

(через $t \approx 200$ с). Также наблюдается эффект излома и ужесточение спектра за счет эволюции, т.е. уменьшения показателя степени спектра с течением времени.

$$c Q(E) = C \cdot E^{-\alpha}, \alpha = 4, n = 10^{13} \text{ см}^{-3}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе транспортного уравнения Гинзбурга-Сыроватского для двух предельных режимов – «тонкой» и «толстой» мишени были сделаны расчеты спектра энергичных протонов. Предполагалась непрерывная инжекция частиц. Полученный результат можно использовать для расчета спектров гамма-излучения и анализа экспериментальных данных.

Авторы благодарят В.В. Гречнева и В.И. Киселева за полезные советы и обсуждение работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. Происхождение космических лучей. Москва: Изд-во АН СССР, 1963. 385 с.

Belyaev G. et al. Measurement of the Coulomb energy loss by fast protons in a plasma target // *Phys. Rev. E*. 1996. V. 53, N 3. P. 2701–2707.

Cheng C.C. Theoretical studies of the flux and energy spectrum of gamma radiation from the Sun // *Space Sci. Rev.* 1972. V. 13, N 1. P. 3–123.

Emslie A.G. The collisional interaction of a beam of charged particles with a hydrogen target of arbitrary ionization level // *Astrophys. J.* 1978. V. 224. P. 241–246.

Hudson H.S. The relationship between long-duration gamma-ray flares and solar cosmic rays // in *Space Weather of the Heliosphere: Processes and Forecasts*, IAU Symp., Cambridge University Press, Cambridge 2018. V. 335. P. 49–53.

Hulot E., Vilmer N., Trotter G. Relative timing of solar prompt gamma-ray line and X-ray emission expected from a trap plus precipitation model for protons and electrons // *A&A*. 1989. V. 213, N 1–2. P. 383–396.

Kocharov L., Kovaltsov G.A., Torsti J. Trapping and precipitation of protons during stochastic acceleration in magnetic loops // *Astrophys. J.* 2000. V. 543. P. 438–446.

Kafexhiu E., Romoli C., Taylor A.M., Aharonian F. Energetic Gamma-Ray Emission from Solar Flares // *Astrophys. J.* 2018. V. 864, N 2. P. 148.

Mandzhavidze N., Ramaty R. Gamma rays from pion decay-Evidence for long-term trapping of particles in solar flares // *Astrophys. J. Part 2-Letters*. 1992. V. 396, N 2. P. L111–L114.

Murphy R. J., Dermer C. D., Ramaty R. High-energy processes in Solar flares // *Astrophys. J.* 1987. V. 63. P. 721–748.

Ramaty R., Kozlovsky B., Lingenfelter R.E. Solar gamma rays // *Space Sci. Rev.* 1975. V. 18, N 3. P. 351–388.

Workman R. L. et al. Review of Particle Physics // *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022. V. 2022. P. 083C01.