

І.А. Климишин

**АСТРОНОМІЯ:**  
**концепції і деякі прості розв'язки**  
**окремих задач**

Івано-Франківськ  
2019 р.

## ББК 22.3 К49

Цей текст підготовлено для використання студентами та учнями шкіл на семінарських заняттях, в астрономічних гуртках і в науково-популярних лекціях для найширшого кола слухачів. Взято до уваги, що в новій освітній парадигмі ЮНЕСКО «головний акцент робиться не на засвоєння інформації або готового знання, а на розвиток мислення... (Бо) старий лозунг «Знання – сила» поглинається ширшим: «Розумність є силою».

Подану тут наукову інформацію доцільно поєднувати з текстами інших публікацій автора, зокрема, «Астрономія – класична і нобеліанська» (співавтор Ю.М.Пунжин), «Синиці й журавлі – в пошуках першооснов буття», «Про космічне, земне, світоглядне» та «Збагнути світ і себе в ньому» (їх співавтор О.І.Климишин), також з «найпопулярнішою історією астрономії» - «Відкриття нашого Всесвіту» (співавт. О.І.Климишин, О.І.Семак). Вони є у блозі «Небозвід».

Також, річ ясна, регулярно переглядати наявні в інтернеті нові/оновлені підручники та монографії з астрономії та окремих питань фізики.

Автор усвідомлює певну недосконалість/недоліки окремих частин тексту, зокрема – повторення деяких, зокрема світоглядних, питань.

Оскільки в астрономії літеру  $R$  позначають радіус зорі, то тут газову сталу позначено літерою  $B$ .

Автор цих рядків правила капетфах ніколи не визнавав. Бо ж, зокрема, чуємо «зфотографувати» (ну, у російській мові є «сфотографировать»). Але «дотриматись цього правила» не завжди вдається, бо «щось виправить редактор, щось комп'ютер»»...

Нумерацію формул дано окремо у кожному розділі..

## Короткий вступ

Серед багатьох галузей науки виділяються чотири: астрономія, фізика, хімія та біологія. Перша «шукає» місце людини у зоряному (галактичному) світі. Друга, фізика, вивчає «особливості взаємодій елементів будівельного матеріалу», з якого *усе* змонтоване. Третя, хімія, встановлює якість конфігурацій «цеглинок світобудови» та їх використання при побудові, зокрема, «Світу живих форм». Завдання ж четвертої, біології, - дати осмислену картину усього розмаїття життя на Землі та причину його появи на ній.

За відомим і справедливим твердженням, сучасна астрономія взагалі і, зокрема, космологія, ***тримається на трьох китах. Перший – потужна спостережувальна техніка***, бо ж діаметри комбінованих телескопічних дзеркал сягають десяти-одинадцяти метрів, радіотелескопів – 500 м. До того ж надзвичайно ефективними є дослідження Всесвіту в "позаоптичному" діапазоні електромагнітних хвиль із борта штучних супутників Землі та автоматичних міжпланетних станцій. ***Другий – це сукупність усіх законів і висновків теоретичної та експериментальної фізики. І третій – сучасні надпотужні електронно-обчислювальні машини.***

Усвідомивши себе, людина віддавна намагалася збагнути своє місце у Світі. Цю ситуацію іноді описують так: "Людина задає питання і Природа їй відповідає". Однак не завжди її можна зрозуміти, бо мова Природи математично стає все складнішою! Слово ж *концепція* походить від латинського conceptus – думка, поняття, а ще concersio – сприйняття. Отже, ***їдеться про систему поглядів на певні явища, про спосіб розуміння і тлумачення цих явищ.***

Видатний фізик **Річард Фейнман** (США, 1918 – 1988, Нобел. Пр. 1965 р.) образно зауважив: "Світ є наче велетенськими шахами, в які грають боги. Ми слідкуємо за їхньою грою, але правил гри не знаємо. А саме вони, ці правила гри, і є фундаментом сучасної фізики".

## I. «Правила правильного мислення»

Завдяки їм маємо можливості «збагнути Світ» та впевненість у тому, що зроблені висновки є правильними.

### Закони логіки

Упродовж двох тисячоліть розмірковування про всі явища в світі вкладали згідно з правилами (законами) *формальної логіки*. Три із чотирьох **законів логіки** були сформульовані ще Аристотелем. Перший – **закон тотожності** (формула: “ $A \in A$ ” – “поняття при обговоренні слід вживати в одному і тому ж значенні”). Другий – **закон суперечності** (“ $A$  не є не- $A$ ”: “дві протилежні думки про один і той же предмет не можуть бути одночасно істинними”). Третій – **закон виключення третього** (“ $B \in$  або  $A$ , або не- $A$ ” – “дві суперечливі думки про один і той же предмет не можуть бути одночасно ні істинними, ні хибними, одна з них істинна, друга обов’язково хибна”). Четвертий, **закон достатньої підстави**, сформулював Г.-В. Ляйбніц (+1716): “Якщо існує  $B$ , то є, як його достатня підстава,  $A$ ”. Тобто “Будь-яке істинне судження повинно мати свою достатню підставу”. *Модальну логіку* описано на с. 116.

Філософ Еріх Фромм (1900 – 1980) співставив особливості світосприймання європейців і народів Азії. У цих других буття базується на так званій *парадоксальній логіці*, за якою два суперечливі твердження про якийсь предмет не виключають одне одного: азієць каже “ $B \in A$  і не- $A$ ”. У ХХ ст. такий парадоксальний підхід підтверджено науково. Адже найдрібніша порція світла, квант, є, з одного боку, частинкою, але з іншого – хвилею, тобто не-частинкою. Те ж стосується й інших елементарних частинок.

У 1970 р. започатковано видання міжнародного журналу “Foundations of Physics” (“Основи фізики”). На його обкладинці зазначено, що журнал має за мету з’ясування “понятійного базису” і фундаментальних теорій сучасної фізики, біофізики і космології, публікацію матеріалів, в яких є

аналіз “логічної, методологічної і загально філософської бази фізичних теорій і процедур”. На думку видавців, головними задачами досліджень у царині основ фізики повинні бути пояснення фундаментальних ідей, розкриття й усунення суперечностей, що в них приховуються, встановлення плідотворних контактів між фізикою і суміжними з нею науками (космологією, біологією, хімією)...

### **Фізична реальність та її відображення**

Розвиток знання підлягає впливу традицій. І навіть тоді, коли старі традиції руйнуються, у новому знанні зберігаються деякі їх елементи, які не лише не суперечать відкриттям, але й допомагають їм народжуватися. Ці найстійкіші елементи і відносяться до основ науки. Таких елементів не так вже й багато.

До них можна віднести передусім *філософські категорії і принципи*. Яким би не було нове знання, воно завжди виражається через невелике число вихідних понять і принципів. (Як ось) – *річ, властивість, відношення, якість і кількість, процес, рух, стан, простір, час, реальність, можливість і дійсність, випадковість і необхідність* та деякі інші. Серед принципів – принцип збереження і змін, причинності й розвитку тощо” .

*У природознавстві важливою є концепція реальності*. І важливим є розуміння вживання цього поняття у двох смислах; бо ж “багато речей не дано людині безпосередньо, тобто через її відчуття. Наприклад, про властивості і закони Всесвіту або ж елементарних частинок ми знаємо не безпосередньо, а за допомогою фізичних теорій і складних технологічних пристроїв... Крім цього, і для Всесвіту, і для елементарних частинок вчені придумали багато різних теорій, які часто пропонують різні (якщо не протилежні) уявлення про свої предмети дослідження. І якщо ототожнювати кожен раз такі уявлення з тим, про що в них йде мова, вийде, що реальність – це навіть не дволикий Янус, а хамелеон. Залежно від стану

розвитку теорії або від специфіки теорії реальність виявляється кожен раз інакшою. Що більше, вона по-різному виявляє себе залежно від конструкції наших приладів, експериментальних установок. Наприклад, електрон, як відомо, веде себе то як частинка, то як хвиля...

Тому на стику фізики і філософії в ділянці основ фізики виникло поняття **фізичної реальності**, що є одною з центральних методологічних і світоглядницьких категорій фізики... Фізична реальність формується, річ ясна, об'єктивною реальністю як її відображення або частина, яку вивчає фізика. Але вона представляє собою зовсім не об'єктивну, “позалюдську”, реальність..., фізична реальність на відміну від об'єктивної реальності включає в себе і риси людської діяльності (матеріальної та ідеальної)...

Отже, фізична реальність формується частково завдяки теорії, яка здатна випереджувати, наперед визначати результати практики, зокрема в експериментальній діяльності, здатній створювати і такі об'єкти, яких немає в навколишній природі (наприклад, у прискорювачах)... В процесі розширення наших знань про фізичну реальність, уточнення її понять деякі (за припущенням) матеріальні елементи здатні набувати риси ідеальних або навіть врешті-решт перетворюватися в них. Особливо це типове для процесу зміни одної фундаментальної теорії іншою такою теорією, коли генерується нова фізична реальність... (Для прикладу) було позбавлене фізичного смислу поняття орбіти електрона в атомі...

Фізична реальність світу квантових об'єктів виявляє себе передусім як реальність квантових процесів. У своєму описі вона характеризується сумісним застосуванням понять корпусули і хвилі, перервності і неперервності, частини і цілого, елемента і системи... можливості і дійсності, випадковості і необхідності. (Отже) **фізична реальність** – це **багаторівнева ієрархічна матеріально-ідеальна структура**, утворі з онтологічними рівнями різного ступеня складності...

*CONTRARIA SUNT COMPLEMENTA* – *протилежності доповнюють одна одну*. Цей напис вмістив Нільс Бор на своєму гербі. Йдеться про *принцип доповнювальності*, що його зформулював Бор у 1927 р.: кожне істинно глибоке явище природи не може бути визначене однозначно за допомогою слів нашої мови і потребує для свого визначення принаймні двох додаткових понять, що взаємно виключають одне одного. Інакше: **наші визначення явищ природи бувають однозначні, але при цьому не повні. Коли ж вони повні, то неоднозначні, бо включають в себе додаткові поняття, що є несумісними в рамках формальної логіки.**

Фактично принцип доповнювальності був відомий давно. Так, Аристотель твердив, що “гармонія – це змішування і поєднання протилежностей”. У Давньому Китаї виникла *філософія Тао*, яка повністю базувалася на принципі доповнювальності (її символ “інь – янь” – два близькі, білий і чорний, кружечки, що оточені кометоподібними, відповідно чорним і білим, утворами, які в сумі формують круг).

У 1931 р. австрійський логік і математик **Курт Гьодель** (1906 –1978) довів *теорему про неповноту*: “Якщо система  $Z$  (що вміщує арифметику натуральних чисел) несуперечлива, то в ній існує таке твердження  $A$ , що ні само  $A$ , ні його заперечення не можуть бути доведеними засобами  $Z$ ”. Тобто: **“Жодна система не може бути пізнана до кінця зсередини – поза зв’язком з іншими системами вищого порядку”**.

Отже - неможливо вичерпно описати світ, в якому живе людина, зокрема – описати причину появи та існування Всесвіту, не вийшовши за його межі. А це людині “не дано, принаймні до її смерті”. Тож і відповіді на деякі “одвічні питання” отримати неможливо...

І все ж людина в своєму намаганні з’ясувати таємниці Всесвіту і збагнути “навіщо вона в ньому” вперто просувається вперед. Зокрема, розвиваючи й уточнюючи “мову” (а це передусім певні математичні прийоми), якою “Природа розмовляє з ученим”. Формулюючи певні здогади,

гіпотези, користуючись правилом, що має назву **бритва Оккама**: *Entia non sunt multiplicanda - “сутності не повинні помножуватися”*. Тобто, з декількох гіпотез перевагу віддають тій, у якій кількість припущень мінімальна. Зформулював це правило англійський філософ **Уїльям Оккам** (1300 – 1349).

### **Про гармонію чисел і знань**

У VI ст. до н.е. в грецькій колонії на півдні Італії у Кротоні виникла Піфагорійська школа, засновником якої був філософ **Піфагор** (бл. 580 – 500 рр. до н.е.). На жаль, його твори, зокрема – “Про природу”, до нас не дійшли. Однак їх (його) головна ідея така: при вивченні навколишнього світу дуже важливу роль відіграють числа, тобто кількісна оцінка конкретних характеристик кожного явища. Тому було сформульовано, зокрема, таке положення: “Небо – це гармонія і число”, “Все, що існує, можна уподібнити числу”. Згодом Аристотель напише: “Вони побудували небо з чисел”. І таки **Піфагор** уперше висловив думку про те, що Земля – куля, що вона висить у просторі без усякої підтримки... Десь тоді ж зародилася геометрія, і вже на дверях Академії філософа Платона (427 – 347 рр. до н.е.) було написано: “Нехай не входить ніхто, хто не знає геометрії”.

Якраз використовуючи геометричні прийоми, **Аристарх Самоський** (бл. 310 – 230 до н.е.) здійснив першу спробу встановити відносні відстані Місяця і Сонця, як також розміри цих світил. В Александрії інший видатний математик **Ератосфен** (бл. 276 – 194 до н.е.) виміряв діаметр Землі, **Гіппарх** (бл. 198 – 125 до н.е.) з високою точністю визначив відстань від Землі до Місяця. Нарешті, **Птолемей** (бл. 87 – 165 н.е.) за допомогою комбінацій рівномірних і правильних колових рухів на 1300 років “врятував явища, що їх проявляють планети” – дав метод обчислень їх положень на тлі зір наперед/назад на десятки років!



Як алгебраїчні, так і геометричні методи розвивалися поступово. Поняття синуса зформувалося в часи **Гіппарха**, тангенса – в X ст., десяткового дробу – з 1585 р., логарифмів – 1614 р. (**Дж. Непер**) і 1624 р. (**Й.Кеплер**).

У свій час **Галілей** зазначив, що “книга природи написана математичною мовою”. Тоді він уявляв її як мову співвідношення чисел і геометричних прийомів. Лише півстоліттям пізніше незалежно **Ньютон** і **Ляйбніц** зробили наступний (і то дуже важливий!) крок – розробили методи *диференціального* та *інтегрального* числення. В середині XIX ст. закладено основи *тензорного* числення, без чого А. Айнштейн не зміг би записати співвідношення загальної теорії відносності.

Але ось що - то всерйоз, то як сміховинна примара - супроводжувало розвиток цих інструментів пізнання Світу. **Августин Аврелій** (354 – 430, св. Августин) писав: “Геометрію варто б заборонити в усіх християнських країнах, оскільки вона привчає розум логічно мислити”, а воно ж “математика відвертає від Бога”. А ще: “Добрый християнин повинен остерігатися математиків... Нам загрожує небезпека реальна, що математики вклали угоду із сатаною, щоб затемнити розум і запроторити людину у пастку пекла”. Імператор Візантії **Юстиніан** (483 – 565) видав низку жорстоких законів проти всіх, хто займається математикою, їх прирівнювали до злодіїв і вбивць, “найнеугодніших Богові людей”. Математичні книги спалювали... Певний час (XII – XVI стт.) в Європі читання книг з фізики було визнано гріхом, і “таких грішників” подекуди заковували живцем або спалювали. Один із теоретиків ісламу **аль Газалі** (1059 – 1111) пояснював: “мало існує людей, які займаються математикою і які не стали б при цьому віровідступниками”, бо “математика руйнує релігійний світогляд і приводить до віровідступництва”.

Та й значно пізніше англійський філософ-теолог **Джордж Берклі** (1685 – 1753, з 1734 р. англіканський єпископ) вважав

за потрібне заявити: “Диференціальні рівняння – це химера, знаярдя диявола”...

Та яким би загрозливим не здавався дамоклів меч, “образно підвішений над *дослідником*” - **Бором** чи **Гьоделем**, усе ж *він* (велика група, “від покоління до наступного”) і дослідження веде, та ще й ще ставить питання як щодо достовірності знання, так і природи наукових законів! Тут наведемо слова **Г.Мак-Вігті**: “Що є природою наукових знань? Чи є їх висновки беззаперечними і абсолютними фрагментами остаточної істини, чи вони є неминуче минущими і зникаючими конструкціями?... Вихідна точка зору тут... – передусім нам досяжні дані відчуттів – дані, отримані із спостережень та експериментів... Наступна реакція людського розуму полягав в тому, щоб накреслити раціональну картину цих відчуттів... упорядкувати їх певним чином... щоб зрозуміти їх... розкрити їх властивості. І – **закони природи придумані як принципи, згідно з якими “працює” цей раціональний світ**”.

Щоправда, в процесі нагромадження нових даних певні закони замінюються новими, більш загальними. Можна б говорити про якесь наближення до істини завдяки зусиллям кожного наступного покоління вчених.

У 1623 р. **Галілей** зазначив: “Філософія природи написана у найвеличнійшій книзі, яка завжди відкрита перед нашими очима, – маю на увазі Всесвіт, але зрозуміти її зможе лише той, хто спочатку вивчить мову і збагне абетку якою вона написана. А написана ця книга мовою математики і літери її – трикутники, кола й інші геометричні фігури, без яких неможливо збагнути по-людськи її слова: без них – марне кружляння у темному лабіринті”.

**Ньютон**, розуміючи, що **відкритий ним закон всесвітнього тяжіння – це опис, а не пояснення**, в “Математичних основах природознавства” написав про це так: “Причин же цих властивостей сили тяжіння я дотепер не зміг вивести з явищ, а гіпотез я не придумую”...

А ось висловлювання **А.Айнштейна**: “Увесь попередній досвід переконує нас у тому, що природа являє собою реалізацію найпростіших математично мислимих елементів... Тому я вважаю у певному смислі оправданою віру давніх у те, що чисте мислення у стані збагнути реальність”. Однак: “... кожен, хто насмілиться взяти на себе роль судді у всьому, що стосується Істини і Знання, зазнає поразки під сміх богів”...

І ще його ж: “У цьому зв’язку виникає питання, яке хвилювало дослідників усіх часів. Чому можлива така досконала відповідність математики з реальними предметами, якщо сама вона є витвором лише людської думки, не пов’язаної з будь-яким досвідом? Чи може людський розум без будь-якого досвіду, шляхом одного лише розмірковування збагнути властивості реальних речей?”.

В іншому місці **Айнштейн** писав: “Фізичні поняття є вільними творіннями людського розуму, а не визначені однозначно зовнішнім світом, як це іноді може здаватися. В нашому стремлінні збагнути реальність ми дещо уподібнюємося людині, яка хоче збагнути механізм закритого годинника. Він бачить циферблат і рухомі стрілки, навіть чує тикання, але не має засобів відкрити його корпус. Якщо вона дотепна, то може намалювати собі певну картину механізму, яка відповідала б усьому, що вона спостерігає, але вона ніколи не може бути впевнена в тому, що її картина єдина, яка могла б пояснити її спостереження. Вона ніколи не буде в змозі порівняти свою картину з реальним механізмом, і вона не може навіть уявити собі можливість або смисл такого порівняння”.

А ось слова німецького математика **Германа Вейля** (1885 – 1955) з його книги “Філософія математики і природничих наук (1949 р.): “У природі існує внутрішньо притаманна їй прихована гармонія, яка відображається у нашому розумі у формі простих математичних законів. Саме цим пояснюється, чому природні явища вдається

передбачувати за допомогою комбінації спостережень і математичного аналізу”.

На ту ж тему в “Анатомії науки” (1926 р.) написав американський фізик-хімік **Гілберт Н. Льюїс** (1875 – 1946): “Вчений – людина практична і змагає до практичної мети... Вона говорить не про остаточний результат, а про чергове наближення... Покладати, що існує істина в останній інстанції, хоча така точка зору поширена незвичайно широко, не дуже корисно для науки; вона придатна хіба що як покажчик горизонту, до якого можна змагати, але не пункт, якого можна досягти”.

Тепер - рядки з книги **М.Клайна** “Математика. Пошук істини”: “... мислителі вимушені були визнати, що незвичайна ефективність математики незбагненна”. **Ервін Шредінгер** у книжці “Що таке життя з точки зору фізика?” визнав, що «суть відкриття людиною законів природи цілком може знаходитися за межами людського розуму». Інший видатний фізик **Фрімен Дайсон** також вважає, що “ми, очевидно, ще не наблизилися до розуміння взаємозв’язку між фізичним і математичним світами”. До слів цих учених залишається лише додати висловлювання **Айнштайна**: “Найбільш незбагненне у цьому світі те, що він збагнений”. За **Джинсом**, математичні рівняння – єдине, що нам достовірно відомо про явища фізичного світу. Урожай, який вінчає усі зусилля в фізиці, – лише набір математичних формул; реальна сутність матеріальної субстанції назавжди залишиться непізнаваною”.

**I - Уайтхед**: “Так приходимо до беззаперечного та неспростовного висновку: математика і фізична реальність нероздільні... Межі нашого знання реальності існують, але вони поступово розширюються... Хоча математика і є чисто людським творінням, вона відкрила нам доступ до деяких таємниць природи і тим дала змогу добитися успіхів, що перевищили усі сподівання. Як це не парадоксально, але якраз дуже далекі від реальності математичні абстракції дали

людині змогу досягнути немало... Для мислячого вченого математичний опис завжди був невичерпним джерелом здивування, породженого тим, що природа виявляє дивовижно високий рівень відповідності математичним формулам. Чи закладені регулярні залежності, що виражаються фізичними законами, в самій природі і ми лише відкриваємо їх, чи їх винаходить і застосовує до природи розум ученого, в будь-якому випадку вчені повинні надіятися, що їх невтомна праця сприяє глибшому проникненню в таємниці природи”.

Тут можна згадати й слова **Давида Гільберта** (1862 – 1943), що математика – це єдина симфонія нескінченного. Бо ж “у математиці панує нескінченність”. Але й що будова цієї величної споруди, за словами **А.Г.Конфоровича**, час від часу зазнавала справжніх логічних катастроф, після яких на місці витончених теорій лишалися жалюгідні руїни: “Серед інших наукових катастроф математичні були найпродуктивніші. Що ж до причини потрясінь, то здебільшого це було поняття нескінченності. Воно виявилось навдивовижу багатоліким.... Виявилось, що людина в своїй, по суті скінченній, практиці не може обійтися без нескінченності...”

Істинна суть нескінченності виявилася складною, точніше невичерпною. Потрясіння, які пережила математика на шляху пізнання цієї суті, свідчили, що створений математичний апарат уже недостатній для дальшого розкриття деяких сторін дійсності. Можливо, таких, що сьогодні про них ми і не підозрюємо. Наше наближення до абсолютної істини є лише асимптотичним... І навіть математика безсила зробити скінченним наш шлях до істини, безсила обминути, уникнути нових протиріч і парадоксів, які постануть у майбутньому”.

Попри все тут сказане, аж ніяк не можна заперечувати роль філософії в духовному житті людей. Бо ж це завдяки їй, її зусиллями на основі усієї сукупності даних науки створюється **наукова картина світу** – система уявлень про

найзагальніші закони будови й розвитку Всесвіту та його окремих частин. І ця наукова картина світу, більшою чи меншою мірою, стає елементом **світогляду** кожної людини.

Слабким місцем є те, що наукова картина світу складається внаслідок поширення досягнень науки далеко за межі можливих у кожному епоху спостережень і дослідів. Тому й настають моменти часто навіть болісні, коли, щоб узгодити її з новими науковими фактами, її необхідно ламати, замінювати іншою. В астрономії, скажімо, це проявлялося як звільнення від **антропоцентризму** – від уявлення, нібито людина перебуває у центрі світобудови. На першому етапі – переконання, нібито Земля плоска, змінилося уявленням про її кулястість. Далі з “центра світобудови” вона “стала” однією з планет Сонячної системи і “почала” рухатися навколо Сонця. Згодом з’ясувалося, що Сонце розміщене не в центрі Галактики, а ледве не на її окраїні. Нарешті, було з’ясовано, що за межами нашої Галактики є незліченна кількість таких же велетенських зоряних систем, що цей світ галактик до того ж “розлітається” (розширюється) у всіх напрямках.

Як бачимо, **не погоджувалася людина зі, здавалося б, переконливими досвідними даними, з відчуттями кожного**, бо ж ні обертального, ні поступального руху Землі **ніхто** не відчуває! Тож доводиться зробити висновок: **є в людини дивне устремління з’ясувати “стан речей” у Природі. Є певна інтуїція, яка в поєднанні зі здоровим глуздом накреслює перед нею величну Картину світобудови, що навіть суперечить відчуттям.** І не випадково (хоч можна дивуватися з цього) “Сфера світу” англійського вченого **Сакробоско (Джон Халівуд, бл. 1200 – 1256)** – здавалося б, простий виклад понять сферичної астрономії та опис руху планет – стала другою (після Біблії!) книгою, опублікованою друкарським способом. Як і тому, що, враховуючи її переклади на майже всі європейські мови, **її тиражували упродовж століть ледве не кожного року...**

Доречно згадати і декількох вчених XIV – XV ст., які вимовили такі ж сміливі думки, що не вкладалися в рамки тодішнього світогляду. Скажімо, ректор Паризького університету **Жан Буридан** (1300 – 1358) писав: “Передусім є серйозний сумнів у тому, що Земля міститься безпосередньо у центрі Всесвіту... Багато людей, як відомо, вважали ймовірним, що рух Землі по колу певним чином не суперечить загальноприйнятому і що кожен звичайний день вона здійснює повний оберт із заходу на схід...” Підтримав цю думку його учень **Микола Орем** (1323 – 1382): “Я заявляю, що, по-перше, неможливо довести протилежне за допомогою будь-якого досліду, по-друге, за допомогою роздумувань і, по-третє, я наведу міркування на користь цієї думки”.

### Про мову фізики

Поняття *фізика* зрозуміле для всіх віддавна. Тут і дослідження руху кинутого вгору камінця (*кінематика*), і взаємодія двох тіл, скажімо, Землі і Місяця (*динаміка*). А коли чуємо/читаємо слово *астрофізика*, то розуміємо, що це «розділ астрономії, який вивчає фізичну природу і хімічний склад небесних тіл, передусім зір, міжзоряного газу та міжгалактичного середовища, а також процеси, що відбуваються в них».

Зформувалося уже і поняття *космофізика*. За тлумачним Словником, це нібито те ж, що й астрофізика. Але тут усе ж «зміщується наголос, *акцент*!» Бо підкреслюється якнайглибше дослідження фізичної природи і хімічного складу усього розмаїття об'єктів навколишнього Всесвіту і то в їх розвитку упродовж мільярдів років. «*Просто ж фізика*», як уявляємо, головну увагу приділяє дослідженню «*мікросвіту*» - світу елементарних частинок та «стосунків (взаємодій) між ними».

В останні три десятиліття відбувається поступове зближення «великого» і «малого» («телескопічного» і «мікроскопічного») – астрономії та фізики: формується нова галузь науки -

**космомікрофізика.** Досягається це вкрай нелегко. Бо ж «світ елементарних частинок» надто розмаїтий.

І фізики-експериментатори докладають неймовірні зусилля для встановлення мас, зарядів і тривалості життя кожної з них. А теоретикам доводиться тут же розробляти і «випробовувати» складні математичні прийоми для їх класифікації та пояснення «що воно і до чого».

Астрономам же необхідно «заглянути якомога дальше в ту зоряну безодню!» «Щось із неї виловити» і, за допомогою фізиків, адекватно з'ясувати. І... розвиток науки привів до виявлення абсолютно непередбачуваних сто років тому факторів – «темна матерія», «темна енергія» (див. далі).

Безперервно удосконалювалася й ускладнювалася мова фізики як засіб опису законів природи. На початку ХХ ст. змінився підхід до опису фізичних явищ: простір і час, які «раніше існували окремо і незалежно один від одного», були з'єднані в єдиний чотиривимірний простір-час, де своєрідною абеткою стали скаляр, вектор, матриця і тензор.

Нагадаємо: **Скаляр** (з лат. *scalaris* – східчастий) – величина, яка повністю визначається своїм числовим значенням (дійсним числом та одиницею виміру), як ось висота стовпа, вага тіла тощо. **Вектор** (лат. *vector* – той, який несе) – величина, що характеризується розміром і напрямом; в  $n$ -вимірному просторі – це упорядкована сукупність чисел  $a_1, \dots, a_n$ .

**Матриця** (лат. *matrix* – матка) – сукупність чисел, розміщених у прямокутній таблиці у вигляді стовпців і рядків, підпорядкована певним правилам рівності, додавання, віднімання та множення; якщо  $m = n$ , то матриця має назву квадратної порядку  $n$ .

**Тензор** (від лат. *tensus* – напружений) – узагальнення понять скаляра, вектора (напр. т. напруженості), матриці тощо. В кожній системі координат тензор задається деякою сукупністю чисел, які взяті в певному порядку і змінюються при переході від однієї системи до іншої за спец. законом. Наприклад, у тривимірному просторі тензор визначається  $3^r$ , де число  $r$  – **ранг** тензора.



Скаляр є тензором нульового рангу, вектор – тензором першого рангу.

Загалом - сучасна фізика (тим більше - *космофізика*) досягла таких висот, а окремо взяті її творці продираються через такі хащі математичних конструкцій, що іноді мало хто, крім них самих, це в змозі збагнути...

Гортаючи ж сторінки астрономії, переконаємось: слова **Роберта Емдена** (швейц., 1862 – 1940) - «Дорога до пізнання зір пролягає через атом» - були і залишаються дуже влучними. Водночас усвідомлюємо: вкрай своєчасною була «поява» для нас отого «третього кита» - усього розмаїття ідей сучасної теоретичної фізики, щоб учені змогли адекватно осмислювати результати спостережень, проведених «на землі і під водою (про це далі)», але й, за допомогою космічних апаратів, - за тисячі і мільйони кілометрів поза нашою планетою.

## II. СІМ КРОКІВ ДО ТАЄМНИЦЬ СВІТОБУДОВИ

### Про інструменти і результати

Ще на світанку своєї історії люди уважно стежили за небесними світилами. Яскравіші зорі об'єднували в сузір'я, складали про них легенди. Навіть здогадувалися, що зорі — це такі ж сонця, як і наше. Але, здається, на цьому й завершувалося будь-яке знання «про небо». І наче підсумком були ось ці слова давньогрецького філософа **Сократа** (469 – 399 рр. до н.е.): «Усе, що вище від нас, те нас не стосується». Бо ж «... усе це назавжди залишиться таємницею для смертного. І, звичайно, самим богам сумно бачити намагання людини розгадати те, що вони назавжди приховали від неї»...

Те саме, але двома тисячами років пізніше, говорив і французький філософ **Огюст Конт** (1798–1857): «Ми нічого не можемо дізнатися про зорі, крім того, що вони існують. Навіть їхня температура назавжди залишиться невизначеною». Заняття ж астрономією — це «марна трата часу, яка не може дати ні корисних, ні цікавих результатів».

Ці висловлювання згадуємо сьогодні з посмішкою. Адже тепер якраз наука про зоряне небо — **астрономія** — розгортає перед нами панораму Всесвіту в усій його величі й красі. І кожне тут відкриття — це свідчення (що б хто не казав) могутності людського розуму. Бо ж мова йде про вивчення об'єктів, які перебувають від нас на справді фантастичних відстанях. Сотні тисяч, мільйони й мільярди років проходять світлові промені в просторах Всесвіту, перш ніж потрапити в телескоп спостерігача на Землі. Нам залишається хіба повторити сказане французьким ученим **Блезом Паскалем** (1623–1662): «Дивне не те, що Всесвіт безконечний, а те, що людина здатна збагнути його таємниці».

За 200 останніх років уже вдалося з'ясувати основні проблеми, що стосуються природи зір і фізики процесів, які відбуваються в їх надрах. Балансуючи, як кажуть, на грані можливого, астрономи крок за кроком освоюють царину, яка за Сократом мали би бути назавжди таємницею для смертного. Особливо тепер, коли дослідження ведуться в усіх діапазонах електромагнітних хвиль (рис. 1).

Дослідження навколишнього Всесвіту проводяться як наземними телескопами (для типового порівняння ілюструють два – див. рис. 2 і 3), так і встановленими за межами земної атмосфери на космічних орбітальних станціях (почавши від 1962 р., з цією метою вже запущено близько ста ШСЗ та АМС). Коли для вловлювання нейтрино встановлюють детектори у глибоких шахтах та на дні великих озер на глибинах до 1500 метрів. Коли вводять у дію антени (також – інтерферометри з двох таких антен з базою декілька тисяч км) для реєстрації гравітаційних хвиль, що виникають при збуреннях гравітаційних полів, зокрема, в системах кратних зір. Винятково плідними є спостереження з-за меж земної атмосфери. Особливо – якщо телескопи «підвішено» у точках Лагранжа, причому у двох варіантах – у системі Земля-Місяць (рис.4) або Земля-Сонце (рис.5).

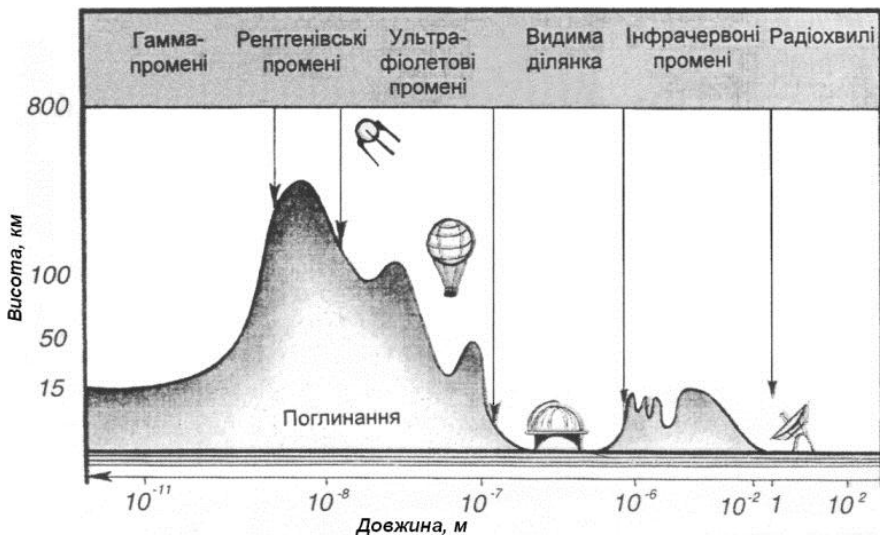


Рис. 1. Шкала електромагнітних хвиль та умови їх проходження через земну атмосферу

Так, у системі Земля – Місяць є точка  $L_1$  – на відстані 57 600 км від Місяця, з протилежного боку така ж (рис. 4). Аналогічні точки є в системі Сонце-Земля (рис.5). То ж не дивно, що окремі сторінки історії астрономії в останні три десятиріччя доводиться переписувати ледве не щороку!

Отже, спочатку – «про те, що в нас під ногами (*про планету Земля*)».

За уявленнями давньогрецьких філософів, зокрема **Піфагора** (VI ст. до н. е.)

- а) Земля та інші небесні тіла мають кулясту форму,
- б) Земля «висить у всесвіті без будь-якої підтримки»,
- в) зорі прикріплені до кришталевої сфери, яка упродовж доби здійснює оберт навколо Землі.

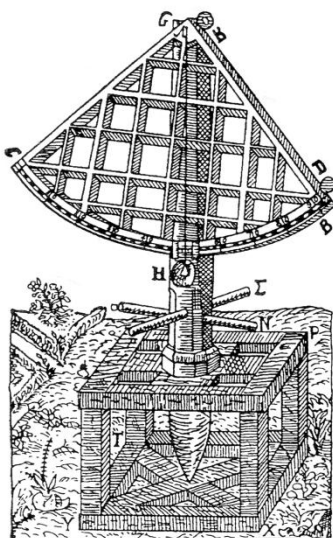


Рис. 2. Квадрант часів Тихо Браге

Відстані давні греки вимірювали у стадіях (звідси і наше – *стадіон*). Було прийнято, що одна *стадія* – це відстань, яку проходять, доки при сході Сонця його диск не з'явиться над горизонтом. «В наших одиницях вимірів» - це орієнтовно 185 метрів. Отже, до Місяця – за їхнім уявленням - 126 000 стадій, тобто нібито 23 300 км, а це усього 3,6 радіуса Землі. Відстань же від Землі до «небесного склепіння» мала б сягати 756 000 стадій, тобто 140 000 км. А це – 22 радіуси Землі або ж - 3,5 її обводу по екватору.

За легендою, головний бог Зевс, розлютившись, скинув із неба бога вогню і ковальства Гефеста, і той падав на Землю дев'ять днів. Розв'язуючи записане в диференціальній формі співвідношення для прискорення та підставляючи числові значення маси і радіуса Землі, «допитливі» знайшли: за 9 діб має ріальна точка падає на її поверхню з висоти, що дорівнює 91 радіусу Землі або 1,5 радіуса орбіти Місяця.



Рис. 3. Інтерферометр із 4-х Дуже Великих (4x8,2м) Телескопів Європейської Південної обсерваторії – (ESO Very Large Telescope Interferometer), за роздільною здатністю цей інтерферометр еквівалентний дзеркалу діаметром 130 м.

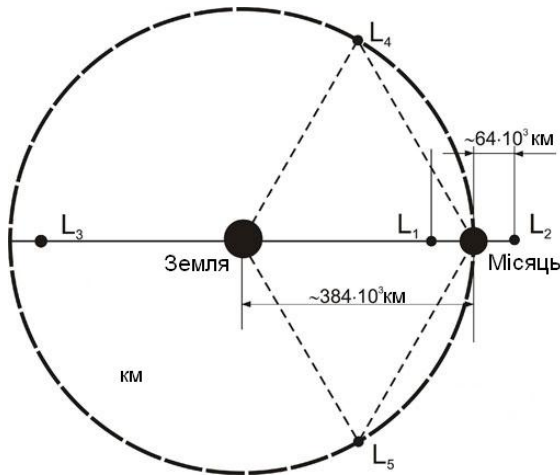


Рис. 4. Точки Лагранжа в системі Земля – Місяць.

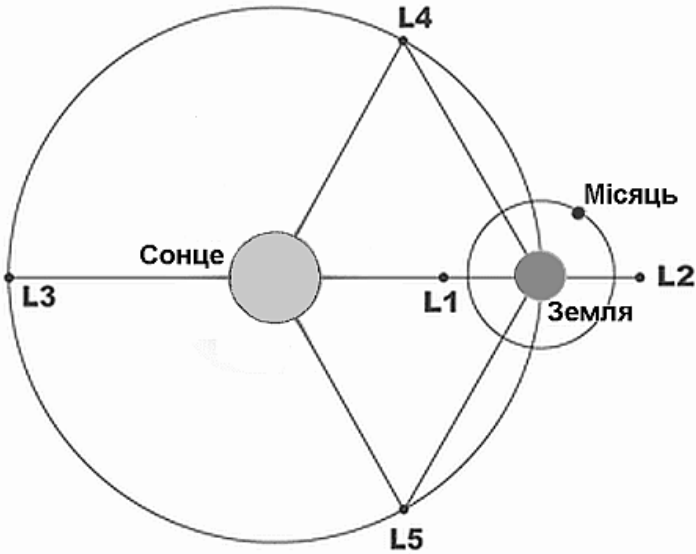


Рис. 5. Положення точок Лагранжа  $L_1$  та  $L_2$  в системі Сонце – Земля; відстань від Сонця до Землі – 150 млн. км. Відстані від Землі до точок  $L_1$  і  $L_2$  – близько 1,5 млн. км.

Тож для давніх греків світ був тісеньким. І їхні боги, які - «зразу ж за склепінням», були дуже близько. Згодом (це вже за 130 років до н.е.) грек **Гіппарх** за тривалістю проходження Місяця через конус земної тіні визначив: відстань Земля-Місяць рівна 59,3 радіуса Землі. «Тож – небо «мало би бути» в 16 разів далі, ніж до того думали. А все ж – близьке! І «звідти видно кожного на землі, з його невдачами і болячками».

В цьому суть **антропоцентризму** - уявлення, за яким людина перебуває у центрі Світобудови.

В подальшому **астрономи** (саме вони!!), образно кажучи, зробили уже сім кроків для звільнення від цього хибного уявлення як про будову та масштаби Всесвіту, так і про місце людини в ньому.

**Таблиця 1.**  
**Найбільші діючі дзеркальні телескопи**

Назва телескопа	Місце знаходження	Діаметр дзеркала, м	Рік спорудження
Гігантський південно-африканський телескоп, ALT	Сатерленд, ПАР	11	2005
Великий Канарський телескоп	Пальма, Канарські острови	10,4	2002
Телескопи Кек	Мауна-Кеа, Гавайї	9,82 × 2	1993, 1996
Телескоп Хоббі-Еберлі, HET	Джефф-Девіс, Техас	9,2	1997
Великий бінокулярний телескоп, LBT	гора Грехем, Аризона	8,4 × 2	2004
Дуже великий телескоп, ESO VLT	Серро Параналь, Чилі	8,2 × 4	1998, 2001
Телескоп Субару	Мауна-Кеа, Гавайї	8,2	1999
Телескоп Північний Джеміні, GNT	Мауна-Кеа, Гавайї	8,1	2000

Телескоп Південний Джеміні, GST	Серро Пашон, Чилі	8,1	2001
Мультидзеркальний телескоп, ММТ	гора Хопкінс, Аризона	6,5	2000
Магелланові телескопи	Лас Кампанас, Чилі	6,5 × 2	2002
Великий телескоп азимутальний, БТА	гора Пастухова, Росія	6,0	1975
Великий зенітний телескоп, LZT	Мейпл Ридж, Канада	6,0	2001
Телескоп Хейла, ММТ	гора Паломар, Каліфорнія	5,08	1948

### Три перші, визначальні, кроки

**Крок перший** зробив польський астроном **Миколай Коперник** (1473 - 1543). Він «зрушив Землю» - «визнавши» її *усього лише одною з планет, які кружляють навколо Сонця.*

Здогади про те, що Земля рухається у просторі, висловлені багатьма давньогрецькими вченими і вже «зовсім прямо» у книжці «Про вчену неграмотність» (1440 р.) німецьким філософом (і кардиналом, багаторічним дорадником папи) Миколою **Кузанським**. У згаданій книжці (після винайдення книгодрукування її публіковано у 1488, 1514 і 1565 роках) він писав: «Земля насправді рухається, хоча ми цього не помічаємо, оскільки відчуваємо рух лише при порівнянні з чим-небудь нерухомим».



**Коперник** у книзі «Про обертання небесних сфер» (1543 р., перевидана в Базелі 1566 р., в Амстердамі 1617 р.) довів, що видимий добовий рух Сонця, Місяця і зір обумовлений обертанням Землі навколо своєї осі, зміна ж пір року — рухом Землі, разом з іншими планетами, навколо Сонця.

Відомо, що він довго зволікав із публікацією книги, і тому подекуди з'явилися твердження, нібито він боявся переслідування з боку Церкви. Це — не так. Бо ось що писав йому найближчий тоді дорадник папи кардинал Шонберг (1536 р.): «Я дізнався, що ти... склав нову теорію будови світу, в якій ти вчиш, що Земля рухається... Я ще і ще наполегливо прошу тебе повідомити про твій винахід ученим людям і в першу чергу прислати мені твої роздуми... (І)...якщо ти виконаєш у цьому моє прохання, то побачиш, що мав справу з людиною, яка турбується про твоє ім'я і бажає бути корисною такому генієві».

Коперник же зволікав із публікацією книги, бо знав, що в його моделі «не все гаразд», що в окремих місцях вона просто неправильна. Так, він розмістив Сонце «у центрі світу». Але зберіг уявлення давньогрецьких філософів про *рівномірний коловий рух планет зі сталими швидкостями*.

А що насправді це не так, то Копернику довелося прийняти, що кожна планета рухається по великому колу, центр якого обертається навколо Сонця по малому колу. Проблему вирішив **Кеплер**: «планети обертаються по *еліптичних* орбітах, а Сонце перебуває у фокусі кожної орбіти. Згодом **Ньютон** пояснив особливості рухів планет навколо Сонця дією **закону всесвітнього тяжіння**.

У той час перед Католицькою Церквою стояла проблема реформи календаря. Бо тоді уже стала надто явною неточність юліанського календаря, за яким, зокрема, правило визначення дати Пасхи встановили ще в 325 р. - 1200 роками раніше! І вже, бувало, християни чули від євреїв (їх календар був точніший): «та що це за календар у вас: ви вже (перед Пасхою) кілька тижнів тому мали би постити, а ще їсте м'ясо».

Реформу календаря проведено у 1582 р.: 1) усунуто з лічби 10 діб, що накопилися внаслідок різниці в тривалості року

юліанського календаря та року астрономічного («тропічного»), і 2) щоб ця похибка не нагромаджувалася в майбутньому, прийнято в подальшому викидати 3 доби в кожних 400 роках.

Упродовж років стверджували, нібито за пропаганду ідей Коперника було спалено (1600 р.) **Джордано Бруно**. Та, як з'ясовано, він («монах-утікач») постраждав за різкі виступи проти монастирських маєтків. Про теорію Коперника на судовому процесі не згадано жодним словом.

**Крок другий** «підготував» близько 1625 р. італійський учений **Галілео Галілей** (1564 – 1642), оприлюднивши твердження: *«залишаючись у царині допустимого, я скажу, що навіть із чотирьох нерухомих зір, не кажучи вже про всі, не знайдеться і двох, однаково віддалених від будь-якої точки, яку ви побажаєте обрати у всесвіті...»*.

І цим він «розбив у друзки» так близьку нібито кришталеву сферу! Перед землянами відкрилася *безодня Світобудови!* Це *не могло не нажахати* – усіх, від неграмотного селянина й аж до Папи Римського.

Ставало все очевиднішим, що Сонце – усього одна із зір, які у своїй сукупності «створили» на небі, зокрема, величну панораму Молочного Шляху. Поступово ставало очевидним і те, що всі ці зорі об'єднані у велетенську систему зір, яка й отримала назву – *Галактика*.

І ось у 1785 р. англійський астроном **Вільям Гершель** (1738 – 1822) зробив **другий крок** у звільненні від антропоцентризму. Він побудував першу модель Галактики як велетенської зоряної системи, «встановивши», однак, Сонце недалеко від її центра.

Нашу Галактику Гершель назвав усього лише одним із багатьох «островів» безкрайнього Всесвіту.

**Крок третій** зробив у 1918 р. американський астроном **Харлоу Шеплі** (1885 -1972). Розробивши надійний метод визначення відстаней до окремих груп зір за співставленням «видимих зоряних величин» наявних в них змінних зір (цефеїд)

з періодами зміни їх яскравості (блиску), він зумів побудувати модель Галактики у формі велетенського диска. Шеплі вперше встановив шкалу відстаней у Галактиці. При цьому **він змістив Сонце із її центра на відстань 50 000 світлових років від нього та «змусив» наше денне світило обертатися навколо цього центра.**

В останній чверті XIX ст. група астрономів здійснила каторжну роботу з класифікації багатьох сотень зір за особливостями їх спектрів (тобто фактично визначено поверхневі температури зір). Завершилася ця робота побудовою **діаграми спектр-світність** чи, інакше, **діаграми Герцшпрунга-Рессела** (рис.6). В її назві увічнено шану двом провідним тогочасним астрономам. **Ейнар Герцшпрунг** (дан., 1873–1967) у 1905–1907 рр. відкрив існування зір-гігантів і зір-карликів (порівняно із Сонцем). Він довів, що зорі, які «в основному» мають однакові спектри (тобто однакову поверхневу температуру), можуть істотно відрізнятись за своєю потужністю. **Генрі Рессел** (ам., 1877–1957) крім «добудови» цієї діаграми розробив **концепцію еволюції зір**, за якою головним джерелом енергії зір є **гравітаційне стискування**.

Важко було б уявляти будь-які розмірковування про будову й джерела енергії зір, особливо ж – про їх еволюцію без діаграми спектр-світність. Стисло про неї можна сказати таке. По горизонталі на ній відкладають «поверхневу» температуру зорі  $T$  або спектральний клас чи просто вказують колір зорі. Зліва біло-голубий, тут температура близька до 30000 K. посередині шкали  $T = 6000K$ , колір таких зір жовтий (тут і наше Сонце). Зправа  $T = 3000K$ , сюди «вкладаються» червоні зорі. По вертикалі відкладають потужності – світності зір  $L$  – в одиницях світності Сонця (рис. 6).

90% зір вкладається на вузьку смугу, що перетинає це поле зліва направо зверху вниз. Близько 10% займає лівий нижній кут, це білі карлики. Зправа зверху є гіганти, ще вище – надгіганти. Їхні радіуси відповідно у сотні і тисячі разів перевищують сонячний.

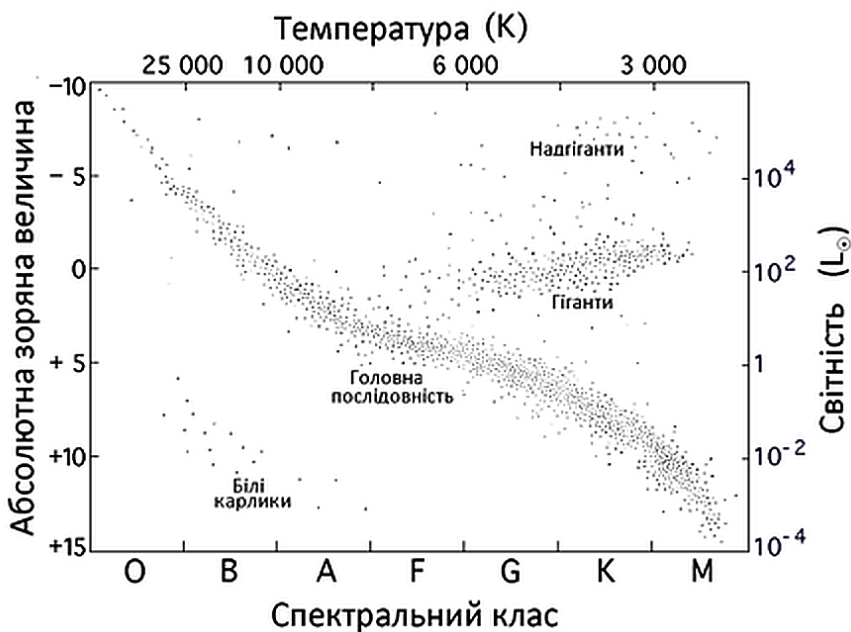


Рис. 6. Діаграма спектр-світність (Герцшпрунга – Рессела).

Найважливішою характеристикою зорі є її маса. У зір червоних карликів вона не перевищує 0,1, у білих гігантів сягає 100 мас Сонця. І – дуже визначальне: чим більша маса зорі, тим вище місце вона займає на головній послідовності.

У 1924 р., американський астроном **Едвін Габбл** (1889 – 1953) виявив у «туманності Андромеди» 12 змінних зір – цефеїд. Співставлення їх із такими ж зорями нашої Галактики привело його до висновку, що частина відомих «туманностей» насправді є далекими зоряними системами – *галактиками*, такими ж як і наша або й значно більшими.

### **Завдяки двом теоріям Айнштейна**

**Крок четвертий** пов'язаний з іменем **Альберта Айнштейна** (1879 -1955) - творця спеціальної теорії відносності – СТВ (1905 р.) і загальної теорії відносності - ЗТВ (1915 р.).

Два постулати, що були зформульовані в першій з них, цілком змінили класичні уявлення про простір і час та привели до відкриття глибокого внутрішнього зв'язку маси й енергії. Ось вони: 1) закони природи однакові у всіх інерціальних системах координат, що рухаються рівномірно й прямолінійно одна відносно одної; і 2) швидкість світла у вакуумі у всіх інерціальних системах однакова.

Айнштайн писав: «Ми бачимо, що не слід надавати абсолютного значення поняттю одночасності. Дві події, одночасні при спостереженні з одної координатної системи, уже не сприймаються як одночасні при розгляді їх з іншої системи, котра рухається відносно першої».

Тож час  $\tau$ , вимірюваний у системі відліку, де відбувається подія (космонавтами в космічному кораблі, що рухається зі швидкістю  $v$ ), прийнято називати *власним* часом, а  $\Delta t$  (проміжок між двома сигналами) - *інтервалом власного часу*. На Землі ж тривалість цього проміжка буде визначена інтервалом *координатного часу*  $\Delta t$ . Пов'язані вони співвідношенням  $\Delta t = \Delta \tau / \sqrt{1 - \beta^2}$ ,  $\beta = v/c$ . Конкретно це дало змогу встановити несподіваний факт розширення Всесвіту з прискоренням (див. нижче).

Іншим великим досягненням СТВ, фізики взагалі, було встановлення *зв'язку між енергією і масою тіла*. За малих швидкостей СТВ дає таке співвідношення:  $E \approx m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2$ , де другий доданок — добре відомий вираз для кінетичної енергії тіла, яке має масу  $m_0$  і рухається зі швидкістю  $v$ . А при  $v=0$  отримуємо, що  $E_0 = m_0 c^2$ , - так звану *енергію спокою* маси  $m_0$ .

Сьогодні ця формула є основою усіх обрахунків, пов'язаних із будівництвом атомних електростанцій (йдеться про розпад ядер урану) і моделюванням процесів виділення енергії у надрах зір (синтез важчих хімічних елементів, починаючи від ядер гелію). Саме спеціальна теорія відносності дала «ключ» і до розгадки питання про джерела енергії зір,.

У надрах Сонця з чотирьох протонів утворюється ядро гелію (два протони при цьому перетворюються на нейтрони). Маса одного протона в атомних одиницях (ат. о.) становить 1,00813, отже, маса чотирьох протонів – 4,03252 ат. о., тоді як маса ядра гелію дорівнює 4,00389 ат. о. Отже, випромінюється лише *різниця маси*  $\Delta m = 0,02863$  ат. о., тобто лише 1/140 частина маси, що бере участь в реакціях синтезу. І з утворенням одного ядра гелію виділяється енергія  $E = 4,3 \cdot 10^{-12}$  Дж.

«**Дарунки**» від ЗТВ. Упродовж декількох століть після **Ньютона** ніхто не сумнівався, що весь навколишній Всесвіт перебуває у *статичному стані* (тобто що його розміри з часом не змінюються). Але це вимагало обґрунтування, передусім – з точки зору динаміки. Адже кинутий горизонтально камінець падає, описуючи криву лінію – параболу. Тут – виявляє себе і геометрія, але і фізика! Бо "розхил кривої" визначається числовими значеннями як швидкості камінця, так і прискорення сили тяжіння. Інший приклад. Уявімо горизонтально натягнуту гумову плівку. Легка кулька, маючи певну горизонтальну швидкість, рухатиметься на ній рівномірно і прямолінійно. Якщо ж на плівку покласти тягарець - мембрана прогнеться. І кулька відхилиться від початкового напрямку та навіть опише коло навколо нього.

Тож при обговоренні проблеми згадують слова видатного математика **Георга Рімана** (нім., 1826 – 1866): «*Сила – це наслідок геометрії*». Адже поклавши на стіл зіжмаканий листок паперу, можемо побачити, як після зіткнення з «горбочком» легка кулька «наче внаслідок дії якоїсь сили» змінить напрям свого руху!

ЗТВ є узагальненням виведеного І.Ньютоном закону всесвітнього тяжіння і *включає його як граничний випадок*, зокрема, коли відносні рухи двох тіл описують швидкостями, значно меншими від швидкості світла.

Основоположною ж ідеєю **загальної теорії відносності** А.Айнштейна є те, що *за умови рівності інертної і гравітаційної мас* (перша фігурує у другому законі Ньютона,

друга – в законі всесвітнього тяжіння) прояв сили тяжіння локально можна звести до розгляду прискореного руху вибраної системи координат і навпаки. Так, для пасажера космічного корабля можна створити "комфортні земні умови", якщо надати кораблеві сталі прискорення  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ . З іншого боку, обертання планети навколо Сонця, зумовлене його притяганням, можна розглядати як її вільний рух у певним чином викривленому просторі.

Загалом - в історії фізики кожен наступний крок супроводжується новими вимогами до математичного апарату. Ось слова **Галілея**: "*Природа розмовляє з людиною мовою математики*" і в його часи це була мова *геометрії й алгебри*. **Ньютон** розробив основи *диференціального й інтегрального числення*, хоча закон тяжіння отримав з порівнянь сторін трикутників. **А. Айнштейну ж**, щоб пов'язати характеристики викривленого простору-часу з особливостями розподілу гравітуючої маси, довелося використати *тензорне числення*, розвинуте на основі геометричних ідей видатних німецьких математиків – **К. Гаусса** (1777 – 1855) та **Г. Рімана**. Істотно розширилися варіанти побудови/вибору моделі Всесвіту завдяки працям російського вченого **О.О.Фрідмана** (1888 – 1925), якими теоретично обґрунтовано можливість розширення Всесвіту як такого.

Вибір варіантів моделей «конкретизувався» завдяки спостереженням (1929 р.) **Едвіна Габбла** (ам., 1889 – 1953), який виявив *червоне зміщення* у спектрах галактик. Як також: *чим більша відстань до галактики, тим більша швидкість її руху* відносно нашої зоряної системи. Звідси випливало, що весь навколишній світ галактик  $t_H$  років тому почав розширюватися «в усі боки» від якогось, очевидно, надшільного стану. Не маючи надійних даних щодо відстаней до галактик, Габбл зробив висновок, що цей *Великий вибух* (так було названо «момент появи Всесвіту як такого») трапився 2 мільярди років тому. Тепер це число уточнено і збільшено до 13,7 млрд.

У масштабах Сонячної системи і в найближчих околицях Галактики є три ефекти, які доводять правильність ідей ЗТВ. Це рух перигелію планети, відхилення променя світла

гравітаційним полем зорі і зміщення у червоний бік ліній у спектрах зір.

1) Найбільшим перший ефект спостерігається у найближчого до Сонця Меркурія. Велика піввісь його орбіти  $a = 57,9$  млн. км, ексцентриситет  $e = 0,2066$ , період обертання навколо Сонця  $T \approx 88$  діб. За сто років планета здійснює навколо Сонця 415 обертів, а напрям її великої осі, відповідно до теорії Айнштейна, повертається відносно зір на кут  $\varphi \approx 43",03$  (за один оберт – на  $0",108$ ). Щоправда, за рахунок притягання Меркурія іншими планетами вісь орбіти Меркурія повертається за сто років на  $532"$ , а це в 12 разів перевищує релятивістський ефект. І все ж його виявлено.

2) Йдеться про вільний рух фотонів у викривленому просторі – часі. Як виявилось, світловий промінь відхиляється від прямолінійного шляху на величину, яка *удвічі* перевищує ту, що впливає з теорії Ньютона..

3) Третій ефект теорії Айнштейна полягає в тому, що спектральні лінії світла, випромінюваного з поверхні тіла масою  $M$  і радіусом  $R$ , зміщуються у червоний бік – так зване гравітаційне червоне зміщення. Для Сонця при довжині хвилі  $\lambda = 4000\text{Å}$  це дає  $\Delta\lambda = 0,008\text{Å}$ . У спектрах зір білих карликів ефект істотно більший.

ЗТВ передбачає також існування *гравітаційних хвиль*. І тут важливими є дослідження тісних подвійних систем. Непряме підтвердження існування цих хвиль отримано після 15-річних спостережень пульсара PSR 1913+16. Цей об'єкт – подвійна система, що в сузір'ї Орла. Очевидно, вона складається з двох нейтронних зір, одна з яких і є пульсаром. Як виявилось, період обертання пульсара навколо центра мас системи зменшується, а це значить, що пульсар PSR 1913+16 втрачає свою орбітальну енергію, тобто що обидві зорі поступово зближуються, рухаючись по спіралях. Інакше кажучи, пульсар проходить через периастр із випередженням. Теорія передбачила тут зменшення орбітального періоду на  $75,8$  мкс/рік, а спостереження дали значення  $76,3$  мкс /рік. За відкриття і дослідження цього об'єкта **Рассел Халс** і **Джеф Тейлор** у 1993



р. отримали **Нобелівську премію** з фізики (див. с. 61). У 2015 р. вже двічі було зареєстровано гравітаційні хвилі, що були породжені, в обох випадках, злиттям двох **чорних дір** – в одну.

Ще 1798 р. **П.Лаплас** висловив міркування, що вони (чорні діри) «можуть існувати» в рамках класичної фізики. Будь-яка пробна маса  $m$  залишить поверхню тіла масою  $M$  та радіусом  $R$ , якщо її кинути радіально вгору з такою швидкістю  $v$ , при якій її

кінетична енергія  $W_k = \frac{mv^2}{2}$  стане рівною потенціальній  $W_p$  або

перевищить її, тобто при  $\frac{v^2}{2} = \frac{GM}{R}$ . Видно, що чим менше  $R$ ,

тим більшою мала б бути швидкість пробної маси. При  $R = R_g$  швидкість  $v$  повинна досягти швидкості світла. З цього Лаплас і виснував, що коли в природі і є тіла, радіуси яких  $R \leq R_g$ , то світло не може залишити їх поверхонь. Лаплас писав: «зоря з густиною, рівною густині Землі, і з діаметром у 250 разів більшим від діаметра Сонця не дає жодному світловому променеві досягнути нас завдяки своєму тяжінню, а тому не виключено, що найяскравіші небесні тіла у Всесвіті з тої причини невидимі».

Можливість існування цих екзотичних об'єктів впливає із ЗТВ. Теорія еволюції зір говорить, що чорні діри мали б бути, зокрема, логічним завершенням розвитку тих зір, маси яких у декілька разів перевищують масу Сонця. Припущення про наявність чорних дір збагачує наші уявлення про джерела енергії, які, можливо, існують у космічних глибинах. При цьому також постає низка запитань стосовно найфундаментальніших властивостей простору-часу. Ось чому проблема чорних дір чи не найпопулярніша серед астрономів...

Величину  $R_g = \frac{2GM}{c^2}$  прийнято називати **гравітаційним радіусом тіла**, а сферу радіуса  $R_g$ , описану навколо центра точкової маси  $M$ , – **сферою Шварцшильда**.

Отже, коли відстань  $r$  до центра маси  $M$  істотно перевищує її гравітаційний радіус  $R_g$ , то  $dt = d\tau$  – власний час збігається з

координатним. Якщо ж  $r \rightarrow R_g$ , то при будь-якому конкретному інтервалі власного часу  $d\tau$  маємо  $dt \rightarrow \infty$ . Так, наприклад, коли уявний спостерігач подає світлові імпульси з інтервалом  $1c$ , то для іншого спостерігача, що перебуває далеко від маси  $M$  і дуже швидко рухається, ті імпульси розділені «вічністю». З усього сказаного ясно, чому з назвою об'єкта, радіус якого дорівнює гравітаційному, поєднують слово «чорний». Цим хочуть підкреслити, що з поверхні такого об'єкта до далекого спостерігача не може доходити жодне випромінювання.

Для маси, рівної масі Сонця, гравітаційний радіус  $R_g \approx 3$  км і середня густина  $\rho \approx 2 \cdot 10^{19}$  кг/м<sup>3</sup>, що істотно перевищує густину атомного ядра ( $10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>). Про властивості речовини при таких густинах (а тому й про існування чорних дір з такими масами) поки що говорити важко. Проте коли у сферу Шварцшільда стискується маса, що в десятки, сотні, а тим більше в тисячі або мільйони разів перевищує масу Сонця, то густини тут будуть цілком «звичними». То ж у цілому немає жодних підстав думати, що в природі такі об'єкти утворюватися не можуть.

### Ще три кроки до незбагненого...

**Крок п'ятий** зробив у 1932 р. швейцарець **Фріц Цвіккі** (1898 – 1974). Досліджуючи скупчення галактик у сузір'ї Діви, він виявив, що швидкості семи з них у скупченні Кома сягають 6600 – 8500 км/сек. Звідси випливало, що в сумі їхні кінетичні енергії істотно перевищують потенціальну, обумовлену силою взаємного притягання. І, отже, ці скупчення мали б давно вже розпастися. Пояснення «їх існування дотепер» могло бути таке: насправді маси галактик разів у десять більші, однак ця значна частина маси невидна. Тобто – «у природі» існує **темна маса**, і її орієнтовно у десять разів більше від тої, що світиться.

Переконливим доказом того, що вона існує, є особливість розподілу швидкостей обертання зір навколо центра у нашій Галактиці: орієнтовно на відстанях від 2 до 30 кілопарсеків від її центра орбітальні швидкості зір однакові – близько 240 км/с. Аналогічна ситуація і в інших надійніше досліджених

галактиках. Пояснити це можна, поклавши, що міжзоряне середовище «заповнене» згаданою темною масою.

**Крок шостий** зробив видатний фізик, наш земляк-одесит **Георгій Гамов** (1904 - 1968). Він дійшов до висновку: основна частина наявного у природі гелію – це наслідок процесів, які відбувалися на «**дозоряній стадії**». Але це могло би бути лише за надвисокої температури. І справді, всебічний аналіз питання довів: 19/20 наявного гелію «породилося» саме при десятих мільярдах градусів. Так розроблено **модель «гарячого Всесвіту»**.

**Гамов** також передбачив (1948 р.): перебуваючи у стані надвисокої температури, Всесвіт був заповнений високочастотними квантами (порціями енергії). При фантастично швидкому розширенні («роздуванні») вони ставали квантами все менших частот, і в наш час їх можна виявити в радіодіапазоні як **реліктове радіовипромінювання**. Його і відкрили у 1965 р. американські фізики **Арно Пензіас** і **Роберт Вільсон** (Нобелівська премія 1978 р.). Шар речовини (точніше – це сфера), в якому «народжувалися» ці кванти, перебуває, «з нашої точки зору», на фантастичній відстані понад 13 млрд. світлових років. А, що найголовніше, її речовина «кипить», і тому від точки до точки небесної сфери інтенсивність випромінювання дещо інакша. Ці **флуктуації реліктового радіовипромінювання** вивчені за допомогою космічних апаратів.

**Крок сьомий звільнення від антропоцентризму** здійснили дослідники спалахів **Наднових зір** типу *SN Ia*, виявлених у далеких галактиках. Такі зорі є подвійними системами. Теорію ж руху частинок у системі з двома центрами тяжіння розробив ще французький учений **Едуард Рош** (1820–1883). Згодо було складено уявлення про **поверхню Роша** і про **порожнину Роша**, яку ця поверхня охоплює. А вона, як **поверхня рівного потенціалу**, охоплює обидві маси у вигляді пісочного годинника й «утворює в перерізі вісімку» (рис. 7).

У процесі еволюції першого компонента його оболонка,

розширюючись, заповнює свою *порожнину Роша* і тоді через *внутрішню точку Лагранжа*  $L_1$  речовина перетікає в напрямку до другого, який є білим карликом, осідає на його поверхню та

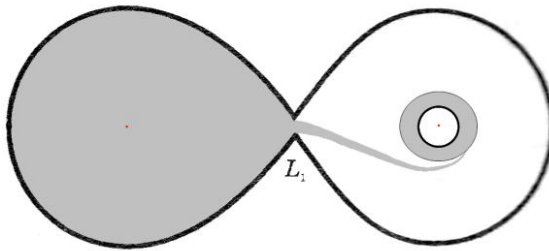


Рис. 7. Перетікання речовини від зорі-гіганта в бік білого карлика.

поступово розігривається. І як тільки маса білого карлика досягне критичної *межі Чандрасекара* ( а це 1,44 маси Сонця), він спалахує як Наднова *Ia* (див. с.53).

Дослідник спалаху з'ясовує : 1) його яскравість, 2) зміщення ліній у спектрі і 3) тривалість перебування у фазі максимуму блиску. Бо ж тут враховується згаданий вище ефект *СТВ* про відносність тривалості проміжків часу у різних системах координат, які рухаються одна відносно одної.

У найближчій галактиці зоря перебуває в максимумі блиску тиждень. Але, у відповідності з теорією Айнштейна, чим більша швидкість віддалення Наднової, тим цей проміжок максимуму, з точки зору земного спостерігача (!), стає більшим (конкретно не один тиждень, а два, для ще дальших – три). Отже - виявлено, що, *почавши з певної відстані, галактики не просто розлітаються, а рухаються зі все більшими прискореннями.* Це означає, що розширенням “керує” не лише *відома* світла і темна речовина! Що на певному етапі головну роль починає відігравати якась додаткова “розштовхувальна” *темна енергія.* Виявили цей ефект дві групи дослідників незалежними спостереженнями спалахів Наднових у якомога дальших галактиках. Що це таке – конкретних відповідей ще нема.

У намаганні з'ясувати фізичну суть природи розширення Всесвіту першим був *Ераст Глінер* (нар. 1923 р. в Києві ). Ще у

1965 р. він висловив таке міркування: стан Всесвіту визначається універсальним *космічним вакуумом*. Йдеться про середовище, описуване певною, не рівною нулю, енергією, густина якої  $\epsilon$  скрізь однакова і не змінюється з часом. Визначальним тут є *рівняння стану*: тиск рівний густині енергії, взятої зі знаком мінус:  $p = -\epsilon$  («у нашій фізиці» випадок  $p < 0$  реалізовується у розтягнутому металевому стрижні). З теорії випливає: *вакууму притаманне антитяжіння*.

Наявна у Всесвіті речовина породжується *внаслідок квантових флуктуацій*. І, як тільки це сталося, вона, ця речовина, внаслідок дії антигравітації, миттєво розігрівалася і набувала надвеликих швидкостей, що й призводило до її миттєвого розширення - до *Великого Вибуху*.

У 1964 р. англійський фізик *П.Хіггс* увів у теорію *силове поле*, яке при взаємодії з елементарною частинкою породжує її масу. Є навіть вислів: частинки отримують масу, “проковтуючи” бозони Хіггса – “згустки” *полів Хіггса*.

*Підсумовуючи* ж, “чого і скільки є у нашому Всесвіті”, роблять висновок: доступна для спостережень речовина – це усього 0,5%, ще 4,4% – несутінна (холодна), але звична нам речовина, і ще 26,8% – екзотична темна матерія, властивості якої нам невідомі, частка ж “темної енергії”, переобчисленої в масу, - 68,3%. Отже, ми живемо у світі, якого лише 1/200-ту здатні дослідити. Це як би встановити 200 свічок, з яких запалено одну, і здалека “досліджувати цю систему”.

Обчислення показують, що у *Всесвіті на кожен нуклон припадає близько 1 млрд фотонів*. Їхня ж маса, на чотири порядки менша за середню густину речовини у Всесвіті. Це означає, що в наш час реліктове випромінювання зовсім не впливає на особливості розширення Всесвіту.

**Додаток про дискусійне - про струнну космологію.** З 1968 р. фізики здійснюють спробу розглядати елементарну частинку як об’єкт протяжністю  $l_{pl} = 10^{-35}$  м. Тобто – у фізику введено новий (і несподіваний!) принцип: на найменшому, мікроскопічному рівні все складається з *вібруючих волокон*. І – вже немає мови про різні

частинки, а йдеться про різні *ноти*, які «звучать на фундаментальній струні». А різні моди коливань породжують різні маси і константи взаємодії. Чим більша амплітуда і менша довжина хвилі, тим більша енергія, а нею і визначається маса елементарної частинки. І - головна ідея «нинішнього дня» така: елементарна частинка є насправді *струною*.

Теорія струн стосується найглибших питань світобудови і є сучасною спробою відповіді на питання про природу фундаментальних взаємодій. Однак, основні проблеми тут залишаються відкритими....

Математичне узгодження рівнянь теорії струн досягають, якщо коливання струни відбувається в 11-вимірному просторі-часі: тут 10 просторових, з них сім компактифікуються – згортаються в кільця розміром  $l_{pl}$ . Щоправда, в теорії, в яких деякі з цих додаткових вимірів можуть простягатися на нескінченність. Ми їх, однак, не сприймаємо, бо «приковані до своєї 3-вимірної гіперповерхні». Теорія ж суперструн мала би бути частиною грандіозного синтезу, що має назву *M-теорії* (хтось каже – від слова «мембрана», інші – «містерія»).

Слово Нобеліанту **С. Вайнбергу**: «Це буде єдина фундаментальна теорія. Але поки що ніхто не знає, як записати рівняння цієї теорії. А головне – невідомо, які фізичні принципи керують такою фундаментальною теорією».

### III. ДЕЩО ІНАКШЕ - ПРО ТЕ Ж

#### Ще раз – добірка чисел

Астрономія, як наука, існує близько 2500 років. Однак до початку XIX ст. астрономи вивчали лише Сонячну систему, у XIX ст. – уже нашу Галактику. І лише в XX ст. вони досягли світу інших галактик, який, як виявлено, *розширюється*.

Відповідно добирали масштабні одиниці для вимірювання відстаней. Наприклад, відстань до Місяця вимірювали в милях чи кілометрах. У межах Сонячної системи зручною виявилася *астрономічна одиниця* – відстань від Землі до Сонця (1 а.о. =  $149,6 \cdot 10^9$  м). При вивченні об'єктів Галактики довелося ввести такі одиниці, як *світловий рік* – відстань, що її світло проходить за один рік (1 св. рік =  $63240$  а.о. =  $9,5 \cdot 10^{15}$  м), і *парсек* –

відстань, з якої радіус земної орбіти видно під кутом 1" (1 пк = 206 265 а.о. = 3,26 св. роки =  $3,09 \cdot 10^{16}$  м).

**В найближчих до Землі околицях** уточнено кількість *малих планет* (МП) – астероїдів, які кружляють навколо Сонця (деякі з них мають власних супутників), також комет і дрібніших «пилинок», яких поблизу Землі є чимало. Щоправда, усього цього «в сумі» – лише чи не 1/20 маси Місяця –  $3,5 \cdot 10^{21}$  кг. До речі, тепер прийнято називати *астероїдами* об'єкти, діаметри яких перевищують 30 м, усе менше – *метеороїдами*.

Наприкінці ХІХ ст. МП було відомо 400, наприкінці ХХ ст. – («пронумерованих» і з відомими вже елементами орбіт) 9709. На початок 2015 р. вже їх налічували 422 636. Встановлено, що 97% з них рухаються між Марсом і Юпітером. Близько ста – зближуються з орбітою Землі, деякі навіть «заходять» всередину орбіти Меркурія. Як вважають, у Сонячній системі можна налічити до 2 млн об'єктів, розміри яких перевищують 1 км.

Тут окремо приділено увагу «крижаним брилам» (кометним ядрам), незліченна кількість яких в сукупності утворює відкритий у 1992 р. *пояс Койпера* (ПК), що простягнувся, у площині екліптики, від орбіти Нептуна (30 а.о.) до декількох сотень астрономічних одиниць від Сонця (до 55 а.о.). Вже відомо понад 1000 таких об'єктів. Передбачається, що їх, ще не виявлених, з діаметром понад 100 км є тут більше 70 000.

Ще далі, від 5000 до 100 000 а.о. простяглася сферична (!) *хмара Оорта*. Кожне тут кометне тіло (а їх там – чи не сто мільярдів!) рухається по майже коловій орбіті, здійснюючи оберт навколо Сонця за мільйони років.

Виявлено десятки «астроблем» – *ран*, залишених на поверхні Землі від її зустрічі з уламками комет, з астероїдами, обговорюється проблема «астероїдної загрози»... Тут обмежимося зауваженням, що «за деякими обчисленнями» серйозне зіткнення із Землею стається через кожні 100–1000 років.

Вважають, що всі більші об'єкти з поясу астероїдів вже

виявлено і що імовірність зустрічі Землі з ними передбачувана. Складніше з тими, що в хмарі Оорта. У наш час «у масштабі планети» вже організовано *службу сталого моніторингу* – систему спостережень і контролю за всіма об'єктами неба, зокрема, на великих обсерваторіях – за допомогою телескопів-роботів. З'ясовано, що об'єкти з діаметрами 1–10 м, можна виявити на відстані близько 1 мільйона км від Землі – утричі далі, ніж Місяць. Ті ж, розміри яких сягають десятків і сотень метрів, – значно далі. Аналізують і способи захисту, зокрема, за допомогою ракет, які зближаться з об'єктом, щоб роздробити його або ж змінити його орбіту.

За останні 30 років межі Сонячної системи розширились у декілька разів.

З 1988 р. розпочалася епоха відкриття планет біля окремих зір – *екзопланет*. Уже виявлено планету біля оранжевого субгіганта  $\gamma$  *Sep A*. Сьогодні цих екзопланет відомо вже понад 5000 (зокрема КА «Кеплер» їх виявив більше 4700).

Сьогодні астрономи зуміли заглибитися у Всесвіт на відстані, звідки світлові промені йдуть до Землі близько 13 млрд. років. Тут уже використовують таку масштабну одиницю, як *мегапарсек* – мільйон парсеків ( $1 \text{ Мпк} = 10^6 \text{ пк}$ ).

Радіус Сонячної системи оцінюють у 60 а. о. Найближча до нас зоря  $\epsilon$  в сузір'ї Кентавра, відстань до неї – 4,3 св. роки. Якщо змодельювати будову Сонячної системи так, що відстань Земля - Сонце дорівнює 1 см, то ця зоря була б на відстані 2 км.

*Зорі*, як і Сонце, – це велетенські газові кулі, що випромінюють енергію за рахунок синтезу в їх надрах ядер гелію та інших хімічних елементів. Близько 200 млрд. зір об'єднані в гігантську зоряну систему – *Галактику*. Основну частину її зір неозброєним оком бачимо у вигляді *Молочного Шляху*. Усі зорі в Галактиці, як і Сонце, обертаються навколо ядра Галактики, Галактика ж рухається як єдине ціле у просторі.

Серед мільярдів зір нашої Галактики виявлено близько 50 000 *змінних зір*, яскравість яких у той чи інший спосіб змінюється. Серед *спалахуючих* зір особливо цікаві *наднові*,



яскравість яких упродовж тижня співмірна з яскравістю галактики, в якій цей спалах відбувся.

В останній чверті XIX ст. група астрономів здійснила нелегку роботу з класифікації багатьох сотень зір за особливостями їх спектрів (тобто фактично визначено поверхневі температури зір). Завершилася ця робота побудовою *діаграми спектр-світність* чи, інакше, *діаграми Герцшпрунга-Рессела* (*G-P*, рис. 6). В її назві увічнено шану двом провідним тогочасним астрономам. **Ейнар Герцшпрунг** (дан., 1873–1967) у 1905–1907 рр. відкрив існування зір-гігантів і зір-карликів (порівняно із Сонцем). Він довів, що зорі, які «в основному» мають практично однакові спектри (тобто однакову поверхневу температуру), можуть істотно відрізнятися за потужністю. **Генрі Рессел** (ам., 1877–1957) крім «добудови» цієї діаграми розробив концепцію еволюції зір, за якою важливим (тоді уявлялось – єдиним) джерелом енергії зір є *гравітаційне стискування*.

Неможливо грати в шахи без шахової дошки! І так же важко уявити будь-які розмірковування про будову й джерела енергії зір, особливо ж – про їх еволюцію без діаграми спектр-світність (рис. 6; на рис. 8 проведено лінії однакових мас і радіусів).

Стисло про неї можна сказати таке. По горизонталі на ній відкладають «поверхневу» температуру зорі  $T$  або спектральний клас чи просто вказують колір зорі. Зліва білоголубий, тут температура близька до 30 000 К, посередині шкали  $T = 6000$  К, колір таких зір жовтий (тут і наше Сонце). Справа  $T = 3\,000$  К, сюди «вкладаються» червоні зорі. По вертикалі відкладають потужності - світності зір  $L$  – в одиницях світності Сонця.

І тут виявляє себе дивовижна річ. Якби між згаданими характеристиками зір не було певної залежності, то сотні чи й тисячі зір розподілялися б «на полі» діаграми рівномірно. Тимчасом 90% з них вкладається на вузьку смугу, що перетинає це поле зліва направо і – зверху вниз. Близько 10% займає лівий нижній кут, це білі карлики. Справа зверху є гіганти, ще вище – надгіганти. Їхні радіуси відповідно у сотні і тисячі разів перевищують сонячний. тисячі зір розподілялися б «на полі»

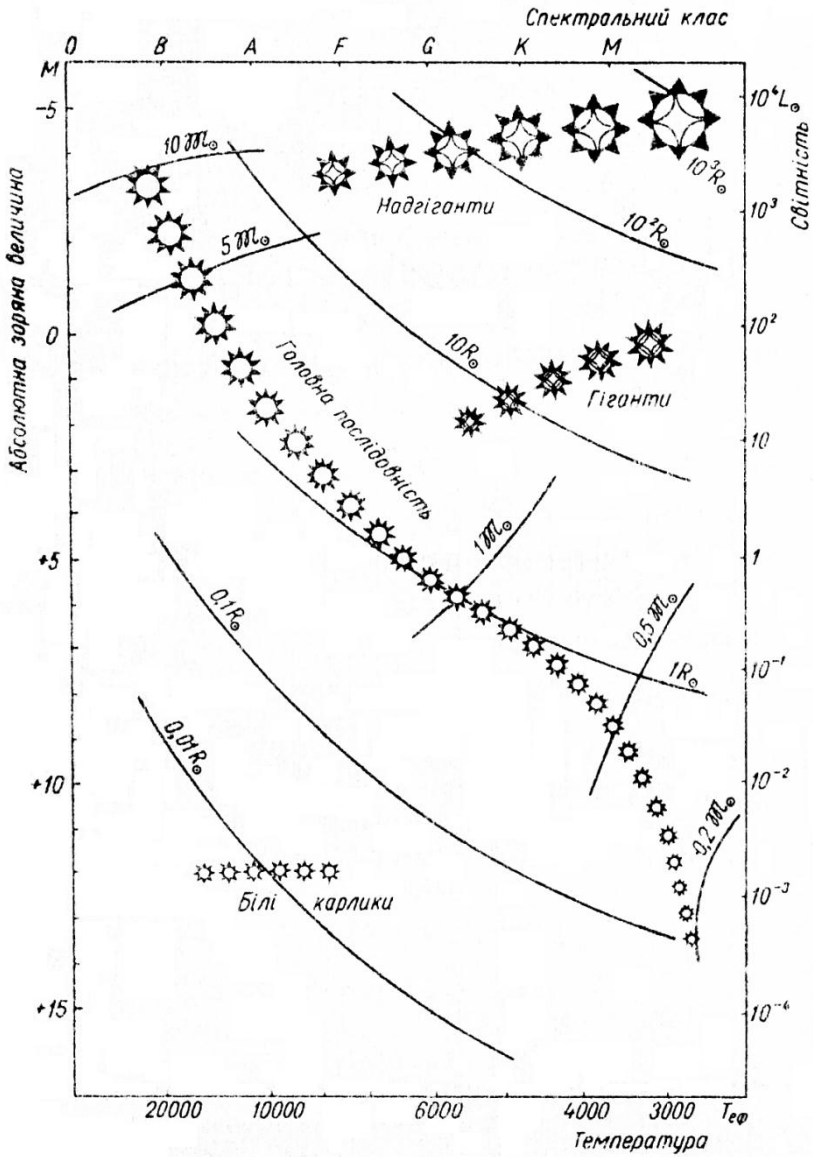


Рис. 8. Діаграма спектр-світність

діаграми рівномірно. Тимчасом 90% з них вкладається на вузьку смугу, що перетинає це поле зліва направо і – зверху вниз. Близько 10% займає лівий нижній кут, це білі карлики. Справа зверху є гіганти, ще вище – надгіганти. Їхні радіуси відповідно у сотні і тисячі разів перевищують сонячний.

Найважливішою характеристикою зорі є її маса. У зір червоних карликів вона не перевищує 0,1, у білих гігантів сягає 100 мас Сонця. І – дуже визначальне: чим більша маса зорі, тим вище місце вона займає на головній послідовності.

Значна частина зір «навколо нас» об'єднана в системи, що складаються з двох, трьох і більше (навіть із шести) компонентів. Є тут і *скупчення* зір – *розсіяні* і *кулясті*, в перших налічують 200-500 зір, у других – їх один-декілька мільйонів. Є також і велетенські газово-пилові хмари – *туманності*. Усе це, в сукупності, - наша **Галактика**, яка до того ж заповнена розрідженим *міжзоряним газом* і пронизана магнітними полями.

Наша Галактика має лінзоподібну (точніше – спіральну) форму, її діаметр сягає 100 000 св. років, товщина – 10 000 св. років. За її межами виявлено сотні мільйонів таких же зоряних систем. Є галактики-гіганти, є галактики-карлики. Вони об'єднуються у *скупчення галактик*.

**В** середньому відстані між галактиками принаймні на порядок перевищують їх лінійні розміри (тож вони справжні оази в пустелі), їх кількість швидко зростає при переході до об'єктів слабкіших за блиском. Адже галактик, яскравіших 12-ї зоряної величини, відомо близько 250, 15-ї – вже 50000.. За допомогою ж телескопів із діаметром дзеркала 10 м, як і еквівалентного їм млрд. галактик 29 – 30<sup>m</sup>.

За формою галактики різноманітні: є галактики *спіральні*, *єліптичні*, *є неправильні*. Виявлено також *квазари* – об'єкти, що мають вигляд звичайних зір, але є потужними джерелами радіовипромінювання. За сучасними уявленнями – це ядра *галактик-гігантів*.

## Окремі сторінки історії

Уже від давньогрецьких філософів маємо, зокрема, «як спадщину», уявлення про те, що *Земля – має кулясту форму* (**Піфагор**, бл. 550 р. до н.е.), про *атом як «зернину»* в будові в будові речовини, яка визначає межу її подільності (Левкіп, Демокріт, V - IV ст. до н.е.).

Проведені упродовж століть спостереження видимого руху Сонця й Місяця, також п'ятьох «блукаючих світил» - *планет* на тлі зір змушували розробляти теорії цих рухів.

Загалом - будувати моделі світобудови, в центрі яких мала би перебувати Земля (**Евдокс, Аристотель** – IV ст. до н.е.). Особливої ж уваги заслуговує праця **Гіппарха** (185 – 125 до н.е.), якого справедливо названо фундатором астрономії. Він із високою точністю визначив відстань до Місяця (59 радіусів Землі) та його радіус, пояснив причини нерівномірного руху як Сонця, так і Місяця («центри їх колових орбіт не співпадають із центром Землі»).

Майже 1500 років проіснувала *геоцентрична система Птолемея* (бл. 87 - 165), описана ним у фундаментальній праці «Альмагест». Так, в її основі було хибне уявлення про нерухомість Землі та про її центральне положення у світі. Але Птолемей зумів змодельювати нерівномірний, петлеподібний рух кожної планети «поєднанням двох кіл»: планета рухається зі сталою кутовою швидкістю по малому колу – *епіциклу*, центр якого – «середня планета» - також зі «своєю» сталою кутовою швидкістю по більшому колу – *деференту*. Можна лише дивуватися з того, як Птолемею вдалося з високою точністю (для кожної з п'яти планет) визначити зі спостережень ці пари кутових швидкостей, як також, - відношення радіусів епіцикл/деферент. Бо ж комбінацією таких рівномірних рухів вдавалося (упродовж століть!) описувати те, що спостерігач реально реєстрував на небі!

Але ще понад тисячу років «довелося чекати» на правильні формулювання питань: що ж все таки є «центром світобудови» і в чому причина спостережуваних рухів небесних світил...

**В** роки Середньовіччя, «нареши́ті», **Миколай Кузанський**(1401 – 1464) у кн. «Про вчене незнання» (1440 р., видана друком у 1488, 1514 і 1565 рр.) на підставі усього лише логічних розмірковувань ствердив, що 1) «Земля не може перебувати у центрі Всесвіту, оскільки Всесвіт має свій центр скрізь, а коло ніде» - тобто він є неохопним; 2) стосовно речовини, з якої складається Земля і небесні тіла, то «між ними немає жодної різниці», бо 3) «Земля таке ж, як і інші, небесне світило»; далі що 4) «жодна із зоряних ділянок не позбавлена мешканців» і ще 5) «Земля насправді рухається, хоча ми цього не помічаємо».

«Великою бідою» для астрономів упродовж 15-ти століть було незнання справжніх відстаней – від Землі до Сонця, до інших планет, зрештою – і до «кришталевої сфери», до якої зорі були «не то підвішені, не то на ній намальовані». Так, спробу встановити відстань «Земля – Сонце» здійснили ще Аристарх Самоський (III ст.. до н.е.) й, услід за ним, Гіппарх. Але – применшили її... у 20 разів. Відповідно у стільки ж разів «були меншими» і відстані до всіх планет. Радіус же кришталевої сфери нібито був усього в півтора рази більшим за відстань до Сатурна.

Як уже згадано, з появою книги **Миколая Коперника** (1473 – 1543) «Про обертання небесних сфер» (1543 р.) розпочалася перша революція в астрономії. Чітко і стисло про це написано на пам'ятнику йому, відкритому у Варшаві в 1830 р.: «Він зупинив Сонце, зрушив Землю». Довгий час залишалося, однак, питання: чому він зволікав із публікацією своєї книги? Ми даємо таку образну відповідь: він чекав на Йоганна Кеплера (1571 – 1630), з яким однак розминувся в часі.

Річ у тім, що «встановивши Сонце у центрі світобудови», Коперник, услід за Птолемеєм, зберіг уявлення про рівномірні (зі сталими кутовими швидкостями) рухи планет (Землі також) по колових орбітах, Тож йому доводилося приймати, що планета рухається навколо фіктивної точки і вже та обертається навколо Сонця. Знову ж таки - по коловій орбіті (насправді тих кілець для кожної планети було декілька). Ведучи уже мову про

тяжіння, Коперник, як справжній учений, усвідомлював, що його конструкції є, скажемо так, недосконалими. Як згодом зауважив англійський фізик Джеймс **Максвелл**, якраз Кеплер і вимів із неба це «павутиння», встановивши, що насправді планети кружляють навколо Сонця по еліптичних орбітах.

Як виявилось, числові характеристики моделі Птолемея, «перевернуті з голови на ноги», правильно описують масштаби Сонячної системи – з точністю до на цей час ще невідомого коефіцієнта (скажемо так – «масштабного фактора»). Років через 120 стане ясним: усі відстані в Сонячній системі слід збільшити – у 20 разів.

Видумка ж «завятих атеїстів», нібито Коперник боявся переслідування з боку Церкви, абсолютно безпідставна. Навпаки загальновідомо, що два високі церковні достойники (кардинал Микола Шонберг і єпископ Тідеман Гізе) буквально змушували його опублікувати книгу якнайскоріше. Очевидно, тому, що Католицька Церква готувала реформу календаря, і свіжі астрономічні дані, як ось – про тривалість астрономічного (тропічного) року - були дуже потрібні.

**Не**минуче тут постає питання про Джордано Бруно, життя якого закінчилося трагічно нібито за пропаганду геліоцентричної моделі світу Коперника. І тут правди ні на гріш: на судовому процесі про цю «модель світобудови» навіть не згадували. Питання це досконало вивчали учені США **Л.Лернер** та **Е.Госселін**, див. журн. «В мире науки», М.,1987, № 1, с. 80 – 88. І ось їх висновок: Бруно теорії Коперника фактично не знав і відгукувався про неї так: «його праця постає ... як невпорядковане нагромадження безглузких помилок». «Читаймо!» То що ж було причиною цієї драми?

Кажуть: Дж. Бруно намагався відновити релігійно-містичні уявлення давніх греків і на їхній основі «примирити поміркованих протестантів Англії з поміркованими католиками Франції проти реакційної Іспанії». Додають ще й таке: його, може, б і не спалили, якби він менш різко виступав проти монастирських приборків і маєтків...

**Тихо Браге, Кеплер, Галілей...** Ці три видатні постаті «на щастя» таки не розминулися в часі. Інакше: «Де загубилися б високоточні, як на той час, спостереження **Тихо Браге** (1546 – 1601), проведені ним упродовж двадцяти років, якби не Йоганн Кеплер?» З іншого ж боку: «Що зміг би залишити після себе неперевершений у своїй наполегливості Кеплер, якби не ці результати спостережень Браге?»...

Щасливий збіг обставин - і нова *коперниканська* астрономія отримала для свого розвитку перший потужний імпульс та обґрунтування, якого здолати не могла вже ніяка сила.

Отримавши (1576 р.) від короля у своє розпорядження острів Вен (20 км від Копенгагена, площа 750 га) і «більше ніж бочку золота», на той час усього лише 30-річний Браге зразу ж перетворив його на унікальний астрономічний центр світового значення. Було виготовлено близько 20 високоточних кутовимірних приладів - квадрантів і секстантів, армілярних сфер тощо. Допомогали йому у спостереженнях, точність яких (порівняно з до тогочасними) було підвищено у 50 разів, не менше 20 чоловік, з них 10 учнів і помічників, але й механіків та інших спеціалістів. Кажуть таке: «Витривалість самого Тихо, здавалося не мала меж. Хоча цілі ночі він проводив за спостереженнями, вдень він рідко коли спав...».

Після смерті його високого покровителя Браге 1597 р. залишив Данію і, проблукавши по Європі два роки, опинився у Празі, де й помер. Як свідчив Кеплер, що вже тоді співпрацював з ним, в останні дні свого життя Браге неодноразово шептав «Життя прожито не даремне!»... І це – велика правда!

Високо цінуючи Коперника, Тихо Браге все ж не сприймав його модель світу. Мовляв, «ця груба маса Землі, так мало пристосована до руху, не може, подібно до інших небесних тіл, зміщуватися і рухатися». І далі: «.. Сонце, Місяць і сфера нерухомих зір... мають центром Землю. П'ять планет обертаються навколо Сонця, як свого вождя і короля, а Сонце... в їх супроводі здійснює свій річний рух навколо Землі». Браге зобов'язував Кеплера використати його спостереження, планети

Марс передусім, для побудови саме такої *гео-геліоцентричної* моделі.

**Життя Кеплера** було дуже й дуже важким. Передусім – вкрай слабе здоров'я. Як і гнітюча убогість, відсутність бодай якихось коштів на прожиття – своє і родини (вмирала діти, померла перша, згодом і друга дружина). В одному з листів, маючи на увазі складання гороскопів, він писав: «Краще видавати альманахи з передбаченнями, ніж просити милостиню. Астрологія – дочка астрономії, хоча й незаконна, і хіба не природно, щоб дочка кормила свою матір, яка інакше могла б померти з голоду...». І склав він за своє життя цих «передбачень» 800.. А як інакше міг вижити ?

В одному тексті «Про себе» він написав, що він «безперервно зазнає каяття з приводу втраченого часу». А воно ж «Бездіяльність – смерть для філософії: так будемо ж жити і працювати...».

Узявшись за опрацювання спостережень Марса, Кеплер сподівався, що зможе «вирішити цю проблему» за 8 днів. Насправді на це затрачено 8 років надсадливої праці! Опис його зусиль у встановленні *трьох законів Кеплера* неможливо передати кількома реченнями, але усе ним пережите є в кн. «Історія астрономії» (Ів.-Фр, 2006, с. 263 – 279, [www.lib.if.ua](http://www.lib.if.ua)).

Немаловажне й таке. У Кеплера була уроджена короткозорість і так звана молекулярна поліопія – хвороба, при якій, дивлячись на певний об'єкт (наприклад, на Місяць), він бачив не одне, а декілька його зображень. А все ж якраз він запропонував звичну нам схему телескопа-рефрактора...

**Галілей...** «Прослухавши випадково лекцію з евклідової геометрії, він закинув вивчення медицини», щоб невдовзі стати професором математики й астрономії та отримувати зарплату у 33 разів меншу від професора медицини!

Знаємо: Галілей першим зконструював телескоп (є свідчення – мікроскоп також) і за його допомогою відкрив гори на Місяці, чотири супутники Юпітера, фази Венери, «роздробив Молочний Шлях на окремі зорі», навіть відкрив плями на Сонці.



Це був великий прорив у намаганні збагнути таємниці Світобудови! А все ж найголовнішим було інше. Галілей не сприйняв на віру твердження Аристотеля (яке упродовж 1500 років «бубоніли» у всіх університетах: «*ex o dixi - Sam* (Учитель) *так сказав*»): тіла падають на Землю зі швидкостями, які пропорційні їхній вазі (тобто тіло масою 5 кг падає у 5 разів швидше від того, яке має масу 1 кг...).

Можливо, він знав, що років 40 до нього французький учений **П'єр Рамус** (1545 – 1572) уже заявив: «усе, що стверджував Аристотель, - брехливе». Пройшли роки. І - ведучи мову про Галілея, англійський фізик Олівер Лодж (1851 – 1940) у кн. «Піонери науки» зазначив: «Він.. вирішив показати факти, якими вони є ..В присутності усього університету піднявся на відому падаючу вежу, узявши з собою два ядра: стофунтове та однофунтове. Він встановив їх на краю вежі і пустив обидва одночасно. Вони пролетіли разом і разом діткнулися Землі. Глухий удар падаючих ядер об землю прозвучав як похоронний дзвін над старою системою фізики і провістив народження нової»...

Слід відмітити: і до Галілея було принаймні шість «спроб» заперечити Аристотеля. Але «ніхто не зробив належних висновків та узагальнень». А він це зробив! Хоча й було оте: «У Старому Завіті згадується семисвічник, отже є лише сім планет», «супутники невидні, отже – вони непотрібні, тому не існують». Як і таке: «в голові є сім отворів, також ... існує сім металів,... то планет має бути сім».

Але... «є людина, але й – історична епоха, в якій вона опинилися»...зі «своїм характером» (що теж немаловажне). Галілей був фундатором експериментальної фізики! Та не для всіх його «інтуїтивних передбачень» можна було віднайти «експериментальні основи», особливо - в астрономії. Аж ніяк не виправдовуючи тодішнє знущання над ученим («з мотузкою на шії, в покаяній одежі, стоячи на колінах, зрікався...»), сприймаємо і сказане Галілею (його у минулому – другом?)

Папою **Урбаном УШ**: «Бог може досягати своїх цілей нескінченною кількістю шляхів, тому.. не слід позбавляти Бога

вибору» ( в розумінні: Могутній Творець міг влаштувати світ так, щоб світила оберталися навколо Землі, але і так, щоб Земля рухалася навколо Сонця; але доки немає доказів – висловлювання, уточнимо – «з боку науки», мають бути обережними).

Так, Галілей «розтрошив небесну твердь» (!), логічно довівши, що *«розглядаючи будь-яку ділянку неба, з отої множини зір не знайдете й двох, які були б на однаковій відстані від нас»*. Це був заключний, величний акорд розпочатого Коперником («усвідомленого до основ, у ті часи, чи й ні?») *звільнення від антропоцентризму* (погляду, ніби то людина – у центрі світобудови).

Працю Галілея «Пробірних справ майстер» вважають маніфестом нового природознавства, який робить докази, засновані на спостереженні, експерименті і точному математичному розрахунку. Обговорюючи проблему вибору системи світу, природу комет і особливості їх руху, він висловився так: «Філософія написана у величній книзі (я маю на увазі Всесвіт), яка постійно відкрита нашому погляду, але зрозуміти її може лише той, хто спочатку навчиться осягати її мову і тлумачити знаки, якими вона написана. Написана ж вона мовою математики, і знаки її – трикутники, кола та інші геометричні фігури, без яких людина не змогла б зрозуміти в ній жодного слова; без них вона була б приречена блукати напотемки лабіринтом».

**Ньютон...** - фундатор сучасної теоретичної фізики, Водночас, у тому ж розумінні, й астрономії - **як механіки небесної**.

Але, *«щоб він з'явився»* - (у 1687 р. своєю працею «Математичні основи природознавства») - мало відбутися визначення відстаней до інших планет, тобто – встановлення *масштабів Сонячної системи*. Це якраз і було зроблено у 1672 р. завдяки спостереженням – «в Парижі і Кайєні, яка в Америці» - положення Марса серед зір в його протистоянні із Сонцем («геометрія тут елементарна, а база – діаметр Землі - уже

відома!»). І зразу ж тоді «*відстані до планет, порівняно із толемеевими, зросли у 20 разів*».

Це було винятково важливим! До Місяця відстань встановив ще Гіппарх. Так, і рух Місяця, і падіння яблука на голову Ньютона (образне, звичайно) - це вияв одної і тої ж причини! Але для узагальнення, у масштабах Сонячної системи, необхідно знати *реальні* відстані планет від Сонця. Кеплер міг обійтися без них: в його другий і третій закони «входили» усього лише *відносні* відстані, як ось, «відношення кубів великих півосей орбіт», То ж - який завгодно коефіцієнт-множник у чисельнику й знаменнику – тут скорочується! Але співставляти рух Місяця навколо Землі й Землі навколо Сонця (а тут – різні центри тяжіння!) можна лише у випадку, якщо відомі справжні їх відстані до згаданих центрів!

Щасливо ці відстані було «своєчасно» виміряно. Тож, у підсумку, завдяки Ньютону, і маємо *закон всесвітнього тяжіння!* А це - вияв одної із чотирьох *взаємодій*, завдяки яким наш Світ *є таким, яким є*.

У ті часи вже засвідчила про себе й інша (*електромагнітна*) взаємодія - у формі світлових потоків, передусім від Сонця. Вона згодом «виявила себе» в одному із розділів фізики – в *оптиці*. І цим питанням Ньютон приділив велику увагу, що не обійшлося без («нікчемної, побутової») трагедії: випадкової пожежі, коли то згорів чорновик його «Оптики», внаслідок чого він «кілька місяців був зовсім не при своєму розумі» (за кн. **П.С.Кудрявцева** «Історія фізики», т. 1, с. 182, 1951 р.).

Подальший розвиток «знання про весь навколишній світ», упродовж 250 років, відбувався «спокійно», однак - у все стрімкішому темпі. Віддзеркаленням цього є хронологічні таблиці в курсах фізики й астрономії. Тут і «створення першого електричного конденсатора» (1746 р.), і встановлення закону збереження електричного заряду (1750 р.), залежності тиску від температури (1787 р.), встановлення закону електричної взаємодії («закон Кулона», 1785 р.), магнітної дії електричного

струму (**Х.Ерстед**, 1820 р.), відкриття **М.Фарадея** явища електромагнітної індукції (1831 р.)...

Головним же у цей період було формулювання **закону збереження енергії**. Як також - її **перетворення з одного виду (форми) в інший**.. Серед багатьох трудівників цієї ниви виділяється передусім постать **Ю.Майєра**...

В астрономії тоді ж **Дж. Брайлей** відкрив явище аберації (1727 р.), що стало *першим доказом* правильності теорії Коперника. Згодом (1781 р.) **Вільям Гершель** відкрив нову планету Сонячної системи – Уран. У 1802 р. **Вільям Волластон** (Англія) виявив у сонячному спектрі сім тонких темних ліній. І майже зразу (1814 р.) **Йозеф Фраунгофер** (Німеччина) дослідив та описав їх уже 574!

Тоді ж «у рамках небесної механіки» здійснено всебічний аналіз *задачі трьох тіл*. Передусім **Леонард Ейлер** (1707 – 1783) у своїй «Механіці» (1736 р.) виклав «геометричну математику» Ньютона звичною для нас мовою диференціального й інтегрального числення. Він же виявив, що навіть у задачі трьох тіл рух «може бути стійким і зберігатися подібним до себе», якщо ці тіла в початковий момент, за умови певних відстаней і певних швидкостей, перебували на одній прямій (це випадок трьох *колінеарних точок*).

Цю задачу згодом детальніше розглянув французький математик **Жозеф Лагранж** (1736 – 1813): рух трьох тіл буде стійким і в тому випадку, якщо вони в початковий момент розташовані у вершинах рівностороннього трикутника і якщо вони мають певні за величиною і напрямом швидкості. Цей трикутник періодично пульсує, обертаючись навколо центра згаданих трьох гравітуючих точок.

**Розв'язки** ці актуальні й тепер. Передусім, якщо йдеться про «розташування» певної космічної лабораторії за межами земної атмосфери: в системі Земля – Місяць, «між ними», є точка  $L_1$  - на відстані 57 600 км від нього, з протилежного боку така ж. Аналогічні точки є у системі *Сонце-Земля*! І «корисною» стала, для розташування дослідницьких лабораторій, точка  $L_2$  – з протилежного («для нас») від Сонця

боку, на відстані 1,5 млн км від Землі (див. рис. 3 / I ). Звідти і передавав КА «Планк» інформацію «про небо» - про «ситуацію, яка була у Всесвіті за 14 млрд. років до нашого народження».

Найдетальніше теорію руху частинок у системі з двома центрами тяжіння розробив **Едуард Рош** (див. с.35). В середині ХХ ст. було встановлено: як тільки процесі еволюції подвійної системи масивніша зоря заповнює свою *порожнину Роша*, через *внутрішню точку Лагранжа  $L_1$*  речовина цієї зорі «перепливає» до її супутника та «осідає» на його поверхні. Наслідком цього є спалах *Наднової «типу Ia»*. Виявлення їх у найдальших галактиках допомогло (майже 20 років тому) зробити висновок: «на найбільших космічних відстанях Всесвіт розширюється з прискоренням». Так виявляє себе *якась «темна енергія»*.

Поняття *енергії* як міри руху у фізику поступово входить з ХУІІІ ст. В середині ХІХ ст. було зформульовано *закон збереження енергії* – як *перше начало термодинаміки*. Введено поняття *ентропії* як міри якісного знецінення активності енергії. Адже у фізичних системах, ізольованих від зовнішніх впливів, теплові явища розвиваються у напрямі вирівнювання температури. У цьому суть *другого закону термодинаміки*. Це породило *«термодинамічний парадокс»*: унаслідок вирівнювання температури будь-які зміни в стані речовини ставали б неможливими, тож загалом мала б настати *теплова смерть Всесвіту*. Оскільки ж її «ще нема» то це одзначає, що «з моменту його формування пройшло не так вже й багато часу».

**У** ХІХ ст. поступово відбулося об'єднання розуміння суті електричних і магнітних явищ. Вирішальними тут були праці англійського фізика **Майкла Фарадея** (1791 – 1867), який, зокрема, у 30-х роках увів поняття *поля*, що, як висловився А.Айнштейн, **стало** найважливішим відкриттям від часів Ньютона. Фарадей увів поняття про електричні та магнітні силові лінії, висловив ідею про електромагнітну природу світла, також (у 1840 р.) – думку про єдність сил природи та взаємне перетворення різних видів енергії. Математичне обґрунтування теорії електромагнітного поля здійснив у 1855 р. англійський

фізик **Джеймс Максвелл** (1831 – 1879), який встановив закон розподілу молекул за швидкостями.

**Ще** – конспективно – про деякі здобутки XIX ст. У 1843 р. Генріх **Швабе** (Німеччина) відкрив періодичність (бл. 10 років) у появі плям на Сонці. У 1846 р. на підставі обчислень Урбена **Левєр'є** Йоганн **Галле** відкрив восьму планету Сонячної системи – Нептун. У 1851 р. в Парижі встановлено **маятник Фуко** – прилад для демонстрації обертання Землі навколо своєї осі. 1854 р. – Герман **Гельмгольц** (Німеччина) висловив думку, за якою енергія Сонця звільняється внаслідок його неперервного стискування. У 1859 р. Роберт **Бунзен** і Густав **Кірхгоф** (Німеччина) встановили, що за особливостями спектрів зір можна вивчати їхній хімічний склад. У 1868 р. Джозеф **Лок'єр** (Англія) виявив у спектрі Сонця лінію раніше невідомого хімічного елемента – **гелію** (на Землі його було відкрито у 1895 р.). Завдяки здобуткам Нобеліантів Беккереля, Марії і П'єра Кюрі, як також Резерфорда та **Фредеріка Содді** (англ., 1877 – 1956), із досліджень ними радіоактивного розпаду урану (і ін.) було розроблено методи встановлювання віку Землі, метеоритів (згодом - доставлених із Місяця зразків його «грунту»). Обмежимось зауваженням: з 1 кг урану в конкретному зразку через 100 млн. років виділяється свинцю 13 г, через 2 млрд. років – 225 г.

У 1911 р. Резерфорд запропонував **модель атома** із щільним, вкрай малих розмірів ядром, яке має додатній електричний заряд (згодом, у 1920 р., він же передбачив існування нейтрона і дейтрона). Зразу ж, у 1913 р., застосувавши ідею Планка про квантування енергії, на основі цієї моделі **Нільс Бор** (дан., 1885 – 1962), прийнявши уявлення про дискретність енергетичних станів в атомі, створив «планетарну» **модель атома**. Основою тут були два відомі постулати: 1) всупереч законам електродинаміки електрон може перебувати на певному енергетичному рівні («на стаціонарній орбіті»), не випромінюючи енергію, і 2) він випромінює (чи поглинає) квант світла при переході на інший рівень («на іншу орбіту»).

Ці постулати Бора було сприйнято навіть вороже, як ось: «Якщо це правильне, то воно означає кінець фізики як науки» (А.Айнштейн). А Х.Лоренц взагалі пожалкував, що не помер п'ятьма роками раніше, «коли у фізиці все ще зберігалася відносна ясність»... Згодом (1927 р.) Бор «здивував» усіх уже згаданим *принципом доповнювальності*.

Але, щоб «аж до такого дійшло», **Луї де Бройль** (фр., 1892 – 1987 ) мав показати, що всі тіла у природі мають водночас і хвильові, і корпускулярні властивості. Ця ідея була блискуче підтверджена дифракцією електронів у кристалах.

Цю ідею використав (1926 р.) **Ервін Шредінгер** (австр., 1887 – 1961) при створенні основ *хвильової механіки*.

## До зір – через атом: джерела енергії

На початку ХХ ст. стало очевидним: якщо гравітаційне стискування зорі і є джерелом висвічуваної енергії, то це – в масштабах мільйонів років. Відкрите ж дещо раніше явище радіоактивного розпаду наштовхувало на думку, що вік окремих «складових Світобудови» (Сонця зокрема) в сотні-тисячі разів більший. І отже, необхідно «шукати» якісь інші джерела енергії!

«За щасливим збігом обставин» наприкінці ХІХ ст. фізики уже якнайсерйозніше «перейнялися таємницями атома». Вчасно! Бо перед їхніми колегами-астрономами уже «на весь рід» постали питання: чому  $N_1$  кількість атомів формує зорю типу Сонця, тоді як, коли їх  $N_2$ , - зоря є гігантом чи аж надгігантом, із радіусом у 100 чи й 10 000 разів більшим від сонячного! Або карликом... Як також - «чому зорі святяться?»

«Для початку» можна б згадати, що **В.Гершель** у 1795 р. уявляв, нібито Сонце - темна, тверда і холодна куля, поверхня якої, можливо, заселена живими істотами, що навколо Сонця є два шари хмар: зовнішній (гарячий) і внутрішній – темний та холодний, та що сонячні плями – це дірки у хмарах, крізь які проглядає ота холодна сонячна поверхня. Згадаємо тут і слова «про таємниці Сонця» нашого земляка, директора Пулковської обсерваторії **Бориса Герасимовича** (1889 – 1937): «Перед нами – одна з найвеличніших проблем, які коли-небудь природа

ставила перед людиною. Ця проблема ще дуже далека від свого вирішення. По-суті, ми лише тепер домоглися її правильної постановки - її розв'язок є справою майбутніх поколінь».

Насправді вона нібито була розв'язана уже через три роки. Але кажемо «нібито». Бо інакше як пояснити той факт, що на тему еволюції зір (що неминуче включає в себе і проблеми як енергії, так і хімічної еволюції речовини в надрах зір, передусім Сонця) в заключні 30 років ХХ ст. щорічно публікувалось до 5000 статей. Щорічно проводили по одному-два симпозіуми/колоквиуми на ці теми. Тобто: головний механізм виділення енергії в надрах зір з'ясовано. Це – реакції синтезу ядер все складніших хімічних елементів. Але щоб пояснити їх поширеність у Всесвіті, доводиться «використовувати» вісім варіантів реакцій (плюс ще декілька «із дозорної стадії»).

Основою тут є *формула Айнштейна*  $E = mc^2$ , точніше, наявна завдяки *ефекту упаковки* різниця маси чотирьох нуклонів і маси ядра гелію, помножена на  $c^2$ . Вона і дає вихід енергії при синтезі одного ядра гелію:  $E = 4,3 \cdot 10^{-12}$  Дж. За тою ж схемою оцінюється і «видаїність енергії» усіма наступними реакціями. З одним «але»: реакції синтезу все важчих ядер *аж до заліза включно(!)* є *екзотермічними*, тобто вони супроводжуються виділенням енергії, усі ж подальші, аж до формування ядер урану, - *ендотермічні*.

Тут уже виявляє себе «мудрість космічної кузні»: «стискайся, зіронько, і віддавай частину звільнюваної *гравітаційної енергії* на kleпання все важчих ядер, схему реакцій фізики згодом придумають!» (Зокрема, **Фаулер** та його сучасники, див. нижче). «А що від вісмуту до урану «мляві» процеси занадто неефективні, то я, твоя Матінка-Природа, *придумаю нейтрино*, потоки яких миттєво будуть виносити геть частину звільнюваної гравітаційної енергії. А різке зменшення тиску в околі центра зорі приведе до катастрофи – *колапсу*. І ото якраз за ті лічені хвилини/секунди і буде склепано увесь заключний ланцюжок ядер до урану включно. Бомбу матимеш, ну, й електрику»...



Чи не першим, хто «запідозрив» ще в 1920 р., що Сонце висвічує енергію, яка звільнюється внаслідок «ядерного горіння водню при його перетворюванні в гелій», був англійський астроном **Артур Еддінгтон** (1882 – 1944). Згодом, наприкінці 20-х років осмислити перебіг можливих реакцій ядерного синтезу в надрах зір намагався **Г.Гамов** – вчений широкого профілю і з тонким відчуттям суті тої чи іншої проблеми – від походження планет, «народження і смерті Сонця», походження хімічних елементів і аж до «триплетної системи інформаційного коду білкової молекули ДНК» - запису літер генетичного коду у світі живих форм. Але, як зауважували його ж колеги, підіймаючи великі питання і пропонуючи правдоподібні відповіді на них, він не опрацьовував деталей (інакше: «в нього була багата уява, але його числові результати породжували підозріння»).

Тож перший ґрунтовний аналіз термоядерних процесів, які відбуваються в надрах зір, здійснив у 1938 р. **Ганс Бете** (нім., 1906 – 2005). Він відкрив цикли термоядерних реакцій, що є джерелом енергії зір головної послідовності. **Нобелівська Премія 1967 р.** При нагородженні його було зазначено, що ця праця «є одним із найважливіших використань фундаментальної фізики у наш час і веде до поглиблення наших знань про Всесвіт».

Спочатку однак Бете дослідив «шестиступеневий» вуглецево-азотний цикл (*CNO*-цикл) формування ядер гелію з 4-х протонів, в якому вуглець, азот і кисень відіграють роль каталізаторів. Наступного року він (і незалежно від нього **К.Вейцекер**) опрацював схему протон-протонного (*p-p*) циклу. Перший «працює» в надрах зір, маси яких більші від сонячної. Відмінність між ними полягає в тому, що для *p-p* –циклу середній час реакції становить 14 млрд років, тоді як для *CNO*-циклу 320 млн. років. Тому й вік Сонця вимірюємо мільярдами років, тоді як зорі верхньої частини головної послідовності перебувають на ній кілька сотень мільйонів років.

Важливий внесок у розуміння процесів, завдяки яким формується наявне співвідношення вмісту різних хімічних

елементів в атмосферах зір та в міжзоряному середовищі, здійснив **Уільям Фаулер** (ам., 1911 – 1995, *Нобелівська премія 1983 р.*). У 1957 р. він довів, що синтез важких елементів відбувається внаслідок захоплення вільних нейтронів унаслідок *s* або *r* процесів.

Нагадаємо: ***s-процес*** (від англійського *slow* – повільний) – це процес повільного захоплення нейтронів у ядрах зір із  $M \geq 1,5M_{\odot}$  на пізньому етапі їхньої еволюції. Потрапляючи в ядро, нейтрон перетворюється в протон раніше, ніж це ядро захопить ще один нейтрон і стане стійким ізотопом. Так утворюються ядра все важчих (після заліза) хімічних елементів аж до вісмуту ( $^{209}\text{Bi}$ ). Джерелами вільних нейтронів є реакції типу  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{23}\text{Mg} + n$ ,  $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{31}\text{S} + n$ .

У свою чергу, ***r-процес*** (від слова *rapid* – швидкий) – це процес захоплення нейтронів атомними ядрами, який відбувається у надрах Наднової під час спалаху упродовж усього близько 100 с, тоді саме утворюються ядра елементів з атомною масою до  $A \approx 270$  (зокрема урану і торію).

За рахунок *s*-процесів утворюються "надлишки" ядер поблизу атомних мас  $A \approx 86, 130$  і  $196$ , за рахунок *r*-процесів – при  $A \approx 90, 140$  і  $210$ .

Згодом (1965 р.) **У.Фаулер** здійснив детальний аналіз задачі про формування ядер  $\text{He}^4$ ,  $\text{He}^3$  і  $\text{D}$  упродовж перших трьох хвилин розширення Всесвіту.

.... «Історія існування будь-якої зорі – це справді титанічна боротьба між силою гравітації, яка намагається її необмежено стиснути, і силою газового тиску, котра прагне її «розпорошити», розсіяти в навколишньому міжзоряному просторі. Багато мільйонів і мільйонів років триває та «боротьба». Протягом цих дивовижно великих строків сили рівні. Та врешті-решт... перемога буде за гравітацією.».

Цими словами **Й.С.Шкловський** чітко охарактеризував причину, яка призводить до утворення білих карликів, нейтронних зір або ж чорних дір.

Важливою тут стала праця **Субраманьяна Чандрасекара** (інд./ам., 1910 – 1995). Він (1935 р.) розробив теорію

внутрішньої будови зір білих карликів (БК), встановив *верхню, критичну межу маси БК*:  $M_{\text{кр}} = 1,2 M_{\text{с}}$  при радіусі  $R = 0,01R_{\text{с}}$ , як також залежність радіуса від маси БК. Також дослідив фізичний стан речовини у надрах БК: вона є електронно-ядерною плазмою, При цьому йдеться про вироджений електронний газ, тиск якого і забезпечує рівновагу зорі.

Згодом (разом із **Маріо Шонбергом**) він виявив критичне значення маси ізотермічного ядра зорі (*межа Шонберга-Чандрасекара- ШЧ*), при досягненні якої ядерні джерела її енергії концентруються у тонкому сферичному шарі між ізотермічним ядром і зовнішньою оболонкою (це стало основою моделей зір червоних гігантів).

Межа *ШЧ* визначає особливості спалахів Наднових типу Ia (*SN Ia*), про що вже згадано на с. 35 і 53. Визначальним є те, що ці *SN* «калібровані» за величиною своєї маси *межею ШЧ*, тому і величина звільненої внаслідок вибуху енергії також «калібрована», *відома для спостерігача*. Тож *SN Ia* можуть відігравати роль «*стандартної свічки*», тобто бути використаними для визначення відстаней до далеких галактик.

Як зазначено, рівновага зорі може «забезпечуватися» тиском «звичного нам *ідеального* газу (звичайні зорі) чи тиском *виродженого електронного* газу. Цим другим і визначається структура білих карликів.

У 1934 р., відділивши Наднові зорі від Нових, **Вальтер Бааде** (1893 – 1960) і **Фріц Цвіккі** (1898 – 1974) висловили припущення, за яким внаслідок спалаху Наднової утворюється *надщільна* вироджена зоря, що складається з нейтронів. Отже, встановлено: є «третій варіант» - *нейтронні зорі*, маси яких не можуть перевищувати  $3M_{\text{с}}$ , орієнтовні радіуси – 12 км і густина співмірна з густиною атомного ядра ( $10^{14}$  г/см<sup>3</sup>), їхня рівновага забезпечується тиском виродженого газу нейтронів. І виявляють вони себе як *пульсари*. За їх відкриття **Ентоні Хюїш** (англ., 1924 р.н.) отримав *Нобелівську Премію 1974 р.*

Тоді ж, у 1968 р., англійський астроном **Томас Голд** і висловив твердження (тепер загальноприйняте), що *пульсари* – це *нейтронні зорі*, які дуже швидко обертаються навколо своїх

осей. Вони мають надпотужні магнітні поля, осі яких не співпадають з осями обертання. У такій моделі інтервал між імпульсами відповідає періодові обертання нейтронної зорі навколо своєї осі – це так звана *модель маяка*. Спостерігач зауважує сигнал лише в момент, коли вузький пучок енергії від гарячої плями, що є над магнітним полюсом, спрямований на нього.

Уже відомо близько 900 пульсарів. Періоди  $P$  більшості з них близькі до 0,75 с. У першого з відкритих  $P = 1,337301101$  с.

Невдовзі (1974 р.) американські вчені **Джеф Тейлор** мол. (1941 р.н.) і **Рассел Халс** (1950 р. н.) на 305-м РТ в Аресібо виявили «тип пульсарів, завдяки яким з'явилися нові можливості у вивченні гравітації». (*Ноб. Пр. 1993 р.*) Першим тут був подвійний радіопульсар PSR 1913+16 (в сузір'ї Орла), який став «справжньою лабораторією з дослідження релятивістських ефектів». Цей об'єкт складається з двох нейтронних зір, одна з яких і є пульсаром. Орбітальний період пульсара 6,75 год., ексцентриситет орбіти 0,6, орбітальна швидкість 200 км/с, період пульсації 0,059 с оцінено з точністю 15 знаків після коми. Обертання великої осі  $4,2266^\circ/\text{рік}$  – у 36000 разів більше, ніж зміщення перигелію Меркурія. Це дало змогу оцінити сумарну масу системи:  $M = 2,8275 M_\odot$ . За встановленим гравітаційним червоним зміщенням оцінено масу самого пульсара –  $1,4411 M_\odot$ .

Після 15-річних спостережень пульсара PSR 1913+16 можна було впевнено сказати: *непряме підтвердження існування гравітаційних хвиль уже є*. Як виявилось, період обертання пульсара навколо центра мас системи зменшується, а це значить, що пульсар PSR 1913+16 втрачає свою орбітальну енергію, тобто що обидві зорі поступово зближуються, рухаючись по спіралях. Інакше кажучи, пульсар проходить через периастр із випередженням (рис. 9). Як уже було згадано, теорія передбачила тут зменшення орбітального періоду на 75,8 мкс, а спостереження дали значення 76,3 мкс /рік. Аналогічно досліджують ще близько десяти таких же систем. В

усіх випадках зменшення періоду практично збігається з передбаченнями ЗТВ.

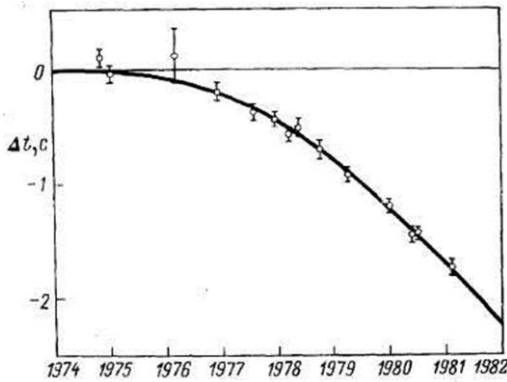


Рис. 9. Випередження в проходженні пульсара PSR 1913+16 через периастр порівняно з обчисленим, що відповідає сталому періоду обертання системи навколо центра мас

### Космічно-космологічний коктейль

Коктейль - хмільний напій із суміші усіляких наливок і соків. Для аматора ж астрономії кожна обговорювана тут *космофізична* тема п'янить - від передчуття нових проривів у незвідані космічні далі.

Ось перша «із цього циклу»: **Нобелівську Премію 1970 р.** отримав **Ганнес Альвен** (шв., 1908 – 1995) «за внесок і фундаментальні відкриття у магнітній гідродинаміці та плідні застосування у різних галузях фізики плазми» - формулювання Комітету, який саме нею визнав, що «астрофізики таки її варті». У 1937 р. Альвен висловив ідею про існування галактичного магнітного поля (що *не було тоді сприйняте...*), запропонував механізм прискорення космічних променів цими полями. У 1942 р. відкрив існування поперечних магнітогідродинамічних хвиль, які поширюються в плазмі уздовж магнітних силових ліній і швидкість яких визначається лише напруженістю магнітного поля та густиною плазми (їх згодом названо *альвенівськими*). Реальність їх зразу ж підтвердив Енріко Фермі. Поєднавши

гідродинаміку й електромагнітну теорію, Альвен розробив основоположні принципи *магнітогідродинаміки* - нової галузі науки, А ще – висловив свою гіпотезу походження Сонячної системи.

... У 1946 р. Гамов запропонував модель гарячого Всесвіту, але таку, в якій температура миттєво і різко зменшується – щоб не було стану рівноваги, щоб те, яке вже «склепалося», не мало змоги «розвалитися». Але ж у рівновазі «із тим сугубо матеріальним» були й кванти «світла», для них був «певний Планк» - розподіл енергії за частотами. І він оце внаслідок розширення «деформувався та зміщувався в бік усе довших хвиль», його ж максимум мав би бути десь у сантиметрових радіохвилях, що відповідало б температурі 5К.

І ось **А. Пензіас** та **Р. Вілсон** використали збудований у 1960 р. рупорний рефлектор – для прийому сигналів, відбитих від ШСЗ «Ехо», який після 1963 р. вже став непотрібним. Вони внесли зміни для роботи в радіодіапазоні (встановлено мікрохвильовий посилювач - рубіновий мазер біжучої хвилі, охолоджуваний до  $T < 4,2$  К, в розрахунку на прийом сигналів на довжині хвилі близько 7 см). Розроблено метод виділення «корисного» сигналу із шуму локальних джерел.

І - зареєстрували (передбачене Гамовим!) «надлишкове випромінювання» з ефективною температурою 3,5 К, яке надходило з усіх точок небесної сфери. Повідомлення про це у супроводі (скажемо так – цілком адекватної) інтерпретації теоретиків (Р. Дікке та ін..) опубліковане в одному і тому ж журналі. І це стало поштовхом до нових пошуків... Як тут не згадати: спочатку йшлося про вивчення розподілу дискретних джерел радіовипромінювання й дифузного газу в Молочному Шляху, а ще - «якогось там гало» навколо нашої Галактики! А – «розверзлася безодня»... За це й отримали Нобелівську Премію **1978 р.** Зразу підкреслено, що це – «одне із найважливіших відкриттів в історії світу, значний прорив у розумінні походження Всесвіту».

Відзначенням труднощі досліджень, але й тріумфу у цьому ж напрямку була і **Премія 2006 р.** - «за відкриття ... анізотропії

космічного мікрохвильового фонового випромінювання,... за роботу, що дозволяє прослідкувати розвиток Всесвіту і зрозуміти процес виникнення космосу, зір та галактик». Її отримали **Джон Мезер** (ам., 1946 р.н.) та **Джордж Смут** (ам., 1945 р.н.). Зразу ж прозвучало: «ще відкриття відкрило нову еру в космології, поклавши початок *перетворенню її з міфу та спекуляцій на повноцінний науковий* напрямок». А ще й таке: «реліктове радіовипромінювання може бути використане як могутній засіб для дослідження динаміки та геометрії Всесвіту». Як також «від **Стівена Хокінга**»: «Результати цих досліджень – це найважливіше відкриття століття, якщо не всіх часів». Бо... вони заглянули за 5-й знак після коми.

А з чого починалося у 1972 р.? На висотному літаку У-2, на аеростатах, на супутниках. Було понад 120 проектів, була група близько 1000 чоловік. Задумано: винести телескоп за межі атмосфери за допомогою КА «Шатл» у 1988 р. («на переконування у доцільності таких досліджень було затрачено шість років»). Але після катастрофи «Челенджера» (28.01.1986 р.) пішла мова про запуск телескопа за допомогою ракети Дельта. Отже – три подальші роки затрачено на зменшення параметрів супутника COBE (Cosmic Background Explorer Satellite) до розмірів: діаметр 2,5 м, довжина 5,5 м, маса – 2,5 т. Запуск проведено 18.11.1989 р. на висоту 900 км – двох детекторів, охолоджуваних рідким гелієм до 2К. Після опрацювання результатів – доповідь 23.04.1992 р. про виявлені *флуктуації* реліктового радіовипромінювання. Тоді Дж. Смут сказав: «Це як для віруючої людини побачити обличчя Бога».

Вище вже згадано про Наднові типу Ia, світності яких у максимумі блиску «калібровані», тобто фактично однакові завдяки «межі Чандрасекара» для їхньої маси:  $L = 4 \cdot 10^9 L_{\odot}$ . Однак відстань до зорі наперед не відома, її можна визначити лише за швидкістю зменшення її блиску: чим повільніше він зменшується, тим яскравішою була зоря у максимумі (це виявив Марк Філіпс). Це і дає змогу врешті-решт визначити відстань до конкретної Надгової у тій чи іншій галактиці.

У травні 1998 р. відбулася знаменна астрономічна конференція, де було розглянуто особливості розширення Всесвіту. Заслухано результати, отримані двома групами (керівник першої **С. Перлмуттер**, другої **А. Рісс** у співавторстві з **Б.Шмідтом**), перша з них опрацювала дані спостережень 35 Наднових типу Ia, друга - 42-х. Незалежно було проведено співставлення видимих зоряних величин і червоних зміщень цих Наднових. І - висновок: ***почавши від червоних зміщень  $z = 0,5$  розширення є прискореним!*** Це відкриття започаткувало нову революцію в космології.

Так постало питання: а що ж є причиною цього «додаткового розтягування» простору? Поки що висновок такий: очевидно, ***так виявляє себе вакуум***, дія якого все ще слабо усвідомлювана. Важливим стало те, що цей ефект можна було оцінити/встановити *кількісно* за допомогою супутників типу COBE, в подальшому - WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2001 р.) і «Планк», 2009 р.

Важливу і, мабуть, достовірну гіпотезу щодо «перших мікросекунд розвитку Всесвіту висловив Ераст **Глінер** (1923 р.н., Росія/США): спочатку у Всесвіті був вакуум, з якого ***породжувалася речовина, що розширювалася під дією антигравітації вакууму***. Так виникло спостережуване космологічне розширення».

Залишається додати: на підставі даних супутників COBE, WMAP і «Планк» отримано такі результати щодо структури нашого Всесвіту. Найбільш адекватною, що узгоджується з результатами спостережень, виявляється така добірка параметрів «нашого Всесвіту»: звичної для нас баріонної речовини – 5% (з цього щоправда ***лише 0,5% «світної»***), темної матерії (невідомої все ще природи) – 25%, «темної енергії» – 70%, стала Габбла  $H = 68 \pm 9$  км/с/Мпк, реалізовується модель евклідового простору ( $\kappa = 1$ ).

А ще – Нобеліант **Пітер Гігс** висловився так: «Хоч я і невіруючий, скажу: немає суперечностей між Богом-Творцем і тим, що вже відкрито нами у Всесвіті, цілком можливе бути релігійною людиною і вченим водночас».



## Що може геометрія

У Передмові до 3-го тому своєї «Історії фізики» (1971 р.) відомий російський вчений (історик фізики і техніки) проф. **П.С.Кудрявцев** (1904 – 1975) зазначив таке: «Викласти історію фізики ХХ століття – задача непосильна для однієї людини. Фізика наших днів розрослася й ускладнилася так, що слідкувати навіть за розвитком вузької її галузі стає важкою справою. Спеціалісти ж, які працюють у різних напрямках, часто не розуміють один одного...

Згодом російський фізик-Нобеліант (2003 р.) **В.Л. Гінзбург** (1916–2009) «про це ж» написав так: «У наші дні передній фронт фізики... відділений від людини із середньою освітою .. широкою смугою, замінованою величезним фактичним матеріалом і математичними формулами... На здолання цієї смуги потрібно роки праці навіть для людей із великими здібностями»...

Інший же видатний російський учений (також Нобеліант, 1975 р.) **А.Д.Сахаров** (1921–1989) записав у своєму щоденнику: «Я поставив свою задачею вивчити теорію струн і суміжні теорії, а також вивчити теоретичні праці на стику космології і фізики високих енергій. Я не дуже надіюся на особистий творчий успіх., але розуміти суть того, що, можливо, є черговою революцією у фізиці, – повинен прагнути!!!». А через декілька місяців він записав таке: «У грудні 1985 – травні 1986 р. я посилено займався цим; на жаль, наявність серйозних прогалин у моїх знаннях перешкодила мені досягнути бажаної мети»...

Йдеться про те, що творці сучасної фізики (і космофізики), в намаганні розкрити величні Таємниці мікро- і мегасвіту, «продираються через такі хащі математичних конструкцій, що мало хто, крім них самих, це в змозі збагнути»...

«На превелике щастя» (можна й без лапок) для майбутніх ентузіастів такі ж допитливі вже розробили певні математичні прийоми, знайомство з якими може бути дуже корисним. Їх і подаємо нижче. Почнемо з простого, колись - найважливішого.

Величним (!) прикладом корисності математики у з'ясуванні таємниць Світобудови були геометричні конструкції в моделюванні рухів планет. Особливо те, як Ньютону вдалося встановити закон всесвітнього тяжіння «усього лише з аналізу подібності трикутників». З цього тут і почнемо.

Як відомо, Ньютон був одним із творців нового математичного методу — диференціального й інтегрального числення. Проте у своїй праці «Математичні основи природознавства» (1687 р.), де було сформульовано закон все-світнього тяжіння, він уникає застосування цих методів, а кожне своє твердження чи теорему обґрунтовує за допомогою геометричних прийомів. Тому читати книжку Ньютона дуже важко. Звичною ж для нас мовою диференціального та інтегрального числення результати Ньютона були викладені петербурзьким академіком Леонардом Ейлером (1707—1783) у книжці «Механіка» (1736 р.).

Своїми «Основами» Ньютон заклав фундамент небесної механіки, довів правильність геліоцентричної системи світу. Тут ми простежимо, як, виходячи із законів Кеплера, шляхом певних геометричних побудов Ньютон встановив закон всесвітнього тяжіння і як з нього, у свою чергу, вивів закони руху планет.

Отож спочатку Ньютон доводить тезу («Твердження VI» його праці): «Якщо тіло  $P$  (рис.10), обертаючись навколо центра  $S$ , описує криву  $APQ$  і пряма  $ZPR$  дотикається до цієї кривої в точці  $P$  і якщо з якої-небудь точки  $Q$  цієї кривої, дуже близької до  $P$ , проводиться пряма  $QR$ , паралельна  $SP$ , і на  $SP$  опускається перпендикуляр  $QT$ , то доцентрова сила буде обернено пропорційна граничній величині, до якої наближається вираз  $\frac{SP^2 \cdot QT^2}{QR}$ , коли точки  $P$  і  $Q$  зливаються між собою».

Справді, якби на тіло не діяла доцентрова сила, то воно рухалося б по прямій  $PR$ . Нехай тепер  $g$  — прискорення доцентрової сили,  $\tau$  — малий відрізок часу, за який тіло пройшло шлях  $PQ$ . Величину відрізка  $QR$  неважко знайти за

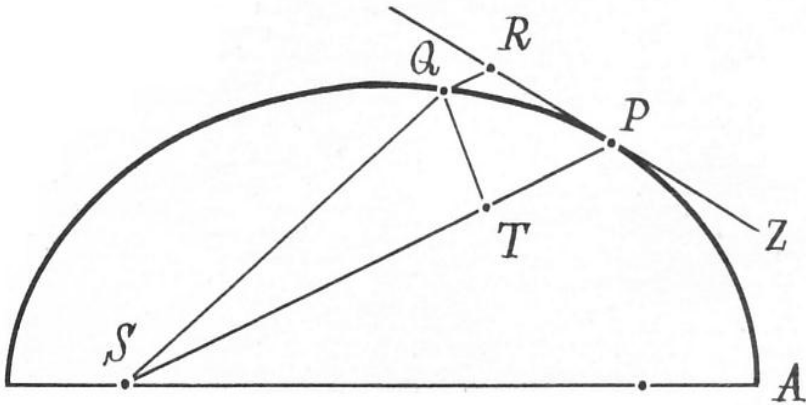


Рис 10. До задачі про величину доцентрової сили

відомою формулою для рівномірно прискореного руху:  
 $QR = \frac{g\tau^2}{2}$ . Позначимо тепер через  $C$  (відповідно до другого закону Кеплера) подвоєну площу, яку описує радіус-вектор  $SP$  за одиницю часу. Тоді маємо, що  $C\tau = SP \cdot QT$ , або

$$\tau = \frac{SP \cdot QT}{C}.$$

Так знаходимо, що сила, яка діє на одиницю маси тіла  $P$ , дорівнює

$$g = 2C^2 : \frac{SP^2 \cdot QT^2}{QR}.$$

На основі останнього співвідношення Ньютон і встановлює закон всесвітнього тяжіння. Ось його міркування («Твердження XI»): «Тіло обертається по еліпсу; треба знайти закон доцентрової сили, направленої до фокуса еліпса.

Нехай  $S$  є фокусом еліпса (рис. 11). Проводимо  $SP$ , яка перетинає діаметр  $DK$  в точці  $E$  і ординату  $QV$  у точці  $x$  та



При суміщенні точок  $Q$  і  $P$  матимемо  $Qx = Qv$  і, отже, в границі буде

$$Qx^2 : QT^2 = Qv^2 : QT^2 = EP^2 : PF^2 = \\ = AC^2 : PF^2 = CD^2 : CB^2,$$

[оскільки «Всі паралелограми, побудовані на спряжених діаметрах заданого еліпса або гіперболи, рівні між собою за площею»]. Отже,

$$Qv^2 : QT^2 = AC^2 : PF^2 = CD^2 : CB^2. \quad (4)$$

Після перемноження пропорцій (1), (2), (3) і (4) матимемо

$$L \cdot QR : QT^2 = 2PC : Gv.$$

Отже в границі, якщо суміщаються точки  $Q$  і  $P$ , дістанемо

$$L \cdot QR = QT^2. \quad (5)$$

Помноживши обидві частини цієї рівності на  $\frac{SP^2}{QR}$  матимемо

$$\frac{SP^2 \cdot QT^2}{QR} = L \cdot SP^2. \quad (6)$$

Отже, доцентрова сила обернено пропорційна  $L \cdot SP^2$ . Тобто, ця сила обернено пропорційна квадратові відстані від фокуса до орбіти, по якій рухається тіло.

Ньютон доводить, що й у випадку руху тіла по гіперболічній орбіті доцентрова сила також обернено пропорційна квадратові його відстані до фокуса цієї кривої.

Далі («Твердження XVII») Ньютон розв'язує і зворотню задачу: «Поклавши, що доцентрова сила обернено пропорційна квадратам відстаней місць до центра і що абсолютна величина цієї сили відома, необхідно знайти криву, яку опише тіло, що виходить із заданого місця із заданою швидкістю». Відповідь – «шукана крива буде еліпсом, ... параболою ... або гіперболою» (див. нашу кн. «Астрономія вчора й сьогодні», К., Наукова думка, 1976 р., с. 137 – 138).

Так і було встановлено один з фундаментальних законів світобудови.

«Оглядаючись назад», зазначимо:

У випадку колової орбіти **закон всесвітнього тяжіння можна отримати з третього закону Кеплера** шляхом таких елементарних міркувань. Під час руху матеріальної частинки

(планети), що має масу  $m$ , із швидкістю  $v$  по колу радіусом  $r$  навколо «силового центра» (Сонця) на неї діє відцентрова сила

$$F_B = \frac{mv^2}{r}.$$

Цю формулу опублікував у 1673 р. Христіан **Гюйгенс**. Отже, з того часу наведені нижче міркування вже були можливі.

Очевидно, що сила  $F_B$  зрівноважується певною доцентровою силою  $F_g$ , залежність якої від відстані  $r$  поки що нам невідома.

Прийmemo до уваги, що коли  $T$  — період обертання тіла (планети), то його колова швидкість  $v = \frac{2\pi r}{T}$ . З третього закону Кеплера

$\frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{a_2^3}{a_1^3}$  випливає, що  $\frac{T_2^2}{a_2^3} = \frac{T_1^2}{a_1^3}$ . Отже, для кожної з планет  $\frac{T^2}{a^3} =$

$\text{const} = A$  і  $T^2 = Aa^3$ . Замінивши  $a$  на  $r$ , знаходимо, що  $v^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{Ar^3} = \frac{4\pi^2}{Ar}$ .

Для сили  $F_g$  знаходимо вираз  $F_g = \frac{4\pi^2 m}{Ar^2}$ : сила обернено пропорційна квадрату відстані до силового центра — Сонця.

«Що і треба було довести»... Можна б лише поставити питання: чому це Ньютон описав встановлений ним закон всесвітнього тяжіння (1687 р.) вкрай нелегким для сприймання порівнянням сторін подібних трикутників. Адже він розробив основи диференціального та інтегрального числення! Є думка: мовляв, лише у такому вигляді ідеї Ньютона могли зрозуміти його сучасники. У звичній же для нас формі цю задачу виклав Л.Ейлер у книжці «Механіка» (1736 р.).

Мабуть доречною буде і така рефлексія як щодо «математики», так і «фізики». Отже, незалежно від Ньютона, **Г.В.Лейбніц** у 1684 р. опублікував основи диференціального, у 1686 р. — інтегрального числення. Цікавим є і те, що закон всесвітнього тяжіння елементарно випливає зі встановленого у 1673 р. **Х.Гюйгенсом** співвідношення для відцентрової сили в поєднанні з третім законом Кеплера та величиною колової швидкості. А про те, що сила тяжіння обернено пропорційна квадрату відстані, говорили **Й.Кеплер**, француз **І.Буйо** (1645 р.), а ще **Р.Гук** у двох листах до Ньютона (другий у 1680 р.). І все ж цілком беззаперечним є те, що саме Ньютону належить

визнання. Адже він *розв'язав пряму і обернену задачу*: довів залежність сили тяжіння від відстані, але і те, що коли ця сила саме така, то «матеріальна точка» може рухатися по еліптичній орбіті, параболічній та гіперболічній - залежно від початкової умови.

Поборовшись з рецензентами й редакторами, автор все ж давав усю цю математику для аналізу у шкільних фізичних та астрономічних гуртках (див. «Астрономія вчора й сьогодні», 1976 р.; «Нариси з історії астрономії», 1987 р.).

### **Оцінка температури в центрі Сонця**

На початку ХХ ст. одному з астрономів для такої оцінки потрібний був ледве не цілий рік (бо ж оскільки тиск, температура і густина речовини від поверхні зорі до її центра зростають, доводилося «просуватися вперед» невеличкими кроками). Проблема ж була «нагальна». Адже уявлення, за яким зорі світяться завдяки гравітаційному стисканню, виявилось не завжди придатним: час такого процесу був украй малим. І тоді вже зформувалася думка, що ця енергія могла б звільнитися в надрах зорі завдяки перебігу реакцій синтезу складніших хімічних елементів, якщо температура там досягає достатніх для цього значень.

Тож – якими є температури в центрі Сонця та інших зір?

Як виявляється, її можна визначити «до смішного швидко й просто» ... Слід лише *у рівнянні гідростатичної рівноваги відношення приростів величин замінити різницею значень «зверху і в центрі», для інших же величин, що входять у задачу, узяти їх середні значення.*

Але насамперед необхідно констатувати, що Сонце й інші зорі протягом мільярдів років перебувають у стані механічної рівноваги. Це означає, що на будь-якій відстані  $r$  від центра зорі сила тяжіння, спрямована до центра, зрівноважена тиском, величина якого зростає у напрямі до центра зорі.

Розглянемо елемент газу на відстані  $r$  від центра зорі. Нехай густина газу  $\rho$ , висота стовпчика  $dr = r_2 - r_1$ , площа його поперечного перерізу  $S$ . Тоді маса вибраного елемента

$m = Sdr\rho$ . Відповідно до закону всесвітнього тяжіння цей елемент маси притягується усією масою зорі  $\mathcal{M}(r)$ , яка міститься всередині сфери радіуса  $r$ , із силою

$$f = \frac{G\mathcal{M}(r)m}{r^2} = \frac{G\mathcal{M}(r)}{a^2} \rho Sdr \quad (1)$$

Коли б сила притягання нічим не зрівноважувалася, то виділений нами елемент маси вільно падав би до центра зорі.

Час падіння можна оцінити за формулою:  $t_2 = \sqrt{\frac{2R}{g}}$ .

Прийнявши за довжину шляху радіус зорі  $R$  і взявши до уваги, що прискорення сили тяжіння  $g = \frac{GM}{R^2}$ , знаходимо час падіння речовини до центра зорі – так званий **гідродинамічний час**:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2R}{g}} = \sqrt{\frac{2R^3}{GM}} \quad (2)$$

Неважко переконатися, що для Сонця  $t_2 \approx 3000$  с.

Зорі перебувають у рівновазі мільйони років. Отже, зоря, і Сонце зокрема, існує у стійкому стані тому, що з глибиною (у напрямі до центра) температура  $T$  і густина  $\rho$ , а відповідно і тиск  $p$ , зростають. Пригадаємо, що для ідеального газу ці параметри

пов'язані співвідношенням  $p = \frac{B}{\mu} \rho T$ . Тут  $B$  - газова стала

(фізики використовують літеру  $R$ , однак «для нас» це радіус зорі),  $\mu$  – молярна маса. Для “типового” хімічного складу зоряних атмосфер (близько 67 % за масою водню і 31 % гелію), у тому числі й сонячної,  $\mu=0,6$ .

На відстані  $r_1$  і  $r_2$  від центра зорі тиск відповідно дорівнює  $p_1$  і  $p_2$ , причому приріст тиску  $dp = p_1 - p_2 > 0$ . Саме ця різниця тисків і зрівноважує силу тяжіння згаданого елемента газу. Таким чином, умова рівноваги запишеться так:

$$dpS = -f, \text{ або } \frac{dp}{dr} = -\frac{G\mathcal{M}(r)}{r^2} \rho. \quad (3)$$



Це рівняння є одним з найважливіших у теорії внутрішньої будови зір. За його допомогою оцінюють температуру в надрах тієї чи іншої зорі.

І тут використаємо таку *хитрість*. Будемо вважати, в першому наближенні, що зоря однорідна, тобто густина в ній не змінюється з відстанню від центра. Відношення приростів величин  $dp$  і  $dr$ , які входять у формулу (3), замінимо різницями їх значень на поверхні зорі (тут  $p = 0$ ,  $r = R$ ) та в її центрі ( $p = p_c$ ,  $r = 0$ ):  $dp \rightarrow 0 - p_c = -p_c$ ,  $dr \rightarrow R$ .

Врахуємо, що  $\mathcal{M}(r) \rightarrow \mathcal{M}$ , якщо  $r \rightarrow R$ . Тоді матимемо:

$$\frac{p_c}{R} = \frac{G\mathcal{M}}{R^2} \rho. \quad (4)$$

Оскільки при  $\rho = const$ ,  $p_c = \frac{B}{\mu} \rho T_c$ , то з цих двох останніх співвідношень знаходимо, що

$$T_c = \frac{\mu G \mathcal{M}}{B R}. \quad (5)$$

Підставляючи значення відповідних величин для Сонця:  $\mu = 0,6$ ,  $M_\odot = 2 \cdot 10^{30}$  кг,  $R_\odot = 6,95 \cdot 10^8$  м, а також сталих  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ ,  $B = 8,31 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})$ , знаходимо, що **температура в центрі однорідного за густиною Сонця становила б  $T_c = 14 \cdot 10^6 \text{ К}$ . Точні обрахунки за допомогою сучасних ЕОМ дають практично те саме значення!** Це приклад того, як шляхом наближених оцінок можна дістати досить вірогідне значення певного фізичного параметра.

При стискуванні зорі половина гравітаційної енергії витрачається на розігрівання її надр. Ця обставина також дає змогу оцінити температуру зоряної речовини. Пригадаємо, що середня енергія однієї частинки  $\varepsilon = \frac{3}{2} kT$ , де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{К}$  - стала Больцмана. Якщо маса зорі рівна  $\mathcal{M}$ , а середня маса частинки  $m$ , то зоря складається  $\mathcal{M}/m$  частинок. Їх повна теплова енергія

$$E = -\frac{3}{2} \frac{\mathcal{M}}{m} kT. \quad (6)$$

Половина потенціальної енергії зорі – це  $\frac{1}{2}U = -\frac{3}{4} \frac{GM^2}{R}$ .

Порівнюючи ці дві величини ( $E = \frac{1}{2}U$ ), знаходимо середнє значення температури речовини зорі:

$$T = \frac{Gm\mathcal{M}}{2kR}. \quad (7)$$

Покладемо, що Сонце зформувалося з чистого водню. Тоді маса частинки  $m_H = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг. Підставляючи у формулу (50) числові значення всіх параметрів, знаходимо, що  $T = 11 \cdot 10^6$  К.

Як бачимо, температура в надрах зір сягає значення мільйонів градусів, що цілком достатнє для звільнення енергії внаслідок реакцій синтезу хімічних елементів.

#### IV. ЧУДО-ТЕОРІЯ РОЗМІРНОСТЕЙ

З початком ХХ ст. стало очевидним, що надійним інструментом, зокрема, у космічній газовій динаміці є аналіз розмірностей фізичних величин, які є визначальними при розгляді тої чи іншої задачі. Ось, зокрема, що написав академік **С.І.Вавилов** у передмові до 1-го російськомовного видання (1934 р.) книги П.У.Бріджмена (згодом лауреата Нобелівської премії з фізики - 1946 р.): «Вчення про розмірності фізичних величин давно увійшло як обов'язковий розділ у підручники вищої школи. Недостатність і недовомленість більшості таких викладів загальновідомі. Прийнято розглядати розмірності лише як зручний метод для переходу від одної системи одиниць до іншої... Тим часом у «приватному порядку» фізики широко користуються аналізом розмірностей в якості простого рекогносційовочного теоретичного прийому, що дозволяє передбачити розв'язок складної задачі за винятком певного сталого множника. В руках таких досвідчених дослідників, як

Релей, Джинс, Едінгтон та інші цей метод приводив до дуже цікавих результатів».

Доречно тут пригадати думку видатного вченого і педагога Джона Уїлера (вчителя Річарда Фейнмана), що отримала назву «правило Уїлера»: *«Ніколи не починай обчислень, доки не знаєш відповіді... Роби припущення швидко, інтуїтивно. Вдалі припущення укріплюють цю інтуїцію. Помилкові припущення дають корисну встряску».*

Вивченням властивостей небесних тіл, міжпланетного, міжзоряного і міжгалактичного середовища на основі знань про найголовніші фізичні та хімічні властивості матерії займається *астрофізика*. Вона встановлює певні співвідношення між окремими параметрами зір і туманностей. Результати знаходять шляхом розв'язування (за допомогою ЕОМ) систем складних диференціальних рівнянь. Проте загальні співвідношення між згаданими параметрами можна дістати саме на підставі теорії розмірностей. Деякі з таких задач космічної фізики ми і розглянемо тут. Але передусім – про середовище та рухи в ньому.

## Про термодинаміку й газодинаміку

В курсі «Загальна астрономія», і в окремих спецкурсах ведемо мову про рухи і зміни параметрів газового середовища. Тож передусім пригадаємо, що голландське *gaz* фактично походить від грецького «хаос» - безформний стан. Малось на увазі агрегатний (від латинського «зібраний») стан, в якому частинки слабко пов'язані між собою силами взаємодії, а їх кінетична енергія більша за потенціальну.

Першою характеристикою атмосфери Землі, оболонки зорі чи міжзоряного середовища є *концентрація частинок в одиниці об'єму  $n$* . Далі - це хімічний склад і відповідна йому *молярна маса  $\mu$* . Для нейтрального водню  $\mu = 1$ , іонізованого -  $\mu = 1/2$  (електрон у встановленні рівноважного стану відіграє таку ж роль, як і протон). Також це *густина  $\rho$* , що для чисто водневого середовища визначається як  $\rho = nm_H$  ( $m_H$ - маса атома водню).

Далі, незалежним параметром, яким описується стан системи частинок, є виміряна за шкалою Кельвіна **температура**  $T$ . В поєднанні  $\rho$  і  $T$  визначаємо **тиск**  $p$  за формулою Клапейрона - Менделєєва

$$p = \frac{B}{\mu} \rho T, \quad (1)$$

де  $B = 8,31$  Дж/моль.К - універсальна газова стала,  $\mu$ -**молярна маса**. У випадку хімічно однорідної речовини  $\mu = \frac{M}{\nu}$ , де  $M$ - маса,  $\nu$ -кількість молів цієї речовини. Кількість однакових частинок, що містяться в одному їхньому молі, звать **сталю** (числом) **Авогадро** ( $N_A = 8,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>).

Як знаємо, газ, в якому сили міжмолекулярної взаємодії відсутні, звать **ідеальним** газом. Одною із важливих його характеристик є **внутрішня енергія**  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = c_v T, \quad (2)$$

де  $c_v$ - **питома теплоємність**, визначена при сталому об'ємі  $V$ . Тепловою функцією, або **ентропією**,  $\omega$  звать функцію стану термодинамічної системи, що дорівнює сумі їх внутрішньої енергії і добутку тиску на об'єм системи

$$\omega = \varepsilon + pV = c_p T, \quad (3)$$

тут  $c_p$ - теплоємність при сталому тиску. Величини  $c_p$  і  $c_v$  пов'язані **співвідношенням Майєра**  $c_p - c_v = B$ . Вводиться також показник адіабати  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ , так що

$$c_v = \frac{B}{(\gamma-1)}, c_p = \frac{\gamma B}{(\gamma-1)}.$$

Параметри  $c_p$  і  $c_v$  визначаються через ступені свободи  $i$ :  $c_v = \frac{i}{2}B$ ,  $c_p = \frac{i+2}{2}B$ . Для одноатомного газу  $i = 3$ , так що  $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{5}{3}$ , для двоатомного  $i = 5$  і  $\gamma = \frac{7}{5}$ , для триатомного (і більше)  $i = 6$ ,  $\gamma = \frac{4}{3}$ .

Зміна стану системи описується *першим законом термодинаміки*

$$\delta Q = d\varepsilon + \delta A = c_V T + p dV: \quad (4)$$

кількість теплоти  $\delta Q$ , наданої системі, витрачається на зміну її внутрішньої енергії  $d\varepsilon$  і на виконання системою роботи  $\delta A$  проти зовнішніх сил. Якщо між системою і навколишніми тілами обміну тепловою енергією немає ( $\delta Q = 0$ ), то процес є *адіабатним*. Тоді із співвідношення

$$c_V dT + p dV = 0 \quad (5)$$

отримаємо, використавши (1),

$$\frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0,$$

так що

$$PV^\gamma = const. \quad (6)$$

Це - *рівняння Пуасона*.

Записаний вище *перший закон* термодинаміки (4) не вказує і не дає змоги передбачити, в якому напрямку буде перетікати енергія. Про це говорить її *другий закон*: у всіх явищах природи тепло само собою передається від тіл із вищою температурою до тіл, де вона менша.

Для цього процесу введено поняття ентропії  $s$ : *ентропія* -це функція стану системи, диференціал якої в оборотному процесі дорівнює відношенню нескінченно малої кількості теплоти, наданої системі, до температури цієї системи:

$$ds = \frac{dQ}{T}. \quad (7)$$

Отже, при переході системи зі стану 1 у стан 2 ентропія змінюється на величину

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Всі реальні процеси необоротні, тому ентропія  $s$  ізольованої системи може лише зростати.

Статистичне формулювання другого закону термодинаміки дав **Л. Больцман**: у кожній ізольованій системі відбуваються

такі зміни, які приводять систему до її найбільш імовірного стану.

Атмосфера Землі, структура зір, зокрема Сонця, їх зовнішніх шарів є неоднорідними, хоча й перебувають вони у стаціонарному стані. Визначальною тут є *масштабна висота*  $H$  (висота однорідної атмосфери, її виводять з рівняння гідростатичної рівноваги зорі), так що густина  $\rho$  зі зростанням відстані  $h$  від певного рівня (для Землі - від її поверхні) змінюється за законом

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{gh}{a^2}} = \rho_0 e^{-\frac{h}{H}}, \quad (8)$$

тут  $g$ -прискорення сили тяжіння,  $a$ -швидкість звуку. Отже,  $H = a^2/g$ . Біля поверхні Землі це 8,5 км. Але, оскільки температура повітря з висотою змінюється, то насправді тут  $H = 6 - 15$  км, а при  $h > 150$  км параметр  $H$  ще більший. Для сонячної фотосфери  $H \approx 200$  км.

### **Суть теорії розмірностей. Пі-теорема**

**Основні визначення теорії розмірностей, складені Дж.**

**Уїлером**, такі:

«1. Вираження одиниць вимірювання довільної фізичної величини через одиниці вимірювання величин, прийнятих за основу, зветься розмірністю.

2. Розмірність будь-якої фізичної величини може бути лише добутком піднесених до степеня величин, прийнятих за основні.

3. Розмірності обох частин рівності, що виражає певну фізичну закономірність, повинні бути однакові.

4. Безрозмірні комплекси розмірних величин, що являють собою добуток різних степенів цих величин, зветься критеріями подібності, їх зазвичай позначають як  $\Pi = \text{idem}$ ».

**П-теорему** формулюють так. Нехай певна задача описується  $n$  параметрами  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , розмірності яких  $[A_1], [A_2], \dots, [A_n]$ . І якщо з них  $t$  параметрів мають *незалежні* розмірності (наприклад, маса зорі  $[M] = \text{кг}$ , її розміри  $[R] = \text{м}$ ) то за П-теоремою *зі згаданих  $n$  параметрів можна скласти*

$K = n - m$  безрозмірних величин (“комплексів”), кожен з яких - з точністю до сталого коефіцієнта - визначає певний закон природи.

## Деякі найпростіші задачі

### а). Період коливання маятника

Розглянемо, як методом теорії розмірностей можна дістати відому формулу для періоду коливання математичного маятника. Тут визначальними параметрами є період  $P$ , довжина маятника  $l$  і прискорення сили тяжіння  $g$  (отже,  $n = 3$ ). Їхні розмірності такі:  $[P]=T$ ,  $[l]=L$  і  $[g]=L/T^2$ . Параметрів із незалежними розмірностями два ( $m = 2$ ). Таким чином, матимемо один безрозмірний комплекс  $\Pi = Pl^x g^y$ , або

$$\Pi = TL^x \left( \frac{L}{T^2} \right)^y = T^{1-2y} L^{x+y}. \quad (9)$$

Відповідна система алгебраїчних рівнянь така:

$$\begin{cases} 1 - 2y = 0 \\ x + y = 0. \end{cases}$$

$$\text{Звідси } x = -\frac{1}{2}, \quad y = \frac{1}{2}.$$

Отже, безрозмірний комплекс набуває вигляду:  $\Pi = Pl^{-1/2} g^{1/2}$ , що дає таку формулу для періоду  $P$ :

$$P = \Pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (10)$$

Цікаво, що коли підставити в цю формулу замість прискорення  $g$  його значення, записане через масу і радіус зорі  $g = \frac{GM}{R^2}$ , а замість довжини маятника  $l$  — радіус зорі  $R$ , то дістанемо формулу (2) для періоду пульсації зорі. Фізична суть обох явищ – пульсації зорі й коливання маятника – одна і та

сама. Це – механічні рухи у полі тяжіння, обумовлені невеликими відхиленнями від положення рівноваги.

### **б). Проблеми пульсації зір**

Теорія пульсацій зір – один із найскладніших розділів астрофізики. В її основі лежать записані у диференціальній формі закони збереження імпульсу та енергії. Завданням теорії пульсацій є вивчення розподілу амплітуди коливань від центра зорі до її поверхні, узгодження отриманих результатів зі спостереженнями, а головне – пояснення самого *механізму* пульсацій.

Отже, тут – дві проблеми: є рух як газодинамічне явище і є причина ритмічного його повторювання. В намаганні збагнути суть і масштаби прийнято уявляти сферичну зорю маятником: вона ритмічно розширюється і стискається ( легко допустити, що амплітуди зміщень найбільші в поверхневих шарах зорі).

Серед близько 30000 зір, яскравість (світність) яких з часом в той чи інший спосіб змінюється, виділяють довгоперіодичні цефеїди. У нашій Галактиці їх виявлено майже 1000, ще десятки – в інших, близьких галактиках. Періоди зміни їх блиску є в межах від 1 до 130 діб при амплітудах від  $0,06$  до  $1,5^m$  (зміна блиску зоряної величини  $m$  на 1 відповідає зміні потоку енергії у 2,5 раза). Ритмічні ж зміщення ліній у спектрах цих зір то в червоний, то в синій бік свідчать про розширення і стиск поверхневих шарів зір.

Для їх типового представника – зорі  $\delta$  Цефея встановлено такі параметри: її середній радіус  $R = 42R_{\odot}$ , відхилення від цього середнього значення,  $\Delta R \approx 2R_{\odot}$ , тобто відносне зміщення фотосферного шару  $\Delta R/R \approx 0,05$ . Зоря змінює свій блиск від  $3,48^m$  до  $4,37^m$  (тобто у 2,5 раза) з періодом у 5,366 доби.

Поєднання ж фотометричних спостережень зі спектрами (зміни яскравості зорі упродовж кожних 5,4 доби зі зміщеннями ліній в її спектрі) привело до висновку: найбільшою є яскравість зорі тоді, коли речовина її оболонки рухається з найбільшою швидкістю в бік спостерігача, у мінімумі ж блиску є найбільша



швидкість стискання, тоді то радіус зорі близький до свого середнього значення.

Тут використаємо теорію розмірностей для визначення періоду  $P$  пульсації зорі масою  $M$  і радіусом  $R$ . Очевидно, що процес пульсації зумовлений тяжінням зорі і визначається величиною її маси  $M$ , радіусом  $R$ , сталою  $G$ . Запишемо розмірності згаданих величин:

$$[P]=T; \quad [M]=M, \quad [R]=L; \quad [G]=\frac{L^3}{MT^2}.$$

Параметрів у задачі всього чотири ( $n = 4$ ), з них четвертий є конкретною комбінацією розмірностей, якими характеризуються перші три. Тому в задачу входять три параметри з незалежними розмірностями ( $n = 3$ ), і відповідно до  $\Pi$ -теорема з параметрів  $P$ ,  $M$ ,  $R$  і  $G$  можна скласти один безрозмірний комплекс:  $\Pi = PG^x R^y M^z$  (не порушуючи загальності, ми поклали, що показник степеня при  $P$  дорівнює одиниці).

Запишемо комплекс через розмірності кожного з параметрів:

$$\Pi = T \left( \frac{L^3}{MT^2} \right)^x L^y M^z = T^{1-2x} L^{3x+y} M^{z-x}. \quad (11)$$

Так дістаємо систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} 1 - 2x = 0 \\ 3x + y = 0 \\ z - x = 0 \end{cases}$$

та їх розв'язки  $x = z = 1/2$ ,  $y = -3/2$ .

Шукане співвідношення для періоду пульсації  $P$ :

$$P = \Pi (GM)^{-1/2} R^{3/2} = \Pi \left( \frac{R^3}{GM} \right)^{1/2} \quad (12)$$

Оскільки  $\frac{M}{4/3\pi R^3} = \bar{\rho}$  (середня густина зорі), то це співвідношення можна переписати ще й так:

$$P\sqrt{\bar{\rho}} = \frac{\Pi}{\sqrt{\frac{4\pi}{3}G}} = \text{const.} \quad (13)$$

А це добре відоме в астрофізиці співвідношення “період - середня густина”, яке і виконується для всіх пульсуючих зір.

Пульсуючу зорю можна розглядати як своєрідний сферичний маятник, який ритмічно з періодом  $P$  розширюється і стискується.

Числове значення константи  $\Pi$  є все ж неоднаковим для різних типів пульсуючих зір. Головне, однак, у встановленні наведеного тут, і спільного для всіх випадків, співвідношення між параметрами  $P$  і  $\bar{\rho}$ .

Для однорідної кулі стала  $\Pi = 0,14$ , якщо  $P$  виміряно в добах, а  $\bar{\rho}$  у  $\text{г/см}^3$ . Узагалі ж, як виявилось, вона залежить від структури зорі, а тому її числове значення при переході від цефеїд з  $P = 2$  доби до 70 діб зменшується майже удвічі. Якщо ж знехтувати цим уточненням, то з формули (2) при  $\Pi = 0,14$  отримаємо такі оцінки періодів пульсації. Для Сонця і подібних до нього зір  $\rho = 1,41\text{г/см}^3$ , тож  $P = 3$  год, для цефеїд  $\rho = 0,01\text{ г/см}^3$ ,  $P = 50$  діб, для лірид  $\rho = 10^{-8}\text{г/см}^3$ ,  $P = 1,4$  доби, для зір типу Міри Кита  $P = 1400$  діб.

Співпадання теоретичних значень періодів зі спостережуваними підтверджує механічну природу пульсацій зір. Однак, як показує аналіз, зоря, яку виведено зі стану рівноваги, припинила б свої коливання через декілька діб. Тим часом зорі пульсують (змінюючи свій блиск) упродовж сотень тисяч років. Очевидно, ці коливання підтримуються енергією, яка звільняється у глибоких надрах зір унаслідок термоядерних реакцій. Важче було пояснити інше: яким чином промениста енергія, що повільно просочується до поверхні зорі,

перетворюється в механічну. Цю проблему з'ясовано завдяки працям С.А. Жевакіна і Р. Крісті в 50-х роках ХХ ст.

### ***в) Гравітаційна нестійкість. Критерій Джинса***

За своєю глибинною суттю проблема гравітаційної нестійкості охоплює надзвичайно широкий діапазон явищ – від формування нашої планетної системи і аж до появи різних структур у Галактиці. Адже тут виділяють декілька їх окремих частин, тобто типів об'єктів у їх сукупності (кажуть типів населення). Беруть до уваги явний зв'язок сконденсованих форм речовини з її ж розпорошеним станом, тобто зір із різними типами туманностей. Такий підхід до проблеми є «зручнішим», оскільки йдеться про стійкість/нестійкість середовища, щодо якого можна застосувати уже добре відомі співвідношення для ідеального газу.

Отже, йдеться про еволюцію явища – росту збурення густини речовини під дією сили тяжіння. Це - питання про гравітаційну нестійкість - про утворення фрагментів газопилової хмари, в подальшому – формування з них зір. Таку задачу кількісно розглянув у 1902 р. англійський фізик та астроном Джеймс Джинс (1877-1946). Він довів, що безконечне однорідне середовище є нестійким відносно поздовжніх хвиль: при певній великій довжині хвилі стиск, розпочавшись, буде продовжуватися під дією гравітації. Інакше кажучи, якщо через певне середовище проходить звукова хвиля і тому в ньому виникають згущення та розрідження, то при деякій її довжині  $\lambda_1$  таке згущення стає зародком конденсації і далі вже притягує до себе навколишню речовину.

Справді, нехай  $\rho$  - густина середовища,  $T$  – температура,

$$a = \sqrt{\gamma \frac{B}{\mu} T} \text{ – відповідна їй швидкість звуку в цьому середовищі (} \gamma$$

– відношення питомих теплоємностей,  $B$  – універсальна газова стала,  $\mu$  – молекулярна маса). Джинс установив, що коли

довжина хвилі  $\lambda$  звукового збурення менша деякого критичного значення  $\lambda_j$ , причому ( $G$  – гравітаційна стала)

$$\lambda_j = \sqrt{\frac{\pi a^2}{G\rho}}, \quad (14)$$

то сили пружності (тиск газу) у змозі повернути частинки середовища до первісного стану. Якщо ж  $\lambda > \lambda_j$ , то згущення, яке виникло, стає зародком конденсації і далі вже притягує до себе навколишню речовину. Стискуючись, такий фрагмент хмари (його об'єм  $\lambda_j^3$ , маса  $\lambda_j^3\rho$ ) і стає протозорею, а пізніше — зорею у повному значенні цього слова.

Тож цю, ще й тепер актуальну проблему, доцільно розглянути у рамках теорії розмірностей. Тут задача про гравітаційну нестійкість туманності характеризується параметрами  $\lambda$ ,  $G$ ,  $\rho$ ,  $a$ , розмірності яких можна записати так:

$$[\lambda] = L; [G] = \frac{L^3}{MT^2}; [\rho] = \frac{M}{L^3}; [a] = \frac{L}{T}, \quad (15)$$

де  $L$  – розмірність довжини,  $T$  – часу,  $M$  – маси,  $a$  – швидкість звуку. З цих чотирьох параметрів задачі три мають незалежні розмірності. Тому, відповідно до П-теорема, з них можна скласти один безрозмірний комплекс:

$$\Pi = \lambda G^x \rho^y a^z,$$

де  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – шукані показники степенів. Підставляючи розмірності кожного з параметрів, запишемо це співвідношення так:

$$\Pi = L \cdot \frac{L^{3x}}{M^x T^{2x}} \cdot \frac{M^y}{L^{3y}} \cdot \frac{L^z}{T^z} = L^{1+3x-3y+z} M^{y-x} T^{-2x-z}. \quad (16)$$

Оскільки  $\Pi$  – величина безрозмірна, то, прирівнявши показники степенів до нуля, отримуємо систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} 1 + 3x - 3y + z = 0, \\ y = x, \\ z = -2x, \end{cases}$$

та їх розв'язки:

$$x = y = \frac{1}{2}; z = -1.$$

Отже, безрозмірний комплекс має вигляд

$$\Pi = \lambda(G\rho)^{1/2}a^{-1}.$$

Розв'язавши його відносно критичної довжини, знаходимо:

$$\lambda = \Pi \sqrt{\frac{a^2}{G\rho}}. \quad (17)$$

Таким чином, теорія розмірностей дає змогу отримати залежність між параметрами задачі - з точністю до множника, величина якого часто близька до одиниці.

Тут варто підкреслити, що величина  $\lambda$ , знайдена за формулою (3), може бути прийнятою за  $\lambda_j$ . Бо в комплексі (2) порівнюємо дві величини: гравітаційну енергію згустка  $U$  і його теплову енергію  $E$ . Оскільки маса згустка  $m \approx \lambda_j^3 \rho$ , то

потенціальна енергія  $U = \frac{GM}{\lambda_j} \approx G\rho\lambda_j^2$ . Зі свого боку, тепла

енергія в розрахунку на одиницю маси  $E \approx \frac{BT}{\mu} \approx a^2$ . Зіставивши

величини  $U$  і  $E$ , знаходимо, що

$$\lambda_j \approx \sqrt{\frac{a^2}{G\rho}}, \quad (18)$$

- здобутий раніше (з точністю до сталої величини) вираз (3).

Щоправда, при формуванні цієї задачі Джинс допустив певну некоректність. Адже нескінченне однорідне середовище може бути в початковий момент у статичній рівновазі лише у випадку, якщо його густина  $\rho = 0$ . Згодом було з'ясовано, що певні уточнення та зміни не вплинули істотно на отриманий Джинсом розв'язок. Детально це питання обговорене в монографії Я. Б. Зельдовича та І. Д. Новикова «Строение и эволюция Вселенной» (М., Наука, 1975, с. 272-279).

## г) Потенціальна енергія зорі

На окремих етапах розвитку зір певну роль відіграє таке джерело енергії, як їхнє гравітаційне стискування, що супроводжується звільненням потенціальної енергії. Залежність величини цієї енергії від параметрів зорі – маси  $\mathcal{M}$  та радіуса  $R$  можна знайти наближено.

Розділимо уявно зорю, що має масу  $\mathcal{M}$  і радіус  $R$ , на дві рівні частини. Знайдемо роботу, яку треба витратити на відокремлення двох половинок на відстань  $\Delta r$ . Відомо, що робота дорівнює добуткові сили на пройдений шлях:  $A = f\Delta r$ . Прийемо, що величина діючої сили дорівнює силі взаємного притягання, а її середнє значення на проміжку від  $R$  до  $2R$

$$f = \frac{G\mathcal{M}_1\mathcal{M}_2}{r^2} = \frac{4}{9} \cdot \frac{G\mathcal{M}_1\mathcal{M}_2}{R^2}.$$

Поклавши, що  $\Delta r = R$ ,  $\mathcal{M}_1 = \mathcal{M}_2 = \frac{\mathcal{M}}{2}$ , знаходимо

$$A = \frac{1}{9} \cdot \frac{G\mathcal{M}^2}{R}.$$

Проте це ще не вся робота, яку можна здійснити над половинками зорі. По-перше, їх можна розсунути на більшу відстань, як кажуть, “на нескінченність”. По-друге, кожному з цих половинок у свою чергу можна поділити пополам і також взаємно їх віддалити. Склавши всю виконану роботу над “розпоршенням” зорі, дістаємо формулу:

$$U \cong \frac{3}{2} \cdot \frac{G\mathcal{M}^2}{R} \quad (19)$$

Підставивши числові значення усіх величин, знаходимо, зокрема для Сонця,  $U = 6 \cdot 10^{41}$  Дж.

Під час стискування газової кулі (якщо тільки зорі утворюються з фрагментів газопилових хмар) маємо обернену картину: енергія не витрачається, а виділяється. І, як показує

аналіз, майже половина її при цьому йде на розігрівання зорі, друга половина висвічується.

А ось як можна знайти формулу для величини потенціальної енергії зорі за допомогою теорії розмірностей. Задача характеризується чотирма параметрами з розмірностями:

$$[U] = \frac{ML^2}{T^2}; \quad [G] = \frac{L^3}{MT^2}; \quad [M] = M \quad [R] = L,$$

так що лише три з них мають незалежні розмірності. Тому можна скласти один безрозмірний комплекс

$$\Pi = UG^x M^y R^z. \text{ Або}$$

$$\Pi = \frac{ML^2}{T^2} \left( \frac{L^3}{MT^2} \right)^x M^y L^z = M^{1-x+y} L^{3x+z+2} T^{-2x-2}. \quad (20)$$

Звідси дістаємо систему алгебраїчних рівнянь для визначення показників степенів

$$\begin{cases} 2x + 2 = 0, \\ 1 - x + y = 0, \\ 3x + z + 2 = 0 \end{cases}$$

та їх розв'язки  $x = -1, y = -2, z = 1$ .

Таким чином, безрозмірний комплекс має вигляд  $\Pi = UG^{-1}M^{-2}R$ . Розв'язавши його відносно потенціальної енергії, маємо:

$$U = \Pi \frac{GM^2}{R} \quad (21)$$

А це і є шукана формула з точністю до сталої  $\Pi \approx \frac{3}{2}$ .

а). Використаємо формулу (1) для  $U$ , щоб визначити, скільки речовини повинно випадати на Сонце щороку, щоб забезпечити його втрати енергії. Якщо світність Сонця  $L = 4 \cdot 10^{26}$  Дж, а в році налічується  $T = 3,16 \cdot 10^7$  с, то за рік

Сонце втратить енергію  $Q = LT$ . Приріст потенціальної енергії за рахунок випадання на Сонце речовини знаходимо диференціюванням виразу для  $U$  по  $\mathcal{M}$  при сталому значенні  $R$ :

$$dU = \frac{3GMd\mathcal{M}}{R}$$

Оскільки за умовою виконується рівність  $dU = Q$ , то

$$LT = \frac{3GMd\mathcal{M}}{R}$$

і приріст маси  $d\mathcal{M}$  визначається так:

$$dU = \frac{TLR}{3GM} \quad (22)$$

Підставляючи відомі величини у формулу ( $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ ,  $R = 7 \cdot 10^8 \text{ м}$ ,  $\mathcal{M} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ ), знаходимо, що  $d\mathcal{M} = 2,2 \cdot 10^{22} \text{ кг}$ , тобто 0,0034 маси Землі за рік, або одна маса Землі за кожні 294 роки.

б) А ось як змінювався б період обертання Землі навколо Сонця під час зростання його маси. Швидкість колового руху

Землі по орбіті радіуса  $a$  рівна  $v = \sqrt{\frac{GM}{a}}$ , а період її обертання

$$T = \frac{2\pi a}{v} = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}} = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{G}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mathcal{M}}} \quad (23)$$

Щоб знайти приріст періоду  $dT$ , формулу (23) необхідно продиференціювати по  $\mathcal{M}$ :

$$dT = -2\pi \sqrt{\frac{a^3}{G}} \cdot \frac{d\mathcal{M}}{2\sqrt{\mathcal{M}^3}} = -T \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{d\mathcal{M}}{\mathcal{M}} \quad (24)$$

що дає  $dT = -0,17c$  за рік. Оскільки половина звільненої енергії витрачається на розігрівання надр Сонця, то величини  $d\mathcal{M}$  і  $dT$  потрібно подвоїти.

Обчислимо, наскільки мав би зменшуватися радіус Сонця, щоб, як це твердив Гельмгольц, за рахунок цього ефекту



світність Сонця підтримувалася на сучасному рівні. Диференціюємо формулу (1) по  $R$ , вважаючи  $M$  сталим:

$$dU = \frac{3}{2} \frac{GM^2}{R^2} dR. \text{ Прирівнюючи цей приріст потенціальної енергії}$$

величині  $Q = LT$ , знаходимо, що  $LT = \frac{3}{2} \frac{GM^2}{R^2} dR$  і

$$dR = \frac{2LTR^2}{3GM^2} \quad (25)$$

Після підстановки числових значень маємо:  $dR = 15$  м. Оскільки, як уже згадувалося, половина звільненої енергії витрачається на розігрівання зорі, це число подвоюємо.

Такий проміжок часу прийнято називати **шкалою Гельмгольца**. Час начебто і не малий, але, ще в середині XIX століття палеонтологічні дані переконливо доводили, що насправді вік нашої планети (а отже і Сонця) набагато більший! Тому то астрономи і фізики і були змушені шукати (і знайти) нове джерело енергії - синтез в надрах зір ядер важчих хімічних елементів.

## 2. Стисло - про ударні хвилі

### А. «Зоряні» ударні хвилі.

На певному етапі еволюції зоря, маса якої  $M \geq 1,2M_{\odot}$ , практично раптово стискується (відбувається «вибух всередину» – *імплюзія*). При цьому наявні в її речовині електрони «втискуються» в ядра складніших елементів (проходить реакція  $p + e^{-} \rightarrow n + \nu$  – «нейтронізація» речовини), внаслідок чого атомні ядра розпадаються на окремі нейтрони. І коли маса залишка зорі – її ядра –  $M < 3M_{\odot}$ , то цей нейтронний газ здатний відновити рівновагу зорі, але вже при розмірах  $R \approx 10 - 20 \text{ км}$ .

Обчислимо насамперед величину потенціальної енергії  $\Delta U$ , яка звільняється при зменшенні розмірів зорі з масою  $M = 3M_{\odot}$  від  $R_1 \approx 1R$  до  $R_2 = 10\text{км}$ :

$$\Delta U = \frac{GM^2}{R_2} - \frac{GM^2}{R_1} \approx \frac{GM^2}{R_2}, \quad (27)$$

що дає величину енергії  $\Delta U \approx 3,2 \cdot 10^{47}$  Дж.

При спалаху Наднової оболонка, маса якої сягає величини  $m \approx M_{\odot}$ , розлітається в навколишній простір із швидкістю  $v \approx 10000$  км/с. Кінетична енергія цієї речовини

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ кг} \cdot \left(10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = 10^{44} \text{ Дж.}$$

Як бачимо, «коефіцієнт корисної дії» такого вибуху невеликий: в кінетичну енергію оболонки переходить усього близько 1 % звільненої енергії. Не менше 99 % її «викрадають» нейтрино, що виникають у центральних зонах зорі і, пронизуючи всю її товщу, виходять у міжзоряне середовище. І вже зовсім мала частка (близько 0,01 Е) висвічується, тобто поширюється у навколишньому просторі у вигляді квантів електромагнітного випромінювання.

Згаданий 1% енергії – це все ж велика її частина. Тому після спалаху зорі формується потужна **ударна хвиля**, яка й поширюється певний час (до затухання) у міжзоряному середовищі. Пригадаємо, що ударна хвиля виникає завжди, як тільки відбулося миттєве виділення значної кількості енергії. У місці вибуху температура і тиск газу раптово зростають. Нагрітий газ (його параметри позначають індексом «2») розширюється в бік холодного (тут параметри позначаються індексом «1»:  $T_1$ ,  $p_1$  і т. д.) із швидкістю, яка на початку може істотно перевищувати швидкість звуку  $a_1$ . Межа, яка розділяє два стани — нагрітий і холодний, зветься **фронтом ударної хвилі**, її швидкість позначимо через  $D$ . Отже,  $D > a_1$ .

При переході газу через фронт ударної хвилі виконуються закони збереження маси, імпульсу і енергії, з яких випливають

певні співвідношення для величин стрибків параметрів газу, які при  $D \gg a_1$  і  $\gamma=5/3$  (одноатомний газ) мають такий простий вигляд:

$$p_2 = \frac{3}{4} \rho_1 D^2; \quad \rho_2 = 4\rho_1; \quad T_2 = \frac{3\mu_2 D^2}{16B}. \quad (28)$$

Тут  $\mu_2$  – молекулярна маса за фронтом ударної хвилі,  $B$  – універсальна газова стала.

Так, якщо в атмосфері зорі чи в міжзоряному середовищі рухається ударна хвиля із швидкістю «всього» 100 км/с, то при  $\mu_2 = 0,5$  (іонізований водень) температура безпосередньо за фронтом хвилі зростає до величини  $T_2=110\ 000$  К. Якщо ж  $D = 1000$  км/с, то  $T_2 \approx 10^7$  К.

При спалахах Наднових швидкості речовини, що розлітається у навколишній простір, сягає значень 10 000 км/с. Це значить, що попереду самої речовини у міжзоряне середовище рухається ударна хвиля, яка і нагріває наявний там газ до високих температур. З часом цей газ поступово охолоджується: на місці спалаху зорі виникає потужне джерело як радіо-, так і (іноді) оптичного і навіть рентгенівського випромінювання.

Задачу, яка при цьому виникає, можна зформулювати так: знайти, за яким законом у міжзоряному середовищі (де густина  $\rho_1 \approx 2 \cdot 10^{-21}$  кг/м<sup>3</sup>) поширюється ударна хвиля? І яку відстань вона проходить там, тобто який об'єм буде охоплено цим збуренням?

Певну відповідь тут дають розв'язки, отримані ще 1944 р. Л. І. Седовим (СРСР) якраз на основі теорії розмірностей. Простежимо тут, з яких міркувань вони були отримані.

Нехай у певному середовищі з густиною  $\rho_1$  відбулося миттєве виділення енергії  $Q$ . Треба знайти, як із часом  $t$  змінюється радіус фронту ударної хвилі  $r$  та швидкість руху хвилі  $D = \frac{dr}{dt}$ . У випадку сильної ударної хвилі величиною

тиску  $p_1$  перед її фронтом можна знехтувати порівняно з тиском за фронтом.

Отже, задача описується чотирма такими параметрами:  $r$ ,  $t$ ,  $Q$  і  $\rho_1$ . Неважко переконатися, що три з них мають незалежні розмірності, бо

$$[r] = L; [t] = T; [\rho_1] = \frac{M}{L^3}; [Q] = \frac{ML^2}{T^2}.$$

З них і складаємо один безрозмірний комплекс

$$\Pi = rQ^x \rho_1^y t^z, \quad (29)$$

При  $\Pi \approx 1$ , що підтверджується зіставленнями зі спостереженнями, із співвідношення (29) і випливає закон руху сильної ударної хвилі в однорідному середовищі:

$$r = \left( \frac{Q}{\rho_1} \right)^{1/5} t^{2/5}. \quad (30)$$

Тоді швидкість фронту хвилі, у свою чергу, визначається, як

$$D = \frac{2}{5} \left( \frac{Q}{\rho_1} \right)^{1/5} t^{-3/5} = \frac{2}{5} \left( \frac{Q}{\rho_1} \right)^{1/2} r^{-3/2}. \quad (31)$$

Саме цей розв'язок і дав можливість оцінити, зокрема, вік залишків спалахів наднових зір. Наприклад, у сузір'ї Лебеда є відома волокноподібна туманність, радіус якої  $r = 20$  пк, а швидкість розширення  $v \approx 115$  км/с. Співставлення цих даних з розв'язками (30) і (31) приводить до висновку, що спалах Наднової тут відбувся близько 70 000 років тому.

## **Б. Сильні ударні хвилі в земній атмосфері**

Це, значною мірою, ідеалізована задача, бо реально густина середовища (та й інші параметри), змінюються від точки до точки, особливо з висотою над поверхнею планети. І все ж у "нульовому наближенні", при відносно невеликих масштабних вимірах можна розглядати задачу про рух ударних хвиль в *однорідному середовищі*.

Аналіз проблеми став особливо актуальним у процесі підготовки і підриву перших атомних бомб. І першим кроком

тут став метод теорії розмірностей, який був успішно використаний Л. Сєдовим (СРСР) ще в 1944 р.

**а) Сферична ударна хвиля.**

Розглянемо застосування згаданого методу, почавши від сферичного випадку. Одним із визначальних параметрів тут є  $Q$  – величина звільненої внаслідок вибуху енергії. Тож задача загалом характеризується чотирма параметрами:  $r$ ,  $t$ ,  $Q$ , і  $\rho_1$ . Їхні розмірності

$$[r] = L, [t] = T, [\rho_1] = M/L^3, [Q] = ML^2/T^2$$

Отже, можемо скласти один безрозмірний комплекс

$$\Pi = rQ^x \rho^y t^z. \tag{32}$$

Підставимо розмірності:

$$\Pi = L \left( ML^2/T^2 \right)^x \left( M/L^3 \right)^y T^z = L^{1+2x-3y} M^{x+y} T^{z-2x} \tag{33}$$

Так отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} 1 + 2x - 3y = 0, \\ x + y = 0, \\ z - 2x = 0, \end{cases} \tag{34}$$

з якої знаходимо:  $x = \frac{1}{5}$ ,  $y = \frac{1}{5}$ ,  $z = -\frac{2}{5}$ . Приймаємо  $\Pi = 1$ .

Таким чином закон руху сильної сферичної ударної хвилі, що рухається в однорідній атмосфері, записується так:

$$r = \left( \frac{Q}{\rho} \right)^{\frac{1}{5}} t^{\frac{2}{5}}. \tag{35}$$

А що  $D = \frac{dr}{dt}$ , то знаходимо і формулу для швидкості ударної хвилі

$$D = \frac{2}{5} \left( \frac{Q}{\rho} \right)^{\frac{1}{5}} t^{-\frac{3}{5}} = \frac{2}{5} \left( \frac{Q}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} r^{-\frac{3}{2}}. \tag{36}$$

Розв'язавши це рівняння відносно  $r$  і поклавши  $D \rightarrow a_1$ , оцінимо масштаб  $r_\phi$  зони, охопленої збуренням. Поділивши ж  $r_\phi$  на швидкість звуку  $a_1$ , знаходимо  $t$  – орієнтовний час розвитку події.

Конкретно, бомба, підірвана над Хіросімою, мала еквівалент 20000 т тротилу. Бомба у 100 Мт має потужність у  $z=5000$  разів більшу. Як згадано, радіус дії ударної хвилі  $r_*$  можна оцінити, підставивши в (36)  $D \approx a_1 = 330\text{м/с}$ , задане  $Q$  і  $\rho_1 = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{г/см}^3$ .

Для першої бомби знаходимо  $r_* = 1$  км, для 100-мегатонної  $r_*$  буде у  $\sqrt[3]{5000}$  разів більшим, тобто 17 км.

*Довідка:* 1кг тротилу =  $4,2 \cdot 10^6$  Дж = 1000 ккалорій.

Зі співвідношення (4) видно, що зміна з часом радіуса фронту  $r_\phi$  ударної хвилі визначається величиною енергії  $Q$ , яка звільнилася при вибуху. І – «гуляє розповідь про анекдотичний випадок», який трапився у США при випробуванні чи не першої атомної бомби. Маса її «заряду» була тоді ще великою таємницею(!). Однак один «допитливий з вулиці», якимось не то дізнався про час випробування чи усього лише вів пошук комети або лічив метеори і зробив декілька фотографій (з фіксацією моментів часу розвитку події). За формулою (4) він визначив «тротиловий еквівалент», про що й повідомив «зацікавленим». «Кажуть, шуму навколо цього було багато»...

### **б) Циліндричний випадок.**

Такий розвиток подій передбачає, що заряд підірвано вздовж осі  $z$  і до того ж у всіх точках одночасно. Розподіл заряду визначається концентрацією енергії в розрахунку на одиницю довжини

$$Q = \left(\frac{ML}{T^2}\right). \quad (37)$$

Тож безрозмірний комплекс матиме вигляд

$$\Pi = L \left(\frac{ML}{T^2}\right)^x \left(\frac{M}{L^3}\right)^y T^z = L^{1+x-3y} M^{x+y} T^{z-2x}, \quad (38)$$

звідки отримуємо рівняння для визначення показників степенів:

$$\begin{cases} 1 + 2x - 3y, \\ x + y = 0, \\ z - 2x = 0, \end{cases} \quad (39)$$

так що, поклавши  $\Pi = 1$ , маємо

$$r = \left(\frac{Q}{\rho}\right)^y t^{-z}, \text{ тобто } r = \left(\frac{Q}{\rho}\right)^{\frac{1}{4}} t^{\frac{1}{2}}. \quad (40)$$

Звідси знаходимо формулу для швидкості ударної хвилі  $D$ :

$$D = \frac{dr}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{Q}{\rho}\right)^{1/2} \frac{1}{r}. \quad (41)$$

У цьому випадку енергія витрачається на нагрівання газу і надання йому імпульсу значно "економніше", тому й залежність  $D$  від  $r$  істотно послаблена.

#### ***в) Плоский випадок.***

Тут енергія розподілена у площині і при складанні безрозмірного комплексу беремо до уваги, що розмірність  $[Q_n] = \text{Дж/см}^2$ , тобто  $[Q_n] = \frac{M}{T^2}$

Складаємо безрозмірний комплекс

$$\Pi = L \left(\frac{M^2}{T^2}\right)^x \left(\frac{M}{L^3}\right)^y T^z, \text{ так що}$$

$$\Pi = L^{1+2x-3y} M^{x+y} T^{z-2x}. \quad (42)$$

Підставивши знайдені показники степенів, отримуємо

$$r = \left(\frac{Q_n}{\rho}\right)^{\frac{1}{3}} t^{\frac{2}{3}}; \quad D = \frac{dr}{dt} = \frac{2}{3} \left(\frac{Q_n}{\rho}\right)^{\frac{1}{3}} t^{-\frac{1}{3}}; \quad D = \frac{2}{3} \left(\frac{Q_n}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{r}}. \quad (43)$$

Усі такі задачі сьогодні розв'язують за допомогою ЕОМ. Наведені тут розв'язки адекватно описують розвиток подій, доки  $D$  істотно перевищує  $a_1$ .

**На** початку ХХ ст. стало очевидним: якщо гравітаційне стискування зорі і є джерелом висвічуваної енергії, то це – в масштабах мільйонів років. Відкрите ж дещо раніше явище радіоактивного розпаду наштовхувало на думку, що вік окремих «складових Світобудови» (Сонця зокрема) в сотні-тисячі разів більший. І отже, необхідно «шукати» якісь інші джерела енергії!

## **V. Життя: проблема біохімічна і математична**

Представники двох природничих наук – астрономії і біології, розширюючи межі своїх досліджень “у просторі й часі”, хоч-не-хоч змушенні “зазирати в огород сусіда”. З одного боку, *біолог*, аналізуючи висновки щодо зміни форм життя на Землі упродовж сотень мільйонів років, стикається з питанням про роль у цьому хімічного складу земної атмосфери, фізичних умов на поверхні планети, коливань клімату в цілому. А ще - влітання в земну атмосферу метеорних тіл і навіть спалахів, у близькому сусідстві із Сонцем, Наднових зір. Свідомо чи несвідомо, біолог приймає до уваги: все живе на планеті, та й ми зокрема, “збудовані із попелу давно згаслих зір”...

Зі свого боку, *астроном* дуже часто зобов'язаний відповідати на питання “чи є біля інших зір такі ж планетні системи?”, а якщо так, то «чи є життя за межами Землі?». Отже, він повинен мати уявлення про найголовніші характеристики живого, про сучасні погляди на проблему появи життя на Землі. А воно ж – вражає своїм розмаїттям. Адже у наш час на Землі налічено близько 600 тисяч видів рослин і близько 1,5 млн. видів тварин, з них понад 1 млн. – це різні види комах.

### **Цеглинки світобудови живого**

Сто років тому характеризували життя як спосіб існування білкових речовин. Із середини ж ХХ ст. центр уваги зміщено на нуклеїнової кислоти, зокрема на ДНК – дезоксирибонуклеїнову кислоту. Адже в ній закодовано інформацію і про “будівельні матеріали” (білки), з яких будується живий організм (це досліджено вже досить детально), і про загальний архітектурний план будови (де і як це записано, – дотепер ще не з'ясовано!).



“Основною цеглиною” будови живого організму, як відомо, є клітина. З одного боку, це – хіміко-біологічна лабораторія, де безперервно відбуваються десятки тисяч реакцій, в яких приймають участь майже 100 000 молекул різних ферментів (білків). Та куди важливішим виявилось наголосити інше: *клітина, точніше її молекула ДНК, – це дивовижний сховок інформації*, опис якої складає велику бібліотеку! Образно кажуть, що клітина – це своєрідне видавництво, де відбувається неперервне розмноження і редагування складних текстів, їх переклад з однієї мови на іншу і передача цієї інформації “у різні інстанції”. У клітині зберігаються повні і конкретні дані про ту чи іншу живу істоту, про її загальний вигляд, про будову її окремих органів та про всі системи життєзабезпечення: яким має бути скелет в організмі, які м’язи, якими (скажімо конкретно – для людини) повинні бути властивості шкіри (щоб захищати тіло від бактерій, виділяти піт, здійснювати поверхневе дихання та як “самолікуватися” при її пошкодженні!), яким (до тонкощів) мають бути будова і принцип роботи серця, легень, печінки і т.д., як буде збудоване вухо чи око і де ці органи мають бути розміщені, щоб це і для організму було зручно, і щоб збоку виглядало гарно! І, якщо це стосується людини, то також і її здатність писати драми і сонети, малювати картини, вивчати навколишній Всесвіт і будувати космічні кораблі!

Отже йдеться про фантастичну кількість інформації, зконцентровану у малесенькій краплині речовини, інформації, закодованій у певній молекулі, і то так, що там же є механізм і засоби її відчитування, декодування та реалізації. Питання, отже, в тому, чи здатна нежива матерія шляхом самоорганізації утворювати певні складні молекулярні структури, окремі компоненти якої стикалися між собою у потрібних концентраціях? Щоб ця сліпа і темна стихія дала їм те, чого не має сама, - осмисленість та інформацію. Це питання якраз з’ясовує математика, зокрема – теорія імовірності як галузь математики, що займається пошуком

відповідей на питання типу: можна чи ні очікувати позитивний результат при повторенні певних дій.

Далі переконаємося в тому, що якби Природа “всліпу” перебирала всі можливі варіанти, то для побудови не те що усього “Космосу живих форм”, а лише однієї його “цеглини” – клітини – не вистачило б речовини, наявної у всьому “Великому Космосі зір і галактик”.

Передусім констатуємо декілька вже з’ясованих чисел. У тілі людини налічують близько  $10^{27}$  атомів. Людина – це чітка допасованість 100 видів клітин, і загальне їх число сягає  $10^{16}$ . У клітині  $10^{12} - 10^{14}$  атомів, в молекулі ДНК їх близько  $10^{10}$ .

Ще таке. Близько 0,5% клітин щодоби “виходять з ужитку”- демонтують самі себе, а це – 300 млрд. Як зазначив **Д. Раваліко** у книжці “Сотворення – не казка” (1984), “якщо їх вкласти одна за одною, то вийде намисто довжиною 3000 км”.

В якості “будівельного матеріалу” для білків використовується 20 амінокислот (АК) хоча в природі їх є 200. Синтез одної молекули білка триває 3-4 секунди, так що наявні в людському організмі 17 кг білка поновлюються за 80 діб. Як кажуть, за своє життя людина оновлює увесь свій білок близько 200 разів (річ ясна, навіть не усвідомлюючи цього).

Зазираючи ж у “сучасну” клітину, визнаємо: білок із 100 АК – “не для нас”. При середній молекулярній масі одної АК  $\mu \approx 15$  отримуємо молекулярну масу такого білка усього 1500. Тим часом нижньою межею цієї характеристики вважається сполука з  $\mu \approx 6000$ , тоді як верхня сягає 2 000 000.

Цілу низку питань, що стосується “Космосу живих форм”, вдало і доступно висвітлив Раваліко у згаданій книжці “Сотворення – не казка”. У ній, зокрема, читаємо (с. 28): “Людське тіло, складене з 60 тисяч мільярдів живих клітин, з яких кожна є казково складна, – це одна жива галактика. Вона може себе розбудовувати, розпочинаючи з одної лише клітини, на основі програми того всього, що має бути

виконане; воно записане на стрічках ДНК, зібраних в одному керівному центрі. Той центр дбає про всі “плани будови”, щоб розпланувати будову різних органів, щоб координувати їхню діяльність та вводити в дію всю оту біологічну систему”.

В іншому місці (с. 57) цей автор ставить дуже слушні питання: “Звідки така організованість взялася? Нині ми бачимо, що клітина сама себе розбудовує, використовуючи власні плани будови, власні технічні інформації та власну програму, яку записано на її стрічці ДНК. Звідки беруться оті “плани”, оті інформації, ота складна програма?... Невже можливо доказати, що цей твір надлюдської інтелігентності завдячується неінтелігентності, безглуздю сліпому випадку?”. І, нарешті, (с. 87): “Відкриття ДНК було дошкульним ударом для тих, які визнають матеріалістичний атеїзм... ДНК є вершиною див природи. Матеріалістичне пояснення про самочинне виникнення життя є вершиною людського безумства”.

Про що тут йдеться? А про те, що, обговорюючи фантастичну складність “Космосу живих форм” (зокрема – й окремої клітини), ми сьогодні усього лише з’ясовуємо дивовижну здатність клітини (живого організму в цілому) готувати, для себе ж, окремі “будівельні блоки” (типу “за ось цим рецептом, з цього місця в ДНК, виготовимо щєбінь”, “з цього – дерев’яну балку”). Однак ми все ще не маємо жодного уявлення про те, де і як записано “архітектурний план” організму (та й окремих його органів), не знаємо, як в окремій клітині (хоча в ній є всі хромосоми, вся ДНК) здійснюється установка на те, “ким їй, цій клітині бути”, “яке місце у цій світобудові зайняти”. Тобто, ми не знаємо, як тут здійснюється “блокування” одних “рецептів будівництва” і як “подається директива” на розбудову “саме цього і саме тут”!!!  
Це – **проблема формогенезу...**

Але навіть якщо в питанні формогенезу ніхто і нічого сьогодні сказати не може, то є інше – великі, справді космічні

числа у варіантах “монтажування” окремих блоків, необхідних для появи і подальшого самовідтворення конкретної клітини.

Краса троянди справді змушує поставити питання про Творця як джерело прекрасного. Але стократ дивніші, дивовижніші вияви Його мудрості ми «носимо з собою», в собі... Біологи це формулюють як проблему **12-ти систем організму та їх функцій**. З наявних в Інтернеті матеріалів дізнаємось: «Весь організм людини умовно поділений на системи органів, об'єднаних за принципом здійснюваної роботи, функції. Ці системи названо анатоμο-функціональними, їх в організмі людини дванадцять... Кожна система виконує ... певну функцію. Від якості її виконання залежить здоров'я людини в цілому. Якщо з якихось причин якась із систем ослаблена, то інші здатні перебрати частково на себе її функцію, допомогти їй відновитися» (!!)...

Ось перелік цих 12-ти систем: 1). Центральна нервова система (ЦНС). 2). Система органів дихання. 3). Система органів кровообігу. 4). С. органів кровотворення. 5). С. органів травлення – споживання, переробки, засвоєння й видалення продуктів життєдіяльності. 6). С. органів сечовиділення і шкіра – очистка організму. 7). Система репродуктивності – відтворення організму. 8). С. ендокринна - регуляції біоритму життя, основних процесів обміну речовин. 9). Кістково-м'язова С. – забезпечення структурності, функцій руху. 10). Лімфатична С. – здійснення очищення організму та знешкодження сторонніх факторів. 11). Імунна С. – забезпечення захисту організму від шкідливих і сторонніх факторів і 12). Периферійна нервова система – забезпечення перебігу процесів збудження і гальмування, передача команд ЦНС до робочих органів.

І кожен із органів людського тіла має дивовижно складну будову та й розміри, щоб належно «реалізувати» все те, до чого він призначений. Описане усе це в товстених монографіях та підручниках з анатомії, фізіології та психології людини. Окремо ж є ще й добірки книг про внутрішні хвороби й усілякі травматичні епізоди та як організм із ними бореться.

Нелегкою була б мова про те, наскільки жахає вся ця складність! Як і безнадійними були б розмірковування на тему «чи може сліпо-глухо-німа природа створити хоча б одну із перелічених тут систем»! І все ж, навіть не підозріваючи про масштаби цієї складності, вже сотні років тому філософи і природознавці намагалися дати певне пояснення, а частіше – поставити питання «як її пояснити?»

### **«Задача Шкловського»**

На думку багатьох фахівців життя найглибше можна збагнути і висловити лише засобами і мовою *кібернетики* – науки про загальні закони одержання, зберігання і перетворення інформації у складних керуючих системах. Найповніше ці ідеї висловив **Й.С.Шкловський** у книжці “Вселенная, жизнь, разум” (з 1962 по 1987 рр. її перевидано шість разів). Ось їх стислий переказ.

Як прості одноклітинні, так і найскладніші організми пристосовані, до виживання, незважаючи на те, що ззовні вони безперервно піддаються подразненням, з яких багато руйнівних. Кажемо: певна “керуюча система” організму отримує про них інформацію у формі закодованих сигналів, переробляє її, створює нову інформацію, яка спрямована на самозбереження (виживання), і посилає її назовні. А водночас і ту, і іншу вводить у “запам’ятовуючий пристрій” (в пам’ять), що дозволяє в подальшому співставляти “нове” зі “старим”. Матеріальними носіями, усієї цієї інформації є окремі молекули.

Тому російський вчений О.О.Ляпунов дав таке визначення: *життя – це високостійкий стан речовини, який використовує для вироблення зберігаючих реакцій інформацію, що кодується станом окремих молекул.*

Однак з досвіду знаємо, що будь-яке відхилення від рівноваги, яке можна розцінити як певний “запис інформації” з часом зникає. Так, принесений у кімнату нагрітий шматок металу охолоджується, а холодний нагрівається до температури навколишнього середовища (точніше це звучить

так: настає вирівнювання температури). Тому, щоб зберегти певний інформаційний сигнал, організм повинен протидіяти цим руйнівним процесам, затратити для цього певну енергію, яку він і отримує – ззовні завдяки обміну речовин.

Виходячи з цих міркувань, **Й.С.Шкловський** і підкреслив, що старі уявлення про життя неправильні, оскільки вони усього лише ототожнювали його з обміном речовин. А це нічого не давало, зокрема, для розуміння якісного стрибка від неживого до живого: «Запас інформації для забезпечення зберігаючих реакцій не може виникнути в організмі самовільно. Новий організм *отримує* її, як і першопочаткову керуючу систему, в *готовому вигляді*. Звідки? Від батьків... З гіпотезою Опаріна сьогодні погодитися важко. Достаток на Землі в минулому різноманітних складних “будівельних блоків” ще *не пояснює*, як виникла і стала функціонувати жива машина... Думати, що зовсім випадково, шляхом “перегрупування” окремих блоків – багатоатомних молекул може виникнути прадНК і погрібний для її функціонування комплекс білків-ферментів, – значить вірити в чудо. Імовірніше, що мавпа створить **66-й сонет Шекспіра**»:

Я кличу смерть – дивитися набридло  
На жебри і приниження чеснот,  
На безтурботне і вельможне бидло,  
На правоту, що їй затисли рот,  
На честь фальшиву, на дівочу вроду  
Поганьблену, на зраду в пишноті,  
На правду, що підлоті на догоду  
В бруд обертає почуття святі,  
І на мистецтво під п'ятою влади,  
І на талант під наглядом шпика,  
І на порядність, що безбожно краде,  
І на добро, що в зла за служника!  
Я від цього всього помер би нині.  
Та як тебе лишити в самотині?!

Цей текст цікавий, і то вже «від першої літери». Хоча б: чому Й.С.Шкловський узяв один із сонетів Шекспіра і – чому якраз 66-й сонет? Тут він - в перекладі Дмитра Павличка (є ще й інший, можливо, в окремих місцях - виразніший, переклад Дмитра Паламарчука):

Напевне, гортаючи сторінки згаданої (цікавої!!) книги Й.С.Шкловського, не один читач співставляв із текстом цього сонета тодішню (1962 р., як і до і після нього) навколишню дійсність... І міг здогадуватися: чи не тому його так і не обрали членом Академії наук. Бо ж «десь там мистецтво, а десь талант»....

### Математичний апарат

Отже, передусім, – про «математичний апарат», який використовується при обговоренні можливостей перебігу тих чи інших хімічних процесів, що мали б завершитися появою на Землі живих організмів.

Це - *перестановка  $P$ , розміщення  $A$ , комбінація  $C$ , число варіантів  $W$ , імовірність  $p$* . Йдеться про аналіз різних варіантів групування (поєднання) окремих елементів (атомів) у молекули чи певних молекулярних (“базових”) сполук у значно складніші структури. Формули тут запишемо, виходячи з найелементарніших розмірковувань.

А). **Перестановки.** Оцінимо передусім, скільки можливостей щодо взаємного розташування двох гостей (назвемо їх  $M$  і  $N$ ) має господар дому  $\Gamma$ , якщо біля столика є три крісла (позначимо їх 1, 2 і 3). Очевидно, є такі можливості:

- 1) господар займає крісло 1, гість  $M$  – крісло 2,  $N$  – крісло 3 (будемо надалі позначати це так:  $M \rightarrow 2, N \rightarrow 3$ ) або ж  $M \rightarrow 3, N \rightarrow 2$ . Тобто, узявши до уваги лише гостей, знаходимо число перестановок  $P = 2$ .
- 2) Господар займає крісло 2 ( $\Gamma \rightarrow 2$ ), тоді як  $M \rightarrow 1, N \rightarrow 3$  або навпаки,  $M \rightarrow 3, N \rightarrow 1$ . Нарешті,

3)  $\Gamma \rightarrow 3$ , тоді  $M \rightarrow 1$ ,  $N \rightarrow 2$  або  $M \rightarrow 2$ ,  $N \rightarrow 1$ . Загалом же, як бачимо, може реалізуватися шість варіантів.

Уточнимо сказане: мова тут йшла про **перестановки** об'єктів (елементів задачі). Якщо цих об'єктів  $n$ , то всі вони рівноправні і в кожному з варіантів розміщень певний об'єкт з'являється лише один раз. При довільному  $n$  формула для перестановок має вигляд:

$$P_n = n! \quad (1)$$

Де запис  $n!$  читають “ен факторіал”. Обчислення ж  $n!$  здійснюються за формулою

$$n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot (n-1) \cdot n.$$

Конкретно при  $n = 3$  маємо  $P_3 = 1 \times 2 \times 3 = 6$ ; якщо  $n = 4$ , то  $P_4 = 1 \times 2 \times 3 \times 4 = 24$ ;  $P_5 = 5! = 120$ . Далі, зокрема,

$$10! = 3\,628\,800 \approx 3,63 \cdot 10^6; \quad 100! \approx 9,54 \cdot 10^{157}.$$

Як бачимо, знаходження факторіалів чисел, більших від 10, – річ нелегка. На щастя, як це виявив шотландський математик **Джеймс Стерлінг** (1692–1770), при великих  $n$  факторіал  $n$  можна знайти (з незначною похибкою) за формулою

$$n! \approx \sqrt{2n\pi} n^n \cdot e^{-n} \approx 2,51 \sqrt{n} \left(\frac{n}{e}\right)^n. \quad (2)$$

Тут  $\pi = 3,142$ ,  $e = 2,718$ .

Запам'ятаймо: зі збільшенням кількості елементів задачі число перестановок різко зростає.

**Б). Розміщення і комбінації.** Формули для **розміщення** з  $n$  елементів по  $m$ , тобто  $A_n^m$ , і **комбінацій** (= сполучень) з  $n$  елементів по  $m$ , тобто  $C_n^m$ , мають відповідно вигляд

$$A_n^m = n! : (n - m)!, \quad (3)$$

$$C_n^m = n! : (n - m)! m! \quad (4)$$

Так що  $A_n^m = C_n^m P_m$ .



Як приклад, візьмемо випадок  $m=3$  при  $n=5$ . Тут  $C_5^3 = 10$ , а при  $P_3 = 3! = 6$  маємо  $A_5^3 = 60$ . Розглянемо уважніше ці числа, прийнявши в якості елементів п'ять літер – К, Л, М, Н і П. Десять різних сполучень по 3 такі: КЛМ, КЛН, КЛП, КМН, КМП, КНП, ЛМН, ЛМП, ЛНП і МНП. Зауважуємо, що кожну літеру при цьому використано шість разів, однак поєднання будь-яких трьох літер зустрічаємо лише один (!) раз. Оскільки ж, як продемонстровано вище, з трьох елементів можна скласти шість різних перестановок –  $P_3 = 6$ , то розміщень з п'яти елементів по три і буде 60:  $A_5^3 = 10 \times 6 = 60$ .

Прийmemo до уваги: **сполучення** засвідчують кількість випадків, в яких певний елемент бере участь у формуванні складнішої системи, **розміщення** враховують усі можливі варіанти положень цього елемента в групі. Однак в обох випадках цей елемент у конкретній групі не повторюється двічі або більше разів!

**В). Число варіантів.** Особливої уваги заслуговує питання про кількість можливих варіантів  $W$  і про формулу, за допомогою якої їх можна оцінювати. Для початку прийmemo, що в нас – дві літери: Л і М. Перебираючи клавіатуру машинки, можемо скласти таке: ЛЛ, ММ, ЛМ, МЛ, тобто чотири варіанти. Якщо літер три – Л, М і Н, але їх знову треба записати по дві, маємо: ЛЛ, ММ, НН, ЛМ, ЛН, МЛ, НЛ, МН і НМ – усього дев'ять. Узагальнюючи, скажемо: кожна така задача має дві незалежні характеристики:  $m$  – число літера в алфавіті (*у біології – загальне число атомів чи певних “базових сполук”*), як ось амінокислоти – АК, і  $N$  – кількість знаків у тексті – складових у молекулі, тобто повна кількість атомів чи тих же “базових сполук” у ній), завдяки яким і утворюється  $W$  варіантів. Тобто

$$W = m^N \quad (5)$$

Інакше кажучи, число літер множимо “на себе”  $N$  разів. У першому з наведених прикладів  $m=2$ , і  $N=2$ , тому  $W=2^2=4$ , в другому  $m=3$ ,  $N=2$  і  $W=2^3=8$ .

Г). **Імовірність.** За кількістю можливих варіантів  $W$ , які зокрема “всліпу” мала б перебрати природа для “монтування” складних блоків – важливих компонентів світу живих форм, імовірність події відповідно оцінюється як

$$p = \frac{1}{W}. \quad (6)$$

Тепер уже слід прийняти до уваги, що кожний з елементів (як ось літера К чи М і ін.) може бути використана всі  $m$  разів або ж  $m-1$ ,  $m-2$  і т.д., врешті-решт 0 разів.

Далі, річ ясна, надзвичайно важливою є оцінка кількості літер (атомів чи “базових сполук”)  $Z$ , використаних для перебору всіх варіантів. І, якщо процес перебігає зі швидкістю  $V$  (ударів по клавіатурі друкарської машини чи реакцій з’єднання атомів або сполук за секунду), можна оцінювати й час  $T$ , затрачений на “реалізацію проекту”.

Очевидно, що

$$Z = WN, \quad T = \frac{Z}{V} = \frac{WN}{V} \quad (7)$$

Приймаємо до уваги, що 1 рік = 32 000 000 секунд =  $3,2 \cdot 10^7$  с.

Пропонуємо Читачеві розглянути складніші, ніж було наведено, приклади. Ми ж з’ясуємо, скільки часу потрібно було б мавпочці, щоб, “барабанячи всліпу” зі швидкістю 10 ударів за секунду по клавіатурі україномовної машинки (в якій – 33 літери плюс інтервал, отже  $m=34$ ), щоб отримати тексти: 1). “Я вчуся”, 2). “Я вчуся читати”, 3). “Я вчуся читати і писати” і 4). “Я вчуся читати і писати у школі”.

Уточнюємо: у всіх випадках  $m=34$ . Далі:  $N_1=7$ ,  $N_2=14$ ,  $N_3=23$  і  $N_4=31$ . Використовуючи формули (6) і (7), знаходимо

$$\begin{aligned}
 W_1 &= 5 \cdot 10^7, & Z_1 &= 3,5 \cdot 10^8, & T_1 &= 10 \text{ років} \\
 W_2 &= 2,5 \cdot 10^{21}, & Z_2 &= 3,5 \cdot 10^{22}, & T_2 &= 10^{14} \text{ років} \\
 W_3 &= 1,6 \cdot 10^{35}, & Z_3 &= 3,6 \cdot 10^{36}, & T_3 &= 10^{28} \text{ років} \\
 W_4 &= 2,7 \cdot 10^{47}, & Z_4 &= 8,4 \cdot 10^{48}, & T_4 &= 3 \cdot 10^{47} \text{ років}
 \end{aligned}$$

(запис  $10^{14}$  відчитуємо так: одиниця і 14 нулів за нею).

Після всього цього вже маємо змогу оцінити зусилля мавпочки, яка, “виконуючи побажання Й.С. Шкловського”, “намагається створити” 66-й сонет Шекспіра. Тут  $N=490$  і при  $m=34$  знаходимо

$$W=5 \cdot 10^{749}, \quad Z=2,5 \cdot 10^{752}, \quad T=7,7 \cdot 10^{743} \text{ років.}$$

В англійській абетці 26 літер. Отже, при  $m=27$  і орієнтовно тому ж  $N=490$  (англомовного тексту “під руками” поки що не маємо) знаходимо:

$$W_a=5 \cdot 10^{700}, \quad Z_a=2,5 \cdot 10^{702}, \quad \text{і } T_a=7,7 \cdot 10^{694} \text{ років.}$$

Тож принагідно можемо іронізувати: україномовна мавпочка, щоб створити сонет Шекспіра, мала б трудитися у  $10^{49}$  разів довше, ніж англійська!

Нагадаємо: вік Всесвіту оцінюють в 15 млрд. років ( $1,5 \cdot 10^{10}$  років), а Землі утричі менше. Усього лише... Не встигла би бідолаха...

## Про кількість інформації

Для аналізу розглянутих вище задач використовують також поняття **кількість інформації**  $H$ . За одиницю виміру тут приймають **біт** (від англійського *binary digit* – двійкове число, що однозначно встановлює одну з двох можливостей: випаде “орел” чи “решка” при киданні монети). В загальному

$$H=3,32 \lg W \text{ біт.} \quad (8)$$

Встановлено, що людина здатна сприймати інформацію до 25 біт/с. А на одній сторінці наукової статті налічують декілька сотень біт інформації.

Ось дві ілюстрації на цю тему, запозичені з книги чеського вченого Вацлава **Крейчі** “Світ очима сучасної фізики” (М., Мир, 1984, с. 273). Розгадка того, яку з 32 карт виділив для себе гравець, містить 5 біт інформації. З’ясовуємо

це, здійснюючи послідовно поділ розкладеної в ряд колоди карт спочатку на “ліву” і “праву” половини і ставлячи питання “в котрій з них ця карта?”. Відповідь і дає один біт інформації. Далі цю половину ділимо знову навпіл, ставимо те ж питання, отримуючи 2-й біт. Після цього ділиться навпіл група з 8 карт, тоді з 4-х і, нарешті, з двох, цей останній 5-й поділ і визначає шукану карту.

А ось оцінка кількості інформації, що характеризує найпростіший живий організм. Якщо виключити воду (в організмі дорослої людини її 60%), то відносний вміст “найголовніших” 15-ти хімічних елементів у живій речовині такий: 50% вуглецю, 20% кисню, 14% – азоту, 8% – водню, 3% – фосфору. І ще 5% – це в сукупності кальцій, калій, хлор, магній, сірка, натрій, залізо, цинк, кобальт і марганець (всі інші для нижчих форм життя начебто “не обов’язкові”). Висушений найпримітивніший живий організм має об’єм  $10^{14}$  см<sup>3</sup>, один атом займає об’єм орієнтовно  $10^{-23}$  см<sup>3</sup>. “Отже цей організм складається з  $10^{-14} / 10^{-23} = 10^9$  “комірок”, в кожній з яких або є один атом, або ж вона порожня. І якщо імовірність усіх 16 можливостей однакова, то для “заселення” кожної комірки необхідно 4 біти інформації. Для побудови ж усього організму – гігантське число  $4 \cdot 10^9$  (тобто 4 млрд.) біт”.

**Оцінки Д. Раваліко.** У двох варіантах у згаданій вище книжці (с. 66 і 68) Д. Раваліко проводить обчислення формування молекул білка з 539 амінокислот і з’ясовує, що навіть часу 300 млрд. років є надто мало для реалізації цього процесу (покладає, що в кожному кубосантиметрі води океану з’єднується один мільйон протеїнів за секунду).

Доречно, однак, звернути увагу на деякі неточності цього тексту. Пов’язані вони з тим, що замість обчислень усіх можливих варіантів для випадку “текст складається з  $N$  літер при  $m$  літерах алфавіту” тобто за формулою (6), автор обчислює можливі перестановки за формулою (1). Цим, річ ясна, кількість варіантів може бути істотно зменшена. Бо ж насправді певна АК (з 20 можливих!) може бути

“вмонтована” двічі, тричі і т.д., тоді як інша – жодного разу. В іншому місці обчислено факторіал числа 539 – загальної кількості АК в молекулі, хоча знову ж таки йдеться про варіанти тексту з  $m = 20$  літер. Аналіз можливості “самомонтування” складних молекул, наявних у живій клітині, знаходимо і в статті російського вченого **Д.С.Чернавського** (журнал “Успехи физ. н.”, 2000 т.170, №2, с.161): «Припустимо, що в первинному гіперциклі механізм кодування був таким же, як і в сучасній біосфері, тобто містив понад 100 білків. Кожен з них складається з близько 100 амінокислот. Для їх кодування необхідна ДНК, що налічує 60 тисяч нуклеотидів. Якщо прийняти це..., то імовірність випадкового виникнення такої ДНК рівна

$$p = 4^{-60\,000} = 10^{-40\,000}.$$

Річ ясна, це абсурдно мала величина».

Появу тут числа 60 000 легко з’ясувати, розписавши його як  $100 \times 100 \times 6$ : для синтезу цих 100 білків по 100 АК потрібно всього 10 000 АК. А кожна з них на здвоєній (!) стрічці ДНК кодується “двічі” по три літери (бо ж напроти літери А завжди стоїть Т, літери Г – Ц, і навпаки).

Отже, хоча об’єктивно число  $10^{-40\,000}$  є справді малим, то лише залежно від того, “в якому ракурсі його розглядати”. Бо автори таких текстів “приховано” беруть найпростішу клітину, в яку згодом Природа за мільярди років мала б вносити певні ускладнення, збагачуючи “форму і зміст” життя.

**Загальне зауваження.** Повторимось: формальні обчислення з використанням, формул (1) – (8) можна проводити з двох точок зору: 1) задаючи середню швидкість “монтування” складної структури, обчислювати час, необхідний для одержання бажаної концентрації, і 2) розраховуючи всі можливі варіанти, визначати кількість необхідних атомів і порівнювати результат із загальною їх кількістю у Всесвіті, досяжному для спостережень.

Цей другий підхід є нагляднішим і переконливішим. Число атомів у доступному для спостережень Всесвіті (**число Едінгтона**)  $N \approx 10^{80}$  знайдене з елементарних міркувань: середня густина речовини  $\bar{\rho} \approx 10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>, радіус  $r_B \approx 10^{28}$  см, отже об'єм доступної для спостережень частини Всесвіту  $V_B \approx 10^{85}$  см<sup>3</sup> і маса, “охоплена” цим радіусом  $m_B = V_B \bar{\rho} = 10^{85} \times 10^{-29}$  г. =  $10^{56}$  г. Поділивши її на масу протона  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-24}$  г, і знаходимо вказане число  $N \approx 10^{80}$ .

Отже, якщо “монтується” усього лише одна молекула гемоглобіну з 539 амінокислот, а кожна в середньому складається з 13 – 20 атомів, і якщо всі можливі варіанти перебираються “всліпу”, то: у відповідності з формулами (6) і (7) кількість варіантів буде  $20^{539} \approx 2 \cdot 10^{701}$ .

На це піде  $Z=539 \times 2 \cdot 10^{701}$  амінокислот, або ж  $N = 10^{705}$  атомів. В доступному для спостережень Всесвіті, як уже згадано, їх усього  $10^{80}$ . Як бачимо, такі обчислення ведуть до важких розбіжностей між “наявністю” і “потребою”. У клітині ж білків десятки тисяч, і складових частин у деяких із них значно більше...

Висновок з усього, тут сказаного, може бути лише один: Природа не перебирає можливі варіанти, для цього в неї немає ні часу, ні ресурсів! Тому є всі підстави вести мову про строгу цілеспрямованість процесу формування складних хіміко-біологічних структур “від початку”!!

Тож не дивно, що в сучасному підручнику “Загальна біологія” для X – XI класів М.Є. Кучеренка та ін. (К., Генеза, 2000) прямо зазначено, що “питання про суть життя не вирішене і понині”.

### **Про онтологічне**

Наявність у навколишньому світі розмаїтого зла часто породжує розгубленість, навіть розпач... В такі моменти життя наче залишаємось «сам на сам із ворожим світом». І тоді

згадуємо дідів-батьків, як вони в такі ж хвилини шукали розраду й підтримку в молитві, покладали надію на Бога.

Два останні століття, здавалося б, «зробили все», щоб витравити з людських душ оту прадідівську віру в Творця, надію на Його підтримку. Тож «закономірним» **сьогодні** є те, що **людина**, значною мірою позбувшись «наївної просто віри», **хоче мати логічні докази існування об'єкта своєї віри**.

Зусилля «у цьому напрямі» розпочалися чи не три тисячі років тому. Було зформульовано декілька логічних доказів – *аргументів* щодо існування Творця навколишнього світу. Найвідоміші з них три – **космологічний, телеологічний та онтологічний**.

Суть **космологічного** (від грецького *космос* – Всесвіт) аргументу у найзагальнішій формі висловив грецький філософ **Платон** (427 – 347 до н.е.): “Все, що виникло, потребує певної причини”. Однак ланцюжок причин не може бути безконечним. Отже, мусить бути Першопричина – Бог.

Загальніше кажучи, навколишній світ – матеріальний, він існує в часі і просторі, кожна його частина має певну енергію. Причина ж Всесвіту є поза цими категоріями. Вона – не матеріальна, не обмежена простором і часом, не пов'язана, в нашому розумінні, з енергією. Тобто ця Причина - Творець, Дух – Всемогутній, Вічний і Всюди присутній.

**Наполеон Бонапарт** (1769 - 1821) своє світобачення перепоїв так : “Моя релігія проста: я дивлюся на Всесвіт і переконуюсь, що він не міг бути справою сліпого випадку, а створений якоюсь невідомою і всемогутньою істотою, яка настільки перевищує людину, наскільки Всесвіт перевищує наші найкращі машини”.

**Телеологічний** (від грецького *телос* – мета) аргумент звучить так: «Світ надто складний, щоб виникнути випадково». Тож, обдумуючи надзвичайну складність Світобудови, давньогрецькі філософи (зокрема, Анаксагор, Сократ і Платон), повели мову про Верховний Розум, про Великого Майстра, Архітектора. **Ісаак Ньютон** (1643 – 1727) конкретизував це словами: “Чи ж було побудоване око без розуміння оптики, а

вухо без знання акустики?» І в іншому місці: “Будова таких надзвичайно майстерних частин тварин, як очі, вуха, мозок, м'язи, серце та інші, також інстинкт звірів і комах, — все це не може бути витвором чого-небудь іншого, крім мудрості й мистецтва могутнього, вічно живого Діяча...”. Відоме й оте, іншого британця - **Вільяма Пейлі** (+ 1805 р.): «Якщо є годинник, то є і майстер, який його змонтував».

**Онтологічний** же (від грецького *суцце* та *слово*) аргумент формувався з осмислення *буття як такого*. Грецький філософ **Аристотель** (384 – 322 до н.е.) цей напрям розмірковувань назвав *першою філософією*. Надовго за ним закріпилась назва *метафізика*, що дослівно мало б означати «*те, що після фізики*», а точніше – «те що вище, що над фізикою». Інакше – це галузь науки, яка уявно виділяє (*відриває*) від усіх ознак і властивостей конкретних предметів найзагальніші і формує з них *вищі, незмінні ознаки усього існуючого*. І вони вже недоступні для органів відчуттів, а осягаються *абстрактно* («відокремлено від конкретного»).

Поступово формувалося **поняття досконалості**, яка може існувати не лише в свідомості людини (як *ідея*), але і в реальності. Чи не найчіткіше цей аргумент обговорив **Ансельм Кентерберійський** (1033 – 1109): 1) Бог – це досконала Істота, краща за яку уявити неможливо. 2) Ідея Бога наявна у свідомості. 3) Істота, яка існує у свідомості і реальності, краща за ту, яка існує лише у свідомості. 4) Якщо Бог присутній лише в уяві, то можемо уявити кращу істоту – ту, яка наявна і в реальності. 5) Ми не можемо уявити щось кращого від Бога. 6) Тому Бог існує. І Він – ідеальна Істота.

Невід’ємною ж ознакою найдосконалішої Істоти і є її буття. **«Бо якщо ідея Бога не містить у собі існування, то це не можна назвати досконалістю. Тому, за своєю природою, Бог повинен існувати».**

Ці три аргументи і укріплювали в людей уявлення про наявність у світі Найвищої Істоти, безконечно досконалої Першопричини, премудрого Творця й Управителя усього існуючого. Як також - уявлення про те, що людина в принципі



не може вичерпно зрозуміти й осягнути Бога. Що деякі з Його рис взагалі для людини незбагненні. Що Він – *Дух*, отже не має властивостей, які людина могла б пізнати своїми відчуттями. Зокрема, вона Його не може бачити своїми тілесними очима. Він – вічний, незалежний від часу і перебуває поза часом. Він Всемогутній, Всезнаючий, Всюди присутній.

І повнота Його досконалості визначається **Його буттям** як найголовнішою характеристикою.

### **Теореми Гьоделя**

**Курт Гьодель** (1906 – 1978) – видатний логік – математик ХХ ст. Народився в м. Брно (тоді це «в Австрійській імперії»), закінчив Віденський університет, в якому з 1930 р. став професором кафедри математики. У 1940 р. втік у США («бо єврей»), де працював у Принстонському інституті перспективних досліджень, ставши близьким (на 27 років молодшим) другом А.Айнштейна.

Біографи К. Гьоделя звертали увагу на те, що він упродовж років цікавився релігійними питаннями. Відома його переконаність у тому, що «порядок світу відображає порядок Вищого Розуму, який ним керує». Аналізуючи наявні концепції часу, Гьодель дійшов висновку, що час – ця таємнича і водночас само суперечлива сутність, яка формує основу світу і нашого власного існування» і яка врешті-решт стане найбільшою ілюзією. Час згодом перестане існувати, і настане інша форма буття – вічність. Так Гьодель склав переконання про існування життя за гробом: «Якщо світ є розумно сконструйованим, то має бути посмертне існування».

Гьодель не сумнівався в можливості збудувати раціональну теологію, яка «може бути аксіоматизована аналогічно математичній чи фізичній теорії обґрунтування віри». На цій основі він із 1940 р., використовуючи засоби та прийоми *модальної логіки*, робив усе успішніші спроби побудувати онтологічний доказ існування Творця. Однак - утримувався від публікацій, очевидно, не бажаючи вислуховувати критику мало компетентних колег.

У 1931 р. Гьодель опублікував статтю «Про нез'ясовані проблеми формальних систем», якою «перевернув світ математичної логіки». Все зводиться до ситуації: якщо є система **аксіом** (тверджень, які приймаються в математиці за основу без доведень), то чи впливає з неї однозначний висновок щодо правильності (чи хибності) певного судження?

Гьодель довів таку дивну властивість цієї системи: «Якщо в ній можна довести твердження  $A$ , то можна довести і твердження  $\neg A$ ». Популярно це, як **теорему про неповноту наших знань**, озвучують так: «Жодна система не може бути пізнана до кінця зсередини – поза зв'язком з іншими системами вищого порядку».

Насправді йдеться про два рівні (чи грані) проблеми – про дві взаємно пов'язані і доповнюючі теореми: **будь-яка система логічних розмірковувань є або неповною, або суперечливою**.

Ось перша, або **слабка теорема Геделя про неповноту**: «Будь-яка формальна система аксіом містить нерозв'язні припущення». І друга, **сильна теорема**: «Логічна повнота (чи неповнота) будь-якої системи аксіом не може бути доведеною в рамках цієї системи. Для її доведення чи спростування потрібні додаткові аксіоми (підсилення системи)».

Звідси висновок: «Епоха Науки і Просвітництва закінчилася в 1931 р. ... (Бо) після Гьоделя нічого не можна стверджувати напевно. Немає більше Наукової Істини. Світла їй пам'ять, вона була такою гарною чи такою страшною, але пошук її був величним» (М.Кордонський, див. Інтернет).

Від часів Аристотеля, у «звичній нам, щоденній» **формальній логіці** йдеться про висновок із двох засновків: « $x$  належить до групи  $y$ ,  $y$  входить у групу  $z$ , отже  $x$  належить до групи  $z$ ». Тим часом «щоденно і повсюдно» ця «прямолінійність мислення»... обмежена! Бо насправді є випадки **неозначеності**, невизначеності, коли вживаємо поняття **можливо!** І вже з часів Аристотеля виробляються основи загальнішої науки про упорядкування нашого мислення - **модальної логіки**, в якій і враховується оте **можливо**.

Основи модальної логіки викладено, зокрема, у кн. Р.Фейса «Модальная логика» (М., Наука, 1974). Суть ідей Геделя – у кн. Ю.И.Манина «Математика как метафора» (М., 2008). На цю тему в Інтернеті є тексти І.Гарина, Г.Калябіна, В.Каплана та ін..

«В рамках» **модальної логіки** аналіз онтологічного аргумента проводиться за допомогою низки символів – скорочень звичних для нас слів і понять, але придатних для обчислювальних машин.. Передусім, обсяг істинності певного судження окреслюється **квантором** – позначенням логічної операції, яка «дає кількісну характеристику області істинності предиката, до якого вона застосовується».

І тут є два варіанти: певна риса притаманна для всіх об'єктів, що відображається **квантором загальності**

$\forall_x$  - читаємо - «для всіх  $x$ ».

Якщо ж ця риса притаманна лише окремим об'єктам, тоді це позначається **квантором існування**

$\exists_x$  - «для деяких  $x$ »,

$\wedge$  - **кон'юнкція** («з двох висловлювань за допомогою зв'язки «і» отримують нове висловлювання») та

$\vee$  - **диз'юнкція** (тут об'єднуються два судження за допомогою логічного сполучника *або*).

$\supset$  - **імплікація** (від *тісно зв'язую*) – логічна операція, за допомогою якої з двох висловлювань утворюється умовне «якщо..., то... ». Є й співвідношення між елементами суджень, як ось:

$\sim$  - **заперечення**,  $\square$  - **необхідність**,  $\diamond$  - **можливість** (і ін.).

Ось фрагмент тексту (усього це 21 рядок) онтологічного доказу, записаного Гьоделем засобами модальної логіки:

*Axiom 4.*  $P(E)$

*Theorem.*  $G(x) \supset N(\exists y)G(y)$ ;

*hence*  $(\exists x)(G(x)) \supset N(\exists y)G(y)$

*hence*  $M(\exists x)(G(x)) \supset MN(\exists y)G(y)$  ( $M$  = possibility)

$M(\exists x)(G(x)) \supset N(\exists y)G(y)$

Загалом у ньому вказується на «наявність чи відсутність зв'язку між змістом речення і дійсністю, на можливість, якогось факту чи сумнів у ньому, бажання або прямий наказ виконати дію тощо». Його «переклад» в цілому на звичну нам мову звучить так:

*Визначення 1:* «х» є Богоподібним тоді і лише тоді, коли усі його властивості позитивні.

*Визначення 2:* «А» є властивістю «х» тоді і лише тоді, коли для кожної властивості «В» «В» має свій «х», і «А» впливає з «В».

*Визначення 3:* «х» обов'язково існує тоді і лише тоді, коли усі його складові однозначно визначені.

*Аксіома 1:* Якщо властивість позитивна, то її зворотне не є позитивним.

*Аксіома 2:* Будь-які головні властивості будуються на основних властивостях, тобто головна властивість позитивна лише тоді, коли усі основні – позитивні.

*Аксіома 3:* Властивості Богоподібності завжди позитивні.

*Аксіома 4:* Якщо головна властивість – позитивна, то і всі її складові – позитивні.

*Аксіома 5:* Існування – позитивна властивість.

*Аксіома 6:* Для будь-якої головної властивості «Р», якщо «Р» позитивне, то її властивості позитивні.

*Теорема 1:* Якщо властивість позитивна, то це можна довести.

*Висновок 1:* Властивість бути Богоподібним – постійна.

*Теорема 2:* Якщо щось Богоподібне, то воно повинно існувати.

*Теорема 3:* Богоподібність завжди можна довести.

(тут позитивне розуміється як досконалість, як виключно добре).

I - головний висновок, зроблений К. Геделем зі свого аналізу «з позахмарних висот» логіки: **світ не замикається у просторі матерії. Є нематеріальний, але об'єктивно існуючий світ...**

«Математика не є творінням людського духа, а людський дух аж ніяк не можна звести до комп'ютерної схематики. Те і

друге, математика і людський дух, доповнюються лише одним, поєднуються лише з одним – із нематеріальною реальністю. Після смерті життя продовжується; і все у Всесвіті має свій смисл. Людина не може вичерпати усе закладене в ній упродовж одного життя, тому життя існує і за могильною межею, щоб розвинути можливості, приховані в людині. У протилежному випадку людське життя втрачає усякий сенс. Існування Бога онтологічно доказове».

«У релігії ...куди більше розумного, ніж це прийнято вважати, але ми змалку настроєні до цього вороже, виховані школою, недолугим викладанням релігії, книгами і враженнями...».

«Гедель доводить, що... світ не замикається в просторі матерії. *Логічним наслідком теорем Геделя є визнання існування нематеріального, але об'єктивно існуючого світу, який не підпадає під «юрисдикцію» математики зокрема і точної науки взагалі... Теорема Геделя з математичною достовірністю стверджують дуальність світобудови, даючи змогу примирити Платона й Аристотеля, матеріалізм та ідеалізм, науку і релігію на строго логічній основі»* (І.Гарін).

«.. є нескінченно багато тверджень, які довести в принципі неможливо, однак вони правильні!». (І) *намагатися збагнути всемогутність Божу, «намагатися описати безконечність категоріями скінченного - це застосовувати інструмент там, де він незастосовний. Сокирою добре колоти дрова, але не робити трепанацію черепа... Світ значно складніший, ніж ті моделі, якими ми його описуємо... І те, що ми звемо «науковою картиною світу» - це лише модель. І все наше пізнання – це заміна одних моделей іншими,... які лише наближено описують реальність»* (В.Каплан).

**Ю.Манін** так прокоментував цю ситуацію: «Математики засобами самої математики довели існування абсолютно нерозв'язних математичних проблем... Так наука вперше зіткнулася з Богом в самій собі - непізнаванністю цілісного.. Якщо говорити точніше, людський розум може багато чого

досягти, оперуючи з частинами і множинами, але, рухаючись вглиб, упирається в непробивну броню Первоединого».

Важливим тут став і результат, отриманий польсько-американським математиком Альфредом Тарським (1901- 1983) - засновником формальної теорії істинності: *«саме поняття істинності логічно невиразиме»*.

### **Насамкінець – «про пошук сусідів»**

«На жаль», закінчуються невдачею зусилля зареєструвати бодай щось, що не можна пояснити дією природних факторів. Хоча дослідження об'єктів Галактики проводилися за допомогою *рентгенівських телескопів «Ухуру»* (1970 р.) та *«Айнштайн»* (1978 р.), у *гамма-діапазоні «INTEGRAL»* (2002), *«Swift»* (2004) та *«Fermi»* (2008) (у дужках вказані роки запусків). Виведено було і **орбітальні (фіксовані) лабораторії в точки Лагранжа** (рис. 4 і 5). Найвідоміші: *«Габбл»* (1990), *«Гіппаркос»* (1989), а також *«Гершель»* (2009). Особливо «корисною», для розташування дослідницьких лабораторій, є точка  $L_2$ , що на відстані 1,5 млн. км від Землі – з протилежного щодо Сонця боку.

У грудні 2013 р. в точку  $L_2$  (рис. 5) встановлено КТ **Gaia**. Результати роботи цієї обсерваторії, як сподіваються, будуть мати дуже важливий вплив на розвиток астрономії. Програма: збір *астрометричної* та *астрофізичної* інформації про «далекі і надалекі об'єкти Всесвіту». Зокрема, очікують, що вдасться відкрити близько 10000 нових *екзопланет*.

Загалом, *почавши від 1962 р. для астрономічних досліджень «за межі» земної атмосфери запущено майже сто ШСЗ та АМС*. «Там уже працюють» десятки інфрачервоних, ультрафіолетових, рентгенівських та гамма-обсерваторій, які досліджують небо у всіх діапазонах електромагнітних хвиль. І, відповідно, є і буде «злива» наукових публікацій з астрономії. Може, і «сусіди» десь знайдуться...

## **Замість післямови**

В Інтернеті є книга болгарського вченого **Тихомира Димитрова** «Вони вірували в Бога: п'ятдесят Нобелівських лауреатів та інші великі вчені» - *читаймо!*. Звідти - висловлювання декількох із них:

**Роберт Міллікен** (1868 – 1953, Премія 1923 р.): “Дві найважливіші складові прогресу: благополуччя і прогрес людства утримуються на двох стовпах. Якщо один із них упаде – загине вся будівля. Ці два стовпи – це культивування і поширення по всьому світу: 1) духа релігії, 2) духа науки (знання)”. “Я не можу уявити собі, як може справжній атеїст бути вченим... Виключно матеріалістична філософія уявляється мені вершиною невігластва. Саме це почуття відповідальності – усвідомлення, що ми повинні зіграти належну нам роль якомога краще, – виявляє нашу богоподібність”.

“... Найважливіше у житті – вірити в моральні і духовні цінності, вірити, що життя має значення і смисл, вірити, що ми кудись-то йдемо! ...Бог діє за допомогою законів”.

**Альберт Айнштейн** (1879 – 1955, Премія 1921 р.)

«Незважаючи на всю гармонію космосу, яку я зі своїм обмеженим розумом все ж здатний сприйняти, знаходяться ті, хто твердить, що Бога нема. Але найбільше мене дратує те, що на підтримку своїх поглядів вони цитують мене...»

Чим глибше людина проникає в таємниці природи, тим сильніше вона вшановує Бога... Істинна релігія – це справжнє життя, життя усією душею, з усією її добротою і праведністю...

Вірую в єдиного Бога і з чистим сумлінням можу сказати, що ніколи не відчував симпатії до атеїстів. Людство без релігії перебувало б у варварському стані свого розвитку... Релігії, мистецтва і науки – це три вітки одного дерева. Усі ці устремління спрямовані до облагороджування життя людини, до того, щоб вивести індивіда зі сфери суто фізичного існування у сферу свободи». І ще: “Кожний серйозний природодослідник повинен бути якимсь чином людиною релігійною. У безконечному універсумі проявляється діяльність безконечно

досконалого Розуму. Якщо уявлення про мене як про атеїста взяте з моїх наукових праць, то можу сказати, що моїх робіт не зрозуміли...

Одне я усвідомив за своє довге життя: вся наша наука наївна і проста порівняно з реальністю - і все ж це найдорожче, що в нас є. Наука без релігії кульгає, релігія без науки сліпа».

**Вернер Гайзенберг** (1901 – 1976, Премія 1932 р.): «Перший ковток із келиха природознавства породжує атеїзм, але на дні посудини нас очікує Бог».

Усі знаємо, ким був француз **Вольтер** – войовничий ніби то безбожник, хоча – ворог лише католицької церкви. Бо ж він розмірковував і так: «Для всезагального добра необхідний Бог, який нагороджує і карає. Без такого Бога ми залишалися б у бідах без надії, у пороці без докорів сумління.. Хто визнає, що віра в Бога стримає хоч декількох людей від злочинів, той визнає, що ця віра повинна бути прийнята усім людством. Ви боїтеся, що віра в Бога приводить до марновірства і духа переслідування; але чи не треба боятися ще більше того, що людина, яка заперечує Бога, робиться жертвою ще дикіших пристрастей і жахливіших злочинів?

Турбуйтеся про те, щоб віра не принизилася до забобону і до релігійного переслідування. Спаси нас, Боже, від служителя релігії, який умертвляє свого короля освяченим кинджалом, але спаси нас і від гнівного і жорстокого деспота, який, не віруючи в Бога, є сам для себе бог».

І ще його ж: «Хто твердо вірить у Бога, який нагороджує за добре і карає за злочин, той затремтить в момент, коли він вже буде готовий убити невинну людину, і ніж випаде з його рук... Визнання Бога – засіб проти суспільної анархії і зловживань. Атеїзм – спокуса для маси, жахливе знаряддя політичної аморальності і політичного цинізму для правлячих верхів... Атеїзм є дуже небезпечним страховиськом в засобах тих, хто керує... Не настільки темний, як фанатизм, атеїзм завжди є фатальним для чесноти».

І ще таке: «Немає природи, все у Всесвіті – мистецтво, а мистецтво мовить про Творця...»



Тут уже мова про *естетичний аргумент*: у природі є краса – наче спеціально призначена для споглядання її розумною істотою – людиною. Тож логічно ставити питання: *з якого це дива «сліпо-глухо-німа» природа творить красу?* Для чого існує краса у природі?...

Переконали роздуми щодо цього знаходимо в новелі **Конан Дойля** (+ 1930 р.) «Морська угода». Задивляючись на розквітлу троянду, Шерлок Холмс розмірковує так: “Мені здається, що своєю вірою в Божественне Провидіння ми зобов'язані квітам. Усе інше – наші здібності, наші бажання, наша їжа – необхідне нам передусім для існування. Але троянда нам дана понад усе. Запах і колір троянди прикрашають життя, а не є умовою для його існування. Лише Божественне Провидіння може бути джерелом прекрасного. Ось чому я й кажу: доки є квіти, людина може надіятися”.

Є й *аргумент точної настройки*: бо ж 15 (чи й 25) фізичних параметрів (як ось, *швидкість світла c, гравітаційна стала G* та інші) *привносяться* у розроблені вже фізичні теорії «з неба», кажемо – ззовні, з експерименту.

Є поняття *антропного принципу*, який стверджує, що *існування життя на Землі істотно залежить від найзагальніших властивостей Всесвіту*. Суть його з'ясовують ще й так: наявність життя, представником якого ми є, накладає на властивості Всесвіту низку сильних обмежень. Зокрема, **Пол Девіс** висловився так: «*Здається, що для створення Всесвіту хтось привів усі кількісні параметри у взаємну відповідність... Усе це створює грандіозне враження задуму*».

Як відомо, головним *будівельним матеріалом* живих організмів є *білки, інформація ж «про все» записана у хромосомах*, точніше – в *молекулі ДНК*. Білки збудовані із 20 амінокислот (АК), хоча їх загалом у природі є близько 200. І як доведено вже з розгляду можливих варіантів (які Природа мала би перебирати!), ні про яке «монтування білків всліпу» не може бути й мови. Тому й сказав **Фред Хойл**: «Та не мучилася природа всліпу. Бо від початку Надінтелект дав їй програму!»

Тож зрозуміло, що як молекули білка, так і ДНК (це особливо,

бо йдеться про фантастичну концентрацію інформації в мікроскопічному об'ємі!) не могли б утворитися внаслідок (випадкового!) «монтування самих себе».

Здається, найкраще про це сказав **Стівен Мейєр** (США), відомий природодослідник і філософ: «Упродовж усього ХІХ століття вчені вважали, що існують два основні фактори – матерія та енергія. На початку ХХ століття з'явився третій наріжний камінь, з яким повинна рахуватися наука, – це *інформація*. Коли ми маємо справу з біологією століття інформації, виникає й міцніше розуміння того, що *молекула ДНК є реальним доказом розуму, реальним доказом інтелекту*. Це те, що може бути поясненим лише за допомогою уявлень про розумний задум».

І ще: «Відомо, що розумні істоти можуть створювати інформаційно насичені системи. *Наші* (взагалі людські) *докази ґрунтуються не на тому, чого ми не знаємо, але на тому, що ми знаємо* про причинно-наслідкову структуру світу. *Нам невідомі природні причини появи інформації*. Цей процес не можна пояснити з матеріалістичної точки зору, – у всякому разі, це не природній добір, не процеси самоорганізації і не випадковість. Нам, однак, *відомий один фактор, справді здатний породжувати інформацію, й цей фактор – розум*. Тому, коли люди з наявної інформації в ДНК роблять висновок про наявність задуму, вони, з погляду історичної науки, доходять правильного й очевидного висновку. Коли ми знаходимо інформаційно насичену систему в клітині, точніше, в молекулі ДНК, ми можемо зробити висновок, що вирішальну роль у появі такої системи відіграв розум».

Звернемо увагу і на статтю у “Віснику НАНУ” №11-12 за 1996 р. академіка **О.Ахієзера** (у співавторстві з **Д.Білозоровим** та **О.Філоненко**), де читаємо: “Автори статті переконані, що наука і релігія можуть співіснувати, бо належать до різних сфер людської діяльності. Та хоч наука має справу з Природою в усій її величі й невичерпності, розуміння цієї Природи викликає у вченого майже релігійне почуття». Там же наведено слова **В.Гайзенберга**: «У природознавстві йдеться про істинне і неістинне, у релігії – про добро і зло».

Бо наука каже нам “як збудований світ”, релігія – “як нам у ньому жити”. Щоправда, сфери начебто різні. Однак є точка, чи лінія, де їхні “світоглядно важливі установки” перетинаються!! І це – *питання про першооснову буття!*

Вже визнано: релігійна віра забезпечує цілісність свідомості людини, визначає та “цементує” весь її світогляд. Німецький психоаналітик **Карл Юнг** зазначив: «Серед усіх моїх пацієнтів, які переступили 35-річний рубіж, не було жодного, в якого б труднощі врешті-решт не приводили до пошуків релігійних поглядів на життя».

### **Поцікавмось на дозвіллі:**

Хто «відкрив канали» на Марсі?. Хто «вкрив його поверхню буйною рослинністю»? Хто в яких напрямках визначав на діаграмі спектр-світність еволюцію зір? Хто твердив, що атом – вигадка фармацевтів? Хто висловив твердження, що сила – це геометрія? В чому суть «трьох правил Фарадея»? Хто і що відстоював у «Великій суперечці» та де і коли вона відбулася? Де сьогодні розташована Гринвіцька обсерваторія? Хто, будучи знаменитим математиком, фізиком і астрономом, «виявив величезні плантації коноплі на Юпітері»?

## Зміст

Короткий вступ (3)

**I. «Правила правильного мислення»:** Закони логіки (4).

Реальність та її відображення (5). Гармонія чисел і знань (8).  
Про мову фізики (15).

**II. Сім кроків до таємниць Світобудови:** Про інструменти і результати (17). Три перші визначальні кроки (24). Завдяки двом теоріям Айнштейна (29). Ще три кроки до незбагненного (34). Додаток: про дискусійне (36).

**III. Дещо інакше – про те ж:** Ще раз – добірка чисел (39). Окремі сторінки історії (44). До зір через атом (55). Космічно-космологічний коктейль (61). Що може геометрія (65). Температура в центрі Сонця (71).

**IV. Чудо-теорія розмірностей.** Про термодинаміку і газодинаміку (74). Суть теорії розмірностей, II-теорема (78).

Декілька найпростіших задач: а) період коливання маятника (79), б) пульсації зір (80), гравітаційна нестійкість, критерій Джинса (83), потенціальна енергія зорі (86). 2. Стисло про ударні хвилі. А: зоряні ударні хвилі (89). Б) Сильні ударні хвилі в земній атмосфері (92): а) сферична УХ (93). б) циліндрична УХ (94), плоска УХ (94).

**V. Життя: проблема біохімічна і математична:** Цеглинки світобудови живого (96). Задача Шкловського (101). Математичний апарат (103). Про кількість інформації (107). Про онтологічне (110). Теореми Гьоделя (113). Насамкінець – про пошук «сусідів» (118). Замість післямови (118).