



ГОЛОВАЧ
Юрій Васильович — академік НАН України, завідувач відділу статистичної теорії конденсованих систем Інституту фізики конденсованих систем НАН України

ЦІЛЕ Є БІЛЬШИМ ЗА СУМУ ЙОГО ЧАСТИН

Нобелівська премія з фізики 2021 року

Нобелівську премію з фізики 2021 р. було присуджено «за новаторський внесок у наше розуміння складних систем», причому одну половину спільно присудили Сюкуро Манабе та Клаусу Гассельманну «за фізичне моделювання клімату Землі, кількісне визначення мінливості та надійне прогнозування глобального потепління», а іншу — Джорджо Парізі «за відкриття взаємодії безладу і флуктуацій у фізичних системах від атомних до планетарних масштабів».

Ключові слова: Сюкуро Манабе, Клаус Гассельманн, Джорджо Парізі, складні системи, безлад, флуктуації, моделювання клімату, спінове скло.

Цьогорічна Нобелівська премія з фізики викликала жваві дискусії як у середовищі фізиків, так і поза ним. Одні бачать у ній штучне поєднання різних робіт задля задоволення чийось політичних амбіцій, інші — ще одну легітимізацію науки про складні системи, яка, за геніальним передбаченням Стівена Гокінга, має стати наукою XXI століття. На мою думку, унікальність цьогорічної премії в тому, що вона, з одного боку, привернула увагу наукової спільноти до трьох дійсно визначних робіт, кожна з яких збагатила людство новими знаннями, а з іншого — відзначила їх як єдине ціле, як новий напрям науки. «Ціле є більшим за суму його частин», — цей вислів часто наводять, говорячи про складні системи, і саме цими словами доречно охарактеризувати подію, про яку йтиметься в цій статті.

Наука, особливо природнича, пов'язана з редукціонізмом: розв'язати певну проблему, зрозуміти ціле означає розбити його на менші частини і дослідити їх. Такий підхід визначав загальний науковий прогрес і спричинив появу та успіхи окремих наук. Грандіозне завдання, яке особливо актуально звучить сьогодні, — це зрозуміти, що стається, коли окремі частини об'єднуються в ціле. Наприклад, сьогодні ми недостатньо добре розуміємо процеси формування клімату чи свідомості, функціонування імунної системи чи економіки, багатьох інших, не лише фізичних, систем. Вирішенням саме таких завдань і займається наука про складні системи, яка значною мі-

рою ґрунтується на застосуванні методів і концептуального апарату фізики, насамперед статистичної фізики та теорії динамічних систем. До речі, часто формальним початком відліку, сигналом про виникнення цієї науки вважають статтю ще одного нобелівського лауреата з фізики, Філіпа Андерсона «More is different» [1]. Цю статтю було опубліковано в 1972 р., тож наука про складні системи наступного року святкуватиме свій піввіковий ювілей, а про її зрілість свідчить, зокрема, і цьогоорічна Нобелівська премія.

Клімат, погода і спінове скло. Незважаючи на те, що поняття «складна система» активно використовується в науковій літературі і навіть, кажучи ширше, стає одним із центральних у загальнокультурному контексті, на сьогодні ми не маємо його чіткого означення. В цьому можна перекоонатися, не лише заглядаючи в енциклопедії, а й читаючи фахові статті. Загалом для того, щоб система багатьох взаємодіючих агентів (у типово фізичних задачах — частинок із фундаментальними взаємодіями між ними) вважалася складною, їй мають бути притаманні одна чи кілька таких ознак: виникнення нових якостей — так звана *емерджентність*, коли ціле володіє властивостями, які не очевидно впливають з властивостей окремих частин; чутливість — *ефект метелика*, коли незначна зміна у початкових умовах приводить до докорінно різних сценаріїв еволюції; *самоорганізація* і виникнення структур; підпорядкування степеневим законам (*товсті хвости* у статистичних розподілах) та *адаптивний характер взаємодій*. Остання з перелічених властивостей означає, що у складній системі макро- і мікростани динамічно оновлюють одні одних: взаємодії між складовими частинами приводять до колективної поведінки, а отже, породжують макроскопічний стан. У свою чергу, у складній системі ці взаємодії зазнають впливу макростану і змінюються впродовж еволюції системи.

Поглянемо під цим кутом на коротке формулювання результатів робіт учених, удостоєних цьогоорічної премії з фізики, викладене у пресрелізі Нобелівського комітету [2] (деталь-

нішу інформацію про лауреатів подано наприкінці цієї статті):

Однією зі складних систем, що мають життєво важливе значення для людства, є клімат Землі. Сюкуро Манабе продемонстрував, як підвищення рівня вуглекислого газу в атмосфері призводить до підвищення температури на поверхні Землі. У 1960-х роках він очолював роботи з розроблення фізичних моделей клімату Землі і був першим, хто дослідив взаємодію між радіаційним балансом і вертикальним переносом повітряних мас. Його робота заклала основу для побудови сучасних кліматичних моделей.

Приблизно через десять років Клаус Гассельманн створив модель, яка пов'язує погоду і клімат, відповідаючи таким чином на питання, чому кліматичні моделі можуть бути надійними, незважаючи на те, що погода мінлива і хаотична. Він також розробив методи визначення специфічних сигналів, слідів, які природні явища та діяльність людини залишають у кліматі. Його методи було використано, щоб довести, що підвищення температури в атмосфері пов'язане зі спричиненими діяльністю людини викидами в атмосферу вуглекислого газу.

Приблизно в 1980 р. Джорджо Парізі виявив приховані закономірності у невпорядкованих складних матеріалах. Його відкриття є одними з найважливіших внесків у теорію складних систем. Вони дають змогу зрозуміти й описати багато різних і, на перший погляд, цілком випадкових матеріалів і явищ не тільки у фізиці, а й в інших, дуже різних ділянках, таких як математика, біологія, нейронаука та машинне навчання.

Починаючи «з кінця», з номінації Джорджо Парізі, зазначимо, що згадані там складні невпорядковані матеріали — це так звані спінові стекла, про які ще буде сказано нижче. Хоча клімат згадується в номінаціях і Сюкуро Манабе, і Клауса Гассельманна, в їхніх роботах ідеться про різні його аспекти. У Клауса Гассельманна, зокрема, це формування довгочасових стійких явищ на основі випадкових короткочасових флуктуацій, спричинене механізмом стохастичного резонансу (над яким працював і Дж. Парізі), а в Сюкуро Манабе —

дослідження рівнянь балансу випромінювання і транспорту повітря. Якщо додати, що визначальні публікації у кожній з груп виходили з інтервалом близько десяти років і безпосередні поклики між ними практично відсутні, стають зрозумілими сумніви тих, хто не бачить зв'язку між цими трьома дослідженнями і трактує їх як роботи з фізики твердого тіла (спінове скло) і з метеорології (клімат і погода). Однак такий зв'язок стає очевидним, коли придивитися уважніше до характерних ознак досліджуваних явищ — саме такі їх спільні риси, як згадані вище емерджентність, чутливість, виникнення структур, степеневі закони та ін. природним чином об'єднують їх у єдине ціле, ім'я якого — фізика складних систем.

Детермінізм і передбачуваність у складних системах. Одну зі своїх узагальнюючих статей про фізику і складні системи (вона так і називається: «Complex systems: a physicist's viewpoint») Дж. Парізі розпочинає словами: «Останніми роками фізики глибоко зацікавилися вивченням поведінки складних систем. Результатом цих зусиль стала концептуальна революція, зміщення парадигми, яке має далекосяжні наслідки для самого означення фізики» [3]. На думку автора, значною мірою таке зміщення парадигми пов'язане з еволюцією понять *детермінізму* і *передбачуваності* у фізиці [4]. Передбачуваність у класичній механіці XIX ст. означала, що зміну в часі станів (координат та імпульсів) усіх частинок можна в принципі порохувати, знаючи їх значення в початковий момент. Знаменитий демон Лапласа потребує лише задання початкових умов, щоб розв'язати рівняння руху і однозначно передбачити майбутнє: «...ніщо не буде невизначеним для нього, і майбутнє, як і минуле, буде відкрите його очам...» [5]. Дві значні зміни в розумінні передбачуваності відбулися в другій половині XIX і на початку XX ст. з появою статистичної механіки і квантової механіки. У статистичній механіці мікростани системи багатьох частинок описуються ймовірностями, а передбачуваність — це визначення таких величин, як середнє значення, дисперсія, функції розподілу. У квантовій механіці в принципі

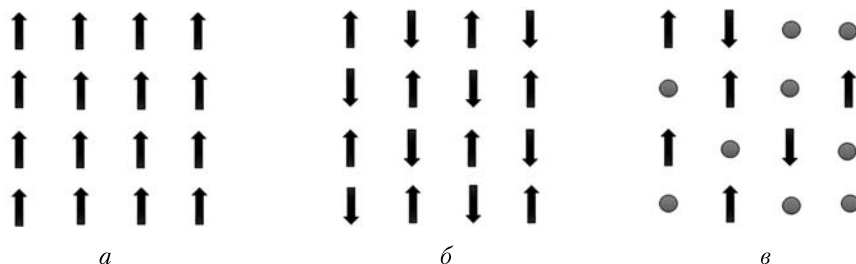
неможливо відтворити результати одиничного експерименту. Таким чином, поняття передбачуваності навіть одночастинкового стану набуває ймовірнісного характеру: воно включає або середні значення спостережуваних для однієї частинки із системи (ансамблю) взаємодіючих класичних частинок, або ж середні значення спостережуваних для однієї квантової частинки, виміряні у послідовності експериментів.

Ще одна зміна (і в розумінні, і в самому означенні) поняття передбачуваності сталася завдяки дослідженням детермінованого хаосу. Як виявилось, для певного класу динамічних систем довгочасові прогнози практично неможливі: невеликі зміни у початкових умовах приводять до величезних змін в еволюції системи. Причому такий «ефект метелика» спостерігається для детермінованих рівнянь руху, які не містять стохастичних складових, однак є нелінійними. Для прикладу, при передбаченні погоди запуск тієї самої програми на різних комп'ютерах може давати суттєво відмінні результати через накопичення помилок округлення під час обчислень [6].

Передбачуваність у складних системах також ймовірнісна. Однак, на відміну від класичної статистичної чи квантової механіки, взаємодії у складних системах можуть не лише бути нелінійними, а й змінюватися в часі. У свою чергу, це може привести до значно багатших фазових діаграм і макроскопічної поведінки [4, 7]. За словами Дж. Парізі, «така точка зору значно відрізняється від традиційної... Прогнози роблять не для властивостей заданої системи, а для розподілу ймовірностей цих властивостей, які змінюються разом із системою. Ми недостатньо звиклися з цією новою точкою зору, щоб оцінити всі її можливості. Зазвичай зміна парадигми приводить до зміни поставлених питань. Так, не потрібно запитувати, як поведеться конкретна система. Ми повинні запитати, які головні властивості поведінки системи, що належить до цього класу» [3].

Структурний безлад і фрустрації. Тоді як погода є однією з улюблених тем щоденних розмов, далеко не кожен чув про спінове скло. На думку Філіпа Андерсона, історія спінового

Феромагнетик (а),
антиферомагнетик (б)
і спінове скло (в)
(рис. Мар'яни Красницької)

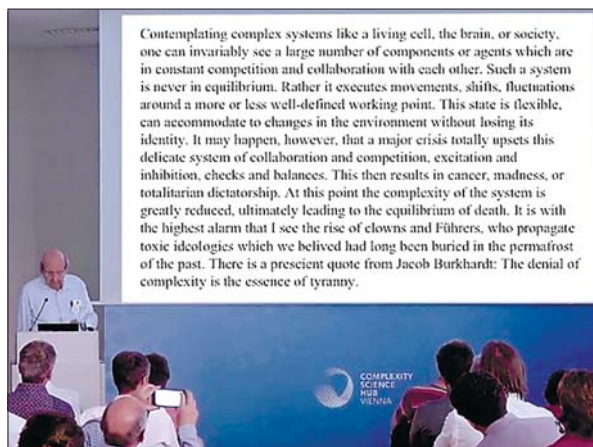


скла — найкращий приклад того, що справжню наукову таємницю варто досліджувати до кінця заради неї самої, незалежно від будь-якого очевидного практичного значення чи «інтелектуального гламуру». Справді, в цій історії переплелися і зацікавленість у пізнанні природи речей — рушій і причина наукового дослідження, — і практичне застосування, що з плином часу охоплює все ширше коло явищ.

Стан спінового скла, поряд із феромагнетизмом і антиферомагнетизмом, — три найчастіші форми магнітного впорядкування [8, 9]. Феромагнетики — це клас речовин (до них належать такі метали, як залізо, нікель, кобальт, їх сплави та сплави рідкісноземельних металів), у яких за низьких температур (нижчих від температури Кюрі T_C) спонтанно виникає намагніченість. Наприклад, стрілка компаса виготовлена з феромагнітного матеріалу, і очевидно, що T_C цього матеріалу вища за кімнатну температуру. Так, для заліза $T_C = 1043$ К. Уявити (змоделювати) феромагнетик можна як сукупність багатьох частин — елементарних магнітних моментів, «спінів», взаємодія між якими є такою, що мінімізує загальну енергію для однаково спрямованих сусідів. За низьких температур у системі виникає впорядкована структура, макроскопічно однорідний стан, або так званий чистий стан (див. частину «а» на рисунку). Цей стан характеризується відмінною від нуля намагніченістю — «параметром порядку»: всі спіни спрямовуються в одному напрямку. В антиферомагнетиках, на відміну від феромагнетиків, взаємодія між спінами мінімізує енергію для протилежно спрямованих сусідів. Тож впорядкування у цих матеріалах виглядає інакше (див. «б», де спіни

спрямовані однаково через один). В антиферомагнетиках такий чистий впорядкований стан також один, а відмінним від нуля параметром порядку є підграткова намагніченість. Відповідна температура, за якої спонтанно виникає параметр порядку, називається температурою Нееля T_N . Для типових антиферомагнетиків, таких як сполуки перехідних металів, T_N становить величину порядку 100 К.

Спінове скло — ні феромагнетик, ні антиферомагнетик. Типові спінові стекла — це сплави магнітних (Fe, Mn) і немагнітних (Au, Ag, Cu, Pt) металів. Ще на початку 1970-х років виявили, що такі сплави за низьких температур переходять у новий стан, подібний до аморфного стану звичайного скла, що утворюється при замерзанні рідини. Типова температура такого склування $T_g \sim 10$ К. Нижче температури склування сплав втрачає ергодичність: його стан (наприклад, намагніченість) не визначається однозначно температурою T і магнітним полем H , а залежить і від способу, в який змінювалися T і H . При цьому спостерігається низка особливостей у термодинамічних і структурних характеристиках таких сплавів. У спінових стеклах (див. «в» на рис.) магнітні атоми (стрілки) розподілені в немагнітній матриці (сірі диски) випадково, як це зображено на рисунку. *Структурний безлад* є важливим чинником, що визначає властивості таких сплавів. Ще одним визначальним чинником є геометрична *фрустрація*. Вона пов'язана з тим, що частина взаємодій між магнітними атомами у спіновому склі феромагнітна (а отже, сусіди прагнуть впорядкуватися в одному напрямку), а частина — антиферомагнітна, причому феро- і антиферомагнітна складові приблизно однакові.



Виступ Імре Кондора у Complexity Science Hub (Відень) 24 травня 2018 р. Фото Райнгарда Фолька

Для деяких конфігурацій взаємодій це може приводити до ситуації, коли магнітний момент атома не має переважного напрямку орієнтації. У передмові до книжки [8] таку ситуацію порівняно з психологічною фрустрацією, розгубленістю у життєвих ситуаціях, коли людина прагне одночасно досягти двох несумісних цілей (наприклад, приятелювати з двома особами, що ворогують між собою).

Огляд, навіть короткий, основних етапів пізнання таємниці спінового скла потребував би пояснення ще багатьох понять фізики і математики, а серед них і таких, які фізики успішно використовують без належних строгих математичних обґрунтувань, — на подив математиків і захоплення фізиків, адже переможців не судять [8–11]. Слід було б назвати і багатьох інших героїв пошуків розгадки цієї таємниці, таких як Сем Едвардс, Філіп Андерсон, Девід Шеррінгтон, Скотт Кіркпатрік, Девід Таулесс. Приємно, що серед них є і наш земляк-полтавець, професор Університету Сорбонна Віктор Доценко [10, 11]. Історія дослідження спінового скла наповнена несподіванками, труднощами і незвичними способами їх подолання. Незвична навіть визначальна характеристика фазового переходу в стан спінового скла — параметр порядку, аналог повної чи підграткової намагніченостей у «звичних»

феро- і антиферомагнетиках. Джорджо Парізі усвідомив, що, на відміну від феромагнетиків чи антиферомагнетиків, які у впорядкованій фазі мають скінченну кількість чистих станів (усі елементарні магнітні моменти спрямовані в один бік чи впорядковані через один; див. «а» і «б» на рис.), стан спінового скла характеризується безмежною кількістю чистих станів. Причина цьому — згадані вище структурний безлад і фрустрації: різні конфігурації системи характеризуються близькими значеннями мінімумів енергії, але вони розділені високими бар'єрами, які система не може подолати.

Для теоретичного опису спінового скла застосовують так званий реплічний трюк, коли замість однієї системи розглядається набір її копій-реплік. Такий спосіб дозволяє розрахувати спостережувані величини, усереднюючи їх за різними конфігураціями структурного безладу (розташуванням феро- і антиферомагнітних взаємодій у «в» на рис.). Відмінний від нуля параметр порядку, що сигналізує про перехід у стан спінового скла за температури T_g , визначається через кореляцію середніх одновузлових намагніченостей у різних репліках. Дж. Парізі виявив приховану структуру в репліках і знайшов спосіб описати це математично, розглядаючи порушення реплічної симетрії і показуючи, що нескінченна кількість чистих станів у спіновому склі організована в ультраметричний спосіб [8].

Ідеї і методи, що виникли завдяки вивченню спінового скла, дозволяють не лише пояснити виникнення особливого магнітного впорядкування у структурно-невпорядкованих фрустрованих магнетиках за низьких температур, вони придатні для більшого — пояснити емерджентність, чутливість, самоорганізацію та інші характерні особливості різних явищ, керованих безладом та фрустраціями. Серед них — поведінка зернистої речовини, нейронних мереж, таких як мережі Гопфілда, різні задачі оптимізації, інформатики, генетики. Адже структурний безлад і фрустрації притаманні багатьом системам, і не лише у фізиці, а тому теоретичний опис впливу цих чинників на поведінку спінового скла, на думку Нобелівсько-

БІОГРАФІЇ ЛАУРЕАТІВ

го комітету, є «одним з найважливіших внесків у теорію складних систем» [2]. Повертаючись до поняття передбачуваності, згаданого на початку цієї статті, можна стверджувати, що завдяки працям цьогорічних нобелівських лауреатів стає ще зрозумілішим зв'язок між, здавалося б, протилежними поняттями — детермінізмом і випадковістю.

На завершення хотів би процитувати Імре Кондора, співавтора Джорджо Парізі у ділянці фізики спінового скла і одного з творців науки про складні системи. Це доповідь, з якою він виступив на міжнародній зустрічі в Complexity Science Hub у Відні [12] і яка зайняла всього одну сторінку презентації. Подібно до того, як передбачення Сюкуро Манабе і Клауса Гассельманна, оприлюднені ще у 1960–1970-х роках, слугували застереженням вчених про можливий сценарій глобальної зміни клімату, слова Імре Кондора водночас і відображають суть науки про складні системи, і застерігають суспільство, передусім невігласів на всіх рівнях його ієрархії, про можливі сценарії розвитку: *«Споглядаючи складні системи, такі як жива клітина, мозок чи суспільство, завжди можна побачити велику кількість компонент чи агентів, які постійно конкурують і співпрацюють один з одним. Така система ніколи не перебуває в рівновазі. Скоріше вона виконує рухи, зміщення, флуктуації навколо більш-менш чітко визначеної робочої точки. Цей стан є гнучким, може пристосуватися до змін навколишнього середовища без втрати своєї ідентичності. Проте може статися так, що велика криза повністю зруйнує цю делікатну систему співпраці і конкуренції, збудження і гальмування, стримувань і противаг. Це потім призводить до раку, божевілля чи тоталітарної диктатури. У цей момент складність системи значно зменшується, що в кінцевому підсумку призводить до рівноваги смерті. Я з найвищою тривогою бачу зростання клоунів і фіорерів, що пропагують токсичні ідеології, які, як ми вважали, давно були поховані у вічній мерзлоті минулого. Є прозорлива цитата Якоба Буркгардта: “Заперечення складності є суттю тиранії”».*



Фото: Reuters

Джорджо Парізі (Giorgio Parisi) народився 4 серпня 1948 р. в Римі. Його батько і дід були будівельниками, тому заохочували юнака стати інженером. Натомість він вирішує перервати родинну традицію. «Я хотів зробити щось наукове, тому що це було складно», — згадує він. Парізі отримав докторський ступінь у Римському університеті «Ля Сапієнца» в 1970 р. Його науковим керівником був Нікола Кабіббо, за словами Парізі — найяскравіший теоретик у Римі того часу. Дослідження Кабіббо та Парізі стосувалися фізики високих енергій, яка в той час, як стверджує Парізі, вважалася «найскладнішою та найважливішою ділянкою» для вивчення. Відразу після захисту Парізі починає працювати в Національній лабораторії Фраскати, дослідницькому закладі з прискорювачем частинок поблизу Рима. Там він пропрацював 10 років, будучи також запрошеним науковцем у Колумбійському університеті у США (1973–1974), Інституті вищих наукових досліджень (IHES, 1976–1977) та Вищій нормальній школі (ENS, 1977–1978) у Франції. З 1981 по 1992 р. він був професором теоретичної фізики в Університеті Риму II «Тор Вергата», а в 1992 р. повернувся як професор квантової теорії до Університету Риму I «Ля Сапієнца», де працює й дотепер.

Наукові інтереси Джорджо Парізі надзвичайно широкі і стосуються насамперед квантової теорії поля, статистичної фізики і складних систем. «Я маю схильність працювати над різними предметами одночасно, бо для того, щоб прийшла ідея, потрібен час. Ви повинні засвоїти поняття», — пояснює він. Низка міждисциплінарних досліджень, проведених за його ініціативою, заклали підґрунтя для формування сучасної науки про складні системи. Так, його основоположні дослідження спінових стеклов (об'єкта фізики конденсованої матерії) виявили їх глибокий зв'язок зі статистичними моделями в теорії оптимізації та в біології. У свою чергу, це привело до застосування методів і концептуального апарату ста-

тистичної фізики у дослідженні систем взаємодіючих агентів нефізичної природи. Одним з прикладів є його роботи з питань виникнення колективної поведінки живих організмів чи розроблення концепції стохастичного резонансу у вивченні зміни клімату. Вагомий внесок зробив Дж. Парізі у фізику елементарних частинок, зокрема у квантову хромодинаміку й теорію струн. Так зване рівняння Докшицера—Грибова—Ліпатова—Альтареллі—Парізі описує розподіл партонів під час зіткнень в адронних реакціях з кварками і глюонами. У галузі динаміки рідин він разом з Уріелем Фрішем ввів мультифрактальні моделі для опису турбулентних потоків. А рівняння Кардара—Парізі—Жанга (KPZ) моделює стохастичну агрегацію і є одним зі способів опису росту поверхні.

Джорджо Парізі — володар якщо не всіх, то принаймні більшості найпрестижніших фізичних наукових відзнак. Серед них — медаль Больцмана (1992), медаль Дірака ІСТР (1999), премія Енріко Фермі (2002), премія Денні Гайнемана з математичної фізики (2005), премія Ноніно «Італійський майстер нашого часу» (2005), премія Лагранжа (2009), медаль Макса Планка (2011), премія Ларса Онсагера (2016). Він член (у 2018—2021 рр. — президент) Академії деї Лінчеї, до складу перших академіків якої входив Галілео Галілей, Французької академії наук (1992), Національної академії наук США (2000). З 2016 р. Джорджо Парізі — лідер руху «Salviamo la Ricerca Italiana», що має на меті чинити тиск на уряди Італії та ЄС, щоб домогтися належного фінансування фундаментальних досліджень.

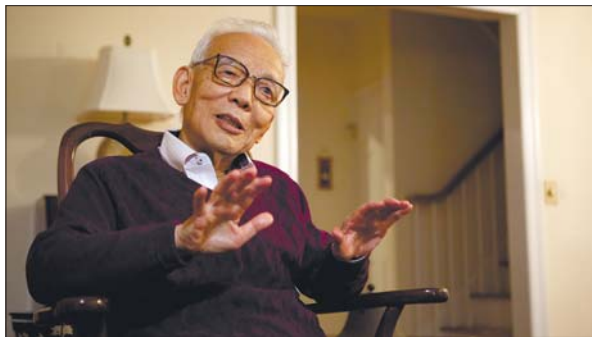


Фото: Princeton University

Сюкуро Манабе (Syukuro Manabe) народився 21 вересня 1931 р. в с. Шинріцу, район Ума, префектура Ехіме, Японія. Його дід і батько були лікарями, і родина очікувала, що він також стане лікарем. Однак, за словами Сюкуро Манабе, «у надзвичайній ситуації кров приливає до моєї голови, тому з мене не вийшло б хорошого лікаря». Вчений з гумором додає: «Я мав жахливу пам'ять і незграбні руки і вважав, що моя єдина хороша риса — це дивитися на небо і губитися в своїх думках».

Тож він вивчає метеорологію в Токійському університеті, приєднується до дослідницької групи Шигекати Шоно і у 1959 р. здобуває ступінь доктора наук. Після захисту докторської дисертації Манабе переїжджає у США і до 1997 р. працює у відділі дослідження загальної циркуляції Бюро погоди США (нині — Лабораторія геофізичної динаміки плиннів Національного управління океанічних і атмосферних досліджень, NOAA). В 1968—1997 рр. він був також професором Принстонського університету, а в 1983 р. — запрошеним професором Університету Токіо. В 1997—2001 рр. працює в Японії, у Центрі передових досліджень глобальних змін на посаді директора відділу досліджень глобального потепління. У 2002 р. повертається до США як запрошений дослідник у програмі атмосферних та океанічних наук Принстонського університету, в якому зараз обіймає посаду старшого метеоролога. В 2002—2009 рр. він був також консультантом Японського агентства з морської та наземної науки і технологій, а в 2007—2014 рр. — запрошеним професором Університету Нагоя.

Своїм розвитком наука про моделювання клімату значною мірою завдячує роботам Сюкуро Манабе. За словами кліматолога Габріеля Веккі, саме з цих робіт виникла ідея про те, що «можна взяти щось настільки складне, як кліматична система, запрограмувати рівняння, які керують нею, помістити їх у комп'ютер і використати це для моделювання кліматичної системи. Він не тільки проілюстрував деякі потенційні наслідки глобального потепління, а й дав нам дорожню карту того, як займатися наукою про клімат». Як перший крок у розробленні тривимірних моделей атмосфери Манабе і Ветеральд створили одновимірну одноколонну модель атмосфери в радіаційно-конвективній рівновазі з ефектом позитивного зворотного зв'язку водяної пари. Використовуючи модель, вони виявили, що у відповідь на зміну концентрації вуглекислого газу в атмосфері температура на поверхні Землі та в тропосфері підвищується, тоді як у стратосфері вона знижується. Ця робота згодом стала основою комплексної моделі загальної циркуляції атмосфери і тривимірного моделювання реакції температури та гідрологічного циклу на збільшення вмісту вуглекислого газу. У 1969 р. Манабе і Браян опублікували першу роботу з моделювання клімату за допомогою поєднаних моделей океан—атмосфера. Протягом 1990-х — початку 2000-х років дослідницька група Манабе публікувала основоположні роботи, використовуючи моделі океану з поєднаною атмосферою для дослідження залежної від часу реакції клімату на зміну концентрації парникових газів в атмосфері. Вони також застосували цю модель для вивчення минулих кліматичних змін, зокрема з'ясування ролі надходження прісної води в північну частину Атлантичного океану як потенційної причини так званої різкої зміни клімату, очевидної в палеокліматичних записках.

Сюкуро Манабе — член Національної академії наук США та іноземний член Японської академії, Academia Eurgoraea і Королівського товариства Канади. У 1992 р. він став першим лауреатом премії «Голуба планета». Серед його нагород медаль Карла-Густава Россбі від Американського метеорологічного товариства (1992), екологічна премія Volvo (1997), медаль Бенджаміна Франкліна (2015), премія Крафорда в галузі наук про Землю (2018, разом із Сьюзен Соломон).



Фото: MPI-M

Клаус Фердинанд Гассельманн (Klaus Ferdinand Hasselmann) народився 25 жовтня 1931 р. в Гамбурзі. Його батько, Ервін Гассельманн — економіст, журналіст, видавець, був активним діячем соціал-демократичної партії Німеччини. Коли Клаусу було всього два роки, сім'я, рятуючись від нацистського режиму, емігрувала до Великої Британії і поселилася у Велвін-Гарден-Сіті на північ від Лондона. Тут він здобуває початкову та гімназійну освіту і в 1949 р. повертається до Німеччини. В 1949—1950 рр. проходить практичний курс з машинобудування, а в 1950—1955 рр. вивчає фізику і математику в Гамбурзькому університеті, захистивши дипломну роботу з ізотропної турбулентності. Його докторська дисертація з фізики (1957), виконана в Геттінгенському університеті та Інституті динаміки рідин Макса Планка, була присвячена методу визначення відбиття і заломлення ударних фронтів і довільних хвиль малої довжини на поверхні поділу двох середовищ. У 1963 р. отримує габілітацію з фізики. У 1957—1961 рр. — асистент в Гамбурзькому університеті, у 1961—1964 рр. — асистент і асоційований професор Інституту геофізики і фізики планет та Інституту океанографії Скріппса Каліфорнійського університету Сан-Дієго. З 1966 р. — професор геофізики та фізики планет в Гамбурзькому університеті. У 1967—1968 рр. — запрошений професор Кембриджського університету, а з 1970 по 1972 р. — професор Доерті в Океанографічному інституті Вудс-Гол в Массачусетсі. В 1972 р. він став професором теоретич-

ної геофізики, а також директором Інституту геофізики в Гамбурзькому університеті. З лютого 1975 р. по листопад 1999 р. Клаус Гассельманн був директором-засновником Інституту метеорології Макса Планка в Гамбурзі. З січня 1988 по листопад 1999 р. він також був науковим директором Німецького кліматичного обчислювального центру (DKRZ, Deutsches Klimarechenzentrum) у Гамбурзі. В 2001 р. став співзасновником Європейського кліматичного форуму (сьогодні Global Climate Forum) і до 2018 р. був віцеголовою та членом правління цієї організації. Зараз він професор-емерит Гамбурзького університету.

На своєму сайті Гассельманн так окреслює свої наукові інтереси: динаміка клімату, випадкові процеси, хвилі океану, комплексні оціночні дослідження (тобто дослідження, що намагаються пов'язати основні особливості суспільства та економіки з біосферою й атмосферою), об'єднана теорія поля. Його внесок в океанографію передусім пов'язаний з дослідженням нелінійних взаємодій в океанських хвилях і застосуванням формалізму діаграм Фейнмана до класичних полів випадкових хвиль. За його словами, «завдяки цьому досвіду я зацікавився фізикою елементарних частинок і квантовою теорією поля. Тому я ввійшов у квантову теорію поля через задні двері, працюючи з реальними хвильовими полями, а не з частинками». Розроблена ним модель мінливості клімату — модель Гассельманна — описує стохастичний вплив коливань погоди на клімат і дозволяє передбачити мінливість клімату на основі інформації про короткочасові коливання погоди. Він також розробив методи для визначення свого роду «відбитків пальців», які природні явища і діяльність людини залишають на кліматі, і показав, що підвищення температури в атмосфері відбувається через викиди вуглекислого газу, які здійснює людина. «Через 30—100 років, залежно від того, скільки викопного палива ми споживатимемо, ми зіткнемося з дуже значною зміною клімату. Кліматичні зони зміняться, опади будуть розподілятися інакше. Тоді ми більше не зможемо говорити про випадкові результати, — сказав він в інтерв'ю в 1988 р. — Ми повинні усвідомити, що входимо в ситуацію, коли дороги назад немає».

За свою кар'єру Гассельманн отримав багато нагород. Зокрема, це медаль Свердрупа Американського метеорологічного товариства (1971), премія «Білий ведмідь Нансена» (1993), міжнародна премія за життєві досягнення в океанології (1996), меморіальна медаль Саймонса Королівського метеорологічного товариства (1997), медаль Вільгельма Б'єркнеса Європейського геофізичного товариства (2002), нагорода Фонду BVVA «Рубежі знань» (2009). Він іноземний член Шведської королівської академії наук, член Європейської академії наук і мистецтв, почесний член Європейського товариства наук про Землю і Королівського метеорологічного товариства.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Anderson P.W. More is different: Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science. *Science*. 1972. **177**(4047): 393–396. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.177.4047.393>
2. The Nobel Prize in Physics 2021. Press release. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/press-release/>
3. Parisi G. Complex systems: a physicist's viewpoint. *Physica A*. 1999. **263**(1-4): 557–564. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(98\)00524-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(98)00524-X)
4. Holovatch Yu., Kenna R., Thurner S. Complex systems: physics beyond physics. *Eur. J. Phys.* 2017. **38**(2): 023002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6404/aa5a87>
5. de Laplace P.S. *A Philosophical Essay on Probabilities*. New York, London: Wiley, Chapman and Hall, 1902. https://en.wikisource.org/wiki/A_Philosophical_Essay_on_Probabilities
6. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1963. **20**(2): 130–141. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2)
7. Thurner S., Hanel R., Klimek P. *Introduction to the Theory of Complex Systems*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780198821939.001.0001>
8. Mézard M., Parisi G., Virasoro M.A. *Spin Glass Theory and Beyond. An Introduction to the Replica Method and Its Applications*. Singapore: World Scientific, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1142/0271>
9. Ruiz-Lorenzo J.J. Nature of the Spin Glass Phase in Finite Dimensional (Ising) Spin Glasses. In: Holovatch Yu. (ed.) *Order, Disorder and Criticality. Advanced Problems of Phase Transition Theory*. Vol. 6. Singapore: World Scientific, 2020. P. 1–52. DOI: <https://doi.org/10.1142/11711>
10. Dotsenko V. *Introduction to the Theory of Spin Glasses and Neural Networks*. Singapore: World Scientific, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1142/2460>
11. Dotsenko V. *Introduction to the Replica Theory of Disordered Statistical Systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524592>
12. Imre Kondor. “I am worried about the rise of new ‘Führers’”. https://www.youtube.com/watch?v=CNXXIr_n6iA

Yurij V. Holovatch

Institute for Condensed Matter Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1125-2532>

THE WHOLE IS MORE THAN THE SUM OF THE PARTS

Nobel Prize in Physics 2021

The Nobel Prize in Physics 2021 was awarded “for groundbreaking contributions to our understanding of complex systems” with one half jointly to Syukuro Manabe and Klaus Hasselmann “for the physical modelling of Earth's climate, quantifying variability and reliably predicting global warming” and the other half to Giorgio Parisi “for the discovery of the interplay of disorder and fluctuations in physical systems from atomic to planetary scales”.

Keywords: Syukuro Manabe, Klaus Hasselmann, Giorgio Parisi, complex systems, disorder, fluctuations, climate modeling, spin glass.