

Семинар ОФВЭ, 13 января 2009 г.

**В. Н. Пантелеев**

---

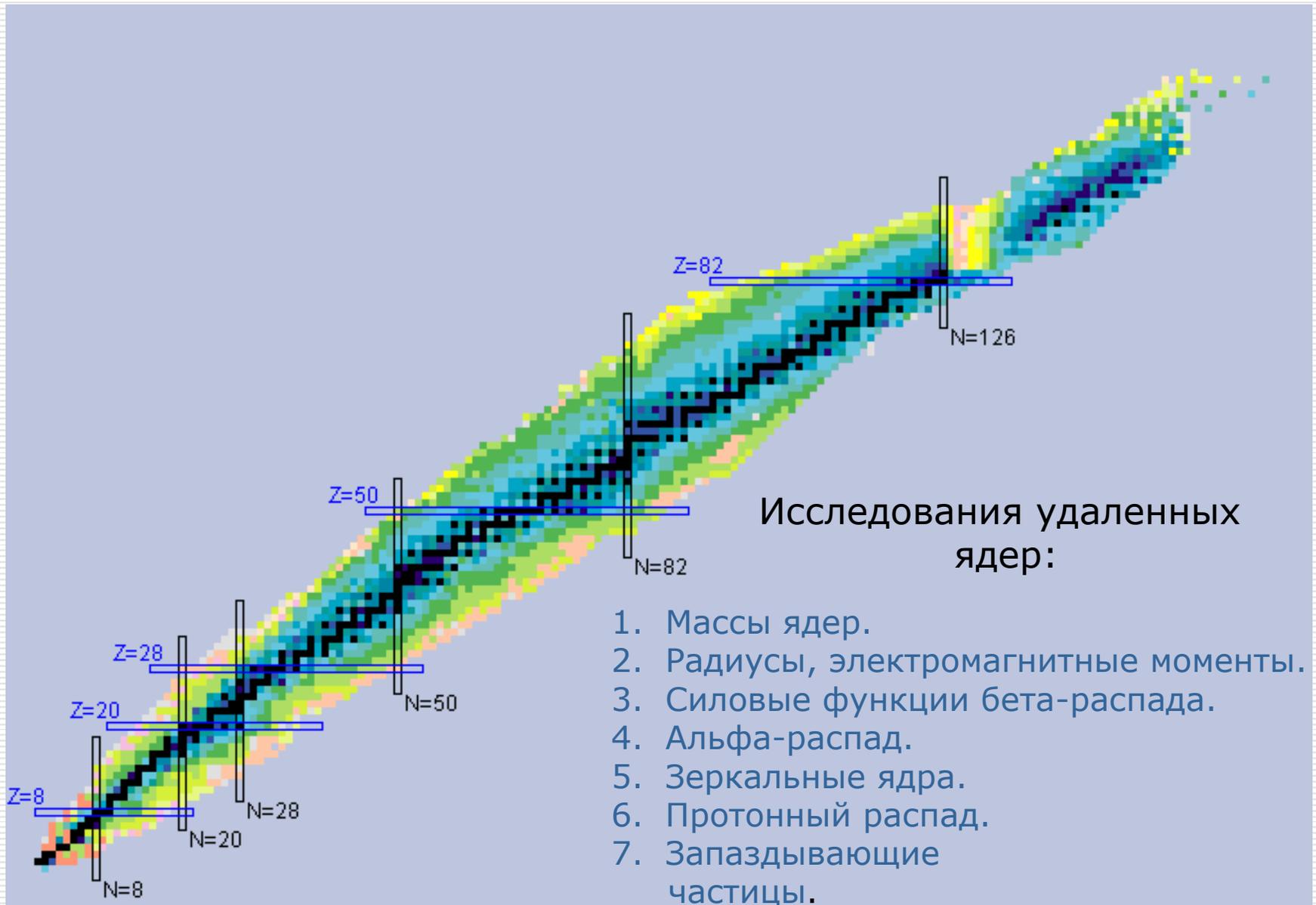
**Перспективы получения и исследования  
короткоживущих нейтроноизбыточных  
ядер на реакторе ПИК**

# Фабрики нейтронодефицитных и нейтроноизбыточных ядер, удаленных от полосы бета-стабильности

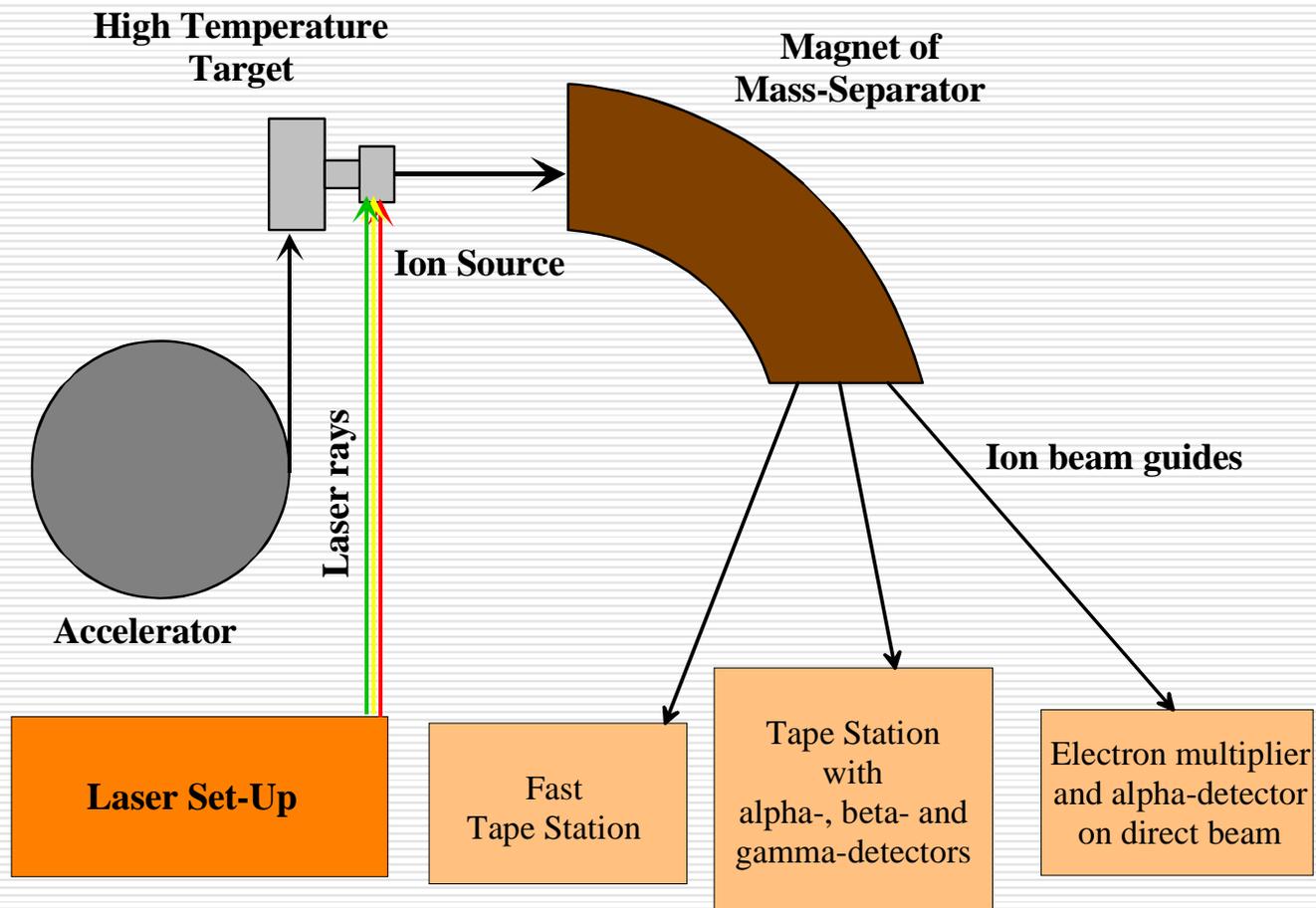
---

1. ISOLDE (CERN), протоны *1.4* ГэВ, до *3*  $\mu\text{A}$
2. ISAC (TRIUMF), протоны *0.5* ГэВ, до *100*  $\mu\text{A}$
3. ИРИС (Гатчина), протоны *1* ГэВ, до *0.3*  $\mu\text{A}$

# Карта нуклидов



# ***ISOL- система ИРИС (Исследование Радиоактивных Изотопов на Синхроциклотроне)***



## **За время работы с момента запуска установки ИРИС (1975) из мишеней из тугоплавких металлов и карбида урана – 238 получено:**

---

- более 300 ядер, 17 – идентифицировано впервые.
  - Проведены систематические исследования распадов Гамов-Теллеровских резонансов нейтронодефицитных ядер.
  - Измерены значения  $Q_{\beta}$  энергий распада более 60 ядер, для 32 -  $Q_{\beta}$  измерено впервые, что позволило определить массы большого числа чрезвычайно удаленных нуклидов.
  - В области нейтронодефицитных изотопов редкоземельных элементов впервые идентифицирован участок границы протонной устойчивости.
  - Методами резонансной ионизационной и коллинеарной спектроскопии определены изотопические изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов и электромагнитные моменты более 120 нуклидов редкоземельной области.
  - Впервые предложен и использован метод резонансной ионизационной спектроскопии в лазерном ионном источнике, позволяющий проводить исследования радиоактивных ядер, образующихся в мишени в количестве всего 100 ядер в секунду.
-

## Периодическая таблица с указанием элементов, изотопы которых производятся из УС мишеней на протонах

|          |          |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1<br>H   |          |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |          |          | 2<br>He  |
| 3<br>Li  | 4<br>Be  |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          | 5<br>B   | 6<br>C   | 7<br>N   | 8<br>O   | 9<br>F   | 10<br>Ne |
| 11<br>Na | 12<br>Mg |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          | 13<br>Al | 14<br>Si | 15<br>P  | 16<br>S  | 17<br>Cl | 18<br>Ar |
| 19<br>K  | 20<br>Ca | 21<br>Sc | 22<br>Ti  | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni | 29<br>Cu | 30<br>Zn | 31<br>Ga | 32<br>Ge | 33<br>As | 34<br>Se | 35<br>Br | 36<br>Kr |
| 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y  | 40<br>Zr  | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd | 47<br>Ag | 48<br>Cd | 49<br>In | 50<br>Sn | 51<br>Sb | 52<br>Te | 53<br>I  | 54<br>Xe |
| 55<br>Cs | 56<br>Ba | 57<br>La | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt | 79<br>Au | 80<br>Hg | 81<br>Tl | 82<br>Pb | 83<br>Bi | 84<br>Po | 85<br>At | 86<br>Rn |
| 87<br>Fr | 88<br>Ra | 89<br>Ac | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110      | 111      | 112      |          |          |          |          |          |          |

|          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 58<br>Ce | 59<br>Pr | 60<br>Nd | 61<br>Pm | 62<br>Sm | 63<br>Eu | 64<br>Gd | 65<br>Tb | 66<br>Dy | 67<br>Ho | 68<br>Er  | 69<br>Tm  | 70<br>Yb  | 71<br>Lu  |
| 90<br>Th | 91<br>Pa | 92<br>U  | 93<br>Np | 94<br>Pu | 95<br>Am | 96<br>Cm | 97<br>Bk | 98<br>Cf | 99<br>Es | 100<br>Fm | 101<br>Md | 102<br>No | 103<br>Lr |

produced from UC targets  
 can be produced from UC targets

additional research and development needed  
 cannot be produced from UC targets

## ***ISOL системы следующего поколения***

---

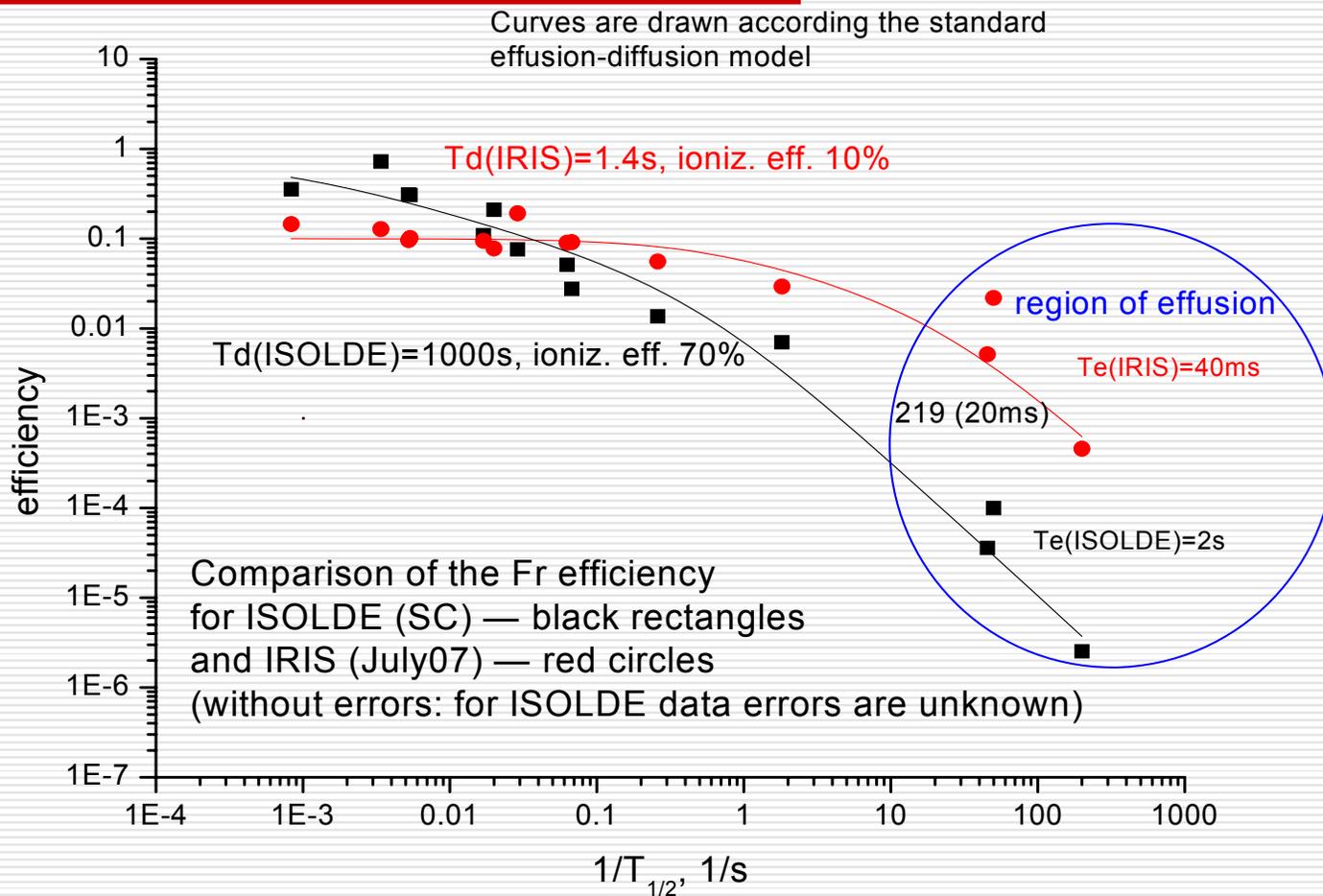
Токи первичных частиц до 5 mA

Использование нейтронных конвертеров

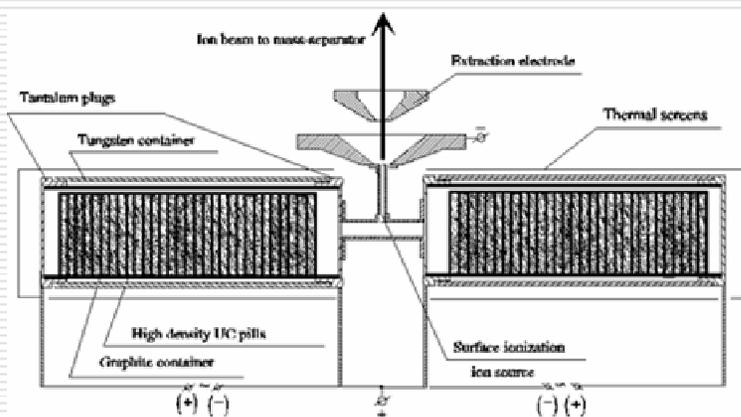
Масса УС мишенного вещества до нескольких килограммов

---

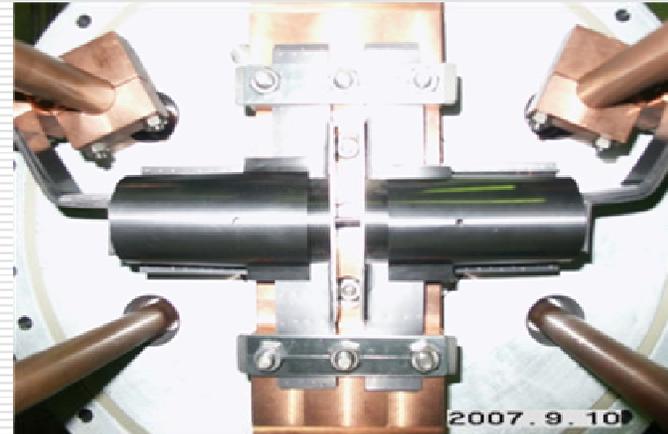
# Сравнение эффективности получения изотопов Fr с различными периодами полураспада на установках ИРИС и ISOLDE из УС мишеней с массой 5 и 55 граммов



## Big mass target

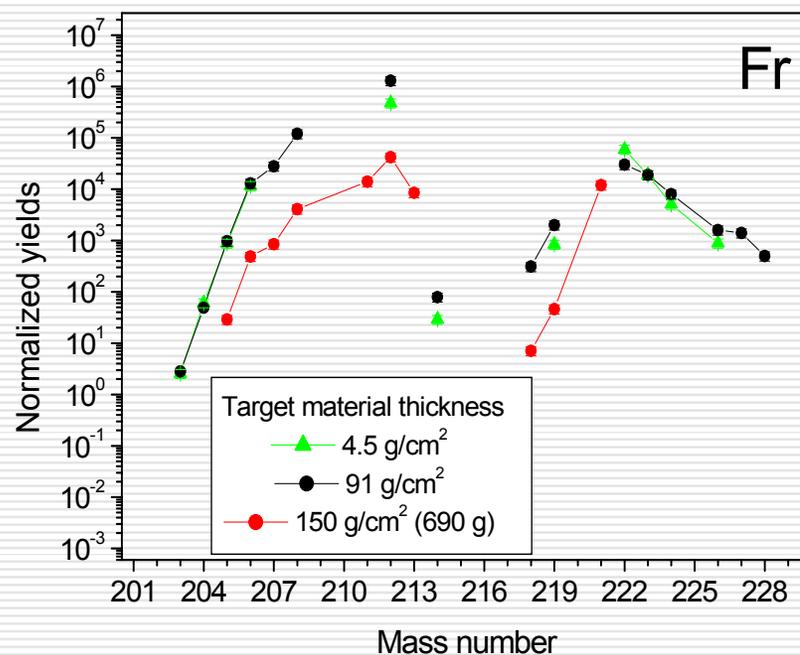
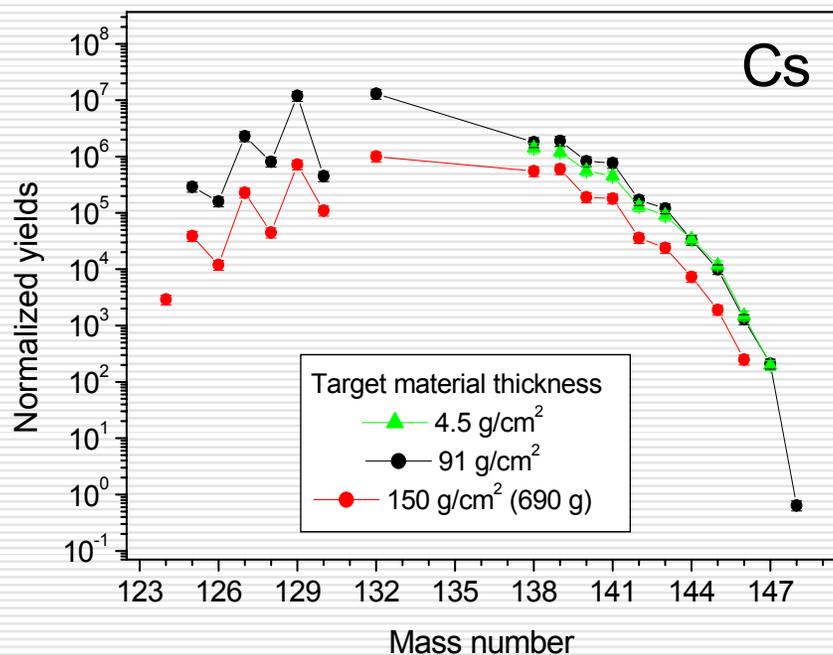


*57 pellets, 25 mm in diameter, 2 mm thickness. Grain size 5  $\mu\text{m}$ . Uranium mass 700 g. High temperature tungsten surface ionizer. The target was normalized at the test bench at  $T=1800$  °C.*

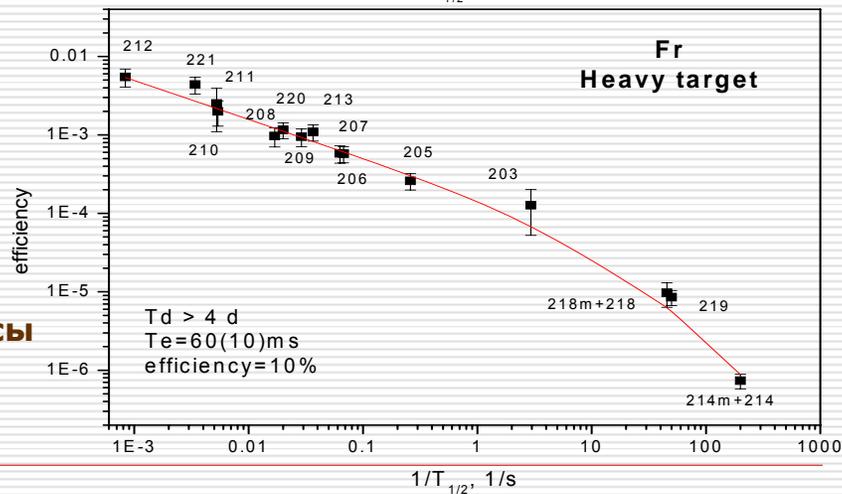
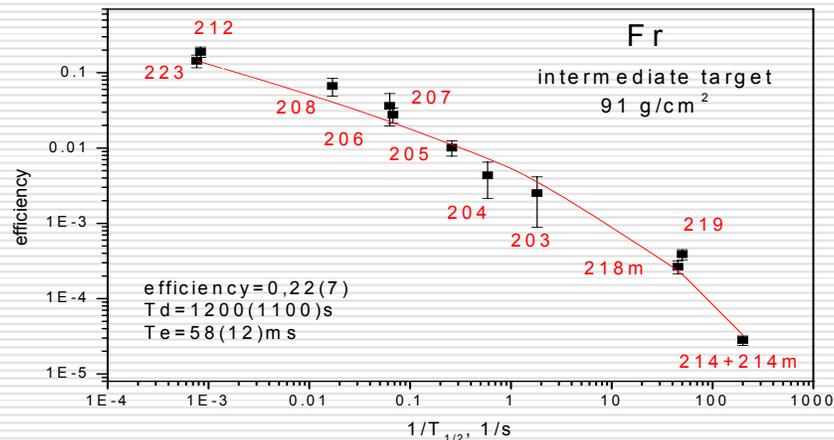
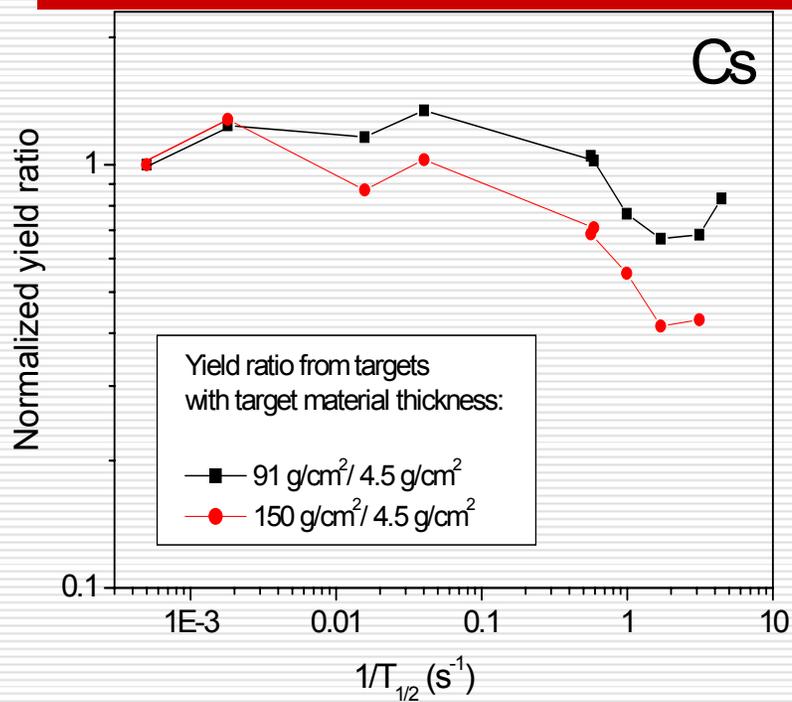


*The target unit construction allows to combine in with the electron beam-plasma ion source as well.*

# Нормированные выходы изотопов Cs и Fr из мишеней различной массы (нормировка на $1\text{ г/см}^2$ и $0.1\ \mu\text{А}$ )



# Сравнение быстродействия и эффективности мишеней с массой 93 и 690 г.



**Вывод:** при увеличении массы мишени от 4.5 до 93 г выходы Cs и Fr растут пропорционально массе мишенного вещества. При увеличении массы до 700 г рост выходов существенно уменьшается из-за значительного замедления процесса диффузии

## *ISOL установки на тепловых нейтронах*

---

OSIRIS (Studsvik, Sweden) -  $2 \times 10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>s (на мишени),  
установка закрыта в 2005

PIAFE (Grenoble, France) -  $3 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>s (на мишени), проект закрыт

MAFF (Munich, Germany) -  $3 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>s (на мишени),  
проект разрабатывается

---

# Направления исследований нейтроноизбыточных ядер на установках ИРИС и ИРИНА

---

## 1. Ядерная спектроскопия.

а. Основные свойства ядер, сильно удаленных от полосы бета-стабильности (времена жизни, типы и ветки распада и т.д.) для конструирования и описания моделей астрофизических процессов ( $r$ - и  $rp$ - процессы).

б. Проблема «сохранения магии» для ядер далеких от полосы стабильности имеет фундаментальное значение и для ядерной физики, и для астрофизики

## 2. Лазерная спектроскопия.

Измерения изотопических сдвигов и сверхтонкого расщепления атомных уровней позволяют получить такие характеристики ядер, как изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов, спины и электромагнитные моменты.

Одним из наиболее интересных объектов для лазерно-ядерных исследований является так называемый «оболочечный эффект» в среднеквадратичных зарядовых радиусах, то есть заметный скачок в ходе изотопической зависимости среднеквадратичных зарядовых радиусов при переходе через магическое число. Исчезновение такого скачка может указывать на изменение магического числа.

В этом смысле наиболее интересные объекты исследований - Sb, Sn, In, Cd, Ag с числом нейтронов близким к  $N=82$ . Важно отметить, что при этом очень важны систематические исследования изотопических изменений среднеквадратичных зарядовых радиусов, чтобы определить общие тенденции изменений основных свойств ядерной материи.

На данный момент недостаточно исследован оболочечный эффект в окрестности  $N=50$ . Здесь наибольший интерес представляют изотопические цепочки Ge, Ga, Zn, Cu, и Ni. Эти нуклиды вызывают дополнительный интерес, как уникальные объекты для исследований поведения изотопической зависимости среднеквадратичных зарядовых радиусов между двумя соседними подоболочками.

Для получения экзотических нейтроно-избыточных ядер предлагается организовать ISOL установку на пучке тепловых нейтронов реактора «ПИК». Такая система могла бы обеспечить эффективное получение интенсивных ионных пучков широкого круга нейтроноизбыточных ядер для ядерно-спектроскопических и лазерно-спектроскопических исследований. В частности, мишень из карбида урана-235 массой 6 г, установленная на пучке нейтронов с потоком  $10^{13}$  н/см<sup>2</sup> сек, могла бы обеспечить получение изотопа  $^{132}\text{Sn}$  с интенсивностью порядка  $10^{10}$  ат/сек, что на несколько порядков превышает возможности установки ИРИС на синхроциклотроне ПИЯФ.

---

# Предварительная схема ISOL установки ИРИНа (Исследование Радиоактивных Изотопов на НейтронАх) на пучке реактора ПИК.

$$\sigma_{\text{fiss}}(n_{\text{he}} + {}^{238}\text{U}) \approx 1\text{b}$$

$$\sigma_{\text{fiss}}(n_{\text{th}} + {}^{235}\text{U}) \approx 500\text{b}$$



Канал ГЭК-5 :  $\Phi_0 = 0.2 \times 10^{15} \text{ н/см}^2 \text{сек}$

Предполагаемый используемый

поток:  $\Phi_1 = 10^{12} - 10^{14} \text{ н/см}^2 \text{сек}$

К экспериментальным  
установкам

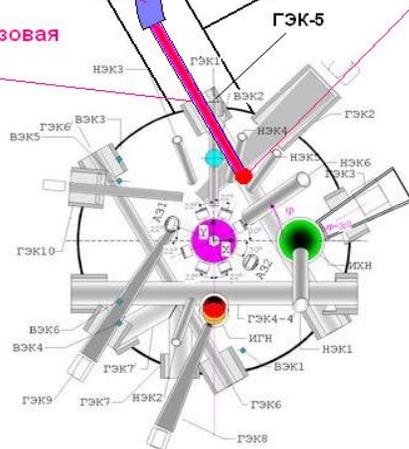
Камера разводки  
ионных пучков

Магнит  
масс-сепаратора

Поворотная магнитная  
или электростатическая  
система

Мишень и ионный  
источник

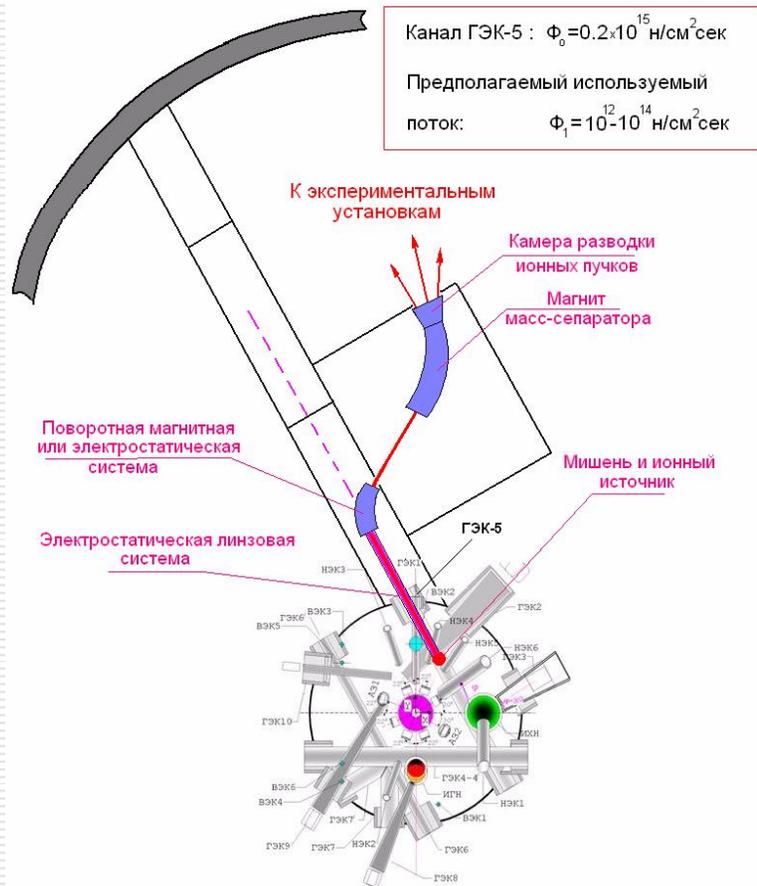
Электростатическая линзовая  
система



В мишени из 6 г  ${}^{235}\text{U}$   
при потоке  $10^{13} \text{ н/см}^2/\text{с}$   
образуется  $\approx 10^{12}$  атомов  ${}^{132}\text{Sn}$

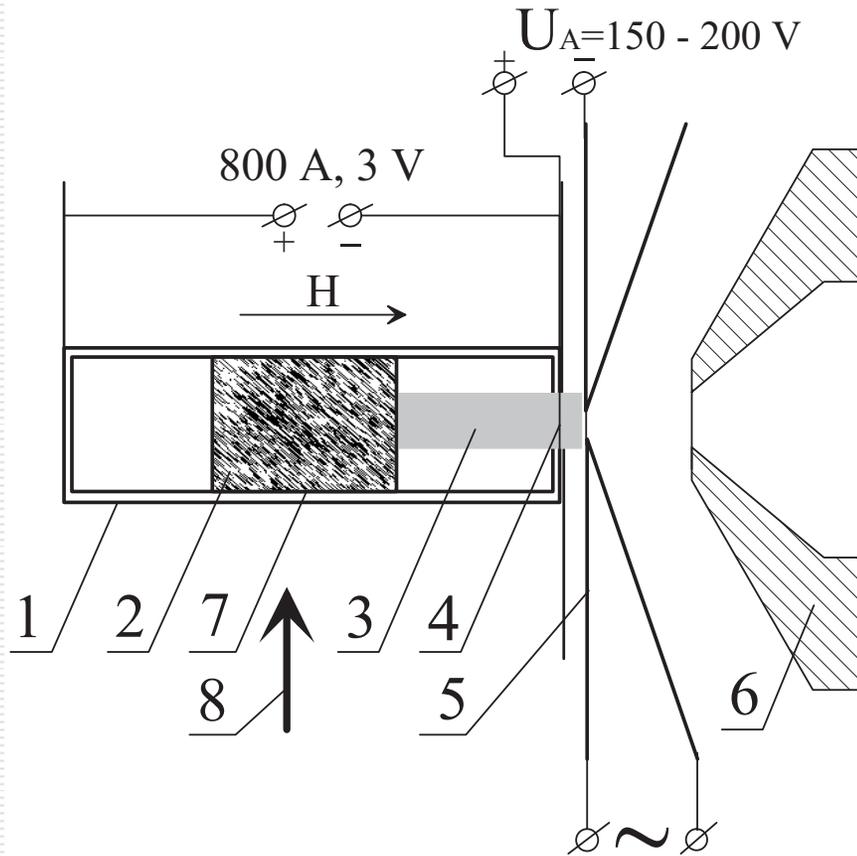
При протонном токе на установке  
EURISOL 5mA в мишени  ${}^{238}\text{U}$   
толщиной  $200 \text{ г/см}^2$  в прямой реакции  
образуется также  $\approx 10^{12}$  атомов  ${}^{132}\text{Sn}$ ,  
При работе с Hg-конвертером  
оценки для EURISOL проекта:  
 $\approx 10^{12}$  атомов  ${}^{132}\text{Sn}$  в мишени 2 кг  ${}^{238}\text{U}$ ,  
Для проекта SPES  
(1mA, 100MeV p, Be-конвертер):  
 $\approx 10^{11}$  атомов  ${}^{132}\text{Sn}$  в мишени 2 кг  ${}^{238}\text{U}$ ,  
при этом скорость выделения из  
тяжелой мишени на порядки  
хуже

# Расчетные выходы масс-сепаратора ИРИНа (мишень – 6 г $^{235}\text{U}$ , нейтронный поток – $10^{13}$ н/см<sup>2</sup>сек)



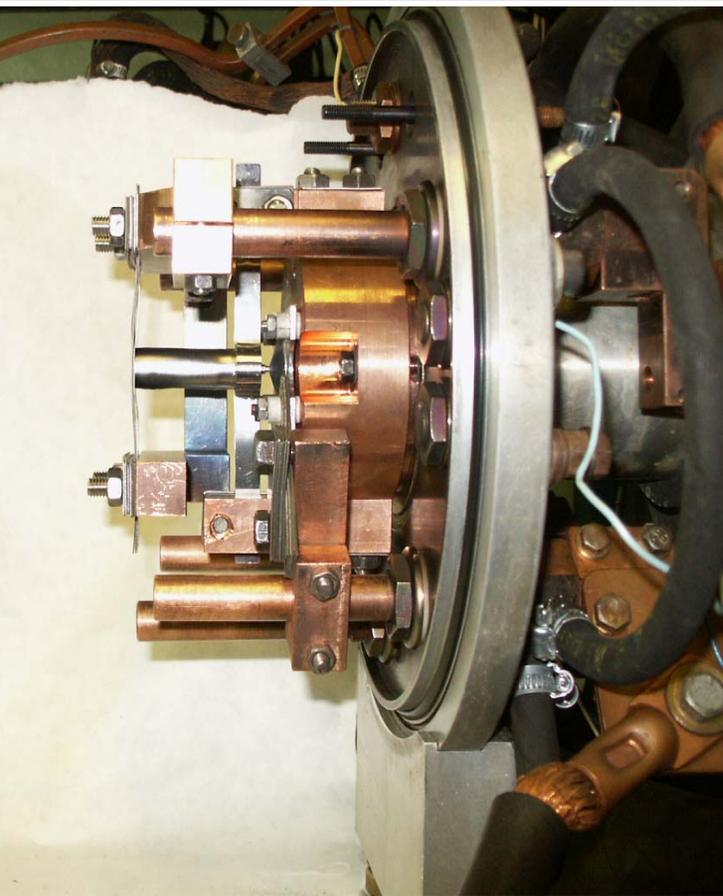
|                   | ИРИНа              | ISOLDE            |
|-------------------|--------------------|-------------------|
| $^{77}\text{Cu}$  | $1 \times 10^6$    | $2 \times 10^3$   |
| $^{78}\text{Cu}$  | $1 \times 10^5$    | $2 \times 10^2$   |
| $^{78}\text{Zn}$  | $1 \times 10^7$    | $4 \times 10^5$   |
| $^{80}\text{Ga}$  | $1 \times 10^8$    | $3 \times 10^5$   |
| $^{121}\text{Ag}$ | $1 \times 10^9$    | $3 \times 10^7$   |
| $^{129}\text{Ag}$ | $1 \times 10^1$    | 1                 |
| $^{131}\text{Cd}$ | $1 \times 10^2$    | $1 \times 10^3$   |
| $^{132}\text{Cd}$ | <1                 | $1 \times 10^1$   |
| $^{132}\text{In}$ | $1 \times 10^5$    | $1 \times 10^5$   |
| $^{134}\text{In}$ | $4.5 \times 10^2$  | $1 \times 10^3$   |
| $^{132}\text{Sn}$ | $1 \times 10^{10}$ | $2 \times 10^8$   |
| $^{135}\text{Sn}$ | $1 \times 10^6$    | $1 \times 10^5$   |
| $^{147}\text{Cs}$ | $10^8$             | $1.5 \times 10^6$ |
| $^{150}\text{Cs}$ | $10^3$             | $10^2$            |
| $^{146}\text{Ba}$ | $10^9$             | $2 \times 10^5$   |

## Схема мишенно-ионного устройства для установки ИРИНа



1. Tungsten container.
2. Target material.
3. Electron beam.
4. Grid.
5. Electron emitting cathode.
6. Extraction electrode.
7. Graphite container.
8. Proton beam.

## Прототип высокотемпературного мишенно-ионного устройства для масс-сепаратора ИРИНа



Масса мишенного вещества **5 – 10 г**

Внутренний контейнер из карбида Ta+Zr с температурой плавления более 4000 °С

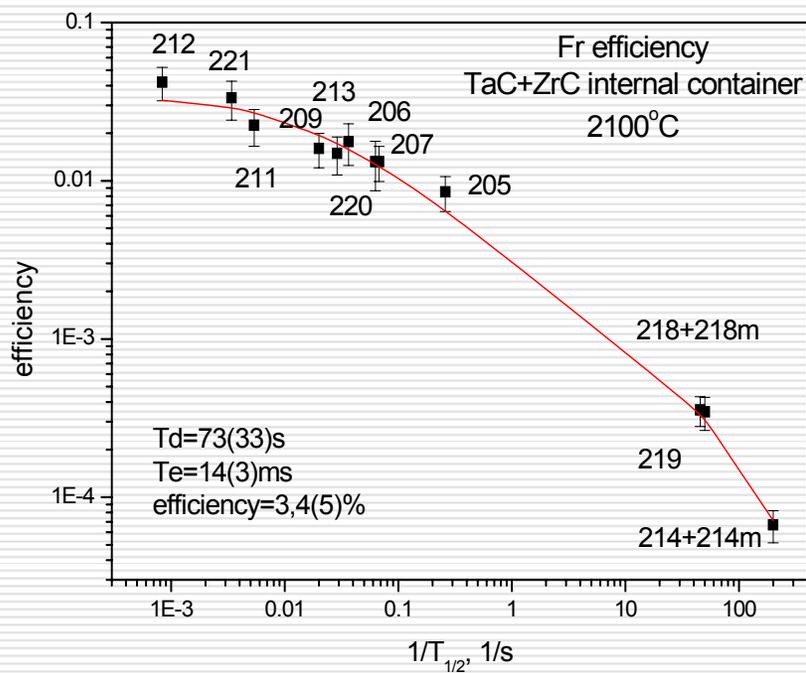
Рабочая температура **2300 – 2500 °С**

Рассеиваемая мощность до **2-3 кВт**

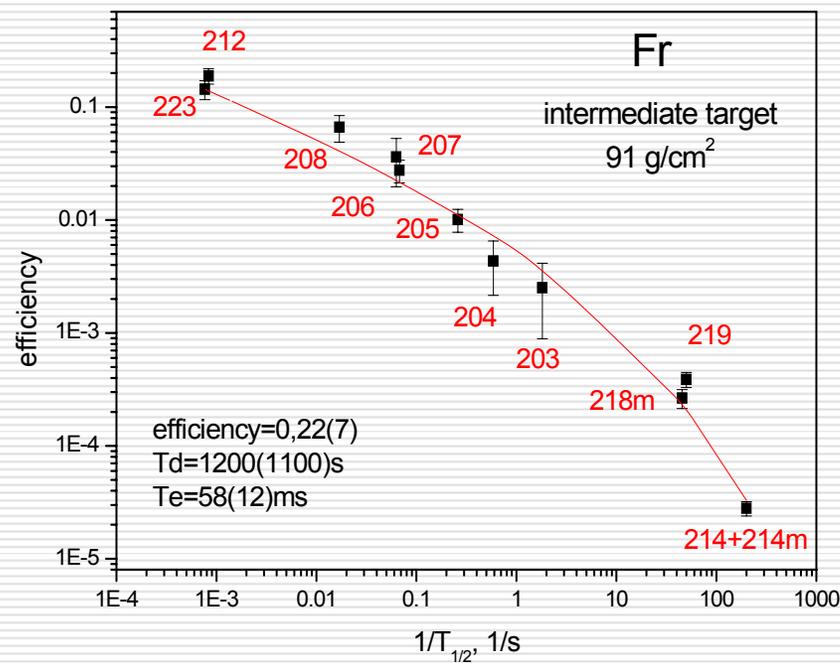
Из <sup>238</sup>U мишени на протонном пучке получены высокие выходы короткоживущих изотопов Cs и Fr с периодами полураспада до нескольких миллисекунд

# Эффективность прототипа мишенно-ионного устройства для масс-сепаратора ИРИНа

Мишень для м-с ИРИНа  $T_m = 2100\text{ }^\circ\text{C}$



Стандартная мишень  $T_m = 2000\text{ }^\circ\text{C}$



## Периодическая таблица с указанием элементов, изотопы которых получают из УС мишеней на нейтронах

|          |          |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1<br>H   |          |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |          |          | 2<br>He  |
| 3<br>Li  | 4<br>Be  |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          | 5<br>B   | 6<br>C   | 7<br>N   | 8<br>O   | 9<br>F   | 10<br>Ne |
| 11<br>Na | 12<br>Mg |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          | 13<br>Al | 14<br>Si | 15<br>P  | 16<br>S  | 17<br>Cl | 18<br>Ar |
| 19<br>K  | 20<br>Ca | 21<br>Sc | 22<br>Ti  | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni | 29<br>Cu | 30<br>Zn | 31<br>Ga | 32<br>Ge | 33<br>As | 34<br>Se | 35<br>Br | 36<br>Kr |
| 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y  | 40<br>Zr  | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd | 47<br>Ag | 48<br>Cd | 49<br>In | 50<br>Sn | 51<br>Sb | 52<br>Te | 53<br>I  | 54<br>Xe |
| 55<br>Cs | 56<br>Ba | 57<br>La |           |           |           |           |           |           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|          |          |          | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110      | 111      | 112      |          |          |          |          |          |          |

|          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |  |  |  |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|--|--|
| 58<br>Ce | 59<br>Pr | 60<br>Nd | 61<br>Pm | 62<br>Sm | 63<br>Eu |          |          |          |          |           |           |           |           |  |  |  |
| 90<br>Th | 91       | 92<br>U  | 93<br>Np | 94<br>Pu | 95<br>Am | 96<br>Cm | 97<br>Bk | 98<br>Cf | 99<br>Es | 100<br>Fm | 101<br>Md | 102<br>No | 103<br>Lr |  |  |  |

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> produced from UC targets</p> <p><span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #FFFF00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> can be produced from UC targets</p> | <p><span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #ADD8E6; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> additional research and development needed</p> <p><span style="display: inline-block; width: 20px; height: 10px; background-color: #FFFFFF; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> cannot be produced from UC targets</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Расчетные выходы ISOL системы PIAFE  
 на реакторе в Гренобле (мишень - 4 г  $^{235}\text{U}$   
 нейтронный поток -  $3 \times 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>сек)

PIAFE yields

Ion beam intensities  
 after mass separation  
 (ions per s)

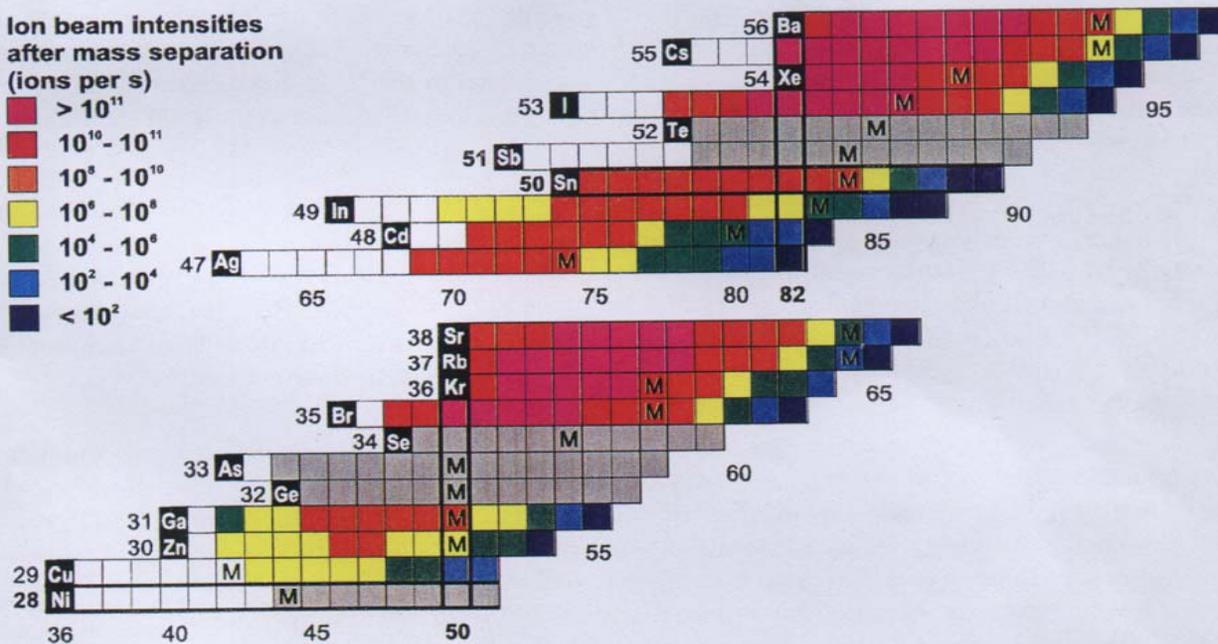
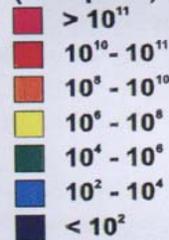


Figure 15: The figure shows estimated ion yields of PIAFE after mass separation. Isotopes where too few information was available for a reliable yield estimate are marked in grey. The black boxes indicate the most neutron rich stable isotopes. The heaviest isotopes, for which the mass was experimentally determined [9] are marked by a "M".

## Медицинские пучки высокой чистоты

---

ISOL системы следующего поколения также имеют специально оборудованный “медицинский” пучок для получения моно-изотопных источников высокой чистоты для диагностики и лечения различных заболеваний. На медицинских пучках крупных ISOL систем планируется построение центров по on-line использованию радиоактивных изотопов  $^{131}\text{I}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{153}\text{Sm}$  и других для диагностики и лечения раковых заболеваний, а также для дальнейших исследований по значительному расширению круга нуклидов, используемых для этих целей. Например, кроме  $\beta^-$ -излучателя  $^{153}\text{Sm}$ , используемого для лучевой бета-терапии, станут доступны другие  $\beta^-$ -излучатели  $^{143}\text{Pr}$ ,  $^{149}\text{Pm}$  и  $^{156}\text{Eu}$ . Получение и использование изотопов с различными периодами полураспада позволит изучать соотношение между периодами полураспада используемых изотопов и соответственным биологическим откликом.

---

# Карта нуклидов

