

Головна астрономічна обсерваторія
Національної Академії наук України

На правах рукопису

Манджос Андрій Володимирович

**Взаємокогерентні властивості випромінювання у
гравітаційно-лінзовій оптиці**

01.03.02 - астрофізика, радіоастрономія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізичних наук

Київ - 1997

52



00751815 (R)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Астрономічній обсерваторії Київського
Національного університету ім.Т.Г.Шевченка

Офіційні опоненти:

- доктор фіз.мат наук, член-кореспондент НАН України,
Фомін Петро Іванович
- доктор фіз.мат наук, старший науковий співробітник,
Мінаков Анатолій Олексійович
- доктор фіз.мат наук, старший науковий співробітник,
Сажін Михайло Васильович

Провідна організація: Спеціальна астрофізична обсерваторія РАН,
Росія, с.Нижній Архиз

Захист дисертації відбудеться "27 " березня___ 1997 р. на засіданні
Спеціалізованої вченої ради Д 016.14.01 з присудження вченого ступеня
доктора фізико-математичних наук при Головній астрономічній
обсерваторії НАН України за адресою: 252127, м. Київ - 127, Голосієво,
ГАО НАНУ. Початок засідань Спецради об 11 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ГАО НАНУ за адресою:
252127, м. Київ - 127, Голосієво, ГАО НАНУ

Автореферат розісланий

" 27 " березня 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради:

Гусєва Н.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертація присвячена дослідженню взаємокогерентних властивостей зображень космічних об'єктів у гравітаційних лінзах. Крім того, в ній досліджуються просторово-когерентні властивості електромагнітного випромінювання від космічних об'єктів, що проходить крізь гравітаційну хвилю.

Актуальність проблеми. В астрономії в останні роки спостерігається великий інтерес до досліджень гравітаційного лінзування космічних тіл, зокрема, такого явища, як мікролінзування. У світі зараз виконується низка спостережних програм, спрямованих на детектування цього явища. Такий інтерес до нього пов'язаний з тим, що воно відкриває перспективи вимірювання важливих параметрів космічних об'єктів (див. нижче), визначення яких, з одного боку, має фундаментальне значення для розуміння будови та процесів розвитку космічних систем, а, з другого боку, є дуже складним або неможливим іншими методами. У зв'язку з цим слід відзначити, що взаємна когерентність зображень, по-перше, є єдиним безперечним тестом самого явища мікролінзування, по-друге, вона органічно переплетена з фотометричними проявами мікролінзування і повинна враховуватися при інтерпретації спостережних даних і, по-третє, пряме детектування ефекту взаємної когерентності зображень у гравітаційних лінзах дозволило б прямим чином визначити ті параметри, про які йшла мова вище. Теоретичні дослідження спостережних проявів дії гравітаційних хвиль на електромагнітне випромінювання космічних

об'єктів має значення для проблеми перевірки фундаментальних завбачень загальної теорії відносності.

Метою роботи є розробка теорії взаємної когерентності зображень космічних об'єктів у гравітаційних лінзах, яка до цього часу фактично не існувала. На базі теорії необхідно сформулювати ті умови, при яких зображення в гравітаційних лінзах можуть бути взаємокогерентними, тобто, коли випромінювання пар зображень будуть попарно інтерферувати між собою, і далі вказати на конкретні типи космічних об'єктів, які можуть мати взаємокогерентні зображення. Далі необхідно провести кількісні оцінки цього ефекту та дати теоретичне обґрунтування того, саме які параметри космічних об'єктів можуть бути визначені на основі цього ефекту. Крім того ставиться завдання дослідити вплив гравітаційних хвиль на просторово-когерентні властивості електромагнітного випромінювання від космічних тіл.

Наукова новизна визначається результатами, що отримані вперше.

1. Загальний формалізм для дослідження проблеми взаємної когерентності зображень космічних об'єктів в гравітаційних лінзах на фоні космологічного гравітаційного поля.

2. Сформульовані умови, при яких взаємна когерентність може досягати реалістичних значень для її спостереження. Доведено, що каустичні лінії гравітаційної лінзи є одночасно лініями стаціонарної фази інтегралу взаємної когерентності, звідки випливає, що взаємна

когерентність буде найбільшою у спряжених парах зображень, що утворюються при перетині об'єкту каустикою гравітаційної лінзи.

3. Отримані аналітичні вирази ступеню взаємної когерентності для різних випадків гравітаційного лінзування (див. *Закінчення*).

4. Проведені кількісні оцінки ефекту для конкретних типів космічних об'єктів. Визначені конкретні типи космічних об'єктів, взаємна когерентність зображень яких при мікролінзуванні може досягати реалістичних значень.

5. Доведено, що при мікролінзуванні спектр об'єкту може частково спотворюватися за рахунок ефекту взаємної когерентності зображень.

6. Отримано аналітичний розв'язок рівняння гравітаційної лінзи в околі каспової точки.

7. Запропоновано метод визначення параметрів гравітаційних лінз за даними просторової інтерферометрії зображень космічних об'єктів у них.

8. Проведено послідовний релятивістський аналіз проблеми частотної модуляції електромагнітного випромінювання космічного об'єкту гравітаційною хвилею від подвійної зірки та висновки щодо можливостей спостереження цього ефекту.

Науково-практична цінність роботи. Мікролінзування зараз стало реальним спостережним фактом. Ефекти взаємної когерентності зображень, що його супроводжують, відкривають перспективу незалежного визначення таких параметрів, як маси і розміри зірок, параметрів структури квазарів, тангенціальних швидкостей зірок, галактик, квазарів

тощо. Значення всіх цих параметрів для астрономії в цілому і, зокрема, для космології важко переоцінити. Сформульовані в дисертації умови, за яких взаємокогерентні явища можуть мати місце, дозволять розробити програми пошуку цих ефектів. Отримані в дисертації аналітичні вирази для ступенів взаємної когерентності у різних випадках дають уяву про те, яким чином цей ефект залежить від параметрів лінзованих об'єктів, про які йшла мова вище. Це складе основу для методів визначення цих параметрів у разі детектування явища взаємної когерентності. Крім того, розвинена теорія взаємної когерентності зображень дозволяє враховувати це явище при інтерпретації спостережних даних мікролінзування, коли це необхідно. Результати дослідження впливу гравітаційних хвиль на електромагнітне випромінювання космічних об'єктів у майбутньому можуть скласти основу спостережної програми для детектування цих ефектів, що мають пряме відношення до загальних засад теорії відносності.

На захист виносяться:

1. Загальна постановка проблеми взаємної когерентності зображень космічних об'єктів у гравітаційних лінзах у межах Фрідмановської космології.
2. Дослідження взаємокогерентних властивостей гравітаційно-лінзових зображень у макролінзах.
3. Дослідження зв'язку між взаємокогерентними властивостями зображень та каустиками при мікролінзуванні.

4. Отримання залежностей взаємокогерентних ефектів від параметрів мікролінзи та лінзованого об'єкту.

5. Дослідження фотометричних та інтерферометричних властивостей зображень в околі каспової точки мікролінзи.

6. Пошук конкретних класів космічних об'єктів, мікролінзування яких призводить до взаємокогерентних ефектів на достатньому рівні для їх детектування.

7. Дослідження можливостей часткового спотворення спектру об'єкту при його мікролінзуванні за рахунок ефекту взаємної когерентності зображень.

8. Дослідження проблеми переходу електромагнітного випромінювання через зону фокусу в наближенні геометричної оптики та в постгеометричному наближенні.

9. Дослідження проблеми взаємозв'язку просторових спектрів зображень у гравітаційних лінзах та розподілу в них гравітуючої матерії.

10. Проблема впливу гравітаційної хвилі на просторово-когерентні властивості електромагнітного випромінювання.

Апробація роботи. Результати дисертації доповідались на міжнародній конференції Gravitational lensing (Hamburg, 1991), на XXII Генеральній Асамблеї МАС (Гаага, 1994), на 1-й і 2-й конференціях з релятивістської астрофізики та космології пам'яті Шварцмана (1988, 1991, Нижній Архиз),

на 20МУ та 30МУ з'їздах УАА (1993,1995, Голосієво), на семінарах ГАО НАНУ, ІТФ НАНУ, САО РАН, ГАШ МДУ, АО ЛГУ, АО ХГУ.

Особистий внесок автора. А.В.Манджос майже усю роботу виконав самостійно. У статтях [Манджос & Хміль, 1977, 1978, 1979, 1981] постановка задач та ідейна основа їх вирішення належать А.В.Манджосу, у розрахунках обидва співавтори приймали рівну участь. Ці роботи склали основу кандидатської дисертації С.В.Хміля, науковим співкерівником якої (разом з А.Ф.Богородським) був А.В.Манджос. Те ж саме можна сказати про участь А.В.Манджоса в роботах [Verkhoglyadova O.P. & Mandzhos, 1978, 1979]. У роботі [Захаров & Манджос, 1993] постановка задачі та приблизно третина розрахунків належать А.В.Манджосу. В роботах [Alexandrov et al., 1994; 1995] у А.В.Манджоса рівноцінний внесок з усіма співавторами. В роботі [Khmil et al., 1995] А.В.Манджосом самостійно написано розділ про дослідження доколу каспової точки гравітаційної лінзи, а в розділі про спостереження спектральних ефектів мікролінзування - його рівноцінна участь з усіма співавторами. Що стосується робіт [Афанасьев и др., 1996a,b], то вони зроблені у рамках дослідницького проекту, що виконується творчою групою співробітників АО КУ та САО РАН, і науковим керівником якого є А.В.Манджос. Йому належить в цих роботах постановка задачі, участь у спостереженнях та головна ідея вторинної обробки спостережного матеріалу (розділення спектрів зображень).

Об'єм та структура роботи. Дисертація складається з Вступу, 6 глав, Закінчення та списку літератури. Вона має 266 сторінок основного тексту, 8 малюнків та список літератури з 213 назв.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано короткий огляд спостережних основ гравітаційно-лінзової оптики у Всесвіті. Приділено увагу основним типам гравітаційного лінзування.

а) гравітаційні лінзи з галактиками-гравітаторами та кратними зображеннями квазарів у них. Особливу увагу звернено на лінзові системи Q0957 + 561 ("Перша лінза"), Q2237 + 030 ("Хрест Ейнштейна"), H1413 + 117 ("Лист конюшини");

б) гравітаційні лінзи з протяжними зображеннями об'єктів типу *кілець Ейнштейна-Хвольсона*;

в) *скупчення галактик* як лінзуючі системи із зображеннями далеких фонових галактик у вигляді дуг та дужок;

г) *дальнє мікролінзування* – лінзування квазарів зірками проміжних галактик;

д) *близьке мікролінзування* – лінзування зірок навколишніх галактик (Велика Магеланова Хмара, Андромеда тощо) зірками або зореподібними масами (МАСНО) нашої Галактики.

Стисло обговорюються різноманітні можливості використання всіх цих ефектів для отримання інформації, важливої для астрофізики та космології.

У першій главі коротко викладені основи теорії гравітаційного космічного лінзування. Представлено рівняння лінзи як головне в даній теорії. Введені також такі ключові поняття, як коефіцієнт підсилення лінзою потоку випромінювання, час відносної затримки сигналів від лінзових зображень об'єктів, каустичні лінії лінзи, радіус Ейнштейна-Хвольсона тощо.

У другій частині цієї глави подані результати розробок автором дисертації ряду спеціальних питань гравітаційної оптики, що мають відношення до проблеми взаємної когерентності. Серед них: (i) питання переносу низькочастотних коливань амплітуд високочастотного електромагнітного випромінювання у наближенні геометричної оптики та постгеометричному наближенні; (ii) проблема переносу амплітуд поля високочастотного випромінювання через зону фокусу, що досліджується також у цих наближеннях; (iii) метод визначення параметрів гравітаційної лінзи за просторовими спектрами зображень космічного об'єкту в ній. Крім того обговорюється ідея перевірки на основі ефектів гравітаційного лінзування гіпотези Дірака про змінність сили гравітації при розширенні Всесвіту.

У другій главі сформульовані головні положення теорії взаємної когерентності зображень у гравітаційній оптиці. Весь теоретичний аналіз проводився у наближенні лінеаризованої теорії тяжіння Ейнштейна на фоні гравітаційного поля космологічної моделі Фрідмана, у наближеннях квазімонохроматичного випромінювання та геометричної оптики, а також

при припущенні малих кутів заломлення та наближення плоского гравітатора-лінзи. Для головної величини теорії – ступеню взаємної когерентності γ_{12} – пропонується така загальна формула:

$$\gamma_{12} = \frac{1}{\sqrt{I_1 I_2}} J_{12}; \quad J_{12} = e^{i\Delta} \iint_{\sigma} \frac{f[\delta t(\xi, \eta)] \cdot J(\xi, \eta) e^{i\omega \delta t(\xi, \eta)}}{D_1^{\Phi}(\xi, \eta) \cdot D_2^{\Phi}(\xi, \eta)} d\xi d\eta \quad (1)$$

де J_{12} – інтеграл взаємної когерентності, I_1, I_2 – потоки випромінювання, що приймаються спостерігачем, відповідно, від першого та другого зображення, $J(\xi, \eta)$ – поверхнева яскравість об'єкту у його власній системі відліку, $\delta t(\xi, \eta)$ – відносний час затримки сигналу для двох зображень точки з координатами ξ, η на поверхні об'єкту у системі відліку спостерігача, D_1^{Φ}, D_2^{Φ} – фотометричні відстані від цієї точки до спостерігача з урахуванням дії як поля гравітаційної лінзи, так і космологічного гравітаційного поля; $f[\delta t(\xi, \eta)]$ – коефіцієнт послаблення взаємної когерентності за рахунок відносного фазового зсуву випромінювання від пари зображень (вихід поза час когерентності), $g(0) = 1$; ω – середня циклічна частота випромінювання; Δ – фазовий стрибок у пучку випромінювання від одного із зображень, що перетинає зону фокусу.

Головний фізичний зміст ступеню взаємної когерентності втілюється, як відомо, у формулі для повного потоку випромінювання I від взаємокогерентної пари зображень, що приймається спостерігачем:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}| \cos \varphi_{\gamma} \quad (2)$$

де $|\gamma_{12}|$ та φ_γ – відповідно модуль та фаза γ_{12} як комплексної величини. Остання складова у цій формулі являє собою інтерференційну компоненту потоку.

У другій частині цієї глави досліджується взаємна когерентність зображень об'єкту, що розташований у околі регулярної точки *макралінзи*. Ступінь взаємної когерентності у цьому випадку може бути представлено загальним аналітичним виразом, що є справедливим для довільного розподілу маси в лінзі:

$$\gamma_{12} = 2 \frac{J_1(x) e^{i(\delta + \omega \Delta t)}}{x}, \quad x = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + z_d) \frac{D_d}{D_{ds}} \theta R_Q \quad (3)$$

де $J_1(x)$ – функція Беселя першого порядку; Δt – середня відносна затримка для цієї пари зображень; λ – довжина хвилі випромінювання; z_d – червоне зміщення лінзи; D_d, D_{ds} – відстані за кутовим розміром (для випадку космологічної моделі Фрідмана) відповідно між спостерігачем і лінзою та між лінзою та об'єктом; θ – кутова відстань між зображеннями; R_Q – радіус об'єкту, що у даному випадку являє собою однорідний диск, розміри якого набагато менші за радіус Ейнштейна-Хвольсона лінзи. Для пари зображень Першої гравітаційної лінзи (Q0957+561) у радіодіапазоні ($\lambda = 18$ см) при космологічних параметрах $H_0 = 75$ км/сек/Мпс та $q_0 = 1/2$ та при розмірах об'єкту $R_Q = 10^{16}$ см (кern квазару) модуль ступеню взаємної когерентності дорівнює:

$$|\gamma_{12}| = 4.8 \cdot 10^{-17} \quad (\text{лінза Q0957+561})$$

Фактично для всіх макрозображень у відомих гравітаційних лінзах цей вираз для γ_{12} призводить до таких малих числових значень, що практично їх можна вважати рівними нулю. Це дозволяє зробити загальний висновок, що *при макролінзуванні зображення космічних об'єктів практично взаємнокерентні*. Звідси висновок, що значущі ефекти взаємної когерентності можна очікувати лише для зображень, що формуються при *мікролінзуванні* космічних об'єктів зірками проміжних галактик.

У третій частині цієї глави досліджується випадок мікролінзування компактного об'єкту (кern квазару) *точковою* масою (поодинокі зірка). Оскільки найбільший ефект взаємної когерентності слід чекати тоді, коли точкова маса проектується на диск об'єкту, то була вибрана саме така геометрія лінзової системи. Ступінь взаємної когерентності пари зображень у цьому випадку може бути представлений формулою:

$$\gamma_{12} = -\frac{1}{2} \pi c \frac{1}{1+z_d} \cdot \frac{D_{ds}}{D_d D_s} \cdot \frac{J_0}{\sqrt{I_+ I_-}} \cdot \frac{1}{\omega} \quad (4)$$

де D_s – відстань за кутовим розміром від спостерігача до об'єкту, J_0 – поверхнева яскравість об'єкту в місці проєкції на нього точкової лінзуючої маси. Кількісні оцінки для типових лінзових систем свідчать про те, що у випадках мікролінзування поодинокію зіркою модуль ступеню взаємної когерентності збільшується на 10-12 порядків порівняно з випадками макролінзування. Наприклад, при субкосмологічних відстанях до

гравітатора ($D_d \approx 100$ Мпс) при тих же розмірах об'єкту ($R_Q = 10^{16}$ см) для радіодіапазону ($\lambda = 18$ см) модуль ступеню взаємної когерентності дорівнює: $|\gamma_{12}| \cong 5 \cdot 10^{-5}$. Однак слід визнати, що і в цих випадках ефект ще недостатній, щоб виявлятися у спостереженнях.

В третій главі проведено загальний аналіз проблеми взаємної когерентності зображень у гравітаційній лінзі. Виходячи з формули взаємної когерентності (1), слід відзначити, що характерною особливістю цього інтегралу є наявність швидкоосцилюючого множника в його інтегранді. Тому асимптотична оцінка цього інтегралу може бути зроблена методом стаціонарної фази. Ідея цього методу, як відомо, полягає у тому, що головний внесок в інтеграл складають довкілля т.з. стаціонарних ліній. У зв'язку з цим в дисертації доводиться наступна теорема:

Каустики і тільки каустики гравітаційної лінзи є стаціонарними лініями інтегралу взаємної когерентності.

Ця теорема дозволяє виділити цілий клас пар зображень, що вирізняються своїми взаємокогерентними властивостями. При перетині випромінюючої поверхні об'єкту каустикою виникає пара т.з. *спряжених* зображень, що дотикаються одне одного. Спільною межею цих двох зображень є частина *критичної лінії* (критична лінія - відображення каустики гравітаційною лінзою). У дисертації доводиться, що через вищезгадану теорему взаємна когерентність саме цих зображень досягає екстремально великих значень.

У другій частині третьої глави отримана загальна формула для ступеню взаємної когерентності спряжених пар зображень. Для випромінюючого однорідного диску малих розмірів маємо:

$$\gamma_{12} = \left(\frac{3c}{16}\right)^{1/3} \Gamma\left(\frac{1}{3}\right) e^{i\left(\frac{\pi}{6} + \Delta\right)} \left(-\frac{v_1 A}{u}\right)^{1/6} \frac{\sqrt{1-s^2}}{(1-s)K\left(\sqrt{\frac{1+s}{2}}\right) + 2sE\left(\sqrt{\frac{1+s}{2}}\right)} \cdot \frac{1}{(1+z_d)^{1/3}} \sqrt[4]{\frac{D_s D_d}{2D_d}} \cdot r_g^{-1/12} R_Q^{-1/2} \omega^{-1/3} \quad (5)$$

де K та E повні еліптичні інтеграли 1^{го} та 2^{го} роду, s - відстань центру диску від каустики в одиницях радіусу диску ($s > 0$, коли центр диску розташований з т.з. додатнього боку від каустики, $s < 0$ - з т.з. від'ємного боку); u, v_1 - часткові похідні за просторовими координатами від двовимірного потенціалу лінзи: $u = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$, $v_1 = \frac{\partial^3 \psi}{\partial x^2 \partial y}$, $A = \sqrt{2(1+u)}$; r_g - гравітаційний радіус лінзи; R_Q - радіус об'єкту. Залежність від частоти у цій формулі $\gamma \propto \omega^{-1/3}$ обумовлює гостре зростання ступеню взаємної когерентності саме у випадку спряжених пар зображень. Слід відзначити, що ця формула справедлива для широкого класу гравітаційних лінз, що мають каустики, включаючи найпростіші з них - двохточкові, тобто подвійні зірки. Це пов'язано з тим, що вона отримана на основі універсального рішення рівняння гравітаційної лінзи в околі каустики. Таким чином, підводячи підсумки двох останніх глав, слід відзначити, що **взаємна когерентність зображень реальних космічних об'єктів може**

досягати значущих величин, по-перше, тільки при мікролінзуванні, і, по-друге, тільки у випадках, коли мікролінза має складну структуру та має каустики і тільки у ті періоди, коли космічний об'єкт перетинається каустикою.

Слід також підкреслити, що ефект значно зростає при переході центру диска з додатнього боку від каустики на від'ємний.

У четвертій главі представлені результати кількісних розрахунків ефекту взаємної когерентності та знайдено кілька реальних астрономічних випадків, коли цей ефект достатньо велик, щоб проявлятися у спостережних даних. З цією метою була обрана модель мікролінзи - двохточкова лінза (подвійна зірка). З одного боку, це є найпростіша лінза, що має каустику. Оскільки формула (5) для ступеню взаємної когерентності справедлива для широкого класу лінз, то ці кількісні оцінки мають універсальний характер. З другого боку, подвійні зірки складають досить значну частину зоряного населення галактик, і через те аналіз випадку подвійної зірки має і прямиий сенс.

Для подвійної зірки, що має такі параметри: маси компонент $M_1 = M_2 = M_\odot$; відстань між компонентами дорівнює радіусу Ейнштейна-Хвольсона цієї мікролінзи, розрахунки ступеню взаємної когерентності дають:

I. Близьке мікролінзування (експеримент типу MACHO).

Радіус лінзованої зірки $R = 0.25 \cdot 10^{11}$ см,

Оптичний діапазон: $\lambda = 4000 \text{ \AA}$ та $\lambda = 8000 \text{ \AA}$

Варіанти відстані центру об'єкту від каустики: $s = 0$ (на каустиці) та

$s = -0.75$ (з від'ємного боку від каустики).

1) Об'єкт - зірка з Великої Магеланової Хмари (LMC): $D_s = 48$ кпс.

а) Відстань до мікролінзи: $D_d = 0.1D_{\text{LMC}}$:

$$|\gamma_{12}|_{4000\text{\AA}, s=0} = 0.040; \quad |\gamma_{12}|_{4000\text{\AA}, s=-0.75} = 0.057;$$

$$|\gamma_{12}|_{8000\text{\AA}, s=0} = 0.050; \quad |\gamma_{12}|_{8000\text{\AA}, s=-0.75} = 0.072;$$

б) Відстань до мікролінзи: $D_d = 0.01D_{\text{LMC}}$:

$$|\gamma_{12}|_{4000\text{\AA}, s=0} = 0.071; \quad |\gamma_{12}|_{4000\text{\AA}, s=-0.75} = 0.104;$$

$$|\gamma_{12}|_{8000\text{\AA}, s=0} = 0.090; \quad |\gamma_{12}|_{8000\text{\AA}, s=-0.75} = 0.131;$$

2) Об'єкт - зірка з галактики Андромеда: $D_s \cong 600$ кпс.

а) Відстань до мікролінзи: $D_d = 0.1D_{\text{LMC}}$:

$$|\gamma_{12}|_{4000\text{\AA}, s=0} = 0.142; \quad |\gamma_{12}|_{4000\text{\AA}, s=-0.75} = 0.206;$$

$$|\gamma_{12}|_{8000\text{\AA}, s=0} = 0.179; \quad |\gamma_{12}|_{8000\text{\AA}, s=-0.75} = 0.260;$$

б) Відстань до мікролінзи: $D_d = 0.01D_{\text{LMC}}$:

$$|\gamma_{12}|_{4000\text{\AA}, s=0} = 0.252; \quad |\gamma_{12}|_{4000\text{\AA}, s=-0.75} = 0.367;$$

$$|\gamma_{12}|_{8000\text{\AA}, s=0} = 0.318; \quad |\gamma_{12}|_{8000\text{\AA}, s=-0.75} = 0.462;$$

II. Дальнє мікролінзування: лінза - Хрест Ейнштейна, $z = 1.695$, мікролінза розташована в галактиці-лінзі, $z = 0.036$)

Два варіанти сталої Хабла: $H_1 = 75$ км/сек/Мпс та $H_2 = 50$ км/сек/Мпс.

а) Радіодіапазон - $\lambda = 18$ см, об'єкт - ядро квазару, найменший розмір об'єкту $R_Q = 10^{16}$ см:

$$|\gamma_{12}|_{H_1, s=0} = 0.048; \quad |\gamma_{12}|_{H_2, s=-0.75} = 0.078;$$

б) Оптика - $\lambda = 8000$ Å, об'єкт - емісійна хмара з BLR квазару, розмір $R_Q = 10^{12}$ см:

$$|\gamma_{12}|_{H_1, s=0} = 0.251; \quad |\gamma_{12}|_{H_2, s=-0.75} = 0.403;$$

З цих прикладів видно, що існують реальні астрономічні ситуації, коли ефект взаємної когерентності зображень мікролінзування достатньо великий, щоб проявлятися в спостережних даних.

У п'ятій главі досліджуються властивості зображень об'єкту, що розташований в околі каспової точки (точки звороту) каустики гравітаційної лінзи. Саме поблизу цієї точки слід очікувати найбільшого ефекту взаємної когерентності зображень.

Насамперед, було знайдено точний аналітичний розв'язок наближеного рівняння гравітаційної лінзи для цієї області. Він справедливий для широкого класу гравітаційних лінз, і тому зроблені на базі його висновки мають універсальний характер.

Як відомо, у цьому випадку для внутрішньокаспової частини випромінюючої поверхні об'єкту існує три зображення, а для зовнішньої - одне. Двоє із цих трьох зображень (хай зображення 1 та 3) мають лише одну спільну точку між собою. Ця точка є відображення каспової точки. Пари зображень 1,2 та 2,3 мають спільні межі між собою. Ці спільні межі являють собою відрізки критичної лінії (тобто відрізки відображень каустики). В результаті дослідження взаємокогерентних властивостей цих трьох пар зображень (1,2; 2,3; 1,3) отримані аналітичні вирази для ступенів взаємної когерентності γ_{ik} . Оскільки у випадку пари 1,3 головний внесок до інтегралу взаємної когерентності дає лише окіл ізольованої точки, (а не відрізок лінії), результуюча величина γ_{13} виявляється малою. Значно більших значень досягають ступені взаємної когерентності пар зображень 1,2 та 2,3.

Кількісні оцінки показують, що у випадку, коли каспова точка проектується на випромінюючу поверхню об'єкту, ступінь взаємної когерентності суттєво збільшується у порівнянні з регулярними випадками, що були розглянуті в двох попередніх главах. Слід зауважити, що у випадках близького мікролінзування (експеримент типу МАСНО) імовірність проекції каспової точки на диск об'єкту (зірки) мала. Навпаки, у випадку далекого мікролінзування для тих лінз, у яких поверхнева масова щільність в околі макрозображень квазару наближається до критичної щільності мікролінзування, ця імовірність буде достатньо

великою. Це стосується перш за все випадків, коли об'єктом є kern квазару у радіодіапазоні.

У шостій главі аналізується проблема впливу гравітаційної хвилі на просторово-когерентні властивості випромінювання космічного об'єкту. Мова йде про фазову модуляцію електромагнітного випромінювання далекого фонового джерела (квазару) гравітаційною хвилею від тісної подвійної зірки. У цьому випадку гравітаційна хвиля діє на випромінювання як оптично активне фонове середовище. Якщо період обертання подвійної зірки складає кілька годин, то довжина гравітаційної хвилі на багато порядків перевищує довжину хвилі випромінювання квазару як в оптиці, так і в радіодіапазоні. Тому ця задача розв'язується в наближенні геометричної оптики. Кількісні оцінки показують, що для навколосемного спостерігача локальним впливом гравітаційної хвилі на випромінювання та спостережну апаратуру можна знехтувати. Знехтувано малим є також результуюча дія гравітаційної хвилі на випромінювання вздовж всієї подальшої частини променя від спостерігача до нескінченності (у бік, протилежний від подвійної зірки). При інтерферометричних спостереженнях додаткова різниця фаз випромінювання $\Delta\Phi$, що обумовлена результуючою дією гравітаційної хвилі вздовж всього шляху від квазару, записується у вигляді:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_{em}} \Delta K_{\mu} d^{\mu} \quad (\mu = 0, 1, 2, 3) \quad (6)$$

де $\lambda_{\text{ем}}$ - довжина хвилі випромінювання квазару, d^μ - 4-вектор бази інтерферометру, ΔK_μ - зміна світлового вектору (дотичного вектора до нульової геодезичної випромінювання), що обумовлена результуючою дією гравітаційної хвилі вздовж всієї траєкторії від квазару до спостерігача. Нехай початок просторових координат розташовано у центрі мас подвійної зірки, напрямок осі X співпадає з напрямком від квазару до спостерігача, а напрямок осі Z співпадає з напрямком прицільного вектору від променя до подвійної зірки. Тоді світловий вектор K^μ в точці навколосемного спостерігача дорівнює:

$$K^\mu = \tilde{K}^\mu + \Delta K^\mu; \quad \tilde{K}^\mu = \left\{ \frac{1}{c}, 1, 0, 0 \right\}; \quad \Delta K^0 = \frac{Q}{c} \cdot \frac{\lambda_g^2}{p^2} \cos^2 \alpha \cdot \sin \left[2\omega \left(t - \frac{r_0}{c} \right) \right]$$

$$\Delta K^1 = \frac{Q}{c} \cdot \frac{\lambda_g^2}{p^2} \cos^2 \alpha \cdot \sin \left[2\omega \left(t - \frac{r_0}{c} \right) \right], \quad \Delta K^2 = 0, \quad (7)$$

$$\Delta K^3 = \frac{Q}{c} \cdot \frac{\lambda_g^2}{p^2} \cos^2 \alpha \cdot \sin \left[2\omega \left(t - \frac{r_0}{c} \right) \right], \quad Q = \frac{4G\mu R^2 \omega^3}{\pi^2 c^5},$$

де λ_g - довжина гравітаційної хвилі, p - прицільний параметр; α - кут між віссю Z та нормалю до площини орбіти подвійної зірки; остання розташована у площині XZ; ω - циклічна частота обертання подвійної зірки; r_0 - відстань до подвійної зірки; орбіту подвійної зірки взято з нульовим ексцентриситетом; G - гравітаційна стала Ньютона; μ - приведена

маса зірки. Слід відзначити, що малі калібруючі перетворення координат у даному випадку практично не впливають на кінцевий результат.

Кількісні оцінки ефекту дають такі результати. Нехай період обертання подвійної зірки дорівнює $T_{\text{обер}} = 2$ години. Маси компонент $M_1 = M_2 = M_{\odot}$. Нехай $\alpha = \pi/4$; прицільна відстань дорівнює 10 довжинам гравітаційної хвилі; якщо відстань до подвійної зірки порядку 100 пс, то тоді кутова відстань на небі між квазаром та подвійною зіркою порядку $1''$. Нехай база просторового інтерферометру ($d^0 = 0$) має довжину порядку розмірів Землі $d = 10^4$ км та орієнтована паралельно прицільному вектору (осі Z). Тоді у радіодіапазоні ($\lambda_{\text{ем}} = 10$ см) амплітуда коливань додадкового відносного базового зсуву фаз $\Delta\Phi$, обумовленого дією гравітаційної хвилі, буде рівна:

$$\Delta\Phi = 2.3 \cdot 10^{-9} \text{ рад}$$

а еквівалентна відносна часова затримка дорівнює:

$$\Delta t = 1.2 \cdot 10^{-18} \text{ сек}$$

Це ще занадто мала величина для реєстрації. Звідси слід зробити висновок, що ефект занадто малий для реєстрації його радіоінтерферометрами з базами в межах Землі.

Але якщо взяти космічний радіоінтерферометр з довжиною бази $d = 10^7$ км, то відповідні величини виявляються рівними:

$$\Delta\Phi = 2.3 \cdot 10^{-5} \text{ рад} \quad \Delta t = 1.2 \cdot 10^{-15} \text{ сек}$$

4. Отримані аналітичні вирази для ступеню взаємної когерентності зображень для різних випадків гравітаційного лінзування:

а) макролінзування;

б) мікролінзування поодинокую зіркою у випадку, коли гравітатор проектується на диск об'єкту;

в) випромінююча поверхня перетинається каустикою мікролінзування;

г) об'єкт розташований в околі каспової точки мікролінзи.

Ці аналітичні вирази дають залежність ефекту та його динаміки від таких параметрів космічних об'єктів, що входять в лінзову систему, як маси і розміри зірок, параметрів структури квазарів, тангенціальних швидкостей зірок, галактик, квазарів тощо. Це відкриває перспективу визначення цих параметрів у випадку детектування ефекту взаємної когерентності зображень.

5. Зроблено висновок, що при перетинанні зіркою каустики мікролінзи її спектр повинен частково спотворюватися завдяки взаємній когерентності зображень. За певними умовами цей ефект може набувати достатньо значної величини, щоб бути зареєстрованим.

6. Отримано аналітичний розв'язок рівняння гравітаційної лінзи в околі каспової точки каустики, справедливий для широкого класу лінз.

7. Пропонується метод визначення параметрів гравітаційної лінзи безпосередньо за просторовими спектрами зображень космічних об'єктів (VLBI спостереження), обминаючи етап відтворення зображень.

8. Пропонується метод проходження дифракційної зони гравітаційної лінзи ("фокусу") при переносі амплітуд електромагнітного випромінювання вздовж світлових променів у постгеометричному наближенні.

9. Досліджено ефект модуляції просторових взаємокогерентних властивостей електромагнітного випромінювання від віддаленого космічного джерела (кварзу) гравітаційною хвилею від тісної подвійної зірки. Отримано аналітичний вираз для додаткового базисного фазового зсуву випромінювання (VLBI спостереження), що обумовлений гравітаційною хвилею. Показано, що величина цього зсуву упритул наближається до точності сучасної спостережної апаратури при спостереженнях за допомогою космічного інтерферометру.

ПУБЛІКАЦІЇ

Основні матеріали, що відносяться до теми дисертації, опубліковані в таких роботах:

1. Манджос, А.В. Уравнения поля Йордана и космологическая задача // 1968, Вестник Киевского университета, No.10, с.104 - 115.
2. Манджос, А.В. Космологическое решение уравнений поля Йордана-Дикке и наблюдательные данные // 1969, Астрофизика, т.5, с.645 - 653.
3. Манджос, А.В. Космологическое решение уравнений поля Йордана-Дикке и данные наблюдений // 1971, Украинский физический журнал, т.13, No.3, с.413 - 422 .

4. Манджос, А.В. & Хмиль, С.В. К вопросу о распространении квазимонохроматического излучения в гравитационных полях // 1977, Астрометрия и астрофизика, т.31, с.85 - 92.
5. Манджос, А.В. & Хмиль, С.В. Об асимптотическом поведении высокочастотного электромагнитного излучения // 1978, Проблемы космической физики, Киев, Выща школа, вып.13, с.135 - 141.
6. Манджос, А.В. & Хмиль, С.В. Пучок частично поляризованного электромагнитного излучения в гравитационном поле Шварцшильда // 1979, Астрометрия и астрофизика, т.38, с.41 - 50.
7. Манджос А.В. Хмиль С.В. О когерентных свойствах излучения вращающейся звезды // 1981, Астрофизика, т.17, с.141 - 153.
8. Манджос А.В. О степени взаимной когерентности изображений, формируемых гравитационной линзой // 1981, Письма в Астрон. ж., т.7, с.387 - 389.
9. Манджос, А.В. Интерферометрия изображений и параметры гравитационной линзы // 1983, Письма в АЖ, т.9, с.524 - 528.
10. Verkhoglyadova O.P. & Mandzhos A.V. Mutual coherent properties of the images of the images of the quasar microlensed by star mass // 1989 Preprint ITF-89-4E, Kiev, AS Ukr SSR, 35p.
11. Verkhoglyadova, O.P. & Mandzhos, A.V. On mutual coherence of the images formed by gravitational lenses // 1990, Сообщения Специальной астрофизической обсерватории, т.64, с.108 - 111.

12. Манджос, А.В. О взаимной когерентности изображений квазара, микролинзированного двойной звездой // 1990, Письма в А.Ж., т.16, с.598 - 604.
13. Манджос, А.В. Взаимокогерентные свойства изображений квазара, наблюдаемого через гравитационную линзу. Общее решение для соприкасающихся изображений // 1991а, Астрон.ж., т.68, с.22 - 29.
14. Манджос, А.В. Взаимокогерентные свойства изображений квазара, наблюдаемого через гравитационную линзу. Микролинзирование двойной звездой // 1991b, Астрон.ж., т.68, с.236 - 243.
15. Захаров, А.Ф. & Манджос, А.В. Взаимная интерференция изображений в гравитационной оптике // 1993, ЖЭТФ, т.104, вып.4(10), с.3249 - 3268.
16. Mandzhos, A.V. Mutual interference and structural properties of object images in the vicinity of the gravitational lens cusp point // 1993, Preprint No.98, SAO RAN, Nizhnij Arkhys, Russia. 40p.
17. Alexandrov, A.N., Khmil, S.N., Mandzhos, A.V. & Zhdanov, V.I. Relativistic effects and space radio interferometry // 1994, Вісник Київського університету, Астрономія, No.33, с.44 - 48.
18. Манджос, А.В. Взаимо-интерференционные и структурные свойства изображений объекта в окрестности касповой точки гравитационной линзы. Структура изображений вблизи касповой точки // 1995а, Астрон.ж., т.72, с.146 - 152.
19. Манджос, А.В. Взаимо-интерференционные и структурные свойства изображений объекта в окрестности касповой точки гравитационной

- линзы. Степень взаимной когерентности изображений // 1995b, Астрон.ж., т.72, с.153 - 160.
20. Alexandrov,A.N., Izotova,I.Yu., Karachentseva,V.E., Khmil,S.V., Kudrya,Yu.N., Mandzhos,A.V., Parnovski,S.L., Vavilova,I.B. & Zhdanov,V.I. Relativistic astrophysics, cosmology and extragalactic astronomy at astronomical observatory of Kyiv university // 1995, in: *Астрономічна обсерваторія Київського університету* Киев, с.266 - 294.
21. Khmil,S.N., Mandzhos,A.V. & Zhdanov,V.I. Investigations of cosmic microlensing effects. Theory and observations // 1995, in: *Астрономічна обсерваторія Київського університету*, Киев, с.288 - 294.
22. Афанасьев,В.Л., Власюк,В.В., Додонов,С.Н., Жданов,В.И., Манджос,А.В., Спиридонова,О.И. & Хмиль,С.В. Исследование эффектов микролинзирования: наблюдательная программа и некоторые результаты // 1996а, *Кинематика и физика космических тел*, т.12, с.3 - 10.
23. Афанасьев,В.Л., Власюк,В.В., Додонов,С.Н., Жданов,В.И., Манджос,А.В., Спиридонова,О.И. & Хмиль,С.В. Исследование спектров гравитационных линз N1413+117 и Q2237 +030 // 1996b, *Кинематика и физика космических тел*, т.12, с.11 - 16.

АННОТАЦИЯ

Манджос А.В. Взаимокогерентные свойства излучения в гравитационно-линзовой оптике.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика, радиоастрономия, Национальный университет им. Т.Г.Шевченка, Астрономическая обсерватория, Киев, 1997 г.

Защищается 23 научные работы, которые содержат теоретические исследования проблемы взаимной когерентности изображений космических объектов в гравитационно-линзовой оптике, а также ряда специальных вопросов, непосредственно примыкающих к этой теме. Установлено, что эффект взаимной когерентности достигает максимальных, реальных для его наблюдательного проявления значений только в гравитационных микролинзах сложной структуры, имеющих каустики, и только в те моменты, когда излучающие поверхности объектов пересекаются этими каустиками. К объектам, у которых взаимная когерентность пар изображений микролинзирования может достигать значимых величин, в частности, относятся: в радиодиапазоне — керны квазаров; в оптике — звезды ближайших галактик (в экспериментах типа МАСНО) и эмиссионные облака из BLR квазаров. Расчитан эффект фазовой модуляции электромагнитного излучения космического объекта гравитационной волной, величина которого вплотную приближается к возможностям детектирования с помощью космического радиointерферометра.

Mandzhos A.V. The mutual coherence properties of radiation in the gravitational lens optics.

The dissertation for the degree of doctor of physics and mathematics; the speciality 01.03.02 – astrophysics, radioastronomy, Kyiv Shevchenko University, Astronomical Observatory, Kyiv, 1997.

23 scientific articles are defended that contain the theoretical investigations of the mutual coherence of cosmic object images in the gravitational lenses and some special questions that are directly related to this problem. It was found that the mutual coherence effect achieves maximum in the microlenses of a complicated structure, which have caustics, and only when the object's radiation surfaces are intersected by these caustics. The quasar kerns in radio, stars from near galaxies (in MACHO type experiments) and emission clouds from quasar's BLR in optics are proved to be the objects that may have the significant mutual coherence of their images. The phase modulation in electromagnetic radiation of an cosmic object due to action of a gravitational wave has been worked out yielding an effect that approaches to possibilities of detection by cosmic radiointerferometer.

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

гравітаційне мікролінзування, взаємна когерентність, гравітаційні хвилі.

Mandzhos

Підписано до друку 17.02.97р. Формат 60x84/16.
Ум. друк. арк. 1,5. Обл.-вид. арк. 1,5.
Наклад 100. Зам. 44.

Відділ оперативної поліграфії
Центру Міжнародної освіти
227-41-23, 227-12-75, 227-37-86

AB 37.045