

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

А. А. Гвоздев, И. С. Огнев, М. В. Чистяков

**Введение
в релятивистскую астрофизику
и современную космологию**

Учебное пособие

*Рекомендовано
Научно-методическим советом университета для студентов,
обучающихся по направлению Физика*

**Ярославль
ЯрГУ
2013**

УДК 52:524.8(075.8)
ББК В632я73
Г25

Рекомендовано
*Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2013 года*

Рецензенты:

Залуцкий А.А., кандидат физ.-мат. наук, доцент;
Ученый совет ЯФ ФТИАН РАН

Гвоздев, Александр Александрович.

Г25 Введение в релятивистскую астрофизику и современную космологию :
учебное пособие / А.А. Гвоздев, И.С. Огнев, М.В. Чистяков ; Яросл. гос.
ун-т им. П.Г. Демидова. — Ярославль : ЯрГУ, 2013. — 100 с.

ISBN 978-5-8397-0968-3

Настоящее пособие представляет краткий курс, освещающий базовые понятия и основные направления современной астрофизики и космологии. Подробно разбираются теория формирования и устойчивости политропных звезд, релятивистская кинетика и теория переноса излучения, современное состояние проблемы взрыва сверхновых с коллапсом центральной части.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 011200.62, 011200.68 Физика (дисциплины «Избранные вопросы космофизики», «Астрофизика», «Избранные вопросы релятивистской астрофизики», цикл БЗ), очной формы обучения.

УДК 52:524.8(075.8)
ББК В632я73

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-02-00394-а).

ISBN 978-5-8397-0968-3

© ЯрГУ, 2013

1 Особенности астрофизики и космологии

В настоящее время астрофизика и космология являются бурно развивающимися направлениями современной физики. В первую очередь это связано с выводом в космос приборов, изучающих внеземные объекты, что позволило получать о них существенно более точную и достоверную информацию, поскольку прохождение излучения через атмосферу может искажать его характеристики. Кроме того, увеличилось количество таких приборов и их чувствительность, что привело к тому, что сейчас теоретическая астрофизика явно отстает от огромного потока наблюдательных данных, получаемых по внеземным объектам.

Под астрофизикой обычно понимается направление, занимающееся исследованием внеземных объектов и явлений с помощью открытых на Земле физических законов. Космология ставит перед собой куда более далеко идущую цель — изучение строения и эволюции Вселенной в целом. Оба эти направления постулируют, что в других частях Вселенной применимы законы физики, открытые на Земле. На самом деле, данный факт постоянно проверяется с помощью разных независимых методов, причем внутри Солнечной системы этот факт можно считать практически подтвержденным. Отметим, что только такой подход, основанный на единстве законов физики во всей Вселенной, позволяет изучать физическими методами объекты, с которыми мы не можем иметь непосредственного контакта для проведения над ними эксперимента. Поэтому основным методом теоретической астрофизики и космологии является моделирование. Суть этого метода состоит в том, что в рамках некоторой модели на основе известных физических законов предсказываются наблюдаемые проявления изучаемых объектов. Затем эти предсказания проверяются наблюдениями, которые могут либо подтвердить, либо опровергнуть предложенную модель.

Другой отличительной особенностью астрофизики и космологии является то, что типичные времена изменения астрофизических объектов слишком велики по сравнению с возможным временем их наблюдения. Казалось бы, это делает невозможным изучение эволюции астрофизических объектов. Однако это не так, потому что наблюдению, как правило, доступно сразу большое количество однотипных объектов разных возрастов. С одной стороны, это связано с тем, что вблизи нас такие объекты могут рождаться постоянно на протяжении продолжительного времени. С другой стороны, от удаленных объектов свет идет к нам

долгое время. Поэтому если во Вселенной в одно и то же время образовались некоторые объекты, то более удаленные из них мы будем наблюдать на более раннем этапе развития. Однако при таком подходе к изучению эволюции астрофизических объектов следует иметь некоторую осторожность. Это связано с тем, что детали рождения и развития объектов, которые образуются на различных этапах эволюции Вселенной, могут существенно отличаться. Так, например, звезды первого поколения (самые ранние звезды, формировавшиеся из вещества еще необогащенного тяжелыми элементами) вследствие малой металличности могли иметь существенно большие массы и эволюционировали быстрее, чем, например, звезды третьего поколения, обилие тяжелых элементов в которых близко к солнечному.

Еще одной особенностью астрофизики и космологии является существенная роль эффектов селекции. Под селекцией в астрофизике понимается то, что зачастую мы видим не самые распространенные объекты данного типа, а тех его представителей, которых легче всего наблюдать. Так, например, долгое время радиопульсары, которые являются очень яркими периодическими радиоисточниками, считались единственными представителями нейтронных звезд. Однако открытия последних пятнадцати лет показали, что это не так, а их выделенная роль была связана с тем, что такие источники легче обнаруживать. И хотя на настоящее время из известных более чем двух тысяч одиночных нейтронных звезд подавляющее число составляют именно радиопульсары, но реальная их доля в популяции существенно меньше.

1.1 Способы наблюдения внеземных объектов

Как отмечалось выше, в астрофизике и космологии отсутствует непосредственный контакт с предметом исследования. Поэтому единственный способ получения сведений о внеземных объектах — это их наблюдение. С незапамятных времен этим занималась еще астрономия, однако такое наблюдение позволяло лишь предсказывать перемещения звезд и планет по небесной сфере, но ничего не могло сказать об их строении и эволюции. Качественный перелом произошел в конце XIX века с появлением спектрального анализа, дающего возможность исследовать химический состав и физическое состояние (температуру, концентрации компонент и др.) источника света. Применение этого метода к звездам показало, что все они состоят из известных на Земле элементов, а их

физика подчиняется тем же законам. Это дало сильный толчок для исследования внеземных объектов на качественно новом уровне. В настоящее время спектральные методы являются одними из самых мощных наблюдательных инструментов в астрофизике и космологии, так как позволяют не только определять химический состав источника и его физические параметры, но и рассчитывать расстояние до удаленных объектов по смещению его спектральных линий. Для близких источников с помощью этого метода иногда удается получить распределение лучевых скоростей по объекту, что позволяет определить скорости внутренних движений и общую массу источника.

Дальнейшее развитие экспериментальных методов в астрофизике и космологии было связано с выходом наблюдений за оптический световой диапазон. Расширение наблюдаемого спектра сначала за счет радиодиапазона (конец 30-х годов XX в.), а затем (60–80-е годы XX в.) за счет инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-диапазонов, позволило получать об исследуемых объектах куда более полную информацию. Дальнейшим этапом стал вывод этих приборов в космос, что дало возможность избавиться от влияния земной атмосферы на регистрируемое излучение и сделать получаемую информацию более достоверной и качественной. На рисунке 1 приводится усредненный электромагнитный спектр Вселенной, принимаемый на Земле. Как видно из графика, существенный вклад в него дает реликтовое излучение (левый пик). Следующий пик имеет галактическое происхождение и связан в основном с излучением газопылевых облаков. Третий пик приходится на рентгеновскую область и гамма-диапазон. Он обусловлен очень горячими и взрывающимися объектами как нашей, так и других галактик.

Кроме ставшего уже традиционным способа изучения внеземных объектов по регистрации от них фотонного излучения в разных диапазонах энергии, информация о них может быть получена также детектированием и других частиц, например нейтрино. Как известно, нейтрино участвуют лишь в слабом и гравитационном взаимодействии, поэтому они очень плохо взаимодействуют с веществом. Например, для солнечных нейтрино Земля и большинство звезд являются прозрачными, так как длина свободного пробега нейтрино в этих объектах существенно превышает их размеры. Такая большая проникающая способность нейтрино создает серьезные технические проблемы при их регистрации, и именно поэтому нейтринные телескопы представляют из себя огромные установки, включающие в себя тонны специального вещества (воды, льда

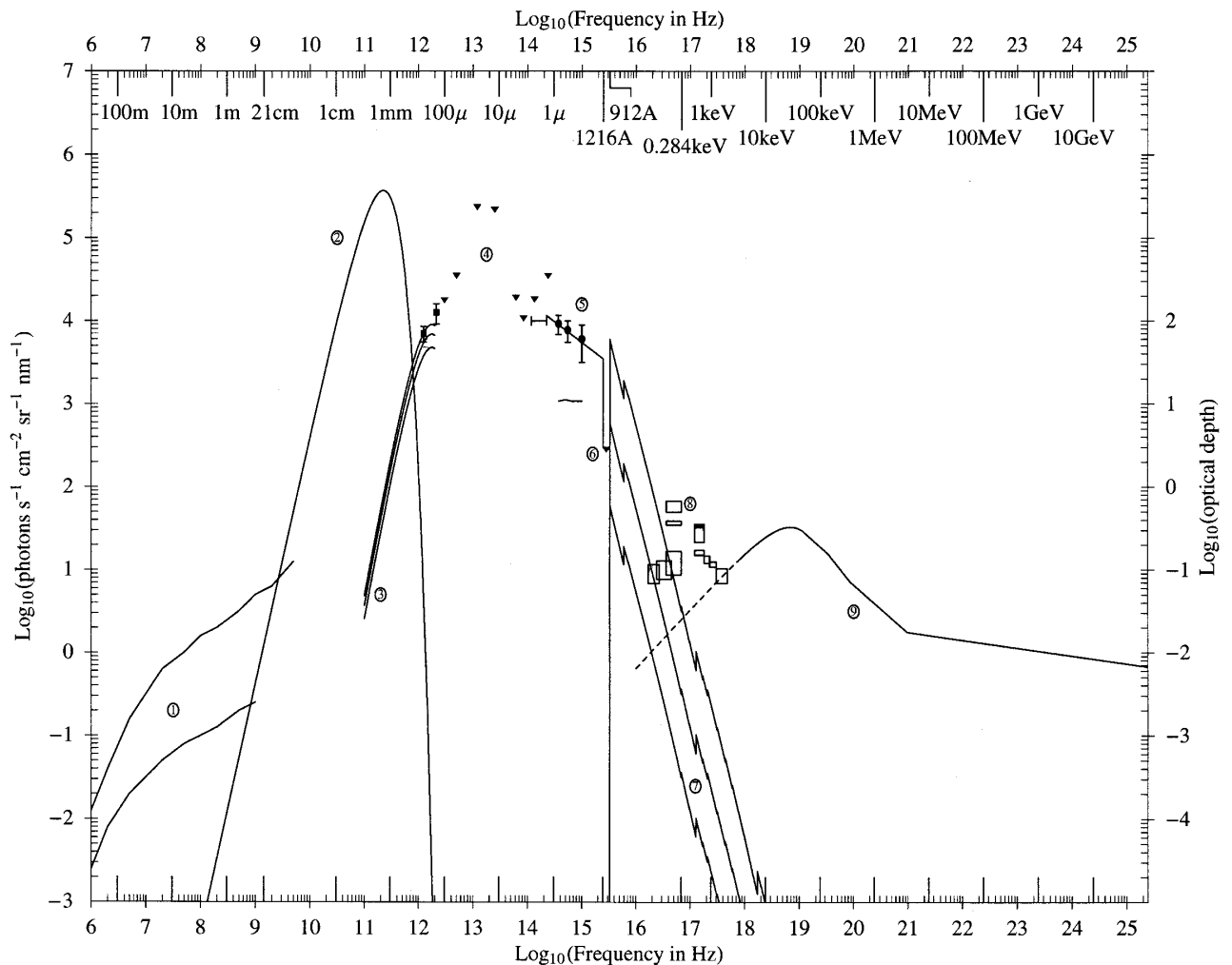


Рис. 1. Спектр фонового излучения Вселенной в фотонах. По вертикальной оси отложена интенсивность излучения в логарифмической шкале (число фотонов, приходящих за секунду на квадратный сантиметр поверхности из телесного угластерадиан в полосе нанометр), по горизонтальной оси, тоже в логарифмическом масштабе, частота, длина волны и энергия фотонов. Отдельные вклады в спектр слева направо: (1) радиоизлучение (рассеяние электронов на ионах и синхротронное излучение частично ионизованного диска Галактики), (2) реликтовый фон (чернотельное излучение с температурой $T \simeq 2.7$ K), (3) субмиллиметровый диапазон (реликтовое излучение, рассеянное на горячих электронах межзвёздного и межгалактического газа), (4, треугольники) инфракрасное излучение (газопылевые облака Галактики), (5, точки) видимый диапазон (звезды Галактики), линия ниже точек соответствует суммарному вкладу далеких галактик, (6) ультрафиолетовый диапазон (почти вертикальная кривая соответствует спектральной линии водорода Ly_{α} , излучаемой ионизованными межгалактическими облаками водорода с разными красными смещениями), (7) коротковолновая ультрафиолетовая область (излучение горячей межзвёздной плазмы за счет фотоионизации, разные линии соответствуют разной плотности водорода), (8, прямоугольники) пик в рентгеновском диапазоне (аккреционные диски вокруг нейтронных звезд и черных дыр, горячий межгалактический газ), (9) γ -диапазон (ядро и диск галактики). Взято из работы [1]

или сцинтиллятора), с которым и происходит взаимодействие нейтрино. Однако большая проникающая способность нейтрино не только создает трудности при их регистрации. Это же позволяет им свободно излучаться из плотных и горячих областей, существенно непрозрачных для других видов частиц. Например, нейтрино свободно выходят из ядра Солнца, тогда как фотоны имеют там длину свободного пробега, не превышающую сантиметра. Таким образом, регистрация нейтрино позволяет получать информацию о внутренних частях астрофизических объектов, недоступных для изучения с помощью фотонной астрономии. Детектируемые нейтрино обычно подразделяются по источникам, в которых они рождаются.

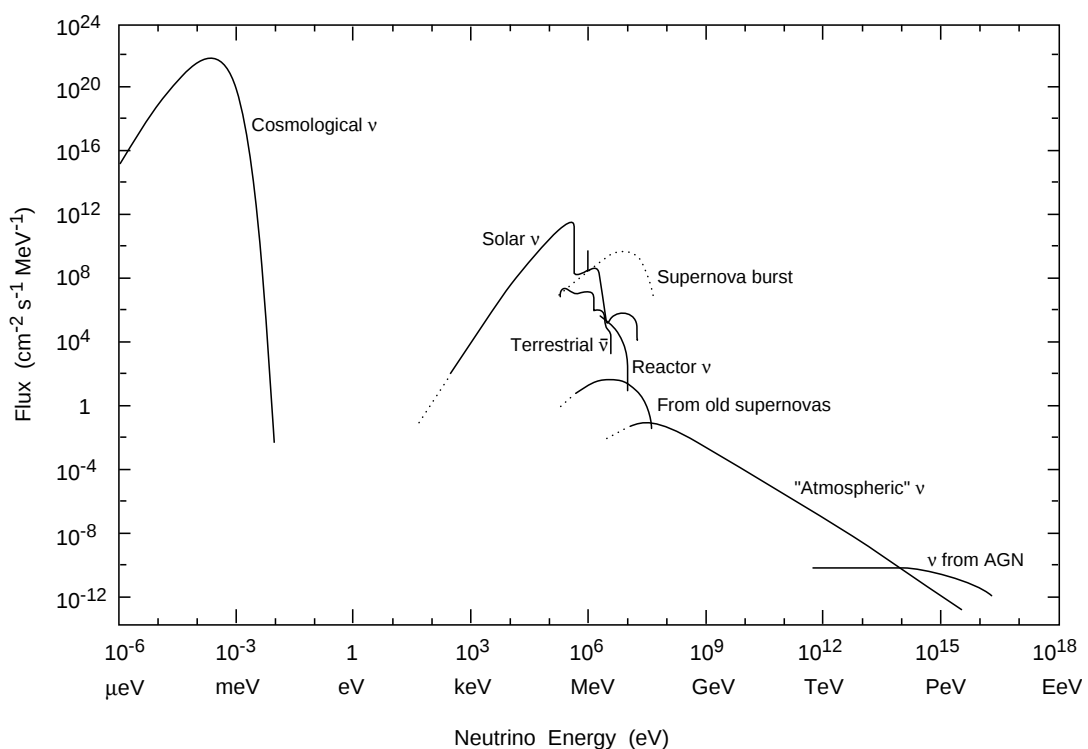


Рис. 2. Ожидаемая интенсивность потока нейтрино от различных источников: реликтовые, солнечные, земные, реакторные, атмосферные, от сверхновых и активных галактических ядер. (Взято из работы [2])

На рисунке 2 приводится примерный спектр нейтрино и их источники. Как видно из графика, наиболее интенсивный поток соответствует реликтовым нейтрино. Происхождение этих нейтрино аналогично происхождению реликтовых фотонов. На масштабе температур $T \sim 2.5$ МэВ ($t \sim 0.1$ с) нейтрино стали слабо взаимодействовать с веществом (для реликтовых фотонов это произошло при $T \sim 0.3$ эВ ($t \sim 400$ тыс. лет)) и далее лишь остывали за счет расширения Вселенной. Так как реликто-

вые нейтрино раньше перестали взаимодействовать с веществом, то их сегодняшняя температура должна быть меньше температуры реликтового излучения. К сожалению, роль реликтовых нейтрино в современной Вселенной невелика, а их экспериментальное обнаружение вряд ли будет возможно в ближайшее время. Однако в ранней Вселенной они существенно влияли на темп ее расширения и на ход первичного нуклеосинтеза. Поэтому их существование косвенно подтверждается теоретическими моделями и не вызывает сомнения в настоящее время. Следующими по энергии идут солнечные нейтрино, источником которых являются термоядерные реакции внутри Солнца. Отметим, что наблюдение именно солнечных нейтрино впервые позволило доказать наличие у нейтрино массы. Далее, достаточно близко по энергии к солнечным нейтрино стоят реакторные и геонейтрино. Как понятно из названия, первые из них имеют техногенную природу и рождаются в ядерных реакторах, тогда как источником геонейтрино являются распады радиоактивных изотопов в недрах Земли. Сюда же можно было отнести ускорительные нейтрино, которые рождаются в ускорителях частиц, однако их вклад в общую интенсивность достаточно мал. Отметим, что реакторные и ускорительные нейтрино не играют никакой роли в астрофизике, однако очень важны для наземных экспериментов, изучающих свойства нейтрино. Геонейтрино из-за слабости потока пока тоже не могут дать существенной информации о внутренних частях Земли, но, как показывают различные модели, они играют существенную роль в ее тепловом балансе. Далее по энергии следуют нейтрино от коллапса массивных звезд. На конечной стадии эволюции звезд с массой $M \gtrsim 10 M_{\odot}$ происходит коллапс их железного ядра, который приводит к нейтронизации вещества и короткому нейтринному всплеску (supernova burst на рис. 2). Затем остаток коллапса остывает за счет излучения нейтрино в течение примерно 10 секунд. Такой спектр близок к чернотельному и имеет характерную температуру $T \sim 10$ МэВ (from old supernova на рис. 2). Отметим, что чувствительность современных нейтринных телескопов позволяет детектировать поток нейтрино от сверхновой, если он произойдет в нашей галактике. Одним из наиболее известных кандидатов на такое событие является красный сверхгигант Бетельгейзе, который, по оценкам, может взорваться как сверхновая в любое время в течение нескольких следующих тысяч лет. Далее протяженную часть спектра занимают атмосферные нейтрино. Источниками этих нейтрино являются космические лучи, которые взаимодействуют с ядрами воздуха в атмосфере Земли. Примерно на

масштабе энергий $E \sim 10^{14}$ эВ в общем спектре начинают доминировать нейтрино космического происхождения, которые называют космические нейтрино высоких энергий. Их источником являются активные ядра галактик, в джетах которых происходит эффективное ускорение протонов и электронов на ударных волнах. Взаимодействие ускоренных протонов с фотонами приводит к рождению π -мезонов, которые могут распадаться на высокоэнергичные фотоны и нейтрино. Именно эти нейтрино и наблюдаются как космические. Отметим, что менее энергичные космические нейтрино аналогичным образом могут рождаться в оболочках сверхновых и в γ -всплесках, однако в этом диапазоне энергий их вклад в общую интенсивность существенно меньше, чем вклад атмосферных нейтрино.

Другим важным источником информации об астрофизических объектах является детектирование от них потоков высокоэнергичных частиц, получивших название космические лучи. К ним относятся заряженные частицы, такие как протоны, ядра более тяжелых элементов и электроны. Отличительной особенностью космических лучей является их огромная энергия. Она существенно превосходит тепловую энергию фотонов и даже нейтрино, излучающихся этими же источниками. Таким образом, потоки высокоэнергичных частиц должны рождаться во внешних областях астрофизических объектов, где возможны механизмы эффективного ускорения заряженных частиц. В частности, такое ускорение возможно, например, на фронте ударной волны (так называемый механизм ускорения Ферми) или в сильных электрических полях, существующих в радиопульсарах. Следовательно, детектирование космических лучей позволяет получать информацию о нестационарных явлениях во внешних областях астрофизических объектов. Усредненный спектр космических лучей приводится на рисунке 3. Отметим, что на графике не приведена низкоэнергетическая составляющая космических лучей. К ней относятся солнечные космические лучи, ускорение которых происходит во вспышечных процессах на Солнце. А также аномальные космические лучи, образующиеся в солнечной системе на периферии гелиомагнитосферы. Высокоэнергичная часть спектра делится на космические лучи галактического происхождения, энергия которых достигает значения $E \sim 10^9$ ГэВ, и космические лучи внегалактического происхождения, минимальная энергия которых составляет $E \sim 10^6$ ГэВ. Как видно из графика, внегалактические космические лучи имеют характерный завал интенсивности на масштабе $E \sim 10^{11}$ ГэВ. Этот завал связан с пределом Грайзена—Зацепина—Кузьмина, суть которого состоит в том,

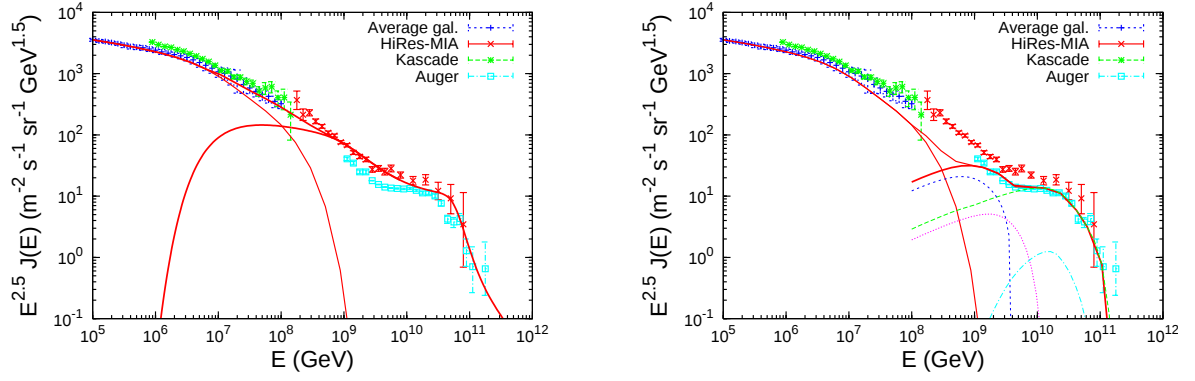


Рис. 3. Усредненный спектр космических лучей. Наблюдательные данные (точки) и их приближения (линии), полученные с помощью разных моделей источников внегалактических космических лучей и их химического состава. (Взято из работы [3])

что внегалактические протоны, имеющие энергию более $E \sim 5 \cdot 10^{10}$ ГэВ, будут эффективно терять ее из-за взаимодействия с фотонами реликтового излучения.

Существует еще один принципиальный способ получения информации об астрофизических объектах — детектирование от них гравитационных волн. И хотя пока прямой регистрации гравитационных волн не произошло, но есть косвенные подтверждения их существования. Кроме того, уже работающие детекторы имеют достаточную чувствительность, чтобы зарегистрировать гравитационные волны от слияния в тесной двойной системе, либо от взрыва сверхновой, если эти события произойдут в нашей галактике. Таким образом, есть надежда, что прямая регистрация гравитационных волн может произойти в ближайшем будущем.

Как было описано выше, основными способами получения информации об астрофизических объектах на настоящее время является регистрация от них фотонов, нейтрино и космических лучей. Детектирование гравитационных волн пока остается лишь теоретической возможностью. Однако даже их отсутствие, позволяет получать ограничения на физические параметры систем, от которых они ожидалось, но не были обнаружены. Сводная информация по основным видам частиц, регистрируемых в астрофизике, и их источникам приведена в таблице (1). В эту таблицу не были включены гравитационные волны, однако отметим, что на настоящее время наиболее интересными кандидатами на их регистрацию являются процессы слияния нейтронных звезд и черных дыр в тесных двойных системах.