Молодое рассеянное скопление α Рег в обзоре СРГ/eРОЗИТА

*steppanarinastro@gmail.com
**irek_khamitov@hotmail.com

Панарин С.С.[1,2*], Хамитов И.М.[1,2**], Бикмаев И.Ф.[1,2], Гильфанов М.Р.[3,4], Сюняев Р.А.[3,4]

[1]КФУ, Казань, [2]Академия наук РТ, Казань, [3]ИКИ РАН, Москва, [4]Институт астрофизики общества Макса Планка, Гархинг (Германия)

Мотивация

Рентгеновская активность маломассивных звезд тесно связана с их вращением и эволюцией магнитного динамо. В раннем возрасте звезды вращаются быстро и демонстрируют постоянный уровень рентгеновской активности ($L_x/L_{bol} \approx 10^{-3}$). Вследствие магнитного торможения **наблюдается переход к степенной зависимости рентгеновского потока от периода вращения**, что отражается в поведении величины $R_x = L_x/L_{bol}$ как функции периода P [1,2]. Таким образом, рассеянные скопления, представляющие собой одновозрастные популяции, являются уникальной лабораторией для **изучения зависимости «возраст – вращение – активность»** и проверки рентгено-хронологических моделей. **Скопление Альфа Персея** (Melotte 20) — молодое рассеянное скопление на расстоянии ~ 172 пк с возрастом порядка 50–70 млн. лет [3,4]. Оно занимает промежуточное положение между совсем молодыми ассоциациями (например, Orion OB1) и скоплениями большего возраста (Плеяды, Гиады), что позволяет использовать его для отслеживания изменения рентгеновской активности звезд в промежуточные возрастные эпохи.

Данные СРГ/eРОЗИТА

Ранее **рентгеновские исследования Альфа Персея** были ограничены выборочными наблюдениями *ROSAT* и *XMM-Newton*, выявившими несколько десятков источников [5,6]. Однако глубина этих обзоров не позволяла получить достаточную для анализа активности выборку членов скопления.

В результате многократного сканирования всего неба с помощью рентгеновского телескопа **eРОЗИТА** [7] на борту орбитальной обсерватории СРГ [8] был получен **обзор всего неба в мягком рентгеновском диапазоне (0.3-2.3 кэВ)** с итоговой чувствительностью на порядок выше, чем ROSAT. Это открывает возможность более детального **систематического изучения активности звезд в скоплениях**.

В данной работе мы исследовали рентгеновскую активность членов скопления Альфа Персея, используя данные eРОЗИТА и **оптический каталог из 1406 членов скопления**, построенный на основе данных Gaia DR3 (M. Zerjal et al., 2023). В результате перекрестной идентификации **найдено 526 рентгеновских источников**, ассоциированных со звездами скопления, включая **479 объектов, ранее не наблюдавшихся** в рентгеновском диапазоне другими миссиями.

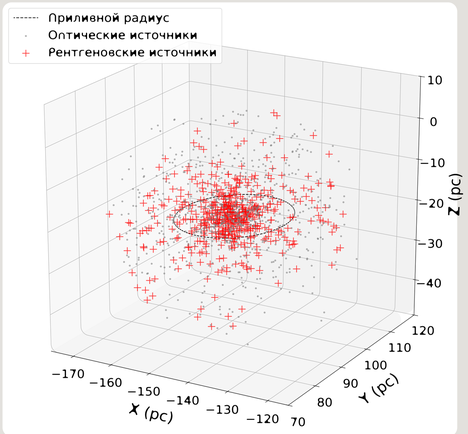


Рис. 1 Трехмерное распределение оптических (GAIA, серый цвет) и рентгеновских источников (eROSITA), ассоциированных с членами скопления Альфа Персея. Черным пунктиром отмечен приливной радиус скопления r_{tidal} = 12.8 пк с центром в α = 51.75° и δ = 49.12°. Скопление находится на низкой галактической широте ($b \approx -7°$), что приводит к высокой плотности фоновых звёзд и существенно осложняет задачу выделения членов, особенно среди маломассивных объектов. Оси: X – от Солнца к центру Галактики (l = 0°), Y – в направлении вращения (l = 90°), Z – к NGP (b = +90°).

Более высокая доля рентгеновских источников внутри приливного радиуса (~48% против ~27% снаружи) может говорить о принадлежности большинства X-источников к скоплению

Определение периодов вращения

Для анализа зависимости рентгеновской активности от вращения **необходимы периоды как можно большего числа звезд с измеренной рентгеновской светимостью**.

Основу выборки в нашей работе составили периоды из каталога Boyle et al. (2023, TESS) — 308 объектов, дополненные значениями из Messina et al. (2003) и Gaia DR2 (ещё 31 объект). Существенная часть источников (~200) не имела опубликованных периодов, что потребовало автоматического определения на основе данных миссии TESS.

Мы реализовали **многоэтапный автоматический алгоритм**:

- *Кластеризация кривых блеска* (метод k-means) по параметрам амплитуды, формы и асимметрии.
- *Определение периодов методом Ломба–Скаргла* для каждой кривой.
- Верификация через *FFT-анализ* и оценку отношения сигнал/шум.
- *Агрегация (взвешивание) значимых кривых* и выбор финального периода по максимизации SNR.

1. Каждая кривая $f_i(t)$ фазируется по тестируемому периоду P:
$$\phi_i = (t_i \, mod[P])/P$$
2. Кривые интерполируются на общую фазовую сетку, нормализуются и взвешиваются по качеству S/N
3. Формируется агрегированная кривая:
$$F_{avg}(\phi) = \frac{1}{W}\Sigma\, w_i\, f_i(\phi), W = \Sigma\, w_i$$
4. На агрегированной кривой проводится быстрое Фурье-преобразование (FFT), и выбирается период, соответствующий пику мощности с высоким отношением S/N

Метод позволил получить новые надёжные оценки для **101 источника**, расширив выборку для анализа зависимости $L_x/L_{bol} - R_o$

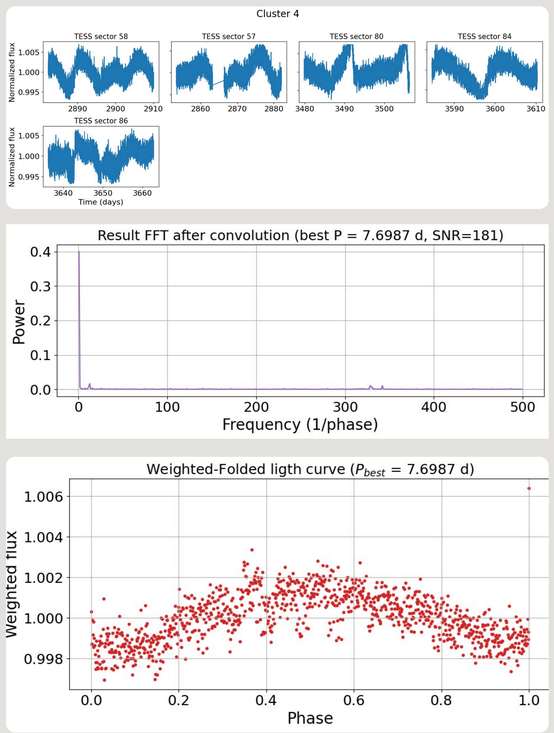


Рис. 2 Пример кластеризации и получения взвешенной кривой блеска с итоговым периодом. Для извлечения наиболее вероятного периода из зашумленных кривых блеска мы использовали ***метод взвешенной агрегации фазированных сигналов.*** Сверху вниз кратко показаны этапы 1-4: кластеризация схожих по параметрам кривых блеска (график 1); определение периодов для каждой прямой, создание взвешенной кривой блеска и проведение на ней FFT (график 2); итоговая кривая блеска, отобранная как лучшая среди полученных по отдельным кластерам

Рентгеновская активность – вращение

Известно, что магнитная активность звезд связана с их вращением через динамо-механизм: чем быстрее вращение, тем эффективнее генерация магнитного поля и коронального излучения.

Однако период вращения ***P*** сам по себе не универсален: у звёзд разных масс и глубины конвективной зоны **одинаковый период может приводить к разной рентгеновской активности $R_x = L_x/L_{bol}$**. В связи с этим эффектом для анализа рентгеновской активности вводится число Россби:

$$Ro = P/\tau$$

где τ – время циркуляции конвективной ячейки, являющееся функцией массы звезды ***M*** *(в данной работе использована log–log зависимость аналогично [2]).* Оно нормирует вращение на внутренние свойства звезды и позволяет сравнивать объекты разных масс.

Наблюдаемая **зависимость R_x – Ro** (рис. 3, правый график) имеет два режима:

- при малых Ro — **насыщение** ($R_x \sim 10^{-3}$), когда активность перестаёт расти с увеличением вращения;
- при больших Ro (> 0.1) — **ненасыщенный режим,** где активность падает по степенному закону.

Поиск точки излома Ro_{br} количественно определяет границу между "насыщенным" и "ненасыщенным" режимами. Фактически Ro_{br} – граница эффективности динамо: ниже неё динамо работает на максимуме, выше — его эффективность уменьшается.

Положение излома важно для калибровки моделей эволюции звезд и позволяет проверять модели эволюции вращения и магнитной активности: как быстро звёзды теряют угловой момент, как затухает активность с возрастом. Предполагается, что данная точка смещается, это должно отражать возрастные эффекты скопления.

В предыдущих исследованиях [1,2] переход между режимами описывали степенным законом с изломом. В данной работе мы **аппроксимировали подвыборку K-звезд** (рис. 4) скопления Альфа Персея при помощи **кусочно-линейного анзатца**:

$$log(R_X) = \begin{cases} \beta_1 log(Ro) + C_1, Ro < Ro_{\rm br} \\ \beta_2 log(Ro) + C_2, Ro \geq Ro_{\rm br} \end{cases}$$

где Ro_{br} – число Россби в точке излома, β_1 и β_2 – показатели степенного закона в двух режимах

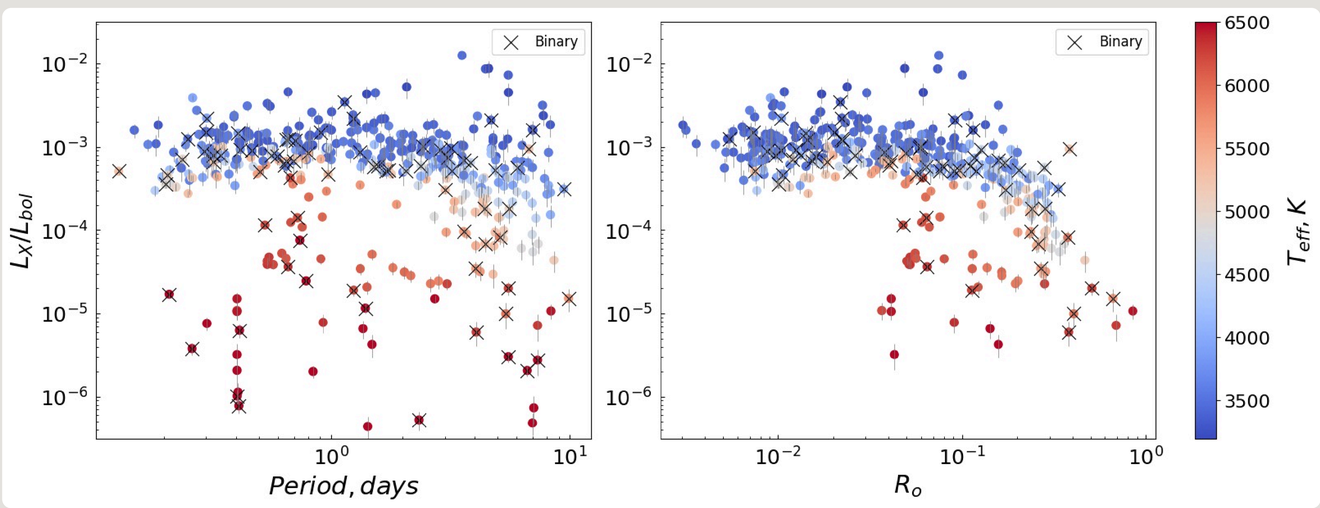
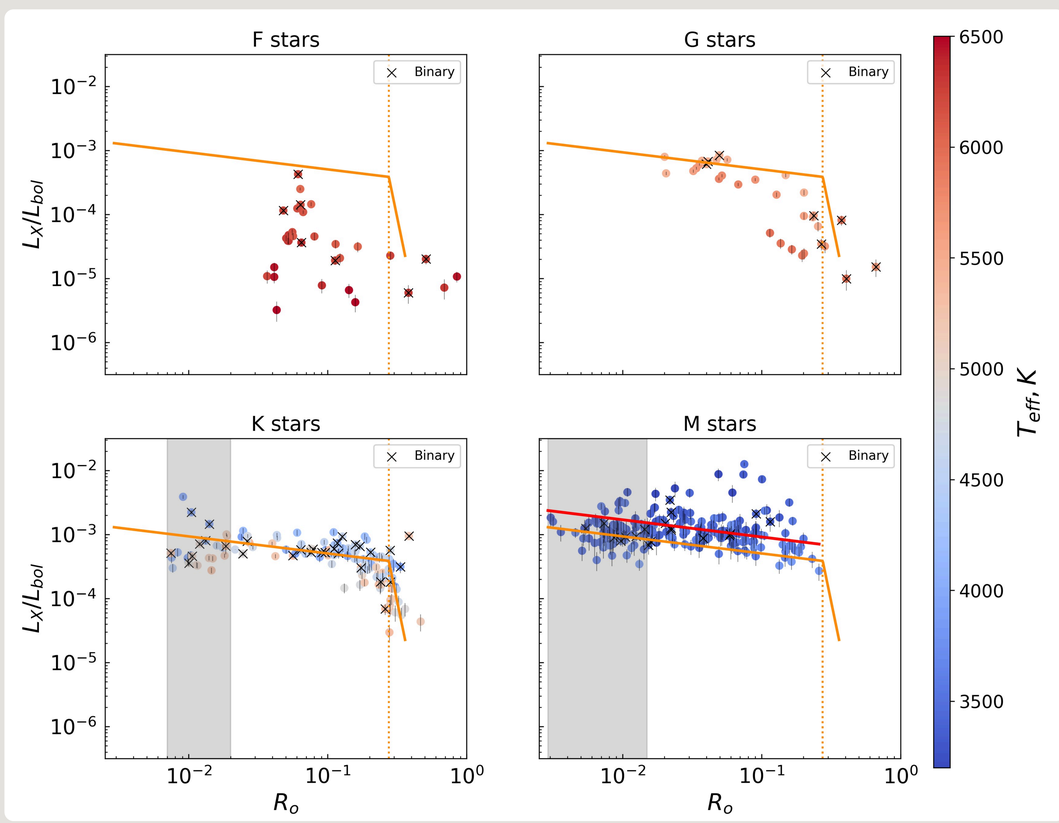


Рис. 3 Зависимость "Рентгеновская активность – вращение". На графиках показано отношение рентгеновской и болометрической светимостей как функция периода вращения ***P*** (слева) и числа Россби ***Ro*** (правый). Подтвержденные двойные системы выделены крестиками, остальные звезды — цветом по эффективной температуре.



В результате, исключив сильно выбивающиеся точки, источники с зарегистрированной двойственностью и область так называемого сверх-насыщения (рис. 4, серый цвет), мы получили **значение излома между насыщенной и ненасыщенной зонами** при

$$Ro_{\rm br} = 0.28^{+0.04}_{-0.03}$$

а также показатели степенного закона:

$$\beta_1 = -0.27 \pm 0.04$$
$$\beta_2 = -10.50 \pm 4.96$$

Положение точки излома для Альфа Персея в пределах ошибок **совпадает со значением, определенным нашей группой для Плеяд** в недавнем исследовании (Khamitov et al, 2025)

Рис. 4 Зависимости L_X/L_{bol} от числа Россби для звезд, разделенных по **спектральным классам F, G, K и M**. Желтой линией на всех графиках показаны результаты аппроксимации данных для K-звезд степенным законом с изломом. Красной линией на панели для M-звезд показан результат аппроксимации степенным законом. Крестиками отмечены источники, у которых обнаружена двойственность по спектральным наблюдениям. Серым цветом показана область вероятного сверх-насыщения, которая была исключена при описании зависимости

Обсуждение

Проведенный анализ источников eРОЗИТА в скоплении Альфа Персея показал, что **рентгеновская активность** членов скопления демонстрирует **классическую зависимость от числа Россби** с переходом от насыщенного к ненасыщенному режиму.

Найденное положение точки излома **Ro** для K-звезд в Альфа Персее находится в согласии с результатом Ro_{br} = 0.25 ± 0.02 для Плеяд [9], что может быть аргументом в пользу **универсальности ключевых свойств звездного динамо в рассматриваемом возрастном интервале**, однако это утверждение требует измерения Ro_{br} для скоплений других возрастов по как можно большему числу источников.

Наклон фитирующей прямой для M-звезд β = −0.27 ± 0.03 на рис. 4 в пределах ошибок совпадает с наклоном для K-звезд в области насыщения, что также может говорить в пользу **универсальности механизмов при переходе между спектральными классами**. Размеры нашей выборки F и G звезд в Альфа Персее не позволят количественно описать их поведение.

Дальнейшая работа включает:

- выявление и характеристику звезд с **выраженной рентгеновской переменностью** (X_{var} > 10);
- **построение однородного каталога eROSITA-источников**, ассоциированных с членами Альфа Персея;
- сравнение данных eROSITA с результатами других рентгеновских миссий (ROSAT, XMM-Newton)

Источники

[1] Pizzolato N., Maggio A., Micela G., et al. Activity-rotation relationship in late-type main-sequence stars // A & A. — 2003. — Vol. 397, No. 1. — P. 147–157.

[2] Wright N. J., Drake J. J., Mamajek E. E., Henry G. W. The stellar-activity-rotation relationship and the evolution of stellar dynamos // Astrophys. J. — 2011. — Vol. 743, No. 1. — Article 48.

[3] Danner C. A., Sandquist E. L., Schaefer G. H. et al. Precise Age for the Binary HD 21278 in the Young Alpha Persei Cluster // Astrophys. J. — 2025. — (accepted) — arXiv:2506.08241

[4] van Leeuwen F. Parallaxes and proper motions for 20 open clusters as based on the new Hipparcos catalogue // A & A. — 2009. — Vol. 497, No. 1. — P. 209–242.

[5] Prosser C. P., Randich S. Identification of new low-mass members of the Alpha Persei open cluster by ROSAT. I. // Astron. Nachr. — 1998. — Vol. 319, No. 4. — P. 201.

[6] Pillitteri I., Remage Evans N., Wolk S. J., Bruck Syal M. XMM-Newton observation of the α Persei cluster // Astron. J. — 2013. — Vol. 145, No. 5. — Article 143

[7] Predehl P., Andritschke R., Arefiev V. et al. The eROSITA X-ray telescope on SRG // A & A. — 2021. — Vol. 647. — Article A1.

[8] Sunyaev R., Arefiev V., Babyshkin V. et al. The SRG/eROSITA all-sky survey: early results and future prospects // A & A. — 2021. — Vol. 656. — Article A132.

[9] Khamitov I. M., Bikmaev I. F., Gilfanov M. R., et al. 850 SRG/eROSITA Sources in the Pleiades // Astron. Lett. — 2024. — Vol. 50, No. 11. — P. 780–795.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-12-00292