

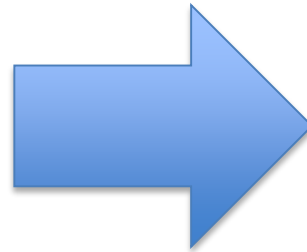


# Ядерная физика и Человек

# Радиация

# Взаимодействие излучения с веществом

- Альфа
- Бета
- Нейтроны
- Космический фон
- Осколки деления
- Протоны, ионы
- Ультрафиолет
- Рентген и далее

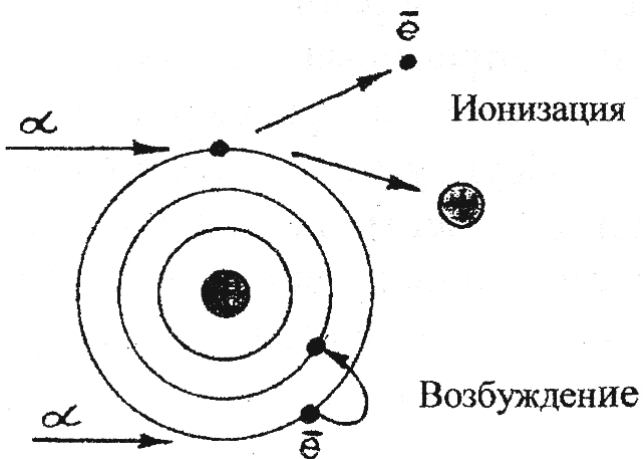


- Тяжелые частицы
- Электроны
- Гамма-кванты
- Нейтроны

Взаимодействие частиц с веществом зависит от их типа, заряда, массы и энергии. **Заряженные частицы** ионизуют атомы вещества, взаимодействуя с атомными электронами. **Нейтроны и гамма-кванты**, сталкиваясь с частицами в веществе, передают им свою энергию, вызывая ионизацию за счет вторичных заряженных частиц.

В случае гамма-квантов основными процессами, приводящими к образованию заряженных частиц являются фотоэффект, эффект Комптона и рождение электрон-позитронных пар. Взаимодействие частиц с веществом зависит от таких характеристик вещества как его плотность, атомный номер и средний ионизационный потенциал вещества.

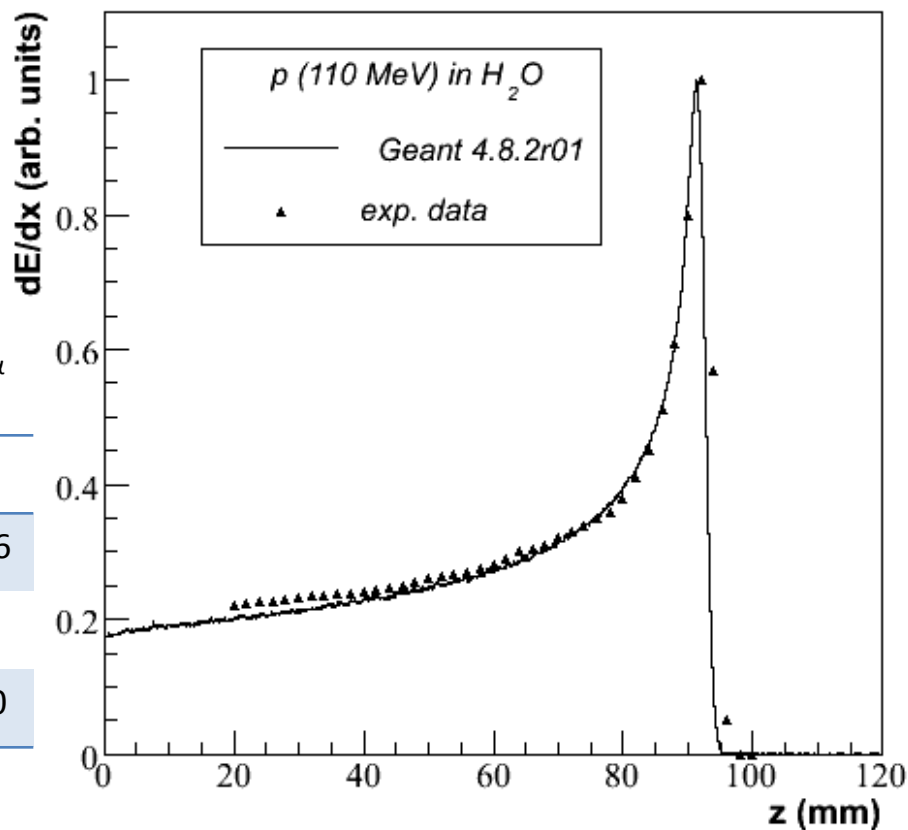
# Тяжелые частицы



- Альфа
- Осколки деления
- Протоны, ионы

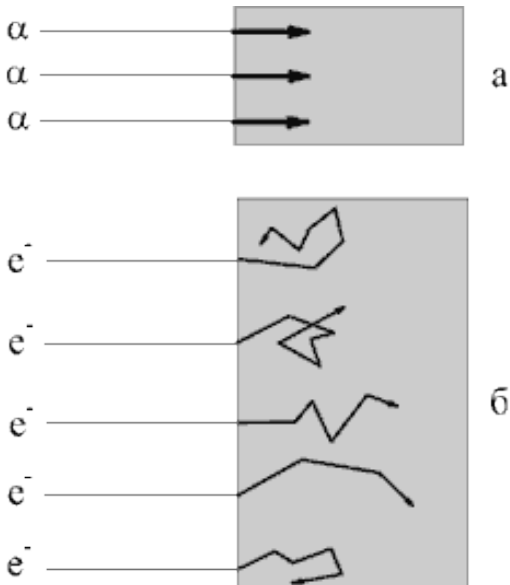
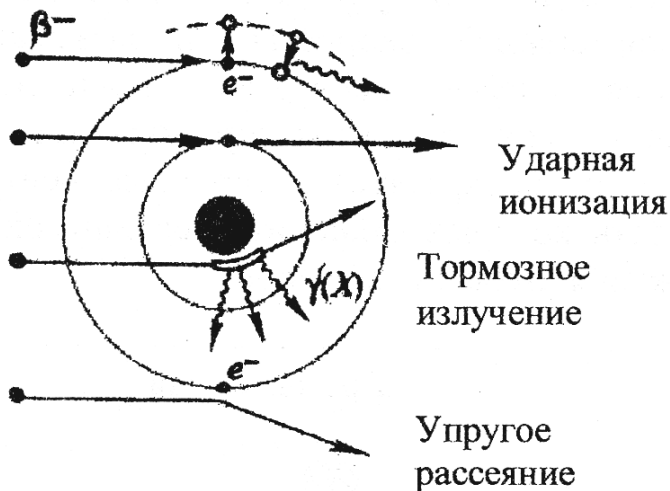
Величина пробега  $\alpha$ -частицы в зависимости от энергии  $T_\alpha$

$T_\alpha$ , МэВ	4	5	6	7	8	9	10
Воздух, см	2,5	3,5	4,6	5,9	7,4	8,9	10,6
Al, мкм	16	23	30	38	48	58	69
Биол. ткань, мкм	31	43	56	72	91	110	130



# Электроны

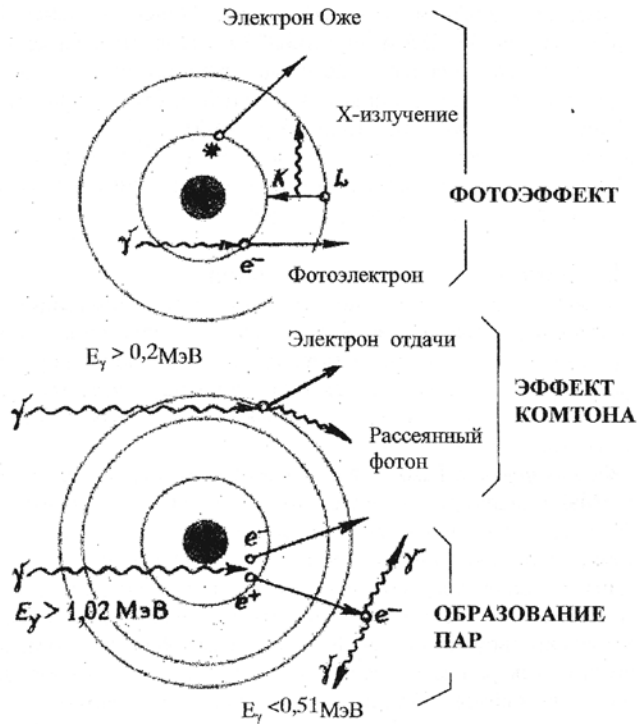
Возбуждение



Величина эффективного пробега электронов в зависимости от энергии

Е, МэВ	0,05	0,5	5	50	500
Воздух, см	4,1	160	$2 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$
Вода, см	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,19	2,6	19	78
Алюминий, см	$2 \cdot 10^{-3}$	0,056	0,95	4,3	8,6
Свинец, см	$5 \cdot 10^{-4}$	0,026	0,30	1,25	2,5

# Электромагнитное излучение



Падающие  
ФОТОНЫ



Вторичные  
фотоны

Вторичные  
электроны

(упрощённое  
представление)

- При прохождении  $\gamma$ -квантов через вещество энергия  $\gamma$ -квантов не изменяется, но в результате взаимодействий ослабляется интенсивность пучка  $\gamma$ -квантов.

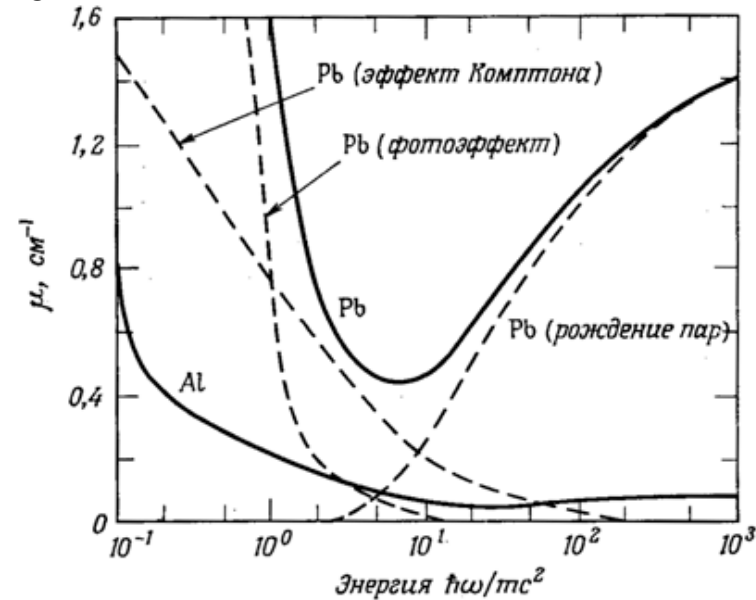
- $dI/I = -\mu dx$

- $I_x = I_0 \exp(-\mu x)$

$I$ : число фотонов на единицу площади в секунду [ $\text{с}^{-1}$ ]

$\mu = \mu_{\text{Комп}} + \mu_{\text{фото}} + \mu_{\text{пар}}$  :

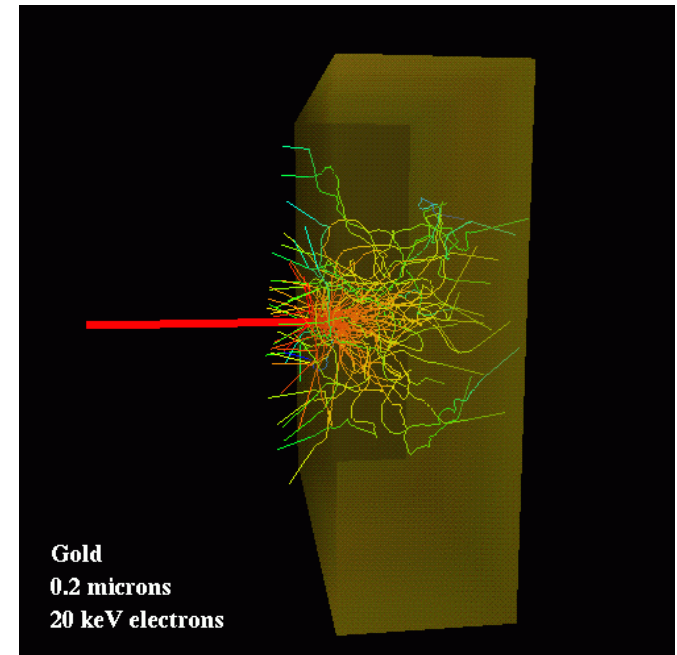
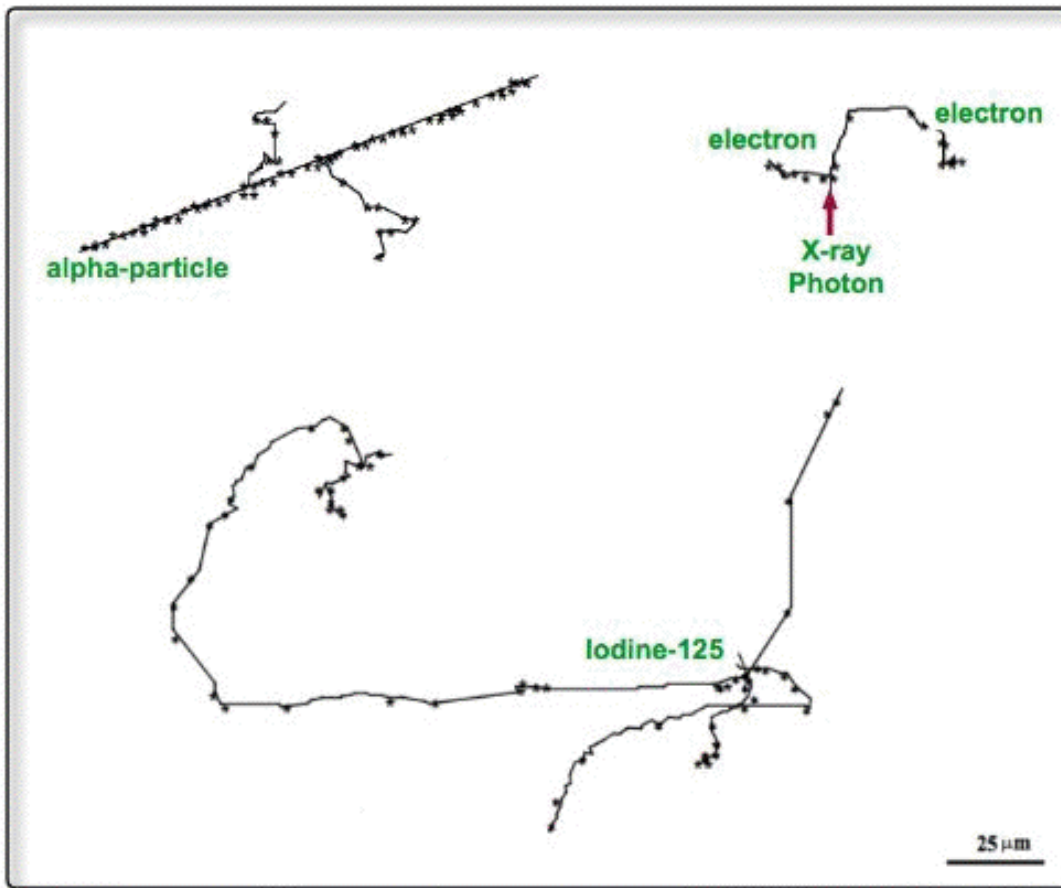
$\mu$  коэффициент линейного ослабления [ $\text{м}^{-1}$ ]



Для характеристики **проникающей способности**  $\gamma$ -квантов используют

1. значение  $1/\mu$  - средняя глубина проникновения фотонов в данный материал;
2. значение  $d_{1/2}$  - слой половинного ослабления потока  $\gamma$ -квантов.

	$E_\beta = 1,7 \text{ МэВ}$		$E_\gamma = 1,7 \text{ МэВ}$	
	R, см	$d_{1/2}$ , см	$1/\mu$ , см	$d_{1/2}$ , см
Воздух	600	90	16000	23000
Алюминий	0,3	0,043	7,8	11,3

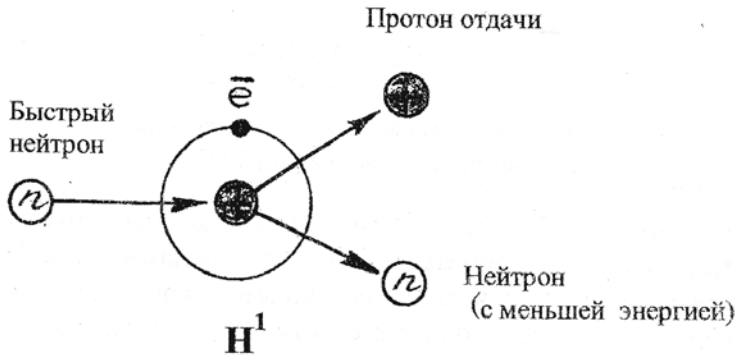


Моделирование рассеяния электронов в золотой фольге

Ионизация вдоль трека частицы в воде, для  $\alpha$ -частицы 5.4 МэВ (слева вверху), для электронов, образованных в результате поглощения фотона рентгеновского диапазона 1.5 кэВ (справа вверху) и электронов, образовавшихся в результате распада изотопа иода  $^{125}\text{I}$ . Звездочками отмечены акты взаимодействия в атомами среды



# Нейтроны



$E_n$	Тип нейтронов	Реакция
$< 0,05$ эВ ( $\sim 580$ K)	тепловые	$(n, \gamma), (n,p)$
$0,05$ эВ – $1$ кэВ	медленные	$(n,n)$
$> 1$ кэВ	быстрые	$(n,n), (n,n')$

Ослабление пучка нейтронов тонким слоем вещества:

$$I(x) = I_0 e^{-N\sigma x}$$

$\Sigma = N\sigma$  ( $\text{см}^{-1}$ ) - линейный коэффициент ослабления потока нейтронов

$\lambda = 1/\Sigma$  - длина свободного пробега нейтрона в веществе.

Длина свободного пробега быстрых нейтронов ( $\lambda$ ) в различных				
Материал	Химическая формула	Плотность $\text{г/см}^3$	$\lambda$ (см) при энергии :	
			4 МэВ	14.9 МэВ
Полиэтилен	$(\text{CH}_2)_4$	0.92	5.5	13.9
Графит	C	1.6	11.4	24.0
Железо	Fe	7.89	7.6	8.3
Свинец	Pb	11.34	15.0	15.5

# Биологическое воздействие

**Альфа-излучение** не может проникнуть сквозь кожные покровы. Пробег альфа-частиц с энергией 4 Мэв в биологической ткани составляет 31 мкм.

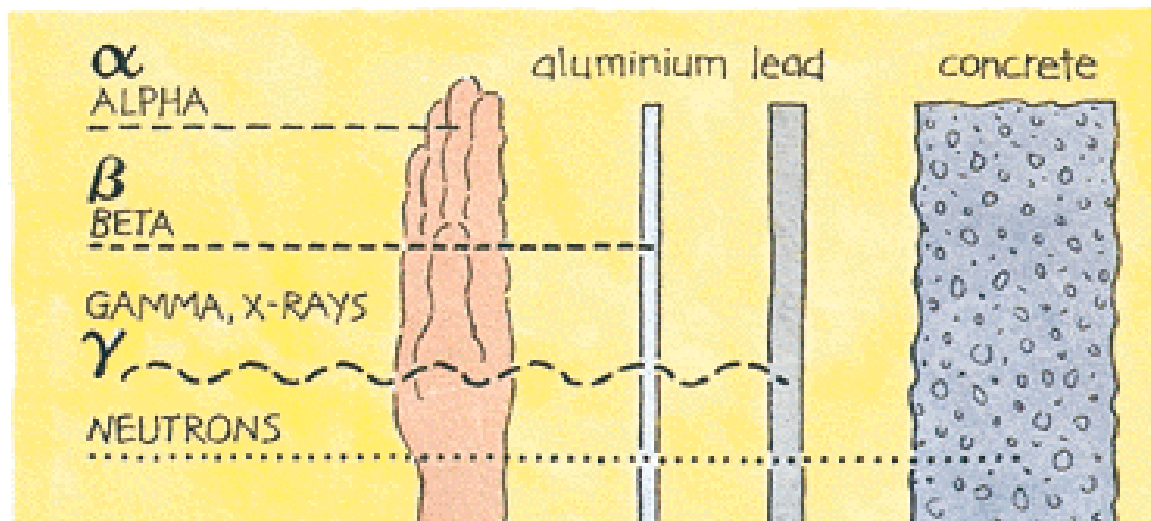
**Бета-излучение** обладает большей проникающей способностью. Пробег электронов с энергией 4 Мэв в воздухе составляет 17.8 м, а в биологической ткани 2.6 см.

**Гамма-излучение** имеет еще более высокую проникающую способность. Под его действием происходит облучение всего организма.

**Тепловые нейтроны** :  $\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  ( $\sigma = 0.33$  барн) и  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  ( $\sigma = 1.76$  барн). Основной эффект воздействия на биологическую ткань происходит под действием протонов, образующихся в реакции (n,p) и теряющих всю свою энергию в месте рождения.

**Медленные нейтроны**: большая часть энергии расходуется на возбуждение и расщепление молекул ткани.

Для **быстрых нейтронов** до 90% энергии в ткани теряется при упругом взаимодействии. При этом решающее значение имеет рассеяние нейтронов на протонах. Дальнейшее выделение энергии происходит в результате ионизации среды протонами отдачи.



# Дозы излучения и единицы измерения

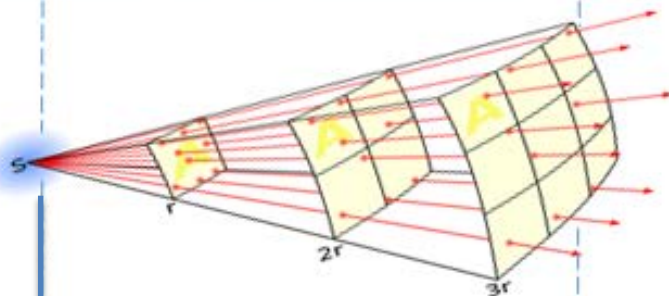
Радиоактивный  
распад



Единицы измерения

1 Беккерель (Бк)=  
=1 распад в секунду

Ионизирующее  
излучение



Факторы, влияющие на  
прохождение  
излучения

- Расстояние ( $1/r^2$ )
- Рассеяние
- Поглощение

Регистрация



Единицы измерения

Доза:

- Поглощенная (физическая)- Грей (Гр)
- Эквивалентная (биологическая)– Зиверт (Зв)

Число отсчетов:

- В секунду
- В минуту

# Активность

$$a_t = a_0 \exp(-\lambda t) = a_0 e^{-\lambda t}$$

Единица измерения активности – число распадов в секунду

- **1 Беккерель = 1 распад/сек**
- **1 Кюри =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк**
- Активность может измеряться в числе распадов на единицу объема или массы

Картофель = 170 Бк/кг

Бананы = 130 Бк/кг

Гранит = 1000 Бк/кг

Угольная зола = 2000 Бк/кг

Радиоактивность человека по  $^{40}\text{K}$  – 5500 Бк, по  $^{14}\text{C}$  - 3000Бк

**Радиоактивный источник для терапии  $\sim 10^{14}$  Бк**

**$^{239}\text{Pu} = 2,3 \cdot 10^{12}$  Бк/кг = 63 Ки/кг**

Специальных условий (например, защиты) требует применение радионуклидов, имеющих  $A > 10^8$  Бк (очень приблизительная оценка)

**Экспозиционная доза (X)** пропорциональна количеству ионов, которые создают **гамма-** и **рентгеновское** излучения в единице массы воздуха. Ее принято измерять в рентгенах (Р).

$$X = dQ/dm$$

**dQ** -- заряд вторичных частиц, образующихся в массе вещества **dm** при полном торможении всех заряженных частиц .

**Поглощенная доза (D)** — количество энергии излучения, поглощенное единицей массы вещества.

$$D = dE/dm$$

Единица поглощённой дозы – **грей** (Гр).

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад} = 10^4 \text{ эрг/г.}$$

Внесистемная единица **рад** определяется как поглощённая доза любого ионизирующего излучения, равная 100 эрг на 1 грамм облучённого вещества.

**Эквивалентная доза (H)** дополнительно учитывает разницу в разрушительной способности разных типов радиации. Измеряется в зивертах (Зв).

$$H = \sum W_r D_r$$

$D_r$  --- поглощённая доза, созданная облучением  $r$  и усреднённая по анализируемому органу или по всему организму,

$W_r$  --- коэффициент качества излучения.

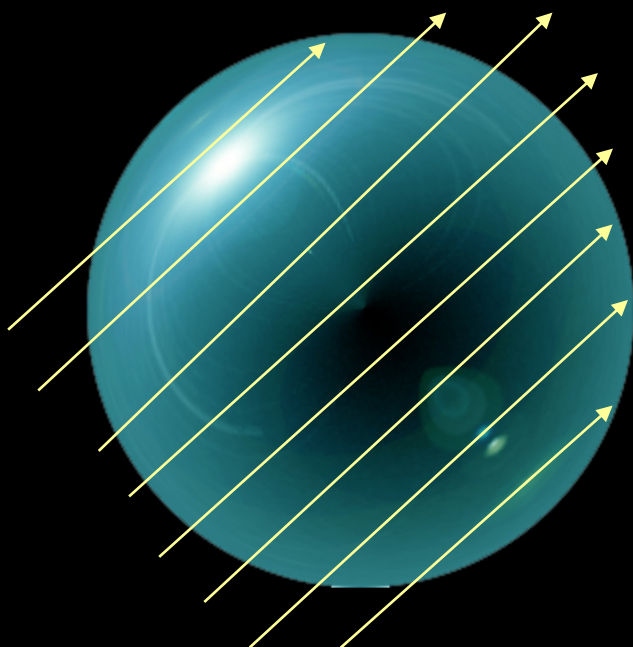
	$\gamma$	$\beta$	Нейтроны					$p$	$\alpha$
E (МэВ)			< 0,01	0,01 ÷ 0,1	0,1 ÷ 2	2 ÷ 20	> 20		
$W_r$	1	1	5	10	20	10	5	5	20

**Эффективная эквивалентная доза ( $E_{эфф}$ )** учитывает различную чувствительность органов к радиации: так, облучать руку менее опасно, чем спину или грудь.

$$E_{эфф} = \sum W_t H_t$$

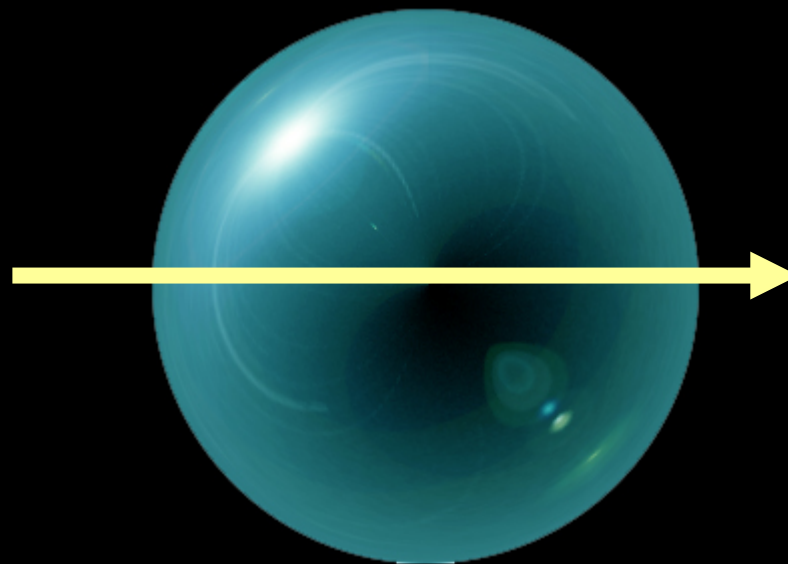
# Распределение дозы излучений в веществе

**1 unit of the dose**



**X-rays**

**1 unit of the dose**



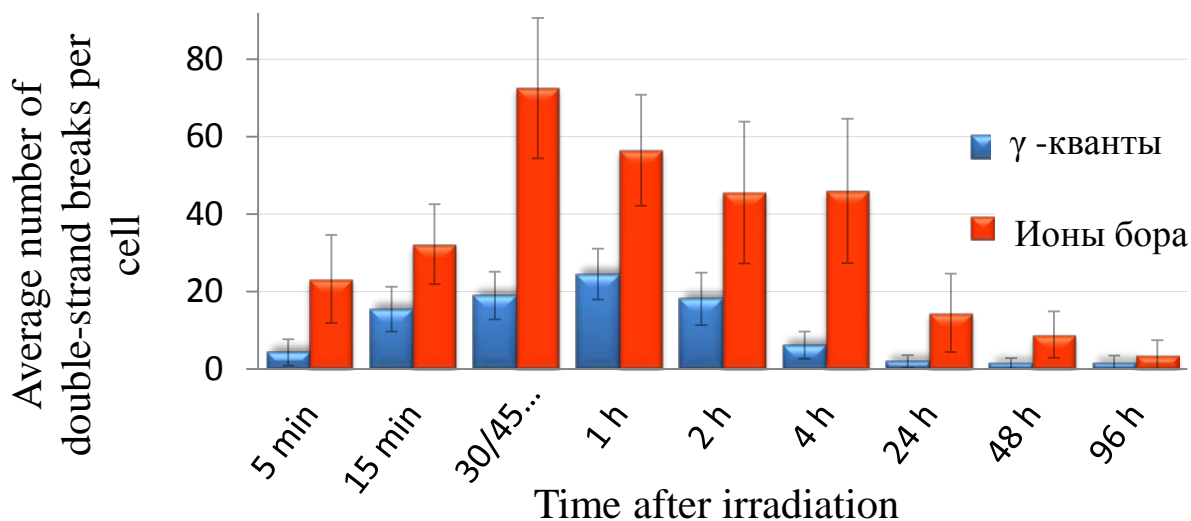
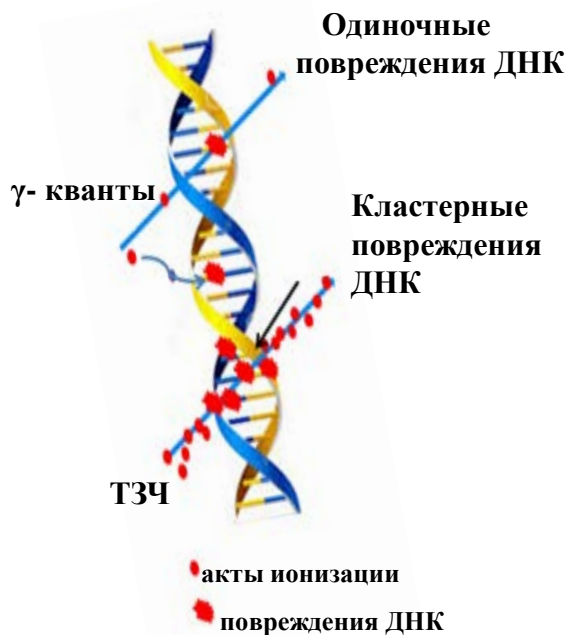
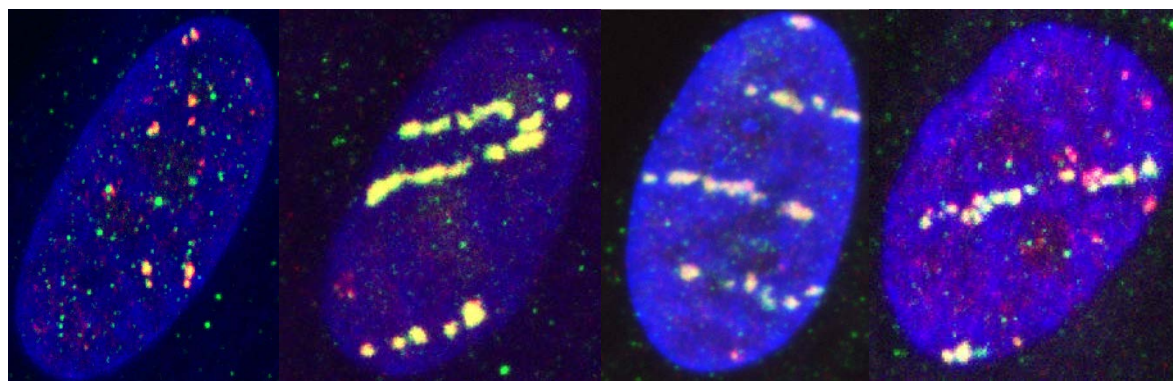
**Fe ion**

# Повреждение и восстановление структуры ДНК при действии ускоренных тяжёлых ионов



$\gamma$ -rays

$^{11}\text{B}$  ions, 50 MeV/amu





# Биологическое воздействие

Стадия	Процессы	Время
Физическая	Ионизация и возбуждение атомов (молекул), прежде всего, молекул воды	$10^{-15} - 10^{-14}$ с
Физико-химическая	Перераспределение поглощенной энергии внутри молекул, разрыв связей, образование свободных радикалов ( $H^*$ , $OH^*$ )	$10^{-14} - 10^{-11}$ с
Химическая	Реакции радикалов друг с другом и взаимодействие радикалов с молекулами белка, ферментов и др. Химическая модификация важных в биологическом отношении молекул.	$10^{-6} - 10^{-3}$ с
Биологическая	Последовательное поражение на всех уровнях биосистемы от субклеточного до организменного	Секунды - годы

# Воздействие на человека

- **Соматические** (телесные) – возникающие в организме человека, который подвергался облучению;
- **Генетические** – связанные с повреждением генетического аппарата и проявляющиеся в последующих поколениях: это дети, внуки и более отдаленные потомки человека, подвергшегося облучению.

Соматические эффекты	Генетические эффекты
Лучевая болезнь Локальные лучевые поражения Лейкозы Опухоли разных органов	Генные мутации Хромосомные aberrации

# Воздействие на человека

Доза, мЗв	Причина и результат воздействия
<b>0.7 ÷ 2</b>	Доза от естественных источников в год
50	Предельно допустимая доза профессионального облучения в год
100	Уровень удвоения вероятности генных мутаций
<b>250</b>	Однократная доза оправданного риска в чрезвычайных обстоятельствах
1 000	Доза возникновения острой лучевой болезни
3 000 ÷ 5 000	Без лечения 50% облученных умирает в течение 1–2 месяцев вследствие нарушения деятельности клеток костного мозга
$(10 \div 50) 10^3$	Смерть наступает через 1–2 недели вследствие поражений главным образом желудочно-кишечного тракта
$10^5$ (100 Зв)	Смерть наступает через несколько часов или дней вследствие повреждения центральной нервной системы

# Предельные дозы

Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	<b>20 мЗв в год</b> в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более <b>50 мЗв в год</b>	<b>1 мЗв в год</b> в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более <b>5 мЗв в год</b>
Эквивалентная доза за год		
в хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв
коже	500 мЗв	50 мЗв
кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

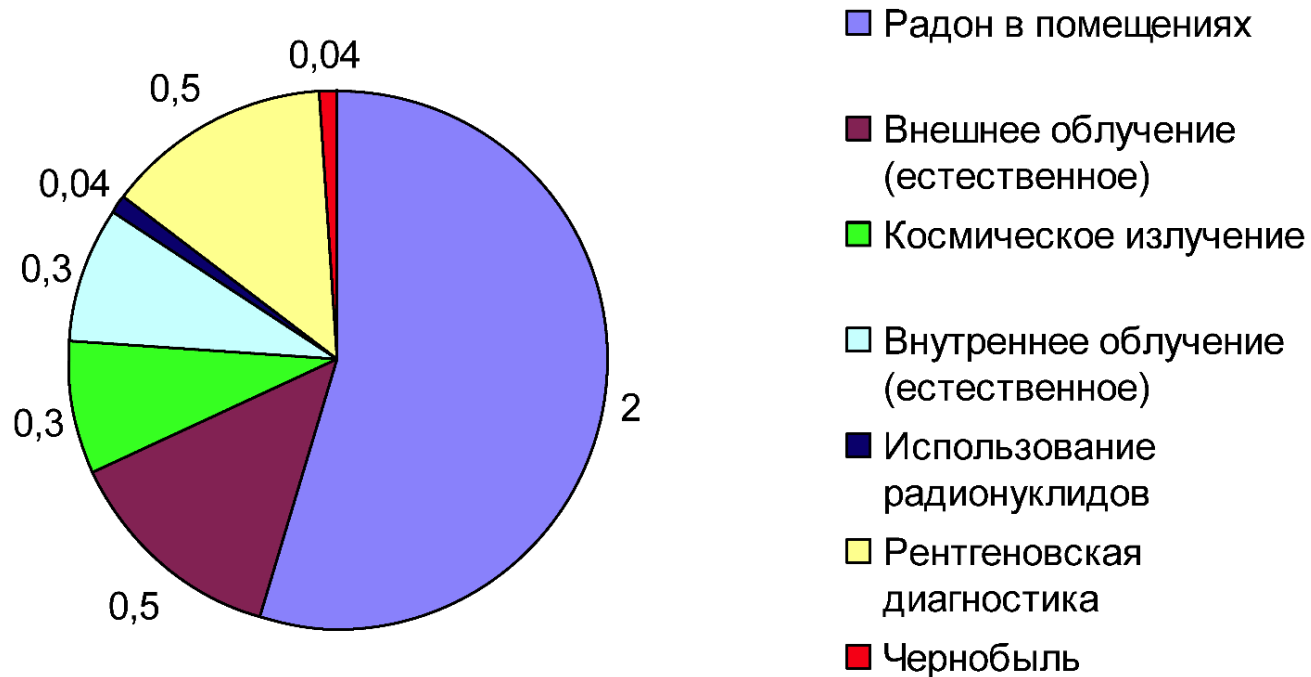
Предел индивидуального пожизненного риска (вероятности возникновения у человека какого-либо эффекта в результате облучения) в условиях нормальной эксплуатации для техногенного облучения в течение года персонала принимается равным  $1.0 \cdot 10^{-3}$ , а для населения –  $5.0 \cdot 10^{-5}$ . Уровень пренебрежимого риска составляет  $10^{-6}$ .

## Эффективные эквивалентные годовые дозы (в среднем по всему земному шару)

Источник (или вид деятельности)	Доза на 1 человека в среднем , мЗв	Типичные индивидуальные дозы, мЗв
Естественный фон	3,1	1,0 – 5,0
Медицинская диагностика	0,5 – 0,1	0,1 – 10,0
Профессиональное облучение	0,002	0,5 – 5,0
Производство ядерной энергии	0,0002	0,001 – 0,1
Все ядерные взрывы и все аварии, связанные с утечкой радионуклидов	0,04	0,01

# Естественный фон

Эффективные эквивалентные годовые дозы  
(в среднем по всему земному шару), мЗв



# РАДИОНУКЛИДЫ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

## Природные

## Космогенные

$^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$   
 $^{22}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ...

## Искусственные

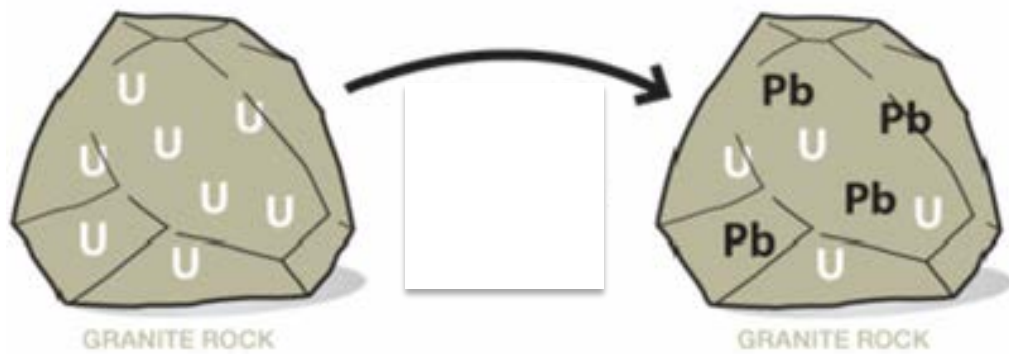
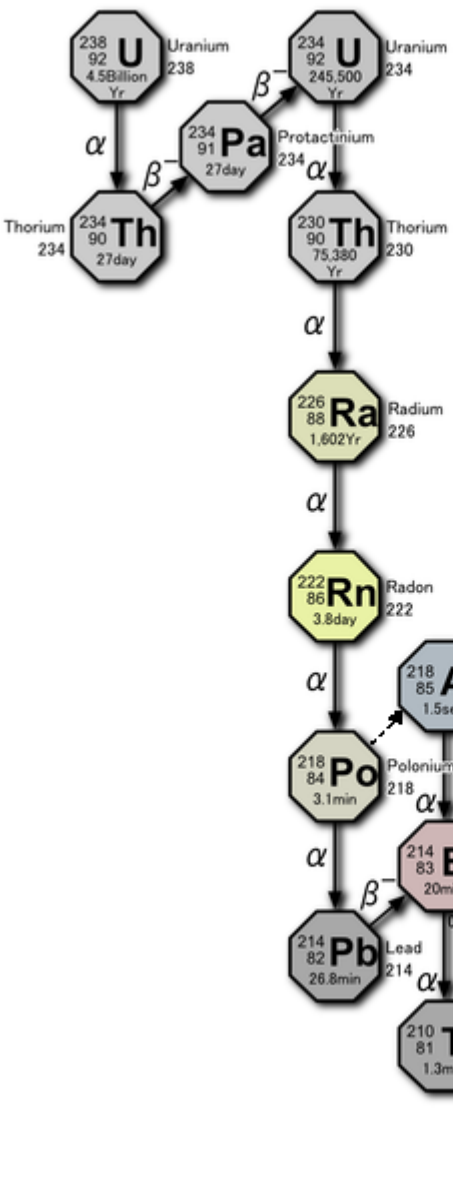
$^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$   
 $^{60}\text{Co}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ..

$^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{150}\text{Nd}$   
 $^{176}\text{Lu}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{138}\text{La}$ ,  $^{144}\text{Nd}$ ...

## Естественные ряды

$^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ...  
 $^{235}\text{U}$ ,  $^{231}\text{Pa}$ ,  $^{227}\text{Ac}$ ...  
 $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ...

# Как определить возраст Земли?



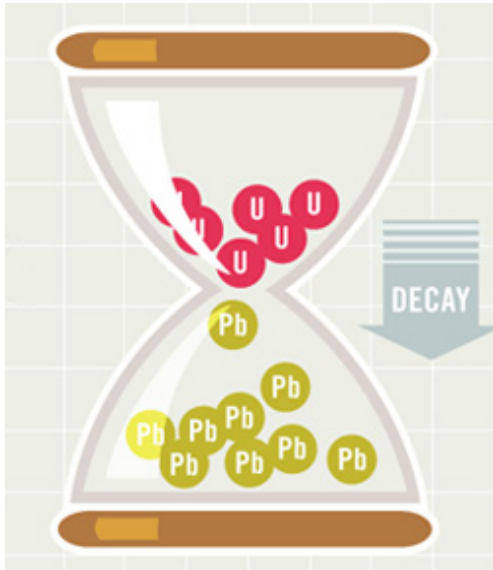
Изотоп	$^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}$
Содержание в природе (в %)	1,4	24,1	22,1	52,4

$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 4.47$  млрд. лет)  
 $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 704$  млн. лет)  
 $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 14.01$  млрд. лет)

Радиогенные изотопы



# Как определить возраст Земли?



ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

$$dN = -\lambda N dt$$

Число ядер урана

$$N_U(t) = N_U(0)e^{-\lambda_U t}$$

Число ядер свинца за счет распада урана

$$N_{Pb}(t) = N_U(0)(1 - e^{-\lambda_U t}) = N_U(t)(e^{\lambda_U t} - 1)$$

Соотношение между изотопами свинца

$$\frac{N_{206Pb}(t)}{N_{204Pb}(t)} = \frac{N_{206Pb}(0)}{N_{204Pb}(0)} + \frac{N_{238U}(t)}{N_{204Pb}(t)} (e^{\lambda_{238U} t} - 1)$$

# Как определить возраст Земли?

$$\Delta \left( \frac{N_{206}}{N_{204}} \right) = \frac{N_{206Pb}(t) - N_{206Pb}(0)}{N_{204Pb}(t) - N_{204Pb}(0)} = \frac{N_{238U}(t)}{N_{204Pb}(t)} (e^{\lambda_{238U}t} - 1)$$

$$\Delta \left( \frac{N_{207}}{N_{204}} \right) = \frac{N_{207Pb}(t) - N_{207Pb}(0)}{N_{204Pb}(t) - N_{204Pb}(0)} = \frac{N_{235U}(t)}{N_{204Pb}(t)} (e^{\lambda_{235U}t} - 1)$$

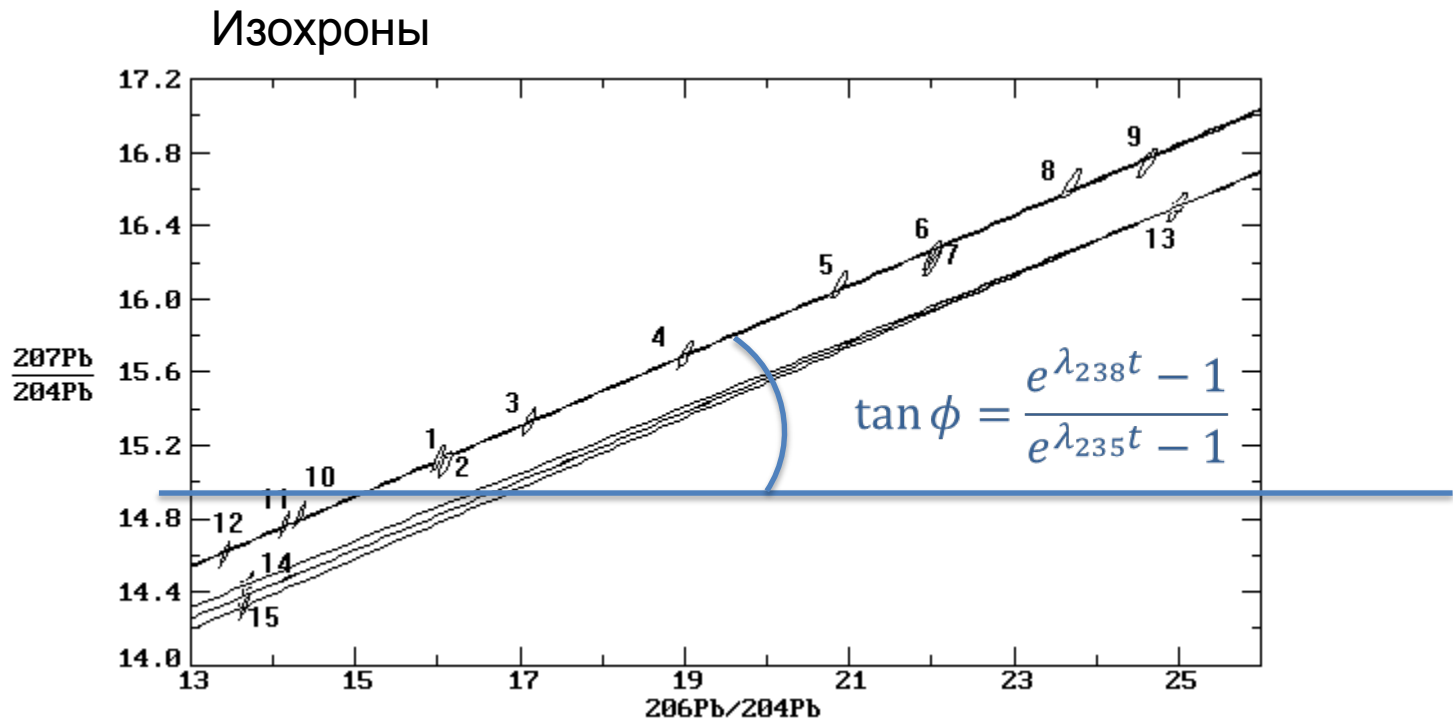
Изменение соотношения между изотопами свинца

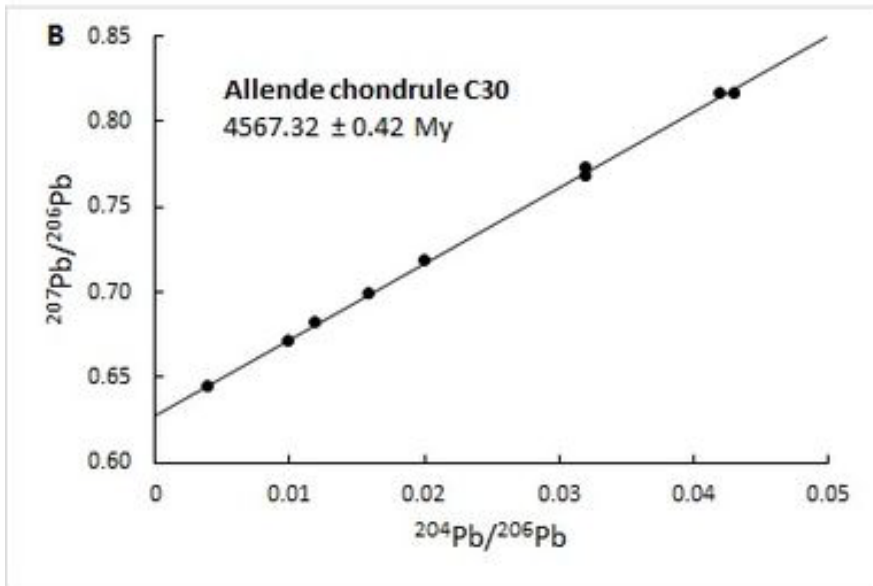
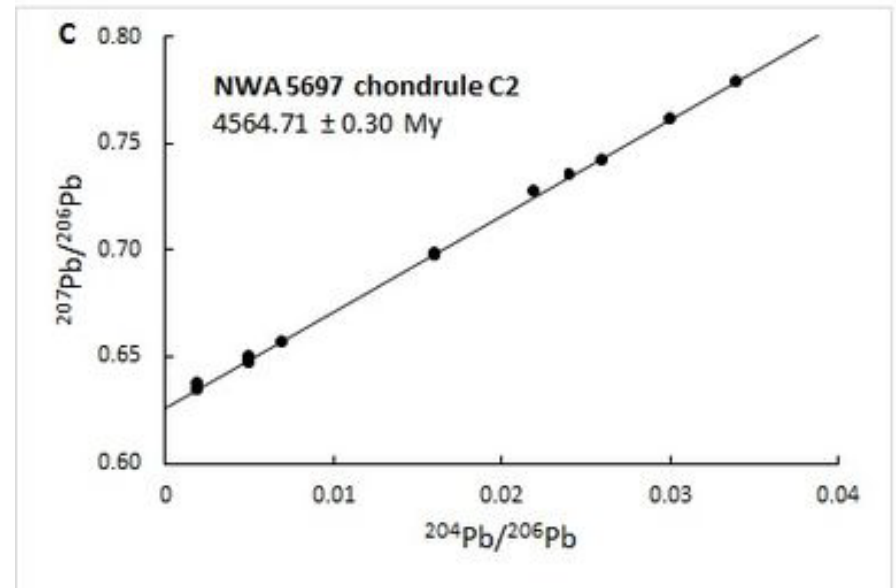
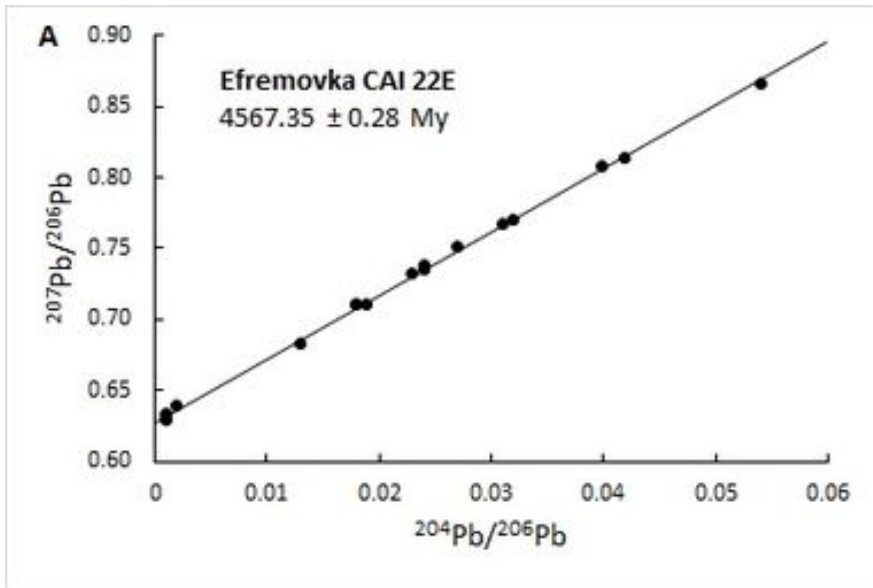
$$\frac{\Delta \left( \frac{N_{206}}{N_{204}} \right)}{\Delta \left( \frac{N_{207}}{N_{204}} \right)} = \frac{N_{238U}(t) (e^{\lambda_{238U}t} - 1)}{N_{235U}(t) (e^{\lambda_{235U}t} - 1)}$$

# Как определить возраст Земли?

$$\frac{N_{238U}(t)}{N_{235U}(t)} = \text{Const} = 137,798 \pm 0,013$$

Постоянная распада  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$





Возраст Солнечной системы  
 $T \sim 4567.7 \cdot 10^6$  лет

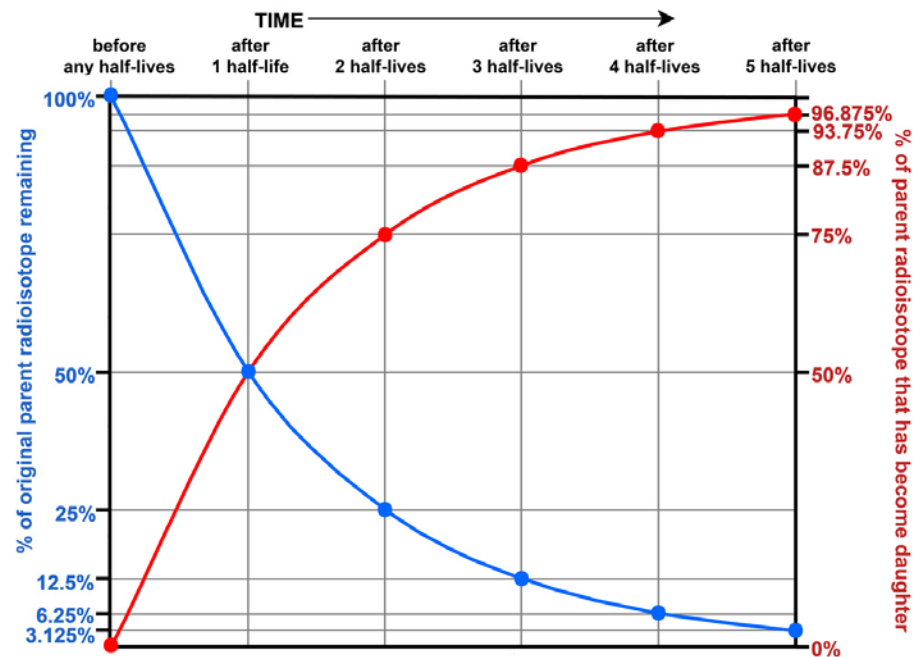
Connelly, J.N., Bizzarro, M., Krot, A.N., Nordlund, A., Wielandt, D., and M.A. (2012). The absolute chronology and thermal processing of solids in the solar protoplanetary disk. *Science*, 338: 651 – 655.

# Ядерная хронология

- ❑ долгоживущие радиоактивные изотопы, образующиеся при взаимодействии космических лучей с ядрами атмосферы Земли
- ❑ долгоживущие радиоактивные изотопы, образовавшиеся во время формирования Солнечной системы
- ❑ долгоживущие изотопы радиоактивных семейств

## Геохронология

- Уран -свинцовый метод
- Торий-свинцовый метод
- Свинец-свинцовый метод
- Рубидий-стронциевый метод
- Рений-осмиевый метод
- Калий-аргоновый метод



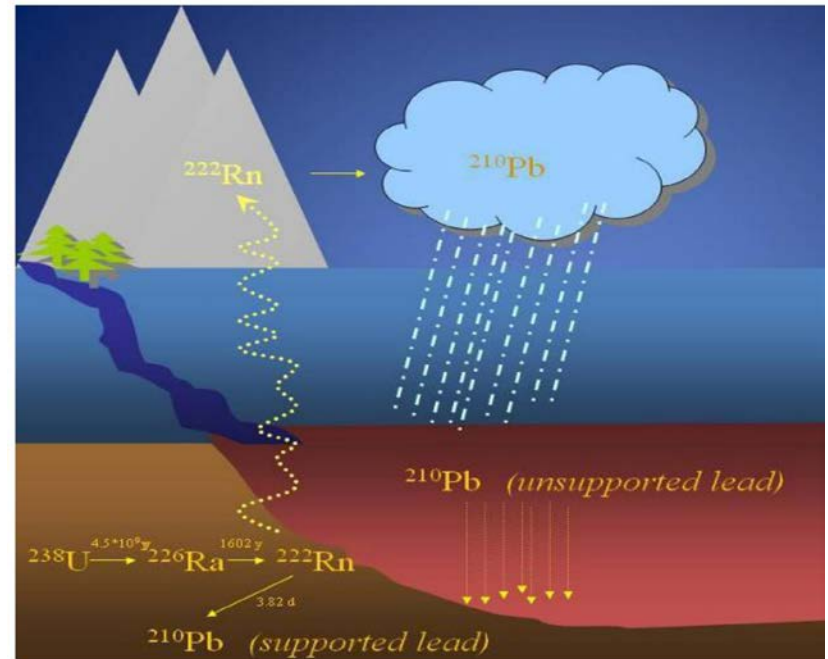
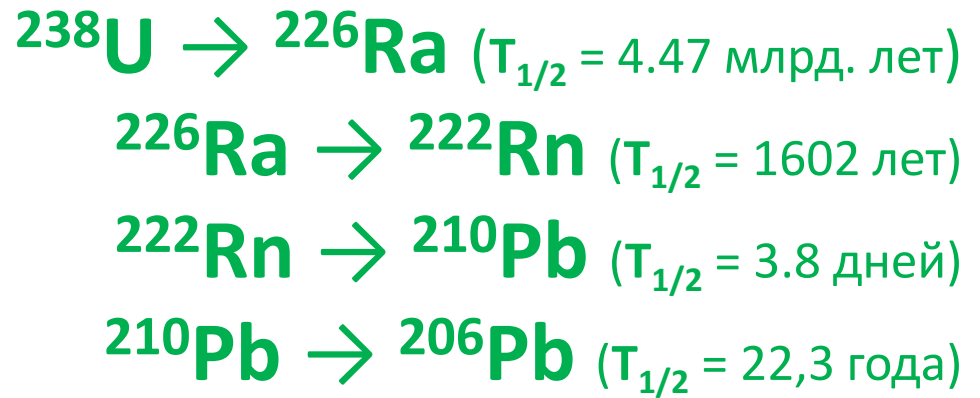
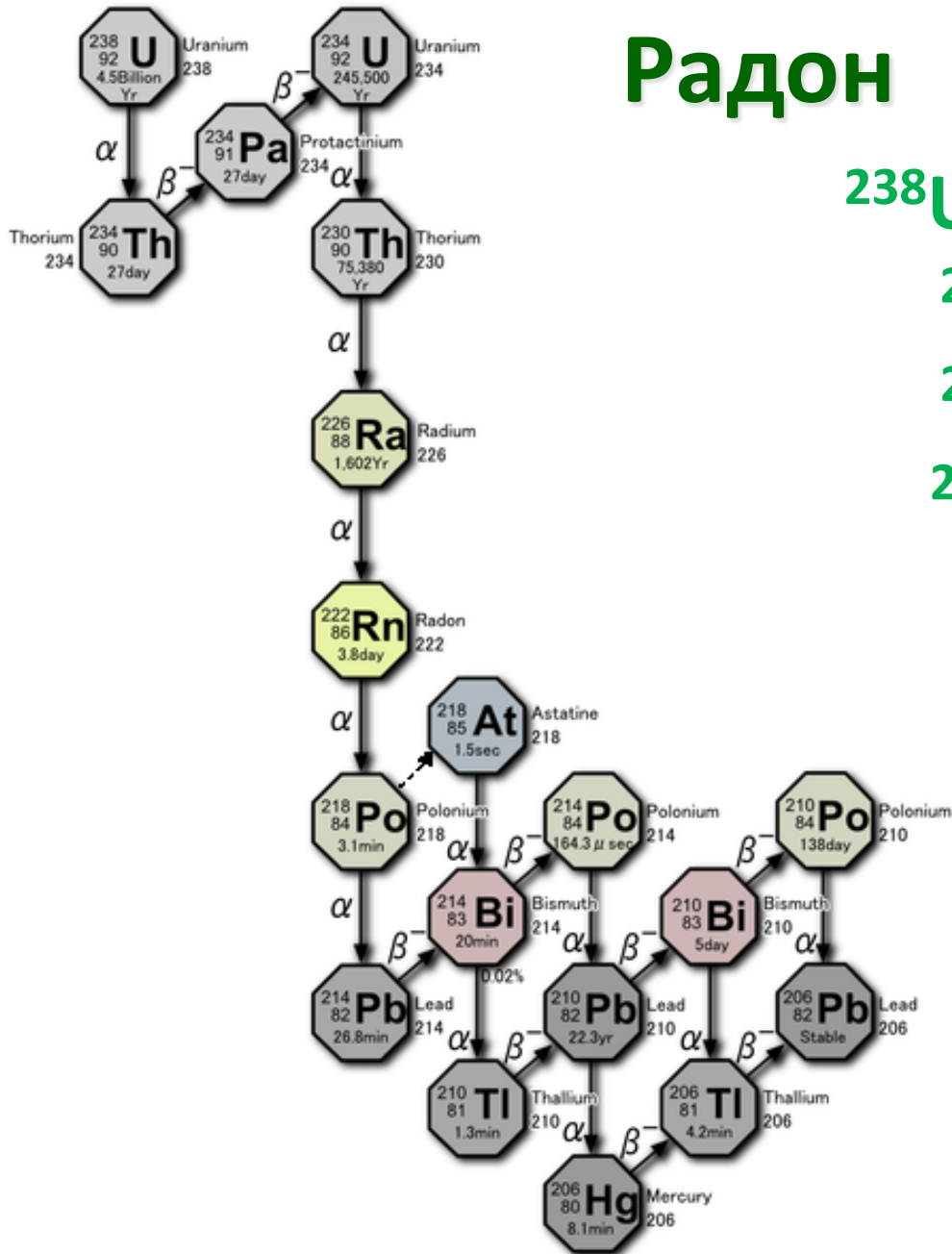
$$N_{Pb}(t)/N_U(t) = e^{\lambda_U t} - 1$$

# Земные радионуклиды

Радиоактивные изотопы, изначально присутствующие на Земле.			
Радионуклид	Весовое содержание в земной коре	Период полураспада, лет:	Тип распада:
Уран-238	$3 \cdot 10^{-6}$	$4.5 \cdot 10^9$	$\alpha$ -распад
Торий-232	$8 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{10}$	$\alpha$ -распад, $\gamma$ -распад
Калий-40	$3 \cdot 10^{-16}$	$1.3 \cdot 10^9$	$\beta$ -распад, $\gamma$ -распад
Ванадий-50	$4.5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{14}$	$\gamma$ -распад
Рубидий-87	$8.4 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{10}$	$\beta$ -распад
Индий-115	$1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{14}$	$\beta$ -распад
Лантан-138	$1.6 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{11}$	$\beta$ -распад, $\gamma$ -распад
Самарий-147	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{11}$	$\alpha$ -распад
Лютеций-176	$3 \cdot 10^{-8}$	$2.1 \cdot 10^{10}$	$\beta$ -распад, $\gamma$ -распад

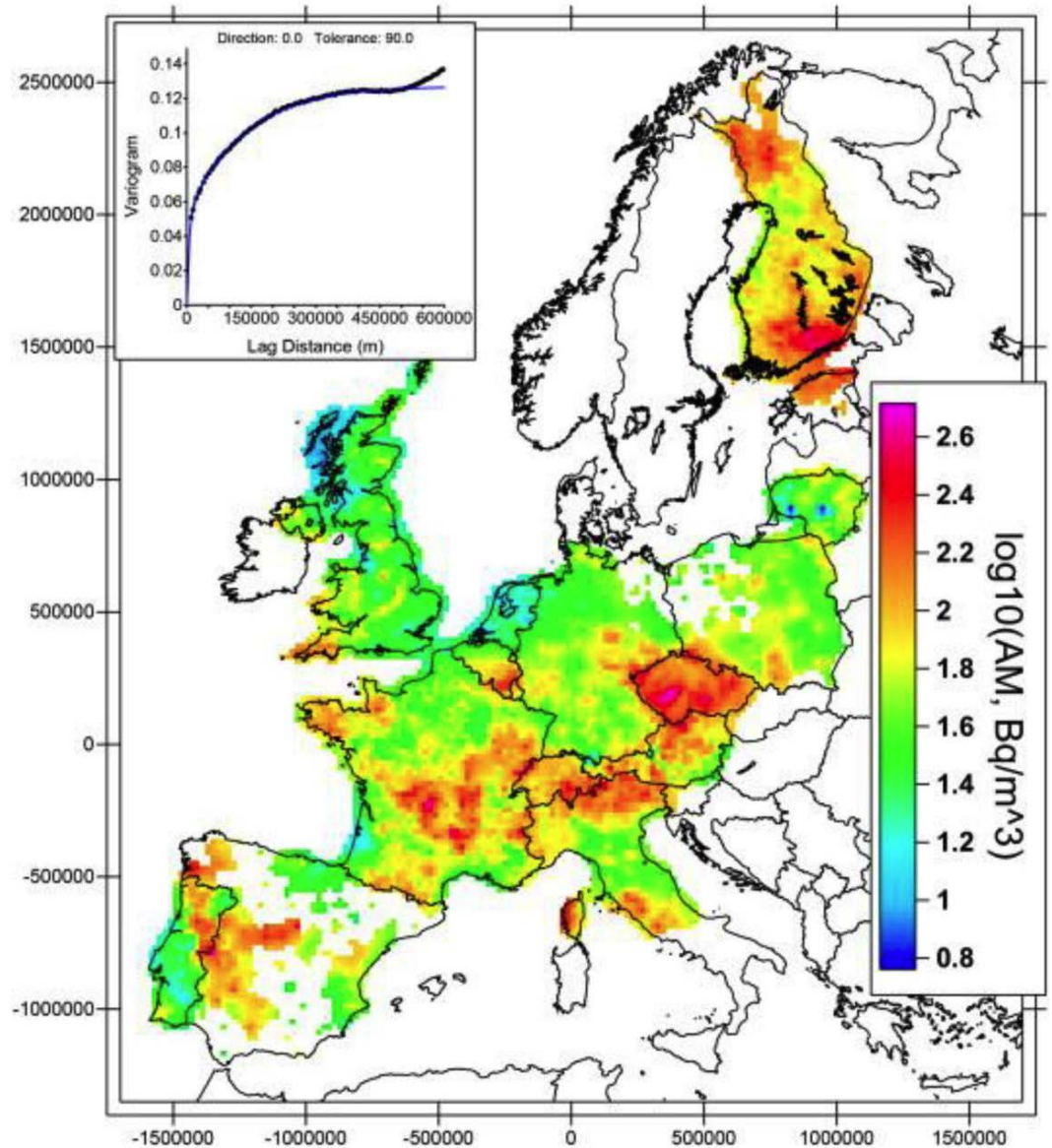
Средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников, составляет около **0.35 мЗв**

# Радон



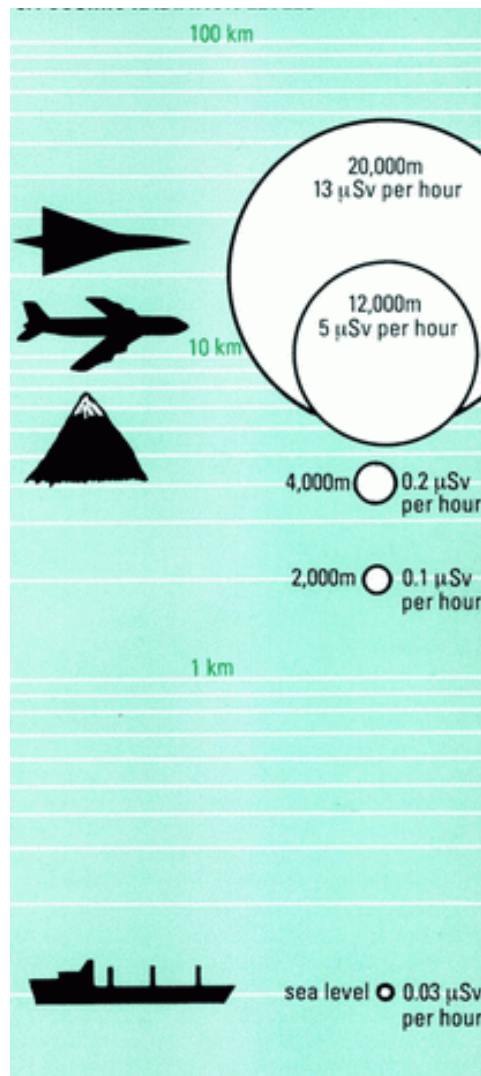
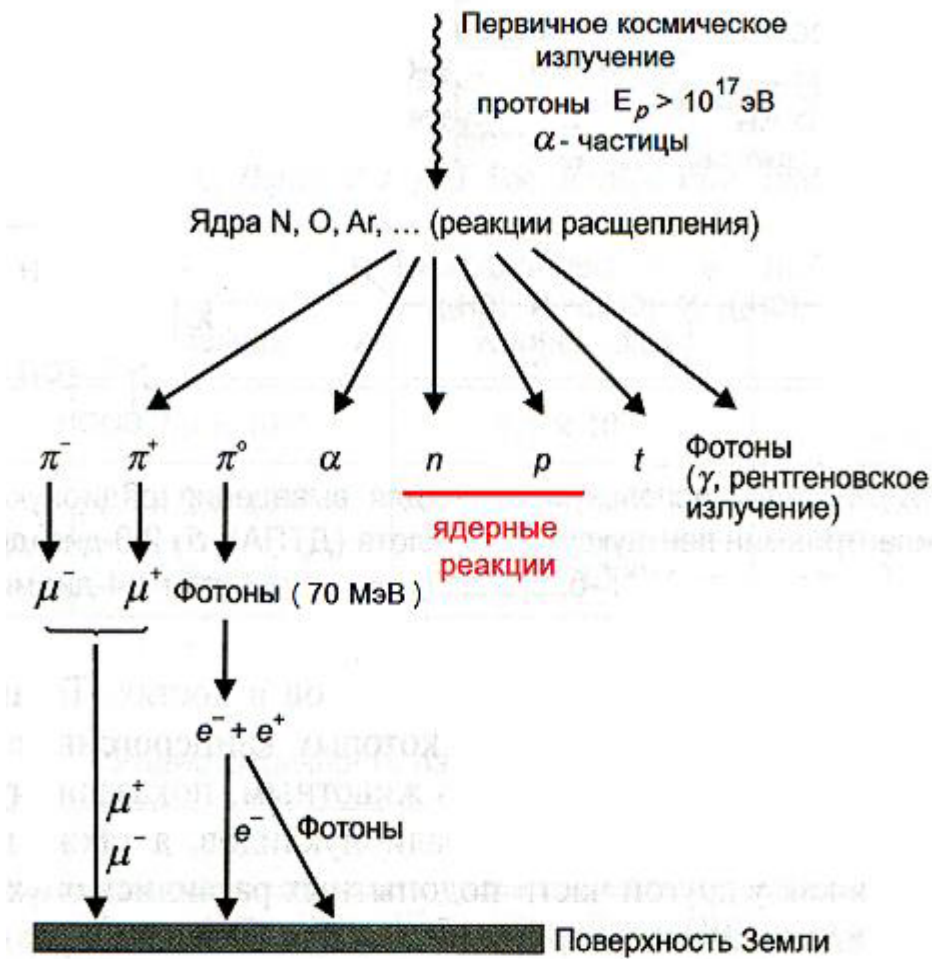
# Радон

Мощность излучения различных источников радона	
Источник радона	Мощность излучения, кБк/сут
Природный газ	3
Вода	4
Наружный воздух	10
Строй-материалы, грунт под зданием	60





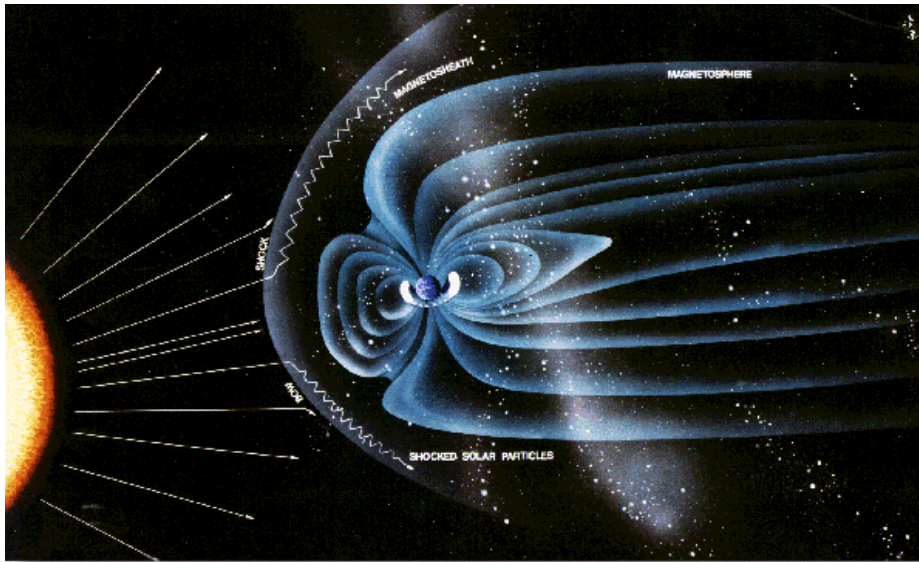
# Космические лучи



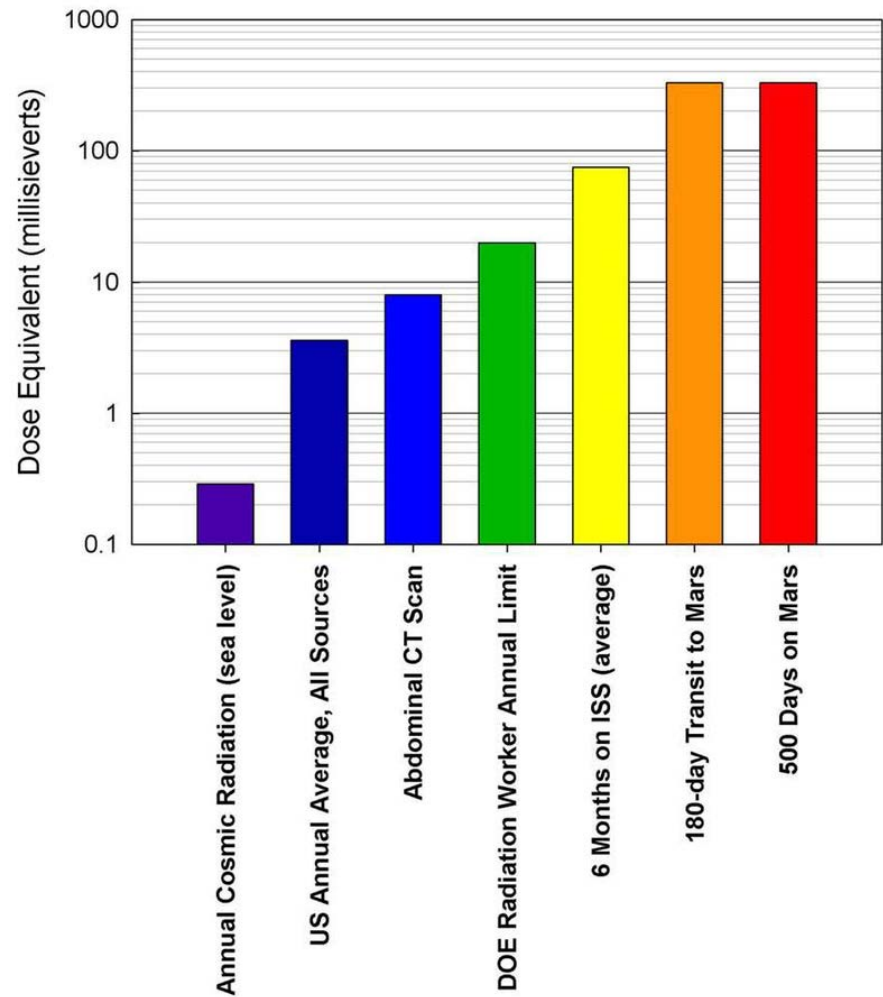
5 мкЗв/час

0,03 мкЗв/час

# Космические лучи

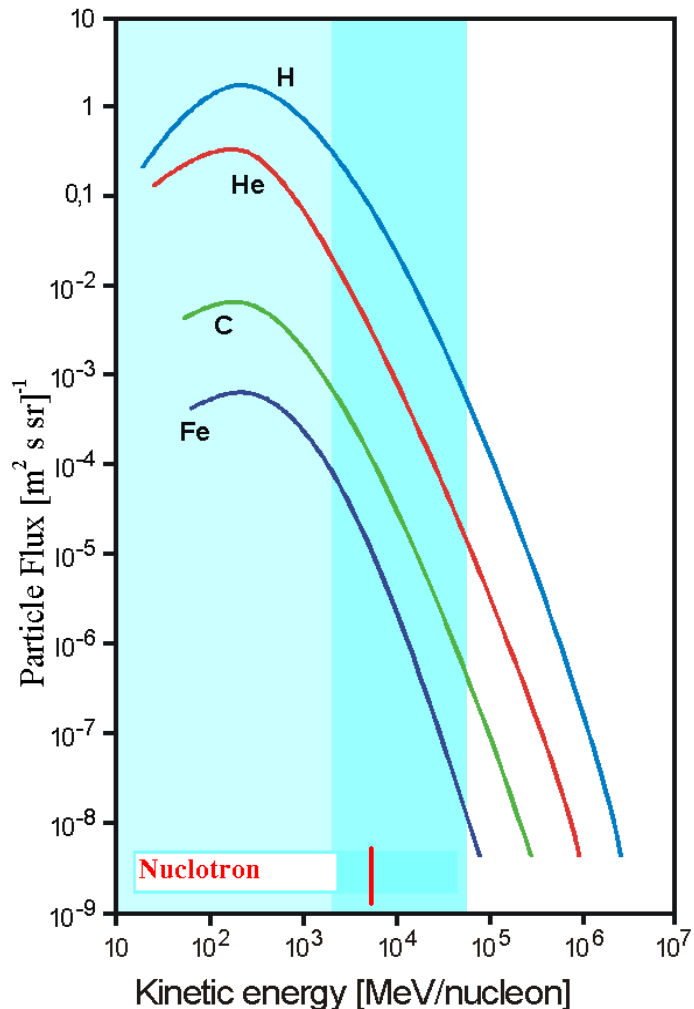


За счет космического излучения большинство населения получает дозу, равную около **0.35 мЗв /год**.  
Эффективная доза от глобальных авиаперевозок составляет на душу населения в мире в среднем около **1 мкЗв/год**, а в Северной Америке около 10 мкЗв.



МКС (400 км) – 1 мЗв/день

# Потоки галактических тяжёлых ионов

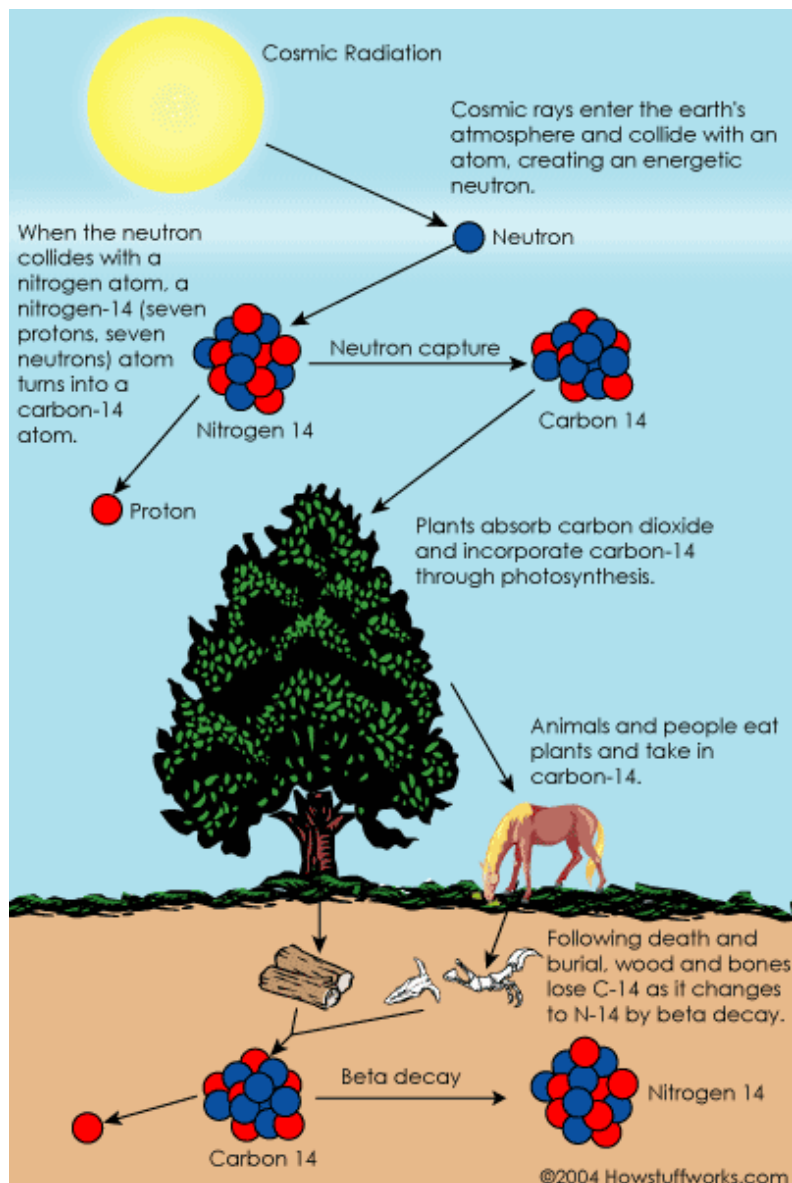


Particle flux density interplanetary space  $z \geq 20$  160 per day per  $\text{cm}^2$

Последствия биологического действия тяжёлых ионов галактического космического излучения:

- Генетические нарушения:**
- генные и структурные мутации,
- раковые заболевания;
- Нарушение зрительных функций:**
- образование катаракты;
- повреждение сетчатки;
- Нарушение функций ЦНС**

# Космогенные радионуклиды



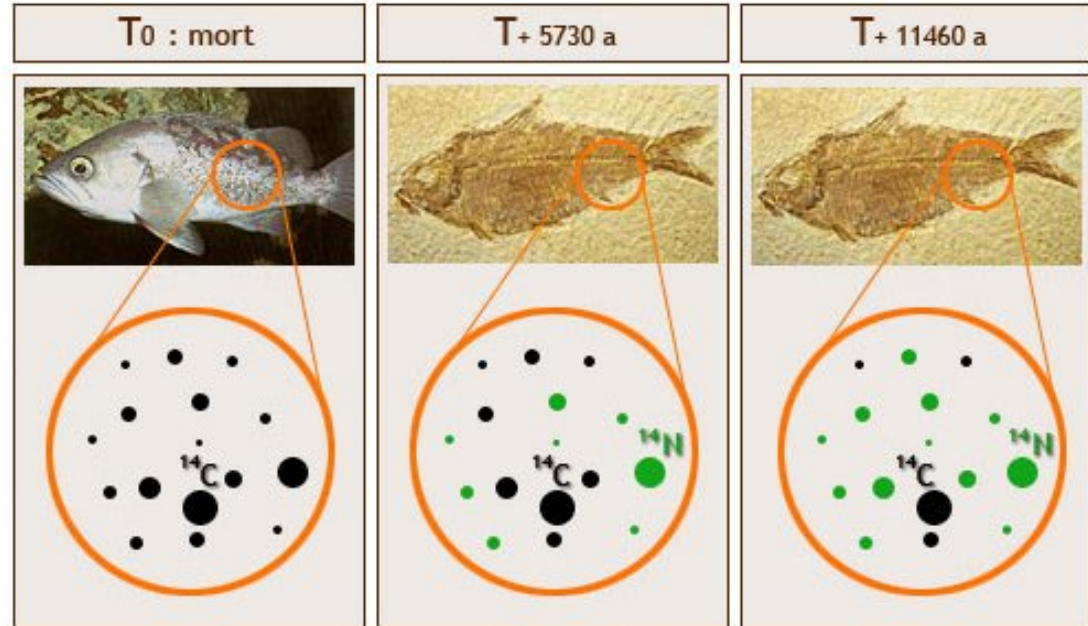
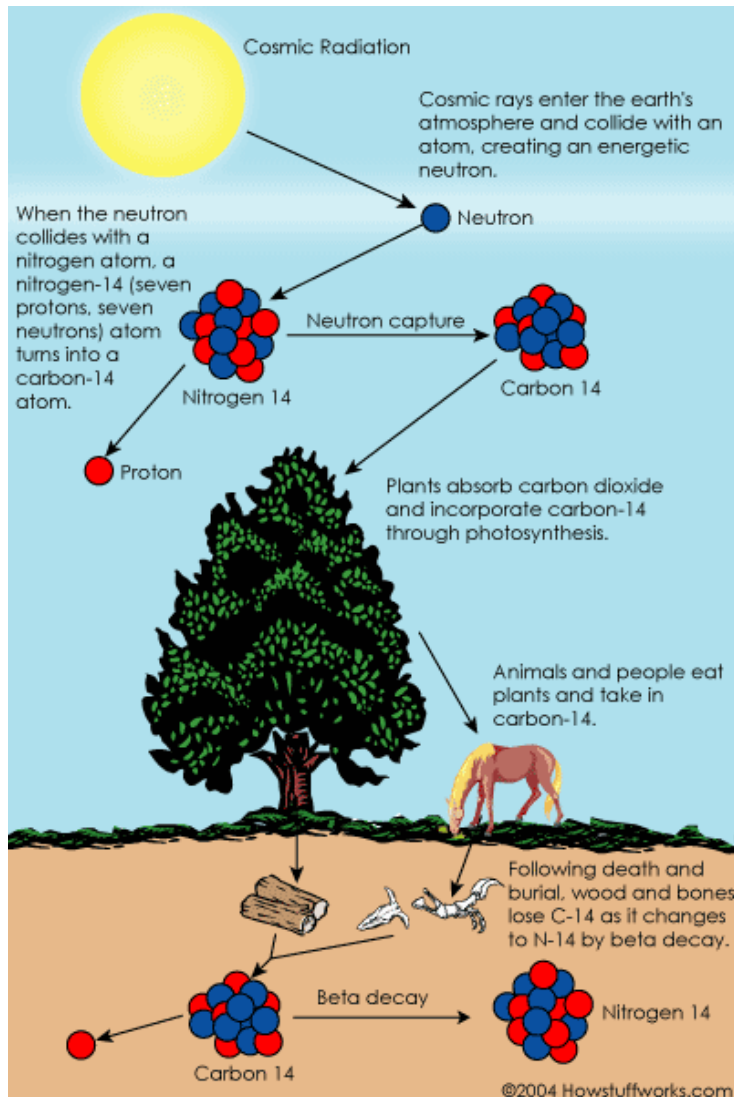
В создание дозы наибольший вклад вносят  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{14}\text{C}$  и  ${}^{22}\text{Na}$  которые поступают вместе с пищей в организм человека

Среднее годовое поступление космогенных радионуклидов в организм человека

Радионуклид	Поступление, Бк/год	Годовая эффективная доза, мкЗв
${}^3\text{H}$	250	0.004
${}^7\text{Be}$	50	0.002
${}^{14}\text{C}$	20000	12
${}^{22}\text{Na}$	50	0.15

Суммарный вклад космогенных радионуклидов в индивидуальную дозу составляет около **15 мкЗв/год.**

# Радиоуглеродный метод



$$T_{1/2} ({}^{14}\text{C}) = 5700 \pm 30 \text{ лет}$$

**Нобелевская премия по физике**

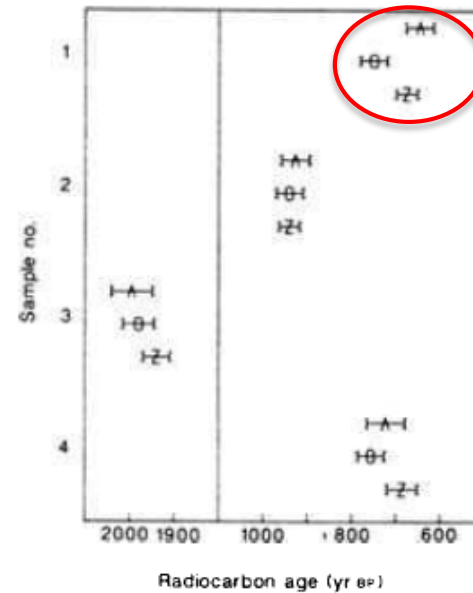
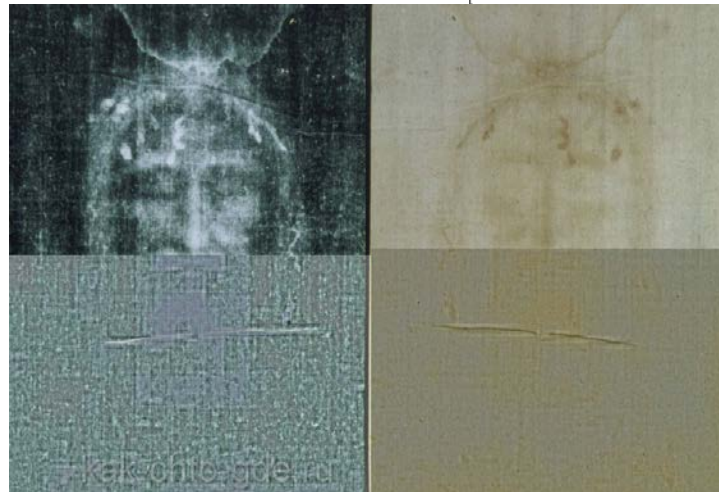
1960 г. **У. Ф. Либби** За введение метода использования углерода-14 для определения возраста в археологии, геологии, геофизике и других областях науки

# Radiocarbon dating of the Shroud of Turin

P. E. Damon<sup>†</sup>, D. J. Donahue<sup>†</sup>, B. H. Gore<sup>†</sup>, A. L. Hatheway<sup>†</sup>, A. J. T. Jull<sup>†</sup>,  
 T. W. Linick<sup>†</sup>, P. J. Sercel<sup>†</sup>, L. J. Toolin<sup>†</sup>, C. R. Bronk<sup>‡</sup>, E. T. Hall<sup>‡</sup>,  
 P. E. M. Hedges<sup>‡</sup>, R. Housley<sup>‡</sup>, I. A. Law<sup>‡</sup>, C. Perry<sup>‡</sup>, G. Bonani<sup>§</sup>, S. Trumbore<sup>||</sup>,  
 J. C. Ambers<sup>¶</sup>, S. G. E. Bowman<sup>¶</sup>, M. N. Leese<sup>¶</sup> & M. S. Tite<sup>¶</sup>

<sup>†</sup> Department of Physics, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721, USA  
<sup>‡</sup> Department of Archaeology and History of Art, University of Oxford, Oxford, OX1 3QJ, UK  
<sup>§</sup> Radiophysik, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich, Switzerland  
<sup>||</sup> Lamont Geological Observatory, Columbia University, Palisades, New York 10964, USA  
<sup>¶</sup> British Museum, London, WC1B 3DG, UK

*Four samples from the Shroud of Turin have been dated by accelerator mass spectrometry in laboratories at Arizona, Oxford and Zurich. As controls, three samples whose ages had been determined independently were also dated. The results provide strong evidence that the linen of the Shroud of Turin is mediaeval.*



**1260 – 1390 г**

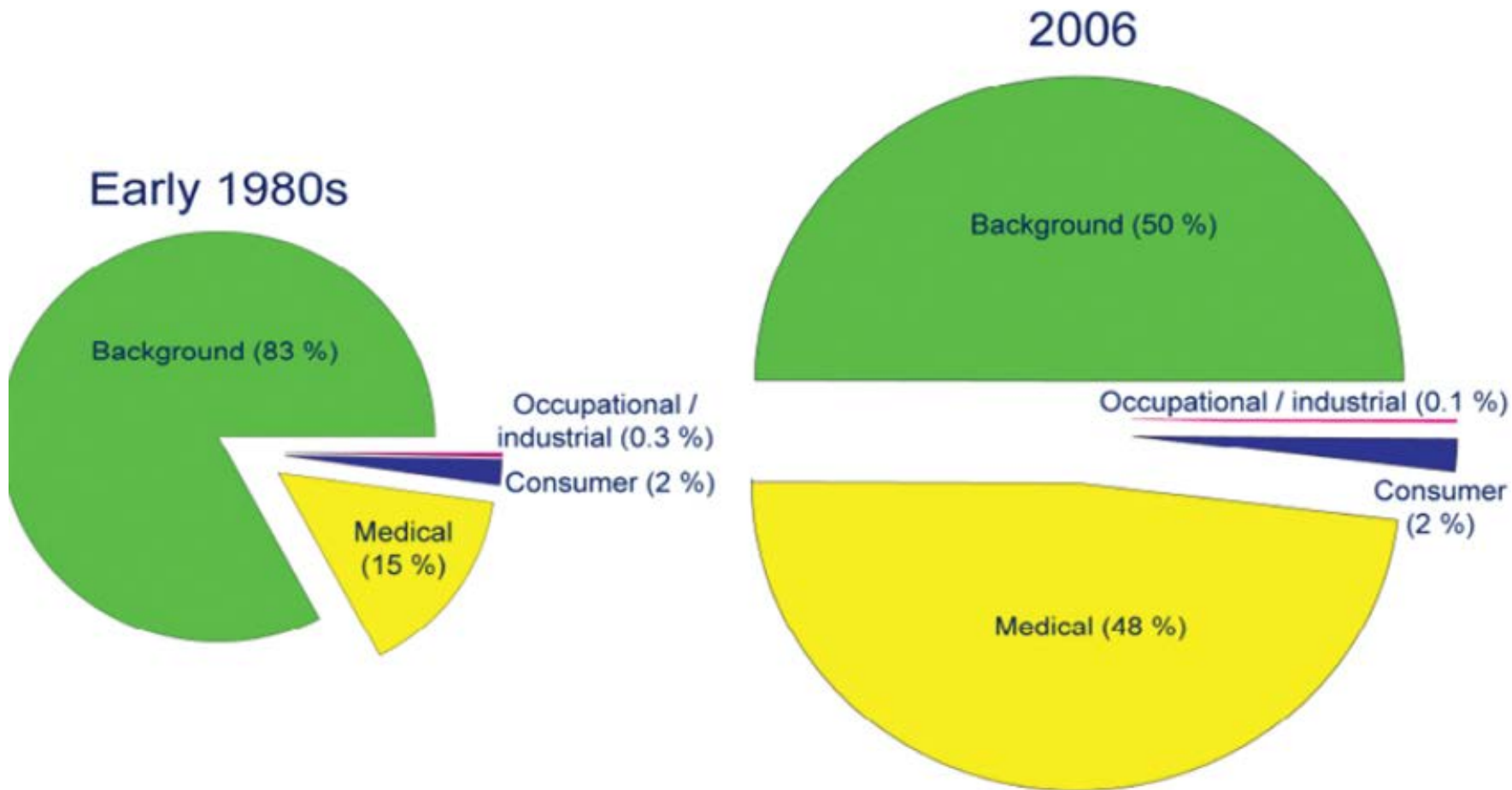
Mean radiocarbon dates, with  $\pm 1\sigma$  errors, of the Shroud of Turin and control samples, as supplied by the three laboratories (A, Arizona; O, Oxford; Z, Zurich) (See also Table 2.) The shroud is sample 1, and the three controls are samples 2-4. Note the break in age scale. Ages are given in yr BP (years before 1950). The age of the shroud is obtained as AD 1260-1390, with at least 95% confidence.

# Земные радионуклиды

## Внутреннее облучение

Тело человека (70 кг)			Доза,
Нуклид	$T_{1/2}$	A, Бк	мкЗв/год
$^{40}\text{K}$	$1,28 \cdot 10^9$ лет	4 400	180
$^{14}\text{C}$	5700 лет	3 200	10
$^{226}\text{Ra}$	1600 лет	1,5	13
$^{210}\text{Po}$	160 сут	19,5	130
$^{220}\text{Ra}$	54 сек		170 - 220
$^{222}\text{Ra}$	3,8 сут		800 - 1000
$^{90}\text{Sr}$ (1973)	30 лет	48	45

Средняя доза внутреннего облучения за счет радионуклидов земного происхождения составляет **1.35 мЗв/год.**



	Early 1980s	2006
Collective effective dose (person-Sv)	835,000	1,870,000
Effective dose per individual in the U.S. population (mSv)	3.6	6.2