

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

НАУКОВИЙ ЧАСОПИС

НАЦІОНАЛЬНОГО ПЕДАГОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ М. П. ДРАГОМАНОВА



Серія 5

Педагогічні науки: реалії та перспективи

Випуск 34

Київ
Видавництво НПУ імені М. П. Драгоманова
2012

УДК 378: 52

Кузьменков С. Г., Верестюк В. П.
Херсонський державний університет

СИНЕРГЕТИКА І АСТРОФІЗИКА

У статті обґрунтована доцільність використання ідей і принципів синергетики під час підготовки викладачів фізики та астрономії. Наводяться конкретні приклади застосування синергетичного підходу під час пояснення механізмів: народження зір, теплової і механічної стійкості зір, пульсації змінних зір цефеїд.

Ключові слова: синергетика, динамічно стабільні системи, адаптивні системи, системи, що еволюціонують, фізична й астрономічна освіта, теплова і механічна стійкість зір, пульсації цефеїд, народження зір.

Синергетику на сьогодні вважають одним із найпопулярніших і найперспективніших підходів у науці. “Синергетику можна розглядати як міждисциплінарний рух у сучасній науці, що знаменує собою становлення нового погляду людини на світ і на самого себе у цьому світі. Синергетика – це новий діалог людини з природою, новий синтез людського знання й мудрості” [4].

Синергетика чинить все більший вплив на різні сфери діяльності людства і викликає все більший інтерес не тільки серед представників природничо-математичних, а й гуманітарних наук (у тому числі й педагогіки). Водночас у навчанні фізики (як загального курсу, так і теоретичного) і астрономії у вищій школі синергетичний підхід (хоча б його елементи, провідні ідеї) послідовного втілення не знайшов. Проте, на нашу думку, він міг би значно збагатити, поглибити уявлення майбутніх фахівців про навколишній світ. Тому **метою** цієї статті є обґрунтування доцільності використання ідей і принципів синергетики під час підготовки викладачів фізики та астрономії, і демонстрація на конкретних прикладах застосування синергетичного підходу в астрономічній освіті.

Згідно з теорією Великого вибуху (гарячою моделлю походження Всесвіту) все дивовижне розмаїття космосу виникло в процесі еволюції первісної безструктурної матерії – хаосу. Як і чому виникають з хаосу об’єкти, що мають внутрішній порядок, наприклад зорі і планети? Якщо на перше запитання відповідь більш-менш дається, то друге запитання, зазвичай, обходять.

Появу макроскопічно впорядкованих у просторі й часі структур у первісно безструктурному середовищі називають самоорганізацією. Під структурою розуміють не тільки статичні утворення типу кристалів, а й впорядковані рухи середовища. В астрофізиці результатом самоорганізації вважають і вже згадуване утворення зір і планет, і магнітні поля цих об’єктів, цикл сонячної активності, механізм пульсації цефеїд, спіральну структуру галактик тощо.

Фізик Г. Хакен [14] запропонував об’єднати усі методи опису колективних явищ самоорганізації в різних областях фізики, хімії, біології, економіки і соціології під єдиною назвою “синергетика”.

Існує багато визначень поняття “синергетика”, наприклад, у популярній енциклопедії “Вікіпедія” наводиться таке: “**Синергетика** (від грец. συν – префікс зі значенням сумісництва та грец. εργον – “діяльність”) – міждисциплінарний напрям у науці, що вивчає загальні закономірності явищ та процесів у складних нерівноважних системах (фізичних, хімічних, біологічних, соціальних та ін.) на основі притаманних їм

принципів самоорганізації”. За висловлюванням відомих фахівців О. М. Князевої та С. П. Курдюмова: “Якщо шукати гранично коротку характеристику синергетики як нової наукової парадигми, то така характеристика містила б усього три ключові ідеї: самоорганізація, відкриті системи, нелінійність” [4].

До головних принципів синергетики відносять [4; 8-16]:

– природа ієрархічно структурована в кілька видів відкритих нелінійних систем різних рівнів організації, а саме існують *динамічно стабільні, адаптивні*, і найбільш складні *системи, що еволюціонують*;

– перехід з одного рівня на інший здійснюється через нерівноважний стан, причому нерівноважність є необхідною умовою появи нової організації, нового порядку, тобто *розвитку*;

– загальним для усіх систем, що еволюціонують, є: нерівноважність, спонтанне виникнення нових локальних утворень (як на мікро, так і на макрорівні), зміни на макроскопічному (системному) рівні, виникнення нових властивостей системи, етапи самоорганізації та фіксації нових якостей системи;

– системи, що розвиваються, завжди відкриті і обмінюються енергією та речовиною з зовнішнім середовищем, завдяки чому і відбуваються процеси локальної упорядкованості та самоорганізації. Закрита ж система згідно з другим законом термодинаміки має в кінцевому рахунку досягти стану з максимальною ентропією і припинити будь-які еволюції;

– у нерівноважних умовах відносна незалежність елементів системи поступається місцем корпоративній (узгодженій) поведінці елементів: біля рівноваги елемент взаємодіє тільки з сусідніми елементами, подалі від рівноваги – “відчуває” всю систему цілком і узгодженість поведінки елементів зростає;

– фундаментальним принципом самоорганізації є виникнення нового порядку і ускладнення систем через *флуктуації* станів їх елементів та підсистем. Такі флуктуації зазвичай угамовуються в усіх динамічно стабільних та адаптивних системах завдяки *негативним зворотним зв'язкам*, що забезпечують збереження структури та близького до рівноваги стану системи. Проте в складніших відкритих системах, завдяки або притоку енергії зовні, або процесам всередині системи, що мають кумулятивний характер (наприклад, зміна хімічного складу в ядрі зорі внаслідок термоядерних реакцій), відхилення від рівноваги з часом посилюються, накопичуються, виникає ефект колективної поведінки елементів та підсистем, що, в решті решт, спричиняє або руйнування колишньої структури, або виникнення нового порядку. Отже, етап самоорганізації настає лише у випадку переважання *позитивних зворотних зв'язків*, що можуть діяти у відкритій системі, над негативними зворотними зв'язками;

– у станах, далеких від рівноваги, починають діяти біфуркаційні механізми – з'являються короточасні *точки галуження* переходу до того чи іншого відносно довготривалого режиму системи – *аттрактору*. Зазвичай неможливо передбачити, який з можливих аттракторів займе система.

Самоорганізація в складних системах, переходи від одних структур до інших, виникнення нових рівнів організації матерії супроводжуються порушенням симетрії. Для опису еволюційних процесів необхідно відмовитись від симетрії часу, характерної для повністю детермінованих і оборотних процесів у класичній механіці. Самоорганізація в складних відкритих системах спричиняє незворотне руйнування старих і виникнення нових структур та систем, що разом з явищем неубування ентропії в закритих системах зумовлює існування “стріли часу” в Природі.

Яскравим прикладом самоорганізації є процес народження зір. За сучасними уявленнями зорі утворюються внаслідок гравітаційного стискання великих, порівняно

щільних (концентрація молекул $10^9 - 10^{12} \text{ м}^{-3}$) та холодних (температура близько 10–30 К) газово-пилових хмар, яких достатньо багато в галактиках (крім, можливо, еліптичних). Якщо з якихось зовнішніх причин (ударні хвилі, які виникають під час спалахів близьких наднових, спіральні хвилі густини, які розповсюджуються в спіральних галактиках, зоряний вітер від близьких гарячих ОВ-зір тощо) хмара почне стискування, то такий процес за певних умов може стати необоротним. Тоді зростаюча сила власного тяжіння хмари стискає її до все більшої густини. Хмара набуває сферичної форми, температура в центрі стискання поступово підвищується до приблизно 1 млн. К. За такої температури починаються реакції термоядерного синтезу – перетворення Гідрогену в Гелій. Стискання припиняється, молода зоря переходить у довготривалий стан механічної і теплової рівноваги.

Очевидно, що зоря є складнішим за структурою, більш упорядкованим об'єктом ніж газово-пилова хмара. Щоб продемонструвати цей процес еволюції від простішого до складнішого, можна використати звичне для студентів поняття ентропії. Відомо, що ентропія є мірою впорядкованості систем. І хоча останнім часом з'являються думки, що ентропія реальних систем не може слугувати мірою безладу (див., наприклад, [12]), покажемо, що зоря має меншу ентропію ніж газово-пилова хмара.

Не вдаючись до деталей народження зір, визначимо, як змінюється ентропія в процесі переходу від молекулярної хмари (яка складається переважно з H_2) з концентрацією молекул $n_1 = 10^{11} \text{ м}^{-3}$ та температурою $T = 20 \text{ К}$ до стану, характерного для сучасного Сонця.

В процесі народження зорі речовина змінює свій стан від молекулярного до повністю іонізованого. Розрахунок ентропії у випадку навіть двохатомного газу являє собою непросту задачу. Проте відомо, що за таких низьких температур, які характерні для малих конденсацій у гігантських молекулярних хмарах, внесок в ентропію, зумовлений ефектами обертання молекул та коливанням атомів у молекулах, є нехтовно малим. Отже, двохатомний газ за таких умов веде себе як одноатомний і під час розрахунку ентропії можна враховувати тільки поступальний рух. У цьому випадку ентропія дорівнює [7]

$$S = Nk \left[\ln \frac{V}{N} \left(\frac{mkT}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{5}{2} \right], \quad (1)$$

де N та m – кількість та маса частинок, V – об'єм, який вони займають, k – стала Больцмана, \hbar – стала Планка. Зручніше мати справу з питомою ентропією, тобто ентропією, розрахованою на одну частинку: $s = S/N$. Тоді для зміни ентропії дістаємо

$$\Delta s = s_2 - s_1 = k \ln \left[\frac{n_1}{n_2} \left(\frac{\mu_2 T_2}{\mu_1 T_1} \right)^{\frac{3}{2}} \right], \quad (2)$$

де n_1 та n_2 – відповідно концентрації молекул та частинок у хмарі та зорі, μ_1 , T_1 та μ_2 , T_2 – відносні молекулярні маси і температури речовини хмари та зорі.

Знаючи середню густину Сонця $\bar{\rho}_{\odot} \approx 1400 \text{ кг/м}^3$ і середню відносну молекулярну масу його речовини $\mu_2 = 0,6$ [5] для середньої концентрації речовини зорі, подібної до Сонця, отримуємо

$$n_2 = \frac{\bar{\rho}_\odot}{\mu_2 m_p} = 1,4 \cdot 10^{30} \text{ м}^{-3},$$

де m_p – маса протона.

Тоді, приймаючи для хмари $\mu_1 = 2,4$ (сонячний хімічний склад), а для середньої температури зорі $T_2 = 3,5 \cdot 10^6 \text{ К}$ [5], знаходимо

$$\Delta s \approx -28k.$$

Отже, в процесі народження зорі дійсно відбувається зменшення ентропії. Слід зазначити, що це відбувається за рахунок зменшення потенціальної енергії (зоря народжується в результаті гравітаційного стискання, а власна гравітаційна енергія хмари та зорі від'ємна). Половина енергії, що вивільняється йде за теоремою віріала [6] на нагрівання зорі, інша половина на випромінювання. Оскільки зоря є відкритою системою, то народжуючись, вона нагріває навколишнє середовище, що еквівалентно скиданню надлишків ентропії у це середовище. Зазначимо також, що розрахунки, виконані за формулою (1), жодним чином не враховують зміни структури системи, а лише фіксують зміну, а саме зменшення її фазового об'єму.

Народившись, зоря виходить на головну послідовність діаграми Герцшпрунга-Рессела, де і перебуває більшу частину свого життя, перетворюючи в своїх надрах Гідроген у Гелій (наприклад, Сонце має перебувати на головній послідовності приблизно 10 млрд. років). У цьому стані зорю можна віднести до *динамічно стабільних систем*.

Стационарні зорі перебувають у тепловій рівновазі. У цьому стані збалансовані процеси: виділення енергії в надрах, тепловідведення з надр до поверхні та випромінювання енергії з поверхні. У термоядерних реакціях виділяється точно така кількість енергії, яка необхідна, щоб підтримувати зорю у тепловій і механічній рівновазі. Ця кількість енергії визначається головним чином масою зорі.

З'ясуємо за рахунок чого забезпечується тепла стійкість зір. Зоря є механічною системою, що складається з частинок (протонів, електронів та значно меншої кількості ядер важчих елементів), які рухаються, маючи певну кінетичну енергію, у гравітаційному полі, що створює вся зоря. Тому для цієї системи справедлива теорема віріала [6]:

$$2W_T + W_g = 0, \quad (3)$$

де W_T – тепла, а W_g – гравітаційна потенціальна енергія зорі.

Поєднуючи вираз (3) із законом збереження енергії $W = W_T + W_g$, дістаємо надзвичайно важливі результати

$$W_T = -\frac{W_g}{2}, \quad W = \frac{W_g}{2} = -W_T \quad (4)$$

Отже, згідно з виразом (4) для зміни повної енергії матимемо

$$\Delta W = -\Delta W_T. \quad (5)$$

Якщо якимось чином додатково забирати енергію у зорі, наприклад, через випромінювання, то $\Delta W < 0$, і згідно з (5) вона має нагріватись: $\Delta W_T > 0$. І навпаки, якщо якимось чином додавати енергію зорі, то $\Delta W > 0$, і вона буде охолоджуватись: $\Delta W_T < 0$.

Оскільки

$$W = \frac{W_g}{2}, \quad \text{а} \quad W_g \approx -\frac{GM^2}{R}, \quad (6)$$

то зоря буде підтримувати себе у тепловій рівновазі, змінюючи радіус.

Ми стикаємось із парадоксальним фактом: віднімаючи у зорі енергію, її неможливо охолодити. Будь-яка спроба відібрати у зорі енергію спонукає її стискатися та вивільняти гравітаційну енергію у такій кількості, що не тільки компенсує витрати енергії з поверхні, але ще й нагріває зоряну речовину. Така “поведінка” зорі фактично означає, що вона має *від’ємну теплоємність*. Водночас нагрівання зоряної речовини прискорить темп виділення енергії в ядерних реакціях і ця додаткова енергія ще більше розігріє зорю. Тиск газу при цьому збільшиться, зоря розшириться до такого об’єму, за якого сили газового тиску врівноважаться силами гравітації. В результаті теплова і механічна рівновага відновляться.

Можна сказати, що стаціонарна зоря є системою, що саморегулюється. Від’ємна теплоємність зорі виконує функцію негативного зворотного зв’язку, який і робить цю систему динамічно стабільною.

До *адаптивних систем* можна віднести цефеїди. Свою назву ці зорі отримали від зорі δ Цефея, змінність якої була виявлена ще в 1784 р. [3] Нині відомо, що цефеїди – це пульсуючі змінні зорі. Цефеїди здійснюють малі коливання навколо положення рівноваги, змінюючи свій радіус і ефективну температуру (майже у протифазі), а отже, й світність. Періоди пульсацій класичних цефеїд лежать у межах 1–100 діб. Звичайна зоря (типу Сонця), якщо її вивести зі стану рівноваги, достатньо швидко припинить свої коливання внаслідок їх поступового згасання, оскільки є динамічно стабільною системою. Тим часом цефеїди змінюють свій блиск упродовж сотень тисяч і мільйонів років. Можна вважати, що вони здійснюють *автоколивання*.

Очевидно, що ці коливання підтримуються енергією, яка вивільняється в надрах зір унаслідок термоядерних реакцій. Важче пояснити інше: яким чином промениста енергія, що повільно просочується з центральних областей зорі до її поверхні, спричиняє механічну дію? Цю проблему розв’язано в 50-х роках ХХ ст. завдяки працям С.А. Жевакіна і Р. Крісті [3], які першими звернули увагу на те, що дестабілізуючий вплив на зоряну оболонку може мати шар частково іонізованого Гелію. Товщина зони, де Гелій перебуває переважно у стані однократної іонізації, становить $0,01-0,02R_{\odot}$, в той час як радіуси цефеїд близько $50 R_{\odot}$ (цефеїди – це гіганти спектральних класів F та G) [1, 2]. Проте саме ця зона, що має незначну товщину і дуже малу масу, спричиняє рух і підтримує коливання зовнішніх шарів зорі. Відбувається це завдяки ритмічній зміні непрозорості у цій зоні.

Справа в тому, що коефіцієнт непрозорості зоряної речовини істотно залежить від її густини і температури:

$$\kappa = \kappa_0 \rho^m T^{-s}, \quad (7)$$

де показники степеню $m \approx 0,8 - 1,0$, а $s \approx 3 - 4$ (вони змінюються у цих межах залежно від самих значень густини і температури) [1].

Суть механізму виникнення пульсацій (так званого “ κ -механізму”) полягає у наступному. У зоні часткової іонізації Гелію в процесі стискання газу температура підвищується незначно, оскільки енергія витрачається не на розігрів речовини, а на подальшу іонізацію тієї частини Гелію, що ще перебуває в атомарному стані або у стані однократної іонізації. Зростання густини в процесі стискання і практична незмінність його температури зумовлюють згідно з формулою (7), підвищення коефіцієнта непрозорості у цій зоні. Потік випромінювання при цьому, так би мовити “замикається”, створює додатковий тиск, який починає грати роль поршня. Це призводить до розширення оболонки, її охолодження та зменшенню густини. При цьому температура спадає повільніше адіабатичного закону внаслідок процесів рекомбінації Гелію.

Коефіцієнт непрозорості, а отже, й тиск випромінювання зменшуються, і розширення припиняється. Досягнувши певного віддалення, зовнішні шари під дією гравітації вільно падають назад, за інерцією проскакують середнє, рівноважне положення і розпочинається новий етап стискання, повторюється весь попередній цикл пульсацій.

Дослідження показали, що зоряні пульсації можливі лише у тому випадку, коли зона однократної іонізації Гелію перебуває на певній глибині і коли вона здатна “налаштуватися” на резонанс з усією зорею [1]. За розрахунками для зір з ефективними температурами вище приблизно 7500 К зона часткової іонізації Гелію занадто близька до поверхні, що спричиняє недостатню непрозорість, а для зір з ефективними температурами менше ≈ 5500 К вона залягає занадто глибоко, тому її вплив на зоряну оболонку незначний. До того ж у холодних зорях реалізуються умови для виникнення великомасштабної конвекції речовини, яка зменшує градієнт тиску і температури вздовж радіусу, так що великомасштабні радіальні пульсації не розвиваються [2].

Розкачування коливань може починатись з випадкового невеликого стискання зони часткової іонізації Гелію. Амплітуда коливань, що виникли, зростає доти, доки не виникне стан, в якому розкачування коливань зрівнюється з їх згасанням. Згасання зумовлено тим, що газ, який розширюється, витрачає енергію на підняття зовнішніх шарів зорі. З моменту встановлення рівноваги між розкачуванням і згасанням коливань зоря буде періодично стискатись та розширюватись зі сталою амплітудою доти, доки будь-які зміни в структурі зорі не порушать цю рівновагу [11].

Отже, в цефеїдах виникає просторово-часовий порядок. Система весь час адаптується до нових умов, що виникають. Самоорганізація системи відбувається завдяки узгодженості коливань іонізаційної рівноваги, непрозорості речовини та механічних коливань зовнішніх шарів зорі.

Наостанок зазначимо, що використання ідей і принципів синергетики під час навчання фізики та астрономії має важливі методологічні та світоглядні наслідки. Студент має відчутти єдність природи, гармонію і дивовижну будову Всесвіту, усвідомити, як природним шляхом виникають і мільярди років існують складні структури (наприклад, кристали), найпоширеніші космічні об'єкти (зорі, планети) і системи (планетні системи, галактики), як взагалі відбувається еволюція матерії від простого до складного. Використання синергетичного підходу у фізичній та астрономічній освіті, на нашу думку, є особливо актуальним у контексті фундаменталізації цієї освіти і, безумовно, сприятиме формуванню єдиної наукової картини світу.

Використана література:

1. Андрієвський С. М. Курс загальної астрономії: навчальний посібник / С. М. Андрієвський, І. А. Климишин. – Одеса: Астропринт, 2010. – 480 с.
2. Засов А. В. Общая астрофизика / А. В. Засов, К. А. Постнов. – Фрязино, 2006. – 496 с.
3. Климишин І. А. Історія астрономії / І. А. Климишин. – Івано-Франківськ: видавн. ІФТКДІ. 2000. – 652 с.
4. Князева Е. Н. Основания синергетики. Синергетическое мировидение / Е. Н. Князева, С. П. Курдюмов. – М.: КомКнига/URSS, 2005. – 240 с.
5. Кузьменков С. Г. Зорі: Астрофізичні задачі з розв'язаннями: навч. посіб. / С. Г. Кузьменков. – К.: Освіта України, 2010. – 206 с.
6. Кузьменков С. Г. Про одну маловідому теорему / С. Г. Кузьменков // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. – Вип. 99 / Чернігівський національний педагогічний університет імені Т. Г. Шевченка; гол. ред. М. О. Носко. – Чернігів: КНПУ, 2012. – С. 213-218. (Серія: Педагогічні науки).
7. Ландау Л. Д. Статистическая физика. Часть I / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – [Изд. 3-е, доп.]. – М.: Наука, 1976. – 584 с. – (Серия: “Теоретическая физика”, том V).
8. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
9. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках

- / И. Пригожин. – М. : Наука, 1985. – 328 с.
10. Пригожин И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс. – М. : Прогресс, 1986. – 432 с
 11. Розгачева И. К. Самоорганизующиеся системы во Вселенной / И. К. Розгачева. – М. : Знание, 1989. – 64 с.
 12. Хайтун С. Д. От эргодической гипотезы к фрактальной картине мира : Рождение и осмысление новой парадигмы. / С. Д. Хайтун. – М. : КомКнига, 2007. – 256 с.
 13. Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам / Г. Хакен. – М. : Мир, 1991. – 240 с.
 14. Хакен Г. Синергетика / Г. Хакен. – М. : Мир, 1980. – 406 с.
 15. Хакен Г. Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии / Г. Хакен. – Москва-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. – 320 с.
 16. Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. – М. : Мир, 1985. – 424 с.

Аннотация

В статье обоснована целесообразность применения идей и принципов синергетики при подготовке преподавателей физики и астрономии. Приводятся конкретные примеры использования синергетического подхода при объяснении механизмов: рождения звезд, тепловой и механической устойчивости звезд, пульсаций переменных звезд – цефеид.

Ключевые слова: синергетика, динамически стабильные системы, адаптивные системы, эволюционирующие системы, физическое и астрономическое образование, тепловая и механическая устойчивость звезд, пульсации цефеид, рождение звезд.

Annotation

The author proves the feasibility of using the ideas and principles of synergetics during of physics and astronomy teachers training. We give specific examples of the synergetical approach in explaining mechanisms: the birth of stars, thermal and mechanical stability of stars, pulsations of variable stars - Cepheids.

Keywords: synergetics, dynamically stable systems, adaptive systems, evolving systems, physical and astronomical education, thermal and mechanical stability of stars, Cepheid pulsation, birth of stars.