Ускорение космических лучей и генерация нетеплового излучения в остатке сверхновой Кассиопея А

В.Н.Зиракашвили, Ф.А.Агаронян

Ускорение КЛ ударными волнами

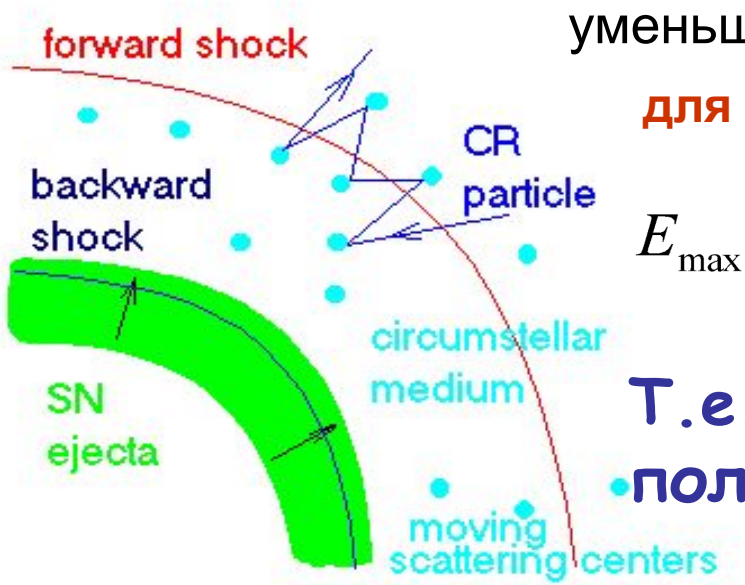
Замечательная особенность- степенной спектр ускоренных частиц $\gamma=(\sigma+2)/(\sigma-1)$, где σ степень сжатия ударной волны, для сильных ударных волн $\sigma=4$ and $\gamma=2$

Крымский 1977; Bell 1978

Максимальная энергия E_{max} : $D(E_{max})\sim 0.1 u_{sh} R_{sh}$

Для молодых ОСН : $u_{sh}R_{sh} \sim 10^{28}$ см^2 с$^{-1}$

а в Галактике **D** $\sim 10^{28}$ см^2 с$^{-1}$ при E~10 ГэВ, т.е. коэфициент диффузии КЛ должен быть сильно уменьшен вблизи фронта УВ



для Бомовской диффузии $D=D_B=cr_g/3$

$$E_{max} = Z\cdot 10^{14}\,\mathrm{eV}\left(\frac{B}{10\,\mu\mathrm{G}}\right)\left(\frac{R_{sh}}{3\,\mathrm{pc}}\right)\left(\frac{u_{sh}}{3000\,\mathrm{km\,s^{-1}}}\right)$$

Т.е. необходимо усиление магнитного поля для ускорения до 10^{15} эВ

observations

radio emission

$\nu_{MHz} = 4.6\ B_{\mu G} E_{e,GeV}^{\ 2}$

E = 50 MeV – 30 GeV

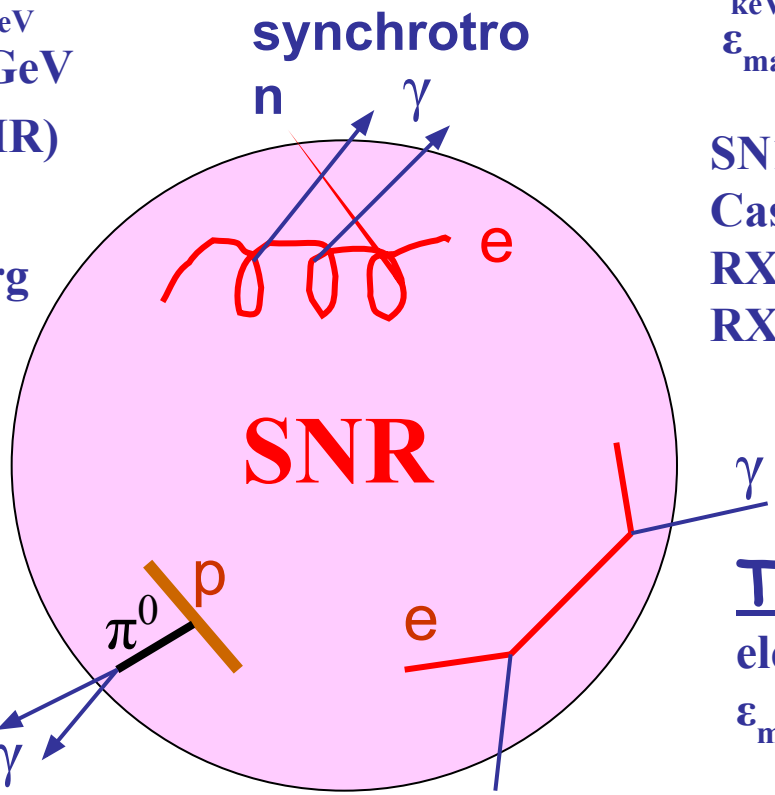
(100 GeV for IR)

$\gamma = 1.9 – 2.5$

$W_e = 10^{48} – 10^{49}$ erg

Ginzburg & Syrovatskii 1964

Shklovsky 1976



γ-rays (π^0)

E = 30-3000 MeV

γ Cygni, IC443

Esposito et al. 1996

Sturner & Dermer 1996

nonthermal X-rays

$\varepsilon_{keV} = 1\ B_{\mu G}(E_e/120\ \text{TeV})^2$

$\varepsilon_{max} \sim 100$ TeV

SN1006 Koyama et al. 1995

Cas A Allen et al. 1997

RX J1713-39 Koyama et al. 1997

RX J0852-46 ("Vela jr") Slane et 2001

inverse Compton

$\varepsilon_\gamma = \varepsilon_0(E_e/m_e c^2)^2$

TeV γ - rays

electrons/protons

$\varepsilon_{max} \sim 100$ TeV

confirmed by HESS (2008) !

SN1006 Tanimori et al 1998

RX J1713 Muraishi et al. 2000

Aharonian et al. 2004

Cas A Aharonian et al. 2001

RX J0852-46 ("Vela jr")

G338.3-0.0; G23.3-0.3; G8.7-0.1…

Aharonian et al. 2005

Рентгеновское изображение Кассиопеи А (Chandra)

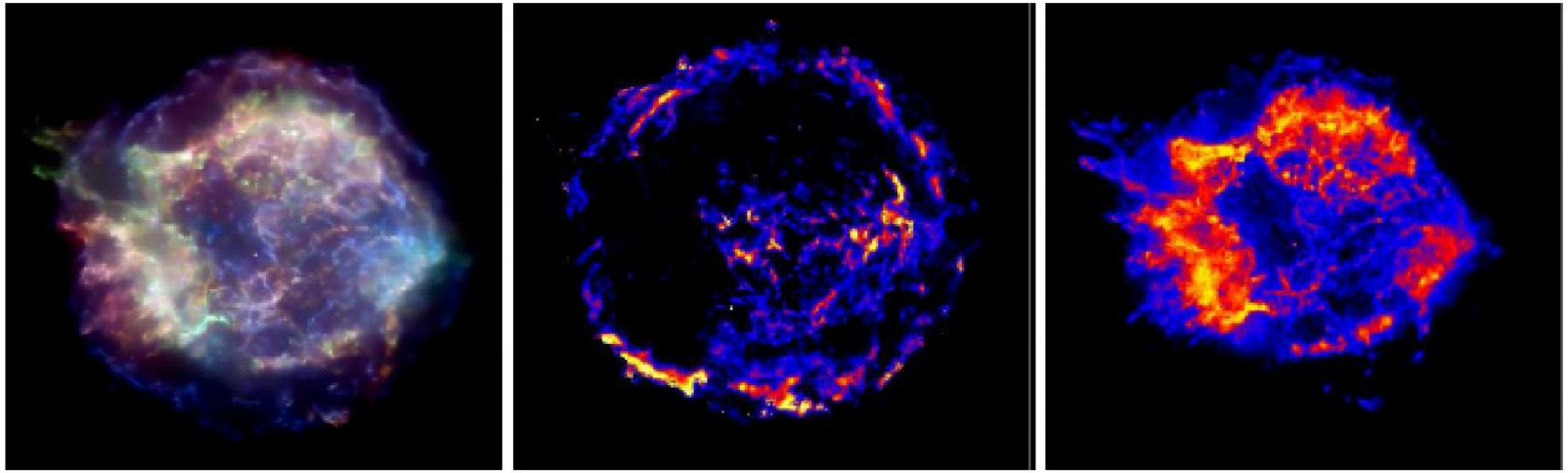
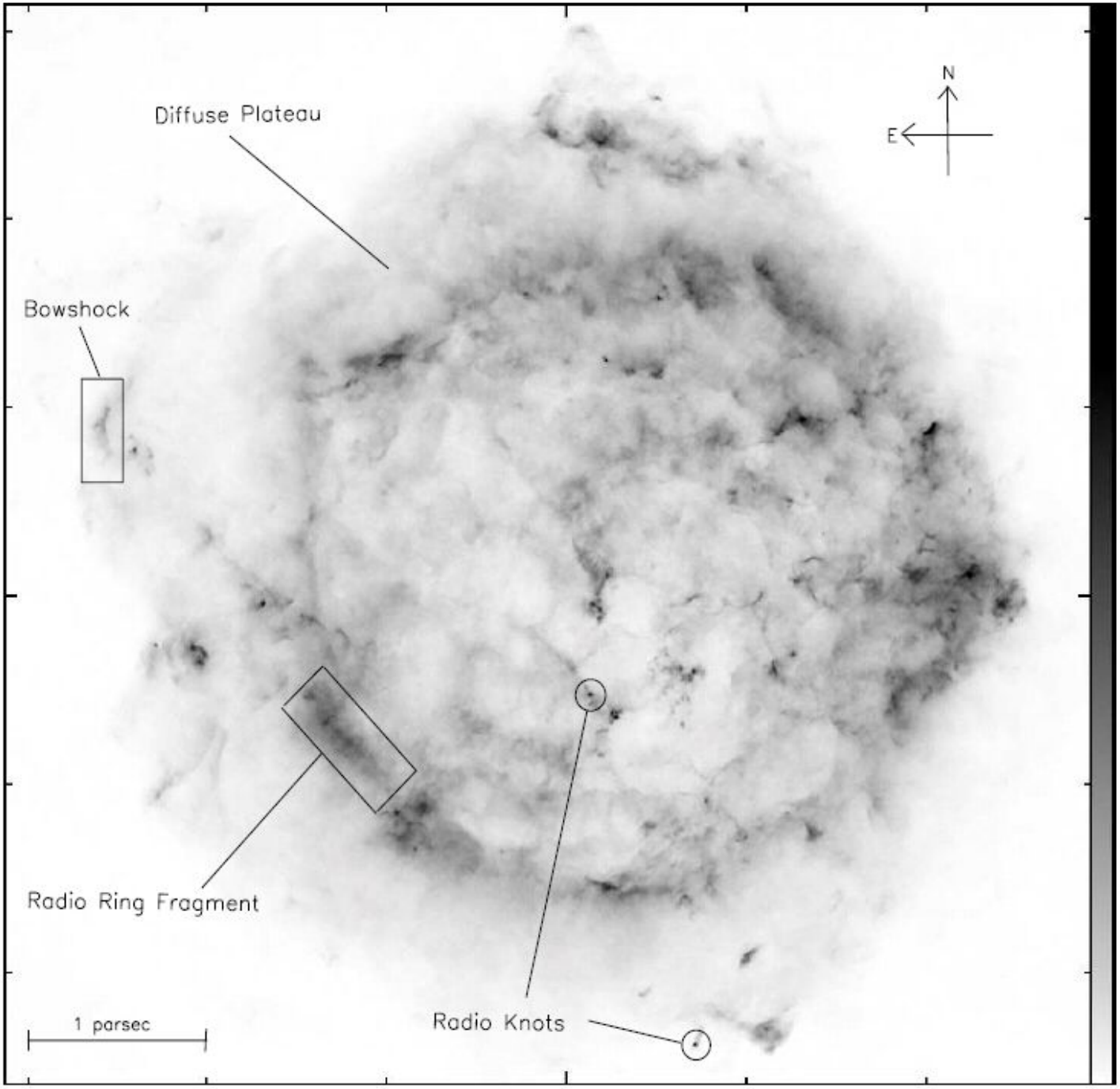


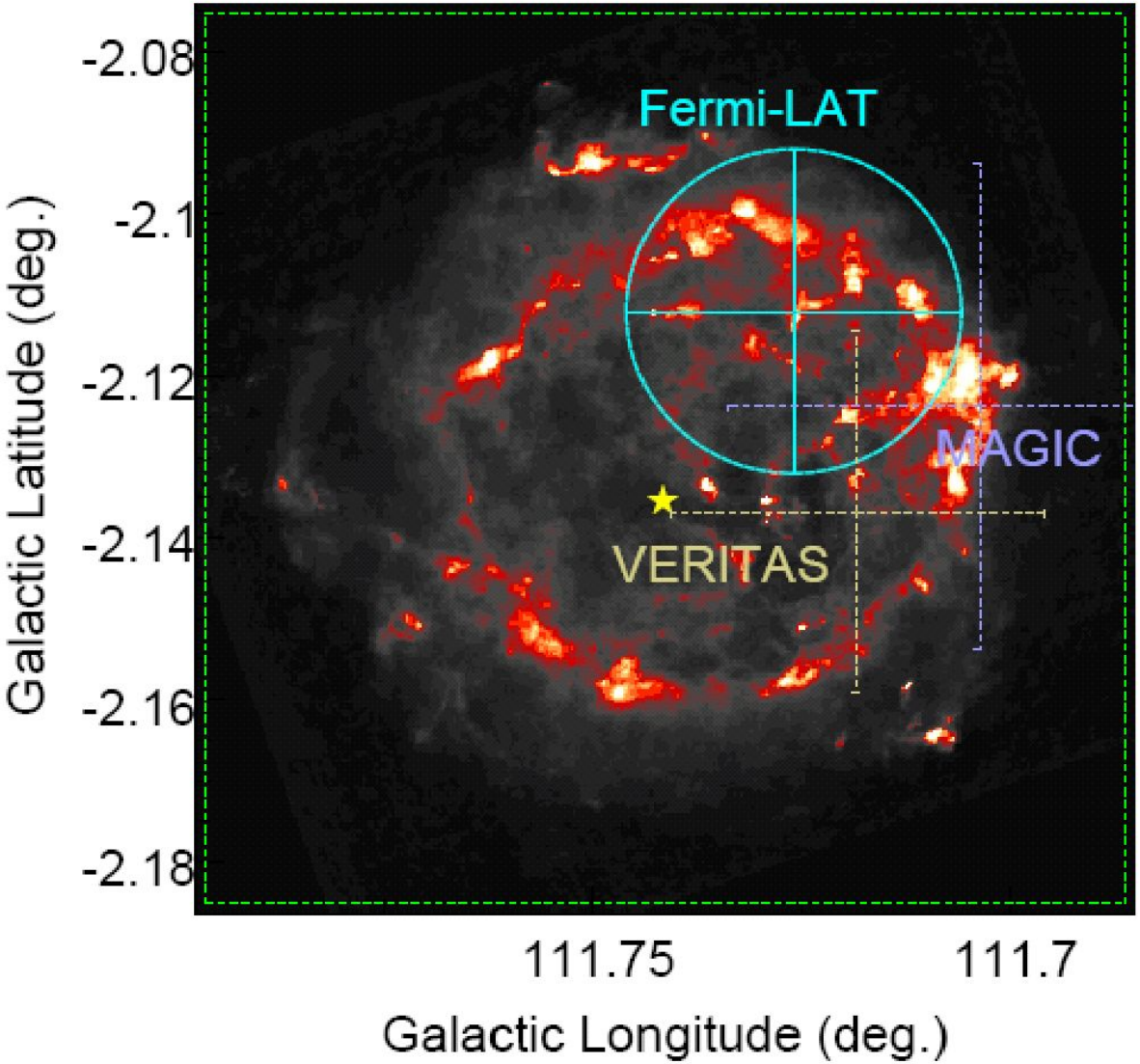
Figure 1. *Left*: A *Chandra* ACIS counts image (log scaling) of Cas A where the red, green and blue colors correspon to the energy bands 0.5–1.5 (i.e. the oxygen, iron, neon and magnesium emission lines), 1.5–2.5 (i.e. the silicon an sulfur emission lines) and 4.0–6.0 keV (i.e. the high-energy continuum), respectively. *Middle*: An image of the fitte bremsstrahlung electron temperature (linear scaling). The values range from about 0.8 keV (blue) to 6.2 keV (yellow) *Right*: An image of the fitted silicon Kα emission line flux (log scaling). The faint, continuum-dominated (i.e. blue-colored filaments around the outer perimeter of Cas A have relatively hard spectra (i.e. high apparent electron temperatures) an little evidence of line emission.

Радио-изображение:

Atoyan et al. 2000



Гэв-ное и ТэВ-ное гамма-излучение от Кассиопеи А также зарегестрировано

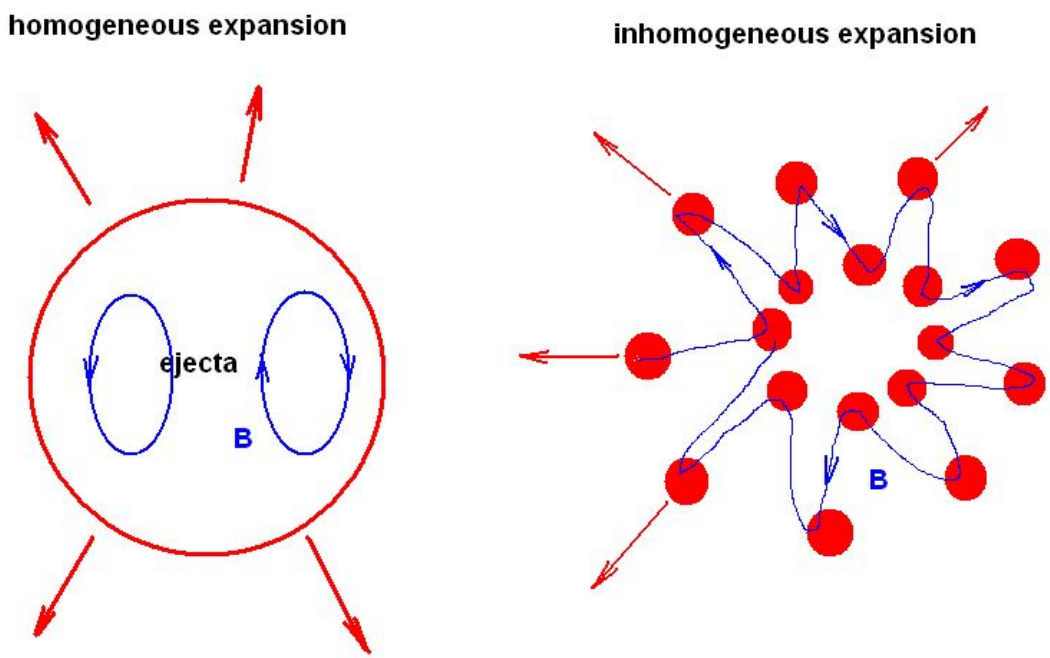


Радио-изображение

Ускорение на обратной ударной волне? Вероятно имеет место в Cas A

(Helder & Vink 2008)

Все зависит от величины магнитного поля в выбросе (ejecta)



+дополнительное усиление при развиттии нерезонансной потоковой неустойчивости (Bell 2004)

$B \sim R^{-2}$, 100 Гс при $R=10^{12}$ см - 10^{-12} Гс при $R=10^{19}$cm=3 пк

Поле может усилиться и стать радиальным – благоприятные условия для инжекции на обратной ударной волне

Численная модель нелинейного ускорения на ударных волнах

(естественное развитие существующих моделей Berezhko et al. (1994-2006), Kang & Jones 2006)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r} r^2 u \rho \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial P_g}{\partial r} + \frac{\partial P_c}{\partial r}\right) \qquad (2)$$

$$\frac{\partial P_g}{\partial t} = -u\frac{\partial P_g}{\partial r} - \frac{\gamma_g P_g}{r^2}\frac{\partial r^2 u}{\partial r} - (\gamma_g - 1)(w-u)\frac{\partial P_c}{\partial r} \qquad (3)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r} r^2 D(p,r,t)\frac{\partial N}{\partial r} - w\frac{\partial N}{\partial r} + \frac{\partial N}{\partial p}\frac{p}{3r^2}\frac{\partial r^2 w}{\partial r}$$

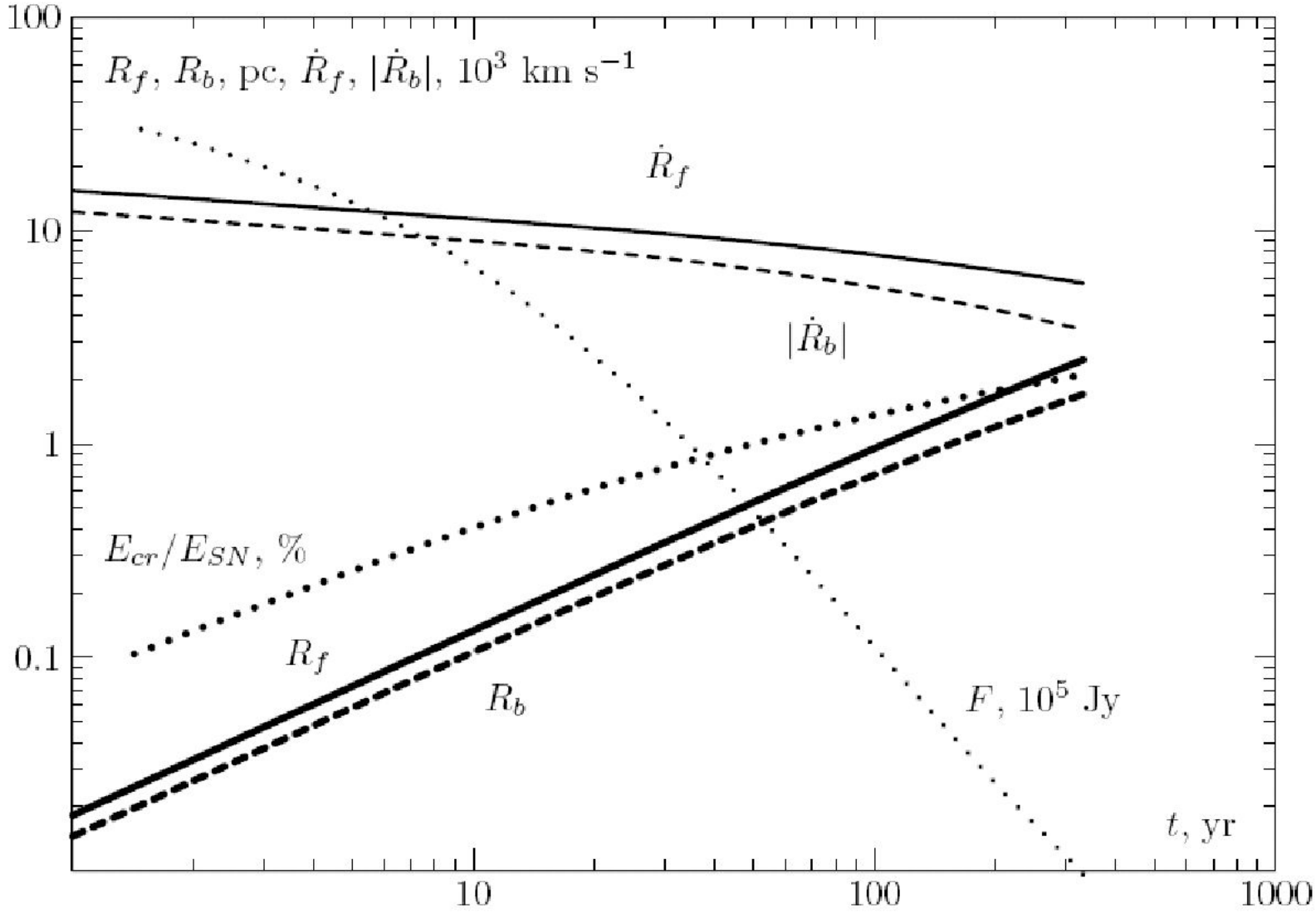
$$+\frac{\eta_f \delta(p-p_f)}{4\pi p_f^2 m}\rho(R_f+0,t)(\dot{R}_f - u(R+0,t))\delta(r-R_f(t))$$

$$+\frac{\eta_b \delta(p-p_b)}{4\pi p_b^2 m}\rho(R_b-0,t)(u(R_b-0,t) - \dot{R}_b)\delta(r-R_b(t)) \qquad (4)$$

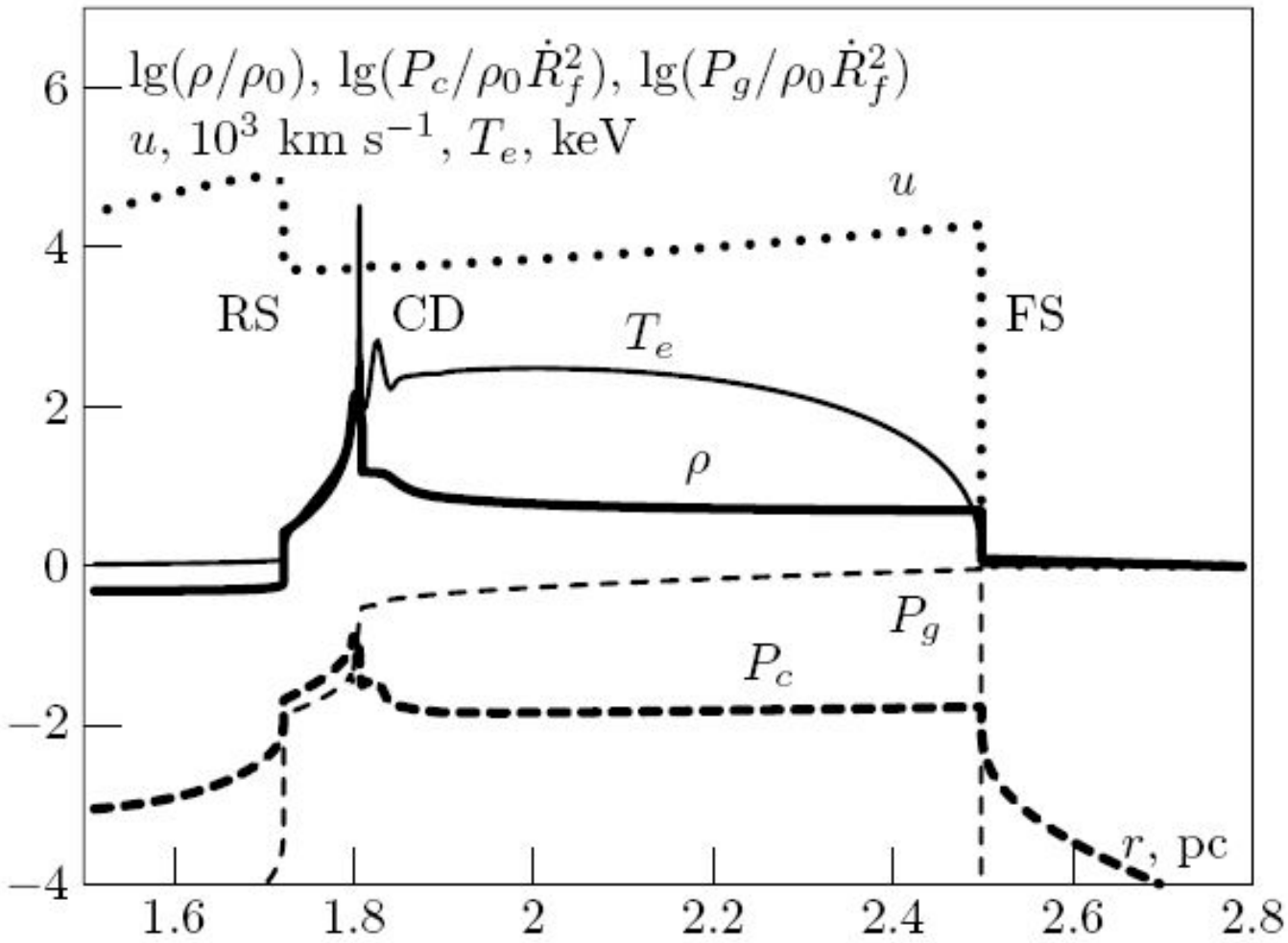
Сферически симметричные уравнения гидродинамики+ уравнение переноса космических лучей

Ускорение на внешней и обратной ударных волнах

Численные результаты



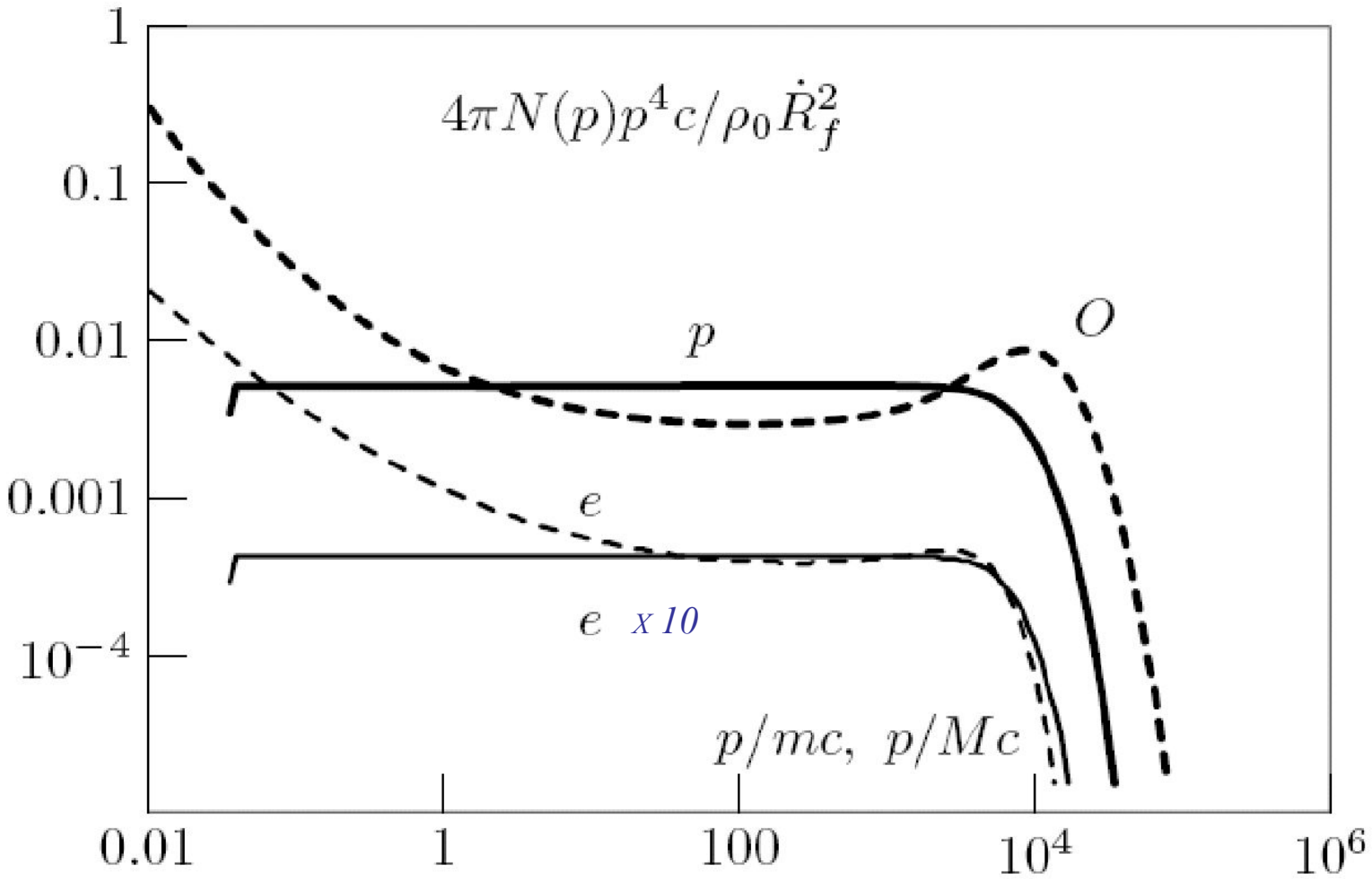
Зависимость физических параметров от радиуса



Внешняя ударная волна не модифицирована давлением КЛ. В противном случае поток гамма-излучения в 10 раз превысил бы наблюдаемый (Fermi LAT).

Наиболее вероятная причина – азимутальное магнитное поле звездного ветра, в котором внешняя ударная волна распространяется.

Спектры ускоренных частиц



Спектры электромагнитного излучения от Кассиопеи А

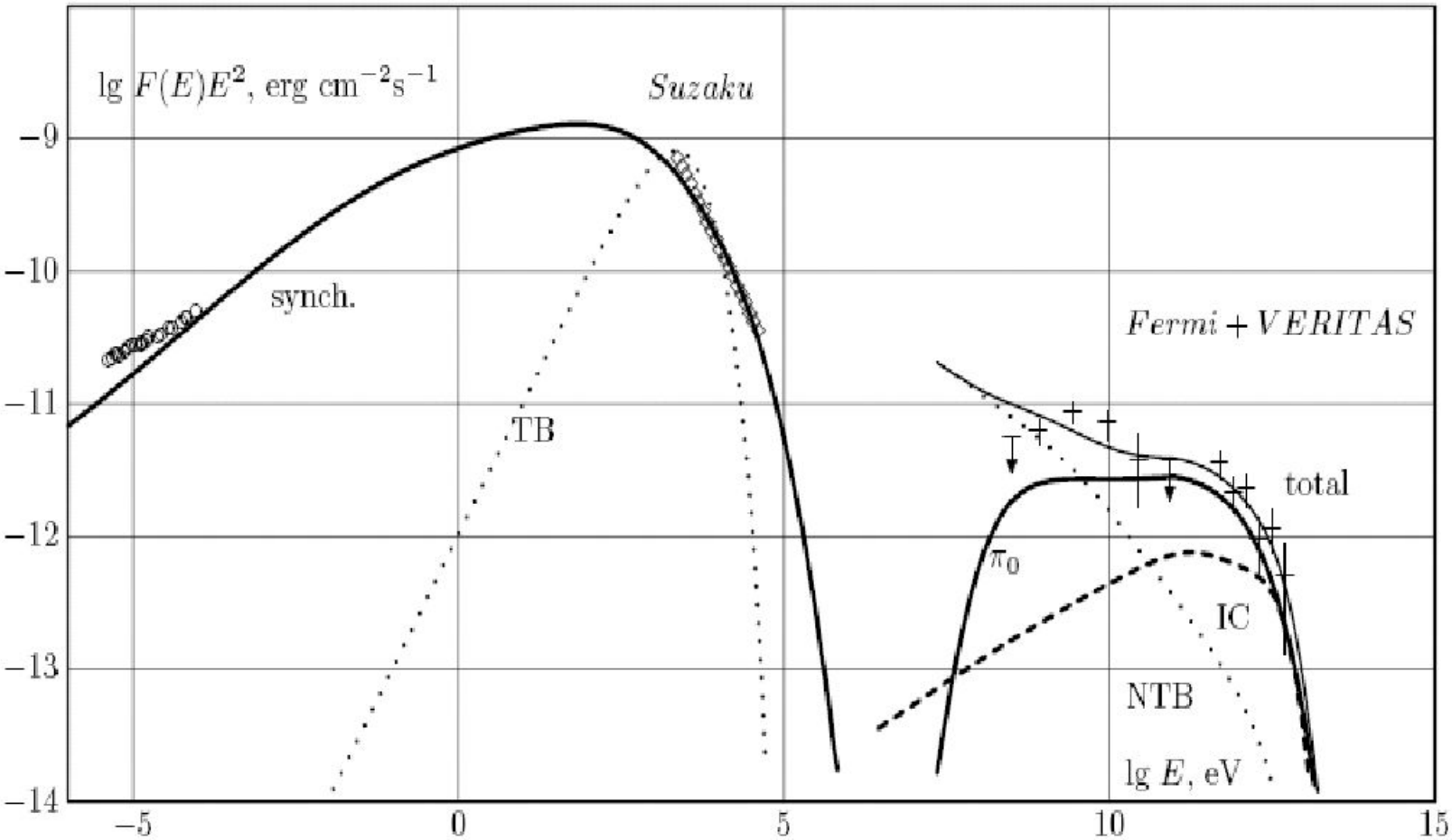


Fig. 5.— The results of modeling of of nonthermal radiation of Cas A. The following basic parameters are used: $t = 330$ yr, $D = 3.4$ kpc, $\dot{M} = 2.2 \cdot 10^{-5} M_\odot$ yr^{-1}, $E_{SN} = 1.7 \cdot 10^{51}$ erg, $M_{ej} = 2.2 M_\odot$, $M_A^f = M_A^b = 10$, $\xi_0 = 0.05$, the electron to nucleon ratios at the forward and reverse shocks $K_{en}^f = 0.008$ and $K_{en}^b = 0.15$. The calculations lead to the following values of the magnetic fields and the shock speeds at the present epoch: the magnetic field downstream of the forward and reverse shocks $B_f = 1100\ \mu$G and $B_b = 230\ \mu$G respectively, the speed of the forward shock $V_f = 5700$ km s^{-1}, the speed of the reverse shock $V_b = 3400$ km s^{-1}. The

Выводы

1. Положение обратной ударной волны в остатке сверхновой Cas A соответствует взрыву типа IIb с небольшой массой выброса 2.2 солнечных масс и энергией взрыва $1.7 \cdot 10^{51}$ эрг. Внешняя ударная волна движется по плотному звездному ветру предсверхновой (красный гигант) с массовым расходом $2.2 \cdot 10^{-5}$ солнечных масс в год.
2. Наблюдаемое рентгеновское, гамма и радио-излучение удовлетворительно объясняется в рассматриваемой модели с ускорением частиц на внешней и обратной ударной волне. Основная часть излучения производится на обратной ударной волне. Внешняя ударная волна доминирует только в радиодиапазоне и в жестком рентгене.
3. Внешняя ударная волна не модифицирована давлением КЛ. В результате максимальная энергия ускоренных протонов порядка 10 ТэВ в настоящий момент. Энергия «колена» - 100 ТэВ для Кассиопеи А.
4. Сверхновые типа IIb рассматриваются как наиболее перспективный кандитат для ускорения КЛ до энергий «колена» и выше. Однако внешняя ударная волна должна быть для этого модифицирована давлением КЛ. В остатке Кассиопея А это не так, что вероятно связано с азимутальным магнитным полем звездного ветра.
5. Возможно, что более перспективными для ускорения до высоких энергий являются сверхновые типа Ib. Быстрый ветер звезды Вольфа-Райе непосредственно перед взрывом сверхновой этого типа сметает звездный ветер красного гиганта и разрушает азимутальную геометрию магнитного поля. Несферический взрыв сверхновой типа IIb также вероятно приводит к ускорению до более высоких энергий.