

Міністерство освіти і науки України

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка

Фізико-математичний факультет

Кафедра фізики

Дипломна робота магістра

З теми: Сучасний стан проблеми темної матерії та темної енергії

Виконав студент 2 курсу F1-M20 групи

Спеціальності 014 Середня освіта (фізика, інформатика)

Пилипів Андрій Ігорович

Керівник: Поведа Р. А., к. фіз.-мат. наук,
доцент

Рецензент: Слободянюк О.В., к.тех. наук,
старший викладач кафедри комп'ютерних наук

Кам'янець-Подільський, 2021 р.

Зміст

Вступ.....	3
Розділ I. Про природу темної матерії, її властивості та прояви. Методи дослідження.....	6
1.1. Проблема чорної матерії.....	6
1.2. Гравітаційне поле у сфері темної матерії.....	14
1.3. Інші аспекти темної матерії.....	23
1.3.1. Повна гравітаційна енергія.....	23
1.3.2. Сили тяжіння.....	24
1.3.3. Стабільність.....	25
1.4. Вплив космологічної константи на викривлення променя світла у метриці Шварцшильда де Сіттера.....	26
1.5. Викривлення променя світла у метриці Коттлера.....	28
1.6. Квадрупольний момент та його вплив на гравіметричні експерименти...33	33
Розділ II. Застосування модифікованого методу Ріндлера-Ісхака на дослідження викривлення променів світла в гало галактики.....	35
2.1. Рівняння геодезичних.....	35
2.2 Модифікований метод Ріндлера – Ісхака.....	36
2.3 Особливі випадки.....	39
Розділ III. Вплив квадрупольного моменту Сонця на гравіметричні експерименти.....	49
3.1 Метрика Ереца-Розена.....	49
3.2 Ефект гравітаційного уповільнення часу.....	50
3.3 Ефект відхилення світла.....	54
3.4 Вплив на прецесію перигелію планет.....	55
Висновки.....	57
Список використаних джерел.....	59

Вступ

Актуальність теми. На сьогоднішній день проблема, пов'язана з присутністю темної матерії в космосі, про існування якої можна, поки теоретично, укласти виходячи з відомих законів тяжіння і, особливо при спостереженні кривої обертання галактик, є дуже актуальною. У сучасній астрофізиці, пропоновані математичні моделі, а також ряд непрямих експериментальних даних говорять про наявність прихованої маси. Виходячи з експериментальних спостережень, було укладено, що складова темної матерії починає нарощувати свою масу з збільшенням відстані від аналізованих галактик. Результати вимірів кривою обертання деяких карликових галактик (таких як DD0154) говорять про те, що дальність поширення темної матерії за їх межами дуже велика [1]. Однак повна маса окремих галактик з урахуванням темної матерії досі невідома. Це пов'язано з тим, що спостереження залежності швидкості обертання частинок для великих радіусів не визначена в точній мірі.

Разом з тим, досі не відома внутрішня структура темної матерії та темної енергії. Одним із пояснень може бути існування невідомих частинок (WIMPs), що створюють гравітаційні поля [2].

Одним із непрямих методів оцінки якості невидимої матерії в будь-якій галактиці або скупченні галактик є гравітаційне лінзування, тобто використання ефекту викривлення променів, що проходять поблизу масивних об'єктів.

З іншого боку, темна матерія пов'язана з силами тяжіння та локалізована на менших масштабах, ніж космологічні, де домінує темна енергія, яка, у свою чергу, виявляє відразливий гравітаційний ефект. При цьому постає питання: чи існує верхня межа для розміру гало темної матерії?

Вже давно відомий факт, що масивні нейтральні атоми водню виконують кругове обертання гало навколо галактичного центру [3]. За червоного зміщення світла, отриманого від цих атомів, можна визначити їх

тангенційні швидкості [4]. Отже, для визначення граничного радіуса розподілу темної матерії в області гало так само можна розглядати орбіти потужних тестових частинок.

Ще одним ефектом є прогнозований теорією Ейнштейна повільний додатковий поворот еліптичних орбіт планет, що рухаються навколо Сонця. Незважаючи на те, що класична теорія відносності Ейнштейна може бути успішно застосована для експериментальної перевірки досить слабких гравітаційних полів Сонця та полів, створених подвійними пульсарами, цих спостережень за кривими обертання в галактичних гало все ще недостатньо для задовільного опису аналізованих математичних моделей. На точність перевірки цього ефекту впливає невизначеність знання величини квадрупольного моменту Сонця. Спостереження, що визначають квадрупольний момент Сонця, дуже важкі, і питання його величині досі залишається відкритим.

Проте вже існують альтернативні теорії, такі як модифікована ньютонівська динаміка [3,4], модель "світу на брані" [5], моделі скалярного поля [6] та інші, які намагаються пояснити темну матерію. Найбільш відомою моделлю є приватне рішення у метриці Мангейма-Казанаса де Сіттера в конформній гравітації Вейля [7].

Актуальність проведеного дослідження визначається тим, що теоретичне вивчення проблеми темної матерії дає можливість пояснити наглядні дані, передбачити та вивчати нові астрофізичні ефекти, що забезпечує краще розуміння картини сучасного Всесвіту, а також його майбутнє.

Об'єкт дослідження – стан проблеми темної матерії та темної енергії.

Предмет дослідження – альтернативні теорії пояснення темної матерії.

Метою роботи є вивчення астрофізичних ефектів прихованої маси галактичного гало, квадрупольного моменту та космологічної константи та їх вплив на гравітаційне лінзування.

Відповідно до поставленої мети вирішувалися такі *завдання*:

1. Визначити ефект у першого порядку на викривлення променя світла методом Ріндлера-Ісхака.
2. Дослідити можливі значення для параметрів φ , M , k при обчисленні кута викривлення променя світла.
3. Розрахувати межу верхньої межі розміру галактичного гало z за допомогою автономної Гамільтонової динамічної системи.
4. Визначити поправку на значення q у різних відомих гравітаційних експериментах Сонячної системи в рамках простору-часу Ереца-Розена.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Визначено наявність відштовхувального гравітаційного ефекту γ на викривлення світла в галузі галактичного гало.
2. Обчислено вплив квадрупольного моменту q з перевіркою гравіметричних розрахунків Сонця, таких як гравітаційне лінзування, прецесія планет та затримка за часом.

Практична значимість:

Проведене дослідження, безумовно, розширює та поглиблює наше уявлення про вплив темної матерії на гравітаційне лінзування, криву обертання галактик та деякі гравіметричні експерименти. Вивчення деяких ефектів гравітаційного лінзування представляє велику значимість з точки зору загальної теорії відносності та як інструмент з виявлення нових властивостей астрофізичних об'єктів. Результати цієї роботи вказують на перспективу експериментального спостереження нових значень кута викривлення променів світла в області галактичного гало.

Структура та обсяг роботи. Магістерська складається із вступу, трьох розділів в основній частині, висновків, списку літератури. Об'єм магістерської роботи складає 60 сторінок.

Висновки

Дослідження, виконані в рамках цієї роботи присвячені визначенню деяких ефектів темної матерії. Так само були виявлені деякі ефекти внаслідок гравіметричних експериментів з урахуванням впливу квадрупольного моменту Сонця. Рішення даних задач актуально, перш за все, для отримання нових теоретичних обґрунтувань астрофізичних та космологічних проявів темної матерії.

Результати цієї роботи вказують на перспективу експериментального спостереження нових значень кута викривлення променів світла в області галактичного гало. Проведене дослідження, безумовно, розширює та поглиблює наше уявлення про вплив темної матерії на гравітаційне лінзування, криву обертання галактик та деякі гравіметричні експерименти. Вивчення деяких ефектів гравітаційного лінзування представляє велику значущість з погляду загальної теорії відносності та як інструмент з виявлення нових властивостей астрофізичних об'єктів. У певних випадках результати, що випливають з розгляду запропонованих рішень, переходять у відомі, що є підтвердженням достовірності аналізованих теорій. Важливим результатом роботи було визначено наявність відштовхувального гравітаційного ефекту у на викривлення світла у сфері галактичного гало.

Основні результати роботи зводяться до наступного:

1. За допомогою методу Ріндлера-Ісхака отримано коефіцієнт γ , облік якого в рівнянні описує викривлення променя світла показує, що значення викривлення Шварцшильда зменшується. Встановлено вплив коефіцієнта $-\frac{\gamma R}{2}$ на викривлення та його поправного значення $-\frac{3\pi\gamma}{4}$. За допомогою методу Ріндлера-Ісхака було розраховано параметр γ , який може бути фізично суттєвим лише у масштабах галактичного кластера, але не в масштабі Сонячної системи. Обчислено значення кута викривлення $\varepsilon = -\frac{\gamma R}{2}$ для випадку $M = 0$. Показано, що величина $k = \pi / 3$ впливає, як у параметри

Шварцшильда, так і їх конформний параметр γ . Отримано рівняння, що описує як шварццильдове викривлення світла при $M > 0$, так і відштовхуючий гравітаційний ефект космологічної константи $k > 0$ та конформного параметра Вейля $\gamma > 0$ викривлення променя світла.

2. Показано, що розвиток методу Ріндлера-Ісхака в рамках запропонованої нами моделі може бути адаптовано для визначення нового значення кута викривлення в гало темної матерії у більш загальному рішенні, ніж рішення Шварцшильда де Сіттера.

3. Обчислено квадрупольну поправку q відхилення світла, рівну $1,89 \times 10^{-12}$ радіан. Встановлено вплив квадрупольного моменту на ефект уповільнення часу $t(r, r_1)$. Розраховано значення вікового усунення перигелія Меркурія в рамках загальної теорії відносності з поправкою на квадрупольний момент Сонця, яке виявилось рівним $42,56 \pm 0,94''$.

Список використаних джерел

1. Sahni, V. Dark matter and dark energy / V. Sahni arXiv:astro-ph/0403324v3
2. Lake, K. Galactic halos are Einstein clusters of WIMPs / K. Lake arXiv:grqc/0607057v3
3. Bharadwaj S. Modeling galaxy halos using dark matter with pressure / S. Bharadwaj, S. Kar // Phys. Rev. D. - 2003. Vol.68. P.023516-023520.
4. Nucamendi, U. Alternative approach to the galactic dark matter problem / U. Nucamendi, M. Salgado, D. Sudarsky // Phys. Rev. D. - 2001. Vol.63. P.125016-125051.
5. Bekenstein, J. D. Gravitational lenses and unconventional gravity theories / J. D. Bekenstein, R. H. Sanders // Astrophysical Journal. - 1994. Vol.429. P.480-490.; Bekenstein, J.D. Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm / J.D. Bekenstein // Phys. Rev. D. - 2004. Vol.70. P.083509-083542.; Bekenstein, J. D. Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm / J. D. Bekenstein // Phys. Rev. D. - 2005. Vol.71. P.069901-069934.
6. Milgrom, M. A Modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis / M. Milgrom // Astrophysical Journal - 1983. Vol.270. P.365-370.; Milgrom, M. Bimetric MOND gravity / M. Milgrom // Phys. Rev. D. - 2009. Vol.80. P.123536-123553.
7. Rahaman, F. Galactic rotation curves and brane-world models / F. Rahaman, M. Kalam, A. DeBenedictis, A. A. Usmani and Saibal Ray // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2008. Vol.389. P.27-43.
8. Matos, T. Spherical scalar field halo in galaxies / T. Matos, F.S. Guzman, D. Nunez // Phys. Rev. D. - 2000. Vol.62. P.061301-061304.; Nandi, K.K. Remarks on the spherical scalar field halo in galaxies / K.K. Nandi, I. Valitov, N.G. Migranov // Phys. Rev. D. - 2009. Vol.80. P.047301-047306.
9. Mannheim, P. D. Exact vacuum solution to conformal Weyl gravity and galactic rotation curves / P. D. Mannheim, D. Kazanas // Astrophysical Journal. -

1989. Vol.342. P.635-638.; Mannheim, P. D. Are Galactic Rotation Curves Really Flat? / P. D. Mannheim // *Astrophysical Journal*. - 1997. Vol.479. P.659-671.; Mannheim, P. D. Schwarzschild limit of conformal gravity in the presence of macroscopic scalar fields / P. D. Mannheim // *Phys. Rev. D*. - 2007. Vol.75. P. 124006-124037.; Mannheim, P.D. Alternatives to Dark Matter and Dark Energy / P.D. Mannheim // *Progress in Particle and Nuclear Physics*. - 2006. Vol.56. P.340-445.

10. Jungman, G. Supersymmetric dark matter / G. Jungman, M. Kamionkowski, K. Griest // *Phys. Rep.* - 1996. Vol.267. P. 195-373.

11. Fay, S. Scalar fields properties for flat galactic rotation curves / S. Fay // *Astron. Astrophys.* - 2004. Vol.413. P.799-806.

12. Matos, T. Spherical scalar field halo in galaxies / T. Matos, F. S. Guzman, D. Nunez // *Phys. Rev. D* - 2000. Vol.62 P.061301-061304.; Nandi K.K. Remarks on the spherical scalar field halo in galaxies / K.K. Nandi, I. Valitov, N.G. Migranov // *Phys. Rev. D*. - 2009. Vol.80. P.047301-047304.

13. Colpi, M. Boson Stars: Gravitational Equilibria of Self-Interacting Scalar Fields / M. Colpi, S. L. Shapiro, I. Wasserman // *Phys. Rev. Lett.* - 1986. Vol.57. P.2485-2488.

14. Lee, J.-w. Galactic halos as boson stars / J.-w. Lee, I.-g. Koh // *Phys. Rev. D*. - 1996. Vol.53. P.2236-2239.

15. Rahaman, F. Galactic rotation curves and brane-world models / F. Rahaman, M. Kalam, A. DeBenedictis, A. A. Usmani, Saibal Ray // *Mon. Not. R. Astron. Soc.*- 2008. Vol.389. P.27-33.; Nandi, K. K. Features of galactic halo in a brane world model and observational constraints / K. K. Nandi, A.I. Filippov, F. Rahaman, Saibal Ray, A. A. Usmani, M. Kalam, A. DeBenedictis // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* - 2009. Vol.399. P.2079-2087.

16. Nukamendi, U Nonminimal Global Monopoles and Bound Orbits / U. Nukamendi, M. Salgado, D. Sudarsky, *Phys. Rev. Lett.* - 2000. Vol.84. P.3037-3040; Lee, T. Scalar-tensor gravity coupled to a global monopole and flat rotation curves / T. Lee, B. Lee // *Phys. Rev. D*. - 2004. Vol.69. P. 127502- 127505.;

Rahaman, F. Global monopole, dark matter and scalar tensor theory / F. Rahaman, R. Mondal, M. Kalam, B. Raychaudhuri // *Mod. Phys. Lett. A.* - 2007. Vol.22. P.971.

17. Rindler, W. The contribution of the cosmological constant to the relativistic bending of light revisited / W. Rindler, M. Ishak // *Phys. Rev. D.* - 2007. Vol.76. P. 043006-043011.

18. Ishak, M. A new independent limit on the cosmological constant /dark energy from the relativistic bending of light by galaxies and clusters of galaxies / M. Ishak , W. Rindler , J. Dossett, J. Moldenhauer, C Allen // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* - 2008. Vol.388. P. 1279-1283.

19. Sereno, M. On the influence of the cosmological constant on gravitational lensing in small systems / M. Sereno // *Phys. Rev.D.* - 2008. Vol.77. P.043004- 043012; Sereno, M. The role of Λ in the cosmological lens equation / M. Sereno // *Phys. Rev. Lett.* -2009. Vol.102. P.021301-021305.

20. Kantowski, R. Gravitational lensing corrections in flat Λ CDM cosmology / R. Kantowski, B. Chen, X. Dai // *Astrophysical Journal.* - 2010. Vol.718. P.913- 919.

21. Schucker, T. Strong lensing in the Einstein - Straus solution / T. Schucker // *Gen. Rel. Grav.* - 2009. Vol.41. P. 1595-1610.; Schucker, T. Cosmological constant and lensing / T. Schucker // *Gen. Rel. Grav.* - 2009. Vol.41. P.67-75.; Schucker, T. Lensing in the Einstein - Straus solution / T. Schucker // *arXiv: 1006.3234.*

22. Simpson, F. On lensing by a cosmological constant / F. Simpson, J. A. Peacock, A. F. Heavens // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* - 2010. Vol.402. P.2009-2016. Ishak , W. Rindler , J. Dossett, J. Moldenhauer, C Allen // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* - 2008. Vol.388. P. 1279-1283.

23. Ishak, M. More on lensing by a cosmological constant / M. Ishak, W. Rindler, J. Dossett // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* - 2010. Vol.403. P.2152-2156.

24. Park, M. Rigorous approach to the gravitational lensing / M. Park // *Phys. Rev. D*. - 2008. Vol.78. P.023014-023019.
25. Khriplovich, LB. Does cosmological term influence gravitational lensing? /1. B. Khriplovich, A. A. Pomeransky // *Int. J. Mod. Phys. D*. - 2008. Vol.17. P.2255- 2259.
26. Bhattacharya, A. The vacuole model revisited: new repulsive terms in the second order deflection of light / A. Bhattacharya , G.M. Garipova , A. A. Potapov, A. Bhadra, K. K. Nandi // arXiv: 1002.2601.
27. Ishak, M. The relevance of the cosmological constant for lensing / M. Ishak, W. Rindler // *Gen. Rel. Grav.* - 2010. Vol.42. P.2247-2267.
28. Edery, A. Classical tests for Weyl gravity: deflection of light and radar echo delay / A. Edery, M.B. Paranjape // *Phys. Rev. D*. - 1998. Vol.58. P.024011-024014.
29. Pireaux, S. Light deflection in Weyl gravity: constraints on the linear parameter / S. Pireaux // *Class. Quant. Grav.* - 2004. Vol.21. P.4317-4336.
30. Bodenner, J. Deflection of light to second order: a tool for illustrating principles of general relativity / J. Bodenner, CM. Will // *Am. J. Phys.* - 2003. Vol.71. P.770-773.
31. Weinberg, S. *Gravitation & cosmology*, John Wiley & Sons, New York, U.S.A. - 1972.
32. Березин, В.А. Классический аналог квантовой черной дыры Шварцшильда. "Стандартная модель" и за ее пределами. // *Теоретическая и математическая физика*. 2012. Т. 170. С.
33. Klimenko, A. V. Centrifugal cosmological repulsive force in a homogeneous universe / A. V. Klimenko, V. A. Klimenko // arXiv:1105.0815v1
34. Islam, J.N. The cosmological constant and classical tests of general relativity / J.N. Islam // *Phys. Lett. A*. - 1983. Vol.97. P.239-241.
35. Rindler, W. Contribution of the cosmological constant to the relativistic bending of light revisited / W. Rindler, M. Ishak, *Phys. Rev. D*. - 2007. Vol.76.

P.043006-043010.; Rindler, W. The Relevance of the Cosmological Constant for Lensing / M. Ishak, W. Rindler // arXiv: 1006.0014 astro-ph.

36. Ishak, M. A. New Independent Limit on the Cosmological Constant/Dark Energy from the Relativistic Bending of Light by Galaxies and Clusters of Galaxies / M. Ishak, W. Rindler, J. Dossett, J. Moldenhauer and C Allisson // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. - 2008. Vol.388. P. 1279- 1273.

37. Bhattacharya, A. Light bending in the galactic halo by Rindler-Ishak method / Amrita Bhattacharya, Ruslan Isaev, Massimo Scalia, Carlo Cattani, Kamal K. Nandi // Journal of Cosmology and Astroparticles Physics - 2010. Vol. 009. - P. 235017-235030.

38. Bhattacharya, A. The vacuole model revisited: New repulsive terms in the second order deflection of Light / Amrita Bhattacharya, Guzel M. Garipova, Alexander A. Potapov, Arunava Bhadra, Kamal K. Nandi // arXiv: grqc/0910.1112

39. Jordan, D.W. Nonlinear ordinary differential equations 3rd edition / D.W. Jordan, P. Smith Oxford.: Oxford University Press, 1999.

40. Palit A. Stability of Circular Orbits in General Relativity: a Phase Space Analysis / A. Palit, A. Panchenko, N.G. Migranov, A. Bhadra and K.K. Nandi // International Journal of Theoretical Physics - 2009. 48. 1271. P. 1271-1289.

41. Nandi K. K. Features of galactic halo in a brane world model and observational constraints / K. K. Nandi, A.I. Filippov, F. Rahaman, Saibal Ray, A. A. Usmani, M. Kalam, A. DeBenedictis // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society - 2009. 399. P. 2079-2087.

42. Bose, S.K. Introduction to general relativity / S.K. Bose New Delhi: Wiley Eastern, 1980.

43. Carloni, S. Cosmological dynamics of R_n gravity / S. Carloni, P. K. S. Dunsby, S. Capozziello and A. Troisi, Class. Quant. Grav. - 2005. Vol. 22. P. 4839-4863

44. Einstein, A. The Particle Problem in the General Theory of Relativity / A. Einstein, N. Rosen // Physical Review. 1935. Vol.48. P.73-77.

45. Anderson, J. D. Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration/ J. D. Anderson, P. A. Laing, E. L. Lau, A. S. Liu, M. M. Nieto, S. G. Turyshev // *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 81. P. 2858-2861;
46. Anderson, J. D. Study of the anomalous acceleration of Pioneer 10 and 11/ J. D. Anderson, P. A. Laing, E. L. Lau, A. S. Liu, M. M. Nieto, S. G. Turyshev // *Phys. Rev. D.* 2002. Vol. 65. P. 082004.
47. H. Quevedo, H. Multipole moments in general relativity. Static and stationary vacuum solutions // *Fortschr. Phys.* 1990. Vol. 38. P. 733-840.
48. Narlikar, J. V. *Introduction to General Relativity* / J. V. Narlika. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1980.
49. Misner, C. W. *Gravitation* / C W. Misner, Kip S. Thome, John A. Wheeler. San Francisco: Freeman & Co., 1973.
50. Zeldovich Ya. B. *Relativistic Astrophysics* / Ya. B. Zeldovich, I. D. Novikov. Chicago: University of Chicago Press, 1971.
51. Geroch, R. Multipole Moments. II. Curved Space / R. Geroch // *J. Math. Phys.* 1970. Vol. 11. P. 1665427-1665435.
52. Dicke, R. H. Solar Oblateness and General Relativity / R. H. Dicke, H. M. Goldenberg//*Phys. Rev. Lett.* 1967. Vol. 18. P. 313-316.
53. Kuhn, J. R. The Sun's shape and brightness / J. R. Kuhn, R.I. Bush, X. Scheick, P. Scherres // *Nature.* 1998. Vol. 392. P. 155-157.
54. Hartle, J.B. *An Introduction to General Relativity* / J. B. Hartle. Singapore: Pearson Education Inc, 2003
55. Quevedo, H. Pioneer's Anomaly and the Solar Quadrupole Moment / H. Quevedo and L. Parkes // preprint: gr-qc/0501006.
56. Shapiro, 1.1. Fourth Test of General Relativity: New Radar Result /1.1. Shapiro // *Phys. Rev. Lett.* 1971. Vol. 26. P. 1132-1135.