

ПРОЯВЛЕНИЯ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ: КРИВЫЕ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИК И ОТКЛОНЕНИЕ СВЕТА

Гук Н.И., Пархонюк М.П., студенты

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

Иванов М.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. Рассмотрены два независимых доказательства существования тёмной материи: плоские кривые вращения спиральных галактик и аномальное отклонение света вблизи массивных объектов. Показано, что оба эффекта не объясняются видимой барионной материей и требуют введения невидимой массовой компоненты. Приведены физические основы явлений, соответствующие математические соотношения и их интерпретация в рамках концепции тёмного гало.

Проблема скрытой массы во Вселенной была обозначена Ф. Цвикки в 1933 г. при изучении скопления Волосы Вероники: видимой массы галактик оказалось недостаточно для гравитационного удержания скопления. Широкое признание проблема получила в 1970-х годах после систематических наблюдений В. Рубин, показавшей аномальное поведение кривых вращения спиральных галактик. Современные наблюдения предоставляют обширную доказательную базу, указывающую на существование тёмной материи — невидимой массовой компоненты Вселенной. Среди них особое место занимают два независимых эффекта: аномальные кривые вращения и отклонение световых лучей вблизи массивных объектов, регистрируемые принципиально разными методами — динамическим и оптическим. В работе рассмотрены физические основы обоих эффектов и их интерпретация в рамках концепции тёмного гало.

Согласно ньютоновской механике, орбитальная скорость звезды на расстоянии r от центра галактики определяется выражением [1]:

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}, \quad (1)$$

где G — гравитационная постоянная; $M(r)$ — масса внутри радиуса r .

Если вся масса галактики сосредоточена в видимой части, на периферии ожидается спад скорости по закону $v \propto r^{-1/2}$. Однако наблюдения спиральных галактик (рисунок 1) показывают постоянство скорости вращения вплоть до больших радиусов, где видимое вещество практически отсутствует. Из условия $v = \text{const}$ следует $M(r) \propto r$, то есть масса продолжает расти линейно с радиусом за пределами видимого диска. Это указывает на протяжённое сферическое гало из невидимой материи. Для описания профиля его плотности используется модель Наварро–Френка–Уайта (NFW) [2]:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{\left(\frac{r}{r_s}\right)\left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}, \quad (2)$$

где ρ_0 — характерная плотность гало; r_s — радиус масштабирования.

Профиль предсказывает высокую плотность в центре и медленное убывание к периферии, что согласуется с наблюдаемыми плоскими кривыми вращения.

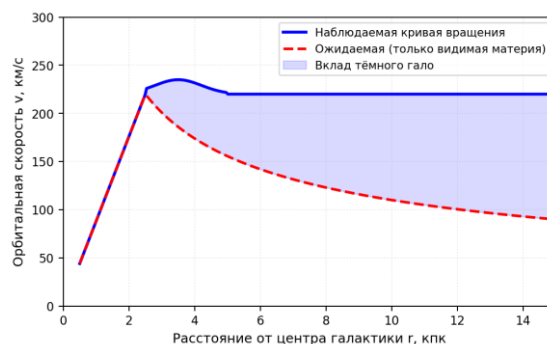


Рисунок 1 – Кривая вращения спиральной галактики: наблюдаемая (сплошная линия) и теоретически ожидаемая для видимой материи (пунктир); закрашенная область — вклад тёмного гало

Независимым свидетельством существования тёмной материи служит отклонение световых лучей вблизи массивных объектов. Согласно общей теории относительности, массивное тело искривляет

пространство-время, и световой луч, проходящий на прицельном расстоянии b от объекта массой M , отклоняется на угол [3]:

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b}, \quad (3)$$

где c — скорость света; b — прицельный параметр.

Наблюдения галактических скоплений показывают, что реальный угол отклонения систематически превышает значение, вычисленное по формуле (3) для видимой барионной массы. Наиболее убедительным примером служит скопление Пули (1E 0657–56): при столкновении двух скоплений горячей газ, составляющий основную барионную массу, замедлился вследствие электромагнитного взаимодействия, тогда как центры гравитационного поля, восстановленные по отклонению света, продолжили движение без торможения. Это указывает на существование невидимой компоненты, не взаимодействующей электромагнитно. Таким образом, оба рассмотренных эффекта — динамический и оптический — дают оценку невидимой массы, что исключает возможность случайной наблюдательной ошибки и существенно укрепляет вывод о реальности тёмной материи.

Следует отметить, что концепция тёмной материи является наиболее принятой, однако не единственной интерпретацией рассмотренных наблюдательных данных. Существуют альтернативные подходы, в частности модифицированная ньютоновская динамика (MOND) и модифицированная гравитация (MOG), которые также воспроизводят кривые вращения и отклонение света без введения невидимой массовой компоненты. Окончательный выбор между конкурирующими гипотезами остаётся открытым вопросом современной астрофизики.

Дополнительным независимым методом поиска тёмной материи служит гравитационное микролинзирование. Когда массивный компактный объект гало (MACHO) проходит вблизи линии наблюдения, его гравитационное поле искривляет световые лучи фоновой звезды, вызывая кратковременное симметричное усиление её яркости без изменения цвета [4] (рисунок 2). Масштабные обзоры MACHO и EROS установили, что подобные объекты составляют лишь незначительную долю тёмного гало, что указывает на небарионную природу основной его части.

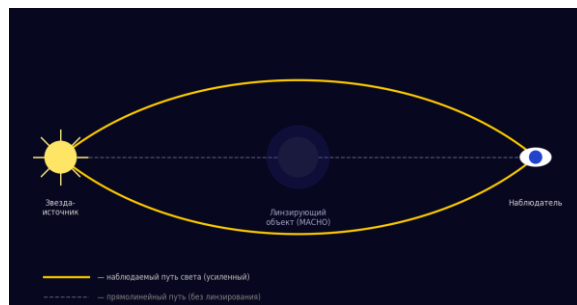


Рисунок 2 – Схема гравитационного микролинзирования: жёлтые лучи — видимый (искривлённый) путь света; серая штриховая линия — прямой путь без линзирования; серый объект в центре — линзирующее тело (MACHO)

Плоские кривые вращения спиральных галактик демонстрируют, что наблюдаемая масса недостаточна для объяснения динамики звёзд на периферии и требуют введения протяжённого тёмного гало с профилем плотности NFW. Аномальное отклонение света вблизи галактических скоплений, в свою очередь, подтверждает наличие невидимой массовой компоненты независимым оптическим методом. Совпадение оценок, полученных принципиально разными способами, свидетельствует о реальности тёмной материи как самостоятельной физической компоненты Вселенной.

Список использованных источников:

1. Rubin, V. C. *Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions* / V. C. Rubin, W. K. Ford // *The Astrophysical Journal*. – 1970. – Vol. 159. – P. 379–403.
2. Navarro, J. F. *The Structure of Cold Dark Matter Halos* / J. F. Navarro, C. S. Frenk, S. D. M. White // *The Astrophysical Journal*. – 1996. – Vol. 462. – P. 563–575.
3. Clowe, D. *A Direct Empirical Proof of the Existence of Dark Matter* / D. Clowe [et al.] // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2006. – Vol. 648. – P. L109–L113.
4. Alcock, C. *The MACHO Project: Microlensing Results from 5.7 Years of Large Magellanic Cloud Observations* / C. Alcock [et al.] // *The Astrophysical Journal*. – 2000. – Vol. 542. – P. 281–307.