (x) из некоторого распределения
- Переходим в локальную систему координат Минковского (для простоты однородной генерации векторов k), генерируем случайные светоподобные и времениподобные вектора k
- Вычисляем энергетические условия в каждой точке (x, k)  $\Xi_N(X) = T_{\mu\nu}(X) k^{\mu} k^{\nu} \geq 0 \quad \forall k^{\mu}$
- Берем минимум по всем реализациям вектора k для каждой точки (x)

### Шаг 3 (проверка сложных мест с произвольной точностью)

- Берем вектора (x, k) с предыдущего шага. Если за счет численных ошибок светоподобность/временеподобность вектора k нарушена – восстанавливаем ее нормировкой одной из его координат.
- Используя библиотеки длинной арифметики (symru, числа с 2500+ знаками) подставляем найденные значения (x, k) в аналитические формулы для энергетических условий.

# Кротовая нора Бронникова-Кашаргина-Сушкова (2023)

## NEC



$$h = 1, \quad h' = 0, \quad h'' < 0, \\ F' = 0, \quad r' = 0, \quad \frac{h'}{r'} < 0, \quad \frac{F'}{r'} > 0.$$

$$r(R, \eta) = b(1 + R^2)^{k+1} (1 - \Delta \cos \eta), \quad \tau - \tau_0(R) = b(1 + R^2)^{k+3/2} (\eta - \Delta \sin \eta) \quad (27)$$

$$r'(R, \eta) = \frac{bR(1 + R^2)^k (2kN_2 - N_1)}{\Delta(1 - \Delta \cos \eta)}, \quad (28)$$

with  $N_{1,2}$  defined in Eq. (19). The density  $\rho$  (6) and the quantity  $d^2r/dl^2$  at  $R = 0$  then read

$$\rho(R, \eta) = \frac{k\Delta}{2\pi G b^2 (1 + R^2)^{2k+3} (1 - \Delta \cos \eta) (2kN_2 - N_1)}, \quad (29)$$

$$\left. \frac{d^2r}{dl^2} \right|_{R=0} = \left. \frac{\Delta(1 - \Delta \cos \eta)}{b(2kN_2 - N_1)} \right|_{R=0}. \quad (30)$$

$$h(R) = \frac{1}{1 + R^2}, \quad F(R) = 2b(1 + R^2)^k, \quad \Rightarrow \quad \Delta = \sqrt{1 - \frac{q^2}{b^2(1 + R^2)^{2k+1}}},$$

$$\rho = \frac{1}{8\pi G} \frac{F'(R)}{r^2 r'} \quad \Leftrightarrow \quad F(R) = 8\pi G \int \rho r^2 r' dR$$

$$2N_2 - N_1 > 0$$

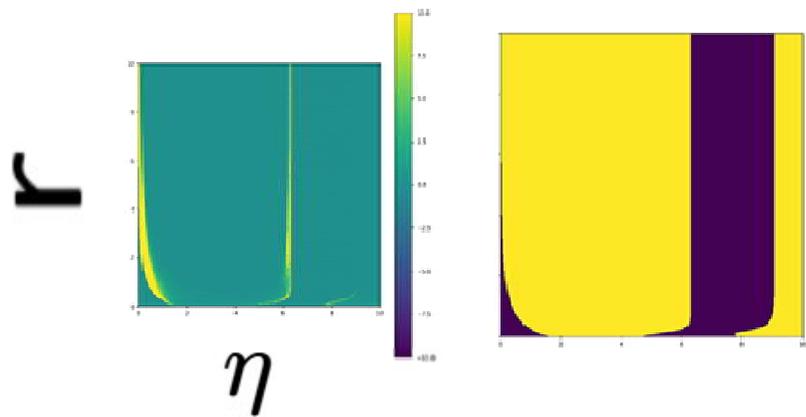
$$q = 0.5$$

$$b = 0.5$$

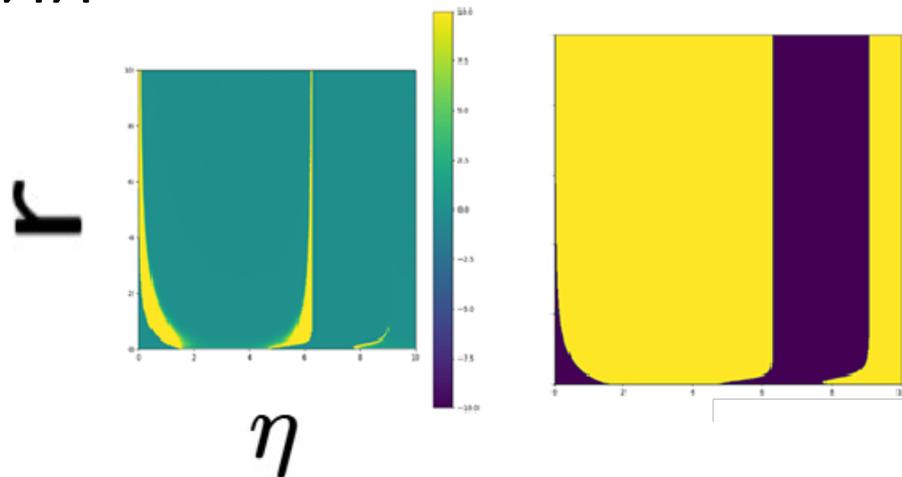
$$k = 0.5$$

Существует область параметров, где NEC действительно выполняется!

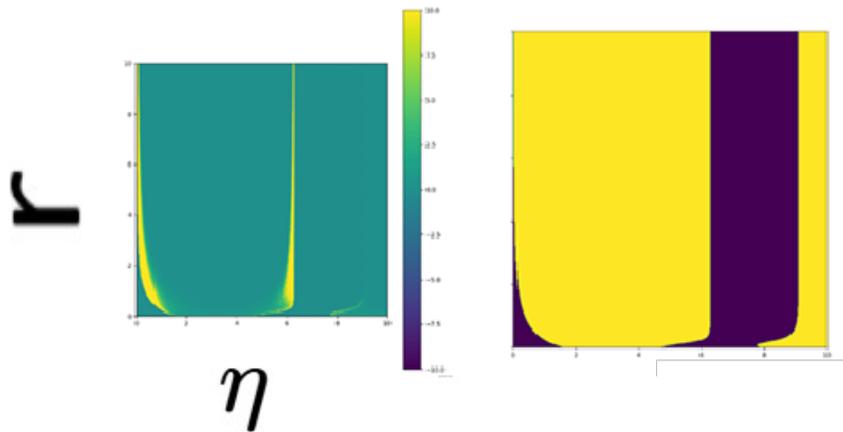
# Энергетические условия



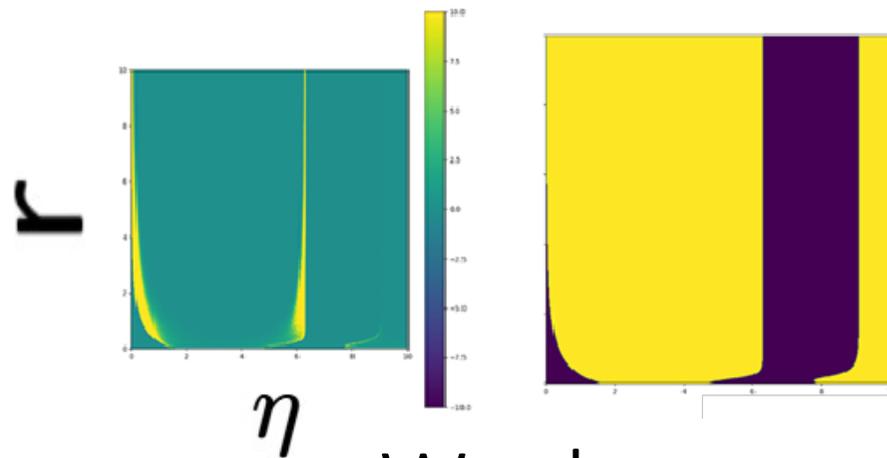
NEC



Dominant

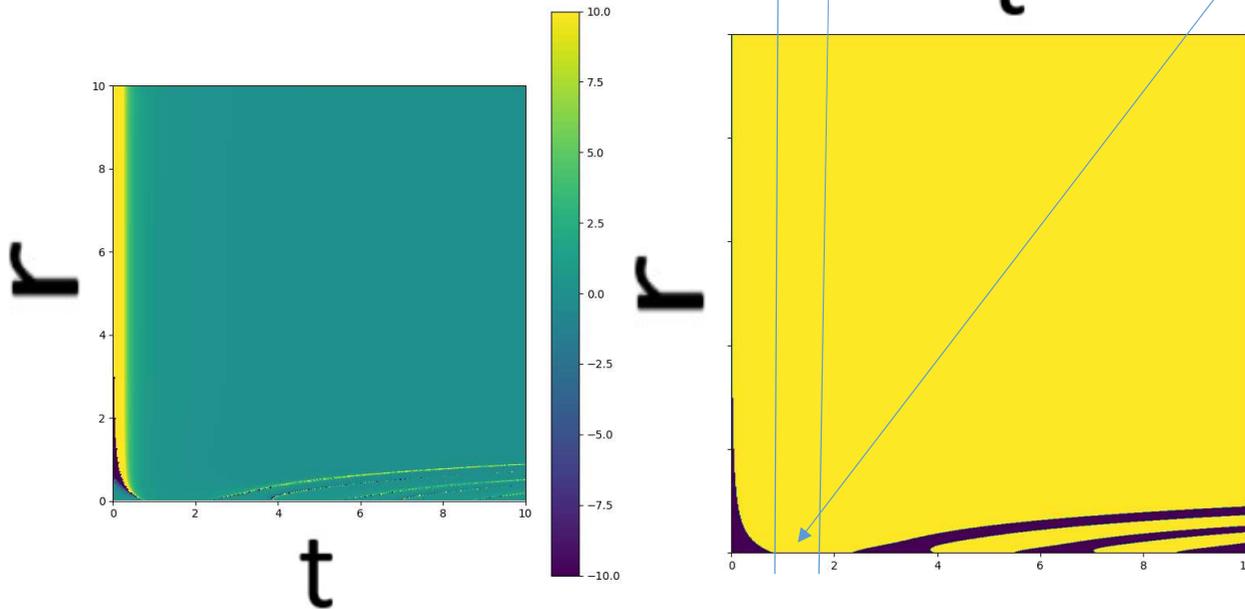


Strong

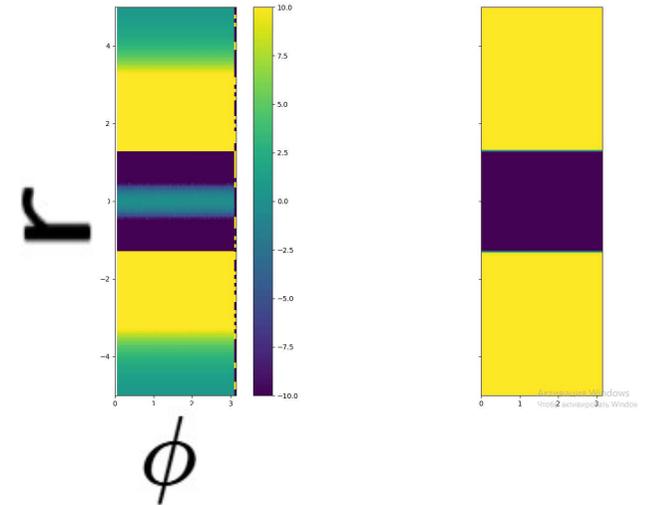


Weak

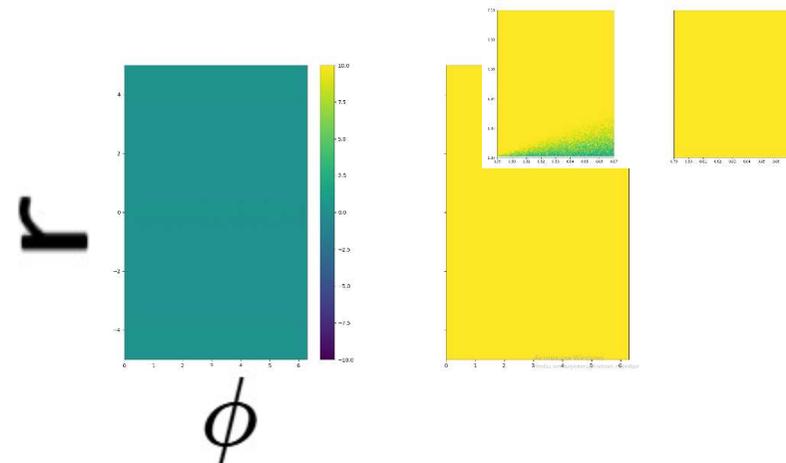
# В координатах (r, t)



Область времени когда везде все хорошо



Плохой момент времени



Хороший момент времени 12/16

- Существует диапазон времен, когда КН во время своей эволюции не нарушает энергетические условия
- Кротовая нора в данной метрике создается из сингулярности. Но что мешает создать КН другим механизмом? Важно лишь, создать в момент времени  $t_1$  нужное распределение вещества, а дальше эволюция должна пойти асимптотически по данной метрике.

# Эволюция во времени и проходимость



$q=0.5$   $b=0.5$   $k=0.5$

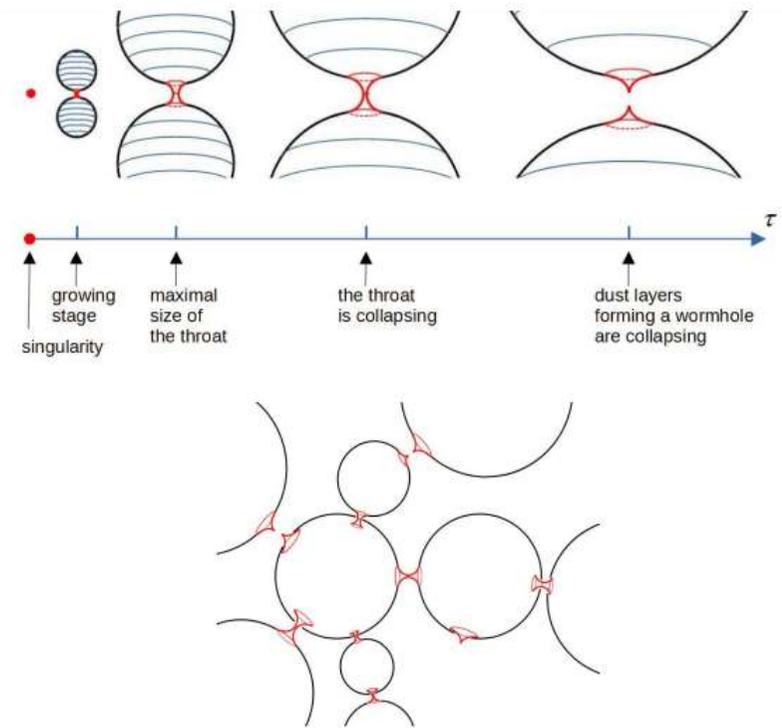


$q = 0.0$   
 $b = 0.5$   
 $k = 0.5$

- Красным – лучи проходящие в другую Вселенную
- Зеленым – лучи, упирающиеся в горизонт (для этой части картинке мы пока не уверены в том, как будет выглядеть изображение тени)

# Что интересно было бы посмотреть дальше?

- Можно ли создать данную метрику не из сингулярности?
- Численно посчитать динамику вещества, оценить стабильность
- Посмотреть могут ли быть у таких кротовых нор аккреционные диски
- Сравнить тени с черными дырами и другими кротовыми норами с точки зрения обнаружимости в будущих РСДБ наблюдениях с Миллиметроном - в первую очередь картину фотонных колец
- Попробовать сделать похожую метрику, но с обоими входами в нашей Вселенной (варп двигатель?)



# Выводы

- Работа в области гравитации (даже в рамках обычного ОТО) аналитическими методами тяжела, тяжело даже просто аккуратно проверить чужой, уже полученный результат. Численные методы позволяют подойти к проверке с очень простой стороны, однако методы основанные на разностных схемах имеют проблемы с точностью (иногда фатальные). Мы предлагаем новый численный подход, основанный символьных вычислениях, точность которого существенно превышает точность разностных схем, и, фактически, в пределе ничем не ограничена.
- Выполненная нами независимая проверка метрики Бронникова (2023) показывает, что проходимые кротовые норы, строго в рамках ОТО, без требования какой-либо экзотики – **Возможны!**
- Раз уж динамические кротовые норы возможны, то, быть может, найдутся похожие (не нарушающие энергетические условия) метрики и для варп двигателей? Что будет означать, что человечество, с практической стороны, не ограничено пределами нескольких ближайших звезд (а, может, и пределами наблюдаемой части Вселенной?)

Численные эксперименты в рамках ОТО, без каких-либо расширений – находятся сегодня в уникальной ситуации. Если что-то показано в рамках численного эксперимента – это точно будет работать в реальности. Т.е. **настоящий, физический эксперимент для подтверждения теоретических результатов - избыточен.**

Спасибо за внимание!