

КОНТРОЛЬ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ ПОЛОСЫ ДЕТЕКТОРА MASS

Корнилов В. Г.

1 Введение

В работе (*Tokovinin A. Polychromatic scintillation. JOSA(A), 2003, V. 20 P. 686-689*) показано, что используемые при восстановлении высотного профиля турбулентности весовые функции зависят и от положения (центральной длины волны λ_0) и от ширины ($\Delta\lambda$ полосы реакции детектора MASS и, естественно, от распределения энергии в спектре излучения звезды-источника. В данной работе рассмотрено влияние неопределенности спектрального состава излучения, попадающего на детектор и причины, вызывающие эти неопределенности. В конце высказаны пожелания, которые позволят уменьшить систематические ошибки определения профилей турбулентности в будущем и скорректировать данные, уже полученные на работающих приборах.

2 Причины существующего многообразия

Спектральная чувствительность детектора MASS — ФЭУ R7400 с бищелочным катодом приведена на Рис.1. Она, вместе со спектральным пропусканием оптики прибора, определяет общую спектральную чувствительность канала MASS. Дополнительным агентом является и земная атмосфера. Напомним, что в приборе на пути света, попадающего на детектор, расположены следующие оптические элементы:

- питающий телескоп — Шмидт-Кассегрен или чистый Кассегрен (ТМТ программа),
- линза Фабри — один или два ахромата, с визуальным просветлением,
- сегментатор — алюминиевый слой с защитным покрытием,
- перебрасывающее зеркало — многослойное диэлектрическое зеркало или алюминиевый слой с защитным покрытием.

Полоса оригинального прибора MASS формировалась: с длинноволновой стороны дихроичным делителем, направляющим красное излучение в подсмотр, а с коротковолновой стороны желтым цветным стеклом типа Schott GG420. Сегментатор и перебрасывающие зеркала были покрыты алюминием с защитным покрытием. Особенности пропускания оптических элементов в синей области спектра ($\lambda < 420$ nm) значения не имеют.

В первых приборах MASS/DIMM (MD1 – MD10) для повышения общего пропускания перебрасывающие зеркала были покрыты многослойным диэлектрическим зеркалом, оптимизированным на диапазон 420 – 600 nm. При изготовлении, однако, коротковолновая граница этого зеркала оказалась около 430 nm. Обрезающий фильтр был изготовлен из стекла, оказавшегося после измерений аналогом GG455. Такой фильтр привел к тому, что

суммарное пропускание прибора оказалось недостаточным, хотя полоса оказалась достаточно близкой к стандартной фотометрической полосе V . Альтернатива — иметь меньше света, но заведомо определенную коротковолновую границу или иметь больше света (т.е. лучшую статистическую точность), но не совсем определенную границу, решилась в пользу второго выбора. Это естественно, поскольку полосу пропускания можно уточнить впоследствии, а данные с большой случайной ошибкой улучшить уже нельзя.

Реализация этого выбора заключалась в удалении из оптического тракта прибора MASS обрезаящих светофильтров. При этом действительно сигнал возрос и, в некоторых случаях, значительно. Однако к тому времени были изготовлено еще несколько приборов, но уже с чисто алюминиевыми перебрасывающими зеркалами.

При отсутствии специального обрезаящего фильтра, коротковолновая граница спектральной полосы чувствительности MASS формируется особенностями пропускания оптических элементов в УФ части спектра.

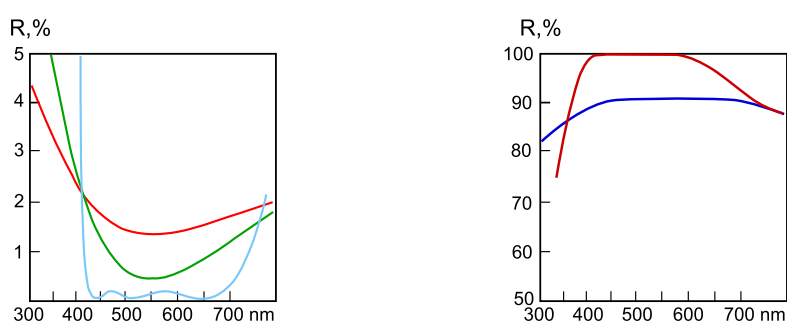


Рис. 1: Отражение от преломляющей поверхности с просветляющим покрытием (слева). Красная кривая — слой MgF_2 на стекле BK7, зеленая кривая — слой MgF_2 на стекле SF5, голубая — улучшенное многослойное покрытие для визуального диапазона. Справа — отражение от алюминиевого слоя без просветляющего покрытия (синяя кривая) и с просветляющим для визуального диапазона (красная).

Так например, в MASS/DIMM для измерения турбулентности по программе ESO с телескопом Celestron 11 имеется 4 отражающих покрытия и 6 преломляющих поверхностей. И отражающие и преломляющие поверхности приводят к понижению пропускания в УФ диапазоне. В основном, из-за наличия просветляющих покрытий, оптимизированных для визуального диапазона ($\lambda > 400 \text{ nm}$). На Рис. 1 приведены типичные зависимости, построенные по данным фирмы Edmund Optics, отражения просветляющих покрытий на преломляющих (слева) и отражающих (справа) поверхностях. Используемые в линзе Фабри ахроматы покрыты слоем MgF_2 , а вот коррекционная пластина телескопа C11 (и, вероятно, телескопов Mead) — многослойном просветляющим покрытием. К сожалению, для таких покрытий точные данные в диапазоне короче 400 nm не доступны.

В диапазоне $\lambda < 350$ основную роль играет стекло SF5, входящее в состав ахроматов. Оно блокирует все излучение короче 320 nm, но на $\lambda = 360$ достаточно прозрачно. Аналогично ведет себя оптический клей.

Коэффициент отражения от зеркальной поверхности с защитным покрытием (см. Рис. 1, слева) уменьшается в диапазоне от 400 nm до 300 nm всего на $\approx 10\%$. Если покрытие имеет оптимизированное на визуальный диапазон многослойное покрытие, то потери составляют до $\approx 40\%$. При четырех поверхностях (две из которых имеют оптимизированное

покрытие) пропускание системы на $\lambda = 300$ составляет примерно 0.3 от пропускания на $\lambda = 400$.

Точно вычислить пропускание всей оптики MASS, включая питающий телескоп, в диапазоне $\lambda < 400$ nm затруднительно, поскольку в этом участвует много факторов одновременно и неопределенность получаемого результата велика.

Измерение же спектрального пропускания всей оптической системы в сборе представляют собой большую отдельную задачу, требующую значительных усилий и необходимой аппаратуры.

3 Набор существующих кривых реакции прибора

На Рис. 2 нанесены спектральные кривые реакции различных версий прибора MASS. Кривая *mass* соответствует оригинальному MASS, изготовленному в 3 экземплярах. Кривая *mass_dimm* определена для приборов MASS/DIMM с обрезаящими желтыми фильтрами и многослойными покрытиями перебрасывающих зеркал. Этим же приборам, при удаленных фильтрах, соответствуют кривые *without* и *without_cut*. Вторая из этих кривых учитывает дополнительные потери УФ излучения, вызванные прибором и питающим телескопом.

Кривая *eso_md* характерна для приборов MASS/DIMM с перебрасывающими зеркалами с алюминиевым покрытием, но без учета пропускания питающего телескопа. Эта кривая должна использоваться при установке прибора на телескопе с обычными зеркалами. Пропускание телескопа системы Шмидт-касегрен, с оптикой, оптимизированной для визуального диапазона, приводит к кривой *elt_mass_dimm*.

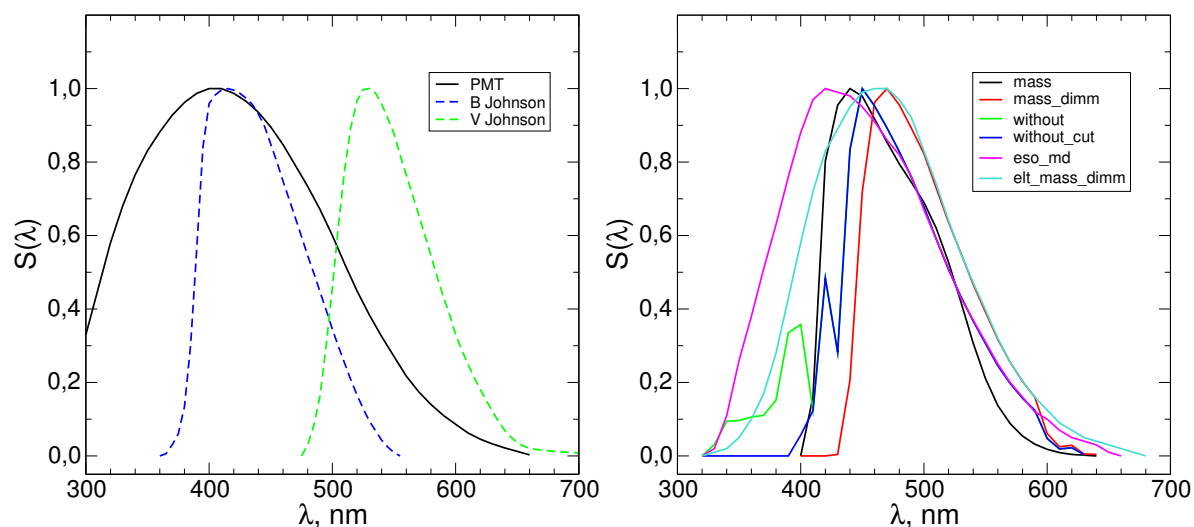


Рис. 2: Слева: кривая спектральной чувствительности (фотонная) бищелочного ФЭУ фирмы Hamamatsu и стандартные фотометрические полосы *B* и *V*. Справа: Набор спектральных кривых чувствительности приборов MASS.

Параметры конкретных реализаций фотометрических полос MASS приведены в таблице ниже.

Таблица 1: Интегральные параметры различных фотометрических полос MASS. λ_0 — центральная длина волны, λ_{eff} — эффективная длина волны для спектрального класса A0 V, $\Delta\lambda$ — эффективная ширина (интеграл под кривой). Все величины в nm.

Реализация	λ_0	λ_{eff}	$\Delta\lambda$
mass	475	469	103
mass_dimm	501	496	94
without	474	470	99
without_cut	486	479	88
eso_md	455	453	157
elt_mass_dimm	474	467	149

Заметим, что мы используемые фотонные, а не энергетические, кривые спектральной чувствительности, поэтому при расчетах также нужно использовать фотонные распределения энергии в спектрах звезд.

4 Величина эффекта неопределенности полосы

Характер изменения весовых функций при изменении положения и ширины спектральной полосы детектора проведен в цитированной выше работе на основе модельной кривой распределения энергии в пределах полосы чувствительности в виде гауссового профиля. Смещение полосы в коротковолновую сторону приводит к увеличению весовой функции, увеличение ширины — к завалу функции при больших высотах. Следует помнить, что использование завышенной весовой функции приводит в результате к занижению интенсивности турбулентности, а заваленной на больших высотах — к увеличению высоты слоев.

Для количественного анализа возможных ошибок, связанных с неправильным выбором кривой реакции прибора или неточным определением этой кривой, при расчете WF мы использовали реальные спектральные кривые из нашего набора. Бралось распределение энергии звезды B0 V, поскольку 1) для него эффекты максимальны и 2) для измерений выбираются, как правило, белые звезды. На Рис. 3, внизу, нанесено отношение весовых функций для кривой **eso_md** и для этой же кривой, но сдвинутой на 20 nm в красную сторону. Видно, что WF для нормальных индексов изменились не более чем на 5%. для дифференциальных несколько более, почти на 10%. Это вызвано и тем, что при таком сдвиге несколько уменьшилась относительная ширина полосы. Использование более красной кривой приведет к завышению интеграла турбулентности примерно на эти же 10% и некоторому малому, но систематическому общему сдвигу слоев вниз.

В верхней части Рис. 3 нанесено отношение весовых функций для кривой реакции **eso_md** (самой синей и широкой кривой) и **mass_dimm** (самой красной и узкой кривой). Здесь отличие WF достигает 30% для дифференциальных индексов и 15% для нормальных. Причем, влияние эффекта на определяемый профиль турбулентности может быть разным, в зависимости от высоты доминирующих слоев. Характер изменения кривых, соответствующих разным индексам, сильно различен. Такое поведение должно привести к возрастанию невязок восстановления высотного профиля.

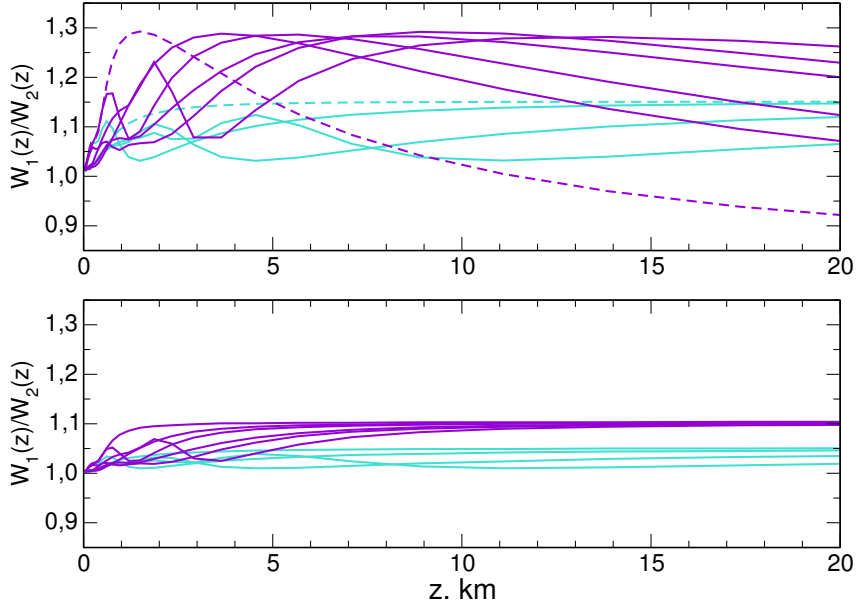


Рис. 3: Верху: отношения весовых функций для кривой реакции `eso_md` и `mass_dimm`. Внизу: отношения весовых функций для кривой реакции `eso_md` и для этой же кривой, сдвинутой на 20 nm в красную сторону. Зеленые кривые соответствуют нормальным индексам, фиолетовые — дифференциальным. Штриховые кривые: индекс A и AB соответственно.

Напротив, весовые функции для кривых `without` и `without_cut`, отличающихся пропуском в УФ области, различаются почти на 25% для дифференциальных индексов (максимальное различие для индекса AB) и менее 3% для нормальных индексов. Сравнение WF для `elt_mass_dimm` и `mass`, имеющих одинаковую центральную длину волны но сильно различающиеся ширины (см. Табл. 1) также показывает подобные различия.

Эти оценки ограничивают сверху возможную ошибку, связанную с проблемой спектральной чувствительности. Заметим, что примерно такая же ошибка возникает, если ошибиться в спектральном классе звезды на три целых класса — например, вместо распределения энергии для звезды B0 V взять распределение для звезды класса G0 III. В случае более узкой спектральной полосы `mass_dimm` — ошибка будет меньше 20%. Характер различия весовых при этом сходен с эффектами сдвига полосы (Рис. 3, внизу). Ошибки, вызванные неопределенностью распределения энергии в спектре звезды-объекта нами далее не обсуждаются.

Напомним, что изменение величины качества изображения из-за обсуждаемых эффектов будет примерно вдвое меньше, т.е. даже при использовании `mass_dimm` вместо `eso_md` ошибка не будет превышать 15%. В действительности, значения, приведенные выше, приводят к значительно меньшим ошибкам, поскольку при восстановлении профиля турбулентности используются весь набор весовых, а не только WF для пары AB. В среднем, различие в WF дифференциальных индексов для ситуации Рис. 4, внизу, составляет около 5% в значимом диапазоне высот.

Как пример, на Рис. 5 приведены результаты обработки с двумя кривыми реакции —

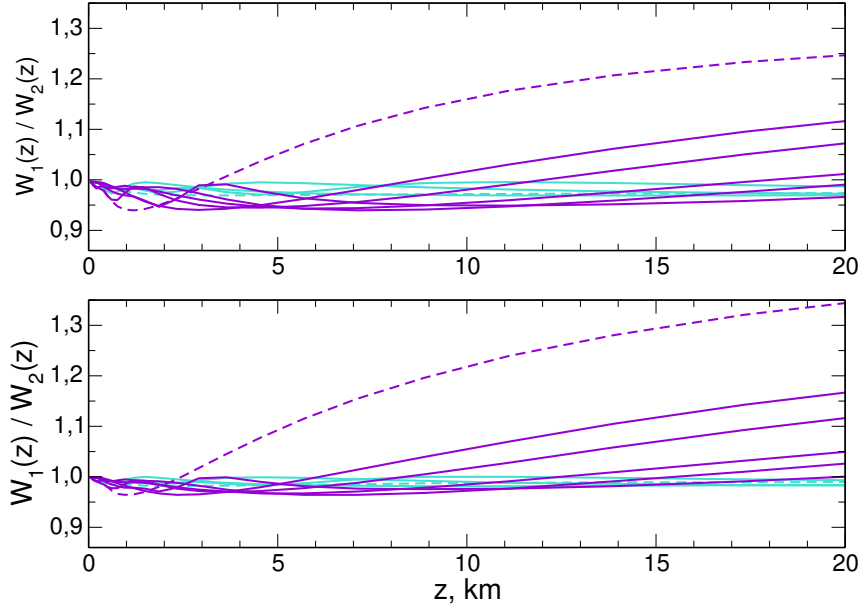


Рис. 4: Внизу: отношения весовых функций для кривой реакции `elt_mass_dimm` и `mass` сильно отличающихся шириной при одинаковой λ_0 . Вверху: отношения весовых функций для кривой реакции `without` и для `without_cut`. Зеленые кривые соответствуют нормальным индексам, фиолетовые — дифференциальным. Штриховые кривые: индекс A и AB соответственно.

правильной `mass` и заведомо неправильной `elt_mass_dimm`. Была выбрана ночь 28 августа 2005 г. измерений на г Майданак, отличающаяся мощной высокой турбулентностью, турбулентность в пограничном слое появлялась эпизодически. При использовании неправильной полосы, изображение с учетом пограничного слоя в среднем на 5% больше, без учета — на 2% больше. Среднеквадратичный разброс отношения составляет 0.04 и 0.02 соответственно.

5 Контроль параметров фотометрической полосы прибора

MASS представляет собой высокоточный фотометр, работающий в некоторой фотометрической полосе. При хороших погодных условиях точность измеряемых им звездных величин очень высока (порядка нескольких 0^m001). Принцип простейшего контроля фотометрической полосы прибора заключается в сравнении звездных величин в системе прибора m_{MASS} с каталожными значениями, например, величиной V . Для различных кривых реакции разность $m_{MASS} - V$ будет по разному зависеть от каталожного цвета измеряемой звезды. Так как проблемы неопределенности полосы MASS связаны с областью короче 420 nm, то вместо $m_{MASS} - V$ предпочтительнее использовать $m_{MASS} - B$.

На Рис. 6 приведены такие цветовые зависимости, посчитанные для нашего набора полос. Все зависимости нормированы на звезды спектрального класса A0 V. Видно, что наклон зависимостей сильно меняется в зависимости от реализации фотометрической полосы

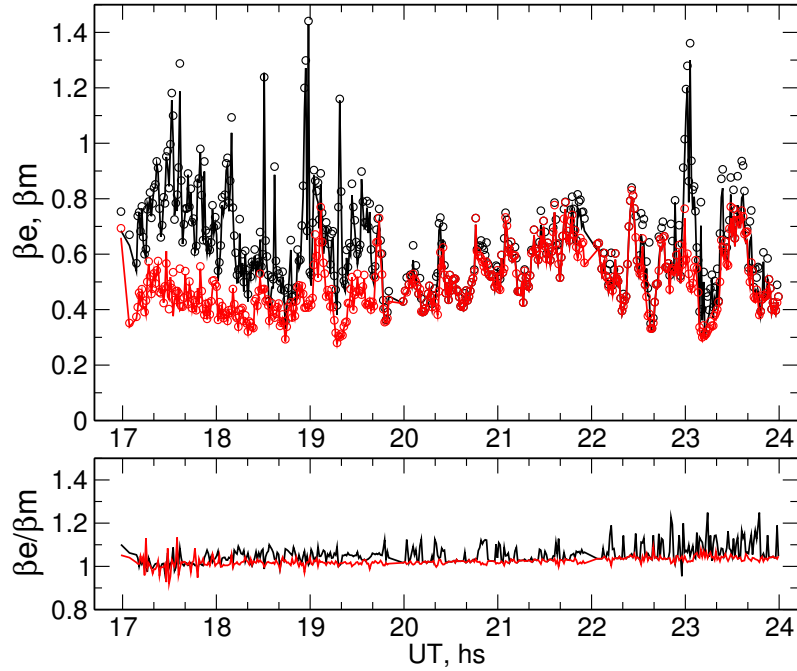


Рис. 5: Верху: Наблюдения с оригинальным MASS на Майданаке 2005.08.26. Качество изображения β_E и β_M по восстановленному профилю турбулентности с использованием кривых реакции `elt_mass_dimm` (кружки) и `mass` (линия). Внизу: отношение β_E и β_M . Черный цвет — с учетом слоя 0.5 км, красный — без учета.

прибора. Так, для наших крайних случаев `mass_dimm` и `eso_md` наклон меняется от -0.64 до -0.19. Величина наклона зависит в основном от положения полосы (см. Табл. 1).

Ширина фотометрической полосы влияет на цветовую зависимость не столь очевидным образом, с шириной полосы связана кривизна зависимости. Например, кривая для реализации `eso_md` в области белых звезд ($B - V < 0^m0$) отклоняется сильно вниз, поскольку эта полоса, в отличие от большинства других, захватывает участок спектра перед Бальмеровским скачком. Именно по звездам спектральных классов B0 – F0 можно оценить ширину фотометрической полосы прибора.

Если сравнить поведение цветových зависимостей для реализаций `elt_mass_dimm` и `mass` видно, что эти зависимости практически совпадают в области $B - V > 0^m0$, но для звезд класса B0, цвета $m_{MASS} - B$ различаются на 0^m08 . Для надежной оценки ширины полосы необходимы уже специально поставленные измерения. Схему таких измерений мы опишем в следующем разделе. Напомним, что несмотря на столь малое цветовое различие, различия в весовых функциях этих полос достигают 30% для индекса AV.

Заметим, в этом методе, цветовые поправки вычисляются по стандартным распределениям энергии, следовательно, ошибки исходных данных приводят к ошибкам поправок. Поскольку сами поправки велики, то и их ошибки значительны, они могут достигать $\sim 0^m03$ и еще больше для красных звезд.

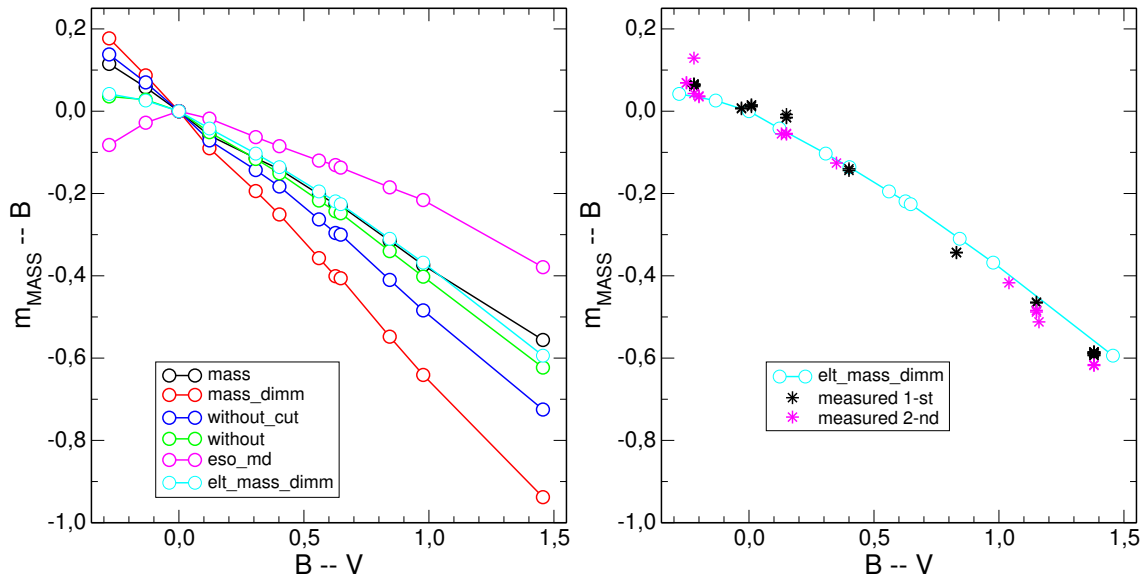


Рис. 6: Слева: рассчитанная двухцветная диаграмма $m_{\text{MASS}} - B$ от $B - V$ для всех реализации полосы MASS. Справа: цветовая зависимость для полосы `elt_mass_dimm` и результаты измерений с прибором ESO.

Ситуация осложняется тем, что примерно 30% программных звезд переменные. Так, из 12 звезд, наблюдавшихся на Толаре в 2004 – 2006 гг, 6 звезд известны как переменные и заподозренные с амплитудой изменения блеска от $0^m.01$ до $0^m.3$. Да и для тех звезд, которые не считаются переменными, B величина известна с небольшой точностью из-за проблемы точных измерений ярких звезд.

Однако, ситуация несколько исправляется тем, что в силу специфики формирования полосы прибора, ширина полосы и положение полосы сильно связаны между собой. На Рис. 6 можно это легко заметить. Эта связь несколько нарушается при дополнительном обрезании чувствительности с красной стороны, как в случае `mass` и меньше в случаях `without_cut`. Но именно в этих случаях проблема не столь остра.

Техника уточнения фотометрической полосы изложена более подробно в приложении.

6 Экспериментальный контроль фотометрической полосы

Первый опыт специальных измерений для контроля фотометрической полосы прибора был проведен М.Сарацином во время тестирования прибора MASS/DIMM для программы ELT на Паранале – ЛаЧира. В две ночи: 2 и 3 августа 2006 было измерено по 12 звезд, примерно по 5 – 10 мин. каждая. Заметим, что среди измеренных звезд (20 разных звезд из списка `star.lst`) 7 звезд заподозрены в переменности.

По измеренным инструментальным величинам были вычислены инструментальные цвета $m_{\text{MASS}} - V$. Сравнение этих цветов с расчетной цветовой зависимостью показала, что принятая в качестве исходной полоса `eso_md` им не удовлетворяет. В результате после-

довательных сдвигов синей границы в красную сторону получена кривая `elt_mass_dimm`, которая и рекомендована для дальнейшего применения с этим прибором.

Уточнение полосы методом, изложенным в приложении, не проводилось из-за малого количества измерений и их неравномерного расположения по спектральным классам. Предварительная обработка заключалась в приведении величин звезд к зениту (не вынос за атмосферу!) с типичным коэффициентом экстинкции 0^m25 . Эта величина оценочная, но ее ошибка, включая цветовой член, вряд ли больше 0^m05 , что при максимальной воздушной массе в 1.34 дает ошибку в зенитной величине менее 0^m02 .

Очевидно, что при такой процедуре мы должны получить фотометрическую полосу прибора со включенной в нее атмосферной компонентой для данных условий измерений. Причем, неселективная компонента атмосферной экстинкции значения не имеет.

Подобная процедура применялась и к данным измерений на Толаре в 2004 – 2006 гг, за исключением того, что коэффициент экстинкции уверенно определялся примерно в половине ночей и составлял от 0^m16 до 0^m20 (полоса этого инструмента более красная, чем прибора ESO). Поскольку эта не были специальные измерения, то в этих данных не хватает разнообразия спектральных классов. Поэтому удалось определить только средний наклон цветовой зависимости $m_{\text{MASS}} - V$ от $B - V$ в статистическом смысле. На Рис. 7 приведены поведение наклона цветовой зависимости в течение всего периода измерений (слева) и гистограммы для интервалов до и после октября 2004.

Для построения этой зависимости брались соседние по времени внутри ночи измерения звезд i и $i+1$, если разность их показателей цвета превышала по абсолютной величине 0^m2 и среднеквадратичный разброс блеска для обеих звезд не превышал 0^m01 . Последнее условие гарантировало фотометрическое качество участка ночи, первое — ослабляло требование к точности каталожных величин V .

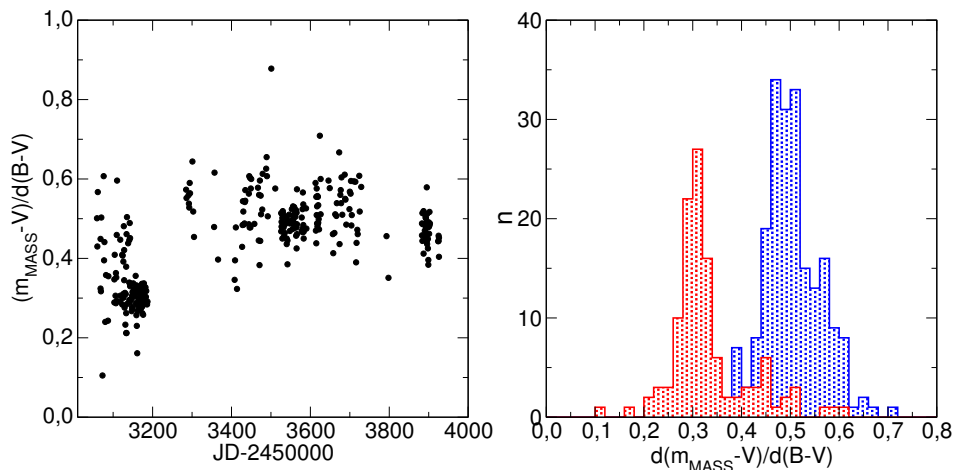


Рис. 7: Слева: поведение наклона цветовой зависимости в течение всего периода измерений. Справа: Распределения наклонов до октября 2004 (красный, медиана распределения 0.31) и после октября 2004 (синий, медиана — 0.50)

Поскольку достоверно известно, что этот прибор имеет многослойные перебрасывающие зеркала, можно утверждать что в период до октября 2004 фотометрическая полоса

вероятнее всего соответствовала кривой `mass_dimm`, а после — кривой `without_cut`.

7 Заключение

Эксперименты с контролем или уточнением фотометрической полосы прибора MASS, точное знание которой необходимо для того, чтобы избежать получения смещенных результатов, показали необходимость выполнения специальных фотометрических программ (1 – 2 полноты в сезон).

Для этих программ должен быть составлен специальный список звезд, имеющих блеск в диапазоне $4 \div 5^m$. Эти звезды имеют более точные каталожные величины, их число достаточно, чтобы исключить все заподозренные переменные, оптимально распределив оставшиеся по спектральным классам. Во время наблюдений должны измеряться звезды и для определения цветовой зависимости ($M_z \approx 1.0$) и звезды для определения коэффициента экстинкции ($M_z \approx 1.6$).

Еще более надежный результат даст применение дополнительного фильтра (на приборах без обрезывающего фильтра, естественно) с границей около $\lambda \approx 380$ nm. В этом случае цветовая поправка между измерениями без фильтра и с фильтром будет мала и будет измерена с большой точностью, т.е. отпадает необходимость привязки к каталожным величинам. Более того, в этом случае точность вычисления цветовой поправки будет велика даже при неадекватности стандартных распределений энергии.

К сожалению, подобную процедуру удаленно выполнить не удастся. После проведения таких измерений фильтр можно оставить в приборе. Это установит заведомо определенную фотометрическую полосу и позволит далее не проводить подобных исследований.

В случае запуска в действие новых приборов желательна установка подобного фильтра. На наш взгляд, оптимальным будет использование готового фильтра из стекла GG385 Schott (см. например, <http://www.pgo-online.com/intl/katalog/schott.html>) толщиной 3 mm и диаметром 25 mm. Такой фильтр можно установить непосредственно перед линзой Фабри.

А Определение полосы при минимуме исходных предположений

В методе используется тот факт, что плохо известные (подлежащие определению) свойства фотометрической полосы относятся к ее синему спаду. Поведение кривой чувствительности в красной области полностью определяется спектральной кривой чувствительности ФЭУ и считается заданным априори. Спад чувствительности на синем краю полосы моделируется простой зависимостью

$$s(\lambda) = \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_c)^4}{r^4}\right) \text{ при } \lambda < \lambda_c, \quad s(\lambda) = 1 \text{ при } \lambda \geq \lambda_c. \quad (1)$$

Функция под экспонентой — это зависимость коэффициента поглощения от λ в зоне обрезания чувствительности оптикой прибора. Здесь выбор четвертой степени продиктован тем, что коэффициент поглощения для большинства стекол действительно хорошо аппроксимируется таким показателем. Формула дает ненормированную зависимость, но это не важно, поскольку нормировочный коэффициент просто войдет в значение нуля-пункта.

Далее задача сводится к вычислению 3-х параметрической зависимости $CI = m_{MASS} - B$ от $B - V$, третий параметр — нуль-пункт CI_0 , только сдвигает $CI(\lambda_c, r)$ по вертикали. Используя численную минимизацию, можно найти значения параметров, оптимальных для данного набора входных инструментальных цветов. Для этого, на языке С был написан подключаемый к **xmgrace** модуль и определение параметров CI_0, λ_c, r проводилось функцией **Data/Transformation/Non-linear curve fitting** этой программы.

На Рис. 8 приведены результаты проверки этого метода простым моделированием. Для полосы **elt_mass_dimm** были вычислены 12 точек цветовой поправки $m_{MASS} - B$ для используемого набора стандартных распределений энергии. К этим значениям был добавлен случайный шум с дисперсией 0^m02 . Результаты восстановления спектральной чувствительности приведены там же. Видно, что при таком входном шуме и 12 измерениях спектральная чувствительность хорошо восстанавливается. Заметим, что исходная кривая **elt_mass_dimm** определялась по данным измерений, но способом ручной подгонки. Поэтому она не совсем описывается формулой (1). Например, реализация 4 имеет $\lambda_0 = 473.5$ nm, $\Delta\lambda = 145$ nm, т.е. она чуть-чуть уже исходной.

Также было проведено моделирование для полосы **without_cut**, имеющие резкие детали, обусловленные многослойным покрытием перебрасывающего зеркала. В результате восстановления получается гладкая кривая, шум в 0^m02 практически не влияет на результат. Однако, при шуме с дисперсией 0^m05 , восстановление становится неустойчивым.

Сравнение весовых функций для исходных и восстановленных кривых показало, что в первом случае различие не превышает 2.5%, а во втором — меньше 10%. Большее различие для кривой **without_cut** вполне понятно, оно вызвано специфичной формой. Из-за этого и ширина восстановленной кривой ($\lambda_0 = 486$ nm, $\Delta\lambda = 106$ nm) отличается от ширины исходной.

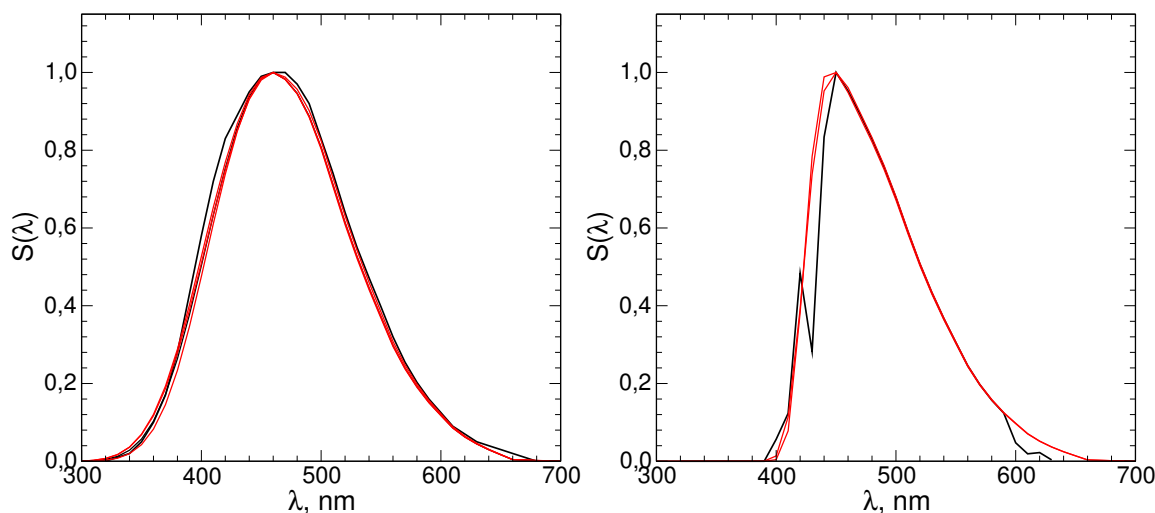


Рис. 8: Слева: исходная полоса **elt_mass_dimm** по которой рассчитывались цветковые поправки $m_{MASS} - B$ (черная) и несколько реализаций полосы, восстановленных по этим поправкам. Справа: то же самое для полосы **without_cut**.