

“КОНЦЕПЦІЇ СУЧАСНОГО ПРИРОДОЗНАВСТВА. МАКРО- ТА МІКРОСВІТИ ЧАСТИНА 3“

(курс за вибором студентів)

Лектор доц. Опанасюк Анатолій Сергійович

Метою курсу є формування у студентів світоглядних орієнтацій і установок особи, що засновані на науковому методі пізнання навколишнього світу. Формування уявлень про сучасну науково-природничу картину світу і місце людини у ній, синтез гуманітарної і природничої складових культури

КАРТИНИ СВІТУ

Фізична картина світу - це особливий самостійний вид знань – найзагальніше теоретичне знання у фізиці (система понять, принципів і гіпотез), що є основою для побудови наукових теорій.

Розвиток фізики безпосередньо пов'язаний з утвердженням фізичних картин світу, що змінюють одна одну.

Побудовані картини світу

Класична наука.

- **Механістична** (Галілей, Кеплер, Ньютон, XVI-XVII ст.)
- **Електромагнітна** (Фарадей, Максвелл, друга половина XIX ст.)

Некласична наука.

- **Квантово-релятивістська** (Ейнштейн, Планк, Бор, де Бройль, Шредингер та ін., 1-3 десятиріччя XX ст.)

Постнекласична наука

Еволюційно-синергетична (теперішній час)

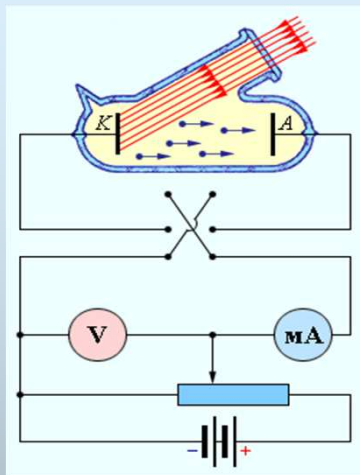
МЕХАНІСТИЧНА КАРТИНА СВІТУ

- Основу картини світу становить **ідея атомізму**, за якою всі тіла складаються з неподільних першоелементів-атомів (корпускул), що перебувають у неперервному тепловому русі.
 - Взаємодії тіл на відстані **відбувається миттєво (принцип дальності Ньютона)**. **Світ є незмінним у часі.**
 - Панує **концепція абсолютного простору і часу.**
 - Світ побудований на єдиному фундаменті – на законах механіки Ньютона. Діють **динамічні закономірності.**
 - Основний **об'єкт дослідження закриті (замкнені) системи.**
 - **Всі процеси оборотні і протікають без розсіювання енергії.** Світ описується **лінійними законами.**
 - Панує **детермінізм**, за яким, якщо відомі початкові умови системи, то можна точно передбачити її майбутнє.
 - Основний метод пізнання **аналіз (редукціонізм - властивості цілого є сумою властивостей частин).**
- Життя і розум у цій картині світу не мають ніякої якісної специфіки.
- **Математичною основою механістичної парадигми є лінійні диференціальні рівняння.**

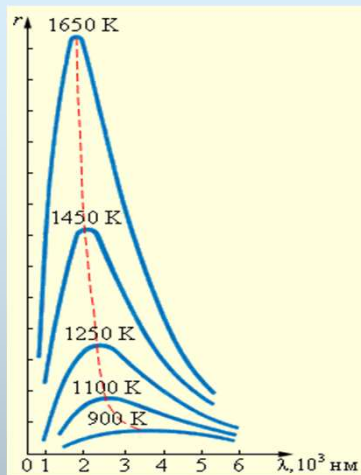
ЕЛЕКТРОМАГНІТНА КАРТИНА СВІТУ

- В науку вводиться поняття **фізичного поля**.
- Матерія в цій картині існує в двох формах – *речовини і поля*, між якими є непрохідна грань: *речовина не перетворюється на поле і навпаки*.
- Відомі два види поля – *електромагнітне і гравітаційне*.
- Взаємодії тіл на відстані *відбувається зі швидкістю світла (принцип близькодії)*.
- Вводиться **концепція відносного простору і часу**. Час нерозривно пов'язаний з процесами, які відбуваються у полі.
- *Все в природі (крім гравітації) зводиться до електромагнетизму*.
- У фізику вперше вводяться поняття *випадковості та ентропії, стріли часу*. З'ясовується необоротність більшості процесів у природі.
- У науці продовжує панувати **ньютонівсько-картезіанська парадигма подвійної реальності**, за якою світ існує незалежно від людини. Відповідно **матеріальний світ можна описати об'єктивно**, не долучаючи до цього опису людину - спостерігача.
- **Життя і розум не мають ніякої якісної специфіки**.

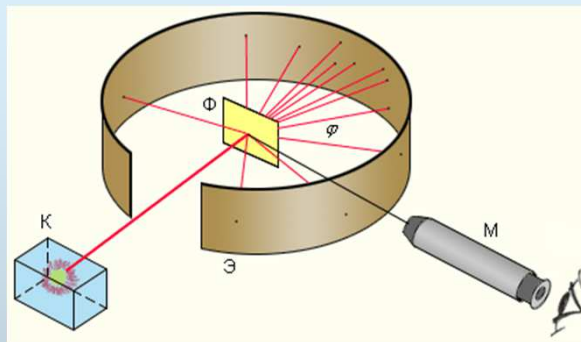
КРИЗА ФІЗИКИ 1895-1905 рр.



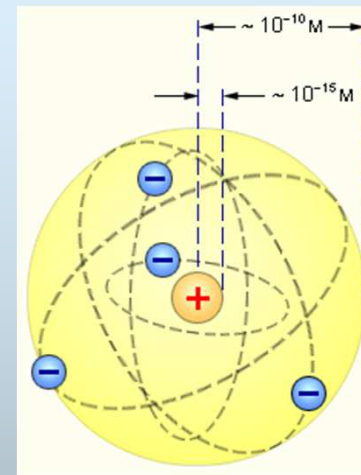
Фотоефект



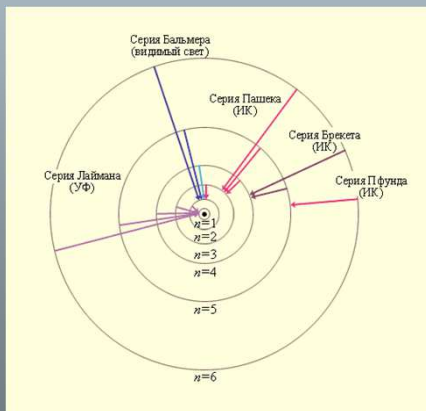
Теплове випромінювання



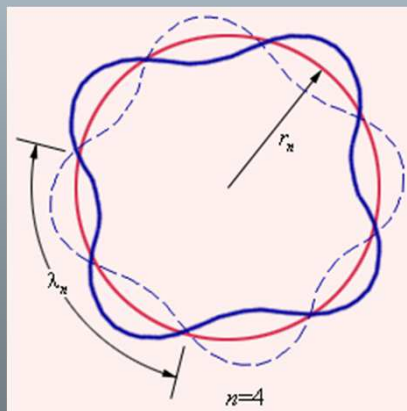
Досліди Резерфорда



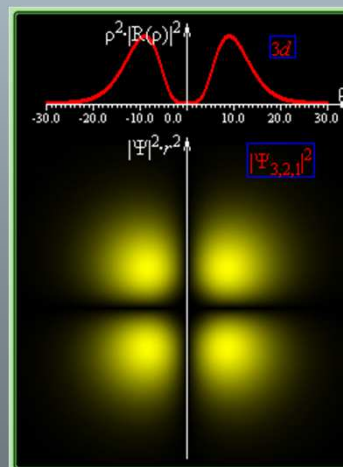
Модель атома Бора



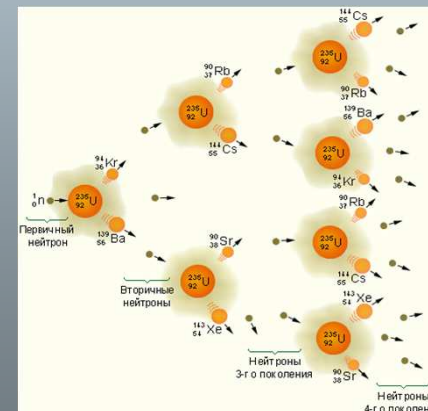
Спектри випромінювання



Корпускулярно-хвильовий дуалізм



Хвильова функція



Радіоактивність

СТАНОВЛЕННЯ КВАНТОВО-РЕЛЯТИВІСТСЬКОЇ КАРТИНИ СВІТУ

Класична фізика

Засновник Ньютон,
1665-1687 рр.

L, m - великі, $v \ll c$ G

Релятивістська фізика

Засновник Ейнштейн,
1905 р.- СТВ, 1915 р.- ЗТВ

L, m - великі, $v \sim c$ c

Квантова фізика

Планк, ле Бройль, Шредінгер,
1900-1924 рр.

L, m - малі, $v \ll c$ h

Релятивістська, квантова фізика

Дірак, 1928 р.

L, m - малі, $v \sim c$

Фізика вакууму

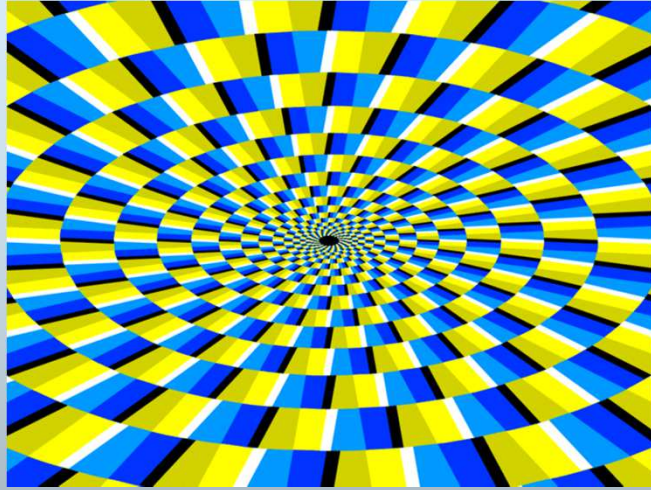
Звичайна речовина становить 4% маси Всесвіту G, c, h

Область невідомих законів

КВАНТОВО-РЕЛЯТИВІСТСЬКА КАРТИНА СВІТУ

- Основа - *релятивістська фізика і квантова механіка.*
- В фізику вводиться ідея *дискретності, квантово-корпускулярного дуалізму. Зтирається грань між речовиною і полем.*
- *Простір і час відносні і пов'язані як між собою так і з матерією.*
- Виникає ідея розвитку (*діалектики*) природи.
- Атом є подільним. Стабільність елементарних частинок виняток, *правилом є їх нестабільність.*
- *Фундаментальними є закономірності ймовірності, що не зводяться до динамічних. Природа речей ґрунтується на випадковості і невизначеності. Опис природи на рівні мікросвіту та ансамблю частинок ймовірностний.*
- *Принципово неможливо відокремити спостерігача від об'єкта досліджень.* Звідси картина світу є *суб'єктивною.*

РЕЛЯТИВІСТСЬКА МЕХАНІКА



*Был этот мир глубокой тьмой окутан.
Да будет свет! И вот явился Ньютон,
Но Сатана недолго ждал реванша,
Пришел Эйнштейн, –
и стало все как раньше*

С.Я. Маршак

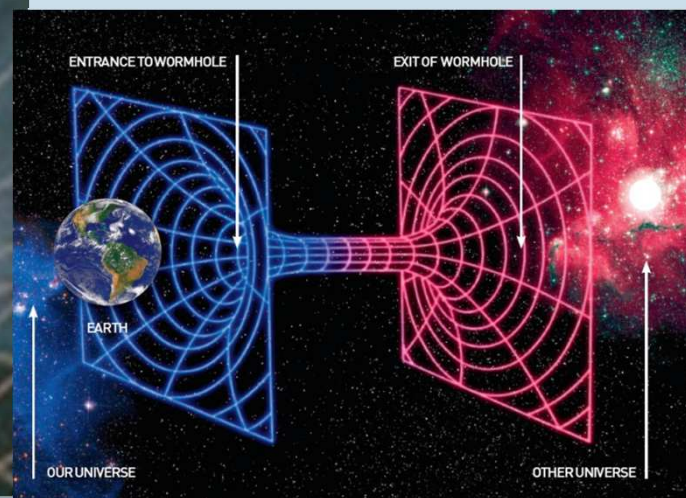
*Здравый смысл – это предрассудки, которые
складываются в возрасте до восемнадцати лет*

А. Эйнштейн

ОБМЕЖЕНІСТЬ КЛАСИЧНОЇ МЕХАНІКИ

Класична механіка (механіка Галілея - Ньютона) описує рух макроскопічних тіл зі швидкостями набагато меншими за швидкість світла

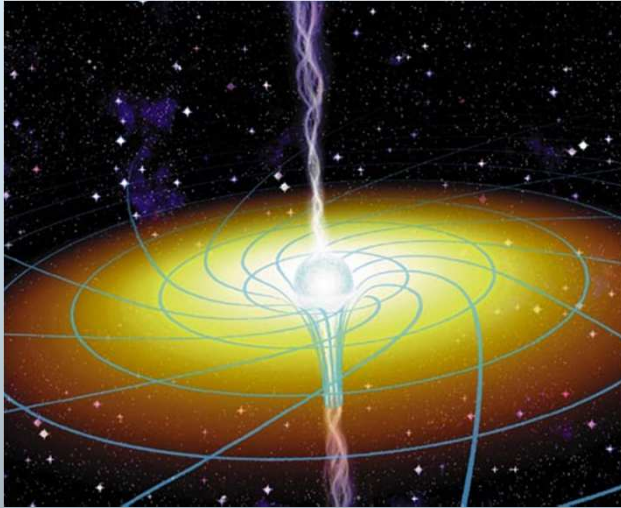
$$v \ll c \quad \text{де} \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$



Графічна ілюстрація викривлення простору - часу під дією матеріальних тіл одне з основних передбачень загальної теорії відносності. Зліва - невеличка воронка, яка утворилася під дією Сонця; в центрі – викривлений простір-час більш масивної нейтронної зірки; справа - глибока воронка без дна – чорна дірка.

Кротова нора, або червоточина (wormhole) - це гіпотетичний стан простору-часу, що представляє з себе «тунель» у просторі. «Кротові нори» можуть бути «світові» (intra-universe), і «міжсвітові» (inter-universe), вони поділені між собою в залежності від того, чи здатні їх входи бути з'єднаними кривою, що не перетинає горловину «нори».

НАСЛІДКИ ІЗ ЗТВ



ЧОРНІ ДІРКИ

Можливість існування ЧД впливає із ЗТВ, зокрема із розв'язку Шварцшильда

$$F = mg = G \frac{Mm}{r^2 \sqrt{1 - \frac{R_\phi}{r}}}$$

Гравітаційний радіус (радіус Шварцшильда)

$$r_g = \frac{2GM}{c^2}$$

З рівняння випливає, що жодна сила в природі за цим радіусом не може компенсувати гравітаційну. В результаті тіло стискається до дуже малих розмірів, а його густина досягає неймовірних значень.

Такий об'єкт називають ЧД оскільки випромінювання від нього до спостерігача не надходить.

$$v = \sqrt{Rg} > c$$

ЧОРНІ ДІРКИ



У ядрі нашої Галактики також є "чорна дірка" масою 4 млн. мас нашого Сонця. Жовтою лінією вказана траєкторія її руху за останні 230 млн. років. Вона знаходиться від нас приблизно на відстані 6000 світлових років.

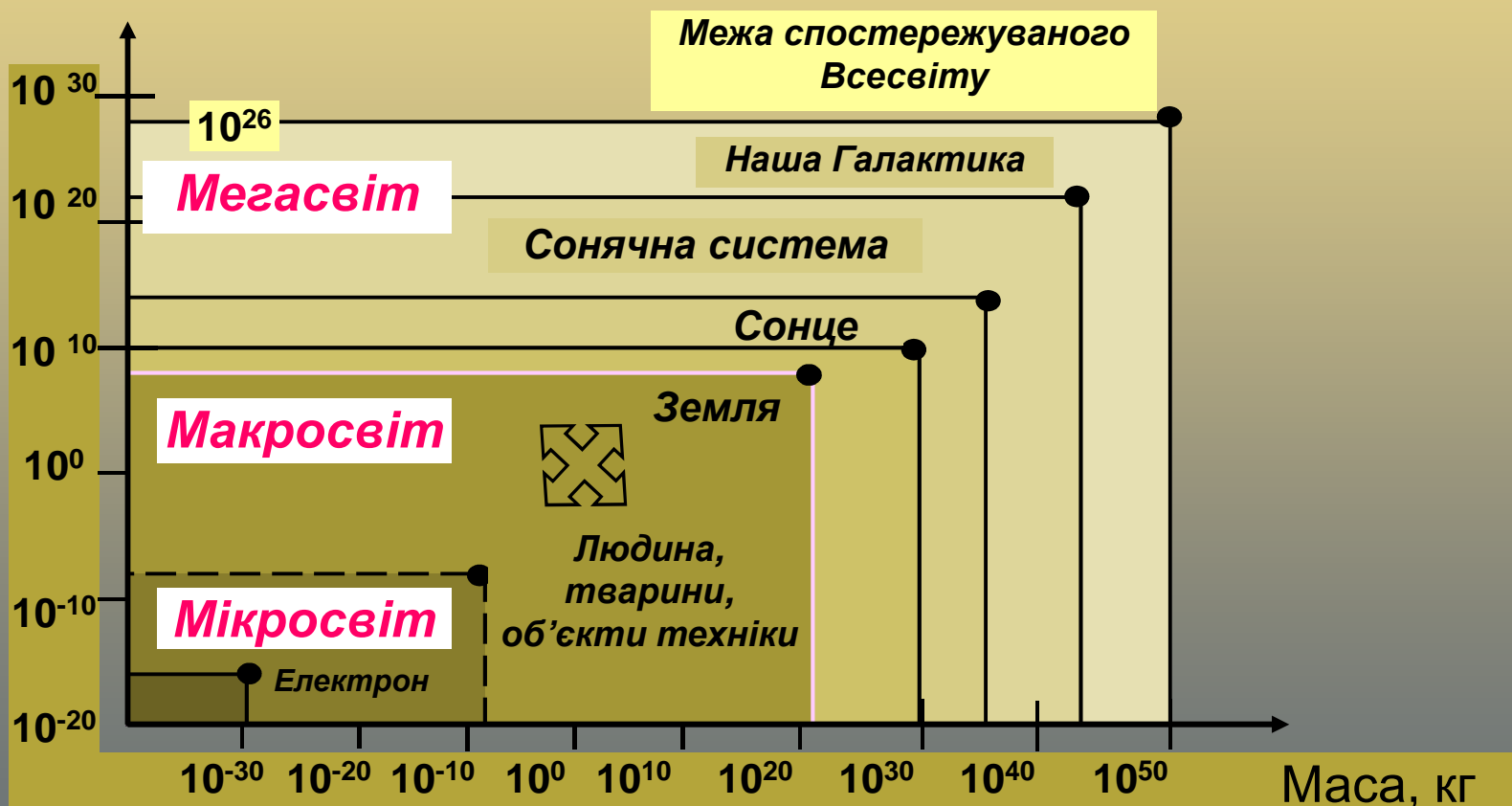
ЕВОЛЮЦІЙНО-СИНЕРГЕТИЧНА КАРТИНА СВІТУ

*От Ньютона до Куна, сна-покою не зная,
Развивалась наука, парадигмы меняя...
И решила наука, что в Сознании сила,
А не только в Материи – как раньше учила*
А. Ільїн

- Основна задача: **включення життя і розуму у картину світу.**
- Перегляд уявлень про простір і час:
простір є багатовимірним;
простір і час є дискретними.
- **Інформація визнається атрибутом матерії як і рух, простір та час.**
- Основою світу є **збудження фізичного вакууму.**
- Основний об'єкт дослідження **відкриті** динамічні системи.
- Центральна ідея – **ідея розвитку або еволюції природи.**
- Усвідомлення **нелінійності більшості явищ Всесвіту.**
- Опис природи на всіх рівнях буття **ймовірностний.**
- Зміна способу мислення: **аналітичне мислення замінюється системним.**
- **Математичний апарат нелінійні диференціальні рівняння**

МАСШТАБИ МІКРО-, МАКРО- ТА МЕГАСВІТІВ

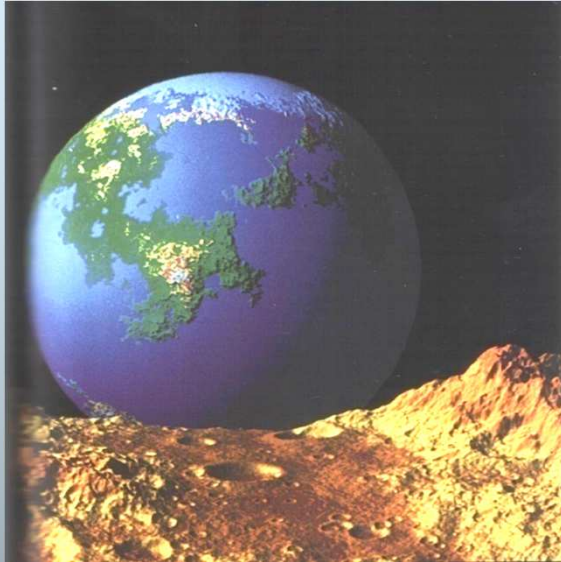
Характерний розмір, м



ШКАЛА ЧАСУ

- Всесвіту - $13,81 \pm 0,11$ млрд. років
- Сонцю - 4,59 млрд. років
- Життю на Землі – 3,9 млрд. років
- Життю на суші - 435 млн. років
- Першим приматам (Іда) - 47 млн. років
- Першим гомінідам (*австралопітекам*) - 4-3 млн. років
- Прирученню вогню людиною прямоходячою (*Homo erectus*) – 1 млн. років
- Сучасній людині (*Кроманьйольцю*) – 100-300 тис. років
- Найдревнішим цивілізаціям - 8-10 тис. років
- Християнству – 2 тис. років
- Сучасній науці – 300 років

МАКРОСВІТ



*Не то, что мните вы, природа:
Не слепок, не бездумный лик -
В ней есть душа, в ней есть
свобода,
В ней есть любовь, в ней есть
язык
Ф. Тютчев*

- Впродовж останніх двох-трьох десятиріч відбулася революція у сфері дослідження явищ, які чудово описуються класичною механікою і належать до макросвіту. За цей час були відкриті *явища динамічного хаосу, самоупорядкування та саморозвитку у відкритих системах*

СИМЕТРІЯ І АССИМЕТРІЯ У ПРИРОДІ

В пізнанні довколишнього світу є три ступені знання: *рівень явищ або подій, законів природи і, нарешті, принципів симетрії*. Підіймаючись цими сходами, вдається все глибше і глибше пізнавати закони буття. Найбільш елементарним є рівень явищ. До нього належить все, що відбувається у світі: рух будь-яких тіл, зіткнення частинок, поглинання і випромінювання світла та багато інших природних процесів. З першого погляду здається, що між ними немає нічого спільного. Проте при більш уважному розгляді можна встановити, що між явищами є певні стійкі взаємозв'язки, що повторюються, – об'єктивні закономірності. Людство ж пізнає закони природи – відображення цих закономірностей у нашій свідомості. *Закони природи завжди мають об'єктивний характер і відображають реальні процеси, що пов'язують явища довколишнього світу.*

В принципі, якби фізики мали у своєму розпорядженні повну інформацію про всі явища і події у світі, то знання законів не було б потрібним. З іншої боку, якби були відомі всі закони або один загальний закон природи, до чого весь час прагнуть фізики, то властивості *інваріантності* (незмінності при деяких перетвореннях) цих законів не давали б ніякої нової інформації. Але, на жаль, навіть більшість законів природи фізикам невідома, тому вони шукають закономірності (*симетрію*) у самих законах природи. Таким чином, якщо *закони керують явищами, то принципи симетрії – це закони фізичних законів*.

Виявлення різних симетрій у природі, а іноді і постулювання їх стало одним із методів теоретичного дослідження мікро-, макро- і мегасвітів. *Закони природи дозволяють передбачати явища, а принципи симетрії – відкривати закони природи.. Встановлення прихованих симетрій у природі дозволяє об'єднати розрізнені знання у єдину теорію та побудувати цілісну картину світу.* Математичним апаратом, який дозволяє це зробити, є теорія груп (симетрії).

Таким чином, усі фізичні закони і явища природи підпорядковуються певним законам симетрії.

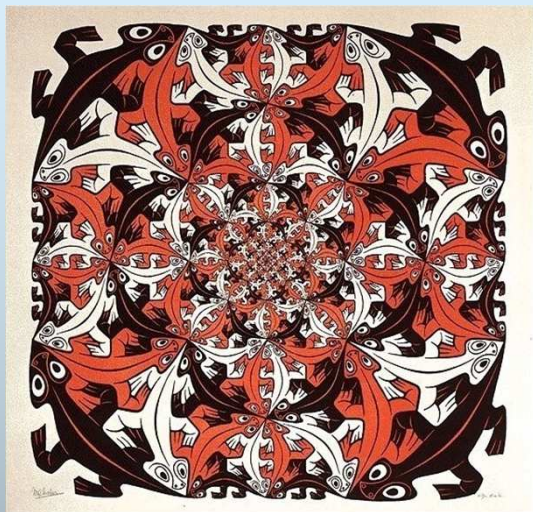
СИМЕТРІЯ І АССИМЕТРІЯ У ПРИРОДІ

- Сьогодні відомо декілька симетрій фізичних законів:
- 1 Фізичні закони незмінні, інакше кажучи, *інваріантні* відносно перенесення (*трансляції*) у просторі, що обумовлене однорідністю останнього.
- 2 Фізичні закони інваріантні відносно до поворотів у просторі. Ця властивість пов'язана з *ізотропією простору*.
- 3 Симетрія фізичних законів визначається і однорідністю часу, *вони інваріантні відносно до перенесень у часі*.
- 4 Принцип відносності законів природи – це також симетрія відносно до переходу з однієї інерціальної системи відліку в іншу. Ця симетрія встановлює *рівнозначність усіх інерціальних систем відліку*.
- 5 Перебіг фізичних явищ не змінюється при перестановці двох ідеально однакових частинок (наприклад, електронів або протонів) – це так звана *перестановна симетрія*.
- 6 Ще один вид симетрії фізичних законів – *інваріантність відносно до віддзеркалення*. Це означає, що дві фізичні установки, одна з яких побудована як дзеркальне відображення іншої, функціонуватимуть однаково.
- Таким чином, у найбільш широкому значенні *симетрія - це інваріантність явища чи об'єкта відносно деяких його перетворень*.

СИМЕТРІЯ І АССИМЕТРІЯ У ПРИРОДІ

- На початку ХХ ст. Е. Нетер сформулювала теорему, згідно з якою, *якщо властивості системи не змінюються від якогось перетворення, то цьому відповідає деякий закон збереження* (теорема Нетер).
- Теорема Нетер може бути сформульована по-іншому. *Наявність в системі симетрії обумовлює існування для неї фізичної величини, що зберігається.* Наприклад, закон збереження імпульсу є наслідком однорідності простору, а закон збереження енергії – наслідком однорідності часу.
- *Симетрії завжди пов'язані із збереженням якихось фізичних величин. Це своєрідні “опорні точки” Всесвіту.*
- Симетрія виділяє спільне як в об'єктах, так і в явищах, підкреслюючи, що, незважаючи на те, що світ різноманітний, у той самий час він і єдиний, оскільки в різноманітних явищах природи наявні елементи спільності.
- Добре відомо, що закони класичної фізики перестають працювати у мікросвіті, замість них використовуються закони квантової механіки. Те саме відбувається при збільшенні швидкості руху системи та наближенні її до швидкості світла, тут працює релятивістська теорія. Все це - вже прояв *асиметрії* законів природи.
- *Симетрія і асиметрія – дві полярні протилежності об'єктивного світу.* На різних рівнях розвитку матерії наявні то *симетрія – відносний порядок, то асиметрія – тенденції порушення спокою, початок руху, розвитку.*

НОВА СИМЕТРІЯ СВІТУ



Моріс Корнеліс Ешер

*Что, не поймешь Природу ты?
Лик Космоса - чужд и ужасен?
Узри фрактальные черты, и ты увидишь –
Мир прекрасен!
Необъясним Природы ритм?
Мрак черных дыр, тьма белых пятен?
Познай фрактальный алгоритм – и
Мир окажется понятен!*

Из нового фізичного фольклору

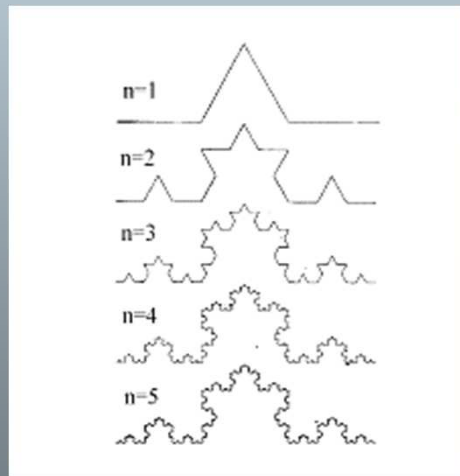
- При побудові моделей, що описують навколишній світ, люди звикли використовувати такі відомі геометричні поняття, як лінія, круг, квадрат, сфера, куб та ін. Однак виявилось, що ці прості образи не завжди адекватно описують природні об'єкти. Геометрія Евкліда, наприклад, не здатна описати форму хмар, гір, дерев, узбережжя моря та ін.
- Це дозволяє зробити так звана **фрактальна геометрія**, центральним поняттям якої є поняття **“фрактал”**.
- **Таким чином була відкрита ще одна симетрія у природі.**

ФРАКТАЛИ

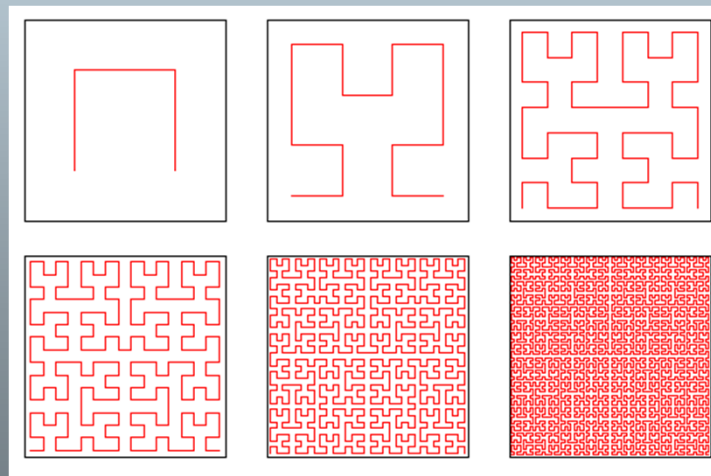
- Термін фрактал ("*frangere*" - ламаний об'єкт з дробовою розмірністю) був запропонований Бенуа Мандельбротом в 1975 році для позначення нерегулярних, але самоподібних структур, якими він займався. Виникнення фрактальної геометрії прийнято пов'язувати з виходом у 1977 році книги Мандельброта «Fractal Geometry Nature».
- Математичне поняття фрактала виділяє **об'єкти, що мають структури різних масштабів, які відображають ієрархічний принцип їх організації.**
- Фрактали володіють властивістю **самоподібності**: їх вигляд істотно не змінюється при розгляді з різним збільшенням, тобто фрактал має практично однаковий вигляд, в якому б масштабі його не спостерігали.
- Іншими словами, **фрактал складається з однотипних елементів різних розмірів і, по суті, є візерунком, що повторюється при зміні масштабів.** Малий фрагмент такого об'єкта подібний до іншого, більш великого фрагмента або навіть до структури у цілому. Тому говорять, що **фрактал є структурою, що складається з частин, які подібні до цілого.**
- Головна особливість фракталів полягає у тому, що вони мають **дробову розмірність**. $1 < D_f < 3$.
- **Фрактали поділяють на геометричні та алгебраїчні.**

ГЕОМЕТРИЧНІ ФРАКТАЛИ

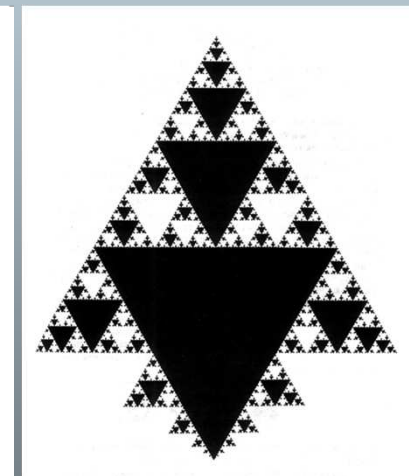
- В двовимірному випадку фрактали одержують за допомогою деякої ламаної лінії, в тривимірному - поверхні, що називаються *генератором*. За один крок алгоритму кожний з відрізків, що складають ламану, замінюється на ламану-генератор у відповідному масштабі. В результаті нескінченного повторення цієї процедури одержують *геометричний фрактал*.



Триадна крива Коха
неперервна крива
нескінченної довжини



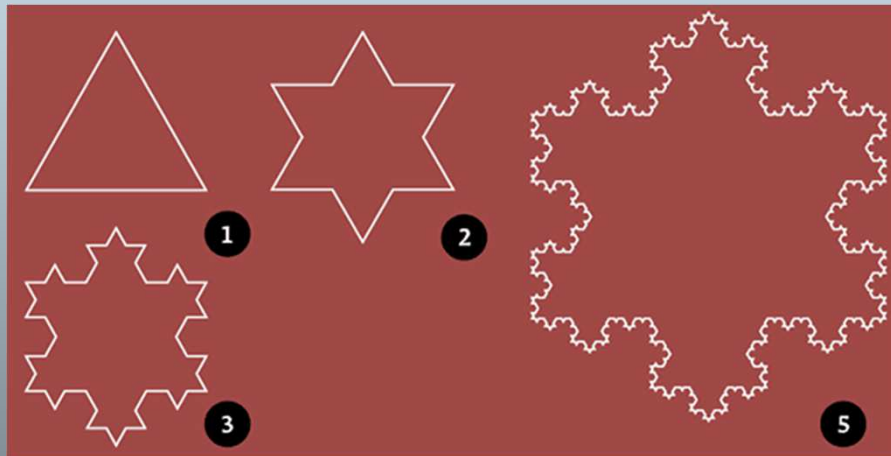
Крива Пеано
неперервна крива, що проходить
через всі точки квадрату



Двовимірний фрактал

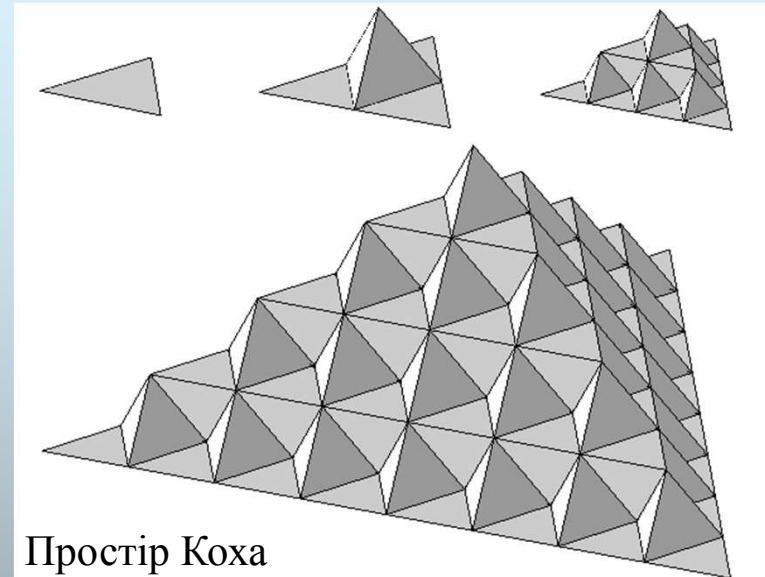
ГЕОМЕТРИЧНІ ФРАКТАЛИ

Довжина лінії, площа поверхні або об'єм тіла пропорційні відповідно лінійному масштабу у першому, другому або третьому ступені, тобто їх розмірність дорівнює розмірності простору, в який вони вкладені. Проте для фракталів це не так, їх **розмірність може виражатися дробовим числом** $1 < D_f < 3$, де D_f – **фрактальна розмірність**.

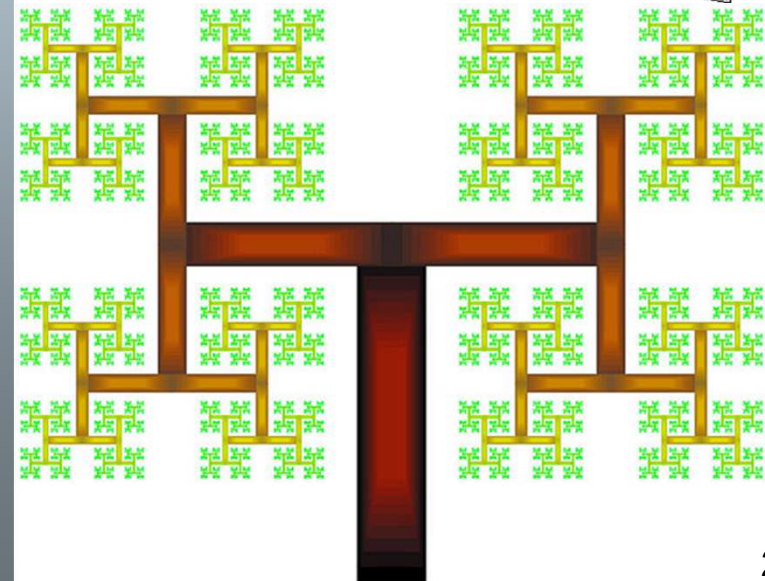


Сніжинка Коха. Вона маючи нескінченний периметр, обмежує кінцеву площу $D_f=1,2628$.

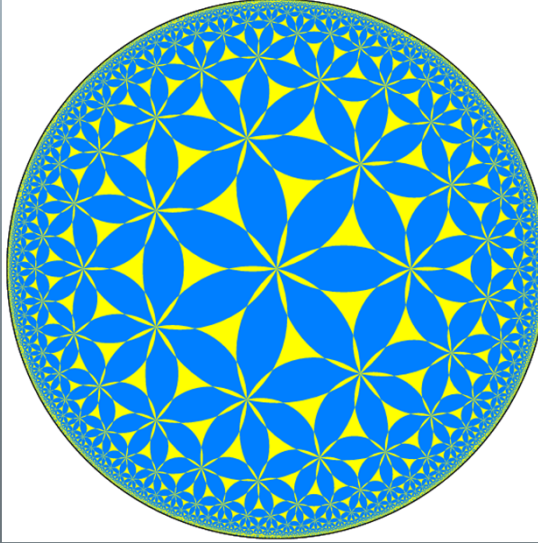
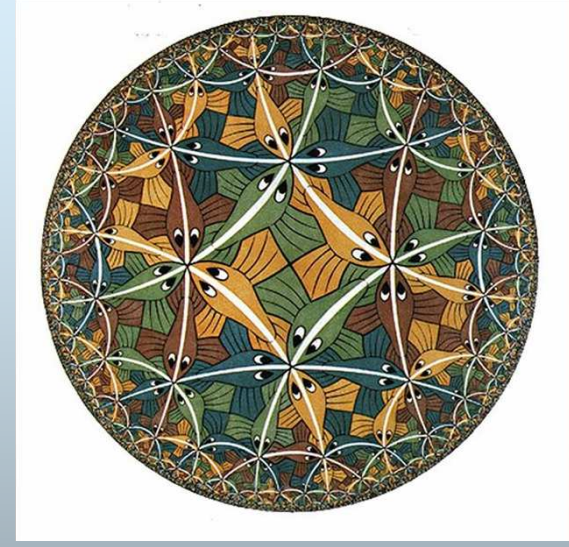
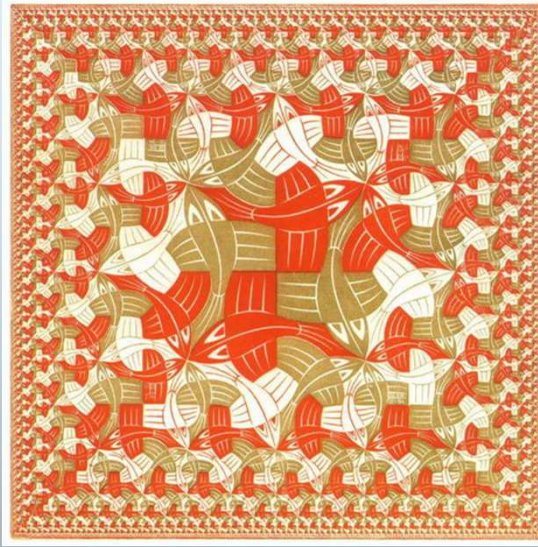
Дерево Мандельброта можна отримати, якщо рисувати товсті букви Н, що складаються з прямокутників



Простір Коха



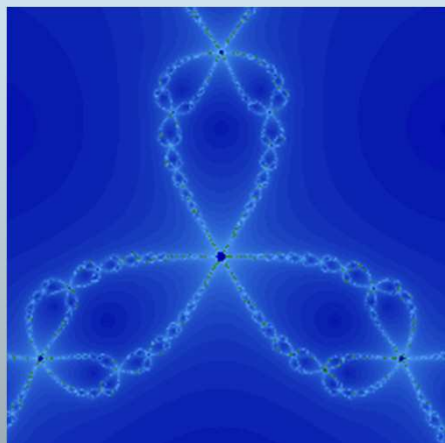
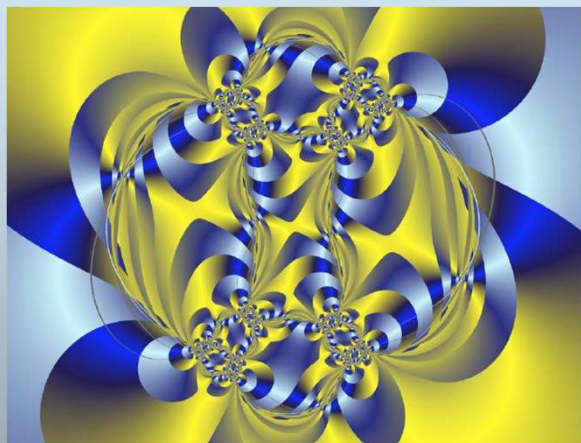
ФРАКТАЛЬНІ РИСУНКИ ЕШЕРА



Нідерландський художник-графік Моріс Корнеліс Ешер (1898 - 1972 рр.) використовував візерунки, які пізніше назвали фрактальними

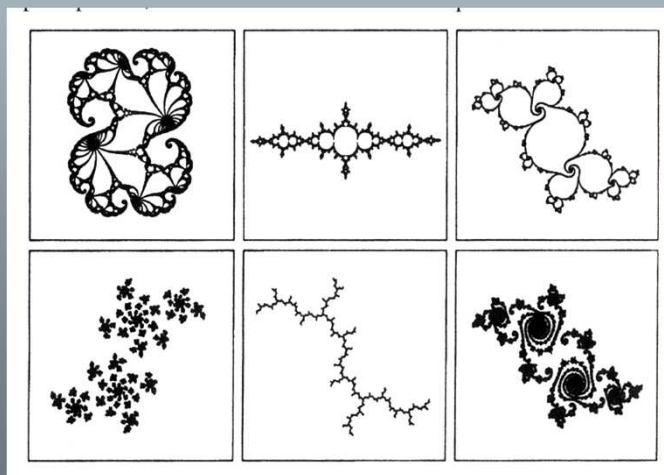
СТОХАСТИЧНІ ФРАКТАЛИ

При їх побудові генератор змінюється випадковим чином. Ці фрактали дуже нагадують природні об'єкти

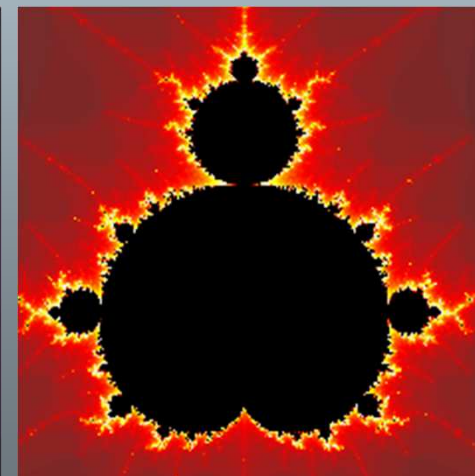
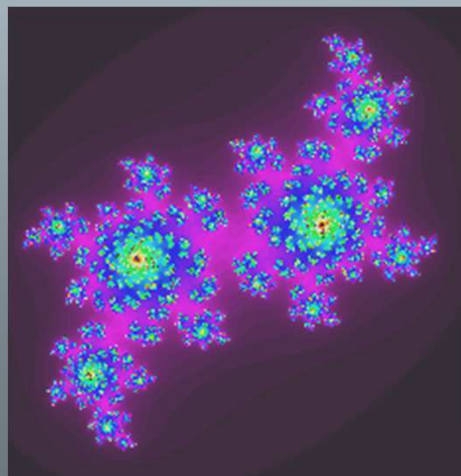


МНОЖИНА МАНДЕЛЬБРО

- Різні фрактальні множини (*алгебраїчні фрактали*) можна одержувати за допомогою простих *ітераційних перетворень*, наприклад, типу $x \rightarrow x^2 + c$, де x – комплексна змінна; c – деяке комплексне число. Коли подібний розрахунок виконується з різними початковими значеннями x , в деяких випадках результат у ході ітераційного процесу буде збільшуватися до нескінченності, у той час як у інших може залишатися скінченним. Відповідно набір усіх значень x , чи точок на комплексній площині (у координатах x , c), які при ітерації обмежені деякою границею, тобто є скінченними, одержав назву *множини Жуліа*. Наприкінці 70-х років Мандельбро, зробив спробу класифікувати множини Жуліа, побудувавши *множину Мандельбро*. *Множина Мандельбро - це сукупність точок на комплексній площині з такими константами c для яких відповідні множини Жуліа являють собою єдині зв'язані області. Ця множина єдина. Вона є найскладнішим математичним об'єктом із всіх коли-небудь винайдених людством. Це надфрактал незбагненої складності* .



Різноманіття фрактальних множин Жуліа



Множина Мандельбро

МНОЖИНА МАНДЕЛЬБРО

Коли множина Мандельбро будується на фіксованій координатній сітці, наприклад, на екрані комп'ютера з'являються два диски: менший з них має майже круглу форму, більший віддалено нагадує контури серця. На кожному з двох дисків виділяється декілька невеликих дископодібних наростів, розміщених на їх границях. Подальше підвищення розрізнення (тобто підвищенням роздільної здатності обчислень) виявляє велику кількість все більш дрібних наростів, що нагадують колючі шипи. Починаючи з цього моменту, багатство форм, що виявляються розширенням меж множини, майже не піддається опису. У міру того, як масштаб спостереження зростає і зображення границі множини збільшується, здається, що проростають паростки і вусики, які, після чергового збільшення, розчиняються у величезній кількості нових форм – логарифмічних спіралей усередині інших спіралей, морських коників і водовертей, що знову і знову повторюють одні і ті ж форми. Ці різноманітні фігури одержали назву *юліанських рядів*.

На кожному кроці “занурення” у глибини множини Мандельбро (потужності сьогоденішніх комп'ютерів забезпечують збільшення у 10^8 разів) нас чекають нові відкриття: ми знову і знову знаходимо найдрібніші копії всієї множини Мандельбро, глибоко заховані в структурі її границі.

Множину Мандельбро можна розглядати як склад, резервуар різноманітних природних форм з їх нескінченними деталями і варіаціями. Точно кажучи, вона не є самоподібною, оскільки не тільки знову і знову повторює одні і ті ж структури, включаючи маленькі копії всієї множини, але і містить, окрім цього, елементи з нескінченного набору множин Жуліа!

ФРАКТАЛЬНИЙ СВІТ

- Фрактальна геометрія змусила вчених переглянути саме поняття складності. *Виявилося, що прості правила ітерації породжують структури складніші, ніж ми можемо навіть собі уявити.*
- Нові відкриття свідчать, що навколишній світ підпорядковується невеликій кількості не складних за своєю суттю законів, які ще потрібно відкрити. Складається враження, що *Всесвіт у своїй основі є досить простим*, або як висловився з цього приводу Ейнштейн, “*При створенні світу Бог був витончений але не злонамірений*”.
- *Квазіфрактал* відрізняється від ідеальних абстрактних фракталів неповнотою і неточністю повторень структури. *Більшість фракталоподібних структур (межі хмар, лінія берега, дерева, листя рослин, корали та ін.), що зустрічаються в природі є квазіфракталами*, оскільки на деякому малому масштабі фрактальна структура зникає. Природні структури не можуть бути ідеальними фракталами із-за обмежень, що накладаються розмірами живої клітини і, зрештою решт, розмірами молекул.
- Таким чином виявилось, що *книга природи написана мовою квазіфракталів.*

ФРАКТАЛЬНИЙ СВІТ



•В наші дні теорія фракталів знаходить широке застосування в різних областях людської діяльності. Крім фрактальної живопису **вони використовуються в теорії інформації для стиснення графічних даних** (тут в основному застосовується властивість самоподібності фракталів - адже щоб запам'ятати невеликий фрагмент малюнка і перетворення, за допомогою яких можна отримати інші частини, потрібно набагато менше пам'яті, ніж для зберігання всього файлу). Додаючи в формули, що задають фрактал, випадкові збурення, можна отримати **стохастичні фрактали, які дуже правдоподібно передають деякі реальні об'єкти** - елементи рельєфу, поверхню водойм, деякі рослини, що з успіхом застосовується у фізиці, географії та комп'ютерної графіки для досягнення більшої схожості модельованих предметів з справжніми. У радіоелектроніці в останнє десятиліття почали випускати **антени, що мають фрактальну форму**. Займаючи мало місця, вони забезпечують цілком якісний прийом сигналу. А економісти використовують фрактали для опису кривих коливання курсів валют (ця властивість була відкрита Мандельбротом більше 30 років тому).

ДИНАМІЧНИЙ ХАОС

- Тривалий час вважалося, що прості системи, які описуються динамічними теоріями, повинні поводитися однозначно і детерміновано, тобто повністю передбачувано. В результаті при розгляді таких систем немає необхідності звертатися до поняття ймовірності. Проте виявилось, що так буває не завжди. Точне визначення положення тіла у механіці є абстракцією, ідеалізацією, **реально здійснення ідеального класичного детермінізму практично неможливе**.
 - По-перше, **початкові умови не можуть бути визначені абсолютно точно**.
 - По-друге, **в процесі руху на систему діють випадкові сили**, які, як правило, не враховуються (або про них нічого не відомо). Навіть якщо ці сили малі, то їх ефект може виявитися значним після достатньо великого часу дії.
 - По-третє, **неможливо гарантувати, що в процесі руху система залишатиметься ізольованою**.
- Тому для опису системи необхідно задавати умови на межі тієї області, усередині якої вона рухається.
- Це означає, що **рух, який передбачається класичною механікою, врешті-решт виявляється нестійким відносно малих змін початкових умов або в результаті дії випадкових сил**. Які б малі не були ці дії, завжди можна знайти такий час, при якому їх ефект виявляється превалюючим. У результаті для кожної механічної системи існує визначений критичний час (горизонт прогнозу), починаючи з якого неможливо точно передбачити її поведінку.
 - Таким чином, з'ясувалося, що **ймовірність виявляє себе навіть там, де безсумнівно вважалося, що царюють однозначні причинно-наслідкові зв'язки**.

ДИНАМІЧНИЙ ХАОС

- Отже, *хаотична, випадкова поведінка можлива навіть в дуже простих динамічних системах.* Дане явище отримало назву *динамічного, або детермінованого хаосу*.
- *Під динамічним хаосом розуміють нерегулярну, або хаотичну поведінку простої системи, що підпорядковується регулярним, невипадковим динамічним законам.*

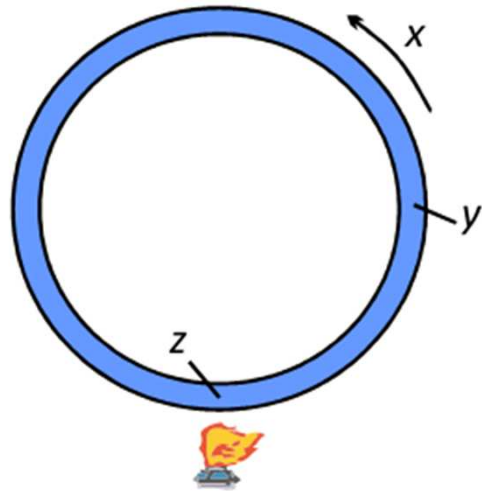
Або коротко – це народження *випадкового з невипадкового*.

Для спостереження даного явища *система обов'язково повинна бути нелінійною*, тобто описуватися *нелінійними диференціальними рівняннями*.

- Вивчає такі процеси наука, яка має назву *нелінійна динаміка*.
- Сьогодні відомо, що більшість рівнянь класичної механіки призводять до хаосу, або, як говорять, *ці рівняння не інтегруються*.
- За висловом британського математика Я. Стюарта, *природа виявилася “безжалісно нелінійною”*.
- На сьогодні відкрито декілька шляхів переходу до хаосу. Зокрема, виникнення динамічного хаосу пов'язують із *нестійкістю руху системи відносно до початкових умов*. Таку чутливість іноді називають *ефектом “метелика”*.

ДИНАМІЧНИЙ ХАОС

Система Лоренца



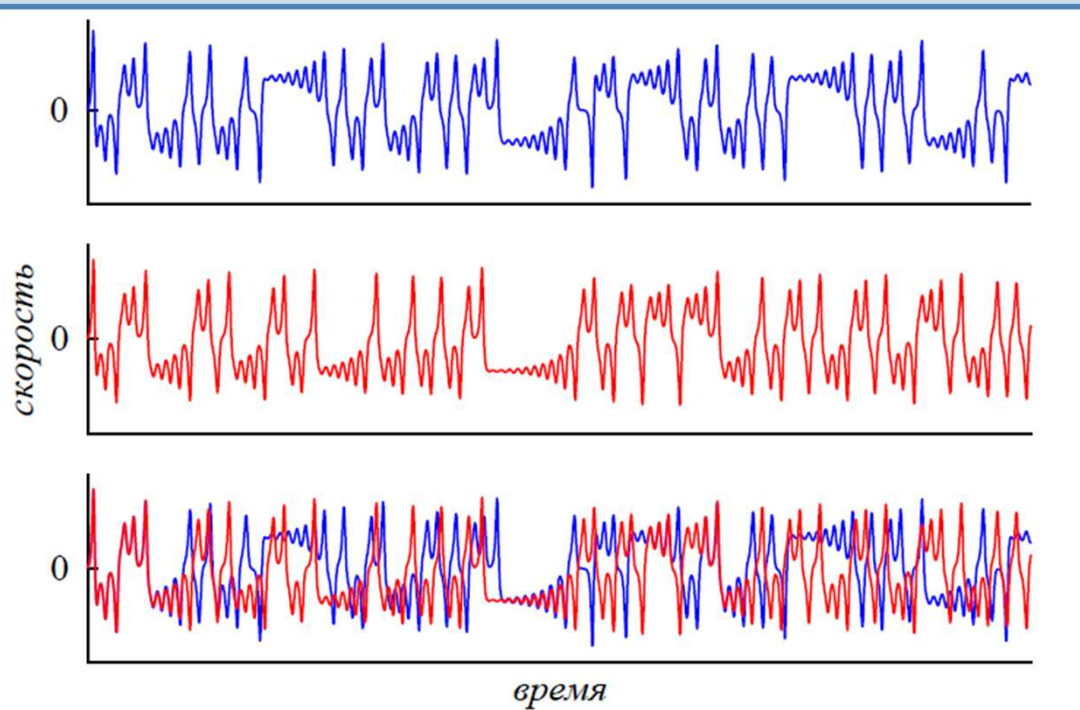
$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) \\ \dot{y} = x(b - z) - y \\ \dot{z} = xy - cz \end{cases}$$

x – швидкість течія;

y, z – відхилення температури від середнього значення

- Через таку малість! Через метелика! - Закричав Екельс. ... - Витончене маленьке створіння, здатне порушити рівновагу, попадали маленькі кісточки доміно ... великі кісточки ... величезні кісточки, сполучені ланцюгом незліченних років, складових Часу.

Р. Бредбері. І грянув грім

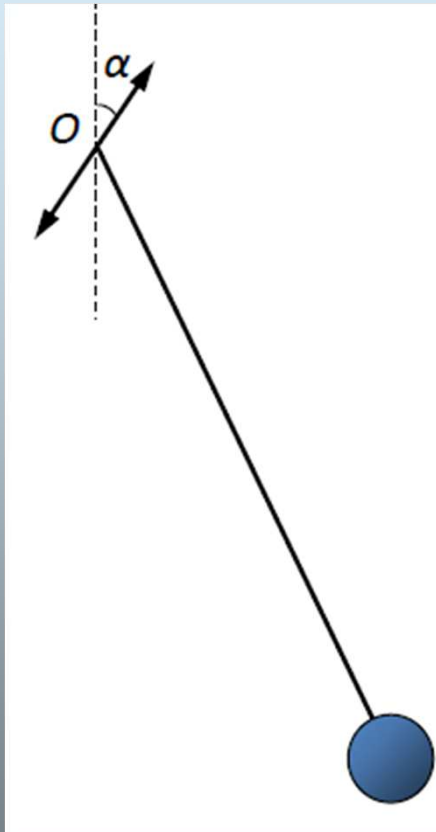


Залежність швидкості течії рідини від часу. Початкові значення величин: $x_0=0, y_0=1, z_0=2$ (синя лінія); $x_0=0, y_0=1, z_0=2,01$ (червона лінія)

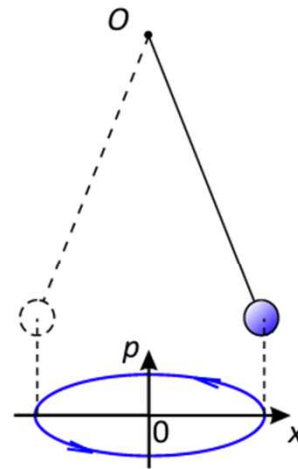
ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ

- Будь-яку матеріальну точку, що рухається у тривимірному просторі, можна описати за допомогою шести чисел, які відповідають координатам та проєкціям її швидкостей (імпульсів) на осі координат. Як правило, для цього використовують так звані **узагальнені координати** (q_i) та **узагальнені швидкості або імпульси** (p_i). Добре відомо, що узагальненими координатами називаються будь-які величини (довжини, кути, площі і т.ін.), які однозначно визначають положення механічної системи у просторі. Похідні за часом від узагальнених координат називаються узагальненими швидкостями.
- Тоді для опису динаміки деякої системи можна ввести багатовимірний (фазовий) простір, у якому осями є координати і проєкції швидкостей (імпульсів) тіла на відповідні осі. Точку, що описує стан системи у цьому просторі в даний момент часу, називають **M-точкою**, а криву у фазовому просторі, що описує еволюцію системи з часом, – **фазовою траєкторією**. Сукупність фазових траєкторій, яка виникає при зміні початкових умов руху, називається **фазовим портретом системи**.
- Іншим важливим поняттям, що характеризує систему, є кількість **ступенів її вільності** - число незалежних величин, необхідних для визначення положення системи у просторі.

МАЯТНИК ЯК МОДЕЛЬ ПРИРОДНИХ ПРОЦЕСІВ



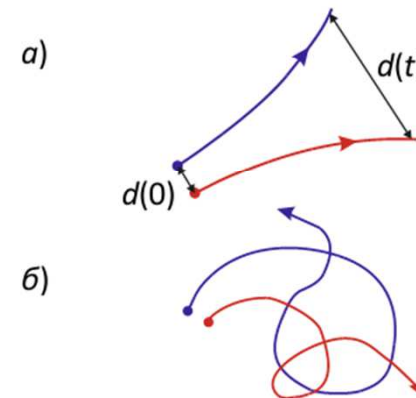
Збереження фазового об'єму



Консервативний маятник і його фазовий портрет

Розбіжність траєкторій

$$d(t) = d(0)\exp(ht), h > 0$$

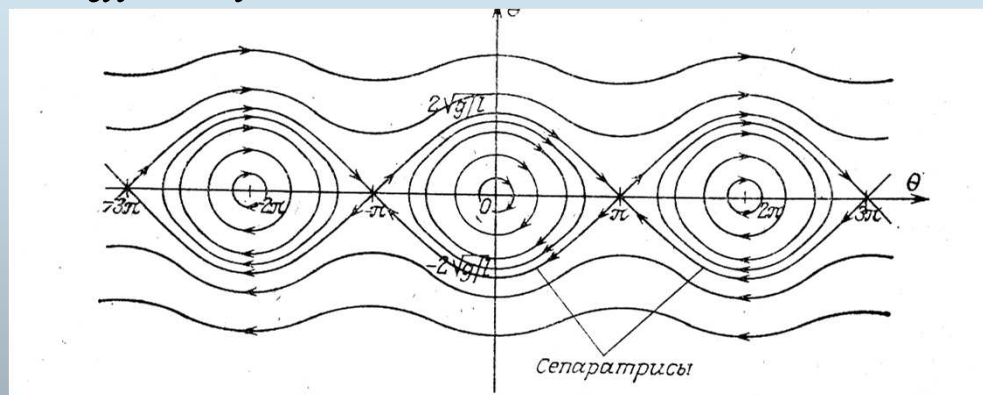


Розбіжність траєкторій (а) їх змішування (б)

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l}\sin\theta = 0$$

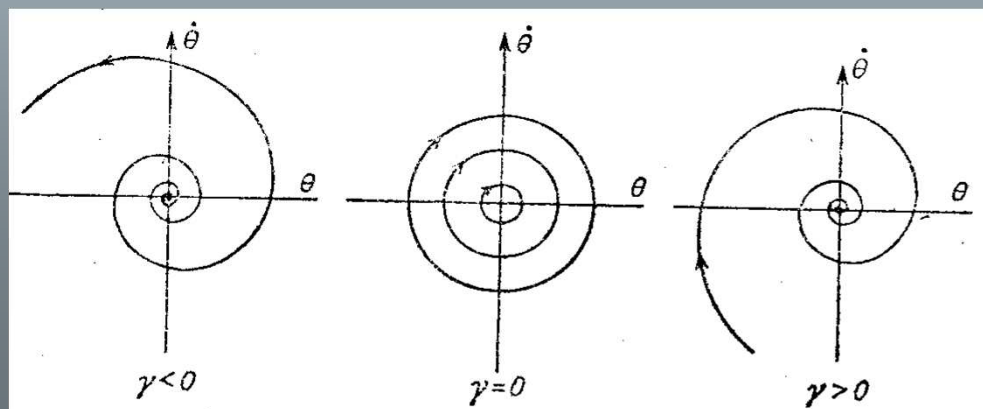
ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0 \quad E(\theta, \theta') = \frac{1}{2} \theta'^2 + \frac{g}{l} (1 - \cos \theta)$$



• **Фазовий портрет** математичного маятника без тертя. Криві на площині (θ, θ') – лінії постійної енергії маятника. Картина періодична відносно кута θ (період 2π)

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \gamma \frac{d\theta}{dt} + \omega^2 \theta = 0 \quad E(\theta, \theta') = \frac{1}{2} (\theta'^2 + \omega^2 \theta^2)$$



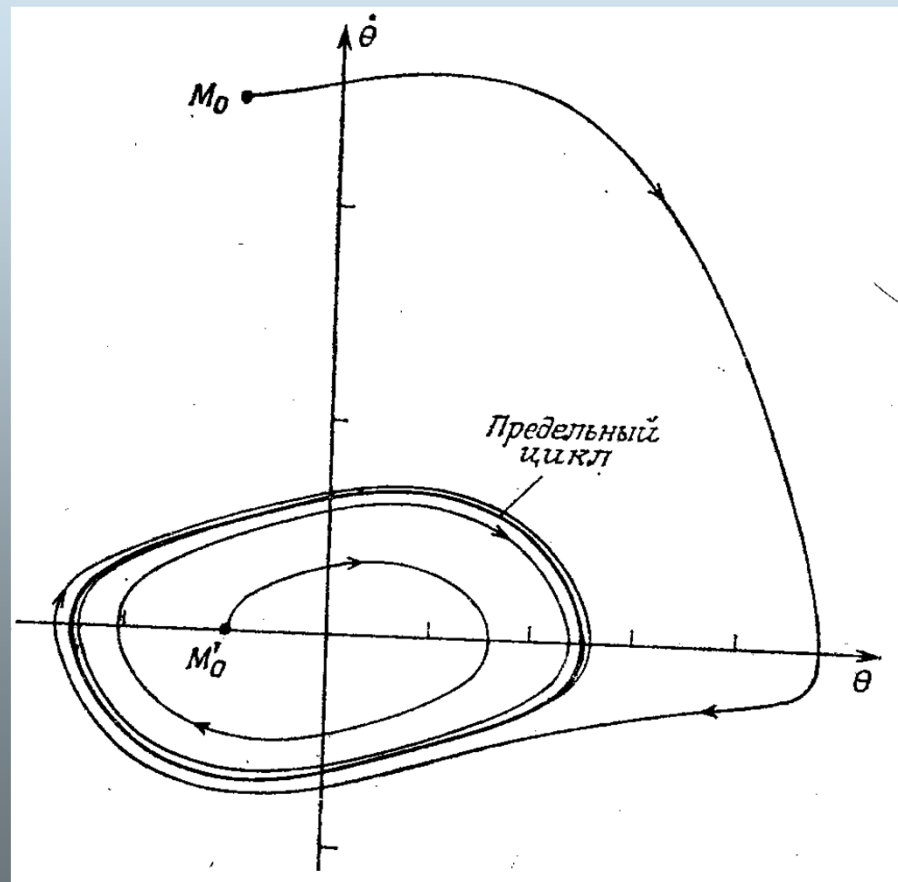
Фазовий портрет маятника з тертям.

а - $\gamma=0$; б - $\gamma<0$; в - $\gamma>0$

Якщо $\gamma > 0$ всі траєкторії на фазовій площині не залежно від початкових умов закінчуються на початку координат, який через це називається точкою притягання, або атрактором (від «attract» – притягання, мета).

РІВНЯННЯ ВАН ДЕР ПОЛЯ

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} - \gamma_0 \left[1 - \frac{\theta^2}{\theta_0^2} \right] \frac{d\theta}{dt} + \omega^2 \theta = 0$$

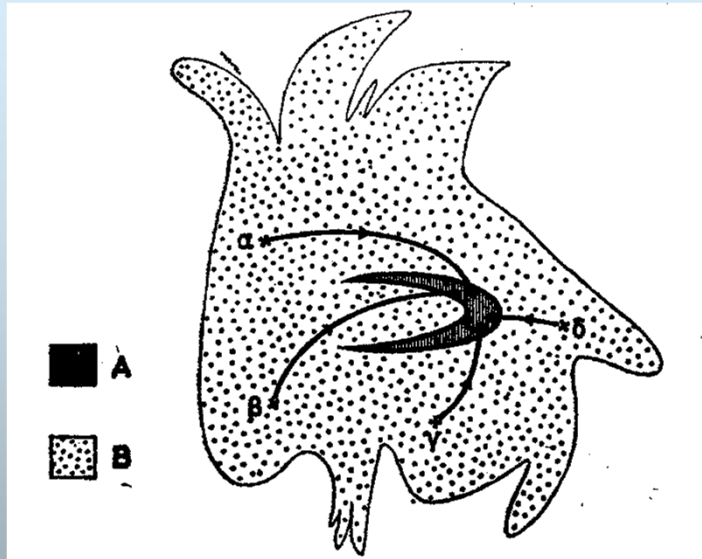


Фазовий портрет рівняння Ван дер Поля

Фазова траєкторія у вигляді замкнутої петлі отримала назву **періодичного атратора**, тоді як у випадку, коли всі траєкторії сходяться до однієї точки вона називається **точковим атратором**.

Загальною особливістю дисипативних динамічних систем є притягання усіх траєкторій, що проходять через деяку область фазового простору, до геометричного об'єкта, який називається атратором.

ДИВНІ АТРАКТОРИ



Областю притягання атрактора В називається безліч точок фазового простору, таких, що траєкторії, які виходять з них, при $t \rightarrow \infty$ прагнуть до атрактора А

Траєкторії деяких нелінійних динамічних систем у багатовимірному фазовому просторі поводять себе незвичайно. Як і в традиційному випадку, існує область, яка притягує до себе всі траєкторії з довколишніх областей, але завдяки особливим властивостям вона одержала назву **«дивного атрактора Лоренца»**. Такі атрактори дійсно виглядають дивно, оскільки не є ні точкою, ні періодичною траєкторією, ні поверхнею; їх порівнюють іноді з поверхнею, що складається з нескінченної множини шарів. Головна ж особливість полягає в тому, що **в дивному аттракторі вибраний навмання розв'язок блукатиме хаотично і з часом наблизиться достатньо близько до будь-якої його точки**. Тому такі процеси одержали назву динамічного хаосу. Дивний атрактор – це математичний образ детермінованих неперіодичних процесів, для яких неможливий довгостроковий прогноз.

ДИВНІ АТРАКТОРИ



Фазовий портрет атрактор
Уеда

Важлива властивість дивних атракторів полягає в тому, що вони, як правило, *обмежені малим числом вимірів* - навіть в багатовимірному фазовому просторі. Наприклад, система може мати 50 змінних, але її рух при цьому описується тривимірним дивним атрактором - згорнутою поверхнею в 50-вимірному просторі. Це, безумовно, характеризує *високий ступінь порядку атрактора*.

Таким чином, хаотична поведінка - в сучасному науковому розумінні цього терміна - суттєво відрізняється від безладного, нестійкого руху. *Хаотична поведінка особливим чином детермінована* і утворює складні структури у фазовому просторі, а дивні атрактори дозволяють зображувати на перший погляд випадкові події за допомогою виразних візуальних форм.

ПОНЯТТЯ БІФУРКАЦІЇ

- В багатьох нелінійних системах, *малі зміни певних параметрів можуть зумовити серйозні зміни основних характеристик їх фазового портрета*. При цьому деякі атрактори можуть зникнути або змінити свій тип, і в той же час можуть раптово з'явитися нові атрактори. Говорять, що такі системи є *структурно нестійкими*. Критичні точки нестійкості одержали назву ***точок біфуркації*** (від франц. *la bifurcation* – розгалуження, вилка), оскільки в еволюції системи саме в цих місцях раптово з'являється можливість вибору і система починає еволюціонувати в тому або іншому новому напрямі. У *фізичному сенсі точкам біфуркації відповідають точки нестійкості, у яких система різко змінює характер поведінки, в ній несподівано виникають нові форми впорядкованості*.
- В математичному значенні ***точки біфуркації відзначають якісні зміни розв'язку рівняння, яке описує складну систему, при зміні параметра рівняння***. З точки біфуркації виходять декілька (дві або більше) стійких або нестійких гілок розв'язків. ***Подання будь-якої характеристичної властивості розв'язків як функції біфуркаційного параметра утворює біфуркаційну діаграму***.
- Оскільки типів атракторів досить небагато, обмежена і кількість різновидів біфуркацій; відповідно їх можна класифікувати топологічно, як і атрактори.

ТЕОРІЯ КАТАСТРОФ

- Виникнення дисипативних структур у природі носить пороговий характер. Нерівноважна термодинаміка, що розглянута нижче, пов'язала цей пороговий характер з нестійкістю, показавши, що нова структура завжди є результатом розкриття нестійкості в результаті флуктуації. Втрата системою стійкості називається **катастрофою**. Точніше - **це стрибкоподібна зміна, що виникає при плавній зміні зовнішніх умов**.
- З математичної точки зору нестійкість і пороговий характер самоорганізації пов'язані з нелінійністю рівнянь, що описують систему. Для лінійних рівнянь існує один стаціонарний розв'язок, для нелінійних декілька. Таким чином, пороговий характер самоорганізації пов'язаний з переходом з одного стаціонарного стану у інший. Математична теорія, що аналізує поведінку нелінійних динамічних систем при зміні їх параметрів, називається **теорією катастроф**.
- Основою теорії катастроф є нова область математики - **теорія особливостей гладких відображень**. Вона започаткована американським математиком **Г. Уїтні у 1955 р.** Після праць **Р. Тома** почався інтенсивний розвиток як самої теорії катастроф, так і її численних додатків.
- **Елементарна теорія катастроф фактично є узагальненням задач на мінімум і максимум в математичному аналізі.** Для функції однієї змінної її поведінка визначається критичними точками – максимумами і мінімумами. Ці точки відповідають рівності нулю першої похідної функції при другій похідній, що є відмінною від нуля (так звані **невироджені критичні точки**).

КЛАСІФІКАЦІЯ КАТАСТРОФ

З'ясувалося, що *для однієї або двох змінних і числа керуючих параметрів, що не перевищує п'яти, є сім типів елементарних катастроф*. Для кожного типу катастроф розглядається поверхня, що залежить від n_i змінних стану і n_a керуючих параметрів в просторі n_i+n_a вимірювань. Поверхня найпростішої катастрофи з однією змінною стану і одним керуючим параметром має вигляд складки на тканині і називається *катастрофою складки*.

- Складка

$$u = x^3 + a_1x$$

Классификация нелинейных осцилляторов:

Kuznetsova A.Yu. et al., Int. J. Bifurcation and Chaos **14**, 1241 (2004)

- Збірка

$$u = \pm(x^4 + a_2x^2 + a_1x)$$

- Ластівчин хвіст

$$u = x^5 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x$$

- Метелик

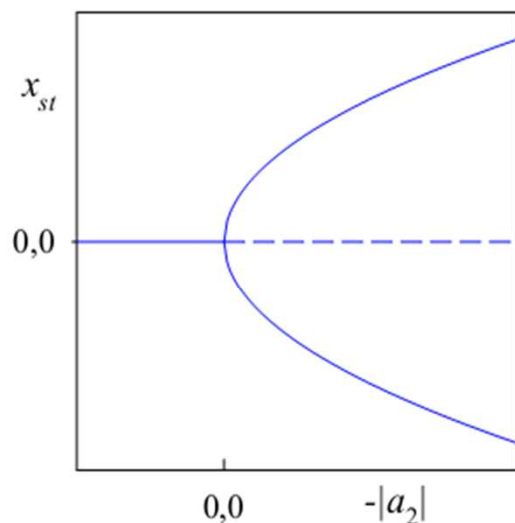
$$u = \pm(x^6 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x)$$

- Вігвам

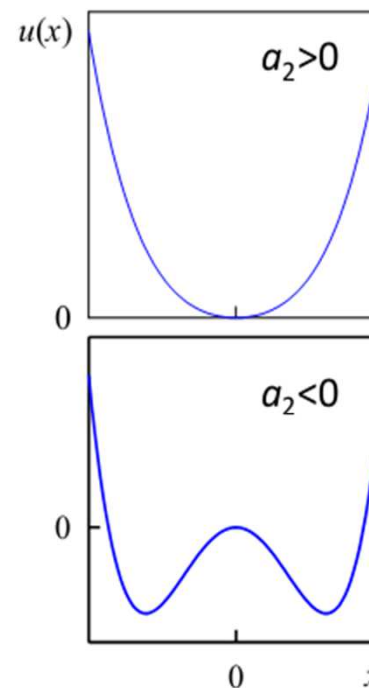
$$u = x^7 + a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x$$

БІФУРКАЦІЯ ПОДВОЄННЯ

$$u = x^4 + a_2 x^2$$



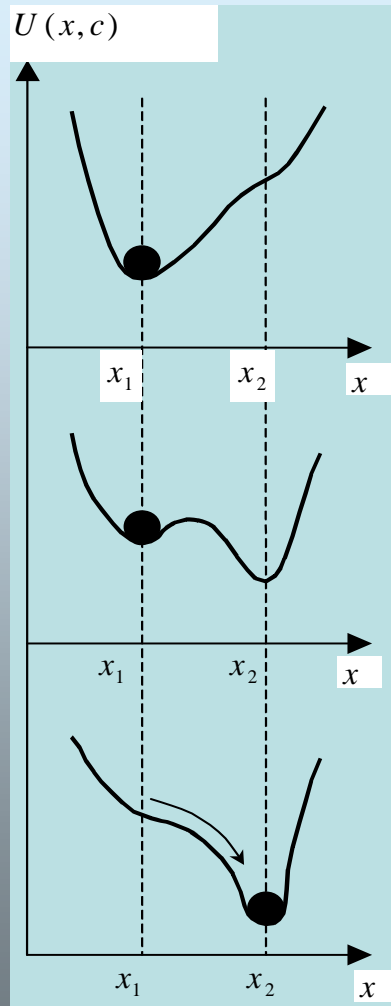
Біфуркація подвоєння (частковий випадок катастрофи збірки при $a_1=0$)



Потенціальна функція

Теорія катастроф визначає область існування різних структур, границі їх стійкості. Значення елементарної теорії катастроф полягає в тому, що *вона зводить величезне різноманіття ситуацій, які спостерігаються у природі, до невеликої кількості стандартних схем, які можна детально дослідити один раз і назавжди.*

ТЕОРІЯ БІФУРКАЦІЙ



Зміна потенціальної функції $U(x, c)$ з часом

• Стан фізичної системи, що описується потенціалом $U(x, c)$, задається точкою (x_i) , в якій потенціал має мінімум. Зміна зовнішніх умов приводить до зміни керуючих параметрів з часом, що, у свою чергу, впливає на вигляд потенціальної функції $U(x, c)$. Глобальний мінімум, що раніше визначав стан системи, може стати метастабільним локальним мінімумом або навіть зовсім зникнути. При цьому система повинна перестрибнути з одного локального мінімуму енергії в інший, в результаті відбувається різка зміна стану системи. Момент переходу залежить від властивостей системи і рівня флуктуацій в ній.

• В реальних умовах, наприклад, при поглибленні нерівноважності у відкритих системах, виникає певна послідовність біфуркацій, відповідно одна структура замінюється іншою. Такі послідовності біфуркацій, маючи ряд загальних особливостей, можуть відбуватися за різними сценаріями.

• Типовим і характерним прикладом такого сценарію є розвиток турбулентності у рідині, що характеризується цілим рядом послідовних біфуркацій, які призводять до надзвичайно складного квазіперіодичного її руху. В результаті виникає **динамічний хаос**

ТЕРМОДИНАМІКА ВІДКРИТИХ СИСТЕМ

- В класичній науці XIX ст. панувало переконання, що матерії властива тенденція до руйнування будь-якої впорядкованості, прагнення до стану рівноваги. В енергетичних термінах це означає повну неврегульованість кінцевого стану системи, або хаос.
- *З точки зору класичної фізики шлях еволюції – це завжди шлях до хаосу.* Такий погляд на речі сформувався під впливом класичної рівноважної термодинаміки. Вона вивчає процеси взаємоперетворення різних видів енергії у ізольованих системах.
- *Ізольованими або замкненими називаються системи, які не обмінюються інформацією, енергією і речовиною із зовнішнім середовищем*
- Згідно з 2 законом рівноважної термодинаміки *при довільних процесах в системах, що мають сталу енергію, ентропія завжди зростає ($\Delta S \geq 0$).*
- Однак розвиток рослинного і тваринного світу, на відміну від неживих систем, характеризується безперервним ускладненням, наростанням організації і порядку. *Жива природа всупереч другому закону термодинаміки чомусь прагне геть від термодинамічної рівноваги і хаосу.* Таким чином спостерігається очевидна *невідповідність законів розвитку неживої і живої природи.*

ТЕРМОДИНАМІКА ВІДКРИТИХ СИСТЕМ

Робота негаентропійного насоса



Потік ентропії $-\Delta_e S$
Зовнішнє середовище

Узагальнення 2 закону термодинаміки
на відкриті системи

$$\Delta S = \Delta_i S + \Delta_e S > 0$$

$$\Delta_e S < 0, \quad |\Delta_e S| = \Delta_i S, \quad \Delta_i S + \Delta_e S = \Delta S = 0$$

Як бачимо, загальна ентропія системи не змінюється.
Відповідно система буде знаходитися у стані
динамічної рівноваги із зовнішнім середовищем.

$$\Delta_e S < 0, \quad |\Delta_e S| > \Delta_i S, \quad \Delta_i S + \Delta_e S = \Delta S < 0$$

Загальна зміна ентропії системи ΔS виявляється від'ємною.
Таким чином, у відкритих системах можлива від'ємна
зміна ентропії, тобто сама ентропія зменшується!

*Енергія – миров царица,
Но черная за нею тень
Непререкаемо влачится,
Уравнивая ночь и день,
Всему уничтожая цену,
Все превращая в дымный мрак...
Ведь энтропия неизменно
Изображалась только так.
Но ныне понято, что тени
Не будет, не было и нет,
Что в смене звездных поколений
Лишь энтропия- жизнь и свет.*

*Зменшення ентропії може
розглядатися як рух
системи від хаосу до
порядку. Це означає, що в
хаотичній системі
можливе спонтанне
виникнення порядку!!!*

ПРИНЦИП МІНІМУМУ ДИСИПАЦІЇ ЕНЕРГІЇ

- Сучасна наука розглядає два основні стани рівноваги складних динамічних систем: **стійку рівновагу та нерівноважну стійкість**.
- Стан стійкої рівноваги достатньо добре вивчений класичною наукою – механікою (статикою) та термодинамікою. Цей стан, де ентропія системи набуває максимального значення, є *глобальним атрактором*. *Перейти у такий стан намагається будь-яка ізольована система*.
- У цьому випадку говорять, що динамічна система перебуває на *основній термодинамічній гілці*.
- Стан нерівноважної стійкості - основний стан відкритих систем, він найбільш часто трапляється на біологічному структурному рівні матерії. Саме такий стан вивчає **нерівноважна термодинаміка**.
- Для опису поведінки відкритих систем використовують **функцію**

дисипації ентропії $\psi = T p = T \frac{d_i S}{dt}$, де $p = \frac{d_i S}{dt} \geq 0$

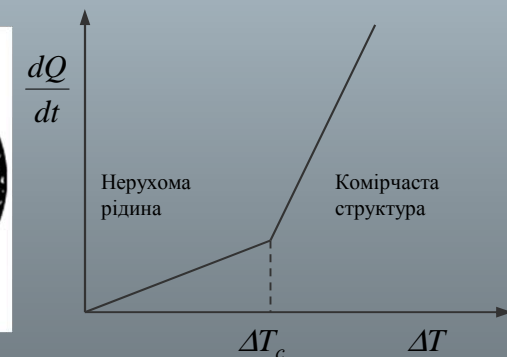
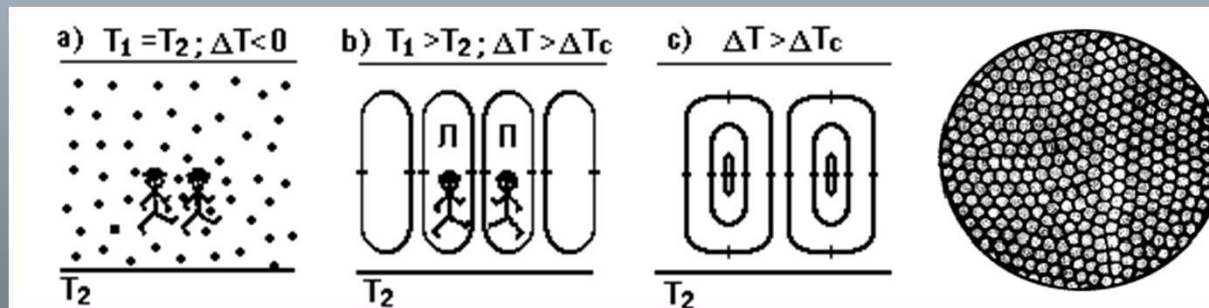
У випадку, коли задані граничні умови не дозволяють досягнути термодинамічної рівноваги, система зупиняється у стані нерівноважної стійкості з мінімумом дисипації енергії.

НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ТЕОРІЇ САМООРГАНІЗАЦІЇ

- *Зростання впорядкованості системи, процес структуроутворення відповідає терміну “онтогенез” (від грец. *ontos* суще, *genesis* - походження). Різноманіття форм, що при цьому виникає, описується терміном морфогенез (від грец. *morphe* - форма). Онтогенез, звичайно, супроводжується морфогенезом. Ці процеси завжди пов'язані з відтоком ентропії з системи, роботою “негаентропійного насоса”. Зараз доведено, що **це загальний закон природи**, який може застосовуватися до онтогенезу ембріона, виникнення зірок та до будь-яких інших процесів у відкритих системах.*
- *В ході розвитку нерівноважного процесу при деякому критичному значенні зовнішнього потоку енергії або речовини виникає нестійкий стан системи, в результаті в ній можуть з'явитися нові форми і структури. Це і є самоорганізація, вона властива так званим **синергетичним системам**.*
- *Теорія самоорганізації складних систем сьогодні розвивається за трьома основними напрямками: **синергетика** (Р. Хакен), **нерівноважна термодинаміка** (І.Р. Пригожин) та **теорія катастроф** (Г.Уїтні, Т.Рене, А.Арнольд).*
- *Загальне значення комплексу синергетичних ідей, полягає у такому: **процеси руйнування і творення, деградації і еволюції у Всесвіті рівноправні; процеси творення (наростання складності і впорядкованості) мають єдиний алгоритм, що не залежить від природи систем, в яких вони відбуваються**. Таким чином, синергетика (від грецьких слів “разом” і “дію”) претендує на відкриття універсального механізму, за допомогою якого здійснюється самоорганізація як в живій, так і в неживій природі.*
- *Під самоорганізацією при цьому розуміється спонтанний перехід відкритої нерівноважної системи від менш складних і впорядкованих форм організації до більш складних і впорядкованих.*
- ***Синергетика є сучасною теорією еволюції великих, надскладних, відкритих, термодинамічно нерівноважних, нелінійних динамічних систем, що мають зворотний зв'язок і існують квазістаціонарно лише в умовах постійного обміну речовиною, енергією і інформацією із зовнішнім середовищем.***
- *До таких систем належать: Всесвіт, природа, людське суспільство як вища форма і продукт матеріальної та духовної культури, що створені людством, та ін.*

ЕФЕКТ БЕНАРА

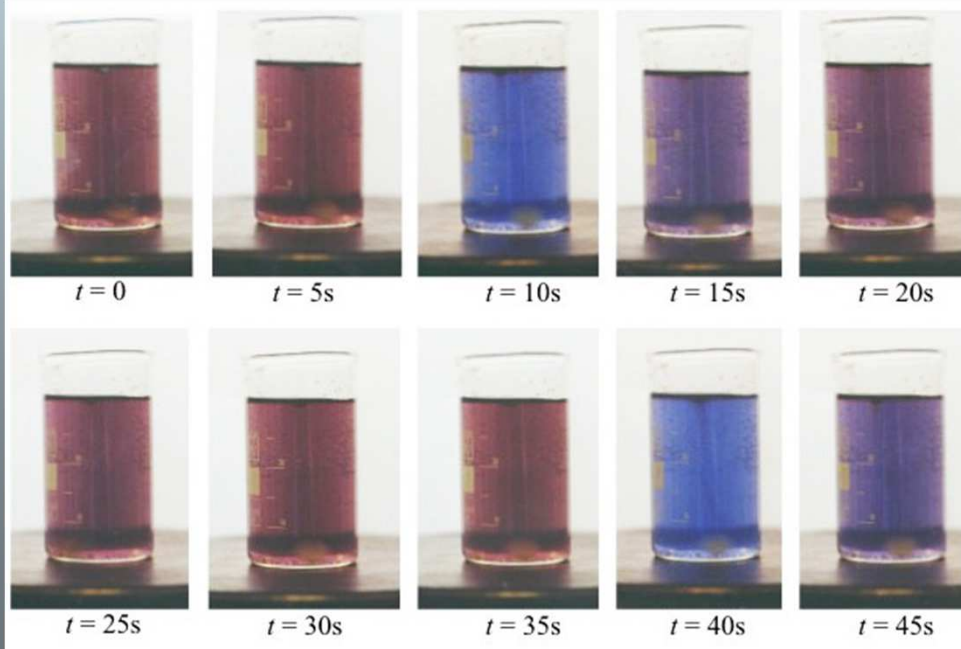
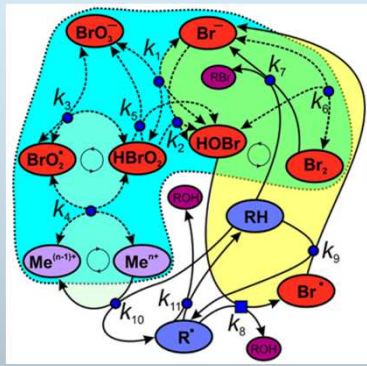
- Найпопулярнішим і наочним прикладом утворення структур наростаючої складності є добре вивчене в гідродинаміці явище, яке називають **нестійкістю Бенара** (відкрите у 1900 р.)
- При підігріванні рідини, що розміщена в посудині, між нижнім і верхнім її шарами виникає деяка різниця (градієнт) температур $\Delta T = T_1 - T_2$. Якщо цей градієнт менший деякого критичного ($\Delta T < \Delta T_c$), то перенесення тепла в рідині відбувається на мікроскопічному рівні. Проте при досягненні градієнтом деякого критичного значення ($\Delta T > \Delta T_c$) в рідині раптово (стрибком) виникає конвекційний макроскопічний рух, в результаті створюються чітко виражені упорядковані структури у вигляді циліндричних осередків.



Стан рідини: а – рівноважний стан рідини при $\Delta T < \Delta T_c$; б – утворення вихорів Бенара при $\Delta T > \Delta T_c$, літерами Л і П позначені напрямки обертання вихорів: Л – ліве, П – праве відповідно; в – структура двох сусідніх вихорів Бенара після біфуркації; г- вигляд осередків Бінара зверху

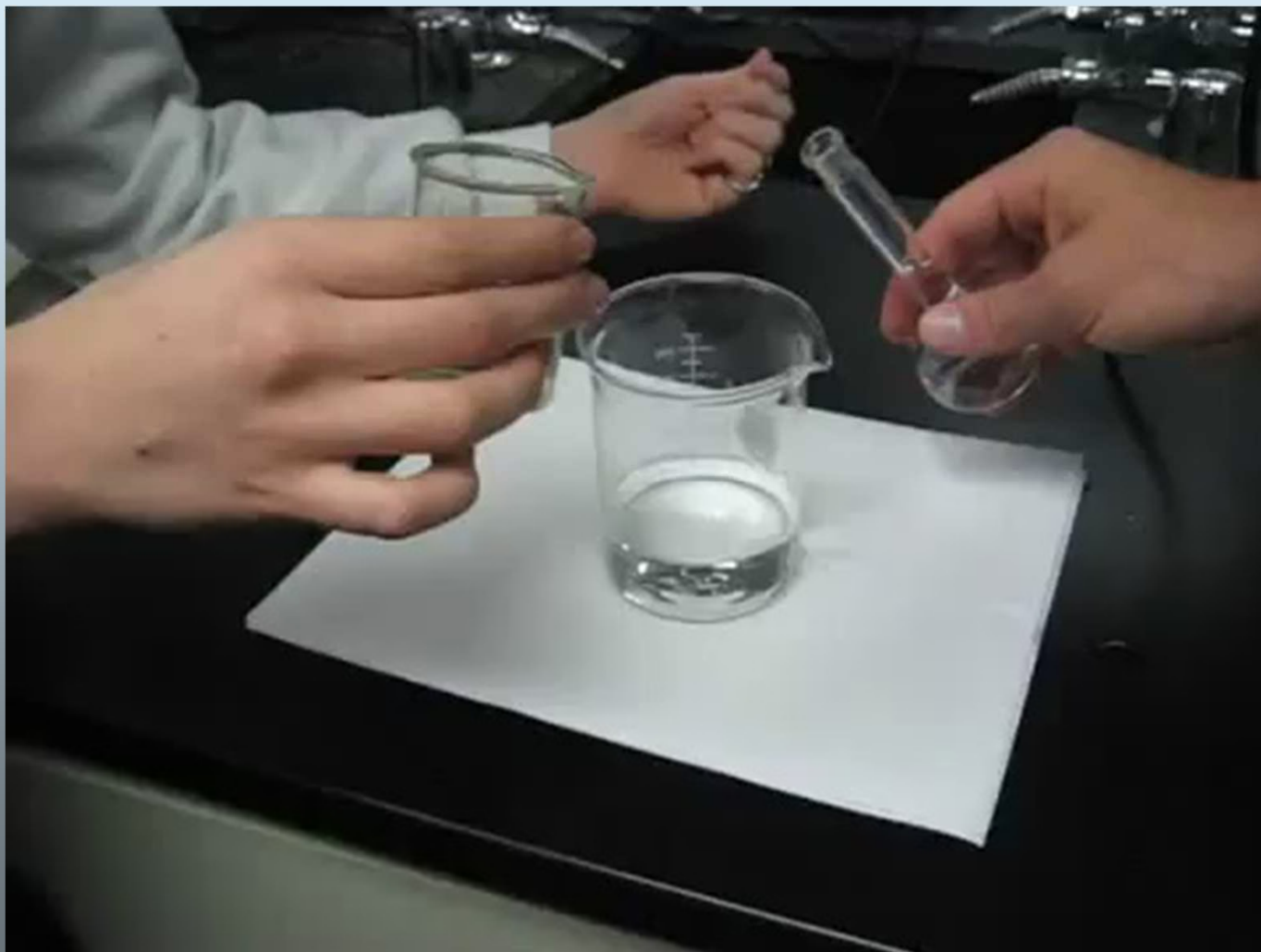
Залежність теплового потоку між нижніми та верхніми шарами рідини від різниці температур

РЕАКЦІЯ БЕЛОУСОВА–ЖАБОТИНСЬКОГО

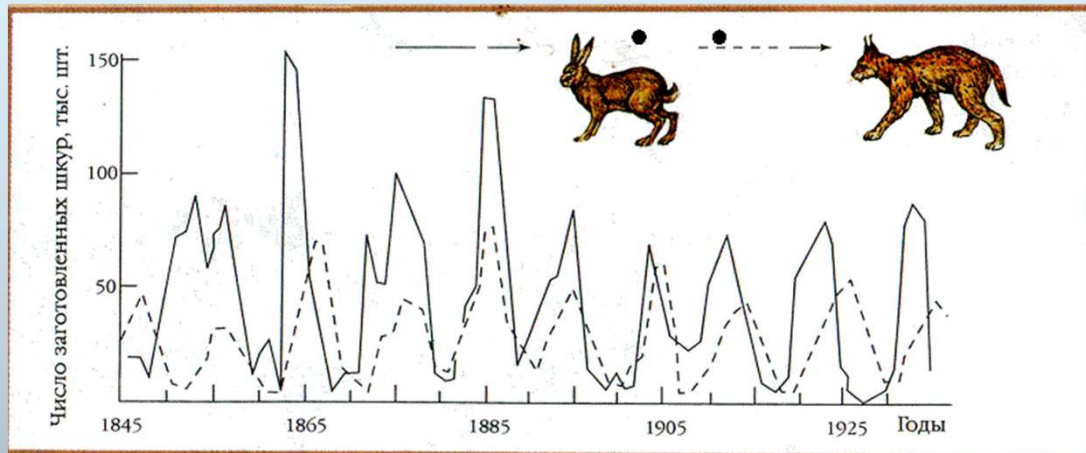


• У хімії відомі так звані *хімічні годинники*. За певних умов деякі хімічні реакції супроводжуються періодичними змінами концентрацій реагентів: з часом один реагент замінюється іншим, потім знов відновлюється і знову зникає, відповідно весь час змінюється колір розчину. Виникає періодичний хімічний процес у просторі та часі, який називають *реакцією Белоусова–Жаботинського*. При цьому утворюються кольорові упорядковані структури, подібні, наприклад, до наведених на рис.

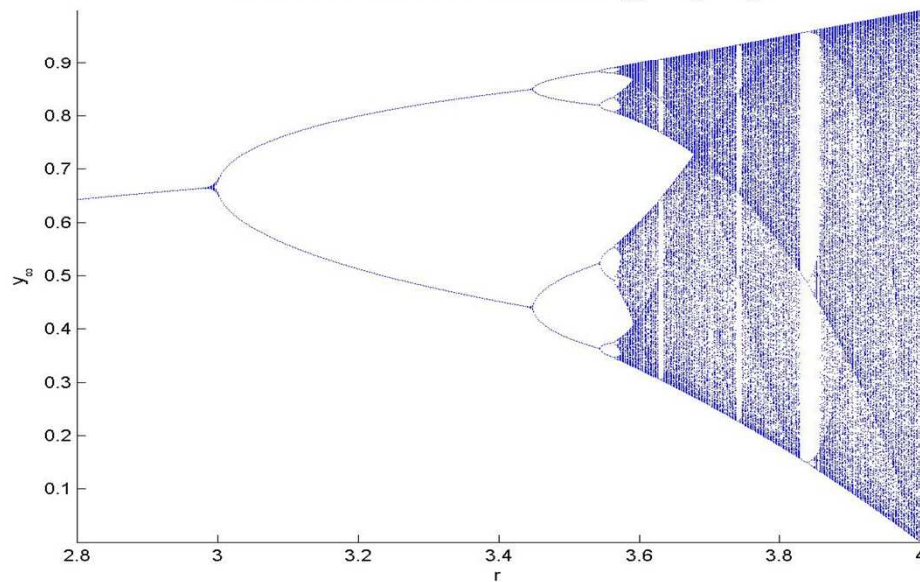
РЕАКЦІЯ БЕЛОУСОВА–ЖАБОТИНСЬКОГО



ПОПУЛЯЦІЙНІ ХВИЛІ

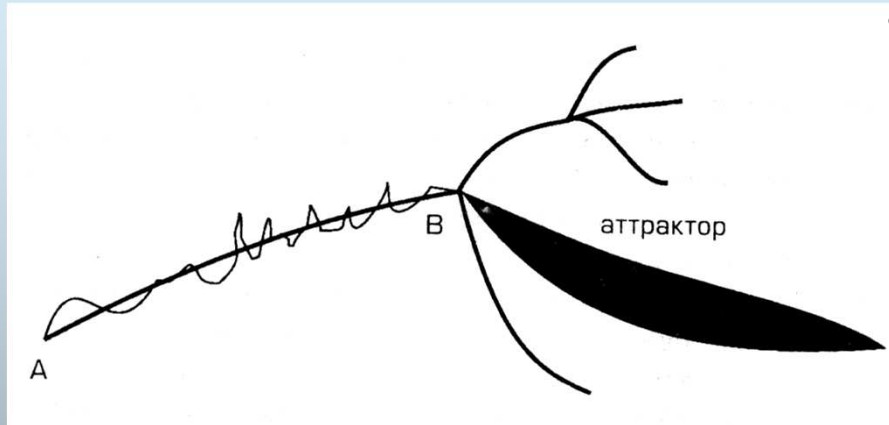


Bifurcation diagram for the logistic equation $y_{n+1} = r y_n (1 - y_n)$



•Відомо, що кількість особин різних видів тварин також схильна до часових коливань. Наприклад, чисельність популяцій зайців і рисей залежить від їх співвідношення. Збільшення кількості хижаків-рисей призводить до зменшення кількості жертв-зайців і навпаки. Динаміка різноманітних популяцій також може бути пояснена на основі законів синергетики. Для цього використовують *логістичне рівняння*

СХЕМА ЕВОЛЮЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРИРОДІ



- На початковому лінійному етапі розвитку (відрізок АВ) відбувається повільна зміна властивостей системи вздовж деякого “каналу”. Межі зміни стану системи (береги “каналу”), визначаються законами фізики, хімії та іншими принципами відбору. В свою чергу, велика кількість випадкових зовнішніх чинників постійно намагаються вивести систему за межі цього встановленого “русла”.
- При цьому ситуація може бути передбаченою з точністю до випадкових флуктуації – шумів. В деякий момент часу B (точка біфуркації), або зовнішній вплив на систему досягає критичного значення, або відбувається накопичення і об'єднання внутрішніх дій системи. В цей момент її параметри починають швидко змінюватися; раніше стабільний стан втрачає стійкість і виникає можливість різних шляхів розвитку BC, BD, BE, \dots . Нестійкість системи означає, що флуктуації перестають бути просто «шумом» і перетворюються на чинник, що направляє її глобальну еволюцію. Серед різних гілок еволюції після точки біфуркації B є траєкторія, яка відрізняється стійкістю. Вона немов би притягає до себе всю безліч траєкторій системи із різними початковими станами, тобто є аттрактором. Якщо система потрапляє в цей коридор траєкторій, то вона неминуче еволюціонує до цього відносно стійкого стану. **Саме ці стани ми найчастіше і спостерігаємо у природі.**

СХЕМА ЕВОЛЮЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРИРОДІ

- Таким чином, рух матерії можна розглядати, **як чергування етапів адаптивного розвитку і етапів катастрофічної поведінки**. Адаптивний розвиток являє собою зміну параметрів системи при збереженні незмінного порядку її організації. При зміні зовнішніх умов параметрична адаптація дозволяє системі пристосуватися до нових заборон, що накладаються середовищем.
- **Катастрофічні етапи – це зміна самої структури вихідної системи, її переродження, виникнення нової якості**. При цьому нова структура дозволяє системі перейти до нової термодинамічної траєкторії розвитку, яка відрізняється меншою швидкістю виготовлення ентропії, або меншими темпами дисипації енергії.
- Математичний опис процесів в подібних системах вимагає використання нелінійних рівнянь, що мають розв'язки, характер яких визначається параметром рівняння. Через ймовірностний характер біфуркаційних процесів їх еволюція не може мати зворотного ходу. Це призводить до необоротності не тільки еволюції, але і часу, виникнення “стріли часу”. Таким чином, стає зрозуміло, що **хаос і випадковість – це творчі, конструктивні засади природи**, які здатні вивести систему на атрактор, на одну з нових власних структур середовища, що відповідає її **внутрішнім тенденціям**.

МЕХАНІЗМ ПРОТІКАННЯ ЕВОЛЮЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

- Всі процеси у світі неживої матерії, живої речовини і суспільства через природні закони розвитку завжди спрямовані у бік ускладнення організації систем (*онтогенезу*) і зростання різноманітності їх форм (*морфогенезу*). Для опису процесу загальних рис самоорганізації зручно скористатися мовою теорії відбору Дарвіна, або, як говорять, дарвінівською тріадою, в якій дещо змінено зміст термінів: *мінливість, спадковість, відбір*.
- Нові якісні особливості відкритих систем виникають завдяки *мінливості*. Остання спричиняється стохастичністю, випадковими змінами в системах, виникненням в них флуктуацій. Далі починають працювати принципи *відбору*, що дозволяють вибрати з можливих віртуальних станів деяку кількість допустимих. До цих принципів відбору перш за все належать закони збереження, закон зростання ентропії в ізольованій системі та інші. Інакше кажучи, *закони відбору - це закони фізики, хімії, біології, закони суспільного розвитку, які з віртуальних рухів відбирають ті, що ми спостерігаємо реально*. Принципи відбору допускають існування біфуркацій, точок, де можливий перехід системи в безліч нових станів. Це приводить до принципової непередбачуваності її еволюції.

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ СКЛАДНИМИ СИСТЕМАМИ

- Керуванням називають процедуру вибору і реалізації визначених цілеспрямованих дій. Як правило, в технічних системах мета не належить системі, вона є зовнішнім відносно неї фактором. Інша річ - складні відкриті системи, до яких, наприклад, належить суспільство чи практично будь-яка природна система. Як правило, у таких системах існує сукупність цілей, при цьому вони не задаються ззовні, а генеруються самою системою.
- З'ясувалося, що *у реальних природних системах резонансна, нехай навіть слабка дія завжди приводить до більшого ефекту, ніж сильна, але не узгоджена з системою.* Традиційний («лінійний») погляд на проблему керування процесами зводився до уявлень, що чим більше вкладеш (енергії, матеріальних коштів, нервів і так далі), тим більшу віддачу одержиш. Синергетика та теорія динамічного хаосу дає нам *новий підхід до проблеми керування: надмірна централізація може призвести до непередбачуваних наслідків*, до кризи, оскільки існує багато шляхів розвитку системи, в той же час вона прагне вийти на один із своїх атракторів. *Якщо є алгоритм виходу на атрактор, зберігаються час, ресурси, зусилля та інше.* В резонансній дії важлива не величина, не сила впливу в процесі керування, а його *правильна просторова і часова організація, «архітектура».* Тобто, треба діяти на середовище в визначеному місці і часі, топологічно узгоджених з її власною структурою. Тоді необхідний результат може бути одержаний шляхом *одного або серії незначних впливів на систему.* Кожний з них лише трохи змінює її фазову траєкторію, але через деякий час накопичення і експоненціальне підсилення малих збурень приведе до суттєвої корекції руху.

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ СКЛАДНИМИ СИСТЕМАМИ



•Таким чином, системи з хаотичними атракторами, а такими є більшість природних і соціальних систем, демонструють одночасно добру керованість і дивну пластичність: чутливо реагуючи на зовнішні впливи, вони між тим зберігають тип руху. Саме комбінація цих двох властивостей є причиною того, що хаотична динаміка є характерною для поведінки багатьох систем живих організмів. *Ненасильство над природою речей - ось принцип синергетики. Треба не будувати і перебудовувати, а виводити, ініціювати складні системи на власні механізми розвитку.*

У складних системах доречно перейти від терміна “керування” до терміна “вибору напрямку розвитку”. Зовнішні дії при цьому повинні бути спрямовані не на жорстке керування з точно визначеними цілями, а на підтримку бажаних тенденцій розвитку або відхід системи від катастрофи. Мова йде про спрямування природних процесів самоорганізації у бажане русло розвитку, яке приведе до порівняно довгого проміжку стабільності системи. Таким чином, повинен реалізовуватися **принцип кормового: кормовий не направляє корабель наперекір стихії, а використовує сили природи для того, щоб рухатися вибраним курсом.** Отже, хаос - необхідна умова для виходу системи на атрактор, на власну стійку тенденцію до розвитку.

Важливим наслідком емпіричних узагальнень є твердження, що *стохастичність і біфуркації приводять у процесі еволюції до безперервного збільшення різноманіття форм світу - морфогенезу.* При цьому із зростанням складності системи збільшується і кількість можливих шляхів її подальшого розвитку. Природа дає можливість з'явитися новим формам організації матерії, ці форми як би потенційно нею заготовлені, але деталі процесу повністю непередбачувані.

ПІДСУМКИ

- Всі існуючі системи в природі можна поділити на два принципово різних види: **ізолювані** (класичні) і **відкриті** (синергетичні). При цьому ізолювані системи, які вивчає класична термодинаміка, є частковим випадком відкритих. Останні відрізняються тим, що можуть обмінюватися з довколишнім середовищем речовиною, енергією або інформацією.
- **Процеси в ізолюваних і відкритих системах розвиваються за абсолютно різними законами.** Процеси в замкнутих системах ведуть до встановлення теплової рівноваги. Вони відбуваються в напрямку від порядку до хаосу, ентропія таких систем збільшується.
- У відкритих нерівноважних системах процеси можуть відбуватися в зворотному напрямку: **від хаосу до порядку**. При цьому порядок в них народжується з хаосу, тобто **хаос є не тільки руйнівним, але і творчим, конструктивним елементом.**
- Відкриті системи у природі численні і різноманітні: вихори в океані і атмосфері, хімічні реакції з часовою і просторовою періодичністю, лазери, живі організми і екосистеми, нарешті ринкова економіка, в якій хаотичні дії мільйонів вільних індивідів приводять до утворення стійких і складних макроструктур. В таких системах завжди спостерігається злагоджена поведінка підсистем, зменшується ентропія, внаслідок чого зростає ступінь їх впорядкування.
- Останніми роками стало зрозуміло, *що лінійний характер еволюції складних систем, до якого звикла класична наука, не правило, а швидше виняток.* **Розвиток більшості природних систем має нелінійний характер.** А це означає, що для складних систем завжди існує декілька можливих шляхів еволюції. Розвиток здійснюється через випадковий вибір однієї з декількох дозволених можливостей подальшої еволюції в точці біфуркації. Отже, **випадковість - не прикре непорозуміння, вона вбудована в механізм еволюції.**

НАРОДЖЕННЯ-БУТТЯ-РОЗПАД

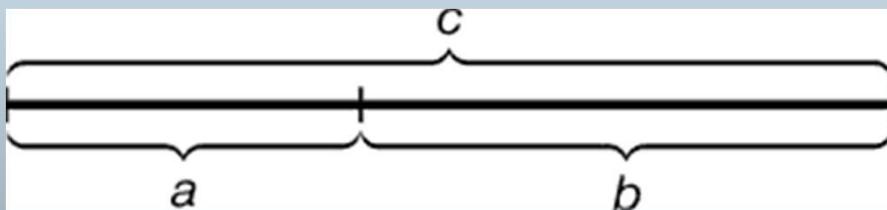
- Згідно з синергетичною концепцією *будь-який еволюційний процес у світі може бути описаний як черета змін опозиційних якостей – умовних станів порядку і хаосу в системі, які сполучені фазами переходу до хаосу (загибель структури) і виходу з хаосу (самоорганізації).*
- З цих чотирьох стадій лише одну стабільну можна віднести до **Буття** (термінологія Пригожина), гомеостазу системи. Часто саме вона найпротяжніша у часі.
- Інші три так чи інакше пов'язані з хаосом і належать до **Становлення** або кризи. Умовність такого розбиття пов'язана з тим, що у *всякому порядку є частка хаосу і, навпаки, в хаосі можна знайти елементи порядку*, все визначається лише *мірою їх змішування*. Відносно короткочасність перехідних кризових фаз можна пояснити заходами *еволюційної безпеки природи*. Тривала криза різко виснажує *адаптаційні можливості системи і вона гине, зникає її системна цілісність*. Саме тому у природі процес еволюції відбувається *дрібними кроками*. Універсальні методи опису цих стадій розвинені у синергетиці.
- **Універсальний (глобальний) еволюціонізм.**
- Одним із найважливіших висновків цієї концепції є думка *про спрямованість розвитку світу як цілого на підвищення своєї структурної організації*.
- **Звідси все, що існує у світі, є результатом еволюції, яка має загальний всеосяжний характер.**

ЗАКОНИ ФОРМОУТВОРЕННЯ В ПРИРОДІ

- В природі порядок з часом перетворюється на хаос, а хаос породжує порядок. При цьому **ні повний порядок, ні абсолютний хаос не є ідеалом світобудови**. Наприклад, нормальне функціонування організму можливо лише при деякій нормі хаотичності, відхилення від цієї норми у обидві сторони свідчить про початок захворювання. Виникає питання, до чого прагне природа? Чи не існує у Всесвіті оптимальне співвідношення порядку (детермінізму) і безладдя (стохастичності), співвідношення, що іменується гармонією?
- Тривалий пошук учених показує, що, **мабуть, такий образ існує і ним є конкретне число**. Співвідношення стохастичності і детермінізму можна углядіти в старовинних правилах так званого **золотого перетину**, або **правилах гармонії**. Схоже, що з використанням тих же принципів відбувається і утворення в природі самоподібних (фрактальних) структур, крім того, існує припущення, що золоті перетини є числовими сталими для систем, що самоорганізуються.
- Математично описати гармонію світу намагалися ще вчені Єгипту, Сходу, Стародавньої Греції. Вже в ті далекі часи вівся пошук математичної суті гармонії, розглядалися ідеї симетрії, поділу цілого на пропорційні частини. Наприклад, цілий відрізок можна розділити на дві частини різними способами. Виникає питання, який з цих поділів приведе людину до відчуття гармонії, краси? Як виявилось, гармонія виявляється в правилі золотого перерізу (*aurea sectio*) - **законі пропорційного зв'язку цілого і частин**, що його утворюють.

ЗОЛОТИЙ ПЕРЕРІЗ

- **Золотий переріз** – це такий пропорційний поділ відрізка на нерівні частини, при якому вся довжина відрізка так відноситься до більшої частини, як велика частина відноситься до меншої; або іншими словами, менший відрізок так відноситься до більшого, як більший - до всього.
- Математично цей закон записується так



$$\frac{a+b}{b} = \frac{b}{a}, \quad \frac{b}{a} = x$$

$$x^2 - x - 1 = 0$$

Геометричне зображення золотої пропорції

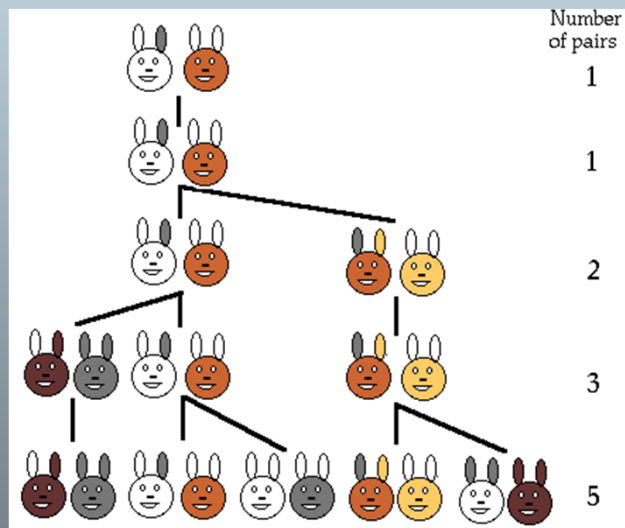
Отримане рівняння має два ірраціональні корені, які отримали назву основ золотої пропорції

$$\tau_{1,2} = x_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}$$

Числові значення цих основ часто позначають також грецькою буквою Φ (фі) на честь древньогрецького скульптора Фідія (Phidias), що часто використовував золоту пропорцію в своїх творіннях. Відповідно числа Фідія дорівнюють $\Phi_1 = 1,6180339\dots$ і $\Phi_2 = -0,6180339\dots$

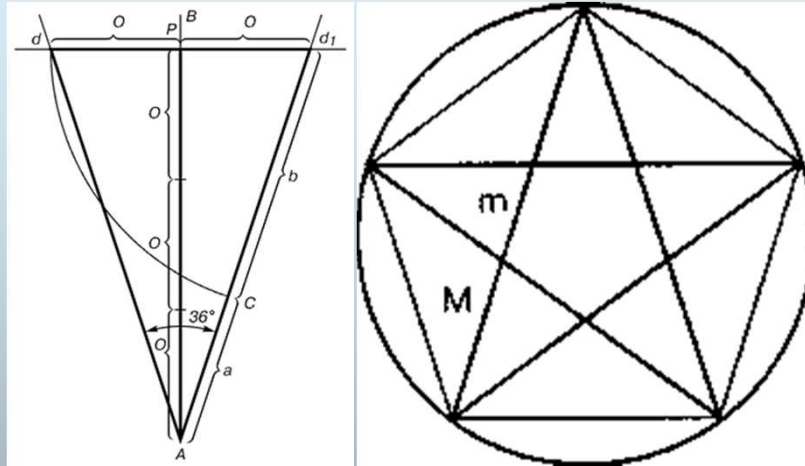
РЯД ФІБОНАЧЧІ

- Із золотим перерізом тісно пов'язана **послідовність, або ряд Фібоначчі**.
- Італійський купець Леонардо з Пізи (1180-1240), більш відомий під прізвиськом Фібоначчі (син Боначчі), був, одним з найвидатніших математиків Середньовіччя. Зокрема, Фібоначчі вперше розглянув таку задачу: “Хтось розмістив пару кролів у місці, що обгороджено з усіх боків стіною, щоб з'ясувати, скільки пар кролів народиться при цьому протягом року, якщо природа кролів така, що через один місяць пара їх народжує іншу пару, а народжують кролі з другого місяця після свого власного народження”

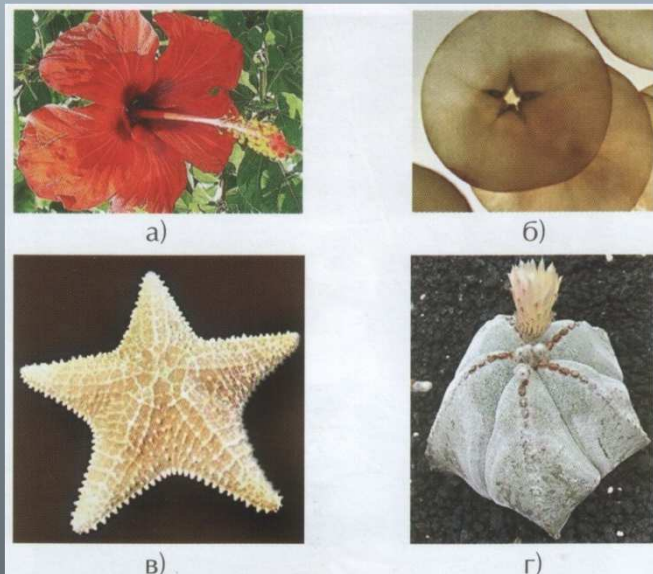


Якщо позначити число пар кролів, що є на n -му місяці, через F_n , то отримаємо такі значення $F_1 = 1$, $F_2 = 1$, $F_3 = 2$, $F_4 = 3$, $F_5 = 5$, $F_6 = 8$, $F_7 = 13$, $F_8 = 21$ і т. ін. Числа F_n , що створюють послідовність називаються **числами Фібоначчі**, а сама послідовність - **послідовністю, або рядом Фібоначчі**. Суть послідовності Фібоначчі полягає в тому, що, починаючи з першого, **кожне наступне число одержується шляхом додавання двох попередніх**. Виникає питання: чому ця послідовність така важлива і чим вона відрізняється від інших відомих числових послідовностей? Виявляється, **відношення наступного члена послідовності до попереднього, як встановив Р.Сімпсон (1687-1768), асимптотично наближається до сталого числа, яке є основою золоті пропорції (числа Фідія)**.

ЗОЛОТИЙ ПЕРЕРІЗ - МОРФОЛОГІЧНИЙ ЗАКОН СВІТОБУДОВИ



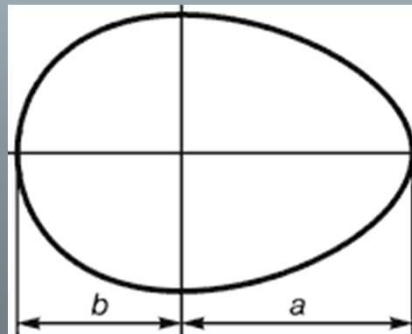
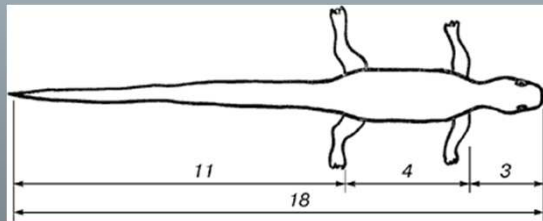
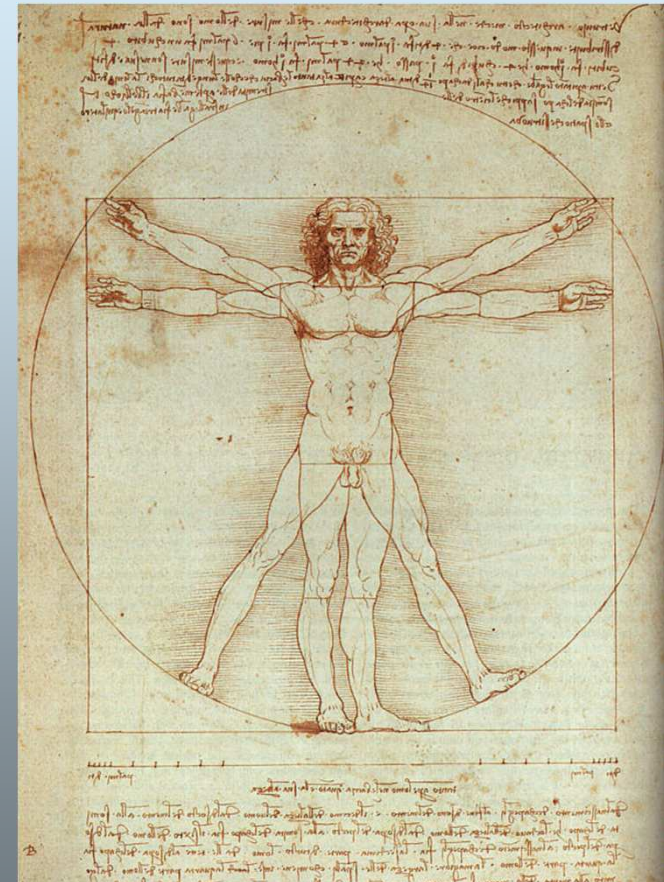
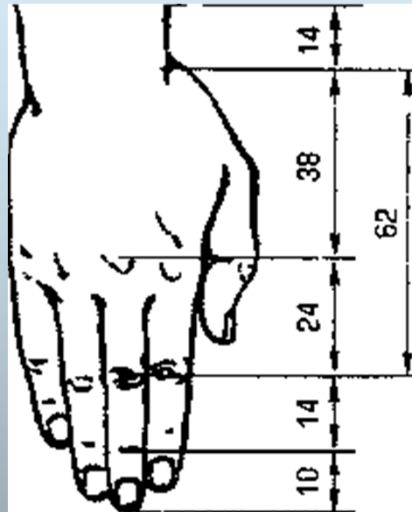
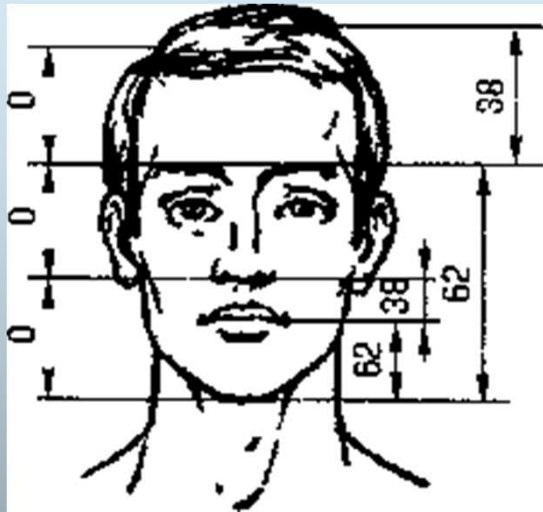
Золоті трикутник і пентаграма



У стародавній Греції золотий переріз став естетичним каноном мистецтва та основою релігійних символів. На ідеях золотої пропорції базується побудова цілого ряду геометричних фігур, що наші далекі предки довгий час вважали магічними. Прикладом такої побудови є *золотий трикутник* - рівнобедрений трикутник, у якого відношення довжини бічної сторони до довжини основи дорівнює 1,618. В *зірчастому п'ятикутнику* (пентаграмі) кожна з п'яти ліній, що утворюють цю фігуру, ділить іншу у відношенні золотого перерізу, а кінці зірок є золотими трикутниками, вершини яких утворюють кут 360

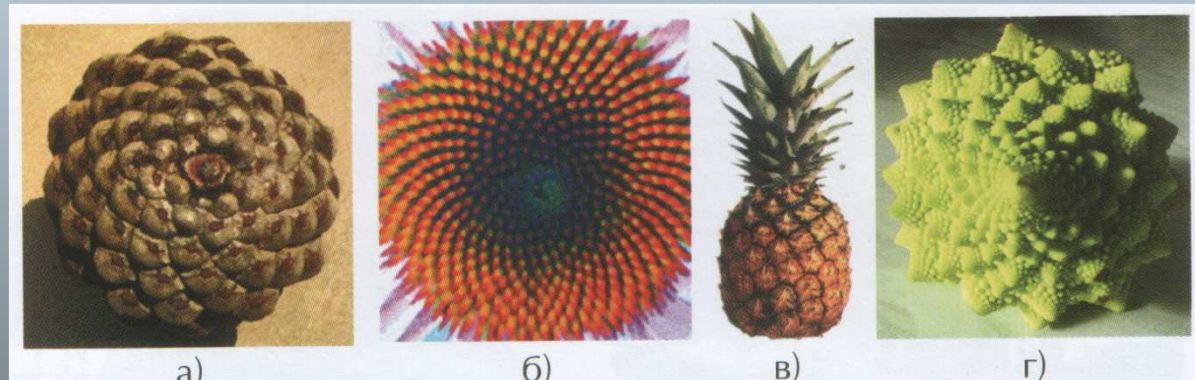
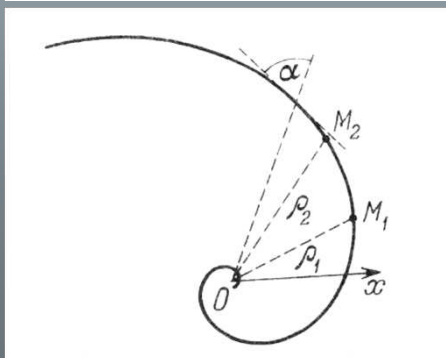
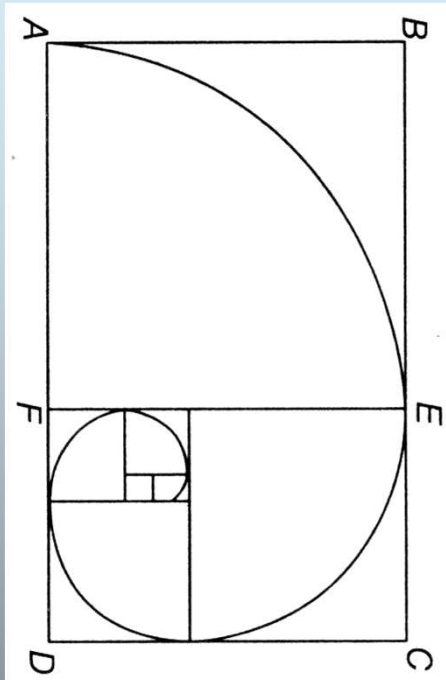
Приклади пентагональної симетрії у природі: а - кітайська троянда; б - яблуко у розрізі; в - морська зірка; г - кактус

ЗОЛОТИЙ ПЕРЕРІЗ - МОРФОЛОГІЧНИЙ ЗАКОН СВІТОБУДОВИ



Золоті пропорції в частинах людського тіла та тваринному світі

ПРИНЦИПИ ФОРМОУТВОРЕННЯ У ПРИРОДІ



"Золотий прямокутник" і логарифмічна спіраль.

У полярних координатах ця спіраль описується рівнянням $\rho = Ae^{k\varphi}$

Спіралі у природі

МІКРОСВІТ

*Все суще во все века без
счета верст
Невидимый связует мост,
И не сорвать тебе цветка,
Не стронув звезд
Френсис Томпсон*

- Закони Всесвіту на мікрорівні вивчає *фізика елементарних частинок* - або, як її зараз частіше називають, *фізика високих енергій*. Фізика високих енергій - одна з областей, що знаходиться зараз на передньому фронті фундаментальної науки. Історично вона утворилася, як наука, що вивчає будову речовини на найглибшому структурному рівні. Проте, у міру накопичення знань про структуру матерії, питання "як влаштований світ?" змінилося питанням, "чому він так влаштований?". Така зміна акцентів дозволила фізиці високих енергій вийти на принципово новий рівень розуміння будови довколишнього світу і перекинути містки між будовою мікро- і мегасвітів.

ІСТОРИЯ ВІДКРИТТЯ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- *Елементарними частинками називаються найдрібніші відомі в даний час частинки матерії .*
- Першою відкритою людством елементарною частинкою був *електрон* (e^-) - носій найменшого негативного електричного заряду, що спостерігається у природі (Томсон, 1897). Позитивно заряджені частинки з масою $1840 m_e$, де m_e - маса електрона, були знайдені Резерфордом (1919) серед вибитих з атомних ядер. Вони отримали назву *протонів* (p). Протон є носієм елементарного позитивного заряду, що за модулем дорівнює заряду електрона. Електрон і протон є основними складовими атомів будь-якої речовини. Інша частинка, що входить до складу ядра атома, але не має електричного заряду - відкрита Чедвіком (1932). Ця частинка, що одержала назву *нейтрон* (n), має масу $1839 m_e$. У тому самому році Гейзенберг показав, що нейтрон і протон є різними зарядовими станами *нуклона*.
- Прямі експериментальні докази існування *фотона* (γ) - кванта електромагнітного випромінювання, - передбаченого Планком (1900) та Ейнштейном (1905), одержали Міллікен (1912 - 1915) і Комптон (1922). Електронне *нейтрино* (ν_e), запропоноване Паулі (1930) для пояснення особливостей β -розпаду нейтрона, відкрили Райнес і Коуен (1953). У складі космічного випромінювання Андерсеном був виявлений *позитрон* (e^+) - частинка з масою електрона яка на відміну від нього має позитивний електричний заряд (1932). Позитрон - перша з відкритих античастинок. Після цього на протязі кількох десятиріч космічне випромінювання було основним постачальником нових елементарних частинок для вчених. Частинки з масою близько $200 m_e$ обох електричних зарядів - *мюони* (μ^+ , μ^-) - були виявлені у космічному випромінюванні Андерсеном та Неддермейером (1936). Трохи пізніше Пауелл (1947) відкрив частинки - кванти сильної взаємодії, передбачені Юкавою (1935). Вони отримали назву *піонів* (π^+ , π^-).

ІСТОРІЯ ВІДКРИТТЯ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК



Траєкторії (треки) та взаємодії суб'ядерних частинок, прискорених прискорювачем, що реєструються камерою Вільсона

Перші частинки з великої групи елементарних частинок, що мають незвичайні властивості і тому названі *дивними*, - K^+ , K^- - мезони і λ - гіперони - були виявлені у тому самому космічному випромінюванні у 40-50-х рр. Надалі інші дивні частинки були знайдені в дослідях на прискорювачах заряджених частинок, шляхом аналізу їх зіткнень та взаємодій одна з одною. З 50-х років саме прискорювачі, що дозволяють надати елементарним частинкам великої енергії, стали основним інструментом при дослідженні їх властивостей (звідси назва "фізика високих енергій"). За допомогою прискорювачів були відкриті антипротон (\bar{p}) (1955), антинейтрон (\bar{n}) (1956), антисигма гіперони ($\bar{\Sigma}, \bar{\Xi}$) (1960), омега-мінус гіперон ($\bar{\Omega}$) (1964). У 1962 р. з'ясувалося, що, окрім електронного нейтрино (ν_e), існує ще і мюонне нейтрино (ν_μ).

• J/ψ (джей-пси)- і ψ' - частинки, які мають маси 3-4 m_p , де m_p - маса протона, відкриті в 1974 р. Вони поклали початок новому класу частинок, що отримали назву *зачарованих*. Інші зачаровані частинки D^0, D^+ і D^* були відкриті в 1976 р. Частинка, що є важким (більш масивним) аналогом електрона і мюона - τ - лептон (таон), знайдена в 1975 р. У подальшому були відкриті частинки (1977) з масою порядку 10 m_p , так звані *красиві мезони* B^+, B^-, B^0 , проміжний та векторні бозони Z^0 (1983).

ІСТОРІЯ ВІДКРИТТЯ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

В 60-ті роки на прискорювачах також була знайдена велика кількість дуже нестійких частинок, що отримали назву *мезонних і баріонних резонансів*. Резонанси являють собою стани, що розпадаються. Саме вони складають *основну частину відомих елементарних частинок*. Досліди дозволили встановити, що майже у кожній частинки є своя *античастинка*, яка відрізняється від неї тільки знаком *адитивних квантових чисел*. Як ми бачимо кількість елементарних частинок в природі виявилася значно більшою ніж потребує проста і економна картина будови речовини.

Згідно з так званою *Стандартною моделлю*, яка встановлює сучасну класифікацію суб'ядерних частинок, *дійсно елементарними, безструктурними зараз вважаються шістнадцять з декількох сотень відомих вченим частинок*. У тринадцяти з них є свої античастинки. Інші частинки мають внутрішню структуру і побудовані з ще більш фундаментальних частинок *кварків* у різних поєднаннях з антикварками. Зв'язок між ними забезпечують інші частинки – *глюони*. Перші експериментальні докази існування кварків були отримані в 1975 р. (відкриття *кваркових струменів*). Останній з них, шостий, - так званий *верхній, або топ-кварк*, знайдений на весні 1995 року .

Глюони відкриті в 1980 р. дослідницькою групою АРГУС (Радянсько-західнонімецько-американсько-шведська група). В березні 2000 року в Центрі європейських ядерних досліджень поблизу Женеви (ЦЕРН) з використанням *колайдера* (прискорювач частинок на зустрічних пучках) важких релятивістських іонів був отриманий новий агрегатний стан речовини - *кварк-глюонна плазма*. А 21 липня 2000 р. в Національній лабораторії імені Фермі (Баталія, США) на установці DONUT (*Direct Observation Nu Tau*) вперше провели пряме спостереження останньої невідомої безструктурної частинки, передбаченої Стандартною моделлю – *тау-нейтрино*. Таким чином, усі елементарні частинки, передбачені Стандартною моделлю (за винятком так званих *хігсонів*), вже спостерігалися експериментально.

ІСТОРИЯ ВІДКРИТТЯ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

- Більшість відомих елементарних частинок є *нестабільними* - вони спонтанно перетворюються на інші. *Стабільними є фотон, всі види нейтрино, електрон, протон та їх античастинки.* Стабільність цих частинок обумовлена непорушністю законів збереження. Решта частинок спонтанно розпадається з різними періодами напіврозпаду від 10^3 до 10^{-23} с. Найбільш довгоживучим серед нестабільних частинок є нейтрон ~ 15 хв. Час розпаду резонансів має порядок характерного ядерного часу $\sim 10^{-22}$ - 10^{-23} с. У результаті послідовних розпадів нестабільних частинок врешті-решт народжуються стабільні частинки. *Стабільні і нестабільні частинки можуть також народжуватися з фізичного вакууму і при взаємодії з іншими стабільними частинками, якщо тільки їх відносна кінетична енергія є більшою від маси спокою частинок, що при цьому виникають.* Зворотний процес, при якому частинки взаємно знищуються, має назву *анігіляції*.
- Можливість народження і знищення частинок у процесах їх зіткнень і спонтанного розпаду є однією із головних властивостей елементарних частинок. Оскільки такі явища можуть бути описані тільки в рамках спеціальної теорії відносності (СТВ), що враховує зв'язок маси частинок з їх енергією, то теорія елементарних частинок є суттєво *релятивістською*. У зв'язку з виявленням процесів взаємних перетворень елементарних частинок термін «елементарні» (найпростіші) стосовно таких мікрооб'єктів втратив своє первинне значення і, як і термін «атом» (неподільний), є умовним. *У науковій літературі замість терміна «елементарні частинки» частіше використовується термін «суб'ядерні частинки», або просто частинки.*
- Всього з античастинками зараз відкрито більше ніж 380 суб'ядерних частинок, і кількість їх продовжує збільшуватися. На думку деяких учених, це свідчить про те, що *найближчим часом буде відкритий новий, більш глибокий порівняно з кварковим рівень будови матерії і відповідно змінений критерій елементарності.*

ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ

Фізиками встановлене існування чотирьох видів взаємодій між суб'ядерними частинками: **сильна (s), електромагнітна (e), слабка (w) та гравітаційна (g)**. Вони перелічені в порядку зменшення інтенсивності. Найкраще вивчені дві з них: гравітаційна і електромагнітна. Основи класичних (неквантових) теорій обох взаємодій закладені давно (Ньютон, Ейнштейн і Максвелл) і відомі у загальних рисах із традиційного курсу фізики. Сучасні теорії всіх взаємодій (окрім гравітаційної) є квантовими і базуються на ідеї близькодії.

Інтенсивність будь-якої взаємодії прийнято характеризувати за допомогою так званої *сталой взаємодії, яка визначає ймовірність процесів, обумовлених даним видом взаємодії*. Відношення значень констант дає відносну інтенсивність відповідних взаємодій, що дозволяє порівняти їх.

Найбільш універсальною з-поміж всіх взаємодій є гравітаційна – вона виникає між будь-якими тілами, що мають масу. Гравітаційна взаємодія характеризується гравітаційною сталою $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$.

У фізиці суб'ядерних частинок гравітаційна взаємодія внаслідок її малої величини не відіграє майже ніякої ролі на відстанях $r > 10^{-33}$ см, в зв'язку з чим нею нехтують. При менших відстанях або дуже великих енергіях ця взаємодія за величиною порівнюється з іншими взаємодіями і повинна бути врахована. Сучасною теорією гравітаційної взаємодії є загальна теорія відносності (ЗТВ). В рамках цієї теорії гравітація розглядається як викривлення простору-часу, тобто має геометричну інтерпретацію.

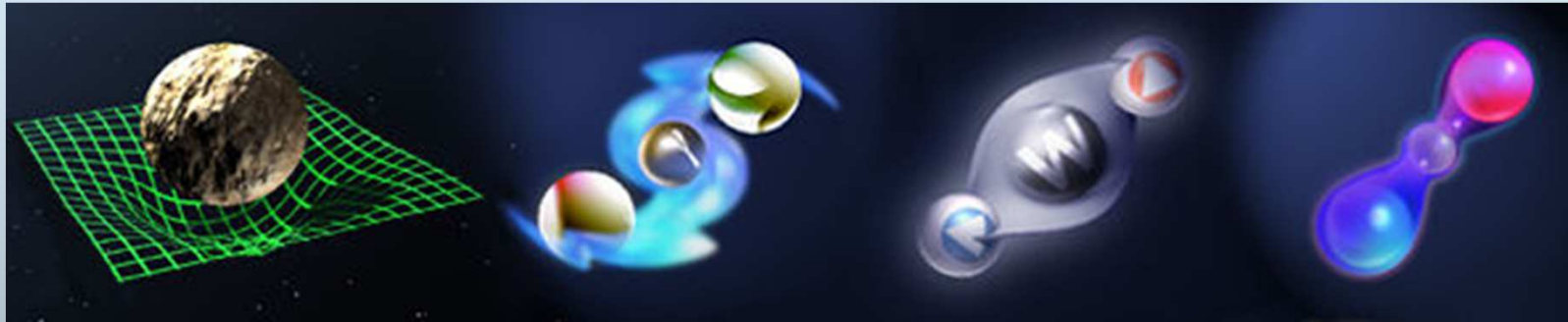
ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ У ПРИРОДІ

Взаємодія	Джерело	Обмінна частинка та її спін J	Константа взаємодії		Радіус дії L , м	Час життя τ , с
			Вираз	Числове значення при $m = m_p$		
Гравітаційна	Маса	Гравітон $J=2$	$\alpha_g = \frac{Gm^2}{\hbar c}$	$0,6 \cdot 10^{-38}$	∞	0
Слабка	Усі ел. частинки	Проміжні бозони $J=1$	$\alpha_w = \frac{g_F m^2 c}{\hbar^3}$	10^{-15}	10^{-19}	10^{-8}
Електромагнітна	Електричний заряд	Фотон $J=1$	$\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar c}$	$1/137 \sim 10^{-2}$	∞	10^{-16}
Сильна	Адрони	Глюони $J=1$	$\alpha_s = \frac{a}{\ln \frac{m}{m_p}}$	1	10^{-15}	10^{-23}

ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ

ЧОТИРИ ТИПИ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ВЗАЄМОДІЙ

Величина 10^{-38} $1/137 \sim 10^{-2}$ 10^{-15} 1



Гравітаційна

Електромагнітна

Слабка

Сильна

Джерело

маса

електричний заряд усі ел. частинки

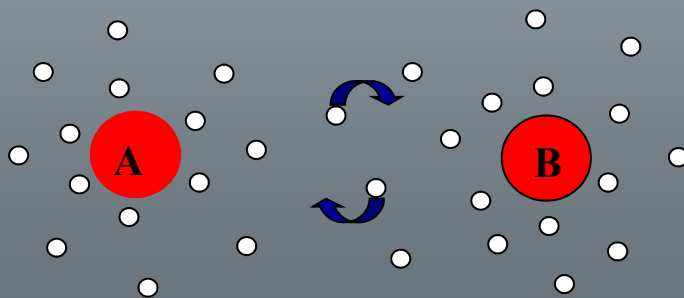
адрони

Обмінна частинка

гравітон

фотон

Проміжні бозони (Z, W) глюони (8)



$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

$$L = c\Delta t = c \frac{\hbar}{\Delta E} = c \frac{\hbar}{mc^2} = \frac{\hbar}{mc} = \lambda_c$$

ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ

Добре відомо, що квантова механіка дозволяє описувати рух суб'ядерних частинок, але не їх виникнення та знищення, тобто вона може бути застосованою лише для опису систем з незмінної кількістю частинок. Узагальненням квантової механіки стала квантова теорія поля. Це квантова теорія систем з нескінченною кількістю ступенів вільності (фізичних полів), яка відповідає вимогам як квантової механіки так і теорії відносності. Необхідність створення такої теорії пояснюється квантово-хвильвим дуалізмом, тобто існуванням хвильових властивостей у всіх без виключення суб'ядерних частинок. У квантовій теорії поля взаємодію трактують як результат обміну квантами поля, а польові величини оголошуються операторами, які пов'язують з актами народження та знищення квантів поля.

Квантова теорія, що описує електромагнітну взаємодію, одержала назву квантової електродинаміки (КЕД), вона вважається найбільш досконалою із усіх існуючих фізичних теорій. Центральним завданням теорії є аналіз актів випромінювання або поглинання фотонів зарядженою частинкою, а також анігіляція електрон-позитронних пар у фотони або породження фотонами такої пари. Ця теорія відповідає основним вимогам як квантової теорії, так і теорії відносності.

Величини m^2 і e^2 у співвідношеннях що описують ці взаємодії залежать від вибору одиниць вимірювання, і це перешкоджає аналізу спільності обох взаємодій. Щоб полегшити порівняння, з цих величин за допомогою універсальних констант - сталої Планка h і швидкості світла c - утворюють безрозмірні константи. Таким чином, вводять безрозмірні величини - гравітаційну та електромагнітну сталу (сталу тонкої структури), де e - заряд електрона (протона) .

ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ

- Необхідно відзначити відмінність між визначенням обох цих сталих. У деякому розумінні, константа α_e є більш універсальною, ніж α_g . Це пов'язано з тим, що у вираз числа α_e входять тільки фундаментальні сталі, в той час як константа α_g характеризується довільною масою m . Щоб усунути цю неузгодженість в константі α_g зазвичай фіксують значення маси m , вважаючи її такою, що дорівнює m_p (маса протона). Цей вибір цілком природний: протон - одна з двох стабільних частинок у Всесвіті. Інша стабільна частинка - електрон - має масу m_e . Вибір між m_p і m_e є в значній мірі умовним.
- Інші дві взаємодії (слабка та сильна) були відкриті лише в ХХ сторіччі. Одна з них - *слабка - керує розпадом більш важких суб'ядерних частинок на більш легкі*. Історично першим був вивчений розпад нейтрона в атомних ядрах (β - розпад), який відбувається за схемою $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$ - нейтрон, протон, електрон та антинейтрино.
- Згодом з'ясувалося, що розпад нейтрона не унікальний. В результаті численних досліджень стало зрозуміло, що *значна частина розпадів суб'ядерних частинок керується єдиною, так званою слабкою взаємодією*. Ця взаємодія характеризується константою Фермі (g_F). Безрозмірна константа слабкої взаємодії записується у вигляді G_F . *Слабка взаємодія також визначає процеси взаємодії нейтрино з речовиною.*

ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ВЗАЄМОДІЇ

- Найбільш складною є ситуація з сильною взаємодією. Ще 20 - 30 років тому сильну взаємодію ототожнювали з ядерною, яка визначала стан протонів і нейтронів в атомних ядрах. Проте створити закінчену теорію ядерної взаємодії не вдалося. Прогрес відбувся у зв'язку з побудовою *динамічної теорії кваркових систем*, яка привела до створення *квантової хромодинаміки* (КХД). У цій схемі ядерна взаємодія ототожнюється із взаємодією багатокваркових систем, з яких складаються нуклони. Таким чином, *на сьогодні із сильною взаємодією ототожнюється взаємодія між кварками, яка, у свою чергу, обумовлює ядерну взаємодію.*

- Залежність сталої сильної взаємодії від маси, на відміну від інших, які постулюються на основі міркувань розмірності, може бути одержана із квантової теорії поля. Її особливістю є те, що вона зменшується при збільшенні маси частинки m . В асимптотичному наближенні, коли $m \gg m_p$, можна одержати

- $$\alpha_s \sim \frac{1}{\ln(m/m_p)}$$

- Цікаво відзначити, що з фундаментальних сталих можна побудувати величини, що мають розмірності довжини, часу, густини, маси, енергії. Ці величини називаються *планківськими*. Фактично це *природні одиниці вимірювання відповідних фізичних величин*.

- Зокрема, *планківська довжина* l_{Pl} , *планківська енергія* E_{Pl} , *планківський час* t_{Pl} і *планківська маса* визначаються такими співвідношеннями:

-
-

ОБ'ЄДНАННЯ ВЗАЄМОДІЙ

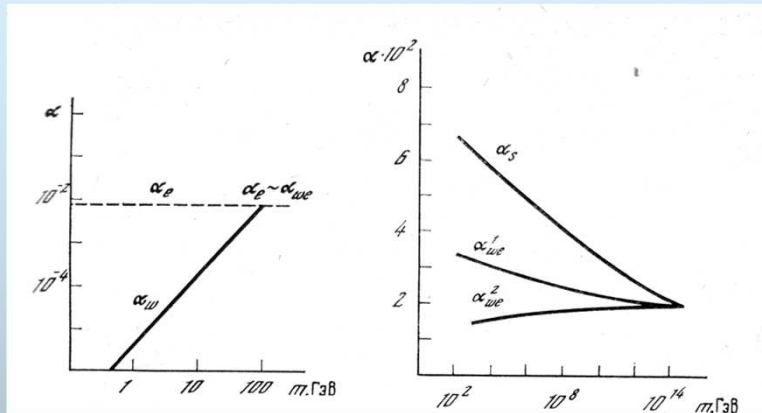


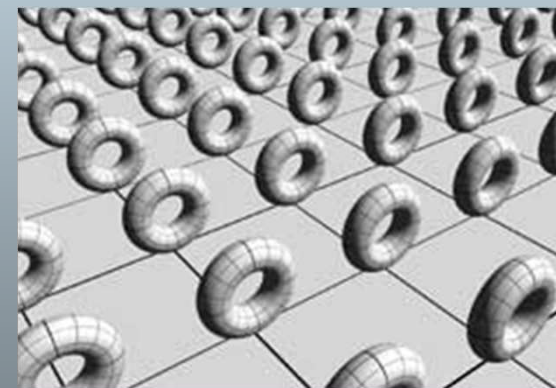
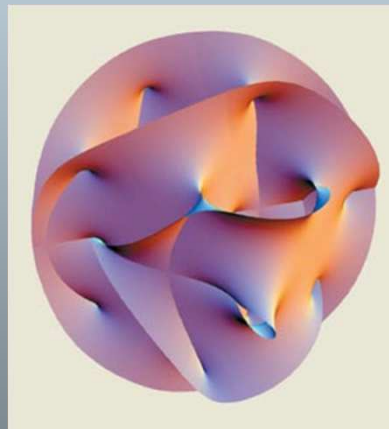
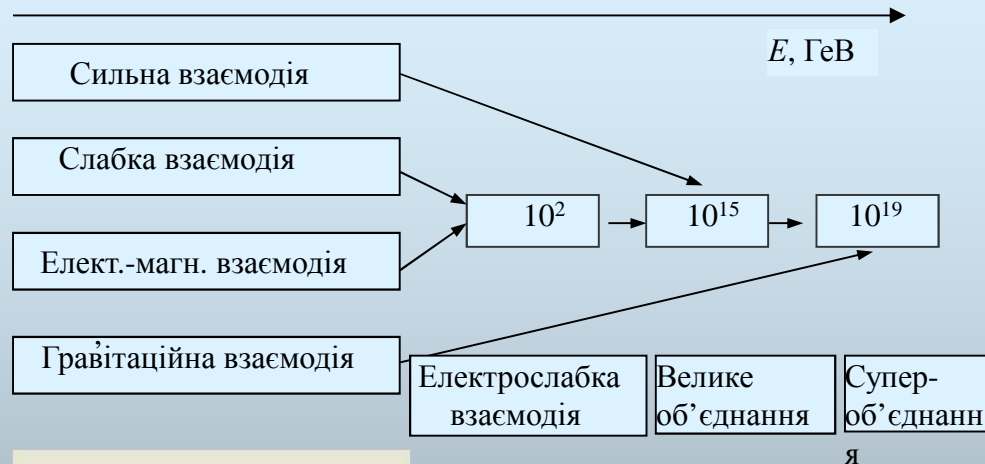
Схема залежності констант електромагнітної α_e слаької α_w та сильної α_s взаємодій від маси частинки переносника

Планківські величини

$$l_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}$$

$$t_{Pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ с}$$

$$E_{Pl} = \frac{\hbar c}{l_{Pl}} = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} = 10^{19} \text{ GeV}$$



Теорію супероб'єднання можна побудувати на основі моделі **суперструн**. Ця теорія ґрунтується на введенні у фізику протяжних мікрооб'єктів (10^{-33} см), які назвали **струнами**. Вони коливаються у 11-мірному просторі і можуть бути як замкненими так і не замкненими. Додаткові виміри не сприймаються, оскільки згорнуті, наприклад, в просторі Калабі-Яу.

Узагальнення цієї теорії (Уїттен, 1995 р.) назвали М-теорією (magic).

СТАНДАРТНА МОДЕЛЬ

Конструкція у фізиці елементарних частинок, що описує електромагнітну, слабку і сильну взаємодію всіх елементарних частинок.

Фундаментальні частинки

Кварки	u up	c charm	t top	γ фотон
	d down	s strange	b beauty	
Лептони	ν _e електронне	ν _μ мюонне	ν _τ тау	Z Z-бозон
	e електрон	μ мюон	τ таон	W W- бозон
Ферміони			Бозони	

$m \sim 125 \text{ GeV}$



Бозон Хигса???

Higgs boson???

- Стандартна модель включає наступні положення.
- Вся речовина складається з 12 фундаментальних частинок-ферміонів: 6 лептонів і 6 кварків, які можна об'єднати в три покоління ферміонів.
- Кварки приймають участь в сильних, слабких і електромагнітних взаємодіях;
- заряджені лептони (електрон, мюон, тау-лептон) - в слабких і електромагнітних;
- нейтрино - тільки в слабких взаємодіях.
- Всі три типи взаємодій з'являються як наслідок постулату: **наш світ симетричний відносно трьох типів каліброваних перетворень.**
- Частинками-носіями взаємодій є:
 - 8 глюонів для сильної взаємодії (група симетрії SU(3));
 - 3 важких каліброваних бозона (W⁺, W⁻, Z⁰) для слабкої взаємодії (група симетрії SU(2));
 - один фотон для електромагнітної взаємодії (група симетрії U(1)).
- На відміну від електромагнітної і сильної, слабка взаємодія може змішувати ферміони з різних поколінь, що приводить до нестабільності всіх частинок, за винятком найлегших, і до таких ефектів, як порушення CP - інваріантності і нейтринних осциляцій

КВАНТОВІ ЧИСЛА СУБ'ЯДЕРНИХ ЧАСТИНОК

- Для того щоб пояснити властивості і поведінку суб'ядерних частинок, їх доводиться наділяти цілим рядом характерних для них фізичних величин - *квантових чисел*. *Сукупність внутрішніх квантових чисел частинки повністю її визначає.*
- Термін «внутрішні» відтіняє належність квантових чисел власне частинці, тобто ці квантові числа не пов'язані з властивостями простору-часу, які зумовлюють звичні величини, що зберігаються: енергію, імпульс і момент кількості руху.
- Основними характеристиками частинок є:
 - 1) маса m ;
 - 2) електричний заряд Q ;
 - 3) спіні J ;
 - 4) баріонний заряд B ;
 - 5) лептонні заряди L_e, L_μ, L_τ ;
 - 6) дивність S ;
 - 7) чарівність (шарм) C ;
 - 8) краса B ;
 - 9) ізотопічний спіні I ;
 - 10) час життя τ ;
 - 11) магнітний момент μ ;
 - 12) парності – просторова P , зарядна C , комбінована CP , G -парність, часове віддзеркалення T .

ІЗОТОПІЧНИЙ СПІН

У 1932 р. Гейзенберг звернув увагу на дивну близькість мас протона і нейтрона: $m_p = 938,3$ МеВ, а $m_n = 939,6$ МеВ. У зв'язку з цим в 1932 р. він висунув ідею, що *протон і нейтрон є різними станами однієї і тієї самої частинки, названої нуклоном*. Своєрідним “перемикачем”, який переводить нуклон з одного стану у інший, є *обмінна частинка*, так званий віртуальний піон. Спостережувальна відмінність між протонним і нейтронним станами нуклона, з погляду Гейзенберга, зводиться до різниці значень *електричного заряду* ($e_p=e$, $e_n=0$), яка і обумовлює невелику відмінність їх мас. Цю властивість нуклона називають **зарядовою незалежністю**, вона обумовлена деякою внутрішньою симетрією частинки. Відповідно протон і нейтрон одержали назву *зарядового мультиплету (дублету)*. Гейзенберг сформулював квантову інтерпретацію цього явища, яка, зрозуміло, істотно розширена і покладена **в основу теорії елементарних частинок**.

Ця концепція базується на такій ідеї: відмінність в станах протона і нейтрона характеризується новим внутрішнім квантовим числом, що одержало назву **“ізотопічний спі́н”**. Слово «спін» у цьому терміні підкреслює ту обставину, що математичний метод, який описує ізотопічний спі́н, близький до того, що описує звичайний спі́н. Тобто характеризується модулем вектора J та його проекцією на визначений напрям J_z .

Нуклон описується вектором ізотопічного спі́ну I , проекція якого I_z на деяку вибрану вісь z може набувати двох значень $\pm 1/2$ відповідно до того, як набуває цих значень проекція звичайного спі́ну. Умовилися вважати, що значення $I_z = +1/2$ відповідає протонному стану нуклона, а $I_z = -1/2$ – нейтронному.

ДИВНІСТЬ

На початку 50-х років спостерігалось таке явище. Тільки що відкриті K -мезон і Λ -частинка не народжувалися порізно. Наприклад, реакція (π -піон), яка, здавалося б, не була заборонена ніякими фізичними законами, не спостерігалася на дослідах. Проте, наприклад, відбувалася реакція .

У фізиці елементарних частинок існує золоте правило: **все, що не заборонено, повинно здійснюватися в природі**. Категоричне заперечення в мікрофізиці означає, що існує якесь **правило заборони**. Воно не абсолютне, але означає, що ймовірність певного процесу близька до нуля.

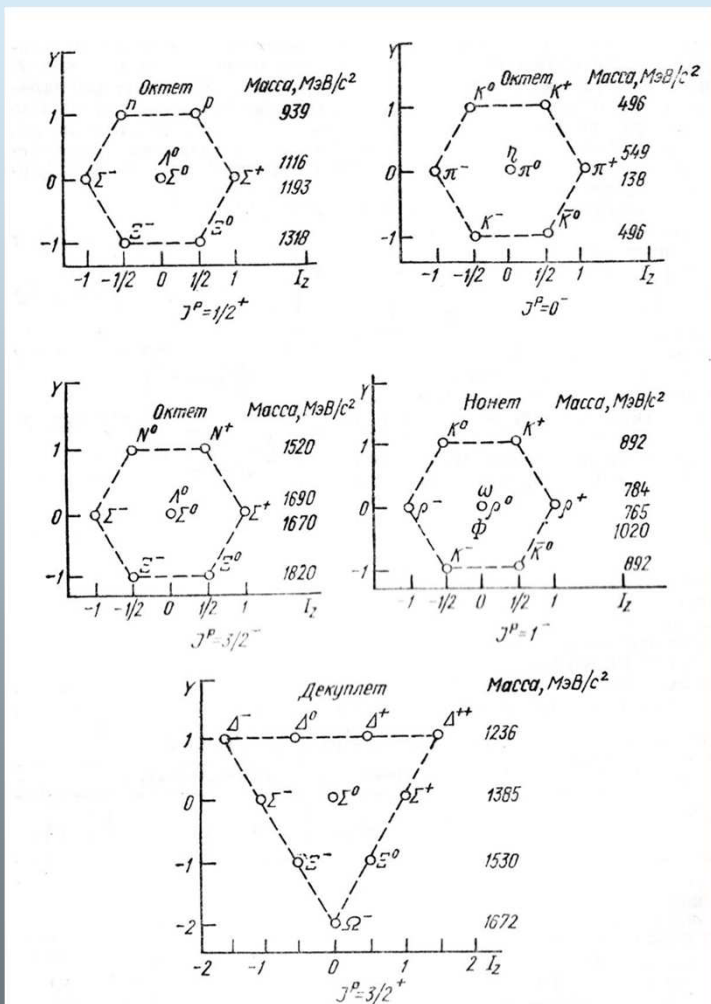
З цієї причини відсутність реакцій з виникненням однієї Λ - частинки і обов'язкове парне їх народження повинні були знайти своє віддзеркалення у конкретному правилі. Гелл-Ман і Нішідзіма сформулювали його в 1952 р. Згідно з цим правилом заборони K - і Λ -частинкам приписувалося нове квантове число - **дивність** (S), яке зберігається в сильних взаємодіях.

Для простоти було запропоновано характеризувати дивність цілими числами. Домовилися, що Λ - частинки мають $S = -1$, K -мезони $S = +1$, дивність нуклонів і піонів дорівнює нулю. Тоді легко пояснюється дивна поведінка нових елементарних частинок. В реакції з одиничним народженням Λ -частинок дивність не зберігається, тому така реакція заборонена. При парному народженні дивності Λ - і K -частинок компенсуються, і, отже, такі реакції дозволені.

На наступному етапі досліджень виникла необхідність в єдиному описі трьох величин, що зберігаються: I , I_z , S . Для цього узагальнили схему, що була застосована для ізотопічного спіну. Замість двовимірного простору ізотопічного спіну було запропоновано **використовувати тривимірний комплексний евклідов простір**. Вектор, що відповідає всім цим квантовим числам, функціонує саме в такому просторі.

На практиці замість дивності S використовують **гіперзаряд** Y , який визначається співвідношенням. Оскільки баріонний заряд B є адитивним, цілочисловим і зберігається, то **гіперзаряд має ті ж властивості, що і дивність**.

УНІТАРНА СИМЕТРІЯ



Введення ізотопічного спіну дозволило виявити внутрішню симетрію суб'ядерних частинок. Відповідна теорія одержала назву теорії унітарної симетрії, вона запропонована Гелл-Маном і Нейманом у 1961 р. **Вихідна ідея унітарної симетрії полягає в незалежності рівняння для енергії сильної взаємодії відносно деяких перетворень, еквівалентних поворотам або обертанням у деякому тривимірному абстрактному векторному просторі – SU(3)-симетрії.**

Вона дозволяє об'єднати велике число схожих частинок, вважаючи їх однією частинкою, але такою, що перебуває в різних станах. При даному підході вдається об'єднати, здавалося б, абсолютно різні елементарні частинки. Наприклад, з'ясувалося, що всі мезони можна вважати різними станами однієї частинки. Адрони також зв'язані між собою законами симетрії.

У теорії унітарної симетрії частинки групуються в унітарні мультиплети, або супермультиплети. Частинки-адрони, що входять у супермультиплет, мають однаковий spin і парність. Теорія унітарної симетрії надихнула на ідею, що **адрони мають внутрішню структуру і складаються з простіших частинок.**

КВАНТОВІ ЧИСЛА ПАРНОСТІ

Законам природи властива симетрія. *Під симетрією у фізиці високих енергій розуміють властивість фізичних величин, що описують поведінку частинок, залишатися незмінними (інваріантними) при визначених математичних перетвореннях над ними.*

Принципи симетрії поділяють на просторово-часові або зовнішні і внутрішні симетрії, що описують властивості самих суб'ядерних частинок.

Квантові числа парності P , C , G , T відображають симетрію перебігу фізичних процесів і, отже, рівнянь руху, що описують частинки в квантовій теорії відносно різних операцій віддзеркалення. Цим операціям відповідають дискретні перетворення хвильових функцій частинок (векторів станів), що приводять до законів збереження деяких фізичних величин.

Відомо, що існує дзеркальна симетрія природи: відбиття простору у дзеркалі (*інверсія*) не змінює фізичних законів. Операції відповідає фізична величина, яка одержала назву *P -парності, просторової парності, або просто парності*. Ця операція переводить ліву систему координат у праву (тобто ліве замінюється правим).

З дзеркальної симетрії пустого простору випливає закон збереження парності: *при усіх перетвореннях системи частинок, парність їх стану залишається незмінною. Збереження парності означає інваріантність законів природи відносно заміни правого лівим і навпаки.*

КВАНТОВІ ЧИСЛА ПАРНОСТІ

Операція C одержала назву *зарядового спряження*. Вона полягає у зміні знаків усіх без винятку зарядів частинки. Така *операція змінює знаки адитивних квантових чисел, але залишає незмінними їх імпульс і спін, тобто замінює частинки на античастинки. Тому операція називається також операцією спряження частинка - античастинка*. Число C називається *зарядовою парністю*. Певну зарядову парність мають тільки частинки, у яких всі заряди дорівнюють нулю, $B=Q=S=L=0$. Такі частинки називаються *істинно нейтральними*.

Операції G відповідає фізична величина, що називається G -парністю. Вона складається із зарядового спряження і повороту на 180° навколо осі у в *ізотопічному просторі*. Оскільки поворот навколо цієї осі змінює знак третьої компоненти I_z ізотопічного спіну, то операція не змінює електричний заряд частинки і дозволяє приписати визначену G -парність адронам, які мають електричний заряд. G -парність зберігається тільки в сильних взаємодіях.

Фундаментальні фізичні закони не змінюються при *оберненні часу*, тобто при заміні в рівняннях теорії t на $-t$. Відповідна операція називається *часовим віддзеркаленням*. *Вона полягає в зміні знаків всіх імпульсів і моментів кількості руху частинки на протилежні*, заміні вектора стану на комплексно спряжений. Симетрія відносно операції не веде до закону збереження якої-небудь парності, але проявляється у *принципі детальної рівноваги*, який добре виконується в сильних і електромагнітних взаємодіях (з точністю $<1\%$) і порушується в слабких взаємодіях.

Операція CP називається *комбінованою інверсією*. При такій операції віддзеркалення всі імпульси і всі заряди змінюють знаки, тобто *частинки переходять у античастинки*. Операція полягає у зміні знаків моментів кількості руху і зарядів частинок. Імпульси при цій операції не змінюються. Згідно з CPT -теоремою Людерса - Паулі (1954-1955) симетрія відносно - операції існує у будь-яких взаємодіях. Іншими *словами, поведінка Всесвіту не зміниться, якщо частинки замінити античастинками, відбити це все у дзеркалі, а потім змінити напрямок часу на протилежний*.

ЗАКОНИ ЗБЕРЕЖЕННЯ У ФІЗИЦІ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

У фізиці суб'ядерних частинок *існує велика кількість законів збереження*. Є всі підстави вважати, що кожний закон збереження пов'язаний з певною симетрією законів природи. Умовно ці закони можна поділити на три групи відповідно до їх фізичної природи:

- 1) закони збереження, пов'язані з геометрією чотиривимірного простору-часу;*
- 2) точні закони збереження зарядів;*
- 3) наближені закони збереження (виконуються тільки для деяких фундаментальних взаємодій).*

Закони збереження у фізиці частинок мають дуже важливе значення, оскільки сучасна теорія високих енергій не має фундаментальних рівнянь руху, аналогічних до рівнянь Ньютона у класичній механіці і Максвелла у класичній електродинаміці. У той же час вивчення різних симетрій, законів збереження і їх наслідків дозволяє систематизувати одержані експериментальні дані. Новітні фізичні теорії, які претендують на статус найбільш загальних, неодмінно повинні пояснити природу фізичних величин, що зберігаються, та виявити їх походження.

НЕЗБЕРЕЖЕННЯ ПАРНОСТІ У СЛАБКИХ ВЗАЄМОДІЯХ

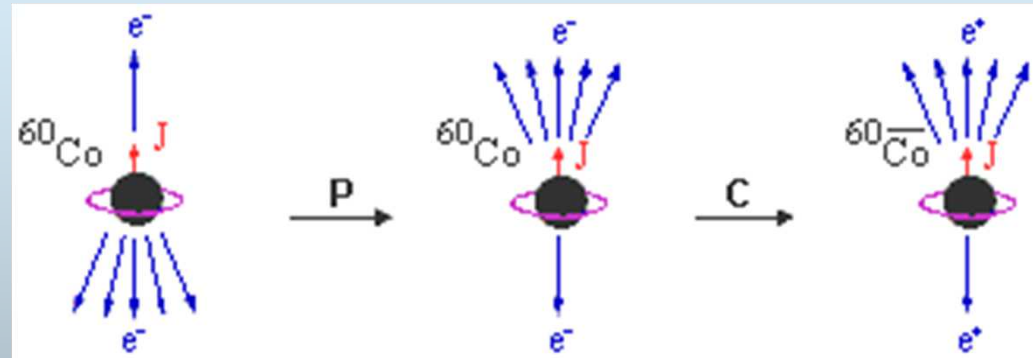
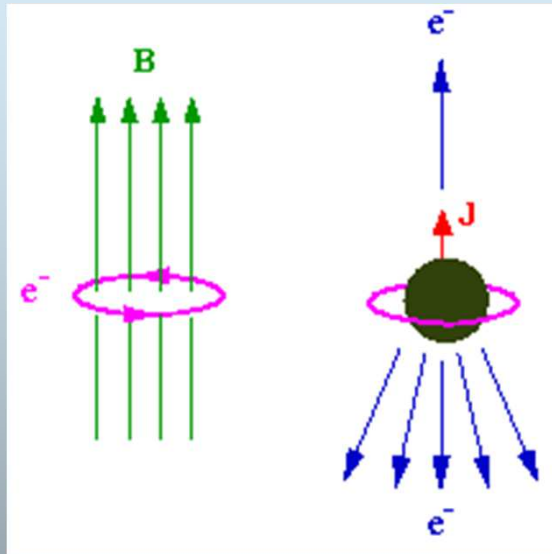
До середини 50-х років вважалося, що у світі суб'ядерних частинок усі відомі закони збереження виконуються суворо. Світ є симетричним відносно таких симетрій, як зарядове спряження C , часове віддзеркалення T та просторова парність P . Пізніше з'ясувалося, що у *мікросвіті симетрія контролюється взаємодією*, при цьому точність проявлення симетрії, а отже, і законів збереження є різною для різних взаємодій – *чим сильніша взаємодія, тим точніше проявляється симетрія*. Так, у процесах, що контролюються гравітаційною, електромагнітною і сильною взаємодіями, строго зберігаються C -, P - і T -симетрії, причому кожна окремо, але *при слабкій взаємодії, як у 1956 р. показали Янг та Лі, ці динамічні симетрії порушуються*.

Експериментально порушення P -парності вперше спостерігалось Ву у 1957 р. при β -розпаді поляризованих ядер. Ідея дослідів полягала у наступному. Якщо праве і ліве у природі не розрізняються, то при β -розпаді вилітання електрона у напрямку спіну ядра і протилежному напрямку повинно мати однакову ймовірність. Якщо ядро випромінює електрони з однаковою ймовірністю в обох напрямках, то дзеркальне зображення системи ядро-електрони відрізнити від самої системи неможливо. Але якщо електрони випромінюються переважно в одному напрямку, то ліве і праве стають відмінними.

У дослідях Ву ядра радіоактивного кобальту орієнтувалися магнітним полем так, щоб їх спіни були спрямовані однаково. У результаті експериментів було встановлено, що *у одному напрямку електронів вилітає більше, ніж у іншому*. З'ясувалося, що електрони випромінюються в основному в напрямку, протилежному напрямку ядерних спінів. Таким чином, *була доведена нерівноправність правого і лівого при слабкій взаємодії*.

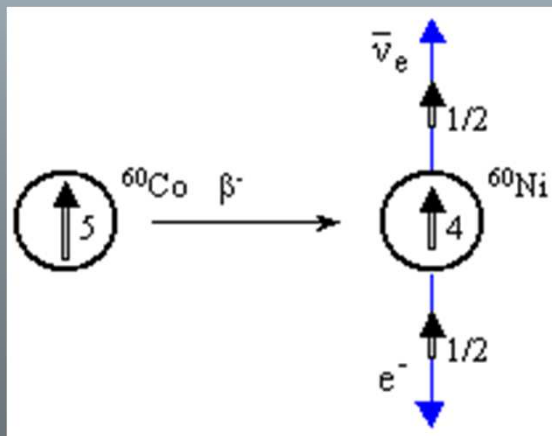
У подальшому явище порушення P -парності було підтверджене на прикладі великої кількості інших слабких розпадів суб'ядерних частинок. Одночасно з'ясувалося, що при таких розпадах порушується і C -парність. Це означає, що *Всесвіт, побудований з античастинок, буде поводити себе по-іншому, ніж 84*
наш.

ДОСЛІДИ ВУ



У дослідах Ву з'ясувалося (див. рис.1) що електрони випромінюються атомами кобальту в основному у напрямі протилежному напрямку магнітного поля (спінів ядер), цим було доведено, що у слабких розпадах парність не зберігається.

Спін у антинейтрино завжди спрямований по імпульсу (див. рис. 2) (позитивна або права спіральність), у нейтрино проти імпульсу (від'ємна або ліва спіральність). При β -розпаді зберігається комбінована СР-парність - послідовність застосування просторової і зарядової інверсії (заміни частинок на їх античастинки (рис. 3).



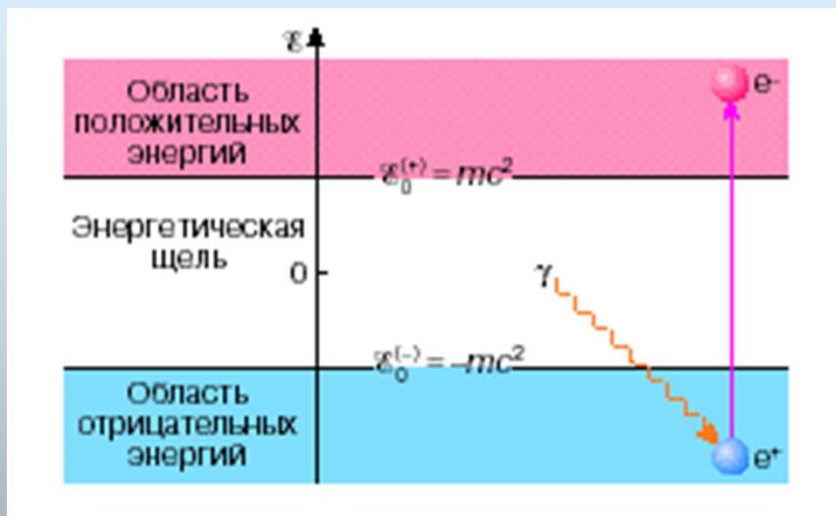
НЕЗБЕРЕЖЕННЯ ПАРНОСТІ У СЛАБКИХ ВЗАЄМОДІЯХ

Довгий час більшість вчених вважали, що слабка взаємодія повинна підпорядковуватися комбінованій CP -симетрії, тобто розвиток Всесвіту повинен відбуватися так само, як і розвиток його дзеркального відбиття при заміні частинок на античастинки. Однак у 1964 р. Крістенсон із співробітниками експериментально показали, що порушується і CP -парність. Це у відповідності до теореми Людерса - Паулі одночасно відповідає порушенню T -інваріантності.

Тривалий час розпади нейтральних K -мезонів були єдиним відомим фізичним процесом, де реєструвалося порушення CP -парності. Лише у 2001 році з використанням асиметричних колайдерів РЕР ІІ (Стенфорд, США) та КЕК (Цукуба, Японія) були досліджені процеси розпаду нейтральних бозонів (B^0 і \bar{B}^0), де *явище порушення CP -інваріантності було встановлено надійно*. Таким чином, зараз немає жодних сумнівів, що слабкі процеси можуть проходити з порушенням просторової парності, тобто вони *ніби відчують різницю між лівим і правим, минулим і майбутнім*. У наш час є чіткі експериментальні докази, що *незбереження парності в слабких взаємодіях має універсальний характер*, воно проявляє себе не тільки в розпадах елементарних частинок, але і в ядерних, і навіть атомних явищах. Тобто слід визнати, що *асиметрія є властивістю природи на найфундаментальнішому рівні*.

Таким чином, відмітною властивістю слабкої взаємодії є її CP -неінваріантність. Це приводить до того, що наш світ є симетричним тільки відносно трьох перетворень – CPT -симетрія, але кожне перетворення окремо приводить до асиметрії. Виявилось, *що у мікросвіті (як і у макросвіті) існує абсолютна різниця між лівим і правим, між минулим і майбутнім, між частинками і античастинками*. Можливо, що ця властивість відповідальна за те, що речовина у Всесвіті значно превалює над антиречовиною, яка побудована з античастинок. Завдяки CP -неінваріантності слабкої взаємодії, як показав Сахаров (1967 р.), *світ і антисвіт несиметричні*.

ЧАСТИНКИ І АНТИЧАСТИНКИ



Рівняння Шредінгера, яке є основним рівнянням квантової механіки, **не задовольняє вимоги теорії відносності - воно неінваріантне відносно перетворень Лоренца**. В 1928 р. Діраку вдалося знайти релятивістське квантово-механічне рівняння для електрона, з якого випливає ряд важливих наслідків. Перш за все з цього рівняння природно, без яких-небудь додаткових припущень можна одержати спін і числове значення власного магнітного моменту електрона. Таким чином, з'ясувалося, що **спін є величиною одночасно і квантовою, і релятивістською**.

Крім того, рівняння Дірака дозволило передбачити існування античастинки електрона - **позитрона**. З рівняння Дірака випливає, що **повна енергія вільного електрона може мати не тільки позитивні, але і негативні значення**. У подальшому в дещо зміненому вигляді рівняння Дірака було застосоване не тільки до електронів, але і до інших частинок із спіном, що дорівнює $1/2$. З'ясувалося, що **у кожній такої частинки (наприклад, протона або нейтрона) повинна існувати своя античастинка**.

ОСНОВИ КЛАСИФІКАЦІЇ СУБ'ЯДЕРНИХ ЧАСТИНОК

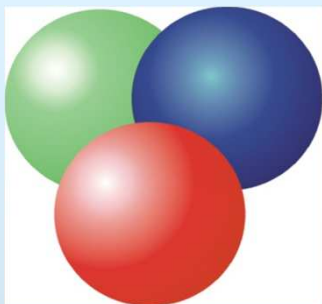
- Суб'ядерні частинки класифікуються за різними параметрами. Найзагальніша основа класифікації частинок - *значення їх власного моменту імпульсу* - спіну (J).
- З'ясувалося, що поведінка частинок істотно залежить від того, яке число, ціле (0, 1, 2,...) або напівціле (1/2, 3/2, 5/2), характеризує спін. Частинки з напівцілим спіном називаються *ферміонами*, з цілим - *бозонами*. В рамках квантової механіки *відмінність в поведінці ферміонів і бозонів проявляється в типі симетрії хвильових функцій, що описують ці частинки*. Якщо хвильова функція симетрична відносно перестановки координат і спінів частинки, то частинка - бозон. У випадку, якщо хвильова функція антисиметрична до перестановки змінних, маємо ферміон. Система, що складається з ферміонів, підлягає принципу заборони Паулі, а для системи з бозонів ця заборона відсутня.
- Згідно з сучасною точкою зору будь-яка *взаємодія елементарних частинок здійснюється іншими частинками - квантами відповідної взаємодії*. Такими *переносниками взаємодії завжди є бозони* (їх називають *калібрувальними*), в той час як сама *матерія побудована з ферміонів*.

ОСНОВИ КЛАСИФІКАЦІЇ СУБ'ЯДЕРНИХ ЧАСТИНОК

Ще однією основою класифікації елементарних частинок є їх взаємодія. Всі елементарні частинки схильні до слабкої взаємодії. Частинки, які, крім того, беруть участь у сильній взаємодії, називаються **адронами** (грецьке «хадрос» означає великий, масивний). Встановлено, що *всі адрони мають внутрішню структуру і складаються з більш фундаментальних частинок - кварків.* Існує шість типів кварків. Адрони з нульовою дивністю називають звичайними, з ненульовою дивними, з ненульовою чарівністю – зачарованими (або шармованими).

Адрони - ферміони одержали загальну назву – **баріонів** (від грецького "баріос" - важкий), адрони - бозони називають **мезонами** (від грецького “месос”- середній, проміжний). Найбільш відомими з баріонів є нуклони (протон і нейтрон), з мезонів - π -мезони (*піони*) і K -мезони (*каони*). До баріонів, крім нуклонів, відносять групу частинок, яка одержала назву *гіперонів*. Гіперони є дивними частинками, оскільки їх дивність не дорівнює нулю.

Ферміони, що не беруть участі у сильній взаємодії, називаються **лептонами**. Лептони отримали свою назву від грецького слова «лептос», яке означає «легкий, дрібний». Ті з них, які мають електричний заряд (тобто електрони і мюони), беруть участь також у електромагнітній взаємодії. Типовими лептонами є електрони і нейтрино. На сучасному рівні *знають тільки лептони і кварки вважаються точковими безструктурними частинками* і, як результат, їх називають *фундаментальними ферміонами*.



Бариони складаються з трьох кварків

Кварки взаємодіють, обмінюючись глюонами



Мезони складаються з кварку та антикварку

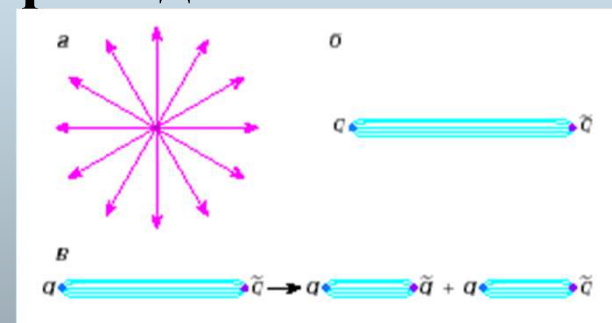
Теорія взаємодії кварків – квантова хромодинаміка

Асимптотична свобода

чим менша відстань, тим менша взаємодія

Конфайнмент

замикання» кварків і глюонів всередині адронів



кварк-антикваркова пара створена з вакууму

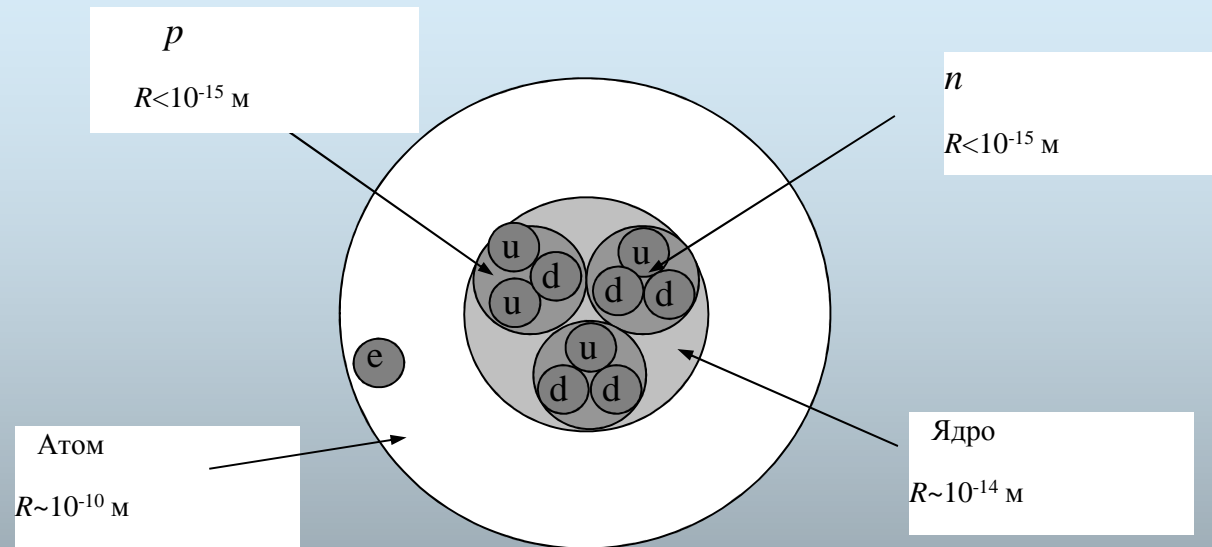
Кварки і глюони не існують у вільному стані!



ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КВАРКІВ

Кварки	<i>u</i>	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>c</i>	<i>b</i>	<i>t</i>
Маса, <i>m</i>	1,5-5 MeV	3-9 MeV	60-70 MeV	1,55 GeV	4,73 GeV	178 GeV
Ізоспін, <i>I</i>	1/2	1/2	0	0	0	0
Проекція, <i>I_s</i>	1/2	-1/2	0	0	0	0
Заряд, <i>q/e</i>	2/3	-1/3	-1/3	2/3	-1/3	2/3
Дивність, <i>S</i>	0	0	-1	0	0	0
Чарівність, <i>C'</i>	0	0	0	1	0	0
Краса, <i>B</i>	0	0	0	0	1	0
Істина, <i>T</i>	0	0	0	0	0	1

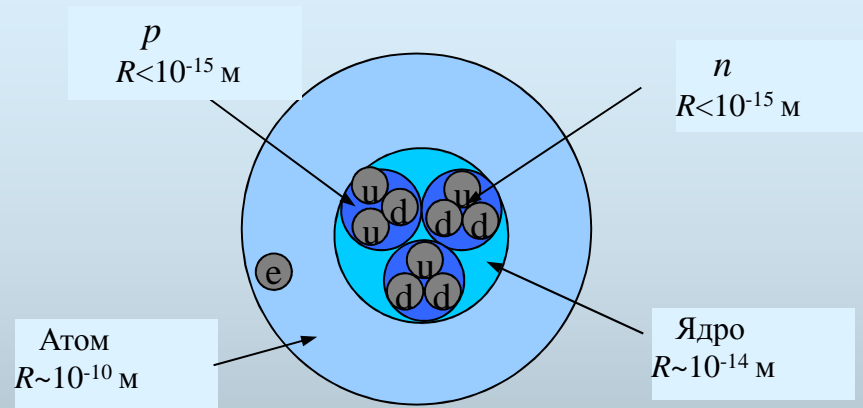
БУДОВА АТОМА



Кварки, які є ферміонами, повинні підлягати принципу заборони Паулі і не *можуть об'єднуватися, якщо їх стани однакові*. А в баріонах і антибаріонах кварки одного аромату часто з'являються разом. Наприклад, протон утворюється комбінацією кварків, яка записується так: *uud*, нейтрон - *udd*. Здавалося б, порушується принцип заборони Паулі. Для усунення цієї суперечності було введено припущення, *що кварки одного аромату не ідентичні*, вони розрізняються характером взаємодії один з одним, і тому для їх опису ввели ще одне квантове число. Його назвали *кольором*. Як «аромат» не має ніякого відношення до запаху, так і «колір» не має нічого спільного із загальноприйнятим значенням цього слова.

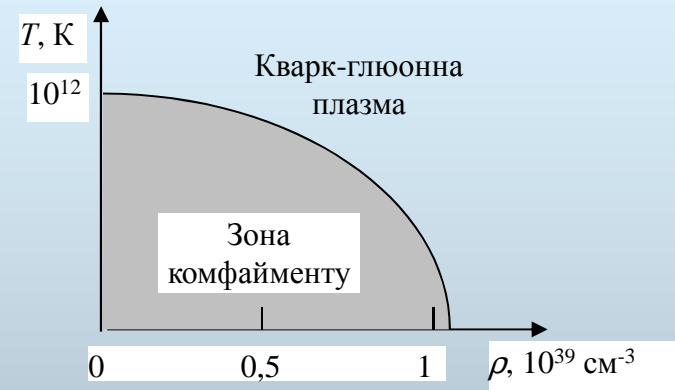
Таким чином, *кварк кожного аромату може існувати у трьох кольорових станах*. За кольори домовилися брати жовтий (*y*), синій (*v*) і червоний (*r*). Антикварки мають кольори, додаткові до білого, які називають *антикольорами* (*y*, *v*, *r*).

КВАРКОВИЙ РІВЕНЬ МАТЕРІЇ



Внутрішня будова атома

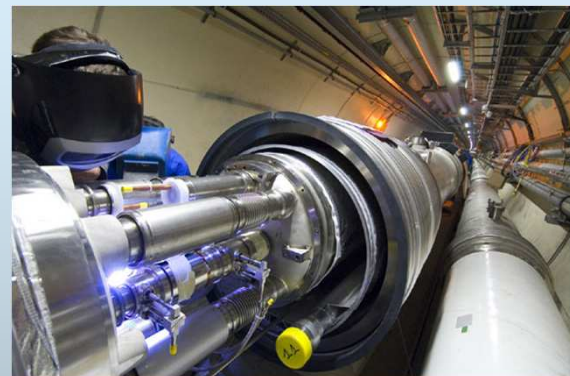
Кварки, які є ферміонами, підлягати принципу заборони Паулі і не можуть об'єднуватися, якщо їх стани однакові. А в баріонах кварки одного аромату часто з'являються разом. Наприклад, протон утворюється комбінацією кварків: uud , нейтрон - udd . Для усунення цієї суперечності було введено припущення, що **кварки одного аромату не ідентичні**, вони розрізняються характером взаємодії один з одним, і тому для їх опису ввели ще одне квантове число - **колір**. Кварк кожного аромату може існувати у трьох кольорових станах. За кольори домовилися брати жовтий (y), синій (v) і червоний (r). Антикварки мають кольори, додаткові до білого, які називають **антикольорами** (y, v, r)



При стисканні ядер окремі нуклони наближаються один до одного, в результаті їх *хвильові функції починають перекриватися*. Як наслідок, кварки і глюони, *втрачають свої зв'язки і починають вільно переміщуватися усередині всього об'єму*. Звичайно, вони, як і раніше, схильні до конфайнменту, але розмір *області, яку ці частинки не можуть покинути, стає набагато більшою*. Усередині всього цього об'єму кварки і глюони можуть переміщатися як звичайні вільні частинки, тобто відбувається **деконфайнмент** кварків і глюонів. Цей агрегатний стан речовини називають **кварк-глюонною плазмою**.

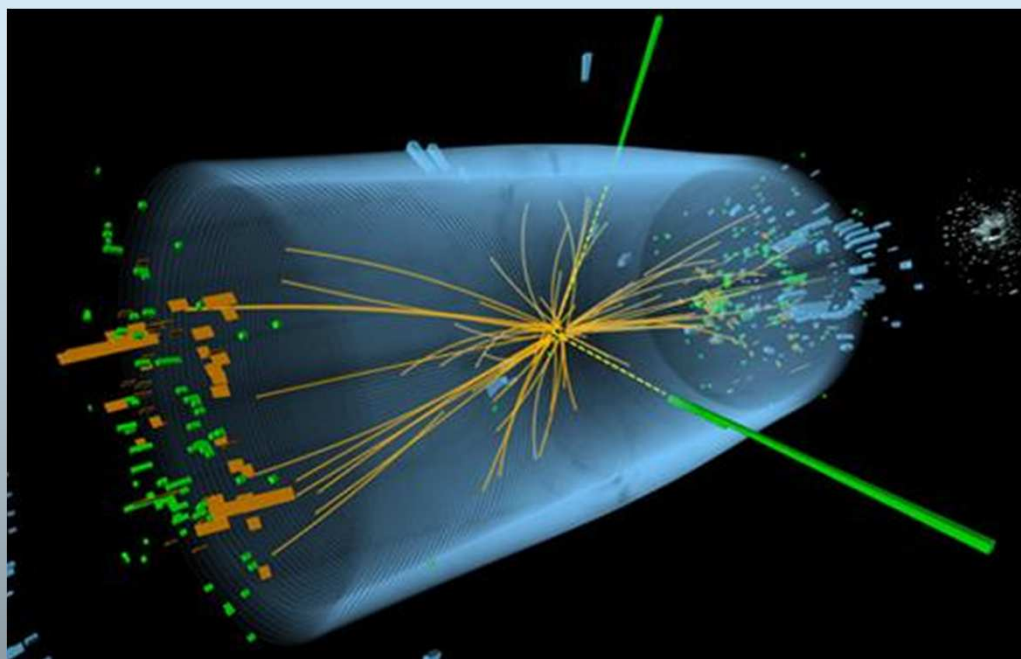
За оцінками вчених він може реалізуватися в надрах нейтронних зірок та існував на початкових етапах розвитку Всесвіту.

ДОСЛІДИ У ЦЕРНІ



•ЦЕРН (CERN) - Європейська організація з ядерних досліджень, найбільша в світі лабораторія фізики високих енергій. Також іноді перекладається як Європейський Центр ядерних досліджень. ЦЕРН знаходиться на кордоні Швейцарії і Франції, поблизу Женеви. Територія ЦЕРНу складається з двох основних майданчиків та кількох дрібніших

ВІДКРИТТЯ БОЗОНІВ ХІГГСА



Бозон Хіггса - остання знайдена частинка Стандартної моделі. Частинка Хіггса так важлива, що в заголовку книги нобелівського лауреата Леона Ледермана «Частинка Бога: якщо Всесвіт це відповідь, то яке питання?» вона названа «god particle» (частинка бога або частинка-бог)

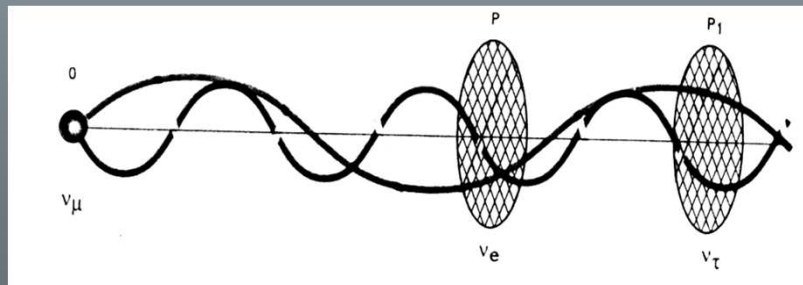
•Бозон Хіггса - елементарна частинка, елементарний бозон, квант поля Хіггса, з необхідністю виникає в Стандартній моделі внаслідок хіггсовського механізму спонтанного порушення електрослабкої симетрії. За побудовою, хіггсовській бозон є скалярною частинкою, тобто має нульовий спіні. Постулюваний Пітером Хіггсом в його фундаментальних статтях, що вийшли у 1964 році. В рамках Стандартної моделі відповідає за масу елементарних частинок. Бозон Хіггса спочатку був передбачений в теорії, і після декількох десятків років пошуку 4 липня 2012 представники ЦЕРНу повідомили, що на обох основних детекторах БАК спостерігалася нова частинка з масою близько 125-126 ГеВ. 14.03.2013 фізики ЦЕРНу підтвердили, що знайдена півроку раніше частинка дійсно є бозоном Хіггса.

НЕЙТРИНО

- Нейтрино є найбільш поширеною і загадковою з суб'ядерних частинок. Існування нейтрино ще у 1930 р. передбачив австрійський фізик Паулі. При бета-розпаді нейтронів за реакцією, що супроводжувалася випромінюванням швидких електронів, частина енергії зникала невідомо куди, крім того, не виконувався закон збереження спіну частинок, що брали участь у реакції. Паулі висунув гіпотезу, що цю енергію виносить деяка нейтральна частинка (реально - античастинка), що вилітає разом з електроном. Частинка за всіма ознаками повинна була мати дуже маленьку масу, тому Фермі, якому Паулі розповів про свою гіпотезу, вигадав для неї назву «нейтрино», що означає «маленький нейтрон», або «нейтрончик».
- Свою ідею Паулі висунув у 1930 р., але лише в 1956 р., тобто через 26 років, нейтрино відкрили експериментально Рейнес і Коуен-молодший (Лос-Аламоська лабораторія). Для цього використовувалася реакція $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$. Великий проміжок часу між двома подіями був обумовлений тим, що нейтрино дуже важко зареєструвати, оскільки воно не має заряду та, як вважалося протягом довгого часу, маси спокою. В результаті **з речовиною нейтрино майже не взаємодіє** (ефективний переріз взаємодії складає $\sigma = (0,94 \pm 0,13) \cdot 10^{-43} \text{ см}^2$) і може вільно пронизати навіть Земну кулю (середня довжина вільного пробігу у речовині складає $\lambda \sim 10^{20} \text{ см}$).
- Реєстрацію нейтрино утруднює також існування фонових процесів, пов'язаних із взаємодією детектора з космічним випромінюванням. У результаті **детектори для спостереження нейтрино необхідно встановлювати глибоко під землею** в надії, що всі інші частинки поглинуться шаром речовини і лише нейтрино залишать у лічильниках свої сліди.

ПРОБЛЕМА ДЕФІЦИТУ СОНЯЧНИХ НЕЙТРИНО

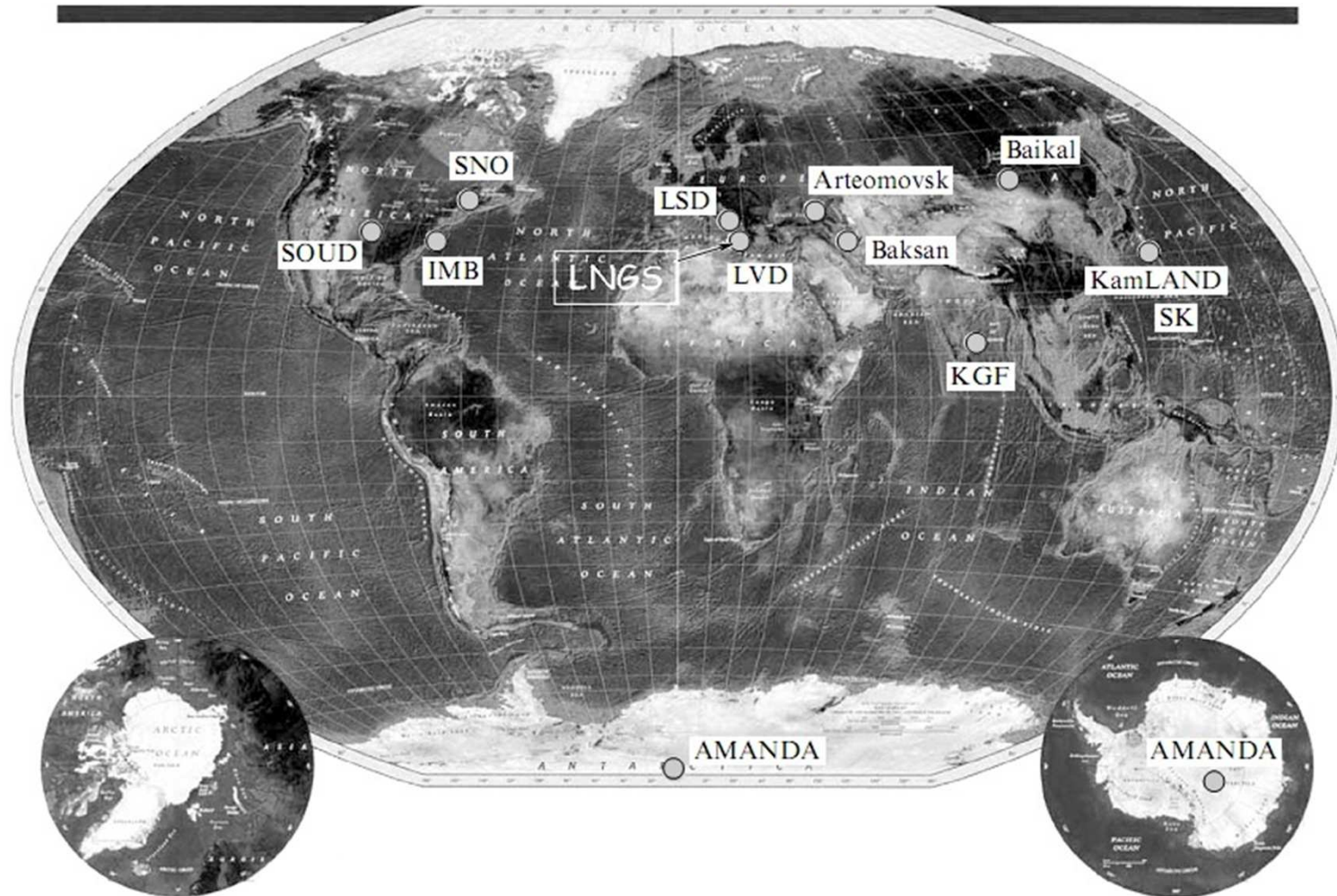
- Сонячні нейтрино в основному утворюються у трьох реакціях, що відбуваються у надрах зірки:
 $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$, $< 0,42$ MeV (водневі);
 ${}^7\text{Be} + e \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$, $= 0,861$ MeV (берилієві);
 ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$, $= 14,06$ MeV (борні).
- Щосекунди Сонце випромінює $1,8 \cdot 10^{38}$ електронних (і лише електронних!) нейтрино. Всі вони практично без поглинання виходять на поверхню Сонця. Однак кількість нейтрино, які долітають до Землі, є приблизно втричі меншою, ніж випромінює Сонце.
- Для пояснення цього розходження у 1954 році американські фізики-теоретики висунули гіпотезу, що сонячні нейтрино нікуди не зникають, а *просто перетворюються в інші типи (аромати)*, які сучасними детекторами не реєструються. Даний процес взаємоперетворень нейтрино був названий *осциляціями*. **Він може мати місце лише тоді, якщо у нейтрино є маса спокою.** Таким чином, *проблема дефіциту сонячних нейтрино звелася до вимірювання їх маси.*
- Теоретичні оцінки мас нейтрино дають такі результати $m_{\nu_e} \sim 10^{-5}$ eV, $m_{\nu_\mu} \sim 10^{-3}$ eV, $m_{\nu_\tau} \sim 10$ eV .
- **Стандартна модель існування маси спокою нейтрино заперечує!!!**



Осциляції нейтрино. Нейтрино можна представити як суперпозицію трьох кольорових компонент-хвиль. У будь-якій точці траєкторії частинки-хвилі можуть мати різні амплітуди та довжину.

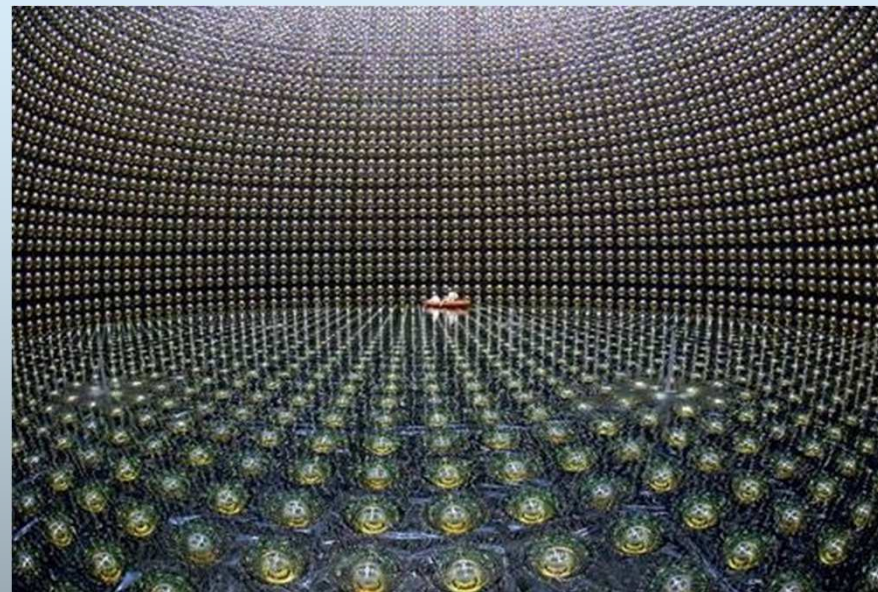
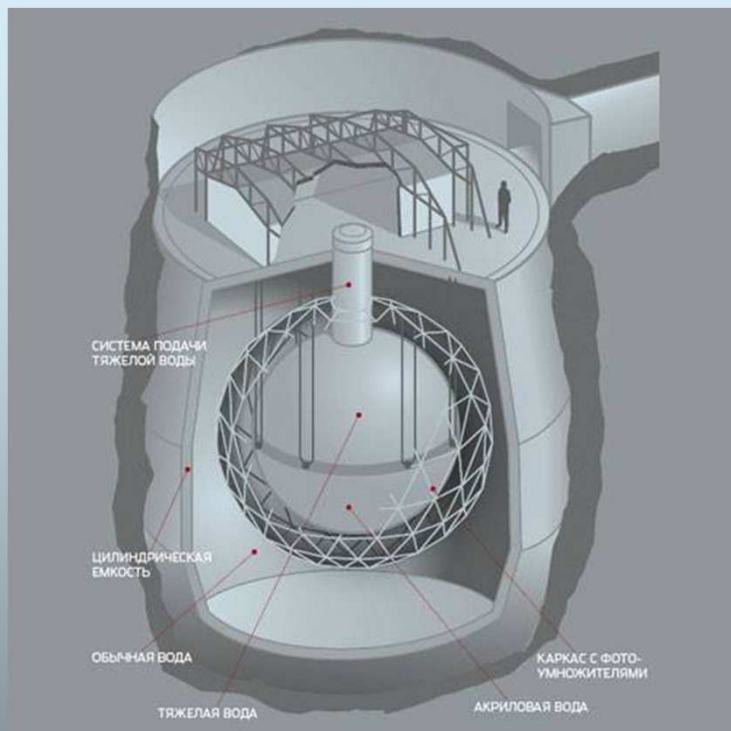
НЕЙТРИННІ ДЕТЕКТОРИ

Нейтринні детектори



Розташування існуючих нейтринних детекторів

НЕЙТРИННІ ДЕТЕКТОРИ



Очі детектора - це чутливі фотоелектронні помножувачі. Майже 9600 таких трубок закріплені на каркасі, що оточує акрилову ємність з важкою водою. Сонячні нейтрино при попаданні у важку воду викликають ряд реакцій, які в кінці ведуть до утворення електронів, що рухаються скоріше ніж світло у воді. Це веде до утворення черенковського випромінювання, яке і фіксують фотопомножувачі.

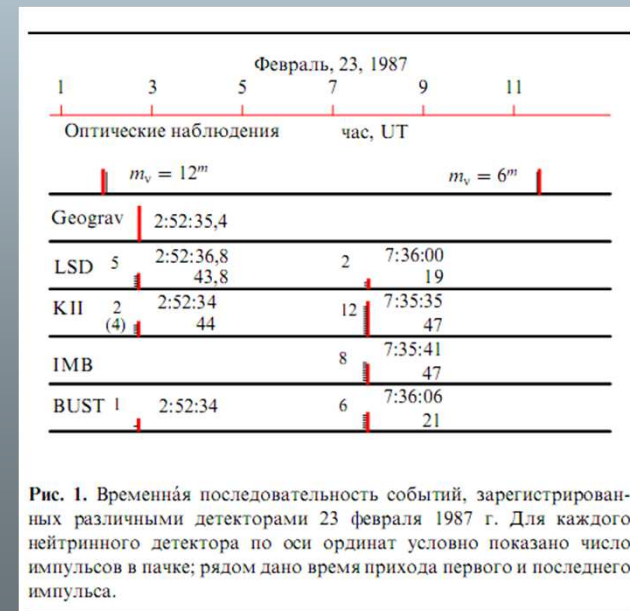
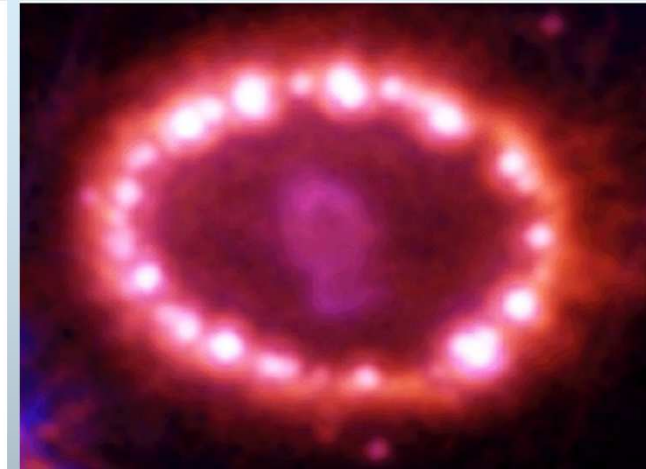
Нейтринна обсерваторія SNO розташована у нікелевій шахті «Крейтон» (Creighton mine) поблизу Седбері в канадській провінції Онтаріо. Для розміщення детектору був вибраний рівень 2070 м. Більше ніж 2 км скального ґрунту захищає чутливий детектор від космічних променей. В теперішній час у зв'язку з закінченням експерименту SNO перетворена в найбільш глибоку у світі підземну лабораторію SNOLAB.

НЕЙТРИННА АСТРОНОМІЯ

Таблиця 7.

Детектор	Глибина, м.в.э.	Маса, кт	Порог, МэВ	Ефективність			Ожидаемое количество событий					Фон, c^{-1}
				η_{e^-}	η_n	η_γ	Стандартная модель [1]			Модель вращающегося коллапса		
							$\tilde{\nu}_e p$ ($\tilde{\nu}_e D + \nu_e D$)	$\nu_i e^-$	$\nu_i C$	$\nu_e A$	$\nu_e C$	
Артемевск АСД, Россия	570	0,105 $C_n H_{2n}$	5	0,97	0,8	0,85	57	2,1	9,5		19* 9**	0,16
Баксан БПСТ, Россия	850	0,13 (0,2) $C_n H_{2n}$	10	0,6		0,2	45 (67)	1,4 (2,2)	2,8 (4,3)		5* (8) 3** (4)	0,013 (0,033)
KamLAND, США – Япония	2700	1 $C_n H_{2n}$	~ 4	0,9			500	22	85		180* 80**	
Gran Sasso LVD, Италия – Россия	3300	0,95 Fe 1 $C_n H_{2n}$	4–6	0,9	0,6	0,55	500	22	55	250* 100**	110* 50**	< 0,1
Kamioka SuperK Япония, США	2700	22,5 H_2O	5,5	0,9			9400	400		650* < 160**		
SNO, Канада	6000	1 D_2O	5				700	16		600* 350**		

* Количество событий для $E_{\nu_e} = 40$ МэВ.
** Количество событий для $E_{\nu_e} = 30$ МэВ.



У грудні 1987 року до Землі дійшло світло від найбільш яскравої наднової нашого часу SN1987A. Відбувся вибух зірки яка у 20 разів більш масивна ніж Сонце. Ця наднова знаходиться у Великій Магелановій Хмарі – сусідці нашої галактики віддаленій на 170 тис. св. років. **Це стало початком міжгалактичної нейтринної астрономії.**