ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЧАСТИЦ

- Андрей Георгиевич Попеко
- Александр Владимирович Еремин
- Малышев Олег Николаевич (физпрактикум)

Что нас ждёт?

Физика атомного ядра и частиц	экзамен
Семинары	зачёт
Ядерно-физический практикум	зачёт

ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЧАСТИЦ

Программа курса

- 1. Введение.
- 2 Основные свойства атомных ядер
- 3. Радиоактивность
- 4. Нуклон - нуклонное взаимодействие и свойства ядерных сил
- 5. Модели атомных ядер
- 6. Ядерные реакции
- 7. Деление ядер
- 8. Сверхтяжёлые ядра и экспериментальные методы физики низких энергий
- 9. Взаимодействие ядерного излучения с веществом
- 10. Ядерные технологии
- 11. Частицы и взаимодействия
- 12. Фундаментальные частицы Стандартной модели.
- 13. Современные астрофизические представления
- 14. Эксперименты в физике высоких энергий
- 15. Космические лучи.

Литература

Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Н. П. Юдин. "Частицы и атомные ядра“, М., Издательство ЛКИ, 2007.
И.М. Капитонов. “Введение в физику ядра и частиц”, М., Издательство Комкнига, 2006
К.Н. Мухин. "Экспериментальная ядерная физика" (в трех томах), СПб., Издательство Лань,. 2008.

- **Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Н. П. Юдин. "Частицы и атомные ядра“, М., МГУ 2005.**
- **Н.Г. Гончарова, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Э.И. Кэбин, М. Е. Степанов. "Физика ядра и частиц. Задачи с решениями", М., Из-во УНЦДО, 2003.**
- **"Субатомная физика. Вопросы. Задачи. Факты." - под редакцией Б.С. Ишханова, изд-во МГУ, 1994.**
- **К.Н. Мухин. "Экспериментальная ядерная физика" (в трех томах), М., Энергоатомиздат. 1993.**
- **А. Любимов, Д. Киш. "Введение в экспериментальную физику частиц", Дубна, Изд. ОИЯИ, 1999.**
- **Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, И.А. Тутынь. "Нуклеосинтез во Вселенной", М., Изд. МГУ, 1999.**
- **http://theory.asu.ru/~raikin/Students/IT_SE/nuclphys.sinp.msu.ru/npi.html**

Масштабы Вселенной

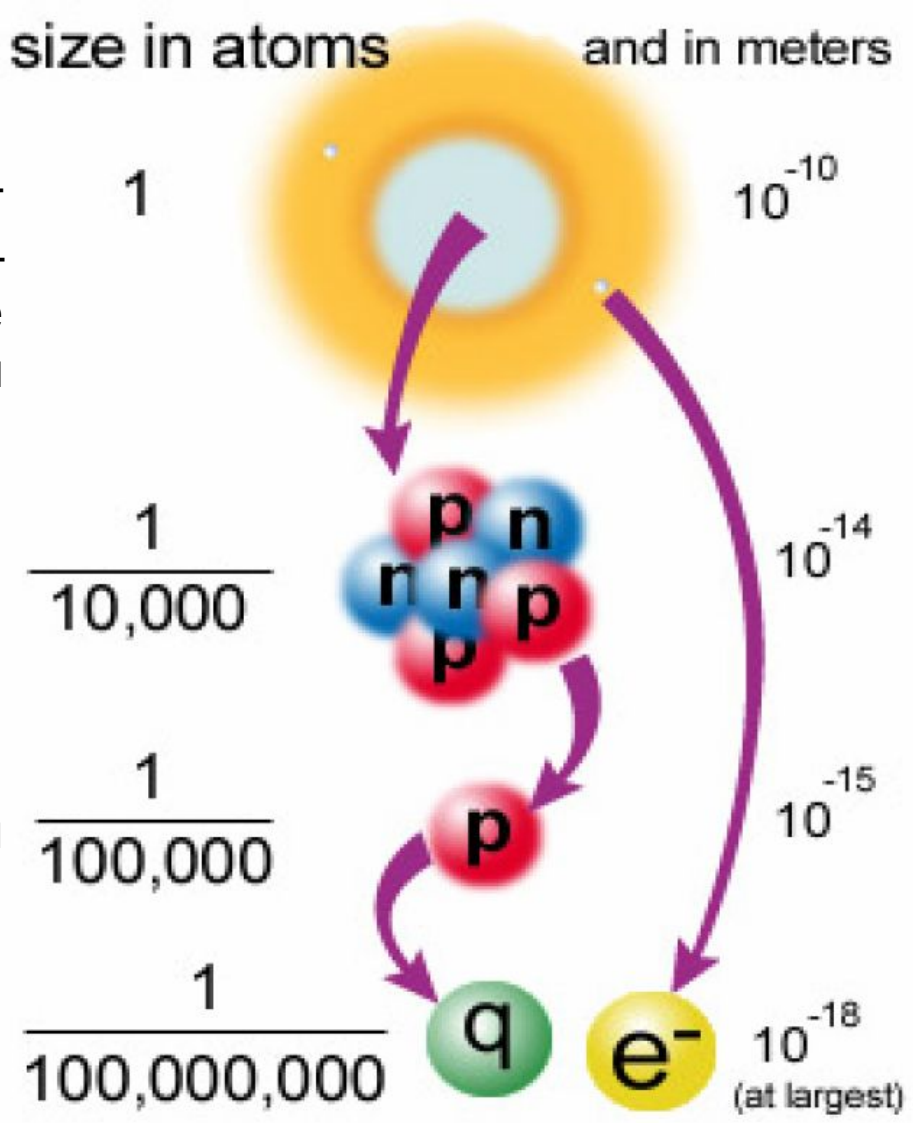
Масштабы Вселенной

Масштабы пространственных размеров исследуемых нами структур мира различаются в 10^{45} раз! В основе этого бесконечного разнообразия структур лежит ограниченный набор фундаментальных частиц, взаимодействие между которыми приводит сначала к существованию адронов и атомных ядер, затем к миру атомов и молекул, бесчисленные соединения которых формируют многообразие органических структур и минералов, а бесконечное тиражирование атомов и молекул создает все многообразие макроскопических структур мира.

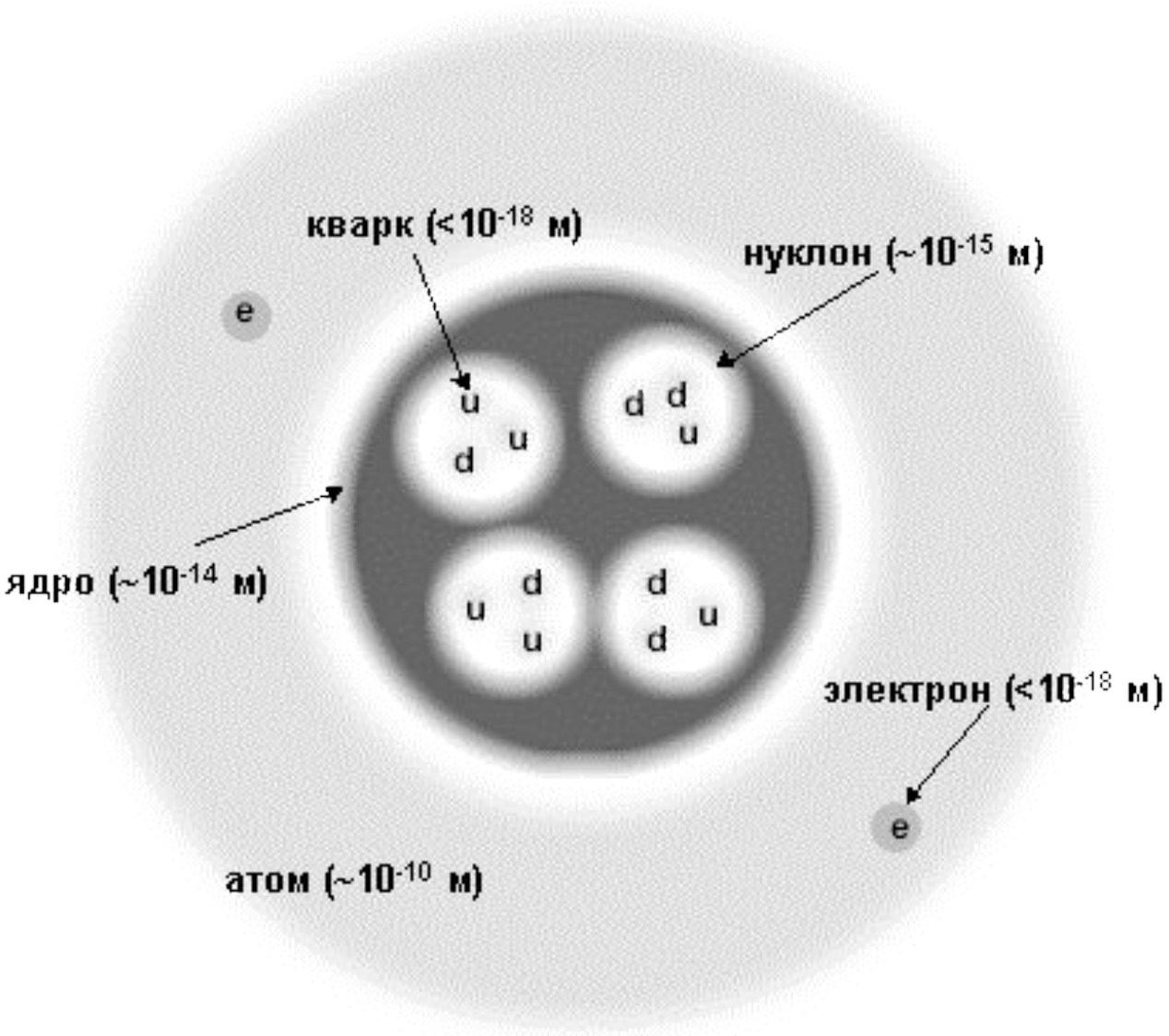
Размеры

Физика ядра и частиц изучает закономерности процессов, происходящих на расстояниях меньше 10^{-14} м. Основной метод исследования таких масштабов — это столкновение частиц друг с другом. При этом необходимо ускорять сталкивающиеся частицы до очень больших энергий. Для этого строят ускорители частиц. Для

Регистрации результатов взаимодействия частиц создаются различного типа детекторы.



Размеры ядра



Ядерная физика

- Эксперимент
- Теория
- Техника (ускорители)
- Техника (детекторы)

Элементарные частицы

Аристотель (384 – 322 до н.э.)

Элементарные частицы

Элементарными частицами называют частицы, которые на современном уровне знаний являются неделимыми, не состоят из других частиц. По мере наших развитий о природе материи в качестве элементарных объектов выступали различные частицы. Аристотель (384 – 322 гг. до н.э.) считал, что все вещество во Вселенной состоит из четырех основных элементов – земли, воздуха, воды и огня, на которые действуют две силы: сила тяжести, влекущая землю и воду вниз, и сила легкости, под действием которой огонь и воздух устремляются вверх. Такой подход к описанию строения Вселенной, когда все делится на вещество и взаимодействия, сохраняется до сих пор.

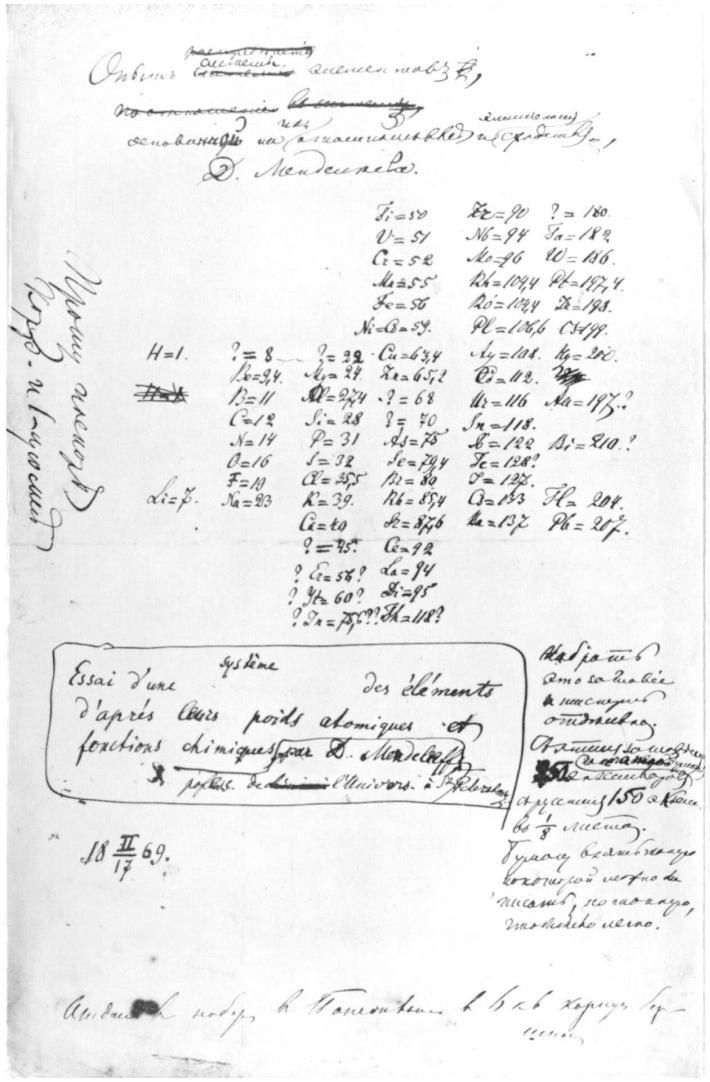
Всё делится на:

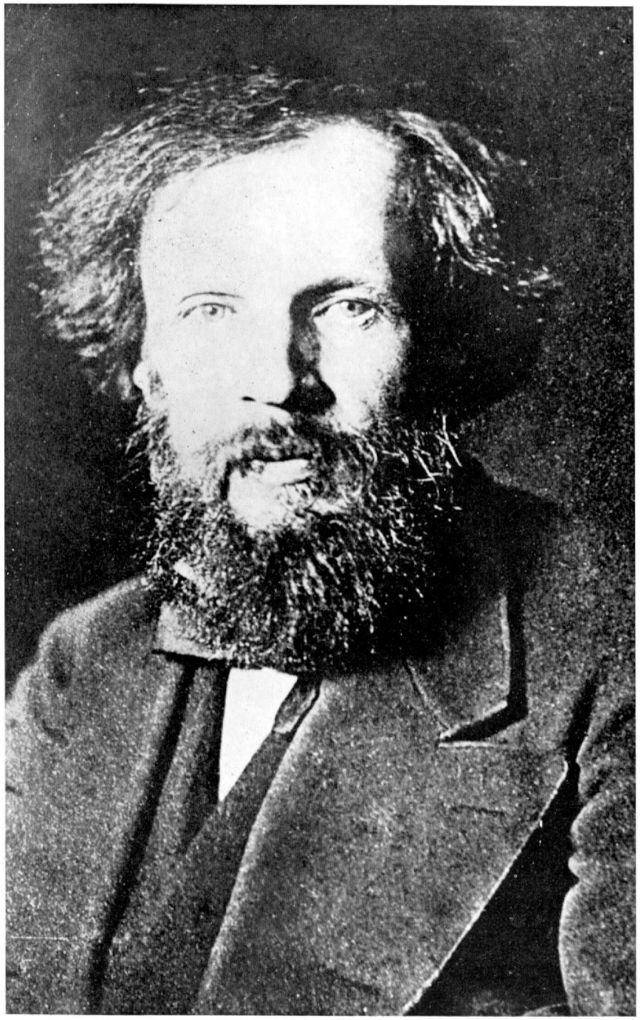
- **вещество: воздух, вода, земля, огонь,**
- **взаимодействия: лёгкость и тяжесть**

Периодическая система элементов

Периодическая система элементов Д.И Менделеева 1869 г.

За основу классификации элементов Д. И. Менделеев выбрал химические свойства элементов.





1834 -1907

Периодическая система элементов

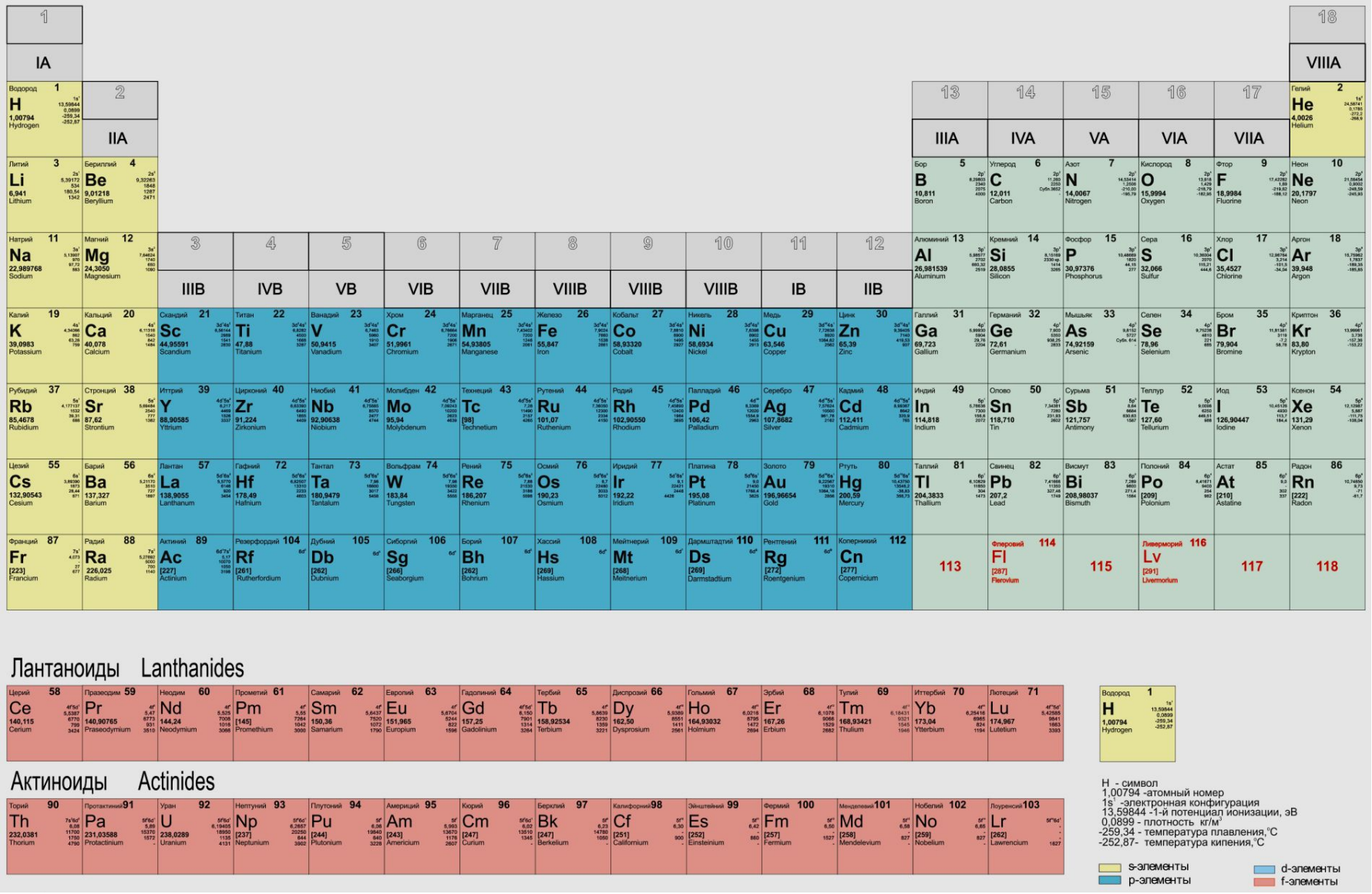
Создание Периодической системы элементов имело два фундаментальных последствия.

• Расстановка всех химических элементов по клеточкам Периодической системы исключило существование каких-либо промежуточных элементов. Сегодня открыто 118 химических элементов и поиски новых, сверхтяжелых элементов продолжаются. Однако известно точно, что до 118-го элемента включительно их всего 118.

• Периодическое изменение химических свойств элементов наводит на мысль о более глубоких принципах их устройства. Окончательно это стало ясно после открытия электрона и атомного ядра.

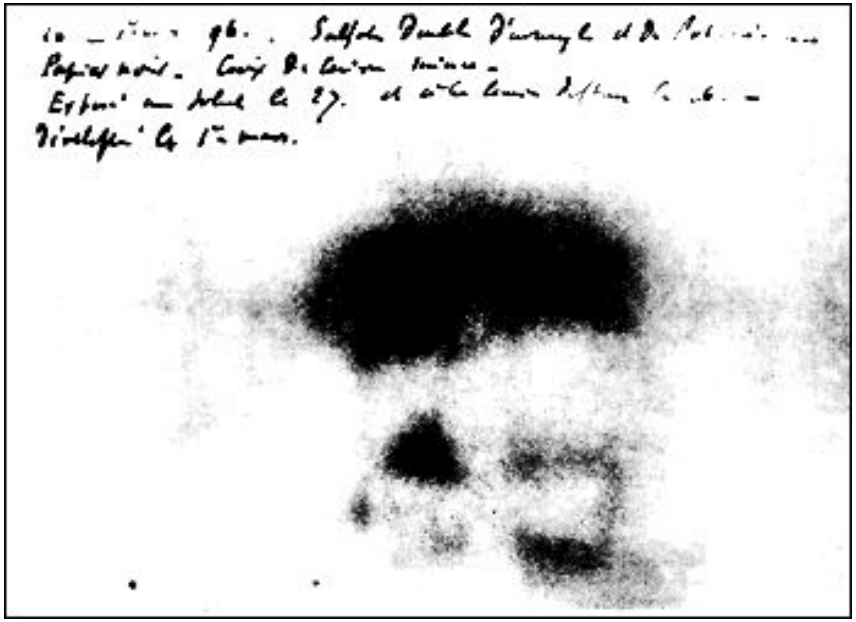
На смену наивным представлениям древних греков о четырёх элементах, лежащих в основе всех веществ Вселенной, пришло представление о следующем уровне организации материи — химических элементах.

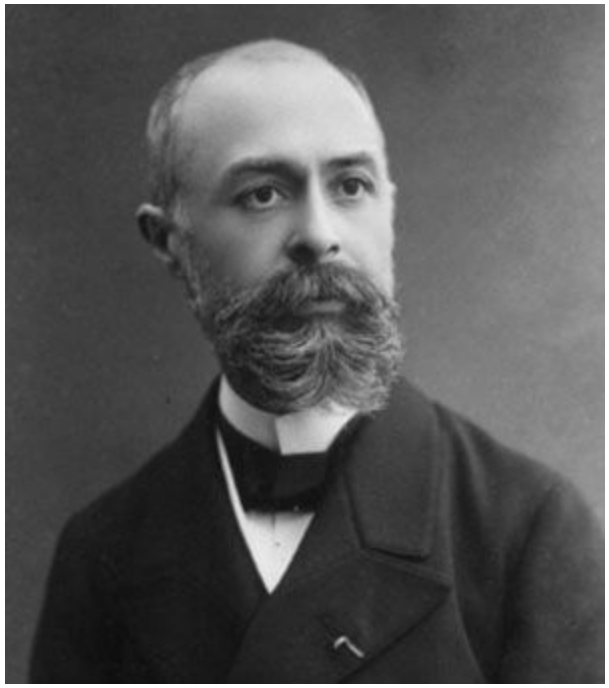
Периодическая таблица элементов Д.И. Менделеева



Радиоактивность

1896
Открытие радиоактивности





Antoine Henri Becquerel
(1852–1908)

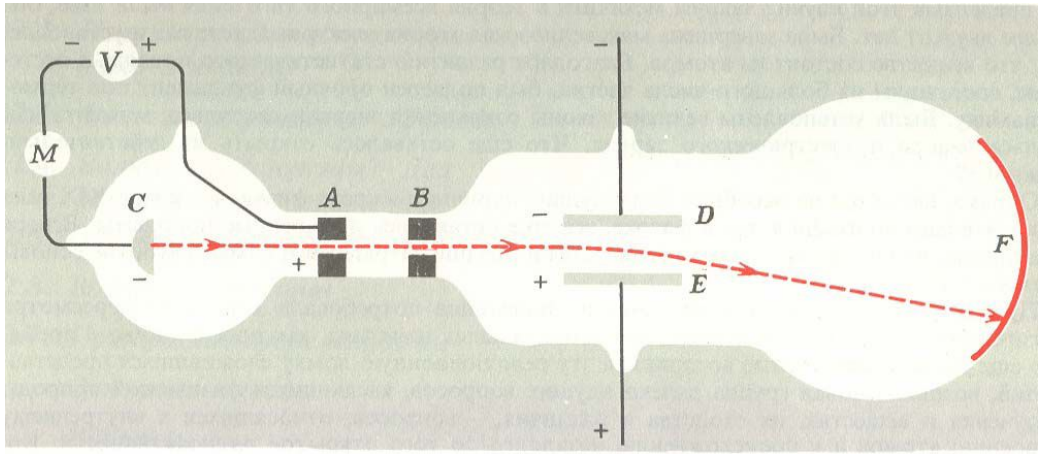
Нобелевская премия по физике
1903 г.- А. Беккерель
За открытие радиоактивности

Элементарные частицы

В конце 19 века в качестве элементарных частиц стали выступать атомы. Открытие электрона и атомного ядра привело к новым элементарным частицам: электрону и атомному ядру.

1897
Электрон

1904
Модель атома



Нобелевская премия по физике 1906 г.–Дж. Дж. Томсон
За большие заслуги в теоретических и экспериментальных исследованиях электрической проводимости газов.

Joseph Thomson (1856-1940)

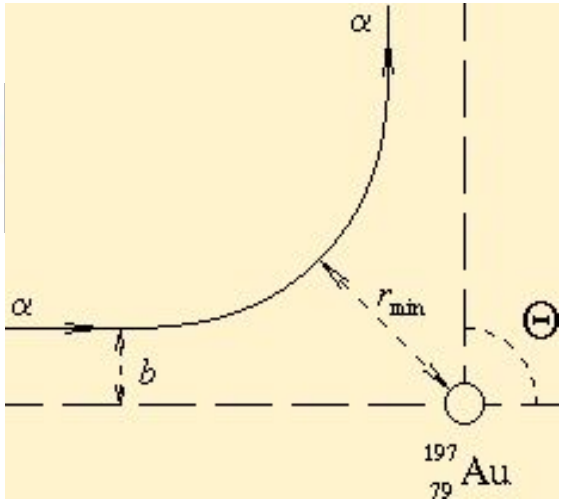
Атомное ядро

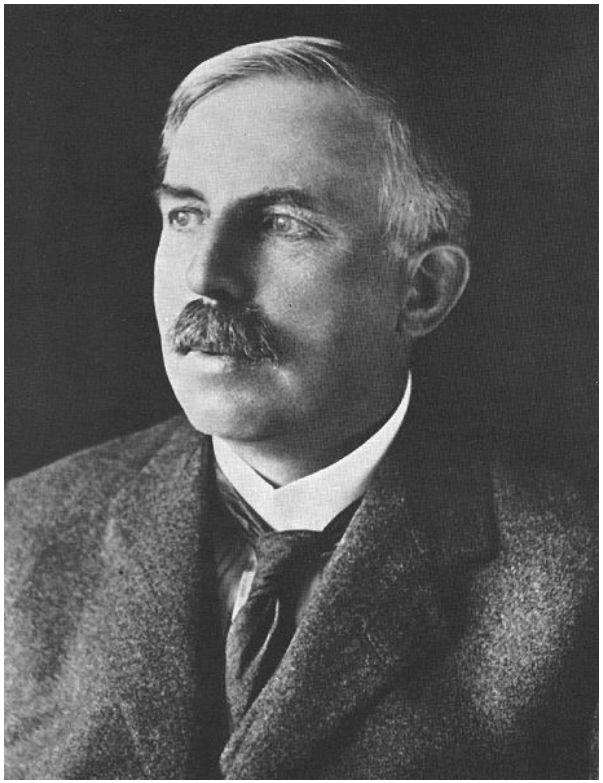
Первая половина 20 го века – атомное ядро, протон, нейтрон

1911
Атомное ядро

$$\alpha + {}^{197}_{79}\mathrm{Au} \rightarrow \alpha + {}^{197}_{79}\mathrm{Au}$$

$$\mathrm{tg}\frac{\theta}{2} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2bE}$$





Нобелевская премия по химии 1908 г. -Э. Резерфорд
За исследования по превращению элементов и за химические исследования радиоактивных веществ.

Э. Резерфорд

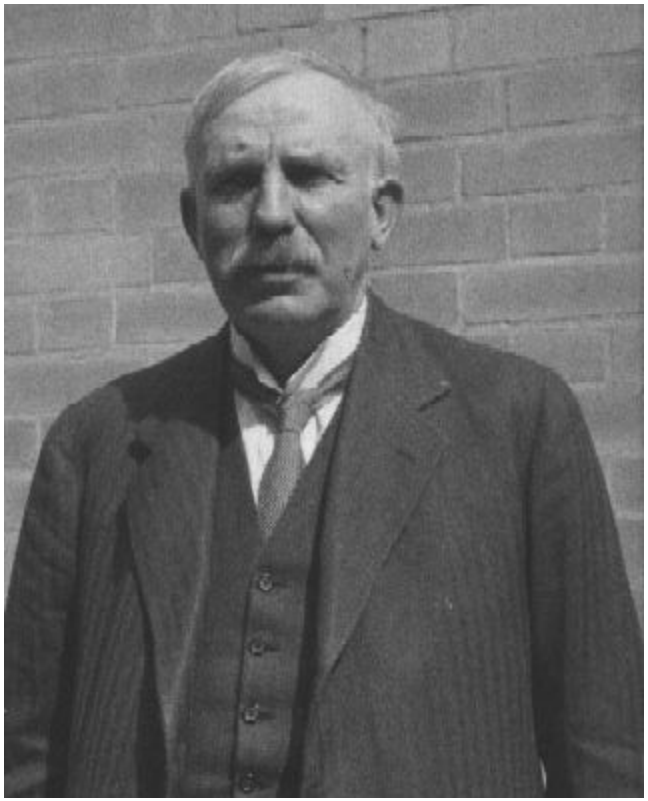
(1871-1937)

Открытие протона

1919
Протон

В 1919 г., продолжая эксперименты по рассеянию α-частиц на различных мишенях, Э.Резерфорд обнаружил, что при бомбардировке ядер азота 14N α- частицами из него вылетают положительно заряженные частицы. Величина заряда этих частиц по абсолютной величине была равна величине заряда электрона, но противоположна по знаку.

$$\alpha + {}^{14}_{7}N \rightarrow p + {}^{17}_{8}O$$



Э. Резерфорд

(1871-1937)

Протоны являются элементарными частицами, входящими в состав атомного ядра

Модель Бора

Модель**, предложенная Бором, впервые** позволила удовлетворительно объяснить закономерность строения атома**.**
Основные постулаты модели Бора**:**

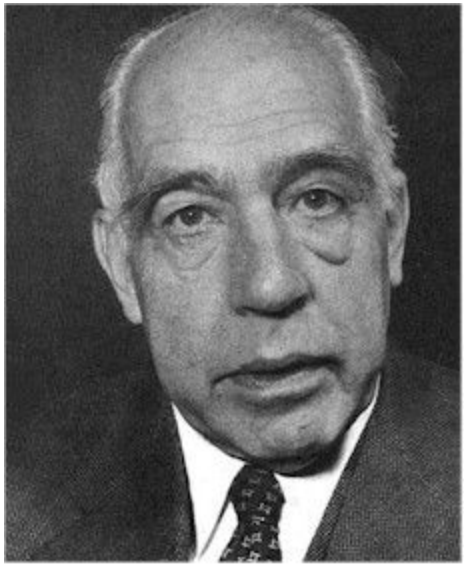
1. Электрон равномерно вращается вокруг атомного ядра по круговой орбите под действием кулоновских сил в соответствии с законами Ньютона**.**

2. Разрешенными орбитами электрона являются только те**, для которых** момент импульса электрона равен *n.*

3. При движении электрона по стационарной орбите атом не излучает энергию**.**
4. При переходе с орбиты с энергии $\boldsymbol{E_i}$ на другую орбиту с энергией E_f **(**$\boldsymbol{E_i} > E_f$**) *излучается фотон, имеющий*** энергию $h\nu = \boldsymbol{E_i} - E_f$ **.**

Модель Бора

1923
Принцип соответствия



Всякая новая теория в физике должна сводиться к хорошо установленной, соответствующей классической теории, если эта теория прилагается к специальным случаям, **которые успешно** описываются менее общей теорией.

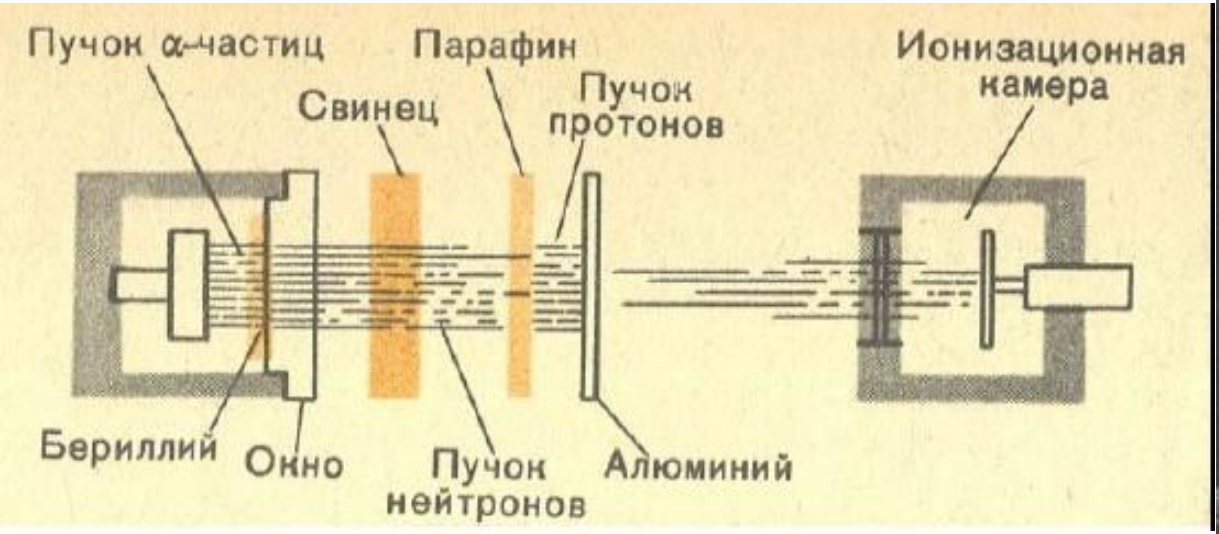
Niels Henrik David Bohr
(1885-1962)

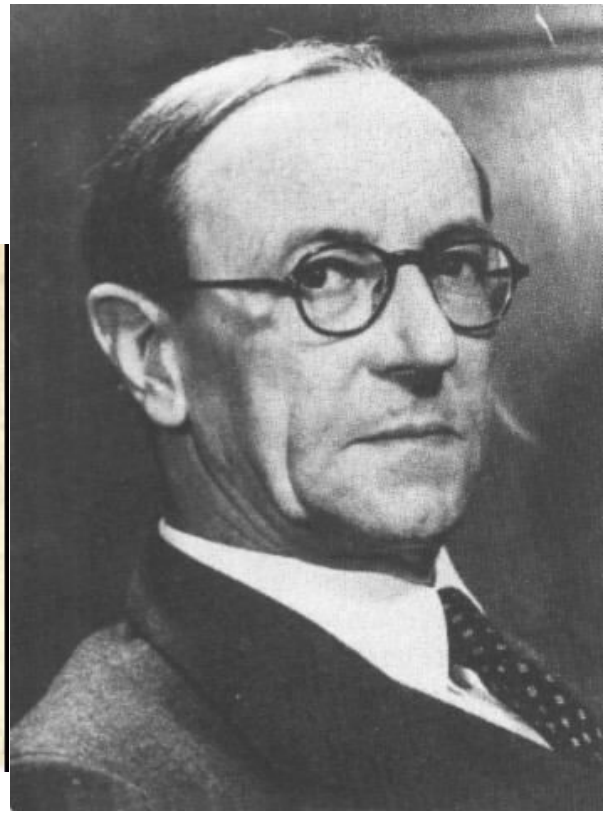
Нобелевская премия по физике
1922 г. – Н. Бор
За работы по исследованию структуры атомов и их излучений.

Открытие нейтрона

1932
Нейтрон

$$\alpha + {}^{9}_{4}Be \rightarrow n + {}^{12}_{6}C$$





James Chadwick

(1891-1974)

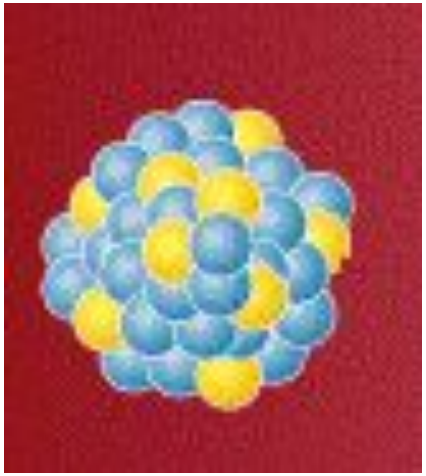
Нобелевская премия по физике
1935 г. – Дж.Чедвик
За открытие нейтрона

Нейтрон

В1930–1932 гг. продолжая начатые Резерфордом эксперименты, В.Боте и Г. Беккер при облучении тонких фольг из бериллия α-частицами обнаружили сильно проникающее излучение, состоящее из нейтральных частиц. Первоначально выдвинутая гипотеза о том, что это фотоны высоких энергий, не выдержала проверки. Лишь в1932 г. Д.Чедвик показал, что это новая, до сих пор неизвестная нейтральная частица с массой, приблизительно равной массе протона.

Обнаруженная частица была названа нейтроном. Сразу после открытия нейтрона Д.Иваненко и В.Гейзенберг независимо друг от друга выдвинули гипотезу, что атомное ядро состоит из нейтронов и протонов.

Атомное ядро



Атомное ядро – связанная система протонов и нейтронов (A,Z)
Z–заряд ядра–число протонов в ядре.
A–массовое число–суммарное число протонов и нейтронов в ядре.

$^{208}_{82}Pb$

Z = 82

N=126

A = 208

В середине 30-х годов XX века физическая картина мира строилась исходя из трёх элементарных частиц — электрона, протона и нейтрона. Вещество состоит из атомов и молекул, в состав атома входят электроны. Основную массу атома составляет атомное ядро, состоящее из протонов и нейтронов.

Размеры ядер

- **Плотность ядерной материи в центре ядра приблизительно одинакова у всех ядер и составляет ~ 0.17 нукл./Фм^3.**
- **Толщина поверхностного слоя (спад плотности от 0.9 до 0.1) у всех ядер примерно одинакова d = 2.4·Фм.**
- **Величина радиуса ядра определяется числом нуклонов, $R = 1.3A^{1/3}$ Фм.**
- **1 Фм = 10^{-13}см.**
- **Единица энергии – электрон-вольт (эВ)**

Атомное ядро

Стабильные ядра

Известно около 300 стабильных ядер

Радиоактивные ядра

Известно около 3000 радиоактивных ядер

Изотопы Ядра с одинаковым Z

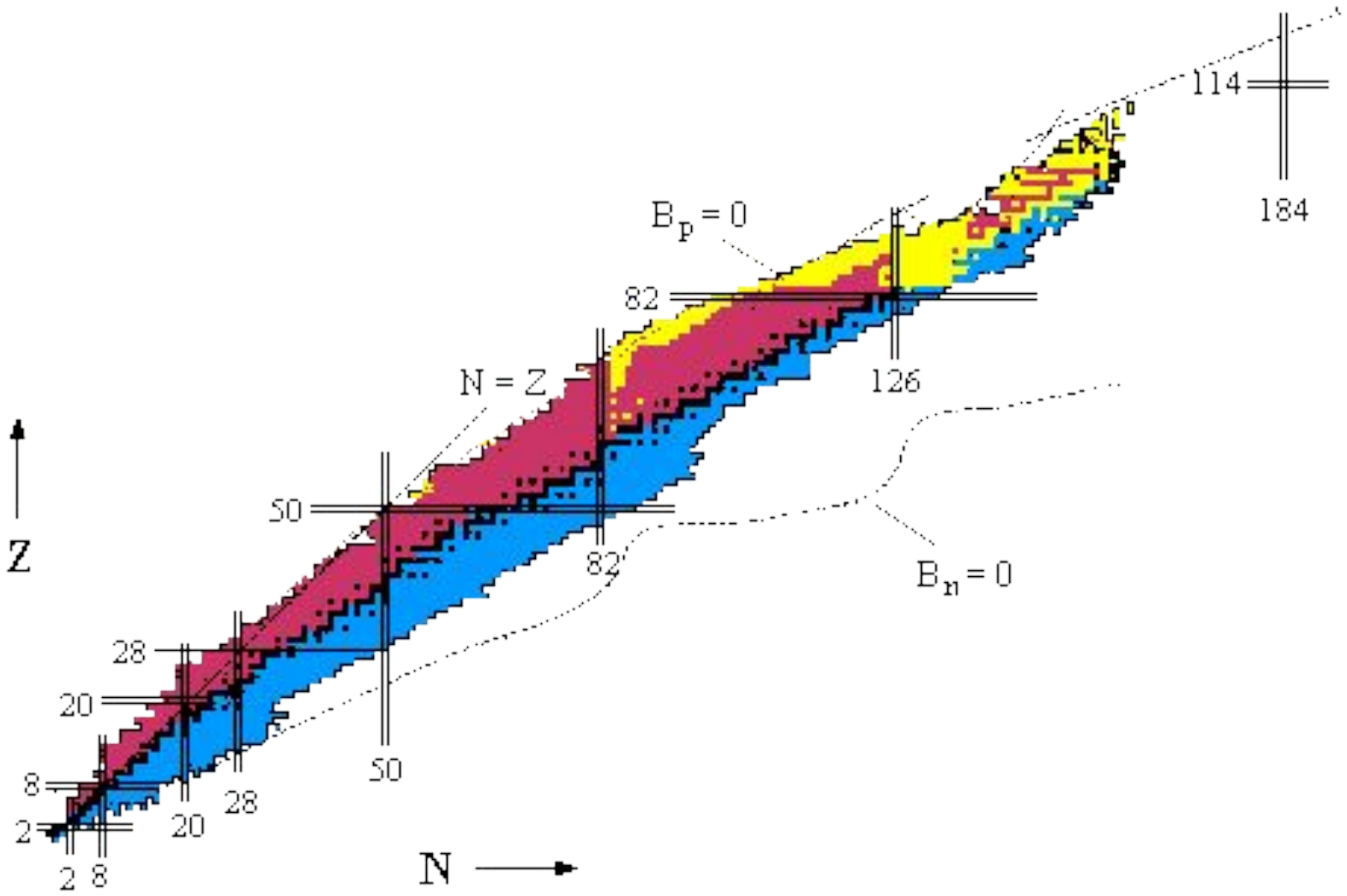
Изобары Ядра с одинаковым A

Каждому ядру соответствует определённое положение на *N,Z диаграмме.*

Стабильные и долгоживущие ядра образуют узкую полосу, называемую линией или долиной стабильности. Легкие стабильные ядра (A < 40) имеют приблизительно равные числа нейтронов и протонов. В области более тяжелых ядер отношение числа нейтронов к числу протонов начинает возрастать и достигает величины 1.6 в районе A = 250. Это изменение отношения N/Z обусловлено короткодействующим характером ядерных сил и возрастающей ролью кулоновского отталкивания протонов с ростом A. Тяжелые ядра оказываются энергетически более устойчивыми, если содержат большее число нейтронов N по сравнению с числом протонов Z. Наиболее тяжелыми стабильными ядрами являются изотопы свинца (Z = 82) и висмута (Z = 83). Для ядер долины стабильности характерно следующее отношение числа нейтронов к числу протонов:

$$\frac{N}{Z} \approx 1 + 0.015 \cdot A^{2/3}$$

N-Z диаграмма атомных ядер



Новая физика на рубеже веков

Развитие физики в начале XX века привело к полному пересмотру классических представлений о строении материи. В основе «новой физики» лежат две фундаментальные теории:

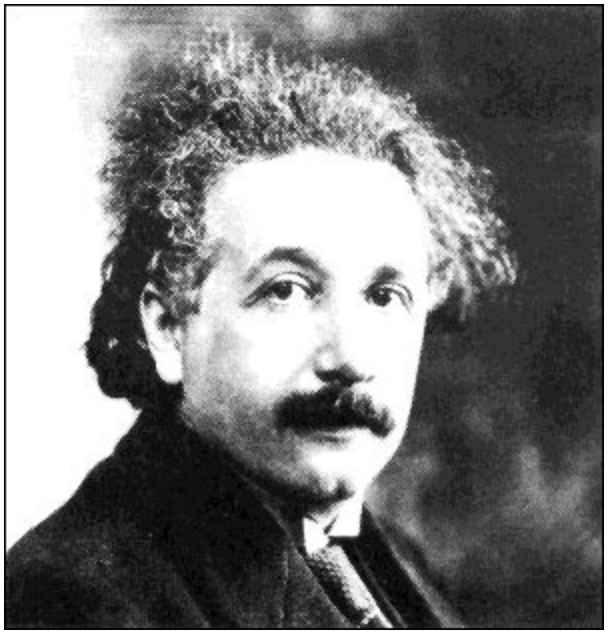
- **специальная теория относительности;**
- **квантовая теория.**

Теория относительности и квантовая теория являются фундаментом, на котором построено описание явлений микромира.

Специальная теория относительности

1905
Специальная теория относительности

Эквивалентность массы и энергии.
$E = mc^2$



Albert Einstein
(1879 -1955)

Нобелевская премия по физике
1921 г. – А. Эйнштейн
За вклад в теоретическую физику и в особенности за открытие закона фотоэлектрического эффекта

$$c = 299722458 \text{ м / сек}$$

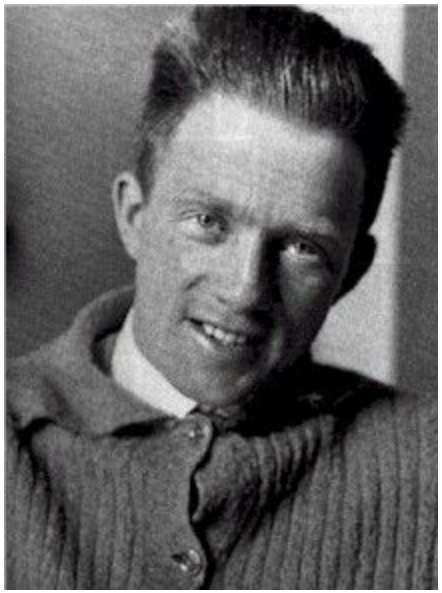
Квантовая механика

1927
Принцип неопределенности

Корпускулярные и волновые свойства частиц. **Принцип неопределенности**

Этот принцип выражает фундаментальный предел возможности одновременного измерения определённыхпар переменных, например положения частицы ***x и*** её импульса ***p***

$$\Delta p \Delta x \sim \hbar$$



Werner Karl Heisenberg
(1901-1976)

Нобелевская премия по физике
1932 г. – В. Гейзенберг
За создание квантовой механики

Квантовая теория поля

Sin-Itiro Tomonaga
(1906-1979)

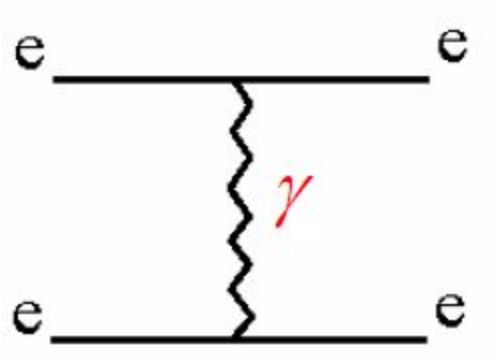
Julian Schwinger
(1918-1994)

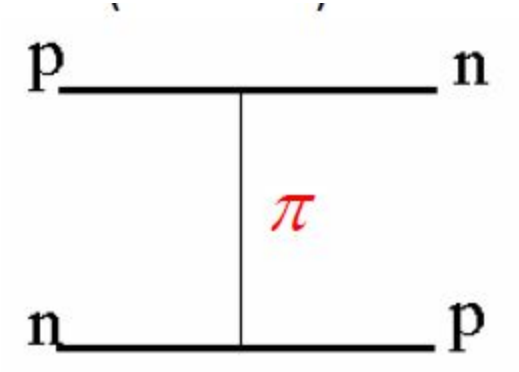
Richard P. Feynman
(1918-1988)

1965 г.— Нобелевская премия по физике
С. Томонага, Ю. Швингер и Р.Фейнман
За фундаментальные работы в области квантовой теории поля с далеко идущими последствиями для физики элементарных частиц.

Теория ядерного взаимодействия

1935 Х. Юкава разработал теорию ядерного взаимодействия и предсказал частицу, связывающую протоны и нейтроны в ядре.





Hideki Yukava
(1907 –1981)

Нобелевская премия по физике
1949 г.–Х. Юкава
За предсказание существования мезонов на основе теоретических работ по ядерным силам

Пионы – кванты ядерного поля

В 1947 году была обнаружена частица, которую предсказал Юкава. Ее назвали π-мезоном или пионом. Существует три разновидности π-мезонов: отрицательно заряженный π− - мезон с массой ~ 140МэВ, положительно заряженная античастицаπ+ - мезон, и нейтральный π0 – мезон с массой ~ 135 МэВ.

В течение 10 лет, последовавших за открытием пиона в 1947 г., таблица элементарных частиц начала быстро пополняться новымиэлементарными частицами. За это время их было открыто свыше 30. Первыми из открытых частиц были K- мезоны или каоны, частицы с массой ~ 500МэВ. Затем были обнаружены тяжелые частицы Λ и Σ. Была обнаружена странная особенность вновь открытых частиц — они рождались парами, хотя не были частицей и античастицей. По-видимому здесь была какая-то новая неизвестная закономерность. Так, например, наблюдалась реакция

$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$$

Лептоны

1897–Д. Томсон	e^-
1937–К. Андерсон	μ^-
956–Ф. Райнес, К. Коэн	$\tilde{\nu}_e$
1962–Л. Ледерман	ν_μ
1975–М. Перл	τ^-
2000–Лаб. Э. Ферми	ν_τ

Лептоны

Лептоны - частицы, участвующие в слабых и электромагнитных взаимодействиях.
Три семейства лептонов составляют 6 частиц:
три заряженных лептона •
электрон *e−*,
• мюон μ−,
• таон τ−
и три нейтральные частицы — нейтрино
• электронное нейтрино v_e,
• мюонное нейтрино v_μ,
• тау-нейтрино v_τ.
Нейтрино участвуют только в слабых взаимодействиях 6 лептонов образуют 3 семейства.

Как устроен Мир . 60-е годы XX века

Лептоны

e^- μ^- τ^-

ν_e ν_μ ν_τ

Адроны

Барионы

$J=\frac{1}{2},\frac{3}{2},\ldots$

Мезоны

$J=0,1,2,\ldots$

Адроны

Подавляющее большинство частиц, открытых начиная с 1940 г., принадлежит к семейству адронов —частиц, сильно взаимодействующих друг с другом. Например, к этому семейству принадлежат хорошо известные частицы —нейтрон и протон.

В настоящее время открыто более нескольких сотен адронов. Они различаются массой, величиной электрического заряда, спином. Общим свойством, отличающим адроны от лептонов, является то, что адроны участвуют в сильных взаимодействиях в то время, как лептоны —только в слабых и электромагнитных.

Кварки

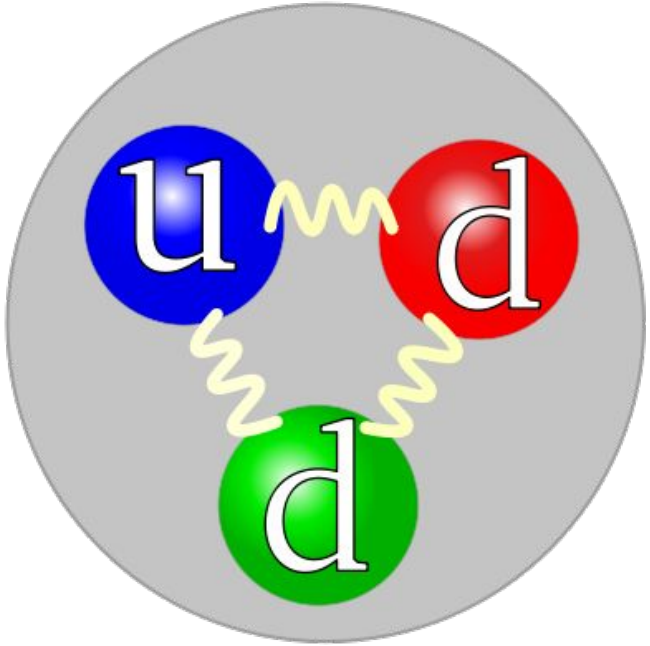
Murray Gell-Mann

George Zweig

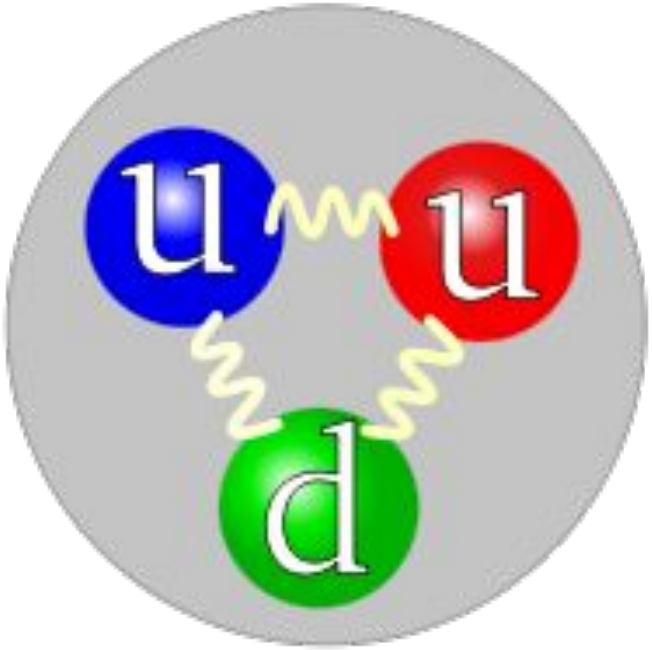
М. Гелл-Манн и Г. Цвейг предложили кварковую модель адронов. Барионы“конструировались”из трёхкварков, мезоны–из кварка и антикварка

Нобелевская премия по физике1969 г.–
М. Гелл-Манн. За вклад и открытия в классификации элементарных частиц и их взаимодействий

Кварки, 1963 г.



нейтрон: 1up 2down



протон: 2up 1down

В 1974 г. были открыты частицы, в состав которых входилч етвертый с–кварк.
В1977г. Был открыт b–кварк.
В1995г. Был открыт t –кварк.
Все адроны состоят из комбинации этих шести кварков, и есть достаточно веские основания считать, что число кварков не должно быть Больше шести.

Как устроен Мир. Конец XX века

ФЕРМИОНЫ

компоненты вещества (спин = ½)

Лептоны (спин = ½)			
Аромат		Масса, ГэВ/c^2	Электрический заряд
ν_e	электронное нейтрино	$<1\times10^{-8}$	0
e	электрон	0,000511	−1
ν_μ	мюонное нейтрино	< 0,0002	0
μ	мюон	0,106	−1
ν_τ	тау-нейтрино	< 0,02	0
τ	тау	1,7771	−1

Кварки (спин = ½)			
Аромат		Прибл. масса, ГэВ/c^2	Электрический заряд
u	up	0,003	2/3
d	down	0,006	−1/3
c	charm	1,3	2/3
s	strange	0,1	−1/3
t	top	175	2/3
b	bottom	4,3	−1/3

Как устроен Мир. Конец XX века

БОЗОНЫ

переносчики взаимодействий (спин = 1)

Объединенное и электрослабое взаимодействия (спин = 1)		
Название	Масса, ГэВ/c^2	Электрический заряд
γ фотон	0	0
W^-	80,4	–1
W^+	80,4	+1
Z	91,187	0

Сильное (цветное) взаимодействие (спин = 1)		
Название	Масса, ГэВ/c^2	Электрический заряд
g глюон	0	0

Стандартная модель

Фундаментальными частицами стандартной модели являются 6 лептонов (e-, μ-, τ-, v_e, v_μ,v_τ) и 6 кварков (u, d, c, s, t, b). Каждый из 6 типов кварков может находиться в трёх цветовых состояниях (например: красный, зеленый, синий). Кварки и лептоны являются фермионами и имеют спин –1/2.

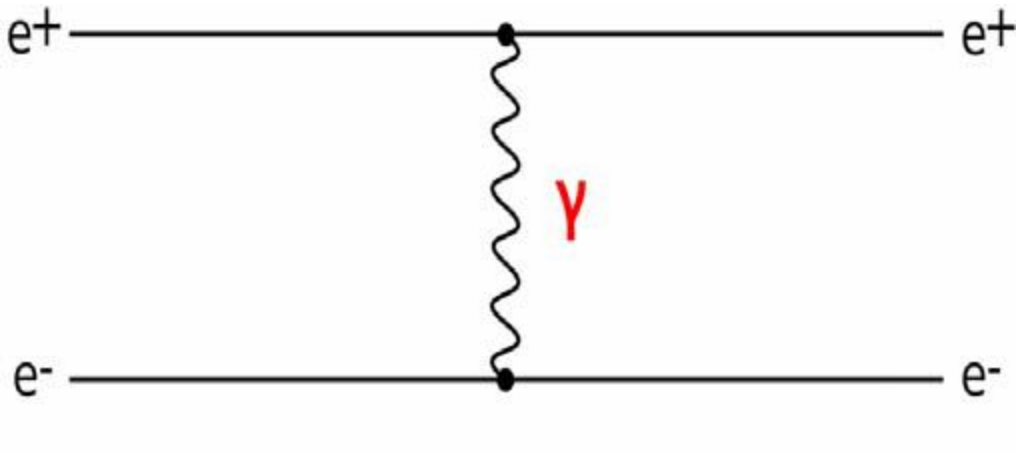
12 фундаментальным фермионам соответствуют 12 антифермионов. Взаимодействия фундаментальных фермионов осуществляются за счет обмена переносчиками взаимодействия — фундаментальными (или калибровочными) бозонами.

Фундаментальные частицы Стандартной Модели

e^-	μ^-	τ^-
ν_e	ν_μ	ν_τ
u	c	t
d	s	b

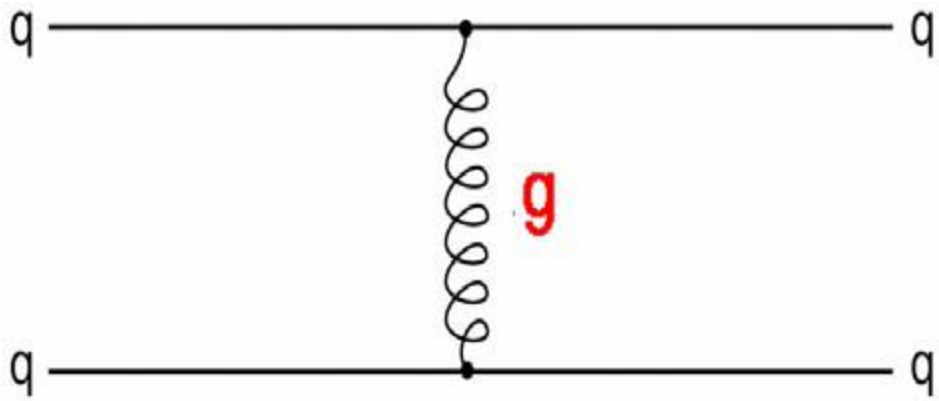
$8g, \quad \gamma, \quad W^+, \quad W^-, \quad Z$

Фундаментальные взаимодействия



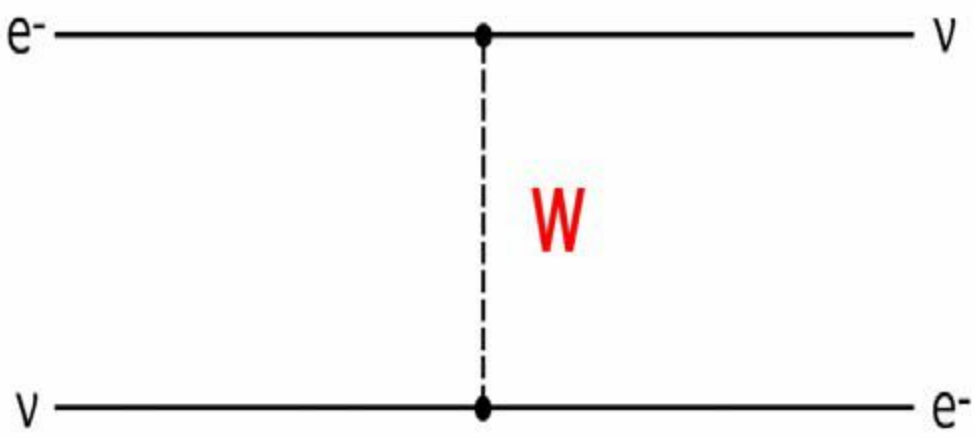
Взаимодействие частиц, имеющих электрический заряд, происходит посредством обмена квантами электромагнитного поля — фотонами или γ-квантами. Фотон электрически нейтрален.

Фундаментальные взаимодействия



Сильное взаимодействие осуществляется за счет обмена глюонами g — электрически нейтральными безмассовыми переносчиками сильного взаимодействия. Глюоны переносят цветовой заряд.

Фундаментальные взаимодействия



В слабом взаимодействии принимают участие все лептоны и все кварки. Переносчиками слабого взаимодействия являются массивные W- и Z-бозоны. Существуют положительные W+- бозоны и отрицательные W–-бозоны, являющиеся античастицами по отношению друг к другу. Z-бозон электрически нейтрален.

Фундаментальные взаимодействия

Взаимодействие между фундаментальными фермионами (кварками и лептонами) переносят калибровочные бозоны. В таблице приведены взаимодействия, частицы участвующие в различных взаимодействиях, калибровочные бозоны — переносчики взаимодействия, радиус действия, константа взаимодействия.

Взаимодействие	На какие частицы действует	Калибровочные бозоны	Радиус действия	Константа взаимодействия
Сильное	Все цветные частицы	8 глюонов, спин $J=1$, безмассовые.	$1\ \text{Фм} = 1/m_\pi$	1
Электро-магнитное	Все электрически заряженные частицы	Фотон, спин $J=1$, безмассовый.	∞	1/137
Слабое	Кварки, лептоны, электрослабые калибровочные бозоны	W^+, W^-, Z, спин $J=1$, $m(W^\pm)=80$ Гэв, $m(Z)=91$ Гэв.	$10^{-2}\ \text{Фм} = 1/m_W$	~1/30
Гравитаци-онное	Все массивные частицы	Гравитон, спин $J=2$, безмассовый	∞	10^{-38}

Фундаментальные взаимодействия

Взаимодействие	Характерная константа
Сильное	1
Электромагнитное	10^{-2}
Слабое	10^{-6}
Гравитационное	10^{-38}

Тёмная материя 1933 г. Ф. Цвики

- **Тёмная материя — вещество неизвестной природы, которое взаимодействует с обычными веществами посредством сил тяготения.**
- **Оно не излучает свет.**
- **Движение галактик в скоплениях можно описать, если предположить, что суммарная масса скопления в 10 раз больше суммарной массы составляющих его галактик.**
- **Устойчивое вращение звезд по орбитам в рукавах спиральных галактик требует большей массы галактик.**
- **Для описания температуры межгалактического газа требуется гравитационный потенциал и, следовательно, масса галактик гораздо больше наблюдаемой оптическими методами.**
- **Микролинзирование удаленных галактик позволяет оценить распределение вещества в галактиках и их скоплениях. Его также оказывается на порядок больше наблюдаемого.**

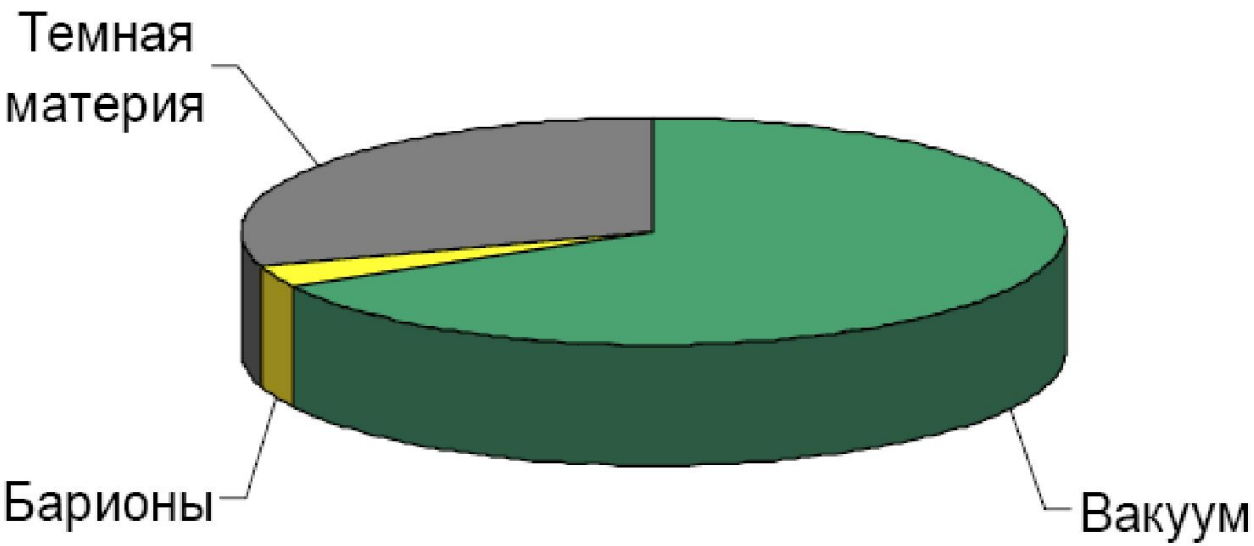
galaxy cluster CL0024+17

Тёмная энергия

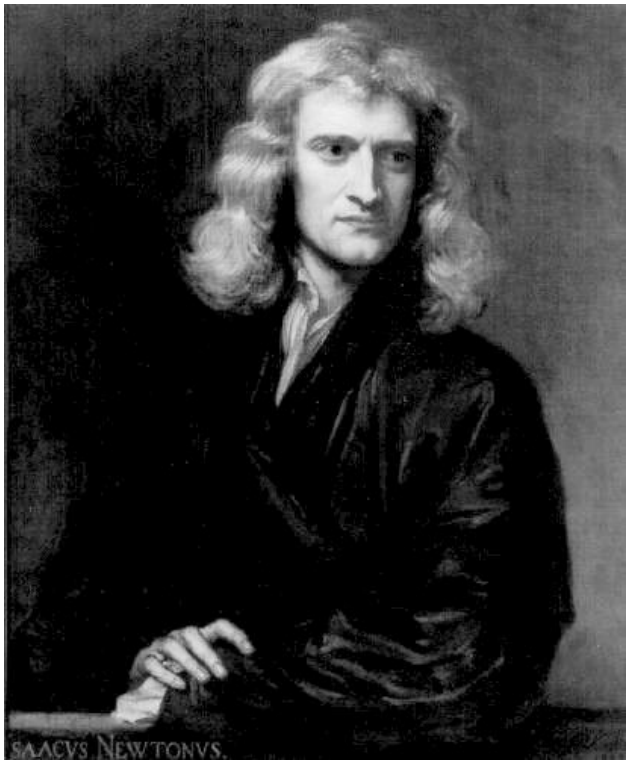
- В начале 1998 г. было сделано открытие. Оказалось, что последние $5 \cdot 10^9$ лет расширение Вселенной не замедлялось, как следует из модели Большого Взрыва, а ускорялось.
- Этот вывод получен в результате анализа спектров излучения взрывающихся Сверхновых, расположенных от Земли на расстоянии 5-10 млрд световых лет.
- Таким образом было доказано наличие в космосе гравитационного отталкивания, присущего физическому вакууму.
- 2008 – тёмный поток.

Характеристики Вселенной

БАРИОНЫ в том числе:	 - звёзды	0.02-0.05 0.002-0.003
ФОТОНЫ		$4.9 \cdot 10^{-5}$
НЕЙТРИНО		$3.3 \cdot 10^{-5}$
ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ в том числе:	 - неизвестные массивные частицы (не барионы) - вакуум	0.96 0.2-0.4 0.6-0.8
ПОЛНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА-ЭНЕРГИИ		1.02 ± 0.02



- **Мельчайшие частицы материи слепляются в результате сильнейшего притяжения, образуя частицы большего размера, но уже менее склонные к притяжению; многие из этих частиц могут опять слепляться, образуя ещё большие частицы с ещё большие частицы с ещё меньшим притяжением друг к другу и так далее в разных последовательностях, пока эта прогрессия не закончится на самых больших частицах, от которых зависят уже и химические реакции и цвет естественных тел, и, которые образуют, наконец, тела ощутимых размеров. Если так, то в природе должны существовать посредники, помогающие частицам вещества близко слепляться друг с другом за счет сильного притяжения. Обнаружение этих посредников и есть задача экспериментальной философии.**

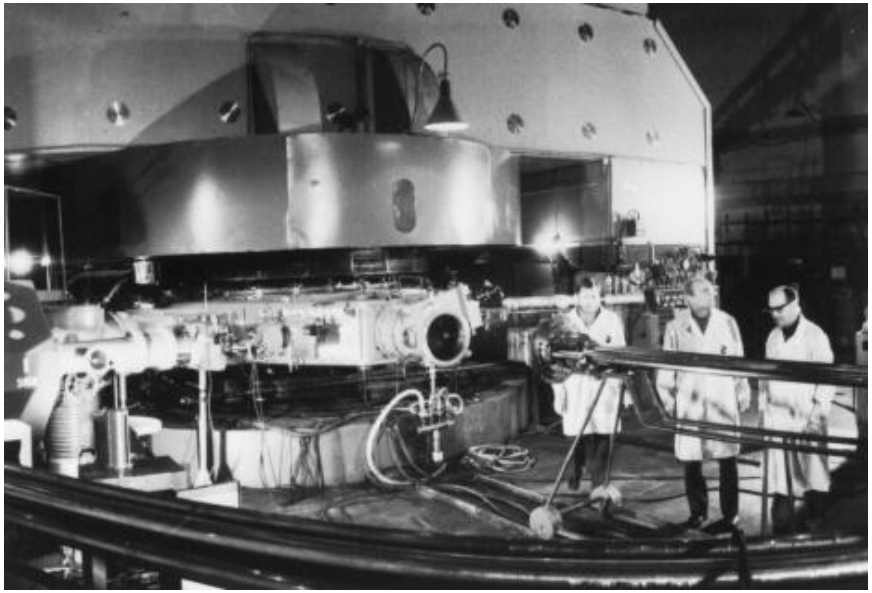


И. Ньютон (1643 – 1727)

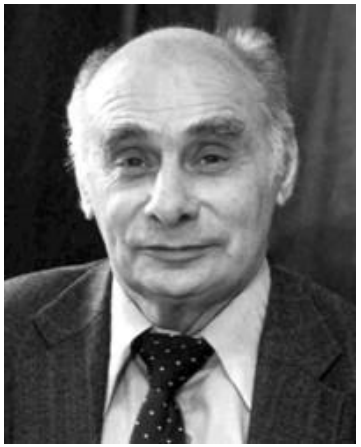
Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research

http://flerovlab.jinr.ru/flnr/index.html

Laboratory of Nuclear Reactions (1957)



FLNR History



G.N. Flerov

Yu.Ts. Oganessian

M.G. Itkis

S.N. Dmitriev

BASIC DIRECTIONS of RESEARCH

1. Heavy and superheavy nuclei

- **Synthesis and study of properties of superheavy elements**
- **Chemistry of new elements**
- **Fusion-fission and multi-nucleon transfer reactions**
- **Mass-spectrometry and nuclear spectroscopy of SH nuclei**

2. Light exotic nuclei

- **Properties and structure of light exotic nuclei**
- **Reactions with exotic nuclei**

3. Radiation effects and physical bases of nanotechnology

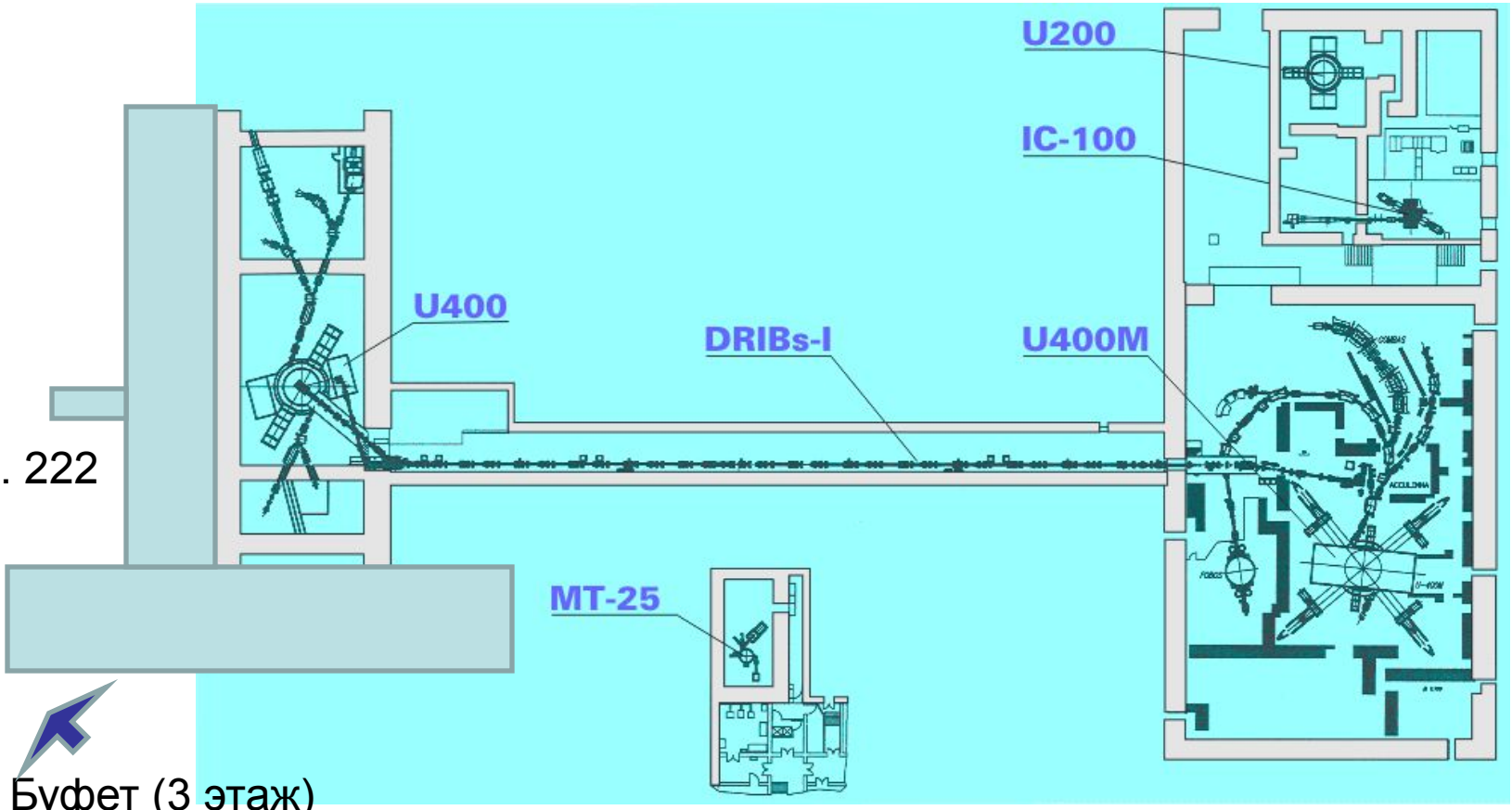
4. Accelerator technology

Staff : **350 people (including 100 younger than 35 years old)**

Budget: **~ 15.0 M$**

Out of budget staff: **140 people**

FLNR accelerators

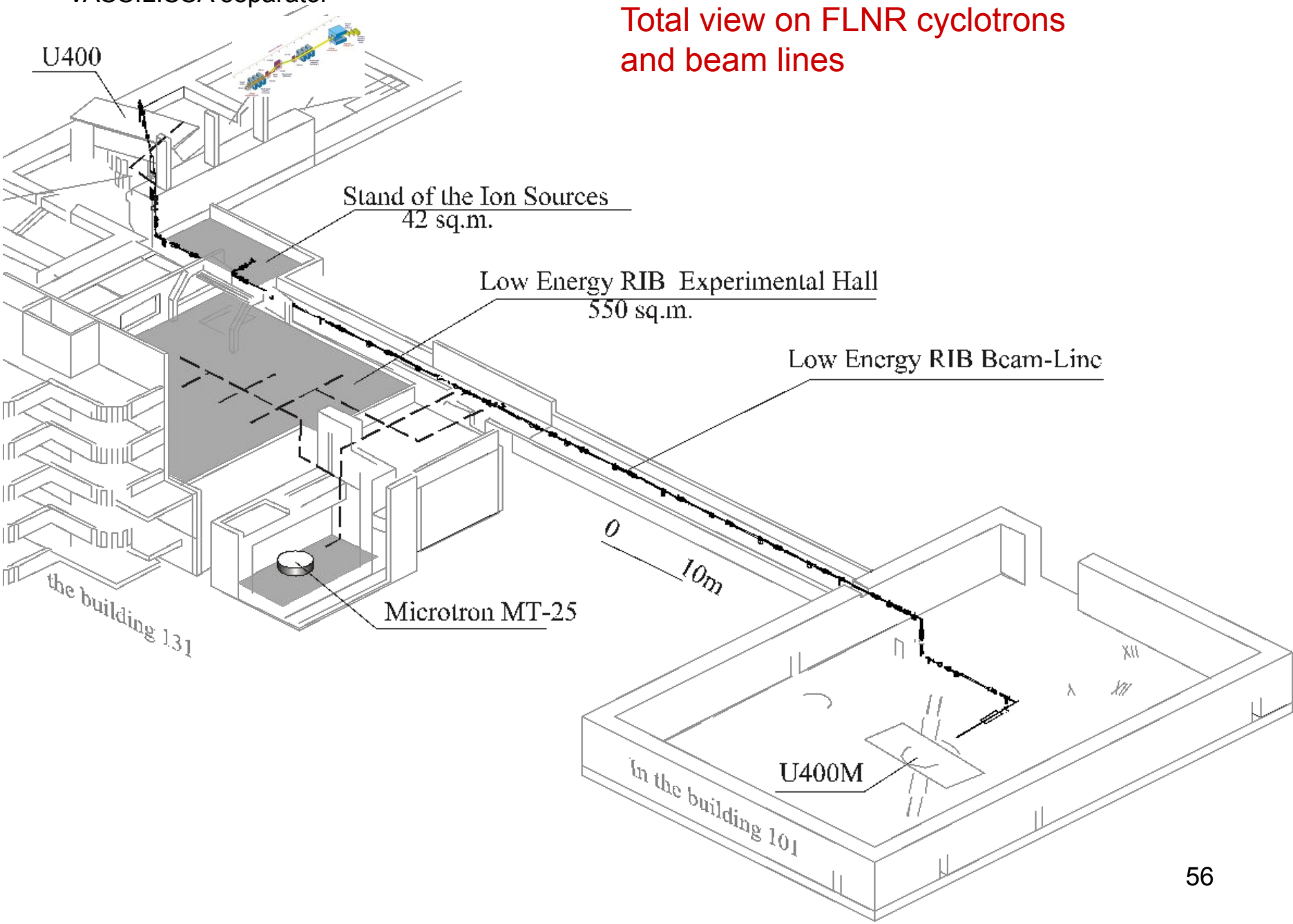


к. 222

Буфет (3 этаж)

VASSILISSA separator

Total view on FLNR cyclotrons and beam lines

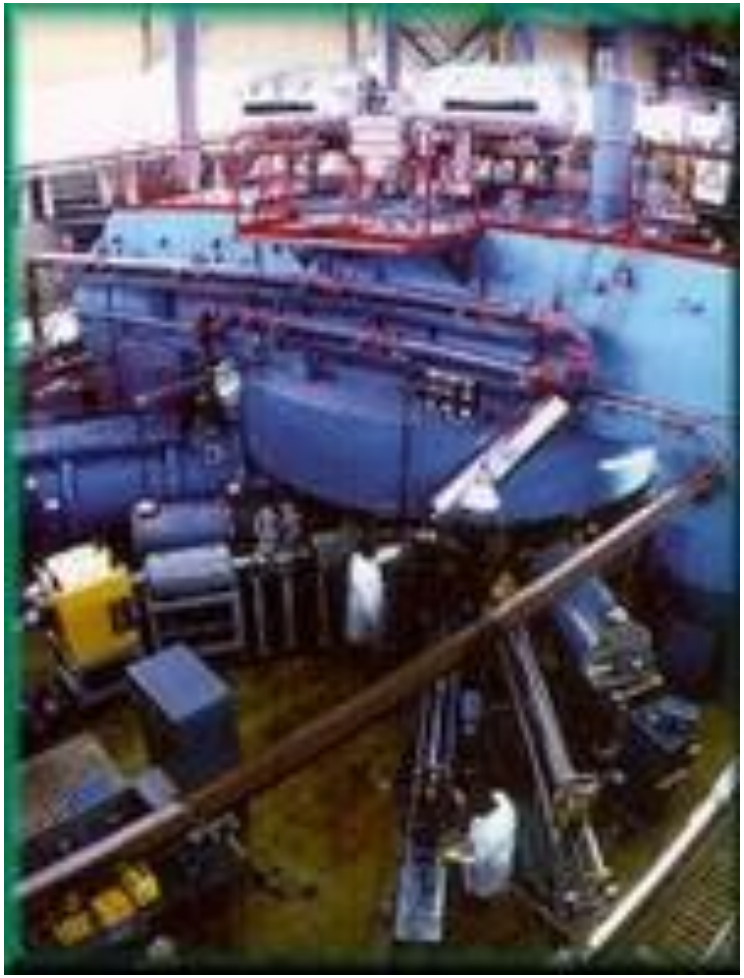


FLNR accelerators

- U400M - 4m heavy ion cyclotron E = 6 ÷ 100 MeV/n
- U400 - 4m heavy ion cyclotron E = 0.5 ÷ 20 MeV/n
- U200 - 2m heavy ion cyclotron E = 3 ÷ 15 MeV/n
- IC-100 - 1m heavy ion cyclotron E = 0.5 ÷ 1.2 MeV/n
- Microtron MT-25 - electron accelerator E = 25 MeV

FLNR accelerators - U400

U400 is designed for production of accelerated ion beams of atomic mass in the range A=4 ÷ 209 and energy 0.5 ÷ 290 MeV/nuclon. U400 isochronous cyclotron has been in operation since 1978. Cyclotron is 4m in diameter, D=4 m, with K=650 energy factor. Charge exchange technique is used for beam extraction. Axial injection channel with external ion source has been in operation at U400 since 1996



FLNR U400 cyclotron

1. Heavy and superheavy nuclei

Synthesis and study of properties of superheavy elements

Chemistry of new elements

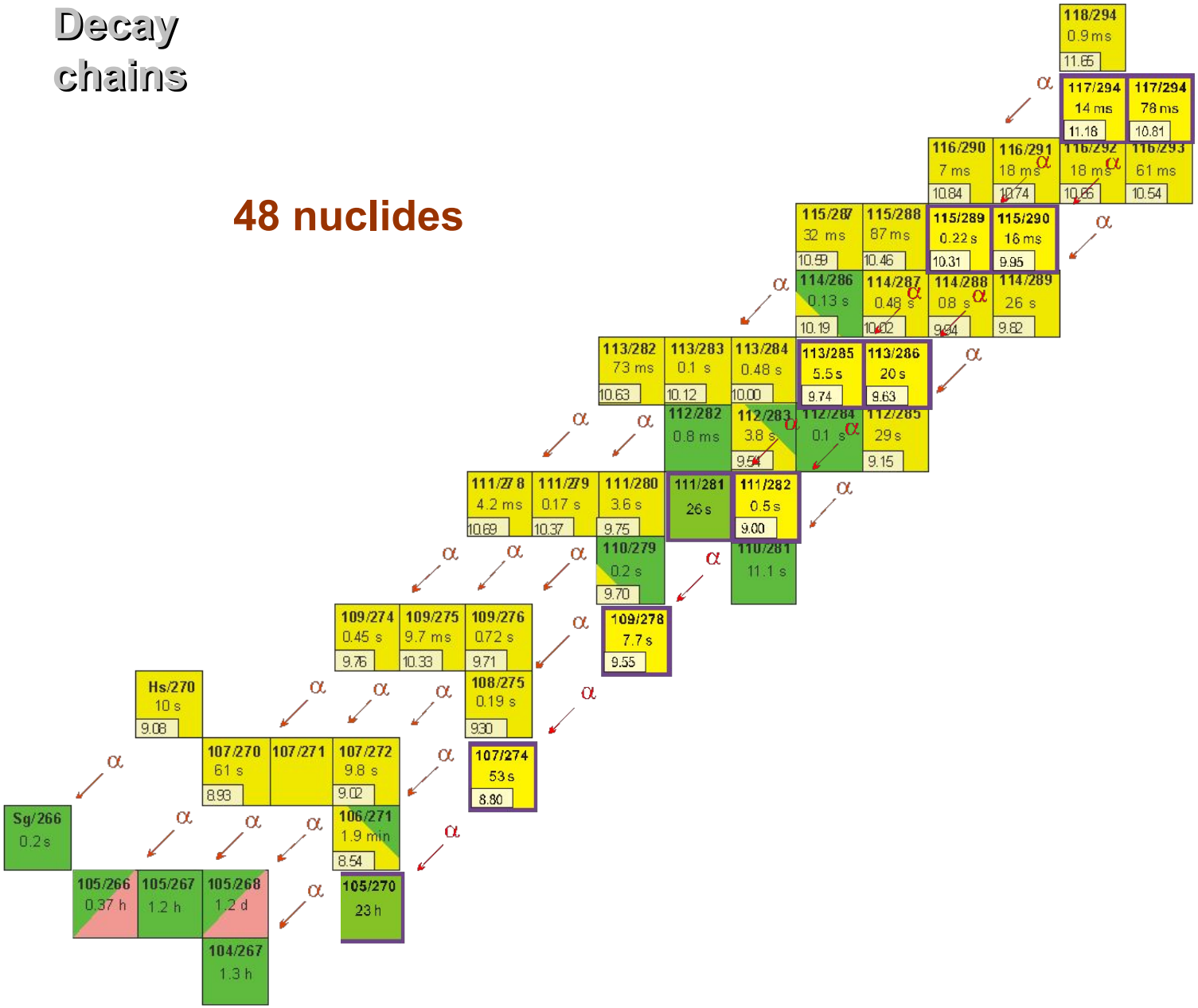
Fusion-fission and multi-nucleon transfer reactions

Mass-spectrometry and nuclear spectroscopy of SH nuclei

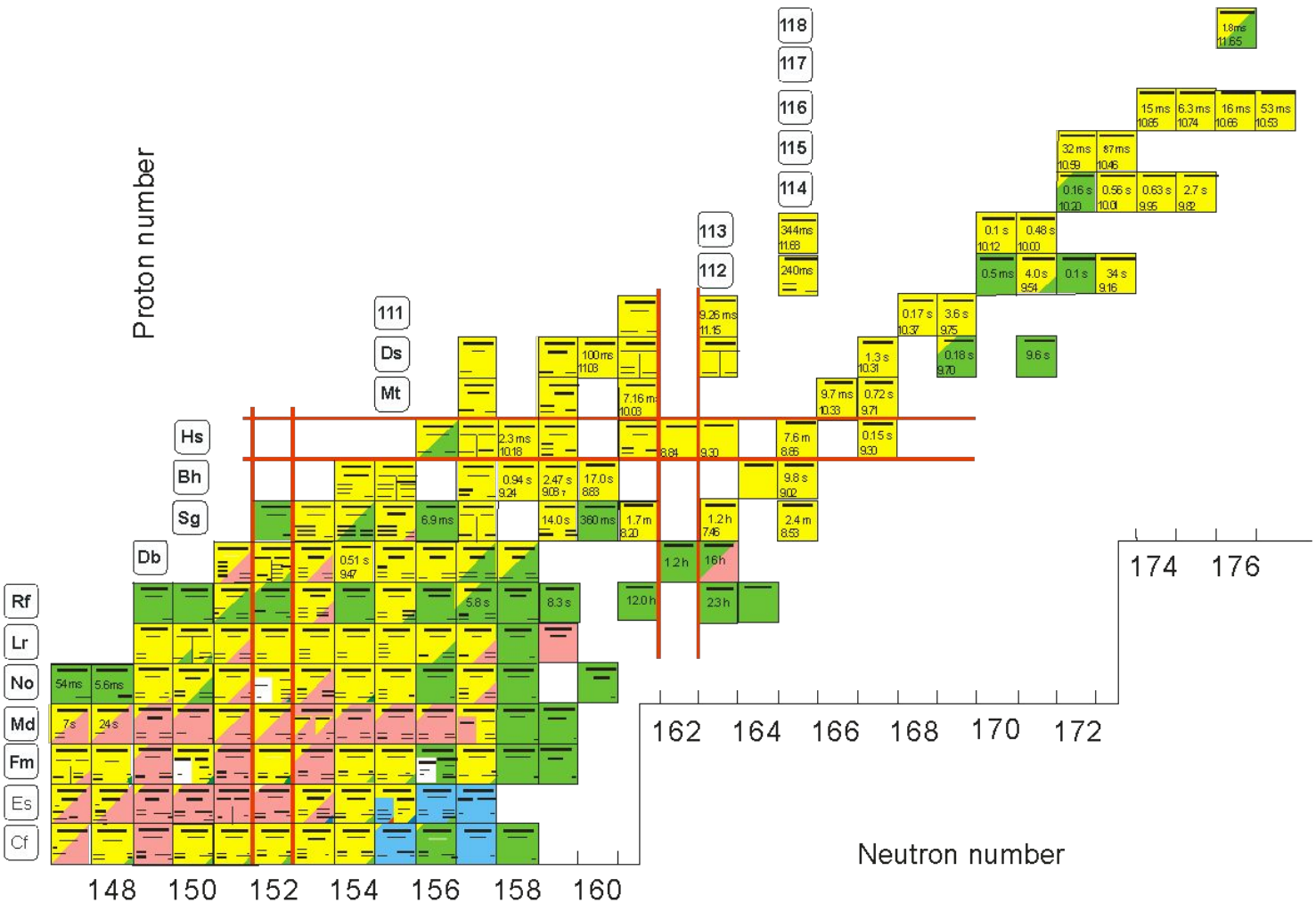
U400 and special low energy extraction line at U400M

Decay chains

48 nuclides



$^{249}Bk + ^{48}Ca$

$T_{1/2} = 320d$

North part of Nuclear chart