



Человек в мире атомных ядер

Ядерная медицина

Диагностика

In vitro

- Радиоиммунный анализ (РИА)

In vivo

- Радиометрия
- Сцинтиграфия
- Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ)
- Позитрон-эмиссионная томография (ПЭТ)
- Компьютерная томография (КТ)
- Магнитно-резонансная томография (МРТ)

Лучевая терапия

- Рентгеновское излучение высокой энергии
- Гамма-терапия
- Облучение быстрыми электронами
- Облучение протонами
- Облучение нейтронами
- Контактная (радионуклидная) терапия

Сколько у человека крови?

Сколько у человека крови?

В кровь человека ввели небольшое количество раствора, содержащего ^{24}Na активностью $A_0 = 300$ Бк. Активность $1,0 \text{ см}^3$ крови, взятой через 30 часов, составила $0,015$ Бк. Найти объем крови человека. $T_{1/2}(^{24}\text{Na}) = 15$ часов.

Сколько у человека крови?

В кровь человека ввели небольшое количество раствора, содержащего ^{24}Na активностью $A_0 = 300$ Бк. Активность $1,0 \text{ см}^3$ крови, взятой через 30 часов, составила $0,015$ Бк. Найти объем крови человека. $T_{1/2}(^{24}\text{Na}) = 15$ часов.

ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

$$dN = -\lambda N dt$$

Постоянная распада λ характеризует вероятность распада атомного ядра в единицу времени.

Число частиц

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Период полураспада

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

Активность

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 e^{-\ln 2 t / T_{1/2}}$$

Сколько у человека крови?

В кровь человека ввели небольшое количество раствора, содержащего ^{24}Na активностью $A_0 = 300$ Бк. Активность $1,0 \text{ см}^3$ крови, взятой через 30 часов, составила $0,015$ Бк. Найти объем крови человека. $T_{1/2}(^{24}\text{Na}) = 15$ часов.

Удельная активность

$$A(t)/V = \left(A_0 / V \right) 2^{-t/T_{1/2}}$$

$$\frac{0.015 \text{ Бк}}{1 \text{ см}^3} = \frac{300 \text{ Бк}}{V} 2^{-\frac{30}{15}}$$

$V = 5\,000 \text{ см}^3$ – объем циркулирующей крови у человека

Радиоизотопная диагностика

- **Радиометрия** - регистрация кинетики (во времени и пространстве) радиоактивных препаратов
- **Сцинтиграфия** - представление радиодиагностической информации в виде цифровых величин, графического изображения и картины пространственного распределения препарата в органах и системах

Основные принципы:

- **оценка степени разведения** препарата в жидких средах организма
- **определение изменения (во времени) уровня радиоактивности** в органах и системах организма или очаге поражения
- **визуализация распределения** введённого в организм **радиоактивного препарата**
- **определение выведения радиоактивных препаратов** из организма или их перераспределения в его биологических средах
- **взаимодействие «in vitro» меченых соединений** с составными частями биологических сред организма («антиген-антитело»).

Меченые атомы



Меченые атомы (изотопные индикаторы) – изотопы, при добавлении в исследуемые объекты способные выполнять роль индикаторов, выявляющих особенности поведения атомов химических элементов, молекул и других химических соединений в этих объектах.

Авторадиограмма (отпечаток), показывающая распределение фосфора (^{32}P) в листьях помидора. Светлые участки соответствуют повышенным концентрациям радиоактивного изотопа; можно видеть, что фосфор сконцентрировался у стебля и в сосудистых частях листьев.

Нобелевская премия по химии

1943 г. – Д. де Хевеши. За работу по использованию изотопов в качестве меченых атомов при изучении химических процессов.

Радиоиммунный анализ (РИА)

метод количественного определения биологически активных веществ, (гормонов, ферментов, лекарственных препаратов и др.) в биологических жидкостях, основанный на конкурентном связывании искомым стабильных и аналогичных им меченных радионуклидом веществ со специфическими связывающими системами (антителами).

В наибольшей мере радиотестирование *in vitro* используется для определения концентрации следующих биологически активных веществ:

- **гормонов** (для диагностики сахарного диабета, патологии гипофизарно-надпочечниковой и тиреоидной систем, выявления причин бесплодия у женщин, развития плода).
- **опухолевых антигенов**, например, раковоэмбрионального антигена для ранней диагностики злокачественных опухолей и контроля за эффективностью их лечения
- **иммуноглобулинов** и специфических реагентов (в диагностике аллергических заболеваний, вирусных инфекций, в том числе СПИДа).

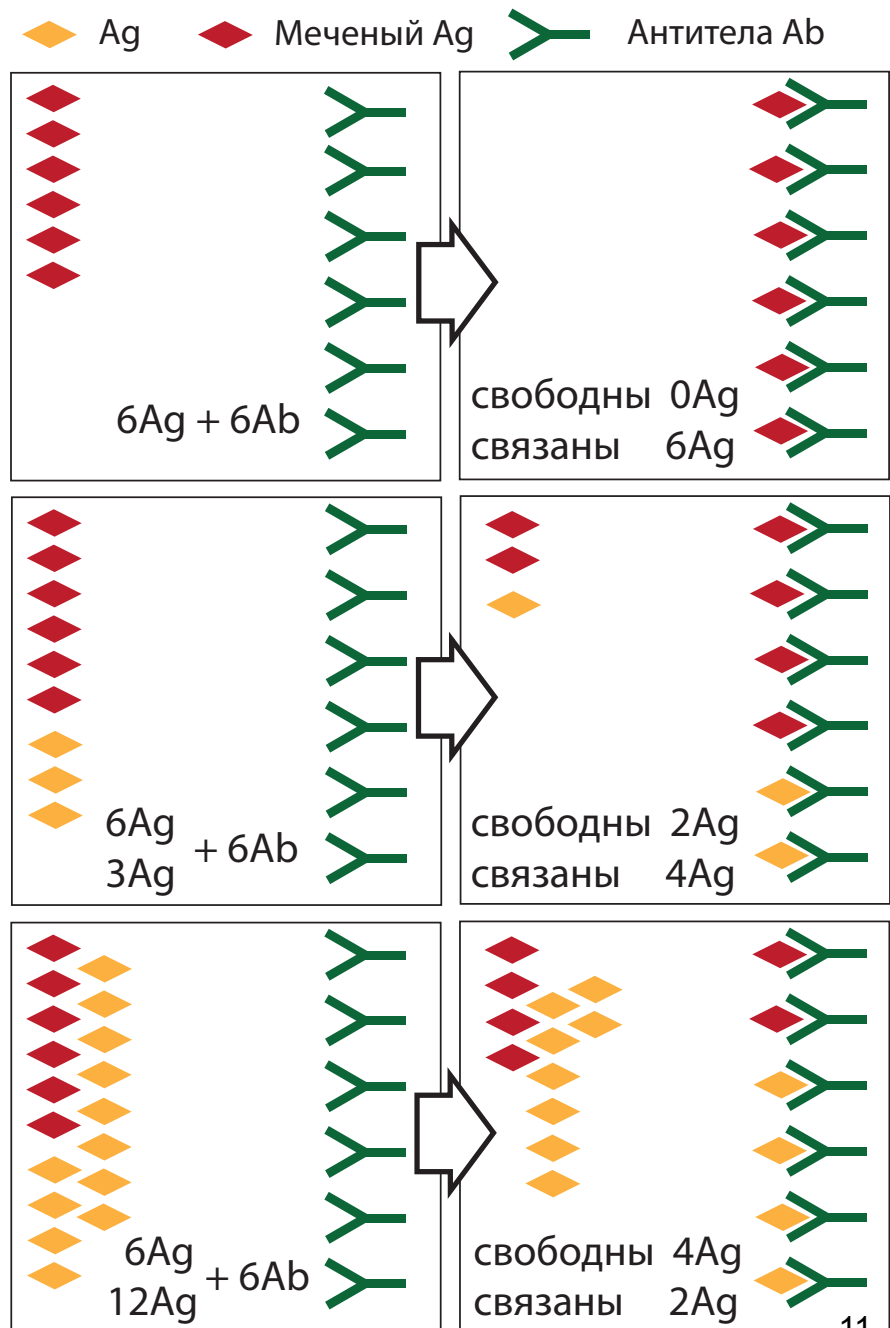
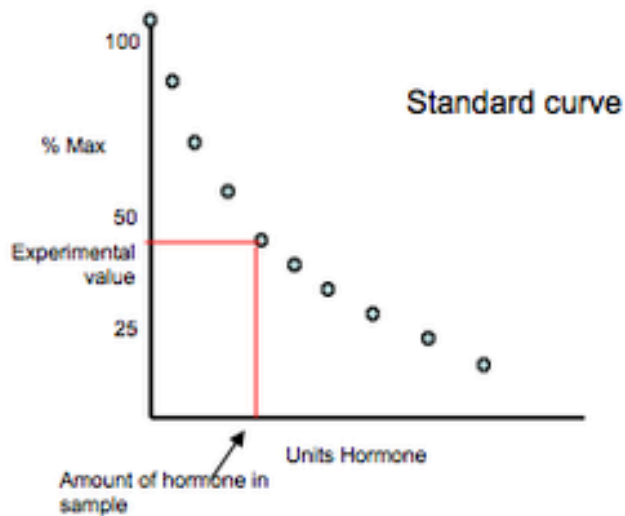
В ряде случаев исследования выполняют на фоне нагрузочных функциональных проб либо в динамике.

Нобелевская премия по физиологии или медицине

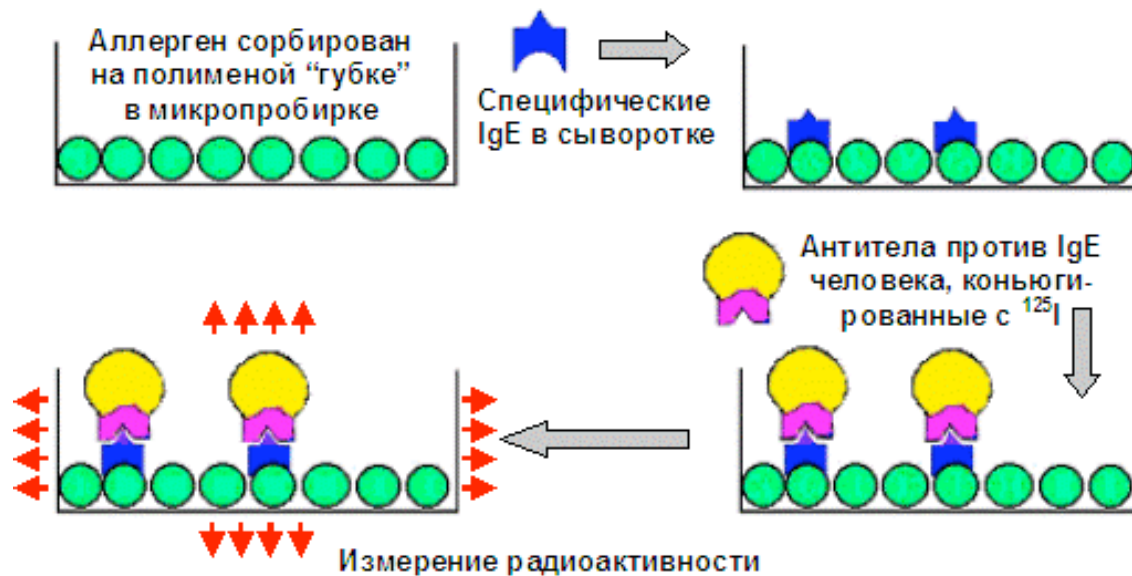
1977 г. – Р. С. Ялоу. За развитие радиоиммунологических методов определения пептидных гормонов.

Радиоиммунный анализ (РИА)

- выделенный из биологического материала немеченный антиген,
- меченный ^{125}I антиген с высокой удельной активностью (0,5 ГБк)
- антисыворотка, содержащая специфические антитела к исследуемому антигену



Радиоаллергосорбентный тест (РАСТ)

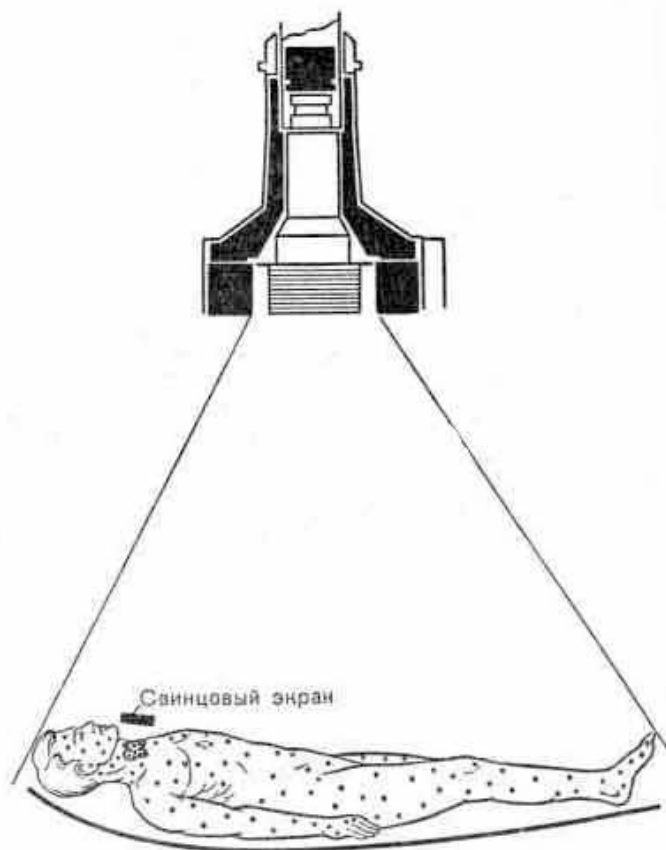


- ❑ Приготовление смеси с реагентами,
- ❑ Инкубирование смеси в течение нескольких часов,
- ❑ Отделение связанной радиоактивной фракции,
- ❑ Радиометрия проб,
- ❑ Расчет результатов (сравнение с калибровкой).

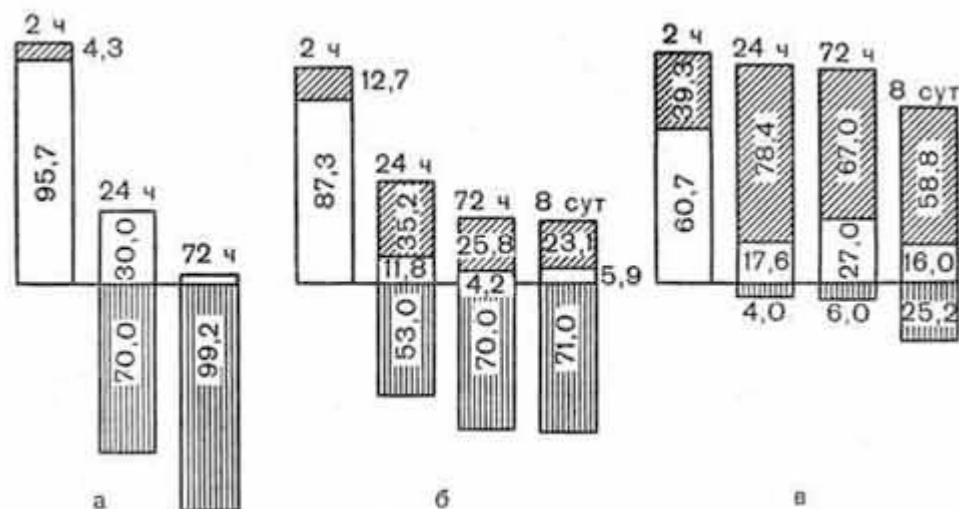
Чувствительность РИА очень высока: вплоть до **10^{-15} моль/л ($\sim 10^{-11}$ г/мл)**. Концентрации базальных концентраций пептидных гормонов обычно находятся в пределах от 10^{-13} до 10^{-10} моль/л.

- простота выполнения анализа и значительная пропускная способность, дающая возможность проводить большое количества проб (400-800 в неделю);
- отсутствие лучевой нагрузки на больного

Исследование йодного обмена методом радиометрии всего тела ($0,7 \text{ МБк } ^{131}\text{I}$)



Геометрия радиометрии больного

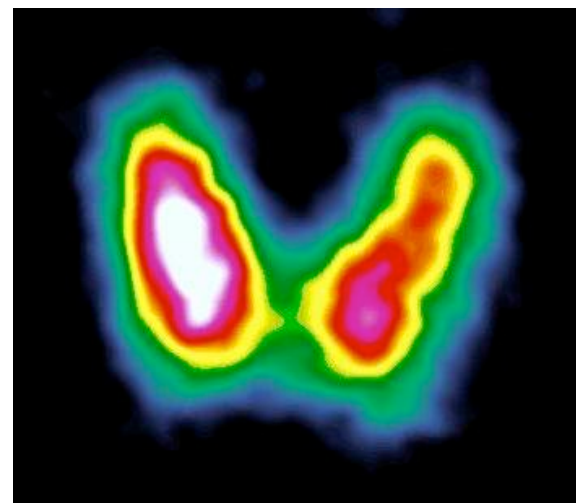
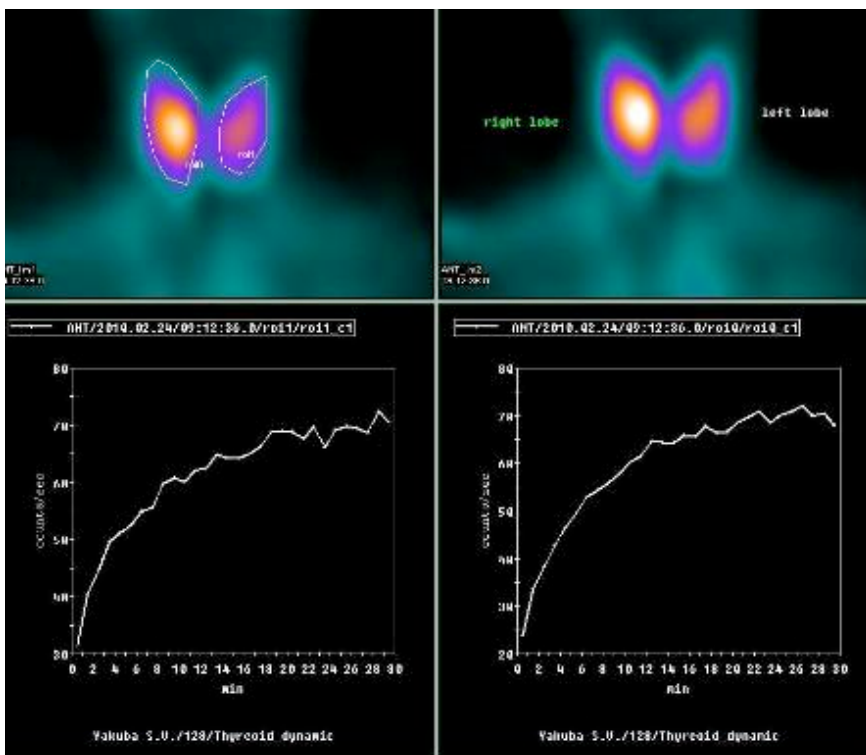
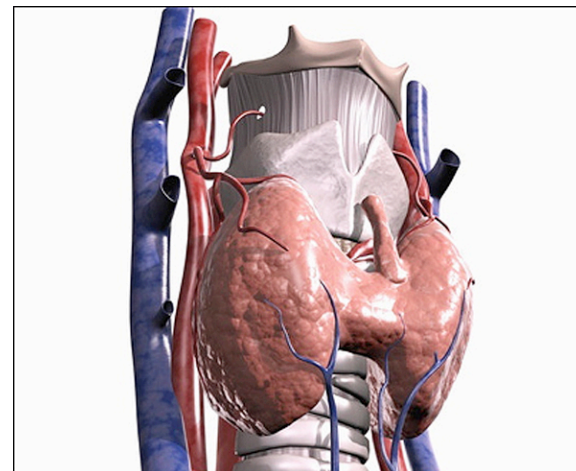


Результаты измерения радиоактивности всего тела и радиоактивности щитовидной железы у больных с микседемой (а), эутиреозом (б) и тиреотоксикозом (в).

Косая штриховка — процент поглощения ^{131}I в щитовидной железе; вертикальная штриховка — процент выведения ^{131}I ; без штриховки — процент ^{131}I в теле больного.

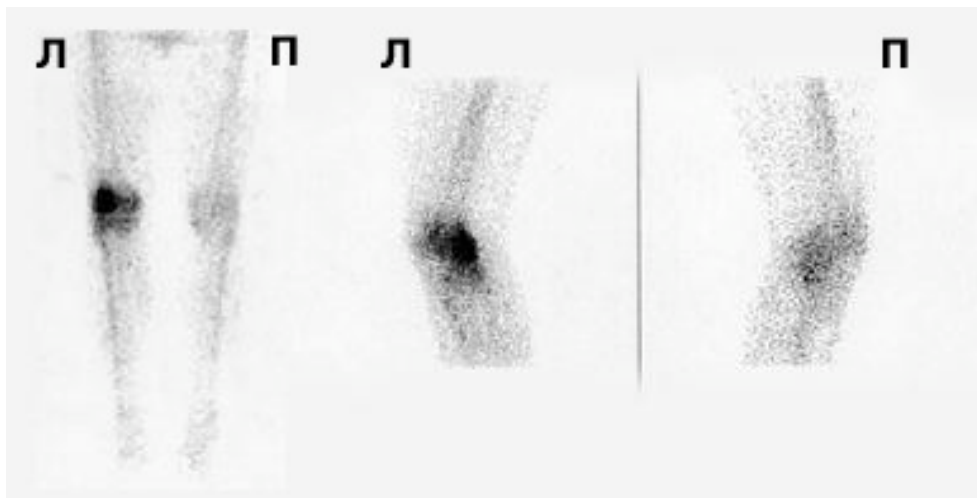
«Медицинская радиология»,
Л.Д.Линденбратен, Ф.М.Лясс

Сцинтиграфия

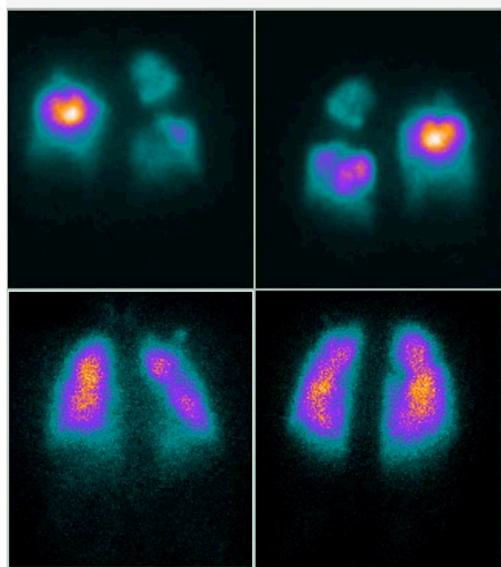


Сцинтиграфия щитовидной железы – визуализация функционирующей ткани щитовидной железы посредством моновалентных анионов ($^{99m}\text{TcO}_4^-$, ^{123}I , ^{131}I), предназначенный для выявления участков повышенного или сниженного метаболизма тиреоидной ткани.

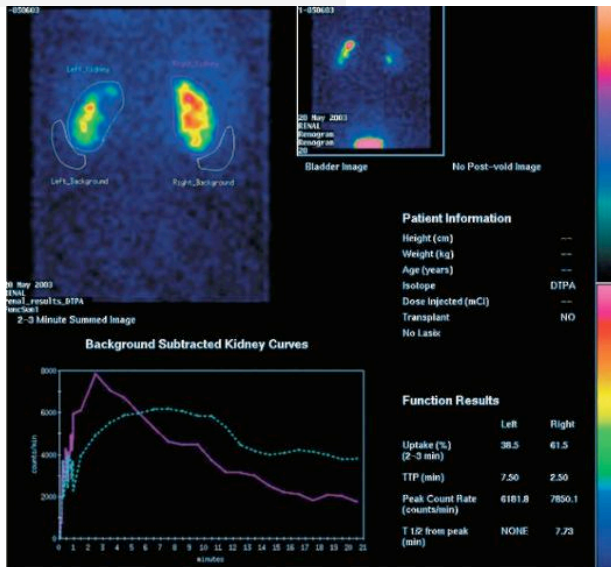
Сцинтиграфия



Сцинтиграфия скелета (^{99m}Tc -технифор). Гиперфиксация радионуклида в сочленяющихся отделах бедренной и большеберцовой костей, надколеннике и мягких тканях левой подколенной области (остеопороз)



Легкие (ТЭЛА). ^{99m}Tc , ^{81}Kr



Почки. ^{99m}Tc , ^{123}I

Цифровая рентгенология

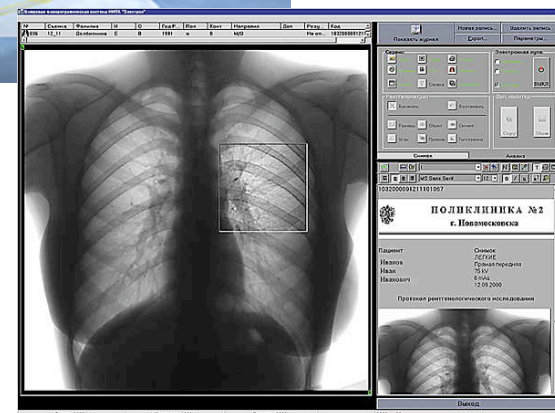
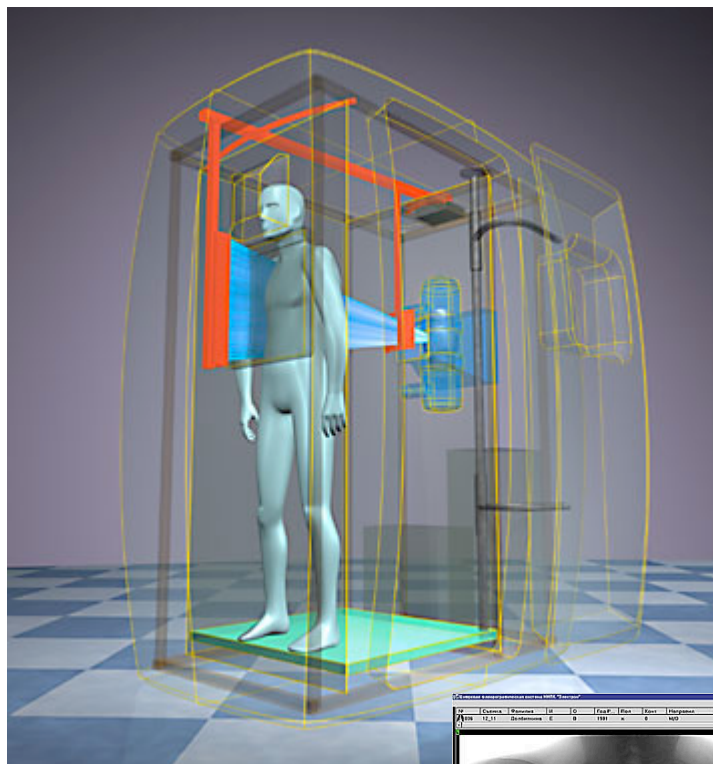


Дозовая нагрузка (снимок)

Пленочная флюорография – 0,5 мЗв

Цифровая флюорография – 0,02 мЗв

Естественный фон – 2,4 мЗв/год



Компьютерная томография (КТ)

В КТ для получения изображения используется рентгеновское излучение. Первый рентгеновский компьютерный томограф был сконструирован в 1969 году английским инженером-физиком Г. Хаунсфилдом и носил название «ЭМИ-сканер» (EMI-scanner). В 1972 году прошли его клинические испытания



Нобелевская премия по физиологии или медицине
1979 г. – А. Кормак, Г. Хаунсфилд. За разработку компьютерной томографии.

Компьютерная томография (КТ)



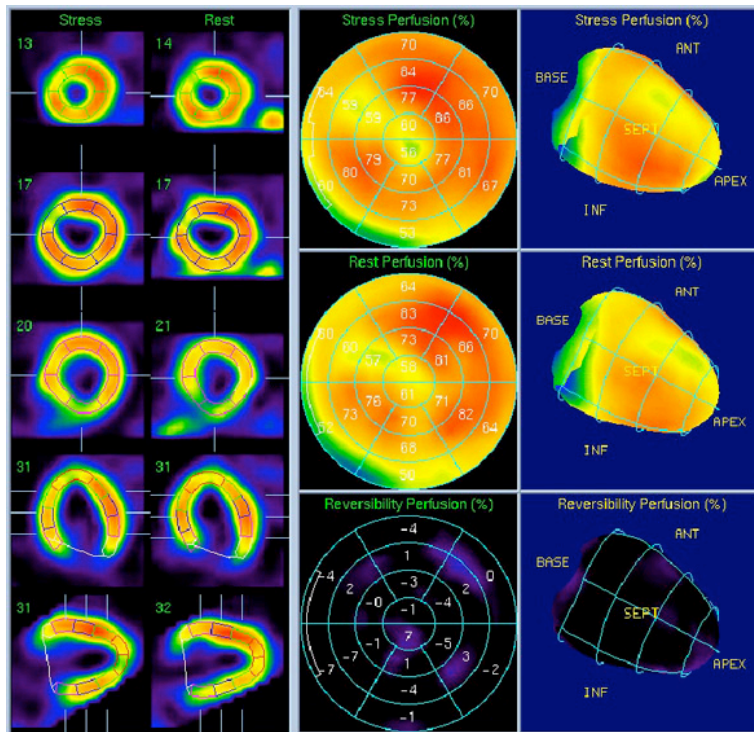
Цикл сканирования одного слоя около 2,5 с.

Однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ)

В основе – гамма-излучение радиофармпрепарата

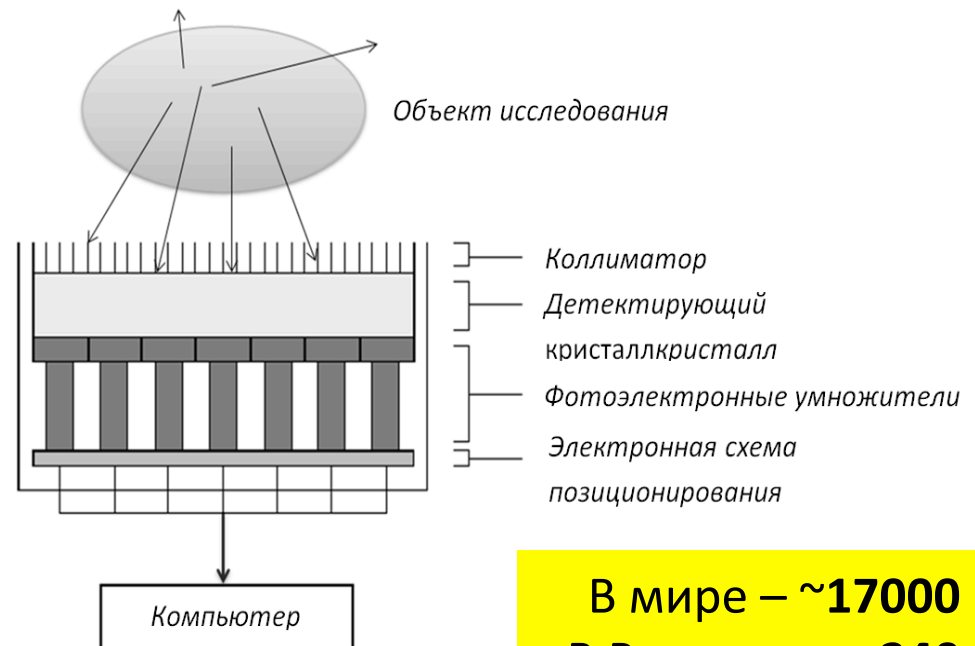
^{99m}Tc , ^{201}Tl , ^{123}I , ^{131}I , ^{111}In и ^{67}Ga

РФП для ОФЭКТ готовят преимущественно на ядерных реакторах, что обеспечивает относительную дешевизну исследования.



Миокард. **^{99m}Tc , ^{82}Rb , ^{201}Tl**

1958 год. Х. Ангер (Беркли, Калифорния, США). Гамма-камера

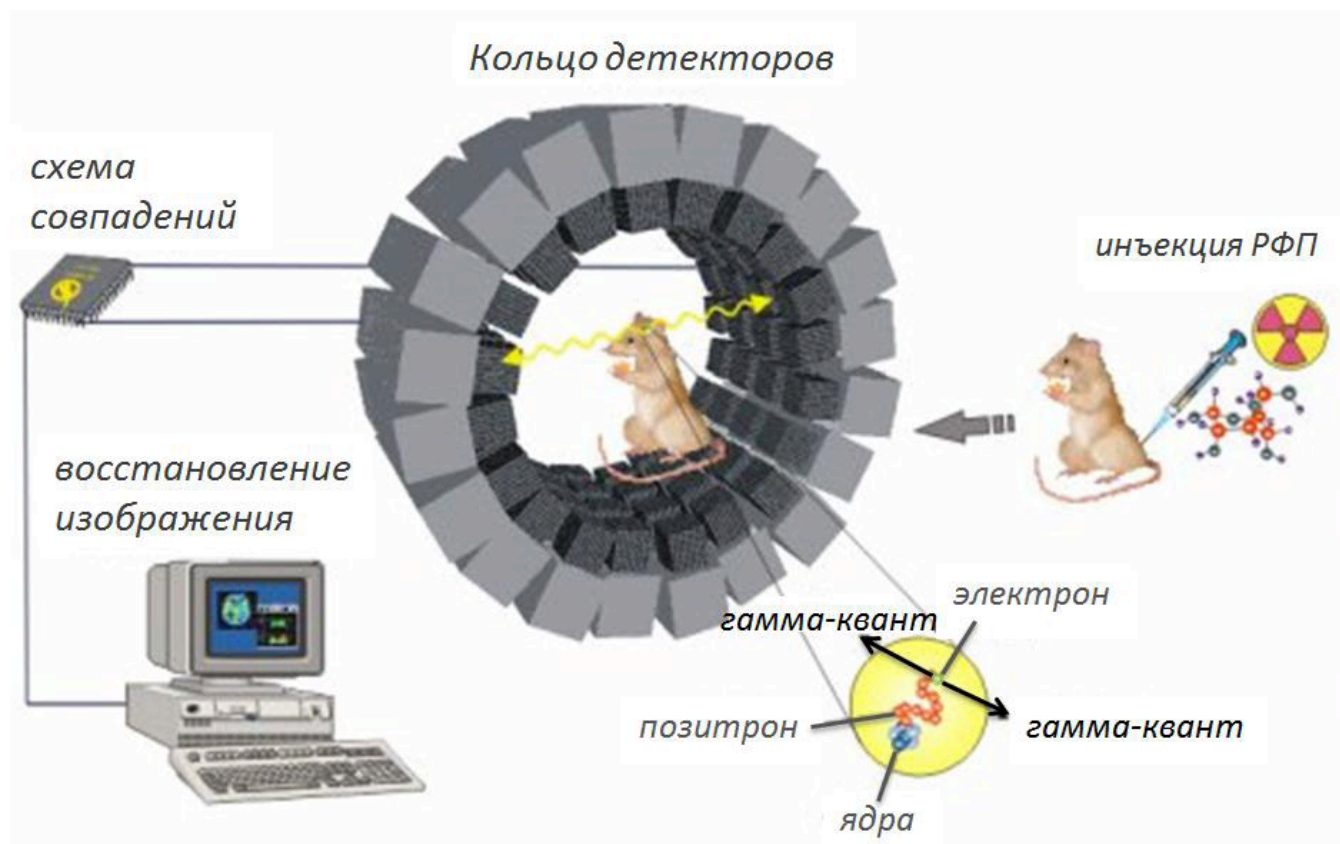


В мире – ~17000
В России – ~240

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ)

Метод радиоизотопной диагностики, позволяющий получать информацию о функционировании выбранного органа или всего тела путём регистрации позитронов (e^+), испущенных введенным РФП.

^{18}F , ^{82}Rb , ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N



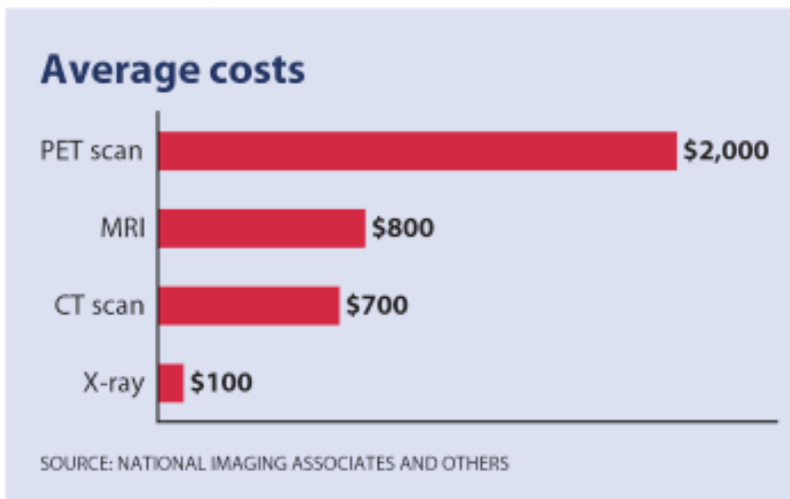
Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ)

Для ПЭТ используются короткоживущие изотопы, получаемые на циклотронах. ПЭТ центр включает в себя

- циклотрон для производства изотопов,
- радиохимическую лабораторию для приготовления радиофармпрепаратов
- ПЭТ установки.



Циклотрон Siemens



(+) Низкая доза при исследовании. Краткий период полураспада изотопов

(-) Стоимость обеспечивающей инфраструктуры во много раз превосходит стоимость аппаратуры. Огромная стоимость владения.

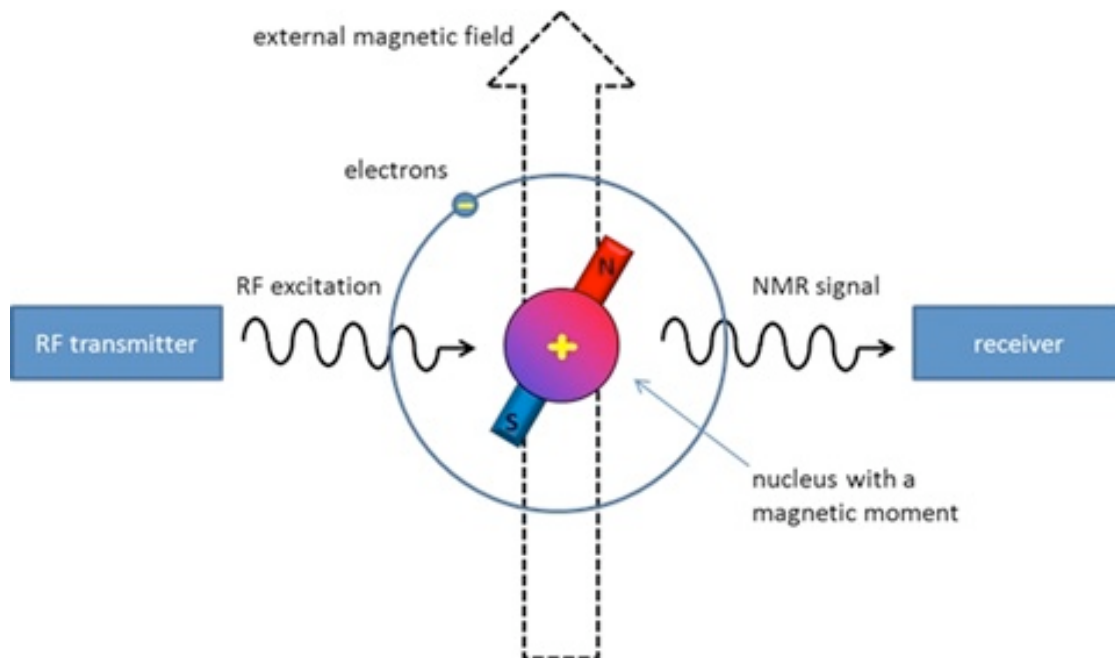
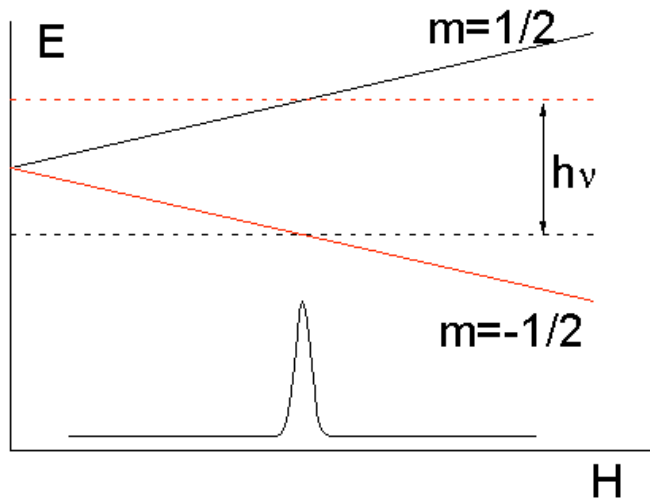
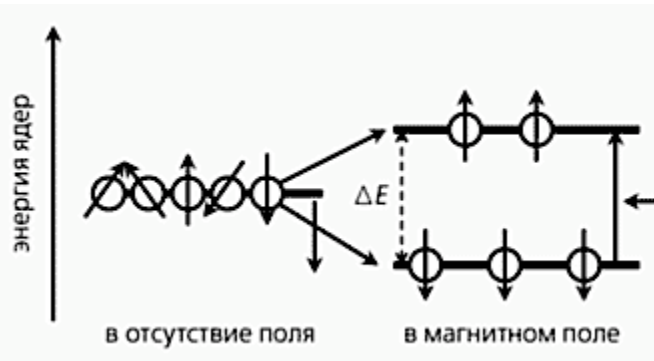
Магнитно-резонансная томография (МРТ)

Ядра атомов при помещении их в магнитное поле способны поглощать энергию в радиочастотном (РЧ) диапазоне и излучать ее после прекращения воздействия РЧ импульса. При этом напряженность постоянного магнитного поля и частота радиочастотного магнитного поля должны строго соответствовать друг другу (резонанс).

Наиболее интересными для медицины являются ядра водорода (^1H), углерода (^{13}C), натрия (^{23}Na) и фосфора (^{31}P), так как все они присутствуют в теле человека. Современные МР-томографы (МРТ) чаще всего «настроены» на ядра водорода, то есть позволяют получить трехмерную карту распределения ядер водорода в теле пациента.

МРТ является конкурентом компьютерной томографии. В отличие от КТ, МРТ хорошо отображает мягкие ткани, тогда как КТ лучше визуализирует костные структуры. Кроме того магнитно-резонансный метод незаменим при обследовании головного и спинного мозга. Современные методики МРТ делают возможным без хирургического вмешательства исследовать функцию органов — измерять скорость кровотока, тока спинномозговой жидкости, видеть активацию коры головного мозга при функционировании органов, за которые отвечает данный участок коры.

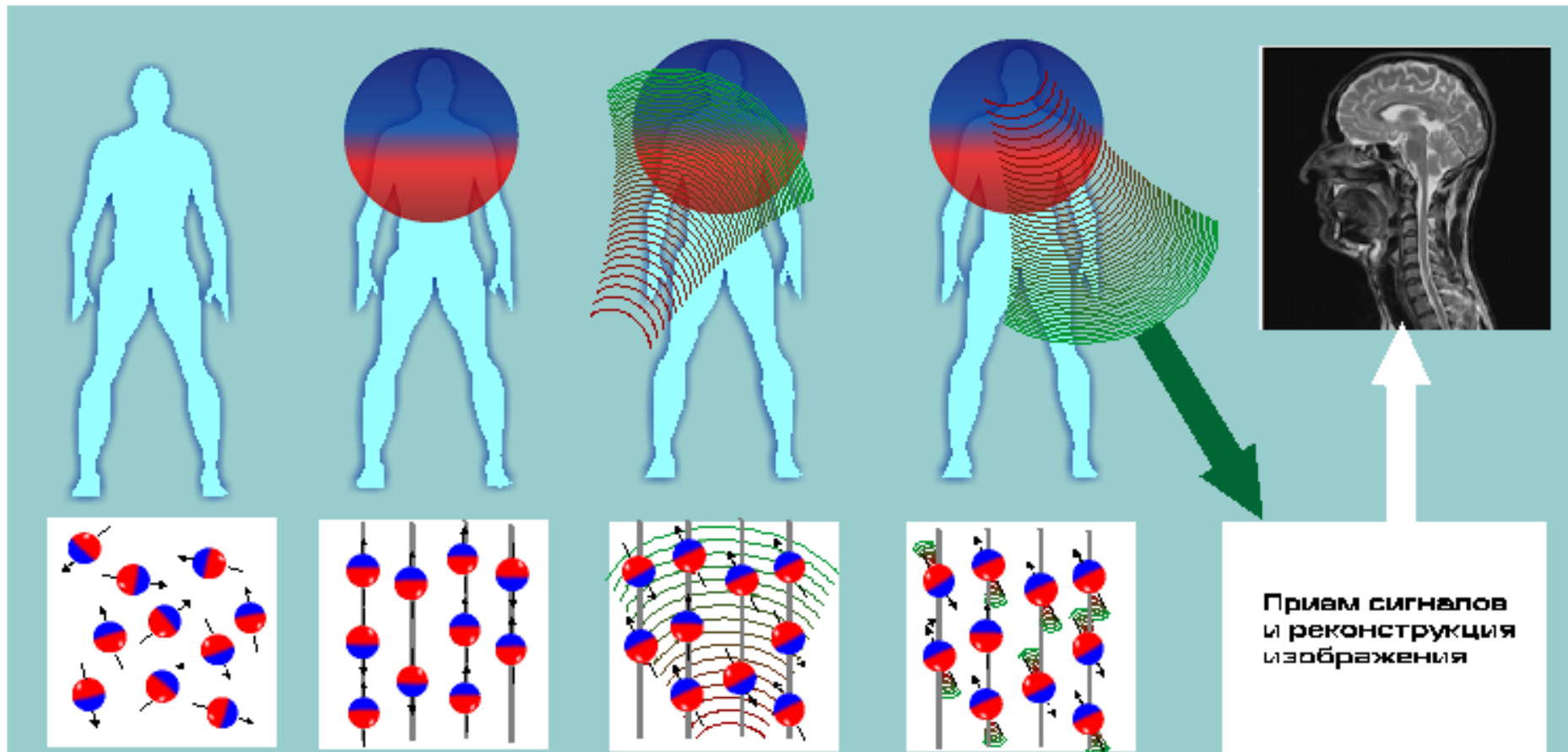
Ядерно-магнитный резонанс (ЯМР)



Нобелевская премия по физике

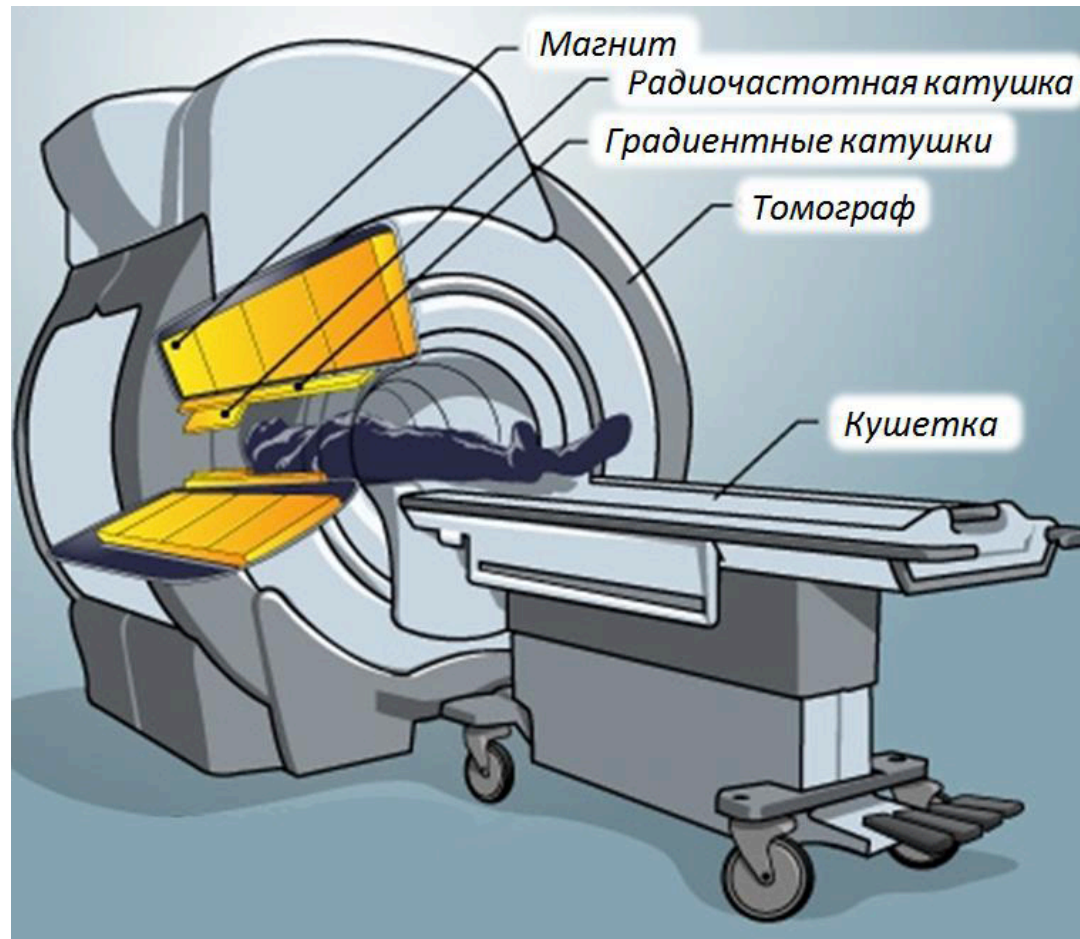
1952 г. – Ф. Блох, Э. Парсел. За развитие новых методов для точных ядерных магнитных измерений и связанные с этим открытия.

Магнитно-резонансная томография (МРТ)



Наиболее интересными для медицины являются ядра водорода (^1H), углерода (^{13}C), натрия (^{23}Na) и фосфора (^{31}P), так как все они присутствуют в теле человека. Современные МР-томографы (МРТ) чаще всего «настроены» на ядра водорода, то есть позволяют получить трехмерную карту распределения ядер водорода в теле пациента.

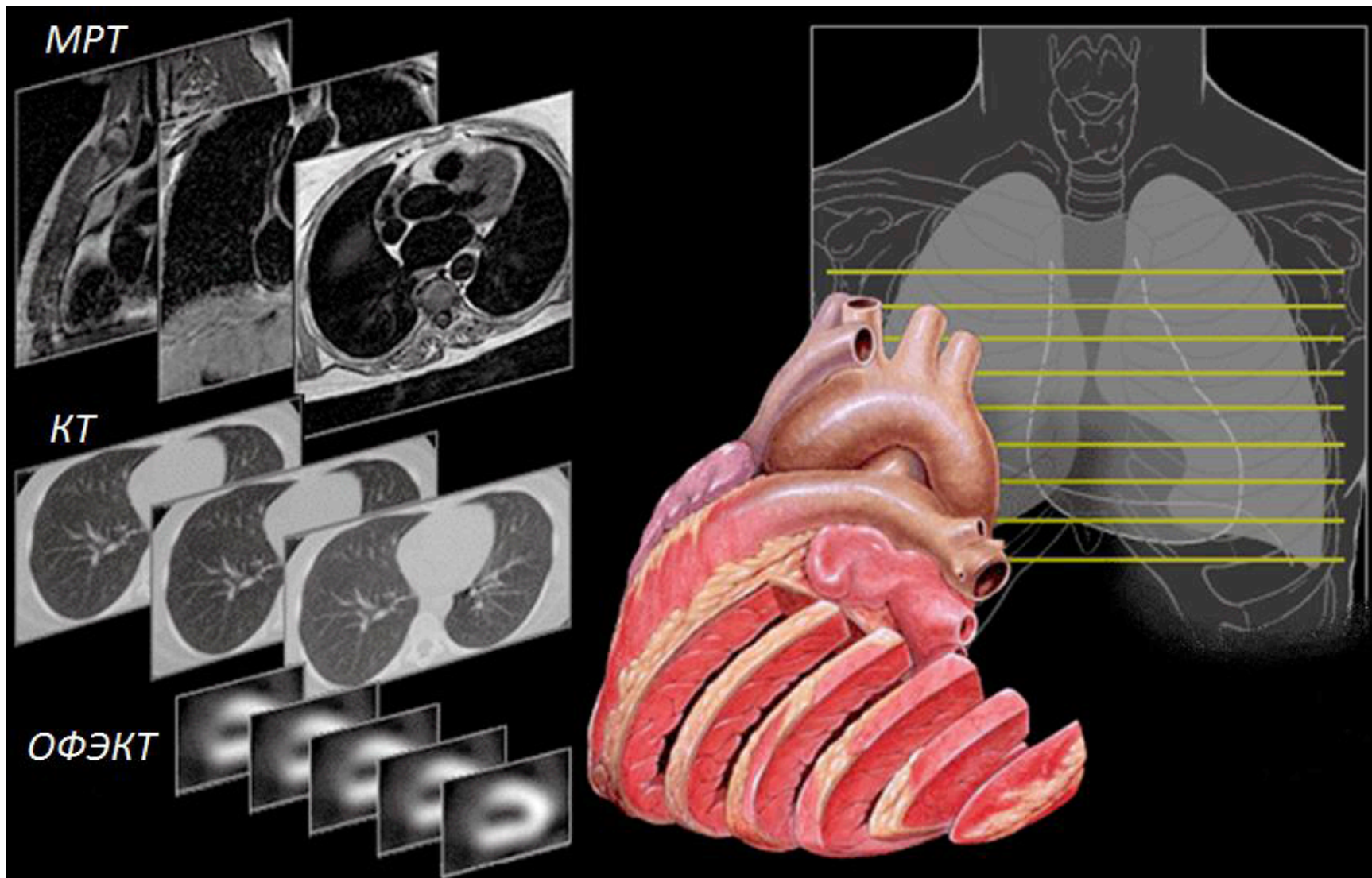
Магнитно-резонансная томография (МРТ)



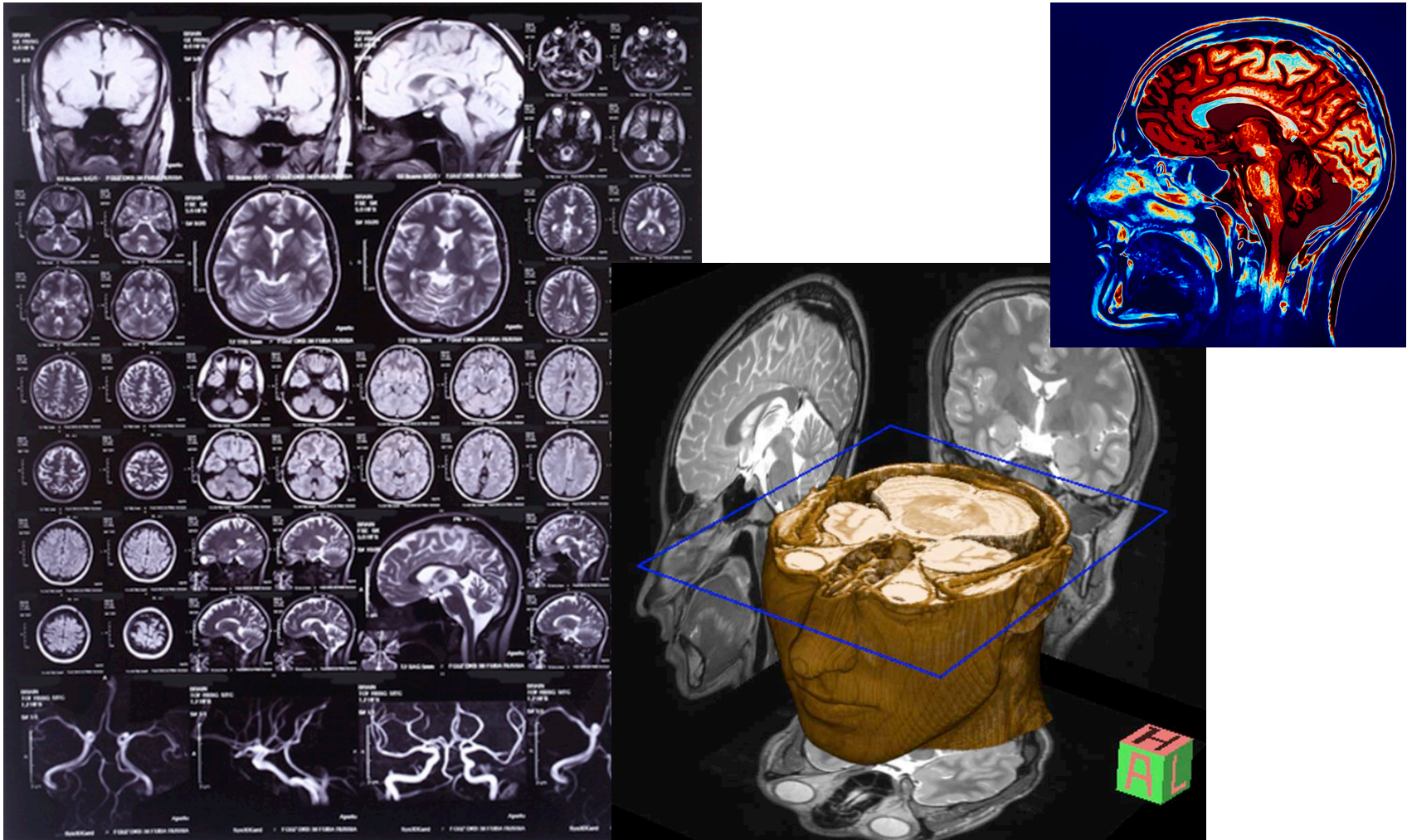
Нобелевская премия по физиологии или медицине

2003 г. – П. Лотербур, П. Мэнсфилд. За изобретение метода магнитно-резонансной томографии.

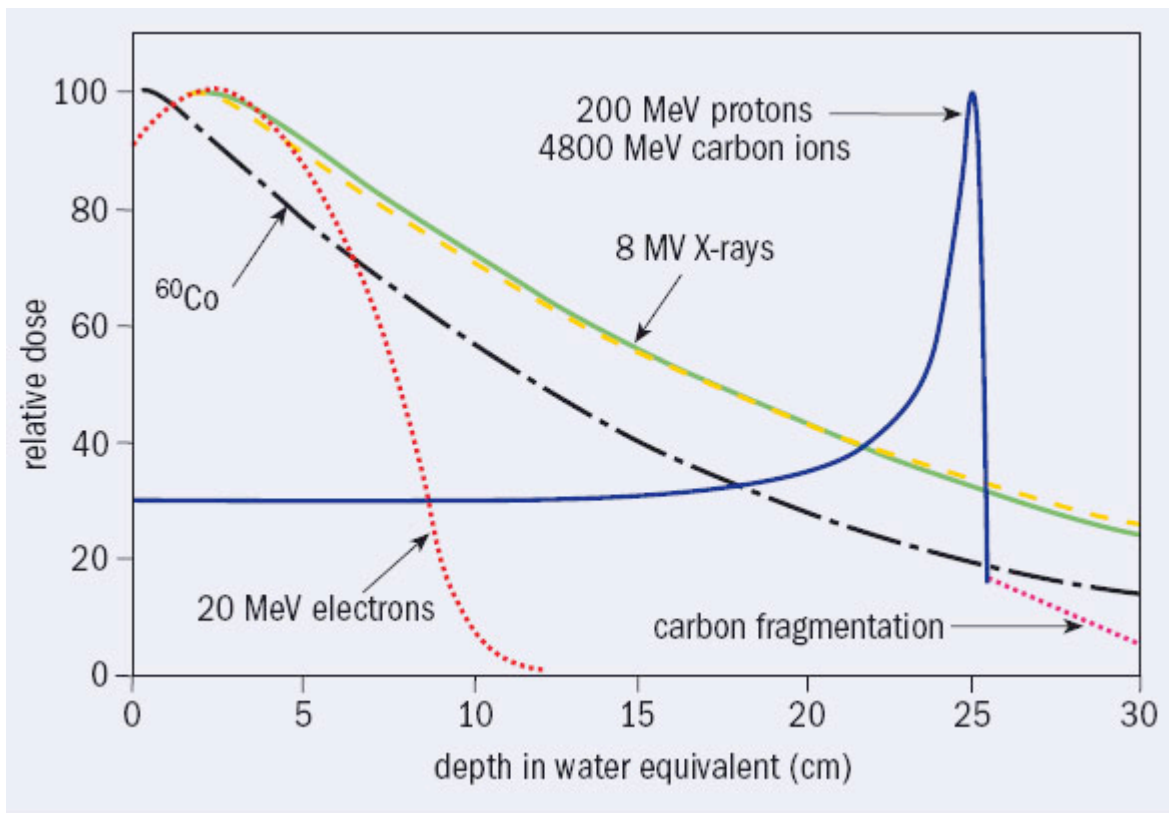
Магнитно-резонансная томография (МРТ)



Магнитно-резонансная томография (МРТ)



Лучевая терапия



- Контактная (радионуклидная) терапия
- Рентгенотерапия
- Гамма-терапия
- Облучение быстрыми электронами
- Протонно-ионная терапия
- Облучение нейтронами

Радиохирургия -- рентгеновское высокой мощности собирается в узкий пучок и используется для уничтожения патологических тканей

Контактная лучевая терапия

Контактная лучевая терапия - метод облучения, при котором источник излучения находится на расстоянии менее 30 см от облучаемого объекта.

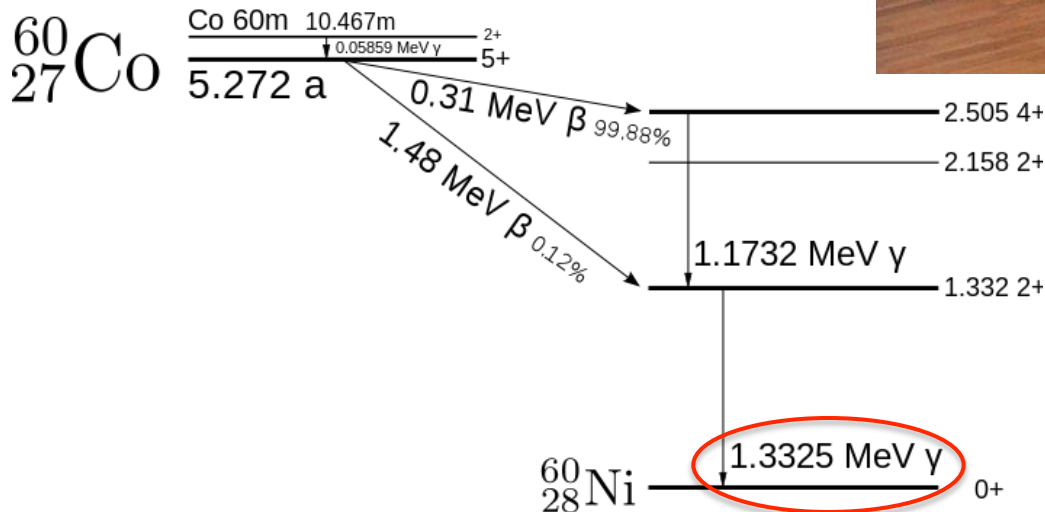
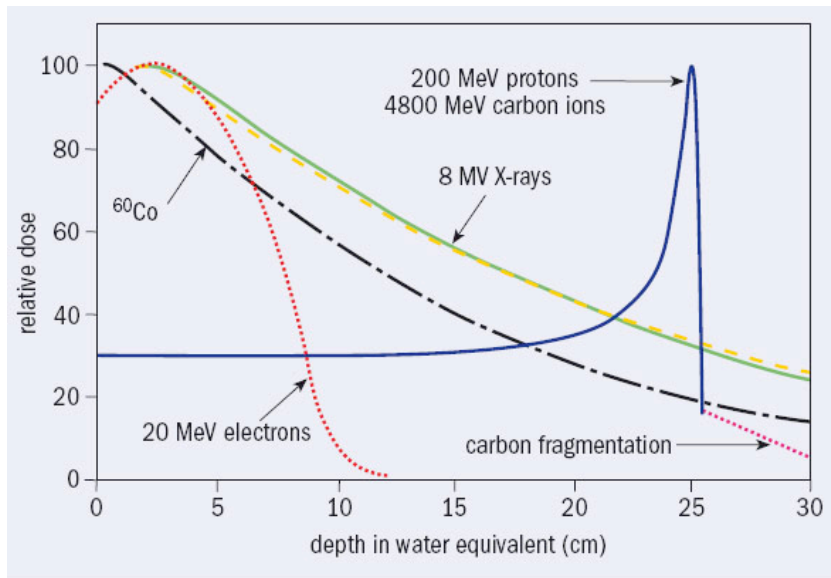
- аппликационная ЛТ (источник помещаются непосредственно на поверхности тела без нарушения целостности тканей);
- внутрисполостное облучение (введение источника излучения в естественные или искусственно образованные полости);
- внутритканевая ЛТ – брахитерапия (введение непосредственно в опухоль или размещение на поверхностях опухоли иглы, гранулы, проволоки, содержащие радиоактивные источники);
- Иммунология (изготовление антител для доставки изотопа в опухоль)



Установки для брахитерапии:

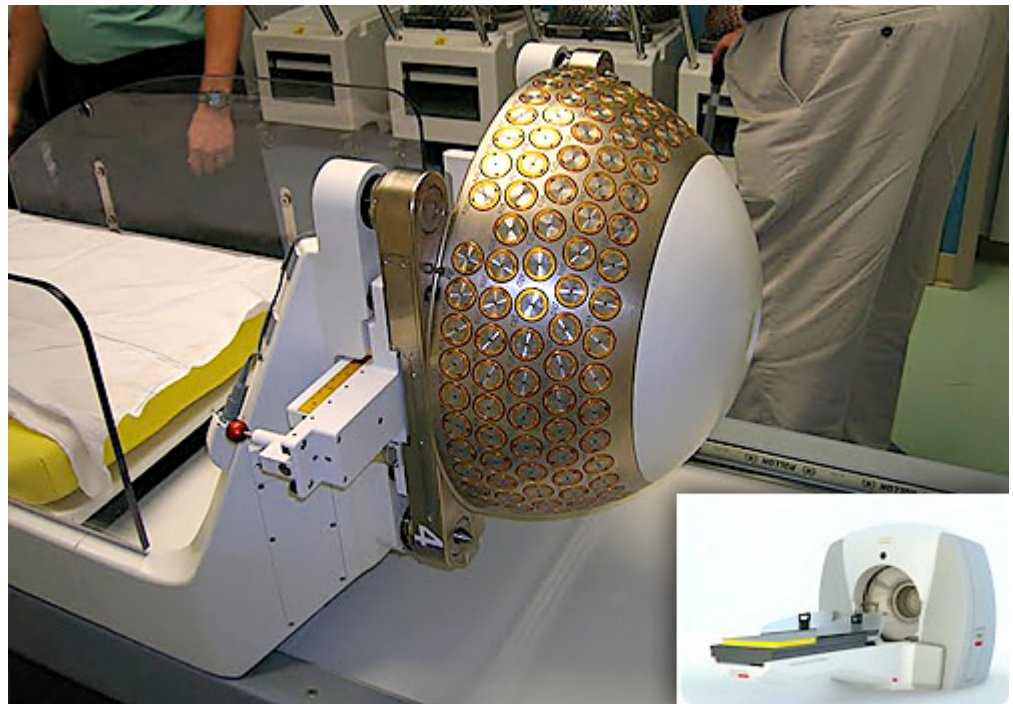
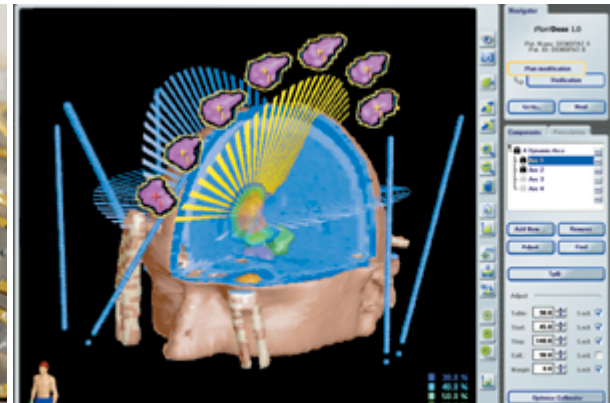
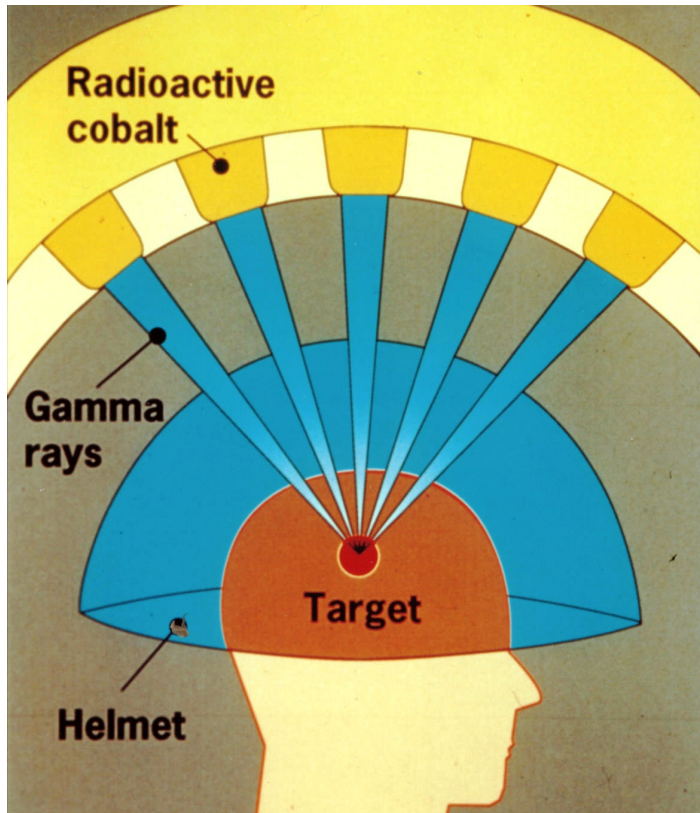
В мире – ~2200
В России – ~150

Гамма – терапия (^{60}Co)



В мире – ~1500
В России – ~250

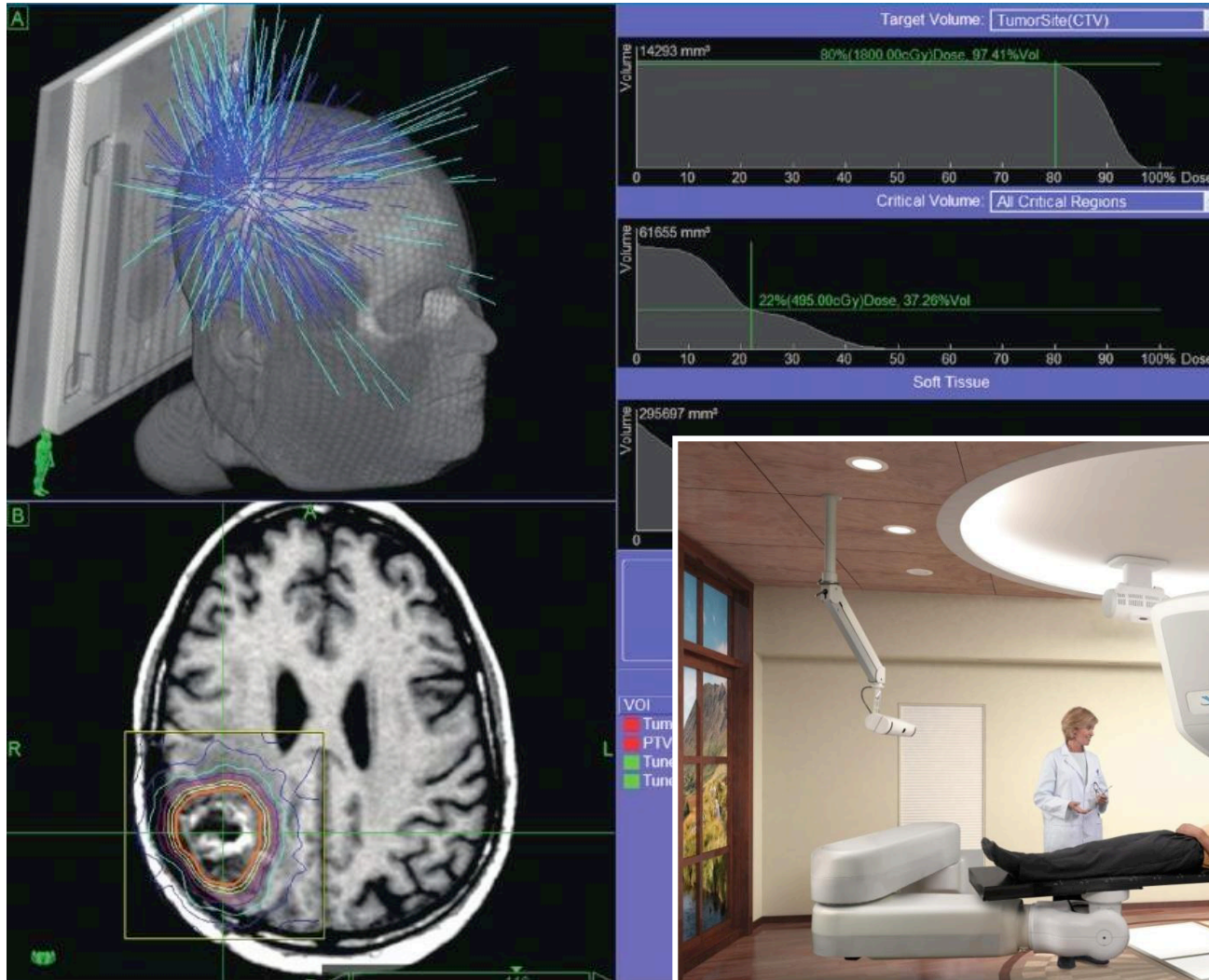
Гамма – нож



^{60}Co , $T_{1/2} = 5,2$ года, $A = 30$ Ки
201 пучок,
 $D \leq 4$ см, $\Delta d = 0,3$ мм

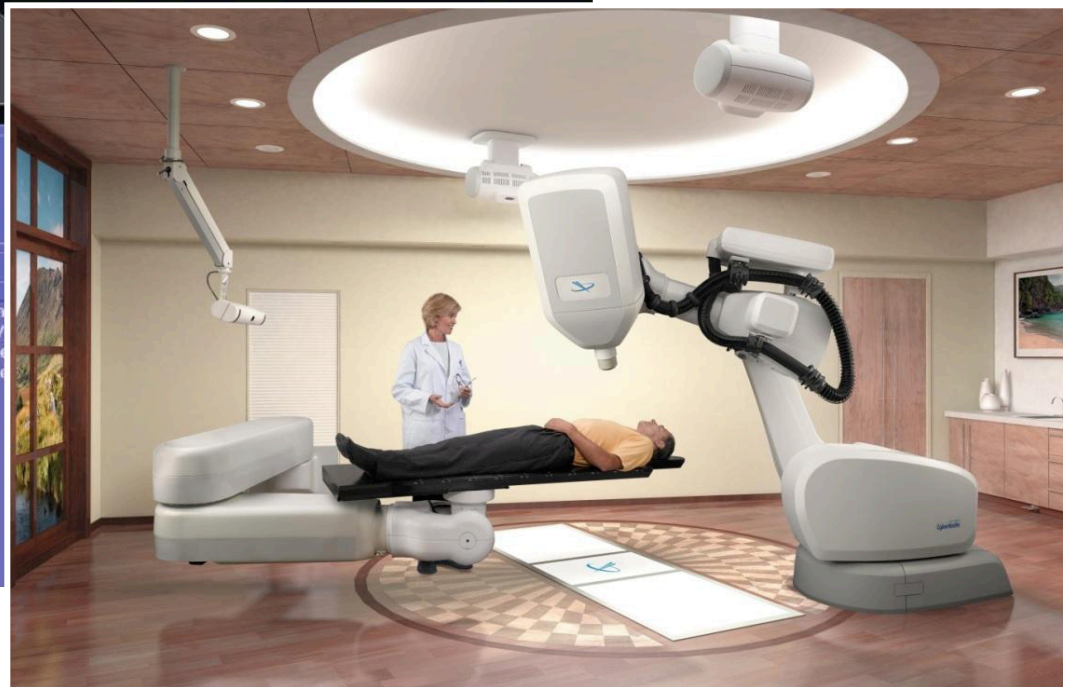
В мире – ~350
В России – 5

Использование пучков электронов (кибер-нож)

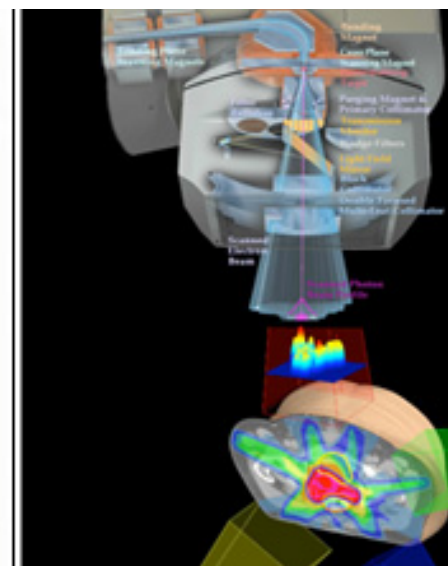
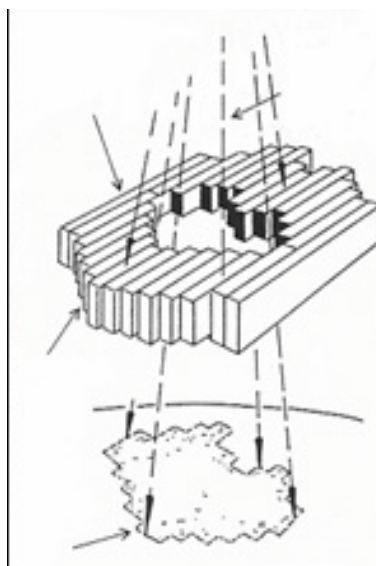


$E_e = 4 - 6 \text{ МэВ}$,
 $E_\gamma \sim 6 \text{ МэВ}$,
 $D \leq 5 \text{ см}$, $\Delta d = 0,5 \text{ мм}$

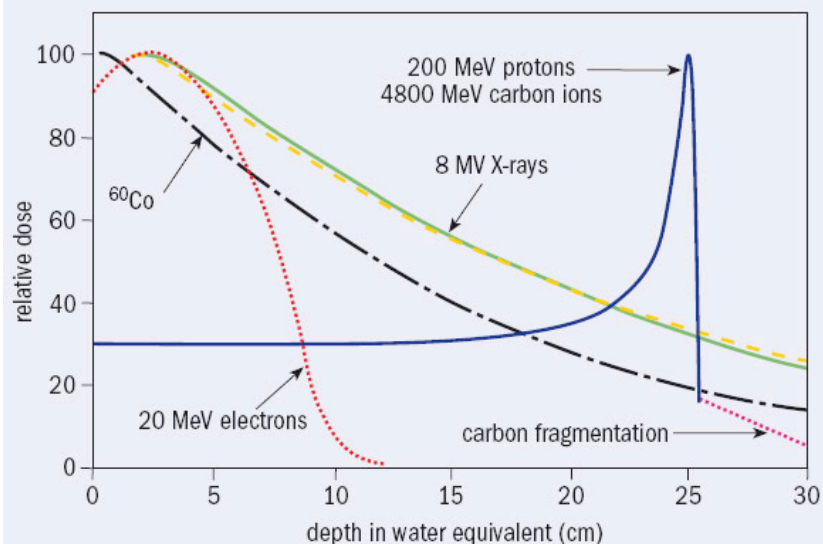
В мире – ~300
В России – 9



Облучение электронами



Радиационная терапия
модулированной интенсивности
(IMRT)



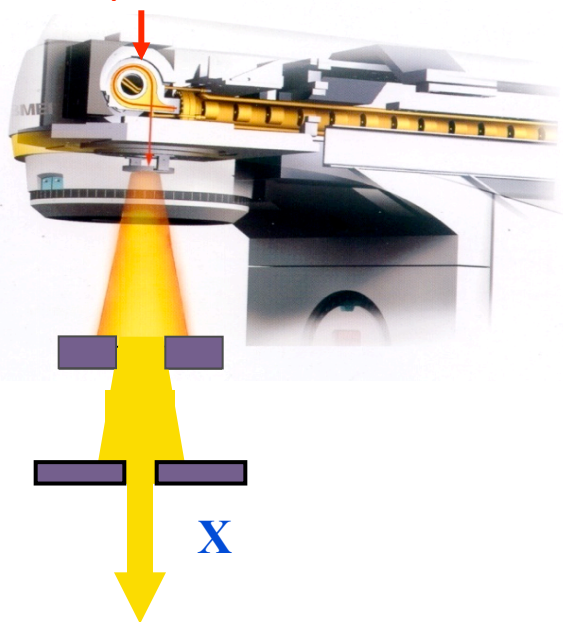
$$E_e = 4 - 50 \text{ МэВ}$$

$$L < 5 \text{ см}$$

В мире – ~14000
В России – ~150

Использование рентгеновских лучей высокой энергии

электроны

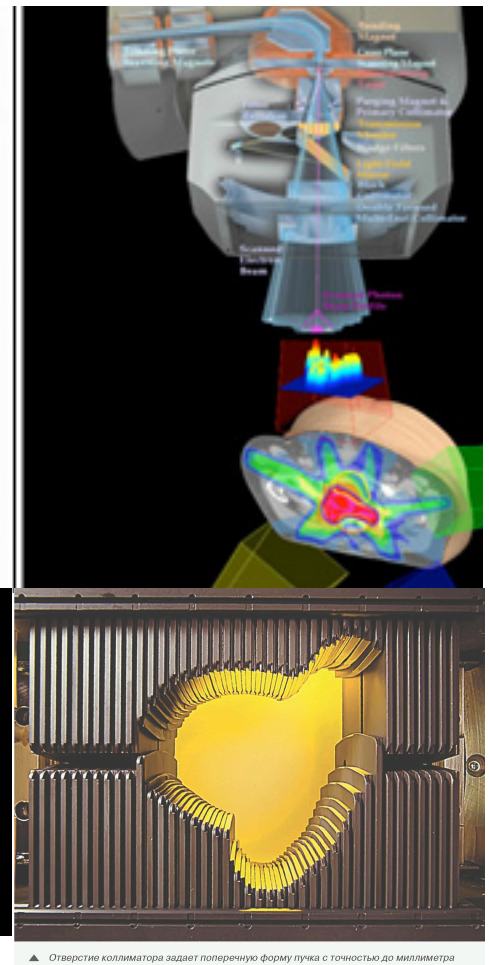
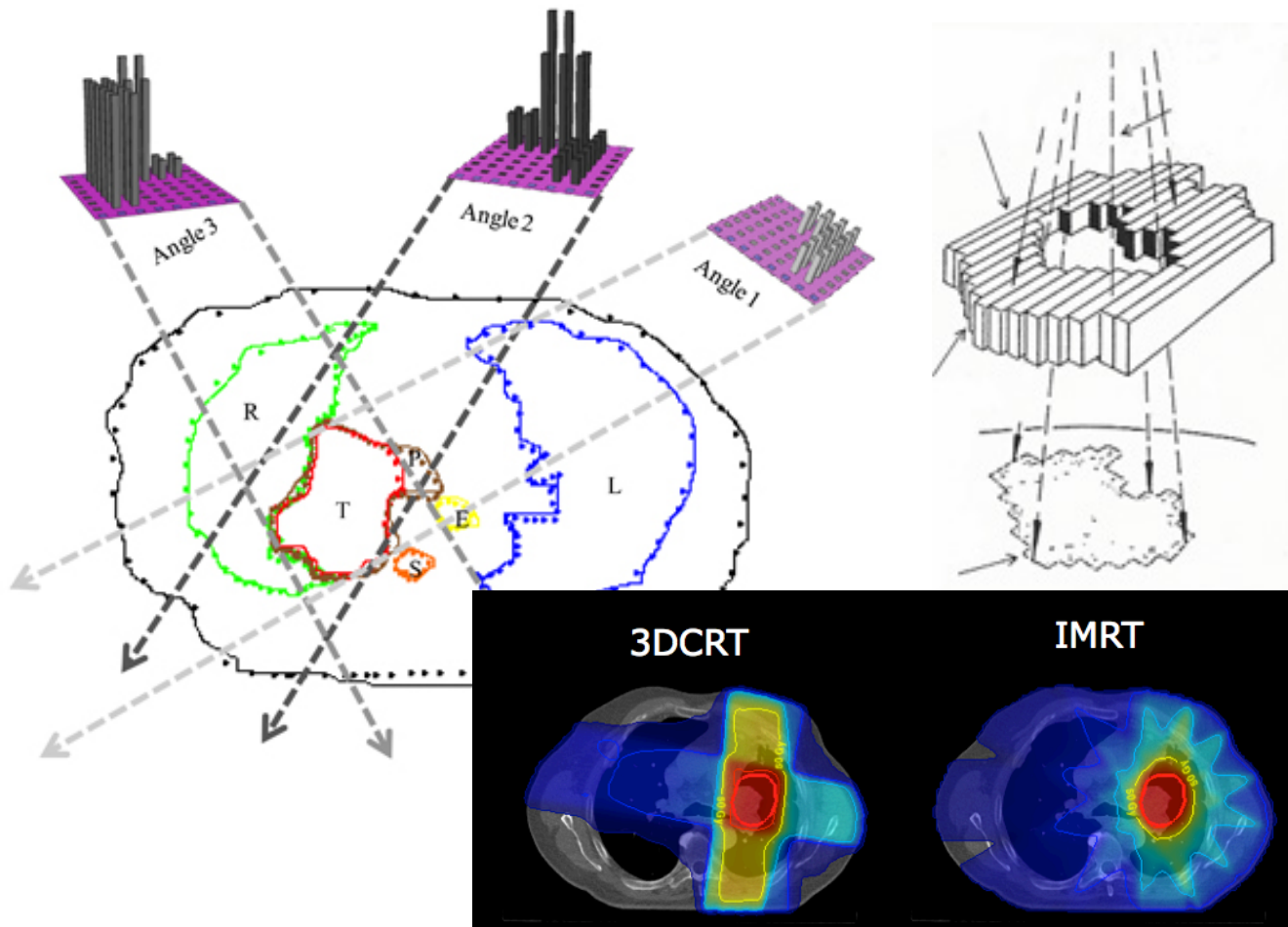


**2000 пациентов в год
на 1 млн населения**



В мире в онкологии используется около 20 000
линейных ускорителей электронов
50% от полного числа работающих
ускорителей

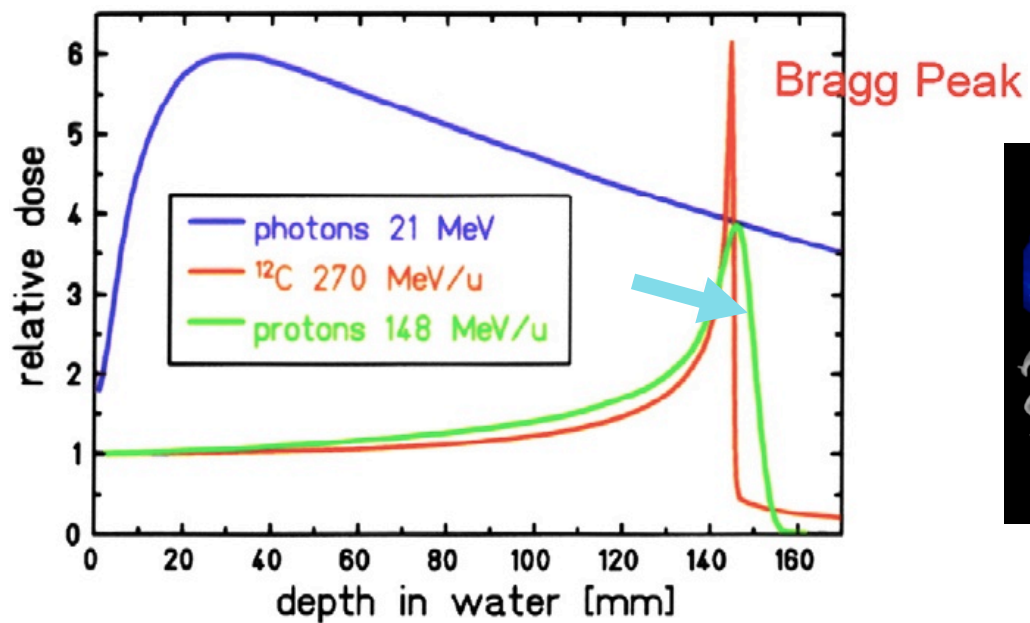
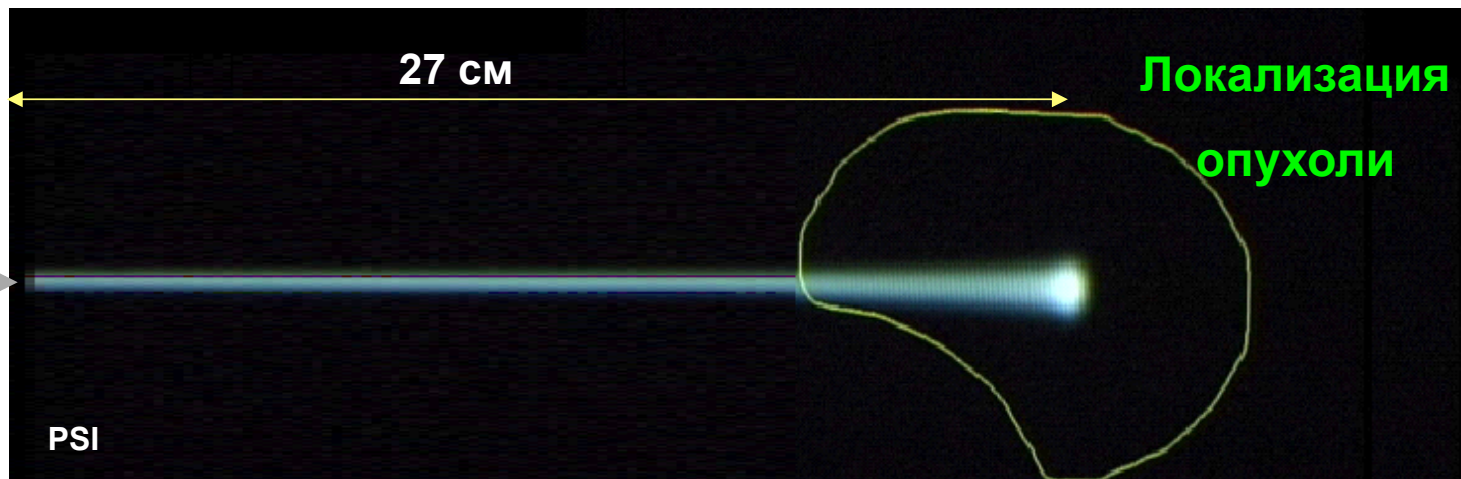
Радиационная терапия модулированной интенсивности (IMRT)



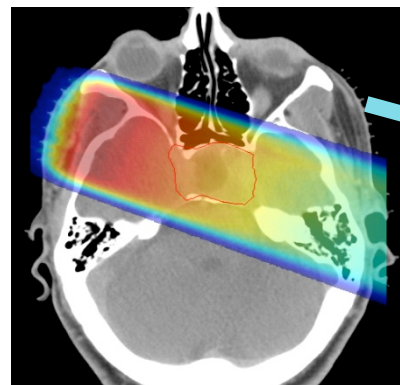
Адронная (протон-ионная) терапия

200 MeV
протоны

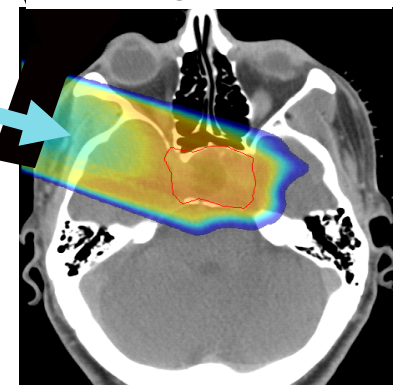
5000 MeV
ионы углерода



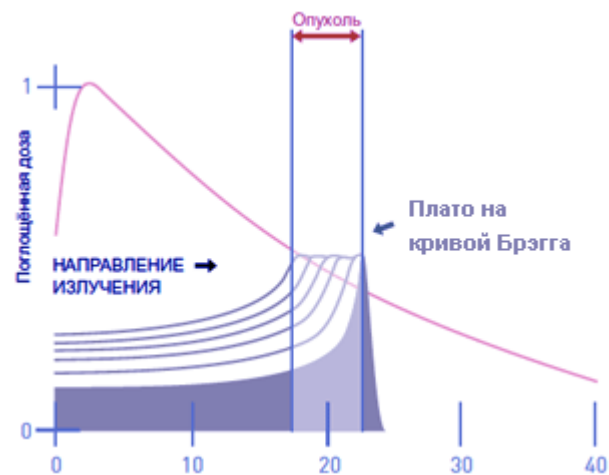
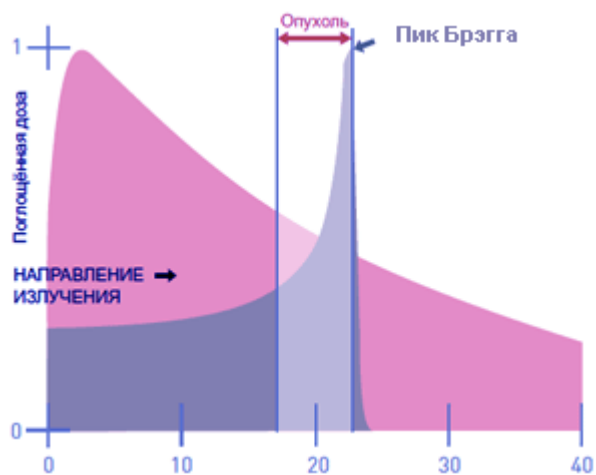
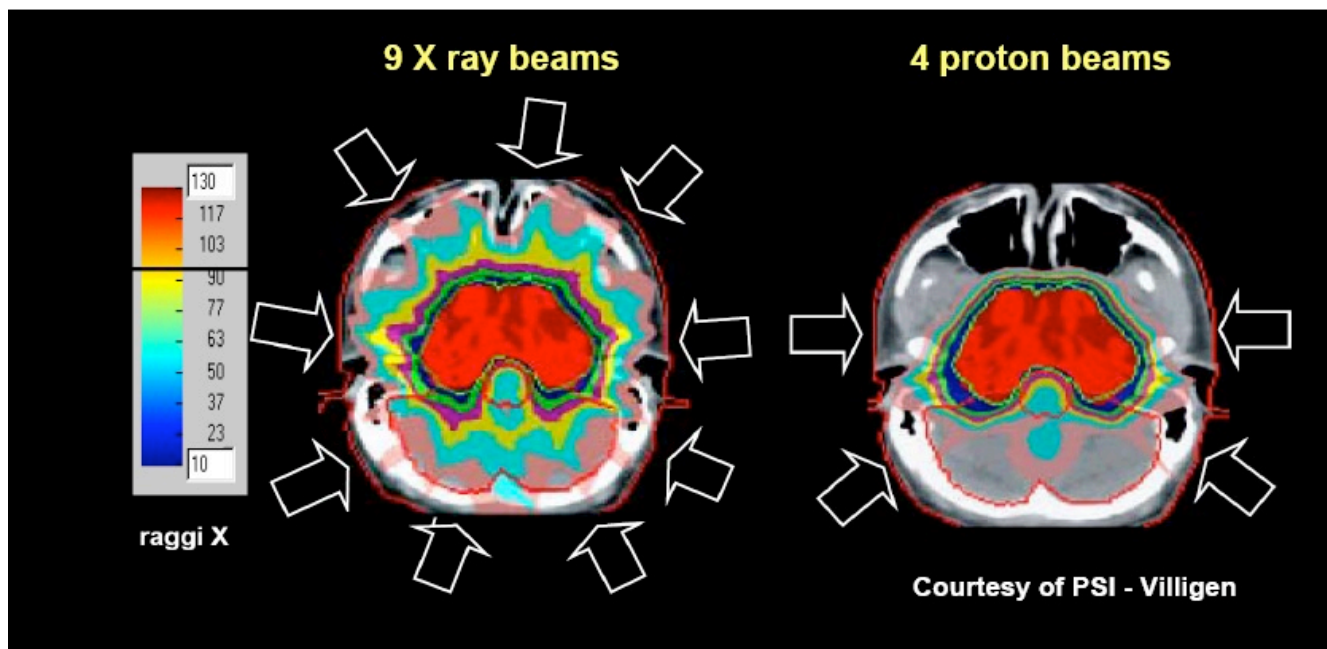
X rays



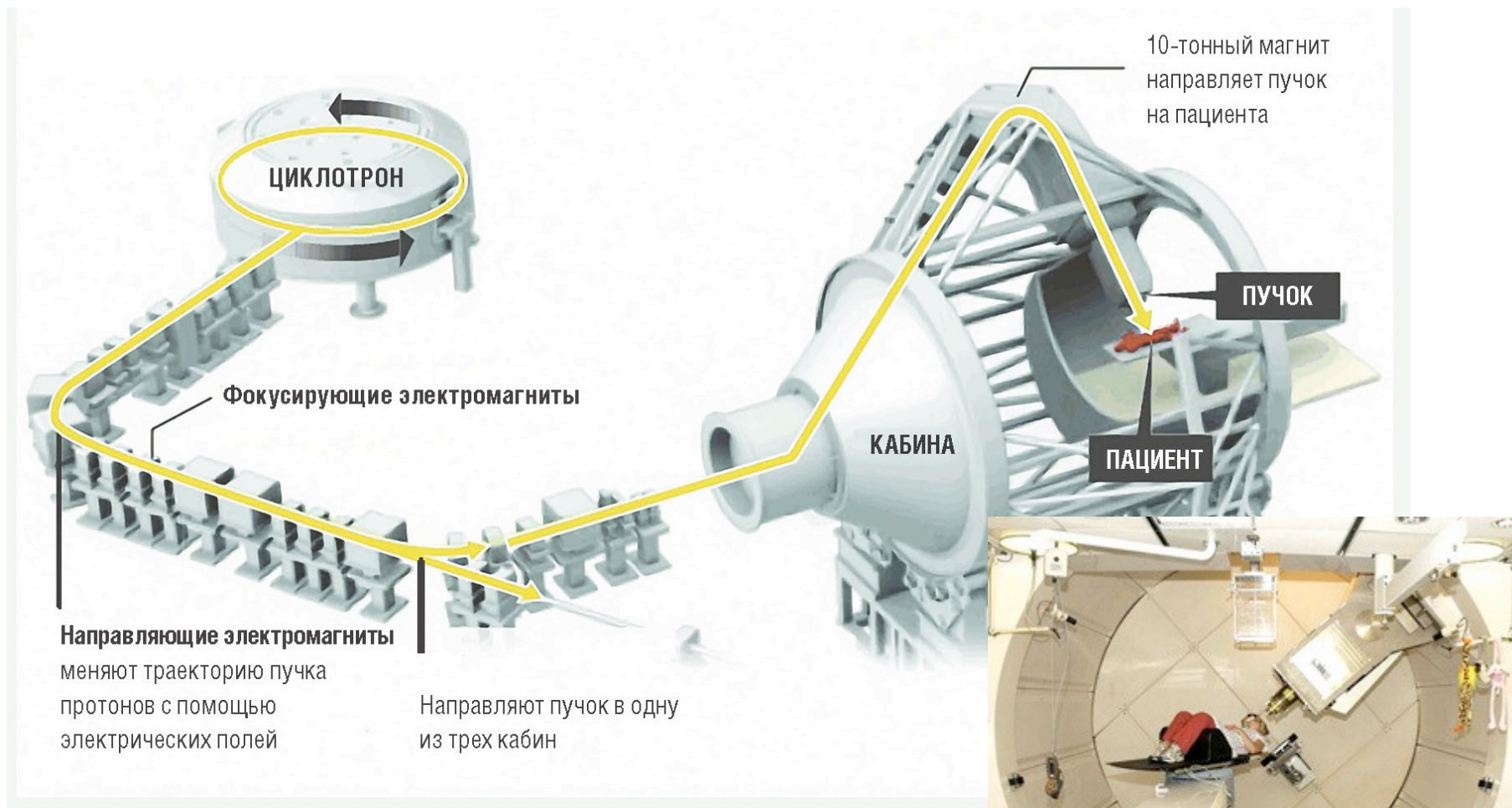
протоны
ионы углерода



Адронная терапия

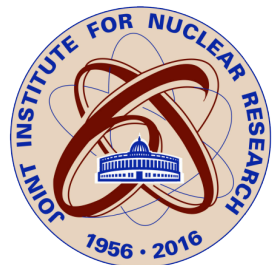


Протонная терапия



В мире – ~300

В России – 3



Протонная терапия

В мире – 90

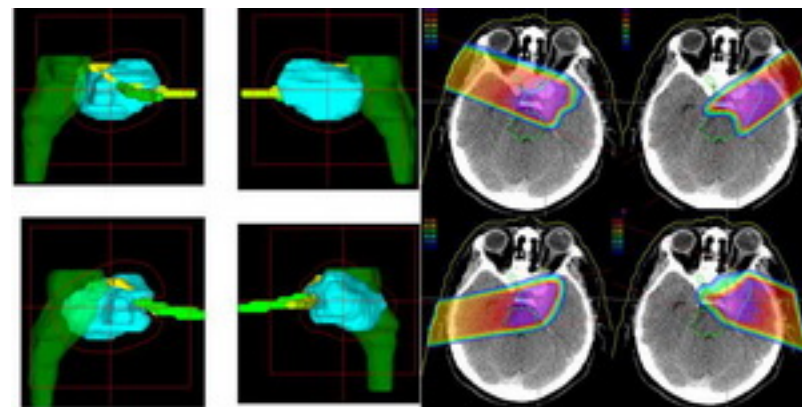
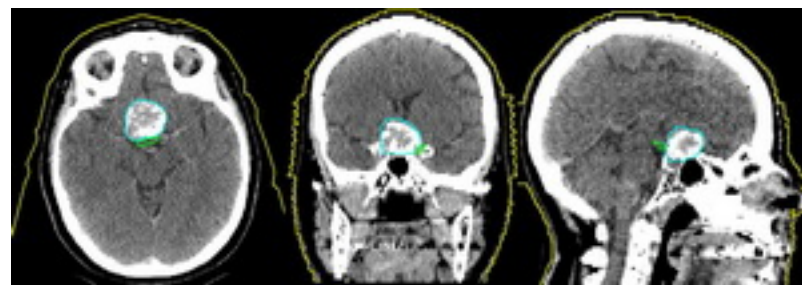
В России – 6

1949 г. – фазотрон на энергию протонов **560 МэВ**

1967 г. – начало исследований по протонной терапии

~100 пациентов в год

- Иммобилизация и томографические исследования
- Трехмерное компьютерное планирование облучения
- Изготовление фигурных коллиматоров
- Ежедневное измерение параметров протонного пучка
- Реализация и верификация плана облучения



<http://mtk.jinr.ru>

3,83 мЗв –

средняя индивидуальная доза облучения от всех источников в 2010 г.

Источники облучения населения РФ

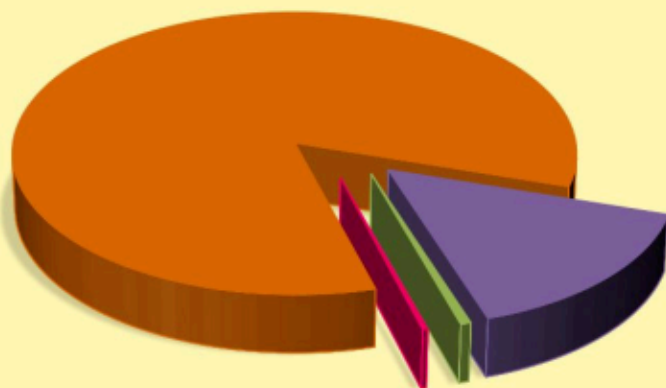
В структуре облучения населения РФ ведущее место занимают природные и медицинские источники. На долю всех остальных источников, в том числе прошлых радиационных аварий, приходится менее 1%.

Космическое излучение



Среда обитания человека

Природные источники
85%



Медицинская диагностика
15%

Атомное производство
0,05%



Атомные электростанции

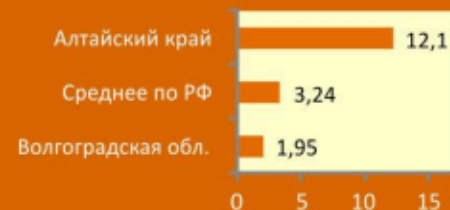
Техногенный фон
0,21%



Прошлые аварии

Диапазон индивидуальных доз облучения от различных источников в 2010 г., мЗв в год

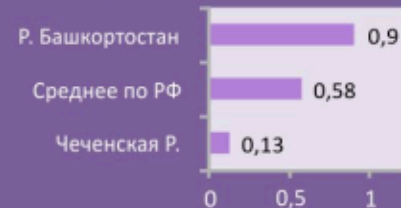
Природные источники



Дозы облучения от остальных источников значительно ниже:

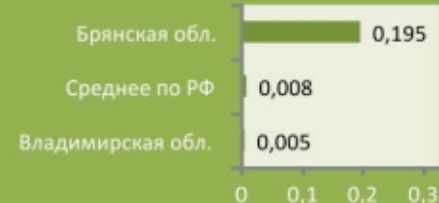
• от медицинской диагностики – в десятки раз

Медицинская диагностика



• от техногенного фона – в сотни и тысячи раз

Техногенный фон



• от атомного производства – в десятки тысяч раз