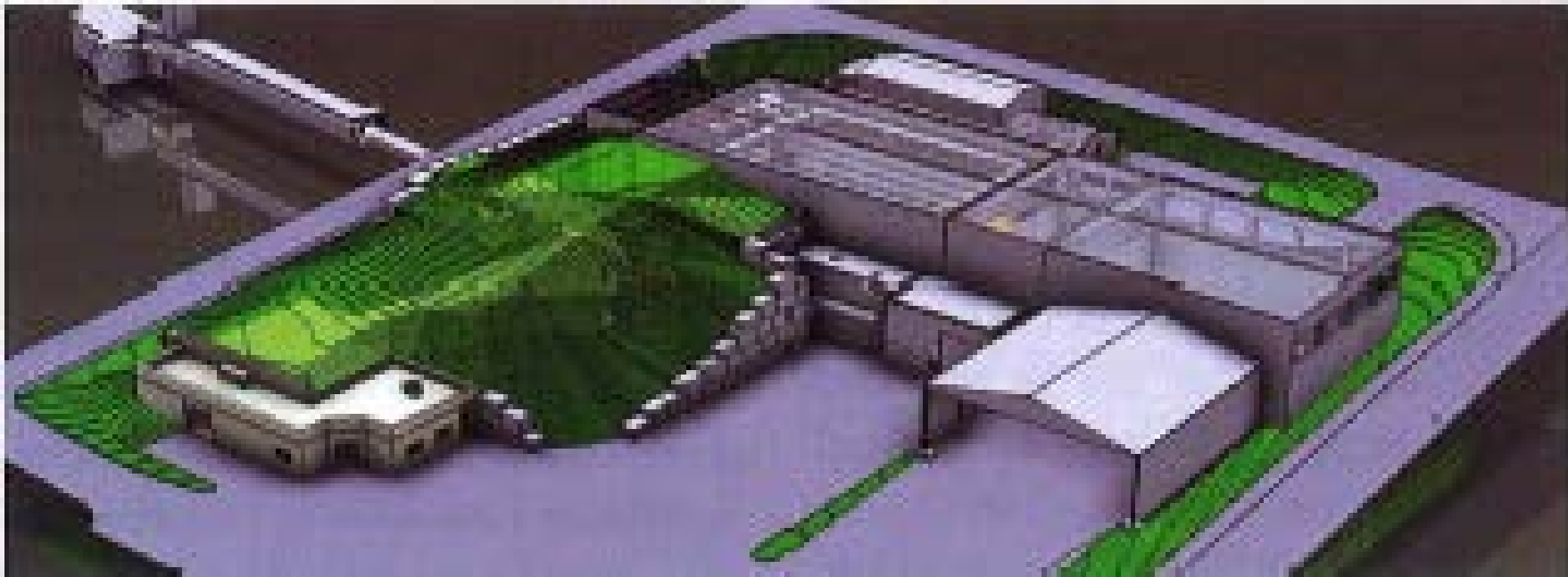


# ISOLDE (Isotope Separator On-line DEvice)

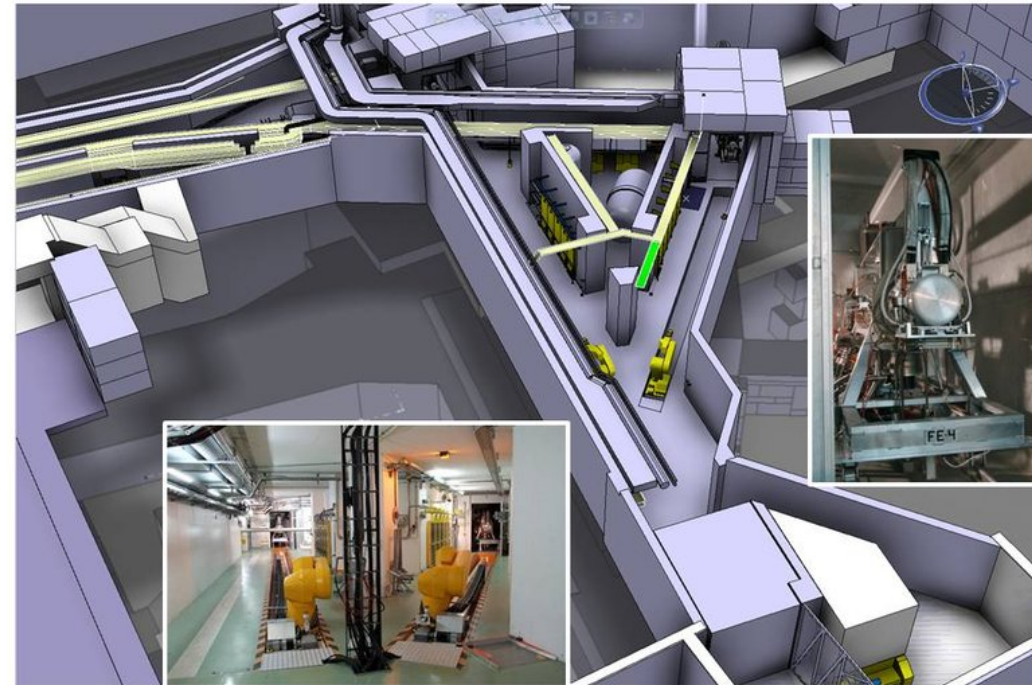


# ISOLDE (Isotope Separator On-line)

- Установка ISOLDE – одна из ведущих лабораторий мира по производству и исследованию радиоактивных ядер. ISOLDE входит в состав комплекса ЦЕРН, расположенного на границе между Швейцарией и Францией. Установка работает с момента ее запуска в 1967 году и в настоящее время получает пучки протонов от протонного синхротронного ускорителя (PSB CERN)

# Технические характеристики

- Энергии протонов в диапазоне 1-1.4 ГэВ
- Физические исследования проводятся в диапазоне энергий от  $10^{-6}$  эВ до 3 МэВ на нуклон
- Обеспечивает до 700 изотопически чистых пучков с интенсивностью от 1 до более чем  $10^{10}$  ионов/с
- Получено более 1000 изотопов 74 элементов в диапазоне  $Z$  от 2 до 89

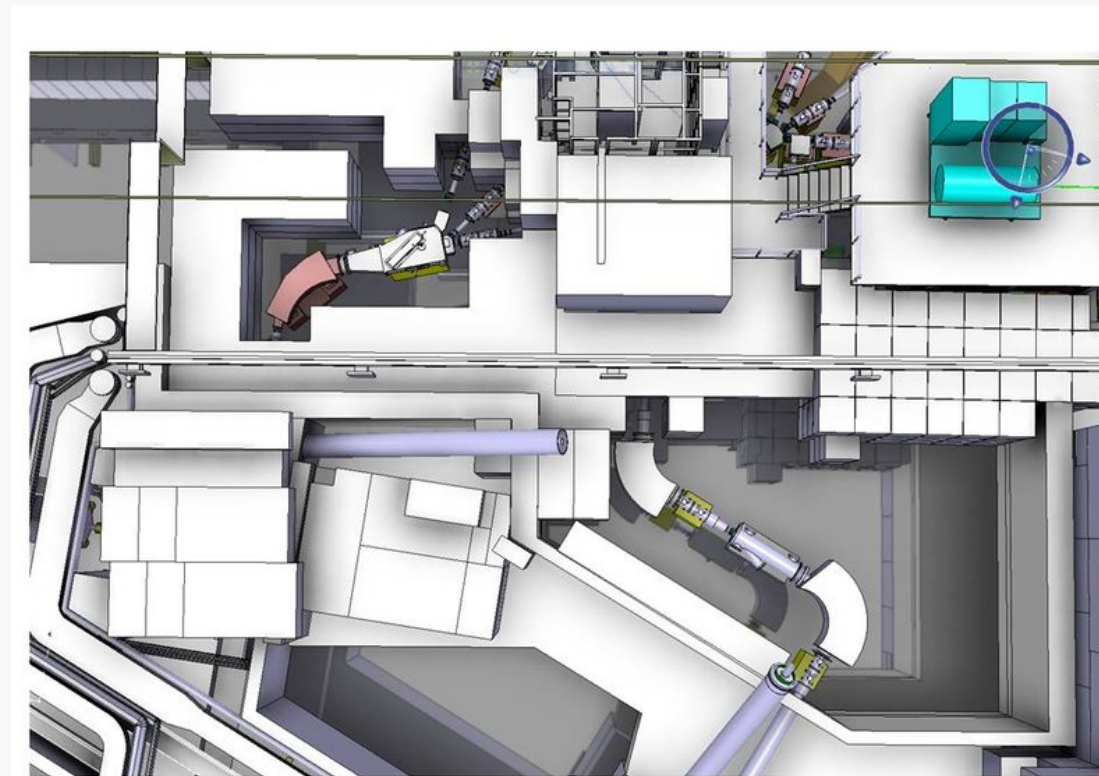


# Принцип работы

- В ISOLDE радиоактивные нуклиды образуются в результате реакций расщепления, деления или фрагментации в толстой мишени, облученной пучком протонов от PSB с энергией 1,4 ГэВ и интенсивностью до 2 мкА. Летучие продукты ядерной реакции выбрасываются из высокотемпературной мишени в ионный источник посредством химически селективных процессов и извлекаются в виде пучка радиоактивных ионов. Наконец, полученные ионы попадают в один из двух масс-сепараторов, которые на выходе дают крайне интенсивные пучки с высокой изотопной и часто изобарной чистотой

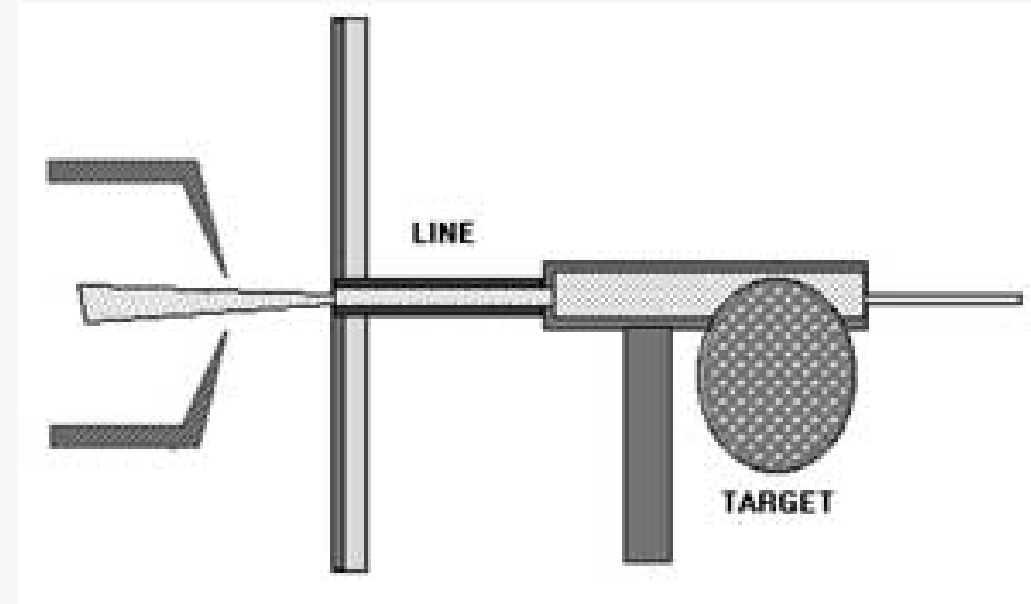
# Принцип работы

- Пучок протонов от PSB поступает в зону мишеней
- В ISOLDE используются три различных типа ионных источников: поверхностные, плазменные и лазерные
- ISOLDE имеет два оперативных сепаратора изотопов: сепаратор общего назначения (GPS) и высокого разрешения (HRS)



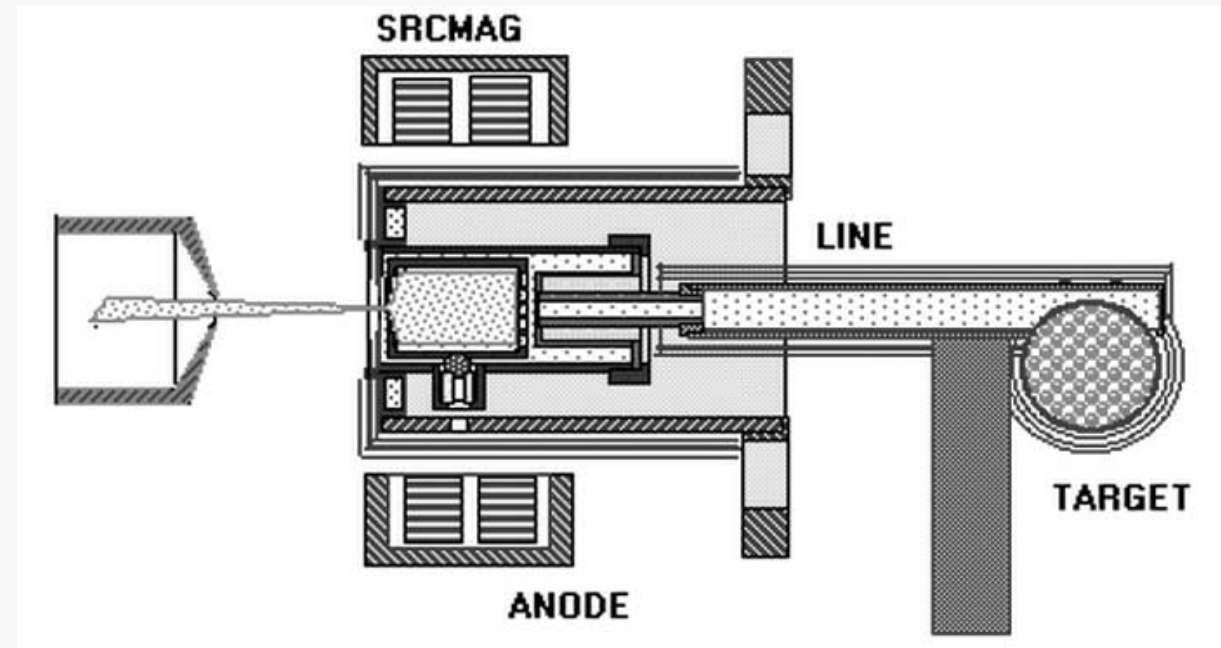
# Источники ионов

- Источник поверхностных ионов - это простейшая установка для ионизации атомов, образующихся в мишени. Ионизатор состоит только из металлической трубки («линии»), например, из тантала или вольфрама. В зависимости от материала линии она может нагреваться вплоть до  $2400^{\circ}\text{C}$ . Источники поверхностных ионов использовались в сочетании с большинством различных материалов мишеней.



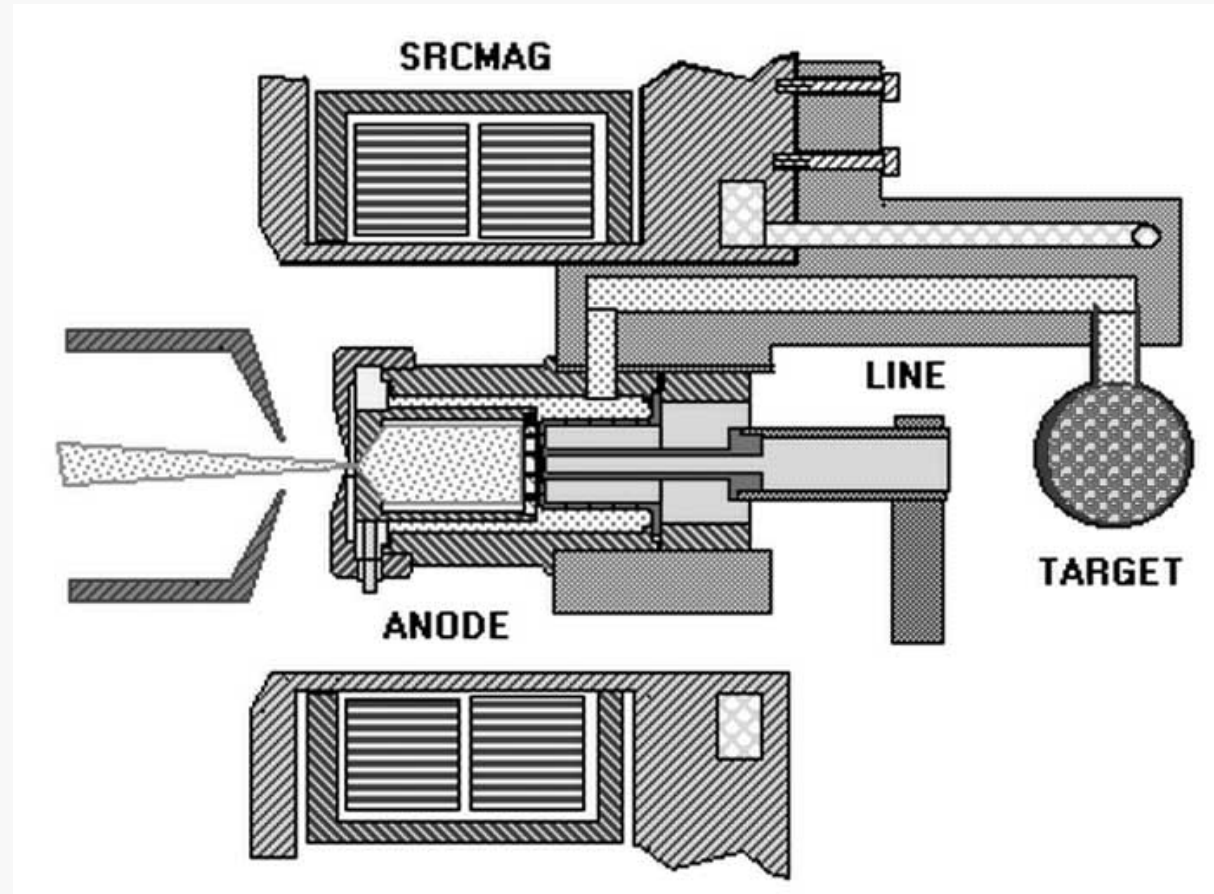
# Источники ионов

- Источник ионов плазмы используется для ионизации элементов, которые не могут подвергаться поверхностной ионизации. Плазма создается газовой смесью (обычно Ar и Xe), которая ионизируется электронами, ускоряемыми между передающей линией и экстракционным электродом путем подачи анодного напряжения около 130В.



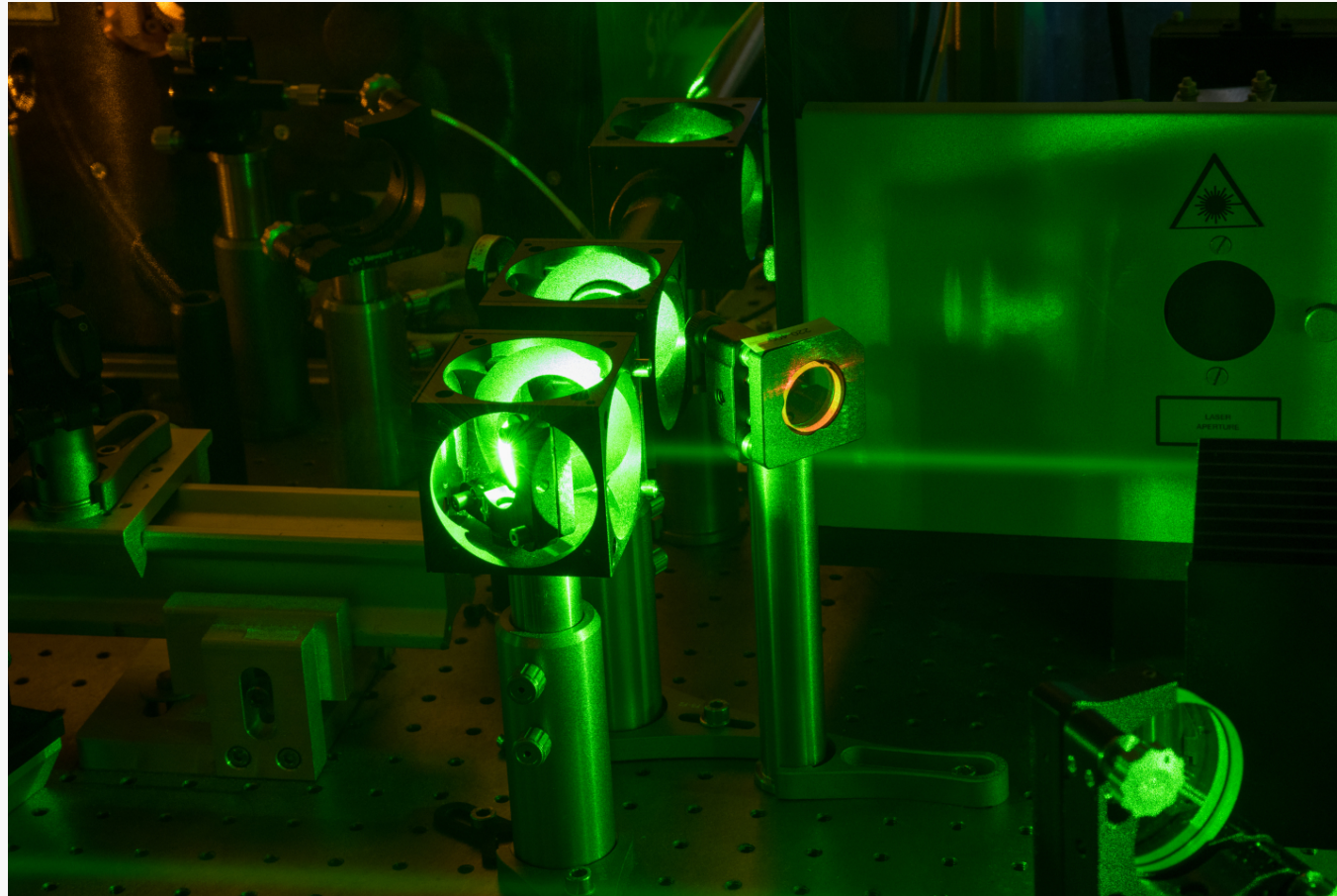
# Источники ионов

- Для получения изотопов благородных газов установка на ионах плазмы была модифицирована таким образом, что линия передачи между мишенью и газовой плазмой охлаждалась непрерывным потоком воды, чтобы подавить перенос менее летучих элементов и уменьшить с помощью этого механизма изобарическое загрязнение в ионные пучки.





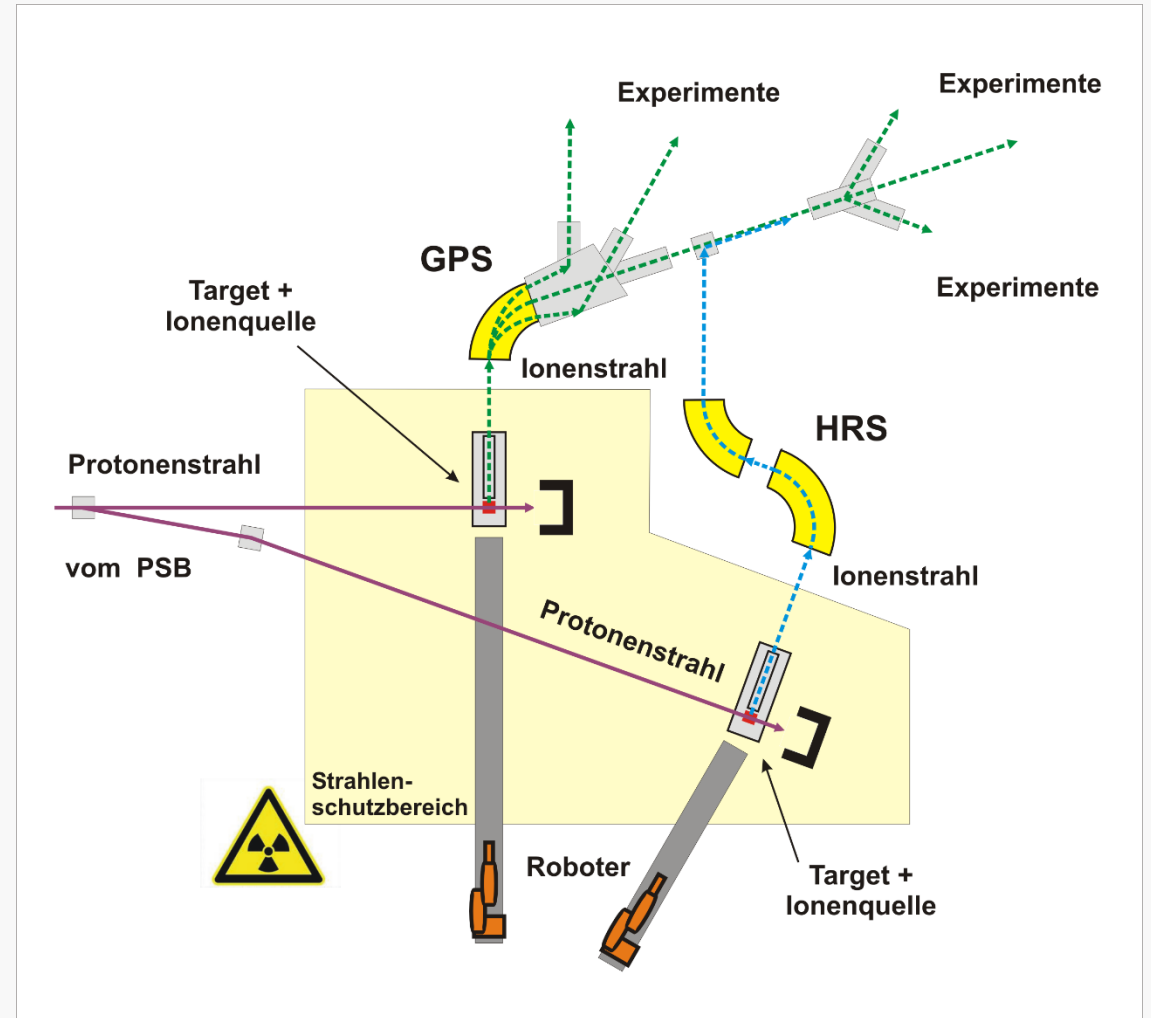
# Источники ионов



- Лазерный источник ионов под названием RILIS создает ионы внутри мишени поверхностного источника с горячей полостью.

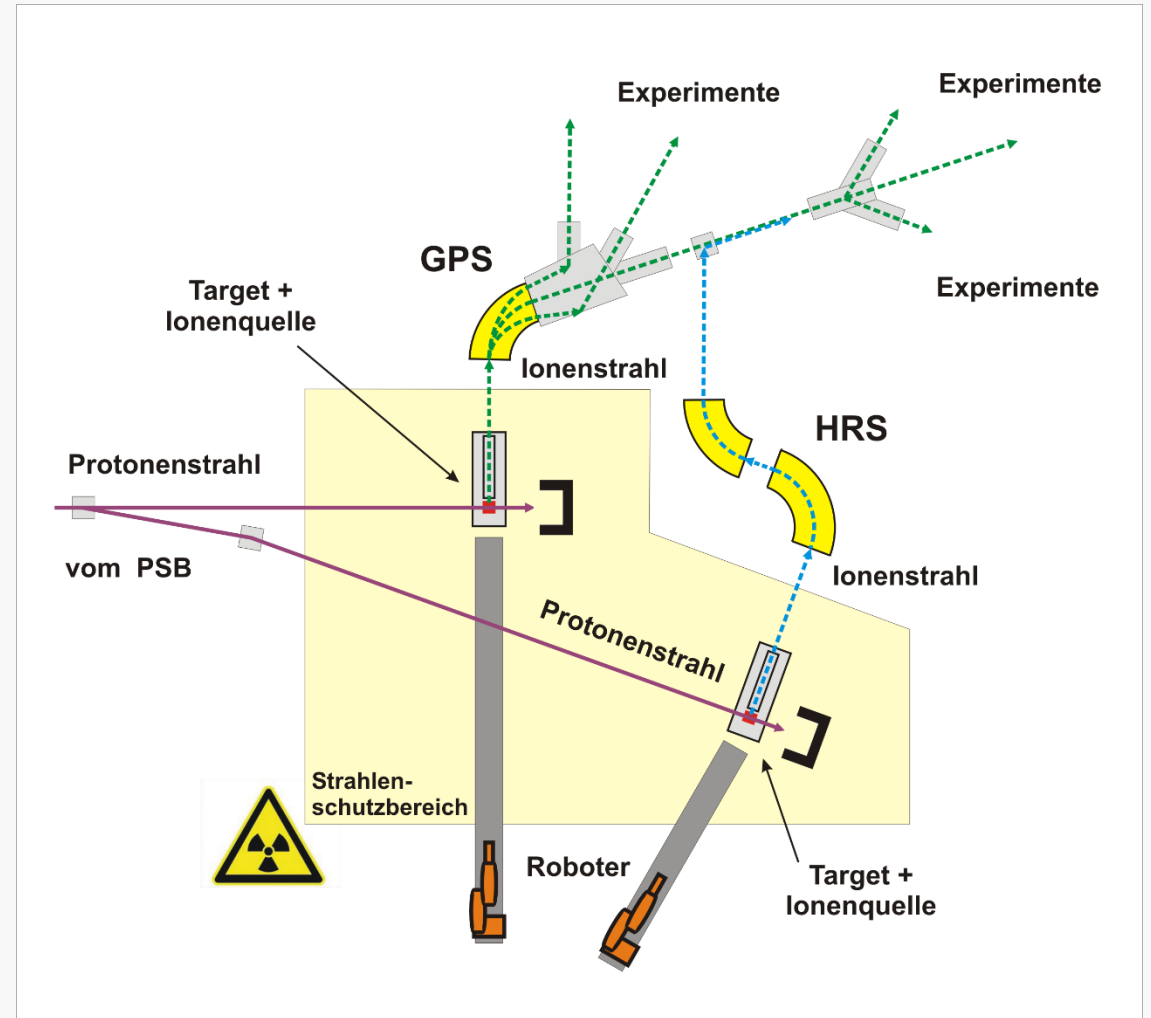
# Масс-сепараторы

- Сепаратор общего назначения (GPS) имеет один изгибающийся магнит и электростатическое распределительное устройство, позволяющее одновременно извлекать три пучка, разделенных по массе.



# Масс-сепараторы

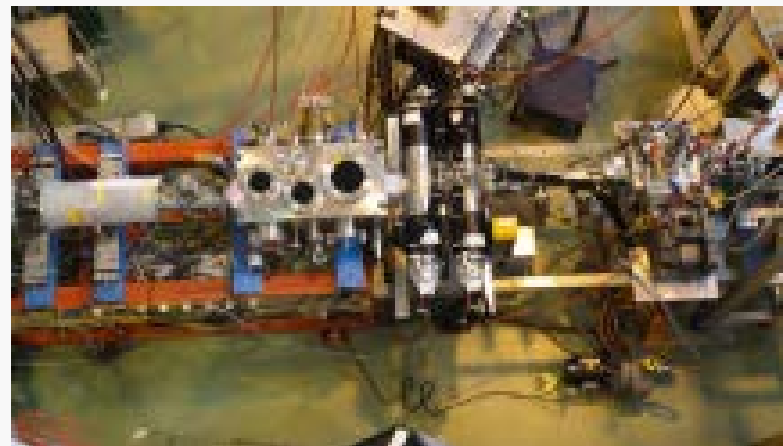
- Сепаратор высокого разрешения (HRS) состоит из двух поворотных магнитов со сложной ионно-оптической системой для коррекции более высокого порядка. Его разрешающая способность по массе превышает 5000.



# Экспериментальные установки

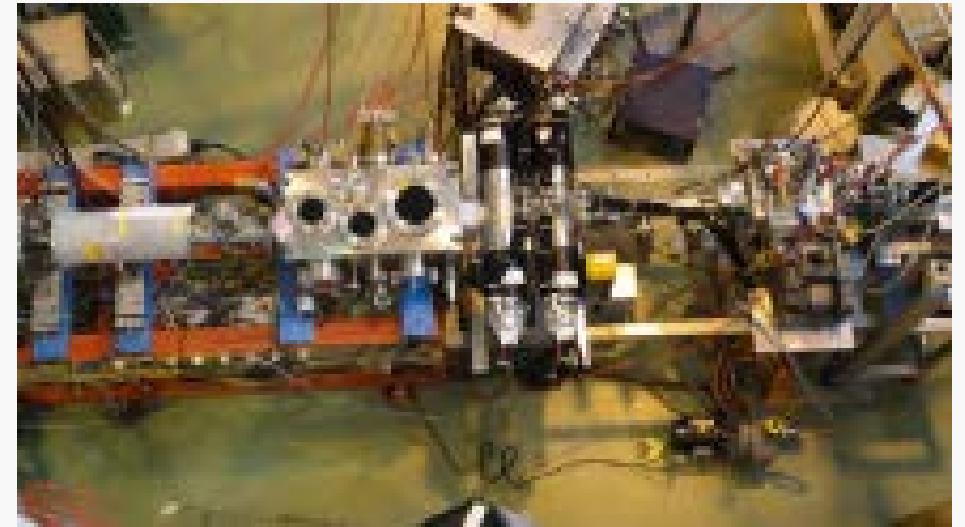
Постоянные эксперименты:

- COLLAPS
- ISOLTRAP
- IDS
- CRIS
- EC-SLI
- ISS
- LUCRECIA
- MINIBALL
- MIRACLS
- WISArD
- и другие..



# Экспериментальные установки

COLLAPS (COLlinear LAser SPectroscopy). Его цель - исследование свойств основного состояния, таких как спины, электромагнитные моменты и зарядовые радиусы экзотических короткоживущих ядер. Полученные с помощью этого детектора данные дают ценную информацию о связи между нуклонами, о симметрии ядерных волновых функций и, следовательно, о симметрии самого ядерного взаимодействия



# Экспериментальные установки

- Прецизионные измерения массы выполняются на масс-спектрометре ISOLTRAP с относительной неопределенностью массы, обычно достигающей  $10^{-8}$ . Здесь изучались нуклиды с периодом полураспада менее 100 мс и частотой получения менее 1000 ионов в секунду. Исследуемые нуклиды варьируются от легких систем, таких как  $^{17}\text{Ne}$ , до тяжелых, таких как  $^{233}\text{Fr}$



# Экспериментальные установки

- Аппарат многоионного отражения для коллинеарной лазерной спектроскопии (MIRACLS) предназначен для измерения свойств основного состояния ядер, таких как размер, форма и электромагнитные моменты редких радиоактивных изотопов. Эти свойства извлекаются из измерений сверхтонкой структуры изотопов с помощью лазерной спектроскопии



# Экспериментальные установки

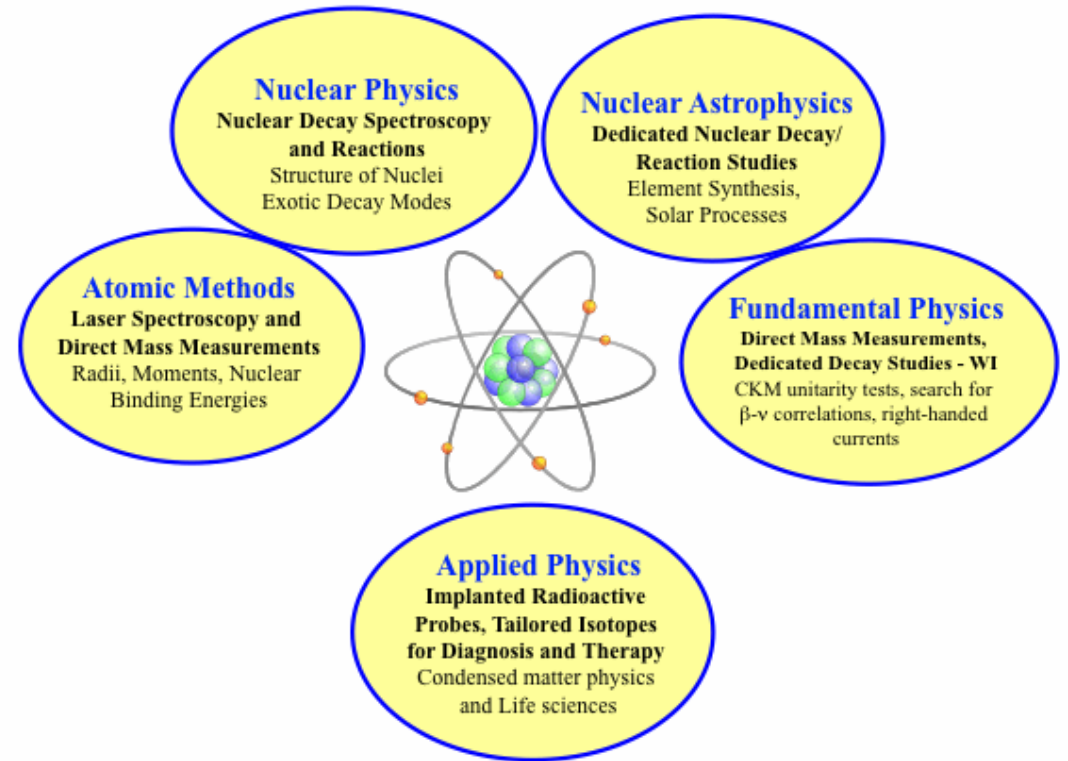
- Матрица германиевых детекторов высокого разрешения Miniball эксплуатируется в REX-ISOLDE в ЦЕРНе более 10 лет. Эта матрица состоит из 24 шестигранных сужающихся кристаллов германия высокой чистоты в металлической оболочке и была специально разработана для экспериментов с пучками радиоактивных ионов низкой интенсивности (RIB).





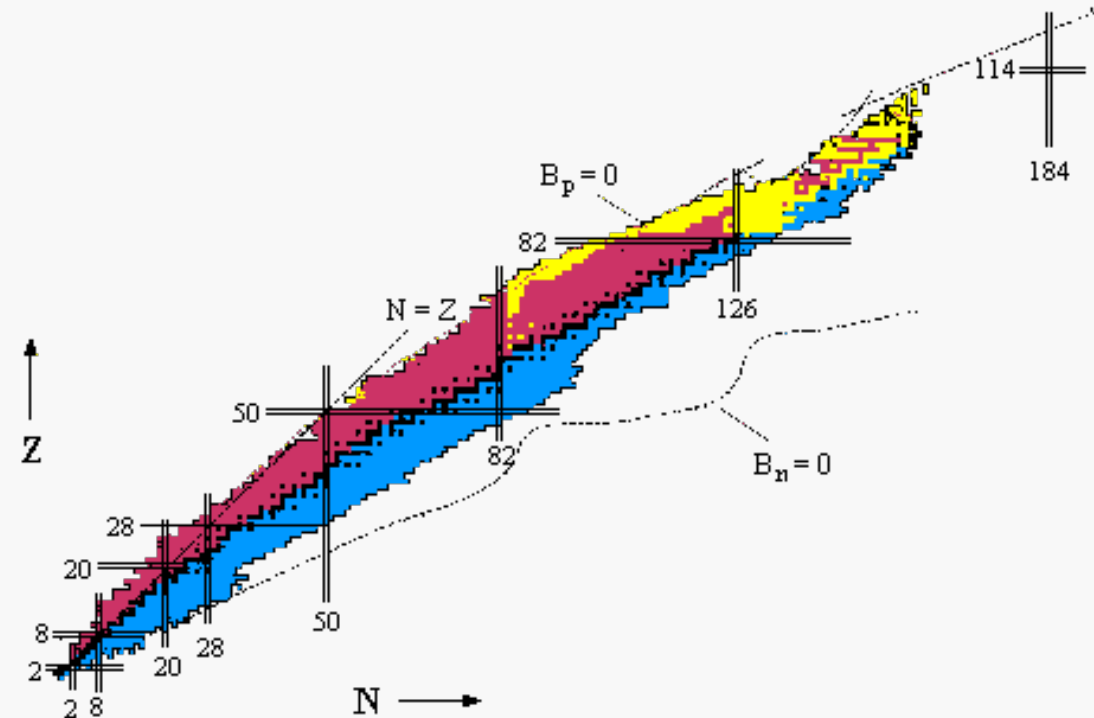
# Основные результаты

- Расширение ядерной карты
- Измерение масс ядер
- Остров инверсии
- Спектроскопия  ${}^{223}_{87}\text{Fr}$
- Исследования изменения формы лёгких изотопов  $\text{Hg}$
- Кластерная эмиссия
- Структура гало



# Основные результаты

- Первые систематические исследования структурной эволюции длинных цепочек изотопов благородных газов, щелочных элементов и ртути были выполнены на ISOLDE уже в первые годы работы. С тех пор идет непрерывное техническое развитие комбинаций мишень-ион-источник, дающих доступ к широким областям ядерной карты.



# Основные результаты

- Высокоточные измерения масс радиоактивных ионов были впервые применены в ISOLDE в эксперименте ISOLTRAP
- Результатом на конец 1980-х годов было более 400 новых или уточненных значений масс радиоактивных изотопов
- Кроме того, успешно измерены изотопы с периодом полураспада до 60 мс

# Основные результаты

- Эксперименты в CERN, PS, проведенные в семидесятых годах, дали первые признаки структурных изменений в регионе около  $^{31}\text{Na}$  (так называемом «острове инверсии»). Многие лаборатории участвуют в продолжающемся выяснении степени структурных изменений. Для изотопов 30-33 Mg, простирающихся далеко за пределы острова внутрь острова, эксперименты в ISOLDE позволили измерить массы, спины, магнитные моменты, скорости E0-перехода, времени жизни уровней, изучить кулоновское возбуждение, реакции переноса ИТД

# Проекты дальнейшего развития

- HIE-ISOLDE (в 2015 запущена первая очередь, в 2018 – вторая). Цель: достичь энергии 10 МэВ/нуклон. С предстоящим обновлением HIE-ISOLDE с высокой энергией и интенсивностью возможности для экспериментов с экзотическими ядрами будут еще больше
- RILIS Upgrade – увеличение энергии и интенсивности лазера и применение в бóльшем кол-ве экспериментов



# Программа экспериментов













Code	Proposal	Title	Spokesperson	Contact person	Status	Code	Proposal	Title	Spokesperson	Contact person	Status
I169	I169	Molecular beams of neutron-rich cerium isotopes for Coulomb-excitation experiments	L. Gaffney	T. Stora	Preparation	IS663	P555	Rotational and Hyperfine Structure of RaF Molecules	Garcia Ruiz, R.F. / Wilkins, S.G.	Wilkins, S.G.	Preparation
I170	I170	Laser spectroscopy measurements on neutron-rich 77–83 Ge isotopes across N = 50 and establishing shape coexistence in 81 Ge via laser spectroscopy (COLLAPS)	X. Yang / M. Bissell	M. Bissell	Preparation	IS690	P597	Reaction studies with neutron-rich light nuclei at the upgraded SEC Device	Borge, M.J.G. / Cederkall, J.	Olaizola, B.	Preparation (HIE-ISOLDE)
I171	I171	Towards laser spectroscopy of exotic fluorine isotopes	R.F. Garcia Ruiz	R.F. Garcia Ruiz	Preparation	IS670	P564	Development of new rare-earth-free hard magnetic materials	Zyabkin, D. / Schaaf, P.	Schell, J. / Johnston, K.	Preparation
I173	I173	Octupole collectivity in 229Pa to guide searches for physics beyond the Standard Model: Extraction rate and beam composition of 229Pa and 228Th	G. de Angelis	K. Johnston	Preparation	IS691	P598	Collection of 129m,131m,133mXe for the gamma-MRI project	Kowalska, M.	Kulesz, K.	Preparation
I196	I196	Laser Cooling of Ra ions for Atomic Parity Violation	Willmann, L.	Willmann, L.	Preparation	IS669	P563	Beta decay along the rp-process path for accurate stellar weak-decay rates: 68Se and 70Se	Nácher, E. / Algora, A. / Briz, J.A.	Lica, R.	Preparation
I197	I197	Benchmarking of a Multi Ion Reflection Apparatus for Collinear Laser Spectroscopy of radionuclides	Malbrunot-Ettenauer, S.	Malbrunot-Ettenauer, S.	Preparation	IS692	P572	Spectroscopy of 8Be: Search for Rotational Bands Above 16 MeV	Gai, M. / Smith, R.	Olaizola, B. / Stora, T.	Preparation (HIE-ISOLDE)
I207	I207	An inelastic excitation study of multiple shape coexistence in 80Zr /	Nara Singh, B.S./ Wadsworth, R.	Gaffney, L.	Preparation	I217	I217	Development of neutron-rich Tb beams for a systematic study approaching the doubly mid-shell in Rare-Earth nuclei	Olaizola, B. / Illana, A	Rothe, S. / Mougeot, M.	Preparation
						IS693	P559	Total absorption spectroscopy of neutron-rich indium isotopes beyond N=82	lkowska, A. / Rubio, B. / Fallot, M. / Fraile, L.	Lica, R.	Preparation

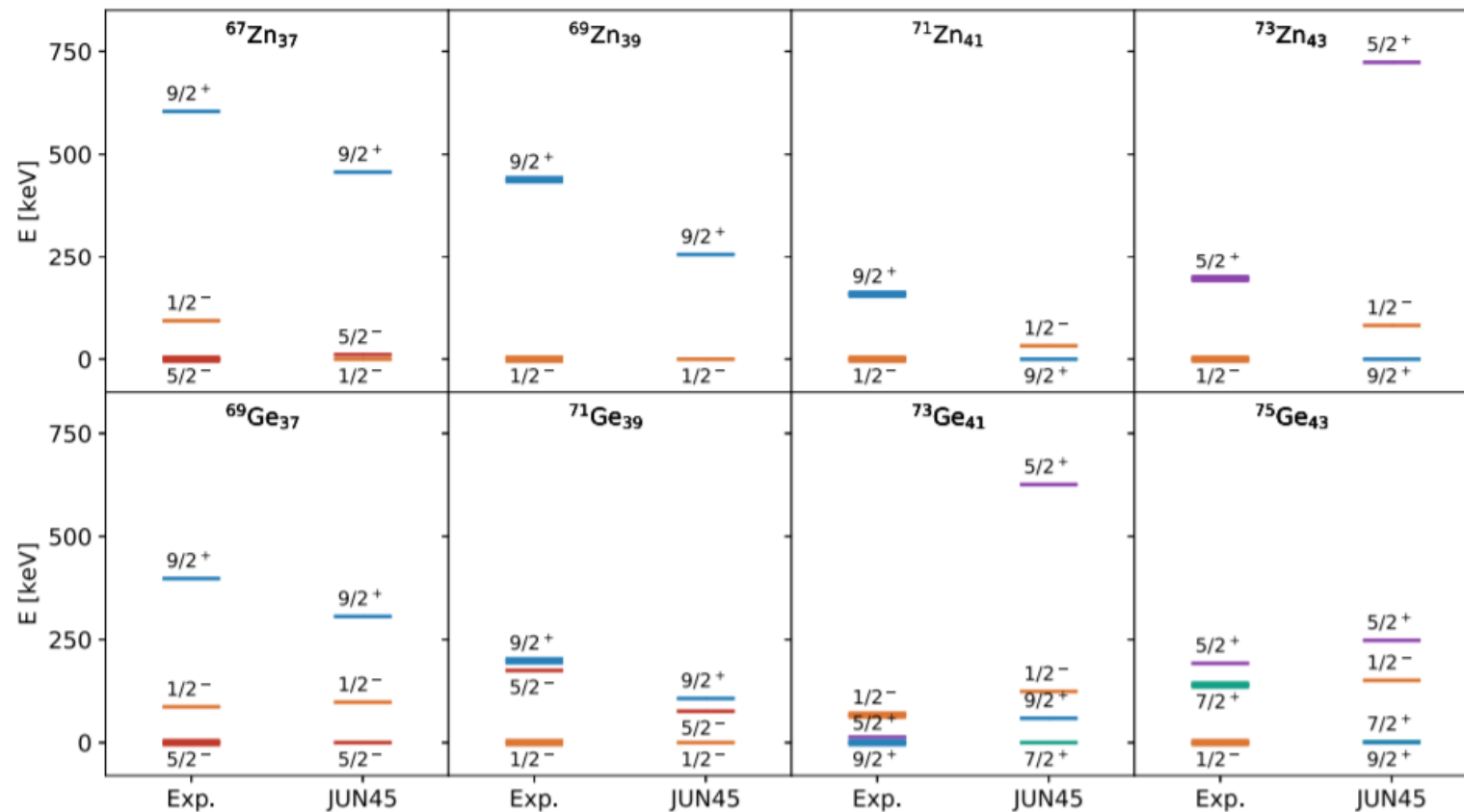
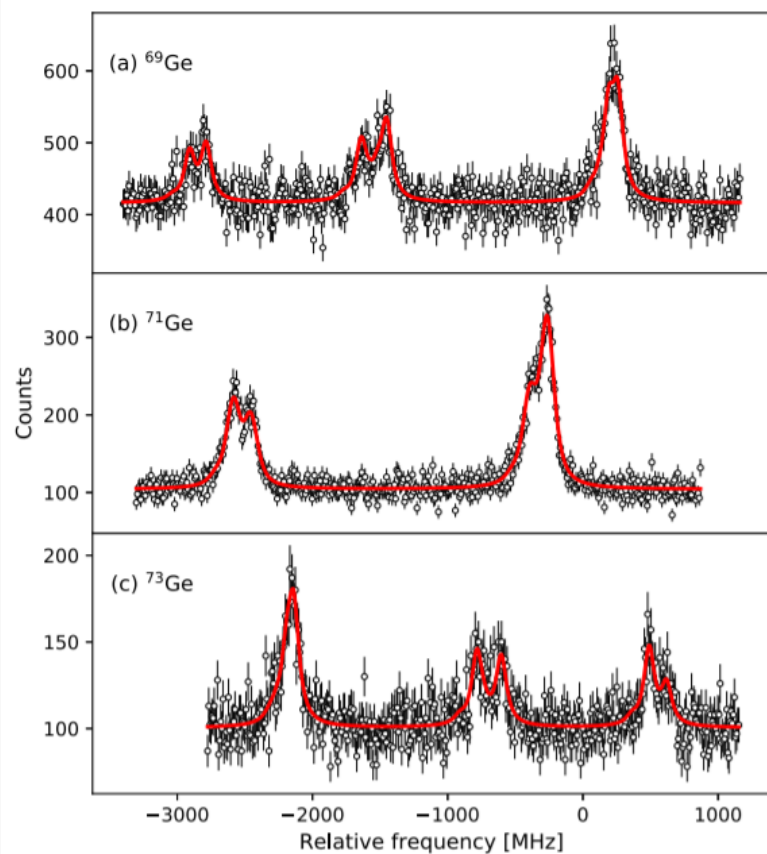
# Программа экспериментов

На момент декабря 2021 года запланировано или уже проводится около 100 экспериментов совершенно разной направленности:

- Измерение масс изотопов или ионов
- Лазерная спектроскопия ядер и атомов
- Нейтронная эмиссия
- $\alpha$ ,  $\beta$ -распад, спонтанное деление тяжелых ионов
- Получение избранных ионов для использования в экспериментах сотрудничающих коллабораций
- И другие

**Nuclear moments of germanium isotopes near  $N = 40$** 

A. Kanellakopoulos <sup>1</sup>, X. F. Yang <sup>2,1,\*</sup>, M. L. Bissell,<sup>3</sup> M. L. Reitsma <sup>4</sup>, S. W. Bai,<sup>2</sup> J. Billowes,<sup>3</sup> K. Blaum <sup>5</sup>,  
 A. Borschevsky <sup>4</sup>, B. Cheal,<sup>6</sup> C. S. Devlin <sup>6</sup>, R. F. Garcia Ruiz,<sup>7,†</sup> H. Heylen,<sup>7</sup> S. Kaufmann,<sup>8,9</sup> K. König <sup>8,‡</sup>,  
 Á. Koszorús,<sup>1,§</sup> S. Lechner <sup>7,10</sup>, S. Malbrunot-Ettenauer,<sup>7</sup> R. Neugart,<sup>5,9</sup> G. Neyens <sup>1,7</sup>, W. Nörtershäuser <sup>8</sup>,  
 T. Ratajczyk,<sup>8</sup> L. V. Rodríguez <sup>5,11,||</sup>, S. Sels,<sup>7,¶</sup> S. J. Wang,<sup>2</sup> L. Xie,<sup>3</sup> Z. Y. Xu,<sup>1,#</sup> and D. T. Yordanov <sup>11</sup>

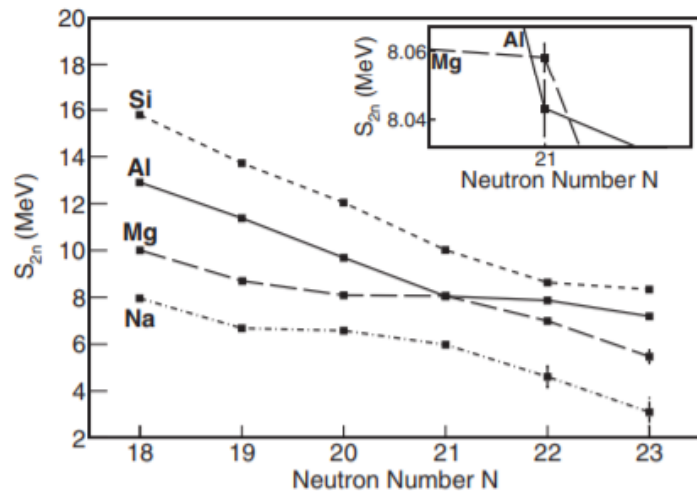




**Mass measurements of neutron-rich isotopes near  $N = 20$  by in-trap decay with the ISOLTRAP spectrometer**

P. Ascher,<sup>1,\*</sup> N. Althubiti,<sup>2,3</sup> D. Atanasov,<sup>4,†</sup> K. Blaum,<sup>4</sup> R. B. Cakirli,<sup>5</sup> S. Grévy,<sup>4,1</sup> F. Herfurth,<sup>6</sup> S. Kreim,<sup>4</sup> D. Lunney,<sup>7</sup> V. Manea,<sup>8,†</sup> D. Neidherr,<sup>6</sup> M. Rosenbusch,<sup>9</sup> L. Schweikhard,<sup>10</sup> A. Welker,<sup>11</sup> F. Wienholtz,<sup>10</sup> R. N. Wolf,<sup>4,‡</sup> and K. Zuber<sup>11</sup>

Isotope	Half-life (ms)	$r = v_c^{ref}/v_c^{ion}$	ME <sub>ISOLTRAP</sub> (keV)	ME <sub>AME16</sub> (keV)	$\Delta_{AME-ISOLTRAP}$ (keV)
<sup>33</sup> Mg	90.5(1.6)	0.84707669(19)	4966.2(6.8)	4962.3(2.9)	3.9(7.4)
<sup>34</sup> Mg	44.9(0.4)	0.87283446(19)	8323.2(6.9)	8323(29)	0.2(29.8)
<sup>34</sup> Si	2770(200)	0.872054302(22)	-19991.7(0.8)	-19957(14)	34.7(14.0)
<sup>34</sup> Al	56.3(0.5)	0.87252260(8)	-2995.4(2.9)	-3000(3)	4.6(4.2)



Пример измерения масс изотопов в области острова инверсии на эксперименте ISOLTRAP с применением ловушек Пеннинга

Спасибо за внимание