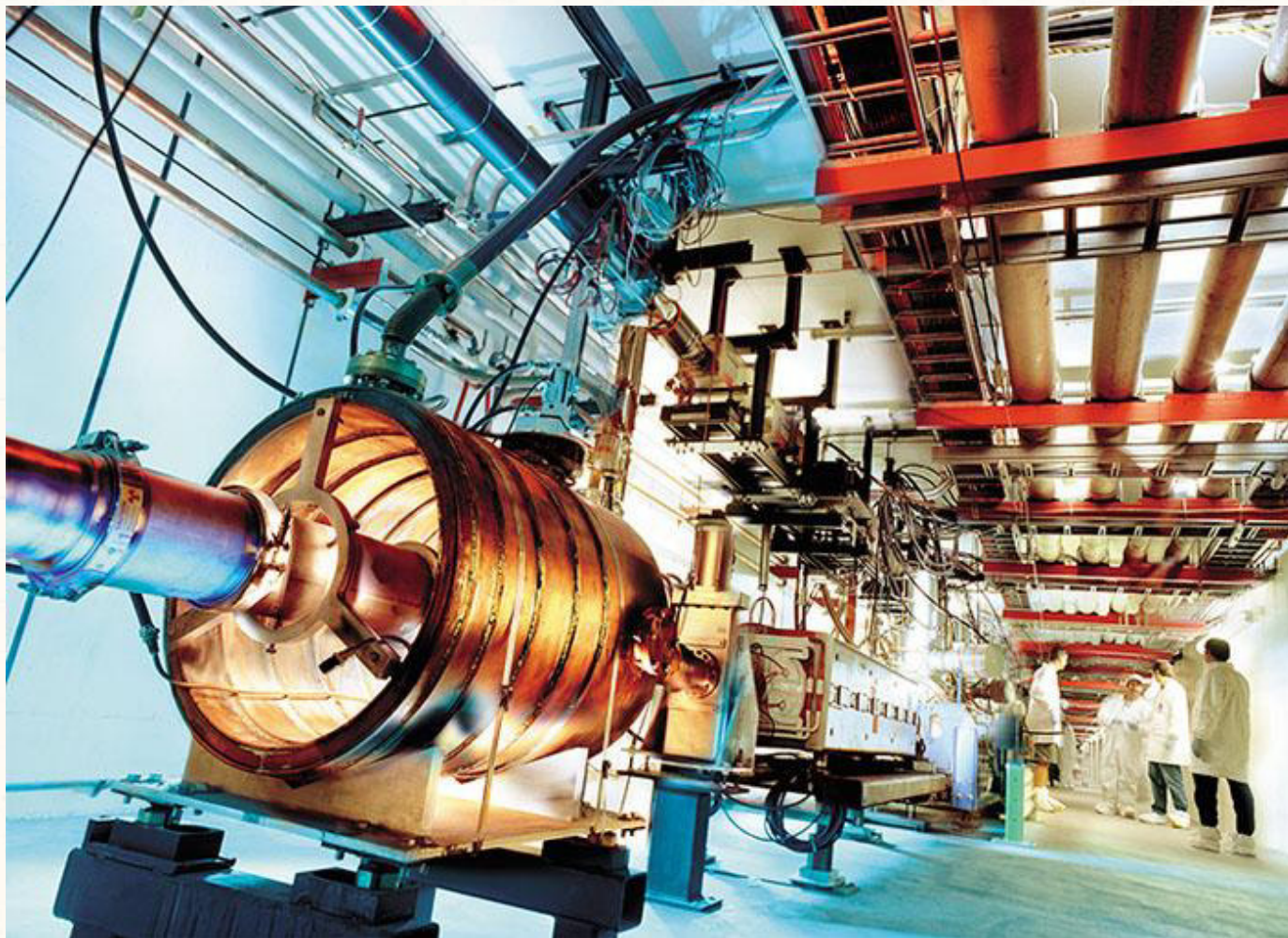


«Основы производства радиоактивных изотопов»

Лекция 6. Производство радионуклидов на циклотроне.

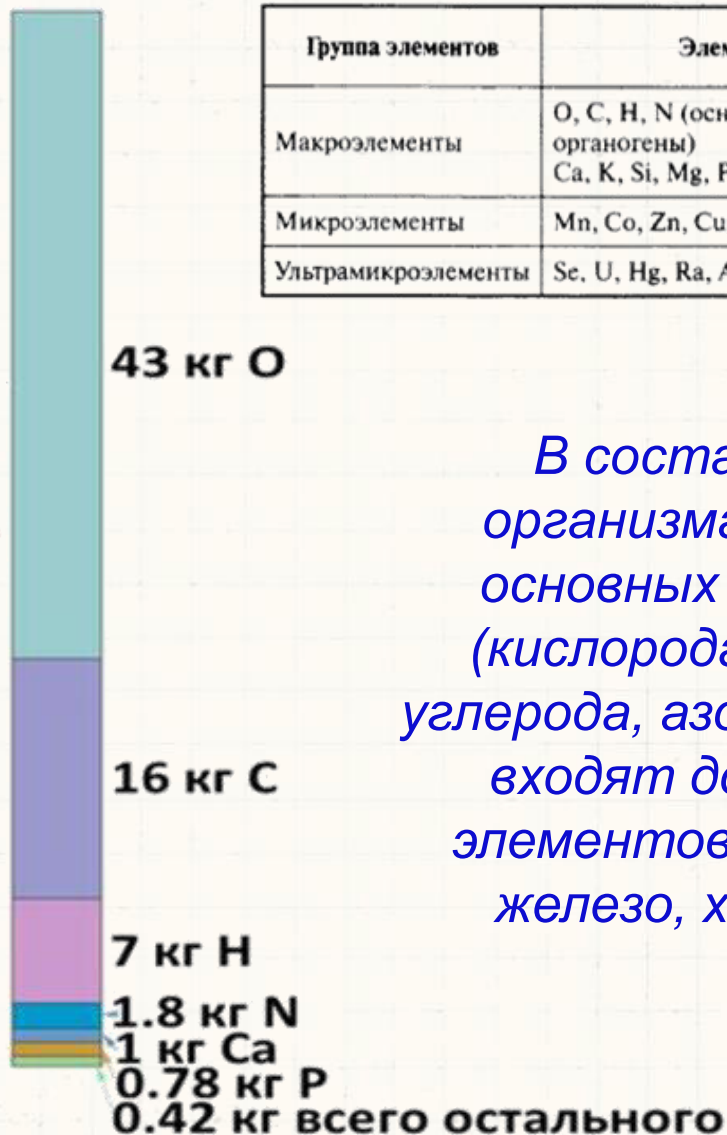
*и.о. доцента кафедры
теоретической и ядерной физики
PhD Зарипова Ю.А.*

*По данным МАГАТЭ в настоящее время **более 200 ускорителей** различных типов используется в мире для производства радионуклидов.*





Ядерная медицина потребляет более 50% всей производимой изотопной продукции.



Группы элементов по их содержанию в живых организмах

Группа элементов	Элементы	Суммарное содержание в клетке, %
Макроэлементы	O, C, H, N (основные, или органогены) Ca, K, Si, Mg, P, S, Na, Cl, Fe	98–99 1–2
Микроэлементы	Mn, Co, Zn, Cu, B, I, F, Mo и др.	0,1
Ультрамикроэлементы	Se, U, Hg, Ra, Au, Ag и др.	менее 0,01

В состав живого организма, помимо 5 основных элементов (кислорода, водорода, углерода, азота и кальция) входят до 70 других элементов (йод, калий, железо, хлор, и др.).

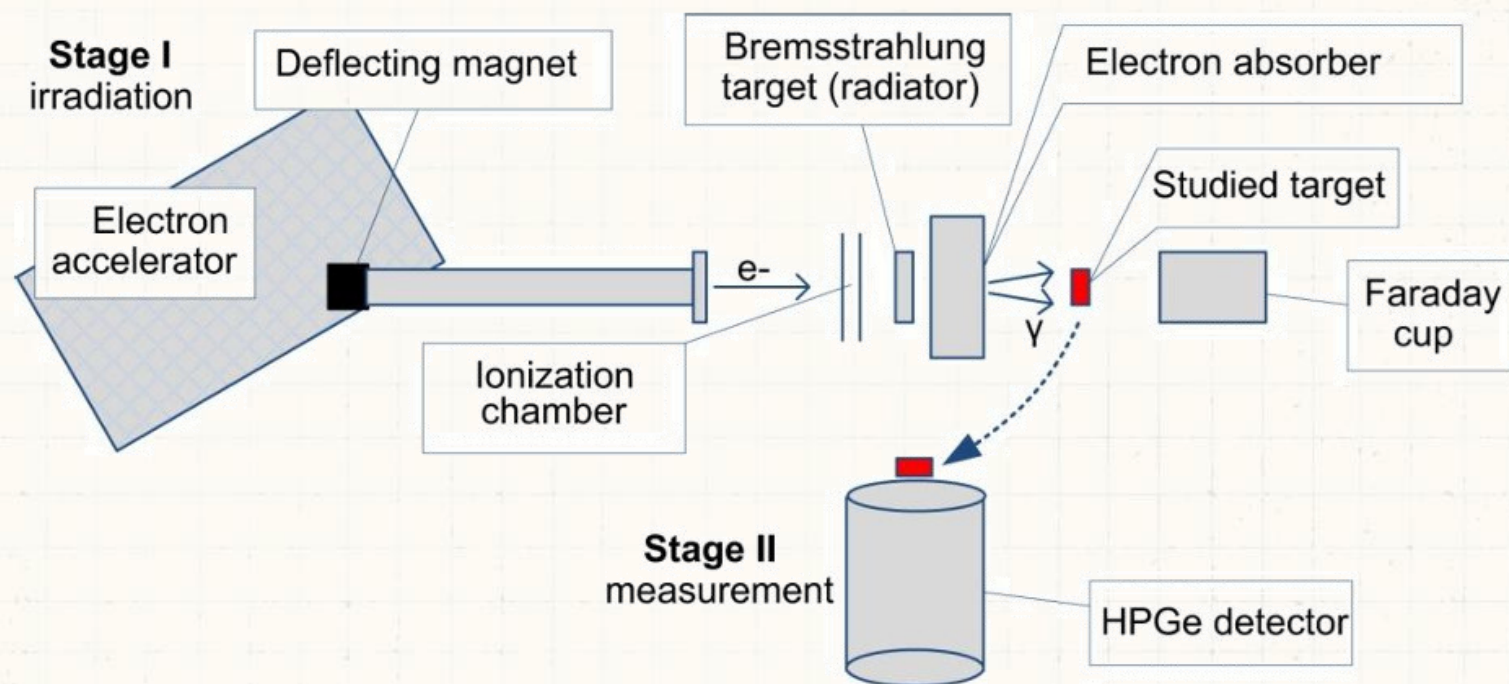
Диагностические радионуклиды, используемые для проведения исследований *in vivo*

- обеспечивать минимальный уровень лучевой нагрузки на так называемые критические органы;
- органотропность (специфическая избирательность) РН или РФП по отношению к исследуемым органам (костные ткани, сердце, почки, головной мозг, лёгкие и проч.)

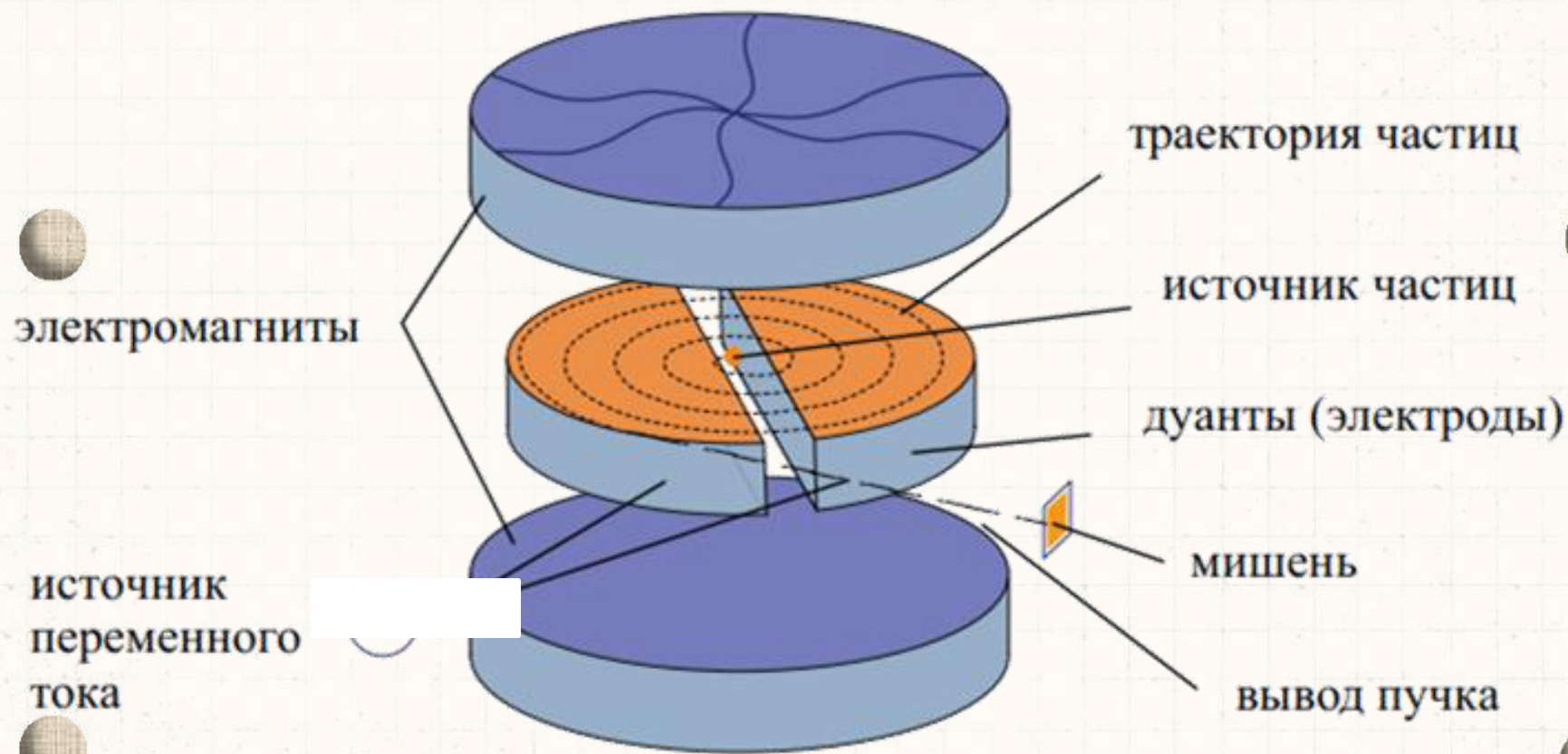
Применяемые для приготовления диагностических РФП радионуклиды должны отвечать следующим требованиям

- удобная для регистрации величина энергии γ -излучения (70-200) кэВ;
- небольшой период полураспада (десятки минут, часы), близкий по продолжительности ко длительности выполнения измерений;
- распад ядра происходит путём изомерного перехода (ИП) либо путём захвата орбитального электрона (ЭЗ) с испусканием монохроматического излучения;
- отсутствие при распаде сопутствующих γ , α , β -излучений.

Наработка радионуклидов на ускорителе



Наработка радионуклидов на циклотроне



Мишенью могут служить металлы, соли, порошкообразные вещества, газы.

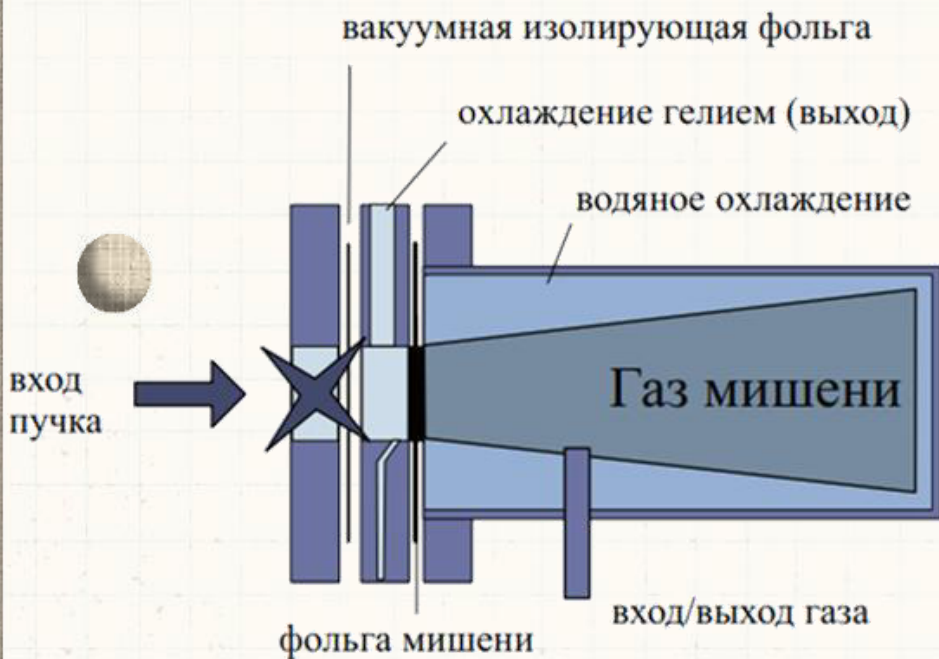


Рис. 3.10. Пример газовой мишени

В качестве твердотельных мишеней используют металлы, оксиды, соли. Среди жидкостных мишеней можно выделить жидкостную мишень из тяжелой воды H_2^{18}O для получения изотопа ^{18}F . Широко используются газообразные мишени: ^{124}Xe — для производства ^{123}I , Kr — для получения ^{81}Rb . **Мишени могут иметь природный изотопный состав или быть изотопнообогащенными.** Обычно материал мишени, обогащенный необходимым стабильным изотопом, после отделения целевого РН и регенерации повторно используют в качестве мишени.

Циклотронные медицинские радиоизотопы

Азот-13

Актиний-225

Астат-211

Бериллий-7

Бром-75

Бром-77

Ванадий-48

Висмут-213

Вольфрам-178

Галлий-67

Галлий-68

Германий-68

Железо-52

Железо-55

Индий-110

Индий-111

Индий-114m

Иод-120g

Иод-121

Иод-123

Иод-124

Иттрий-86

Иттрий-88

Кадмий-109

Кислород-15

Кобальт-57

Криптон-81m

Ксенон-122

Ксенон-127

Медь-64

Медь-67

Мышьяк-73

Мышьяк-74

Натрий-22

Палладий-103

Ртуть-195m

Свинец-201

Свинец-203

Стронций-82

Таллий-201

Технеций-94

Углерод-11

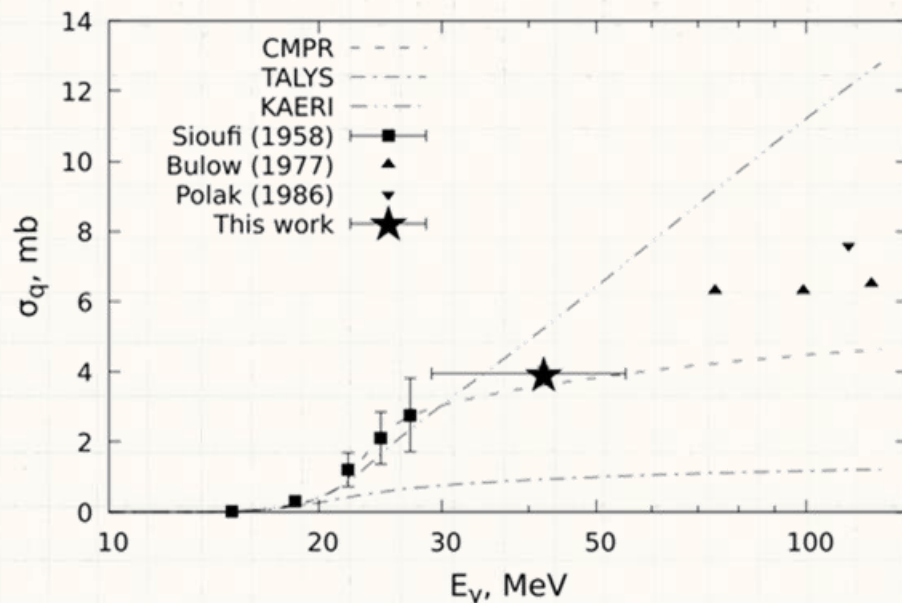
Фтор-18

Хлор-34m

Цинк-62

Цинк-63

Цирконий-89

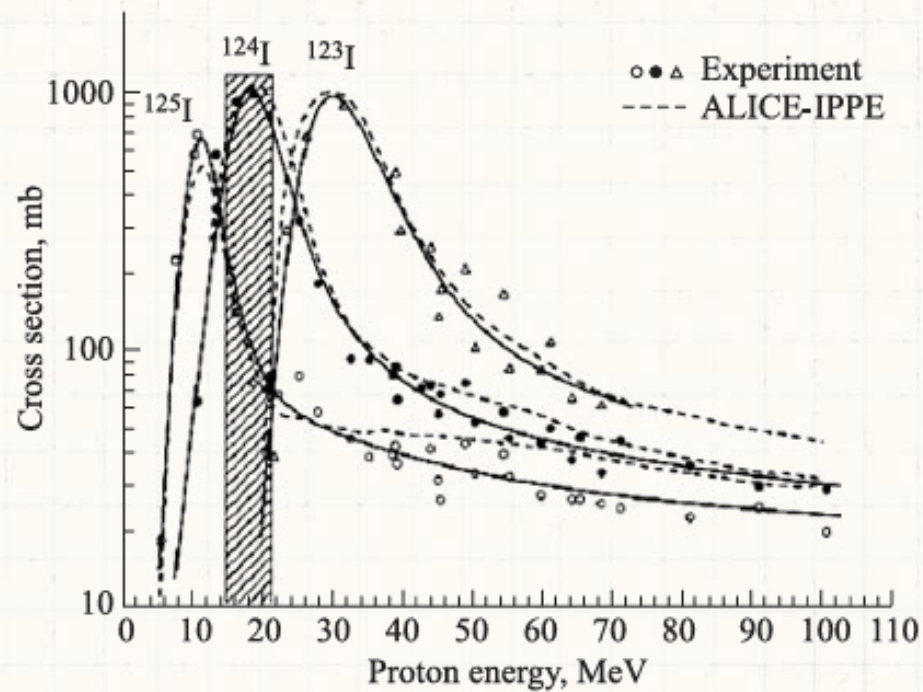


Сравнение экспериментальных выходов реакции $^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$ на пучках тормозного излучения и выходов, рассчитанных на основе известных сечений

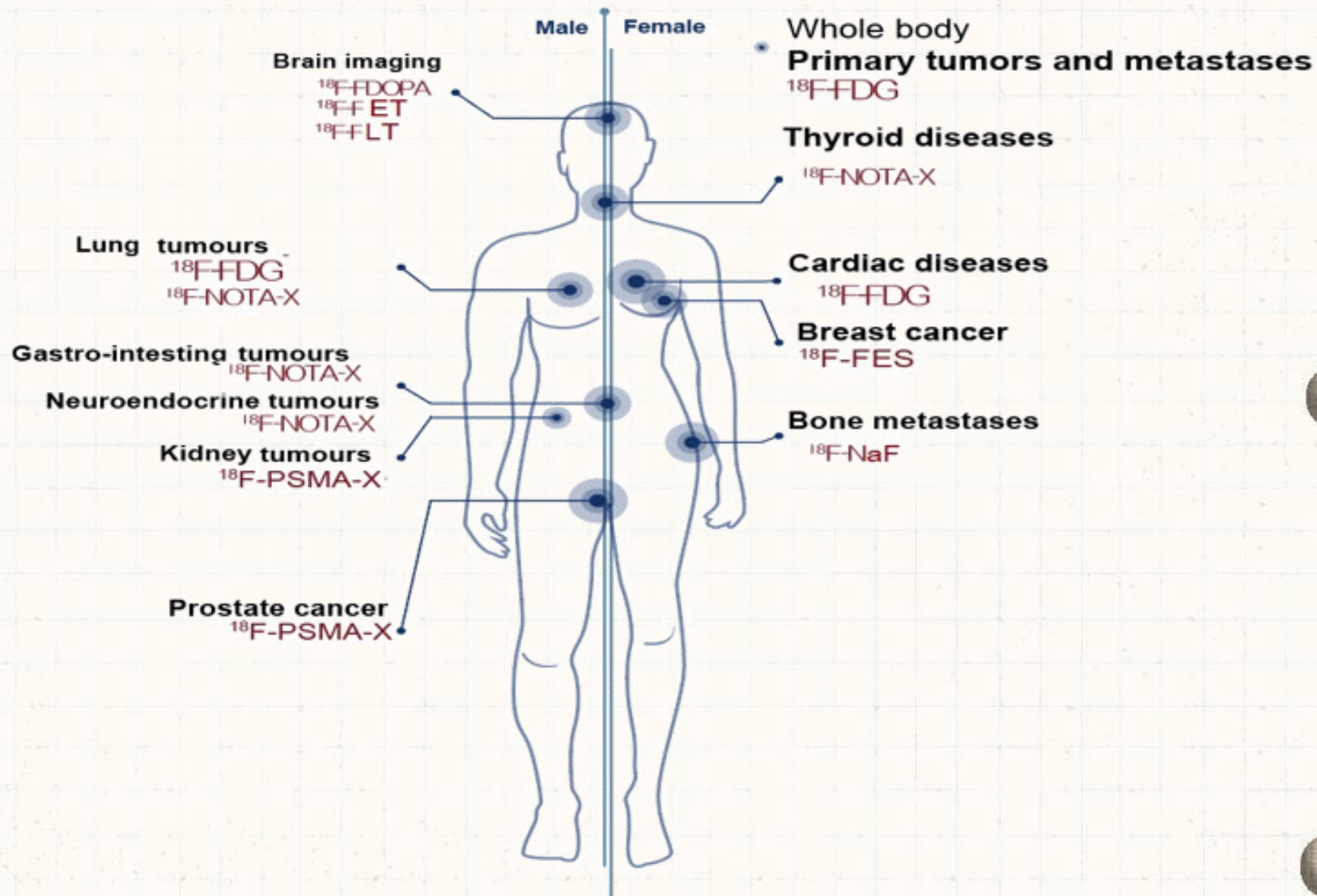
Реакция	Энергия, МэВ	Выход
$^{68}\text{Zn}(p, 2p)^{67}\text{Cu}$	128	$\sim 1.08 \text{ MBq}/(\mu\text{A} \cdot \text{h} \cdot \text{g})$
$^{64}\text{Ni}(\alpha, p)^{67}\text{Cu}$	24	$544 \text{ kBq}/(\mu\text{A} \cdot \text{h})$
$^{70}\text{Zn}(p, \alpha)^{67}\text{Cu}$	18 $\rightarrow$ 8	$2.0 \text{ MBq}/(\mu\text{A} \cdot \text{h})$
$^{68}\text{Zn}(\gamma, p)^{67}\text{Cu}$	60	$470 \text{ kBq}/(\mu\text{A} \cdot \text{h} \cdot \text{g})$
	55	$0.234 \text{ MBq}/(\mu\text{A} \cdot \text{h} \cdot \text{g}/\text{cm}^2)$

^{66}Zn 27.73%	^{67}Zn 4.04%	^{68}Zn 18.45% p, 2p; γ, p d, 2pn; α, α, p	^{69}Zn 56.4 m	^{70}Zn 0.61% p, α
^{65}Cu 30.85%	^{66}Cu 5.12 m	^{67}Cu 61.8 h	^{68}Cu 30.9 s	^{69}Cu 2.85 m
^{64}Ni 0.93% α, p	^{65}Ni 2.51 h	^{66}Ni 54.6 h	^{67}Ni 21 s	^{68}Ni 29 s

Циклотрон	Энергия протонов, МэВ	Ядерные реакции	Основные производимые радионуклиды
Уровень I	≤ 10	(p,n), (p, α)	$^{11}_{\text{C}}$, $^{13}_{\text{N}}$, $^{15}_{\text{O}}$, $^{18}_{\text{F}}$
Уровень II	≤ 20	(p,n), (p, α)	$^{11}_{\text{C}}$, $^{13}_{\text{N}}$, $^{15}_{\text{O}}$, $^{18}_{\text{F}}$, $^{67}_{\text{Ga}}$, $^{103}_{\text{Pd}}$, $^{109}_{\text{Cd}}$, $^{111}_{\text{In}}$, $^{123}_{\text{I}}$, $^{124}_{\text{I}}$, $^{186}_{\text{Re}}$
Уровень III	≤ 45	(p,pn), (p,2n), (p,3n) и др.	$^{22}_{\text{Na}}$, $^{38}_{\text{K}}$, $^{57}_{\text{Co}}$, $^{67}_{\text{Ga}}$, $^{68}_{\text{Ge}}$, $^{73}_{\text{Se}}$, $^{75-77}_{\text{Br}}$, $^{81}_{\text{Rb}}$ ($^{81}_{\text{Kr}}$), $^{111}_{\text{In}}$, $^{123}_{\text{I}}$, $^{201}_{\text{Tl}}$, $^{225}_{\text{Ac}}$
Уровень IV	≤ 200	(p,4n), (p,5n) и др.	$^{22}_{\text{Na}}$, $^{28}_{\text{Mg}}$, $^{52}_{\text{Fe}}$, $^{67}_{\text{Cu}}$, $^{72}_{\text{Se}}$ ($^{72}_{\text{As}}$), $^{81}_{\text{Rb}}$ ($^{81}_{\text{Kr}}$), $^{82}_{\text{Sr}}$ ($^{82}_{\text{Rb}}$), $^{103}_{\text{Pd}}$, $^{109}_{\text{Cd}}$, $^{117\text{m}}_{\text{Sn}}$, $^{123}_{\text{I}}$, $^{149}_{\text{Tb}}$, $^{201}_{\text{Tl}}$



Сечение образования изотопов йода в реакциях $^{125}\text{Te}(p, xn)^{123-125}\text{I}$



Связь между массой радионуклида g [г] и его активностью C [Ки] выражается формулой:

$$g = 0,884 \cdot 10^{-13} C A T_{1/2},$$

где A - атомная масса радионуклида в относительных единицах; $T_{1/2}$ - период его полураспада в секундах. Отсюда, например, 1 мКи ^{18}F ($T_{1/2} = 112$ мин) имеет массу всего $1 \cdot 10^{-11}$ г.

**Коммерческие
циклотроны
протонов и легких
ионов с выводом
пучка**

Циклотрон	Компания (страна)	Энергия (ток) протонов, МэВ (мкА)	Энергия (ток) дейтронов, МэВ (мкА)	Энергия (ток) α -частиц, МэВ (мкА)	Энергия (ток) $^3\text{He}^{2+}$, МэВ (мкА)
У-120	НИИЭФА (Россия)	5–11 (50)	9–14 (50)	18–28 (50)	14–30 (20)
У-120М	ЛЯП ОИЯИ (Россия)	12–40 (50–20)	8–20 (30)	17–41 (20)	17–54 (20)
МГЦ-20	НИИЭФА (Россия)	18 (50)	10 (50)	20 (25)	27 (25)
BC1710	Steel Works (Япония)	17 (70)	10 (70)		
BC3015	Steel Works (Япония)	30 (70)	15 (70)		
480AVF	Sumitomo HI (Япония)	30 (80)			
750AVF	Sumito HI (Япония)	70 (55)			
930AVF	Sumito HI (Япония)	90 (10)	35 (40)		
MC30	Scanditronix (Швеция)	30 (< 50)			
MC40	Scanditronix (Швеция)	40 (70)	20 (70)	40 (60)	53 (60)
MC50	Scanditronix (Швеция)	50 (50)	25 (50)	50 (30)	66 (30)
TCC CS-15	CTI-Siemens (США)	15 (60)	8 (100)	16 (40)	20 (60)
TCC CS-22	CTI-Siemens (США)	22 (50)	12 (50)	24 (50)	32 (50)
TCC CV-28	CTI-Siemens (США)	24 (60)	14 (100)	28 (40)	36 (50)
TCC CS-30	CTI-Siemens (США)	26 (60)	15 (40)	30 (40)	38 (60)

**Некоторые изотопы,
получаемые путем
бомбардировки
мишеней протонами
низких и средних
энергий, а также в
реакциях распада**

Изотоп	Время жизни изотопа	Тип ядерной реакции	Энергия протонов, МэВ	Выход, мКи/мкА·ч	Применение
^{11}C	20 мин	$^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$	10	20	ПЭТ
^{13}N	10 мин	$^{16}\text{O}(p, \alpha)^{13}\text{N}$	11		ПЭТ
^{15}O	2 мин	$^{15}\text{N}(p, n)^{15}\text{O}/^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$	10	21	ПЭТ
^{18}F	1,8 ч	$^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$	10	30	ПЭТ
^{44}Sc	60 мин	$^{45}\text{Sc}(p, n)^{44}\text{Ti}$ (48 лет) $\rightarrow$ ^{44}Sc	30		ПЭТ-генератор
^{52}Fe	8,3 ч	$^{55}\text{Mn}(p, 4n)^{52}\text{Fe}$	80 $\rightarrow$ 50		Гематология
		$^{52}\text{Cr}(^3\text{He}, 3n)^{52}\text{Fe}$	36 $\rightarrow$ 25		
^{64}Cu	12,7 ч	$^{64}\text{Ni}(p, n)^{64}\text{Cu}$	14 $\rightarrow$ 9	6,5	Молекул. ПЭТ
^{67}Ga	78,3 ч	$^{66}\text{Zn}(p, n)^{66}\text{Ga} \rightarrow ^{67}\text{Ga}$	15 $\rightarrow$ 10		Диагностика опухолей
^{68}Ga	68 мин	$^{69}\text{Ga}(p, 2n)^{68}\text{Ge}$ (генератор 270 сут) $\rightarrow$ ^{68}Ga	35		
^{73}Se	7,1 ч	$^{75}\text{As}(p, 3n)^{73}\text{Se}$	40 $\rightarrow$ 30		Селенофарм.
^{76}Br	16 ч	$^{75}\text{As}(^3\text{He}, 2n)^{76}\text{Br}$	25 $\rightarrow$ 15		Бромфарм.
		$^{76}\text{Se}(p, n)^{76}\text{Br}$	16 $\rightarrow$ 8		ПЭТ
^{77}Br	2,8 сут	$^{78}\text{Kr}(p, 2n)^{77}\text{Rb} \rightarrow$ $^{77}\text{Kr} \rightarrow ^{77}\text{Br}$	30		SPECT-диагностика
^{73}Se	7,1 ч	$^{75}\text{As}(p, 3n)^{73}\text{Se}$	40 $\rightarrow$ 30	38	
^{81}Rb	4,6 ч	$^{82}\text{Kr}(p, 2n)^{81}\text{Rb}$	30		SPECT
^{82}Rb	1,3 мин	^{82}Sr (генер. 25,5 сут) $\rightarrow$ ^{82}Rb			ПЭТ коронарные
^{86}Y	14,7 ч	$^{86}\text{Sr}(p, n)^{86}\text{Y}$	14 $\rightarrow$ 10	54	ПЭТ
^{103}Pd	17 сут	$^{103}\text{Rh}(p, n)^{103}\text{Pd}$	14 $\rightarrow$ 7	0,18	Брахитерапия
^{111}In	2,8 сут	$^{112}\text{Cd}(p, 2n)^{111}\text{In}$	22		Диагност. метка
^{123}I	13,2 ч	$^{124}\text{Xe}(p, 2n)^{123}\text{Cs} \rightarrow$ $^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$	30	0,19	SPECT-тироид
^{124}I	4,18 сут	$^{124}\text{Te}(d, 2n)^{124}\text{I}$	14 $\rightarrow$ 10	0,47	Дозиметрия
		$^{124}\text{TeO}_2(p, n)^{124}\text{I}$	13 $\rightarrow$ 9	0,45	Эндотерапия
		$^{125}\text{Te}(p, 2n)^{124}\text{I}$	21 $\rightarrow$ 15	2,19	ПЭТ
^{140}Nd	3,4 сут	$^{140}\text{Pr}(p, 2n)^{140}\text{Nd}$	10 $\rightarrow$ 30		Радиотерапия
^{195m}Pt	4 сут	$^{192}\text{Os}(\alpha, n)^{195m}\text{Pt}$	10 $\rightarrow$ 25		Радиотерапия
^{201}Tl	3,06 сут	$^{203}\text{Tl}(p, 3n)^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$	29		Диагн. кардиолог.
^{225}Ac	10 сут	$^{226}\text{Ra}(p, 2n)^{225}\text{Ac}$	15	$\sim 0,19$	Радиотерапия

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**

