

Ядролық энергетикалық қондырғылар

Ядролық физиканың дамуы

- 1808 Dalton Атомдық теория
- 1876 Goldstein катод сәулесі
- 1891 Stoney электрон тұжырымы
- 1895 Roentgen X сәулесі
- 1896 Becquerel радиоактивтік
- 1897 Thomson катод сәулесі = электрон
- 1898 Rutherford α , β сәулелері
- 1905 Einstein арнайы салыстырмалы теория
- 1911 Rutherford атомның моделі
- 1912 Thomson изотоптық талдау
- 1919 Aston массалық талдау қондырғысы

- 1921 Harkins нейтрон болжамы
- 1930 Bothe $\text{Be}(\alpha, ?)$
- 1932 J. Curie жұбайлар $\text{Be}(\alpha, \gamma)$
- Chadwick **нейтронның табылуы**
- 1934 Fermi баяу нейтрондар
- Szilard тізбекті ядролық реакция
- 1939 Hahn, Strassman, Meitner **ядролық бөліну реакциясы**
- 1942 Fermi **CP-1(Chicago pile-1) тұңғыш реактор**
- 1944 Pu дайындайтын №1 реактор (Hanford, АҚШ)

- 1945 Ядролық бомба сынағы (АҚШ)
- 1945 Табиғи уранды ауыр сулы реактор (ZEEP) (Канада)
- 1946 Шапшаң нейтронды реактор (Clementine) (АҚШ)
- 1950 Бассейн типтегі реактор (BSR) (АҚШ)
- 1951 FBR (ERB-1) (АҚШ) энергетикада қолданды
- 1953 Сутегі бомба сынағы (СССР)
«Атом – бейбітшілік үшін» декларация (БҰҰ)
- 1954 Атомдық сүңгуір кеме жасалды (АҚШ)

Элементар бөлшектер

Элементар бөлшектер деп алғашқы материяны құрайтын, ары қарай бөлінбейтін бөлшектерді айтады. Мысалы үшін электрон, фотон, ж.т.б.

Жер бетіне келіп жатқан сәулелерді ғарыштық сәулелер деп атайды. Олар 1- және 2- ғарыштық сәулелер болып бөлінеді.

1-ғарыштық сәулелер Жер атмосферасының жоғарғы қабатында (50км биікте).

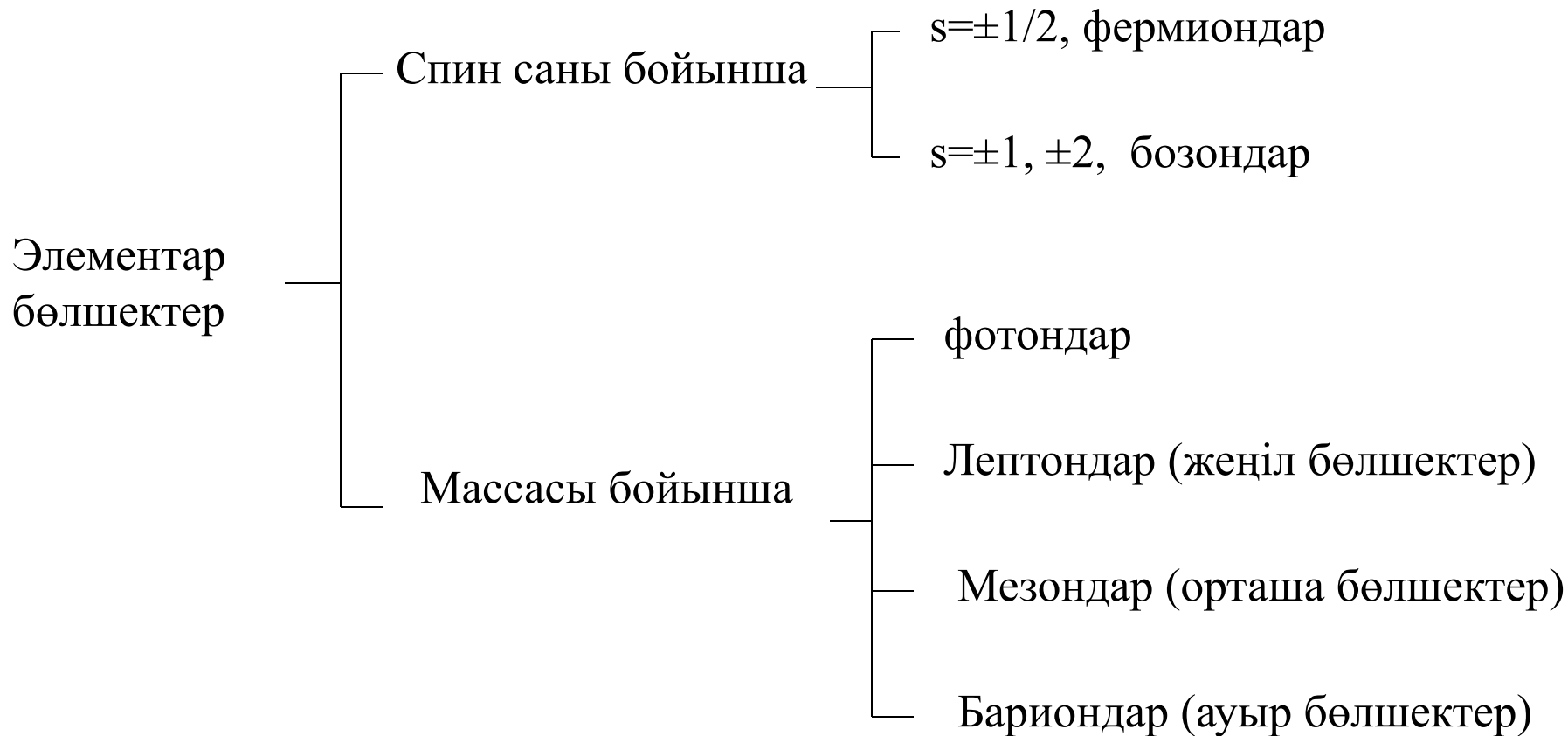
Бұл сәулелердің энергиясы өте жоғары $\approx 10^{10} \dots 10^{19}$ эВ.

Бұларды 92,9% протондар және 6,3% α - бөлшектер құрайды.

2-ғарыштық сәулелер – Жер бетінен 20 км биіктікте 1-ғарыштық сәулелер мен ауаны құрайтын газдардың ядролары соқтығысу арқылы пайда болады.

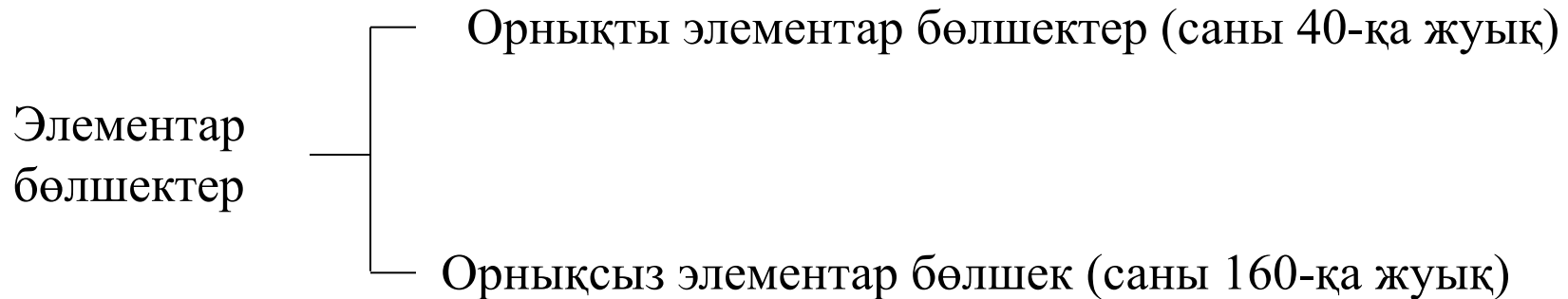
2-ғарыштық сәулелерде негізінен барлық элементар бөлшектер болады.

Элементар бөлшектер түрлері



Элементар бөлшектер (ЭБ)

Барлық элементар бөлшектер жұп болып түзіледі. (электрон – позитрон)
Анти бөлшек: массасы, спині, магнит моменті бірдей, заряды қарама қарсы.



Барлық элементар бөлшектер саны 200 шамасында

Элементар бөлшектердің түрлері және қасиеттері

Бөлшектердің аттары			Белгіленуі		Электрон заряды	Массасы, m_e	Спині, s	Өмір сүру уақыты, с
			бөлшек	анти-бөлшек				
Фотон			γ	γ	0	0	1	Тұрақты
Лептондар	Электрондар		e^-	e^+	1	1	1/2	Тұрақты
	Нейтринолар		ν	$\bar{\nu}$	0	0	1/2	Тұрақты
	Мюондар		μ^-	μ^+	1	206,8	1/2	$\approx 10^{-6}$
	Таондар		τ^-	τ^+	1	3487	1/2	$\approx 10^{-12}$
Мезондар	π -мезондар (пиондар)		π^+	π^-	1	273	0	$\approx 10^{-8}$
			π^0	π^0	0	264	0	$\approx 10^{-16}$
	K -мезондар (каондар)		K^+	K^-	1	966	1/2	$\approx 10^{-8}$
			K^0	$\bar{K}^0$	0	976	1/2	$\approx 10^{-10}$
	Эта-мезон		η	η	0	1074	0	$\approx 10^{-19}$
Бариондар	Нуклондар	Протондар	p	$\bar{p}$	1	1836	1/2	Тұрақты
		Нейтрондар	n	$\bar{n}$	0	1838	1/2	$\approx 10^3$
	Гиперондар	Ламбда гиперондар	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	0	2183	1/2	$\approx 10^{-10}$
		Сигма гиперондар	Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	0	2334	1/2	$\approx 10^{-20}$
			Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	1	2328	1/2	$\approx 10^{-11}$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	1	2343	1/2	$\approx 10^{-10}$
		Кси гиперондар	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	0	2573	1/2	$\approx 10^{-10}$
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	1	2586	1/2	$\approx 10^{-10}$
		Омега гиперон	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	1	3273	3/2	$\approx 10^{-11}$

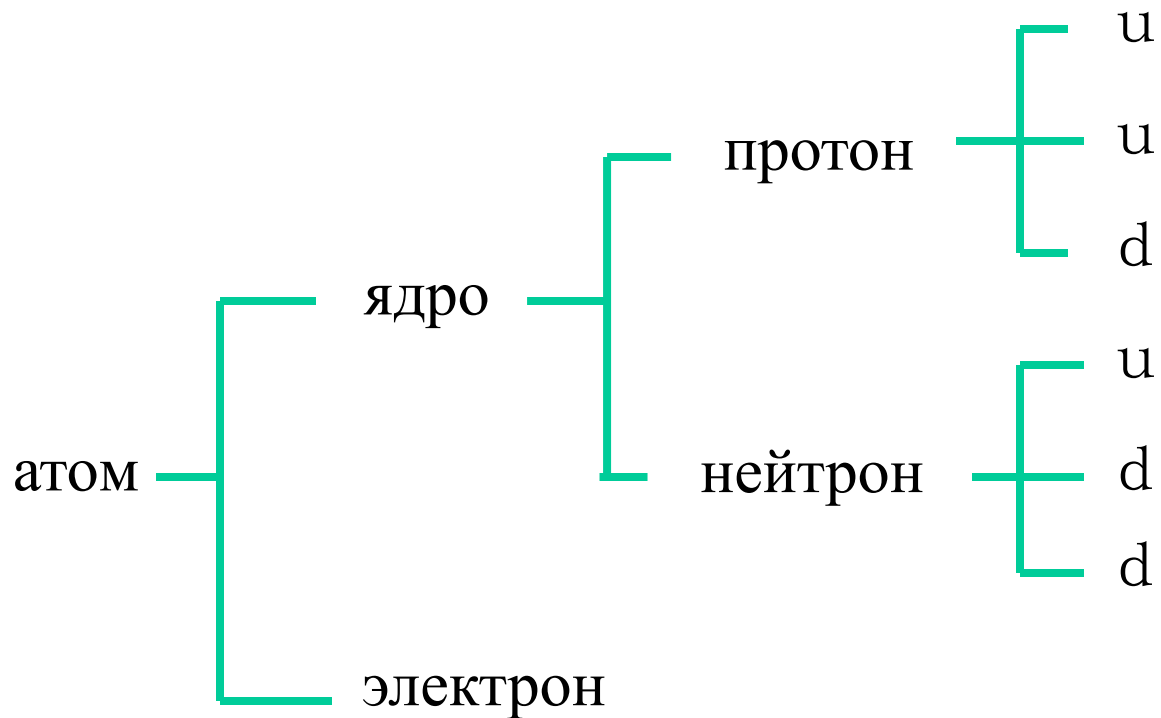
Денелердің бір-бірімен өзара әсерлесуі (4 түрлі күш)

Әсер күш түрлері	Негізгілері	Әсер аумағы
Гравитациялық Әлсіз өзара әсер Электромагниттік Күшті өзара әсер	Гравитон (макродүниелер) Әлсіз бозондар (W^+ , W^- , Z^0) Протондар мен электрондар Нуклондар (протон, нейтрондар)	∞ $\geq 10^{-18}m$ ∞ $\geq 10^{-15}m$

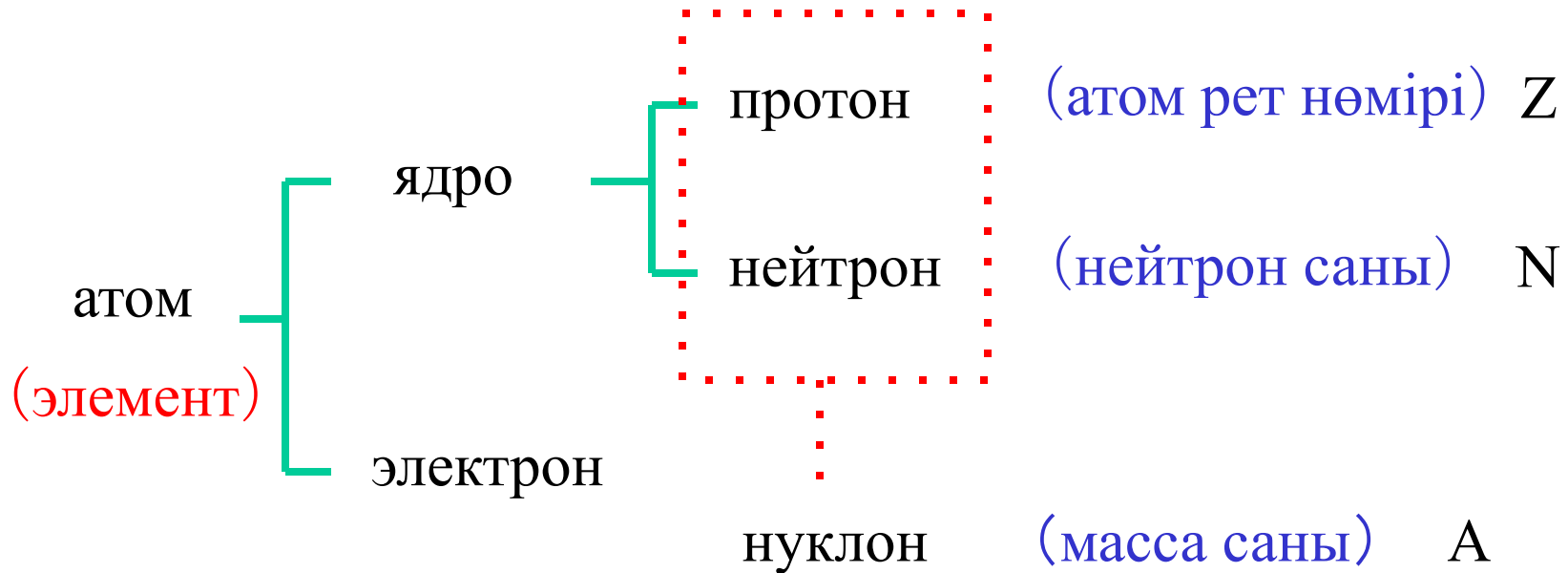
Күшті өзара әсер – электромагниттік күштерден 100 есе, ал әлсіз өзара әсерден 10^{14} дәреже есе зор болады.

1964 жылы М.Гелл-Манн алғаш рет кварк идеясын ортаға қойды. Оның ойы бойынша күшті өзара әсерге қатысатын бөлшектердің барлығы кварктардан тұрады. Алдымен үш кварк *u, d, s* және олардың антикварктары пайда болады. Мысалы протон екі *u*-кварктан және бір *d*-кварктан тұрады.

Атомның құрамы

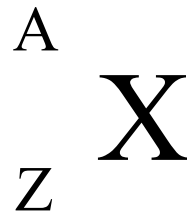


Атомның құрамы



Изотоп — атом рет нөмірі бірдей нейтрон саны ұқсамайтын элементтер

Ядроның белгісі



X: элемент аты (X пен Z өзара сәйкес келеді)

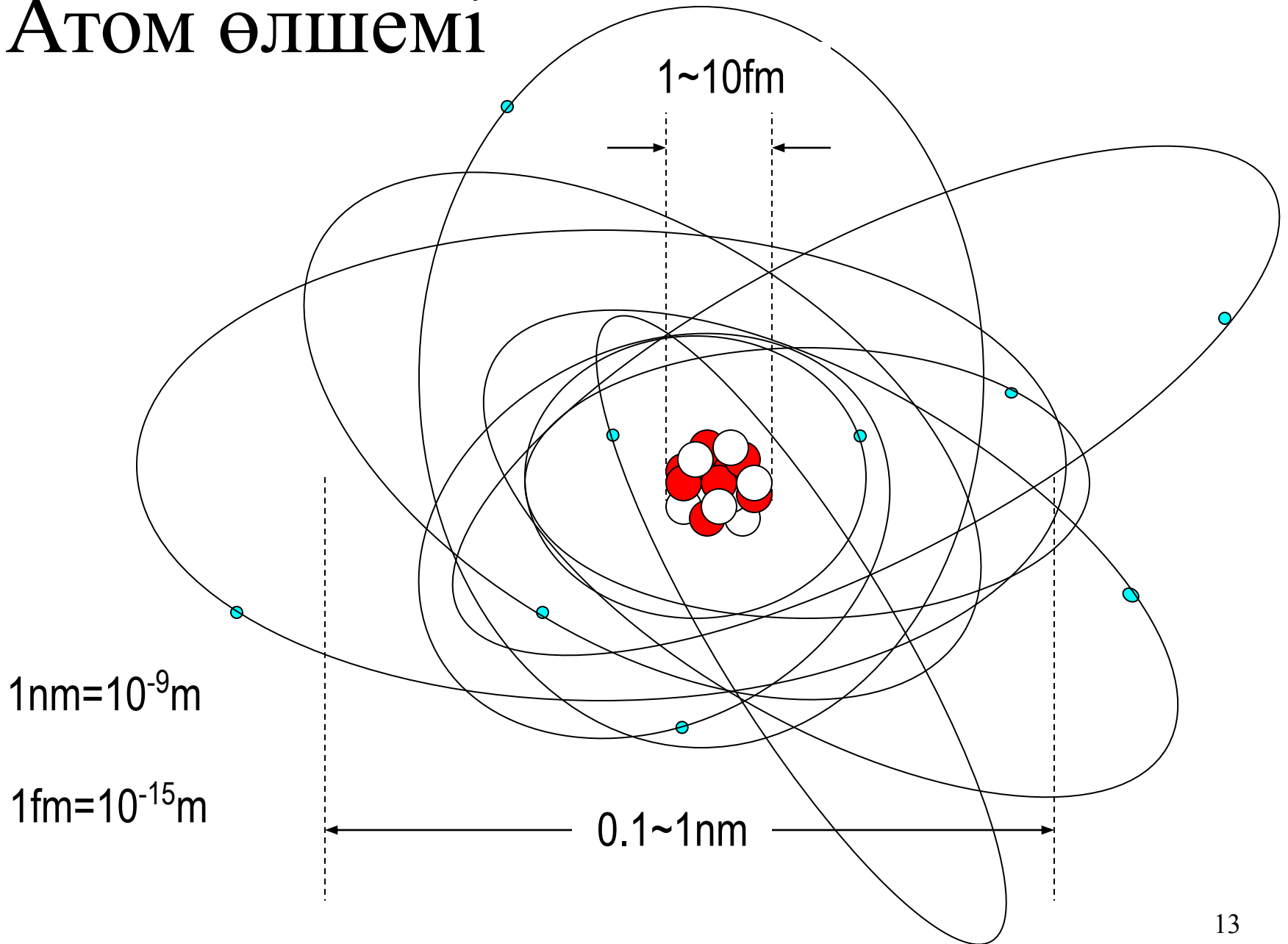
Z: атомдық рет нөмірі: ядродағы протондар(заряд) саны

N: нейтрон саны: ядродағы нейтрондар саны

A: масса саны

$$A=Z+N$$

Атом өлшемі



нейтрон, протон және электронның массасы

Элементар бөлшек	Атомдық масса	$m=E/c^2$ MeV/c ²
Протон	1,007276	938,28
Нейтрон	1,008665	939,57
Электрон	0,000549	0,51

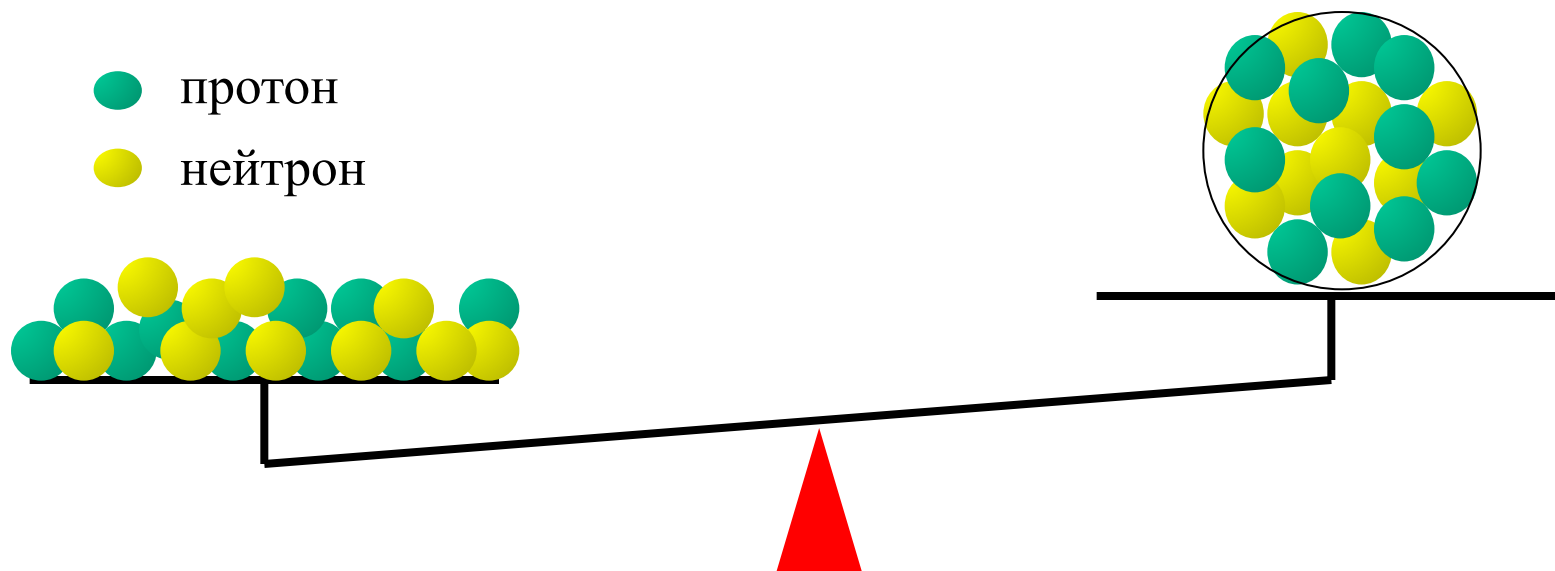
6 протон, 6 нейтрон, 6 электроннан тұратын ¹²C көміртегі атомының 1/12 бөлігі = 1 атомдық масса ретінде қабылданған.

$$1 \text{amu} = 931.5016 \text{MeV}/c^2$$

$$E=mc^2$$

Ядролық энергия көзі

「біріксе жеңілдейді」



Масса ақауы Δm



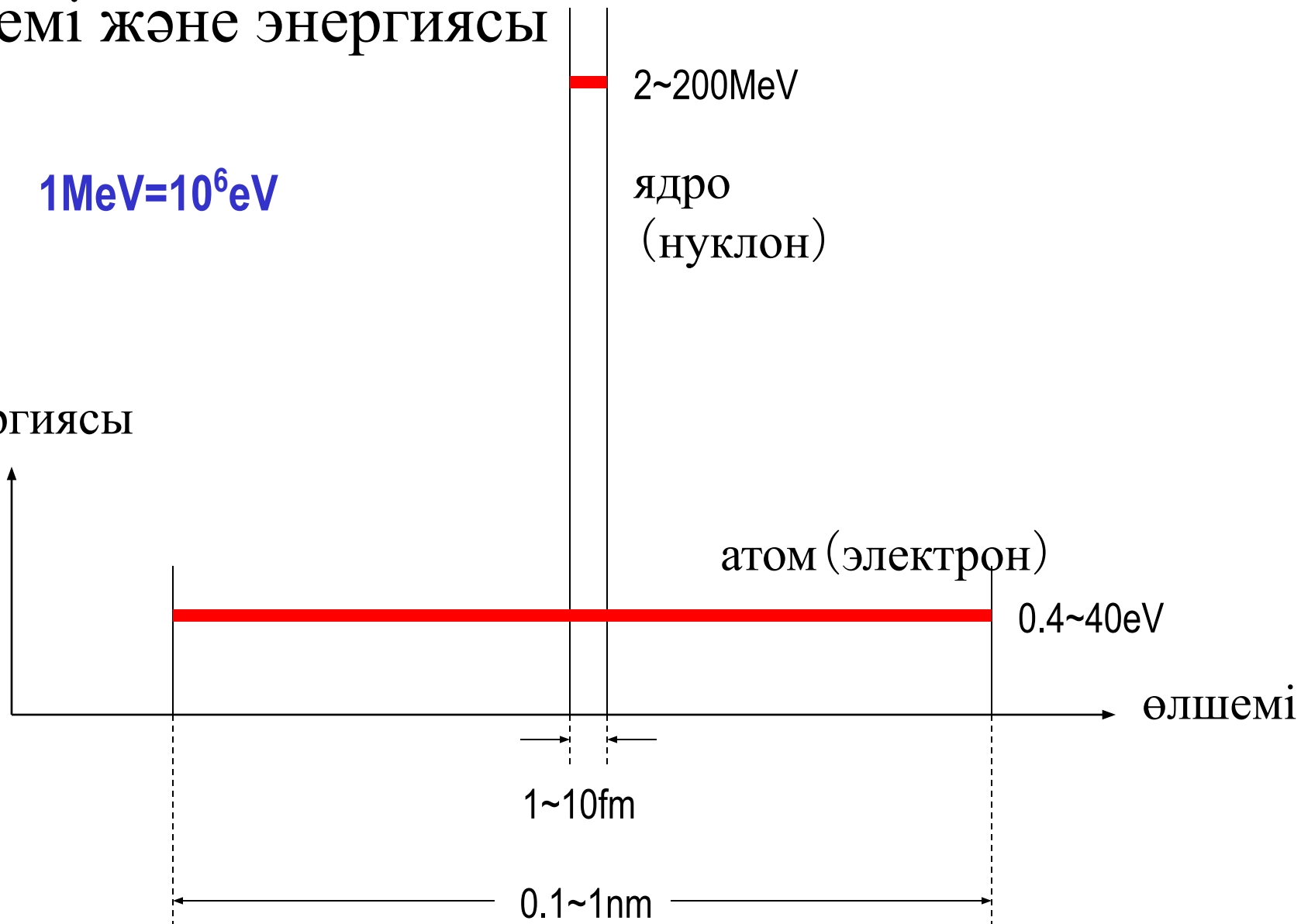
Байланыс энергиясы E

$$E = \Delta m c^2 \quad (c : \text{жарық жылдамдығы})$$

Өлшемі және энергиясы

$$1\text{MeV}=10^6\text{eV}$$

энергиясы



Ядролық энергия мен химиялық энергия

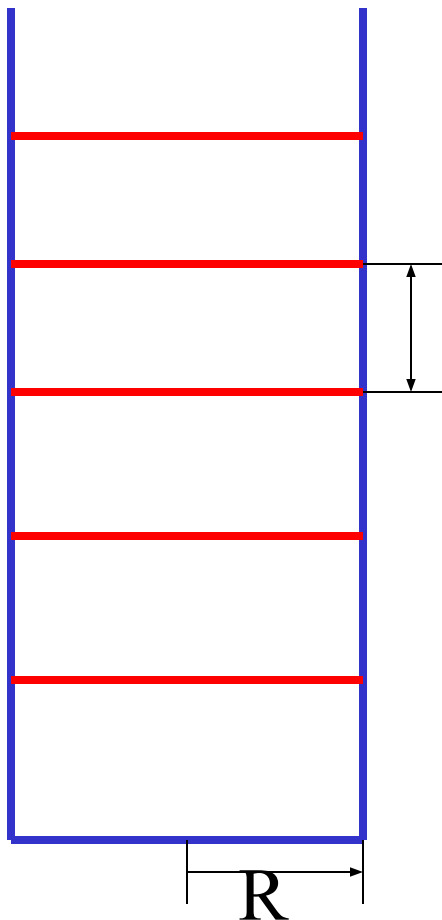
U

Шредингер тендеуі

$$H\psi_n = E_n\psi_n$$

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + U$$

$$\Delta E_n \approx \frac{1}{mR^2}$$



	m	R	ΔE_n
электрон	0.51MeV	$10^{-9} \sim 10^{-10} \text{m}$	0.38~38eV
нуклон	940MeV	$10^{-14} \sim 10^{-15} \text{m}$	2~200MeV

Ядролық энергия = $5 \cdot 10^6$ × химиялық энергия

Ядроның массасы

Ядроның массасы: $M(Z, N) = Zm_H + Nm_N - D(Z, N)$

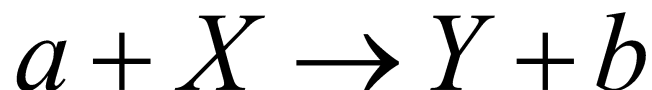
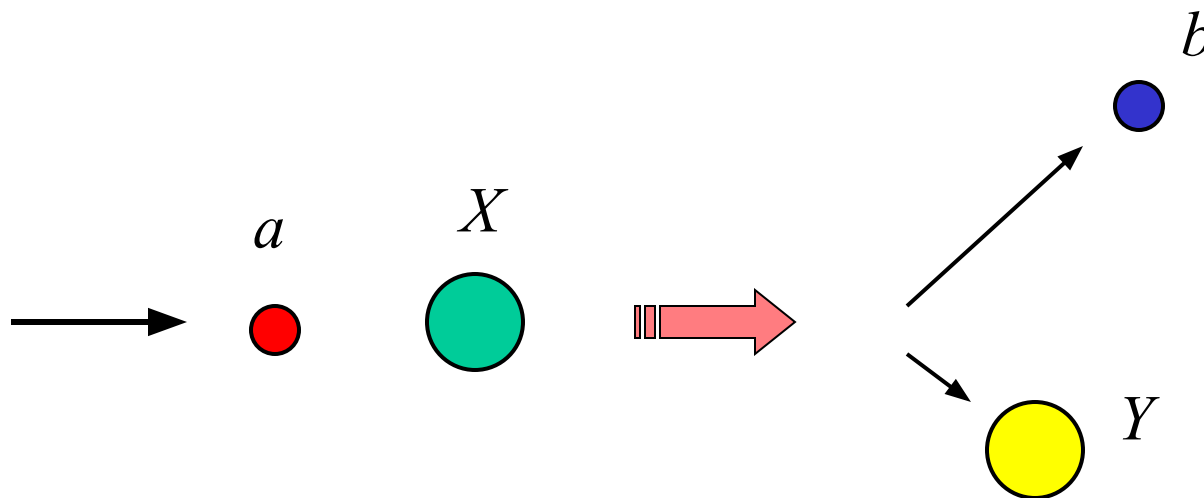
Z : атом рет нөмірі N : нейтрон саны

m_H : сутегі атом массасы m_N : нейтрон массаы

$D(Z, N)$: **масса ақауы** (mass defect)

Байланыс энергия(binding energy) $B(Z, N) = D(Z, N)c^2$

Ядролық реакция (nuclear reaction)



a : түскен сәуле (бөлшек) (incident particle)

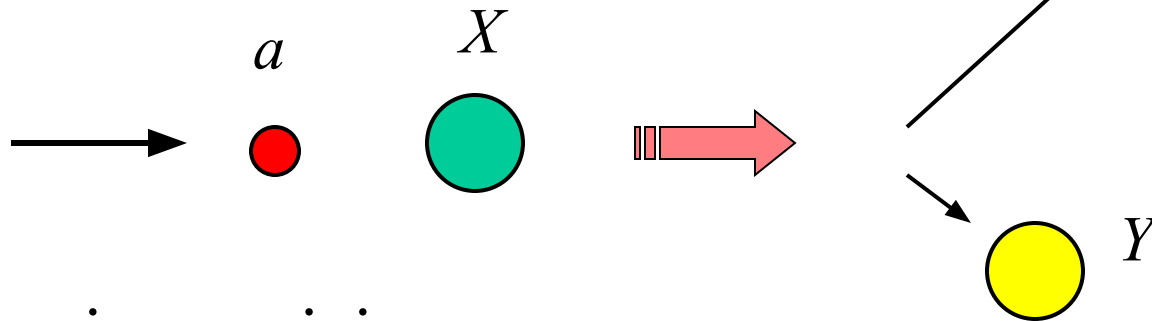
X : нысана ядро (target nucleus)

Y : қалдық ядро (residual nucleus)

b : шығарылған сәуле (бөлшек) (emitted particle)

Ескерту: a болмаған кезде ыдырау (decay) деп аталады

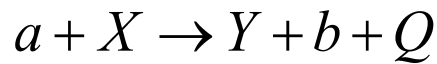
Ядролық реакция (nuclear reaction)



Белгілеу әдісі

- $a+X \rightarrow Y+b$
- $a+X \rightarrow Y+b+Q$
- $X(a,b)Y$

Ядролық реакция (жалғасы)



Q : реакция энергиясы (reaction energy) немесе Q (Q-мәні)

$$Q = E_b + E_Y - E_a$$

E_a, E_b, E_X, E_Y : кинетикалық энергиялар

$$Q = [(M_a + M_X) - (M_b + M_Y)]c^2$$

M_a, M_b, M_X, M_Y : сәйкес массалары

$$(M_a + M_x)c^2 + E_a = (M_b + M_Y)c^2 + E_b + E_Y$$

$$E_{ath} = -Q \frac{M_a + M_x}{M_X} \quad E_{a,th} : \text{тығырық энергия (threshold energy)}$$

$Q > 0$: **жылу шығаратын реакция** (exoergic reaction)

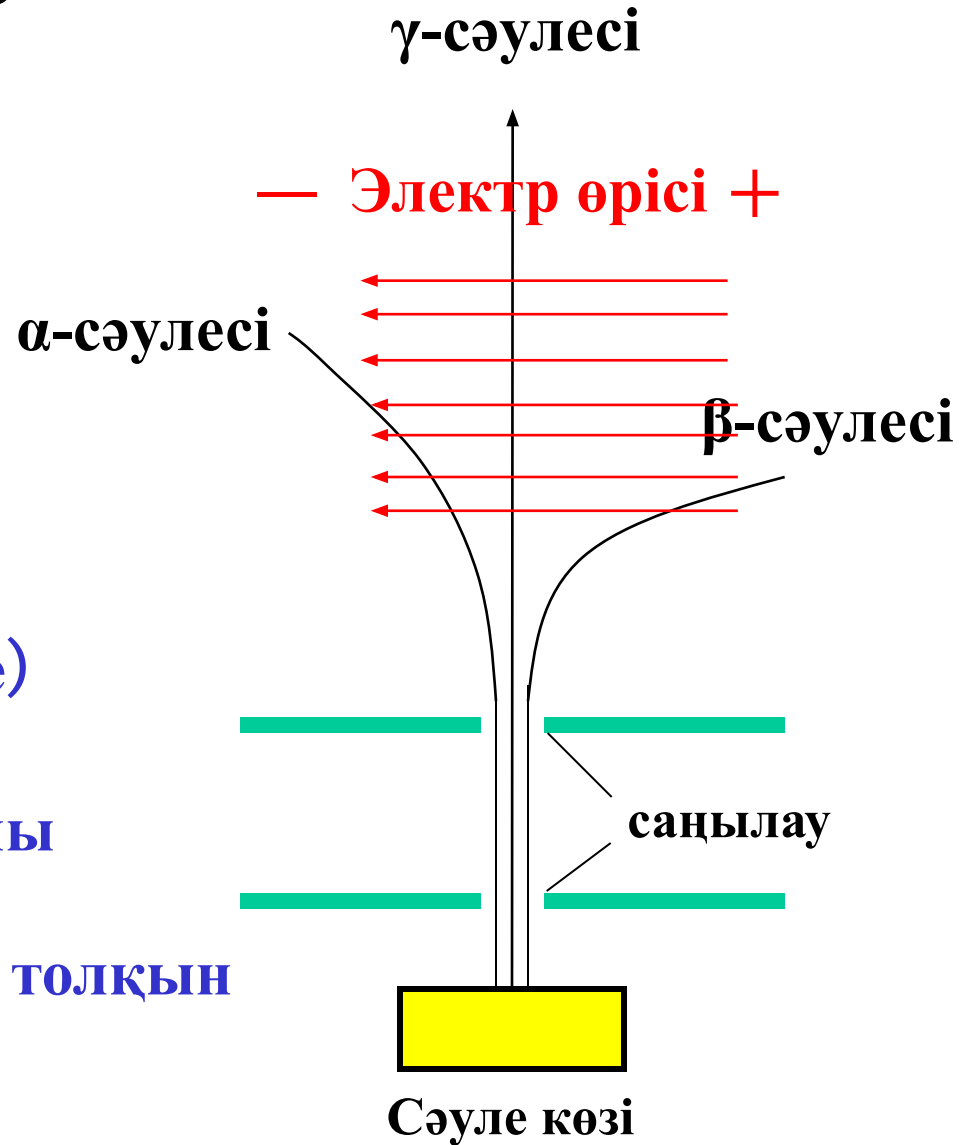
$Q < 0$: **жылу жұтатын реакция** (endoergic reaction)

Ядроның ыдырауы

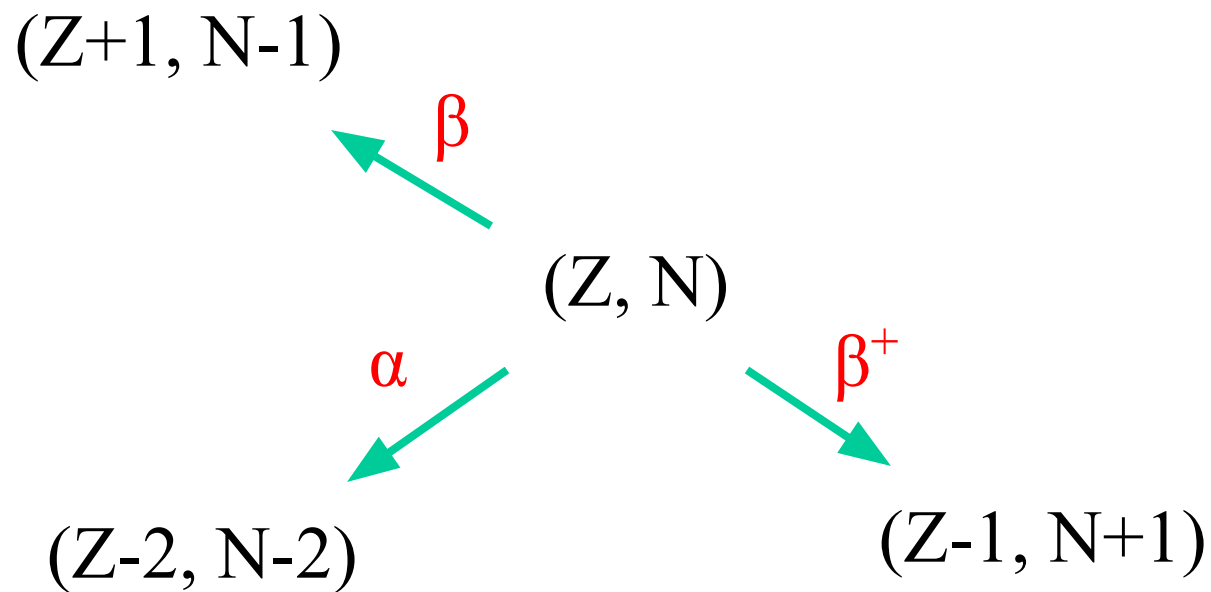
α - сәулесі: гелий ядросы (${}^4\text{He}$)

β - сәулесі: электрондар ағыны

γ - сәулесі: электромагниттік толқын



Ядроның ыдырауы



Ядроның ыдырауы

Ядро санының (N) уақыт бойынша өзгерісі

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad \lambda : \text{ыдырау тұрақтысы}$$

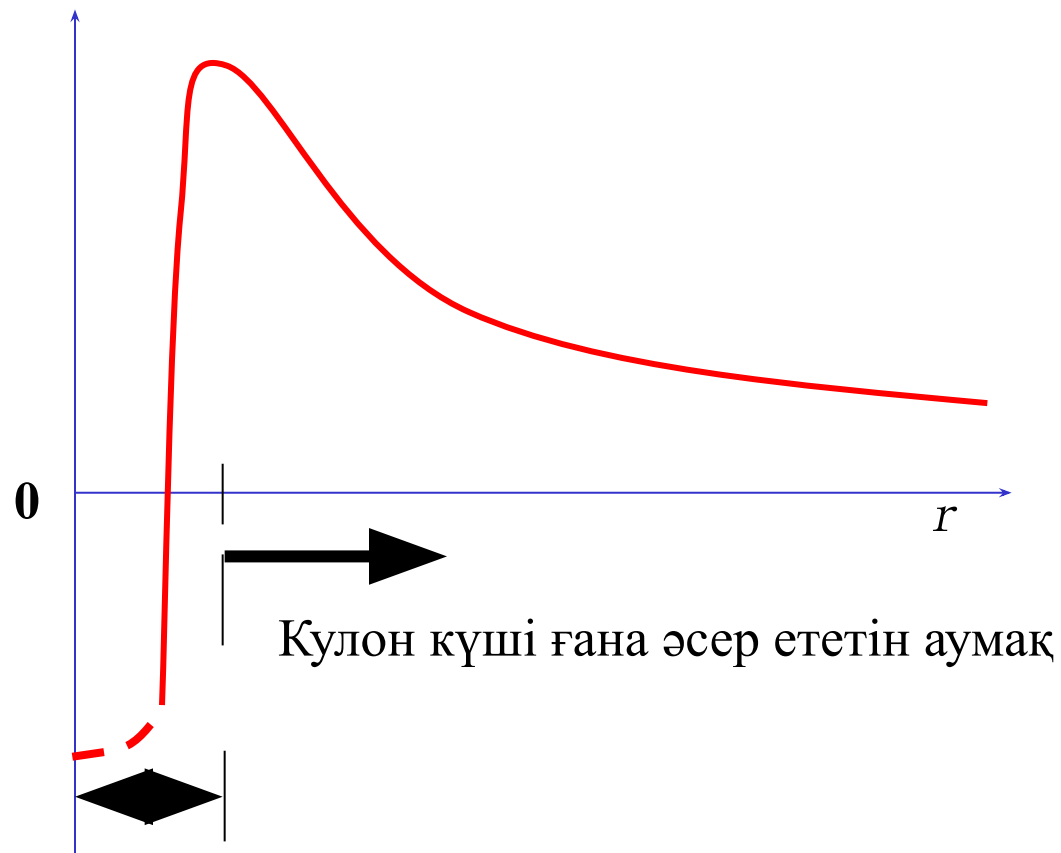
Активтілік: уақыт бірлігіндегі ыдырау саны (1Bq=ыдырау саны/секунд)

$$N = N_0 \exp(-\lambda t)$$

$$T_{1/2} : \text{жартылай ыдырау периоды} \quad T_{1/2} = \frac{\log 2}{\lambda} = \frac{0.69315}{\lambda}$$

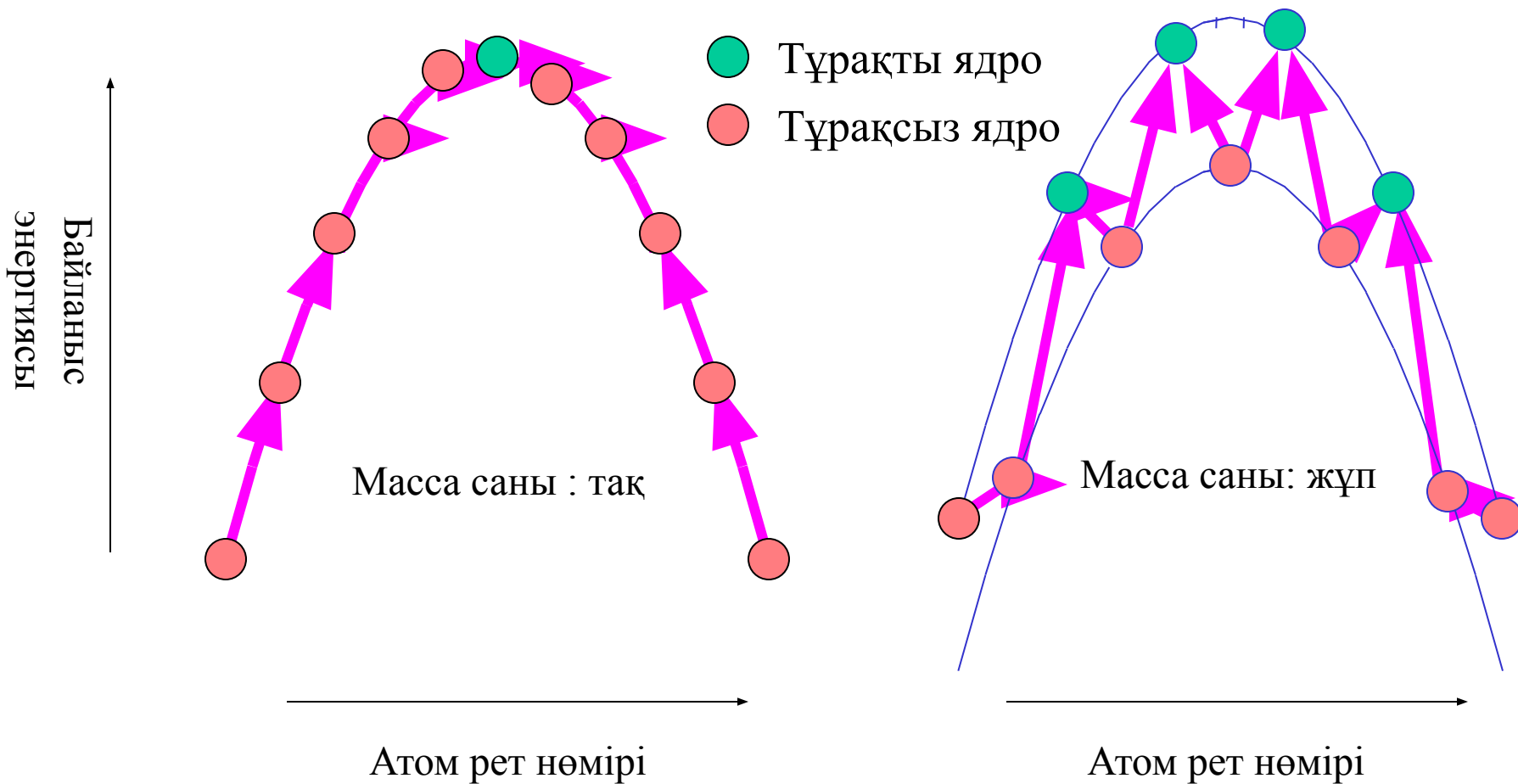
$$\tau : \text{орташа өмір сүру уақыты} \quad \tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N dt = \frac{1}{\lambda}$$

Ыдыраудың Кулондық тебісу потенциалы

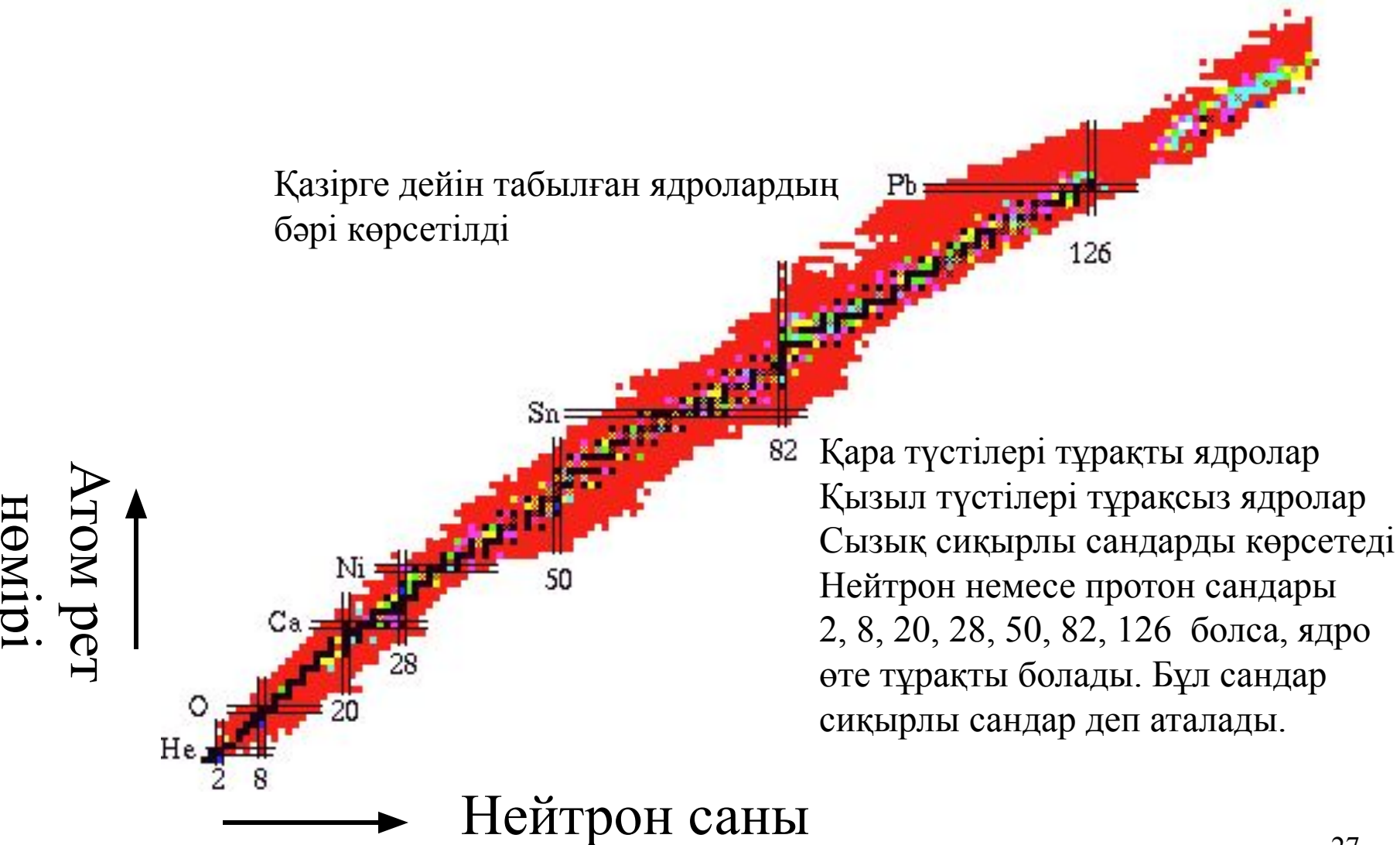


ядролық күш пен Кулон күштің екеуі
де әсер ететін аумақ

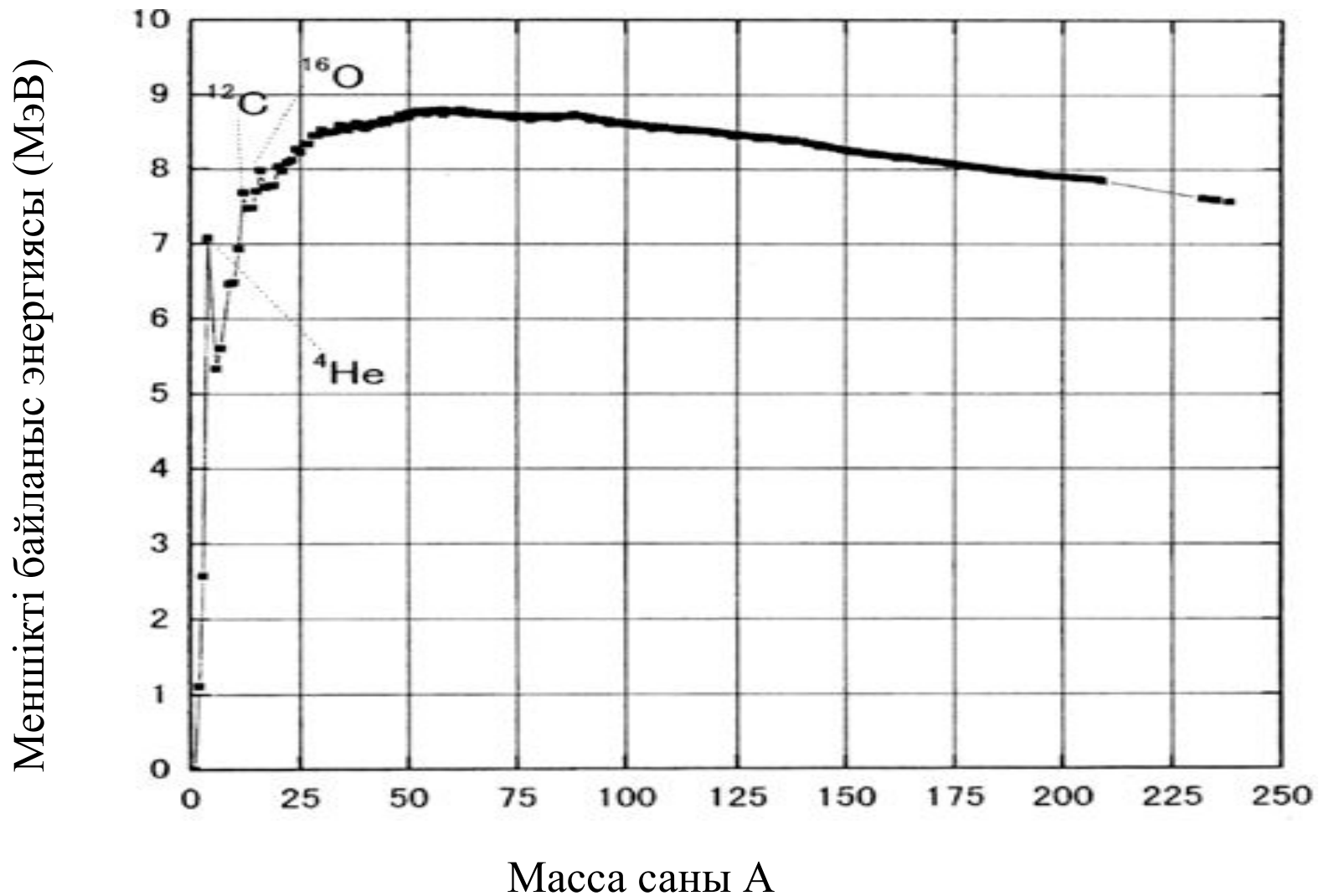
Байланыс энергиясы мен β -ыдыраудың бағыты



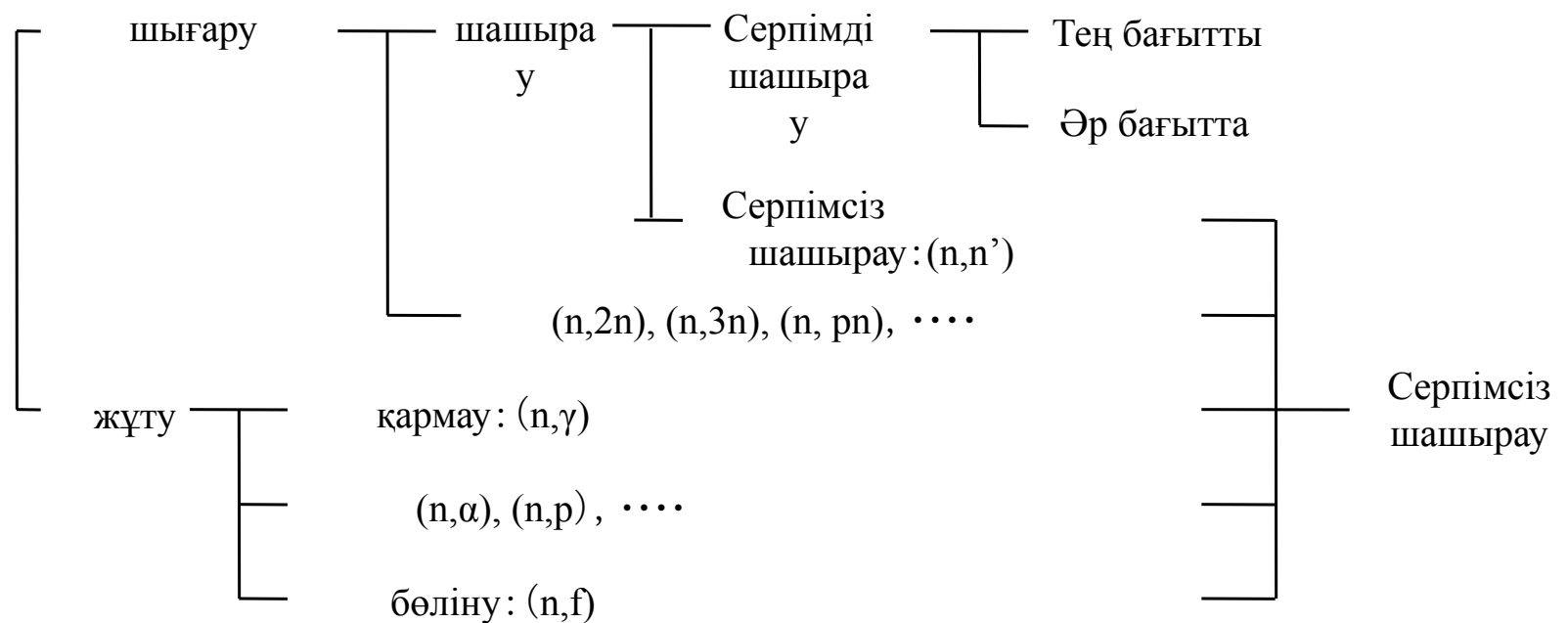
Ядролардың үлестірілуі



Меншікті байланыс энергиясы



Нейтрон мен ядроның реакциясы



Нейтронның ядродан шашырау реакциясы

Реакциядан кейін шашырап шыққан нейтронның энергиясы мен бағыты бастапқы нейтроннан өзгеше болатын реакция

Серпімді шашырау. Реакция барысында нейтрон мен нысана ядроның кинетикалық энергиясының қосындысы және импульсінің қосындысы сақталатын реакция серпімді шашырау реакциясы деп аталады.

1. Потенциалды шашырау: нейтрон нысана ядромен тікелей соқтығыспай нысана ядроның потенциалында шашырайтын реакция.
2. Резонансты серпімді шашырау: нейтрон нысана ядромен соқтығысып құрама ядро қалыптасқан соң нейтрон энергиясын өзгертпей шашырап шығатын реакция.

Серпімсіз шашырау. Нысана ядроға берілген энергияның бір бөлімі нысана ядроның ішкі энергиясын көбейтуге (қоздыруға) жұмсалады.

Нейтронның ядрода жұтылу реакциясы

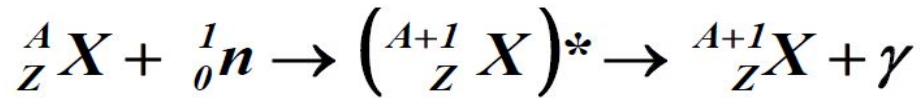
Нысана ядро нейтронды жұтқан соң нейтронның кинетикалық энергиясы мен байланыс энергиясының қосындысына тең деңгейге қозады да, атом массасы біреуі көбейген жаңа ядро пайда болады. Бұл ядро құрама (compound) ядро деп аталады.

Нейтронның жұтылу реакциясы құрама ядроның пайда болуының жалпы атауы болып, реакциядан кейін қандай бөлшек шығаруына байланысты бір неше реакция түріне бөлінеді.

- Құрама ядро гамма сәулесін шығарса: радиациялық қармау реакциясы.
- Құрама ядро зарядты бөлшек шығарса: зарядты бөлшекті шығару реакциясы.
- Екіден жоғары нейтрон шығаратын реакция да $(n,2n)$ жұту реакциясы.

Радиациялық (нейтрон) қармау реакциясы

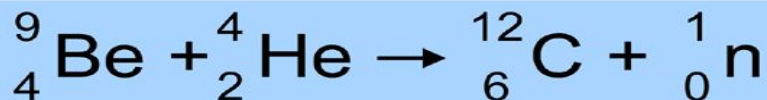
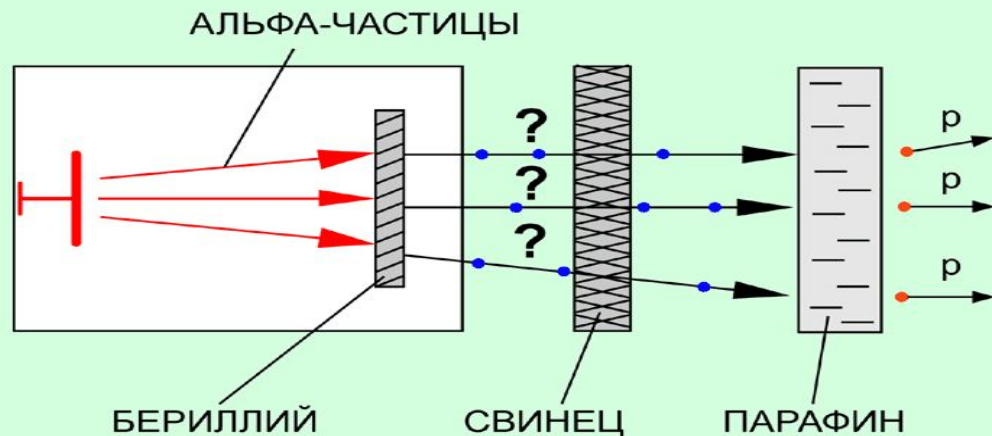
- Құрама ядро γ - сәулесін шығару арқылы негізгі күйге өтеді.



- Нейтрон қармау реакциясында пайда болған құрама ядро тұрақсыз болғандықтан β - ыдырау арқылы β - және γ - $\left({}^{A+1}_Z X \right)^*$ шығарады.
- Мысал үшін, ${}^{59}\text{Co}$ нейтрон қармаған соң ${}^{60}\text{Co}$ -ға айналады. ${}^{60}\text{Co}$ дереу γ - сәулесін шығарады. Бұл кезде шығарған γ - сәулені қармау γ - сәулесі деп атайды. Сондай-ақ, ${}^{60}\text{Co}$ 5,2 жылдық жартылай ыдырау периодымен β - ыдырау арқылы ${}^{60}\text{Ni}$ - ге өзгереді.

Нейтронның ашылуы

1930 жылы жасаған тәжірибелерінде литий мен бериллийді а-бөлшектермен атқылағанда, протонның орнына өте нашар жұтылатын бөлшектер ұшып шығатынын байқайды. Бұл бөлшектер қалыңдығы 20 см болатын қорғасын қабатынан өтіп кеткен.



Ирен
Жолио-Кюри
(1897-1956)



Фредерик
Жолио-Кюри
(1900-1958)

- Олар бериллийді а-бөлшектермен атқылағанда пайда болатын сәуле жолына парафин пластинасын қойғанда, суретте көрсетілгендей сутегіге қаныққан парафиннен протондар ұшып шығады деп болжам жасайды

Ағылшын ғалымы Дж. Чедвик осы жылы берилийді а-бөлшектермен атқылағанда одан бөлінетін табиғаты белгісіз сәуленің қасиеттерін зерттеу жұмыстарын жүргізеді.

Энергияның және импульстің сақталу заңдарына сүйене отырып, жүргізілген есептеулер нәтижесінде белгісіз бөлшектің массасын анықтайды.



Чедвик бұл сәуленің электрлік бейтарап бөлшектер ағыны екенін дәлелдеген. Белгісіз бөлшектің массасы жуықтап алғанда протонның массасына тең болып шыққан. Атом ядросының құрамында протон сияқты ауыр, бірақ бейтарап бөлшектің бар болуы мүмкін деген батыл болжамды 1920 жылы Э. Резерфорд айтқан және оны нейтрон деп атауды ұсынған еді. Сонымен, жаңа бөлшек нейтрон деп аталды. Нейтронның электр заряды нөлге тең, сол себепті оның зат арқылы өтетін өтімділік қабілеті өте жоғары. Қазіргі дәл өлшеулер бойынша нейтронның массасы

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ м.а.б.} = 939,56 \text{ МэВ.}$$



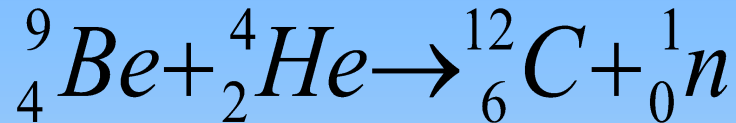
Джон Чедвик
(1920-1998)

Энергия мен импульстің сақталу заңынан нейтронның зат атомдарымен соқтығысу нәтижесінде

$$v_{\text{я}} = \frac{2m_n}{m_n + M_{\text{я}}} v_n;$$

где m_n -нейтрон массасы;
 v_n – нейтронның соқтығысуға дейінгі жылдамдығы;
 $M_{\text{я}}$ – ядро массасы.

А бөлшектерінің бериллий атомымен соқтығысу реакциясы:



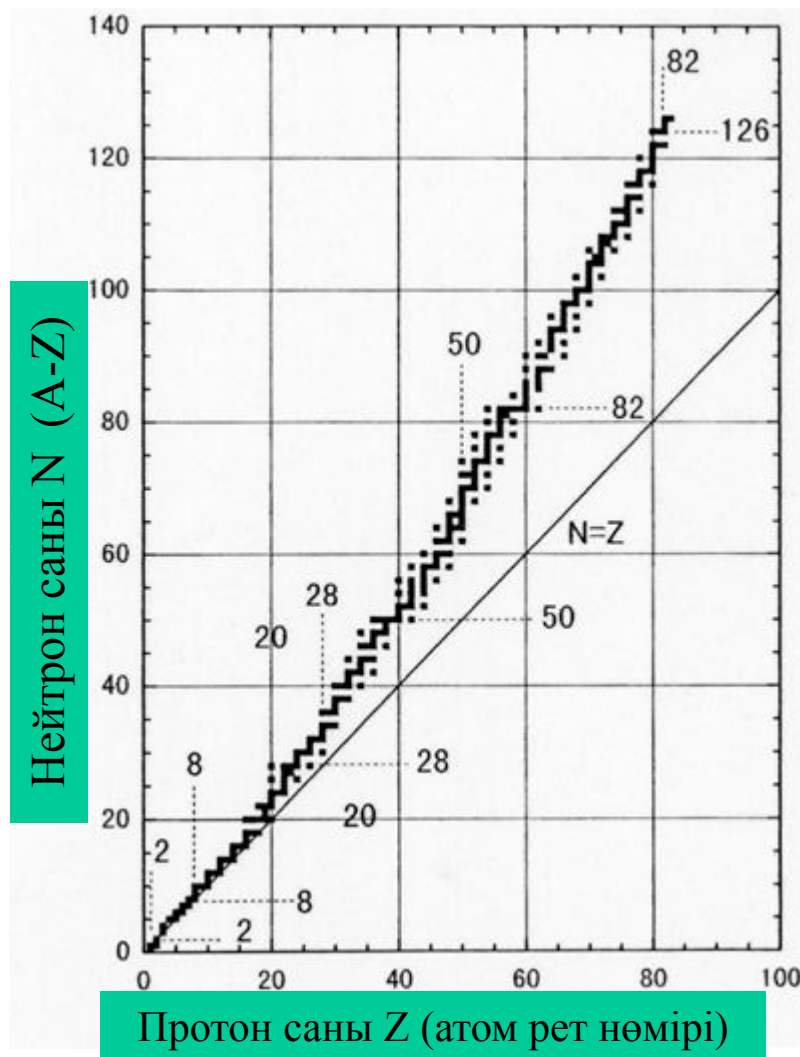
Массалық сандары A бірдей, зарядтық сандары Z әр түрлі нуклидтерді изобаралар (бірдей ауыр деген сөз) деп атайды.

Ядроның құрамына кіретін нейтрондар санын N анықтауға болады:

$$N = A - Z$$

Ядролық зарядтары (реттік нөмірлері Z) бірдей, ал массалық сандары A әр түрлі элементтер атомдарын изотоптар (грекше *isos* — бірдей және *topos* — орын) деп атайды.

Ядроның тұрақтылығы



Ядродағы нейтрондар мен протондардың N/Z қатынасы 1-ге жақын болған кезде ядро тұрақты болатындықтан, масса саны аз ядролар орнықты күйде болады.

Ядроның масса саны артқан сайын протондар арасында Кулон тебісу күші көбейетіндіктен оны әлсірету үшін ядролық күшті көбейтуге тура келеді. Сол себепті нейтрон саны протон санына қарағанда көп болады.

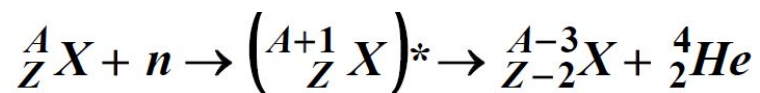
Масса саны артқан сайын N/Z қатынасы көп болып, $Z=84$ -тен жоғары болған кезде тұрақты ядролар болмай қалады.

Зарядты бөлшекті шығару реакциясы

Жеңіл ядролар нейтронды жұтқан соң зарядты бөлшектерді шығарады.

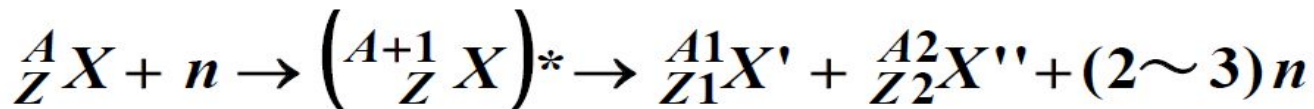
Нысана ядроны сәулелендірген нейтрондардың энергиясы жоғары болған кезде көптеген ядролар протон және α - бөлшегін шығарады.

Егер шығарған бөлшек α - бөлшегі болса, онда реакция өрнегін төмендегідей жазуға болады.



Ядролық бөліну реакциясы (fission)

^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U сияқты ауыр ядролар нейтронды жұтып алған соң 2 ядроға бөлінеді де, 2-3 нейтронды бөліп шығарады. Мұндай реакцияны ядроның бөліну реакциясы деп атайды.



Табиғи уранның 99,3% құрайтын ^{238}U ядросын 1МэВ энергиядан жоғары нейтронмен сәулелендіргенде ғана ядролық бөліну реакциясы пайда болады.

Табиғи уранның 0,7% ғана құрайтын ^{235}U ядросын төмен энергиялы (баяу) нейтронмен сәулелендіргенде ядролық бөліну реакциясы пайда болады.

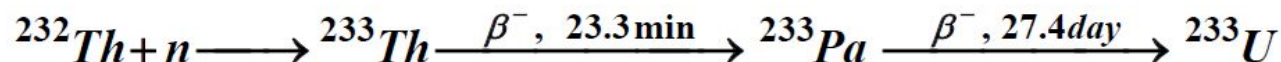
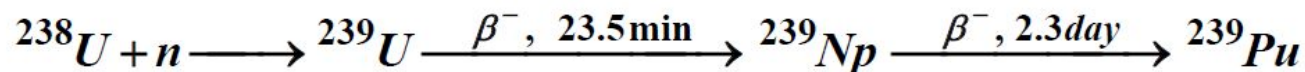
Ядролық бөлінетін заттардың сындық энергиясы

Сындық (критикалық) энергия: атом ядросын қоздыру үшін ядроға берілетін ең төменгі энергия мөлшері реакцияның критикалық энергиясы деп аталады.

ядро	Сындық энергия	Нейтронның меншікті байланыс энергиясы
$\text{Th}^{232} \rightarrow \text{Th}^{233}$	6.5 MeV	5.1 MeV
$\text{U}^{233} \rightarrow \text{U}^{234}$	4.6 MeV	6.6 MeV
$\text{U}^{235} \rightarrow \text{U}^{236}$	5.3 MeV	6.4 MeV
$\text{U}^{238} \rightarrow \text{U}^{239}$	5.5 MeV	4.9 MeV
$\text{Pu}^{239} \rightarrow \text{Pu}^{240}$	4.0 MeV	6.4 MeV

Ядролық бөлінетін ядролар және аналық ядролар

Төмен энергиялы (жылу) нейтрондармен ядролық бөліну реакциясын пайда қылатын табиғи ядро тек ^{235}U . Алайда ^{238}U және ^{232}Th ядролары нейтронды жұтқан соң мынадай процесс бойынша төмен энергиялы нейтрондармен ядролық бөлінетін ядролар ^{239}Pu , ^{233}U пайда болады. Сондықтан мұндай ядроларды аналық ядролар деп атайды.



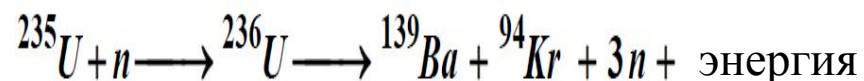
Ядролық бөліну реакциясы

^{235}U ядросы нейтронды қармаған соң құрама ядро ^{236}U пайда болады. Баяу нейтронды қармаған құрама ядро ^{236}U -ның 17% ^{236}U күйінде қалады да, қалған 83% ядролық бөлінеді.

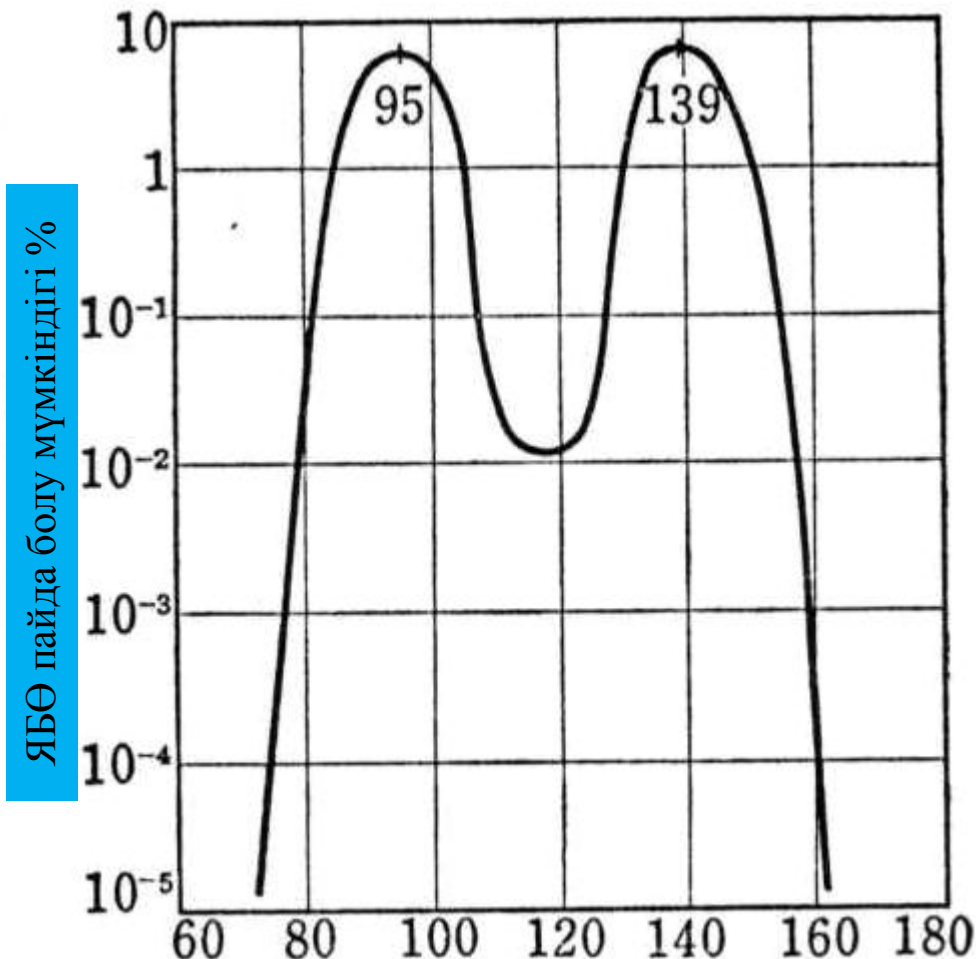
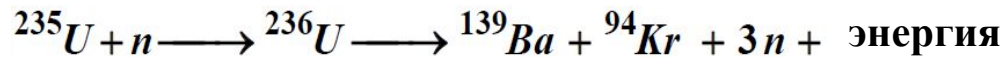
Баяу (жылу) нейтрон деп температурасы қоршаған ортаның температурасымен бірдей нейтронды айтады.

293К (20 °С) температурадағы “баяу” нейтронның энергиясы 0,025 эВ, бұл кездегі жылдамдығы 2200 м/с (дыбыс жылдамдығынан 7 есе жоғары). Энергиясы 1МэВ болатын нейтронның жылдамдығы 14000 км/с болады.

Ядролық бөліну кезінде екі түрлі жаңа ядро пайда болады, мысалы



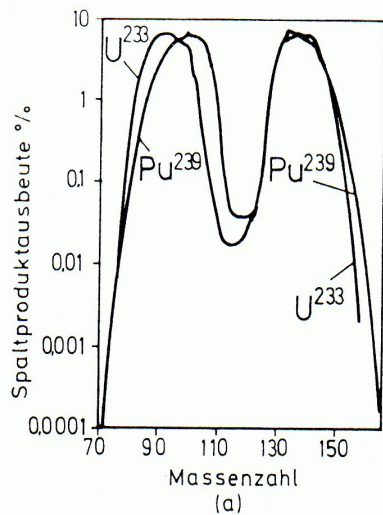
Ядролық бөліну өнімдерінің үлестірілуі



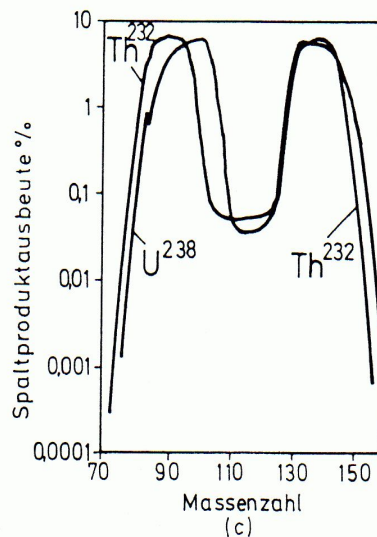
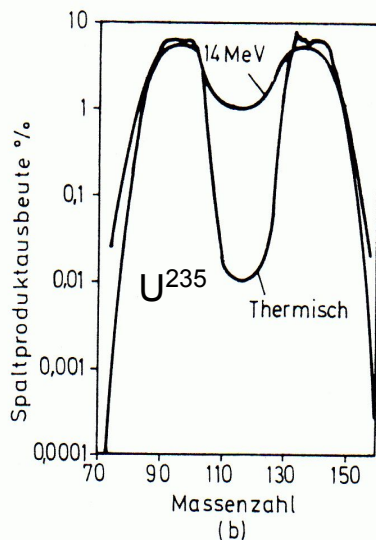
^{235}U жылу нейтрондармен бөліну кезінде пайда болатын бөліну өнімдерінің екі жарықшақтың массалары симметриялы болмайды.

Жаңадан пайда болған екі жарықшақ (ядро) кулон күшінің әсерінен екі жаққа қозғалып, басқа атомдармен соқтығысу арқылы соңында тоқтайды. Кинетикалық энергиясы жылу энергияға айналады.

Бөліну өнімдері

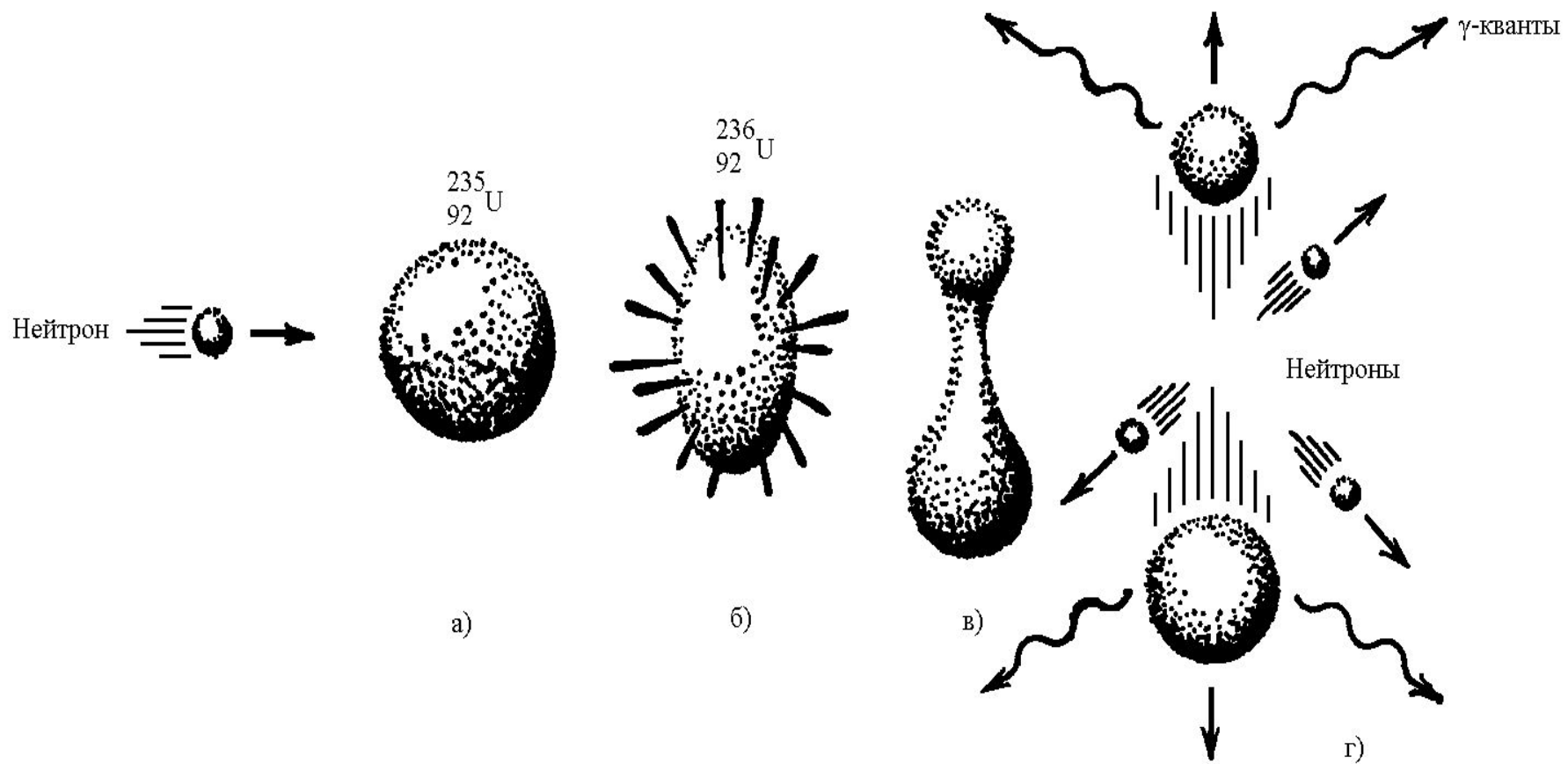


- a) thermal fission of ^{233}U and ^{239}Pu
- b) thermal und 14 MeV-fission of ^{235}U
- c) fission by prompt neutrons of ^{232}Th and ^{238}U

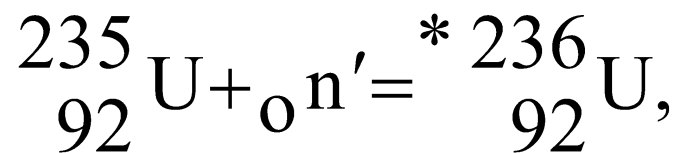


^{235}U бөліну өнімдері

Fission product		nf [%]
^{131}I	(8.05 d)	3.1
^{132}Te	(77 h)	4.7
^{133}Sb	(4.1 min)	4.0
^{133}Te	(63 min)	4.9
^{133}I	(21 h)	6.9
^{133}Xe	(5.27 d)	6.6
^{134}Te	(44 min)	6.9
^{135}I	(6.7 h)	6.1
^{137}Cs	(29 a)	6.15
^{140}Ba	(12.8 d)	6.44
^{143}Ce	(33 h)	5.7
^{144}Ce	(285 d)	6.0



$${}_Z\text{M}^{A-1} + {}_0\text{n}' = {}_Z\text{M}^{*A}$$



Ядро	${}_{92}^{236}\text{U}$	${}_{92}^{239}\text{U}$
$E_{\text{б.а}}, \text{ МэВ}$	5,75	5,85
$E_{\text{м.б}}, \text{ МэВ}$	6,4	4,76

Уран-235 жылулық нейтронды қармаған жағдайда белгігі ықтималдықпен бөлінуі мүмкін. Уран-238 жылулық нейтронда қармағанда түзілетін уран-239 ядросының қоздыру энергиясы сындық энергиядан аз болады, ал уран-238 ядросы жылулық нейтронда қармағанда бөлінбейді. Нейтронды қармағанда бөліу реакциясы пайда болу үшін нейтрондық кинетикалық энергиясы 1 МэВ-тен кем болмауы керек. Мұндай жағдайда қоздыру энергияы байланыс энергиясы және кинетикалық энергиясымен анықталады.

Ядролық бөліну өнімдері және ыдырау жылуы

Тыныш тұрған күйдегі бөліну жарықшағын (жаңадан пайда болған ядроларды) бөліну өнімдері деп атайды. Бөліну өнімдерінің барлығында нейтрон артық болғандықтан тұрақсыз болып, β - ыдырау арқылы тұрақты ядроға ауысады. Бұл кезде β - сәулесінің жылу энергиясы жалпы жылу энергияның 3,5% иелейді, онымен бірге ілесе шығатын γ - сәулесінің энергиясы 3,5% болады. Сондықтан ыдырау жылуы 7% шамасында болады

Бұл энергиялар әртүрлі ядролардың жартылай ыдырау периоды бойынша ұзақ уақыт қоя берілетіндіктен, реактор тоқтағаннан кейінде жалғасты жылу бөліп шығарады. Сол себепті реактор тоқтағаннан кейінде ұзақ уақытқа дейін реактордың салқындату жүйесі жұмыс істеп тұрады.

Осындай ыдырау кезінде қоя беретін жылу энергияларды ыдырау жылуы (decay heat) деп атайды.

Ыдырау жылуын есептеу әдісі

Ыдырау кезінде қоя беретін жылу энергиясы (decay heat)
Way-Wigner өрнегімен есептеледі.

1 рет ядролық бөлінуден кейін t уақыттан соң β - сәулесі және γ - сәулесі арқылы қоя берілетін энергияның мөлшерін E_d деп алсақ, онда

$$E_d = 2,66 \cdot t^{-1,2} \text{ (МэВ/с)}$$

Бөл өрнек ядролық реакция тоқтаған соң $10 \text{ с} \sim 10^6 \text{ с}$ дейін сәйкес келеді.
Бұл уақыт шамамен 278 сағат немесе 12 тәулікке тура келеді.

Егер реактормен бірге салқындату жүйесі де тоқтайтын болса, онда Фукусима АЭС сияқты реакторда апат болады.

Өздігінен ядролық бөліну реакциясы (радиоактивті ыдырау)

Атом ядросының өзгерісі салдарынан өздігінен сәуле шығару құбылысы

Ураннан ауыр ядроларды нейтронмен сәулелендірмесе де өздігінен ядролық бөліну реакциясын жасай алады.

1 грамм калифорний $^{251}\text{Cf}_{98}$ әр секунд сайын $6,2 \cdot 10^{11}$ ядросы бөлініп, $2,3 \cdot 10^{12}$ дана нейтрон бөліп шығарады. Сондықтан нейтрон көзі ретінде жиі қолданылады.

^{235}U -тің бір ядросы жылу нейтронмен бөлінген кезде орташа есеппен 2,4 нейтрон бөлініп шығады. Ал ^{239}Pu -дың бір ядросы жылу нейтронмен бөлінсе, онда орташа есеппен 2,8 нейтрон бөлініп шығады.

Ядролық бөліну кезінде пайда болатын нейтрондардың энергиясы жылулық нейтрондармен салыстырғанда өте жоғары, орташа есеппен 2МэВ шамасында болады. Реакцияны жалғастыру үшін оларды баяулатқыш арқылы 0,025 эВ жылулық нейтрон энергиясына дейін төмендету керек. ^{235}U ядролық бөліну кезінде пайда болатын нейтрондардың энергиясы төмендегі екі өрнек арқылы есептеледі.

$$F(E) dE = 0.453 \cdot e^{-1.036 \cdot E} \cdot \sinh(\sqrt{2.29 E}) dE$$

$$F(E) = 0.770 \cdot \sqrt{E} \cdot \exp(-0.766 \cdot E)$$

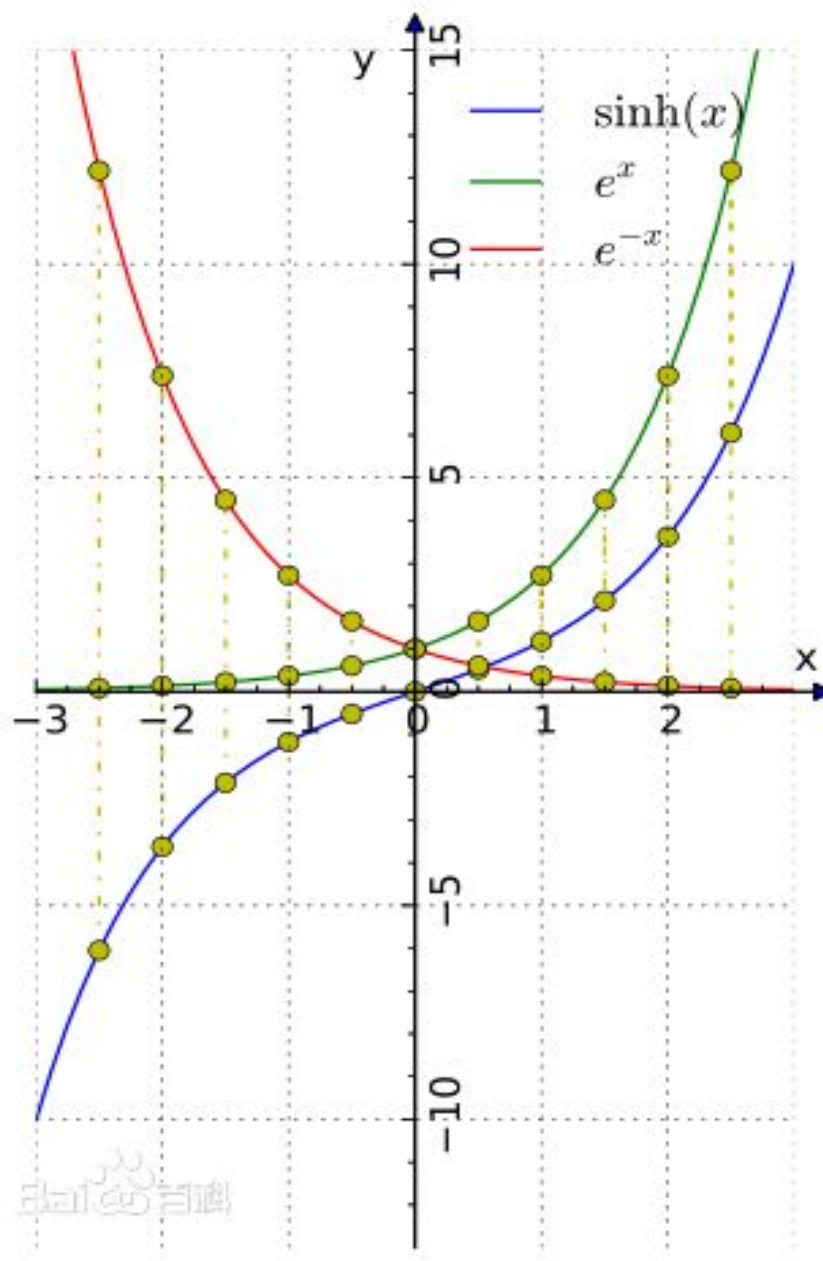
Мұнда, $F(E)dE$ энергиясы $E \sim E+dE$ интервал арасында пайда болатын лездік нейтрондардың салыстырмалы мөлшерін көрсетеді.

Үш түрлі функцияның Графигі

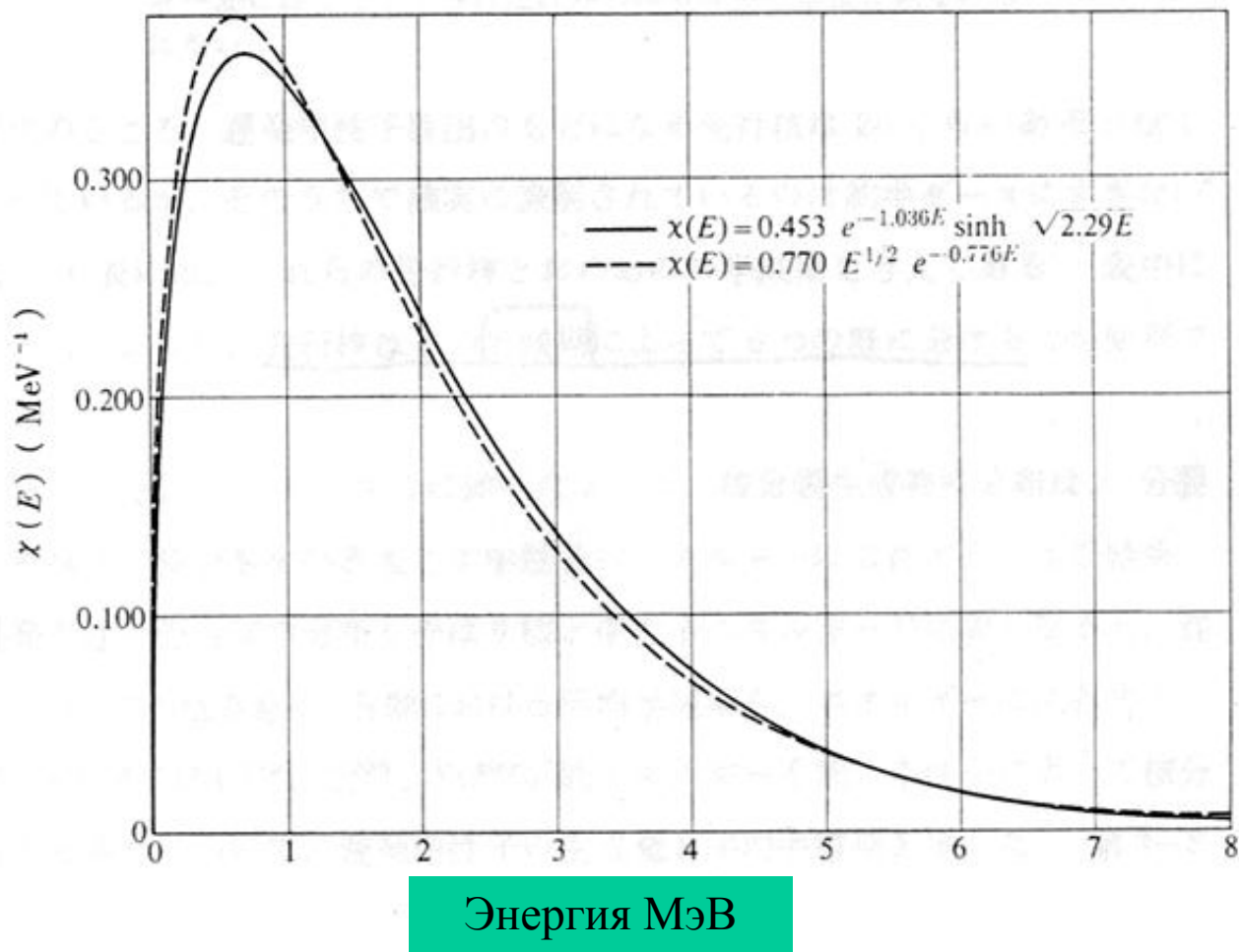
$\sinh(x)$

e^x

e^{-x}



^{235}U бөліну кезінде пайда болатын лездік нейтрондардың спектрі (пайда болу ықтималдығы)



Лездік және кешіккен нейтрондар

Ядролық реакция кезінде пайда болатын нейтрондар реакциямен бір уақытта шығады (10^{-14} с ішінде). Бұларды лездік нейтрондар деп атаймыз.

Алайда, сандық мөлшері 1% толмайтын нейтрондар біраз кешігіп (10 неше секунд ішінде) шығады. Бұлар кешіккен нейтрондар деп аталады.

Кешігіп шығатын нейтрондардың мөлшері аз ғана болғанымен реакторды басқаруды өте маңызды рөл ойнайды.

1г уран бөліну кезінде пайда болатын энергия

^{235}U -тің бір ядросы реактор ішінде бір рет бөлінген кезде шамамен 200 МэВ энергия бөліп шығарады. 1г уранда $2,56 \cdot 10^{21}$ дана ядро бар десек, бұлардың бәрі бөлінген кезде шығаратын жылу энергия мөлшері төмендегідей болады.

$$E = 200 \text{ МэВ} \cdot 2,56 \cdot 10^{21} = 5,12 \cdot 10^{23} \text{ МэВ} = 5,12 \cdot 10^{29} \text{ эВ}$$

1эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. бойынша жылу энергиясы $E = 8,20 \cdot 10^{10}$ Дж болады.

Бұл шамамен 2,5 тонна көмір толық жанғанда шығаратын энергияға тең.

Бұл әр секунд сайын шығаратын жылу энергиясы болғандықтан қуатын есептесек $P = E/t = 8,20 \cdot 10^{10}$ Вт болады.

Бұл қуатты сағатпен есептесек, $P = E/t = 8,20 \cdot 10^{10} / 3600 = 2,28 \cdot 10^7$ Вт/сағат

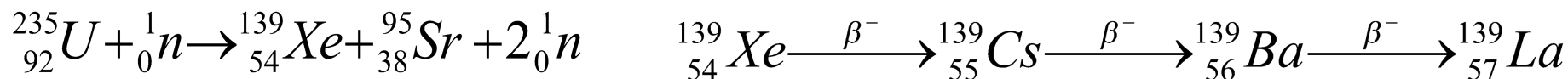
Күн бойынша есептелетін қуат $P = 2,28 \cdot 10^7 / 24 \approx 1 \text{ МВт} / \text{күн}$

Реактор қуаты бойынша бұл энергия $\doteq 2,28 \times 10^7 \text{ (Wh)} \doteq 1 \text{ (MWd)}$ болады.

Реактордағы 1 грамм отынның күндік қуаты шамамен 1 МВт.

Ядроның бөліну реакциясы

^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U сияқты ауыр ядролар баяу нейтрондарды жұту арқылы 2 ядроға бөлінеді, 2-3 нейтронды бөліп шығарады.



$$A=236, E_B=7.6\text{MeV}; A=118, E_B=8.5\text{MeV}$$

$$^{235}\text{U} \text{ 1 ядро: } E \approx 2 \times 118 \times 8.5\text{MeV} - 236 \times 7.6\text{MeV} = 210\text{MeV}$$

$$1\text{г } ^{235}\text{U} \quad E_T \approx \frac{1}{235} \times 6.022 \times 10^{23} \times 210\text{MeV} = 5.38 \times 10^{23}\text{MeV}$$

$$: \\ = 8.61 \times 10^{10}\text{J} \approx 2.06 \times 10^{10}\text{кал.}$$

Бұл 2,5 тонна көмір толық жанғандағы энергияға тең

Ядролық реакцияның қимасы

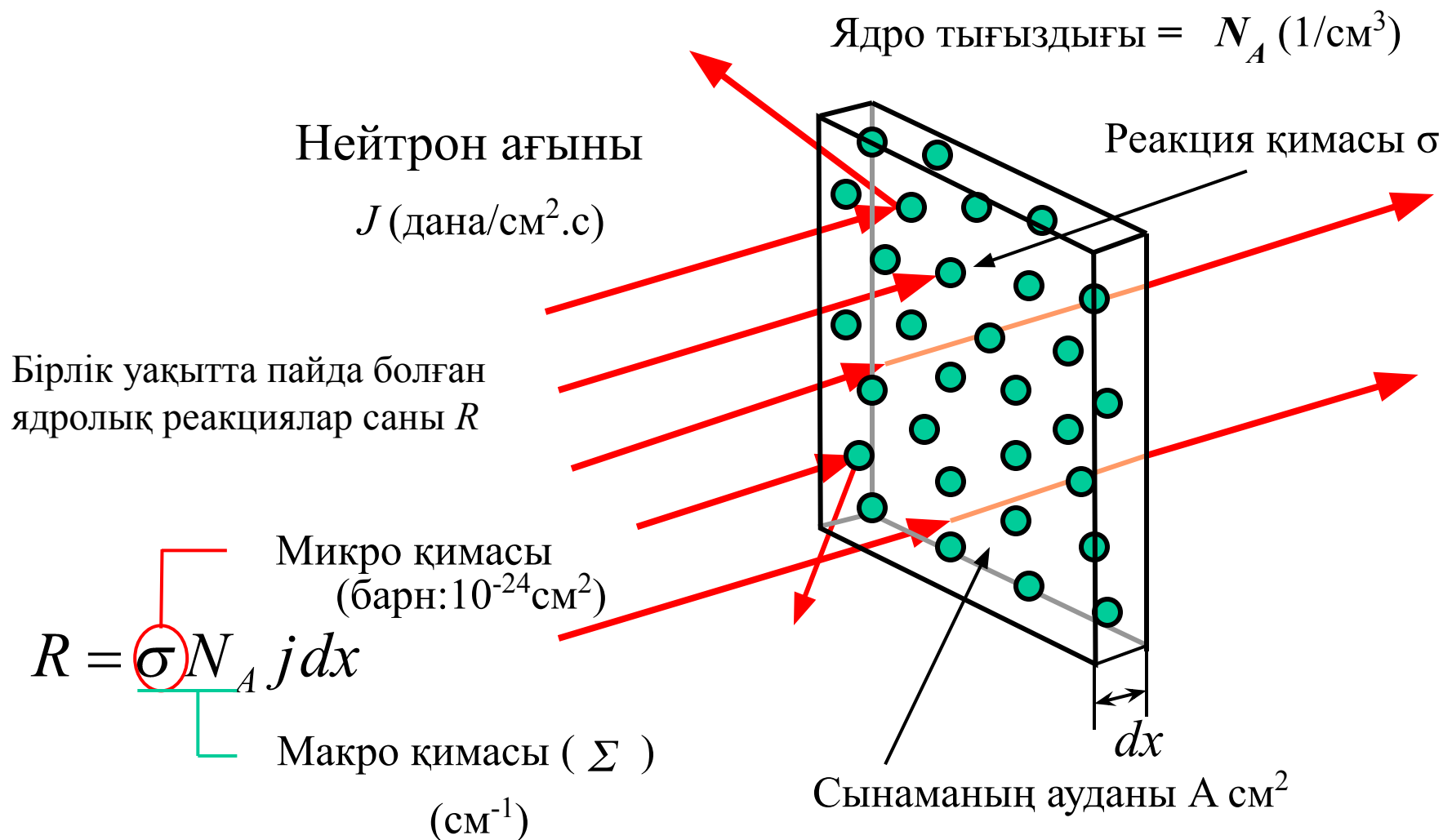
Нейтрон мен ядро реакциясының ықтималдығы

Реактор ішінде пайда болатын құбылыстарды сандық түрде сипаттауға тура келеді. Сондықтан нейтронмен ядроның ядролық реакция тудыру ықтималдығын сипаттайтын физикалық шаманы қарастыру керек.

Бұл шама ядролық реакцияның **қимасы** (cross section) деп аталады. Көлденең қиманың өлшем бірлігі ауданның өлшем бірлігімен ұқсас болғандықтан өлшем бірлігіне **барн** алынған ($1 \text{ барн} = 1 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$).

Нейтрон мен ядроға соғылу кезінде нейтрон жұтылатын болса, бұл реакцияны нейтрон **қармау реакциясы** деп атайды. Реакцияның болу ықтималдығын нейтрон **қармау қимасы** (capture cross section) деп атайды.

Ядроның реакция қимасы



Бірлік уақытта, бірлік көлемде болатын реакция мөлшері R (дана/см³/с)

$R = R_0 / dx A$, мұндағы R_0 реакцияның жалпы саны болып, ол j нейтрон ағыны мен нысанадағы $N_A (= N_0 dx A)$ жалпы ядро санына тура пропорционал болады. Арасындағы пропорционалдық коэффициент σ реакцияның көлденең қимасы деп аталады.

$$R_0 = \sigma \cdot j \cdot N_A \quad \Leftrightarrow \quad R \cdot dx A = \sigma \cdot j \cdot N_0 dx A$$

Мұндағы j бірлік уақытта, бірлік аудан арқылы өтетін нейтрондар ағыны.

$$\sigma = \frac{(R / dx A) / N_A}{j} = \frac{\text{бірлік уақытта, бірлік көлемдегі нысана ядроның реакция мөлшері}}{\text{бірлік уақытта, бірлік ауданға түскен нейтрондар саны}}$$

Бірлік уақытта бірлік ауданға түскен бір дана нейтронның бірлік уақытта, бірлік көлемдегі нысана ядроның біреуімен реакция тудыру ықтималдығын сипаттайтын физикалық шама реакцияның **қимасы** деп аталады.

Нейтрондардың тудыратын ядролық реакция ықтималдығының мөлшерін реакцияның қимасы деп атаймыз.

Реакция қимасы = реакция ықтималдығы

Микроскопиялық қиманың түрлері

(microscopic cross section)

σ_s : шашырау реакциясының көлденең қимасы σ_s .

σ_a : жұту реакциясының көлденең қимасы σ_a .

σ_f : бөліну реакциясының көлденең қимасы σ_f .

σ_c : қармау реакциясының көлденең қимасы. ($\sigma_c = \sigma_\gamma$)

σ_t : толық реакциясының көлденең қимасы. $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$

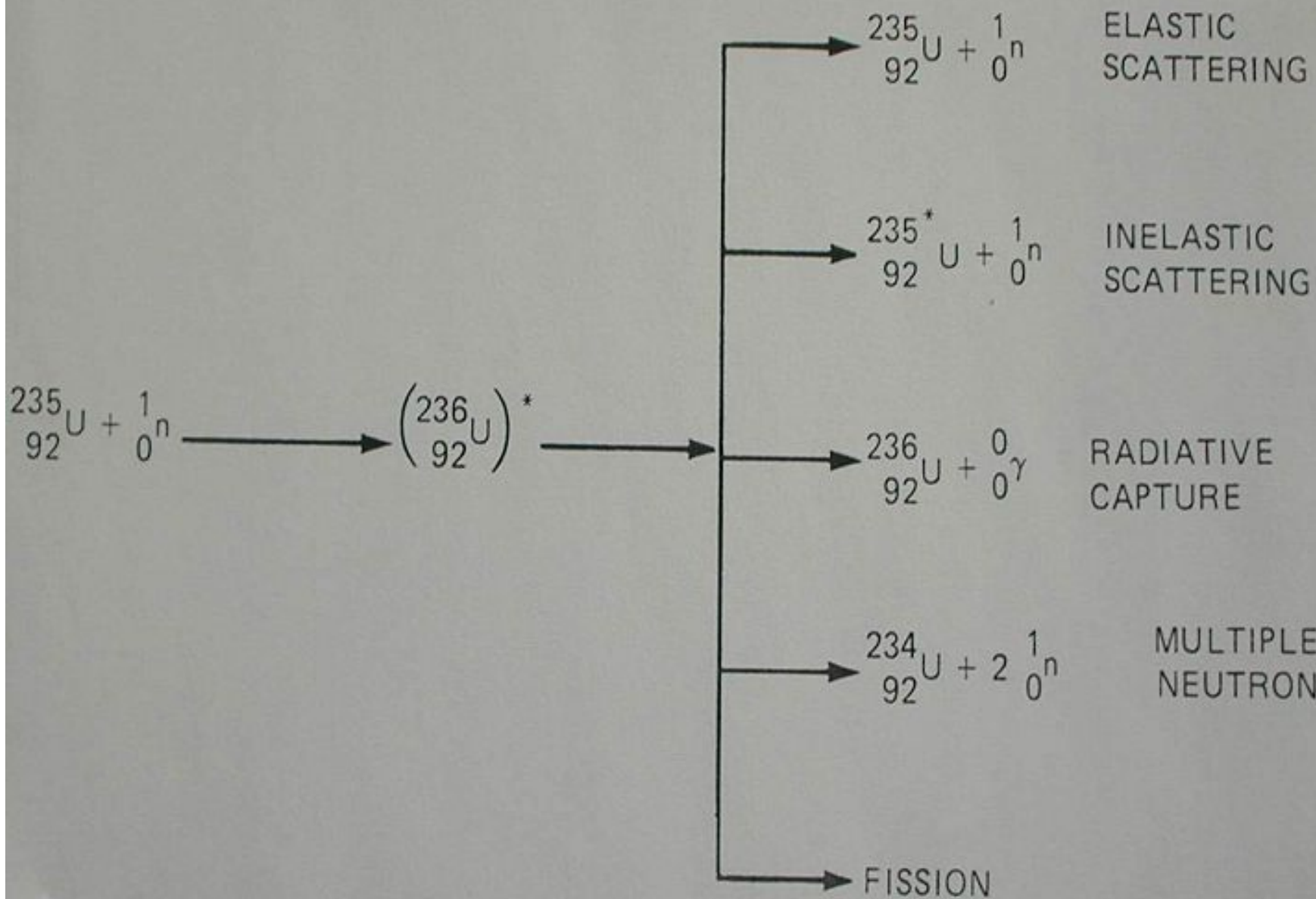
σ_a : жұту реакциясының көлденең қимасы. $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c$

σ_t : толық реакциясының көлденең қимасы. $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_f + \sigma_c$

Микро көлденең қиманың өлшем бірлігі $10^{-24} \text{см}^2 = 1 \text{барн}$. Бұл шама ядроның өлшемі (диаметрі) 10^{-12}см болудан келген.

Реакцияның макро көлденең қимасы $\Sigma = \sigma N_A$ өлшем бірлігі см^{-1} .

Макро көлденең қима барлық ядролардың барлық нейтрондар мен реакция жасау ықтималдығын көрсетеді.



Нейтрон ағыны

$$\phi(v) = vn(v)$$

$n(v)$: нейтрон тығыздығы

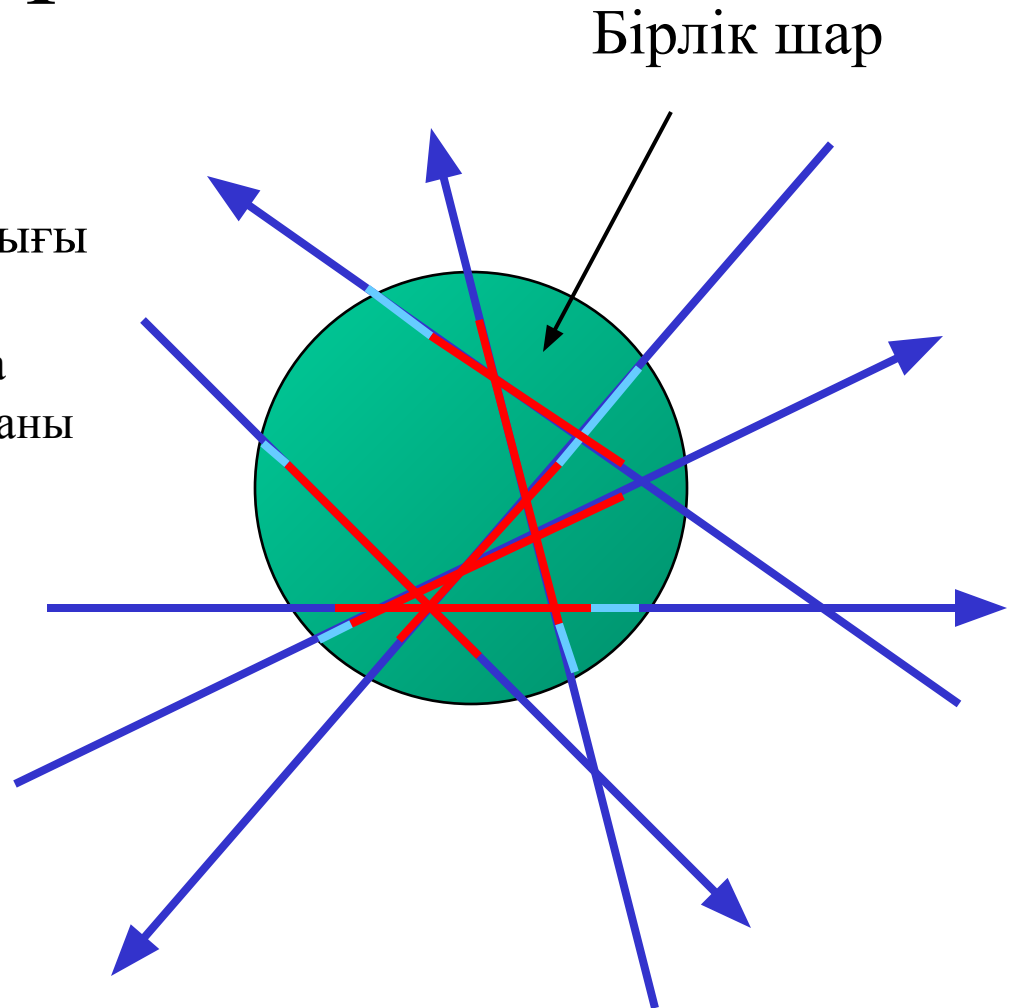
v : бір реткі бөліну кезінде пайда болған нейтрондардың орташа саны

Реакция мөлшері

$$R = \int \Sigma(v)\phi(v)dv$$

$$= \int \Sigma(E)\phi(E)dE$$

$\phi(E)$: нейтрон спектрі



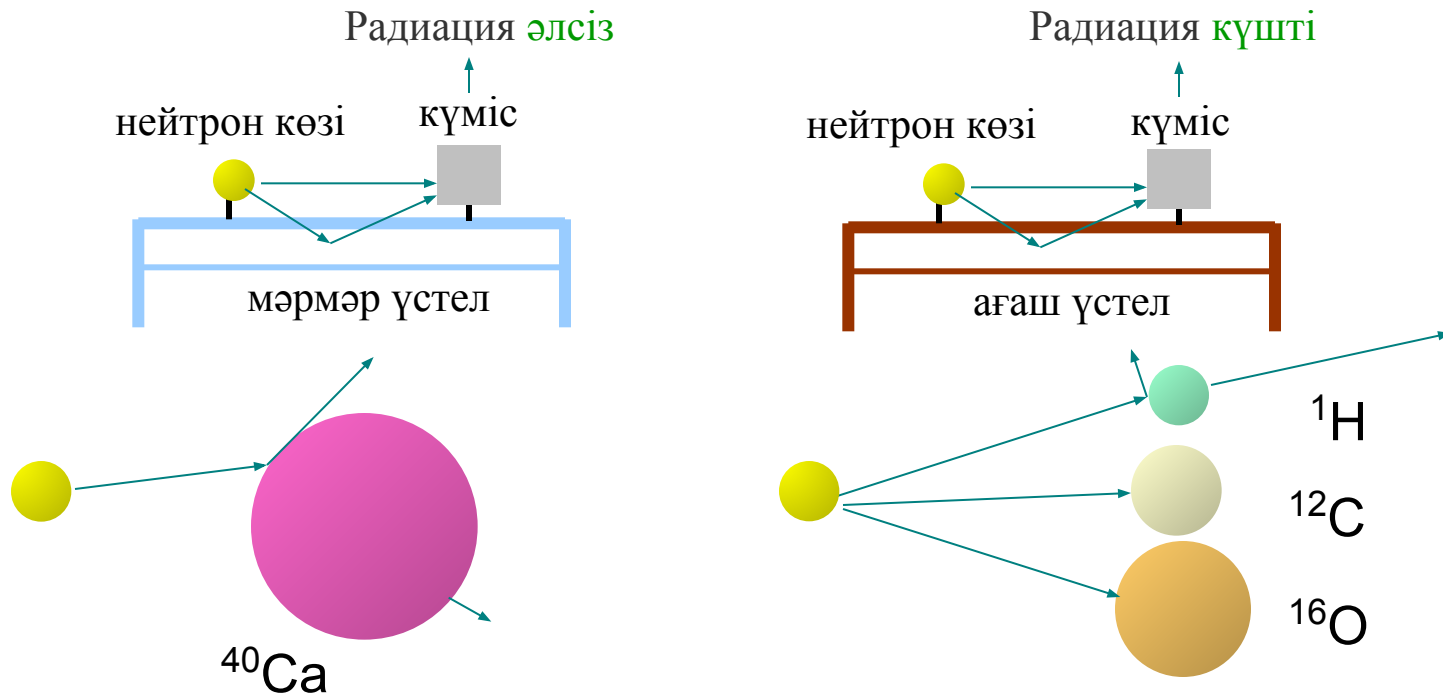
Нейтрондар ағынының физикалық мәні

Нейтронның тығыздығы (бірлік көлемдегі нейтрондар саны) n [/см³] мен нейтрондар жылдамдығының v [см/с] көбейтіндісі nv [/см²/с] нейтрондар ағыны $\phi = nv$ деп аталады.

Өлшем бірлігінің анықтамасы бойынша нейтрондар ағыны бірлік уақытта бірлік ауданнан өтетін нейтрондардың санын білдіреді. Алайда, нейтрондар ағынының шынайы физикалық мағынасы бірлік көлемдегі нейтрондардың бірлік уақытта жүріп өтетін жалпы жолын сипаттайды.

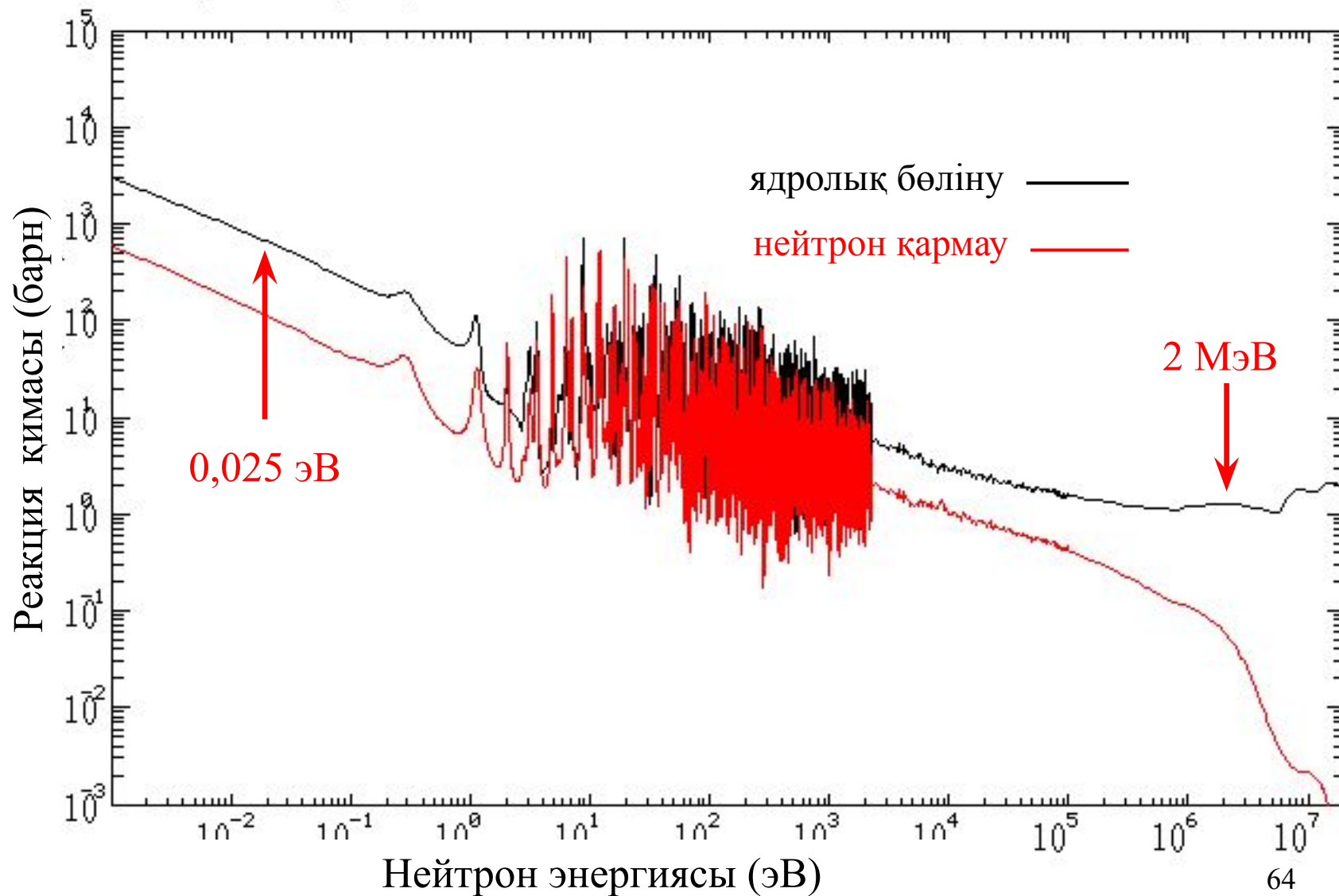
Нейтронның баяулауы

1934 жыл қазанда Рим университетінің зерттеу тобындағы Amadi, Pontecorvo, **Fermi**, Segre қатарлы ғалымдар нейтронның қармау тәжірибесін жасаған.



- нейтронды баяулатса нысана ядроға қармалуы оңай болады
- нейтронды баяулату үшін жеңіл ядромен соғыстыру керек

^{235}U реакция қимасы



Нейтрон энергиясының ^{235}U реакция қимасына болған әсері

Нейтрон энергиясы 1 эВ-тан төмен аумақта бөліну реакциясының қимасы нейтрон энергиясының квадрат түбіріне кері пропорционал түрде азаяды.

1 эВ ~ 500 эВ дейінгі аумақта реакция қимасында үлкен ауытқулар қайталанады. Мұны резонанс деп атайды. Нейтрон энергиясы құрама ядроның қозу деңгейінің энергиясымен бірдей болғандығы себепті бөліну реакциялар оңай жүріледі.

Нейтрон энергиясы артқан сайын резонанс қимасы шыңының биіктігі біртіндеп азайып, энергияның ені де кеңейе түседі. 1 кэВ-тан жоғары аумақты резонанс қимасы бір-бірімен қабаттасу нәтижесінде реакция қимасының өзгерісі біртіндеп азая береді.

Нейтрон энергиясы 1 МэВ-тан асқан кезде ядролық бөліну қимасы көбейе бастайды.

Нейтронның жылдамдығы (энергиясы)

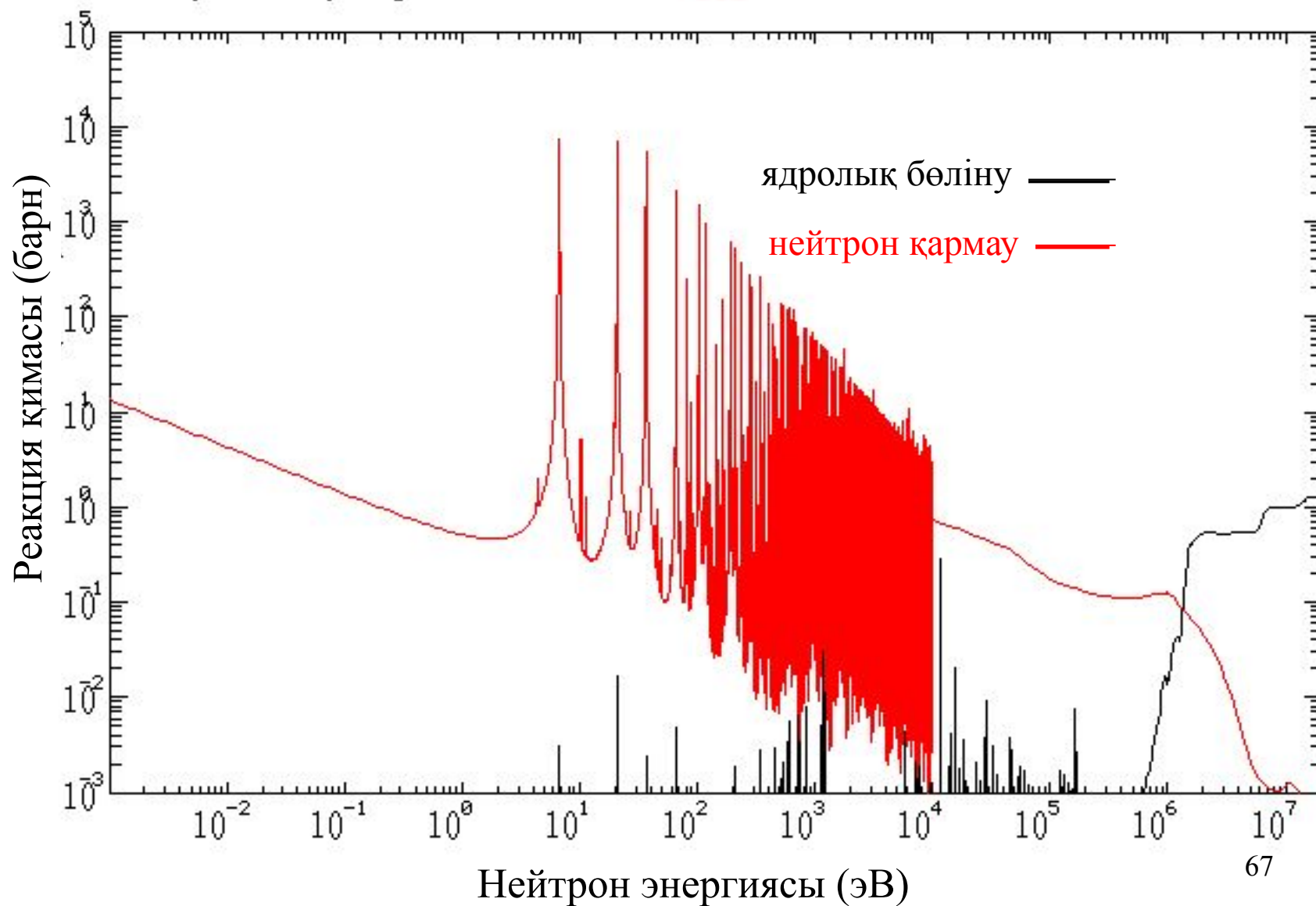
Ядролық бөліну кезінде пайда болатын нейтрондардың барлығын **шапшаң нейтрондар** деп атайды. Олардың орташа энергиясы 2МэВ, ал жылдамдығы 20000 км/с шамасында болады.

Баяу (жылулық) нейтрондар (Thermal Neutron) деп жылдамдығы 2 км/с шамасында, ал энергиясы 0,025 эВ шамасындағы нейтрондарды айтады.

Қалыпты температурада (қоршаған ортаның 293К температурасында) атомдардың қозғалыс жылдамдығы әдетте 2 км/с шамасында болады.

Қоршаған ортаның жылу температурасына сәйкес келетін, энергиясы 0,025 эВ шамасындағы нейтрондарды жылулық нейтрондар немесе баяу нейтрондар деп атайды.

^{238}U реакция қимасы



Табиғатта бар ядролық бөлінетін элемент

ядролық отын □ уран = U

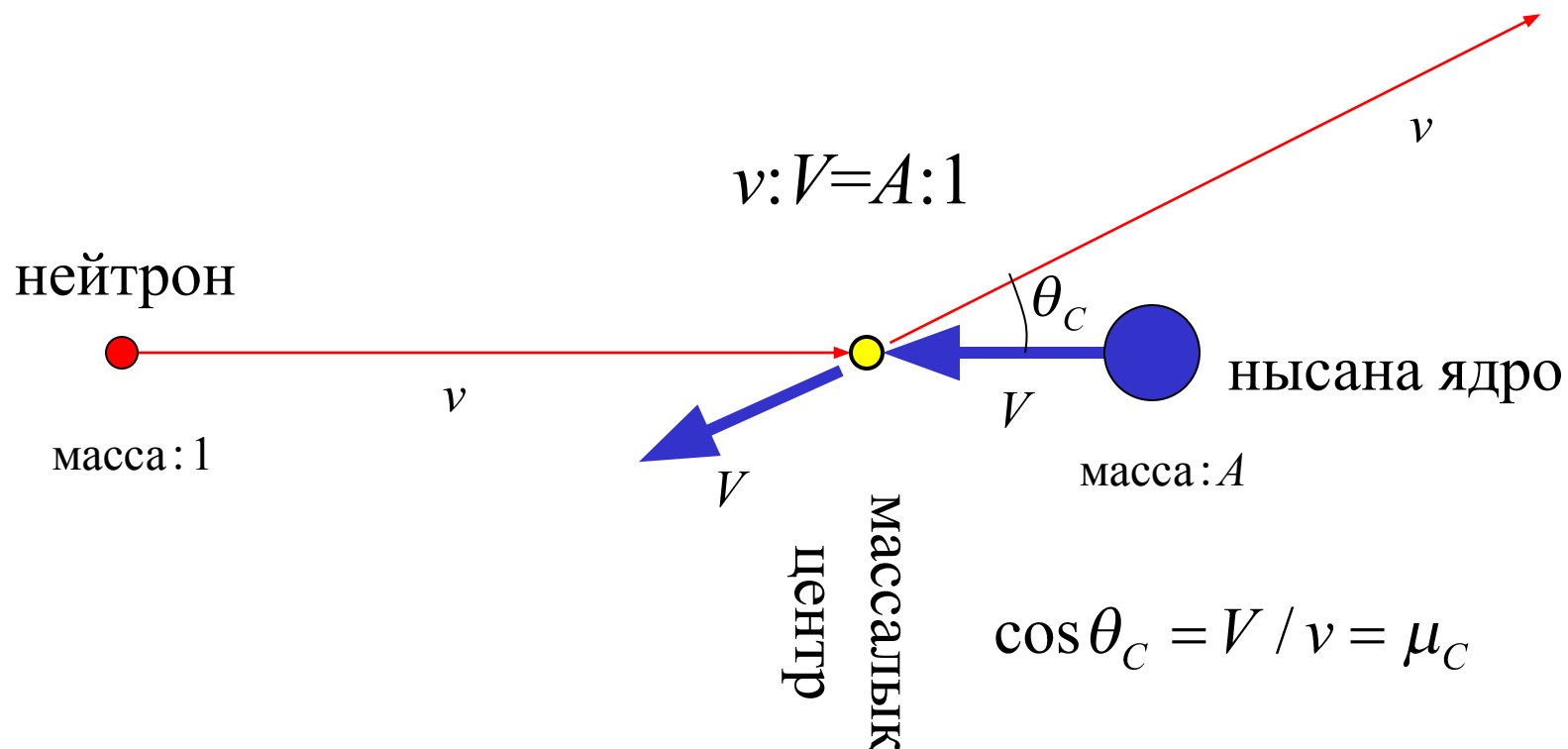
уран (табиғатта бар ең ауыр, ең үлкен элемент)

Атом рет нөмірі 92, негізгі изотоп саны 2

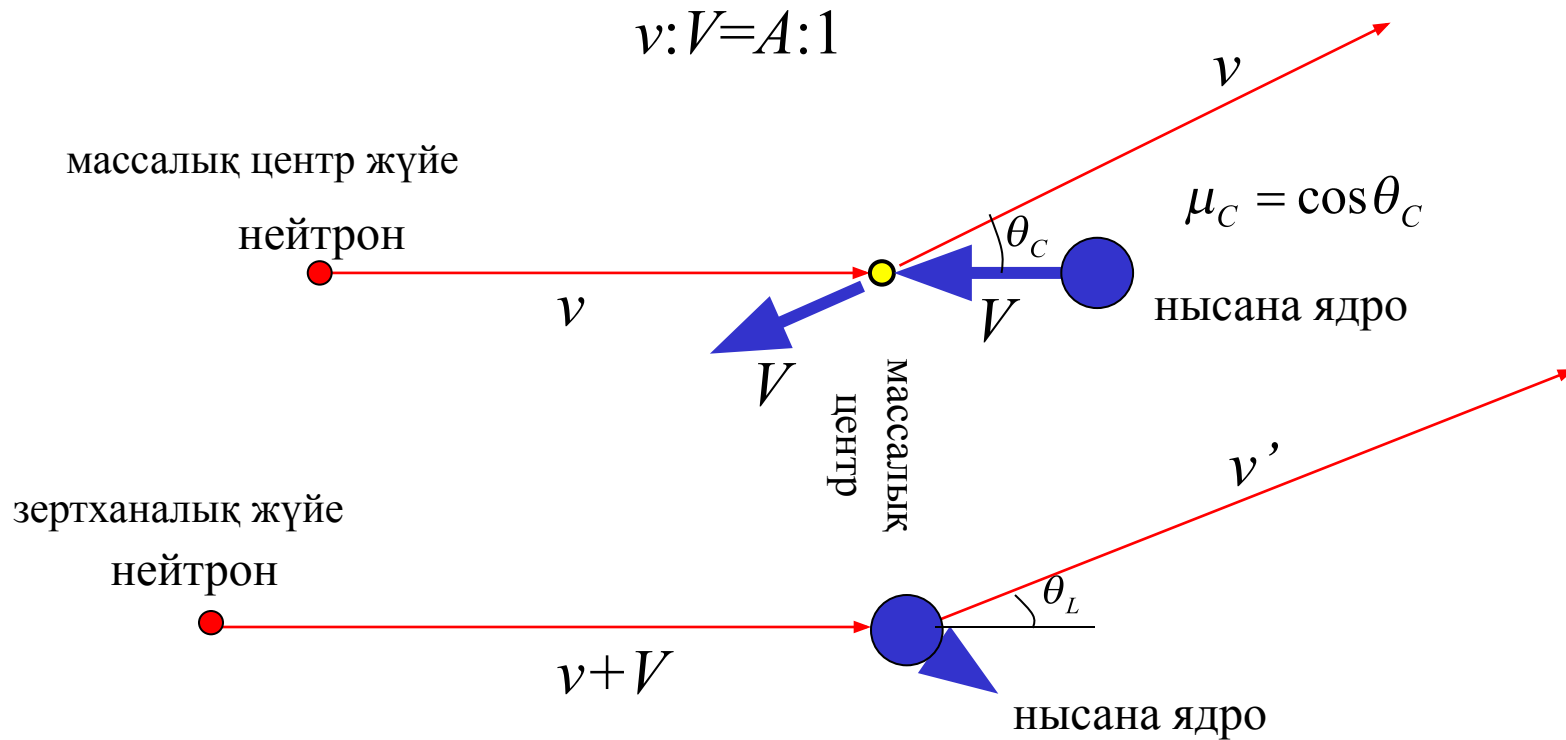
изотоп	Уран 235	Уран 238
масса саны	235	238
нейтрон саны	143	146
	↓	↓
	U-235	U-238
табиғи үлесі	0.7%	99.3%
	↓	↓
	жанады (оңай бөлінеді)	жанбайды (оңай бөлінбейді)



Нейтронның серпімді шашырауы



Нейтронның серпімді шашырауы



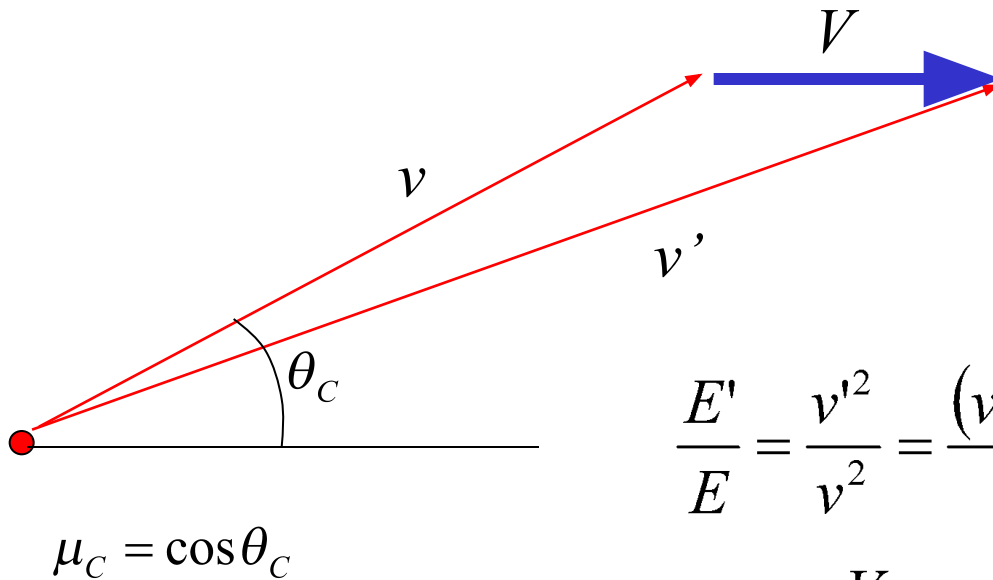
$$\frac{E'}{E} = \frac{1}{2} [(1 + \alpha) + (1 - \alpha) \mu_C]$$

$$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$$

Нейтронның серпімді шашырауы

$$\frac{V}{v} = \frac{1}{A}$$

$$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$$



$$\frac{E'}{E} = \frac{v'^2}{v^2} = \frac{(v \cos \theta_C + V)^2 + (v \sin \theta_C)^2}{v^2}$$

$$= 1 + 2 \frac{V}{v} \cos \theta_C + \left(\frac{V}{v} \right)^2$$

$$= \frac{1}{2} [(1 + \alpha) + (1 - \alpha) \mu_C]$$

Массалық центр жүйесіндегі тең бағытты серпімді шашырау

$$P(\mu_c) = \frac{1}{2}$$

$$P(E \rightarrow E') = P(\mu_c) \frac{d\mu_c}{dE'} = \frac{1}{(1-\alpha)E}$$

$$\xi = \int_{-1}^1 \ln \frac{E'}{E} P(\mu_c) d\mu_c = 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \alpha$$

$$\bar{\mu}_L = \int_{-1}^1 \mu_L P(\mu_c) d\mu_c = \frac{2}{3A}$$

Нысана ядродан серпімді шашырайтын нейтронның баяулау қасиеті

материал	A	α	$\bar{\mu}_L$	ξ
сутегі	1	0	0.667	1.000
дейтерий	2	0.111	0.333	0.725
гелий	4	0.225	0.168	0.425
бериллий	9	0.640	0.074	0.206
көміртегі	12	0.716	0.056	0.158
уран	238	0.983	0	0.0084

$$\alpha = \left(\frac{A-1}{A+1} \right)^2$$

$$\bar{\mu}_L = \frac{2}{3A}$$

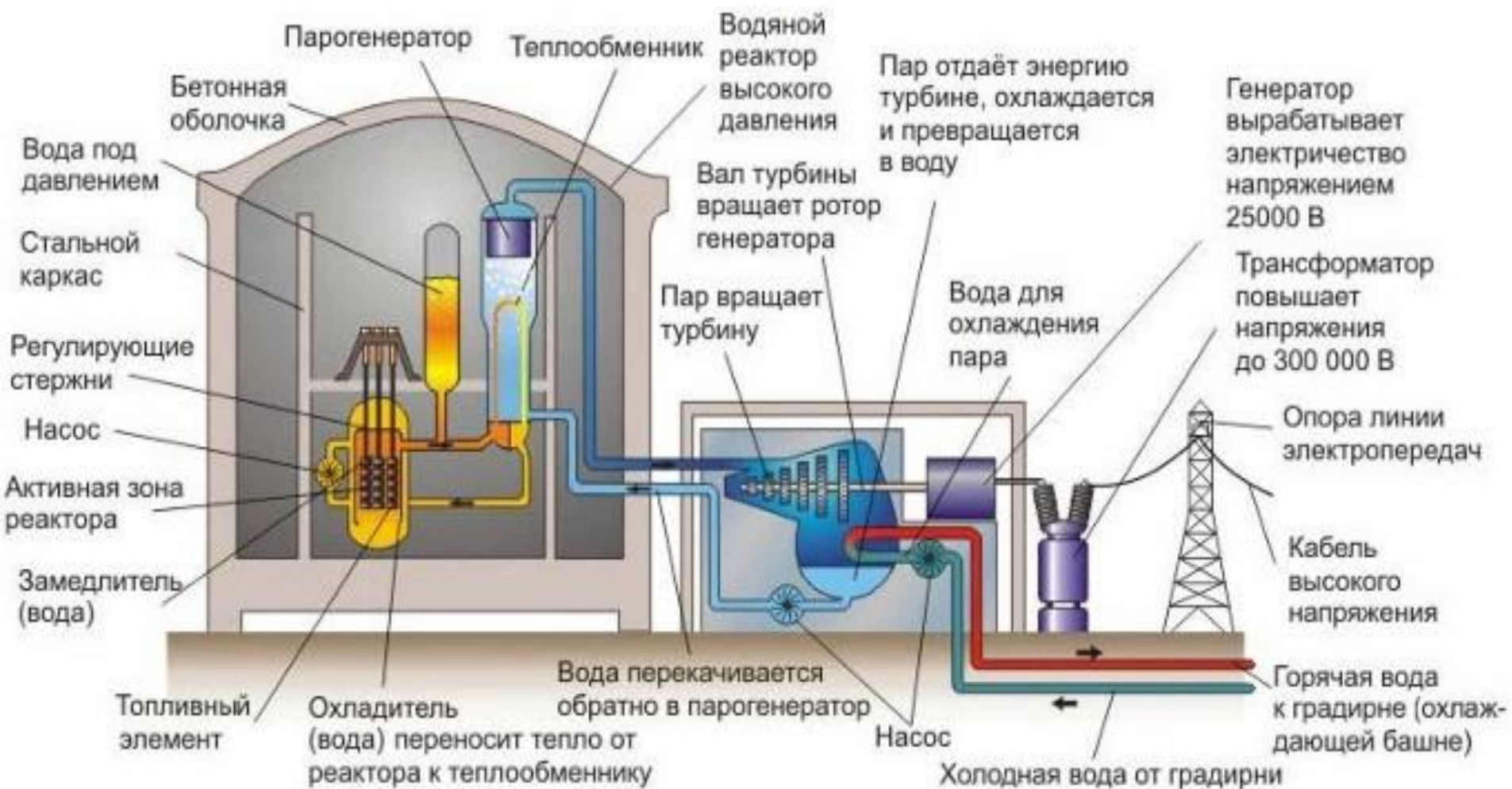
$$\xi = 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \alpha$$

Реактор

Ядролық реактор – ауыр ядролар бөлінуінің **тізбекті реакцияларын** басқаратын және жалғастыратын құрылғы.

Реактор жұмысы нәтижесінде ядролық энергия босап, сыртқы тұтынушылар пайдаланатын жылу энергиясына айналады. Ядролық реактор атом электр стансасының (АЭС) ең негізгі бөлігі. Атом электр стансасы – ең әуелі жылу энергиясын механикалық энергияға, одан соң механикалық энергияны электр энергиясына айналдыратын кешен.

Ядролық отын → ядролық бөліну → энергия көзі



1. Ядролық отын: $^{235}_{92}\text{U}$ және $^{239}_{94}\text{Pu}$
2. Жылу тасымалдағыштар:
су, сұйық натрий; гелий газы
3. Нейтронды баяулатқыштар:
ауыр су; графит
4. Реакция жылдамдығын реттеуші немесе нейтронды жұтқыштар:
бор; кадмий; стержень
5. Нейтрондарды шағылдырғыш:
бериллий

Ядролық реактордың түрлері

- пайдалануы бойынша:
тәжірибелік, Pu өндірістік, энергетикалық
- энергиясы бойынша:
баяу нейтрон, аралық нейтрон, шапшаң нейтрон
- ядролық отыны бойынша:
қатты денелі отын, сұйытылған отын
- баяулатқыш мен салқындатқыш бойынша:
Жеңіл сулы реактор, ауыр сулы реактор, графитті реактор, сұйытылған натриймен салқындататын реактор.

Энергетикалық реактор түрлері

1. Жоғары қысымды жеңіл сулы ректор (PWR)
2. Қайнайтын жеңіл сулы реактор (BWR)
3. Ауыр сулы реактор (HWR)
4. Газбен салқындататын реактор (HTGR, THTR, HTR)
5. Шапшаң нейтронды реактор (LMFBR, GCFR)

Энергиясы
бойынша

шапшаң нейтронды реактор
жылулық нейтронды реактор

Салқындатқыш
бойынша

жеңіл сулы реактор (BWR,PWR)
ауыр сулы реактор
газды салқындатқышты реактор
натрий салқындатқышты реактор

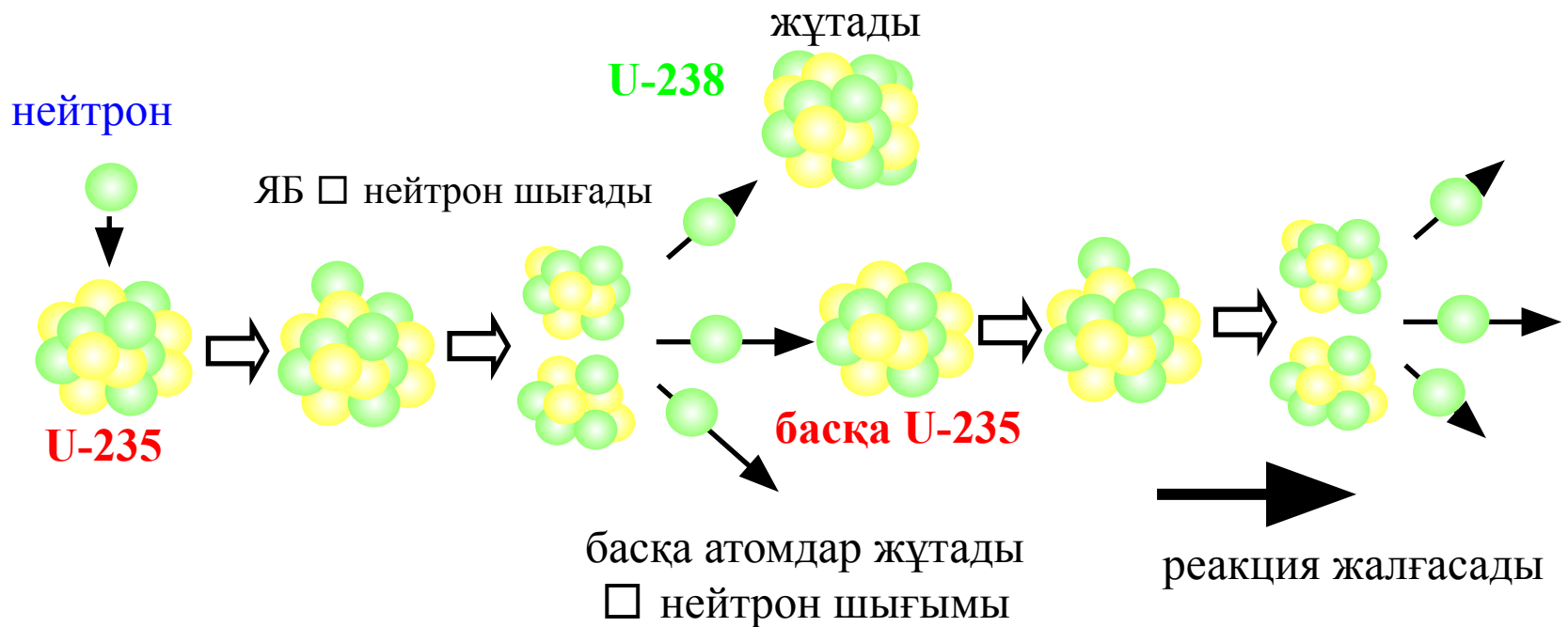
Пайдалануы
бойынша

ғылыми зерттеу реакторы
 ^{233}U , ^{239}Pu өндіретін реактор
$$^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{U}$$
$$^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{Pu}$$
энергетикалық реактор (АЭС, кеме)

Тізбекті реакция

Ядролық бөлінуді (ЯБ) жалғастыру үшін бір ядроның бөліну реакциясы кезінде пайда болған нейтрондардың кемінде біреуі келесі ядроны бөлуге жұмсалуды керек.

Тығырық □ ядролық бөлінудің тізбекті реакциясы тұрақты түрде жалғасатын күйді тығырық (критика) деп атайды.



Табиғи уранды отын ретінде реакторда қолдану



Реактор ішінде уранның тізбекті реакциясы жалғасуы керек

Бұл үшін белгілі бір амалдарды қолдануға тура келеді



(1) ядролық бөліну кезінде қоя беретін шапшаң
нейтрондардың жылдамдығын төмендету ☐ баяулату

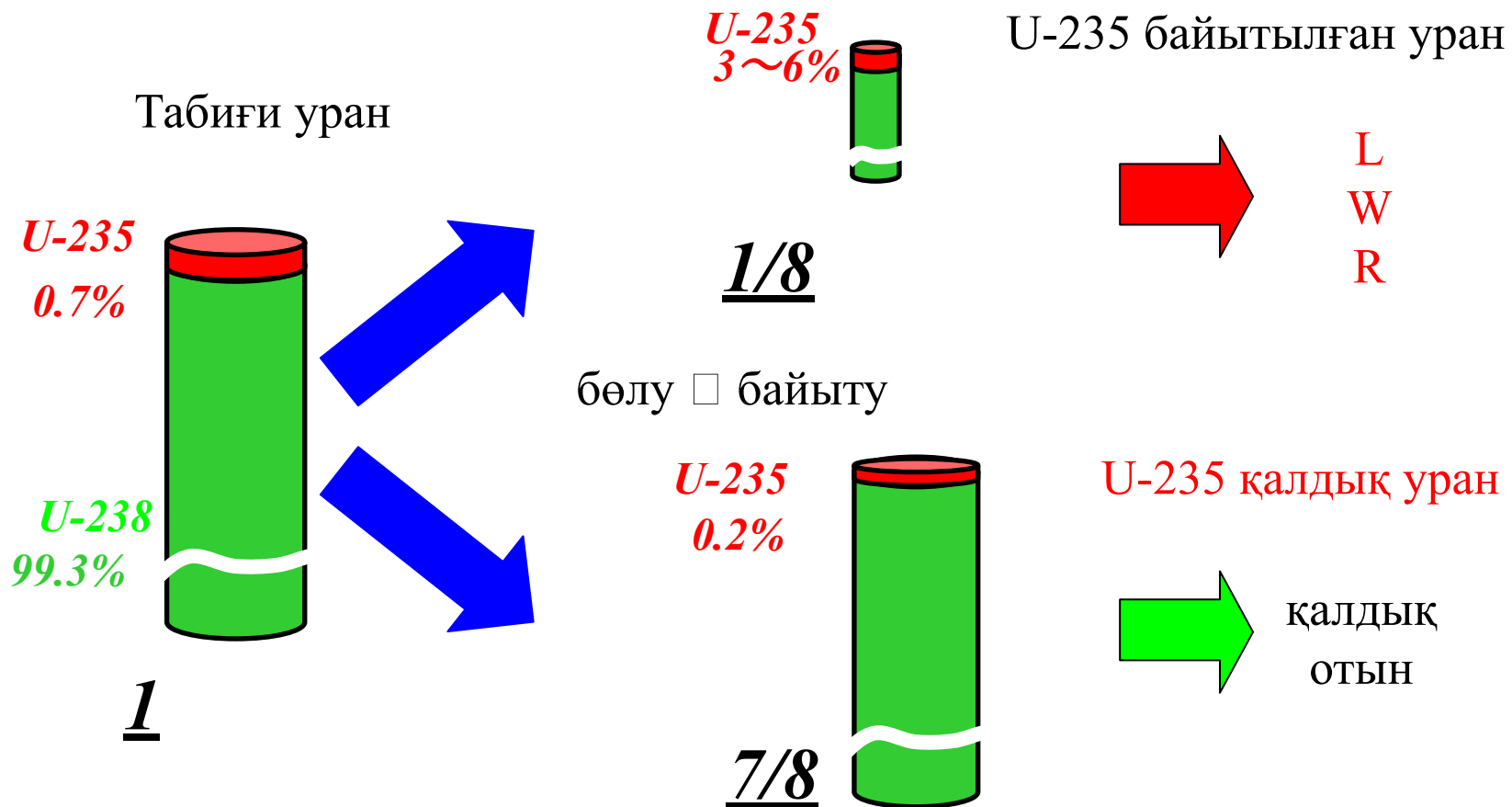
(2) оңай жанатын U-235 қоюлығын арттыру ☐ байыту

(3) мүмкіндігінше ураннан басқа заттарда нейтрондар жұтылмауы керек
(реактор ішінде нейтронды жұтатын басқа заттар өте аз болуы керек)

(4) Нейтрон шығымы өте аз болуы керек (реактор іші үлкен және
цилиндр пішінді болу керек)

Уранды байыту

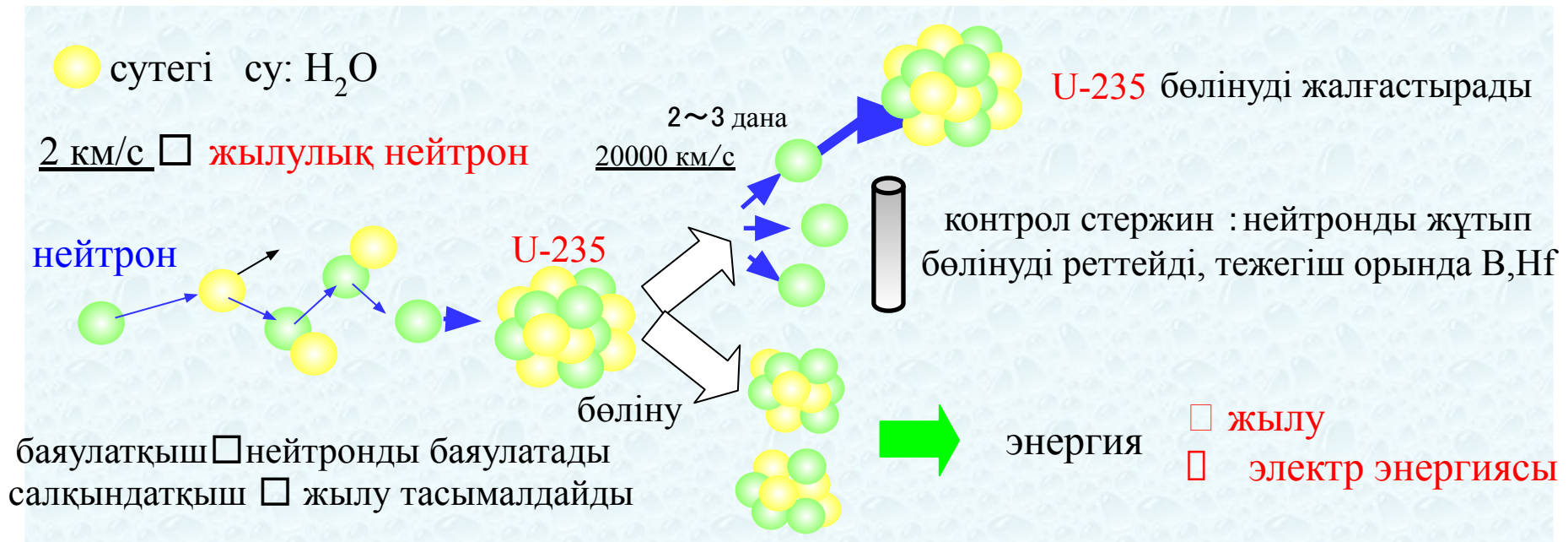
Оңай жанатын U-235-тің үлесін көбейту (байыту)



судың (сутегінің) міндеті

Жеңіл сулы реактор LWR

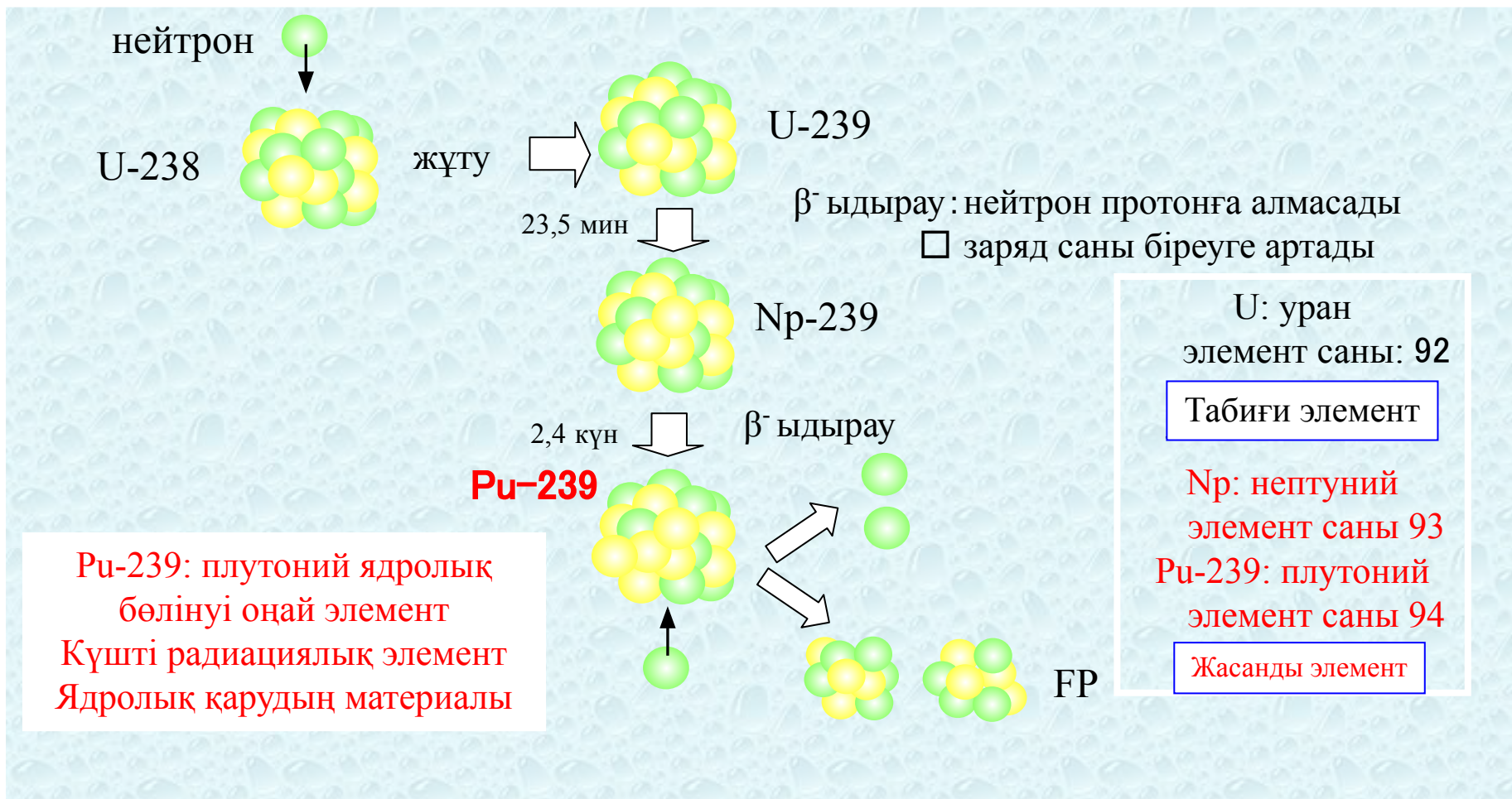
Жылулық нейтронды реактор



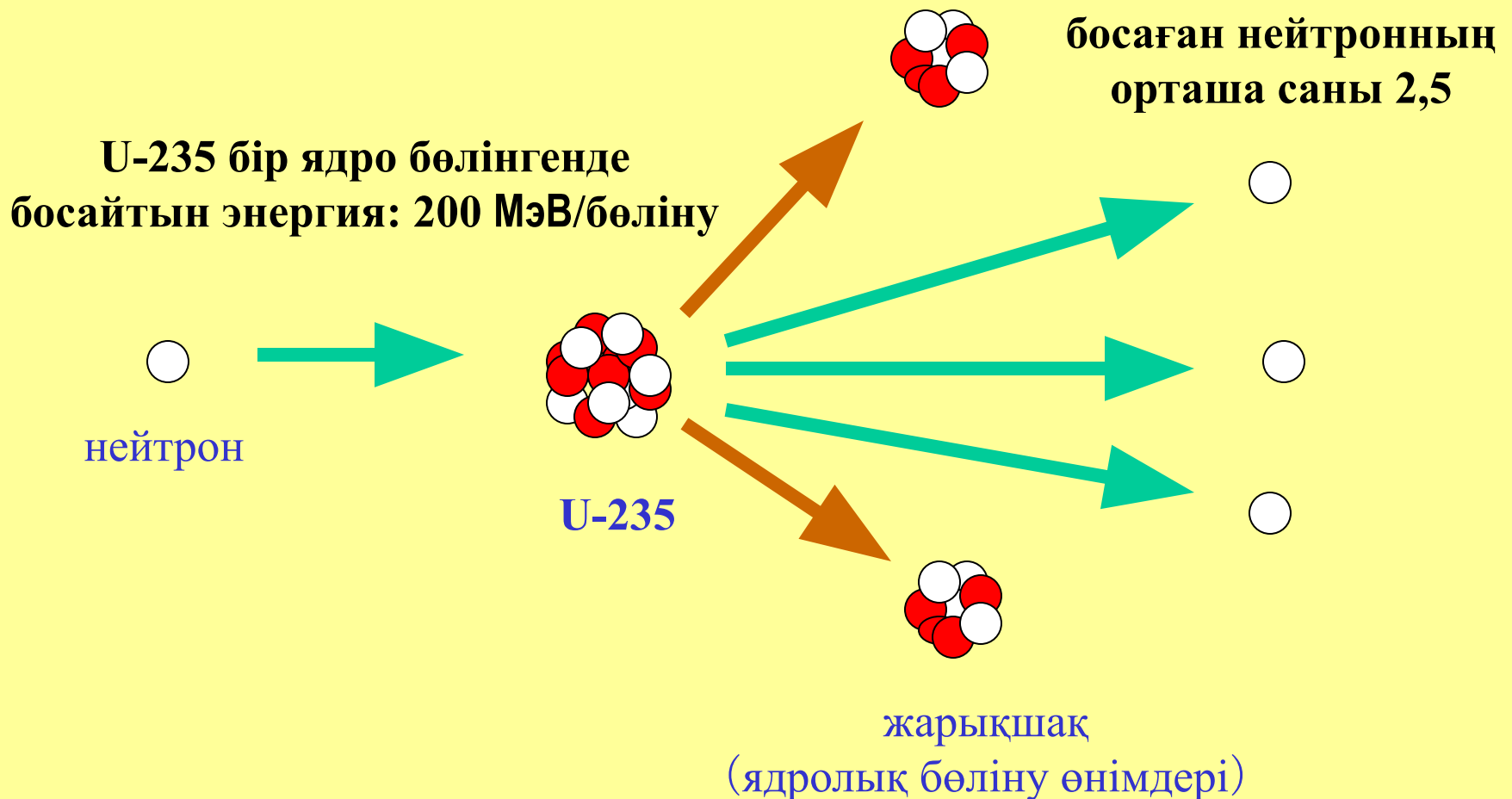
Судың міндеті: (1) нейтронды баяулату
(2) реакторды салқындату (жылу тасымалдау)

баяу нейтрон = жылулық нейтрон

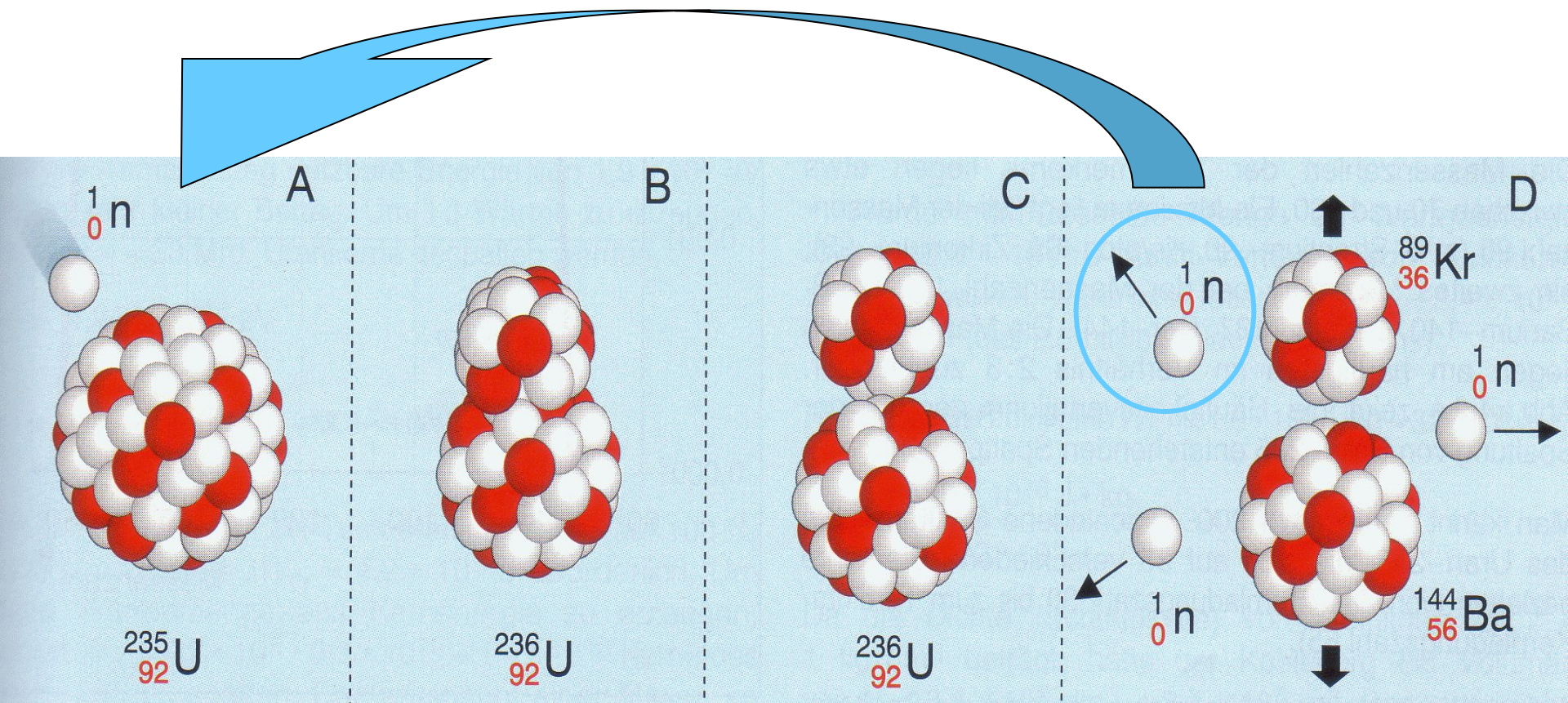
Реактор ішінде бөлінбейтін U-238 нейтронды жұту және β^- ыдырау арқылы оңай бөлінетін плутоний-239 ауысады



U-235 ядролық бөліну



Реактордағы ^{235}U бөліну реакциясы



Бөліну жарықшақтары (Fission fragments)

Ядролық реакция барысында екіге бөлінген ядро бөліну жарықшағы (БЖ) деп аталады, бөліну жарықшақтары жоғары энергиялы және жоғары зарядты болғандықтан, Кулон тебісу күшінің әсерінен екеуі қарама-қарсы бағытта қозғалады.

Жарықшақтар қозғалыс барысында жақын маңында тұрған басқа атомдармен соқтығысу арқылы энергиясын жоғалтып соңында тоқтайды.

Ядролық бөліну кезінде пайда болатын энергияның 80% осы жарықшақтардың қозғалыс энергиясына жұмсалады, және олар қозғалыс барысында жылдамдығы азайып, қозғалыс энергиясы жылулық энергияға айналады.

Бөліну өнімдері (Fission products)

Қозғалысын тоқтатып, тыныштық күйде тұратын жарықшақтарды және олардың ыдырауынан пайда болған ядроларды бөліну өнімдері (БӨ) деп атайды.

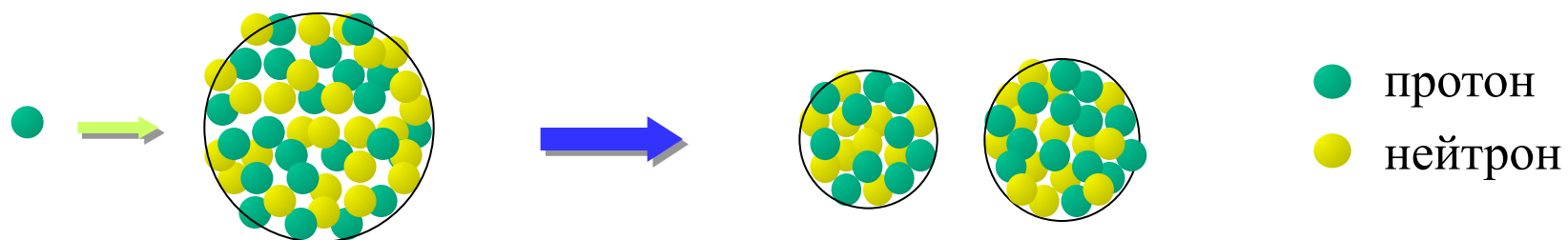
Бөліну өнімдерінде нейтрондар саны көп болғандықтан, олардың басым көп бөлімі β ыдырау арқылы тұрақты ядроларға айналады.

Бұл кезде β ыдырауға 3,5% энергия, ыдыраумен бірге шығаратын γ сәулелеріне 3,5% энергия қоя беріледі.

β ыдырау барысында қоя беретін 7% жылулық энергияны ыдырау жылуы деп атайды. Ол реактор жұмысын тоқтатқаннан кейінде жалғаса береді.

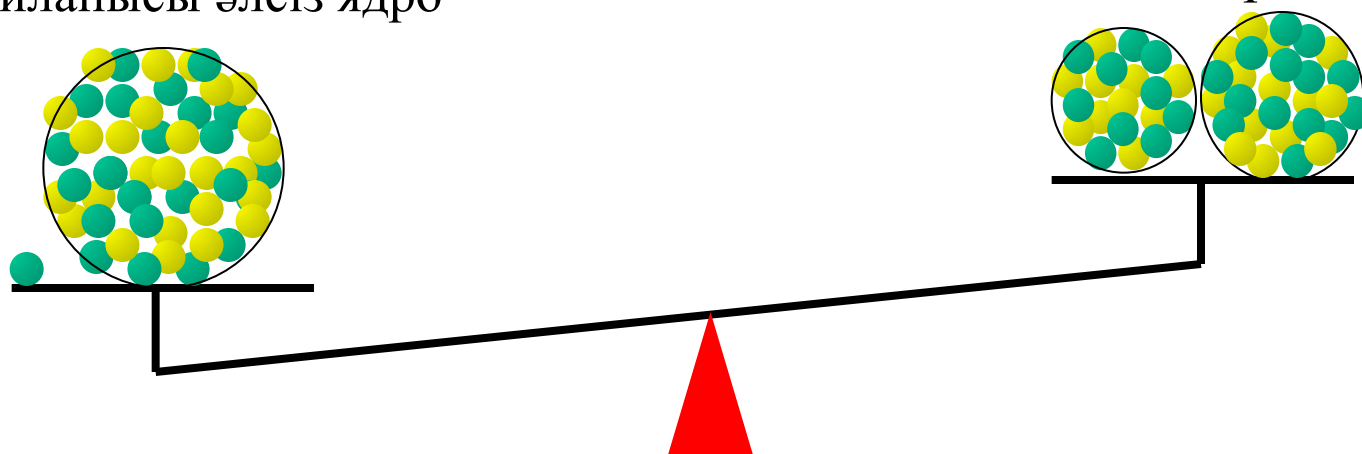
Меншікті байланыс энергиясы = масса ақауының шамасы

Ядро бөлінсе энергия бөліп шығарады (массасы азайыды)



Байланысы әлсіз ядро

Байланысы күшті ядро



Ядролық бөліну

	табиғи	жасанды
Бөлінетін ядро	^{235}U	^{233}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu
Аналық ядро	^{232}Th , ^{238}U	^{240}Pu

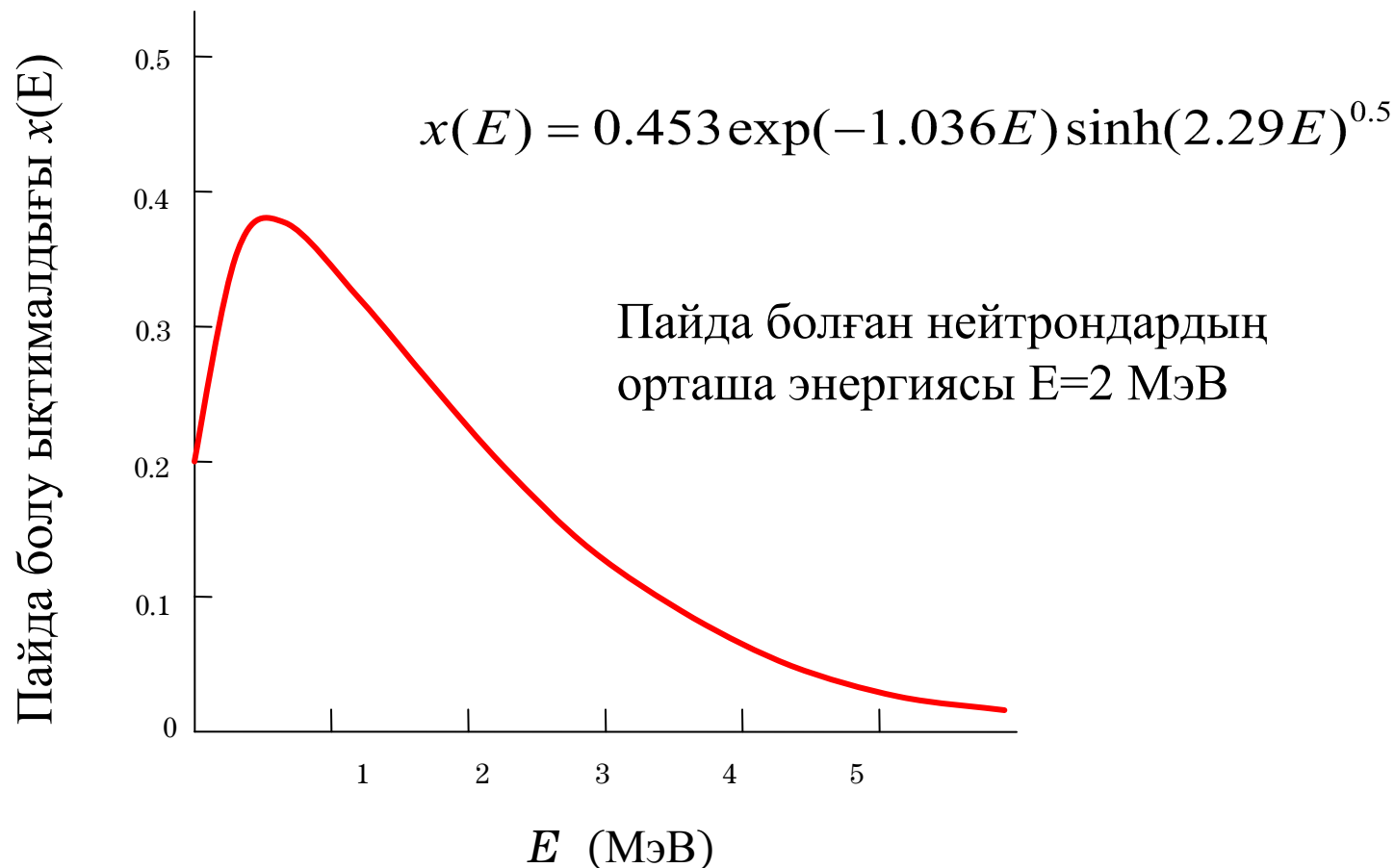
Қоя беретін энергиясы: 200 МэВ/бөліну

Лездік нейтрон $\bar{\nu}$, $\chi(E)$

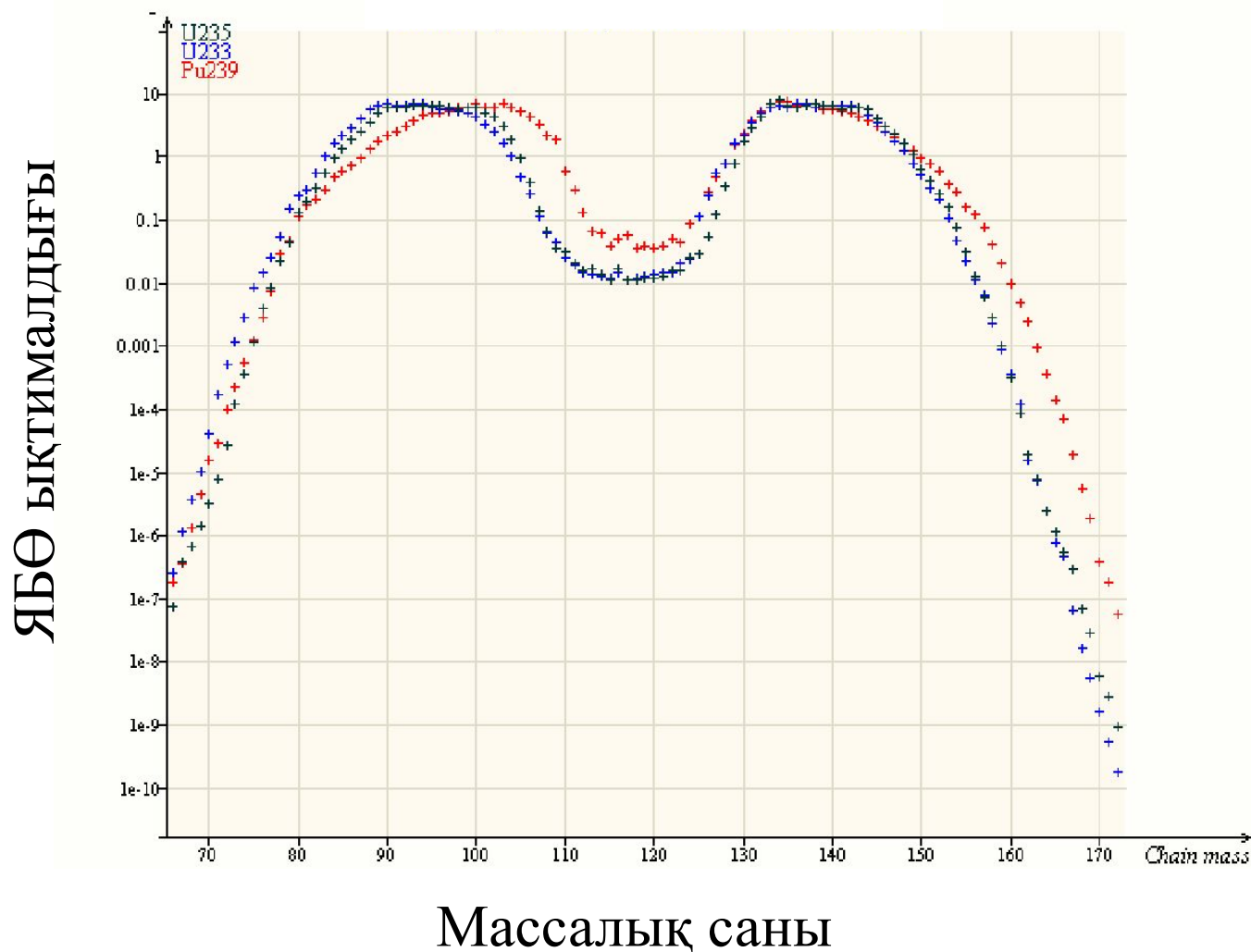
Кешіккен нейтрон

Жарықшак (FF) $\longrightarrow$ БӨ (FP)

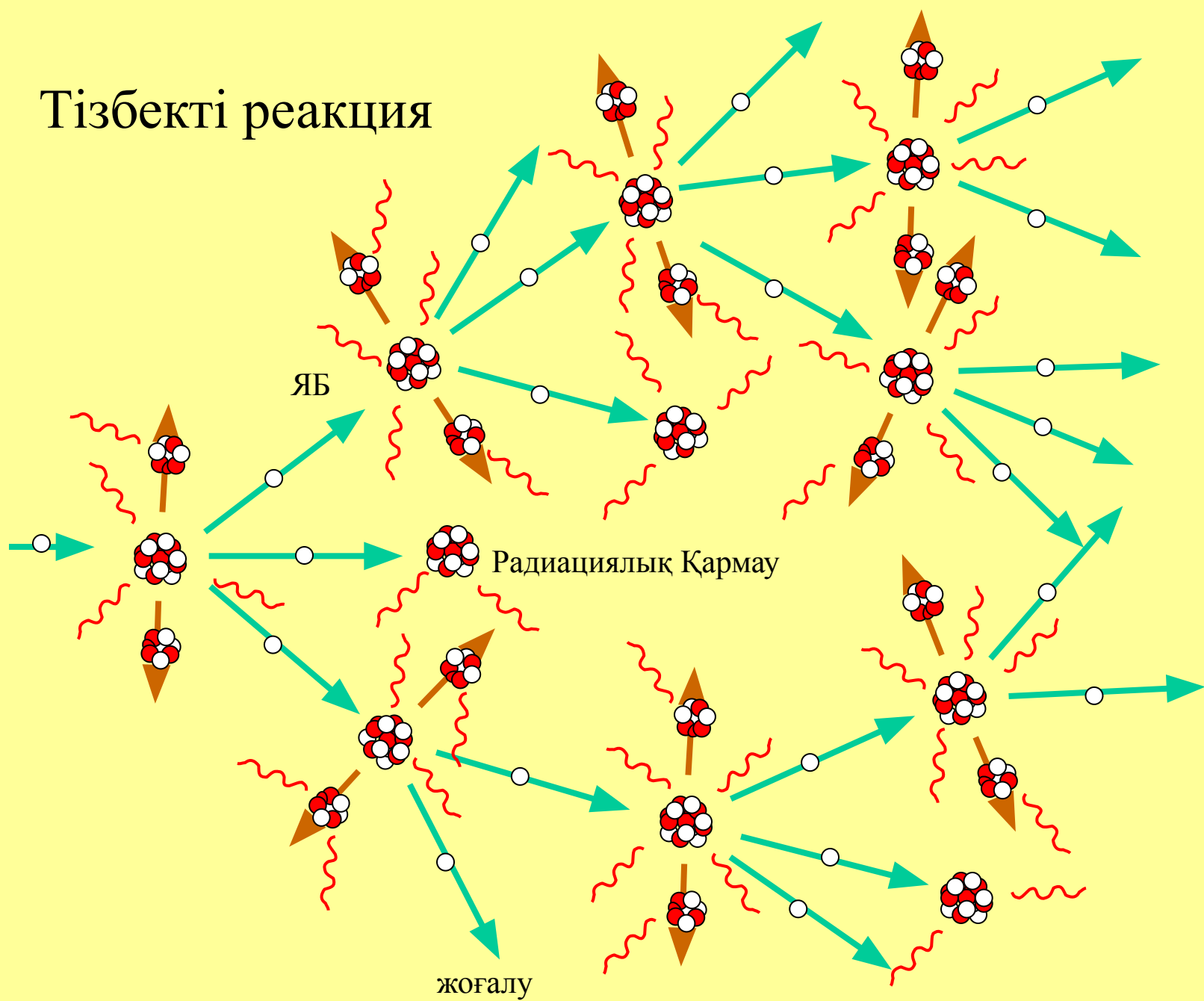
Ядролық бөліну барысында қоя берілетін нейтрондардың энергиялық үлесі



Жарықшақтың массалық үлестірілуі



Тізбекті реакция

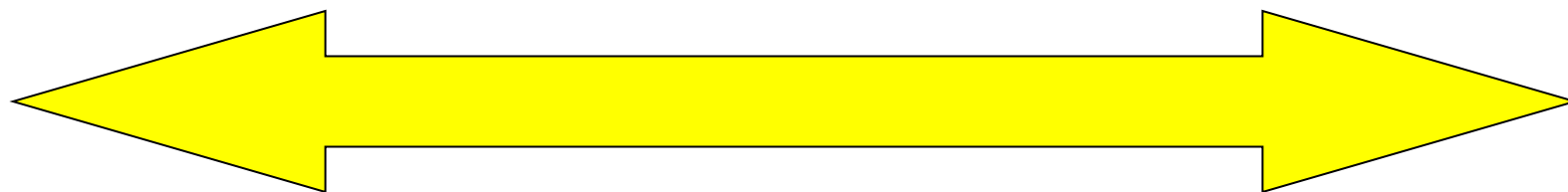


Жоғары тығыздықтағы энергияның қолданылуы

$$\text{энергия} = \text{қуаты} \times \text{уақыт}$$

Жоғары қуат

Ұзақ өмір

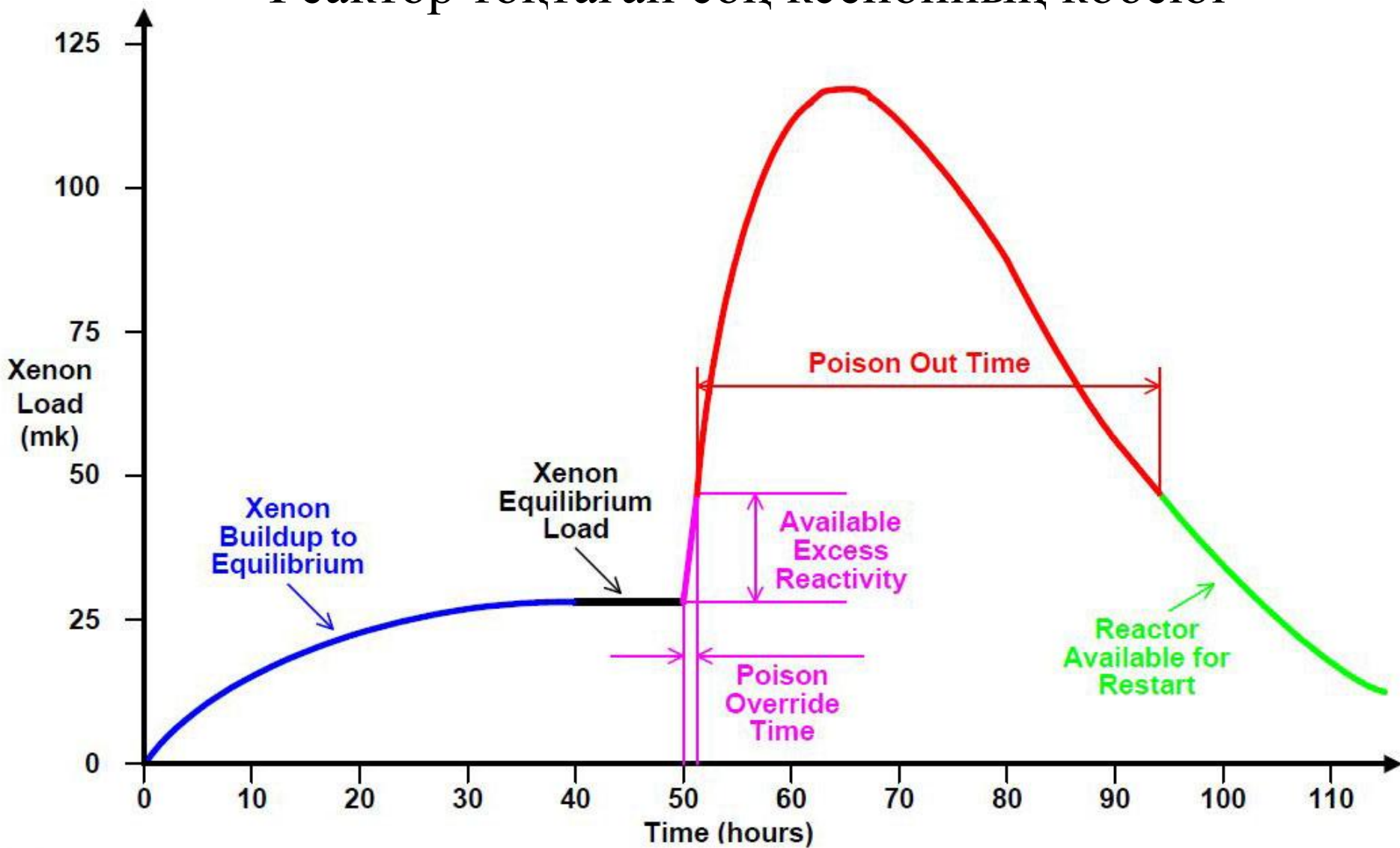


Атом бомбасы

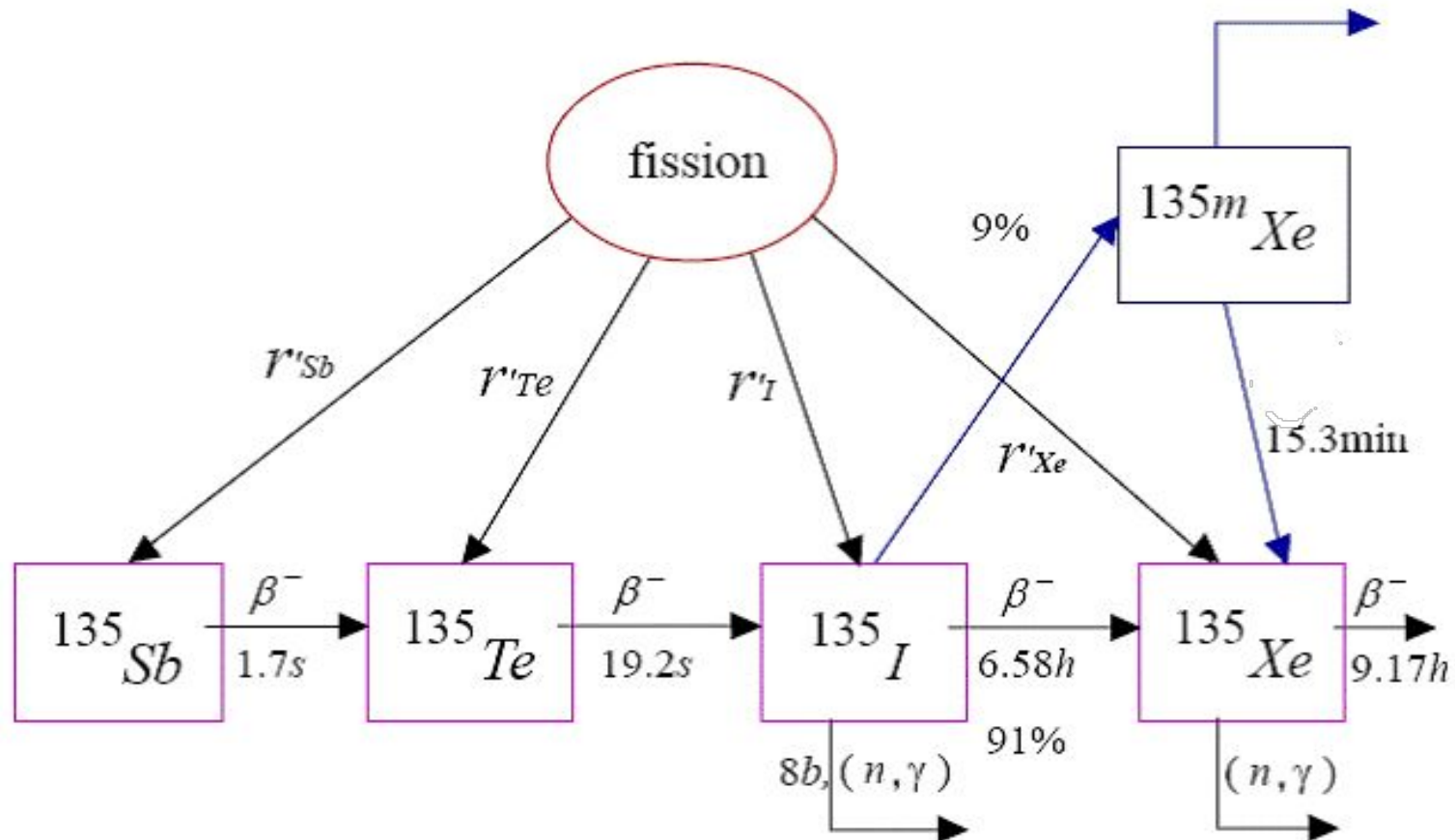
АЭС

Сүңгіуір кеме
Ғарыш реакторы

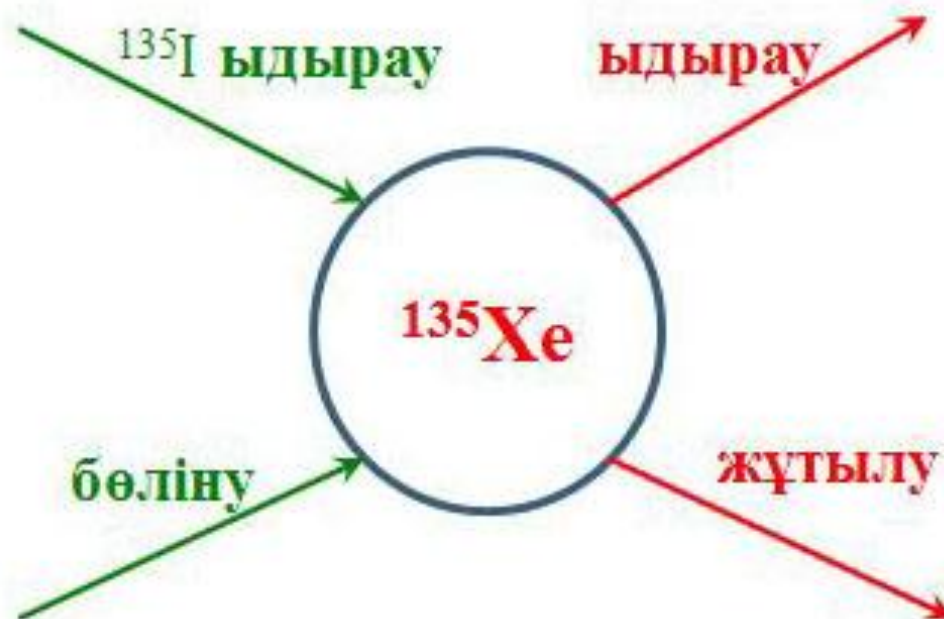
Реактор тоқтаған соң ксенонның көбеюі



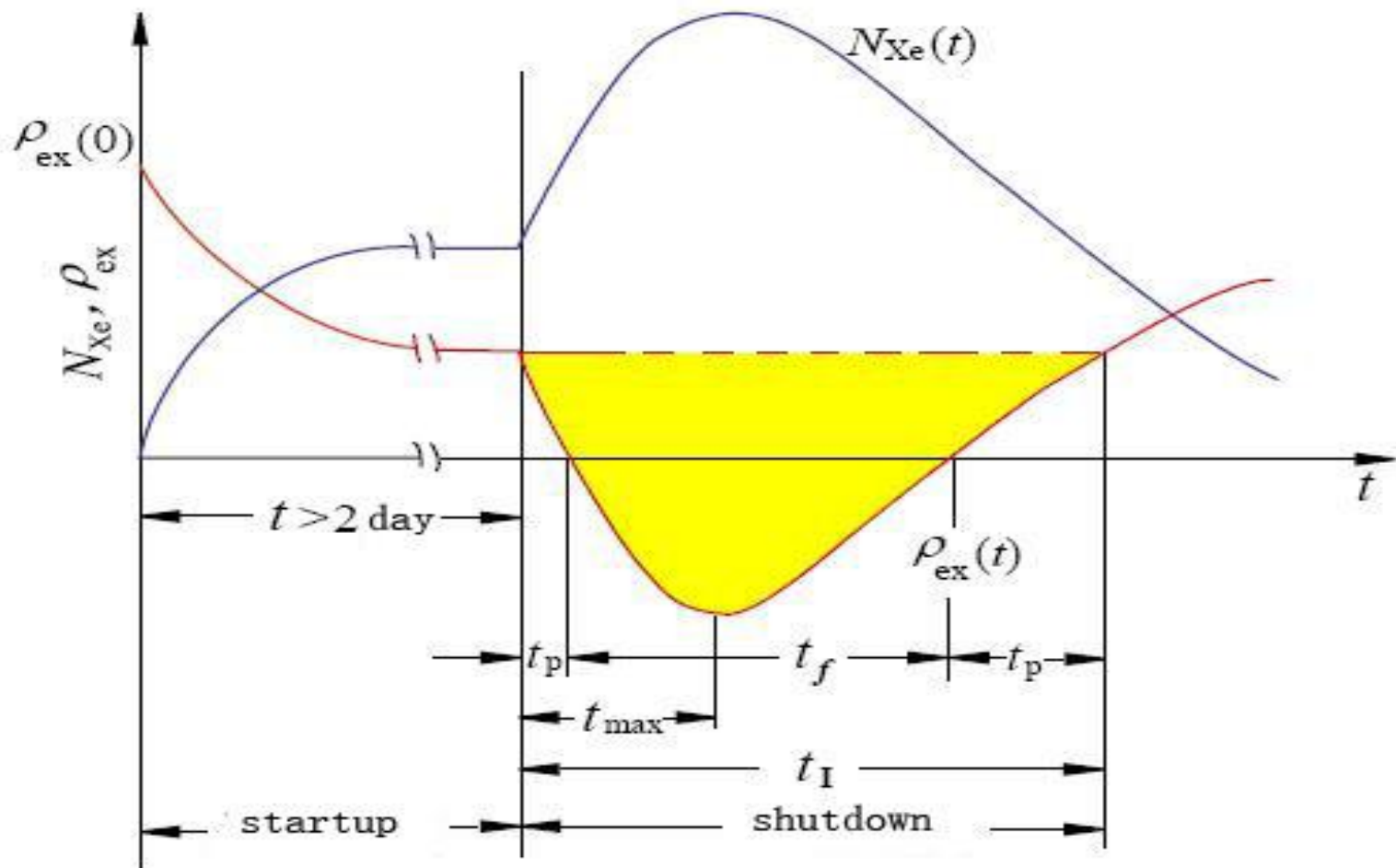
Реакторда ксенонның жиналу себептері



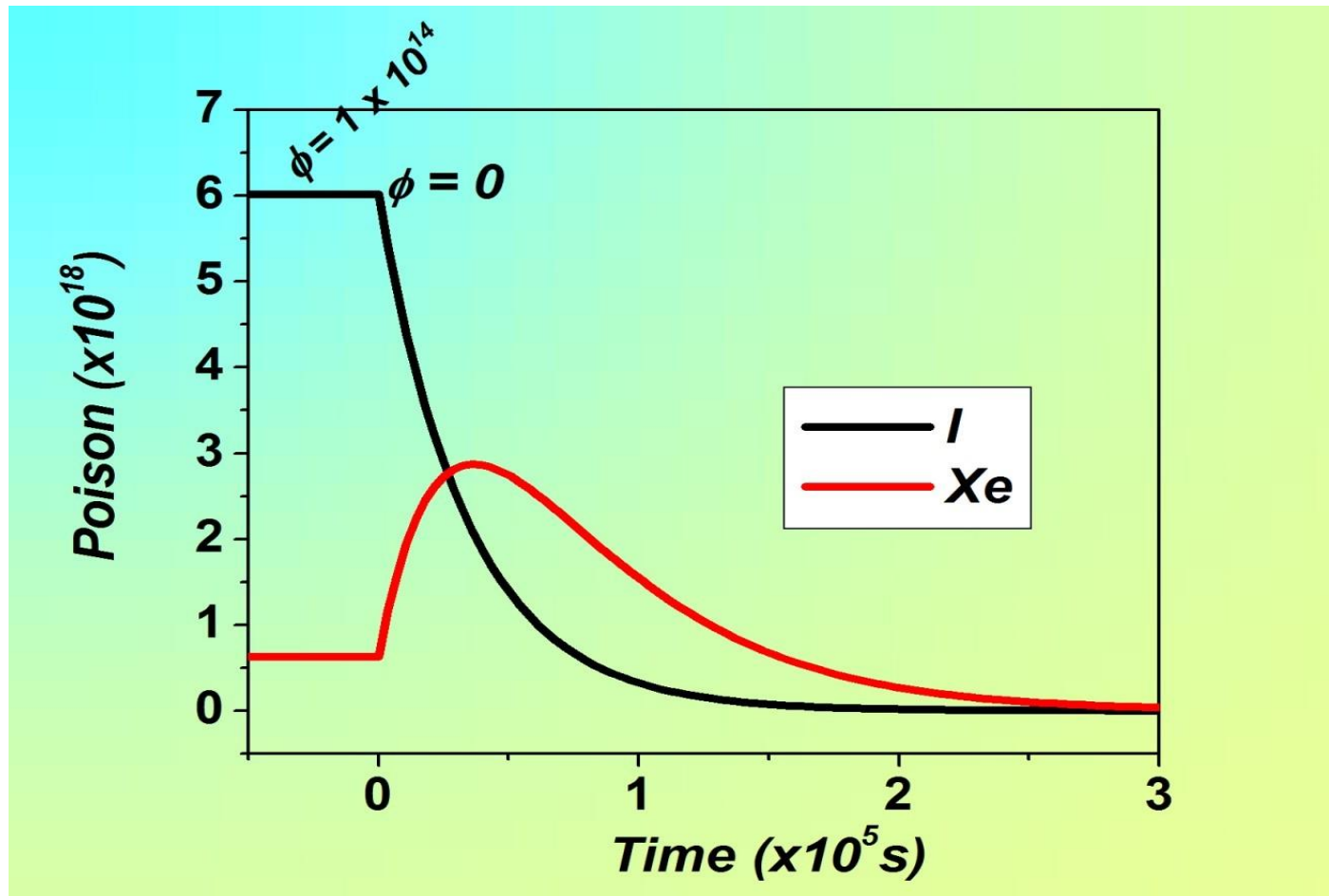
Реакторда ксенонның түзілуі мен жойылуы



Реактор тоқтаған соң иод шұңқырының түзілуі

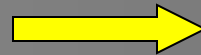


Реактор тоқтаған соң иод пен ксенонның өзгерісі



Атом бомбасының материалы

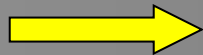
^{235}U баяыту (90% ~
жоғары)



^{235}U атом бомба

Little Boy

Табиғи уран реакторы



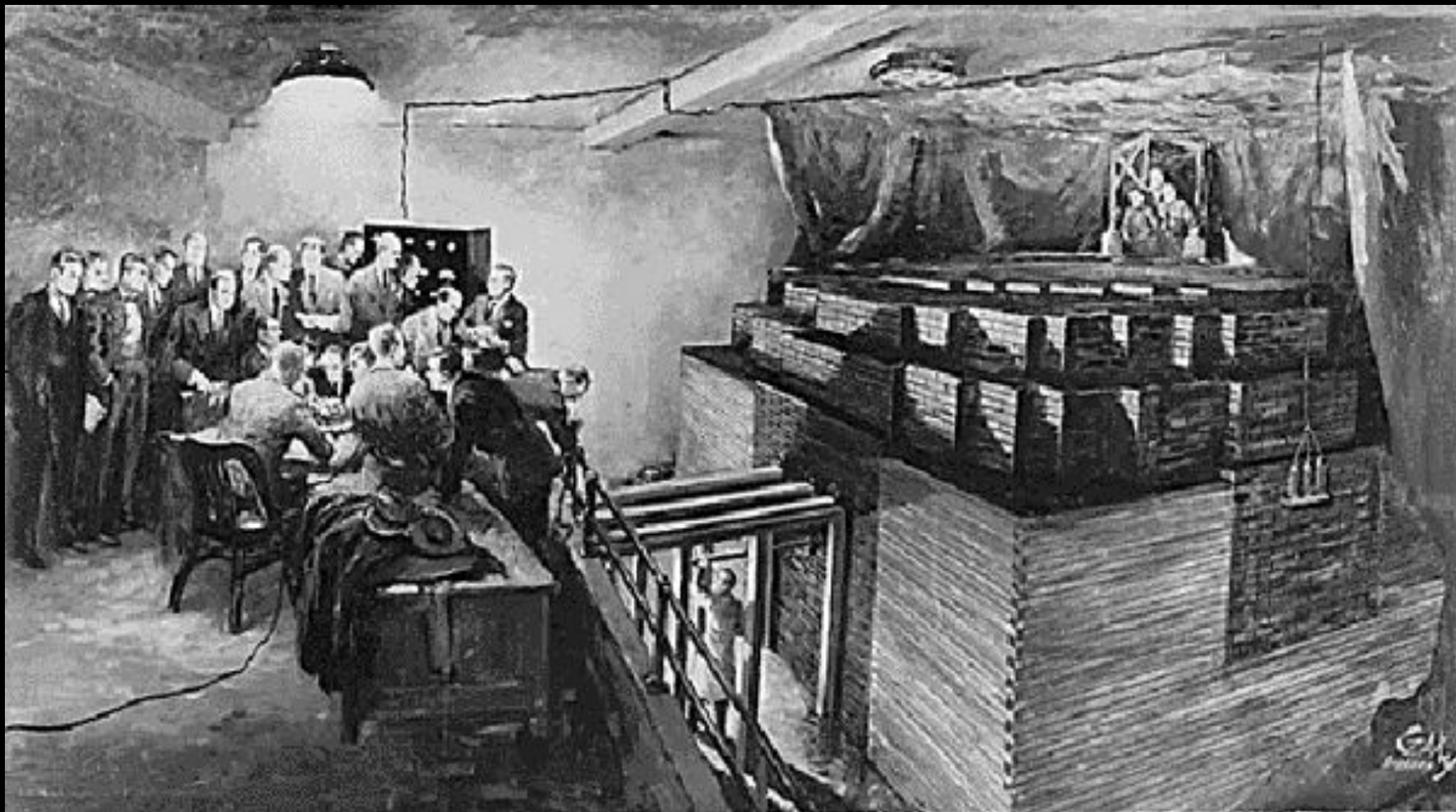
Pu өндіру



^{239}Pu бомба

Fat Man

Тұңғыш атом реакторы Chicago pile-1



Жапонияға тасталған атом бомбасы

Уран бомбасы

90% жоғары байытылған 60 кг уран-235 бомбасы Хиросима қаласына (06.08.1945) тасталған. Соның шамамен 1.5% (0,9 кг) ғана ядролық бөлінген. Жарылыс күші 15000 тонна TNT қуатына тең. Қондырғының ұзындығы 3м, салмағы 4т, диаметрі 0,7м.

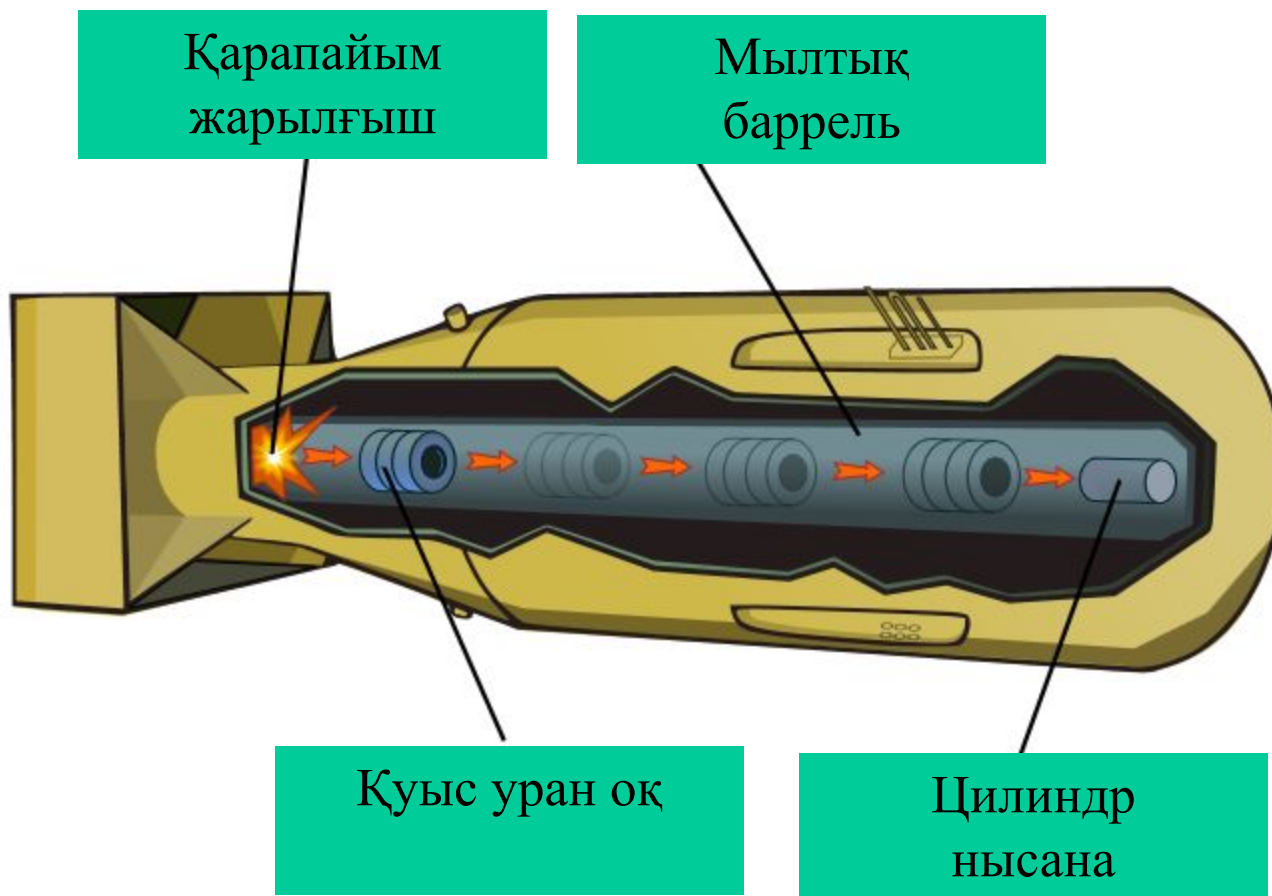
Плутоний бомбасы:

Нагасаки қаласына (09.08.1945) шамамен 8 кг Pu-239 бомбасы тасталған, оның 15% (1,2 кг) ғана ядролық бөлінген, жарылыс күші 20000 тонна TNT қуатына тең. Қондырғының ұзындығы 3,2 м, салмағы 4.5т, диаметрі 1,5м.

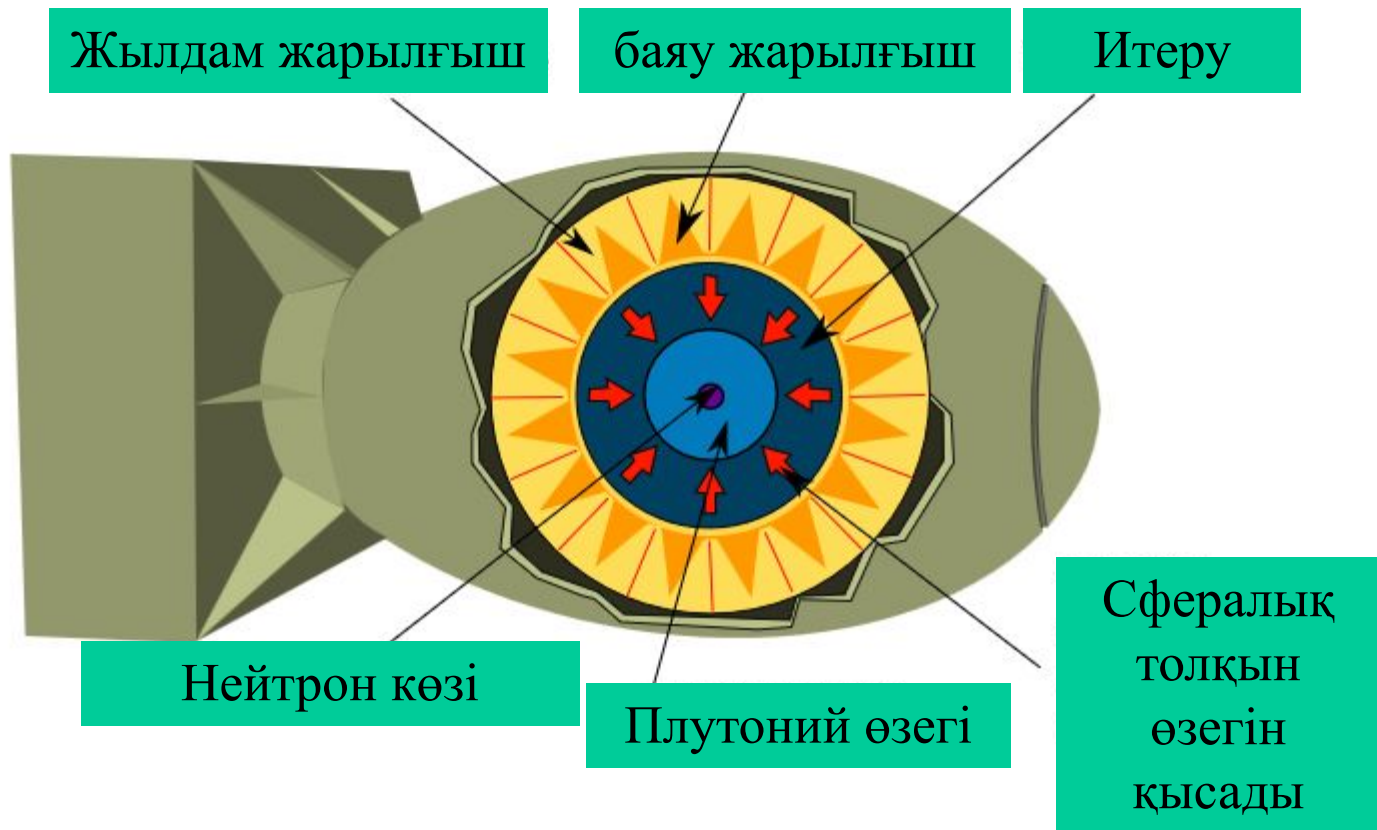
Жапонияға тасталған екі бомбы моделі



Хиросима қаласына тасталған бомба үлгісі



Нагасаки қаласына тасталған бомба үлгісі



Атом бомбасының физикалық әсері және Жарылыс энергиясының үлестірілуі

- (1). Шамамен 50% энергиясы күшті жарылыс толқынына беріліп, бұл күшті жарылыс толқынын жарылыс ошағының жақын маңындағы ғимараттарды бірдей ойрандайды.
- (2). Шамамен 35% энергиясы жылуға айналып, жарылыс ошағының маңындағы ғимараттар жанып, тіршілік атаулының бәрі жоғары температураның әсерінен күйіп кетеді.
- (3). Жарылыс энергиясының шамамен 5% бастапқы радиация энергиясына айналып, жарылыс ошағының жақын маңындағы тіршілік атаулының бәрі өте күшті радиация қабылдайды.

(4). Қалдық радиация жарылыс энергиясының шамамен 10% алатындықтан, жарылыс ошағынан алыстау аумақта да радиоактивтік радиацияны күшті қабылдайды.

(5). Бұдан басқа, энергиясы әлсіздеу болса да жарылыс кезінде ядролық электромагниттік импульстік толқындар пайда болады. Бұл импульстік электромагниттік толқындар компьютер сияқты жоғары қаблетті электр аспаптарының әртүрлі функцияларына үлкен залал әкеледі.

Ядролық қару

Ядролық бөліну мен ядролық синтез реакциясының қайсы біреуін не екеуін де қолдану арқылы физикалық қырып жоятын, адамдарды өлтіру мақсатында жасалған қаруды **ядролық қарау** деп атайды.

Жоғары байытылған уран не плутоний-239 шапшаң нейтрондардың әсерінен тізбекті ядролық реакция тудырады. Дейтерий, тритий, литий сияқты жеңіл ядролардың ядролық синтез реакциясы арқылы бірігуі барысында өте үлкен энергия бөліп шығарып күшті жарылыс тудырады. Сол кезде көп мөлшердегі радиациялық зат пайда болады.

Ядролық қару мен әдеттегі қарудың айырмашылығы

Өте күшті физикалық ойрандау қуаты мен қысқа және ұзақ мерзімдік тіршілікке болған радиациялық залалы.

Ядролық қару мен био-химиялық қарудың айырмашылығы

- Өте көп мөлшерде адамдарды қырып-жою жағында екеуі бірдей.
- Қолданылған жағдайда уланған аумақты биологиялық, химиялық жақтан тазалау екеуінде де қиын.
- Физикалық ойрандау қуаты жағында био-химиялық қару ядролық қарудан көп әлсіз болады.
- Өзіндік құны жағында ядролық қаруды жасау био-химиялық қаруды жасаудан көп қымбат тұрады.

Ядролық қарудың түрлері

1. Атом бомбасы (ядролық бөліну бомбасы)
2. Сутегі бомбасы (ядролық бөліну & ядролық синтез)
3. Нейтрон бомбасы (радиацияны күшейткіш бомба)

Ядролық қарудың принципі мен құрылысы

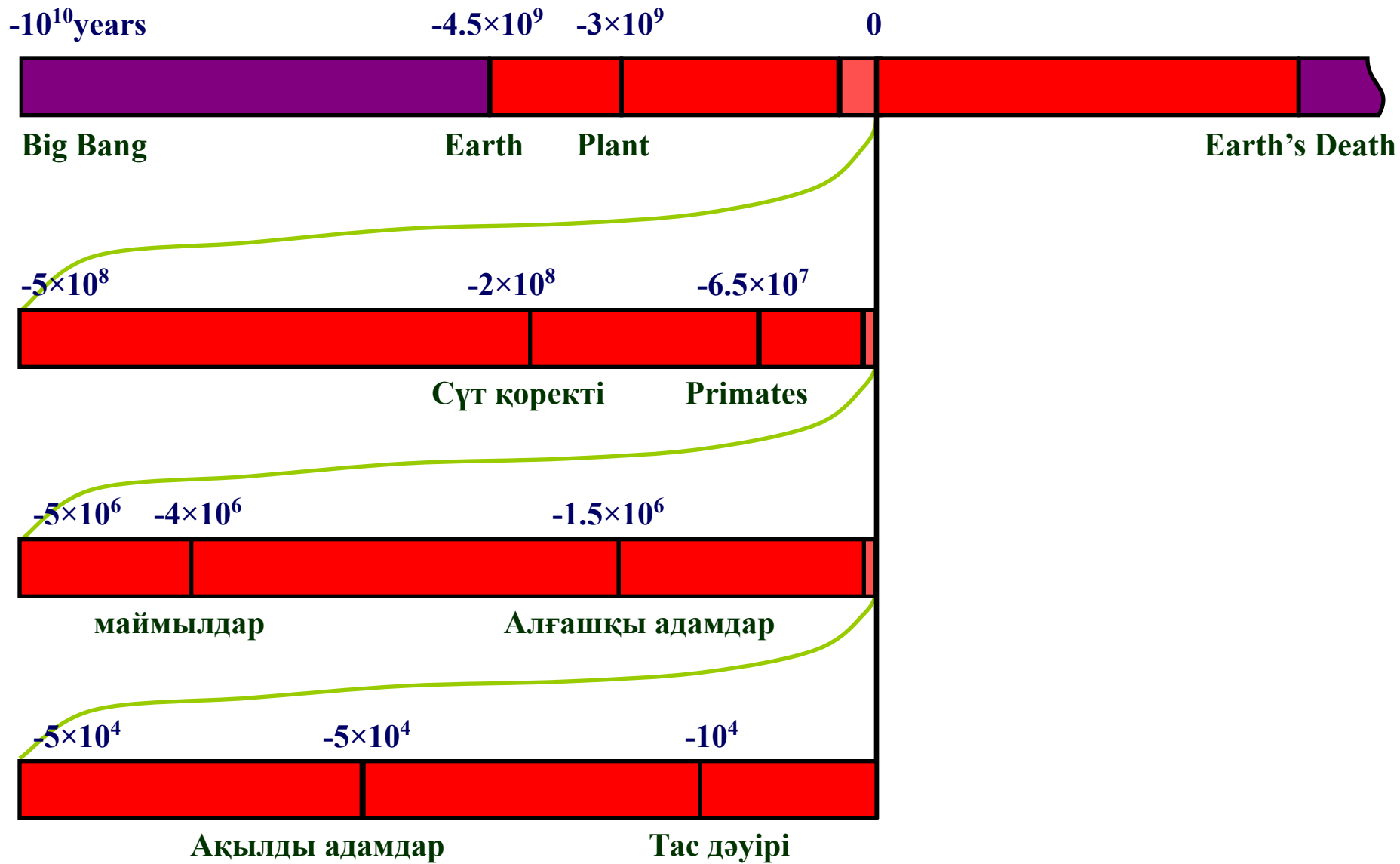
Шапшаң нейтрондардың әсерімен болатын ядролық бөліну тізбекті реакциясын қарастырып көрейік. Әдетте реакторда болатын реакцияны басқарылатын тізбекті реакция, ал атом бомбасында болатын реакцияны басқарылмайтын тізбекті реакция деп түсіндіреді. Алайда, төменде көрсетілгендей ядролық қаруда «қарсы бағыттағы басқару» қажет болады.

Ядролық қаруда жоғары байытылған уран не плутонийді қолданады. Ядролық бөліну энергиясын өте қысқа уақытта қоя беретіндей реакцияны жоғары дәлдікте басқару қажет болады.

Ядролық тізбекті реакцияның сындық мөлшері

Ядролық бөлінетін заттың өздігінен тізбекті ядролық реакцияны жүзеге асыратын ең аз мөлшерін **сындық масса** немесе критикалық масса деп атайды. Тығырық масса ядролық отынның тығыздығына, қоюлығына және шашыратқыш материалының бар жоқтығына тәуелді болады. (қалыпты жағдайда)

Ядро	Шашыратқыш	Қалыңдығы см	Тығырық масса кг
U-235	Жоқ		49
U-235	Берилий	10	14
U-235	Табиғи уран	10	18
Pu-239	Жоқ		12,5
Pu-239	Берилий	5,2	5,4
Pu-239	Берилий	32	2,5
Pu-239	Табиғи уран	5	6,4
Pu-239	Табиғи уран	24	4,4



Constraint
Technology, Living

Constraint
Environment

Адамзаттың энергия шығымы

Тек хим. энергия

-4×10^6 years

Оттың табылуы

-10^4 years

0

Жаңа тас дәуірі

Табиғи энергия

Химиялық энергия

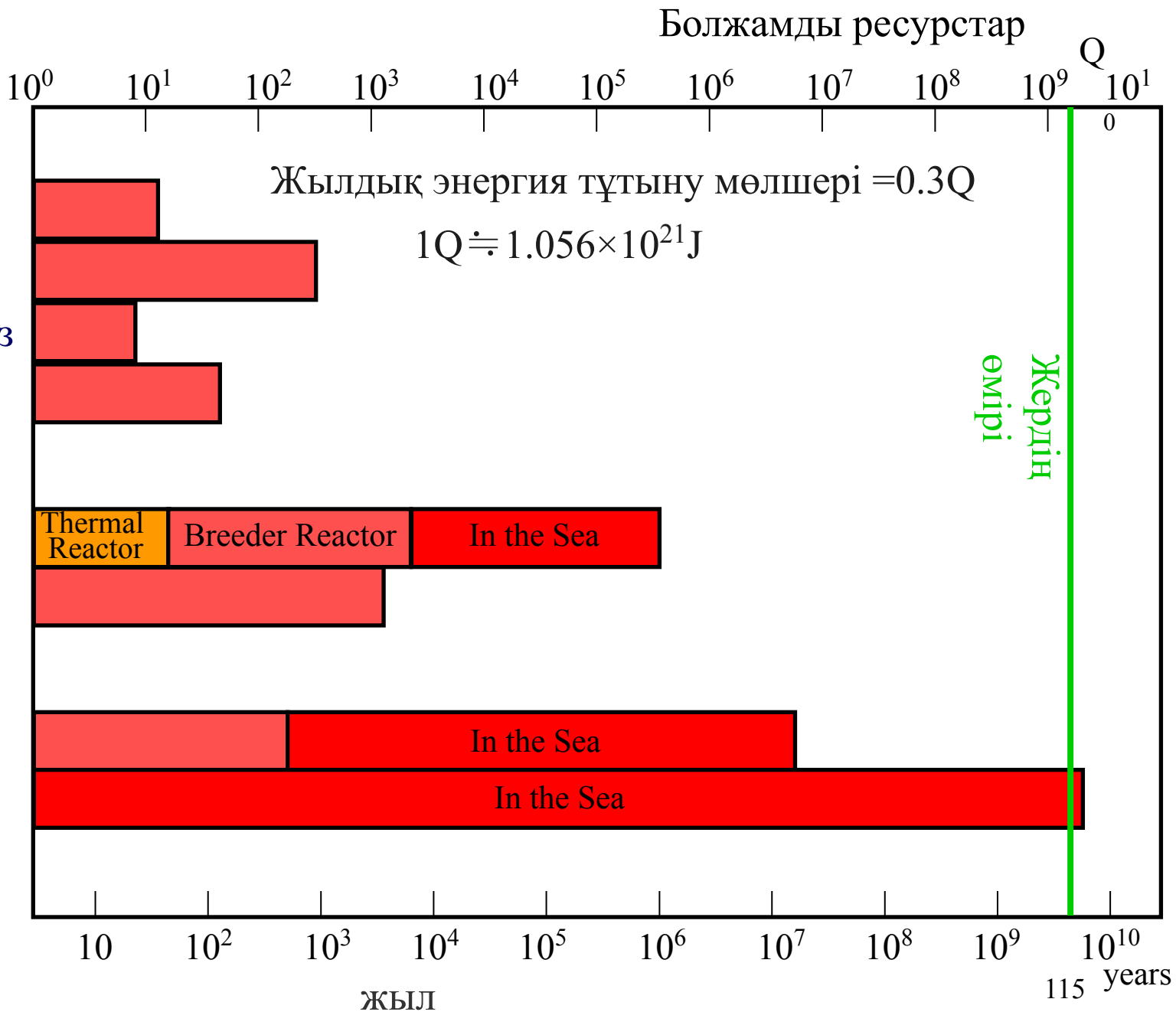
Ядролық энергия

Отын қазбалы
Бөліну
Термоядролық

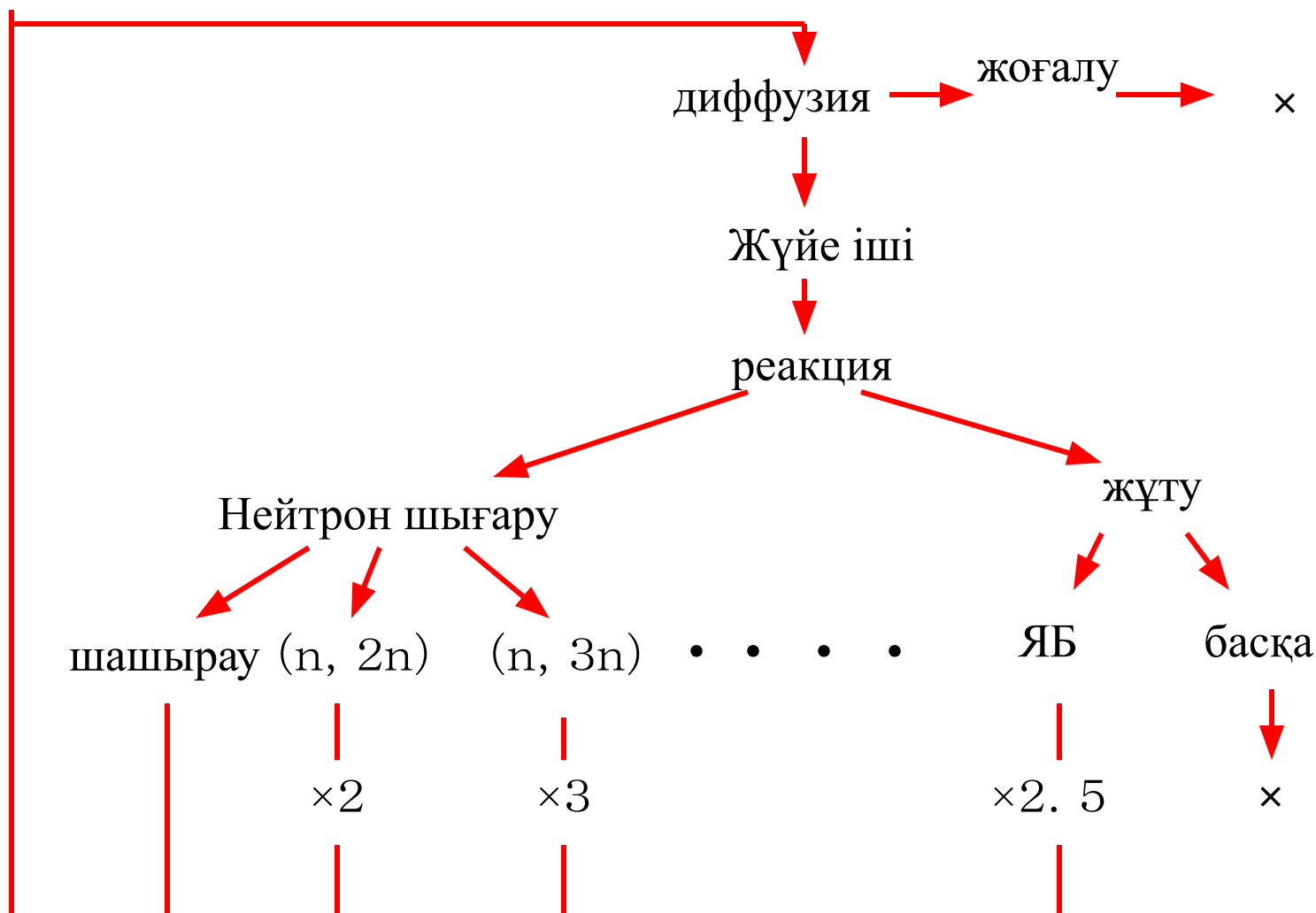
мұнай
көмір
таб. газ
т.б.

уран
торий

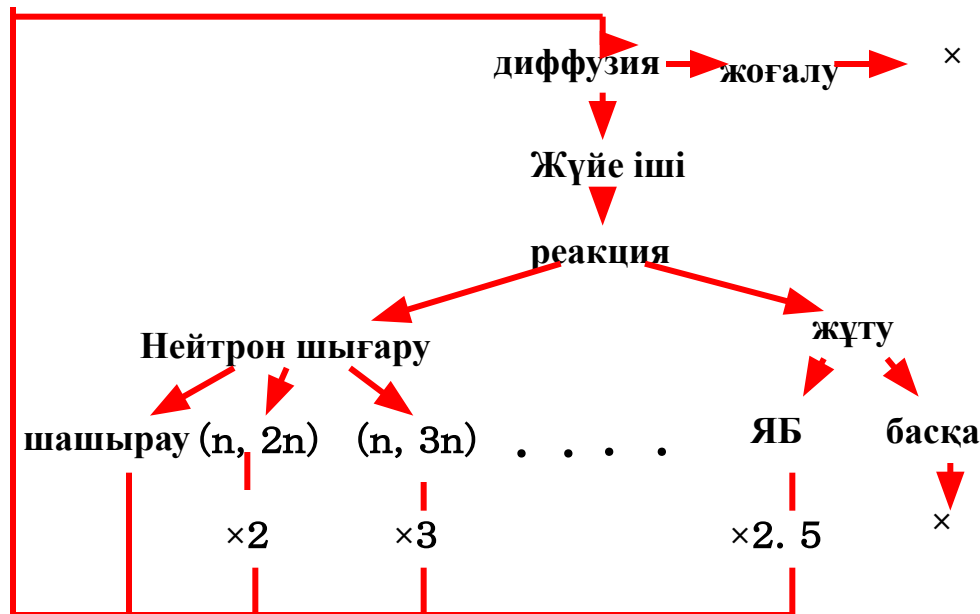
литий
дейтерий



Реактордағы нейтронның қозғалысы

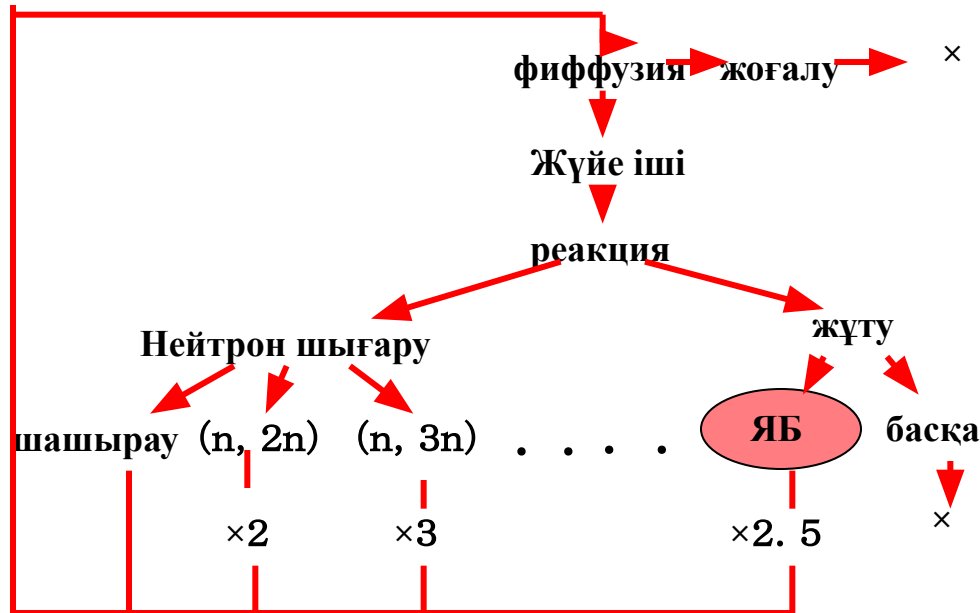


Реактордағы нейтронның қозғалысы



$$\begin{array}{lcl}
 \text{ЯБ пайда болған нейтрон} & & \text{Жұтылған нейтрон} \\
 + & & + \\
 (n, 2n) \text{ көбейген нейтрон} & & \text{Жоғалған нейтрон} \\
 & & \\
 & < \text{Сындық алды} & \\
 & = & \\
 & \text{Сындық} & \\
 & > \text{Асқын сындық} &
 \end{array}$$

ТЫҒЫРЫҚ



Нейтрон өмірі дегеніміз ЯБ пайда болып, келесі ЯБ жоғалғанға дейінгі уақытты бір өмір дейміз.

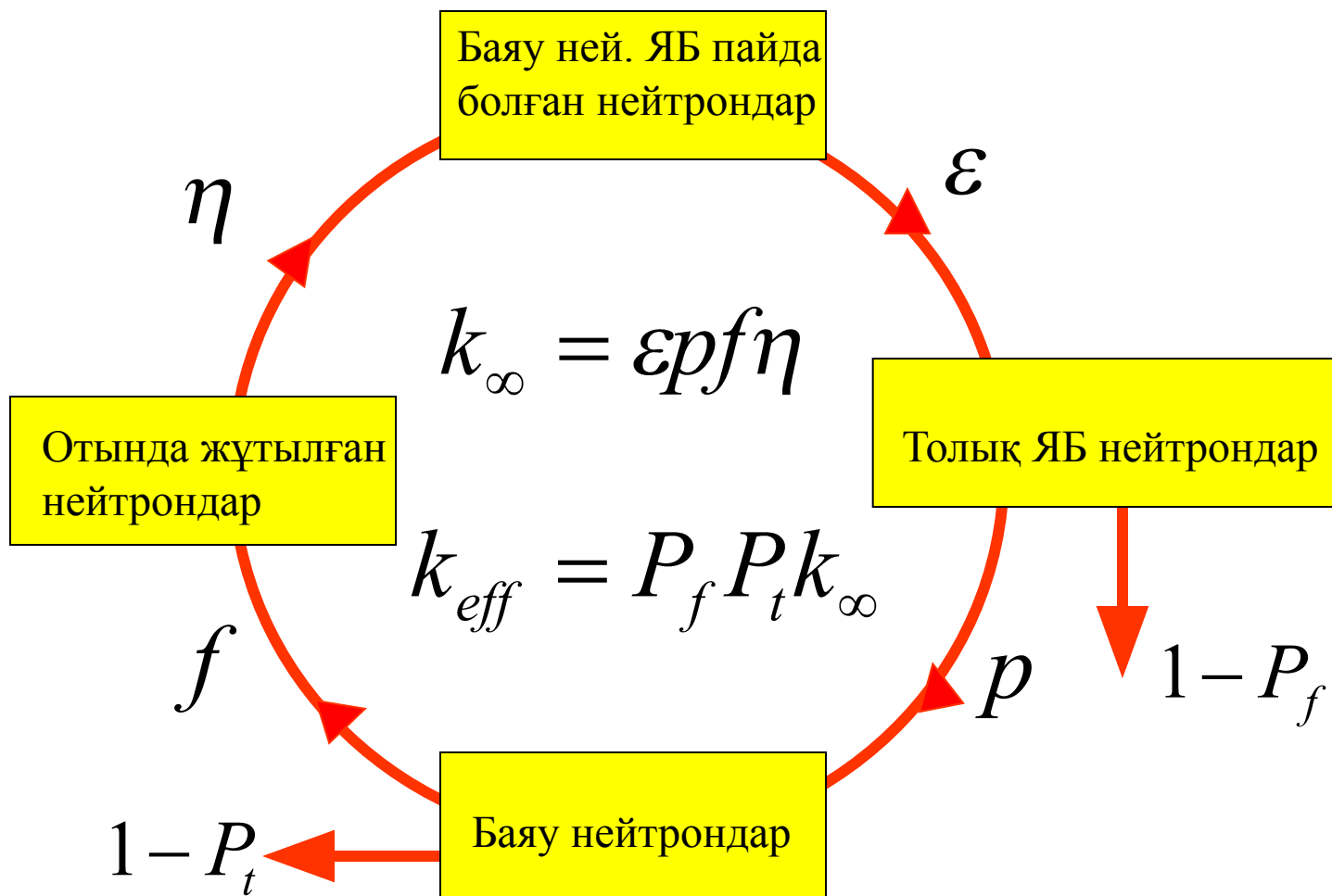
$$k = \text{көбею коэф.} = \frac{\text{Осы буын нейтрон саны}}{\text{Алдыңғы буын нейтрон саны}}$$

$k < 1$ С. алды

$k = 1$ Сындық

$k > 1$ Асқын С.

Фермидің 4 фактор өрнегі



Фермидің төрт фактор өрнегі

Үлкен реакторлары үшін шексіз көбейту факторы анықталады:

$$k_{\infty} = \eta \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot f$$

η = жалпы нейтрондар саны / отында жұтылған нейтрондар саны

ε = жалпы нейтрон саны / жылу нейт. арқылы бөлінген нейт. саны

ρ = шапшаң нейтрондардан баяу нейтрондарға айналған нейтрондар саны / ядролық бөлінуде пайда болған нейтрондардың жалпы саны

f = ЯБ пайда болған жалпы нейтрондар саны / жылулық нейтрон саны

$$\text{ЖН бөліну факторы } \eta = \frac{\text{бөлінуде пайда болған нейтрдар саны}}{\text{жұтылған нейтрдар саны}} = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_a}$$

$$\eta = (1.11-1.24)$$

$$\text{ЖН пайдалану факторы } f = \frac{\text{отында жұтылған ЖН саны}}{\text{жалпы жұтылған ЖН саны}} \approx 0.940$$

$$\text{Резонанстық қашу ықтималдығы } P = \frac{\text{ЖН дейін баяулатынған нейтрондар саны}}{\text{баяулатылған ШН жалпы саны}}$$

$$p \approx 0.906$$

$$\text{ШН бөліну факторы } \varepsilon = \frac{\text{ЖН және ШН бөлінген нейтрондар саны}}{\text{ЖН бөлінген нейтрондар саны}}$$

$$\varepsilon \approx 1.026$$

Reproduction Factor η = $\frac{\text{Number of neutrons produced by fission}}{\text{Number of neutrons absorbed by fuel}} = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_a}$
 $\eta = (\text{range } 1.11\text{-}1.24)$

Thermal utilization factor f = $\frac{\text{thermal neutrons absorbed by fuel}}{\text{total thermal neutrons absorbed}} \approx 0.940$

Resonance escape probability P = $\frac{\text{number of neutrons slowing to thermal energy}}{\text{total number of fast neutrons available for slowing}}$
 $p \approx 0.906$

Fast fission factor ϵ = $\frac{\text{total fission neutrons from thermal and fast fission}}{\text{fission neutrons from thermal fission}}$
 $\epsilon \approx 1.026$

Резонанстан қашу болмайтын ықтималдық, P_{NL}

$$P_{NL} = \frac{\text{жұту}}{\text{жасау}} = \frac{\text{жұту}}{\text{жұту} + \text{қашу}} = P_t P_f$$

Жылу және шапшаң нейтрондардың ықтималдығы

$$P_t = \frac{\text{number of thermal neutrons that do not leak from reactor}}{\text{number of neutrons that reach thermal energies}} \approx 0,861$$

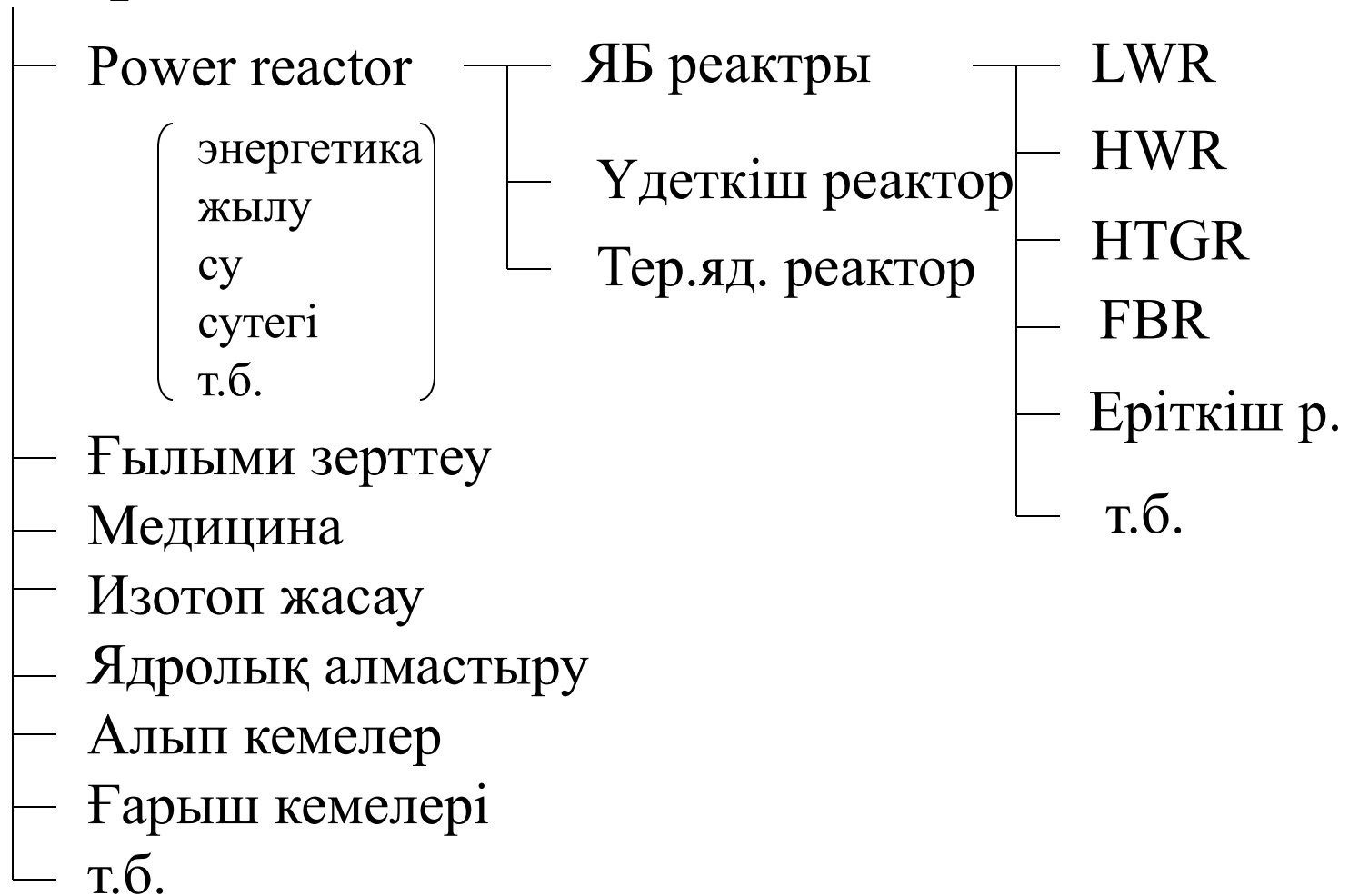
$$P_f = \frac{\text{number of fast neutrons that do not leak from reactor}}{\text{number of fast neutrons produced by all fissions}} \approx 0,865$$

Conversion Ratio (Breeding Ratio)

$$CR = \frac{\text{Average rate of fissile atom Pu-239 production}}{\text{Average rate of fissile atom U-235 consumption}}$$

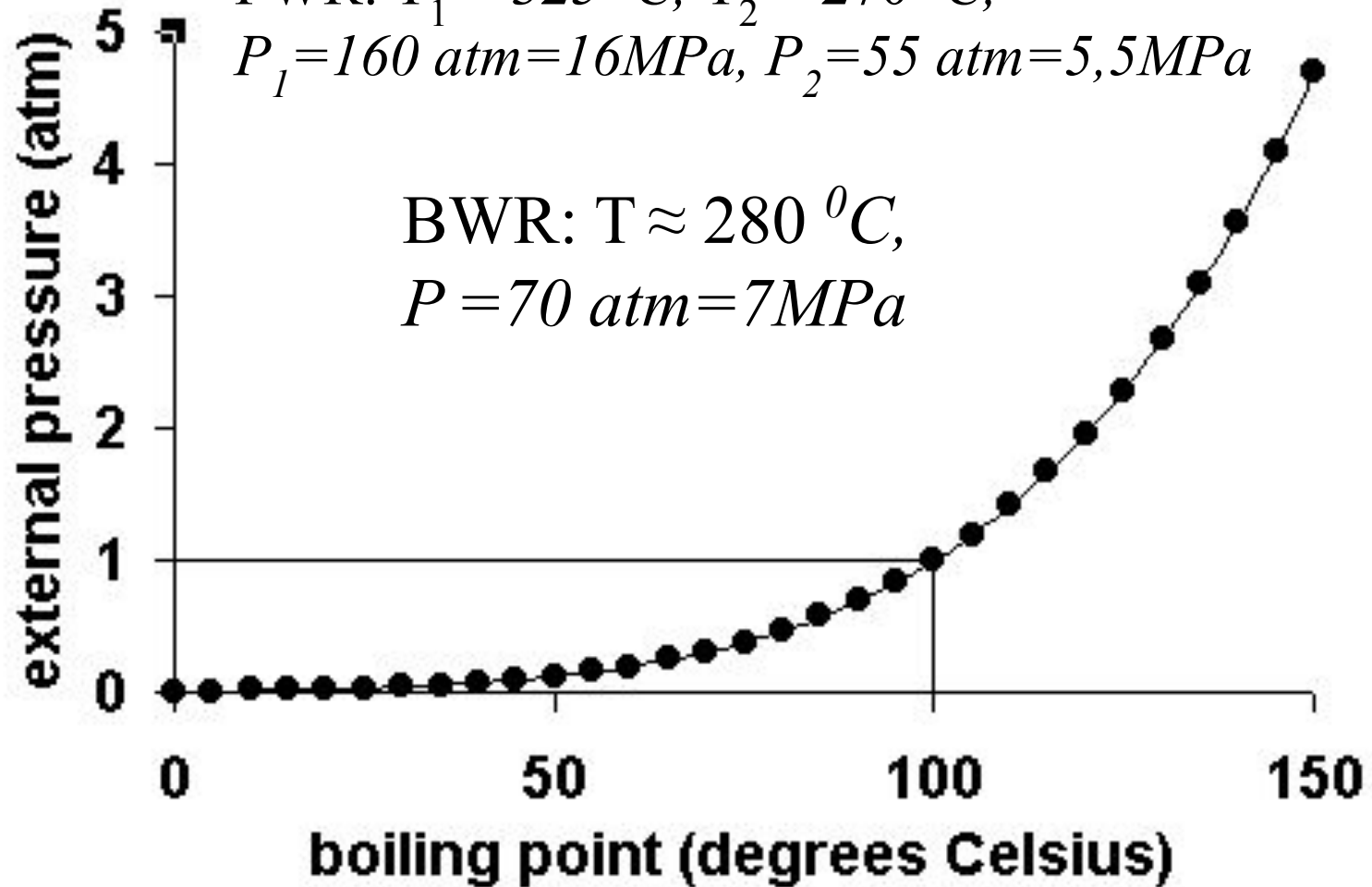
$$CR = \frac{\text{Number of neutrons absorbed in U-238}}{\text{Number of neutrons absorbed in U-235}}$$

Реактор



PWR: $T_1 \approx 325\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 \approx 270\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $P_1 = 160\text{ atm} = 16\text{ MPa}$, $P_2 = 55\text{ atm} = 5,5\text{ MPa}$

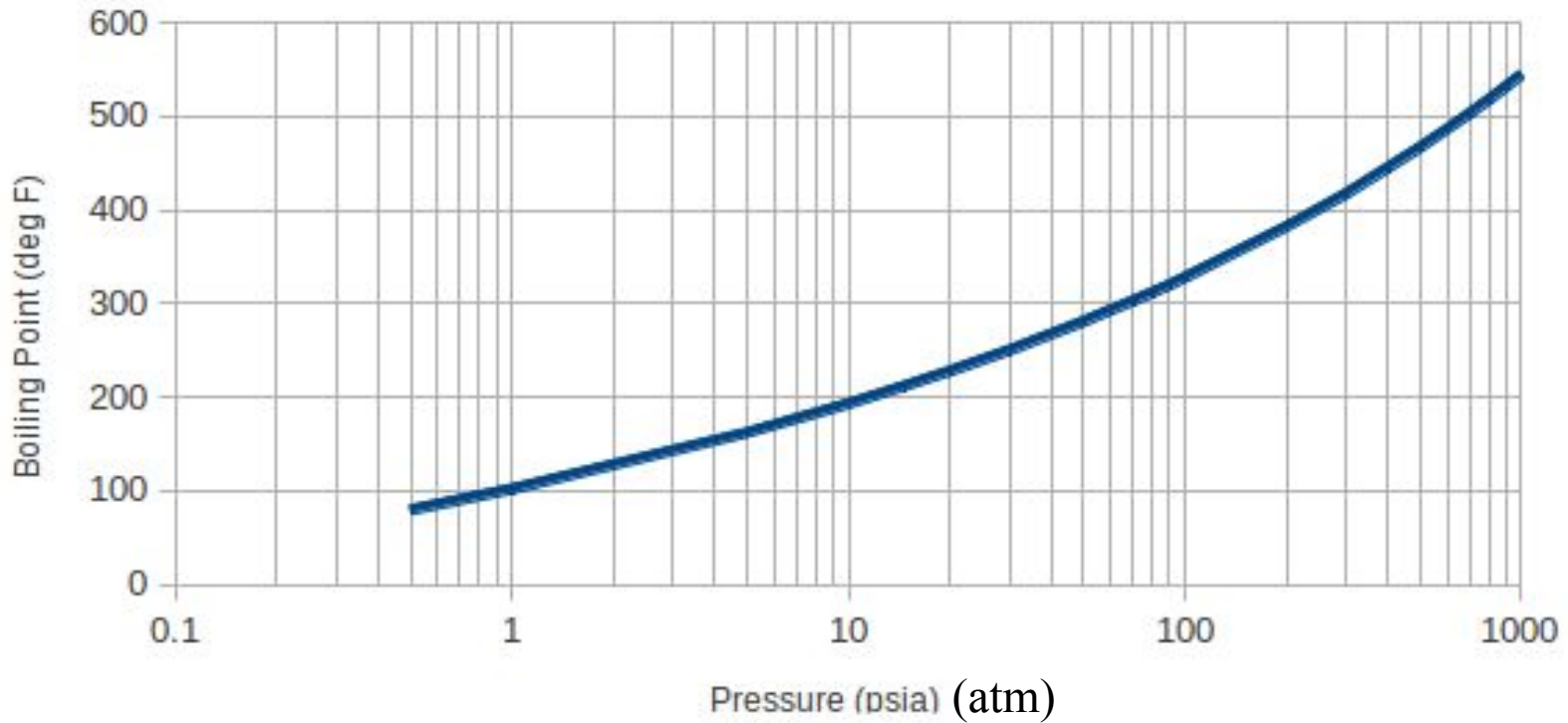
BWR: $T \approx 280\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 $P = 70\text{ atm} = 7\text{ MPa}$



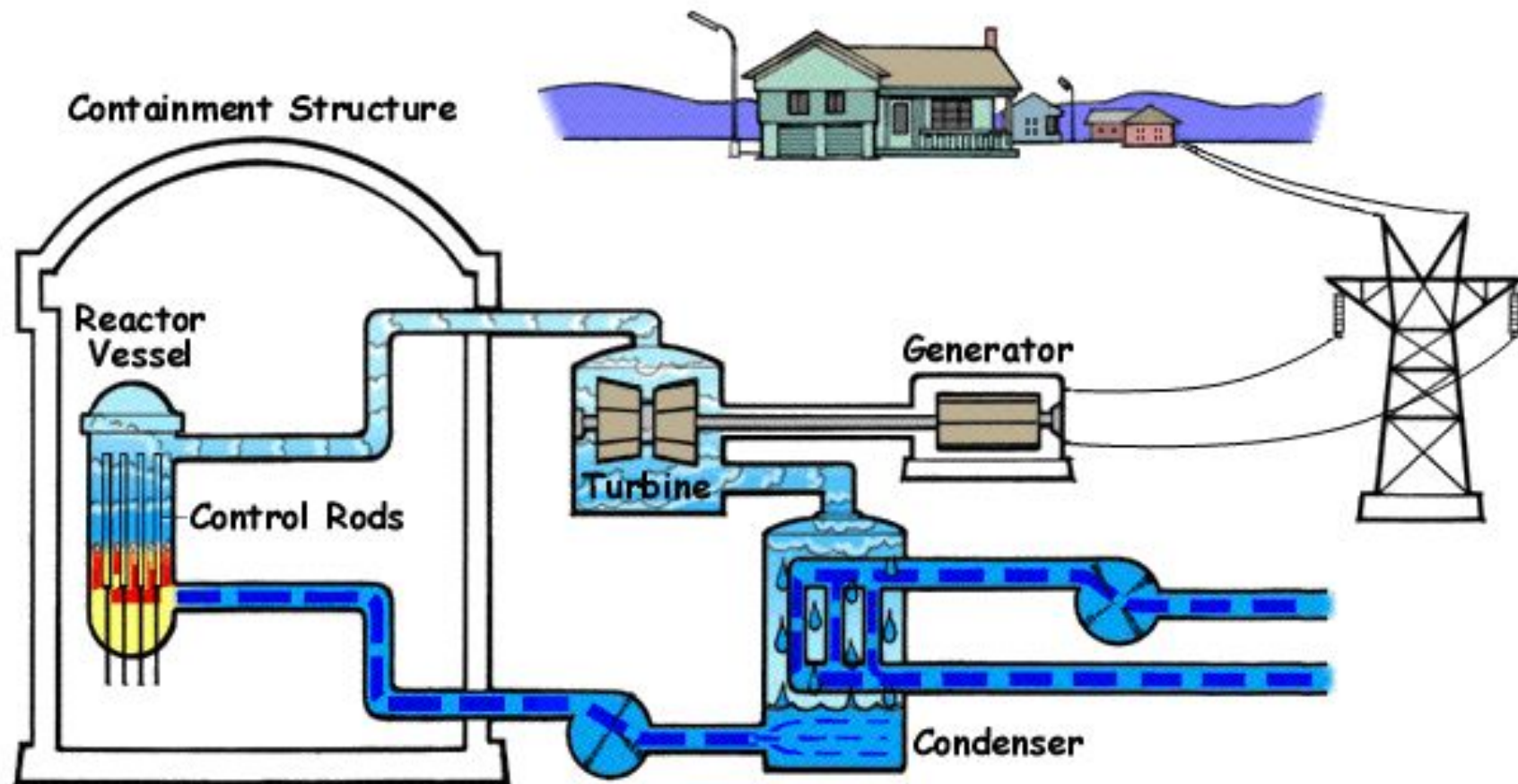
BWR: $T \approx 280^\circ\text{C}$,
 $P = 70 \text{ atm} = 7\text{MPa}$

PWR: $T_1 \approx 325^\circ\text{C}$, $T_2 \approx 270^\circ\text{C}$,
 $P_1 = 160 \text{ atm} = 16\text{MPa}$, $P_2 = 55 \text{ atm} = 5.5\text{MPa}$

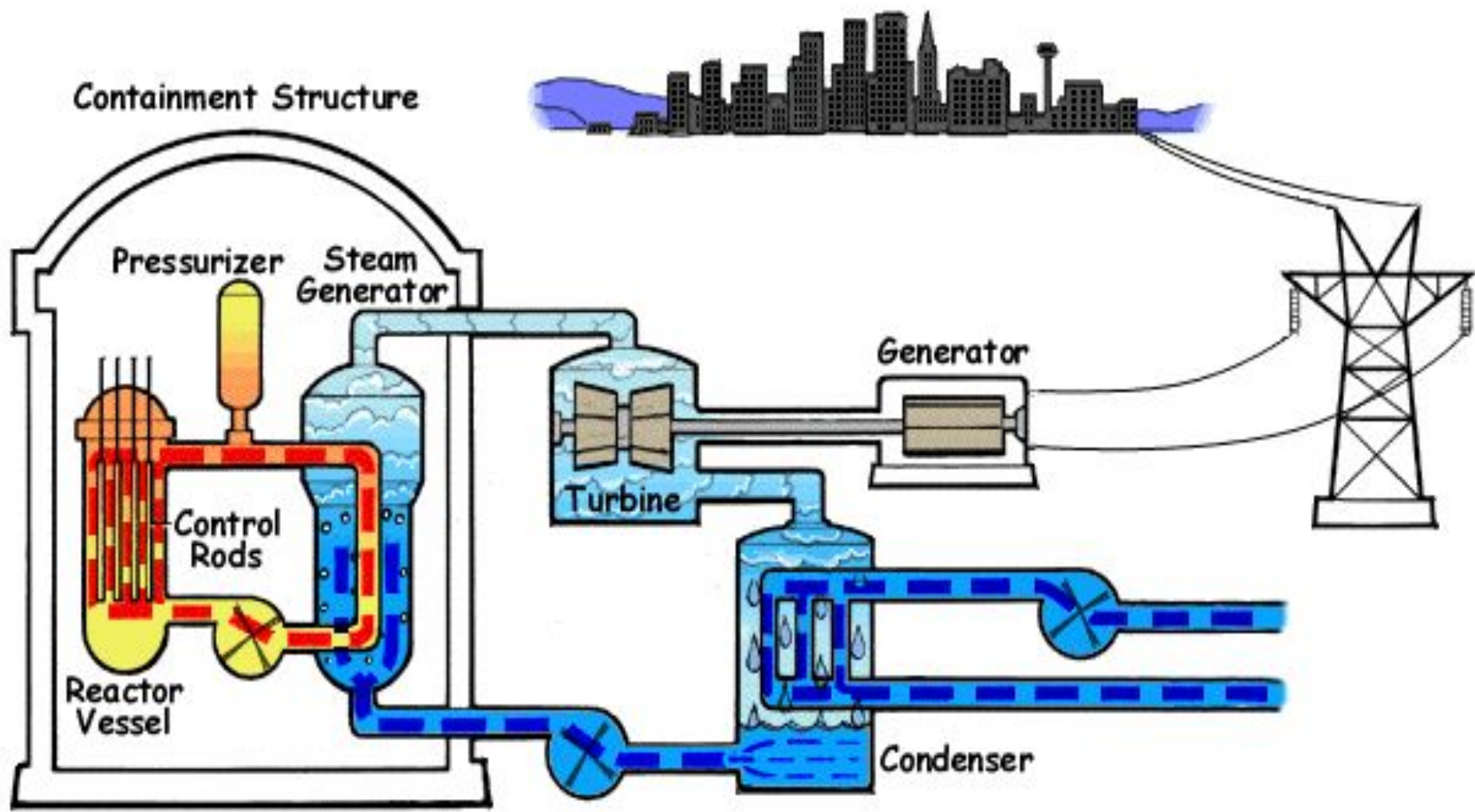
Water - Pressure and Boiling Points



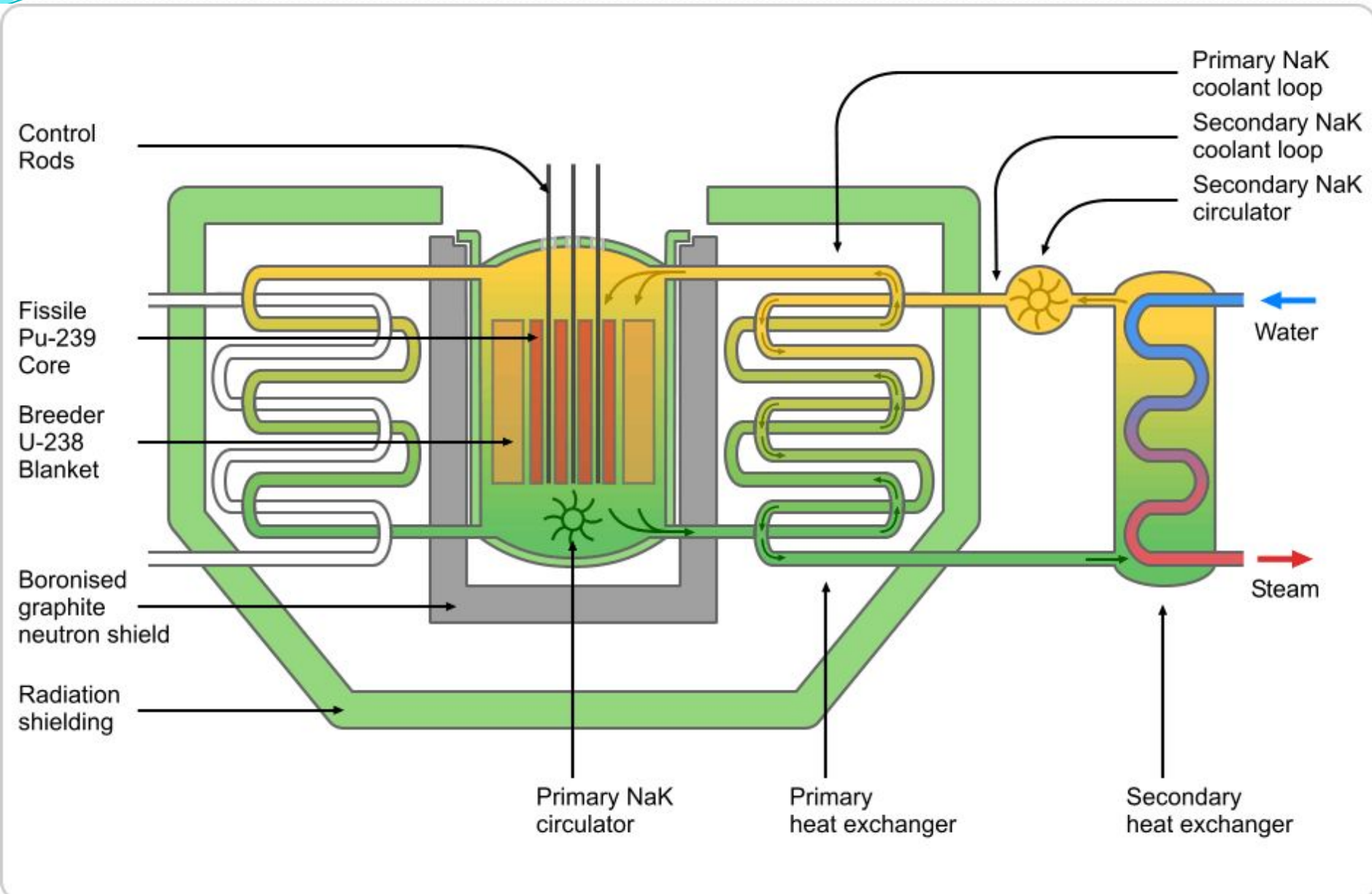
Қайнайтын жеңіл сулы реактор (BWR)



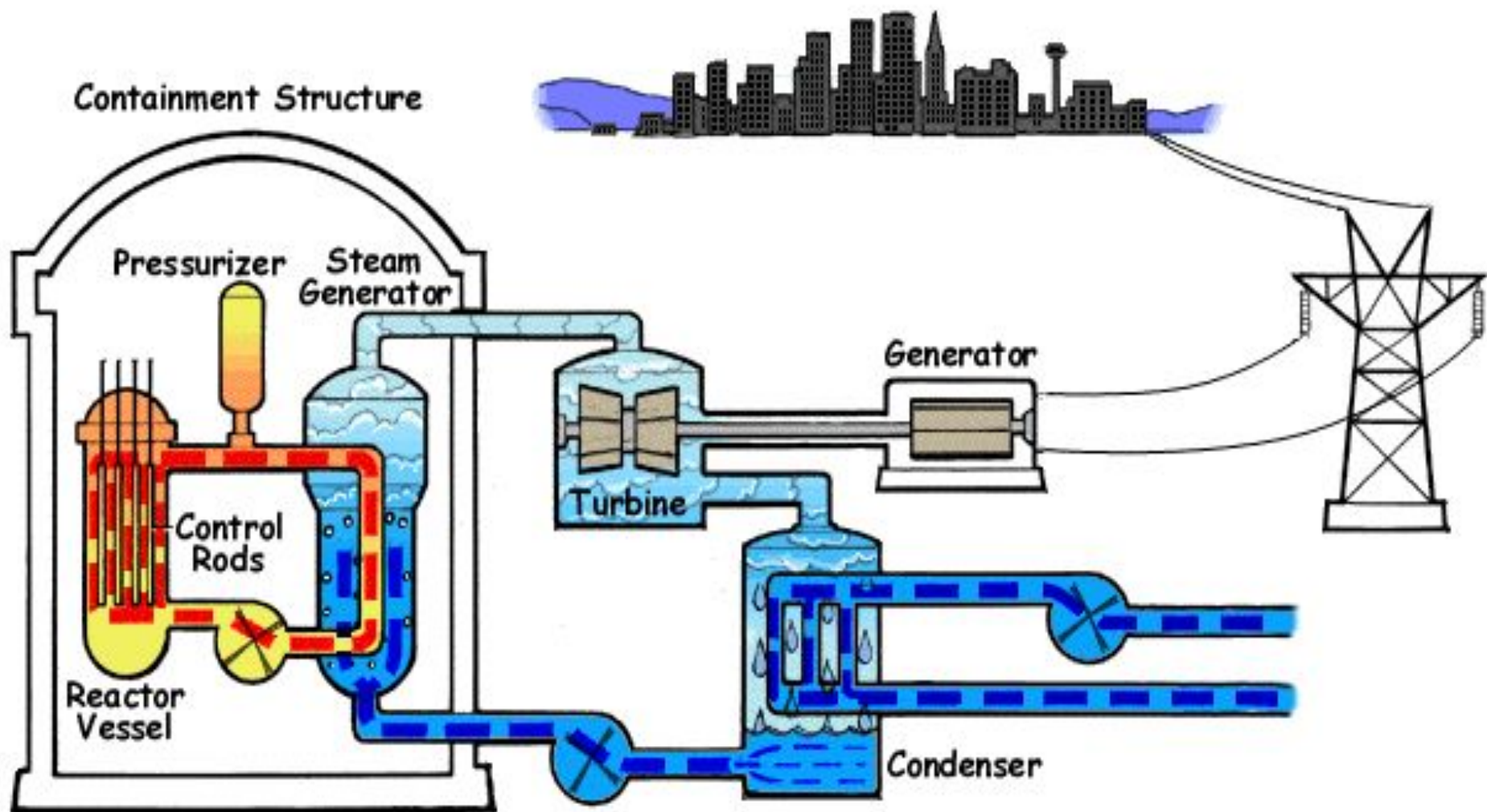
Қысымды жеңіл сулы реактор (PWR)



Шапшаң нейтронды реактор реактор

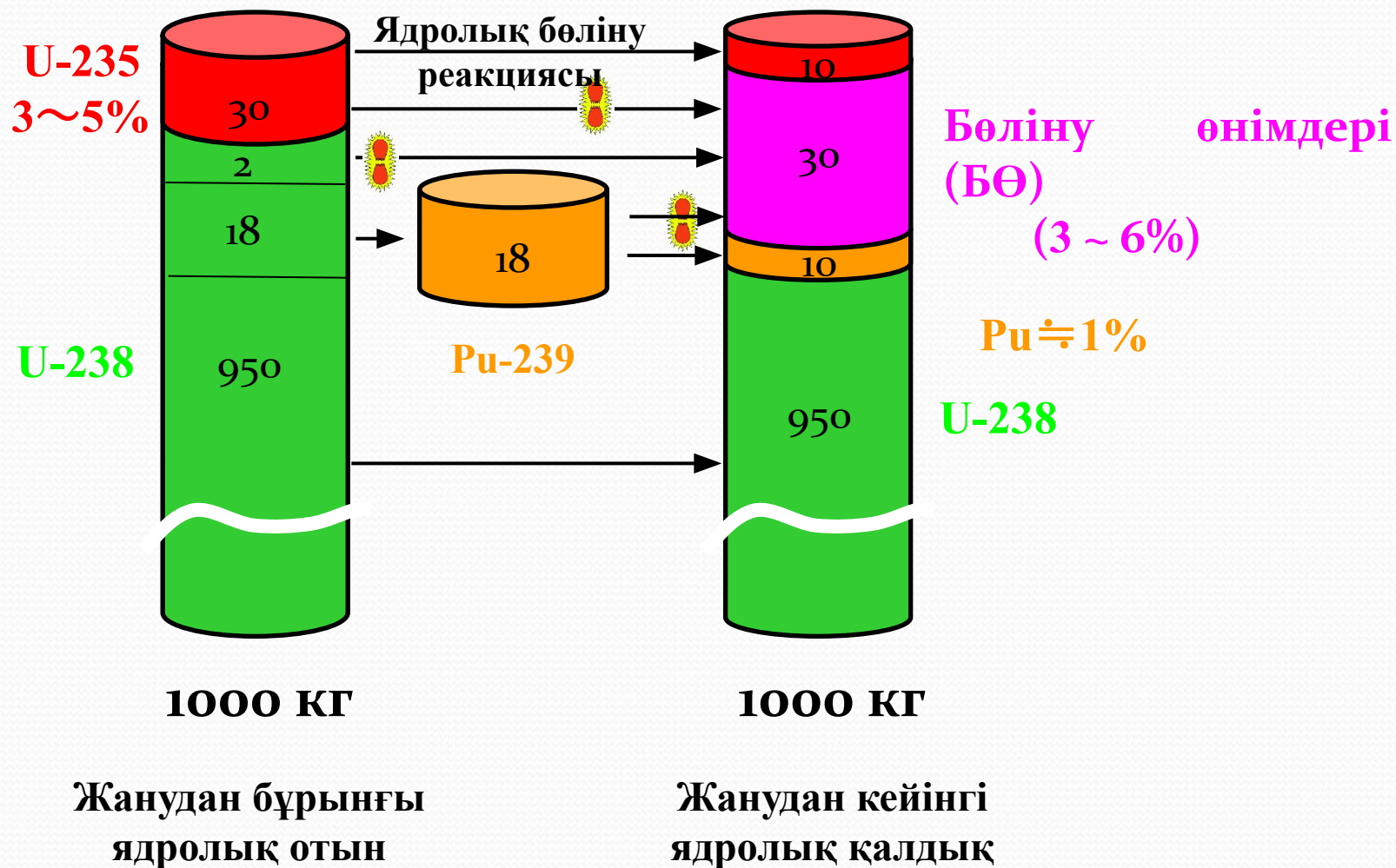


ҚЫСЫМДЫ ЖЕҢІЛ СУЛЫ РЕАКТОР (PWR)

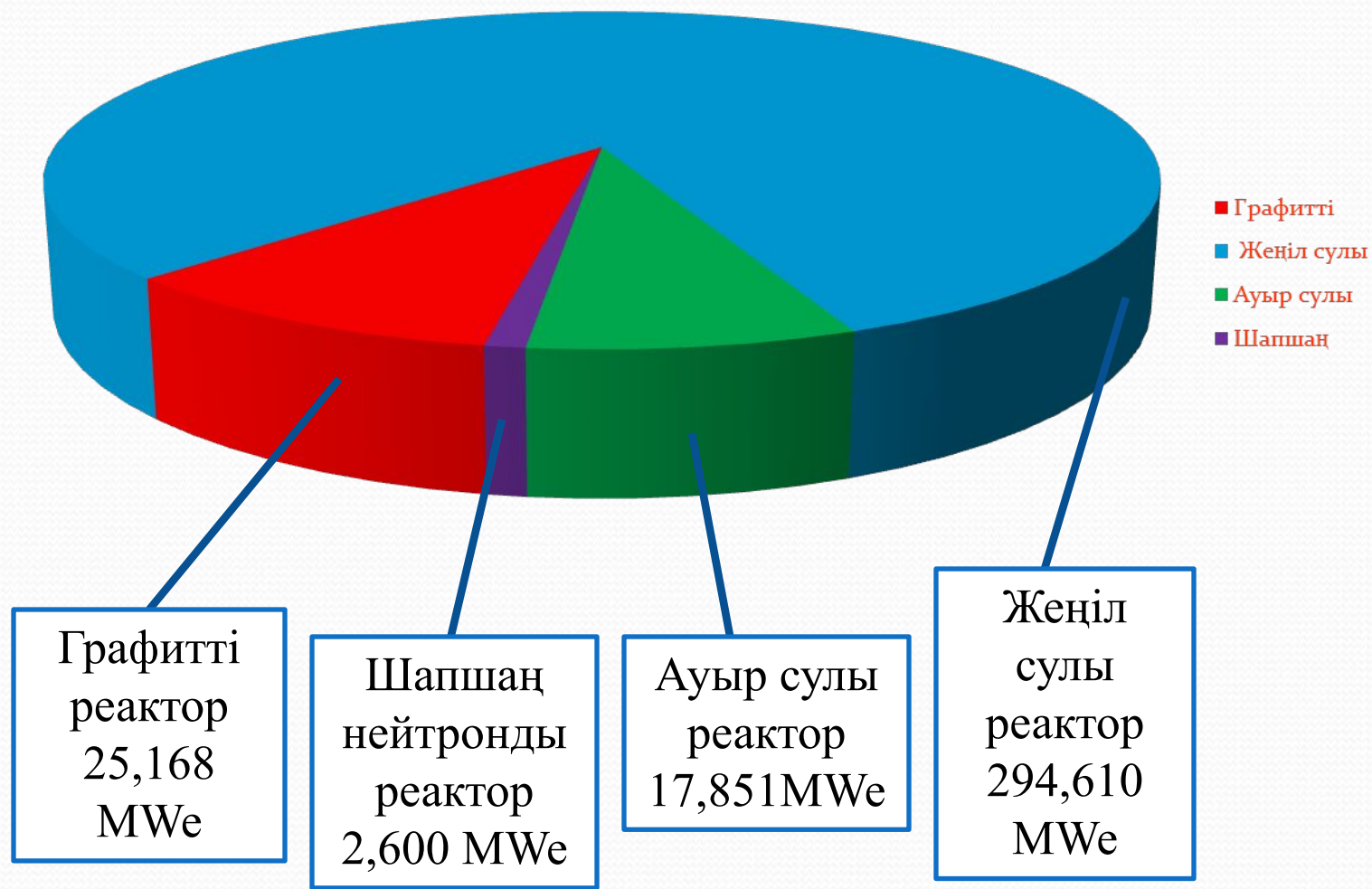


Жеңіл сулы реактордағы уранның жануы

Байытылған уран → Қолданылған уран



Реактордың тиіпі бойынша энергетикадағы үлесі



еЛ реактор саны %

Total

United States 104 20

France 59 76

Japan 55 34

United Kingdom 35 22

Germany 19 31

Russia 29 15

So. Korea 16 41

Canada 14 12

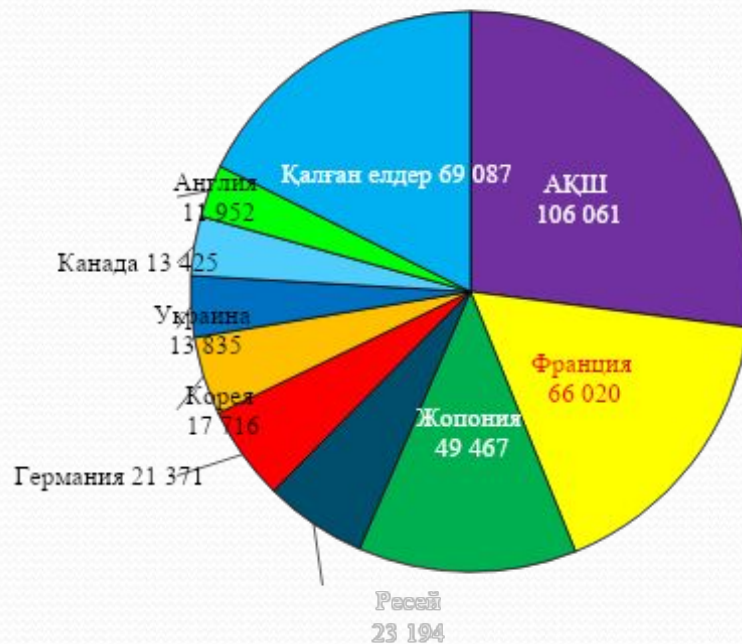
India 14 3

Sweden 11 39

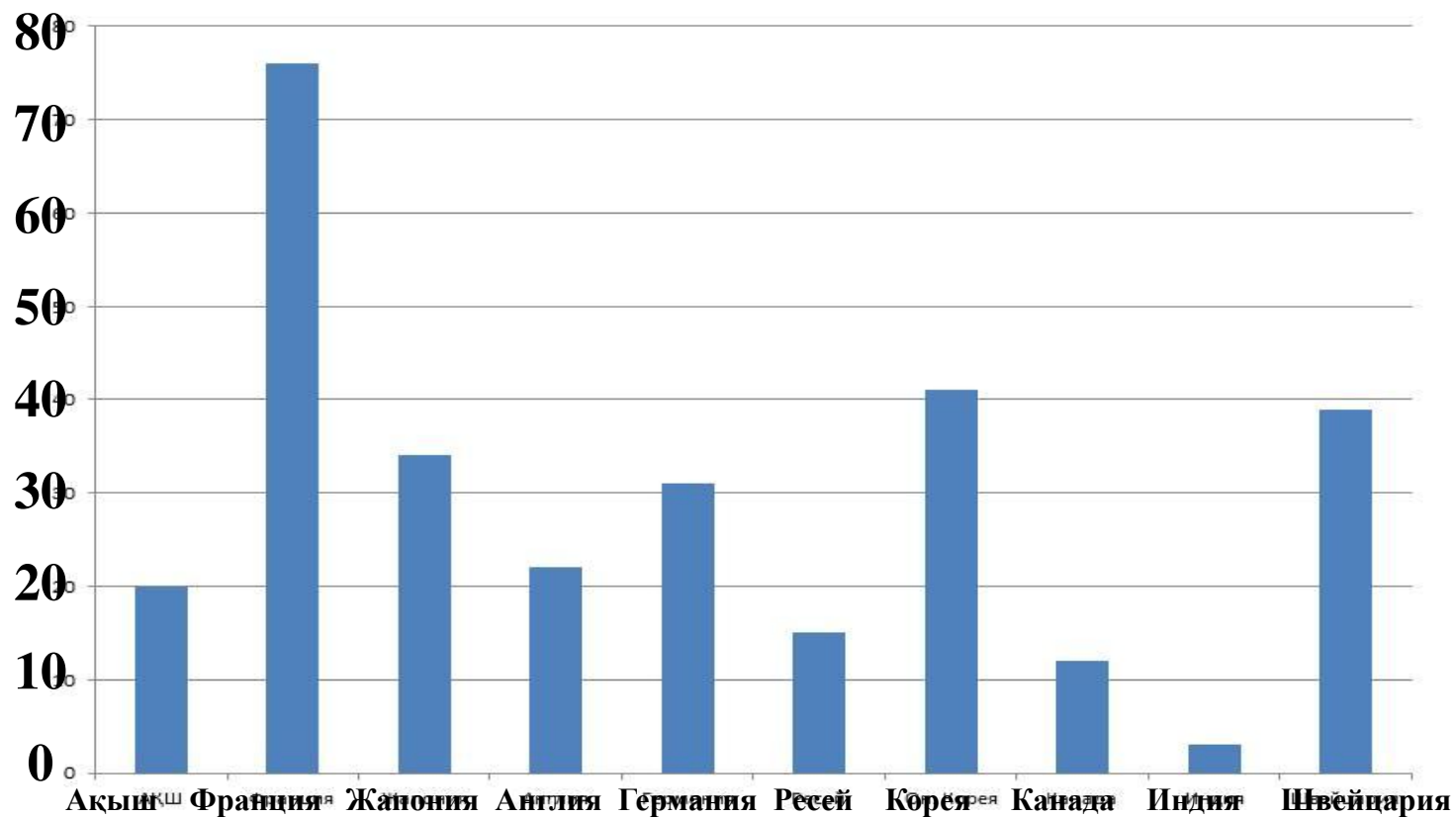
21 Others

Totals: 437 16

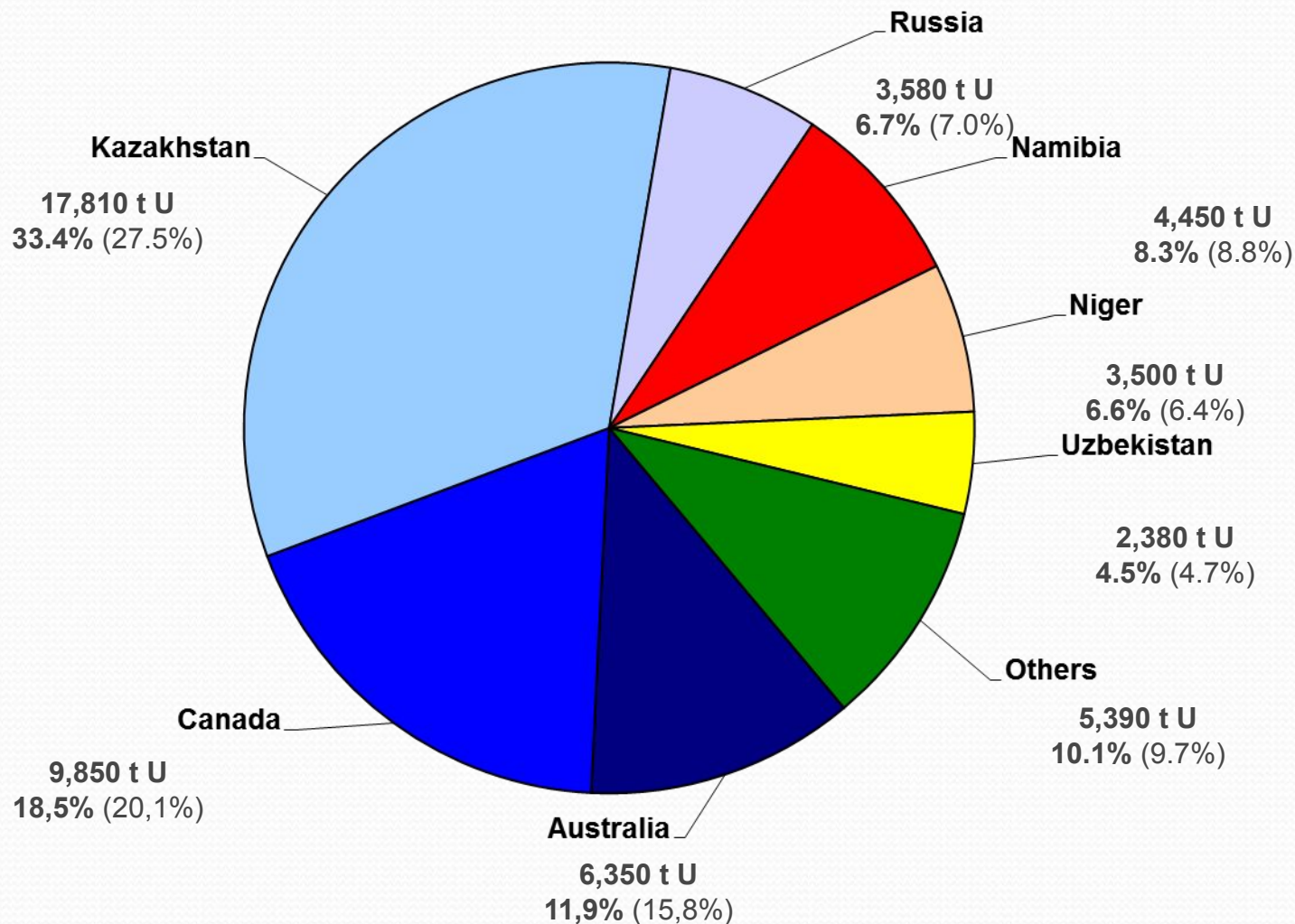
Әлемде өндірілген АЭС -тің үлесі (МВт)



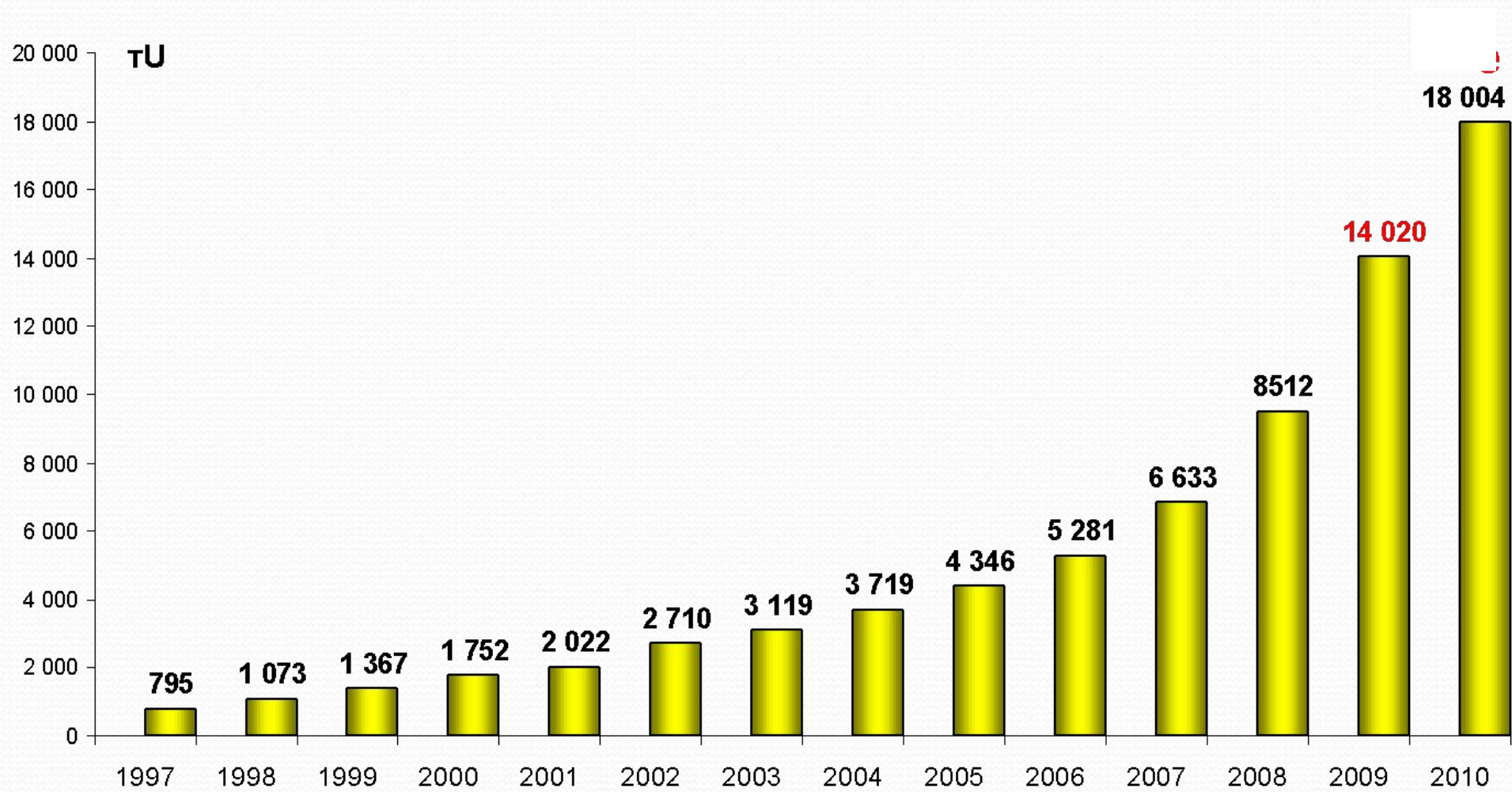
Әлем елдерінің АЭС-тегі үлесі



2010 жылғы әлемдегі уранның өндірісі



1997-2010 аралығында Қазақстанда өндірілген уран.

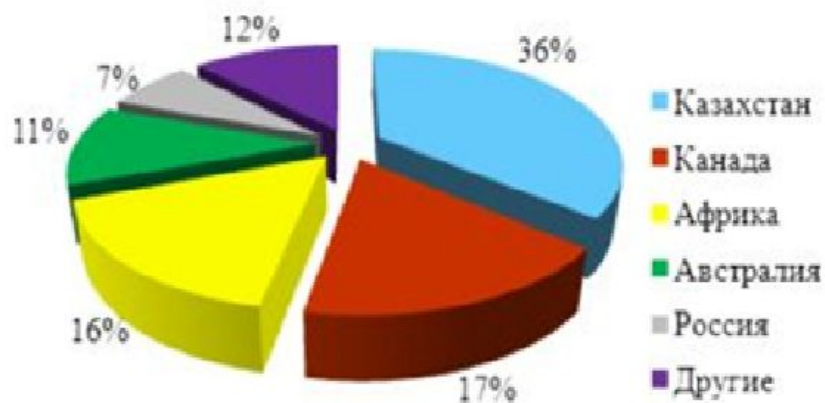


Динамика добычи урана

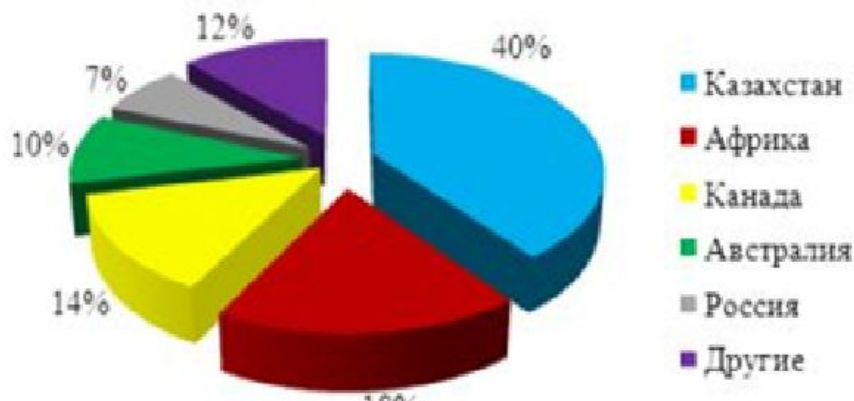


Әлемдегі уран өндірісі

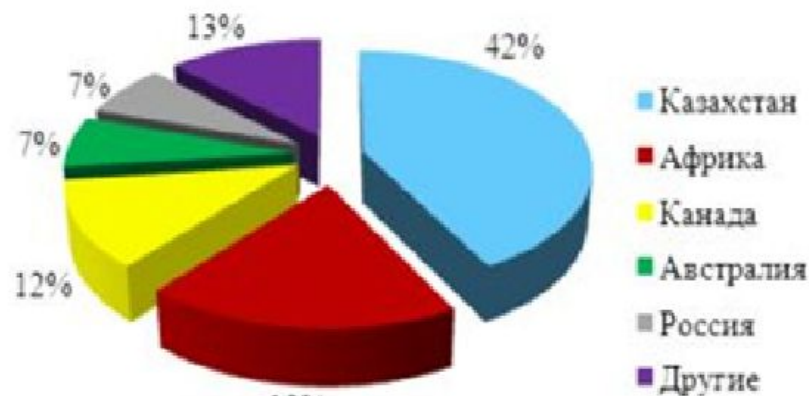
2011 г.

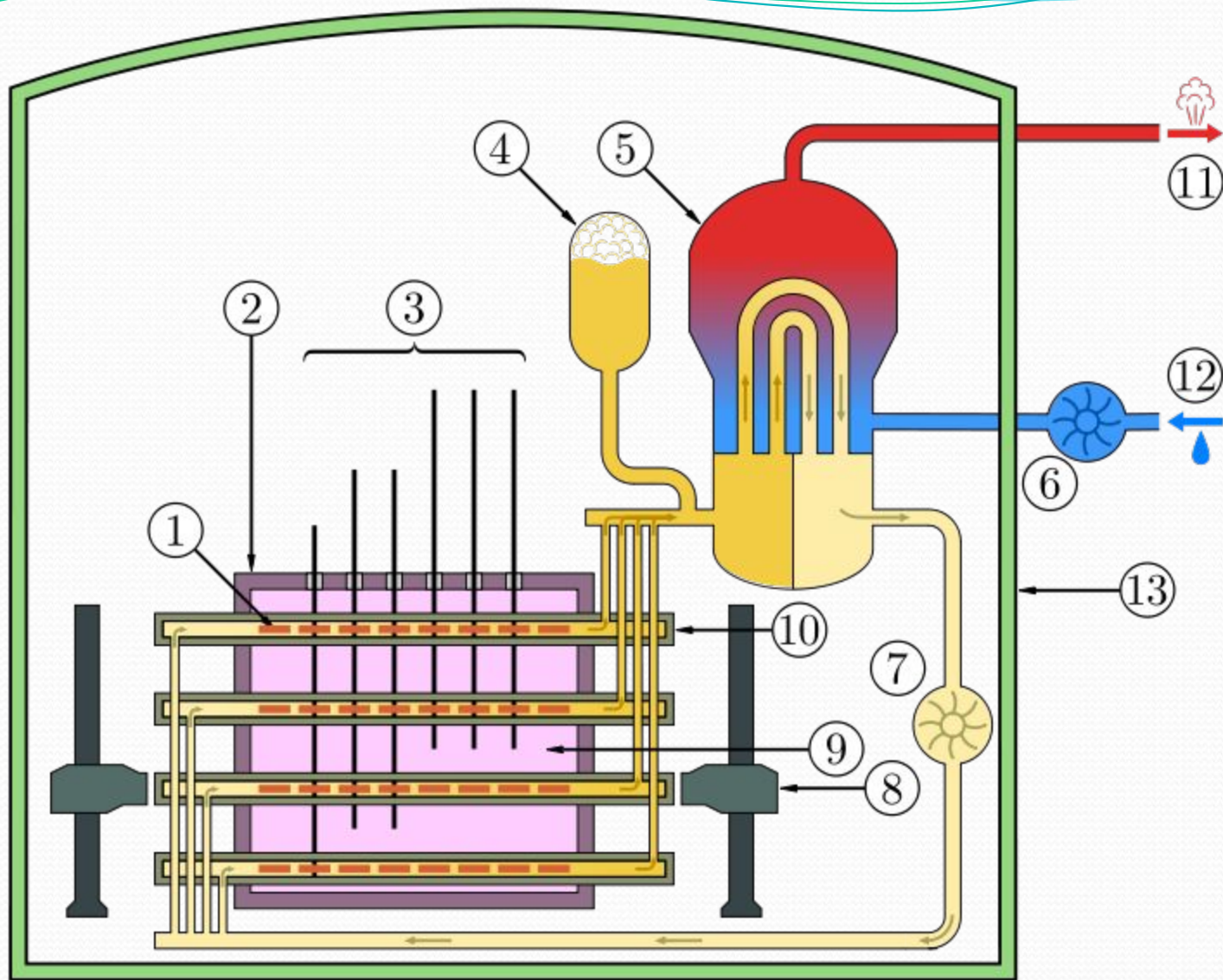


2015 г.

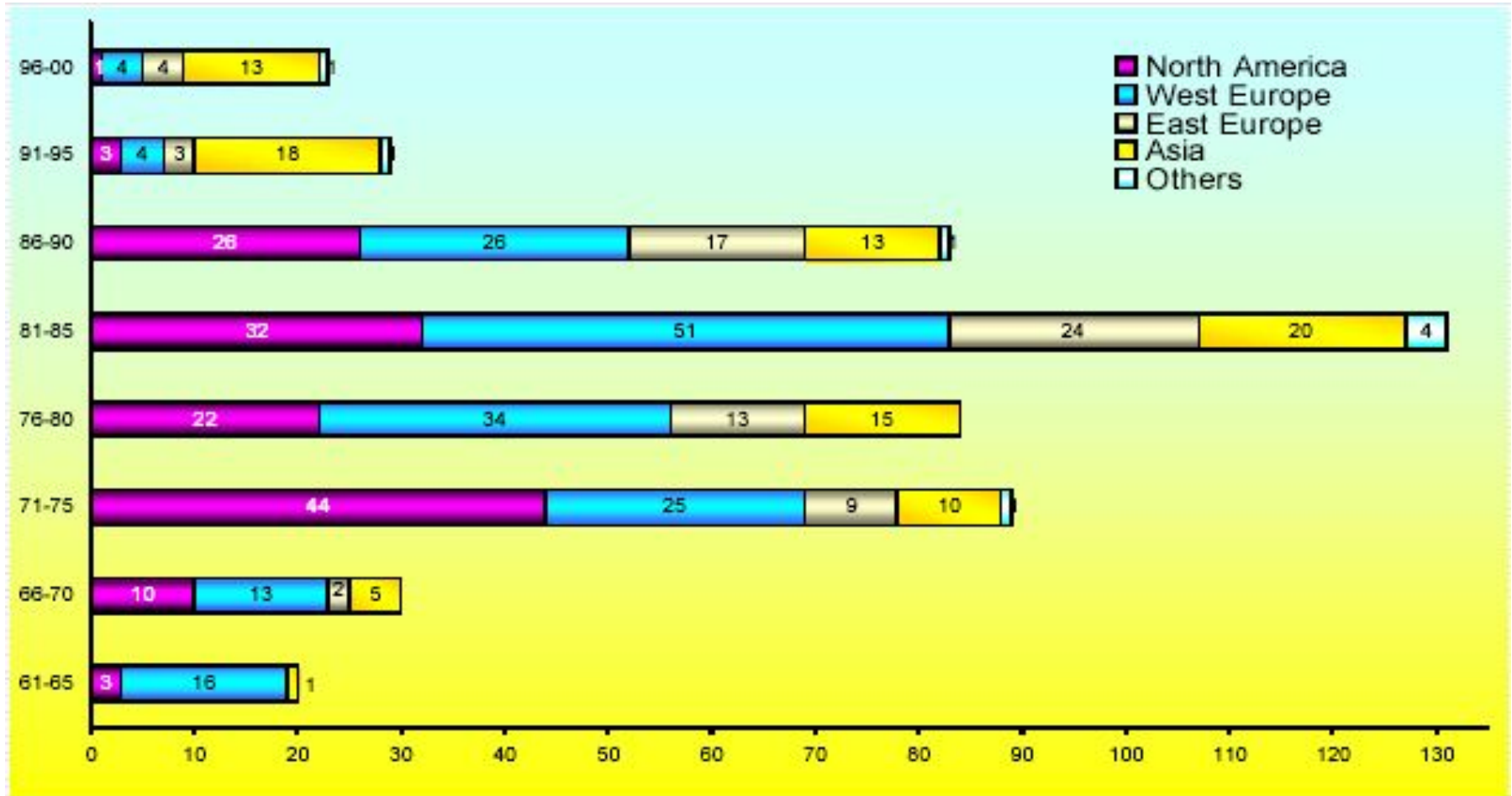


2020 г.

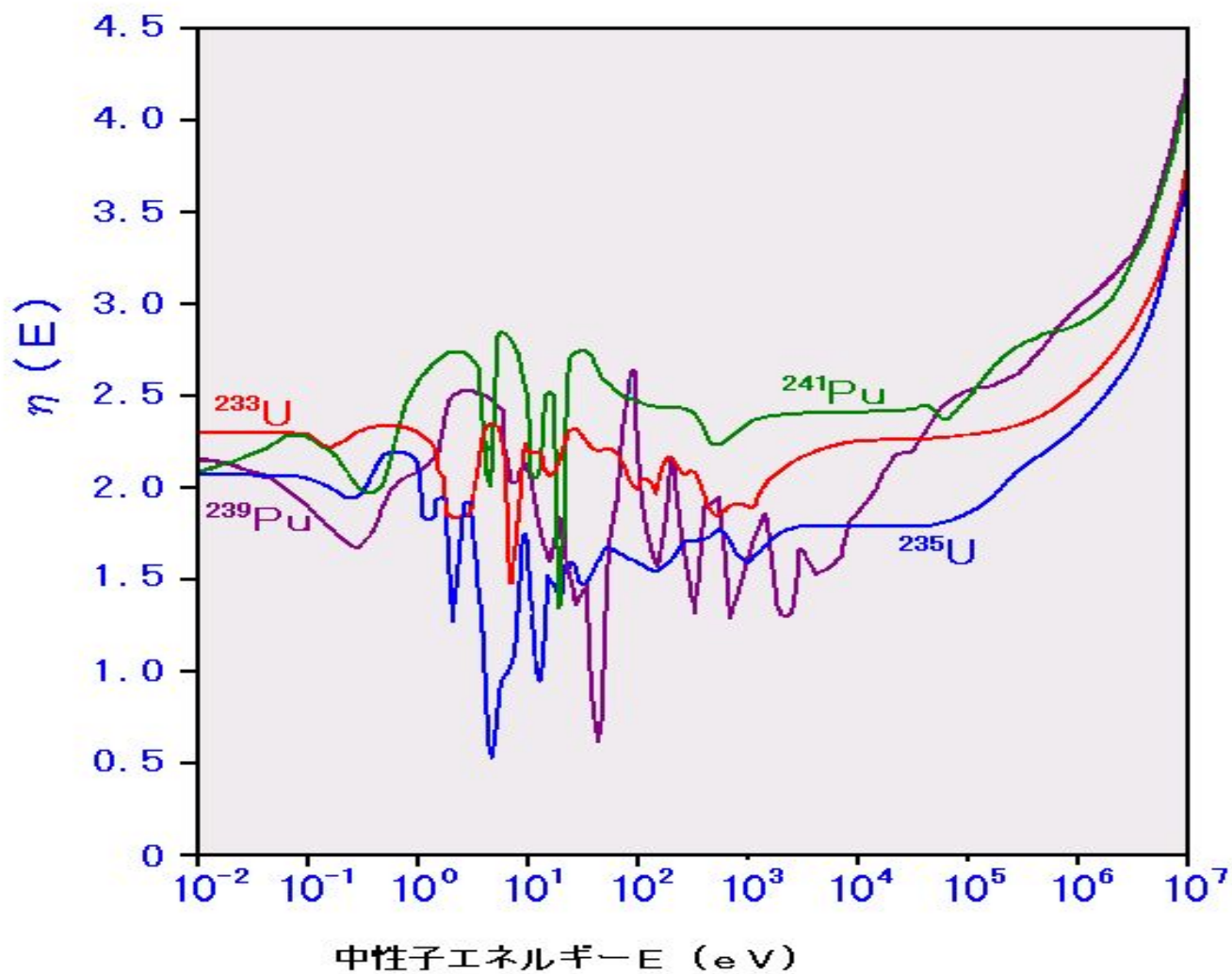




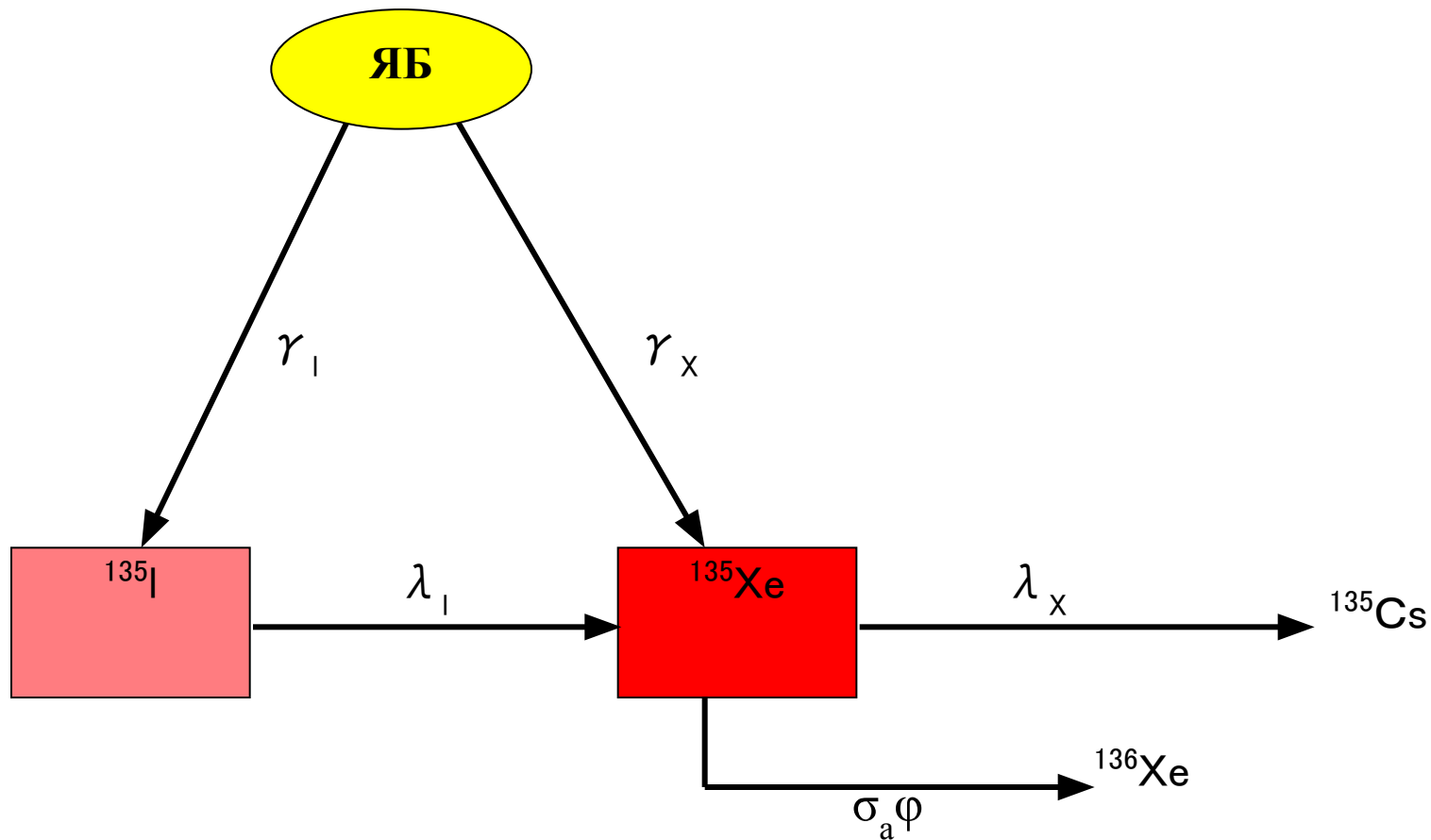
Number of nuclear power plants commissioned - grouped in 5 year interval



η МӘНІ: (өндірілген нейтрон саны / жұтылған н.с.)

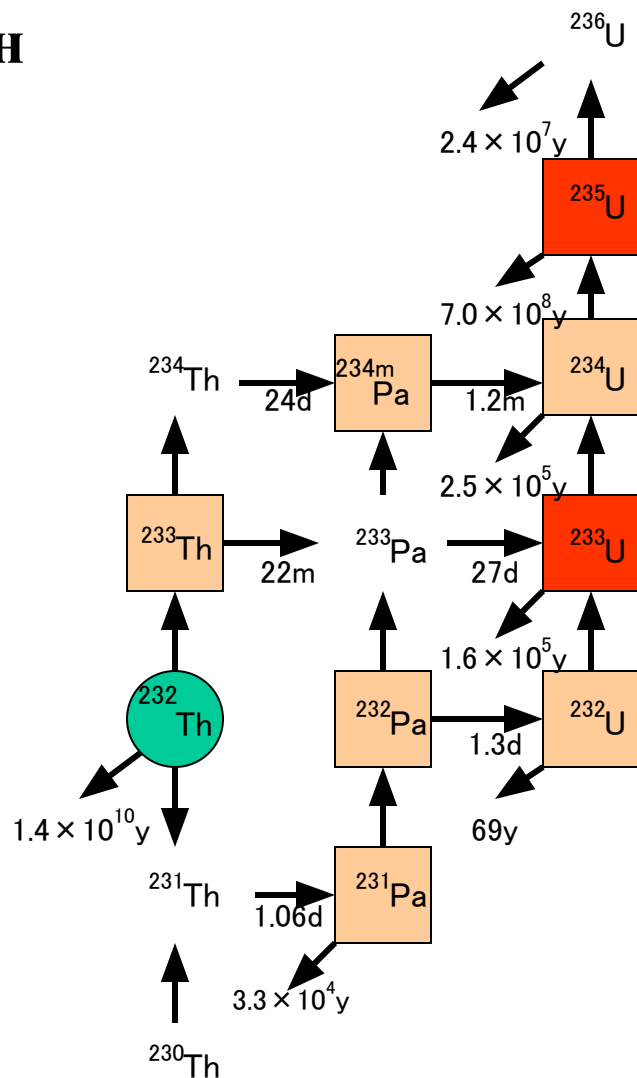
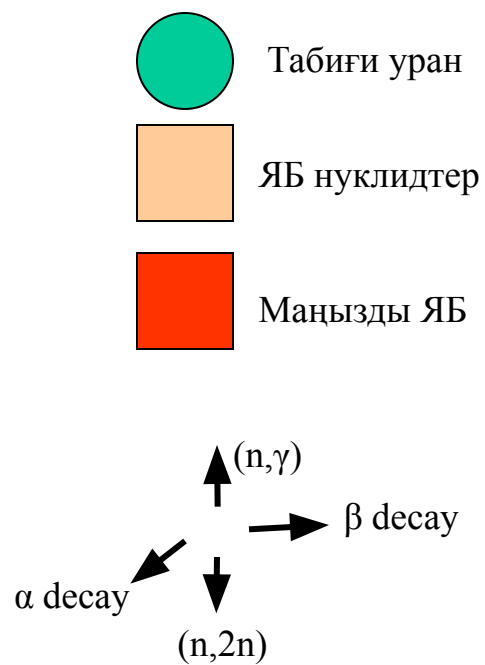


ЯБӨ ^{135}Xe тізбегінің жалғасы

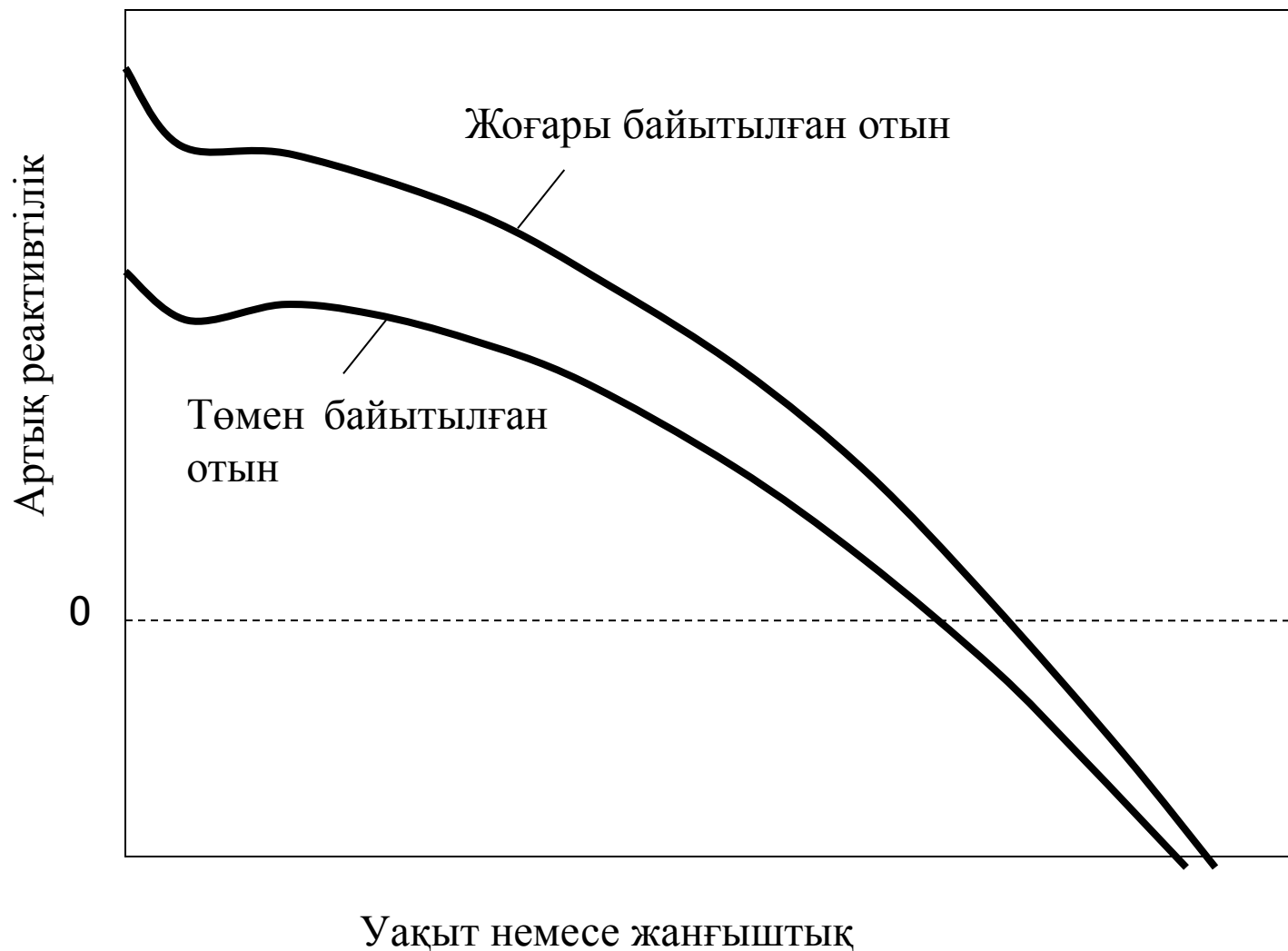




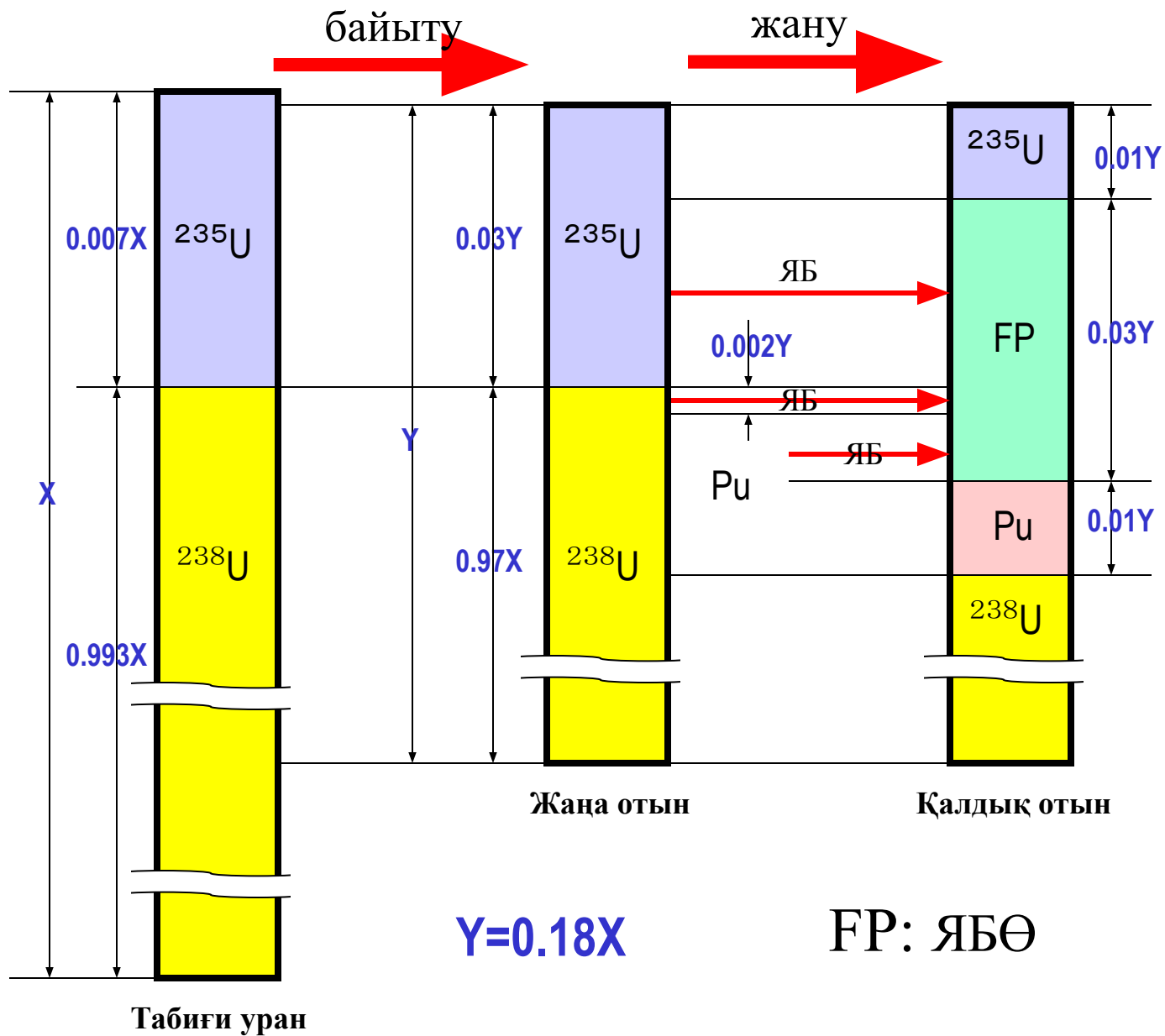
Торий сериялық отын



Артық реактивтіліктің жану бойынша өзгерісі



LWR ядролық отынның өзгерісі



Nuclide densities in the equilibrium state: n_i

$$-(\lambda_i + \phi\sigma_j + r_j)n_j + \sum_k \lambda_{k \rightarrow j} n_k + \phi \sum_k \sigma_{k \rightarrow j} n_k + s_j = 0$$

where

ϕ = neutron flux

σ_j = micro. total transmutation cross-section of j 'th nuclide

$\sigma_{k \rightarrow j}$ = micro. transmutation cross-section of k 'th to j 'th nuclide

λ_i = decay constant of j 'th nuclide

$\lambda_{k \rightarrow j}$ = decay constant of k 'th to j 'th nuclide

r_j = discharge constant of j 'th nuclide

s_j = supply rate of j 'th nuclide from external source

Nuclide Densities in Equilibrium State

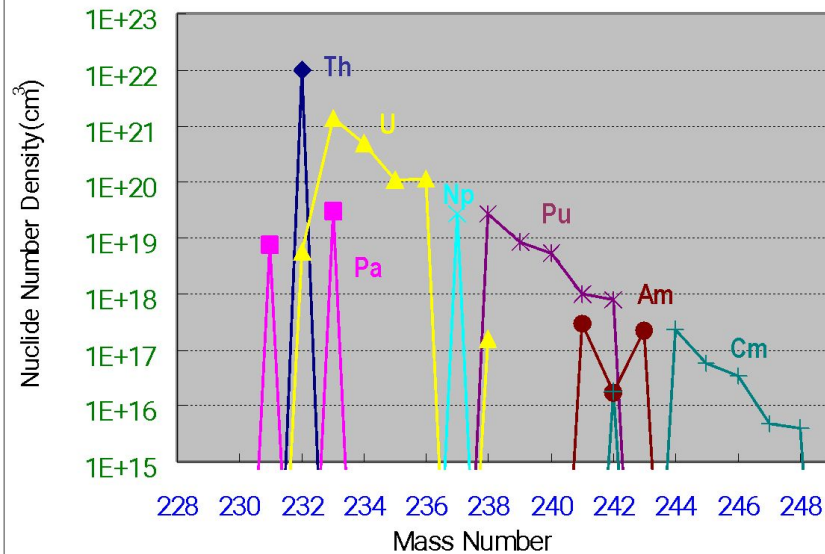
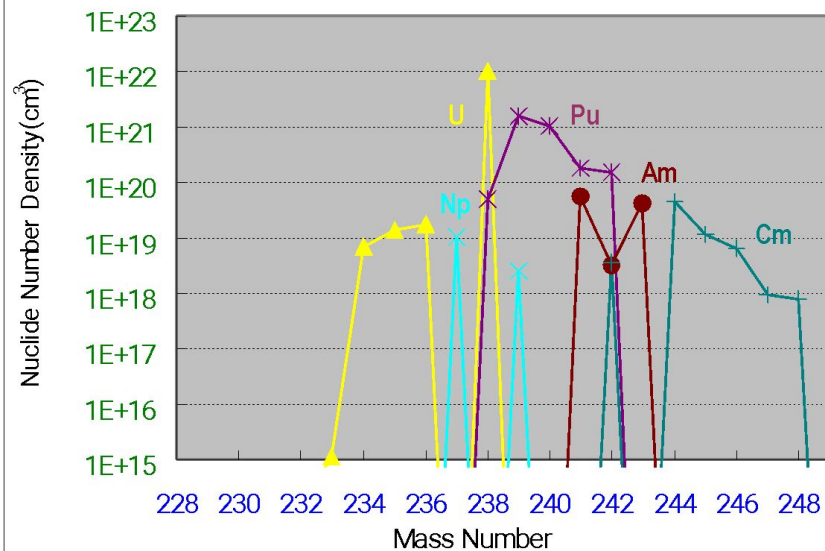
$$\mathbf{M}\mathbf{n} = \mathbf{s}$$

$\mathbf{M}$: transmutation matrix

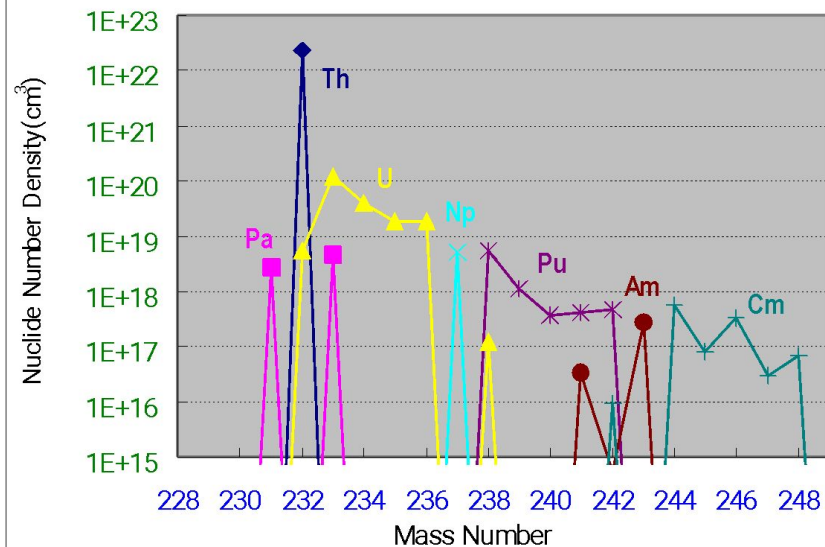
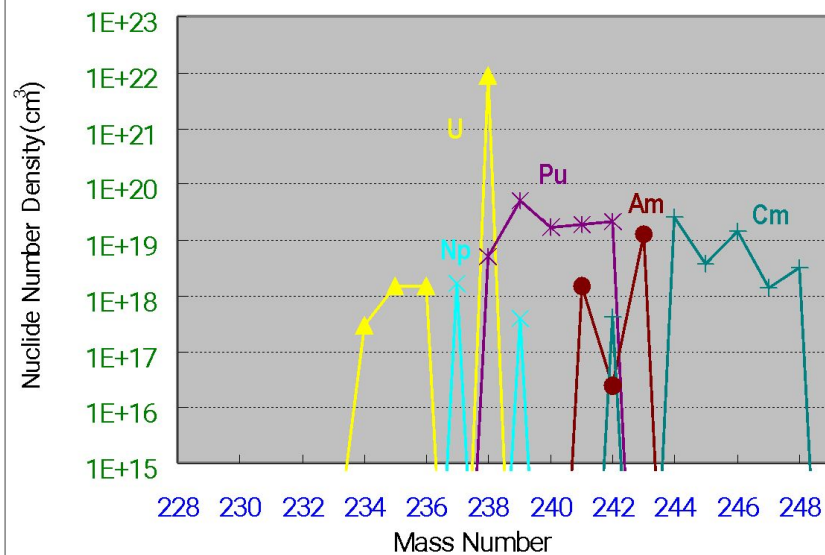
$\mathbf{n}$: nuclide densities of HMs and FPs

$\mathbf{s}$: fuel supply rates

Fast reactor



Thermal reactor



Uranium cycle

Thorium cycle

Neutron Balance

$$\eta = \frac{\nu \Sigma_f(\textit{fuel})}{\Sigma_a(\textit{fuel})}$$

$$h = \frac{\nu \Sigma_f(\textit{fuel})}{\Sigma_a(\textit{fuel} + \textit{FP})}$$

$$k_{\infty} = \frac{\nu \Sigma_f(\textit{fuel})}{\Sigma_a(\textit{fuel} + \textit{FP} + \textit{others})}$$

Neutron Balance

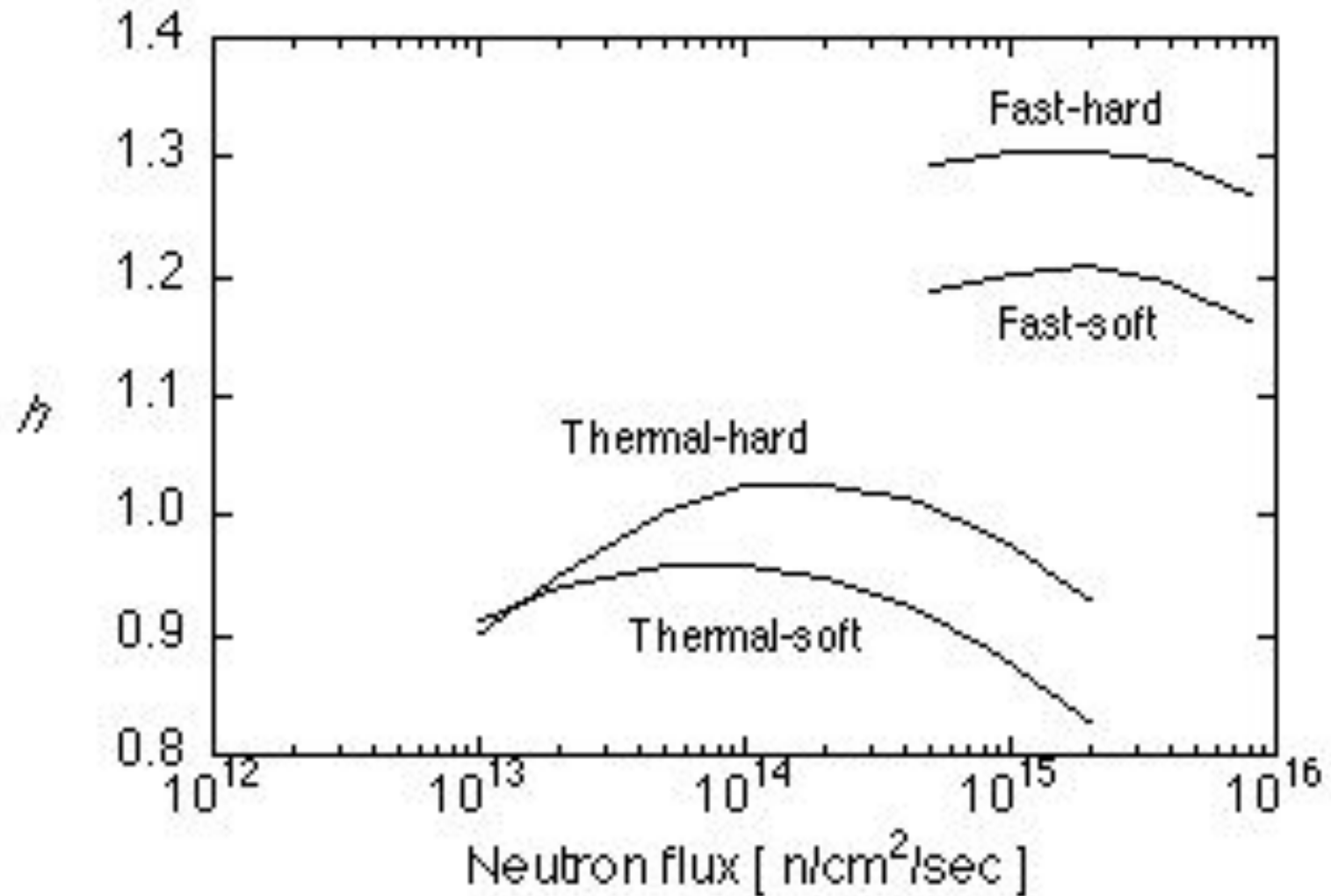
$$h = \frac{\nu \Sigma_f}{\Sigma_a} = \frac{(\nu \sigma_f, n)}{(\sigma_a, n)} = \frac{(f, s)}{(a, s)}$$

Where f and a are nuclide importance given by

$$M^t f = \phi \nu \sigma_f$$

$$M^t a = \phi \sigma_a$$

h-values of Natural Uranium for Different Neutron Spectrum



h-values of Thorium for Different Neutron Spectrum

