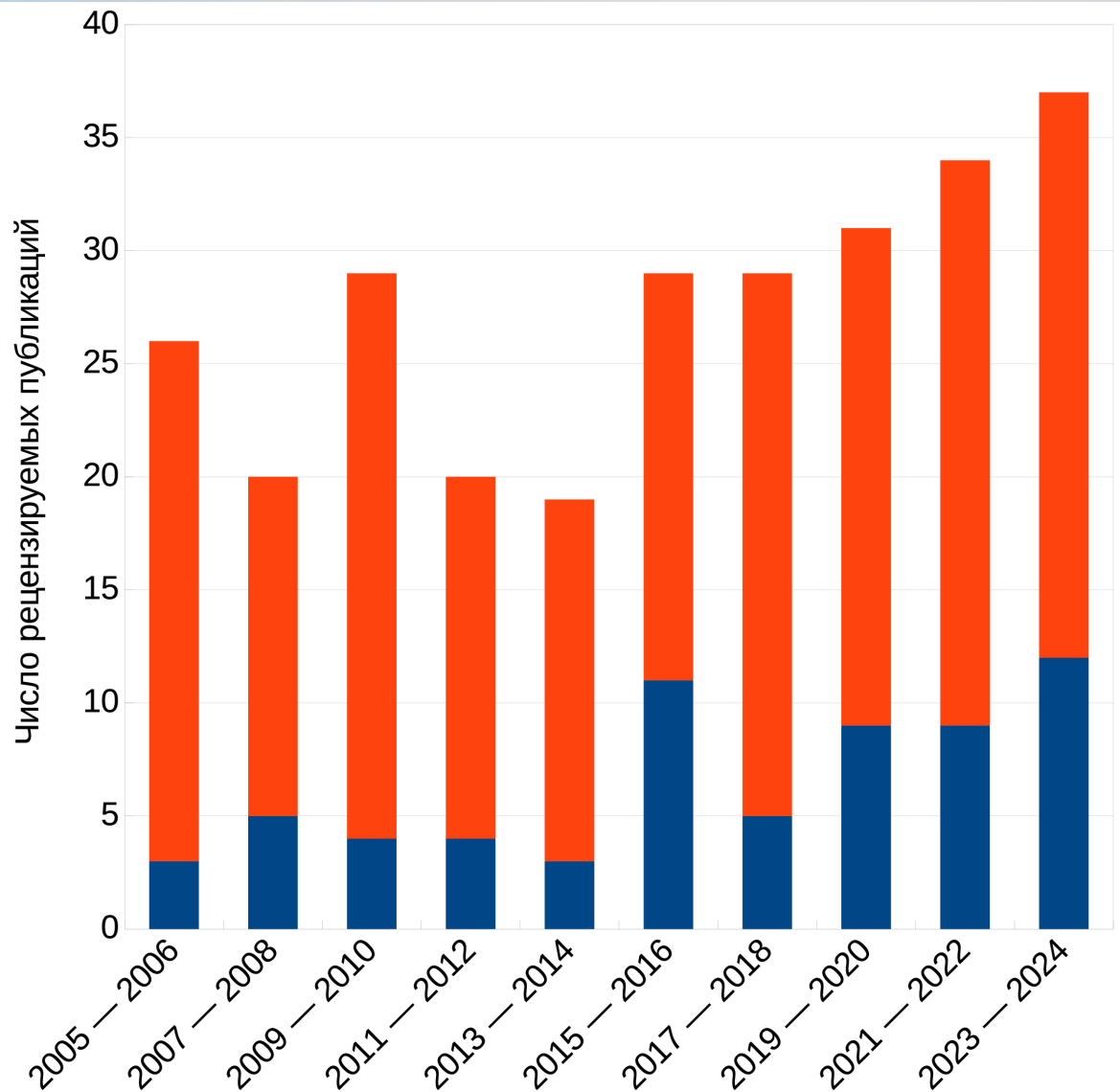


ULX и LBV через гризмы SCORPIO

**Винокуров А. С., Дедов Е. О., Соловьева Ю. Н.,
Костенков А. Е., Шолухова О. Н., Саркисян А. Н.**

Публикации



2005 год — первая работа с участием сотрудников ЛФЗ на основе данных SCORPIO.

Первые 10 лет в среднем 17% публикаций по результатам наблюдений с редуктором, во втором десятилетии доля выросла до 29%.

Поиск и исследование звезд предельной светимости

Четыре наблюдательные программы на SCORPIO/SCORPIO-2 в последнем десятилетии:

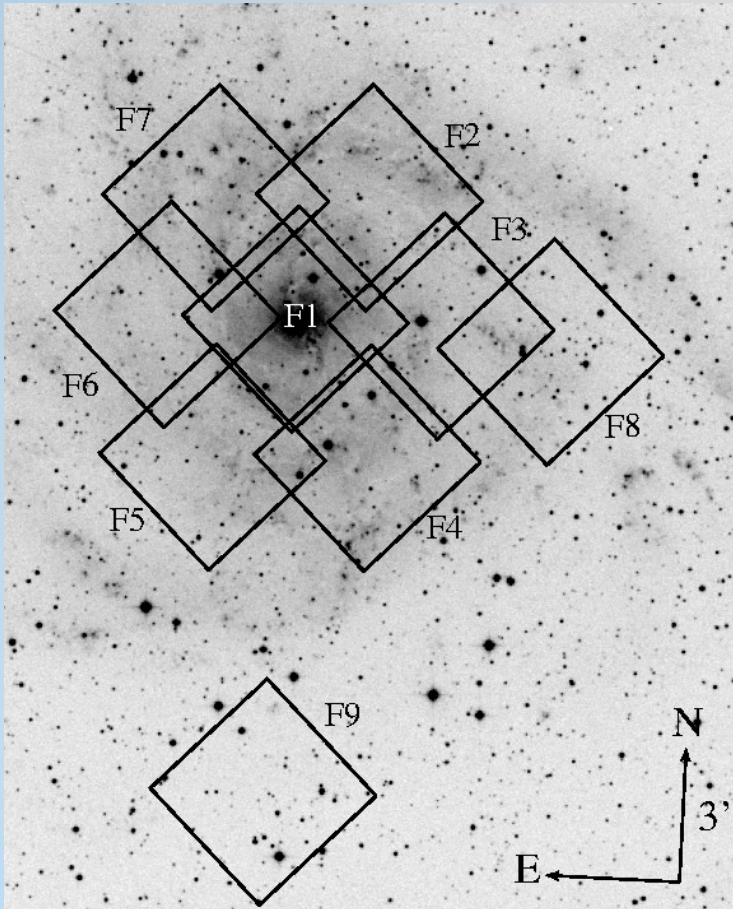
1. Массивные звезды в близких галактиках,
2. Новые кандидаты в LBV в близких галактиках,
3. Поиск сверхмассивных звезд в галактиках за пределами Местной группы,
4. Широкодиапазонная спектроскопия LBV звёзд в галактиках Местного объёма.

Задачи: поиск звезд с массами >200 солнечных, расширение выборки внегалактических ярких голубых переменных (LBV), B[e]-сверхгигантов (sgB[e]), желтых гипергигантов и др., определение параметров звезд и их ветров.

Промежуточные итоги: десятки кандидатов, часть из них пока не классифицированы. В качестве побочного продукта — компактные OB-ассоциации и звезды Вольфа-Райе.

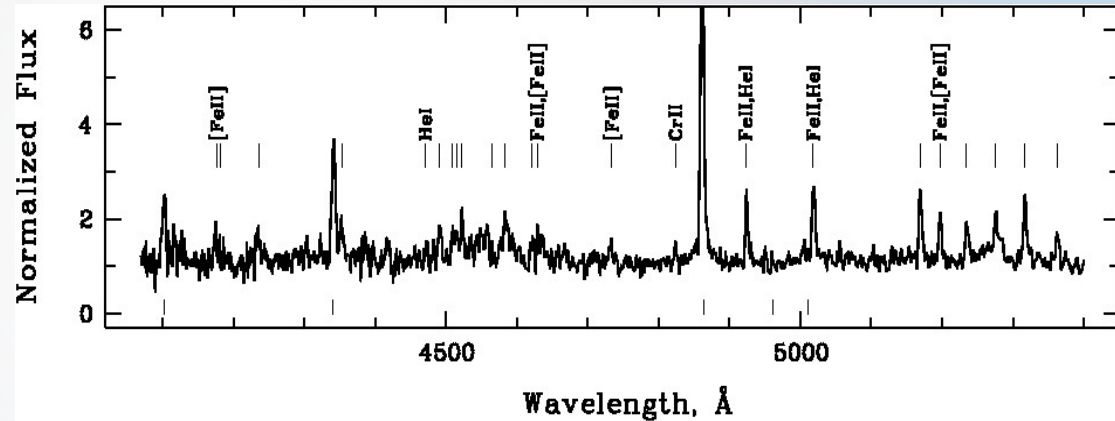
Опубликованы результаты исследований 13 новых LBV и LBV-кандидатов, 3 кандидатов в sgB[e].

Поиск ярчайших звезд в галактике IC 342



Изображение галактики IC 342 на снимке DSS-обзора. Отмечены девять полей космического телескопа им. Хаббла, в которых производился поиск.

По программе на БТА “Поиск сверхмассивных звезд в галактиках за пределами Местной группы” на SCORPIO-1 и 2 проведены спектральные наблюдения 24 из 27 отобранных кандидатов в массивные звезды галактики IC 342. 12 объектов представляют собой одиночные сверхгиганты классов от O9 до F5 или пространственно неразрешенные молодые компактные скопления, 7 объектов показали Вольфа–Райе особенности, два объекта были классифицированы как кандидаты в LBV в холодном состоянии, один объект — кандидат в B[e]-сверхгиганты.



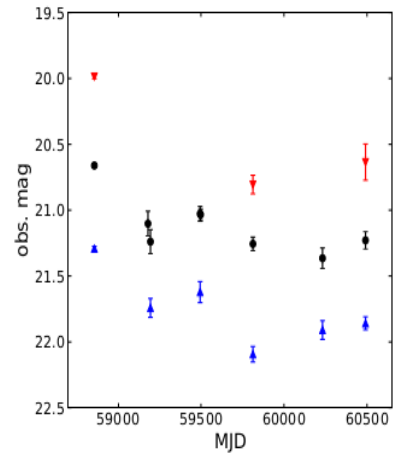
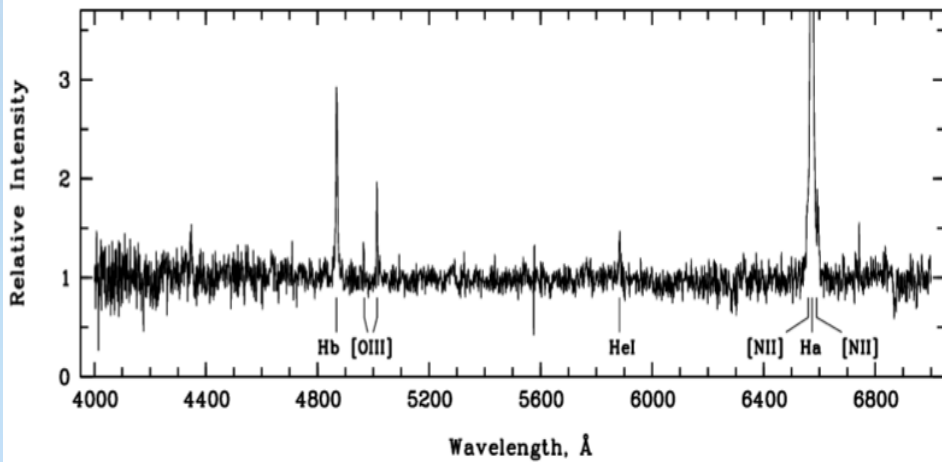
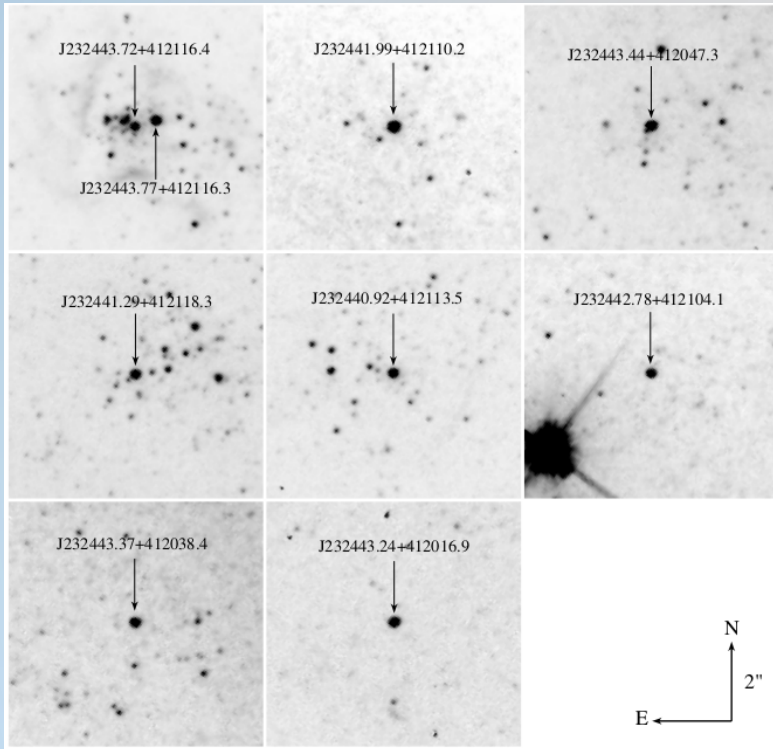
Спектр кандидата в LBV F3.7 в голубой диапазоне.

LBV кандидат в карликовой галактике UGC 12588

На SCORPIO-2 проведены спектральные и фотометрические наблюдения cLBV J232441.99+412110.2. Данный объект является самым ярким среди ранее выделенных 9 кандидатов в звезды высокой светимости ($-10.0^m < M_V < -8.5^m$) галактики UGC 12588 ($D \approx 11$ Мпк).

Наиболее заметная деталь в спектре J232441.99+412110.2 – широкие компоненты линий водорода. Эквивалентная ширина линии H α составляет около -120 \AA . По водородным линиям окружающей туманности получена оценка межзвёздного поглощения $A_V = 0.51 \pm 0.07^m$. Обнаружена переменность блеска $\Delta R = 0.59 \pm 0.05^m$.

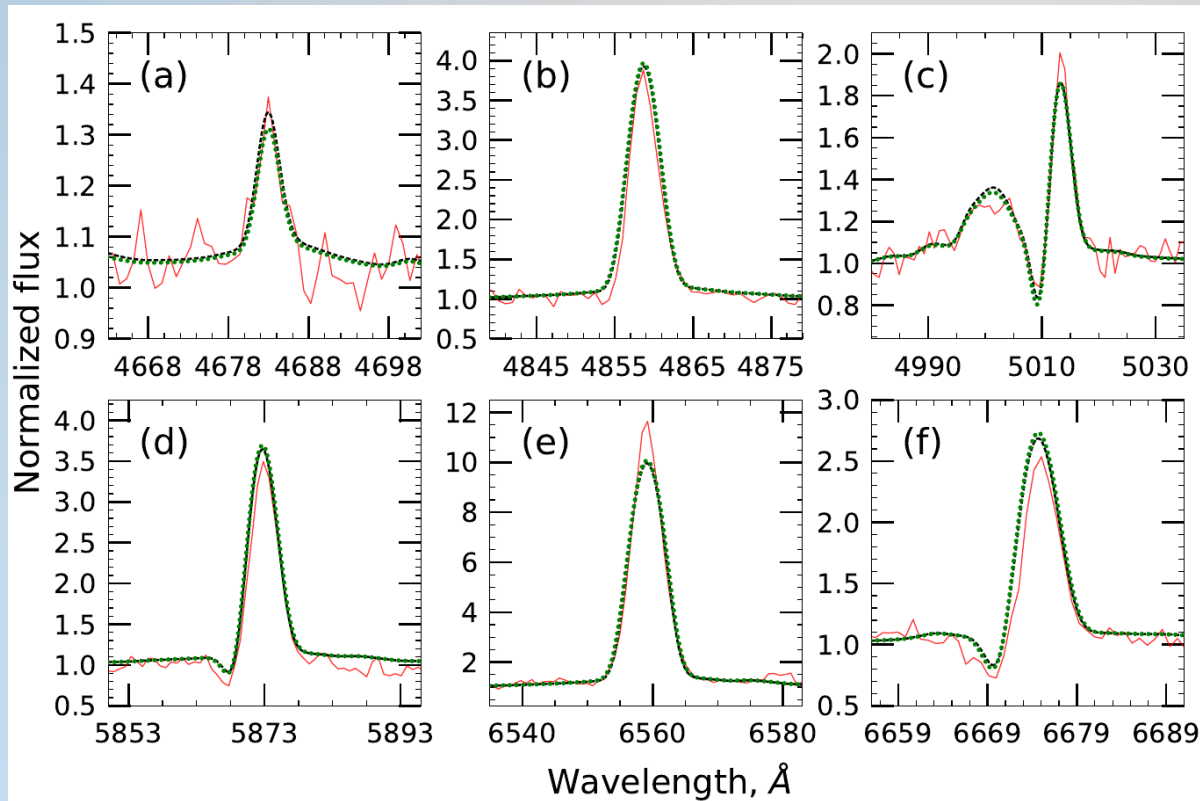
J232441.99+412110.2 находится в относительно малочисленной группе звёзд возрастом более 10 млн лет, что накладывает серьезные ограничения на эволюционный статус и начальную массу звезды.



Слева: нормированный спектр J232441.99+412110.2.
Справа: кривая блеска по данным HST, БТА и Цейсс-1000 в полосах V (красный, смещение -0.5^m), R (черный), I (синий, смещение 0.5^m).

(Solovyeva et al. 2025, accepted in Astronomy Letters)

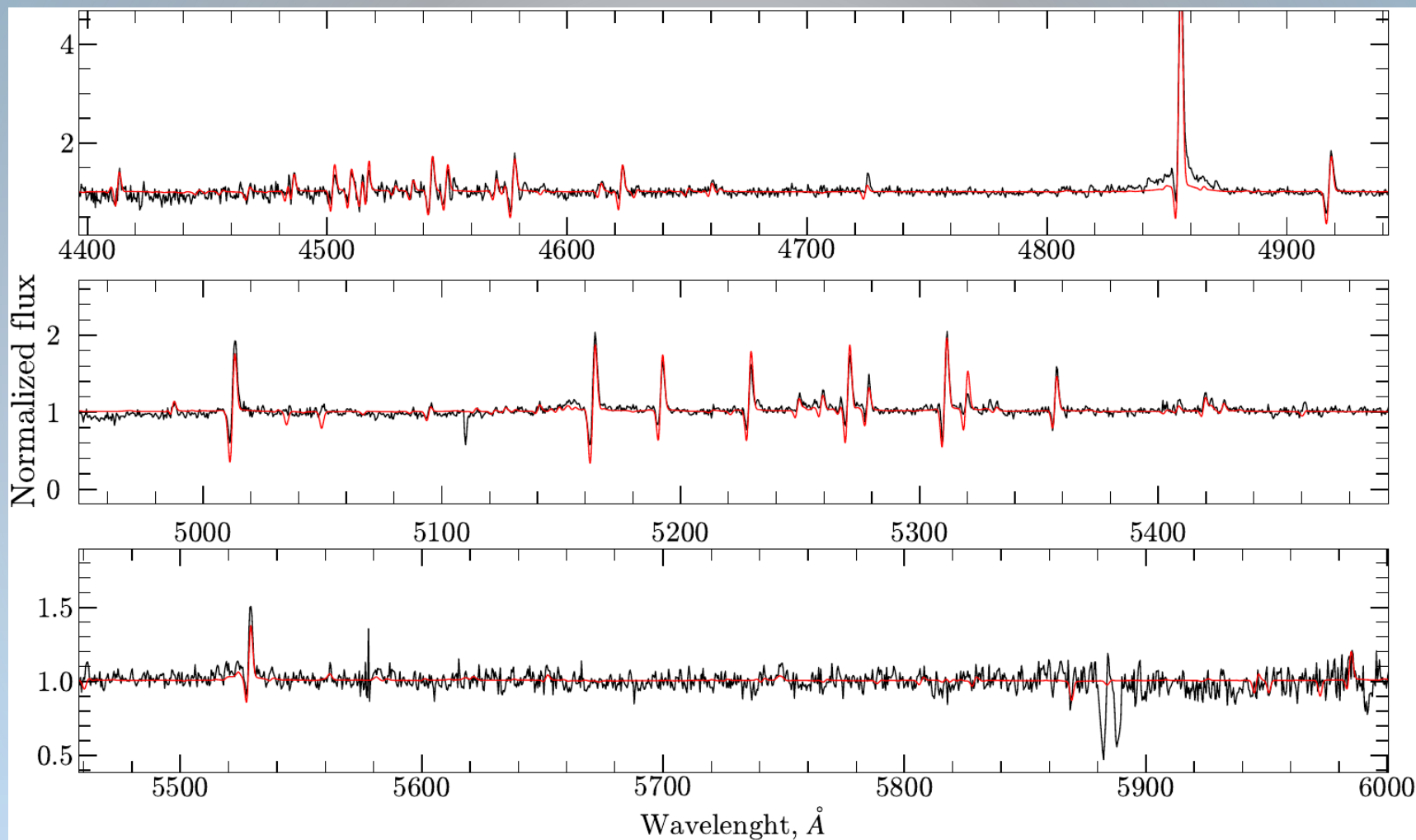
Оценка массы яркой голубой переменной Var 2



Наблюдаемые (красным) и модельные профили линий. Черная штриховая линия – модель с аппроксимацией закона ускорения ветра β -законом с $\beta=1$, зеленая пунктирная – модель со скоростным законом, рассчитанным с учетом баланса радиальных сил в ветре звезды.

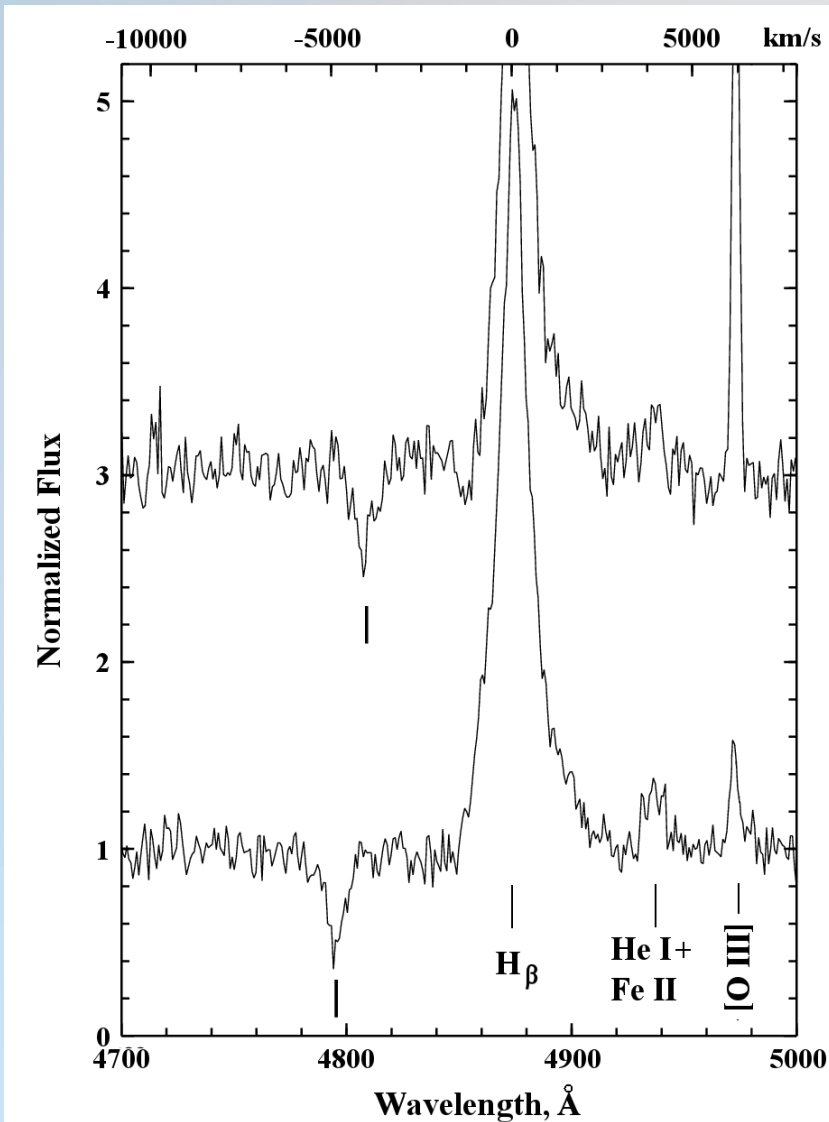
В рамках наблюдательной программы “Широкодиапазонная спектроскопия LBV звёзд в галактиках Местного объёма” на SCORPIO-1 получены прямые изображения в фильтрах UVVRcIc и спектры “классической” LBV звезды Var 2 со спектральным разрешением около 3\AA . На основе этих данных с помощью кода CMFGEN построена модель протяженной атмосферы звезды с учетом всех металлов, чей вклад в ускорение ветра превышает 1%. Показано, что реальный закон ускорения ветра хорошо соответствует стандартному β -закону с $\beta=1$. Получены достоверные оценки (точности $\approx 3\text{-}10\%$) не только параметров ветра (температура фотосферы $T = 24.4\text{ кК}$, радиус фотосферы ветра $45 R_{\odot}$, темп потери массы в ветре $2.1 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$, терминальная скорость 230 км/с), но и текущей массы звезды ($23M_{\odot}$), что сделано лишь для нескольких LBV.

AF And в холодном состоянии



Спектроскопия AF And, выполненная в августе 2025 года с решеткой VPHG2300@510 и щелью шириной 0.5". Среднее по диапазону спектральное разрешение 1.4 \AA . Оценки параметров звезды и ее ветра: температура фотосферы $T = 9.2 \text{ kK}$, радиус фотосферы ветра $390 R_{\odot}$, темп потери массы в ветре $9 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$, терминальная скорость 100 km/s .

Обнаружение струйных истечений у SN импостора?

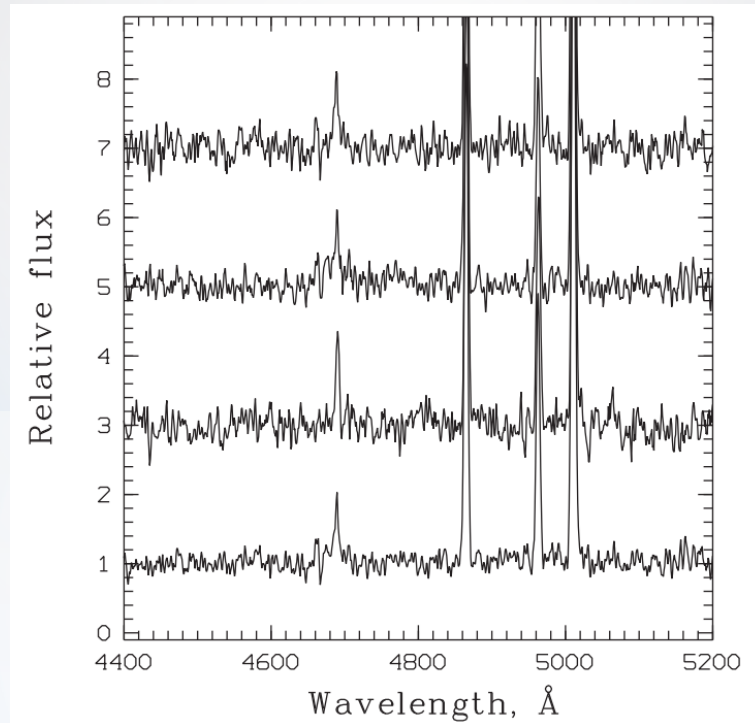


В ряде спектров импостора сверхновой AT2016blu, полученных на БТА/SCORPIO-1,2, обнаружены смещенные в сторону коротких длин волн абсорбционные особенности линии $H\beta$, отделенные от эмиссионной компоненты участком континуума. Положение абсорбций меняется, соответствуя скоростям около 4000-5000 км/с. Подобная картина наблюдается у некоторых симбиотических переменных (например, MWC560, Tomov et al. 1990) и интерпретируется как проявление коллимированного истечения из аккреционного диска вокруг компактного компонента. Наличие аналогичных истечений в случае AT2016blu может рассматриваться как косвенное указание, что этот объект также представляет собой двойную систему с аккреционным диском, но с учетом разницы в болометрических светимостях гораздо более массивную в сравнении с MWC560. Таким образом, возможно найдено первое подтверждение физической модели импосторов SN, предложенной Soker et al. (2016).

Ультраяркие рентгеновские источники и их туманности

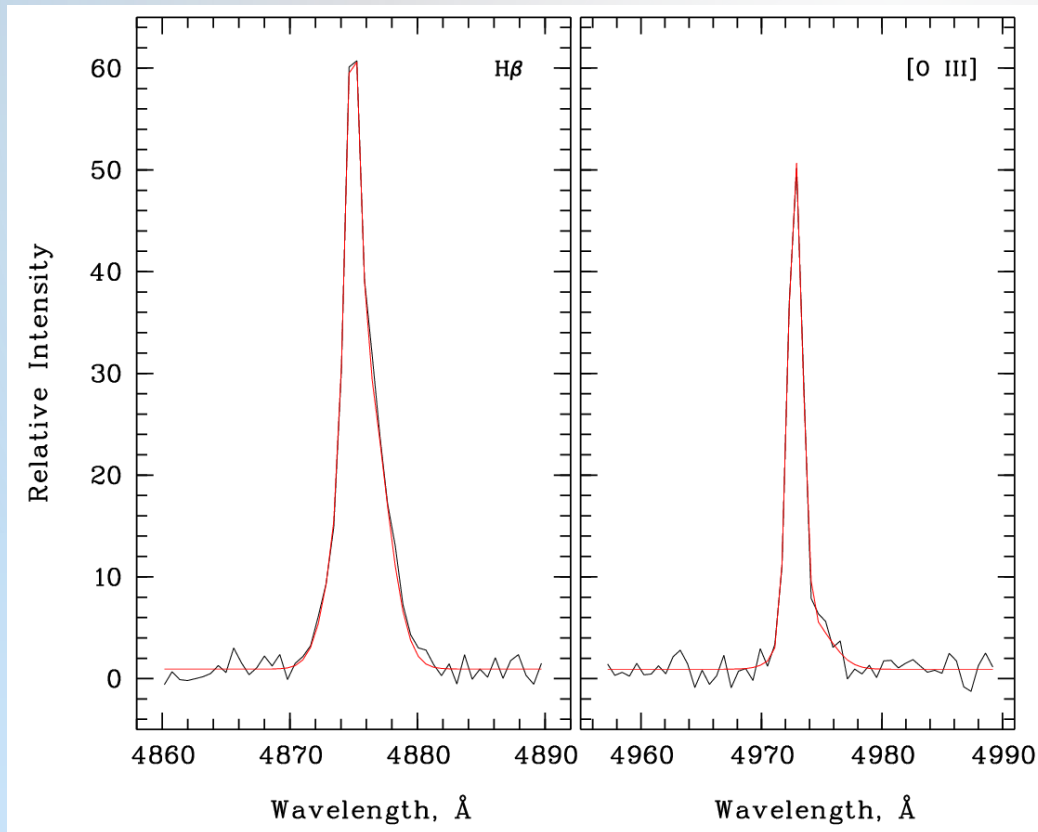
Исследования ULX начинались в 2005-2007 гг. со спектроскопии туманностей вокруг них на MPFS и SCORPIO.

В 2010х поставлена задача получать спектры не только туманностей, но и слабых ($V = 21 - 23^m$) звездообразных оптических источников, с которыми отождествляются эти рентгеновские двойные. Один из ярких успехов – исследование отождествленного нами ULX в галактике NGC4395 ($V = 23.0$; Vinokurov et al. 2018, ApJ, 854, 176), у которого удалось обнаружить формирующуюся в аккреционном диске широкую компоненту эмиссии He II $\lambda 4686$. При размерах звездных изображений 1-1.5" пригодные для анализа спектры удавалось накопить за 1-1.5 часа (гризмы VPHG1200G и VPHG1200B, щель 1.2").



Спектроскопия туманности вокруг NGC4861 X-1

По результатам недавних наблюдений туманности вокруг NGC4861 X-1 на БТА/SCORPIO-2 показано, что эмиссии имеют сложный профиль, состоящий из узкой и широкой компонент с $\text{FWHM}=1.32\pm 0.07\text{\AA}$ и $\text{FWHM}=4.1\pm 0.4\text{\AA}$ соответственно. Широкая компонента свидетельствует о наличии ударных волн со скоростями около 200 км/с, которые потенциально могут решить проблему возникновения ранее обнаруженного нами синхротронного излучения туманности (Gong et al. 2023). Интересно, что полная энергетика туманности и ее наблюдательные свойства в разных диапазонах длин волн делают ее более компактным и плотным аналогом туманности MF16 вокруг известного ультраяркого рентгеновского источника NGC6946 ULX-1.

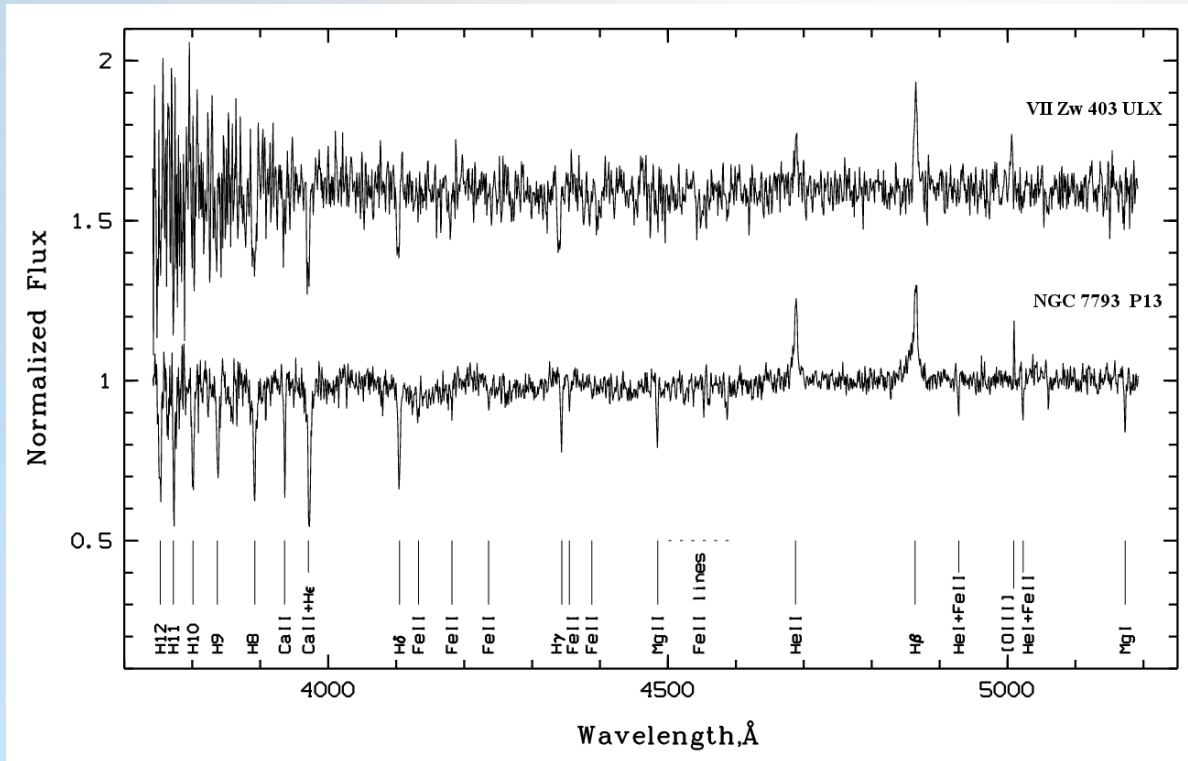


На рисунке показан профиль линии $\text{H}\beta$ в сравнении с профилем линии $[\text{O III}] \lambda 4959$.

VPHG1800@500 с щелью 0.5", 3 экспозиции по 600сек.

Обнаружение звезды-донора в UGC6456 ULX

На БТА/SCORPIO проведены спектральные и фотометрические наблюдения ультраяркого рентгеновского источника UGC6456 ULX в минимуме блеска объекта ($V=21.5$). Суммарное время накопления спектров в этом состоянии составило около 10 часов, отношение сигнал-шум достигло 12 в районе 4000\AA и около 15 на 5000\AA . Это позволило обнаружить ряд абсорбционных особенностей, среди которых наиболее глубокими и надежно идентифицируемыми являются линии Бальмеровской серии водорода и линия Ca II $\lambda 3934$. Ширина линий, измеренная при их аппроксимации функцией Гаусса, с точностью до ошибок измерений около $0.3\text{-}0.5\text{\AA}$ соответствует спектральному разрешению гризмы VPHG1200B (5.5\AA). Узкие водородные линии однозначно указывают, что в минимуме блеска основной вклад в оптическое излучение дает звезда-донор. Расчет моделей в CMFGEN с учетом облучения звездного ветра рентгеновским источником позволило с хорошей точностью воспроизвести спектр (включая эмиссии He II $\lambda 4686$ и H β) и оценить темп потери вещества $\dot{M} \approx 6 \times 10^{-6} M_{\odot}/\text{год}$.



Суммарный нормированный спектр UGC6456 ULX в сравнении со спектром ультраяркого рентгеновского пульсара NGC7793 P13 (Motch et al. 2014). Линии поглощения в спектре NGC7793 P13 принадлежат донору B9 Ia.

Вместо заключения

SCORPIO-1 и 2 прекрасно зарекомендовали себя в наблюдениях слабых (а иногда и предельно слабых) звездообразных источников – достигаемые с их помощью результаты не уступают тому, что удавалось получить в тех же диапазонах длин волн и с близким спектральным разрешением на лучших зарубежных инструментах с поправками на диаметр зеркала телескопа и размер изображений. Основные ограничения в наблюдениях связаны не с приборами, а с погодными условиями.

Неплохо бы:

- иметь широкий набор гризм с разными рабочими диапазонами по длинам волн, позволяющих получить спектральное разрешение $R \sim 3000-5000$ с щелями 0.5-1.0”;
- продвинуться в синий диапазон до $\sim 3500 \text{ \AA}$ и иметь там относительно приличное пропускание и спектральное разрешение.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!