

СКАЛЯРНЫЕ ПОЛЯ В КОСМОЛОГИЧЕСКИХ И АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Космология и астрофизика, науки о строении и эволюции Вселенной, находятся сейчас на необычайно интересном этапе своего развития. Это связано в значительной мере с открытиями последних десятилетий, заставляющих существенно менять наше представление об устройстве Вселенной. Эти открытия стали возможными благодаря быстрому развитию наблюдательной техники и средств обработки получаемой из космоса информации. Но сами по себе наблюдательные данные - это лишь полдела. Следующим шагом является осмысление этих данных с целью понять, что же за ними кроется. Ярким примером тому является открытое в конце XX века в астрономических наблюдениях ускоренное расширение современной Вселенной. Тот факт, что Вселенная расширяется, был известен еще с 20-х годов прошлого века. Однако до XX века считалось, что это расширение идет с замедлением, конца за счет торможения силами гравитации. Открытие же ускоренного расширения кардинально поменяло наше понимание современной эволюции Вселенной. Что же стоит за таким ускоренным расширением? Каковы его причины? Одним из ответов на эти вопросы является возможность наличия в современной Вселенной скалярных полей.

Что же такое скалярное поле? Оно пришло в космологию из теории элементарных частиц, где, начиная с 30-х годов прошлого века, оно широко используется при описании элементарных частиц и их взаимодействий. Для понимания сущности скалярного поля удобно провести следующую аналогию с классической механикой: Как и в механике, где для описания физической системы вводятся понятия кинетической и потенциальной энергии системы, для скалярного поля также можно ввести эти понятия. Тогда, например, для описания системы со скалярным полем, как и в обычной механике, достаточно будет лишь задать форму кинетической и потенциальной энергии. Как мы увидим в дальнейшем, различный выбор указанных энергий позволяет описывать совершенно различные физические системы с масштабами в диапазоне от микроскопических до размеров всей видимой Вселенной.

Пожалуй, одним из первых успешных применений скалярного поля в космологии явилось его использование в качестве основного механизма, обеспечивающего инфляционное расширение ранней Вселенной. На этом этапе своего развития Вселенная расширялась экспоненциально быстро, сумев за ничтожные доли секунды увеличить свои размеры с планковских, т.е. порядка 10^{-33} см, до макроскопических. Такое сверхбыстрое расширение стало возможным благодаря присутствию в ранней Вселенной особого типа скалярных полей, у которых энергия была сосредоточена в потенциальной части. На языке гидродинамики это соответствует наличию большого отрицательного давления, которое и обеспечивало «расталкивание» частиц в ранней Вселенной и их ускорение до огромных скоростей.

После завершения стадии инфляции энергия скалярных полей становится сосредоточенной в кинетической части. При этом поле начинает совершать быстрые колебания с потерей своей энергии на рождение различных типов элементарных частиц. Эта стадия эволюции ранней Вселенной, называемая скалярной, обеспечила присутствие вещества в ранней Вселенной. Из этого вещества впоследствии образовались звезды и галактики, а через несколько миллиардов лет - и наше Солнце со своей планетной системой, включая Землю. Т.е. можно сказать, что скалярные поля и есть тот первоисточник, который обеспечил как наличие планет и звезд, так и само существование нашей Вселенной в теперешнем ее виде!

Возникает вопрос: а что было до эпохи инфляции? Определенного ответа на этот фундаментальный вопрос, к сожалению, нет до сих пор. Однако, как показывают проводимые исследования, скалярные поля и здесь могут прийти на помощь. Дело в том, что, будучи фундаментальными по своей природе, скалярные поля могут описывать как макроскопические, так и микроскопические (квантовые) системы [1]. Способность скалярных полей быть проквантованными как раз и используется при моделировании самых ранних этапов эволюции Вселенной. Этим занимается наука квантовая космология. В ней, как и в обычной квантовой механике, вводится в рассмотрение волновая функция, которая только теперь применима не к отдельной частице, а ко всей Вселенной в целом. Квадрат этой волновой функции описывает вероятность прохождения тех или иных процессов во Вселенной. В частности, такая волновая функция дает вероятность самого рождения Вселенной. Используя различные скалярные поля, удастся выяснить, какие из них являются наиболее предпочтительными в смысле обеспечения большей вероятности рождения Вселенной с заданными свойствами. Другой важный вопрос, решаемый при этом, состоит в том, что разные скалярные поля дают различные начальные условия для инфляции. А это уже непосредственно влияет на всю последующую эволюцию Вселенной, и, в принципе, может быть проверено наблюдательно.

Возвращаясь к современной ускоренно расширяющейся Вселенной, отметим, что и здесь скалярные поля могут играть важную роль. Дело в том, что, как и на инфляционной стадии, рассмотренной нами выше и описывающей эволюцию ранней Вселенной, в современную эпоху Вселенная, по сути, также проходит чрез стадию инфляции. Поэтому вполне естественно предположить, что и в современной Вселенной имеются те или иные скалярные поля. При этом они могут быть распределены либо однородно по всей Вселенной, либо образовывать кластеры, т.е. относительно компактные гравитационно связанные объекты. В случае однородного распределения скалярные поля отвечают за ускоренное расширение Вселенной и являются одной из форм проявления так называемой темной энергии. Последняя представляет собой новую форму материи, однородно заполняющую Вселенную. В настоящее время ее природа не ясна. Но скалярные поля-один из основных кандидатов на роль темной энергии. Что касается кластеризованных скалярных полей, то они могут быть ответственными за наличие во Вселенной еще одной

загадочной субстанции - темной материи. Последняя настолько слабо взаимодействует с электромагнитным излучением, что является практически невидимой, а ее присутствие выявляется лишь по гравитационному взаимодействию с обычным веществом. И здесь скалярные поля, обладая нужными свойствами, позволяют с успехом использовать их при описании темной материи.

Переходя к более мелким пространственным масштабам, рассмотрим теперь, какую роль играют скалярные поля на уровне конфигураций с размерами звезд. Как показывают исследования, проведенные в последние 50- 60 лет, и здесь скалярные поля могут играть существенную роль. В простейшем варианте можно представить себе конфигурацию, состоящую из скалярного поля, удерживаемого собственным гравитационным полем, - скалярную звезду. Давление внутри такой звезды, противодействующее гравитационному полю и не дающее ей сжиматься, возникает за счет квантового принципа неопределенности Гейзенберга /2/. В этом смысле такая скалярная звезда есть некий квантово-классический объект, существование которого обеспечивается одновременно и квантовыми, и классическими свойствами скалярного поля. Как показали исследования, массы таких объектов могут меняться от атомных («гравитационный атом») до масс порядка солнечной. Не исключено, что таких объектов во Вселенной может быть достаточно много. Тогда в случае, если их электромагнитное излучение слабо, они вполне могут служить кандидатами на роль недостающей темной материи.

Другой интересной особенностью скалярных полей является тот факт, что их кинетическая энергия может быть отрицательной. Это свойство кардинально отличает скалярные поля от обычной материи и приводит к тому, например, что плотность энергии таких скалярных полей может быть отрицательной. Такие поля называются фантомными, или духовыми /3/. Если они действительно существуют в природе, то они могут образовывать очень интересные объекты, называемые кротовыми норами. Последние представляют собой туннели в пространстве-времени, соединяющие либо удаленные части нашей Вселенной, либо даже разные Вселенные. При этом, поскольку они могут быть макроскопическими, то через них может проходить обычное вещество и даже люди. Такие туннели являются существенно более короткими, чем тем расстояния, которые соединяют удаленные точки во внешнем по отношению к кротовым норам пространстве. Соответственно время, требуемое на перемещение из одной точки пространства в другую, по туннелю намного меньше, чем вне его. Т.е. такая кротовая нора есть, по сути, машина для перемещения во Вселенной на большие расстояния. И все это благодаря отмеченным выше удивительным свойствам духового скалярного поля.

Продолжая развивать эту идею, можно предположить, что кротовые норы могут быть заполнены обычным веществом, например таким, из которого состоят звезды. Тогда с точки зрения удаленного наблюдателя будет видна интересная картина: поскольку у кротовой норы есть два входа, то наблюдатель будет видеть две звезды, разнесенные в пространстве, но одинаковые по характеристикам. Кроме того, поскольку вещество может двигаться по туннелю, то это будет проявляться в периодическом и синхронном изменении яркости звезд. Этот факт можно установить наблюдательным путем, и если такие звезды-близнецы будут найдены во Вселенной, то

это можно будет рассматривать как указание в пользу действительного существования во Вселенной духовых скалярных полей.

До сих пор мы рассматривали скалярные поля, которые могут взаимодействовать с обычным веществом лишь гравитационно. Однако возможна ситуация, когда имеется прямое взаимодействие «скалярное поле - вещество». Примером таких полей являются хамелеоновые скалярные поля, которые непосредственно связаны с веществом. В этом случае они обретают новые интересные свойства. Например, масса их квантов становится зависимой от свойств того вещества, с которым они взаимодействуют. Это, в свою очередь, приводит к существенному изменению физических характеристик тех объектов, в которые входит хамелеоновое скалярное поле. Так, например, если такое поле образует вместе с обычным веществом звезду, то физические параметры такой звезды (масса, распределение плотности вещества, центральная плотность и температура и т.д.) могут быть совершенно иными, чем без скалярного поля. И если такие поля действительно существуют во Вселенной, то их влиянием никак нельзя пренебречь при построении моделей реальных звезд /4/.

Заканчивая этот краткий и далеко неполный обзор возможных применений скалярных полей в космологии и астрофизике, мы видим, что они играют существенную и разнообразную роль при описании различных космологических и астрофизических явлений. Они с успехом применяются при моделировании процессов как на космологических масштабах, сравнимых с размерами видимой Вселенной, так и на относительно небольших астрофизических масштабах, когда с них помощью описываются объекты с размерами порядка звездных. Временной интервал, на котором «работают» скалярные поля различной природы, также велик: от момента рождения нашей Вселенной около 14 млрд лет назад до наших дней. Все это делает скалярные поля универсальным инструментом, который, наряду с другими фундаментальными полями, позволяет создавать целостную и согласованную картину эволюции и строения ранней и современной Вселенной.

Список литературы

1. Линде А.Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология. - М.: Наука, 1990.-237 с.
2. Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В. Космология ранней Вселенной. - М.: Изд-во МГУ, 1988. - 200 с.
3. F. E. Schunck, E. W. Mielke, General relativistic boson stars, Class. Quant. Grav. 20, R301-R356 (2003). [arXiv:0801.0307 [astro-ph]].
4. E. J. Copeland, M. Sami, S. Tsujikawa, Dynamics of dark energy, Int. J. Mod. Phys. D15,1753-1936 (2006). [hep-th/0603057].