

ПРАВЛЕНИЕ 1. ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ НАУКА И ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПРАКТИКА: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

УДК 530.12

КОСМОЛОГИЯ И АСТРОФИЗИКА – ПЕРЕДНИЙ КРАЙ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ НАУКИ

Ю.П. Выблый

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь

А.А. Леонович

Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

Рассмотрены основные теоретические и экспериментальные достижения в области космологии и астрофизики. Дано краткие описания стандартной космологической модели, требующей существования темной энергии и темной материи, и описание открытия гравитационных волн.

Ключевые слова: космология, астрофизика, темная энергия, темная материя, космологическое расширение, гравитационные волны.

COSMOLOGY AND ASTROPHYSICS - THE FRONT EDGE OF FUNDAMENTAL SCIENCE

Yu.P. Vyblyi

Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

A.A. Leonovich

Belarusian State University of Informatics
and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

The basic theoretical and experimental achievements in the field of cosmology and astrophysics are considered. Brief descriptions of the standard cosmological model that require the existence of dark energy and dark matter, and a description of the discovery of gravitational waves are given.

Key words: cosmology, astrophysics, dark energy, dark matter, cosmological expansion, gravitational waves.

Фундаментальные и прикладные исследования в физике всегда играли ведущую роль в мировой науке. Использование результатов этих исследований в технике, в первую очередь в IT технологиях, кардинально изменили образ жизни человека за последние 50 лет, тем не менее,

фундаментальная физика остается наиболее притягательной областью как для ученых, так и для всех интересующихся наукой.

Начиная с середины 20-го века, ведущим направлением этих исследований была физика элементарных частиц, в рамках которой была построена стандартная модель фундаментальных взаимодействий (исключая гравитационное). Триумфальным подтверждением этой модели явилось экспериментальное открытие в 2012 году предсказанной ранее частицы - бозона Хиггса, играющей в теории центральную роль.

С другой стороны, начиная с конца прошлого столетия получили бурное развитие астрофизические и космологические исследования, в которых главную роль играет четвертое фундаментальное взаимодействие – гравитационное. После создания Альбертом Эйнштейном в 1916 году теории этого взаимодействия – общей теории относительности, космология и, отчасти, астрофизика, являлись в основном теоретическими дисциплинами. Ситуация стала быстро меняться благодаря созданию новых мощных наблюдательных установок: наземных и особенно орбитальных телескопов, работающих в различных волновых диапазонах - от инфракрасного до гамма диапазона. И новые открытия не заставили себя ждать! В 1998 году при наблюдениях за сверхновыми звездами типа Ia было обнаружено, что в удалённых галактиках, расстояние до которых было определено по закону Хаббла, сверхновые типа Ia имеют меньшую, чем предсказывалось, яркость и в дальнейшем эти результаты были неоднократно подтверждены [1,2]. Отсюда следует вывод, что в настоящее Вселенная расширяется не замедленно, как этого требуют уравнения Эйнштейна при наличии обычной материи, а ускоренно. За это открытие в 2011 году Сол Перлмуттер, Брайан Шмидт и Адам Рисс получили Нобелевскую премию по физике.

Для общей теории относительности открытие ускоренного космологического расширения привело без преувеличения к весьма драматическим последствиям. Для объяснения этого явления было введено в рассмотрение понятие «тёмной энергии» — однородной и изотропной субстанции, обладающей только гравитационным взаимодействием и имеющей отрицательное давление, если моделировать её идеальной жидкостью. В настоящее время можно выделить три подхода к объяснению природы тёмной энергии. Первый состоит во введении в уравнения Эйнштейна так называемого Λ -члена (где Λ - постоянная величина, называемая космологической константой), который рассматривал еще Эйнштейн, и от которого он отказался после появления работы Фридмана. Второй подход — моделирование тёмной энергии динамическим скалярным полем и третий, наиболее радикальный — модификация уравнений Эйнштейна, которая обеспечивает ускоренное расширения в современную эпоху и не противоречит наблюдаемым эффектам в слабых гравитационных полях.

Каждый из этих подходов имеет свои достоинства и недостатки и решающую роль в установлении модели тёмной энергии должны сыграть точные измерения темпа ускорения расширения. В современную эпоху

темная энергия вносит основной вклад в энергетический состав Вселенной. Согласно опубликованным в 2015 году данным наблюдений космической обсерватории «Планк», общая энергия наблюдаемой Вселенной состоит (с точностью до округлений) на 69,1 % из тёмной энергии, на 25,9 % - из тёмной материи (о ней будет идти речь далее) и только на 4,9 % из обычной барионной материи. Все имеющиеся экспериментальные данные и космологические модели вместе с теорией элементарных частиц позволили создать полный космологический сценарий эволюции Вселенной — так называемую стандартную Λ CDM-модель [3]. Наблюдаемая нами сейчас Вселенная возникла 13,8 миллиардов лет назад из некоторого начального состояния, названного Большим Взрывом, и с тех пор непрерывно расширяется и охлаждается. Ранняя Вселенная представляла собой высокооднородную и изотропную среду с весьма высокой плотностью энергии, температурой и давлением, и получила название горячая Вселенная. В результате расширения и охлаждения во Вселенной происходили фазовые переходы, приводящие к образованию различных элементарных частиц, частиц тёмной материи, барионов (протонов и нейтронов), атомов, а затем сгущений барионной материи в виде звёзд, планет и галактик. По мере космологического расширения и падения плотности остальных видов материи начинает доминировать тёмная энергия.

В создание современной космологической модели внесли вклад многие выдающиеся ученые и большие коллективы астрономов и астрофизиков. Совокупность этих результатов имеет настолько важное значение для понимания строения и эволюции Вселенной, что в 2019 году работы по космологии еще раз за последние 8 лет были отмечены Нобелевской премией — ее получил Джеймс Пиблс с формулировкой «за теоретические открытия в области физической космологии».

По мере введения в строй все новых, преимущественно орбитальных, телескопов увеличиваются массивы информации, относящиеся к различным астрофизическим объектам: звездам различных типов, черным дырам, галактикам. В настоящее время эти данные не являются изолированными, а встраиваются, достраивают или подвергают сомнению и полемизируют с Λ CDM-моделью. Наиболее близкой к космологии является часть астрофизики, занимающаяся галактиками и их соединениями, включая крупномасштабную структуру Вселенной. Именно отсюда мы знаем о другой весьма существенной и загадочной компоненте материи во Вселенной - тёмной материи [4].

Скопления галактик были теми индикаторами, которые в начале 1930-х годов впервые натолкнули Фрица Цвикки на мысль о существовании во Вселенной тёмной, ненаблюдаемой в электромагнитных волнах материи. Данные, полученные для материи во внешних областях самих галактик, показали, что скорость кругового движения для различных галактик не уменьшается по мере движения от центральных областей галактик к периферийным, как должно быть при сосредоточенности массы в светящихся

областях галактик, а выходит на константу, формируя так называемые плоские ротационные кривые галактик.

Эти данные, в совокупности с выводом о нестабильности дисков в спиральных галактиках без стабилизирующего их протяжённого гало, открытой в 1973 году Джерри Острайкером и Джеймсом Пиблзом, переломили мнение астрономов и астрофизиков, заставив их середине 1970-х годов признать наличие тёмной материи. Её природа до настоящего времени остаётся предметом дебатов. Кроме тёмной материи, существует большое число достаточно хорошо изученных наблюдательно астрофизических объектов, таких как квазары, пульсары, нейтронные звезды, черные дыры, сверхновые звезды, природа процессов в которых не совсем ясна или совсем неизвестна. К этому перечню относится и ряд очень далеких источников, выделяющих огромную энергию, таких как гамма-всплески и активные ядра галактик.

Огромным достижением в астрофизике последних лет явилось экспериментальное открытие в конце 2015 года гравитационных волн и идентификация их источников - сливающихся чёрных дыр [5]; с кратким описанием этого открытия можно ознакомиться, например, в [6]. Оно совершено международной коллаборацией LSC (LIGO Scientific Collaboration), которая включает в себя более тысячи исследователей из примерно 40 научно-исследовательских институтов из 15 стран. Ведущим проектом в этой коллаборации являются американская обсерватория LIGO. LSC работает в тесном взаимодействии и франко-итальянской коллаборацией Virgo, чей детектор расположен вблизи итальянского города Пиза. Американская обсерватория LIGO заработала в 2002 году. Для того, чтобы поймать гравитационную волну детектор должен быть в состоянии регистрировать смещения зеркал на фантастически малые расстояния – примерно 4×10^{-16} см. К настоящему времени обнаружено около десятка событий детектирования гравитационных волн, вызванных слиянием астрофизических объектов различной природы. В 2017 году основателям проекта LIGO Райнеру Вайссу, Бэрри Бэрришу и Кипу Торну была присуждена нобелевская премия.

Существует и развивается также проект космической гравитационно-волновой лаборатории eLISA – Evolved Laser Interferometer Space Antenna, (ранее LISA). Идея этого проекта – размещение лазерных гравитационных интерферометров со сверхдлинной базой на системе спутников, что еще на порядки повысит чувствительность детектора и позволит регистрировать низкочастотные гравитационные волны. eLISA – это планируемый совместный эксперимент американского НАСА и Европейского космического агентства. Для миссии eLISA вместе будут запущены три идентичных космических корабля, и затем они самостоятельно выйдут на постоянные орбиты вокруг Солнца. Корабли будут располагаться в вершинах почти равностороннего треугольника на расстоянии 5 млн. км друг от друга. В настоящее время эксперимент находится в стадии проектирования, предполагаемое время запуска – 2034 год.

Космология и астрофизика, наряду с квантовой физикой микромира, являются основой современной естественнонаучной картины мира. Важно отметить, что знание и понимание этой картины является, с одной стороны, обязательным условием для успешной научной работы в области фундаментальной физики, а с другой – в определенной степени необходимо каждому культурному человеку и, наверняка, человеку, имеющему университетское образование.

Список использованных источников

1. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant / Riess A.G. et al. // *Astron.J.* 1998. - Vol. 116. - p.1009-1038.
2. *Perlmutter, S.* Measurements of Omega and Lambda from 42 high redshift supernovae / S. Perlmutter // *Astrophys. J.* 1999.- Vol. 517. - p. 565-586.
3. *Горбунов, Д.С.* Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. / Горбунов, Д.С., Рубаков В.А. - М.: ЛКИ, 2008. – 614 с.
4. *Drees, M., Gerbier G.* (Particle Data Group) Dark matter / M. Drees, G Gerbier // *Chin. Phys. C.* 2016. - Vol. 40. - article 100001
5. LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / Abbott B.P. et al. // *Physical Review Letters.* 2016. -V. 116 (6). - 061102
6. *Выблый, Ю.П.* Открытие гравитационных волн / Ю.П. Выблый // *Вестник Фонда фундаментальных исследований.* 2016. - №4, с. 41–54.
7. *Шупляк В.И.* Значение курса «Основы современного естествознания» для естественно-научной подготовки специалистов в высшей школе / В.И. Шупляк, Г.И. Касперович // *Актуальные проблемы современного естествознания.* – Минск, изд-во РИВШ, 2018. – С.26 – 30.