

# Big Bounce and Inflation from Spin and Torsion

Nikodem Popławski



RUSGRAV-17

St. Petersburg, Russia

July 1, 2020

# Большой отскок и космическая инфляция от спина и кручения

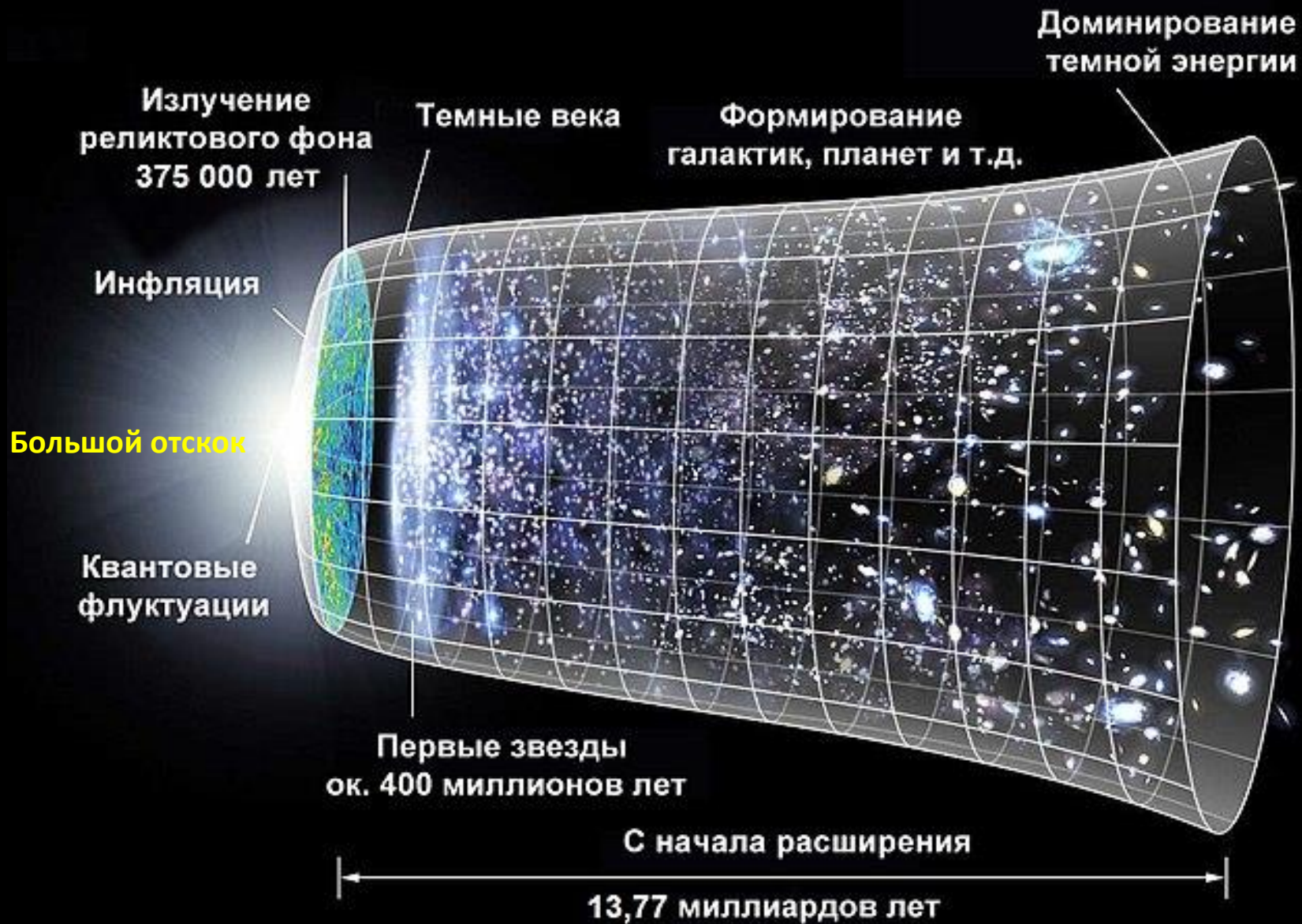
Никодем Поплавски



17 Российская Гравитационная Конференция

Санкт-Петербург, Россия

1 июля 2020 г.



# Проблемы общей теории относительности

Космология основана на общей теории относительности, которая описывает гравитацию как кривизну пространства-времени.

- Сингулярности: точки с бесконечной плотностью вещества.
- Несовместимо с квантовой механикой. Нам нужна квантовая гравитация. Это может решить проблему сингулярности.
- Уравнения поля содержат сохранение орбитального момента импульса, противоречащее уравнению Дирака, которое дает сохранение **полного момента импульса** (орбитальный + спин) и допускает спин-орбитальный обмен в квантовой механике.

Простейшее расширение ОТО, включающее спин:

**Теория Эйнштейна-Картана (Einstein-Cartan-Sciama-Kibble)**. Это может решить проблему сингулярности.

# Проблемы космологии большого взрыва и инфляции

- Сингулярность большого взрыва.
- Что вызвало большой взрыв? Что существовало раньше?
- Инфляция (экспоненциальное расширение ранней Вселенной) решает проблемы плоскостности и горизонта и предсказывает наблюдаемый спектр возмущений реликтового излучения . Что вызвало инфляцию? (гипотетические скалярные поля обычно используются).
- Как закончилась инфляция? Как избежать вечной инфляции?

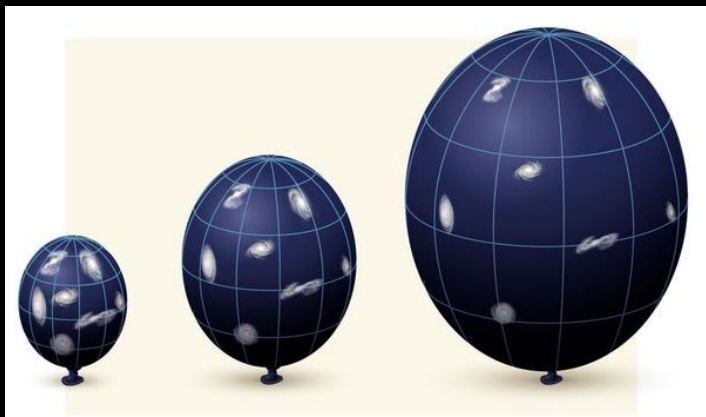
Теория Эйнштейна-Картана заменяет большой взрыв несингулярным **большой отскок**. Динамика после отскока может объяснить проблемы плоскостности и горизонта.

NP, PLB 694, 181 (2010).

# Закрытая Вселенная

Если Вселенная закрытая, она аналогична 2-мерной поверхности 3-мерной сферы. Вселенная была бы математически 3-мерной гиперповерхностью 4-мерной гиперсферы.

Точки от поверхности воздушного шара не находятся во Вселенной в этой аналогии.



*Image credit: One-Minute Astronomer*

Радиус воздушного шара = **масштаб** (scale factor)  $a$ .

Вселенная расширяется (закон Хаббла). Вселенная может быть конечной (закрытой) или бесконечный (плоский или открытый).

# Теория гравитации Эйнштейна-Картана-Сиама-Киббла (ЭКСК)

- **Тензор кручения (torsion tensor)** является переменной в дополнение к метрике. Тензор кручения является антисимметричной частью аффинной связности.

$$S^k_{ij} = \Gamma^k_{[ij]}$$

$$C^k_{ij} = 2S_{(ij)}^k + S^k_{ij}$$

- Ковариантная производная метрики обращается в нуль (как в ОТО), и связность имеет чисто метрическую часть и торсионную часть.

$$\Gamma^{\rho}_{\mu\nu} = \{\rho_{\mu\nu}\} + C^{\rho}_{\mu\nu}$$

- Плотность лагранжиана пропорциональна скаляру кривизны Риччи  $R$  (как в ОТО), построенному из связности. Тензор кривизны можно разложить в чисто метрическую часть (тензор Римана) и часть, которая содержит кручение и его производные.

$$R^{\lambda}_{\rho\mu\nu} = P^{\lambda}_{\rho\mu\nu} + C^{\lambda}_{\rho\nu;\mu} - C^{\lambda}_{\rho\mu;\nu} + C^{\sigma}_{\rho\nu} C^{\lambda}_{\sigma\mu} - C^{\sigma}_{\rho\mu} C^{\lambda}_{\sigma\nu}$$

- Вариация полного действия для гравитации и вещества по кручению дает уравнения поля Картана:

$$S_{jik} - S_i g_{jk} + S_k g_{ji} = -\frac{1}{2} \kappa s_{ikj}$$

$$\mathfrak{S}_{ij}{}^k = 2 \frac{\delta \mathcal{L}_m}{\delta C^{ij}{}_k}$$

Лагранжиан для поля Дирака содержит ковариантную производную спинора, содержащую кручение.

**Кручение** пропорционально плотности **спина** фермионов.

- Вариация по метрике дает уравнения Эйнштейна:

**Кривизна** пропорциональна плотности **энергии и импульса**.

Используя разложение по кривизне, их можно записать в виде ОТО с тензором энергии-импульса с квадратичными по спиновой плотности членами.

$$G^{ik} = \kappa T^{ik} + \frac{1}{2} \kappa^2 \left( s^{ij}{}_j s^{kl}{}_l - s^{ij}{}_l s^{kl}{}_j - s^{ijl} s^k{}_{jl} + \frac{1}{2} s^{jli} s_{jl}{}^k + \frac{1}{4} g^{ik} (2s_j{}^l{}_m s^{jm}{}_l - 2s_j{}^l{}_l s^{jm}{}_m + s^{jlm} s_{jlm}) \right)$$



# Теория гравитации ЭКСК

- ЭКСК значительно отличается от ОТО при плотностях  $> 10^{45}$  кг / м<sup>3</sup>. В вакууме снижается до ОТО. ЭКСК проходит все тесты, которые проводит ОТО.
- Частицы Дирака можно макроскопически усреднить как **спиновую жидкость** (spin fluid).

$$s^{\mu\nu\rho} = s^{\mu\nu}\omega^\rho$$

$$s^{\mu\nu}\omega_\nu = 0$$

$$s^2 = s^{\mu\nu}s_{\mu\nu}/2$$

$$s^2 = \frac{1}{8}(\hbar cn)^2$$

- Эффективная плотность энергии и давление  $\epsilon - ks^2/4$  и  $p - ks^2/4$ . Они нарушают энергетические условия на высоком  $s^2$  и избегают теорем сингулярности.
- Спин и кручение изменяют плотность энергии и давление с **отрицательным** членом, пропорциональным квадрату плотности числа фермионов  $n$ , действуя как **отталкивающая гравитация** (Kopczyński, Trautman, Hehl, Kuchowicz, Gasperini).

# Вселенная со спиновой жидкостью

- Мы предполагаем, что Вселенная закрыта, однородная и изотропная. Уравнения Эйнштейна-Картана становятся уравнения Фридмана для масштаба  $a$ .

$$\frac{\dot{a}^2}{c^2} + 1 = \frac{1}{3}\kappa\left(\epsilon - \frac{1}{4}\kappa s^2\right)a^2$$
$$\frac{\dot{a}^2 + 2a\ddot{a}}{c^2} + 1 = -\kappa\left(p - \frac{1}{4}\kappa s^2\right)a^2$$

- Для релятивистской материи уравнения Фридмана можно записать в терминах температуры:  $\epsilon \approx 3p \sim T^4$ ,  $n \sim T^3$ .

$$\frac{\dot{a}^2}{c^2} + 1 = \frac{1}{3}\kappa(h_*T^4 - \alpha h_{nf}^2T^6)a^2$$
$$\frac{\dot{a}}{a} + \frac{\dot{T}}{T} = 0$$

$$\alpha = \kappa(\hbar c)^2/32$$

# Вселенная со спиновой жидкостью

- Мы используем безразмерные количества, где критические значения соответствуют порядку Планка и зависят от количества частиц.

$$x = \frac{T}{T_{\text{cr}}} \quad y = \frac{a}{a_{\text{cr}}} \quad \tau = \frac{ct}{a_{\text{cr}}}$$
$$T_{\text{cr}} = \left( \frac{2h_{\star}}{3\alpha h_{\text{nf}}^2} \right)^{1/2} \quad a_{\text{cr}} = \frac{9\hbar c}{8\sqrt{2}} \left( \frac{\alpha h_{\text{nf}}^4}{h_{\star}^3} \right)^{1/2}$$

Уравнения Фридмана становятся:

$$\dot{y}^2 + 1 = (3x^4 - 2x^6)y^2$$
$$xy = C > 0$$

NP, ApJ 832, 96 (2016); G. Unger & NP, ApJ 870, 78 (2019)

# Генерация несингулярного отскока

$$\dot{y}^2 + 1 = \frac{3C^4}{y^2} - \frac{2C^6}{y^4}$$

$$y_{\pm}^2 = 3C^4 \left[ \frac{1 \pm \sqrt{1 - \frac{8}{9C^2}}}{2} \right]$$

Точки поворота ( $\dot{y} = 0$ ) для закрытой Вселенной с кручением положительны. Масштаб  $y$  не может достичь 0 - **никакой космологической сингулярности!**

$$C = aT / a_{cr} T_{cr}$$

2 точки поворота если  $C > (8/9)^{1/2}$

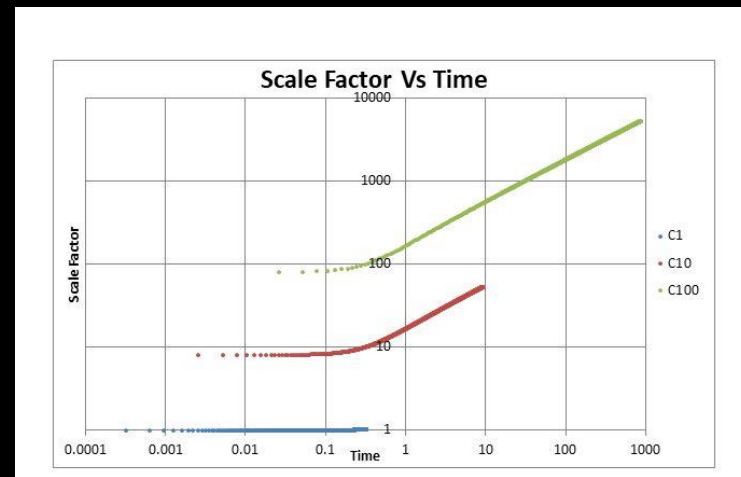
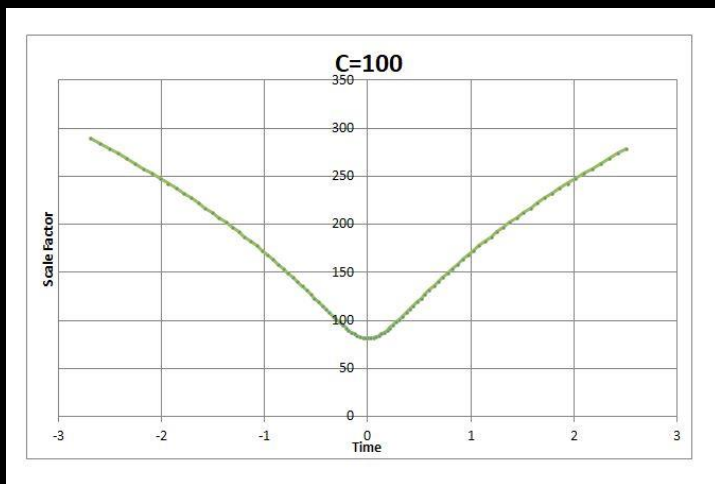
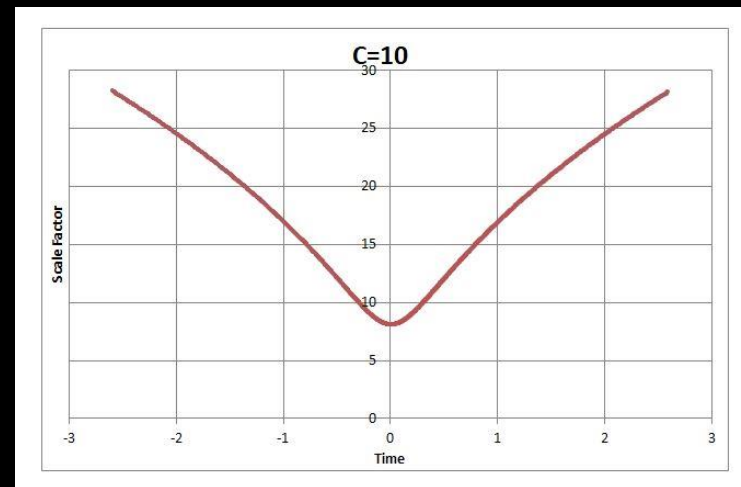
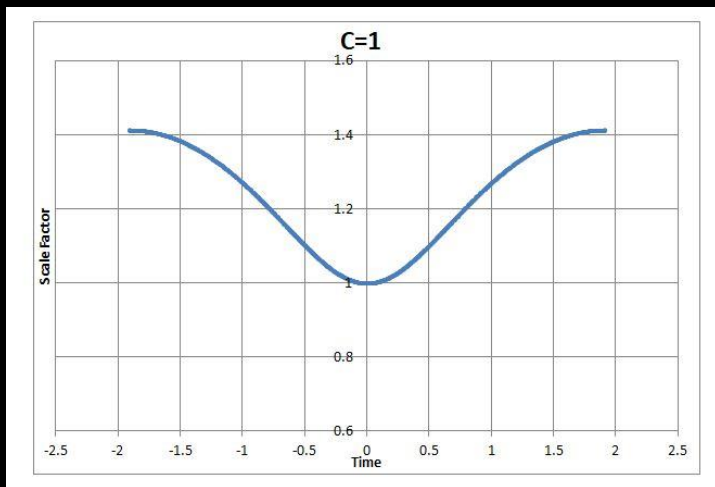
1 точка поворота если  $C = (8/9)^{1/2}$  -> стационарная Вселенная

0 точек поворота если  $C < (8/9)^{1/2}$  -> Вселенная не может существовать!

Закрытая Вселенная - **продукт  $aT$  имеет нижний предел.**

Плоская и открытая Вселенная - сингулярности также избегают, но нет ограничений на  $C$ .

# Генерация несингулярного отскока

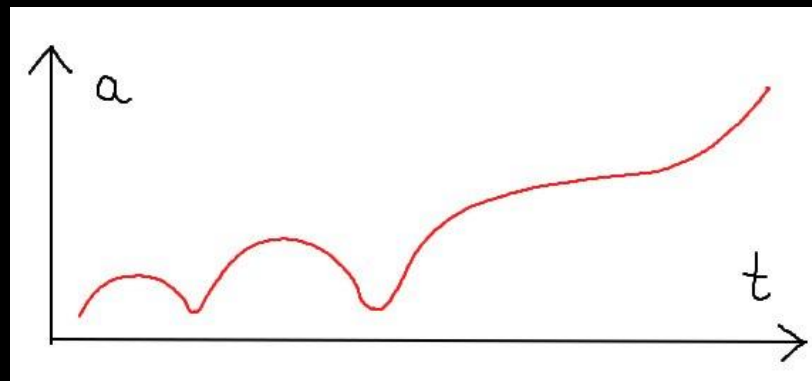


Предложение: Вселенная началась, когда  $C \sim 1$ . Производство квантового вещества увеличило значение  $C$  до  $> 10^{30}$ .

# Закрытая вселенная с космологической постоянной

Если у закрытой Вселенной недостаточно массы, она не достигнет размера, в котором доминирует космологическая постоянная, и рухнет на другой несингулярный отскок.

Образование квантовых частиц при скачке увеличивает массу во Вселенной. Вселенная может иметь несколько отскоков, пока не достигнет этого размера, а затем она расширится до бесконечности.



# Материальное производство вызывающее инфляцию

Вблизи отскока происходит образование частиц (Parker, Starobinsky, Zel'dovich). Размерные соображения дают производительность, пропорциональную  $H^4$ , с  $\beta$  в качестве параметра производства. Уравнения Фридмана дают:

$$\frac{\dot{a}^2}{c^2} + 1 = \frac{1}{3}\kappa(h_*T^4 - \alpha h_{nf}^2 T^6)a^2$$

$$\frac{\dot{a}}{a} \left[ 1 - \frac{3\beta}{c^3 h_{n1} T^3} \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^3 \right] = -\frac{\dot{T}}{T}$$

Чтобы избежать вечной инфляции: максимальное значение члена с термином  $\beta$  должно быть ниже 1. Это условие дает верхний предел:  $\beta < \beta_{cr} \approx 1/929$ .

NP, ArJ 832, 96 (2016)

# Материальное производство вызывающее инфляцию

$$\frac{\dot{a}}{a} \left[ 1 - \frac{3\beta}{c^3 h_{n1} T^3} \left( \frac{\dot{a}}{a} \right)^3 \right] = -\frac{\dot{T}}{T}$$

Для  $\beta \approx \beta_{cr}$  и во время фазы расширения, когда  $H = \dot{a}/a$  достигает максимума, член с  $\beta$  немного меньше 1.

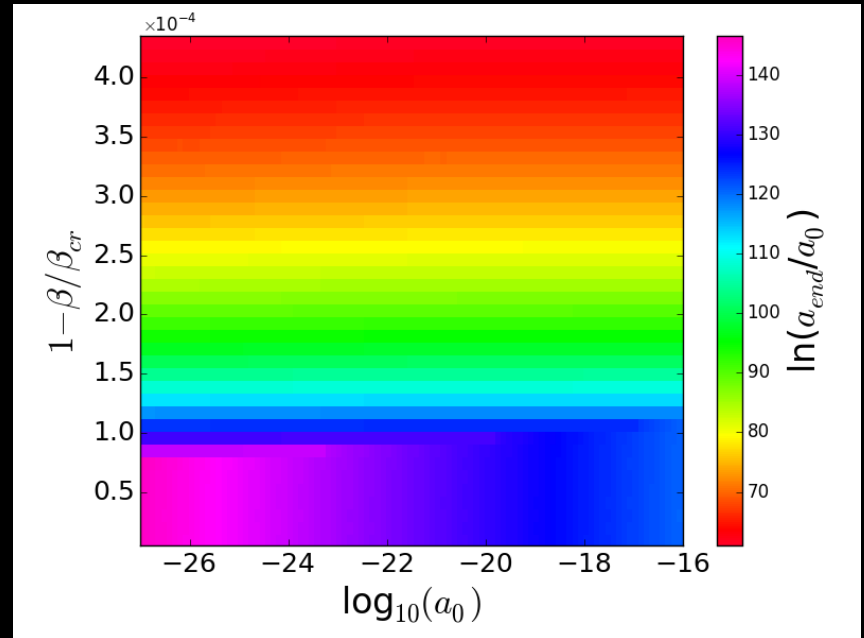
Следовательно, температура практически постоянна. Из уравнения Фридмана для энергии параметр Хаббла почти постоянен.

**Экспоненциальное** расширение и увеличение массы продолжают около времени Планка, затем  $H$  и  $T$  уменьшаются. Кручение становится слабым, инфляция **заканчивается** и начинается эпоха радиационного доминирования. Скалярные поля не нужны.



- Количество отскоков (пока Вселенная не достигнет равенства излучения и вещества) зависит от образования частиц, но не слишком чувствительно к начальному масштабу.
- Большой взрыв был последним отскоком (большой отскок).

$\beta/\beta_{cr}$	Number of bounces
0.996	1
0.984	2
0.965	3
0.914	5
0.757	10

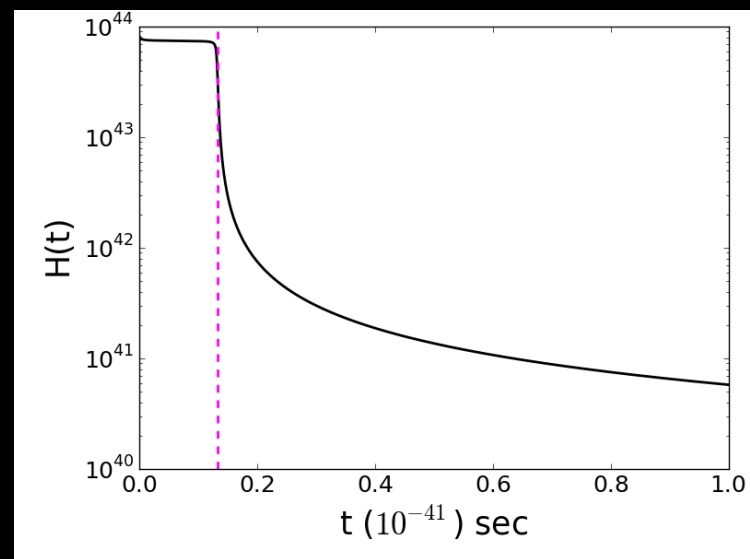
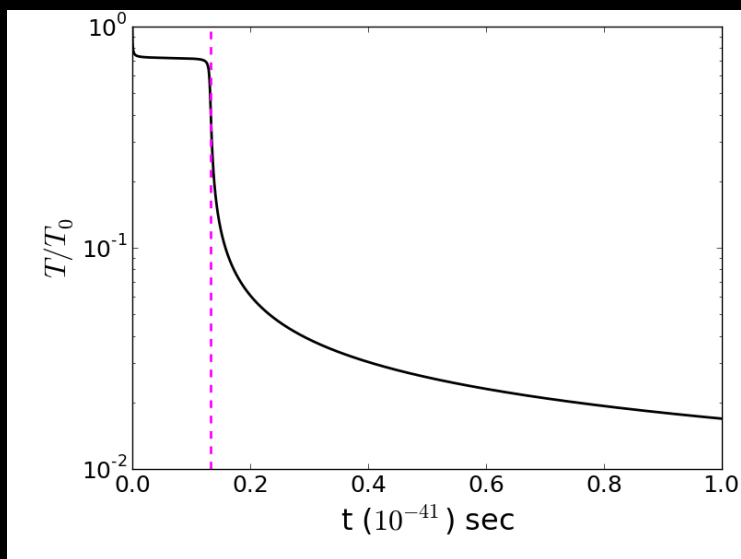
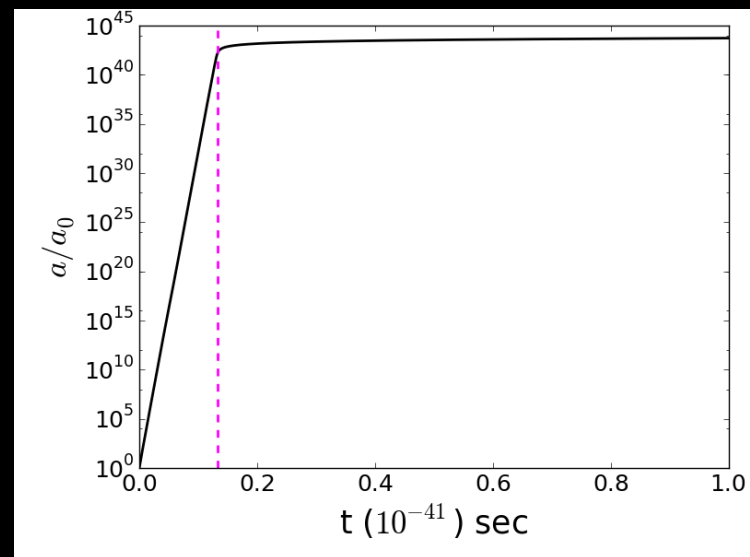


S. Desai & NP, PLB 755, 183 (2016)

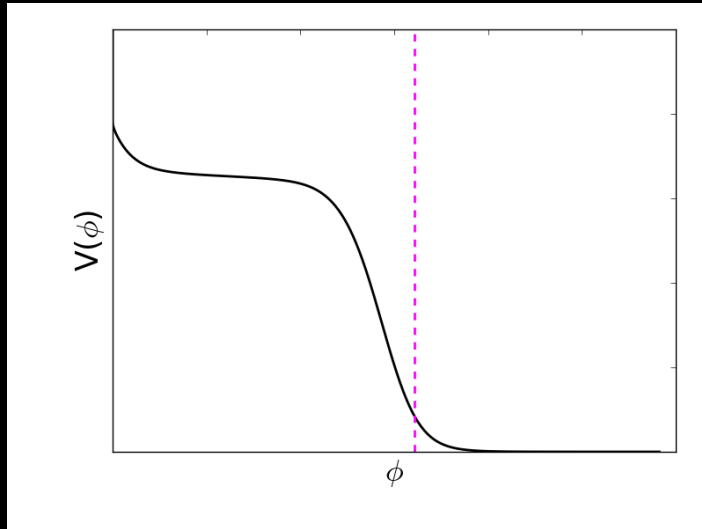
Динамика очень ранней  
Вселенной с:

$$\beta/\beta_{cr} = 0.9998$$

Начальный масштаб  
 $a_0 = 10^{-27}$  m



Можно численно найти потенциал скалярного поля, который генерирует такую же временную зависимость масштаба.



$$\beta/\beta_{cr} = 0.9998$$

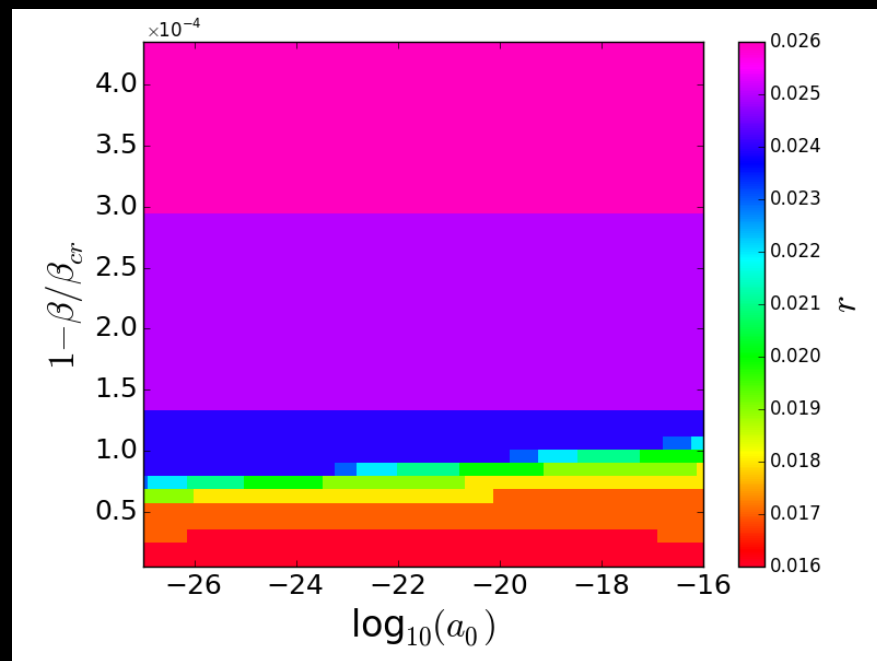
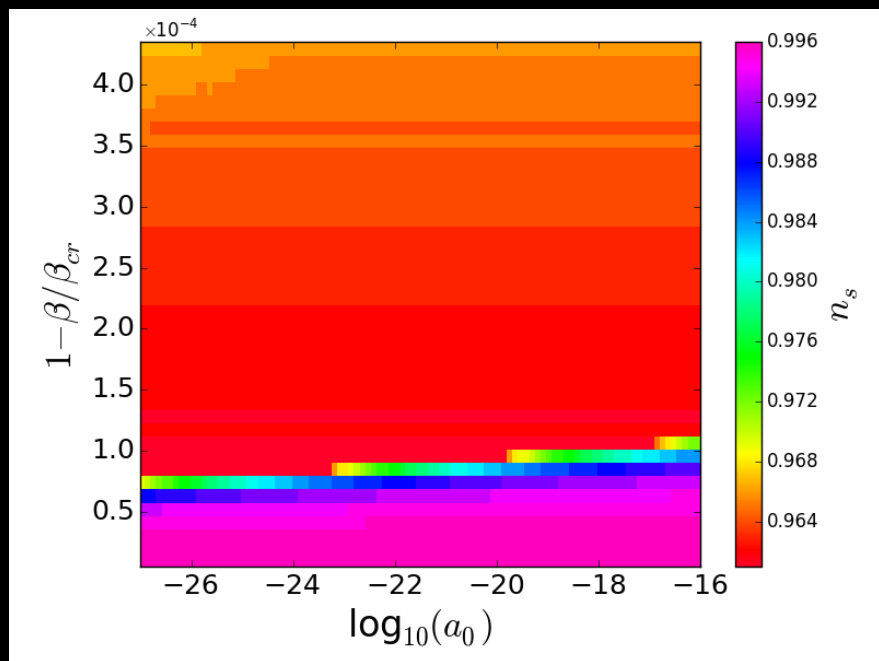
**Платообразный** потенциал – одобрен Planck 2013.

Модели инфляции на плато скалярного поля: проблема начальных условий, вечная инфляция, вероятность (по сравнению со степенным), несколько параметров:

[Ijjas, Steinhardt & Loeb, PLB 723, 261 \(2013\).](#)

Космология с кручением позволяет избежать этих проблем только с одним параметром.

Из эквивалентного скалярного потенциала можно вычислить параметры, которые измеряются в реликтовом излучении.



В соответствии с Planck 2015:  
 $n_s = 0.968 \pm 0.006$ ,  $r < 0.12$

Не слишком чувствителен к начальному масштабу.

# Каждая черная дыра создает новую вселенную?

Закрытая Вселенная, возможно, возникла изнутри черной дыры, существующей в родительской вселенной, когда  $C > (8/9)^{1/2}$ .

Соответственно, каждая черная дыра может создать новую закрытую детскую вселенную: Novikov; Pathria; Hawking; Frolov, Markov, Mukhanov (предельная кривизна); Smolin, NP (кручение).

Эта гипотеза должна решить информационный парадокс черной дыры: информация проходит через **мост Эйнштейна-Розена** в детскую вселенную по другую сторону горизонта событий черной дыры.

Движение через горизонт событий только одно: оно определяет прошлое и будущее. Временная асимметрия на горизонте событий может вызвать асимметрию времени повсюду в детской вселенной и объяснить, почему время течет в одном направлении.

## Подтверждения:

University Research Scholar program at University of New Haven

Dr. Shantanu Desai

Gabriel Unger, Jordan Cubero (students)

## Библиография:

Kibble, JMP 2, 212 (1961)

Sciama, RMP 36, 463 (1964)

Hehl, von der Heyde & Kerlick, PRD 10, 1066 (1974)

Frolov, Markov & Mukhanov, PLB 216, 272 (1989)

Ellis & Madsen, CQG 8, 667 (1991)

NP, arXiv:0911.0334; PLB 690, 73 (2010)

NP, PLB 687, 110 (2010); PLB 694, 181 (2010); GRG 44, 1007 (2012);

PRD 85, 107502 (2012); IJMPD 27, 1847020 (2018); MPLA 33, 1850236 (2018);

Cubero & NP, CQG 37, 025011 (2020)

NP, ApJ 832, 96 (2016); Desai & NP, PLB 755, 183 (2016); Unger & NP, ApJ 870, 78 (2019)

# Резюме

- The conservation law for total angular momentum (orbital + spin) in curved spacetime, consistent with Dirac equation, requires torsion.
- The simplest theory with torsion, Einstein-Cartan gravity, has the same Lagrangian as GR, but the affine connection contains the torsion tensor (which GR assumed to be zero).
- We assumed that the early Universe is classical (with modifications from quantum spin), homogeneous, and isotropic (on large scales).
- Torsion is strong only at extremely high densities and manifests itself as gravitational repulsion that may avoid the formation of singularities. The Big Bang is replaced by a nonsingular Big Bounce.
- Particle production after a bounce can generate a finite period of inflation which ends when torsion becomes weak. No hypothetical fields are needed. The dynamics is plateau-like and supported by the Planck data.

Будущая работа: исследуйте, как присутствие **анизотропии** влияет на избежание сингулярностей, и проанализируйте происхождение **первичных колебаний**.