

Рисунок: ESO/L. Calçada

Кандидат физико-математических наук
С.М. Комаров

Дети темной материи

При упоминании темной материи кто-то пренебрежительно кривится, мол, напридумывали эти ученые какие-то темные сущности, а кто-то с замиранием сердца ожидает услышать рассказ об одной из величайших тайн Вселенной. Откуда взялась сама идея, что Вселенная буквально наполнена удивительной материей, которую не видно, не слышно, на которую разве что можно натолкнуться, да и то это неточно? Какие идеи, связанные с этой субстанцией, занимают мысли ученых? Об этом говорили во время дискуссии о деятельности научно-образовательной школы «Фундаментальные и прикладные исследования космоса» МГУ имени М.В. Ломоносова. В ней участвовали такие выдающиеся ученые, как академики А.М. Черепашук, В.А. Рубаков и их коллеги из Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга и НИИ ядерной физики МГУ.

▲ Так иллюстратор релизов Южной европейской обсерватории представляет распределение темной материи, принадлежащей к нашей Галактике. Та ее часть, что расположена за пределами видимого диска Млечного Пути, астрономы называют гало. Интересно, что измерения показывают: в месте текущего расположения Солнечной системы и ее ближних окрестностях темной материи почти нет. Астрофизикам придется немало поломать голову, чтобы объяснить этот феномен

Что-то со скоростью не так

Считается, что первым темную материю придумал американский астроном Фриц Цвикки. Это не так. Цвикки не мог объяснить поведение галактик: они в своих скоплениях движутся с огромной скоростью, порядка тысячи километров в секунду, и сдержать их от вылета из скопления может только гравитация. Так вот, массы видимого вещества, а тогда астрономы видели только звезды, для создания столь мощной гравитационной ловушки катастрофически не хватало: ее требовалось в десять раз больше! Эту недостающую массу он и назвал скрытой или темной материей, однако под ней имел в виду вполне обычное вещество: пыль, газ, темные звезды, в общем то, что тогда не видели в телескоп.

Со временем большую часть такого вещества удалось разглядеть. Оказалось, что основную его массу составляет невидимое вещество межзвездной среды, главным образом водород: его масса во Вселенной в 19 раз больше массы звезд. Чтобы это вещество увидеть, нужно задействовать другие диапазоны спектра электромагнитного излучения: облака атомарного межзвездного водорода видны в радиодиапазоне, пыль — в дальнем инфракрасном, невидимые звезды, а это, например, нейтронные звезды, черные дыры — в рентгеновском, его излучает падающее на них вещество.

Казалось бы, проблема Цвикки была решена, но наблюдения за галактиками породили новую загадку. Примерно в середине 70-х годов, когда телескопы позволили вести наблюдения не только в видимом, но и в других диапазонах, астрономы стали замечать аномалии в движениях водорода и звезд в галактиках. Дело в том, что, согласно законам Кеплера, скорость движения объекта по орбите однозначно связана с той массой, что находится внутри этой орбиты. Астрофизики в своих расчетах предполагают, что основная масса галактик со-

средоточена в центре, а остальные звезды составляют лишь пренебрежимо малую добавку.

При удалении орбиты любого объекта от центра галактики его скорость сначала быстро нарастает, потому что быстро растет масса, оказавшаяся внутри этой орбиты. Но вот внутри орбиты оказалась основная масса галактики. Дальнейшее увеличение радиуса орбиты не приводит к росту силы гравитации и теперь скорость движения должна уменьшаться как единица на корень из радиуса. Однако этого не происходит: скорости движения и звезд и водорода по мере удаления от центра галактик быстро выходят на плато и далее не изменяются. Более того, у водорода плато продолжается далеко за пределами видимого галактического диска и вообще до тех пор, пока этот разреженный водород виден в телескоп. Такое возможно, если огромная скрытая масса размазана по пространству, многократно превышающему объем галактики.

Поведение облаков газа в скоплениях галактик дает астрономам дополнительную уверенность в существовании скрытой массы. В них имеются облака очень горячего газа. Его температура достигает сотен миллионов градусов. В таких облаках протоны движутся со скоростями в тысячу километров в секунду. Однако размер облаков невелик, газ концентрируется в очень маленьких областях внутри скоплений галактик. Какая сила может его удержать? Астрономы сходятся во мнении, что такой силой опять-таки обладает скрытая масса, распределенная по скоплению: она создаст гравитационную ловушку,

▼ Если темная материя в галактике есть, зависимость скорости вращения объекта от радиуса его орбиты быстро выходит на длинное плато (слева). В противном случае она имеет вид кривой с узким максимумом (справа)

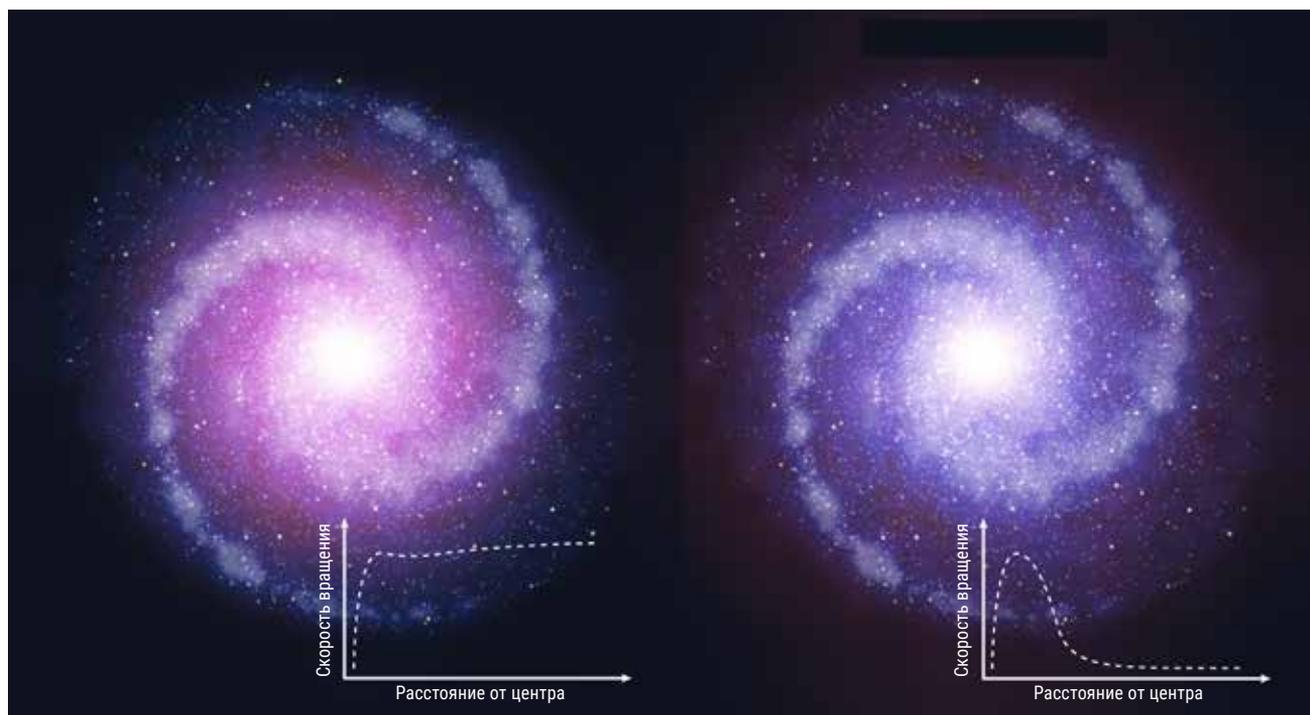


Рисунок: ESO

которая не позволит частицам даже с невообразимо большой скоростью улететь прочь.

Астрономы считают, что нужно различать скрытую массу и темную материю. В первое понятие входит некая масса в галактиках, которая попросту не излучает ничего такого, что можно было бы увидеть имеющимися приборами. Это может быть вполне обычное, но пока что невидимое вещество: коричневые карлики, нейтронные звезды, остатки погибших звезд, астероиды, кометы. Только в 80-х годах появились идеи, что эта иная материя — небарионная, то есть которая, в отличие от вещества, не построена из протонов и нейтронов.

Древние неоднородности

Источником таких идей стала экспериментальная космология, которая базируется на изучении реликтового излучения. Если считать от момента рождения Вселенной, то первым необъяснимым без темной материи фактом стало происхождение крупномасштабной структуры Вселенной. Многолетние наблюдения показали, что вещество распределено в ней крайне неоднородно: звезды собраны в галактики размером порядка 10 килопарсек, галактики формируют скопления 5–10 мегапарсек, а из них построены стены и филаменты, разделенные огромными областями пустоты. На самом крупном масштабе Вселенная выглядит как мыльная пена, где вещество сосредоточено в тонких пленках и нитях (см. карту Вселенной в «Химии и жизни» 2006, 8).

Причина возникновения такой структуры понятна. Еще в 60-х годах академик Я.Б. Зельдович предположил, что вскоре после Большого взрыва в формирующемся горячем веществе возникают спонтанные флуктуации плотности, которые по мере расширения дают вселенские неоднородности. Эти флуктуации должны были оставить следы в виде неоднородности реликтового излучения. И такие неоднородности нашли, заглянув практически в момент возникновения нашего мира!

Физика — наука точная, она позволяет все рассчитывать. Так вот, подставляя результаты измерения начальных флуктуаций плотности вещества в соответствующие формулы, физики обнаружили, что построить наблюдаемую Вселенную не получается: за прошедшее время из них не удастся вырастить структуру требуемого масштаба. Для этого не хватает массы, ведь вещество скучивается за счет создаваемой ею гравитации. Нужно добавить массу, и, как показало компьютерное моделирование, немалую: почти в пять раз больше, чем масса всего вещества, видимого и невидимого, а если речь идет о видимых звездах — то в сто раз большую!

Соображения космологов на сей счет примерно таковы. На самых ранних стадиях эволюции Вселенной темная материя перестала взаимодействовать с веществом; она осталась холодной, то есть скорости движения частиц этой материи были во много раз меньше скорости света. В холодной материи даже маленькие неоднородности плотности не исчезали, а начинали гравитационно скучиваться, втягивая в себя все новые и новые частицы темной материи, создавая гравитационные

ямы. А обычное вещество было слишком горячим, оно из этих ям легко вылетало. Шло время, вещество остывало, и созданные темной материей гравитационные ловушки стали его втягивать. Не будь темной материи, ничего бы не было: ни галактик, ни их скоплений, ни Земли, ни нас. Вселенная до сих пор оставалась бы однородной с небольшими вкраплениями более плотных образований. Для космологов очень важно, что темная материя была холодной, в крайнем случае, теплой. Что она остыла гораздо раньше, чем вещество отделилось от излучения и образовались атомы. Именно такая темная материя к тому времени могла подготовить гравитационные ловушки для вещества.

Почему для космологов так важен момент разделения вещества и излучения? Потому что они могут заглянуть в прошлое не далее этого события: сохранившиеся с тех пор фотоны формируют реликтовое излучение, которое несет информацию о состоянии Вселенной именно в этот момент. Никаких более ранних источников информации о ней нет, далее к началу времен предполагается скорее источник фантазий теоретиков, чем объективного знания.

Скрытая масса — не темная материя?

Насколько темная материя космологов соответствует той скрытой массе, что видят астрономы? Вопрос этот отнюдь не столь прост, как кажется. По данным космологов, а они претендуют на очень точный расчет, темной материи должно быть в пять с лишним раз больше, чем вещества. Однако попытки оценить ее по астрономическим проявлениям дают большое разнообразие результатов.

Так, в Солнечной системе определена верхняя граница содержания темной материи — не более 10%, а ее концентрацию оценивают в 0,4 ГэВ на кубический сантиметр (то есть, $7 \cdot 10^{-25}$ кг в кубометре; напомним, что, в соответствии с формулой Эйнштейна, энергию легко пересчитать в массу, и наоборот). В локальном звездном скоплении, включающем Солнечную систему, как свидетельствует динамика звезд, плотность темной материи составляет 0,025 масс Солнца на кубический парсек (см. «Химию и жизнь», 2014, 3).

А вот с центром Млечного Пути проблема. Согласно теории, количество темной материи возрастает по мере приближения к центру галактики. Там у нас расположен прекрасный прибор для измерения ее плотности: звезды, обращающиеся вокруг центральной черной дыры. Самая близкая к ней из числа изученных — звезда S2 (см. «Химию и жизнь», 2020, 11). Она вращается по эллиптической траектории с периодом около шестнадцати лет, и за ней наблюдают уже почти два периода. Благодаря этому удалось выявить прецессию орбиты звезды. Так вот, она полностью описывается теорией относительности и никакой добавки скрытой массы не требует. Может быть, необходимость добавки обнаружат при дальнейших наблюдениях за этой или за более близкими к центру звездами, которые нашли не столь давно.

А может быть, и нет. Такое предположение вытекает из свежих наблюдений за движениями звезд в других галактиках. Как было сказано в начале статьи, аномалии их скоростей служат свидетельством присутствия скрытой массы. Так вот, это справедливо для древних галактик, свет от которых идет к нам более 10 млрд лет. А с более-менее современными галактиками так получается не всегда: начиная с 2017 года накапливаются наблюдения о таких галактиках, у которых нет никаких аномалий, вызванных скрытой массой, либо они ничтожны.

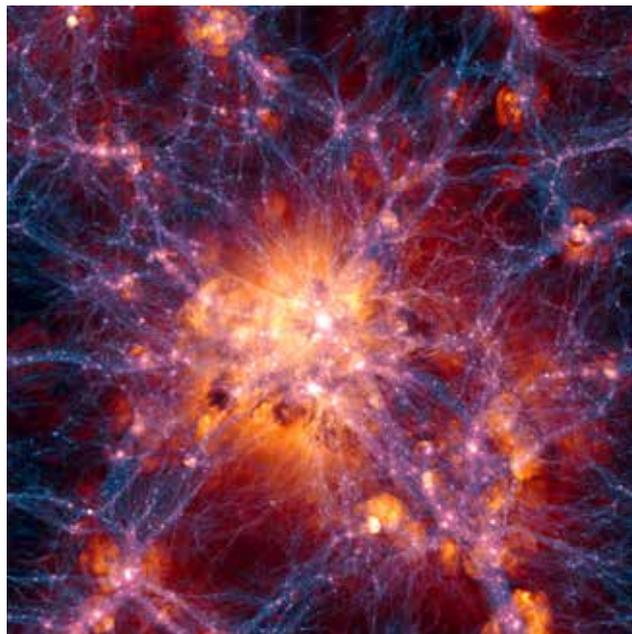
Сейчас астрономы и космологи сходятся в одном: скрытая масса может быть не тождественна темной материи. Более того, скрытую массу в той или иной степени может обеспечить вещество, которое мы пока не видим в силу недостатка наших приборов. Не исключено, что какие-то проявления скрытой массы удастся понять в рамках модифицированных теорий гравитации. Но вот чего точно не удастся сделать без темной материи, так это получить крупномасштабные структуры Вселенной. Для этого требуется, чтобы она была обязательно небарионной, непохожей на вещество, и состояла из массивных, тяжелых частиц. Иначе никак не выходит, что в ходе Большого взрыва темная материя не разогревалась, а оставалась холодной в отличие от частиц будущего барионного вещества.

Подгоняем модели. Быстро и недорого

А что же собой может представлять эта темная материя? Из каких частиц она состоит? Одну из первых гипотез выдвигал Я.Б. Зельдович, предлагая нейтрино на роль кандидата. Эта идея не сработала, и сейчас у теоретиков есть огромное количество самых разнообразных идей. Наиболее популярные идеи можно свести к трем типам: темная материя состоит из тяжелых частиц, легких частиц и вообще не из частиц, а из первичных черных дыр или проявлений модифицированной гравитации. Начнем с последних.

По мнению космологов, модифицированная гравитация, которая предполагает отклонения от законов Ньютона на малых расстояниях или при больших ускорениях не поможет разгадать тайну темной материи. Причина в том, что с ее помощью не удастся создать упомянутые гравитационные ямы на начальных стадиях Большого взрыва. То есть, обеспечить формирование структур Вселенной. Для этого нужна объекты, обладающие массой, а не поправки к законам механики. Первичные черные дыры на это способны, поэтому с точки зрения космологии они не запрещены. А вот астрономы такие дыры не видят, хотя должны бы, ведь при падении вещества в черную дыру идет хорошо заметное излучение.

С первичными черными дырами как с кандидатами в темную материю связан один кошмарный для физиков сценарий. Согласно теории Хокинга, такие дыры способны за прошедшее время испариться, и от них остались ничтожные останки. Они могут придавать Вселенной скрытую массу, однако никак не проявляют свое существование. Найти их, скорее всего, не удастся никогда.



▲ Как прочная сетка не дает луковицам или апельсинам раскатиться по прилавку, так и жгуты темной материи стягивают облака горячего межгалактического газа

На роль легких частиц темной материи после неудачи нейтрино, как правило, выдвигают аксионы. Эти гипотетические частицы очень легки, масштаб их массы простирается от 10^{-22} до 1 эВ, а может быть, и дальше. Идея аксионов довольно трудна для понимания людей, не посвященных в особенности приготовления блюд на кухне теоретической физики. Вкратце можно сказать, что их предложили в конце 70-х годов для решения некоторых проблем теории квантовой хромодинамики, которая описывает сильные взаимодействия элементарных частиц. А название придумал будущий нобелевский лауреат Фрэнк Вилчек в честь стирального порошка, поскольку предполагалось, что эта частица отмоет теорию от трудностей. Пока не случилось: аксионы никто не смог экспериментально зафиксировать.

Для нас же важно, что аксионы практически не взаимодействуют с веществом, но, в отличие от нейтрино, в сильном магнитном поле превращаются в фотоны, и наоборот, что называют эффектом Примакова. Этим эффектом и пытаются пользоваться исследователи, которые хотят доказать, что аксионы существуют. Делают они это не ради темной материи, но, если аксионы будут найдены, они станут неплохими претендентами на роль ее частиц.

Вот как выглядит один из экспериментов по поиску этих странных сущностей. Свет мощного источника пропускают через сильное магнитное поле и направляют его на металлическую стену. За ней также стоит магнит, а далее — фотоприемник. Если магнитное поле достаточно сильное, свет пройдет сквозь стену: сначала фотоны станут аксионами, те свободно преодолеют толщину металла, а затем магнитное поле вновь обратит их в фотоны. Увы, эта остроумная схема, как и несколько других, пока что не сработала.

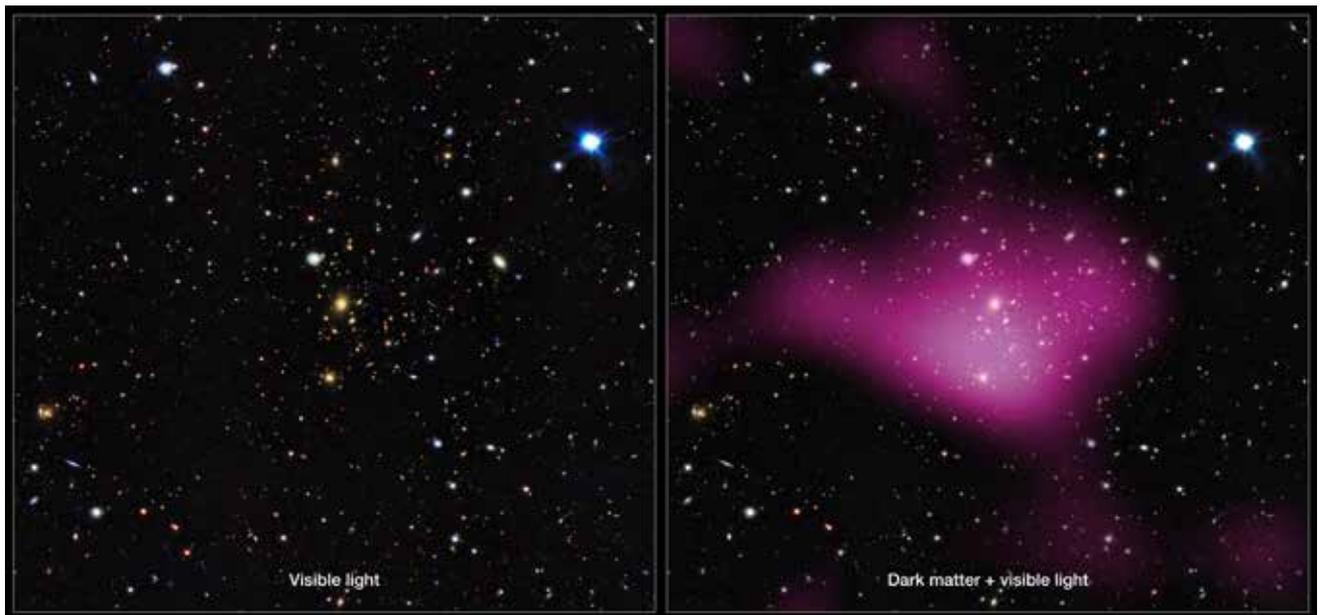


Фото: Kilo-Degree Survey Collaboration/A. Tudorica & C. Heymans/ESO

▲ При анализе распределения темной материи астрономы используют эффекты гравитационного линзирования: отклонение света массивным объектом. Если рассчитать возникающие искажения, то можно понять, как распределена скрытая масса. Казалось бы, на этом участке неба нет ничего, кроме скопления галактик (слева). А расчет выявляет облако темной материи, масса которого в 30 раз превышает массу видимого вещества

Однако больше всего внимание теоретиков и экспериментаторов привлекают тяжелые частицы, которые составляют расширения Стандартной модели — основной теории, дающей список элементарных частиц нашего мира. Частиц темной материи среди них нет, и в этом, возможно, состоит неполноценность Стандартной модели, что обосновывает попытки ее расширить. Более того, темная материя оказывается интересной зацепкой; с ее помощью можно построить новый класс теорий поля.

Этот подход несколько напоминает поиск бумажника под фонарем, поскольку там светлее. Дело в том, что почти любую модель частиц темной матери можно подогнать под данные эксперимента. Есть даже компьютерные программы, которые проверяют их на соответствие эксперименту. Как шутят сами физики, с их помощью производство теорий темной материи можно ставить на поток и работать под девизом: шьем модели по заказу и подгоняем их под эксперимент в короткий срок! Беда в том, что экспериментальные ограничения на эти модели крайне скудны. В сущности, всего-то надо получить измеренную плотность темной материи при Большом взрыве. Этого для однозначного выбора мало. Пока что из моделей, признанных наиболее перспективными, следует, что масса тяжелых частиц темной материи лежит в диапазоне 500—2500 ГэВ. Из этих оценок исходят при поиске их следов.

Как видно, спектр масс гипотетических частиц — от легких до тяжелых — растянулся более чем на сорок порядков! При таком разнообразии претендентов только

эксперимент способен выбрать из фантазий теоретиков единственную верную модель.

... и бочонок жидкого газа

Сейчас на охоту за темными частицами вышло много научных коллективов, каждый из которых мечтает первым поймать загадочную рыбу. Они, как бреднем все плотнее и плотнее окружают темную материю всевозможными ограничениями, но добыча постоянно ускользает, порой практически из-под носа. Так теоретики раз за разом дают новые оценки того же сечения взаимодействия частиц темной материи с веществом, экспериментаторы должным образом увеличивают чувствительность приборов, но никаких следов добычи не замечают. При этом за двадцать лет чувствительность выросла в сто тысяч раз.

Рыбаки сходятся к целевой заводи по трем стратегическим протокам. Это попытки напрямую зафиксировать столкновение частицы темной материи с веществом, найти в космосе следы аннигиляции частиц темной материи при столкновении друг с другом и создать частицу темной материи в ускорителе.

Как же надеются непосредственно, а не по косвенным признакам поймать неуловимую частицу? Вот одна из групп экспериментов; их считают самыми перспективными — использование детектора из жидкого благородного газа, такие детекторы построены в США, КНР и ЕС. Отечественные физики считают, что у нас есть превосходная площадка для создания детектора на базе Баксанской нейтринной обсерватории, однако пока даже к подготовке необходимых решений не приступали.

Детектор представляет собой термос, заполненный сверххолодной жидкостью из массивных атомов. Термос надежно изолирован от внешних источников излучений тем, что размещен в толще скальных породах и экранирован водой. Защиту от внутренних источников излучения обеспечивает глубокая очистка от примесей и от собственных радиоактивных изотопов выбранного

благородного газа. А это либо ксенон, либо аргон. Они прекрасно дополняют друг друга, обеспечивая измерения в разных диапазонах массы гипотетических тяжелых частиц темной материи.

Суть идеи детектора такова. Для частицы темной материи фактически не существует ни атомов, ни их электронных оболочек, только ядра; для нее вещество, которое кажется нам плотным, представляет собой пустоту, и ловить темную материю в такой ситуации все равно что ловить рыбку в сеть, ячейки которой в тысячи раз больше размера этой рыбки. Сработает только браконьерская сеть, к которой приложено электричество: случайно столкнувшись с ее нитями, рыбка будет оглушена.

Аналогично упомянутой рыбке, частица темной материи провзаимодействует с веществом, лишь встретив в пустоте ядро атома, то есть оказавшись рядом с ним в пределах сечения взаимодействия. Однако электричеством ее не возьмешь. В лучшем случае такая частица способна к слабому взаимодействию, тогда удар по ядру будет относительно сильным. В худшем, когда она способна лишь на гравитацию, эффект окажется менее ярким: сработает только энергия движения,

▼ Десять миллиардов лет тому назад галактики стремительно стягивались к областям с высокой плотностью темной материи и формировали крупномасштабные структуры Вселенной. Штрихи на этом рисунке показывают величины и ориентацию векторов скоростей галактик, летящих к массивной центральной области, а размер изображенной области — 100 млн световых лет

ведь гравитация гораздо слабее слабого взаимодействия. В любом случае столкновение должно привести к нефиксируемому нагреву атома детектора, а если повезет, то вызовет возбуждение атомов, может быть, даже их ионизацию, и породит пусть слабый, но свет. Скорее всего, ультрафиолетовый. Его зафиксируют фотоумножители.

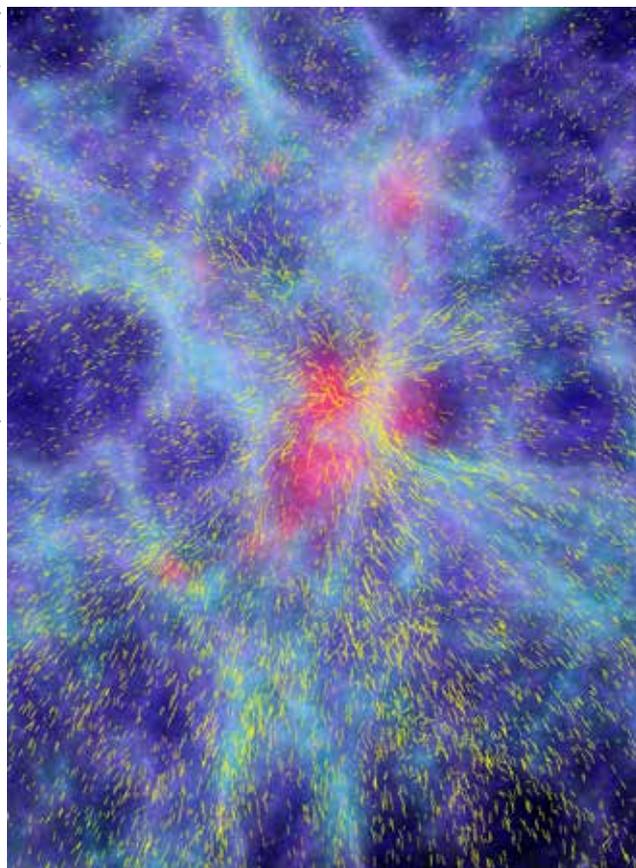
А дальше исследователям придется придумывать, что это было: артефакт, мнимое воплощение мечты или объективная реальность. Помогать в этом деле будут статистика, показывающая превышение числа событий над предложенным физиками уровнем, и тот факт, что темная материя холодная. Это ведь не она налетает на Солнечную систему, как, скажем, частицы космических лучей. Это Солнечная система летит с огромной скоростью, 200 км в секунду, сквозь темную материю. Значит, плотные объекты системы, включая Землю, ее замечают, как веник сметает лежащий на полу мусор.

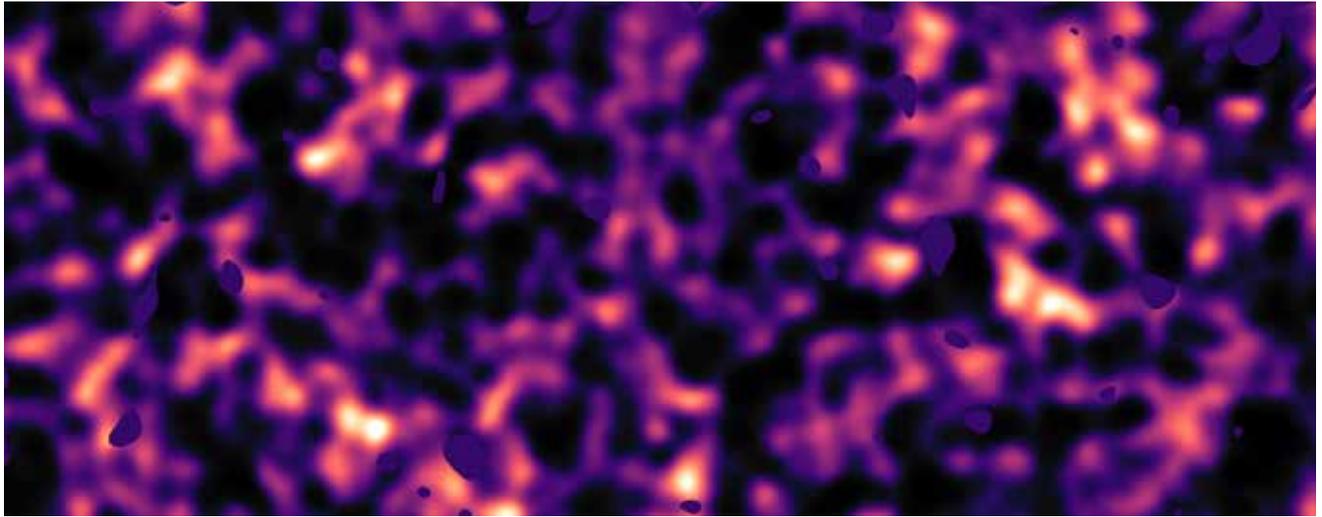
Однако в движении Земли, да и всех небесных тел системы, есть одна особенность. Полгода, с весны по осень, вектор движения Земли совпадает с вектором движения Солнца в Галактике, а вторые полгода он направлен в другую сторону. Значит, должны существовать сезонные колебания в количестве столкновений детектора с темной материей, заметаемой Землей. Если в статистике всплеск будет надежно выявлена такая сезонность, это окажется неплохим следом. А физический результат интерпретации полученных следов: масса частицы темной материи и сечение ее взаимодействия с веществом.

Пока что никаких следов детекторы не нашли, но время от времени появляются сообщения о каких-то неясных намеках на успех. Например, группа под руководством профессора Елены Априле, эксплуатирующая детектор XENON1T в итальянской лаборатории Гран-Сассо (в него налито 3,2 тонны жидкого ксенона), в 2020 году, то есть через год после того как установку закрыли на реконструкцию, сообщила, что за эффективные 0,65 года наблюдений было замечено несколько больше событий в низкоэнергетической области 2—3 кэВ, чем ожидалось. Предположительно это могло быть как след от солнечных аксионов, так и проявление тритиевого загрязнения вещества детектора. Видимо, в ходе экспериментов после реконструкции удастся внести какую-то ясность.

Специалисты же считают, что ни один из работающих сегодня детекторов не сможет зафиксировать частицы темной материи. Причина — слишком маленький объем вещества, чтобы справиться с задачей при малом содержании темной материи в Солнечной системе. Однако это важная деятельность, которая позволит отладить технологии и в конце концов сделать нужную установку. Впрочем, такими установками не обойтись. Только соединяя эксперименты по прямому детектированию, работы по созданию частиц темной материи на ускорителях, наблюдения космоса в гамма-телескопы в поисках следов аннигиляции темной материи и результаты экспериментальной космологии, удастся сплести сеть, способную поймать в этой темной воде вожаделенную золотую рыбку современной физики.

Рисунок: Klaus Dolag and equipment VIMOS-VLT Deep Survey





▲ Наблюдения за миллионами галактик позволили построить карту распределения темной материи во Вселенной. На этом фото показана ситуация 6 млрд лет тому назад

Глубокий эконо

О пользе фундаментальной науки

В ходе дискуссии в МГУ имени М.В. Ломоносова возник вопрос: а какая польза от темной материи. Кандидат физико-математических наук А.Е. Пухов, быстро проведя вычисления, заметил, что благодаря ей в одном кубометре пространства содержится один мегаватт энергии и если эту материю аннигилировать, то можно такую энергию высвободить. Для сравнения: в кубометре газа содержится в сто раз меньше энергии, а в кубометре угля — в десять раз больше. Конечно, это скорее шутовское замечание, однако исследования темной материи в США в значительной степени финансирует именно Министерство энергетики.

Из опытов по поимке аксионов сразу следует очень перспективная технология передачи оптической информации на большие расстояния: если эти частицы свободно пройдут сквозь стену, то превращая фотоны в аксионы и обратно, можно будет передавать сигнал хоть сквозь Землю без всяких кабелей.

А вот что говорит кандидат физико-математических наук А.С. Чепурнов, участвующий в создании

аргонового детектора «DarkSide-20k» в лаборатории Гран-Сассо. В этот детектор сначала нальют 20 тонн жидкого аргона, а в перспективе увеличат его количество до 200 тонн.

По его мнению, уже сейчас можно назвать три важные технологии, которые без этого проекта попросту не были бы реализованы. Во-первых, детектору нужно небывало много изотопно-чистого аргона. На Земле нет производства, способного удовлетворить аппетит физиков, и сейчас, чтобы обеспечить работу этого детектора, на Сардинии строят огромную колонну высотой 200 метров для гравитационного разделения изотопов газа. Она станет отделять радиоактивный аргон-39 от аргона-40. Эту установку можно будет использовать для изотопного разделения многих веществ, например при изготовлении фармпрепаратов.

Во-вторых, в «DarkSide-20k» используют кремниевые фотоумножители в количестве десятков тысяч штук. Для их производства строят заводы и разрабатывают новую элементную базу. Однако кремниевые фотоумножители планируют использовать в самых разных отраслях, например в лидарах для роботоз-

автомобилей. Это даст толчок для развития новой микроэлектроники.

В-третьих, жидкий аргон — прекрасный сцинтиллятор. И в России, и за рубежом есть программы по созданию новых позитрон-эмиссионных томографов, где именно жидкий аргон работает как детектор сигналов. Такой томограф проще устроен, а значит, дешевле, точнее и надежнее, чем имеющиеся.

Вообще же, полезно вспомнить историю с ПЗС-матрицами, которые сейчас используют во всех цифровых фотоаппаратах и смартфонах. Изначально эту технологию применили для цифровизации астрономических наблюдений (см. «Химию и жизнь», 2004, 10). Матрицы были сложными машинами и стоили очень дорого; для обсерватории оснастить телескоп ПЗС-матрицей считалось порой подвигом и требовало хитрых переговоров с меценатами. Однако потребность в них росла и привела к появлению массового производства. Теперь ПЗС-матрицы стоят копейки и ими пользуются миллиарды людей во всем мире. Никто не подозревает, что при изготовлении селфи он использует поистине космическую технологию.