



ПРИСКОРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ В УКРАЇНІ ДЛЯ FCC ($e^+ e^-$) ТА FCC(hh)

П.І. Гладких, І.С. Гук, Г.Д. Коваленко

*ІНЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України,
Харків, Україна*



21-22 January 2025. Kyiv. Ukraine

SALO

History

1953 LUE-0.7

1954 LUE-3.5

1956 LUE-30

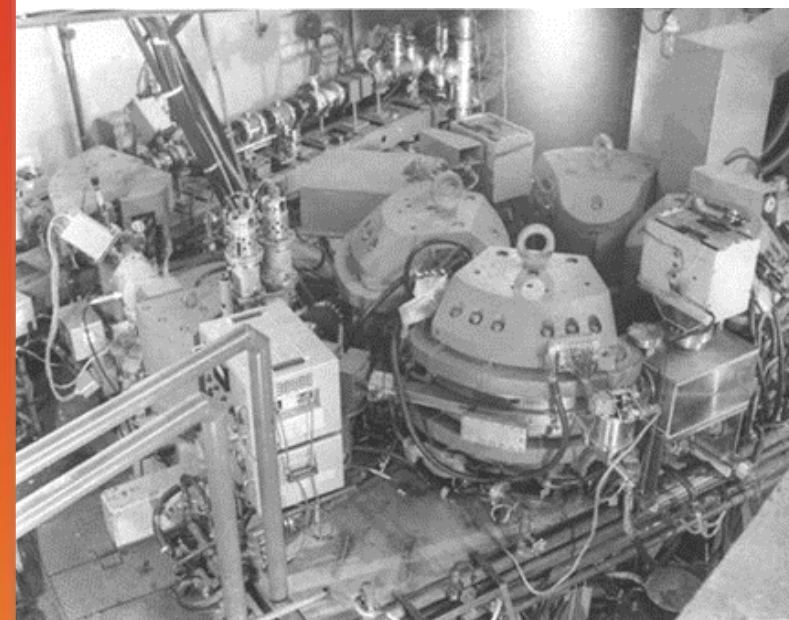
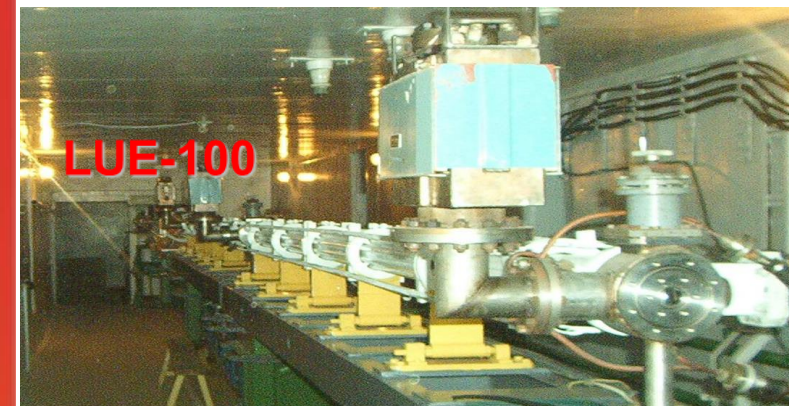
1958 LUE-90

1963 LUE-300

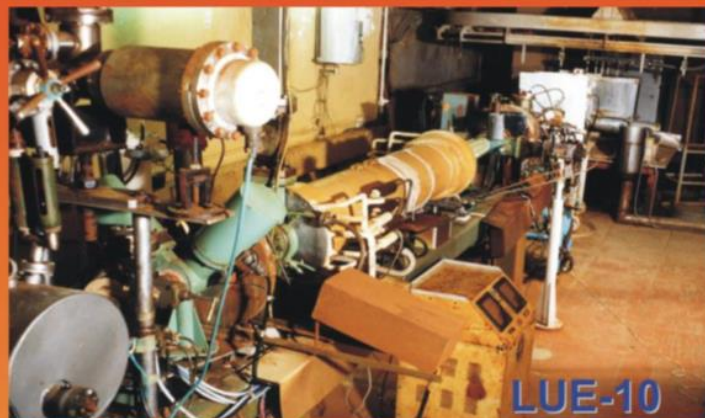
1964 LUE-40

1965 LUE-2000

1987 LUE-10



1967 STORAGE RING N-100



NSC KIPT

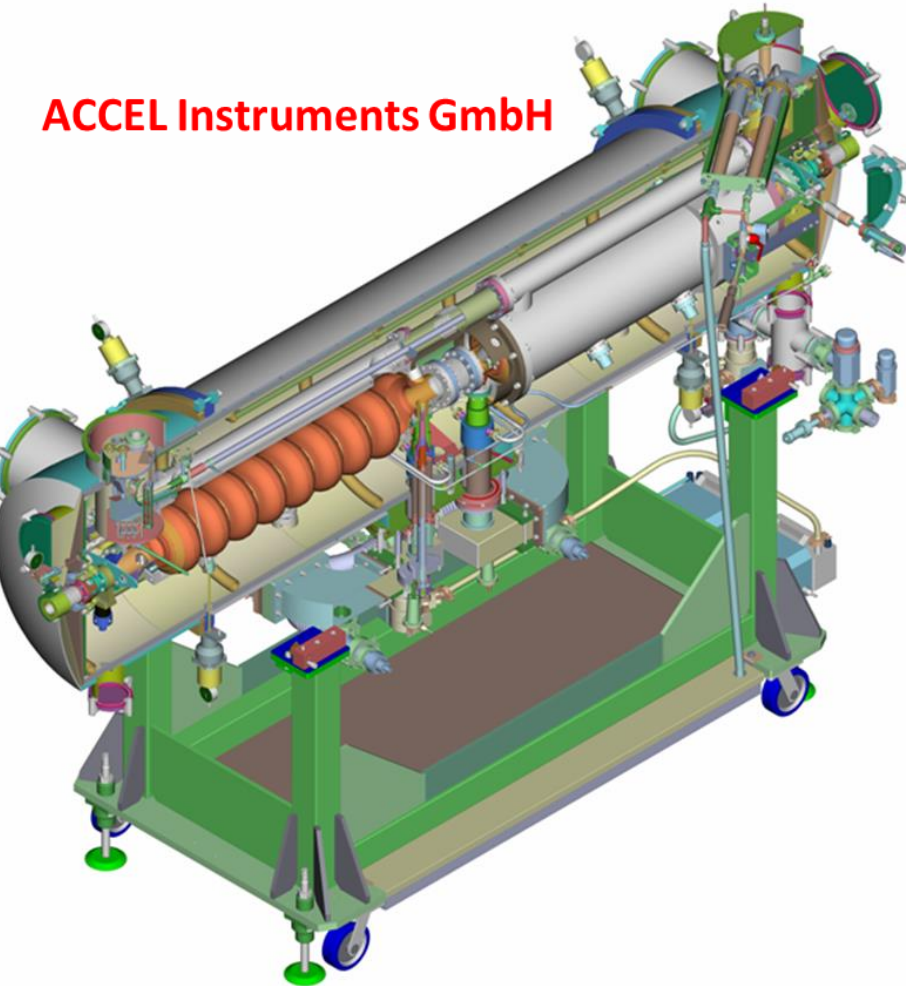
До 1993 року Харківський фізико-технічний інститут був найбільшим науковим центром України, де проводилися дослідження з ядерної фізики з використанням пучків γ -квантів, електронів, протонів та інших заряджених частинок. Інститут мав низку унікальних прискорювальних установок: найбільші в Європі лінійні прискорювачі електронів ЛУ-2000 та ЛУ-300, накопичувач Н-100 та ряд прискорювачів на меншу енергію. В інституті був сформований великий колектив висококваліфікованих фахівців з ядерної фізики та фізики прискорювачів.

Після 1993 року в Росії було ліквідовано виробництво клістронів для наших прискорювачів, великі прискорювальні установки були зупинені. Експериментальна робота, що становить основу ядерно-фізичних досліджень, практично припинилася, наукові співробітники були змушені переносити свої дослідження на інші установки поза Україною або перекваліфікуватися. Були втрачені технології по виробництву прискорювальних структур. Відсутність «живої» роботи в першу чергу призвела до відтоку молодих фахівців з цієї галузі наукової діяльності та старіння кадрів. Зараз роботу лінійних прискорювачів ЛУ-2000 і ЛУ-300 на програму з ядерної фізики та фізики високих енергій відновити не тільки неможливо, але й недоцільно, оскільки існуюча матеріально-технічна база досліджень безнадійно застаріла як морально, так і фізично. Ці прискорювачі, як і циклотрон У-240 в ІЯД в Києві, мікротрон в Ужгороді та інші установки в Україні, були спроектовані і побудовані понад шістьдесят років тому, більшість витратних матеріалів та пристроїв для цих установок промисловістю вже давно не випускаються.

Єдина в Україні кафедра по фізиці прискорювачів на фізико-технічному факультеті в Харківському національному університеті була закрита на початку цього століття. Різко зменшилась кількість студентів і на спеціальності «ядерна фізика».

Представники ННЦ ХФТІ приймали участь в розробці одного із детекторів в проекті LHC, систем інжекції пучків позитронів в проектах CLIC, ILC та FCC, але прогнозувати участь наших вчених в розробці цих прискорювачів в майбутньому неможливо без відродження в Україні технічної бази ядерно-фізичних досліджень і на її основі - школи фахівців з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів. Для цього в ННЦ ХФТІ з 2002 року разом Технічним університетом в Ейндховені (Нідерланди) було розпочато розробку нового прискорювального комплексу SALO.

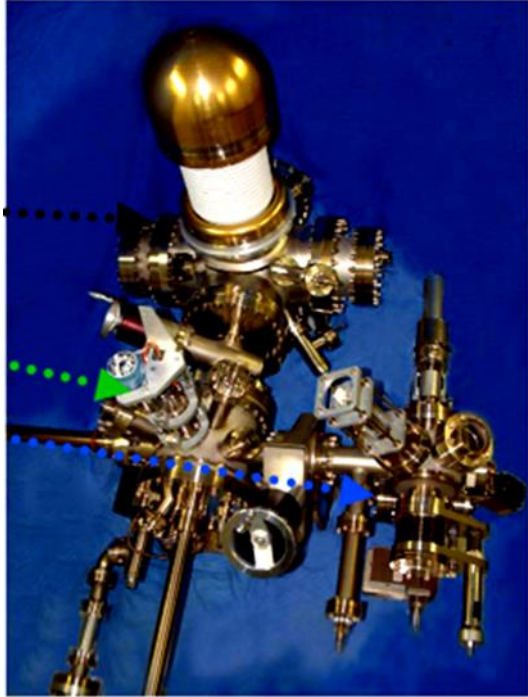
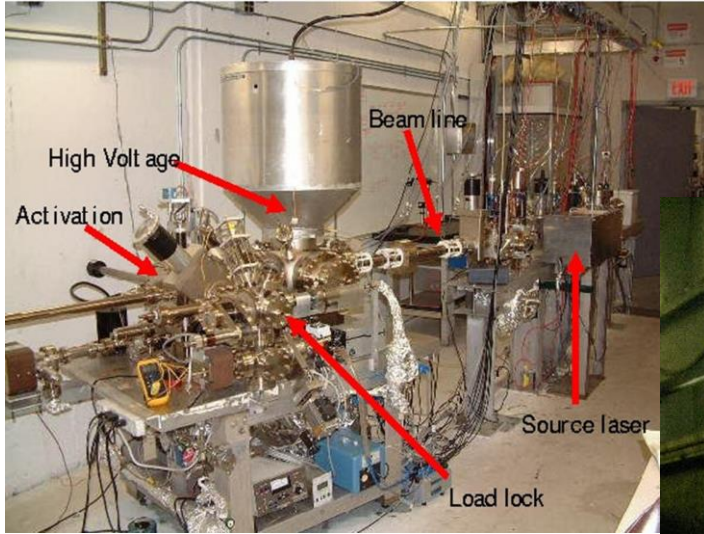
ACCEL Instruments GmbH



В основу цієї установки були застосовані надпровідні прискорювальні структури TESLA, які були розроблені в DESY для проекту одноіменного лінійного колайдера, який був використаний в подальшому при розробці проекту ILC. Ці прискорювальні секції почали серійно вироблятися фірмою ACCEL Instruments GmbH в Німеччині.



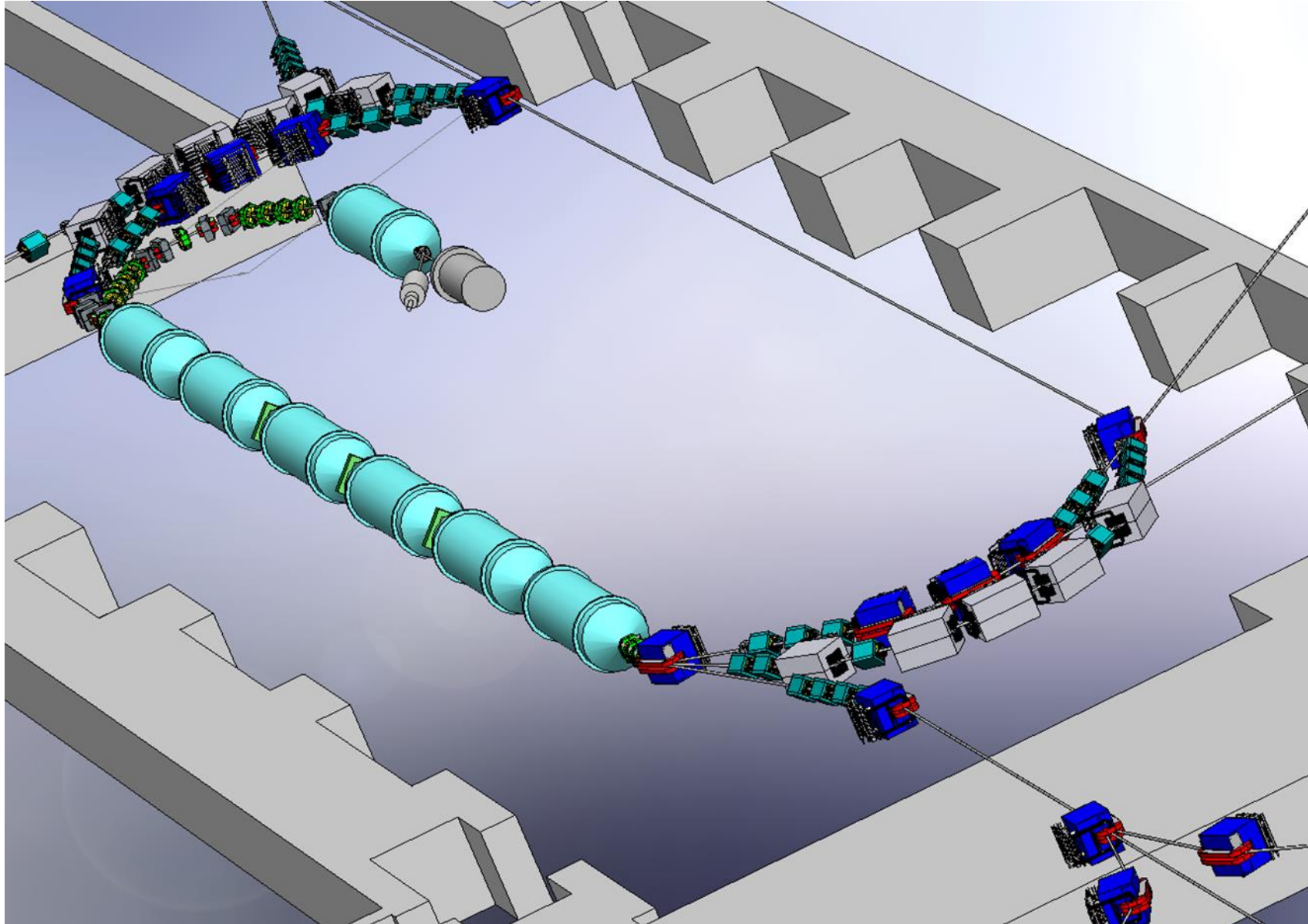
The Polarized Electron Gun



Dipoles and quadrupoles *Netherlands*



На основі існуючих і розроблених магнітних елементів було створено проект магнітної структури рециркулятора та об'ємну модель системи в цілому, що продемонструвало технічну можливість реалізації прискорювального комплексу.



З 2014 року, коли стало зрозуміло, що побудувати в ННЦ ХФТІ прискорювальний комплекс на основі новітніх технологій не буде можливості, (а це виключає доступ вчених України до створення сучасних прискорювачів для потреб науки і ядерних технологій як в країні, так і в світі) і до 2022 року, як зараз стало ясно із наших досліджень, в напрямках розвитку прискорювальних технологій і напрямках використання в світі ядерно-фізичних досліджень сталися великі зміни.

Публікація в 2019 році **Future Circular Collider Conceptual Design Report** в 4 томах

«з початкової концепції у 2011/2012 роках електронно-позитронного колайдера класу 100 км у тому ж тунелі, що й майбутній протон-протонний колайдер потужністю 100 TeV, призвело до оновлення Європейської стратегії фізики елементарних частинок у 2020 році, яка визнала техніко-економічне обґрунтування FCC як головний пріоритет для CERN та його міжнародних партнерів – надає світовій спільноті фізиків високих енергій найпотужніший інструмент для дослідження. FCC-ее пропонує ідеальні умови (світність, калібрування енергії центра мас, численні експерименти і, можливо, монохроматизації) для вивчення чотирьох найважчих частинок SM зі шквалом можливостей для прецизійних вимірювань, пошуку рідкісних або заборонених процесів і можливого відкриття слабо зв'язаних частинок. Він також є ідеальним плацдармом для адронного колайдера на енергію 100 TeV, для якого він забезпечує значну частину інфраструктури. Ці дві машини, кожна з яких має свою власну мотивацію, разом пропонують унікально потужний довгостроковий план для фізики елементарних частинок 21-го століття» (<https://cerncourier.com/a/fcc-the-physics-case/>).



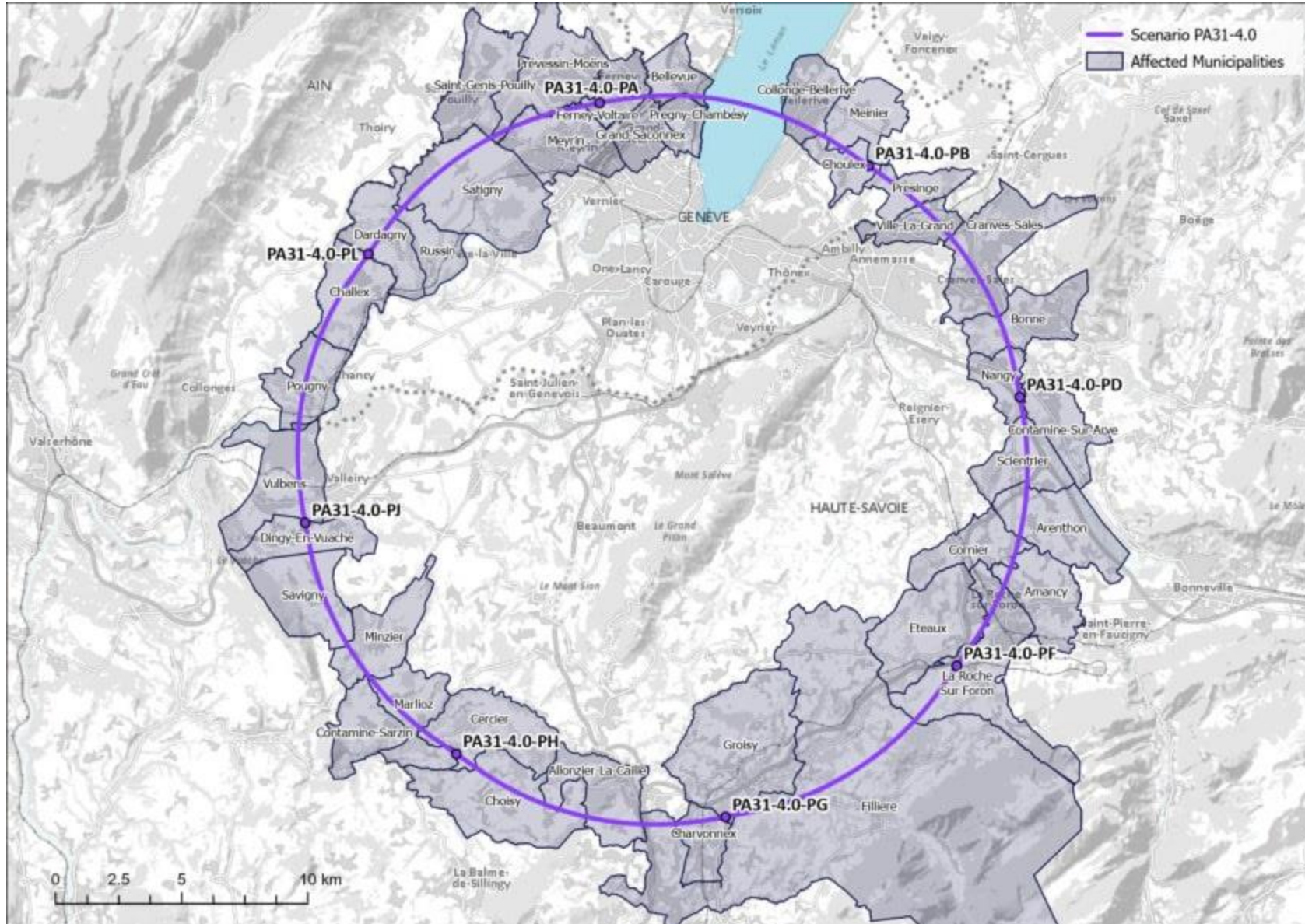
SUISSE
FRANCE

LHC

Genève

FCC

Annecy



Для FCC планується побудувати новий тунель з окружністю 90,7 км, середньою глибиною 200 м і вісьмома наземними майданчиками для чотирьох експериментів. Спочатку в тунелі буде розміщено FCC- ee^+ , електронно-позитронний колайдер, який пропонує 15-річну дослідницьку програму з середини 2040-х років. Друга машина, FCC- hh , буде встановлена в тому ж тунелі, повторно використовуючи існуючу інфраструктуру, подібно до того, як [LHC](#) замінив [LEP](#). FCC- hh спрямований на досягнення енергії зіткнення 100 TeV, зіткнення протонів, а також важких іонів, буде працювати до кінця 21 століття. Витрати - 15 мільярдів швейцарських франків, розподілених принаймні на 15 років для FCC- ee з чотирма експериментами, затрати - близько 800 000 людино-років роботи.

Орієнтовний графік створення FCC такий:

2025: Завершення техніко-економічного обґрунтування FCC

2027–2028: Рішення держав-членів ЦЕРНу та міжнародних партнерів

2030-ті: Початок будівництва

Середина 2040-х років: FCC- ee^+ починає працювати і працює приблизно 15 років

2070-ті роки: FCC- hh починає працювати і триватиме приблизно 25 років

Прийняті для створення FCC технічні і технологічні рішення ґрунтуються на досвіді створення в ЦЕРНі колайдерів [LEP](#) і [LHC](#) , якими Україна не володіє.

На даний час в Україні працюють тільки чотири прискорювача електронів: технологічний прискорювач ЛУ-10 на енергію 10 MeV, прискорювач ЛУ-30 на енергію 30 MeV, прискорювач ЛУ-40 в ННЦ ХФТІ, роботу яких вдалось відновити після завданих війною пошкоджень, і мікротрон М-30 на енергію 25 MeV в Institute of Electron Physics, National Academy Sciences of Ukraine, Uzhhorod. Ці прискорювачі були створені (як сказано було раніше) більше 60 років тому і вже давно не відповідають вимогам сучасних ядерно-фізичних досліджень.

В 2022 році в ННЦ ХФТІ для відродження в Україні фундаментальних і прикладних досліджень в галузі ядерної фізики, фізики високих енергій та взаємодії випромінювання з речовиною був запропонований проект багатофункціонального прискорювального комплексу «**MAC NSC KIPT**», головним об'єктом якого є рециркулятор електронів на максимальну енергію біля 600 MeV. В основу цього концептуального проекту були запропоновані ідеї розвитку прискорювальних технологій, закладені в European Strategy for Particle Physics - Accelerator R&D Roadmap 2020 року. Стратегія є дороговказом, по якому будуть розвиватися прискорювачі в Європі до 2026 року для підтримання створення FCC. Ці технології (технології рекуперації енергії ERL) будуть використовуватись в подальшому при реалізації проекту FCC(hh).

Розробка і будівництво комплексу **MAC** дасть змогу Україні відродити матеріальну базу для розвитку ядерних досліджень і в подальшому долучитись до розробки новітніх прискорювальних технологій в міжнародних прискорювальних проектах .

Якщо взяти до уваги, що в ННЦ ХФТІ на даний час зосереджені майже всі фахівці по прискорювачам в Україні, є надія, що, при необхідному фінансуванні, комплекс може бути створений в стислі терміни на основі новітніх прискорювальних технологій при поетапному запуску установки. Робота фізико-технічного факультету на території ННЦ ХФТІ дасть змогу залучити до створення установки викладачів, аспірантів і студентів факультету і сприяти поверненню молоді в цю галузь науки.

Загальний вигляд магнітно-оптичної структури багатофункціонального прискорювального комплексу представлений на Рис.1. В його складі – надпровідний інжектор на енергію 4 MeV, 7 надпровідних прискорювальних модулів, які забезпечують приріст енергії на 175 MeV і система рециркуляції, яка забезпечує трикратне проходження пучка через прискорювальну структуру.

Варіант створення каналів виводу пучків електронів з рециркулятора для фізичних досліджень представлений на Рис.2.

Рис.1

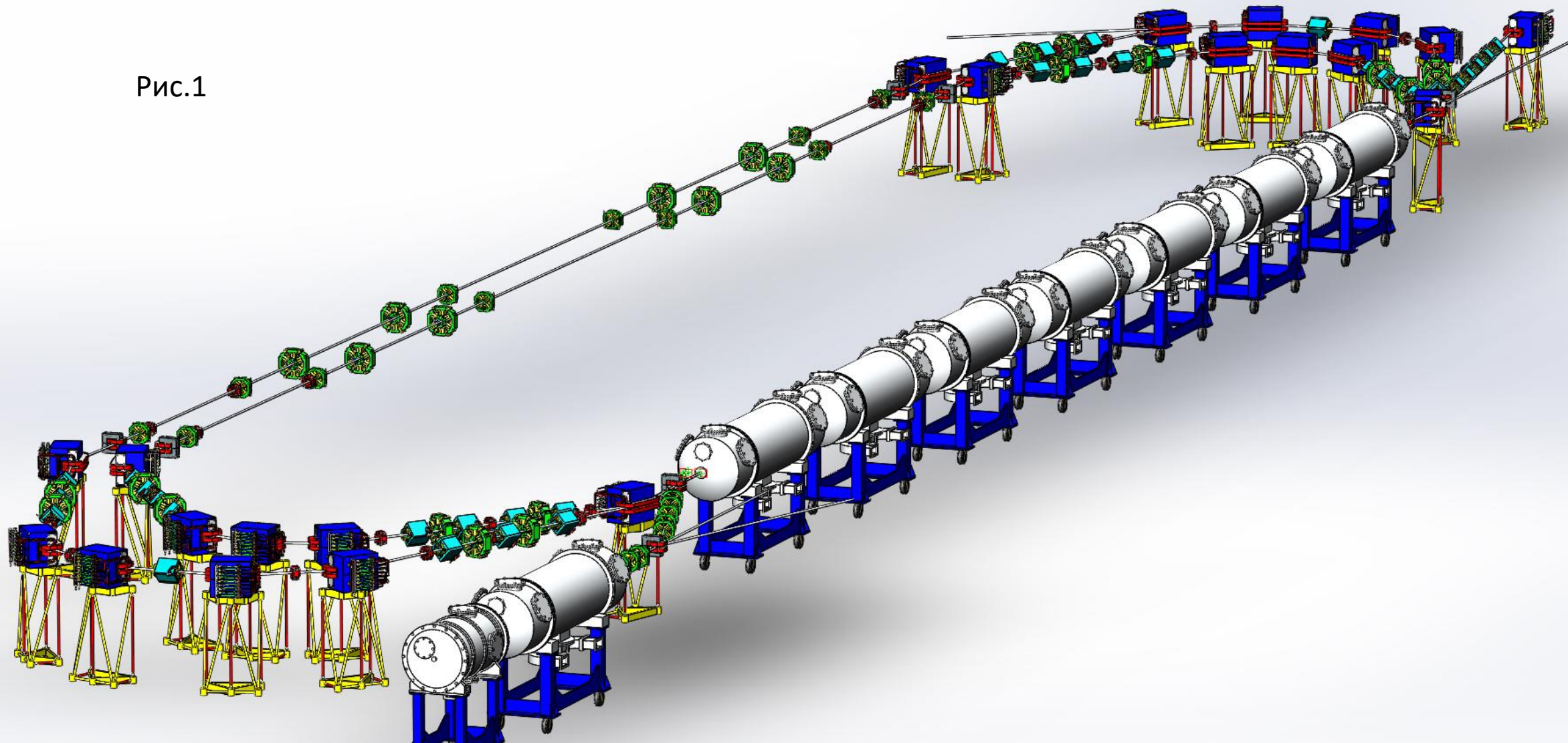
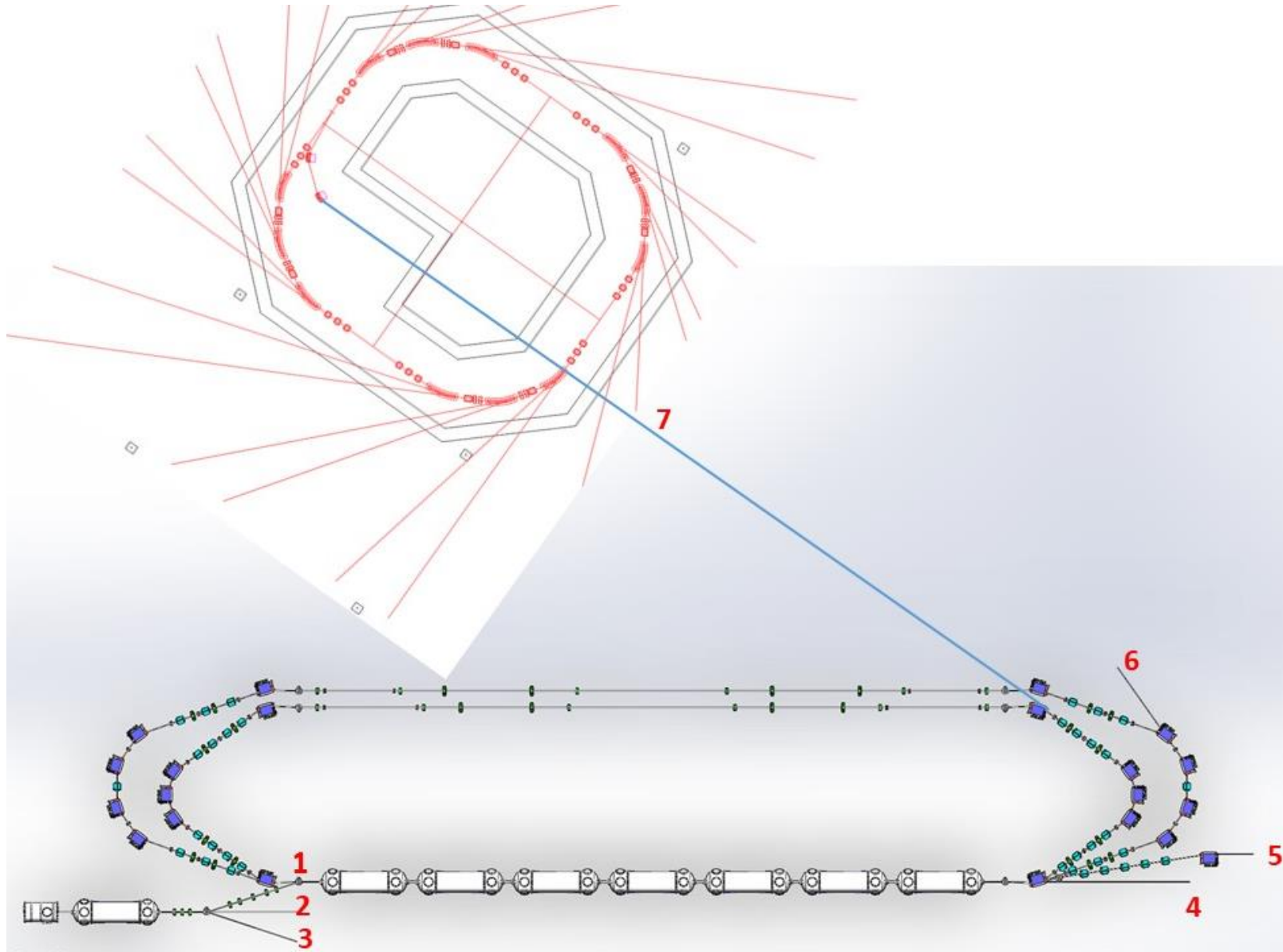


Рис.2



Канали вивода пучків на рециркуляторі комплексу «MAC NSC KIPT»

1. Енергія до 29 MeV, інжекція пучків електронів і позитронів в рециркулятор.
2. Енергія до 29 MeV, для робіт з радіаційними технологіями, виробництва ізотопів для медицини і т.і..
3. Енергія до 29 MeV, для створення джерела позитронів для позитрон-анігільційної спектроскопії
4. Енергія до 200 MeV, на мішень імпульсного джерела нейтронів
- 5-6. Максимальна Енергія 555 і 380 MeV, ядерно-фізичні дослідження, лазер на вільних електронах
7. Енергія 200 MeV, інжекція в накопичувач, джерело синхротронного випромінювання, на енергію 1.2 GeV

Дякую за увагу