

АНТОНИНО дель ПОПОЛО

НЕВИДИМАЯ ВСЕЛЕННАЯ

Темная материя и темная энергия.
Происхождение и исчезновение Вселенной

Перевод с английского
Н.Ф. Орловой

под научной редакцией
д-ра физ.-мат. наук
О.С. Сажиной

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2023

УДК 524.8
ББК 22.6
П58

П58 Пополо Антонино дель

Невидимая Вселенная

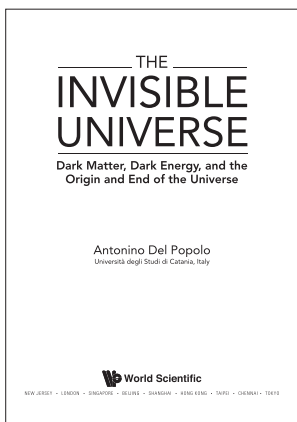
Темная материя и темная энергия.

Происхождение и исчезновение Вселенной

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2023 – 260 с. ISBN 978-5-94836-670-8

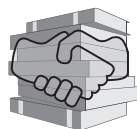
Звезды и небесные тела еще в древности волновали умы наших предков. Сегодня Вселенная намного сложнее для нас по сравнению с представлениями о ней сотни лет назад: черные дыры, нейтронные звезды, белые карлики, сверхновые, различные виды туманностей, галактик, скопления и сверхскопления галактик и многое другое. Самое удивительное состоит в том, что сегодня мы знаем: все бесчисленные объекты, которые мы наблюдаем во Вселенной – это всего лишь 5 процентов составляющей ее материи, лишь «видимая» ее часть.

В книге автор пытается ответить на самые сложные и интригующие вопросы космологии: как возникла и развивалась Вселенная; есть ли альтернатива теории Большого взрыва; безгранична ли Вселенная или у нее есть предел; что заставило Вселенную вырасти в невероятно малые сроки от микроскопических до макроскопических размеров. А в конце путешествия астрофизик Антонино дель Пополо приоткрывает завесу над тайной темной энергии – какую роль она играет в эволюции и возможном исчезновении Вселенной?



УДК 524.8
ББК 22.6

*Книга подготовлена в рамках проекта
«Книжная дипломатия»
Международной академии транспорта
и АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»*



Copyright © 2021 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Все права защищены. Настоящая книга не может быть воспроизведена целиком или частями никакими средствами, включая электронные, механические или фотокопирование, не может быть включена в базы данных или поисковые системы, как существующие на сегодняшний день, так и появившиеся позже, без письменного согласия Издателя.

Русский перевод выполнен с согласия World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., Singapore

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», перевод на русский язык, оригинал-макет, оформление, 2023

ISBN 978-5-94836-670-8

ISBN 978-981-125-263-1 (англ.)

Содержание

Введение	4
Глава 1. Краткая история теории Большого взрыва	8
Глава 2. Изначальная Вселенная	34
Глава 3. Откуда мы знаем, что темная материя существует?	66
Глава 4. Гармония мира	89
Глава 5. Что такое темная материя?	100
Глава 6. Золотой век физики частиц: Стандартная модель	114
Глава 7. Кандидаты в темную материю	148
Глава 8. Обнаружение темной материи	168
Глава 9. Темная энергия	187
Глава 10. Конец Вселенной.....	213
Приложения	231
Библиография	248
Предметный указатель	250

Введение

*У каждого из нас, как и у Луны, есть своя темная сторона,
которую никому никогда не показывают.*

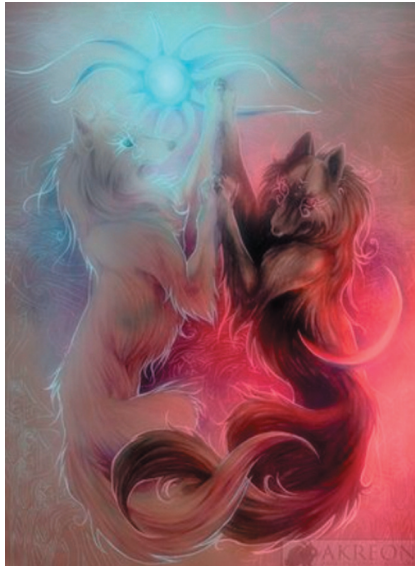
Марк Твен

Люди — это неотъемлемая часть Вселенной, материи, возникшей в результате Большого взрыва, чьи внутренности, мышцы, легкие и сердце связаны с элементами, сформированными в недрах звезд. Поэтому нет ничего удивительного в том, что человека изначально волновало небо, доказательством чему служат наскальные рисунки с изображением богов и героев, а также храмы и древнейшие астрономические обсерватории. Такова особенность нашего вида, названного Карлом Линнеем *Homo sapiens* (человек разумный). Греки называли человека *антропос*, что можно истолковать как «тот, кто смотрит вверх»¹.

Насколько нам известно, из всех видов, живших и живущих на этой планете, только человек обладает сознанием, способен наблюдать за небом, понимать его красоту и задаваться вопросами о смысле жизни и о смерти, о происхождении и исчезновении как человека, так и Вселенной. Более того, слово *homo* (человек) имеет тот же корень, что и слово *humus* (земля, грязь). Таким образом, *Homo anthropos* это своего рода мостик между землей и небом, наделенный с рождения любопытством, которое толкает его на исследование и постижение тайн природы. Небо объединяет огромное число людей, живших и живущих на Земле по сей день. Меняются и исчезают языки и цивилизации, как и религии, объясняющие то, что есть жизнь и каковы ее цели. Современная организация общества, конечно же, существенно отличается от той, что была десятки тысяч лет назад. Эволюция во всех сферах жизни изменила и уничтожила то, что некогда было незыблемым в самом образе мысли. Объединяет все эти изменения только небо, само оставаясь практически неизменным. У Луны все те же фазы, и Солнце следует своему годовому циклу, определяющему смену времен года. Положение созвездий, видимых в разные периоды года, практически не изменилось. В конечном итоге, люди, которые жили 30 тысяч лет назад под нашим небом, видели те же созвездия и все те же звезды в подобном положении.

¹ На самом деле слово *anthropos* можно разделить на *anō* (вверх), *anthreo* (смотрю) и *ops* (глаз). Это толкование находит свое подтверждение в «Метаморфозах» Овидия, где мы увидим: «Os homini sublime dedit, coelumque tueri iussit [deus]» (Человеку даровано лицо, повернутое вверх, а его взгляд устремлен в небо и поднимается к звездам). Книга 1, с. 85–86.

Однако очевидно и то, что хотя небо все то же, воспринимается оно по-другому: изменилось понимание небесных тел и явлений, из которых оно состоит, а также их смысл. Аборигены Австралии верили, что Солнце – это женщина, которая просыпается утром у себя дома на востоке и разжигает костер. Перед тем как отправиться в путь, она украшает себя красной охрой, которая, растворяясь в воздухе, окрашивает облако в красный цвет. Это был рассвет. Как только женщина достигала запада, она меняла свой макияж, окрашивая небо желтым и красным, и это был закат. Наконец Женщина-Солнце возвращалась под землей в свой дом. Для индоевропейских народов Солнце и Луна передвигались по небу на запряженных лошадьми колесницах, которыми управлял возничий. Викинги винили в солнечных затмениях волка Сколля, который гнался за богом Солнца, Солем, и, догнав его, разрывал на части. Тогда люди поднимали страшный шум – стучали горшками и сковородками, чтобы испугать волка и вернуть Солнце на место. То же самое случалось и во время лунного затмения: волк Хати пожирал Луну (Мани). Персы верили, что затмения – это кара господня, а римляне и представить себе не могли, что затмения вызваны природными явлениями. Понимание этого явления и предсказание затмений приписывают грекам (Фалес Милетский, 585 г до Р.Х.), хотя, по-видимому, еще древние халдеи 2500 лет назад уже знали о 18-летнем цикле, т.н. цикле Сароса, в конце которого повторяются затмения.



Сколль и Хати (2009). Предоставлено Akreon

Незнание природных явлений привело к созданию мифов и богов, управлявших всеми сферами жизни. И хотя некоторые греческие философы, а также представители Великой Греции (современная Сицилия), например Пифагор, Архимед, Анаксимандр, Эмпедокл и Аристарх, уже обладали более научным представлением о мире, его часто не воспринимали по культурным или политическим причинам. Например, Эпикур не принял атомистическую теорию. Даже Иоганн Кеплер многие столетия спустя считал, что планеты — это разумные существа. Декарт и Ньютон, хотя и верили, что природные законы созданы Богом и Вселенная сама управляет собой, следуя этим законам, считали, что Бог может в любой момент изменить эти законы. Ньютон полагал, что Бог постоянно вмешивается, чтобы планеты следовали правильным орбитам. С развитием исследований и научной мысли объяснительная роль богов и мифов существенно сократилась. Роли религии и науки явно разграничились.

Как мы сказали, небо объединяет нас с нашими предками. Всего лишь сто лет назад считалось, что Вселенная представляет собой звезды, планеты и кометы.

Сегодня Вселенная намного сложнее для нас по сравнению с представлениями о ней наших предков: черные дыры, нейтронные звезды, белые карлики, сверхновые, различные виды туманностей, галактик, скопления и сверхскопления галактик и многое другое. Самое удивительное состоит в том, что сегодня мы знаем: все бесчисленные объекты, которые мы наблюдаем во Вселенной, всего лишь 5 процентов составляющей ее материи, лишь «видимая» ее часть. Однако наше преимущество в знании по сравнению с нашими предками значительно сократится, если мы будем полагать, что обладаем ограниченным знанием даже малой части Вселенной, которую видим. Мы даже не понимаем, из чего она на самом деле состоит. Мы можем лишь количественно определить степень нашего невежества относительно Вселенной в процентах — 95%, и у этого невежества есть имя: темная материя и темная энергия. О первой мы имеем некоторое представление: вероятно, это неуловимые частицы, слабо взаимодействующие с обычным веществом. Относительно второй, которая начала проявляться всего несколько миллиардов лет назад, мы знаем и того меньше: возможно, это энергия вакуума, который действует как отталкивающая гравитация, но в сущности мы лишь нащупываем путь в темноте.

Космология изучает Вселенную во всей ее целостности, пытаясь понять ее происхождение, структуру и эволюцию.

В этой книге я изложу космологию так называемого Большого взрыва и альтернативную теорию, которая объясняет, как возникла и развивалась

Вселенная, переходя из состояния, где в горячей среде доминировала энергия, к кристаллизации энергии в галактиках и структурах, которые мы наблюдаем. Мы увидим, как возникла Вселенная в результате фазы ускоренного расширения, известной как инфляция (см. раздел 2.2 и Приложение А), что заставило Вселенную вырасти в невероятно малые сроки от микроскопических до макроскопических размеров, сглаживая свою геометрию и преобразуя энергию вакуума в материю и энергию.

Мы узнаем, как изучение галактик, скоплений галактик, отклонение света, производимого массами, и *микроволновое фоновое излучение*, или реликтовое излучение, пронизывающее всю Вселенную, помогли нам понять, что большая часть материи, составляющей Вселенную, невидима, а также обсудим несколько предположений относительно природы этой материи.

Темная материя состоит из частиц, которые отличаются от частиц обычной материи, новых частиц, предсказанных теориями, выходящими за рамки *Стандартной модели физики элементарных частиц*, полученных, выявленных и изученных в огромнейших ускорительных машинах, таких как БАК (Большой адронный коллайдер) в ЦЕРН (Европейском центре ядерных исследований) в Женеве. Мы обсудим эту модель, историю ее создания, основополагающие идеи ее построения, а также поймем, как мир, который мы видим таким прочным, на самом деле состоит из полей и волн, и как из полей и «симметрий» рождаются элементарные силы природы. Мы увидим, что этот мир разительно отличается от того, как мы его воспринимаем. Потом мы отправимся в «зоопарк» кандидатов в частицы темной материи и обсудим их свойства. Поговорим о частицах, чье существование продиктовано особой симметрией, *суперсимметрией*, и рискнем отправиться в малоизученные области дополнительных измерений в поисках частиц темной материи, и опишем методы, с помощью которых продвигаются поиски этого современного Грааля.

И тогда приоткроется завеса над тайной темной энергии и гипотезами относительно ее природы, что поможет нам сделать вывод о том, какую роль она играет в эволюции и конце Вселенной. Судя по ее известным на данный момент свойствам, темная энергия может привести Вселенную к тепловой смерти — и она превратится в некую вселенную, где в огромных и холодных пространствах перемещаются одни фотоны. Если же в будущем темная энергия обнаружит другие свойства, то возникнут новые сценарии развития Вселенной, где она вновь сожмется в результате *Большого хлопка* или будет иметь цикличную природу, благодаря которой после рождения, эволюции и смерти вновь, словно птица Феникс, возродится из пепла.

ГЛАВА I

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ТЕОРИИ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

История астрономии — это история уходящих горизонтов.

Эдвин Хаббл

1.1. Статическая Вселенная

С древних времен и до Средних веков концепция космоса основывалась на физике Аристотеля и астрономических моделях Птолемея. Вселенная была статической, ничто не менялось: планеты и звезды двигались в соответствии с неизменными и вечными циклами. Идеи Николая Коперника и Джордано Бруно, а также издание в 1687 году книги Исаака Ньютона *Principia Mathematica* («Математические начала натуральной философии») значительно изменили представление о космосе, но не представление о его статичной природе.

Неизменяемая Вселенная обладает удивительным обаянием. Одной из характерных черт западной мысли было предпочтение такого мирового устройства, где на Вселенную не влияет то, что происходит на Земле. В качестве примера подобного видения вещей можно привести древний миф о вечном возвращении, который в современные времена поддерживал даже Фридрих Ницше, или вселенную с часовым механизмом, типичную для ньютоновской механики. Взгляд Ньютона был редукционистским, или упрощенным: объяснение функционирования космоса сводится к использованию физических законов. Обобщенное толкование редукционизма приводит к статической природе Вселенной. В сущности, даже если планеты двигаются, то делают они это в соответствии с определенными и вечными законами, которые, повторяясь, способствуют появлению вселенной, которая всегда равна самой себе. Однако тут есть одна проблема: статичность вступает в конфликт с ньютоновской механикой. Поскольку гравитация притягивает, как указал Ричард Бентли в конце XVII века, судьба всех статических и конечных систем — это сжатие. Ньютону не составило труда разрешить этот парадокс. Достаточно было предположить, что Вселенная бесконечна и

массы распределены равномерно, что благодаря симметрии приводит к разрушению гравитационных сил. Таким образом, Вселенная Ньютона была бесконечна, равномерна, статична и находилась в состоянии неустойчивого равновесия. Однако вскоре замаячил еще один парадокс, подрывающий точку зрения Ньютона — т.н. парадокс Ольберса, согласно которому тот факт, что ночное небо не такое ясное, как днем, несовместим со вселенной, которая бесконечна и равномерно заселена звездами.

Представление о статической вселенной так долго владело умами, что изменения произошли лишь с приходом XX века. До открытия Хабблом расширяющейся Вселенной статическую вселенную признавали многие ученые XX века, в том числе Альберт Эйнштейн. Через два года после публикации трактата по общей теории относительности в 1917 году Эйнштейн приложил свою теорию ко Вселенной и обнаружил результаты, противоречащие его представлениям, равно как и представлениям других ученых того времени, о статичной природе Вселенной. Он обнаружил, что его уравнения предсказывали расширяющуюся или сжимающуюся вселенную. Не слишком доверяя в данном случае своим уравнениям и следуя общему предубеждению, что Вселенная по своей природе статична, Эйнштейн ввел в свои уравнения постоянную, космологическую константу Λ , которая, производя отталкивание, противодействует гравитационному притяжению и вынуждает Вселенную оставаться статической.

Проблема, с которой столкнулся Эйнштейн, используя свои уравнения, была сродни той, что обозначил Бентли несколько веков ранее в контексте ньютоновской механики, а именно: любая конечная и статическая система рано или поздно сожмется. Эйнштейн не мог решить проблему так, как Ньютон, из-за сложной структуры своей модели. Вселенная Эйнштейна имела особую геометрическую структуру, конечную и без границ. С точки зрения геометрии это была *3-сфера*, то есть трехмерная сфера, встроенная в четырехмерное пространство. Чтобы лучше в этом разобраться, поясню на примере: поверхность шара — это двумерная сфера, называемая *2-сферой*, в трехмерном пространстве. Данте Алигьери уже представил себе такую структуру: его *Рай* имеет структуру 3-сферы, как подметил в 1979 году математик Марк Петерсон¹. Его Вселенная была конечной, но беспредельной, безграничной, как сфера, и поскольку гравитация притягивает, — увы! — такая Вселенная не могла быть статической.

¹ В 2006 году это интуитивное наблюдение развил румынский физик и публицист Хория-Роман Патапиевич в своей книге «Глаза Беатриче: Каков был на самом деле мир Данте?»

Таким образом, если Ньютон сумел решить проблему и сделать вселенную статичной, предположив, что она бесконечна, равномерна и симметрична, в геометрии Эйнштейна этого не могло случиться. Поэтому, чтобы разрешить это противоречие, он ввел космологическую постоянную, которая должна была блокировать тенденцию к расширению или сжатию его вселенной.

Результатом стала статическая и закрытая Вселенная. Более того, космологическая константа Λ своим робким присутствием обнаруживала свое воздействие лишь на очень больших масштабах — космологических масштабах. Казалось, это хорошее решение проблемы. Эйнштейн считал, что в случае ненулевой космологической константы и нулевой плотности материи его уравнения не имеют решения. Однако он заблуждался, и в том же году Виллем де Ситтер показал, что Вселенная с космологической константой и лишенная материи экспоненциально расширяется. В течение двух лет Эйнштейн пытался найти ошибку в решении де Ситтера, но ему это так и не удалось.

1.2. Вселенная Фридмана

Однако природу не так просто обуздать, и рано или поздно все тайное становится явным. И вот в 1922 году Александр Фридман, русский метеоролог, по образованию физик и математик, многогранный человек по натуре, работавший в обсерватории Петрограда (ныне Санкт-Петербург), опубликовал статью под названием «О кривизне пространства» в немецком научном журнале, а то время физика, образно говоря, была синонимом Германии. Полученные им решения не отличались от тех, к которым ранее пришел Эйнштейн: они определяли однородную, изотропную и нестатическую вселенную. В отличие от Эйнштейна, Фридмана эти результаты не испугали. Решения уравнений Фридмана, то есть возможные вселенные, которые описываются этими уравнениями, бывают трех типов, как видно на рис. 1.1.

Три типа вселенных, т.е. решения уравнений Эйнштейна, зависят от плотности массы-энергии Вселенной (помните, что масса и энергия — это две стороны одной и той же монеты, как показал Эйнштейн в своей знаменитой формуле $E = mc^2$). Несложно определить конкретную величину плотности, называемой критической плотностью, ρ_c , равную $8,6 \times 10^{-30}$ г/см³, т.е. 0,000000000000000000000000000086 г/см³ (см. врезку 1), или, проще говоря, 5 атомов водорода на кубический метр. Эта плотность называется критической, поскольку различает три разных типа геометрии во Вселенной. На рис. 1.1 показаны три возможных типа Вселенной.

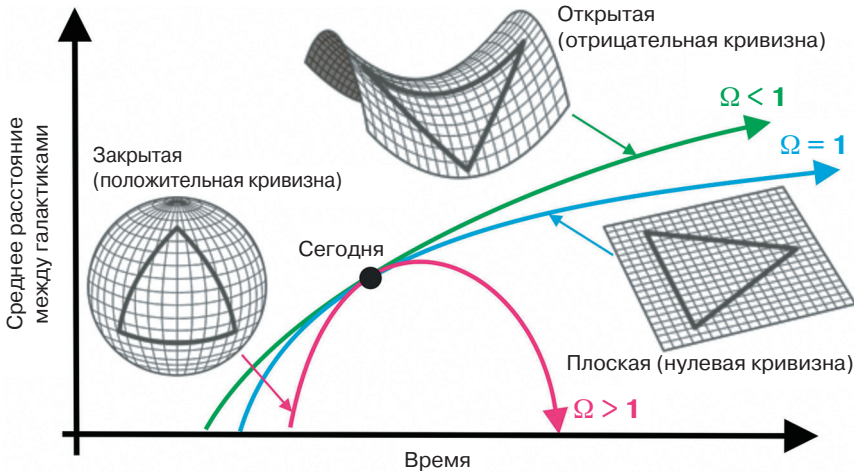


Рис. 1.1. Три вселенных Фридмана

Каждая кривая показывает рост расстояния между галактиками со временем. По вертикальной оси на рис. 1.1 отложен т.н. параметр расширения, который представляет относительное расширение Вселенной, и его можно рассматривать как среднее расстояние между галактиками. По горизонтальной оси отложено время.

Если средняя плотность Вселенной (ρ) больше критической плотности ρ_c , то Вселенная расширяется до максимального радиуса, а потом снова сжимается, как видно по красной кривой на рис. 1.1.

Врезка 1

Степени десяти

Чтобы записывать большие и малые числа более простым и компактным образом, ученые используют обозначение степеней 10. Степень 10 – это число, за которым следует число нулей, равное показателю степени. Например, если мы хотим написать 1000, т.е. 1 с тремя нулями, то пишем 10^3 . Масса Солнца составляет 2×10^{30} кг, т.е. 2 с 30 нулями: 2 000 000 000 000 000 000 000 000 000.

В случае малых чисел, например одной тысячной, $1/1000 = 0,001$, а именно: 1, а перед ним три нуля, пишем 10^{-3} .

Итак, 10^n обозначает 1, за которой следуют n нулей, а 10^{-n} обозначает 1, которой предшествует n нулей.

Единицы массы, используемые в астрофизике

Как правило, масса небесных тел велика. Масса Солнца в килограммах составляет 2×10^{30} , она часто используется как единица измерения массы и записывается как $1 M_{\odot}$.

Итак: $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$ кг.

Звезда массой в 8 раз большей, чем масса Солнца, обозначается как $8 M_{\odot}$.

Единицы расстояния в астрофизике

Как и масса, расстояния в астрофизике выражаются другими единицами:

Астрономическая единица, или а.е., это расстояние от Земли до Солнца, $\sim 149\,597\,870\,700$ км.

Световой год, или св. год, это расстояние, которое проходит свет за один год: $9\,460\,730\,472\,581$ км.

Парсек, или пк – это расстояние, равное 3,26 световых года, т.е. $3,26 \times 10^{16}$ м. Кратные парсека это килопарсек (кпк, 1000 пк), мегапарсек (Мпк, 10^6 пк) и гигапарсек (Гпк, 10^9 пк).

Единицы температуры и энергии

В этой книге температура измеряется в градусах Кельвина и обозначается К. Чтобы перевести температуру в градусы Цельсия, надо вычесть 273,16 из величины температуры в градусах Кельвина.

В качестве меры энергии мы будем использовать электрон-вольт, эВ, и его кратные: килоэлектрон-вольт (кэВ, 1000 эВ), гигаэлектрон-вольт (ГэВ, 10^9 эВ) и тераэлектрон-вольт (ТэВ, 10^{12} эВ).

Электрон-вольт можно также выразить в градусах Кельвина: $1 \text{ эВ} \sim 11\,600 \text{ К}$.

Массу предмета можно выразить в электрон-вольтах и его кратных. Например, масса протона $m_p = 1,67 \times 10^{-27}$ кг $\sim 938 \text{ МэВ}/c^2$.

Фридман назвал это решение «периодическим миром». Пространство подобно трехмерной сфере (*3-сфера*, о которой мы говорили ранее), и по этой причине пространственная геометрия вселенной называется *сферической*. Эта Вселенная называется *закрытой вселенной*¹, и она имеет положительную кривизну.

¹ Кривизна указывает, как далеко кривая или объект отклоняется от плоского состояния. Здесь и далее «Вселенная» с прописной буквы означает описание нашей вселенной.

В отличие от евклидовой геометрии, в этой вселенной сумма внутренних углов треугольника больше 180 градусов, пространство конечно, и две параллельные прямые сходятся. Если плотность меньше критической, как видно по зеленой кривой на рис. 1.1, Вселенная расширяется бесконечно, и поэтому мы говорим об *открытой вселенной* с отрицательной кривизной. Ее пространственная геометрия называется *гиперболической*, поскольку напоминает седло лошади, а пространство бесконечно. В гиперболической геометрии сумма внутренних углов треугольника меньше 180 градусов, и две параллельные прямые сходятся в одном направлении, а расходятся в другом. Если плотность равна критической, что соответствует синей линии на рис. 1.1, Вселенная будет расширяться бесконечно, геометрия *евклидова*, где сумма внутренних углов треугольника равна 180 градусов, и две параллельные линии не пересекаются. Кривизна такой вселенной равна нулю. Этот тип Вселенной также называется *плоской Вселенной*, поскольку ее геометрия подобна плоскости.

В космологии в практических целях вместо критической плотности ρ_c используют отношение между плотностью ρ и критической плотностью ρ_c . Это отношение называют *параметром плотности* и обозначают $\Omega = \rho/\rho_c$. Параметр плотности также выражает количество массы определенного вида с точки зрения критической плотности. Например, как мы увидим, *барионная материя* (та, из которой мы состоим) составляет всего 5 % материи во Вселенной, и поэтому с точки зрения ρ_c мы напишем $\Omega_b = 0,05$. Три типа геометрии, которые мы видели ранее и которые представлены на рис. 1.1, можно выразить через параметр плотности Ω следующим образом: у плоской вселенной с плотностью равной критической ($\rho = \rho_c$) он равен 1 ($\Omega = 1$); у гиперболической вселенной Ω меньше 1 ($\Omega < 1$), а у закрытой вселенной Ω больше 1 ($\Omega > 1$).

Три варианта решений Фрийдмана можно объяснить интуитивно с помощью ньютоновской механики. Если мы бросим мяч вверх со скоростью меньше 11,2 км/с (называемой *скоростью убегания*¹), минимальной скоростью, с которой объект покидает Землю, преодолевая гравитационное притяжение), мяч упадет вниз. Так происходит в закрытой вселенной Фрийдмана ($\Omega > 1$). Если мяч движется быстрее скорости убегания, он больше не вернется на Землю. Это соответствует гиперболической вселенной ($\Omega < 1$). Если же скорость равна скорости убегания, мяч тоже никогда не вернется на Землю, и у нас $\Omega = 1$.

Фрийдман не только показал, что Вселенная Эйнштейна неустойчива (расширяется или сжимается), но и первый сказал, что Вселенная имеет начало, а также оценил ее возраст: 10–20 миллиардов лет. Вселенная могла родиться из того, что математики называют *гравитационной*

¹ Вторая космическая. — Прим. перев.

сингулярностью, т.е. точки, в которой кривизна стремится к бесконечной величине. Как примеры гравитационной сингулярности, помимо той, что связана с рождением Вселенной, можно назвать *черные дыры*, о которых все мы слышали, — они поглощают всё, что проходит мимо в определенном радиусе, даже свет! Однако Фридмана сингулярность интересовала не с точки зрения физики, а с точки зрения математики.

Как мы узнаем далее, всего лишь через несколько лет, в 1927 году, Жорж Леметр объяснил физический смысл гравитационной сингулярности: взрыв т.н. *первоначального атома*, в наше время известного как Большой взрыв. Этот термин с известной долей иронии ввел Фред Хойл: он был сторонником модели вселенной, альтернативной модели Большого взрыва, т.н. *теории устойчивого состояния*¹. Объясняя свою теорию во время радиоэфира Би-би-си, он сказал: «Эти теории основаны на гипотезе, что вся материя во Вселенной была создана во время одного Большого взрыва в конкретный момент в далеком прошлом».

В ответ на статью Фридмана Эйнштейн кратко высказал свое мнение в прессе, заявив, что вычисления русского ученого ошибочны. Фридман написал Эйнштейну письмо, где постарался объяснить свою точку зрения. Лишь год спустя по настоянию Юрия Круткова, коллеги Фридмана, Эйнштейн прочел письмо и понял, что был не прав. Он опубликовал статью, где признал, что решения Фридмана были верными, но с его точки зрения «лишены смысла с точки зрения физики». Однако прямо перед публикацией последнюю фразу сняли.

Прошло еще десять лет, прежде чем Эйнштейн в полной мере оценил правоту Фридмана, а в 1931 году он удалил космологическую константу из своих уравнений и, со слов Георгия Гамова в 1956 году, пришел к выводу, что введение Λ в уравнения было «самой большой ошибкой в моей жизни».

В 1923 году, помимо вышеизложенных результатов, Фридман обсуждал проблему определения геометрии вселенной, используя триангуляцию²

¹ Теория стационарной Вселенной/устойчивого состояния — это космологическая модель, предложенная Фредом Хойлом, Германом Бонди и Томасом Голдом, в основе которой лежит *совершенный космологический принцип*, т.е. представление о том, что Вселенная однородна и изотропна в пространстве и во времени. Вселенная расширяется и обладает одними и теми же свойствами в любой момент времени и в любой точке пространства. Уменьшение плотности благодаря расширению компенсируется непрерывным созданием материи.

² Триангуляция — это метод, позволяющий вычислить неизвестное расстояние, используя геометрические свойства треугольников.

удаленных небесных тел, например Андромеды. Эта идея, подобно идее Гаусса, нашла применение всего несколько десятилетий назад, благодаря некоторым космическим полетам и с использованием намного больших масштабов, чем те, что предлагал Гаусс.

Фридман прожил недолгую (1888—1925), но очень яркую и насыщенную жизнь. Он проявил себя еще в школе, вместе со своим близким другом, математиком Яковом Тамаркиным. По окончании школы поступил в Университет Петрограда, ныне Санкт-Петербурга, где преподавал физик Пауль Эренфест. Он стал профессором Пермского университета, а потом получил место в Геофизической обсерватории Петрограда, а вскоре ее возглавил. Во время Первой мировой войны на борту бомбардировщика Фридман лично убедился в правоте своих баллистических теорий и получил Георгиевский крест за боевые заслуги. А в 1925 году даже побил рекорд по полетам на воздушном шаре, достигнув высоты 7400 метров для проведения своих экспериментов. В том же году он умер от тифа.

Несмотря на значительные результаты, научные труды Фридмана не оказали существенного влияния на астрономическое сообщество его времени, может быть, потому, что он умер вскоре после публикации своих работ.

1.3. Леметр и расширение Вселенной

По иронии судьбы результаты Фридмана и его обоснование теории Большого взрыва получили развитие благодаря бельгийскому священнику-иезуиту Жоржу Леметру.

Леметр родился в 1894 году в Шарлеруа. Как студент, изучающий инженерное дело, он вступил в бельгийскую армию во время Первой мировой войны. После войны в 1920 году получил ученую степень, а потом поступил в семинарию и в 1923 году получил сан аббата. Параллельно продолжает обучение в Кембридже под руководством Артура Эддингтона, высоко ценившего его способности. Позже Леметр продолжил обучение в Массачусетском технологическом институте, где получил вторую научную степень. В 1925 году он обнаружил решения Фридмана уравнений общей относительности. На знаменитой Сольвевской конференции 1927 года познакомился с Эйнштейном и узнал, что они уже были получены Фридманом.

В том же году Леметр опубликовал на французском языке свою известную статью «Однородная Вселенная постоянной массы и возрастающего радиуса, объясняющая радиальные скорости внегалактических

туманностей»¹ в малоизвестном бельгийском научном журнале *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*. В этой работе он рассматривал динамические решения уравнений общей теории относительности с более физической точки зрения, нежели Фридман, и предположил, что со временем радиус Вселенной может произвольно меняться. В результате он пришел к выводу, что существует взаимосвязь между скоростью удаления, т.е. отрыва, внегалактических туманностей, и расстоянием, на котором они найдены, известная сегодня под названием закон Хаббла. В результате он вывел уравнение $v = kr$, где $k = 0,68 \times 10^{-27} \text{ см}^{-1}$, а именно $0,000000000000000000000000000068 \text{ см}^{-1}$ (см. врезку 1, Степени десяти). Числовые значения в этом отношении были получены с помощью оценок скорости туманностей Слайфера и Стромберга. Леметр не придавал большого значения полученному результату, однако указал, что сдвиг к красному (красное смещение) туманности следует интерпретировать не как эффект Доплера², т.е. как удаление галактик в статической вселенной, но как результат динамики самой системы. Это полностью совпадает с современной точкой зрения. Красное смещение, наблюдаемое в спектрах удаляющихся от нас галактик, является не следствием движения галактик в пространстве, а фактом расширения пространства и увлечения галактик.

Врезка 2

Световой и электромагнитный спектр

В природе есть разные виды волн, например те, что мы видим на пруду, когда бросаем в воду камень. Звук тоже представляет собой волну. Когда некое тело колеблется, его колебания передаются воздуху, который доносит их до нашего уха. Свет — это волна, произведенная колебанием электрического и магнитного поля, и поэтому называется электромагнитной волной. Электрическое поле обозначают **E**, а магнитное — символом **B** (см. врезку 5, где объясняется, что такое поле). Распространяется магнитное поле со скоростью примерно 300 000 км/с (рис. Б2.1).

¹ Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nebuleuses extra-galactiques.

² Эффект, открытый Кристианом Допплером в 1842 году, согласно которому частота волн, излучаемых движущимся объектом, больше при приближении объекта и наоборот (см. врезку 3, Эффект Доплера).

Электромагнитная волна

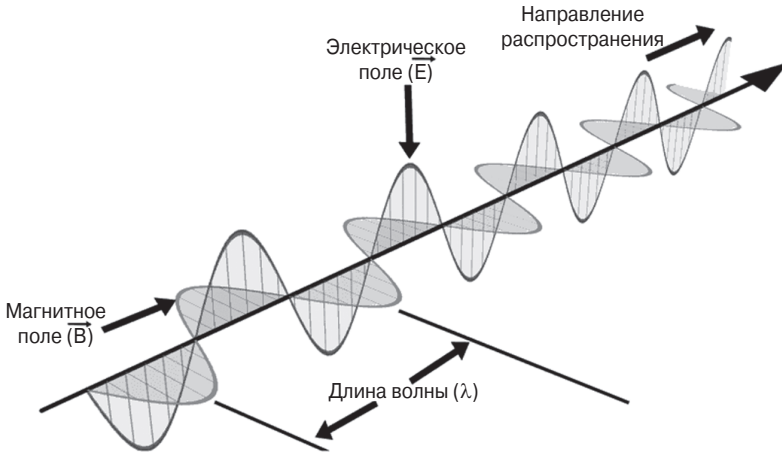


Рис. Б2.1. Электромагнитное поле

Все волны имеют *длину волны*, расстояние между двумя пиками, показанными на рис. Б2.2.

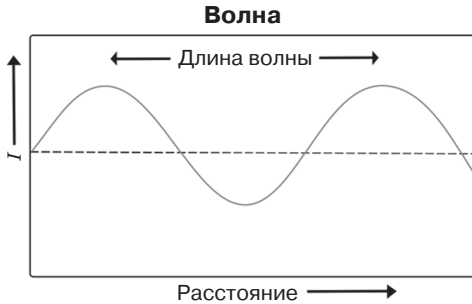


Рис. Б2.2. Волна

Частота ν обозначает число колебаний в секунду и связана с *длиной волны* λ отношением $\lambda \nu = \text{скорость волны}$. Волна с большей скоростью имеет большую энергию. Наши глаза восприимчивы к видимому свету, длина волны которого колеблется между 390 и 700 нм, где нм — это *нанометр*, или миллиардная часть метра. Свет, который мы видим, белого цвета, но с помощью призмы его можно разложить на компоненты от фиолетового до красного, как видно

на рис. Б2.3, который называется непрерывным спектром. Помимо видимого света, есть и другие электромагнитные излучения. Весь набор электромагнитного излучения представляет электромагнитный спектр, который состоит из спектральных участков, как видно на рис. Б2.3. Итак, от меньшей длины волны к большей, есть радиоволны, микроволны, инфракрасные, видимые, рентгеновские и гамма-лучи.

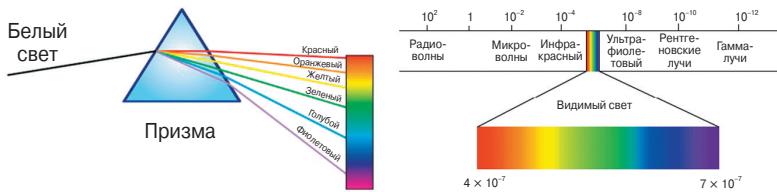


Рис. Б2.3. Световой спектр и спектральные диапазоны

В зависимости от температуры, химического состава и плотности небесные тела излучают в разных участках спектра. Электромагнитное излучение не всегда ведет себя как волна. В одних экспериментах как волна, в других как частица. Бывает также, когда частицы в некоторых экспериментах ведут себя как волны. В физике такую двойственную природу компонентов материи — волновую и корпускулярную — принято называть *корпускулярно-волновым дуализмом*. Таким образом, свет можно рассматривать как состоящий из частиц, которые двигаются со скоростью света, без заряда и массы, называемых фотонами, которые обычно обозначают греческой буквой γ .

То, что спектральные линии (см. врезку 3, Спектр поглощения и излучения) небесных тел и галактик сдвинулись в красную сторону (см. врезку 3, Эффект Доплера), было известно уже во второй половине XIX века. В 1842 году Кристиан Доплер, а в 1845 году и Арман Физо заметили, что спектральные линии, наблюдаемые в свете некоторых звезд, сдвинулись в сторону красного участка спектра, а некоторые в сторону голубого.

Это свойство использовал Уильям Хаггинс для определения скорости звезд, а в 1912 году Весто Слайфер применил этот метод к галактике Андромеды, определив, что она приближается к нам со скоростью 300 км/с. В 1917 году он получил результаты относительно движения 25 систем, из которых только четыре к нам приближаются, и установил, что средняя скорость галактик 570 км/с.

Врезка 3

Спектр поглощения и излучения

В простом, хотя и некорректном представлении атом водорода состоит из протона в центре и вращающегося вокруг него электрона. Есть разные уровни энергии, обозначенные буквой n . Электрон можно найти только на одном энергетическом уровне, т.е. $n = 1, 2, 3...$ У каждого атома имеется уникальное количество электронов в единственной конфигурации, т.е. у каждого элемента есть свой собственный четкий набор энергетических уровней. Это устройство энергетических уровней представляет собой своего рода отпечаток пальца атома. Если фотон ударяет атом, а энергия фотона равна разнице между двумя энергетическими уровнями, тогда электрон на нижнем уровне может поглотить фотон и прыгнуть на верхний уровень, *возбуждая* атом. Если же энергия фотона не равна разнице энергии между двумя уровнями, то он не поглотится. То же самое происходит во время перехода с более высокого на более низкий уровень. В первом случае мы говорим о поглощении фотона (рис. Б3.1).

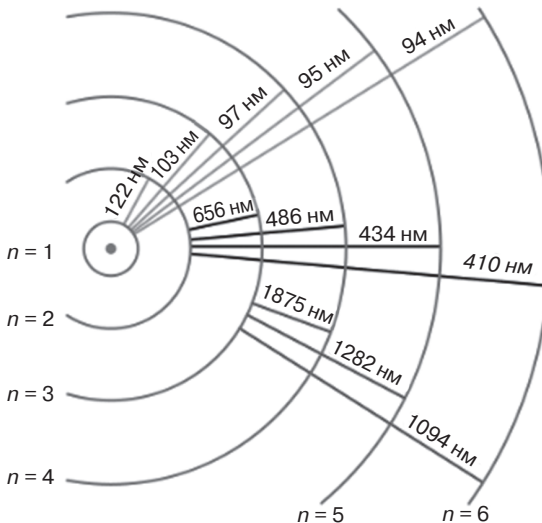


Рис. Б3.1. Энергетические уровни атома водорода

Давайте подсветим газ, свет которого потом пройдет через призму (или дифракционную решетку) (рис. Б3.2).



Рис. Б3.2

Если мы рассмотрим свет после прохождения сквозь газ, мы заметим пропуски, темные пустые промежутки. Темные линии соответствуют энергиям (длинам волн), для которых есть разница в энергетических уровнях водорода. Поглощаемые фотоны появляются как темные линии, потому что фотоны с такими длинами волны поглощаются (рис. Б3.2, правая часть).

Давайте проведем еще один эксперимент: свет горячего газа проходит сквозь призму (или дифракционную решетку) (рис. Б3.3). Мы получим спектр излучения (рис. Б3.3, правая часть).



Рис. Б3.3

Спектр излучения будет абсолютно противоположным спектру поглощения.

Поэтому темные линии в спектре поглощения соответствуют частотам света, поглощенным газом. Эти темные линии точно соответствуют частотам спектра излучения.

В опыте с поглощением мы видим черные линии. Каждая из них соответствует разным элементам.

На рис. Б3.4 представлены некоторые линии в солнечном спектре.

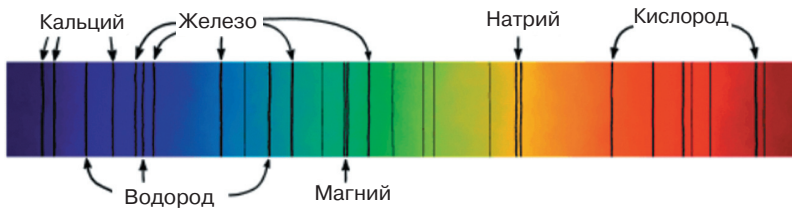


Рис. Б3.4

Из того, что мы увидели, можно сделать следующий вывод: у каждого элемента типичный спектр, как штрих-код, который его безошибочно определяет.

Эффект Доплера

Галактики состоят из мириад звезд, спектры которых объединяются в спектры, подобные звездным. Изучение спектра позволяет помимо всего прочего определить скорость галактик. Линии спектра приближающейся галактики смещаются в голубую сторону (*голубое смещение*), а линии удаляющейся галактики смещаются в красную сторону (*красное смещение*), как видно на рис. Б3.5.

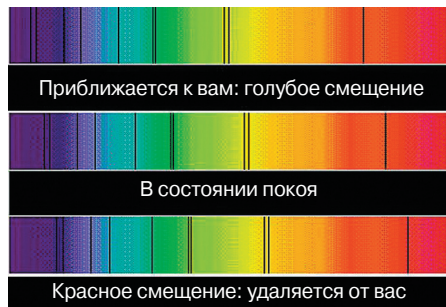


Рис. Б3.5. Красное смещение

Если представить себе, что тело — это лента, то происходит следующее: при удалении она как бы растягивается, а при приближении — сжимается (рис. Б3.6).

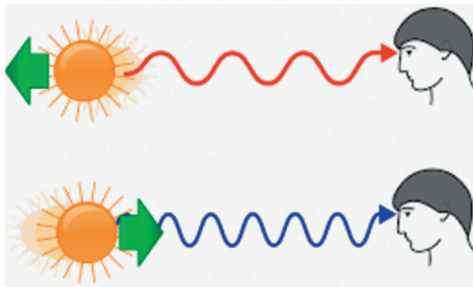


Рис. Б3.6

Это явление называется *эффектом Доплера*, по имени Кристиана Доплера, который открыл его в 1845 году. Эффект Доплера применим к любой волне, в том числе звуковой. Когда приближается машина скорой помощи с воющей сиреной, звук (громкость) выше, поскольку по мере сжатия волны ее длина уменьшается, а частота и вместе с ней и энергия увеличиваются. Когда скорая удаляется, звук сирены ослабевает из-за обратного эффекта.

Чтобы проверить это явление, Доплер нанял группу музыкантов, которые играли в вагоне поезда. Слушая звук при приближении и удалении вагона, он удостоверился, как работает открытое им явление.

Тем не менее идеи из статьи Леметра не были приняты. Эйнштейн, дискутируя с ним, сказал, что с точки зрения математики статья безупречна, а с точки зрения физики ужасна.

В течение трех лет статья Леметра, опубликованная в малоизвестном журнале, оставалась незамеченной и обратили на нее внимание совершенно случайно. На заседании Королевского астрономического общества де Ситтер обсуждал результаты своей последней работы, опубликованные в материалах конференции. На той же конференции Эддингтон выразил мнение, что необходима модель, промежуточная между моделями Эйнштейна и де Ситтера. И тогда Леметр написал Эддингтону о своей работе. Эддингтон рассказал о ней де Ситтеру и другим своим коллегам, перевел на английский язык, чтобы сделать ее еще более востребованной. Статья стала популярной, однако ее фундаментальную часть удалили. В сущности в переводе 1931 года не было раздела с данными и дискуссии по поводу закона Хаббла¹, поскольку Леметр как переводчик и редактор статьи не считал этот пункт важным.

1.4. Первичный атом

За исключением Фридмана к идее о Вселенной, у которой есть начало, астрономы относились с недоверием. Да и для самого Фридмана сингулярность представляла собой лишь «математический объект». Только Эддингтон в 1928 году в своей книге «Природа физического мира» упо-

¹ Закон Хаббла: расстояние между галактиками прямо пропорционально скорости их удаления.

мянул состояние, из которого возникает и расширяется Вселенная, хотя он и не был убежден, когда сказал, что «Вселенная началась со взрыва».

К представлениям Эддингтона всерьез отнесся Жорж Леметр, профессор астрофизики в Католическом университете в Лувене.

В своей статье 1931 года «Расширяющаяся Вселенная» он высказал предположение, что могла существовать статическая протовселенная, в которой «вся энергия была в форме электромагнитного излучения, и она внезапно сконденсировала в материю». Эта идея нашла свое подтверждение в его статье «Принцип мира с точки зрения квантовой теории», опубликованной в 1931 году в журнале *Nature*, где он писал:

«Мы могли бы представить себе начало Вселенной в виде уникального атома, атомный вес которого — это суммарная масса Вселенной. Этот в высшей степени неустойчивый атом будет делиться на все меньшие атомы во время сверхрадиоактивного процесса».

Эта идея получила дальнейшее развитие во время ряда конференций, проведенных Бельгийским астрономическим обществом, Британской ассоциацией продвижения естествознания, а также в публикации «Расширение пространства». В этой статье Леметр писал:

«Таким образом, первоначальное расширение происходило в три этапа: первый период стремительного расширения, в котором атом-вселенная разбивается на атомные звезды; второй период — замедления, а вслед за ним третий период — ускоренного расширения».

Модель Леметра показала, что у Вселенной есть начало, но исключала наличие сингулярности. Он не обсуждал происхождение первичного атома, но допускал его существование до т.н. радиоактивного взрыва. Согласно его теории, бесполезно обсуждать свойства первичного атома до момента взрыва, поскольку пространство и время начались бы только после его распада. Это точно соответствует современной точке зрения: пространство и время возникли в результате Большого взрыва и поэтому не имеет смысла обсуждать, что было до этого.

Как сказал Святой Августин, «мир был создан не во времени, а в свое время», или, как говорил Стивен Хокинг, «думать о том, что происходило до Большого взрыва, все равно что думать, что расположено к северу от Северного полюса».

Если работа Леметра о расширении Вселенной получила признание, то модель первичного атома научное сообщество не восприняло. Приведу всего лишь один пример: в январе 1933 года Эйнштейн посетил семинар

Леметра о космическом излучении, которое Леметр ошибочно считал неким «реликтовым излучением», которое могло дать нам информацию относительно первых моментов Вселенной. После семинара Эйнштейн обсуждал с Леметром вопросы космологии и сказал, что ему не нравится его идея о «первичном атоме», поскольку она «в значительной мере предполагает [теологическую] идею создания». После конференции Леметра в Пасадене на тему космологии первичного атома Эйнштейн пошел еще дальше, сказав: «Это самое красивое и самое всеобъемлющее объяснение создания, которое я когда-либо слышал». Эйнштейн, как и другие ученые, путался в понятиях «создание» и «начало». Для Леметра исходная сингулярность была не «созданием», а «естественным началом» вещей. Он всегда разделял религию и науку — настолько, что при личной встрече с Папой Пием XII сказал, что поддержанная Папой в 1951 году идея о том, что наука подтвердила Книгу бытия, неверна.

1.5. Внегалактическая природа туманностей

С точки зрения наблюдений, до конца 20-х годов прошлого века считалось, что Вселенная совпадает с нашей Галактикой. 26 апреля 1920 года состоялся спор между Харлоу Шепли и Гебером Кёртисом на эту тему: Шепли считал, что Вселенная состоит только из нашей Галактики, а Кёртис полагал, что наша Галактика — лишь одна из многих. Тогда в споре не было ни победителя, ни проигравшего.

Большой спор разрешился лишь несколько лет спустя, после публикации в 1925, 1926 и 1929 гг. трех работ американского астронома Эдвина Хаббла. Он показал внегалактическую природу NGC 6822 (галактики Барнарда), а также галактик M33 и M31, дав обоснование тезису Кёртиса, которую поддержали и другие астрономы, например Эрнст Эпик и Кнут Лундмарк. Для этого Хаббл использовал особые звезды *цефеиды*, которые мы скоро обсудим¹.

Курьезный эпизод из жизни Шепли свидетельствует о том, что и ученым ничто человеческое не чуждо.

Когда Шепли работал в Обсерватории Маунт-Уилсон вместе с Хабблом и Милтоном Хьюмасоном, Хьюмасон показал ему фотографическую пластинку с изображением одной из цефеид в галактике Андромеды. Тогда Хьюмасон пометил пластинку, чтобы потом ее было проще

¹ Хаббл уже приступил к поиску взрывающихся звезд, называемых *новыми*. Он заметил одну из новых среди звезд, но, приглядевшись, понял, что это цефеида, что и позволило ему определить расстояние до Андромеды.

найти. А Шепли, поняв, что с помощью этой цефеиды можно доказать, что Вселенная намного больше его модели, а значит, разрушает ее значимость, стер пометку, пытаясь таким образом скрыть свои заблуждения относительно существования других галактик. Очевидно, Хьюмасын знал расположение этой цефеиды и сказал его Хаббл, который и определил расстояние до Андромеды¹.

Эдвин Хаббл родился в 1889 году в Маршфилде. Изучал математику и астрономию в Чикагском университете, а потом получил ученую степень в области права в Королевском колледже в Оксфорде. Вернувшись в США, начал изучать физику, математику, а потом испанский язык, которым занимался и в Оксфорде, и лишь в 1914 году решил связать свою жизнь с астрономией. В 1917 году получил докторскую степень и в 1919 году Джордж Хейл, директор Обсерватории Маунт-Уилсон в Пасадене, предложил ему постоянную работу.

Знания Хаббла в области астрономии и физики были весьма ограничены, однако он сумел достичь значительных успехов в своей карьере.

Полученные Хабблом результаты стали возможными благодаря фундаментальному открытию Генриетты Ливитт, которая в 1908 году опубликовала свою работу «1777 переменных звезд в Магеллановых облаках» в журнале *Annals of Harvard College Observatory* (Анналы обсерватории Гарвардского колледжа), а в 1912 году в информационном бюллетене обсерватории под номером 173 вышла ее статья «Периоды 25 переменных звезд в Малом Магеллановом облаке». В этих работах Ливитт показала существование взаимосвязи между яркостью и периодом переменных звезд под названием цефеиды, по имени Цефеи, второй обнаруженной звезды этого типа. Эти звезды периодически пульсируют, период изменяется от нескольких дней до пары месяцев, благодаря чему меняется их яркость в результате сложных явлений, имеющих отношение к степени их эволюции. Чем больше период колебания, тем больше их внутренняя яркость.

Генриетта Ливитт была одной из знаменитых «женщин-компьютеров» — астрономов, нанятых Эдвардом Пикерингом для составления каталога спектров и яркости звезд на фотографических пластинках обсерватории. Считается, что за четыре года работы они каталогизировали 225 000 звезд и в 1890 году опубликовали первый каталог, который в 1949 году был расширен до 360 000. Открытие Ливитт было столь значительным, что в 1924 году Королевская академия Швеции выдвинула ее на Нобелевскую премию. К сожалению, Ливитт умерла в конце 1921 года.

¹ Андромеду также называют М31 как 31-ю галактику в каталоге Мессье.

Важность цефеид состоит в том, что они служат *стандартными свечами*, эталонными звездами, для которых можно определить *абсолютную величину*, или *внутреннюю яркость*, которая в случае с цефеидами связана с периодом колебания. А по *внутренней яркости/светимости* и по *кажущейся светимости*, т.е. той, что мы наблюдаем, можно определить и расстояние.

Поясню на примере: допустим, у нас есть электрическая лампочка, и мы знаем ее мощность, обычно измеряемую в ваттах и называемую также *яркостью*, т.е. количество энергии, которое она выделяет в одну секунду. Если мы будем отодвигать лампочку на все большее расстояние, то заметим, что она светит все менее ярко. Интенсивность света, который мы наблюдаем, изменяется по мере изменения расстояния. То количество, которое можно назвать *кажущейся яркостью*, или технически *поток*, зависит от внутренней или реальной яркости лампочки и от расстояния и уменьшается пропорционально квадрату последнего. Другими словами, если поток лампы на расстоянии одного метра равен 1, то на расстоянии 10 м он будет равен $1/100$, а на расстоянии 100 м — $1/10\,000$. Зная внутреннюю яркость лампочки и измерив ее кажущуюся яркость, поток, можно определить, как далеко от нас лампочка, используя это известное отношение. И так, чтобы определить расстояние, мы должны измерить поток и знать внутреннюю яркость объекта. Покупая лампочку, мы знаем ее яркость от производителя, но в случае с астрономическим объектом все обстоит иначе. Однако есть объекты, для которых мы уже знаем или же можем вычислить внутреннюю яркость, т.е. существуют стандартные свечи. Или вот еще один пример: допустим, рыбаки ночью хотят понять, как далеко они находятся от берега, и они видят свет маяка. Чем дальше они от берега, тем менее ярок свет маяка. Чтобы точно определить расстояние до берега, рыбаки должны были узнать заранее действительную яркость и измерить кажущуюся. Вот и для определения расстояний в космологии нам нужны космические «маяки».

1.6. Хаббл и расширяющаяся Вселенная

Хотя Леметр теоретически обосновал закон расширения Вселенной, благодаря упомянутым ранее осложнениям он так и не был признан научным сообществом. В определенном смысле и сам Леметр был тому виной, поскольку, как уже было сказано, в английском переводе своей статьи 1927 года собственноручно убрал практически все ссылки на закон расширения.