

УДК 535.8:620.3

ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Штундер А.А, студент

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Горячун Н.В. – старший преподаватель

Аннотация. Темная материя представляет собой гипотетическую форму материи, не участвующую в электромагнитном взаимодействии и проявляющую себя исключительно через гравитационные эффекты. Её существование необходимо для объяснения наблюдаемых скоростей вращения галактик, гравитационного линзирования и крупномасштабной структуры Вселенной. В работе рассмотрены астрофизические и космологические доказательства существования темной материи, проанализированы основные кандидаты на роль частиц темной материи — слабо взаимодействующие массивные частицы (вимпы). Особое внимание уделено современным экспериментальным установкам по прямому детектированию темной материи, включая проекты PICASSO и XMASS, их конструктивным особенностям и достигнутым чувствительностям.

Ключевые слова: темная материя, скрытая масса, вимпы, нейтралито, детектирование темной материи, эксперимент PICASSO, эксперимент XMASS, жидкий ксенон, перегретая жидкость.

Введение. Современная космология свидетельствует, что барионная материя, из которой состоят звезды, планеты и межзвездный газ, составляет лишь около 4,4% от полной массы Вселенной. Оставшаяся часть приходится на темную энергию ($\approx 72,6\%$) и темную материю ($\approx 23\%$). Темная материя не испускает электромагнитного излучения, что делает её прямое наблюдение невозможным, однако её присутствие уверенно регистрируется по гравитационным эффектам, оказываемым на видимые объекты.

Проблема темной материи распадается на две составляющие: астрофизическую, заключающуюся в противоречии между наблюдаемой массой гравитационно-связанных объектов и их динамическими параметрами, и космологическую, связанную с несоответствием средней плотности Вселенной, определенной по астрофизическим данным, предсказаниям космологических моделей. Разрешение этих противоречий требует допущения существования ненаблюдаемой материи, распределенной в галактических гало и имеющей массу на порядок выше совокупной массы светящейся материи.

Основная часть. Одним из наиболее убедительных астрофизических свидетельств существования темной материи является проблема вращения галактик. Согласно закону всемирного тяготения, для галактики с распределением массы $M(r)$ в пределах радиуса r , скорость вращения определяется выражением:

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}$$

За пределами области, в которой сосредоточена основная масса видимого вещества, скорость вращения должна убывать обратно пропорционально r . Однако наблюдательные данные для многих спиральных галактик демонстрируют, что скорость вращения остается практически постоянной на значительных удалениях от центра (20–25 килопарсек). Это противоречит быстрому убыванию плотности наблюдаемой материи от центра к периферии. Для объяснения наблюдаемых кривых вращения необходимо существование ненаблюдаемой материи, простирающейся на расстояния, в десятки раз превышающие видимые границы галактик, и имеющей массу на порядок выше совокупной массы светящейся материи [1].

По современным представлениям, основная доля темной материи является небарионной, то есть не участвует в сильном и электромагнитном взаимодействиях. В зависимости от скоростей частиц темная материя разделяется на горячую и холодную. Горячая темная материя состоит из частиц, движущихся с околосветовыми скоростями, преимущественно из нейтрино. Холодная темная материя должна состоять из массивных медленно движущихся («холодных») частиц или сгустков вещества. Основными кандидатами на роль холодной темной материи выступают слабо взаимодействующие массивные частицы — вимпы (от англ. Weakly Interactive Massive Particles), такие как легчайшие суперсимметричные частицы (нейтралито), которые в большинстве теорий суперсимметрии являются стабильными.

Для прямого детектирования вимпов разработаны и функционируют несколько экспериментальных установок, использующих различные физические принципы регистрации. Среди них особое место занимают эксперименты PICASSO и XMASS.

Эксперимент PICASSO (Project in Canada to Search for Supersymmetric Objects) базируется в SNOLAB (Канада). Чувствительным материалом детектора являются миллионы микрокапель перегретой

жидкости — перфторбутана (C_4F_{10}). Принцип работы основан на том, что жидкость, нагретая до температуры выше точки кипения, находится в метастабильном состоянии. При взаимодействии вимпа с атомом фтора в капле инициируется процесс фазового перехода жидкость-пар, сопровождающийся образованием пузырька (рисунок 1). Эти мини-взрывы регистрируются пьезоэлектрическими сенсорами по звуковым импульсам (рисунок 2).

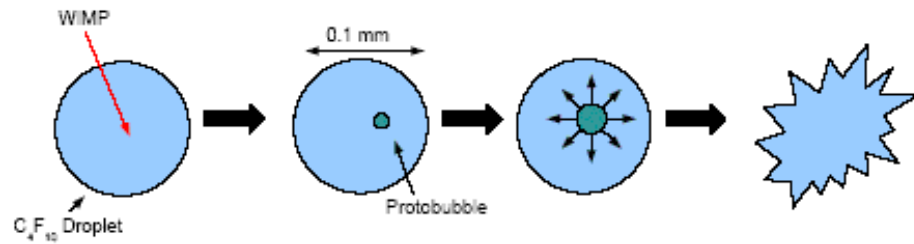


Рисунок 1 – Взаимодействие WIMПов с жидким C_4F_{10}

Один модуль последнего поколения установки (рисунок 3) имеет объем 4,5 л и содержит 80 г C_4F_{10} , сигналы регистрируются 9 пьезоэлектрическими сенсорами с последующей локализацией событий методом триангуляции. В настоящее время установка PICASSO состоит из 32 таких модулей с общей активной массой 2,6 кг.

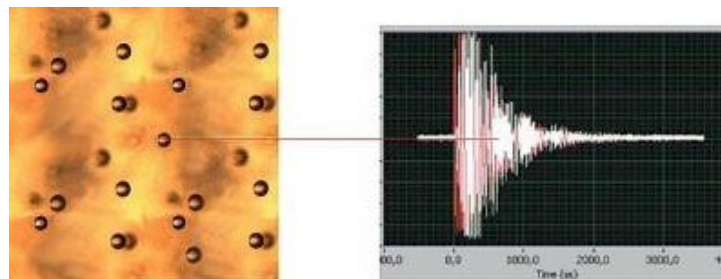


Рисунок 2 – Регистрация WIMПов пьезоэлектрическим сенсором

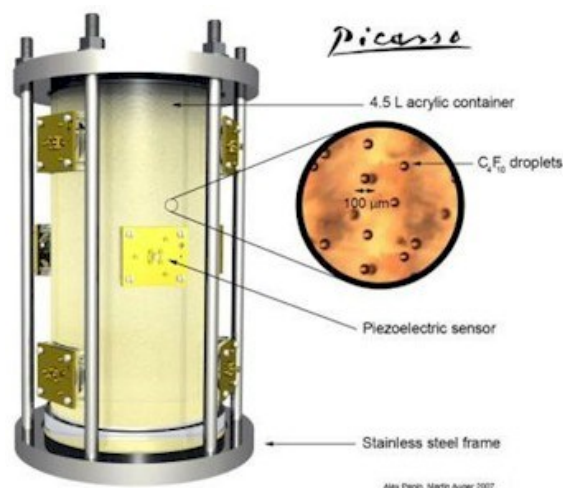


Рисунок 3 - Модуль детектора PICASSO

Эксперимент XMASS, расположенный в обсерватории Камиока (Япония), использует детектор на жидком ксеноне для прямого детектирования темной материи. Преимущества такого подхода включают высокий световыход, большое атомное число ($Z = 54$), а также доступность жидкой и газообразной фаз необходимой чистоты. Вспышки сцинтилляции возникают при упругом рассеянии вимпа на ядре ксенона, а выделившийся свет регистрируется множеством фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) [2].

Детектор XMASS (рисунок 4) представляет собой резервуар высотой 10 м и диаметром 10 м, заполненный водой, которая служит активной защитой от нейтронов, возникающих в мюонных реакциях, и пассивной защитой от гамма-квантов и нейтронов окружающей породы. На стенках резервуара установлены 20-дюймовые ФЭУ.

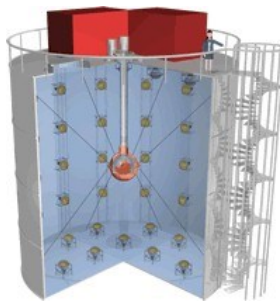


Рисунок 4 - Детектор XMASS

В центре установки (рисунок 5) расположен детектор на жидком ксеноне, окруженный 642 специально разработанными для XMASS низкороговыми ФЭУ (рисунок 6) производства Hamamatsu [3]. Поскольку сигналы темной материи чрезвычайно редки и слабы, критически важно снижение фона и порога регистрации. Количество радиоактивных примесей (U, Th) в ФЭУ уменьшено в 100 раз по сравнению с обычными приборами. Благодаря высокому атомному номеру ксенона гамма-излучение эффективно затухает в приповерхностном слое детектора, что дополнительно снижает гамма-фон.

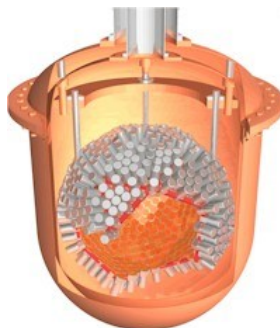


Рисунок 5 - Детектор в центре

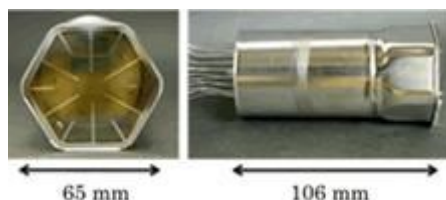


Рисунок 6 - ФЭУ для XMASS

Сравнительный анализ чувствительности различных экспериментов по поиску темной материи представлен на рисунке 7. Синяя и зеленая линии демонстрируют зависимости для существующих экспериментальных установок (CDMS-II, XENON10), желтые точки обозначают наиболее вероятные области значений параметров вимпов, предсказываемые теоретическими моделями и экспериментом DAMA. Ожидается, что в результате модернизации XMASS достигнет чувствительности, в 100 раз превышающей текущие показатели, что позволит осуществить прямое детектирование темной материи.

Альтернативные кандидаты и косвенные методы регистрации. Помимо вимпов, в качестве кандидатов на роль частиц темной материи рассматриваются также аксионы — гипотетические псевдоскалярные частицы, введенные для решения проблемы сильной CP-инвариантности в квантовой хромодинамике. Аксионы обладают чрезвычайно малой массой (от 10^{-6} эВ до 10^{-3} эВ) и крайне слабым взаимодействием с веществом, что делает их детектирование ещё более сложной задачей по сравнению с вимпами. Для поиска аксионов разрабатываются резонансные полостные эксперименты (ADMX, CAPP), в которых ожидается преобразование аксионов в фотоны в сильном магнитном поле.

Другим перспективным направлением является косвенное детектирование темной материи по продуктам аннигиляции или распада её частиц. Крупные нейтринные телескопы (ANTARES, Baikal-GVD, IceCube) ориентированы на регистрацию нейтринных потоков из центра Галактики, Солнца или Земли, где возможно накопление частиц темной материи. Гамма-обсерватории (Fermi-LAT, H.E.S.S., CTA) ведут поиск избыточного гамма-излучения из областей с высокой плотностью темной материи — карликовых

сфероидальных галактик, галактического гало. Однако интерпретация таких сигналов осложнена наличием астрофизического фона (пульсары, остатки сверхновых, космические лучи), что требует высокой угловой и энергетической разрешающей способности инструментов.

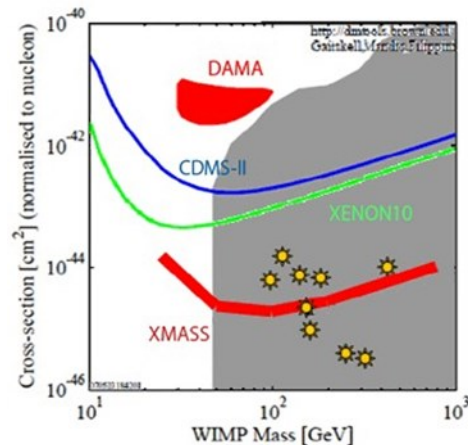


Рисунок 7 – Зависимость чувствительностей детекторов от массы «вимпов»

Важным дополнением к прямым и косвенным методам являются коллайдерные поиски. На Большом адронном коллайдере (ATLAS, CMS) исследуются события с недостающим поперечным импульсом, которые могут указывать на рождение частиц темной материи в паре со стандартными частицами. Хотя к настоящему моменту убедительных сигналов не обнаружено, полученные ограничения существенно сужают пространство допустимых моделей, особенно для вимпов с массами менее 100 ГэВ.

Следует отметить, что ни один из методов пока не дал статистически значимого открытия. Это заставляет исследователей совершенствовать как сами детекторы, так и методы обработки данных. Например, в эксперименте PICASSO используется акустическая дискриминация событий, позволяющая отличать сигналы от вимпов от α - и γ -фонов по форме звукового импульса. В XMASS, помимо активной водяной защиты, применяется анализ временных профилей сцинтилляций и пространственная реконструкция событий для отбора событий в объеме детектора вдали от стенок.

Достигнутые на сегодня пределы сечения взаимодействия вимпов с нуклонами составляют величину порядка $10^{-46} - 10^{-44}$ см² для масс 10–10³ ГэВ. Эксперименты следующего поколения (DARWIN, XENONnT, LZ) планируют снизить этот порог до 10^{-48} см², что позволит проверить практически все предсказания суперсимметричных моделей. В случае отрицательного результата физикам, вероятно, придется серьезно пересмотреть парадигму холодной темной материи или предположить более экзотические сценарии (например, темную материю в виде первичных черных дыр или ультралегких бозонных полей) [4].

Заклучение. Темная материя остается одной из фундаментальных проблем современной физики и астрофизики. Многообразие наблюдательных данных — от кривых вращения галактик до гравитационного линзирования и анизотропии реликтового излучения — убедительно свидетельствует в пользу существования скрытой массы, не участвующей в электромагнитном взаимодействии. Наиболее вероятными кандидатами на роль частиц темной материи являются слабо взаимодействующие массивные частицы (вимпы), предсказываемые в рамках суперсимметричных расширений Стандартной модели.

Современные эксперименты по прямому детектированию, такие как PICASSO и XMASS, используют различные физические принципы — от фазовых переходов в перегретой жидкости до регистрации сцинтилляций в жидком ксеноне. Достигнутые чувствительности уже позволили существенно ограничить область допустимых параметров вимпов. Планируемое повышение чувствительности экспериментальных установок открывает перспективы прямого обнаружения частиц темной материи в ближайшие годы, что станет важнейшим подтверждением существующей космологической парадигмы и может указать путь к физике за пределами Стандартной модели.

Список использованных источников:

1. Официальный сайт XMASS experiment. — Режим доступа: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/index-e.html>. (Материалы для разделов об эксперименте XMASS).
2. Официальный сайт The PICASSO experiment. — Режим доступа: <http://www.picassoexperiment.ca/index.php>. (Материалы для разделов об эксперименте PICASSO).
3. Weakly Interacting Massive Particle. — Wikipedia. — Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Weakly_Interacting_Massive_Particle. (Обзорный материал для разделов о вимпах и суперсимметричных кандидатах).
4. Kobayashi K. Status of XMASS experiment / K. Kobayashi // Proceedings of the International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics. — 2010.

UDC 535.8:620.3

DARK MATTER: PHYSICAL PRINCIPLES, DETECTION METHODS AND MODERN EXPERIMENTS

Shtunder A.A., student

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

Goryachun N.V. – senior lecturer

Annotation. Dark matter is a hypothetical form of matter that does not participate in electromagnetic interaction and manifests itself exclusively through gravitational effects. Its existence is necessary to explain the observed rotation curves of galaxies, gravitational lensing, and the large-scale structure of the Universe. This paper examines the astrophysical and cosmological evidence for the existence of dark matter, and analyzes the main candidates for dark matter particles — weakly interacting massive particles (WIMPs). Special attention is paid to modern experimental setups for direct dark matter detection, including the PICASSO and XMASS projects, their design features and achieved sensitivities.

Keywords: dark matter, hidden mass, WIMPs, neutralino, dark matter detection, PICASSO experiment, XMASS experiment, liquid xenon, superheated liquid.