

2. Якая доля ядзер ізатопа германію ${}_{32}^{68}\text{Ge}$ з перыядам паўраспаду $T_{1/2} = 270$ сут захаваецца праз прамежак часу $t = 4,5$ года?
3. Перыяд паўраспаду стронцыю ${}_{38}^{90}\text{Sr}$ $T_{1/2} = 29$ гадоў. Колькі часу спатрэбіцца для таго, каб ад узору масай $m = 1,0$ г засталася $(1/32)$ г.
4. Вызначыце лік атамаў, якія змяшчаюцца ў свінцы ${}_{82}^{210}\text{Pb}$ масай $m = 0,632$ г. Колькі атамаў застанецца праз $\Delta t = 95$ гадоў, калі перыяд паўраспаду $T_{1/2} = 19$ гадоў?
5. Вызначыце масу m_1 радыеактыўнага рэчыва, што не распалася праз суткі, калі спачатку яго маса была $m = 1,0$ кг. Перыяд паўраспаду рэчыва $T_{1/2} = 12$ гадзін.



§ 40. Дзяленне цяжкіх ядзер. Ланцуговыя ядзерныя рэакцыі

Адкрыццё дзялення ўрану азначала з'яўленне новага віду паліва — самой масы матэрыі.

Д. Юз

- Асобае месца сярод ядзерных рэакцый займаюць ланцуговыя ядзерныя рэакцыі дзялення, якія прывялі да стварэння, з аднаго боку, новых крыніц энергіі, а з другога — да з'яўлення новага тыпу зброі, якая мае каласальную магутнасць. Высветлім асноўныя заканамернасці дадзенага тыпу рэакцый і ўмовы іх узнікнення.



Энергія, якая вызваляецца пры ядзернай рэакцыі, называецца энергетычным выхадам ядзернай рэакцыі.

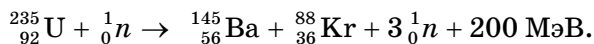
Асобы тып ядзерных рэакцый складаюць ядзерныя рэакцыі дзялення элементаў, размешчаных у канцы перыядычнай сістэмы хімічных элементаў. У выніку такіх рэакцый вылучаецца велізарная колькасць энергіі. Чаму гэта адбываецца?

Звернемся да графіка, паказанага на малюнку 211 (§ 37). Для цяжкіх ядзер, напрыклад такіх як ${}_{92}^{235}\text{U}$, энергія сувязі, што прыпадае на нуклон, складае велічыню 7,6 МэВ. Калі рухацца ўздоўж крывой на графіку залежнасці энергіі сувязі ад ${}_{92}^{235}\text{U}$ да месца, дзе знаходзяцца ядры хімічных элементаў з сярэдзіны перыядычнай сістэмы элементаў Мендзялеева, то бачна, што энергія сувязі нарастае ад $\sim 7,5$ МэВ да $\sim 8,8$ МэВ на нуклон.

Такім чынам, пры дзяленні цяжкага ядра на 2—3 больш легкія асколкі энергія сувязі, якая прыпадае на кожны нуклон, павялічваецца на велічыню парадку 1 МэВ. Паводле закону захавання энергіі такая ж колькасць энергіі вылучаецца пры дзяленні ядра. Такім чынам, падчас ядзернай рэакцыі, якая прыводзіць да з'яўлення ядзер з большай удзельнай энергіяй сувязі, павінна вылучацца энергія. Лік нуклонаў у кожным ядры ўрану роўны $N = 235$. Такім чынам, рэакцыя дзялення аднаго ядра прыводзіць да вылучэння каля 200 МэВ энергіі. Нават улічваючы разнастайныя страты, гэты лік непараўнальны з энергіяй $\sim 1\text{—}5$ эВ, вылучаемай у хімічных рэакцыях акіслення (гарэння паліва).

Такія вывады знайшлі сваё пацверджанне падчас шматлікіх эксперыментаў у першай палове XX ст. Асноўнае пытанне было ў тым, як прымусіць ядро дзяліцца. Бамбардзіроўка α -часціцамі ці пратонамі неэфектыўная з прычыны іх моцнага адштурхвання ядром. Электроны — занадта лёгкія «снарады». Выбар упаў на нейтроны. Яны дастаткова цяжкія (у параўнанні з электронамі) і ў той жа час электрычна нейтральныя. З прычыны гэтага нейтроны могуць бесперашкодна падлятаць да ядра-мішэні, рухаючыся з найменшай скорасцю. Патрапіўшы ў сферу дзеяння ядзерных сіл прыцягнення, нейтрон пранікае ў ядро.

У 1938 г. нямецкія радыехімікі Ота Ган, Фрыц Штрасман, Лізе Мэйтнер, Ота Фрыш упершыню ажыццявілі рэакцыю дзялення ${}_{92}^{235}\text{U}$ нейтронамі:



Адзначым, што сама ідэя дзялення ядра была такой незвычайнай, што навуковы свет спачатку не ўспрыняў вынікі іх эксперыментаў. І толькі праз некаторы час было ўсвядомлена, што ядро ўрану распадаецца галоўным чынам на два асколкі. У выніку дзялення могуць утварыцца розныя радыеізатопы. У большасці выпадкаў ядро дзеліцца на няроўныя асколкі (ядры): масавы лік большага ядра вагаецца ў межах ад 135—145, а меншага — ад 90—100. У кожным акце дзялення ядра ўрану вызваляюцца 2—3 нейтроны. Кінетычная энергія асколкаў, якія разлятаюцца, складае велічыню ~ 165 МэВ, а астатняя частка энергіі прыпадае на нейтроны і гама-кванты. Дадзеная рэакцыя паказана на малюнку 220.

У 1940 г. савецкія фізікі Георгій Флэраў і Канстанцін Пятржак выявілі новы від радыеактыўных ператварэнняў — спонтаннае дзялен-

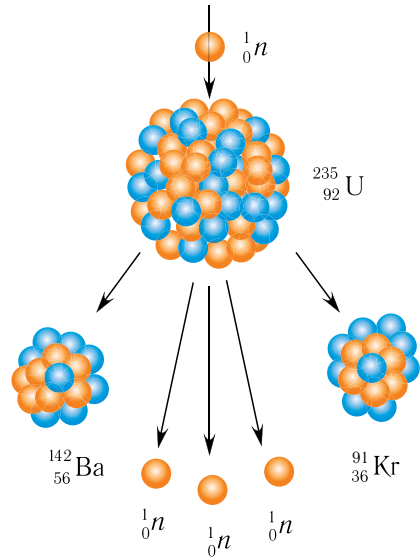
не ядзер урану ${}_{92}^{238}\text{U}$. У працэсе дзялення ўтвараюцца асколкі — ізатопы элементаў сярэдзіны перыядычнай сістэмы са значэннямі Z ад 34 (ізаотоп селену ${}_{34}^{74}\text{Se}$) да 67 (ізаотоп гольмію ${}_{67}^{162}\text{Ho}$).

Новая з’ява была названа *дзяленнем ядра* з-за падабенства з дзяленнем клеткі ў біялогіі. Найбольш верагодным з’яўляецца дзяленне ядра на два асколкі. Адносіна іх мас складае прыкладна 3 : 2. Верагоднасць дзялення на тры асколкі складае велічыню 10^{-2} — 10^{-8} ад верагоднасці дзялення на два. Рэакцыі дзялення ядзер звычайна з’яўляюцца эксаэнергетычнымі з вылучэннем энергіі ~ 200 МэВ у кожным акце рэакцыі.

Пры дзяленні ядра ўрану адзін нейтрон выклікае дзяленне аднаго ядра. Два асколкі дзялення, ужо не злучаныя магнутымі, але караткадзеючымі ядзернымі сіламі, з вялікімі скарасцямі разлятаюцца за кошт сіл электростатычнага адштурхвання. Сумарная кінетычная энергія асколкаў ($E \approx 170$ МэВ) складае асноўную долю ўсёй энергіі, вызваляемай пры дзяленні ядра ($E \approx 200$ МэВ).

З’яўленне асколкаў — не адзіны вынік дзялення ядра. Пачатковая адносіна ліку нейтронаў да ліку пратонаў у ядры-асколку прыкметна большая за значэнне гэтай велічыні для стабільных ядзер параўнальнай масы.

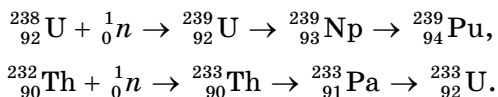
За кожны акт дзялення ядра ўтвараюцца ў сярэднім 2—3 новыя нейтроны, кожны з энергіяй у сярэднім $E \sim 2$ МэВ ($v \sim 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$). Яны выпускаюцца ядром урану адразу пасля дзялення і называюцца *імгненнымі*. Асколкі, што ўтварыліся, з’яўляюцца β^- -радыеактыўнымі. Таму пасля шэрага іх β^- -распадаў яны ператвараюцца ў стабільныя ізатопы. Часцей за ўсё даччынае ядро, якое ўтварылася пасля β^- -распаду, аказваецца ўзбуджаным і пераходзіць у асноўны энергетычны стан з выпусканнем γ -кванта або нейтрона, што выпускаюцца праз некалькі мінут пасля дзялення ядра і называюцца *запазняяльнымі*. Такія нейтроны складаюць каля 0,75 % утвораных нейтронаў.



Мал. 220. Рэакцыя дзялення ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ пад дзеяннем нейтрона



Уран ${}_{92}^{238}\text{U}$ і торый ${}_{90}^{232}\text{Th}$, якія выкарыстоўваюцца ў якасці сыравіны для атрымання штучнага паліва, пачынаюць дзяліцца пры энергіі нейтронаў, вышэйшай за 1 МэВ:



Асаблівасць ізатопаў ${}_{92}^{233}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$ і ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ заключаецца ў тым, што яны дзяляцца цеплавымі нейтронамі. У гэтым і заключаецца сэнс тэрміна «які дзеліцца».

Паколькі дзяленне ядзер выклікаюць нейтроны, а ў выніку дзялення зноў нараджаюцца нейтроны, то пры пэўных умовах працэс, пачаўшыся аднойчы з аднаго нейтрона, можа прыняць характар *ланцуговай рэакцыі*: за адным дзяленнем пойдучь следам іншыя і г. д.

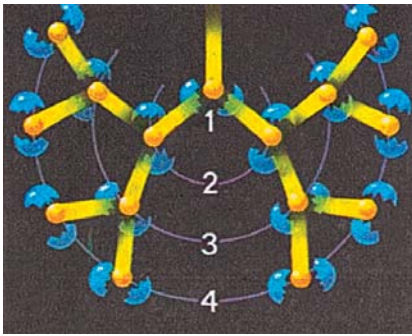
Ядзерная рэакцыя дзялення, у якой часціцы (нейтроны), што выклікаюць рэакцыю, утвараюцца і як прадукты гэтай жа рэакцыі, называецца *ланцуговай*.

Якія ж умовы неабходны для ланцуговых ядзерных рэакцый?

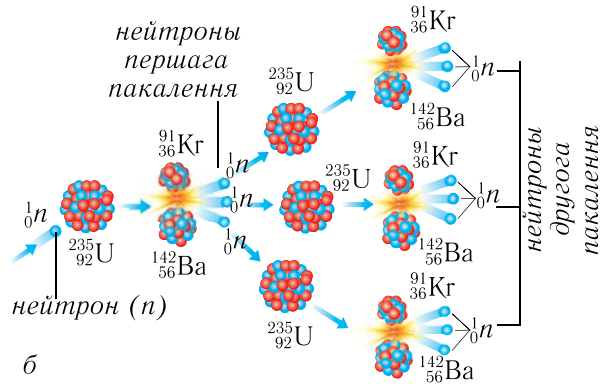
З прычыны вялікай пранікальнай здольнасці нейтронаў і з-за канчатковых памераў зоны (актыўнай зоны), у якой знаходзіцца рэчыва, што дзеліцца, многія з нейтронаў пакідаюць яе, і ланцуговая рэакцыя не адбываецца. Таму для ажыццяўлення ланцуговай рэакцыі вызначальнае значэнне маюць памеры зоны, якую называюць *актыўнай*, у якой адбываецца рэакцыя. Мінімальныя памеры актыўнай зоны, пры якіх магчыма ажыццяўленне ланцуговай ядзернай рэакцыі, называюцца *крытычнымі* памерамі. Ад чаго ж залежаць гэтыя памеры?

Крытычныя памеры залежаць ад прыроды рэчыва, якое дзеліцца, яго формы. Чым большыя памеры актыўнай зоны, тым вышэй верагоднасць паглынання ўнутры яе нейтронаў. Для ўрану ${}_{92}^{235}\text{U}$ меншая верагоднасць вылету нейтронаў за межы зоны да іх паглынання, г. зн. яе памеры будуць меншымі, чым для зоны з ${}_{92}^{238}\text{U}$. Акрамя таго, памер зоны будзе меншы з прычыны таго, што для расшчаплення ${}_{92}^{235}\text{U}$ можна выкарыстоўваць павольныя нейтроны.

Крытычныя памеры паменшацца, калі вакол актыўнай зоны змясціць запавольнік (графіт, вадз), паколькі нейтроны, якія вылятаюць з яе, будуць адбівацца ад яго і вяртацца назад у яе. Эфектыўнасць іх адбіцця значна павялічваецца пры таўшчыні адбівальніка, якая перавышае сярэднюю даўжыню прабега нейтронаў у ім.



а



б

Мал. 221. а — ланцуговая рэакцыя дзялення (1 — першасны нейтрон (першае пакаленне), 2 — другое пакаленне, 3 — трэцяе пакаленне); б — схема рэакцыі

Ацэнім крытычную масу рэчыва, што дзеліцца, у такой зоне. Найменшыя памеры і масу мае рэчыва шарападобнай формы, паколькі для яго адносіна плошчы паверхні да аб'ёму мінімальныя. радыус шара павінен быць большы за даўжыню прабегу нейтрона да сутыкнення з ядром. Тады крытычную масу ўрану ${}_{92}^{235}\text{U}$ можна ацаніць, і яна складае прыкладна 48 кг. Пры шчыльнасці ўрану $1,895 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ радыус шара такой масы роўны прыкладна 8,5 см. Для ізатопа плутонію ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ крытычная маса складае ўжо 17 кг, што адпавядае шару радыусам 6,0 см.

Нанава ўтвораныя пры ядзернай рэакцыі дзялення два ці тры нейтроны выклічуць дадатковыя акты дзялення, таму працэс будзе лавінападобна нарастаць (мал. 221).

Так запускаецца ланцуговая рэакцыя дзялення, пры якой нанава ўтвораныя нейтроны выклікаюць працэс дзялення новых ядзер, падобна таму, як пастаўленыя ў шэраг косці даміно «завальваюцца адна на адну».

Падобнае некантралюемае (некіруемае) развіццё ланцуговай рэакцыі прыводзіць да вызвалення каласальнай колькасці энергіі за вельмі кароткі прамежак часу. Менавіта такія працэсы адбываюцца пры ядзерным выбуху (мал. 222).

Колькасць нейтронаў, якія ўзнікаюць у адным акце дзялення, называецца *пакаленнем* нейтронаў.



Мал. 222. Ядзерны выбух

Колькаснай характарыстыкай ланцуговай рэакцыі дзялення з'яўляецца каэфіцыент размнажэння нейтронаў:

$$k = \frac{n_2}{n_1},$$

дзе n_2 — лік нейтронаў у дадзеным пакаленні, n_1 — лік нейтронаў у папярэднім пакаленні. Калі каэфіцыент размнажэння $k = 1$, то лік нейтронаў у ім увесь час застаецца нязменным. Пры $k > 1$ агульны лік нейтронаў у рэактары павялічваецца з цягам часу і магчыма іх некантралюемае размнажэнне, што прыводзіць да выбуху. Пры $k < 1$ лік нейтронаў памяншаецца, і рэакцыя з цягам часу спыняецца.

Нейтроны могуць паглынацца рознымі прымесямі, пакідаць абсяг, у якім адбываецца рэакцыя, губляць сваю энергію ў выніку вялікага ліку актаў рассеявання. З усіх магчымых страт каэфіцыент размнажэння k павінен быць большы за адзінку для ланцуговай ядзернай рэакцыі.

Ланцуговая ядзерная рэакцыя будзе *самападтрымліваемай*, калі колькасць нейтронаў у кожным наступным пакаленні не памяншаецца.

Такім чынам, для ланцуговых самападтрымліваемых ядзерных рэакцый неабходны наступныя ўмовы:

- 1) неабходна мець мінімальную колькасць рэчыва, каб нейтроны паспелі ўзбудзіць ядро да выхаду з абсягу, які займае рэчыва, што дзеліцца;
- 2) энергія нейтронаў, што ўзнікаюць пры дзяленні, павінна быць дастатковай, каб выклікаць дзяленне ядзер;
- 3) каэфіцыент размнажэння нейтронаў $k > 1$;
- 4) адсутнасць прымесей, паглынаючых утвораныя нейтроны.

► Ядзернае «паліва» ў атамнай бомбе ўтрымліваецца ў выглядзе аддзеленых адна ад другой порцый дакрытычнай масы. Звычайны (трацілавы) выбух злучае гаручае ў адзіны ўзор, маса якога перавышае крытычную. Пасля гэтага праз нікчэмна малы час адбываецца ядзерны выбух.

Ланцуговая ядзерная рэакцыя ўпершыню была ажыццёўлена ў ЗША Энрыка Фермі ў 1942 г., у СССР — Ігарам Курчатавым у 1946 г.

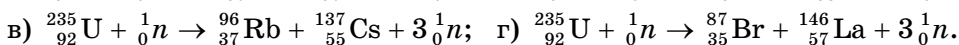
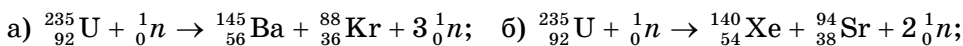
Назваючы энергію, якая вылучаецца пры дзяленні ядра, атамнай, мы робім дзвіную памылку. Па-першае, дзеліцца не атам, а ядро, а па-другое, выраз «атамная энергія» ў літаральным сэнсе азначае «энергія непадзельнага». Правільна яе называць ядзернай энергіяй.



1. Што называюць дзяленнем ядра? У чым заключаюцца асаблівасці гэтага працэсу?
2. Як растлумачыць здольнасць цяжкіх ядзер да дзялення? Чаму пры дзяленні ядзер адбываецца вылучэнне энергіі?
3. Апішыце механізм дзялення ядра ўрану і запішыце ўраўненне дадзенай ядзернай рэакцыі.
4. Што называюць ланцуговай ядзернай рэакцыяй? Дзякуючы чаму аказалася магчымым існаванне ланцуговай ядзернай рэакцыі дзялення?
5. Пакажыце графічна і растлумачце працэсы, якія адбываюцца пры ланцуговай рэакцыі ва ўране ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Практыкаванне 26

Вызначыце энергетычны выхад рэакцый:

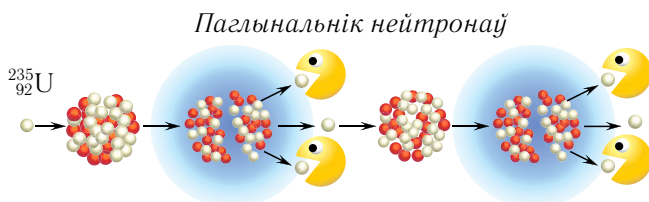


Масы ізатопаў (а. а. м.): ${}_{56}^{145}\text{Ba}$ — 144,92763; ${}_{36}^{88}\text{Kr}$ — 87,91445; ${}_{54}^{140}\text{Xe}$ — 139,92164; ${}_{38}^{94}\text{Sr}$ — 93,91536; ${}_{37}^{96}\text{Rb}$ — 95,93427; ${}_{55}^{137}\text{Cs}$ — 136,90709; ${}_{35}^{87}\text{Br}$ — 86,92071; ${}_{57}^{146}\text{La}$ — 145,92579.

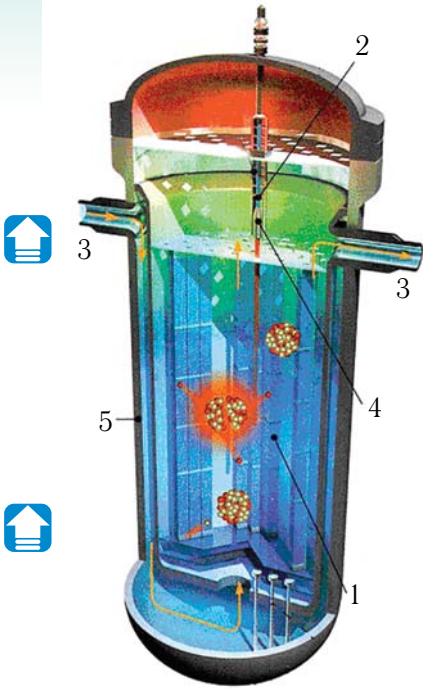
§ 41. Ядзерны рэактар

- Для рэалізацыі кіруемай ланцуговай рэакцыі створаны асобыя прылады — ядзерныя рэактары, якія дазваляюць атрымліваць электраэнергію ў прамысловых маштабах. Як гэта адбываецца? Якую будову мае ядзерны рэактар? Якія праблемы ён стварае для навакольнага асяроддзя?

Ланцуговая рэакцыя можа быць кіруемай і некіруемай (ядзерны выбух). Для кіравання ланцуговай рэакцыяй неабходна вельмі дакладна кантраляваць працэс размнажэння нейтронаў з дапамогай паглынальнікаў нейтронаў (мал. 223), робячы яго такім, каб лік нейтронаў у працэсе рэакцыі заставаўся практычна нязменным.



Мал. 223. Кантралюемая ядзерная рэакцыя ў ядзерным рэактары



Мал. 224. Схема ядзернага рэактара: 1 — актыўная зона з цвэламі; 2 — запавольнік (звычайная, цяжкая вада); 3 — сістэма адводу цепланосьбіта; 4 — стрыжні кіравання рэакцыяй; 5 — ахоўны корпус

Вызначальную ролю ў кіраванні ланцуговымі ядзернымі рэакцыямі ў рэактарах адыгрываюць *запазныя нейтроны*. Іх сярэдні час жыцця для $^{235}_{92}\text{U}$ складае некалькі секунд. Гэта дае магчымасць для маніпулявання кіруючымі стрыжнямі з мэтай падтрымкі каэфіцыента размнажэння нейтронаў $k = 1$.

Ядзерны рэактар — гэта прылада, у якой адбываецца кіруемая ланцуговая ядзерная рэакцыя дзялення ядзер цяжкіх элементаў пад дзеяннем нейтронаў (мал. 224). Падчас рэакцыі вызваляецца энергія, якую можна выкарыстоўваць для вытворчасці электрычнай энергіі.

Ядзерны рэактар мае пяць асноўных складаных частак, паказаных на малюнку 224. Спрошчаная (функцыянальная) схема ядзернага рэактара прыведзена на малюнку 225.

1. *Актыўная зона*, якая ўтрымлівае ядзернае гаручае, змешчанае ў асобых цеплавывлучаючых элементах, ці *цвэлах* (па першых літарах словазлучэння). Цвэлы ўяўляюць сабой вельмі доўгія трубка, якія праходзяць праз усю актыўную зону рэактара. Менавіта ў іх адбываецца ланцуговая рэакцыя. Актыўная зона акружана адбівальнікам нейтронаў, які вяртае іх унутр актыўнай зоны для працягу рэакцыі. Добрым адбівальнікам нейтронаў з'яўляецца берылій.

У якасці ядзернага гаручага выкарыстоўваюцца тры віды радыеактыўных ізатопаў: урану $^{238}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$ і плутонію $^{239}_{94}\text{Pu}$.

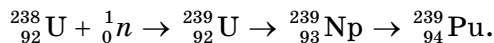
2. *Запавольнік хуткіх нейтронаў* (графіт, звычайная і цяжкая вада, берылій, аксід берылію, гідрыды металаў, арганічныя вадкасці). Сярэдняя энергія нейтронаў, якія з'яўляюцца ў рэактарах, каля $E \sim 2$ МэВ. Калі энергія нейтронаў меншая за $E \sim 0,1$ эВ, то іх называюць *цеплавымі*, паколькі іх скорасці блізкія да скорасці цеплавога руху, модуль якой $2,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Калі энергія нейтронаў большая за $0,1$ МэВ,

а модуль іх скорасці $\sim 10^7 \frac{m}{c}$, то нейтроны называюць *хуткімі*. Прамежжавы абсяг энергій належыць прамежжавым (рэзанансным) нейтронам. Запавольнік эфектыўна адбірае энергію ад хуткіх нейтронаў, якія нараджаюцца ў рэакцыі дзялення. (Успомніце сутыкненне двух цел аднолькавай масы.) Нейтроны запавольваюцца (адсюль і назва рэчыва — запавольнік) да энергій парадку доляў электронвольта.

Пад дзеяннем павольных (цеплавых) нейтронаў дзеліцца толькі даволі рэдкі ў прыродзе ізатоп урану ${}_{92}^{235}\text{U}$, у той час як значна больш распаўсюджаны ізатоп ${}_{92}^{238}\text{U}$ паглынае цеплавыя нейтроны без дзялення на асколкі. Пры кожным акце дзялення ${}_{92}^{235}\text{U}$ вылучаецца ў сярэднім $W = 170$ МэВ у выглядзе кінетычнай энергіі асколкаў, што разглядаюцца. Ізатопы ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, ${}_{92}^{233}\text{U}$, што дзеліцца пад дзеяннем цеплавых нейтронаў, у прыродзе не сустракаюцца і атрымліваюцца штучна.

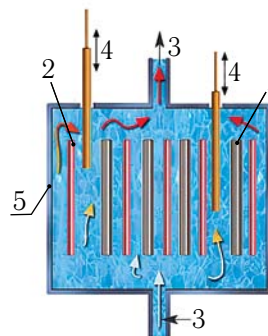
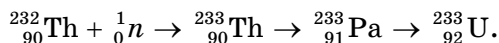
У рэактарах на хуткіх нейтронах выкарыстоўваюцца *ўрана-плутоніевы* цыкл, у якім ядро ${}_{92}^{238}\text{U}$ ператвараецца ў ядро ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, і *торыевы* цыкл, у якім ядро ${}_{90}^{230}\text{Th}$ ператвараецца ў ядро ${}_{92}^{233}\text{U}$.

Ядры ізатопа ${}_{92}^{238}\text{U}$ могуць дзеліцца толькі пад дзеяннем хуткіх нейтронаў. Аднак асноўнай рэакцыяй пры ўзаемадзеянні з нейтронамі з'яўляецца захоп нейтрона, пасля якога яны самаадвольна ператвараюцца ў ядры ізатопа плутонію ${}_{94}^{239}\text{Pu}$:



Атрыманы ізатоп ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ з'яўляецца практычна стабільным, паколькі яго перыяд паўраспаду $T_{1/2} = 24\,400$ гадоў. Плутоній ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ па здольнасці да ўзаемадзеяння з нейтронамі падобны да ізатопа ўрану ${}_{92}^{235}\text{U}$. Пры захопе нейтрона ядро плутонію дзеліцца і выпускае ў сярэднім 2—3 нейтроны, здольныя падтрымліваць развіццё ланцуговай рэакцыі.

Пад дзеяннем хуткіх нейтронаў ядро ізатопа торыю ${}_{90}^{232}\text{Th}$ таксама самаадвольна зведае ланцужок распадаў, ператвараючыся ў ядро ізатопа ${}_{92}^{233}\text{U}$:



Мал. 225. Схема актыўнай зоны рэактара: 1 — актыўная зона з цвяламі; 2 — запавольнік (вада); 3 — сістэма адводу цепланосьбіта; 4 — стрыжні кіравання рэакцыяй; 5 — ахоўны корпус

Ізатоп урану ${}_{92}^{233}\text{U}$ таксама з'яўляецца практычна стабільным, паколькі яго перыяд паўраспаду $T_{1/2} = 162\,000$ гадоў, але ён дзеліцца цеплавымі нейтронамі.

Такім чынам, захоп хуткіх нейтронаў ізатопамі ${}_{92}^{238}\text{U}$ і ${}_{90}^{232}\text{Th}$ дазваляе ажыццяўляць узнаўленне ядзернага гаручага ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ і ${}_{92}^{233}\text{U}$.

Ядзерны рэактар на хуткіх нейтронах выконвае адначасова дзве функцыі — вытворчасць энергіі і ўзнаўленне ядзернага гаручага. Менавіта таму ён называецца яшчэ рэактарам-размнажальнікам (брыдарам). Акрамя таго, у ім можна выкарыстоўваць у якасці гаручага не толькі рэдкі ў прыродзе ізатоп урану ${}_{92}^{235}\text{U}$, але і значна больш распаўсюджаны ізатоп урану ${}_{92}^{238}\text{U}$.

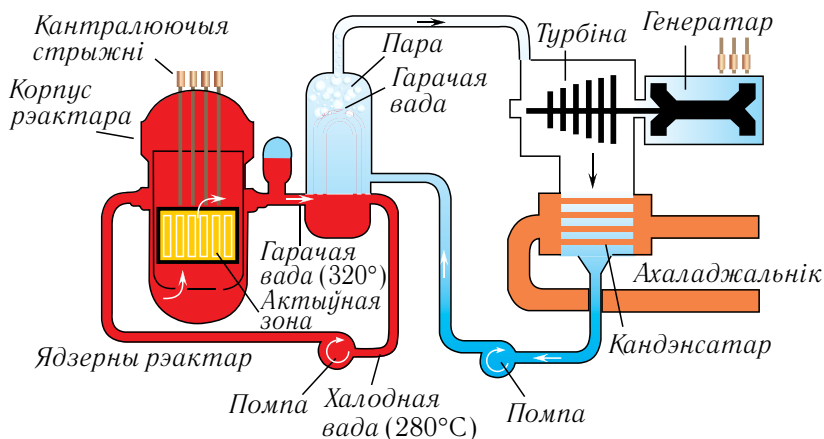
У сувязі з тым, што запасы радыеактыўных ізатопаў, якія натуральна дзеляцца, абмежаваны, магчымасць ажыццяўлення працэсаў вытворчасці ядзернага гаручага ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ і ${}_{92}^{233}\text{U}$ у рэактарах на хуткіх нейтронах мае прынцыповы характар для будучыні ядзернай энергетыкі. Акрамя таго, ядзерныя рэактары на цеплавых нейтронах здольны «спаліць» толькі (0,5—1) % урану ${}_{92}^{235}\text{U}$. Прымяненне рэактара-размнажальніка дазваляе павялічыць эфектыўнасць выкарыстання гаручага ў дзясяткі разоў.

3. *Сістэма ахалоджвання* — цепланосьбіт (для адводу з актыўнай зоны рэактара вылучанай у ёй энергіі) — вада, газы, вадкі натрый. Вада награваецца сценкамі цэлаў да тэмпературы $t = 300\text{ }^\circ\text{C}$ і пад ціскам парадку $p \sim 10^7$ Па (100 атм) выводзіцца з актыўнай зоны. Далей вада ператвараецца ў пару і накіроўваецца да паравых турбін для генерацыі электрычнай энергіі.

4. *Сістэма рэгулявання* — прылада для забеспячэння магчымасці кіравання ланцуговай рэакцыяй. У сістэме рэгулявання выкарыстоўваюцца паглынальнікі (стрыжні) з бору, г. зн. рэчыва, якое актыўна паглынае нейтроны.

Калі стрыжні з паглынальнікам увесці ў актыўную зону, то каэфіцыент размнажэння нейтронаў памяншаецца. І, наадварот, вывадзенне стрыжняў з актыўнай зоны павялічвае каэфіцыент размнажэння. Гэтым і дасягаецца кіраванне рэакцыяй. Звычайна гэта робіцца аўтаматычна. У няштатных сітуацыях прадугледжана экстранае спыненне ланцуговай рэакцыі, якое ажыццяўляецца скіданнем у актыўную зону спецыяльных аварыйных стрыжняў (стрыжняў бяспекі).

5. *Сістэма бяспекі* — абалонка з бетону з жалезным напаўняльнікам (для абароны навакольнай прасторы ад іанізуючага выпраменьвання кампанентаў паліва і прадуктаў ядзернай рэакцыі).



Мал. 226. Дыяграма, якая паказвае работу атамнай электрастанцыі з герметычным вадзяным контурам ахалоджвання

Ядзерныя рэактары адрозніваюцца па тыпе выкарыстоўваемага ядзернага гаручага, запавольніка і цепланосьбіта.

Выпрацоўка электраэнергіі, заснаваная на выкарыстанні кіруемай ядзернай рэакцыі, ажыццяўляецца на атамных электрастанцыях (АЭС) (мал. 226).

Перавагі атамных электрастанцый:

- 1) не спажываюць кісларод і арганічнае паліва;
- 2) не забруджваюць навакольнае асяроддзе попелам, серай і іншымі прадуктамі згарання арганічнага паліва.

Небяспечныя фактары ўздзеяння АЭС на навакольнае асяроддзе:

- 1) радыеактыўныя адходы;
- 2) радыеактыўнае забруджванне мясцовасці;
- 3) небяспека экалагічных катастроф;
- 4) парушэнне цеплавога балансу ў наваколлі АЭС.

Усім вядома Чарнобыльская катастрофа, якая адбылася на 4-м блоку Чарнобыльскай атамнай станцыі ў красавіку 1986 г. У выніку парушэння тэхналагічных працэсаў адбылося пераграванне актыўнай зоны. Выбух, які адбыўся пасля гэтага, разбурыў абалонку рэактара. Вялікая колькасць радыеактыўных рэчываў была выкінута ў атмасферу. Кароткачасоваму забруджванню кароткажывучымі ізатопамі падвергліся велізарныя тэрыторыі. Доўгачасовае забруджванне зрабіла немагчымымі для пражывання тысячы квадратных кіламетраў тэрыторыі Беларусі, Расіі і Украіны, дзе выпалі найбольш небяспечныя нукліды стронцыю $^{90}_{38}\text{Sr}$ (перыяд паўраспаду 27,7 года) і цэзію $^{137}_{55}\text{Cs}$ (перыяд паўраспаду каля

30 гадоў). Нуклід $^{90}_{38}\text{Sr}$ адкладаюцца ў касцявых тканках і касцявым мозгу — органе крывятворэння, што можа прывесці да развіцця рака крыві (лейкеміі) і касцей. Нуклід $^{137}_{55}\text{Cs}$, якія трапляюць у арганізм галоўным чынам праз стрававальны тракт і дыхальныя шляхі, назіпаюцца ў асноўным у шкільных мышцах, выпускае γ -выпраменьванне, якое наносіць значныя пашкоджанні арганізму.

▶ Першая ў свеце атамная электрастанцыя была пабудавана ў СССР у г. Обнінску і дала ток 27 чэрвеня 1954 г. Першая ў Беларусі атамная электрастанцыя пабудавана ў паўночна-заходняй частцы краіны паблізу ад горада Астравец Гродзенскай вобласці. Яе праектная магутнасць з двума энергаблокамі складае 2,4 ГВт.



1. Што называюць ядзерным рэактарам? Што з'яўляецца ядзерным гаручым у рэактарах?
2. Якое рэчыва выступае запавольнікам нейтронаў у ядзерных рэактарах? Для чаго патрэбен запавольнік?
3. Што выкарыстоўваюць у якасці цепланосьбіта ў ядзерных рэактарах?
4. Як ажыццяўляецца кіраванне ланцуговай рэакцыяй дзялення?
5. Што выкарыстоўваецца ў сістэме біялагічнай абароны ад патоку нейтронаў і γ -выпраменьвання, якія ўзнікаюць у рэактары?
6. У чым заключаюцца перавагі выкарыстання атамных электрастанцый у параўнанні з цеплавымі электрастанцыямі?
7. У чым заключаюцца асноўныя недахопы ядзернай энергетыкі?

§ 42. Рэакцыі ядзернага сінтэзу

- У нетрах зорак, якія свецяцца (у тым ліку і Сонца), «бушуюць» ядзерныя рэакцыі сінтэзу, якія прыводзяць да вылучэння энергіі з іх паверхні ў выглядзе выпраменьвання. Энергетычная праблема будучыні на нашай планеце (з улікам абмежаванасці запасаў вугалю, нафты і газу) можа быць вырашана за кошт стварэння кіруемай рэакцыі тэрмаядзернага сінтэзу, у якой будуць скарыстаны воды Сусветнага акіяна.

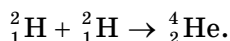
Нягледзячы на тое што атамныя электрастанцыі экалагічна больш чыстыя ў параўнанні з цеплавымі электрастанцыямі, у ядзернай энергетыкі ёсць істотныя недахопы. Па-першае, радыеактыўныя элементы (уран і торый) складаюць $\sim (3 - 8) \cdot 10^{-4} \%$ па масе ў зямной кары і іх здабыча ўсё больш ускладняецца. Па-другое, што рабіць з радыеактыўнымі адходамі, колькасць якіх увесь час нарастае?

Гэтых недахопаў можна пазбегнуць, калі для атрымання энергіі выкарыстоўваць не рэакцыі дзялення цяжкіх ядзер, а рэакцыі сінтэзу лёгкіх ядзер.

Гэтыя рэакцыі эфектыўна працякаюць пры звышвысокіх тэмпературах $T \sim 10^9$ К і самападтрымліваюцца за кошт значнага вылучэння ў іх энергіі. Такія рэакцыі называюцца **тэрмаядзернымі**. Прычына вылучэння энергіі тая ж, што і ў выпадку рэакцый дзялення — удзельная энергія сувязі прадуктаў рэакцыі вышэйшая, чым у зыходных матэрыялах.

Энергія спакою двух лёгкіх ядзер большая, чым ва ўтворанага з іх выніковага ядра. Паколькі выніковае ядро мае меншую масу, то пры яго ўтварэнні павінна вызваляцца энергія $Q = \Delta mc^2$.

Найпрасцейшым прыкладам тэрмаядзернай рэакцыі з'яўляецца пераўтварэнне дэйтэрыю ${}^2_1\text{H}$ у гелій ${}^4_2\text{He}$:



Масавы лік ядра дэйтэрыю ${}^2_1\text{H}$ $m_{\text{H}} = 2,01355$ а. а. м., масавы лік ядра гелію ${}^4_2\text{He}$ $m_{\text{He}} = 4,00150$ а. а. м. У выніку рэакцыі сінтэзу дэфект мас:

$$\Delta m = m_{\text{He}} - 2m_{\text{H}} = 4,00150 \text{ а. а. м.} - 2 \cdot 2,01355 \text{ а. а. м.} = -0,0256 \text{ а. а. м.}$$

Гэта складае 0,63 % агульнай масы ядзер вадароду. У той час як пры дзяленні ўрану дэфект мас складае 0,056 %. Такім чынам, для адной і той жа масы рэчыва пры ядзерным сінтэзе вылучаецца прыкладна ў 10 разоў больш энергіі, чым пры дзяленні ядра. Калі б гэты працэс атрымалася выкарыстаць для вытворчасці энергіі, то ён апынуўся б у 10 раз больш эфектыўным за працэс дзялення ўрану.

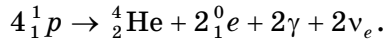
Асноўная перавага выкарыстання ядзернага сінтэзу для атрымання энергіі заключаецца, перш за ўсё, у колькасці запасаў паліва. Для чалавецтва было б вельмі зручна, калі б для рэакцыі сінтэзу патрабаваўся найбольш часта сустракаемы ізатоп вадароду ${}^1_1\text{H}$. Аднак для рэакцыі сінтэзу яго неабходна нагрэць да велізарнай тэмпературы. Дэйтэрыў ${}^2_1\text{H}$ уступае ў рэакцыю сінтэзу пры больш нізкай тэмпературы, чым ізатоп вадароду ${}^1_1\text{H}$, а трытый ${}^3_1\text{H}$ яшчэ пры больш нізкай тэмпературы. Але паколькі трытый ${}^3_1\text{H}$ нестабільны, то ў якасці асноўнага ядзернага паліва застаецца толькі дэйтэрыў ${}^2_1\text{H}$.

У Сусветным акіяне з 7000 атамаў вадароду толькі адзін з'яўляецца дэйтэрыем ${}^2_1\text{H}$. Значыць, запасы дэйтэрыю ў ім складаюць 80 000 км³. У выніку рэакцыі сінтэзу вадароду, які змяшчаецца ў 1 л вады, вылуча-

еца столькі ж энергіі, колькі вылучаецца пры згаранні 300 л бензіну. Такім чынам, з дэйтэрыю, які змяшчаецца ў акіяне, можна атрымаць столькі энергіі, колькі вылучаецца пры згаранні бензіну, аб'ём якога перавышае аб'ём зямнога шара, г. зн. яго запасы практычна невычэрпныя. Акрамя таго, пры рэакцыях сінтэзу фактычна не ўтвараюцца радыеактыўныя адходы.

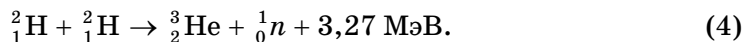
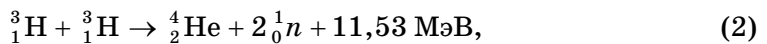
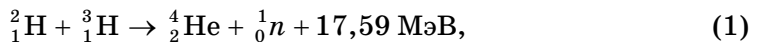
Аднак сур'ёзнай перашкодай на шляху да атрымання энергіі з'яўляецца кулонаўскае адштурхванне ядзер дэйтэрыю, якое пры пакаёвай тэмпературы не дазваляе ім зблізіцца да адлегласцей, на якіх узнікаюць караткадзеючыя ядзерныя сілы прыцягнення. Для пераадолення сіл адштурхвання неабходна нагрэць дэйтэрыў ${}^2_1\text{H}$ да вельмі высокіх тэмператур $T \sim 10^9$ К, пры якіх магчымы рэакцыі сінтэзу. Гэта з'яўляецца істотнай перашкодай для шырокага ўжывання рэакцый ядзернага сінтэзу ў энергетыцы. Гэта тэмпература нашмат вышэйшая за тэмпературу ўнутры Сонца ($T \sim 10^7$ К). Тэрмаядзерная рэакцыя адбываецца і ў іншых зорках. У іх ёсць адна істотная перавага: дзякуючы каласальным масам і памерам у іх аптымальна рашаецца праблема гравітацыйнага ўтрымання і тэрмаізаляцыі рэчыва, якое ўяўляе сабой плазму.

Асноўнай крыніцай энергіі Сонца з'яўляюцца рэакцыі, якія прыводзяць да ператварэння чатырох пратонаў у ядро гелію ${}^4_2\text{He}$ з вылучэннем 26,72 МэВ энергіі:



У прыродных умовах такія рэакцыі працякаюць толькі ў нетрах зорак, а для ажыццяўлення іх на Зямлі неабходна моцна разагрэць рэчыва або ядзерным выбухам, або магутным газавым разрадам, або гіганцкім імпульсам лазернага выпраменьвання, або бамбардзіроўкай інтэнсіўным пучком часціц.

Для кіравання рэакцыямі сінтэзу неабходна стварыць тэрмаядзерны рэактар. Найбольш верагодна ажыццяўленне такога рэактара на наступных ядзерных рэакцыях сінтэзу:



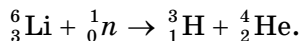
Найбольш даступнай з рэакцый сінтэзу (па абсягу неабходных тэмператур) і энергетычна выгаднай з'яўляецца рэакцыя (1) паміж ядрамі дэйтэрыю і трытыю. Пры гэтым на адзін нуклон вылучаецца 3,5 МэВ, а пры рэакцыях дзялення — 1 МэВ. Для таго каб дэйтэрыі мог пранікнуць да ядра трытыю, яму неабходна мець энергію парадку 1 МэВ. Разлічым тэмпературу, якую павінна мець часціца, каб мець такую энергію.

Сярэдняя кінетычная энергія часціцы ў газе $E = \frac{3}{2}kT$, тады

$$T = \frac{2E}{3k} = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \cdot 10^6 \text{ В}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}} = 7,7 \cdot 10^9 \text{ К.}$$

Пры такой тэмпературы рэчыва амаль кожнае сутыкненне часціц прыводзіла б да ядзернай рэакцыі, аднак на Зямлі такія ўмовы неадсяжныя.

У праблеме тэрмаядзернага сінтэзу ёсць яшчэ адно пытанне: дзе ўзяць трытыі? Трытыі у прыродзе ўтрымліваецца ў нязначнай колькасці. Ён утвараецца ў верхніх пластах атмасферы пры сутыкненні касмічных часціц з атамамі азоту. Але яго можна атрымаць у ядзерных рэактарах пры апраменьванні ${}^6_3\text{Li}$ нейтронамі. Ён можа быць атрыманы ў самім тэрмаядзерным рэактары, калі выкарыстаць магутныя патокі нейтронаў:



Дэйтэрыі прысутнічае ў прыродным вадародзе, і яго можна атрымаць, падзяляючы ізатопы вадароду. Запасы дэйтэрыю ў Сусветным акіяне велізарныя, на шматлікія тысячы гадоў хопіць таксама запасаў літыю, неабходнага для вытворчасці іншага ізатопа — трытыю.

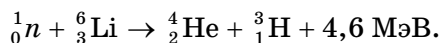
Для практычнага кіравання тэрмаядзернымі рэакцыямі найважнейшым з'яўляецца стварэнне такіх умоў, пры якіх высокатэмпературная плазма з дапамогай магнітных палёў устойліва ўтрымліваецца ў стане цеплаізаляцыі. Для гэтай мэты выкарыстоўваюцца магнітныя камеры. Асноўнымі відамі страт з'яўляюцца цеплата, якая сыходзіць праз сценкі рэактара, і тармазнае выпраменьванне ў плазме.

Да пераваг выкарыстання рэакцый сінтэзу для атрымання энергіі адносяцца:

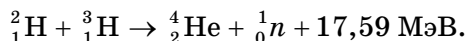
- 1) высокі выхад энергіі;
- 2) экалагічная бяспека рэактара;
- 3) адсутнасць праблемы пахавання радыеактыўных адходаў.

Ажыццявіць кіруемую тэрмаядзерную рэакцыю ў прамысловых маштабах, г. зн. дамагчыся энергетычнага выхаду, які перавышае выдаткі, пакуль не атрымалася.

На Зямлі ў наш час змаглі ажыццявіць толькі некіруемую тэрмаядзерную рэакцыю сінтэзу пры выбуху вадароднай бомбы. Трэба адзначыць, што спачатку ў вадароднай бомбе выбухае змешчаная ўнутры яе атамная бомба. У выніку адбываецца рэзкі рост тэмпературы да значэнняў $(10 - 20) \cdot 10^6$ К, пры гэтым узнікае паток нейтронаў і электрамагнітнага выпраменьвання. Нейтроны ўступаюць у рэакцыю з ізатопам літыю, што знаходзіцца ў бомбе, з утварэннем трытыю:



Павышэнне тэмпературы да неабходнага значэння разам з утвораным трытыем прыводзіць да тэрмаядзернай рэакцыі:



Асноўная частка энергіі (70 %) адносіцца хуткімі нейтронамі і ядрамі атамаў гелію (20 %).

► Даследаванне механізмаў ядзернага сінтэзу і распаўсюджанасці розных ядзер дае магчымасць зазірнуць у далёкае мінулае, калі «нараджаліся» хімічныя элементы. Вывучэнне радыеактыўнасці, адкрыццё дзялення і сінтэзу ядзер паказалі, што на ранніх стадыях Сусвет складаўся толькі з самых лёгкіх элементаў — вадароду і гелію, а ўсе цяжэйшыя элементы ўтварыліся ў выніку ядзерных рэакцый у зорках і пры выбухах зорак.

У 2005 г. было прынята рашэнне аб будаўніцтве Міжнароднага эксперыментальнага тэрмаядзернага рэактара ў г. Кадараш (Францыя).



1. Якія рэакцыі называюцца тэрмаядзернымі?
2. Як растлумачыць, што пры сінтэзе лёгкіх ядзер вылучаецца энергія?
3. Якія ўмовы ажыццяўлення ядзернай рэакцыі сінтэзу?
4. Як называюцца найбольш вядомыя ізатопы вадароду і як іх абазначаюць?
5. Параўнайце энергію, якая прыпадае на адзін нуклон пры тэрмаядзернай рэакцыі і ланцуговай ядзернай рэакцыі.
6. Абмяркуйце добрыя якасці і недахопы розных спосабаў атрымання энергіі: спальванне выкапнёвага гаручага, дзяленне ядра і ядзерны сінтэз.

7. Ці прымянімая формула Эйнштэйна $E = mc^2$:

- а) да дзялення ядзер;
- б) да ядзернага сінтэзу;
- в) да ядзерных рэакцый?

8. Крыніцай электрамагнітнай энергіі, якая выпраменьваецца Сонцам і іншымі зоркамі, служыць тэрмаядзерны сінтэз. Якія ўмовы ў нетрах зорак робяць магчымым праходжанне тэрмаядзернага сінтэзу?

§ 43. Іанізуючае выпраменьванне. Элементы дазіметры

- Чалавек штосекундна падвяргаецца ўздзеянню выпраменьванняў. Выпраменьванне Сонца з'яўляецца адным з ключавых фактараў узнікнення і існавання жыцця на Зямлі. Аднак некаторыя віды выпраменьванняў небяспечныя для здароўя чалавека. Якія гэта выпраменьванні? Як ад іх можна абараніцца?

Зараджаныя часціцы, рэнтгенаўскае і γ -выпраменьванне, распаўсюджваючыся ў рэчыве, узаемадзейнічаюць з яго атамамі. За кошт сваёй энергіі часціцы выпраменьвання могуць іанізаваць атамы, выбіваючы з іх электроны. Часта адна часціца ў стане іанізаваць некалькі атамаў, таму працэс распаўсюджвання такога выпраменьвання праз рэчыва суправаджаецца яго моцнай іанізацыяй. З прычыны гэтага **іанізуючым** называюць такі від выпраменьвання, узаемадзеянне якога з рэчывам прыводзіць да іанізацыі яго атамаў і малекул (мал. 227).

Аснову біялагічнага дзеяння іанізуючага выпраменьвання на жывыя тканкі складаюць хімічныя працэсы, якія адбываюцца ў іх клетках пры



Мал. 227. Віды выпраменьванняў