

JINR

114 Flerovium

FLND

Dubna



JOINT INSTITUTE
FOR NUCLEAR RESEARCH

**ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Вторичные пучки (пучки радиоактивных изотопов)



**МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА
УСКОРИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ:
ЦИКЛОТРОНЫ**

Крупко Сергей Анатольевич
Группа АКУЛИНА
ЛЯР ОИЯИ
krupko@jinr.ru

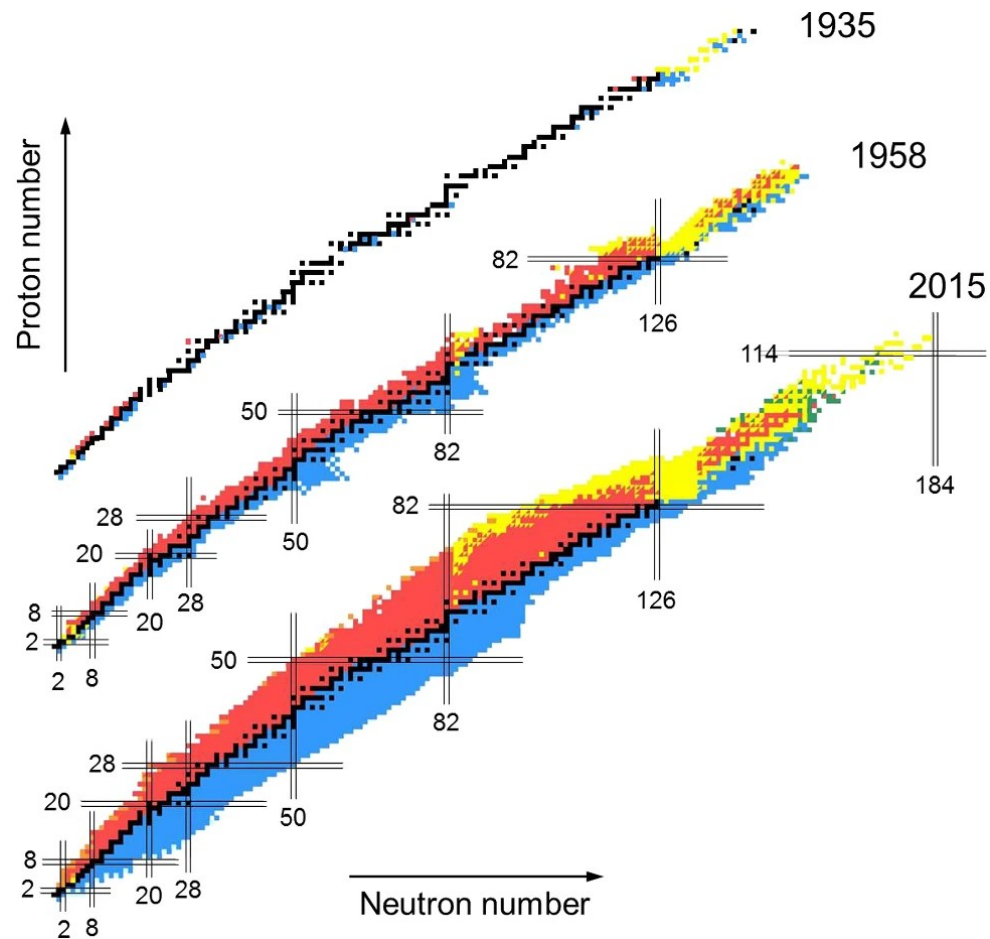
25 – 30 АВГУСТА 2024

N/Z — диаграмма атомных ядер (Таблица изотопов)

- Стабильных изотопов: 254
- Изотопов в природе: 339
- Открыто изотопов: ~4000 в 2015
- Могут существовать еще 2000-3000 изотопов

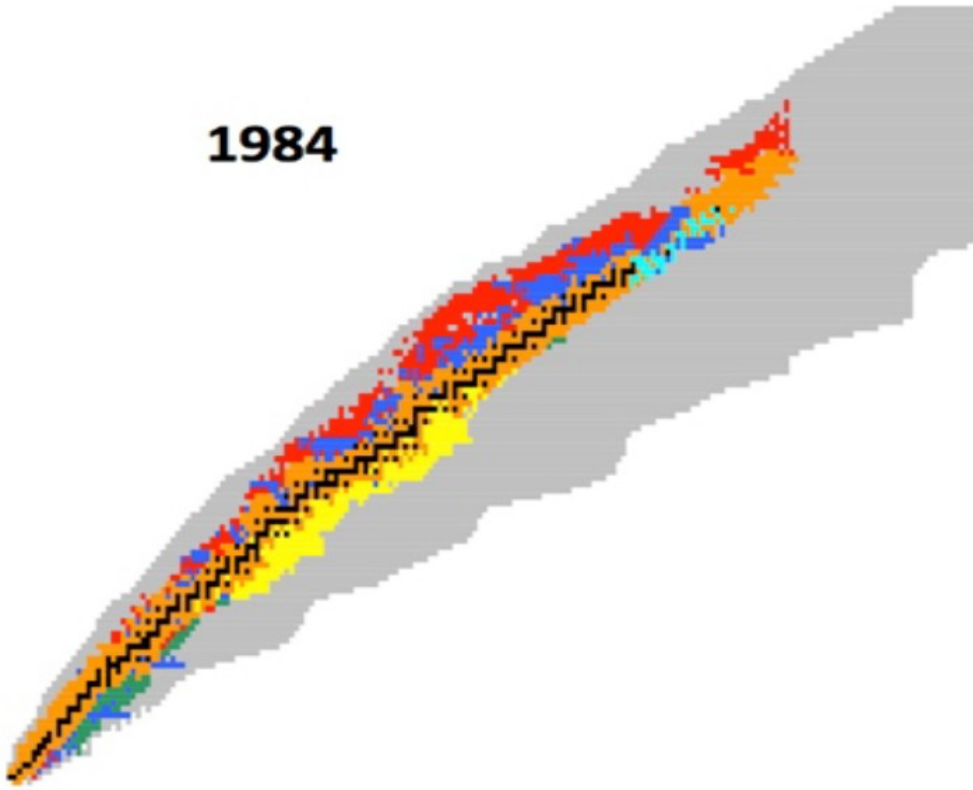
Пучки радиоактивных изотопов состоят из продуктов реакций пучка с материалом производящей мишени (вторичные пучки)

Радиоактивность — свойство атома, время жизни должно быть больше времени захвата электрона $>10^{-15}$ с

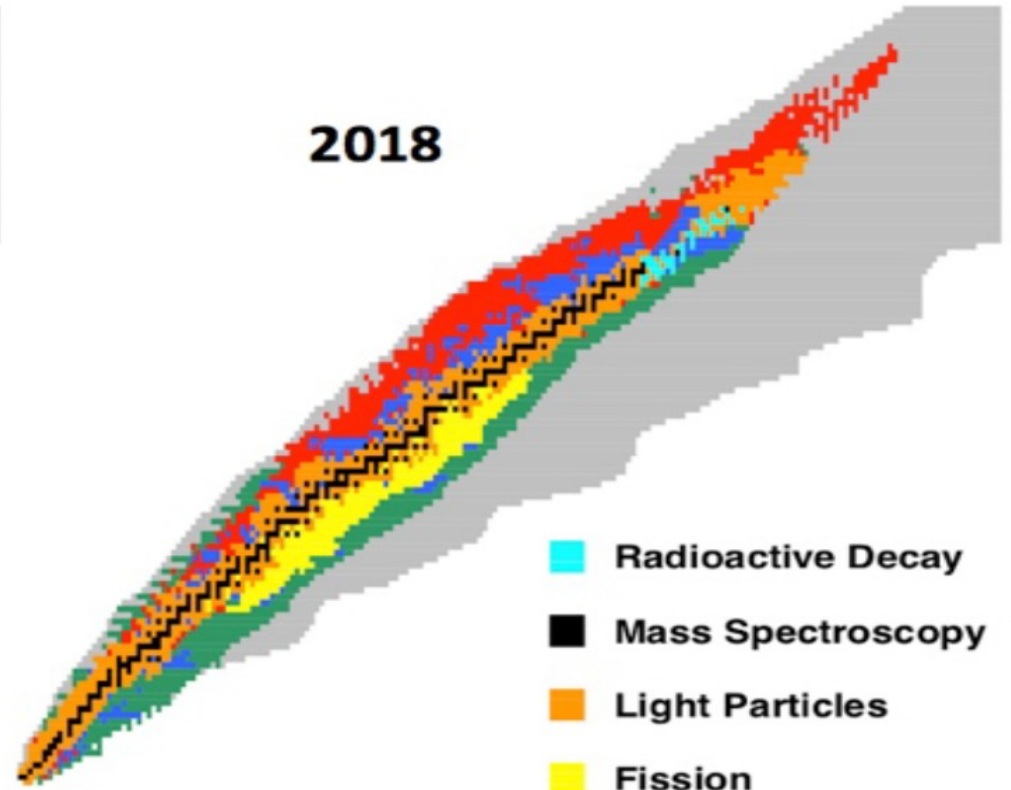


Методы синтеза изотопов

1984



2018



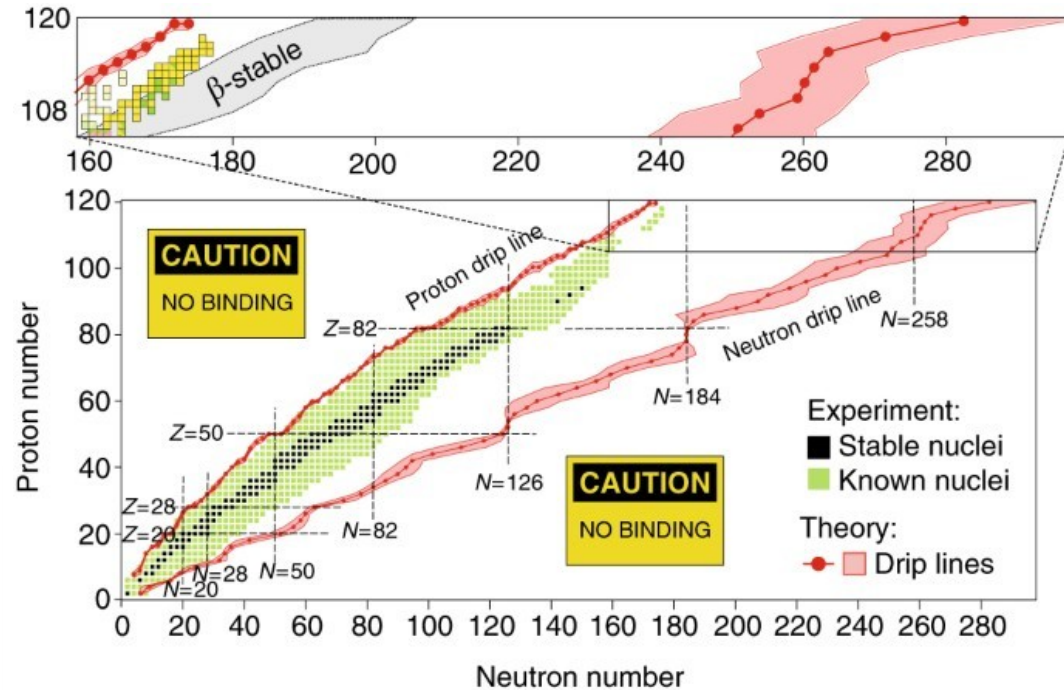
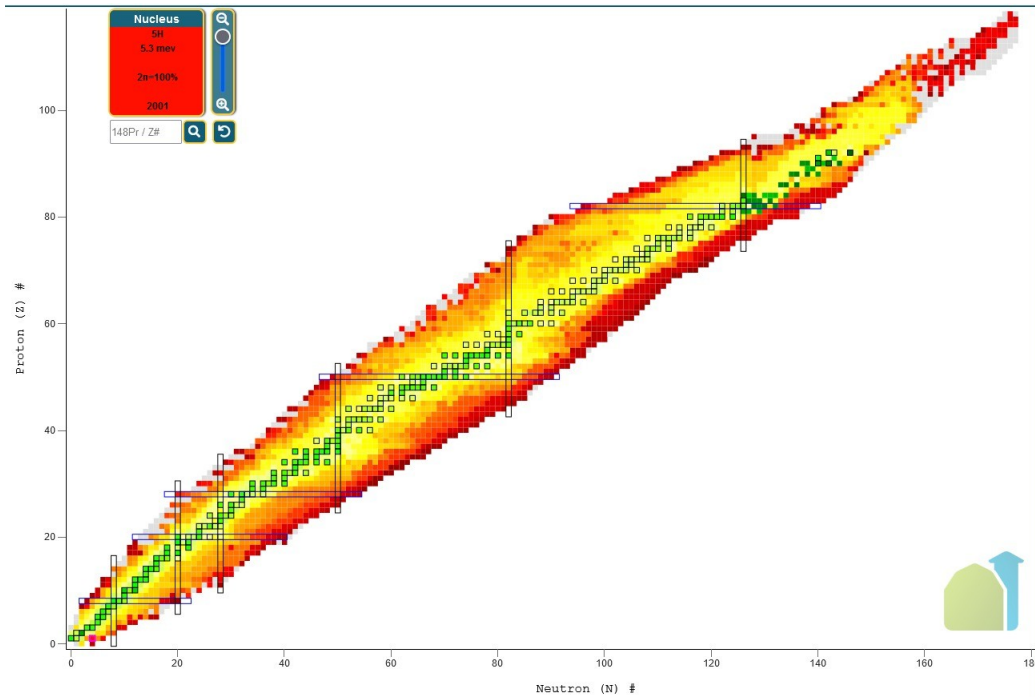
- Radioactive Decay
- Mass Spectroscopy
- Light Particles
- Fission
- Fusion/Transfer
- Spallation
- Projectile Fragmentation/Deep Inelastic

M. Thoennessen
MSU/NSCL - 2018

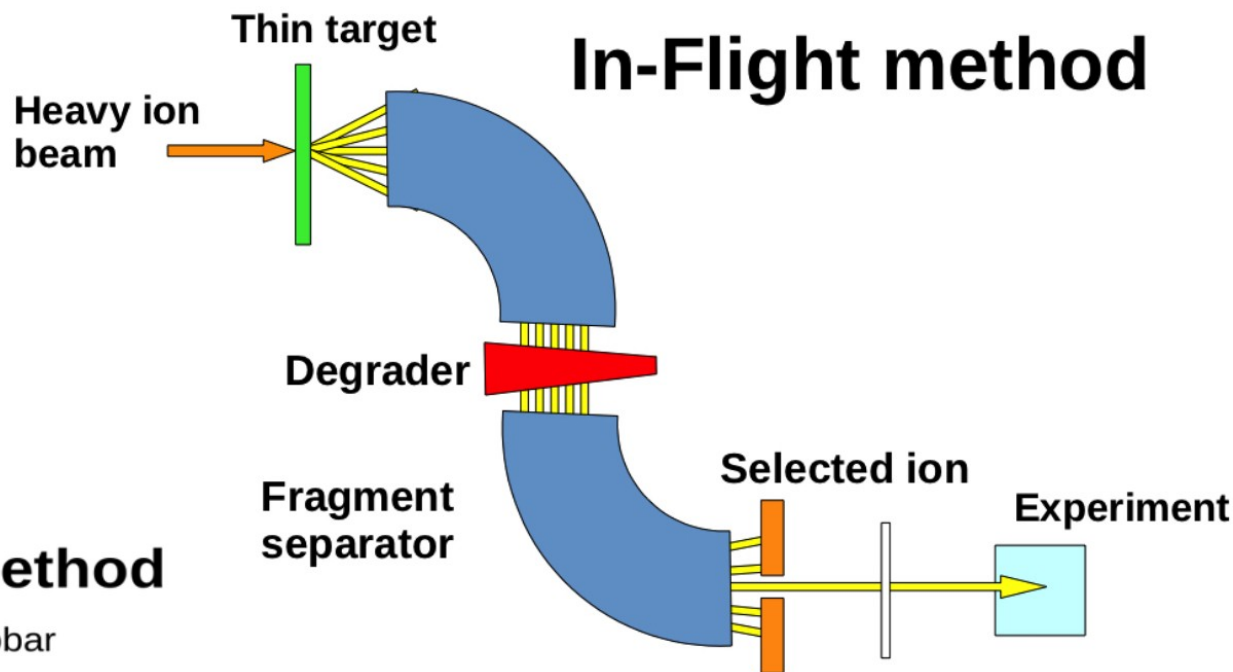
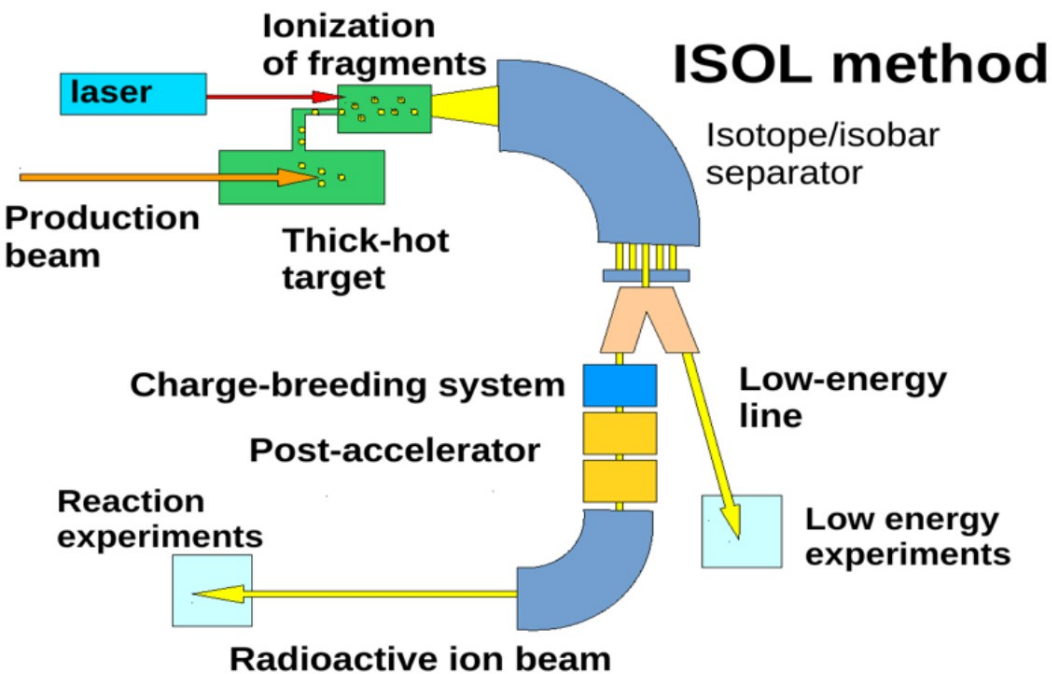


Время жизни и границы применения

- > недели — возможно накопление и сепарация изотопов химическими и механическими методами
- > секунды — метод активационного анализа
- > 0,1 с — возможно переускорение
- > 0,5 мкс — возможно получение на фрагмент-сепараторе
- < 0,5 мкс (включая нестабильные ядра) — получение в реакциях со вторичными пучками и регистрация по продуктам распада



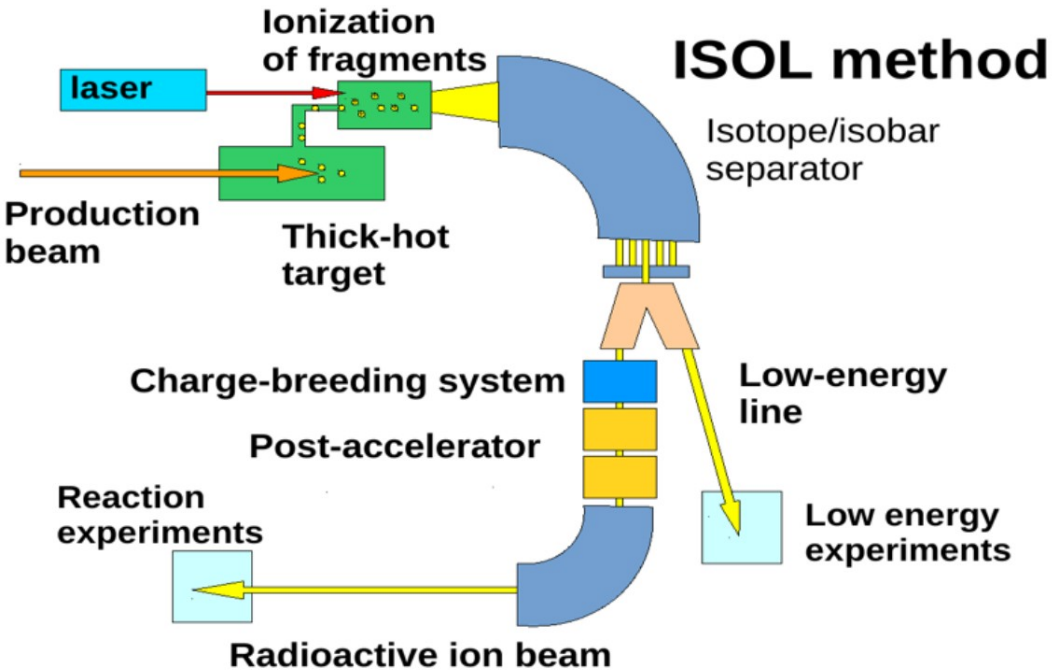
Сравнение методов получения



Разница в остановке или сохранении скорости продуктов реакции на мишени, а также в необходимости переускорения

Метод ISOL (ISOLDE, TRIUMF, SPIRAL₂, LNS, DRIBs)

Толстая мишень → Экстракция → Переускорение



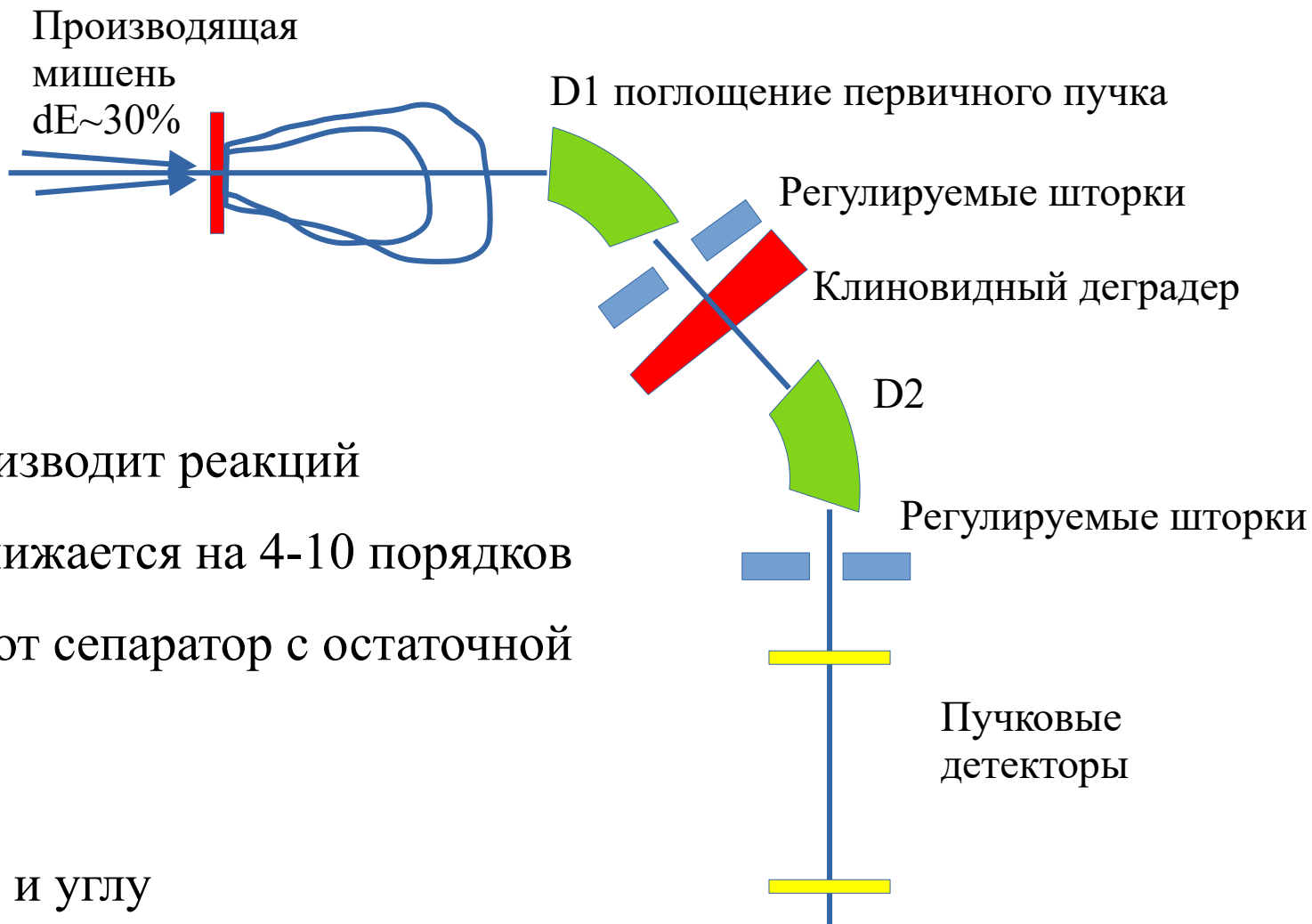
REX-ISOLDE (CERN) $E = 3$ МэВ/нуклон >100
изотопов / 30 элементов

- + Большая вероятность ядерного взаимодействия в мишени
- + Высокие интенсивности
- + Чистый и прецизионный переускоренный пучок
- + Не нужен качественный или изотопный пучок
- Извлечение продуктов из мишени
- Ионизация
- Долгий транспорт
- Химическая избирательность

Не эффективен при временах жизни <200 мкс

Метод «на лету» («in-flight») GSI, RIKEN, GANIL, MSU, ЛЯР

- ✓ Предел времени жизни < 100 нс
- ✓ Нет химической избирательности
- ✓ Относительно дешево
- × $> 99\%$ пучка не производит реакций
- × Интенсивность понижается на 4-10 порядков
- × Продукты пролетают сепаратор с остаточной скоростью
- × Наличие примесей
- × Разброс по энергии и углу



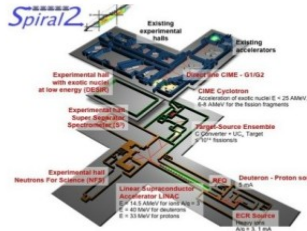
Детектирование частиц вторичного пучка

- Высокая загрузка до 10^6 частиц в секунду
- Широкий диапазон для регистрации всех примесных изотопов при невысоких искажениях вторичного пучка
- Пособытийная регистрация (Event-by-Event)
- Надежная идентификация и отбраковка двух частиц в банче
- Траектория падения на физическую мишень
- Прецизионное измерение скорости
- Радиационная и термическая стойкость

Big, bigger, the biggest

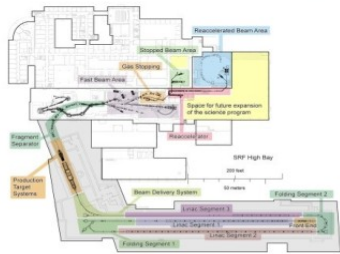
Huge increase in the scale of modern and prospective RIB facilities:
Price tag 1-2 G€

Scale increase – (i) RIB production increase and (ii) universality of RIB facility

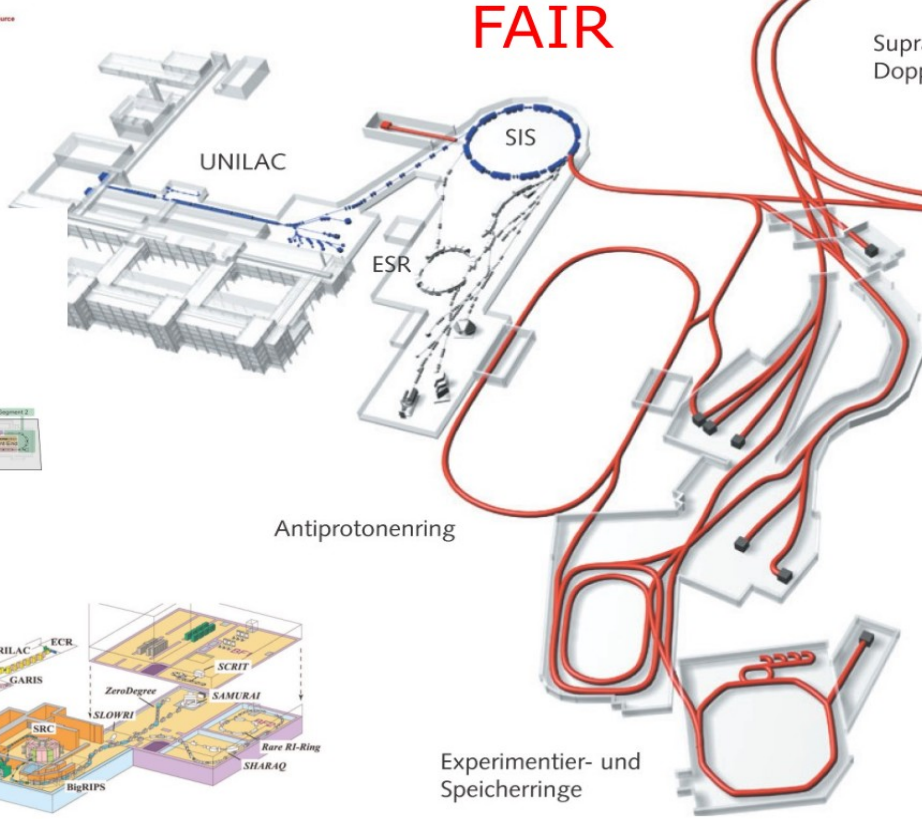
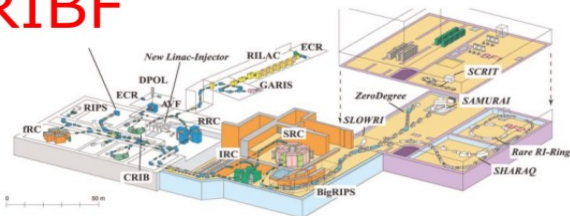


SPIRAL 2

FRIB



RIBF



FAIR

Supraleitender Doppelringbeschleuniger

U400M hall



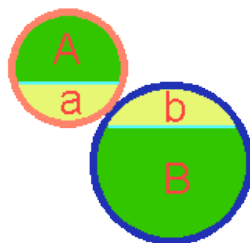
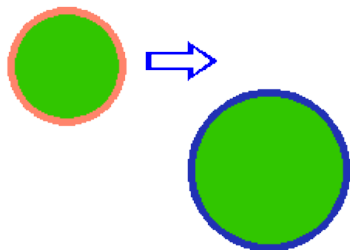
Is it possible to have world competitive RIB program with modest investment scale?

100m

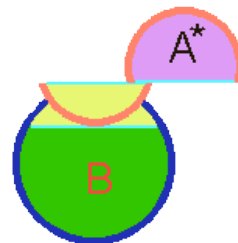
Experimentier- und Speicherring

Образование вторичных ядер: фрагментация

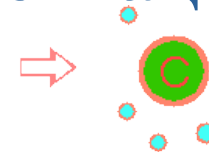
Пучок
тяжелых
ионов



1



2



3

1 Abrasion

Removal of the part "a"
(statistics)

Gaussian

2 Friction - loss of kinetic energy

Transformation into the
internal degrees of freedom.
Exchange of nucleons

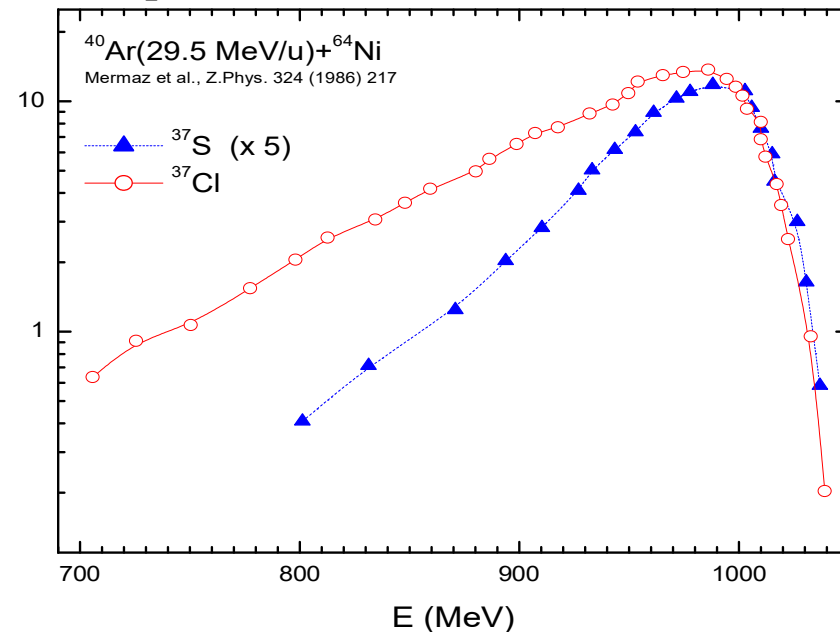
Exponential
attenuation

3 Ablation

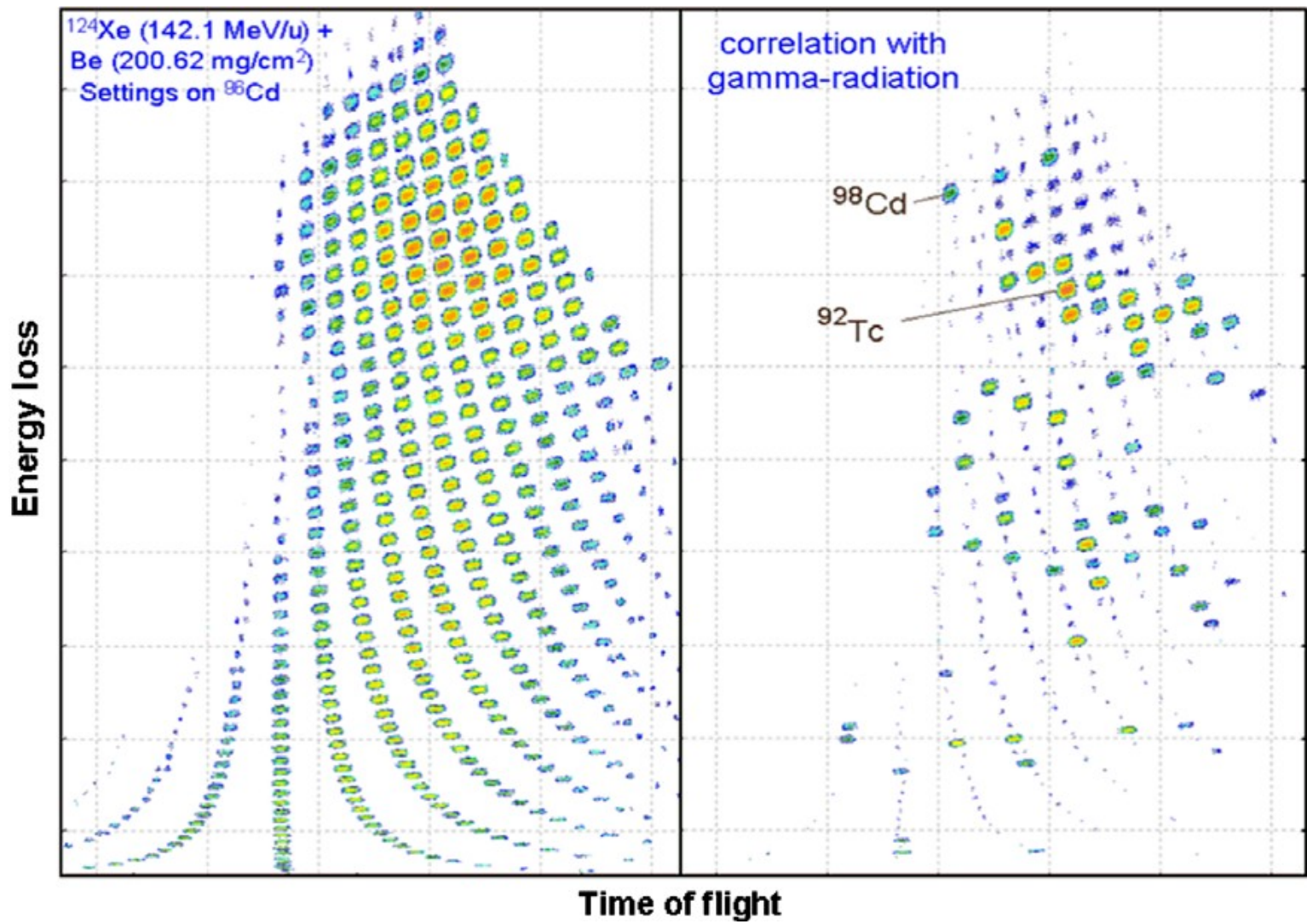
light nuclei emission,
gamma-emission

Broadening

Распределение продольного импульса
вторичного изотопа



Идентификационный плот продуктов реакции $^{124}\text{Xe} + \text{Be}$



Основной метод сепарации на ленту

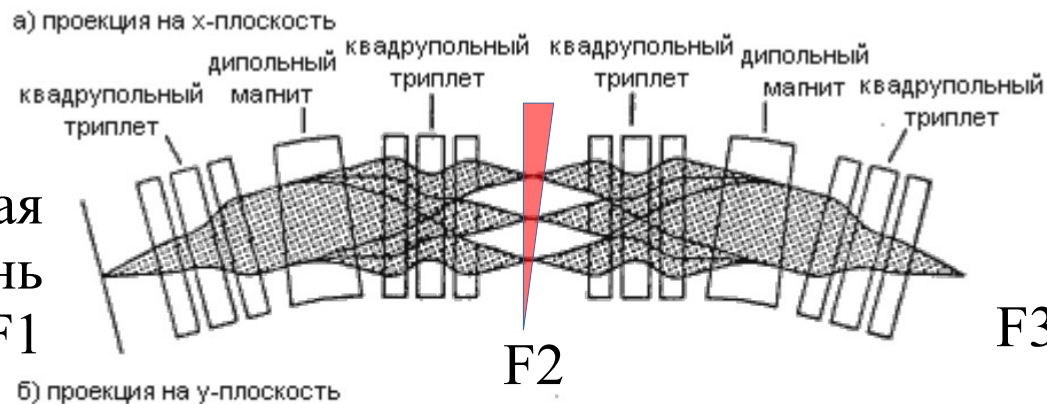
$V\rho - \Delta E - V\rho$

$$\frac{Av}{Z}$$

$$\frac{A^3}{Z^2}$$

$$\frac{Av'}{Z}$$

Производящая
мишень
F1

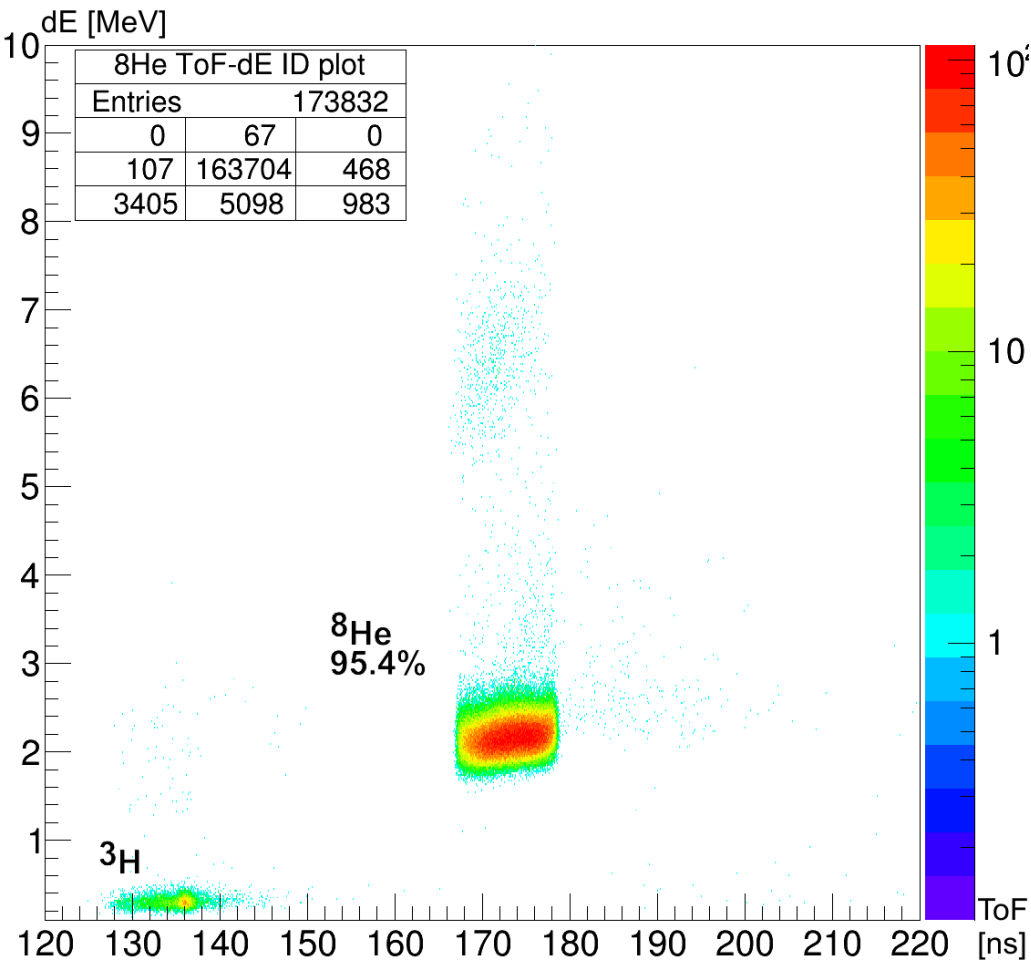


F3 положение по
горизонту $\sim \frac{A^{5/2}}{Z^{3/2}}$

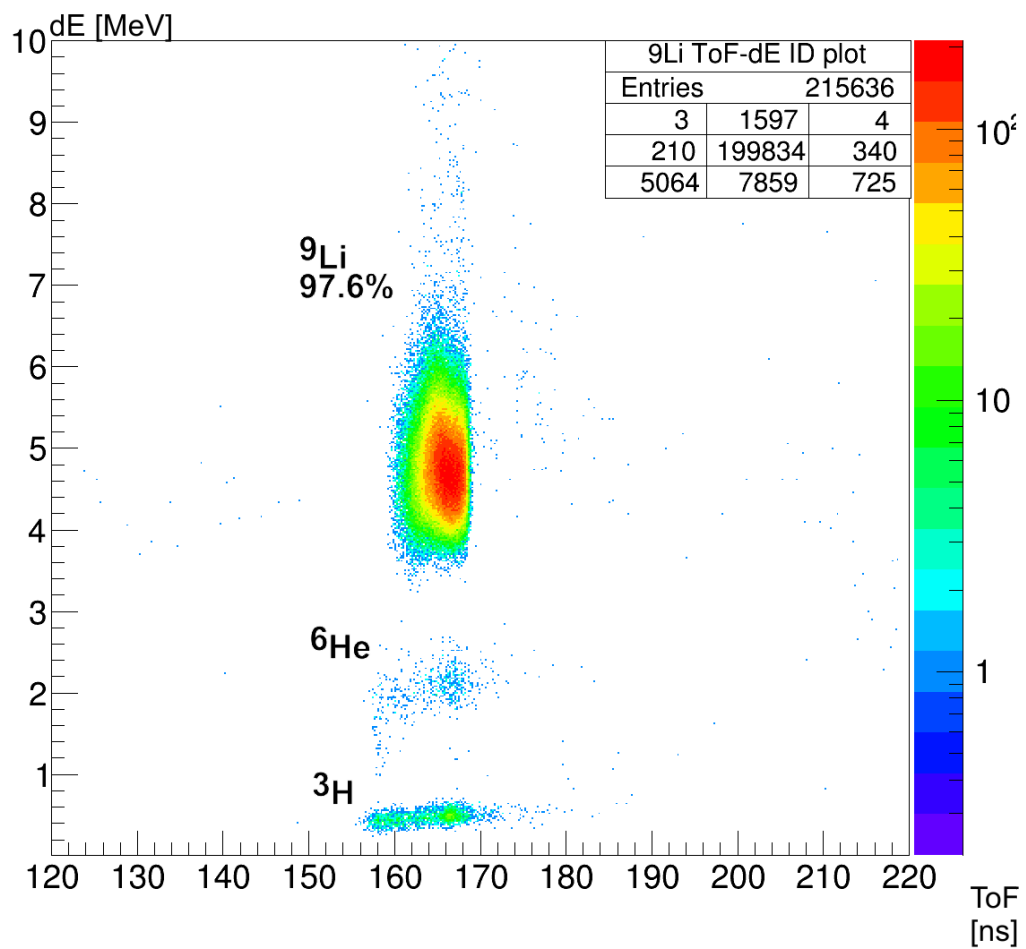
Рис. 3.5. Ахроматическая ионно-оптическая система, состоящая из двух дипольных магнитов и квадруольных триплетов

$^{11}\text{B}(33.4\text{МэВ/н})+\text{Be}(1000\text{u})\rightarrow\text{Клин Be}(1000\text{u})$

ID plot $E=27,4$ МэВ/н



ID plot; $E=31,0$ МэВ/н; $\Delta P\pm 3.25\%$

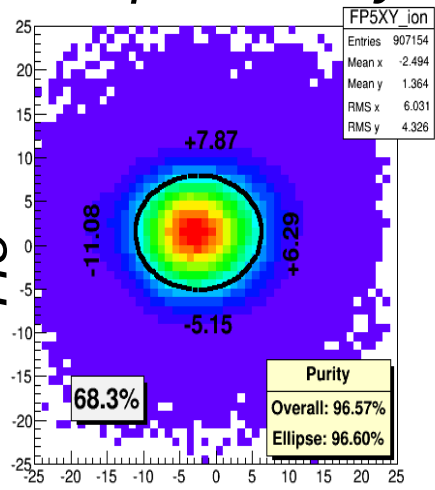


$^{11}\text{B}(33.4\text{МэВ/н}) + \text{Ве}(1000\text{и}) \rightarrow \text{Клин Ве}(1085\text{и}(\text{эфф})) \rightarrow \text{}^8\text{He}(27,4\text{МэВ/н})$

Эксперим. Фокус F5

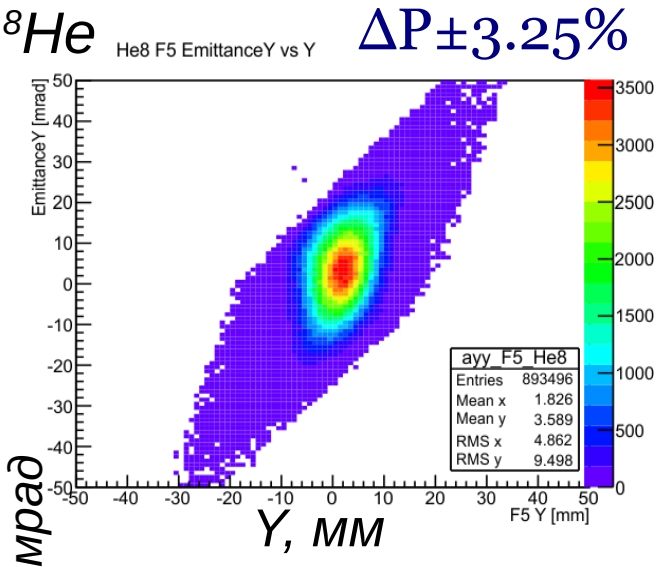
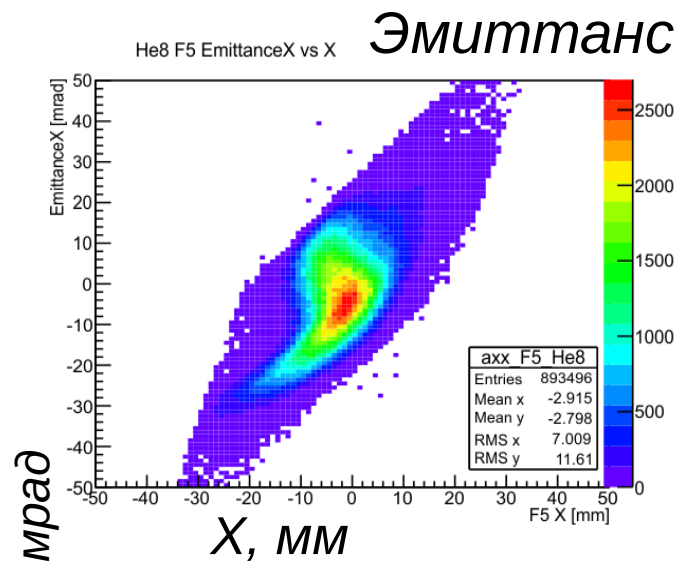
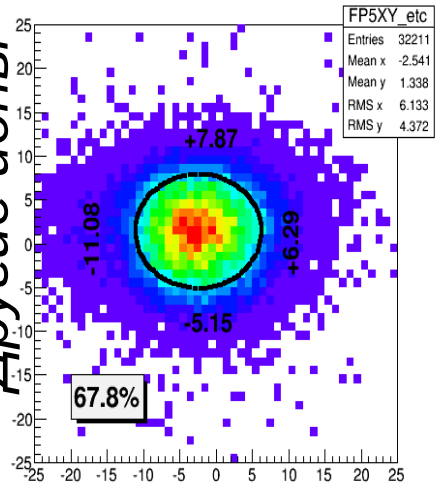
Эмиттанс ^8He $\Delta P \pm 3.25\%$

^8He

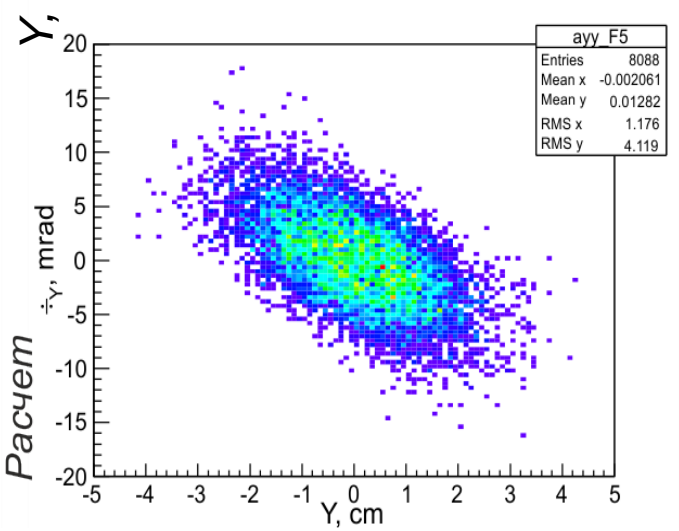
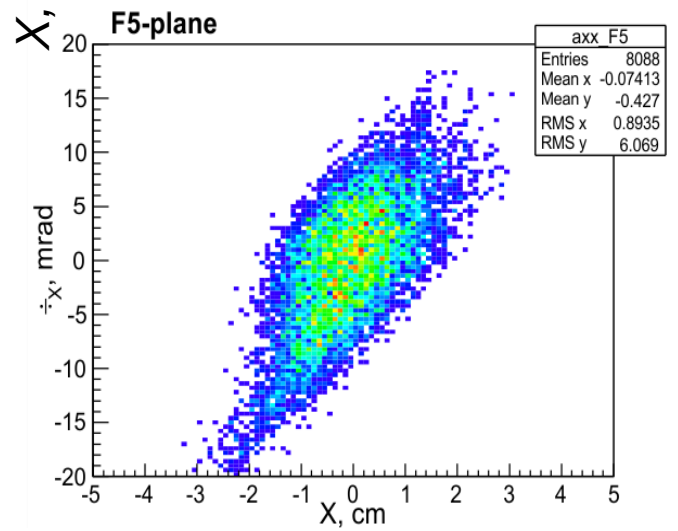


90% ВНУТРИ Ø25 ММ

Другие ионы

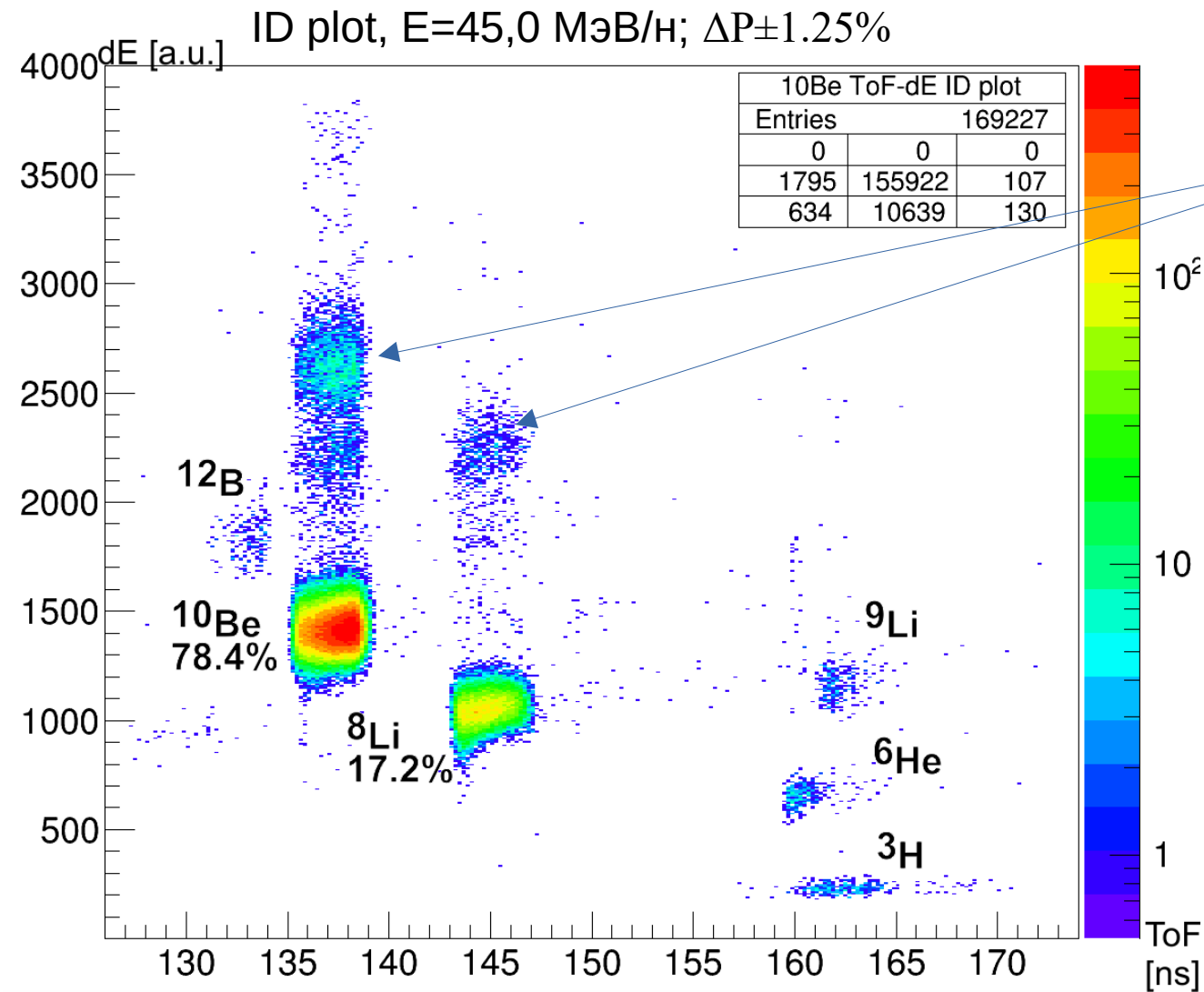


Эксперимент



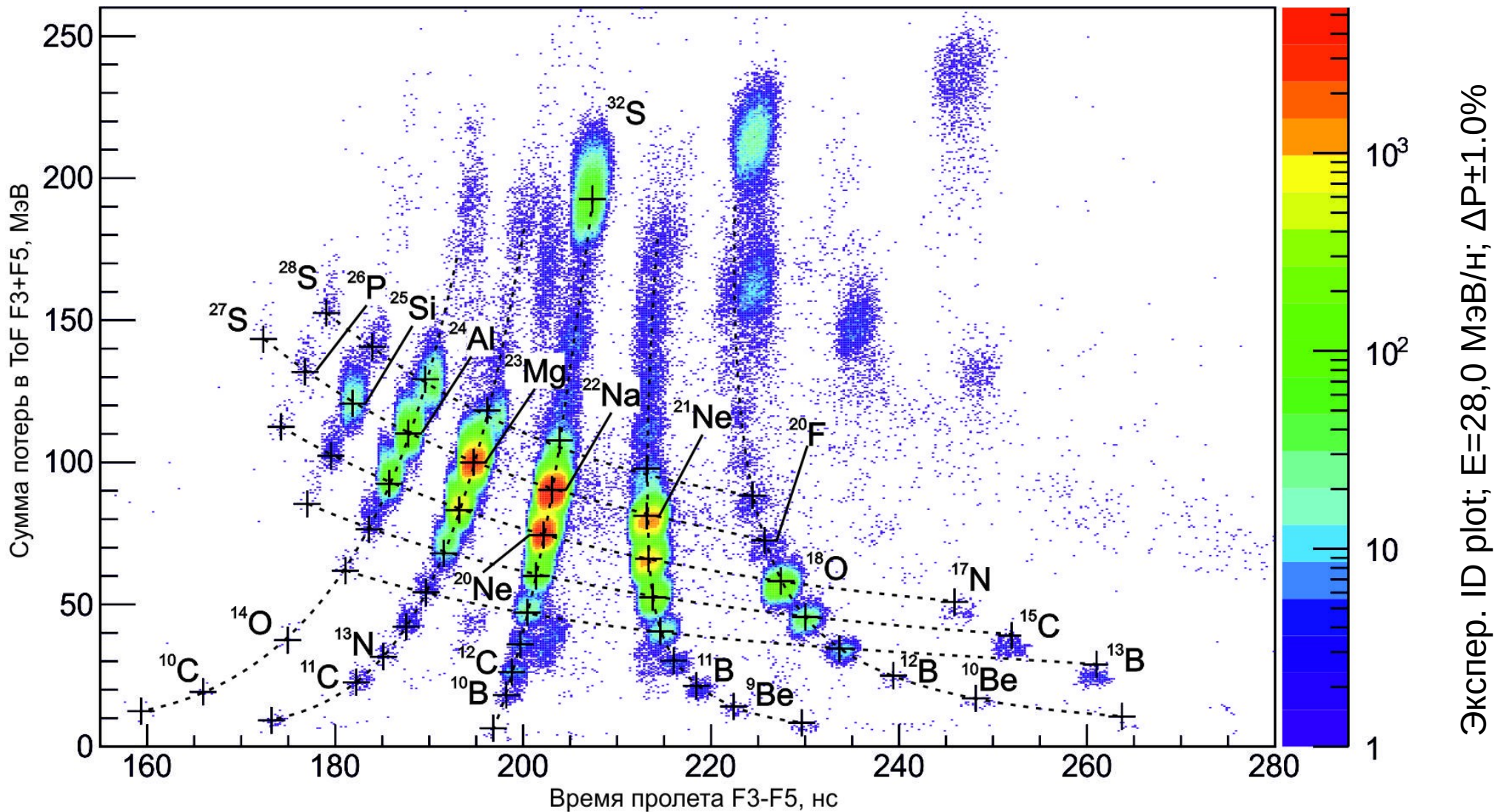
Расчет

$^{15}\text{N}(49,3\text{МэВ/н})+\text{Ве}(1000\text{и})\rightarrow\text{Клин Ве}(1170\text{и}(\text{эфф}))\rightarrow^{10}\text{Ве}\rightarrow\text{ТоF } 2\times 250\text{и}$



Фантомы от двух
частиц в банче

$^{32}\text{S}(52,7\text{МэВ/н})+\text{Ве}(500\text{у})\rightarrow\text{Клин Ве}(465\text{у})\rightarrow^{27}\text{S}\rightarrow\text{ТоF } 2\times 125\text{у}$



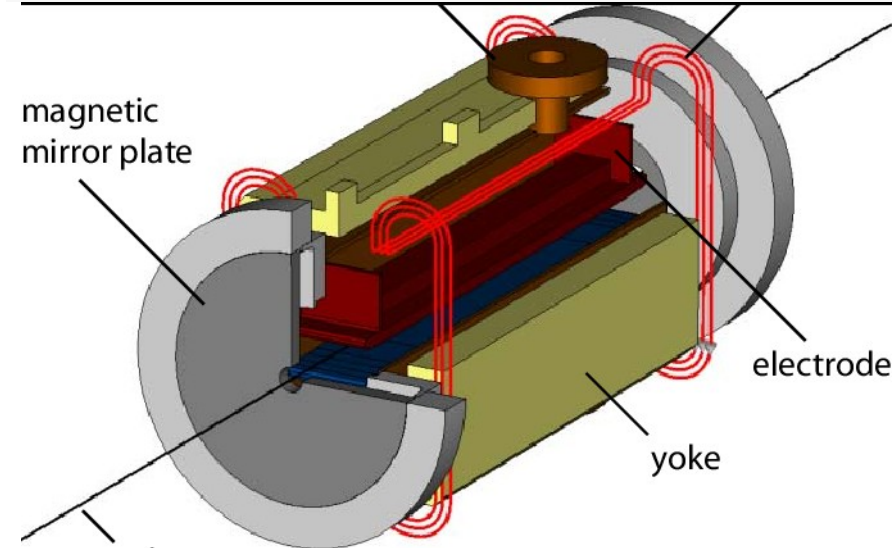
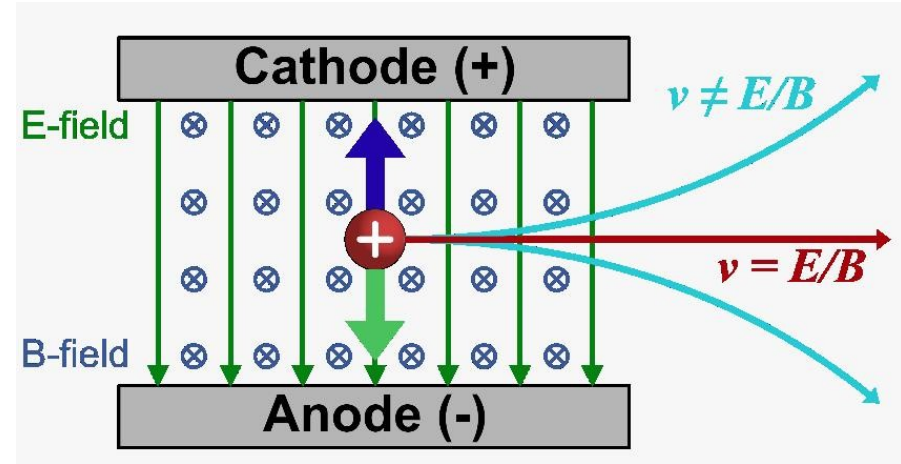
Фильтр Вина (Wien) на ФС LISE (Ganil, Франция)

Легкие ядра до 100 МэВ/нуклон, тяжелые 30 МэВ/нуклон

- Длина секции выбора скорости, совмещенной с время-пролетной базой: 12 м
- Электростатическая камера с зазором 10 см при +/-250 кВ
- Магнитное поле 0,05-0,1 Тл при зазоре 50 см
- Два фильтра по 2,5 м длиной каждый

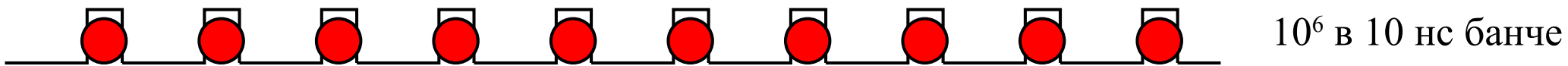
Принцип: Скрещенные поля настраиваются на взаимную компенсацию воздействия на выделяемый изотоп.

Метод применим до энергии 250 МэВ/нуклон

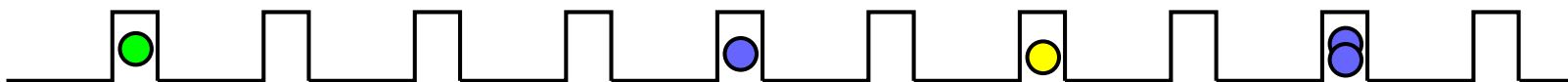


Временная структура вторичного пучка после производящей мишени повторяет структуру первичного пучка

Первичный пучок 10^{13} pps / 10 MHz / Duty 10%



Приведенный выход вторичного пучка 10^{-7}



Вероятность присутствия вторичной частицы в банке 10%

Вероятность прихода 2х вторичных частиц в одном банке 1%

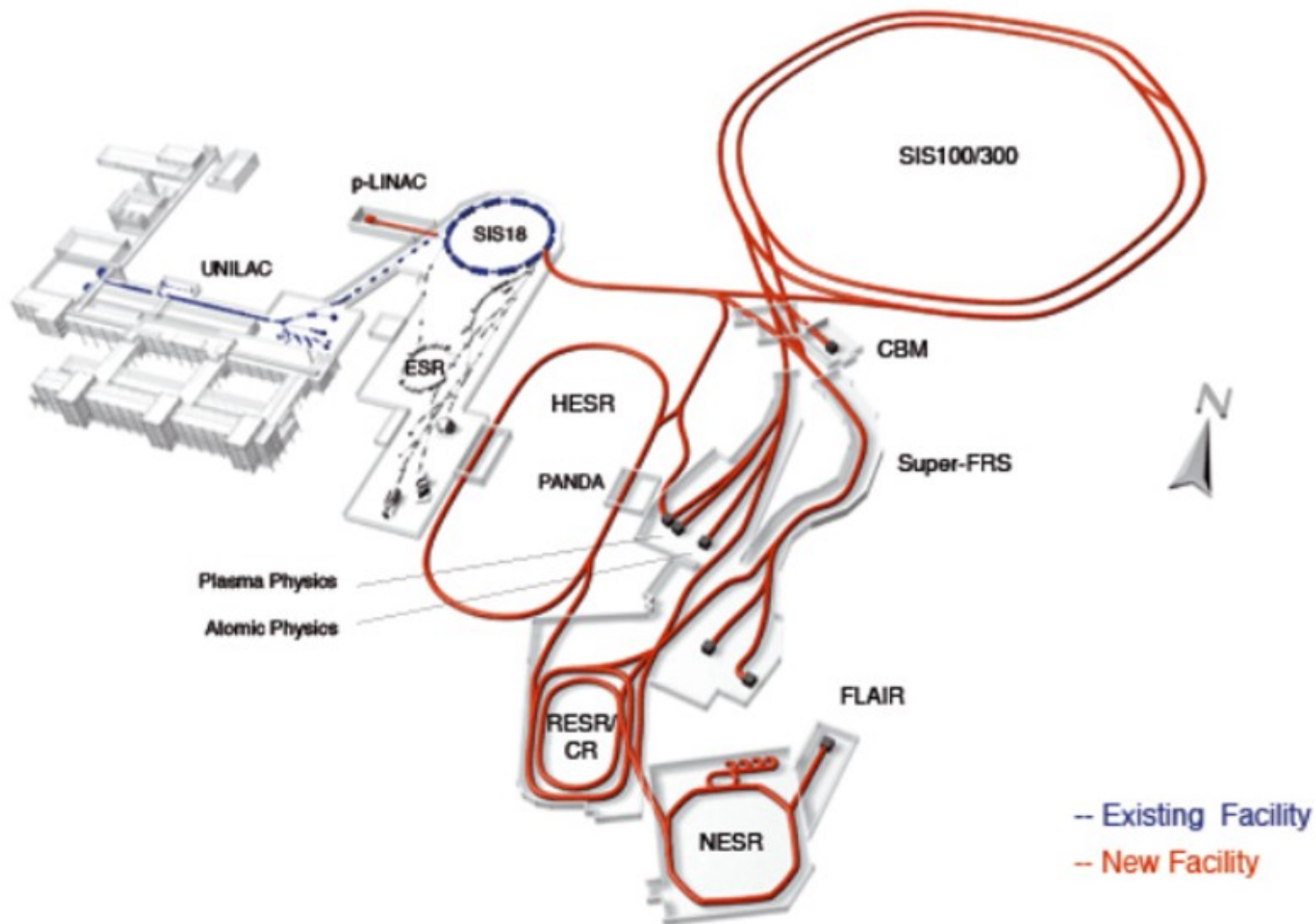
После пролета сепаратора:



Наложение:
Плохое событие

Выход вторичного пучка 10^6 pps

NuSTAR@FAIR(GSI, Darmstadt, Germany)



Существующее

- UNILAC
- SIS18
- FRS 220...700 МэВ/нуклон)
- ESR

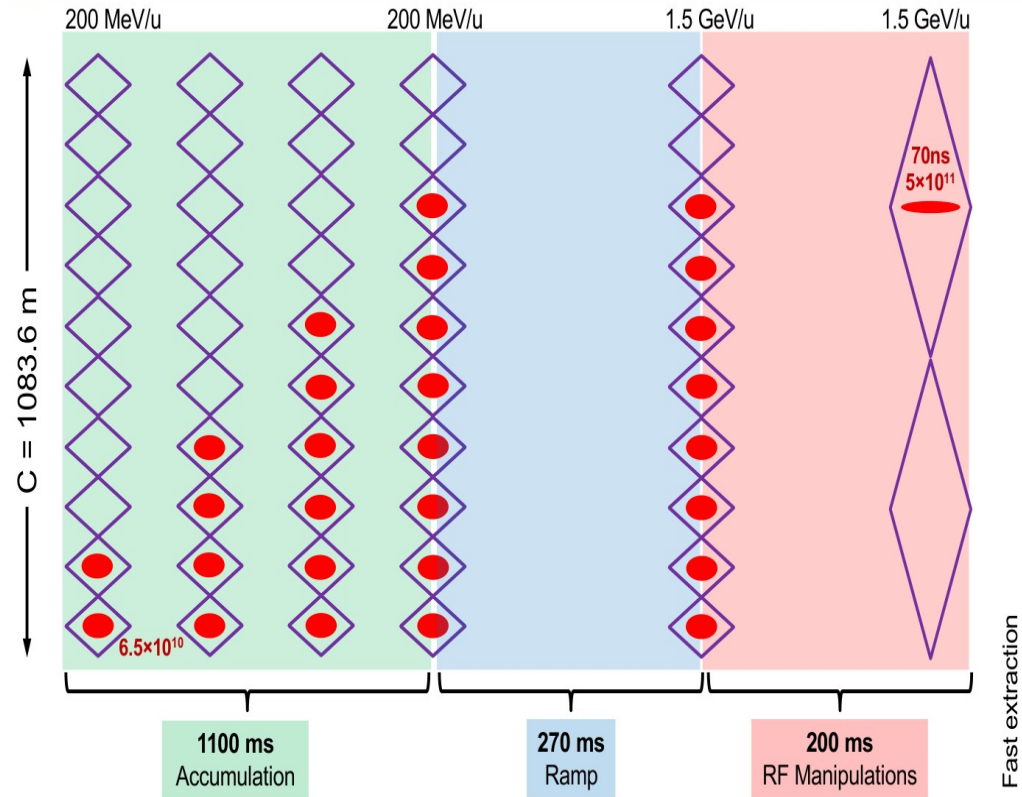
Строящееся

- UNILAC
- SIS18
- SIS100
- SuperFRS до 1500 МэВ/нуклон

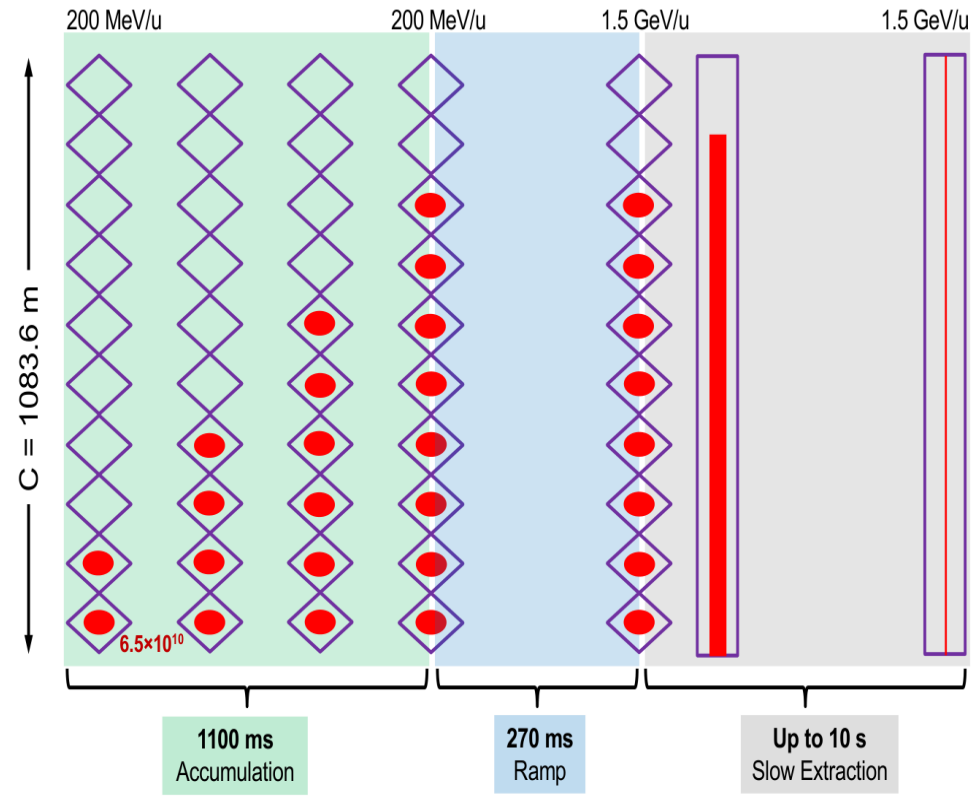
SIS100: Ускорение U^{28+}



Reference Cycle: U^{28+} fast extraction



Reference Cycle: U^{28+} slow extraction



Временная структура пучка из SIS100:

Избыточная мгновенная интенсивность при невысокой интегральной

- Ударная и концентрированная тепловая нагрузка на производящую мишень
- Пропуск части событий из-за перегрузки детектирующей системы

Table 1: Design beam parameters for the lightest and heaviest ions in SIS100

SIS100	Protons	Uranium U^{28+}
Number of injections	4	4
Injection method	long. stacking	long. stacking
Number of ions per cycle	2.5×10^{13}	5×10^{11}
Maximum energy	29 GeV	2.7 GeV/u
Ramp rate	4 T/s	4 T/s
Beam pulse length after compression	50 ns	90 - 30 ns
Extraction mode	Fast and slow	Fast and slow
Repetition frequency	0.4 Hz	0.7 Hz

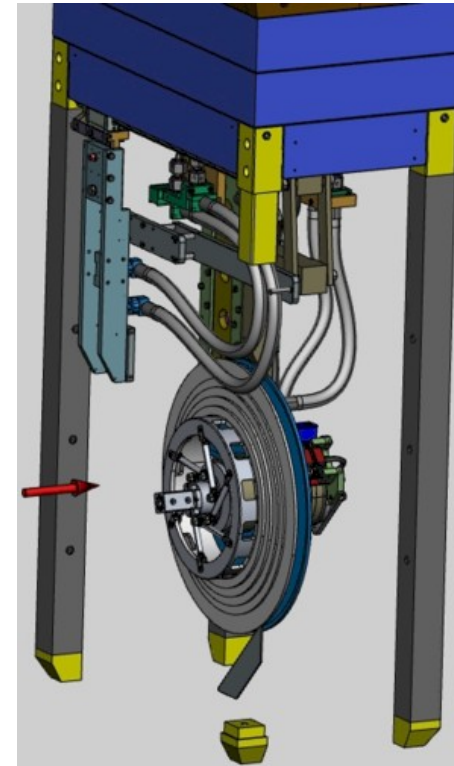
Требования для производящей мишени при быстром выводе 10^{12} U:

Длина импульса 50-60 нс
Размер пятна

$\sigma_x = 1$ мм, $\sigma_y = 1$ мм
Плотность энергии 40 кДж/г
 $dT=30,000$ °C

Испарение любого материала

Медленный вывод занимает несколько секунд



Какая временная структура оптимальна для реакций с вторичными пучками?

- CW с частотой 10...20 МГц:
период 50...100 нс, длительность 5...10 нс (скважность <10%)
- В соответствии с быстродействием детекторов пучковых частиц до 10^6 ион/с
- Невысокая вероятность прихода двух частиц пучка в одном банче

ВЧ-фильтр (Radio Frequency Fragment Separator)

RIKEN(Япония), NSCL(США), АКУЛИНА-2(ЛЯР ОИЯИ)

NSCL

Длина 1,5 м

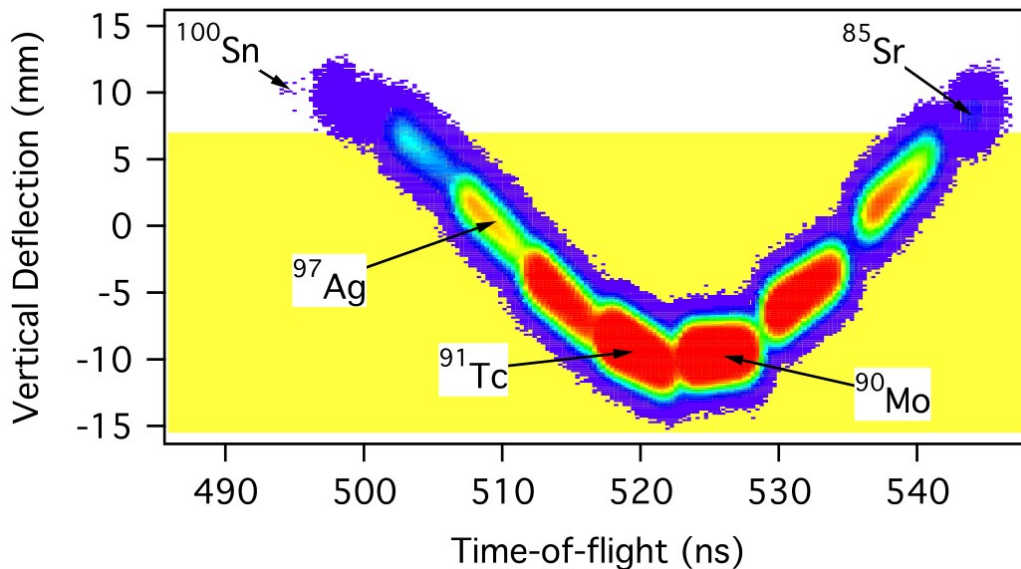
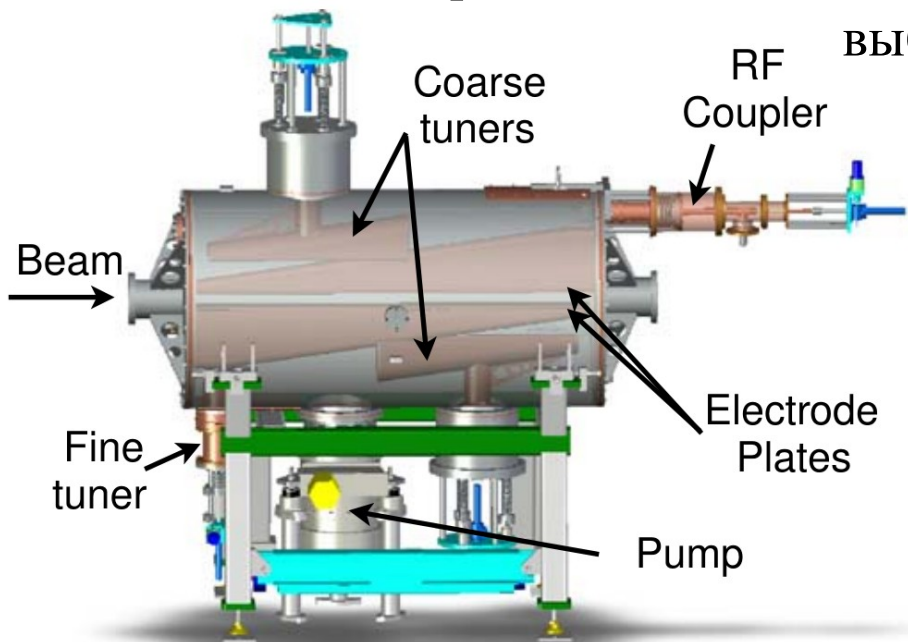
Частота 19-27 МГц

Напряжение 100 кВ

Q 7500-10000

Очистка в десятки раз

- Резонатор на пучковую частоту или $1/2$
- Достаточно высокое напряжение
- Длина ограничена изменением фазы при пролете через фильтр $\varphi < \pi$ (< 20 нс при 25 МГц)
- Фаза подбирается так, чтобы пропускать выбираемый изотоп на максимуме поля



Какой пучок лучше для получения вторичных пучков?

- CW 10-20 МГц
- Энергия от 50 до 250 МэВ/нуклон
- Размер пятна на мишени 2x2 мм, приемлемо до 4x4 мм
- Чем шире набор ускоряемых изотопов, тем выше качество вторичного пучка (оптимизация)

Спасибо за внимание!