

Леонид Григоренко

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



**Замысел и научная программа перспективного  
КОМПТОНОВСКОГО ИСТОЧНИКА МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ГАММА-  
КВАНТОВ НЦФМ**



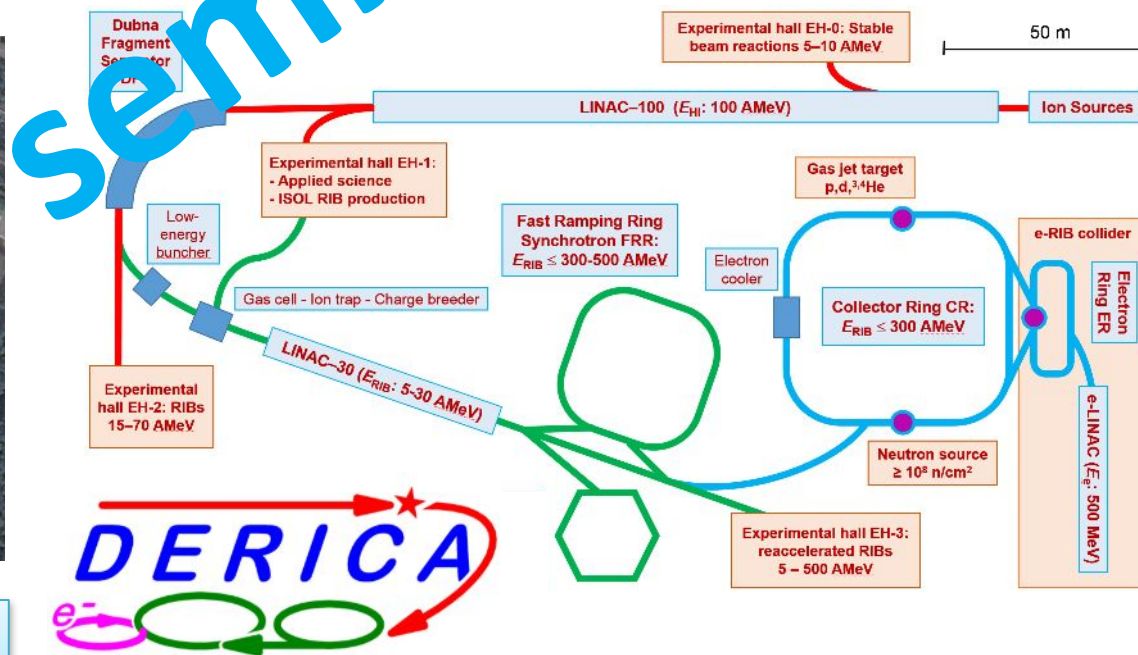
**ИНОК =  
ИНтенсивный  
Обратный  
Комптон**

Леонид Григоренко

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



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



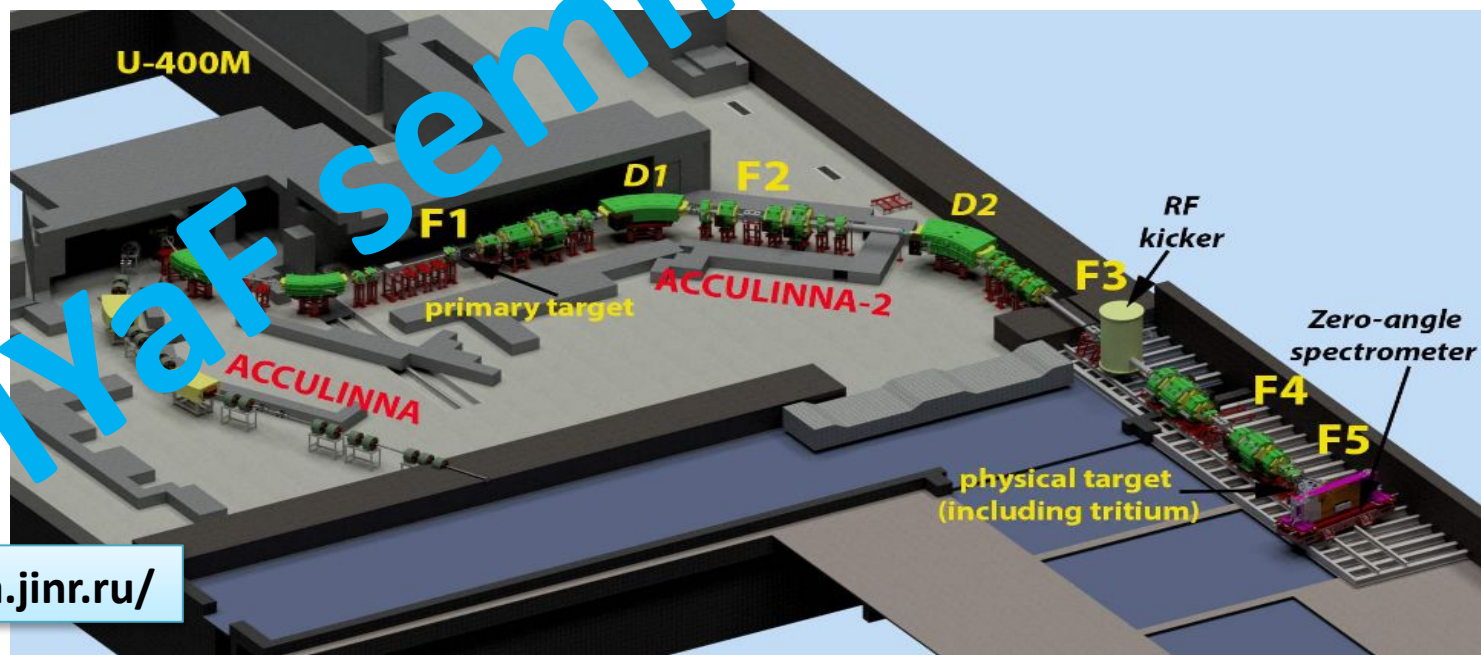
<http://aculina.jinr.ru/derica.php>

Leonid Grigorenko

Flerov Laboratory of Nuclear Reactions,  
JINR, Dubna



Тяжелейшие изотопы водорода  ${}^6\text{H}$  и  ${}^7\text{H}$  в экспериментах на установке ACCULINNA-2



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

Леонид Григоренко

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



Исследования экзотических ядер на установке ACCULINNA-2.

Перспективы ядерной физики низких энергии в РФ.

От ACCULINNA к ACCULINNA-2

Экспериментальная “кампания”  
2018-2021

Экспериментальная программа  
ACCULINNA-2 в 2023-2025  
Приглашение к сотрудничеству

Перспективы ядерной физики  
низких энергий в РФ

**НЦФМ**

# NCPM Satis (Sarov)

**“Super c- $\tau$  factory”  
– heavy c quark and  
heavy meson physics**

**XCELS – eXawatt  
Center for Extreme  
Light Studies**

**«Гибридная  
электронно-фотонная  
вычислительная  
система»**



# **Отчет по прошлым семинарам**

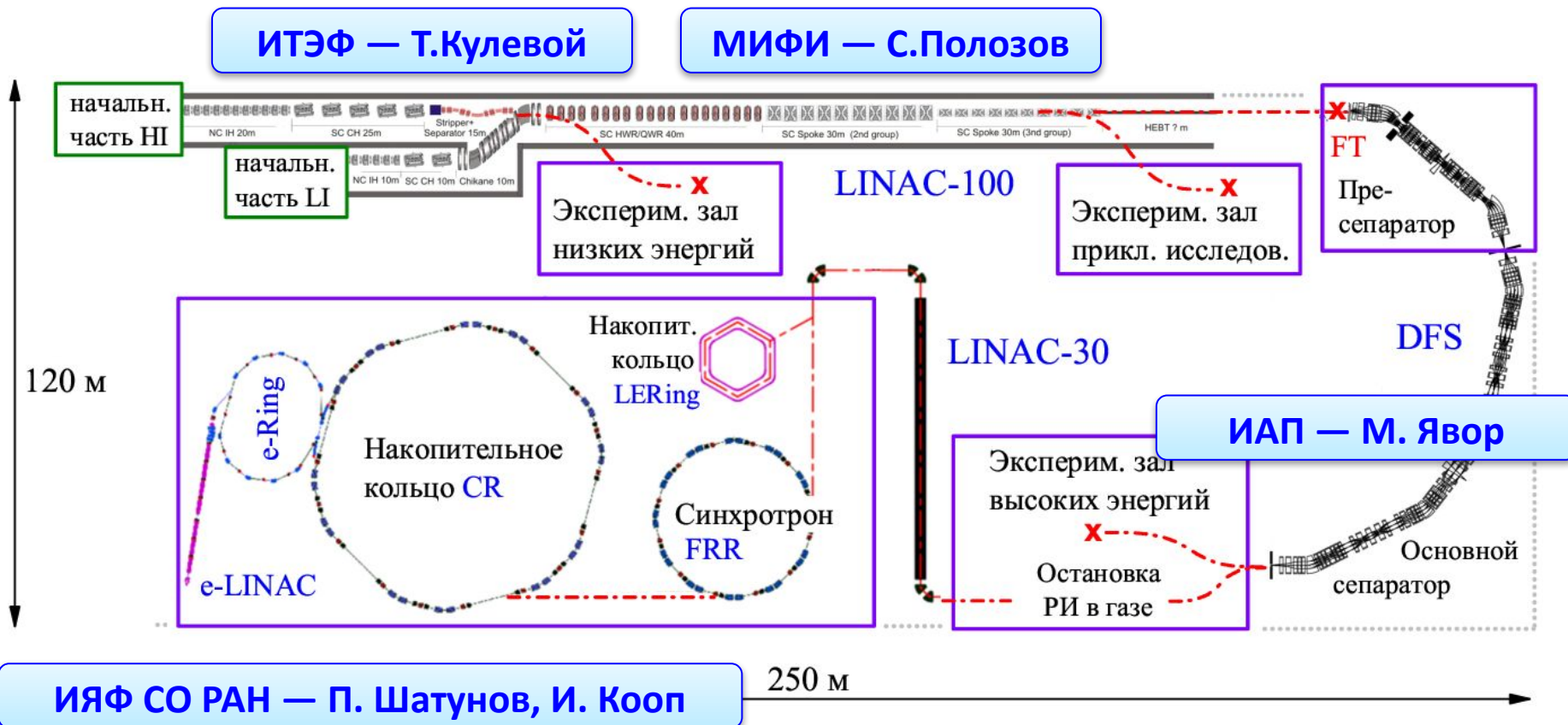
**DERICA**

# DERICA — Dubna Electron Radioactive Ion Collider fAcility

Facility with world-unique scientific program

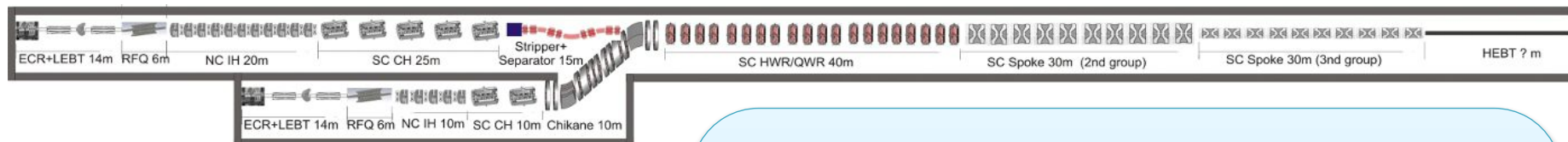
Underdeveloped field:  
storage ring physics with RIBs

Empty field: studies of RIBs  
in electron-RIB collider





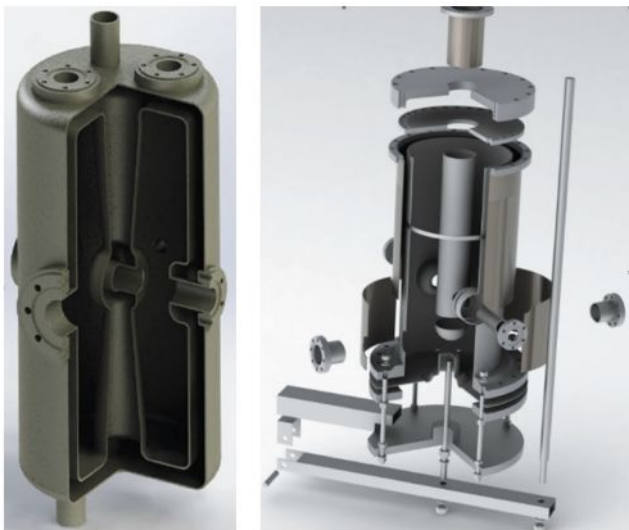
# Другие «ключевые» R&D: LINAC-100



## Challenges of LINAC-100 design

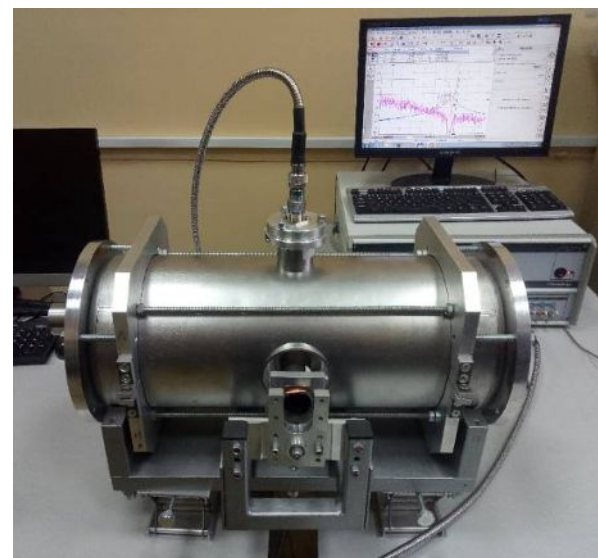
- Ratio of normal/superconducting
- Strippers (1,2 ?), stripping energies
- Acceleration of several charge states
- One or two front ends
- Ca beam  $\sim 3$  emA  $\sim 300$   $\mu$ A 1500 kW beam
- U beam  $\sim 1$  emA  $\sim 30$   $\mu$ A 600 kW beam
- Lossless operation

Design: S.M. Polozov, MEPHI

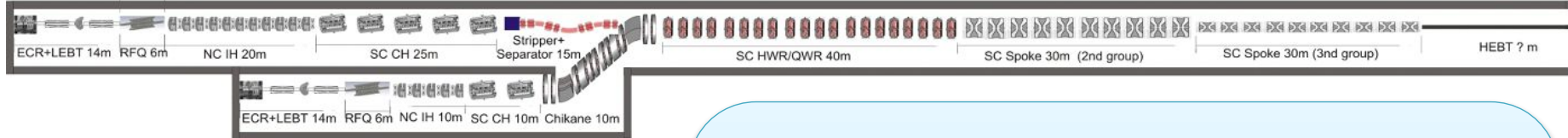


“Recovery” of RF superconductivity technology in Russia

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



# Другие «ключевые» R&D: LINAC-100



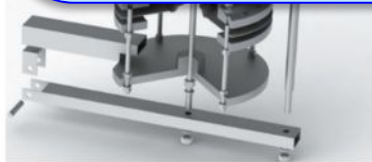
## Challenges of LINAC-100 design

- Ratio of normal/superconducting
- Strippers (1,2 ?), stripping energies
- Acceleration of several charge states
- One or two front ends

Design: S.M. Polozov, MEPHI



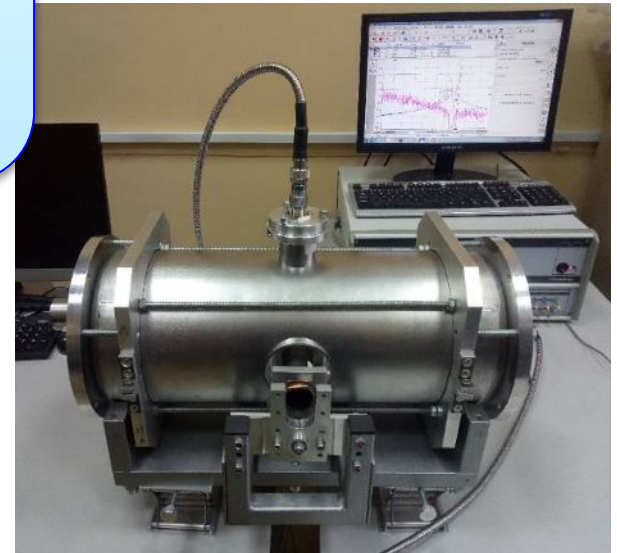
**Доводка HWR и создание QWR  
поддержаны в рамках  
направления  
6 НЦФМ**



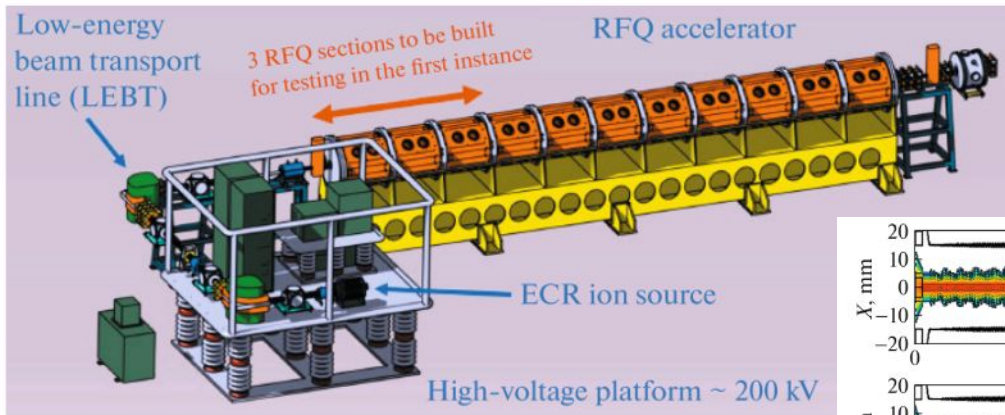
“Recovery” of RF  
superconductivity  
technology in Russia

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

300  $\mu\text{A}$  1500 kW beam  
30  $\mu\text{A}$  600 kW beam

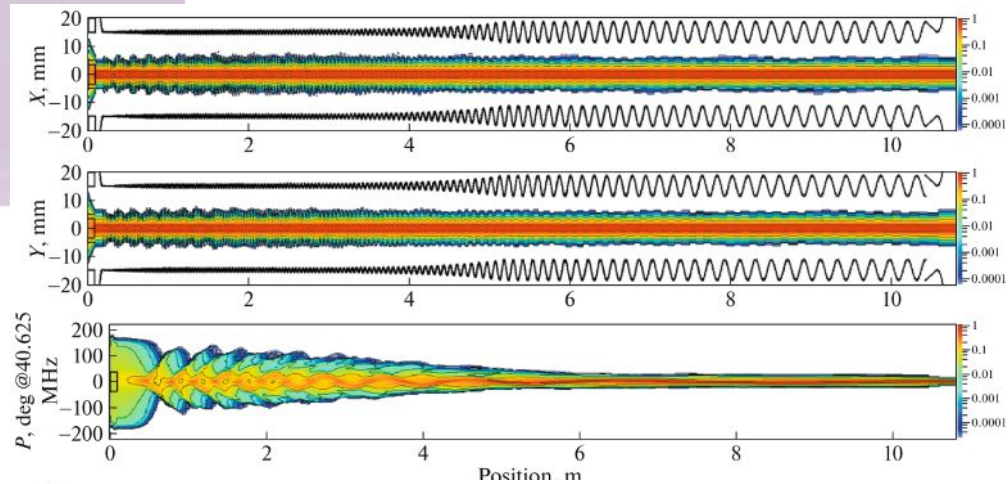


# Первое что проверить: Front end LINAC-100

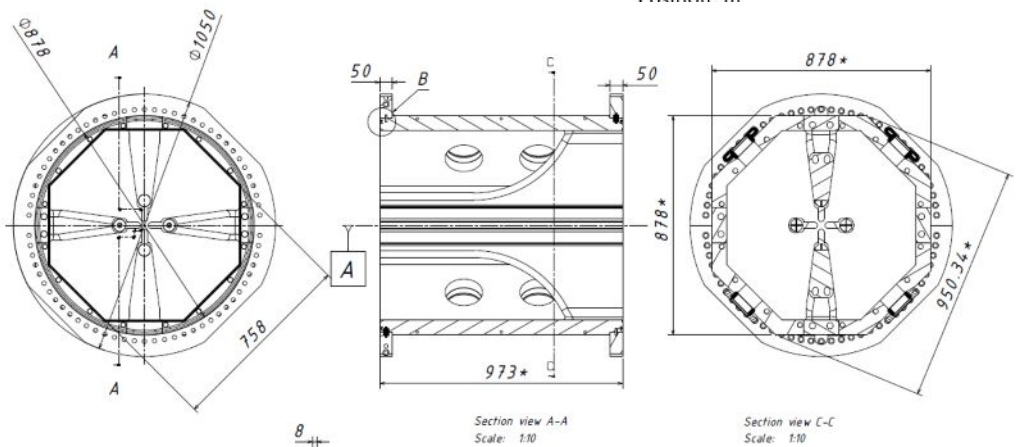
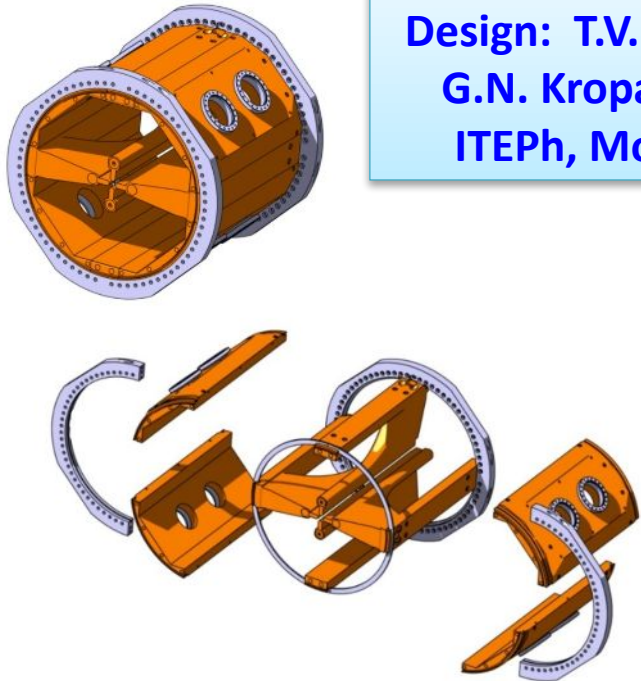


**Challenges of LINAC-100 front end**

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



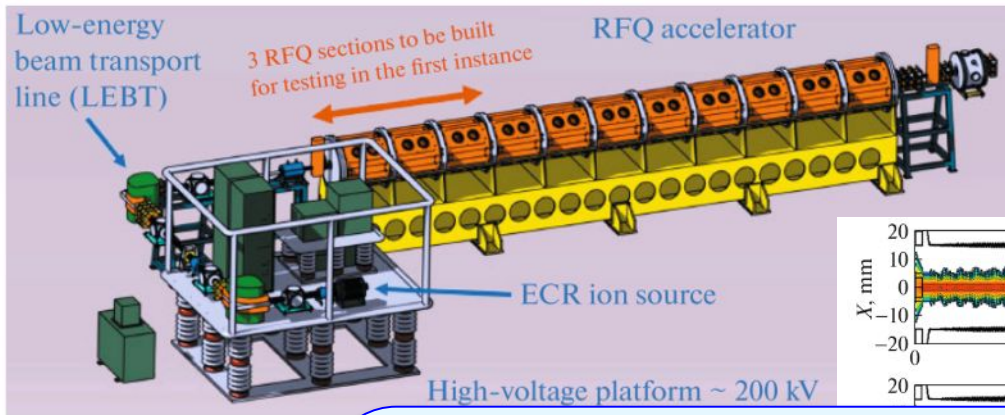
**Design: T.V. Kulevoy,  
G.N. Kropachev,  
ITEPh, Moscow**



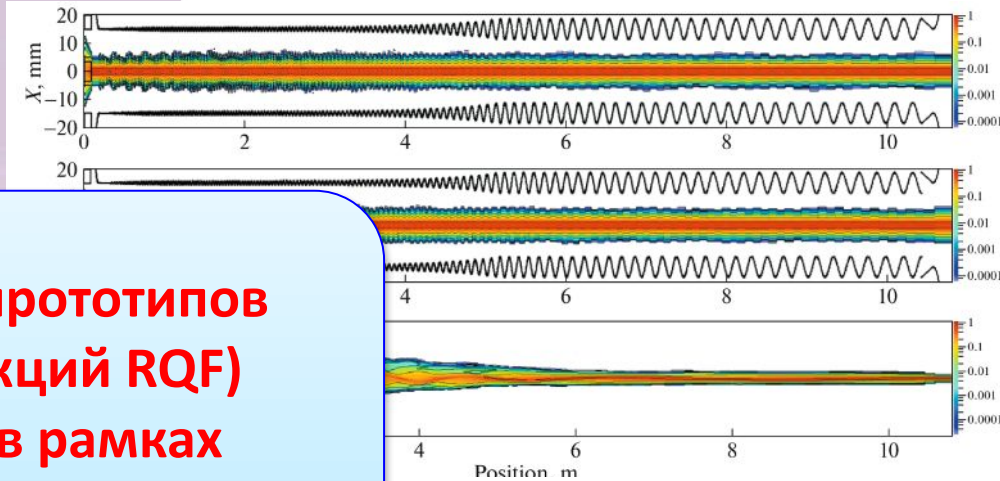
Паз для прокладки витон  
Front view  
Scale: 1:10

**Production, VNIITF (?), BINP (?)**

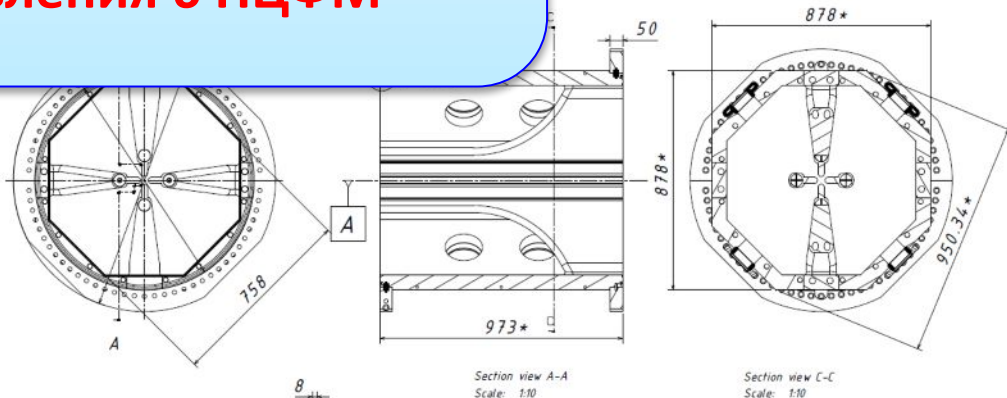
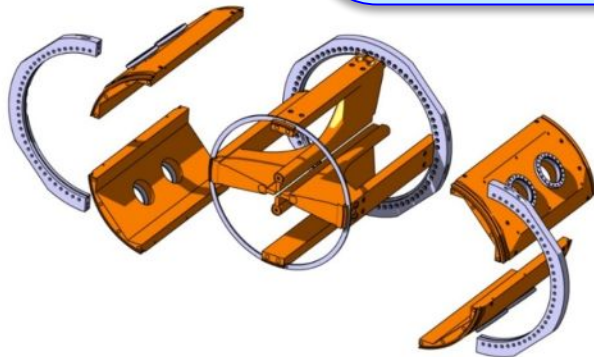
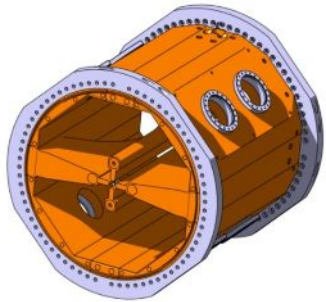
# Первое что проверить: Front end LINAC-100



- Challenges of LINAC-100 front end**
- Ca beam ~3 emA, U beam ~1 emA
  - Practically "lossless" RFQ operation



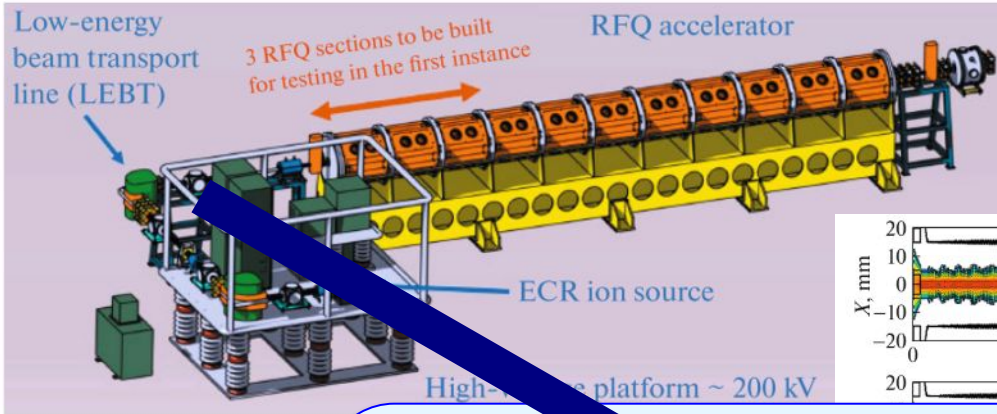
**Изготовление прототипов  
(несколько секций RQF)  
поддержано в рамках  
направления 6 НЦФМ**



Паз для прокладку витон  
Front view  
Scale: 1:10

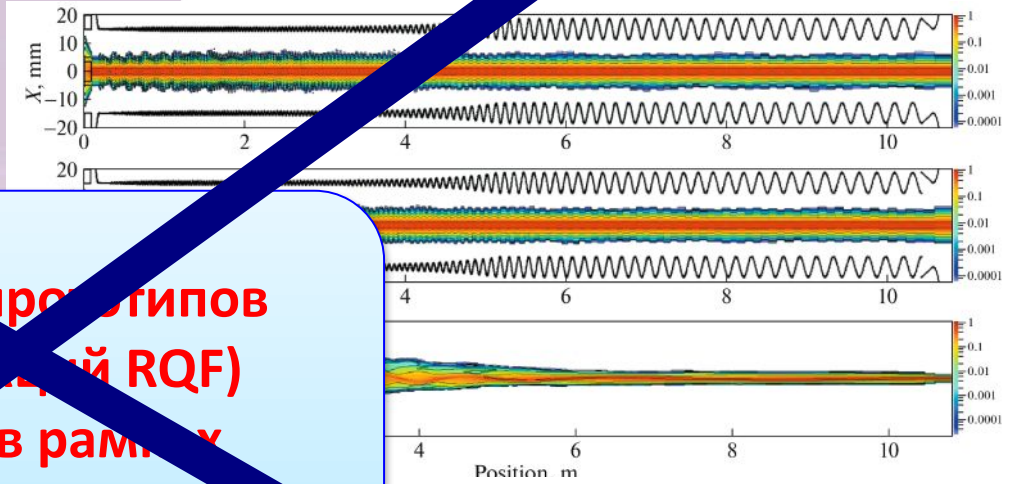
**Production, VNIITF (?), BINP (?)**

# Первое что проверить: Front end LINAC-100

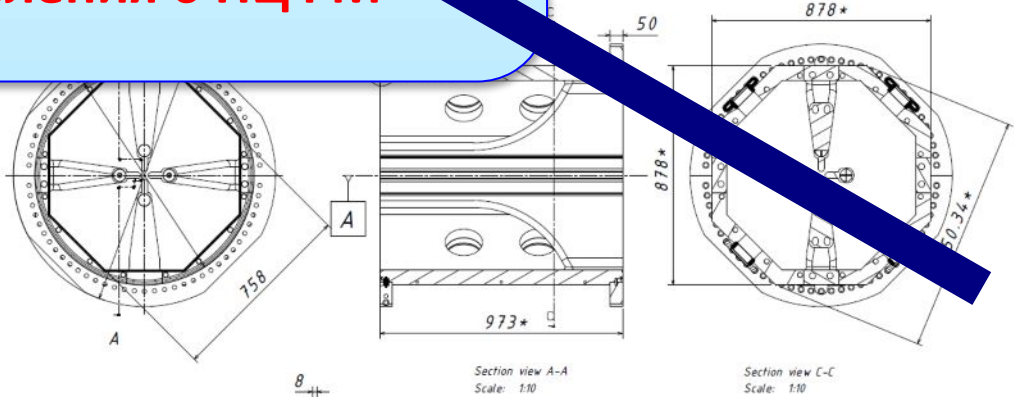
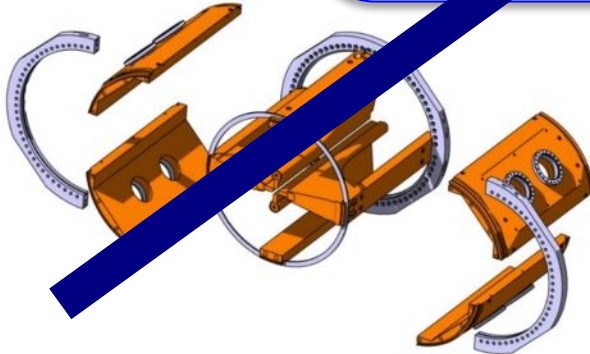
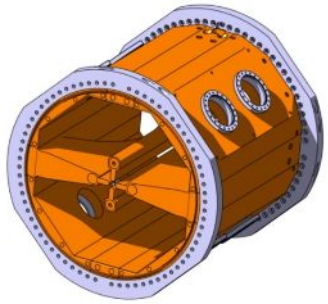


**Challenges of LINAC-100 front end**

- Ca beam  $\sim 3$  emA, U beam  $\sim 1$  emA
- Practically "lossless" RFQ operation



**Изготовление прототипов (несколько секций RQF) поддержано в рамках направления 6 НЦФМ**

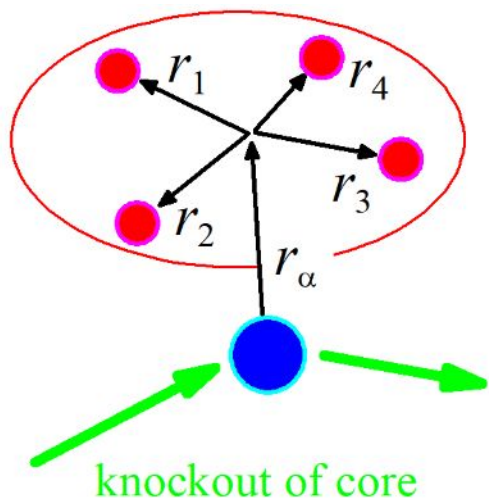


**Production, VNIITF (?), BINP (?)**

# **Отчет по прошлым семинарам**

**Легкая экзотика –  
тетранейтрон**

# How to get real $^4n$ ?



## Broad states beyond the neutron drip line

Examples of  $^5\text{H}$  and  $^4n$

L.V. Grigorenko<sup>1,2,a</sup>, N.K. Timofeyuk<sup>3</sup>, and M.V. Zhukov<sup>4</sup>

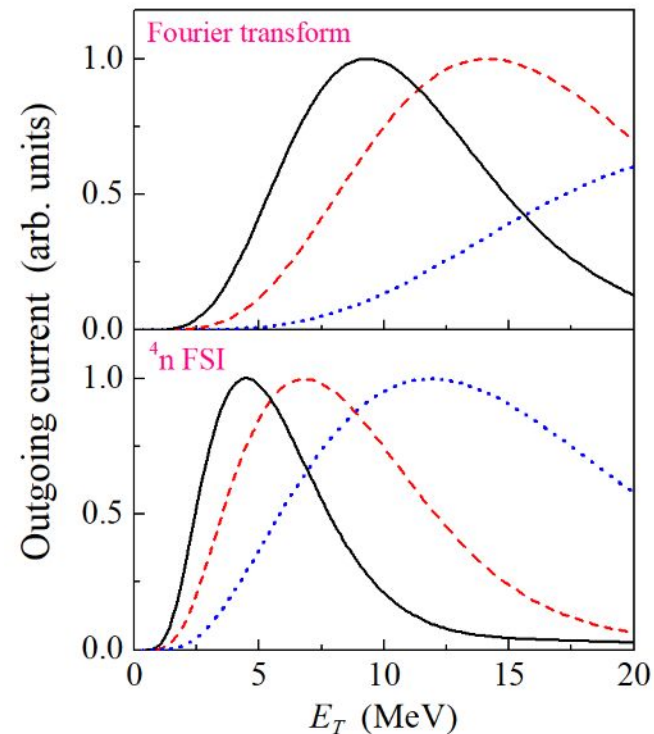
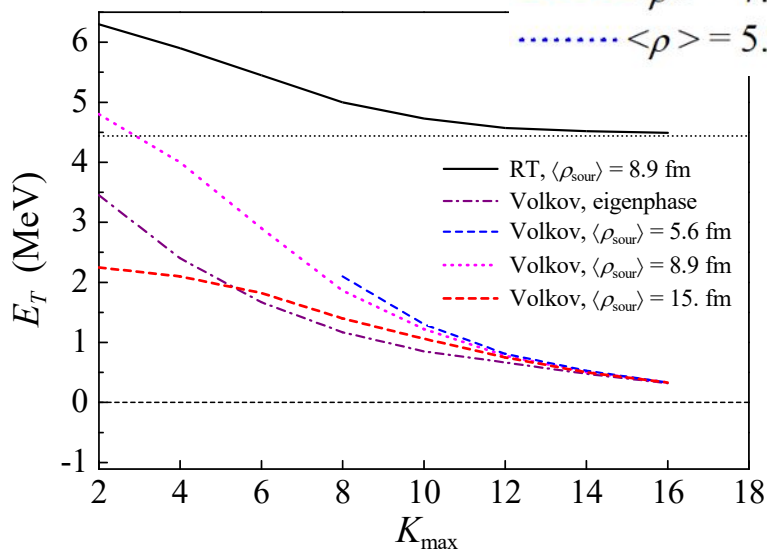
$$(H_4 - E_T) \Psi^{(+)} = \Phi$$

$$\Phi = \int d\Omega_q Y_{00}(q) \int d^3r_\alpha e^{iqr_\alpha} \langle \alpha | ^8\text{He} \rangle$$

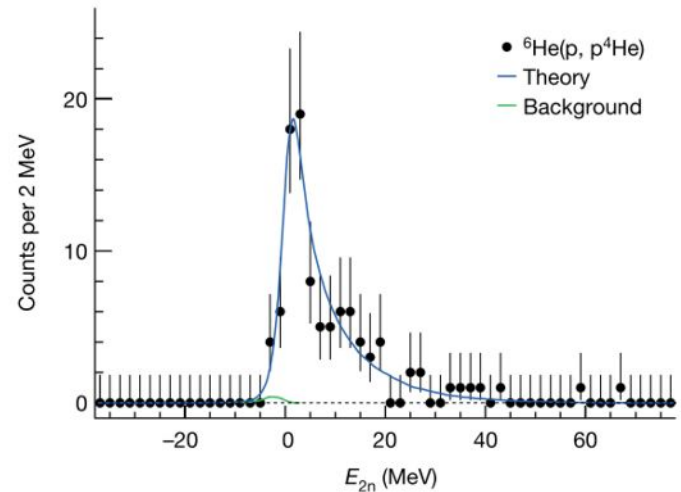
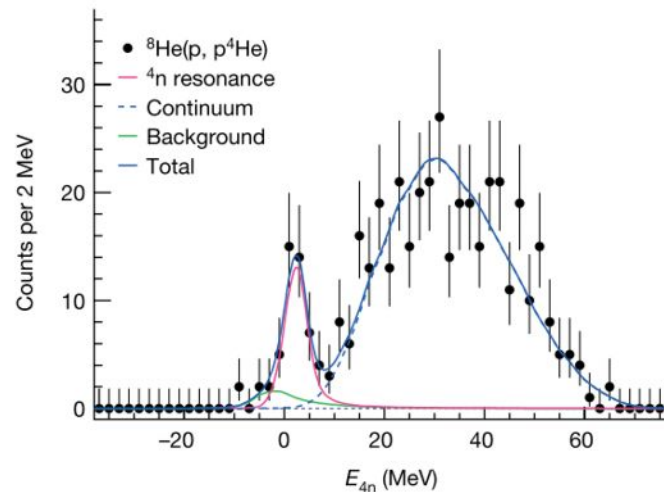
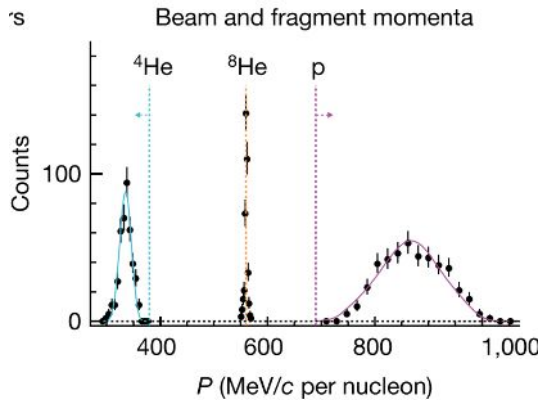
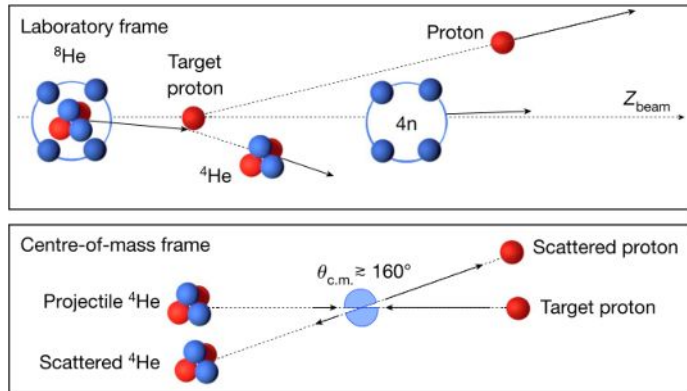
Конфигурация  
 $^8\text{He } 0^+$  только  
 $[p_{3/2}]^4$

RMS size of the source

- $\langle \rho \rangle = 8.9$  fm
- - -  $\langle \rho \rangle = 7.3$  fm
- ⋯  $\langle \rho \rangle = 5.6$  fm



# Experiment $^4n$



## Article

# Observation of a correlated free four-neutron system

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04827-6>

Received: 4 August 2021

Accepted: 28 April 2022

Published online: 22 June 2022

Open access

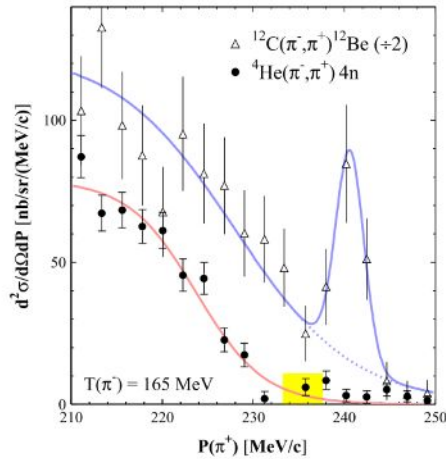
Check for updates

M. Duer<sup>1,2</sup>, T. Aumann<sup>12,3</sup>, R. Gernhäuser<sup>1</sup>, V. Panin<sup>2,5</sup>, S. Paschalis<sup>1,6</sup>, D. M. Rossi<sup>1</sup>, N. L. Achouri<sup>1</sup>, D. Ahn<sup>5,10</sup>, H. Baba<sup>3</sup>, C. A. Bertulani<sup>8</sup>, M. Böhmer<sup>4</sup>, K. Boretzky<sup>2</sup>, C. Caesar<sup>1,2,5</sup>, N. Chiga<sup>9</sup>, A. Corsi<sup>9</sup>, D. Cortina-Gil<sup>10</sup>, C. A. Douma<sup>1</sup>, F. Dufter<sup>1</sup>, Z. Elekes<sup>12</sup>, J. Feng<sup>13</sup>, B. Fernández-Domínguez<sup>10</sup>, U. Forsberg<sup>6</sup>, N. Fukuda<sup>5</sup>, I. Gasparic<sup>13,14</sup>, Z. Ge<sup>5</sup>, J. M. Gheller<sup>7</sup>, J. Gibelin<sup>7</sup>, A. Gillibert<sup>8</sup>, K. I. Hahn<sup>15,16</sup>, Z. Halász<sup>12</sup>, M. N. Harakeh<sup>11</sup>, A. Hirayama<sup>17</sup>, M. Holl<sup>1</sup>, N. Inabe<sup>5</sup>, T. Isobe<sup>5</sup>, J. Kahlbow<sup>1</sup>, N. Kalantar-Nayestanaki<sup>1</sup>, D. Kim<sup>16</sup>, S. Kim<sup>1,16</sup>, T. Kobayashi<sup>18</sup>, Y. Kondo<sup>17</sup>, D. Körper<sup>2</sup>, P. Koseoglou<sup>1</sup>, Y. Kubota<sup>1</sup>, I. Kuti<sup>12</sup>, P. J. Li<sup>19</sup>, C. Lehr<sup>1</sup>, S. Lindberg<sup>20</sup>, Y. Liu<sup>13</sup>, F. M. Marqués<sup>1</sup>, S. Masuoka<sup>1</sup>, M. Matsumoto<sup>17</sup>, J. Mayer<sup>22</sup>, K. Miki<sup>1,10</sup>, B. Monteagudo<sup>7</sup>, T. Nakamura<sup>17</sup>, T. Nilsson<sup>23</sup>, A. Obertelli<sup>15</sup>, N. A. Orr<sup>1</sup>, H. Otsu<sup>1</sup>, S. Y. Park<sup>15,19</sup>, M. Parlog<sup>1</sup>, P. M. Potlog<sup>23</sup>, S. Reichert<sup>4</sup>, A. Revel<sup>17,24</sup>, A. T. Saito<sup>17</sup>, M. Sasano<sup>5</sup>, H. Scheit<sup>1</sup>, F. Schindler<sup>1</sup>, S. Shimoura<sup>21</sup>, H. Simon<sup>1</sup>, L. Stuhl<sup>16,21</sup>, H. Suzuki<sup>1</sup>, D. Symochko<sup>1</sup>, H. Takeda<sup>5</sup>, J. Tanaka<sup>1,2</sup>, Y. Togano<sup>17</sup>, T. Tomal<sup>17</sup>, H. T. Törnqvist<sup>1,2</sup>, J. Tscheuschner<sup>1</sup>, T. Uesaka<sup>5</sup>, V. Wagner<sup>1</sup>, H. Yamada<sup>17</sup>, B. Yang<sup>13</sup>, L. Yang<sup>21</sup>, Z. H. Yang<sup>3</sup>, M. Yasuda<sup>1</sup>, K. Yoneda<sup>1</sup>, L. Zanetti<sup>1</sup>, J. Zenihiro<sup>2,25</sup> & M. V. Zhukov<sup>20</sup>

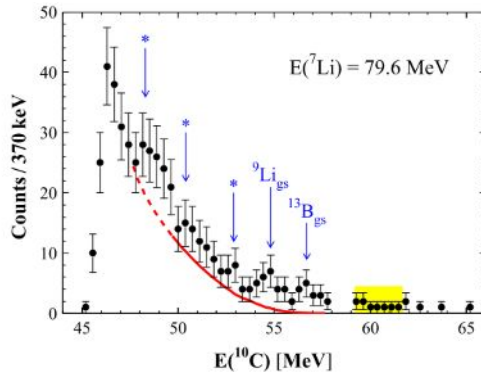
A long-standing question in nuclear physics is whether chargeless nuclear systems can exist. To our knowledge, only neutron stars represent near-pure neutron systems, where neutrons are squeezed together by the gravitational force to very high densities. The experimental search for isolated multi-neutron systems has been an ongoing quest for several decades<sup>1</sup>, with a particular focus on the four-neutron system called the tetra-neutron, resulting in only a few indications of its existence so far<sup>2–4</sup>, leaving the tetra-neutron an elusive nuclear system for six decades. Here we report on the observation of a resonance-like structure near threshold in the four-neutron system that is consistent with a quasi-bound tetra-neutron state existing for a very short time. The measured energy and width of this state provide a key benchmark for our understanding of the nuclear force. The use of an experimental approach based on a knockout reaction at large momentum transfer with a radioactive high-energy  $^8\text{He}$  beam was key.



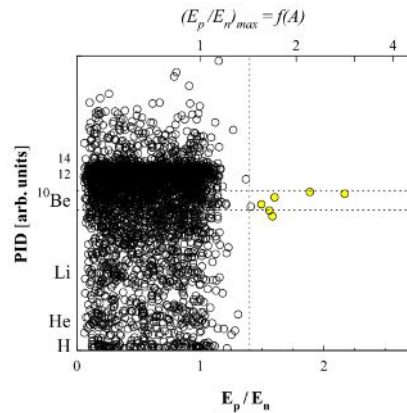
# Experiment on ${}^4n$



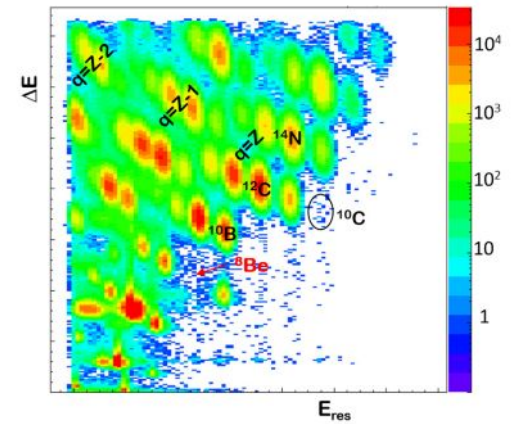
**Fig. 3** Experimental results for the reactions  ${}^4\text{He}(\pi^-, \pi^+)4n$  at  $\theta = 0^\circ$  (circles) and  ${}^{12}\text{C}(\pi^-, \pi^+){}^{12}\text{Be}$  at  $\theta = 8^\circ$  (triangles, divided by 2). The curves are fits to guide the eye, with a Woods-Saxon distribution only (red) plus an additional Gaussian function (blue). The peak in the  ${}^{12}\text{C}$  channel corresponds to the formation of the  ${}^{12}\text{Be}$  ground and two first excited states, and the range in yellow in the  ${}^4\text{He}$  channel to the region expected for a bound tetraneutron. Adapted from Ref. [26]



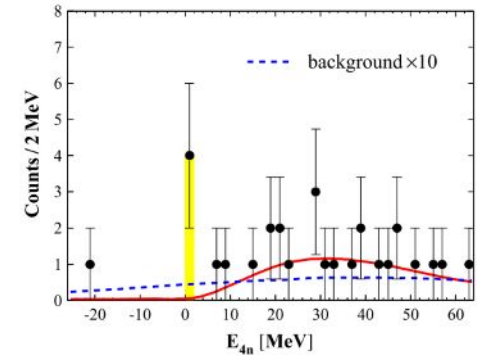
**Fig. 5** Energy spectrum of  ${}^{10}\text{C}$  from the  ${}^7\text{Li}({}^7\text{Li}, {}^{10}\text{C})4n$  reaction at  $\theta = 7.4^\circ$ . Known contaminant reactions are indicated either explicitly or with an asterisk. The red curve corresponds to five-body phase space, and the range in yellow to the region expected for a bound tetraneutron. Adapted from Ref. [44]



**Fig. 6** Scatter plot of the particle identification parameter PID vs the proton recoil in the neutron detector (normalized to the neutron energy) for the reaction  $({}^{14}\text{Be}, X+n)$ . The dotted lines show the region centered on the  ${}^{10}\text{Be}$  peak and with  $E_p/E_n > 1.4$ , and the 6 events in yellow are candidates to the formation of a bound tetraneutron. The scale on the upper axis shows the maximum proton recoil as a function of the multineutron mass number. Adapted from Ref. [3]



**Fig. 1** Identification spectrum, energy loss vs. residual energy, for the run with a central  ${}^{10}\text{C}$  energy of 20.5 MeV selected through the magnetic field. Clusters of ions with two, one and no electrons are denoted. For the completely stripped ions ( $q=Z$ ) a few  $N=Z$  nuclei are labeled as well as the region of the  ${}^{10}\text{C}$  ions.



**Fig. 7** Missing-mass spectrum of the  ${}^4\text{He}({}^8\text{He}, {}^8\text{Be})4n$  reaction. The solid (red) curve represents the sum of the direct decay of correlated  $2n$  pairs plus the estimated background. The dashed (blue) curve represents only the latter, multiplied by a factor of 10 in order to make it visible. The 4 events at threshold are highlighted in yellow. Adapted from Ref. [4]

# Recent theory works on $4n$

## Nonresonant Density of States Enhancement at Low Energies for Three or Four Neutrons

Michael D. Higgins<sup>Ⓧ\*</sup>

*Department of Physics and Astronomy, Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907, USA*

Chris H. Greene<sup>Ⓧ†</sup>

*Department of Physics and Astronomy, Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907, USA  
and Purdue Quantum Science and Engineering Institute, Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907, USA*

A. Kievsky<sup>Ⓧ‡</sup> and M. Viviani<sup>Ⓧ§</sup>

*Instituto Nazionale di Fisica Nucleare, Largo Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy*



(Received 8 May 2020; revised 26 June 2020; accepted 6 July 2020; published 28 July 2020)

The low energy systems of three or four neutrons are treated within the adiabatic hyperspherical framework, yielding an understanding of the low energy quantum states in terms of an adiabatic potential energy curve. The dominant low energy potential curve for each system, computed here using widely accepted nucleon-nucleon interactions with and without the inclusion of a three-nucleon force, shows no sign of a low energy resonance. However, both systems exhibit a low energy enhancement of the density of states, or of the Wigner–Smith time delay, which derives from long-range universal physics analogous to the Efimov effect. That enhancement could be relevant to understanding the low energy excess of correlated four-neutron ejection events observed experimentally in a nuclear reaction by Kisamori *et al.* [Phys. Rev. Lett. **116**, 052501 (2016)].

## Prediction for a Four-Neutron Resonance

A. M. Shirokov,<sup>1,2,3,\*</sup> G. Papadimitriou,<sup>4,†</sup> A. I. Mazur,<sup>3</sup> I. A. Mazur,<sup>3</sup> R. Roth,<sup>5</sup> and J. P. Vary<sup>2,‡</sup>

<sup>1</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Department of Physics and Astronomy, Iowa State University, Ames, Iowa 50011-3160, USA*

<sup>3</sup>*Pacific National University, 136 Tikhookeanskaya Street, Khabarovsk 680035, Russia*

<sup>4</sup>*Nuclear and Chemical Science Division, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California 94551, USA*

<sup>5</sup>*Institut für Kernphysik, Technische Universität Darmstadt, 64289 Darmstadt, Germany*

(Received 20 July 2016; revised manuscript received 9 September 2016; published 28 October 2016)

We utilize various *ab initio* approaches to search for a low-lying resonance in the four-neutron ( $4n$ ) system using the JISP16 realistic  $NN$  interaction. Our most accurate prediction is obtained using a  $J$ -matrix extension of the no-core shell model and suggests a  $4n$  resonant state at an energy near  $E_r = 0.8$  MeV with a width of approximately  $\Gamma = 1.4$  MeV.

## Low Energy Structures in Nuclear Reactions with $4n$ in the Final State

Rimantas Lazauskas 


*Université de Strasbourg, CNRS, IPHC UMR 7178, F-67000 Strasbourg, France*

Emiko Hiyama

*Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan and RIKEN Nishina Center, Wako 351-0198, Japan*

Jaume Carbonell

*Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, IJCLab, 91405 Orsay, France*

 (Received 15 July 2022; revised 16 November 2022; accepted 13 February 2023; published 10 March 2023)

We investigate a reaction model that describes a fast removal of the  $\alpha$  particle from the  ${}^8\text{He}$  nucleus with eventual emission of four neutrons. The obtained four neutron energy distribution allows one to explain the sharp low energy peak observed by studying the missing mass spectra of four neutrons in Duer *et al.* [*Nature (London)* **606**, 678 (2022)], as a consequence of dineutron-dineutron correlations. The phenomenon of the emergence of a sharp low-energy peak in the four-neutron energy distribution should be more general and is expected in the decay of other systems containing a four-neutron halo.

Eur. Phys. J. A (2021) 57:105

<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-021-00417-8>

THE EUROPEAN  
PHYSICAL JOURNAL A



Review

## The quest for light multineutron systems

F. Miguel Marqués<sup>1,a</sup> , Jaume Carbonell<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LPC Caen, Normandie Université, ENSICAEN, Université de Caen, CNRS/IN2P3, 14050 Caen, France

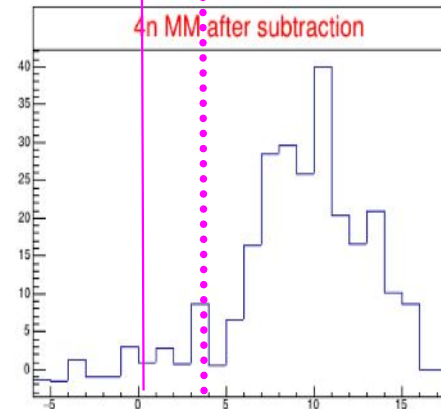
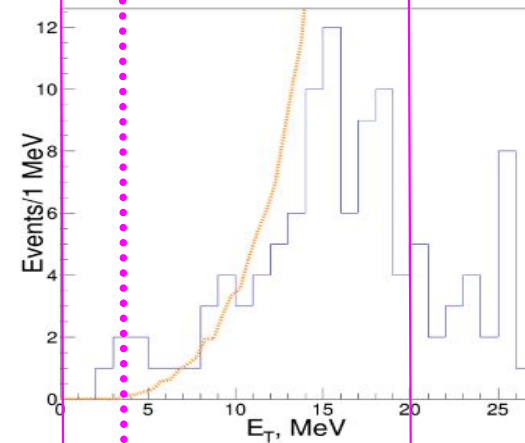
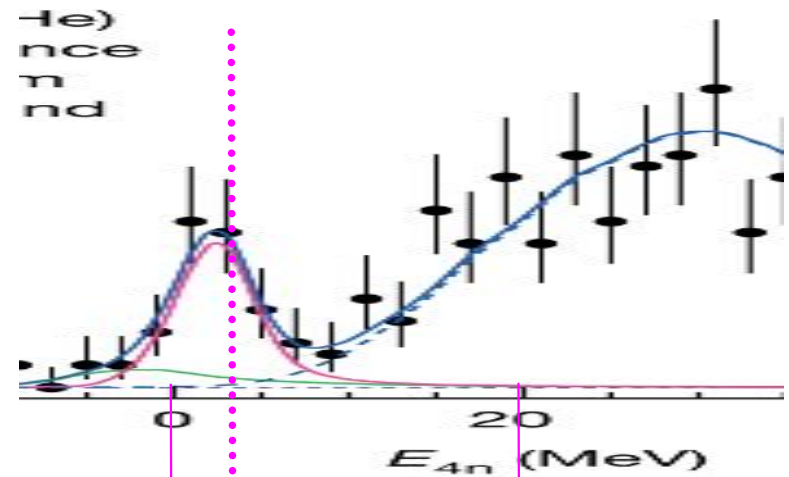
<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, IJCLab, 91405 Orsay, France

# Comparison of $^4n$ data at ACCULINNA-2 and RIKEN

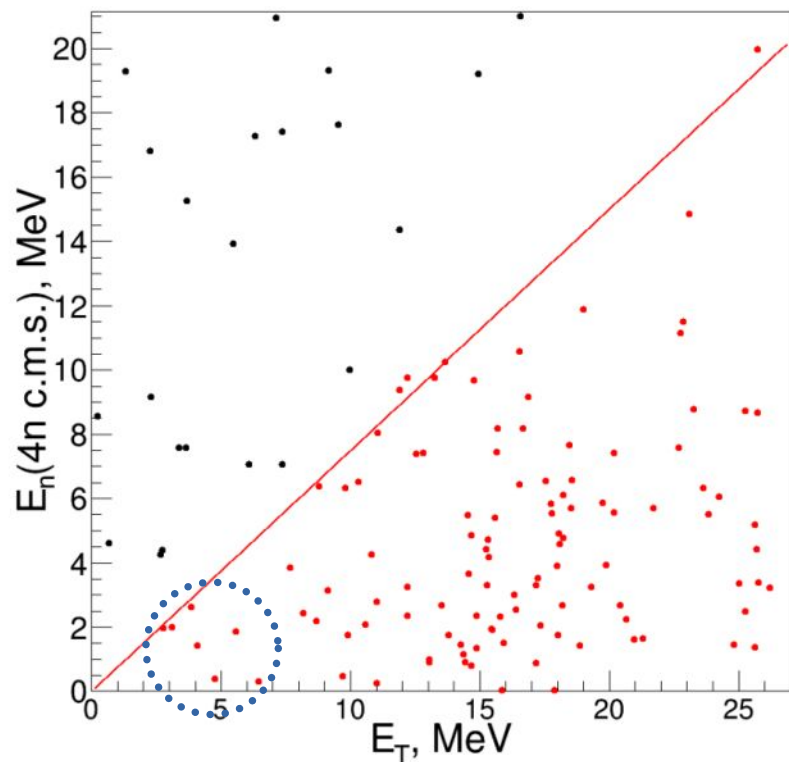
RIKEN  $p(^8\text{He}, p^4\text{He})^4n$

Dubna  $d(^8\text{He}, ^6\text{Li})^4n$

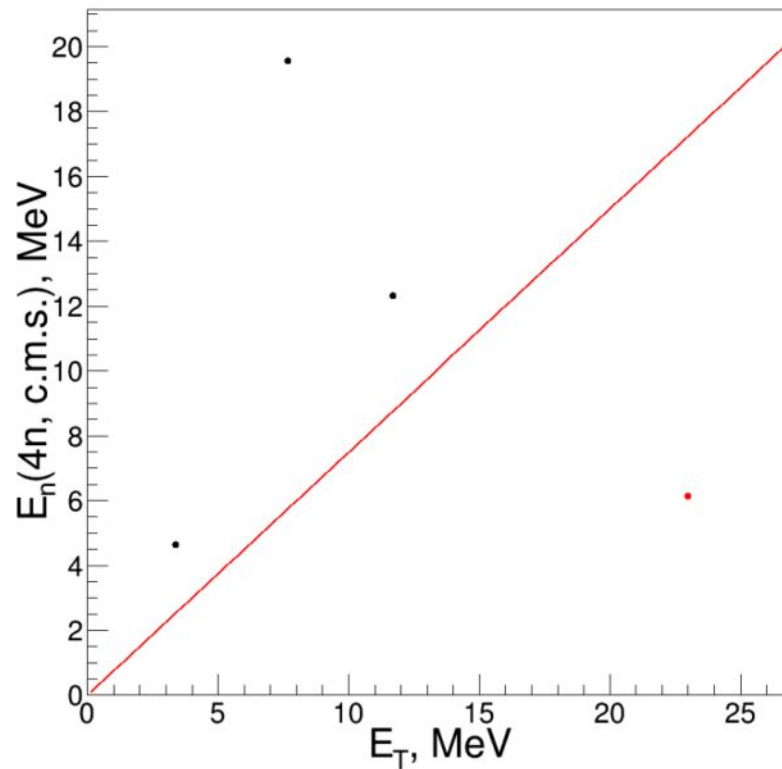
Dubna  $d(^8\text{He}, ^3\text{He})^7\text{H}^* \rightarrow ^4n + t$   
Возбужденные состояния  
 $^7\text{H}$   $E_T > 8$  MeV



# Статистика маргинальная, но фоновые условия отличные



(a)  $D_2$  target

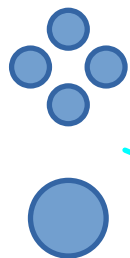


(b) Empty target

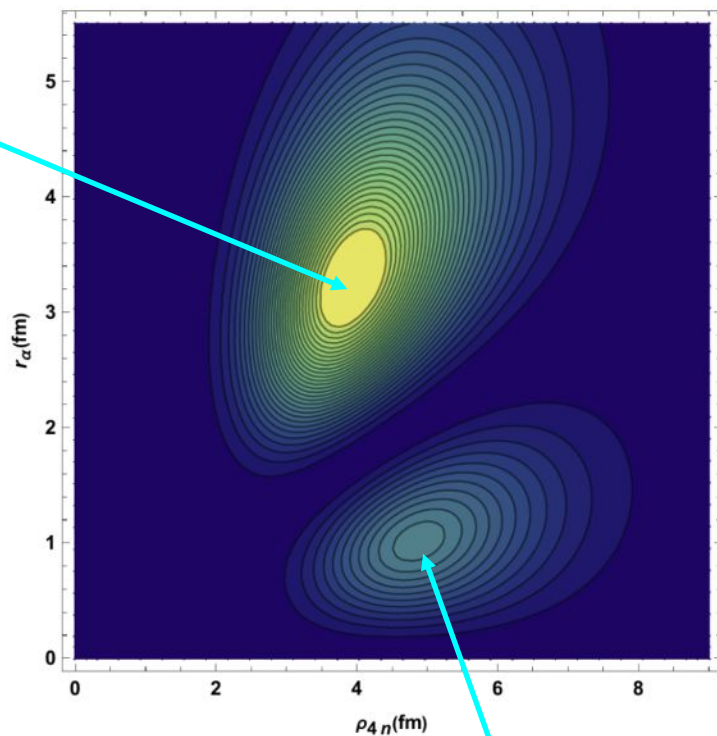
Dubna  $d(^8\text{He}, ^6\text{Li})^4n$

# Современная ВФ ${}^8\text{He}$ в пятичастичной модели (Н.Б. Шульгина, КИ)

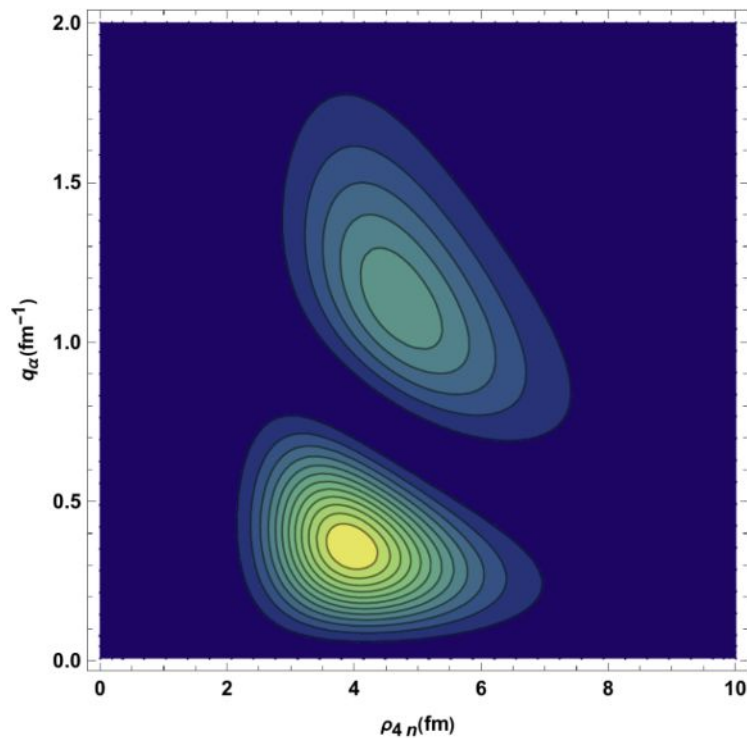
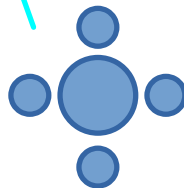
Конфигурация  ${}^8\text{He } 0^+$   
 $[p_{3/2}]^2 [s_{3/2}]^2$  30% резко  
коррелирована



“Метелка”

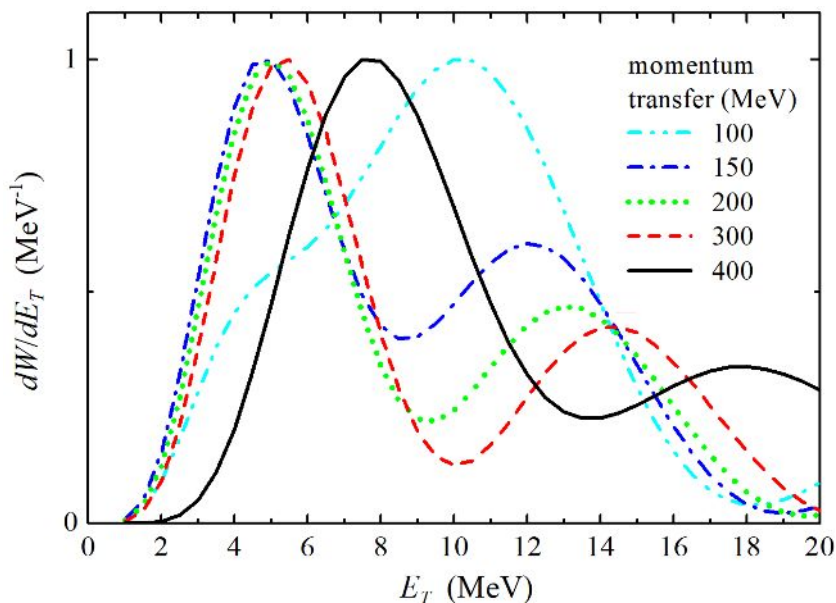


“Крест”



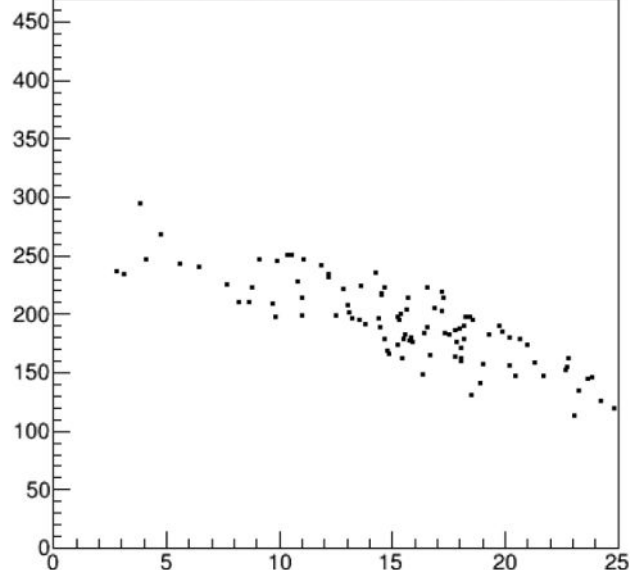
# Спектр $^4n$ , коррелированная часть

Средний радиус  
нейтрона в  
«источнике»  $\sim 5$  fm



Dubna  $d(^8\text{He}, ^6\text{Li})^4n$   
Momentum transfer  
120-250 MeV

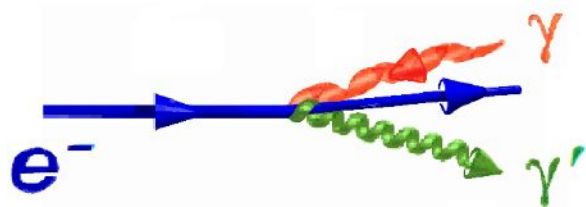
$^4n$  momentum correlation d- $^6\text{Li}$



Dubna  $d(^8\text{He}, ^3\text{He})^7\text{H}^* \rightarrow ^4n+t$   
Возбужденные состояния  $^7\text{H}$   $E_T > 8$  MeV  
Momentum transfer 160-200 MeV



ИЦФМ  
*ИНОК*



**ИНОК =**  
**ИН**тенсивный  
**Обратный КОМПТОН**



# NCPM Satis (Sarov)

**“Super c- $\tau$  factory”  
– heavy c quark and  
heavy meson physics**

**XCELS – eXawatt  
Center for Extreme  
Light Studies**

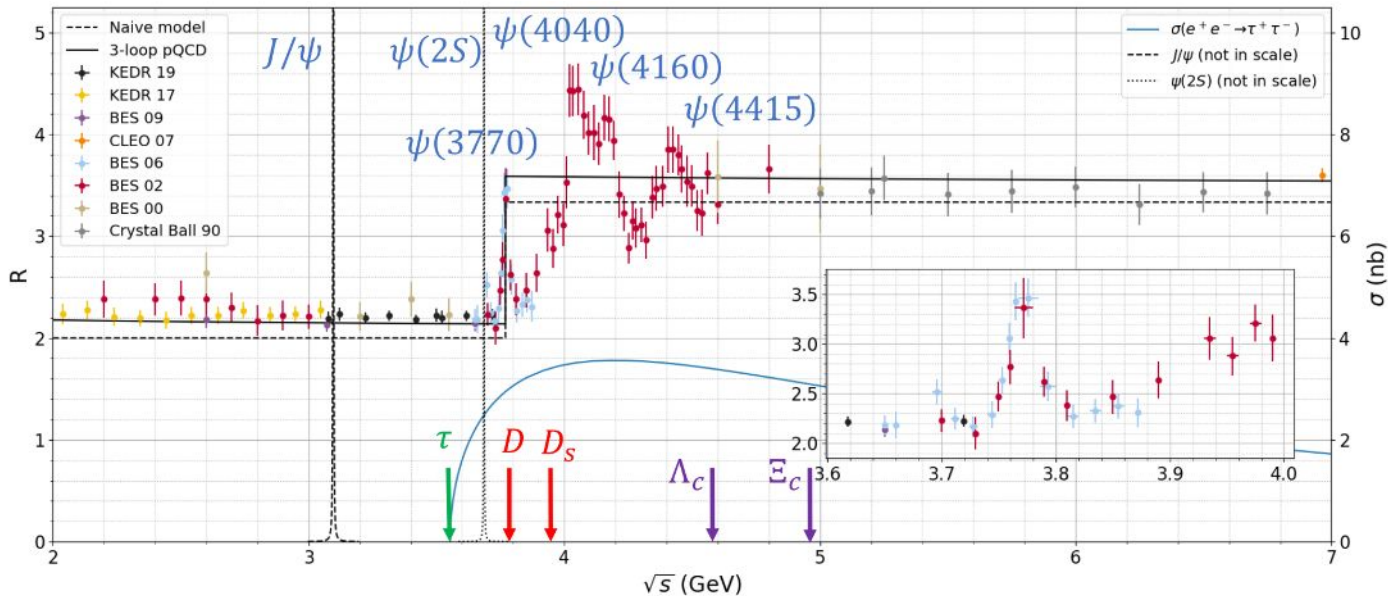
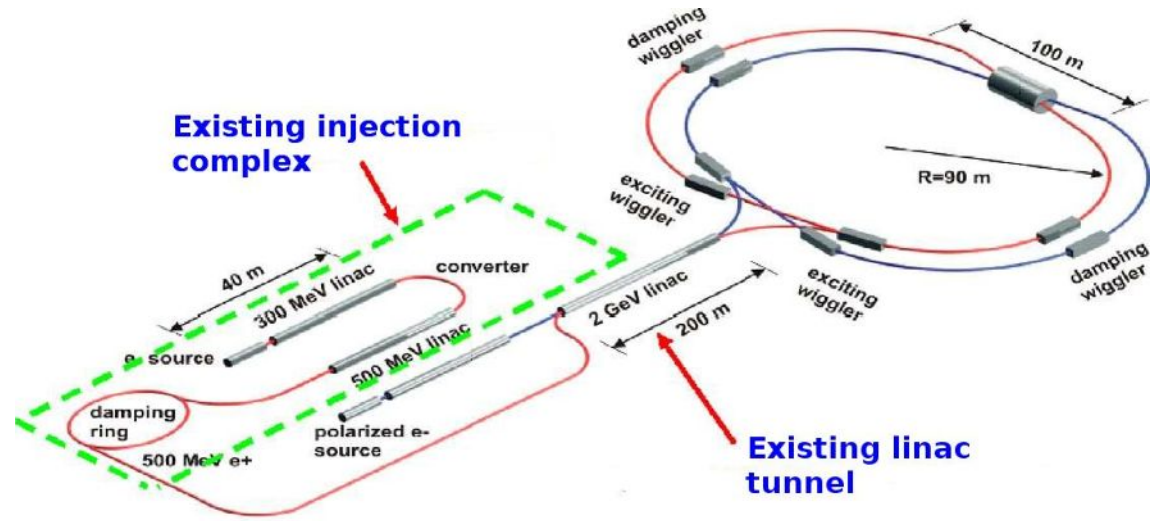
**«Гибридная  
электронно-фотонная  
вычислительная  
система»**



# Super c- $\tau$ factory

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

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



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

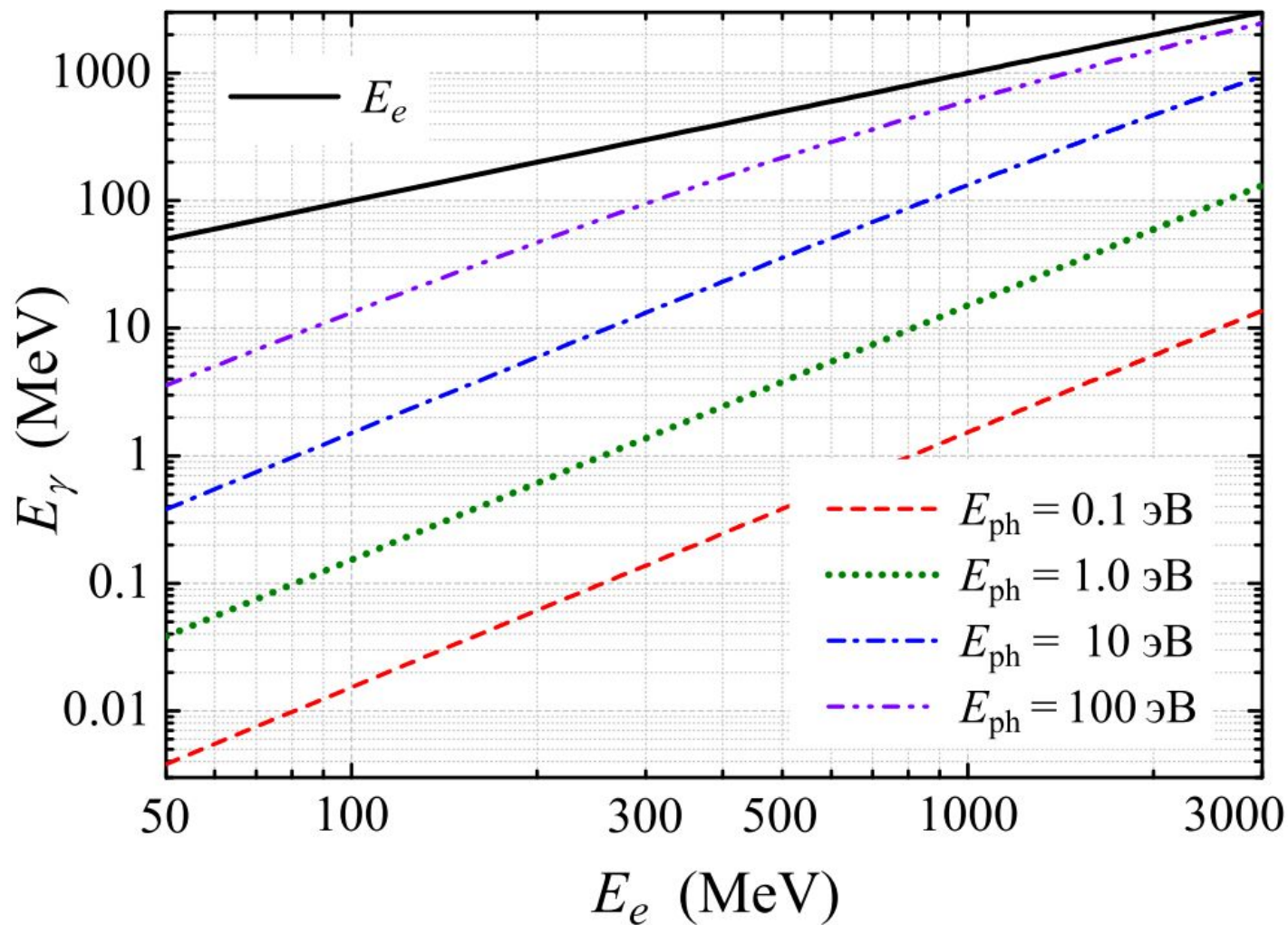
- Very expensive (~100 Grub)
- Time consuming (7-11 years)
- No infrastructure at Sarov

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.

# Энергетика обратного комптона



# Проект научной программы ИКИ НЦФМ

~ 20 организаций  
~ 70 участников  
~ 40 статей  
~ 105 страниц  
~ 380 ссылок



Проект программы v6  
доступен по ссылке

[https://disk.yandex.ru/i/i0xOzrS\\_UXG7g](https://disk.yandex.ru/i/i0xOzrS_UXG7g) , QR коду и на сайте <https://ncphm.ru/inok>

- <sup>1</sup>Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, ОИЯИ, Дубна
- <sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
- <sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», Москва
- <sup>4</sup>Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова, ОИЯИ, Дубна
- <sup>5</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
- <sup>6</sup>Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск
- <sup>7</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт»-ПИЯФ, Гатчина
- <sup>8</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, Москва
- <sup>9</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва
- <sup>10</sup>Институт Ядерных Исследований РАН, Москва
- <sup>11</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров
- <sup>12</sup>Балтийский Федеральный Университет имени Иммануила Канта, Калининград
- <sup>13</sup>Воронежский государственный университет, Воронеж
- <sup>14</sup>Университет Матей Бела, Банска Быстрица, Словакия
- <sup>15</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород
- <sup>16</sup>Сколковский институт науки и технологий, Москва
- <sup>17</sup>Национальный центр физики и математики, Саров
- <sup>18</sup>Государственный университет «Дубна», Дубна
- <sup>19</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
- <sup>20</sup>Госкорпорация «Росатом»

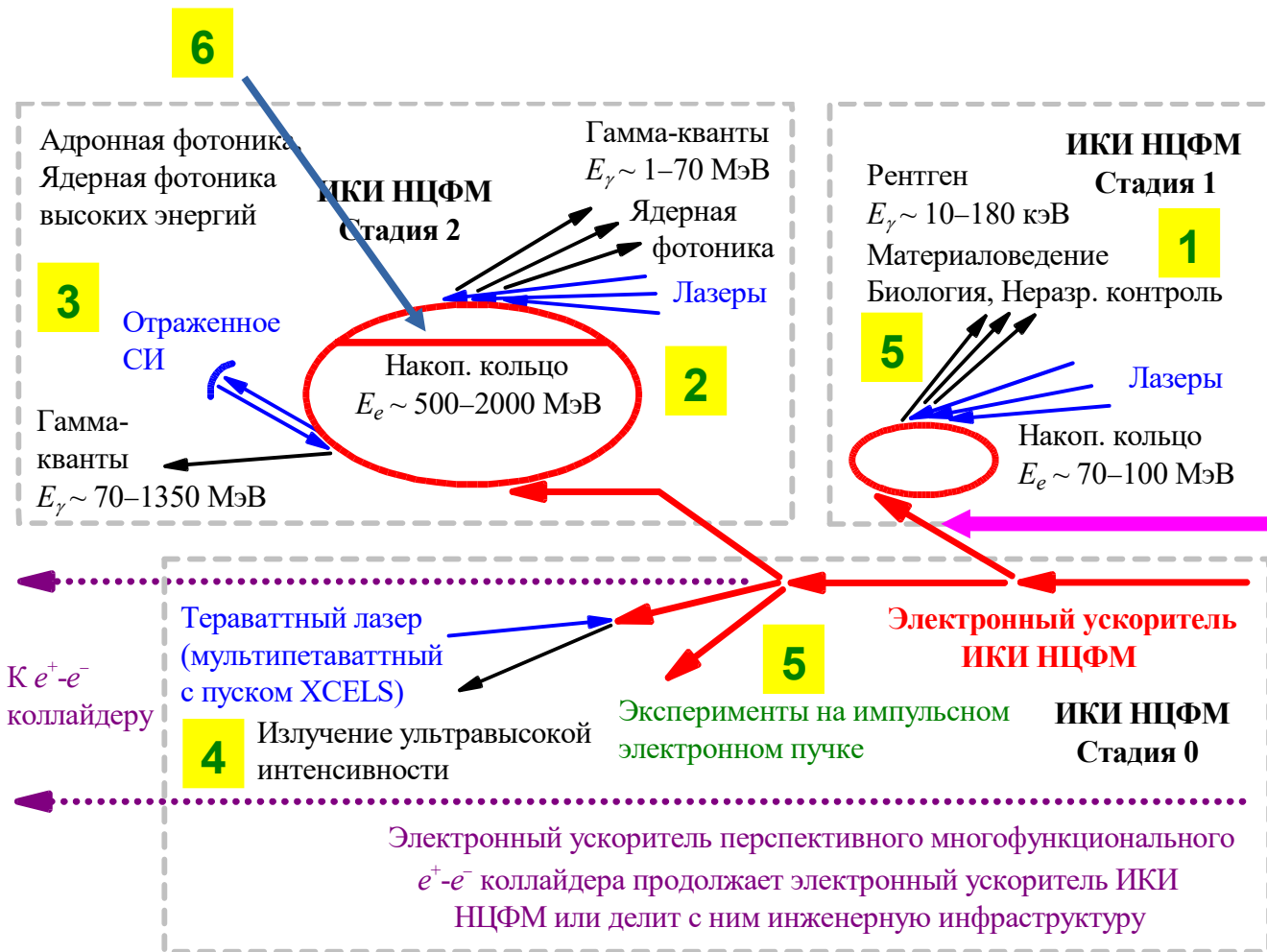
## Проект научной программы ИНОК — комптоновского источника монохроматических гамма-квантов НЦФМ

Л. В. Григоренко<sup>1,1,2,3</sup>, Н. В. Антоненко<sup>4</sup>, И. А. Артюков<sup>5</sup>, М. Н. Ачасов<sup>6</sup>, А. Л. Барабанов<sup>3,2</sup>, С. Л. Белостоцкий<sup>7</sup>, Э. Э. Боос<sup>8,9</sup>, И. Н. Борзов<sup>3,4</sup>, В. В. Варламов<sup>8</sup>, А. А. Васильев<sup>7</sup>, А. В. Виноградов<sup>5</sup>, Н. А. Винокуров<sup>6</sup>, А. А. Воробьев<sup>7</sup>, Л. З. Джилавян<sup>10</sup>, Р. В. Джолос<sup>4</sup>, А. А. Дзюба<sup>7</sup>, В. С. Дюбков<sup>2</sup>, Н. В. Завьялов<sup>11</sup>, Д. А. Зверев<sup>12</sup>, С. Г. Кадменский<sup>13</sup>, С. П. Камерджиев<sup>3</sup>, В. В. Каминский<sup>6</sup>, И. А. Карпов<sup>11</sup>, Е. Э. Коломейцев<sup>4,14</sup>, И. Ю. Костюков<sup>15</sup>, П. А. Кравцов<sup>7</sup>, П. В. Кравченко<sup>7</sup>, А. А. Кузнецов<sup>8,9</sup>, А. М. Лапик<sup>10</sup>, А. Е. Левичев<sup>6</sup>, П. В. Логачев<sup>6</sup>, А. И. Львов<sup>5</sup>, Е. М. Маев<sup>7</sup>, О. Е. Маев<sup>7</sup>, М. А. Мартыанов<sup>15</sup>, В. С. Мележик<sup>4</sup>, А. П. Менушенков<sup>2</sup>, О. И. Мешков<sup>6</sup>, С. Ю. Миронов<sup>15</sup>, И. Б. Мухин<sup>15</sup>, Н. Ю. Мучной<sup>6</sup>, В. О. Нестеренко<sup>4</sup>, О. В. Палашов<sup>15</sup>, А. М. Подурец<sup>11</sup>, С. М. Полозов<sup>2</sup>, А. Л. Полонский<sup>10</sup>, Н. Л. Попов<sup>5</sup>, С. В. Попруженко<sup>2</sup>, А. К. Потемкин<sup>15</sup>, А. П. Потылицын<sup>2</sup>, С. Ф. Разиньков<sup>11</sup>, В. И. Ращиков<sup>2</sup>, С. Г. Рыкованов<sup>16</sup>, А. Б. Савельев-Трофимов<sup>9</sup>, А. П. Северюхин<sup>4</sup>, А. М. Сергеев<sup>17</sup>, Д. Ю. Сергеева<sup>2</sup>, А. А. Снигирёв<sup>12</sup>, И. А. Спирин<sup>11</sup>, М. В. Стародубцев<sup>15</sup>, М. В. Таценко<sup>11</sup>, А. А. Тищенко<sup>2</sup>, Е. В. Ткаля<sup>5</sup>, О. Л. Федин<sup>7</sup>, А. М. Федотов<sup>2</sup>, А. С. Фомичев<sup>1,18</sup>, Б. Ю. Шарков<sup>19,17,2</sup>, П. Г. Шаров<sup>1</sup>, В. И. Шведунов<sup>8</sup>, А. А. Шемухин<sup>8</sup>, О. Н. Шубин<sup>20</sup>, М. С. Хирк<sup>1,8</sup> и В. Д. Эфрос<sup>3</sup>

# 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)



Проект программы v6 доступен на [https://disk.yandex.ru/i/i0xOzrS\\_UXG7g](https://disk.yandex.ru/i/i0xOzrS_UXG7g) по QR коду и на сайте <https://ncphm.ru/inok>

# 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)

Современные программы исследований не реализуемы в рамках “советской” концепции институт-установка.

Необходимо создание национальных пользовательских центров.

## “Политические” аспекты проекта:

- Высокий интерес среди исследователей
- Консенсус среди научных организаций
- ИЯФ СО РАН точно справится с «большим» кольцом
- Стадийность реализации – 3 стадии →
- Низкий риск задержки старта научной программы
- Возможная синергия с будущими мегапроектами
- XCELS и  $e^+e^-$  коллайдером



Проект программы v6 доступен на [https://disk.yandex.ru/i/i0xOzrS\\_UXG7g](https://disk.yandex.ru/i/i0xOzrS_UXG7g)  
QR коду и на сайте <https://ncphm.ru/inok>



# 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	$10^7$
ELI-NP (VEGA)	Румыния	проект	0,2-19,5	0,5	$10^8$
ИКИ НЦФМ	Россия	проект	0-70	0,3	$10^9$
ИКИ НЦФМ	Россия	проект	70-300	0,5	$10^8$

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.

# Ключевые научные возможности ИКИ НЦФМ – 1

**Стадия 0**

**Исследования на прямом  
электронном пучке**

**Импульсы 2 гэВ,  
~1нКл, ~20 пс, ~1 Гц**

«Прямые» электронные пучки вводятся в «научный оборот» на весьма ранней стадии проекта.

Электронный ускоритель ИКИ НЦФМ обеспечит мощные (~1 нКл) и весьма короткие (~20 пс) импульсы для прикладных задач требующих высокого временного разрешения (включая задачи ВНИИЭФ).

Электронный ускоритель ИКИ НЦФМ будет оптимизирован для получение электронных сгустков высокого качества (минимального эмиттанса) под задачи обратного комптона. Специализированных ускорителей такого класса нет, т. к. оптимизация всегда велась под другие задачи (например синхротрон).

В «стандартной комплектации» комплекса предусматриваются исследования с излучением ультравысокой интенсивности (непертурбативная квантовая электродинамика, нелинейный эффект комптона) с использованием тераваттного лазера. В перспективе может использоваться петаваттное и мультипетаваттное излучение лазерных модулей проекта Exawatt Center for Extreme Light Studies (XCELS).

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

**$e^+e^-$  коллайдер**



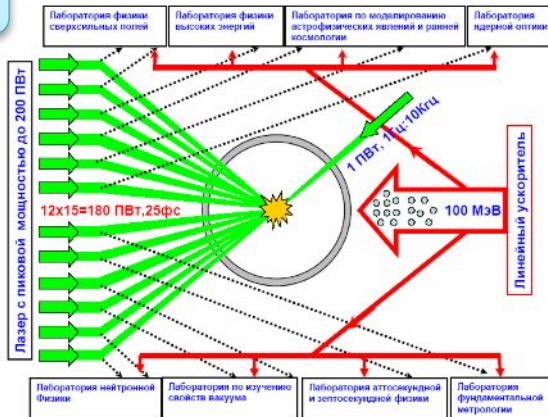
Электронный ускоритель коллайдера продолжает ускоритель ИКИ НЦФМ Или делит с ним инженерную инфраструктуру

**ИНОК**



**Электронный пучок**

**XCELS**

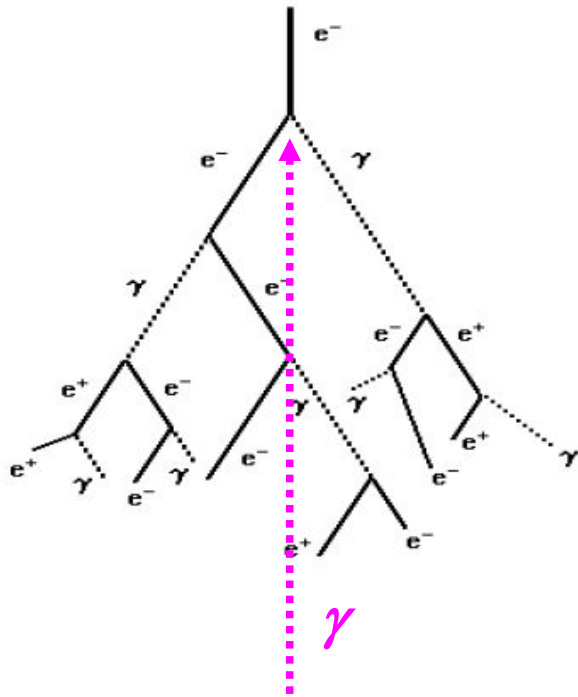


В «стандартной комплектации» ИКИ НЦФМ на прямом электронном канале установлены лазеры «~1 ТВт» и «~1 Дж, ~20 пс» С вводом XCELS становится доступно лазерное излучение «~10 ПВт» и «~100 Дж, ~20 пс»

# Фундаментальная электродинамика на ИНОК/XCELS

преобразование  
света в материю

ИНОК

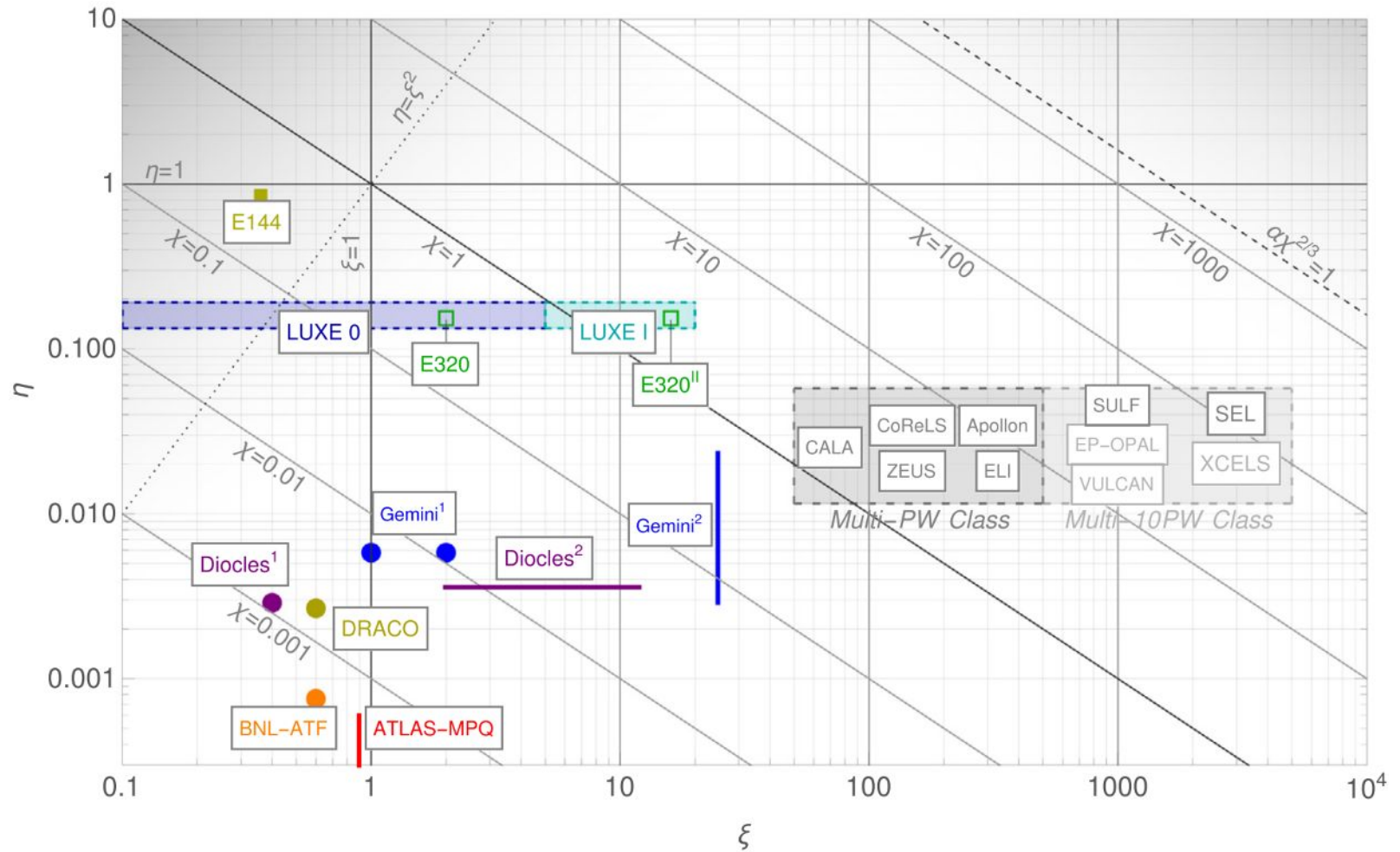


XCELS

- Объединение мультипетаваттного промежуточного канала XCELS с высокой частотой повторения и ускорителя электронов позволит создать уникальный нелинейный комптоновский источник.
- Нелинейный режим комптоновского источника можно использовать для проведения фундаментальных экспериментов с рождением электрон-позитронных пар при взаимодействии комптоновских фотонов с лазерным излучением.
- Такие эксперименты тестируют предсказания сильно-полевой КЭД. Отклонения будут означать или предел в понимании КЭД или наличие «новой физики» (одна из возможностей здесь — проявление взаимодействия с темной материей).
- Схожей тематике посвящен большой международный проект LUXE и часть программы VEGA (ELI-NP) нацеленные, однако, на другую область параметров.

В перспективе – уникальная научная программа

# Фундаментальная электродинамика на ИНОК/ХСЕЛС



$$\chi = \frac{e\hbar[-(p \cdot \mathcal{F})^2]^{1/2}}{m^3 c^4}$$

$$\xi = \left( \frac{e^2 \langle (-p \cdot \mathcal{F})^2 \rangle}{[mk \cdot p]^2} \right)^{1/2}$$

# Ключевые научные возможности ИКИ НЦФМ – 2

Стадия 1

Прикладные исследования с монохромным рентгеном на «малом» накопительном кольце

$E_{\gamma} \sim 10-180$   
keV

- Материаловедение
- Неразрушающий контроль
- Биология
- Спецзадачи по программе ИЯРФ ВНИИЭФ
- Прототипирование «малых ИКИ» для образовательного и коммерческого применения

Монохроматизм рентгеновских квантов ИКИ — для ряда задач ключевое преимущество по сравнению с источниками синхротронного излучения.

Крайне важно — «малый» источник ИКИ НЦФМ позволит на раннем этапе начать научную и методическую работу на площадке НЦФМ, развернуть подготовку персонала ИКИ.

# Ключевые научные возможности ИКИ НЦФМ – 3

Стадия 2

Исследования на основном  
накопительном кольце

$E_\gamma \sim 1-70$   
MeV

Интенсивности ИКИ НЦФМ для ядерной фотоники — на  $\sim 2$  порядка лучше чем у мировых аналогов — становятся возможными ранее даже не рассматривавшиеся эксперименты.

- **Монохроматизация  $\gamma$ -квантов** на ИКИ получается естественно и сопровождается комфортными фоновыми условиями.
- **Для ИКИ НЦФМ поставлены рекордные требования** ( $\sigma \sim 0.3 \%$ ) по энергетическому разрешению  $\gamma$ -квантов для задач ядерной фотоники — это обеспечивает новое качество экспериментов.
- **«Энергетика» основного накопительного кольца избыточна** для ядерной фотоники. Однако благодаря этому
  - (i) обеспечивается «комфортная» низкофоновая эксплуатация комплекса и
  - (ii) возникают научные возможности в области **адронной фотоники** — реакции с образованием мезонов и мезонных атомов.

**Программа по адронной фотонике  
толком не проработана !!!**

# Ключевые научные возможности ИКИ НЦФМ – 4

Стадия 2

Ядерная фотоника – основа научной программы ИКИ НЦФМ

- **Новые данные по структура атомного ядра:**
  - Прецизионные исследования тонкой структуры мультипольных гигантских и пигми-резонансов, **прежде всего дипольных — ГДР и ПДР.**
  - Низкоэнергетические E1 переходы и фазовые переходы в ядрах.
  - Изучение реакций с поляризованными фотонами — **комптоновские фотоны из лазерных источников могут получаться в определенных состояниях поляризации.**
  - Электромагнитные силовые функции малонуклонных систем.
- **Новые, точные, достоверные данные о сечения фотоядерных реакций**
  - Достоверное определение парциальных сечений фотоядерных реакций.
  - Исследования фотоядерных реакций с образованием заряженных частиц, **невозможные сейчас вследствие низкой интенсивности пучков квази-моноэнергетических фотонов и высокого электронного фона в экспериментах с тормозным гамма-излучением.**
- **Новые подходы к физике деления ядер**
  - фотоделение ядер (массовые, зарядовые, энергетические распределения, свойства барьеров деления) остается слабоизученными, **а между тем механизм фотовозбуждения является гораздо более «чистым» чем индуцирование деления нейтронами (эффекты сильного взаимодействия).**



# Ключевые научные возможности ИКИ НЦФМ – 5

## Стадия 2

## Ядерная фотоника – основа научной программы ИКИ НЦФМ

- **Физика изомеров:**
  - Прецизионные данные по изомерным состояниям.
  - Изучение «возможности управления» энергосвободением из изомерных состояний **или надежное доказательство невозможности этого.**
- **Ядерная астрофизика:**
  - Фотоядерные реакции важные для ядерной астрофизики — новые данные «из лаборатории» о реакциях нуклеосинтеза в астрофизических условиях; проблема «обойденных изотопов» в нуклеосинтезе. **Процессы нуклеосинтеза в астрофизике определяются в основном радиационными захватами — а они могут изучаться через обратные процессы фотодиссоциации.**
  - Уравнение состояния ядерного вещества — основа понимания важнейших объектов и событий во вселенной: структуры нейтронных звезд, динамики слияния нейтронных звезд, вспышек сверхновых с коллапсом коры. **Уравнение состояния ЯВ тесно связано со свойствами гигантских резонансов.**
- **Новые подходы к наработке высокочистых медицинских радионуклидов, в реакциях индуцированных фотонами.**

# Конкретика

**ПИЯФ предложил для ИКИ НЦФМ программу по электромагнитным свойствам нуклонов**

**Научная программа ИКИ НЦФМ будет продолжаться дорабатываться в 2024 г.**

**Программа ИКИ НЦФМ по адронной фотонике практически не существует**

**Есть идея что нужна возможность проведения экспериментов на накопительном кольце на струйной газовой мишени**

# Состояние дел в ядерной физике низких энергий



**Перспективный комптоновский комплекс получил мощный импульс к реализации**

**Основа программы: Ядерная фотоника**

**Не теряет актуальности необходимость создания перспективного тяжелоионного ускорительно-накопительного комплекса (DERICA?)**

**Основа программы: Физика радиоактивных изотопов**

