

Що на фронтах фізики сьогодні?

Максим Стріха,

maksym.strikha@gmail.com

Альберт Майкельсон, який став у 1907 р. першим американцем – лауреатом Нобелівської премії з фізики, у 1896 р. писав:

- «Хоч ніколи не можна з певністю стверджувати, що майбутнє фізичної науки вже не припасло для нас жодних дивовиж у своїх коморах, однак видається вірогідним, що **найважливіші основоположні принципи вже твердо встановлено і майбутній розвиток полягатиме лише в точнішому застосуванні цих принципів до всіх явищ, які ми спостерігаємо»**

Про що йтиметься далі:

- Чому 125 років тому фізики думали так?
- Що відбулося після “революції в фізиці” першої чверті ХХ століття?
- Стандартна модель і Загальна теорія відносності – чи можливий місток між ними?
- Теорія струн і пов’язані з нею виклики.
- “Темний” Всесвіт, про 95% якого ми нічого не знаємо.
- Головні проблеми на фронтах фізики.

Думку про “вичерпаність фізики”
поділяла наприкінці XIX ст.
значна частина провідних учених.

Чому?

У другій половині XIX століття завершено побудову класичної термодинаміки та класичної електродинаміки, які, разом зі створеною ще у XVII ст. Ньютоновою мехікою задовільно пояснювали більшість явищ, із якими людина стикалася в повсякденному досвіді

Однак на межі століть почали з'являтися численні експериментальні факти, які в класичні уявлення не вкладалися

- Негативний результат дослідження Майкельсона-Морлі
- Проблема теплоємності металів ($3R$, а не $4,5R$)
- “Ультрафіолетова катастрофа” у випромінюванні АЧТ
- “Червона межа” фотоефекту
- Радіоактивність
- Надпровідність

Як наслідок з'явилися:

- Теорія квантів (Макс фон Планк, 1900)
- Спеціальна (1905) та загальна (1916) теорія відносності (Альберт Айнштайн)
- Ідея корпускулярно-хвильового дуалізму (Луї де Бройль, 1924)
- Квантова механіка (1925-27, Вернер Гайзенберг, Ервін Шредінгер, Макс Борн, Нільс Бор та інші).

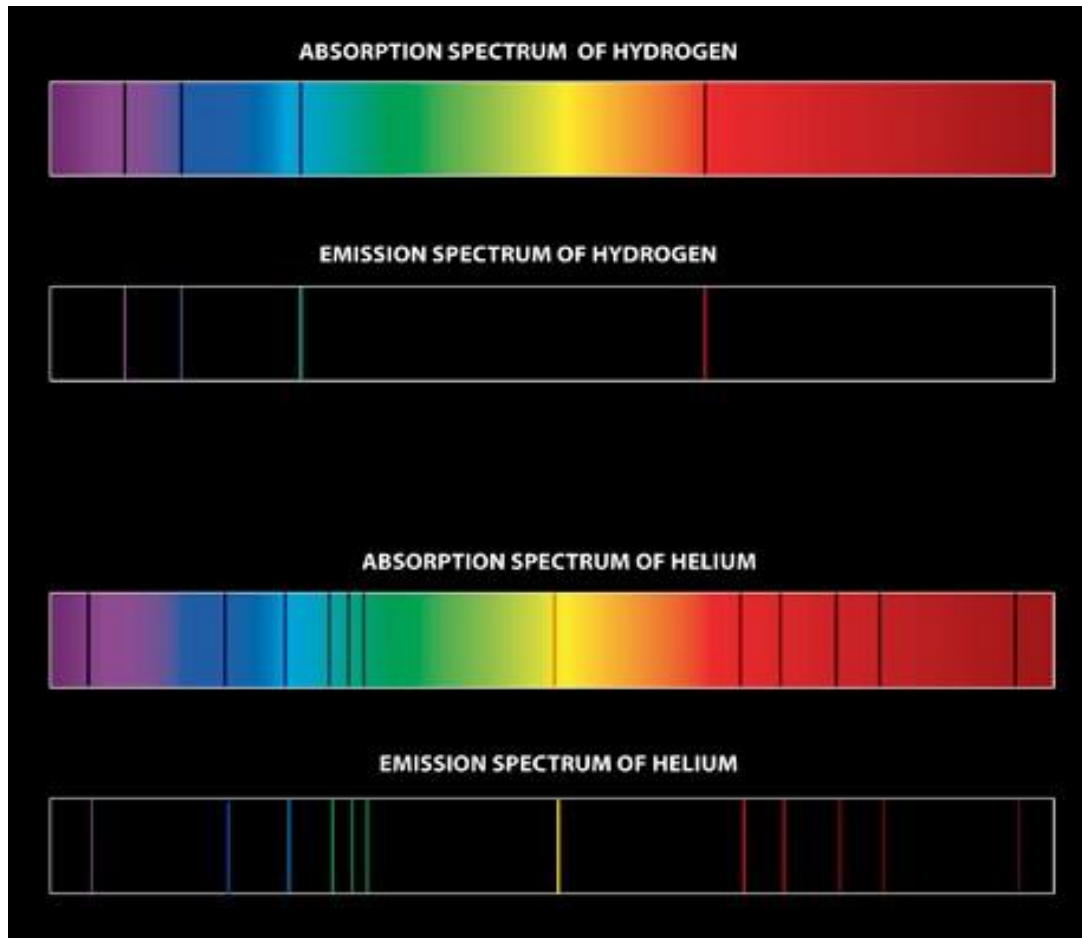
Це сьогодні читають в усіх базових університетських курсах фізики. Що сталось потім?

Розвиток фундаментальної фізики продовжувався, причому особливо інтенсивно – на двох протилежних кінцях шкали масштабів, в області атомних та субатомних відстаней з одного боку, та в області масштабів цілого Всесвіту – з другого. Наука як ніколи раніше близько підійшла до розгадки двох фундаментальних запитань:

Як влаштовано цей світ?

І з чого він почався?

Інструмент вивчення Всесвіту - спектроскопія



Німецький фізик Йозеф Фраунгофер (1787 – 1826) винайшов у 1814 р. спектроскоп. Поєднання призми та лінзи розкладало сонячний промінь з більшою роздільною здатністю, ніж досягнув Ньютон, і дозволило виявити багато вузьких чорних ліній на тлі кольорів веселки.

Відкритий австрійським фізиком **Крістіаном Доплером** (1803 – 1853) ефект, який сьогодні носить його ім'я, призводить до того, що світло від рухомого тіла зсувається в бік довших червоних чи коротших фіолетових довжин хвиль залежно від того, рухається це тіло від чи до спостерігача, а міра зсуву залежить від швидкості тіла.

У 1929 р. американський астроном **Едвін Габбл** (1889 – 1953) виявив червоний зсув у спектрах галактик, які він спостерігав через найбільший на той час телескоп з діаметром дзеркала 100 дюймів (близько 2,5 м) на вершині гори Вілсон. Це вказувало, що вони віддаляються від нас, і так само віддаляються одна від одної. Результат Габбла був першим чітким спостереженням того, що **ми живемо в світі, який розширюється.**

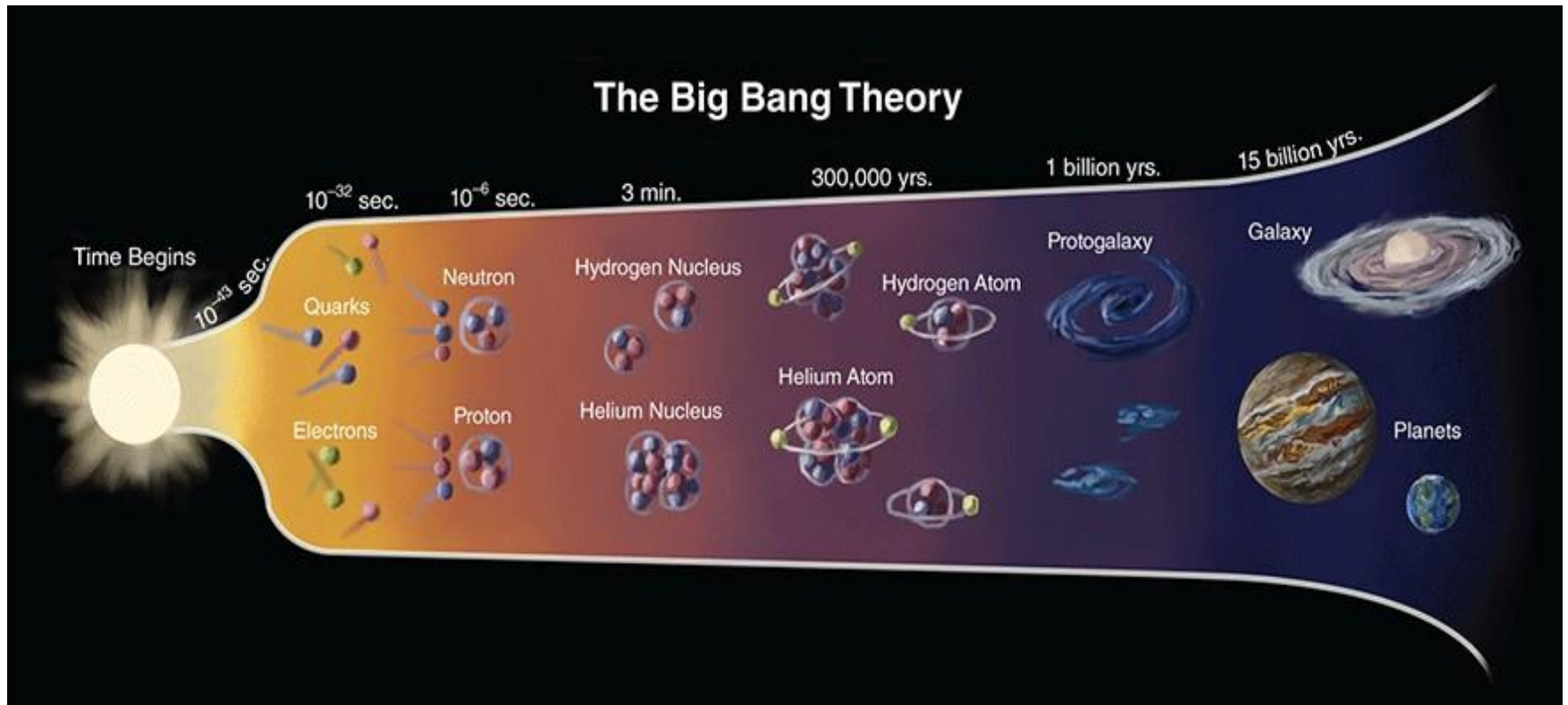
У 1928 р. американський фізик Карл Янскі, що працював у Белл Лабз, відкрив радіосигнали з космосу

Арно Пензіас (н. 1933) і Роберт Вілсон (н. 1936) у 1964 р., вивчаючи радіосигнали з Всесвіту з допомогою рогоподібної антени заввишки 6 метрів, побудованої для того, щоб тестувати сигнали з супутників зв'язку, вловили неочікуваний радіосигнал на мікрохвилі довжиною 7,35 сантиметрів. Він не походив ані з відомих позаземних джерел, ані з земних, таких як недалеко місто Нью-Йорк; він так само не був артефактом. Це був справжній сигнал, **чіткий і незмінний незалежно від того, на яке місце в небі дослідники скеровували свою антену.**

На той час існували дві різні думки щодо походження Всесвіту, розширення якого відкрив Едвін Габбл. У теорії сталого стану Всесвіт залишався гомогенним і незмінним під час свого розширення, зумовленого тим, що весь час виникає нова матерія. У теорії Великого вибуху Всесвіт почався з однієї точки й надвисокої температури і розширювався, аж поки досягнув свого теперішнього стану.

Пензіас із Вілсоном знали: американський фізик Роберт Дік (1916 – 1997) ще раніше порахував, що Великий вибух мусив залишити по собі електромагнітні хвилі, які заповнюють увесь простір, так зване реліктове мікрохвильове випромінювання (РМВ). Це найдавніше випромінювання у Всесвіті повинне було бути того ж типу, що й випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ).

Коли найперші вимірювання Пензіаса та Вілсона було розширено на весь мікрохвильовий діапазон, ці дані точно відповідали передбаченням теорії для температури в 2,7 градуси Кельвіна. Ця дивовижно добра узгодженість стала потужним свідченням на користь Великого вибуху, який відтак зробився загальноприйнятою теорією.



Значний поступ відбувся й на протилежному кінці шкали масштабів. Американські теоретики Річард Фейнман та Джуліан Швінґер разом із японським теоретиком Сінїтіро Томонагою наприкінці 1940-х та в 1950-х рр. остаточно побудували квантову електродинаміку (КЕД), тобто квантову теорію електромагнетизму. Вона показує, як світло й матерія взаємодіють, обмінюючись фотонами, і була підтверджена через надзвичайно точне чисельне передбачення рівнів енергії в атомі водню.

КЕД пояснює **електромагнітну взаємодію**, одну з чотирьох фундаментальних взаємодій у Всесвіті. Подальші роботи показали, що дві з решти трьох взаємодій так само зумовлені обміном елементарними частинками. **Сильна ядерна взаємодія**, яка утримує разом кварки в протонах і нейтронах, зв'язуючи останні в атомні ядра, зумовлена обміном безмасовими частинками, які мають назву **глюонів**. **Слабка ядерна взаємодія**, яка виявляється в радіоактивному розпаді, зумовлена тим, що нейтрони, електрони та інші частинки обмінюються одним з трьох типів частинок, що мають назву **W^+ , W^- та Z бозонів** (тепер відомо, що електромагнетизм і слабка взаємодія є аспектами єдиної «електрослабкої» взаємодії).

Після багатьох зусиль усі ці результати в середині ХХ ст. розвинулися в **Стандартну модель**, яка організовує всі відомі елементарні частинки по групах. Окрім фотонів, глюонів, W^+ , W^- та Z бозонів (п'яти так званих «калібрувальних бозонів» - частинок, які переносять взаємодію), модель включає шість кварків та шість лептонів, які утворюють матерію. Цю теорію було експериментально підтверджено, коли виявили передбачені нею частинки: перші два типи кварків у 1968 р., а потім решту чотири типи кварків, інші елементарні частинки, і насамкінець у 2012 р. бозон Гігґса (який також називають «скалярним бозоном»).

		Три покоління матерії (ферміони)			
		I	II	III	
маса спокою→		2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
електричний заряд→		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
спін→		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
назва→		верхній	зачарований	істинний	γ фотон
	Кварки	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d нижній	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s дивний	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b чарівний	0 0 1 g глюон
	Лептони	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e електронне нейтрино	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ мюонне нейтрино	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ тау-нейтрино	91.2 GeV 0 1 Z ⁰ Z-бозон
		0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e електрон	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ мюон	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ тау	80.4 GeV ± 1 1 W [±] W-бозон

Калібрувальні бозони (переносники взаємодії)

Шотландський теоретик Пітер Гігґс (н. 1929), який передбачив існування цієї частинки, що надавала Стандартній моделі завершеності, отримав Нобелівську премію з фізики 2013 року разом зі своїм бельгійським колегою Франсуа Англером (н. 1932).

Десятиліття експериментів у фізиці елементарних частинок з використанням таких велетенських установок, як Великий адронний колайдер (ВБК) ЦЕРНу, разом із розвитком теорії народили Стандартну модель. Вона поділяє всі відомі елементарні частинки на класи й пояснює походження трьох із чотирьох фундаментальних взаємодій, які дають лад Всесвітові на відстанях від кварків і до галактик, - електромагнітній взаємодії і так званим слабкій та сильній взаємодіям в атомному ядрі. Але вона не описує гравітації, яку окремо пояснює загальна теорія відносності Альберта Айнштейна, яка, на відміну від Стандартної моделі, принципово не містить ідеї квантування.

Сьогодні теоретики намагаються досягнути квантування гравітації і вкладання її в одну схему з іншими трьома взаємодіями, описуваними Стандартною моделлю. Таке об'єднання призведе до універсальної Теорії всього, яка описуватиме дійсність на будь-якому масштабі відстаней. Чільним кандидатом на появу такої теорії в очах великої частини фізиків є Теорія струн, у якій крихітні одновимірні об'єкти, названі струнами, замінюють точкові елементарні частинки. Але, оскільки струни мають масштаб 10^{-35} м, таку теорію принципово неможливо перевірити на досліді, адже вона потребуватиме прискорювача частинок, настільки більшого від ВАК, що його навряд чи можна буде спорудити.

Фундаментальна проблема:

Ставши перед відсутністю інших теоретичних проривів, деякі фізики пропонують не перейматися експериментальним підтвердженням і просто прийняти Теорію струн і пов'язану з нею ідею про те, що дійсність складається з множинних світів, «множинного всесвіту», - **що є радикальним відходом від того, як фізика діяла впродовж століть**. Така пропозиція викликає гарячі заперечення з боку інших авторитетних науковців, зокрема й нобелівського лауреата з фізики 2020 р. Роджера Пенроуза (н.1931).

Чотири фундаментальні експериментальні відкриття останніх десятиліть:

Два очікувані:

Бозон Гіггса (2012)

Гравітаційні хвилі (2015). Це підтвердило зроблене ще за сотню років перед тим передбачення Айнштейна з його загальної теорії відносності, що гравітаційну взаємодію переносять зі швидкістю світла збурення часопростору. Комп'ютерна симуляція поведінки «чорної діри» підтвердила, що вловлений сигнал походить від зіткнення двох «чорних дір» на відстані 1,4 мільярда світлових років від нас.

Але два інші відкриття виявилися цілком неочікуваними

«Темну матерію» відкрили спершу непрямим шляхом, через спричинені нею гравітаційні ефекти. Потому, як попередні астрономічні дані вказали на існування невидимої космічної матерії, у 1970-ті американська астрономиня Вера Рубін (1928 – 2016) помітила аномалії в динаміці спіральних галактик, таких, як наш власний Молочний Шлях. Як і будь-які інші тіла, що обертаються, ці велетенські «дзиґи» розгубили б усі свої зовнішні частини, якби їх не стримувало тяжіння серцевини галактики, обумовлене її масою. Рубін виявила, що для утримання зірок від розлітання навсібіч потрібна в багато разів більша маса, аніж її видно в галактиці, - і це було перше надійне підтвердження існування «темної матерії».

«Темну енергію» також відкрили непрямим шляхом. У 1998 р. астрономи виявили, що деякі наднові – потужні вибухи зірок у їхніх передсмертних муках – у мільярдах світлових років від нас є тьмянішими, аніж це передбачає теорія розширення Всесвіту після Великого вибуху. Нові дані показали, що швидкість розширення збільшується, всупереч тому, що раніше сподівалися: тяжіння маси Всесвіту може з часом сповільнити розширення, чи навіть перетворити його на стискання.

Айнштайн врахував таку силу в 1917 р., запровадивши в свою загальну теорію відносності так звану «космологічну сталу», свого роду анти-гравітацію, яка розштовхувала галактики, щоб не дати Всесвіту колапсувати через силу тяжіння. Але коли Габбл показав, що Всесвіт насправді розширюється, Айнштайн відкинув ідею такої сталої, назвавши її згодом своєю «найбільшою помилкою». У 1998 р. відкриття прискореного розширення відродило цю ідею –

Наступне потужне підтвердження «темної» природи Всесвіту надійшло в 2003 році. НАСА досліджувало ранній Всесвіт шляхом вивчення анізотропії реліктового мікрохвильового випромінювання; точніше ці дослідження було повторено на супутнику імені Планка, запущеному Європейським космічним агентством у 2009 році. Їх результати показали, що в структурі маси та енергії Всесвіту лише **5% припадає на звичайну матерію, - проти 26% темної матерії і 69% темної енергії, які разом складають 95% Всесвіту.** Ці пропорції визначають космологічну «стандартну модель», яка успішно описує багато рис Всесвіту, включаючи його розширення з прискоренням, спричинений ним розподіл галактик, і встановлює вік Всесвіту в 13,8 мільярдів років. Ці пропорції є приголомшливим свідченням того, що після тривалих зусиль **людство дослідило тільки малу частину дійсності,** і майже нічого не знає про решту її, як-от про саме походження «темної енергії».

Одне з припущень переносить нас на квантовий рівень; згідно з ним **«темна енергія» - це так звана «енергія вакууму»**, яка зумовлена роєм віртуальних частинок, що випадково з'являються і зникають у просторі. Енергія вакууму збільшується з розширенням Всесвіту, і підживлює його даліше розширення з усе більшою швидкістю. Але, на жаль, ці теоретизування не підтверджено цифровими оцінками. **Обчислена на такий спосіб енергія вакууму в 10^{60} разів більша, ніж потрібно, щоб пояснити експериментальні дані для наднових**, які й призвели до відкриття «темної енергії». У рамках теорії струн, яка призводить до «множинного Всесвіту», поясненням цієї приголомшливої розбіжності може бути те, що саме в нашому Всесвіті так сталося, що енергія вакууму надзвичайно мала. Однак таке твердження демонструє складність отримання визначених відповідей тоді, коли можна просто заявити, що в різних всесвітах діє різна фізика.

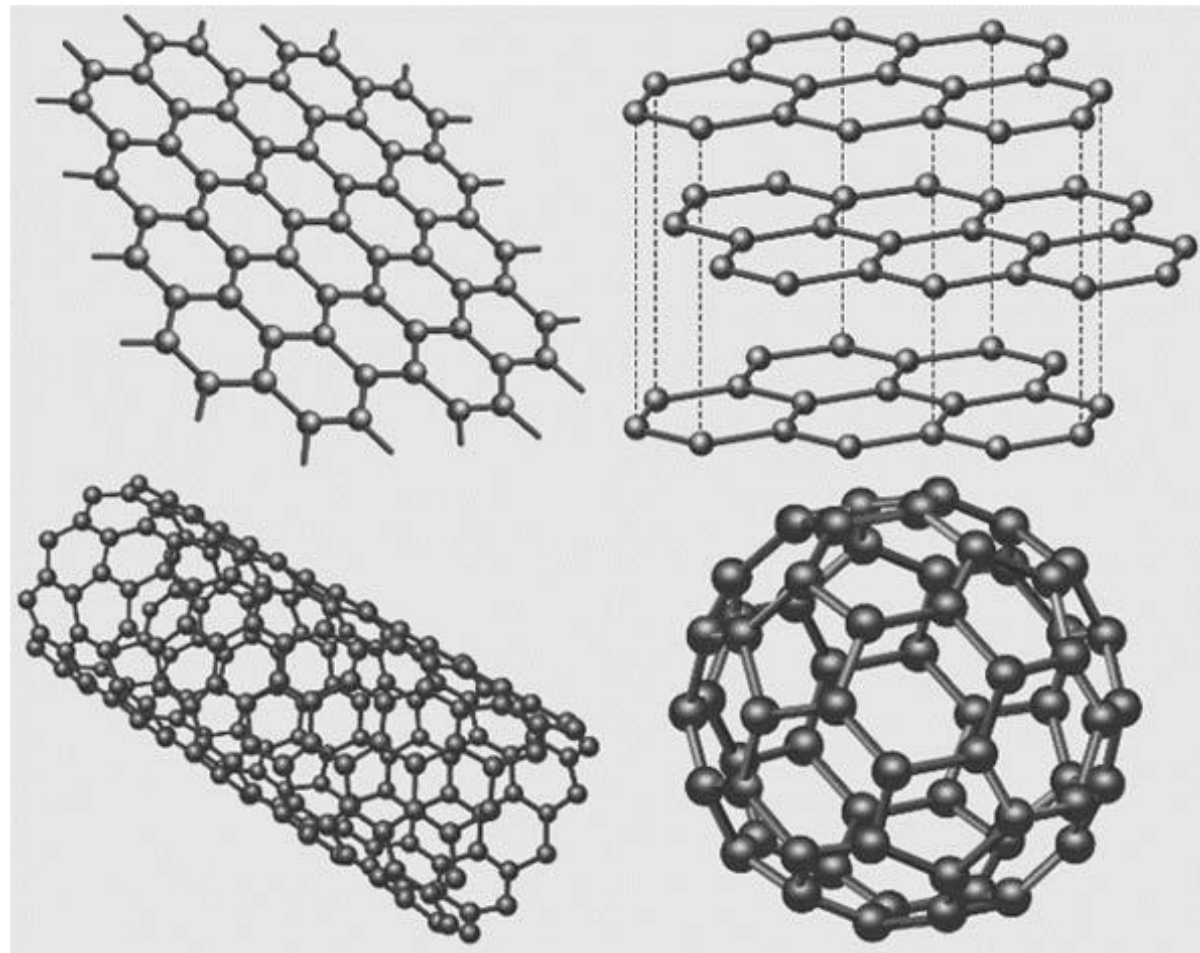
«**Темна матерія**» викликає свої власні запитання. Ми вважаємо, що Стандартна модель описує всі «цеглинки», з яких побудовано Всесвіт – кварки, лептони включно з електронами, мюонами, тау-частинами й нейтрино, і бозон Гіґса. **Жодна з цих «цеглинок» не має властивостей, необхідних для формування «темної матерії»**; отже, потрібна нова частинка. Головним кандидатом, за яким стоять певні астрономічні свідчення, є слабковзаємодіюча масивна частинка (ВІМП), яка мало впливає на звичайну матерію.

Але попри спокусливі підказки, тридцять років експерименту, включаючи й зовсім свіжі результати груп з Італії та Китаю, не дали чітких підтверджень існування ВІМПів. Тому слід визнати: сучасна фізика далека від завершеності. **Про 95% Всесвіту ми майже нічого не знаємо.**

Фундаментальні відкриття відбуваються й на проміжних масштабах.

Виявилось, що в складних динамічних системах надзвичайне значення має точний вибір початкових умов. У 1961 р. американський математик та метеоролог Едвін Лоренц (1917 – 2008) помітив, що введення 0,506 замість 0,506127 як початкового значення змінної в його комп'ютерних моделюваннях погоди радикально змінило картину на ближчі два місяці. Це стало внеском Лоренца в теорію хаосу, у вивчення систем, динамічна поведінка яких сильно залежить від початкових умов, що Лоренц підсумував у «ефекті метелика», коли легкий змах крилець метелика потенційно може спричинити торнадо. Відкриття Лоренца було оцінено комітетом з Премії Кіото в галузі наук про Землю за 1991 рік як таке, що спричинило одну з найдраматичніших змін у поглядах людства на природу від часів Ньютона.

На базі теоретичних ідей, що містилися в доповіді Річарда Фейнмана «Внизу є багато місця» (1959) та стрімкого розвитку ряду прикладних наук реаліями нашого життя стали нанотехнології. Вони призвели до відкриття, одержання та вивчення таких надзвичайно цікавих з фундаментального та прикладного погляду систем, як фулерен C-60 (1986), вуглецеві нанотрубки (1991), графен (2004). Новий технологічний потенціал мають також інші новітні матеріали.



Графен, графіт, вуглецева нанотрубка, фулерен C-60

Група, що одержала назву «**топологічних матеріалів**», демонструє силу математики при аналізі фізичних явищ. Топологія – це галузь математики, яка аналізує просторові властивості, що зберігаються при плавній деформації форми тіла; наприклад, якщо ви візьмете бульбик і почнете розтягувати чи повертати його, в ньому однак лишатиметься тільки одна дірка, аж поки ви його не розірвете. Зв'язки між цим та фізикою можуть здатися надто далекими, але в 1980-ті фізики виявили, що можна зазирнути в природу речовини значно глибше, застосовуючи топологічну математику до квантових ефектів. Ця діяльність мала кульмінацією Нобелівську премію з фізики 2016 року, що її британські теоретики Девід Таулес, Майкл Костерліц і Данкан Галдейн одержали за відкриття «топологічних фаз речовини».

Застосовуючи такий підхід, фізики пояснили загадкові квантові ефекти в твердих тілах і виявили нові екзотичні матеріали, наприклад, діелектрик, який не проводить струму в об'ємі, але проводить його по поверхні; «напівметал», у якому електрони рухаються надзвичайно швидко, не відчуючи мікроскопічних перешкод; і матеріал, який пропускає світло лише в одному напрямку.

Сподіваються, що такі ефекти призведуть до появи мініатюрніших та швидкодіяніших електронних пристроїв, зокрема й важливих для квантових комп'ютерів, а також для ефективніших оптоволоконних мереж.

Дедалі більше досягень квантової фізики знаходять практичне застосування в найрізноманітніших сферах від будівництва й до медицини. Проте, підсумовуючи найважливіші з викликів, які стоять перед ученими, відомий американський фізик і популяризатор науки Сідні Перковіц стверджує, що основні запитання, які надихають фізиків сьогодні й визначають майбутнє їхньої науки, звучать так: «**Що лежить поза Стандартною моделлю?**» - бо це стосується нашого глибшого розуміння природи; і «**Чи зможемо ми виробляти чистішу енергію?**» - бо відповідь на нього, сподіваємося, покращить умови життя людей.

Наприкінці XVII століття було сформовано першу цілісну наукову теорію — ньютонівську механіку. Враження, яке вона справила на сучасників було колосальне.

Світобудова раптом набула струнких і завершених обрисів. Молодший Ньютонів сучасник, великий англійський поет XVIII століття Александер Поуп висловив це відчуття знаменитим двовіршем:

Закони Всесвіту в пільмі ховалися від нас.

«Хай буде Ньютон!» — мовив Бог; і світло стало враз.

На початку XX століття англійський поет Джон Коллінґс Сквайр дописав до цієї захопленої епітафії Ньютону ще два рядки:

Але тривати без кінця воно так не могло:

«З'явись, Айнштайне!» — чорт велів; і стало як було.

На думку українського фізика-теоретика **Вадима Локтева**, досі відкритими залишаються такі фундаментальні питання: Чи може бути уніфіковано закони фізики? Отже — чи має сенс робота над єдиною теорією поля, якої так і не побудував Айнштайн?

Чи є фундаментальні сталі (як-от, стала Планка, швидкість світла) справді сталими, чи вони змінюються в часі (хоч і дуже повільно)?

Чи самі ми у Всесвіті?

Яка будова Всесвіту й роль «темної матерії» та «темної енергії» — слабо взаємодіючої субстанції, яка пронизує весь простір видимого Всесвіту, і відкриття якої стало сенсацією на межі ХХ–ХХІ сторіч?

Чи є глибші фізичні принципи, ніж принцип невизначеності?

Звідки приходять промені з ультрависокими енергіями?

У чому полягає фізичний механізм високотемпературної надпровідності, й узагалі, чи є обмеження на температуру її появи?

Як залежать властивості води від її структури?

Що таке скло й скляний стан?

Що керує сонячними циклами?

Чому напрям магнітного поля Землі змінюється з часом?

Чому відбуваються землетруси і як їх передбачити?

Ще більше питань постає перед фізиками тоді, коли вони звертаються до науки про життя. Серед них чи не найзагадковіші:

Чи/чим відрізняється фізика живого від фізики неживого?

Як біомолекули «впізнають» одна одну?

Що керує біопроцесами в часі?

Чи можна пояснити в термінах фізичних взаємодій людську свідомість?

Попри всі песимістичні прогнози, в науку йти варто. Вона забезпечить цікавою роботою ще не одне покоління дослідників!

Дякую за увагу!
Дерзаймо!