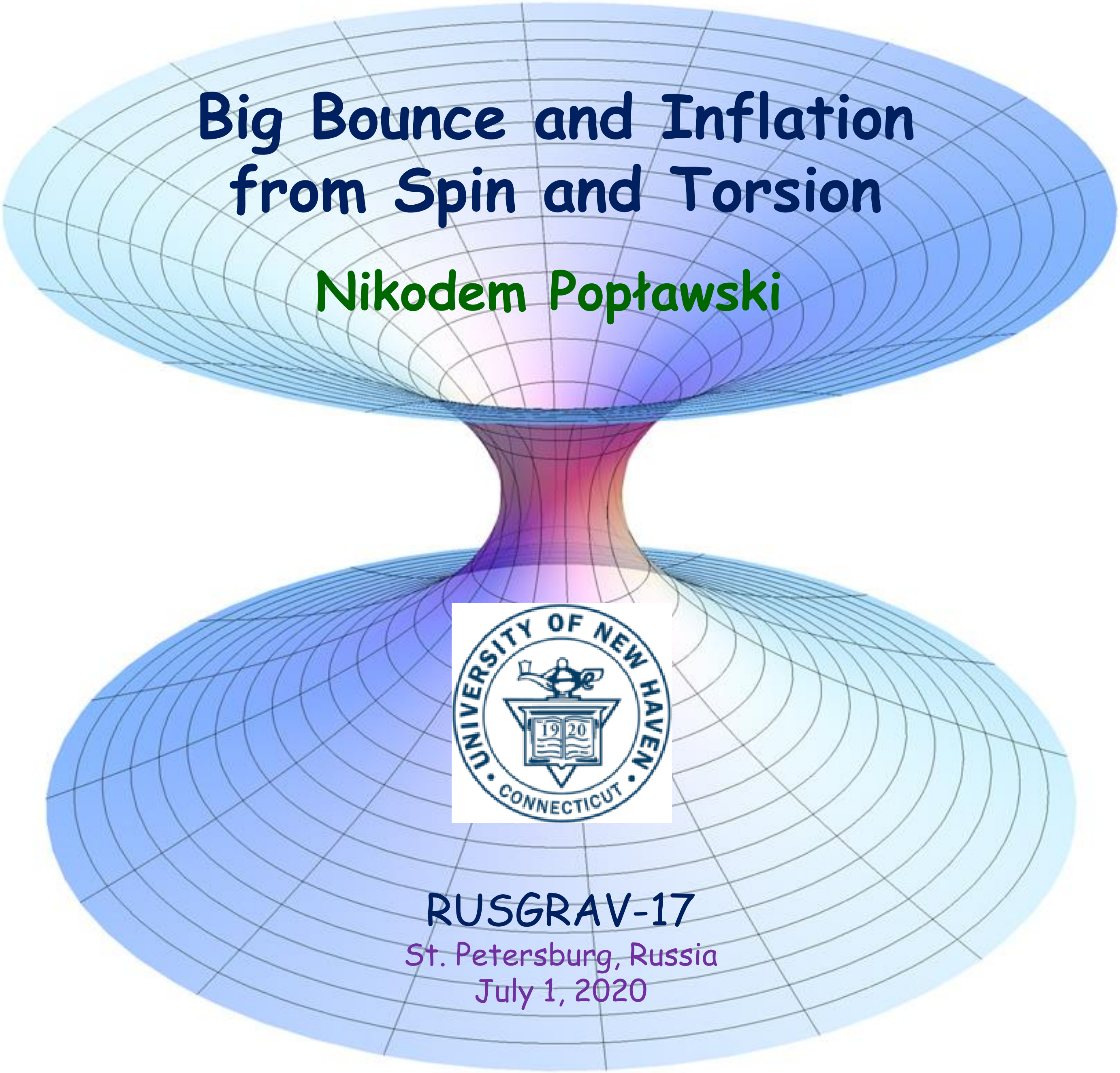
Big Bounce and Inflation from Spin and Torsion

Nikodem Popławski



RUSGRAV-17

St. Petersburg, Russia

July 1, 2020

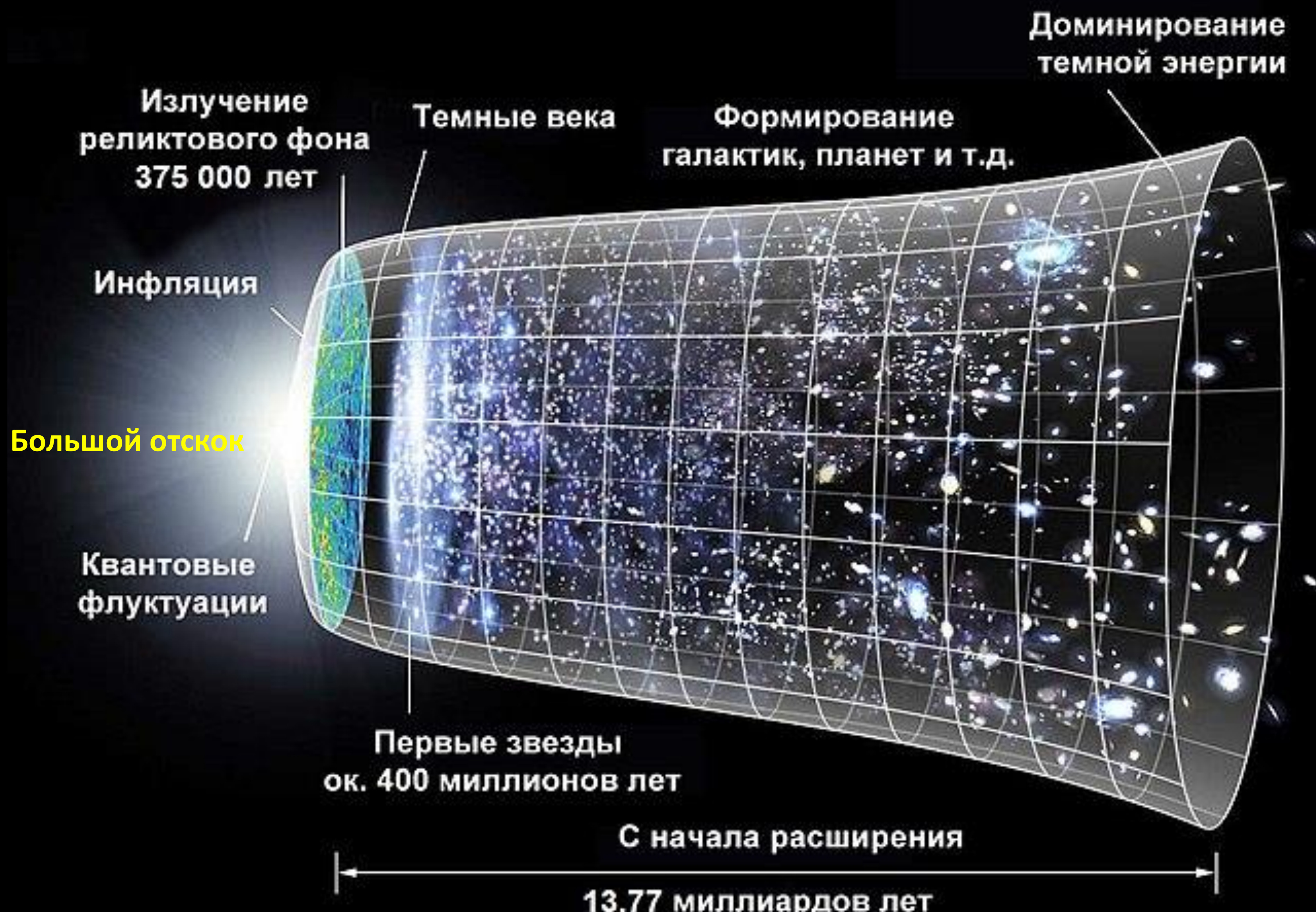
Большой отскок и космическая инфляция от спина и кручения

Никодем Поплавски

17 Российская Гравитационная Конференция

Санкт-Петербург, Россия

1 июля 2020 г.


Доминирование
темной энергии
Излучение
реликтового фона
375 000 лет
Темные века
Формирование
галактик, планет и т.д.
Инфляция
Большой отскок
Квантовые
флуктуации
Первые звезды
ок. 400 миллионов лет
С начала расширения
13,77 миллиардов лет

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.

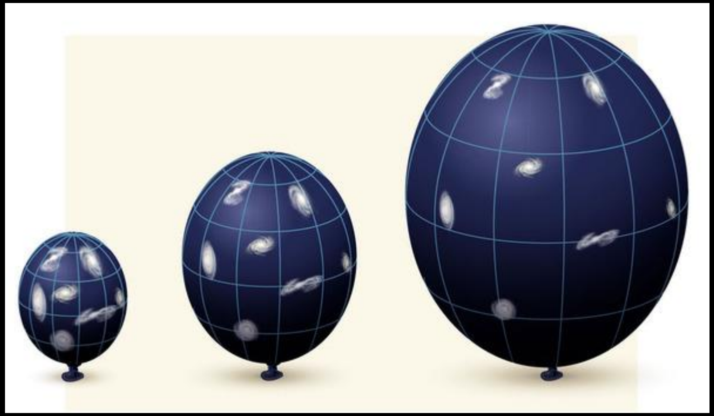


Image credit: One-Minute Astronomer

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-Сиамы-Киббла (ЭКСК)

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

$$S^k{}_{ij} = \Gamma^{\,k}_{[i\,j]} \qquad C^k{}_{ij} = 2S_{(ij)}{}^k + S^k{}_{ij}$$

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

$$\Gamma^{\,\rho}_{\mu\,\nu} = \left\{{}^{\,\rho}_{\mu\,\nu}\right\} + C^\rho{}_{\mu\nu}$$

- 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.

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

Теория гравитации ЭКСК

arXiv.org > gr-qc > arXiv:0911.0334

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

$$S_{jik} - S_i g_{jk} + S_k g_{ji} = -\frac{1}{2}\kappa s_{ikj} \qquad \mathfrak{S}_{ij}{}^{k} = 2\frac{\delta \mathfrak{L}_{\mathrm{m}}}{\delta C^{ij}{}_{k}}$$

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^3. В вакууме снижается до ОТО. ЭКСК проходит все тесты, которые проводит ОТО.

- Частицы Дирака можно макроскопически усреднить как спиновую жидкость (spin fluid).

$$s^{\mu\nu\rho} = s^{\mu\nu}u^{\rho} \qquad s^{\mu\nu}u_{\nu} = 0 \qquad s^2 = s^{\mu\nu}s_{\mu\nu}/2 \qquad s^2 = \frac{1}{8}(\hbar c n)^2$$

- Эффективная плотность энергии и давление $\varepsilon - \kappa s^2/4$ и $p - \kappa s^2/4$. 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: $\varepsilon \approx 3p \sim T^4$, $n \sim T^3$.

$$\frac{\dot{a}^2}{c^2} + 1 = \frac{1}{3}\kappa(h_\star T^4 - \alpha h_{n\mathrm{f}}^2 T^6)a^2$$

$$\frac{\dot{a}}{a} + \frac{\dot{T}}{T} = 0$$

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

Вселенная со спиновой жидкостью

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

$$x = \frac{T}{T_{\rm cr}} \quad y = \frac{a}{a_{\rm cr}} \quad \tau = \frac{ct}{a_{\rm cr}}$$

$$T_{\rm cr} = \left(\frac{2h_\star}{3\alpha h_{nf}^2}\right)^{1/2} \quad a_{\rm cr} = \frac{9\hbar c}{8\sqrt{2}}\left(\frac{\alpha h_{nf}^4}{h_\star^3}\right)^{1/2}$$

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

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

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

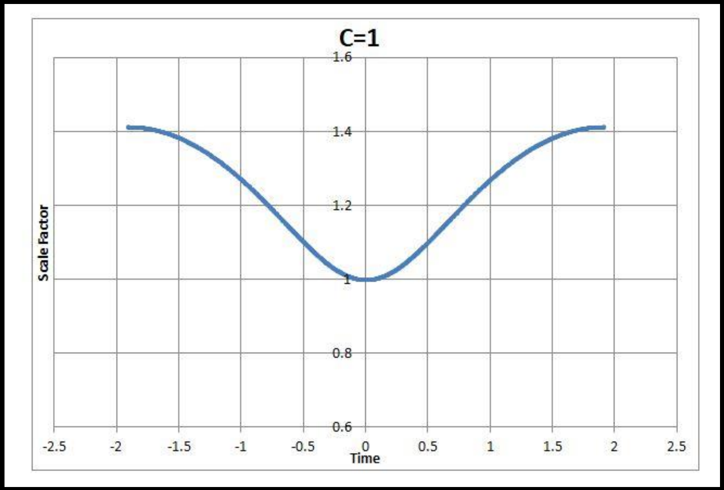
Точки поворота ($\dot{y} = 0$) для закрытой Вселенной с кручением положительны. Масштаб y не может достичь 0 - **никакой космологической сингулярности!**

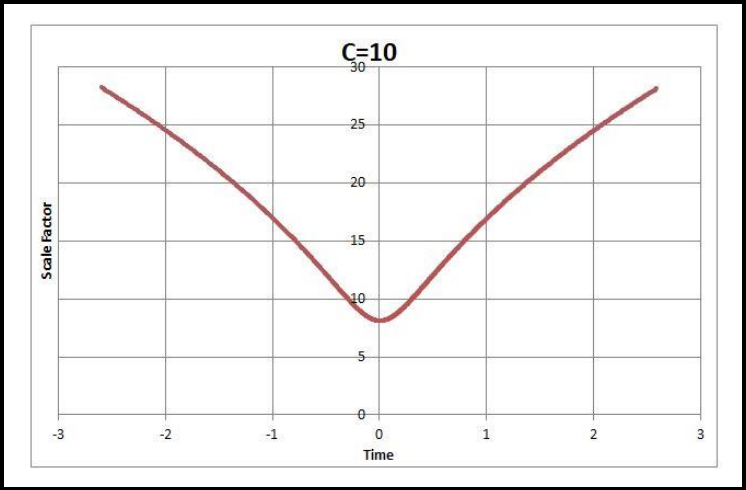
$C = aT / a_{cr}T_{cr}$

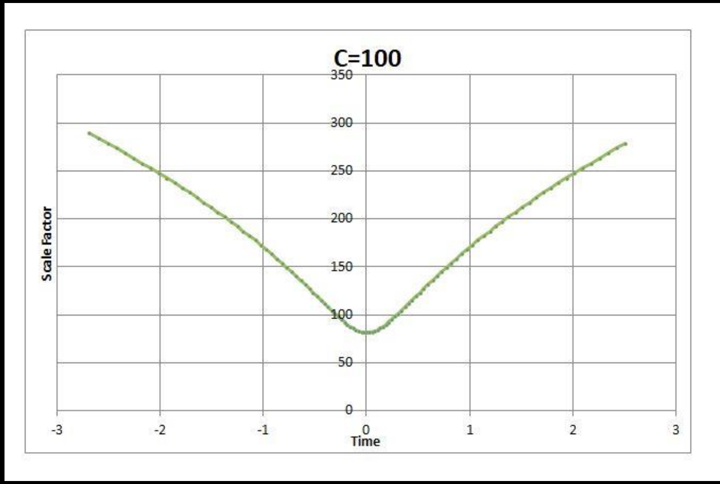
2 tочки поворота если $C > (8/9)^{1/2}$
1 tочка поворота если $C = (8/9)^{1/2}$ -> стационарная Вселенная
0 точек поворота если $C < (8/9)^{1/2}$ -> Вселенная не может существовать!

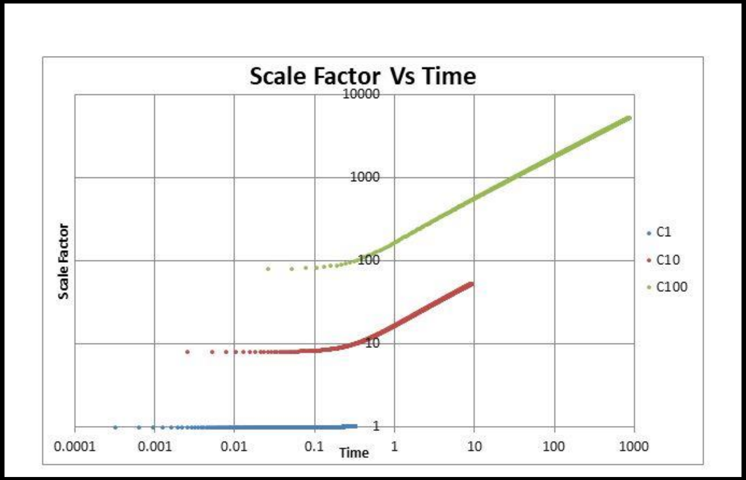
Закрытая Вселенная - продукт aT имеет нижний предел.
Плоская и открытая Вселенная - сингулярности также избегают, но нет ограничений на C.

Генерация несингулярного отскока







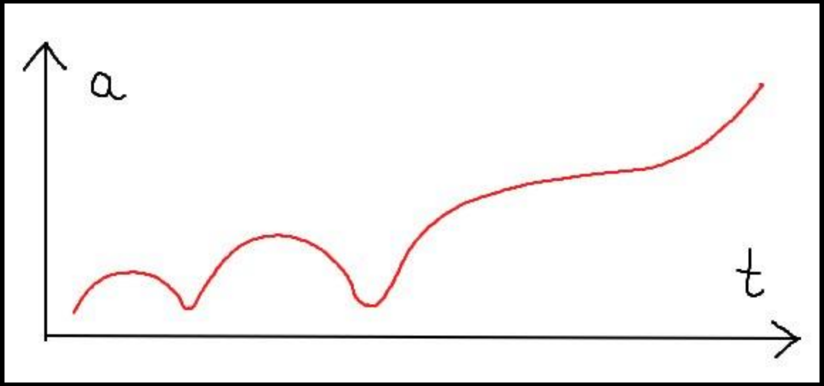


Предложение: Вселенная началась, когда *C* ~ 1. Производство квантового вещества увеличило значение *C* до > 10^{30}.

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 β в качестве параметра производства. Уравнения Фридмана дают:

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

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

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

NP, ApJ 832, 96 (2016)

Материальное производство вызывающее инфляцию

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

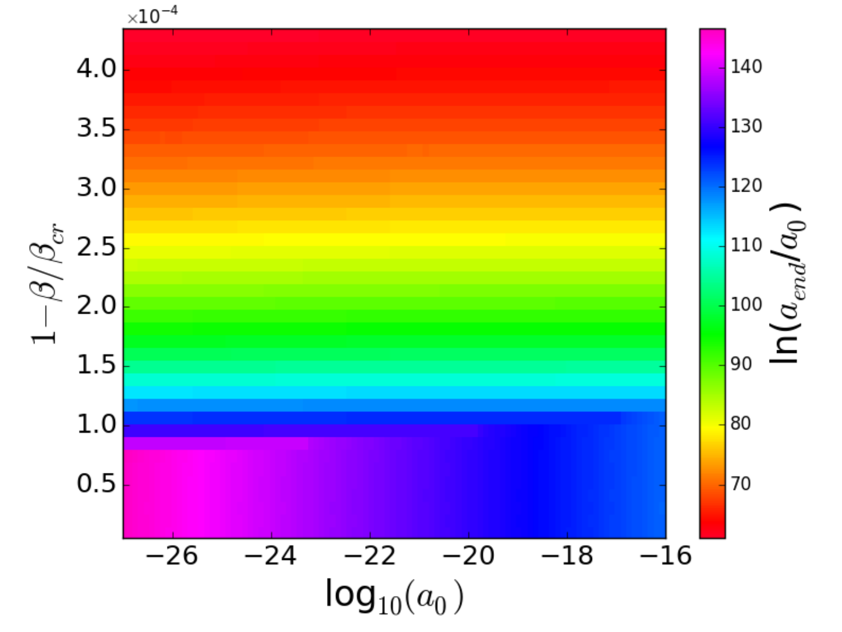
Для $\beta \approx \beta_{cr}$ и во время фазы расширения, когда $H = \dot{a}/a$ достигает максимума, член с β немного меньше 1.

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

Экспоненциальное расширение и увеличение массы продолжаются 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).

β/β_{cr}	Number of bounces
0.996	1
0.984	2
0.965	3
0.914	5
0.757	10

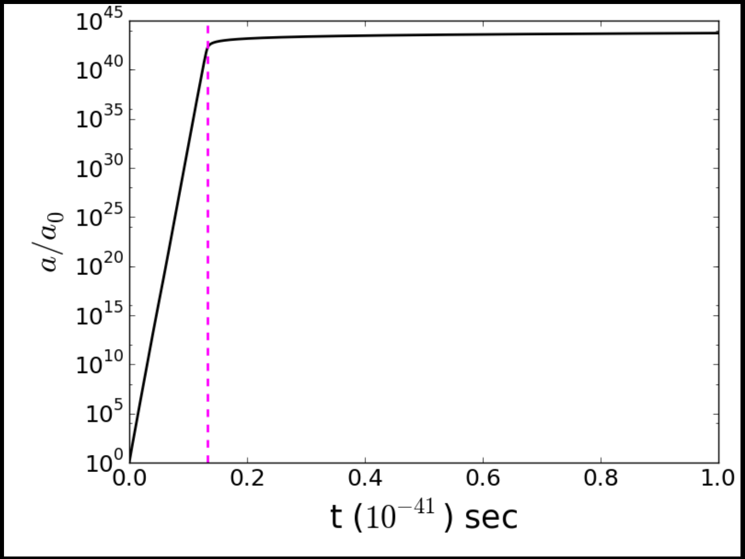


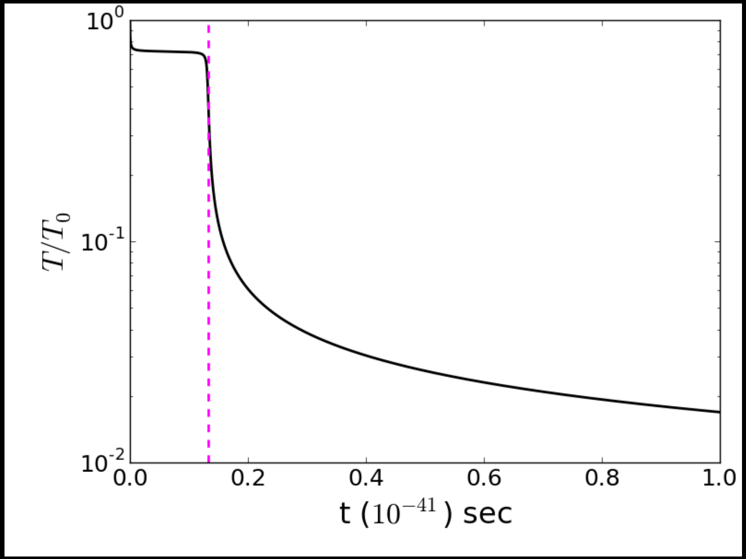
S. Desai & NP, PLB 755, 183 (2016)

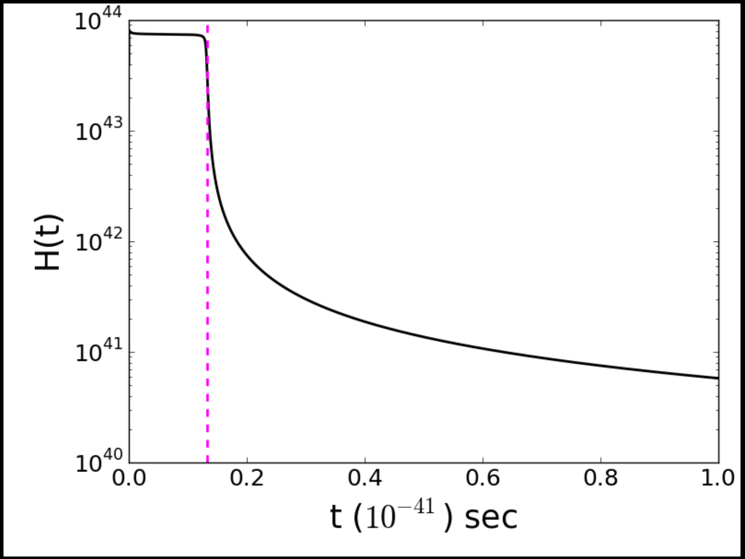
Динамика очень ранней Вселенной с:

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

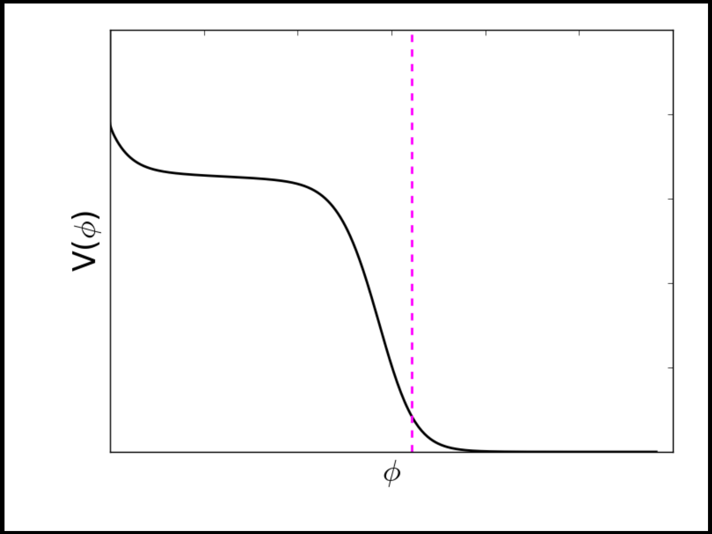
Начальный масштаб $a_0 = 10^{-27}$ m







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

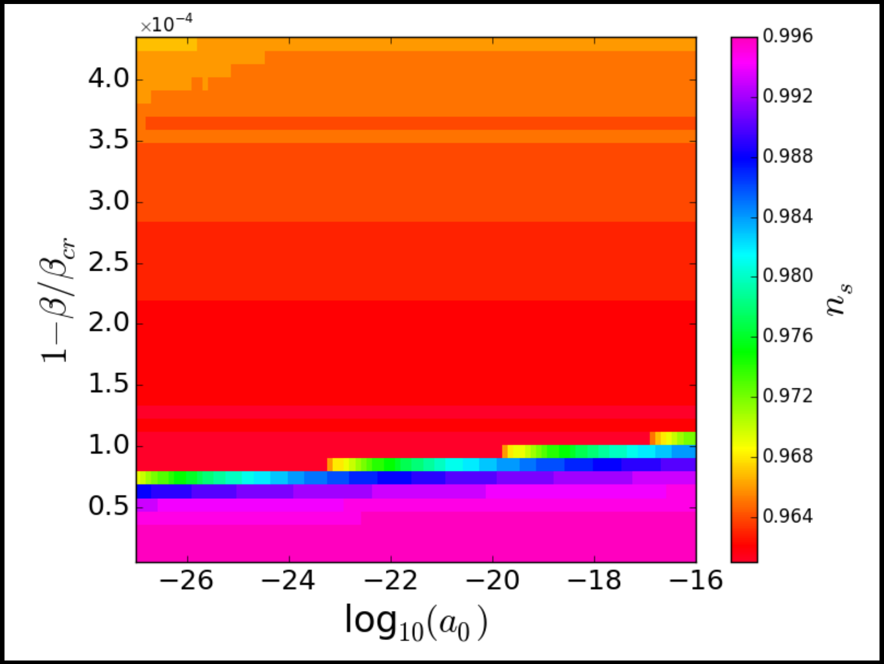


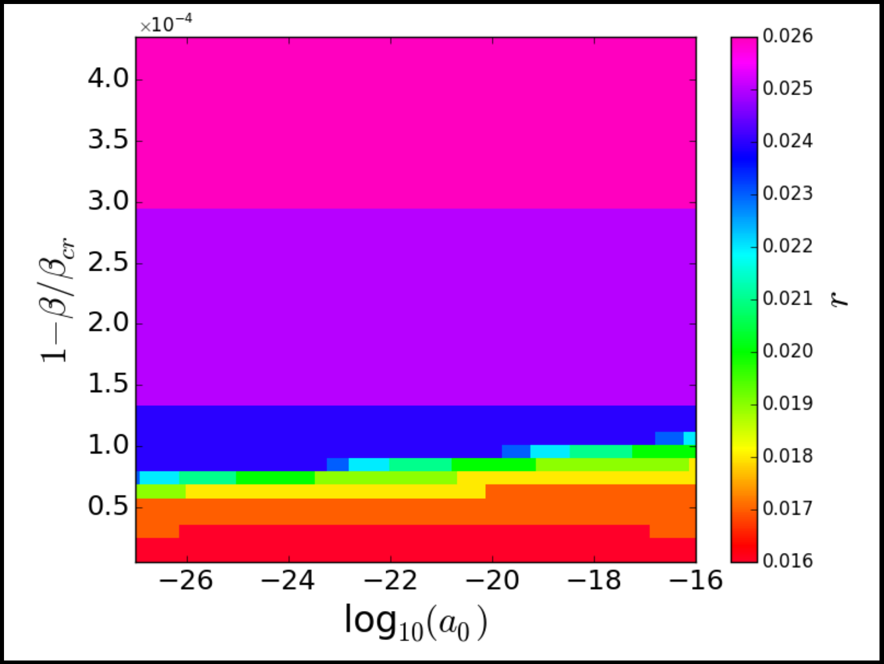
$\beta/\beta_{cr} = 0.9998$

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.