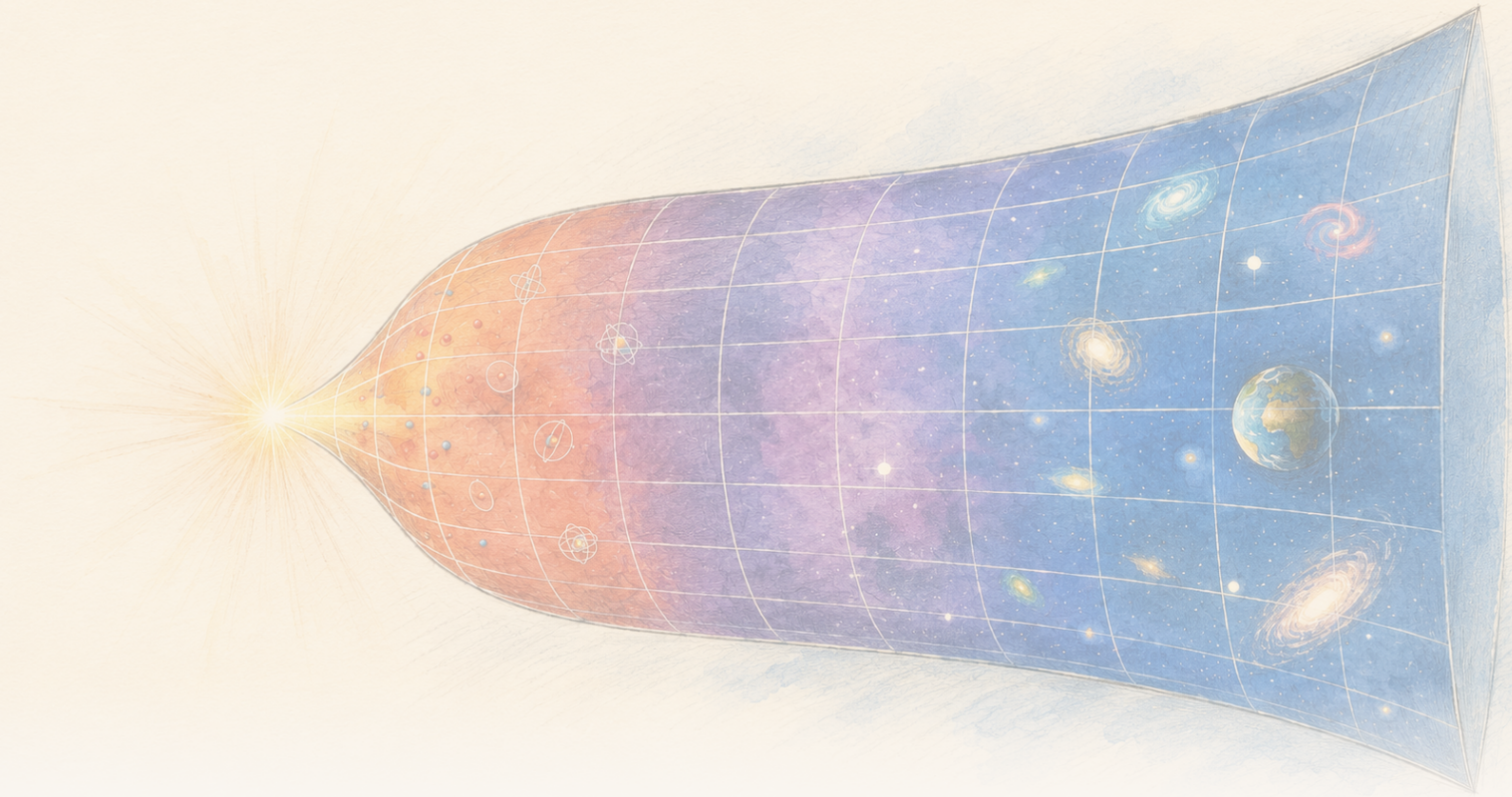

The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

В модели гравитации на основе энтропии локальная плотность энтропии падает, а полная растёт

Статья в Physical Review D выводит температуры, давления и первый закон внутри Gravity From Entropy — предлагаемой модифицированной теории гравитации. В поздневременном приближении Фридмана с малой кривизной локальные плотности энтропии и энергии модели падают, тогда как расширение заставляет полную энтропию расти. Вычисление внутренне конкретно, но условно: космологии Фридмана не являются точными решениями полной теории, а результат не служит наблюдательным доказательством происхождения гравитации из энтропии, объяснением измеренной тёмной энергии или завершённой теорией квантовой гравитации.

Written by Laura Nesso · Cross-checked by Cinzia Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of the gravity from entropy theory*, Ginestra Bianconi, Physical Review D 114, 024042 (2026) · DOI: 10.1103/26kn-thgp

Растущий объём может снижать плотность и одновременно увеличивать полное количество

Если в этой модели плотность энтропии падает при расширении Вселенной, как её полная энтропия всё же может расти?

Представьте расширяющуюся Вселенную, разделённую на маленькие ячейки. Количество чего-либо в каждой ячейке может уменьшаться, даже если общее количество во всей растущей области увеличивается. Снижение плотности и рост полного количества не противоречат друг другу, если меняется сам объём.

Этот простой вопрос о том, как соотносятся плотность и полный объём, лежит в основе гораздо более амбициозной теоретической работы. В Physical Review D математический физик Джинестра Бьянкони развивает термодинамическое описание **Gravity From Entropy** (GfE, «гравитация из энтропии») — недавно предложенной модели, в которой гравитация кодируется информационно-теоретическим отношением между материей и геометрией. Здесь «информационно-теоретический» означает, что модель начинается с математической меры различия двух описаний геометрии: физической геометрии и геометрии, индуцированной материей и кривизной.

В статье выводятся локальные величины, называемые k-энтропиями, k-энергиями, k-температурами и k-давлениями. Префикс k разделяет разные геометрические секторы модели; это не разные вещества и не космические эпохи. Связь между ними имеет ту же форму, что и первый закон термодинамики: изменение энергии равно температуре, умноженной на изменение энтропии, минус давление, умноженное на изменение объёма.

$$\delta\epsilon_k = \theta_k\,\delta s_k - \pi_k\,\delta v$$

Затем статья вычисляет эти величины для расширяющихся космологий Фридмана — стандартных идеализированных вселенных, однородных и изотропных на больших масштабах. В низкоэнергетическом режиме малой кривизны в примерах, где доминируют материя или излучение, локальные плотности энтропии и энергии уменьшаются, но расширение даёт достаточно дополнительного объёма, чтобы полная энтропия росла. Полная энергия в ведущем порядке приближается к постоянной — то есть если сохранить доминирующий при больших временах член и отбросить члены, затухающие быстрее.

Это ясный математический результат. Не менее важна его граница: вычисление выполнено **внутри одной предлагаемой теории**, а космологии Фридмана, использованные для конкретных примеров, являются только **приближёнными**, а не точными решениями полных уравнений GfE. Эти уравнения движения получают вариацией предложенного действия GfE; они включают динамическое G-поле и геометрические секторы более высокого порядка, отсутствующие в обычных уравнениях Фридмана. Статья не наблюдает, как энтропия порождает гравитацию, не идентифицирует тёмную энергию

нашей Вселенной и не завершает теорию квантовой гравитации.

Что предполагает Gravity From Entropy

Общая теория относительности описывает гравитацию через геометрию пространства-времени. Материя сообщает пространству-времени, как искривляться, а кривизна сообщает материи, как двигаться. GfE начинается с другого предлагаемого действия: связанные с метрикой объекты рассматриваются как квантовые операторы, а лагранжиан строится из **геометрической квантовой относительной энтропии** (GQRE).

> **Три термина за 120 секунд**
>
> **Квантовый оператор** — математическое правило, действующее на квантовое состояние и представляющее величину или преобразование. GfE предполагает, что связанные с метрикой объекты можно рассматривать таким образом; статья не требует от читателя воспроизводить эту конструкцию.
> **Лагранжиан** — компактный математический рецепт динамики теории. Его интегрируют по пространству-времени, получая действие, а затем варьируют действие, чтобы вывести уравнения поля.
> **GQRE** — выбранный в GfE специфический лагранжиан модели. Он адаптирует идею квантовой относительной энтропии для сравнения физической метрики с метрикой более высокого порядка, индуцированной материей и кривизной. Название «энтропия» не превращает его в обычную тепловую энтропию.

Относительная энтропия обычно измеряет различимость двух распределений вероятности или квантовых состояний. В GfE сравниваются физическая метрика и метрика более высокого порядка, индуцированная материей и кривизной. «Более высокого порядка» не означает дополнительные измерения пространства-времени. Это означает, что модель объединяет скалярные, вектороподобные и бивектороподобные геометрические секторы в один расширенный объект. Динамическое **G-поле** связывает эти компоненты и «одевает» метрику, используемую и в гравитационной, и в материальной частях модели. Конструкция устроена так, чтобы в низкоэнергетическом пределе малой кривизны её действие переходило в действие Эйнштейна—Гильберта общей теории относительности плюс действие материи.

Последнюю фразу легко прочитать слишком широко. Восстановление уравнений Эйнштейна в определённом пределе — проверка согласованности предложения. Оно не показывает, что природа использует более крупную теорию вне этого предела.

Уравнения поля GfE также содержат динамический член, который схема называет **возникающим эффективным членом тёмной энергии**. В этой статье Бьянкони отождествляет плотность внутренней энергии модели с этим членом. «Эффективная тёмная энергия» описывает его роль в уравнениях. Это не эмпирическое отождествление

с тёмной энергией, выводимой из космологических наблюдений.

> **Три разных значения слова «энтропия»**
>
> **Обычная термодинамическая энтропия** считает, сколько микроскопических конфигураций могут давать одно макроскопическое состояние. **Квантовая относительная энтропия** измеряет различимость двух квантовых состояний. **GQRE** в этой статье — специфическая для модели геометрическая конструкция, вдохновлённая относительной энтропией и используемая как гравитационный лагранжиан. Сходные названия не делают эти величины взаимозаменяемыми; связи, которые использует статья, выводятся внутри GfE.

Точный термодинамический результат внутри модели

Сначала статья работает на уровне самой схемы GfE. Для каждого порядка и типа геометрической степени свободы, индексируемого k, она определяет:

- локальную k-энтропию из GQRE;
- локальную k-энергию из плотности внутренней энергии модели;
- сопряжённую k-температуру;
- и k-давление.

Эти величины подчиняются локальному первому закону. В обозначениях статьи:

$$\delta\epsilon_k = \theta_k\,\delta s_k - \pi_k\,\delta v$$

Индекс k — не перечень разных веществ или эпох Вселенной. В однородном и изотропном вычислении он обозначает пять позиций: одну скалярную; отдельные времениподобную и пространственноподобную позиции векторoподобного сектора; и отдельные время-пространственную и пространство-пространственную позиции бивектороподобного сектора. У скаляра нет направленного индекса, векторoподобные позиции различают временное и пространственные направления, а бивектор строится из пар направлений. Каждый сектор может иметь собственную температуру и давление. K-температура может быть положительной или отрицательной в зависимости от соответствующего компонента G-поля.

Это не температуры, которые измерили бы термометром возле космологического горизонта. Стандартная температура квантового поля в де-ситтеровском пространстве масштабируется как H: **температура Гиббонса—Хокинга** назначается космологическому горизонту, а **вакуум Банча—Дэвиса** — стандартное инвариантное относительно де Ситтера квантовое состояние, чьи корреляции поля дают связанный тепловой отклик. Статья прямо отличает оба понятия от геометрических k-температур, масштабируемых

как H^2 в примере де Ситтера. Здесь «температура» обозначает термодинамически сопряжённую переменную, выведенную из определений энтропии и энергии модели.

Таким образом, аналог первого закона действительно выводится, но только **внутри самой модели**: если принять действие и определения GfE, такая термодинамическая структура следует из них математически.

Почему вычисление Фридмана является приближением

Чтобы превратить формализм в космологический пример, статья использует однородные и изотропные пространства-времена Фридмана—Робертсона—Уокера (FRW). «Однородный» означает, что крупномасштабная модель имеет одинаковые средние свойства в каждой точке; «изотропный» — что она выглядит одинаково во всех направлениях. Один масштабный фактор описывает рост расстояний со временем, материя представляется гладкой идеальной жидкостью, а параметр Хаббла H характеризует скорость расширения. Это идеализированный фон, а не карта отдельных галактик.

Но существует структурное несоответствие. Вселенные Фридмана решают уравнения Эйнштейна. В общем случае они не решают полные уравнения GfE более высокого порядка, которые также отслеживают скалярные, вектороподобные и бивектороподобные секторы и производные G-поля. Уравнения Эйнштейна возвращаются только в первом порядке, в низкоэнергетическом пределе малой кривизны предлагаемой модели.

Статья говорит об этом прямо и рассматривает решения Фридмана как приближения, сравнивая подход с подстановкой решения в приближении среднего поля в более полную теорию, чтобы проверить область надёжности приближения. Режим требует низкой энергии и малой кривизны, что выражается условием $l_P H \ll 1$, где l_P — планковская длина. Второе условие требует, чтобы произведение индуцированной метрики более высокого порядка и обратной физической метрики более высокого порядка оставалось положительно определённым.

Поэтому вывод не в том, что «GfE предсказывает историю нашей Вселенной». Корректнее сказать так: **если Вселенную в рамках GfE можно достаточно хорошо описать знакомой космологией Фридмана, то полные величины GfE подчиняются таким термодинамическим законам масштабирования.**

Локальный результат против полного

Внутри этого режима ведущие локальные величины имеют простые масштабные зависимости:

- плотность энтропии модели масштабируется как H^2;

- плотность энергии модели — как H^4;
- для не-де-ситтеровских примеров Фридмана на поздних временах это примерно t^{-2} и t^{-4}.

Обе плотности уменьшаются по мере расширения Вселенной. Но плотность — не полное количество.

Когда статья интегрирует величины по расширяющейся области пространства-времени, растущий объём меняет ответ. В привычных физических примерах с доминированием материи и излучения полная энтропия растёт со временем, даже если энтропия на единицу объёма снижается. Полная энергия не продолжает расти; в ведущем порядке она приближается к постоянной.

Это наиболее полезный концептуальный результат статьи. Локальное упорядочивание или разрежение не обязательно противоречит глобальному второму закону. Область может становиться локально менее энтропийной на единицу объёма, а интегральная энтропия — расти, если объём пространства-времени растёт быстрее.

Вычисление не доказывает, что это правильное микроскопическое объяснение термодинамической стрелы времени в реальной Вселенной. Оно показывает, что предлагаемая схема может непротиворечиво вместить различие между локальным и глобальным в приближении Фридмана.

Сравнение с де Ситтером — но с другой температурой

Статья также рассматривает пространство де Ситтера — идеализированное экспоненциально расширяющееся пространство-время с постоянным H. Для одного наблюдателя интегрирование выполняется лишь по конечному **причинному ромбу**: пересечению будущего светового конуса более раннего события с прошлым световым конусом более позднего, ограничивающему область пространства-времени, которая может участвовать в наблюдениях между ними. В этом ромбе полная энтропия GfE масштабируется как H^{-2}, то есть так же по H, как знакомая энтропия Гиббонса—Хокинга. Полная энергия GfE имеет порядок единицы в единицах модели.

> **Одно семейство космологических фонов**
>
> FRW — семейство однородных и изотропных геометрий, а не дополнительное место. Вселенные с доминированием материи и излучения — случаи FRW, различающиеся содержимым модели. Пространство де Ситтера тоже можно записать в форме FRW, но оно представляет вакуумно-доминирующий случай с постоянным H и экспоненциальным расширением. Причинный ромб — конечная область, выбранная внутри такого пространства-времени для одного наблюдателя; это не ещё один тип Вселенной.

Совпадение масштабирования не означает вывод того же физического объекта. Связанная k-температура GfE масштабируется как H^2, в отличие от стандартной температуры де Ситтера, масштабируемой как H. Статья интерпретирует различие как указание на то, что k-температура принадлежит геометрии пространства-времени, а не квантовым полям на этом фоне.

Далее предлагается, что такая температура *могла бы* быть связана с излучением гравитонов, а не обычных частиц. Это вопрос для будущего, не результат статьи. Сначала теорию пришлось бы квантовать, чтобы установить, соответствуют ли её температуры какому-либо излучению вообще.

Чего это не доказывает

- Работа **не показывает наблюдательно**, что гравитация возникает из энтропии.
- Она **не устанавливает**, что эффективный член модели является тёмной энергией, измеряемой в космологии.
- Она **не заменяет** общую теорию относительности проверенной более совершенной теорией. Общая относительность появляется здесь как низкоэнергетический предел малой кривизны предложения.
- Она **не делает** космологии Фридмана точными решениями GfE. Они являются приближением, использованным для оценки термодинамического поведения модели.
- Она **не выводит** полный микроскопический подсчёт степеней свободы пространства-времени.
- Она **не предоставляет** завершённую теорию квантовой гравитации и не обнаруживает гравитоны.
- Она **не показывает**, что отрицательные k-температуры являются обычными отрицательными показаниями термометра.

Насколько силён результат

Это рецензированная теоретическая статья, поэтому «доказательства» здесь означают не то же, что в эксперименте. Уместные вопросы: согласованы ли определения, следуют ли выводы и явно ли заданы и контролируются приближения.

На этом уровне статья даёт конкретный термодинамический словарь для GfE и выводит структуру первого закона, а не опирается только на аналогию. Она также необычно явно показывает границу приближения: решения Фридмана заимствуются из общей теории относительности, подставляются в величины GfE и ограничиваются режимом, где индуцированная метрика остаётся корректной.

Более широкие физические утверждения остаются открытыми. Схема нова, статья не

сравнивает её космологию с данными, а некоторые наиболее интересные следствия — квантование, контактно-геометрическая динамика и возможное излучение гравитонов — представлены как направления будущей работы. Внутренняя согласованность необходима новой теории гравитации, но недостаточна, чтобы показать, что теория описывает природу.

Почему это важно

Связь между гравитацией и термодинамикой стара и глубока — от энтропии чёрных дыр до температуры пространства де Ситтера. Многие такие результаты организованы вокруг горизонтов. GfE вместо этого пытается построить локальную объёмную информационную меру непосредственно из отношения между материей и геометрией.

Выживет ли предложение, неизвестно. Но термодинамическое упражнение выявляет полезное требование к любой подобной теории: она должна объяснять, как локальная структура и падающая локальная плотность энтропии могут сосуществовать с растущей полной энтропией в расширяющейся Вселенной.

Статья показывает один математически явный способ, как это может происходить. Её ценность не в закрытии проблемы связи гравитации и энтропии. Она превращает часть проблемы в уравнения, чьи предпосылки, пределы и последующие проверки можно ясно сформулировать.

Краткий итог

Бьянкони выводит термодинамическое описание внутри Gravity From Entropy — предлагаемой модифицированной гравитационной схемы, основанной на геометрической квантовой относительной энтропии. Локальные переменные энтропии, энергии, температуры и давления модели подчиняются первому закону. Когда полные величины GfE вычисляются на низкоэнергетических приближениях Фридмана с малой кривизной, локальные плотности энтропии и энергии падают при расширении Вселенной, но полная энтропия растёт из-за увеличения объёма пространства-времени; в примерах с доминированием материи и излучения полная энергия в ведущем порядке приближается к постоянной. Причинный ромб де Ситтера даёт энтропию, масштабируемую как H^{-2}, но температуру модели, отличную от стандартной температуры горизонта. Это условные математические результаты внутри GfE, а не наблюдательное свидетельство того, что гравитация происходит из энтропии, не измерение тёмной энергии и не завершённая теория квантовой гравитации.

Источники

Ginestra Bianconi, Thermodynamics of the gravity from entropy theory, Physical Review D 114, 024042 (2026) https://doi.org/10.1103/26kn-thgp