

# Возможное нетепловое рентгеновского излучения ОВ звезд: новые результаты

Е. Б. Рыспаева<sup>1</sup>, А. Ф. Холтыгин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пгт. Научный, Крым  
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

## Свидетельства о наличии нетепловых рентгеновских потоков у ОВ звезд

1. Обнаружение синхротронного радиоизлучения у некоторых ОВ звезд
2. Сильное рентгеновское излучение в области жестких энергий (выше 2 кэВ).

## Ранние исследование возможного нетеплового излучения ОВ звезд:

1. Chen & White (1991) сформулировали гипотезу том, что рентгеновское излучение О звезд с энергиями выше 2 кэВ имеет нетепловую природу и генерируется в результате обратного комптоновского рассеяния УФ-фотонов на релятивистских электронах, разгоняемых звездным ветром вблизи звездной поверхности. Модель Chen & White (1991) предсказывала наличие у О звезд магнитных полей с достаточно низкой напряженностью в несколько гаусс.
2. Leto et al. (2017) выдвинули гипотезу о том, что быстровращающиеся Ар/Вр звезды с сильным магнитным полем способны генерировать нетепловое рентгеновское излучение в результате тормозного излучения нетепловых электронов, сталкивающихся с поверхностью звезды.
3. Ryspaeva & Kholtygin (2020) выполнили поиск степенной компоненты в модельных рентгеновских спектрах большого числа ОВ звезд и обнаружили, что многие объекты могут иметь такую компоненту, при этом доля степенной компоненты увеличивается с ростом температуры излучающей плазмы, а спектральный индекс уменьшается с ростом жесткости спектров.

## Постановка задачи:

Сделано предположение, что ОВ звезды, генерирующие тепловое рентгеновское излучение в результате нагрева газа за фронтом ударных волн в их мощных звездных ветрах (в рамках гидродинамической модели Hiller-Feldmeier, «гибридной» модели Cassinelli et al.), выполнена его проверка на большом числе объектов.

Затем был выполнен регрессионный анализ возможных зависимостей между найденными характеристиками рентгеновского излучения звезд и параметрами звезд.

## Найденные зависимости:

Approximation	Models	R	N	FAP	$\alpha$	$\beta$
$kT_{\text{pshock}} = \alpha \cdot FHL^\beta$	AS	$0.51 \pm 0.07$	39	$< 0.005$	$0.11 \pm 0.03$	$0.76 \pm 0.13$
$\langle kT \rangle = \alpha \cdot HR^\beta$	AP	$0.36 \pm 0.09$	70	$< 0.026$	$0.66 \pm 0.16$	$0.28 \pm 0.08$
$\langle kT \rangle = \alpha \cdot v_\infty^\beta$	SP	$0.49 \pm 0.04$	20	$< 0.049$	$(3.28 \pm 3.23) \cdot 10^{-3}$	$0.86 \pm 0.29$
$FPC = \alpha \cdot E_{\text{kin}}^\beta$	ASP	$0.69 \pm 0.01$	15	$< 0.005$	$(7.22 \pm 2.47) \cdot 10^{-4}$	$0.125 \pm 0.003$
$FPC = \alpha + FHL \cdot \beta$	AP	$0.43 \pm 0.02$	62	$< 0.008$	$25.47 \pm 1.38$	$0.54 \pm 0.19$
$FPC = \alpha \cdot FHL^\beta$	SSP <sup>‡</sup>	$0.66 \pm 0.03$	13	$0.015 \pm 0.005$	$7.09 \pm 2.17$	$0.48 \pm 0.07$
$FPC = \alpha \cdot kT^\beta$	AP	$0.50 \pm 0.03$	70	$< 0.001$	$50.42 \pm 1.58$	$0.44 \pm 0.07$
$FPC = \alpha \cdot \dot{M}^\beta$	ASP	$0.61 \pm 0.013$	14	$0.022 \pm 0.004$	$136.01 \pm 15.35$	$0.12 \pm 0.004$
$FPC = \alpha \cdot kT_{\text{aprec}}^\beta$	ASP*	$0.95 \pm 0.04$	8	$< 0.001$	$29.02 \pm 5.76$	$0.97 \pm 0.16$
$G = \alpha \cdot FHL^\beta$	AP	$-0.45 \pm 0.14$	62	$< 0.014$	$10.45 \pm 2.71$	$-0.32 \pm 0.14$
	SP	$-0.51 \pm 0.15$	47	$< 0.006$	$8.03 \pm 1.14$	$-0.25 \pm 0.07$
$G = \alpha \cdot HR^\beta$	AP	$-0.43 \pm 0.15$	53	$< 0.043$	$1.98 \pm 0.81$	$-0.32 \pm 0.09$
	SP	$-0.54 \pm 0.18$	54	$< 0.007$	$2.66 \pm 0.73$	$-0.22 \pm 0.07$
$G = \alpha \cdot kT^\beta$	AP	$-0.36 \pm 0.10$	63	$< 0.035$	$2.99 \pm 0.40$	$-0.22 \pm 0.06$
	SP <sup>o</sup>	$-0.47 \pm 0.12$	49	$< 0.015$	$3.02 \pm 0.49$	$-0.59 \pm 0.28$
	SP*	$0.85 \pm 0.09$	8	$< 0.030$	$2.40 \pm 0.84$	$0.44 \pm 0.10$

## Методика анализа спектров:

Проанализированы архивные рентгеновские наблюдения 95 ОВ звезд, выполненные на спутнике «ХММ-Newton», извлечены звездные спектры в диапазоне энергий 0.2-8 кэВ и аппроксимированы следующими модельными комбинациями:

**APEC+PL (AP)** — от звезды исходит стационарное тепловое излучение и вместе с ним нетепловое;

**PSHOCK+PL (SP), PSHOCK+PSHOCK+PL (SSP)** — тепловое рентгеновское излучение формируется вследствие столкновения неоднородностей в звездном ветре и одновременно присутствует нетепловое излучение;

**APEC+PSHOCK+PL (ASP)** — звезда одновременно генерирует тепловое рентгеновское излучение согласно гибридной модели Cassinelli et al. с учетом нестационарного высвечивания газа за фронтом ударных волн и вклада нетеплового рентгеновского излучения, описываемого степенным спектром PL.

Здесь PSHOCK (Borkowski et al. 2001) - модель плоско-параллельной ударной волны, использовалась для описания нестационарного теплового рентгеновского излучения. APEC (Smith et al. 2001), MEKAL (Mewe et al. 1984, Liedahl, 1986) - модели излучения горячей плазмы, где атомы ионизируются электронным ударом, применялись для описания рентгеновского излучения, формирующегося в режиме бесстолкновительных ударных волн. Для поиска возможного нетеплового рентгеновского излучения звезд был добавлен компонент PL со степенным спектром.

Были оценены следующие характеристики рентгеновских спектров:

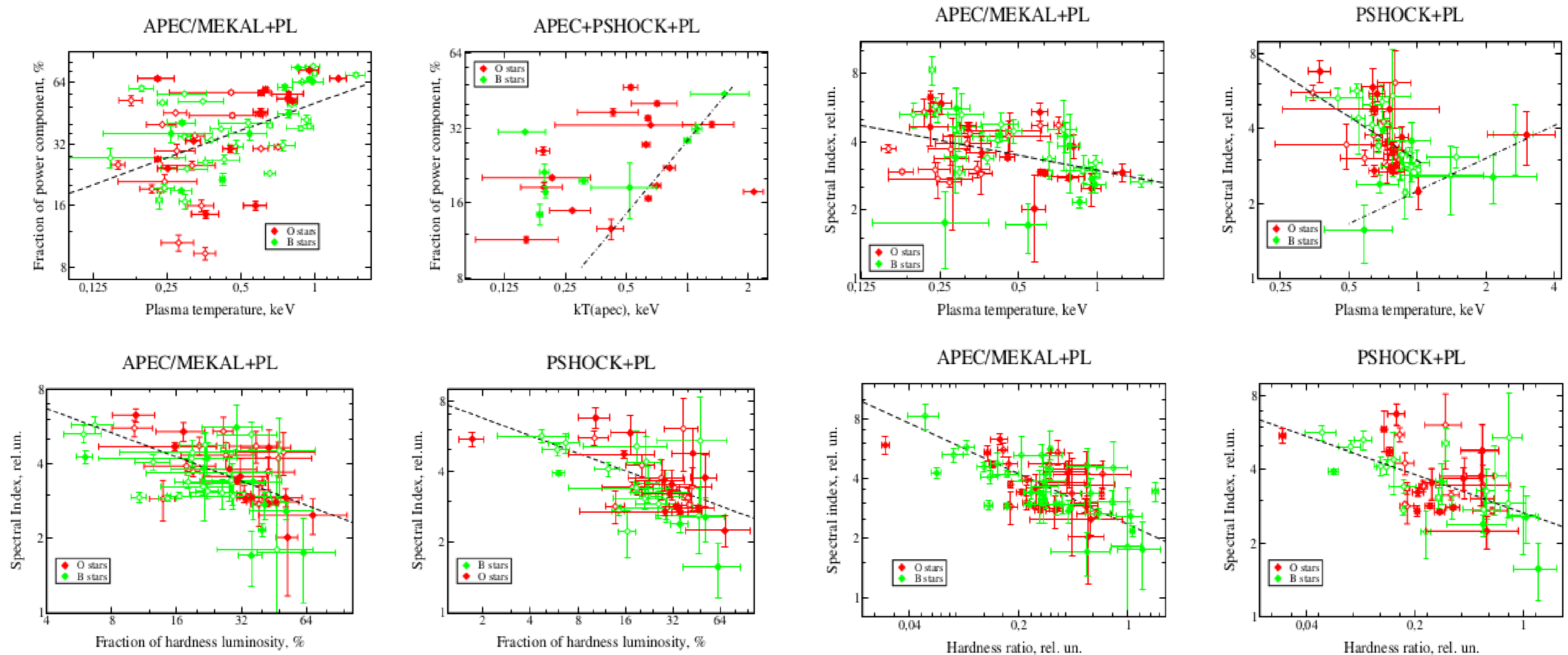
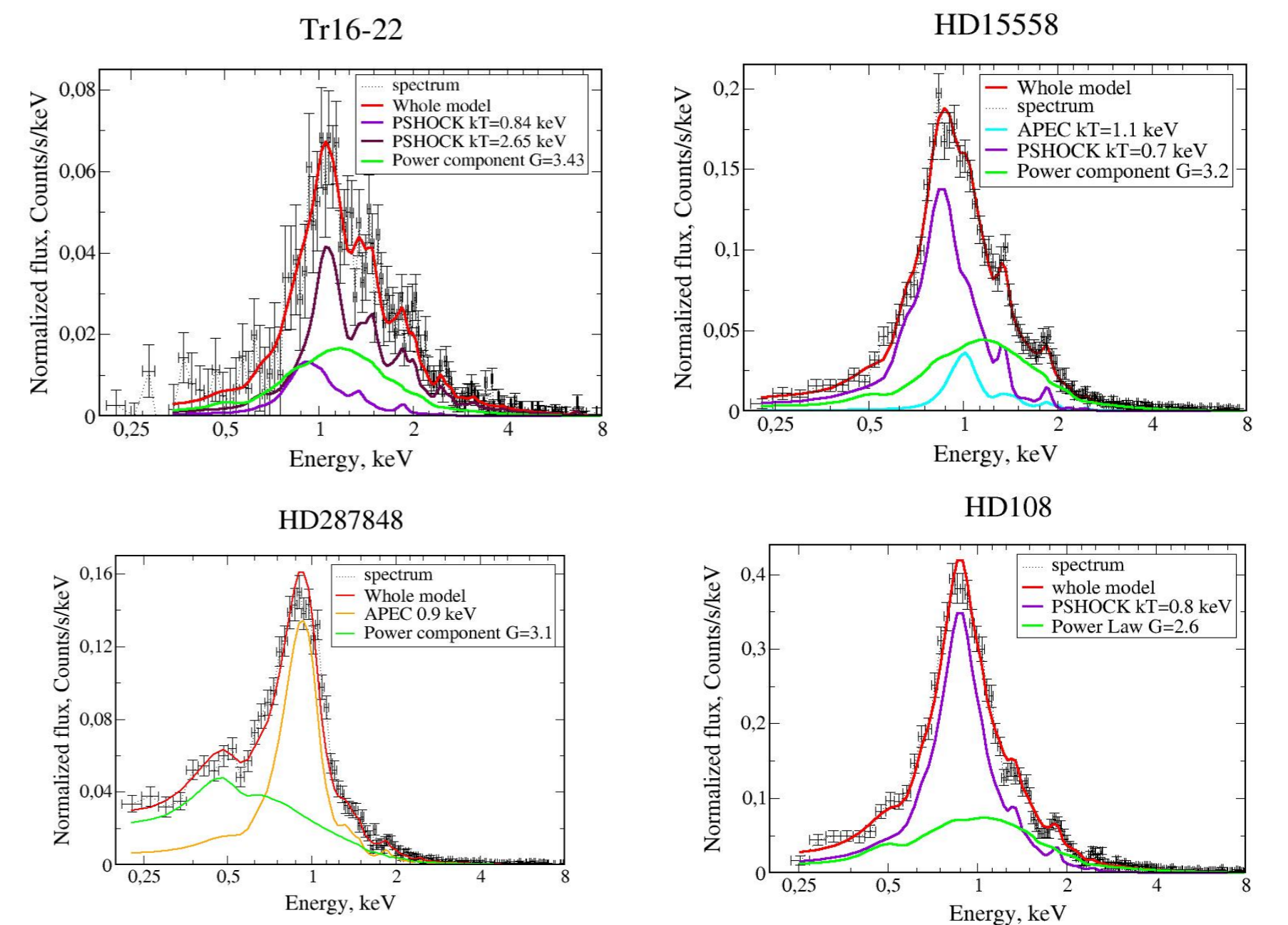
kT — температура излучающей плазмы (кэВ);

G — спектральный индекс (отн. ед.);

FPC — доля степенной компоненты в полном модельном спектре (%);

FHL — доля рентгеновской светимости в жесткой части спектра в светимости на всем диапазоне энергий (%).

HR — жесткость рентгеновских спектров;



## Заключение

Выполненный анализ спектров подтвердил наличие найденных Ryspaeva & Kholtygin (2020) зависимостей доли степенной компоненты от температуры плазмы и спектрального индекса от жесткости для большего числа объектов, при этом последняя зависимость выполняется даже если считать тепловое рентгеновское излучение звезд нестационарным. Спектральный индекс уменьшается с ростом доли жесткой светимости. Не обнаружено значимой зависимости спектрального индекса от температуры излучающей плазмы.

## Список литературы

1. Borkowski K., Lyerly W. J., Reynolds S., 2001 ApJ 548, 820
2. Cassinelli, J.P., Swank, J.H. 1983, ApJ 271, 681
3. Feldmeier, A., Puls, J., Pauldrach, A.W.A., 1997. A&A 322, 878
4. Hillier D.J., Kudritzki R.P., Pauldrach A.W., et al., 1993, A&A 276, 117
5. Liedahl D. A., Osterheld A. L., Goldstein W. H., 1995, ApJ, 438, L115
6. Leto P., Triglioni C., Oskinova L. et al., 2017, MNRAS, 467, 2820
7. Mewe K., Gronenschild E. H. B. M., van der Oord G. H. J., 1985, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 62, 197
8. Mewe K., Lemen J. R., van der Oord G. H. J., 1986, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 62, 511
9. Ryspaeva E., Kholtygin A., 2020, Astrophysical Bulletin, 2020, Vol. 75, No. 2, 127
10. Smith R. K., Brickhouse N. S., Liedahl D. A., Raymond J. C., 2001, ApJ, 556, L91
11. Waldron, W.L., Cassinelli, J.P. 2009, ApJ 692, L76