



**Joint Institute for Nuclear  
Research**

SCIENCE BRINGING NATIONS  
TOGETHER

**Leonid Grigorenko**

Flerov Laboratory of Nuclear  
Reactions, JINR, Dubna, Russia

## **Prospects for the development of large nuclear physics facilities in the Russian Federation**

**Status of selected problems in the studies of few-body  
phenomena in nuclear systems.**

**Emphasys on  
«not  
understood»  
yet**

**Two-proton radioactivity and “true” three-body decay**

**“Transitional dynamics” in the three-body decays**

**Search for multi-neutron radioactivity. Experimental  
studies of  $2n$ ,  $3n$ , and  $4n$  decays**

# Разговор за жизнь.

## Состояние дел в ядерной физике низких энергий

**Печальное**

Исчерпание к концу 80-х научной повестки со стабильными пучками

Исчерпание ресурса и устаревание советской научной инфраструктуры

Исчерпание советских кадровых запасов

**Стратегическая ошибка - ставка на участие в проектах на западе**

Молодежь на экспорт

Научный туризм сениоров

**Стратегическое злоупотребление**

Цикл апгрейда в современной «большой» науке — 10 лет

После 3-4 таких циклов инфраструктура бесповоротно устаревает и становится не активом, а обременением

# Крупные физические проекты в РФ

**НИСА, ЛФВЭ ОИЯИ**

Столкновения релятивистских тяжелых ионов, физика адронов, кварк-глюонной плазмы, газа адронных резонансов

**СКИФ, Кольцово**

Синхротронный источник 4-го поколения (электроны 3 ГэВ)

**СКИ, Саров**

Ионный ускоритель от р до Вi до 800 АМеV для тестирование корпусированных электронных компонент

**КИТ, Снежинск**

Комплекс импульсной томографии

# Какие фундаментальные задачи стоят перед ядерной физикой

## Карта нуклидов

- 254 стабильных изотопов,
- 339 есть в природе
- Свыше 3100 РИ известно
- Примерно 2500 не известно

Невиданно обширное поле для экстенсивного развития

От фундаментальных взаимодействий к ядрам

От ядер к ядерной астрофизике

Протонная граница стабильности: достигнута и изучена до  $Z < 32$

Пределы существования ядерной структуры: известны только для легчайших элементов

“Остров стабильности” сверхтяжелых: коснулись краешка...

Нейтронная граница стабильности: достигнута и изучена до  $N < 20$

- Экзотическая ядерная динамика и структура:
- Нейтронные/протонные гало
  - Ядра с нейтронной «кожей»
  - «Мягкие» моды возбуждения
  - Разрушение стандартной оболочечной структуры
  - Новые магические числа



# Radioactive ion production: Radioactive Ion Beams (RIB)

“Old school”

**Прямые реакции**

Адиабатически быстрые реакции вовлекающие малое число степеней свободы

**Реакции слияния, глубоко неупругие реакции**

«Медленные» реакции при энергии около вершины барьера

**In-flight, фрагментация**

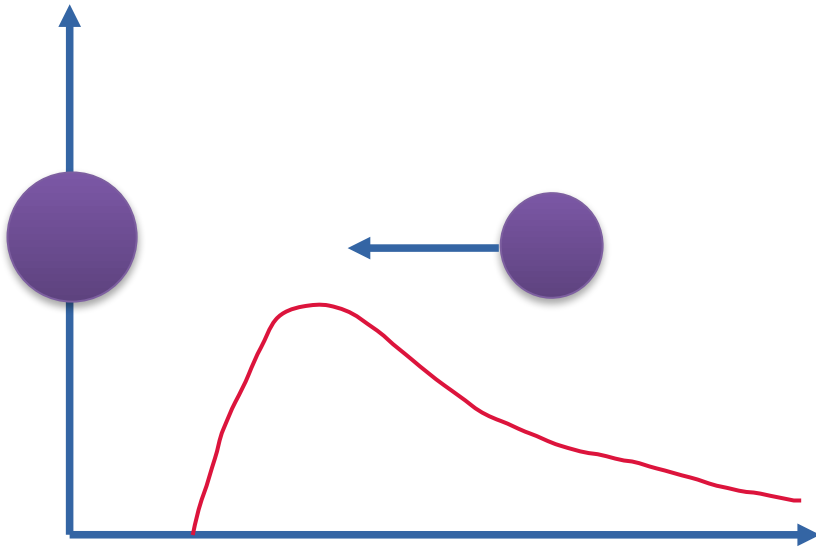
сбор и очистка продуктов фрагментации релятивистского пучка на фиксированной мишени

**ISOL — Isotope Separation On-Line**

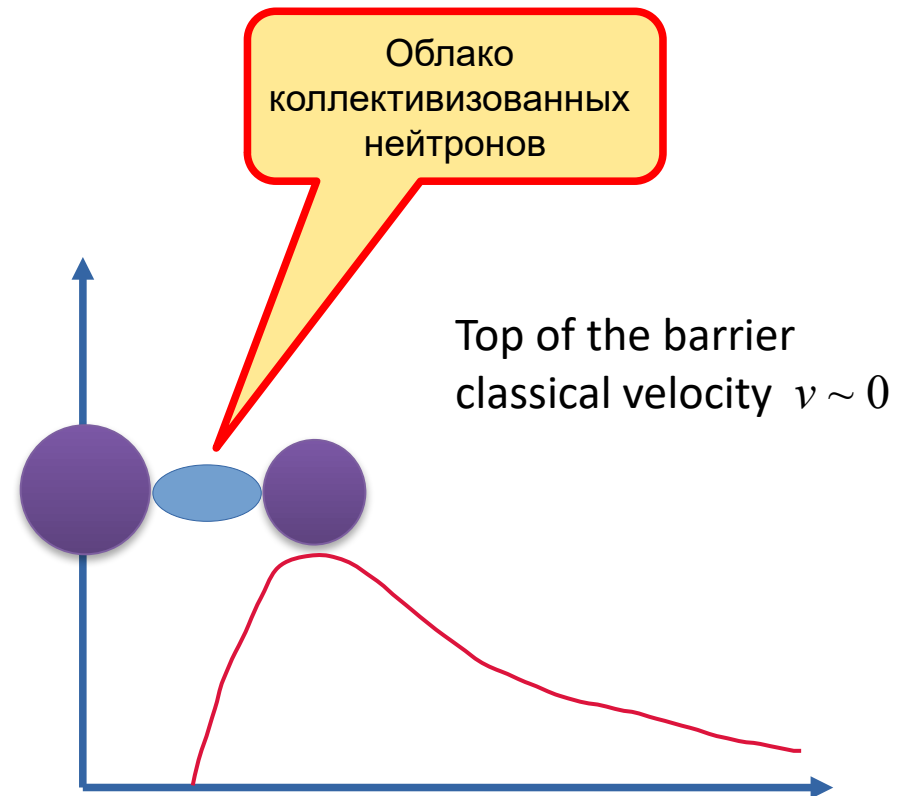
сбор и очистка продуктов индуцированного деления

Modern trend: «Фабрики»  
радиоактивных изотопов

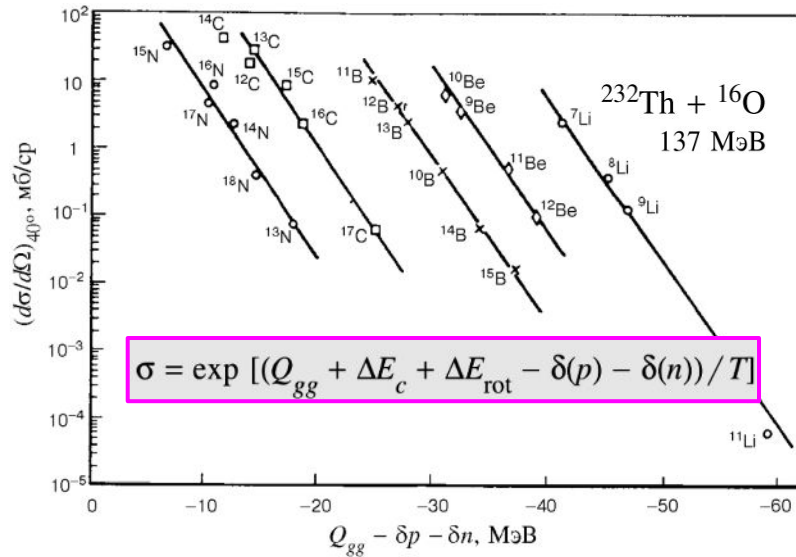
# Медленные реакции для синтеза ( $E = E_{\text{barrier}}$ ): слияние и многонуклонный обмен в глубоко-неупругих реакциях



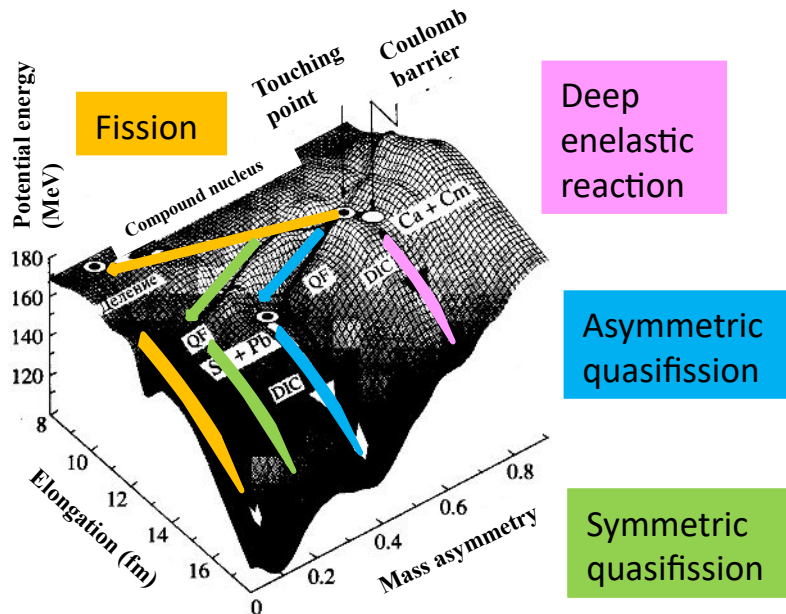
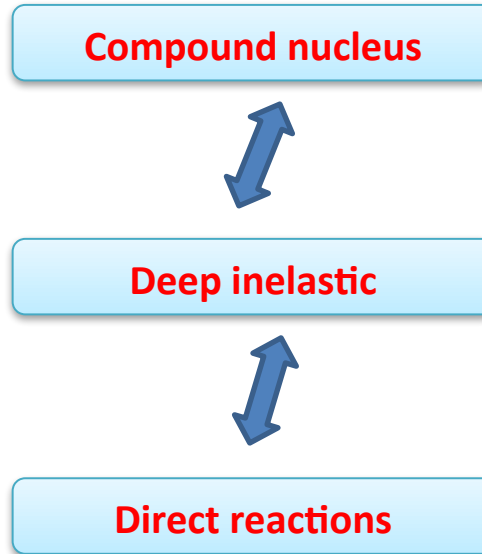
- Флуктуации нейтронов вправо-влево ведут к образованию экзотических ядер
- Флуктуации энергии нейтронного облака (скажем сброс энергии через излучение нейтронов) ведут к “охлаждению” системы и синтезу



# Deep inelastic collisions



V.V. Volkov, 1966,  
Deep inelastic  
reactions



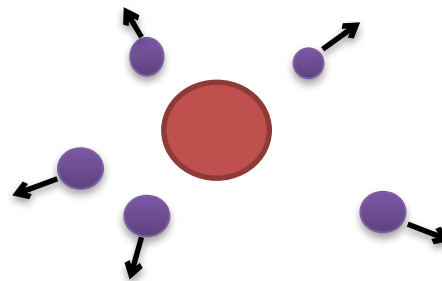
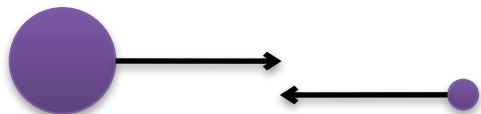
Discovery of light isotopes at FLNR in 1968-1971:  $^{18}\text{C}$ ,  $^{20,21}\text{N}$ ,  $^{22,23,24}\text{O}$ ,  $^{23,24,25}\text{F}$ ,  $^{25,26}\text{Ne}$

About 30 new isotopes discovered at FLNR in this technique

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

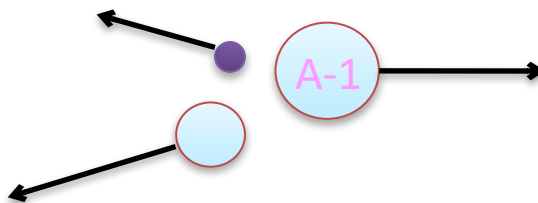
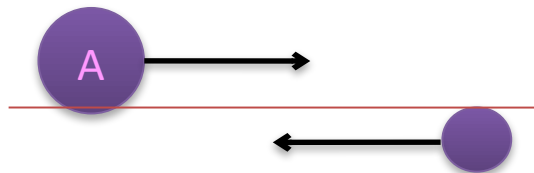
# Быстрые реакции для синтеза ( $E > 15-50$ A MeV)

Spallation



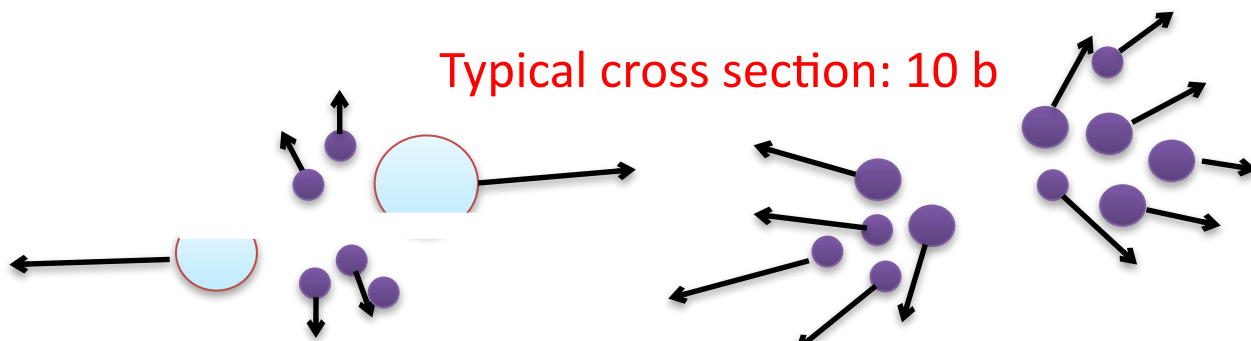
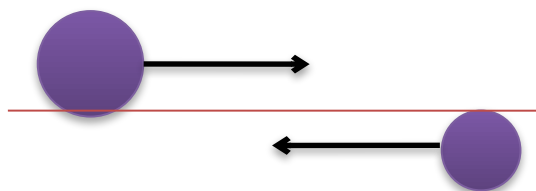
Typical cross section: 1b

Knockout



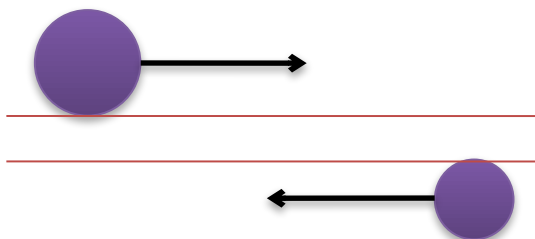
Typical cross section: 10 mb

Fragmentation



Typical cross section: 10 b

Dissociation

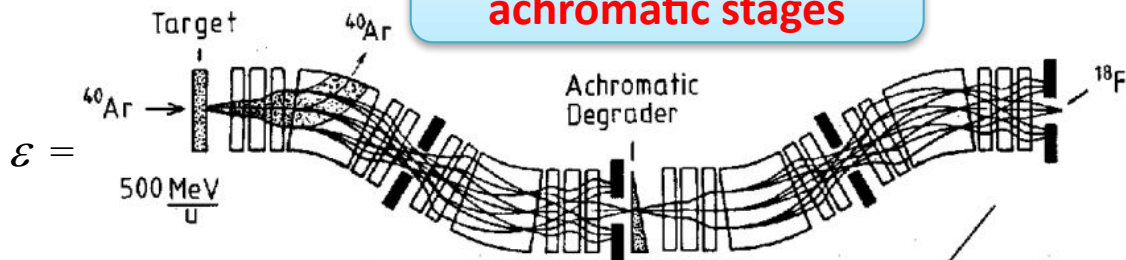


Typical cross section: 1 mb

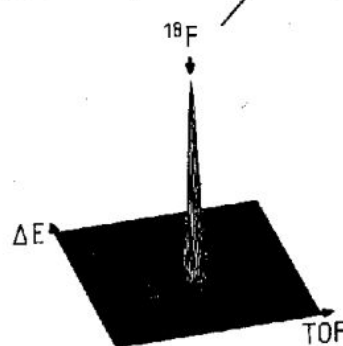
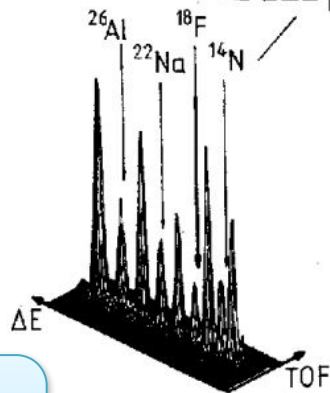


# Производство радиоактивных изотопов методом In-Flight (Fragment Separators)

**Typical FS design: 1-3 achromatic stages**

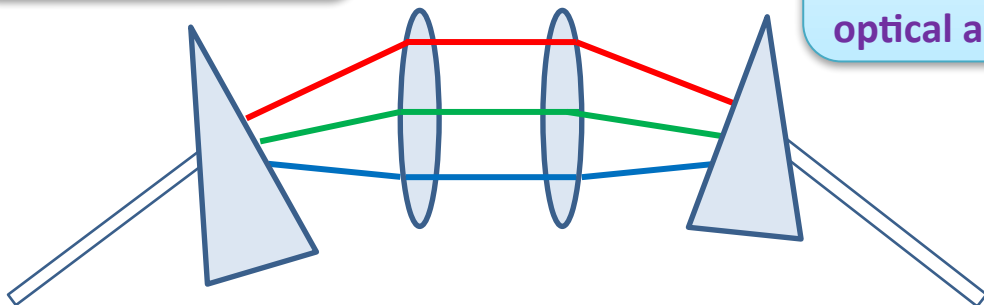


**FRS@GSI**

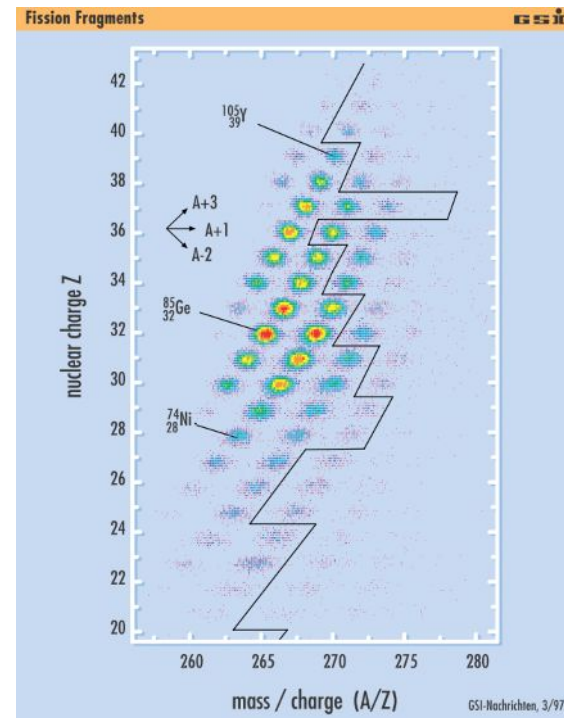


**Qualitatively:**  
Dipole = prism  
Quadrupole = lens

**Wedge degrader changes energy – no direct optical analogue**



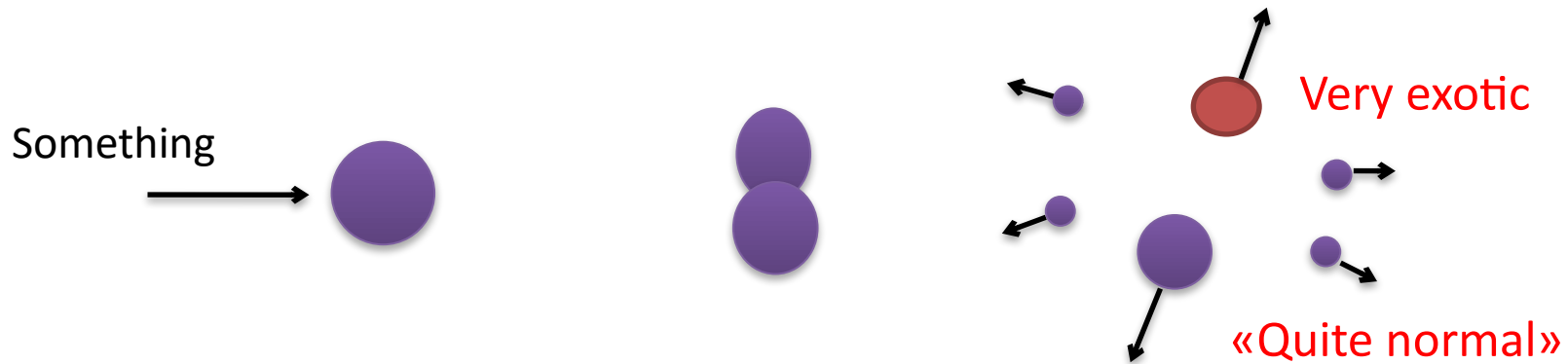
**TOF – ΔE particle identification**



**Fast RIB delivery –  
t < 100-300 ns**

**Selectivity ~10<sup>-17</sup> - 10<sup>-18</sup>**

# Индуцированное деление $^{238}\text{U}$ ( $^{235}\text{U}$ ?)



## Protons

CERN ISOLDE 1 GeV

TRIUMF 500 MeV

RAON 30 MeV

## Neutrons

SPIRAL2 (d,n) conversion

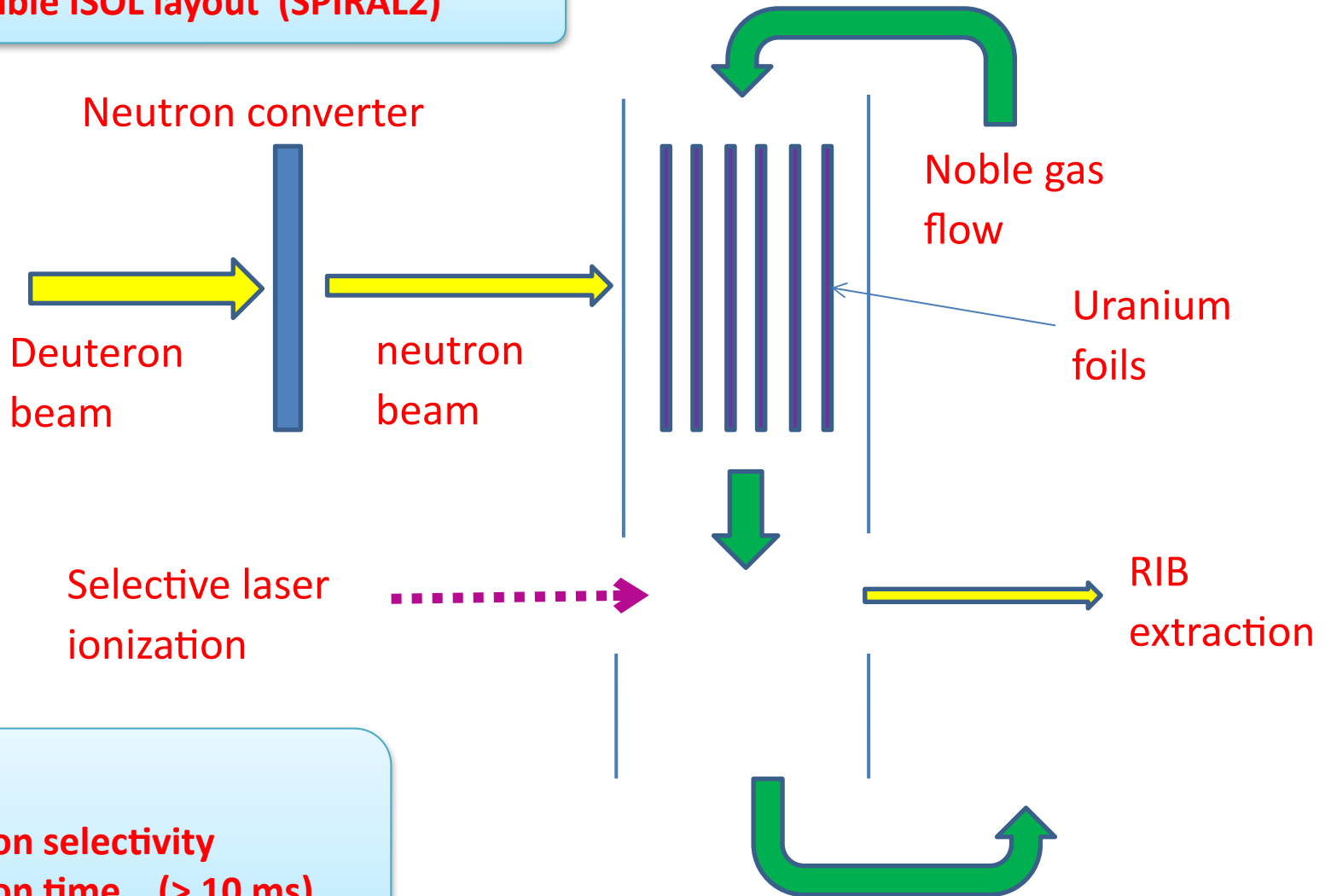
IRINA reactor thermal neutrons

Electrons and  
bremsstrahlung photon

IREN 200 MeV

# RIB production: ISOL (Isotope Separation On-Line)

## Possible ISOL layout (SPIRAL2)



### Problems:

- Extraction selectivity
- Extraction time (> 10 ms)

# Реализованные и реализуемые проекты в РФ

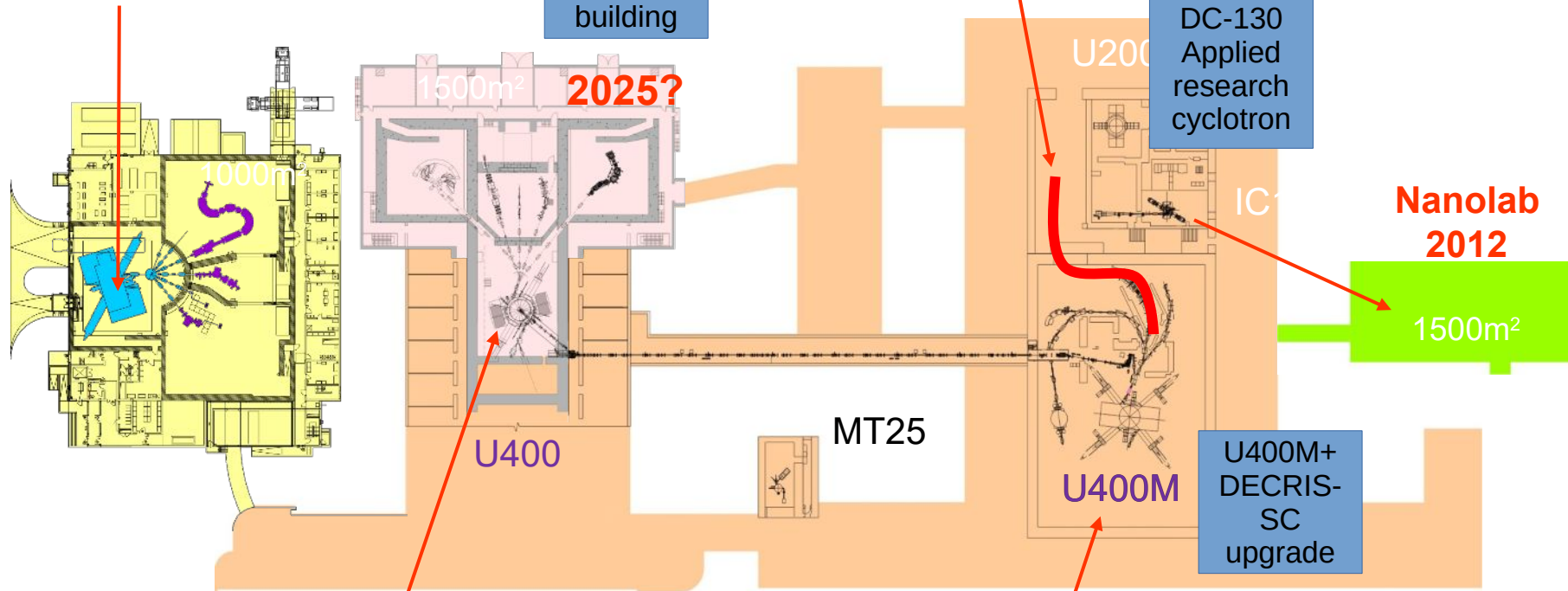
# Flerov Lab layout

**SHE research:  
DC-280  
Since 2019**

**RIB research:  
ACCULINNA-2  
Since 2018**

New lab building

DC-130  
Applied  
research  
cyclotron



**SHE research:  
U-400 Since 1978**

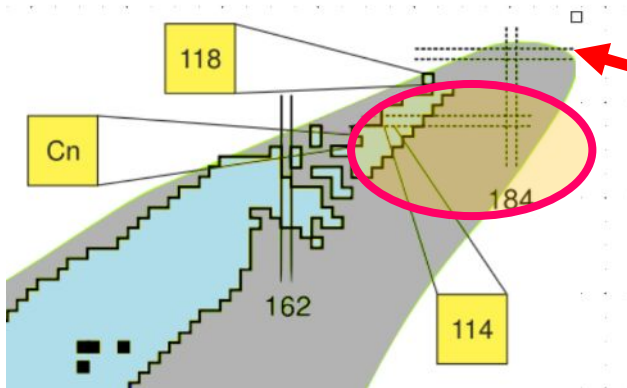
Nuclear  
Physics

Exotic Nuclei  
 $E = 30 \div 60 \text{ MeV/n}$   
 $A < 60$

**Reaction studies:  
U-400 Since 1988**

# Superheavy element factory (FLNR JINR)

**Achievement of the «Nobel class» - island of stability of superheavies**



**Prospects to «complete» the Mendeleev table (Z=120)**

Cadmium 112.41	Indium 114.82	Tin 118.71	Antimony 121.76	Tellurium 127.60	Iodine 126.90	Xenon 131.29
80 <b>Hg</b> Mercury 200.59	81 <b>Tl</b> Thallium 204.38	82 <b>Pb</b> Lead 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208.98	84 <b>Po</b> Polonium (209)	85 <b>At</b> Astatine (210)	86 <b>Rn</b> Radon (222)
112 <b>Cn</b> Copernicium (285)	113 <b>Nh</b> Nihonium (286)	114 <b>Fl</b> Flerovium (289)	115 <b>Mc</b> Moscovium (290)	116 <b>Lv</b> Livermorium (293)	117 <b>Ts</b> Tennessine (294)	118 <b>Og</b> Oganesson (294)

**“Niche” science:  
Only superheavies**

**Move to element 120 is  
slowed by problem of target  
materials**

**2022-2023 – “record” production  
results for Z=115 studies, several  
new isotopes**



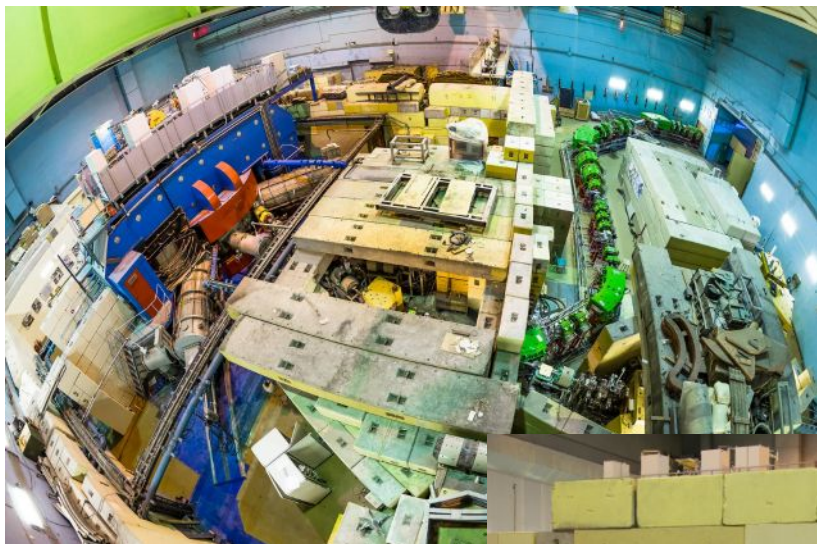
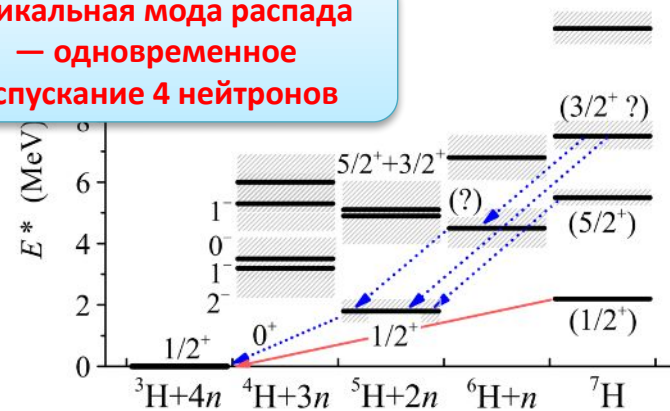


# АССУЛИННА-2 (ЛЯР ОИЯИ)

Программа мирового класса

2018-2020 Решение 40-летней проблемы  ${}^6\text{H}$  и  ${}^7\text{H}$ ,  
Необычные результаты по  ${}^4\text{n}$

Уникальная мода распада  
— одновременное  
испускание 4 нейтронов



Ускоритель на  
реконструкции

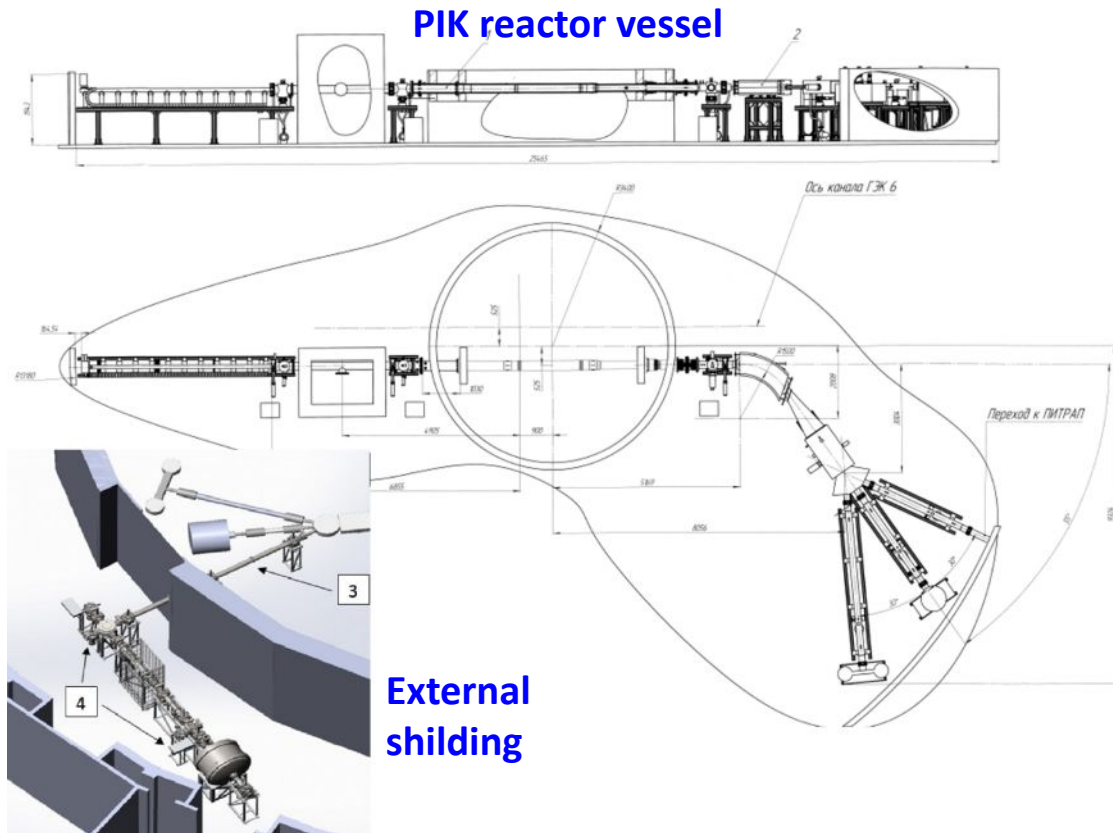
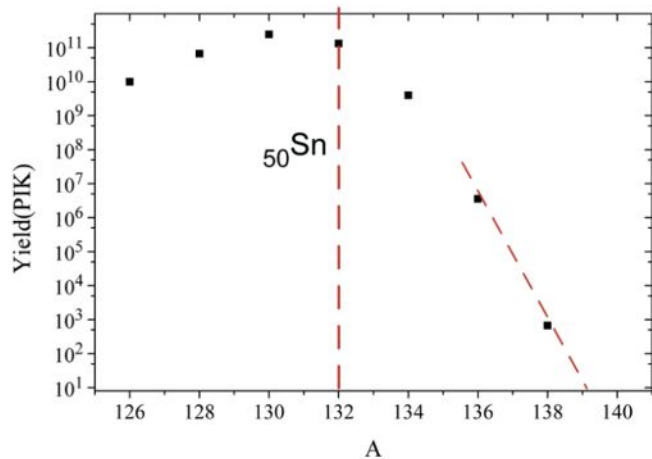
Были бы “в топе” лет  
20-25 назад

Нишевые исследования:  
Легчайшие изотопы

# IRINA (PNPI, Gatchina)

ISOL method – induced fission of  $^{238}\text{U}$  (or better  $^{235}\text{U}$ )  
by neutrons from PIK reactor

Record intensities for ISOL  
method production



Example of  $^{132}\text{Sn}$ :  
Better than CERN ISOLDE by 3 orders of magnitude  
Better than SPIRAL-2 by 2 orders of magnitude

Not enough place for  
desired instruments

PIK development is slow

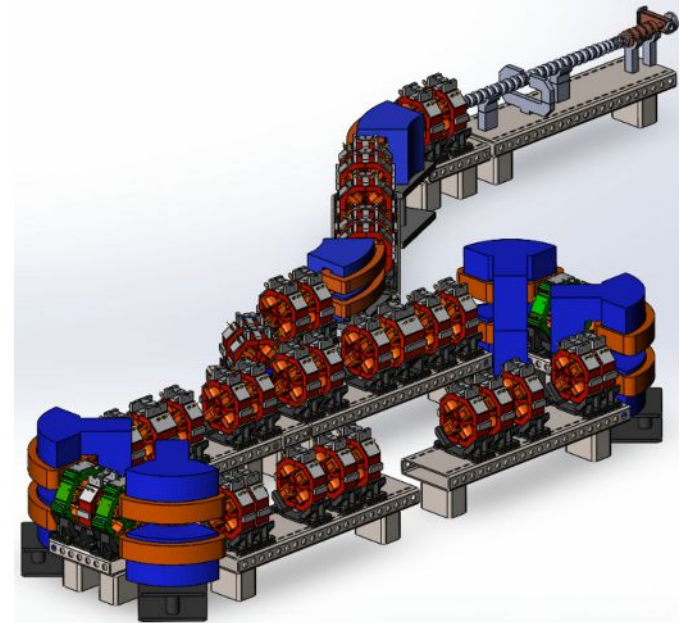
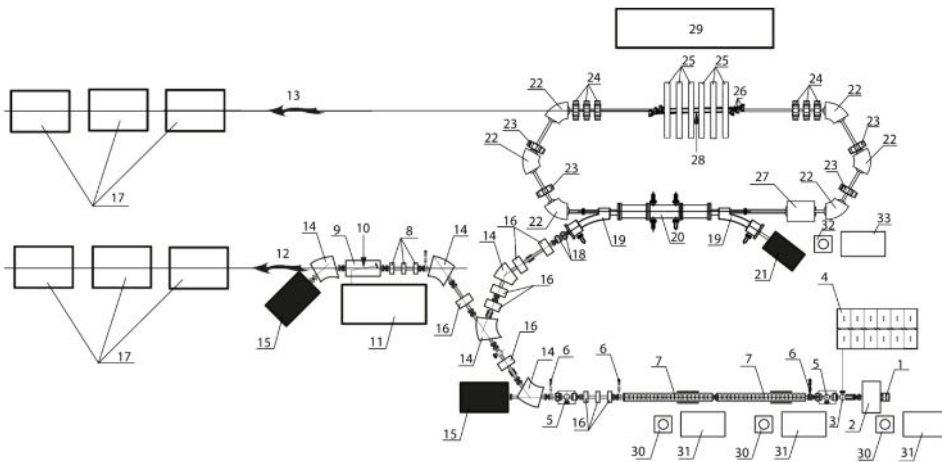


Необходимость прикладных  
машин “университетского”  
класса

# Проекты малых комптоновских источников МГУ и МИФИ

ИКИ МГУ

ИКИ МИФИ

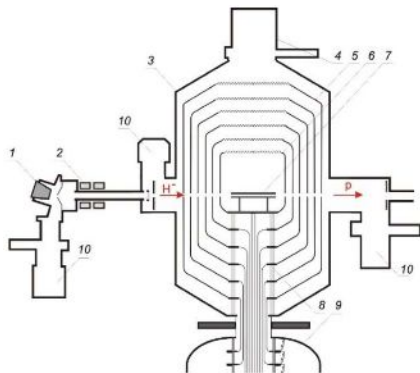


# Проекты малых источников нейтронов

Тема развития малых комптоновских источников созвучна теме компактных нейтронных источников для медицины/педагогики/локального применения

## Проект ИЯФ СО РАН

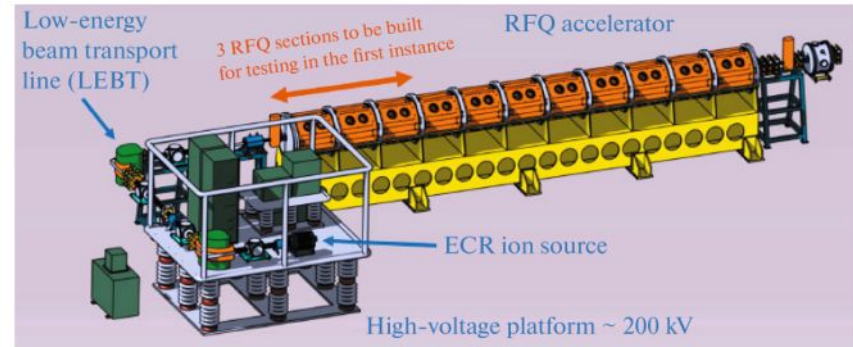
«Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией»  
ИЯФ СО РАН



Бор-захватная нейтронная  
Терапия (БЗНТ)  
 ${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^7\text{Be} + n - 1.88$   
 ${}^{10}\text{B} + n \rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha + 2.79$



## Проект «ДАРЬЯ» ИТЭФ-СПбГУ

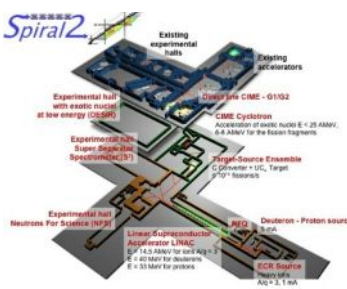


Шкалируемый  
ускоритель протонов  
на основе RFQ и DTL  
модулей

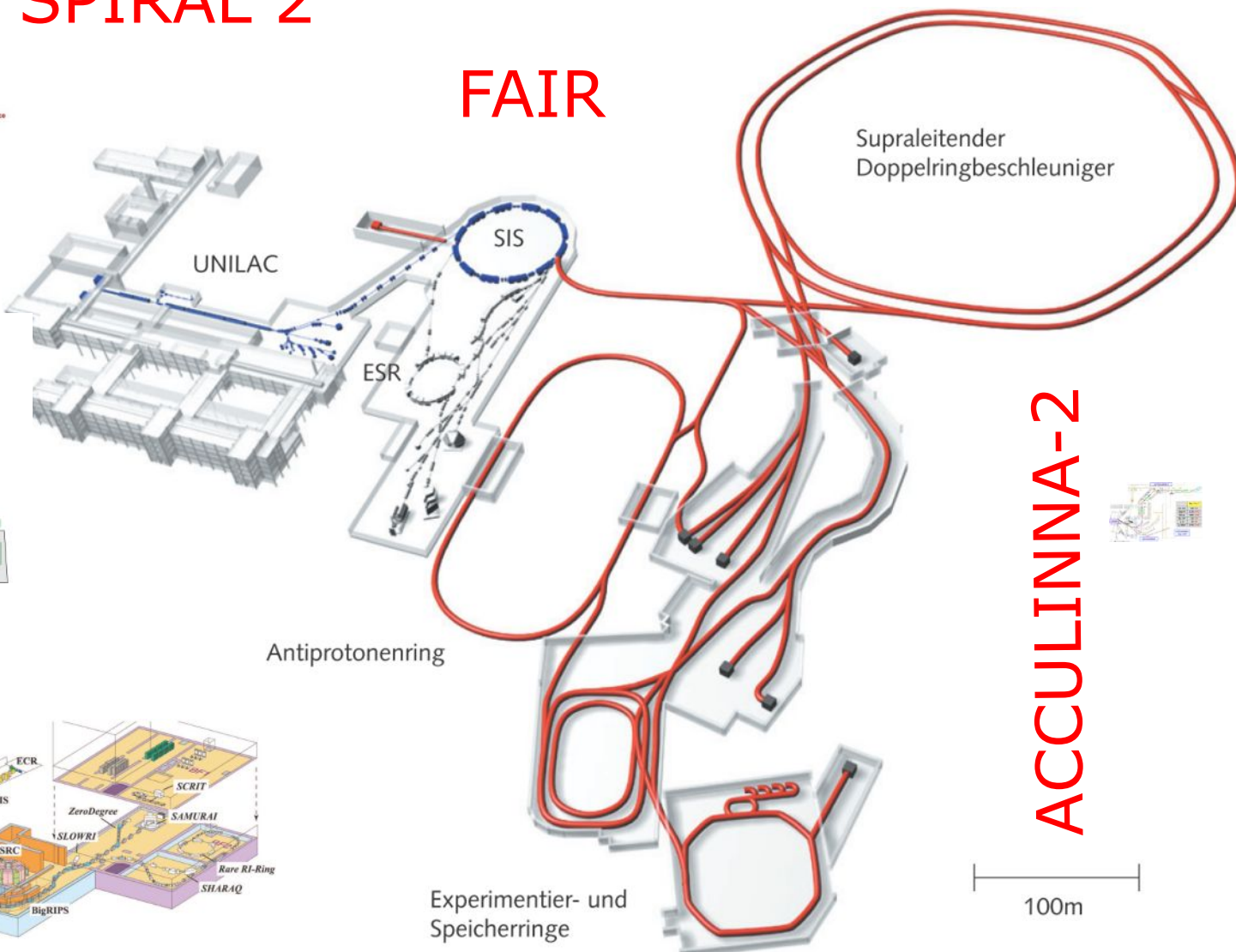
А тем временем за рубежом

# Big, bigger, the biggest – фабрики РИ «третьего поколения» 2007+

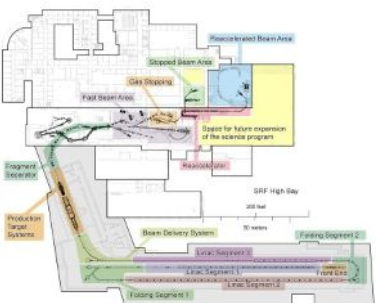
**SPIRAL 2**



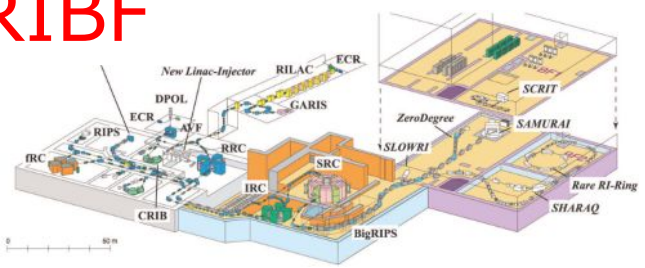
**FAIR**



**FRIB**



**RIBF**



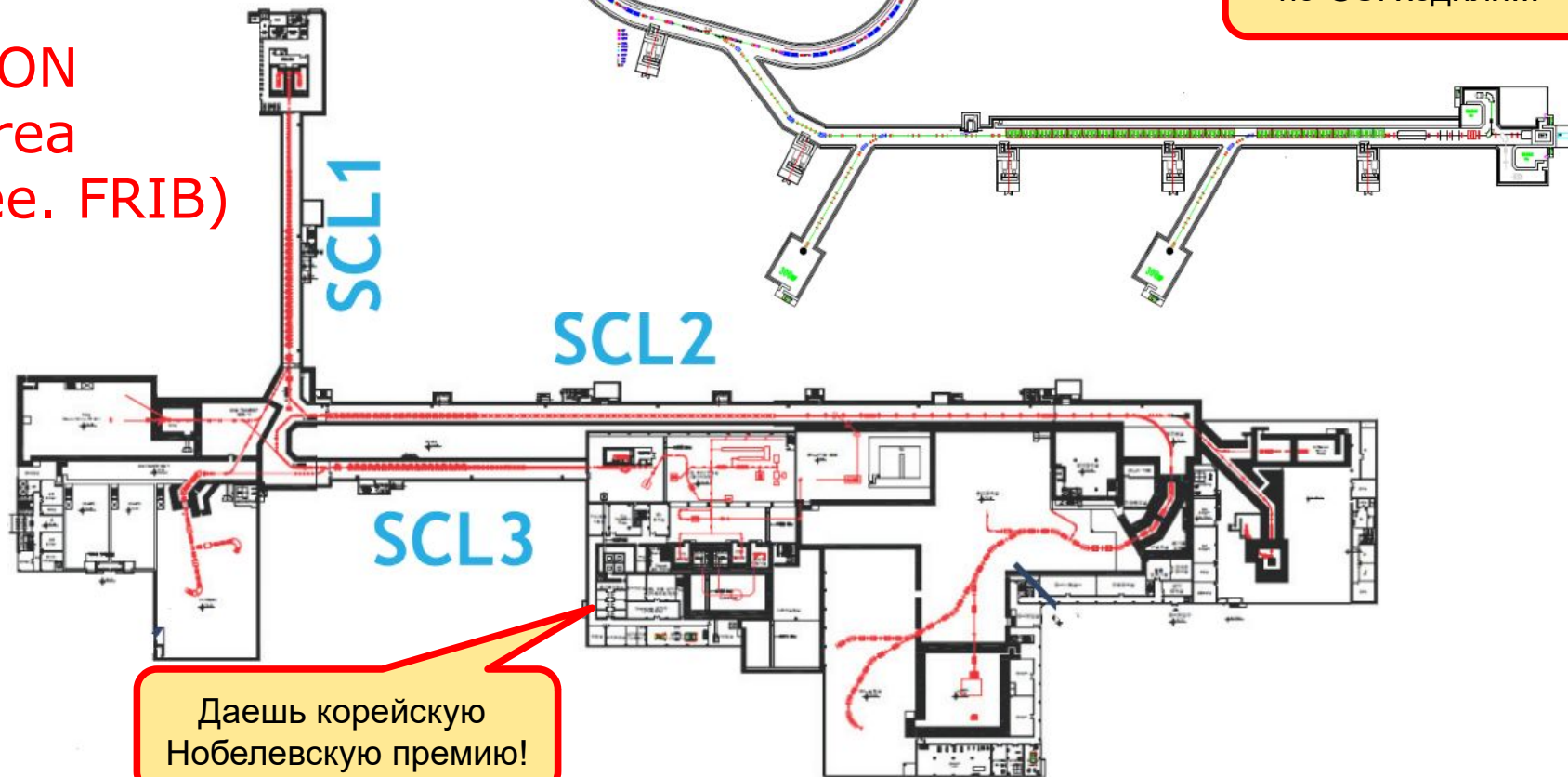
However,  
even bigger...

HIAF China  
(see, FAIR)

Horizontal size of the  
slide ~1 km

Китайцы строим  
по GSI ходили...

RAON  
Korea  
(see. FRIB)



Даешь корейскую  
Нобелевскую премию!

# **DERICA – Dubna Electron-Radioactive Isotope Collider fAcility**

**попытка создать проект мирового класса**



## Scientific program of DERICA — prospective accelerator and storage ring facility for radioactive ion beam research

L V Grigorenko, B Yu Sharkov, A S Fomichev, A L Barabanov, W Barth, A A Bezbakh, S L Bogomolov, M S Golovkov, A V Gorshkov, S N Dmitriev, V K Eremin, S N Ershov, M V Zhukov, I V Kalagin, A V Karpov, T Katayama, O A Kiselev, A A Korshennikov, S A Krupko, T V Kulevoy, Yu A Litvinov, E V Lychagin, I P Maksimkin, I N Meshkov, I G Mukha, E Yu Nikolskii, Yu L Parfenova, V V Parkhomchuk, S M Polozov, M Pftzner, S I Sidorchuk, H Simon, R S Slepnev, G M Ter-Akopian, G V Trubnikov, V Chudoba, C Scheidenberger, P G Sharov, P Yu Shatunov, Yu M Shatunov, V N Shvetsov, N B Shulgina, A A Yukhimchuk, S Yaramyshev

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.07.038387>

ISSN 1063-7788, *Physics of Atomic Nuclei*, 2021, Vol. 84, No. 1, pp. 68–81. © Pleiades Publishing, Ltd., 2021.  
Russian Text © The Author(s), 2021, published in *Yadernaya Fizika*, 2021, Vol. 84, No. 1, pp. 53–66.

### ELEMENTARY PARTICLES AND FIELDS Experiment

## DERICA Project and Strategies of the Development of Low-Energy Nuclear Physics

L. V. Grigorenko<sup>1),2),3)\*</sup>, G. N. Kropachev<sup>4),1)</sup>, T. V. Kulevoy<sup>4)</sup>,  
I. N. Meshkov<sup>5),6),7)</sup>, S. M. Polozov<sup>2)</sup>, A. S. Fomichev<sup>1),8)</sup>,  
B. Yu. Sharkov<sup>9),2)</sup>, P. Yu. Shatunov<sup>10)</sup>, and M. I. Yavor<sup>11)</sup>

Received May 24, 2020; revised May 24, 2020; accepted May 24, 2020





# По результатам R&D LINAC-100 + DFS

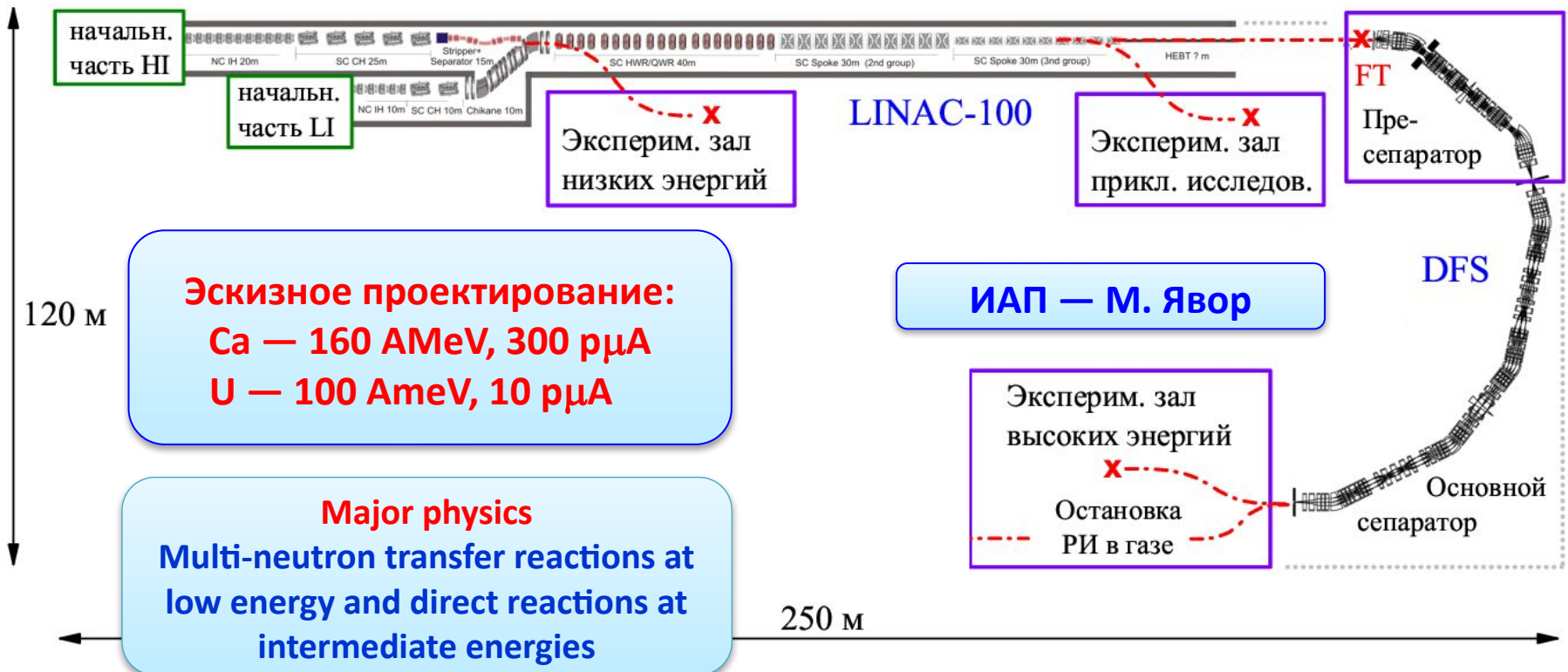
«Рекордный» высокоточный линейный сверхпроводящий ускоритель непрерывного действия

Теплый фрагмент-сепаратор на исключительно высокие токи

ИТЭФ — Т.Кулевой

МИФИ — С.Полозов

???



# Electron scattering

After masses, the radial properties are the most important characteristics of nuclei



Robert Hofstadter 1915-1990, 1961 Nobel Prize "for his pioneering studies of electron scattering in atomic nuclei and for his consequent discoveries concerning the structure of nucleons.."

- First Born approximation, fast electrons, relatively light nuclei

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

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

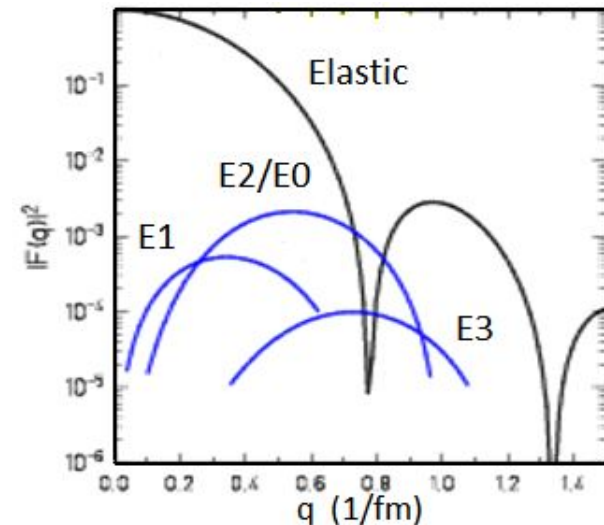
$$q = 2k \sin(\theta/2)$$

- Charge formfactor, charge radius

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

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

Electromagnetic probe is the most reliably studied  
- Electron scattering



- Experiments in traps – “static” EM characteristics -> derivation of  $r_{\text{ch}}$

- Electron scattering – differential characteristics

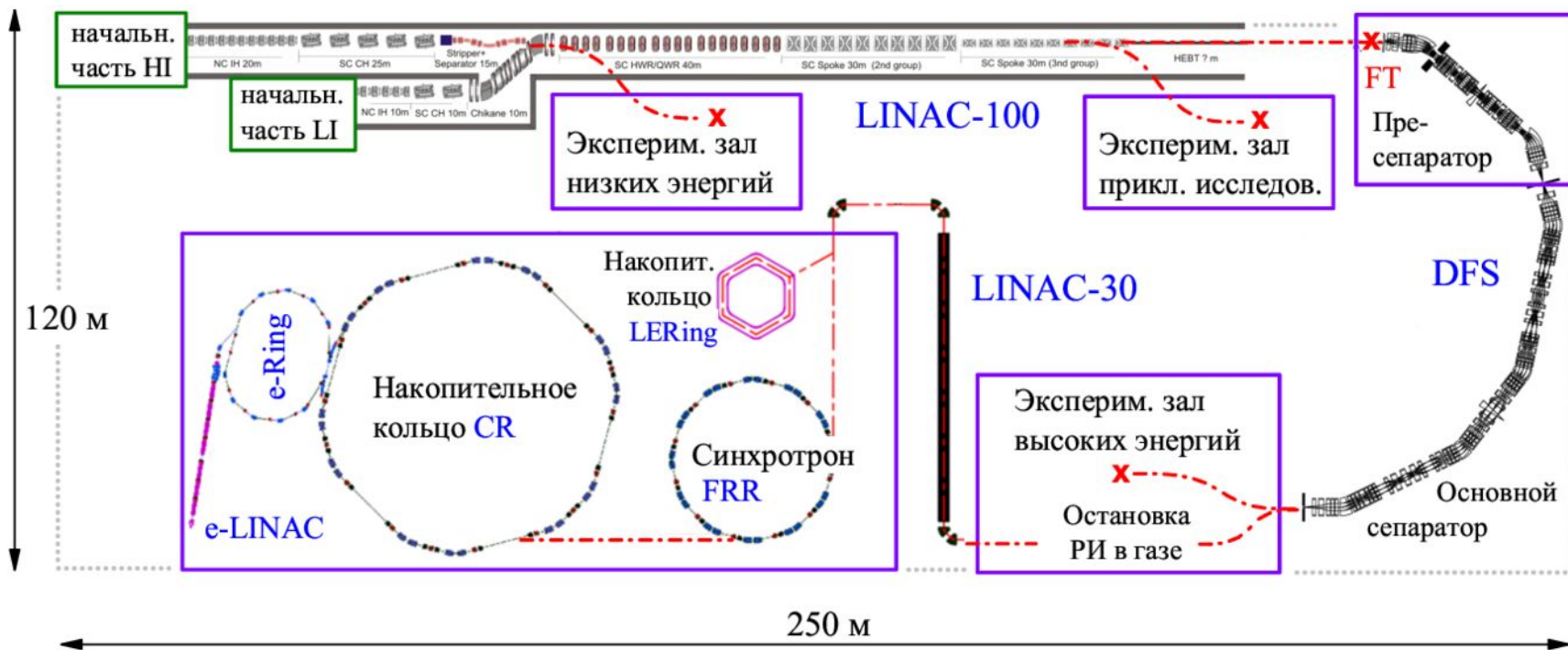
# DERICA – Dubna Electron- Radioactive Isotope Collider Facility



**Facility with world-unique scientific program**

**Underdeveloped field: storage ring physics with RIBs**

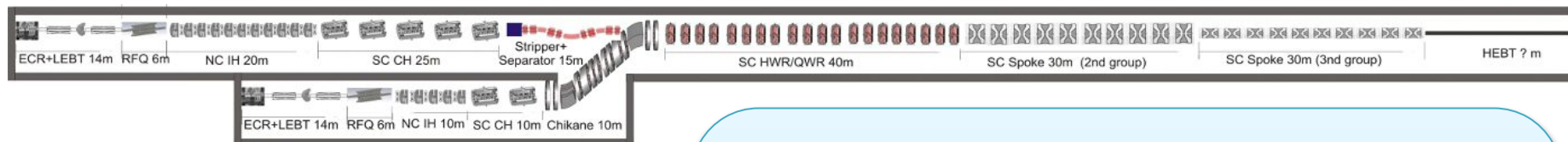
**Empty field: studies of RIBs in electron-RIB collider**



**ИЯФ СО РАН — П. Шатунов, И. Кооп**

**Quest to realize e-RIB collider**

# Другие «ключевые» R&D: LINAC-100



## Challenges of LINAC-100 design

- Ratio of normal/superconducting
- Strippers (1,2 ?), stripping energies
- Acceleration of several charge states
- One or two front ends
- Ca beam  $\sim 3$  emA  $\sim 300$  pμA 1500 kW beam
- U beam  $\sim 1$  emA  $\sim 30$  pμA 600 kW beam
- Lossless operation

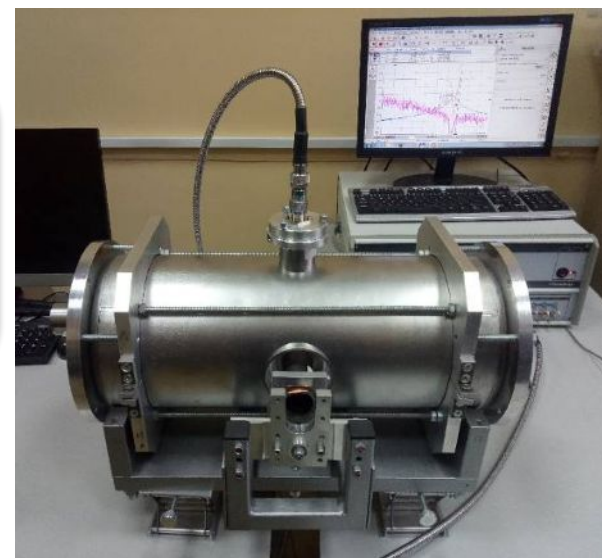
Design: S.M. Polozov, MEPHI



Доводка HWR и создание QWR поддержаны в рамках направления 6 НЦФМ

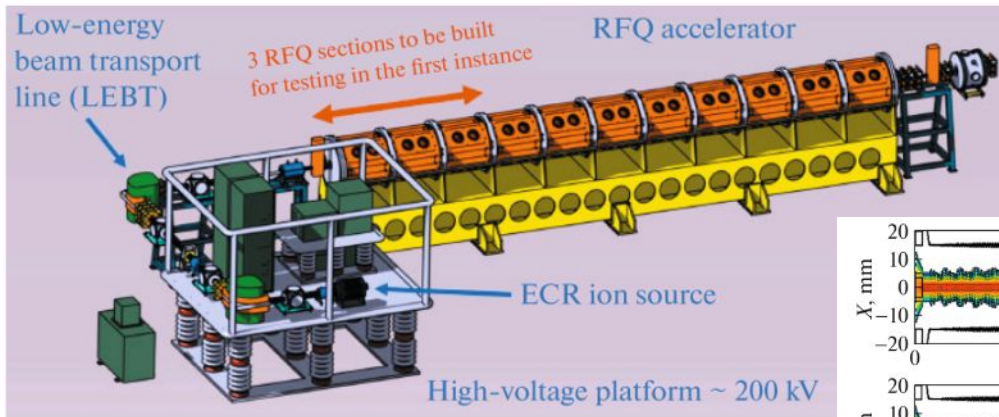
“Recovery” of RF superconductivity technology in Russia

Production: V.G. Zalesski, FTI NAB, Minsk



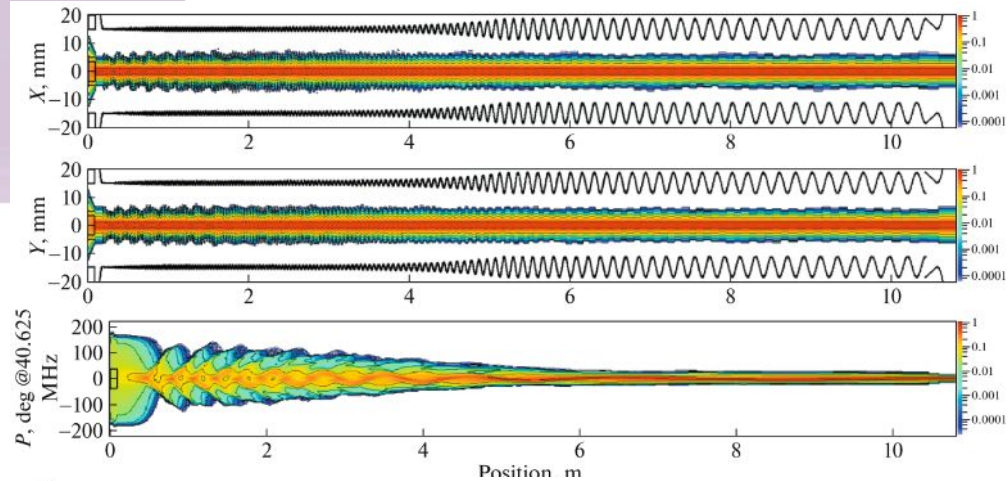


# Front end LINAC-100

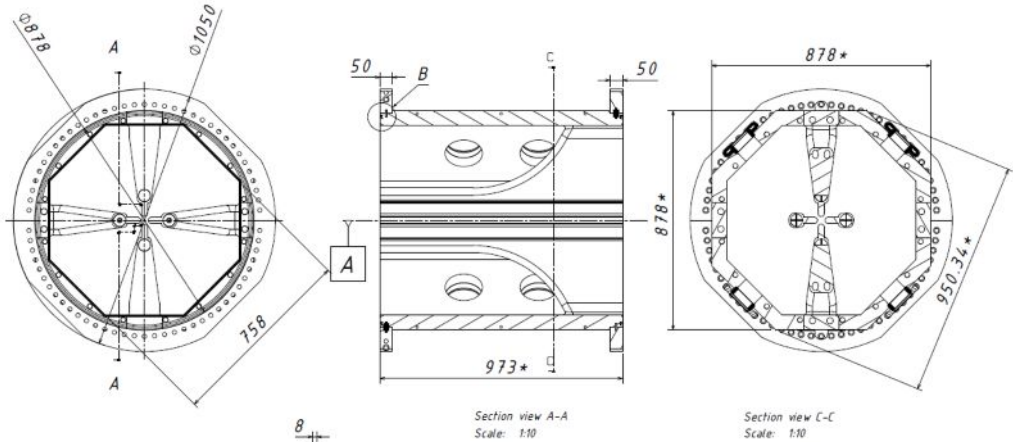
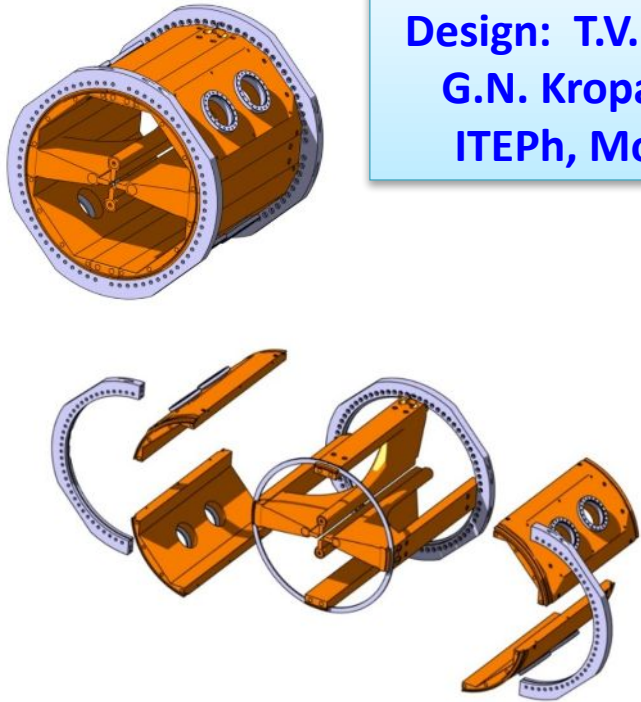


**Challenges of LINAC-100 front end**

- Ca beam ~3 emA, U beam ~1 emA
- Practically "lossless" RFQ operation



**Design: T.V. Kulevoy,  
G.N. Kropachev,  
ITEPh, Moscow**



Паз для прокладку витов  
Front view  
Scale: 1:10

**Production, VNIITF, BINP**

“Big Sarov” project -  
National Center for Physics and  
Mathematics (NCPM)

ИНОК



# NCPM Satis (Sarov)

**C- $\tau$  factory – heavy  
c quark and heavy meson  
physics**

**XCELS – exawatt center  
for extreme light  
studies**

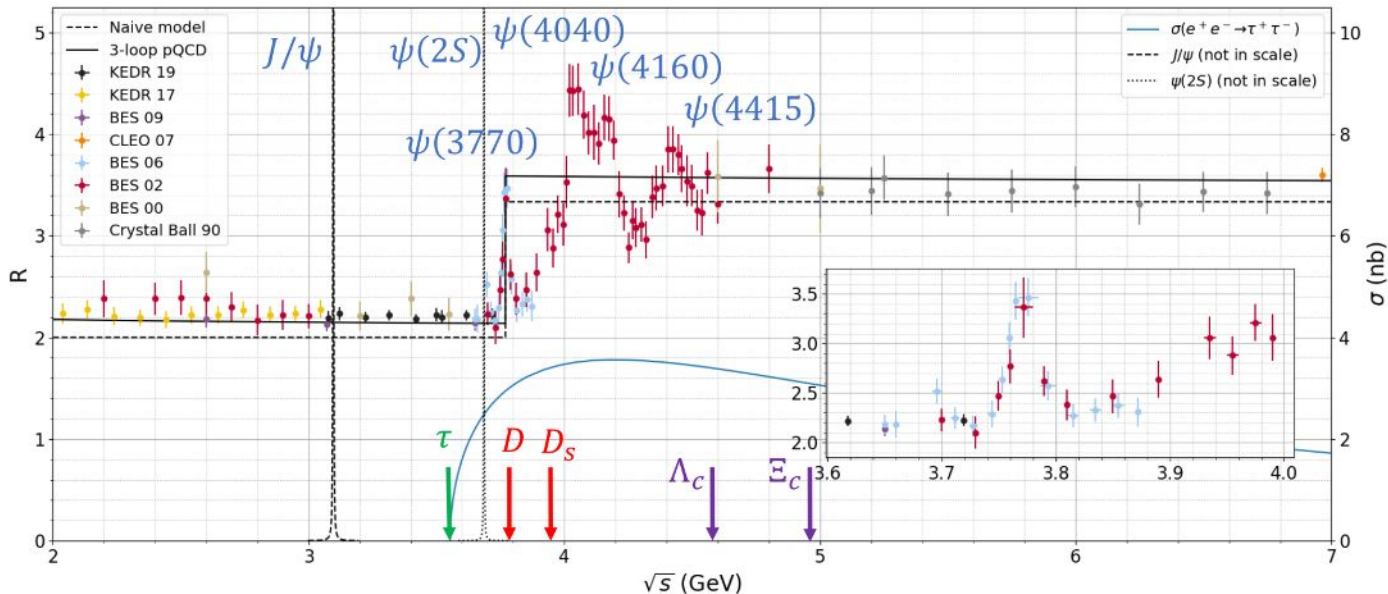
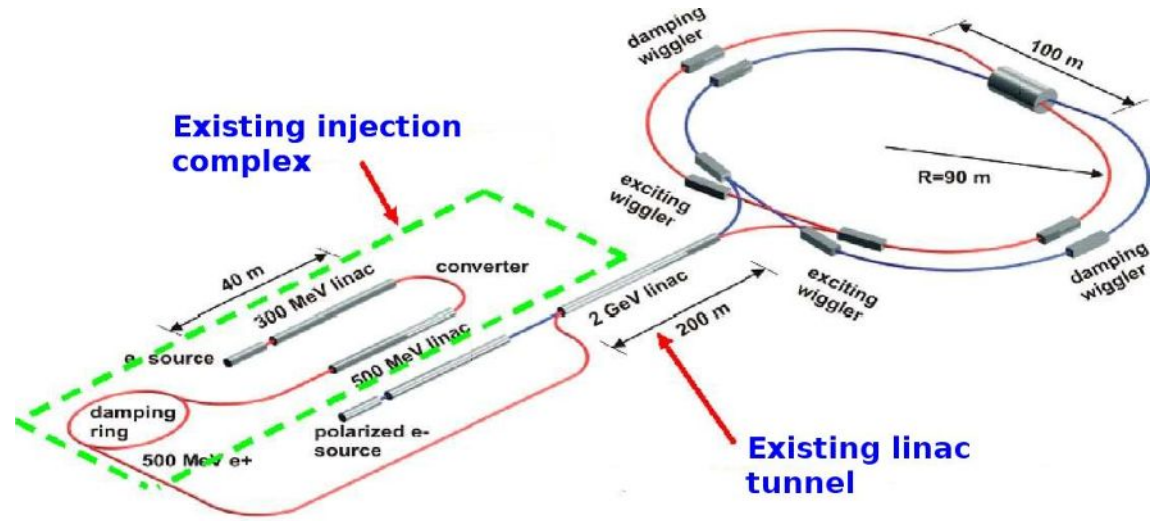
**Optical  
supercomputer**



# Super $c\text{-}\tau$ factory

**Multifunctional  
electron-positron collider  
c.m.  $E_{e^+e^-} \sim 7 \text{ GeV}$**

**Low-cross-section and  
precision measurements**

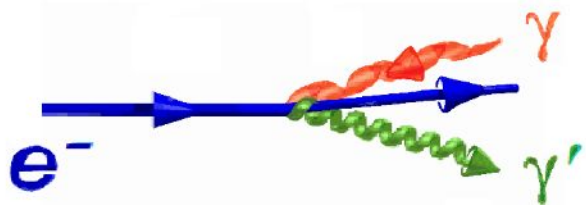


**Luminosity aim  
2 orders of  
magnitude  
higher than at  
existing  
facilities**





НЦФМ  
*ИНОК*

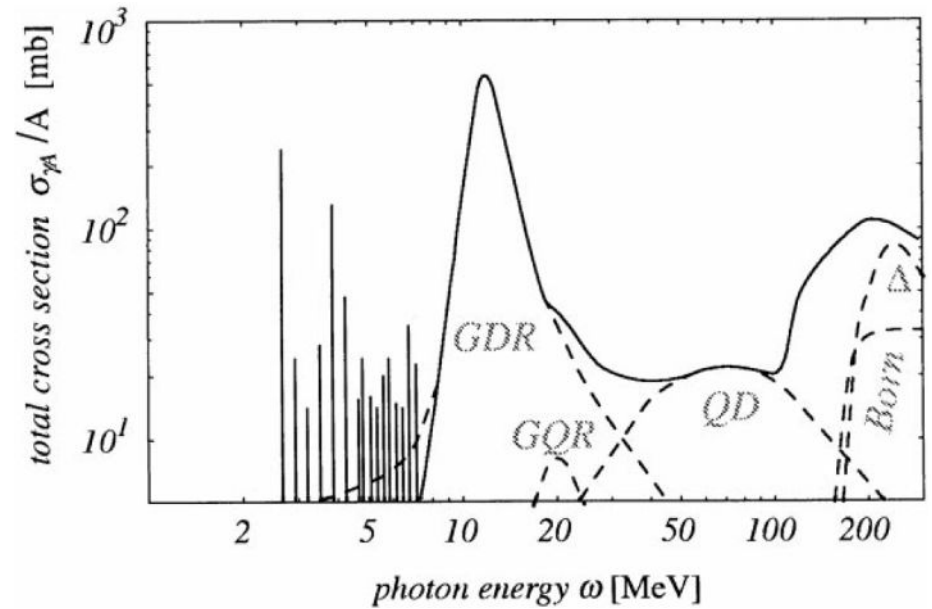
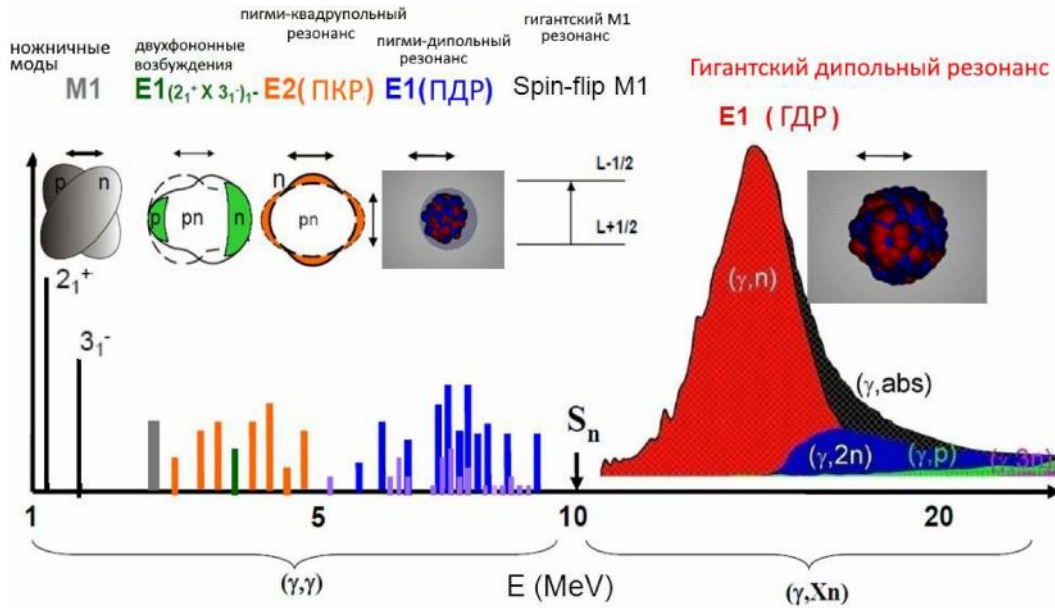


В качестве первой масштабной научной установки Национального центра физики математики (НЦФМ, Саров) предлагается создание комплекса

## **ИНОК – ИНтенсивный Обратный Комптон**

– источника (квази)монохроматических рентгеновских и  $\gamma$ -квантов, основанного на эффекте обратного комптоновского рассеяния фотонов на релятивистских электронах. Базовой установкой комплекса будет электронный накопитель с рекордными параметрами.

# Ядерная физика низких энергий с фотонами



# Концепция ИКИ НЦФМ

## Основные научные направления:

- Прикладные исследования с монохромным рентгеном (1)
- Ядерная фотоника (2)
- Адронная фотоника (3)
- Излучение ультравысокой интенсивности (4)
- Задачи ВНИИЭФ по Спецтематике (5)
- Фунд. свойства нуклонов (6)



Сайт проекта ИНОК — <https://ncphm.ru/inok>

Проект программы ИНОК доступен по QR коду и по адресу <https://ncphm.ru/inok/program>

# «Тактика» использования КОМПТОНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ

$E_{ph} \sim 0.1 \text{ eV}$

$E_{\gamma} \sim 0.4\text{--}6 \text{ MeV}$

Газовый  $\text{CO}_2$   
лазер

1я  $E_{ph} \sim 1.1 \text{ eV}$

$E_{\gamma} \sim 4\text{--}70 \text{ MeV}$

3я  $E_{ph} \sim 3.5 \text{ eV}$

$E_{\gamma} \sim 210 \text{ MeV}$

Твердотельный  
Nd:YAG лазер

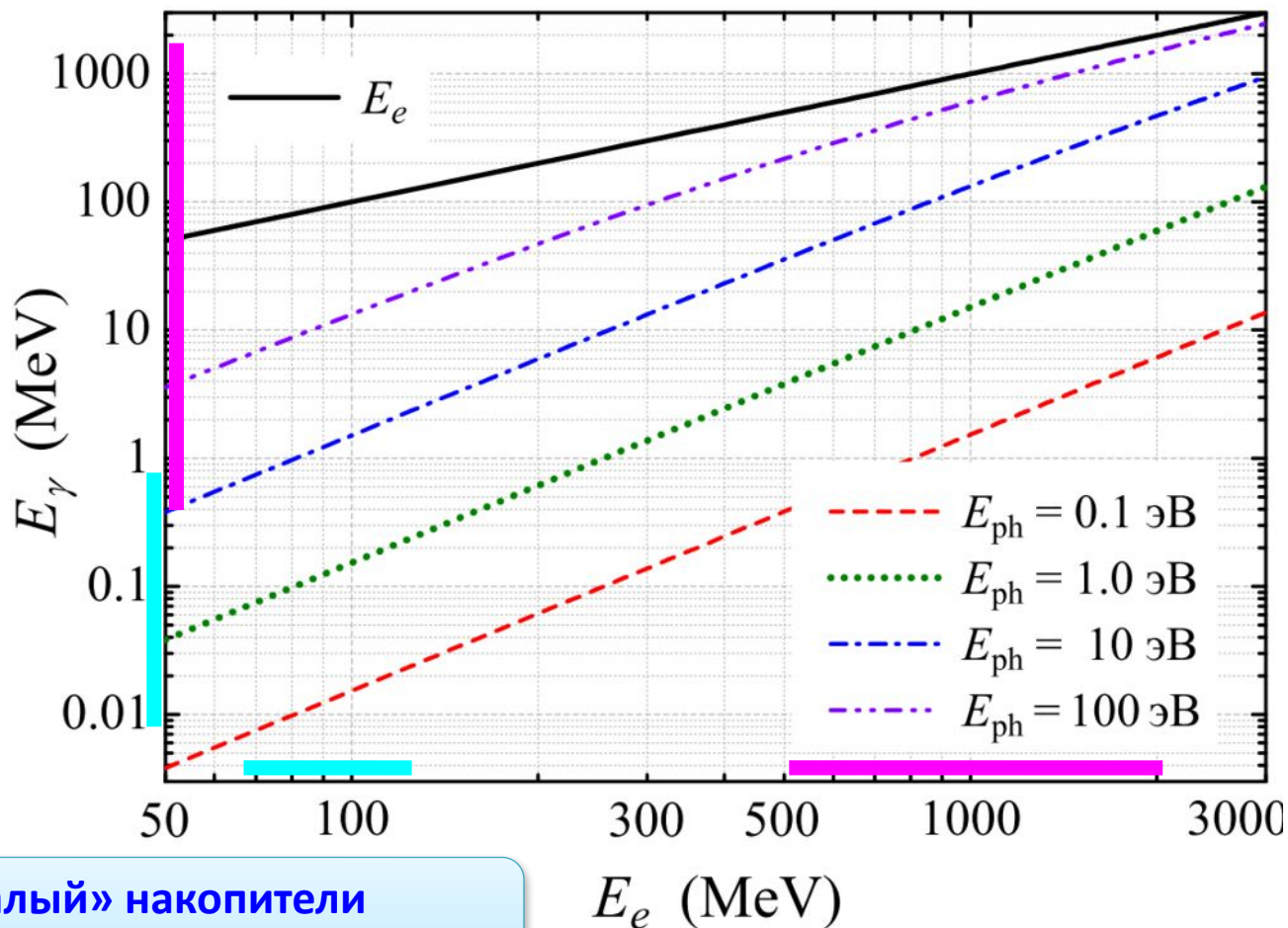
$E_{ph} \sim 100 \text{ eV}$

$E_{\gamma} \sim 1500 \text{ MeV}$

Отраженный УФ  
(ондулятор?)

Рассеяние фотона строго назад, законы сохранения

$$E_{\gamma} = \frac{E_e + \sqrt{E_e^2 - m_e^2}}{E_e - \sqrt{E_e^2 - m_e^2} + 2E_{ph}} E_{ph} \approx \frac{4E_e^2 E_{ph}}{4E_e E_{ph} + m_e^2}$$



«Большой» и «малый» накопители  
перекрывают диапазон от 10 кэВ до 1500 МэВ

# Существующие и планируемые КОМПТОНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ

Название	Страна	Статус	Энергия $\gamma$ - квантов (МэВ)	Энергетич. разброс ( $\sigma$ ,%)	Поток (фот/с)
New Subaru	Япония	работает	0-76	1,2	$10^5$
HI $\gamma$ S	США	работает	0-100	0,8	$10^7$
VEGA (ELI-NP)	Румыния	проект	0,2-19,5	0,5	$10^8$
Gamma Factory	CERN	проект	0,2-16	0,5	$10^7$
ИКИ НЦФМ	Россия	проект	0-70	0,3	$10^9$
ИКИ НЦФМ	Россия	проект	70-300	0,5	$10^8$

**Важнейшие требования предъявленные к проектируемым в мире комптоновским источникам это перестраиваемость по энергии “на ходу” и высокая монохроматичность**

**Дизайн ИНОК (в том числе, использование 2 колец) оптимизирован именно по этим параметрам**

Создание в России самого интенсивного в мире источника квазимонохроматического гамма-излучения позволит совершить качественный скачок в фотоядерной физике и достигнуть технологического лидерства в области создания таких установок.



# Возможная синергия ИНОК с проектами $e^+e^-$ коллайдера, XCELS и СИЛА

ИНОК

$e^+e^-$  коллайдер



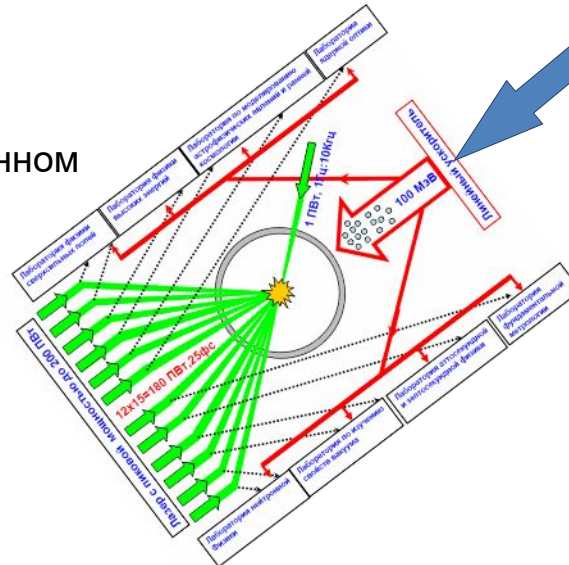
Электронный ускоритель коллайдера продолжает ускоритель ИКИ НЦФМ Или делит с ним инженерную инфраструктуру



Электронный пучок

XCELS

В «стандартной комплектации» ИКИ НЦФМ на прямом электронном канале установлены лазеры « $\sim 1$  ТВт» и « $\sim 1$  Дж,  $\sim 20$  пс» С вводом XCELS становится доступно лазерное излучение « $\sim 10$  ПВт» и « $\sim 100$  Дж,  $\sim 20$  пс»



СИЛА

Системы электронного ускорителя ИНОК могут стать прототипами для систем ускорителя комплекса СИЛА

# Заключения

**Обновление аппаратной и кадровой базы ядерной физики низких энергий особенно затруднено**

**Есть примеры реализации (успешного развития) в РФ проектов большого масштаба**

**Есть хорошие идеи как и куда должна двигаться ядерная физика низких энергий**

**К сожалению «per aspera ad astra» но работы для яркого будущего отечественной науки системно ведутся**