

Гладилин П.Е., Быков А.М., Осипов С.М., (Физико-Технический Институт им. А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург)

Компактные кластеры молодых массивных звёзд наблюдаются в нашей Галактике и в галактиках с повышенным звездообразованием. Кластеры со множественными звёздными ветрами и ударными волнами являются областями эффективного ускорения космических лучей до ультррелятивистских энергий. Источники, связанные со взаимодействием ударной волны сверхновой с ветрами молодых звёзд, имеют сложное распределение ускоренных частиц по энергиям со спектральным изломом в районе нескольких ТэВ и жёстким степенным спектром от 10 ТэВ до 10 ПэВ. Повышенный поток ускоренных частиц в этом диапазоне позволяет получить высокие потоки нейтрино и гамма-излучения с энергиями выше 1 ТэВ. В докладе обсуждаются последние наблюдения обсерватории H.E.S.S. ярких гамма-источников в области галактических звёздных кластеров Westerlund 1 и CI\*1806-20. Гамма-источник со сверхновой в компактном кластере может продуцировать сопутствующий поток нейтрино от р-р-взаимодействий с окружающей средой, позволяющий объяснить часть высокоэнергичных событий, детектированных комплексом IceCube.

## Модель нетеплового источника в компактном звёздном кластере со сверхновой

Для сверхновой, взорвавшейся в молодом звёздном кластере, присутствие в её окрестности близко расположенных звёзд спектральных классов O и B приводит к резкому увеличению эффективности ускорения заряженных частиц на её ударной волне по сравнению с «изолированным» случаем (см. рис.1).

Взаимодействие с ближайшими звёздными ветрами либо с коллективным кластерным ветром приводит к формированию системы сходящихся ударных волн (ССУВ), характеризующейся увеличением на порядок максимальной энергии ускоренных частиц (по сравнению с изолированным остатком), повышению мощности излучения, а также жёстким спектром ускоренных КЛ и излучения в области максимальных энергий (свыше 1 ТэВ).

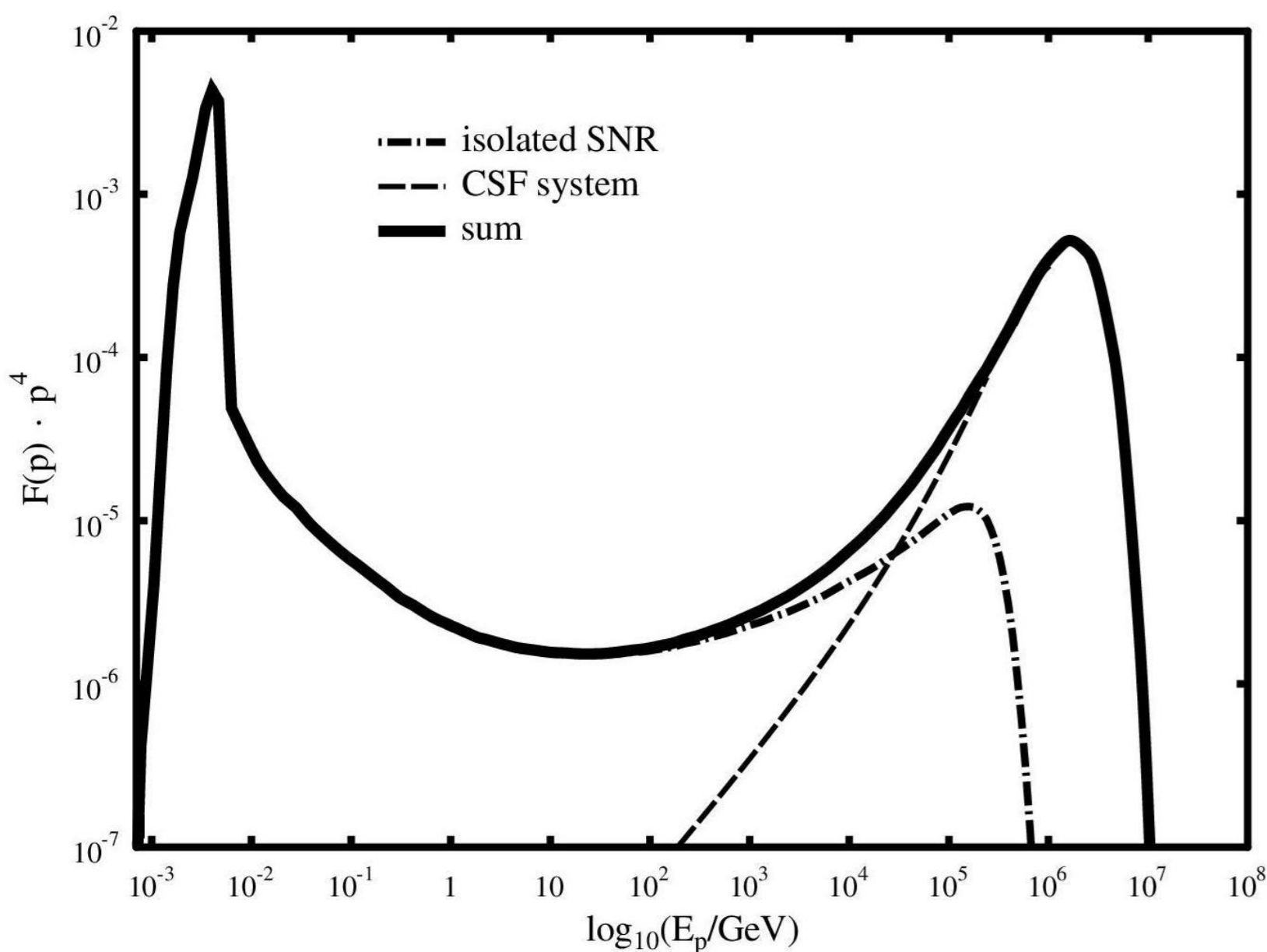


Рис.1 Спектр протонов, ускоренных в системе сходящихся ударных волн в сравнении со спектром одиночного остатка сверхновой. Определяющий вклад на высоких энергиях даёт источник, связанный со взаимодействием двух ударных волн. (Gladilin et al, 2015)

Перечисленные свойства делает ССУВ одними из наиболее мощных галактических ПэВатронов, потенциально способных вносить существенный вклад в спектр КЛ за «коленом».

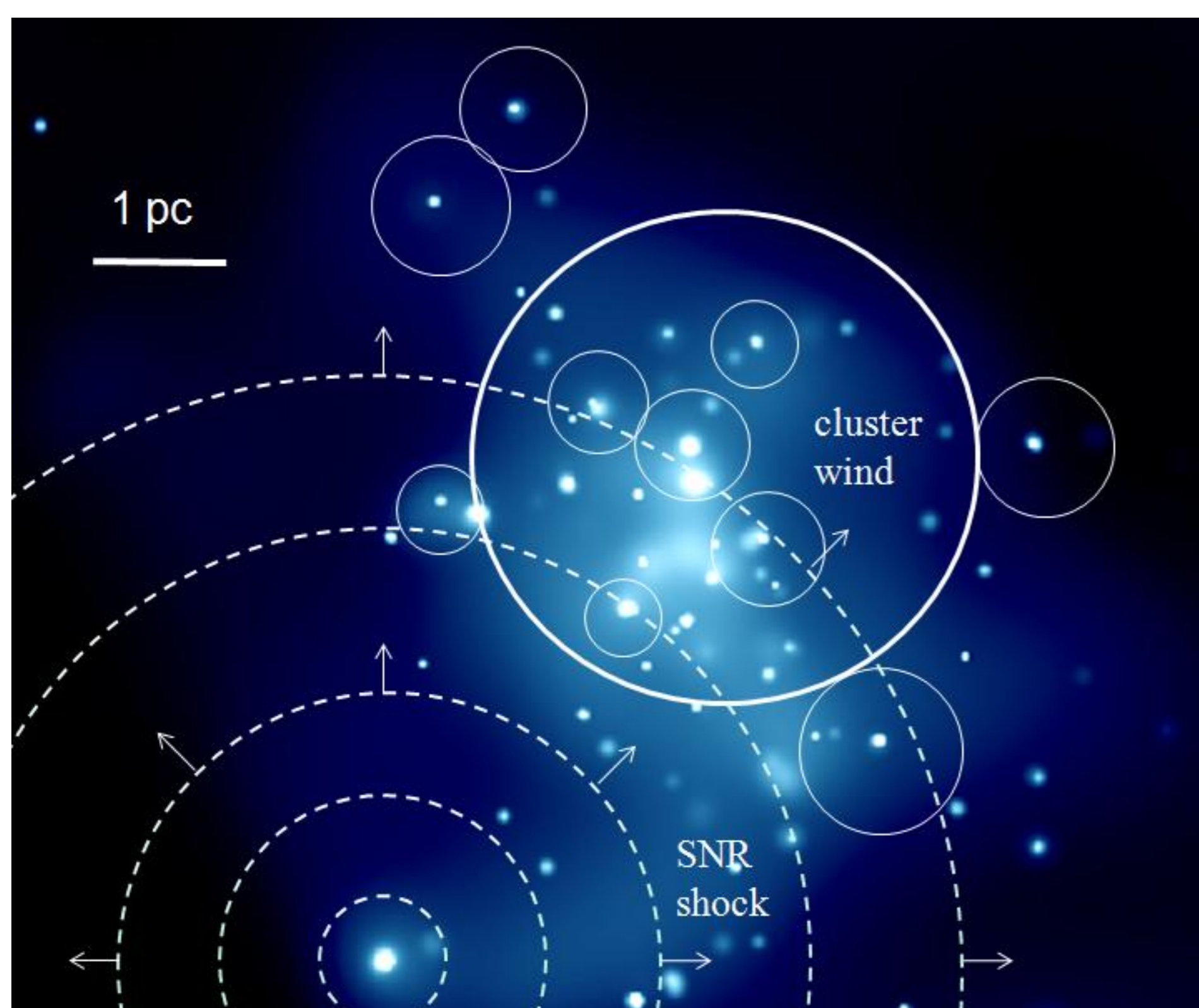


Рис.2 Схематическое изображение распространения ударной волны остатка сверхновой в компактном звёздном кластере с большим количеством молодых звёзд с мощным звёздным ветром. (Изображение: Credit: NASA/CXC/UCLA/M.Muno et al.)

## Источник в окрестности звёздного кластера CI\* 1806-20

Обсерваторией H.E.S.S. было зафиксировано мощное гамма-излучение в окрестности компактного звёздного кластера CI\* 1806-20 вблизи галактического центра на энергиях до 10 ТэВ. В предположении существования источника типа ССУВ можно объяснить наблюдаемое гамма-излучение источника HESS J1808–204.

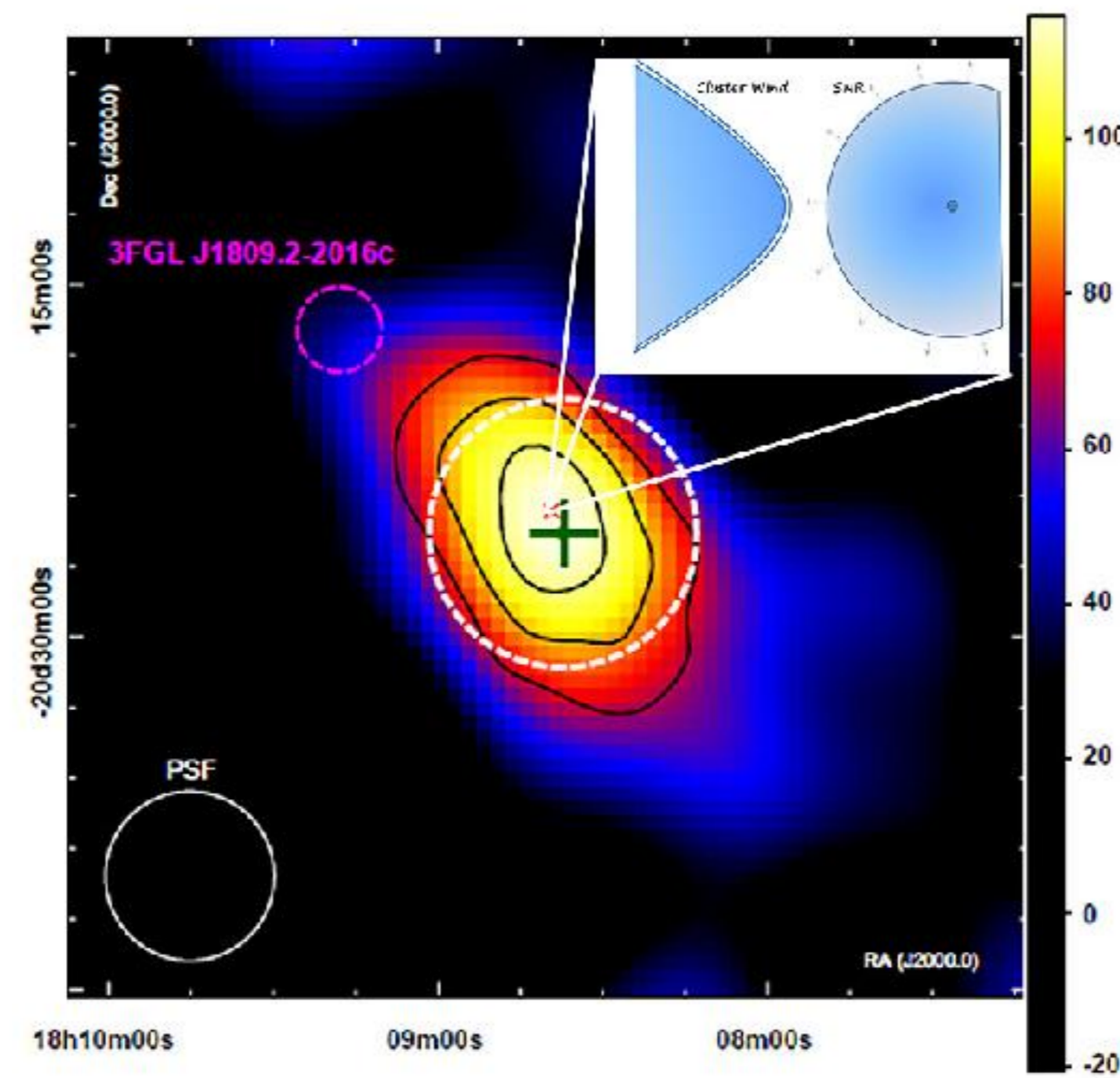


Рис.3 Изображение источника HESS J1808–204 в направлении звёздного кластера CI\* 1806-20 и схематичное изображение геометрии вероятного источника (Изображение: HESS Collaboration, Abdalla et al, 2016)

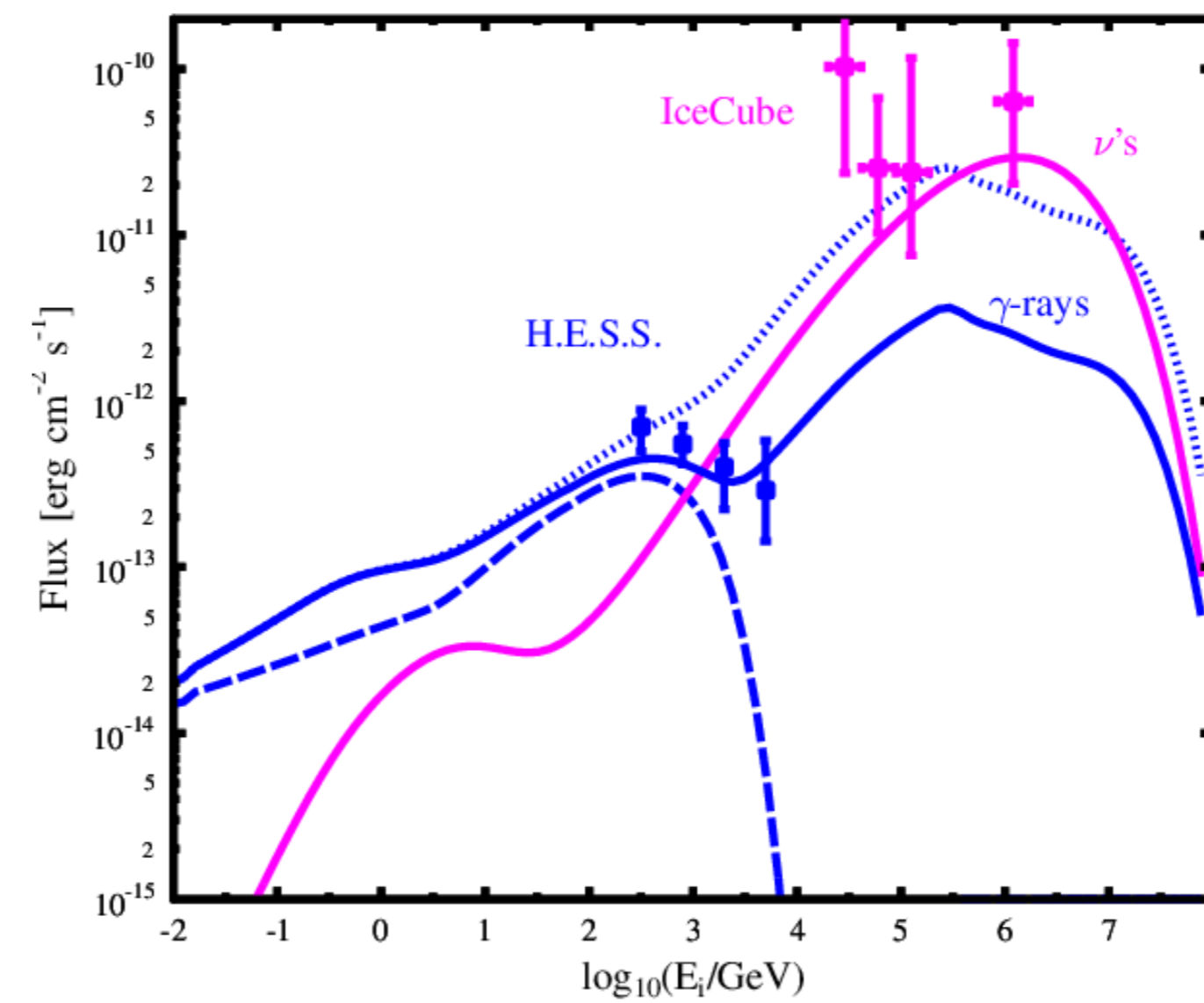


Рис.4 Спектры нейтрино и гамма-излучения в модели взаимодействия ударной волны остатка сверхновой с кластерным ветром CI\* 1806-20. (Bykov et al, 2017)

## Источник в компактном кластере Westerlund 1

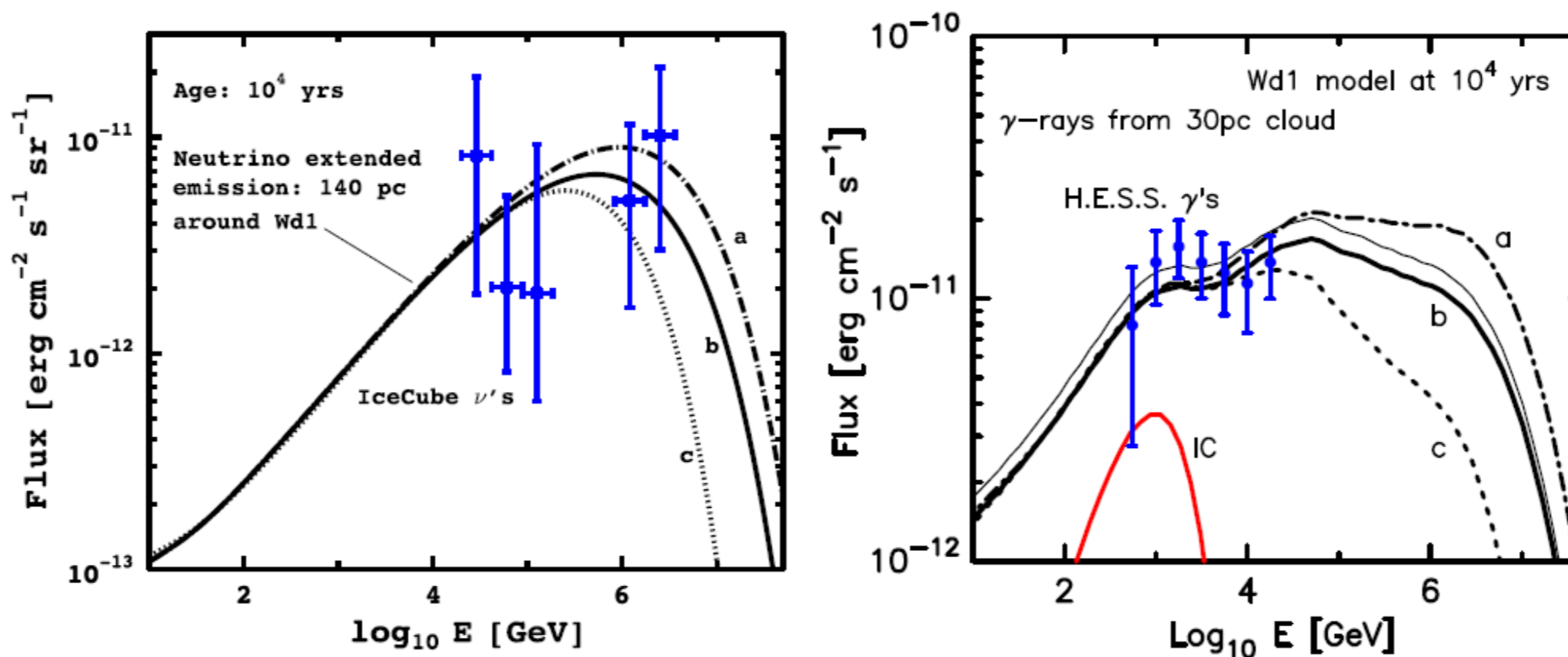


Рис.5 Спектры нейтрино и гамма-излучения в предположении существования источника типа ССУВ внутри компактного кластера Westerlund 1, d=3.5 kpc. (Bykov et al, 2015)

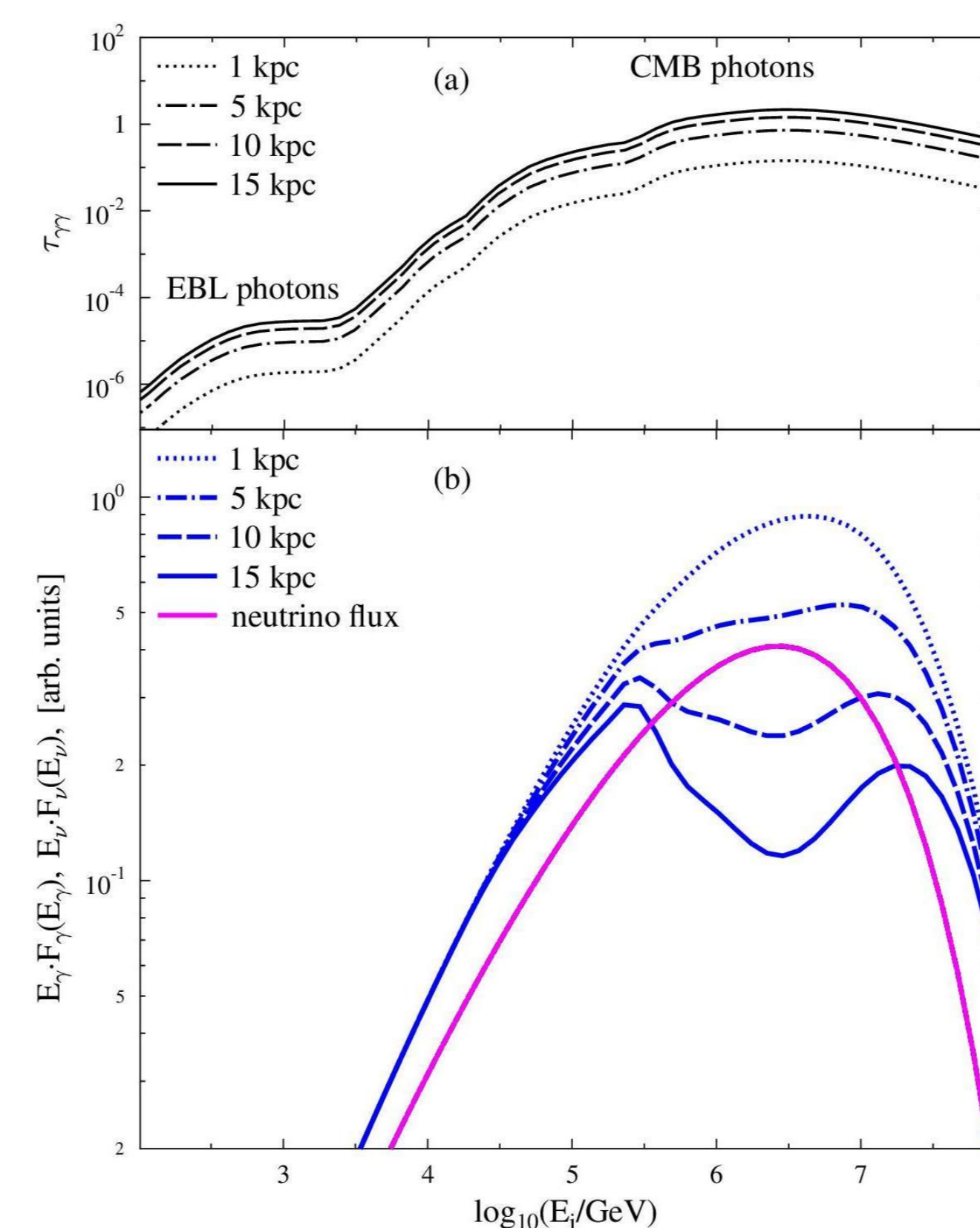


Рис.6 Сверху: оптическая толща для эффекта Брейта-Вилера (фотон-фотонного взаимодействия) для различных расстояний до источника излучения; снизу: нормированные спектры нейтрино и гамма-излучения для различных расстояний до источника. Из-за поглощения гамма-излучения за счёт образования электрон-позитронных пар в диапазоне 10(14)-10(16) эВ поток нейтрино излучения по мере удаления от источника становится выше соответствующего ему гамма-излучения (Romansky et al, 2016).

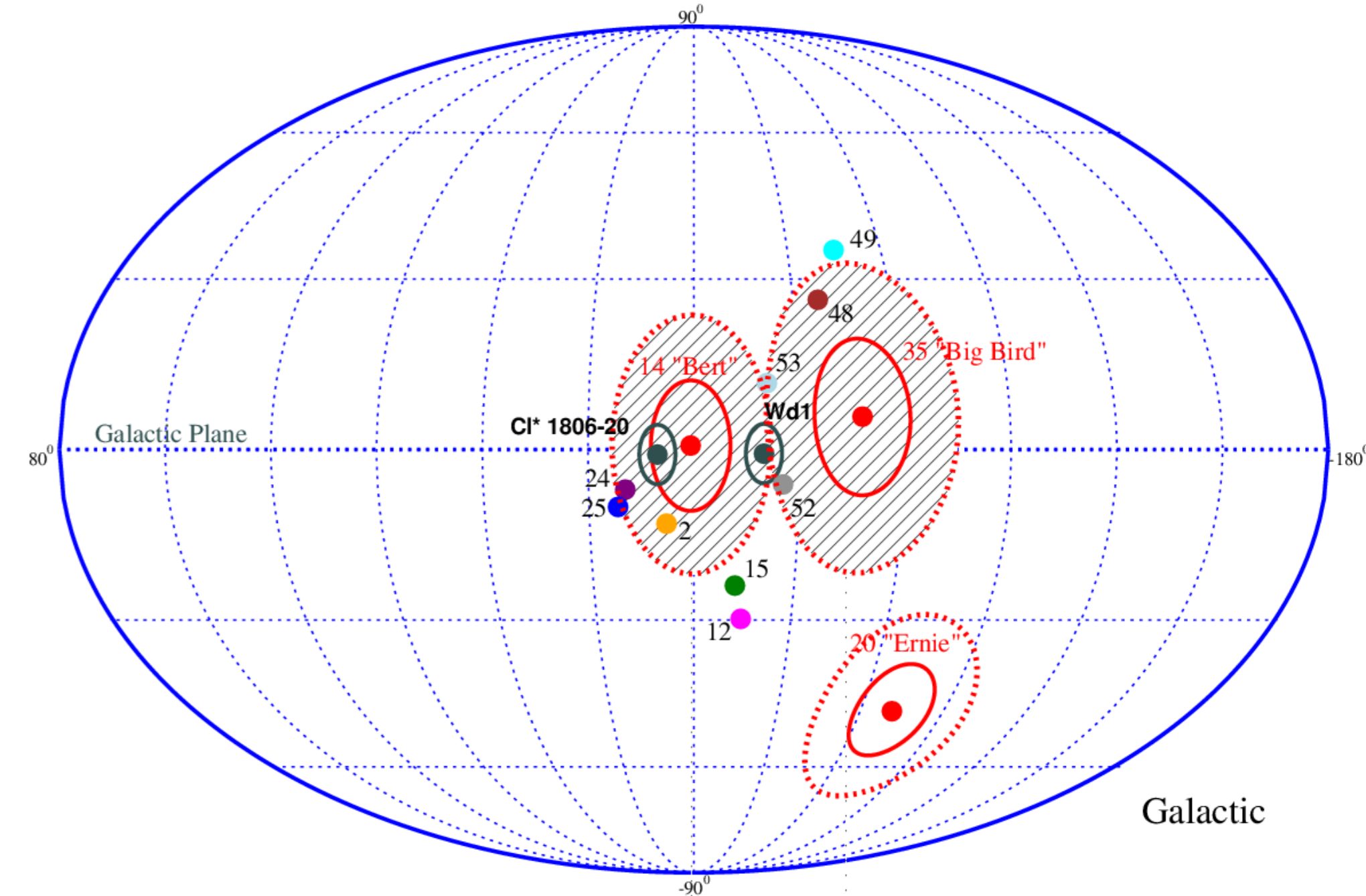


Рис.7 Карта субПэВных и ПэВных нейтринных событий с контурами ошибок (1σ и 2σ) для области вблизи звёздных кластеров Westerlund 1 и CI\* 1806-20. Источники вблизи этих кластеров могут быть ответственны как минимум за два ПэВных события, детектированных обсерваторией IceCube в 2013-2015 гг. (Bykov et al, 2016)

## Спектр космических лучей высоких энергий

Нерегулярные структуры и повышенное содержание «лёгкой» компоненты КЛ на энергиях 10 – 100 ПэВ могут быть объяснены вкладом в общий поток КЛ источников типа ССУВ, в том числе, от компактных звёздных кластеров.

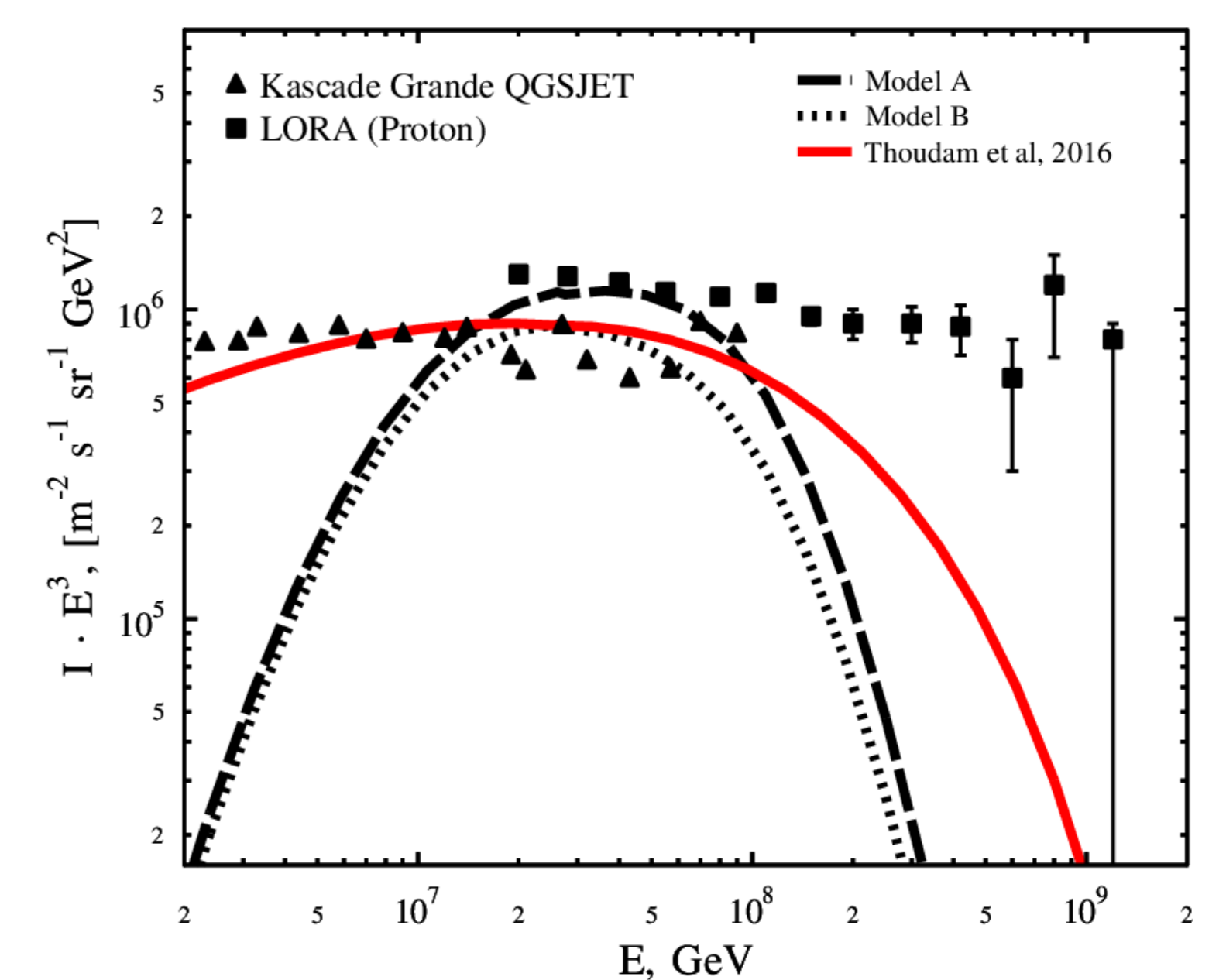


Рис.8 Поток КЛ по последним данным обсерватории LOFAR и KASCADE - Grande, а также результат численных расчетов в диффузионной модели Гало- диска для галактических сверхновых (красная кривая) и систем ССУВ (10% от числа сверхновых, черные кривые). Системы ССУВ могут вносить существенный вклад в поток КЛ на энергиях выше 1 ПэВ.

Класс нетепловых источников, связанных со сверхновой в компактном звездном скоплении, представляет собой мощную популяцию, которая теоретически может вносить существенный вклад в поток КЛ на энергиях от первого до второго колена в спектре галактических КЛ. Также, эти источники на время существования эффективного ускорителя (<300 лет) могут определять максимальные энергии и излучательную мощность всего родительского кластера.

## Выводы:

- системы сходящихся ударных волн внутри компактных звёздных кластеров могут быть мощными источниками нейтрино и гамма-излучения

- остаток сверхновой внутри (или снаружи) звёздного кластера увеличивает максимальные энергии ускоренных частиц и мощность излучения кластера на несколько сотен лет

- источники нейтрино, связанные с такими системами, могут быть ответственными за часть субПэВных и ПэВных событий, детектированных комплексом IceCube.

- современные проекты в области наблюдательной астрофизики высоких энергий (такие как H.E.S.S., Cherenkov Telescope Array (CTA), HAWC Observatory, IceCube Neutrino Observatory) позволяют получить данные выше 100 ТэВ и обеспечить новую информацию о свойствах излучения источников внутри звёздных кластеров на данных энергиях.