

**Международный семинар
«Развитие радиохимии и получение медицинских изотопов»
14 января 2022 г., Институт ядерных исследований РАН, Москва-Троицк**

посвященного 70-летию со дня рождения д-р физ.-мат. наук, зав. лабораторией радиоизотопного комплекса
Бориса Леонидовича Жуйкова

ХИМИЯ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Николай Аксенов

**Лаборатория ядерных реакций
им. Г.Н. Флерова**

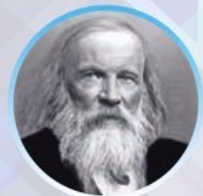


**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**
НАУКА СБЛИЖАЕТ НАРОДЫ



1956





Периодическая система элементов Д. И. Менделеева Periodic Table of the Elements

РАЗДВИГАЕМ ГРАНИЦЫ ИЗВЕСТНОГО
EXPANDING THE FRONTIERS OF KNOWLEDGE

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH



1										18									
1 1.008 H Hydrogen Водород																		2 4.0026 He Helium Гелий	
3 6.94 Li Lithium Литий	4 9.0122 Be Beryllium Бериллий																	9 18.998 F Fluorine Фтор	10 20.180 Ne Neon
11 22.990 Na Sodium Натрий	12 24.305 Mg Magnesium Магний																	17 35.45 Cl Chlorine Хлор	18 39.948 Ar Argon
19 39.098 K Potassium Калий	20 40.078 Ca Calcium Кальций	21 44.956 Sc Scandium Скандий	22 47.867 Ti Titanium Титан	23 50.942 V Vanadium Ванадий	24 51.996 Cr Chromium Хром	25 54.938 Mn Manganese Марганец	26 55.845 Fe Iron Железо	27 58.933 Co Cobalt Кобальт	28 58.693 Ni Nickel Никель	29 63.546 Cu Copper Медь	30 65.38 Zn Zinc Цинк	31 69.723 Ga Gallium Галлий	32 72.630 Ge Germanium Германий	33 74.922 As Arsenic Мышьяк	34 78.971 Se Selenium Селен	35 79.904 Br Bromine Бром	36 83.798 Kr Krypton		
37 85.468 Rb Rubidium Рубидий	38 87.62 Sr Strontium Стронций	39 88.906 Y Yttrium Иттрий	40 91.224 Zr Zirconium Цирконий	41 92.906 Nb Niobium Ниобий	42 95.94 Mo Molybdenum Молибден	43 95.94 Tc Technetium Технеций	44 101.07 Ru Ruthenium Рутений	45 101.07 Rh Rhodium Родий	46 106.42 Pd Palladium Палладий	47 107.868 Ag Silver Серебро	48 112.411 Cd Cadmium Кадмий	49 114.82 In Indium Индий	50 118.710 Sn Tin Олово	51 121.76 Sb Antimony Сурьма	52 127.60 Te Tellurium Теллур	53 126.905 I Iodine Иод	54 131.29 Xe Xenon Ксенон		
55 132.91 Cs Caesium Цезий	56 137.33 Ba Barium Барий	57 138.91 La Lanthanum Лантан	72 178.49 Hf Hafnium Гафний	73 180.95 Ta Tantalum Тантал	74 183.84 W Tungsten Вольфрам	75 186.21 Re Rhenium Рений	76 190.23 Os Osmium Осний	77 190.23 Ir Iridium Иридий	78 195.08 Pt Platinum Платина	79 196.967 Au Gold Золото	80 200.59 Hg Mercury Ртуть	81 204.38 Tl Thallium Таллий	82 207.2 Pb Lead Свинец	83 208.98 Bi Bismuth Висмут	84 209 Po Polonium Полоний	85 210 At Astatine Астат	86 222 Rn Radon		
87 223 Fr Francium Франций	88 226 Ra Radium Радий	89 227 Ac Actinium Актиний	104 261 Rf Rutherfordium Резерфордий	105 262 Db Dubnium Дубний	106 263 Sg Seaborgium Сиборгий	107 263 Bh Bohrium Борий	108 265 Hs Hassium Хассий	109 265 Mt Meitnerium Мейтнерий	110 266 Ds Darmstadtium Дармштадтий	111 267 Rg Roentgenium Рентгений	112 269 Cn Copernicium Коперниций	113 269 Nh Nihonium Ниголий	114 269 Fl Flerovium Флеровий	115 270 Mc Moscovium Московий	116 270 Lv Livermorium Ливерморий	117 270 Ts Tennessine Теннесси	118 270 Og Oganesson Оганесон		

Лантаноиды / Lanthanides

58 140.12 Ce Cerium Церий	59 140.91 Pr Praseodymium Празеодим	60 144.24 Nd Neodymium Неодим	61 144.91 Pm Promethium Прометий	62 150.36 Sm Samarium Самарий	63 151.96 Eu Europium Европий	64 157.25 Gd Gadolinium Гадолиний	65 158.93 Tb Terbium Тербий	66 162.50 Dy Dysprosium Диспрозий	67 164.93 Ho Holmium Гольмий	68 167.26 Er Erbium Эрбий	69 168.93 Tm Thulium Тулий	70 173.05 Yb Ytterbium Иттербий	71 174.97 Lu Lutetium Лютеций
---------------------------------------	-------------------------------------------------	-------------------------------------------	----------------------------------------------	-------------------------------------------	-------------------------------------------	-----------------------------------------------	-----------------------------------------	-----------------------------------------------	------------------------------------------	---------------------------------------	----------------------------------------	---------------------------------------------	-------------------------------------------

Актиноиды / Actinides

90 232.04 Th Thorium Торий	91 232.04 Pa Protactinium Протактиний	92 238.03 U Uranium Уран	93 237 Np Neptunium Нептуний	94 239 Pu Plutonium Плутоний	95 243 Am Americium Америций	96 243 Cm Curium Кюрий	97 247 Bk Berkelium Берклий	98 251 Cf Californium Калифорний	99 252 Es Einsteinium Эйнштейний	100 257 Fm Fermium Фермий	101 258 Md Mendelevium Менделеев	102 259 No Nobelium Нобелий	103 261 Lr Lawrencium Лоуренсий
----------------------------------------	---------------------------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------------	------------------------------------------	------------------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	---------------------------------------	----------------------------------------------	-----------------------------------------	---------------------------------------------

Атомный номер
Atomic number

Символ
Symbol

Атомная масса
Atomic mass

Название
Name

Год открытия
Year of discovery

Электронная конфигурация
Electronic configuration

105 Db
[Rn] 5f¹⁴6d¹7s²
Dubnium
Дубний

s-элементы d-элементы
p-элементы f-элементы

НАУКА СБЛИЖАЕТ НАРОДЫ | SCIENCE BRINGING NATIONS TOGETHER

RECENT POSTS

eTOC 'Chemistry International' - Jan-Mar 2022

2022 CHEMRAWN VII Prize for Green Chemistry - Call for Nominations

eTOC Alert 'Pure and Applied Chemistry' - January 2022

eTOC Alert 'Pure and Applied Chemistry' - December 2021

The Top Ten Emerging Technologies in Chemistry - Call for Proposals for 2022

IUPAC ANNOUNCES THE NAMES OF THE ELEMENTS 113, 115, 117, AND 118

30 November 2016



Elements 113, 115, 117, and 118 are now formally named nihonium (Nh), moscovium (Mc), tennessine (Ts), and oganesson (Og)

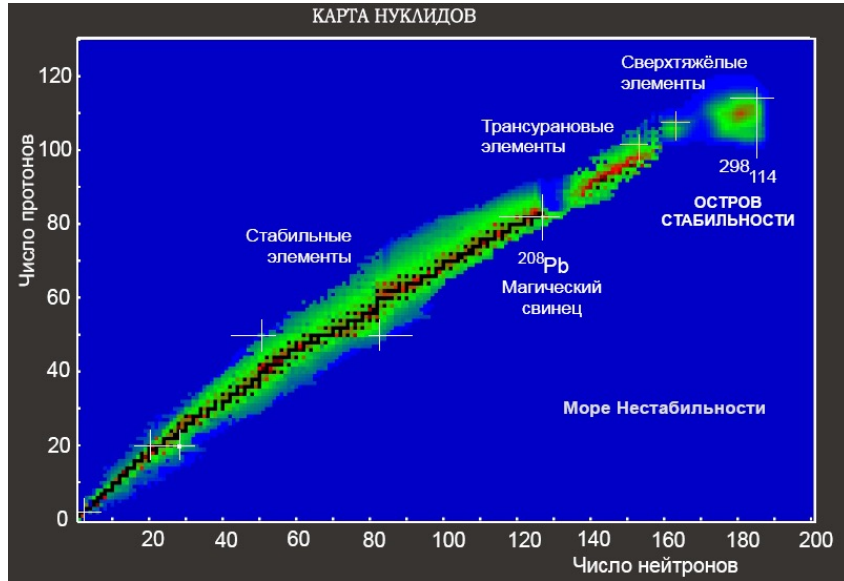
Research Triangle Park, NC: On 28 November 2016, the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) approved the name and symbols for four elements: nihonium (Nh), moscovium (Mc), tennessine (Ts), and oganesson (Og), respectively for element 113, 115, 117, and 118.

Ю.Ц. Оганесян

За открытие новых сверхтяжелых элементов и экспериментальные доказательства существования “острова стабильности”

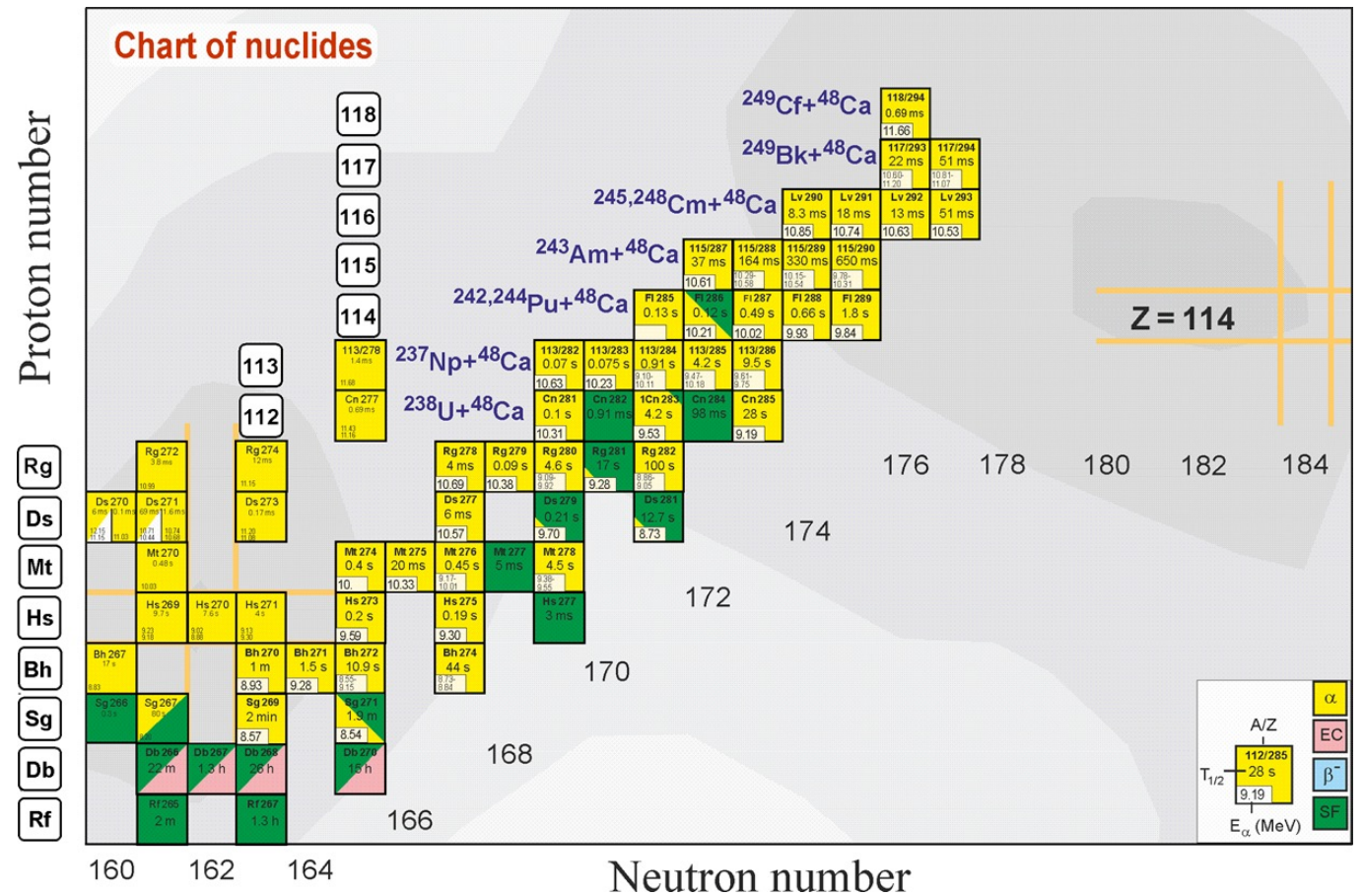
29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.921595	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904
47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447
80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98040	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)
112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (286)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (289)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessine (294)	118 Og Oganesson (294)
66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.93033	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93422	70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.967	
98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)		

Сверхтяжелые элементы



ЛЯР 1999-2018:

Область сверхтяжелых ядер синтезированных в реакциях с ^{48}Ca



Теория оболочечного строения ядра

Острова стабильности

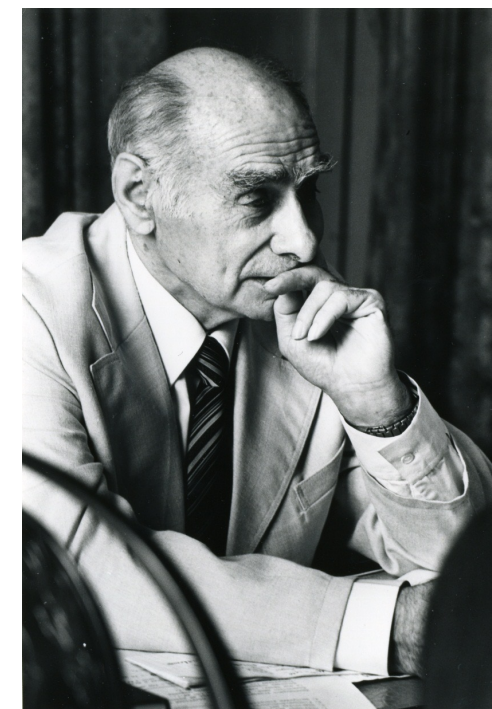
Сверхтяжелые элементы

- Альфа-распад (или СД)
- Время жизни 1 мс – 1 день
- Получение на ускорителях тяжелых ионов
- Ультранизкие сечения ядерных реакций

Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова

В 2022 – 65 лет!

Основание в 1957

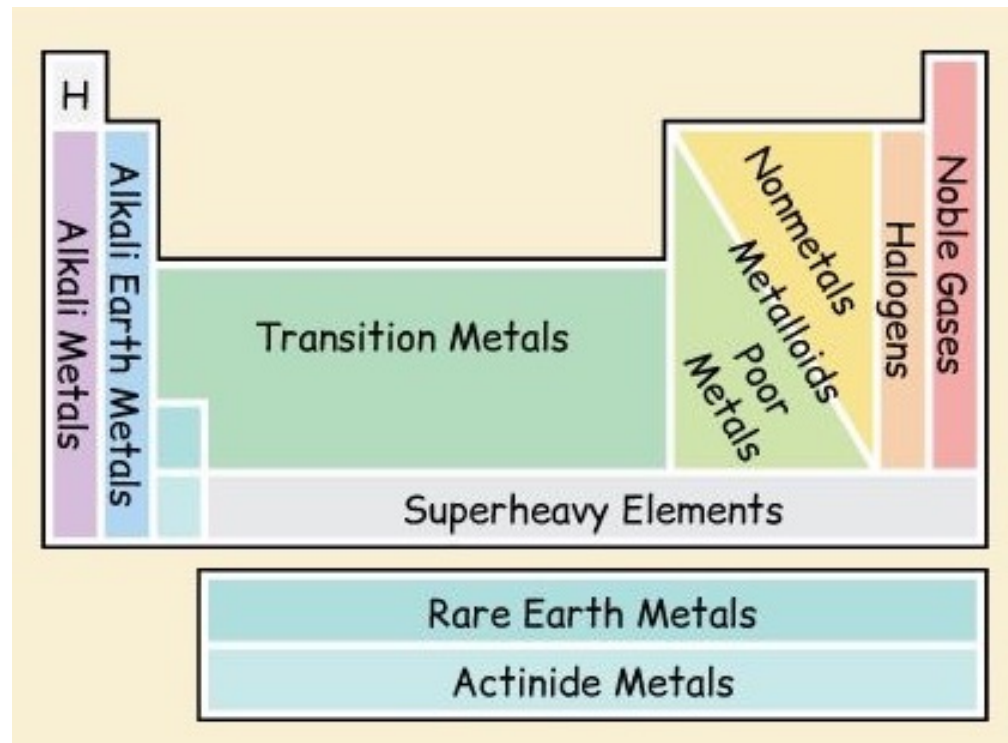


уникальные возможности для исследований ядерных реакций с тяжелыми ионами, и в области химии, известной как ядерная химия

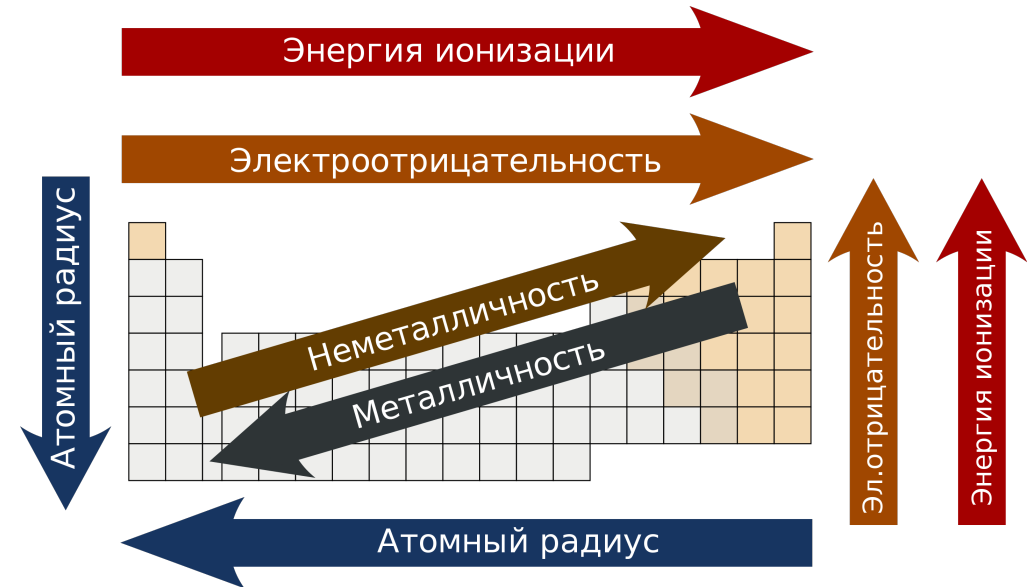
Г. Н. Флёрв
1913 — 1990

Фундаментальные вопросы химии СТЭ

- Химическая идентификация
- Структура Периодической таблицы



- Влияние релятивистских эффектов
- Периодические закономерности



Особенности изучения химии СТЭ

- Получение радиоизотопов только на ускорителях тяжелых ионов
- Низкие сечения ядерных реакций
- Короткое время жизни ($T_{1/2}$)
- Обнаруживаются в результате распада
- Один атом



М. Кюри

Открытие первых радиоактивных элементов

При выборе метода выделения и изучения необходимо учитывать:

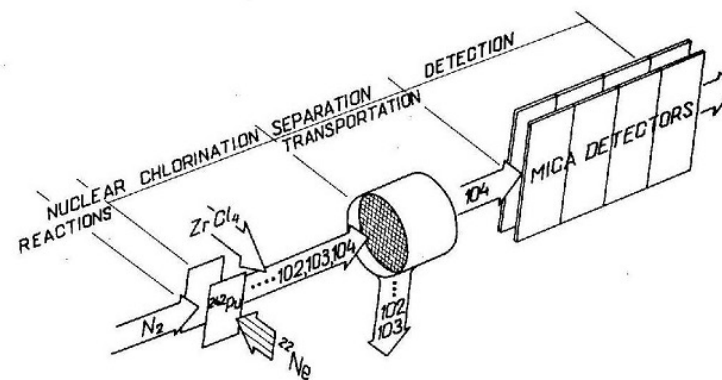
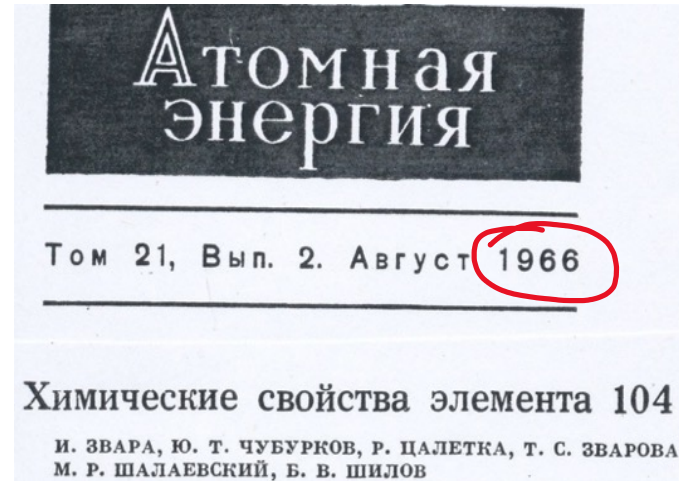
- выделение одного атома или его дочерних нуклидов из миллиардов продуктов ядерных реакций
- высокая селективность и эффективность выделения
- не образуют жидкости и твердые тела
- учет адсорбции и др. процессов
- учет химических реакций с горячими атомами
- быстрые химические взаимодействия
- стабилизация в одной хим. форме
- результат должен быть предсказан теорией
- строго контролируемые и воспроизводимые условия
- анализ низкой статистики
- детектирование цепочки альфа-распада или СД
- и др.

**Возрождение радиохимии
на совершенно новом уровне!**

Основы новой области химии - химии единичных атомов



Иво Звара
1934 – 2021



Стратегия:

Сравнить химические свойства(поведение) СТЭ со свойствами его более легких гомологов в группе ПТ

13
Бор 5 _{2p}
В 8,2983 10,811 2340 Boron 2075 4086
Алюминий 13 _{3p}
Al 5,98377 26,981539 2702 Aluminum 660,32 2519
Галлий 31 _{4p}
Ga 5,99930 69,723 5904 Gallium 29,76 2304
Индий 49 _{5p}
In 5,78556 114,818 7300 Indium 156,6 2072
Таллий 81 _{6p}
Tl 6,10829 204,3833 11850 Thallium 304 1475
113

- Шаг 1: получение СТЭ в ядерной реакции
- Шаг 2: получение летучего соединения СТЭ в химической реакции
- Шаг 3: измерение радиоактивного распада сверхтяжелого атома
- Шаг 4: экстраполяция данных адсорбции на макроскопические величины

ИЮПАК признал точную химическую идентификацию открытием элемента 104

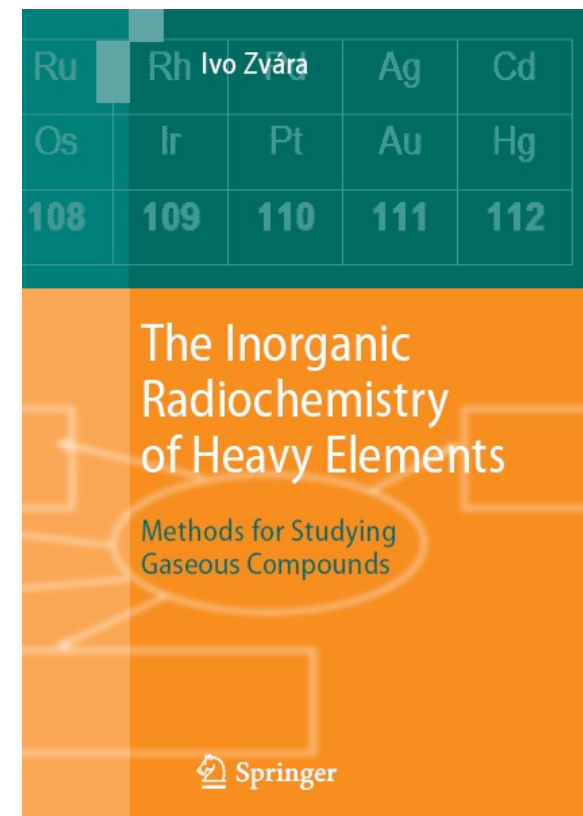
Газовая адсорбционная термохроматография

Разработка основ газохимических методов разделения
большой части элементов Периодической системы
Д.И.Менделеева: **Борис Леонидович Жуйков**

В ЛЯР с 1974 – **14 лет успешной, высокоэффективной и продуктивной работы**

- 1982 кандидатская диссертация
«Методы разделения летучих элементов и оксидов в поиске сверхтяжелых элементов и при получении радиоизотопов»
- 2009 докторская диссертация
«Газохимические методы и их применение для исследования свойств новых элементов и получения радионуклидов»
- Впервые охарактеризована летучесть Rf в восстановительной атмосфере.
Определена энтальпия сублимации элементарного и тетрахлорида Rf.
- Разработан экспрессный метод химического выделения Hs как аналога Os.

И. Звара - Принципы:



Современные проблемы химии СТЭ

Необходимо существенное повышение
общей эффективности эксперимента!



Первая химия новых элементов

Хроматография (оксо)галогенидов

Термохроматография оксидов

Жидкостная экстракция и ионный обмен

Термохроматография Sn, Fl (Nh?)
в элементарном состоянии

Современные проблемы химии СТЭ

Релятивистские эффекты (РЭ) и химические свойства СТЭ

Основные РЭ в атомах СТЭ:

- Сжатие и стабилизация s- и $p_{1/2}$ -орбиталей;
- Растяжение и дестабилизация $p_{3/2}$ -, d- и f-орбиталей;
- Спин-орбитальное расщепление.

В атомах СТЭ РЭ существенно влияют на:

- потенциал ионизации;
- ковалентный/ионный радиус;
- поляризуемость;
- энергия основного состояния;
- спектроскопические характеристики.

Влияние РЭ на химические свойства:

- энергия, длина и тип химической связи;
- константы устойчивости комплексов СТЭ;
- энергия диссоциации молекул СТЭ;
- валентные состояния атомов СТЭ.

Квантово-химический расчет позволяет осуществить грамотное планирование эксперимента и дать интерпретацию его результатов

Современные проблемы химии СТЭ

Борис Жуйков: Комбинирование теоретического и экспериментального подхода

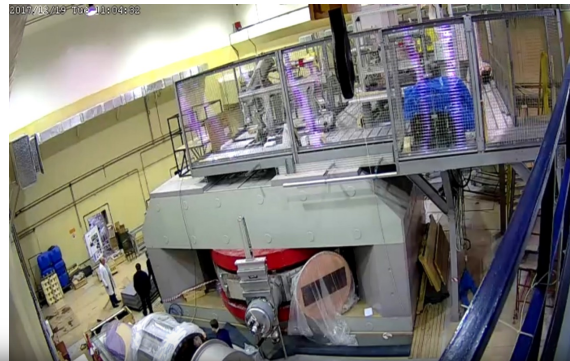
- **Предсказание температуры осаждения в термохроматографии ультрамикрочколичеств веществ с учетом химических реакций на поверхности**

Теоретическое моделирование взаимодействия атомов и молекул СТЭ с поверхностью и определение энтальпии адсорбции даст возможность сравнивать результаты квантово-химического расчета с экспериментальными данными по газовой хроматографии.

Обнаруженное теоретически и подтвержденное экспериментально отклонение свойств СТЭ от трендов, характерных для их легких гомологов, может быть интерпретировано как проявление релятивистских эффектов в химии.

- **Энтальпия адсорбции и сублимации атомов и молекул СТЭ на поверхности;**
- **Предсказание устойчивости комплексов и наиболее вероятной кристаллической структуры СТЭ;**
- **Определение типа химической связи в соединениях СТЭ.**

ФАБРИКА СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ: НОВЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СТЭ



НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ХИМИИ СТЭ!

- Новые экспериментальные установки
- Открытие новых СТЭ
- Эксперименты с высокой статистикой

2019: Создание нового, мощного ускорителя ДЦ-280 стабильных и долгоживущих радиоактивных изотопов в области масс ионов $A = 10-100$ с интенсивностью до $10 \text{ p}\mu\text{A}$ и энергией до 8 МэВ/нуклон



Ю.Ц. Оганесян

2022: первый химический эксперимент на Фабрике СТЭ



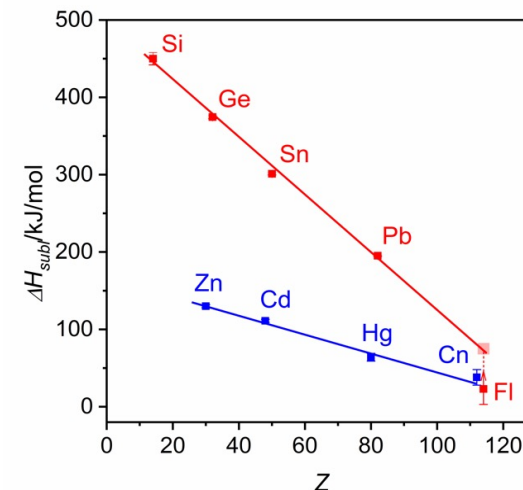
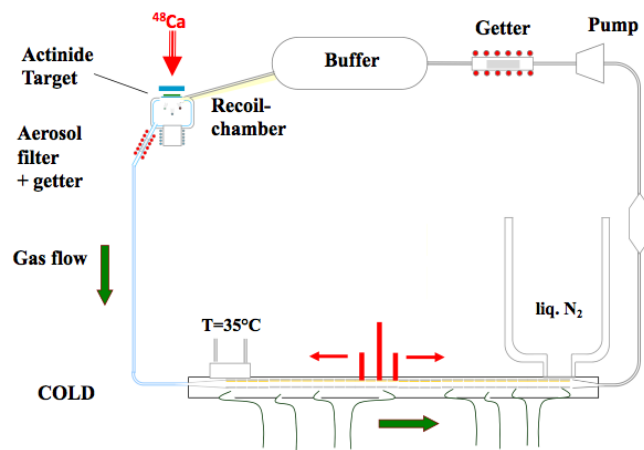
nature Vol 447|3 May 2007|doi:10.1038/nature05761

LETTERS

Chemical characterization of element 112

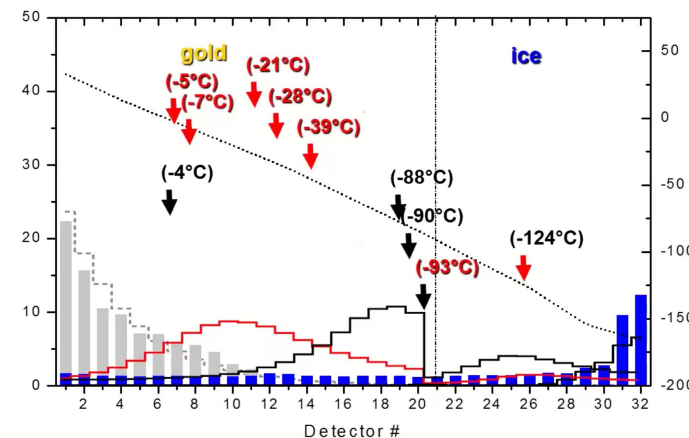
R. Eichler^{1,2}, N. V. Aksenov³, A. V. Belozero³, G. A. Bozhikov³, V. I. Chepigin³, S. N. Dmitriev³, R. Dressler¹, H. W. Gäggeler^{1,2}, V. A. Gorshkov³, F. Haenssler^{1,2}, M. G. Itkis³, A. Laube¹, V. Ya. Lebedev³, O. N. Malyshev³, Yu. Ts. Oganessian³, O. V. Petrushkin³, D. Piguet¹, P. Rasmussen¹, S. V. Shishkin³, A. V. Shutov³, A. I. Svirikhin³, E. E. Tereshatov³, G. K. Vostokin³, M. Wegrzecki⁴ & A. V. Yeremin³

Radiochim. Acta 98, 133–139 (2010) / DOI 10.1524/ract.2010.1705
© by Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München



Indication for a volatile element 114

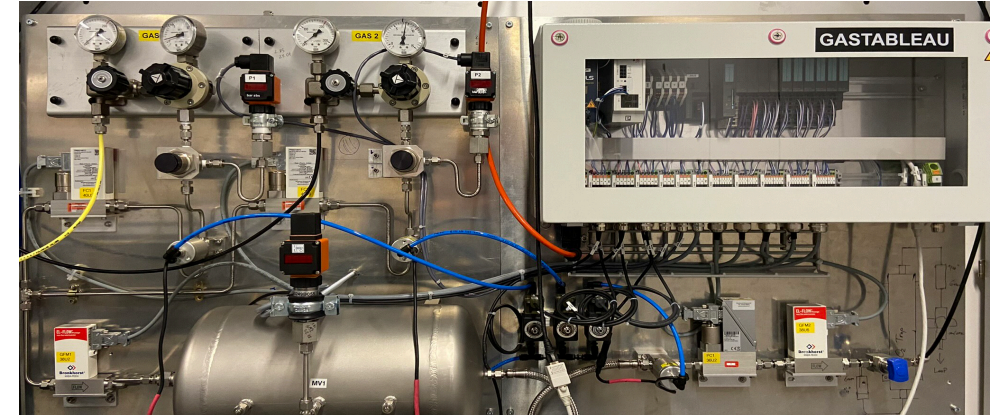
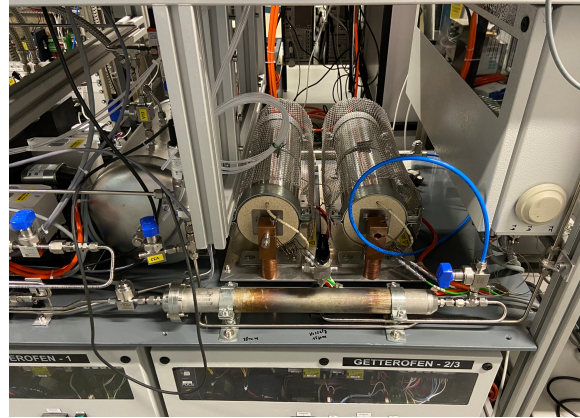
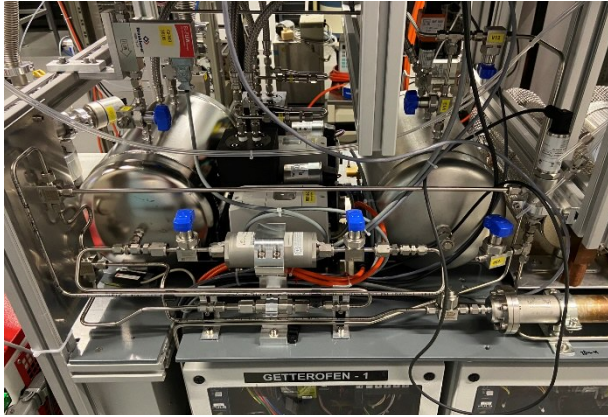
By R. Eichler^{1,2,*}, N. V. Aksenov³, Yu. V. Albin³, A. V. Belozero³, G. A. Bozhikov³, V. I. Chepigin³, S. N. Dmitriev³, R. Dressler¹, H. W. Gäggeler^{1,2}, V. A. Gorshkov³, R. A. Henderson⁴, A. M. Johnsen⁴, J. M. Kenneally⁴, V. Ya. Lebedev³, O. N. Malyshev³, K. J. Moody⁴, Yu. Ts. Oganessian³, O. V. Petrushkin³, D. Piguet¹, A. G. Popeko³, P. Rasmussen¹, A. Serov^{1,2}, D. A. Shaughnessy⁴, S. V. Shishkin³, A. V. Shutov³, M. A. Stoyer², N. J. Stoyer⁴, A. I. Svirikhin³, E. E. Tereshatov³, G. K. Vostokin³, M. Wegrzecki⁵, P. A. Wilk⁴, D. Wittwer² and A. V. Yeremin³



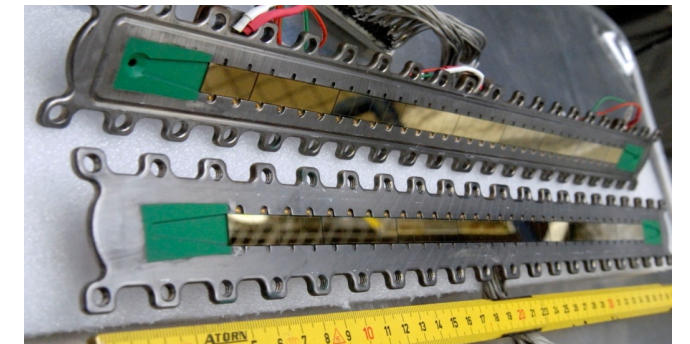
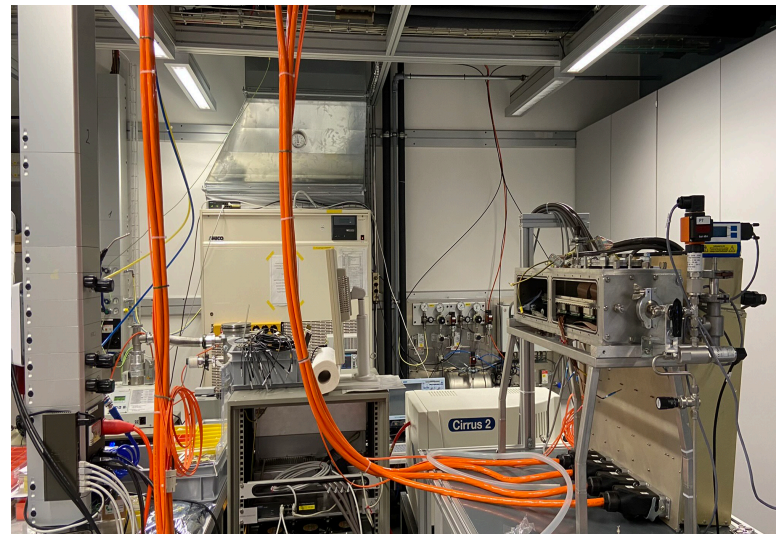
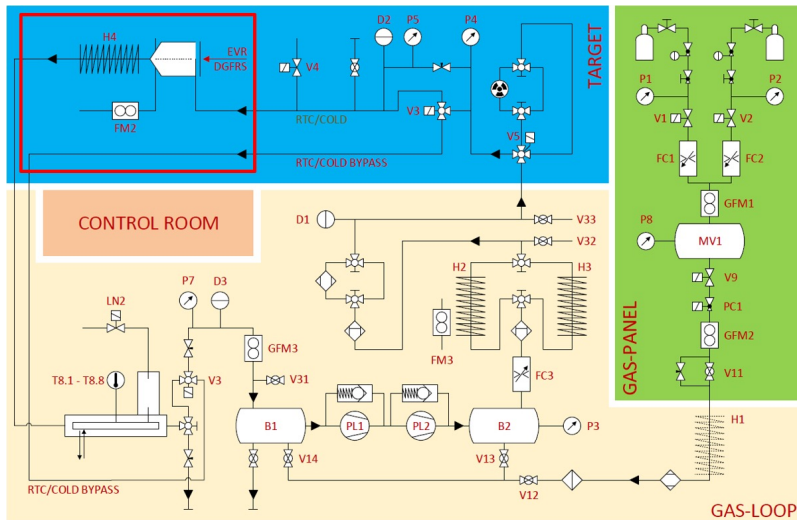
Fl - очень летучий благородный металл (3 атома)!

2021 год – Фабрика СТЭ: 94 атома в 1 эксперименте!

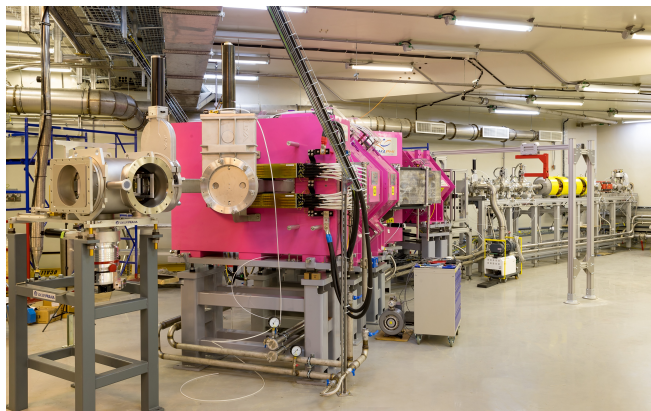
2022: первый химический эксперимент на Фабрике СТЭ



системы очистки, смешивания газов, регулирования газового контура, измерительной системы установки COLD



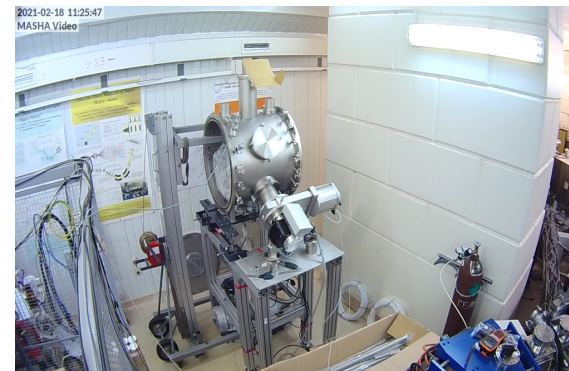
Перспективы развития: новые установки и эксперименты



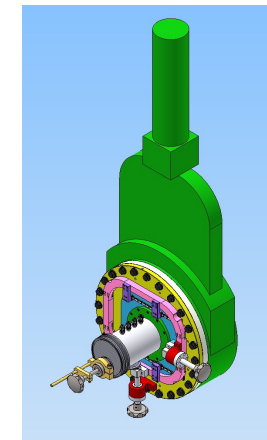
Новый пресепаратор
для радиохимии



Новые мишени



Новые установки: ионная ловушка
и масс-сепаратор



Камеры сбора ядер отдачи

Подходы к изучению новых элементов - Ts и Og

Модельные эксперименты
с гомологами элементов 115-118

Б. Жуйков: Разработаны методы газохимического разделения большого числа химических элементов, основанные на возгонке в токе водорода или кислорода (воздуха), применении твердых реагентов и «химических фильтров» при высокой температуре.

Летучесть элемента 113?

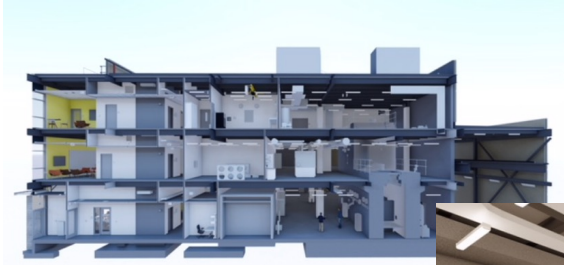
S.N. Dmitriev et al., Mendel. Comm., 24, 253 (2014)

N.V. Aksenov et al., Eur. Phys. J. A (2017) 53: 158

Безусловно это одно из самых актуальных направлений современной радиохимии и ядерной химии!

Новая радиохимическая лаборатория ЛЯР

Проект стартует в 2022 году



- **Мишенная лаборатория Фабрики СТЭ**
- **Разработка технологий наработки медицинских радиоизотопов**
- **Развитие радиохимических методов**
- **И др.**

Сотрудничество с кафедрой радиохимии химфака МГУ:

Особая роль Б.Л. Жуйкова

Коллектив Лаборатории ядерных реакций
поздравляет с 70-летием!



Желаем крепкого
здоровья
и выдающихся научных
открытий!