



Керування властивостями матеріалів в екстремальних умовах

ЦИКЛ РОБІТ НА ЗДОБУТТЯ ДЕРЖАВНОЇ ПРЕМІЇ УКРАЇНИ В
ГАЛУЗІ НАУКИ ТА ТЕХНІКИ В 2020 р.
ВИСУНУТИЙ ВЧЕНОЮ РАДОЮ
ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА 30.10.2020р.



- **Львівський національний університет імені Івана Франка МОН України (2)**
- **Інститут фізики конденсованих систем НАН України, м. Львів (2)**
- **Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Інститут теоретичної фізики ім.О.І.Ахієзера (3)**
- **Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України (1)**

ПУБЛІКАЦІЇ

- До циклу робіт включено **185** публікація, серед яких **7** монографій, **4** глави у колективних монографіях, **2** –огляди, **174** статті (**164** – в англomовних журналах з імпакт – фактором), а також **2** науково-популярні роботи.

- ***Загальна кількість посилань на публікації / h-індекс циклу робіт***

Web of Science – 2026/23,

Scopus – 2130/23,

Google Scholar – 2966/27.

За тематикою циклу захищено 7 докторських та 23 кандидатських дисертацій.

УЧАСНИКИ-АВТОРИ ВІД ЛЬВОВА

- **Плевачук Юрій Олександрович, 1958р.н., д.ф.-м.н., с.н.с., начальник науково-дослідної частини (ЛНУ)**
- **Склярчук Василь Михайлович , 1959р.н., д.ф.-м.н., головний науковий співробітник (ЛНУ)**
- **Брик Тарас Михайлович , 1963р.н., д.ф.-м.н., с.н.с., заступник директора з наукової роботи (ІФКС)**
- **Козловський Михайло Павлович, 1952р.н. д.ф.-м.н., професор, головний науковий співробітник (ІФКС)**

УЧАСНИКИ-АВТОРИ ВІД ННЦ ХФТІ

- **Пелетминський Олександр Сергійович , 1975 р.н., к.ф.-м.н., с.н.с., старший науковий співробітник**
- **Слюсаренко Юрій Вікторович , 1957 р.н., д.ф.-м.н., професор, академік НАНУ, начальник відділу**
- **Сотніков Андрій Геннадійович, 1983 р.н., к.ф.-м.н., с.д., старший науковий співробітник**

УЧАСНИК-АВТОР ВІД ІМФ НАНУ

- **Рудь Олександр Дмитрович , д.ф.-м.н., 1958 р.н., професор, завідувач відділу ІМФ НАНУ**

Керування властивостями матеріалів в екстремальних умовах

Мета - опис та аналіз фазових станів, що виникають у середовищах за екстремальних умов і демонструють нові і незвичні властивості (зокрема в безпосередньому околі точок фазових перетворень), з точки зору здобуття нових знань про матеріали та можливості застосувань для створення якісно нових технологій майбутнього. Цикл робіт охоплює взаємодоповнююче дослідження різних за типом фазових перетворень у складних фізичних системах, у широких діапазонах керуючих параметрів, таких, як температура, тиск та зовнішнє поле.

Керування властивостями матеріалів в екстремальних умовах

Поєднано три основні способи пізнання фізичних явищ:

- (i) мікроскопічні теорії, де властивості речовини визначаються аналітично на основі інформації про взаємодії між частинками;
- (ii) методики першопринципного комп'ютерного моделювання, які дозволяють максимально враховувати різні типи взаємодій;
- (iii) прецизійні експериментальні дослідження в екстремальних термодинамічних умовах, проведені у вітчизняних та зарубіжних лабораторіях, що сприяє практичному використанню здобутих результатів.

Керування властивостями матеріалів в екстремальних умовах

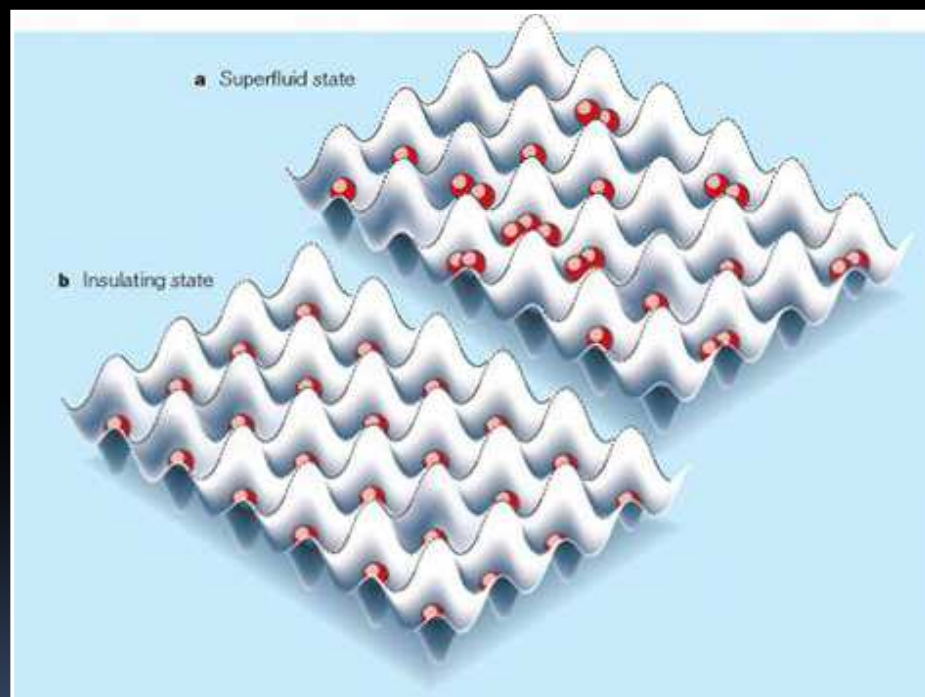
Запропоновані та реалізовані авторами методики досліджень дозволили об'єднати низку вагомих результатів як фундаментального, так і прикладного характеру, що стосуються таких об'єктів досліджень, як магнітні системи, у тому числі високоспінові, системи, складені атомами лужних металів у широких діапазонах змін температур і тиску (від ультрахолодних парів до металів) та під впливом зовнішнього електромагнітного поля, системи на основі телуру і селену за різних температур і концентрацій, тощо.

Керування властивостями матеріалів в екстремальних умовах

Дослідження відкривають перспективи застосування здобутих результатів у металургії, приладо- та машинобудуванні, космічній техніці, при створенні ряду нових композиційних матеріалів спеціального призначення: антифрикційних зносостійких, електротехнічних, магнітних; при розробці атомних лазерів, надчутливих оптичних перемикачів, пристроїв для фокусування й накопичення енергії в сонячних батареях за похмурої погоди, а також керування груповою швидкістю світла в бозе-конденсаті (аж до повної його зупинки!) за допомогою зовнішнього магнітного поля.

Теорія просторово-періодичних станів у бозе-ейнштейнівському конденсаті (БЕК)

- ✓ Передбачено й вивчено періодичні фази БЕК (аналог надплинного кристалу)



- A.S. Peletminskii, S.V. Peletminskii, and Yu.V. Slyusarenko, *Laser Phys.*, 2002, Vol. 12, No.1 p. 162-185.
- A.S. Peletminskii, S.V. Peletminskii, and Yu.V. Slyusarenko, *Theor. Math. Phys.*, 2000, Vol. 125, No.1, p. 1431-1452; doi: 10.1007/BF02551046.

Уповільнення світла

$$\epsilon^{-1}(\mathbf{k}, \omega) = 1 + \frac{g}{2\pi^2 k^2} \sum_{\alpha\beta} |\sigma_{\alpha\beta}(\mathbf{k})|^2 \frac{n_\alpha - n_\beta}{\omega - \Delta\epsilon_{\beta\alpha} + i\gamma_{\beta\alpha}}$$

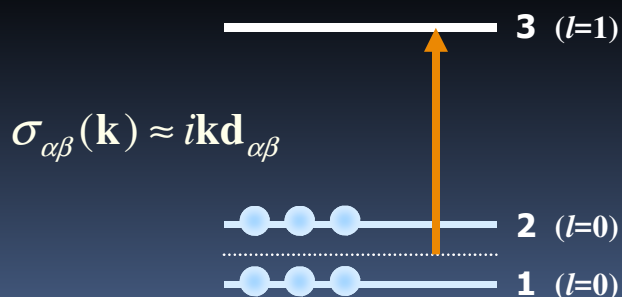
$$v_g = \frac{c}{n + \omega \cdot \partial n / \partial \omega}$$

$$n \approx \sqrt{\epsilon}$$

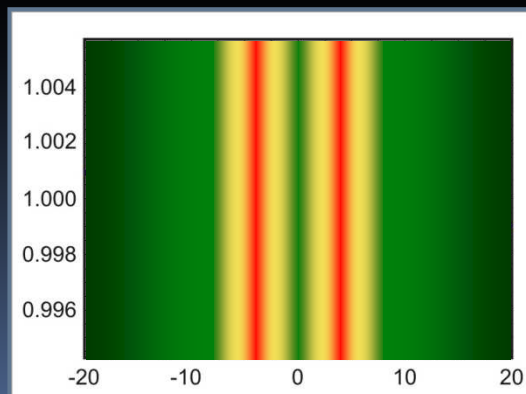
Світло може уповільнюватись в областях прозорості й сильної дисперсії (поблизу резонансів)

до $v_g \sim 300 \text{ м/с}$

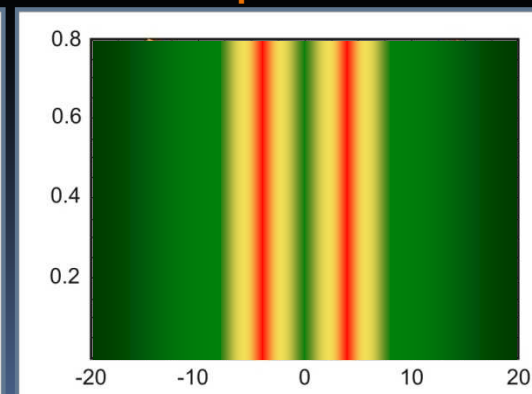
3-рівнева система



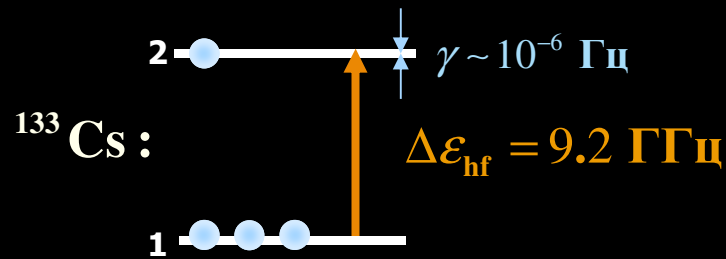
показник заломлення



інтенсивність світла, що пройшло



Уповільнення мікрохвиль



$$10^{-3} \text{ см}^{-3} \ll |n_1 - n_2| \ll 10^{16} \text{ см}^{-3}$$

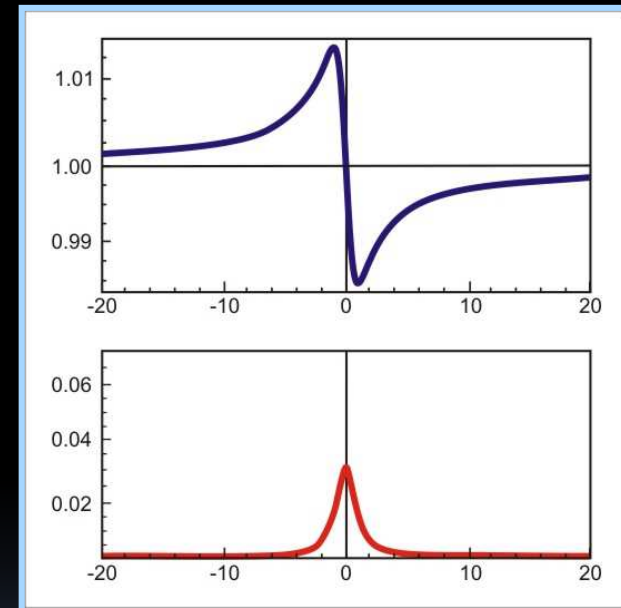
Атоми цезію у стані БЕК з густиною $n_1 = 1.3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$

Групова швидкість сигналу:

$$v_g \approx 0,06 \text{ см/сек}$$

Показник заломлення

Коефіцієнт згасання

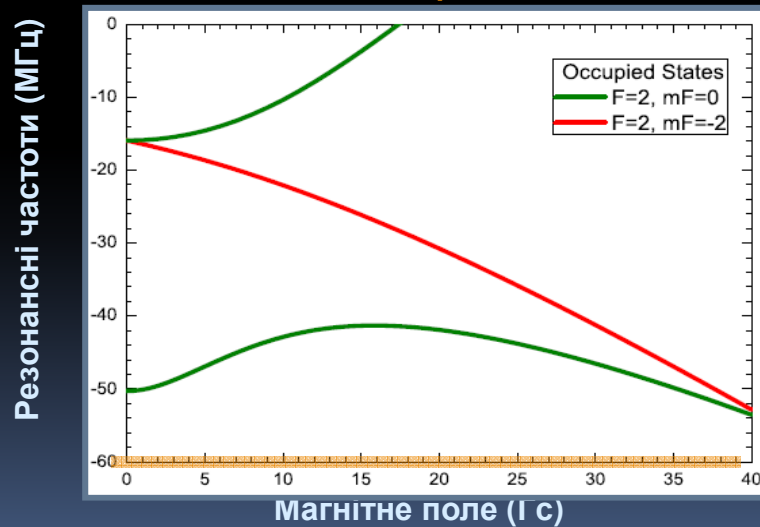
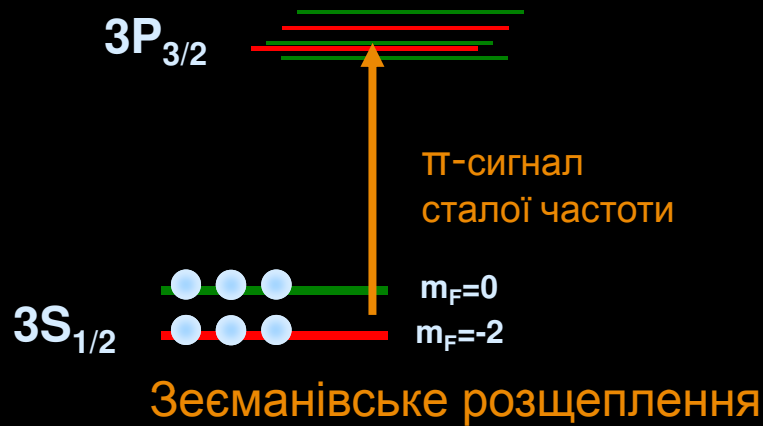


розстройка частоти (мкГц)

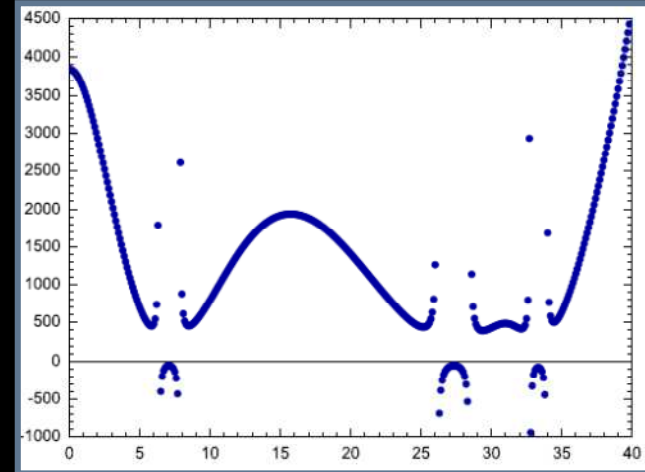
Yu.V. Slyusarenko, A.G. Sotnikov.

Journal of Low Temperature Physics 2008, V.150, N.3/4

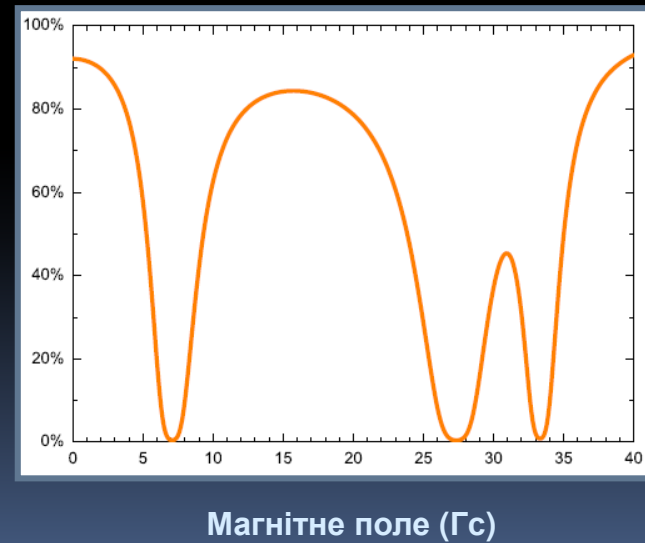
Керування швидкістю світла за допомогою магнітного поля



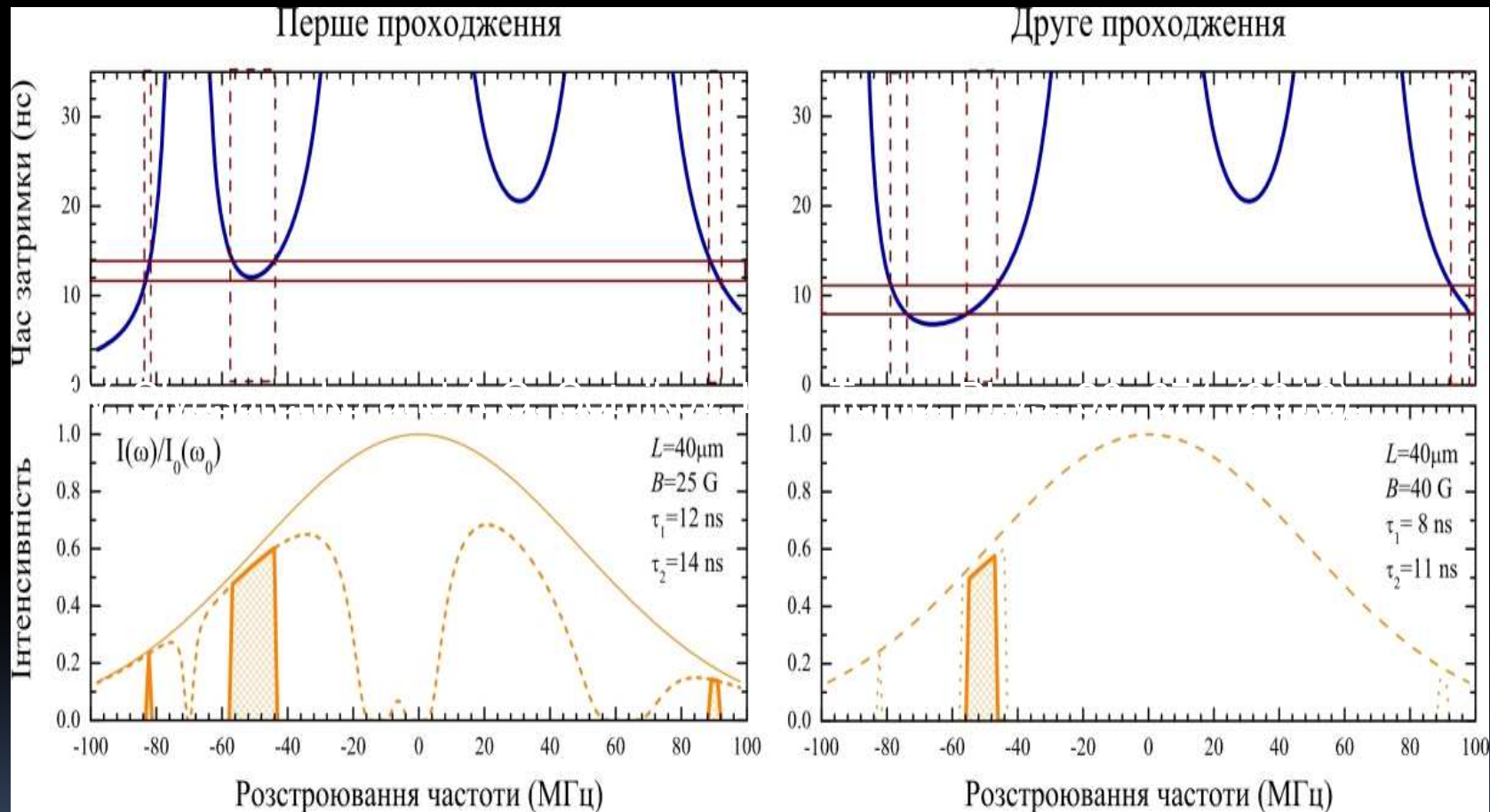
Групова швидкість (м/с)



Пропущене світло



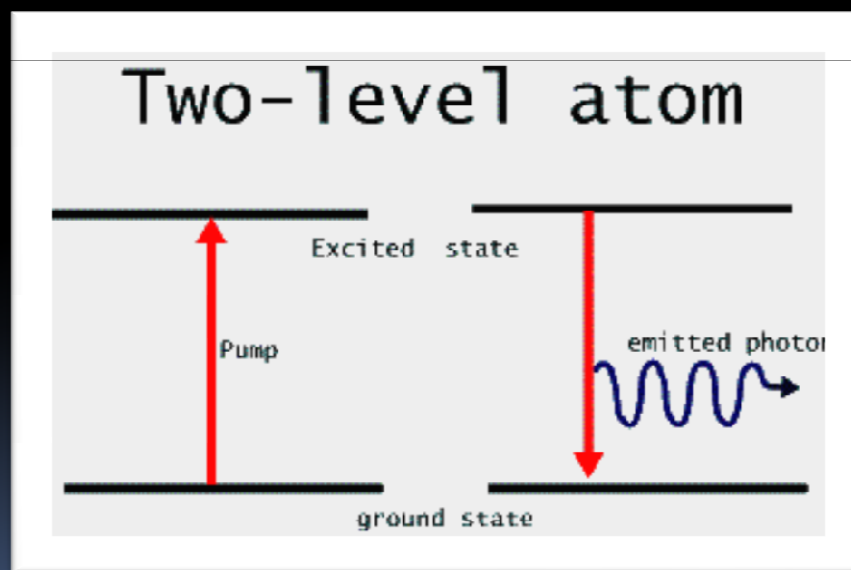
Фільтрація оптичних сигналів за допомогою БЕК атомів



Yu.V. Slyusarenko, A.G. Sotnikov, **Low Temperature Physics**, 2010, V.36 p.671

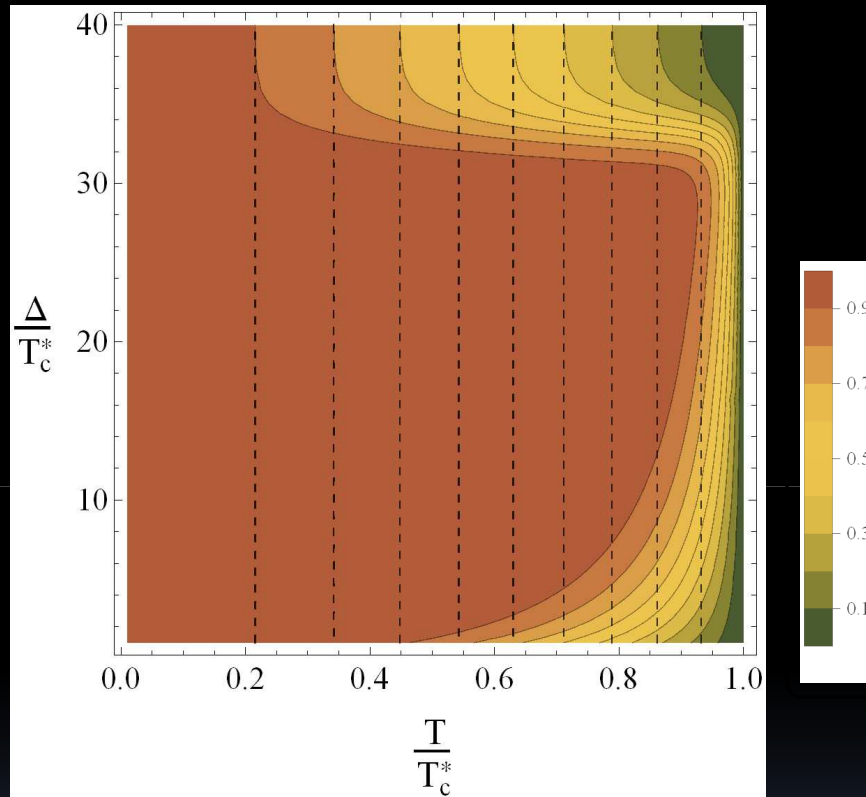
Бозе-конденсація фотонів в атомарних ідеальних газах

- Запропоновано реалізацію БЕК фотонів в ідеальному газі Фермі-або Бозе – атомів, що знаходяться у термодинамічній рівновазі з фотонами. Атоми можуть бути тільки у двох квантових станах: основному та збудженому (дворівневий атом). Фотони утримуються дзеркалами.



Yu. Slyusarenko, A. Kruchkov, Phys. Rev. A, 2013, Vol.88, No.5, 013615 (1-12)

Фракція фотонів у конденсаті



Густина атомарного БЕК

$$n_{\alpha_1}^0(T) \approx n \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^{3/2} \right\},$$

$$T_c^* \approx T_c$$

Режим
“лавинної”
конденсації

$$n_{ph}^0(T) \approx n_{ph} \left\{ 1 - \left(\frac{T}{T_c^*} \right)^{3/2} \exp \left[-\Delta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c^*} \right) \right] \right\}$$

“Зупинене світло”

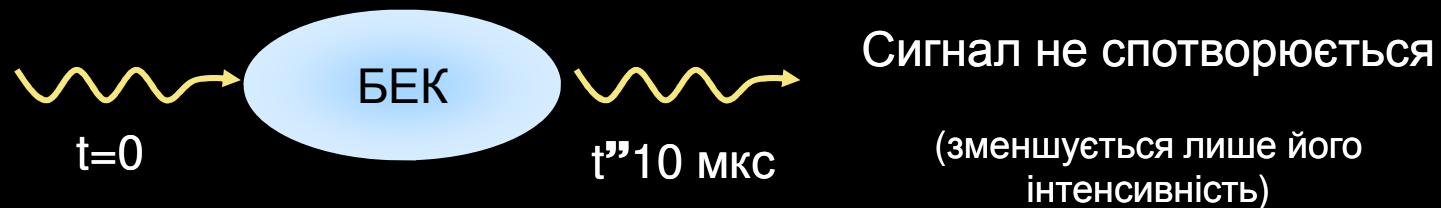
$$v_g \equiv \left(\frac{d\omega(k)}{dk} \right)_{k=0} = 0$$

Оскільки незначне пониження температури за критичне значення викликає “лавинну” конденсацію майже всіх фотонів, а групова швидкість дорівнює нулю для сконденсованих фотонів, то такий режим можна вважати “зупинкою світла”.

Передбачено режими формування **інверсного заселення** атомарних рівнів зниженням температури системи без застосування штучно індукованої прозорості.

Конденсат атомів і фотонів для “побутових потреб”

Уповільнення електромагнітних хвиль



- Нелінійна оптика: створення надчутливих оптичних перемикачів (завдяки невеликим потужностям лазерів)
- Збереження інформації (?)
- Чутливі детектори магнітних полів (групова швидкість сигналу сильно залежить від параметрів енергетичного спектру)
- Квантові комп'ютери (?)
- Фільтри електромагнітних сигналів

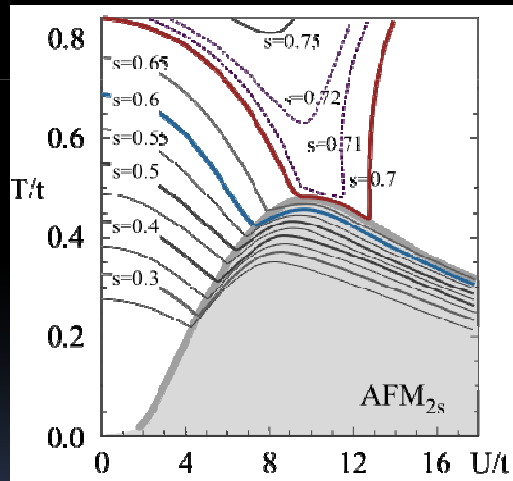
Зупинка електромагнітних хвиль

- Створення нових джерел для лазерів
- Фокусування й накопичення енергії в сонячних батареях за похмурої погоди

Квантовый магнетизм трикомпонентных фермионных газов в оптических гратках

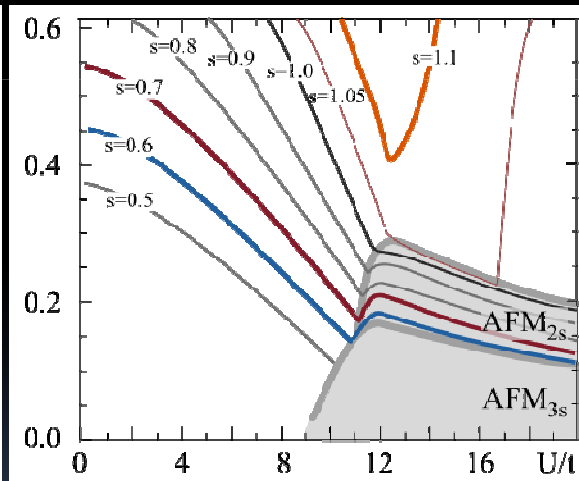
- ✓ Впервые получена фазовая диаграмма магнитных упорядоченных состояний;
- ✓ Детально исследованы термодинамические характеристики фаз и переходов;
- ✓ Встановлено важливі переваги таких сумішей для експериментального досягнення впорядкування в оптичних ґратках (більш висока ентропія).

Двокомпонентна суміш

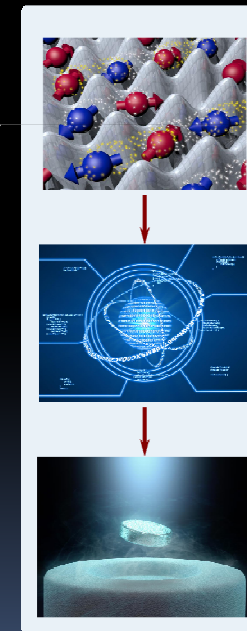


Магнетизм **недосяжний** при $S > 0.7Nk_B$ (експер.)

Трикомпонентна суміш



Магнетизм **досяжний** при $S > 0.7Nk_B$ (експер.)



Експеримент. отримання зразків

Використання у квантових комп'ютерах

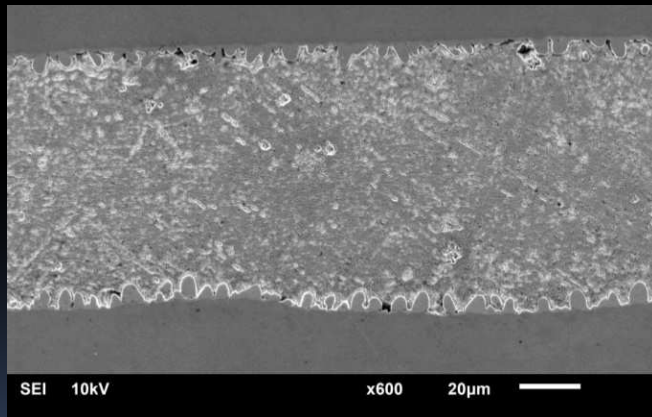
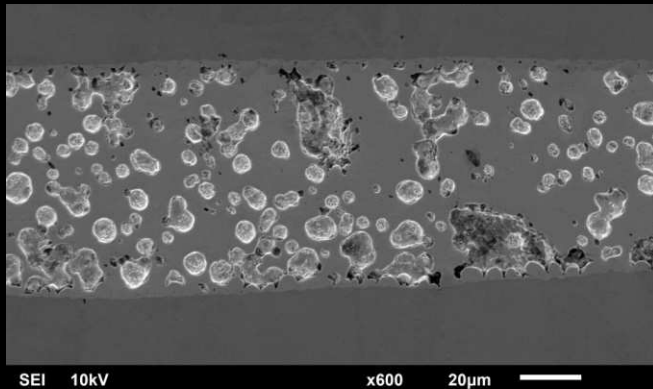
Високотемпер. надпровідність

➤ A. Sotnikov, Physical Review A 92, 023633 (2015).

Модифікація наночастинками структурно-чутливих властивостей матеріалів для створення нових безсвинцевих припоїв



Львівський
національний
університет
імені Івана Франка



Мікроструктура (SEM) паяних з'єднань сплаву SAC305 з домішками наночастинок Al_2O_3

Суть, мета розробки: Запропоновано методи та технологічні процеси імплементації наночастинок у матеріали для нових безсвинцевих припоїв на основі Sn. Отримано експериментальні зразки нанодисперсних матеріалів для припоїв на базі Sn-Co, Sn-Cu-Ag (SAC) з домішками металевих та неметалевих наночастинок для застосування в режимі поетапного паяння в різних температурних діапазонах. Наночастинки стабілізують структуру припою, що під час кристалізації зазнає суттєвих модифікацій під зовнішніми впливами (електричні і магнітні поля, температурні градієнти, швидкості охолодження, вібрації), запобігають утворенню тріщин втомлюваності та розповзанню контактів, знижують зернистість, покращують змочування поверхні.

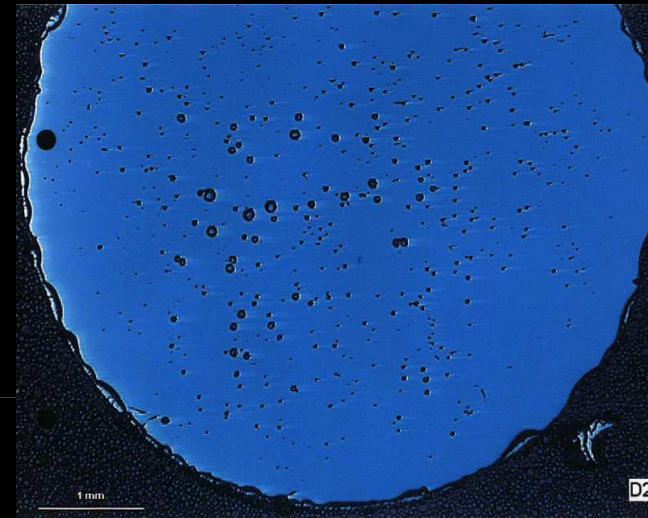
Інноваційний аспект. Удосконалено технологію отримання матеріалів для припоїв у вигляді тонких стрічок товщиною 20-30 мкм методом швидкого загартування. Форма таких стрічок є зручною для паяння широких ділянок з точно визначеними розмірами, що важливо для з'єднання композитів з металевими матрицями.

Моноотектичні сплави



Львівський
національний
університет
імені Івана Франка

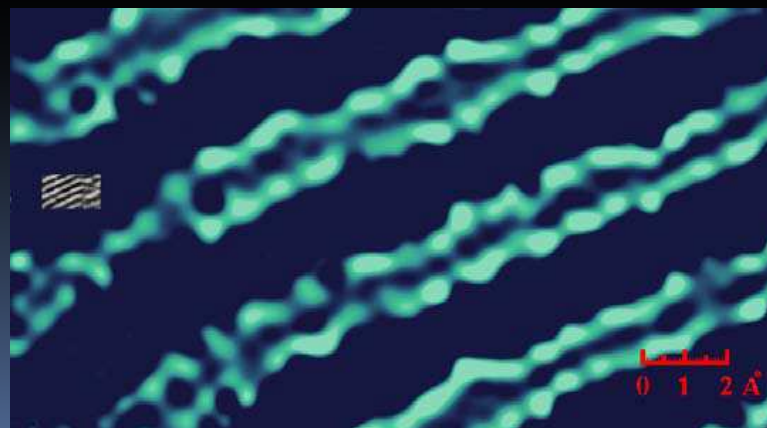
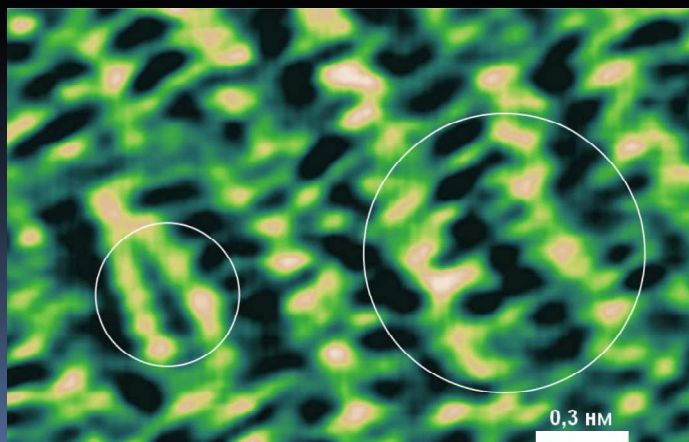
- **Практичний інтерес**
- Самозмащувальні підшипники (Cu-Sn-Pb, Al-Pb, Al-Bi, Al-Si-Pb, Al-Si-Bi)
- Композитні надпровідники (Cu-V)
- Гранульовані ГМО матеріали (гігантський магнетоопір) (Cu-Co)
- Виплавка срібла (процес Паркера) (Ag-Pb-Zn)
- Електричні вимикачі (Ni-Ag)
- **Проблеми виготовлення:**
- Швидке розділення фаз
- Неможливість отримати дрібнодисперсну суміш для практичного застосування
- Високі температури
- **Причини швидкого розшарування:**
- Седиментація, зумовлена гравітацією
- Конвекція Маранґоні



В умовах мікрогравітації вперше отримано важливу інформацію про вплив термокапілярної конвекції на процес розшарування у металевих розплавах. Досліджено формування дрібнодисперсної структури розплаву та розраховано густину потоку крапель однієї з фаз крізь матрицю іншої, а також досліджено часові і температурні залежності цього процесу.

Структура та властивості вуглецевих та композитних водневосорбційних металевих наноматеріалів, отриманих в умовах впливів високих потоків енергії механоактиваційної обробки і фазових перетворень гідрування-дегідрування

Експериментально здобуто вуглецевий наноматеріал (ВНМ), який можна описати як локальні гетероалотропні структури вуглецю, і які характеризуються одночасною присутністю в структурі матеріалу декількох типів ближнього атомного порядку без явної межфазної межі. В умовах високоенергетичної дії під час механоактиваційної обробки локальні температура і тиски в місцях контакту тіл, які мелються, наприклад, досягають значень $T \geq 10^3$ К, $P \sim 5$ ГПа за час взаємодії $\tau \sim 10^{-8}$ с. Це призводить до сильного локального спотворення кристалічної структури вихідних матеріалів аж до виникнення аморфного стану, фазових перетворень в цих місцях і враховуючи надшвидкий час взаємодії, що є аналогом надшвидкого загартування, можливість отримання і фіксації нових метастабільних станів і сполук, які не можна отримати традиційними металургійними методами.



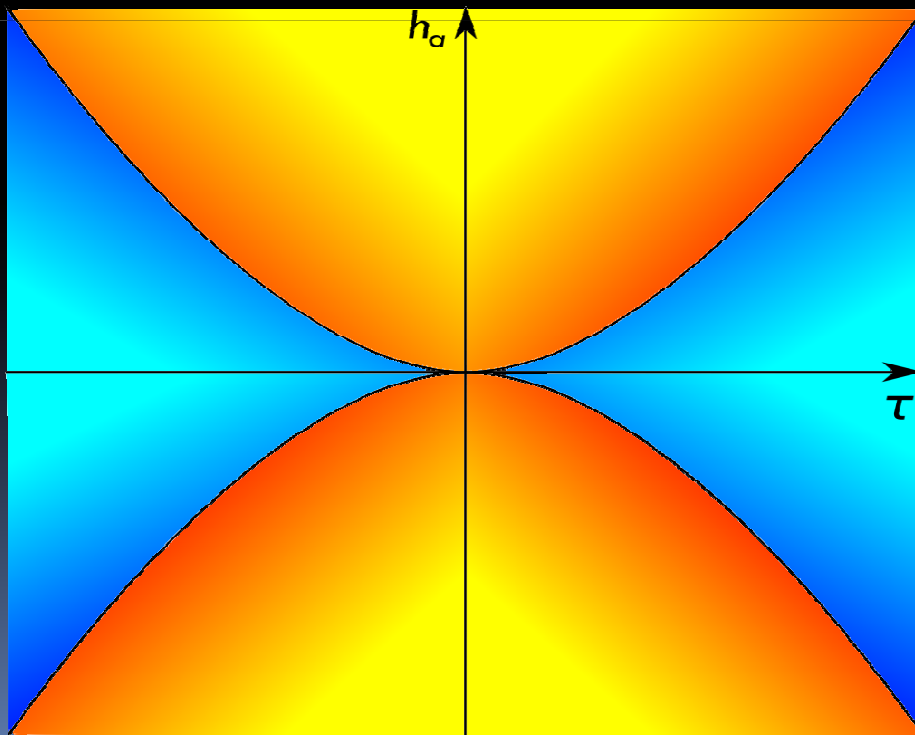
Вільна енергія моделі Ізінга в зовнішньому полі

$$F = F_a + F_s + F_h$$

$$F_a = -kTN \left(\ln chh - F_{02}h^2 + \gamma_0 + \gamma_1\tau + \gamma_2\tau^2 \right)$$

$$F_s = -kTN \gamma_s \left(h_a^2 + h_c^2 \right)^{\frac{d}{d+2}}$$

$$F_h = -kTN \left[e_0 h_a \left(h_a^2 + h_c^2 \right)^{\frac{1}{2(d+2)}} - e_2 \left(h_a^2 + h_c^2 \right)^{\frac{d}{d+2}} \right]$$



Граничне значення поля

2007).

$$h_c = \tau_a^{p_0}; p_0 = \ln E_1 / \ln E_2 = \delta\beta$$

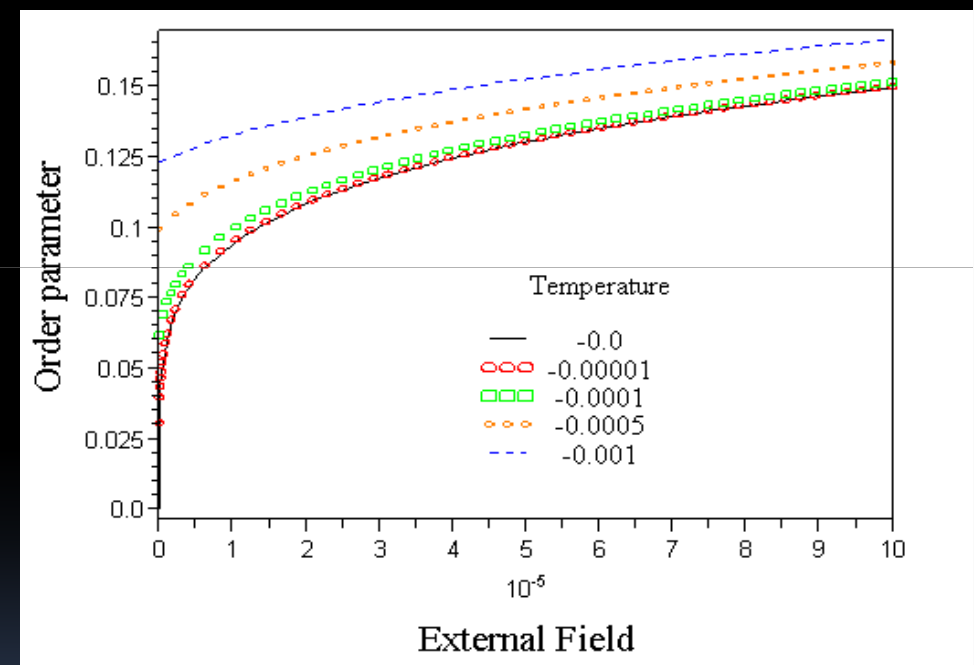
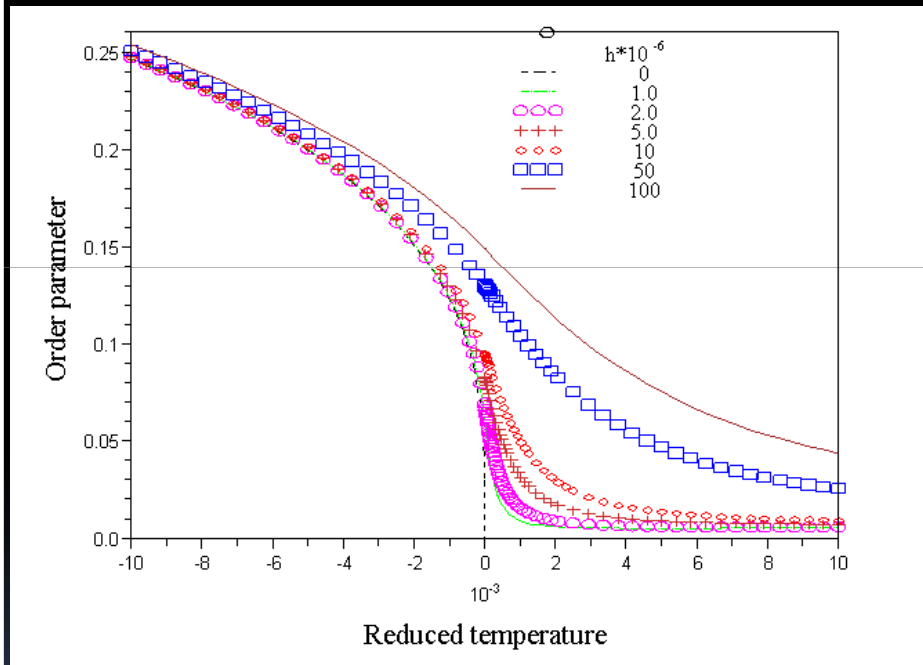
$$\tau_a = \tau \frac{C_{1k}}{f_0}; \tau = (T - T_c) / T_c$$

Температурна та польова поведінка параметра порядку

$$M = -\frac{1}{N} \left(\frac{dF}{d\mathcal{H}} \right)_T = \sigma_{00} (h_a + h_c)^{\frac{1}{\delta}}$$

- кросверна форма рівняння стану

В граничних випадках



Параметр порядку системи як функція температури (зліва) при різних значеннях поля, і як функція поля (справа) для деяких значень температури

M.Kozlovskii, R.Romanik, JML, 2012

Т.Брик: комп'ютерне моделювання твердих тіл та рідин в умовах екстремальних тисків і температур

- Здобуто аналітичні вирази для “позитивної дисперсії” звукових збуджень та щільності в дисперсії поперечних мод, що дозволило в комплексі з IXS (непружне розсіяння рентгенівських променів) експериментами і моделюванням МД запропонувати критерій поділу надкритичних флюїдів на рідинний та газовий типи динаміки
- На основі *ab initio* моделювання та з IXS експериментів встановлено існування структурного переходу в розплаві Rb при тисках ~ 12 GPa, яке проявлюється в нетипових залежностях дифузії та швидкості звуку від тиску
- На основі моделювання заліза в умовах температури і тиску ядра Землі встановлено нетпову релаксацію зсувного напруження та пояснено її за допомогою макроскопічних рівнянь динаміки
- *Ab initio* моделювання розплаву Li при високих тисках вперше показало появу екзотичних високочастотних поперечних мод, існування яких пізніше було підтверджено кількома групами для розплавів Na, Zn, Tl, Fe.

Дякую за увагу!