

Простір та космічний апарат як високоточна лабораторія



Стефано Віталє

професор
відділення фізики
Університету м. Тренто,
асоційований співробітник
Національного інституту
ядерної фізики,
науковий керівник космічного
проекту "LISA Pathfinder"
(космічна обсерваторія з
досліджень гравітаційних хвиль),
що готується в Європейському
космічному агентстві,
Італія

Стаття підготовлена за матеріалами
виступів С. Віталє на Наукових
асамблеях КОСПАР, люб'язно
наданих автором Я.С. Яцківу

Наші уявлення про простір, час та гравітацію базуються на метричній парадигмі. Згідно з цією парадигмою [1], ми живемо у просторі-часі, що є 4 вимірним многовидом, в якому вільні частинки рухаються вздовж геодезичних. Гравітація викривляє геометрію цього многовида. Тобто, геодезичні, вздовж яких рухаються вільні пробні частинки, вже не є прямими лініями, як це було б за відсутності гравітації. Прямалінія у просторі-часі відповідає рухові без прискорення, тобто, вона є прямолінійною траєкторією у просторі за умови, що частинка рухається зі сталою швидкістю. Таким чином, перший прояв гравітації — відносне прискорення вільного падіння частинок.

У рамках метричної парадигми можливі різні уявлення стосовно того, яким саме чином гравітація викривляє простір-час [1]. Упродовж років теорія відносності Ейнштейна вдало та успішно протистояла критиці з боку альтернативних теорій, і її узгодження з результатами спостережень є безсумнівним.

Метрична парадигма та особливо загальна теорія відносності (ЗТВ) все ще містять багато відкритих питань. Напевно, одне з найважливіших —

питання про відкриття критичного гравітаційного сектора у спостереженнях Всесвіту шляхом детектування гравітаційного випромінювання небесних тіл. Крім того, наше розуміння того, як гравітація може бути об'єднана з іншими фундаментальними взаємодіями є дуже обмеженим, особливо стосовно того, як вона може поводити себе на квантовому рівні.

Космічні експерименти відігравали і продовжують відігравати важливу роль у дослідженні цієї проблеми, завдяки двом істотним можливостям, які можуть бути реалізовані лише у космосі. Великий просторовий масштаб є безпосереднім фактором, що робить помітною низку експериментальних ефектів; крім того, рівень точності вимірювань вільного падіння пробних частинок, що може бути досягнутий у такому експерименті, постійно зростає. У цій роботі наведено короткий огляд за більш ніж 50 років роботи космічних місій та досліджень, від тих, що були започатковані невдовзі після заснування COSPAR, з локації Місяця, і до таких завдань близького майбутнього, як, наприклад, обсерваторії для спостереження гравітаційних хвиль, такі, як LISA.

Простір, час та гравітація, виміряні у космосі

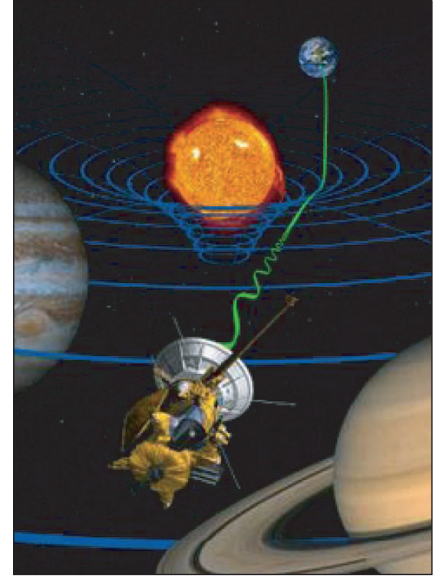
Існує декілька стовпів, що підпирють метричну парадигму. Найважливішим із них є, напевно, **принцип еквівалентності**. Цей принцип наразі підтверджений із відносною точністю 10^{-13} . Він стверджує, що всі точкові вільні частинки, при наявності чи за відсутності гравітації, рухаються вздовж однієї і тієї самої траєкторії у просторі, й з однаковими швидкостями, якщо в них однакові початкові умови. Вражаючий наслідок цього принципу полягає в тому, що з точки зору вільно падаючої частинки гравітацію ніби виключено. Справді, всі сусідні вільні частинки падають так само, разом із першою, або рухаються зі сталою швидкістю відносно до неї. Тільки віддалені частинки падають із іншою швидкістю, і мають відносно прискорення внаслідок гравітації, як це було згадано у вступі. Це ускладнює спостереження гравітаційних ефектів, оскільки у вільно падаючій лабораторії, в першому наближенні, гравітаційне поле джерел, що перебувають зовні неї, не відчувається. Як наслідок, для дослідження гравітації у вільно падаючій лабораторії, скажімо, на Землі та у Сонячній системі, основними об'єктами розгляду мають бути вільно падаючі частинки на якомога більших відстанях одна від одної. І навіть перевірка меж застосовності принципу ек-

вівалентності не має багато можливостей для свого здійснення, крім як шляхом порівняння відносних прискорень вільно падаючих частинок. Це є основною причиною того, що космічні експерименти, де вільно падіння може здійснено майже необмеженим чином на значних просторових масштабах, відіграють таку велику роль у цій області досліджень.

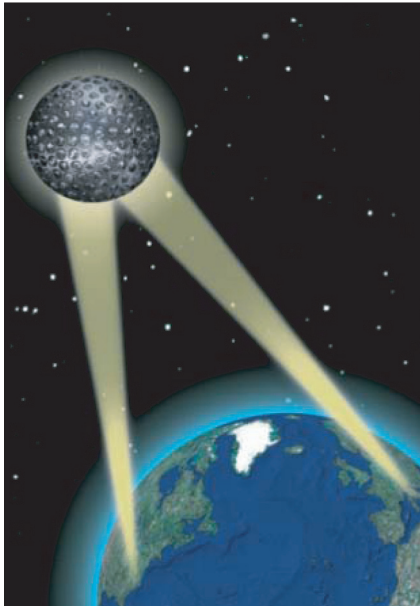
Справді, космічні експерименти в науках про простір, час та гравітацію почалися відразу з настанням космічної ери. Виконуючи побажання багатьох вчених, астронавти Аполло-11 встановили на поверхні Місяця лазерний відбивач, який зробив можливою високоточну локацію самого Місяця. Це був початок довгої низки експериментів і досліджень, які коротко підсу-



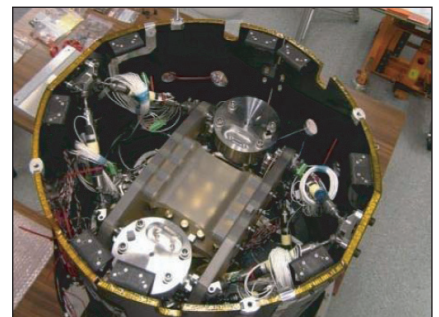
Лазерна локація Місяця: Apollo-11, Луна-17



Вимірювання затримки часу і зсуву частоти (за допомогою радіолокації навколосемних та міжпланетних тіл): Mariner, Viking, GP-A, Voyager, Cassini, ACES, Bepi Colombo

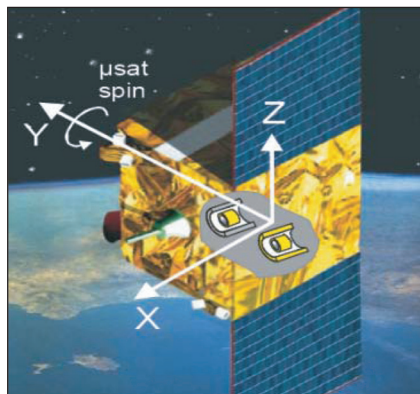
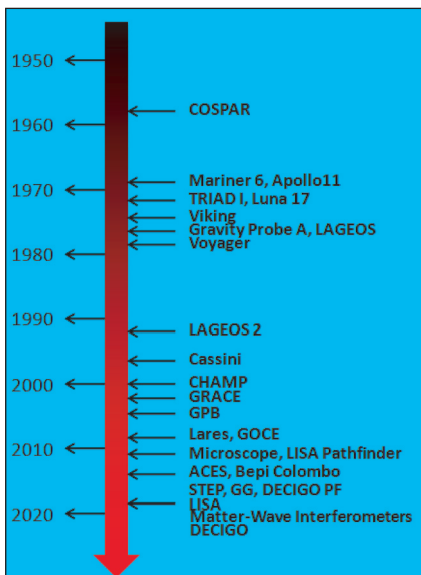


Уповільнення інерційних систем (за допомогою лазерної локації геодезичних супутників): LAGEOS, KAGEOS-2, GP-B, Lares, Matter-Wave Interferometers

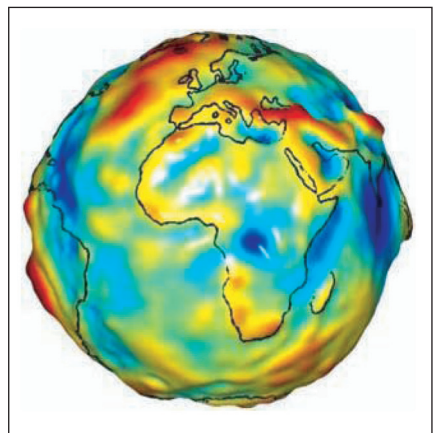


Гравітаційні хвилі: LISA Pathfinder, DECIGO Pathfinder, LISA, DECIGO

Рис. 1. Космічні експерименти і місії, в яких виконувалися фундаментальні дослідження з проблем простору-часу та гравітації (починаючи з заснування COSPAR 1958 р.). Список призначений лише для демонстрації, тобто не охоплює всі експерименти



Принцип еквівалентності: Apollo-11, Луна-17, Microscope, STEP, GG, Matter-Wave Interferometers



Ньютонівська гравітація: TRIAD-1, CHAMP, GRACE, GOCE

мовано на Рис.1. Їх можна систематизувати за технікою, і отже, віднести до наступних типів:

— високоточні спостереження руху Місяця й інших тіл, що перебувають на навколоземних орбітах. Це стосується всіх місій, які доставили рефлектори на Місяць, Аполло-11, Луна 17 [3] та ін. Але ця категорія також містить лазерну локацію геодезичних супутників, що обертаються навколо Землі, таких як LAGEOS [4] або LARES [5];

— радіолокація навколоземних та міжпланетних тіл. Перші дослідження червоного зсуву на Gravity Probe A [6], довга низка радіолокаційних спостережень із використанням посадочних модулів та космічних апаратів для дослідження глибокого космосу, таких як Марінер, Вікінг, Вояджер [1] і, останнім часом, Кассіні [7]. Майбутні плани щодо цих експериментів містять, наприклад, радіодослідження на супутнику Бепі-Коломбо [8];

— космічні перевірки принципу еквівалентності. Серія місій та досліджень, яка мала на меті порівняння падіння тіл різного складу для тестування меж застосовності принципу еквівалентності. Це, принаймні, місія Мікроскоп [9], яка є затвердженою і перебуває в стані розробки, й інші, такі як STEP [10] та GG [11], або експерименти із холодними атомами, які призначені для дослідження у лабораторії на різних рівнях досконалості;

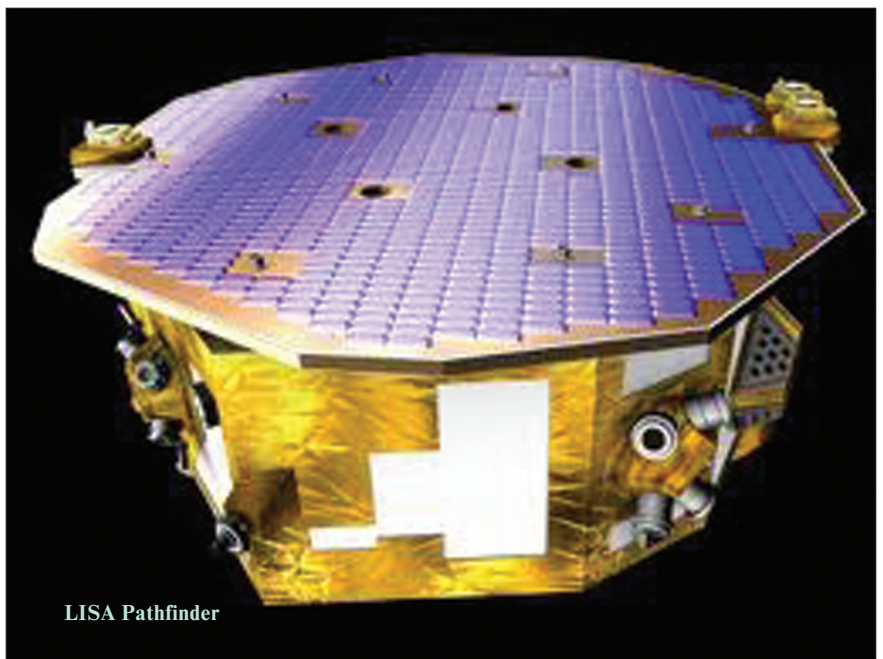
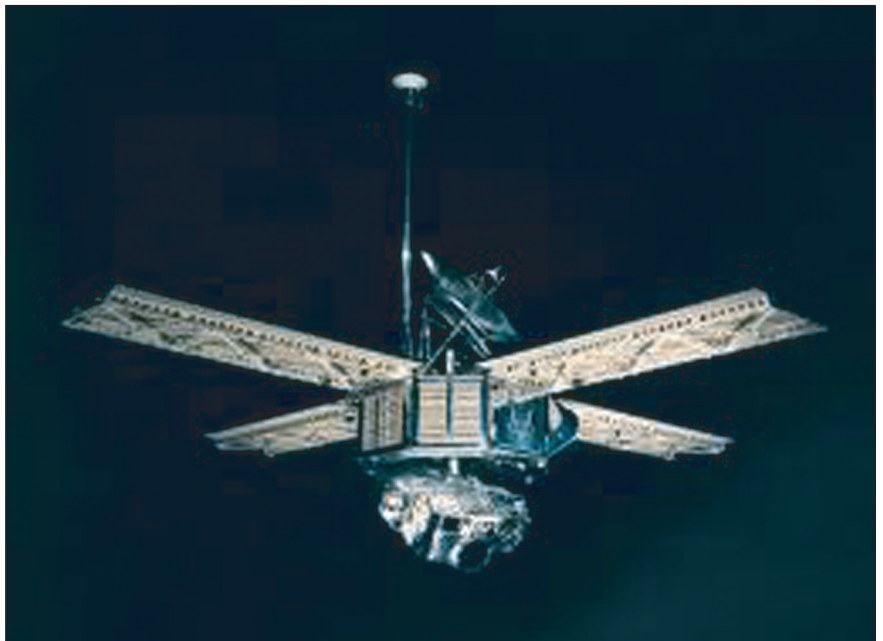
— тестування явища захоплення систем відліку рухами мас. Це питання входило до кола завдань місії GP-B [12], до складу якої входив набір орбітальних гіроскопів. Ця місія працювала у 2004-2005 роках. Дослідження захоплення систем відліку є також одним із завдань супутників Lageos та LARES [13], не кажучи про орбітальні гіроскопи з кільцевими інтерферометрами [14];

— гравітаційно-хвильова астрономія. Для дослідження цього кола питань призначена LISA зі своєю технологією наведення LISA Pathfinder [15]. Місія LISA перебуває в стадії розроблення, а її система наведення LISA Pathfinder готується до запуску найближчими роками [16]. На меншому ступені готовності до роботи перебуває DECIGO [17] та її система наведення, що має на меті вивчення гравітаційних хвиль із частотами, проміжними між тими, на яких працюватиме LISA та тими, на яких працюють наземні спостережні обсерваторії;

— дослідження у галузі ньютонівської гравітації та інших подібних технологій. Низка місій надала стрімкого зростання точності відтворення карт відхилень земного тяжіння від прос-



Mariner-10



LISA Pathfinder



того сферичного закону: Champ [18], Grace [19] та GOCE [20]. Попри те, що ці місії мають справу з класичною ньютонівською гравітацією, вони вносять свій внесок у, якнайменше, розвиток вимірювальної техніки.

Крім того, у деяких дослідженнях неточна інформація про ньютонівську гравітацію може замаскувати ефекти ЗТВ, як це було із TRIAD-I [21], історично першою місією, призначеною для тестування технік безгальмівного контролю за супутниками, яка нині є потужною технікою для значної частини досліджень. Із прогресом у техніці пробних мас, вимірювань часу і простору, із появою супутників високого рівня стабільності, ці дослідження стають все актуальнішими. Початкова стадія досліджень сфокусована на тестуванні спостережних ефектів ЗТВ, які суперечать ньютонівським уявленням про гравітацію. Наступним кроком є дослідження меж застосовності ЗТВ, або навіть і метричної парадигми. В ході досліджень на різних масштабах, можливо, будуть отримані сильні обмеження на нашу модель Всесвіту і фундаментальних взаємодій, які важко узгодити з будь-якою моделлю великого об'єднання квантової механіки та гравітації.

Прогрес точності вимірювань відкриває можливості використання гравітації для дослідження Всесвіту. Справді, метричні теорії передбачають зміни кривизни, зумовлені прискоренням маси-енергії, поширення випромінювання у вигляді гравітаційних хвиль із швидкістю світла. Таким чи-

ном, значна кількість інформації про розподіл маси-енергії у просторі-часі від ділянок типу горизонту подій чорної діри або видимої межі Всесвіту блукає навколо Землі у вигляді фактично нерозсіяних гравітаційних хвиль, тільки очікуючи, що люди збудують обсерваторію, щоб спостерігати їх.

Основи метрології простору-часу

Усі експерименти, показані на Рис.1, взагалі можна розділити на дві групи. До першої групи відносяться експерименти, пов'язані з захопленням систем відліку, такі, як GP-B та Lageos, а також вимірювання обертання спіну або орбітального кутового моменту вільно падаючого тіла. Більшість експериментів з іншої групи може бути зведена, зрештою, до порівняння швидкостей двох або більшої кількості вільно падаючих тіл, локально або на значній відстані, з урахуванням Допплерівського зв'язку в тому чи іншому вигляді. В такий спосіб працюють системи наведення Cassini, GP-A та LISA. Можна вважати, що обидві групи експериментів вимірюють обертання деякого 4-вектора (спіну або швидкості) фіксованої довжини у просторі-часі. Але технічно експерименти з цих двох груп помітно відрізняються.

Спершу розглянемо захоплення систем відліку. Принцип еквівалентності, зонайменше, у ейнштейнівському формулюванні містить набагато більше інформації, ніж просте тверд-

ження про універсальність вільного падіння. Він стверджує, що у вільно падаючій лабораторії гравітаційні ефекти у будь-якому фізичному експерименті локально нівелюються. Як один із наслідків, навіть за присутності гравітації, спін у вільно падаючій лабораторії зберігає свій напрям. Таким чином, система відліку, що прив'язана до вільно падаючого спіну, є локально інерційною. Але, за наявності кривизни, ця локально інерційна система не є однаковою всюди. Тоді як спін обертається навколо масивного центрального тіла, локально інерційна система обертається відносно напрямків поширення світлових променів від далеких зір. Тобто кут між вектором спіну та напрямками, руху світлових променів постійно змінюється. Цей ефект, відомий як геодезична прецесія, був вперше помічений під час високоточної локації Місяця, обертання якого навколо Землі робить його схожим, грубо кажучи, на гіроскоп, що обертається навколо Сонця [3].

До того ж, метричні теорії, зокрема ЗТВ, передбачають, що кривизна простору-часу пов'язана не тільки зі стаціонарною густиною маси-енергії, а й із потоками маси-енергії. Наприклад, локально вільно падаюча система відліку, пов'язана з центральним тілом, що обертається відносно до напрямків руху світлових променів від далеких зір, не є ідентичною системою, пов'язаній із нерухомим тілом такої самої маси. Якщо центральне тіло обертається, вільно падаюча система відліку, пов'язана з ним, повинна підпадати під правило, згідно з яким її осі обертаються відносно напрямку поширення одних і тих самих світлових променів. На відносно невеликих масштабах, поблизу Землі, цей ефект, грубо кажучи, імітує обертання локально-інерційної системи відліку відносно до далеких зір. Відповідна кутова швидкість обертання є величиною порядку $\Omega_N \approx GM_\oplus / c^2 R_\oplus \approx 10^{-9} \Omega_\oplus$, де G — гравітаційна стала, c — швидкість поширення світла у вакуумі, M_\oplus , R_\oplus та Ω_\oplus — маса, радіус та кутова швидкість обертання Землі відповідно. Цей ефект, відомий як захоплення систем відліку, вважається наслідком принципу Маха в межах ЗТВ: інерція — це гравітаційний ефект внаслідок обертання відносно до матерії, розподіленої у Всесвіті.

Ефект захоплення можна прослідкувати за даними про динаміку супутників LAGEOS [13], при моделюванні та відокремленні інших класичних ефектів. Для виконання такого завдання дуже важливо мати тонку мо-

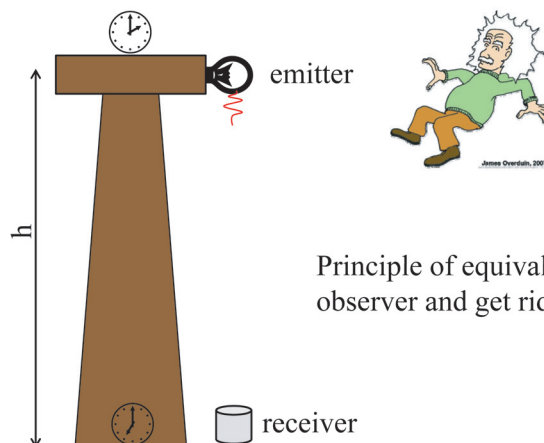
дель гравітаційного поля Землі, отриману геодезичними місіями, такими як Champ та GOCE. Ефект прецесії кутового моменту супутників, що діють як гігантські гіроскопи, становить приблизно 30 мікросекунд дуги на рік, вимірний із відносною точністю, кращою, ніж 10%. Запуск іншого космічного супутника, присвяченого цій проблемі, LARES, має підвищити цю точність до рівня декількох відсотків.

Крім того, в 2004-2005 роках місія NASA та Стенфордського університету Gravity probe B (GP-B) [12] виконувала квазінеперервні спостереження з високою роздільною здатністю за відносним відхиленням набору криогенних гіроскопів, що швидко оберталися (з частотою 50 Гц) відносно напрямку руху світла, що приходить від далеких зір. За рік очікувана величина ефекту, спричиненого обертанням спінів гіроскопів становила приблизно 39 мікросекунд дуги відносно до напрямку на зорю. Цей ефект, знову ж таки, приховується за низкою класичних, негравітаційних ефектів, які іноді сягають непередбачувано високих значень. Тим не менше, ретельна редукція даних обіцяє кінцевий результат із точністю на рівні 10%.

Більшість інших експериментів, показаних на Рис.1, бере в основу замість вказаного вище порівняння компонент векторів швидкості двох частинок вздовж осі, що поєднує їх. Частинки можуть бути розташовані близько та включені до одного супутника, як це зроблено на місіях GOCE, Microscope, STEP, та системі наведення LISA Pathfinder. Їхній відносний зсув вимірюється локальним датчиком на зразок того, який буде розміщений на борту LISA Pathfinder, або датчикам зі значною ємністю GOCE та Microscope, або надпровідним індуктивним пристроєм на борту STEP.

Але пробні "частинки" можуть також розташовуватися на значній віддалі. Такий варіант відтворено на Cassini (друга "частинка" розташована на Землі, відстань між ними становить 1 а.о.). Таку ж ситуацію реалізовано для дзеркал, розміщених на кінцях плечей інтерферометра LISA, на відстані 5 млн. км. Зрештою, так само зроблено і для стометрової дистанції прискорювача пробних мас, включеного до подвійної системи GRACE. Грубо кажучи, коли частинки віддалені, порівняння їхніх швидкостей відбувається шляхом обміну електромагнітними пучками випромінювання з обчисленням зсуву по частоті між системами відліку спокою обох частинок. За відсутності гравітації стандарт-

Testing validity: gravitational frequency shift (Local invariance: clock beat same time everywhere)



на формула Доплера спеціальної теорії відносності, що описує зв'язок між частотою електромагнітних коливань у пучку, виміряну приймачем, і частотою випроміненого пучка, має вигляд:

$$\Delta\nu/\nu_0(t) = -\Sigma k_\mu (v^\mu_{rek}(t) - v^\mu_{em}(t-L/c)), \quad (1)$$

де k_μ — компоненти хвильового 4-вектора пучка. Тут $v^\mu_{rek}(t)$ — компоненти 4-швидкості приймача у момент спостереження, а $v^\mu_{em}(t-L/c)$ — компоненти 4-швидкості емітера у $t-L/c$, коли відбулося випромінювання пучка.

У присутності гравітації ця формула залишається незмінною. Але є приховані наслідки впливу гравітації. Істотно, що в присутності гравітації не існує єдиної вільно падаючої системи відліку в усьому просторі. Тобто, якщо ми оберемо вільно падаючу систему відліку в системі відліку спокою емітера, приймач матиме певне прискорення в цій системі відліку. Отже, навіть якщо в момент випромінювання пучка приймач перебуватиме в стані спокою, до моменту поглинання він набуде деякої швидкості, що призведе до Доплерівського зсуву.

По-друге, хвильовий вектор пучка змінюється під час поширення світла

від емітера до приймача. Локально вільно падаючий спостерігач, на якого не впливає гравітація, буде бачити його як сталий вектор. Але, внаслідок кривизни простору-часу, вільно падаючі спостерігачі в різних точках простору і часу є прискореними один відносно одного. Як наслідок, у кожний момент часу хвильовий вектор вимірюється новим спостерігачем, доплерівськи зміщеним відносно інших.

Для прикладу такого "доплерівського зв'язку" наведемо першу місію у цій галузі. У Gravity Probe A (GP-A) [16] двобічний мікрохвильовий зв'язок був встановлений між наземною станцією та надзвуковою ракетою, яка несла на собі високоточний водневий лазер. Експеримент мав на меті перевірку передбачених ЗТВ зсувів частоти між випроміненим та прийнятим мікрохвильовими пучками. Такий зсув частоти породжується відносним прискоренням вільно падаючих систем відліку з різними початками відліку, розташованих у гравітаційному полі Землі. Він може бути обчислений, згідно з (1), за формулою:

$$\Delta\nu/\nu_0 \approx (1+\alpha)\Delta U/c^2.$$

Тут ΔU — різниця між потенціалами гравітаційного поля (на одини-

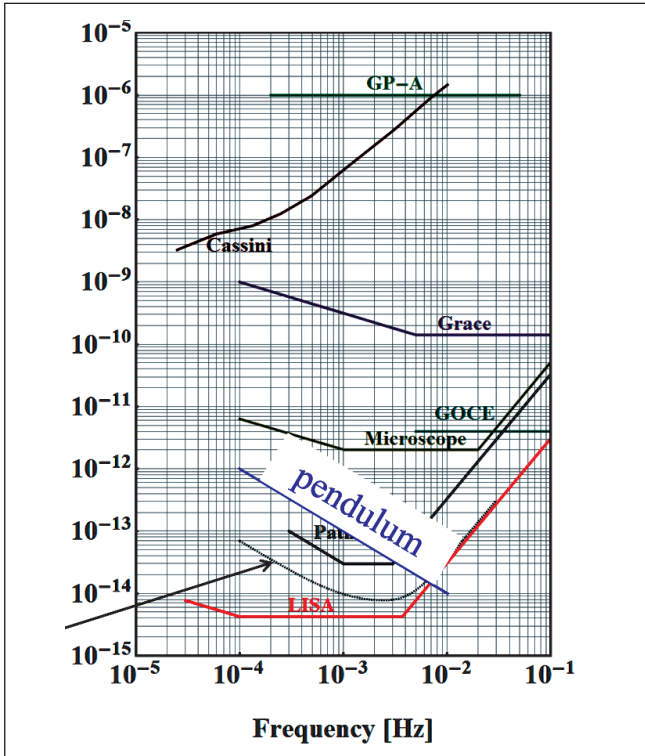


Рис. 2. Прояви диференційного прискорення на різних місіях, розглянутих у тексті. Степенева спектральна густина диференційного прискорення була оцінена з посилення і вказана лише приблизно. Можна очікувати нижчі значення похибок. Штрихова лінія в напрямі нижньої частини рисунка — очікувана помилка внаслідок не врахованих моделлю випадкових сил, які діють на пробні частинки на борту LISA Pathfinder

цю маси) між емітером та приймачем, α — параметр, який набуває різних значень у різних метричних теоріях, для ЗТВ він дорівнює нулеві. Місія GP-A визначила, що він дорівнює 0, з невизначеністю нижче 10^{-4} . Підвищення роздільної здатності в 30 разів або більше, обіцяє ACES. Це є місія ESA CNES із цезієвим атомним годинниковим стандартом часу на борту Міжнародної космічної станції, зв'язок якої з Землею здійснюється мікрохвильовим пучком високої стабільності.

Одним із завдань найсучасніших досліджень простору космічними зондами в радіодіапазоні, таких як Cassini, було визначення кривизни, спричиненої масою-енергією і перевірка того, чи відповідає вона наслідкам ЗТВ. У цих

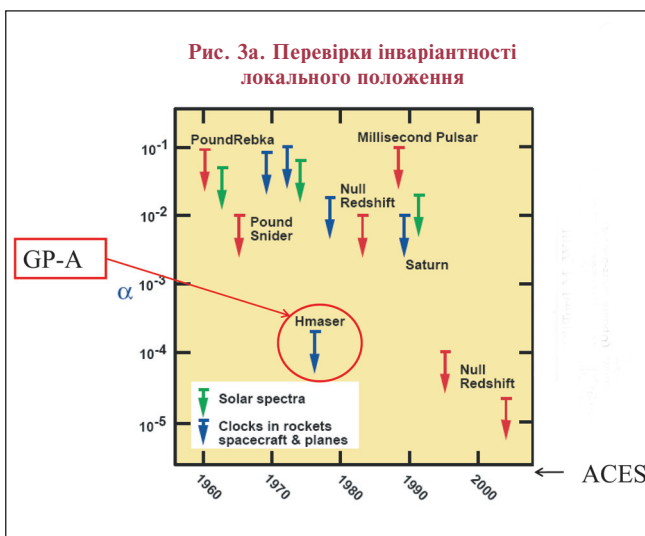


Рис. 3а. Перевірки інваріантності локального положення

експериментах радіопучки поширюються між космічним зондом та Землею в обох напрямках. Коли зонд перетинає умовну лінію, що пов'язує Землю з Сонцем, він потрапляє в ділянку, де гравітаційне поле зорі сягає максимального значення. Застосування рівняння (1) або, краще, його узагальнення на будь-яку метричну теорію, дає змогу обчислити відносний зсув частоти пучка у вигляді:

$$\Delta\nu/\nu_0 \approx -4(1+\gamma)(GM_{\text{Sun}}/c^2r_{\oplus})^{3/2}(r_{\oplus}/d),$$

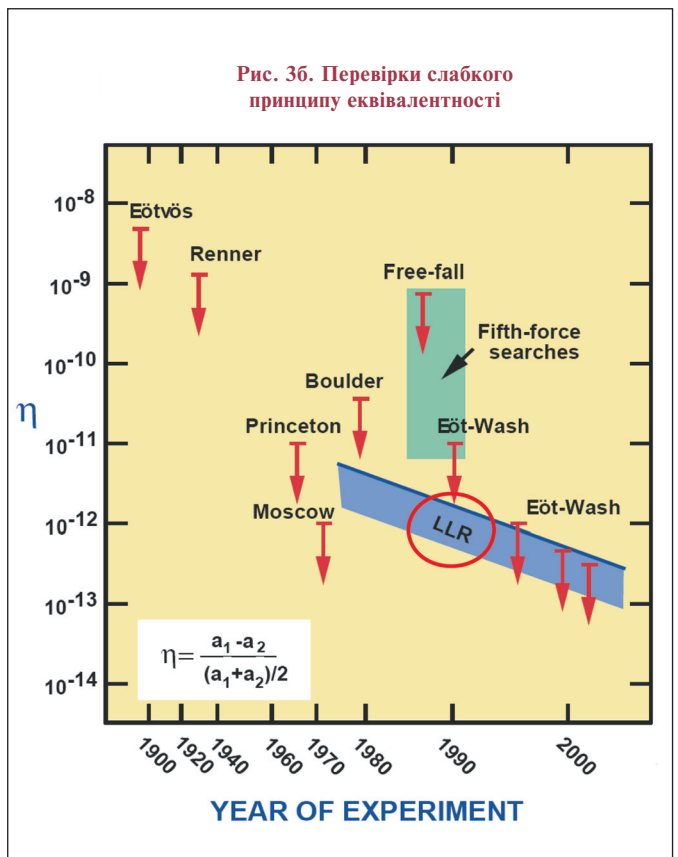
де M_{Sun} — маса Сонця, r_{\oplus} — відстань між Сонцем та Землею, d — прицільна відстань пучка відносно центра Сонця. γ — параметр Едінгтона, який для ЗТВ має значення $\gamma=1$, а в альтернативних метричних теоріях гравітації набуває різних значень. За результатами експерименту Cassini визначено, що $|\gamma-1| < 4.4 \cdot 10^{-5}$, що, знову ж таки, чудово узгоджується із ЗТВ.

Насамкінець, у кожному з трьох плечей інтерферометра LISA два лазерні пучки поширюються у зворотних напрямках від двох пробних частинок, які вважаються вільно падаючими. Пробні частинки також містяться на двох кінцях космічних апаратів, відстань між ними становить $5 \cdot 10^6$ км. Можна показати [26], що викривлення гравітаційних хвиль під час поширення є причиною зсуву частоти у формулі (1), а також те, що в цьому разі він задається співвідношенням:

$$\Delta\nu/\nu_0(t) - \nu_{\text{em}}^{\mu} \{h_+(t) - h_+(t-L/c)\},$$

де $h_+(t)$ — амплітуда хвилі. Амплітуда хвилі пропорційна до малих збурень метричного тензора у деякій системі відліку, яка за відсутності гравітаційних хвиль була б інерційною. Тут, заради простоти, вважається, що гравітаційні хвилі поширюються у напрямі, перпендикулярному до напрямку плеча інтерферометра, і мають таку поляризацію, що спричиняють максимально можливий сигнал.

Рис. 3б. Перевірки слабого принципу еквівалентності



Всі сигнали, задіяні в цьому експерименті й описані вище, залежать від часу. Також залежить від часу і зсув частоти, як можна бачити з формули (1), еквівалентно деякому відносному прискоренню частинок. Таким чином, всі ці експерименти вимірюють деяке еквівалентне, можливо, із запізненням у часі, відносне прискорення однієї або більше пар вільно падаючих частинок. Практичним наслідком цього факту є те, що всі ці експерименти або техніки їх виконання можуть бути описані в термінах шуму еквівалентного прискорення. Для деяких із них це показано на рис. 2. А саме, на цьому рисунку показано декілька експериментів. По-перше, збурення в цих експериментах можна поділити на два категорії. Будь-яка різниця шумового фону у складі сил, що спричиняють відносне прискорення частинок, спотворюватиме фізичний сигнал. По-друге, оскільки не існує сенсора руху, який був би вільним від вхідного шуму, доведеться мати справу із суперпозицією різних сигналів, які імітують відносне прискорення. Зазвичай, спектральна густина вхідного шуму, виражена як еквівалентне зміщення, стає більш плоскою на високих частотах. Перехід плато квазібілого шуму в еквівалентні прискорення збільшує шум пропорційно до квадрата частоти і робить високо-частотний нахил видимим у багатьох лініях на Рис.2.

На цьому ж рисунку субгерцевий частотний діапазон сягає частот, нижчих 1 мГц. Причини цього можуть бути як специфічними для кожного експерименту, так і загальними. Гравітація є слабкою взаємодією, вона домінує над іншими силами тільки тоді, коли її джерело — велике небесне тіло. Рух небесних тіл або рух навколо небесних тіл, зазвичай, відбувається із порівняно низькими частотами. Саме низькі частоти, розглянуті в цій роботі, є причиною виникнення принципових обмежень для наземних експериментів. Силовий шумовий фон на поверхні Землі зростає дуже швидко в бік низьких частот, головним чином, завдяки сейсмічному та гравітаційному впливам внаслідок повільного руху мас. Таким чином, найамбітніші експерименти, такі, як LISA/LISA Pathfinder, не можуть мати робочі частини, розташовані на поверхні Землі, як це було із Cassini або із GP-A, до складу яких входили наземні станції приймання.

Відзначимо також, що істотний прогрес у вимірюваннях прискорення був досягнутий у цій галузі або може очікуватись у близькому майбутньому.

Якщо всі місії, описані вище, досягнуть запланованої мети, підвищення точності буде прогресувати більш ніж на 8 порядків величини від GP-A до LISA.

Гравітація до свого горизонту

Сьогодні існують два основні напрямки, які можуть наблизити нас до створення загальної моделі фундаментальних взаємодій. По-перше, це дослідження застосовності метричного принципу взагалі, і ЗТВ зокрема. По-друге, гравітаційно-хвильова астрономія відкриває двері до спостережень, які дозволять удосконалити як загальну модель Всесвіту, так і уявлення про фундаментальні взаємодії.

Прикладом першого підходу може слугувати пошук порушень принципу еквівалентності. Всім теоріям, які намагаються об'єднати гравітацію з квантовими уявленнями, доводиться мати справу з багатьма складними моделями. Ці моделі передбачають порушення принципу еквівалентності за тих чи інших умов, або якісь відхилення від уявлень ЗТВ про те, яким чином маса-енергія спричиняє кривизну. Наприклад, модель космічних струн передбачає нові, далекодійні взаємодії, які залежать від густини маси-енергії. Таким чином, тіла різного складу будуть падати до Землі з різними прискореннями. Величина такого ефекту невизначена і може змішуватися із іншими відхиленнями від метричної парадигми.

Microscope [9] планує здійснити перевірку на еквівалентність прискорень двох пробних частинок в напрямі до центру Землі з точністю 1 на 10^{15} . Це у 100 разів краще, ніж було отримано за десятиріччя тестувань на Землі [25]. Основна ідея такого експерименту полягає у виборі пробних мас різного хімічного складу, аби деякий параметр, який описує матеріал, наприклад, баріонне число, був різним при однаковій масі-енергії. Одні пробні частинки Microscope зроблені з платини та родію, інші з титану, і отже, мають різницю у баріонному числі близько 0.2%.

STEP — більш амбіційна місія. Вона перевірятиме ідентичність вільного падіння різних тіл у полі тяжіння Землі з точністю 1 до 10^{18} . Це відповідає роздільній здатності 10^{-17} м/с² для часу спостереження декілька годин.

Окрім того, цей експеримент запланований як глобальніша кампанія, в ході якої будуть порівнюватись прискорення восьми пробних частинок, виготовлених із різних матеріалів. Це

дозволить переконатися у достовірності результату, якщо відхилення буде зафіксовано. Справді, одна з головних технічних проблем цих експериментів полягає у необхідності відокремлення систематичних помилок, які легко можуть симулювати порушення еквівалентності, від переконливих результатів тестів.

Можна навести аргументи [27], які передбачають порушення на таких масштабах. Якщо такі порушення будуть виявлені на експерименті, це стане справді революційною подією для наших уявлень та відкриє еру абсолютно нової фізики. Проте, якщо принцип еквівалентності виживе навіть попри ці тести, сумніви стосовно концептуального об'єднання гравітації з квантовою фізикою стануть іще сильнішими.

Зрештою, гравітаційні хвилі є останнім горизонтом високоточної просторово-часової метрології. Вони були передбачені ЗТВ на ранній стадії її розвитку і були посередньо спостережені у спіральній формі подвійного пульсара PSR 1916+13, яка утворилася внаслідок втрат енергій у вигляді гравітаційного випромінювання (рис. 4а).

Гравітаційні хвилі генеруються прискореною матерією. Найпростішим прикладом може слугувати пара компактних тіл, що обертаються одне навколо одного. Такі хвилі мають низьку ступінь взаємодії з матерією, тому Всесвіт є здебільшого прозорим для них. Ці два факти роблять гравітаційні хвилі унікальним засобом для спостереження Всесвіту. З одного боку, хвилі випромінювалися у Всесвіті в усі часи аж донині, вони поширюються незбурено і можуть бути спостережені. З іншого боку, вони несуть інформацію про просторово-часову структуру гравітаційного поля, взаємодію, яка істотно домінує на таких масштабах, та про її джерела (рис. 4 б).

Роздільна здатність LISA (рис. 4 в, г) щодо прискорення пробних частинок сягає 3-10-15 мс⁻²/Гц на частоті не вище 0.1 мГц. Завдяки такій роздільній здатності відкривається багате спостережне вікно. Джерела, які можуть бути цілями цієї місії, різноманітні — від подвійних галактик, деякі з яких були "сертифікованими джерелами" для LISA, до надмасивних чорних дір, розміщених на космологічних відстанях. Викладення ролі астрофізики та космології в гравітаційній астрономії виходить за межі цієї статті (рис. 4б). Втім, доцільно згадати декілька спостережень, що безпосередньо досліджують природу гравітації [29].

Ці спостереження стосуються перевірок квадрупольної формули для

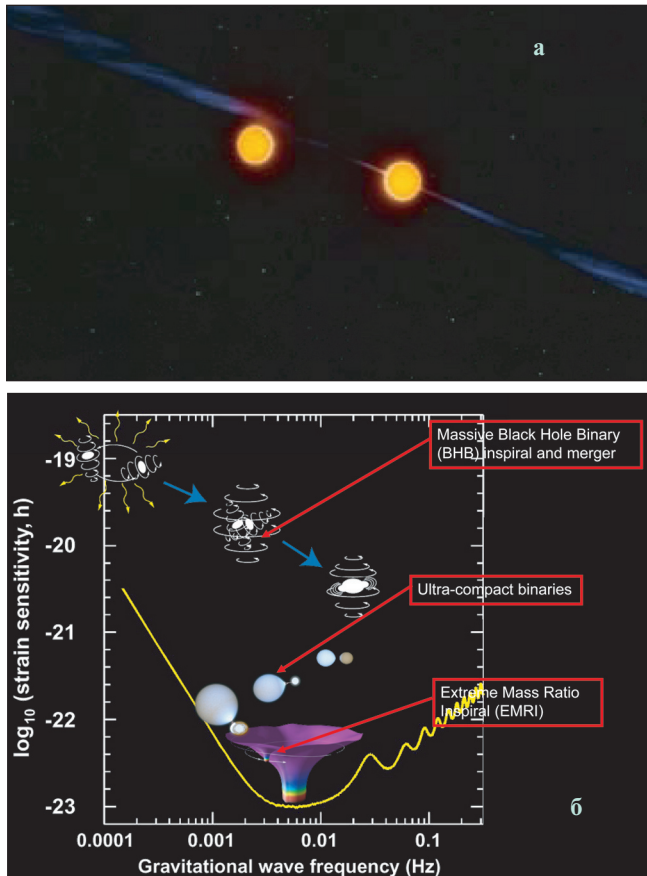
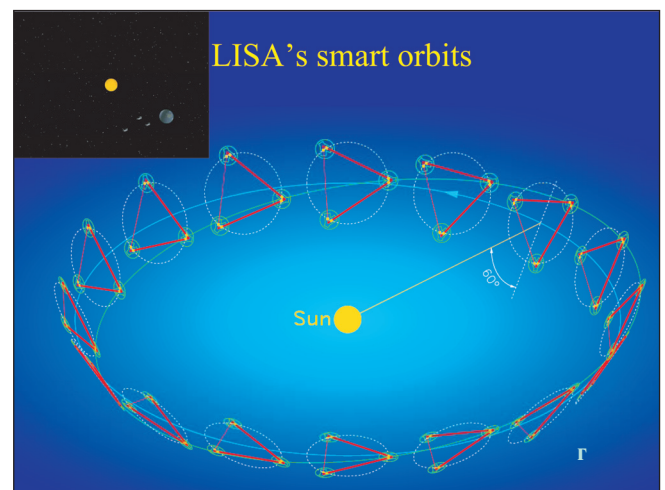
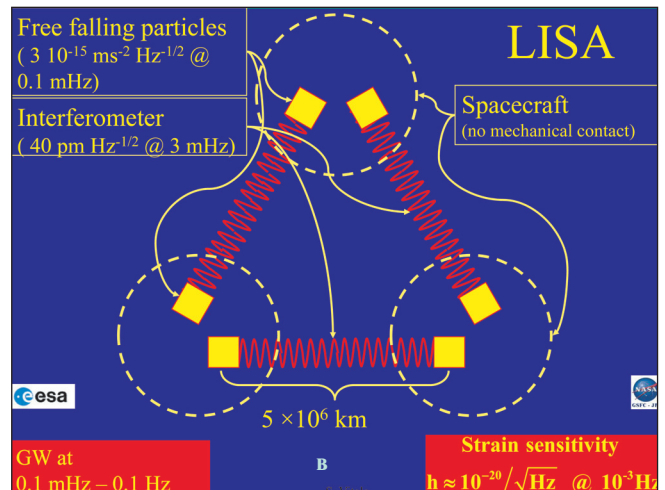


Рис. 4. а) Подвійний пульсар PSR1913+16, спостереження якого можуть підтвердити існування гравітаційних хвиль; б) небесні об'єкти для досліджень в LISA; в) і г) схема експерименту і орбіти LISA



генерації хвиль, вимірювання швидкості їх поширення при наявності та за відсутності дисперсії. Якщо спостереження хвиль, випромінених подвійною чорною дірою, матимуть позитивний результат, вони покажуть, по-перше, що чорні діри існують, і, по-друге, підтвердять фундаментальні фізичні особливості чорних дір. Це стосується багатьох ефектів — від відомої теореми про те, що "чорна діра не має волосся" до теореми Хоукінга-Беркенштейна щодо росту чорних дір під час злиття. Загалом, інтенсивні гравітаційні хвилі від подвійних чорних дір дають можливість виміряти

відстань навіть до джерела з червоним зміщенням $z > 20$. Це має призвести до "нової космогонії" і зробить можливими незалежні вимірюваннями рівнянь стану темної енергії, сталої Габла, та багатьох інших параметрів.

Зрештою, загадка простору, часу та гравітації є одним із найважливіших питань фізики. Космос і космічні апарати є найефективнішими лабораторіями для їх вивчення.

Переклад з англійської —
Олена Федорова

Література

1. Найсучасніший і найповніший огляд основних принципів метричних і неметричних теорій гравітації і стану їхньої експериментальної перевірки можна знайти у:
2. Will C. M. 2006 Living. Rev. Relativity, vol.3.
3. Williams J. G. et al. 2002. Lunar Laser tests of gravitational Physics. In: Proc. Ninth. Marcel Grossmann Mtg, pp. 1797-98.
4. <http://msl.jpl.nasa.gov/QuickLooks/lageosQL.html>
5. Ciufolini I.: arXiv:gr-qc/060908v1 20 Sept.2006.
6. Vessot R.F.C. et al. 1980 Phys. Rev.Lett. Vol.45, P.2081-2084.
7. Bertotti B. Iess L., Tortora P. 2003, Nature, Vol.425, P. 374-376.
8. <http://sci.esa.int/bepicolombo>
9. Chun R., Rodrigues M., Touboul P. 2002, Nuclear Physics B, Vol.113, P.277-281.
10. Sumner T. J. Et al. 2007, Advances in Space Research, Vol.39, P. 254-258.
11. <http://eotvos.dm.unipi.it/>
12. <http://einstein.stanford.edu/>
13. Ciufolini I. 2007, Nature, Vol.449, P.42-47.
14. www.esa.int/science/hyper
14. Vitale S. et al. 2002, Nuclear Physics B, Vol.110, P.209.
15. Anza S. et al. 2005, Class. Quantum Grav. Vol.22, P. S125-S138.
16. www.esa.int/science/lisapathfinder

17 DECIGO

- 18 www-app2.gfz-potsdam.de/pb1/op/champ/
- 19 www.csr.utexas.edu/grace/
- 20 www.esa.int/SPECIALS/GOCE
- 21 Stanford and John Hopkins Universities 1974, J.Spacecrafts, Vol.9, P.637.
- 22 Muhlfelder B. et al. 2009, Space Sci. Rev. Published on line 16 May 2009 DOI 10.1007/s11214-009-9523-8.
- 23 Аби зробити математичні викладки простішими у рівнянні (1), можна розглянути хвильовий вектор, скажімо, в точці розташування приймача, і застосувати замість модифікацій внаслідок кривизни, технічно кажучи, паралельне перенесення, зі швидкістю руху емітера.
- 24 Salomon C. et al. 2001, in: CR Acad. Sci. Vol. IV-2, P.1313.
- 25 Schlamminger S. et al. 2008, Phys. Rev. Lett. Vol.100, P.041101.
- 26 Vitale S. 2009, Space Science Reviews. Published on line 14 May 2009. DOI 10.1007/s11214-009-9521-6.
- 28 Taylor J.H., Weisberg J.M. 1982, Astrophys. J., Vol.253, P.908-920.
- 29 Prince T. et al. The Promise of low-frequency gravitational wave astronomy. www.srl.catech.edu/lisa/documents/whitepapers/. Accessed 12 June 2009.