

# УДИВИТЕЛЬНЫЙ МИР РИДБЕРГОВСКИХ АТОМОВ

Доктор физико-математических наук Б.Б. ЗЕЛЕНЕР<sup>1-3</sup>,  
кандидат физико-математических наук Б.В. ЗЕЛЕНЕР<sup>1</sup>, Е.Б. ЗЕЛЕНЕР<sup>1</sup>

DOI: 10.31857/S023336190002438-7

## Глава 1.

### Введение в современную физику

Открытие в XX в. таких новых направлений физики, как квантовая механика, физика лазеров, твёрдого тела, плазмы, физического вакуума, взаимодействия излучения с веществом, позволили в XXI в., уже на новом уровне, перейти к более подробному теоретическому и экспериментальному изучению фундаментальных основ строения различных видов материи.

В середине 70-х гг. советским физиком В.С. Летоховым и немецким физиком Т. Хэншем были предложены методы охлаждения атомов при помощи лазерного излучения. Уже в конце 80-х гг. эти методы получили экспериментальную реализацию. Была создана так называемая магнитооптическая ловушка. При помощи комбинации лазерного излучения, настроенного в резонанс с переходом между уровнями атомов, и магнитного поля в камере с глубоким вакуумом, удаётся захватить и охладить около миллиарда атомов в магнитооптической ловушке до температур порядка

$10^{-4}$ – $10^{-3}$  К (0 К – это  $-273$  градуса по Цельсию)<sup>4</sup>. Таких низких температур невозможно достичь никакими другими способами. Надо отметить, что согласно закону физики, нельзя достичь температуры ниже 0 К. Это просто объяснить, поскольку температура есть мера движения атомов, а 0 К (самая минимальная температура) соответствует тому, что все атомы остановились. Надо сказать, что при помощи магнитооптической ловушки и технологии вторичного испарительного охлаждения на основе оптических или магнитных ловушек можно получить газ, состоящий из атомов при значении температуры вплоть до  $10^{-10}$  К<sup>5</sup>, то есть атомы в газе практически замирают. Оптические, или, как их ещё называют дипольные, ловушки в отличие от магнитооптической ловушки отстроены далеко от резонанса. Принцип действия оптической ловушки сводится к фокусированию мощного оптического излучения и созданию сильного градиента электрического поля. В фокус лазерного луча притягиваются нейтральные атомы

<sup>4</sup> Филипс У.Д. Лазерное охлаждение и пленение нейтральных атомов. *Успехи физических наук*. 1999. 169(3). С. 305–322.

<sup>5</sup> Leanhardt A.E., Pasquini T.A., Saba M., Schirotzek A., Shin Y., Kielpinski D., ... & Ketterle, W. Cooling Bose-Einstein condensates below 500 picokelvin. *Science*, 2003. 301(5639). P. 1513–1515.

<sup>1</sup> ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН.

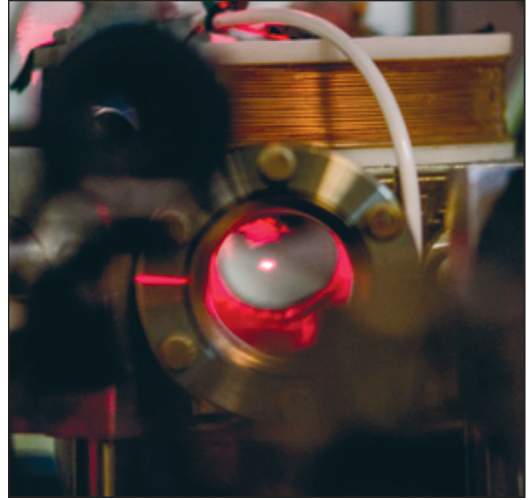
<sup>2</sup> НИЯУ Московский инженерно-физический институт.

<sup>3</sup> НИУ Московский энергетический институт.

за счёт того, что они имеют дипольный момент. Дипольный момент появляется у атома, поскольку существует расстояние между внешним электроном и ионом. При испарительном охлаждении мощность лазера уменьшают и самые быстрые атомы улетают, за счёт этого оставшиеся атомы становятся всё более и более холодными.

При таких малых температурах образуется коллектив из ультрахолодных атомов, обладающий удивительными свойствами<sup>6</sup>. В этом случае атомы начинают вести себя как единый квантовый объект. Этот коллектив атомов обладает, в зависимости от величины суммарного спина<sup>7</sup> атомов, свойствами, подобными свойствам частиц света – фотонов, такими, как дифракция и интерференция в случае с целым спином, и свойствами электронов в случае полуцелых спинов (рис. 1).

При этом появляется возможность моделировать различные состояния вещества. Например, из-за малого размера электронов трудно экспериментально изучать их свойства, поскольку, чтобы измерить координату или импульс, нужно, чтобы какая-то другая частица столкнулась с электроном и затем попала в детектор, чтобы зафиксировать её параметры. Но проблема заключается в том, что электрон – это очень маленькая элементарная частица и воздействовать на неё можно в лучшем случае такой же элементарной частицей, например электроном или фотоном. Поскольку энергии этих частиц сопоставимы, получается, что при взаимодействии с изучаемым электроном, это взаимодействие оказывается очень сильным, и мы теряем всю информацию об изучаемом нами объекте. Другое дело – атомы. Они намного тяжелее



**Рис. 1.**  
**Магнитооптическая ловушка с атомами лития, находящаяся в ОИВТ РАН. В центре видно облако холодных атомов, захваченных в ловушку.**

электронов и фотонов. В случае сверхнизких температур и в зависимости от суммарного спина, как это было сказано выше, атом начинает себя вести, как фотон или электрон. При этом воздействие на атом элементарной частицы не меняет существенно его траекторию движения. Следовательно, мы можем моделировать свойства электронов и фотонов при помощи более крупных объектов, таких как атомы. Возникает новое понятие в физике – квантовый симулятор. Квантовый симулятор – это система, свойства которой подобны свойствам очень маленьких элементарных объектов, но при этом более удобная в изучении и диагностике.

Теперь остановимся на современных представлениях о различных видах материи. **На данный момент физики разделяют всю известную материю на четыре типа. Первый** – это вещество. Вещество обладает массой покоя и может находиться в четырёх агрегатных

<sup>6</sup> Кеттерле В. Когда атомы ведут себя как волны. Бозе-эйнштейновская конденсация и атомный лазер. Успехи физических наук. 2003. 173(12). С. 1339.

<sup>7</sup> Спин – одно из квантовых чисел, характеризующее собственный момент импульса атома.

состояниях: твёрдом, жидком, газообразном и в виде плазмы, когда атомы в веществе разделяются на электроны и ионы и получается система из отрицательно и положительно заряженных частиц. **Второй тип** можно называть по-разному: волна, информация, энергия или излучение. Есть несколько видов волн, таких как электромагнитная волна или свет, состоящая из фотонов, гравитационная волна, которая возникает в результате взаимодействия массивных объектов, а также сильное и слабое взаимодействия, возникающие внутри ядер атомов. Этот вид материи не имеет массы покоя и всегда движется со скоростью света.

Надо отметить, что эти два типа материи встречаются в повседневной жизни, они привычны нам и ещё с древних времён изучаются людьми. Но существуют ещё два типа материи, которые были открыты лишь в XX в. и пока не очень хорошо изучены.

**Третий тип** материи – это антивещество. Антивещество, подобно веществу, имеет массу покоя. Каждой частице вещества соответствует симметричная частица антивещества равная по массе, но противоположная по заряду. Например, отрицательно заряженному электрону соответствует симметричная частица – положительно заряженный позитрон. В нашем мире мы не можем наблюдать хоть сколько-нибудь крупные объекты антивещества, поскольку при взаимодействии с веществом происходит так называемая аннигиляция<sup>8</sup>.

И, наконец, **четвёртый тип** материи – физический вакуум. Физический вакуум – это материя, в которой содержатся по сути все другие виды материи. Это, в том числе, связанные энергией электрон-позитронные или протон-антипротонные пары. Если провести мысленный эксперимент и представить, что существует

отдалённое место во Вселенной, где нет ничего: ни вещества, ни антивещества, ни света, никакого другого вида энергии, всё равно там будет находиться физический вакуум. То есть надо чётко понимать, что **пустоты в нашем мире нет**. В любом, самом, казалось бы, пустом месте есть все виды материи, только в связанном состоянии. Физический вакуум при воздействии на него достаточно большой энергии распадается на вещество и антивещество. Видимо, так и возникла наша Вселенная и произошёл так называемый Большой взрыв. В настоящее время в современных лабораториях изучаются свойства и физического вакуума, и антивещества. Об этих экспериментах пойдёт речь в следующих главах.

## Глава. 2. Ридберговские атомы

Как известно, атомы состоят из электронов и ядер. При этом есть внешний электрон, который называется валентным. Этот электрон обычно находится на самом нижнем из возможных уровней. Но при помощи электрического разряда или лазера его можно перевести в любое вышележащее состояние. В атоме существует множество уровней, каждому из которых соответствуют определённые квантовые числа. Основным является главное квантовое число  $n$ , которое обозначает высоту орбиты. **Ридберговскими атомами называются такие атомы, в которых внешний валентный электрон находится на уровне с главным квантовым числом много больше единицы.** Такие атомы могут быть в сотни раз больше атомов в основном состоянии и иметь микронные размеры. Первые экспериментальные наблюдения высоковозбуждённых атомов были реализованы ещё в конце XIX в. Спектры высоковозбуждённых атомов были получены в результате обобщения астрономических наблюдений. В 1890 г.

<sup>8</sup> Аннигиляция – это процесс, при котором две симметричные частицы, например электрон и позитрон, превращаются в энергию.

Й. Ридберг опубликовал свою работу<sup>9</sup> о структуре спектров химических элементов. Это открытие послужило толчком к созданию квантовой механики, поскольку по законам классической механики все тела могут занимать любые орбиты в зависимости от кинетической энергии тел. Оказалось, что наблюдаемый оптический спектр излучения атомов имеет отдельные не пересекающиеся линии различного цвета, что говорило о строго определённых орбитах электронов и нарушало принципы обычной классической механики.

Ридберговские атомы обладают уникальными свойствами. Они имеют большое время жизни и очень чувствительны к электрическим и магнитным полям. Также ридберговские атомы обладают огромной силой взаимодействия. Благодаря своим уникальным особенностям ридберговские состояния атомов представляют большой интерес для физики и химии. Однако отсутствие удобного экспериментального способа переводить атомы в заданное квантовое состояние мешало систематическому изучению ридберговских атомов. В 1950-х и 1960-х гг. одним из распространённых способов получения ридберговских атомов было возбуждение электронным ударом. Но и данный способ не позволял возбуждать атомы до заданного квантового состояния. Новым толчком к изучению ридберговских атомов стало появление в 1970-х гг. перестраиваемых лазеров на красителях. По мере развития методов диагностики и возбуждения ридберговских атомов интерес к ним возрастал. Лазерное охлаждение и захват атомов в магнитооптическую ловушку, описанные в первой главе, дали толчок в изучении высоковозбуждённых атомов при ультранизких температурах.

<sup>9</sup> Rydberg J.R. XXXIV. On the structure of the line-spectra of the chemical elements. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1890. 29(179). P. 331–337.

Существует несколько различных путей получения ридберговских атомов в магнитооптической ловушке. Чаще всего используется двух- или трёхфотонное импульсное возбуждение, которое позволяет перевести до 100% атомов в выбранное состояние. При помощи двух импульсов можно перевести электрон сначала на промежуточный уровень, а потом на высоколежащий ридберговский.

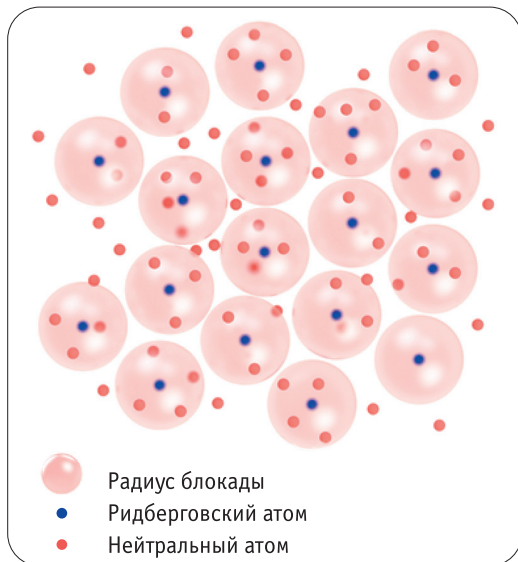
Традиционным способом детектирования ридберговских атомов является их ионизация электрическим полем с последующим детектированием электронов и ионов. В наших работах реализовано возбуждение атомов лития-7 в ридберговские состояния с использованием непрерывного лазерного излучения<sup>10</sup>. Для диагностики энергии высоковозбуждённых состояний непосредственно регистрировалось изменение резонансной флюоресценции ультрахолодных атомов лития-7 в магнитооптической ловушке, при этом измерялась частота лазера, переводящая атомы в ридберговские состояния. Данный метод диагностики интересен тем, что не разрушает ридберговские состояния.

### Глава 3. Эксперименты с ридберговскими атомами

Свойства ридберговских атомов позволяют проводить уникальные эксперименты на их основе.

В 2001 г. М. Лукиным из Гарвардского университета было открыто свойство ридберговских атомов под названием “ридберговская блокада”<sup>11</sup> (рис. 2). Суть заключается в том, что если два или более атомов в основном состоянии находятся достаточно близко друг от друга,

<sup>10</sup> Зеленер Б.Б., Саакян С.А., Саутенков В.А., Манькин Э.А., Зеленер Б.В., Фортон В.Е. Эффективное возбуждение ридберговских состояний ультрахолодных атомов лития-7. Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2014. 100(6). С. 408–412.



**Рис. 2.**  
**Схематичная иллюстрация**  
**ридберговской блокады.**

и при помощи лазера мы пытаемся их перевести в высоковозбуждённое состояние, то из этой группы в ридберговское состояние переходит только один атом. Остальные атомы остаются не возбуждёнными, поскольку первый возбуждённый атом обладает большим дипольным моментом, который смещает уровни соседних атомов и лазер становится не резонансным для этих атомов. Более того, такая группа атомов попадает в так называемое спутанное состояние. Понятие спутанного состояния пришло из квантовой механики и говорит о том, что до прямого измерения того, какой же атом перешёл в ридберговское состояние, мы заранее не можем определить, какой именно. При повторении эксперимента в ридберговское состояние будут переходить разные атомы. В начале 1980-х гг.

Р. Фейнман предложил новую концепцию под названием "Квантовый компьютер". Такой гипотетический компьютер будет обладать совершенно другой архитектурой, нежели обычные современные компьютеры, а скорость вычислений для определённых задач, в том числе задач нахождения простых чисел из их произведения (задача криптографии), будет осуществляться на несколько порядков быстрее. Обычный бит информации может принимать значение 0 или 1. В квантовом компьютере будет использоваться квантовый бит, или кубит. Он может принимать множество значений от 0 до единицы и вместо операции сложения или вычитания будет решаться дифференциальное уравнение. Логика в квантовых компьютерах совсем другая. Например, в квантовом компьютере будут полностью отсутствовать циклы, привычные для обычных вычислений. Кубиты будут построены на системах в спутанных состояниях, и одними из возможных кандидатов на эту роль являются атомы, приготовленные с использованием ридберговской блокады.

В 2017 г. бездефектный регистр из 50 кубитов на основе ультрахолодных ридберговских атомов рубидия и эффекта ридберговской блокады был блестяще продемонстрирован М. Лукиным и его группой в университете Гарварда<sup>12</sup>. Реализация крупномасштабных полностью управляемых квантовых систем является захватывающей перспективой в современной физической науке. Метод основан на быстром в реальном масштабе времени контроле при помощи сверхчувствительной камеры ста оптических нерезонансных ловушек, которые используются, чтобы расположить ультрахолодные атомы в желаемых геометрических узорах и поддерживать эти

<sup>11</sup> Lukin M.D., Fleischhauer M., Cote R., Duan L.M., Jaksch D., Cirac J.I., Zoller P. Dipole blockade and quantum information processing in mesoscopic atomic ensembles. *Physical Review Letters*. 2001. 87(3). P. 037901.

<sup>12</sup> Bernien H., Schwartz S., Keesling A., Levine H., Omran A., Pichler H., Vuletić V. Probing many-body dynamics on a 51-atom quantum simulator. *Nature*. 2017. 551(7682). P. 579.

конфигурации путём замены утраченных атомов из резервуара. Атомы из ловушек могут утрачиваться за счёт столкновения с остаточными газами в вакуумной камере. Этот подход может позволить контролируемое проектирование масштабированных систем многих тел для квантовой обработки информации с использованием возбуждения ридберговских атомов для создания кубитов.

Другим уникальным экспериментом с ридберговскими атомами является эксперимент по получению антиводорода в лабораториях международного центра ЦЕРН. Антиводород на этих установках получался путём смешивания антипротонов и позитронов в магнитной ловушке. Антипротоны получались в коллайдере в результате расщепления вакуума на протоны и антипротоны при помощи столкновения ионов тяжёлых частиц на скоростях близких к скорости света. Затем антипротоны отделялись от протонов при помощи магнитного поля и далее, по отдельному каналу, охлаждаясь сначала в магнитном поле, а затем в газе холодных электронов, попадали в магнитную ловушку, где сталкивались с позитронами. Позитроны, в свою очередь, получались в реакциях радиоактивного распада. В результате из позитронантипротонной плазмы в первые моменты времени получались ридберговские атомы антиводорода, далее позитроны двигались вниз по уровням и в результате получались атомы антиводорода в основном состоянии. В 2016 г. в лаборатории ALPHA под руководством Н. Мэдсена был впервые измерен спектр атома антиводорода<sup>13</sup>, при этом отличия этого спектра от спектра атома водорода не наблюдалось. Основной проблемой этого эксперимента являлась невозможность захвата большого числа атомов антиводорода в основном состоянии. На данный момент удалось одновременно захватить лишь несколько десятков антиатомов. Основной причиной этого является большое магнитное поле ловушки.

Это магнитное поле препятствует движению электронов вниз по уровням. Получение достаточного количества атомов антиводорода (больше тысячи) возможно прояснит тот факт, почему в нашей Вселенной имеет место количественная асимметрия вещества и антивещества.

Большой интерес представляют также эксперименты по созданию различных экзотических молекул из ридберговских атомов. Ридберговские молекулы составляют класс экзотических молекул, которые связаны взаимодействием между ридберговским электроном и основным состоянием атома. В молекулах наблюдаются крайне длинные связи и гигантские постоянные дипольные моменты. В таких экспериментах при температурах очень близких к абсолютному нулю атомы, находящиеся в состоянии бозе-конденсации<sup>14</sup>, переходят в различные ридберговские состояния. При этом при возбуждении определённых конфигураций ридберговских атомов возникают молекулы, в которых распределение электронов напоминает бабочку. Учёным под руководством Х. Отта из университета Кайзер-слаутерна в 2016 г. удалось извлечь длину связи, дипольный момент и угловой момент молекулы<sup>15</sup>. Это позволяет создавать молекулы с детерминированной длиной связи, с возможностью перестраивать длину связи и ориентацию молекулы. При этом можно в таких молекулах селективно выбирать различные уровни энергий, что позволяет эти

<sup>13</sup> Ahmadi M., Alves B.X.R., Baker C.J., Bertsche W., Butler E., Capra, A., Collister R. Observation of the 1S–2S transition in trapped antihydrogen. *Nature*. 2017. 541(7638). P. 506.

<sup>14</sup> Конденсат Бозе – Эйнштейна – агрегатное состояние материи, основу которой составляют бозоны, охлаждённые до температур, близких к абсолютному нулю (меньше миллионной доли градуса выше абсолютного нуля). В таком сильно охлаждённом состоянии достаточно большое число атомов оказывается в своих минимально возможных квантовых состояниях и квантовые эффекты начинают проявляться на макроскопическом уровне. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/rurwikil/207004>

молекулы использовать в качестве элементов квантового компьютера.

Ещё одним примером удивительных свойств ридберговских атомов являются ридберговские атомы на основе щёлочноземельных элементов, таких как магний, кальций и стронций. Наличие двух валентных электронов позволяет создавать ридберговские состояния с двумя возбуждёнными электронами. Так называемые планетарные атомы могут проявлять разное притяжение и отталкивание между собой. Также можно следить за движением высоковозбуждённого ридберговского атома за счёт подсвечивания второго валентного электрона в оптическом диапазоне на переходе между нижними уровнями возбуждения. Эти исследования могут ответить на вопросы, связанные с взаимодействием между ридберговскими атомами и образованием из них самоорганизующихся структур.

При температурах близких к нулю и возбуждении одинаковых сферических состояний ридберговских атомов возможно образование решётки, подобной решётке в твёрдых телах, только на очень больших расстояниях, порядка микрона, что на три порядка больше, чем в твёрдом теле. Существование такого гипотетического агрегатного состояния вещества было предсказано Э.А. Маныкиным в 1981 г. и получило название "ридберговское вещество". К сожалению, к настоящему моменту такое вещество не открыто, хотя в нашей лаборатории мы ведём исследования в этом направлении и надеемся его получить. Из численных расчётов было предсказано формирование пространственных структур, подобных жидкому или твёрдому телу, а также структур типа кластеров или цепочек. Особенностью такого вещества будет являться такая же электронная проводимость, как проводимость металла. Если

ридберговское вещество будет открыто, появится возможность получения самоорганизующихся структур из миллиардов атомов, которые также могут быть полезны для создания масштабируемых кубитов.

#### Глава 4. Детекторы микроволнового излучения на основе ридберговских атомов

Наша планета является песчинкой в громадной Вселенной, которую мы видим в телескопы. Земля входит в Солнечную систему, которая в свою очередь входит в галактику Млечный путь. Наша галактика входит в местную группу галактик, далее в сверхскопление Девы, местное сверхскопление и, наконец, мы наблюдаем всю обозримую Вселенную. При формировании Вселенной из скоплений галактик возникли структуры, напоминающие нити. И вся Вселенная представляет собой структуру, напоминающую паутину. Почему Вселенная имеет такую неоднородную структуру и что будет дальше, это одни из главных вопросов космологии. Современные теории предполагают, что наша Вселенная возникла в результате Большого взрыва. В первое время после создания вещество Вселенной было настолько плотным, что свет не мог выйти наружу и только спустя 300 тысяч лет после уменьшения плотности материи вся Вселенная засияла. Сейчас, куда бы мы ни смотрели в телескопы, мы всегда видим это излучение. Поскольку это излучение возникло в начале развития Вселенной – его назвали реликтовым. Существование реликтового излучения было теоретически предсказано в 1948 г. Г. Гамовым, Р. Альфером и Р. Германом при построении теории Большого взрыва. В 1965 г. А. Пензиас и Р.В. Вильсон на рупорно-параболической антенне в г. Холмдейле (США) обнаружили реликтовое излучение, которое имеет температуру 3.5 К.

<sup>15</sup> Niederprüm T., Thomas O., Eichert T., Lippe C., Pérez-Ríos J., Greene C. H., Ott H. Observation of pendular butterfly Rydberg molecules. *Nature communications*. 2016. 7. P. 12820.

Подробные исследования при помощи наземных и космических телескопов показали, что это излучение не однородно по интенсивности и анизотропно в разных направлениях. Есть отдельные пятна с более высокой и более низкой температурой. Эта неоднородность реликтового излучения как раз и привела к формированию такой неоднородной паутинообразной структуры Вселенной. Более подробное изучение неоднородности может рассказать нам больше о свойствах и структуре Вселенной, а также позволит заглянуть в будущее.

Впервые эксперимент по исследованию анизотропии реликтового излучения был сделан в СССР на орбитальном телескопе "Реликт-1" на спутнике "Прогноз-9" в 1983 г. Далее были более точные эксперименты COBE и WMAP (NASA, США). Самый точный эксперимент, проведённый на данный момент, – это эксперимент на телескопе "Планк" Европейского космического агентства в 2009–2013 гг. **Реликтовое излучение – это микроволновое излучение на длине волны около 3 мм, и как оказалось, это излучение соответствует переходам между высоколежащими ридберговскими состояниями, и детектор на основе ридберговских атомов будет самым чувствительным из всех существующих детекторов с возможностью регистрации отдельных фотонов.**

Сотрудниками нашей лаборатории была предложена схема детектора микроволнового излучения с использованием ультрахолодных ридберговских атомов для космического эксперимента. Предполагается, что наш прибор будет чувствительней на 2 порядка, чем лучшие существующие установки, в том числе обсерватории "Планк", и будет иметь очень широкий диапазон регистрируемых частот, от 250 мкм до 100 мм.

Ещё одной загадкой является тот факт, что мы видим только 5 процентов Вселенной, остальная её часть невидима для телескопов. По последним данным,

кроме обычного вещества есть ещё тёмная материя и тёмная энергия. Нас интересует тёмная материя.

Тёмную материю регистрируют косвенными методами. Когда мы изучаем движение галактик и пытаемся рассчитать скорость их вращения, оказывается, что они должны двигаться быстрее, чем мы видим на самом деле. Это связывают с существованием очень большого количества тёмной материи. Теоретические предсказания говорят о том, что частицы тёмной материи, аксионы, при воздействии сильного магнитного поля распадаются на фотоны микроволнового излучения. Это излучение мы также сможем зарегистрировать при помощи нашего квантового детектора на основе ультрахолодных ридберговских атомов.

Надо отметить, что разрабатываемый нами детектор может иметь практическое применение на земле в качестве высокочувствительного сканера в системах безопасности, а также в качестве очень хорошо защищённого канала передачи данных на основе микроволнового излучения.

## Глава 5. Заключение

Итак, мы видим, что очень многие направления физики связаны с изучением ридберговских атомов. Одной из причин возникновения квантовой механики послужили исследования высоковозбуждённых атомов в космическом пространстве. **Технологии на основе охлаждённых и захваченных в магнитооптические и оптические ловушки атомов, с возможностью селективно создавать ридберговские атомы, позволят в будущем создать квантовые компьютеры и изучить антивещество. Развитие микроволновых детекторов на основе ультрахолодных ридберговских атомов позволит ещё точнее определить структуру Вселенной, а возможно, прийти к новой модели мироздания в результате экспериментального обнаружения частиц тёмной материи.**