

Министерство просвещения Российской Федерации

Полное наименование учебного заведения

VII Международный конкурс исследовательских работ школьников

Research start 2024/2025

Исследовательская работа по астрономии

Исследование точности определения параметров звёзд по спектральному распределению энергии

Выполнил: Лазарев Михаил Александрович

ученик 10 класса

Руководитель: Дедов Евгений Олегович

Заведующий лабораторией физики звёзд, кандидат физ.-мат. наук

Москва, 2024г

Содержание

Введение.....	3
Теория.....	3
1.1 Инструменты работы.....	3
1.2 Метод.....	4
1.3 Генерация данных.....	4
1.4 Подгонка моделей звезд под данные.....	5
1.5 Обозначения.....	5
1.6 Спектры и фильтры:.....	6
Результаты.....	6
Анализ.....	7
Заключение.....	8
Приложения.....	9
2.1 Модель Kurucz.....	9
2.2 Модель черного тела.....	10
2.3 Таблица погрешности и неопределенности для модели Kurucz.....	12
2.4 Таблица погрешности и неопределенности для модели черного тела.....	12
Список литературных источников.....	12

Введение

Определение физических характеристик звёзд, таких как эффективная температура, является одной из ключевых задач современной астрофизики. Фотометрические методы, основанные на анализе излучения звёзд в различных диапазонах спектра, широко используются во многих работах, например в таких как [1], [2], [3]. Однако, несмотря на распространённость метода, его погрешности практически не изучены, в особенности это касается, например, холодных звёзд с эффективной температурой ниже 5000 К. Это связано с тем, что длина волны, соответствующая максимуму излучения таких объектов, лежит за пределами оптического диапазона: для более горячих звёзд это ультрафиолетовая область спектра, а для более холодных — инфракрасная. Также для звёзд со средней температурой, несмотря на то что их максимумы попадают в диапазоны наиболее распространённых фильтров, используемых в современных миссиях и телескопах, существует не так много работ, изучающих погрешности этого метода (Arcavi et al., (2022)[4]; McDonald et al., 2024[5]). Несмотря на эти ограничения, оптическая фотометрия продолжает активно использоваться для изучения звёзд благодаря доступности данных крупнейших обзорных миссий, таких как Gaia, PanSTARRS и SDSS (Gaia Collaboration et al., 2016[6]; Chambers et al., 2016[7]; SDSS Doi et al., 2015[8]). Эти проекты предоставляют огромные объёмы фотометрических данных, что делает их ценным ресурсом для астрофизических исследований. Однако точность определения параметров звёзд часто остаётся недостаточно изученной, а ошибки измерений часто недооцениваются. Целью данной работы является исследование ошибок оценки температуры звёзд численным методом.

Теория

1.1 Инструменты работы

Все создание и обработка спектров велась в python. Для создания спектров использовалась библиотека pysynphot[9], для подгонки модели использовалась функция `curve_fit` из библиотеки `scipy.optimize`. Часть фильтров бралась из `pysynphot`, а другая с сайта `svo2.cab.inta-csic.es`[10]. Также для визуализации и работы с данными использовались `matplotlib`, `numpy` и латех.

1.2 Метод

Метод, используемый в данной работе, заключается в следующем. Сначала создается спектр с помощью библиотеки `pysynphot`. Потом на спектре применяются фильтры из той же библиотеки с целью получения звездной величины, и к ним искусственно добавляется погрешность. И в конце для разных моделей звезды, доступных в данной библиотеке, подгоняются параметры, такие как температура, $\log(g)$ и металличность, что позволяет максимально точно фитировать данные с целью определения температуры.

1.3 Генерация данных

Для генерации спектров использовались две принципиально разных модели: черного тела, которое бралось из библиотеки `pysynphot` и реалистичные спектры из атласа моделей звёздных атмосфер *Atlas of Model Atmospheres* [11], также поставляемые библиотекой `pysynphot`. Оба класса моделей создавались в одном диапазоне температур от 3500 K до 10000 K. Для изучения была выбрана металличность, принимаемая равной 0, а $\log(g) = 4$. Спектры нормируются на радиус Солнца, наблюдаемого с расстояния 10 пк. Это сделано для того чтобы исключить влияние неизвестного свободного коэффициента. Однако стоит сказать, что в реальности спектр от модельного будет различаться на некоторую константу, которая почти всегда неизвестна (так как зачастую расстояние и радиус звезды, которые в первую очередь влияют на константу, неизвестны);

однако метод `curve_fit` предсказывает с достаточной точностью, благодаря которой можно пренебречь погрешностью, вносимой свободным коэффициентом, и поэтому в данной работе это не исследовалось. Далее нужно получить звездные величины в различных фильтрах. Использовались фильтры из видимого диапазона, ультрафиолета и ближнего ИК. Для получения звездной величины библиотека `rusynphot` дискретно интегрирует спектр с разными весовыми коэффициентами для разных длин волн, после чего поток сравнивается с аналогичным для Веги, для перевода в систему звездных величин `Vegamag`. Далее идет этап добавления погрешностей в значения звездных величин. Всего рассматривалось три погрешности: 0.05 mag, 0.10 mag, 0.15 mag. Эти погрешности соответствуют высокой, умеренной и низкой точности измерений современных устройств. Этот шаг является одним из самых главных, так как в данной работе мы исследуем именно влияние погрешностей на точность измерения температуры. Для добавления погрешностей используется нормальное распределение со среднеквадратичным отклонением, равным погрешности, и средним значением, равным нулю. Нормальное распределение взято из библиотеки `numpy`.

1.4 Подгонка моделей звезд под данные

Я использую метод прямого моделирования, используемый Brown et al. (2016)[12] и Arcavi et al (2022)[4], при котором из модельного спектра (в нашем случае — the Kurucz model[11]) получают звездные величины в различных спектрах, а затем сравнивается с подгоняемыми данными, используя хи-квадрат в качестве функции правдоподобия, причем все полосы взвешиваются одинаково.

1.5 Обозначения

В дальнейшем мы будем использовать термин «погрешность» для обозначения разницы между средним измеренным значением и истинным значением, в то время как термин «неопределенность» будет обозначать оценку разброса измеренного значения, вызванного погрешностями измерений или

апостериорными данными подгонки. Например, если для черного тела с температурой 10000 K мы измеряем температуру 8000 ± 3000 K, то погрешность составляет 2000 K, а неопределенность — 3000 K. В работе фильтры Johnson Morgan обозначаются как UBVRI. Фильтры F218W и F275W обозначаются как WW. Фильтры F154W и N242W обозначаются как FN. Фильтры PanSTARRS z и y обозначаются как ZY или YZ.

1.6 Спектры и фильтры:

Для видимого диапазона взяты фильтры (U)BVRI(Johnson Morgan 1953[13]; Cousins 1976[14]), будет рассмотрен вариант с U и без него. Также стоит отметить, что фильтр I немного залезает в ближний ИК, но так как он является достаточно распространённым, то мы припишем его к визуальным фильтрам. Для ультрафиолета использовались 2 комбинации фильтров: F218W и F275W (в дальнейшем называются WW), F154W и N242W (в дальнейшем называются FN). Для ближнего ИК использовались также 2 комбинации фильтров: JHK (Cohen et al. (2003)[15]) и фильтры из обзора PanSTARRS z и y. Фильтры F154W, N242W, z и y взяты с сайта svo2.cab.inta-csic.es[10], а остальные из библиотеки pysynphot.

Результаты

В итоге глобально есть три варианта комбинации фильтров: визуальные, визуальные + ультрафиолет, визуальные + ближний ИК. Для каждого из вариантов есть две комбинации фильтров, при том для визуальных фильтров в комбинации с другими фильтрами используются фильтры BVRI. Также спектры аппроксимируются двумя моделями BlackBody и the Kurucz model[11] для трёх различных погрешностей. Всего получается 36 результирующих аппроксимаций, которые мы представляем в виде графиков (считая график зависимости и график отклонения под ним как один). Для каждой комбинации фильтров и погрешности было сделано по 10 точек (равномерно от 3500 K до 10000 K) и на каждую точку по 20 усреднений (то есть 20 раз заново генерировалась погрешность с заданным среднеквадратичным отклонением и

средним значением 0). В качестве границ области неопределенности границами служили средние значения \pm среднеквадратичное отклонение полученной температуры модели для этой изначальной температуры. На графиках также пунктиром отмечена линия $x = y$, а жирная красная линия отвечает за среднее значение. В качестве метрики успешности аппроксимации набора фильтра использовался хи-квадрат

Анализ

Наиболее эффективной комбинацией фильтров (успешность оценивалась по среднему хи-квадрату для всего диапазона температур) для аппроксимации модели Kurucz оказалось при погрешности 0.05 mag BVRIFN, а при погрешности 0.10 или 0.15 mag BVRIJHK. При аппроксимации BlackBody это оказалось BVRI. Стоит отметить, что, несмотря на то, что кажется, что при добавлении большего количества фильтров предсказания будут лучше, однако при аппроксимации черного тела мы можем видеть, что это далеко не всегда так. Причиной этому служит то, что значения, получаемые с использованием некоторых фильтров, имеют похожие отклонения от значений фильтров при применении их на спектре звезды, из-за чего предсказания выходят достаточно точными. Однако другие фильтры, например, те, что выходят в красную часть спектра, где у обеих моделей похожие графики, получаются более точными. Из-за этой разницы аппроксимация с использованием большего числа фильтров иногда выходит значительно хуже. Это очень хорошо видно на графиках с аппроксимацией моделью the Kurucz и набором UBVRI (без U получается лучше). При фитировании черного тела диапазон температур, полученный с разными наборами фильтров, варьируется от очень малых значений до тысяч кельвинов при максимальной рассматриваемой температуре. Погрешность оказывается довольно значительной, достигая 20% от измеряемой температуры. Низкие температуры примерно в половине случаев удаётся предсказать с высокой точностью, однако начиная с 7000 K наблюдается существенное отклонение. Кроме того, при использовании наборов фильтров, включающих

ультрафиолетовые (в данном случае речь идёт о фильтрах FN и WW), можно заметить, что среднеквадратичное отклонение температуры оказывается пренебрежимо малым, однако среднее значение сильно отклоняется от истинного. Это неудивительно: большее количество фильтров обеспечивает более высокую точность, но поскольку модель черного тела существенно отличается от модели Kurucz, возникает систематическое смещение. При использовании фильтра U этот эффект также наблюдается, но выражен слабее. Что касается модели Kurucz, её среднее отклонение составляет от 250 до 500 K, а предсказанная температура в среднем очень близка к истинной, лишь слегка отклоняясь при приближении к 10 000 K при использовании фильтров BVRIYZ.

Заключение

Результаты исследования показали, что наиболее точные оценки температуры звёзд достигаются при использовании комбинации фильтров BVRIJHK для модели Kurucz и BVRI для модели BlackBody, особенно при низких погрешностях измерений (0.05 mag). Выяснилось, что увеличение числа фильтров не всегда улучшает точность: в некоторых случаях это приводит к ухудшению из-за особенностей спектрального распределения. Наилучшие результаты для модели Kurucz получены с фильтрами BVRIFN при погрешности 0.05 mag, а для более высоких погрешностей (0.10 и 0.15 mag) оптимальной стала комбинация BVRIJHK. Таким образом, выбор фильтров и модели спектра существенно влияет на точность определения температуры, что важно учитывать при обработке данных и оценки температуры.

Приложения

2.1 Модель Kurucz

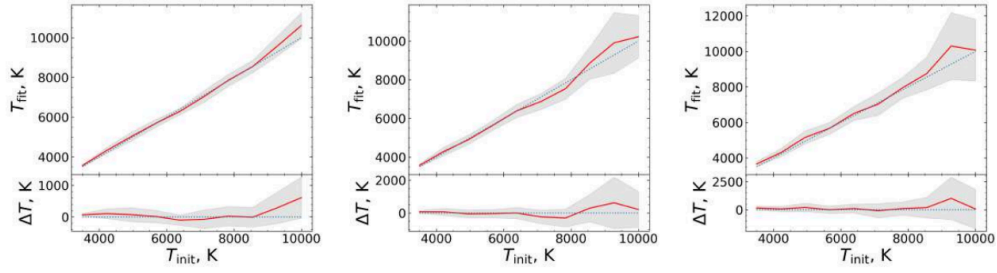


Рис. 1: Распределение ошибок оценки температуры звёзд методом фитирования моделей спектров (для фитирования используется the Kurucz model) используя фильтры BVR с различными ошибками фотометрии (0.05 – левая панель, 0.10 средняя панель, 0.15 – правая панель). Зависимость полученной температуры звезды от исходной температуры звезды показана красным цветом. Для наглядности, прямая вида $y = x$ нанесена синим пунктиром. Черная выделенная область отражает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. На графике внизу показана разница между исходной и полученной температурами в зависимости от исходной температуры.

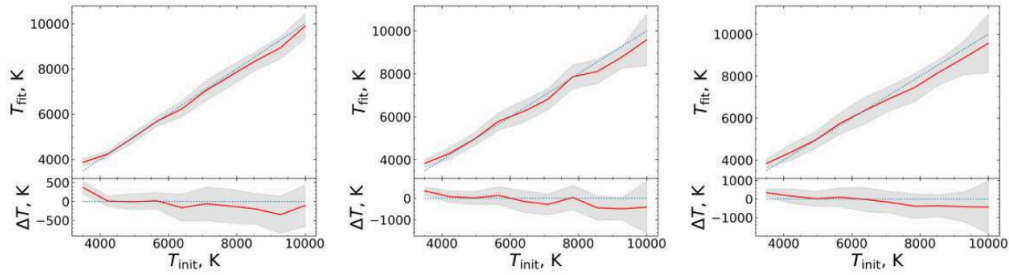


Рис. 2: Распределение ошибок оценки температуры звёзд методом фитирования моделей спектров (для фитирования используется the Kurucz model) используя фильтры UBVR с различными ошибками фотометрии (0.05 – левая панель, 0.10 средняя панель, 0.15 – правая панель). Зависимость полученной температуры звезды от исходной температуры звезды показана красным цветом. Для наглядности, прямая вида $y = x$ нанесена синим пунктиром. Черная выделенная область отражает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. На графике внизу показана разница между исходной и полученной температурами в зависимости от исходной температуры.

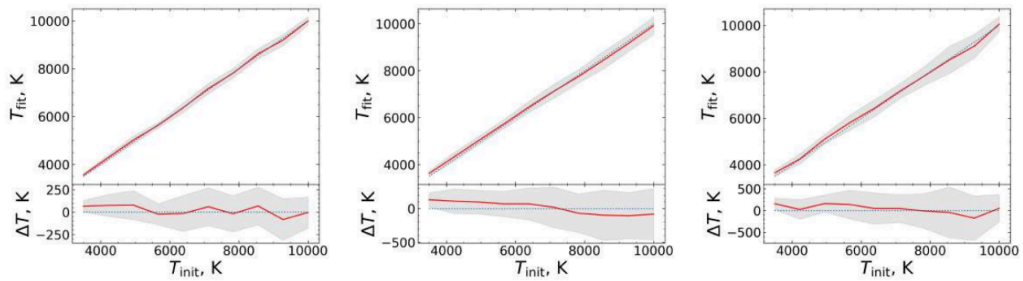


Рис. 4: Распределение ошибок оценки температуры звёзд методом фитирования моделей спектров (для фитирования используется the Kurucz model) используя фильтры BVR filter with W (BVR filter with W) с различными ошибками фотометрии (0.05 – левая панель, 0.10 средняя панель, 0.15 – правая панель). Зависимость полученной температуры звезды от исходной температуры звезды показана красным цветом. Для наглядности, прямая вида $y = x$ нанесена синим пунктиром. Черная выделенная область отражает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. На графике внизу показана разница между исходной и полученной температурами в зависимости от исходной температуры.

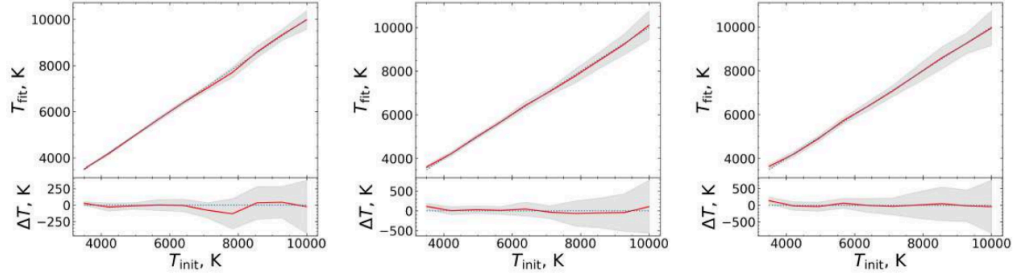


Рис. 5: Распределение ошибок оценки температуры звёзд методом фитирования моделей спектров (для фитирования используется the Kurucz model) используя фильтры BVRJHK с различными ошибками фотометрии (0.05 – левая панель, 0.10 – средняя панель, 0.15 – правая панель). Зависимость полученной температуры звезды от исходной температуры звезды показана красным цветом. Для наглядности, прямая вида $y = x$ нанесена синим пунктиром. Черная выделенная область отражает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. На графике внизу показана разница между исходной и полученной температурами в зависимости от исходной температуры.

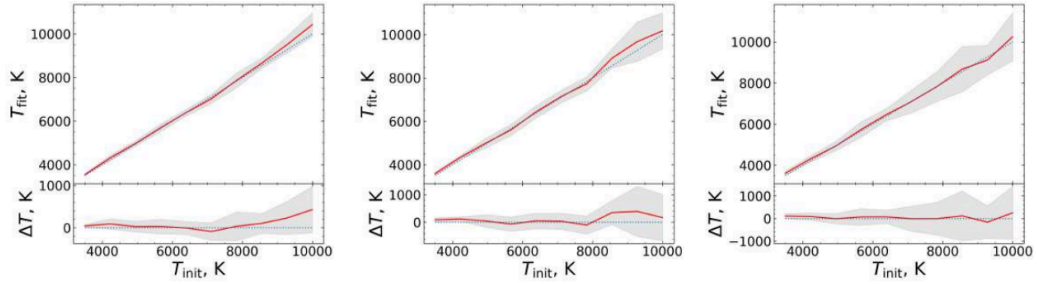


Рис. 6: Распределение ошибок оценки температуры звёзд методом фитирования моделей спектров (для фитирования используется the Kurucz model) используя фильтры BVRJYZ с различными ошибками фотометрии (0.05 – левая панель, 0.10 – средняя панель, 0.15 – правая панель). Зависимость полученной температуры звезды от исходной температуры звезды показана красным цветом. Для наглядности, прямая вида $y = x$ нанесена синим пунктиром. Черная выделенная область отражает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. На графике внизу показана разница между исходной и полученной температурами в зависимости от исходной температуры.

2.2 Модель черного тела

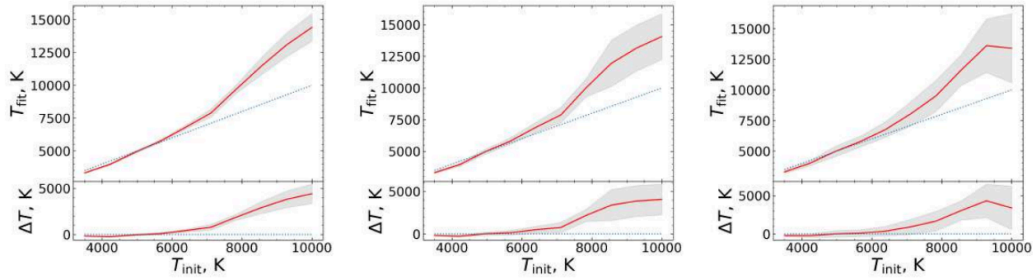


Рис. 7: Распределение ошибок оценки температуры звёзд методом фитирования моделей спектров (для фитирования используется the BlackBody model) используя фильтры BVRI с различными ошибками фотометрии (0.05 – левая панель, 0.10 – средняя панель, 0.15 – правая панель). Зависимость полученной температуры звезды от исходной температуры звезды показана красным цветом. Для наглядности, прямая вида $y = x$ нанесена синим пунктиром. Черная выделенная область отражает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. На графике внизу показана разница между исходной и полученной температурами в зависимости от исходной температуры.

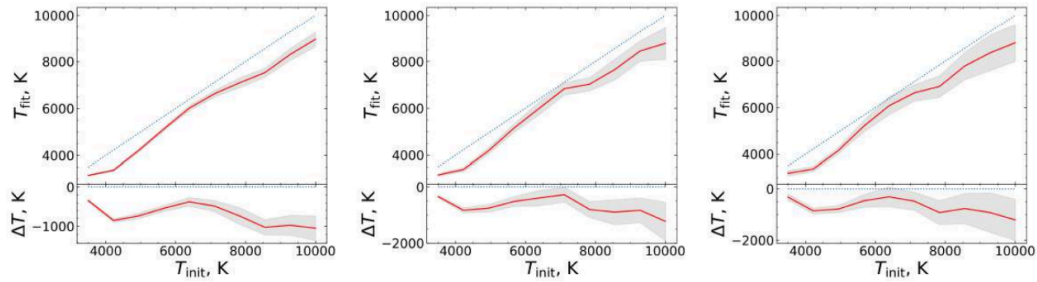


Рис. 8: Распределение ошибок оценки температуры звёзд методом фитирования моделей спектров (для фитирования используется the BlackBody model) используя фильтры UBVR с различными ошибками фотометрии (0.05 – левая панель, 0.10 – средняя панель, 0.15 – правая панель). Зависимость полученной температуры звезды от исходной температуры звезды показана красным цветом. Для наглядности, прямая вида $y = x$ нанесена синим пунктиром. Черная выделенная область отражает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. На графике внизу показана разница между исходной и полученной температурами в зависимости от исходной температуры.

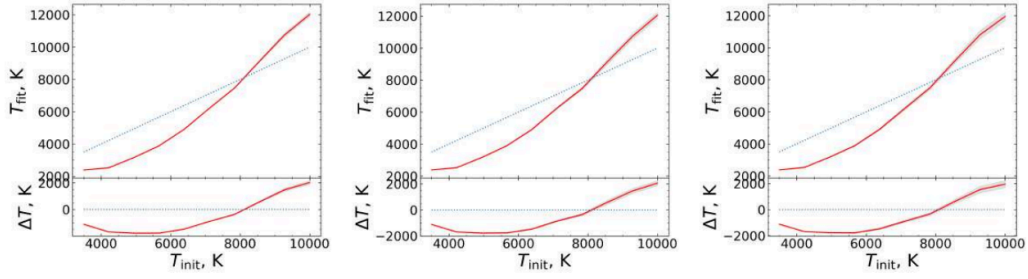


Рис. 9: Распределение ошибок оценки температуры звёзд методом фитирования моделей спектров (для фитирования используется the BlackBody model) используя фильтры BVRIFN с различными ошибками фотометрии (0.05 – левая панель, 0.10 – средняя панель, 0.15 – правая панель). Зависимость полученной температуры звезды от исходной температуры звезды показана красным цветом. Для наглядности, прямая вида $y = x$ нанесена синим пунктиром. Черная выделенная область отражает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. На графике внизу показана разница между исходной и полученной температурами в зависимости от исходной температуры.

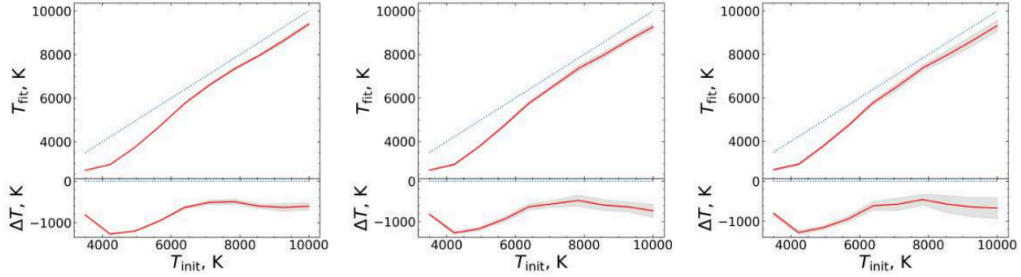


Рис. 10: Распределение ошибок оценки температуры звёзд методом фитирования моделей спектров (для фитирования используется the BlackBody model) используя фильтры BVRIWW с различными ошибками фотометрии (0.05 – левая панель, 0.10 – средняя панель, 0.15 – правая панель). Зависимость полученной температуры звезды от исходной температуры звезды показана красным цветом. Для наглядности, прямая вида $y = x$ нанесена синим пунктиром. Черная выделенная область отражает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. На графике внизу показана разница между исходной и полученной температурами в зависимости от исходной температуры.

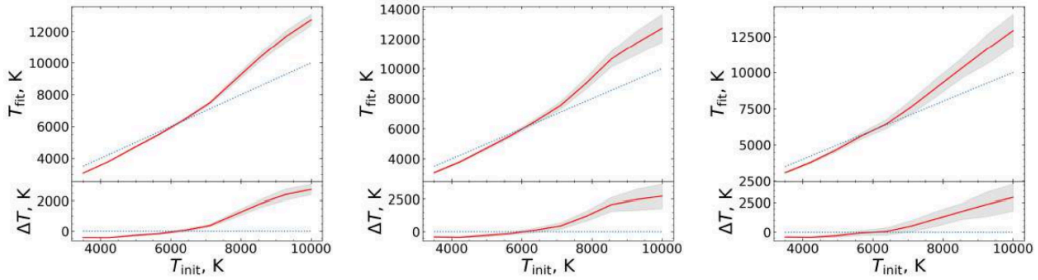


Рис. 11: Распределение ошибок оценки температуры звёзд методом фитирования моделей спектров (для фитирования используется the BlackBody model) используя фильтры BVRIJHK с различными ошибками фотометрии (0.05 – левая панель, 0.10 – средняя панель, 0.15 – правая панель). Зависимость полученной температуры звезды от исходной температуры звезды показана красным цветом. Для наглядности, прямая вида $y = x$ нанесена синим пунктиром. Черная выделенная область отражает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. На графике внизу показана разница между исходной и полученной температурами в зависимости от исходной температуры.

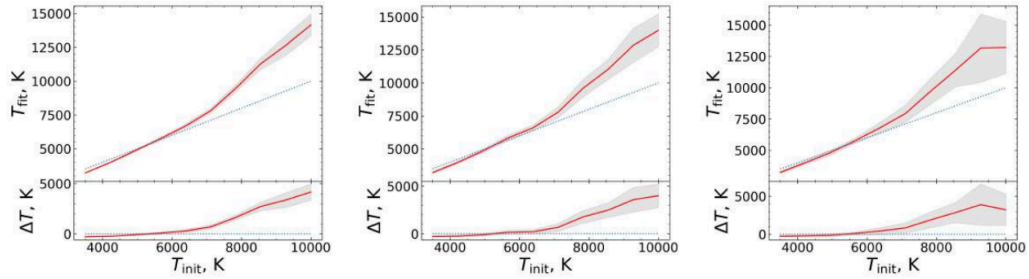


Рис. 12: Распределение ошибок оценки температуры звёзд методом фитирования моделей спектров (для фитирования используется the BlackBody model) используя фильтры BVRIYZ с различными ошибками фотометрии (0.05 – левая панель, 0.10 – средняя панель, 0.15 – правая панель). Зависимость полученной температуры звезды от исходной температуры звезды показана красным цветом. Для наглядности, прямая вида $y = x$ нанесена синим пунктиром. Черная выделенная область отражает среднеквадратичное отклонение от среднего значения. На графике внизу показана разница между исходной и полученной температурами в зависимости от исходной температуры.

2.3 Таблица погрешности и неопределённости для модели Kurucz

Фотометрическая система	Погрешность (mag)	Неопределённость (K)	Погрешность (K)
BVRI	0.05 mag	[60, 690]	[−190, +320]
	0.10 mag	[85, 1430]	[−140, +900]
	0.15 mag	[115, 1530]	[−80, +240]
UBVRI	0.05 mag	[45, 420]	[−40, +60]
	0.10 mag	[90, 780]	[−140, +165]
	0.15 mag	[100, 1100]	[−300, +160]
BVRIFN	0.05 mag	[30, 390]	[−75, +85]
	0.10 mag	[60, 490]	[−270, +70]
	0.15 mag	[110, 480]	[−150, +130]
BVRIWW	0.05 mag	[70, 330]	[−75, +90]
	0.10 mag	[90, 420]	[−180, +90]
	0.15 mag	[110, 580]	[−340, +175]
BVRIJHK	0.05 mag	[60, 370]	[−50, +40]
	0.10 mag	[95, 595]	[−100, +90]
	0.15 mag	[105, 775]	[−200, +100]
BVRIYZ	0.05 mag	[30, 550]	[−90, +430]
	0.10 mag	[75, 905]	[−100, +395]
	0.15 mag	[105, 1170]	[−160, +255]

2.4 Таблица погрешности и неопределённости для модели черного тела

Фотометрическая система	Погрешность (mag)	Неопределённость (K)	Погрешность (K)
BVRI	0.05	[40, 820]	[−250, +4600]
	0.10	[70, 1750]	[−260, +5700]
	0.15	[120, 3000]	[−200, +3920]
UBVRI	0.05	[25, 210]	[−700, −200]
	0.10	[40, 530]	[−710, −180]
	0.15	[70, 770]	[−690, −50]
BVRIFN	0.05	[4, 95]	[−1750, +1980]
	0.10	[9, 180]	[−1780, +1980]
	0.15	[12, 380]	[−1760, +2100]
BVRIWW	0.05	[12, 92]	[−1220, −510]
	0.10	[26, 140]	[−1220, −520]
	0.15	[45, 340]	[−1220, −480]
BVRIJHK	0.05	[14, 200]	[−630, +450]
	0.10	[30, 400]	[−610, +430]
	0.15	[40, 680]	[−630, +720]
BVRIYZ	0.05	[20, 240]	[−600, +24]
	0.10	[50, 410]	[−595, +40]
	0.15	[45, 570]	[−600, +0]

Список литературных источников

1. Bessell M. S. UBVRI photometry II: the Cousins VRI system, its temperature and absolute flux calibration, and relevance for two-dimensional photometry // . — 1979. — Vol. 91. — P. 589–607.
2. Gordon Kathryn D., Gies Douglas R., Schaefer Gail H. et al. Angular sizes, radii, and effective temperatures of B-type stars from optical interferometry with the CHARA array // The Astrophysical Journal. — 2019. — Vol. 873, № 1. — P. 91.
3. Apellániz J. Maíz, Sota A. Towards using optical/NIR photometry to measure the temperature of O stars // arXiv preprint astro-ph/0702516. — 2007.

4. Arcavi Iair. Errors when constraining hot blackbody parameters with optical photometry // *The Astrophysical Journal*. — 2022. — Vol. 937, № 2. — P. 75.
5. McDonald Iain, Zijlstra Albert A., Cox Nick L. J. et al. PySSED: an automated method of collating and fitting stellar spectral energy distributions // *RAS Techniques and Instruments*. — 2024. — Vol. 3, № 1. — P. 89–107.
6. Collaboration Gaia et al. The Gaia mission // *arXiv preprint arXiv:1609.04153*. — 2016.
7. PAN-STARRS/PS1. PAN-STARRS/PS1 Filter Profiles. — 2023. — Accessed: 2023-10-01.
8. Doi Mamoru, Tanaka Masayuki, Fukugita Masataka et al. Photometric response functions of the Sloan Digital Sky Survey imager // *The Astronomical Journal*. — 2010. — Vol. 139, № 4. — P. 1628.
9. Institute STScI (Space Telescope Science). pysynphot: Synthetic Photometry Software Package. — 2023. — Accessed: 2023-10-01.
10. Spanish Virtual Observatory. Filter Profile Service (FPS). — Online. — 2023. — Accessed: 03.03.2025.
11. Kurucz Robert L. Model atmospheres for population synthesis // *Symposium-International Astronomical Union / Cambridge University Press*. — 1992. — Vol. 149. — P. 225–232.
12. Brown Peter J., Breeveld Alice, Roming Peter W. A., Siegel Michael. Interpreting flux from broadband photometry // *The Astronomical Journal*. — 2016. — Vol. 152, № 4. — P. 102.
13. Johnson H. L., Morgan W. W. Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes Spectral Atlas // *The Astrophysical Journal*. — 1953. — Vol. 117. — P. 313.
14. Cousins A. W. J. VRI Standards in the E Regions // *Memoirs of the Royal Astronomical Society*. — 1976. — Vol. 81. — P. 25.
15. Cohen Martin, Wheaton Wm. A., Megeath S. T. Spectral Irradiance Calibration in the Infrared. XIV. The Absolute Calibration of 2MASS // . — 2003. — Vol. 126, № 2. — P. 1090–1096.