

УДК 519.6

Численное моделирование спектров гамма-всплесков в ходе рассеяния на релятивистских электронах

*Ларцев Артем Игоревич¹*lartsev.ai@yandex.ru
SPIN-код: 6467-0046*Лукин Владимир Владимирович^{1,2}*vvlukin@gmail.com
SPIN-код: 3626-4657*Титарчук Лев Григорьевич³*

titarchuk@fe.infn.it

*Калашников Илья Юрьевич¹*kalasxel@gmail.com
SPIN-код: 3527-4620¹ ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия³ АКЦ ФИАН, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена модель формирования гамма-излучения в ходе релятивистского выброса из комптоновского облака плазмы вокруг магниторотационной сверхновой. Смещение энергии фотонов в зону высоких энергий предполагается как результат рассеяния фотонов, испущенных фотосферой звезды, на релятивистском потоке водородной ионизированной плазмы. Для описания процесса гамма-выброса используется трехмерная модель релятивистской радиационной газовой динамики (РРГД), включающая полное уравнение переноса излучения (УПИ) с интегралом рассеяния. Для моделирования перераспределения энергий фотонов по спектру используется комптоновское дифференциальное сечение рассеяния. Для численного решения системы РРГД используется явная схема расщепления. УПИ решается методом коротких характеристик, газовая динамика методом Годунова. Проведено моделирование эволюции релятивистского джета в межзвездной среде и спектрального перераспределения энергии фотонов в результате комптоновского рассеяния на релятивистском установившемся потоке.

Ключевые слова: гамма-всплески, радиационная релятивистская газовая динамика, перенос излучения, комптоновское рассеяние.

Введение. Формирование гамма-выброса является до конца не изученным процессом, объединяющим в себе множество физических законов. Длинные гамма-всплески связывают со взрывами сверхновых класса Ic [1, 2], которые в результате коллапса оставляют компактное ядро, окруженное облаком нагретого вещества, в котором в ходе аккреции формируется коллимированный канал, где развивается струйный выброс плазмы [3]. Предполагается, что появление жесткого спектра в наблюдениях связано с собственным излучением комптоновского облака и рассеяния испущенных ядром фотонов на релятивистском потоке [1].

Целью работы является получение спектра гамма-всплеска для чего необходимо моделировать процесс переноса излучения в релятивистском потоке [4] и рассматривать модели рассеяния фотонов на ультрарелятивистских электронах [5].

Методы и материалы; результаты. Математическая модель включает набор уравнений РРГД и квазистационарное УПИ. Для задачи ускорения вещества УПИ решается в приближении серой материи с томсоновской индикатрисой рассеяния [5].

При вычислении спектров используется многогрупповое приближение с комптоновским сечением рассеяния [5], позволяющее учитывать эффект понижения/повышения частоты при взаимодействии с электронами.

Для получения спектров сначала моделируется радиационный разгон в расчетной области, имеющей форму усеченного конуса, затем решается УПИ в многогрупповом приближении. Расчеты показали, что давление излучения способно переводить начальный субрелятивистский поток в релятивистский режим. В канале образуются две ударные волны. В связи с направленностью комптоновской индикатрисы рассеяния, гамма-всплеск наблюдается при малом отклонении положения наблюдателя от направления выброса.

Заключение. Представлена оригинальная трехмерная релятивистская радиационная газодинамическая модель ускорения струи в стационарном канале внутри облака комптонизированной плазмы вокруг сверхновой. Рассмотрено ускорение плазмы в стационарном коническом канале под воздействием излучения в ходе гамма-выброса. Рассчитаны спектры для различных точек наблюдателя, показана зависимость энергии фотонов от направления распространения излучения.

Список источников

- [1] Titarchuk L., Farinelli R., Frontera F., Amati L. An upscattering spectral formation model for the prompt emission of gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 2012, vol. 752, pp. 166–128. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/752/2/116>
- [2] Kelly P.L., Kirshner R.P., Pahre M. Long γ -Ray Bursts and Type Ic Core-Collapse Supernovae Have Similar Locations in Hosts. *The Astrophysical Journal*, 2008, vol. 687, pp. 1201–1207. <https://doi.org/10.1086/591925>
- [3] Moiseenko S.G., Bisnovatyi-Kogan G. S., Ardeljan N.V. A magnetorotational core-collapse model with jets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, vol. 370, pp. 501–512. <https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0511173>
- [4] Kato S., Fukue J. *Fundamentals of Astrophysical Fluid Dynamics*. Astronomy and Astrophysics Library. Osaka, Springer, 2020, 652 p.
- [5] Pomraning G. *The equations of radiation hydrodynamics*. Oxford, New York, Pergamon Press, 1973, vol. 54, 298 p.

Numerical Modeling of Gamma-ray Burst Spectra during Upscattering by Relativistic Electrons

*Lartsev Artem Igorevich*¹

lartsev.ai@yandex.ru
SPIN-code: 6467-0046

Lukin Vladimir Vladimirovich^{1,2}

vvluhin@gmail.com
SPIN-code: 3626-4657

*Titarchuk Lev Grigorievich*³

titarchuk@fe.infn.it

*Kalashnikov Ilia Yurievich*¹

kalasxel@gmail.com
SPIN-code: 3527-4620

¹KIAM RAS, Moscow, Russia

²BMSTU, Moscow, Russia

³ASC PIAS, Moscow, Russia

Abstract. The model of gamma-ray burst (GRB) formation during a relativistic outflow from a Compton plasma cloud surrounding a magnetorotational supernova. The shift of photon energies into the high-energy range is interpreted to the scattering of photons emitted by the stellar photosphere on a relativistic flow of hydrogen-ionized plasma. A three-dimensional model of radiative relativistic hydrodynamics (RadRHD) is used to describe the GRB process, which includes a complete radiative transfer equation (RTE) with a scattering integral. To modeling the redistribution of photon energies across the spectrum the Compton differential scattering cross-section is used. To obtain numerical solution of RadRHD equations the explicit splitting method is used. For the radiative transfer equation with scattering the short characteristics method is used, and for the relativistic hydrodynamics the Godunov-type one. The evolution of a relativistic jet in the interstellar space and the spectral redistribution of photon energy as a result of Compton scattering on a relativistic flow are obtained.

Keywords: gamma-ray bursts, radiative relativistic hydrodynamics, radiative transfer, Compton scattering

Introduction. The formation of a gamma-ray emission is an unexplored process that combines many physical laws. The long GRBs is proposed to be associated with supernovae of Ic type (collapsar model) [1, 2], where the progenitor star is assumed to leave a central remnant surrounded by a cloud of heated matter. Accreting process leads to formation of collimated channel is assumed where astrophysical jet evolves [3].

The appearance of a hard emission in the spectra observations is assumed connect with the radiation of the Compton cloud and the scattering of photons emitted by the photosphere by a relativistic stream [1].

This paper aim is to obtain spectra of a gamma-ray burst. This requires modeling the process of radiation transfer in a relativistic flow [4] and consider photon scattering on ultra-relativistic electrons [5].

Methods and materials; results. The mathematical model includes the set of radiation relativistic hydrodynamics equations (RadRHD) for ideal (inviscid) hy-

drogen gas including the quasi-stationary radiation transfer equation. The problem of matter acceleration is solved by the grey matter approximation with a Thomson indicatrix scattering [5].

To compute spectra, a multi-group approximation with the Compton scattering cross-section is used. This approach allows take into account the effect of lowering/increasing the frequency when colliding with electrons.

To obtain the spectra, firstly, acceleration by radiation is modeled in the computational domain which has form of a truncated cone, then the RTE with a multigroup approximation is solved.

The results of the gas-dynamic simulation showed that the radiation pressure transforms the initial subrelativistic flow into a relativistic mode. Two shock waves form in the channel. Due to the directionality of the Compton scattering indicatrix, a gamma-ray burst is observed with a small deviation of the observer's position from the flow direction.

Conclusion. The original three-dimensional radiative relativistic hydrodynamic model of jet acceleration in a stationary channel inside the Compton cloud surrounding a supernova is presented.

Plasma acceleration in a stationary conical channel, taking into account the effect of radiation during the gamma-ray burst is considered. The spectra for observer different points of view are calculated. The dependence of the photon energy on the direction of radiation propagation is shown.

References

- [1] Titarchuk L., Farinelli R., Frontera F., Amati L. An upscattering spectral formation model for the prompt emission of gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 2012, vol. 752, pp. 166–128. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/752/2/116>
- [2] Kelly P.L., Kirshner R.P., Pahre M. Long γ -Ray Bursts and Type Ic Core-Collapse Supernovae Have Similar Locations in Hosts. *The Astrophysical Journal*, 2008, vol. 687, pp. 1201–1207. <https://doi.org/10.1086/591925>
- [3] Moiseenko S.G., Bisnovatyi-Kogan G. S., Ardeljan N.V. A magnetorotational core-collapse model with jets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, vol. 370, pp. 501–512. <https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0511173>
- [4] Kato S., Fukue J. *Fundamentals of Astrophysical Fluid Dynamics*. Astronomy and Astrophysics Library. Osaka, Springer, 2020, 652 p.
- [5] Pomraning G. *The equations of radiation hydrodynamics*. Oxford, New York, Pergamon Press, 1973, vol. 54, 298 p.