

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
“МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА”

---

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ЧАСТИЦ И КОСМОЛОГИИ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА  
РАСПАДАЮЩАЯСЯ ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ КАК  
ВОЗМОЖНОЕ РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ  $H_0$

Выполнил студент  
443 группы  
Неделько Н. С. \_\_\_\_\_  
(подпись)

Научный руководитель:  
Рубаков В. А. \_\_\_\_\_  
(подпись)

Научный консультант:  
Горбунов Д. С. \_\_\_\_\_  
(подпись)

Научный консультант:  
Чудайкин А. С. \_\_\_\_\_  
(подпись)

Допущен к защите \_\_\_\_\_  
(дата)

Зав. кафедрой,  
Рубаков В. А. \_\_\_\_\_  
(подпись)

Москва  
2020 г.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Данные и методы обработки</b>	<b>5</b>
1.1 Используемые наборы данных . . . . .	5
1.2 Обработка . . . . .	6
<b>2 Распадающаяся темная материя</b>	<b>7</b>
<b>3 Результаты</b>	<b>7</b>
3.1 Набор А и распад темной материи после рекомбинации . . .	7
3.2 Набор Б . . . . .	10
3.3 Распад темной материи до рекомбинации . . . . .	13
<b>4 Заключение</b>	<b>16</b>

# Введение

Исследования микроволнового реликтового излучения дали огромный вклад в наше представление о эволюции Вселенной. С каждым новым поколением телескопов удастся разрешить все больше деталей в анизотропии его температуры и поляризации, что позволяет проверять на прочность все больше аспектов космологических моделей. Наиболее известным и масштабным экспериментом в этой области на сегодняшний день является четырехлетняя миссия телескопа Planck [1]. Структура реликтового фона по данным Planck по большей части согласуется со стандартной  $\Lambda$ CDM-космологией, но накопление телескопом данных и их углубленный анализ выявили некоторые достаточно серьезные расхождения. Одно из них – расхождение в  $2.8\sigma$  в виде избыточного сглаживания пиков в спектре анизотропии [1–5]. Другой особенностью, которая может указывать на проблемы в данных Planck, является умеренное расхождение в получаемых значениях параметров между данными самого Planck на малых ( $\ell < 800$ ) и больших ( $\ell > 800$ ) мультиполях [1, 4]. Кроме того, существует небольшая нехватка возмущений на  $20 \leq \ell \leq 30$ , что находится в противоречии с избытком линзирования.

Важной проверкой качества данных Planck является сравнение его карт анизотропии с независимыми результатами наземных наблюдений, особенно в области больших  $\ell$ . Наиболее значимыми экспериментами в этой области являются проекты South Pole Telescope (SPT) [6–8] и Atacama Cosmology Telescope (ACT) [9,10], способные исследовать области гораздо меньших угловых размеров, чем в наблюдениях Planck. В частности, данные обзора  $2540deg^2 SPT - SZ$ , дополненные на  $\ell < 500$  результатами миссии WMAP, дают слабый (в пределах  $1\sigma$ ) недостаток линзирования и в целом удовлетворяют  $\Lambda$ CDM [11].

Еще один важный аспект – карта поляризации. Поскольку анизотропия поляризации реликтового фона на больших  $\ell$  подвержена искажению близкими источниками в значительно меньшей степени, чем анизотропия температуры [12, 13], ее спектры EE и TE могут дать более надежные оценки космологических параметров и величины линзирования. Наиболее

точные измерения здесь получены коллаборацией SPT. Они показывают расхождение для величины сглаживания в  $2.9\sigma$  относительно результатов Planck и показывают небольшой недостаток сглаживания в сравнении с  $\Lambda$ CDM ( $1.4\sigma$  по результатам анализа SPTpol  $500deg^2$ ) [14]. Таким образом, наземные наблюдения хорошо согласуются друг с другом и противоречат результатам Planck, а недостаток линзирования в сравнении с  $\Lambda$ CDM может указывать на новую физику. Линзирующий потенциал также можно получить непосредственно из квадратичных оценок на  $T$ ,  $E$  и  $B$ . Построенный таким образом по данным о температуре и поляризации в области  $100 < \ell < 2000$  из  $500deg^2$  SPTPol [15, 16] спектр мощности линзирующего потенциала  $C_l^{\phi\phi}$  дает сглаживание на  $1.8\sigma$  меньше, чем ожидается в  $\Lambda$ CDM на основе данных Planck.

Другой способ проверки — сравнение модельно-зависимых предсказаний на основе наблюдений реликтового фона с прямыми наблюдениями для современных значений параметров, в частности, амплитуды линейных флуктуаций плотности материи  $\sigma_8$  и локального параметра Хаббла  $H_0$ , и здесь тоже обнаружены значительные отличия от предсказаний Planck [17–26] : объединение обзоров неба KiDS, VIKING-450 и DES [27] дает расхождение в  $2.5\sigma$  для параметра  $S_8 \equiv \sigma_8(\frac{\Omega_m}{0.3})^{0.5}$  [1, 27], а анализ спектров удаленных сверхновых типа Ia дает  $H_0 = 74.03 \pm 1.42 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ , расхождение в  $4.4\sigma$  [28] (несколько других независимых методов приводят к значениям около  $73 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$  [29–33], а модельно-зависимое значение по данным Планка  $H_0 = 67.36 \pm 0.54 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$  [1]). При этом данные SPT (а также данные Planck на малых мультиполях [34]) сочетаются с этими наблюдениями заметно лучше [14, 35]. Как видно, основная причина нестыковок содержится в области высоких  $\ell$  данных Planck. При этом в крупномасштабной области точность наблюдений Planck, по крайней мере для карты температур, все еще выше, чем у SPT. Логичным шагом, таким образом, является сшивка данных Planck и SPT способом, дающим наибольшую точность на всем спектре.

Ошибки наблюдений или обработки данных — не единственное возможное объяснение расхождений. Возможно, их устранение требует модификации космологической модели. Таких модификаций существует множество,

в частности, различные варианты темной энергии [36–40] и темной материи [41–44]. Недавние исследования показывают, что для решения проблемы  $H_0$  требуется изменение космологии до рекомбинации [45, 46]. Полученное объединение данных SPT и Planck вместе с дополнительными наборами данных было использовано для проверки одного из таких расширений: распадающейся темной материи (Decaying Dark Matter, DDM).

# 1 Данные и методы обработки

## 1.1 Используемые наборы данных

- Полный набор данных Planck (Planck2018), обрезанный по  $\ell_{\max} = 1000$  [1]
- Данные Planck по температуре в диапазоне  $\ell < 1000$  (PlanckTT-low $\ell$ )
- EE-спектр Planck на  $\ell < 30$  (low $\ell$ ) [1], необходимый для определения оптической глубины эпохи реионизации  $\tau$  для избавления от вырождения между ней и амплитудой спектра  $A_s$  (эти данные используются во всех обсуждаемых объединениях данных и потому в дальнейшем не указываются)
- TE и EE спектры обзора SPTPol 500  $deg^2$  в области  $50 < \ell \leq 8000$  [14] (SPTPol)
- Измерения линзирующего потенциала  $C_\ell^{\phi\phi}$  при  $100 < \ell < 2000$  из данных SPTPol [15](Lens)
- Гауссово распределение на  $S_8 = 0.762 \pm 0.0024$  по данным KiDS, VIKING-450 и DES [27] ( $S_8$ )
- Гауссово распределение на  $H_0 = 74.03 \pm 1.42 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  по результатам анализа коллаборацией SH0ES наблюдений HST [28] ( $H_0$ )

## 1.2 Обработка

Моделирование и анализ выполнены с помощью модуля CLASS [47] (вычисление космологических параметров) и кода MontePython [48,49] (построение апостериорных распределений параметров), а также пакета getdist [50] для получения областей достоверности и контуров.

## 2 Распадающаяся темная материя

Несмотря на множество косвенных доказательств существования темной материи, экспериментально обнаружить частицы, составляющие ее, до сих пор не удастся, поэтому круг потенциальных кандидатов весьма широк.  $\Lambda$ CDM-космология использует модель холодной темной материи, состоящей из массивных слабо взаимодействующих частиц. Однако, вообще говоря, ниоткуда не следует, что темная материя должна состоять лишь из одного вида частиц. Напротив, “видимый” сектор материи состоит из различных типов частиц (с точки зрения космологии как минимум можно выделить барионы, нейтрино и фотоны). Далее можно предположить, что некоторые из этих частиц нестабильны. Такая модель будет описываться двумя дополнительными параметрами: начальной долей нестабильной фракции  $F$  и шириной распада  $\Gamma$  (в данной работе приведенной в  $\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ ). При этом главным следствием будет снижение амплитуды возмущений плотности темной материи на малых  $z$  и снижение плотности энергии нерелятивистской материи вообще [41]. Первый эффект напрямую приводит к уменьшению модельно-зависимой оценки на  $S_8$ , а также ослабляет линзирование на крупномасштабных структурах, что объяснило бы нехватку линзирования в данных SPT. Второй же эффект приводит к росту  $H_0$  из-за снижения вклада в плотность энергии Вселенной материального сектора, тормозящего расширение. Ранее уже было показано, что  $F$  должно быть достаточно мало, а  $\Gamma$  относительно велика, то есть к настоящему моменту практически вся нестабильная темная материя уже распалась [42, 44].

## 3 Результаты

### 3.1 Набор A и распад темной материи после рекомбинации

Первым способом объединения данных SPT и Planck является простое обрезание полного набора Planck 2018 сверху по  $\ell_{max} = 1000$  и дополнение

- Planck 2018( $\ell_{\max} = 1000$ ) + SPTPol( $\ell_{\min} = 1000$ )
- Planck 2018( $\ell_{\max} = 1000$ ) + SPTPol( $\ell_{\min} = 1000$ ) +  $H_0$  +  $S_8$
- Planck 2018( $\ell_{\max} = 1000$ ) + SPTPol( $\ell_{\min} = 1000$ ) + Lens
- Planck 2018( $\ell_{\max} = 1000$ ) + SPTPol( $\ell_{\min} = 1000$ ) +  $H_0$  +  $S_8$  + Lens

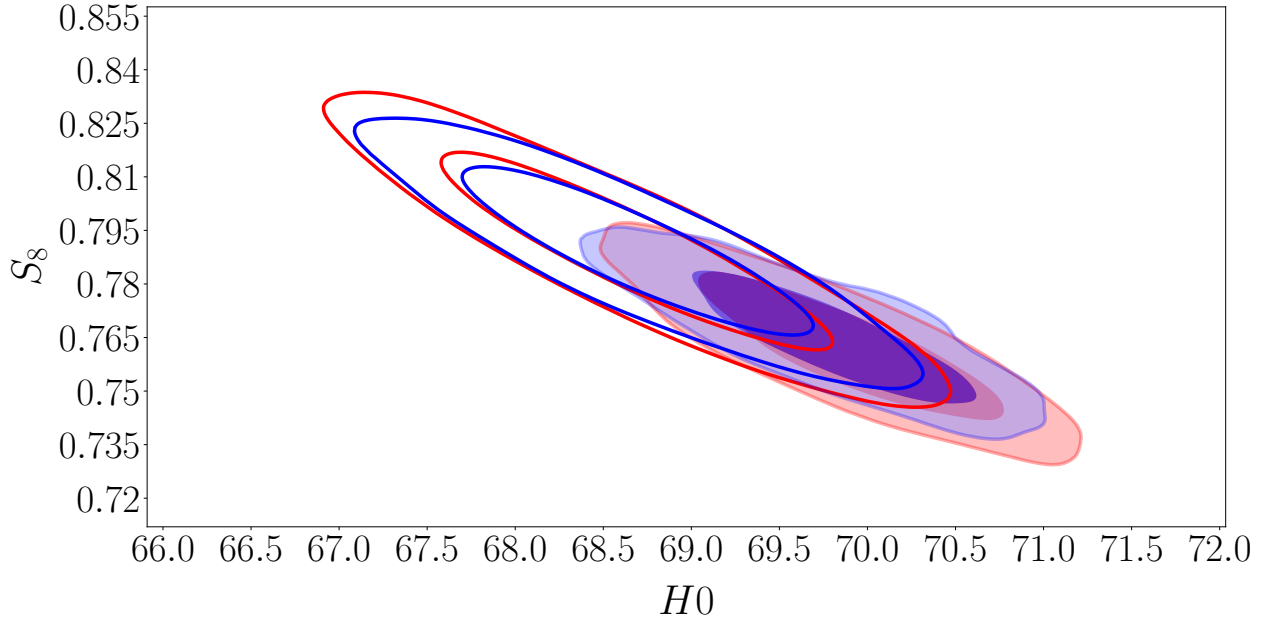


Рис. 1: Ограничения на  $S_8$  и  $H_0$  в модели  $\Lambda$ CDM для Набора А

его данными SPTPol, комплементарно обрезанными снизу по  $\ell_{\min} = 1000$ . Далее набор Planck 2018 ( $\ell_{\max} = 1000$ )+SPTPol( $\ell_{\min} = 1000$ ) обозначается как Набор А. Полученные в рамках  $\Lambda$ CDM ограничения на  $S_8$  и  $H_0$  показаны на рис. 1 (синие контуры соответствуют добавлению данных Lens, закрашенные контуры – добавлению данных прямых измерений HST и KV450+DES).

На основе Набора А было проведено исследование модели DDM, в которой темная материя распадается на поздних этапах эволюции Вселенной, затрагивая реликтовый фон только через линзирующий потенциал.



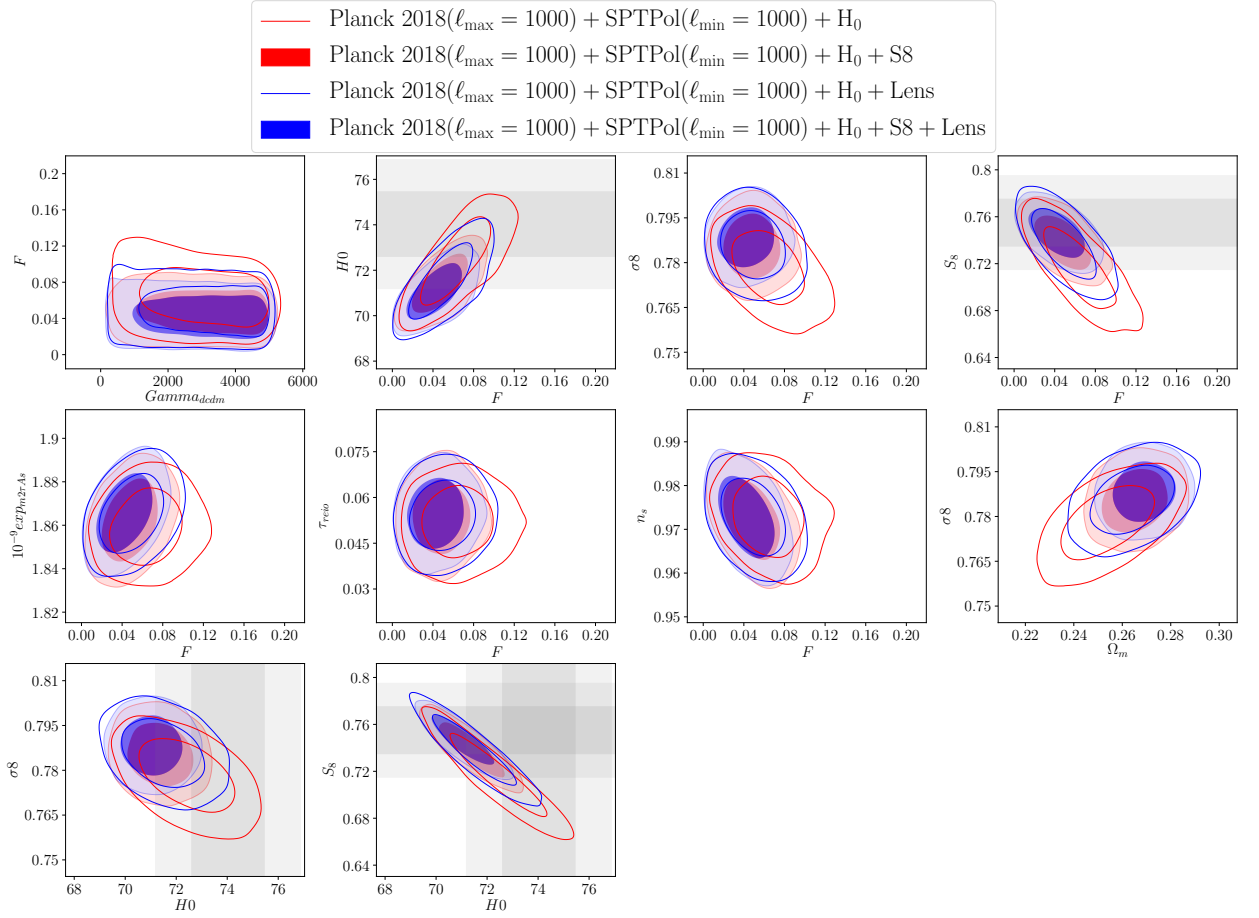


Рис. 2: Области ограничений на некоторые параметры для модели DDM. Серые полосы соответствуют  $1\sigma$ - и  $2\sigma$ -ограничениям из наборов  $S_8$  и  $H_0$ .

Этому соответствуют относительно малые значения  $\Gamma$ , поскольку поздний распад требует достаточно большого времени жизни. В такой модели удалось добиться улучшения в  $2.4\sigma$  по  $\chi^2$  относительно  $\Lambda$ CDM, но, как видно из рис. 2, рост  $F$ , и, следовательно,  $H_0$  значительно ограничен данными KV450+DES: увеличение  $F$  быстро приводит к падению  $S_8$  ниже наблюдательных ограничений [27]. При более внимательном рассмотрении было обнаружено, что Набор А является избыточным: вклад данных SPTPol на больших мультиполях практически подавляется данными Planck 2018 на  $\ell < 1000$ , что видно из относительного положения черных и красных контуров на рис. 3, следовательно, обрезанный SPTPol в данном случае имеет крайне низкую статистическую значимость.

## 3.2 Набор Б

Для обеспечения полноты данных был построен Набор Б, в котором карта поляризации на  $\ell > 30$  была полностью передана SPT, а из данных Planck был взят только набор PlanckTT-low $\ell$  и данные по поляризации на  $\ell < 30$ .

Прежде всего необходимо убедиться, что выбранные наборы данных согласуются. Как видно из рис. 4, результаты для PlanckTT-low $\ell$  (синие контуры) и SPTPol (красные контуры) достаточно близки, в пределах  $1\sigma$ , а значит, их объединение дает осмысленные результаты. Чтобы оценить значимость отличия от стандартной процедуры, помимо результата объединения PlanckTT-low $\ell$ +SPTPol приведены графики для полного набора данных Planck (Planck 2018, зеленые контуры). Даже в рамках  $\Lambda$ CDM объединенный набор данных полностью устраняет расхождение по  $S_8$  [27] и значительно, на  $2\sigma$ , облегчает расхождение по  $H_0$ , при этом точность заметно возрастает по сравнению с SPTPol.

В Таблице 1 приведены полученные ограничения на космологические параметры. Совмещение SPTPol и PlanckTT-low $\ell$  привело к улучшению ограничений на все параметры кроме оптической глубины  $\tau$ , которая задается данными low $\ell$ , общими для всех наборов.

После этого добавляется правдоподобие Lens, которое снимает вырождение между  $\sigma_8$  и  $\Omega_m$ , поскольку оно чувствительно к комбинации  $\sigma_8\Omega_m^{0.25}$ .

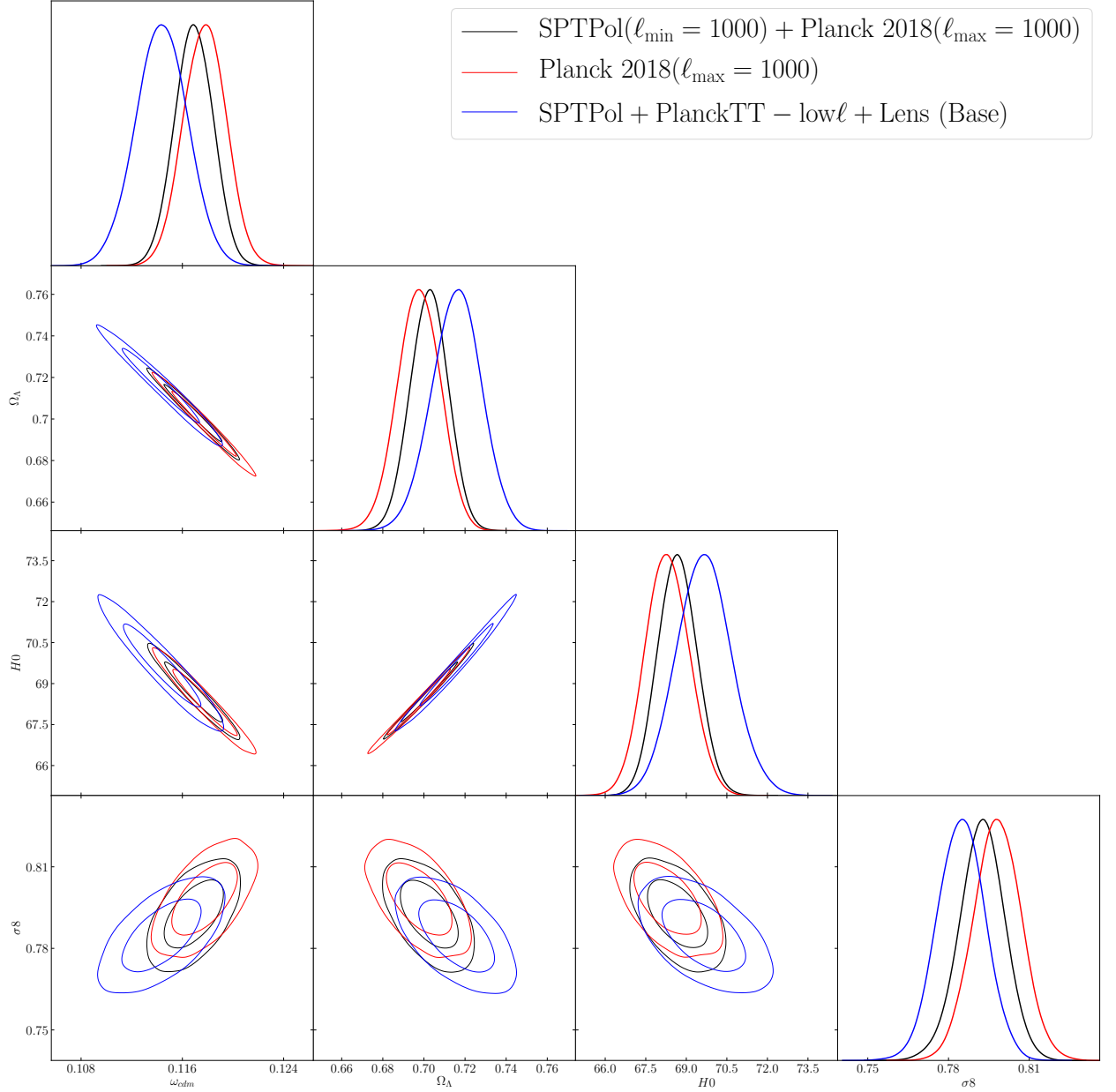


Рис. 3: Области ограничений на космологические параметры в модели  $\Lambda$ CDM для наборов А (черные контуры) и Б (синие контуры) в сравнении с обрезанными по  $\ell_{\text{max}} = 1000$  данными Planck 2018 (красные контуры).

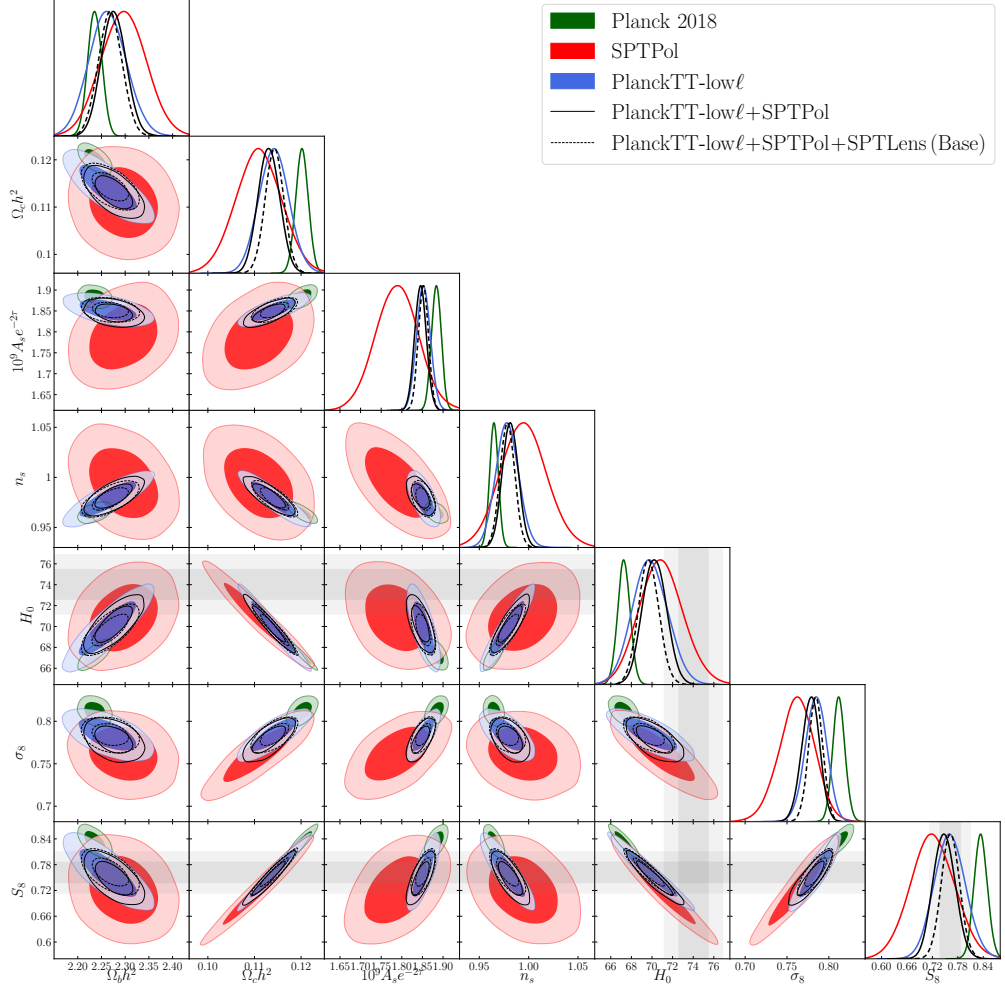


Рис. 4: Области значений космологических параметров для различных наборов данных в рамках  $\Lambda$ CDM.

Это позволяет дополнительно уточнить оценку значения  $S_8$ , при этом среднее значение возрастает на  $0.6\sigma$ . Значения остальных параметров не испытывают значимых сдвигов. В дальнейшем комбинация PlanckTT-low $\ell$ +SPTPol+Lens обозначается как Base (пунктирные контуры на рис. 4). Для этого набора имеем

$$S_8 = 0.763 \pm 0.022, H_0 = 69.68 \pm 1.00 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1},$$

таким образом, остается расхождение по  $H_0$  на уровне  $2.5\sigma$ .

Еще один способ проверить самосогласованности комбинированного набора - согласие полученного на его основе спектра линзирования с модельным в рамках  $\Lambda$ CDM. Для этого вводится дополнительный свободный параметр  $A_L$ , масштабирующий весь спектр линзирования и таким образом

Параметр	PlanckTT-low $\ell$	SPTPol	PlanckTT-low $\ell$ +SPTPol	Base
$100\Omega_b h^2$	$2.263 \pm 0.040$	$2.296 \pm 0.048$	$2.276 \pm 0.026$	$2.269 \pm 0.025$
$\Omega_c h^2$	$0.114 \pm 0.003$	$0.111 \pm 0.005$	$0.113 \pm 0.002$	$0.114 \pm 0.002$
$H_0$	$69.82 \pm 1.72$	$70.90 \pm 2.12$	$70.25 \pm 1.15$	$69.68 \pm 1.00$
$\tau$	$0.051 \pm 0.009$	$0.053 \pm 0.010$	$0.050 \pm 0.009$	$0.051 \pm 0.009$
$\ln(10^{10} A_s)$	$3.022 \pm 0.019$	$2.989 \pm 0.031$	$3.015 \pm 0.018$	$3.021 \pm 0.017$
$n_s$	$0.978 \pm 0.012$	$0.995 \pm 0.023$	$0.981 \pm 0.008$	$0.979 \pm 0.007$
$r_{\text{drag}}$	$145.84 \pm 0.64$	$146.47 \pm 1.34$	$146.02 \pm 0.52$	$145.76 \pm 0.46$
$\Omega_m$	$0.283 \pm 0.020$	$0.269 \pm 0.026$	$0.277 \pm 0.013$	$0.284 \pm 0.012$
$\sigma_8$	$0.784 \pm 0.013$	$0.762 \pm 0.021$	$0.778 \pm 0.010$	$0.784 \pm 0.009$
$S_8$	$0.762 \pm 0.037$	$0.721 \pm 0.052$	$0.748 \pm 0.026$	$0.763 \pm 0.022$

Таблица 1: Ограничения на параметры в модели  $\Lambda$ CDM для Набора Б, ошибки  $1\sigma$ .

варьирующий величину сглаживания спектров, причем идеальному совпадению с предсказаниями  $\Lambda$ CDM соответствует  $A_L = 1$ . Добавление  $A_L$  не привело к существенному изменению полученных ранее ограничений, а для самого масштабного параметра получено значение  $A_L = 0.99 \pm 0.03$ , то есть достигается полное согласование с теорией. Таким образом, описанный способ объединения температурных данных Planck на малых  $\ell$  с данными по температуре и поляризации SPT дает сбалансированный результат на всех угловых масштабах.

### 3.3 Распад темной материи до рекомбинации

На Наборе Б использовалась модель с значительно большими  $\Gamma$ , в которой нестабильная фракция распадается еще до рекомбинации (early DDM). В таком режиме воздействие распада на современную картину оказывается несколько иным, поскольку изменения затрагивают и реликтовый фон. Кроме того, поскольку в наборе Base уже в  $\Lambda$ CDM расхождение по  $S_8$  полностью устранено, дальнейшее уменьшение  $S_8$  вступает в противоречие с данными KV450+DES. В результате значение  $S_8$  практически не зависит от  $F$  и  $\Gamma$  (уменьшение  $\Omega_m$  компенсируется ростом  $\sigma_8$ )<sup>1</sup>. За счет снижения общей плотности материи наблюдается рост  $H_0$ , но он не превышает  $2\sigma$

<sup>1</sup>Поскольку модель должна сохранять картину анизотропии реликтового излучения, нестабильная темная материя добавляется поверх обычной, тем самым увеличивая общее количество темной материи в ранней Вселенной. Это приводит к более длительной пылевидной стадии и, следовательно, росту амплитуды возмущений. Таким образом,  $\sigma_8$  растет с увеличением  $F$  и уменьшением  $\Gamma$ . Это поведение отличается от модели позднего распада, где состояние ранней Вселенной совпадает с  $\Lambda$ CDM

относительно  $\Lambda$ CDM.

$$S_8 = 0.746 \pm 0.014, H_0 = 71.6 \pm 0.8 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$$

Таким образом, eDDM не дает существенного эффекта, поскольку Набор Б сам по себе решает проблемы, которые в Наборе А приходилось компенсировать DDM.

Параметр	А (+ $S_8 + H_0$ ) DDM	Б (+ $S_8 + H_0$ ) $\Lambda$ CDM	Б (+ $S_8 + H_0$ ) eDDM
$H_0$	$71.55 \pm 0.76$	$70.71 \pm 0.72$	$71.56 \pm 0.76$
$\ln(10^{10} A_s)$	$3.026 \pm 0.018$	$3.027 \pm 0.017$	$3.026 \pm 0.018$
$\Omega_m$	$0.267 \pm 0.007$	$0.272 \pm 0.008$	$0.266 \pm 0.007$
$\sigma_8$	$0.783 \pm 0.009$	$0.781 \pm 0.007$	$0.783 \pm 0.009$
$S_8$	$0.746 \pm 0.014$	$0.762 \pm 0.018$	$0.739 \pm 0.015$

Таблица 2: Сравнение ограничений на некоторые параметры для наборов А и Б, ошибки  $1\sigma$ .

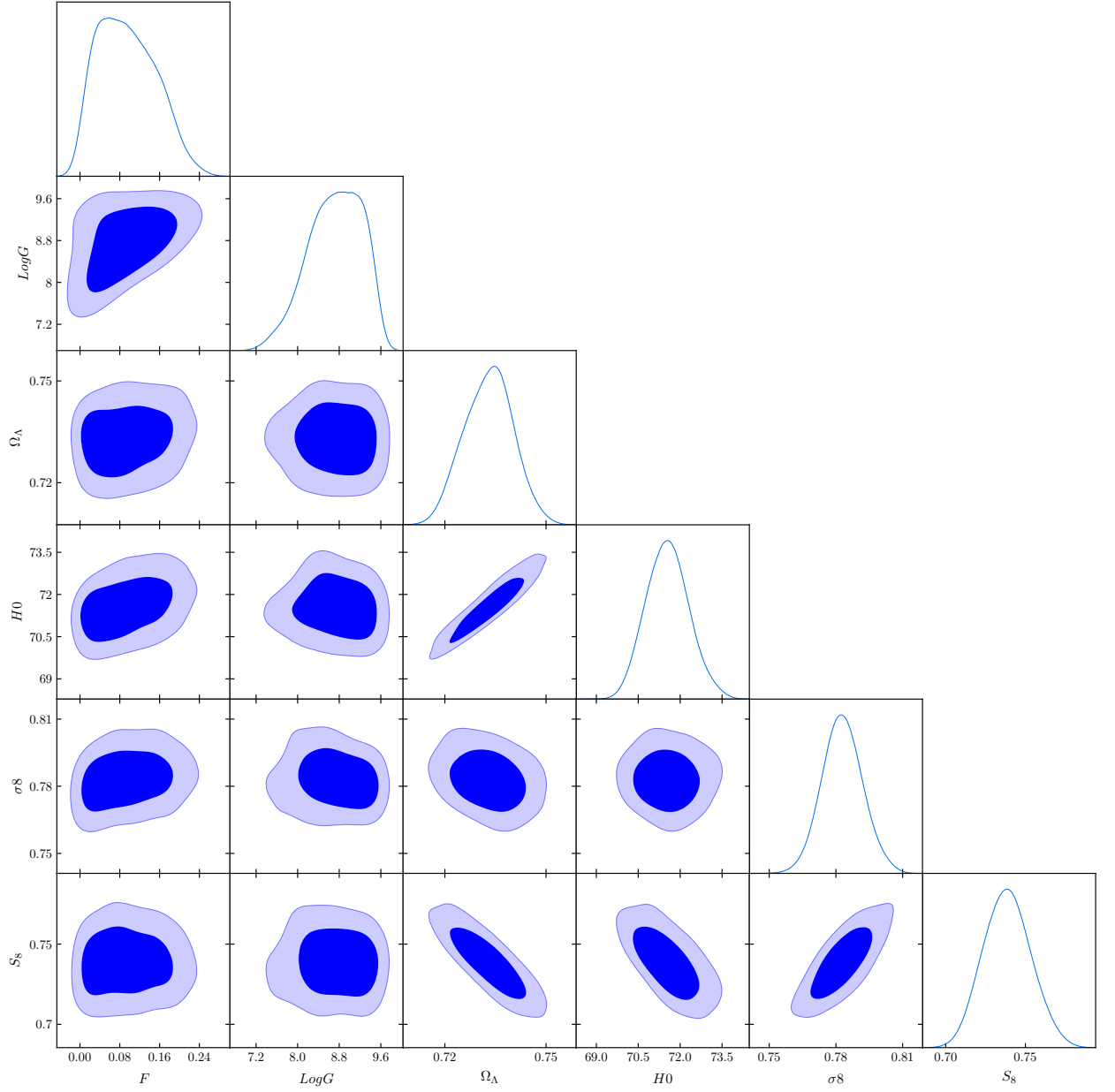


Рис. 5: Области ограничений на космологические параметры в модели eDDM для Набора Б (Base+ $S_8 + H_0$ ).  $\text{LogG}$  – десятичный логарифм  $\frac{\Gamma}{\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}}$ .

## 4 Заключение

- Получено самосогласованное объединение данных о реликтовом фоне телескопов Planck и SPT, избегающее внутренних противоречий полного набора Planck
- Показано, что это решение значительно ослабляет противоречие между модельно-зависимыми предсказаниями на основе реликтового фона  $\Lambda$ CDM и прямыми наблюдениями на малых  $z$ , полностью решая проблему  $S_8$  и существенно ослабляя проблему  $H_0$ :  
 $S_8 = 0.763 \pm 0.022$ ,  $H_0 = 69.68 \pm 1.00 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$
- Исследована возможность устранения оставшихся расхождений в двух режимах модели распадающейся темной материи, показано, что в рамках данного набора данных она не дает значительного преимущества перед  $\Lambda$ CDM

Следует отметить, что полученное в рамках Набора Б объединение данных является хорошо самосогласованным и может использоваться в дальнейшем для проверки разнообразных расширений стандартной космологии. Например, в рамках модели ранней темной энергии (EDE) удалось полностью решить проблему  $H_0$  [51].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] PLANCK collaboration, N. Aghanim et al., *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, 1807.06209.
- [2] PLANCK collaboration, P. A. R. Ade et al., *Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters*, *Astron. Astrophys.* **594** (2016) A13 [1502.01589].
- [3] G. E. Addison, Y. Huang, D. J. Watts, C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw et al., *Quantifying discordance in the 2015 Planck CMB spectrum*, *Astrophys. J.* **818** (2016) 132 [1511.00055].



- [4] PLANCK collaboration, N. Aghanim et al., *Planck intermediate results. II. Features in the cosmic microwave background temperature power spectrum and shifts in cosmological parameters*, *Astron. Astrophys.* **607** (2017) A95 [1608.02487].
- [5] P. Motloch and W. Hu, *Lensing-like tensions in the Planck legacy release*, 1912.06601.
- [6] M. Lueker et al., *Measurements of Secondary Cosmic Microwave Background Anisotropies with the South Pole Telescope*, *Astrophys. J.* **719** (2010) 1045 [0912.4317].
- [7] E. Shirokoff et al., *Improved constraints on cosmic microwave background secondary anisotropies from the complete 2008 South Pole Telescope data*, *Astrophys. J.* **736** (2011) 61 [1012.4788].
- [8] C. Reichardt et al., *A measurement of secondary cosmic microwave background anisotropies with two years of South Pole Telescope observations*, *Astrophys. J.* **755** (2012) 70 [1111.0932].
- [9] ACT collaboration, J. Fowler et al., *The Atacama Cosmology Telescope: A Measurement of the  $600 < \ell < 8000$  Cosmic Microwave Background Power Spectrum at 148 GHz*, *Astrophys. J.* **722** (2010) 1148 [1001.2934].
- [10] S. Das et al., *The Atacama Cosmology Telescope: A Measurement of the Cosmic Microwave Background Power Spectrum at 148 and 218 GHz from the 2008 Southern Survey*, *Astrophys. J.* **729** (2011) 62 [1009.0847].
- [11] K. T. Story et al., *A Measurement of the Cosmic Microwave Background Damping Tail from the 2500-square-degree SPT-SZ survey*, *Astrophys. J.* **779** (2013) 86 [1210.7231].
- [12] M. Seiffert, C. Borys, D. Scott and M. Halpern, *An upper limit to polarized submillimetre emission in Arp 220*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **374** (2007) 409 [astro-ph/0610485].

- [13] R. Battye, I. Browne, M. Peel, N. Jackson and C. Dickinson, *Statistical properties of polarized radio sources at high frequency and their impact on CMB polarization measurements*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **413** (2011) 132 [1003.5846].
- [14] SPT collaboration, J. W. Henning et al., *Measurements of the Temperature and E-Mode Polarization of the CMB from 500 Square Degrees of SPTpol Data*, *Astrophys. J.* **852** (2018) 97 [1707.09353].
- [15] W. L. K. Wu et al., *A Measurement of the Cosmic Microwave Background Lensing Potential and Power Spectrum from 500 deg<sup>2</sup> of SPTpol Temperature and Polarization Data*, *Astrophys. J.* **884** (2019) 70 [1905.05777].
- [16] SPT collaboration, F. Bianchini et al., *Constraints on Cosmological Parameters from the 500 deg<sup>2</sup> SPTpol Lensing Power Spectrum*, 1910.07157.
- [17] SPT collaboration, S. Bocquet et al., *Cluster Cosmology Constraints from the 2500 deg<sup>2</sup> SPT-SZ Survey: Inclusion of Weak Gravitational Lensing Data from Magellan and the Hubble Space Telescope*, *Astrophys. J.* **878** (2019) 55 [1812.01679].
- [18] PLANCK collaboration, P. A. R. Ade et al., *Planck 2015 results. XXIV. Cosmology from Sunyaev-Zeldovich cluster counts*, *Astron. Astrophys.* **594** (2016) A24 [1502.01597].
- [19] A. Vikhlinin et al., *Chandra Cluster Cosmology Project III: Cosmological Parameter Constraints*, *Astrophys. J.* **692** (2009) 1060 [0812.2720].
- [20] H. Böhringer, G. Chon and C. A. Collins, *The extended ROSAT-ESO Flux Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) IV. X-ray Luminosity Function and First Constraints on Cosmological Parameters*, *Astron. Astrophys.* **570** (2014) A31 [1403.2927].
- [21] H. Böhringer, G. Chon, J. Retzlaff, J. Trümper, K. Meisenheimer and N. Schartel, *The extended Northern ROSAT Galaxy Cluster Survey*

- (*NORAS II*) *I. Survey Construction and First Results*, *Astron. J.* **153** (2017) 220 [1704.06489].
- [22] H. Hildebrandt et al., *KiDS-450: Cosmological parameter constraints from tomographic weak gravitational lensing*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **465** (2017) 1454 [1606.05338].
  - [23] H. Hildebrandt et al., *KiDS+VIKING-450: Cosmic shear tomography with optical+infrared data*, *Astron. Astrophys.* **633** (2020) A69 [1812.06076].
  - [24] DES collaboration, T. M. C. Abbott et al., *Dark Energy Survey year 1 results: Cosmological constraints from galaxy clustering and weak lensing*, *Phys. Rev.* **D98** (2018) 043526 [1708.01530].
  - [25] DES, SPT collaboration, T. M. C. Abbott et al., *Dark Energy Survey Year 1 Results: Joint Analysis of Galaxy Clustering, Galaxy Lensing, and CMB Lensing Two-point Functions*, *Phys. Rev.* **D100** (2019) 023541 [1810.02322].
  - [26] HSC collaboration, C. Hikage et al., *Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data*, *Publ. Astron. Soc. Jap.* **71** (2019) Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 71, Issue 2, April 2019, 43, <https://doi.org/10.1093/pasj/psz010> [1809.09148].
  - [27] S. Joudaki et al., *KiDS+VIKING-450 and DES-Y1 combined: Cosmology with cosmic shear*, 1906.09262.
  - [28] A. G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, L. M. Macri and D. Scolnic, *Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics beyond  $\Lambda$ CDM*, *Astrophys. J.* **876** (2019) 85 [1903.07603].
  - [29] D. W. Pesce et al., *The Megamaser Cosmology Project. XIII. Combined Hubble constant constraints*, *Astrophys. J.* **891** (2020) L1 [2001.09213].

- [30] C. D. Huang, A. G. Riess, W. Yuan, L. M. Macri, N. L. Zakamska, S. Casertano et al., *Hubble Space Telescope Observations of Mira Variables in the Type Ia Supernova Host NGC 1559: An Alternative Candle to Measure the Hubble Constant*, 1908.10883.
- [31] S. Taubenberger, S. H. Suyu, E. Komatsu, I. Jee, S. Birrer, V. Bonvin et al., *The Hubble Constant determined through an inverse distance ladder including quasar time delays and Type Ia supernovae*, *Astron. Astrophys.* **628** (2019) L7 [1905.12496].
- [32] K. C. Wong et al., *H0LiCOW XIII. A 2.4% measurement of  $H_0$  from lensed quasars:  $5.3\sigma$  tension between early and late-Universe probes*, 1907.04869.
- [33] K. Liao, A. Shafieloo, R. E. Keeley and E. V. Linder, *Determining  $H_0$  Model-Independently and Consistency Tests*, 2002.10605.
- [34] R. A. Burenin, *Measurements of the Matter Density Perturbation Amplitude from Cosmological Data*, *Astron. Lett.* **44** (2018) 653 [1806.03261].
- [35] SPT collaboration, K. Aylor et al., *A Comparison of Cosmological Parameters Determined from CMB Temperature Power Spectra from the South Pole Telescope and the Planck Satellite*, *Astrophys. J.* **850** (2017) 101 [1706.10286].
- [36] E. Di Valentino, A. Melchiorri, E. V. Linder and J. Silk, *Constraining Dark Energy Dynamics in Extended Parameter Space*, *Phys. Rev.* **D96** (2017) 023523 [1704.00762].
- [37] Q.-G. Huang and K. Wang, *How the dark energy can reconcile Planck with local determination of the Hubble constant*, *Eur. Phys. J.* **C76** (2016) 506 [1606.05965].
- [38] M.-M. Zhao, D.-Z. He, J.-F. Zhang and X. Zhang, *Search for sterile neutrinos in holographic dark energy cosmology: Reconciling Planck*

observation with the local measurement of the Hubble constant, *Phys. Rev.* **D96** (2017) 043520 [1703.08456].

- [39] X. Li and A. Shafieloo, *A Simple Phenomenological Emergent Dark Energy Model can Resolve the Hubble Tension*, *Astrophys. J.* **883** (2019) L3 [1906.08275].
- [40] S. Pan, W. Yang, E. Di Valentino, A. Shafieloo and S. Chakraborty, *Reconciling  $H_0$  tension in a six parameter space?*, 1907.12551.
- [41] Z. Berezhiani, A. D. Dolgov and I. I. Tkachev, *Reconciling Planck results with low redshift astronomical measurements*, *Phys. Rev.* **D92** (2015) 061303 [1505.03644].
- [42] A. Chudaykin, D. Gorbunov and I. Tkachev, *Dark matter component decaying after recombination: Lensing constraints with Planck data*, *Phys. Rev.* **D94** (2016) 023528 [1602.08121].
- [43] V. Poulin, P. D. Serpico and J. Lesgourgues, *A fresh look at linear cosmological constraints on a decaying dark matter component*, *JCAP* **1608** (2016) 036 [1606.02073].
- [44] A. Chudaykin, D. Gorbunov and I. Tkachev, *Dark matter component decaying after recombination: Sensitivity to baryon acoustic oscillation and redshift space distortion probes*, *Phys. Rev.* **D97** (2018) 083508 [1711.06738].
- [45] J. L. Bernal, L. Verde and A. G. Riess, *The trouble with  $H_0$* , *JCAP* **1610** (2016) 019 [1607.05617].
- [46] K. Aylor, M. Joy, L. Knox, M. Millea, S. Raghunathan and W. L. K. Wu, *Sounds Discordant: Classical Distance Ladder &  $\Lambda$ CDM -based Determinations of the Cosmological Sound Horizon*, *Astrophys. J.* **874** (2019) 4 [1811.00537].
- [47] D. Blas, J. Lesgourgues and T. Tram, *The Cosmic Linear Anisotropy Solving System (CLASS) II: Approximation schemes*, *JCAP* **1107** (2011) 034 [1104.2933].

- [48] B. Audren, J. Lesgourgues, K. Benabed and S. Prunet, *Conservative Constraints on Early Cosmology: an illustration of the Monte Python cosmological parameter inference code*, *JCAP* **1302** (2013) 001 [1210.7183].
- [49] T. Brinckmann and J. Lesgourgues, *MontePython 3: boosted MCMC sampler and other features*, 1804.07261.
- [50] A. Lewis, *GetDist: a Python package for analysing Monte Carlo samples*, 1910.13970.
- [51] A. Chudaykin, D. Gorbunov and N. Nedelko, *Combined analysis of Planck and SPTPol data favors the early dark energy models*, 2004.13046.