



БЛИНОВ Владимир Евгеньевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск), профессор кафедры электрофизических установок и ускорителей Новосибирского государственного технического университета. Автор и соавтор 328 научных публикаций

На конечной фазе эволюции звезд в результате взрывов сверхновых в нашей галактике появляются тяжелые элементы с массой, большей, чем у водорода и гелия. Звезды служат своеобразными тиглями, в которых эти элементы образуются, а их катастрофическая смерть разносит последние по всей галактике. В дальнейшем это звездное вещество служит материалом, из которого образуются планеты и в итоге мы сами.

На фото – Туманность Медузы, представляющая собой оболочку, оставшуюся от взрыва сверхновой звезды IC 443.

Credit: Adam Block/Mount Lemmon SkyCenter/University of Arizona

Ключевые слова: космические лучи, сверхновая, механизм ускорения космических частиц.

Key words: cosmic rays, supernova, particle acceleration mechanism

Галактический ускоритель

В 1912 г. австрийский физик и будущий нобелевский лауреат В. Гесс на основе наблюдений за изменением ионизации воздуха с высотой сделал вывод о существовании проникающего излучения внеземного происхождения. Спустя столетие после открытия космических лучей ученым с помощью космического гамма-телескопа «Ферми» удалось подтвердить гипотезу, что космические лучи разгоняют до сверхвысоких скоростей (энергий) остатки взорвавшихся сверхновых звезд. Это открытие было отмечено журналом «Science» как наиболее значимое достижение в физике в 2013 г., войдя в десятку самых выдающихся открытий прошлого года

История изучения космических лучей началась еще в конце XIX в. после открытия феномена естественной радиоактивности: физики обнаружили, что заряженный электроскоп быстро разряжается, если рядом с ним находится радиоактивный материал. После этого скорость разряда электроскопа стали использовать для измерения уровня радиоактивности. В то время полагали, что *атмосферное электричество* (ионизация воздуха) вызывается только естественной радиацией, источником которой являются радиоактивные элементы земной коры и радиоактивные газы, содержащиеся в воздухе.

В 1900 г. шотландскому физика и будущему нобелевскому лауреату Ч. Вильсону, а также двум немецким школьным учителям Ю. Элстеру и Г. Гейтелю удалось повысить чувствительность электроскопа и с более высокой точностью измерить скорость спонтанного разряда. На основе этих измерений они пришли к выводу, что источник ионизации находится вне сосуда электроскопа, причем часть радиации является сильно проникающей. Это предположение было подтверждено в 1902 г. количественными измерениями, проведенными такими выдающимися исследователями, как Э. Резерфорд и Г. Кук.

Согласно первоначальным предположениям, все это излучение имело земное происхождение. Для проверки этой гипотезы были проведены измерения уровня радиации в зависимости от высоты над поверхностью Земли, а также при погружении электроскопа под воду. Однако полученные данные не соответствовали ожидаемым:

© В. Е. Блинов, 2014



В 1911—1912 г. австрийский физик В. Ф. Гесс (на фото – в правой части корзины) совершил ряд полетов на стратостатах для определения космической природы проникающей радиации. © Archive Victor F. Hess Society, Echophysics—European Centre for the History of Physics, Pöllau, Austria

Уникальные возможности космического телескопа-обсерватории «Ферми» (справа) дали ученым возможность доказать теорию происхождения космических лучей сверхвысоких энергий. © NASA/Goddard Space Flight Center Conceptual Image Lab

оказалось, что радиоактивность уменьшалась при погружении в воду, но возрастала с увеличением высоты над Землей. Эти результаты прямо указывали, что регистрируемое излучение не зависит от радиоактивности земной коры, однако физики не спешили отказываться от гипотезы о земной природе мистической проникающей радиации.

Все изменилось после серии экспериментов, проведенных В. Гессом в 1912 г. с использованием армейских стратостатов. Проведя серию измерений уровня радиации в зависимости от высоты подъема, он обнаружил ее рост примерно в четыре раза на большой высоте по сравнению со значением на поверхности Земли. Повторив эти измерения во время частичного солнечного затмения, Гесс смог оценить влияние излучения Солнца как возможного источника радиации.

На основе данных, полученных в этих экспериментах, он сделал вывод, что «результаты представленных наблюдений, по-видимому, наиболее естественно могут быть объяснены исходя из предположения, что излучение с очень высокой проникающей способностью входит в атмосферу Земли сверху... Так как не обнаружено уменьшения интенсивности излучения ночью и во время солнечного затмения, то трудно предположить, что Солнце является источником этого излучения» (Гесс, 1936). О научной жизни Виктора Гесса читайте интересную статью Питера М. Шустера в *Journal of Astroparticle Physics* (<http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.05.005>).

За более чем столетнюю историю физики космических лучей многое удалось понять и детально исследовать. Так, было установлено, что первичные космические лучи, бомбардирующие земную атмосферу, на 90 %

состоят из *протонов* (ядер атома водорода), а остальная часть – из ядер атомов легких элементов, образовавшихся еще в «юной» Вселенной, и электронов. Вторичные космические лучи образуются в процессе взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли, а до поверхности Земли долетают в основном *мю-мезоны* – частицы, аналогичные по свойствам электронам, но в двести раз тяжелее их.

Каждую минуту каждый квадратный сантиметр земной поверхности пересекают два мю-мезона. Наряду с земной радиоактивностью (прежде всего от радиоактивного газа радона) они формируют естественную дозу облучения человека, которая была бы много выше, не будь атмосферы, частично защищающей нас от облучения. К примеру, экипажи самолетов, проводящие на больших высотах много времени, получают дозы облучения, сравнимые с дозами облучения персонала атомных станций.

Интенсивность первичных космических лучей быстро уменьшается с ростом энергии. Из теоретических моделей следует, что космические лучи с энергией до 10^{18} эВ – внутригалактического происхождения, а имеющие более высокие энергии приходят к нам извне, причем источники их происхождения до сих пор точно не установлены.

Максимальные энергии космических лучей в миллиарды раз превосходят энергию Большого адронного коллайдера, что делает их исследования очень привлекательными и перспективными для физики элементарных частиц. Однако крайне низкая интенсивность таких лучей (одна частица на 1 км^2 в сто лет!) требует создания детекторов огромных размеров и затрудняет проведение экспериментов. Тем не менее наличие в кос-

мических лучах частиц с энергией, недоступной для наземных ускорителей и, как следствие, потенциальная возможность обнаружения новых физических явлений при сверхвысоких энергиях, продолжает вдохновлять физиков на проведение все новых исследований с космическими лучами.

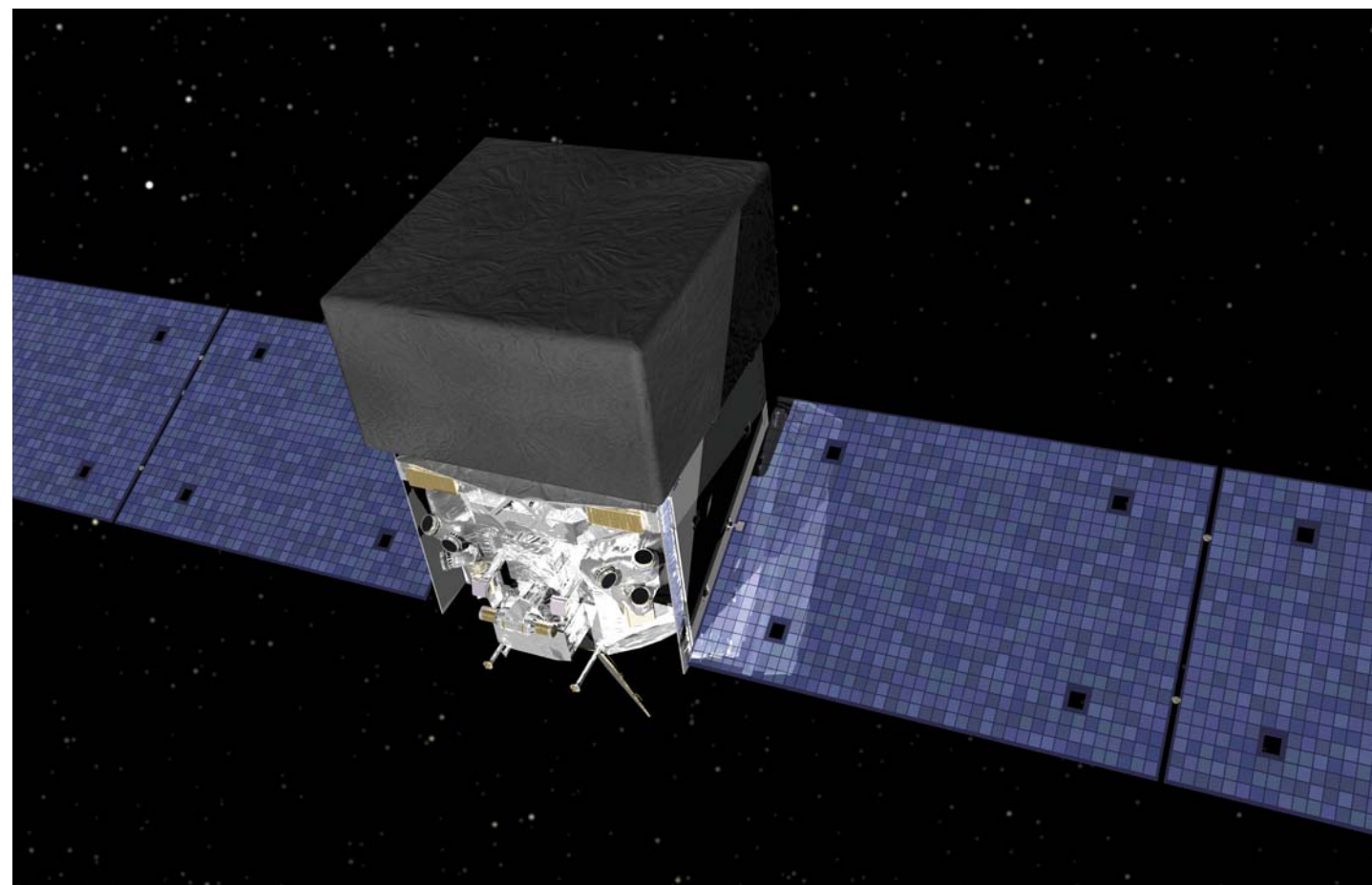
Одной из нерешенных загадок физики космических лучей является принцип работы «космического ускорителя», который разгоняет внутригалактические космические лучи до сверхвысоких энергий. Теоретики уже давно предложили механизм ускорения, основанный на разгоне частиц при прохождении их через фронт ударной волны, возникающей при взрыве сверхновой звезды, но экспериментального подтверждения этой гипотезы до недавнего времени не существовало.

Траектории электрически заряженных частиц, из которых состоят космические лучи, искривляют галактические магнитные поля, из-за чего определить положение источника излучения по измерению направления траектории заряженной частицы невозможно. Гамма-кванты, в отличие от заряженных частиц, не подверже-

ны влиянию магнитных полей, поэтому их регистрация позволяет достаточно точно определить координаты источника излучения. Именно этим обстоятельством и воспользовались исследователи из международной коллаборации «Ферми», в которую входят США, Франция, Германия, Италия, Япония и Швеция.

Космическая обсерватория «Ферми», выведенная НАСА на околоземную орбиту в 2008 г., – пример сотрудничества представителей двух наук – астрофизики и физики элементарных частиц. В ней использованы технологии регистрации гамма-излучения, применяемые при создании детекторов для исследований по физике элементарных частиц, но вывод ее на околоземную орбиту и обеспечение ее многолетней работы потребовали от международной команды физиков и НАСА решения ряда очень сложных инженерных и технологических задач.

Широкоугольный телескоп «Ферми» предназначен для регистрации, определения направления прилета и последующей визуализации гамма-излучения с энергиями от миллиона до сотен миллиардов электрон-вольт



Это изображение остатков сверхновой IC443 (Туманность Медузы) является комбинацией изображений, полученных в разных диапазонах длин волн. С помощью обсерватории «Ферми» было зарегистрировано жесткое гамма-излучение (пурпурный цвет), излучение в видимом диапазоне (желтый цвет); с помощью космического инфракрасного телескопа «WISE» – инфракрасное излучение в различном диапазоне: с длиной волны 3,4 мкм (синий цвет), с длиной волны 4,6 мкм (голубой цвет), с длиной волны 12 мкм (зеленый цвет), с длиной волны 22 мкм (красный цвет). Голубые петли отмечают границы, на которых происходит взаимодействие остатков сверхновой с плотным облаком межзвездного газа.

Credit: Nasa/Doe/Fermi lat collaboration, Tom Bash and John Fox/Adam Block/Noao/Aura/Nsf, JPL-Caltech/Ucla

(заметим, что энергия видимого излучения, регистрируемого сетчаткой глаза, лежит в диапазоне 2–3 эВ). Результат, отмеченный журналом «Science», был получен при исследовании гамма-излучения от оболочек, образовавшихся в результате взрыва двух сверхновых звезд – IC443 и W44.

Остатки IC443, известные под названием Туманность Медузы, находятся на расстоянии 5 тыс. световых лет от Земли в направлении созвездия Близнецов и имеют возраст около 10 тыс. лет. Остатки W44 удалены от нас примерно на 9,5 тыс. световых лет в направлении созвездия Орла, а их возраст составляет около 20 тыс. лет. Каждый из этих объектов представляет собой «вещественные» остатки, образовавшиеся в результате взрыва массивной звезды на последней стадии ее эволюции, и расширяющуюся ударную волну. Оболочки от взрыва сверхновых IC443 и W44 расширяются, достигая холодных плотных облаков межзвездного газа, которые испускают гамма-излучение.

До измерений, проведенных обсерваторией «Ферми», не было известно, какие точно частицы космических лучей – протоны или электроны – производят гамма-излучение, исходящее из облаков межзвездного газа, так как эти частицы возбуждают гамма-излучение примерно с одинаковой энергией. После четырех лет исследований и тщательного анализа данных физики обнаружили главную особенность гамма-излучения, генерируемого остатками двух исследуемых сверхновых звезд. Эта особенность обусловлена короткоживущей частицей – нейтральным π -мезоном, который образуется при столкновении протонов космических лучей



Согласно теоретической модели ускорения космических лучей, заряженная частица, захваченная магнитным полем остатков сверхновой, движется в этом поле случайным образом и иногда пересекает фронт главной ударной волны, образовавшейся после взрыва. При каждом пересечении «туда и обратно» фронта ударной волны скорость частицы должна увеличиться примерно на 1%. После множества таких переходов частица набирает энергию, достаточную, чтобы преодолеть удерживающее ее магнитное поле оболочки сверхновой и вырваться «на свободу» в галактическое пространство в виде космического луча сверхвысокой энергии

с практически неподвижными протонами оболочки сверхновой.

После своего рождения нейтральный π -мезон быстро распадается на два гамма-кванта – это излучение имеет характерное распределение по энергии с резким спадом в области низких значений. Именно такую особенность в спектре гамма-излучения межзвездного газа удалось обнаружить с помощью обсерватории «Ферми». Это явилось убедительным доказательством того, что остатки сверхновых IC443 и W44 ускоряют именно протоны.

Таким образом, физикам удалось неопровержимо доказать, что остатки исследуемых сверхновых звезд

являются природными ускорителями протонов, что подтвердило правильность теоретических моделей ускорения космических лучей.

К этому можно только добавить, что предположение о том, что космические лучи сверхвысоких энергий ускоряются магнитными полями облаков межзвездного газа, было выдвинуто в 1949 г. виднейшим итальянским физиком Э. Ферми – тем самым Ферми, в честь которого и был назван космический телескоп-обсерватория, где было сделано открытие.