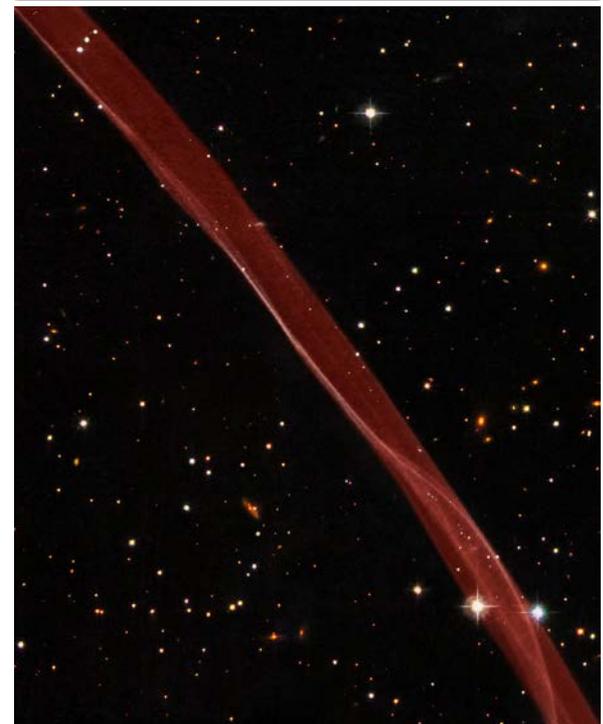
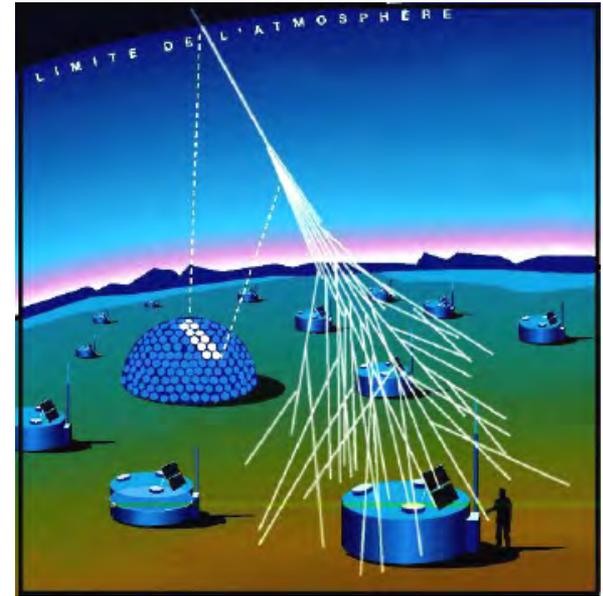
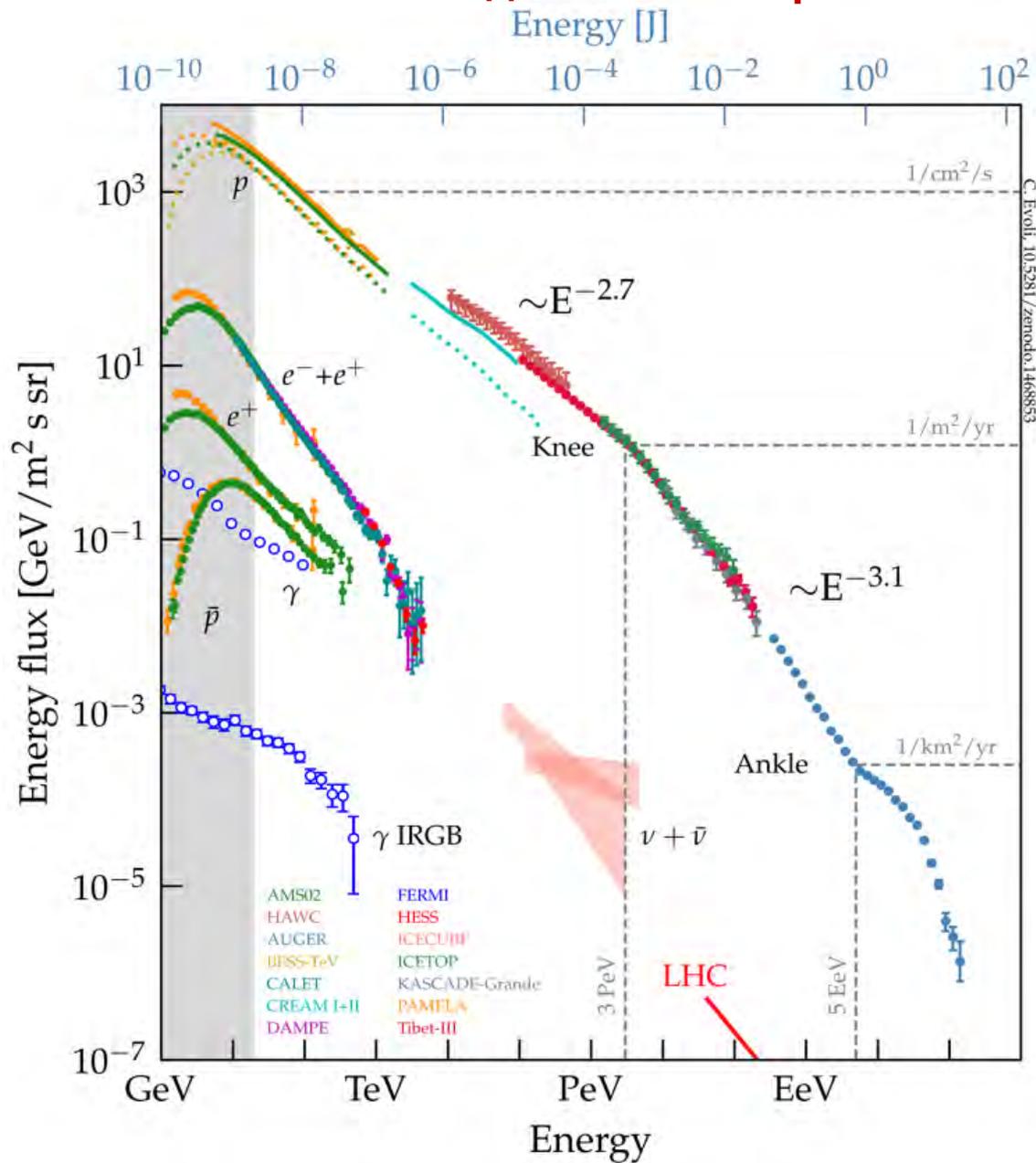


Нелинейные процессы в космических ускорителях частиц

**А.М.Быков
ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН**

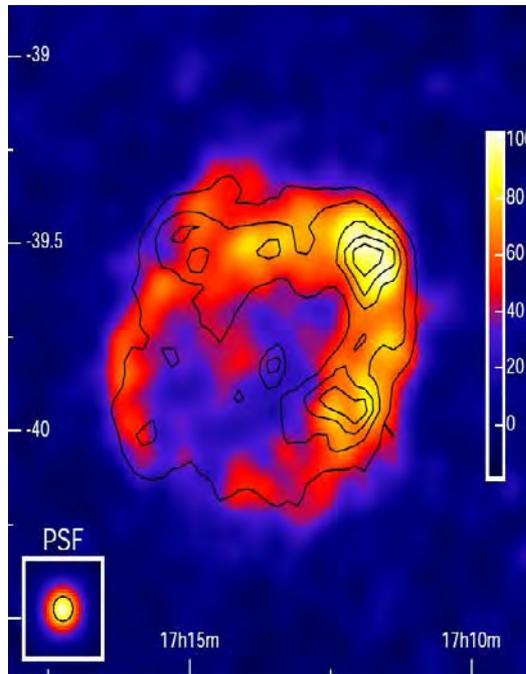
Нижний Новгород, 2020

Наблюдаемый спектр космических лучей



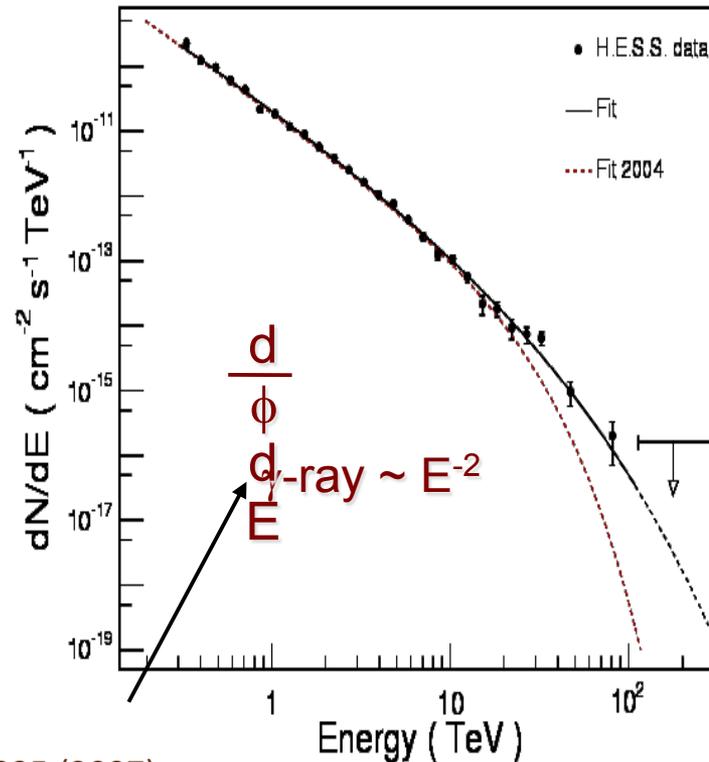
Какова природа космических ускорителей?

TeV наблюдения RXJ1713.7-3946 H.E.S.S.



RXJ1713.7-3946 (HESS)

F.Aharonian+, *Astron.Astrophys.***464**, 235 (2007)



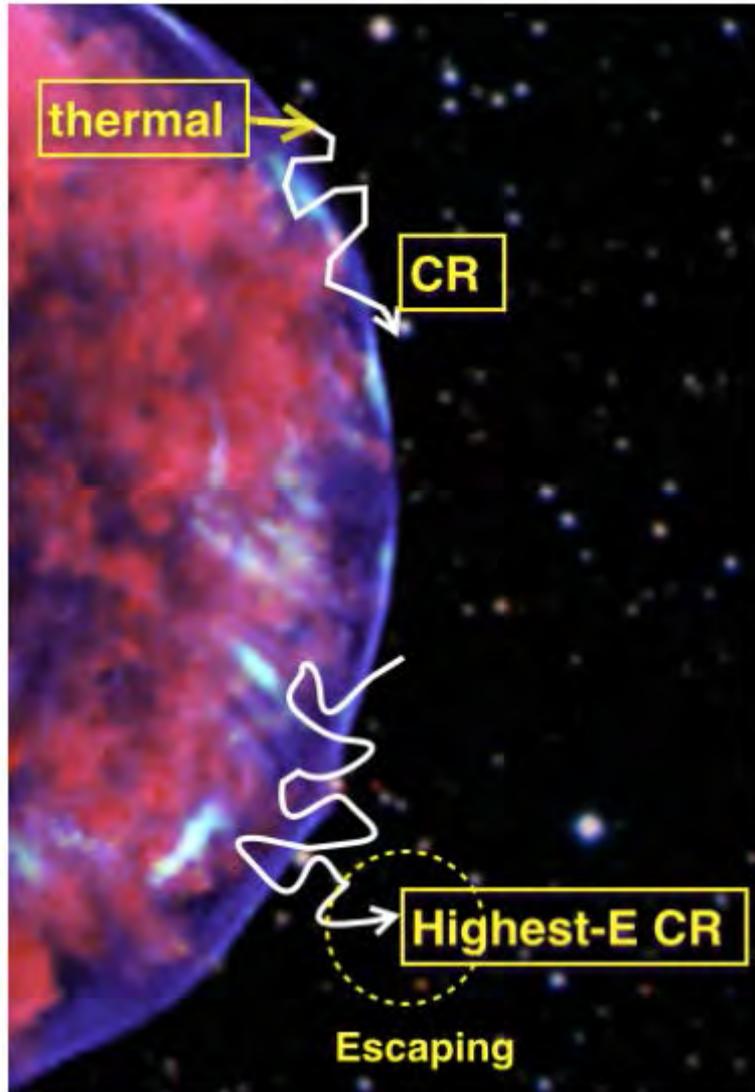
Как это выглядит? СН в далеких галактиках

Сверхновая Ia 1994D в галактике
NGC 4526 Hubble Space Telescope

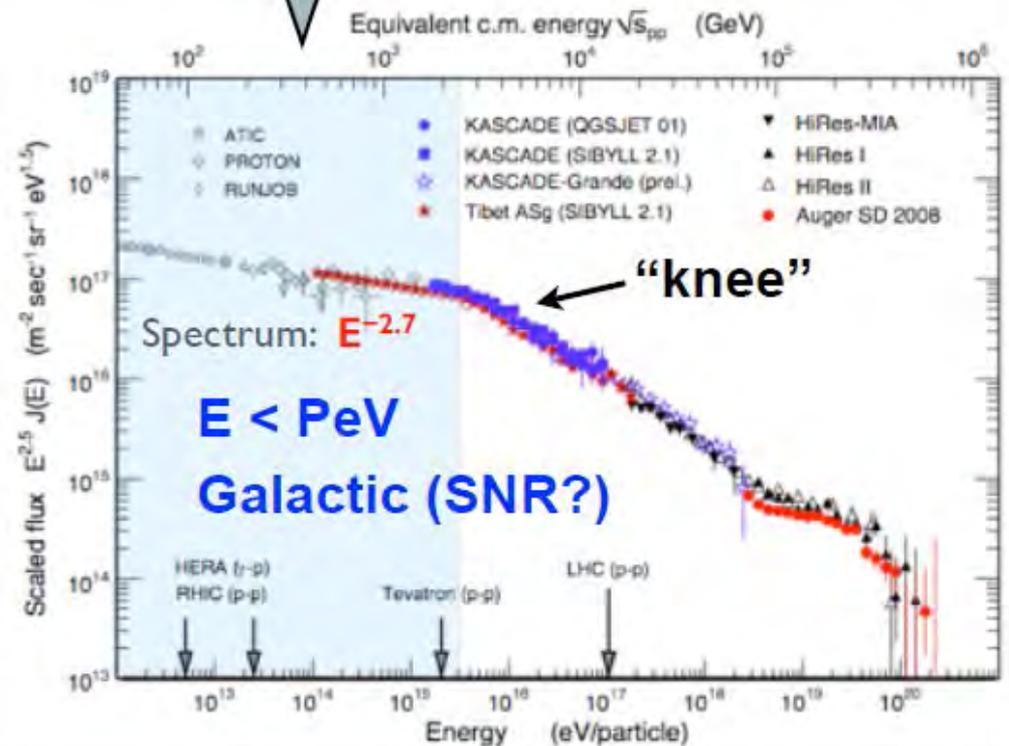
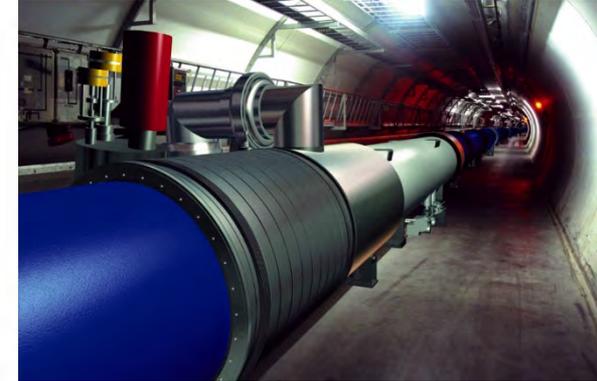


<http://www.eso.org/public/images/ann11014a/>

Остатки СН как ускорители КЛ



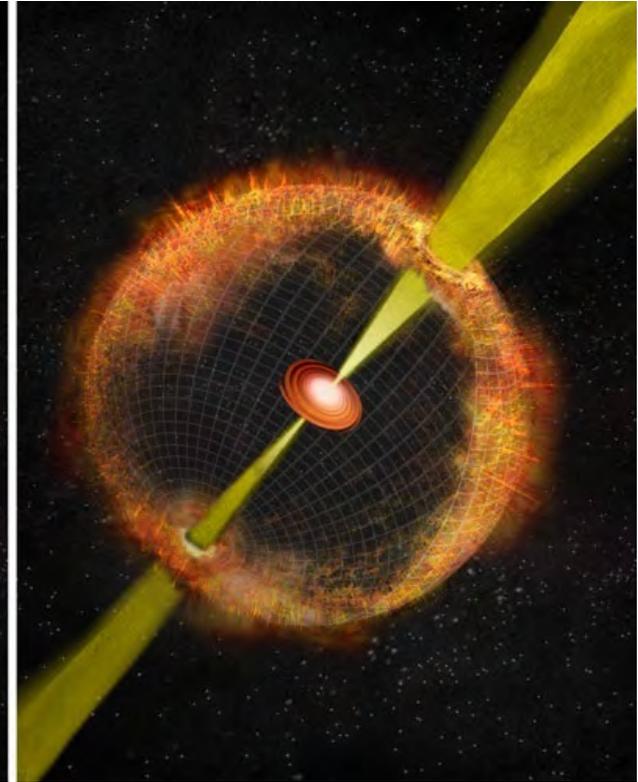
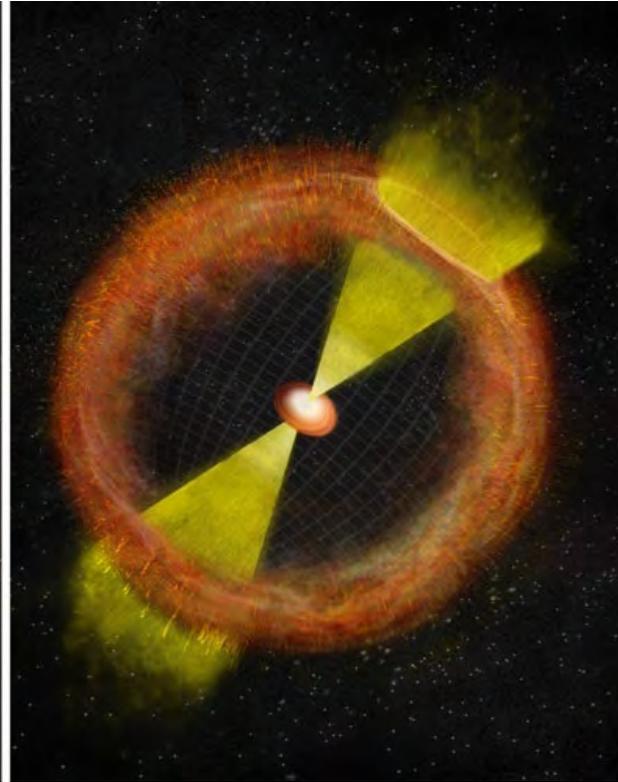
Supernova remnants
(SNRs)



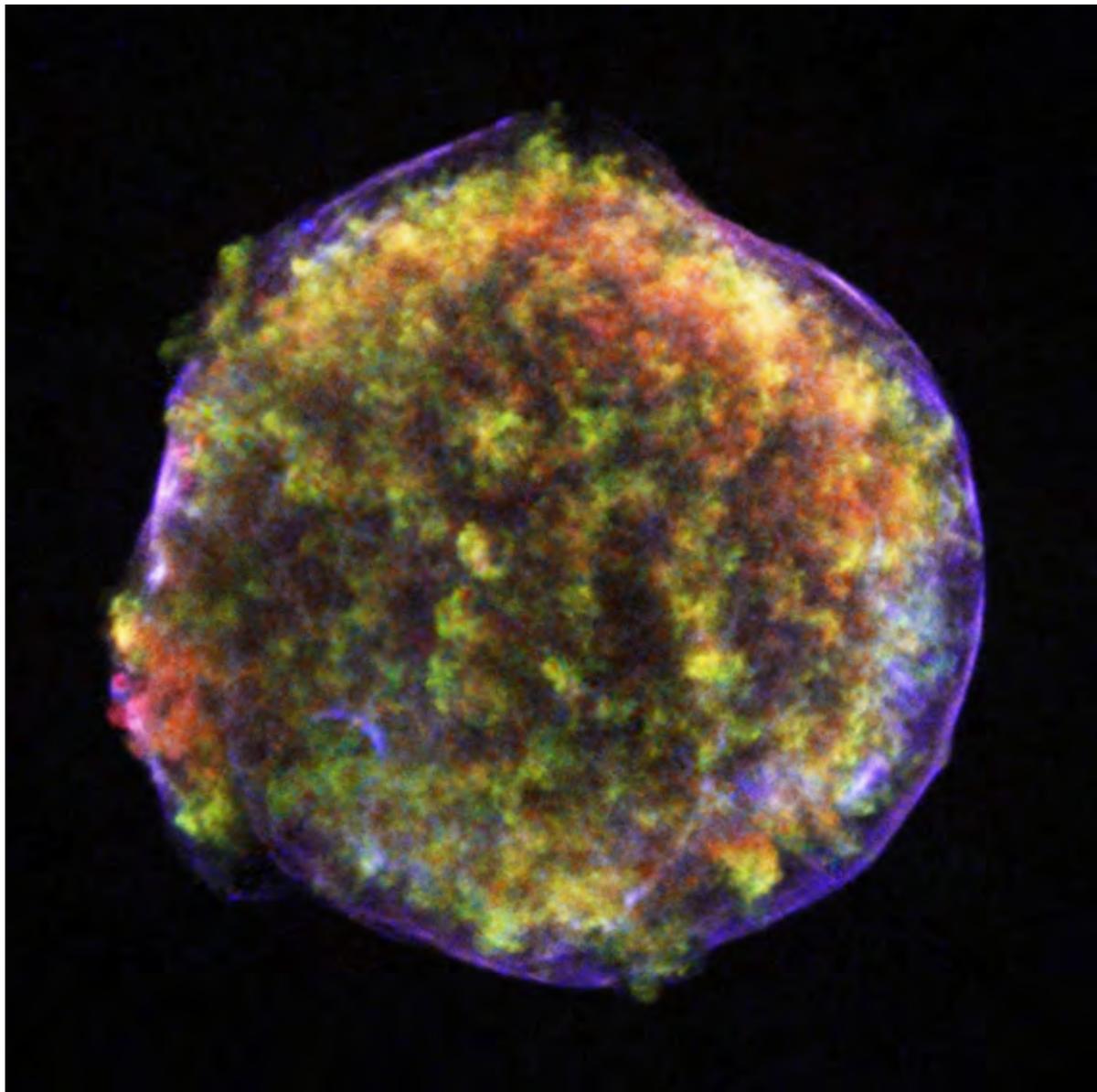
Сверхновые

Релятивистские сверхновые Ib/c

Гамма-всплески (длинные)

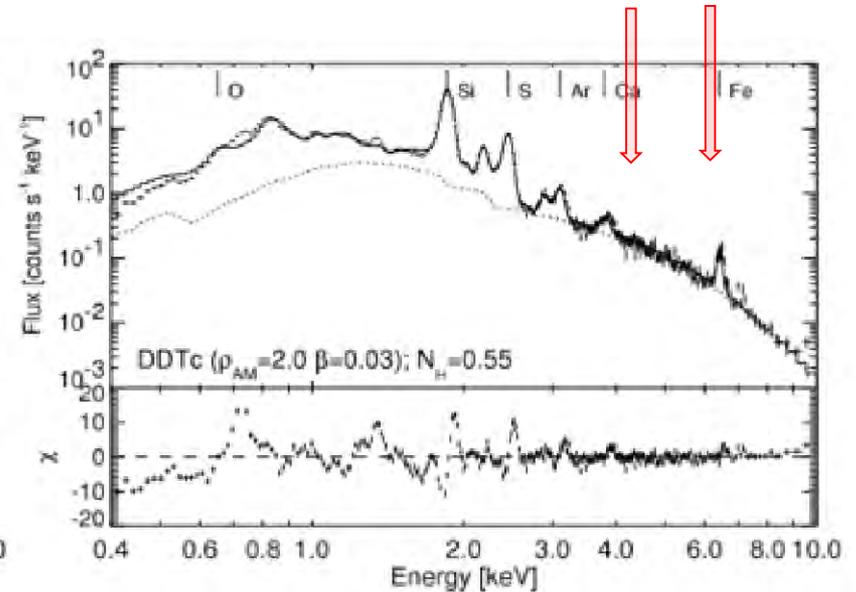
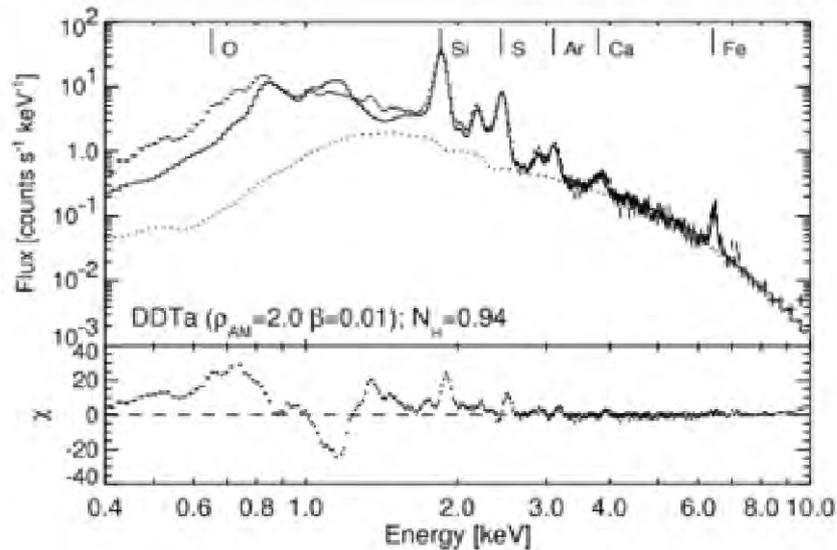


- Сверхновая звезда инициируется коллапсом железного ядра звезды с массой > 8 солнечных масс. Может сопровождаться длинным гамма-всплеском.
- Слияние двух компактных объектов НЗ-НЗ, НЗ-ЧД вероятно порождают короткий гамма-всплеск.



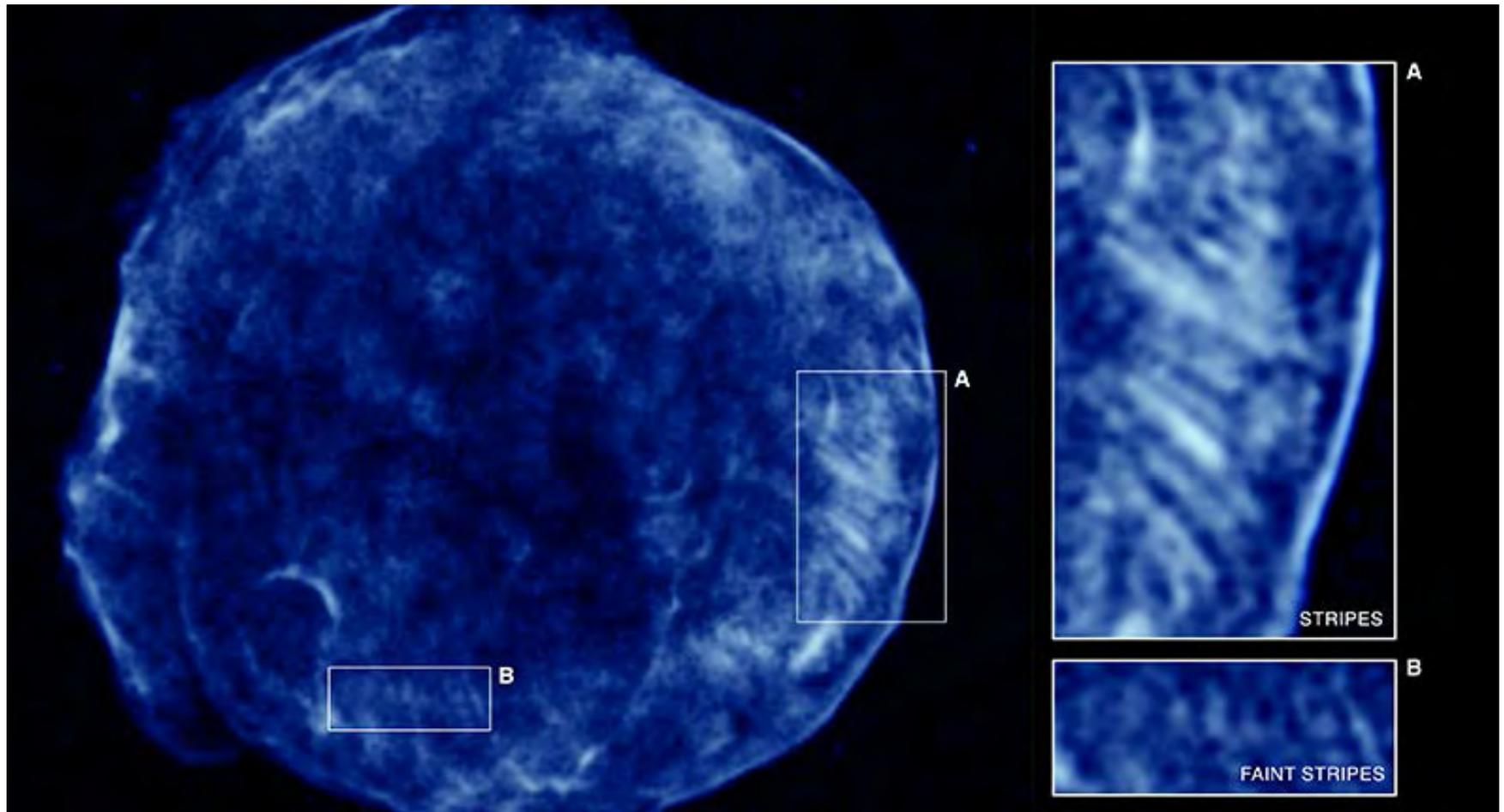
Оболочка остатка Tycho1572 AD (рентгеновские изображения Chandra, NASA/CXC.)

XMM-Newton spectrum of Tycho's SNR

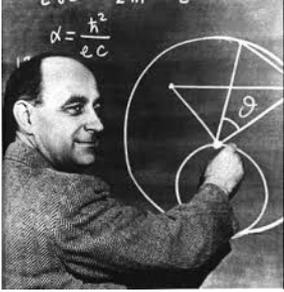


Tycho XMM (Badenes+ '06)

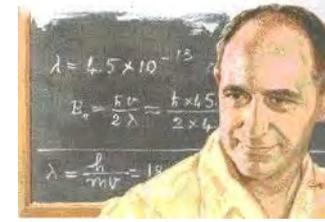
Chandra 4-6 keV Image of Tycho's SNR



Eriksen + 2011



Origin of Cosmic Radiation



PHYSICAL REVIEW

VOLUME 75, NUMBER 8

APRIL 15, 1949

On the Origin of the Cosmic Radiation

ENRICO FERMI

Institute for Nuclear Studies, University of Chicago, Chicago, Illinois

(Received January 3, 1949)

A theory of the origin of cosmic radiation is proposed according to which cosmic rays are originated and accelerated primarily in the interstellar space of the galaxy by collisions against moving magnetic fields. One of the features of the theory is that it yields naturally an inverse power law for the spectral distribution of the cosmic rays. The chief difficulty is that it fails to explain in a straightforward way the heavy nuclei observed in the primary radiation.

I. INTRODUCTION

IN recent discussions on the origin of the cosmic radiation E. Teller¹ has advocated the view that cosmic rays are of solar origin and are kept relatively near the sun by the action of magnetic fields. These views are amplified by Alfvén, Richtmyer, and Teller.² The argument against the conventional view that cosmic radiation may extend at least to all the galactic space is the very large amount of energy that should be present in form of cosmic radiation if it were to extend to such a huge space. Indeed, if this were the case, the mechanism of acceleration of the cosmic radiation should be extremely efficient.

where H is the intensity of the magnetic field and ρ is the density of the interstellar matter.

One finds according to the present theory that a particle that is projected into the interstellar medium with energy above a certain injection threshold gains energy by collisions against the moving irregularities of the interstellar magnetic field. The rate of gain is very slow but appears capable of building up the energy to the maximum values observed. Indeed one finds quite naturally an inverse power law for the energy spectrum of the protons. The experimentally observed exponent of this law appears to be well within the range of the possibilities.

Диффузионный механизм ускорения Ферми

МГД возмущения переносятся течением \mathbf{V} и образуют “сходящиеся зеркала”

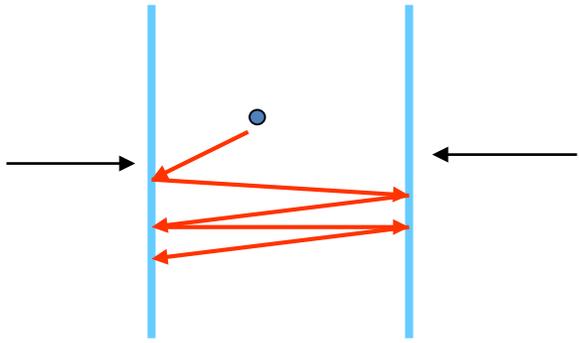
- частицы рассеиваются волнами
- многократно пересекают фронт УВ

“Fermi first order process”

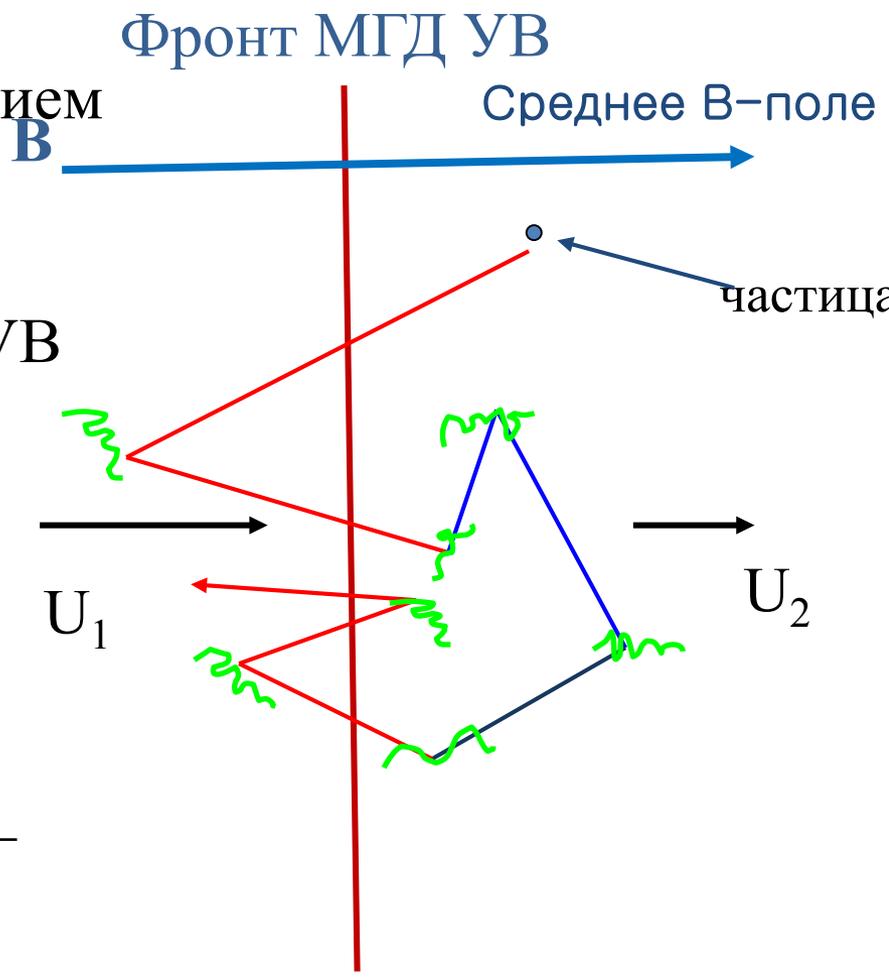
Изменение энергии частицы

$$\frac{\Delta p}{p} \sim \pm 2 \frac{U_s}{v}$$

$$v \approx c$$

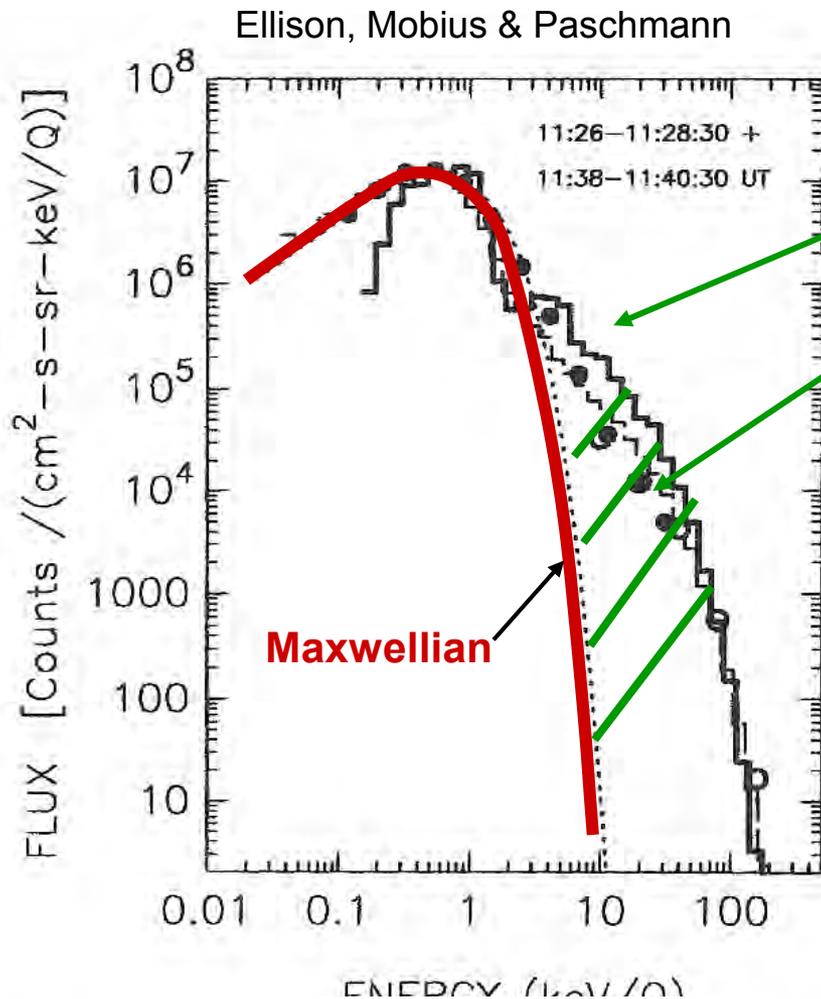


Сходящиеся зеркала



Система покоя УВ

Наблюдения прибором AMPTE / IRM диффузных ионов в квази-параллельной части головной УВ земной магнитосферы



Наблюдаемая
эффективность ускорения
частиц высокая:

~2.5% протонов попадают
в нетепловой хвост

>25% потока энергии
через фронт УВ идет в
нетепловые протоны

Не исключено, что в сверхновых,
где УВ сильные эффективность
может достигать 50%

assumed.

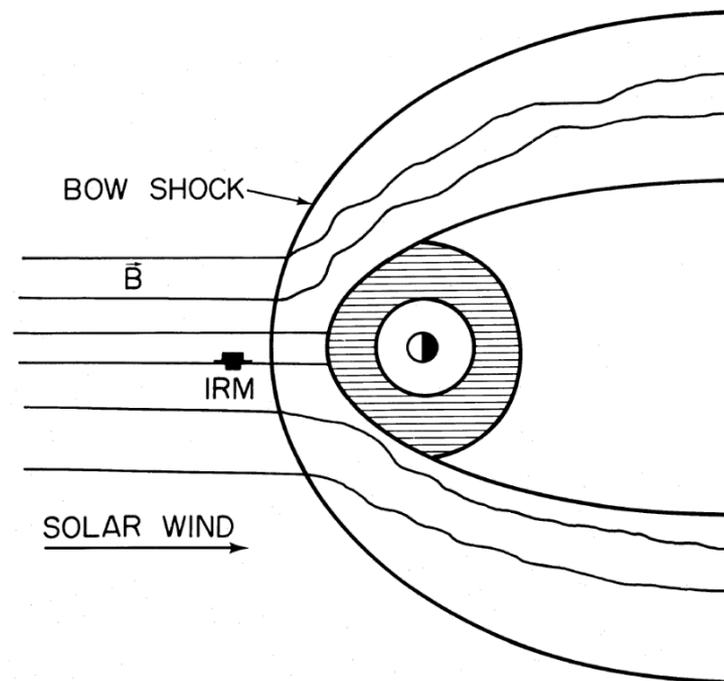
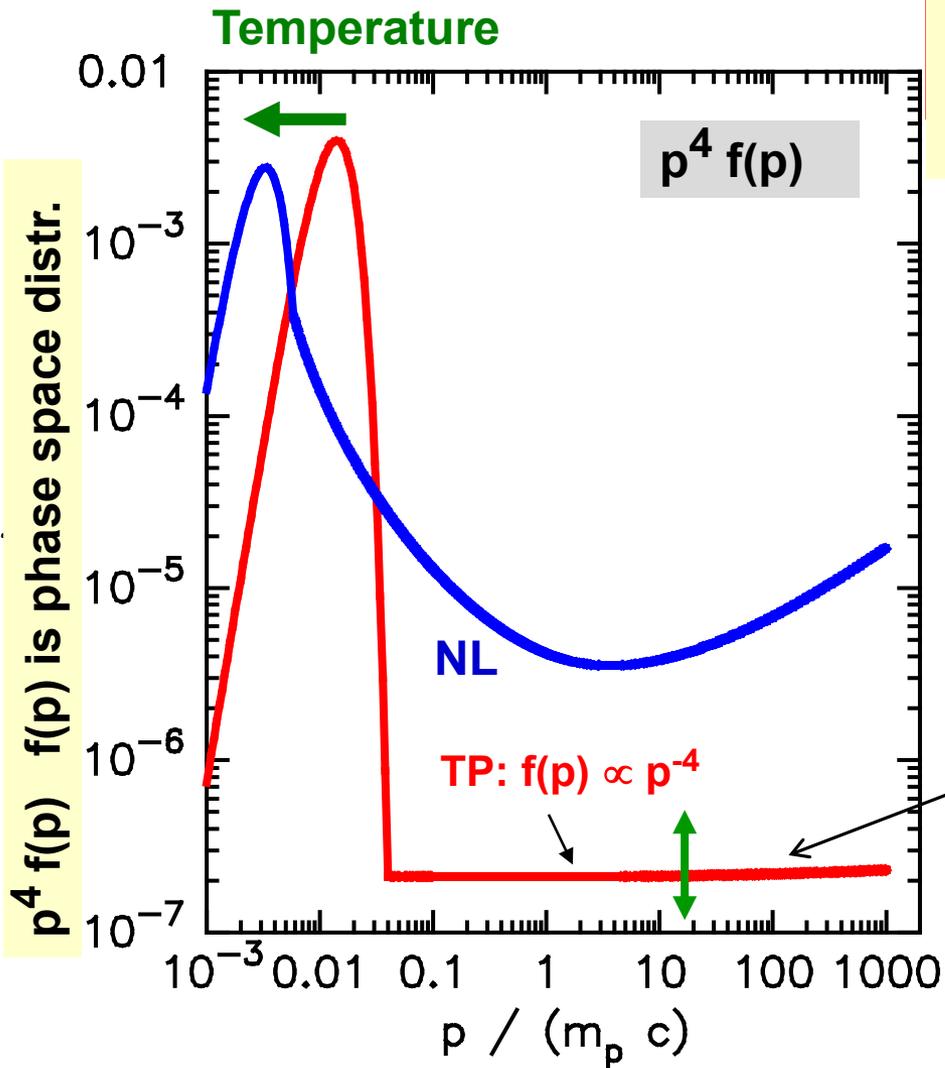
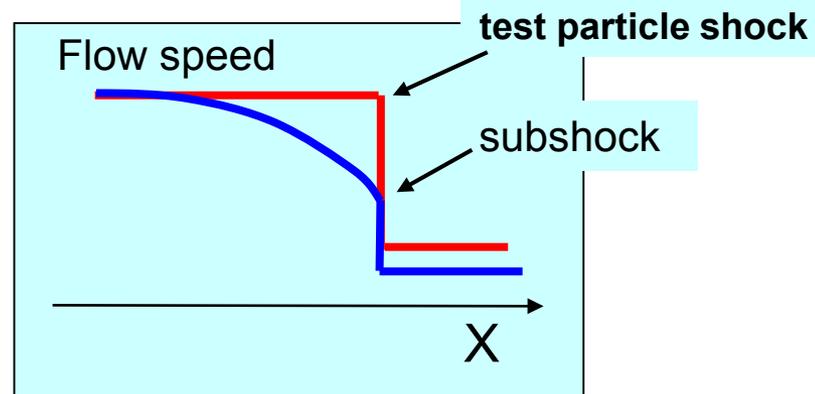


Fig. 1.—Schematic representation of the bow shock during the diffuse ion event of 1984 September 5

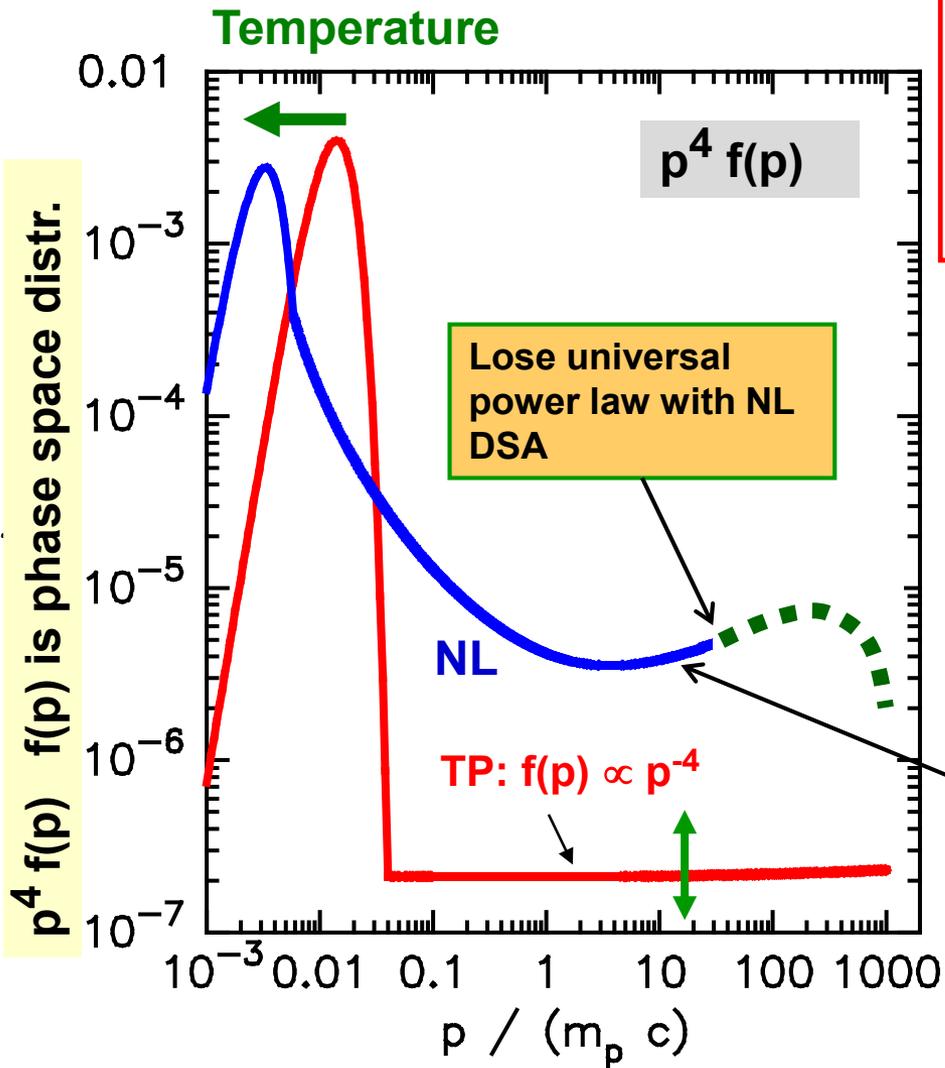


Модель пробных частиц → разрыв (ступенька) скорости без нелинейной модификации течения и разрыва



“Универсальный” спектр $\propto E^{-2}$

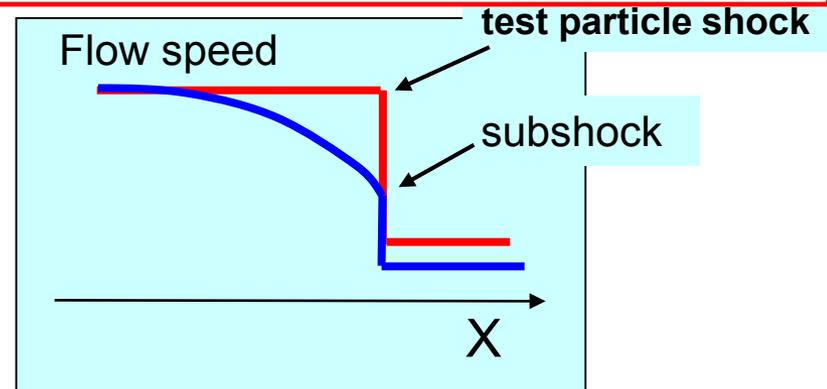
Универсальный спектр пробных частиц, ускоренных УВ получен в 1977-78 в пионерских статьях Г.Ф.Крымского, A.Bell, W.I.Axford et al, Blandford Ostriker



Эффективное ускорение КЛ приводит к модификации течения перед фронтом.

Профиль более плавный, а скачек меньше.

Спектр частиц меняется.



- ▶ Concave spectrum
- ▶ Compression ratio, $r_{\text{tot}} > 4$
- ▶ Low shocked temp. $r_{\text{sub}} < 4$

Расчет спектра КЛ требует одновременного учета частиц как над-тепловых, так и самых высоких энергий...

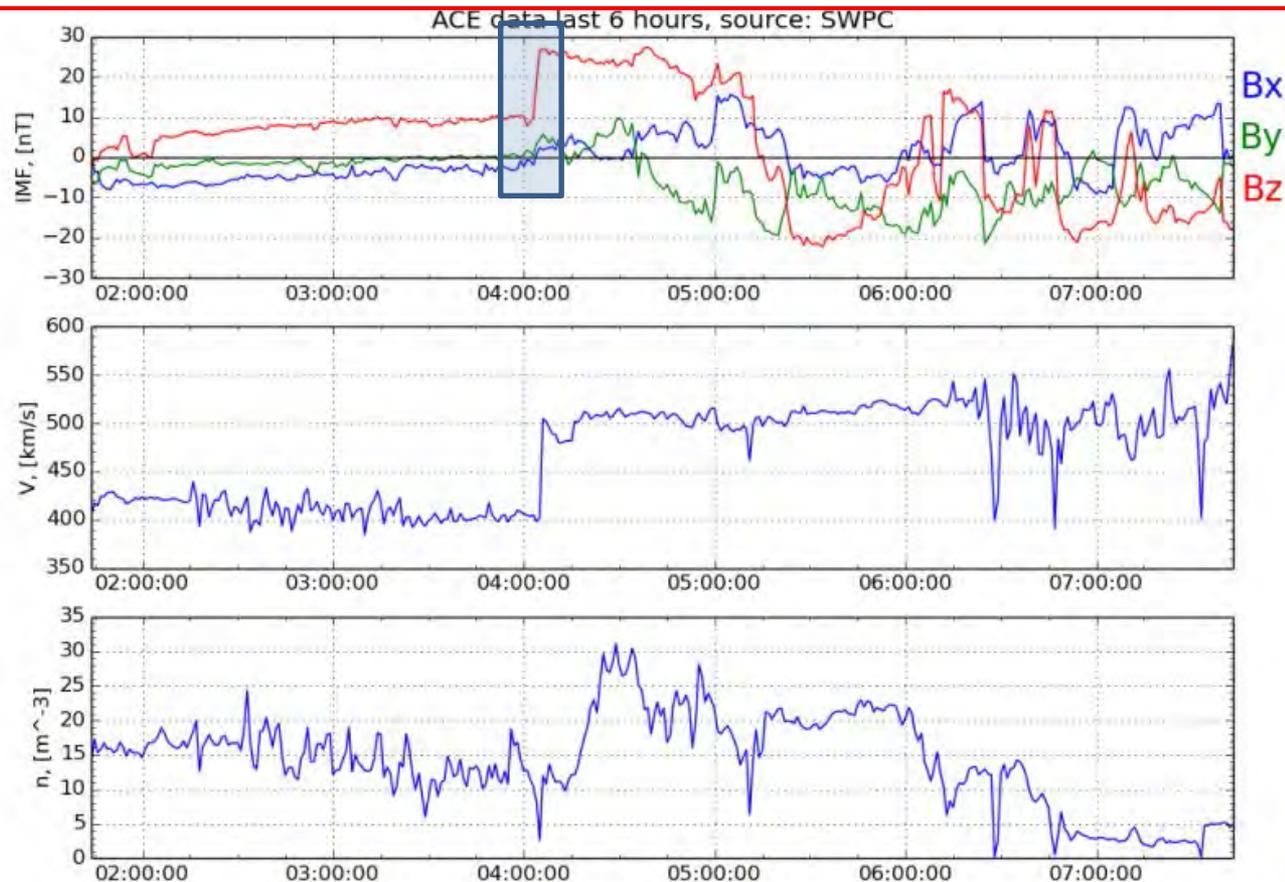
Что такое бесстолкновительные ударные волны?

(немного истории)

Thomas Gold (1955):

Быстрое нарастание возмущений в магнитных бурях, связанных с солнечными вспышками, свидетельствует о наличии:

- (i) межпланетной среды (теперь мы знаем кулоновский пробег ~ 1 АЕ) и**
- (ii) бесстолкновительных ударных волн**



Updated March 17 2015 - 07:47:38 UTC

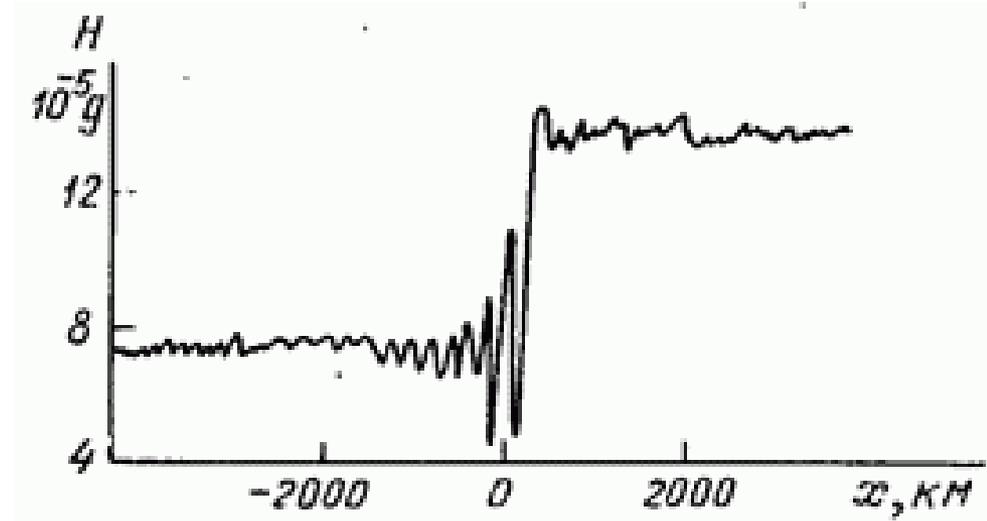
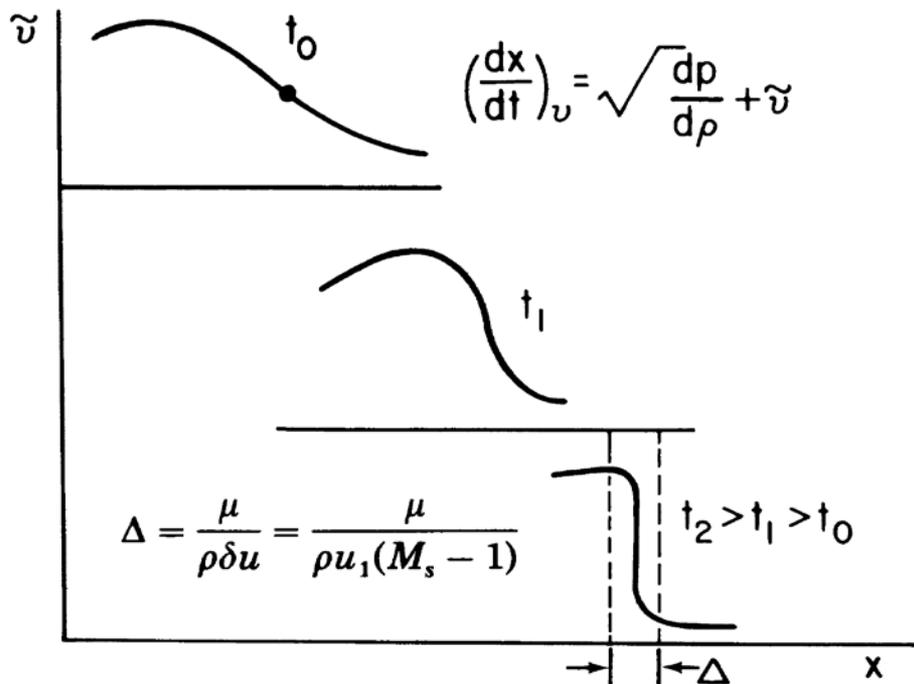
Thomas Gold (1955):

Быстрое нарастание возмущений в магнитных бурях, связанных с солнечными вспышками, свидетельствует о наличии:

- (i) межпланетной среды (теперь мы знаем кулоновский пробег ~ 1 АЕ) и
- (ii) бесстолкновительных ударных волн

Столкновительные ударные волны имеют ширину больше длины кулоновского пробега

Бесстолкновительные ударные волны



$$\delta \sim \frac{c}{\omega_p}$$

Fig. 2. Steepening and formation of a gas dynamic shock. Definition of shock thickness Δ .

Ударные волны поперек магнитного поля в слабостолкновительной плазме

Р. З. Сагдеев

О НЕЛИНЕЙНЫХ ДВИЖЕНИЯХ РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ * 1958

Найдено решение для установившихся магнитозвуковых волн большой амплитуды, распространяющихся поперек магнитного поля.

$$\frac{d}{dx} nv = 0;$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{Mnv^2}{2} + \frac{H^2}{8\pi} \right) = 0;$$

$$mnv \frac{dv_y}{dx} = -enE_y + \frac{e}{c} nvH - \bar{v} mnv_y;$$

$$\frac{dE_y}{dx} = 0;$$

$$\frac{dH}{dx} = \frac{4\pi ne}{e} v_y.$$

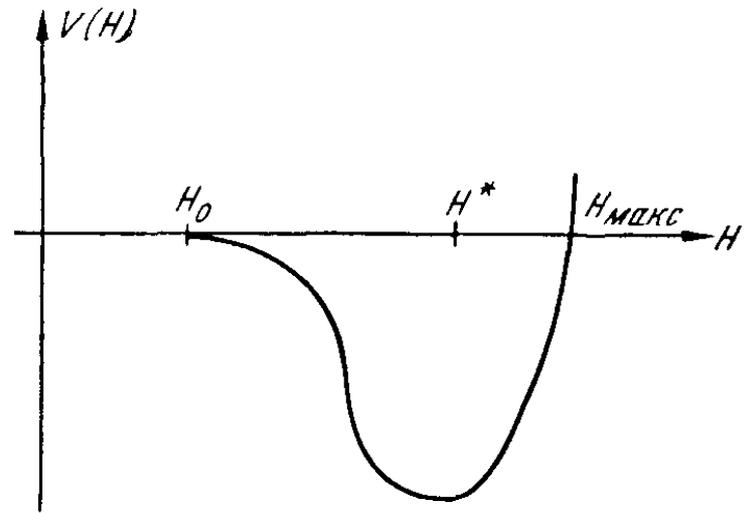
$$-a^2 \frac{d^2 H}{dx^2} = H_0 - H + H \frac{H^2 - H_0^2}{8\pi Mn_0 u^2} + \frac{a^2}{u} v \frac{dH}{dx}$$

$$a^2 = \frac{mc^2}{4\pi ne^2} = \frac{c^2}{\omega_0^2}$$

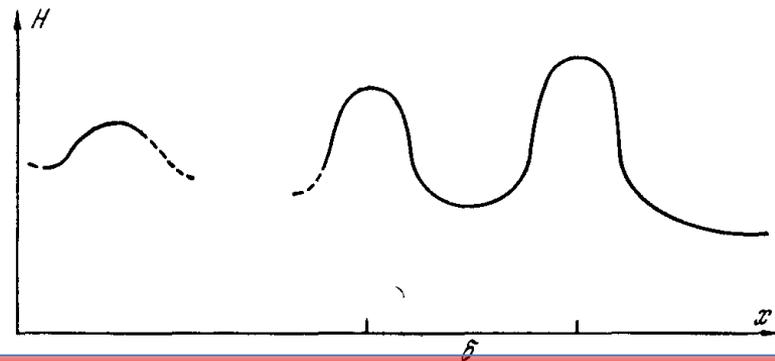
КОЛЛЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЕ

Р. З. Сагдеев

1964



$$H^* = -\frac{H_0}{2} + \sqrt{8\pi n_0 M u^2 + \frac{H_0^2}{4}}$$



$$\delta \approx \frac{a}{\sqrt{M-1}} \ln \frac{u}{va} \sqrt{M-1}$$

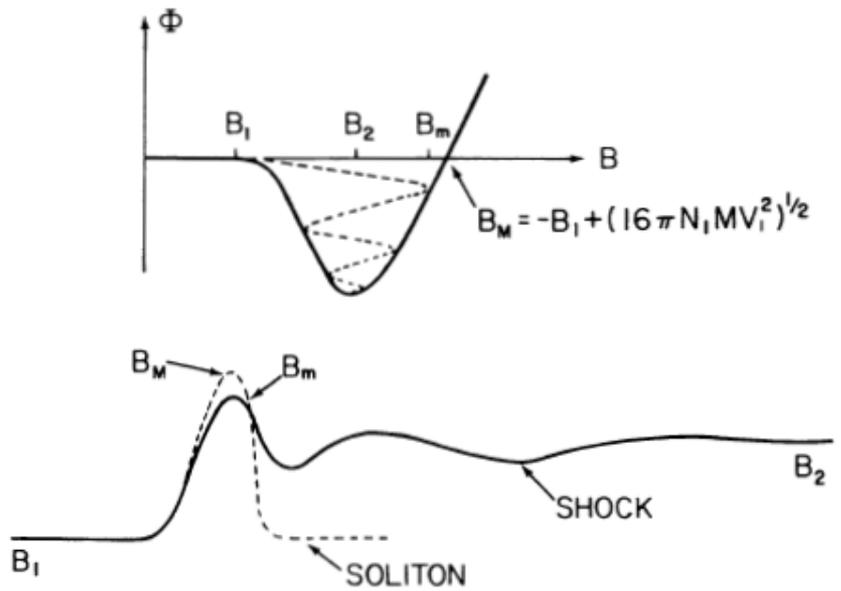
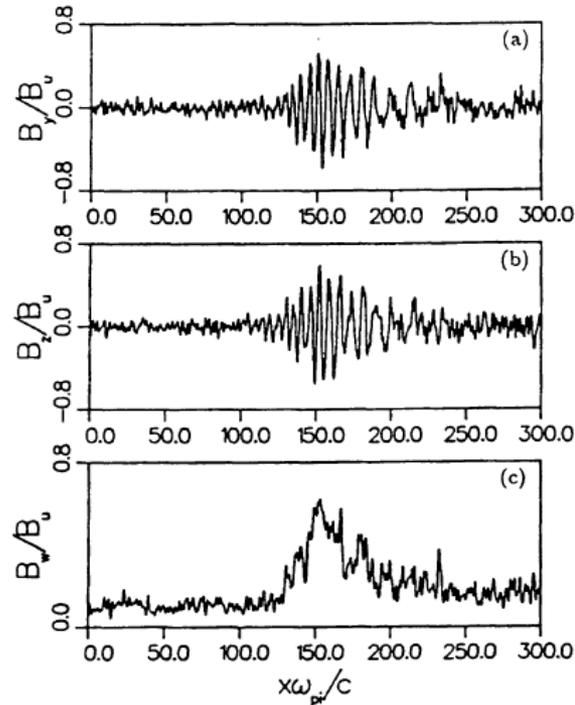
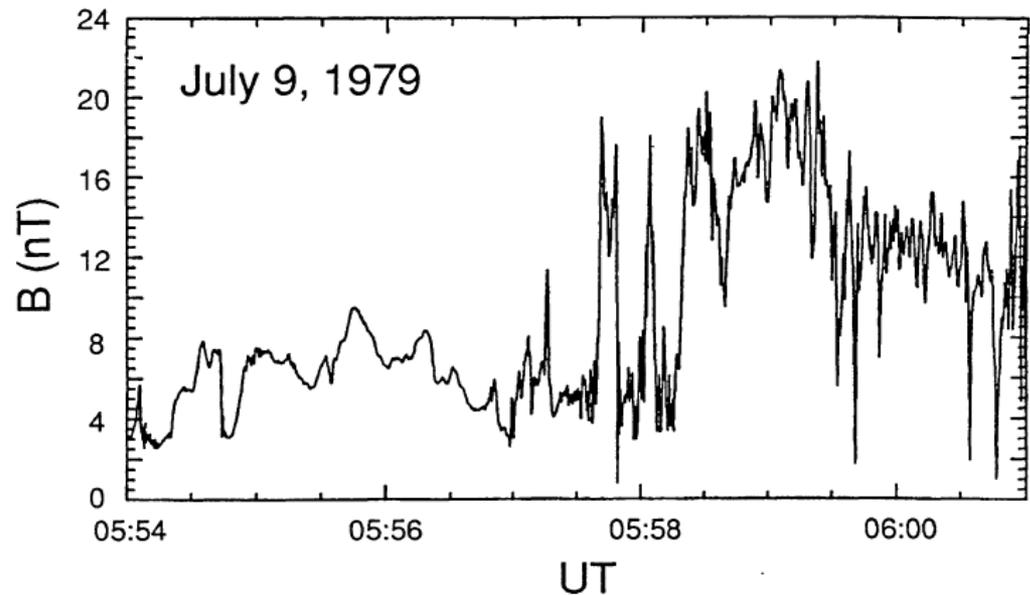


Fig. 8. Transition from magnetosonic soliton to shock for $v^* \neq 0$.



K. Quest 88

**70-80e годы – “золотой век”
наблюдений межпланетных
бесстолкновительных ударных
волн и ранних
компьютерных моделей**



1. ISEE observations of a magnetic field profile of a quasi-parallel shock crossing (courtesy of C. T. Russell, 1990).

Трёхмерный гибридный код Maximus

- ▶ Ионы - макрочастицы
- ▶ Электроны - безмассовая жидкость

$$\frac{d\vec{r}_k}{dt} = \vec{V}_k$$

$$\frac{d\vec{V}_k}{dt} = \frac{Z_k}{m_k} (\vec{E} + \vec{V}_k \times \vec{B})$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{\rho_c} (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} - \frac{1}{\rho_c} (\vec{j}_{\text{ions}} \times \vec{B}) - \frac{\nabla P_e}{\rho_c}$$

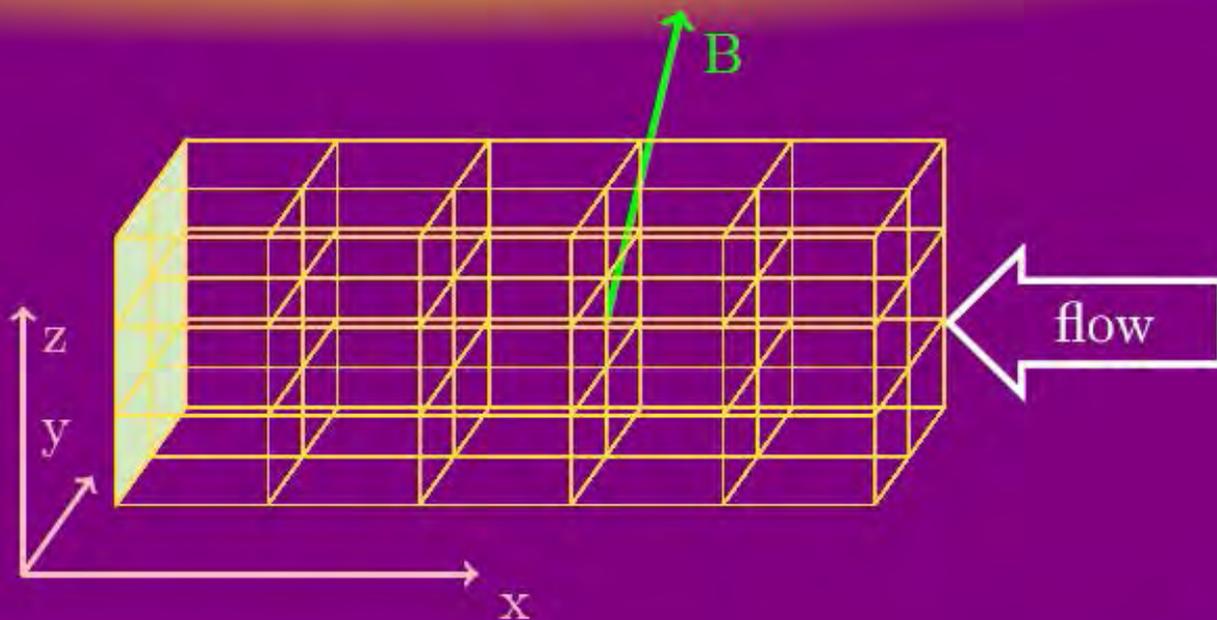
$$\vec{j}_{\text{ions}} = \sum_{\text{cell}} S(\vec{r}_k) Z_k V_k \rho_c = \sum_{\text{cell}} S(\vec{r}_k) Z_k$$

- ▶ $\text{div} \vec{B} = 0$
- ▶ Схема TVD
- ▶ Второй порядок точности
- ▶ Сохранение энергии в пределах 10%
- ▶ Сохранение импульса в пределах 1%

Кропотина, АБ, Густов и др.

Инициализация ударной волны

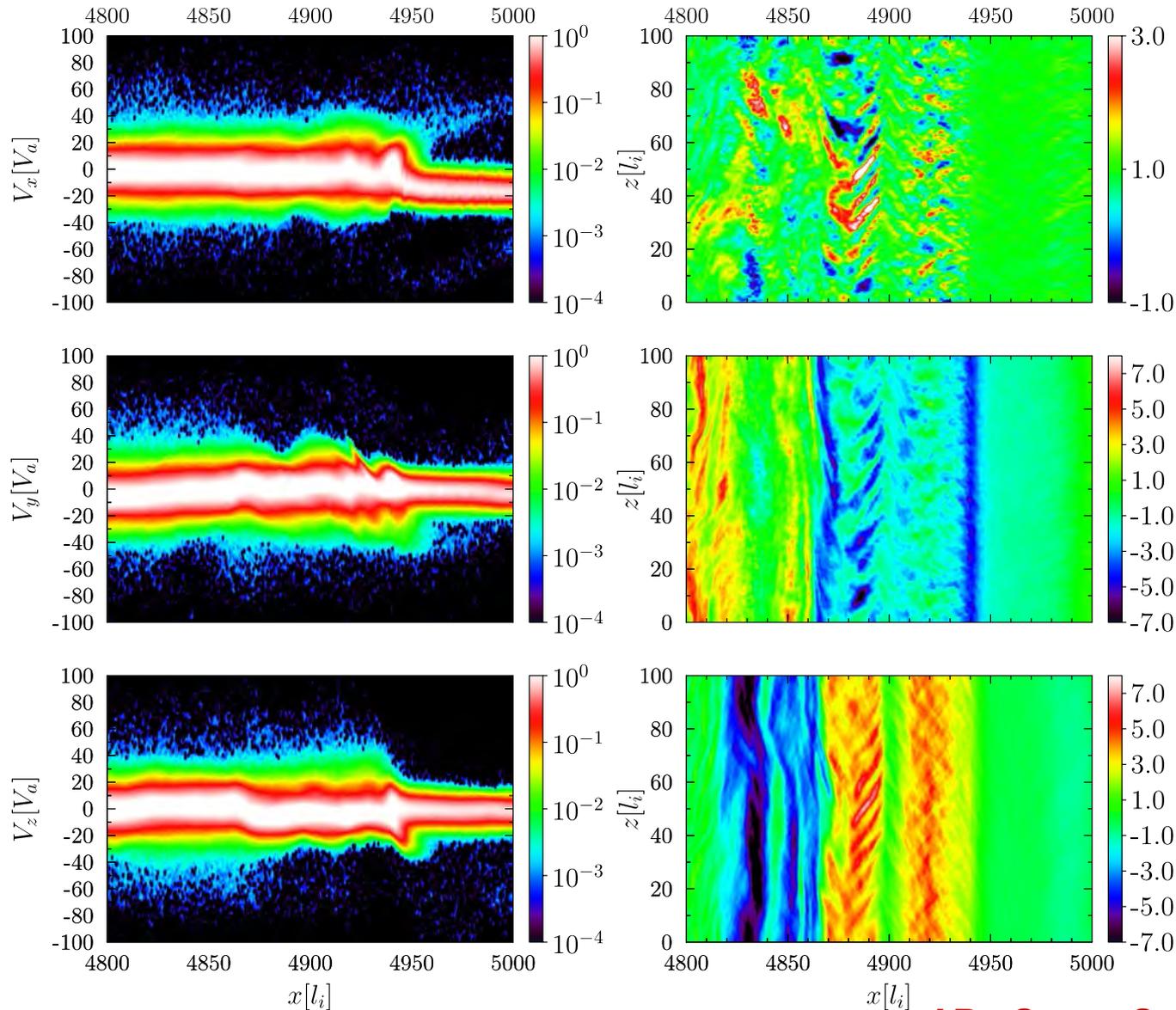
- ▶ Сдвинутая сетка
- ▶ B на гранях
- ▶ E на рёбрах

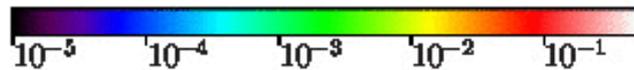
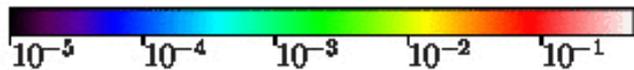
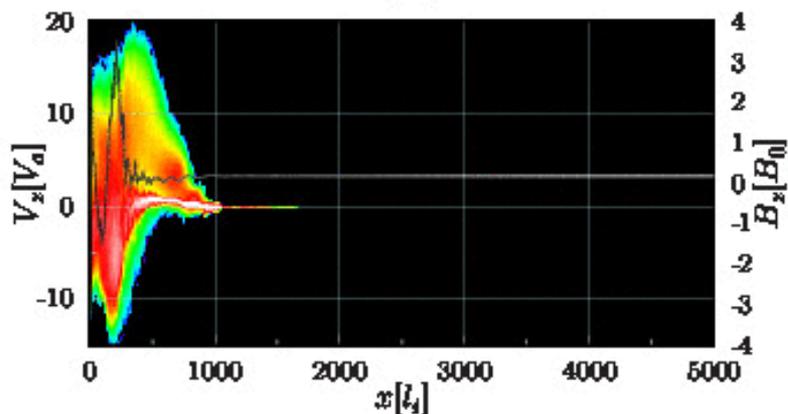
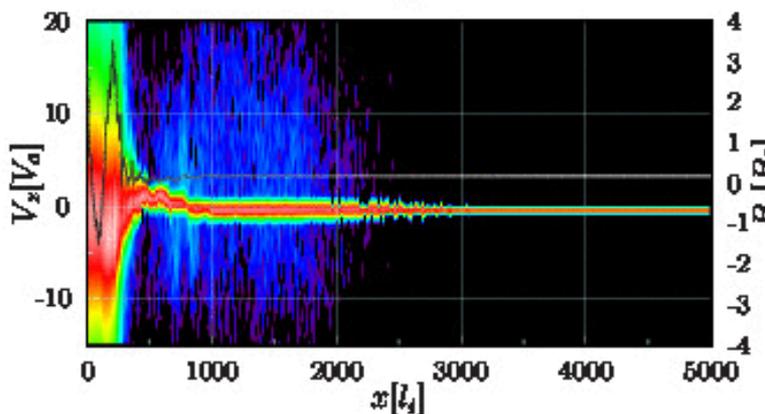
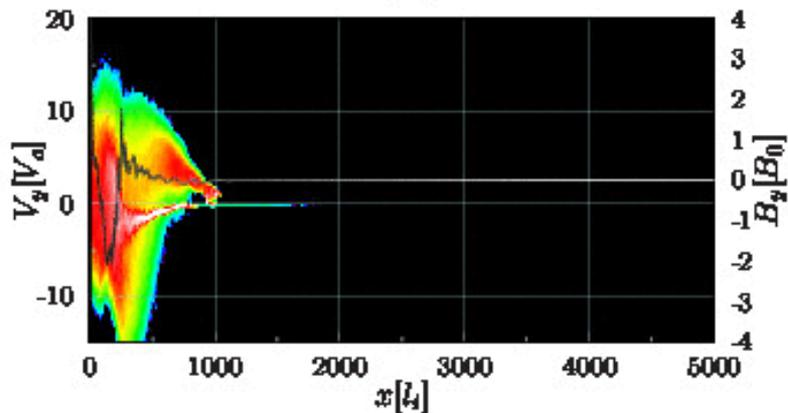
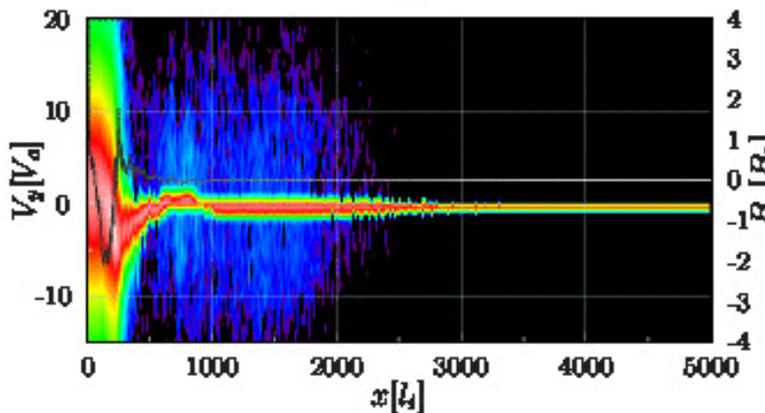
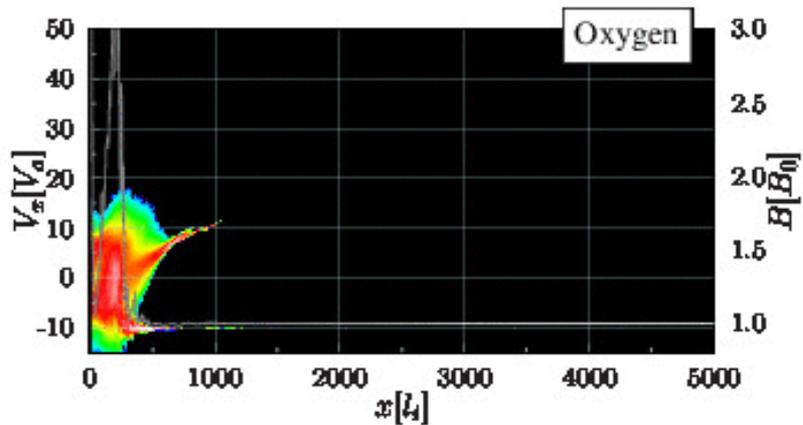
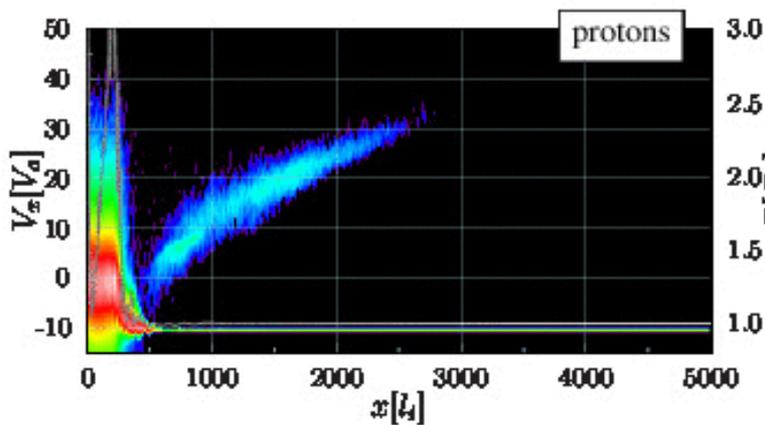


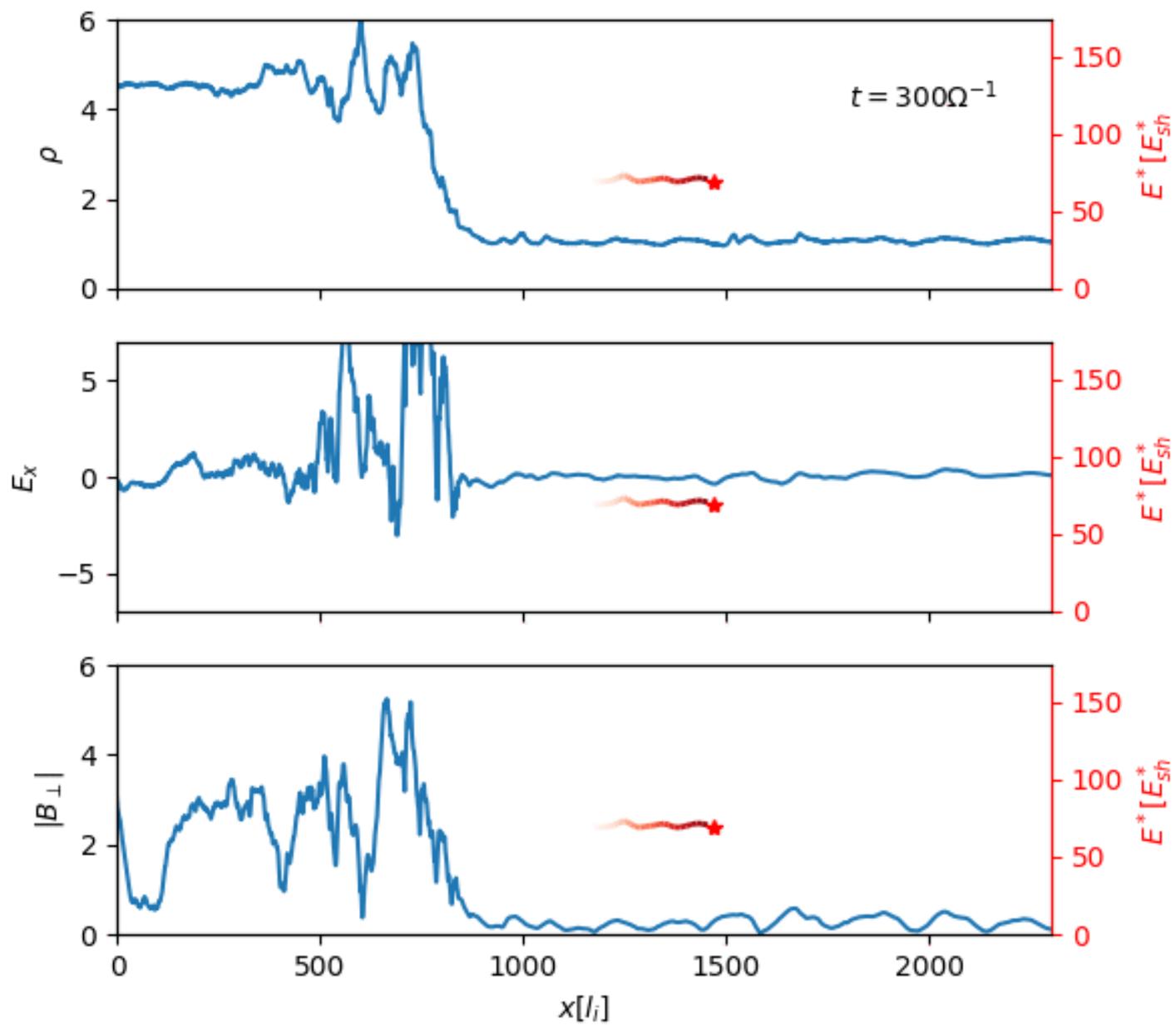
Безразмерные параметры моделирования:

- ▶ Альвеновское число Маха M_a
- ▶ Угол наклона магнитного поля к нормали θ
- ▶ Отношение теплового давления к магнитному β

**Hybrid PIC simulation of collisionless shock structure at “micro” scales
(1000 gyroradii of thermal proton) . Injection of non-thermal protons is apparent.**







Вычислительные требования к PIC моделям в интервале от keV до TeV для нерелятивистских UV остатков сверхновых очень жесткие:

Интервал энергий:

$$\frac{E_{\max}}{E_{\text{thermal}}} > \frac{\text{TeV}}{\text{keV}} > 10^9$$

Интервал длин
(число ячеек в 1-D):

$$\frac{\text{Diff Length TeV proton}}{\text{electron skin depth, } (c / \omega_{pe})} > 10^{10}$$

Число шагов по
времени:

$$\frac{\text{Accel Time to TeV}}{\omega_{pe}^{-1}} > 10^{14}$$

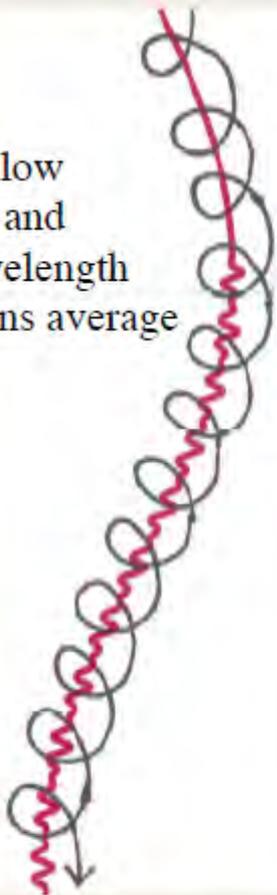
→ Моделирование PIC позволяет исследовать важные нелинейные микроскопические процессы формирования вязкого скачка UV и инжекцию частиц в ускорение Ферми, но при фиксированных граничных условиях.

PIC модели должны быть 3-D (Jones, Jokipii & Baring 1998)

Поэтому на сегодня учет обратного влияния частиц высоких энергий на структуру течения требует использования приближенных методов Монте-Карло или уравнений переноса

Рассеяние КЛ: резонансное и нерезонансное

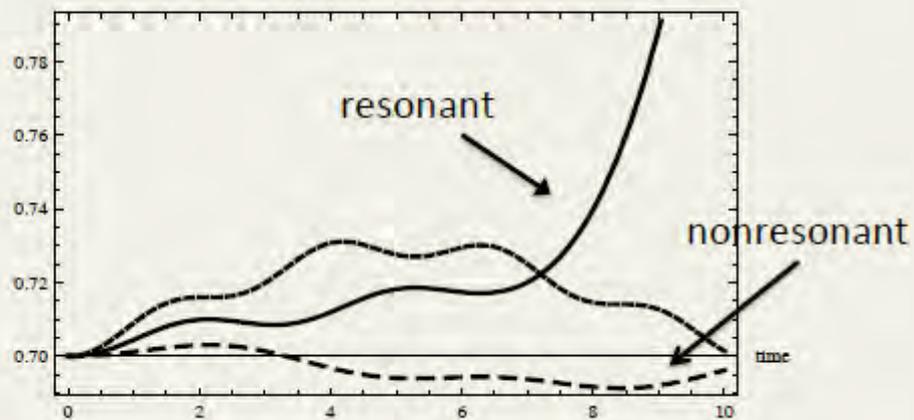
Orbits follow fieldlines and short wavelength fluctuations average out.



Gyroresonant fluctuations (Doppler shifted frequency $kv_{\text{parallel}} = \omega_{\text{cr}}$) scatter in pitch angle.



J. Everett

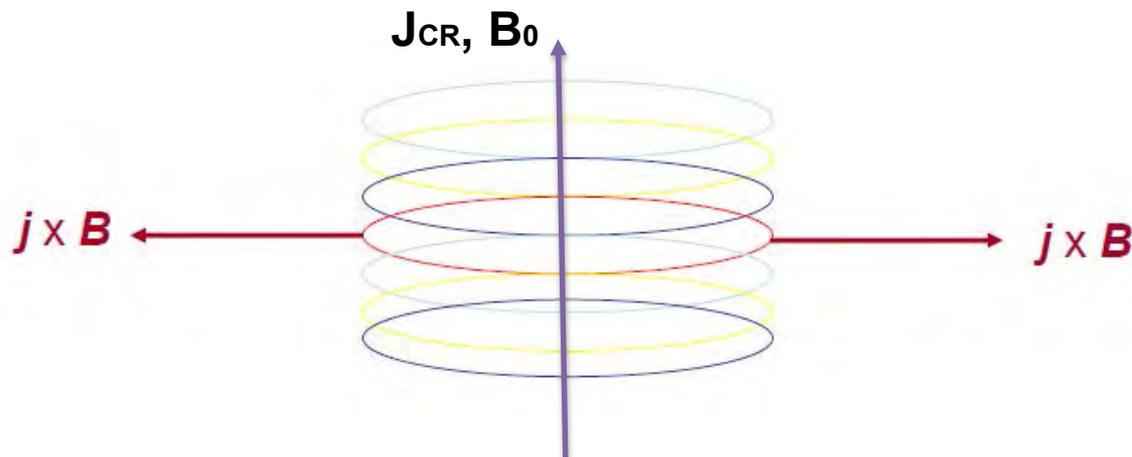


Быстрая коротковолновая нерезонансная неустойчивость Белла (2004)

Флуктуации магнитного поля с масштабами меньше R_g (ларморовского радиуса КЛ) вызывают лишь слабый отклик тока КЛ. Поэтому для таких флуктуаций ток КЛ фиксирован, также как и компенсирующий ток электронов фоновой плазмы.

Это приводит к быстрому росту флуктуаций поля с масштабами меньше R_g , открытому А.Беллом (MNRAS, v.353, 550, 2004).

Возмущения поля и скорости, в отличие от альвеновских мод имеют малую фазовую скорость и плотность их кинетической энергии выше, чем магнитной.



$$\gamma = \sqrt{\frac{kBj_{CR}}{\rho} - k^2 v_A^2}$$

Growth limited by field tension at short wavelength

**Коротковолновая нерезонансная
неустойчивость Белла (2004)
индуцированная током космических лучей**

$$\tilde{\rho} \left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{u}} \nabla) \tilde{\mathbf{u}} \right) = -\nabla \tilde{p}_g + \frac{1}{c} \tilde{\mathbf{j}} \times \tilde{\mathbf{B}} + e (\tilde{n}_p - \tilde{n}_e) \tilde{\mathbf{E}}$$

$$\tilde{n}_p + \tilde{n}_{cr} = \tilde{n}_e$$

$$\tilde{\mathbf{E}} = -\frac{1}{c} \left[\tilde{\mathbf{u}} \times \tilde{\mathbf{B}} \right].$$

$$\nabla \times \tilde{\mathbf{B}} = \frac{4\pi}{c} \left(\tilde{\mathbf{j}} + \tilde{\mathbf{j}}^{cr} \right)$$

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{B}}}{\partial t} = \nabla \times (\tilde{\mathbf{u}} \times \tilde{\mathbf{B}})$$

$$\tilde{\rho} \left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{u}} \nabla) \tilde{\mathbf{u}} \right) = -\nabla \tilde{p}_g + \frac{1}{4\pi} (\nabla \times \tilde{\mathbf{B}}) \times \tilde{\mathbf{B}} - \frac{1}{c} (\tilde{\mathbf{j}}^{cr} - e \tilde{n}_{cr} \tilde{\mathbf{u}}) \times \tilde{\mathbf{B}}.$$

Если сила Лоренца превышает магнитное натяжение, имеем:

$$\frac{c}{4\pi} |\mathbf{B} \times \text{rot } \mathbf{B}| < |\mathbf{J}_{CR} \times \mathbf{B}|$$

Отсюда $B_{\max} \sim \frac{4\pi J_{CR}}{ck}$ Условие на длину волны (отсутствие отклика тока): $ck_{\min} = eB$

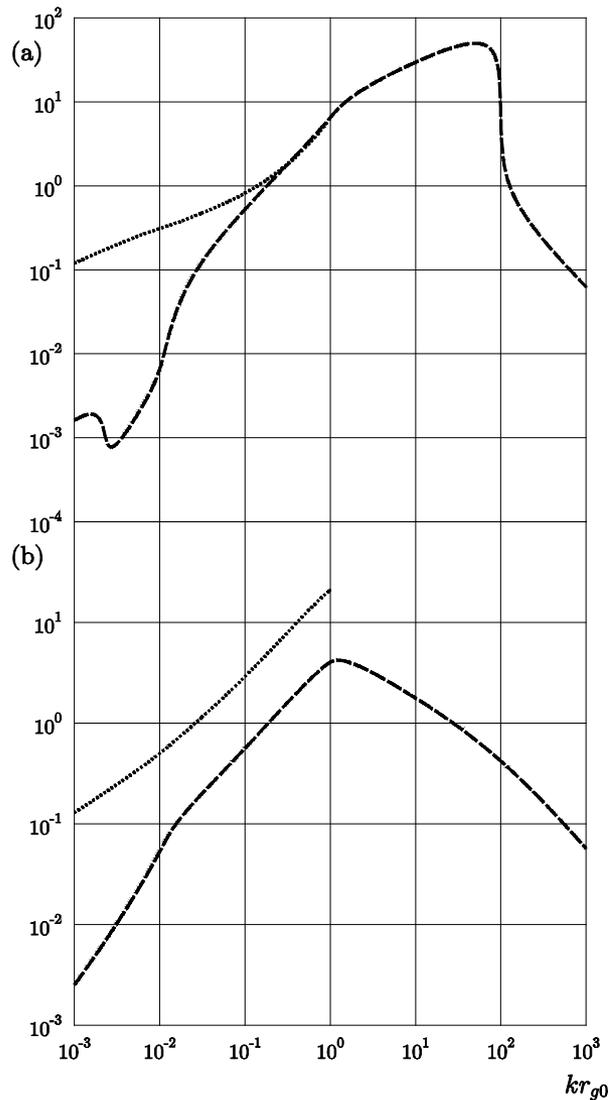
$$\gamma = \sqrt{\frac{kBj_{CR}}{\rho} - k^2 v_A^2}$$

$$\frac{B_{\max}^2}{8\pi} = \eta \frac{v_{sh}}{c} \frac{\rho v_{sh}^2}{2}$$

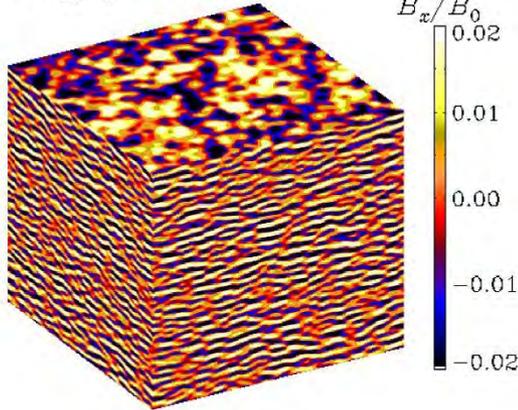
Growth limited
by field tension
at short wavelength

Неустойчивости токов КЛ

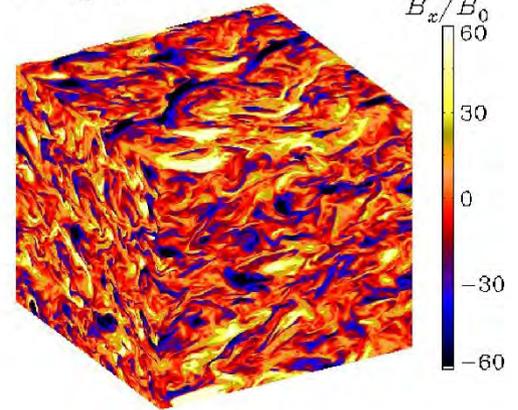
$Im[\omega/(v_A r_{g0}^{-1})]$



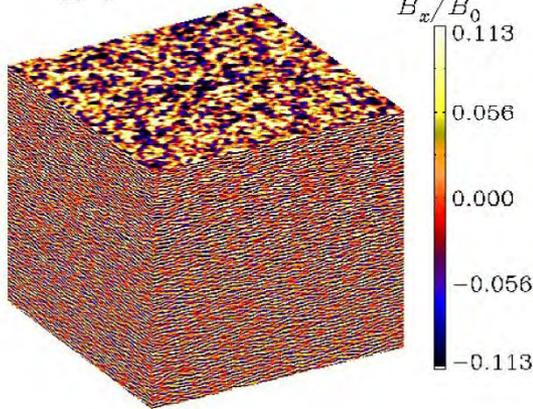
$t v_{A0} k_1 = 0.200$



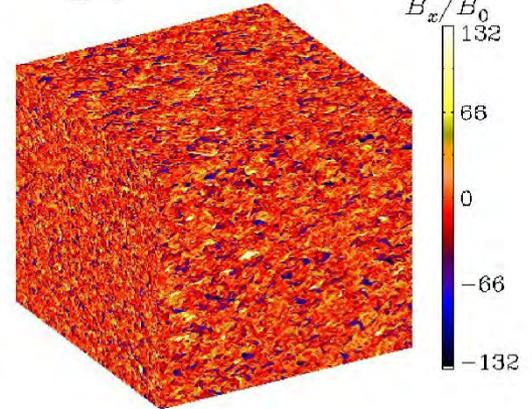
$t v_{A0} k_1 = 0.650$



$t v_{A0} k_1 = 0.050$



$t v_{A0} k_1 = 0.124$

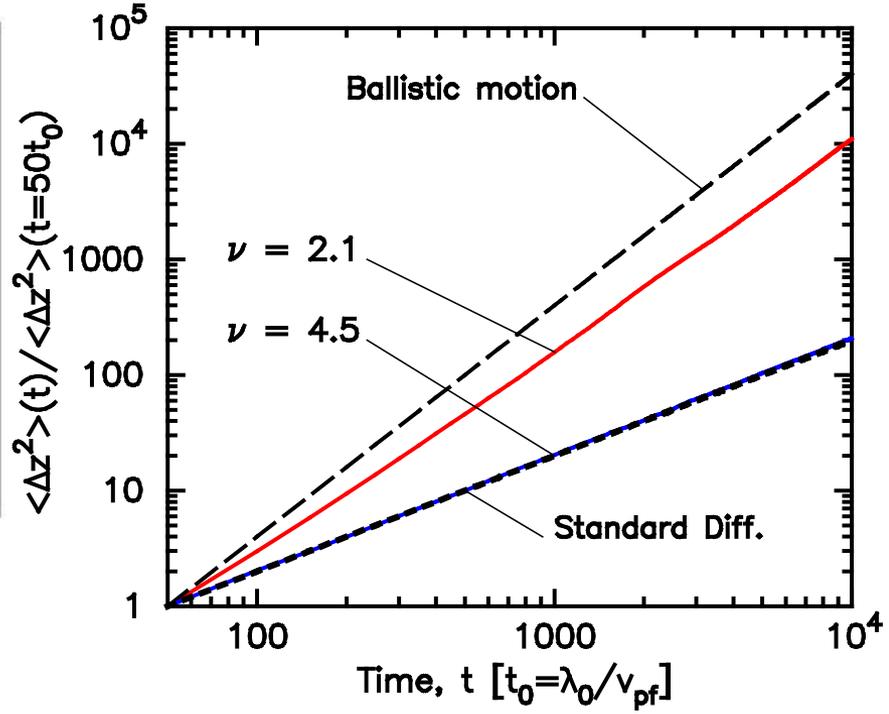
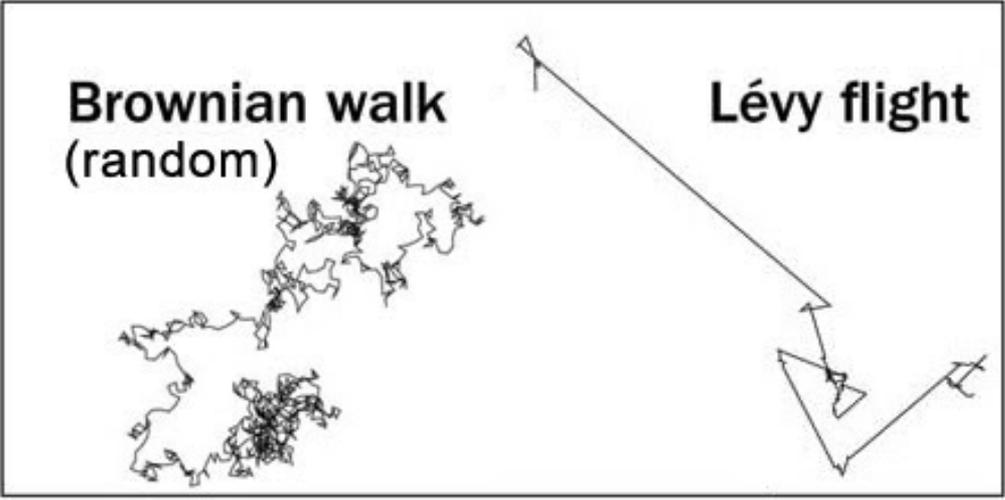


Перенос частиц в окрестности УВ

Диффузия

vs

Levy walks



AB+ PHYSICAL REVIEW E 95, 033207 (2017)

Нелинейные модели МГД-течений с ударными волнами и усилением флуктуирующих магнитных полей для расчета ускорения частиц и излучения фотонов и нейтрино высоких энергий

Комбинированные расчеты методами particle-in-cell и Монте-Карло

Задача с широким диапазоном масштабов от км до долей парсека
И динамическим диапазоном энергий частиц от долей ГэВ до 100 ПэВ

Решение требует комбинированных методов микроскопического
плазменного моделирования (PiC) и нелинейной модели Монте-Карло

Законы сохранения потоков массы, импульса и энергии на фронте УВ

$$\rho(x)u(x) = \rho_0u_0$$

$$\rho(x)u^2(x) + P_{th}(x) + P_{cr}(x) + P_w(x) = \Phi_{P0}$$

$$\frac{\rho(x)u^3(x)}{2} + F_{th}(x) + F_{cr}(x) + F_w(x) + Q_{esc} = \Phi_{E0}$$

Уравнение переноса спектральной плотности энергии турбулентности

$$\frac{\partial F_w(x, k)}{\partial x} + \frac{\partial \Pi(x, k)}{\partial k} = u(x) \frac{\partial P_w(x, k)}{\partial x} + \Gamma(x, k) W(x, k) - \widehat{L}(x, k)$$

*турбулентный
каскад*

*усиление полей
неустойчивостями*

диссипация

$$F_w(x, k) = \frac{3}{2} u(x) W(x, k), \quad P_w(x, k) = \frac{W(x, k)}{2}$$

Изменения потоков энергий компонент

$$\frac{dF_w(x)}{dx} = u(x) \frac{dP_w(x)}{dx} + \int_{(k)} \Gamma(x, k) W(x, k) dk - L(x)$$

$$\frac{dF_{th}(x)}{dx} = u(x) \frac{dP_{th}(x)}{dx} + L(x); \quad L(x) = \int_{(k)} \widehat{L}(x, k) dk$$

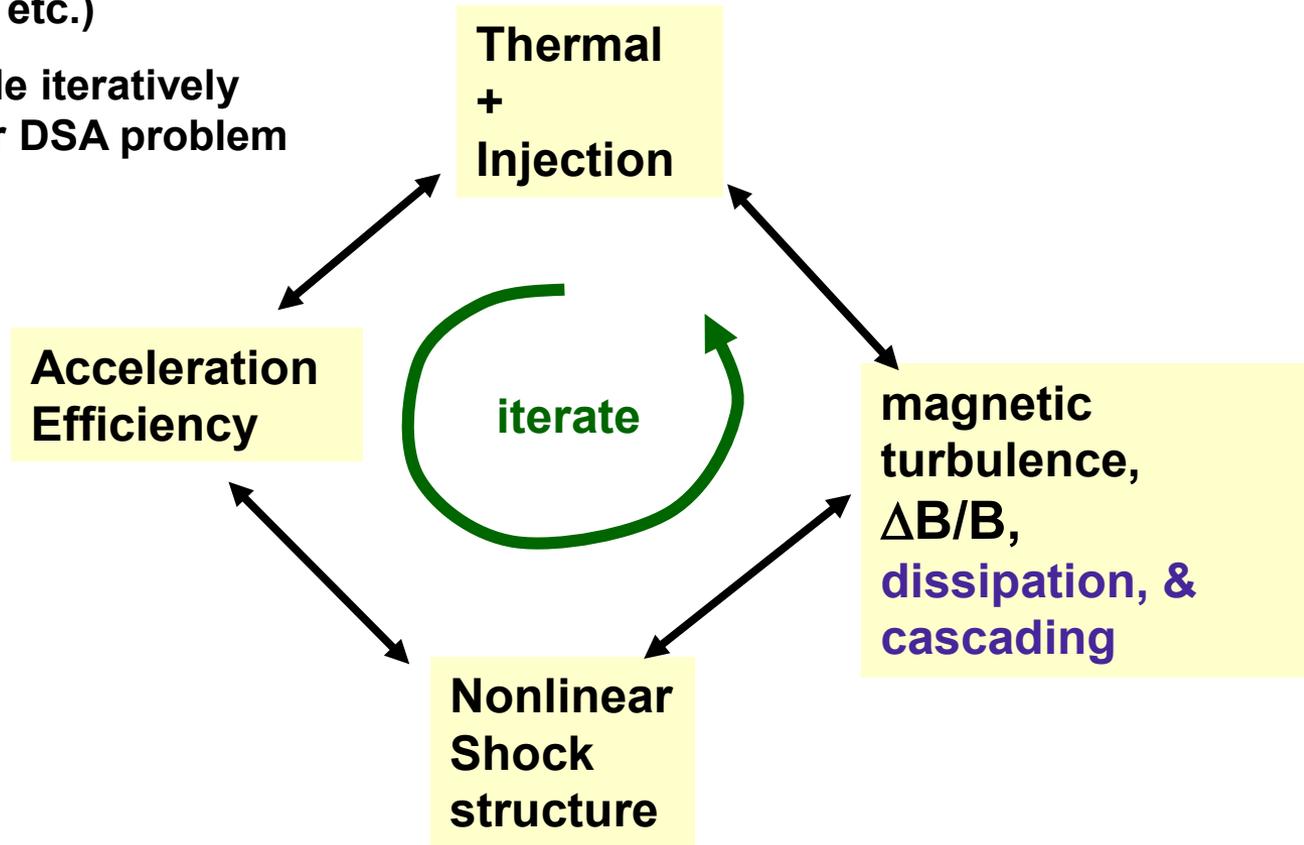
$$\frac{dF_{cr}(x)}{dx} = [u(x) + v_{scat}(x)] \frac{dP_{cr}(x)}{dx}$$

для выполнения законов сохранения

$$v_{scat}(x) = - \int_{(k)} \Gamma(x, k) W(x, k) dk \bigg/ \frac{dP_{cr}(x)}{dx}$$

Using approximate plasma physics (quasi-linear theory, Bohm diffusion, etc.)

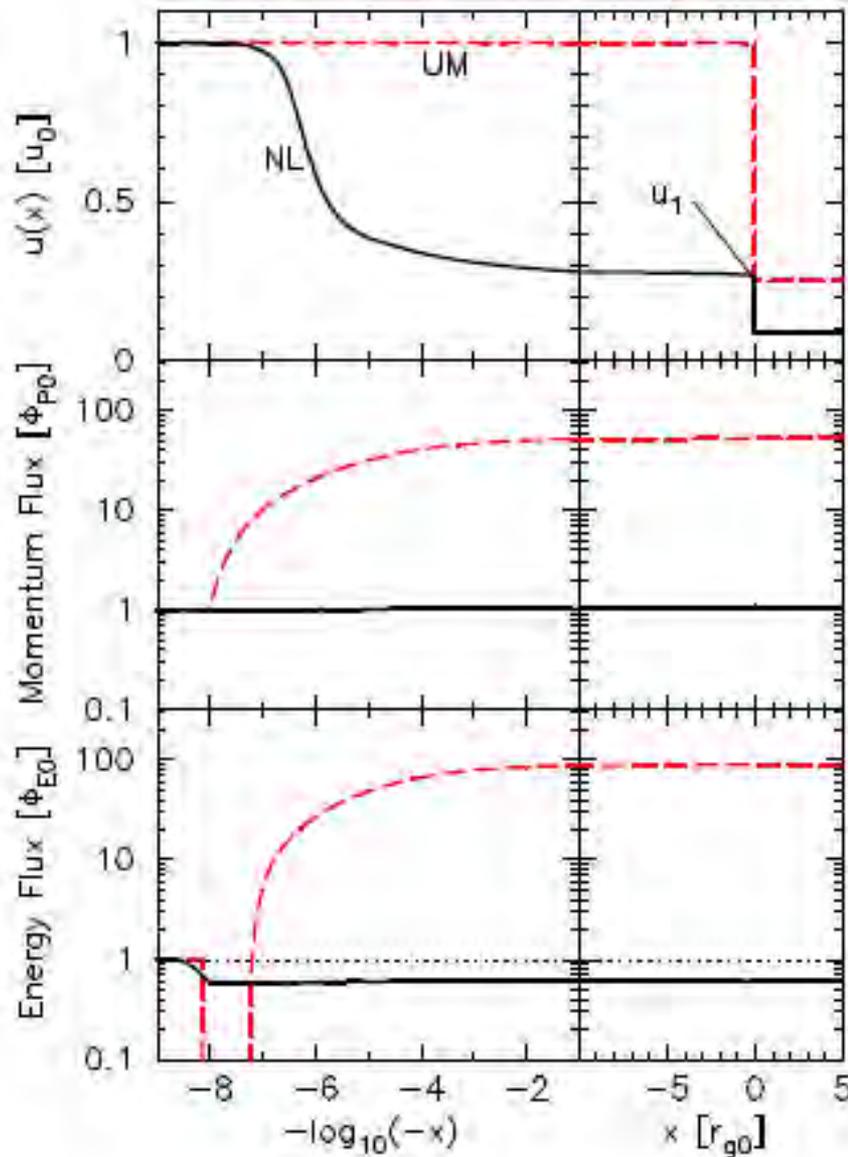
Monte Carlo code iteratively solves nonlinear DSA problem with MFA



If acceleration is efficient, all elements feedback on all others

Monte Carlo model of Nonlinear Diffusive Shock Acceleration

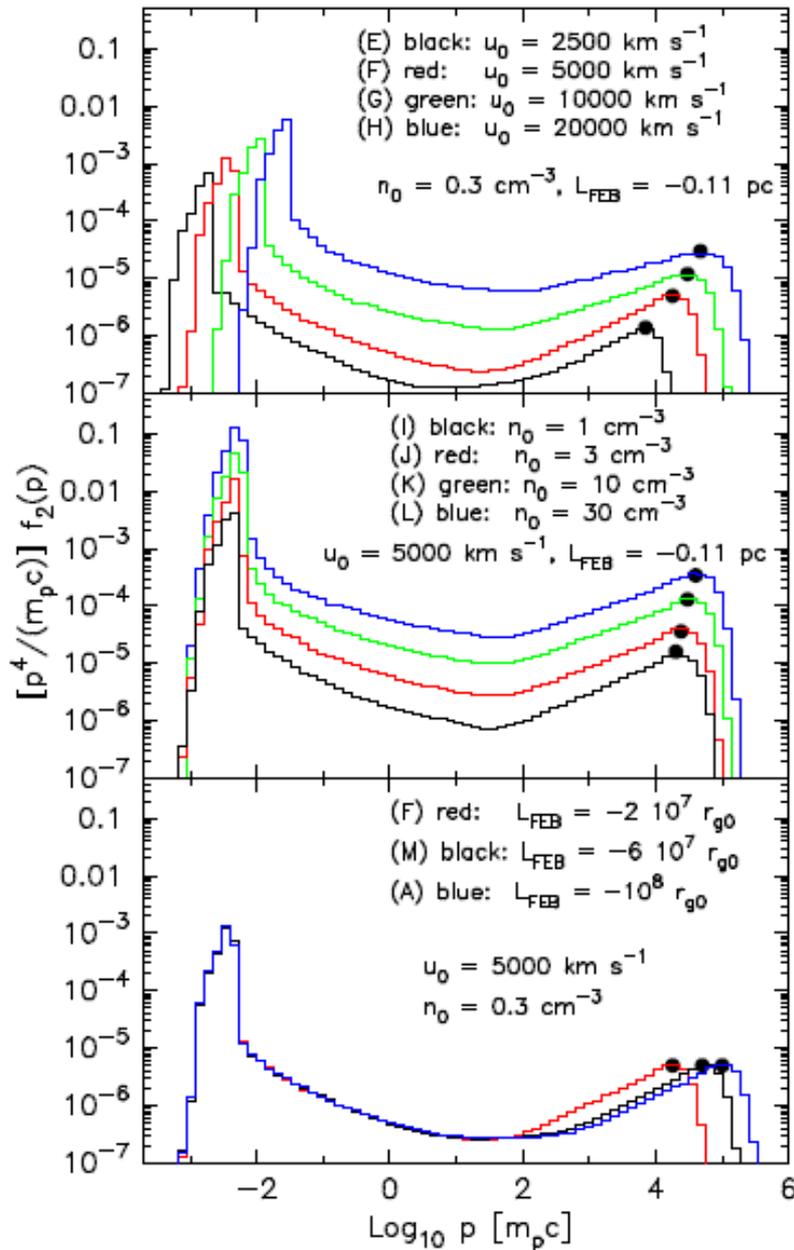
Нелинейные расчеты структуры МГД-течения модифицированного нетепловыми частицами



$$r_{g0} = \frac{m_p c u_0}{e B_0}$$

$$n_0 = 0.3 \text{ cm}^{-3}; u_0 = 5000 \frac{\text{KM}}{\text{c}}; B_0 = 3 \text{ мкГс}$$

Спектры частиц ускоренных на УВ

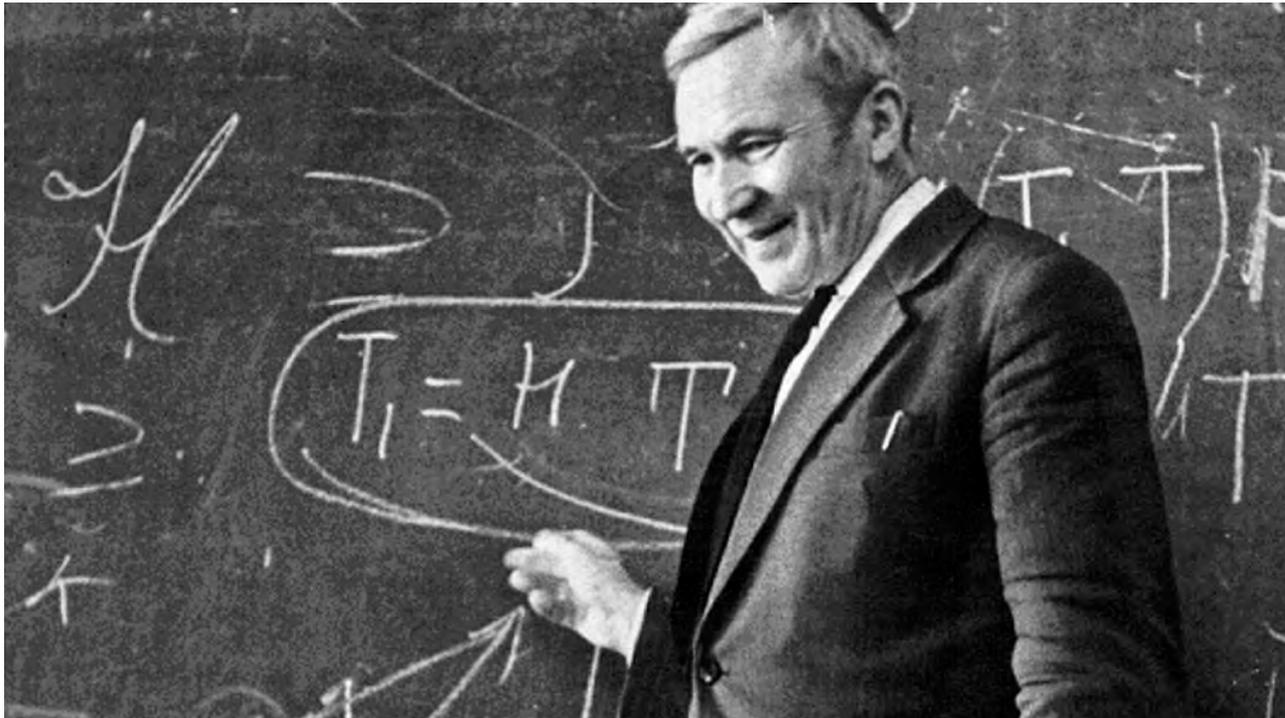


Maximal momentum of accelerated CRs

$$p_{\text{max}} \propto n_0^\delta u_0 L_{\text{FEB}}$$

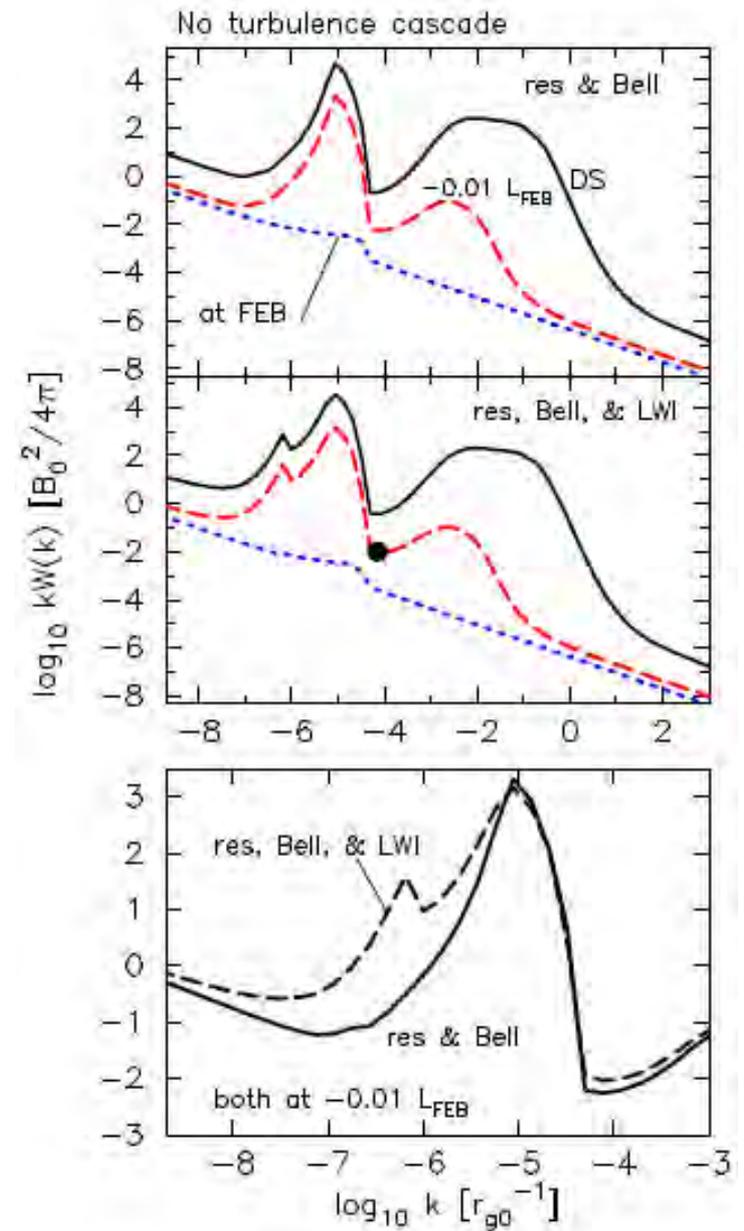
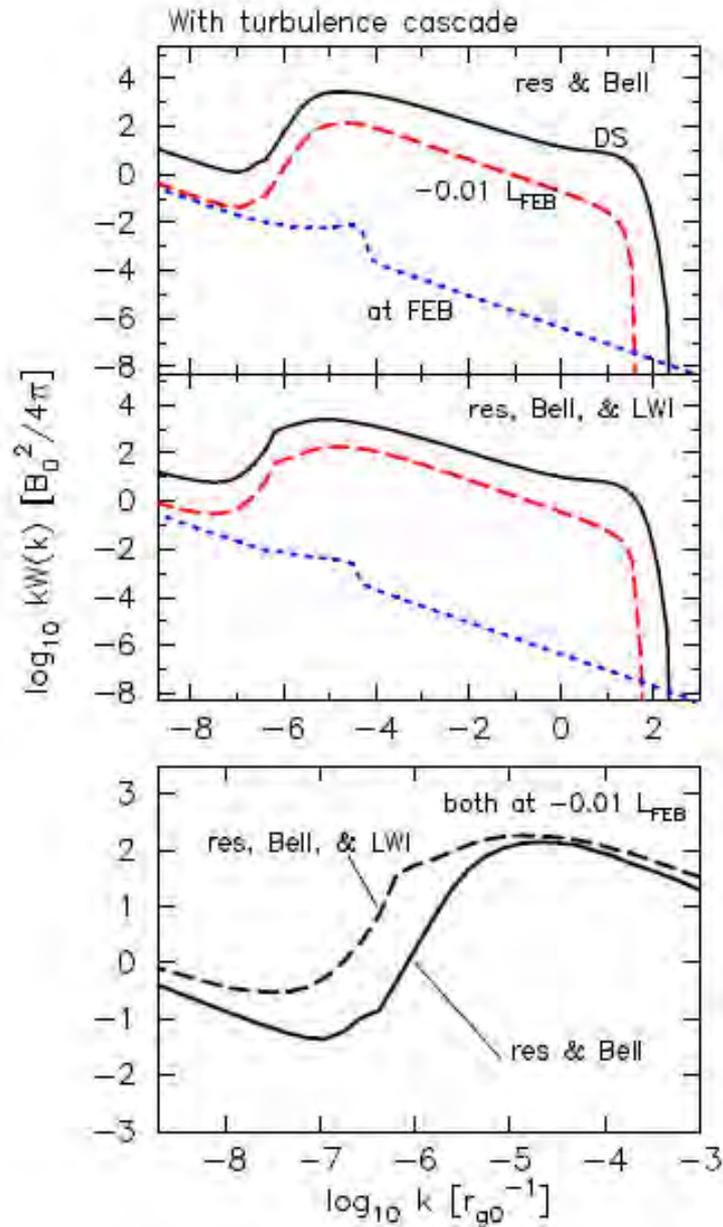
$$\delta = 0.25$$

Магнитная турбулентность

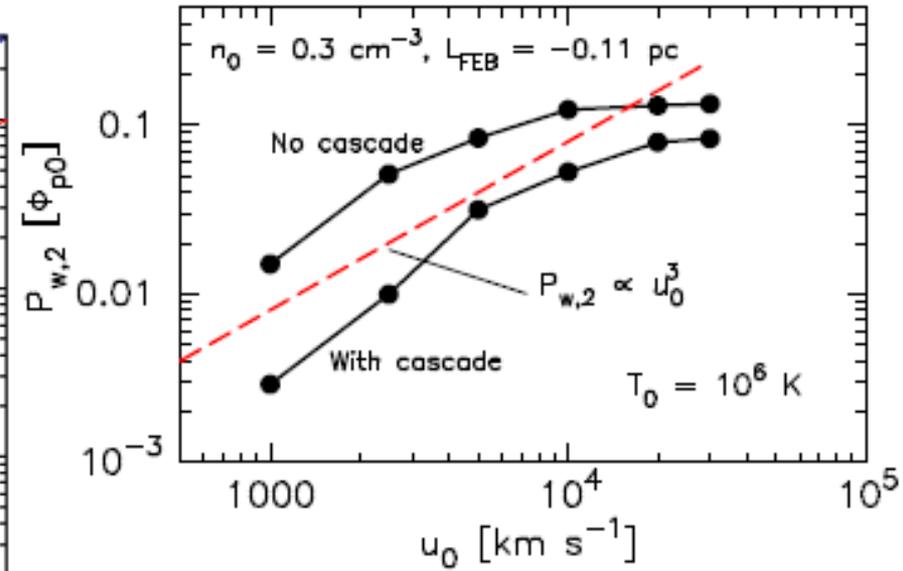
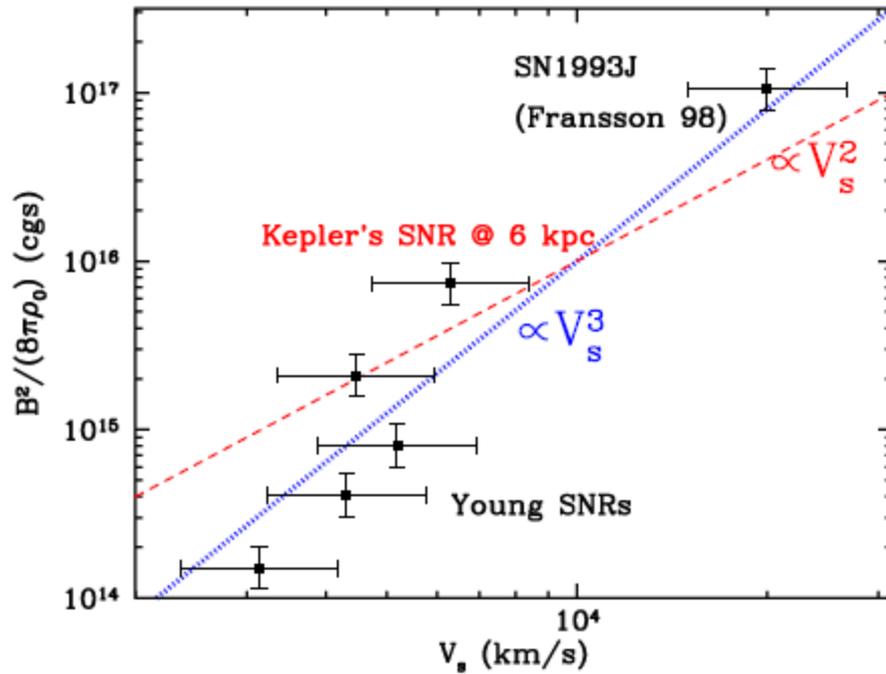


**Турбулентный каскад
А.Н.Колмогорова
в несжимаемой
системе** или
**анизотропная МГД-
турбулентность
Голдрайха-Сридхара?**

Спектры магнитной турбулентности УВ с 3 неустойчивостями КЛ



Эффективность конверсии энергии течения в магнитную турбулентность



ApJ, 789:137, 2014

Jacco Vink AARv12

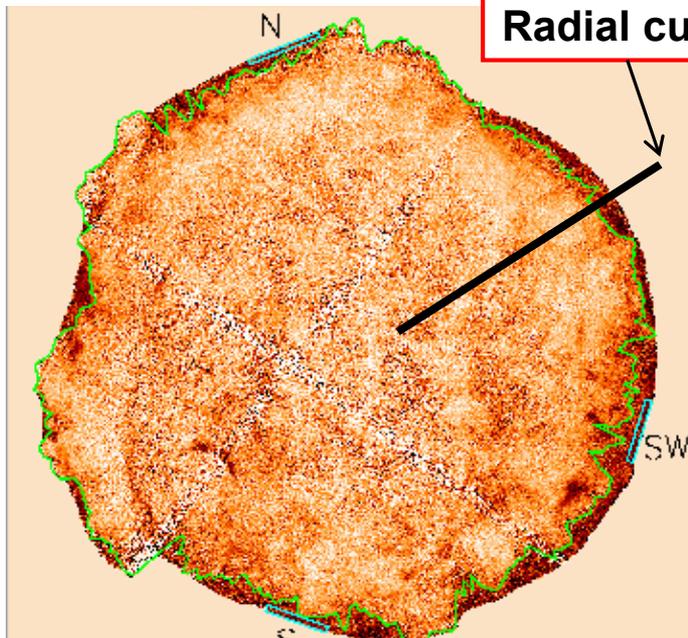
Свидетельство сверх-адиабатического усиления В-поля

Sharp synch. X-ray edges

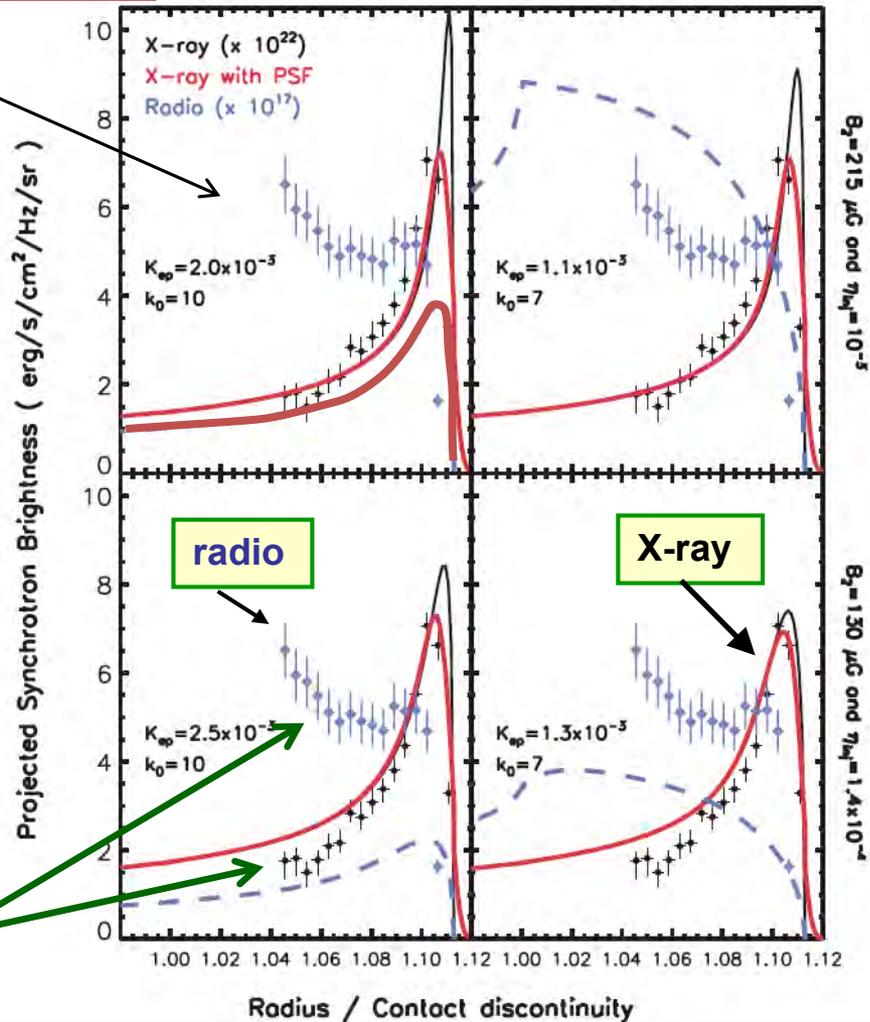
Cassam-Chenai et al. ApJ

Magnetically Limited Rim

Synchrotron Losses Limited Rim



Chandra observations of Tycho's SNR
(Warren et al. 2005)

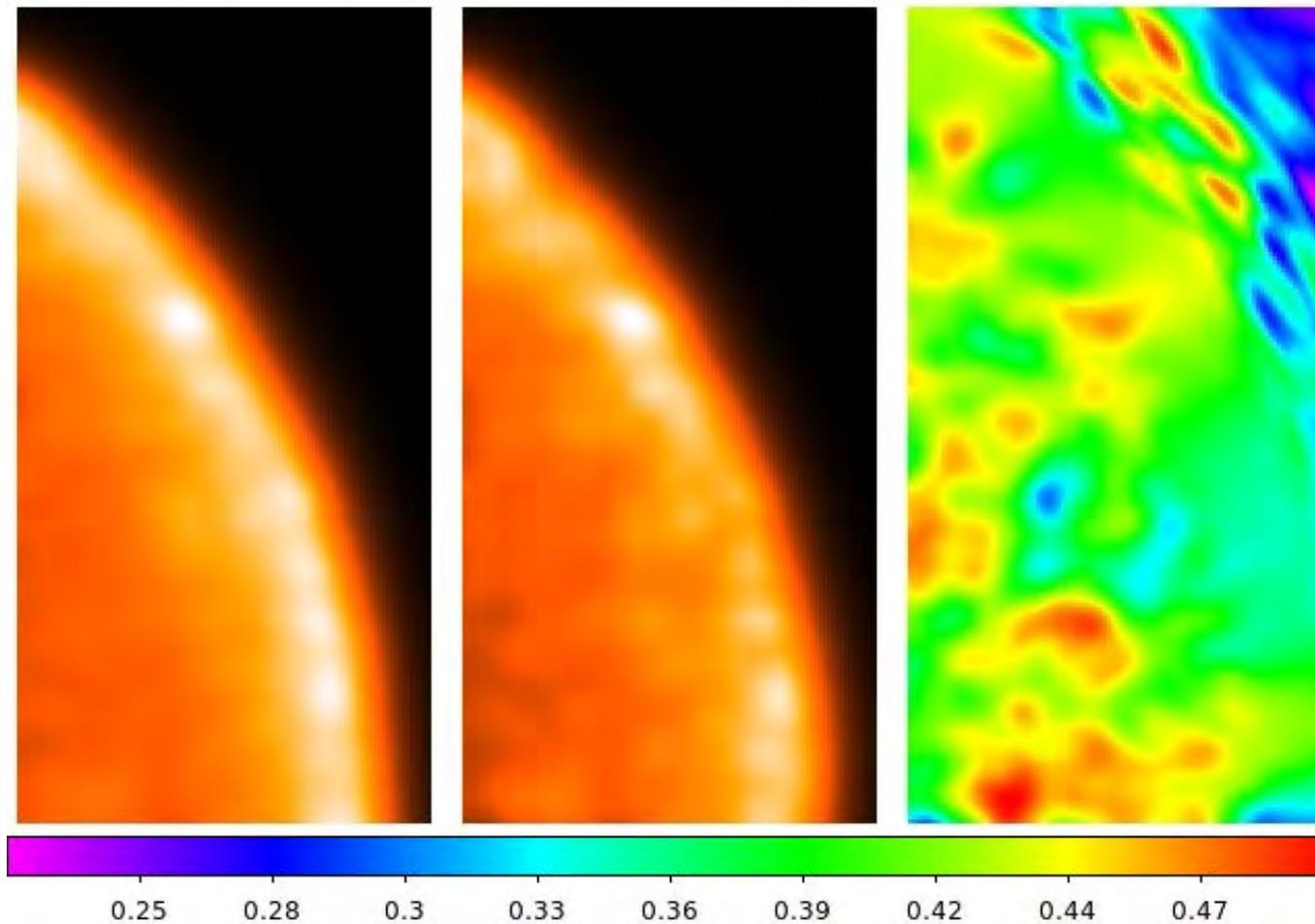


См отличие радио и рентгеновских синхротронных филаментов

Тонкие синхротронные филаменты

дают поле 10 раз выше адиабатического

**Модель поляризованного рентгеновского изображения оболочки молодой сверхновой на энергии 5 кэВ.
Степень поляризации показана на правой панели.**

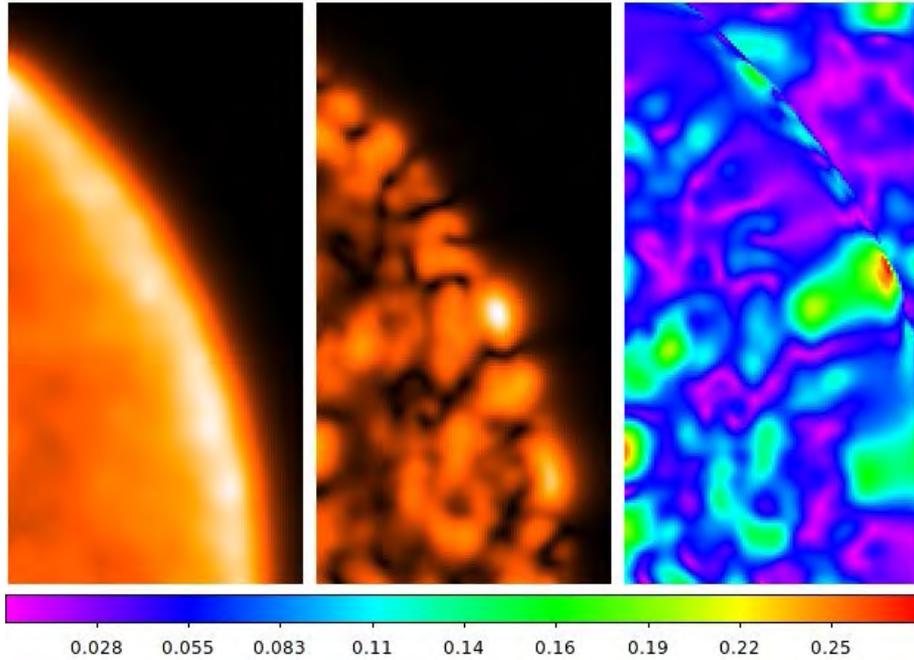


турбулентность Колмогорова $K^{-5/3}$

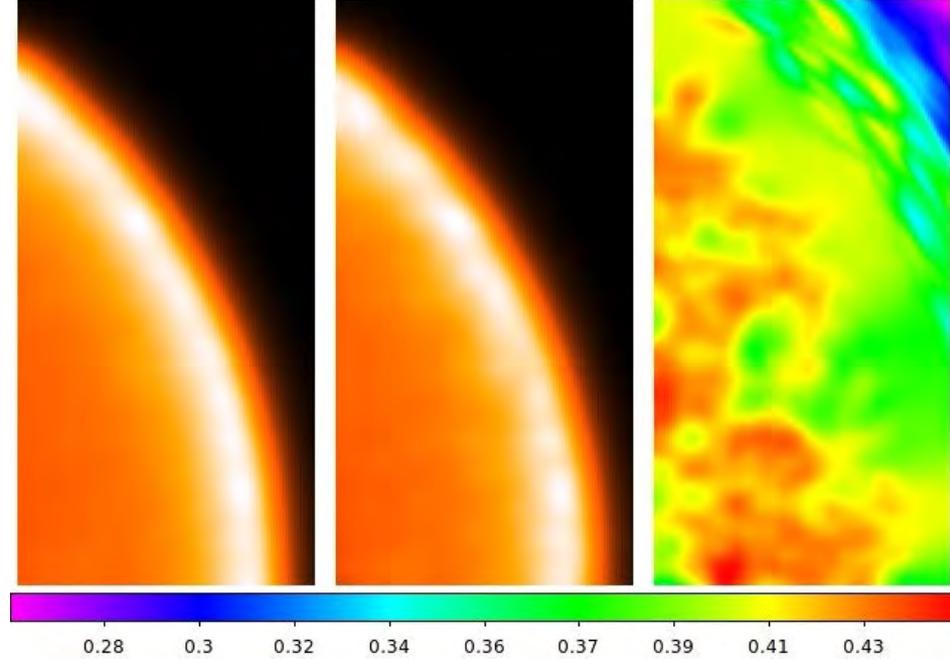
**AB & Uvarov MNRAS v.399, p1119
J Phys 2017**

**Simulated X-ray images for polarized 5 keV photons
XIPE/IXPE perspective (24" PSF)**

**No Faraday rotation in X-rays and
the intermittence of the anisotropic turbulence result in a sizeable polarisation**



$K^{-5/3}$ (Kolmogorov model)



K^{-1} (Bohm diffusion model)

XIPE

The X-ray Imaging Polarimetry Explorer

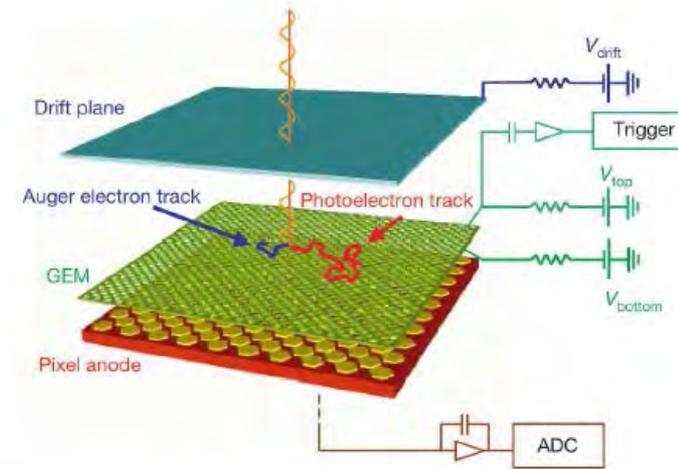
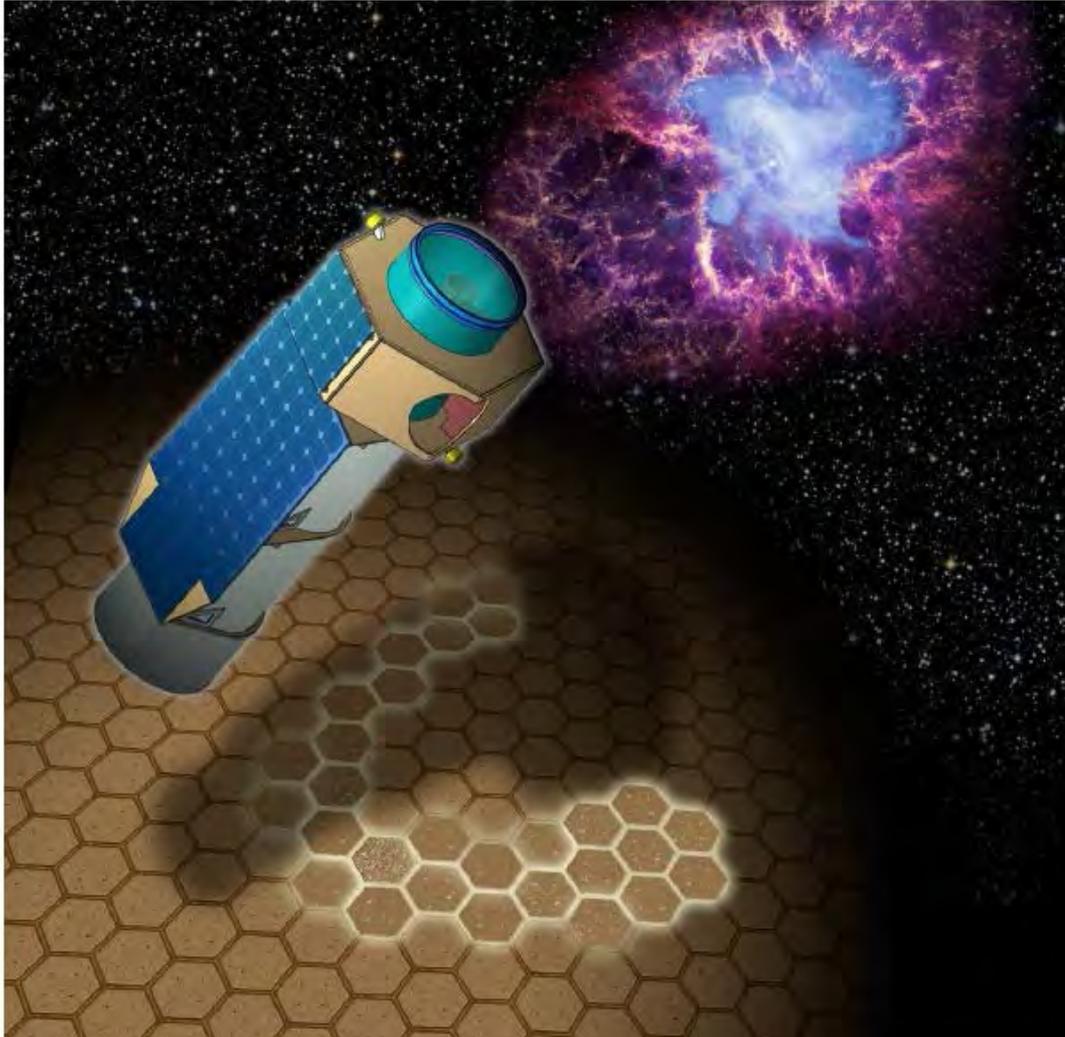


Figure 17 Principle of operation of the GPD (Costa et al. 2001).

Gas Pixel Detector

The GPD is able to measure the linear polarization of photoabsorbed photons by reconstructing the emission direction of the ejected photoelectrons. It comprises a gas cell with a thin 50 μm Beryllium entrance window, an absorption/drift gap, a charge amplification stage and a multi-anode read-out which is the pixelated top metal layer of a CMOS ASIC analog chip (see Figure 17, Costa et al. 2001). The ASIC has 105600 pixels at 50 μm pitch, and it is at its third generation of development (see Figure 18, Bellazzini et al.

P.Sofita +



Спасибо за внимание!