

25 ЯДЕРНІ РЕАКЦІЇ ТА ЕЛЕМЕНТАРНІ ЧАСТИНКИ

ЗВЕДЕННЯ ОСНОВНИХ ФОРМУЛ

25.1 Символічний запис ядерної реакції



де A_ZX і ${}^{A'}_{Z'}Y$ - початкове і кінцеве ядра відповідно з зарядовими числами Z та Z' і масовими числами A і A' ; a - частинка, що бомбардує ядро, b - частинка, що утворюється в результаті реакції.

При позначенні частинок використовуються символи:

p - протон; n - нейтрон; d - дейтон; α - альфа - частинка; γ - гамма - фотон.

Під час ядерної реакції виконуються закони збереження :

- а) масового числа;
- б) зарядового числа;
- в) релятивістської повної енергії;
- г) імпульсу.

25.2 Енергія ядерної реакції

$$Q = [(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)]c^2,$$

де m_1 і m_2 - маса спокою ядра-мішені і частинки, що його бомбардує; $(m_3 + m_4)$ - сума мас спокою ядер продуктів реакції.

Поріг ядерної реакції - це мінімальне значення кінетичної енергії частинки, що бомбардує нерухому мішень - ядро, при якій відбувається ця реакція. При цьому швидкості частинок, які утворюються внаслідок реакції, дорівнюють нулю.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Приклад 25.1 Знайти енергію реакції ${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^6_3\text{Li}$, якщо відомо, що кінетична енергія протона $W_p = 5,45 \text{ MeV}$, ядра гелію $W_{\text{He}} = 4 \text{ MeV}$ і що ядро гелію вилетіло під кутом $\alpha = 90^\circ$ до напрямку руху протона. Ядро-мішень ${}^9_4\text{Be}$ нерухоме.

Розв'язання

$\omega - ?$	Енергія реакції Q є різницею між сумою кінетичних енергій ядер-продуктів реакції і кінетичною енергією ядра, що спричиняє реакцію
$W_p = 5,45 \text{ MeV},$	
$W_{\text{He}} = 4 \text{ MeV},$	
$\alpha = 90^\circ.$	
	$Q = W_{\text{Li}} + W_{\text{He}} - W_p. \quad (1)$

У цьому виразі невідома кінетична енергія W_{Li} літію. Для її визначення скористаємося законом збереження імпульсу

$$\vec{p}_p = \vec{p}_{\text{He}} + \vec{p}_{\text{Li}}. \quad (2)$$

Вектори \vec{p}_H і \vec{p}_{He} за умовою задачі взаємно перпендикулярні і, отже, разом з вектором \vec{p}_{Li} утворюють прямокутний трикутник. Тому

$$(p_{\text{Li}})^2 = (p_{\text{He}})^2 + (p_p)^2. \quad (3)$$

Виразимо в цій рівності імпульси ядер через їх кінетичні енергії. Оскільки кінетичні енергії ядер за умовою набагато менші від енергій спокою цих ядер, то можна скористатися формулою класичної фізики:

$$p^2 = 2mW. \quad (4)$$

Замінивши у рівнянні (3) квадрати імпульсів ядер їх виразами (4), після спрощення отримаємо

$$m_{Li}W_{Li} = m_{He}W_{He} + m_pW_p,$$

звідки

$$W_{Li} = \frac{m_{He}W_{He} + m_pW_p}{m_{Li}}.$$

Підставивши цей вираз у співвідношення (1), знайдемо

$$Q = \frac{m_{He}W_{He} + m_pW_p}{m_{Li}} + W_{He} - W_H. \quad (5)$$

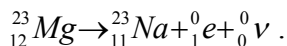
Після підставлення у вираз (5) числових значень величин у *MeV* та *а.о.м.*, одержимо

$$Q = \frac{4,00260 \cdot 4 + 1,00728 \cdot 5,45}{6,01513} + 4 - 5,45 = 2,13 \text{ (MeV)}.$$

Відповідь: $Q = 2,13 \text{ MeV}.$

Приклад 25.2 В результаті розпаду радіоактивне ядро магнію ${}^{23}_{12}\text{Mg}$ вивільнило позитрон і нейтрино. Визначити енергію Q β^+ - розпаду ядра.

Розв'язання. Реакцію β^+ - розпаду ядра магнію можна записати так:



Припускаючи, що ядро магнію було нерухомим, і враховуючи, що маса спокою нейтрино практично дорівнює нулю, напишемо рівняння енергетичного балансу. На підставі закону збереження релятивістської повної енергії маємо

$$m_{\text{Mg}}c^2 = m_{\text{Na}}c^2 + W_{\text{Na}} + m_e c^2 + W_e + W_\nu, \quad (1)$$

де $m_{\text{Mg}}c^2$ - енергія спокою ядра магнію; $m_{\text{Na}}c^2$ - енергія спокою ядра натрію; W_{Na} - кінетична енергія ядра натрію; $m_e c^2$ - енергія спокою позитрона; W_e - кінетична енергія позитрона; W_ν - енергія нейтрино.

Енергія розпаду дорівнює

$$Q = W_{\text{Na}} + W_e + W_\nu = (m_{\text{Mg}} - m_{\text{Na}} - m_e)c^2. \quad (2)$$

Виразимо маси ядер магнію і натрію через маси відповідних нейтральних атомів

$$Q = ((m_{\text{Mg}} - 12m_e) - (m_{\text{Na}} - 11m_e) - m_e)c^2. \quad (3)$$

Оскільки маси спокою електрона і позитрона однакові, то після спрощень співвідношення (3) отримаємо:

$$Q = (m_{\text{Mg}} - m_{\text{Na}} - 2m_e)c^2.$$

Зробивши підставлення числових значень фізичних величин у MeV та *а.о.м.* у цей вираз, знайдемо

$$Q = (22,99414 - 21,99444 - 2 \cdot 0,00055) \cdot 931,4 = 3,05 \text{ (MeV)}.$$

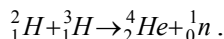
Відповідь: $Q = 3,05 \text{ MeV}$.

Приклад 25.3 Яку масу води, взятої при $0^\circ C$, можна закип'ятити, використовуючи енергію термоядерного синтезу гелію з дейтерієм і тритієм, якщо ККД перетворення енергії дорівнює $\eta = 10\%$? Маса гелію, що утворився, $m = 1 \text{ г}$.

$m_B - ?$
$\eta = 10\%$,
$m = 1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг}$,
$T = 0^\circ C$,
$c = 4200 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot K)$.

Розв'язання

Запишемо рівняння ядерної реакції синтезу гелію:



Маса спокою частинок, що утворилися, менша за маси спокою частинок, що вступили в

реакцію, тому в процесі синтезу ядер вивільниться енергія

$$Q_0 = (m_{{}^2_1H} + m_{{}^3_1H} - m_{{}^4_2He} - m_n) c^2. \quad (1)$$

При одиничному акті термоядерного синтезу вивільняється енергія Q_0 і витрачається маса $m_0 = 5 \text{ а.о.м.} = 5 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ дейтерію і тритію. Отже, використавши паливо масою m , ми вивільнимо енергію

$$Q = Q_0 \frac{m}{m_0}. \quad (2)$$

Вода при цьому отримує таку кількість теплоти:

$$Q_B = \eta Q. \quad (3)$$

Використавши зв'язок між кількістю теплоти і теплоємністю води, можна записати

$$Q_B = c_B m_B \Delta t. \quad (4)$$

Прирівнявши співвідношення (3) та (4), отримаємо

$$\eta Q = c_B m_B \Delta t,$$

звідки

$$m_B = \frac{\eta Q}{c_B \Delta t}. \quad (5)$$

Підставивши в даний вираз співвідношення (1) та (2), отримаємо остаточно

$$m_B = \frac{\eta (m_{\text{H}}^2 + m_{\text{H}}^3 - m_{\text{He}} - m_n) c^2}{c_B m_0 \Delta t}. \quad (6)$$

Після підставлення числових значень у цей вираз знайдемо:

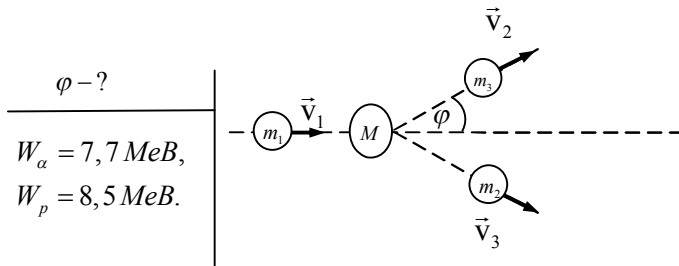
$$\begin{aligned} m_B &= \frac{0,1 \cdot (2,01410 + 3,01605 - 4,00260 - 1,00867) \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2}{4190 \cdot 5 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 100} = \\ &= 50 \cdot 10^3 \text{ (кг)}. \end{aligned}$$

Це у 50 млн. разів більше за масу термоядерного палива, яке було використано на нагрівання!

Відповідь: $m_B = 50 \text{ т}$.

Приклад 25.4 У реакції ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$ кінетична енергія α - частинки дорівнює $W_\alpha = 7,7 \text{ MeV}$. Визначити, під яким кутом до напрямку руху α - частинки вилітає протон, якщо відомо, що його кінетична енергія дорівнює $W_p = 7,7 \text{ MeV}$.

Розв'язання



Позначимо, як показано на рисунку m_1, m_2, m_3 - масові числа відповідно α - частинки, протона та ядра віддачі (у нашому випадку це ядро атома кисню), W_1, W_2, W_3 - їх кінетичні енергії. Оскільки ядро атома азоту не рухається (його масове число дорівнює M), то закон збереження енергії має вигляд:

$$W_1 + Q = W_2 + W_3, \tag{1}$$

де Q - енергія ядерної реакції.

Запишемо закон збереження імпульсу

$$\vec{p}_1 = \vec{p}_2 + \vec{p}_3. \tag{2}$$

З співвідношення (2) та рисунка маємо для числових значень імпульсу рівняння

$$p_3^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \varphi. \quad (3)$$

Оскільки

$$p^2 = (mv)^2 = \frac{mv^2}{2} 2m = W 2m,$$

то рівняння (3) набуде вигляду:

$$2m_3W_3 = 2m_1W_1 + 2m_2W_2 - 2 \cos \varphi \sqrt{2m_1W_1 2m_2W_2},$$

або

$$W_3 = \frac{m_1}{m_3} W_1 + \frac{m_2}{m_3} W_2 - \frac{2 \cos \varphi}{m_3} \sqrt{m_1 m_2 W_1 W_2}. \quad (4)$$

Виключимо з (1) та (4) енергію W_3 та отримаємо формулу, яка пов'язує кінетичну енергію частинок, що бомбардують, з кінетичною енергією отриманих частинок:

$$W_1 \left(\frac{m_3 - m_1}{m_3} \right) + Q = W_2 \left(\frac{m_2 + m_3}{m_3} \right) - \frac{2 \cos \varphi}{m_3} \sqrt{m_1 m_2 W_1 W_2}. \quad (5)$$

Знайдемо енергію ядерної реакції

$$Q = [(m_1 + M) - (m_2 + m_3)] c^2. \quad (6)$$

Розв'яжемо (5) відносно $\cos \varphi$ та отримаємо

$$\cos \varphi = \frac{m_2 + m_3}{2} \sqrt{\frac{W_2}{m_1 m_2 W_1}} - \frac{m_3 - m_1}{2} \sqrt{\frac{W_1}{m_1 m_2 W_2}} - \frac{m_3 Q}{2 \sqrt{m_1 m_2 W_1 W_2}}. \quad (7)$$

Візьмемо значення мас частинок, які беруть участь в реакції, з таблиць А7 та А8 додатка А

$$m_1 = 4,00388 \text{ а.о.м.}, \quad M = 14,00752 \text{ а.о.м.},$$

$$m_2 = 1,00814 \text{ а.о.м.}, \quad m_3 = 17,00453 \text{ а.о.м.}$$

та підрахуємо енергію реакції

$$\begin{aligned} Q &= [(4,00388 + 14,00752) - (1,00814 + 17,00453)] 931,4 = \\ &= -1,183 \text{ (MeV)}. \end{aligned}$$

Підставимо числові значення у співвідношення (7) та отримаємо

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{1+17}{2} \sqrt{\frac{8,5}{4 \cdot 1 \cdot 7,7}} - \frac{17-4}{2} \sqrt{\frac{7,7}{4 \cdot 1 \cdot 8,5}} - \frac{17 \cdot (-1,183)}{2 \sqrt{4 \cdot 1 \cdot 7,7 \cdot 8,5}} = \\ &= 0,59. \end{aligned}$$

$$\varphi = \arctg 0,59 = 30,5^\circ.$$

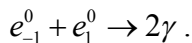
Відповідь: $\varphi = 30,5^\circ$.

Приклад 25.5 Позитрон та електрон анігілюють з утворенням двох фотонів. Визначити: а) енергію кожного з утворених фотонів W_ϕ за умови, що кінетична енергія електрона та позитрона до їх зіткнення дорівнювала нулю; б) довжину хвилі λ цих фотонів.

Розв'язання

Запишемо реакцію анігіляції електрона та позитрона

$$\left. \begin{array}{l} W_{\phi} - ? \quad \lambda - ? \\ m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг.} \end{array} \right|$$



Енергія γ -квантів, які утворилися, згідно з формулою Ейнштейна для зв'язку маси та енергії дорівнює

$$2W_{\phi} = 2m_e c^2 ,$$

де m_e - маса спокою електрона (позитрона); c - швидкість світла у вакуумі.

Тоді

$$W_{\phi} = m_e c^2 .$$

Підставимо числові значення фізичних величин у це співвідношення та отримаємо

$$W_{\phi} = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 8,19 \cdot 10^{-14} \text{ (Дж)} = 0,51 \text{ (MeV)} .$$

Енергія фотона визначається за формулою

$$W_{\phi} = \frac{hc}{\lambda} ,$$

де $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ - стала Планка.

Тоді

$$\lambda = \frac{hc}{W_{\phi}}.$$

Підставимо числові значення фізичних величин у отримане співвідношення та виконаємо обчислення

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{8,19 \cdot 10^{-14}} = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ (м)}.$$

Відповідь: а) енергія кожного фотона - $W_{\phi} = 0,51 \text{ MeV}$;

б) $\lambda = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}$.

ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

25.1 Визначити порядковий номер Z та масове число A частинки, позначеної літерою x , у символічному записі ядерної реакції: а) ${}^{14}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{C} + x$; б) ${}^{27}_{13}\text{Al} + x \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{26}_{12}\text{Mg}$.

Які це частинки?

Відповідь: а) $Z = 0$; $A = 1$, це 1_0n - нейтрон;

б) $Z = 0$; $A = 0$, це 1_0n - гамма – квант.

25.2 Написати не зазначені позначення у нижченаведених записах ядерних реакцій:

а) ${}^{27}_{13}\text{Al}(n, \alpha)x$; б) ${}^{19}_9\text{F}(p, x){}^{16}_8\text{O}$; в) ${}^{55}_{25}\text{Mn}(x, n){}^{55}_{26}\text{Fe}$;

г) ${}^{27}_{13}\text{Al}(\alpha, p)x$; д) ${}^{14}_7\text{N}(n, x){}^{14}_6\text{C}$; е) $x(p, \alpha){}^{22}_{11}\text{Na}$.

Відповідь: а) ${}^{24}_{11}\text{Na}$; б) ${}^4_2\text{He}$; в) ${}^1_1\text{H}$; г) ${}^{30}_{14}\text{Si}$; д) ${}^1_1\text{H}$; е) ${}^{25}_{12}\text{Mg}$.

25.3 Написати не зазначені позначення у нижченаведених записах ядерних реакцій, спричинених фотонами:

а) ${}^{27}_{13}\text{Al}(\gamma, x){}^{26}_{12}\text{Mg}$; б) ${}^{27}_{13}\text{Al}(\gamma, n)x$;

в) ${}^{63}_{29}\text{Cu}(\gamma, x){}^{62}_{29}\text{Cu}$; г) $x(\gamma, n){}^{131}_{74}\text{W}$;

Відповідь: а) ${}^1_1\text{H}$; б) ${}^{26}_{13}\text{Al}$; в) 1_0n ; г) ${}^{132}_{74}\text{W}$.

25.4 Визначити енергію, яка вивільняється при нижченаведених ядерних реакціях:

а) ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^3_1\text{H}$; б) ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0n$.

Відповідь: а) $Q = 4,04 \text{ MeV}$; б) $Q = 3,26 \text{ MeV}$.

25.5 Знайти енергію, яка вивільняється при наступних ядерних реакціях:

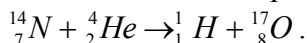
а) ${}^2_1\text{H} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^4_2\text{He}$; б) ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$;

в) ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$; г) ${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$;

Відповідь: а) $Q = 18,3 \text{ MeV}$; б) $Q = 22,4 \text{ MeV}$; в) $Q = 17,3 \text{ MeV}$;

г) $Q = 4,02 \text{ MeV}$.

25.6 Визначити енергію, поглинуту при ядерній реакції:



Відповідь: $Q = 1,18 \text{ MeV}$.

25.7 Під час бомбардування ізотопу азоту ${}^{14}_7N$ нейтронами утворюється ізотоп вуглецю ${}^{14}_6C$, який виявляється β -радіоактивним. Написати рівняння обох реакцій.

25.8 При бомбардуванні ізотопу алюмінію ${}^{27}_{13}Al$ α -частинками утворюється радіоактивний ізотоп фосфору ${}^{30}_{15}P$, який потім розпадається з вивільненням позитрона. Написати рівняння обох реакцій. Визначити питому активність отриманого ізотопу, якщо відомо, що його період напіврозпаду дорівнює 130 с.

Відповідь: $a = 1,1 \cdot 10^{23} (\text{с} \cdot \text{кг})^{-1}$.

25.9 При бомбардування ізотопу азоту ${}^{23}_{11}Na$ дейтонами утворюється β -радіоактивний ізотоп натрію ${}^{24}_{11}Na$. Лічильник β -частинок встановлений поблизу препарату, який містить радіоактивний ${}^{24}_{11}Na$. Під час першого вимірювання покази лічильника дорівнювали 170 імпульсів за хвилину, а через добу - 56 імпульсів за хвилину. Написати рівняння обох реакцій. Знайти період напіврозпаду ізотопу ${}^{24}_{11}Na$.

Відповідь: $T_{1/2} = 15$ годин.

25.10 Яку кількість води можна нагріти від $0^{\circ}C$ до кипіння, якщо використати усе тепло, що вивільниться при реакції ${}^7_3Li(p, \alpha)$ під час повного розпаду одного грама літію?

Відповідь: $m = 5,7 \cdot 10^5 \text{ кг}$.

25.11 Ізотоп гелію 3_2He утворюється при бомбардування ядер тритію 3_1H протонами. Написати рівняння ядерної реакції та визначити енергію, яка вивільняється під час цієї реакції. Знайти «поріг» W_D ядерної реакції.

Відповідь: $Q = -0,78 \text{ MeV}$, реакція протікає з поглинанням енергії; $W = 1,04 \text{ MeV}$.

25.12 Визначити поріг W_{Π} ядерної реакції ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p)$.

Відповідь: $W_{\Pi} = 1,52 \text{ MeV}$.

25.13 Визначити поріг W_{Π} ядерної реакції ${}^7_3\text{Li}(p, n)$.

Відповідь: $W_{\Pi} = 1,89 \text{ MeV}$.

25.14 На атомній електростанції за рік витрачається $m = 19,2$ кг урану ${}^{235}_{92}\text{U}$. Враховуючи, що при кожному акті розпаду ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ вивільняється енергія $W = 200 \text{ MeV}$ і коефіцієнт корисної дії при виробленні електроенергії дорівнює $\eta = 25\%$, знайти електричну потужність атомної електростанції.

Відповідь: $N = 125 \text{ МВт}$.

25.15 Порівняйте енергії, що виділяються при термоядерному синтезі ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$ (W_T) і розпаді ядра урану ${}^{235}_{92}\text{U}$ (W_U), якщо в обох випадках витрачаються однакові маси ядерного пального. Кожен акт розпаду супроводжується виділенням енергії $W = 200 \text{ MeV}$.

Відповідь: $\frac{W_T}{W_U} = 7,55$.

25.16 Яку енергію у кіловат-годинах можна отримати від поділу $m = 1\text{г}$ урану ${}^{235}_{92}\text{U}$, якщо в одному акті розпаду ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ вивільняється енергія $W = 200 \text{ MeV}$?

Відповідь: $W = 2,5 \cdot 10^4 \text{ кВт} \cdot \text{годин}$.

25.17 Вважаючи, що в одному акті розпаду ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ вивільняється енергія $W = 200 \text{ MeV}$, визначити енергію, що виділяється при розпаді одного кілограма ізоотопу ${}^{235}_{92}\text{U}$, а також масу кам'яного вугілля з теплотворною здатністю $q = 30 \text{ кДж/г}$, яка є еквівалентною у тепловому відношенні до одного кілограма урану.

Відповідь: $W = 8,2 \cdot 10^{10}$ кДж; $m = 2,7 \cdot 10^6$ кг .

25.18 Яка кількість урану ${}^{235}_{92}\text{U}$ витрачається за добу на атомній електростанції потужністю $N = 5000$ кВт? ККД електростанції складає $\eta = 17\%$ та при кожному акті розпаду ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ вивільняється енергія $W = 200$ Мев .

Відповідь: $m = 31$ г .

25.19 Під час вибуху водневої бомби відбувається термоядерна реакція утворення гелію з дейтерію та тритію. 1 Написати ядерну реакцію; 2 Визначити енергію, що вивільняється під час цієї реакції; 3 Яку енергію (у кіловат-годинах) можна отримати при утворенні $m = 1$ г гелію?

Відповідь: 2 $Q = 17,6$ Мев; 3 $W = 11,8 \cdot 10^4$ кВт · годин .

25.20 Яку частку своєї початкової швидкості складе швидкість нейтрона після пружного центрального зіткнення його з нерухомим ядром ізотопу ${}^{24}_{11}\text{Na}$?

Відповідь: $\frac{v'_1}{v_1} = 92\%$.

25.21 Заряджена частинка влітає в однорідне магнітне поле, індукція якого дорівнює $B = 0,5$ Тл та рухається по колу радіусом $R = 10$ см . Швидкість частинки складає $v = 2,4 \cdot 10^6$ м/с . Визначити питомий заряд частинки.

Відповідь: $\frac{q}{m} = 4,8 \cdot 10^7$ Кл/кг .

25.22 Електрон був прискорений електричним полем з різницею потенціалів $U = 180$ кВ .

1 Враховуючи поправки теорії відносності визначити для такого електрона масу, швидкість та кінетичну енергію та питомий заряд.

2 Визначити швидкість цього електрона без урахування релятивістської поправки.

Відповідь: 1 $m = 1,23 \cdot 10^{-30} \text{ кг}$; $v = 1,02 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; $W = 1,8 \cdot 10^5 \text{ eB}$;

$$\frac{e}{m} = 1,3 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг} . 2 \quad v = 2,52 \cdot 10^8 \text{ м/с} .$$

25.23 Нейтрон та антинейтрон об'єднуються, утворюючи два фотони. Визначити енергію кожного з фотонів W_ϕ , які утворилися. Прийняти, що початкова енергія частинок була нехтовно малою.

Відповідь: $W_\phi = 1,51 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 941 \text{ MeB}$.

25.24 K^0 - мезон розпадається на два заряджених π - мезони. Маса кожного з π - мезонів, які утворилися, у 1,77 разу більша за його масу спокою. Вважаючи, що спочатку K^0 - мезон не рухався і його маса спокою дорівнює $965 m_e$, де m_e - маса спокою електрона, знайти: а) масу спокою π - мезонів, які утворилися; б) швидкість π - мезонів у момент їх утворення.

Відповідь: а) $m = 273 m_e$; б) $v = 2,48 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

25.25 Позитрон та електрон анігілюють з утворенням двох фотонів. Визначити: а) енергію кожного з утворених фотонів за умови, що кінетична енергія електрона та позитрона до їх зіткнення дорівнювала нулю; б) довжину хвилі цих фотонів.

Відповідь: а) енергія кожного фотона - $W_\phi = 0,51 \text{ MeB}$;

б) $\lambda = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}$.