Инженерная школа ядерных технологий

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

V Международная научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов "Изотопы: технологии, материалы и применение"

ИТМП

РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

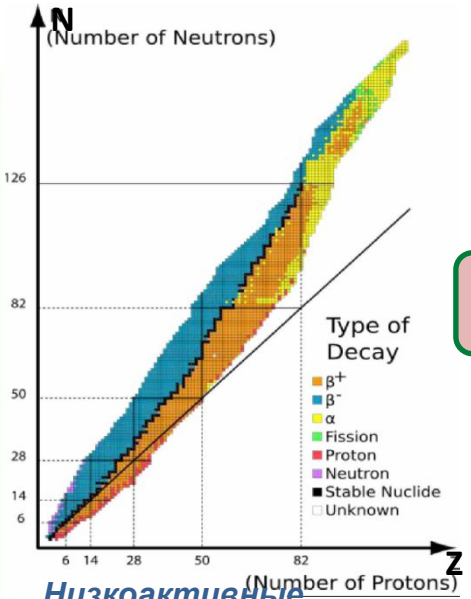
Современные области применения изотопной продукции

Скорынин Г.М., к.т.н., г. Зеленогорск Красноярского края

Орлов А.А., д.т.н., профессор ОЯТЦ ИЯТШ НИ ТПУ, Томск

Томск, 19 - 23 ноября 2018 г.

Разнообразие изотопов и нуклидов



4040 разновидностей атомов (включая 754 изомера) для 118 элементов указаны в 10-м издании “Karlsruhe Nuclide Chart”, февраль 2018

Около 3700 радионуклидов, (в т.ч. ≈750 изомеров)

276(=90+163+23) Стабильные иотопы

Природные радиоизотопы

90 Теоретически стабильные изотопы (Z=1…40)

163 Практически стабильные изотопы (Z=41…83)

23 Квази-стабильные изотопы

23

35-23=12 Первозданные (primordial) радиоизотопы, (включая Th-230, U-234)

44 изотопа трех радиоактивных семейств Th-232, U-235 и U-238

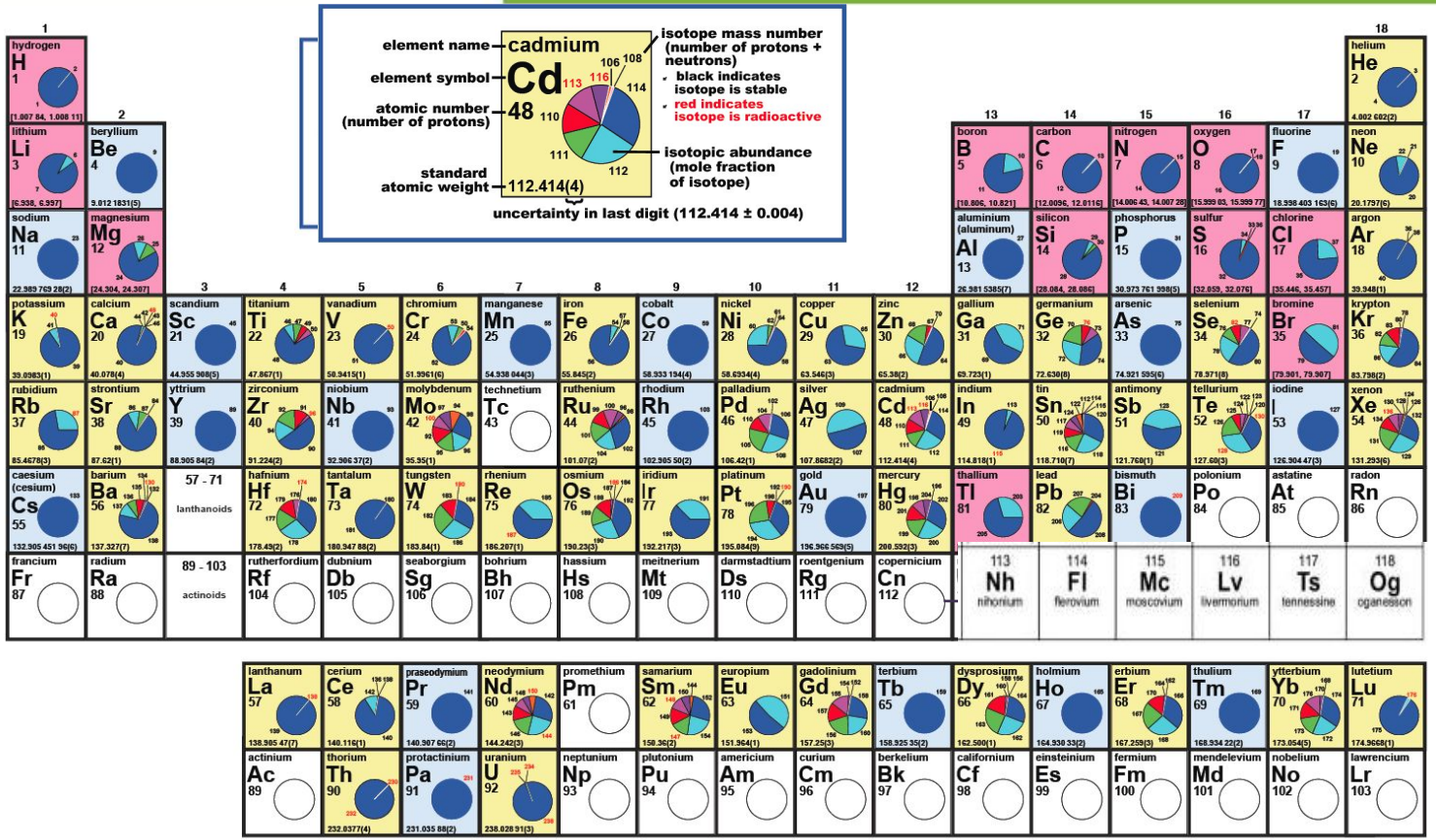
> 20 космогенных радионуклидов

Низкоактивные изотопы с очень длинным $T_{1/2}$. не представляют радиационной опасности!

Распределение химических элементов по количеству природных изотопов

Число изотопов у элемента	Химические элементы с данным числом природных изотопов	Число химических элементов
1	Be, F, Na, Al, P, Sc, Mn, Co, As, Y, Nb, Rh, I, Cs, Au, Bi, Pr, Tb, Ho, Tm	20
2	H, He, Li, B, C, N, Cl, V, Cu, Ga, Br, Rb, Ag, In, Sb, La, Ta, Re, Ir, Tl, Eu, Lu, Th	23
3	O, Ne, Mg, Si, Ar, K, U	7
4	S, Cr, Fe, Sr, Pb, Ce	6
5	Ti, Ni, Zn, Ge, Zr, W	6
6	Ca, Se, Kr, Pd, Hf, Pt, Er	7
7	Mo, Ru, Ba, Os, Hg, Nd, Sm, Gd, Dy, Yb	10
8	Cd, Te	2
9	Xe	1
10	Sn	1

IUPAC Periodic Table of the Isotopes - 2013



– только один природный изотоп

- два или более природных изотопа

– только искус-ственные изотопы

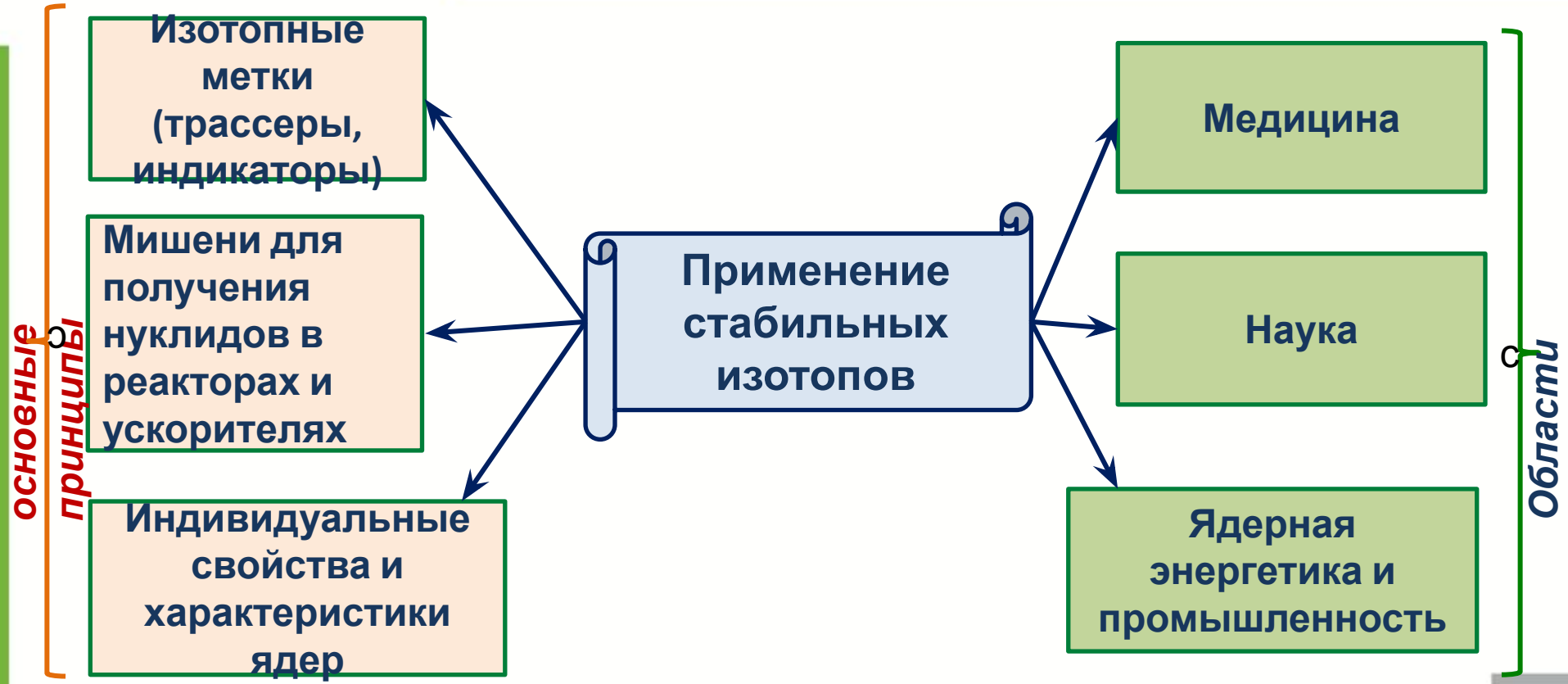
International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) Project 2007-038-3-200, "Development of an isotopic periodic table for the educational community"

October 1, 2013 www.ciaaw.org

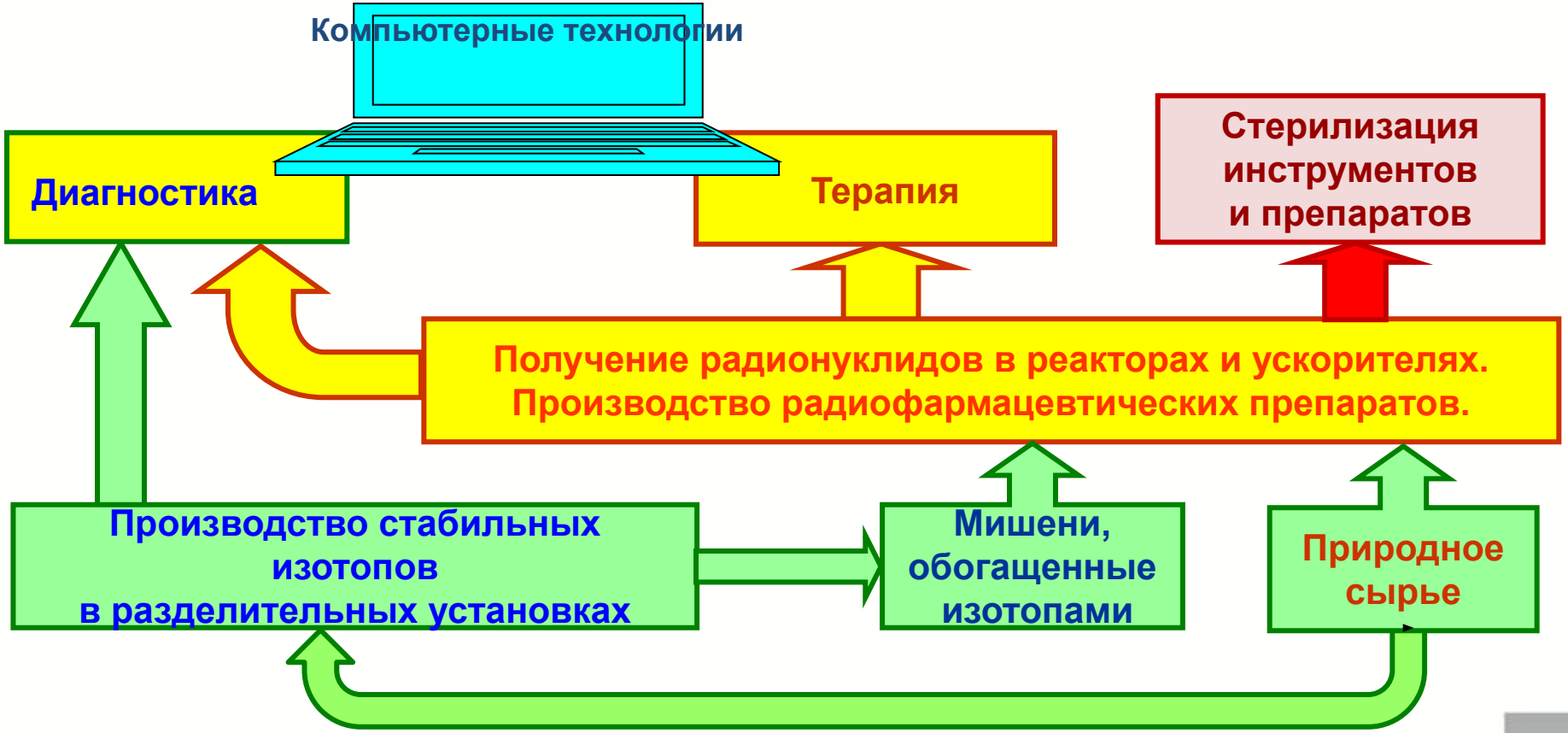
Производство стабильных изотопов

Технология разделения изотопов	Производители изотопов	Выпускаемые изотопы
Физико-химические методы (химический изотопный обмен, дистилляция, электролиз и т.д.)	Десятки производителей в США, Канаде, Европе, России, Китае, Израиле, Грузии и др.	Изотопы легких элементов (Z <10)
Электромагнитное разделение	ORNL, Ок Ридж, США ФГУП «Электрохимприбор«, Лесной НИЦ “Курчатовский институт”, Москва CIAE, Китай	Изотопы химических элементов средних и тяжелых масс
Ионно-циклотронный резонанс в плазме	Theragenics, Ок Ридж, США(2012)	Палладий, никель, молибден, гадолиний, диспрозиум, эрбий.
Газовые центрифуги	АО «ПО ЭХЗ», Зеленогорск (1971) Urenco, Алмело, Нидерланды (1990) АО «СХК», Северск (1992) РФЯЦ –ВНИИЭФ, Саров (1995)	Изотопы элементов, имеющих летучие соединения

Общие принципы и основные области применения стабильных изотопов



Стабильные изотопы в ядерной медицине

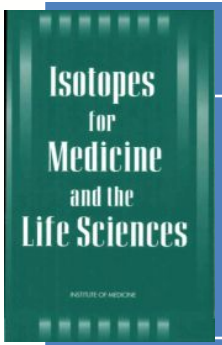


ECP ISOTOPE PRODUCTS for MEDICINE

Now it produces 95 stable isotopes of 19 following chemical elements:

- Carbon (C) — 12, 13, 14
- Silicon (Si) — 28, 29, 30
- Sulfur (S) — 32, 33, 34, 36
- Argon (Ar) — 36, 38, 40
- Iron (Fe) — 54, 56, 57, 58
- Nickel (Ni) — 58, 60, 61, 62, 64
- Zinc (Zn) — 64, 66, 67, 68, 70
- Germanium (Ge) — 70, 72, 73, 74, 76
- Selenium (Se) — 74, 76, 77, 78, 80
- Krypton (Kr) — 78, 80, 82, 83, 84, 85, 86
- (Mo) Molibdenum — 92, 94, 95, 96, 98, 100
- (Cd) Cadmium — 106, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 116
- (Sn) Tin — 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, 124
- (Te) Tellurium — 120, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 130
- (Xe) Xenon — 124, 126, 128, 129, 130, 131, 132, 134, 136
- (W) Tungsten — 180, 182, 183, 184, 186
- (Os) Osmium — 184, 186, 187, 188, 189, 190, 192
- (Ir) Iridium — 191, 193
- (Pb) Lead — 204, 206, 207, 208
- (U) Uranium — 233, 234, 235, 238

Примеры непосредственного использования стабильных изотопов в медицине и биологии



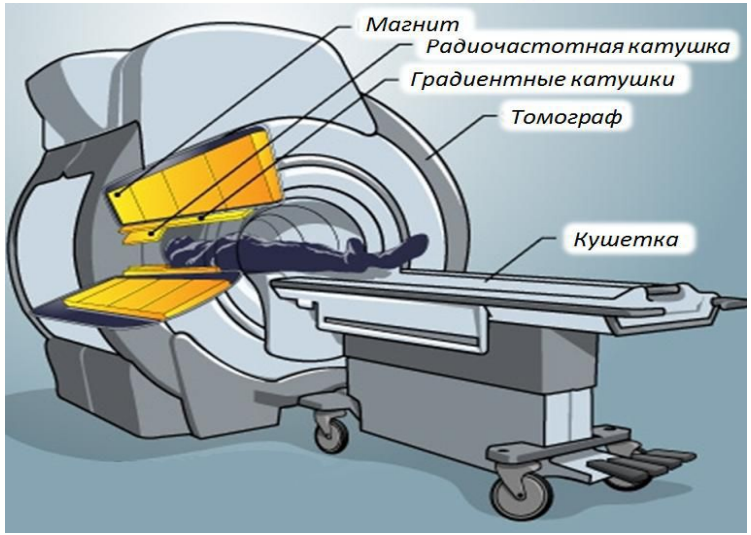
Стабильные изотопы	Применение
boron-10	Изучение метаболизма бора меченными атомами; бор-нейтронозахватная терапия рака
carbon-13	Исследование фундаментальных реакций в органической химии; Исследования структуры органических молекул ; Исследования метаболизма, включая врожденные нарушения; Дыхательный тест выявления бактерии «Helicobacter pylori»; Загрязнения воздуха и глобального изменения климата.
sulfur-33, sulfur-34	Исследования генома человека и молекулярные исследования;
chlorine-35, chlorine-37	Исследования токсичных веществ в окружающей среде.
chromium-53, chromium-54	Исследования обмена хрома и потребности человека; Изучение механизма диабета.
nickel-58, nickel-60, nickel-61, nickel-64	Измерение потребления и поглощения питания человека.

Примеры непосредственного использования стабильных изотопов в медицине и биологии (продолжение)

Стабильные изотопы	Применение
iron-54, iron-57, iron-58	Исследования метаболизма железа и расхода энергии; Условия для эффективного усвоения и выделения железа; Исследования для разработки успешного лечения анемии
krypton-78, krypton-80, krypton-82, krypton-84, krypton-86	Диагностика заболеваний легких
lead-204, lead-206, lead-207	Измерения уровней свинца в крови методом изотопного разбавления
molybdenum-94, molybdenum-96, molybdenum-97, molybdenum-100	Определение потребностей в питании человека.
selenium-74, selenium-76, selenium-77, selenium-78, selenium-80, selenium-82	Биодоступность в качестве основного питательного вещества
xenon-129	Магнитно – резонансная томография (МРТ)
zinc-64, zinc-67, zinc-68, zinc-70	Определение требований к потребности человека в цинке ;

Из S. Adelstein and F. Manning (Editors), Isotopes for Medicine and the Life Sciences, Committee on Biomedical Isotopes, INSTITUTE OF MEDICINE, 1995

Магнитно-резонансная томография (МРТ)



МРТ-изображение позвоночника, полученное осенью 2011 года в Российском радиологическом центре (Москва).

МРТ - метод исследования внутренних органов и тканей на основе явления ядерного магнитного резонанса в основном ядер атомов водорода.
Для улучшения качества изображения иногда используются для контраста вещества, меченые изотопами He-3, C-13, O-17 или Xe-129.

Стабильные изотопы – прекурсоры радионуклидов в реакторах

Стабильный изотоп	Ядерная реакция	Радиоизотоп	Полу-период	Применения радионуклида
iron-54	$^{54}Fe(n,\gamma)^{55}Fe$	iron-55	2.73y	Источник тепла (медицинское применение)
tellurium-124	$^{124}Te(n,\gamma)^{125m}I$,	iodine-125	59.9d	Диагностика остеопороза (изображение); Трассеры лекарственных средств; Диагностика и лечение рака мозга (замена I -131); Брахитерапия интерстициальной радиации.
xenon-124	$^{124}Xe(n,\gamma)^{125}I$			
cadmium-116	$^{116}Cd(n,2n)^{115}Cd \rightarrow \rightarrow ^{115m}In$	indium-115m	4.49h	Маркеры крови для оценки воспалительных заболеваний кишечника.
osmium-190	$^{190}Os(n,\gamma)^{191}Os \rightarrow ^{191m}Ir$	iridium-191m	6s	Сердечно-сосудистая ангиография.
sulfur-33	$^{33}S(n,p)^{33}P$	phosphorus-3	25d	Метка в исследованиях молекулярной

Адаптировано из

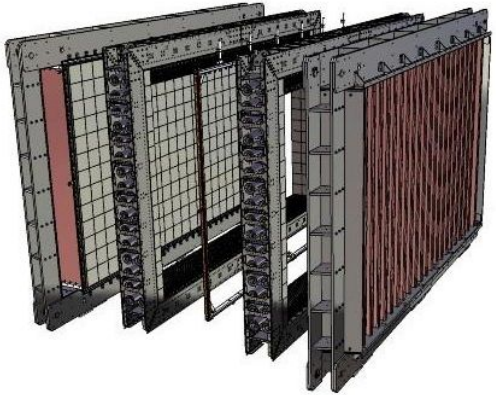
Стабильные изотопы – прекурсоры радионуклидов в ускорителях

Стабильный изотоп	Ядерная реакция	Радиоизотоп	Полу-период	Применения радионуклида
Carbon-12	$^{12}C(d,n)^{13}N$	Nitrogen-13	9,97m	ПЭТ-визуализация, перфузия миокарда.
Iron-54	$^{54}Fe(d,n)^{55}Co$	Cobalt-55	17,5h	Калибровка медицинских гамм-камер, радиатор в исследованиях и источник рентгеновской флуоресцентной спектроскопии.
Iron-56	$^{56}Fe\ (p,2n)^{55}Co$			
Zinc-67	$^{67}Zn\ (p,\ 2n)^{67}Ga$	Gallium-67	78,3h	Выявление абдоминальных инфекций, выявление лимфомы Ходжкинса, используемое с In-111 для инфекций мягких тканей и выявления остеомиелита, оценки саркоидоидиза и других гранулематозных заболеваний, особенно в легких и средостении.
Zinc-68	$^{68}Zn\ (d,\ 3n)^{67}Ga$			
Krypton-82	$^{82}Kr(p,2n)^{81}Rb \rightarrow ^{81m}Kr$	Krypton-81m	13.3s	Визуализация легких.
Cadmium-112	$^{112}Cd(p,n)^{111}In$	Indium-111	2,81d	Обнаружение отторжения трансплантанта сердца, визуализация абдоминальных инфекций, маркировка антител
Xenon-124	$^{124}Xe(\gamma,p)^{123}I$	Iodine-123	13,1h	Диагностика мозга, щитовидной железы, почек и миокарда, церебральный кровоток

Примеры применения стабильных изотопов в ядерной энергетике и промышленности

Стабильные изотопы	Применение
Deuterium (H-2)	Тяжелая вода как теплоноситель и замедлитель нейтронов в в ядерных реакторах типа CANDU, работающих на природном уране
B-10, Cd- 113> 95 %	В системе управления и защиты (СУЗ) тепловых реакторов, Конструкционные материалы защитных контейнеров для хранения ОЯТ
Sm-149, Eu-151, Eu-153, Gd-157, Dy-161, Er-167	*Выгорающие поглотители нейтронов для повышения эффективности использования ядерного топлива*
Depleted Zn-64 < 1 %	Добавка в теплоноситель ядерных реакторов для замедления коррозии и снижения дозовой нагрузки на персонал
Zr-90 > 99 % ;W-184 и др.	Малоактивируемые конструкционные материалы для ядерных реакторов
Pb-206 > 95 %	*Малоактивируемый свинцово-висмутовый охладитель быстрых реакторов (для снижения накопления Po-210 и Bi-207)*

Международные научные проекты с использованием стабильных изотопов



Основные направления использования стабильных изотопов в науке

СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ

Исследования процессов методом изотопных меток

физика, химия, биология, медицина, геохимия, археологи я, агрономия, экология и т. д . . .

Метрология

Международные эталоны единиц измерения:
а.е.м. (~~O-16~~,C-12), секунда (~~Rb-87~~,Cs-133), метр (~~Kr-86~~),
килограмм (Si-28 ?);

Аналитика

Масс-спектрометрия,
Спектральный анализ, Изотопное разбавление, Активационный анализ, Мессбауэровская

Фундаментальны е исследования материи

Ядерные данные, Свойства нейтрино и других частиц, Синтез сверхтяжелых, Поиск темной материи,
Поиск безнейтринного двойного бета -распада

Крупные международные научные проекты с использованием стабильных изотопов

№	Годы	Проект	Лаборатория (страна)	Обогащение	Масса изотопа, kg	Цель проекта
1	1990-2000	KAERI	South Korea	Mo-98 > 98 %	2	Разработка U-Mo топлива для получения Tc-99m
2	2001-2003	Laurence National Laboratory	Berkley, USA	Si-28 > 99,9 % Si-29 > 90 % Si-30 > 90 %	28 0,5 0,5	Исследования изотопов кремния для применения в полупроводниках
3	2002-2003	XMASS	Japan	Xe-129 > 80 % Xe-131 > 80 %	10	Поиск темной материи
4	2002-2008	Avogadro	Germany, Russia, Belgium, Australia	Si-28 > 99,99 %	5	Уточнение числа Авогадро, создание нового между-народного эталона массы
5	2012-2018	Kilogram-2, Kilogram-3	Germany, Russia	Si-28 > 99,997 % (Si-29 / Si-30 > 5)	15 -?-	
6	2018-2020	BEST	Baksan Neutrino Observatory, Russia	Cr-50 > 97%	3,5	Поиск «стерильных» нейтрино

МОЛНИЯ

Революция в Международной системе единиц (СИ)

16 ноября 26-я Генеральная конференция весов и мер в Версале единогласно проголосовала за пересмотр четырех из семи базовых единиц Международной системы единиц (СИ): килограмма, ампера, кельвина и моля!

С 20 мая 2019 года все единицы СИ будут определены в терминах ьных констант, значения которых теперь определены

- постоянная Планка $h = 6{,}626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ кг · м^2 · с$^{-1}$;
- элементарный заряд $e = 1{,}602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ Кл;
- постоянная Больцмана $k = 1{,}380\ 649 \times 10^{-23}$ кг · м^2 · с$^{-1}$;
- константа Авогадро $N_A = 6{,}022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ моль$^{-1}$.

Ранее были определены константы:

- скорость света в вакууме $c = 299\ 792\ 458$ м/с;
- $\Delta\nu = 9\ 192\ 631\ 770$ Гц невозмущенная частота сверхтонкого перехода из основного состояния атома цезия-133;
- световая эффективность $K_{cd} = 683$ лм / Вт (для монохроматического излучения с частотой 540×10^{12} Гц).

Уточнение числа Авогадро с помощью изотопно чистого кремния-28

Для уточнения числа Авогадро метрологи из физико-технического института Германии изготовили идеальный шар из монокристалла изотопа кремния-28 диаметром около 93,5 мм миллиметра. Изотоп Si-28 с обогащением
> 99,999 % произведен ЭХЗ. Для уточнения числа Авогадро изготовлено 5 кремниевых сфер. На основе числа Авогадро дано новое определение моля. Надежда ученых, что такой шар будет выбран эталоном килограмма, не оправдалась.

Генеральная конференция выбрала альтернативный вариант эталона килограмма на основе постоянной Планка, значение которой уточнили в Национальном институте стандартов и технологий США с помощью электромагнитных «Ватт-весов».

С 20 мая 2019 года вместо платиново-иридиевой «гири» в качестве эталона килограмма будет использоваться формула, как и для других базовых единиц

Зарождение теории безнейтринного двойного β-распада

Wolfgang Pauli
(1900-1958)

Enrico Fermi
(1901-1954)

Paul Dirac
(1902-1984)

1930- Волфган Паули выдвинул гипотезу о существовании нейтрино

1933- Энрико Ферми создал теорию **β**-*распада*

1935 - Мария Гепперт-Майер года выдвинула идею и рассчитала вероятность ***двух нейтринного*** *двойного* **β** *- распада.*

1937-Этторе Майорана построил теорию нейтрино, по которой они являются их собственными античастицами;

В теории антивещества Дирака нейтрино и антинейтрино — это разные частицы ($\nu \neq \tilde{\nu}$), а в теории Майораны — это одна и та же частица ($\nu = \tilde{\nu}$).

1939 -Уэнделл Фарри обсудил возможность ***безнейтринного*** *двойного* **β** *-распада для проверки теории Майораны. Регистрация ββ(0ν)-распада будет однозначно свидетельствовать о майорановской природе нейтрино*

Maria Göppert-Mayer
(1906-1972)

Ettore Majorana
(1906-1938)

Wendell Furry
(1907-1984)

Ранние эксперименты по исследованию двойного β-распада

1950 - первое наблюдение 2ν-распада в геохимическом эксперименте с Te-130.
По содержанию дочернего продукта в теллуровой руде определен $T_{1/2} = 1{,}4 \cdot 10^{21}$ лет.

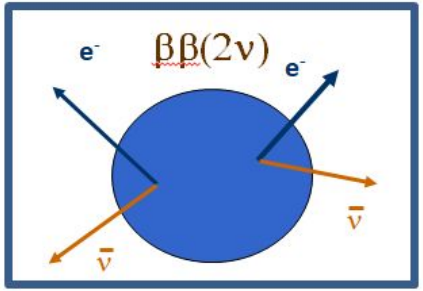
1967 - в геохимическом эксперименте для **ββ(2ν)**-распад в Se-82 определен $T_{1/2} = 0{,}6 \cdot 10^{20}$ лет.

1966 – 1986 проводился ряд прямых счетчиковых экспериментов. За 20 лет **ββ(2ν)**- распада не зарегистрировано, но эксперименты позволили определить нижний предел периода полураспада (чувствительность) со знаком неравенства.

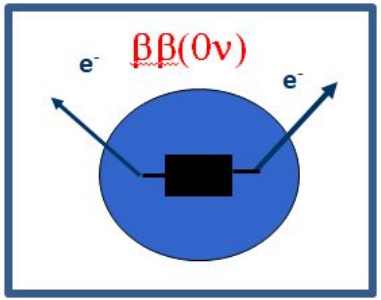
1987 - М.Моу с сотрудниками в университете Калифорнии в прямом счетчиковом эксперименте впервые наблюдали 36 событий **ββ(2ν)**- распада в 14 г Se-82 ($T_{1/2} = 1{,}1 \cdot 10^{20}$ лет).

В настоящее время ββ(2ν)-распад обнаружен уже для 11 ядер:

(Ca-48, Ge-76, Se-82, Zr-96, Mo-100, Cd-116, Te-128, Te-130, Xe-136, Nd-150, U-238).



Безнейтринный ββ(0ν)-распад пока не обнаружен.



Его регистрация будет однозначно свидетельствовать о майорановской природе нейтрино. В этом случае потребуется корректировка стандартной модели физики!

Основные эксперименты по исследованию двойного β-распада [ββ(2ν)]

№	Год	Коллаборация	Лаборатория (страна)	Изотоп, обогащение	Масса изотопа, kg
1	1987	Michael Moe's grup	University of California	Se-82>97 %	0,014
2	1991-1999	IGEX	Gran Sasso of INFN (Italy)	Ge-76 > 86 %	6,5
3	1990-2003	Heidelberg-Moscow		Ge-76 > 86 %	11
4	1990-1994	NEMO		Mo-100 > 95 %	13
5	1995	NEMO 2		Se-82 > 95 %	1
6	2002-2003	EXO	New Mexico, USA	Xe-136 > 80 %	100
7	2004-2005	GERDA	Gran Sasso	Ge-76 > 86 % (Ge-70 < 0,01 %)	30-40

A. S. Barabash, Brief review of double beta decay experiments, 21 Feb 2017

Текущие и перспективные потребности в стабильных изотопах для экспериментов по поиску безнейтринного двойного β-распада

№.	Лаборатория (страна)	Эксперимент (проект)	Изотоп, обогащение	Текущая пот-ребность, kg	Будущая потребность, kg	Годы
1	YangYang (Korea)	AMoRE	Mo-100 > 95 %	1,5	200	2020-2024
2	Gran Sasso (Italy)	CUORE	Te-130 > 99 %	-	200	~2022
3		GERDA	Ge-76 > 87 %	35	200 (LEGEND1)	~2022-2025
4	Sanford Under-ground Lab, (USA)	MAJORANA	Ge-76 > 87 %	30	1000(LEGEND2)	~2025-2030
5	WIPP (USA)	nEXO	Xe-136 > 80 %	200	5000	~2025-2030
6	Modane (France)	SuperNEMO	Se-82 > 97 %	7	100	~2020
7	Kamioka (Japan)	KamLAND-Zen	Xe-136 > 99 %	750	1000	~2020-2022
8	SNOLAB (Canada)	SNO+	Te-130 > 99 %	850	1000	~2020-2022

Nd-150> 91 % ?

A. S. Barabash, Brief review of double beta decay experiments, 21 Feb 2017

Состояние и перспективы развития изотопической инженерии

■ Наименее изученными остаются изотопные эффекты в кристаллах и других конденсированных средах. Изотопическая инженерия - новое перспективное направление развития современной микро-электроники, оптоволоконной и лазерной техники, создания принципов хранения и обработки информации в квантовых компьютерах.

■ Фундаментальные исследования подтверждают различия в теплопроводности у различных изотопов кремния, германия и углерода.

■ Применение изотопа С-13 уменьшает поглощение и рассеивание луча мощного $C0_2$–лазера при прохождении через атмосферу, изотопы Cd-114, Cd-112 улучшают характеристики гелий-кадмиевых лазеров.

■ Серия зарубежных патентов с одинаковым названием *«Isotopically altered optical fiber»* (Allan Douglas, James Bell и др.) свидетельствует о растущем интересе к изотопно-модифицированным материалам оптоволокон.

■ Исследования в области изотопической инженерии, проводимые как за рубежом (А. Березин, Канада, В.Г. Плеханов, Эстония и др.), так и в России (В.И. Ожогин, А.В. Тихомиров с сотрудниками Курчатовского института, В.Ф. Мышкин, В.А. Хан с сотрудниками ТПУ, и др.), пока не вышли из «академической» стадии.

■ Для улучшения характеристик конечных продуктов путем применения изотопно-модифицированных материалов потребуется проведение обширных прикладных исследований и разработок.

Инженерная школа ядерных технологий

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

ckorynin@gmail.com

orlovaa@tpu.ru