

# Диффузия космических лучей в Галактике

Я.Н.Истомин

Физический институт им.

П.Н.Лебедева

Алмата, 2017

Случайное магнитное поле,  $\langle V \rangle = 0$ .

- Парная корреляционная функция  $\langle V(r)V(r+R) \rangle = \Phi(R)$ , корреляционная длина  $L$ .
- $V_0^2 = \langle V^2 \rangle$ ,  $\omega = eV_0/mc\gamma$ ,  $r_L = c/\omega$ ,  $b = V/V_0$
- Коэффициент диффузии,  $D = \langle rv \rangle$

- Уравнения движения частиц

$$\frac{dr_i}{dt} = v_i,$$

$$\frac{dv_i}{dt} = \omega_c e_{ikl} v_k b_l.$$

- Характерные масштабы – Ларморовский радиус  $r_L$  и неоднородность поля  $l$ .  $r_L = E/eV$
- $B = 10^{-5}$  G,  $E = 1$  GeV –  $r_L = 10^{12}$  cm
- $E = 10^{15}$  eV –  $r_L = 10^{18}$  cm.
- 1.  $r_L \ll l$ , движение вдоль магнитного поля + циклотронное вращение. Также дрейфовое движение – градиентный дрейф и центробежный дрейф.

- 2.  $r_L \gg l$ , почти прямолинейное движение со слабым отклонением в сторону, перпендикулярную направлению магнитного поля.
- 3.  $r_L$  порядка  $l$  – ничего не знаем, а именно здесь будет самый большой вклад в диффузионное движение. Нет малого параметра.

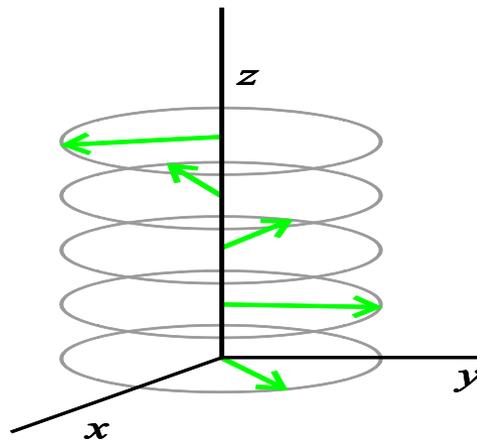
- Характерные размеры в Галактике – от
- $10^{12}$  см до  $100 \text{ pc} = 3 \cdot 10^{20}$  см и далее – размер Галактики  $30 \text{ kpc} = 10^{25}$  см и гало.
- Приближения:
- Магнитное поле –  $\mathbf{H} + \mathbf{V}$ ,  $\langle \mathbf{V} \rangle = 0$ ,  $|\mathbf{V}| \ll \mathbf{H}$ .
- Случайное поле раскладываем на плоские волны с частотой  $\Omega$  и волновым

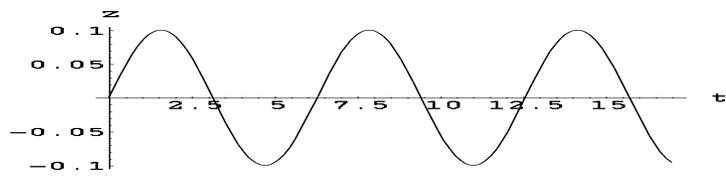
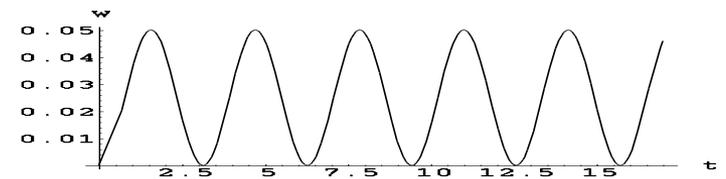
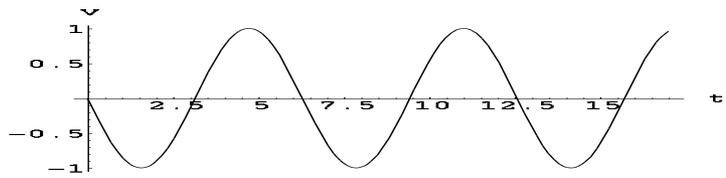
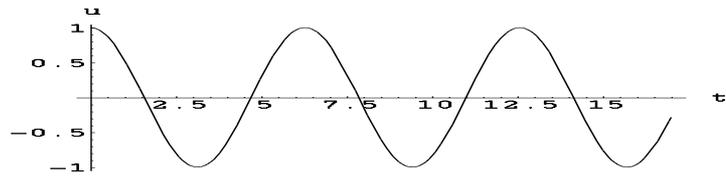
- вектором  $k$ . Резонансы
- $\Omega - k_{\parallel} v_{\parallel} = n\omega$ , Альфвеновские и магнитозвуковые волны -  $\Omega = kv_A$ ,  $v_A \ll c$
- $k = r_L^{-1}$
- $V^2(k) = k^{-\beta}$ ,  $\beta = 5/3$  – Колмогоровский спектр.
- $D \propto r_L^{1/3}$

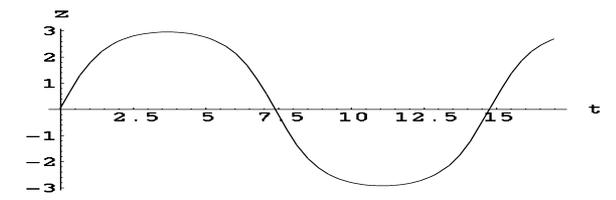
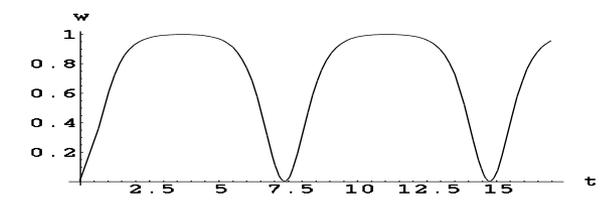
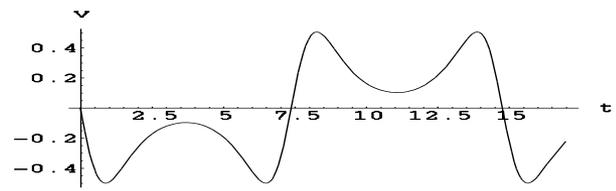
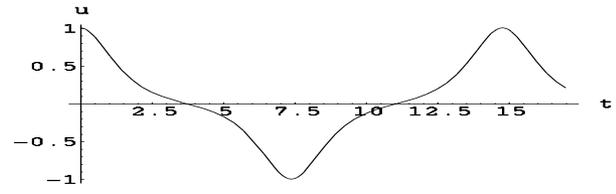
- $H=0$  – численные вычисления

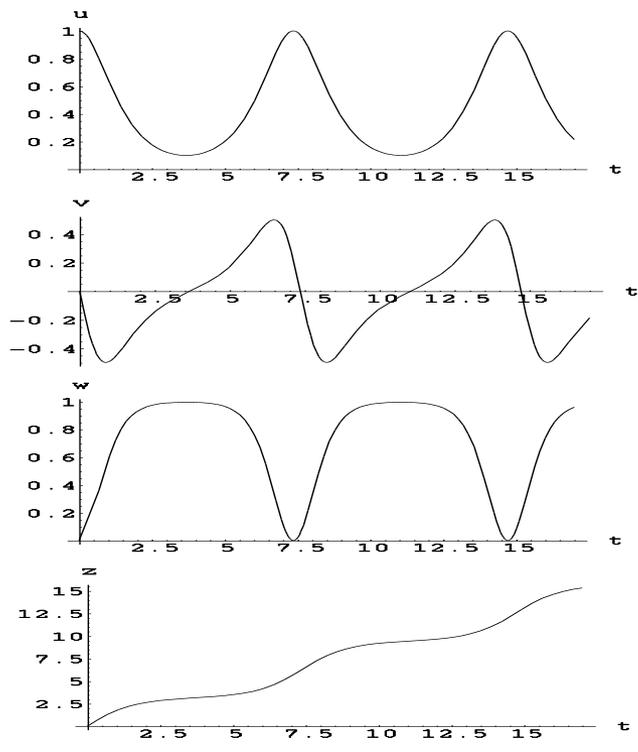
$$D = \frac{v_0^2}{2\omega_c} \langle \mathbf{r} \operatorname{curl} \mathbf{b} \rangle.$$

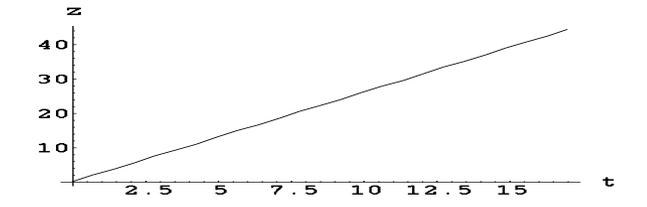
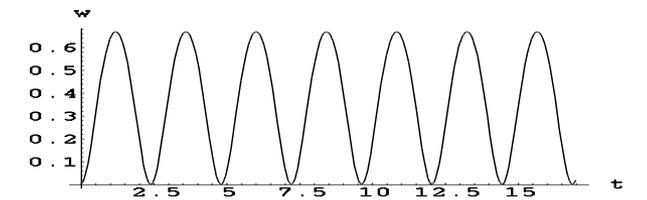
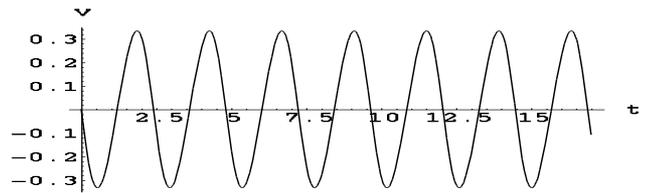
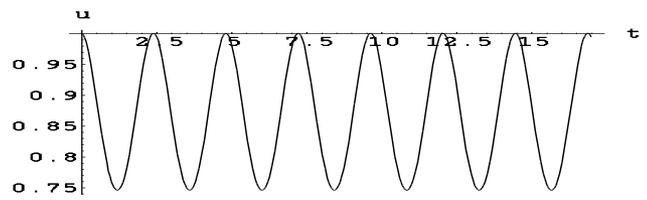
- Бессиловое магнитное поле
- $\text{curl } \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$
- $\alpha \approx \text{const}$ ,  $\mathbf{B}(r) = B_0(\sin \alpha z, \cos \alpha z, 0)$
- Параметр  $a = r_L \alpha$ ,  $l = 2\pi/\alpha$

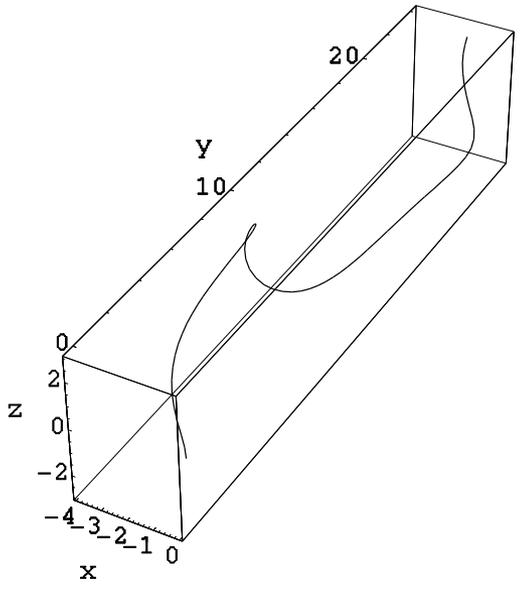




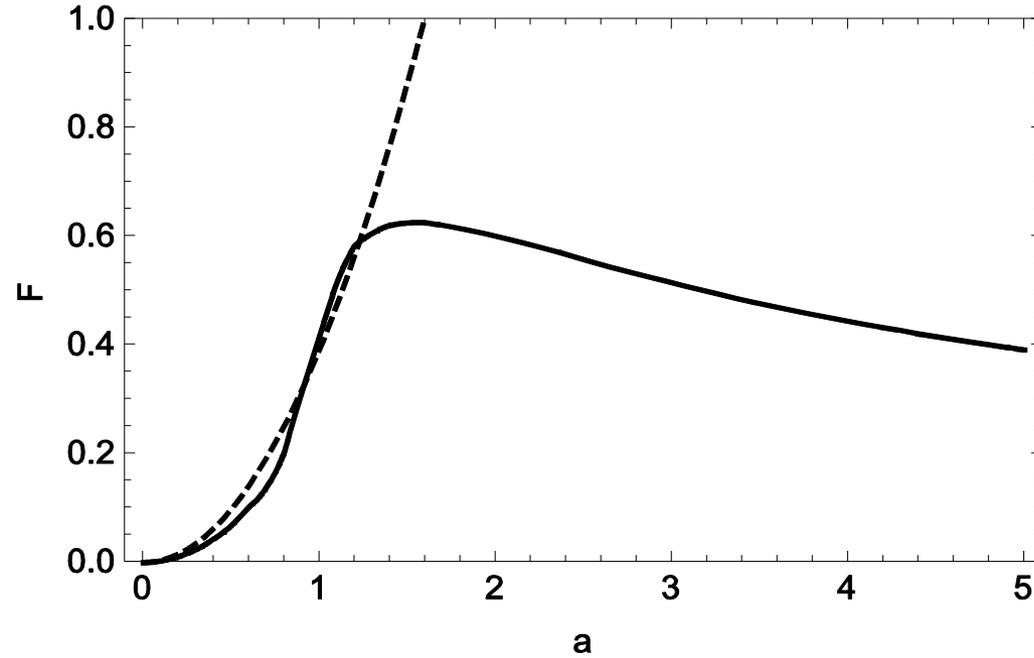




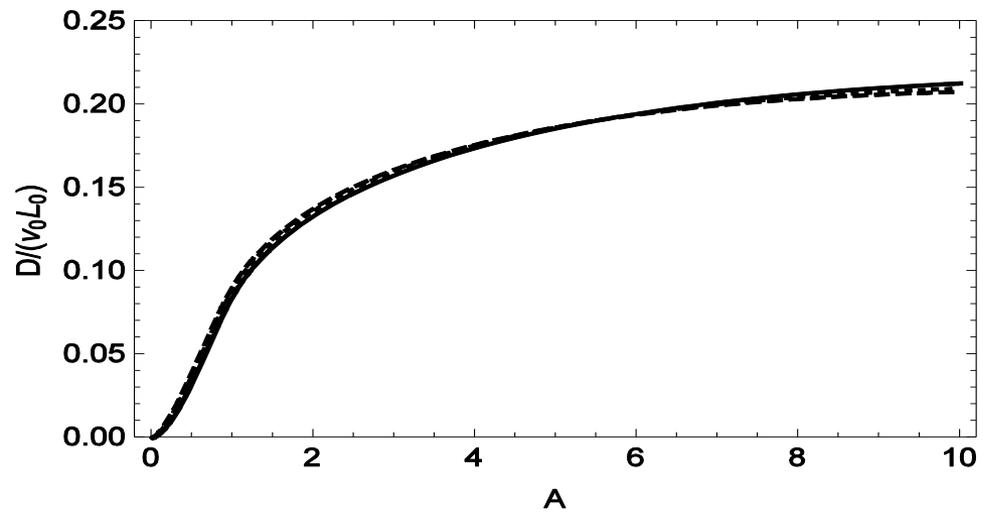




- $D = v r_L F(a)$ ,  $a = r_L \alpha$



- Спектр случайного магнитного поля
- $B_0(r) = B_{LS}(r/L)^\beta$
- $\beta = 1/3$  для Колмогоровской турбулентности
- Усреднение по спектру -  
 $A = 2\pi\nu/L\omega(B = B_{LS})$  – безразмерный параметр



- При  $A < 1$  ( $r_{LS} < L/2\pi$ )  $D = 0.1 vLA$ ,
- При  $A > 1$   $D = 0.1 vLA^2$
- $D = c^2 \tau$ ,  $\tau = \pi^2/2D_\phi$ ,  $D_\phi = \delta\varphi^2 v/L$ ,
- $\delta\varphi = L/r_L$

$$D_\phi = \frac{4\beta}{3(2\beta + 1)} \frac{v_0 L_0}{r_L^2}.$$

- Бомовская диффузия –  $D \propto r_L$

$$D_B = cT / (16eH) = v_T^2 / (16\omega_c)$$

- Теперь необходимо усреднить по крупномасштабным полям  $V_{LS}$  и размерам  $L$ .
- Распределение по магнитному полю выберем таким же, как и для мелкомасштабного
- $V_{LS} = V_m (L/L_m)^\beta$

- $dN=f(L)dL, f(L)=\sigma L_m^{-1}(L/L_m)^{(\sigma-1)}$

Усреднение по масштабам дает

- $D=vL_m(2\pi r_m/L_m)^\delta, \delta=(1-\sigma)/(1+\beta)$

- При  $\beta=1/3$   $\delta<0.75$ .

- Для почти плоского спектра по масштабам,

- $\sigma=1/15, \delta=0.7$

- Выводы
- 1. На примере бессилового магнитного поля прослежен непрерывный переход
- от циклотронного вращения к захваченному в ловушки, затем к пролетному и свободному движению частиц.
- 2. Коэффициент диффузии пропорционален Ларморовскому радиусу  $r_L$  при  $r_L < L$  и  $r_L^2$  при  $r_L > L$ .

- 3. Усреднение по крупномасштабному магнитному полю  $B_{LS}$  и масштабам  $L$  дает зависимость  $D \propto r_L^\delta$ ,  $\delta = (1 - \sigma)/(1 + \beta)$ ,
- Для  $\beta = 1/3$  and  $\sigma = 1/15$   $\delta = 0.7$
- 4. Наиболее вероятный спектр Галактических лучей в источнике является универсальный спектр,  $E^{-2}$ .