

УДК 524.7

DOI: <https://doi.org/10.17721/BTSNUA.2023.67.12-15>

Сергій ПАРНОВСЬКИЙ, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-1855-1404

e-mail: parnovsky@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

АСТРОНОМІЧНА ДРАБИНА ВІДСТАНЕЙ І ПОВ'ЯЗАНІ З НЕЮ ПРОБЛЕМИ

Наведено короткий опис методів визначення відстаней до небесних тіл у Сонячній системі, Галактиці та поза нею, описано концепцію "драбини відстаней". Обговорено проблеми, що виникають за переходу з одного щабля на інший. Систематична похибка у визначенні відстаней та сталої Габбла виникає у процесі калібрування нових залежностей за більш традиційними методами у випадку, якщо останні мають статистичний характер. Висвітлено наслідки цього та шляхи зменшення їхнього впливу за допомогою оцінювання похибки у процесі її моделювання методом Монте-Карло та введення відповідної поправки.

Ключові слова: відстані, галактики, зорі, статистичні методи, стала Габбла.

Вступ

Стаття є оглядовою і присвячена визначенню відстаней до небесних тіл і пов'язаними із цим проблемами. Спочатку описано методи, які використовують для цього. І зроблено це на напівпопулярному рівні, без деталей, які можна знайти в підручниках, довідниках або в інтернеті. Потім пояснено, чому використання методів, що базуються на використанні статистичних залежностей, призводить до зсувів і систематичних похибок. Проте саме такі залежності лежать в основі всіх методів визначення відстаней до віддалених позагалактичних об'єктів. Причому джерелом похибок є кожен перехід на наступний щабель на так званій астрономічній драбині відстаней (astronomic distance ladder). Тому використання точніших методів оцінювання відстаней, наприклад за спалахами наднових типу Ia, не приводить до зменшення зсуву (bias) для відстаней, отриманих за його допомогою. Далі йдеться про наслідки, що випливають з існування цього зсуву. Запропоновано ввести поправку, розраховану за методом Монте-Карло, для часткової компенсації вказаного зсуву негативного впливу.

Історичний огляд розвитку методів визначення відстаней до небесних тіл. Для визначення відстаней до близьких і далеких об'єктів використовують суттєво різні методи, причому відстані до далеких галактик або квазарів оцінюють за допомогою "драбини відстаней". Коротко перелічимо ці методи та нагадаємо, як вони з'явилися.

Відстані до об'єктів у Сонячній системі. У їхній основі лежить визначення відстаней між точками на поверхні Землі. Знаючи їх, можна оцінити розміри земної кулі. Із цим завданням чудово впорався давньогрецький астроном Ератосфен. Точніші виміри були проведені пізніше. Для визначення форми Землі король Франції Людовик XV направив у 1736–1737 рр. експедицію у Лапландію, очолювану П'єром Луї Мопертюї, яка визначила довжину ділянки меридіана, що відповідає одному градусу широти. Це дозволило встановити відстані між різними обсерваторіями або іншими точками спостережень, а також довжину й орієнтацію лінії між ними у просторі. Одиницю довжини у системі СІ обрано саме на основі довжини земного екватора.

Відстані до небесних тіл оцінювали за вимірюванням їхнього паралакса. Нехай ми маємо близький предмет на більш далекому тлі, наприклад на тлі зоряного неба. Спостерігаючи його з різних місць, ми побачимо його у різних місцях небесної сфери. Так само і в разі астрономічних спостережень, які проводять одночасно у двох віддалених одна від одної обсерваторіях. Планету або інший об'єкт буде видно у різних частинах якогось сузір'я, тобто на тлі віддалених зір. Знаючи кут, на який перемістилася проекція планети на небесну сферу, відстань між обсерваторіями та кути між усіма необхідними напрямками, можна визначити відстань до планети.

До цього моменту вже були відкриті закони Кеплера, які дозволяють за відношенням періодів обертань планет навколо Сонця встановити співвідношення осей їхніх еліптичних орбіт. Інакше кажучи, визначити розміри цих осей, виражені в астрономічних одиницях, тобто через середню відстань між Землею та Сонцем. Варто зауважити, що величина самої астрономічної одиниці була відома з меншою точністю ніж відстані в а. о. Визначивши її, астрономи могли б дізнатися відстань до будь-якого об'єкта у Сонячній системі у звичайних одиницях.

Для цього потрібно з великою точністю виміряти відстань до будь-якої планети, астероїда чи Сонця і таким чином визначити, чому дорівнює астрономічна одиниця.

Точність вимірювання зростає, якщо обсерваторії розташовані далеко одна від одної, годинники, які використовуються для синхронізації часу спостереження, показують точний час, а планета, відстань до якої визначається, має малі кутові розміри. Тому краще визначити відстані не до великих планет, а до відкритих у XIX ст. малих чи карликових планет, наприклад, до Церери. Після відповідних вимірів величина 1 а. о. лише трохи уточнювалася. Наприклад, після того, як відстань до планет навчилися визначати з більшою точністю за допомогою радіолокації. Використовуючи кутовий відбивач, установлений 1969 р. на Місяці, астронавтами місії "Аполлон-11" (відбивачі більшого розміру встановлено під час польотів "Аполлон-14" і "Аполлон-15"), і лазерну локацію, астрономи відстежують відстань до Місяця з точністю кілька дециметрів. Це практично завершило питання про відстань до об'єктів усередині Сонячної системи.

Відстані до об'єктів у Галактиці. Наступним щаблем драбини відстаней стало визначення відстаней до найближчих зір. Вони також були визначені за допомогою паралакса, але спостереження за положенням близької зорі на тлі віддаленіших проводилося з різницею часу в пів року. У моменти спостережень обсерваторія перебувала у двох протилежних точках земної орбіти, тобто відстань між місцями, у яких вели ці спостереження, становила 2 а. о. Після тривалих пошуків астрономи змогли визначити паралакси близьких зір, спочатку тільки у трьох, потім у кількох десятків.

Незабаром стало зрозуміло, що навіть за допомогою більших і досконаліших телескопів неможливо визначити паралакс далеких зірок, він занадто малий. Вимірювання, засновані лише на геометрії, на видимому положенні зірок, зайшли у глухий кут. Потрібні були методи, що дозволяють зв'язати відстані до далеких зірок із невідомим ще паралаксом із відстанями до близьких зірок із вимірюваним паралаксом.

Деяке уявлення про відстань дає видима зоряна величина, але розкид в абсолютних зоряних величинах зір є настільки великим, що оцінювання відстані тільки за видимою величиною має обмежений сенс. Наприклад, світність Альтаіра перевищує сонячну в 10,9 разів, Сіріуса у 25 разів, Веги в 57,5 разів, Альдебарана у 190 разів, Канопуса в 5200 разів, а Денеба у 25000 разів.

На допомогу прийшли зорі, світність яких змінюється, точніше один з їхніх видів, який називають цефеїдами, жовтими гігантами або жовтими надгігантами. Назва походить від однієї конкретної зірки – δ Цефея. Вони змінюють свої розміри, періодично збільшуючи та зменшуючи свій радіус. Водночас змінюється їхня температура та прозорість зовнішніх шарів. У результаті цефеїди змінюють свою світність, причому період цієї зміни сталий і не дуже великий, від 1 до 45 діб. Дані про період зміни яскравості цефеїд забезпечують потрібну додаткову інформацію про їхню світність у максимумі.

1908 р. американський астроном Генрієтта Лівіт відкрила у галактиці Мала Магелланова Хмара 1777 змінних зірок, із них сотню цефеїд. Вона, природно, не знала відстані до Малої Магелланової Хмари, але розуміла, що всі цефеїди там розташовані приблизно на однаковій відстані від спостерігача і відношення їхніх світностей дорівнює відношенню світлових потоків, виміряних на Землі. Спостереження, проведені Генрієттою Лівітт 1912 р., показали, що чим більша світність цефеїди, тим довший період пульсації. Розуміло, що такі зорі з певним періодом мають деякий розкид у світності, але він значно менший за розкид світності пересічних зірок.

Тому астрономи змогли дізнатися про відношення відстаней до двох цефеїд. Можна було б запровадити якусь "цефеїдну одиницю відстаней", наприклад відстань до δ Цефея, і знайти відстані до всіх жовтих гігантів, що спостерігаються, в цих одиницях. Але астрономам важливо було дізнатися відстані у звичних одиницях: метрах, парсеках чи світлових роках. Це зміг зробити Ейнар Герцшпрунг, який 1913 р. визначив відстані до 13 цефеїд, вимірявши їхні паралакси. У статтю вкралася помилка, через яку відстані до цефеїд були занижені в 10 разів. Незабаром вона була помчена й усунена.

Тоді астрономи змогли визначити відстані навіть до далеких цефеїд, чим і скористалися. 1918 р. Харлоу Шеплі визначив розміри і форму Чумацького Шляху та положення Сонця у Галактиці. Едвін Габбл 1924 р. за допомогою цефеїд у Туманності Андромеди довів, що вони містяться поза межами Чумацького Шляху, тобто належать іншій галактиці. Проте цефеїди становлять незначну частку всіх зірок. Як визначити відстань до інших? І тут знову знадобилася додаткова інформація, цього разу про спектр зірки. За ним можна дізнатися її спектральний клас та отримати оцінку світності зорі за допомогою діаграми Герцшпрунга – Рассела. Залишається оцінити відстань за цією оцінкою та виміряною видимою зірковою величиною зірки.

Розуміло, що є інші методи оцінювання відстаней до зірок. Гарлоу Шеплі, наприклад, зробив це, порівнявши радіальні й тангенціальні швидкості великої вибірки зір відносно спостерігача. Радіальні компоненти були виміряні за ефектом Доплера, що призвів до зсуву спектральних ліній. Тангенціальні компоненти вимірюють за власними рухами зір, які вимірюються у кутових одиницях за рік або сторіччя. Шеплі виходив із міркувань про те, що розподіл компонент швидкостей зір вибірки має збігатися після зведення до однакових одиниць, наприклад км/с. Проте такий метод погано працює для однієї зорі. Він, скоріше, дозволив отримати оцінку "цефеїдної одиниці відстані" у парсеках методом, відмінним від вимірювання паралакси. Крім того, рух зір навколо центра Галактики є джерелом систематичної похибки під час використання цього методу.

Відстані до позагалактичних об'єктів. Для визначення, або скоріше оцінювання відстаней до близьких і далеких галактик, використовують суттєво різні методи. Словом "близькі" я позначаю такі галактики, в яких ми можемо спостерігати за допомогою телескопів окремі об'єкти та деталі структури. Всі методи оцінки базуються на статистичних закономірностях, часто емпіричних. Більшість із них оснований на тому, що ми маємо певні оцінки світності або лінійного розміру якогось позагалактичного об'єкта і вимірюємо його видиму зоряну величину або кутовий розмір. Як особливо бажані об'єкти розглядають такі, які мають практично однакову світність ("стандартна свічка") або розміри ("стандартна лінійка"). Цю світність або розміри визначають за спостереженням близьких об'єктів, відстань до яких визначають іншим методом. Отриману величину застосовують для оцінювання відстаней до віддаленіших об'єктів такого типу.

Відстані до близьких галактик. Після спостережень цефеїд у близьких галактиках астрономи визначили відстані до цих галактик і за ними їхні світності й розміри. Проте результати розрахунків їх дуже здивували. Всі галактики виявилися значно меншими за нашу Галактику і світили куди слабше, а їхні складові, наприклад скупчення зірок, були менші за відповідні частини Чумацького Шляху. Більше того, розрахований за цими даними вік Всесвіту був значно меншим за вік деяких геологічних порід Землі. До середини минулого століття стало зрозуміло, що з відстанями до галактик щось складається помилково. Причина виявилася нетривіальною – у природі є різні види цефеїд. Для визначення відстані у Галактиці використовували так звані класичні цефеїди. А ось у галактиці Андромеди і більш далеких астрономи спостерігали цефеїди типу II з іншою залежністю світності від періоду коливань видимої зоряної величини. Це доведено 1952 р. німецьким астрономом Вальтером Бааде (з 1931 по 1958 р. він жив у США). Після вступу країни до Другої світової війни влада з'ясувала, що цей громадянин Німеччини не має посвідки на проживання у США і має бути інтернованим. Його помістили під домашній арешт в обсерваторії Маунт-Вілсон із найбільшим на той час 100-дюймовим телескопом. Там він користувався винятковими умовами: через світломаскування спостереженням не заважали вогні Лос-Анджелеса, а весь спостережний час був у розпорядженні Бааде, бо інші співробітники обсерваторії пішли на військову службу. Стаття Бааде розв'язала проблеми, що накопичилися.

Оцінки відстаней до найближчих галактик, отримані за спостереженнями цефеїд різних типів, досі є найнадійнішими. Вони доповнюються оцінками на основі спостережень зірок певних класів, наприклад червоних гігантів, та й просто за вимірами видимих зоряних величин найяскравіших зірок галактики. Розуміло, що оцінки відстаней є тільки для галактик, в яких можна спостерігати окремі зорі. Для оцінювання відстаней використовують також флуктуації поверхневої яскравості галактики.

Для більш віддалених галактик ми можемо оцінити світність або розміри, використавши їхній статистичний зв'язок із ширинами ліній випромінювання, які характеризують швидкість обертання галактик. Деталі відповідних залежностей, таких як: Таллі – Фішера, Фабер – Джексона, D_T - σ тощо, можна знайти в літературі.

Відстані до далеких галактик, квазарів і наднових. Основний метод оцінювання відстані до далеких об'єктів – це вимірювання червоного зсуву в їхньому спектрі та використання закону Габбла для невеликих z або космологічних формул для великих z . В останньому випадку поняття відстані стає неоднозначним через кривину простору-часу. Тому розрізняють відстані, що розраховані за різними показниками: фотометричну, за кутовими розмірами, за червоним зсувом тощо.

Для оцінювання фотометричної відстані треба мати щось на кшталт "стандартної свічки". Для цього добре підходять спалахи наднових типу Ia. Вони мають абсолютну зоряну величину, близьку до $M_b = -19.5^m$. Точність цієї оцінки зростає при врахуванні параметрів кривої блиску за допомогою так званого співвідношення Філіпса (Phillips, 1993). Але щоб відкалібрувати шкалу відстаней по спалахах наднових, треба спостерігати досить велику кількість цих спалахів у близьких галактиках, для яких ми маємо оцінку відстані за статистичними залежностями.

За допомогою спостережень за віддаленими спалахами наднових типу Ia відкрито прискорене розширення Всесвіту. Хоч підкреслити, що для цього не потрібне точне визначення відстаней до спалахів. Для демонстрації існування темної енергії достатньо дослідити форму кривої залежності видимих зоряних величин спалахів від їхніх червоних зміщень з урахуванням співвідношення Філіпса. А для визначення відстаней необхідно скористатися оцінками відстаней до близьких спалахів, отриманих альтернативними методами. Тому похибки оцінки визначаються і похибками всіх попередніх шаблів на драбині відстаней. Вони накопичуються мірою просування драбиною відстаней до найдаліших об'єктів на небі.

Проблеми у визначенні відстаней

Від опису методів перейдемо до проблем, що пов'язані з визначенням відстаней. Проте спочатку нагадаємо, що існують два види помилок і відповідно два показники точності. Уявіть, що ви стріляєте по мішені. Припустимо, що ваші кулі потрапляють у ціль дуже купно, в ідеалі – у ту саму точку. Це означає, що у вас все добре з тією точністю, яка в англійській мові зветься precision. Але якщо ця точка розташована далеко від центра мішені, то у вас проблеми з тією точністю, яка зветься accuracy. Вона характеризується систематичним відхиленням або систематичною помилкою (bias). А precision характеризується середньою випадковою помилкою. Її квадрат називають дисперсією. Точна оцінка повинна мати і малу дисперсію, і мале випадкове відхилення.

Між цими типами помилок є принципова відмінність. Якщо систематичне відхилення відсутнє, то зробивши багато вимірювань, можна зменшити дисперсію їхнього середнього результату від справжнього значення. Проте, якщо у нас є систематичне відхилення, то збільшення вибірки не дасть позбутися його.

Проблема у тому, що використання статистичних залежностей у калібруванні призводить до того, що оцінки відстаней мають чималу систематичну помилку. Її величина зменшується у разі зменшення дисперсії величини, яка оцінюється за статистичною залежністю, наприклад, розкид світностей цефеїд з однаковим періодом змінності або зір одного спектрального класу. Але ця дисперсія існує, саме тому ми говоримо про статистичний характер залежності, який не можна усунути збільшенням кількості спостережень.

Подивимось на вимірювання відстаней до різних небесних тіл. Всі відстані у Сонячній системі отримані прямими вимірюваннями. Їхня точність обмежена точністю самих вимірювань і поправок, зроблених під час опрацювання даних. Наприклад, вимірювання паралаксів і взагалі астрометрія починалися з припущення про те, що промені світла поширюються по прямій, що не зовсім правильно через вплив показника заломлення середовища й ефекти ЗТВ. Поправки на рефракцію в атмосфері Землі було введено давно, ефекти ЗТВ враховують в особливо точних вимірюваннях близько пів століття. Точність покращують через відповідні корекції, точність яких збільшується із часом. Отже, визначення відстаней у Сонячній системі має випадкову похибку. Немає систематичної похибки, яку неможливо усунути.

Відстані до зір, визначені за їхніми паралаксами, теж у принципі вільні від систематичних похибок. Відстані за цефеїдами, за світностями зір головної послідовності й іншими статистичними залежностями мають розкид. Коли ми переходимо до відстаней, отриманих за статистичними залежностями, які калібрують на основі відстаней, отриманих за цефеїдами, тощо, то виникає систематична похибка (bias). Це наслідок статистичного опрацювання даних. Якщо ми хочемо дізнатись про якусь залежність $y=f(x)$ за набором даних вимірювань x_i, y_i , то випадкові похибки у величинах ординати y_i призводять до випадкових похибок у параметрах залежності. Натомість випадкові похибки у величинах абсциси x_i призводять додатково до систематичних похибок у параметрах залежності. Це дає систематичну похибку в оцінюванні величини за отриманою залежністю.

Що впливає із цих загальних міркувань? Коли астрономи калібрують відстані за цефеїдами або за світностями зір головної послідовності, то абсцисою є відстані до близьких зір, визначені за паралаксами, які мають невеликі похибки, що можуть бути ще зменшені за покращеної точності вимірювання. Ординатою є відстані, що калібруються. Їхній розкид пов'язаний зі статистичним характером залежності. Проте для кожної зорі, відстань до якої отримано за допомогою статистичної залежності, можна вказати розподіл імовірності того, що справжня відстань лежить у певних межах.

За переходу на наступний шабелі драбини астрономи порівнюють відстані, отримані для вибірки близьких галактик іншими методами (залежностями типу Таллі – Фішера, флуктуаціями поверхневої яскравості тощо), які відіграють роль ординати, та відстані, які отримано за цефеїдами, котрі є абсцисами. Саме похибки в абсцисах призводять до появи систематичної похибки калібрування та всіх відстаней, що оцінено за одержаною залежністю. Останні не можуть бути усунені або суттєво зменшені саме через неточний характер закономірностей, на основі яких отримані величини x_i . У разі переходу на наступні шаблі драбини відстаней ці похибки тільки зростають.

Указане стосується також відстаней, оцінених за спалахами наднових типу Ia. Проте ці оцінки не потрібні для того, щоб показати, що Всесвіт розширюється з прискоренням. Як уже стверджувалося, для цього треба дослідити залежність видимої зоряної величини спалаху з урахуванням співвідношення Філіпса та його параметра червоного зміщення. Калібрування відстаней за спалахами наднових впливає лише на величину параметра сповільнення.

Які є можливості для зменшення похибок оцінювання відстаней на верхніх шаблях драбини відстаней? Насамперед – це зменшення похибок абсцис точок, які використовують у калібруванні. Вони пов'язані з розкидом статистичних залежностей, які застосовують на попередньому шаблі для оцінки відстані. Тобто має сенс зменшити цей розкид наскільки це можливо. Зробити це можна за допомогою введення поправок або додаткових параметрів у залежність під час її калібрування, загалом у процесі використання всієї наявної інформації про об'єкт, відстань до якого оцінюється.

Для зменшення систематичної похибки за переходу з якогось щабля на наступний можна вводити відповідні поправки, розраховані чисельно із застосуванням комп'ютерного моделювання, наприклад симуляцій за методом Монте-Карло.

Результати

В астрономії існує поняття про драбину відстаней. У разі переходу на наступний щабель відстані на вищому щаблі калібрують за відстанями, отриманими на нижчому. Якщо останні мають розкид через статистичний характер застосованої залежності, у калібруванні виникають систематичні похибки. Саме вони можуть бути джерелом так званої Hubble tension.

Дискусія і висновки

Величини параметра Габбла та сталої Габбла (значення цього параметра нині) розраховують за даними про червоний зсув у спектрі об'єкта, який вимірюють із великою точністю, та оцінку відстані до нього, що має описані вище похибки, які неможливо усунути. Вони спричиняють похибки та систематичний зсув величини сталої Габбла. Причому такий зсув мало відрізняється для різних небесних тіл, якщо відстані до них оцінено за тим самим методом. Іншими словами, значення сталої Габбла, отримані за великою вибіркою, можуть мати добру precision у разі поганой ассурасу. Це добре проілюстровано у статті (Parnovsky, 2021) згідно з результатами моделювання за методом Монте-Карло.

Для визначення сталої Габбла за спостереженням об'єктів із $z \ll 1$ не використовують дані для близьких галактик через вплив їхніх пекулярних швидкостей на тлі невеликої швидкості габблівського розбігання. Залишаються дані для більш далеких галактик, відстані до яких отримано на високих щаблях астрономічної драбини відстаней. Тому значення сталої Габбла визначається із систематичною похибкою. Аналогічна величина, отримана іншими методами за даними про ранній Всесвіт, має інші похибки. Отже, нема нічого дивного в тому, що ці оцінки відрізняються. Відмінності відомі як габблівська розбіжність (див., напр., (Di Valentino et al., 2021; Efstathiou, 2021; Verde, Treu, & Riess, 2019)). Вони можуть бути пояснені описаними вище зміщеннями оцінки сталої Габбла (Parnovsky, 2021).

Подяки, джерела фінансування. Ця робота виконана за рахунок часткового фінансування в межах виконання держбюджетної теми 22БФ023-01.

Список використаних джерел

- Di Valentino, E., Mena, O., Pan, S., Visinelli, L., Yang, W., Melchiorri, A., Mota, D. F., Riess, A. G., & Silk, J. (2021). In the Realm of the Hubble tension – a Review of Solutions. *Classical and Quantum Gravity*, 38, id.153001, 110.
 Efstathiou, G. (2021). To H_0 or not to H_0 ? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505, 3866–3872.
 Parnovsky, S. L. (2021). Bias of the Hubble Constant Value Caused by Errors in Galactic Distance Indicators. *Ukrainian Journal of Physics*, 66, 955–970.
 Phillips, M. M. (1993). The absolute magnitudes of Type IA supernovae. *Astrophysical Journal Letters*, 413, L105–L108.
 Verde, L., Treu, T., & Riess, A. (2019). Tensions between the early and late Universe. *Nature Astronomy*, 3, 891–895.

References

- Di Valentino, E., Mena, O., Pan, S., Visinelli, L., Yang, W., Melchiorri, A., Mota, D. F., Riess, A. G., & Silk, J. (2021). In the Realm of the Hubble tension – a Review of Solutions. *Classical and Quantum Gravity*, 38, id.153001, 110.
 Efstathiou, G. (2021). To H_0 or not to H_0 ? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505, 3866–3872.
 Parnovsky, S. L. (2021). Bias of the Hubble Constant Value Caused by Errors in Galactic Distance Indicators. *Ukrainian Journal of Physics*, 66, 955–970.
 Phillips, M. M. (1993). The absolute magnitudes of Type IA supernovae. *Astrophysical Journal Letters*, 413, L105–L108.
 Verde, L., Treu, T., & Riess, A. (2019). Tensions between the early and late Universe. *Nature Astronomy*, 3, 891–895.

Отримано редакцією журналу / Received: 02.02.23

Прорецензовано / Revised: 14.02.23

Схвалено до друку / Accepted: 19.12.23

Serge PARNOVSKY, DSc (Phys. & Math.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-1855-1404

e-mail: parnovsky@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

COSMIC DISTANCE LADDER AND RELATED PROBLEMS

A brief review and description of the methods of determining the distances to celestial bodies in the Solar System, the Galaxy and beyond is given; the concept of the "distance ladder" is described. The problems that arise when moving from one level to another are shown. A bias in the determination of distances and a systematic error in the Hubble constant occur if we use distances estimated using statistical dependencies to calibrate ones obtained by another method. This is a consequence of statistical data processing when approximating any dependence based on a set of measurement data. Random errors in the values of the ordinate lead to random errors in the parameters of the dependence. However, random errors in the values of the abscissa lead additionally to systematic errors in the dependence parameters. This gives a systematic error when estimating the value based on the obtained dependence.

When astronomers calibrate distances to the stars in the Galaxy estimated by Cepheid or main-sequence star luminosities, the abscissa is the distance to nearby stars determined by parallaxes, which have small errors that can be reduced as measurement accuracy improves. A spread in ordinate for fixed abscissa is related to the statistical nature of dependence. When moving to the next rung of the ladder, astronomers compare the distances obtained for a sample of nearby galaxies by other methods (Tully-Fisher-type dependencies, surface brightness fluctuations, etc.), which are ordinate, and the ones obtained from Cepheid, etc, which are the abscissa. It is the errors in the abscissas that lead to the appearance of the bias of the calibration and all the distances estimated by the obtained dependence. This bias increases when moving to the next rungs of the distance ladder. The consequences of it and ways to reduce the bias impact are discussed. Appropriate corrections could be done using the error estimation obtain from the Monte Carlo simulations. This bias can be the source of the Hubble tension.

Keywords: galaxies, star formation, statistical methods.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.