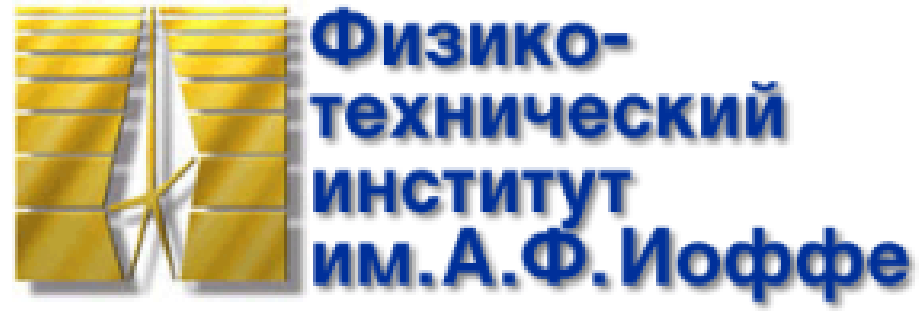


# Поглощение фотонов от далеких источников тормозным излучением горячего газа в скоплениях галактик



А. Н. Попов<sup>1,\*</sup>, Д. П. Барсуков<sup>1</sup>, А. В. Иванчик<sup>1</sup>, С. В. Бобашев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

\* alexander.popov@mail.ioffe.com

## Аннотация

В работе рассматривается поглощение высокоэнергичных фотонов при взаимодействии с фотонами теплового тормозного излучения в скоплениях галактик с образованием электрон-позитронных пар и его возможное влияние на искажение спектра далеких источников в гамма-диапазоне. Показано, что величина этого эффекта заметно меньше эффектов поглощения гамма-фотонов при взаимодействии с фотонами реликтового излучения и фотонами внегалактического фона инфракрасного и радио- диапазонов. Тем не менее было найдено, что данный эффект может проявляться для гамма-фотонов с энергиями  $0.1 \div 100$  ГэВ.

## Поглощение гамма-квантов

Сечение реакции взаимодействия фотонов с рождением  $e^- - e^+$  пары:

$$\sigma = \pi r_e^2 \frac{1 - \beta^2}{2} \left[ (3 - \beta^4) \ln \left( \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \right) - 2\beta(2 - \beta^2) \right] \cdot H(s - 1), \quad s = \frac{\epsilon E}{2m^2 c^4} \cdot (1 - \cos \theta), \quad \beta = \sqrt{1 - \frac{1}{s^2}} \quad (1)$$

где  $r_e = \frac{e^2}{m c^2}$  – классический радиус электрона,  $\beta = \frac{v}{c}$  – скорость электрона и позитрона в системе центра масс, отнесенная к скорости света,  $H(x)$  – функция Хевисайда.

Для плазмы, имеющей максвелловское распределение электронов по скоростям с температурой  $T_e$  излучательную способность вещества  $\epsilon_\nu$  можно записать в виде [1]:

$$\epsilon_\nu = \frac{8}{3} \left( \frac{2\pi}{3} \right)^{1/2} \frac{e^6}{m^2 c^3} \left( \frac{m}{k T_e} \right)^{1/2} N_i N_e g(\nu, T_e) e^{-\frac{h\nu}{k T_e}} \quad (2)$$

где  $\nu$  – частота фотона тормозного излучения,  $\epsilon = h\nu$ ,  $N_e$  и  $N_i$  – концентрации электронов и ионов,  $T_e$  – электронная температура,  $g(\epsilon, T_e)$  – фактор Гаунта, который мы будем считать равным [2]:

$$g(\nu, T_e) = \frac{\sqrt{3}}{\pi} K_0(h\nu/2kT_e) e^{h\nu/2kT_e} \quad (3)$$

## Геометрия

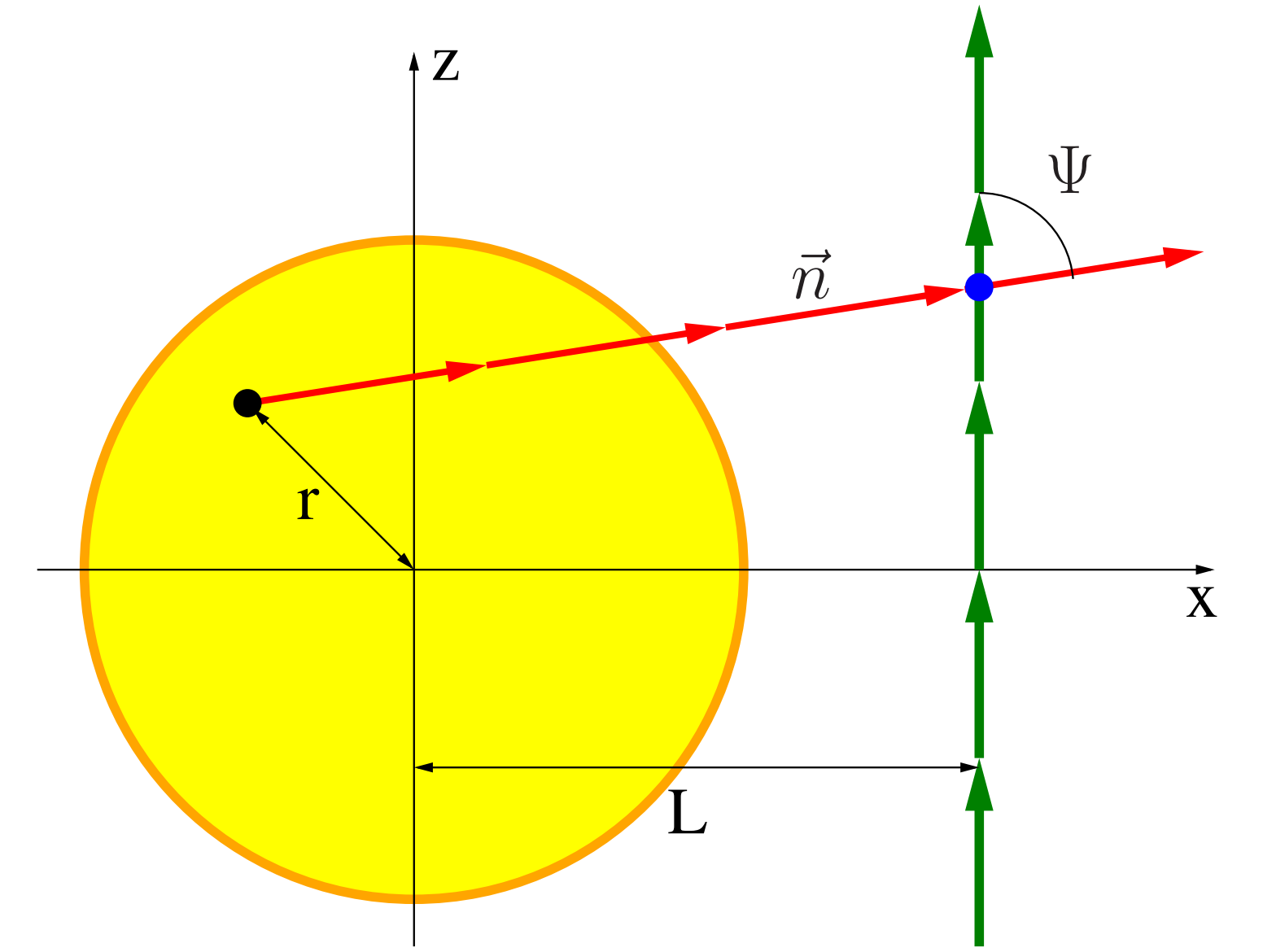


Рис. 1. Схема рассматриваемой геометрии. Газ в скоплении изображен желтым кругом, траектория гамма-кванта – зеленой прямой.

## Результаты

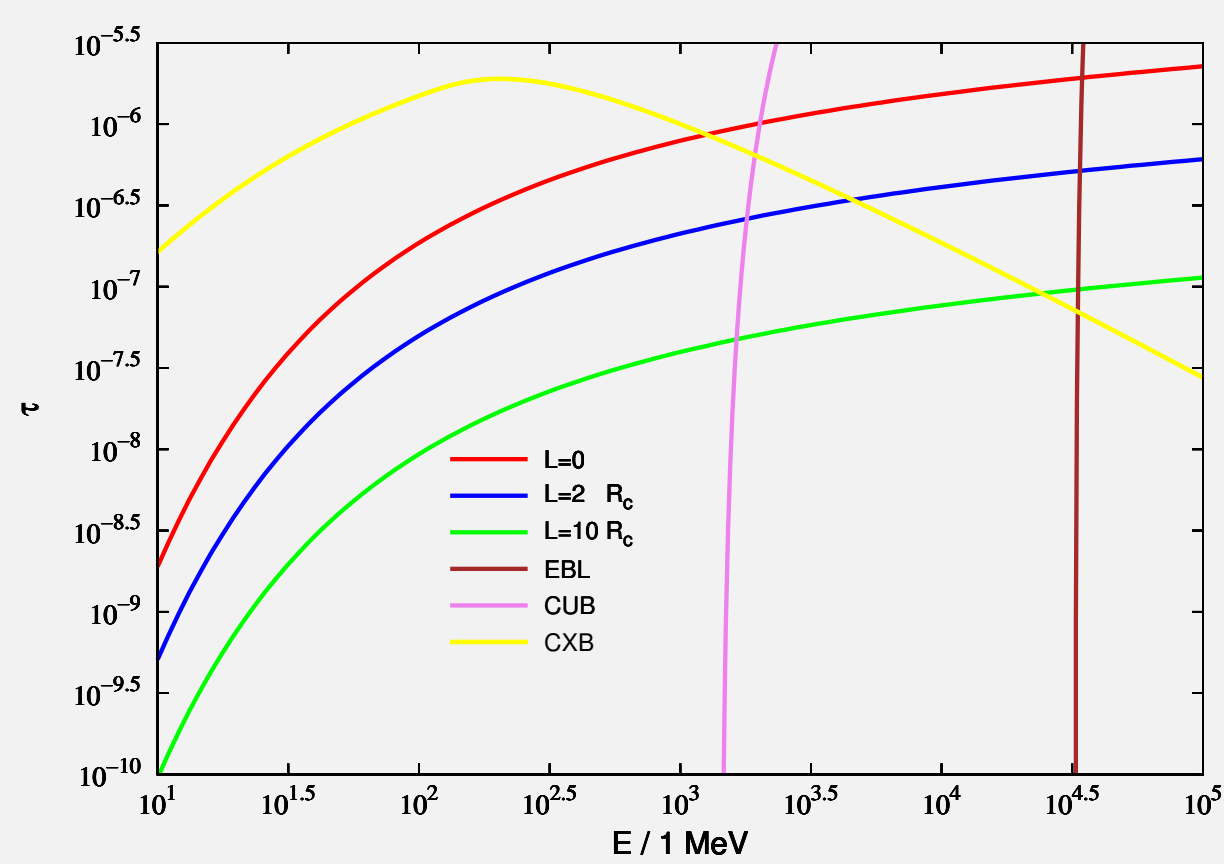


Рис. 2. Зависимость оптической толщины  $\tau$  от энергии гамма-кванта для скопления Bullet.

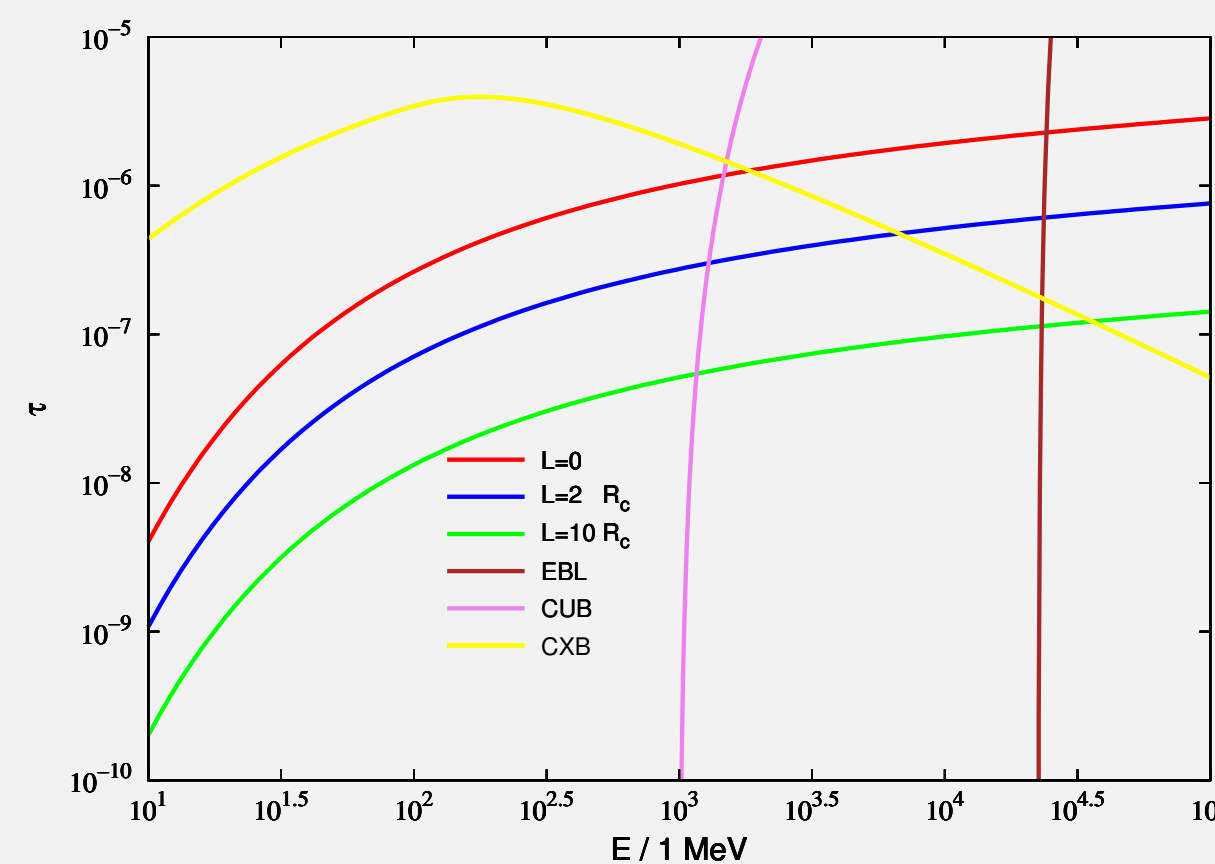


Рис. 3. То же, что на рис. 2 для скопления El Cordo.

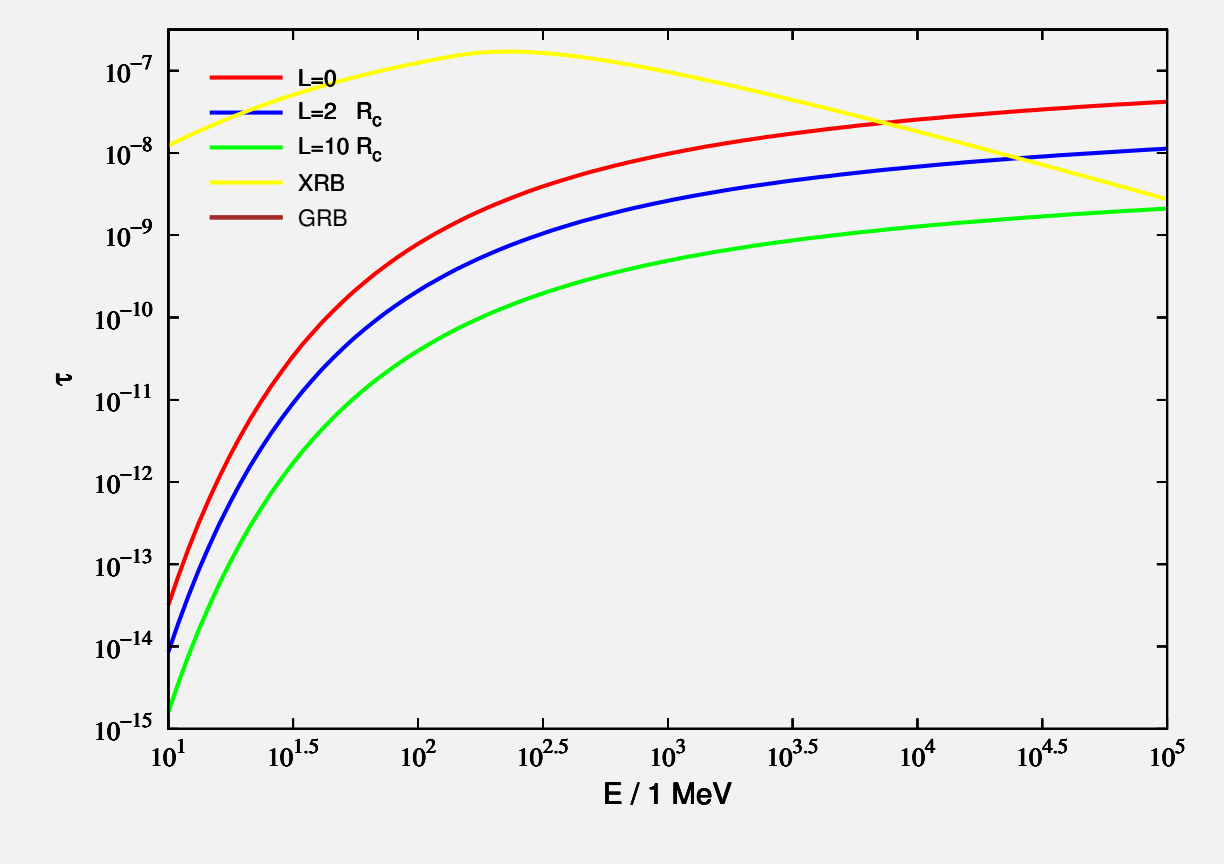


Рис. 4. То же, что на рис. 2 для скопления Leo.

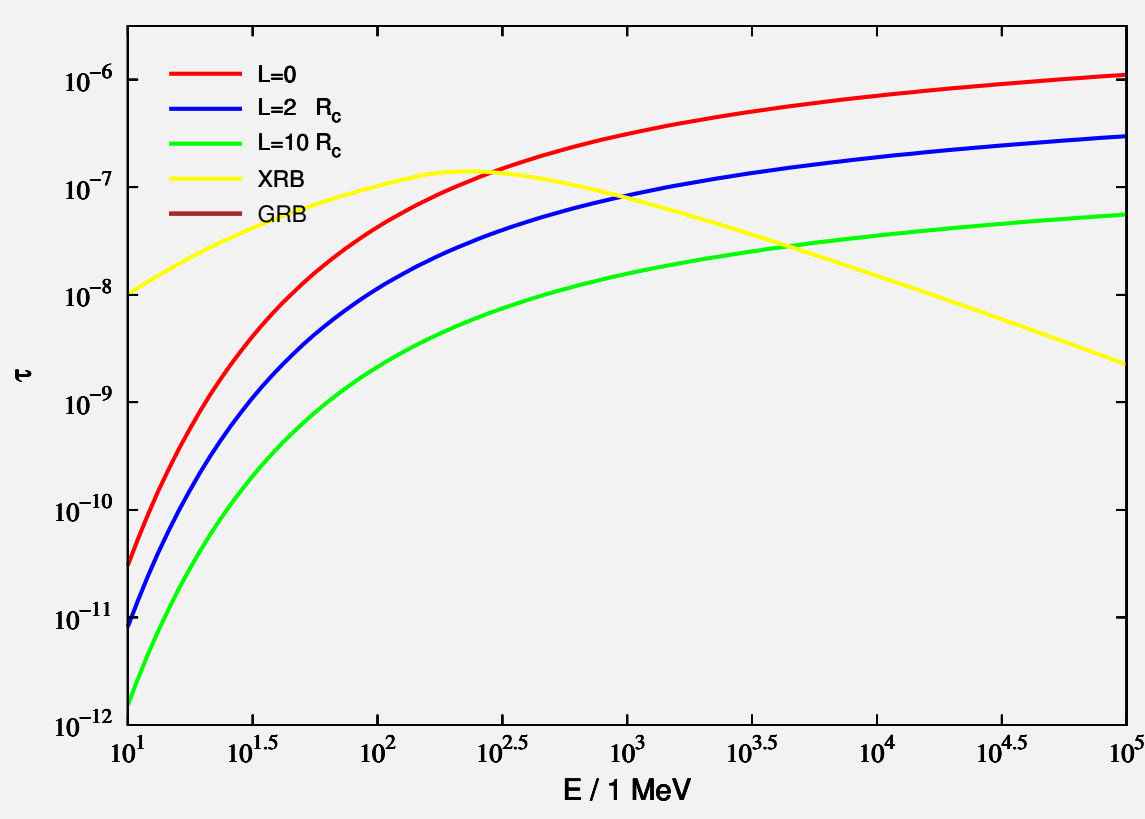


Рис. 5. То же, что на рис. 2 для скопления Perseus.

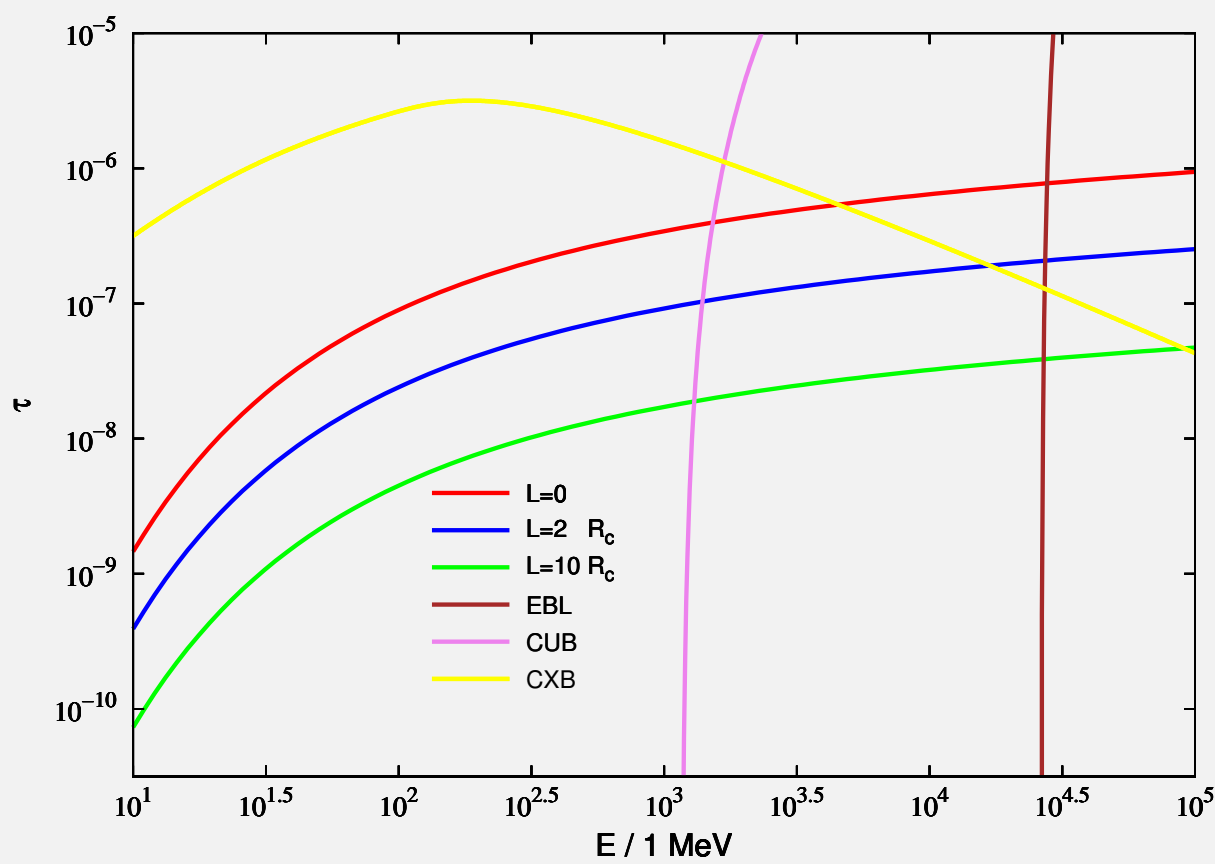


Рис. 6. То же, что на рис. 2 для скопления Phoenix.

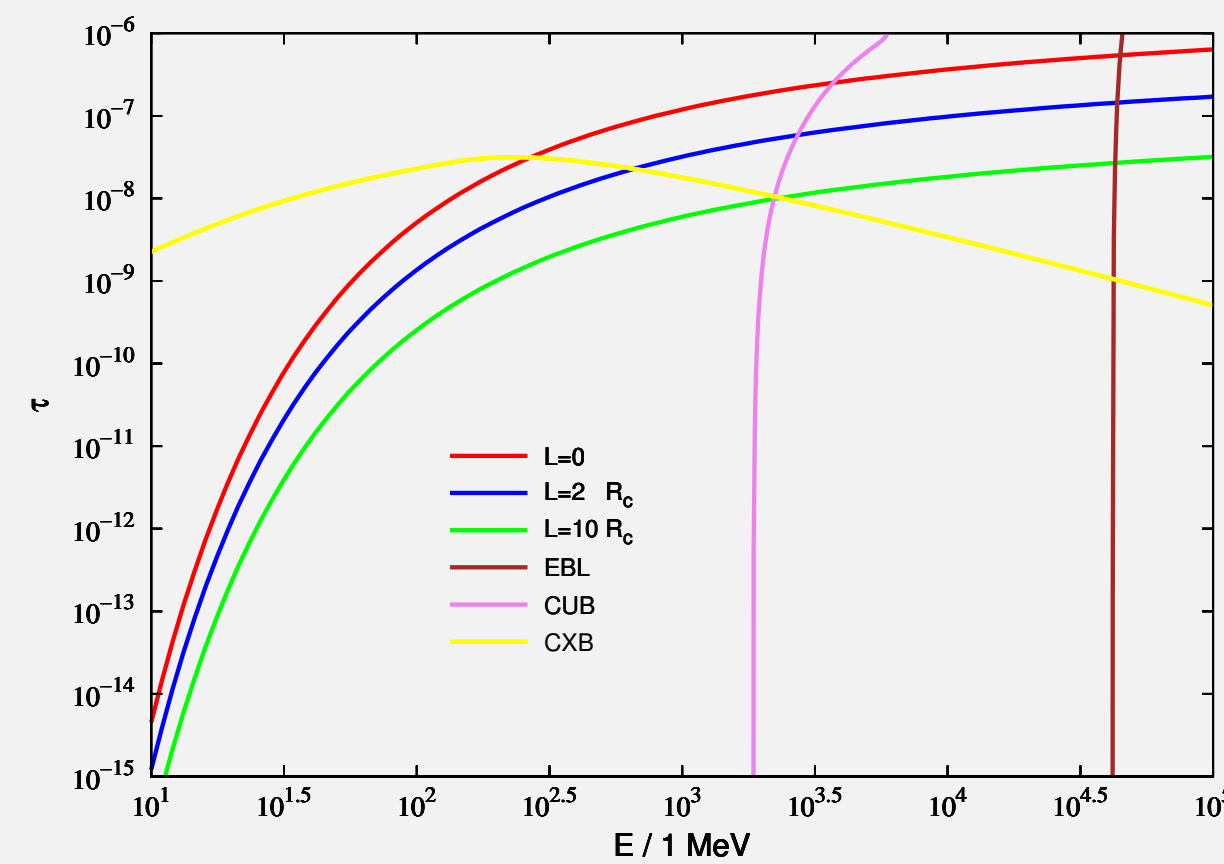


Рис. 7. То же, что на рис. 2 для скопления Virgo.

## Выводы

В ходе работы было показано, что взаимодействие гамма-квантов с образованием электрон-позитронных пар с тормозным излучением газа в скоплениях галактик крайне мало. Характерные значения оптической толщины  $\tau \sim 10^{-8} - 10^{-5}$ . Это намного меньше, чем оптическая толщина из-за аналогичного взаимодействия с EBL- и CRB-фотонами и тем более с CMB-фотонами. Однако было найдено, что если взять EBL-спектр приведенный в работе [3], то в диапазоне энергий  $E = 10^2$  МэВ –  $10^2$  ГэВ взаимодействие с CMB-, EBL- и CRB-фотонами пренебрежимо мало по сравнению с рассматриваемым в данной работе взаимодействием гамма-квантов с фотонами тормозного излучения газ в скоплениях галактик, но сравнимо с оптической толщиной по поглощению на CXB-фотонах, спектр которых взят из работы [4]. и может превышать последнюю в указанном выше диапазоне энергий.

## Список литературы

- [1] K. Lang, Astrophysical formulae, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1974  
 [2] В. В. Железняков. Излучение в астрофизической плазме, М.: «Янус-К», 1997  
 [3] A. Franceschini, G. Rodighiero, M. Vaccari, Astron. Astrophys **487**, 837 (2008)  
 [4] Ajello M et al 2008 *ApJ* **689** 666-77