

Предложение на разработку спектрографа низкого разрешения *TDS* для 2.5м телескопа КГО ГАИШ

Версия 2.1 (19.05.2016, S.Potantin, N.Shatsky, potantin@sai.msu.ru)

История изменений:

Версия 1 04.05.2016: исходный текст, написанный по результатам устного обсуждения и e-mail

Версия 2 15.05.2016: диапазон высокого синего разрешения уточнён (460-550нм), добавлены данные возможных приёмников и наброски оптического и механического конструктива. Общая правка текста. Изначальные запросы по e-mail удалены как более неактуальные.

Версия 2.1 19.05.2016: получены ответы от Wasatch Photonics, неясности и сомнения с VPH-решётками сняты, текст исправлен.

Версия 2.2 30.05.2016: мелкие правки

Настоящий документ суммирует запросы научного сообщества ГАИШ МГУ на создание спектрографа низкого разрешения для 2.5м телескопа КГО ГАИШ с целью формулирования оптимального задания на разработку его оптики и механики. Предлагается возможное принципиальное оптикомеханическое решение конструкции.

Научная задача

Телескоп Кавказской обсерватории МГУ диаметром главного зеркала 2.5м является многозадачным инструментом для научных и научно-образовательных целей. Он призван решать задачи, поставленные как университетским научным коллективом со сложившимися интересами и заделом в определённых областях астрономических исследований и в подготовке специалистов в области астрономии, так и в рамках совместных с внешними организациями и отдельными специалистами проектов. Выбор программ наблюдений будет осуществляться на конкурсной основе с соответствующе подобранными критериями для максимальной итоговой результативности инструмента, конечно, с учётом его параметров и особенностей места его установки.

В астрономическом институте Штернберга развиты исследования нестационарных объектов, таких как транзиентные явления различной природы (новые и сверхновые звёзды, гамма-всплески, вспыхивающие звёзды), переменные звёзды различной природы, активные ядра галактик и микроквезары и появление эффективного инструментария их исследования в форме т. н. *алертных*, follow-up или мониторинговых спектральных наблюдений должно дать ощутимый результат в плане научной отдачи. Поэтому поставлена задача построить эффективный инструмент для решения главной задачи: спектральной классификации и мониторинга сверхновых звёзд и других транзиентных явлений, в т.ч. обнаруживаемых системой МАСТЕР, а также родственных по спектральным проявлениям объектов, таких, как

внегалактические источники (области звездообразования, яркие голубые гиганты, АЯГ и др.), релятивистские объекты, микроквезары, звёзд на поздних стадиях эволюции и др.

Примечание: на прошедшей осенью 2015г в CAO РАН конференции был сформулирован запрос научной общественности на подобные по типу и параметрам инструменты. В этом духе и выполнена предлагаемая ниже эскизная разработка оптического спектрографа для нового 2.5м телескопа Кавказской обсерватории. Рабочее название настоящего проектируемого инструмента предлагается такое : *TDS = Transient Double-beam Spectrograph*.

Выбор параметров спектрографа

Поскольку размер телескопа умерен, требуется довольно выраженная специализация инструмента для достижения его результативности именно по главной задаче, в силу общеизвестного противоречия между требованиями по спектральным параметрам, перечисленным ниже в порядке важности для решения главной задачи прибора:

- **максимальное пропускание оптики E и ограничение фоном неба** по предельно слабым измеряемым спектральным плотностям потока (кв/А/с/см^2), определяемое также выбранным детектором ($QE(\lambda)$, RON , DC);
- **достаточные** для классификации и исследования ключевых областей спектра **спектральная разрешающая сила R** (при ширине щели, определяемой статистикой качества изображений на месте установки телескопа, 1 угл.сек) и **спектральный диапазон ($\lambda \min$, $\lambda \max$)**;
- **достаточная** для надёжного вычитания фона неба **угловая длина щели 2Ω** в длиннощелевом режиме, или, иными словами, размер поля зрения коллиматора. Это по-иному называется *фактором мультипликативности*, т. е. число одновременно измеряемых объектов, что является одним из наиболее важных параметров спектрографов по смежным задачам, см. ниже.
- **достаточная механическая стабильность** для достижения требуемой точности калибровки по длине волны ($d\lambda/dT$, $d\lambda/dg$, $d\lambda/dt$), где T — температура среды, g — изменяемый вектор тяжести при изменении ориентации прибора в пространстве, t — время);
- **достаточная автоматизация** прибора для готовности работать в любом предусмотренном для решения основных задач алертном и/или сервисном режимах, с малым временем выхода на рабочий режим; **статус штатного дежурного прибора**, т. е. постоянно находящегося в своём, оптимально выбранном, фокусе телескопа,

приводимого в действие любым оператором телескопа или автоматическим планировщиком по текущей программе или алертному запросу и снабжённого системой автокалибровки и устойчивым и «прозрачным» конвейером обработки данных;

- **достаточная нетребовательность к ресурсам**: способность находиться длительное время в дежурном режиме без трудоёмкого обслуживания (гл.образом относится к приёмнику);
- **достаточно низкая стоимость** разработки и изготовления для выполнимости проекта с имеющимися материальными, человеческими и временными ресурсами.

Подчёркнутый принцип *достаточности* по большинству параметров предлагается принять во имя высокой проникающей способности спектрографа, требуемой для достаточно детального исследования объектов наиболее характерных звёздных величин V от 16 до 18. Именно это должно обеспечить большой научный выход инструмента и его конкурентоспособность, при немаловажном условии реализации проекта в относительно короткие сроки: 2 года до ввода в строй в виде штатного прибора.

Главным ключевым методом в достижении высокой эффективности современных спектрографов является разделение света по диапазонам на несколько пучков (или плечей) — синий, красный, инфракрасный итп, например как сделано в приборе X-Shooter ESO VLT и многих других. Это позволяет за одну экспозицию получать информацию во всех потенциально интересных областях спектра без потери эффективности за счёт применения дихроичных делителей потока и оптимизации оптики и приёмников на свой, относительно узкий диапазон. Этот метод предлагается использовать и в настоящем приборе, разделив свет на два плеча — синее и красное по границе примерно 5600-5700Å.

В качестве диспергирующих элементов между классической решёткой с поверхностным профилем (или *шеллетом*) и голографическими решётками с объёмной фазой предлагается сделать выбор в пользу последних, т. к. для диапазонов умеренной ширины (не покрывающих всю оптическую область спектра) они дают бо́льшие средние эффективности и существенно более низкий рассеянный свет. Для достижения требуемых разрешающих сил в наших условиях достаточно применение дисперсоров стандартного размера 50мм, что выгодно с экономической точки зрения.

Для максимума эффективности в *базовом* режиме низкого разрешения предполагается классическая конструкция с фиксированным углом изгиба системы, без дополнительных компенсирующих призм. Для повышенных разрешений предлагается применить компенсирующие призмы для распространения пучка центра диапазона в том же направлении, что и в базовом. Угол при вершине этих призм будет меньше, чем у классических призм, что опять-таки выгодно с

точки зрения пропускания. Наконец, для очень низких разрешения, в синей и УФ части спектра при схеме с изломом возможно применение призмы (или призм) в качестве альтернативного дисперсора, что позволяет ещё больше снизить уровень рассеянного света.

Ориентировкой в выборе детектора в разработке по ряду причин оптического, технологического и экономического порядка является камера *Andor Newton 940* с ПЗС-приёмником E2V формата 512x2048 элементов (пиксель 13.5мкм). Это позволяет при низких собственных шумах (за счёт термоэлектрического охлаждения до -80°C, достигаемого из-за малого размера детектора и, следовательно, оптического окна) получить требуемый спектральный диапазон с оптимальным антибликовым покрытием («BU», <QE>=93% для синего плеча и «BV», <QE>=90% для красного), и разрешением при относительно невысоких материальных затратах.

В итоге предложен следующий набор базовых параметров спектрографа для оптимизации конструкции его оптических элементов:

Пар.	Наименование	Значение	Примечание
E	Эффективность: пропускание оптики, дисперсора, кв.выход детектора	>40%	Без учёта потерь в атмосфере, телескопе и на щели: пропускание коллиматора, дисперсора, оптики камеры и ПЗС в максимуме рабочего диапазона. Эффективность на краях диапазона должна определяться технологиями доступных дисперсоров и приёмников (оптимальными кривыми QE).
λ_{min} , λ_{max}	Диапазон	Красный: 5800 — 7200Å $\lambda_c 6500$ Синий: 3600 — 5600Å $\lambda_c 4600$	Расчётные диапазоны для оптимизации качества оптики при минимальном числе элементов (рассеянии) и максимальном пропускании. Желательно включение линий 5577(O) и 5461(Hg) Деление дихроиком с длиной волны 50% 5670Å (например http://www.thorlabs.de DMPLP567 или Asahi Spectra) <u>Сменные дисперсоры:</u> Красный диапазон: предусмотреть возможность добавить высокое разрешение на H α (опция) Синий диапазон в режиме повышенного разрешения: 4600 — 5500Å $\lambda_c 5050Å$
s	Рабочая ширина щели	1"	Определяется качеством изображений в месте наблюдения; для расчётного спектрального разрешения и фактора оцифровки. Другие щели: 1.5", 2.5" и 10" доступны на турели.
p	Размер пикселя приёмника	13.5мкм	В расчёте на стандартные детекторы фирмы E2V. Возможно использование 15мкм или 11мкм детекторов без существенного отклонения от оптимума.
SF	Фактор оцифровки	2.7 — 3.2	Пикселей на аппаратный контур, в расчёте на

	(sampling)		стандартную щель 1"; учитывает геометрические, волновые aberrации и бюджет ошибок изготовления; <u>во всём диапазоне длин волн</u> и по высоте щели
2Ω	Угловая высота щели	3'	Минимальная высота щели на детекторе и для оптимизации оптики
T	Рабочий диапазон температур	-15..+15°C	Для терморасчёта оптики. Оптимизация на 0°C. Спектрограф без термостата, должен выживать в пределах от -20 до +30°C.

Принципы оптимизации конструкции оптики

В силу ограниченных ресурсов проекта, в т.ч. фокальных станций телескопа, которые можно задействовать на постоянной основе, а также великого разнообразия оставшихся за пределами описанного выше круга основных задач инструмента, наиболее чувствительным ожидается ограничение по полю зрения, поскольку, при сходных требованиях по минимальной спектральной разрешающей силе и диапазону, именно его размер определяет мощность и применимость инструмента для широкого круга задач по близким галактикам и галактическим скоплениям, работе в режиме щелевой маски, применения оптиковолоконной *псевдощели* для многообъектной и интегральной спектроскопии, а также спектроскопии с распределённой апертурой (типа VIRUS).

Так, известно, что увеличение поля зрения спектрографа от 5 до 10 угловых минут влечёт за собой неизбежное усложнение линзовой оптики коллиматора и, в некоторых случаях, камеры, что подрывает главный принцип специализации для достижения эффективности в выбранной задаче. Кроме того, это требует применения больших приёмников с вертикальным размером до 2048 пикселей, чтобы сохранить оптимальный фактор оцифровки изображения щели, а это не всегда оптимально с точки зрения обобщённой эффективности.

Большой круг задач вне описанного выше, вместо большой длины щели, требует возможность устанавливать щелевые маски для многообъектной спектроскопии без переформирования зрачка (т.е. без оптиковолоконного узла переброса в псевдощель). Однако, для того чтобы при выбранном поле зрения не потерять в спектральном диапазоне для объектов, расположенных в стороне от осевой линии приёмника (положения длинной щели для центральной длины волны), требуется увеличение размера приёмника в направлении дисперсии и, конечно, углового поля зрения оптики камеры. Как правило это требует усложнения конструкции, что приводит к увеличению поглощения, уровня рассеянного света и стоимости изготовления, а также усложнению юстировки оптики. Наконец, такой конструктив требует лёгкий ежедневный доступ к фокальной плоскости телескопа для смены масок, что не всегда технологически возможно (в т.ч. в нашем случае размещения на телескопе, см. ниже).

По этим причинам предлагается оптимизировать оптику коллиматора и камеры для минимальной длины щели 3' и поля зрения камеры, диктуемого спектральным диапазоном в соответствии с форматом приёмника по оси X. Далее пробовать увеличивать длину щели, не допуская добавления новых элементов и *относительного* уменьшения итогового пропускания более, чем на 5%. В итоге оценить возможность использования приёмников увеличенного размера для поля до 5'.

Параметры приёмников

Поскольку при разработке спектрографа одним из основных ограничений обычно является доступная модель приёмника, ниже приведены глубина фокальной плоскости в конструктиве камеры и параметры входного оптического окна криостата, а также самого детектора (для расчёта дисперсии и фактора оцифровки). Параметры даны для камер: NBI 2K (ПЗС E2V231-42 BI, рабочий детектор без темнового шума, LN2-охлаждаемый, имеется 1шт); Princeton Instruments VersArray 1300B (ПЗС EEV36-40 BI MPP, термоохлаждаемый до -60°C, с заметными темновым шумом и эфф-м послесвечения, близкий аналог Newton по размерам камеры и детектора; имеются 2шт); Andor Newton 940 (ПЗС E2V 42-10; целевая модель детектора) и камеры Princeton Instruments Sophia 2048B (приёмник E2V CCD42-40; в остальном похожа на Newton). Параметры с знаком «?» требуется уточнить на оборудовании, опубликованные данные неполны.

	NBI 2K	PI VA1300B	Newton 940	PI Sophia 2048B
Задний отрезок ВФ камеры (механический конструктив)	24 (см. чертёж)	47.5 (F-mount) ~12 (без насадки) ??	10	47.5 (F-mount) ~12 (без насадки) ?
Толщина окна, Тw , мм	10 (может быть заменено на любую линзу диам 50мм)	3?	1.5	3.2
От окна до детектора, Вw , мм	10.28	11.4 (0.45") ??	7.14	9
св. диаметр окна, Dw , мм	46	?	45	?
Материал окна	Silica	SI-UV fused-silica	FS (fused silica)	Fused silica
Формат детектора	2048x2048	1300x1340	2048x512	2048x2048
Пиксель, мкм	15	20	13.5	15
Ссылки	http://lnfm1.sai.msu.ru/kgolocal/tech/2.5m/equip/ccds/nbi2k/mech/100_Sternberg%20II%20Front.pdf чертёж	http://wise-obs.tau.ac.il/observations/filters/PI_CCD/versarray.pdf скан руководства	http://www.andor.com/learning-academy/camera-windows-optimizing-for-different-spectral-regions	http://www.princetoninstruments.com/userfiles/files/assetLibrary/Datasheets/Princeton_Instruments_SOP_HIA_2048_eXcelon-N1-prelim-4-20-16.pdf

Видно, что параметры окна весьма различны, даже по толщине. Поэтому результаты оптимизации оптики камеры будут существенно отличаться для этих трёх камер. Наиболее выгодными параметрами обладает целевая камера Newton, поскольку оптимизация светосильного объектива обычно «стремится» поместить плоско-вогнутую последнюю линзу как можно ближе к детектору. В качестве временной замены возможен вариант VA1300, если уточнить параметры окна и смириться с временной потерей оптимальной оцифровки (фактор 2 вместо 3).

Расчёт основных параметров оптики

На основании данных выше целевых спектрального диапазона и приёмника (Newton 940), можно применить в виде электронной таблицы элементарные уравнения решётки и оптики, для прикидки основных параметров оптической схемы спектрографа. Данный ниже вариант расчёта с фокусом коллиматора **330мм** предусматривает заказной (увеличенный, $L=70\text{мм}$) дихроик для разделения пучков синего и красного плечей, но зато оптимален по использованию активной площади дисперсоров как наиболее дорогостоящих элементов (т. е. по разрешению). Альтернативный вариант с $F_{\text{кол}}=270\text{мм}$ сокращает размер дихроика до коммерчески доступного $d50\text{мм}$, но уменьшает разрешающую силу R на 20% (до 2400 в R и 2200 в B), что кажется неоправданным.

Требуемые спектральные диапазоны получаются с VPH-решётками Wasatch Photonics высокой эффективности: **1200 lpp/650nm** для красного плеча (стандартный дизайн, эфф-ть около 90% в пике и на периферии), и заказными решётками **1800 lpp/505nm** и **900 lppmm/460nm** для синего плеча (повышенного и низкого разрешения, эффективности 87/72% и 89/68%, соответственно).

Для того, чтобы смена дисперсора не приводила к необходимости поворачивать плечо (оптику камеры и саму ПЗС-камеру), для дисперсора повышенного разрешения предлагается дизайн в виде «недо-гризмы», т. е. наклейка двух 27-градусных просветлённых стеклянных призм на подложку и покровное стекло решётки, которые в итоге отклонят пучок для центральной длины волны (505nm) в направлении центральной длины волны синего диапазона низкого разрешения (угол отклонения 23.8°). Это решение представляется оптимальным и с т.зр. потерь света, которые должны быть минимальны именно для низкого разрешения.

В качестве альтернативы использованию VPH-решётки для синего диапазона при выбранной «гнутой» схеме возможно использование спаренной призмы в качестве дисперсора низкого разрешения. Компромисс между дисперсией и удовлетворительной УФ-прозрачностью достигается, например, применением флинта SF5 фирмы Schott AG. При угле при вершине призм в 35 градусов волны требуемого синего диапазона на выходе второй призмы отклоняются точно в направлении диапазона повышенного разрешения решётки VPHG1800G (угол отклонения 53°) без компенсирующих призм и с умеренными углами падения и выхода ($29-32^\circ$), хотя и покрывают лишь чуть менее половины ширины детектора (900пикс). Оба варианта показаны на рисунке

внизу.

Архаизм призмленного решения кажущийся: для УФ-диапазона их эффективность (по дисперсии и пропусканию) близка к дифракционным решёткам, что в нашем случае также очевидно. При смещении из УФ в синюю область они, конечно, проигрывают решёткам, зато дают высокую чистоту (контраст) спектра. В смысле достижения предельно слабых величин объектов это решение весьма интересно. В выбранной схеме есть возможность применить как тот, так и другой тип дисперсора.

Возможно, имеет смысл рассмотреть и третий вариант — применение классических решёток (с поверхностным штрихом), хотя в итоге это может оказаться и не таким выигрышным, если вспомнить их повышенное по сравнению с призмами и VPH-решётками рассеяние и немалую стоимость (т. к. размер выходит за пределы 2"). Кроме того, эти решётки требуют совершенно иную компоновку прибора (относительно малый угол между падающим и дифрагированным пучками).

Разрешённое фокусное расстояние камер **Fcam** варьирует в пределах **от 110 до 150мм** для обоих плечей (относительный фокус от 2.7 до 3.6), будучи ограниченным требованием к минимальному фактору оцифровки 2.7 (с учётом 10%го увеличения ширины контура от ошибок изготовления и волновых эффектов) с нижней стороны и покрытием спектрального диапазона с верхней. Соответственно, при $F_{col}=330\text{мм}$ **высота щели меняется от 3.5' до 2.6'**. Выбор конкретного (наименьшего возможного) значения Fcam возможен только на этапе оптимизации оптической схемы, поскольку указанный диапазон светосил весьма непростой для качественной оптики высокой прозрачности.

Входные параметры:	Обозначение	Величина	Единицы	Примечания
Расчётная ширина щели	s	0,1 мм		1 arcsec = 0,0969626451
Телескоп диаметр	D	2500 мм		
Телескоп относ.фокус	F/#	8		<i>Ftel</i> 20000
Размер пикселя	p	13,5 мкм		Newton 940P (BV & BU)
Ширина детектора	Xdim	2048 пикс		
Высота детектора	Ydim	512 пикс		

Целевые параметры:

Фактор оцифровки	SF	2,72 +/- 0.3
Высота щели	SH	3 arcmin

Свободные параметры:

Коллиматор фокус.расст	Fcol	330 мм	<i>Dcol</i>	41,25
------------------------	------	--------	-------------	-------

<i>Параметры плечей:</i>		Red arm	Blue arm	
Камера фокус.расст.	Fcam	150	150	мм
Угол поворота плеча		45,272	23,807	53,048

<i>Дисперсия:</i>		R	B (low res)	G (med res)
Центральная длина волны	LC	650	460	505 нм
Минимальная длина волны	L_MIN	580	360	460 нм
Максимальная длина волны	L_MAX	720	560	550 нм
Целевой диапазон	RANGE_0	140	200	90 нм

Дисперсоры:

Частота штрихов	d^-1	1200	900	1800
длина волны блеска	lam_blaze	650	460	505 нм
Угол Брэгга	a_bragg	22,95	11,95	27,03 гр
Угол падения	fi	22,6	11,95	26,8 гр
Угол дифракции центр	theta	22,67	11,86	26,25 гр
Угол призм-компенсаторов				27,09 гр

Итоговые параметры:

Ширина изображ.щели	SF	3,37	3,37	3,37 пикс
Высота щели	SH	2,61	2,61	2,61 arcmin
дисперсия	diamdx	0,69	0,98	0,45 A/pix
диапазон	range	141,73	200,43	91,84 нм
длина освещ. дисперсора	L	44,68	42,16	46,21 мм
Разрешение	delta_lam	2,33	3,30	1,51 A
Разрешающая сила	R	2788	1396	3345
длина освещ. Дихроика	Ldich	58,3		

Illustration 1: Вариант таблицы расчёта оптики спектрографа в геометрическом приближении. Показаны три канала: красный и два сменных синих (синий и "зелёный" для повышенного разрешения)

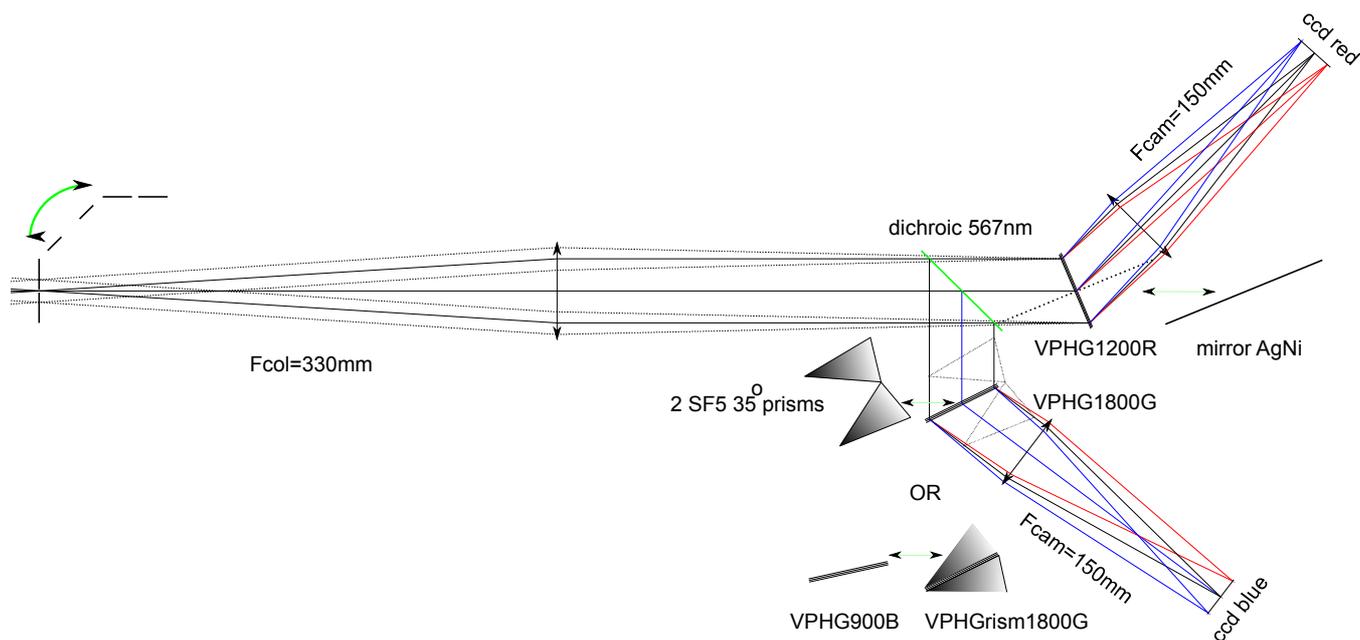


Illustration 2: Принципиальная (гауссова) оптическая схема TDS с сменными элементами и вариантами синего плеча. Слева сменные щели (щель перпендикулярна плоскости рисунка). Пунктиром показаны лучи от краёв поля зрения Z' (длина щели).

Требования к оптикомеханической конструкции

1. Наличие оптической системы автокалибровки с моторизованным вводом пучка от ламп непрерывного и линейчатого спектра подходящей плотности линий, телецентрическим пучком с освещением зрачка, адекватным освещению от телескопа и источником в виде интегрирующей сферы.
2. Механические дрейфы $d\lambda /dT$, $d\lambda /dg$ не более 0.1пикс на 1 градус Цельсия изменения температуры корпуса и на 10 градусов наклона корпуса по обеим осям, соответственно. Временной дрейф $d\lambda /dt$, определяемый неупругими деформациями любого происхождения, не более 0.1пикс/сут.
3. Наличие моторизованной смены дисперсоров для переключения между базовым разрешением и повышенным; плюс возможность ввода вместо дисперсора плоского зеркала для получения прямого изображения рабочего поля зрения с целью контроля положения источника, быстрой фотометрии итп (если окажется возможным)

конструктивно).

4. Наличие системы контроля положения объекта на щели во время экспозиции для автогидирования.

С целью быстрого переключения между режимом прямых изображений и спектральным, а также минимальных потерь света, целесообразно рассмотреть помещение спектрографа **в фокусе Кассегрена (C1)** телескопа с отбором света внутри существующего блока фильтров и затвора для ПЗС-камеры (Filter & Shutter Unit, FSU) специально добавленным узлом вводимого диагонального зеркала. Этот же узел вводимых зеркал можно будет использовать в будущем и для запитывания оптоволоконного спектрографа высокого разрешения. Таким образом, наличие камеры прямых снимков, установленной одновременно со спектрографом на узле FSU, позволяет реализовать требование «штатности» и «дежурности» прибора при решённом вопросе возможности установить любой необходимый позиционный угол щели (ротатором C1). Изменение угла ориентации прибора по отношению к вектору тяжести за время экспозиции также будет умеренным по сравнению с размещением в фокусе Нэсмита и механическим ротатором прибора.

На рисунке ниже показан пример компоновки прибора с размещением на основе FSU (использован чертёж NBI, изготовителя блока). Хотя в объёме FSU действительно много свободного места, этот вариант был набросан вчерне с целью показать, что совмещение этих двух приборов в принципе возможно. Основные свойства этого дизайна следующие:

- Перехват света перед фокусом C1 света идёт диагональным алюминированным зеркалом размером 60x85мм (из расчёта поля зрения 5') с точкой пересечения оптической оси на высоте **135мм** от передней привалочной плоскости FSU. Таким образом, фокальная плоскость отображается на расстоянии **153мм** от оптической оси телескопа. Зеркало вводится в пучок кареткой, перемещающейся по рельсу, укреплённому на стойках с использованием резьбовых отверстий M5 S1-S8 (предусмотренных в корпусе FSU специально для дополнительной аппаратуры).
- На той же каретке устанавливается другое зеркало, которым на входную апертуру спектрографа перебрасывается свет калибровочного источника, также установленного в объёме FSU.
- На каретке может быть установлено и третье зеркало для отведения света в другой прибор, например в приёмно-калибровочный блок оптоволоконного спектрографа высокого разрешения, который также может быть размещён целиком в объёме FSU по причине своего малого размера. Таким образом, сменой режимов работы FSU (прямые изображения, TDS, спектрограф высокого разрешения, калибровочный источник) может легко управлять один шаговый двигатель с концевиком. Управление этого узла может быть

интегрировано в программно-аппаратный функционал FSU.

- Щелевой подсмотр для переброски изображения зеркальных щёчек входной щели спектрографа (как щелевого, так и высокого разрешения) также может быть установлен на той же каретке или реализован отдельно.
- Тубус коллиматора TDS с блоком сменных щелей на конце вводится через боковое круглое отверстие FSU (диаметром **120мм**). Щели в 1" оправках (на 3' поле зрения нужны $L=20\text{мм}$, изготовитель пока неизвестен) укреплены на коническом вращающемся барабане, причём ориентированы по направлению его вращения (для уменьшения зависимости положения щели от неточности установки барабана). Достаточно тесный дизайн этой части спектрографа (компактный узел барабана щелей, недоступность узла во время наблюдений) является «платой» за размещение спектрографа в Кассегрене.
- Тубус коллиматора закреплён на среднике спектрографа, расположенном снаружи FSU вплотную к его боковой стенке. Основу средника составляет оптическая скамья, на которой закреплены все остальные элементы спектрографа. В частности, смена дисперсоров осуществляется вертикальными движениями прецизионных кареток (вдоль штрихов решёток, показаны зелёными «ласточкиными хвостами» на плане), что традиционно применяется для уменьшения смещений спектра от неточностей установки дисперсоров. В таком варианте подвижки точности шагового двигателя и винтового привода (как подвижки зеркал в FSU) достаточно, микронные энкодеры не нужны. Есть вариант реализации такого механизма и с точной (микронной) фиксацией введённого дисперсора при помощи трёхточечного зажима типа «ласточкин хвост» рычагом с соленоидным приводом.
- Геометрия FSU накладывает ограничение на минимальное расстояние между фокальной плоскостью и последней линзой коллиматора: **LFL>260мм** и минимальное расстояние последней линзы от зрачка: **LLP>110мм**. Это ограничение также довольно серьёзно с точки зрения дизайна оптики. Оно может быть уменьшено до **80мм** при отказе от зеркала замены дисперсора красного диапазона (оно большое, около 100x50мм).
- К среднику крепятся тубусы камерных объективов плечей. Поскольку спектрограф экспериментальный, из соображений пригодности для дальнейшей смены диапазонов, дисперсоров итп можно рассмотреть крепление тубусов типа барабанов скольжения (с ручным настроечным поворотом и жёсткой фиксацией прижимными винтами). Они условно показаны 90мм зелёными дисками на плане. Расстояние от передней линзы объектива до зрачка (дисперсора) **LLC>50мм**.
- К тубусам объективов уже крепятся ПЗС-камеры. Камеры Andor Newton компактны

(100x100x200мм) и весят всего 2кг (они и показаны схематично на плане). Более тяжёлые камеры потребуют существенного усиления тубусов для избежания заметного гнуптия.

- Для монтажа TDS на FSU должен быть спроектирован и изготовлен массивный суппорт (показан красным перечёркнутым прямоугольником на виде сбоку). Корпус FSU рассчитан на нагрузки до 150кг, поэтому здесь ограничений не ожидается. Практичным будет монтировать TDS на рельсовых направляющих с ходом до 300мм для безопасного и точного ввода спектрографа в FSU после его закрепления («подвески») на рельсах. Это позволит облегчить его обслуживание и наладку.
- Конечно, весь механический дизайн будет проработан в ПО автоматизированного проектирования типа Solid Works для расчёта жёсткости и термоэффектов.
- Управление механическими узлами спектрографа (щели и смена дисперсора) будет осуществляться от компактного микрокомпьютера типа BeagleBonBlack или Raspberry Pi, как реализовано для других приборов на телескопе. Связь с камерами (через USB-интерфейсы) возможна как с посредством индустриального компактного компьютера для приёма и первичного хранения изображений, также размещаемого в непосредственной близости от прибора, так и с использованием USB-ethernet удлинителей.

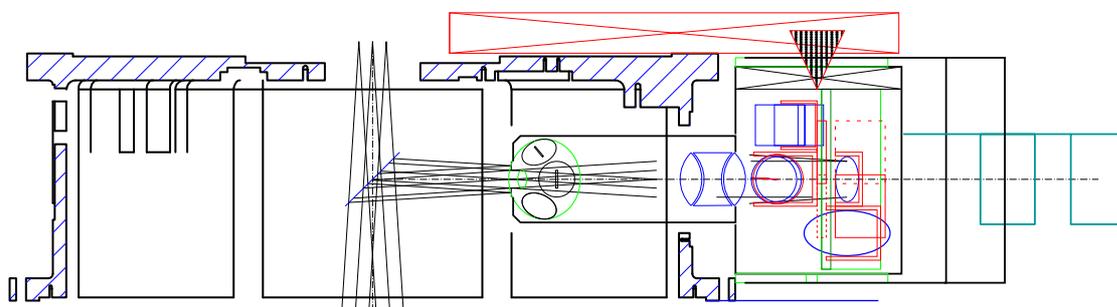
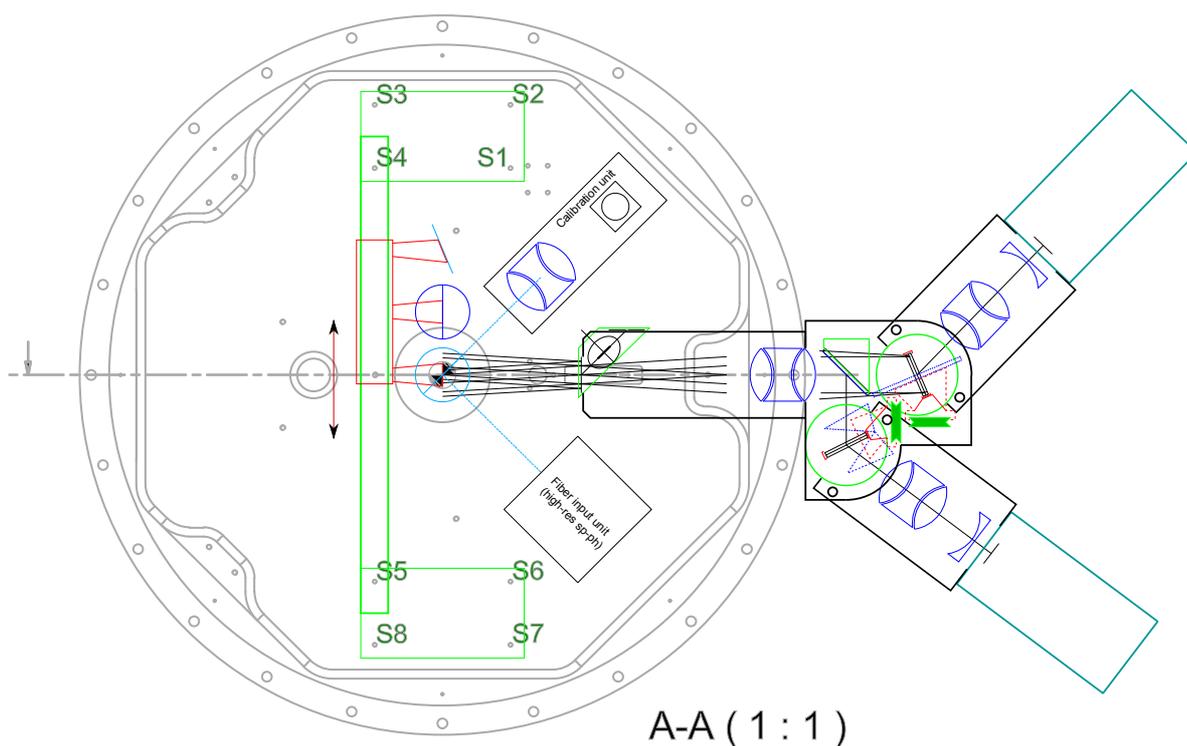


Illustration 3: Набросок механической компоновки TDS. Внизу - вид сбоку (свет из телескопа входит в FSU внизу), сверху - вид в плане (красное плечо вверх, синее вниз). Представлен вариант с призмным синим дисперсором; дисперсия на основе VPHG реализуется аналогично. Зелёным цветом показаны неподвижные опоры оптических элементов, красным - подвижные каретки и опорная балка спектрографа на FSU.

Выводы и дальнейшие шаги

Мы показали, что с определённым реально доступным набором дисперсоров можно реализовать требуемые спектральные диапазоны, при этом в предположении «идеальной» оптики, получаемые разрешения вяжутся с требуемыми за счёт оптимального фактора оцифровки и достаточной длины детектора (т. е. выбранный детектор достаточен для нашей задачи). Высокий квантовый выход приёмника (порядка 90%) и эффективность VPH-решёток (порядка ~80% и выше) оставляют достаточно бюджета для прозрачности оптики (общее пропускание ~70%), строящей

изображения не более 1.5-2 пикселей в геометрическом приближении (чтобы итоговое спектральная разрешающая сила «просела» не более, чем на 20-25%). Предварительные прикидки в программах расчёта оптики показывают, что это реально, хотя именно здесь требуется приложение максимума усилий.

Механический дизайн спектрографа диктуется его назначением дежурного штатного прибора (а не инструмента, используемого в режиме кампаний). Высокая эффективность (малые потери) и возможность поворота щели (изменения её позиционного угла) «навязывают» размещение TDS в фокусе Кассегрена. Чтобы при этом не потерять возможность получения прямых изображений (TDS разрабатывается с главным ориентиром на максимальную простоту и прозрачность оптики и не предусматривает широкопольной фотометрии, т.е. прямых изображений), заманчиво попытаться вписать его в конструктив с выводом света через боковое окно FSU (ныне используемое исключительно для эпизодической ревизии состояния окна ПЗС). Показанные выше схемы, будучи исключительно набросками без намёка на оптимизацию в широком смысле, говорят нам, что при выполнении определённых условий (ограничений) по оптике это возможно. Итоговый конструктив приборов в фокусе С1 остаётся достаточно компактным и нетяжёлым и вместе с тем весьма универсальным по набору предоставляемых режимов наблюдений.

Прежде чем развивать идеи компоновки дальше, требуется выяснить, какова будет итоговая оптическая схема коллиматора и камеры, а также системы подсвета фокальной плоскости от калибровочного источника (интегрирующей сферы с лампами непрерывного и линейчатого спектра), что является необходимым условием для надёжной калибровки прибора. Требуемая светосила камерных объективов (1:3) довольно трудна в реализации, если требуется высокое пропускание, низкое рассеяние и бликование, и, конечно, «хорошие» профили линий получаемого спектра (симметричные и не зависящие от положения в фокальной плоскости камеры). Тут потребуются многоэтапная оптимизация с привлечением нескольких независимых экспертов и оптических дизайнеров, чтобы убедиться в правильности конечного выбора схемы.

Кроме этого, для окончательной оценки эффективности полученного решения требуется учёт поляризационных эффектов, поскольку как косое падение на зеркало отбора света в TDS, так и VPH-решётки и дихроик (и, строго говоря, узкая щель) являются существенно поляризационно-зависимыми приборами и их взаимовлияние должно быть учтено. После этого, в частности, станет ясно, возможно ли применение зеркала прямых изображений в красном плече. В итоге будет получено достаточно информации для полного представления проекта на утверждение к исполнению.
