

Способы измерения температуры реликтового излучения по космологическим данным

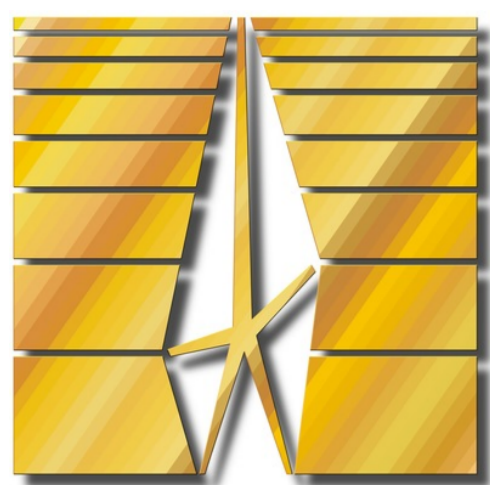
В.А. Шенявский¹, И.А. Барышников^{2,3,*}, В.В. Клименко³, А.В. Иванчик³

¹«Высшая школа экономики», Санкт-Петербург

²Политехнический университет им. Петра Великого, Санкт-Петербург

³Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

*ilyandand@gmail.com



1. Введение

Спектр Реликтового излучения «здесь» и «сейчас» с высокой точностью близок к спектру абсолютно черного тела с температурой $T_0 = 2.7255 \pm 0.0006$ K (Fixsen 2009 [1]). Динамика температуры в процессе развития Вселенной описывается зависимостью этой величины от космологического красного смещения z . В стандартной космологической Λ CDM модели эта зависимость выглядит:

$$T_z = T_0(1+z), \quad (1)$$

Однако она имеет другой вид в альтернативных космологических моделях, выходящих за рамки стандартной физики. Поэтому как можно более точные её измерения чрезвычайно важны для исследования законов Вселенной.

На сегодняшний день известно и реализовано два метода измерения температуры РИ T_z на z : один использует эффект Сюняева-Зельдовича (СЗ-эффект) (Luzzi et al. 2015[2], Hurier et al. 2014[3]), второй — анализ заселенности энергетических уровней атомов и молекул в плотных межзвёздных облаках (Klimenko et al. 2020 [4]).

В данной работе исследовались стандартная и предлагаемая ниже новая процедуры в методе по СЗ-эффекту с помощью численного моделирования искусственного каталога наблюдений СЗ-эффекта.

2. Метод исследования

В данной работе применялся следующий подход. Во-первых, численно моделировался искусственный каталог скоплений галактик, определяемые СЗ-эффектом, со значением температуры РИ «здесь» и «сейчас» $T_0 = 2.7255$ K. Во-вторых, с помощью двух процедур оценивалась эта величина T_0 . Сравнение полученных оценок с величиной 2.7255 K позволило исследовать процедуры.

2.1 Эффект Сюняева-Зельдовича. Процедуры измерения

Эффект Сюняева-Зельдовича заключается в смещении спектра РИ от спектра абсолютно черного тела (АЧТ) (см. рис. 1) при прохождении реликтовых фотонов через «горячий» электронный газ в скоплении галактик. Эффект может описываться как вариацией интенсивности РИ ΔI_{C3} , так и вариацией яркостной температуры РИ ΔT_{C3} . Эффект зависит от четырех параметров: T — температура РИ, τ — оптическая толща, $\beta = v/c$ — пекулярная скорость скопления, $\theta = kT_e/m_e c^2$ — температура электронного газа.

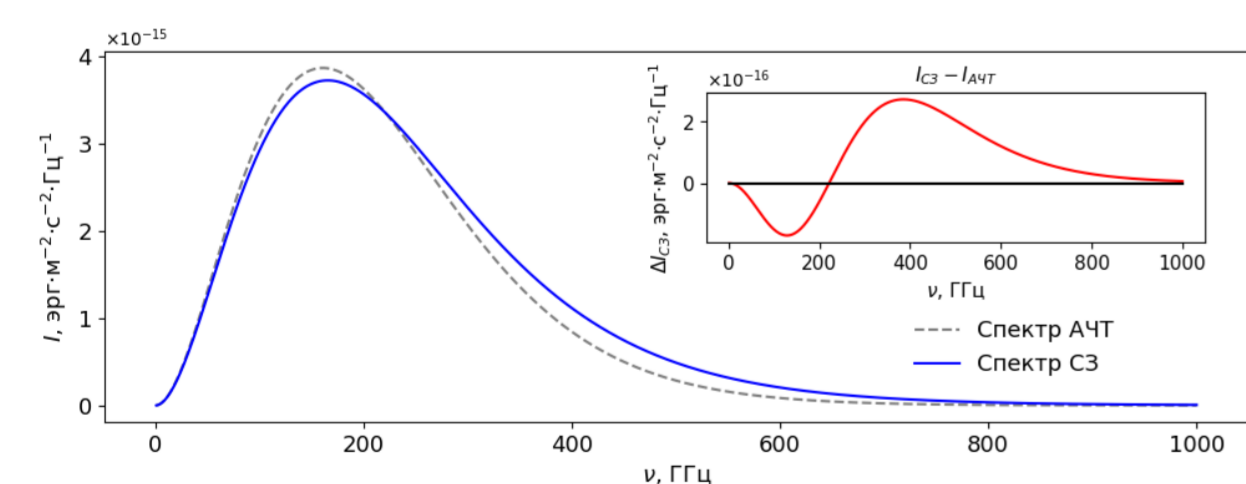


Рис. 1: СЗ-эффект. Зависимости интенсивности излучения и ее вариации от частоты

Стандартная процедура измерения температуры РИ T_z на космологическом красном смещении z по СЗ-эффекту заключается в аппроксимации данных по вариациям температуры РИ ΔT_{C3} на разных частотах с помощью формулы (2):

$$\Delta T_{SZ}(x) = T_0 f(x|\tau, \theta, \beta) \xrightarrow{\text{аппроксимация}} (T_z, \tau, \theta, \beta), \quad (2)$$

$$x = h\nu_0(1+z)/kT_z$$

$$T_0 = 2.7255 \text{ K (Fixsen 2009)}$$

где функция $f(x|\tau, \theta, \beta)$ описана в работе Luzzi et al. 2015[2]. В этой процедуре находится температура РИ T_z на космологическом красном смещении z . Такая процедура использовалась в работах Luzzi et al. 2015[2], Hurier et al. 2014[3].

В данной работе предлагается новая процедура, которая позволяет находить сразу значение температуры РИ T_0 «здесь» и «сейчас». В этой процедуре аппроксимация

данных по вариациям температуры РИ ΔT_{C3} производится по формуле (3):

$$\Delta T_{SZ}(x) = T_0 f(x|\tau, \theta, \beta) \xrightarrow{\text{аппроксимация}} (T_0, \tau, \theta, \beta), \quad (3)$$

$$x = h\nu_0/kT_0$$

где функция $f(x|\tau, \theta, \beta)$ такая же, как и в формуле (3). Важное отличие новой процедуры от стандартной в том, что перед функцией f в новой процедуре стоит варьируемый параметр (искомая температура РИ «здесь» и «сейчас»), а в стандартной стоит температура, фиксированная на значении из работы Fixsen 2009[1]

2.2 Численное моделирование искусственного каталога

Численное моделирование искусственного каталога наблюдений СЗ-эффекта для скоплений производилось следующим образом. Во-первых, фиксировалось значение температуры РИ $T_0 = 2.7255$ K, которое необходимо было восстановить двумя описанными выше процедурами. Во-вторых, генерировались параметры скоплений (τ, θ, β, z) случайным образом в соответствующих диапазонах. В-третьих, по формуле (3) для каждого скопления высчитывались вариации температуры на пяти частотах: 70, 100, 143, 217, 353 ГГц (как в работе Luzzi et al. 2015 [2]). В-четвертых, был произведен статистический анализ ошибок реальных данных из работ Luzzi et al. 2015 [2], в котором определялась корреляция между величиной ошибки и частотой (см. табл. 1). Наконец в каталог записывались значения, разбросанные вокруг высчитанных вариаций температур по нормальному с закону с соответствующими статистическому анализу дисперсиями (см. рис. 2)

Таблица 1: Результат статистического анализа данных из работы Luzzi et al. 2015 [2]. $D[\delta]$ — дисперсия величины δ .

ν , ГГц	70	100	143	217	353
$\delta = \text{ошибка/масштаб}$	0.5	0.14	0.07	0.06	0.3
$\sigma = \sqrt{D[\delta]}$	0.09	0.03	0.02	0.02	0.08

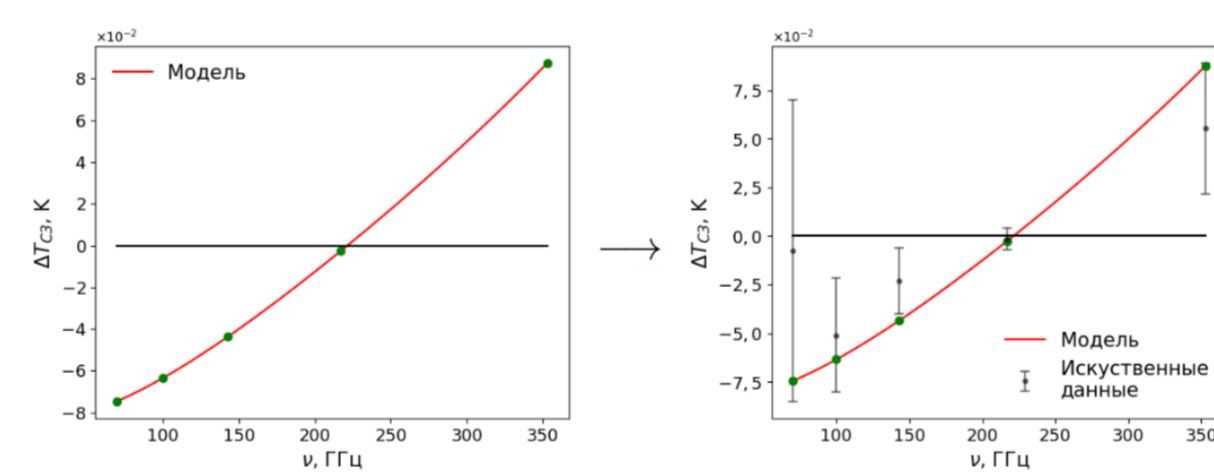


Рис. 2: График вариаций температуры для одного скопления с параметрами $kT_e = 8.0$ кэВ, $\beta = -7.3 \cdot 10^{-4}$, $\tau = 1.6$ и $z = 0.2522$. С использованием этих параметров по формуле (3) высчитывались вариации температуры на частотах 70, 100, 143, 217, 353 ГГц (зеленые точки на графике). Данные (черные точки с ошибками), записанные в искусственный каталог, генерировались из нормального распределения со средними значениями в зеленых точках и дисперсиями, полученными из статистического анализа реальных ошибок в измерениях вариаций температуры в работе Luzzi et al. 2015 [2] (см. табл. 1).

2.3 Анализ скоплений

По искусственным данным (вариациям температур) проводилась аппроксимация (см. рис. 3) согласно процедурам, описанным выше.

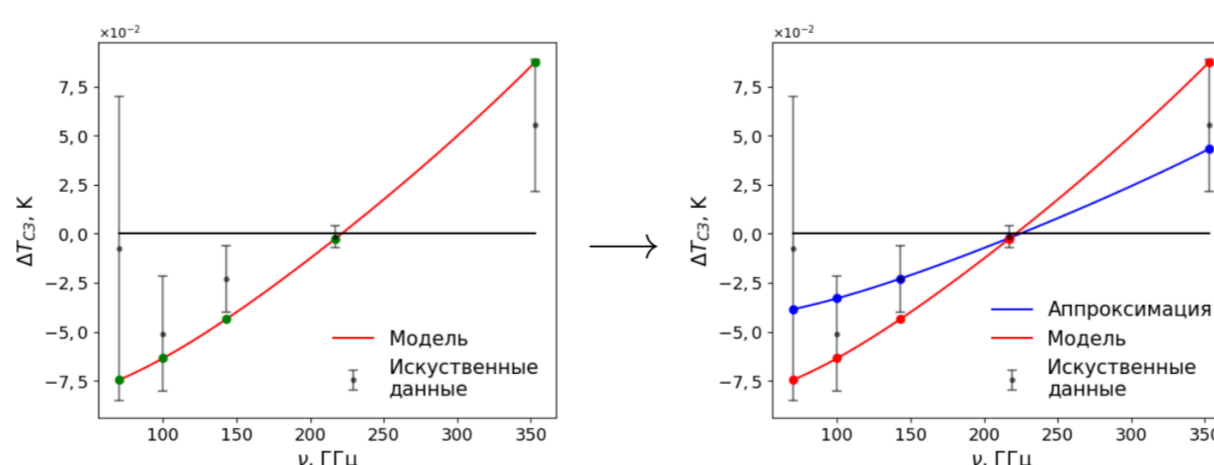


Рис. 3: Пример аппроксимации данных искусственного каталога. Красная линия, черные и зеленые точки имеют тот же смысл, что и на рис. 2. Синяя линия с синими точками — результат аппроксимации.

В стандартной процедуре определялся набор значений температур T_z на разных космологических красных смещениях z . Значение T_0 находилось аппроксимацией этого набора по стандартному закону $T_z = T_0(1+z)$

В новой процедуре получался набор значений температур T_0 , который взвешенно усреднялся

Все аппроксимации и усреднения производились методом Монте Карло по схеме Марковский цепей (Foreman-Mackey et al. 2013 [5]). Метод реализован на языке Python библиотеками emcee и chainconsumer.

3. Результаты

В результате был создан каталог из 1000 скоплений. Из этого каталога двумя процедурами были сначала обработаны 77 скоплений (как в работе Luzzi et al. 2015 [2]). Видно, что при таком объеме выборки процедуры не различимы в пределах ошибок (см. рис. 4, левая пара красно-синих точек). Затем был обработан двумя процедурами весь каталог. На рисунке 4 (вторая пара красно-синих точек) заметно, что при таком объеме выборки процедуры дают систематический сдвиг более чем на 2σ , причем новая процедура восстанавливает значение $T_0 = 2.7255$ K в пределах 2σ , а стандартная процедура — нет.

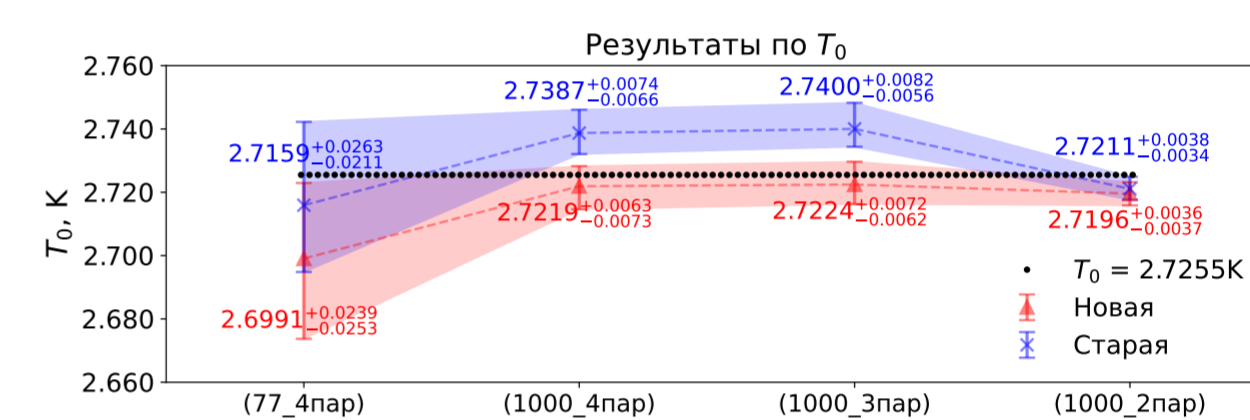


Рис. 4: Оценки температуры реликтового излучения T_0 разными процедурами и разными способами аппроксимации. Синему цвету соответствует стандартная процедура. Красному цвету — новая процедура. Точки с абсциссой «(77_4пар)» — обработано 77 скопления с четырьмя свободными, аппроксимирующими параметрами; точки с «(1000_4пар)» — обработано 1000 скоплений с четырьмя свободными параметрами; с абсциссой «(1000_3пар)» — обработано 1000 скоплений с тремя свободными параметрами (фиксирована температура электронного газа θ); «(1000_2пар)» — обработано 1000 скоплений с двумя свободными параметрами (фиксированы θ и пекулярная скорость β). Черная точечная линия — значение температуры РИ излучения, которое необходимо было восстановить.

Для выяснения причины расхождения процедур был проведен следующий анализ. При обработке всего каталога был зафиксирован параметр $\theta = kT_e/m_e c^2$. Результат виден на рис. 4 (третья пара красно-синих точек). Видно, что это не устранило систематический сдвиг. Была предпринята попытка зафиксировать еще один параметр, который имел негауссово распределение при обработке: величина β — пекулярная скорость скопления. На рисунке 4 (правая пара красно-синих точек), видно, что систематический сдвиг устранен. Следовательно, можно заключить, что систематический сдвиг связан с вариацией параметра β .

4. Выводы

Обнаружен систематический сдвиг оценки температуры РИ «здесь» и «сейчас» T_0 , полученной стандартной процедурой. Сдвиг превосходит статистическую ошибку в случае анализа большого числа скоплений галактик (1000 измерений). Сдвиг не выявлен при измерении новой предложенной в работе процедуре.

Из анализа следует, что причиной систематического сдвига является неопределенность параметра β (пекулярная скорость скопления галактик в единицах скорости света).

Список литературы

- [1] Fixsen D J 2009 *ApJ* **707** 916–920
- [2] Luzzi, G and Génova-Santos, R T and others 2015 **2015** 011–011
- [3] Hurier G, Aghanim N et al. 2014 *A&A* **561** A143
- [4] Klimenko V V and Ivanchik A V et al 2020 *Astron. Lett.* **46** 715–725
- [5] Foreman-Mackey D, Hogg D W et al. 2013 *PASP* **125** 306