

Процессы с участием
фотонов в сильно
замагниченной
электрон-позитронной
плазме

Д.А. Румянцев, М.В. Чистяков
Ярославский гос. университет им. П.Г. Демидова, Ярославль

29 ноября 2007

D. A. Romyantsev, M. V. Chistyakov, JETP 101 (2005) 635
D. A. Romyantsev, M. V. Chistyakov, hep-ph/0609192

Содержание

Введение

- I. Дисперсионные свойства фотонов в сильно замагниченной плазме
- II. Процесс переноса излучения в сильно замагниченной плазме

Заключение

Введение

Критическое значение магнитного поля

$$B_e = \frac{m_e^2}{e} \simeq 4.41 \cdot 10^{13} \text{ Гс}, \quad c = \hbar = k = 1.$$

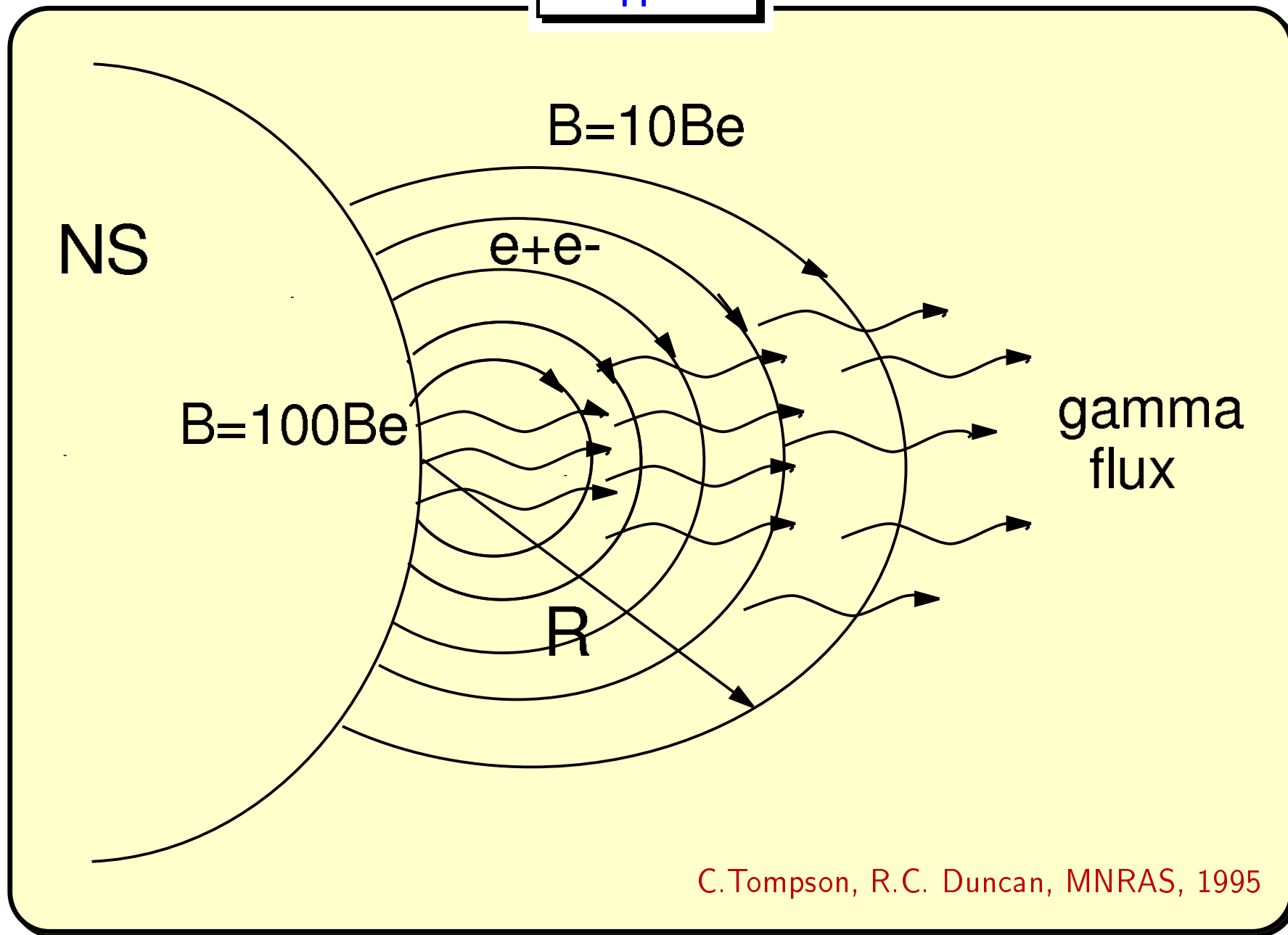
Магнитары: SGR, АХР.

$$B \sim 10^{14} \div 10^{15} \text{ Гс.}$$

Сильно замагниченная плазма:

$$\sqrt{eB} \gg m_e, T, \mu$$

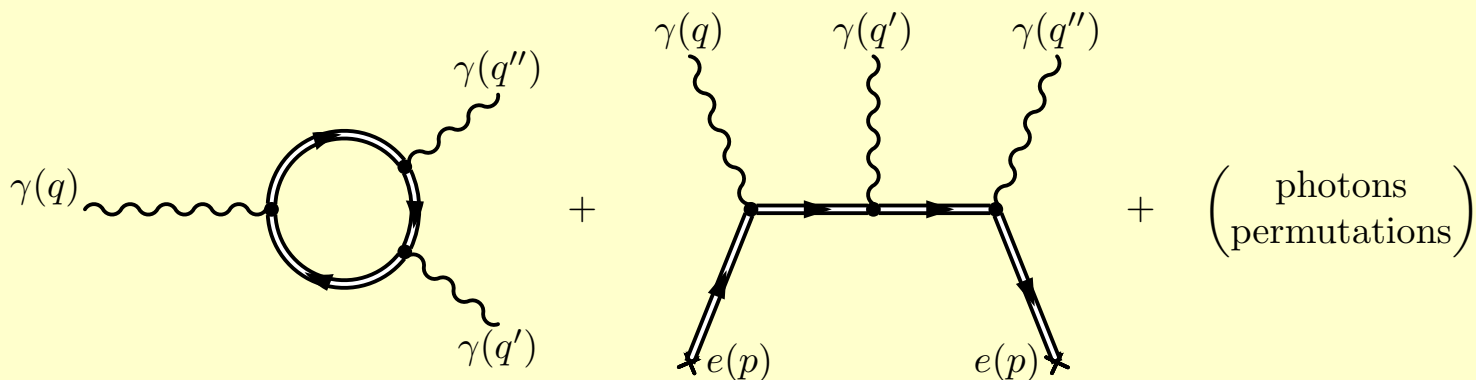
Введение



C.Tompson, R.C. Duncan, MNRAS, 1995

Основные процессы

- Расщепление и слияние фотона



- Комптоновское рассеяние

Продемонстрировать, что последовательный и самосогласованный учет влияния сильного магнитного поля и плотной плазмы необходим для корректного описания переноса излучения.

Дисперсионные свойства фотонов в замагниченной плазме

Определяются собственными векторами и собственными значениями поляризационного оператора:

$$\mathcal{P}_{\mu\nu}\varepsilon_\nu^{(\lambda)} = \mathcal{P}^{(\lambda)}\varepsilon_\mu^{(\lambda)}.$$

Уравнение дисперсии

$$q^2 - \mathcal{P}^\lambda = 0.$$

Перенормировка

$$\varepsilon_\mu^{(\lambda)} \rightarrow \varepsilon_\mu^{(\lambda)} \sqrt{Z_2}, \quad Z_\lambda^{-1} = 1 - \frac{\partial \mathcal{P}^{(\lambda)}(q)}{\partial \omega^2}.$$

Дисперсионные свойства фотонов...

Векторы поляризации в случае $\mu = 0$

$$\varepsilon_{\mu}^{(1)} = \frac{(\varphi q)_{\mu}}{\sqrt{q_{\perp}^2}}, \quad \varepsilon_{\mu}^{(2)} = \frac{(\tilde{\varphi} q)_{\mu}}{\sqrt{q_{\parallel}^2}}, \quad \varepsilon_{\mu}^{(3)} = \frac{q_{\parallel}^2(\Lambda q)_{\mu} - q_{\perp}^2(\tilde{\Lambda} q)_{\mu}}{\sqrt{-q^2 q_{\parallel}^2 q_{\perp}^2}}$$

$\varepsilon_{\mu}^{(3)}$ - не физическая мода!

Векторы поляризации в случае $\mu \neq 0$

$$\varepsilon_{\mu}^{(1)}(q) \simeq d_1 \varepsilon_{\mu}^{(1)} + id_2 \varepsilon_{\mu}^{(3)}, \quad \varepsilon_{\mu}^{(3)}(q) \simeq d_3 \varepsilon_{\mu}^{(1)} + id_4 \varepsilon_{\mu}^{(3)},$$

$$\varepsilon_{\mu}^{(2)}(q) \simeq \frac{(\tilde{\varphi} q)_{\mu}}{\sqrt{q_{\parallel}^2}}.$$

$$\varphi_{\alpha\beta} = F_{\alpha\beta}/B, \quad \tilde{\varphi}_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\varepsilon_{\alpha\beta\mu\nu}\varphi_{\mu\nu}, \quad (a\varphi b) = a_{\alpha}\varphi_{\alpha\beta}b_{\beta}, \quad (ab)_{\parallel} = (a\tilde{\Lambda}b) = (a\tilde{\varphi}\tilde{\varphi}b), \\ (ab)_{\perp} = (a\Lambda b) = (a\varphi\varphi b).$$

Дисперсионные свойства фотонов...

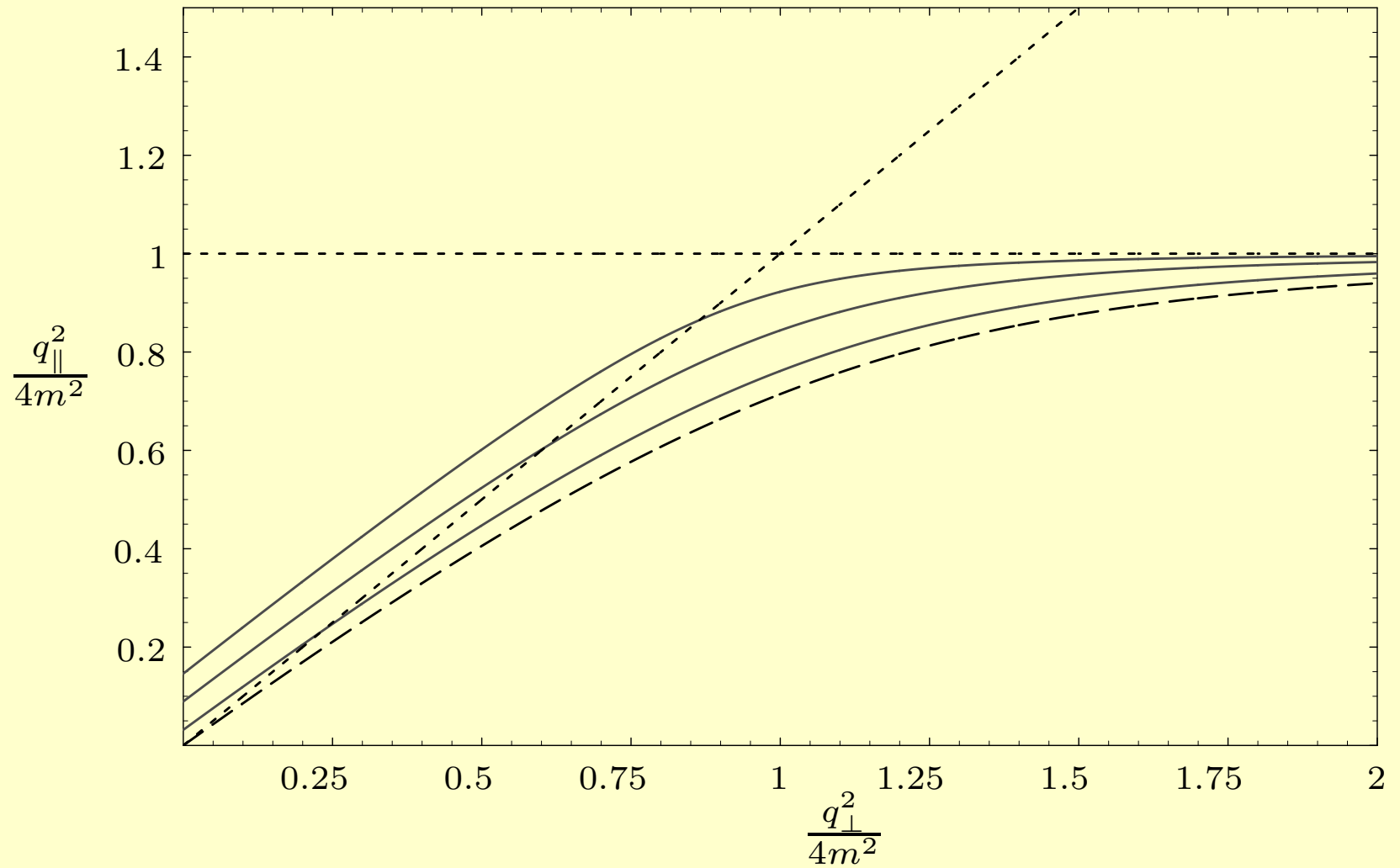


Рис. 1: $B = 200B_e$, $T = 0.25; 0.5; 1MeV$, $\theta = \pi/2$

Дисперсионные свойства фотонов...

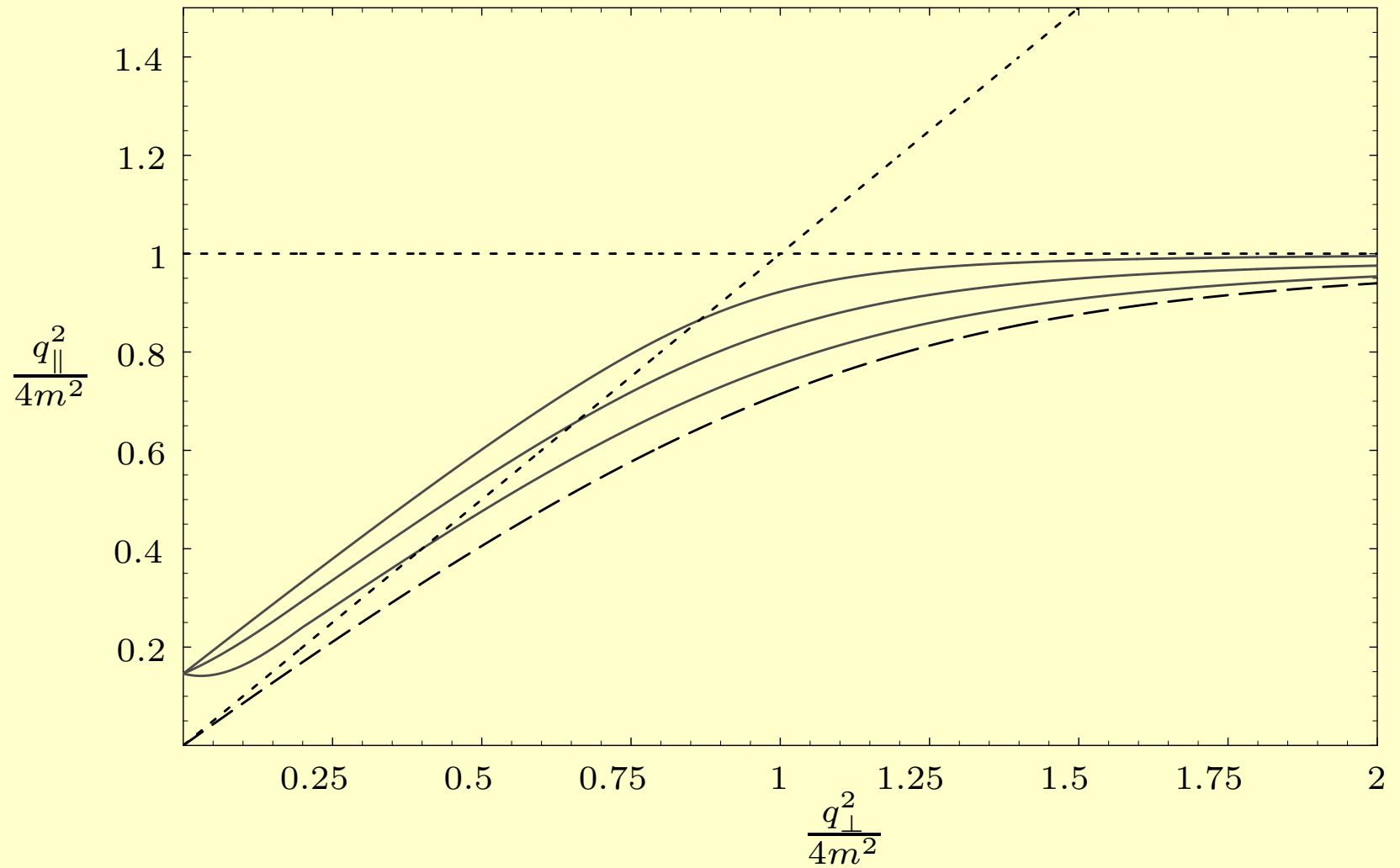


Рис. 2: $B = 200B_e$, $T = 1MeV$, $\theta = \pi/12; \pi/6; \pi/2$

Дисперсионные свойства фотонов...

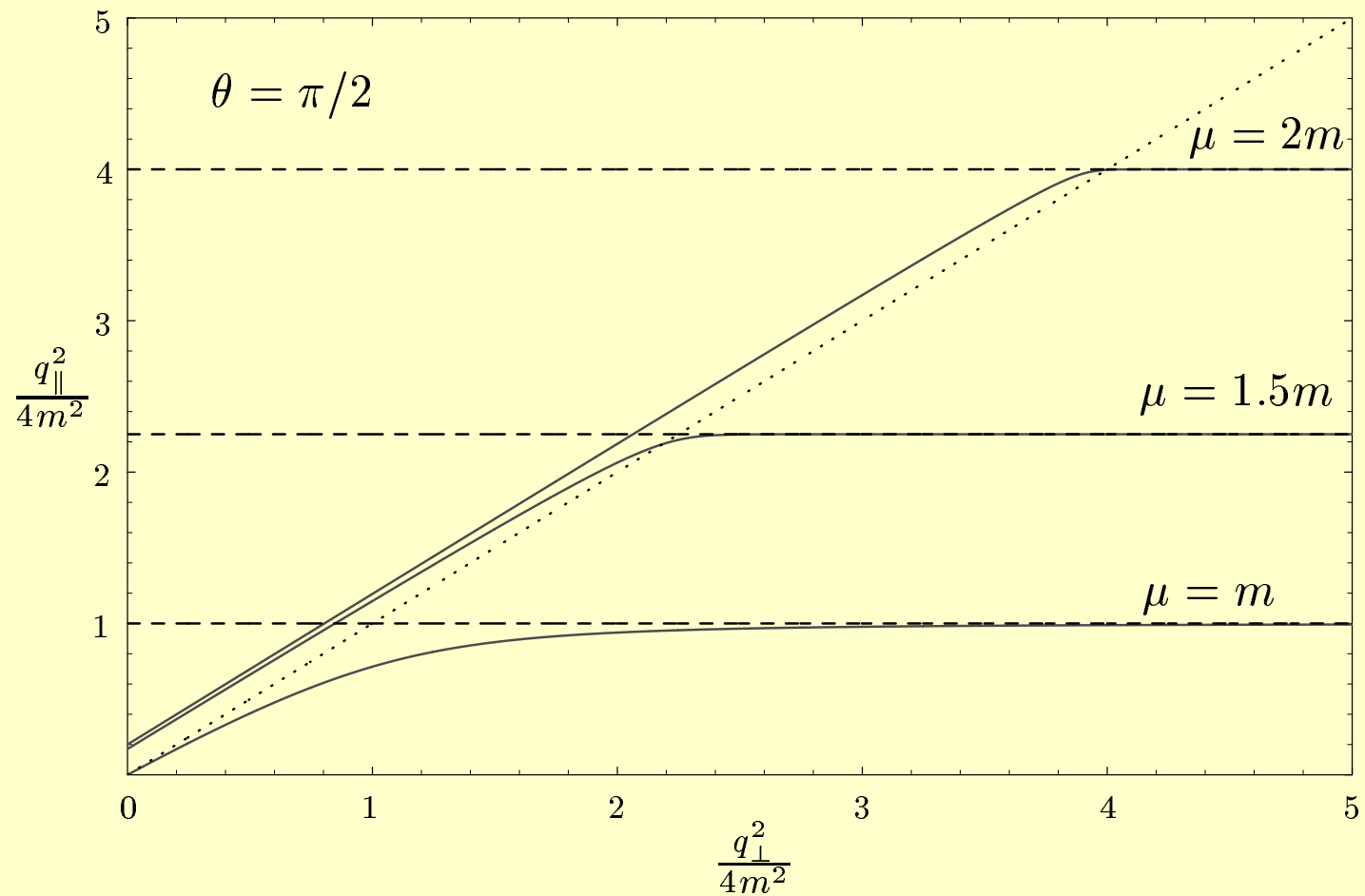


Рис. 3: $B = 200B_e$

Возможные каналы

- мода 1 (необыкновенный фотон)

$$\gamma_1 e^\pm \rightarrow \gamma_1 e^\pm, \gamma_1 e^\pm \rightarrow \gamma_2 e^\pm, \gamma_1 \rightarrow \gamma_1 \gamma_2, \gamma_1 \rightarrow \gamma_2 \gamma_2, \\ \gamma_1 \gamma_2 \rightarrow \gamma_1, \gamma_1 \gamma_1 \rightarrow \gamma_2;$$

- мода 2 (обыкновенный фотон)

$$\gamma_2 e^\pm \rightarrow \gamma_2 e^\pm, \gamma_2 e^\pm \rightarrow \gamma_1 e^\pm, \gamma_2 \rightarrow \gamma_1 \gamma_1, \gamma_2 \gamma_2 \rightarrow \gamma_1, \\ \gamma_2 \gamma_1 \rightarrow \gamma_1.$$

Уравнения переноса излучения

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 D_1 \frac{dn_1}{dr} \right) + K_1(\bar{n} - n_1) + S_{12}(n_2 - n_1) = 0,$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 D_2 \frac{dn_2}{dr} \right) + K_2(\bar{n} - n_2) + S_{21}(n_1 - n_2) = 0,$$

$$\bar{n} = \frac{\omega^3}{2\pi^2} f_\omega, \quad f_\omega = [\exp(\omega/T) - 1]^{-1}$$

Уравнения переноса...

Коэффициенты диффузии, поглощения, рассеяния

$$D_\lambda = \int \frac{d\Omega}{4\pi} \ell_\lambda(\theta, r) \cos^2 \theta,$$

$$K_\lambda = \int \frac{d\Omega}{4\pi} [W_{\lambda \rightarrow \lambda' \lambda''}(\theta, r) + W_{\lambda \lambda' \rightarrow \lambda''}(\theta, r)],$$

$$S_{\lambda \lambda'} = \int \frac{d\Omega}{4\pi} W_{\lambda \rightarrow \lambda'}(\theta, r),$$

$$\ell_\lambda = \left[\sum_{\lambda'=1}^2 W_{\lambda \rightarrow \lambda'} + \sum_{\lambda', \lambda''=1}^2 (W_{\lambda \rightarrow \lambda' \lambda''} + W_{\lambda \lambda' \rightarrow \lambda''}) \right]^{-1}$$

Уравнения переноса...

- рассеяние фотона

$$W_{\lambda \rightarrow \lambda'} = \frac{eB}{16(2\pi)^4 \omega_\lambda} \int |\mathcal{M}_{\lambda \rightarrow \lambda'}|^2 Z_\lambda Z_{\lambda'} \times \\ \times f_E (1 - f_{E'}) (1 + f_{\omega'}) \delta(\omega_\lambda(\mathbf{k}) + E - \omega_{\lambda'}(\mathbf{k}') - E') \frac{dp_z d^3 k'}{E E' \omega_{\lambda'}};$$

- расщепление фотона

$$W_{\lambda \rightarrow \lambda' \lambda''} = \frac{1 - (1/2)\delta_{\lambda' \lambda''}}{32\pi^2 \omega} \int |\mathcal{M}_{\lambda \lambda' \lambda''}|^2 Z_\lambda Z_{\lambda'} Z_{\lambda''} \times \\ \times (1 + f_{\omega'}) (1 + f_{\omega''}) \delta(\omega_\lambda(\mathbf{k}) - \omega_{\lambda'}(\mathbf{k} - \mathbf{k}'') - \omega_{\lambda''}(\mathbf{k}'')) \frac{d^3 k''}{\omega_{\lambda'} \omega_{\lambda''}},$$

- слияние фотонов

$$W_{\lambda \lambda' \rightarrow \lambda''} = \frac{1}{32\pi^2 \omega} \int |\mathcal{M}_{\lambda \lambda' \lambda''}|^2 Z_\lambda Z_{\lambda'} Z_{\lambda''} \times \\ \times f_{\omega'} (1 + f_{\omega''}) \delta(\omega_\lambda(\mathbf{k}) + \omega_{\lambda'}(\mathbf{k}') - \omega_{\lambda''}(\mathbf{k} + \mathbf{k}')) \frac{d^3 k'}{\omega_{\lambda'} \omega_{\lambda''}}.$$

Коэффициент диффузии ...

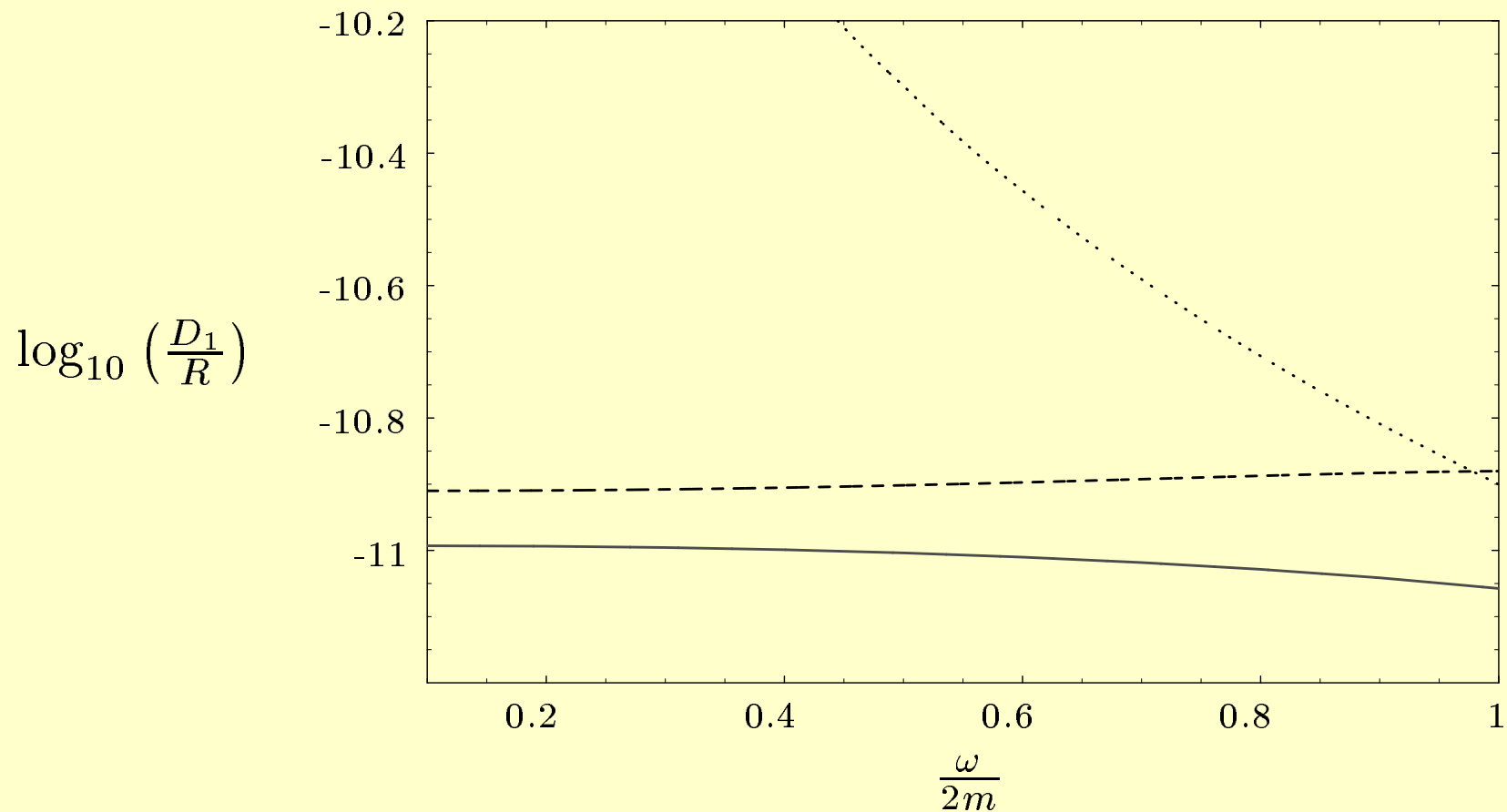


Рис. 4: $B = 100B_e; 60B_e$, $T = 1MeV; 0.5MeV$

Коэффициент диффузии ...

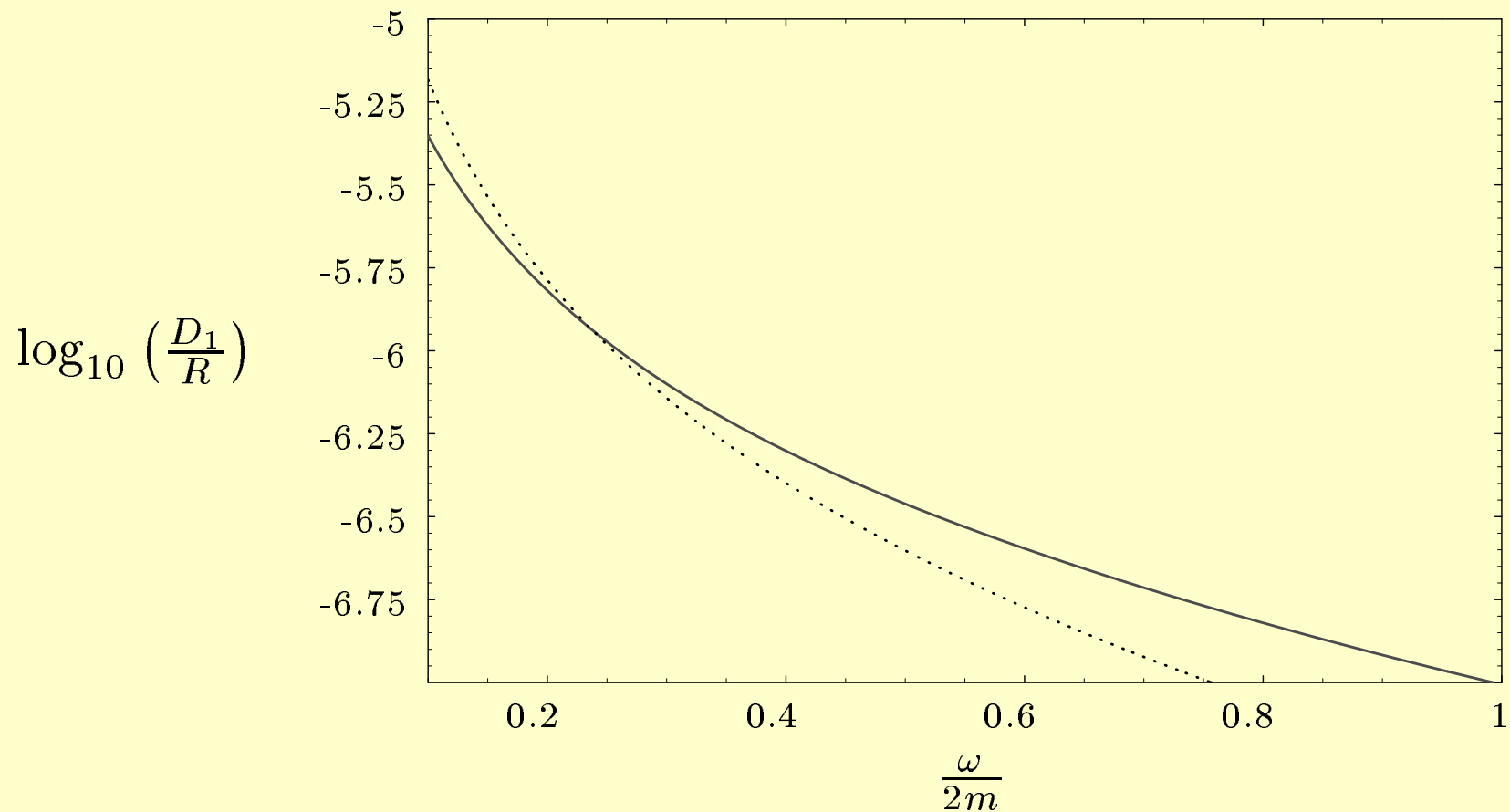


Рис. 5: $B = 10B_e$, $T = 0.05MeV$

Коэффициент диффузии ...

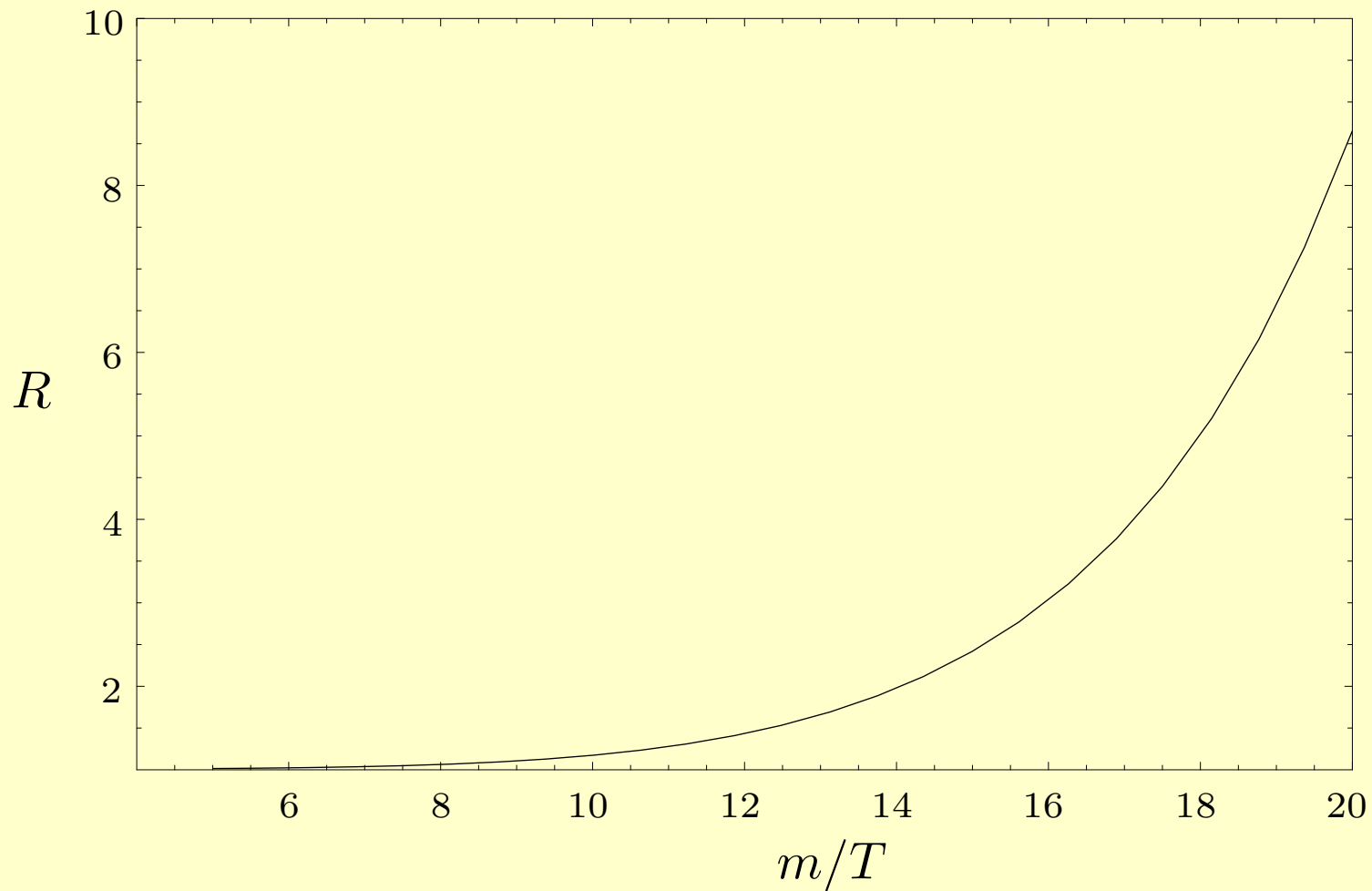


Рис. 6: $B = 200B_e$, $R = D_1^0/D_1^{splitting}$

Коэффициент рассеяния ...

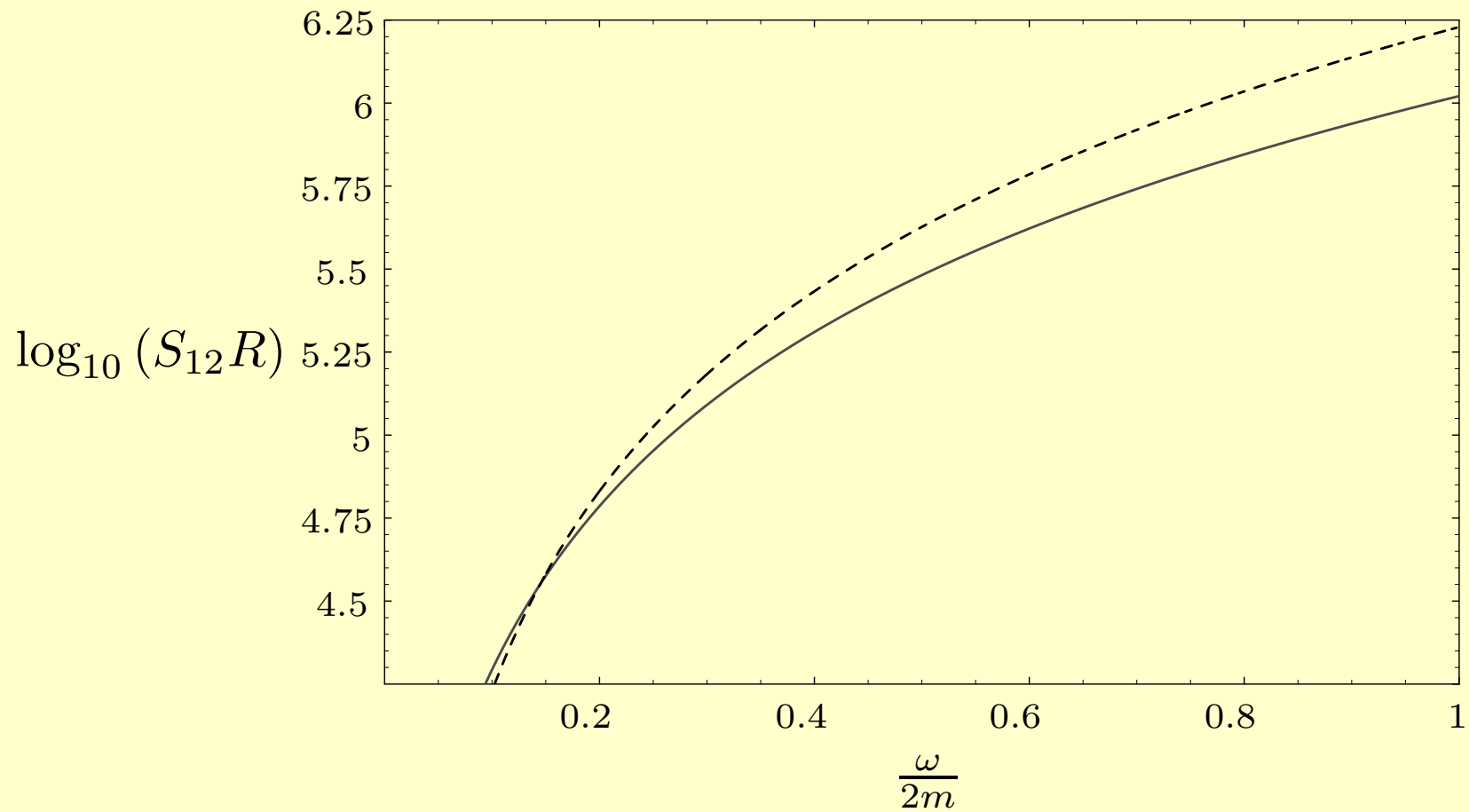


Рис. 7: $B = 10B_e$, $T = 0.05MeV$

Коэффициент диффузии ...

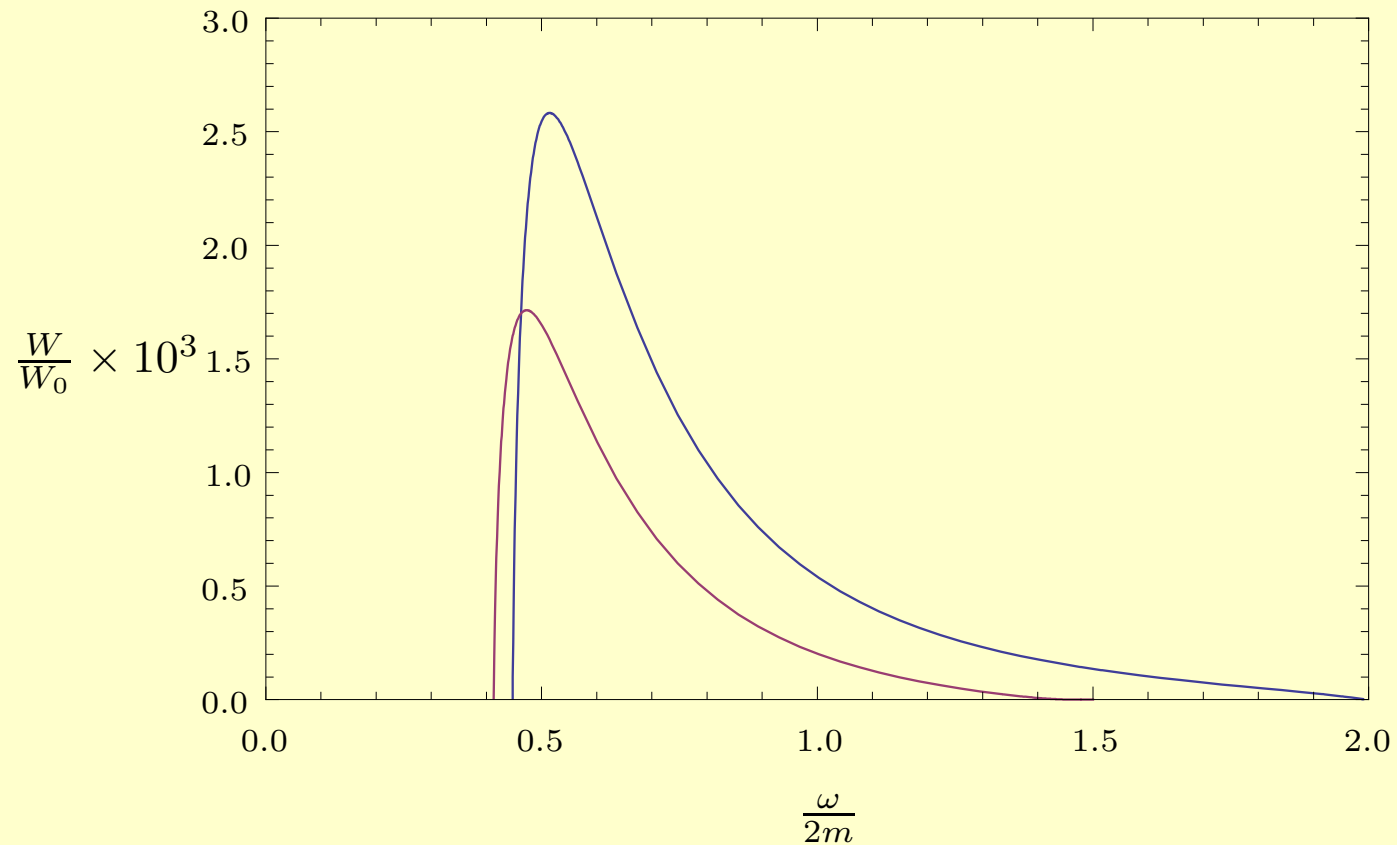


Рис. 8: $\gamma_2 \rightarrow \gamma_1\gamma_1$, $B = 200B_e$, $\mu = 1.5m; 2m$, $W_0 = (\alpha/\pi)^3 m \simeq 3.25 \cdot 10^2 \text{cm}^{-1}$.

Коэффициент диффузии ...

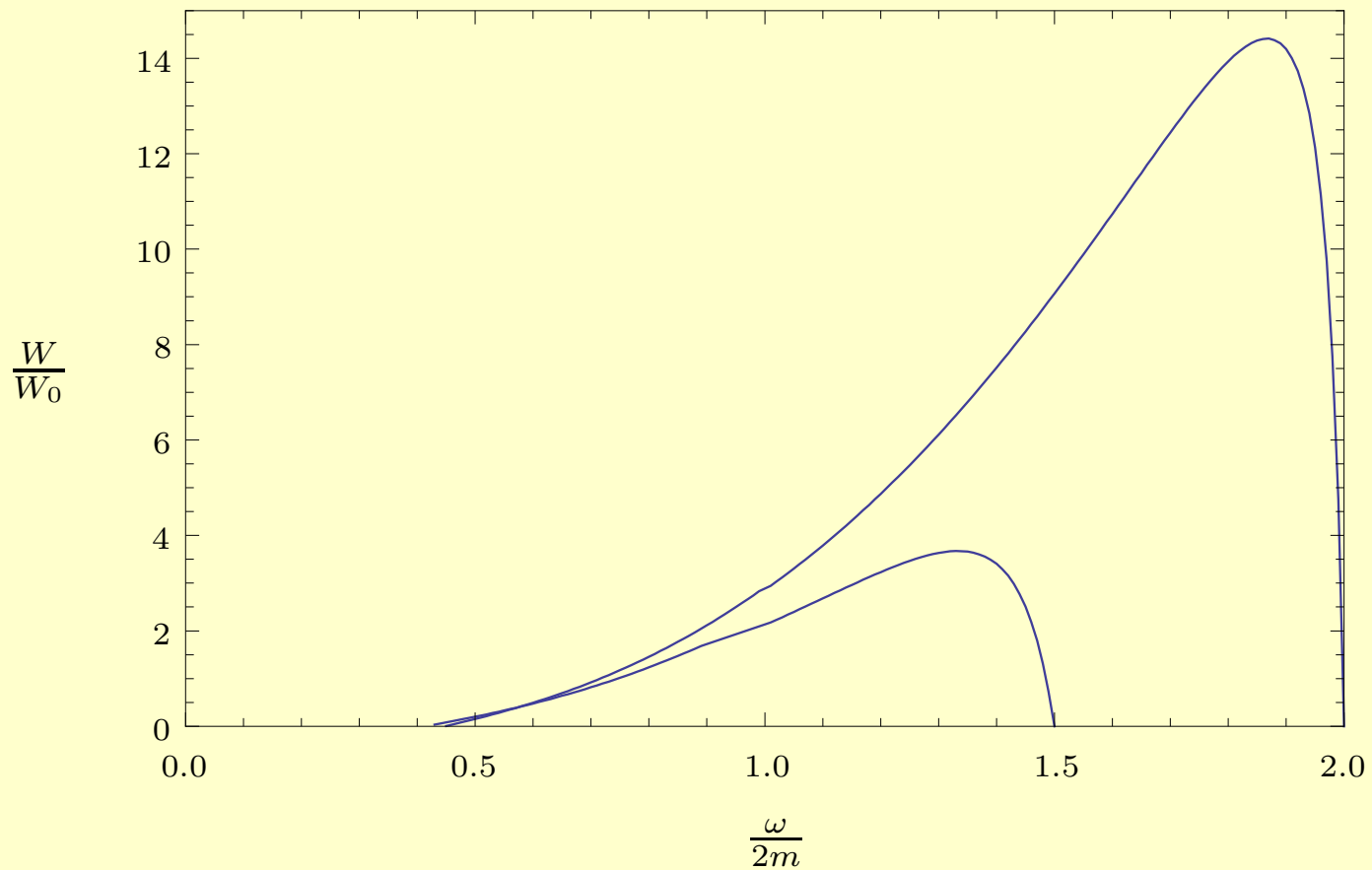


Рис. 9: $\gamma_2 e^\pm \rightarrow \gamma_1 e^\pm$, $B = 200 B_e$, $\mu = 1.5m; 2m$, $W_0 = (\alpha/\pi)^3 m \simeq 3.25 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-1}$.

Заключение

- Дисперсионные свойства фотона и радиационные поправки в сильно замагниченной плазме существенно влияют на процесс переноса излучения
- В зарядово симметричной плазме ($\mu = 0$) необходимо учитывать процессы расщепления и слияния фотонов
- В сильно вырожденной плазме влияние процессов расщепления и слияния фотонов не существенно