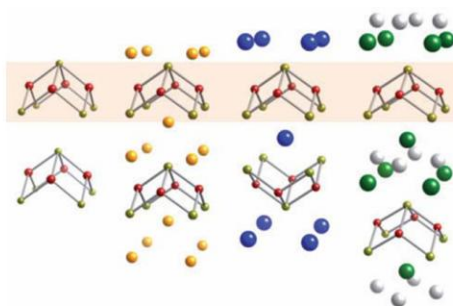
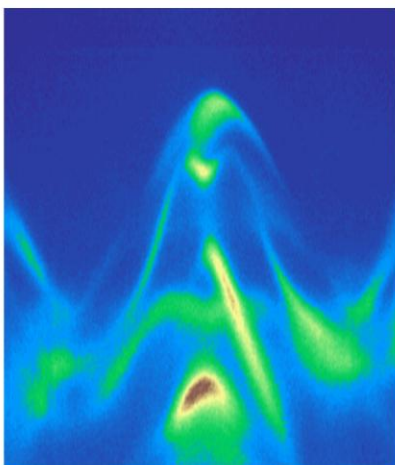


Високотемпературні надпровідники на основі заліза: дослідження та перспективи



[О. А. Кордюк](#)

Інститут металофізики
ім. Г.В. Курдюмова НАН України

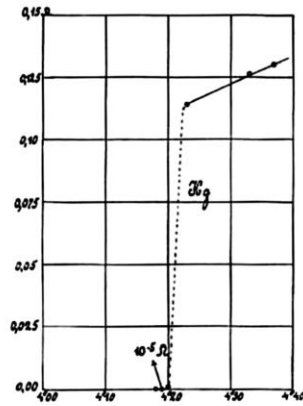
Вельмишановний Борисе Євгеновичу, вельмишановна Президіє,

темою моєї доповіді є **нові надпровідники на основі заліза**, що складають сьогодні один з найпріоритетніших напрямів у фізиці твердого тіла. Я спробую пояснити чому ця тема є такою важливою, і розповісти про наш внесок. Але почну з історії надпровідності,

[О. А. Кордюк](#)

Історія надпровідності: початок

1911



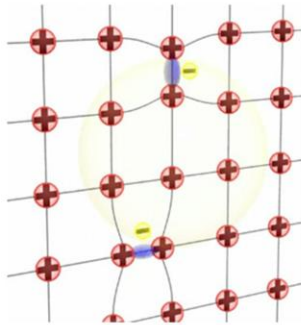
Heike Kamerlingh Onnes
1853-1926

Hg, $T_c = 4.2\text{K}$

зі згадки про Камерлінг Онеса, який 100 років тому зробив важливе відкриття, що електричний опір ртуті повністю зникає нижче 4.2 K.

Історія надпровідності: БКШ

1957



BCS

Фонони, $T_c < 25K$



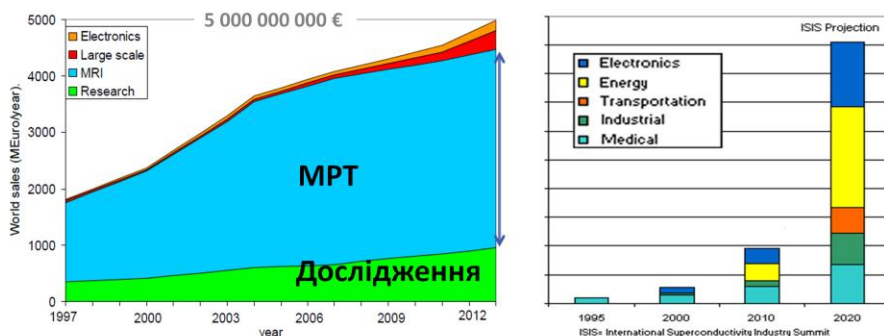
БКШ переконала більшість дослідників, що надпровідність вище 25 К є неможливою. Що, звісно, вплинуло на оцінку перспективності практичного застосування надпровідників

Знадобилося 46 років щоб зрозуміти це явище. Так звана теорія БКШ (на честь Бардіна, Купера та Шриффера), пояснювала надпровідність шляхом спарювання електронів фононами. Важливо, що ця теорія переконала більшість дослідників, що надпровідність вище 25 К є неможливою. Що, звісно, вплинуло на оцінку перспективності практичного застосування надпровідників.

Застосування надпровідності



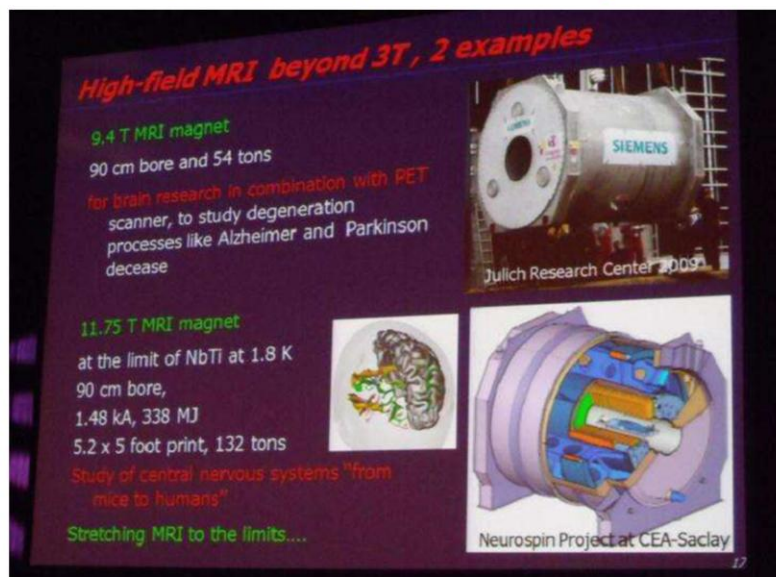
Головне - це **магніти: МРТ, ЯМР, прискорювачі і токамаки.**
 Це в основному НТНП ресурс яких вже вичерпано.



Але застосування є і їх багато. Тут показано ріст світового об'єму продажів надпровідних пристроїв (5 млрд. євро загалом і у 2020 очікується збільшення втричі). Видно що лівова частка припадає на магніти, а серед них в основному Магнітні резонансні томографи (МРТ), та магніти для досліджень (ЯМР, прискорювачі і токамаки).

Але треба сказати, що ці застосування саме досягли обмежень що накладає використання традиційних надпровідників. Зупинюся на кількох пристроях.

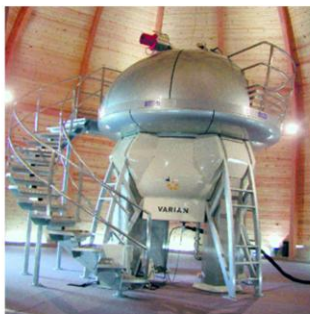
Високопольові МРТ вище 3Т для дослідження мозку



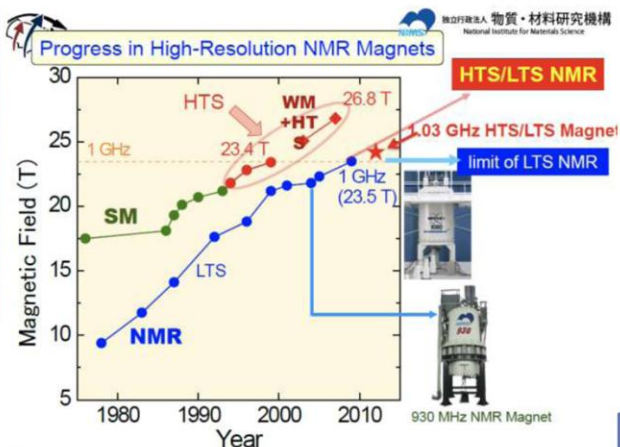
Високопольові МРТ для дослідження мозку є прикладами граничних можливостей надпровідників: нижній дає поле майже 12 Т та важить 132 тони. Поле є максимальним для NbTi при 1.8 К.

ЯМР-спектрометри

біологи готові на все щоб отримати високі поля
але потенціал НТНП - вже вичерпано

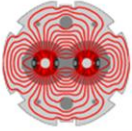


900 МГц надпровідний ЯМР
для вивчення біологічних
макромолекул в
Yokohama City University

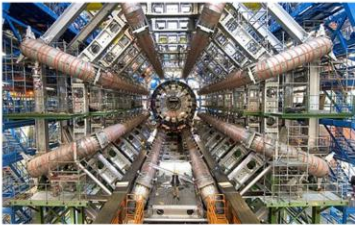


В. Высоцкий ФГЦ 2011

ЯМР спектрометри. Цей надпровідний ЯМР для вивчення біологічних макромолекул підійшов впритул до 1 ГГц межі НТНП. Подальше збільшення частоти потребує використання матеріалів з більшими критичним полем.



Великий адронний колайдер

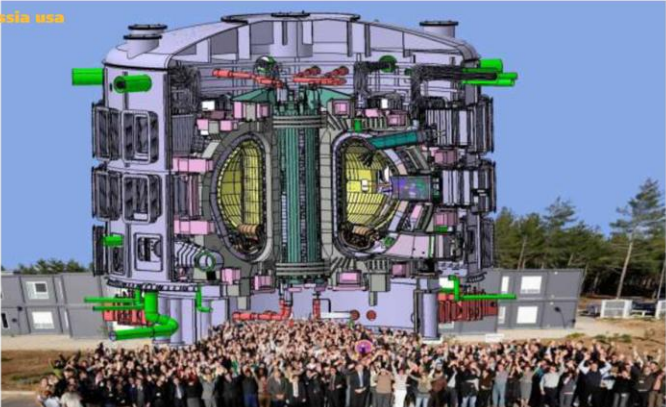


10 000 надпровідних магнітів,
1200 тон кабелю з NbTi при 1.9 K
більше (130 тон LHe)

У Великому адронному колайдері використовується 10 000 надпровідних магнітів та 1200 тон надпровідного кабелю з NbTi. Обмеження у енергії адронів визначається критичним магнітним полем.



Міжнародний експериментальний термоядерний реактор ІТЕР



T_c
 H_c
 J_c

У магнітній системі ІТЕР-а використовується
 близько 600 тон Nb_3Sn .
 І стільки ж $NbTi$



Відомо, що токамак є нерентабельним без використання надпровідників і прогрес у цьому напрямі залежить від їх критичних характеристик: температури, поля, та струму. Міжнародний експериментальний термоядерний реактор (ІТЕР), найдорожчий науковий проект всіх часів (16 млрд. євро), використовує близько 600 (шестиста) тон Nb_3Sn та стільки ж $NbTi$, і відомі проблеми з його будівництвом пов'язані насамперед з низькими магнітними характеристиками цих надпровідників.

Отже, є нагальна потреба у нових
матеріалах і, до 2008 року, певною
заміною НТНП у магнітах вважалися
ВТНП купрати



Отже, є нагальна потреба у нових матеріалах і, до 2008 року, певною заміною
НТНП у магнітах вважалися ВТНП купрати...

Історія надпровідності: ВТНП

1986



Muller & Bednorz

$(\text{LaBa})_2\text{CuO}$, $T_c = 30\text{K}$, зараз до **140K** ($\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_8$)



- Зважаючи на 25 K ліміт теорії БКШ, це відкриття виявилось вибуховим.

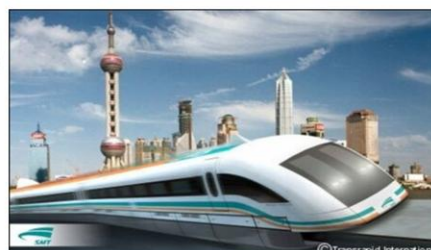
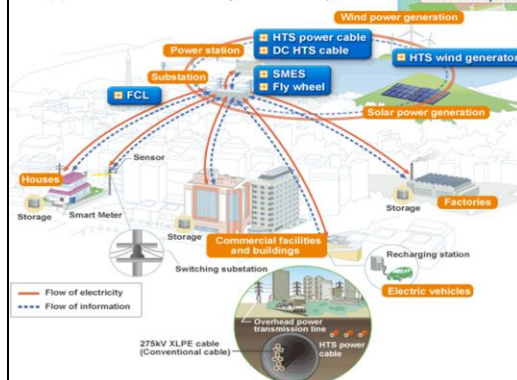
... високотемпературні надпровідники на основі міді, що були відкриті у 1986 році Беднорцем та Мюлером.

Зважаючи на 25 K ліміт теорії БКШ, це відкриття виявилось вибуховим.

Історія надпровідності: ВТНП



Засідання APS 1986 – «фізичний Вудсток»



Думаю багато хто пам'ятає той безпрецедентний ажіотаж, який воно викликало. Сесію Американського фізичного товариства, що бідбулася швидко після відкриття, назвали "Фізичним Вудстоком". Вона закінчилася після третьої ночі і в залі не було жодного вільного стоячого місця. Тоді вважалося, що вдасться досить швидко зрозуміти механізм високотемпературної надпровідності та підвищити критичну температуру до кімнатної, а також, що скоро всі міста стануть надпровідними...

Історія надпровідності: ВТНП



Відомо, що надії на швидкий прогрес у проблемі ВТНП не виправдалися.

Насправді, самі дослідження мали багато дуже важливих позитивних наслідків (наприклад, значно стимулювали розвиток експериментальних технік), але:

Загальноприйнятної теорії ВТНП, такої як БКШ, і досі нема. Чи краще сказати, що немає теорії, яка б призвела до створення нових надпровідників з вищими T_c . Виною цьому складні електронні властивості.

Також "не пішли" і багато "очевидних" застосувань ВТНП. Використання в магнітах, наприклад, заважає сильно анізотропна густина критичного струму внаслідок якої важко створити потрібну конфігурацію котушки.



Виявилося, що для розуміння механізму надпровідності потрібно спершу розплутати електронну структуру купратів, що хоча й не є такою складною як у нових залізних надпровідниках, все ж часто перевищувала ліміт складності для існуючих теорій.

Цією діаграмою я хотів проілюструвати що розуміння тісного взаємозв'язку надпровідності та електронної структури сформувалося саме завдяки проблеми ВТНП, і не в останню чергу завдяки нашим дослідженням.

Електронна структура та Фотоелектронна спектроскопія з кутовим розділенням (ARPES)

Але пер ніж перейти до результатів цих досліджень, маю пояснити що таке ця електронна структура та як ми її вимірюємо, як працює метод фотоемісійної спектроскопії з кутовим розділенням (так званий ARPES).

Фотоелектронна спектроскопія в Україні



**Петро
Григорович
Борзяк**

Ще у 50-х роках заклав
основи досліджень
фотоелектронної емісії
з напівпровідників

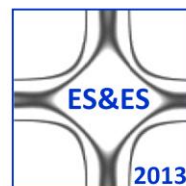


**Володимир
Володимирович
Немошкаленко**

Рентгенівська та фотоелектронна спектроскопії
та методи зонних розрахунків

**Електронна Структура та
Електронна Спектроскопія**

**до 80-річчя від дня народження
академіка В. В. Немошкаленка**



Взагалі, фотоелектронна спектроскопія в Україні має довгу історію.

Петро Григорович Борзяк ще у 50-х роках заклав основи досліджень фотоелектронної емісії з напівпровідників.

А мій вчитель, Володимир Володимирович Немошкаленко, був одним з фундаторів використання рентгенівської та фотоелектронної спектроскопій для дослідження електронної структури твердих тіл. Він також був засновником школи зонних розрахунків у нашому Інституті.

Наступного року ми плануємо організувати міжнародну конференцію присвячену саме поєднанню експерименту та розрахунків, а також 80-річчю від дня народження Володимира Володимировича.

[П. Г. Борзяк](#)

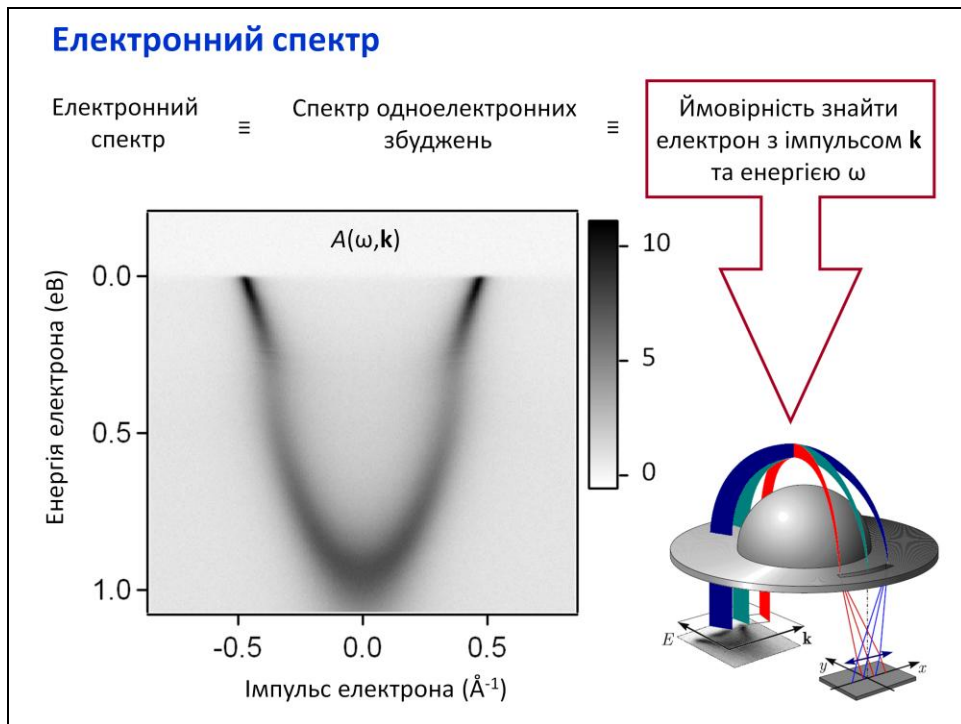
[В. В. Немошкаленко](#)



Я певен, що саме завдяки школі Немошкаленка, нам вдалося швидко досягти успіхів в освоєнні та розвитку фотоемісійної спектроскопії з кутовим розділенням (ARPES) та у дослідженні природи високотемпературної надпровідності.

Тут білим я виділив дійсних та бувших співробітників Інституту металофізики та учнів Володимира Володимировича.

Основні наші партнери по ARPESy – це група в Дрездені, але важливою є й взаємодія з іншими методами: нейтронним розсіюванням, тунельною спектроскопією та транспортом, а також, звичайно, із зонними розрахунками.

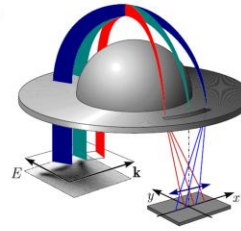
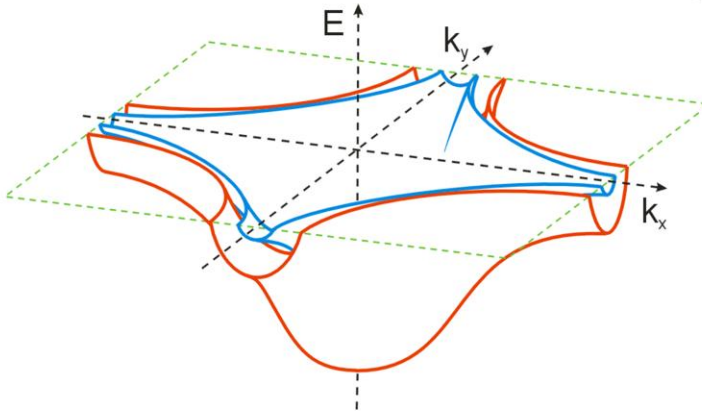


Це приклад електронного спектру що вимірюється в експерименті. За визначенням, це ймовірність знайти у кристалі електрон з певними імпульсом та енергією.

В данному випадку, це спектр ВТНП купратів вздовж одного напрямку...

Електронний спектр квазі-2D кристалів

$$\varepsilon(k_x, k_y) \Rightarrow A(\omega, k_x, k_y)$$

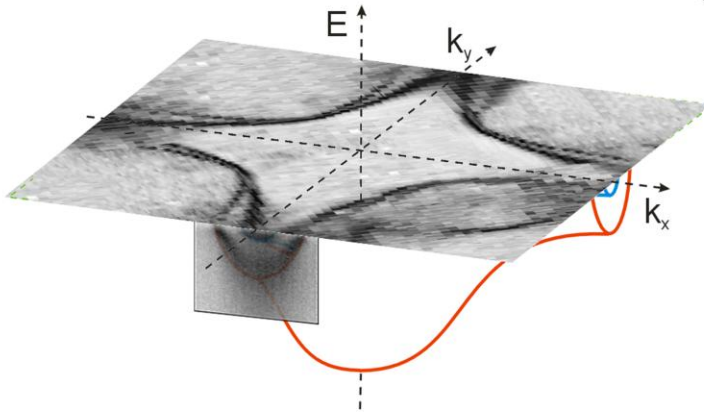


...а повний спектр є розподілом електронів у тривимірному імпульсно-енергетичному просторі.

Електронні зони, що розраховані без урахування взаємодії між електронами, мають тут вигляд поверхонь, поверхнею Фермі називають перетин цих зон на нульовій енергії, енергії Фермі.

Електронний спектр квазі-2D кристалів

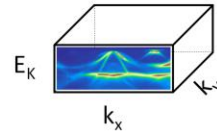
$$\varepsilon(k_x, k_y) \Rightarrow A(\omega, k_x, k_y)$$



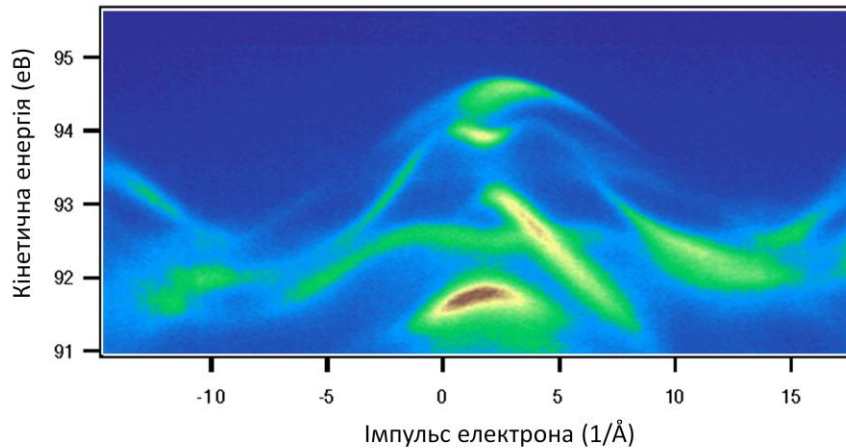
А реальні електрони є розмазаними навколо цих зон. Це – вікно аналізатора, у яке добре видно цей розподіл електронів. Для того щоб подорожувати цим вікном у оберненому просторі кристалу досить просто повернути зразок по відношенню до аналізатора.

Результатом ретельної подорожі буде повний розподіл електронів у 3D просторі, а у перетині такого розподілу рівнем нульової енергії маємо експериментальну поверхню Фермі.

Електронний спектр у імпульсно-енергетичному 3D просторі

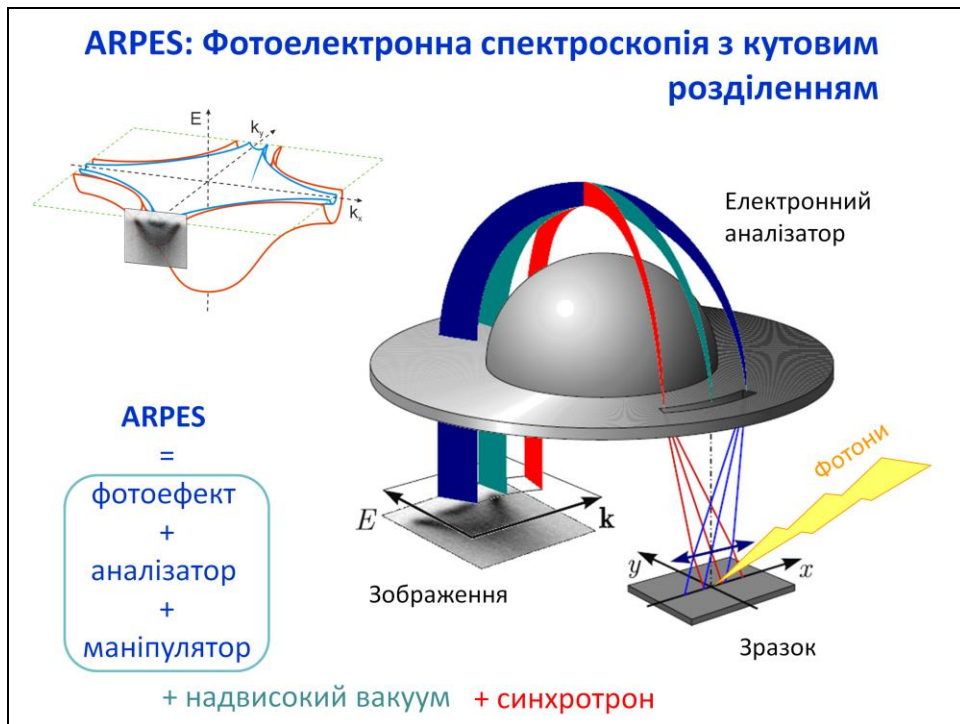


TiSe₂ - «ексітонний ізолятор»



От приклад такого розподілу, у іншій кольоровій шкалі, для TiSe₂, що є ексітонним ізолятором. Тут змінюється полярний кут зразка по відношенню до аналізатора. Видно багато зон, які можна ідентифікувати та досліджувати.

Більшість курсів з квантової фізики починається зі слів про її складність для розуміння через брак повсякденного досвіду. Так от, даний метод дає такі об'єми інформації, що тепер, думаю, цього сказати неможливо.

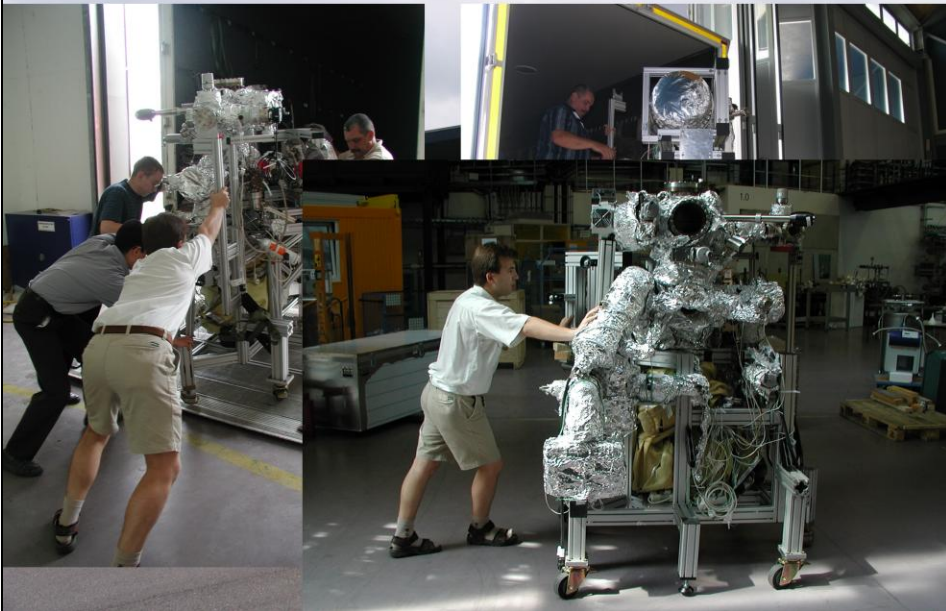


Ідейно, метод є дуже простим. Це фотоефект + аналізатор. Електрони, що вибиваються світлом з монокристалічного зразка, аналізуються електронним аналізатором. Кут вильоту електронів визначається їх імпульсом у кристалі, а аналізатор дає розгортку по енергії, і маємо на вихідному вікні дво-вимірне зображення. Щоб рухати це вікно у імпульсному просторі та отримувати повний спектр потрібен маніпулятор що повертає зразок.

Ще треба згадати необхідність надвисокого вакуума, щоб зберігати чистоту поверхні зразка, тобто і аналізатор і маніпулятор знаходяться всередині вакуумної камери.

Але є й ще один необхідний елемент – це синхротронне випромінювання.

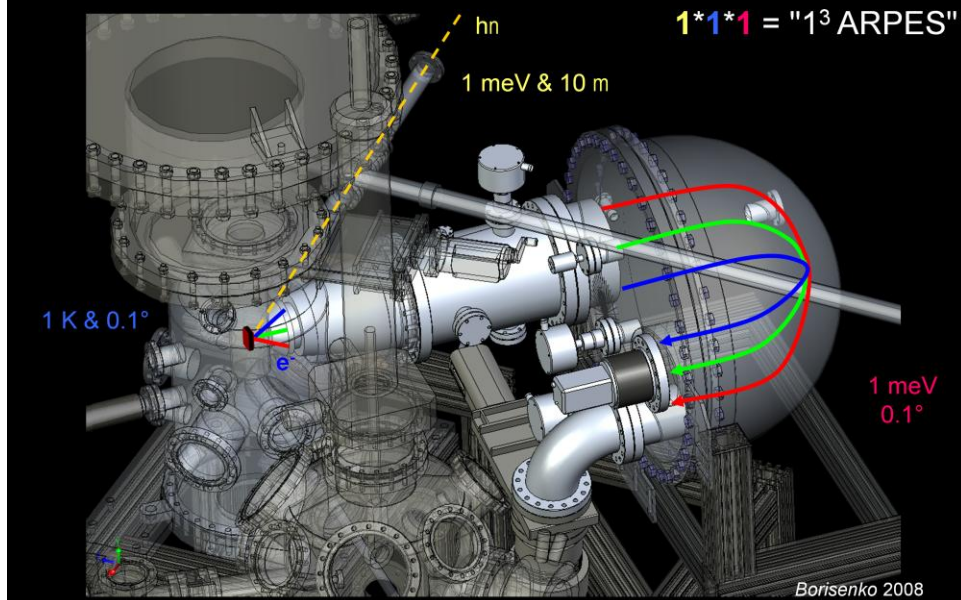
ARPES експеримент вчора...



Ми одними з найперших усвідомили необхідність синхротронного випромінювання для успішного експерименту, і 12 років тому почали подорожувати з експериментальними камерами від синхротрона до синхротрона...

І це був дуже цікавий час. Кожен такий виїздний ARPES-експеримент нагадував мені політ у космос, коли протягом досить обмеженого часу потрібно було цю установку зібрати, відкачати, та примусити працювати. Якщо ні – то програв, але у нас завжди виходило щось нарешті поміряти, хоча іноді і в останній день.

...та сьогодні

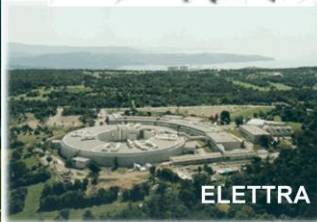


Вже років 5 як це змінилося тому що ми побудували стаціонарну станцію на синхротроні BESSY в Берліні.

Це її реальні креслення. Монокристалічний зразок, знаходиться тут, глибоко у надвисокому вакуумі. Він опромінюється синхротронним світлом, а збуджені ним електрони пролітають крізь аналізатор та залишають зображення на CCD камері. Насьогодні, подібні прилади вже існують практично на кожному синхротроні, але цей є найкращим у світі завдяки рекордному значенню температури зразка (до 1 K) та енергетичного розділення (3 meV).

ARPES =
аналізатор + маніпулятор (10⁶ €)
+ синхротрон



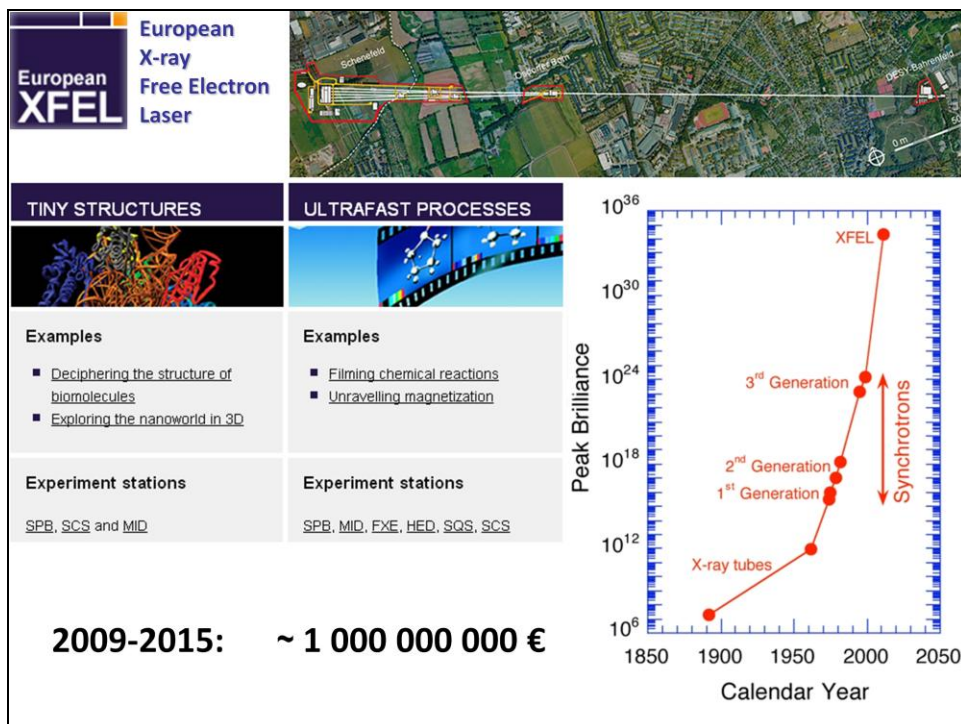




- Напрямок розвитку:
time resolved ARPES,
XFEL

Не враховуючи синхротрон, ціна такого приладу близько млн. євро.

Однак саме використання синхротронів робить такі експерименти більш доступними для українських науковців, тому що синхротронний час розподіляється за якістю поданих туди проектів. Тож маємо цікавий випадок коли експериментатори можуть ефективно працювати в області фізики твердого тіла, маючи за душею тільки ідеї та досвід.

І з часом ця тенденція тільки посилюватиметься. Розвиток таких експериментів – це синхротрони 4 покоління, так звані лазери на вільних електронах.



Мабуть найамбіційніший проект такого лазеру – це Європейський XFEL, що будується в Гамбурзі та коштує 1 млрд. євро. І наші майбутні плани тісно пов'язані з цим великим приладом.

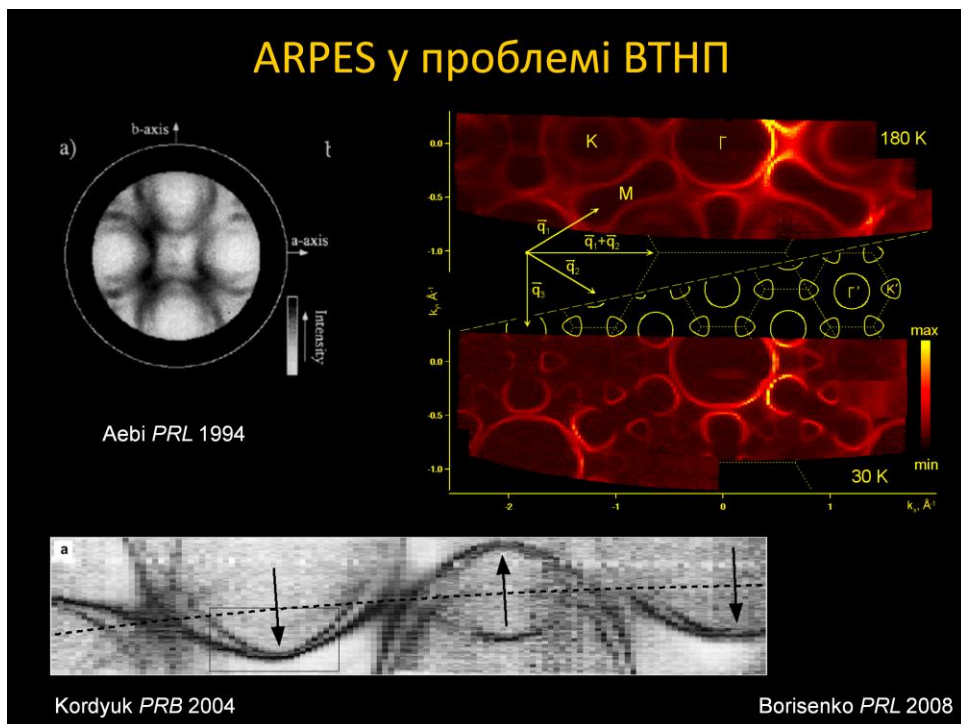
Сучасний ARPES дозволяє визначати електронні спектри кристалів з високою точністю, достатньою як для розрахунку їх магніто-електронних властивостей, так і для розшифровки механізмів міжелектронної взаємодії.



Таким чином, сучасний ARPES дозволяє визначати електронні спектри кристалів з високою точністю, достатньою як для розрахунку їх магніто-електронних властивостей, так і для розшифровки механізмів міжелектронної взаємодії.

Далі, я проілюструю це твердження на двох прикладах: ВТНП купратів – це наш основний визнаний результат, та залізних надпровідників, як новий результат, що є головною темою даної доповіді.

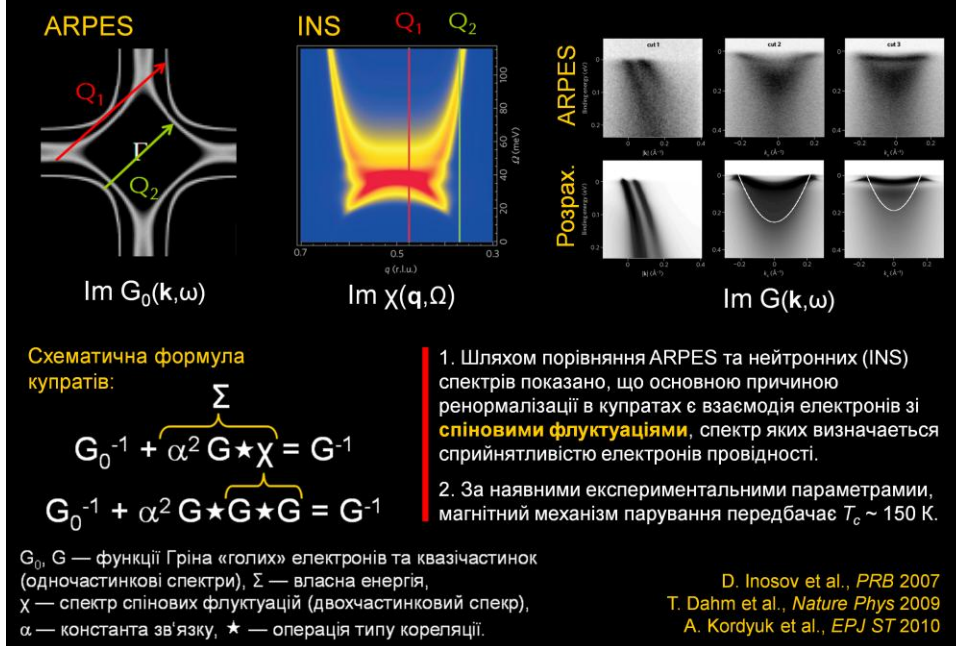
ARPES у проблемі ВТНП



Тут я знову хочу підкреслити, що саме жорсткі змагання за проблему ВТНП мали наслідком значний прогрес у сучасному експерименті. Для ілюстрації можна порівняти поверхні Фермі виміряні Пітером Аєбі у 1994 році і нами за 10 та 14 років.

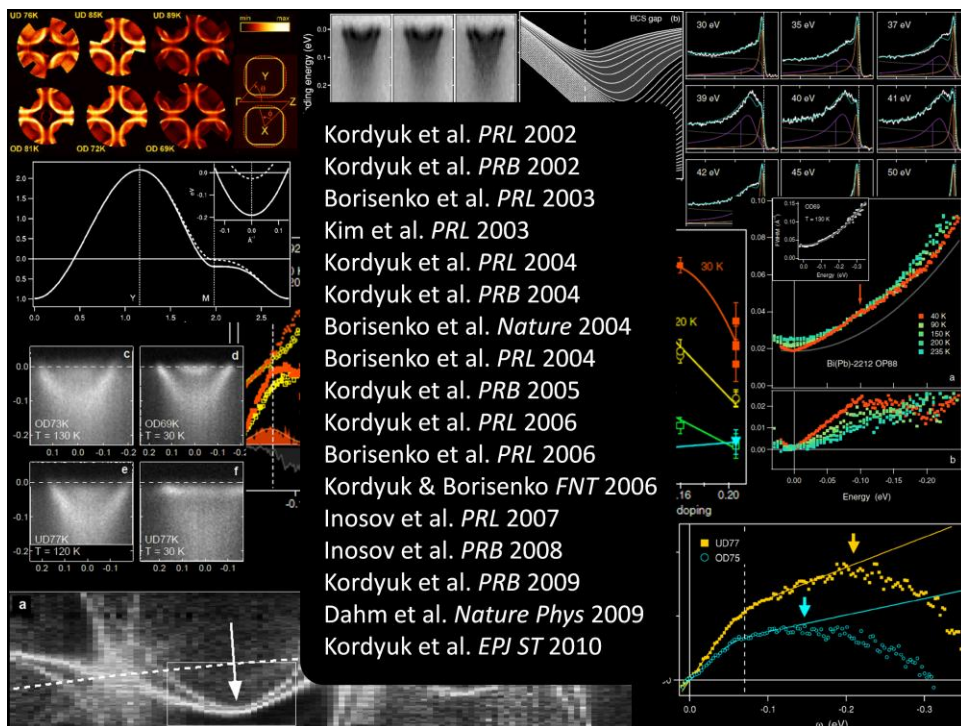
Kordyuk [PRB 2004](#), Borisenko [PRL 2008](#)

Спінові флуктуації — медіатор високотемпературної надпровідності

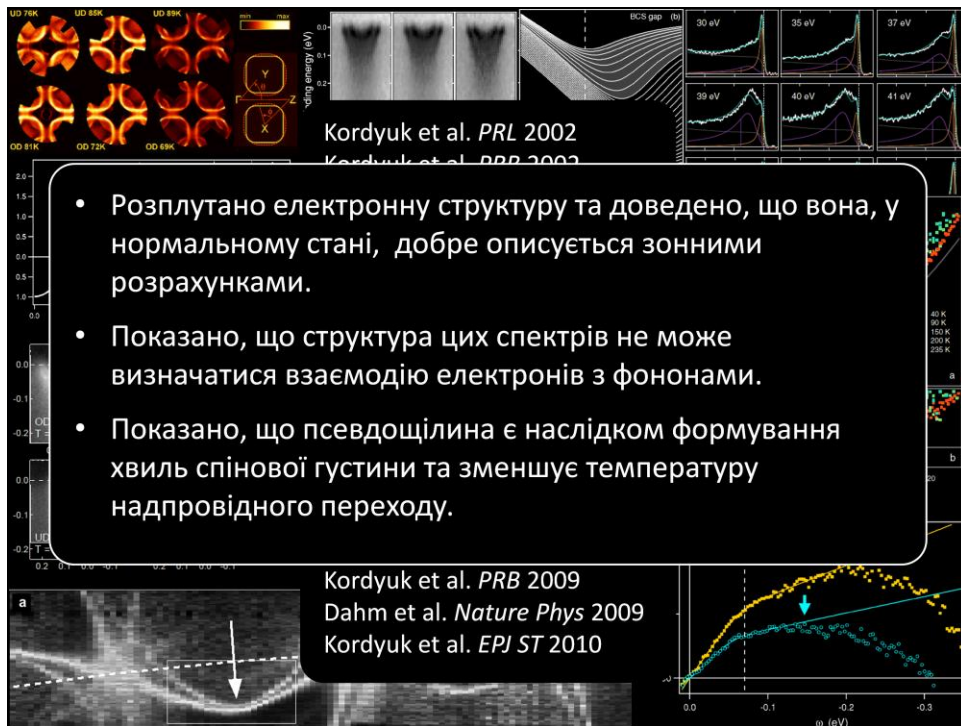


Головним нашим результатом по купратах стало доведення магнітної природи надпровідності. А саме, нами було показано, що структура електронного спектру (що вимірюється ARPESом) повністю визначається спектром спінових флуктуацій (що вимірюється методом непружного розсіювання нейтронів): це експеримент, а це розрахунок на основі кореляції цих двох спектрів.

D. Inosov et al., [PRB 2007](#)
T. Dahm et al., [Nature Phys 2009](#)
A. Kordyuk et al., [EPJ ST 2010](#)



Оскільки часу на деталі нема, то цим колажем та далеко не повним списком наших робіт з цього приводу я хочу сказати що даний результат було отримано звичайно не на порожньому місці, а йому передували 8 років досліджень електронної структури купратів, цього здавалося б простого розподілу електронів в оберненому 3D-просторі.

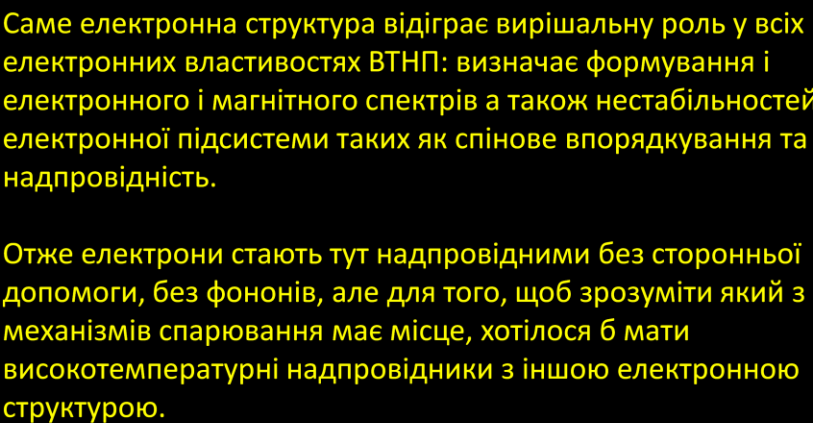


Зокрема, нами було:

розплатано електронну структуру та доведено, що вона, у нормальному стані, добре описується зонними розрахунками;

показано, що структура цих спектрів не може визначатися взаємодією електронів з фононами;

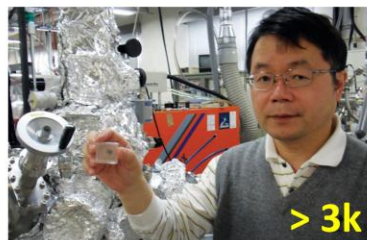
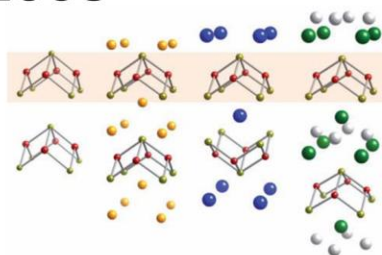
показано, що псевдощілина є наслідком формування хвиль спінової густини та зменшує температуру надпровідного переходу.



Отже електрони стають тут надпровідними без сторонньої допомоги, без фононів, але для того, щоб зрозуміти який з механізмів спарювання має місце, хотілося б мати високотемпературні надпровідники з іншою електронною структурою.

Нова історія надпровідності: залізна доба

2008



Hideo Hosono

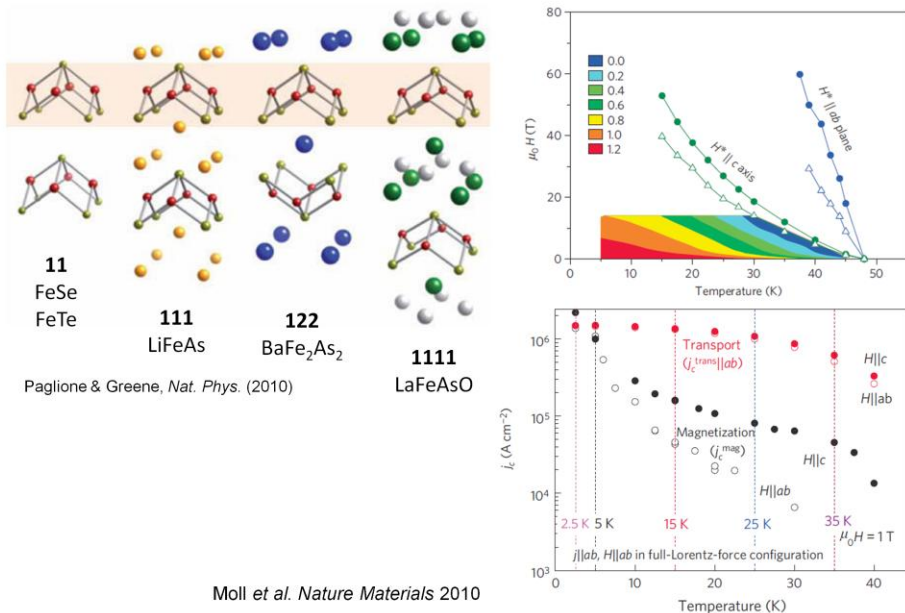
LaFeAs(OF), $T_c = 26\text{K}$, зараз до 56K



І от нещодавно, у 2008 р, японською групою Хосоно було відкрито новий клас високотемпературних надпровідників на основі заліза ("феро-пніктидів"). І дуже швидко у дослідженні надпровідності залізна доба змінила мідну. Всі дослідники надпровідності переключилися на нові матеріали.

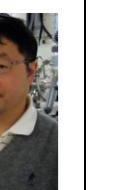
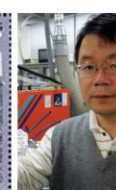
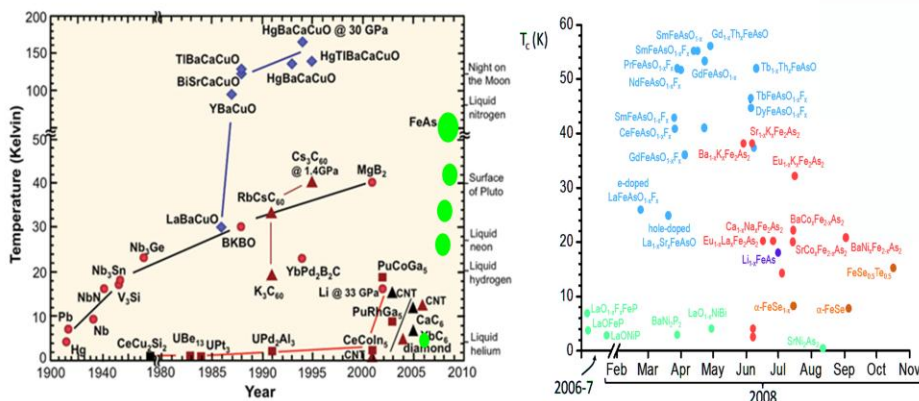
За резонансом це відкриття дуже нагадує відкриття ВТНП-купратів. Тут показовою є кількість цитувань. Якщо роботу Беднорца та Мюлера 1986 року на сьогодні процитовано більше 10 000 разів, то роботу Хосоно 2008 року – вже більше 3 000.

Надпровідники на основі заліза



Так от, саме з точки зору магнітних застосувань ці матеріали є дуже цікавими, оскільки демонструють дуже високі значення критичного магнітного поля при досить ізотропній густині критичного струму.

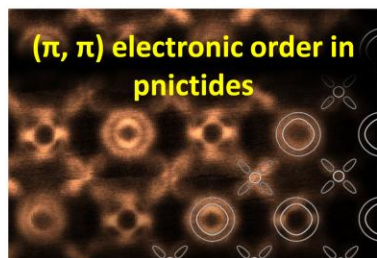
Високотемпературна надпровідність, ВТНП



Критична температура є поки що меншою ніж у купратів (56 проти 140 K), але для застосувань ця різниця не дуже принципова, а крім того, це тільки початок і є реальна надія на її підвищення.

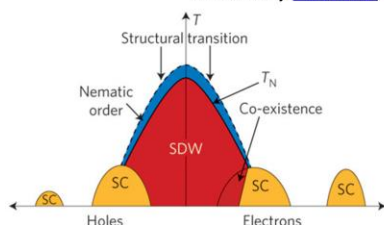
Однак, поки що не перспективні застосування роблять залізні надпровідники такими цікавими для дослідників, а їх різноманіття (це 6 основних сімейств та кілька десятків сполук) та складна фізика.

FeSC: складна електронна структура та складні фізичні властивості, що з неї випливають.

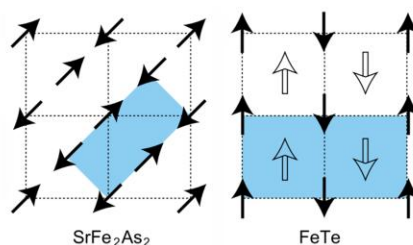


(π, π) electronic order in pnictides

Zabolotnyy [Nature 2009](#)
Evtushinsky [PRB 2009](#)

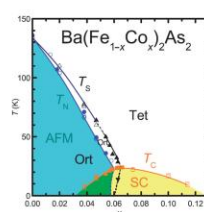


Basov & Chubukov [Nature Phys. 2011](#)

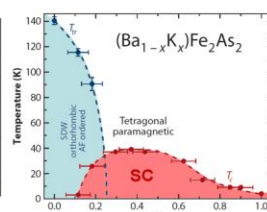


SrFe_2As_2

FeTe



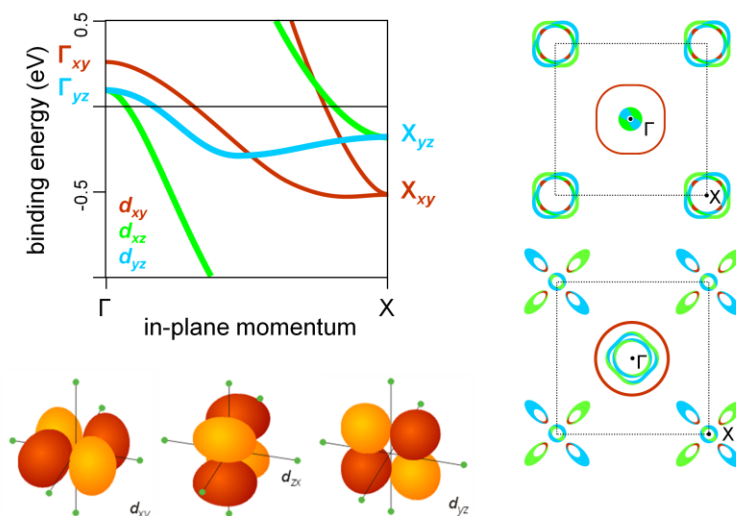
H.-H. Wen & S. Li [Annu. Rev. Cond. Mat. Phys. 2011](#)



Складна фізика – це складна електронна структура і складні фізичні властивості, що з неї випливають: магнітне впорядкування, незвичайна надпровідність, та їх співіснування, багаті фазові діаграми.

Саме виявлення зв'язку електронної структури з надпровідністю є основним висновком моєї доповіді...

Надпровідники на основі заліза

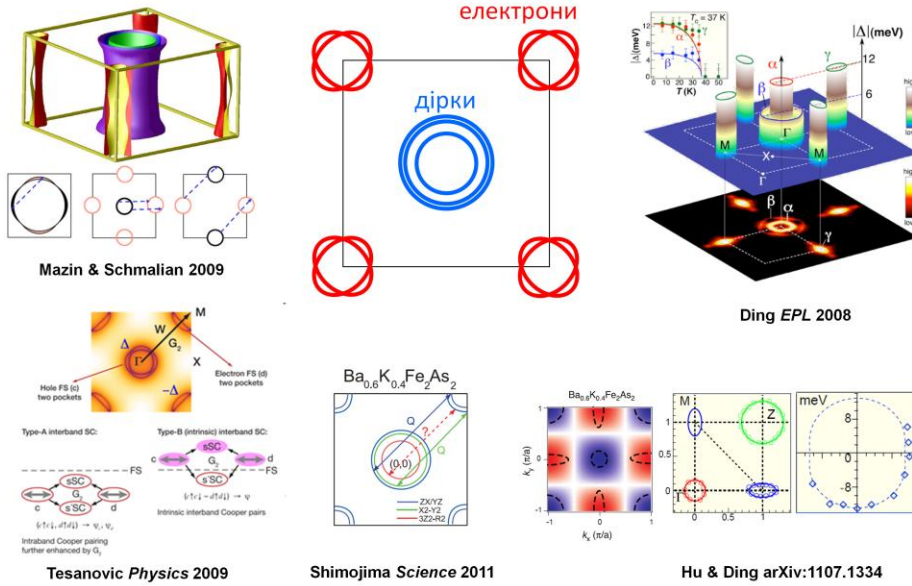


Не дивлячись на різноманіття сполук, як магнітне впорядкування так і провідність та надпровідність тут відбуваються у залізо-пнікtidному шарі, і електронна структура, хоч і складна, є спільною для всіх сполук.

Це означає, що є 5 зон (замість однієї у купратах), сформованих електронами заліза, і ці 5 зон роблять здебільшого 5 Фермі-поверхонь. Але ці поверхні, навіть їх топологія, можуть швидко змінюватися під дією таких факторів як тиск чи зарядове допування, що й призводить до багатих фазових діаграм.

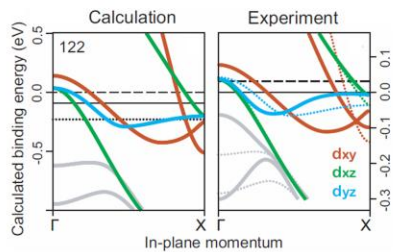
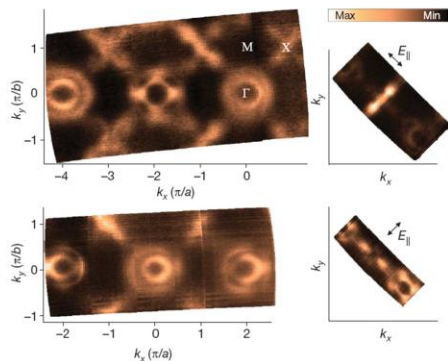
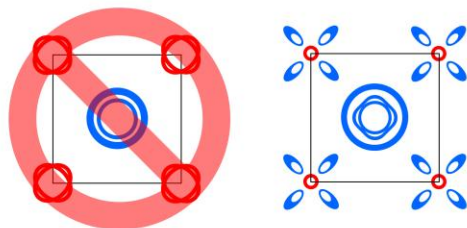
Ця електронна структура загалом добре описується зонними розрахунками (у термінах кількості та симетрії зон). Але щоб відслідкувати ці критичні малі зміни, необхідним є експеримент.

Поверхня Фермі ВКФА

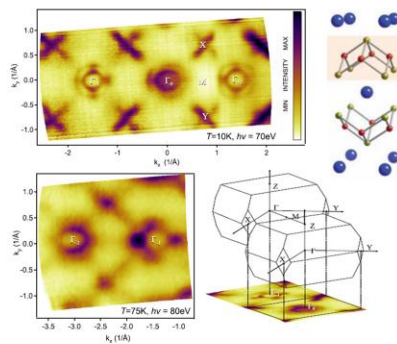


Наприклад система 122, BaKFeAs . Розрахунки дають таку топологію Фермі-поверхні з трьома дірковими поверхнями у центрі Зони Брілюена та двома електронними у кутках, що одразу лягла в основу багатьох теорій та "підтверджувалася" рядом експериментів.

Поверхня Фермі ВКФА

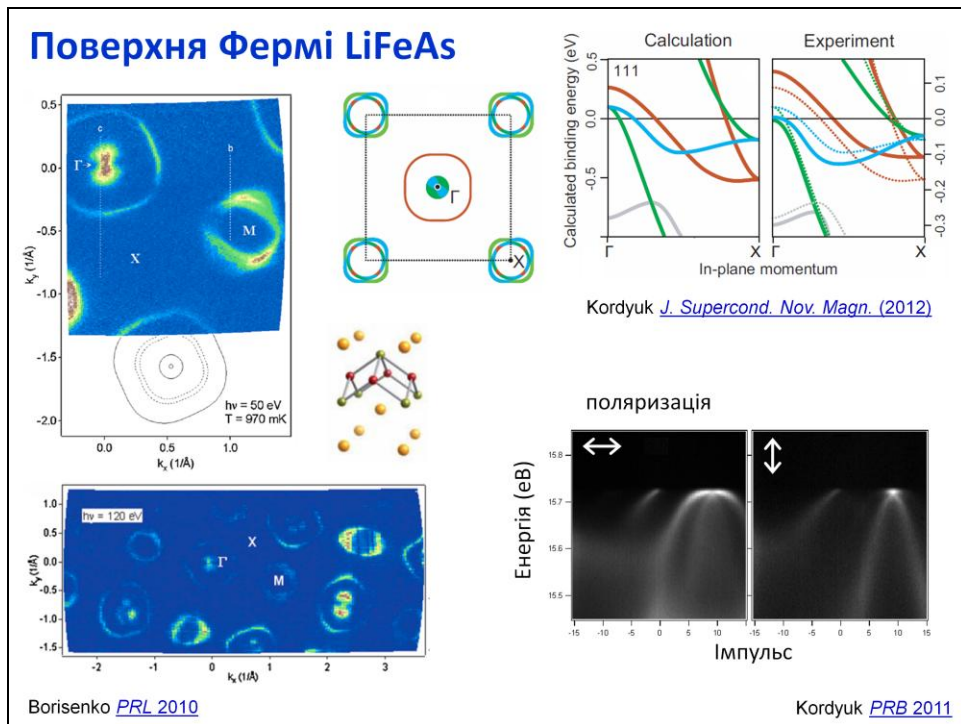


Kordyuk *J. Supercond. Nov. Magn.* (2012)

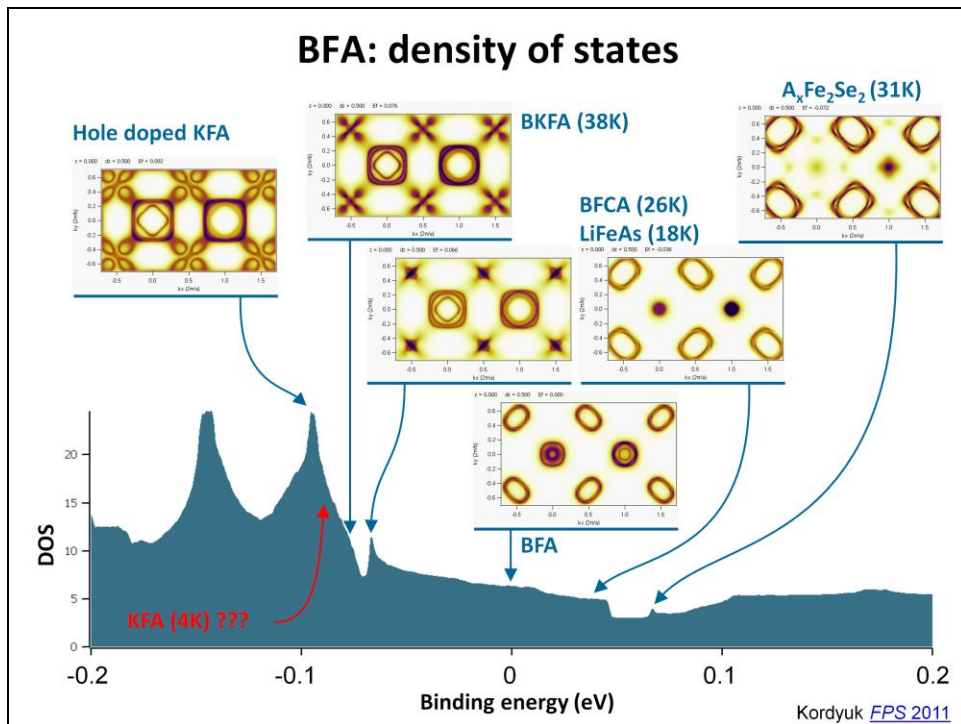


Zabolotnyy *Nature* 2009

Ми показали, що реальна Фермі-поверхня зовсім інша, хоча і є наслідком тої самої зонної структури, але зони є трохи зсунутими.



Інший приклад – LiFeAs. Тут топологія експериментальної поверхні не змінилася, але змінилися розміри, порушивши умови для виникнення спінового впорядкування, що пояснює відсутність магнетизму у цьому матеріалі. Також дві центральні поверхні практично зникли.



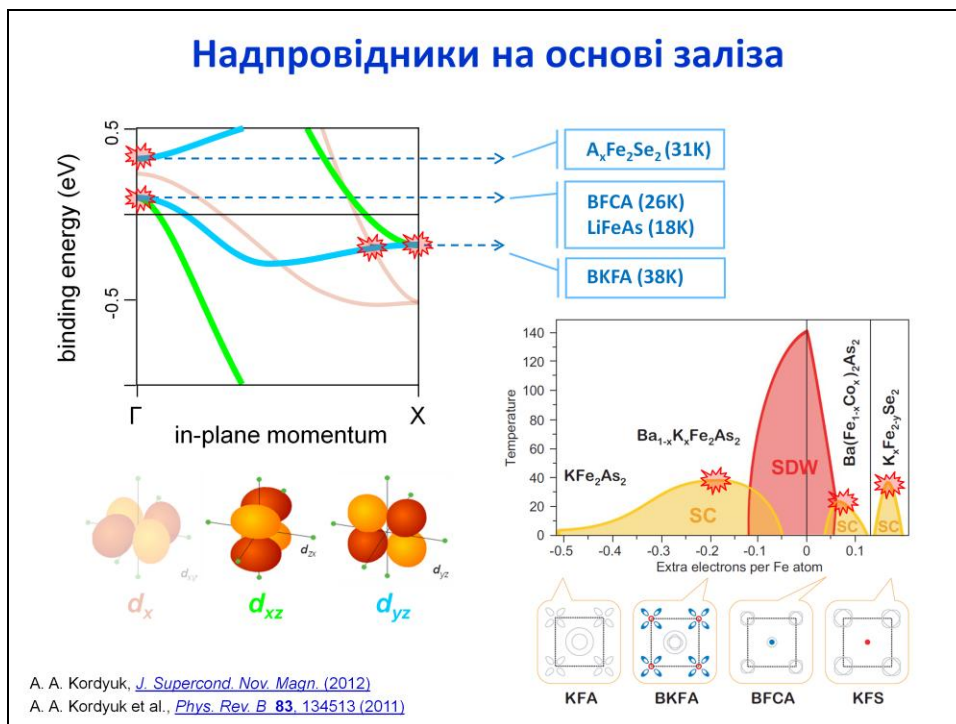
Це останнє спостереження корелює з BKFA, де також максимум T_c спостерігається для кристалів з гранично малою ФП.

Виявилося, що всі відомі залізні надпровідники слідуєть цьому емпіричному правилу: максимальну схильність до надпровідності демонструють виключно системи з гранично малими поверхнями Фермі певної симетрії.

На цьому слайді це проілюстровано на тлі густини електронних станів розрахованої для стехіометричного BaFe_2As_2 .

Звідси стає зрозумілим, що T_c не корелює безпосередньо з густиною станів, оскільки стехіометричний KFe_2As_2 має вищу ніж BKFA густину станів але T_c всього 4 K.

Також видно що діркове допущання KFA (LiFeAs) має призвести до схожій з BKFA пелюсткової топології, але зі значно більшою густиною станів, що має суттєво підвищити T_c .



Отже, можна сказати, що складна електронна структура феро-пніктидів нагадує конструктор де різними чинниками (тиском, зарядовим та ізовалентним допуванням) можна трохи деформувати базову електронну структуру та дивитися що буде. А відбувається наступне – кожен раз, коли рівень Фермі потрапляє на верх чи низ зони (ці гарячі точки), що призводить до топологічного переходу поверхні Фермі званого як перехід Ліфшиця, спостерігається максимум критичної температури.

Слід зазначити, що це працює тільки для зон з певним орбітальним характером (d_{xz}/d_{yz}), а зони з характером d_{xy} виявляються неважливими для надпровідності.

A. A. Kordyuk et al., *J. Supercond. Nov. Magn.* (2012)

A. A. Kordyuk et al., *Phys. Rev. B* **83**, 134513 (2011)

Висновки

- Електронна структура **надпровідних купратів** відіграє ключову роль у формуванні їх електронного і магнітного спектрів а також нестабільностей електронної підсистеми таких як спінове впорядкування та надпровідність.
- Механізм надпровідного спарювання у FeSC лишається поки нез'ясованим, але можна сказати, що електронна структура і тут є визначальною: **максимальну схильність до надпровідності демонструють виключно системи з гранично малими** (близькими до топологічного переходу) **поверхнями Фермі** певної симетрії.
- Саме складність електронної структури цих матеріалів дозволила виявити зазначену кореляцію та вказати шлях до збільшення T_C , правильність якого зараз перевіряється.

Висновки

Електронна структура надпровідних купратів відіграє ключову роль у формуванні їх електронного і магнітного спектрів а також нестабільностей електронної підсистеми таких як спінове впорядкування та надпровідність.

Механізм надпровідного спарювання у FeSC лишається поки нез'ясованим, але можна сказати, що електронна структура і тут є визначальною: максимальну схильність до надпровідності демонструють виключно системи з гранично малими (близькими до топологічного переходу) поверхнями Фермі певної симетрії.

Саме складність електронної структури цих матеріалів дозволила виявити зазначену кореляцію та вказати шлях до збільшення T_C .

Перспективи

- Вивчення надпровідників на основі заліза є **одним з найприоритетніших напрямків** світових досліджень завдяки того що вони пропонують нову цікаву фізику та мають реальні перспективи практичного застосування.
- Завдяки експериментальним та теоретичним дослідженням електронної структури ми знаходимось на передньому краї цих досліджень, однак необхідно **розвивати й інші напрями досліджень феро-пніктидів** в Україні, зокрема магнітно-транспортних властивостей, з огляду на можливі практичні застосування.
- Необхідно, спираючись на український матеріалознавчий досвід, **налагодити в Україні виробництво** придатних для досліджень монокристалів та плівок залізних надпровідників.
- Видається важливою **координація досліджень** залізних надпровідників в Україні з подальшим розвитком міжнародного співробітництва.

Перспективи

Вивчення надпровідників на основі заліза є **одним з найприоритетніших напрямків** світових досліджень завдяки того що вони пропонують нову цікаву фізику та мають реальні перспективи практичного застосування.

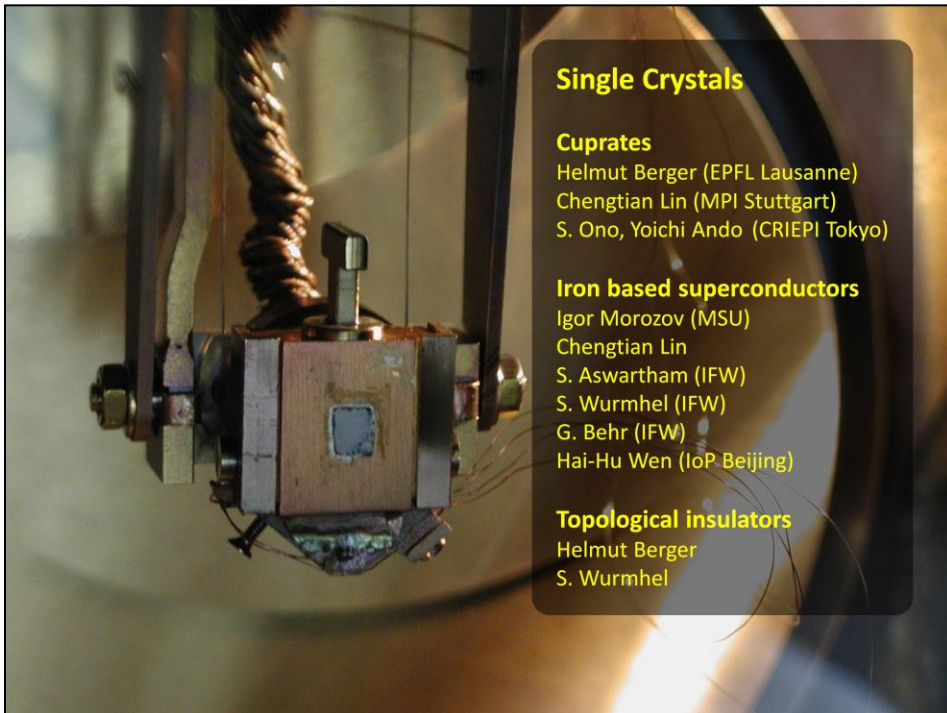
Завдяки експериментальним та теоретичним дослідженням електронної структури ми знаходимось на передньому краї цих досліджень, однак необхідно **розвивати й інші напрями досліджень феро-пніктидів** в Україні, зокрема магнітно-транспортних властивостей, з огляду на можливі практичні застосування.

Необхідно, спираючись на український матеріалознавчий досвід, **налагодити в Україні виробництво** придатних для досліджень монокристалів та плівок залізних надпровідників.

Видається важливою **координація досліджень** залізних надпровідників в Україні з подальшим розвитком міжнародного співробітництва.



Нарешті, слайд який я вже показував, але у вигляді подяк, щоб сказати, що експерименти виконувалися у тісному співробітництві з закордонними колегами, без якого такі дослідження неможливі – для розуміння результатів наших експериментів корисним було дослідження тих самих зразків іншими методами.



Також дуже важливим є внесок тих що вирощують унікальні монокристали,

Synchrotron Light

BESSY (Berlin)

Emile Rienks
Rolf Follath
Andrei Varykhalov
Serguei Molodtsov

SLS (PSI Villigen)

Ming Shi
Vladimir Strocov
Luc Patthey
Joel Mesot

ELETTRA (Trieste)

Alexei Barinov
Pavel Dudin
Stefano Turchini



та допомагають на синхротронах.



Дякую за увагу!