

**Высокоэффективный  
многоцелевой ионный источник.  
Применение в медицине и  
ядерной физике**

**М.Д. Селиверстов**

В.Н. Пантелеев, А.Е. Барзах, Л.Х. Батист,  
Д.В. Фёдоров, В.С. Иванов, Ф.В. Мороз,  
П.Л. Молканов, С.Ю. Орлов, Ю.М. Волков

# Многоцелевой ионный источник масс-сепаратора

## ❖ Применение

- Физика
- Медицина

## ❖ Режим работы

- Источник поверхностной ионизации
- Лазерный ионный источник
  - *Получение изотопов*
  - *Исследование сверхтонкой структуры атомных спектров*

# Ядерная медицина

- Лучевая терапия (протонная терапия, гамма-терапия...)
- Применение радионуклидных фармацевтических препаратов
  - Диагностика (например,  $^{82}\text{Sr}$ : Позитронно-эмиссионная томография)
  - Лечение

$^{226}\text{Ra}$  Мария Кюри

$^{223,224}\text{Ra}$  Targeted Alpha-Therapy (TAT)

# Получение радионуклидов для медицины

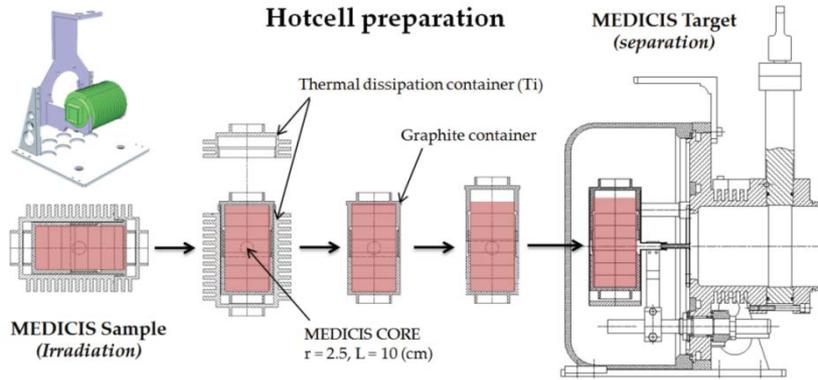
Важная задача – получение высокочистых образцов



Использование масс-сепараторов

# CERN-MEDICIS (Medical Isotopes Collected from ISOLDE)

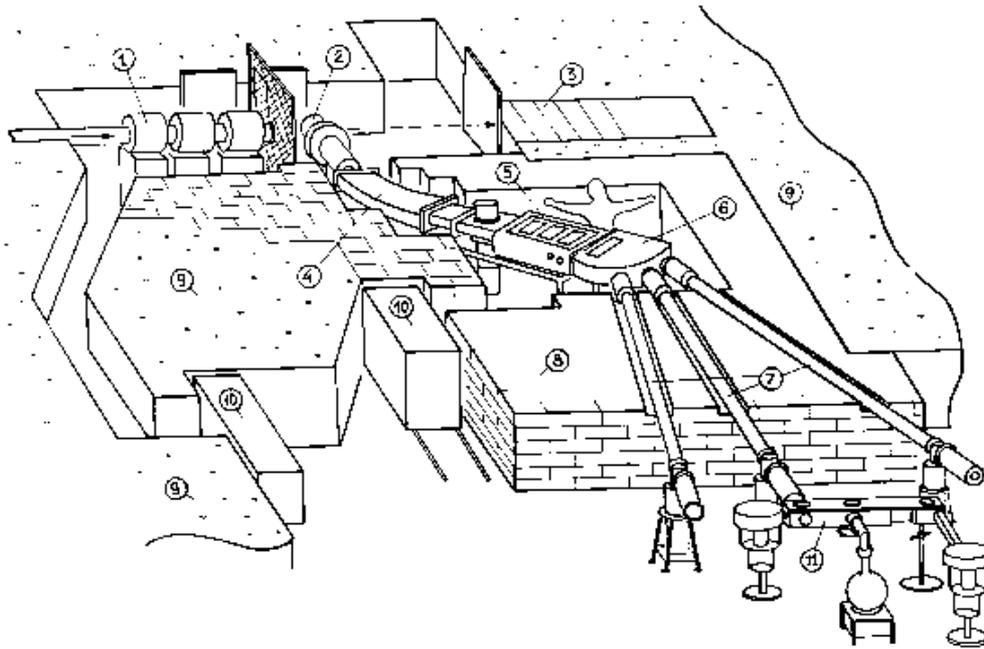
CERN-MEDICIS (Medical Isotopes Collected from ISOLDE)



**MEDICIS**  
*Promed*

**ISOLDE**

# Масс-сепаратор ИРИС

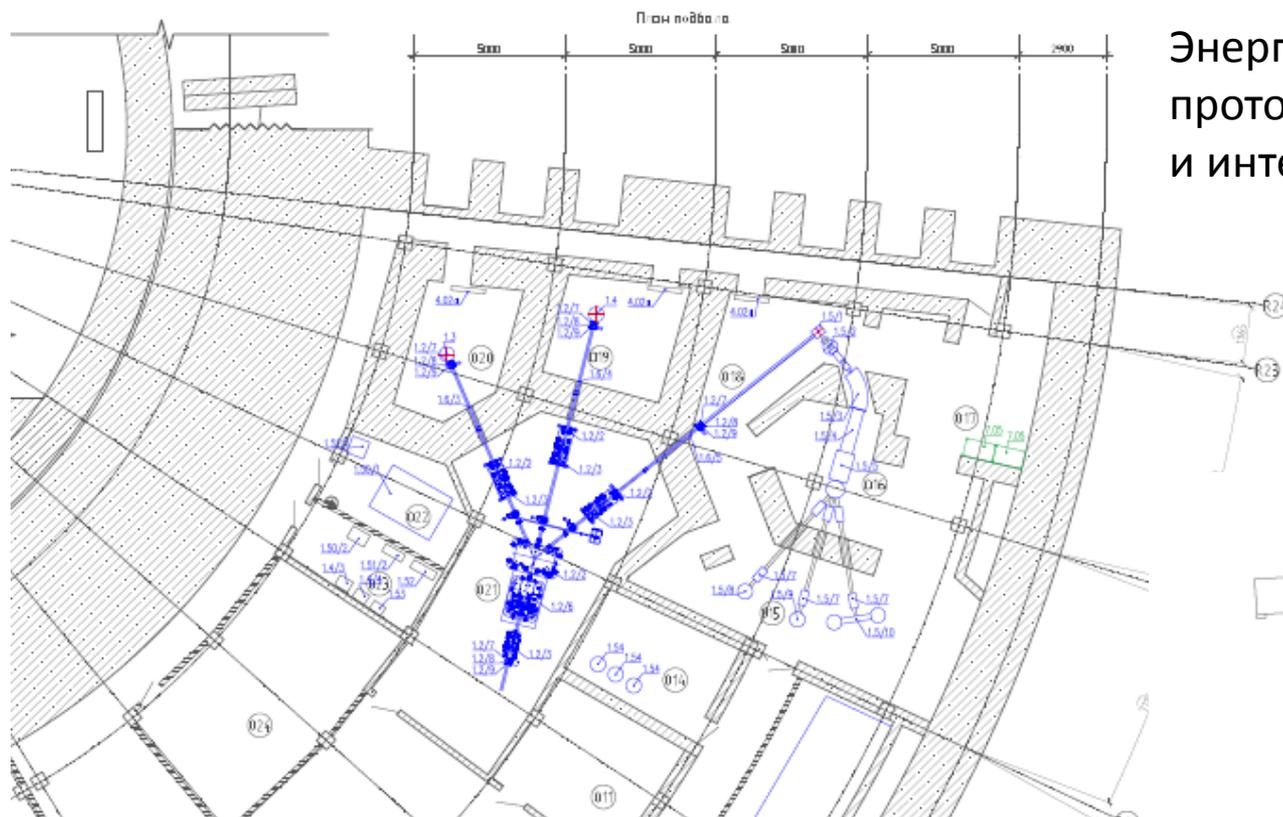


**Синхроциклотрон СЦ-1000**  
энергия протонов 1000 МэВ  
с интенсивностью  
выведенного протонного  
пучка 0.3 мкА (на мишени)

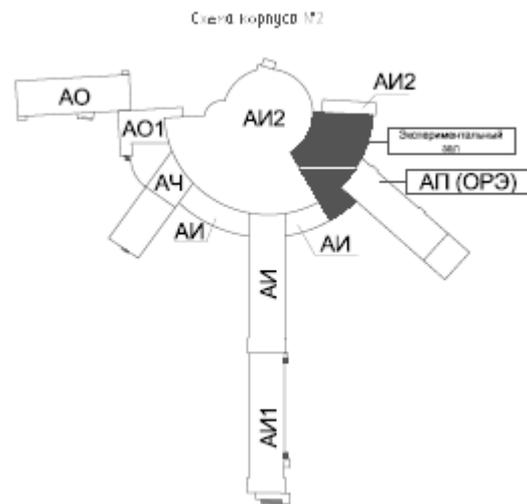
## Artistic view of IRIS facility

1. proton beam of synchro-cyclotron and quadrupole magnets,
2. target and ion source chamber, 3. proton beam dump, 4. isotope separator magnet,
5. collector chamber, 6. switch yard, 7. ion transport tube, 8. iron shielding wall,
9. concrete shielding wall, 10. shielding door, 11. tape collector system.

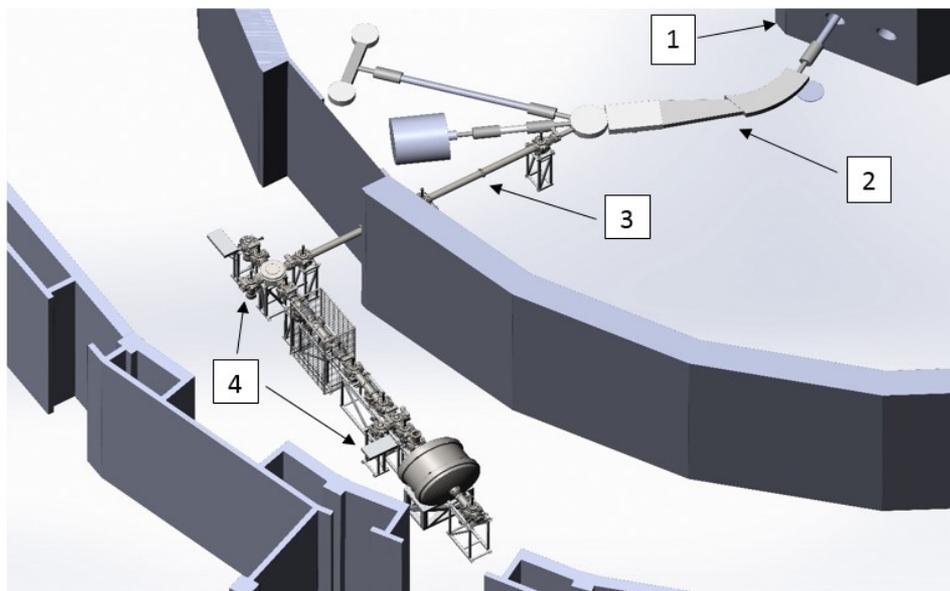
# Комплекс РИЦ-80 на циклотроне Ц-80



Энергия выведенного  
протонного пучка 40–80 МэВ  
и интенсивность до 100 мкА



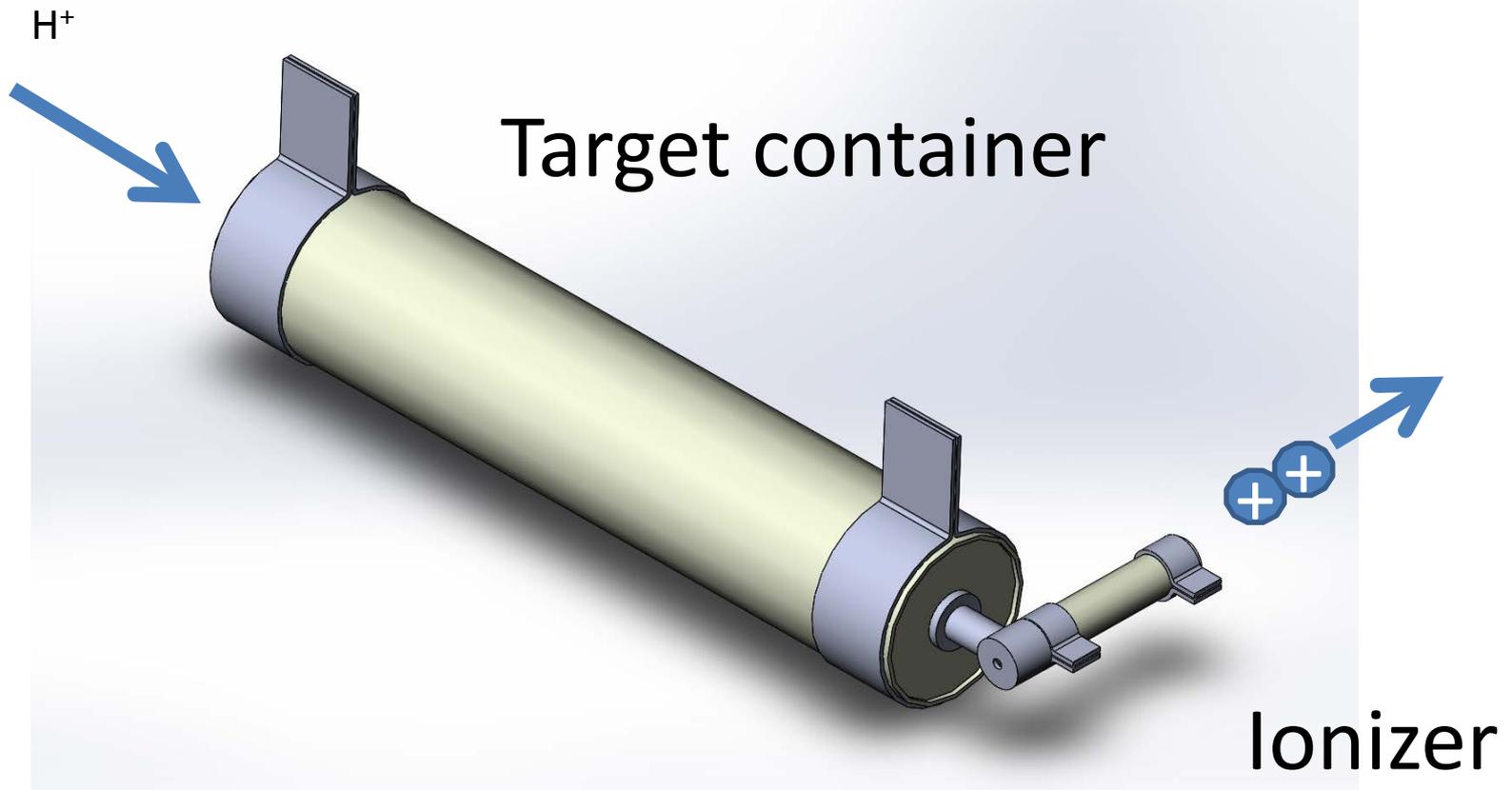
# Лазерно-ядерный комплекс ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на НейтронАх) на реакторе ПИК



Общий вид планируемого расположения масс-сепараторного лазерно-ядерного комплекса ИРИНА в экспериментальном зале РК ПИК: 1- корпус реактора, 2- масс-сепаратор ИРИНА на пучке 5' в главном зале РК ПИК, 3- система сопряжения масс-сепаратора ИРИНА с ловушкой ПИТРАП, 4 - масс-спектрометрический комплекс ПИТРАП в круговой галерее РК ПИК.

# Ионный источник масс-сепаратора

Target – laser-ion-source unit



# Эффективность поверхностной ионизации

Степень поверхностной ионизации

$$\alpha = \frac{n_i}{n_0} = \frac{\sigma_i}{\sigma_0} \exp\left(-\frac{E_I - W}{kT}\right)$$

Эффективность поверхностной ионизации при однократном взаимодействии

$$\beta = \frac{n_i}{n_0 + n_i} = \frac{\alpha}{1 + \alpha}$$

Эффективность поверхностной ионизации при многократном взаимодействии

$$\beta_\Sigma = \frac{\beta N_{coll}}{1 - \beta(1 - N_{coll})}, \quad N_{coll} \approx \frac{S}{S_0}$$

Эффективность ионизатора

$$\varepsilon \approx \beta_\Sigma \varepsilon_{extr} \varepsilon_{st}$$

Среднее время нахождения атома на поверхности

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0}{kT}\right)$$

Вероятность рекомбинации при однократном взаимодействии

$$\Phi = \exp\left(\frac{e\Delta U}{kT}\right) \quad \Delta U = -\frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_e}{n_i}\right), \quad n_e = 2 \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right) \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$$

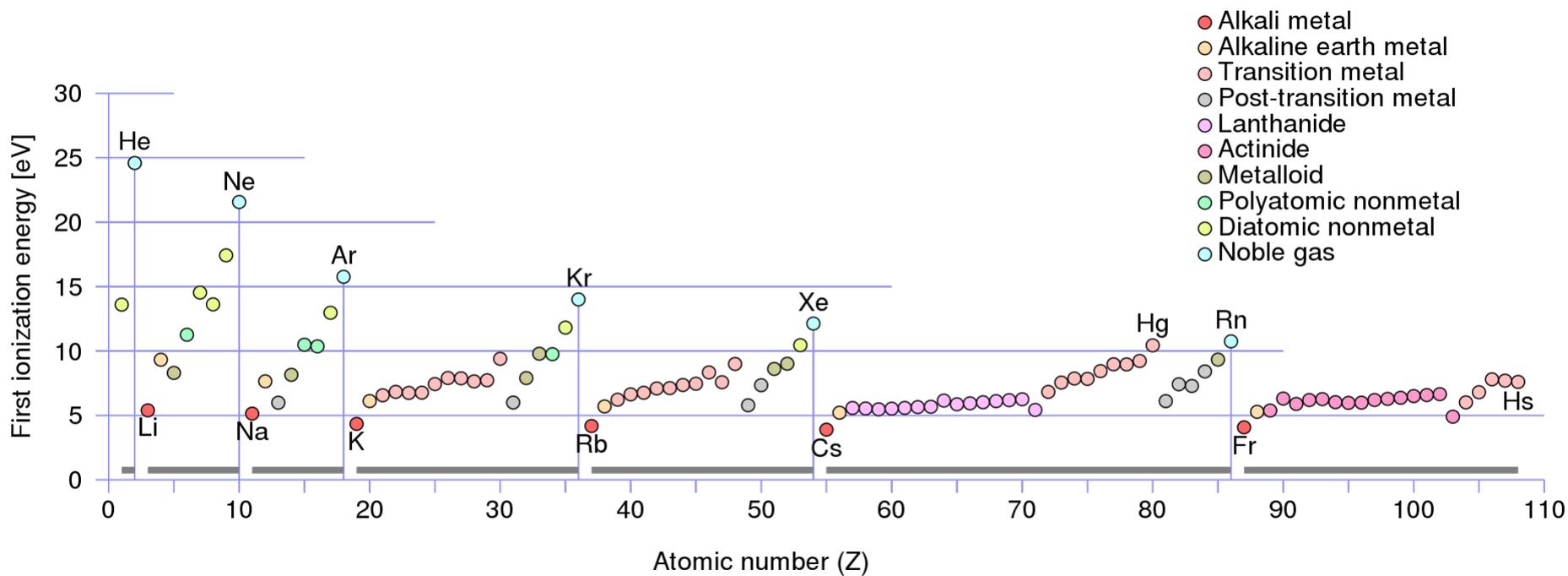
$$\Phi = 2 - 3 \text{ В}$$

# Температура плавления и работа выхода

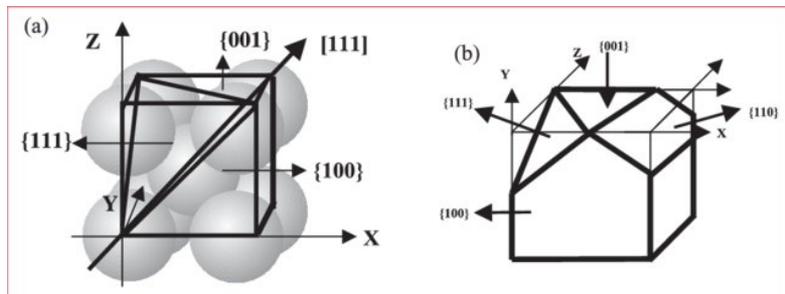
Ionizer material	$T_m$ [°C]	$W$ [eV]
Re	3 185° C	4.72
Nb	2 477°C	3.95 – 4.87
Rh	1 964°C	4.98
Ir	2 466°C	5.27
Ta*	3 017°C	4.25
Ta (110)		4.80
W*	3 422°C	4.55
W (110)		<b>5.2-5.6</b>

\* Polycrystalline

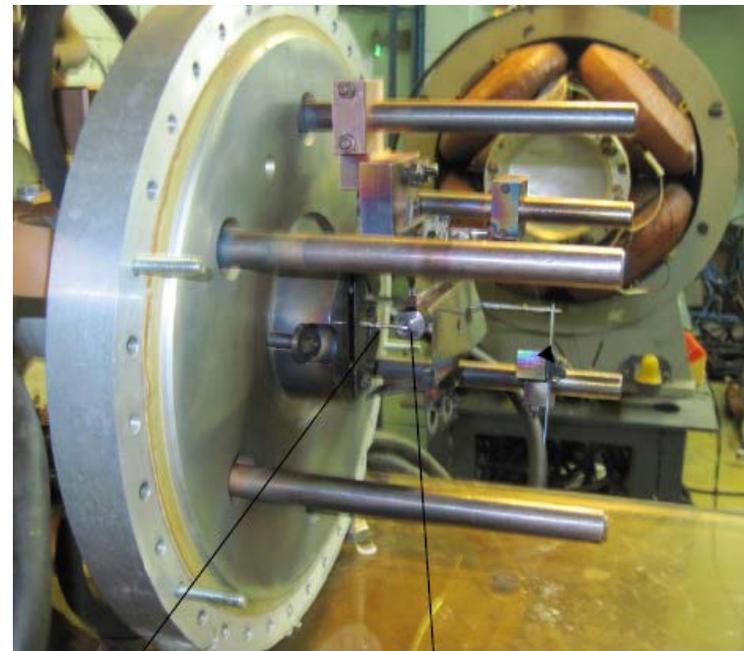
# Потенциал ионизации



# Ионизатор из монокристаллического вольфрама



Длина 20 мм  
Внутренний диаметр 2 мм  
Внешний диаметр 5 мм



Сотрудничество ПИЯФ-НПО «Луч»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 625 728** (13) **C1**

(51) МПК  
H01J 27/26 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(21)(22) Заявка: 2016103208, 01.02.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
01.02.2016

Дата регистрации:  
18.07.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 01.02.2016

(45) Опубликовано: 18.07.2017 Бюл. № 20

Адрес для переписки:

142100, Московская обл., г. Подольск, ул.  
Железнодорожная, 24, генеральному директору  
ФГУП "НИИ НПО "ЛУЧ" П.А. Зайцеву

(72) Автор(ы):

Новиков Илья Николаевич (RU),  
Павлов Андрей Александрович (RU),  
Пантелеев Владимир Николаевич (RU),  
Савватимова Ирина Борисовна (RU),  
Ясколко Антон Андреевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Российская Федерация, от имени которой  
выступает Государственная корпорация по  
атомной энергии "Росатом" (Госкорпорация  
"Росатом") (RU),  
Федеральное государственное унитарное  
предприятие "Научно-исследовательский  
институт Научно-производственное  
объединение "ЛУЧ" (ФГУП "НИИ НПО  
"ЛУЧ") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: ПАНТЕЛЕЕВ В.Н.

Эксперименты на установке ИРИС МЛК  
ИРИНА. Сессия научного совета ОФВЭ,  
23-26 декабря 2014. RU 2293977 C2,  
20.02.2007. RU 2368977 C2, 27.09.2009. SU  
397984 A, 17.09.1973. JP 2004342384 A,  
02.12.2004. Банных О.А. Новый подход к  
поверхностной ионизации и дрейф-  
спектроскопии органических молекул ЖТФ,  
2002, том 72, вып.12, с.88-93.

(54) **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ИСТОЧНИК ПОВЕРХНОСТНОЙ ИОНИЗАЦИИ**

(57) Формула изобретения

1. Высокотемпературный источник поверхностной ионизации из  
монокристаллического материала с объемно-центрированной кубической решеткой,  
снабженный цилиндрическим сквозным отверстием, отличающийся тем, что сквозное  
отверстие выполнено вдоль кристаллографического направления [111] монокристалла.

2. Источник по п. 1, отличающийся тем, что в качестве монокристаллического  
материала с объемно-центрированной кубической решеткой выбраны материалы из  
ряда тугоплавких материалов, таких как: вольфрам, тантал, молибден, ванадий.

3. Источник по п. 1, отличающийся тем, что поверхность сквозного отверстия  
снабжена оксидной пленкой, толщина которой не превышает 1 мкм.

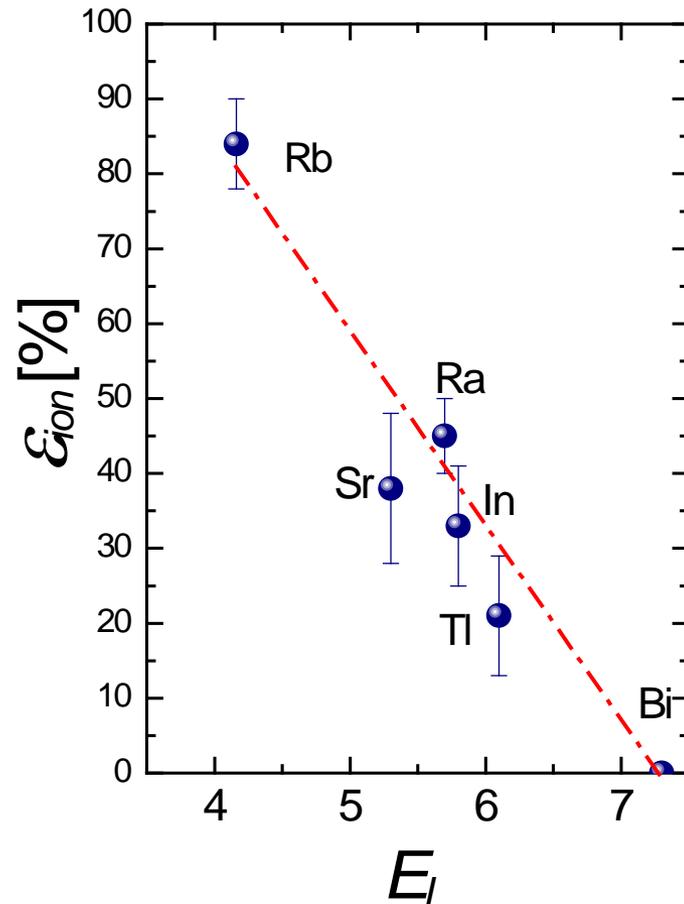
RU 2 6 2 5 7 2 8 C 1

RU 2 6 2 5 7 2 8 C 1

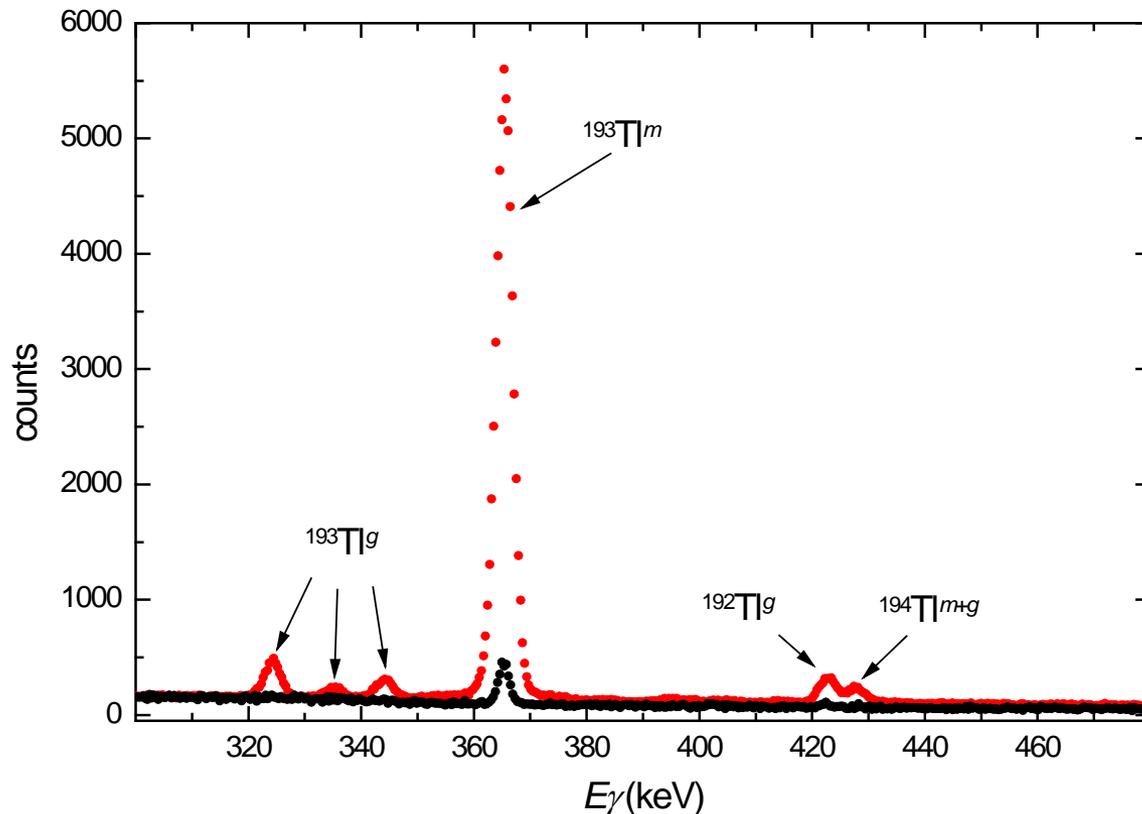
# Результаты: эффективность поверхностной ионизации

	Ionization efficiency [%]	Ionization efficiency [%] <i>literature</i>	$E_i$ [eV]
Rb	84(6)	90 (W*), 40 (Ta*)	4.18
Ra	38(10)	7(W*)	5.3
Sr	45(5)	13 (W*)	5.7
In	33(8)	6(W*)	5.8
Tl	21(8)	0.3 (W*)	6.1
Bi	$10^{-3} - 10^{-2}$	--	7.3

# Результаты: эффективность поверхностной ионизации



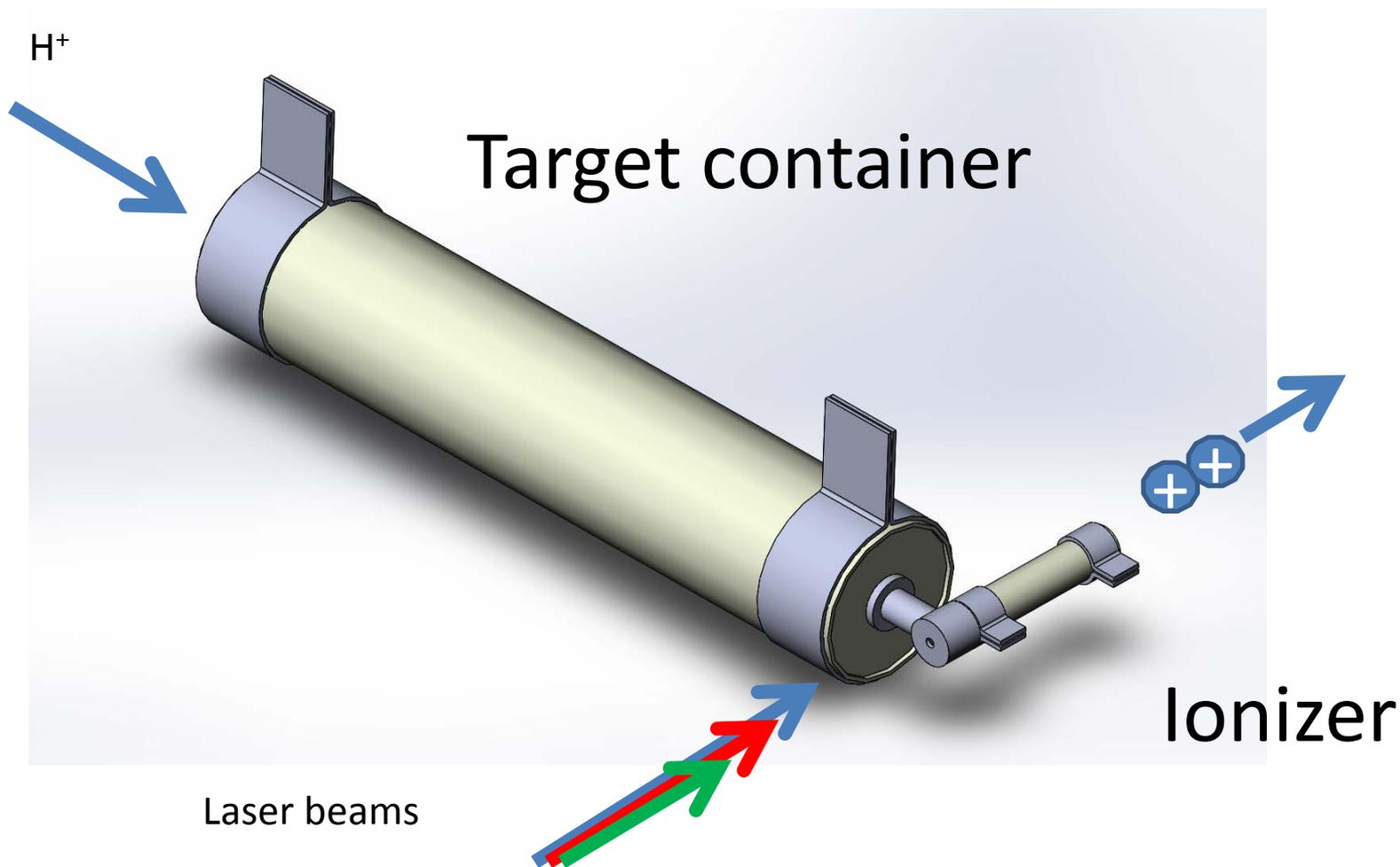
# Результаты: сравнение полученной эффективности поверхностной ионизации Tl для источников из моно- и поликристаллического вольфрама



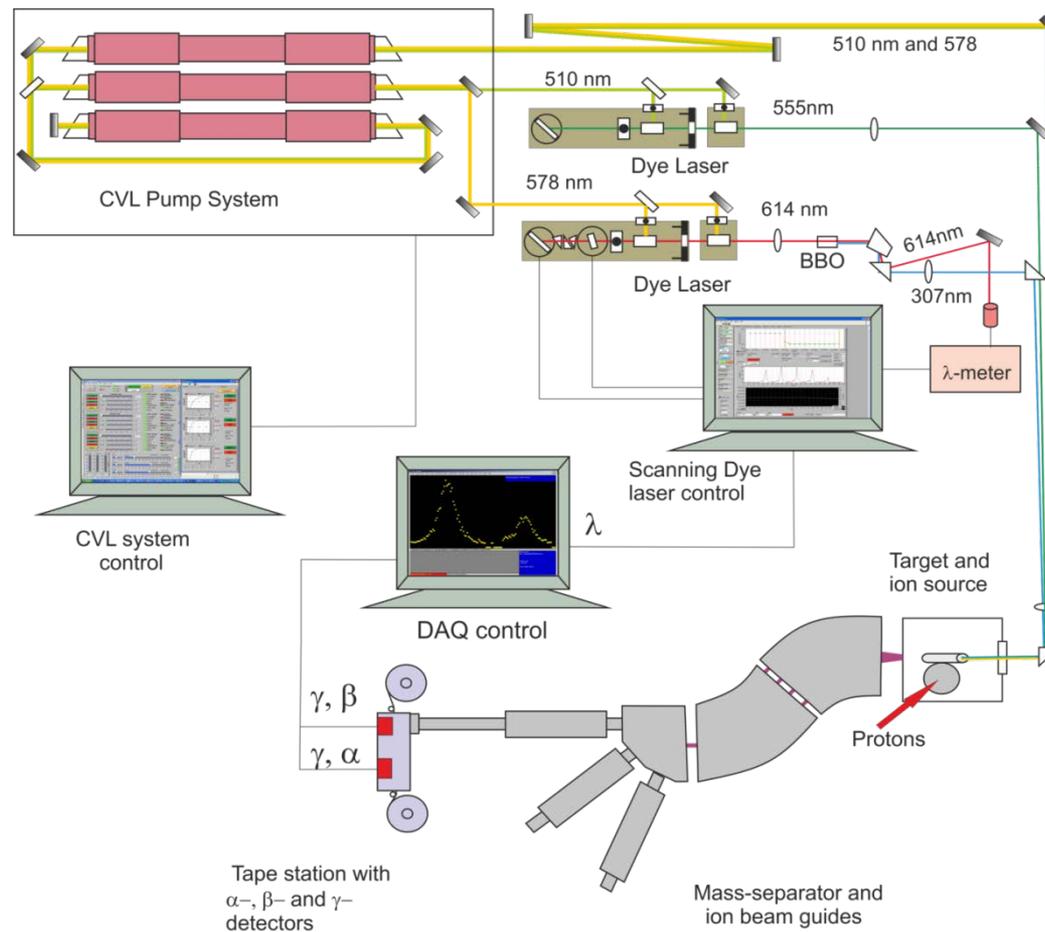
- Монокристаллический W
- Поликристаллический W

# Лазерный ионный источник

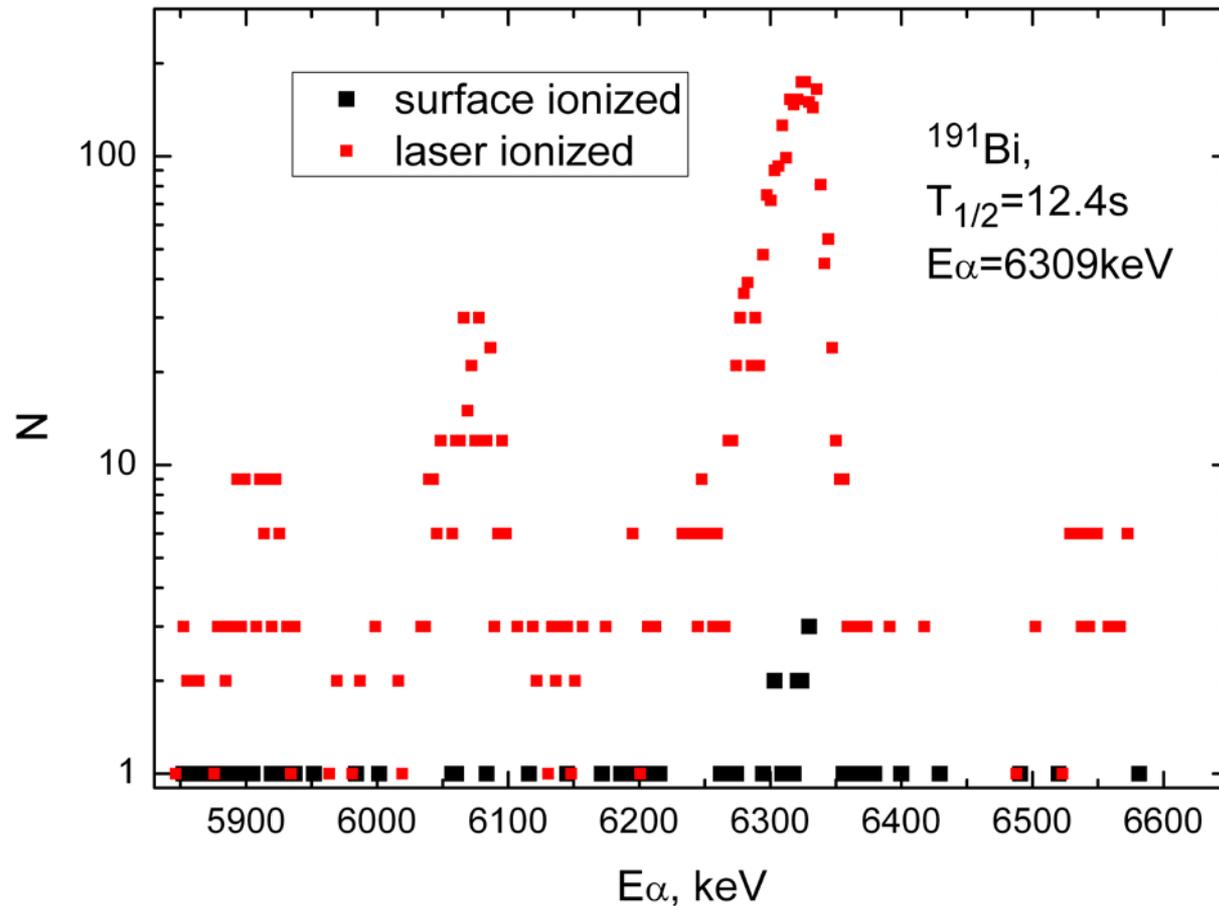
Target – laser-ion-source unit



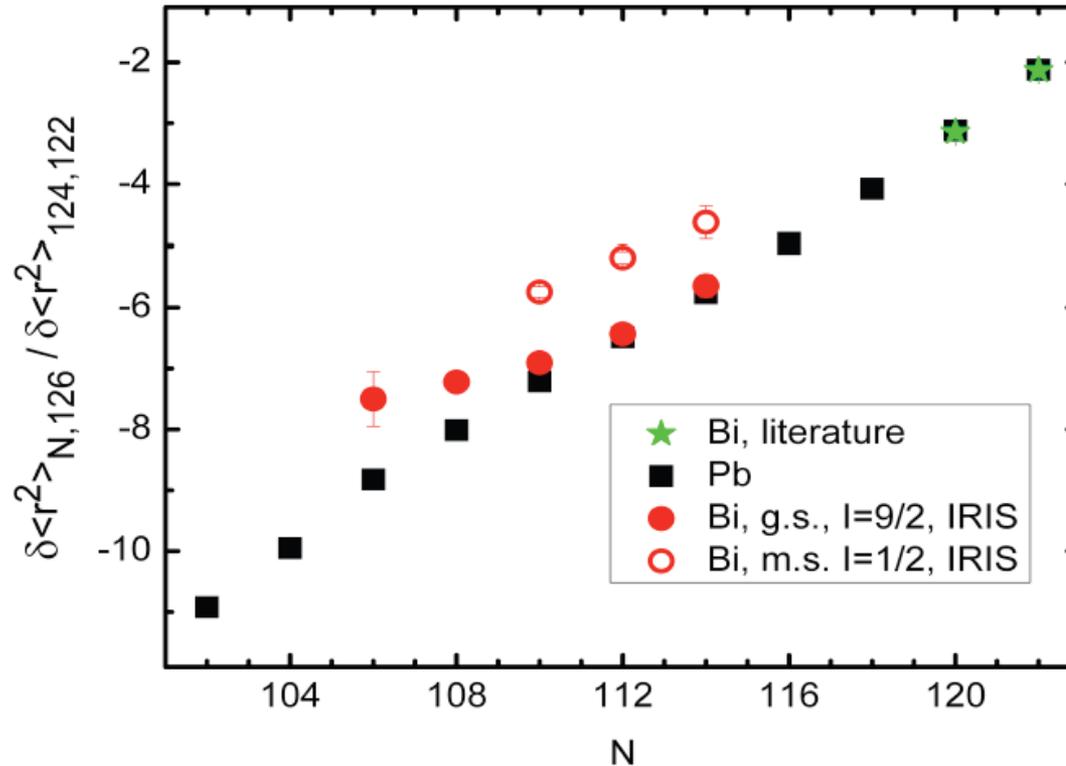
# Схема лазерной установки (эксперименты с висмутом)



# Работа ионизатора в режиме лазерного ионного источника и в режиме источника поверхностной ионизации



# Фотоионизационная спектроскопия в лазерном ионном источнике: результаты



Относительные изменения зарядовых радиусов изотопов (и изомеров) висмута

# Выводы и перспективы

- В ПИЯФ в сотрудничестве с НПО «Луч» был создан прототип ионного источника из монокристаллического вольфрама. Источник этого типа обладает повышенной эффективностью благодаря анизотропии свойств монокристалла, в результате чего внутренняя поверхность трубки ионного источника имеет значительно более высокую работу выхода (~ 5 эВ) по сравнению с поликристаллическим вольфрамом (4.5 эВ).
- Ионный источник был испытан на лазерно-ядерном комплексе ИРИС. Эксперименты показали, что для элементов со средним или высоким потенциалом ионизации наблюдается значительное увеличение эффективности ионизации по сравнению со «стандартными» источниками поверхностной ионизации. Так, для таллия (Tl) наблюдалось 10-кратное увеличение эффективности по сравнению с ионизаторами с теми же геометрическими и температурными параметрами, но изготовленными из поликристаллического вольфрама. Также можно отметить то, что наблюдалась поверхностная ионизация висмута, которая невозможна в «стандартных» источниках поверхностной ионизации.
- В экспериментах с висмутом на масс-сепараторе ИРИС было показано, что разработанный ионизатор может быть также применён в режиме лазерного ионного источника. В этом случае ионизация происходит во внутреннем объёме ионного источника с помощью излучения импульсных лазеров, настроенных в резонанс с частотами оптических переходов в выбранной схеме фотоионизации. Помимо высокой эффективности этот метод позволяет достичь высокой селективности ионизации, т.к. схема фотоионизации индивидуальна для каждого элемента.
- В НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ создана программа развития медицины. Помимо лучевой терапии она включает в себя программу развития производства радионуклидов для целей диагностики и терапии – в частности, строительство масс-сепаратора на одной из мишенных станций комплекса РИЦ-80 на циклотроне Ц-80, а также масс-сепараторного лазерно-ядерного комплекса ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на Нейтронах) на реакторе ПИК для фундаментальных исследований физики ядра, а также разработки новых методов получения радионуклидов для медицины.