

АСТРОФИЗИКА

НОВАЯ КАРТА ВСЕЛЕННОЙ

Трехмерная карта, отображающая миллионы галактик на протяжении 11 млрд лет космической истории, помогает ответить на некоторые из важнейших вопросов космологии

Кайл Доусон и Уилл Персивал

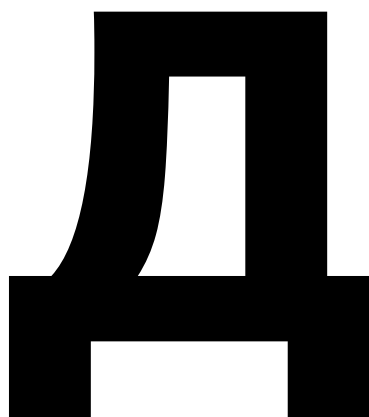


ОБ АВТОРАХ

Кайл Доусон (Kyle Dawson) — профессор физики и астрономии Университета Юты. Был научным руководителем программы «Расширенный спектроскопический каталог барионных осцилляций» (eBOSS), сейчас — один из представителей по связям с общественностью перспективного проекта DESI («Спектрограф для изучения темной энергии»).



Уилл Персивал (Will Percival) — руководитель Центра астрофизики Университета Уотерлу (провинция Онтарио, Канада) и член-корреспондент Института теоретической физики «Периметр». Был научным сотрудником программы создания каталога eBOSS, в настоящее время — главный научный координатор программы разработки космического телескопа для наблюдения в ближнем инфракрасном диапазоне «Евклид».



Дуглас Адамс в своей книге «Автостопом по Галактике» писал: «Космос огромен... Вы просто не поверите, как безмерно, исключительно, ошеломляюще он огромен». Мы и многие другие астрономы посвятили свою научную деятельность созданию карт Вселенной на максимально возможных масштабах — тому, чтобы открыть, насколько на самом деле велик космос и как он устроен.

Создаваемые нами карты имеют решающее значение для изучения физики, которая управляет эволюцией космоса. В июле 2020 г. в рамках продолжавшегося 20 лет проекта, над которым мы работали, под названием «Цифровой каталог звездного неба Слоуна» (*Sloan Digital Sky Survey, SDSS*) была составлена самая подробная карта космоса из когда-либо созданных. Она охватывает наше непосредственное окружение, самые дальние уголки Вселенной и все, что находится между ними. На этой трехмерной карте отмечено местоположение 4 млн галактик, как фонари разбросанных в пространстве, растянувшимся на многие миллиарды световых лет, и во времени начиная с самых ранних эпох существования Вселенной.

Карта показывает, что галактики не распределены в пространстве случайным образом. Наоборот, они группируются, образуя причудливую картину: длинные нити (филаменты) и двумерные листы галактик (стенки) в одних областях и почти не содержащие галактик темные пустоты (войды) — в других. Ученые считают, что эта картина возникла еще до того, как родились

галактики, менее чем через 1 млрд лет после Большого взрыва. Фиксируя на карте самые отдаленные эпохи космической истории, мы можем запечатлеть развитие этой картины и вывести фундаментальные законы, управлявшие их эволюцией. Новый атлас галактик дает нам важнейшую информацию, столь необходимую для понимания некоторых из самых больших загадок физики, таких как геометрия Вселенной и природа темной энергии — движущей силы ускоряющегося расширения пространства.

Ядра и оболочки

Проект «Цифровой каталог звездного неба Слоуна», для составления которого используется Телескоп Фонда Слоуна обсерватории «Апач-Пойнт» в Нью-Мексико, включал в себя проект «Расширенный спектроскопический каталог барионных осцилляций» (eBOSS) и его предшественника BOSS. В этой работе измерения базировались на картине распределения галактик в космосе, которая обуславливается барионными акустическими осцилляциями (BAO). Чтобы разобраться в этой картине,

мы должны рассмотреть эволюцию Вселенной в течение первых 300 тыс. лет, начиная с первой доли секунды после Большого взрыва. В то время Вселенная переживала период быстрого расширения, называемого инфляцией, при котором она росла настолько быстро, что субатомные масштабы увеличились до размеров мяча для гольфа за 10^{-32} с. Во время инфляции мельчайшие квантовые флуктуации в распределении энергии во Вселенной выросли до макроскопических размеров. Постепенно области с большей плотностью энергии притягивали все больше и больше материи, оставляя другие области пустыми. В течение следующих 13,7 млрд. лет эти плотные области сформировали филаменты, стенки, сверхскопления и скопления галактик, которые мы наблюдаем сегодня. Астрономы называют этот процесс формирования крупномасштабной структуры.

Картина барионных акустических осцилляций обусловлена характером взаимодействия излучения и материи и его влиянием на формирование крупномасштабной структуры. Вселенная содержит два типа материи: взаимодействующее с электромагнитным излучением обычное (или барионное) вещество, с которым мы привыкли иметь дело в нашей повседневной жизни, и не взаимодействующее, называемое темной материей. В горячей и плотной ранней Вселенной частицы обычной материи и электромагнитного излучения (фотоны) сталкивались друг с другом так часто, что, по существу, составляли единое целое (плазму), тогда как темная материя могла перемещаться сама по себе. Гравитация заставляла темную материю группироваться в центрах плотных областей, а давление света, пытающегося вырваться наружу, уносило барионную материю прочь.

Пути обычной материи и излучения разошлись примерно через 380 тыс. лет после Большого взрыва (так называемый момент рекомбинации), когда Вселенная расширилась и остыла настолько, что частицы образовали нейтральные атомы, а фотоны получили возможность распространяться свободно. Эту первую вспышку света все еще можно наблюдать в небе как космическое микроволновое фоновое (или реликтовое) излучение. Теперь, когда излучение и материя перестали быть привязанными друг к другу, избыток барионной материи сгруппировался в сферических оболочках вокруг областей с повышенной плотностью темной материи. Гравитация стягивала к этим

структурам как барионную, так и темную материю, но в результате этого процесса на материи Вселенной отпечатался узор в виде сверхплотных областей, окруженных сферическими оболочками. Образованная барионными акустическими осцилляциями (то есть волнами плотности вещества в эпоху, которая предшествовала эпохе рекомбинации) структура обладает характерным масштабом, равным размеру сопутствующего звукового горизонта, и видна на картах распределения галактик.

Мы можем использовать эту структуру в качестве так называемой стандартной линейки — удобный способ измерения космических расстояний. Из-за того, что все эти «узоры» образовались почти одновременно

Поскольку свету далеких галактик требуется много времени, чтобы достичь телескопа, эти карты показывают нам 11 млрд лет космологического времени, охватывая большую часть истории Вселенной

и одинаковым образом, плотные области и оболочки имеют примерно одинаковый характерный размер — каждое такое «ядро» от его оболочки отделяют примерно 500 млн световых лет. Но когда мы видим эти структуры на наших картах, они кажутся меньше или больше в зависимости от того, как далеко они от нас расположены. Поэтому если измерить их видимый размер на ночном небе и сравнить его с известным нам характерным размером, то можно определить расстояние до них.

Распространение света

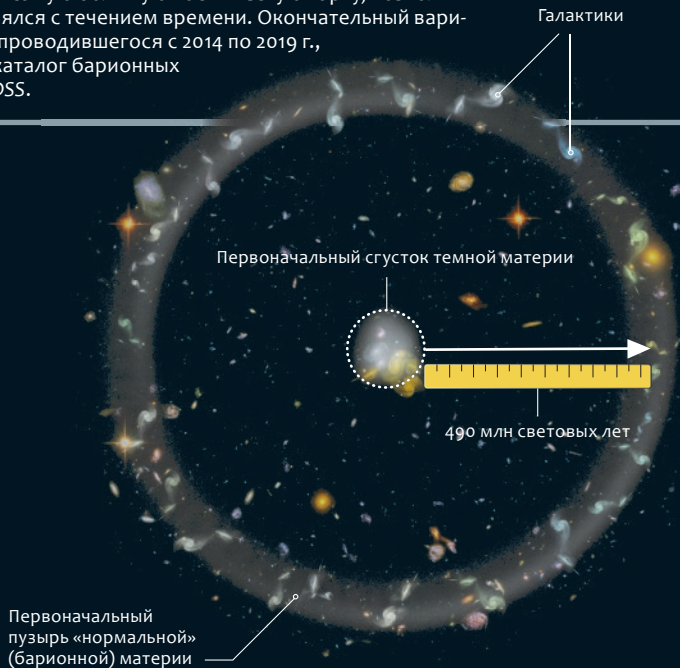
Подобные вычисления расстояний с помощью стандартных линеек позволяют нам измерить среднее расстояние до ряда галактик, но сами по себе они не несут космологической информации. Для полноты картины нам нужна дополнительная информация о скорости, с которой галактики удаляются от нас. Каталог Слоуна содержит все данные, чтобы предоставить эту информацию. Помимо получения подробных изображений одной трети неба, целью программы SDSS было спектроскопическое исследование — определение

Насколько быстро расширяется Вселенная?

Темная энергия — загадочная сила, заставляющая Вселенную расширяться все быстрее и быстрее. Чтобы понять темную энергию, астрономы, в течение двух десятилетий работавшие над проектом «Цифровой каталог звездного неба Слоуна», создали самую большую космическую карту, позволяющую увидеть, как темп расширения Вселенной менялся с течением времени. Окончательный вариант карты был подготовлен в рамках исследования, проводившегося с 2014 по 2019 г., под названием «Расширенный спектроскопический каталог барionных осцилляций» (eBOSS), бывшего частью программы SDSS.

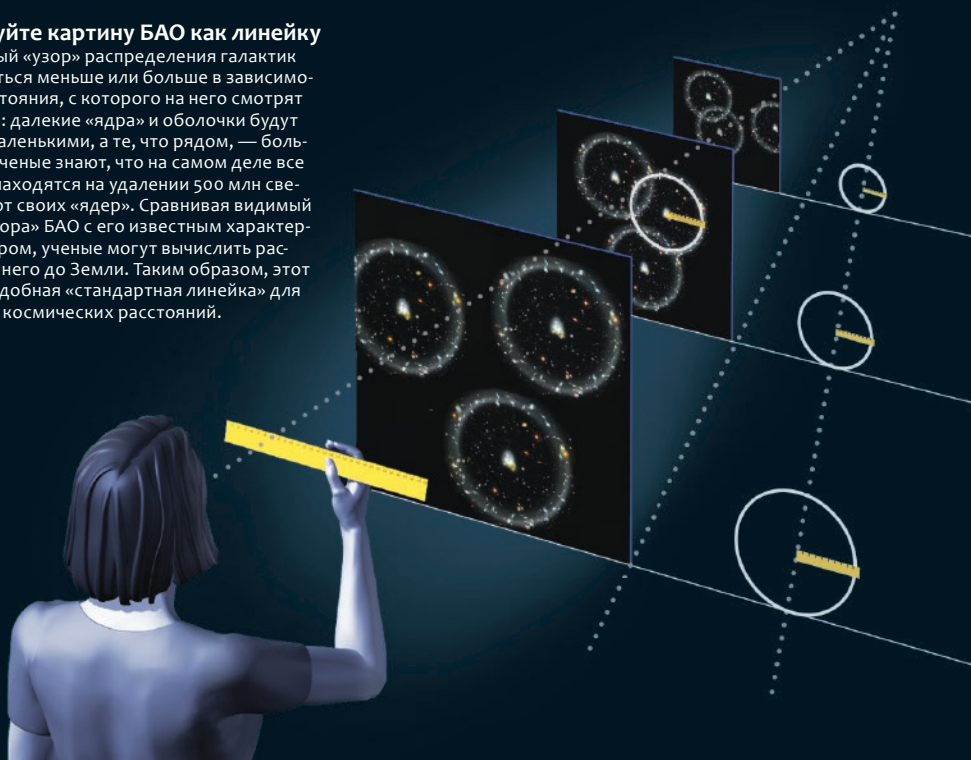
1 Начните со структуры во Вселенной

Целью каталога eBOSS было изучение структуры распределения галактик во Вселенной, обусловленной барионными акустическими осцилляциями (BAO). Этот след образовался в результате мельчайших флуктуаций энергии в пространстве-времени сразу после Большого взрыва. В силу особенностей взаимодействия излучения и материи в ранней Вселенной эти колебания заставляли темную материю формировать сгустки, окруженные сферами обычной материи и излучения, отстоящими от этих сгустков примерно на 500 млн световых лет. Со временем гравитация притягивала оба типа материи к сгусткам темной материи, а также к сферам обычной материи, что привело к относительно равномерному распределению темной и нормальной материи по всей Вселенной. В конце концов галактики сформировались везде, где была материя, в силу этого структура плотных областей и их оболочек сегодня все еще заметна в распределении галактик.



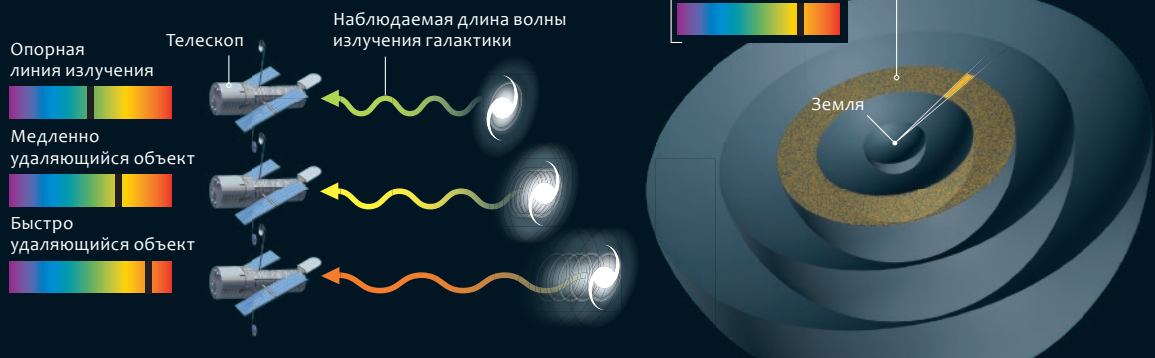
2 Используйте картину BAO как линейку

Характерный «узор» распределения галактик будет казаться меньше или больше в зависимости от расстояния, с которого на него смотрят астрономы: далекие «ядра» и оболочки будут казаться маленькими, а те, что рядом, — большими. Но ученые знают, что на самом деле все оболочки находятся на удалении 500 млн световых лет от своих «ядер». Сравнивая видимый размер «узора» BAO с его известным характерным размером, ученые могут вычислить расстояние от него до Земли. Таким образом, этот «след» — удобная «стандартная линейка» для измерения космических расстояний.



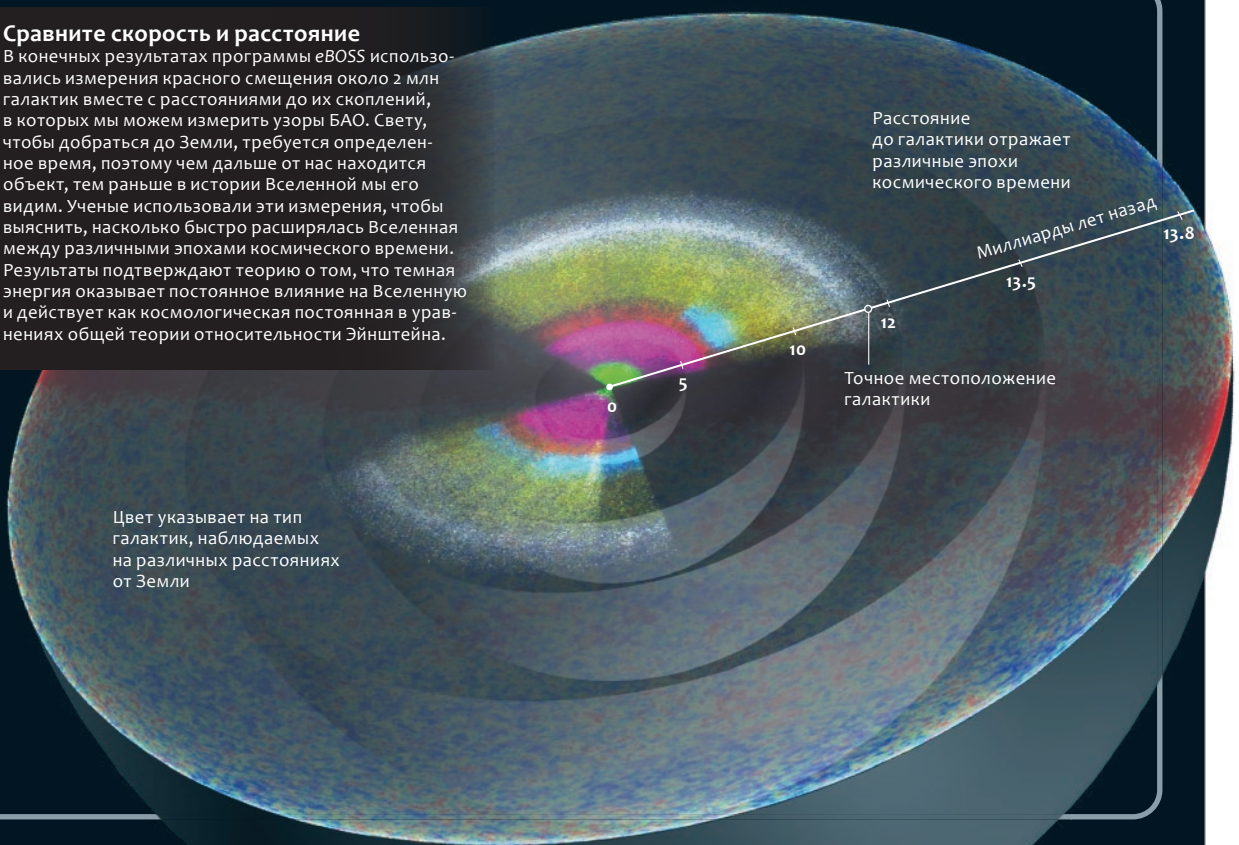
3 Измерьте скорости

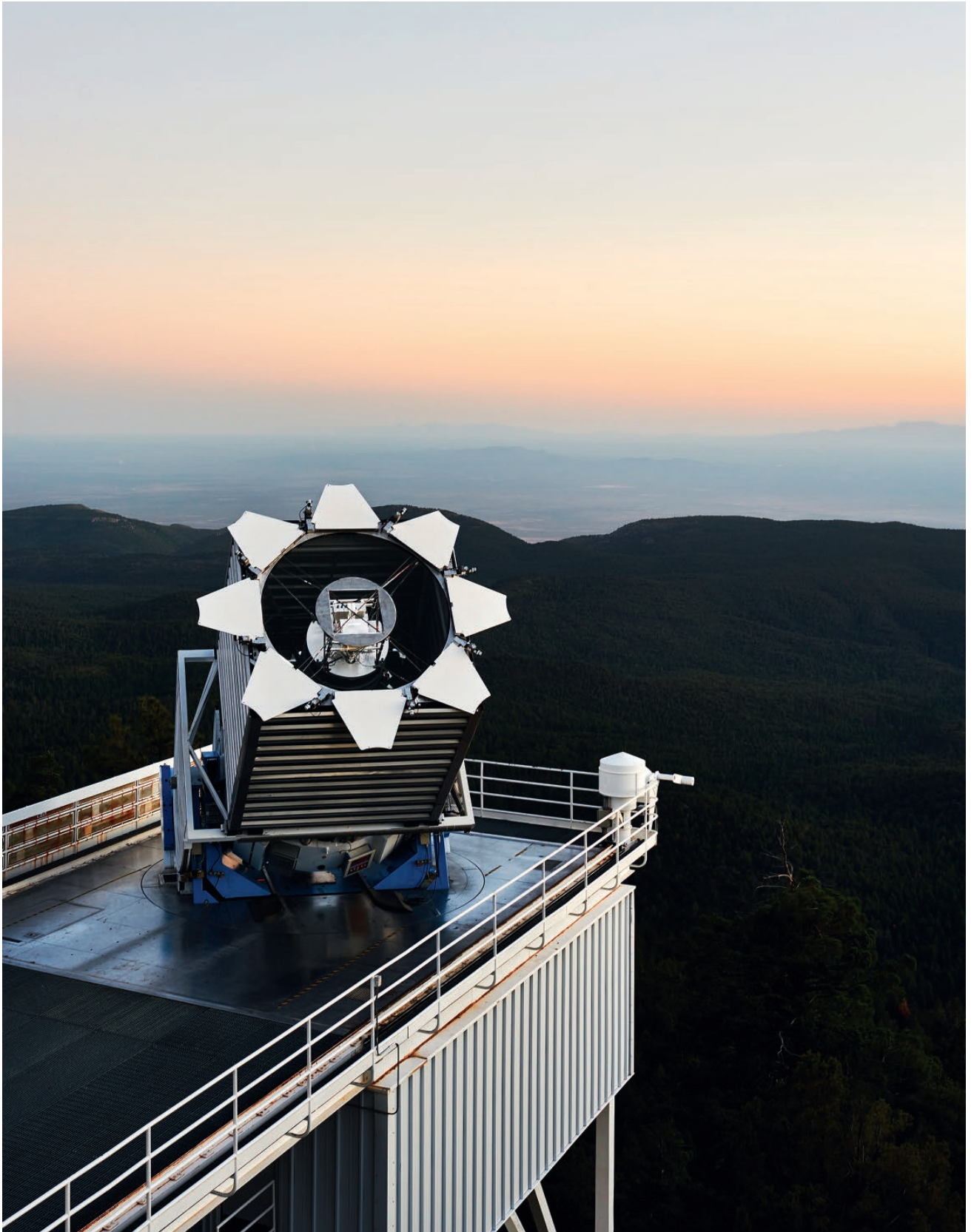
Следующий шаг к пониманию темной энергии — измерить, насколько быстро удаляются от нас галактики, образующие узоры БАО. Поскольку Вселенная расширяется, кажется, что все вокруг от нас удаляется. Это движение заставляет объекты казаться тем краснее, чем больше скорость их разлета, — явление, обусловленное эффектом Доплера. Астрономы могут измерить «красное смещение» галактики — величину, на которую спектр ее излучения сместился в красную сторону, — чтобы определить скорость, с которой она от нас удаляется.



4 Сравните скорость и расстояние

В конечных результатах программы eBOSS использовались измерения красного смещения около 2 млн галактик вместе с расстояниями до их скоплений, в которых мы можем измерить узоры БАО. Свету, чтобы добраться до Земли, требуется определенное время, поэтому чем дальше от нас находится объект, тем раньше в истории Вселенной мы его видим. Ученые использовали эти измерения, чтобы выяснить, насколько быстро расширялась Вселенная между различными эпохами космического времени. Результаты подтверждают теорию о том, что темная энергия оказывает постоянное влияние на Вселенную и действует как космологическая постоянная в уравнениях общей теории относительности Эйнштейна.





В 2000 г. 2,5-метровый телескоп Фонда Слоуна в штате Нью-Мексико дал старт продолжавшейся два десятилетия программе картографирования «Цифровой каталог звездного неба Слоуна»

длин волн излучения, исходящего от объекта, — 2 млн галактик и квазаров (галактик, в которых преобладает излучение вещества, падающего на центральную сверхмассивную черную дыру). Эти спектроскопические изменения показывают, насколько быстро галактики удаляются от нас, что зависит от того, насколько расширилась Вселенная с момента испускания света до момента его наблюдения. Поскольку в результате расширения длина волны увеличивается, излучение становится «более красным» — явление, называемое красным смещением.

При каждом наблюдении в рамках программ BOSS и eBOSS одновременно фиксировались спектры излучения 1 тыс. объектов, для каждого из них использовался отдельный оптоволоконный кабель. Один конец каждого кабеля укреплялся на алюминиевой пластине, расположенной в фокальной плоскости телескопа. Перед одним из ночных наблюдений несколько групп исследователей подготовили восемь таких пластин в специально для этой цели изготовленных картриджах, вставив вручную волокно в каждое из 1 тыс. отверстий. Чтобы подключить одну пластину, двум техникам требовалось около получаса. Самым продуктивным месяцем в истории работы над «Цифровым каталогом звездного неба Слоуна» был март 2012 г., когда с помощью этих пластин мы зарегистрировали 103 тыс. спектров.

Мы выбрали целевые галактики на основе данных из изображений, ранее полученных телескопами по всему миру. Техники в Вашингтонском университете с помощью станка с компьютерным управлением просверлили отверстия в алюминиевых пластинах таким образом, чтобы, когда телескоп направлен на соответствующий участок неба для его часовой экспозиции, конец волокна внутри каждого отверстия идеально совпал с изображением центра одной из целевых галактик или квазара.

Каждую ночь с декабря 2009 по март 2019 г., когда Луна была не слишком яркой, телескоп отслеживал один из участков неба, а волокна передавали свет, падающий на фокальную плоскость, на два спектрографа. Современные детекторные камеры в цифровом виде измеряли интенсивность света как функцию длины волны. Используя эти данные, мы могли вычислить красное смещение каждой галактики.

В течение почти десяти лет, когда в рамках программы eBOSS и ее предшественника BOSS велся сбор данных, мы измерили

местоположение и красное смещение более 4 млн галактик. Поскольку свету далеких галактик требуется много времени, чтобы достичь телескопа, эти карты показывают нам 11 млрд лет космологического времени, охватывая большую часть истории Вселенной.

Изучение темной энергии

Объединив данные наших измерений красного смещения с оценками расстояния по стандартной линейке БАО, мы смогли выявить связь между расстоянием и красным смещением — другими словами, насколько Вселенная расширилась и «растянула» световую волну в зависимости от пройденного светом расстояния. Эта информация показывает, как темп расширения пространства изменился за минувшие 11 млрд лет, позволяя нам глубже проникнуть в сущность одной из самых больших загадок современной физики: темной энергии.

Чтобы объяснить наблюдаемое несоответствие, нам, возможно, потребуется ввести новый вид частицы, поля или взаимодействия

Темная энергия — таинственная сила, которая, по всей видимости, ускоряет расширение Вселенной, — поразительное явление, обнаруженное в 1998 г. Простейшая математическая модель темной энергии — так называемая космологическая постоянная, Λ , член в уравнениях поля общей теории относительности (ОТО) Эйнштейна, который описывает энергию пустого пространства. Эта энергия может действовать как сила отталкивания, противостоящая силе гравитационного притяжения и ускоряющая расширение Вселенной. За последние 20 лет эта космологическая модель, получившая название «Лямбда-CDM» («Лямбда-член + холодная темная материя», Λ CDM), прошла множество проверок, и, хотя мы не до конца понимаем ее, это наша лучшая модель.

Тем не менее у модели «Лямбда-CDM» есть проблемы. Три недавних наблюдения показывают признаки несоответствия модели и действительности. Во-первых, изменения темпа локального расширения пространства не совпадают с предсказаниями модели «Лямбда-CDM», основанными на наблюдениях за областями далекой Вселенной. Во-вторых, наблюдения реликтового

излучения дают основания предположить, что, возможно, пространство искривлено чуть сильнее, чем предсказывает теория инфляции. Наконец, искривление траекторий излучения далеких галактик из-за взаимодействия с веществом оказалось более слабым, чем ожидалось согласно модели «Лямбда-CDM». Время покажет, представляют ли собой эти противоречия первый признак необходимости построения новой космологической модели или же просто отражают проблемы с измерениями. В любом случае данные наблюдений, полученные в ходе программы *eBOSS*, указывают нам правильное направление.

Например, они показывают, что, когда Вселенная достигла 60% от своего нынешнего размера, произошел переход: темп расширения пространства перестал замедляться и начал расти. Эти результаты согласуются с моделью «Лямбда-CDM», которая предполагает, что в этот момент темная энергия победила гравитацию материи, — благодаря влиянию последней расширение до этого момента происходило по инерции.

Другой важнейший параметр космологической модели — кривизна пространства. Теория инфляции предсказывает Вселенную, геометрия которой очень близка к плоской. Однако некоторые более ранние исследования космического фона дают основания предполагать, что пространство слегка искривлено. С помощью карт *eBOSS* мы смогли повысить точность измерений геометрии пространства в десять раз по сравнению с результатами предыдущих наблюдений. Мы не нашли никаких доказательств того, что Вселенная искривлена, что подкрепляет стандартную картину инфляции.

Мы также смогли подвергнуть проверке космологические модели, посмотрев, как быстро формируются структуры — скопления галактик и филаменты. Красные смещения, которые мы измерили в ходе нашей работы, отражают скорость галактик относительно нас, наблюдателей, но не причину этого движения. Основную часть вклада в красное смещение вносит космологическое расширение — тот факт, что все объекты в космосе удаляются друг от друга, — но частично оно вызвано ростом структуры. Когда галактики стягиваются в скопления, увеличивая пустоты, их скорости, а следовательно и красное смещение, изменяются.

Влияние роста структуры на скорости, называемое искажениями пространства красного смещения, проявляется, когда мы

сравниваем картину, наблюдаемую, когда луч зрения лежит в плоскости галактики, с картиной, когда галактика расположена перпендикулярно ему. Величина искажений пространства красного смещения говорит нам о скорости роста структуры. Используя данные программы *eBOSS* и предшествующих ей, мы рассчитали эту скорость с точностью около 3,5%. Наш результат соответствует предсказанному ОТО, что важно, поскольку несколько предыдущих измерений с использованием других методов дают величины примерно на 10% ниже.

В целом наши измерения подтверждают, что нет никаких свидетельств в пользу того, что Стандартная космологическая модель с космологической постоянной Λ неверна. Мы не заметили никаких сюрпризов в вопросах, касающихся роста структур, природы темной энергии или геометрии пространства. Однако мы видим то же несоответствие, о котором уже упоминали, между скоростью расширения пространства, рассчитанной на основе данных из локальной Вселенной (*локальная Вселенная — область радиусом 300 Мпк вокруг земного наблюдателя. — Примеч. пер.*), и данными реликтового излучения. Расчеты, основанные на реликтовом излучении, например, показывают темп расширения (параметр Хаббла) $67,28 \pm 0,61$ км/с на мегапарсек (единицу расстояния в космосе), тогда как локальные измерения сверхновых дают значения на 10% выше. Используя наши измерения БАО, мы оцениваем темп расширения примерно 67 км/с на мегапарсек — и когда мы объединяем полученные нами величины с данными реликтового излучения, и когда мы этого не делаем. Разница между этой величиной и параметром Хаббла, значение которого астрономы получают, когда смотрят только на ближайшее окружение, становится достаточной, чтобы поставить под сомнение основные положения нашей космологической модели. Возможно, проблема с одним или несколькими измеренными параметрами, используемыми в этих расчетах, все еще существует, но с по крайней мере равной вероятностью нам необходимо пересмотреть модель раннего расширения Вселенной и расширяющегося одновременно с ней звукового горизонта. Чтобы объяснить наблюдаемое несоответствие (так называемая проблема несоответствия величины параметра Хаббла), возможно, нам потребуется ввести новый вид частицы, поля или взаимодействия.

Больше и лучше

В последние 20 лет телескоп и спектрографы проекта SDSS стали мировыми лидерами в изучении красного смещения галактик, кульминацией которого оказалась программа eBOSS. Работа над каталогом Слоуна будет продолжена с использованием новых карт звезд и квазаров, и наш успех вдохновил астрономов на планирование еще более обширных каталогов галактик, которые охватят более широкий диапазон космической истории. Один из таких проектов, научная работа в рамках которого уже началась, называется DESI («Спектроскоп темной энергии»). В этом исследовании для построения более глубокой с большим разрешением цифровой карты Вселенной будет использоваться мультиобъектный спектрограф с 5 тыс. оптических волокон на Телескопе им. Николаса Мейола Национальной обсерватории Китт-Пик в Аризоне. Новый спектрограф способен одновременно наблюдать 5 тыс. объектов и расположен на телескопе, диаметр главного зеркала у которого примерно в два раза больше, чем у телескопа проекта SDSS. Вместо того чтобы

полагаться на людей, каждое из 5 тыс. волокон будет размещаться в нужном месте специальным роботом. Через пять лет работы DESI цифровой каталог галактик более чем в десять раз превзойдет каталог Слоуна.

Космический телескоп «Евклид» Европейского космического агентства, запуск которого намечен на 2022 г., также проведет изучение красного смещения большого числа галактик. Используя преимущество расположения в космосе, позволяющее избежать размытия изображения, вносимого атмосферой Земли, «Евклид» будет вглядываться в объекты с большим красным смещением, то есть расположенные от нас на больших расстояниях, чем можно отчетливо разглядеть с Земли. Он измерит красное смещение примерно 25 млн галактик. Помимо DESI и «Евклида», вынашиваются планы создания более крупных мультиобъектных спектрографов на огромных телескопах десятиметрового класса, что должно позволить совершить значительный прорыв в нашем понимании Вселенной. ■

Перевод: А.П. Кузнецов

Выходит 6 раз в год

Познавательный журнал для хороших людей

Глазами геолога: как рождалась Земля – от газопылевого «зародыша» до «живой» планеты

Офиолиты, реликты древней океанической коры, подсказывают, где находятся крупные месторождения золота и серебра

С помощью методов сейсмической томографии ученые научились предсказывать «взрывные» извержения вулканов

В многоэтничном обществе древних пазырыкцев люди оценивали не по расовым признакам, а по личным качествам

Специфические вещества слюны кровососущих иксодовых клещей могут стать основой новых лекарств, включая хирургический клей и антикоагулянты

www.scfh.ru