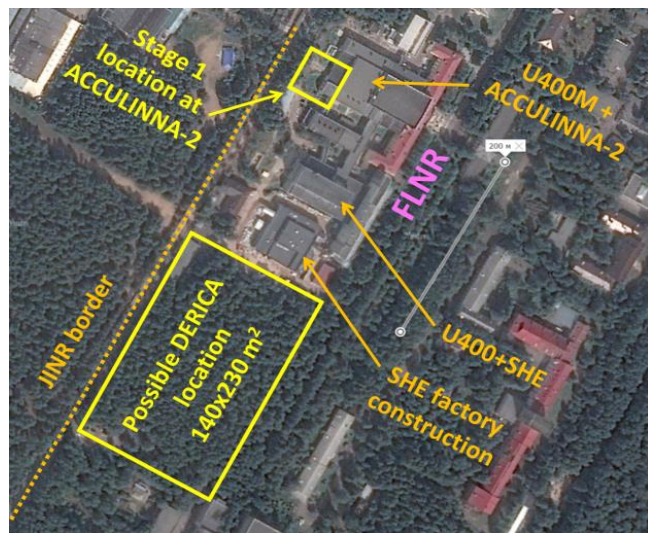


Леонид Григоренко

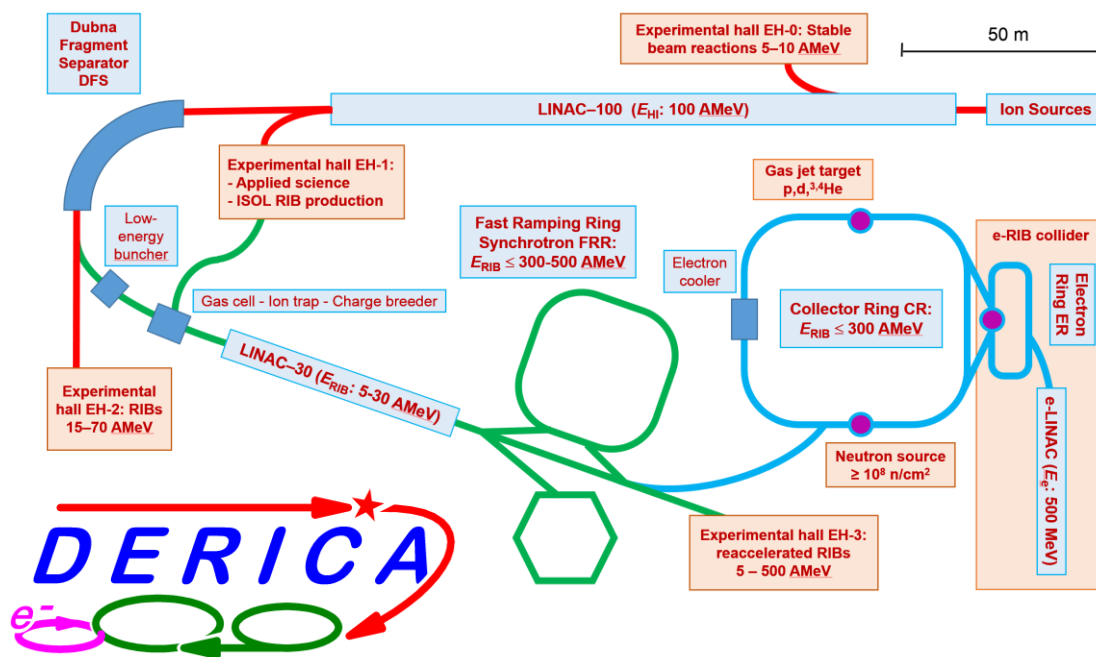
Лаборатория ядерных реакций  
им. Г.Н. Флерова, ОИЯИ, Дубна



## Статус и перспективы исследований с пучками радиоактивных изотопов в ЛЯР ОИЯИ



<http://aculina.jinr.ru/derica.php>



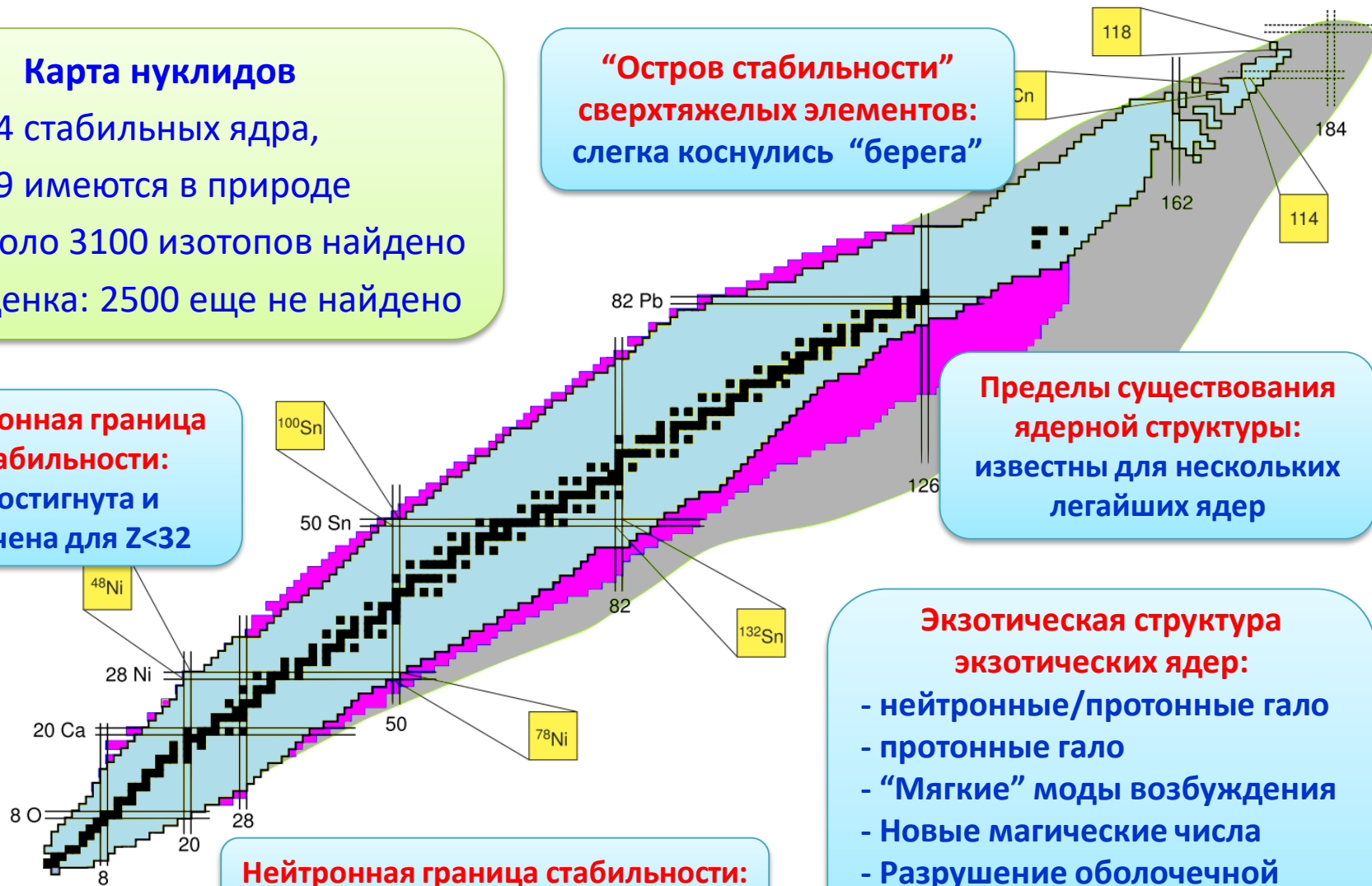
# Физика радиоактивных изотопов

# Физика экзотических ядер или радиоактивных изотопов – “магистральное направление” развития современной низкоэнергетической ядерной физики

## Карта нуклидов

- 254 стабильных ядра,
- 339 имеются в природе
- Около 3100 изотопов найдено
- Оценка: 2500 еще не найдено

**Протонная граница стабильности:**  
Достигнута и изучена для  $Z < 32$



**“Остров стабильности”  
сверхтяжелых элементов:**  
слегка коснулись “берега”

**Пределы существования  
ядерной структуры:**  
известны для нескольких  
легчайших ядер

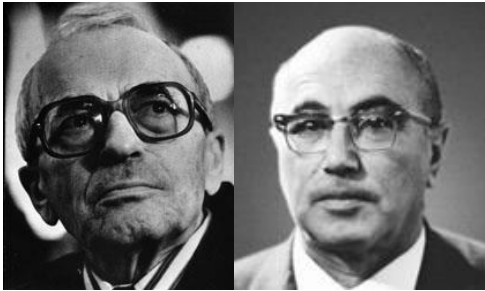
**Экзотическая структура  
экзотических ядер:**

- нейтронные/протонные гало
- протонные гало
- “Мягкие” моды возбуждения
- Новые магические числа
- Разрушение оболочечной структуры

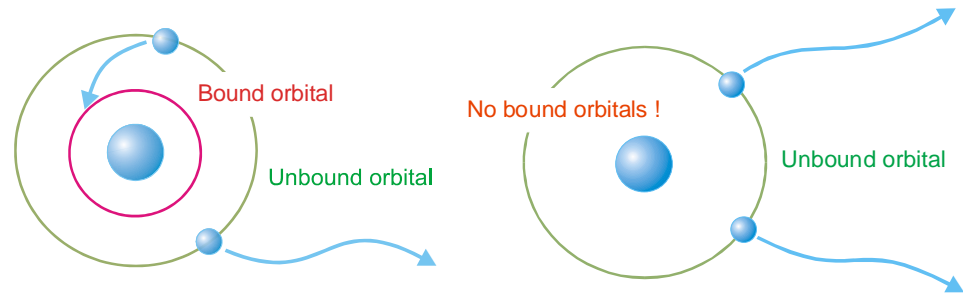
**Нейтронная граница стабильности:**  
Достигнута и изучена для  $N < 20$

Ретроспектива исследований  
легких экзотических ядер в  
ЛЯР ОИЯИ

# Discovery of $\beta$ -delayed proton emission



Ya.B. Zel'dovich and V.I. Goldansky, 1960, predictions of p, 2p radioactivities



**p-radioactivity – natural generalization of  $\alpha$ -radioactivity decay**

**2p-radioactivity – novel genuine quantum mechanical phenomenon**

**Search for p radioactivity – resulted in discovery of  $\beta$ -delayed p decays at FLNR**

**Actual discovery of p, 2p radioactivities much, much later**

V.A. Karnaukhov and G.M. Ter-Akopian, 1963,  $\beta$ -delayed p

Karnaukhov, V., G. Ter-Akopian, and V. Subbotin, 1963, in Proc. Asilomar Conf. on Reactions Between Complex Nuclei, edited by e. a. A. Ghiorso (University of California Press), p. 434.

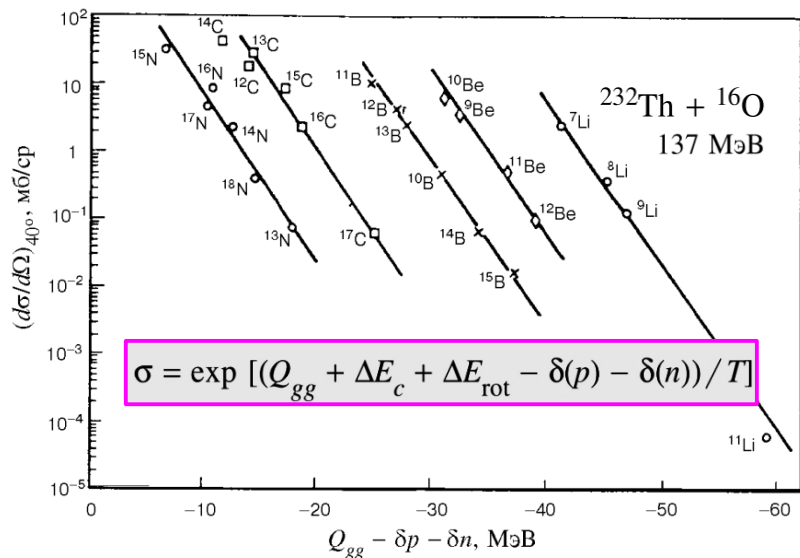


S. Hofmann 1982,  $^{151}\text{Lu}$ : p-radioactivity



M. Pfutzner 2002,  $^{45}\text{Fe}$ : 2p-radioactivity

# Deep inelastic collisions



Compound nucleus

Deep inelastic

Direct reactions

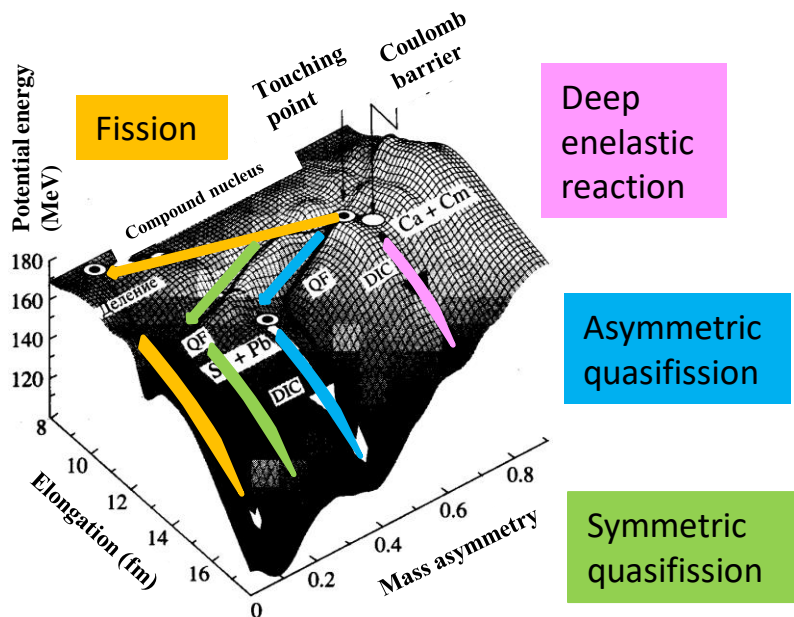


V.V. Volkov, 1966,  
Deep inelastic  
reactions

Discovery of light isotopes at FLNR in 1968-1971: <sup>18</sup>C, <sup>20,21</sup>N, <sup>22,23,24</sup>O, <sup>23,24,25</sup>F, <sup>25,26</sup>Ne

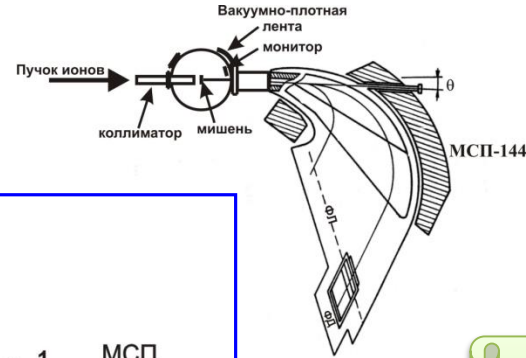
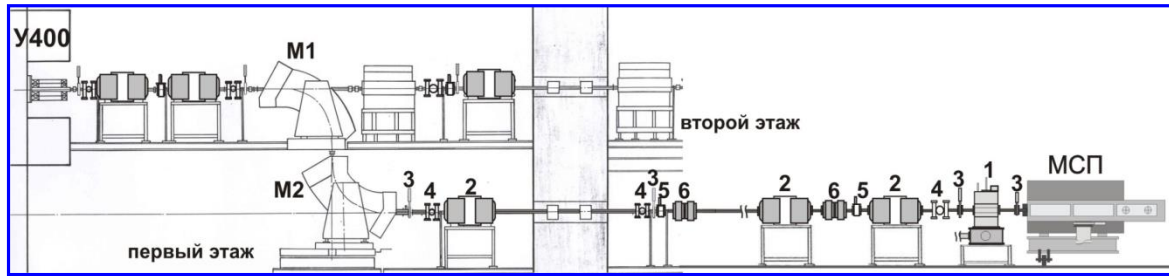
About 30 new isotopes discovered at FLNR in this technique

Deep inelastic reactions remain the prime tool for synthesis of heavy isotopes not accessible e.g. by fragmentation

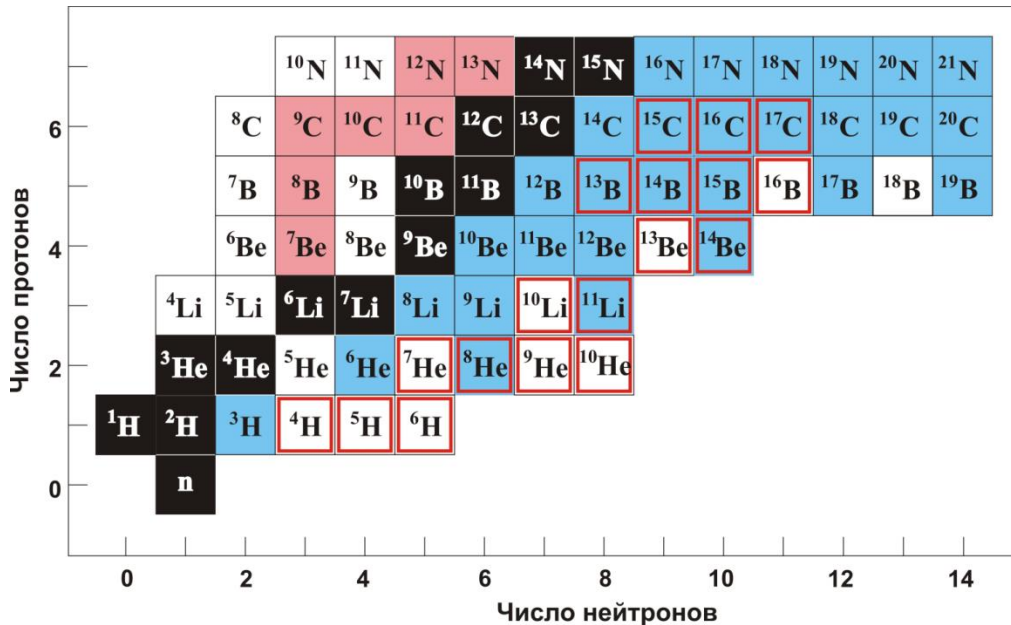


# Light neutron-rich nuclei $Z \leq 6$

U400 cyclotron and MSP-144 spectrometer



Yu.E. Penionzhkevich,  
Experimental campaign  
1985-1995



Charge-exchange, double charge-exchange,  
multinucleon transfer with stable beams

Masses of  ${}^4\text{H}$ ,  ${}^6\text{H}$ ,  ${}^{10}\text{He}$ , and  ${}^{16}\text{B}$

Spectroscopy of  ${}^7\text{He}$ ,  ${}^8\text{He}$ ,  ${}^9\text{He}$ ,  ${}^{10}\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ ,  
 ${}^{14}\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{Li}$ ,  ${}^{13}\text{Be}$ ,  ${}^{13}\text{B}$ ,  ${}^{14}\text{B}$ ,  ${}^{15}\text{B}$ ,  ${}^{16}\text{B}$

Main research at FLNR using MSP-144  
spectrometer,  ${}^{10}\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^{14}\text{Be}$ ,  ${}^{14}\text{B}$ ,  ${}^{15}\text{B}$ ,  ${}^{16}\text{B}$   
investigated in collaboration with HMI using  
Q3D spectrometer

# ЛЯР ОИЯИ в постсоветское время



# Предыстория. К4-К10.

Yu.Ts. Oganessian *et. al.*,  
Z. Phys. A341 (1992) 217



В середине 80-х сформировалась современная идеология исследования РИ. Примерно в это время апгрейдились и приобретали «классический» вид GSI, GANIL, MSU, и RIKEN

Инжекция от циклотрона U-400M

Кольцо К4 (Магнитное поле 4 Тм)

- Накопление
- Охлаждение
- Формирование банчей
- Ускорение

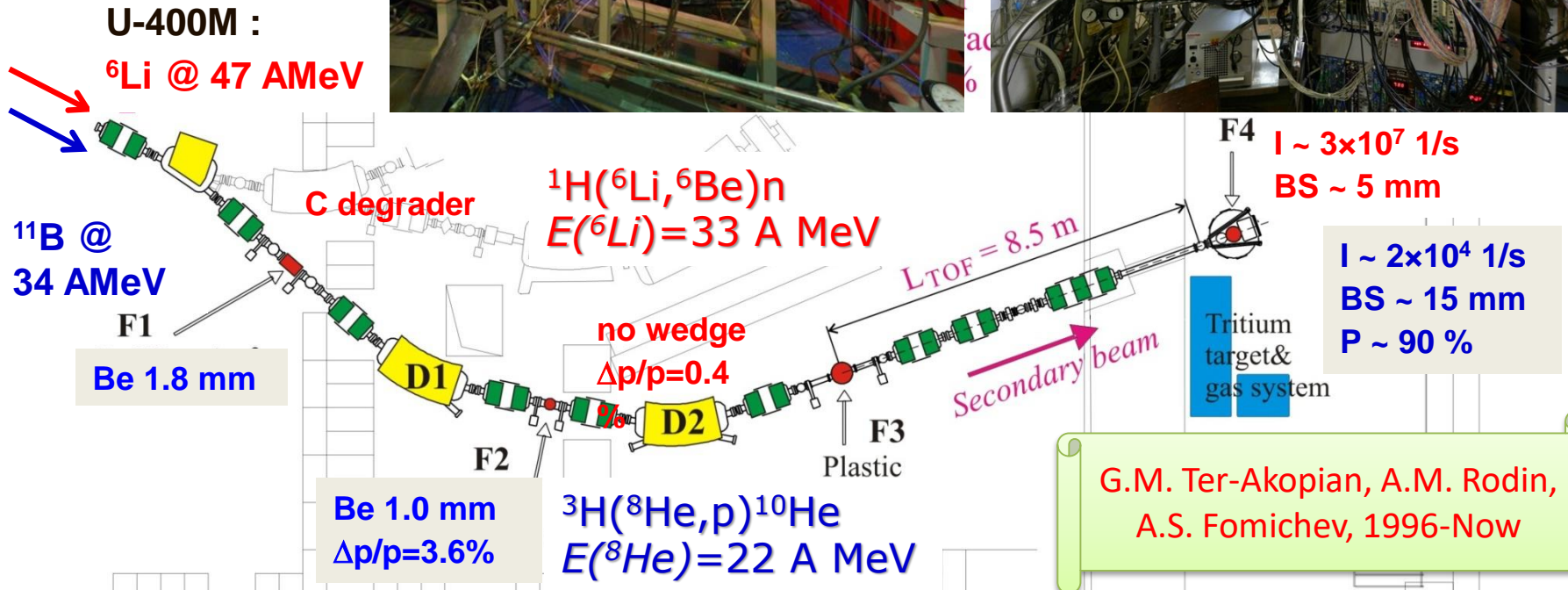
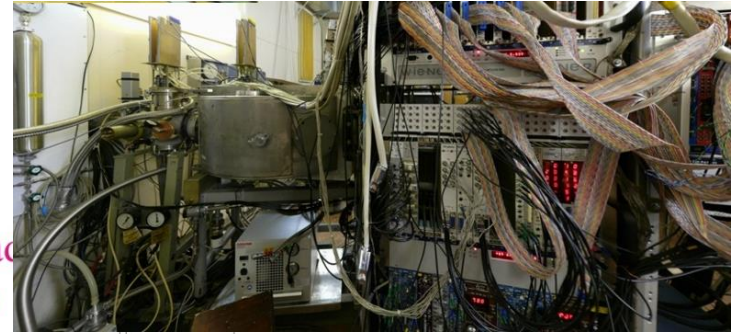
Канал сепарации  
(фрагмент-сепаратор)

Кольцо К10 (Магнитное поле 10 Тм)

- Спектрометр сверхвысокого разрешения
- Реакции на внутренней мишени

**Электрон-ионный коллайдер**

# Flerov Lab: "Superlights" – fragment separator ACCULINNA

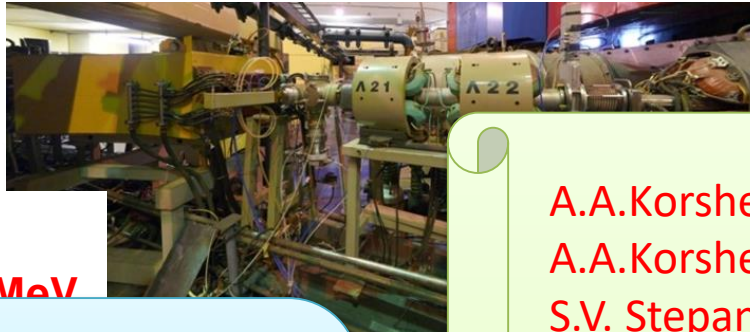


G.M. Ter-Akopian, A.M. Rodin,  
 A.S. Fomichev, 1996-Now

	F2	F3	F4
H/V magnification	0.5/2.0	1.0/1.0	2.25/1.6
Mom. dispersion, mm/%	4.0-18.0	—	—
Mom. resolution	0.003		
H/V RIB size, mm		8/10	20/16



# Flerov Lab: Superlights – fragment separator ACCULINNA



U-400M :

${}^6\text{Li}$  @ 17 AMeV

Transfer, charge-exchange and QFS reaction studies of  ${}^4,5\text{H}$ ,  ${}^{5,6,8,9,10}\text{He}$ ,  ${}^9\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Be}$ ,  ${}^{26,27}\text{S}$ ,  ${}^{17}\text{Ne}$

A.A.Korsheninnikov, PRL **82** (1999) 3581.  
 A.A.Korsheninnikov, PRL **87** (2001) 092501.  
 S.V. Stepanyanov *et al.*, PLB **542** (2002) 35.  
 M.S. Golovkov *et al.*, PLB **566** (2003) 70.  
 G.V. Rogachev *et al.* PRC **67** (2003) 041603(R).  
 M.S. Golovkov *et al.*, PRL **93** (2004) 262501.  
 M.S. Golovkov *et al.*, PLB **588** (2004) 163.  
 M.S. Golovkov *et al.*, PRC **76** (2007) 021605(R).  
 M.S. Golovkov *et al.*, PLB **672** (2009) 22.  
 L.V. Grigorenko *et al.*, PLB **677** (2009) 30.  
 S.I. Sidorchuk *et al.*, PRL **108** (2012) 202502.  
 A.S. Fomichev *et al.*, PLB **708** (2012) 6.  
 I.A. Egorova *et al.*, PRL **109** (2012) 202502.  
 P. G. Sharov *et al.*, PRC **96** (2017) 025807.  
 V. Chudoba *et al.*, PRC C **98**, 054612 (2018).

Be 1.0 mm  
 $\Delta p/p=3.6\%$

${}^3\text{H}({}^8\text{He})$   
 $E({}^8\text{He})$

	F2
H/V magnification	0.5/2.0
Mom. dispersion, mm/%	4.0-18.0
Mom. resolution	0.003
H/V RIB size, mm	

8/10

20/16



# Competitive light nuclei RIB program at FLNR

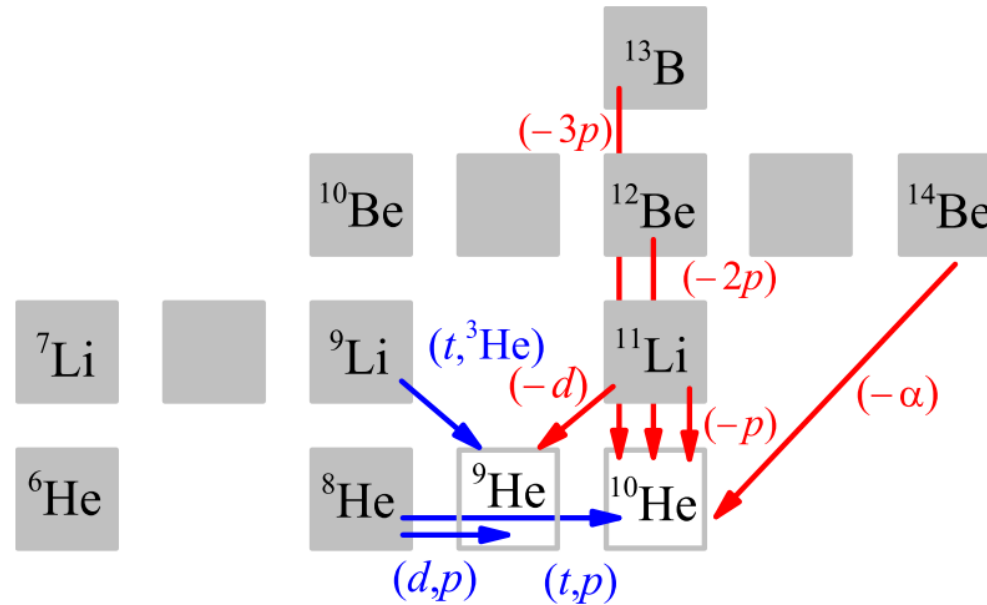
## 1. Field of studies

Intermediate energy reactions  
(20-70 MeV/nucleon)

High energy reactions  
(>70-100 MeV/nucleon)

Transfer reactions

Knockout reactions

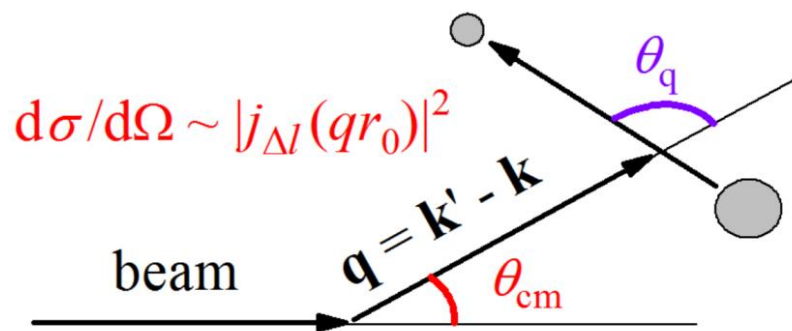


Importance of complementary reaction studies

# Competitive light nuclei RIB program at FLNR

## 2. Correlations and few-body dynamics studies

**Correlations for aligned continuum states populated in the direct reactions**

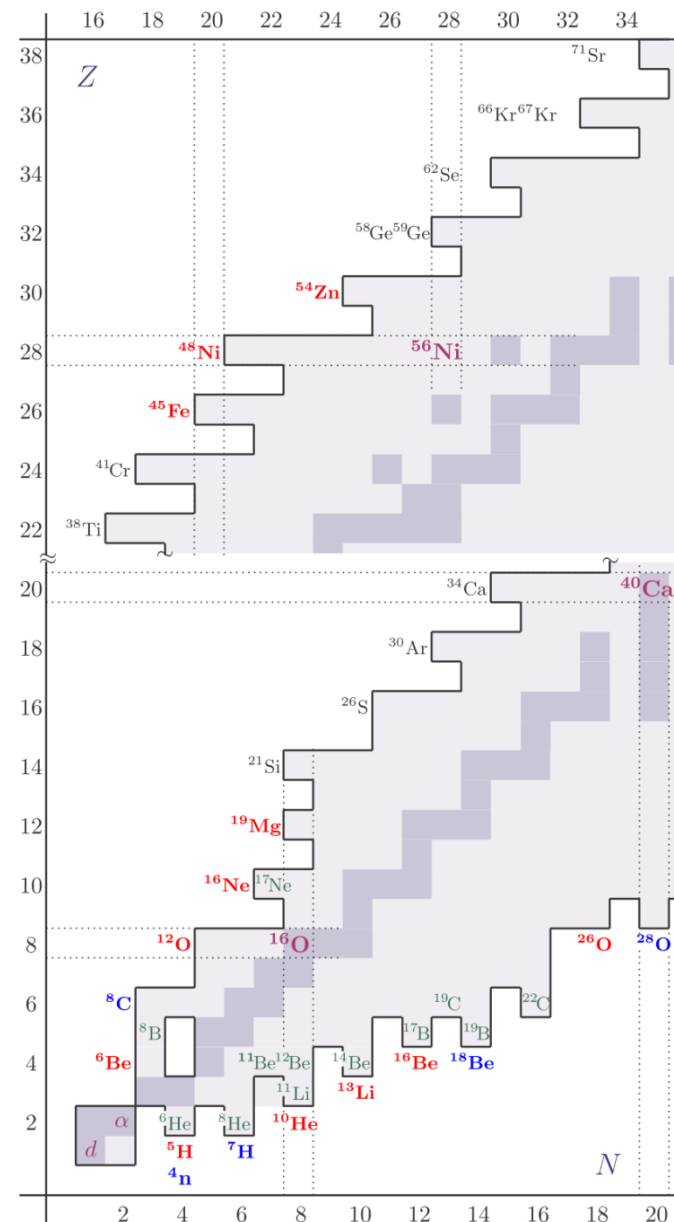


**Few-body dynamics near the driplines, Correlations in the few-body decays: additional degrees of freedom**

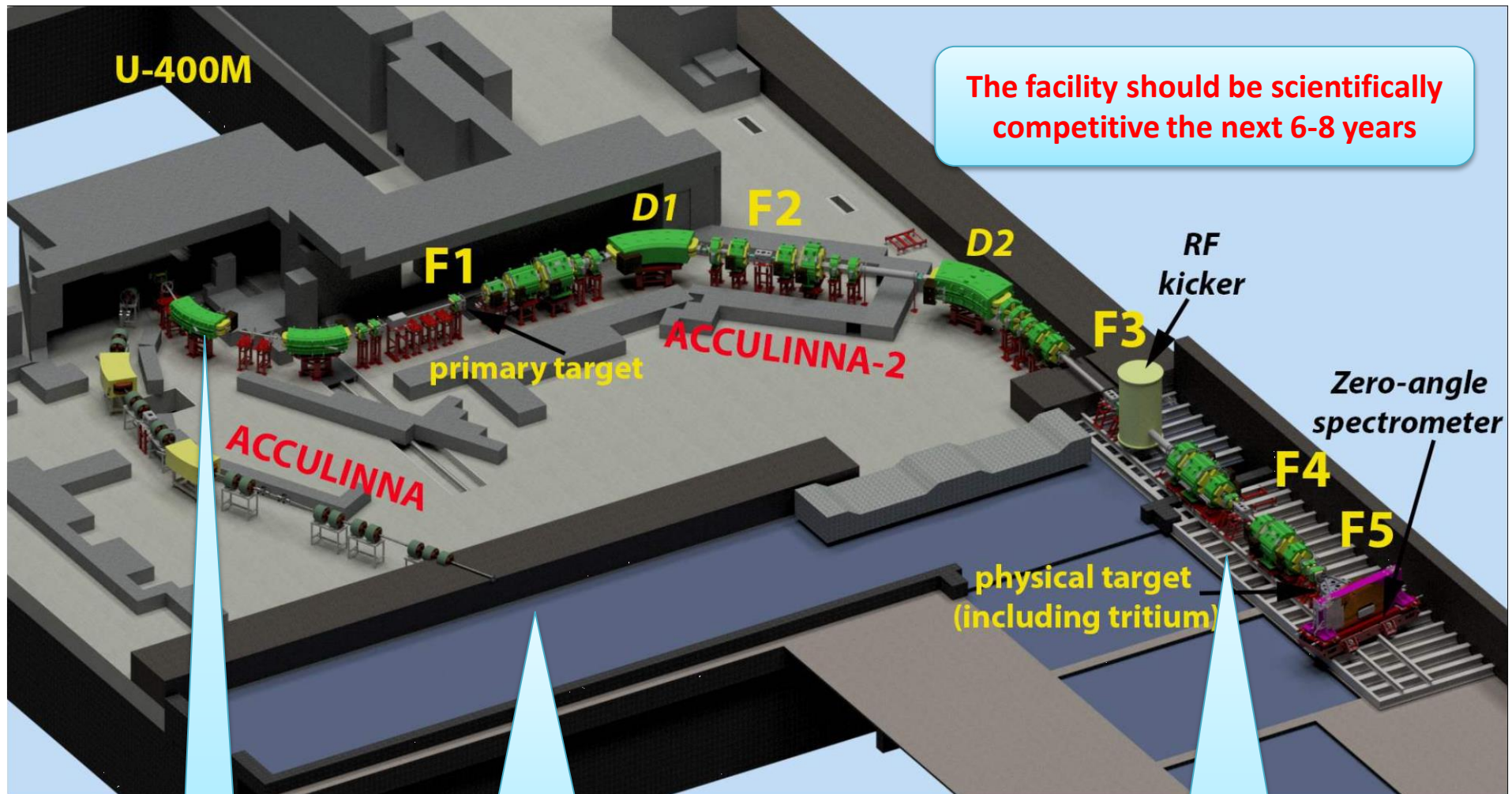
Few-body dynamics at the driplines is consequence of (i) clusterization and (ii) pairing

Exotic phenomena near driplines: Haloes (green) True 2p/2n decays (red) 4p/4n emitters (blue) NOT INVESTIGATED (gray)

**NOT SO EXOTIC:** More or less every second isotope in vicinity of the driplines has features connected to few-body dynamics



# 2014-2017: from ACCULINNA to ACCULINNA-2



U-400M  
hall

ACCULINNA  
experimental hall

ACCULINNA-2  
experimental hall

ЛЯР ОИЯИ сегодня

# What we already have at Flerov lab

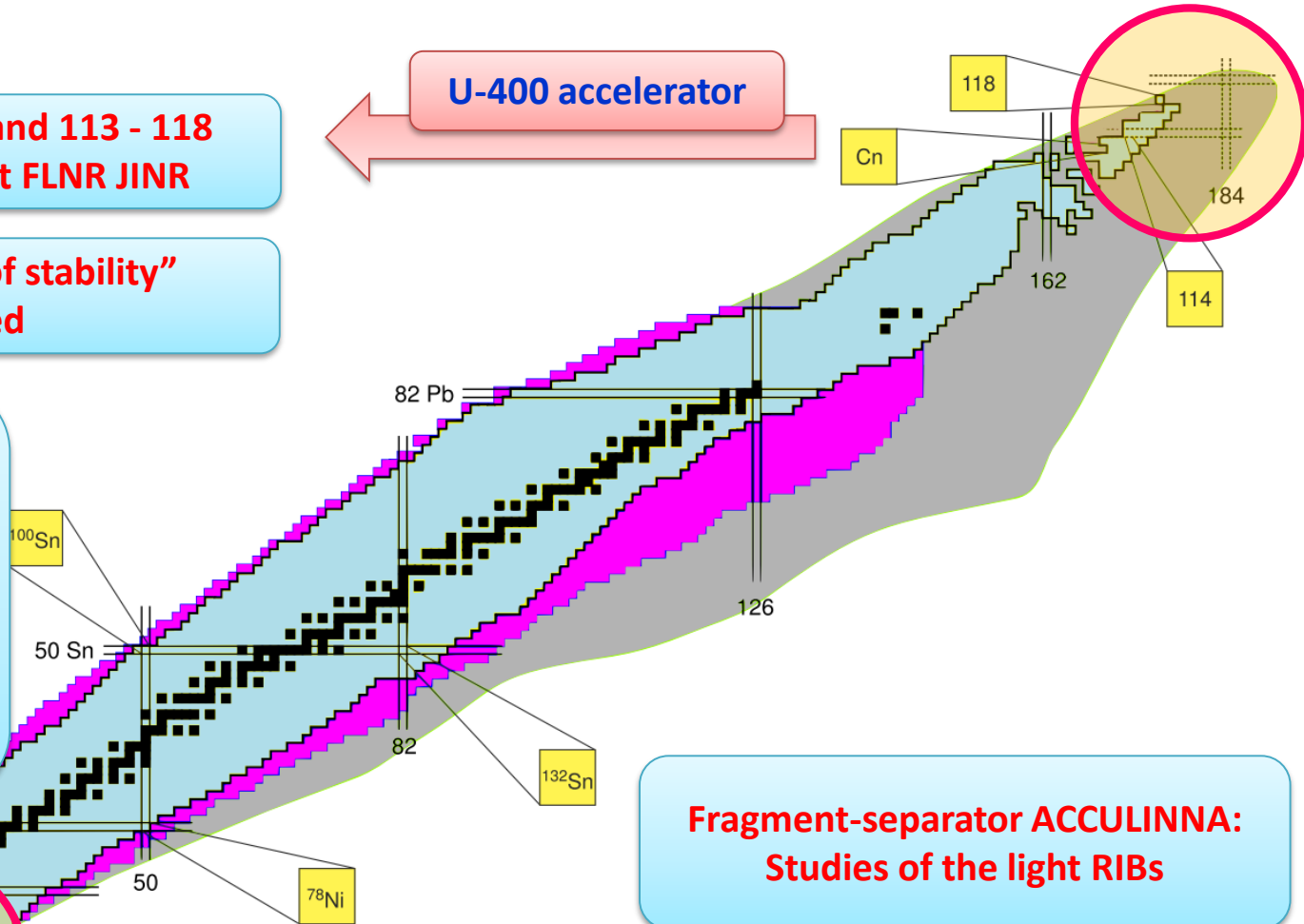
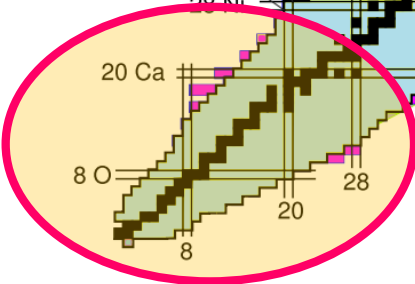
Elements 102 - 108 and 113 - 118  
 were synthesized at FLNR JINR

Superheavy "isle of stability"  
 discovered

**New elements**

- <sup>113</sup>Nh Nihonium
  - <sup>114</sup>Fl Flerovium
  - <sup>116</sup>Lv Livermorium
  - <sup>115</sup>Mc Moscovium
  - <sup>117</sup>Ts Tennessine
  - <sup>118</sup>Og Oganesson
- recognized recently

U-400 accelerator



U-400M accelerator

Fragment-separator ACCULINNA:  
 Studies of the light RIBs

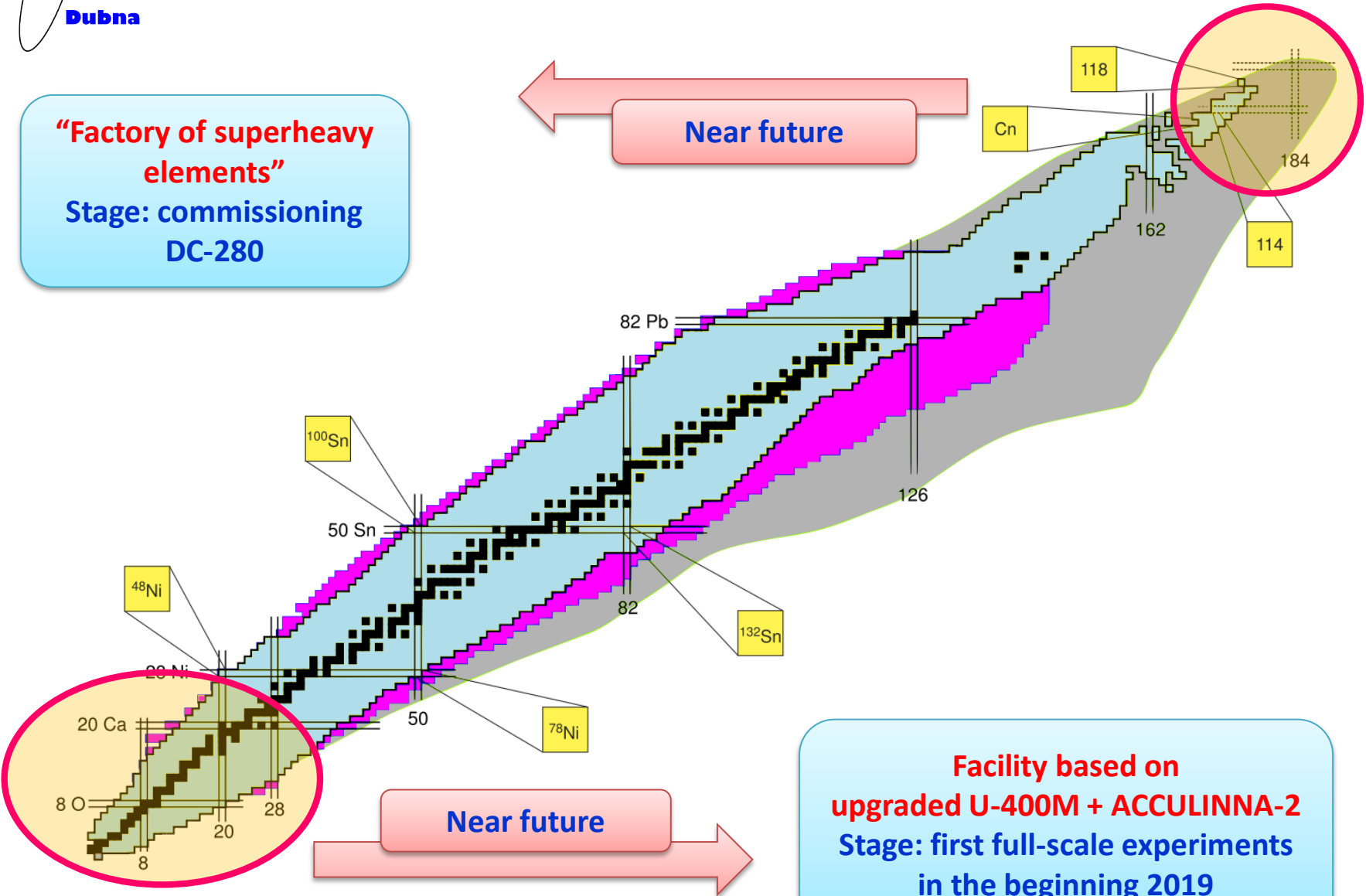
The only facility for RIB studies in  
 Russia, CIS, and Eastern Europe



# FLNR prospects

**“Factory of superheavy elements”**  
 Stage: commissioning  
 DC-280

Near future

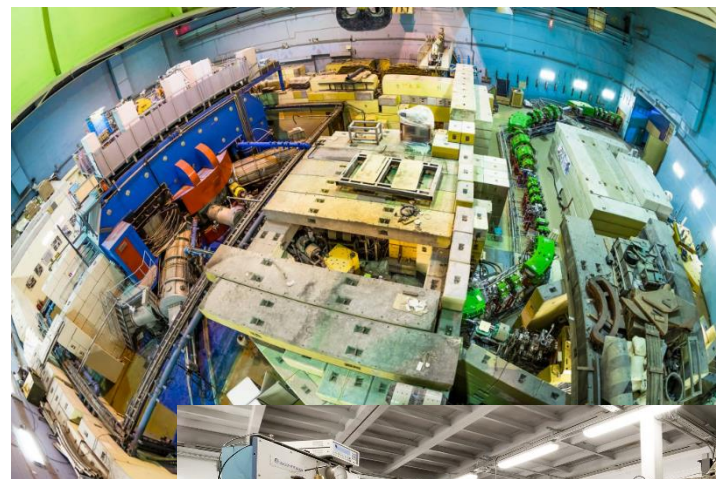


**Facility based on  
 upgraded U-400M + ACCULINNA-2**  
 Stage: first full-scale experiments  
 in the beginning 2019

# Новые установки ЛЯР ОИЯИ

Фрагмент-сепаратор ACCULINNA-2

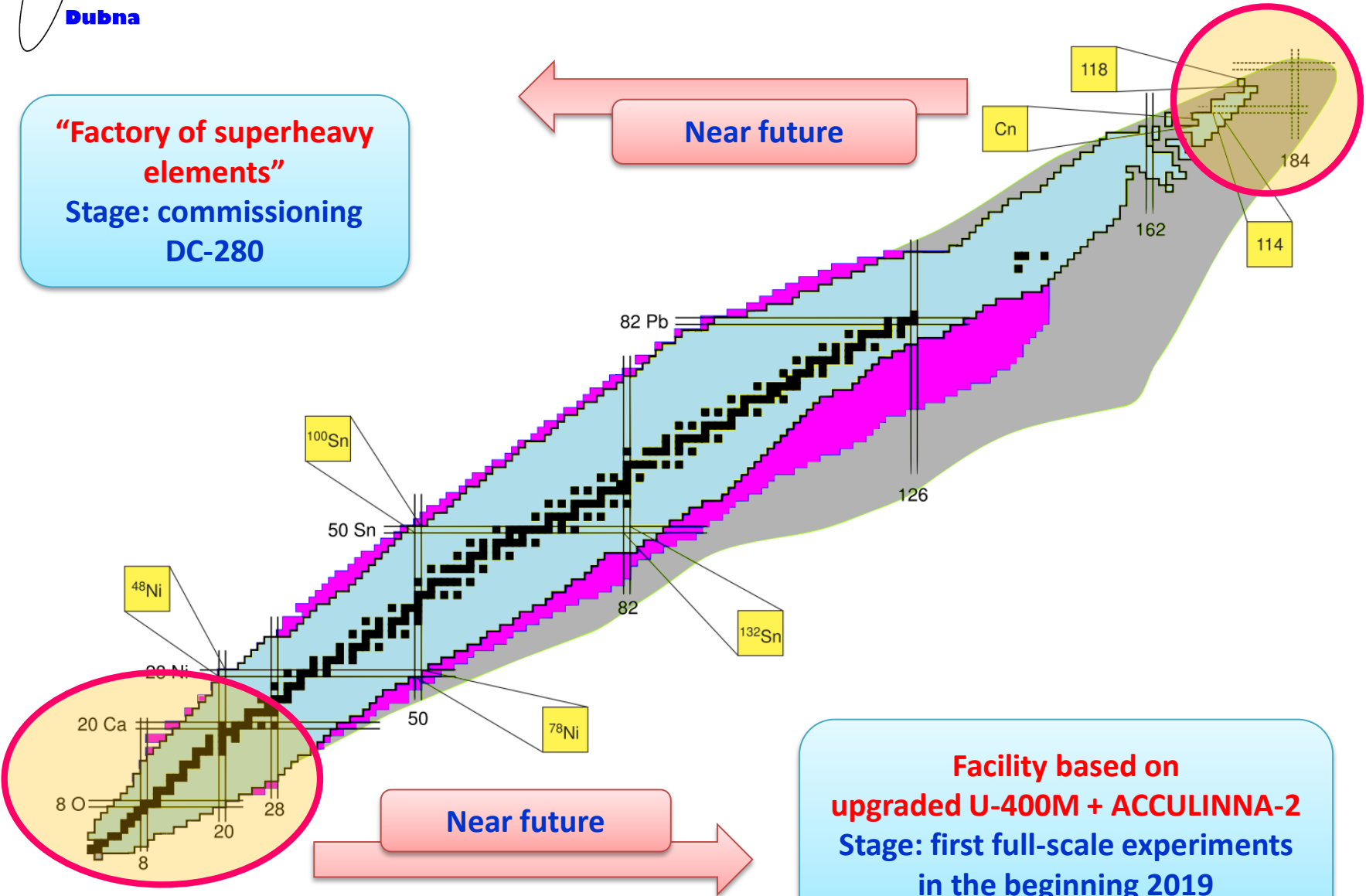
“Фабрика сверхтяжелых элементов”



# FLNR prospects

**“Factory of superheavy elements”**  
 Stage: commissioning  
 DC-280

Near future



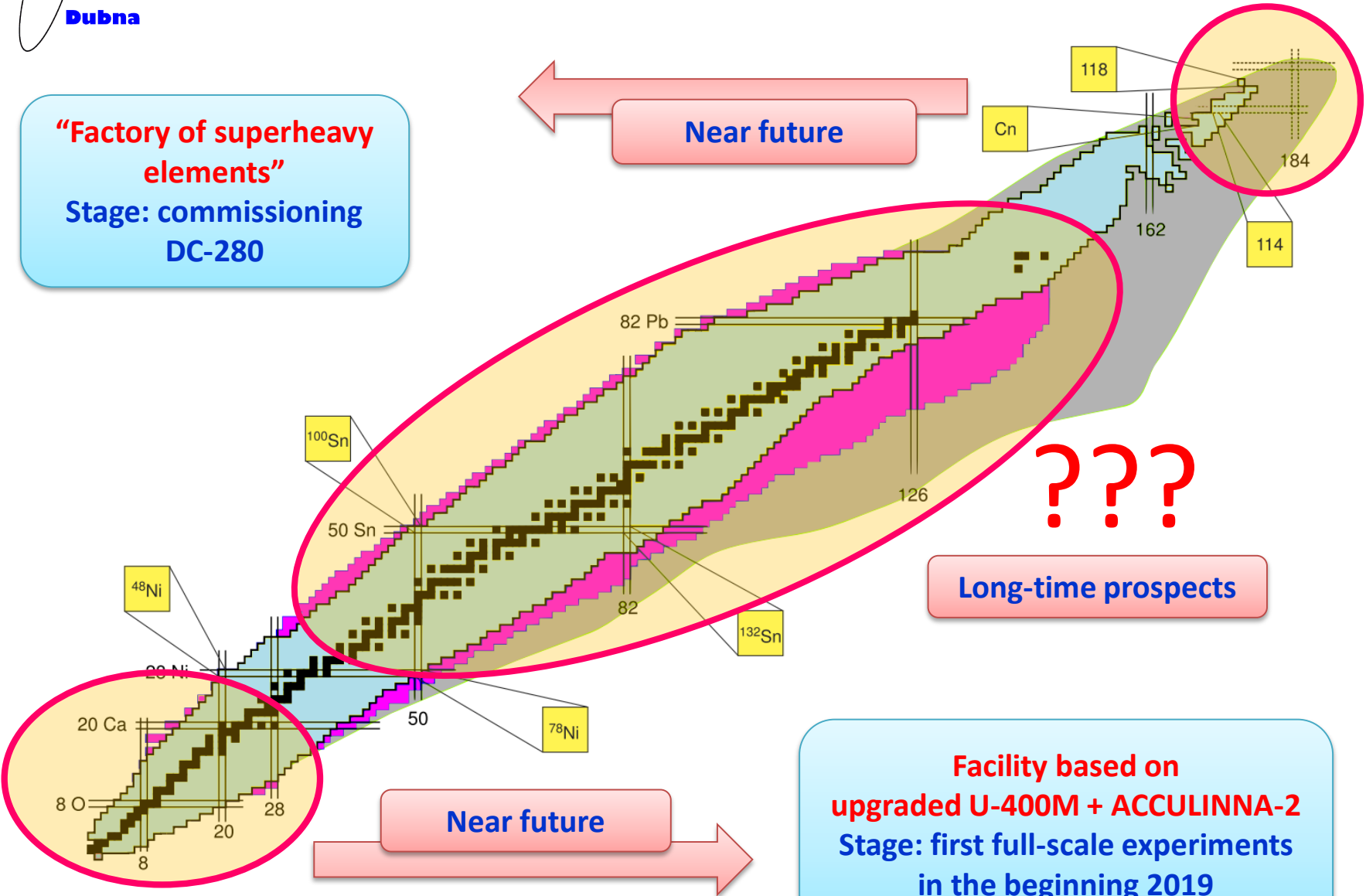
Near future

**Facility based on  
 upgraded U-400M + ACCULINNA-2**  
 Stage: first full-scale experiments  
 in the beginning 2019

# FLNR long-term prospects

**“Factory of superheavy elements”**  
 Stage: commissioning  
 DC-280

Near future



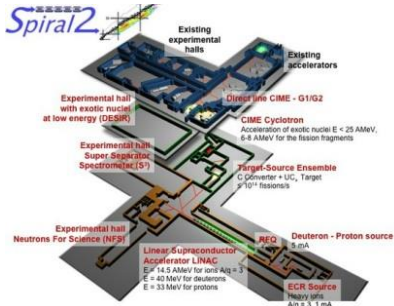
Long-time prospects

**Facility based on  
 upgraded U-400M + ACCULINNA-2**  
 Stage: first full-scale experiments  
 in the beginning 2019

Near future

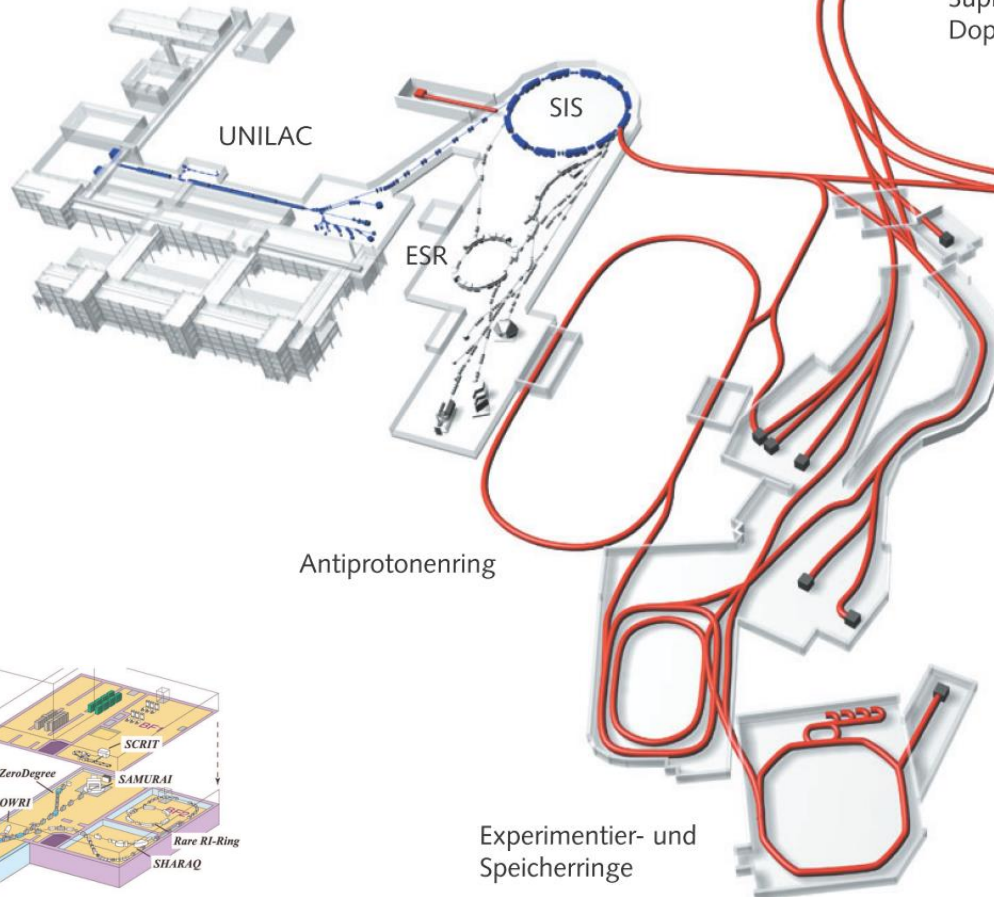
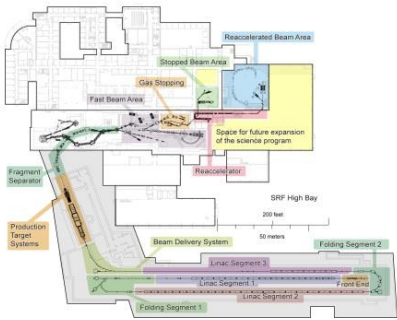
# Фабрики радиоактивных изотопов завтра

# Фабрики радиоактивных изотопов: Все больше, и больше, и больше...



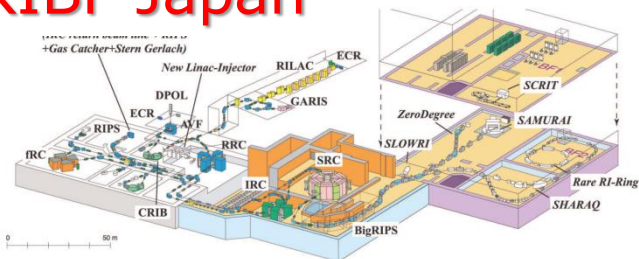
## SPIRAL2 France

## FRIB USA



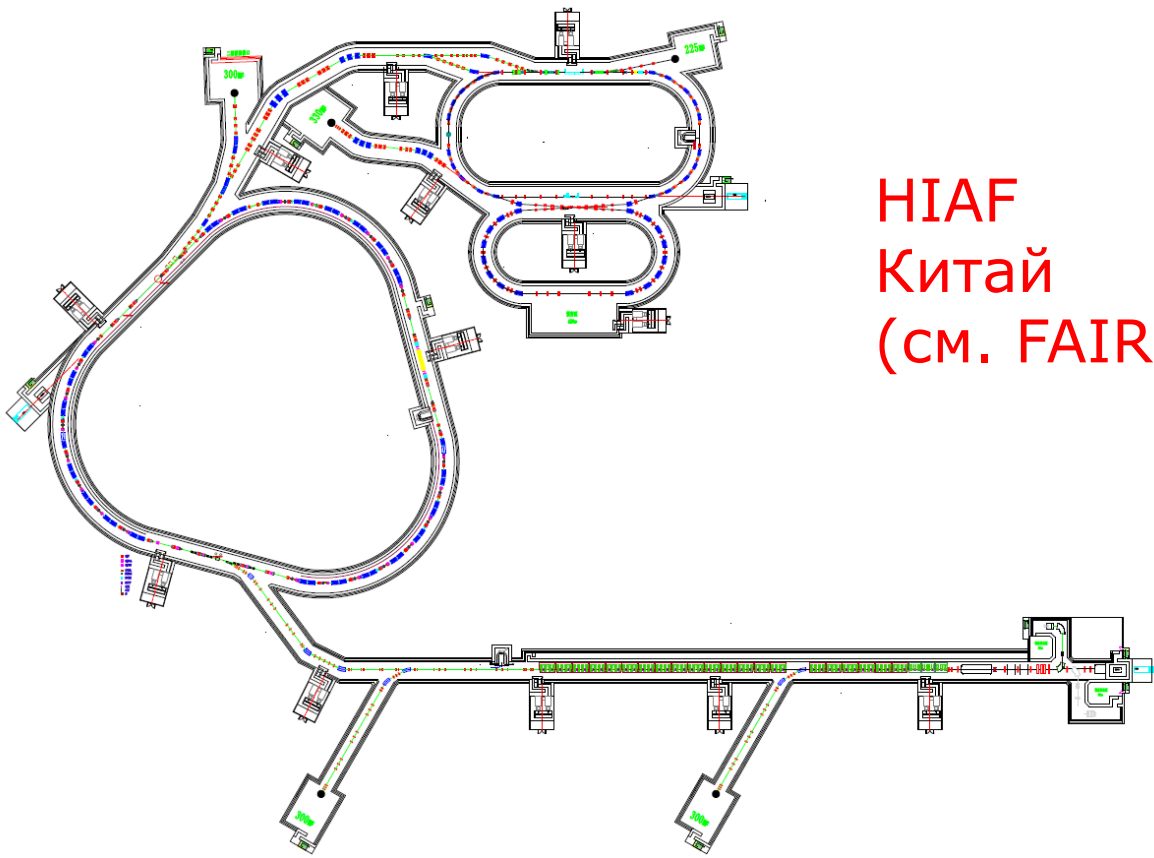
## FAIR, Germany

## RIBF Japan



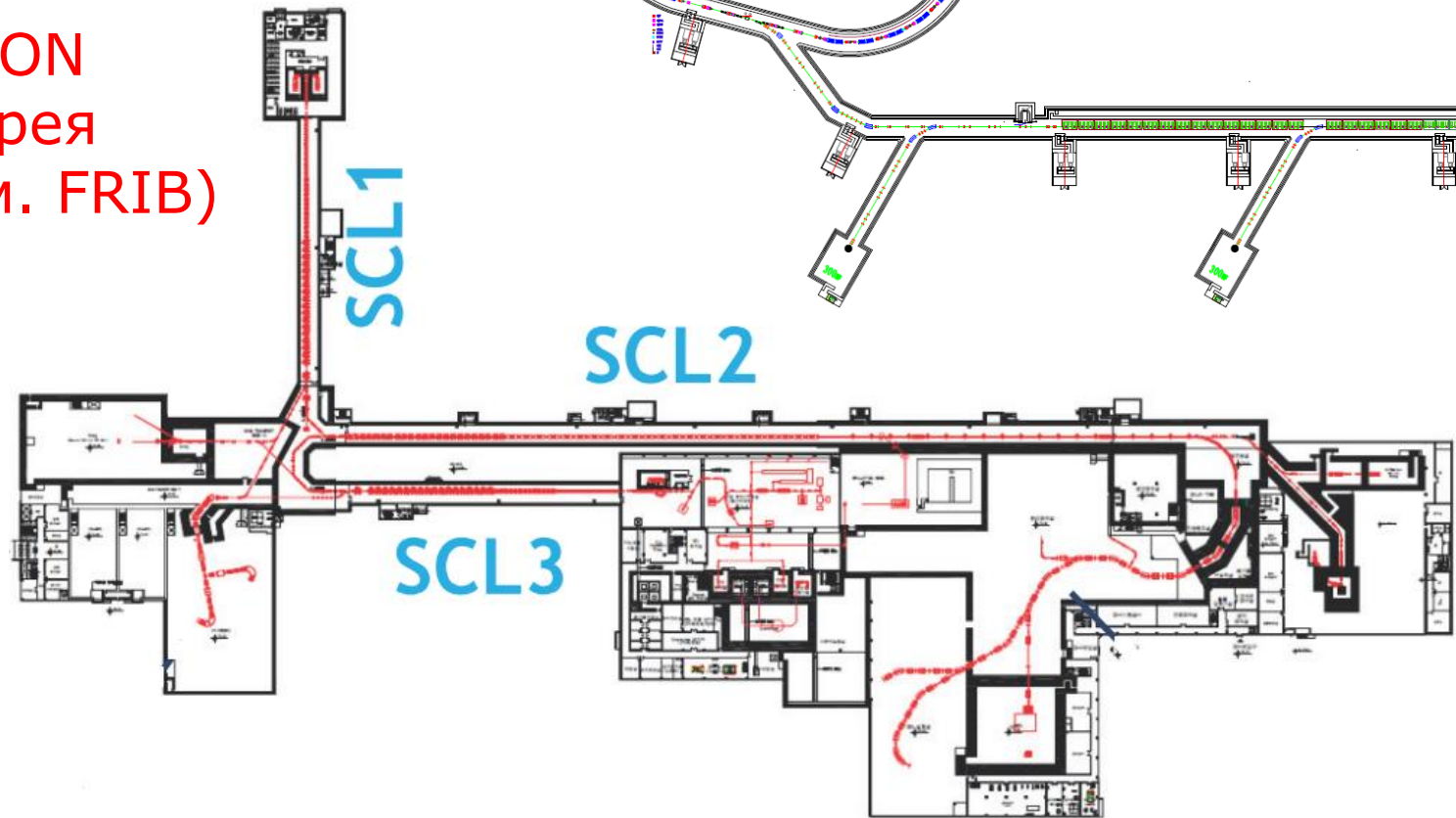
# И еще больше...

Горизонтальный  
размер слайда ~1 км



НИАФ  
Китай  
(см. FAIR)

РАОН  
Корея  
(см. FRIB)



**Нарастание масштаба –**  
**(i) Увеличение интенсивности**  
**вторичных РИ и**  
**(ii) Универсализм «фабрик РИ»**

**Нарастание масштаба**  
**современных «фабрик»**  
**экзотических ядер.**  
**Типичный ценник: 1-2 G€**

**Можно ли в в наших условиях**  
**обеспечить конкурентоспособную**  
**на мировом уровне научную**  
**программу (и не разориться)?**

**Разумно ограничить универсализм**  
**Отправиться на поиск Terra Incognita**



# Поиск «экологической ниши»

«Дефицитная» область:  
физика экзотических ядер  
в накопительных кольцах

«Пустыня»: изучение  
экзотических ядер в  
электрон-РИ коллайдере

Изохронная масс-  
спектрометрия

Etc....

Комплекс электрон-РИ  
коллайдера

Высокоточные  
реакции на  
внутренних газовых  
мишенях

Атомная физика с  
ободранными  
ионами

Накопительное  
кольцо для РИ

Исследования  
радиоактивности с  
ободранными ионами

Спектрометр в точке  
столкновения

Электронное  
накопительное кольцо

Электронный  
ускоритель

# Электронное рассеяние

Наиболее фундаментальная информация о ядрах (i) массы (ii) радиусы (EM формфакторы)

Электромагнитная проба наиболее надежно изученная

Электромагнитное взаимодействие – слабое (нет перерасеяния)

➤ Быстрые электроны, первый Борн

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{PWBA}} = \frac{\sigma_M}{1 + (2E/M_A) \sin^2(\theta/2)} |F_{\text{ch}}(q)|^2$$

$$\sigma_M = (e^4/4E^2) \cos^2(\theta/2) \sin^{-4}(\theta/2)$$

$$q = 2k \sin(\theta/2)$$

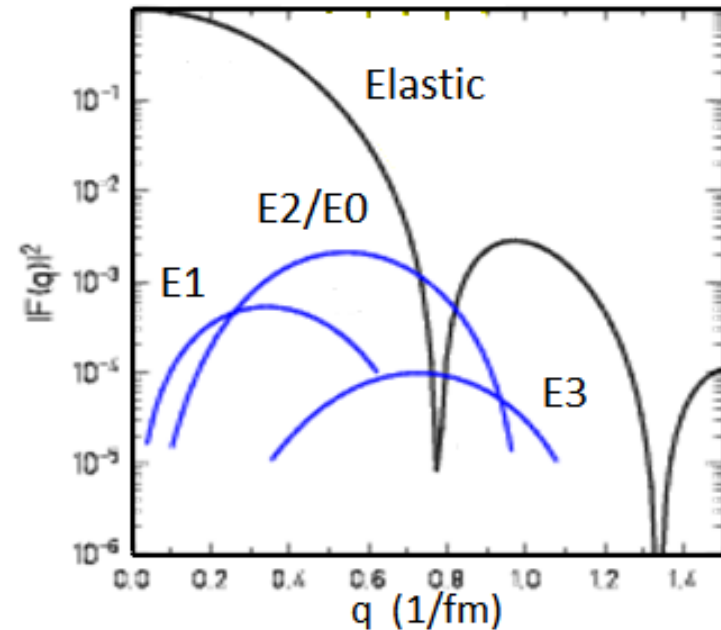
➤ Зарядовый формфактор и радиус

$$F_{\text{ch}}(q) = 4\pi \int_0^\infty dr r^2 j_0(qr) \rho_{\text{ch}}(r)$$

$$F_{\text{ch}}(q)/Z = 1 - \frac{q^2}{6} \langle r_{\text{ch}}^2 \rangle + \dots$$



**Robert Hofstadter** 1915-1990, Нобелевская премия 1961 «за пионерские работы по изучению электронного рассеяния в атомном ядре и за последующие открытия касающиеся структуры нуклона»



- Эксперименты в ловушках – извлечение  $r_{\text{ch}}$  из изотопических сдвигов

- Электронное рассеяние – дифференциальные характеристики (формфакторы)

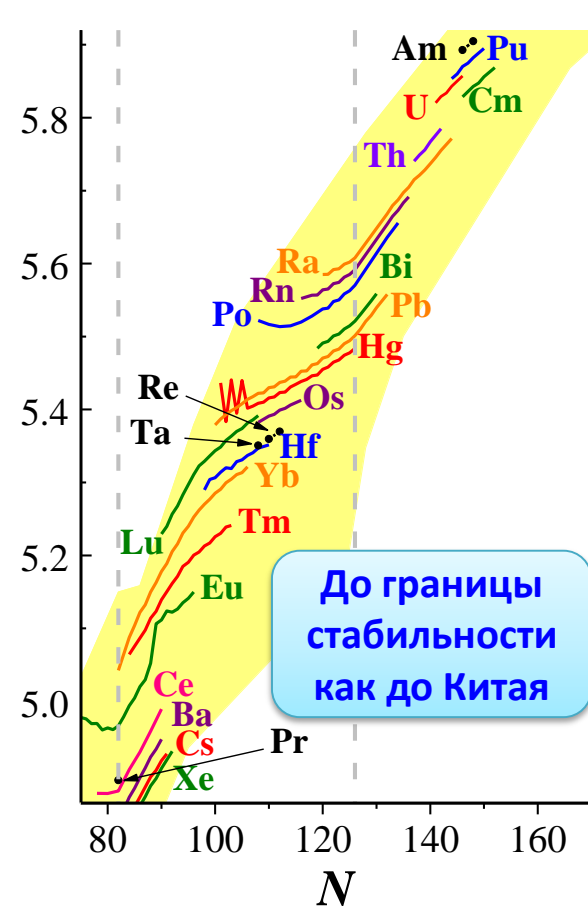
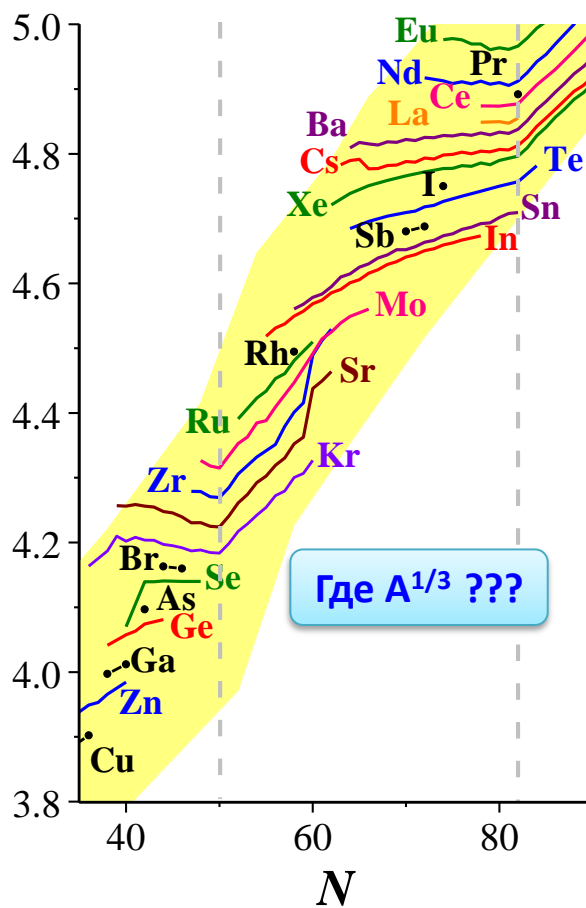
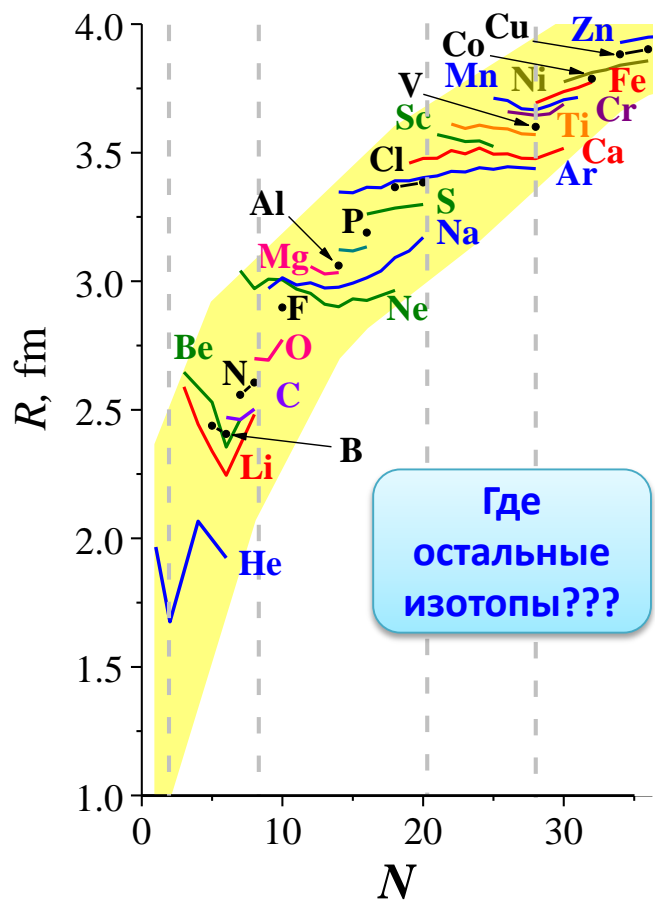
# Зарядовые радиусы – обширное поле для исследований

Радиусы  
измерены у  
900 из 3100  
уже открытых  
изотопов

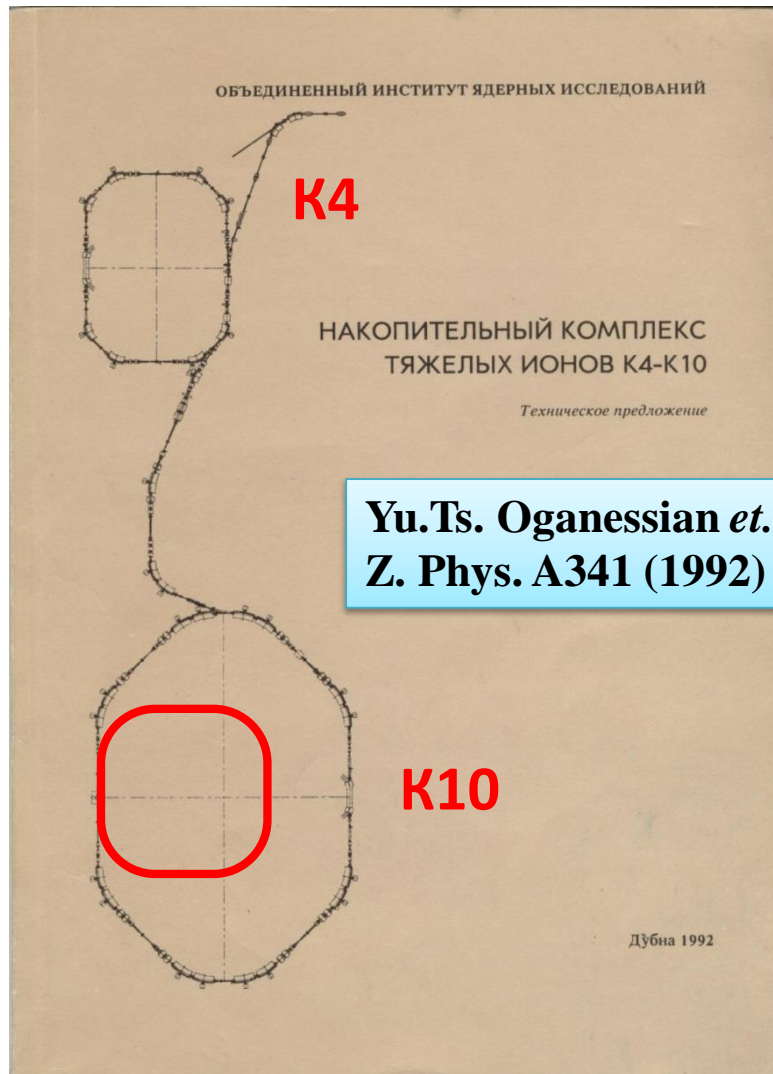
Некоторые  
изотопические  
цепи хорошо  
изучены –  
некоторые нет

Систематики  
демонстрируют  
сложное поведение  
(особенно вблизи  
замыкания оболочек)

Во многих  
изотопических цепях  
мы еще очень  
далеки от границы  
стабильности



# Предыстория. К4-К10.



**Yu. Ts. Oganessian et. al.,  
Z. Phys. A341 (1992) 217**

Инжекция от циклотрона U-400M

Кольцо К4 (Магнитное поле 4 Тм)

- Накопление
- Охлаждение
- Формирование банчей
- Ускорение

Канал сепарации  
(фрагмент-сепаратор)

Кольцо К10 (Магнитное поле 10 Тм)

- Спектрометр сверхвысокого разрешения
- Реакции на внутренней мишени

**Электрон-ионный коллайдер**

# DERICA

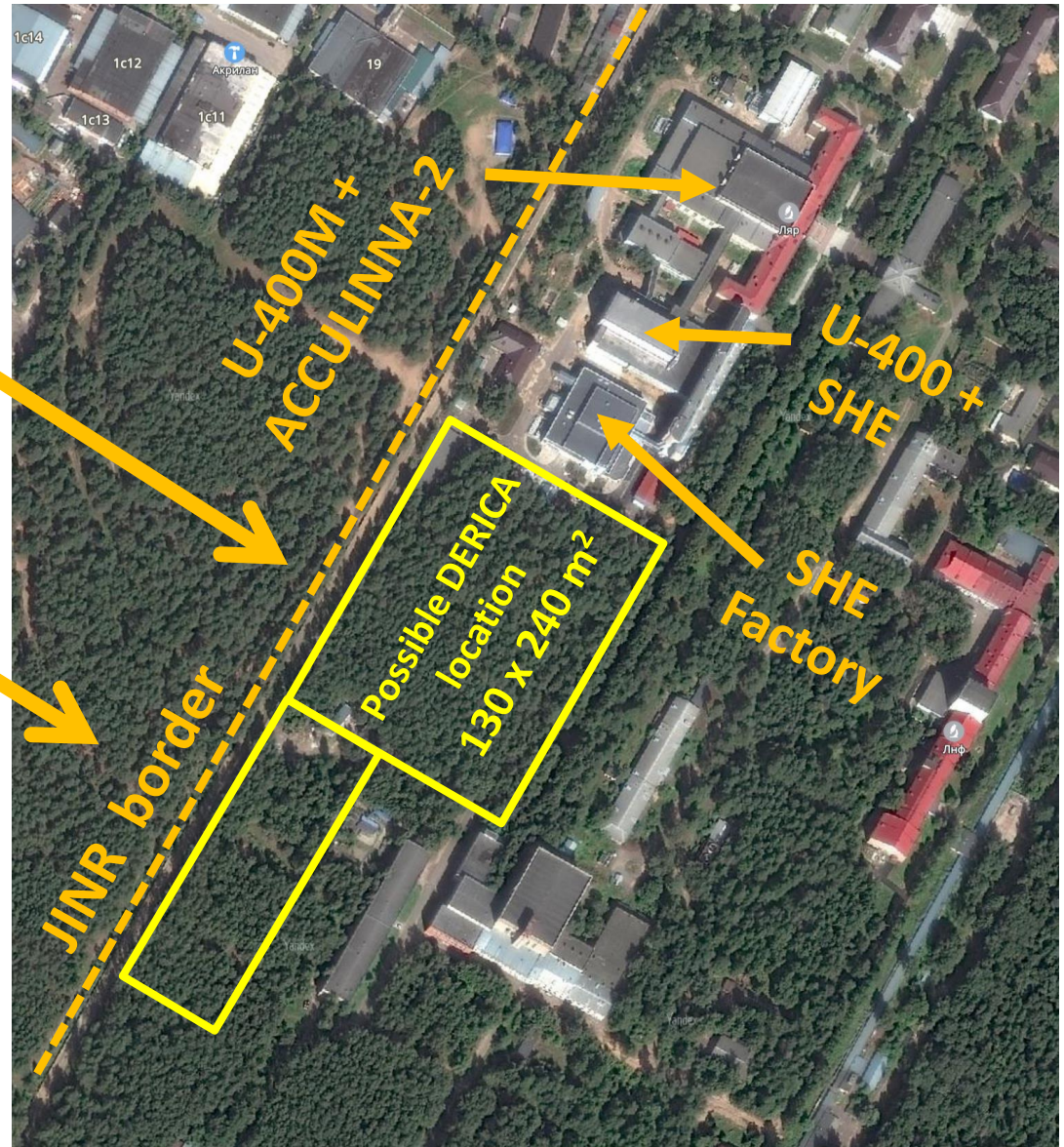
## Dubna Electron-Radioactive Isotope Collider Facility

- Объединённый институт ядерных исследований, Дубна
- Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

# Возможное расположение DERICA

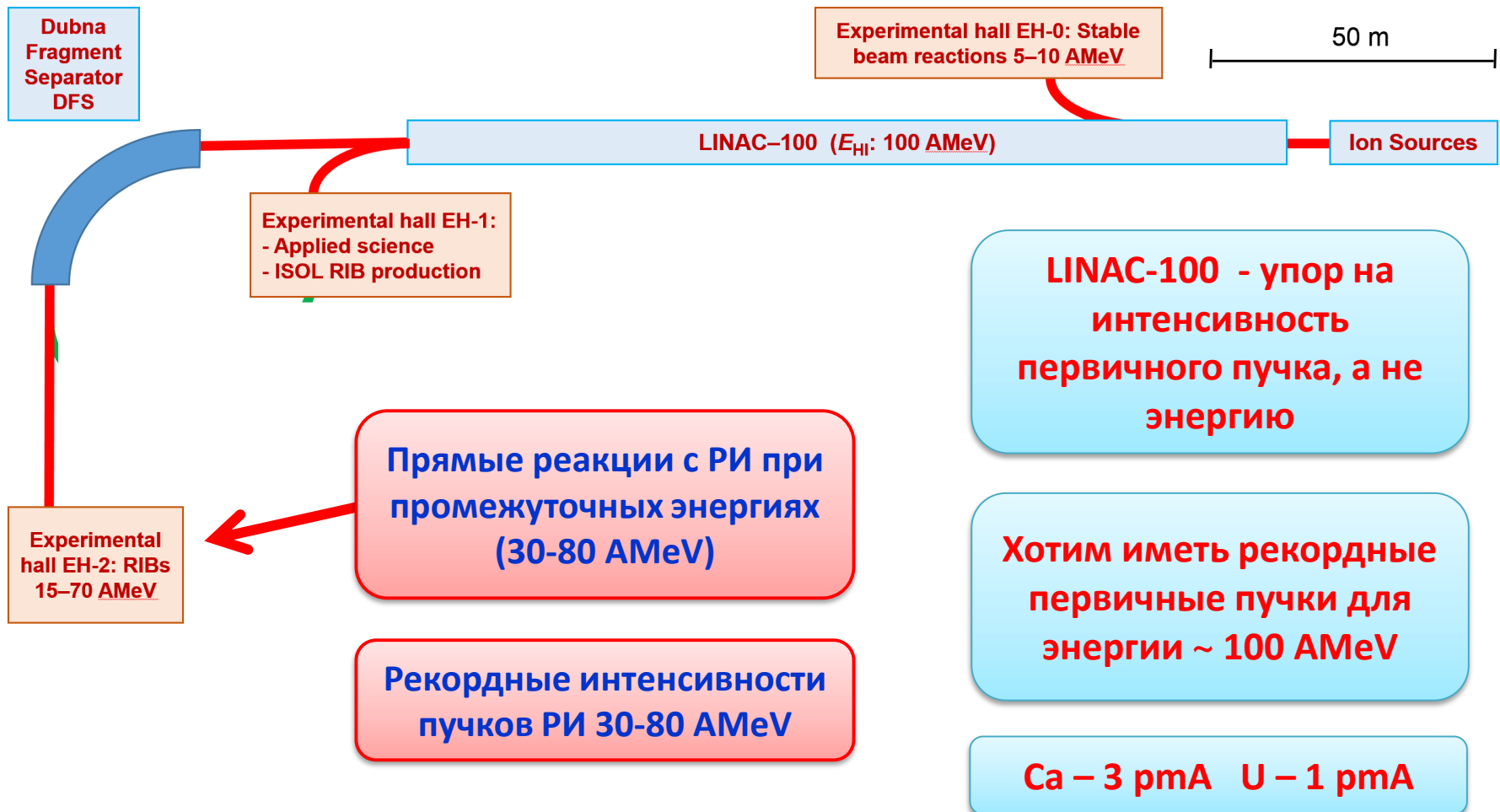
**Есть где строить**

**Можно  
заложить  
возможность  
кардинальной  
модернизации**



# DERICA стадия 2

Новые экспериментальные возможности на каждой стадии



## Первичные пучки современных «фабрик РИ»

RIBF (RIKEN)	370 AMeV
FAIR (Darmstadt)	1800 AMeV
FRIB (MSU)	240 AMeV
RAON (S.Korea)	200 AMeV
HIAF (China)	800 AMeV

**Незачем  
соревноваться в  
«энергетике»**

## Выбранная стратегия производства РИ

**Фокусируемся на  
ИНТЕНСИВНОСТИ  
первичных пучков при  
относительно скромной  
энергии ~100 AMeV**

**С комфортом работаем с  
относительно  
низкэнергетическими РИ:**

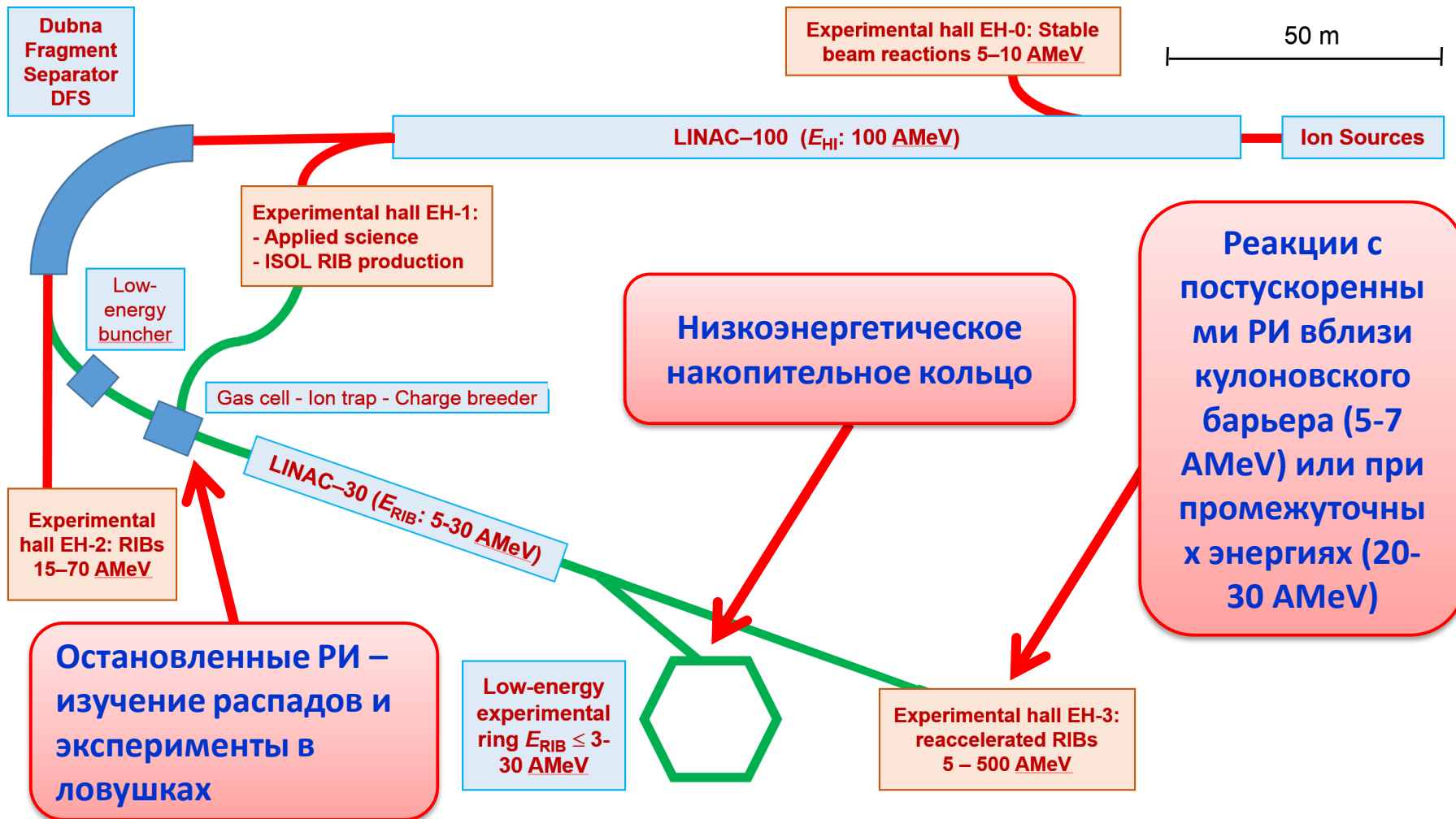
- Проще изучать прямые реакции при 20-70 AMeV
- Проще работать с остановленными пучками

**Основной вызов проекта – построить рекордный  
сильноточный тяжелоионный сверхпроводящий LINAC**



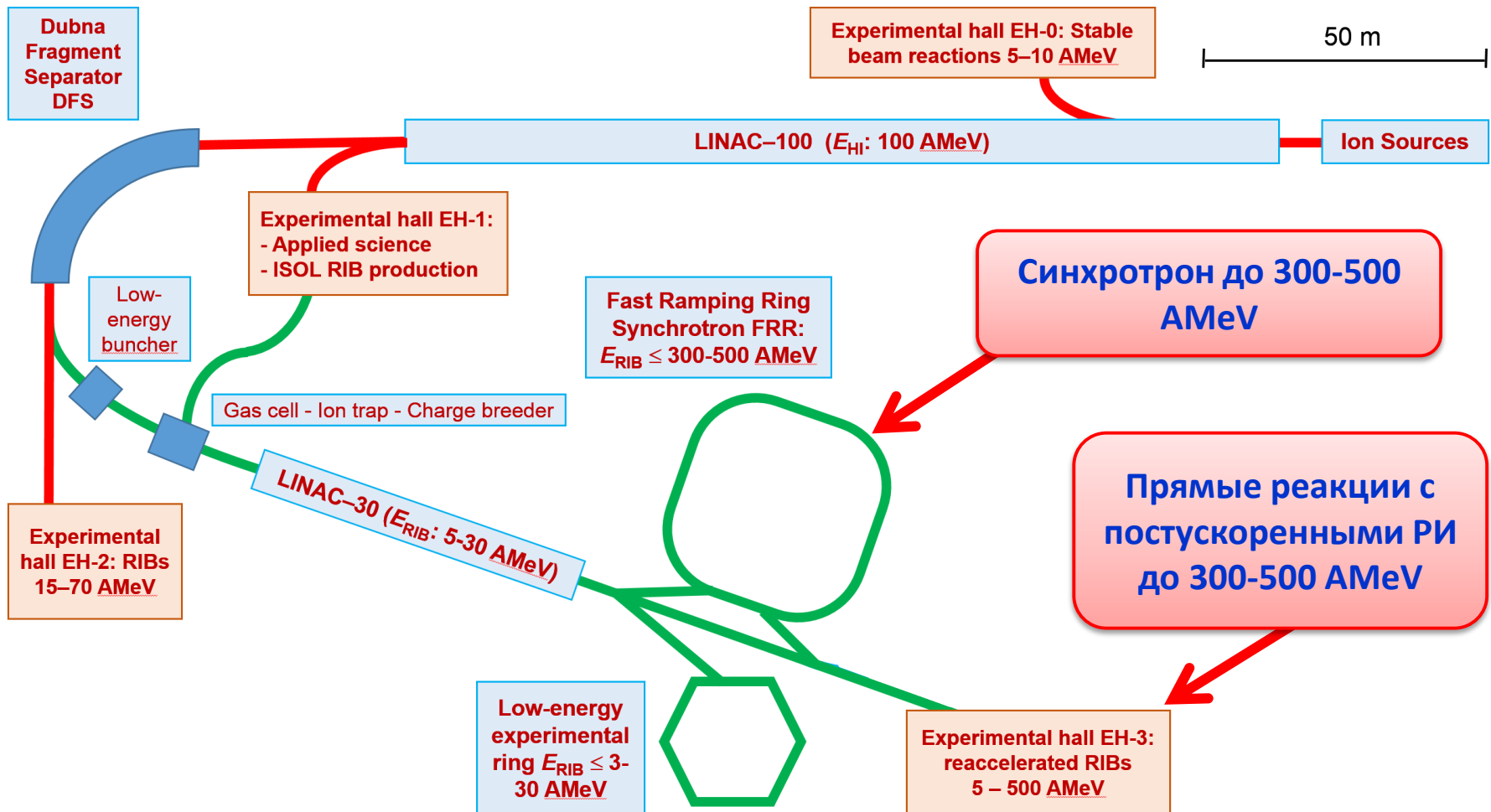
# DERICA стадия 3.1

Новые экспериментальные возможности на каждой стадии



# DERICA стадия 3.2

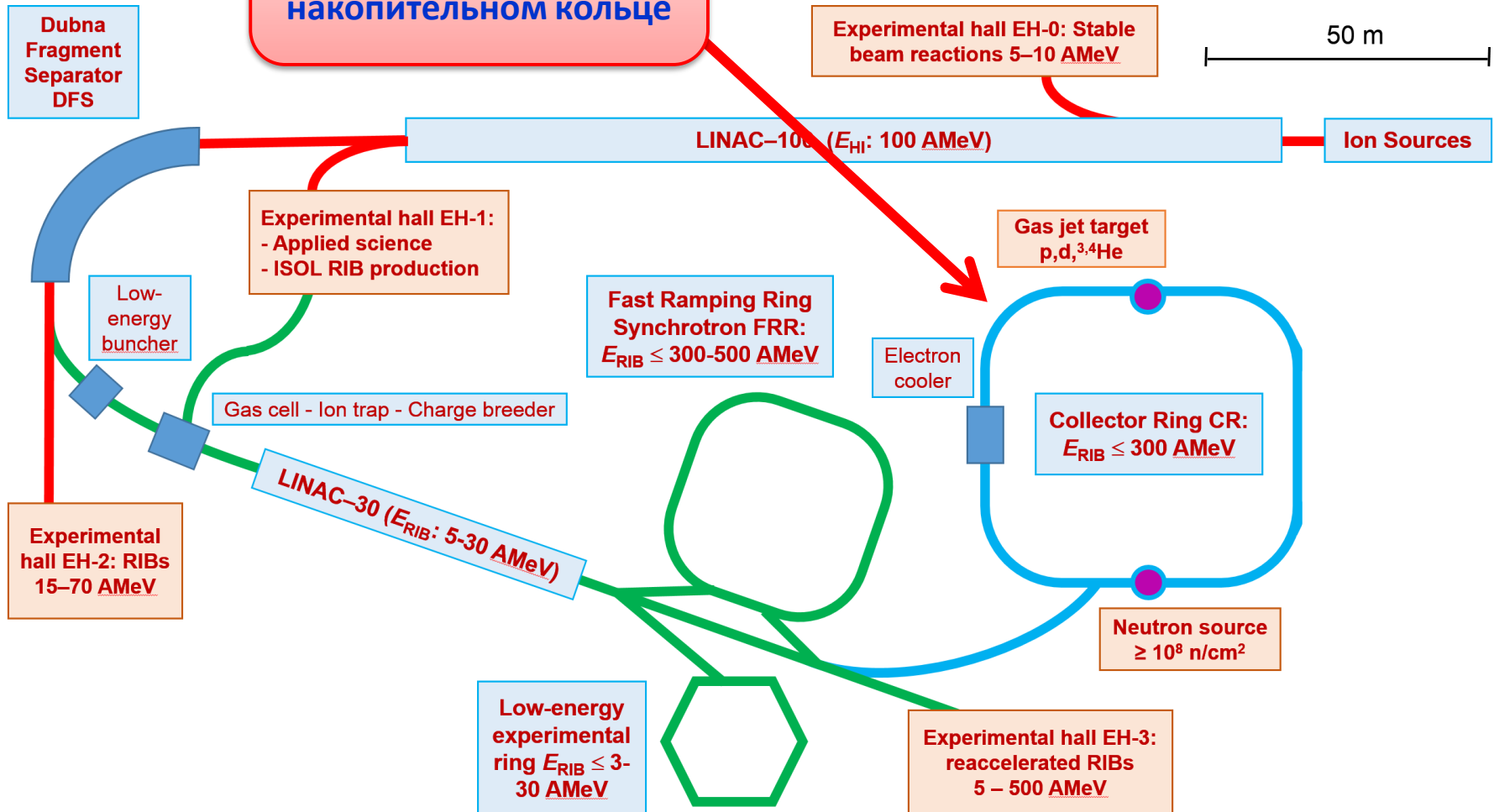
Новые экспериментальные возможности на каждой стадии



# DERICA стадия 4.1

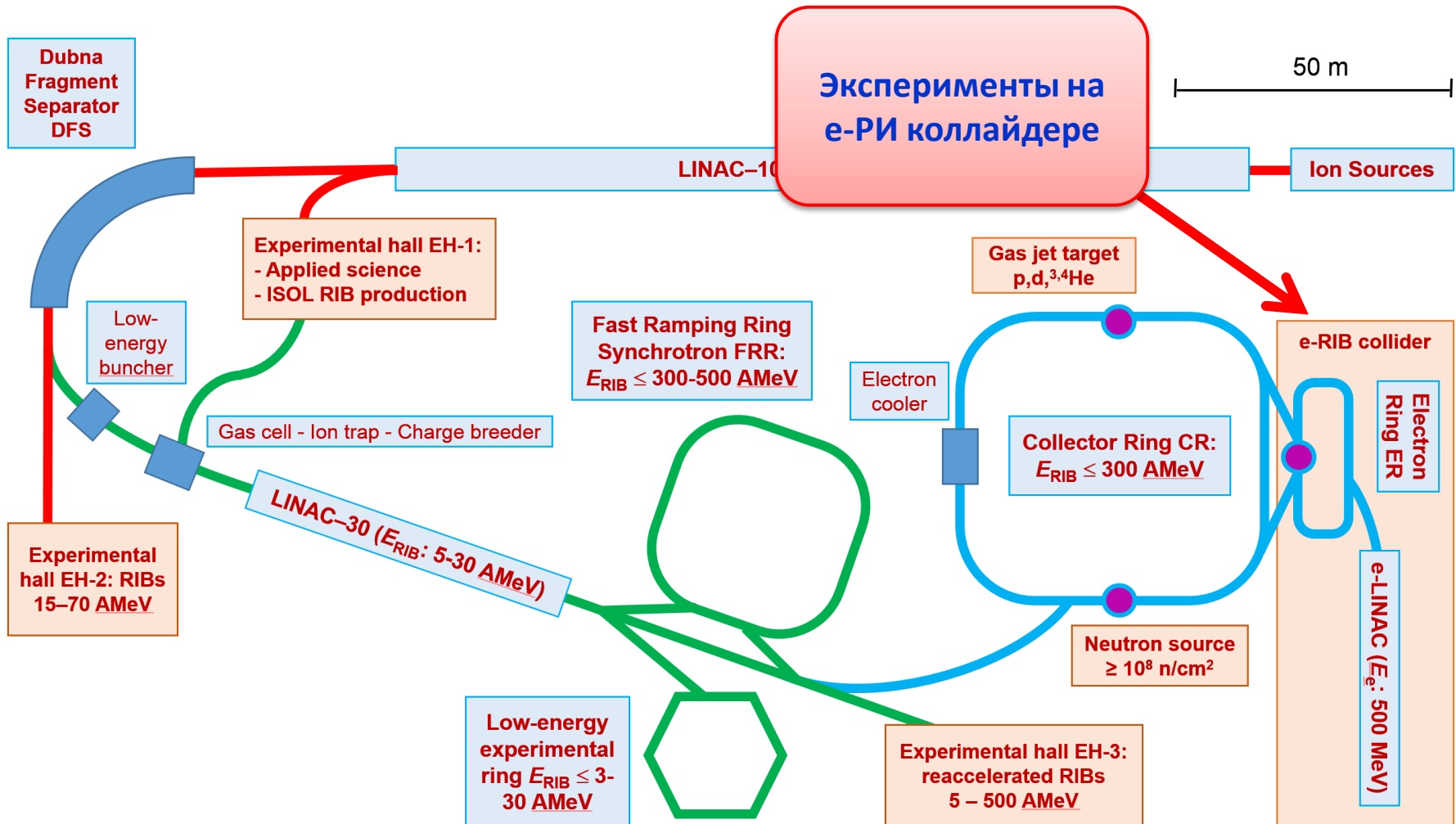
Новые экспериментальные возможности на каждой стадии

Эксперименты в высокоэнергетическом накопительном кольце



# DERICA стадия 4.2

Новые экспериментальные возможности на каждой стадии



# Преимущества предложенного проекта

## Нестандартная общая схема

### ISOL метод:

Индукцированное деление урана,  
вынос РИ потоком буферного газа  
-> проблема постускорить РИ

### In-flight метод:

Фрагментация быстрых первичных ионов,  
отбор РИ фрагмент-сепаратором  
-> проблема остановить/охладить РИ

### Проект DERICA:

In-flight получение РИ + “охлаждение” РИ в газовой  
ячейке + постускорение РИ до 300-500 АМеV

### Стадийность

- Непрерывность и гибкость научной программы
- Низкие технические риски
- Потенциал модернизации

### Уникальные возможности

- Наиболее интенсивные в мире пучки РИ при промежуточных энергиях (20-70 АМеV)
- Постускоренные РИ до ~500 АМеV
- Электрон-РИ коллайдер

Реализация

## Научные задачи перспективного ускорительно-накопительного комплекса для исследования радиоактивных изотопов DERICA

Л.В. Григоренко, Б.Ю. Шарков, А.С. Фомичев, А.Л. Барабанов, В. Барт, А.А. Безбах, С.Л. Богомолов, М.С. Головков, А.В. Горшков, С.Н. Дмитриев, В.К. Еремин, С.Н. Ершов, М.В. Жуков, И.В. Калагин, А.В. Карпов, Т. Катаяма, О.А. Киселев, А.А. Коршенинников, С.А. Крупко, Т.В. Кулевой, Ю.А. Литвинов, Е.В. Лычагин, И.П. Максимкин, И.Н. Мешков, И.Г. Муха, Е.Ю. Никольский, Ю.Л. Парфенова, В.В. Пархомчук, С.М. Полозов, М. Пфютцнер, С.И. Сидорчук, Х. Симон, Р.С. Слепнев, Г.М. Тер-Акопьян, Г.В. Трубников, В. Худоба, К. Шайденбергер, П.Г. Шаров, П.Ю. Шатунов, Ю.М. Шатунов, В.Н. Швецов, Н.Б. Шульгина, А.А. Юхимчук, С. Ярамышев

*Аннотация* Изучение радиоактивных изотопов (РИ) является наиболее интенсивно развивающимся направлением ядерной физики низких энергий. В данной работе рассматривается концепция и научная повестка перспективного ускорительно-накопительного комплекса для исследования РИ, предлагаемого в качестве международного мегапроекта на базе Лаборатории Ядерных Реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного Института Ядерных Исследований. Изложена мотивация нового проекта и даны краткие характеристики комплекса по производству РИ, которые сопоставимы с характеристиками передовых мировых центров – «фабрик РИ». В проекте делается акцент на исследованиях короткоживущих РИ в накопительных кольцах. Уникальной особенностью проекта является возможность изучения взаимодействий электронов с РИ в коллайдерном эксперименте с целью определения фундаментальных свойств ядерной материи – электромагнитных формфакторов экзотических ядер.

26 апреля 2018. Проект был подан на конкурс МОН предложений по проектам создания на территории Российской Федерации инфраструктуры класса «мегасайенс» и/или развития существующей инфраструктуры до уровня класса «мегасайенс»

В сентябре 2018 оценка РАН: рекомендовать к реализации без замечаний.  
Лучше оценки не бывает.

# LINAC-100

7-8 февраля ОИЯИ: первое рабочее совещание по LINAC-100 (в частности) и DERICA (в общем)



**Неотложная практическая задача**  
Начать в этом году разработку и прототипирование “front end” для LINAC-100

- Согласованное сотрудничество на 2019**
- ИТЭФ: НИОКР первая (теплая) половина LINAC-100
  - МИФИ: НИОКР вторая (СП) половина LINAC-100
  - НИИЭФА: магнитная система перспективного ECR 28 ГГц
  - ВНИИТФ: изготовление тестовой RFQ
  - ИЯФ: диагностика пучка
  - ИЯФ СО РАН: НИОКР кольца и фрагмент сепаратор





# Работы по LINAC-100

## Разработка концепции LINAC-100

- Front-end: 1 (универсальная A/Z~3-8) или 2 (A/Z~3 + A/Z~6-8)
- Соотношение теплая/криогенная части
- «Тактика ускорения» – A/Z, стриперы и тд.

МИФИ + ИТЭФ + GSI

## Работы по созданию перспективного ECR источника 28 Гц

- Дизайн ЛЯР ОИЯИ
- Магнитная система НИИФА
- ВЧ система НГУ

## Создание прототипа front-end LINAC-100

- Создание тестового ECR на ток > 1 мА
- Изготовление до 3 секций RFQ
- Создание стенда ECR + LEVT + RFQ

ЛЯР ОИЯИ + НИИФА

ВНИИТФ

ЛЯР ОИЯИ + ИТЭФ + ИЯИ

**Ожидается к концу 2021 г.: эскизный проект LINAC-100, рабочий прототип front-end, прототипы узлов ECR-28**

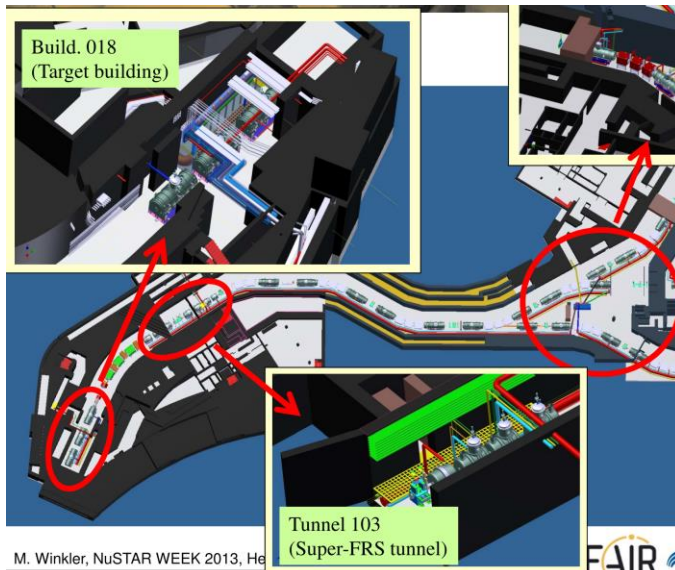
# Вызовы: DFS – DERICA Fragment separator

## DERICA, DFS

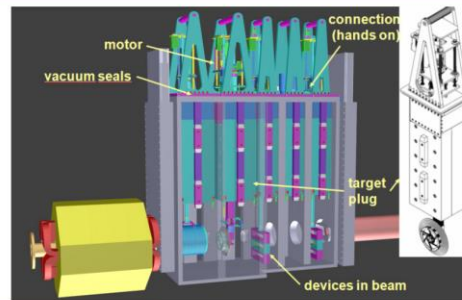
- Ca beam  $\sim 3$  emA  $\sim 250$  pμA 1500 kW beam
- U beam  $\sim 1$  emA  $\sim 30$  pμA 600 kW beam

## FAIR, SuperFRS

- U beam  $\sim 1500$  AMeV
- план:  $\sim 1$  pμA
- реальность:  $\sim 200$  pμA



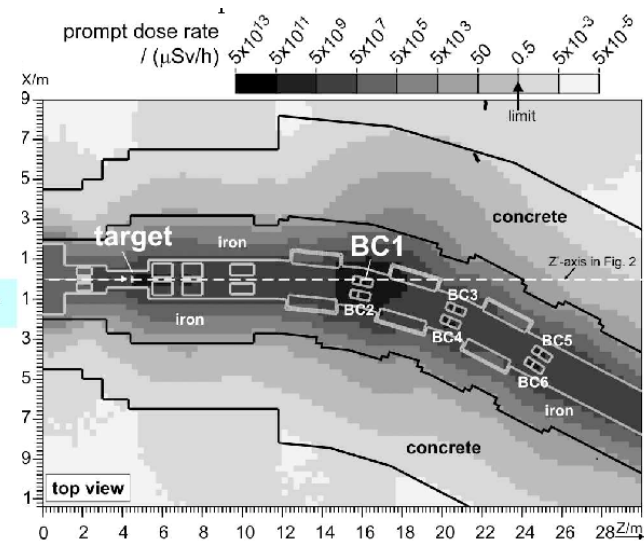
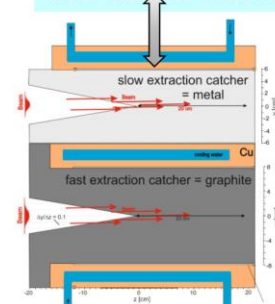
target chamber including plug inserts



prototype target wheel



two-halves catcher



**Ожидается к концу 2021 г.: эскизный проект (CDR) мишенного блока, радиационной защиты и DFS**

# Вызовы: комплекс накопительных колец

## Низкоэнергетическое кольцо

– Энергии 3-30 АМеV    – Дизайн – предположительно «гайка» (???)

## Быстроциклирующий синхротрон FRR

– Инжекция 30 АМеV, экстракция 100-500 АМеV (???)

## Высокоэнергетическое кольцо

– Энергии 100-500 АМеV (???)    – Дизайн – предполож. «квадрат» (???)

## Комплекс коллайдера

– e-LINAC                                    – Электронное накопительное кольцо  
– Точка столкновения (???)        – Электронный спектрометр (???)

**Ожидается к концу 2021 г.: ИЯФ СО РАН подготовит эскизный проект (CDR) всего накопительного комплекса**

# Заключение

**Передовую фабрику РИ у нас в стране построить можно – актуальная научная программа есть**

*DERICA – Проект ОИЯИ+ИЯФ ускорительно-накопительного комплекса мирового класса для экзотических ядер. Акцент на исследованиях в накопительных кольцах. Уникальные возможности включают изучение электромагнитных формфакторов радиоактивных изотопов в коллайдере электрон-РИ.*

**– Ключевые компетенции в наличии в РФ**

**НО**

**– Нереально без привлечения лучших мировых технологий**

**– Не слишком дорогой (~ 300 М€)**

**НО**

**– Уникальные научные возможности мирового класса**

**– Не очень много «бетона»**

**НО**

**– Велик относительный вес высоко-технологичного оборудования**

**– Много вызовов для научного и инженерного сообществ в РФ**

**НО**

**– Не видно критических «узостей»**



# DERICA

Это в некотором смысле не проект  
(вот начало ... вот конец), а  
видение развития физики низких  
энергий в России на 15-30 лет