

УДК 378:[53+620.3]
УКПП
№ держреєстрації 0118U006972
Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2
тел/факс: (0542)33-40-49; e-mail: achornous@sci.sumdu.edu.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи,
д-р фіз.-мат. наук, проф.
_____ А. М. Чорноус

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

**ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ВИВЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ
ОСНОВ НАНОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВА У ЗАКЛАДАХ ВИЩОЇ
ОСВІТИ
(остаточний)**

Науковий керівник НДР
канд. пед. наук,
старший викладач
О.О. Пасько

2020

Рукопис закінчено _____ 2020 р.

Результати роботи розглянуто науковою радою СумДУ, протокол від
_____ 2020 р. № _____

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, канд.
пед. наук,
старший викладач

О. О. Пасько
(реферат; вступ;
розділи 1, 2, 3;
висновки,
рекомендації)

Виконавці:
канд. фіз.-мат. наук, доцент

В. М. Ігнатенко
(розділ 1)

канд. фіз.-мат. наук, доцент

В. Ф. Нефедченко
(розділ 1)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 40 с., 13 рис., 22 джерела.

ЗАКЛАДИ ВИЩОЇ ОСВІТИ, МЕТОДИКА НАВЧАННЯ,
НАНОМАТЕРІАЛИ, НАНОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ФІЗИКА

Об'єкт дослідження: процес навчання фізичних основ наноматеріалознавства у закладах вищої освіти.

Предмет дослідження: методика навчання фізичних дисциплін, пов'язаних з основами наноматеріалознавства у закладах вищої освіти.

Мета проекту: теоретичне обґрунтування і розробка навчально-методичного забезпечення, необхідного для удосконалення методики викладання дисциплін, пов'язаних із вивченням фізичних основ наноматеріалознавства.

Завданнями, на вирішення яких спрямовано проект, є:

1. Провести аналіз навчальної та методичної літератури з метою з'ясування психолого-педагогічних умов вивчення фізичних основ наноматеріалознавства у закладах вищої освіти.

2. Здійснити психолого-педагогічний аналіз навчання відповідних дисциплін та з'ясувати стан інформаційно-ресурсного забезпечення вивчення основ наноматеріалознавства.

3. Розробити методичні рекомендації щодо викладання дисциплін, пов'язаних із вивченням фізичних основ наноматеріалознавства, спрямовані на формування у студентів цілісних уявлень про наноматеріали, їх властивості, основні методи, дослідження структури речовини, та сфери застосування сучасних мікро- та наноматеріалів.

Для досягнення поставленої мети було використано такі **методи дослідження**: *аналіз* – з метою виявлення можливостей фізичних дисциплін щодо розвитку в тих, хто навчається, компетентностей, пов'язаних із наноматеріалознавством; *синтез* – для визначення змісту необхідного навчально-методичного забезпечення та інформаційних ресурсів;

спостереження за навчально-виховним процесом з метою дослідження стану вивчення фізичних основ наноматеріалознавства у закладах вищої освіти.

Основні наукові результати:

Показано, що потенціал загальної фізики як навчальної дисципліни може забезпечити формування сучасного наукового світогляду й поліпшити цільову підготовку кадрів у галузі наноматеріалознавства.

Розроблені методичні рекомендації щодо вивчення питань фізичних основ наноматеріалознавства в межах окремих тем курсу загальної фізики, курсу фізичної електроніки та лабораторного практикуму з метою формування у студентів цілісних уявлень про наноматеріали, їх властивості, основні методи дослідження структури речовини, застосування сучасних наноматеріалів.

Запропоновано лабораторну роботу з використанням порталу відкритих даних Європейської організації з ядерних досліджень (CERN OpenData Portal) для забезпечення реалізації принципу наочності у навчанні та зв'язку теоретичних узагальнень з їх практичним застосуванням.

ЗМІСТ

	с.
Вступ.....	6
1 Методика вивчення питань наноматеріалознавства в окремих розділах курсу загальної фізики.....	9
1.1 Місце питань наноматеріалознавства у розділах «Механіка» та «Молекулярна фізика й термодинаміка».....	9
1.2 Формування знань про основні поняття наноматеріалознавства в «Електродинаміці».....	12
1.3 Питання фізичних основ наноматеріалознавства у розділах «Оптика» та «Атомна і ядерна фізика».....	13
2 Особливості вивчення питань наноматеріалознавства у курсі фізичної електроніки	16
3 Удосконалення лабораторного практикуму з мікро- та наноматеріалознавства	19
Висновки	35
Рекомендації	36
Перелік джерел посилання	37

ВСТУП

Фізика є основою наноматеріалознавства. У процесі засвоєння його фізичних основ формується науковий світогляд здобувача освіти, розвивається самостійність і критичність мислення, реалізується інтелектуальний розвиток особистості, накопичується досвід пізнавальної діяльності, а отже, відбувається формування фахових компетентностей студента. Це вимагає упровадження актуальних підходів до викладання фізичних основ наноматеріалознавства, зокрема, розроблення інформаційно-ресурсного забезпечення.

Актуальність теми. Важливі наукові відкриття сьогодення, пов'язані з фундаментальною фізикою, докорінно змінюють життя суспільства. У вжитку з'являються нові терміни: нанонаука, нанотехнологія, наноструктурні матеріали. Ними позначають першочергові напрями науково-технічної революції, які охоплюють цілі розділи сучасної науки: нові матеріали, напівпровідники, пристрої зберігання інформації, біотехнології, полімери, оптику тощо [3]. Стрімкий розвиток науки породжує потребу у відображенні її важливих та актуальних досягнень в освіті. Широкі можливості для реалізації цього завдання має фізика як навчальна дисципліна у закладах вищої освіти (ЗВО). Нині важливим є висвітлення методичних аспектів формування у студентів знань про розвиток наноматеріалознавства під час навчання фізики у ЗВО.

Фізика як наука про явища природи становить фундамент усього сучасного природознавства. Їй належить виняткове місце в загальній системі знань, накопичених людством. Фізика у ЗВО ґрунтовно вивчається не тільки майбутніми фізиками та вчителями фізики, але і входить до складу програм підготовки електронників, інженерів, педагогів, медиків та ін. Для одних вона є професією, для інших базою для вивчення фахових дисциплін або ж грає лише світоглядну роль. У будь-якому разі, її зміст повинен відображати сучасний стан розвитку й досягнень науки. Аналіз тенденцій розвитку вищої

освіти в Україні у контексті розгляду досліджуваної проблеми дозволяє встановити певні протиріччя:

- між необхідністю забезпечення в навчальному процесі властивої фізиці єдності фундаментальної і прикладної складових змісту та домінуванням академічності у навчанні фізики, браком належного взаємозв'язку здобутих знань із актуальним їх практичним застосуванням;

- між необхідністю поглиблення фундаментальної підготовки студентів щодо питань, пов'язаних із актуальним станом розвитку наноматеріалознавства і певним відставанням освітніх програм з фізики від досягнутого рівня розвитку науки;

- між потребою наукоємних галузей економіки у розвитку нанотехнологічної компоненти в освіті та невисоким рівнем розробленості методики викладання наноматеріалознавства у вищій школі.

Отже, існує необхідність комплексного оновлення змісту курсу фізики та включення питань, що відображають її прикладні аспекти, зокрема, питань наноматеріалознавства.

Питання відбору змісту курсу фізики є одним із ключових у методиці навчання. Очевидно, що він має здійснюватися по-різному у залежності від майбутнього фаху здобувачів освіти. Зокрема, студентам інженерних спеціальностей, які будуть вивчати вузьке коло питань у наноматеріалознавстві, фізика дасть базові знання, що будуть необхідними у майбутній професії; для студентів-електронників значно важливішою є професійна спрямованість із ухилом на прикладний аспект отриманих знань. У цьому випадку необхідне не лише більш детальне ознайомлення тих, хто навчається, з фізичними основами наноматеріалознавства, а формування саме цілісних уявлень про наноматеріали, їх властивості, напрями застосування та основні методи структурних досліджень. Майбутній учитель фізики повинен добре орієнтуватися в сучасних досягненнях фізики, зокрема, у галузі нанотехнологій, та в можливостях їх застосування. Знання основних понять наноматеріалознавства у подальшому дозволить учителю зрозуміти

суть основних досягнень у цій галузі та у доступній формі ознайомити з ними учнів.

Отже, відбір навчального матеріалу повинен визначатися професійною спрямованістю. Виокремлені питання треба включати в певні розділи фізики, а також спеціальні курси та лабораторні практикуми.

Конструювання змісту курсу загальної фізики має бути спрямоване на розв'язання протиріччя між актуальними потребами суспільства у кваліфікованих фахівцях у галузі наноматеріалознавства та невідповідністю традиційного курсу фізики цим потребам.

Серед основних завдань оновленого курсу можна виділити такі:

- формування у здобувачів освіти цілісних уявлень про унікальні властивості наноматеріалів та сфери їх застосування;
- ознайомлення тих, хто навчається, з методами одержання наноматеріалів;
- знайомство студентів з основними інструментами дослідження структури наноматеріалів;
- формування уявлень про практичне значення розвитку наноматеріалознавства для електроніки, комп'ютерної техніки, космічної техніки, військової справи та ін.
- окреслення перспектив розвитку наноматеріалознавства та пробудження інтересу до реалізації власних зусиль у даній галузі.

Таким чином, однією зі складових інформаційно-аналітичної підготовки здобувачів вищої освіти в галузі наноматеріалознавства мають стати:

- 1) знання ключових понять наноматеріалознавства;
- 2) здатність застосовувати сучасні методи аналізу структури речовини;
- 3) розуміння перспектив використання наноматеріалів у різних галузях науки і виробництва.

1 МЕТОДИКА ВИВЧЕННЯ ПИТАНЬ НАНОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВА В ОКРЕМИХ РОЗДІЛАХ КУРСУ ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ

1.1 Місце питань наноматеріалознавства у розділах «Механіка» та «Молекулярна фізика й термодинаміка»

Механіка є основою всього курсу фізики – у процесі вивчення механіки формується фізичний світогляд особистості, здатності до узагальнення та конкретизації змісту навчального матеріалу. Зокрема, в інших розділах класичної фізики моделювання фізичних явищ пов'язане переважно зі створенням механічних образів структур фізичних систем та процесів, що у них відбуваються. На першій, вступній, лекції, присвяченій початку вивчення курсу загальної фізики, при поясненні значущості законів механіки, можна показати, як найпростіші закони класичної механіки, що застосовуються до окремих об'єктів макросвіту, що нас оточує, важливі й для мікросвіту, який змінює функціональне призначення багатьох предметів, що використовуються як у повсякденному житті, так і у виробничих цілях.

Під час наступних лекцій, наприклад, при вивченні механічної енергії, слід розповісти про молекулярний ротор – молекулярний пристрій, що здатний перетворювати енергію в рух [16]. При цьому увагу студентів варто акцентувати не лише на новому пристрої мікросвіту, а й на одиницях вимірювання сил у молекулярних роторах – піконьютонах. На прикладі білкових двигунів, які переміщують «вантаж» у вигляді різних молекул каналами мікротрубок всередині клітин, доцільно сфокусувати увагу студентів на тому, що механізми пересування вивчаються в різних технічних дисциплінах та набувають нового ступеня актуальності у зв'язку з упровадженням нових технологій.

Неабиякий інтерес у студентів викликає інформація про молекулярні пропелери – нанорозмірні молекули, що мають форму гвинта, які здатні робити обертальні рухи через свою унікальну просторову форму, аналогічну з формою макроскопічного гвинта [13].

Під час вивчення основних положень *молекулярної фізики* відкриваються можливості переходу до розгляду структури речовини та ознайомлення тих, хто навчається із впливом цієї структури на властивості матеріалів.

Під час обґрунтування основних положень молекулярно-кінетичної теорії слід указати на те, що сучасна дослідницька база дає можливість не тільки бачити атоми, а й маніпулювати ними. Слід підкреслити, що поєднання однакових атомів у різні форми призводить до появи нових матеріалів. Тут доцільно привести приклад із карбоном. До недавнього часу було відомо, що вуглець утворює три алотропні форми: алмаз, графіт і карбін. На сьогодні відома вже четверта алотропна форма вуглецю, так званий фулерен. Це відкриття Р. Керла, Г. Крото й Р. Смолі (1985 р.) дозволило розширити коло нових синтезованих матеріалів із надзвичайними фізико-хімічними властивостями. У кінці 80-х – початку 90-х років, після того, як була розроблена методика отримання фулеренів у макроскопічних кількостях, було виявлено множини інших – легших та важчих фулеренів: починаючи від C_{20} і до C_{70} , C_{82} , C_{96} , і вище [6, 17].

Далі студентів слід підвести до такої ідеї: фулерени всередині порожні, така порожнина може вмістити будь-який сторонній атом. Коли в молекулу фулерену вводяться атоми металу, то такі комплекси називають металофулеренами. Вони є перспективними для застосування в наноматеріалознавстві та нанохімії.

Далі під час розгляду поверхневого натягу, капілярних явищ, змочування варто звернути особливу увагу студентів на те, що вся сукупність цих явищ обумовлена специфікою поверхневих взаємодій. Зрозуміти її допоможе уявний експеримент [18]. Розглянемо тривимірний об'ємний зразок деякого матеріалу, наприклад, однорідний кристал. Припустимо це куб з довжиною ребра 1 см. Цей зразок має певні фізичні властивості, що не залежать від його розмірів. Поблизу зовнішньої поверхні куба властивості

можуть відрізнятися від відповідних властивостей в об'ємі, однак частка поверхневих атомів мала, і тому внеском поверхневої зміни властивостей можна знехтувати. Якщо розділити куб навпіл – дві його сторони залишаться незмінними, а одна, наприклад, висота d , зменшиться у 2 рази. Чи зміняться при цьому властивості зразка? Ні не зміняться. Повторимо цей експеримент ще раз. Отримаємо аналогічний результат. Багаторазово повторюючи експеримент, ми нарешті отримаємо деякий критичний розмір d^* , нижче якого спостережувана властивість почне залежати від розміру d . Чому так відбувається?

Відбувається це тому, що при зменшенні розміру тіла частка атомів, розташованих на поверхні збільшується. Поверхневі явища, добре відомі студентам, обумовлені саме тим, що сили взаємодії між частинками, з яких утворене тіло, не скомпенсовані на його поверхні, а отже, властивості «поверхневих» атомів відрізняються від властивостей атомів в об'ємі. Оскільки у тіла, що має протяжність в одному з вимірів, порядку нанометрів, кількість поверхневих атомів різко збільшується, то їх внесок у властивості цих об'єктів стає визначальним. Тобто, при $d \leq d^*$ доля вкладу поверхневих атомів у властивості об'єкту стає істотною та продовжує зростати з подальшим зменшенням d . Саме це і є однією з причин прояви нових властивостей на нанорівні (іншою причиною зміни властивостей є те, що на цьому розмірному рівні починає вже виявлятися дія законів квантової механіки). Отже, найістотнішою і найважливішою властивістю наноматеріалів, основною відмінністю їх від звичайних є поява у них принципово нових властивостей, які не виявляються при інших розмірах.

Природно, що критичний розмір d^* для різних матеріалів, і навіть для одного матеріалу, може істотно відрізнятися в залежності від того, яку з властивостей досліджують в експерименті. Однак виявляється, що величина d^* знаходиться приблизно в інтервалі 1-100 нм.

Огляд деяких нових розділів, наприклад, нанофлюїдики, можна запропонувати в якості тем рефератів для самостійної роботи з літературою в межах практичних занять та семінарів.

1.2 Формування знань про основні поняття наноматеріалознавства в «Електродинаміці»

При вивченні розділу «Електродинаміка» у курсі загальної фізики відкриваються широкі можливості для ілюстрації специфічних електричних та магнітних властивостей наноматеріалів, а також їх застосування для створення нових приладів та пристроїв.

При вивченні провідності діелектриків, напівпровідників і провідників у межах курсу загальної фізики формуються початкові знання про моделі й закони мікросвіту. Використання фізичних моделей, що становлять основу зонної теорії провідності, дозволяє показати студентам, яким чином можна з єдиних позицій пояснити класифікацію матеріалів на підставі відмінності їх здатності до пропускання електричного струму.

Останнім часом особливий інтерес викликає дослідження магнітних наночастинок. При зміні розмірів, форми, складу й будови наночастинок можна керувати магнітними характеристиками матеріалів на їх основі [4]. Магнітні наночастинки широко поширені у природі й зустрічаються в багатьох біологічних структурах. У зв'язку з унікальними магнітними властивостями, що виявляються у наночастинках, з'явилося багато шляхів їх наукового та технічного застосування. Магнітні наночастинки використовують у системах збереження інформації, магнітних нанопристроях, медичній діагностиці та для створення нанороботів. Особливі властивості мають частинки, упроваджені в різні матриці: полімерні, цеолітні та інші. Уперше магнітні характеристики матеріалу, що складається з немагнітної твердої діелектричної матриці й розподілених у ній магнітних наночастинок (3-10 нм), були описані в 1980 році. Останніми роками у сфері створення

магнітних наноматеріалів відбулися революційні зміни. Пов'язані вони, по-перше, з розробкою ефективних методів отримання та стабілізації магнітних частинок нанометрових розмірів, по-друге, з розвитком фізичних методів дослідження таких частинок [5].

На завершення розгляду електродинаміки можна ознайомити здобувачів освіти з особливостями глобального проекту, метою якого є цілеспрямований синтез спеціально спроектованих магнітних молекул на підставі квантовомеханічного моделювання з використанням методу Монте-Карло (алгоритм Метрополіс), результати якого можна безпосередньо порівнювати з експериментом [8]. Перспективною галуззю практичного застосування цього проекту є створення високоінтегрованих модулів пам'яті й мініатюрних магнітних вимикачів. Прогнозовано найактуальнішою галуззю їх застосування стане локальна хіміотерапія пухлин.

1.3 Питання фізичних основ наноматеріалознавства у розділах «Оптика» та «Атомна і ядерна фізика»

У заключних розділах «Оптика» і «Квантова та ядерна фізика» викладається матеріал, який має інтеграційний характер. При вивченні класичних тем хвильової оптики, під час розгляду явищ, що відбуваються в тонких плівках, на дифракційних ґратках, у кристалах і розчинах солі, цукру, слід зробити наголос на співвимірності фізичних об'єктів, розміри яких визначаються нанометрами з довжинами хвиль електромагнітного випромінювання. Отже, у викладача з'являється можливість показати важливість фізичних висновків для актуальних прикладних задач.

Розділ, пов'язаний з інтерференцією та дифракцією світла набагато краще засвоюється студентами, якщо супроводжувати викладання матеріалу інформацією про такі прикладні аспекти досліджуваних явищ, як просвітлення оптики, отримання 3D зображень і т. ін. Студентам важливо

знати фізичні принципи, що лежать в основі оптоволоконних технологій, без яких неможливо уявити сучасну якісну передачу великих обсягів інформації. При вивченні тем, пов'язаних із геометричною оптикою, слід приділити увагу нанолінзам, які виробляються для військових і цивільних потреб та телевізійних екранів, створених на основі лінз Френеля [12].

Протягом усього курсу фізики атома і атомного ядра є можливість демонструвати студентам зв'язок між атомною фізикою й сучасними досягненнями нанотехнологій. У 1924 році французький фізик Луї де Бройль висунув гіпотезу про хвильову природу мікрооб'єктів, яка була експериментально підтверджена в 1927 році. Отже, була показана аналогія, яка дозволила побудувати електронний мікроскоп за законами оптики. При вивченні тунельного ефекту слід указати, що на його основі були пояснені раніше незрозумілі процеси, що спостерігалися експериментально. Це стало основою атомної науки й техніки, у тому числі нанотехнологій. У 1981 році Г. Бінніг і Х. Рорер, учені зі швейцарського відділу фірми ІВМ, створили сканувальний тунельний мікроскоп – прилад, що дозволяє діяти на речовину на атомному рівні. За допомогою тунельного мікроскопу стало можливим переміщувати атоми з одного місця на інше, маніпулювати ними і, теоретично, збирати з них будь-який предмет. У 1986 році вченим було присуджено Нобелівську премію.

Варто акцентувати увагу студентів на тому, що цікавим використанням лазерів є лазерний пінцет – оптичний прилад, що дозволяє утримувати й переміщати в просторі мікро- і нанорозмірні об'єкти, захоплені в перетяжку (фокус) лазерного променя [11].

Здобувачі освіти повинні не тільки брати до уваги нову інформацію, а й у кожному випадку добре розуміти фізичну сутність досліджуваного явища або роботи того чи іншого приладу. При вивченні тем, пов'язаних із математичним апаратом, що використовується для описання явищ мікросвіту, студенти вперше отримують початкові відомості про апарат квантової механіки. Математичні методи квантової механіки широко

використовуються у квантовій хімії, у квантовій електроніці, при обробці даних рентгеноструктурного аналізу у кристалографії, актуальність якої в сучасному приладобудуванні, орієнтованому на використання рідких кристалів, напівпровідникових матеріалів важко заперечувати. На заключній лекції з курсу загальної фізики, присвяченій огляду досягнень фізики, слід приділити також увагу й застосуванню сучасних наноматеріалів у різних галузях.

2 ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ ПИТАНЬ АНОММАТЕРІАЛОЗНАВСТВА У КУРСІ ФІЗИЧНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Курс «Фізична електроніка» є синтезом ідей вакуумної та твердотільної електроніки й займається розробкою фізичних і технологічних основ створення інтегральних електронних схем із характерними топологічними розмірами елементів менших за 100 нм. Вона базується на використанні квантових ефектів, що проявляються в наноструктурах. Саме в галузі наноелектроніки слід очікувати найбільш революційних досягнень. Зменшення розмірів пристроїв стало природним процесом сучасної електроніки. При цьому економічні витрати зростають, їх зниження – це, по суті, завдання, яке здатні вирішити нанотехнології в межах розвитку електроніки.

У межах даної теми прекрасним прикладом, що демонструє можливості наноматеріалів, є широка область застосування графену – моношару атомів вуглецю. Графен був отриманий у 2004 році, тому вивчений ще не у повній мірі. За «передові дослідження з двовимірним матеріалом – графеном» А. Гейму і К. Новосьолову була присуджена Нобелівська премія з фізики за 2010 рік. Коли буде вирішене питання формування «забороненої зони» графену, то він замінить кремній в інтегральних мікросхемах. Графен можна також використовувати для виготовлення електродів в іоністорах (суперконденсаторах) для використання їх у якості джерел струму, що здатні перезаряджатися [14]. Дослідні зразки іоністорів на графені мають питому енергоємність 32 Вт·год/кг, порівнянну зі свинцево-кислотними акумуляторами (30–40 Вт·год/кг). У пресі з'явилися відомості про створення нового типу світлодіодів на основі графену, при цьому відзначалася низька вартість їх утилізації.

Приклад із графеном, що характеризується моношаром, можна доповнити іншим прикладом, який є не менш ефектним. Це принц-технології, або процес формування тривимірних мікро- та наноструктур,

заснований на відділенні напружених напівпровідникових плівок від підкладки з наступним згортанням їх у просторовий об'єкт [15]. Технологія названа на честь В. Я. Принца – вченого з Інституту фізики напівпровідників СО РАН, який запропонував цей метод ще у 1995 році.

При вивченні електромагнітних коливань, що створюються в електричних ланцюгах, як приклад, можна розглянути альтернативні способи отримання сигналів. Тут доречно розповісти про антену-осцилятор розмірами близько 1 мкм, створену в 2005 році в лабораторії Бостонського університету. Це пристрій налічує 5000 мільйонів атомів і він здатний осцилювати з частотою 1,49 ГГц, що дозволяє передавати з її допомогою величезні обсяги інформації. У межах цієї теми, як правило, розглядається також явище резонансу. Отже, поряд із прикладами відкриття електронного парамагнітного резонансу й розповіді про резонансну спектроскопію, доречно повідомити і про плазмони. Плазмони – це колективні коливання вільних електронів у металі. На початку 2000 року було дано поштовх до розвитку нової галузі наноплазмоніки, заснованої на технології виготовлення частинок нанорозмірів [7]. У результаті виявилось можливим передавати електромагнітне випромінювання уздовж ланцюжка металевих наночастинок за допомогою збудження плазмонних коливань. Подальший розвиток електроніки багато в чому буде пов'язаний із використанням магнітних наночастинок. Про це свідчать численні роботи зі спінтроніки. Взагалі кажучи, другу половину ХХ і початок ХХІ ст. вважають епохою мікрота наноелектроніки. У цей період у світі відбулася технологічна революція, що зумовила розвиток цифрових та інформаційних технологій і появу спінтроніки. Завданням спінтроніки (спінової електроніки, або магнетоелектроніки) є створення приладів, в основу роботи яких покладені властивості електронних спінів. Це нове поле науки й технологій, на якому для розроблення нових функціональних пристроїв застосовуються властивості як заряду, так і спіну електрона [10]. Початок нової електроніки, яка заснована на фізичних ефектах, зумовлених спіном, відносять до 1988 р.,

коли було відкрито явище гігантського магнітоопору (ГМО). А. Ферт і П. Грюнберг (учені, які його відкрили) сформулювали визначення гігантського магнітоопору як квантово-механічного ефекту, що спостерігається в металевих плівках із послідовних феромагнітних і провідних немагнітних шарів і полягає у значній зміні електричного опору таких структур при зміні взаємного напрямку намагніченості сусідніх магнітних шарів під дією зовнішнього магнітного поля. В основі ефекту, як виявилось, лежить розсіяння електронів, яке залежить від напрямку спіну. У 2007 р. за це відкриття А. Ферт і П. Грюнберг одержали Нобелівську премію з фізики. Нобелівський комітет особливо підкреслив значущість їхньої роботи: «Відкриття гігантського магнітоопору відчинило двері до безлічі нових наукових та технологічних можливостей. Історія ефекту ГМО наочно демонструє, як абсолютно несподіване наукове відкриття може дати поштовх до розвитку зовсім нових технологій та створення нових комерційних продуктів». Нині дослідження зі створення та застосування ГМО-елементів інтенсивно проводяться в багатьох країнах світу, зокрема й Україні [1; 2; 9]. Розроблено кілька конфігурацій систем із ГМО: багатошарові структури, гранульовані сплави, спінові клапани.

Можна виділити кілька груп фізичних явищ, які можуть знайти застосування у спінтроніці: залежність електричного опору однорідних матеріалів від зовнішнього магнітного поля; гігантський магнітоопір у шаруватих структурах із послідовними шарами з феромагнітних і парамагнітних (або антиферомагнітних) металів, у гранульованих структурах; тунельний магнітоопір у шаруватих структурах із феромагнітного металу, розділеного прошарком парамагнітного (або антиферомагнітного) діелектрика; інжекція поляризованих по спіну носіїв струму з феромагнітного матеріалу в немагнітний; взаємний вплив магнетизму і щільності різних носіїв заряду у феромагнітних напівпровідниках.

3 УДОСКОНАЛЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ З МІКРО- ТА НАНОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

Практичне закріплення знань про фізичні явища, які відбуваються в мікро- та наноматеріалах, ознайомлення з методами їх одержання, дослідження фазового складу, кристалічної структури та фізичних властивостей передбачене на лабораторних практикумах. Кожен ЗВО має власний підхід до організації й проведення лабораторних практикумів, що визначається різноманітністю матеріальної бази лабораторій, напрямками науково-дослідної роботи кафедр та навчально-методичним забезпеченням.

Роботи лабораторного практикуму, присвяченого сучасним методам дослідження структури речовини, можуть бути досить різноманітними: від нескладних досліджень поверхні за допомогою оптичних мікроскопів до дослідження нанокристалічних об'єктів за допомогою сучасних електронних мікроскопів.

На відміну від лабораторних практикумів з окремих розділів курсу загальної фізики (механіки, молекулярної фізики, оптики), де тематика робіт синхронізована з матеріалом відповідних розділів, а метою їх є експериментальна перевірка фізичних явищ, які вивчалися у відповідному розділі, а також формування у студентів навичок користування основними фізичними приладами й оволодіння найважливішими методами фізичних вимірювань, метою лабораторного практикуму з мікро- та наноматеріалознавства є практичне ознайомлення здобувачів освіти із сучасними методами експериментального дослідження.

Поряд із традиційними методами дослідження, такими як мас-спектрометрія, електронна мікроскопія, електроннографія та рентгеноструктурний аналіз, у межах лабораторного практикуму студентам можуть бути запропоновані й сучасні роботи.

Однією зі сфер застосування сучасних мікро- та наноматеріалів є детектори частинок та квантів. Так, для систематизації знань студентів про сучасні матеріали та їх практичне застосування нами запропонована *лабораторна робота* «Вивчення принципу роботи детектора елементарних частинок з використанням порталу відкритих даних Європейської організації з ядерних досліджень (CERN Open Data Portal)».

Теоретичні відомості. Для реєстрації (встановлення факту пролітання) частинки, її ідентифікації та визначення основних характеристик – енергії, маси, заряду, спіну – використовують детектори частинок. Лише деякі з численних відомих частинок мають достатньо довгий час життя, щоб залишити «слід» (трек) у детекторі. Більшість частинок виявляють за продуктами розпаду та їх кінематичними співвідношеннями (інваріантна маса). Щоб відтворити механізм розпаду та з'ясувати властивості частинок, що беруть у ньому участь, необхідно отримати максимальну інформацію про кінцеві продукти.

Детектор частинок повинен забезпечувати:

- охоплення повного тілесного кута (без тріщин, тонкої сегментації);
- можливість вимірювання імпульсу та / або енергії;
- виявлення, відстеження та ідентифікація всіх частинок (маси, заряду);
- швидка реакція (відсутність «мертвого часу»).

Як відбувається реєстрація детектором частинки? Зазвичай використовують такі технології:

1. *Іонізаційні детектори.* Якщо частинка має достатньо енергії для іонізації атомів або молекул газу, утворені електрони та йони викликають електричний струм, який можна виміряти.

2. *Напівпровідникові детектори.* Енергію зарядженої частинки, що потрапила в детектор, можна визначити за величиною її імпульсу. Коли заряджена частинка проходить через напівпровідник (кремній, германій та ін.), спостерігаються іонізуючі та неіонізуючі (радіаційне випромінювання) втрати енергії частинки. Втрати енергії на іонізацію означають утворення

електрон-діркових пар у напівпровіднику. Під дією прикладеної напруги електрони переміщуються до електродів детектора, створюючи в зовнішньому колі електричний імпульс. Щоб частинка віддала всю свою енергію на створення електрон-діркових пар, необхідно, щоб весь трек частинки вміщувався в робочій області детектора. Для кожного матеріалу детектора відоме середнє значення енергії, що витрачається на створення електрон-діркової пари. За величиною імпульсу можна розрахувати кількість утворених пар і визначити таким чином повну енергію частинки.

3. *Сцинтилятори.* Це матеріали, у яких виникають короткочасні світлові спалахи або сцинтиляції світла, коли через них проходить іонізуюче випромінювання. Заряджена частинка збуджує атоми в сцинтиляторі, електрон, повертаючись в основний стан, випромінює фотон.

Таким чином, у будь-якому випадку частинка, потрапляючи у детектор, взаємодіє з пасивним та активним матеріалом. Потрапивши у речовину, з якої виготовлено фрагмент детектора, частинка породжує «зливу» вторинних частинок, передаючи їм свою енергію (рис. 3.1.). Процес утворення «зливи» залежить від типу частинок та від матеріалу детектора. У підсумку утворена «злива» поглинається в об'ємі калориметра, а її енергія вимірюється.

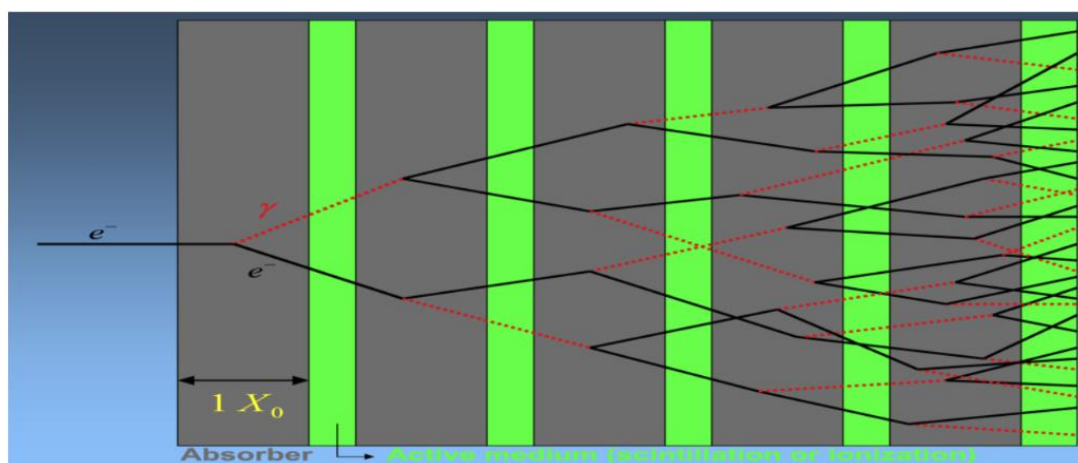


Рисунок 3.1 – Утворення «зливи» вторинних частинок

Розглянемо основи роботи детектора частинок, використовуючи дані з детектора CMS, які доступні на порталі відкритих даних Європейської організації з ядерних досліджень [19]. Детектор CMS є загальним детектором на великому адронному колайдері.

Назва CMS розшифровується як Compact Muon Solenoid (компактний мюонний соленоїд) (рис. 3.2). На перший погляд, слово «компактний» тут може здатися недоречним, адже довжина детектора становить 20 м, а його діаметр – 15 м. Однак, його назва підкреслює, що цей детектор помітно компактніший від іншого детектора ATLAS (довжина 43 м, діаметр 22 м), хоча не поступається йому за дослідницькими можливостями. Цього вдалося досягти завдяки дуже сильному магніту, через якого детектор CMS виявився надзвичайно важким - 15 тисяч тонн проти 7 тисяч тонн детектора ATLAS.

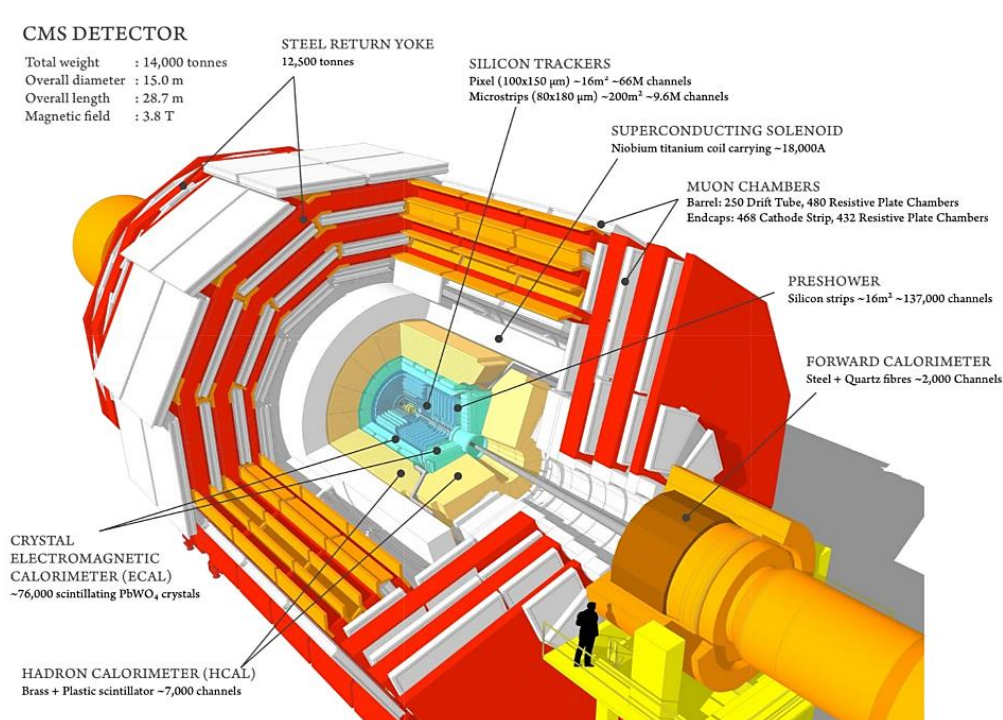


Рисунок 3.2 – Будова детектора CMS

Трекові детектори в детекторі CMS відповідають класичній схемі. Найближче до вакуумної труби розташований піксельний детектор. Три циліндричних шари мають радіуси 4, 7 і 11 см і містять всі разом 65 мільйонів окремих пікселів, кожен розміром 100 на 150 мікрон.

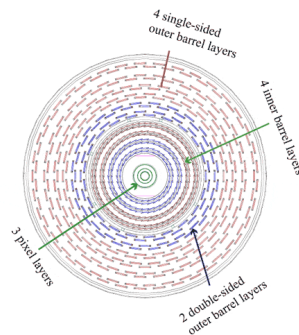


Рисунок 3.3 – Схема розташування окремих модулів трекових детекторів CMS [20]

Далі від вісі пучка й до радіуса 130 см розташовані десять шарів кремнієвого детектора. Він містить понад 15 000 окремих модулів різного дизайну, які налічують разом 10 млн. чутливих смужок, інформація з яких зчитується 80 тисячами каналів збору даних. Для оптимізації роботи детектора його температура підтримується на сталому рівні -20°C .

Система збору даних з центрального детектора спроектована так, щоб важити як можна менше. Після обробки отриманих сигналів «front-end» електронікою (яка кріпиться безпосередньо до торцевих модулів детектора) дані перетворюються у послідовність спалахів інфрачервоного лазера і виводяться із детектора по 40 тисячам оптоволоконних каналів.

Сучасні детектори частинок складаються з шарів – піддетекторів або *калориметрів*, кожен із яких призначений для пошуку конкретних властивостей або конкретних типів частинок.

Трекери – відстежувальні пристрої, що виявляють шляхи електрично заряджених частинок при їх проходженні та взаємодії з відповідною речовиною. Більшість пристроїв відстеження не створюють видимих треків частинок, а записують ті невеликі електричні сигнали, викликані частинками, коли вони рухаються всередині пристрою. Комп'ютерна програма потім реконструює записані шаблони треків. Трекер повністю виготовлений із кремнію.

У детекторі CMS встановлено два типи калориметрів: внутрішній (електромагнітний) – для вимірювання енергій електронів і фотонів, та зовнішній (адронний) – для вимірювання енергій адронів.

Електромагнітний калориметр CMS зроблений на основі важких сцинтиляційних кристалів вольфрамату свинцю, з'єднаних з фотодіодами. Перевага цього матеріалу в порівнянні з іншими сцинтиляторами полягає в тому, що електрони і фотони породжують в ньому дуже короткі «зливи» з відомими властивостями. Це означає, що вимірювання енергій частинок буде відбуватися з високою точністю й на малих відстанях.

У торцевих сегментах CMS, безпосередньо перед електромагнітним калориметром, встановлений тонкий шар спеціального детектора фотонів (preshower). Цей детектор зроблений за технологією кремнієвих смугових детекторів, розмір чутливої зони в ньому становить лише 2 мм (проти кристалів з поперечним перерізом 3×3 см в електромагнітному калориметрі). Торцеві калориметри детектора CMS здатні точно відрізнити окремий фотон з високою енергією від пари фотонів, що утворилися під час розпаду нейтрального високоенергетичного π -мезона і тому вилетіли в дуже близьких напрямках. У звичайному електромагнітному калориметрі ці дві ситуації розрізнити важко, оскільки одиничний фотон і пара близьких фотонів породжують схожі «зливи».

Адронний калориметр повинен породити і поглинути адронні зливи, які за своєю природою більш протяжні, ніж електромагнітні. Зібраний він із 36 окремих «клинів», масою 26 тонн кожен, та ще 36 клинів дещо меншого розміру встановлені на торцях детектора. Кожен складається шарів щільного матеріалу-поглинача, які чергуються з шарами органічного сцинтилятора. Світло, що виділилося у кожному шарі сцинтилятора, виводиться назовні по оптоволокну. На виході це світло перетворюється в електричний сигнал за допомогою гібридних фотодіодів, які були розроблені спеціально для роботи в сильних магнітних полях.

Згадані калориметри можуть зупиняти більшість відомих частинок,

крім мюонів та нейтрино. Мюон може проникати через багатометровий шар заліза без взаємодії і не зупиняється жодним із калориметрів. Його ідентифікують за допомогою *детектора мюонів*.

Мюонні камери розташовані зовні соленоїда, причому вони чергуються із прошарками залізного ярма, яке «утримує» магнітне поле. На детекторі CMS використовуються детектори мюонів трьох типів: дрейфові трубки, катодні смужкові камери та камери з резистивним пластинками. Частина цих камер призначена для визначення координат і часу руху мюонів, а інша частина використовується для швидкого мюонного тригера.

Якщо заряджена частинка влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до ліній індукції, то вона починає рухатися по колу. Вперше формулу для сили, з якою магнітне поле діє на рухому заряджену частинку, встановив нідерландський фізик Х. Лоренц (1853-1928 рр.), Тому цю силу називають силою Лоренца:

$$F_L = qvB \sin \alpha ,$$

де α – кут між напрямками \vec{v} та \vec{B} .

Напрямок сили Лоренца, яка діє на позитивний заряд, що влетів у магнітне поле, знаходять за правилом лівої руки: якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії магнітної індукції входили у долоню, а чотири витягнутих пальці вказували напрям руху частинки, то відхилений на 90° великий палець вкаже напрям сили Лоренца. Якщо частинка заряджена негативно (наприклад, електрон), то напрям протилежний (правило правої руки).

На рисунку 3.4 представлені треки трьох різних частинок. Всі вони рухаються зліва направо в магнітному полі. Напрямок магнітного поля показаний на рисунку позначкою \oplus (надходить від спостерігача й проникає у площину паперу).



Рисунок 3.4 – Схематичні треки частинок у магнітному полі

Перший трек є прямою лінією. Частинка не має заряду, тому вона не відчуває сили. Другий трек вигнутий вгору. Ця частинка має позитивний заряд. Останній трек увігнутий вниз. Ця частинка має негативний заряд.

Отже, чим сильніше магнітне поле \vec{B} або чим швидше рухається частинка \vec{v} , тим більша сила Лоренца а, отже, більший вигин треку.

Частинки ми можемо детектувати за їхніми траєкторіями. Розглянемо деякі основні частинки, які можна ідентифікувати за допомогою детекторів.

Електрон – це стабільна елементарна частинка, що належить до «ферміонного» сімейства частинок. Він має електричний заряд «-1», тоді як протилежна йому частинка, позитрон, має електричний +1. Електрон має масу приблизно $0,5 \text{ MeV}/c^2$.

Фотон – стабільна елементарна частинка, що належить до сімейства бозонів. Фотон не має маси та електричного заряду. Фотон є носієм електромагнітної сили.

Адрон – «важка» композитна частинка, яка складається з двох або більше кварків. Як, наприклад, протони і нейтрони. На противагу їм існують більш легкі лептони, такі як електрони і мюони.

Мюон – елементарна частинка, яка має електричний заряд «-1». Властивості мюонів подібні до властивостей електрона, але мюон приблизно в 200 важчий за електрон.

Щоб утворились нові частинки необхідно зіштовхнути частинки з високими енергіями. Для цього використовують прискорювачі заряджених частинок.

Комплекс прискорювачів у ЦЕРНі (рис. 3.5) є послідовністю прискорювачів, які прискорюють частинки до все більш високих енергій. Кожен прискорювач підвищує енергію пучка частинок, перш ніж вводити пучок в наступний прискорювач в послідовності.



Рисунок 3.5 – Великий адронний колайдер у ЦЕРНі

У Великому адронному колайдері (LHC) - останньому елементі в цьому ланцюжку - пучки частинок прискорюються до енергії 6,5 TeV кожен. І після цього протони, нарешті, спрямовують до двох прискорюючих кілець LHC. Промінь в одному кільці циркулює за годинниковою стрілкою, тоді як промінь в іншому – проти годинникової стрілки. Потрібно 4 хвилини і 20 секунд для заповнення кожного кільця LHC, і 20 хвилин, щоб протони досягли максимальної енергії. Пучки циркулюють протягом багатьох годин всередині кілець LHC. Два пучки приводяться у зіткнення в чотирьох точках, у яких розташовані детектори ALICE, ATLAS, CMS та LHCb. Загальна енергія в точці зіткнення дорівнює 13 TeV.

Електромагніти навколо детекторів частинок генерують магнітні поля для створення сили Лоренца. З точки зору фізики, ключем до ідентичності частинки є її імпульс. Саме він і визначає кривизну її траєкторії: частинки з високим імпульсом рухаються майже прямолінійно, у випадку малого імпульсу рух відбувається по спіралях всередині детектора.

Зміст і метод виконання роботи

I. Визначення елементарної частинки за її треком

Встановіть за малюнком, яку частинку виявлено? Обґрунтуйте, чому ви так вважаєте. Перевірте свою відповідь за допомогою інтерактивного візуалізатора CERN Open Data Portal.

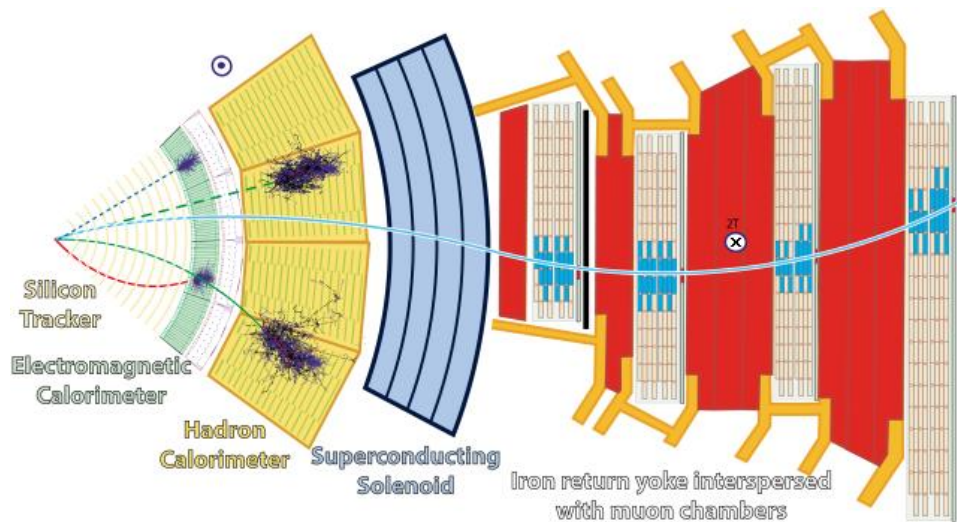


Рисунок 3.6 – CMS (Compact Muon Solenoid) – Компактний мюонний соленоїд

1. Фіолетовий пунктирний трек.

Відповідь. Трек частинки – пряма лінія. Це означає, що частинка не має заряду. Вона зупиняється в електромагнітному калориметрі. Отже, це фотон.

2. Зелений пунктирний трек.

Відповідь. Трек частинки лінійний, отже вона не має заряду. Частинка зупиняється в адронному калориметрі. Таким чином, це нейтральний адрон.

3. Блакитний трек.

Відповідь. Трек частинки вигнутий. За правилом лівої руки з'ясуємо, що вона має позитивний заряд. Оскільки частинка зупиняється у мюонному калориметрі, то вона є «позитивним мюоном» або просто антимюоном.

4. Синій трек.

Відповідь. Трек частинки вигнутий. Правило лівої руки показує нам, що частинка має позитивний заряд. Вона зупиняється в адронному калориметрі. Отже це позитивно заряджений адрон.

5. Червоний пунктирний трек.

Відповідь. Трек частинки вигнутий, отже її заряд "негативний" (правило правої руки). Зупиняється вона в електромагнітному калориметрі. Тому це електрон.

Таким чином, за допомогою інтерактивного візуалізатора CMS можна досліджувати рух різних елементарних частинок.

II. Інтерактивна візуалізація експерименту

Візуальний дисплей CMS може використовуватися для візуалізації даних, отриманих у детекторі [19].

На рисунку 3.7 наведено деякі основні відомості про функціональність кнопок верхнього меню. Меню зліва містить різні частини детектора. Перш, ніж почати користуватися програмою, важливо ознайомитися з різними частинами детектора CMS і функціями кожного з них.

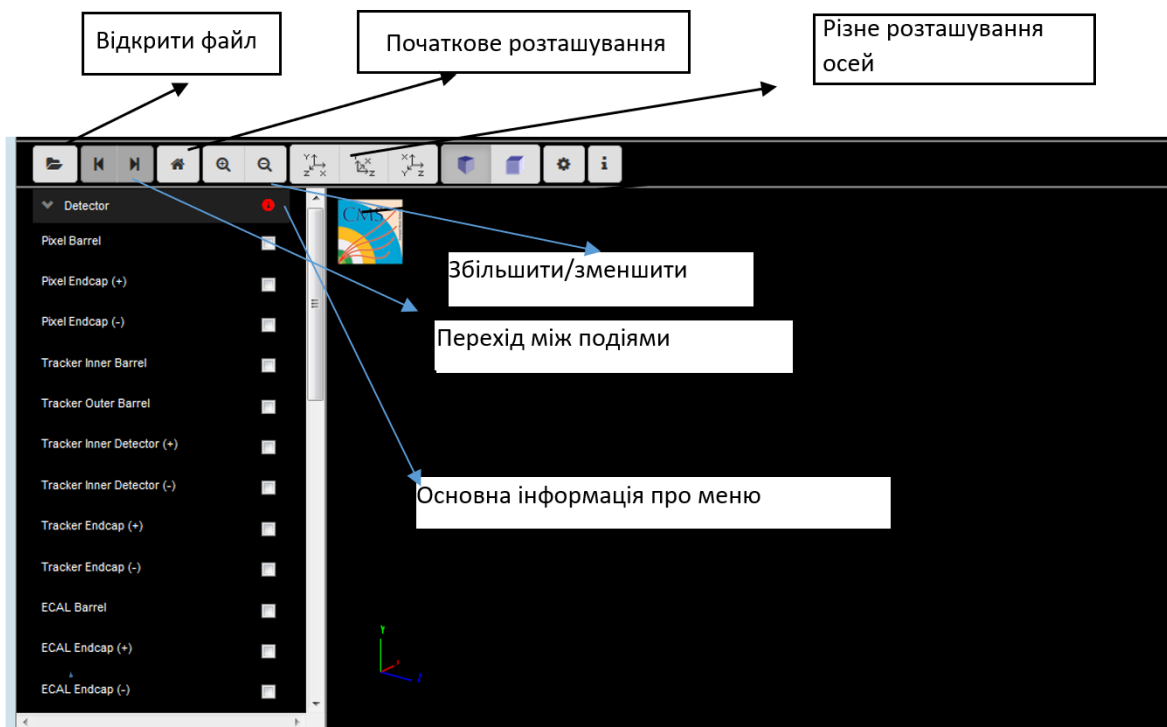



Рисунок 3.7 – Робочий простір інтерактивного візуалізатора експериментів

Щоб розпочати спостереження, необхідно відкрити Подію (Event) та переглянути реальні дані. Подія є фундаментальною взаємодією, яка відбувається, коли частинки стикаються у детекторі. Під час Події вхідні частинки розсіюються або руйнуються, при цьому в залежності від початкової енергії можуть утворюватися сотні нових частинок. Події можна візуалізувати та вивчати за допомогою інструмента «візуалізувати події».

Щоб відкрити набір даних:

Натисніть кнопку відкрити файл . З'явиться таке вікно:

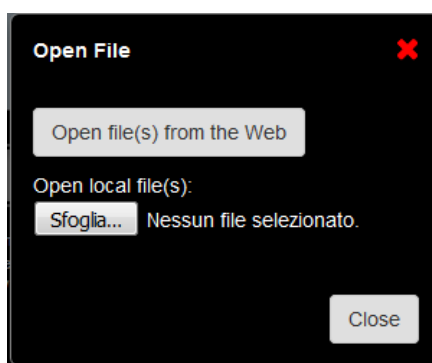


Рисунок 3.8 – Робочий простір інтерактивного візуалізатора експериментів

Виберіть відкриття файлів з Інтернету. Ці файли знаходяться в порталі відкритих даних CERN.

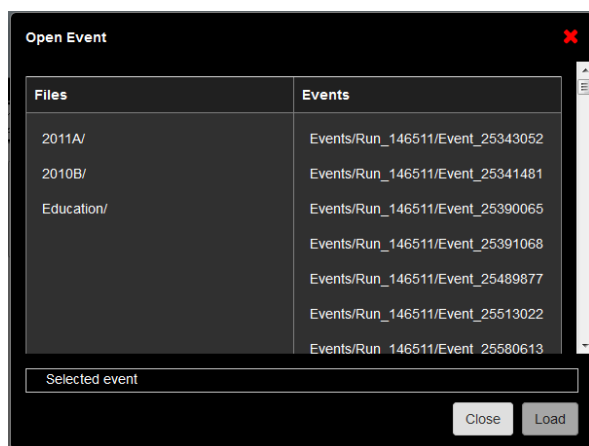


Рисунок 3.9 – Робочий простір інтерактивного візуалізатора експериментів

У папці «Освіта» («Education») можна знайти цікаві приклади подій.

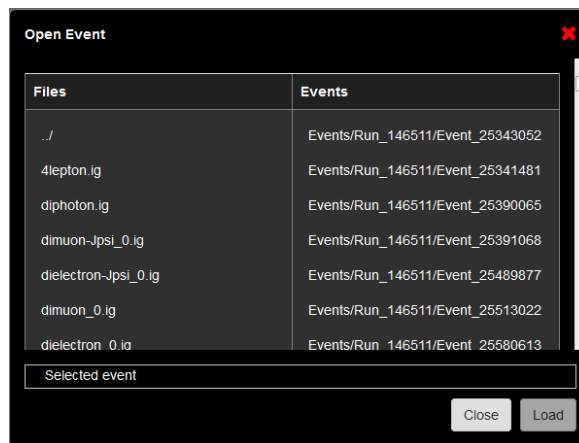


Рисунок 3.10 – Робочий простір інтерактивного візуалізатора експериментів

Відкрийте файл `dimuon_0.ig`. У наведеному прикладі буде розглянуто розпад Z -бозона на два мюони.

Натисніть на подію і виберіть «Завантажити» («Load»).

Після завантаження виберіть «Закрити» («Close»).

На екрані буде відтворено подію (рис. 3.11). У лівому верхньому кутку відображено дату, коли ця подія відбулася.

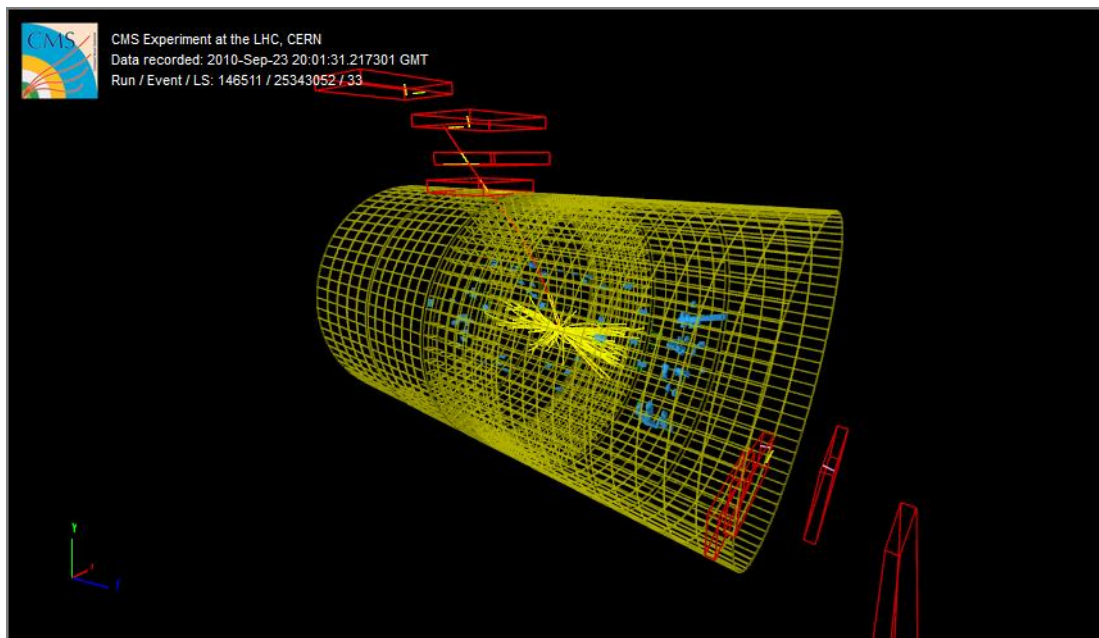


Рисунок 3.11 – Робочий простір інтерактивного візуалізатора експериментів

Розглянемо ліве меню візуалізатора. Воно має такі підменю:

Detector (Детектор): відповідає різним частинам детектора, які нами були розглянуті раніше. У якості посилання вибрано лише зовнішнє значення HСAL

Imported (Імпортовані): недоступні.

Provenance (Походження): перегляньте інформацію про подію на екрані.

Tracking (Відстеження): відповідає системі відстеження. Спочатку показані зіткнення у кластерах. З їх допомогою можна відстежувати реконструйовані треки:

- Si Pixel Clusters: (червоні точки)
- Si Strip Clusters: (червоні смужки)
- перегляди записів відстеження: (жовті точки)
- відповідність трекеру Dets: (жовті прямокутники)
- записані треки (жовті доріжки) - реконструйовані треки електронів і фотонів.

ЕСAL: реконструкція потрапляння частинок у циліндр та зупинка їх у детекторі.

- Barrel Rec Hits (Selected): зелені точки
- Preshower Rec. Hits: недоступно
- Endcap Rec. Hits (Selected): зелені точки

HСAL: реконструйовані удари, показані в кожній частині детектора.

Мюон

- Matching Muon Chambers (вибрані): відповідають реконструйованим мюонам (червоні порожні томи)
- CSC Segments (вибрані): камери катодних смуг (рожеві сегменти)
- RPC Rec. Hits (вибрані): резистивні пластини (жовті сегменти)
- DT Rec. Segments (4D) (вибрані): дрейфові трубки, реконструйовані сегменти (жовті сегменти)
- DT Rec. Hits: дрейфові трубки реконструйоване потрапляння

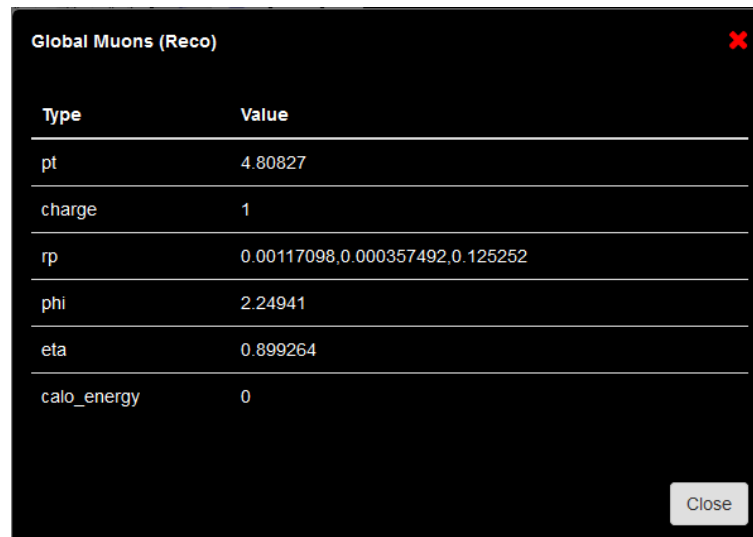
(зелені сегменти).

Фізика

- Electron tracks (треки електронів): з'являтимуться в меню, лише якщо знайдено електрони – зелені доріжки
- Tracker Muons (треки мюонів в трекері): червоні доріжки
- Stand-alone Muons (автономні мюони), виявлені в мюонних камерах: червоні доріжки
- Global Muons (вибраний): реконструйований трек мюонів – червоні доріжки
- Jets: потік частинок в ECAL і HCAL (жовті піраміди)
- Missing Et (втрачені частинки): недоступно.

У даній події нас цікавлять два мюони, які утворилися внаслідок розпаду. Ми можемо отримати інформацію про дані, пов'язані з цими двома мюонами, двома способами:

1) натисканням курсором на доріжку мюона у візуалізаторі – буде відкрито вікно, що містить дані:



Type	Value
pt	4.80827
charge	1
rp	0.00117098,0.000357492,0.125252
phi	2.24941
eta	0.899264
calo_energy	0

Рисунок 3.12 – Робочий простір інтерактивного візуалізатора експериментів

2) за допомогою пункту меню «Global Muons» - у нижній частині візуалізатора з'явиться нова таблиця з даними:

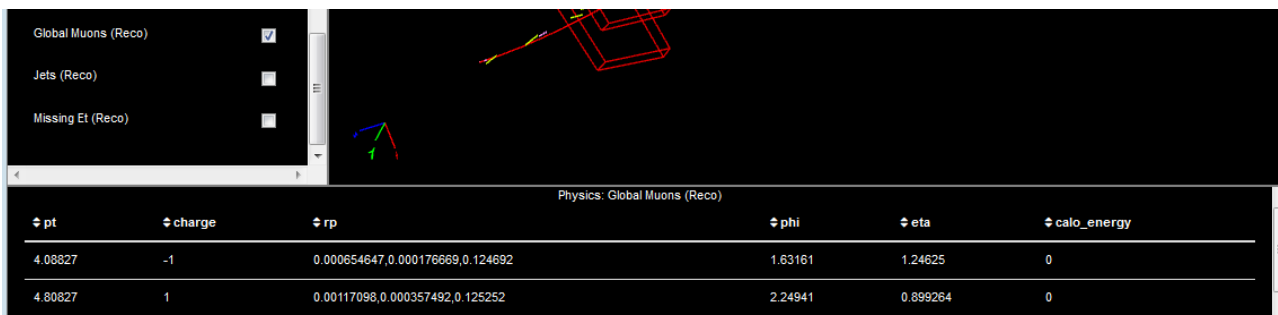


Рисунок 3.13 – Робочий простір інтерактивного візуалізатора експериментів

Пропонується використовувати ці дані під час проведення занять, щоб студенти могли ознайомитися з різними частинами детектора та наслідками зіткнень різних частинок з утворенням треків.

Крім того, на порталі OpenData у папці «Освіта» («Education») представлені різні набори даних, які можна демонструвати. Залежно від набору даних, які відкриває користувач, візуалізація буде різною.

ВИСНОВКИ

Досліджено стан викладання фізичних дисциплін у закладах вищої освіти. Констатовано необхідність поступового системного введення окремих понять наноматеріалознавства у курс загальної фізики та поглибленого їх вивчення на спеціальних курсах й лабораторних практикумах.

Показано, що потенціал загальної фізики як навчальної дисципліни може забезпечити формування сучасного наукового світогляду й поліпшити цільову підготовку кадрів у галузі наноматеріалознавства для актуальних напрямів науки та виробництва.

Розроблені методичні рекомендації для вивчення питань фізичних основ наноматеріалознавства в межах окремих тем курсу загальної фізики, курсу фізичної електроніки та лабораторного практикуму з метою формування у студентів цілісних уявлень про наноматеріали, їх властивості, основні методи дослідження структури речовини, застосування сучасних наноматеріалів.

Запропоновано лабораторну роботу з використанням порталу відкритих даних Європейської організації з ядерних досліджень (CERN OpenData Portal) для забезпечення реалізації принципу наочності у навчанні та зв'язку теоретичних узагальнень з їх практичним застосуванням.

РЕКОМЕНДАЦІЇ

Дослідження варто продовжити у напрямі створення цілісної методики вивчення фізичних основ наноматеріалознавства як окремої навчальної дисципліни з використанням цифрових освітніх засобів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Дехтярук, Л. В., Проценко, І. Ю., Черноус, А. М. (2008). Гігантський магнеторезистивний ефект у магнетних полікристалічних мультишарах. Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології, 6, 1–8. (Dekhtiaruk, L. V., Protsenko, I. Yu., Chornous, A. M. (2008). Giant Magnetoresistive Effect in Magnetic Polycrystalline Multishears. Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies, 6, 1–8).
2. Проценко, І. Ю., Чешко, І. В., Олександрів, Л. В., Кондрахова, Д. М., Пилипенко, О. В., Шабельник, Ю. М., Власенко, О. В. (2013). Магнеторезистивні та магнетооптичні властивості плівкових систем із можливим спін-залежним розсіянням електронів. Успехи фізики металлов, 14, 229–257 (Protsenko, I. Yu., Cheshko, I. V., Odnodvoret, L. V., Kondrakhova, D. M., Pylypenko, O. V., Shabelnyk, Yu. M., Vlasenko, O. V. (2013). Magnetoresistive and magnetoprotective properties of film systems with possible spin-dependent scattering of electrons. Advances in the physics of metals, 14, 229–257).
3. Завражна, О. М.. Методика формування у студентів знань про стан сучасної фізики та нанотехнології [Текст] / О. Завражна, Л. Олександрів, О. Пасько, А. Салтикова // Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології : науковий журнал / Міністерство освіти і науки України, Сумський державний педагогічний університет імені А. С. Макаренка ; редкол.: А. А. Сбруєва, М. А. Бойченко, О. Є. Антонова [та ін.]. – Суми : Вид-во СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2018. – № 1 (75). – С. 196–208.
4. Баранов, Д. А., Губин, С. П. (2009). Магнитные наночастицы: достижения и проблемы химического синтеза. Радиоэлектроника, наносистемы, информационные технологии, 1, 129–147 (Baranov, D. A., Hubin, S. P. (2009). Magnetic nanoparticles: achievements and problems of chemical synthesis. Radio electronics, nanosystems, information technology, 1, 129–147).
5. Губин, С. П., Кокшаров, Ю. А., Хомутов, Г. Б., Юрков, Г. Ю., (2005).

- Магнитные наночастицы: методы получения, строение и свойства. Успехи химии, 74, 539–574 (Hubin, S. P., Koksharov, Yu. A., Khomutov, N. B., Yurkov, N. Yu. Magnetic nanoparticles: preparation, structure and properties. Chemistry successes, 74, 539–574).
6. Елецкий, А. В., Смирнов, Б. М. (1995). Фуллерены и структуры углерода. Успехи физических наук, 9, 977–1009 (Yeletskii, A. V., Smirnov, B. M. (1995). Fullerenes and carbon structures. Successes physical sciences, 9, 977–1009).
 7. Климов, В. В. (2008). Наноплазмоника. Успехи физических наук, 178, 875–880 (Klimov, V. V. (2008). Nanoplasmonics. Successes of physical sciences, 178, 875–880).
 8. Попов, А. М. (2009). Вычислительные нанотехнологии: учебное пособие. М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ им. М. В. Ломоносова; МАКС Пресс (Popov, A. M. (2009). Computational nanotechnology: a study guide. M.: The publishing department of the Faculty of Computer Science of the Moscow State University named after M. V. Lomonosov; MAX Press).
 9. Троянчук, И. О., Бушинский, М. В., Добрянский, В. М., Никитин, А. В., Лобановский, Л. С., Еременко, В. В., Сиренко, В. А. (2013). Условие большого магниторезистивного эффекта в кобальтитах со структурой перовскита. Физика низких температур, 39, 1215–1220 (Troianchuk, I. O., Bushynskii, M. V., Dobrianskii, V. M., Nikitin, A. V., Lobanovskii, L. S., Yeremenko, V. V., Sirenko, V. A. (2013). The condition of a large magnetoresistive effect in cobaltites with a perovskite structure. Physics of low temperatures, 39, 1215–1220).
 10. Ферт, А. (2008). Происхождение, развитие и перспективы спинтроники. Успехи физических наук, 178, 1336–1348 (Firth, A. (2008). Origin, development and prospects of spintronics. The successes of the physical sciences, 178, 1336–1348).
 11. Шахно, Е. А. (2012). Физические основы применения лазеров в медицине. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО (Shakhno, E. A. (2012). Physical

- principles of the use of lasers in medicine. St. Petersburg: NRU ITMO).
12. Lin, J., Genevet, P., Kats, M. A., Antoniou, N., Capasso, F. (2013). Nanostructured Holograms for Broadband Manipulation of Vector Beams. *Nano Letters*, 13, 4269–4274.
 13. Meng, Z., Han, Y., Wang, L. N., Xiang, J. F., He, S. G., Chen, C. F. (2015). Stepwise Motion in a Multivalent [2](3) Catenane. *Journal of the American chemical Society*, 137, 9739–9745.
 14. Oakes, L., Westover, A., Mares, J. W., Chatterjee, S., Erwin, W. R., Bardhan, R., Weiss, S. M., Pint, C. L. (2013). Surface engineered porous silicon for stable, high performance electrochemical supercapacitors. *Scientific Report*, 3. Retrieved from: <https://www.nature.com/articles/srep03020>.
 15. Prinz, V. Y. (1996). Nanoscale engineering using controllable formation of ultra-thin cracks in heterostructures. *Microelectronic Engineering*, 30, 439–442.
 16. Rozenbaum, V. M., Dekhtiar, M. L., Sheng Hsien Lin, Trakhtenberg, L. I. (2016). Photoinduced diffusion molecular transport. *The Journal of Chemical Physics*, 145, 64–110.
 17. Wang, J., Ma, H.-M., Liu, Y. (2016). Sc20C60: a volleyballene. Retrieved from: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/nr/c5nr07784b#!divAbstract>
 18. Пиотровский Л.Б. «Нанотехнология», «нанонаука» и «нанообъекты»: что значит «нано»? // «Экология и жизнь» №8, №9 2010. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431265/Nanotekhnologiya_nanonauka_i_nanoobekt_y_chno_znachit_nano.
 19. CERN OpenData Portal. – Режим доступа : <http://opendata.cern.ch/>
 20. CERN CMS Project. – Режим доступа: <http://cms-project-cmsinfo.web.cern.ch>
 21. Wiener G. J., Schmeling S. M., Hopf M. Introducing 12 year-olds to elementary particles. *Phys. Educ.* 52, 2017 – p. 044001-044008.

22. Woithe, J., Wiener, G. J., Van der Veken, F. Let's have a coffee with the Standard Model of particle physics!. *Physics Education*, 52(3), 2017 – p. 034001.