



## Физика релятивистских ударных волн

к.ф.-м.н. Евгений Владимирович Деришев

*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Н. Новгород*

Релятивистские ударные волны пока невозможно наблюдать в лабораторных экспериментах, но они есть в ряде космических объектов, например, в источниках гамма-всплесков, активных ядрах галактик, двойных звёздных системах с пульсарами. Изучать такие ударные волны приходится опосредованно — через излучение нетепловых частиц, которые в них ускоряются. А значит, наблюдения предоставляют только суммарную картину происходящих в релятивистских ударных волнах физических процессов, и, чтобы иметь предсказательную силу, теория должна охватывать сразу несколько аспектов их физики. Продвижение в этой области стало возможным только в последние годы, когда удачно совпали появление новых теоретических идей и ранее недоступных наблюдений.

Теория релятивистских ударных волн основывается на необычных (для лабораторной практики) физических явлениях. В общих чертах её можно разложить на три задачи: механизм излучения, механизм ускорения частиц и микрофизику ударной волны. Физика процесса излучения в целом хорошо изучена — она находит объяснение в рамках модели синхротронного излучения с самокомptonизацией. В рамках этой модели более низкочастотная часть спектра (энергия фотонов вплоть до ГэВ) представляет собой синхротронное излучение энергичных электронов в магнитном поле ударной волны. Некоторые из синхротронных фотонов рассеиваются теми же электронами, образуя другую, обратную комптоновскую компоненту, которая тянется до ТэВ-ных энергий.

Наиболее вероятным механизмом ускорения частиц в релятивистских ударных волнах является конверсионный механизм и его конкретная реализация, модель равновесной ударной волны. В этой модели ускоренные электроны (и позитроны) представляют собой электрон-позитронные пары, рождающиеся перед фронтом в результате столкновений комптоновских фотонов с синхротронными фотонами, а затем набирающие энергию при переносе потоком к фронту. Модель равновесной ударной волны правильно предсказывает типичную энергию инжектированных электронов в послесвечении гамма-всплесков.

Микрофизика ударной волны, и особенно процесс генерации магнитного поля в плазменной турбулентности, существенно влияет как на излучение, так и на ускорение частиц. Численное моделирование бесстолкновительных и изначально немагнитных релятивистских ударных волн продемонстрировало генерацию короткоживущего (на временной шкале синхротронных потерь) турбулентного магнитного поля. Решить проблему может модель равновесной ударной волны — её отличительной особенностью является сильно растянутая во времени инжекция анизотропных частиц в набегающий поток, что замедляет рост магнитной турбулентности и потенциально делает её достаточно долгоживущей. Однако, наблюдения свидетельствуют о существенной нелинейности турбулентного магнитного поля в релятивистских ударных волнах, и пока непонятно, какой именно механизм обеспечивает такую нелинейность в медленно нарастающей турбулентности.