ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Моделирование поляризации рентгеновского излучения остатка сверхновой Тихо

С.М. Осипов, А.М. Быков, Ю.А. Уваров

39 ВККЛ

2026

Рентгеновские поляризационные наблюдения остатка SN 1006 (обсерватория IXPE). P. Zhou et al, 2023.

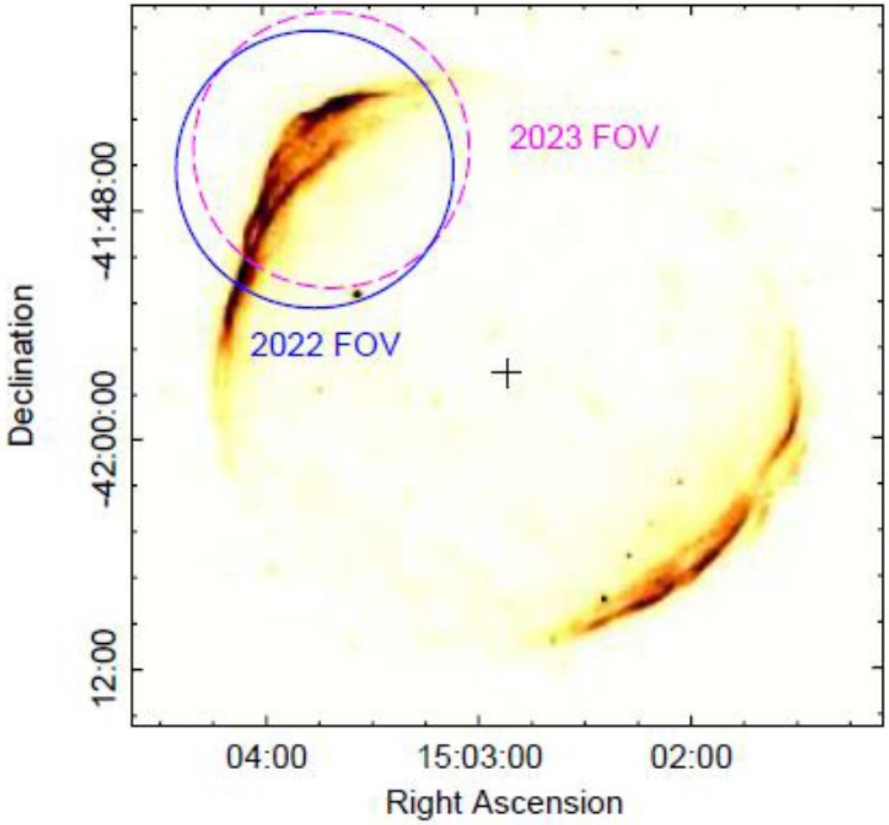

Рис. 1. Поля наблюдения IXPE. Цветом приведены наблюдения XMM-Newton в диапазоне 2-8 кэВ (Li et al. 2016) .

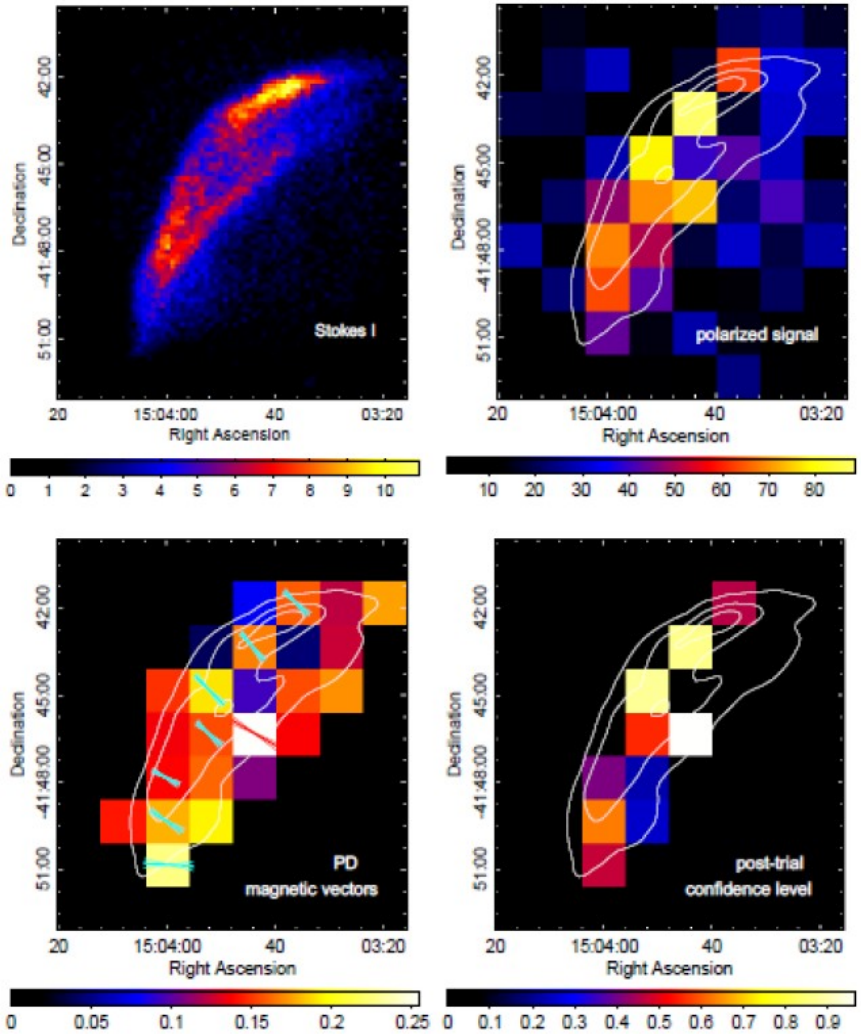

Рис. 2. Изображение IXPE в диапазоне 2-4кэВ. Направление полосок показывает преимущественное направление магнитного поля.

Рентгеновские поляризационные наблюдения остатка Тихо (обсерватория IXPE).
R. Ferrazzoli et al, 2023.

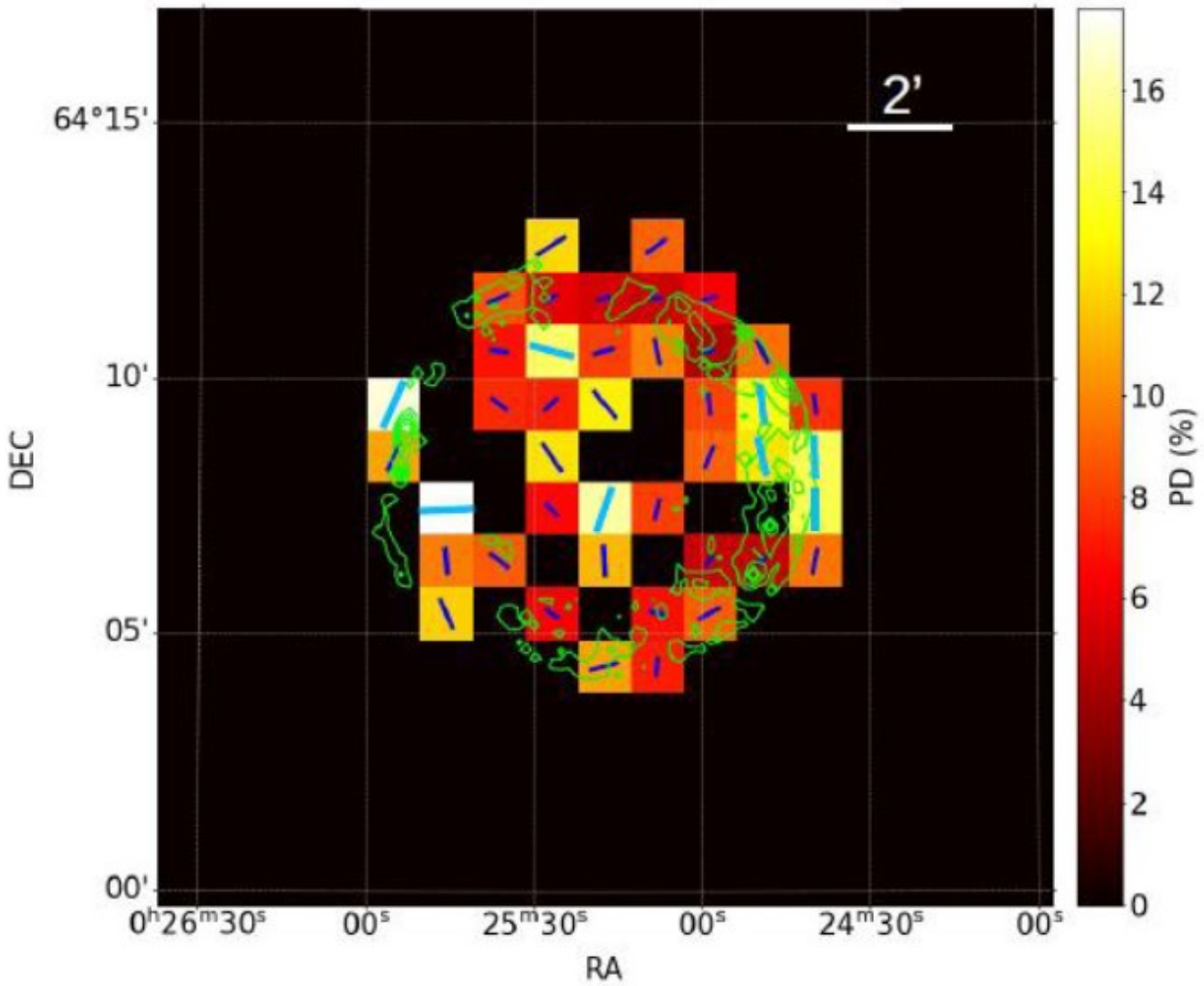

Рис. 3. Карта поляризации в диапазоне энергий 3-6 кэВ с размером пикселей 60“ (IXPE). Показаны пиксили со значимостью выше 1σ. Голубые полоски показывают направление поляризации (направление электрического поля) и их длина пропорциональна степени поляризации. Ориентация магнитного поля перпендикулярна электрическому. Зеленые контуры соответствуют данным обсерватории Chandra в диапазоне 4-6 кэВ.

Схема расчета профиля и поляризации рентгеновского излучения остатка Тихо

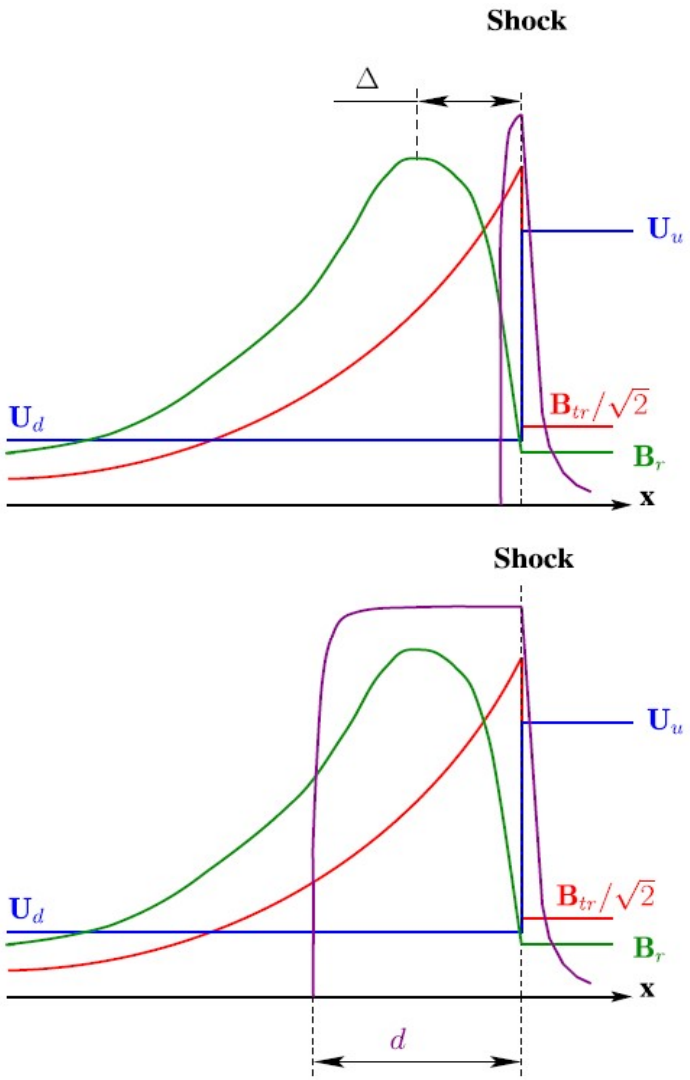

Рис. 4. Схематичное изображение поведения компонент магнитного поля, скорости течения и излучающих электронов вблизи ударной волны. d – ширина распределения электронов, Δ – расстояние между максимумами компонент магнитного поля.

При прохождении через фронт ударной волны турбулентности содержащей сильные флуктуации плотности происходит развитие неустойчивости приводящей к росту магнитного поля. (V. N. Zirakashvili and V. S. Ptuskin, 2008; T. Inoue et al, 2013; Y. Hu et al, 2022)

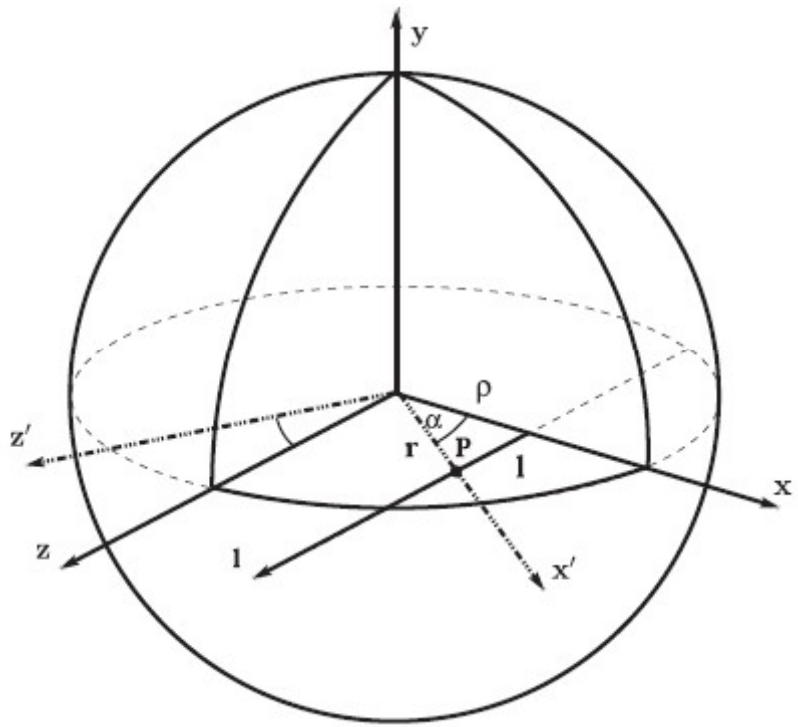

Рис. 5. Схематичное изображение интегрирования по лучу зрения в сферически симметричном приближении рассмотрения остатка сверхновой Тихо. l – направление луча зрения. Поля в точке P определяются поворотом системы координат, так что радиус вектор проведенный из центра остатка к поверхности сферы (ударной волне), совпадает с направлением x на Рис. 4.

Система МГД уравнений для моделирования усиления турбулентности за счет белловской неустойчивости (Bell, 2004)

$$\begin{cases} \rho\left(\dfrac{\partial\vec{u}}{\partial t}+(\vec{u}\nabla)\vec{u}\right)=-\nabla P+\dfrac{1}{4\pi}\left[\left[\nabla\times\vec{B}\right]\times\vec{B}\right]-\dfrac{1}{c}\left[(\vec{J}^{cr}-en_{cr}\vec{u})\times\vec{B}\right] \\ \dfrac{\partial\vec{B}}{\partial t}=\nabla\times\left[\vec{u}\times\vec{B}\right] \\ \dfrac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla(\rho\vec{u})=0 \\ \dfrac{\partial e}{\partial t}+\nabla\left(\rho\dfrac{u^2}{2}\vec{u}+\dfrac{\gamma P\vec{u}}{\gamma-1}+\dfrac{\left[\vec{B}\times\left[\vec{u}\times\vec{B}\right]\right]}{4\pi}\right)=-\dfrac{\vec{u}}{c}\left[\vec{J}^{cr}\times\vec{B}\right] \end{cases}$$

$\vec{u}$, ρ, P - скорость, плотность, давление фоновой плазмы, соответственно

$\vec{B}$ - магнитное поле; e - плотность энергии

$\vec{J}^{cr}$, n_{cr} - ток и концентрация космических лучей, соответственно

Аналогично моделированию V. N. Zirakashvili and V. S. Ptuskin, 2008

Результат моделирования усиления МГД- турбулентности.

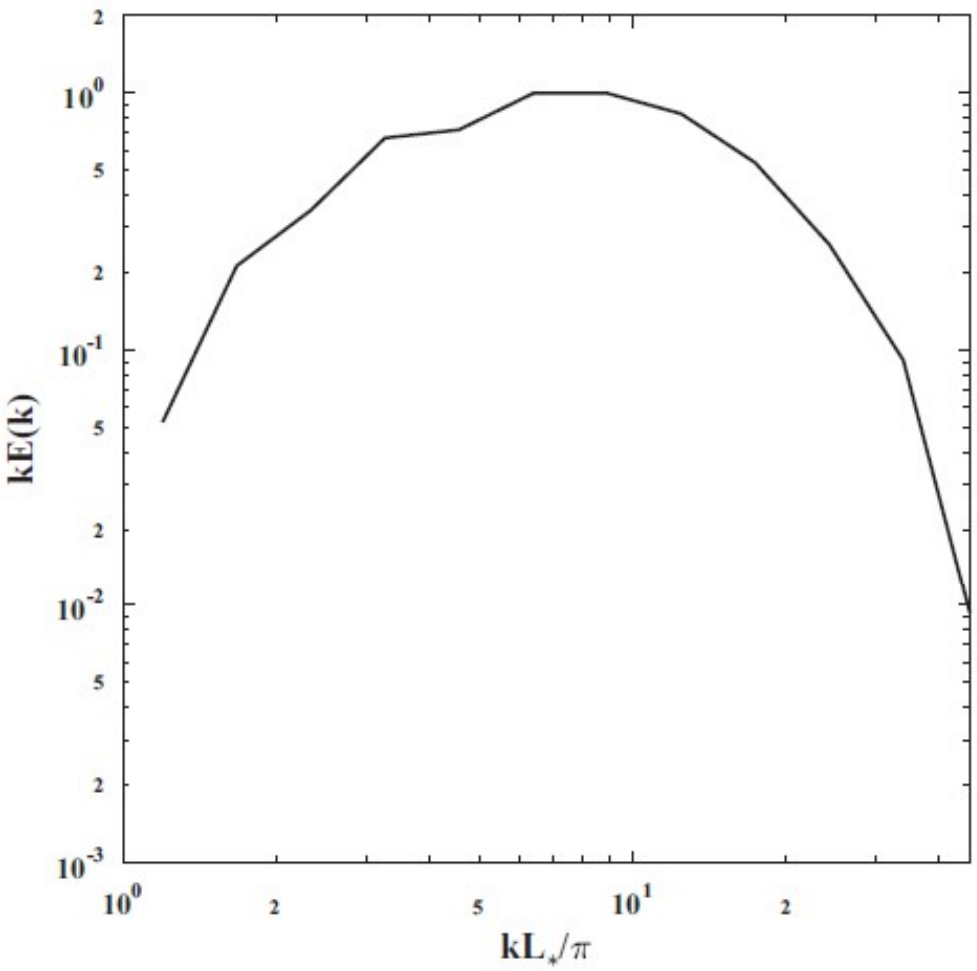

Рис. 6. Спектр энергии магнитного поля, нормированный на максимум кривой, к концу моделирования усиления МГД-турбулентности за счет белловской неустойчивости.

Отношение колебаний плотности к средней плотности к концу расчета $\delta\rho_{rms/}\,\rho \approx 0.4$

Моделирование выполнено с помощью МГД кода PLUTO. Модельный бокс имеет вид куба с размерами -1 до 1 в единицах кода. Число ячеек в расчете 512x512x512. Граничные условия периодические по всем осям.

Нормировочные величины кода PLUTO:
$\rho_* = 1.67 \cdot 10^{-24}$ г/см^3, $u_* = 10^{-8}$ см/с, L_*.

Из Рис. 6 видно, что энергонесущий масштаб турбулентности $L_0 \approx L_*/3$

Начальные условия моделирования:
Концентрация частиц n_0=0.3 см$^{-3}$,
Скорость движения плазмы равна нулю,
Магнитное поле постоянное B и турбулентное δB с колмогоровским спектром:

B=3 мкГс, δB_{rms}=0.1B

$$\delta\vec{B} = \sum_m a_n \vec{e}_n \cos\left(\vec{k}_n \vec{r}_n + \psi_n\right)$$

Расчет на основе кода PLUTO прохождения усиленной белловской неустойчивостью МГД турбулентности через фронт ударной волны

Моделирование выполнено с помощью МГД кода PLUTO. Модельный бокс имеет ячеек в расчете 2560x512x512. Граничные условия периодические по осям y и z (оси перпендикулярные нормали к фронту ударной волны). На правой границе по оси x стоит граничное условие отсутствия потоков. На левую границу оси x подаются результаты расчета предыдущей стадии (усиления турбулентности белловской неустойчивостью) со скоростью 4000 км/с (скорость ударной волны). В начальный момент времени в расчетной области установлена покоящаяся ударная волна в точке $x=2L_*$ и параметры плазмы однородны в предфронте и за фронтом ударной волны, на ударной волне происходит скачек величин в соответствии с условиями Гюгонио, скорость плазмы в предфронте 4000 км/с (вдоль оси x), концентрация протонов 0.3 см^3, магнитное поле направлено вдоль оси x B=3 мкГс.

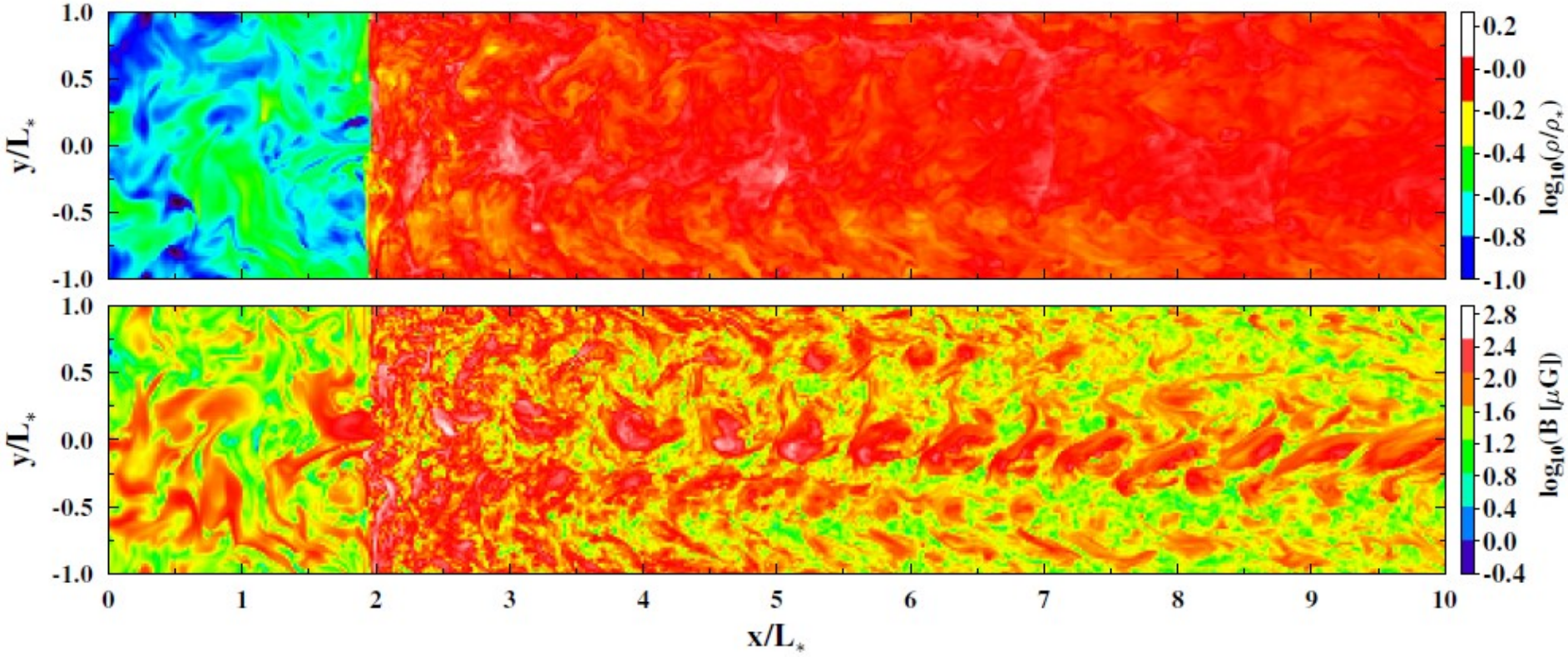

Рис. 7. Срез расчетного бокса при z=0 к концу моделирования. Верхняя панель плотность плазмы. Нижняя панель модуль магнитного поля.

Результаты расчета прохождения усиленной белловской неустойчивостью МГД турбулентности через фронт ударной волны

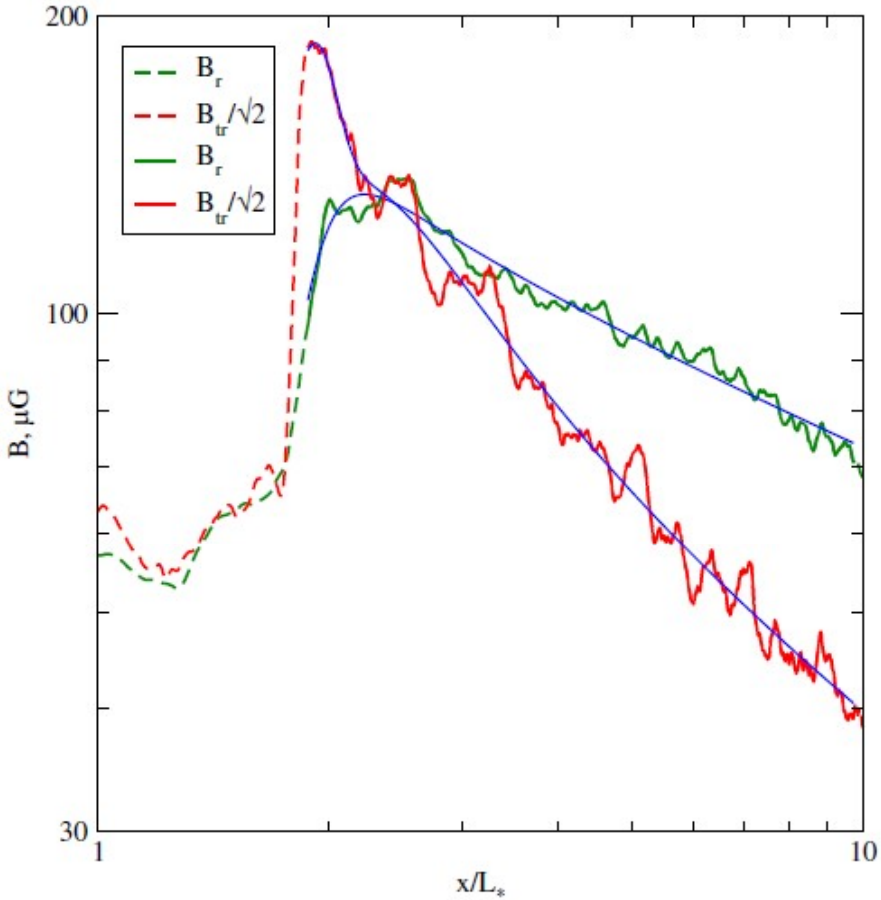

Рис. 8. Зеленая кривая среднеквадратичная параллельная нормали к фронту компонента магнитного поля. Красная кривая среднеквадратичная перпендикулярная нормали к фронту компонента магнитного поля. Синие кривые – аппроксимации используемые для вычисления излучения. Усреднение произведено по поперечным координатам (y, z).

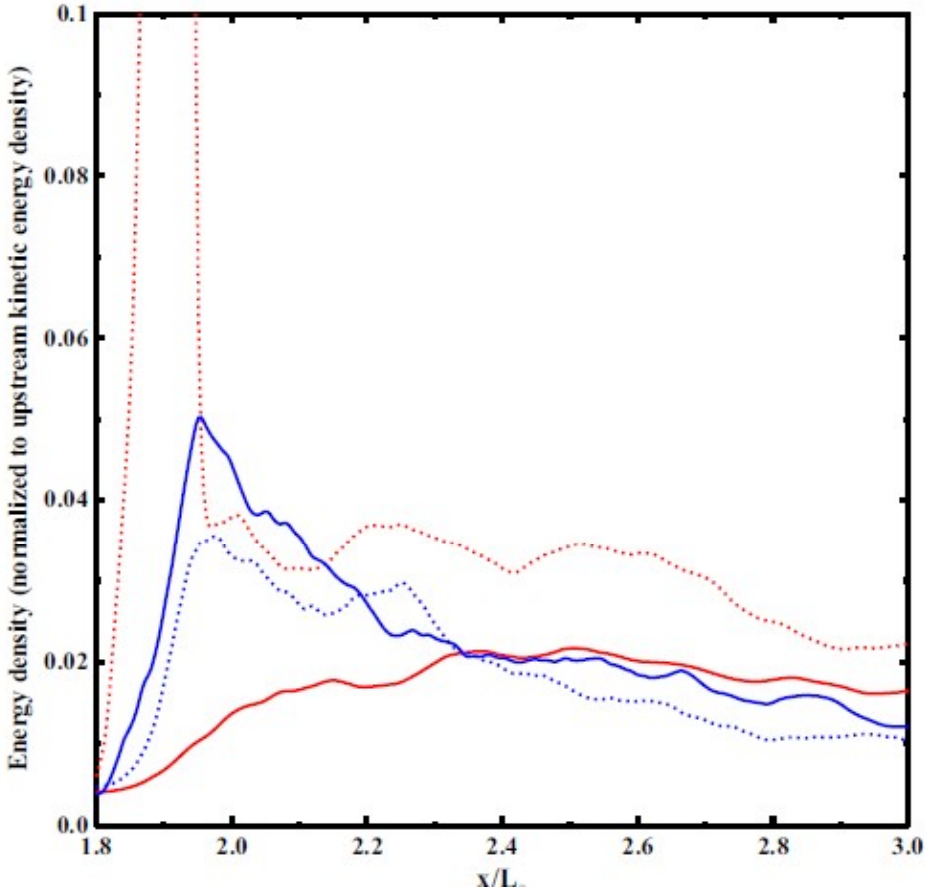

Рис. 9. Точечные кривые компоненты плотности турбулентной кинетической энергии плазмы. Сплошные кривые компоненты плотности турбулентной магнитной энергии плазмы. Красные кривые продольные компоненты. Синие кривые поперечные компоненты. Усреднение произведено по поперечным координатам (y, z).

Расчеты поляризации и профиля рентгеновского излучения остатка Тихо

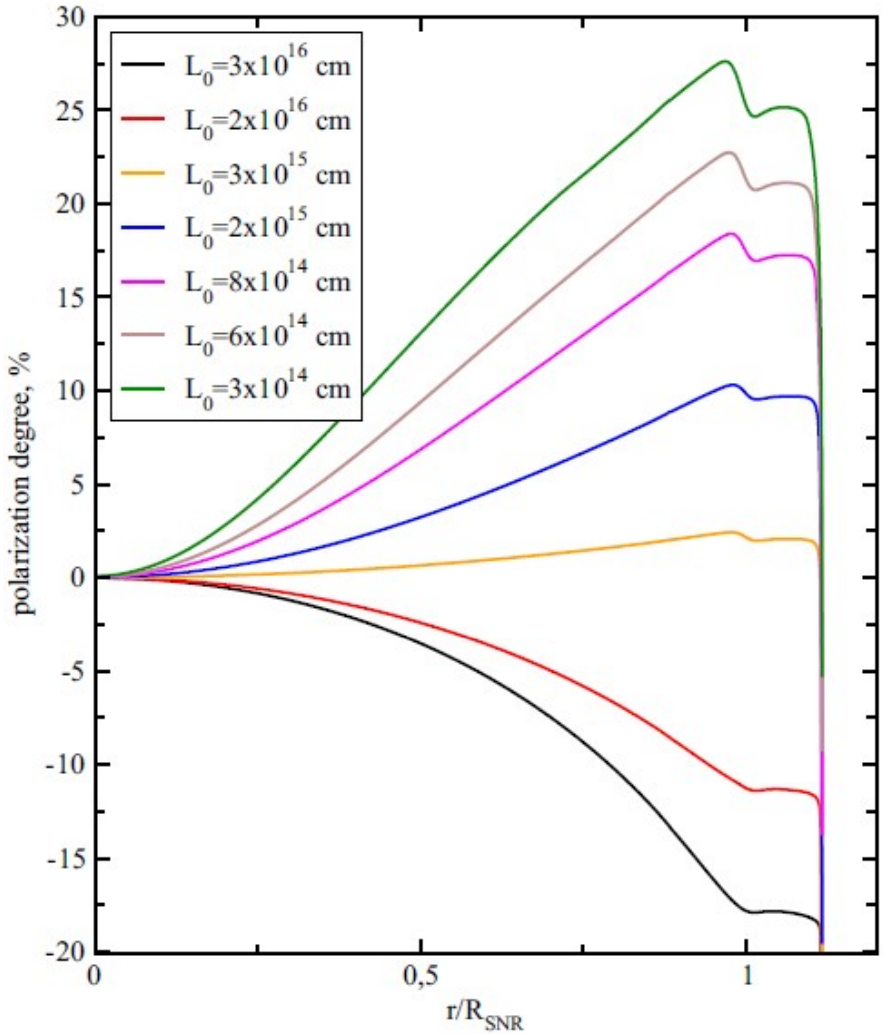

Рис. 10. Процент поляризации рентгеновского излучения в зависимости от положения вблизи фронта ударной волны. Поляризация получена путем свертки PSF IXPE для фотонов с энергией 3 кэВ. Предполагалось, что доля поляризованных синхротронных фотонов составляет 0,6. Положительные и отрицательные значения указывают на радиальное и поперечное направления поляризации соответственно.

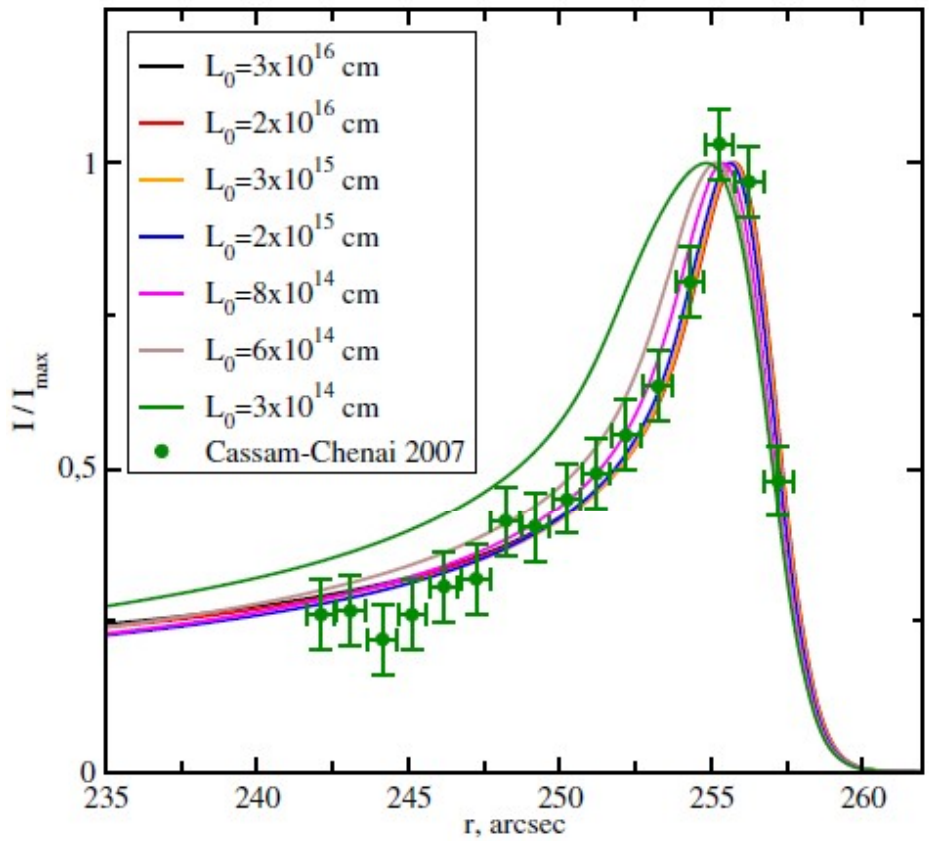

Рис. 11. Смоделированные профили интенсивности Chandra после свертки с помощью PSF Chandra для фотонов с энергией 4 кэВ.

$F(E) = AE^{-\alpha}$ - спектр электронов

$\alpha = 3$ в расчетах

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!

(доклад поддержан грантом РНФ № 25-72-20007)

Рентгеновские поляризационные наблюдения остатка RX1713 (обсерватория IXPE). R. Ferrazzoli et al, 2024.

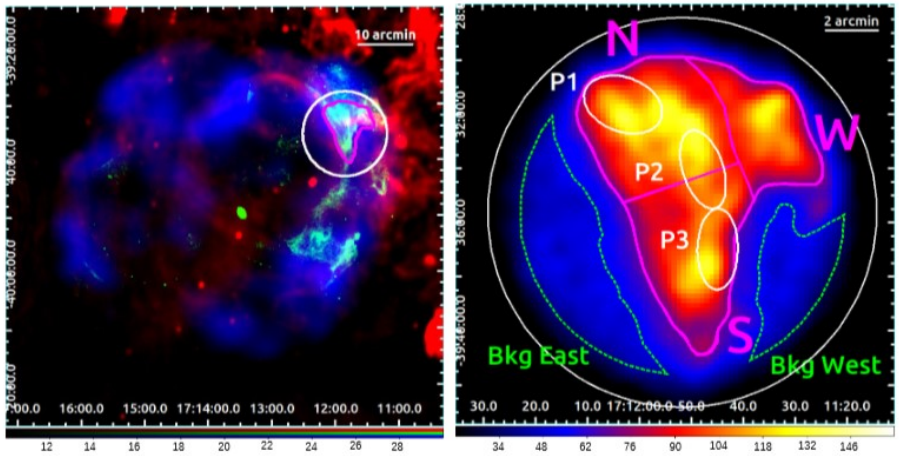

Figure 1. Left: Three-color image of RX J1713: in red the ATCA 20cm image, in green 0.5−7 keV Chandra exposure-corrected mosaic, in blue HESS > 2 TeV excess count map. The magenta contour is the 2−5 keV IXPE emission and the white circle is the IXPE field of view. **Right:** IXPE count map in the 2−5 keV band smoothed with a 30 arcseconds Gaussian kernel. In purple are marked the large-scale sub-regions of the shell selected for analysis: North (N), South (S), and West (W). The white ellipses are small-scale sub-regions also selected for analysis: P1, P2, and P3. The colorbar represents the intensity per pixel. The background extraction regions are marked by dashed green lines.

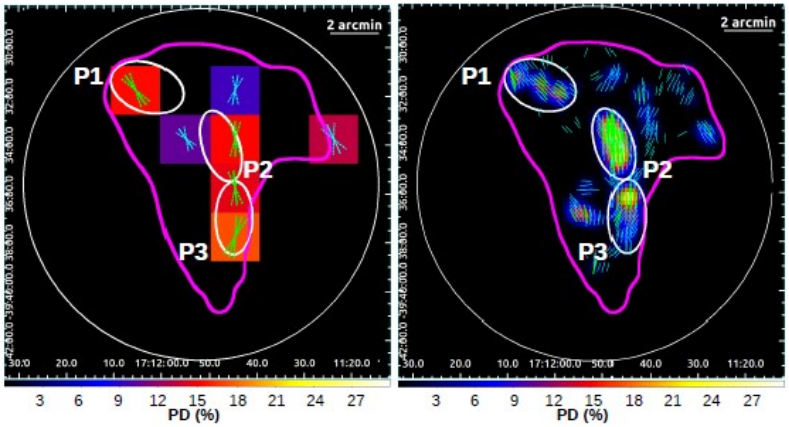

Figure 2. Left: polarization map binned with 2 arcmin-wide pixels. The cyan and green vectors represent the direction of the magnetic field revealed at 2 and 3 σ significance levels, respectively. The length of the vectors is proportional to the PD. The dashed vectors show the 2 σ uncertainty on the magnetic field direction in each pixel to improve the visibility. **Right:** smoothed polarization map with a 1 arcmin Gaussian kernel. As in the previous panel, the cyan and green vectors represent the direction of the magnetic field revealed at 2 and 3 σ significance levels, respectively. In both panels, we show the IXPE field of view as a white circle, the P1, P2, and P3 regions as white ellipses, while the 2−5 keV IXPE contours are in magenta and the colorbar is the PD in percent.

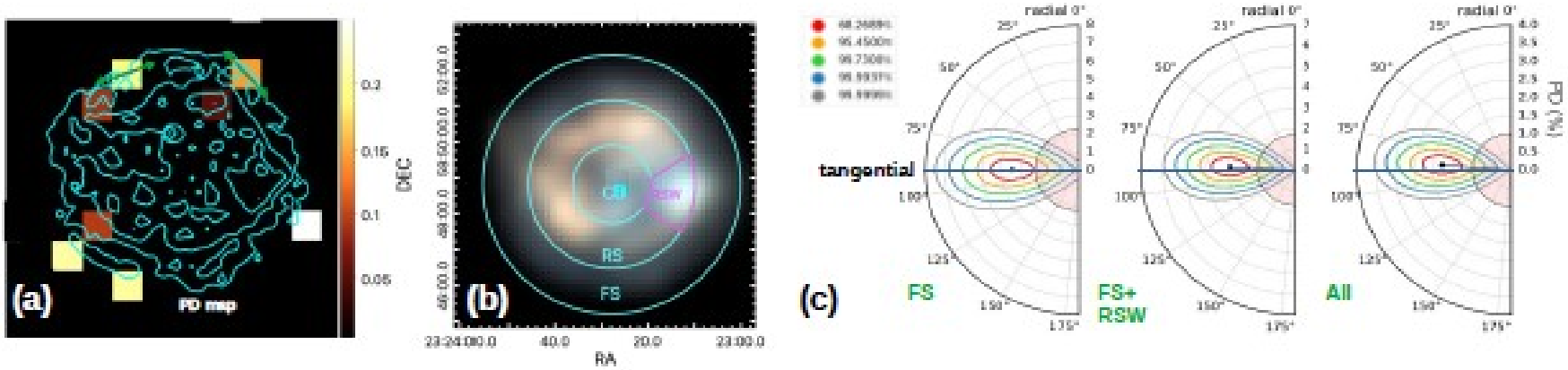

Figure 2: (a): Polarization map in the 3 - 6 keV energy band binned on a 42" pixel size of the SNR Cas A. Only pixels with confidence levels above 2σ are shown. For pixels with 3σ confidence level) the polarization angles are indicated with green arrows. (b): IXPE three color Stokes I image with superimposed the regions of interest used to test for an overall radial or tangential magnetic field orientation. The colder colors indicates a stronger non-thermal emission with respect to the warmer ones. (c): Polar diagrams of the measured PD and PA with respect to circular symmetry as confidence contours for the regions of panel **b**. The shaded pink region corresponds to the MDP99 level. Values around 90 degrees correspond to a tangentially oriented PA averaged over the region, while around 0∘ indicates on average a radially oriented PA. Images adapted from [12].