

# New Concept of Energy Amplification with Light Ions in Subcritical Systems

**Anton Baldin**

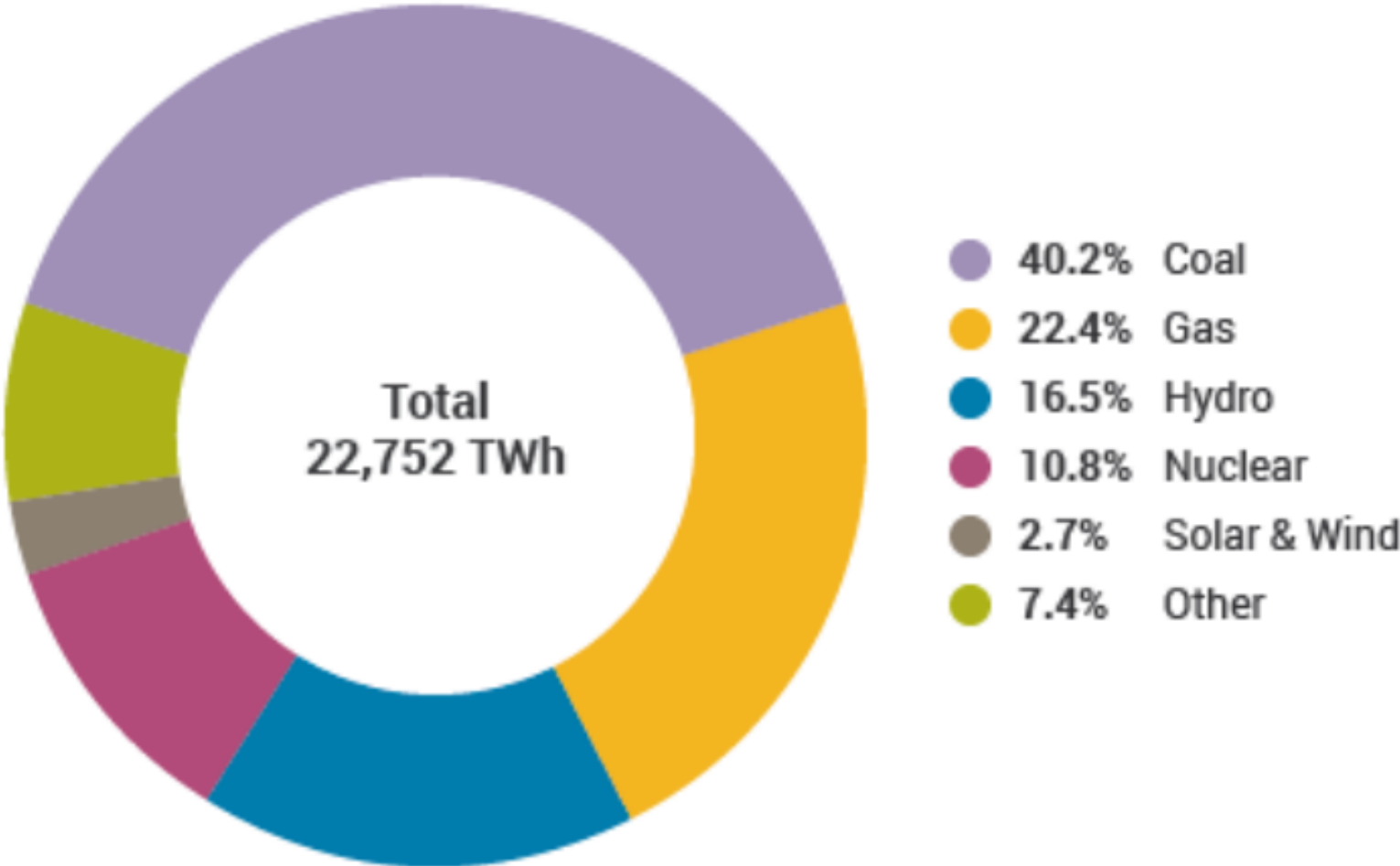


Joint Institute For Nuclear Research, Dubna, Russia  
Institute for Advanced Studies "OMEGA", Dubna, Russia



*16/08/ 2018 Gomelschool-2018*

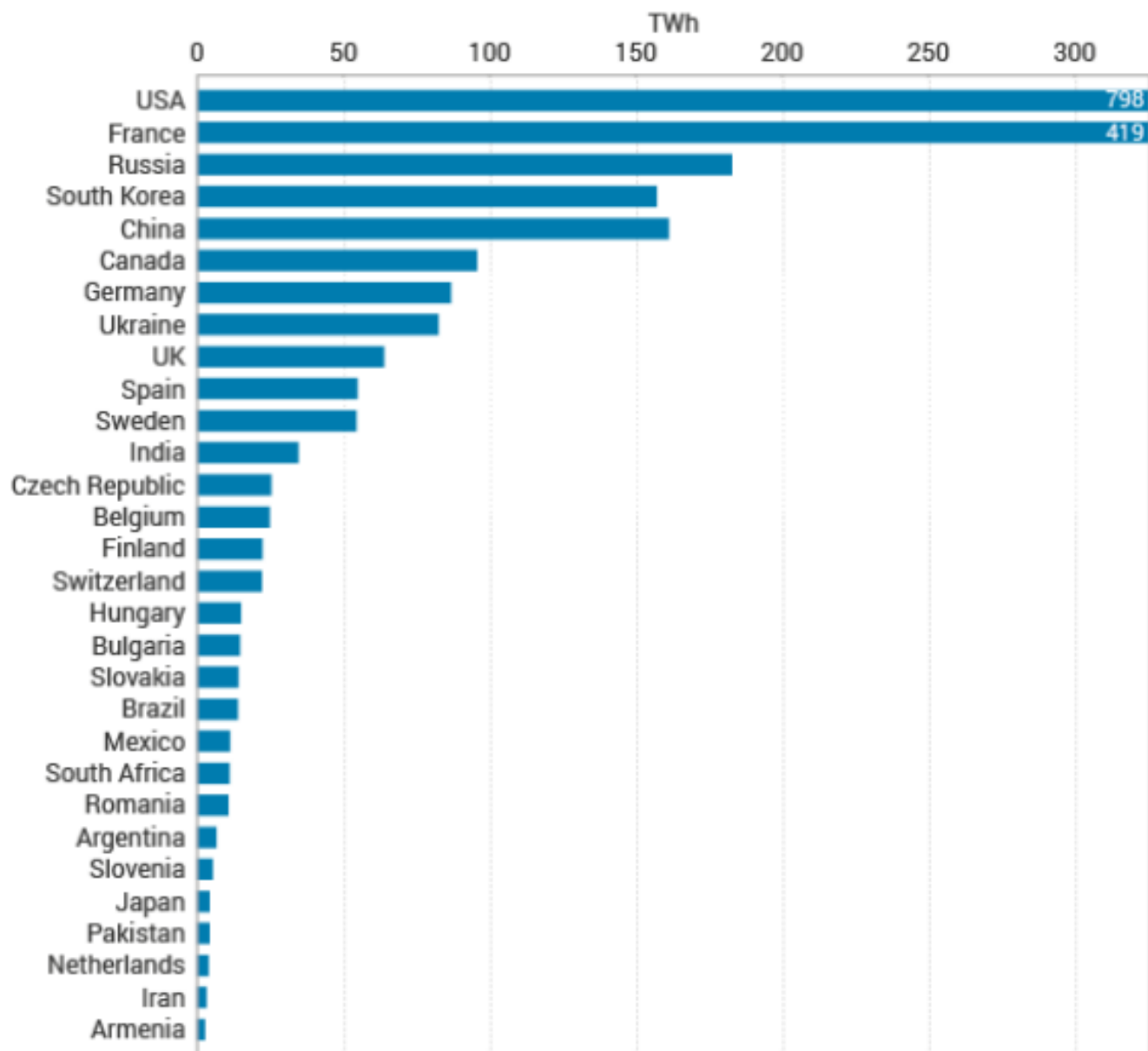
# World Electricity Production 2012



Source: IEA Electricity Information 2014

- **The first commercial nuclear power stations started operation in the 1950s.**
  - **There are over 440 commercial nuclear power reactors operable in 31 countries, with over 390,000 MWe of total capacity. (about 65 more reactors are under construction).**
  - **They provide over 11% of the world's electricity as continuous, reliable base-load power, without carbon dioxide emissions.**
  - **55 countries operate a total of about 245 research reactors, and a further 180 nuclear reactors power some 140 ships and submarines**
-

## Nuclear Generation by Country 2015



Source: IAEA PRIS Database

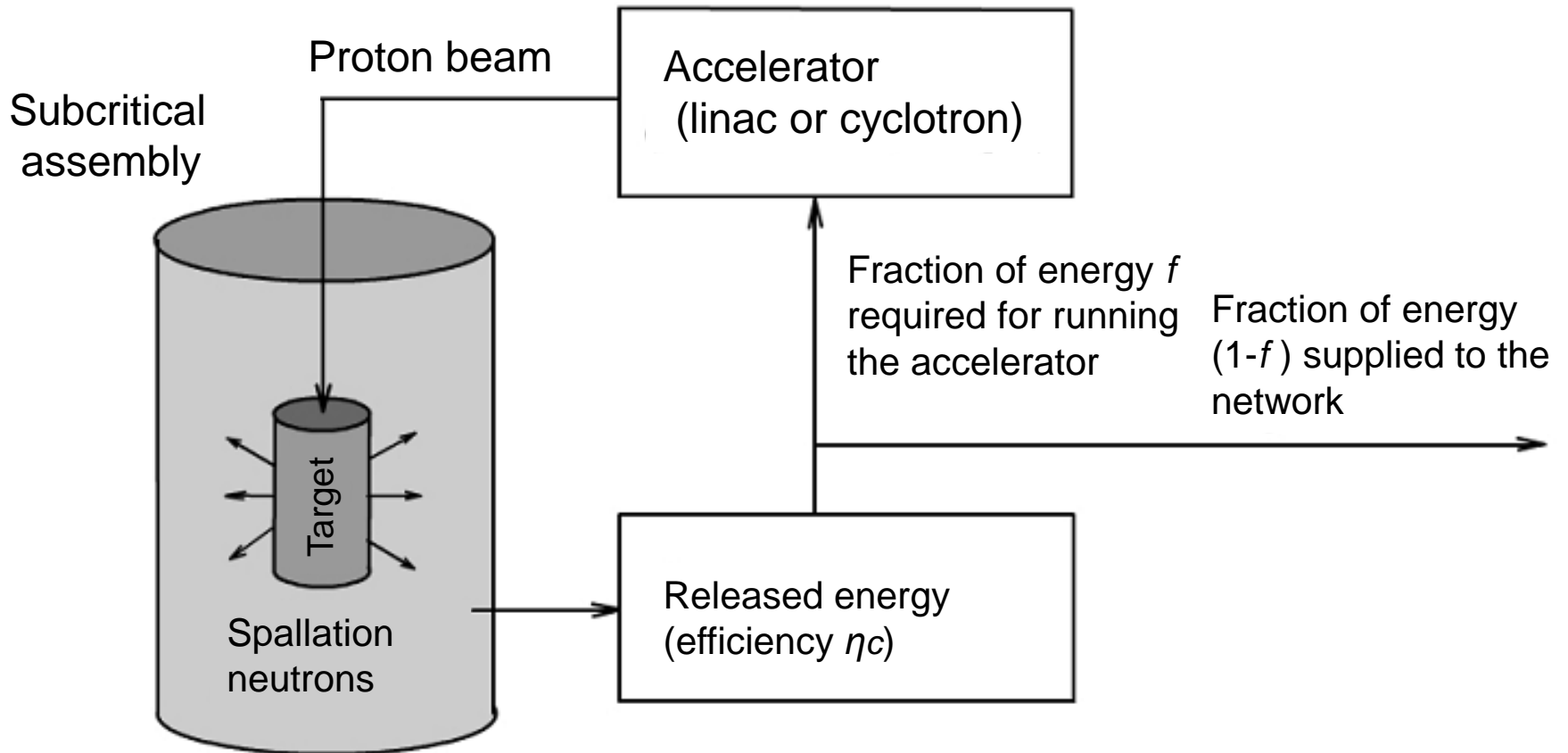
## List of countries by uranium production in 2014

Rank	Country/Region	Uranium production (2014) (tonnes U) <sup>[1]</sup>	Uranium Production (2011) (thousands pounds U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ) <sup>[2]</sup>	Percentage of World Production (2014)
	World	56,217	139,513	
1	<a href="#">Kazakhstan</a>	23,127	46,284	41.1
2	<a href="#">Canada</a>	9,134	25,434	16.2
3	<a href="#">Australia</a>	5,001	15,339	8.9
4	<a href="#">Niger</a>	4,057	10,914	7.2
5	<a href="#">Namibia</a>	3,255	11,689	5.8
6	<a href="#">Russia</a>	2,990	1,516	5.3
7	<a href="#">Uzbekistan</a>	2,400	6,239	4.3
8	<a href="#">United States</a>	1,919	4,316	3.4
9	<a href="#">China</a>	1,500	2,150	2.7
10	<a href="#">Ukraine</a>	926	2,210	1.6
11	<a href="#">South Africa</a>	573	2,210	1.0
12	<a href="#">India</a>	385	1,040	0.7
13	<a href="#">Malawi</a>	369	1,742	0.7
14	<a href="#">Brazil</a>	231	385	0.4
15	<a href="#">Czech Republic</a>	193	660	0.3
16	<a href="#">Romania</a>	77	200	0.1
17	<a href="#">Pakistan</a>	45	117	0.1
18	<a href="#">Germany</a>	33	52	0.1
19	<a href="#">France</a>	3	18	0.0

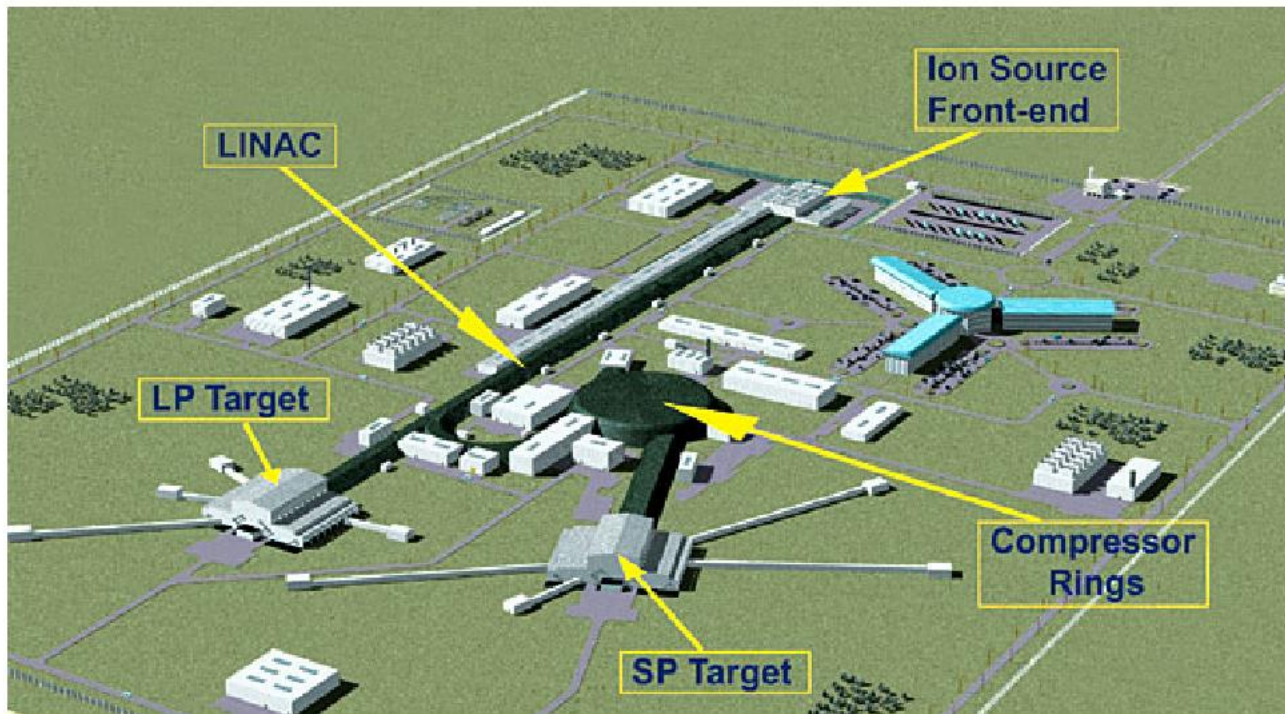
## Largest Uranium Reserves In The World

Rank	Country	Uranium Reserves (metric tons)
1	Australia	1,706,100
2	Kazakhstan	679,300
3	Russian Fed	505,900
4	Canada	493,900
5	Niger	404,900
6	Namibia	382,800
7	South Africa	338,100
8	Brazil	276,100
9	USA	207,400
10	China	199,100
11	Mongolia	141,500
12	Ukraine	117,700
13	Uzbekistan	91,300
14	Botswana	68,800
15	Tanzania	58,500
16	Jordan	33,800

# Accelerator Driven Systems

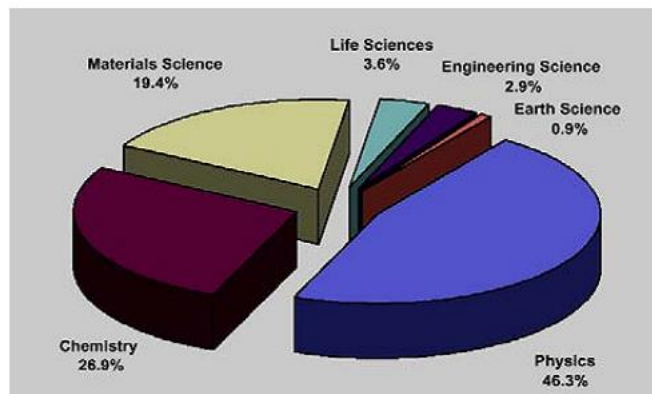


# Европейский источник нейтронов расщепления *ESS*



В 2009 г. было принято решение о строительстве ESS на территории Швеции (Lund)

## Основные направления исследований



Занимаемая площадь под ESS	1 км <sup>2</sup>
Стоимость ESS	1 550 000 000 Euro
Мощность пучка	10 МВт
Энергия пучка	1.33 ГэВ
Мишенная станция (короткие импульсы)	
Мощность пучка	5 МВт
Длительность импульса	1.4 мкс
Частота повторения	50 Гц
Число эксп. установок	22
Мишенная станция (длинные импульсы)	
Мощность пучка	5 МВт
Длительность импульса	2 мс
Частота повторения	16 2/3 Гц
Число эксп. установок	22
Ожидаемое число пользователей в год	4000-5000



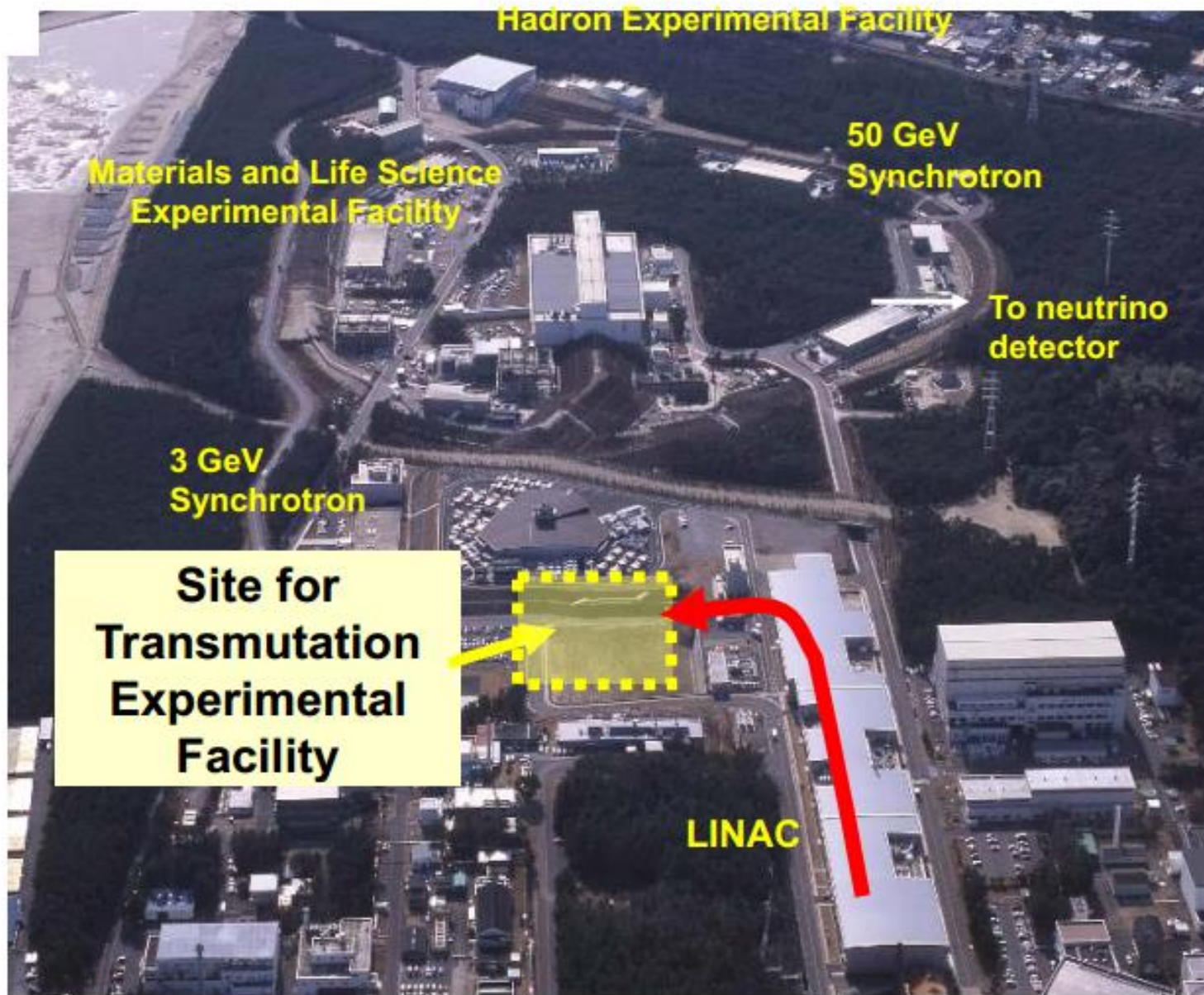
# China Spallation Neutron Source Project (CSNC)



Энергия протонов	<b>1.6 ГэВ</b>
Ср. мощность пучка	0.1 (0.5) МВт
Частота повторения	25 Гц
Протонов в импульсе	$1.6 \times 10^{13}$
Длина импульса на мишени	0.8 мкс

**Источник ISNS в центре передовых технологий RRCAT в Индии на базе протонного синхротрона с энергией 1 ГэВ, частотой 25 Гц и средним током пучка 100 мкА**

# Air Photograph of J-PARC



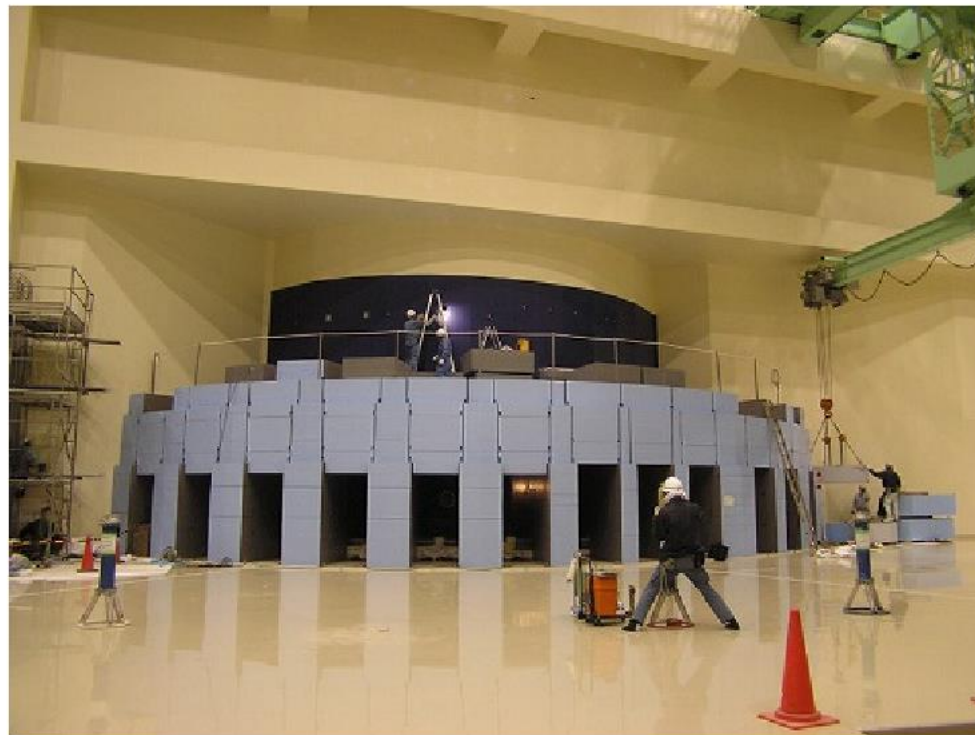
\*1: J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex

# J-PARC KEK

*Мишенная зона*

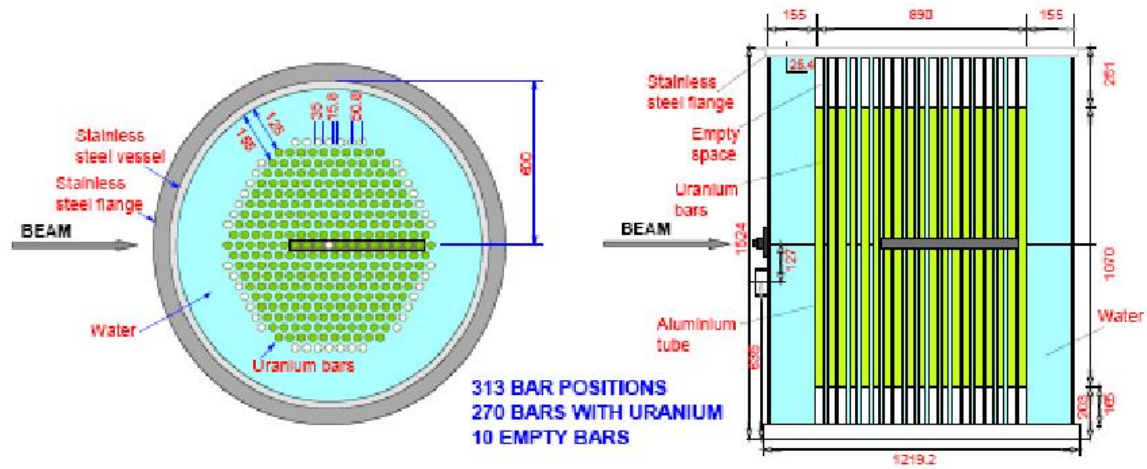


*Экспериментальный зал*

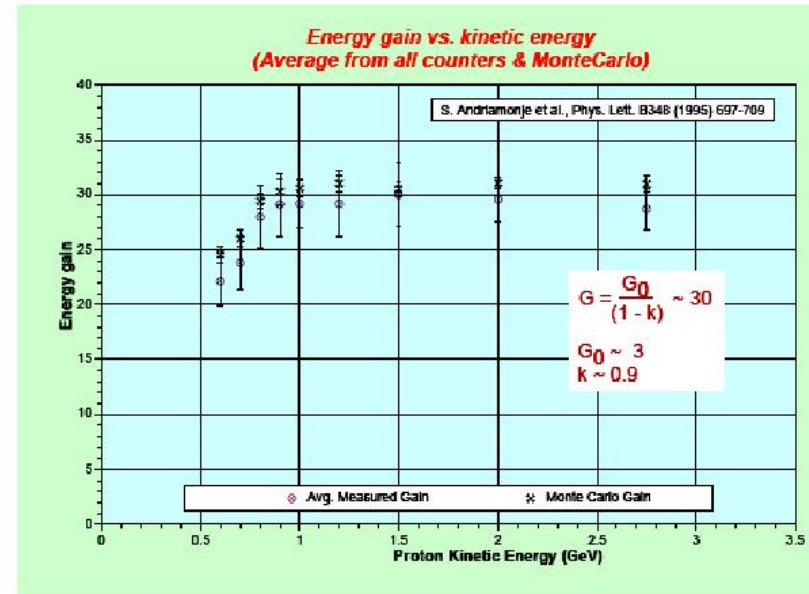
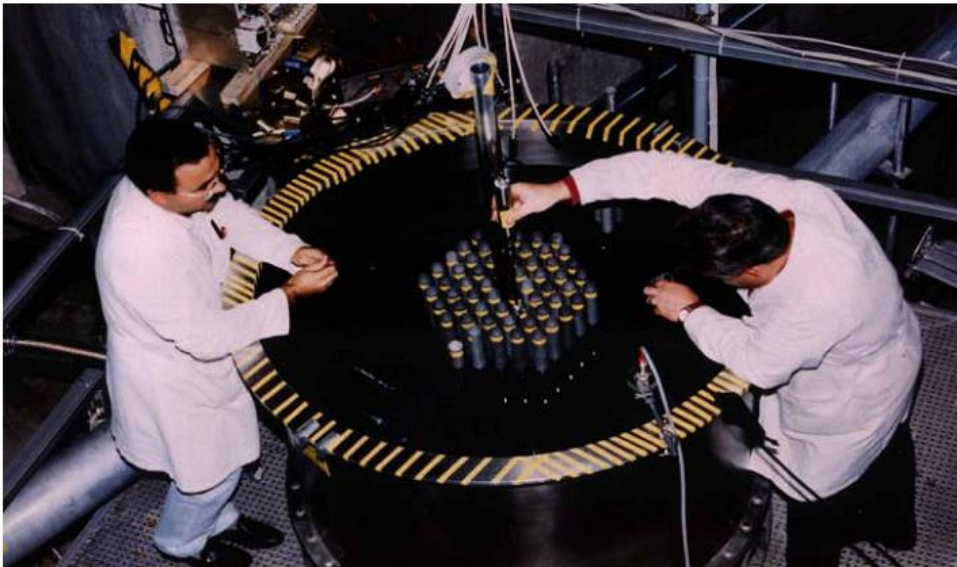


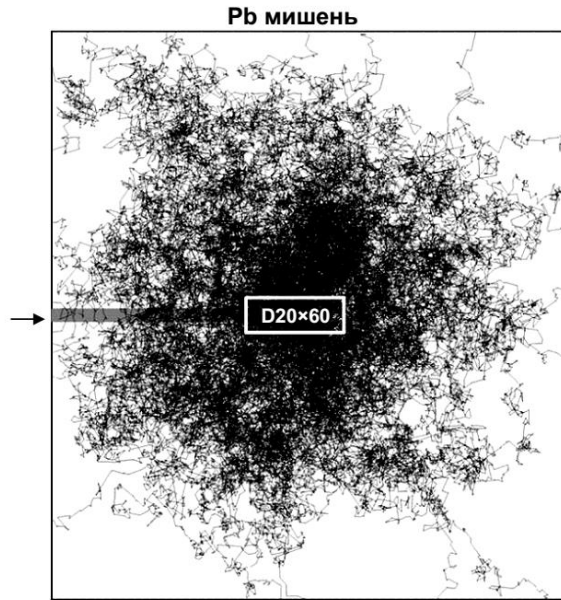
В настоящее время MLF располагает наиболее интенсивными импульсными пучками нейтронов и мюонов, которые производятся **3-ГэВ** протонами с током пучка 0.33 мА на Hg мишени.

# Эксперимент FEAT в ЦЕРН

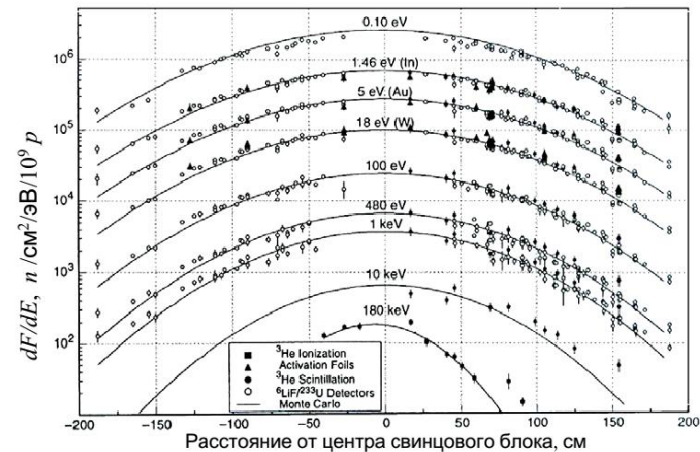


Top and side views of the FEAT assembly along the T7 beam line from the CERN/PS.





Моделирование вторичного нейтронного ливня, вызванного одиночным протоном с энергией 2.7 ГэВ в свинцовой мишени D330×300 см установки TARC



Изменение флюенса нейтронов как функция расстояния от центра свинцового блока эксперимента TARC

## Эксперимент FEAT

Измерения были выполнены на пучке протонов **0.6-2.8 ГэВ** ускорителя PS/CERN при интенсивности 10 р/сек. Установка представляла собой подкритическую сборку из 270 урановых стержней, помещенных в воду, которая играла роль замедлителя.

*Andriamonje S. et al. Phys. Lett. B. 1995. V.348. P.697*

## Эксперимент TARC

Канал T7 на пучке протонов ускорителя PS/CERN, свинцовая мишень D330×300 см, импульс пучка протонов **2.5 и 3.5 ГэВ/с**

*The TARC Collaboration The TARC Experiment (PS211) CERN 99-11. 1999*

**30 июня 1947 г.** директор Института химической физики АН СССР академик Н.Н.Семенов направил И.В.Сталину письмо с описанием идеи защиты от атомных бомб, которое приводится ниже

– **Глубокоуважаемый Иосиф Виссарионович,**

Мне кажется, что нахождение специфической и эффективной защиты от атомных бомб является проблемой едва ли не более важной, чем проблема изготовления атомных бомб.

Между тем проблема эта не только не поставлена перед советскими учеными, но и наши ученые, да, видимо, и большинство заграничных ученых считают, что эффективного метода борьбы с атомными бомбами принципиально существовать не может. [...]

Уже около полугода я размышляю над вопросом возможных путей создания противоатомной защиты. Мне стал ясен принцип, который надо положить в основу. Согласно подсчетам Зельдовича, для практически полной ликвидации взрыва достаточно, чтобы 2–3 миллиона нейтронов попали в активное вещество бомбы в течение 1–2 секунд ее падения на цель. Итак, задача свелась к созданию наземного источника нейтронов соответствующей мощности. Были продуманы несколько вариантов, из которых один намечает, по моему мнению, правильный и перспективный путь решения проблемы.

Он основан на том, что, согласно весьма достоверным подсчетам, протоны с энергией 1 миллиард вольт могут в виде направленного пучка распространяться в воздухе на 3 километра, а с энергией 2,7 миллиарда — на расстояние 10 километров. Попадая в тело бомбы, протоны очень большой энергии, несомненно, будут выбивать нейтроны из ядер и при достаточной интенсивности потока ликвидируют возможность взрыва.

Я поделился своими соображениями с А.И.Лейпунским и поставил перед ним вопрос, нельзя ли для генерации протонов использовать новый принцип ускорителя, недавно им выдвинутый. Лейпунский одобрил мой план. Предварительные подсчеты, им сделанные по моей просьбе, показали, что нужный для наших целей поток протонов получить хотя и трудно, но не представляется невозможным. [...]

Прошу Вас, Иосиф Виссарионович, для более подробного сообщения лично принять меня и т. Лейпунского или, если Вы найдете это нецелесообразным, то поручить поговорить с нами лично т. Берия.

Н. Семенов, 30 июня 1947 года.

# Phasotron and medical applications



I.V. Kurchatov and  
V.P. Dzheleпов

## Synchrocyclotron “Phasotron”

### The First Accelerator in Dubna

Constructed in frames of the Soviet Atomic Project,  
commissioned in December 1949,  
still in operation after a series of modernizations



M. G. Meshcheryakov

#### Machine parameters:

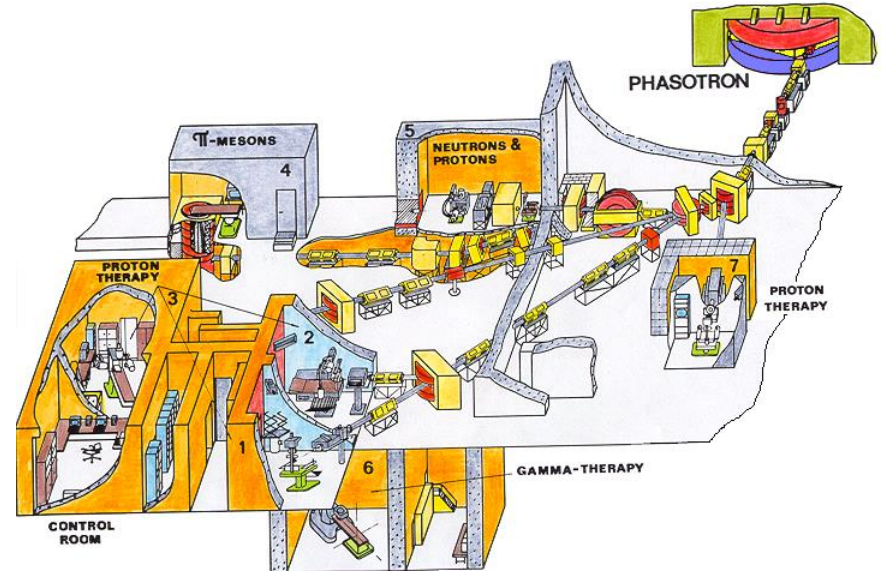
- Protons
- 680 MeV
- 2.2 mA – slow extraction,
- 3 mA – fast extraction



#### Research program:

- ✓ Muon-catalysis
- ✓ Pion & muon physics
- ✓ Nuclear physics

Main application:  
Cancer therapy

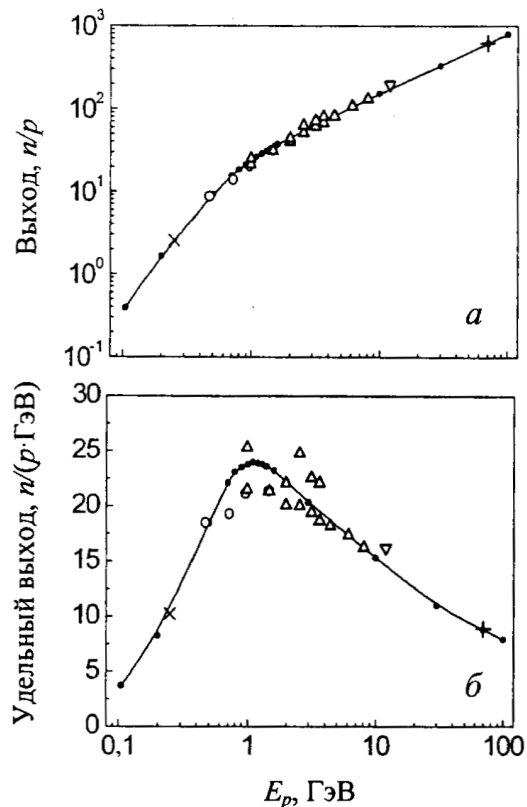




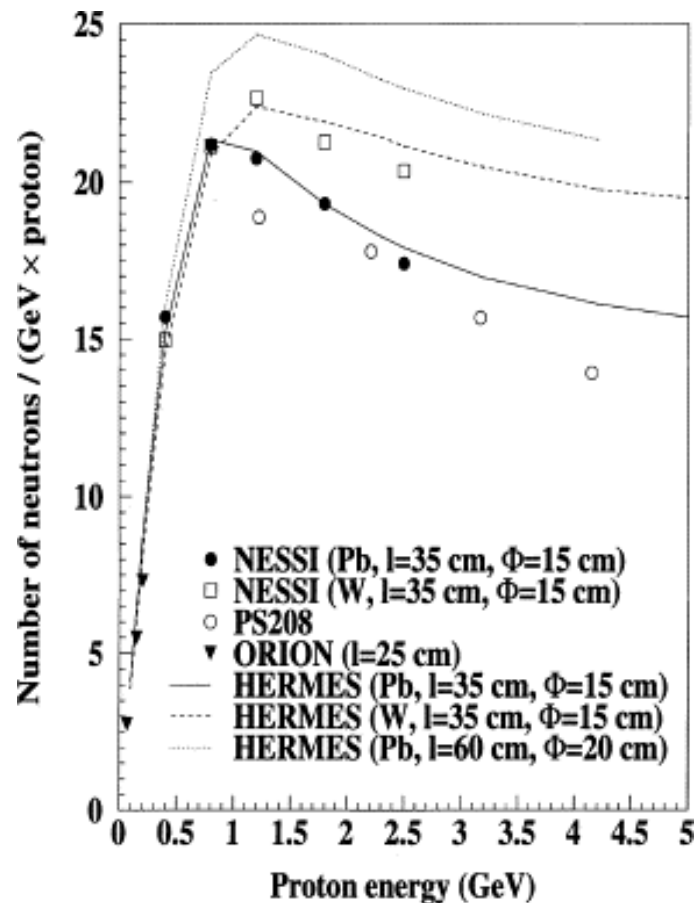
УДК 539.173.12

## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ С ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ МИШЕНЯМИ

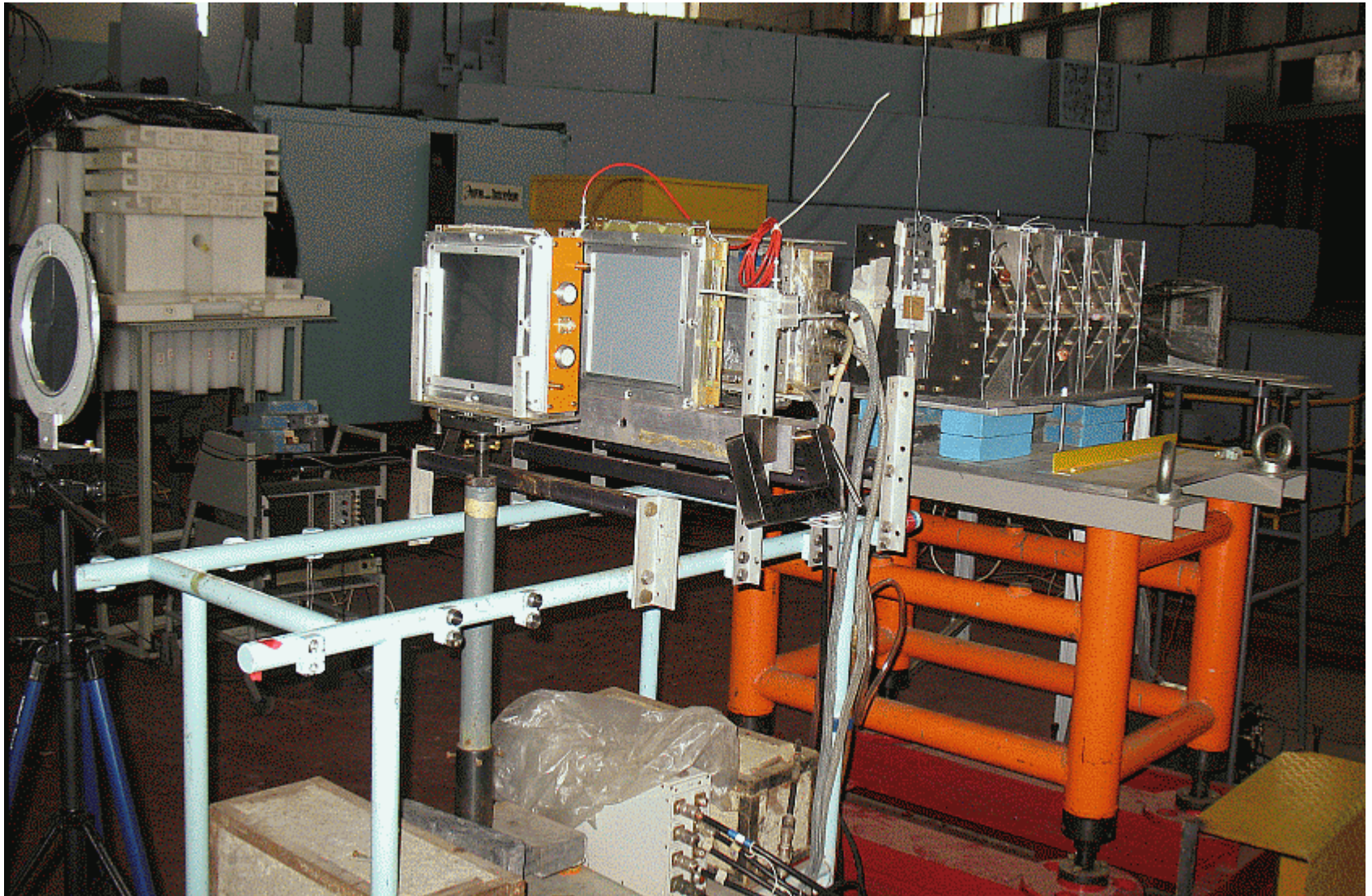
Батяев В.Ф., Бутко М.А., Павлов К.В., Титаренко А.Ю., Титаренко Ю.Е., Тихонов Р.С.,  
Флоря С.Н., Шарков Б.Ю. (ГНЦ РФ — ИТЭФ), Соколовский Н.М. (ИЯИ РАН),  
Фортон В.Е. (Ин-т теплофизики экстремальных состояний Объединенного ин-та высоких температур РАН), Пономарев-Степной Н.Н. (РНИЦ «Курчатовский ин-т»)



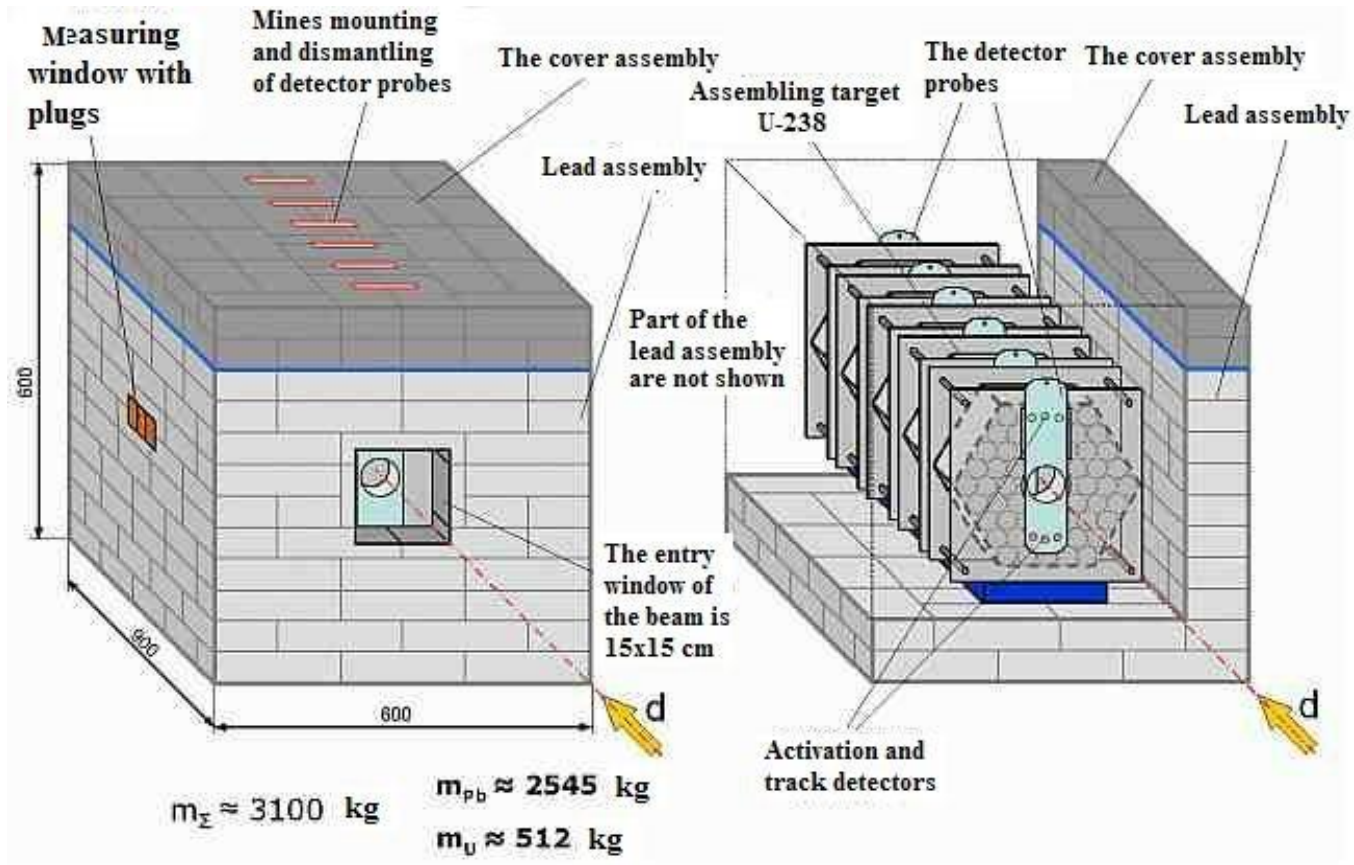
Р и с. 2. Полный (а) и удельный выход нейтронов на 1 ГэВ энергии пучка (б) из цилиндрической свинцовой мишени диаметром 20, длиной 60 см под действием пучка протонов энергией до 100 ГэВ: ● — расчет [21]; ○, △, ▽, +, × — эксперимент [1], [6], [22]—[24]



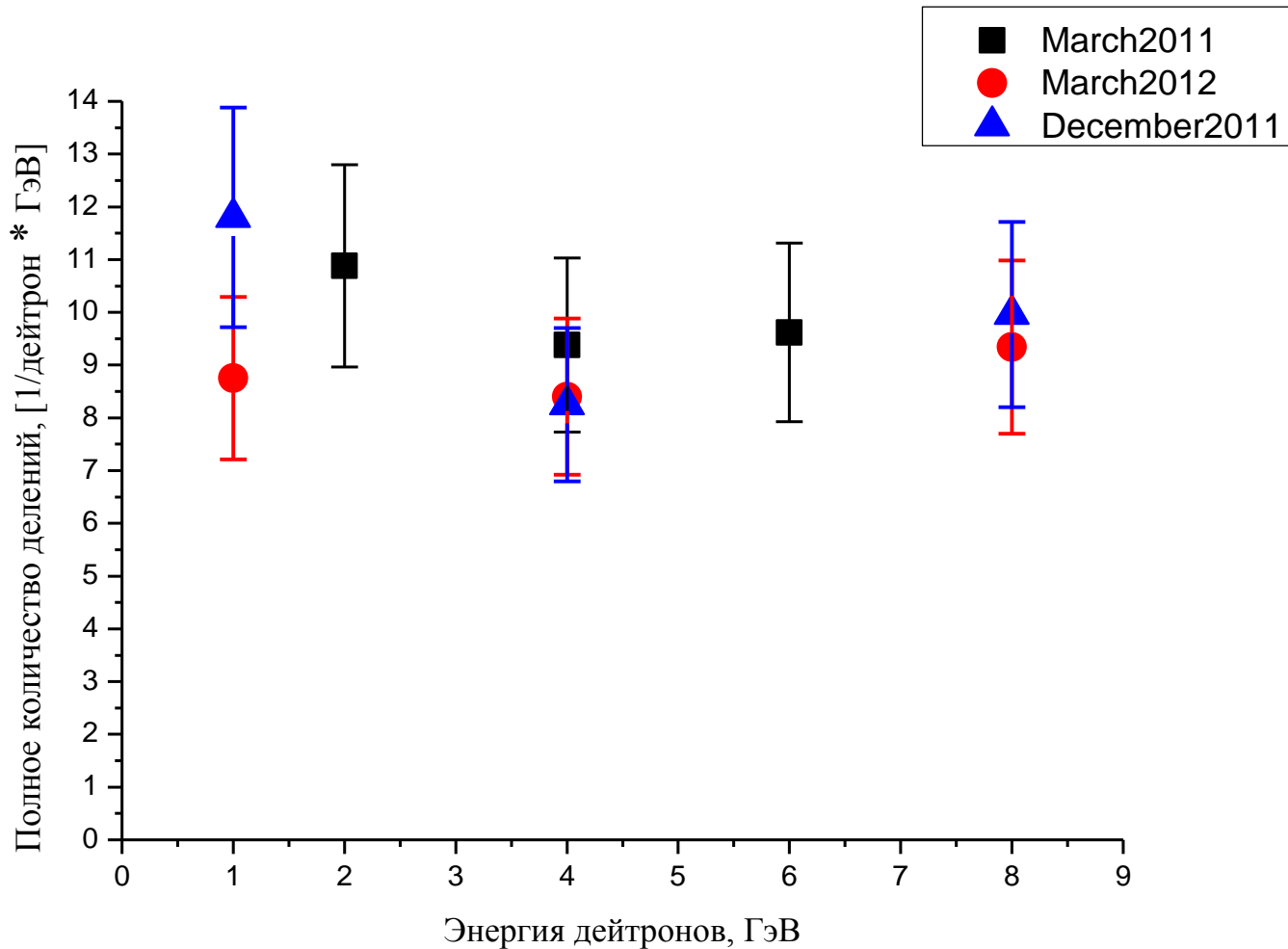
*Quinta target at extracted Nuclotron beam (LHEP JINR)*

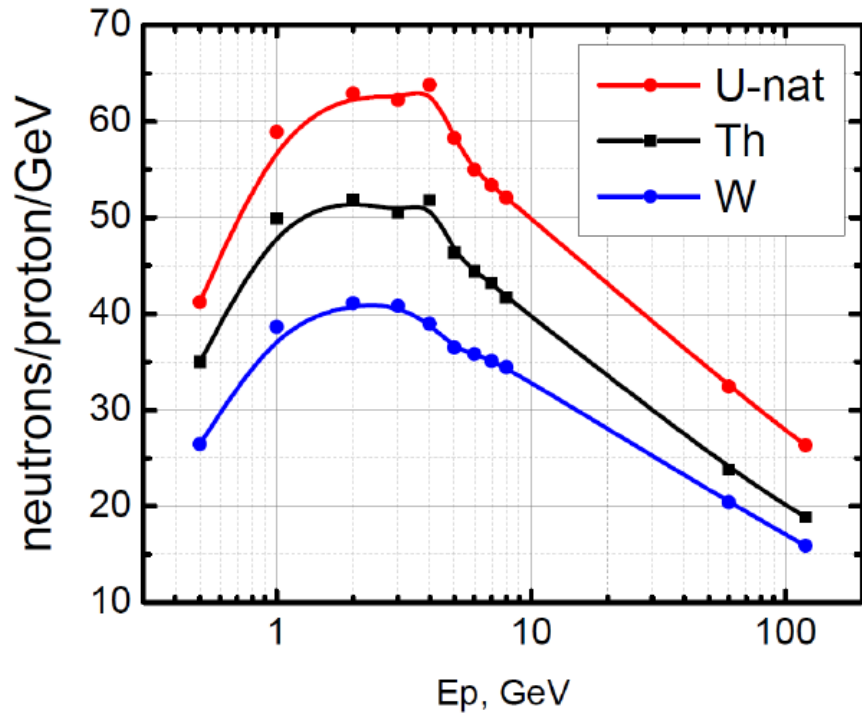


# The "Quinta" target with the lead reflector



Power gain as a function of energy (in units of fission numbers per 1 deuteron and per 1 GeV). Runs 2012-2015.



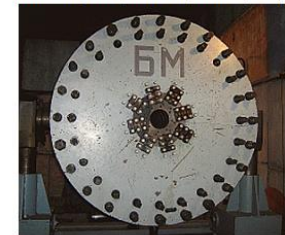
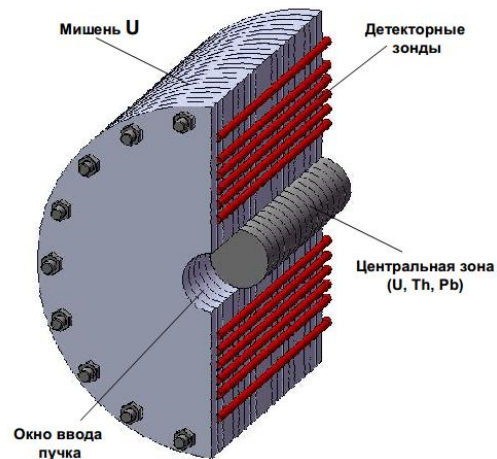
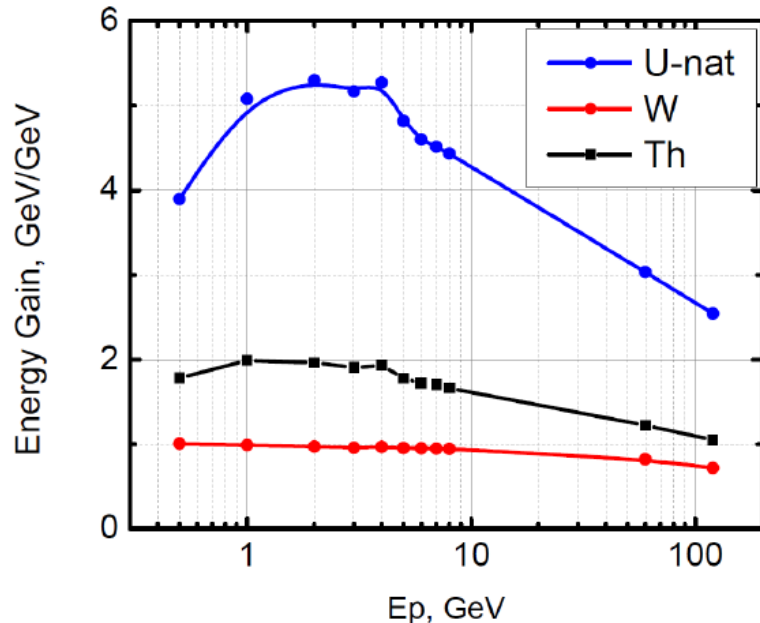


Calculation of optimal energy for the primary proton beam and the quasi-infinite target “BURAN” (V.S.Pronskikh, et al., «Energy production demonstrator for Megawatt proton beams», Fermilab-Conf-14-177-APC-TD. June 2014) indicates that the optimal primary beam energy for ADS systems is about 2-3 GeV.

Квазибесконечная урановая мишень со сменной центральной зоной «Буран» («Buran»)

*Продольное сечение мишени с установленной центральной зоной и детекторными зондами*

*Вид спереди (со стороны пучка)*



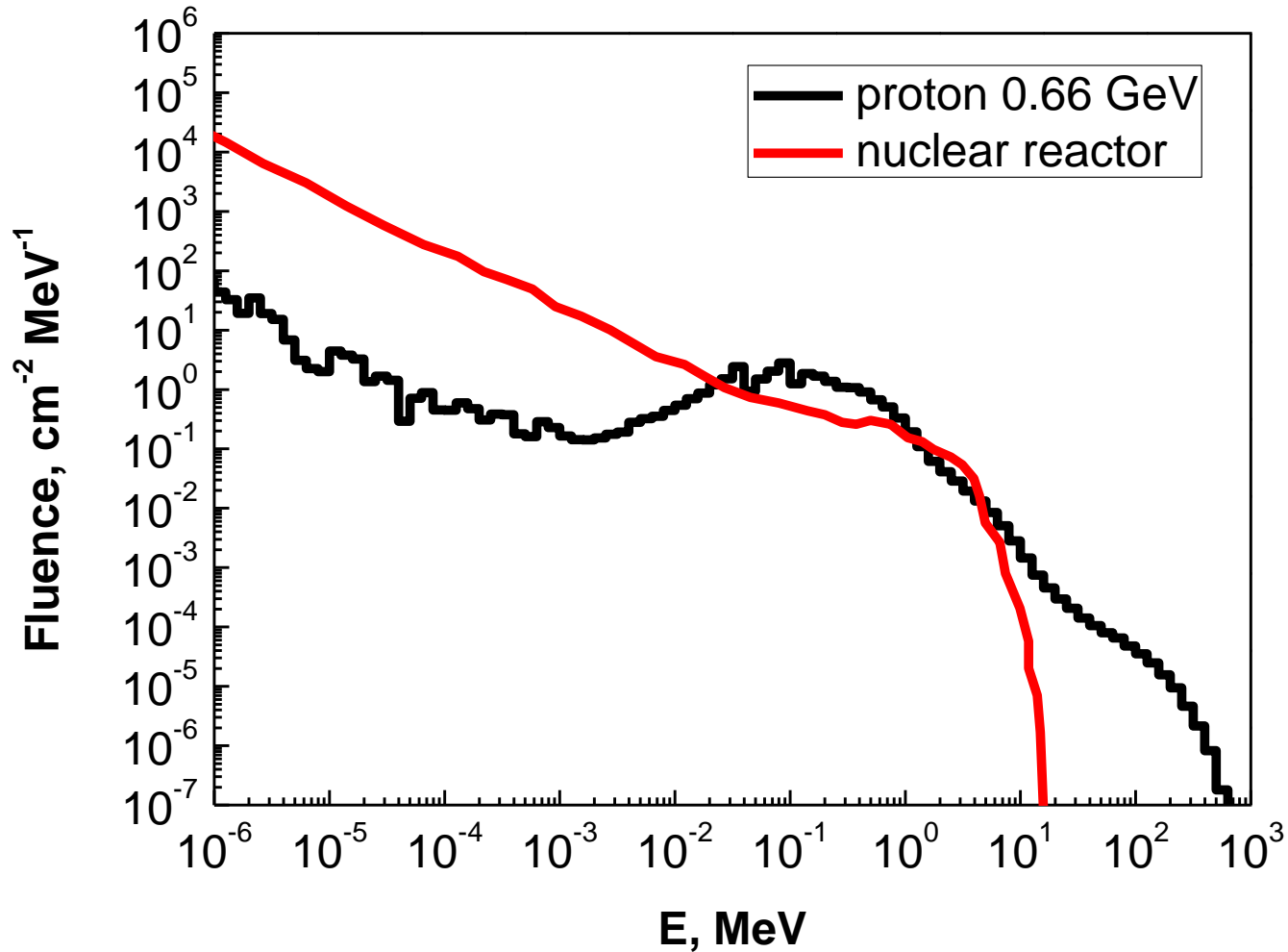
*Вид сзади*

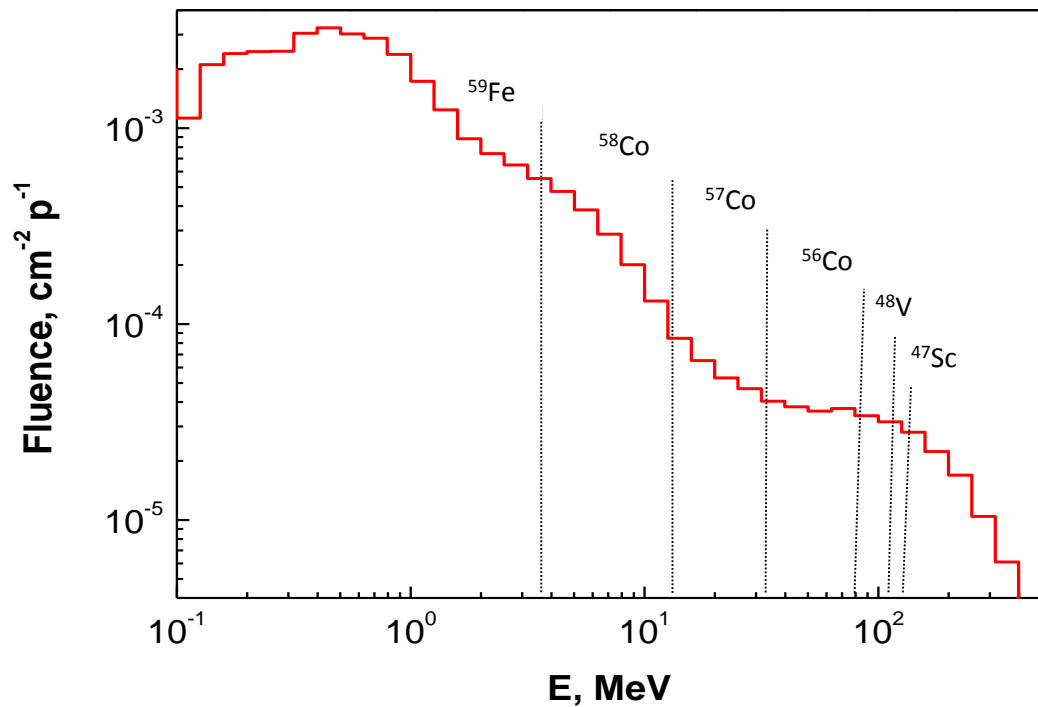


# *Basic goals of experiments with the "Quinta" target*

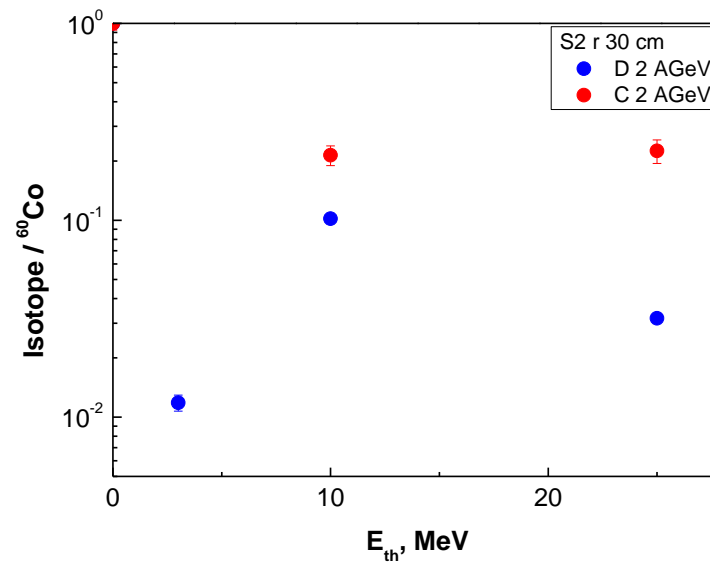
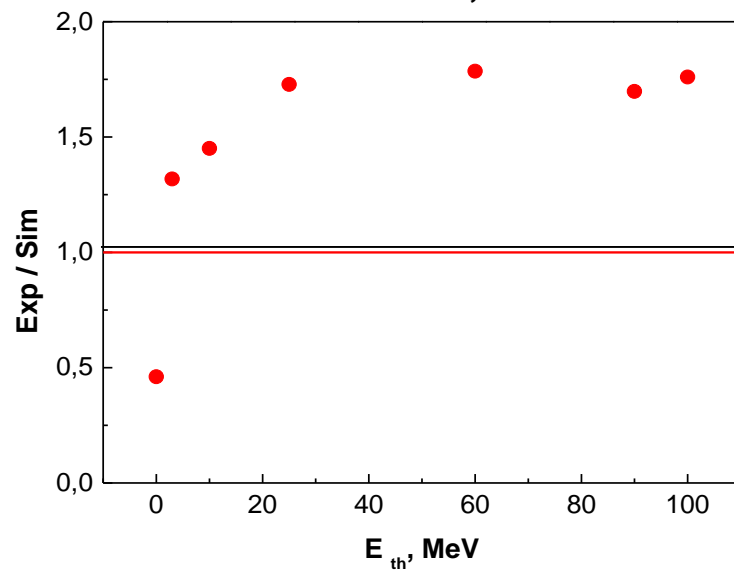
1. Determination of the energy spectrum of the neutrons generated in the uranium target with a beam of relativistic particles, comparison of the experimental data with calculations based on different methods.
2. Determination of the spatial distribution of neutron leakage, its dependence on the energy of incident particles.
3. Measuring the energy yield from deeply subcritical assembly, its dependence on the energy of incident particles.
4. Study of transmutation of minor actinides by neutrons generated in deeply subcritical assembly.
5. Optimization of beam parameters for ADS.

# Neutron energy spectra in a common nuclear reactor and Qunita irradiated by 0.66 GeV proton beam





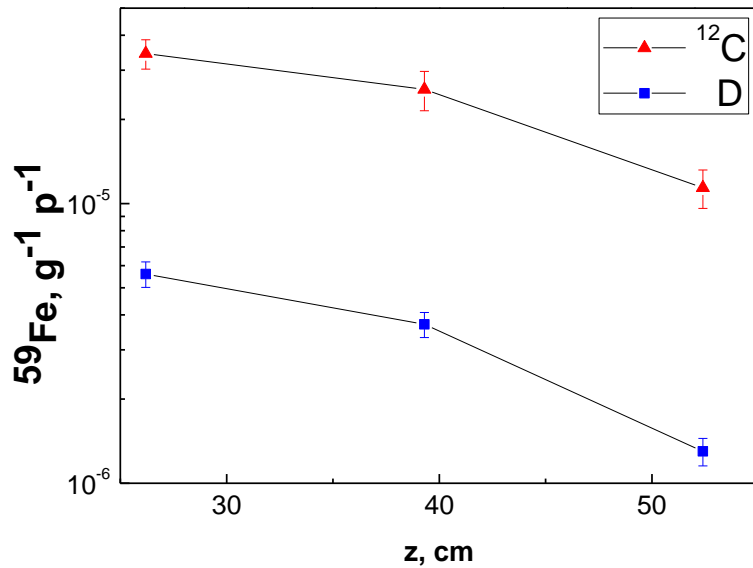
Isotope	$E_{\text{th}}$ [MeV]
$^{59}\text{Fe}$	3
$^{58}\text{Co}$	10
$^{57}\text{Co}$	25
$^{56}\text{Co}$	40
$^{48}\text{V}$	90
$^{47}\text{Sc}$	100



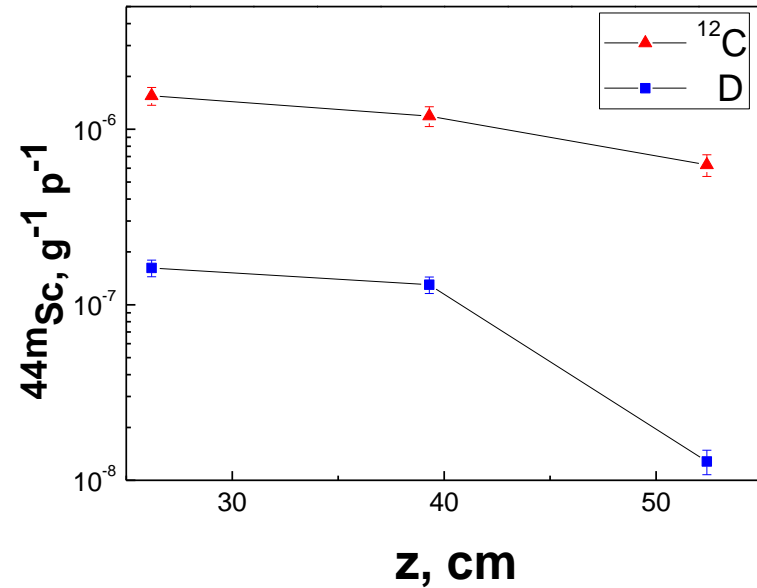


# QUINTA target with Deuteron&Carbon beams 2AGeV

Fe-59  $E_n \geq 4$  MeV



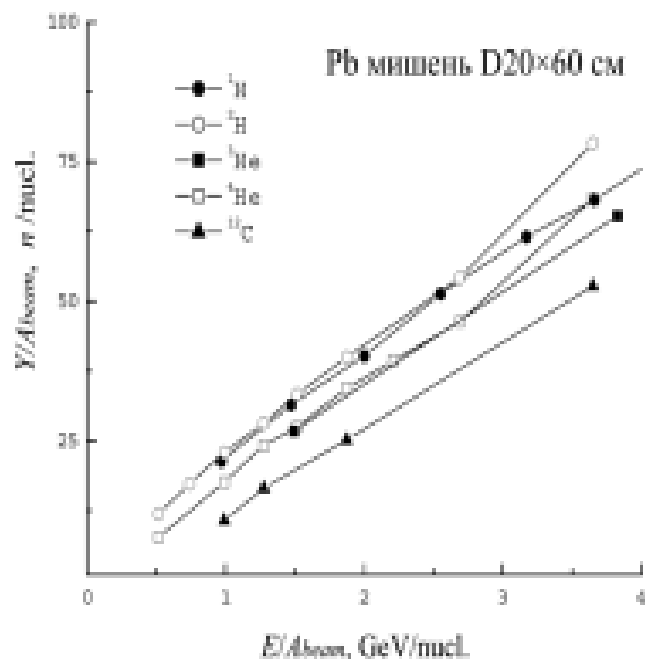
Sc-44m  $E_n \geq 100$  MeV



### JINR/MRTI

Группа Василькова

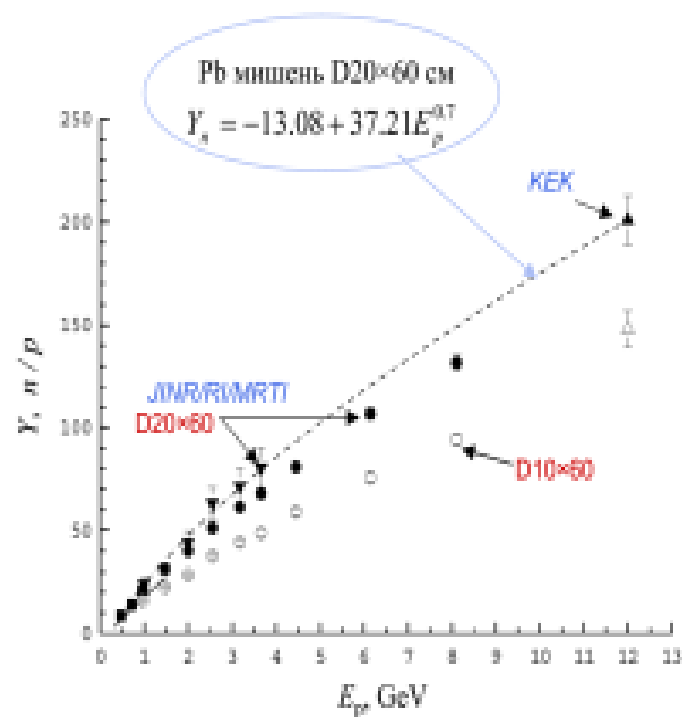
Метод замедления



Энергетические зависимости для среднего выхода нейтронов, приходящегося на нуклон ядра пучка H-1, H-2, He-3, He-4 и C-12

Vasilkov R.G., Yarevich V.I. Proc. ICANS-IX. 1991. P.340

Vasilkov P.G. и др. АЭ. 1995. Т.79. С.257



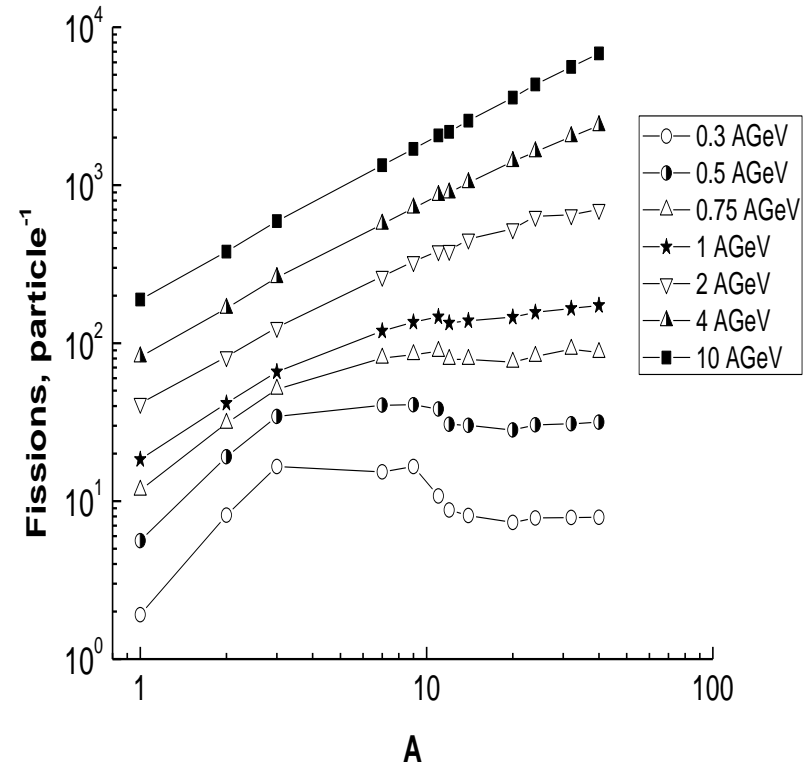
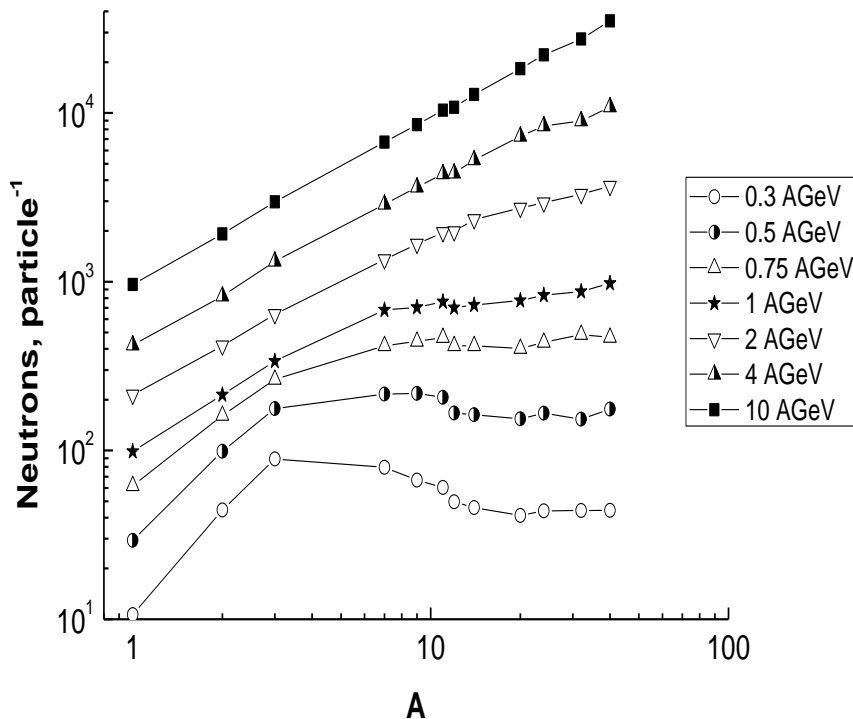
Зависимость выхода нейтронов от энергии протонов пучка для двух протяженных свинцовых мишеней различного диаметра

Proton and ion (deuterons, tritium nuclei,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ ,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{N}$ ,  ${}^{20}\text{Ne}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$ ,  ${}^{32}\text{S}$ , and  ${}^{40}\text{Ca}$ ) interaction with the quasi-infinite target was simulated using GEANT4.

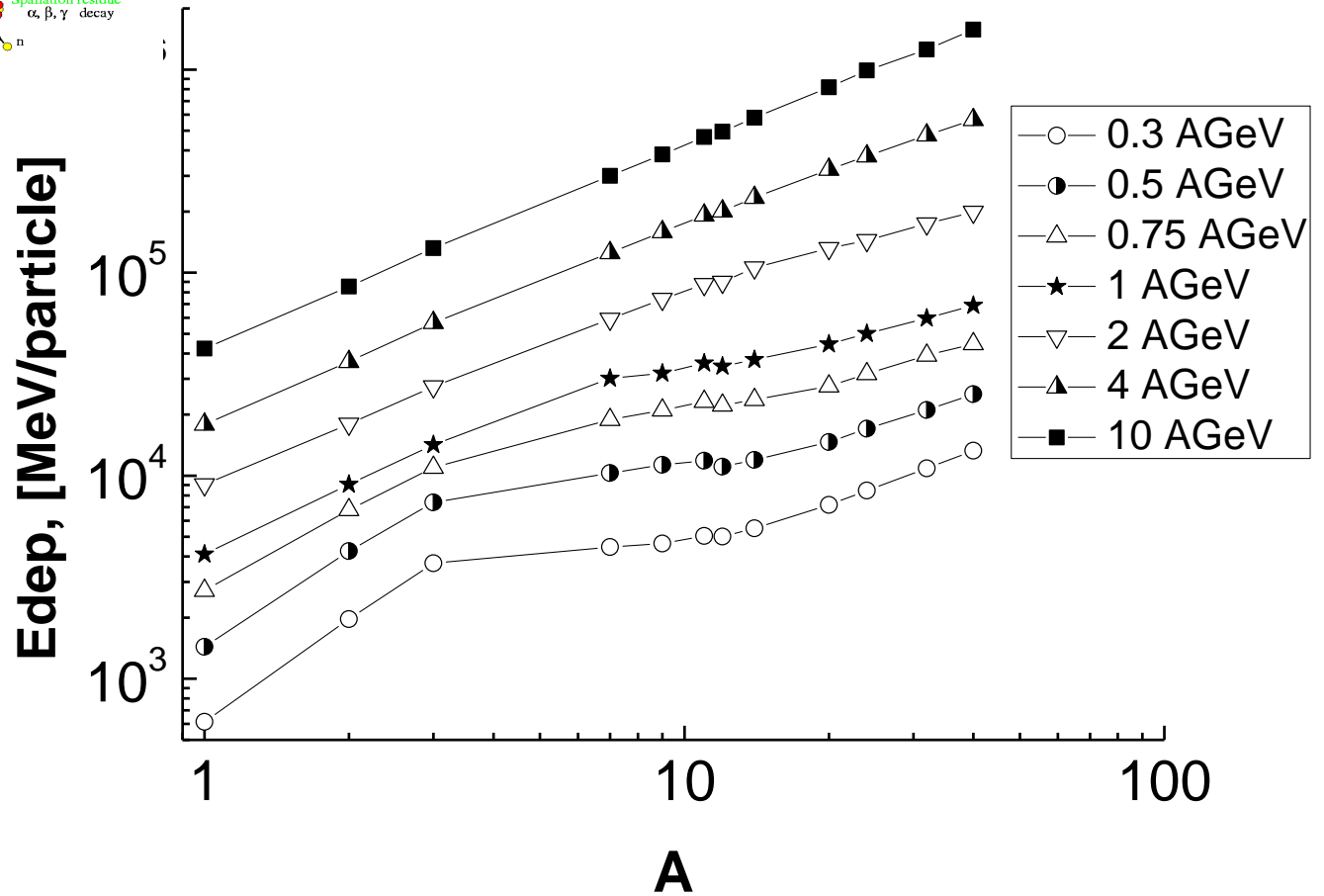
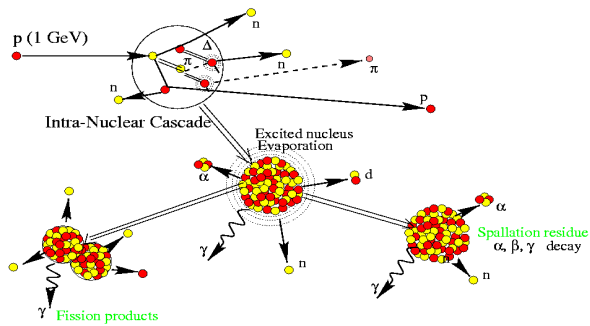
**In all calculations the cylindrical target from natural uranium with a length of 160 cm and a radius of 60 cm was considered.**

The simulation was performed for beam energies from 0.3 to 10 GeV/nucleon. The parameterizations based on experimental data ENDF (Evaluated Nuclear Data File) were used for simulation of the well known neutron spectrum region below 20 MeV. Special attention was paid to simulation of inelastic hadron interactions. For particles with an energy above 50 MeV three cascade models were used: Bertini cascade, Liege cascade и binary cascade (BC). The BC model was used for comparative analysis of ion beams with mass numbers up to 40.

Results of simulation of (a) the total number of produced neutrons and (b) number of fissions of natural uranium normalized to one beam ion for different mass numbers of the beam ions and the set of energies in a range of 0.3-10 GeV/nucleon.

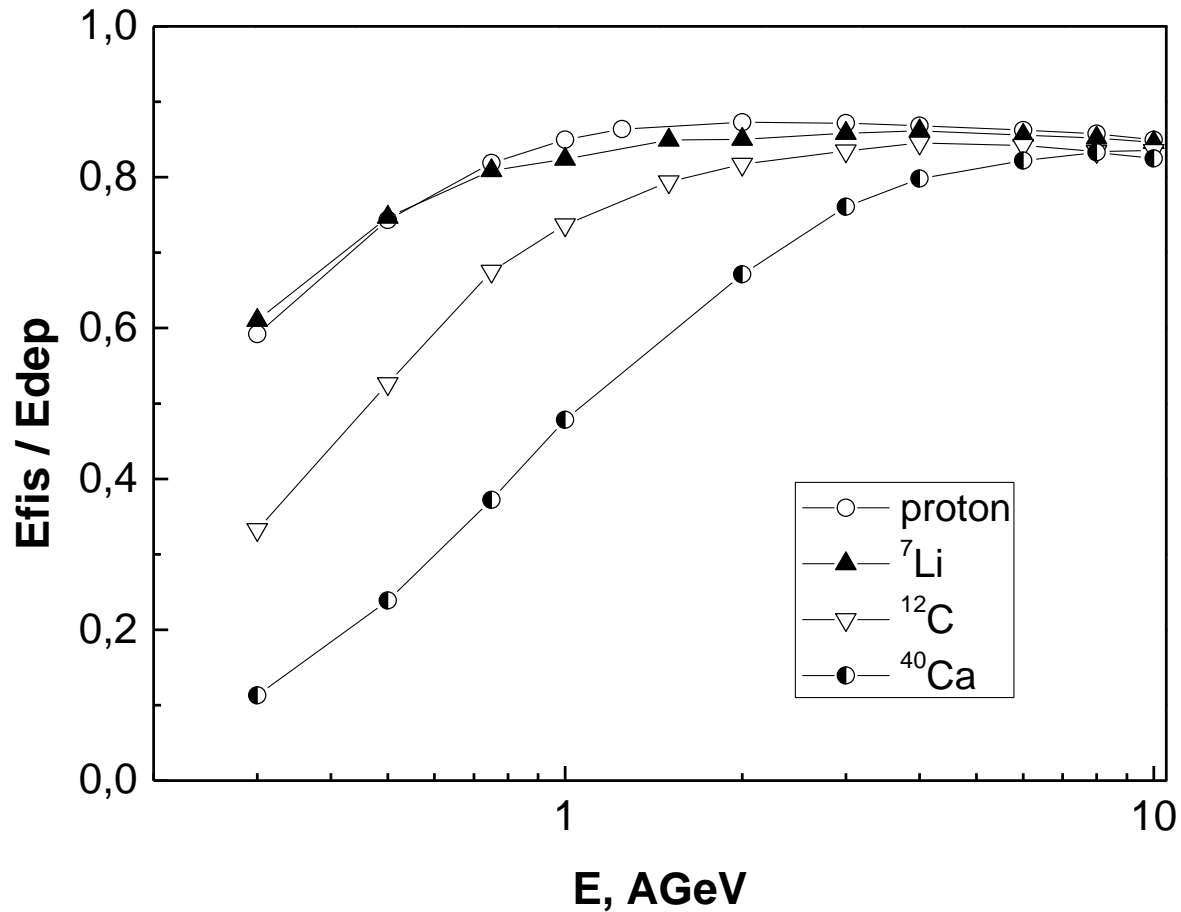


# Integral energy release per one beam ion as a function of mass number of the incident ion (GEANT4).



Relative contribution of the energy released in the target in the uranium fission reaction as a function of kinetic energy per nucleon of the incident ion

$$(E_{fis} = N \cdot 190 \text{ MeV})$$



Energy spent for magnetic field maintenance in **the synchrotron**

$$E_{spent} \sim AP/Z,$$

where  $Z$  is the charge and  $A$  is the mass number,  
 $P$  is the momentum of the accelerated ion.

For an isochronous **cyclotron**  $E_{spent} \sim (AP/Z)^2$ .

For a **linear accelerator**  $E_{spent} \sim AE_k/Z$ ,

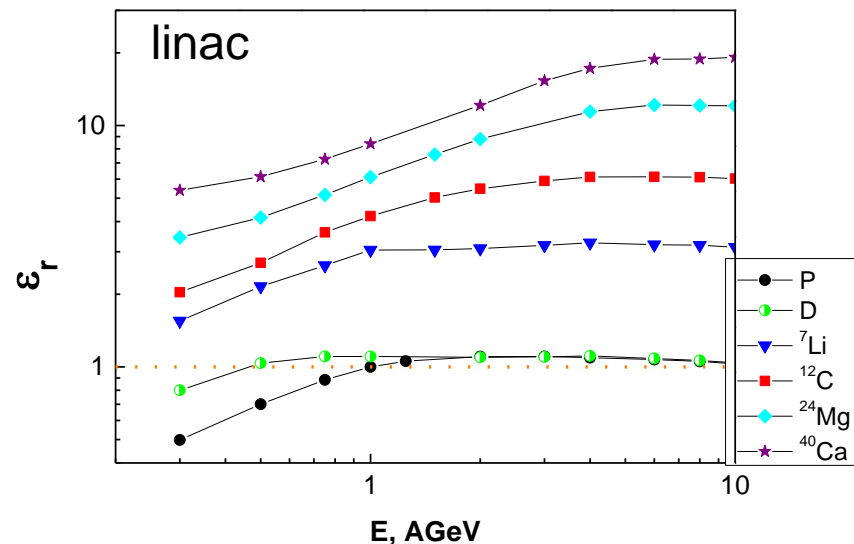
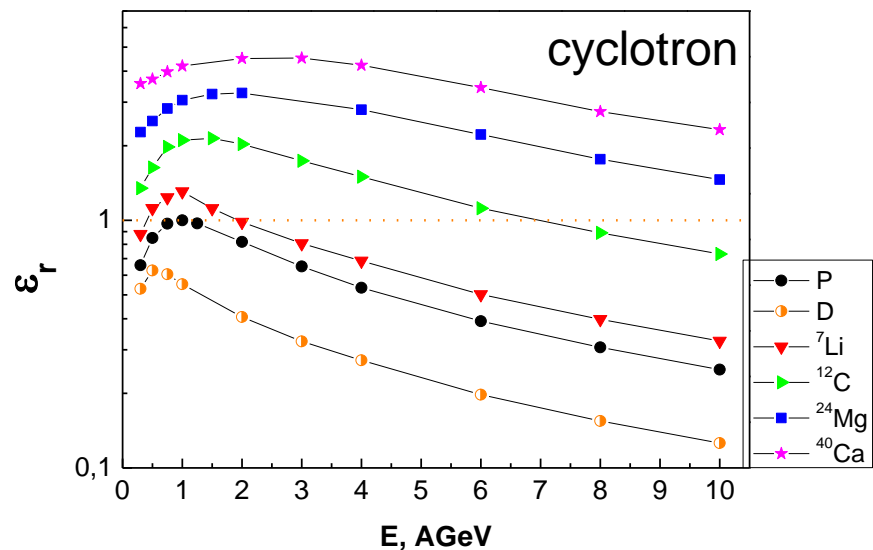
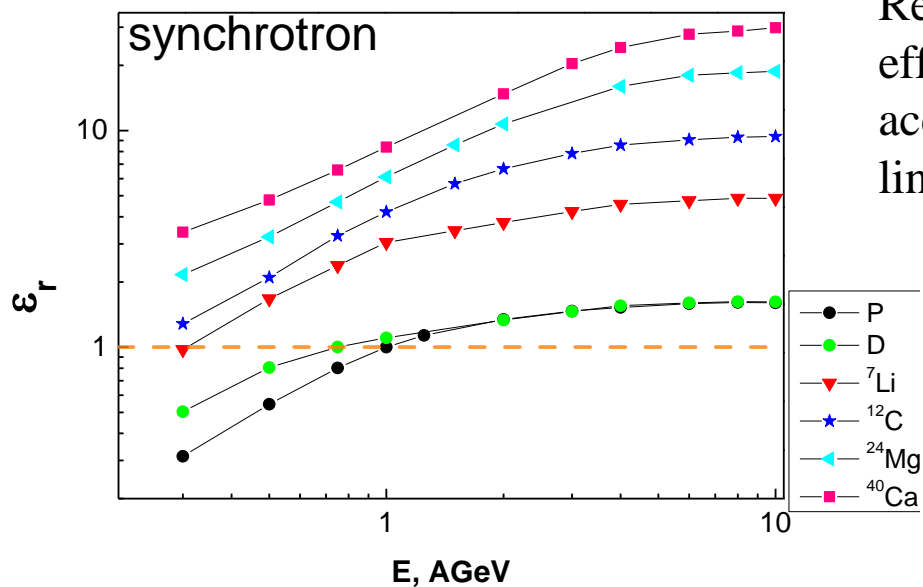
$E_k$  is the kinetic energy per nucleon of accelerated ion.

Relative efficiency  $\epsilon_r$

for ion 2, as compared to ion 1, for different types of accelerators:

$$\epsilon_r = \frac{E_{dep2} E_{spent1}}{E_{dep1} E_{spent2}}$$

Relative (with respect to 1 GeV protons) efficiency of ion energy deposition for beams accelerated in a synchrotron, cyclotron, and a linear accelerator.





Let us estimate the influence of beam intensity on energy consumption.

For beam intensities above  $10^{15}$  the energy spent on the beam acceleration cannot be neglected.

$$E_{tot} = E_{spent} + I \cdot A \cdot E_k$$

where  $I$  is the beam intensity,  $A$  is the ion mass number,  $E_k$  is the required ion kinetic energy per nucleon. The parameter  $\eta$  characterizes the acceleration efficiency (accelerator efficiency).

$$I \cdot A \cdot E_k = \eta \cdot E_{tot}$$

→ We consider the relative efficiency of light ion acceleration for three types of accelerators with respect to protons with the kinetic energy  $E_0 = 1$  GeV and equal intensities (number of ions in the beam) and efficiency for the proton beam  $\eta_0 = 0.1$ .

→ For a synchrotron the energy spent on acceleration of a beam of particles with the charge  $Z$ , the mass number  $A$ , the required energy per nucleon  $E$ , and the intensity  $I$  is written as:

$$E_{tot}(Z, A, E, I) = A \cdot I \cdot E_0 \left[ \frac{E}{E_0} + \frac{1}{Z} \frac{p}{p_0} \frac{1 - \eta_0}{\eta_0} \right]$$

where  $p$  and  $p_0$  are the ion and proton momenta, respectively.

The relative efficiency for a synchrotron is:

$$\varepsilon_r(Z, A, E) = \frac{E_{dep}}{E_{dep0}} \frac{1}{A \left[ \eta_0 \frac{E}{E_0} + \frac{p(1-\eta_0)}{Z p_0} \right]}$$

The relative efficiency for a cyclotron is

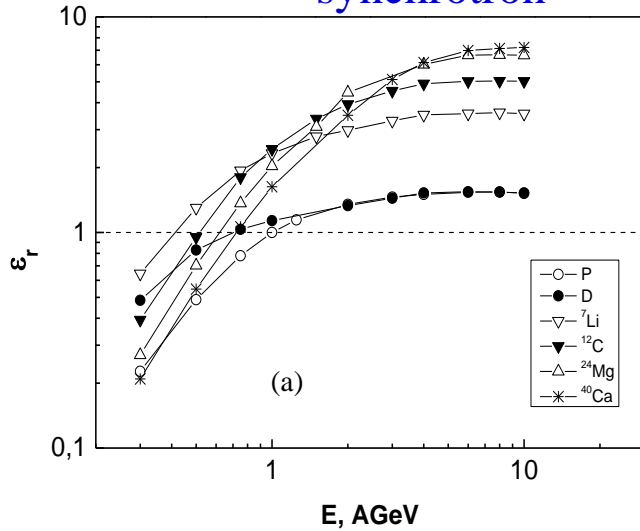
$$\varepsilon_r(Z, A, E) = \frac{E_{dep}}{E_{dep0}} \frac{1}{A \left[ \eta_0 \frac{E}{E_0} + \frac{A p^2 (1 - \eta_0)}{Z^2 p_0^2} \right]}$$

and for a linear accelerator,

$$\varepsilon_r(Z, A, E) = \frac{E_{dep}}{E_{dep0}} \frac{Z \cdot E_0}{A \cdot E [\eta_0 Z + 1 - \eta_0]} \quad (7)$$

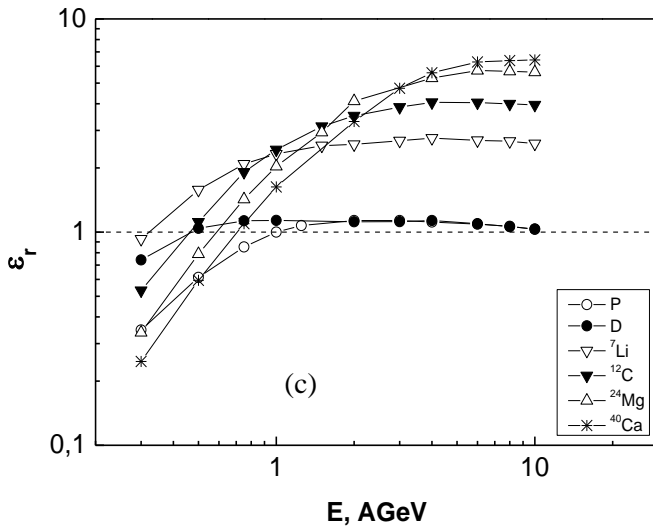
Here,  $E_{dep}$  and  $E_{dep0}$  is the energy deposited in the target for ions and protons, respectively.

### synchrotron

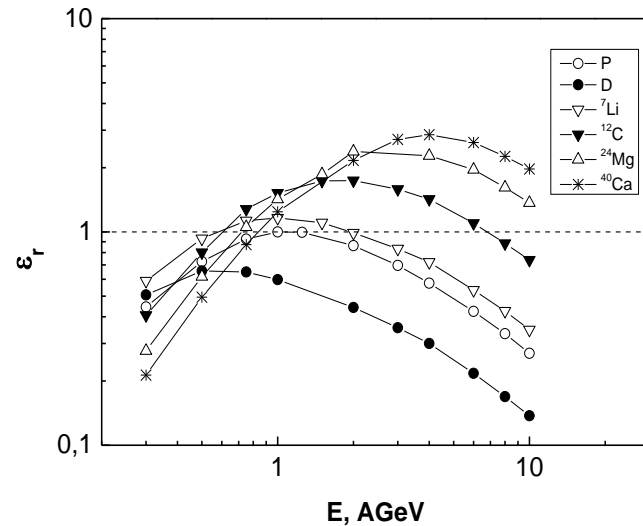


Relative (with respect to protons) ion efficiency as a function of beam energy for beams accelerated in a synchrotron, cyclotron, and a linear accelerator.

### linear accelerator



### cyclotron



The efficiency of 0.5–4 GeV proton and 0.25–1 AGeV light ion ( ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ , and  ${}^{12}\text{C}$ ) beams for energy production in a large **subcritical enriched U target** is analyzed using Geant4. The possibility of increasing the energy deposited in the target irradiated by ion beams with an energy below 0.5 AGeV by using a converter from low Z materials is analyzed. It is shown that 0.3–0.4 AGeV light ion beams are advantageous for ADS from the point of view of energy gain and accelerator size.

# Beam and target parameters

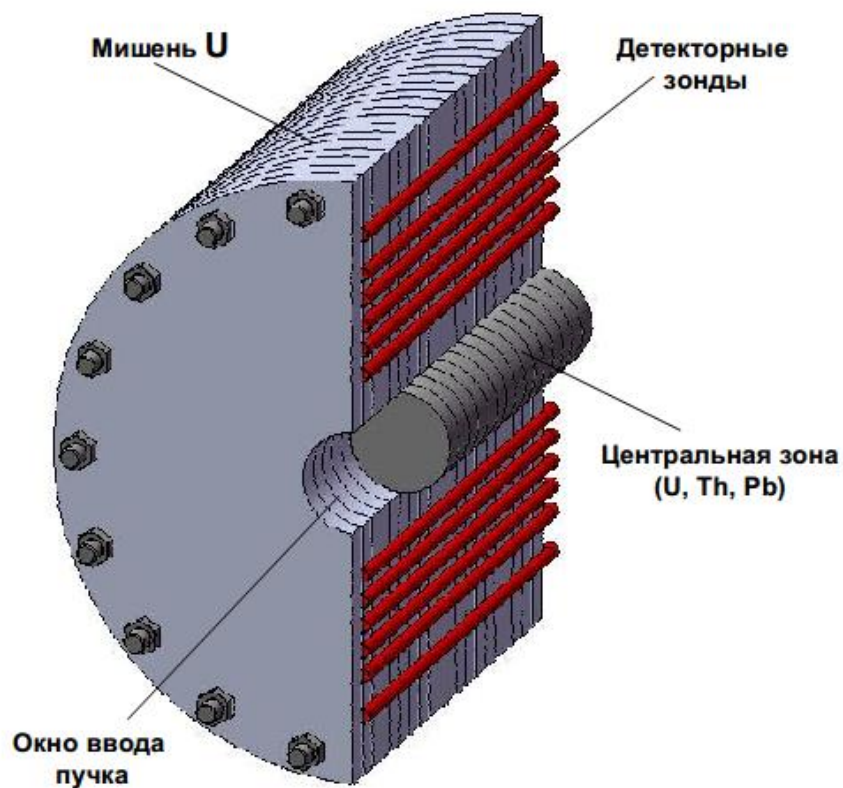
- 0.5–4 GeV proton and 0.25–1 AGeV light ion ( ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ , and  ${}^{12}\text{C}$ ) beams;
- subcritical enriched U target (criticality factor ( $k_{\text{eff}} = 0.96$ ));
- target radius up to 100 cm, target length up to 200 cm;
- target design with the so called “converter” from low-Z material.

Reference parameters: European Spallation Source (ESS) project [<https://europeanspallationsource.se>].

In the ESS project, it is planned to accelerate protons to a final energy of 2.5 GeV, with a beam power of 5 MW, which correspond to a beam intensity of  $1.25 \cdot 10^{16}$  protons/s. The total power consumption is estimated as  $\sim 30$  MW.

## Квазибесконечная урановая мишень со сменной центральной зоной «Буран» («Виган»)

Продольное сечение мишени с установленной центральной зоной и детекторными зондами



Вид спереди (со стороны пучка)



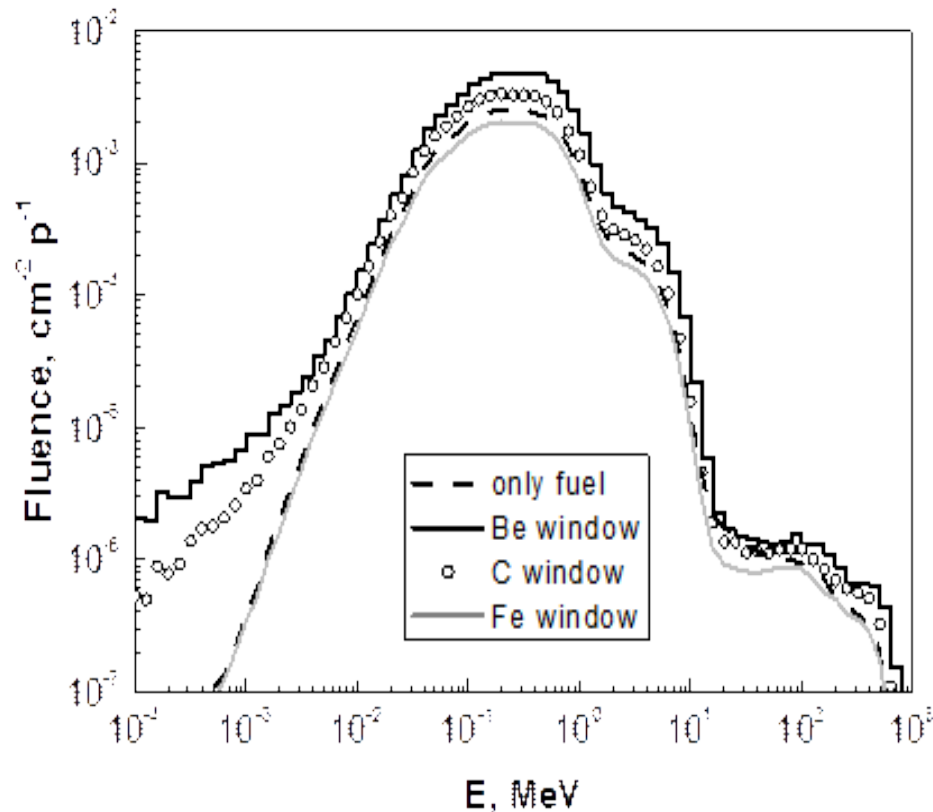
Вид сзади



# Neutron yield in the target

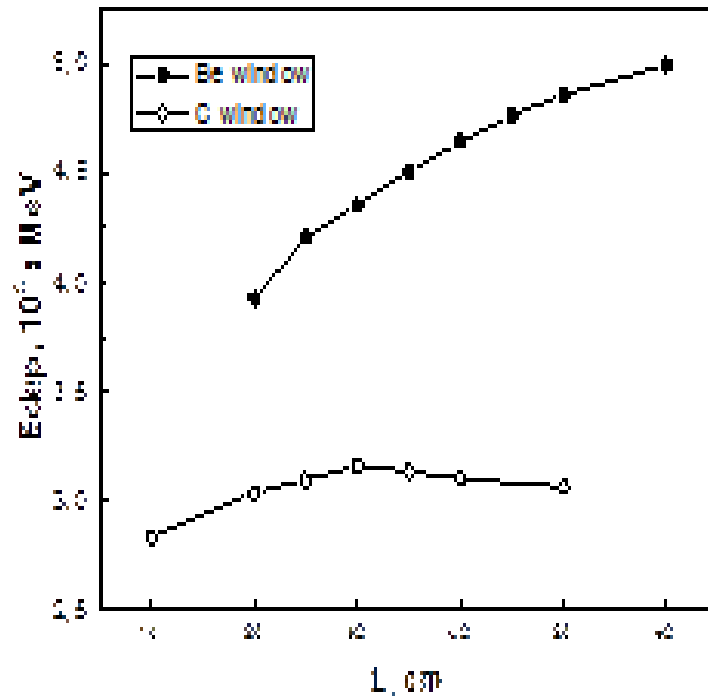
Converter material	Converter length, cm	Total neutron yield, particle <sup>-1</sup>	Yield of neutrons with E>100 MeV, particle <sup>-1</sup>	Deposited energy, 10 <sup>5</sup> ·MeV
fuel	10	34.39	1.492	2.394
Be	60	15.18	4.022	5.064
C	51	8.15	3.249	3.065
Al	43	10.15	2.823	2.781
Fe	16	14.51	2.116	1.929

# Neutron fluence in the target



Average neutron fluence in enriched U target without a converter and with the converter from Be, C and Fe, irradiated by 0.5 AGeV <sup>7</sup>Li beam.

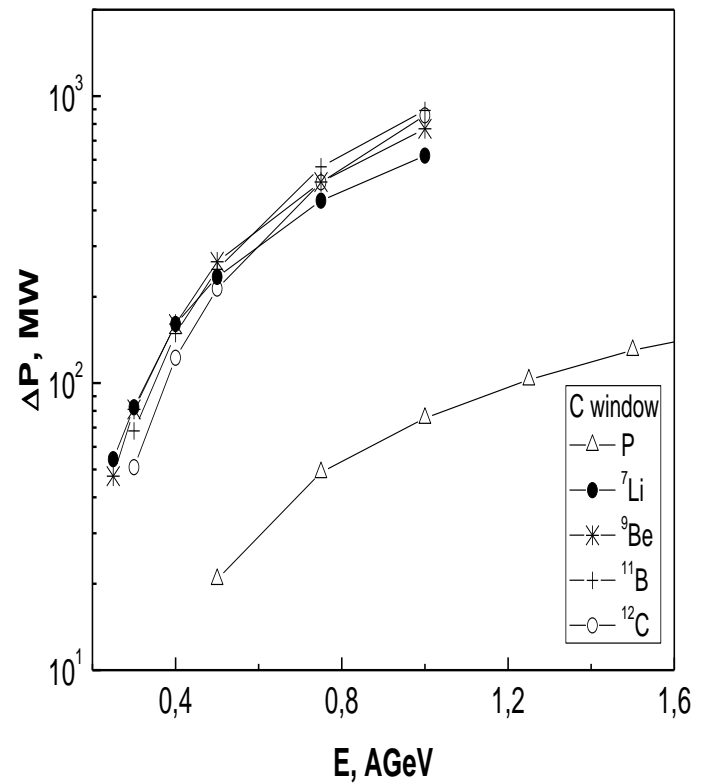
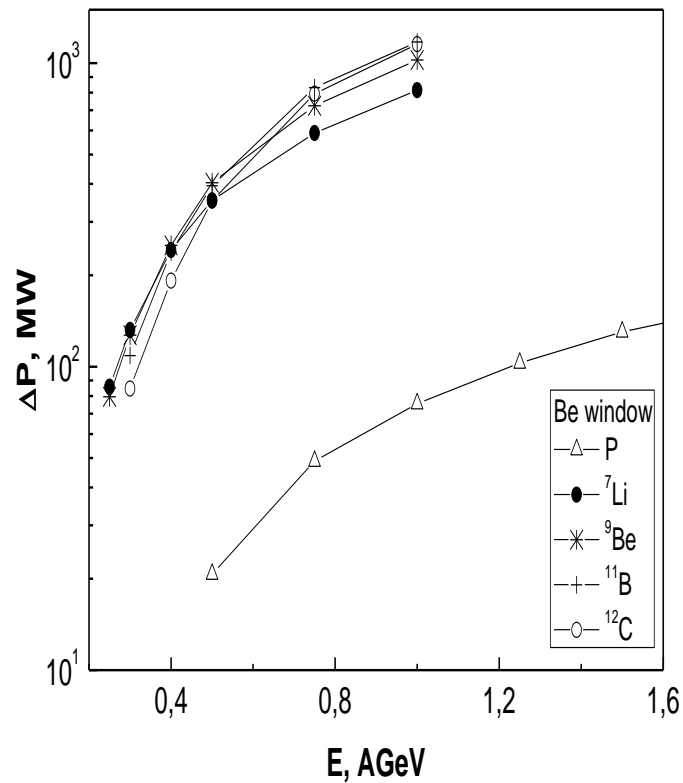
# Energy deposition in the target with Be and C converters



Energy deposited by 0.5 AGeV <sup>7</sup>Li beam as a function of converter length in enriched U target for Be and C converters.



# Power production by p, ${}^7\text{Li}$ , ${}^9\text{Be}$ , ${}^{11}\text{B}$ , and ${}^{12}\text{C}$ beams in the target with Be and C converters



# Further numerical studies

- Comparative simulations and verification of models and codes for BURAN (the large U target) are under way at JINR.
- Integrated simulations including nuclear and thermal processes in the large U target are planned in collaboration of JINR (Dubna) and JIHT RAS (Moscow).
- Measurements of neutron and temperature fields in the upcoming experiment with BURAN.
- The complex of experimental and numerical data provide valuable information for validation of the existing codes and data bases, which is essential for ADS development.

# Conclusions

The ADS-optimal energy **depends on the accelerator type** and the type of accelerated ions.

The optimal proton energy for a synchrotron is ~3 GeV, for a Linac, ~1-1.5 GeV, and for a cyclotron, ~1 GeV.

It was demonstrated that for light nuclei, beginning with  ${}^7\text{Li}$ , with energies > 1 GeV/nucleon, **ion beams are considerably (several times) more efficient** than a proton beam with an energy of 1-3 GeV.

The optimal accelerator energy for carbon is 2 GeV/nucleon, while for  ${}^{40}\text{Ca}$  ions, 4 GeV/nucleon.

The possibility of achieving energy release in a quasi-infinite uranium target equivalent to that of 1 GeV protons with higher efficiency (**and twice as small accelerator size!**) in the case of acceleration of light ions was demonstrated.

It was shown that  ${}^7\text{Li}$  beam with an energy of 0.5 GeV/nucleon is equivalent to proton beam with an energy of 2 GeV/nucleon, which allows one to obtain the same energy production with the same or higher efficiency using  ${}^7\text{Li}$  beams and an accelerator with twice as small size. This is especially topical for the accelerator of an ADS fast reactor.

The experimental studies on irradiation of "Quinta" uranium target at extracted carbon beams of Nuclotron demonstrated the promising character of this research; the future experimental studies with proton and light ion beams up to  ${}^{40}\text{Ca}$  in an energy range of 0.5-4 GeV/nucleon are anticipated.

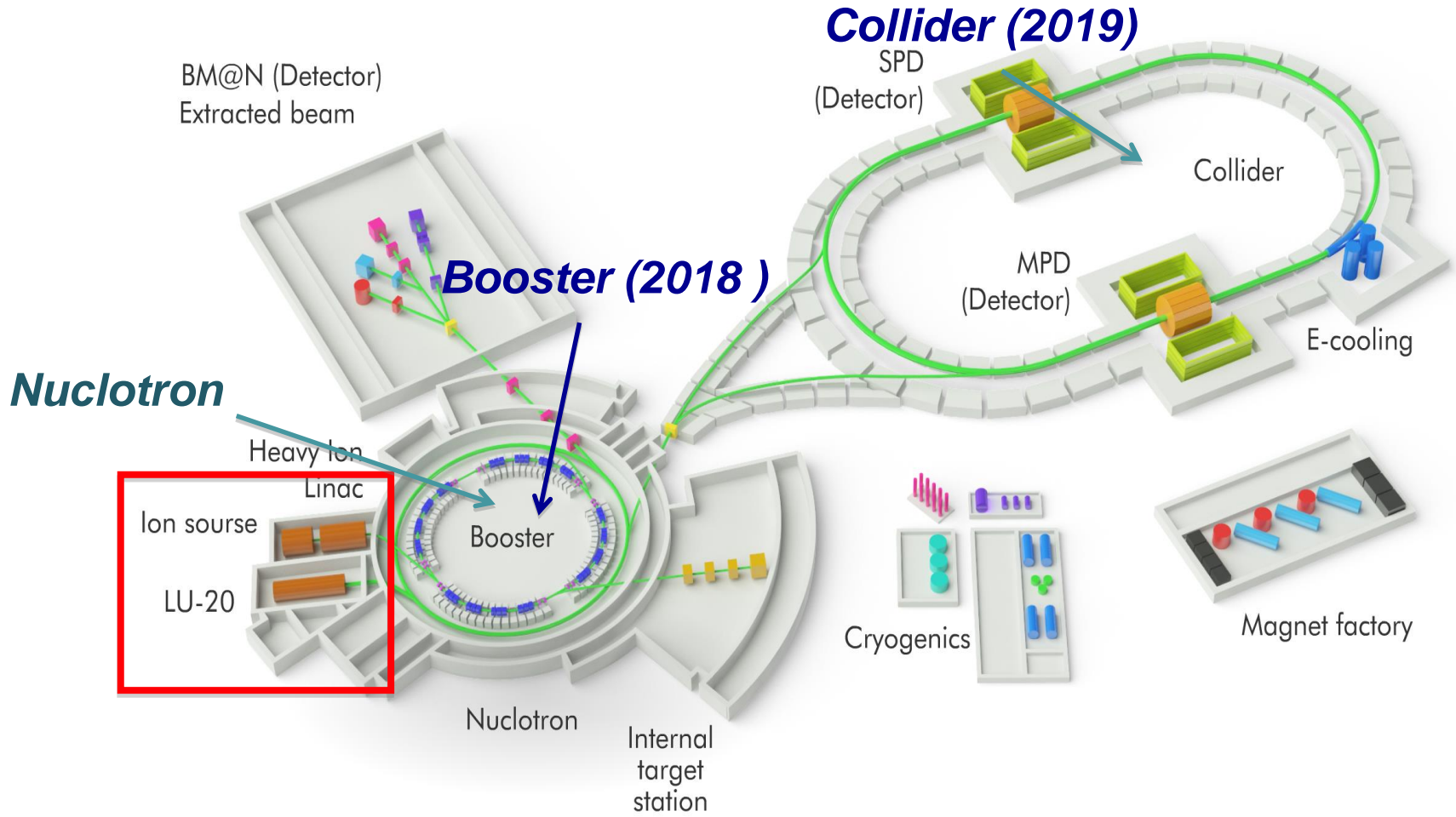
**THANK YOU FOR  
ATTENTION !**

# Dubna

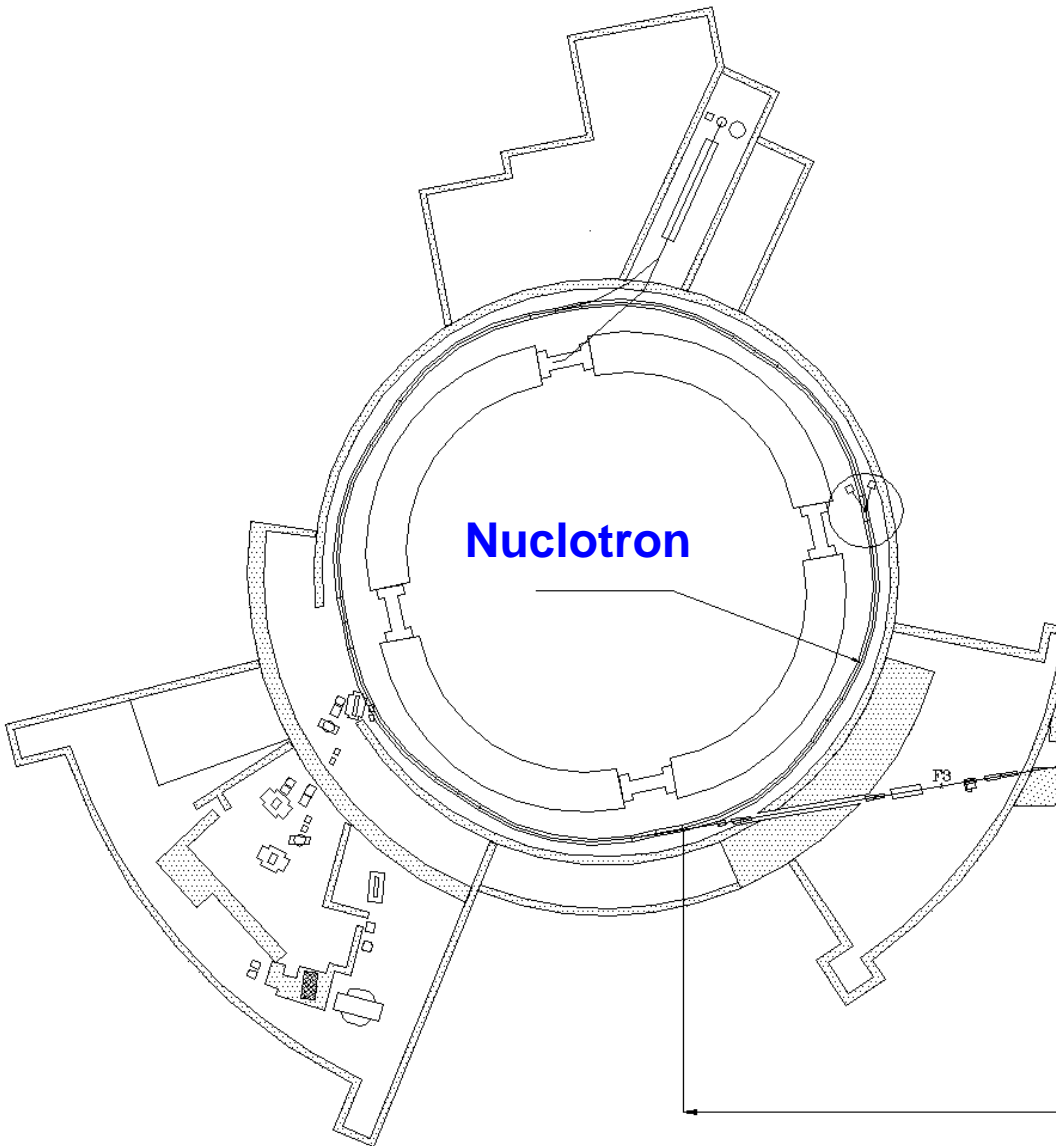


NICA

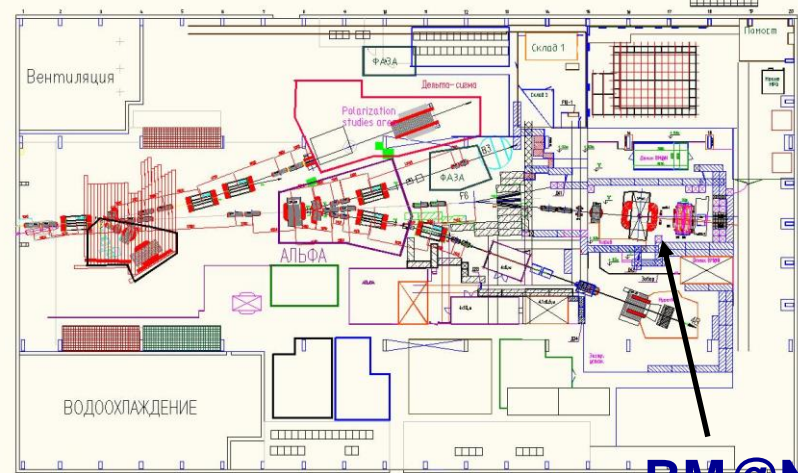
Volga



# **RUN 55 - 2018**



## **Building 205**

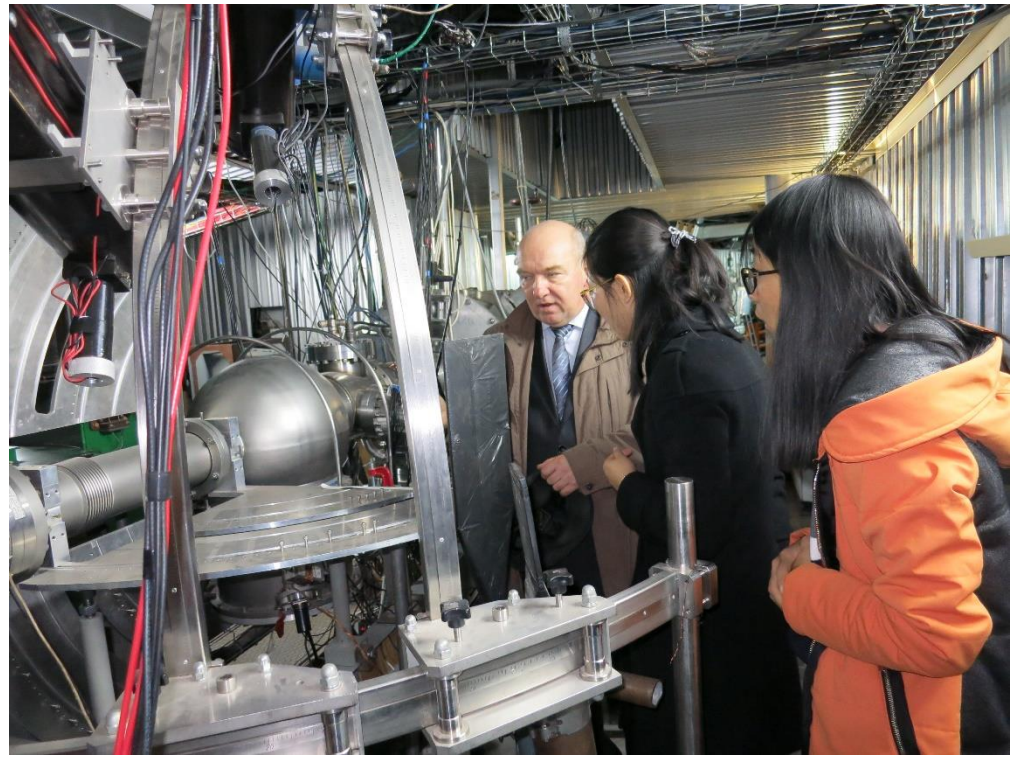


**~160 m**

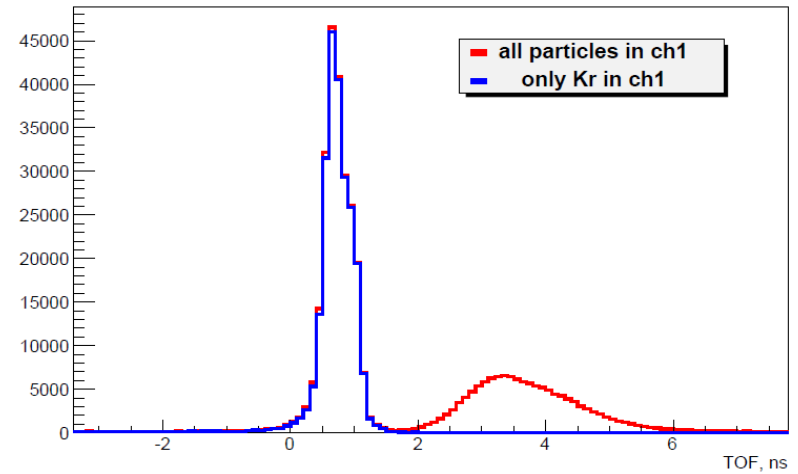
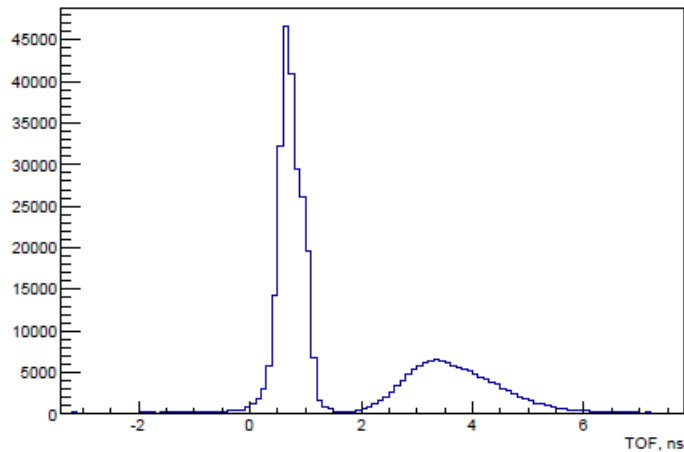
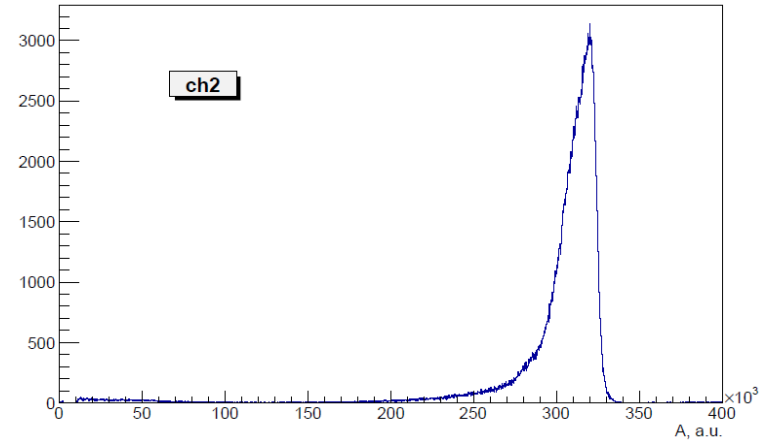
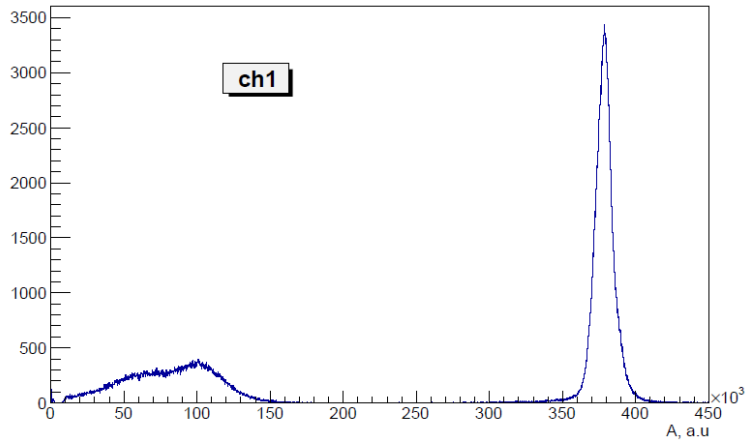
**BM@N**

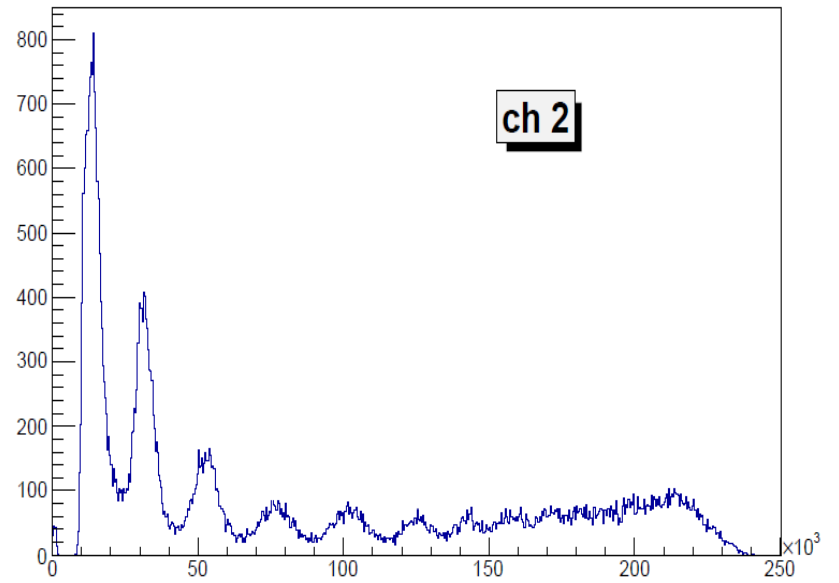
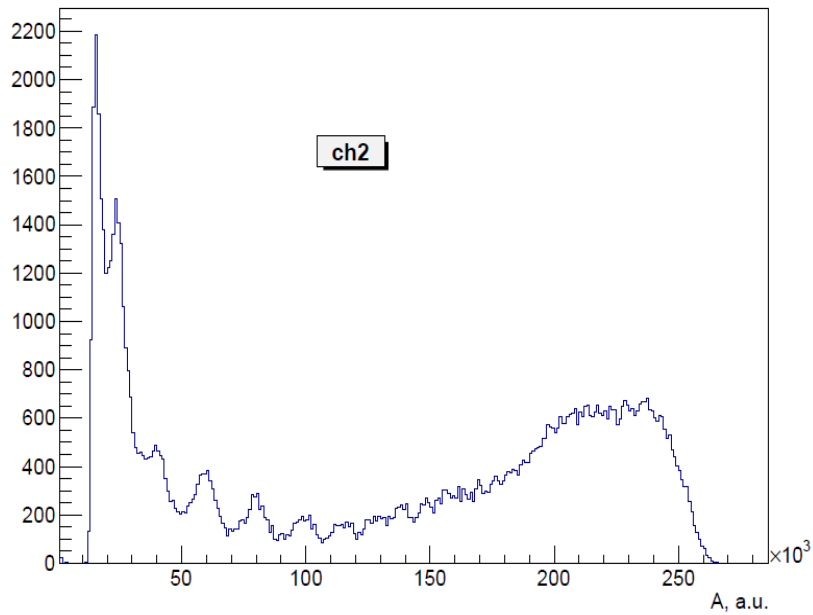
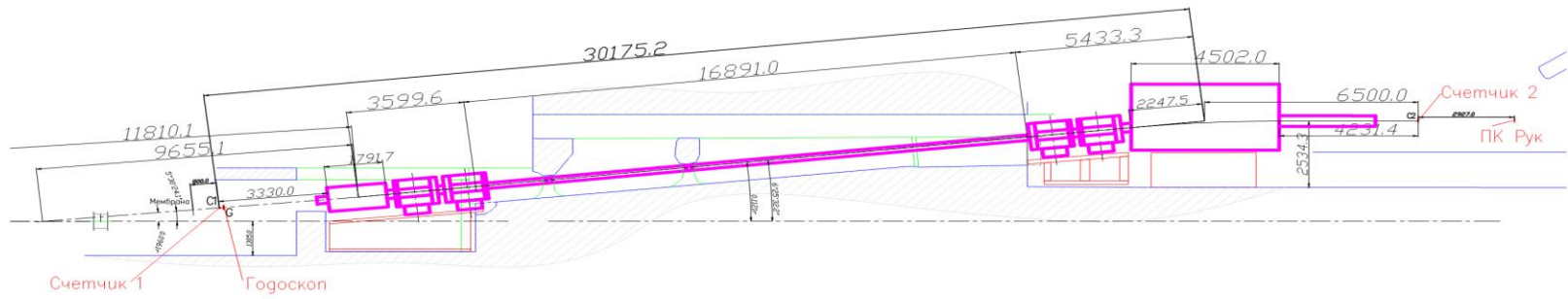




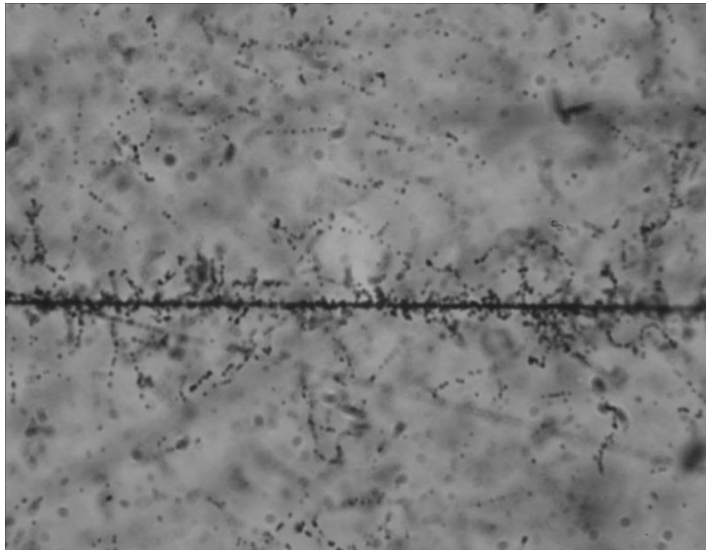
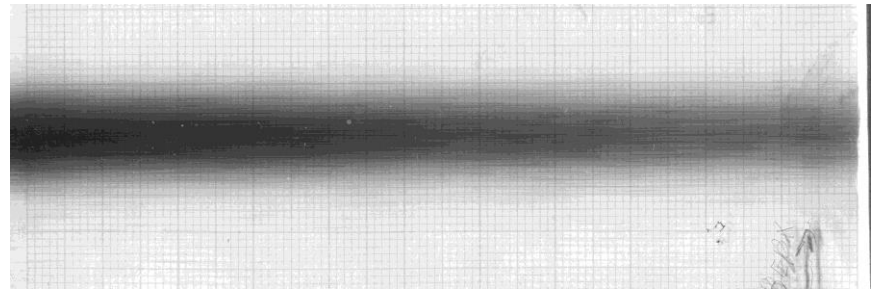


# Kr 2,5 GeV/n

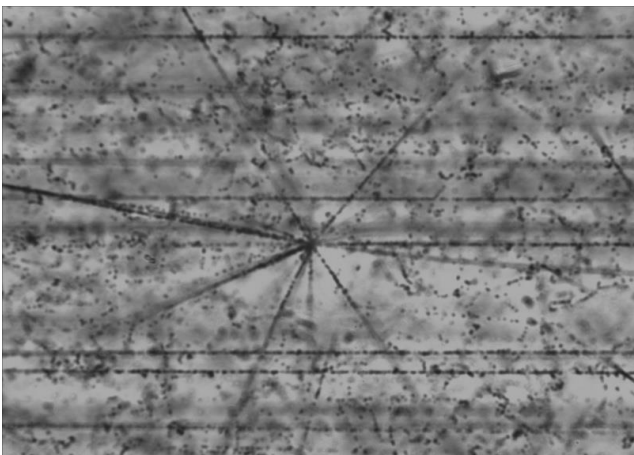




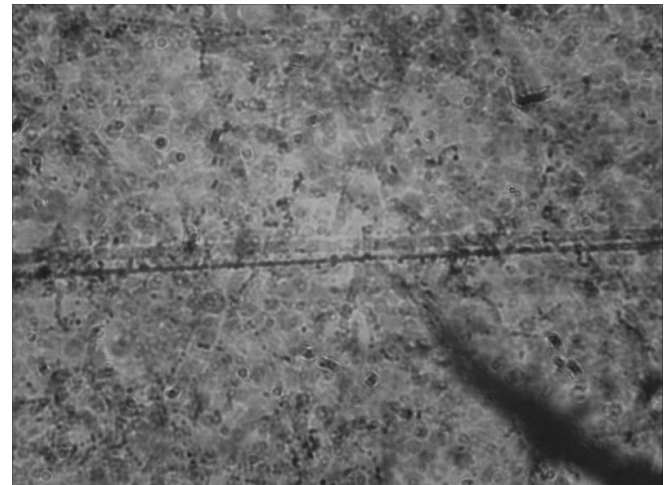
Kr 2,5 GeV/n



Kr



C



Ar