

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

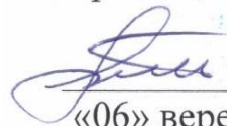
**Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор

ІМаг НАН України та МОН України

д.ф.-м.н., професор



**Олександр ТОВСТОЛИТКІН**

«06» вересня 2022 р.



**РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ (Силабус)**

**В3 ВИБРАНІ РОЗДІЛИ МАГНЕТИЗМУ**

(шифр та назва дисципліни)

для аспірантів

спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали


104 Фізика та астрономія

третього освітнього (освітньо-наукового) рівня

вищої освіти – доктора філософії

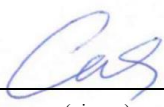
Київ – 2022

**Розробник:**

Д-р фіз.-мат. наук  Салюк Ольга Юріївна  
(підпис)

**Робочу програму узгоджено науково-методичною радою**

Протокол від 30.08.2022р. № 1

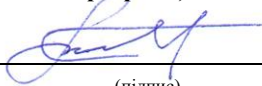
Голова науково-методичної ради  Ольга САЛЮК  
(підпис)

Робочу програму затверджено Вченою радою ІМаг НАН України та МОН України

Протокол від 06 вересня 2022 № 5-22

Голова Вченої ради  Олександр ТОВСТОЛИТКІН  
(підпис)

**Робочу програму погоджено з гарантом освітньої програми (керівником освітньої програми):** Прикладна фізика та наноматеріали 06 вересня 2022 р.  
(назва освітньої програми)

Гарант освітньої програми  Олександр ТОВСТОЛИТКІН  
(підпис)

Пролонговано Вченою радою ІМаг НАН України та МОН України:

навчальні роки пролонгації	Голова Вченої ради ІМаг НАН України та МОН України	підпис	№ протоколу, дата протоколу
20___ / 20___			
20___ / 20___			
20___ / 20___			
20___ / 20___			



# ВИБРАНІ РОЗДІЛИ МАГНЕТИЗМУ

(для здобувачів III (освітньо-наукового) рівня вищої освіти)

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Третій (освітньо-науковий)
Галузь знань	10 Природничі науки
Спеціальність	105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма	Фізика
Статус дисципліни	Нормативна (за вибором)
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	1 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	4 кредити: 120 годин (денна: 18 годин – лекції, 18 годин – практичні заняття, 84 годин – СРС)
Семестровий контроль/контрольні заходи	Залік/МКР
Розклад занять	<a href="http://ukr.imag.kiev.ua">http://ukr.imag.kiev.ua</a>
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: доктор фіз.-мат. наук, доцент Салюк Ольга Юріївна, <a href="mailto:o.y.saliuk@gmail.com">o.y.saliuk@gmail.com</a> +38(050) 3128759
Розміщення курсу	<a href="http://ukr.imag.kiev.ua">http://ukr.imag.kiev.ua</a>

### Програма навчальної дисципліни

#### Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

**Опис дисципліни.** Програму навчальної дисципліни «Вибрані розділи магнетизму» складено відповідно до освітньо-наукової програми «Прикладна фізика та наноматеріали» підготовки доктора філософії спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». В результаті вивчення дисципліни «Вибрані розділи магнетизму» аспірант повинен знати основні поняття магнетизму, актуальні напрямки її сучасного розвитку; вміти орієнтуватися в сучасних тенденціях розвитку магнетизму, перспективах практичного застосування сучасних розробок, встановлення взаємозв'язків між різними галузями.

**Мета навчальної дисципліни.** Метою навчальної вивчення дисципліни є формування у майбутніх фахівців стійких знань та розуміння основних понять, актуальних задач та тенденцій розвитку в галузі фізики магнетизму, уміння використовувати отриманні знання при подальших наукових дослідженнях, а також у своїй практичній діяльності.

**Предмет навчальної дисципліни.** Предметом вивчення даної дисципліни є основні тенденції розвитку сучасної фізики магнетизму, а, сучасні методи вивчення нанооб'єктів, низькорозмірних систем, методи

модифікації твердих тіл з метою надання їм необхідних властивостей, методи контролю і діагностики властивостей твердих тіл.

### **Програмні результати навчання:**

**ЗК 3.** Здатність розроблення та реалізації дослідницько-інноваційних проектів, включаючи проведення самостійних досліджень на професійному рівні.

**ЗК 4.** Здатність застосовувати сучасні інформаційно-комунікаційні технології у різних видах професійної діяльності.

**ЗК 5.** Здатність знаходити, обробляти й аналізувати необхідну інформацію для вирішення проблем й прийняття рішень.

**ФК 01.** Здатність проводити теоретичні й експериментальні дослідження, комбінувати та зв'язувати їх методи, інтерпретувати одержані результати з метою виявлення властивостей та характеристик досліджуваних об'єктів в галузі прикладної фізики та нанотехнологій

**ФК 02.** Здатність визначати завдання фізичного експерименту, самостійно проводити експериментальні дослідження за допомогою сучасного обладнання та вимірювальної апаратури, накопичувати та аналізувати дані, оцінювати можливі похибки та невизначеності.

**ФК 03.** Здатність осмислювати та аналізувати результати експериментальних досліджень, встановлювати зв'язок з теоретичними моделями, вирізняти із накопичених спостережень відтворювані експериментальні факти. Здатність адаптувати і узагальнювати результати сучасних досліджень в галузі прикладної фізики для вирішення наукових і практичних проблем

**ФК 05.** Здатність обирати методи та критерії оцінки дослідження відповідно до цілей та завдань наукового проекту, інтерпретувати результати наукових досліджень, проводити їх коректний аналіз та узагальнення.

**ФК 07.** Здатність розуміти та застосовувати цифрові технології та прикладні математичні пакети для розв'язування фізичних задач, аналізу результатів експериментальних досліджень, моделювання фізичних процесів та систем.

**ФК 08** Здатність проводити дослідження складних систем, їх системний та синергетичний аналіз, використовувати моделі та методи моделювання в наукових дослідженнях.

### *Результати навчання:*

**ПРН 1.** Системні знання у галузі фізики та інших природничих наук, включаючи оволодіння методами наукового дослідження при здійсненні професійної діяльності.

**ПРН 2.** Системні знання поглибленого рівня в галузі прикладної фізики, наукомістких технологій, нових речовин і матеріалів, методів дослідження їх властивостей, зокрема, знання сучасних досягнень та інноваційних прикладних рішень, в тому числі на стику різних галузей науки.

**ПРН 3.** Знання методик проведення теоретичних та експериментальних досліджень, основних принципів системного та синергетичного аналізу, розуміння методів моделювання та фізичних моделей в прикладній фізиці.

**ПРН 6.** Вміння орієнтуватися в наукових проблемах у професійній сфері, знаходити оптимальні шляхи їх розв'язання.

**ПРН 7.** Вміння критично аналізувати, оцінювати і синтезувати нові складні ідеї, які заслуговують на рецензовану публікацію на національному або міжнародному рівні.

**ПРН 8.** Вміння обирати теоретичні й експериментальні методи дослідження, відповідні методи системного і синергетичного аналізу, застосовувати моделі та методи моделювання та інноваційні підходи для розв'язання складних завдань і проблем в науково-дослідній та/або інноваційних сферах.

**ПРН 10.** Вміння збирати та інтерпретувати наукову та фахову інформацію, з використанням сучасних інформаційно-комунікаційних технологій та пошукових систем.

**ПРН 13.** Вміння формулювати свої професійні висновки, особисті результати і досягнення та розумно їх обґрунтовувати для фахової та не фахової аудиторії.

**ПРН 18.** Уміти використовувати сучасні інформаційні та комунікативні технології при спілкуванні, обміні інформацією, зборі, аналізі, обробці, інтерпретації джерел.

### **Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

**Пререквізити.** Передумовою для вивчення дисципліни є наявність ступеня магістра фізики. Дисципліна базується на знаннях фізики твердого тіла, фізики напівпровідників, діелектриків, сегнетоелектриків, металів, магнетиків, методів експериментальних досліджень, вищої математики та методів математичного моделювання, що викладаються під час навчання на 1 – 4 курсах та в магістратурі. Необхідним також є базовий рівень володіння англійською мовою.

**Постреквізити.** Навчальна дисципліна «Вибрані розділи магнетизму» є однією з основ формування наукової складової структурно-логічної схеми освітньої програми. Компетентності, знання, уміння та досвід, отримані в процесі вивчення дисципліни «Вибрані розділи магнетизму» використовуються при засвоєнні освітніх компонентів «Фазові переходи та критичні явища» та «Методи експериментальної фізики» і є необхідними для якісного виконання наукових досліджень за темою дисертації.

### **Зміст навчальної дисципліни**

На вивчення навчальної дисципліни відводиться 120 годин/ 4 кредити ECTS.

Рекомендований розподіл навчального часу

Семестр	Всього (кредитів/ годин)	Розподіл за видами занять (годин)			СРС (годин)	Модульні контрольні роботи (кількість)	Індивідуальні завдання (вид)	Семестровий контроль (вид)
		Лекції	Практичні	Лабораторні				
2	4/120	18	18	-	84	1	–	залік

Дисципліна «Вибрані розділи магнетизму» включає наступні теми:

Тема 1. Типи магнітного порядку.

Тема 2. Феноменологічний опис магнетиків.

Тема 3. Доменні структури на мікро- і нано- рівнях.

Тема 4. Спінова динаміка ферромагнетиків.

Тема 5. Антиферромагнітна спінова динаміка.

Тема 6. Надшвидка спінова динаміка і її реалізація.

### **Навчальні матеріали та ресурси**

#### **Базова література.**

1. *Mattis DC (1981) The Theory of Magnetism I, Springer-V. Berlin Heidelberg.*
2. *Akhiezer AI, Bar'yakhtar VG, Peletminskii SV (1968) Spin waves, North-Holl. Amsterdam*
3. A. V. Kimel, B.A. Ivanov, R.V. Pisarev, P.A. Usachev, A. Kirilyuk, and Th. Rasing, Inertia-driven Spin Switching in antiferromagnets, *Nature Physics* **5**, 570 - 574 (2009).
4. J. H. Mentink, J. Hellsvik, D. V. Afanasiev, B. A. Ivanov, A. Kirilyuk, A. V. Kimel, O. Eriksson, M. I. Katsnelson, and Th. Rasing, Ultrafast spin dynamics in multi-sublattice magnets, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 057202 (2012).

5. R. Khymyn, I. Lisenkov, V. Tyberkevych, B.A. Ivanov and A. Slavin, Antiferromagnetic THz-frequency Josephson-like Oscillator Driven by Spin Current, *Sci. Rep.* **7**, 43705 (2017).
6. T. Satoh, R. Iida, T. Higuchi, Y. Fujii, A. Koreeda, H. Ueda, T. Shimura, K. Kuroda, V. I. Butrim & B. A. Ivanov, Excitation of coupled spin-orbit dynamics in cobalt oxide by femtosecond laser pulses, *Nature Commun.* **8**, 638 (2017)
7. J.R. Hortensius, D. Afanasiev, M. Matthiesen, R. Leenders, R. Citro, A.V. Kimel, R.V. Mikhaylovskiy, B.A. Ivanov, and A.D. Caviglia, Coherent spin-wave transport in an antiferromagnet, *Nature Phys.* **17**, Issue: 9, 1001-1006 (SEP 2021).
8. E. G. Galkina, B. A. Ivanov, Dynamical solitons in antiferromagnets (Review article), *Low Temp. Phys.* **44**, 618-633 (2018).
9. B. A. Ivanov, Ultrafast spin dynamics and spintronics for ferrimagnets close to the spin compensation point (Review), *Low Temperature Physics* **45**, 935–963 (2019)

### Допоміжна література.

10. Вонсовский С.В. *Магнетизм*. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
11. Ивановский В.А., Чеорникова Л.А. *Физика магнитных явлений. Семинары*. – М.: Изд. Моск. Унив., 1981. – 288 с.
12. Уайт Р.М. *Квантовая теория магнетизма*. – М.: Мир, 1972. – 308 с.
13. А.М. Косевич, Б.А. Иванов, А.С. Ковалев. Нелинейные волны намагниченности. Динамические и топологические солитоны. Киев, 1983, 189 с.
14. В.Г. Барьяхтар, Б.А. Иванов, М.В. Четкин. Динамика доменных границ в слабых ферромагнетиках. *УФН*, т.146, с.417 (1985).
15. Б.А. Иванов, А.К. Колежук. Солитоны в низкоразмерных классических антиферромагнетиках (обзор). *ФНТ*, т.21, 355 (1995).
16. Б.А. Иванов, Спиновая динамика антиферромагнетиков под действием фемтосекундных лазерных импульсов (обзор), *ФНТ* **40**, № 2, с. 119–138 (2014)
17. В.Г. Барьяхтар, Б.А. Иванов. *Магнетизм- что это?* Киев, Наукова думка, 1983, 205с. (Engl. Translation: V.G. Bar'yakhtar and B.A. Ivanov. *Modern magnetism. A primer*. Moskva, Mir, 1985).
18. В.Г. Барьяхтар, Б.А. Иванов. *В мире магнитных доменов*. Киев, Наукова думка, 1986, 158 с.

## Навчальний контент

### Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

#### Лекційні заняття.

№	Назва теми лекції та перелік основних питань
1	Лекція 1. Типи магнітного порядку. Магнетики і сегнетоелектрики: порівняльний аналіз. Обмінний гамільтоніан. Феромагнетики, антиферомагнетики та ферімагнетики. Підрешітки. [1-4,10].
2	Лекція 2. Типи магнітного порядку. Особливості антиферомагнетиків, які не притаманні феромагнетикам: фрустровані антиферомагнетики, спінові топологічні дефекти (дисклінації). Антиферомагнетизм в нанорозмірних частинках - феритин, магнітні молекули «залізні кільця». [1,2,10,17].
3	Лекція 3. Феноменологічний опис магнетиків. Феноменологічна теорія феромагнетиків і антиферомагнетиків. Магнітна симетрія для різних магнетиків. Однорідна і неоднорідна обмінна взаємодія, магнітна анізотропія. Взаємодія

	Дзялошинського-Морія та «слабий феромагнетизм» антиферомагнетиків. [1,2,11,17].
4	Лекція 4. Доменні структури на мікро- і нано- рівнях. Магнітна дипольна взаємодія. Причини появи рівноважних доменів у магнітних зразках. Структура доменних стінок. Магнітні неоднорідності в масштабах нанометрів: магнітні вихори. [1,2,10,13-18].
5	Лекція 5. Спінова динаміка феромагнетиків. Рівняння Ландау-Лифшиця для феромагнетиків. Магнони, лінійна і нелінійна динаміка. Спіновий струм, «антизатухання». Спіновий ефект Хола. Спінтроніка. Магنونіка. [3-9,14,15].
6	Лекція 6. Антиферомагнітна спінова динаміка. Рівняння сигма-моделі - «антиферомагнітна динаміка спінів» для антиферомагнетиків і ферімагнетиків. «Обмінне підсилення» частот і швидкостей спінових збуджень. Динаміка доменних стінок і вихорів у антиферомагнетиках. [3-9,16].
7	Лекція 7. Надшвидка спінова динаміка і її реалізація. Магнітна пам'ять: як найшвидше перевернути магнітний момент частинки магнетика. Збудження спінової динаміки фемтосекундними лазерними імпульсами. Антиферомагнітна спінтроніка: перехід в діапазон терагерц. [1,3,4].
8	Лекція 8 Надшвидка спінова динаміка і її реалізація. Спін-орбитальна динаміка. Надшвидка «обмінна» позовжня динаміка спінів у ферімагнетиках. [9,10,11].

### Практичні заняття

№	Назва теми заняття та перелік основних питань
1	Типи магнітного порядку. Магнетики і сегнетоелектрики: порівняльний аналіз. Обмінний гамільтоніан. Феромагнетики, антиферомагнетики та ферімагнетики. Підрешітки. [1-4,10].
2	Типи магнітного порядку. Особливості антиферомагнетиків, які не притаманні феромагнетикам: фрустровані антиферомагнетики, спінові топологічні дефекти (дисклінації). Антиферомагнетизм в нанорозмірних частинках - феритин, магнітні молекули «залізні кільця». [1,2,10,17].
3	Феноменологічний опис магнетиків. Феноменологічна теорія феромагнетиків і антиферомагнетиків. Магнітна симетрія для різних магнетиків. Однорідна і неоднорідна обмінна взаємодія, магнітна анізотропія. Взаємодія Дзялошинського-Морія та «слабий феромагнетизм» антиферомагнетиків. [1,2,11,17].
4	Доменні структури на мікро- і нано- рівнях. Магнітна дипольна взаємодія. Причини появи рівноважних доменів у магнітних зразках. Структура доменних стінок. Магнітні неоднорідності в масштабах нанометрів: магнітні вихори. [1,2,10,13-18].
5	Спінова динаміка феромагнетиків. Рівняння Ландау-Лифшиця для феромагнетиків. Магнони, лінійна і нелінійна динаміка. Спіновий струм, «антизатухання». Спіновий ефект Хола. Спінтроніка. Магنونіка. [3-9,14,15].
6	Антиферомагнітна спінова динаміка. Рівняння сигма-моделі - «антиферомагнітна динаміка спінів» для антиферомагнетиків і ферімагнетиків. «Обмінне підсилення» частот і швидкостей спінових збуджень. Динаміка доменних стінок і вихорів у антиферомагнетиках. [3-9,16].
7	Надшвидка спінова динаміка і її реалізація. Магнітна пам'ять: як найшвидше перевернути магнітний момент частинки магнетика. Збудження спінової динаміки фемтосекундними лазерними імпульсами. Антиферомагнітна спінтроніка: перехід в діапазон терагерц. [1,3,4].
8	Надшвидка спінова динаміка і її реалізація. Спін-орбитальна динаміка. Надшвидка «обмінна» позовжня динаміка спінів у ферімагнетиках. [9,10,11].

## Самостійна робота аспіранта

З метою чіткої організації самостійної роботи студентів і задля підвищення якості засвоєння навчального матеріалу та вироблення ґрунтовних навичок наукової діяльності пропонуються індивідуальні завдання у формі самостійної підготовки конспектів та рефератів із вибраних тем. Самостійна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії є основним засобом засвоєння навчального матеріалу у вільний від навчальних занять час і включає:

№ з/п	Вид самостійної роботи	Кількість годин СРС
1	Підготовка до аудиторних занять	50
2	Підготовка до МКР	16
3	Підготовка до заліку	18

## Політика та контроль

### Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які викладач ставить перед аспірантом:

- правила відвідування занять (згідно розкладу і згідно загально-інститутського розпорядку);
- правила поведінки на заняттях (активність на практичних заняттях є обов'язковою, бали за активність на практичних заняттях не ставляться, відключення телефонів є обов'язковим);
- правила призначення заохочувальних та штрафних балів (штрафні бали не призначаються, заохочувальні бали призначаються суворо згідно підрозділу 8 цього силабусу);
- політика дедлайнів та перескладань (згідно загально-інститутського розпорядку);
- політика щодо академічної доброчесності (згідно загально-інститутського розпорядку);

### Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (РСО)

Поточний контроль: опитування за темою заняття, МКР.

Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу.

Семестрова атестація проводиться у вигляді екзамену. Для оцінювання результатів навчання застосовується 100-бальна рейтингова система і інститутська шкала.

Умови допуску до семестрового контролю: відсутні.

Рейтинг аспіранта з дисципліни складається з балів, які він отримує:

- 1) за роботу на аудиторних заняттях;
- 2) за модульну контрольну роботу (МКР);
- 3) за відповідь на заліку.

Система рейтингових балів

1) Аудиторні заняття. Ваговий коефіцієнт дорівнює 4. Максимальна кількість балів, які може отримати аспірант на лабораторних заняттях становить  $12 \times 4 = 48$  балів. Нарахування балів на одному практичному занятті:

- відмінні відповіді 4 балів;
- дуже добрі, добрі відповіді 3,2 балів;
- задовільні, достатні відповіді 1 бал.

2) Модульна контрольна робота (МКР). Ваговий коефіцієнт дорівнює 12. Максимальна кількість балів за контрольну роботу становить  $1 \times 12 = 12$  балів. Нарахування балів за контрольну роботу:

- «відмінно», повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) 11-12 балів;
- «добре», достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації або незначні неточності) 8-10 балів;
- «задовільно», неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації та деякі помилки) 6-7 балів;
- «незадовільно», незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) 0.

3). Залік. Критерії оцінювання. Завдання містить два теоретичні питання, кожне з яких оцінюється у 20 балів. Всього  $2 \times 20 = 40$  балів.

Нарахування балів за відповідь на заліку:



- повна відповідь (не менше 90 % потрібної інформації) 36-40 балів;
- достатньо повна відповідь (не менше 75 % потрібної інформації) 30-35 балів;
- неповна відповідь (не менше 60 % потрібної інформації) 24-29 балів;
- незадовільна відповідь (менше 60 % потрібної інформації) 0.

Якщо аспірант протягом семестру набрав понад 60 балів, він може отримати залік автоматом. Для виставлення фінальних оцінок рейтинг переводиться у оцінки відповідно до таблиці.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за інститутською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
90-100	Відмінно
75-89	Добре
60-74	Задовільно
Менше 60	Незадовільно
Не виконано інші умови допуску до заліку	Не допущено

### **Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)**

Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль:

1. Магнетики і сегнетоелектрики: порівняльний аналіз.
2. Обмінний гамільтоніан.
3. Феромагнетики, антиферомагнетики та ферімагнетики. Підрешітки.
4. Особливості антиферомагнетиків, які не притаманні феромагнетикам.
5. Антиферомагнетизм в нанорозмірних частинках - феритин, магнітні молекули «залізні кільця».
6. Феноменологічна теорія феромагнетиків і антиферомагнетиків.
7. Магнітна симетрія для різних магнетиків.
8. Однорідна і неоднорідна обмінна взаємодія, магнітна анізотропія.
9. Взаємодія Дзялошинського-Морія та «слабий феромагнетизм» антиферомагнетиків.
10. Магнітна дипольна взаємодія. Причини появи рівноважних доменів у магнітних зразках. Структура доменних стінок.
11. Магнітні неоднорідності в масштабах нанометрів: магнітні вихори.
12. Рівняння Ландау-Лифшиця для феромагнетиків.
13. Магнони, лінійна і нелінійна динаміка.
14. Спіновий струм, «антизатухання».
15. Спіновий ефект Хола.
16. Рівняння сигма-моделі - «антиферомагнітна динаміка спінів» для антиферомагнетиків і ферімагнетиків.
17. «Обмінне підсилення» частот і швидкостей спінових збуджень.
18. Динаміка доменних стінок і вихорів у антиферомагнетиках.
19. Збудження спінової динаміки фемтосекундними лазерними імпульсами.
20. Антиферомагнітна спітроніка: перехід в діапазон терагерц.
21. Спін-орбитальна динаміка. Надшвидка «обмінна» поздовжня динаміка спінів у ферімагнетиках.