

NOWE

Zrozumieć fizykę

4

PODRĘCZNIK • LICEUM • TECHNIKUM

ZAKRES ROZSZERZONY

MARCIN BRAUN

KRZYSZTOF BYCZUK

AGNIESZKA SEWERYN-BYCZUK

ELŻBIETA WÓJTOWICZ



Twoje mocne strony

NOWE Zrozumieć fizykę

Spis treści

O czym jest podręcznik	4	20.2. Reakcje jądrowe	140
► 18. Optyka		20.3. Promieniowanie jądrowe	148
18.1. Soczewki	6	20.4. Czas połowicznego rozpadu	157
18.2. Obraz rzeczywisty	14	Analiza tekstu. Maria Skłodowska-Curie ...	164
18.3. Obraz pozorny tworzony przez zwierciadło płaskie	25	Wiesz, umiesz, zdasz	166
18.4. Obraz pozorny tworzony przez soczewki	30	► 21. Energia jądrowa	
18.5. Rozszczepienie światła	38	21.1. Teoria względności	172
18.6. Natura fal elektromagnetycznych	45	21.2. Masa a energia	180
18.7. Polaryzacja	52	21.3. Energia całkowita	186
Projekt. Zwierciadła wklęsłe i wypukłe	64	21.4. Energia reakcji jądrowych	190
Wiesz, umiesz, zdasz	65	21.5. Energia reakcji rozszczepienia	195
		21.6. Energia syntezy termojądrowej	203
► 19. Fizyka atomowa		21.7. F Życie gwiazd	209
19.1. Zjawisko fotoelektryczne	76	21.8. Galaktyki i Wszechświat	218
19.2. Falowa natura materii	85	Analiza tekstu. Świat zdrowo zafalował ...	228
19.3. Widmo liniowe	92	Wiesz, umiesz, zdasz	230
19.4. Foton jako cząstka	101		
19.5. F Promieniowanie termiczne	106	Tabele	236
19.6. F Efekt cieplarniany	115	Spis doświadczeń obowiązkowych	240
Projekt. Spektroskop	123	Spis infografik	240
Wiesz, umiesz, zdasz	124	Odpowiedzi i wskazówki do wybranych zadań	241
		Indeks	245
► 20. Izotopy i promieniowanie		Indeks nazw obcojęzycznych z wymową ..	247
20.1. Jądro atomowe	132	Spis działów w pozostałych częściach ...	247

O czym jest podręcznik

W podręczniku *Zrozumieć fizykę 4* znajdziesz informacje dotyczące optyki, fizyki atomowej i jądrowej.

Dzięki tym wiadomościom zrozumiesz wiele zjawisk z otaczającego cię świata i sprawnie przejdziesz do kolejnych działów fizyki.



Czemu służą poszczególne elementy podręcznika

Ważne w tej lekcji:

Szybko się zorientujesz, co jest najważniejsze w danej lekcji.

Przypomnij sobie:

Łatwo sprawdzisz, co powinieneś wiedzieć z wcześniejszej edukacji.

$$E = hf$$

Dzięki czytelnym wyróżnieniom szybko odnajdziesz wzory, definicje i ważne stwierdzenia.

Za wyjaśnienie efektu...

Komentarze ułatwią ci zrozumienie informacji z tekstu głównego.

Przykład

Przykłady umożliwią ci prześledzenie toku rozumowania podczas rozwiązywania zadań.

Pytania i zadania

Wykonanie poleceń i zadań na końcu tematu pozwoli ci utrwalić nową wiedzę i nabyte umiejętności.

A to ciekawe

Dzięki ciekawostkom dowiesz się interesujących faktów związanych z lekcją.

F Luneta astronomiczna to przyrząd...

Treści wykraczające poza podstawę programową.

Doświadczenie 1

Doświadczenie 2 obowiązkowe

Czytelnie opisane i zilustrowane doświadczenia ułatwią ci przeprowadzanie i analizowanie eksperymentów.

P

Zadanie analogiczne do przykładu.

i

Zadanie do infografiki.



Do wykonania doświadczenia lub zadania przyda ci się telefon komórkowy.



Do opracowania wyników pomiarów będzie potrzebny komputer.



WIESZ, UMIESZ, ZDASZ

Podsumowanie

Na tych stronach znajdziesz najważniejsze wiadomości z danego działu.

Sposób na zadanie

Wskazówki i podpowiedzi ułatwią ci rozwiązywanie różnych typów zadań.

Zadania powtórzeniowe

Dzięki tym zadaniom sprawdzisz stopień opanowania umiejętności i wiadomości z danego działu.

18. Optyka

1. Soczewki
2. Obraz rzeczywisty
3. Obraz pozorny tworzony przez zwierciadło płaskie
4. Obraz pozorny tworzony przez soczewki
5. Rozszczepienie światła
6. Natura fal elektromagnetycznych
7. Polaryzacja



18.1 Soczewki



Ważne w tej lekcji:

- soczewki skupiające i rozpraszające,
- ognisko i ogniskowa,
- zdolność skupiająca, dioptria,
- przybliżenie cienkiej soczewki.



Przypomnij sobie:

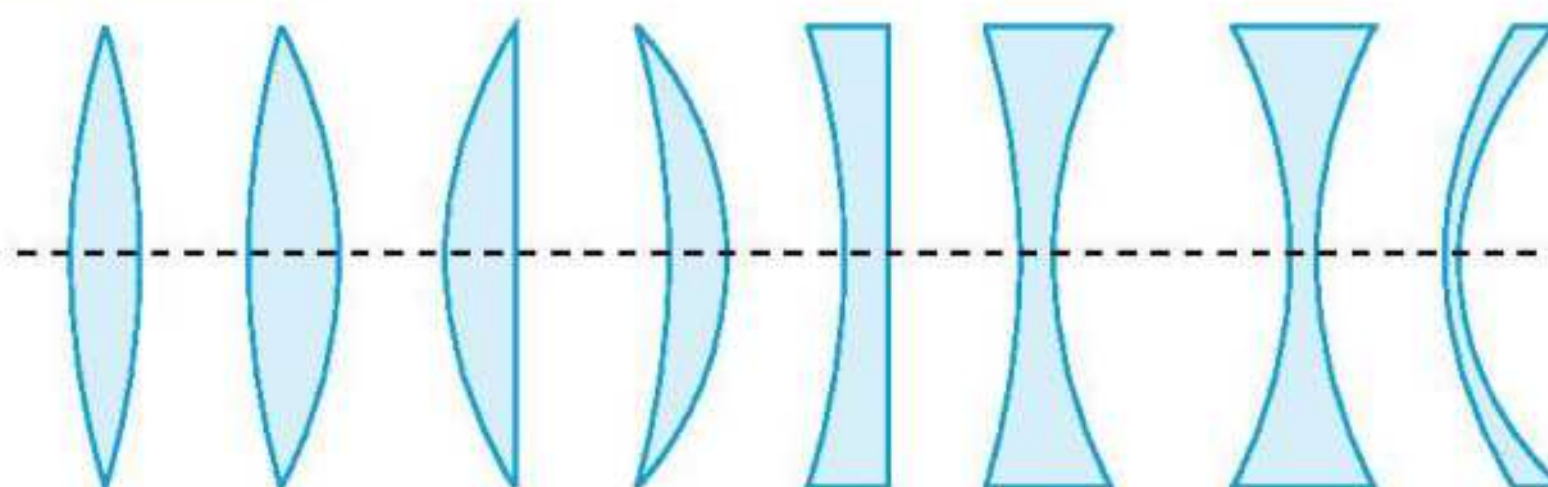
- Gdy światło przechodzi do innego ośrodka, ulega załamaniu.
- Kąt załamania zależy od kąta padania zgodnie z prawem Snelliusa.

■ Soczewki – zastosowanie załamania światła

W drugiej części podręcznika omawialiśmy zjawisko załamania światła i innych fal (patrz ramka „Przypomnij sobie” na następnej stronie). Załamanie światła ma duże znaczenie praktyczne: dzięki niemu działają soczewki, których używamy w okularach, lunetach, mikroskopach i aparatach fotograficznych. W najbliższych lekcjach zajmiemy się dokładniej działaniem soczewek.

■ Oś optyczna

Soczewki mogą mieć różne kształty. Na ogół jednak mają oś symetrii, czyli **oś optyczną**, na rysunku poniżej zaznaczoną linią przerywaną.



Rys. 18.1. Soczewki o różnych kształtach (widok w przekroju)



Przypomnij sobie

Kiedy światło przechodzi do ośrodka, w którym rozchodzi się z inną prędkością, załamuje się, czyli zmienia kierunek.

- Jeśli **światło** zwalnia, załamuje się do normalnej (linii prostopadłej do granicy ośrodków), czyli **kąt załamania** jest mniejszy od **kąta padania**. Taka sytuacja jest przedstawiona na rysunku.
- Jeśli światło przyspiesza, załamuje się od normalnej, czyli kąt załamania jest większy niż kąt padania.

Między **kątem padania** α a **kątem załamania** β zachodzi zależność zwana prawem Snelliusa:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

gdzie **współczynnik załamania** $n = \frac{c}{v}$ określa, ile razy wolniej porusza się światło w danym ośrodku niż w próżni.

Dla powietrza $n \approx 1$, natomiast dla innych substancji współczynnik ten jest większy, ponieważ światło rozchodzi się w nich wolniej.

ZAŁAMANIE ŚWIATŁA

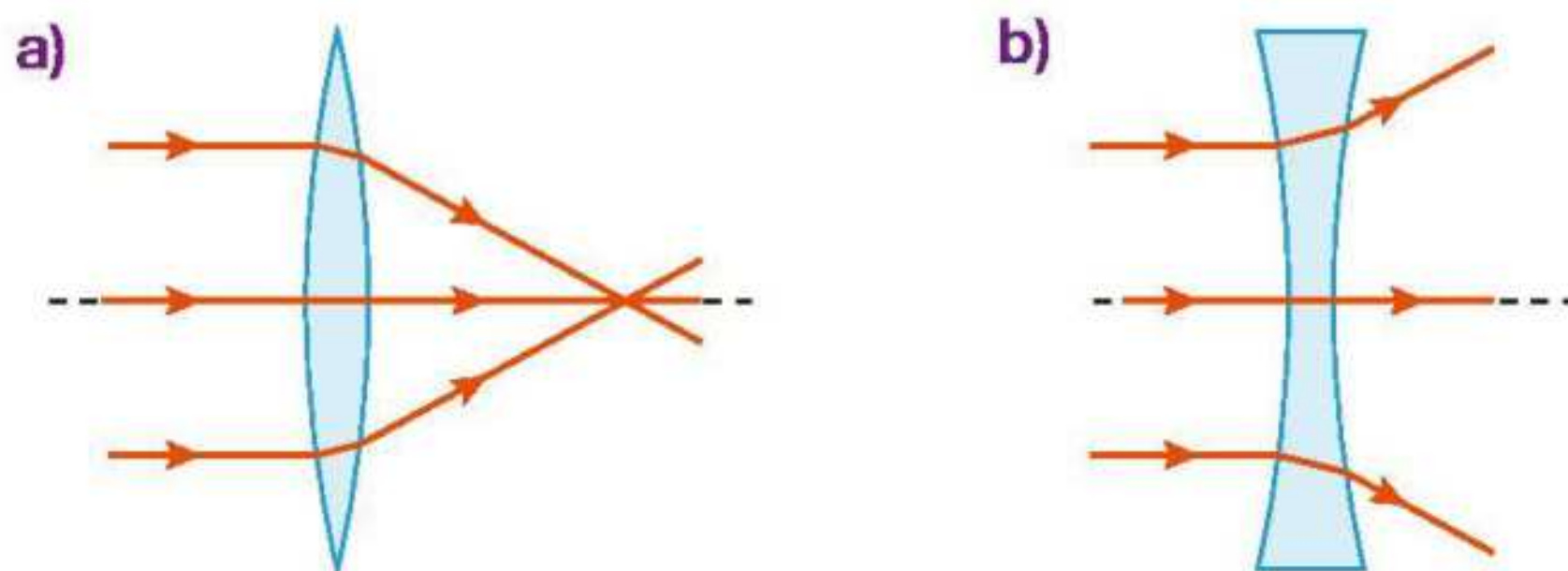


Soczewki skupiające i rozpraszające

Soczewka działa dzięki dwukrotnemu załamaniu światła.

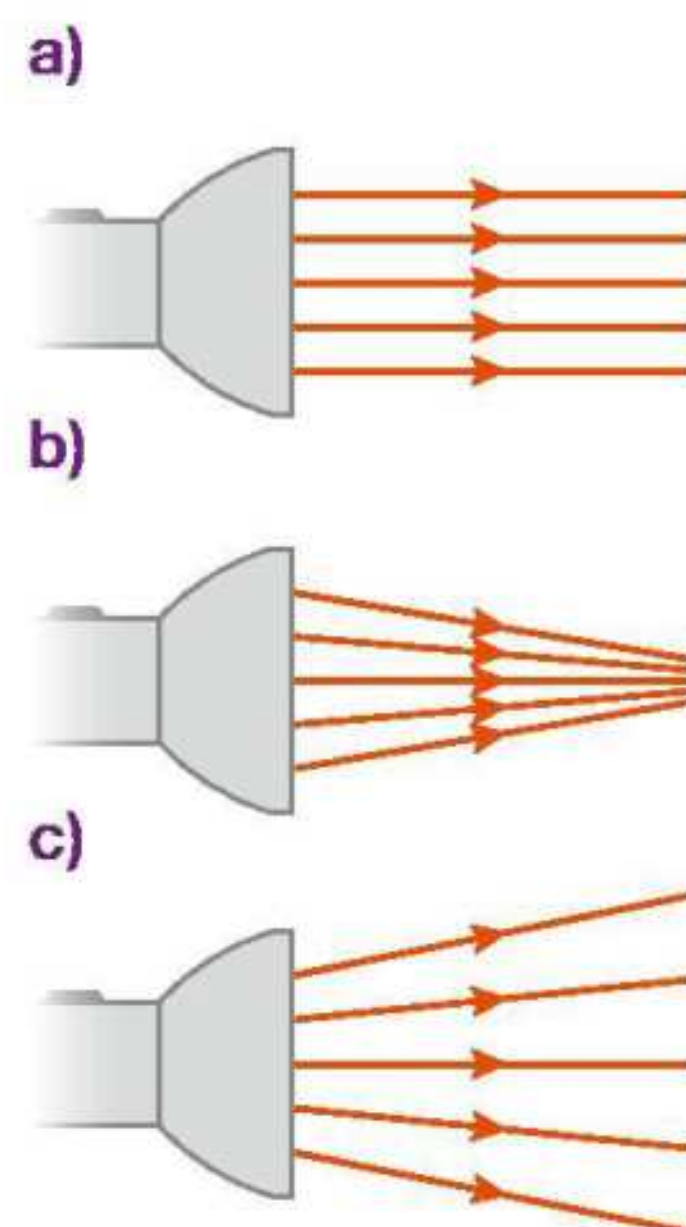
Promień światła przechodzący przez soczewkę załamuje się zarówno wtedy, gdy przechodzi z otoczenia do soczewki, jak i wtedy, gdy przechodzi z soczewki do otoczenia.

Najważniejszy podział soczewek – na skupiające i rozpraszające – opiera się na sposobie, w jaki soczewka zmienia padającą na nią wiązkę światła równoległą do osi optycznej (rys. 18.2).



Rys. 18.2. Przejście równoległej wiązki światła przez soczewkę: a) skupiającą, b) rozpraszającą

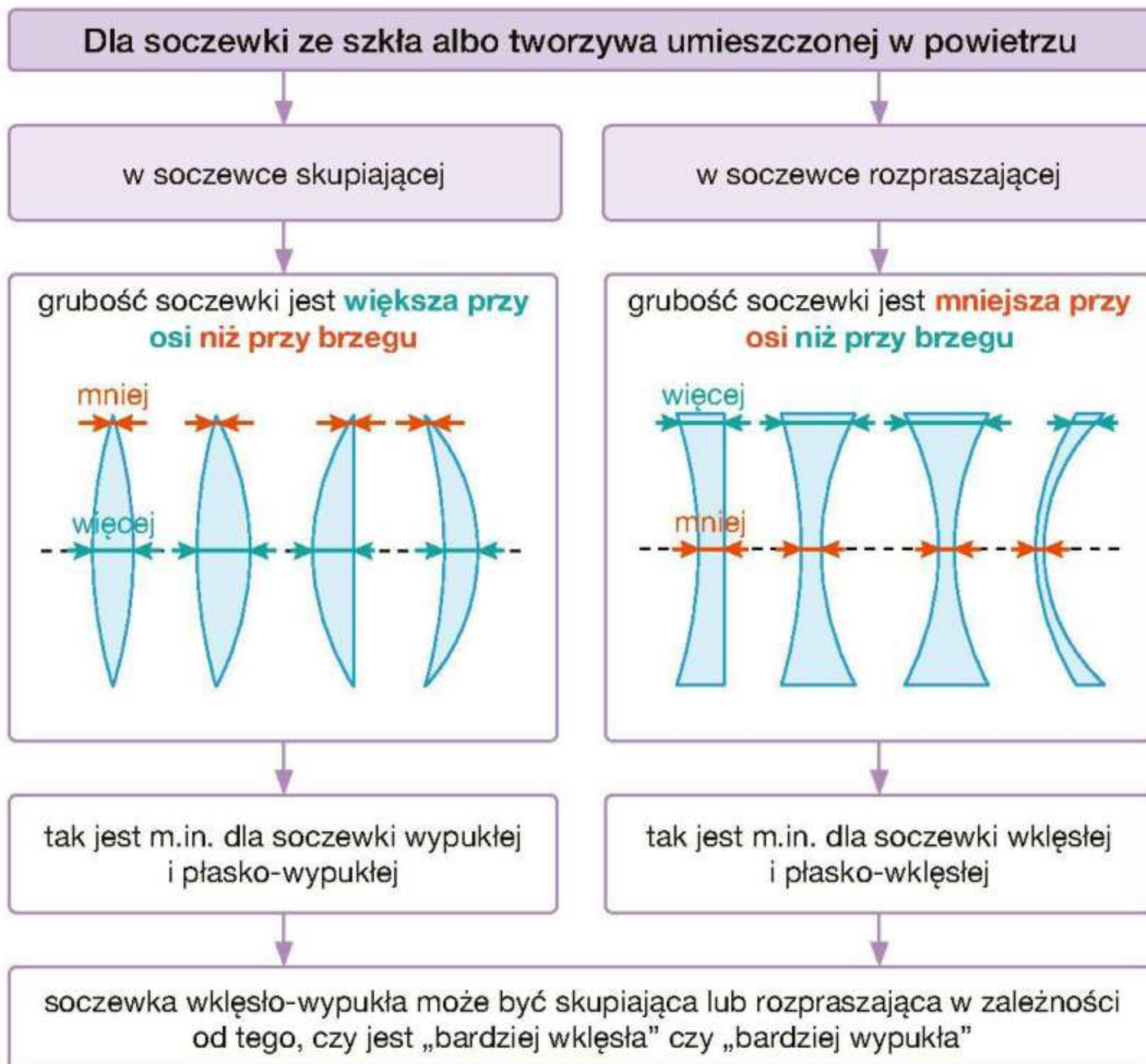
Przypomnijmy przy tej okazji, że wiązka równoległa jest tylko jednym z możliwych rodzajów wiązek światła (rys. 18.3).



Rys. 18.3. Wiązki światła: a) równoległa, b) zbieżna, c) rozbieżna

■ Kształt soczewki a jej działanie

Jaki kształt może mieć soczewka skupiająca, a jaki rozpraszająca? Dla otoczonej powietrzem soczewki szklanej lub wykonanej z tworzywa sztucznego – a są to najczęściej spotykane soczewki – opisuje to diagram.



■ Ognisko soczewki skupiającej

Wykonajmy proste doświadczenie, które pozwoli nam zbadać właściwości soczewki skupiającej.



Doświadczenie 1

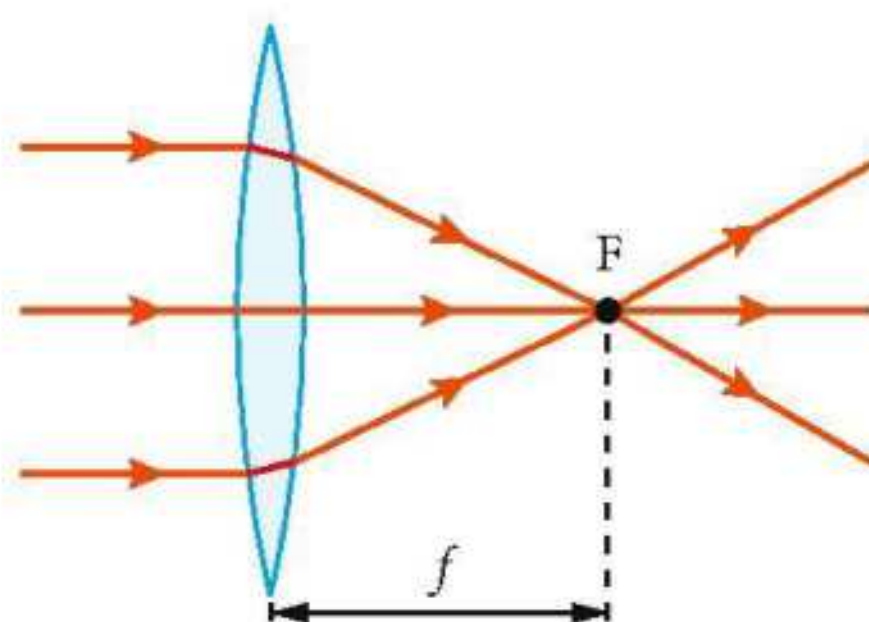
1. Przygotuj dużą soczewkę skupiającą (może to być lupa, czyli szkło powiększające), czarną kartkę oraz miskę z wodą. Doświadczenie można wykonać tylko w słoneczny dzień, najlepiej na dworze.
2. Ustaw soczewkę prostopadle do promieni słonecznych.
3. Za soczewką ustaw kawałek papieru i zmieniaj jego odległość od soczewki. Znajdź takie ustawienie, aby oświetlony obszar był jak najmniejszy.
4. Jeżeli papier się zapali, zgaś go w misce z wodą.

Promienie światła słonecznego są praktycznie równoległe. Soczewka skupia je na bardzo małym obszarze. Ponieważ światło niesie energię,

kartka w tym miejscu się podgrzewa, a w końcu zapala. Nic dziwnego, że miejsce skupienia promieni nazwano ogniskiem.

Kiedy soczewka skupia równoległą wiązkę światła, po przejściu przez nią promienie spotykają się w jednym punkcie, który nazywamy **ogniskiem** i oznaczamy F (rys. 18.4).

Za ogniskiem wiązka staje się rozbieżna.



Rys. 18.4. Ognisko i ogniskowa soczewki skupiającej

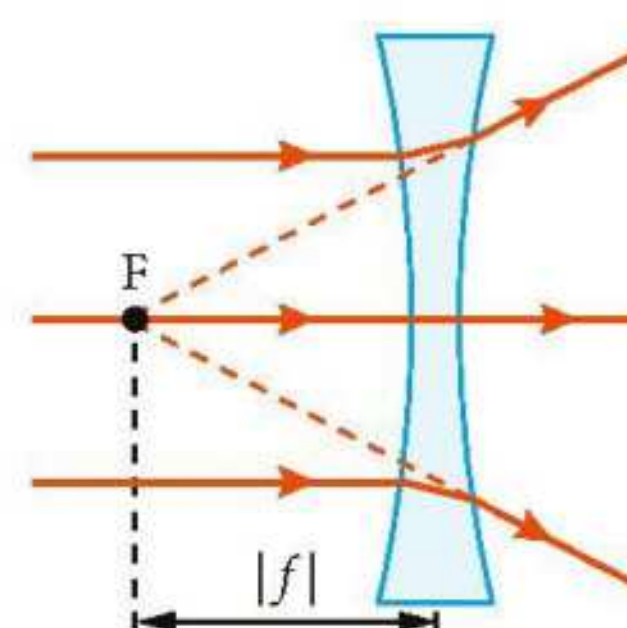
Niektóre soczewki skupiają światło mocniej niż inne, dlatego ognisko może być bliżej lub dalej od soczewki. Ta odległość jest ważną wielkością, dlatego ma własną nazwę: ogniskowa.

Odległość ogniska od środka soczewki nazywamy **ogniskową** i oznaczamy symbolem f .

■ Ognisko i ogniskowa soczewki rozpraszającej

A jak jest dla soczewki rozpraszającej?

Kiedy soczewka rozprasza równoległą wiązkę światła, przedłużenia promieni przecinają się w jednym punkcie. Nazywamy go **ogniskiem pozornym** soczewki (rys. 18.5).



Rys. 18.5. Ognisko pozorne i ogniskowa soczewki rozpraszającej

Aby zaznaczyć, że ognisko pozorne znajduje się przed soczewką, ogniskową zapisujemy ze znakiem minus (np. $f = -20$ cm).

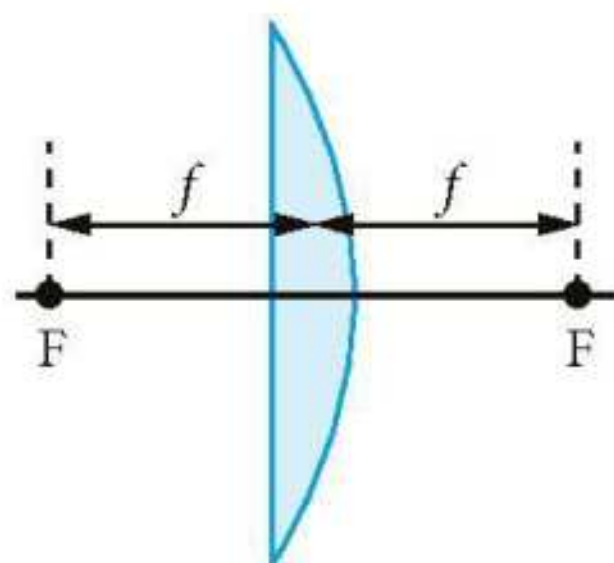
■ Soczewka ma dwa ogniska

Do wyznaczenia ogniska soczewki posługiwaliśmy się padającą na nią równoległą wiązką światła. Gdyby wiązka padała z drugiej strony, znaleźlibyśmy drugie ognisko tej samej soczewki.

Ogniska soczewki leżą na osi soczewki po jej dwóch stronach, w jednakowej odległości od soczewki.

Łatwiej zapalić czarną powierzchnię niż białą. Dlaczego?

Oznaczenie F pochodzi od łacińskiego (i angielskiego) *focus*.



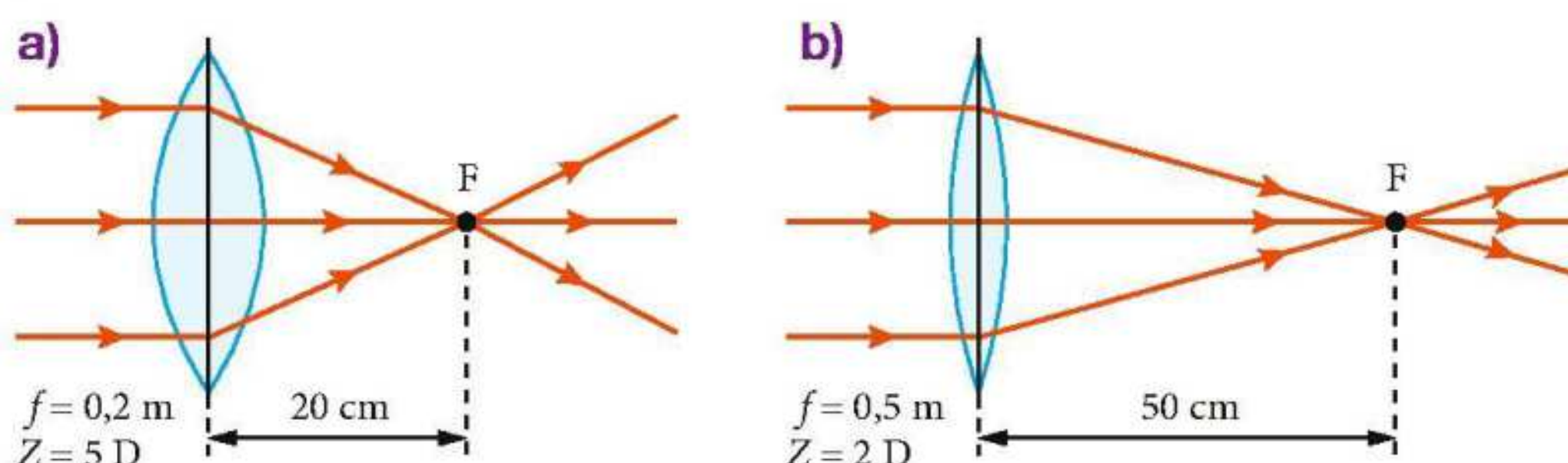
Rys. 18.6. Nawet w soczewce niesymetrycznej ogniska są położone w takich samych odległościach po obu stronach soczewki

Ostatnie ze stwierdzeń wymienionych powyżej pozostaje prawdziwe nawet wtedy, gdy soczewka jest niesymetryczna, np. jest to soczewka płasko-wypukła (rys. 18.6). Obowiązuje ono przy założeniu, że pomiarujemy grubość soczewki, czyli że jej grubość jest znacznie mniejsza od ogniskowej, a także od średnicy soczewki.

■ Zdolność skupiająca

Jak widzisz na rysunku 18.7, soczewka mocniej skupiająca światło ma mniejszą ogniskową niż soczewka, która skupia je słabiej. Mówimy, że soczewka na rysunku 18.7a ma większą zdolność skupiającą niż soczewka na rysunku 18.7b. Aby zdolność skupiającą określać liczbowo, definiujemy ją jako odwrotność ogniskowej:

$$\text{zdolność skupiająca} \rightarrow Z = \frac{1}{f} \leftarrow \text{ogniskowa}$$



Rys. 18.7. Porównanie soczewek o małej (a) i dużej (b) ogniskowej

Jednostką zdolności skupiającej jest dioptria ($1 \text{ D} = \frac{1}{\text{m}}$). Z tą jednostką spotykamy się przy doborze okularów. Przykładowo soczewka okularowa:

- „+2” to soczewka skupiająca o zdolności skupiającej $Z = 2 \text{ D}$, czyli o ogniskowej $f = \frac{1}{2} \text{ m} = 50 \text{ cm}$,
- „-1,5” to soczewka rozpraszająca o $Z = -1,5 \text{ D}$, a więc o ogniskowej:

$$f = -\frac{1}{1,5} \text{ m} = -\frac{2}{3} \text{ m} \approx -67 \text{ cm}$$

■ Od czego zależy ogniskowa soczewki

Ogniskowa soczewki skupiającej zależy od:

- **materiału**, z jakiego została wykonana – im większy współczynnik załamania światła dla tego materiału, tym większa zdolność skupiająca soczewki, a więc tym mniejsza (krótsza) ogniskowa,
- **kształtu** – im mocniej są zakrzywione powierzchnie soczewki wypukłej, tym większa jest jej zdolność skupiająca, a więc tym mniejsza ogniskowa.

Dla soczewki rozpraszającej jest podobnie, ale w tym przypadku trzeba mówić o wartości bezwzględnej zdolności skupiającej i ogniskowej.

Zdolność skupiająca soczewki wklęsło-wypukłej jest tym większa, im bardziej zakrzywiona jest powierzchnia wypukła i im mniej zakrzywiona jest powierzchnia wklęsła.

■ Przybliżenie cienkiej soczewki

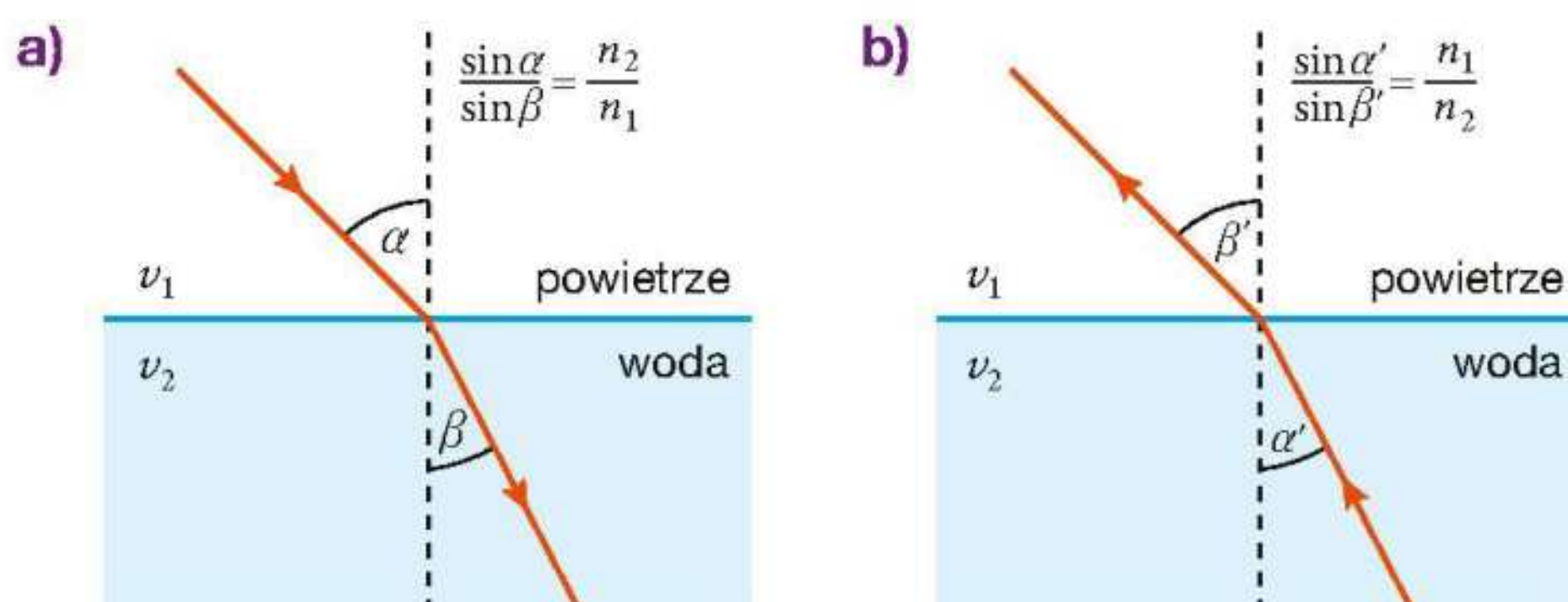
Promień światła przechodzący przez soczewkę załamuje się dwa razy: gdy do niej wchodzi i gdy z niej wychodzi. W naszych rozważaniach pominiemy ten dość skomplikowany mechanizm, a także grubość soczewki. Dlatego w uproszczeniu będziemy rysować załamanie światła w soczewce tylko w jednym miejscu – w jej środku.

Umownie cienką soczewkę przedstawiamy w postaci strzałki zakończonej grotami z obu stron. Kierunek grotów odwzorowuje zakrzywienie powierzchni soczewki (rys. 18.8). Tych symboli używamy na oznaczenie wszystkich soczewek, niezależnie od ich rzeczywistego kształtu.

■ Odwracalność biegu promienia światła

Rozważmy promień światła padający z powietrza na powierzchnię wody pod kątem $\alpha = 30^\circ$. Zgodnie z prawem Snelliusa załamuje się on pod kątem $\beta = 22^\circ$ (rys. 18.9a).

Jeśli z kolei promień przechodzący w przeciwną stronę, z wody do powietrza, pada na granicę ośrodków pod kątem $\alpha' = 22^\circ$, to załamuje się on pod kątem $\beta' = 30^\circ$ (rys. 18.9b).



Rys. 18.9. Z powietrza do wody (a) i z wody do powietrza (b) światło może biec po tym samym torze

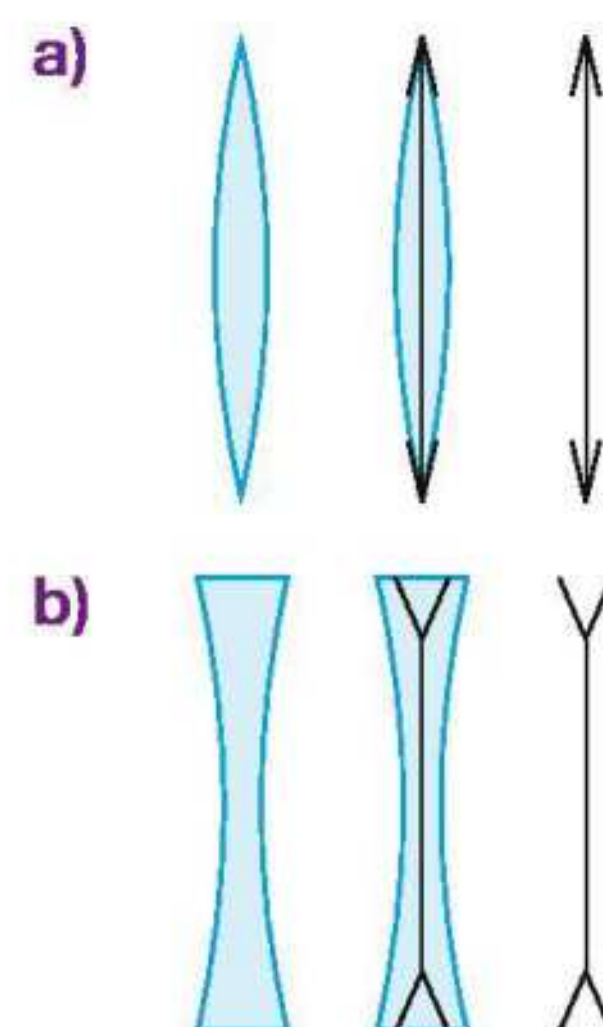
Nie jest to przypadek. Z prawa Snelliusa przy przejściu z ośrodka I do II (np. z powietrza do wody) i z ośrodka II do I (np. z wody do powietrza) wynikają następujące zależności:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \qquad \frac{\sin \alpha'}{\sin \beta'} = \frac{v_2}{v_1}$$

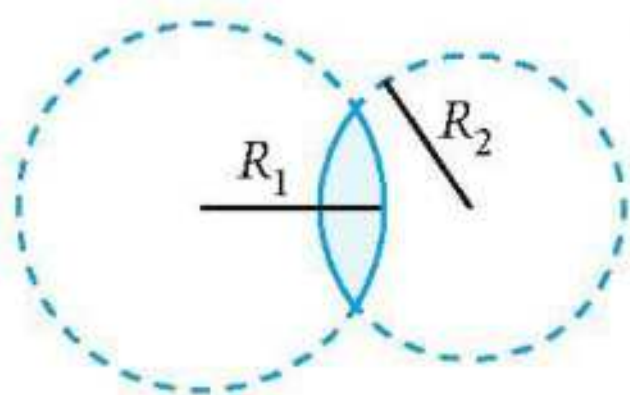
Można stąd obliczyć, że jeśli $\alpha' = \beta$, to $\beta' = \alpha$. Ogólnie można więc powiedzieć, że:

Jeśli światło biegnie po określonej drodze z punktu A do B, to światło wysłane z punktu B może biec po tej samej drodze do punktu A.

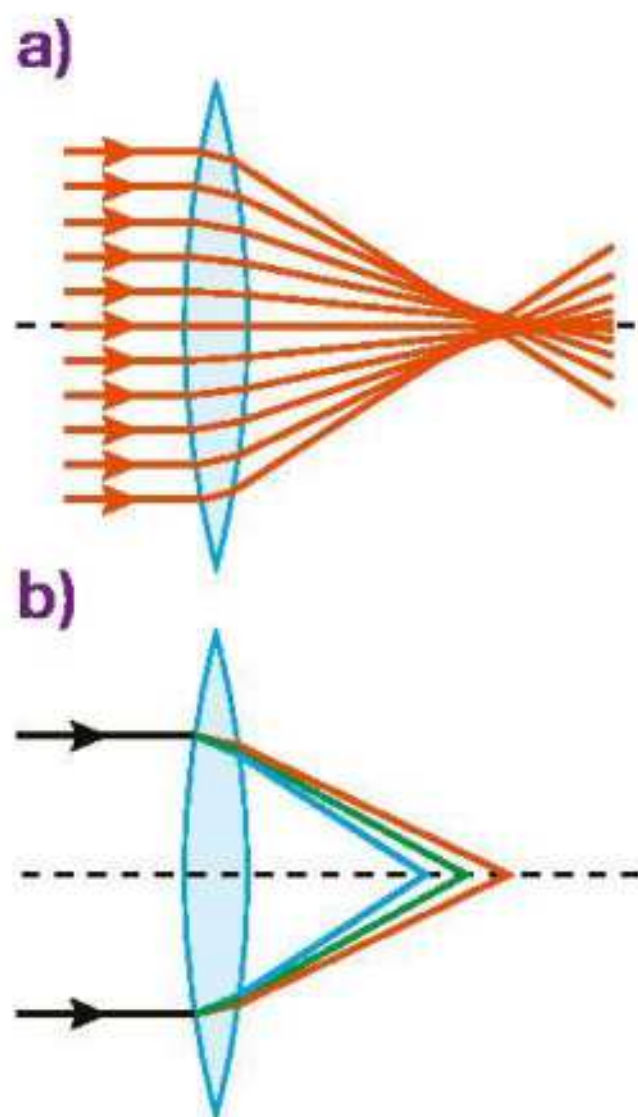
Ta zasada dotyczy również odbicia światła, ponieważ kąt odbicia jest równy kątowi padania.



Rys. 18.8. Schematyczne oznaczenia soczewki:
a) skupiającej,
b) rozpraszającej



Rys. 18.10. Soczewka sferyczna



Rys. 18.11. Aberracja:
a) sferyczna,
b) chromatyczna

F Soczewki sferyczne i asferyczne

Powierzchnia większości obecnie produkowanych soczewek po obu stronach ma kształt części sfery (rys. 18.10) lub płaską powierzchnię z jednej strony, a część sfery z drugiej. Stąd ich nazwa: **soczewki sferyczne**.

Soczewki takie mają jednak jedną podstawową wadę – wbrew temu, co powiedzieliśmy wcześniej, w ich ognisku przecinają się tylko promienie biegnące **blisko osi** soczewki (w przypadku soczewek rozpraszających w ognisku pozornym przecinają się tylko przedłużenia promieni biegnących blisko osi).

Zjawisko to nazywamy **aberracją sferyczną** (rys. 18.11a). W naszych rozważaniach pominiemy to zjawisko. W przypadku precyzyjnych przyrządów optycznych do niwelacji negatywnych skutków aberracji sferycznej stosuje się układy kilku soczewek.

Obecnie coraz częściej można spotkać **soczewki asferyczne**, które mają bardziej skomplikowany kształt, a przez to są droższe w produkcji, ale za to działają dokładnie tak, jak to opisaliśmy.

Jednak nawet soczewki asferyczne nie pozwalają uniknąć innej istotnej wady: **aberracji chromatycznej**, czyli skupiania w różny sposób światła o różnych barwach (rys. 18.11b). Ma to miejsce dlatego, że światło o różnych barwach załamuje się w różnym stopniu.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZCIE



■ Przykład

W jakiej odległości od soczewki o ogniskowej $f = -50$ cm należy ustawić ekran, aby wiązka światła o średnicy 1 cm padająca na soczewkę wzdłuż jej osi oświetliła na ekranie koło o średnicy 10 cm?

Dane: $f = -50$ cm = -0,5 m – ogniskowa soczewki,
 $s_1 = 1$ cm = 0,01 m – średnica wiązki padającej na soczewkę,
 $s_2 = 10$ cm = 0,1 m – średnica obrazu wiązki

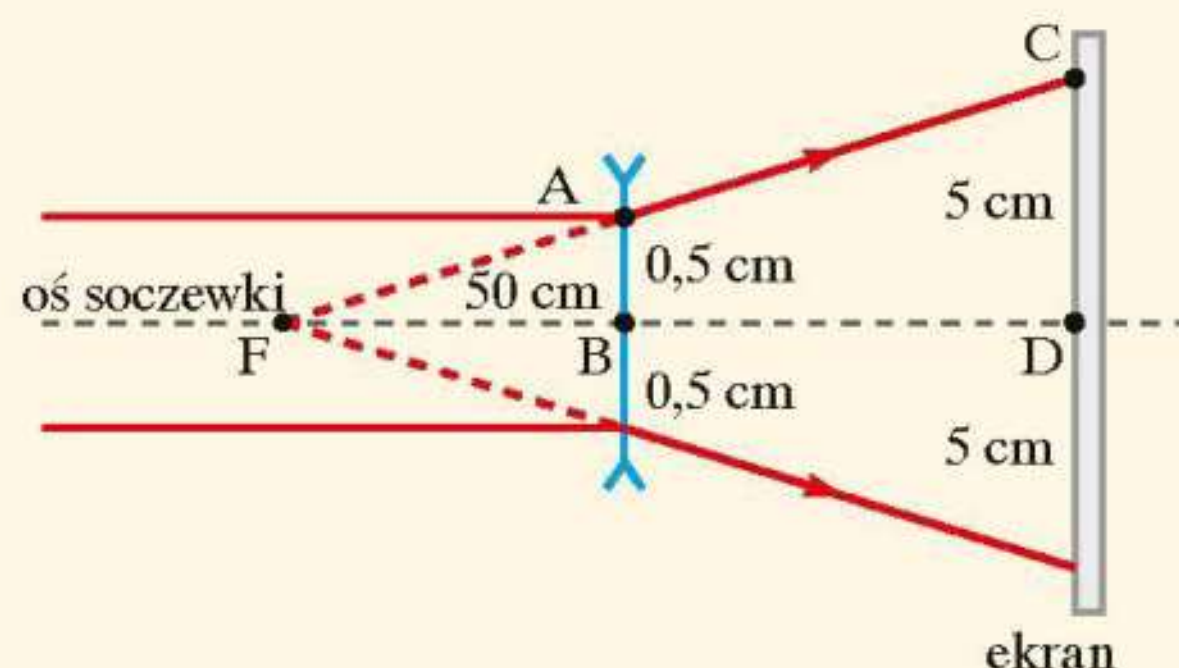
Szukane: x – odległość soczewki od ekranu

Rozwiązanie:

Podstawową częścią rozwiązania tego zadania jest sporządzenie poprawnego rysunku i zaznaczenie na nim danych.

Zwróćmy uwagę, że ujemna ogniskowa oznacza, że mamy do czynienia z soczewką rozpraszającą. Wiązka składa się z nieskończenie wielu promieni, ale na rysunku wystarczy zaznaczyć dwa promienie na jej brzegach.





Przyjmijmy oznaczenia jak na rysunku: A – punkt, w którym skrajny promień pada na soczewkę, B – środek soczewki, C – punkt, w którym skrajny promień pada na ekran, D – punkt, w którym oś soczewki przecina ekran, F – ognisko pozorne soczewki po stronie przeciwnej niż ekran.

Musimy ustalić długość odcinka $x = BD$. Zauważmy, że trójkąty AFB i CFD są podobne. Możemy więc zapisać:

$$\frac{AB}{BF} = \frac{CD}{DF}$$

Po przekształceniu i podstawieniu danych otrzymujemy: $DF = 5 \text{ m}$. Skoro znamy ogniskową soczewki, to długość odcinka BD wynosi:

$$BD = DF - BF = 4,5 \text{ m}$$

Odpowiedź: Ekran należy ustawić w odległości 4,5 m od soczewki.

1. Określ, czy soczewka o danej zdolności skupiającej jest soczewką skupiającą czy rozpraszającą. Oblicz jej ogniskową.

a) $Z = 4 \text{ D}$

b) $Z = -5 \text{ D}$

2. Na ilustracji widzisz dwie soczewki umieszczone w powietrzu. Która z nich jest soczewką skupiającą, a która rozpraszającą?

A.



B.



3. **P** Równoległa wiązka światła o średnicy 5 cm pada na soczewkę o ogniskowej $f = 10 \text{ cm}$ równoległe do jej osi. W jakiej odległości od soczewki należy ustawić ekran, aby wiązka światła skupiona przez soczewkę oświetlała na nim koło o średnicy 2 cm?

Wskazówka. Są dwa rozwiązania.

4. Punktowe źródło światła emituje promienie świetlne jednakowo we wszystkich kierunkach.
- a) Jaką soczewkę należy zastosować, aby część tego światła zamienić w wiązkę równoległą? Jak w stosunku do soczewki należy umieścić źródło światła?
- b) Jakie zastosowania może mieć taki układ?

18.2

Obraz rzeczywisty



Ważne w tej lekcji:

- fizyczny mechanizm tworzenia obrazu,
- konstrukcja obrazu,
- równanie soczewki.

Przypomnij sobie:

- Soczewka skupiająca skupia w jednym punkcie wszystkie promienie padające na nią równoległe do osi optycznej. Ten punkt nazywamy ogniskiem.
- Znajdująca się w powietrzu soczewka wypukła, szklana lub z tworzywa sztucznego, jest soczewką skupiającą.
- Soczewka skupiająca ma dwa ogniska, w równej odległości od soczewki po jej obu stronach.
- Odległość od ogniska do soczewki skupiającej nazywamy ogniskową.

■ Tworzenie obrazu rzeczywistego

Aby zrozumieć, co to jest obraz rzeczywisty, wykonajmy doświadczenie.

Doświadczenie 2

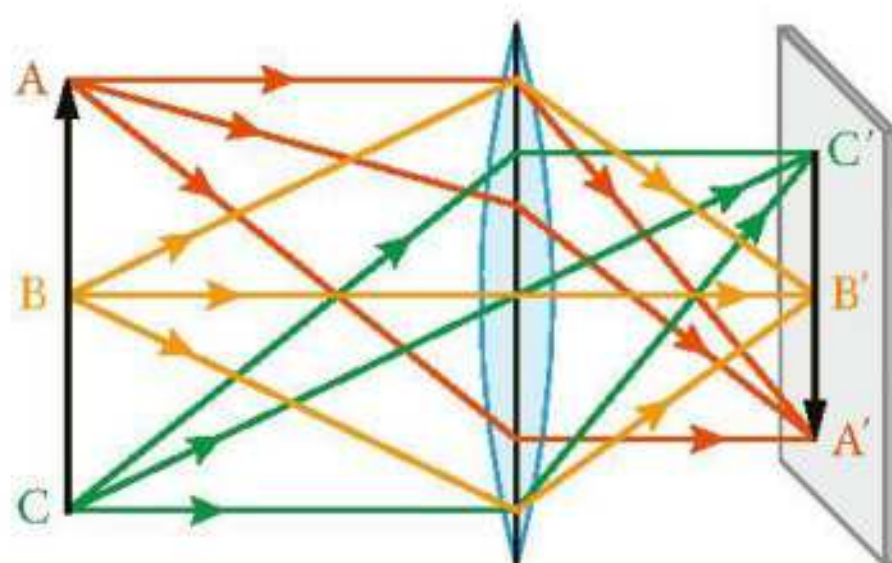
1. Przygotuj soczewkę skupiającą (może to być szkło powiększające), ekran (np. biała kartka albo ściana), świeczkę i zapalki. Doświadczenie wykonaj w półmroku. Jeśli dzień jest jasny, a nie ma możliwości zaciemnienia sali, to przejdź do punktu 4.
2. Ustaw w jednej linii świeczkę, soczewkę i ekran. Odległość między świeczką a soczewką powinna być większa niż ogniskowa soczewki. Jeśli używasz szkła powiększającego z rączką, to do jego umocowania możesz użyć pustej szklanej butelki – włóż do niej rączkę przyrządu.
3. Zmieniaj odległość między soczewką a ekranem, aż zobaczysz na nim wyświetlony ostry obraz świeczki.
4. W jasny dzień możesz spróbować uzyskać na ekranie obraz oświetlonych przedmiotów (drzew, domów) znajdujących się za oknem.



■ Jak powstaje obraz na ekranie?

Wszystkie promienie światła wychodzące z tego samego punktu przedmiotu przy przejściu przez soczewkę załamują się i trafiają w jeden punkt. Jeśli w tym punkcie umieścimy ekran, promienie go oświetlą.

Na rysunku 18.12 promienie wychodzące z punktu A po przejściu przez soczewkę spotykają się w punkcie A'. To samo zjawisko zachodzi dla wszystkich punktów przedmiotu (np. B i C), dlatego na ekranie powstaje obraz całego przedmiotu.



Rys. 18.12. Schemat tworzenia obrazu przez soczewkę skupiającą

Obraz, który można zobaczyć na ekranie, nazywamy obrazem rzeczywistym. Jest on widoczny także bez ekranu (patrz ramka poniżej).

■ Cechy obrazu rzeczywistego tworzonego przez soczewkę

Zarówno wynik doświadczenia, jak i schemat powstawania obrazu rzeczywistego pokazują, że jest on odwrócony o 180° . Zwróć uwagę, że obrót o 180° (rys. 18.13a) to **co innego** niż symetryczne odbicie (rys. 18.13b).



Rys. 18.13. Obraz tworzony przez soczewkę jest odwrócony (a), a nie odbity (b)

Wielkość obrazu może być różna. Czasami obraz jest powiększony, czasami pomniejszony, a czasami naturalnej wielkości – to zależy od odległości przedmiotu od soczewki. Wkrótce nauczysz się rozróżniać te sytuacje (patrz zad. 4 s. 24).

■ Kiedy obraz jest ostry

Obraz rzeczywisty powstaje w ściśle określonym miejscu (gdzie konkretnie – tym zajmiemy się za chwilę).

- Jeśli umieścimy w nim ekran, to zobaczymy ostry obraz.
- Jeśli ekran znajdzie się nieco bliżej lub nieco dalej od soczewki, to także zobaczymy obraz przedmiotu, ale rozmyty.

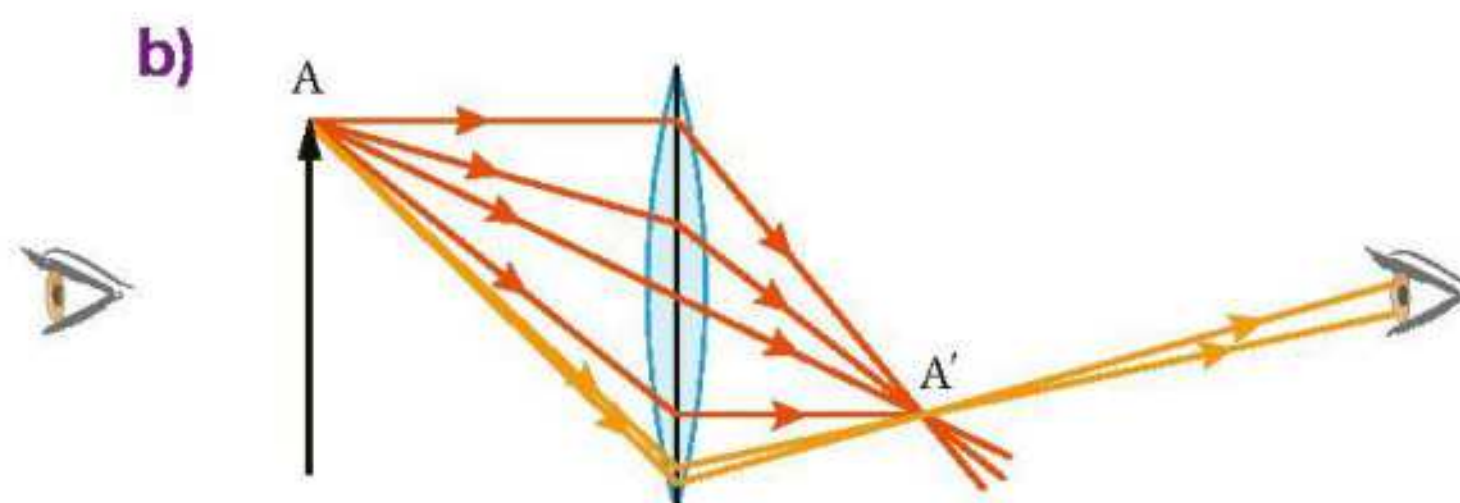
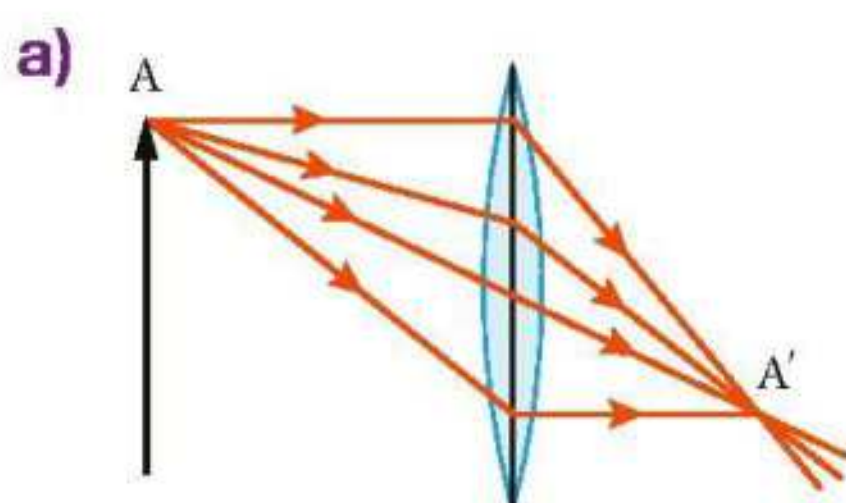
Obraz rzeczywisty widoczny bez ekranu

Taki obraz zobaczymy m.in. wtedy, gdy spojrzymy przez soczewkę wypukłą (np. lupę) na odległe przedmioty.

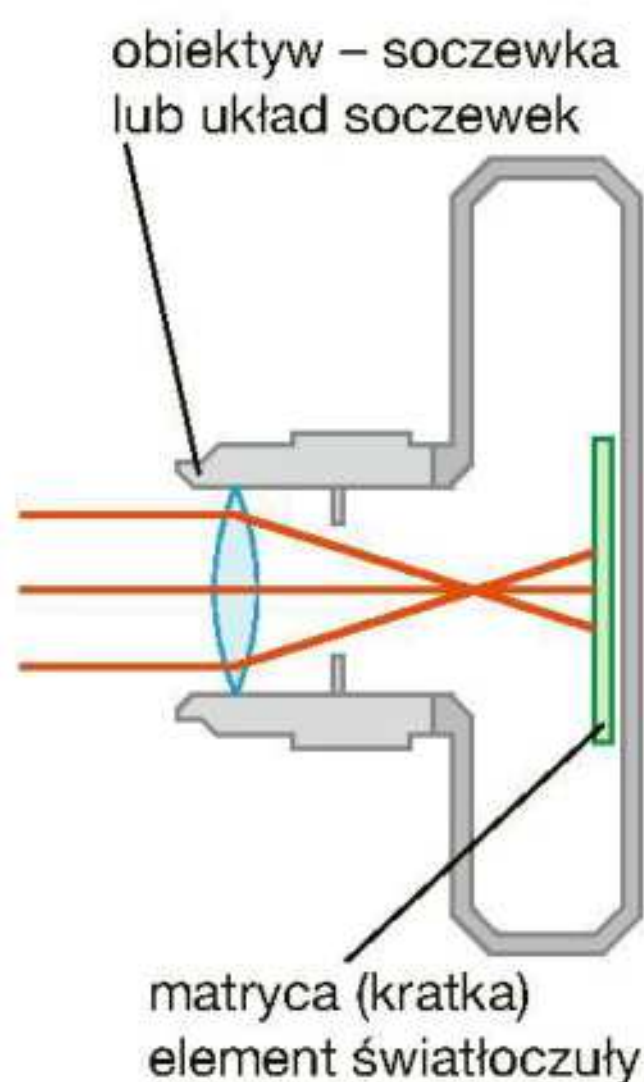
Jak to się dzieje? Przypomnijmy uproszczony schemat powstawania obrazu na ekranie (rys. a). Dla przejrzystości ograniczymy się do jednego punktu przedmiotu (grotu strzałki).

Taki rysunek nie wyjaśnia, dlaczego widzimy obraz – przecież promienie, które nie wpadają do oka, nie mają wpływu na to, co widzimy.

Trzeba jednak pamiętać, że rozważaliśmy tylko kilka przykładowych promieni. Dorysujmy więc (na żółto) takie, które trafią do narządu wzroku (rys. b).



Te promienie, a także wszystkie znajdujące się między nimi, docierają do oka dokładnie tak samo, jakby ich źródło znajdowało się w punkcie A' (obrazie punktu A). Dlatego wydaje nam się, że grot strzałki znajduje się właśnie w tym punkcie. W odróżnieniu od ekranu obserwator może się znajdować bliżej lub dalej – zawsze zobaczy ostry obraz tworzony przez soczewkę.



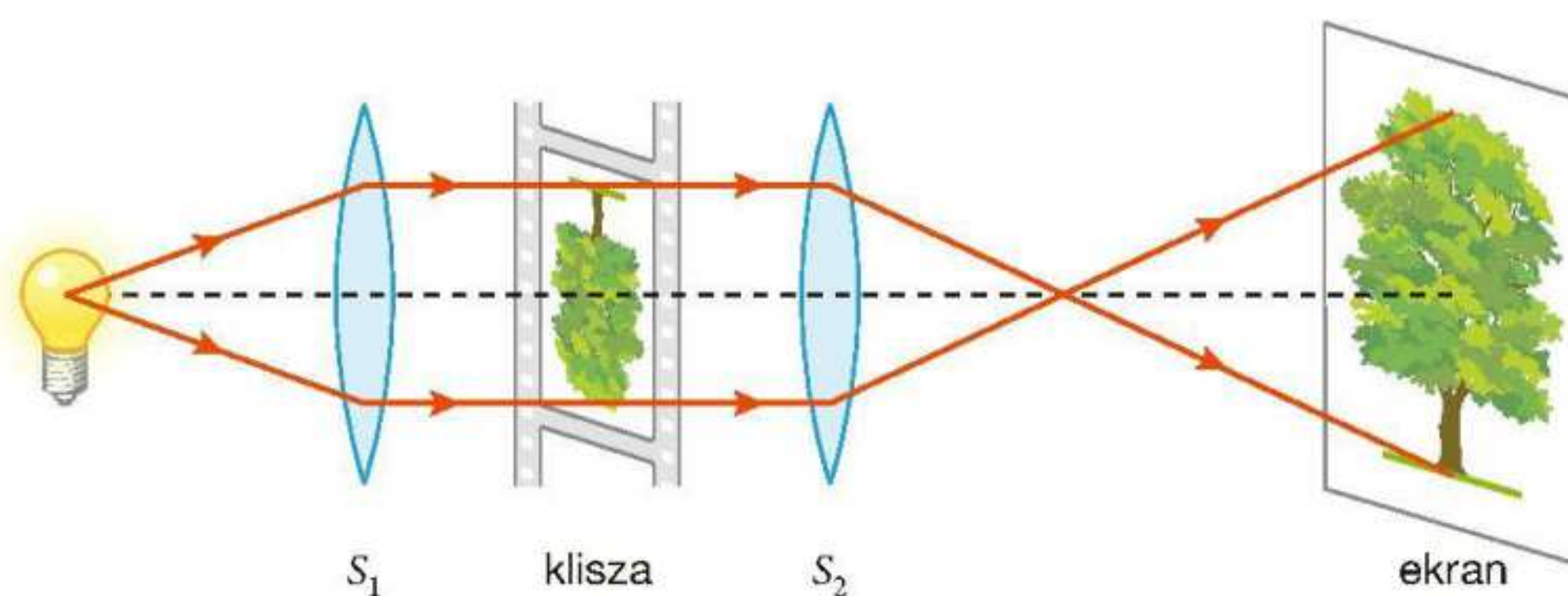
Rys. 18.14. Budowa i działanie aparatu fotograficznego

Obraz rzeczywisty w przyrodzie i technice

Najważniejszym dla nas przykładem tworzenia obrazu rzeczywistego przez soczewkę wypukłą jest działanie ludzkiego oka. Więcej piszemy o tym w ramce na s. 21.

Natomiast najczęściej spotykanym urządzeniem wykorzystującym tworzenie takiego obrazu jest aparat fotograficzny. Jego budowa wzorowana jest na oku (rys. 18.14). Obraz tworzy się tutaj na matrycy elementów światłoczułych, które przekazują informację do procesora.

Innym zastosowaniem jest projektor kinowy (patrz zdjęcie na początku lekcji) lub multimedialny. Światło wstępnie skupione przez soczewkę (oznaczoną S_1 na rysunku 18.15 na następnej stronie) przechodzi w nim przez kliszę filmową lub przezroczysty wyświetlacz. Następnie światło pada na drugą soczewkę (S_2), która tworzy obraz na ekranie.



Rys. 18.15. Budowa i działanie projektora

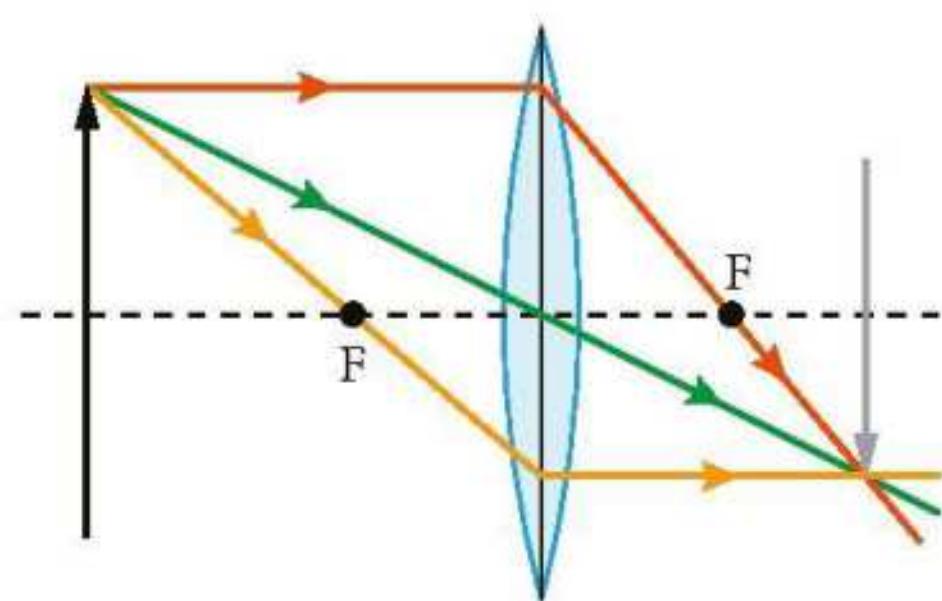
Konstrukcja obrazu

Aby wyznaczyć miejsce powstania obrazu przedmiotu, należy wykonać precyzyjny rysunek przedstawiający bieg wychodzących z niego promieni świetlnych. Jest on zwany **konstrukcją obrazu**.

Promieni takich jest nieskończenie wiele, więc trudno byłoby śledzić je wszystkie, ale do wyznaczenia obrazu danego punktu wystarczy prześledzić bieg wychodzących z niego dwóch promieni. Najlepiej jest wybrać takie, których bieg łatwo skonstruować.

Tam, gdzie się one przetną, przecinają się także wszystkie pozostałe promienie wychodzące z danego punktu przedmiotu.

Na rysunku 18.16 widzisz trzy promienie, z których do konstrukcji obrazu wystarczy wybrać dowolne dwa.



1. Promień równoległy do osi optycznej po przejściu przez soczewkę przechodzi przez ognisko.
2. Promień przechodzący przez ognisko po przejściu przez soczewkę jest równoległy do osi optycznej.
3. Promień przechodzący przez środek soczewki nie zmienia kierunku.

Rys. 18.16. Konstrukcja obrazu rzeczywistego utworzonego przez soczewkę skupiającą

Uzasadnienie reguł konstrukcji

Uzasadnijmy reguły konstruowania obrazu opisane obok rysunku 18.16:

Reguła 1. Wynika wprost z definicji ogniska.

Reguła 2. Opisaną w punkcie 1. regułę możemy odwrócić. Przecież jeśli światło może przebiec jakąś drogą w jedną stronę, to może przebiec ją także w drugą stronę, co wynika z odwracalności biegu promienia światła.

Reguła 3. Wynika z przyjętego przez nas modelu cienkiej soczewki. Ponieważ soczewka jest cienka, promień przejdzie przez jej środek, jeśli padnie na soczewkę bardzo blisko jej osi optycznej.

Odwracalność biegu promienia światła → s. 11

W tym obszarze obie powierzchnie soczewki są już niemal prostopadłe do osi optycznej, a więc światło przechodzi przez soczewkę jak przez płaską płytkę. Promień wychodzący jest zatem równoległy do padającego, być może tylko trochę przesunięty.

Jeśli jednak ponownie przypomnimy sobie, że soczewka jest bardzo cienka, to przesunięcie także możemy pominąć.

■ Doświadczalne wyznaczenie równania soczewki

W zależności od odległości przedmiotu od soczewki zmienia się też odległość obrazu od soczewki. Zbadajmy tę zależność – najpierw doświadczalnie, a następnie za pomocą obliczeń.

Doświadczenie 3 – obowiązkowe

Badanie związku między ogniskową soczewki a położeniem przedmiotu i obrazu



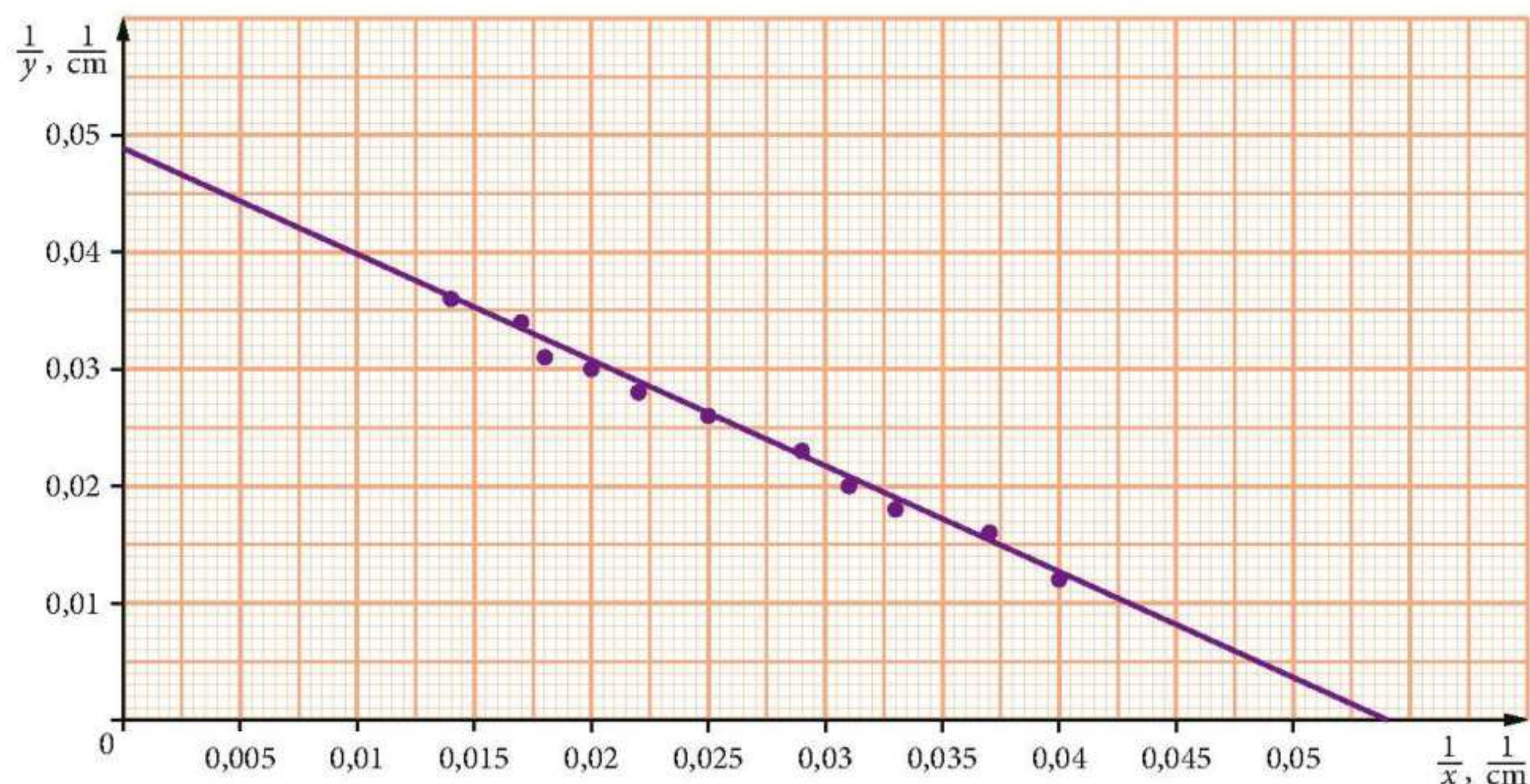
1. Przygotuj soczewkę skupiającą o znanej ogniskowej, świeczkę lub żarówkę z przezroczystą bańką i widocznym włóknem, ekran (np. białą tekturę) oraz miarkę budowlaną albo metr krawiecki. Doświadczenie najlepiej jest wykonać przy słabym oświetleniu.
2. Ustaw pionowo soczewkę, a w pewnej odległości od niej – świeczkę (lub żarówkę).
3. Ustaw ekran w takiej odległości od soczewki, aby powstał na nim ostry obraz świeczki. Zmierz odległość ekranu od soczewki (y) i odległość świeczki od soczewki (x). Powtórz opisane czynności dla kilku innych odległości świeczki od soczewki.
4. Za pomocą arkusza kalkulacyjnego narysuj wykresy różnych zależności zachodzących między odległościami x i y , np. $y(x)$, $y(\frac{1}{x})$, $y(x^2)$, $\frac{1}{y}(\frac{1}{x})$ itd.
5. W którym przypadku wykres jest linią prostą? Ile jest równy współczynnik kierunkowy tej prostej i jaki jest jej punkt przecięcia z osią pionową?

W naszym doświadczeniu używaliśmy soczewki o ogniskowej 20 cm. Wykonaliśmy pomiary i obliczenia dla 11 położzeń soczewki. Wyniki zebraliśmy w tabeli 18.1.

Tabela 18.1. Wyniki dla doświadczenia 3.

Pomiar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x , cm	25	27	30	32	35	40	45	50	55	60	70
y , cm	82	63	57	50	44	39	36	33	32	29	28
$\frac{1}{x}$, $\frac{1}{\text{cm}}$	0,040	0,037	0,033	0,031	0,029	0,025	0,022	0,020	0,018	0,017	0,014
$\frac{1}{y}$, $\frac{1}{\text{cm}}$	0,012	0,016	0,018	0,020	0,023	0,026	0,028	0,030	0,031	0,034	0,036

Spośród wykresów sporządzonych na podstawie danych tylko dla zależności $\frac{1}{y}$ od $\frac{1}{x}$ punkty układają się wzdłuż linii prostej (rys. 18.17).



Rys. 18.17. Wykres na podstawie danych z tabeli 18.1

Na podstawie punktów przecięcia dopasowanej prostej z osiami (lub innych wybranych na niej punktów) możemy określić jej równanie:

$$\frac{1}{y} = -0,9 \cdot \frac{1}{x} + 0,0485$$

Po zaokrągleniu współczynników przyjmuje ona postać:

$$\frac{1}{y} = -1 \cdot \frac{1}{x} + 0,05$$

czyli:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{20}$$

Odległości mierzyliśmy w centymetrach, a więc otrzymana liczba 20 oznacza 20 cm, czyli jest równa ogniskowej soczewki.

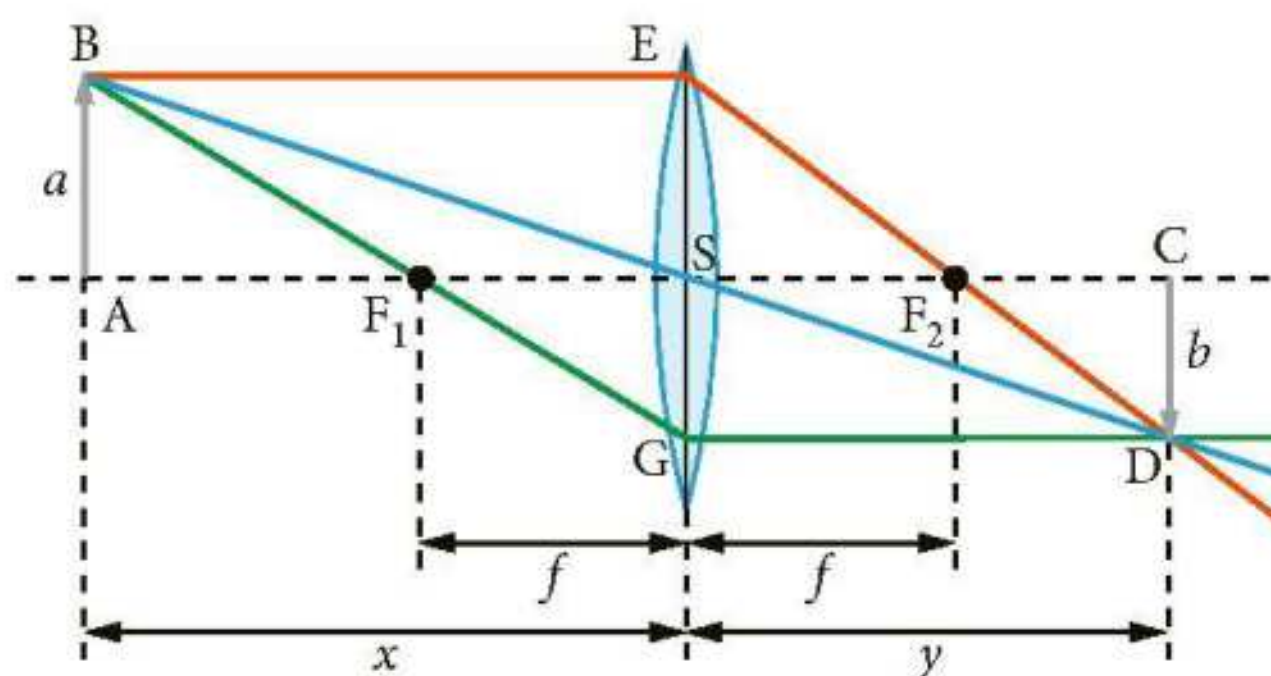
W ten sposób otrzymaliśmy **równanie soczewki**:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}$$

odległość przedmiotu od soczewki ogniskowa
odległość obrazu od soczewki

F ■ Uzasadnienie równania soczewki

Doświadczalnie odkryliśmy powyższe równanie tylko dla jednej soczewki i tylko w przybliżeniu. Możemy jednak uzasadnić je matematycznie na podstawie rysunku przedstawiającego konstrukcję obrazu (rys. 18.18 na następnej stronie).



Rys. 18.18. Schemat konstrukcji obrazu w soczewce skupiającej

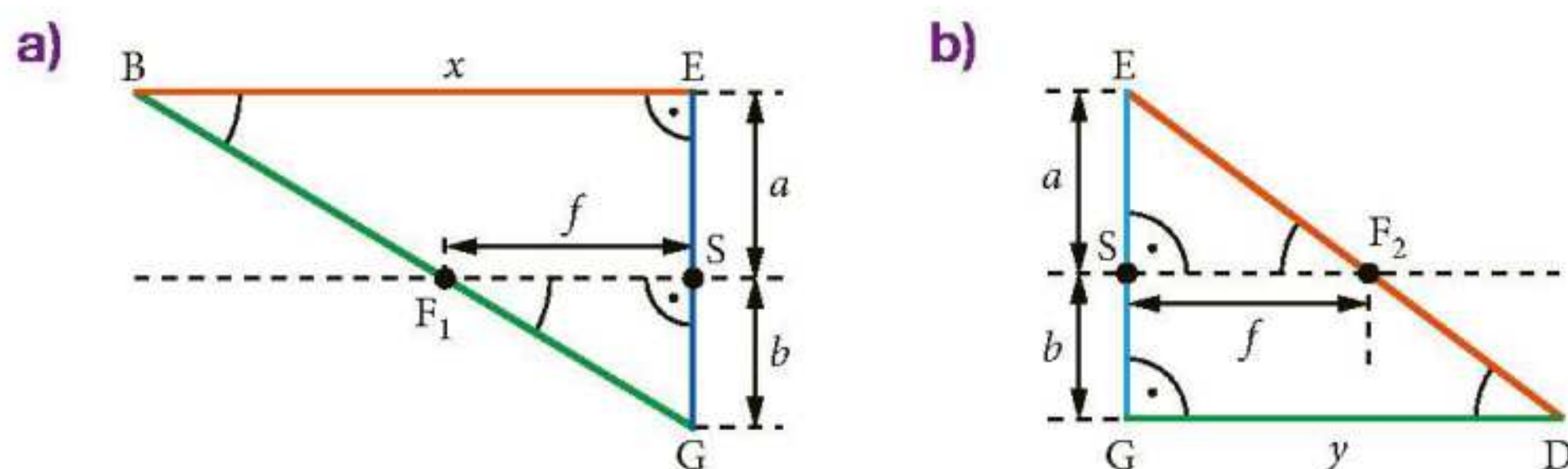
Zauważ, że kąty trójkątów BGE i F_1SG mają takie same miary, dlatego trójkąty te są podobne. Tak samo jest z trójkątami EGD i ESF_2 .

Trójkąty BEG i F_1SG są podobne, więc (rys. 18.19a):

$$\frac{SG}{EG} = \frac{F_1S}{BE}, \text{ czyli } \frac{b}{a+b} = \frac{f}{x}$$

Również trójkąty EGD i ESF_2 są podobne. Stąd (rys. 18.19b):

$$\frac{ES}{EG} = \frac{SF_2}{GD}, \text{ czyli } \frac{a}{a+b} = \frac{f}{y}$$



Rys. 18.19. Trójkąty BEG, F_1SG , EGD i ESF_2 z oznaczeniami

Po dodaniu tych proporcji stronami otrzymujemy:

$$\frac{b+a}{a+b} = \frac{f}{x} + \frac{f}{y} \rightarrow 1 = \frac{f}{x} + \frac{f}{y}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y}$$

Tak więc wyprowadziliśmy sformułowane wcześniej równanie soczewki.

■ Pomiar ogniskowej soczewki

Z równania soczewki płynie ważny wniosek. Gdy odległość x jest bardzo duża, wtedy $\frac{1}{x} \approx 0$, a więc $y \approx f$. Oznacza to, że obraz bardzo odległych przedmiotów powstaje niemal w ognisku soczewki.

Zatem aby poznać ogniskową soczewki, wystarczy wytworzyć obraz odległych przedmiotów (np. domów po drugiej stronie ulicy) i zmierzyć odległość obrazu od soczewki (rys. 18.20). Jest ona w bardzo dobrym przybliżeniu równa ogniskowej.

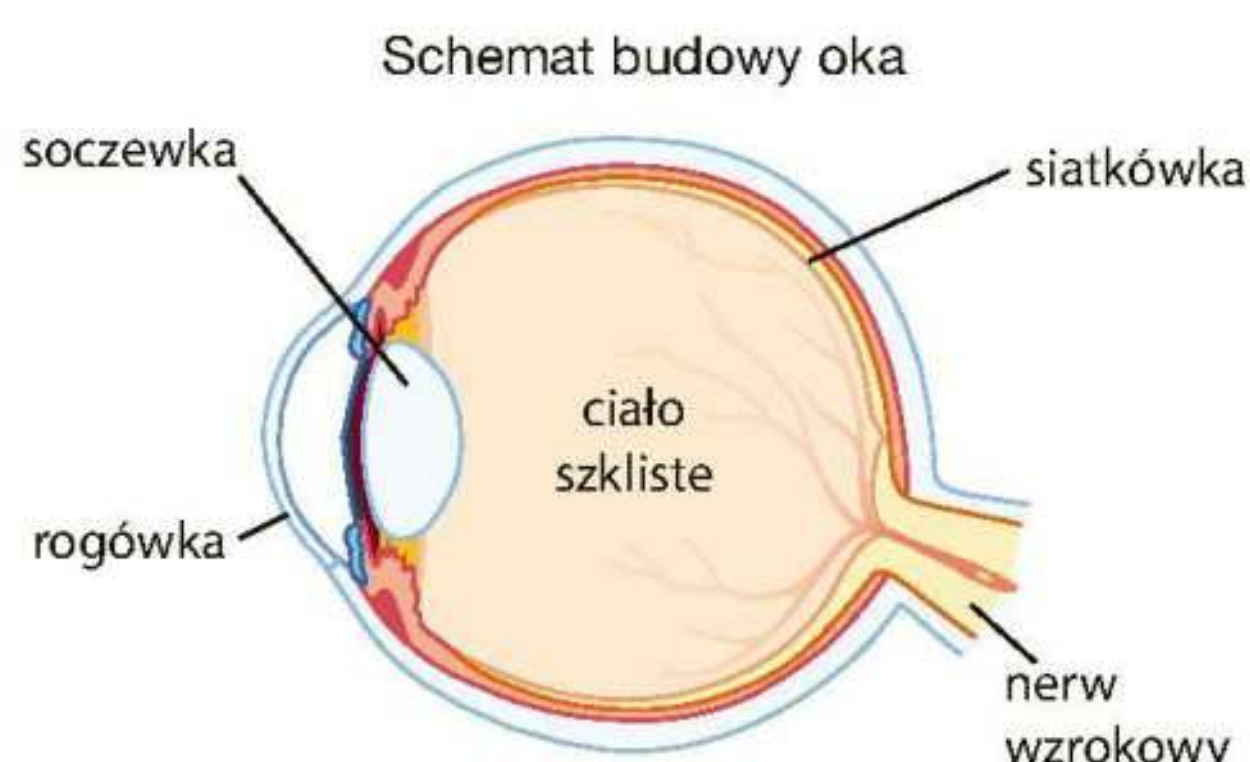


Rys. 18.20. Pomiar ogniskowej soczewki skupiającej

Wady wzroku i ich korygowanie

Rogówka i soczewka oka tworzą układ soczewek działający jak pojedyncza soczewka skupiająca. Dzięki niemu na siatkówce oka powstaje obraz widzianych przedmiotów. Siatkówka składa się z komórek czułych na światło, które za pośrednictwem nerwów przenoszą do mózgu informację o obrazie.

Ponieważ odległość między soczewką oka a siatkówką jest stała, mięśnie oka zmieniają kształt, a co za tym idzie – ogniskową i zdolność skupiającą soczewki. Pozwala to widzieć ostro zarówno przedmioty bliskie, jak i dalekie.

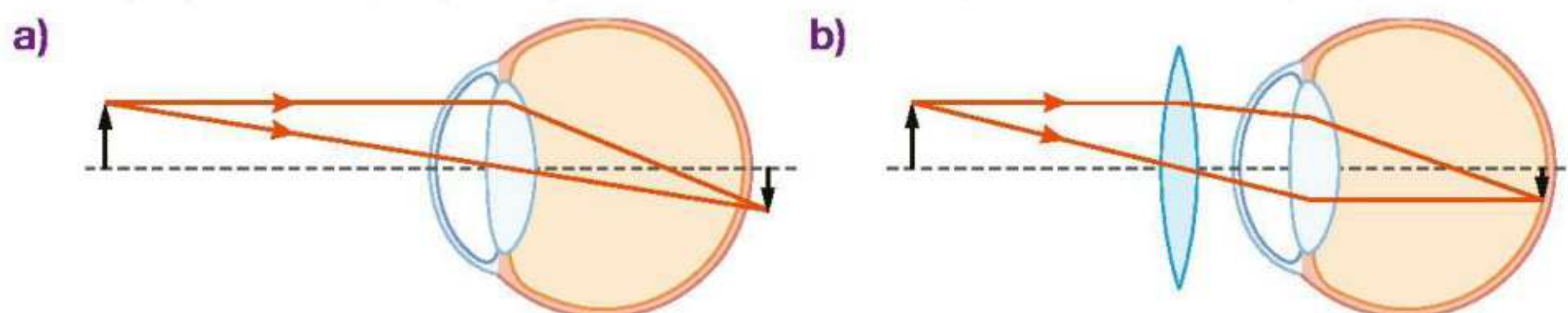


Dalekowzroczność

U osób cierpiących na dalekowzroczność soczewka oka nie jest w stanie osiągnąć zdolności skupiającej wystarczającej do wytworzenia ostrych obrazów bliskich przedmiotów.

Mówimy czasem, że u osób z tą wadą wzroku obraz tworzy się za siatkówką (rys. a). Jeżeli chcielibyśmy być bardziej precyzyjni, powinniśmy powiedzieć, że tworzyłby się tam, gdyby była ona przezroczysta – w rzeczywistości ostry obraz nie powstaje w ogóle.

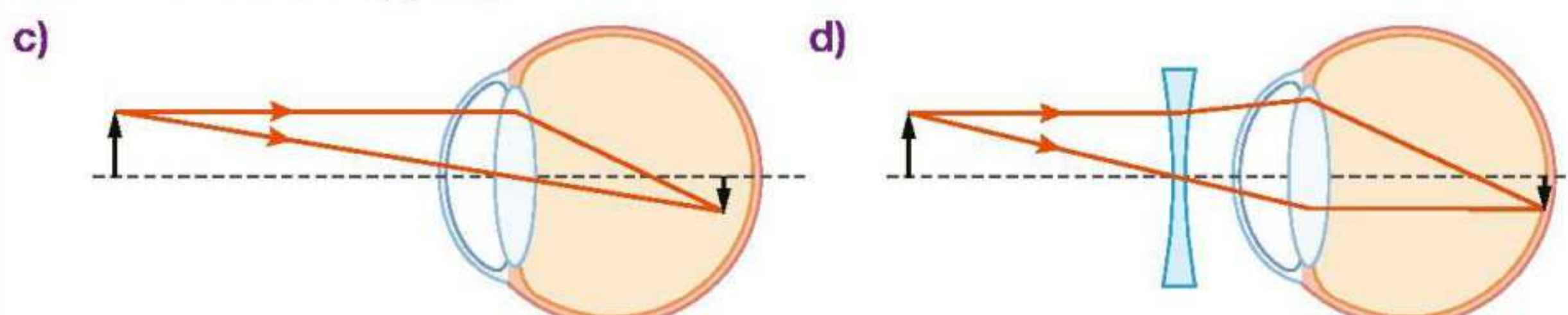
Aby zniwelować tę wadę wzroku, trzeba wstępnie skupić światło wpadające do oka za pomocą **soczewki skupiającej** (rys. b). Dlatego u dalekowidzów stosujemy okulary z soczewkami skupiającymi (tzw. plusy, nazywane tak od dodatniej zdolności skupiającej).



Krótkowzroczność

Jest też wiele osób, które dobrze widzą bliskie przedmioty, ale nie widzą dalekich. Dzieje się tak, ponieważ ich soczewka zbyt mocno skupia światło.

Obraz przedmiotu u krótkowidzów tworzy się przed soczewką (rys. c), dlatego noszą oni okulary z **soczewkami rozpraszającymi** (nazywane minusami od ujemnej zdolności skupiającej). Soczewka taka rozprasza światło, które po skupieniu przez soczewkę oka daje ostry obraz na siatkówce (rys. d).





■ Przykład

Patyczek o długości $h = 20$ cm jest ustawiony w odległości $x = 60$ cm od soczewki o zdolności skupiającej $Z = 2,5$ D, prostopadle do osi optycznej. Jeden z końców patyczka znajduje się na osi optycznej. W jakiej odległości od soczewki powstaje obraz patyczka? Jaka jest wielkość tego obrazu?

Rozwiąż zadanie dwiema metodami: za pomocą rysunku konstrukcyjnego oraz za pomocą obliczeń. Porównaj wyniki.

Dane: $h = 20$ cm – wysokość patyczka (przedmiotu), $x = 60$ cm – odległość przedmiotu od soczewki, $Z = 2,5$ D – zdolność skupiająca soczewki

Szukane: y – odległość obrazu od soczewki, H – wysokość obrazu

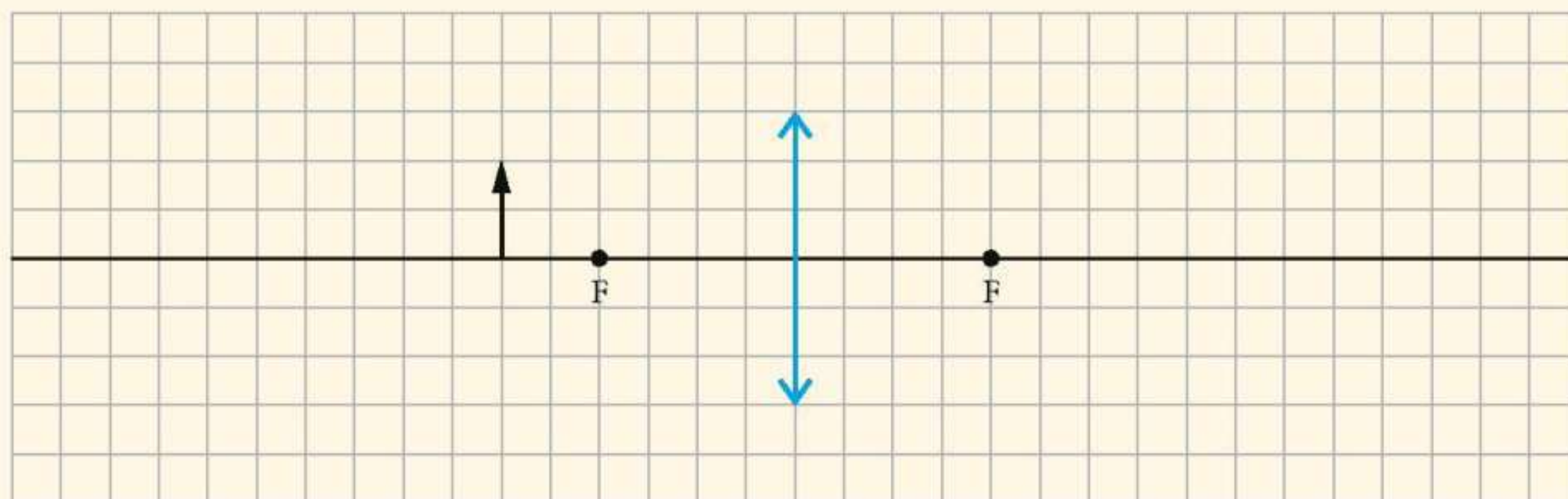
Rozwiązanie:

Metoda graficzna

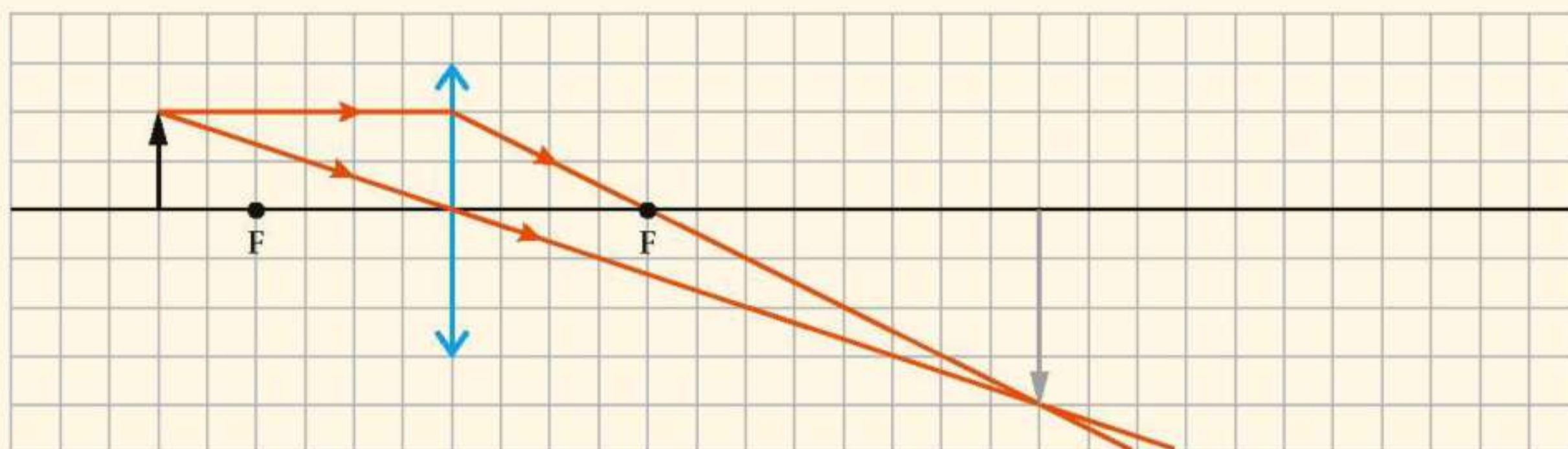
Na podstawie zdolności skupiającej obliczamy ogniskową soczewki:

$$f = \frac{1}{Z} = \frac{1}{2,5 \text{ D}} = 0,4 \text{ m} = 40 \text{ cm}$$

Rysunek wygodnie wykonać na papierze w kratkę. Przyjeliśmy skalę: 1 kratka – 10 cm. Na rysunku zaznaczamy soczewkę, jej ogniska i przedmiot (patyczek).



Konstruujemy obraz zgodnie z zasadami przedstawionymi na s. 17.



Z rysunku odczytujemy, że obraz powstał w odległości $y = 120$ cm od soczewki, a jego wysokość wynosi $H = 40$ cm.



Metoda obliczeniowa

Odległość obrazu od soczewki obliczymy z równania soczewki:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1}{y} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x}$$

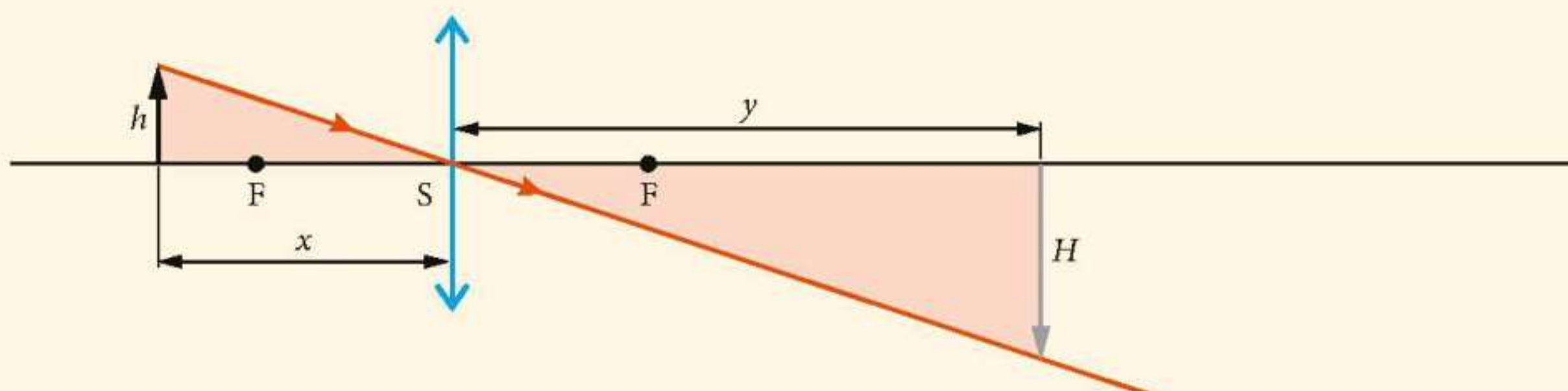
czyli po podstawieniu danych:

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{40 \text{ cm}} - \frac{1}{60 \text{ cm}} = \frac{3}{120 \text{ cm}} - \frac{2}{120 \text{ cm}} = \frac{1}{120 \text{ cm}}$$

a więc:

$$y = 120 \text{ cm}$$

Aby obliczyć wysokość obrazu, skorzystamy z rysunku (nie musimy wykonywać konstrukcji, wystarczy nam szkic).



Zacieniowane trójkąty są prostokątne, a kąty przy wierzchołku S mają równe miary (są to kąty wierzchołkowe). Wobec tego trójkąty są podobne i ich odpowiednie boki są proporcjonalne:

$$\frac{h}{x} = \frac{H}{y}$$

Stąd wyznaczamy wysokość obrazu:

$$H = h \frac{y}{x}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

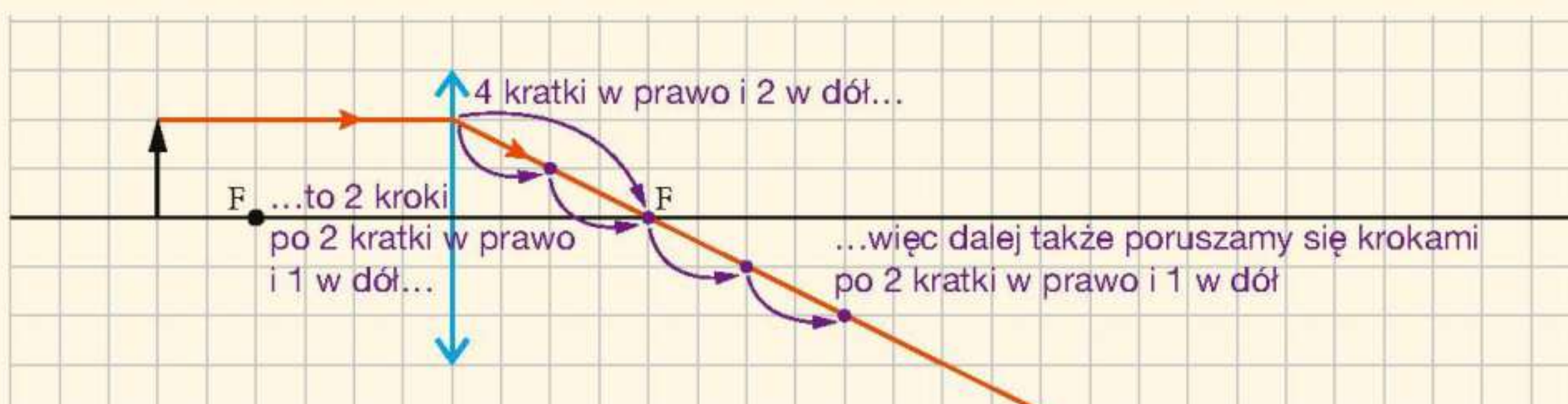
$$H = 20 \text{ cm} \cdot \frac{120 \text{ cm}}{60 \text{ cm}} = 40 \text{ cm}$$

Porównanie wyników

Jak łatwo sprawdzić, że wyniki otrzymane obiema metodami są jednakowe.

Odpowiedź: Obraz ma wysokość 40 cm i znajduje się 120 cm od soczewki.

Uwaga. Przy konstrukcji warto odliczać punkty kratowe jak to przedstawiono na rysunku poniżej. Pozwoli to uniknąć błędów związanych z niedokładnym przykładaniem linijki.



1. **F** Patyczek o wysokości 50 cm znajduje się w odległości 150 cm od soczewki o ogniskowej 25 cm, ustawiony jest prostopadle do osi optycznej soczewki, a jeden z jego końców leży na tej osi. Skonstruuj w odpowiednio dobranej skali obraz patyczka. Następnie oblicz odległość obrazu od soczewki i jego wysokość. Porównaj wyniki obliczeń z wielkościami zmierzonymi na rysunku.
2. Obiektyw prostego cyfrowego aparatu fotograficznego składa się z jednej soczewki o ogniskowej 1 cm. Ostrość nastawiamy przez regulację odległości obiektywu od matrycy. W jakich granicach musi się zmieniać ta odległość, aby można było fotografować obiekty znajdujące się w odległości od 30 cm do nieskończoności?
3. Obiektyw aparatu fotograficznego w telefonie komórkowym składa się albo z jednej soczewki o dużej zdolności skupiającej, albo z wielu soczewek działających łącznie jak jedna. Załóżmy, że ta zdolność skupiająca wynosi 400 D.



- a) W jakiej odległości od soczewki powstanie obraz przedmiotów bardzo odległych, a w jakiej – oddalonych o 10 cm?
 - b) Wyjaśnij, dlaczego taki aparat nie musi być wyposażony w regulację ostrości.
 - c) Dom o wysokości 6 m fotografujemy z odległości 30 m. Jaką wysokość będzie miał obraz tego domu na matrycy?
4. a) Naskicuj przedmiot znajdujący się w odległości $2f$ od soczewki o ogniskowej f oraz jego obraz. Na podstawie swojego rysunku uzasadnij, że obraz jest tej samej wielkości co przedmiot.
- Wskazówka.** Zastanów się, które dwa spośród trzech charakterystycznych promieni wybrać, aby uzasadnienie było jak najprostsze.
- b) Jak zmieni się twój rysunek wtedy, gdy przedmiot zbliży się do soczewki, a jak wtedy, gdy się oddali? Naskicuj te sytuacje.
 - c) Wyciągnij ogólny wniosek co do wielkości obrazu rzeczywistego tworzonego przez soczewkę skupiającą. Zapisz go.
5. Jak zmieni się obraz przedmiotu na ekranie, gdy zasłoniemy dolną połowę soczewki? Spróbuj to przewidzieć, a następnie sprawdź doświadczalnie.
 6. Weź okulary „plusy” ($Z > 0$) i zmierz ogniskową ich soczewki metodą opisaną na s. 20. Porównaj wynik ze zdolnością skupiającą podaną przez producenta okularów.

18.3

Obraz pozorny tworzony przez zwierciadło płaskie



Ważne w tej lekcji:

- jak zwierciadło tworzy obraz,
- co to jest obraz pozorny.

Przypomnij sobie:

- Przy odbiciu światła kąt odbicia jest równy kątowi padania.
- Zwierciadło płaskie (lustro) tworzy obraz naturalnej wielkości, który widzimy po drugiej stronie lustra, naprzeciwko przedmiotowi.

Zwierciadło płaskie

Na poprzedniej lekcji omówiliśmy powstawanie obrazów rzeczywistych tworzonych przez soczewki. Teraz przypomnimy ze szkoły podstawowej, jakie obrazy tworzy zwierciadło płaskie, czyli zwykłe lustro znane z życia codziennego.

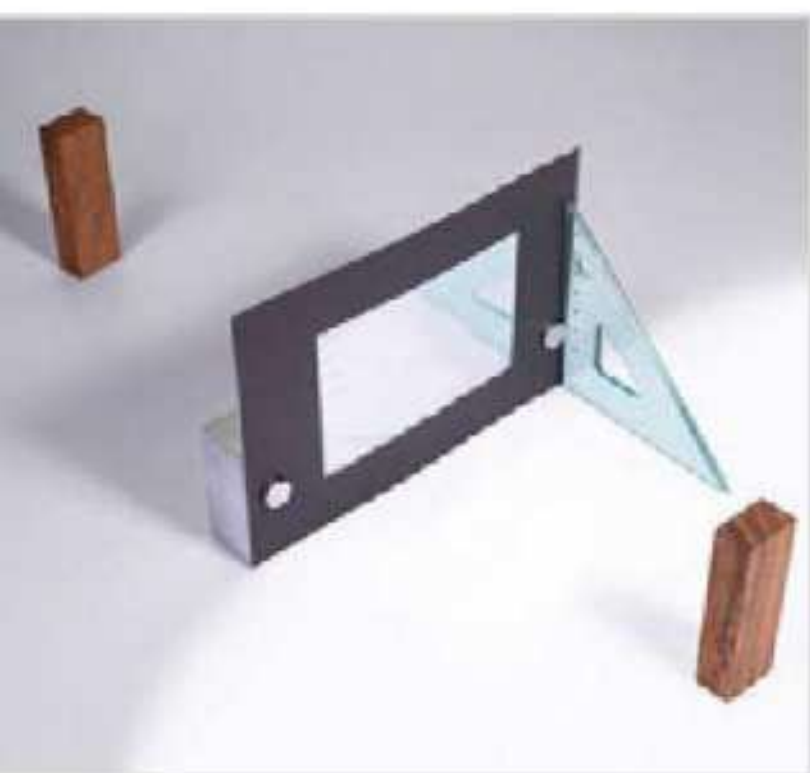
Wprowadzone przy tej okazji pojęcie **obrazu pozornego** przyda nam się także w następnej lekcji, w której pokażemy, że także soczewki w odpowiednich warunkach tworzą taki obraz.

Obraz w lustrze

Zacznijmy więc od doświadczenia, w którym będziemy obserwować obrazy w lustrze.

Przy omawianiu powstawania obrazów w zwierciadle płaskim wystarczy nam prawo odbicia, mówiące, że kąt odbicia jest równy kątowi padania światła.

Prawo odbicia,
podręcznik cz. 1 → s. 333



Doświadczenie 4

1. Przygotuj półprzepuszczalne zwierciadło płaskie, to znaczy takie, w którym widzisz zarówno swoje odbicie, jak i obszar za zwierciadłem. Przy odpowiednim oświetleniu taką rolę mogą odegrać szklane drzwi. Mniejsze zwierciadło możesz też wykonać samodzielnie. W tym celu przyklej kawałek folii NRC (koca ratunkowego) bez zgięć do ramki z tektury (patrz zdjęcie).
2. Ustaw swoje zwierciadło pionowo. Użyj ciężarka na nitce albo ekierki, aby zrobić to dokładnie. Obszar z jednej strony zwierciadła mocno oświetl.
3. Weź dwa jednakowe cienkie przedmioty – na zdjęciu są to ustawione pionowo klocki. Ustaw je po dwóch stronach zwierciadła.
4. Popatrz na zwierciadło od strony słabiej oświetlonej. Ustaw klocki tak, aby klocek po drugiej stronie zwierciadła pokrył się z obrazem (odbiciem) bliższego klocka. Jak są wtedy ustawione klocki?
5. Przesuwaj głowę tak, aby nadal widzieć zarówno dalszy klocek, jak i obraz bliższego. Czy nadal się pokrywają?
6. Usuń dalszy klocek i ustaw na jego miejscu białą kartkę. Czy na kartce tworzy się obraz, podobnie jak w przypadku, kiedy używaliśmy soczewki skupiającej (doświadczenie 2, s. 14)?
7. Co można powiedzieć o obrazie (np. czy jest on powiększony albo odwrócony)?

Omówmy teraz wnioski z doświadczenia.

■ Co to jest obraz pozorny

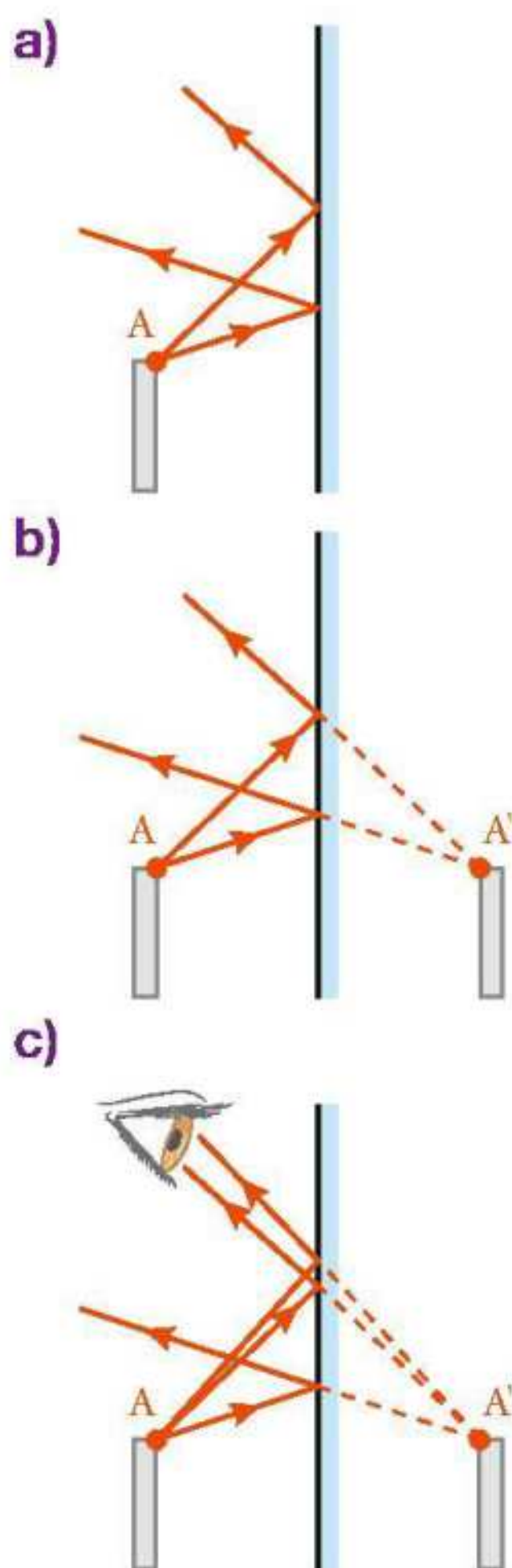
Zacznijmy od punktu 6. Jego wynik nie stanowił zaskoczenia. Zwierciadło płaskie nie tworzy obrazu na ekranie, czyli obrazu rzeczywistego. Za lustrem powieszonym na ścianie łazienki może się znajdować mieszkanie sąsiada, a mimo wszystko nie obawiamy się tego, że będzie mógł nas podglądać.

Obraz, którego nie widać na ekranie, a można go oglądać tylko gołym okiem, nazywamy obrazem pozornym.

■ Jak zwierciadło płaskie tworzy obraz

Rysunek 18.21 przedstawia klocek stojący przed lustrem. Rozważmy na początek jeden punkt klocka i nazwijmy go A. Na rysunku 18.21a widzimy różne promienie światła biegnące z tego punktu w stronę zwierciadła. Po odbiciu rozbiegają się one w różne strony, dlatego nie powstaje obraz rzeczywisty – nie istnieje punkt, w którym by się one spotkały.

Na rysunku 18.21b dorysowaliśmy przerywanymi liniami przedłużenia promieni odbitych. Zauważ, że przecinają się one w jednym punkcie – A'. Tam właśnie powstaje obraz pozorny punktu A, czyli tam widzimy jego odbicie.



Rys. 18.21. Tworzenie obrazu przez zwierciadło płaskie

■ Obraz pozorny a nasz wzrok

Dlaczego odbicie punktu A widzimy w punkcie A'? Przecież przedłużenia promieni to tylko wyobrażone linie, którym fizycznie nic nie odpowiada, a w punkcie A' za lustrem może się znajdować np. ściana.

Przyczyna leży nie tyle w fizyce, co w sposobie działania ludzkiego narządu wzroku. Nasz mózg jest przystosowany do analizy obrazu w sytuacji, gdy promienie świetlne rozchodzą się po liniach prostych (ponieważ tak właśnie dzieje się zazwyczaj).

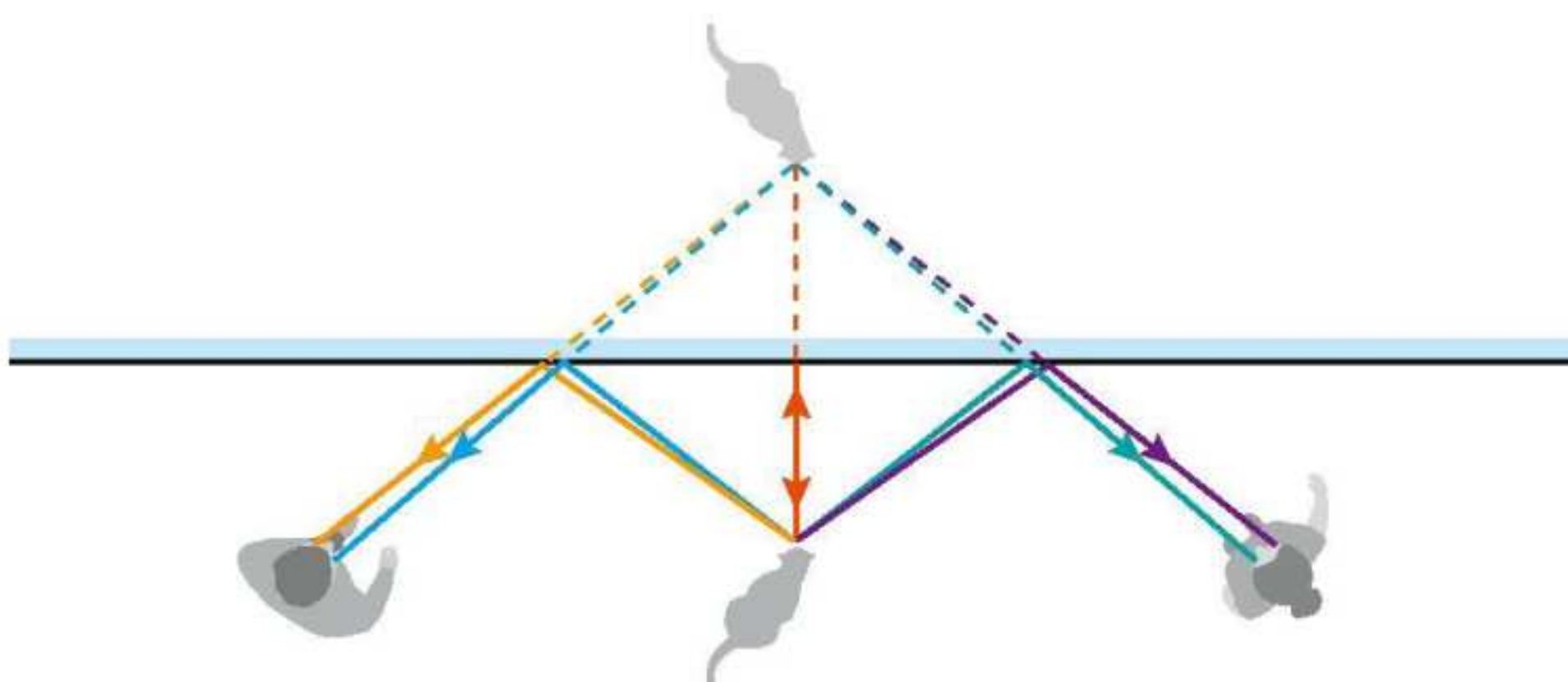
Jeśli więc do oka wpada wiązka promieni, które biegną tak, jakby wychodziły z punktu A' (rys. 18.21c), to wydaje się nam, że naprawdę stamtąd wychodzą. W efekcie widzimy obraz punktu A w punkcie A'.

■ Gdzie tworzy się obraz

Zwierciadło płaskie zawsze tworzy obraz dokładnie naprzeciwko przedmiotu, czyli położony symetrycznie do niego (rys. 18.21c). Dlaczego tak się dzieje, wyjaśniamy w ramce na następnej stronie.

Obraz znajduje się w tym samym miejscu, niezależnie od tego, skąd na niego patrzymy. To stwierdzenie może być zaskakujące, ponieważ najczęściej oglądamy **własne** odbicie, więc gdy się ruszamy, to przesuwamy się zarówno jako obserwator, jak i jako przedmiot. Gdy jednak oglądamy odbicie nieruchomego przedmiotu, zawsze znajduje się ono w tym samym miejscu, nawet jeśli my się przesuwamy. Tak właśnie dzieje się w punkcie 5. doświadczenia 4.

Na rysunku 18.22 widzimy z góry, jak dwie osoby patrzą na odbicie kota w lustrze. Widzą je w tym samym miejscu. Kot także widzi swoje odbicie w tym samym punkcie.



Rys. 18.22. Każda osoba oraz sam kot widzą obraz kota w lustrze w tym samym miejscu

Uzasadnienie położenia obrazu

Rozważmy punkt A przedmiotu oraz dowolny promień biegnący z tego punktu i odbijający się od zwierciadła w punkcie K (rys. a). Przedłużenie tego promienia przetnie się z prostą AL prostopadłą do zwierciadła w pewnym punkcie A'.

Nie wiemy jeszcze, że $AL = LA'$, musimy to dopiero uzasadnić.

W tym celu przyjmijmy oznaczenia kątów jak na rysunku (rys. b). Zauważmy, że:

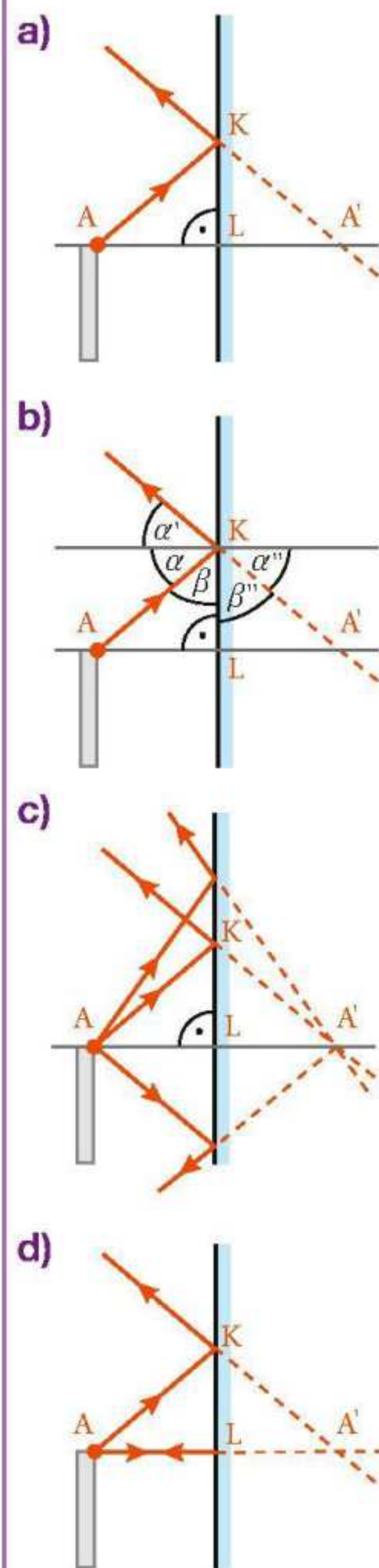
- $\alpha = \alpha'$ (prawo odbicia), $\alpha' = \alpha''$ (kąty wierzchołkowe), a więc $\alpha = \alpha''$.
- W takim razie również kąty $\beta = 90^\circ - \alpha$ oraz $\beta'' = 90^\circ - \alpha''$ są równe.
- Kąty ALK i A'LK także są równe, ponieważ oba są proste.
- Między tymi równymi kątami znajduje się wspólny bok KL.
- Trójkąty AKL i A'KL są więc przystające (cecha przystawania kbk).

A wobec tego $AL = A'L$, czyli punkt A' jest symetryczny do punktu A względem zwierciadła.

Udowodniliśmy, że gdy promień światła wychodzi z punktu A i odbija się od zwierciadła, wtedy przedłużenie promienia odbitego przechodzi przez punkt A' symetryczny do A względem zwierciadła.

Jest tak dla **każdego** promienia, a więc **wszystkie** przedłużenia promieni odbitych przechodzą przez A' (rys. c)

Pozostał nam do rozpatrzenia promień padający na zwierciadło prostopadle. On jednak wraca po tej samej drodze, a więc i jego przedłużenie przechodzi przez A' (rys. d).



Skoro obraz **każdego** punktu przedmiotu tworzy się w miejscu symetrycznym względem zwierciadła, to punkt po punkcie powstaje w ten sposób obraz całego przedmiotu.

■ Obraz prosty, naturalnej wielkości

Jak wiemy z codziennego życia, odbicie w lustrze nie jest odwrócone do góry nogami, czyli mówiąc językiem optyki – zwierciadło płaskie tworzy obraz prosty.

Obraz ten jest takiej samej wielkości jak przedmiot. Jedynie z daleka może się **wydawać** mniejszy, ponieważ każda rzecz widziana z daleka wydaje się mniejsza.

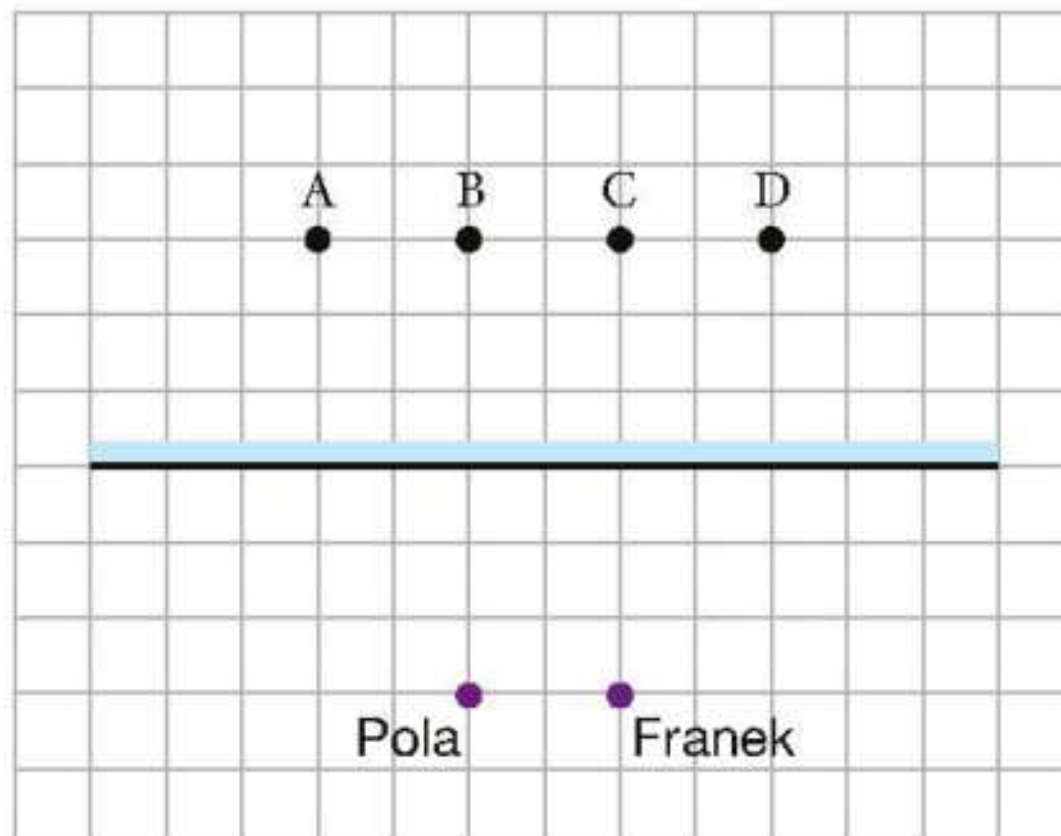
Odbicie symetryczne figury jest zawsze takiej samej wielkości jak ta figura.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Na rysunku widzisz z góry, jak dwie osoby stoją przed lustrem.



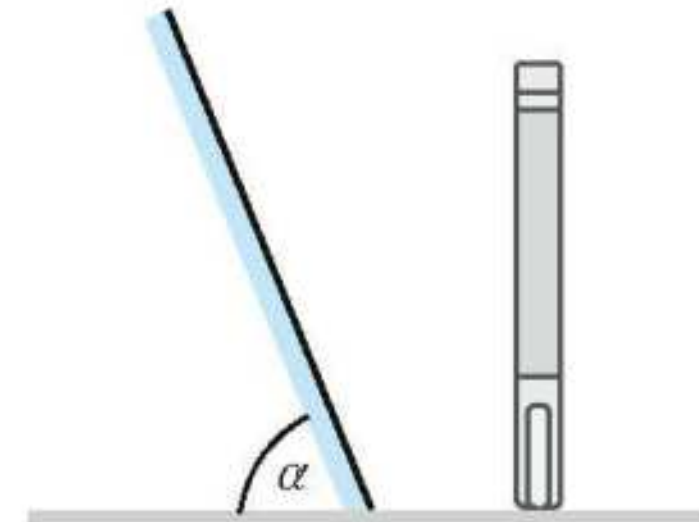
- W którym punkcie Pola widzi swoje odbicie?
 - W którym punkcie Franek widzi odbicie Poli?
 - W którym punkcie Pola widzi odbicie Franka?
2. Na stole stoi ustawione pionowo lustro o szerokości 10 cm, a równoległe do niego leży flamaster również o długości 10 cm, jednak przesunięty względem lusterka (patrz rysunek – widok z góry).



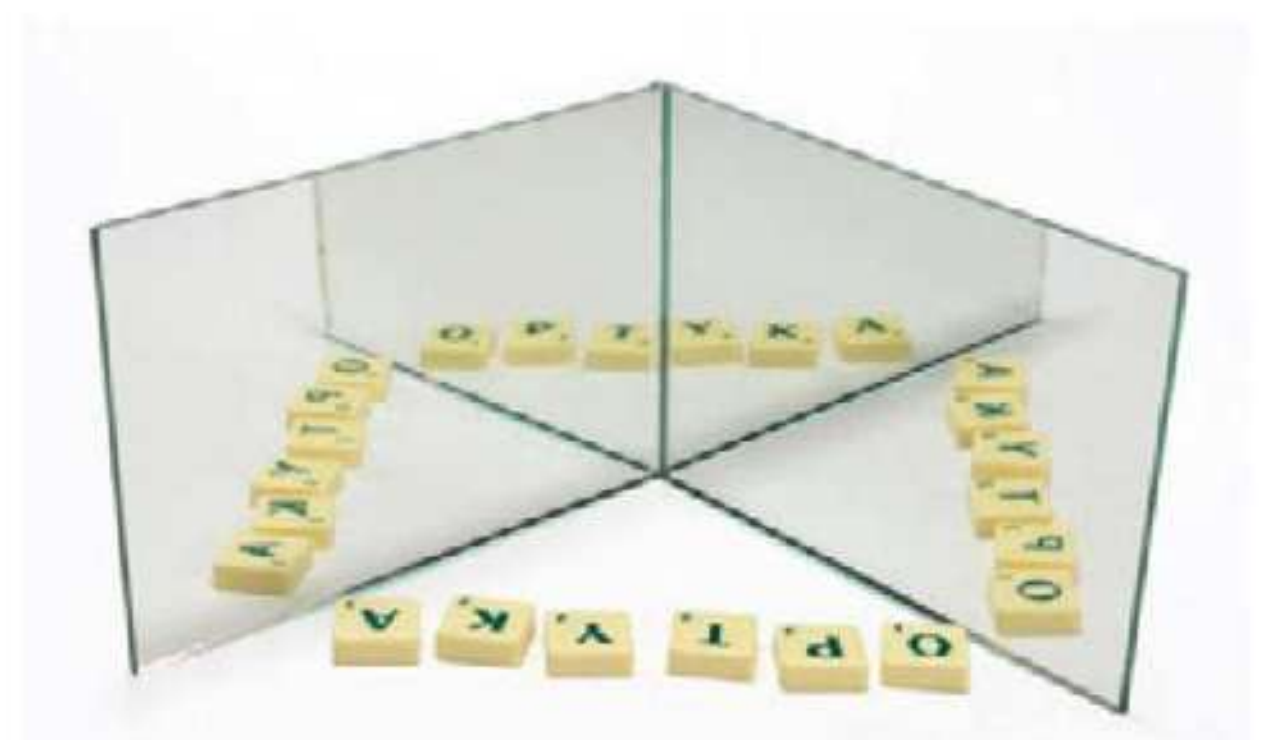
Czy zwierciadło tworzy obraz całego flamastra, czy tylko jego części? Jeśli tylko części, to jaka jest długość tej części? Jeśli całości, to gdzie należy stanąć, aby widzieć cały ten obraz?

3. Na stole stoi lustro ustawione pod kątem $\alpha = 70^\circ$ do poziomu. Naprzeciwko niego stoi na skuwce flamaster o długości 18 cm (patrz rys. – widok z boku). Pod jakim

kątem do poziomu jest nachylony obraz flamastra? Jaka jest długość tego obrazu?



- Na podstawie prawa odbicia określ minimalny pionowy wymiar lustra zawieszonego na pionowej ścianie, w którym w całości może się przejrzeć osoba o wzroście 1,80 m. Czy ten rozmiar zależy od tego, jak daleko od lustra stanie przeglądająca się osoba?
- Wykonaj doświadczenie.
 - Zestaw dwa lusterka pod kątem prostym (możesz do dużego lustra przyłożyć małe lusterko).
 - Popatrz na lustra tak, jak pokazano na rysunkach (widok z góry).
 - Dlaczego taki układ luster nie zamienia prawej strony z lewą? Zwróć uwagę na napis.
 - Przedstaw na rysunku w zeszycie zasadę działania tego układu luster.
 - Zbadaj, co się dzieje, gdy zmieniamy kąt między lustrami.



Obraz pozorny tworzony przez soczewki



Ważne w tej lekcji:

- konstrukcja obrazu pozornego dla soczewki,
- równanie soczewki,
- konwencje dotyczące znaków $+$ i $-$.

Przypomnij sobie:

- Jeśli promienie światła padają na soczewkę rozpraszającą równoległe do jej osi optycznej, to po przejściu przez soczewkę tworzą wiązkę rozbieżną. Przedłużenia tych promieni przecinają się w jednym punkcie zwanym ogniskiem pozornym.
- Szkło powiększające (lupa) pozwala oglądać przedmioty w powiększeniu.

■ Obraz pozorny tworzony przez soczewkę skupiającą

Do tej pory badaliśmy obrazy tworzone przez soczewkę skupiającą w przypadku, gdy przedmiot znajduje się za ogniskiem soczewki. A co się dzieje wtedy, gdy przedmiot znajduje przed ogniskiem? Zbadajmy to doświadczalnie.

a)



b)



Doświadczenie 5

1. Przygotuj soczewkę skupiającą. Jeśli nie znasz jej ogniskowej – zmierz ją.
2. Ustaw przedmiot w odległości mniejszej od ogniskowej tej soczewki.
3. Popatrz na przedmiot przez soczewkę (zdjęcie a). Co obserwujesz?
4. Spróbuj ustawić ekran w taki sposób, aby można było na nim zobaczyć obraz przedmiotu (zdjęcie b). Co obserwujesz?

W naszym doświadczeniu obraz przedmiotu widzimy gołym okiem, ale nie możemy go zobaczyć na ekranie. Jest to więc obraz pozorny, podobnie jak w przypadku zwierciadła płaskiego.

Podobny jest również mechanizm powstawania tego obrazu. Przeanalizujmy bieg promieni światła wychodzących z przedmiotu po przejściu przez soczewkę (rys. 18.23).

Promienie wychodzące z punktu A po przejściu przez soczewkę skupiającą nie przecinają się, ale rozbiegają w różne strony (rys. 18.23a). Nie można więc ustawić ekranu w punkcie przecięcia, skoro taki punkt nie istnieje.

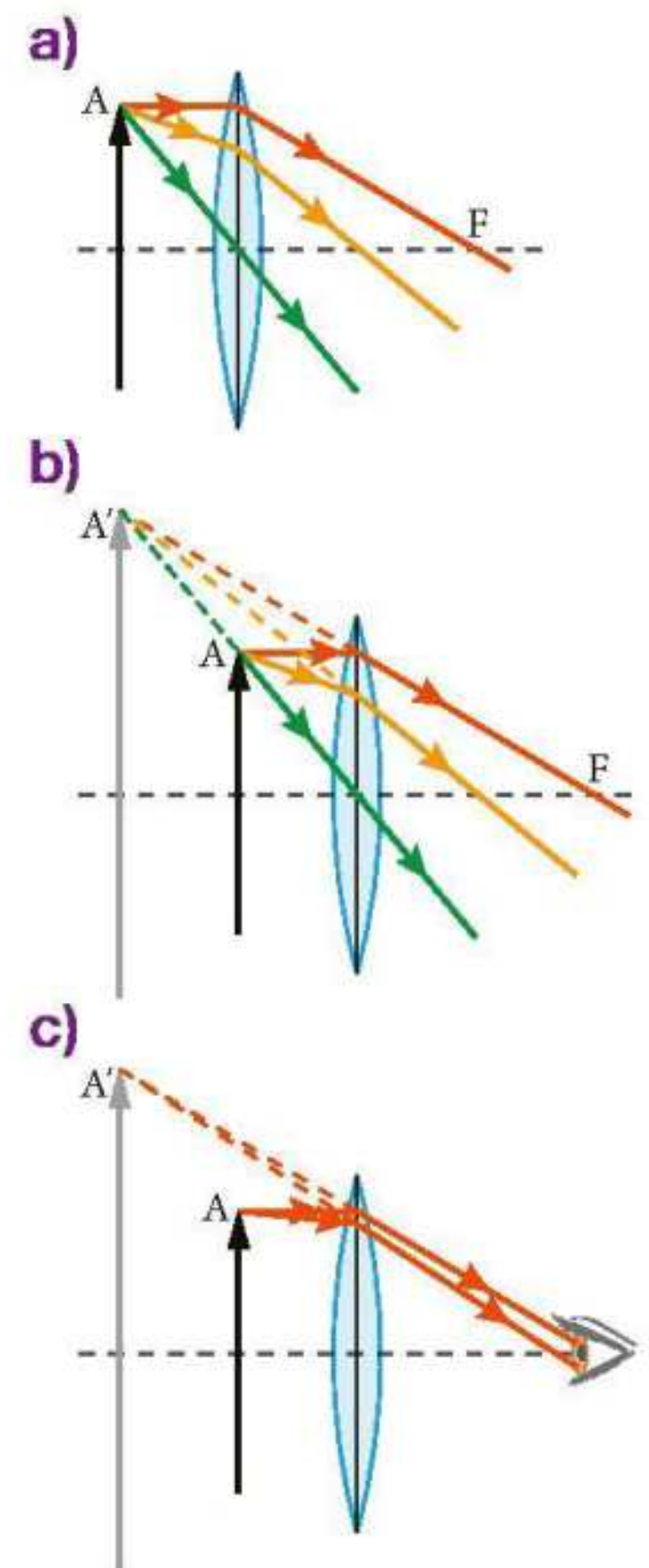
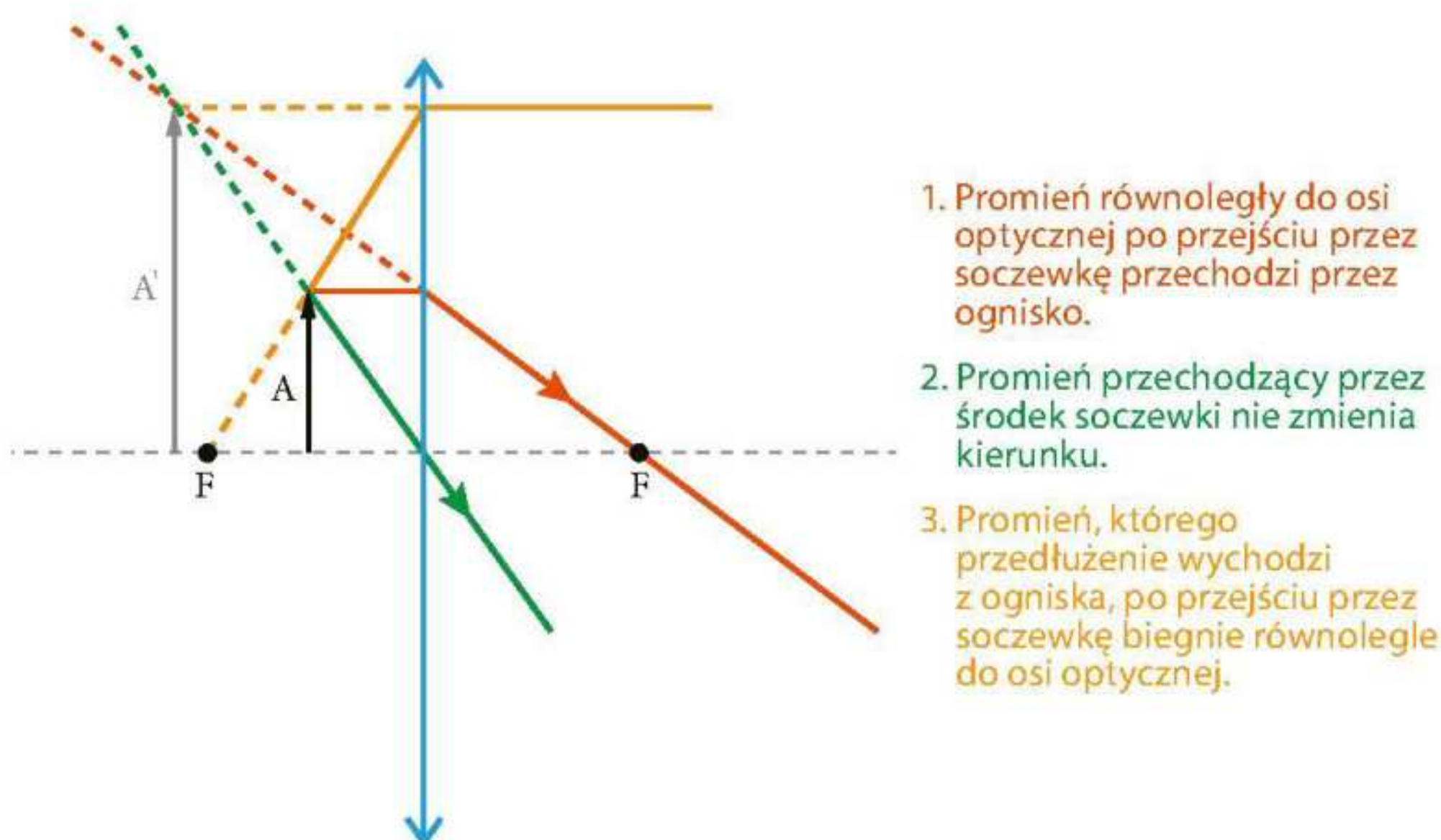
W jednym punkcie A' przecinają się natomiast przedłużenia promieni (rys. 18.23b). W szczególności przecinają się tam promienie wpadające do oka obserwatora (rys. 18.23c). Jak wiesz z lekcji o zwierciadle płaskim (s. 26), w tym miejscu obserwator widzi obraz punktu A, czyli tworzy się tam obraz pozorny punktu A – punkt A'.

■ Cechy obrazu pozornego tworzego przez soczewkę skupiającą

Jak widzimy na zdjęciu a) z doświadczenia 5., obraz pozorny tworzony przez soczewkę skupiającą jest **prosty** (nie jest odwrócony do góry nogami) i **powiększony**. Zależność tę wykorzystuje się do oglądania małych przedmiotów w powiększeniu. Soczewkę skupiającą używaną w ten sposób nazywamy lupą albo szkłem powiększającym.

■ Konstruowanie obrazu pozornego tworzego przez soczewkę skupiającą

Konstrukcja obrazu pozornego jest podobna do konstrukcji obrazu rzeczywistego. Aby znaleźć obraz punktu, musimy prześledzić bieg dwóch promieni i odszukać punkt przecięcia ich przedłużeń (rys. 18.24). Podobnie jak poprzednio, wybieramy takie promienie, których narysowanie jest najłatwiejsze.



Rys. 18.23. Tworzenie obrazu pozornego przez soczewkę skupiającą, przedmiot znajduje się w odległości mniejszej niż ogniskowa soczewki

Rys. 18.24. Konstrukcja obrazu utworzonego przez soczewkę skupiającą wtedy, gdy przedmiot znajduje się bliżej soczewki, niż wynosi jej ogniskowa



■ Soczewka rozpraszająca

Zbadajmy doświadczalnie, jakie obrazy może tworzyć soczewka rozpraszająca. Wykonamy w tym celu prosty eksperyment.

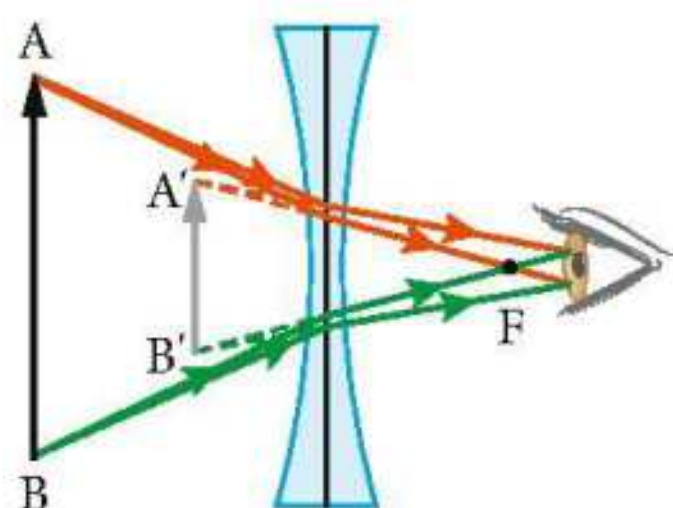
Doświadczenie 6

1. Przygotuj soczewkę rozpraszającą (wystarczą okulary krótkowidza, czyli „minusy”, o $Z < 0$), świeczkę i ekran (np. białą kartkę).
2. Zbadaj, czy za pomocą soczewki rozpraszającej można wytworzyć rzeczywisty obraz przedmiotu.
3. Popatrz przez soczewkę na dowolne przedmioty z różnej odległości. Co widzisz?

■ Cechy obrazu tworzonego przez soczewkę rozpraszającą

W doświadczeniu zauważyliśmy, że:

Soczewka rozpraszająca tworzy obraz **pozorny, prosty, pomniejszony** – niezależnie od tego, gdzie względem niej znajduje się przedmiot.

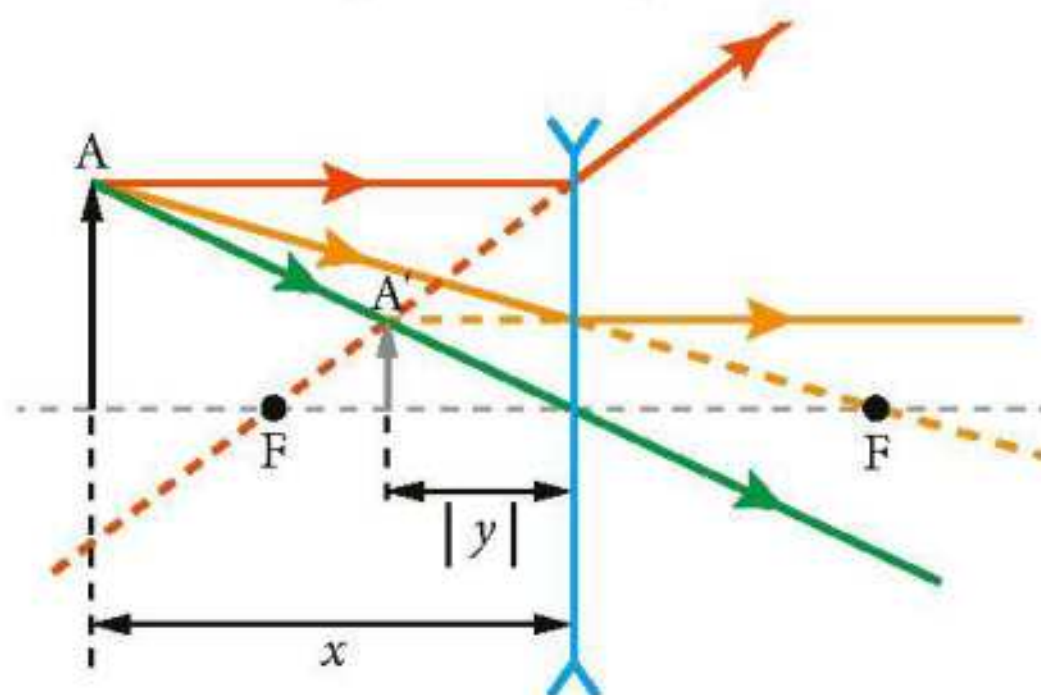


Rys. 18.25. Schemat ilustrujący, w jaki sposób widzimy obraz tworzony przez soczewkę rozpraszającą

Obraz ten powstaje podobnie jak w przypadku soczewki skupiającej i bliskiego przedmiotu, z tą różnicą, że soczewka rozpraszająca tworzy obraz pomniejszony, a nie powiększony (rys. 18.25).

■ Konstrukcja obrazu tworzonego przez soczewkę rozpraszającą

Aby skonstruować obraz, musimy sobie przypomnieć, że gdy na soczewkę rozpraszającą pada promień równoległy do osi optycznej, załamuje się on w kierunku od osi, a jego przedłużenie przechodzi przez ognisko pozorne (rys. 18.26). Natomiast promień przechodzący przez środek soczewki – podobnie jak w soczewce skupiającej – nie ulega załamaniu.



1. Promień równoległy do osi optycznej po przejściu przez soczewkę biegnie tak, że jego przedłużenie przechodzi przez ognisko pozorne.
2. Promień przechodzący przez środek soczewki nie zmienia kierunku (a więc pokrywa się ze swoim przedłużeniem).
3. Promień biegnący w stronę ogniska znajdującego się po przeciwnej stronie soczewki po przejściu przez soczewkę jest równoległy do osi optycznej.

Rys. 18.26. Konstrukcja obrazu tworzonego przez soczewkę rozpraszającą

■ Równanie soczewki

Równanie soczewki uzasadniliśmy tylko dla obrazów rzeczywistych. Przypomnijmy, że ma ono postać:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}$$

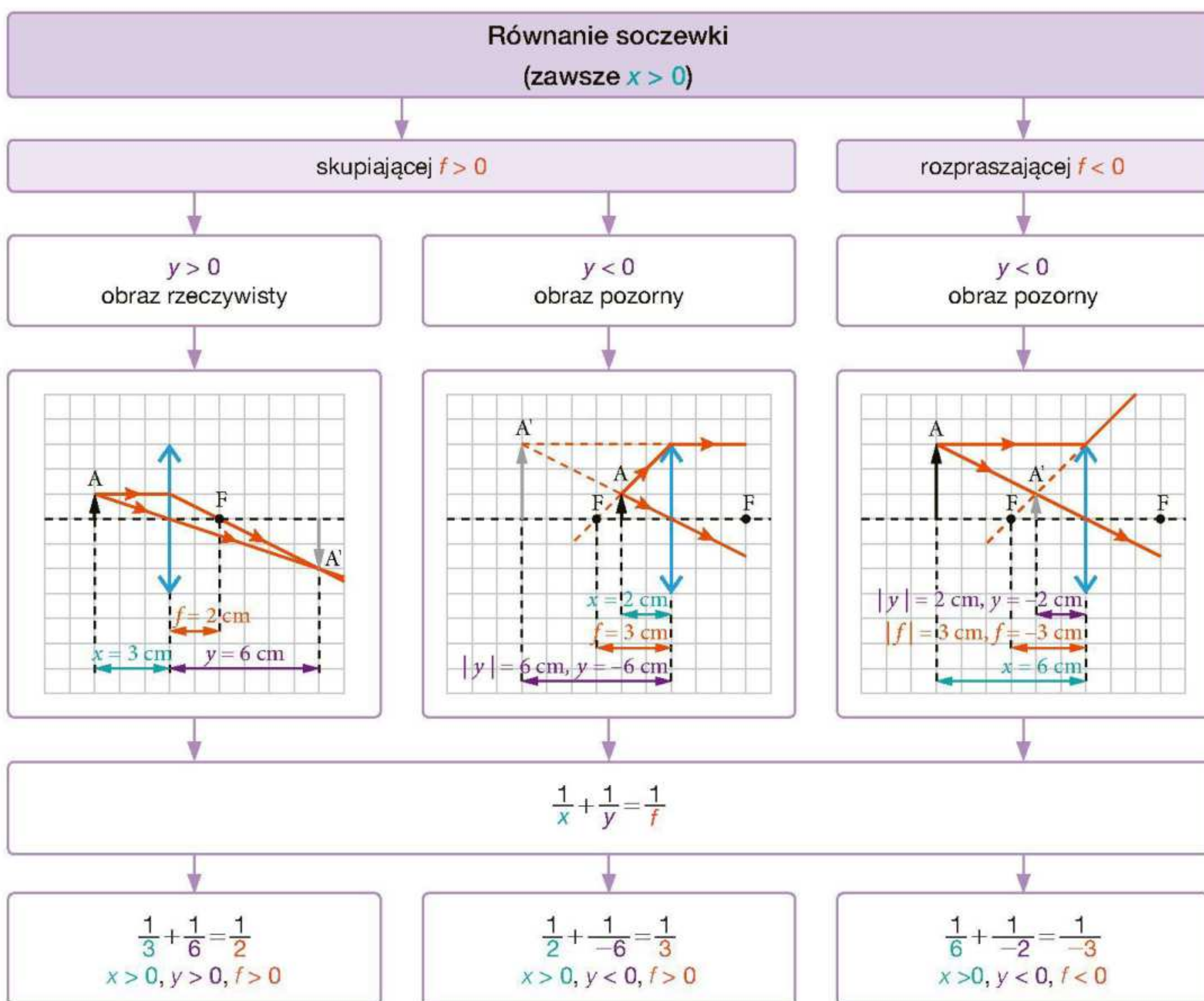


Rys. 18.27. Zastanów się, jak rozpoznać, czy chłopiec na zdjęciu jest krótko- czy dalekowzroczny

Okazuje się, że w przypadku obrazu pozornego równanie soczewki, uzasadnione dla obrazu rzeczywistego, nie zmienia się, jeśli symbolem y oznaczymy odległość obrazu od soczewki ze znakiem minus.

Pamiętaj, że ogniskowa soczewki rozpraszającej także jest ujemna.

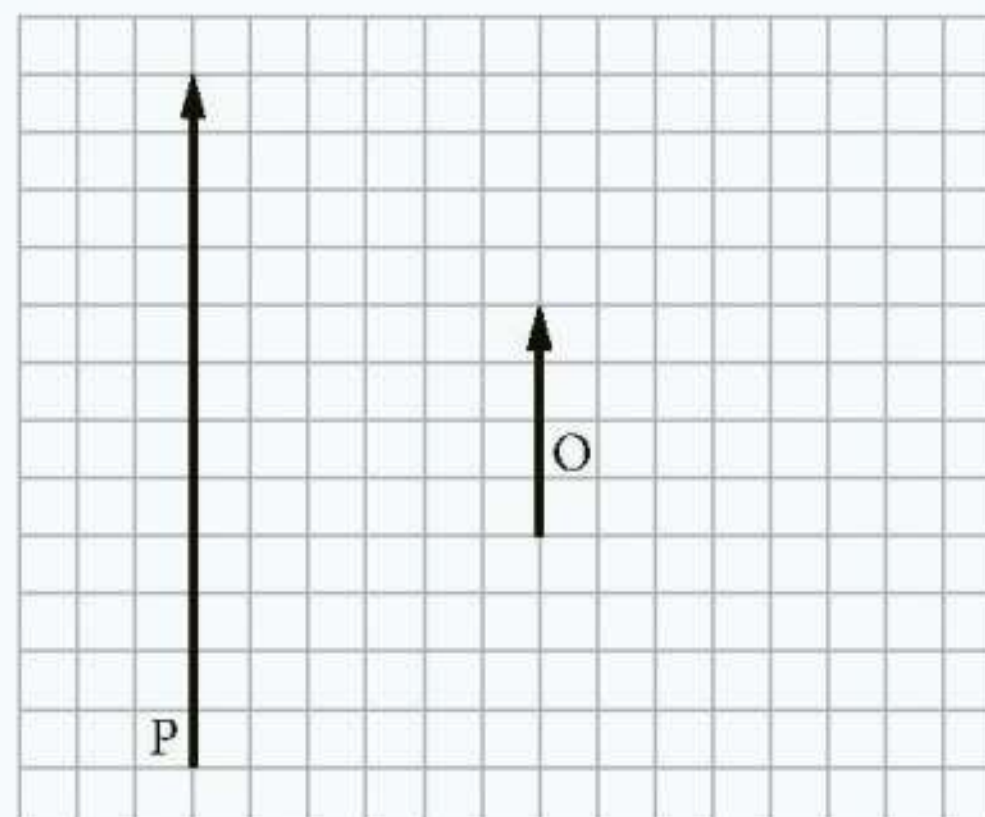
Dzięki tym umowom możemy korzystać z tej samej postaci równania dla wszystkich soczewek i rodzajów obrazów (patrz diagram).



JEST NA TO SPOSÓB

Jak konstrukcyjnie znaleźć położenie soczewki na podstawie przedmiotu i obrazu

Na rysunku przedstawiono przedmiot P oraz jego obraz O tworzony przez soczewkę. Skonstruuj soczewkę, jej oba ogniska i oś optyczną.



PRZEANALIZUJ ROZWIĄZANIE KROK PO KROKU

Krok 1. Zastanawiamy się, w jaki sposób mógł powstać taki obraz

Z rysunku odczytujemy, że obraz jest pomniejszony i prosty (nieodwrócony).

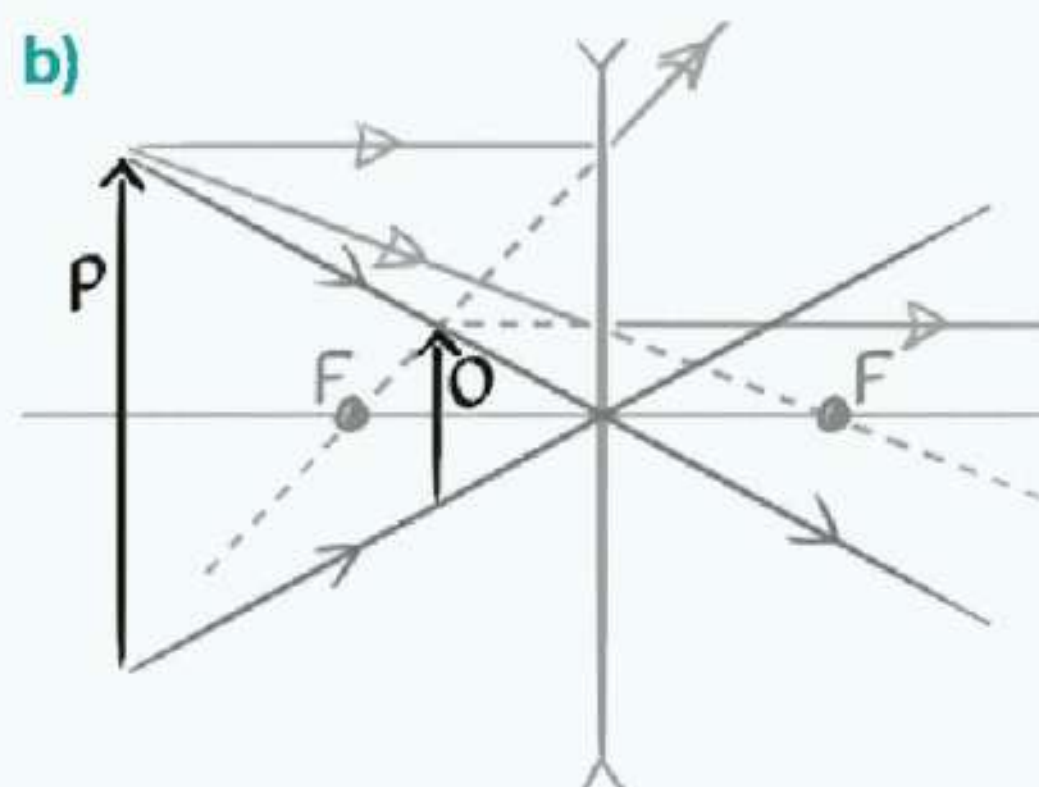
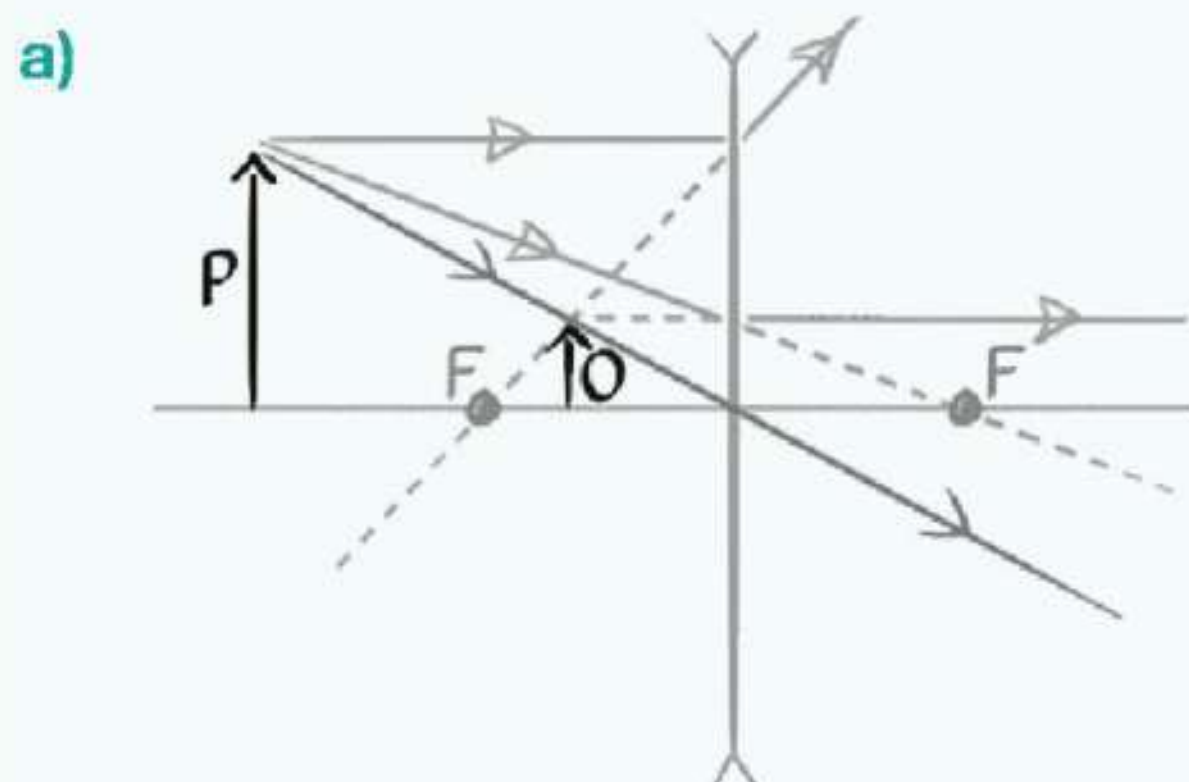
Przypomnijmy sobie, jakie możliwości mamy do wyboru, i porównajmy je z rozpatrywanym przypadkiem:

- soczewka skupiająca może tworzyć obraz rzeczywisty, ale odwrócony – czyli to NIE to, ponieważ nasz obraz jest prosty,
- soczewka skupiająca może także tworzyć obraz prosty, ale powiększony – czyli to NIE to, ponieważ nasz obraz jest pomniejszony,
- soczewka rozpraszająca tworzy obraz prosty i pomniejszony – ZGADZA SIĘ.

Tak więc nasz obraz został utworzony przez soczewkę rozpraszającą. Jest on pozorny, ponieważ soczewka rozpraszająca zawsze tworzy taki obraz.

Krok 2. Szkicujemy, jak powstaje taki obraz

Możemy teraz (w innym miejscu, nie na danym rysunku) naszkicować, jak powstaje obraz tego samego typu (rys. a). Na czarno zaznaczyliśmy to, co w zadaniu jest dane, a na szaro – pozostałe elementy rysunku.



Widzimy, że na szkicu przedmiot i obraz nie są położone tak jak w naszym zadaniu: ich dolne końce znajdują się na jednakowej wysokości. Świadczy to o tym, że w przypadku naszego zadania na osi optycznej znajdują się nie końce przedmiotu i obrazu, ale ich środki.

Musimy więc zmodyfikować nasz szkic. Dwukrotnie wydłużamy przedmiot – to sprawia, że również obraz jest dwa razy dłuższy (rys. b).



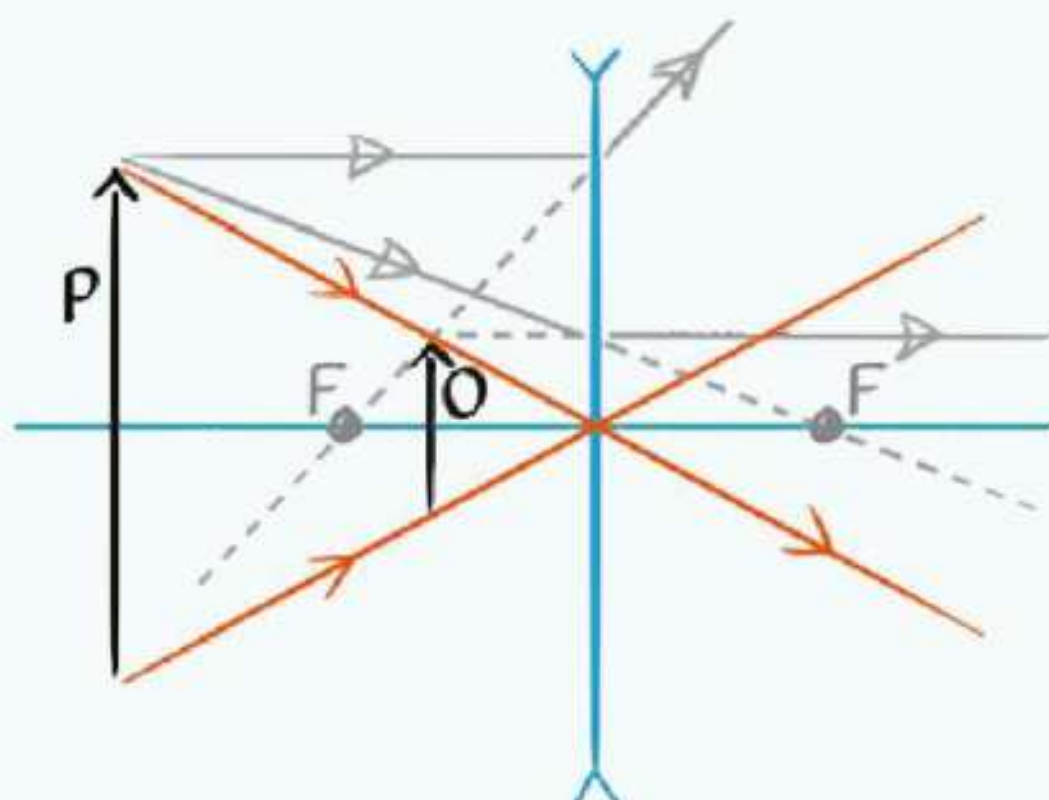


Krok 3. Rysujemy to, co umiemy, aż narysujemy to, co trzeba

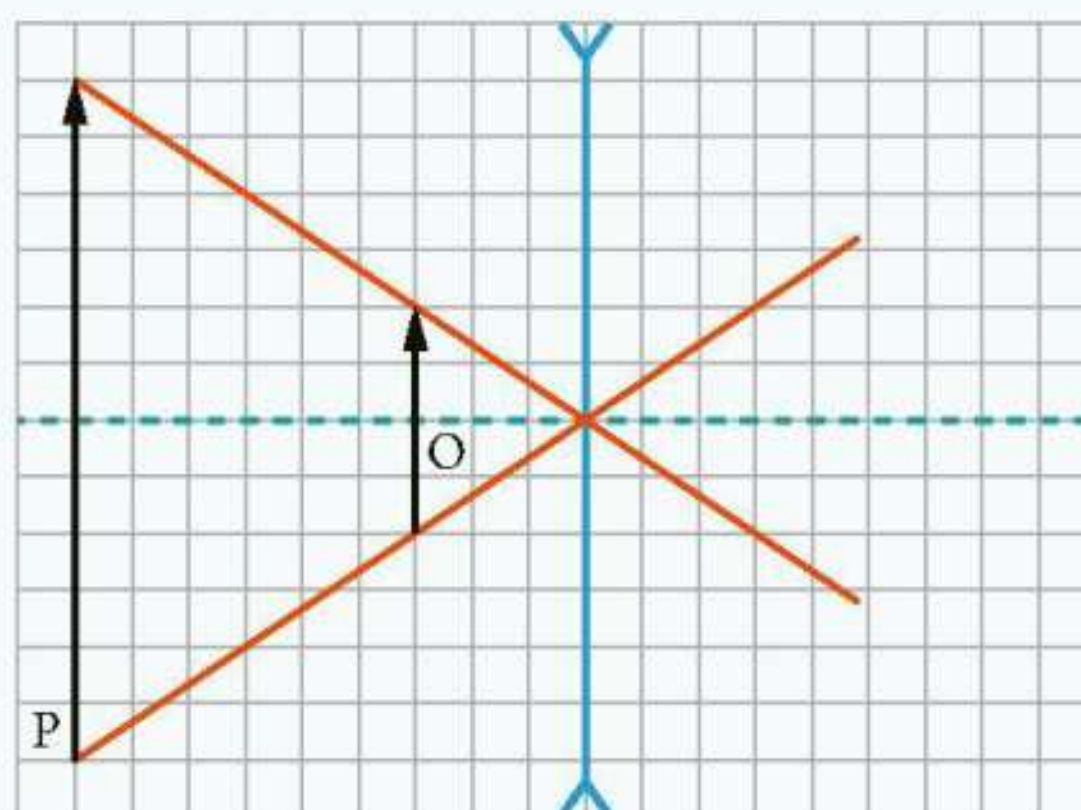
W tym momencie stwierdzamy, że na podstawie położenia przedmiotu i jego obrazu możemy narysować **linie oznaczone na rysunku c) na czerwono**, a ich punkt przecięcia pozwoli nam znaleźć zarówno **soczewkę**, jak i jej **oś optyczną**.

Ponieważ są to szukane elementy rysunku, możemy je skonstruować na rysunku danym w zadaniu (rys. d).

c)



d)



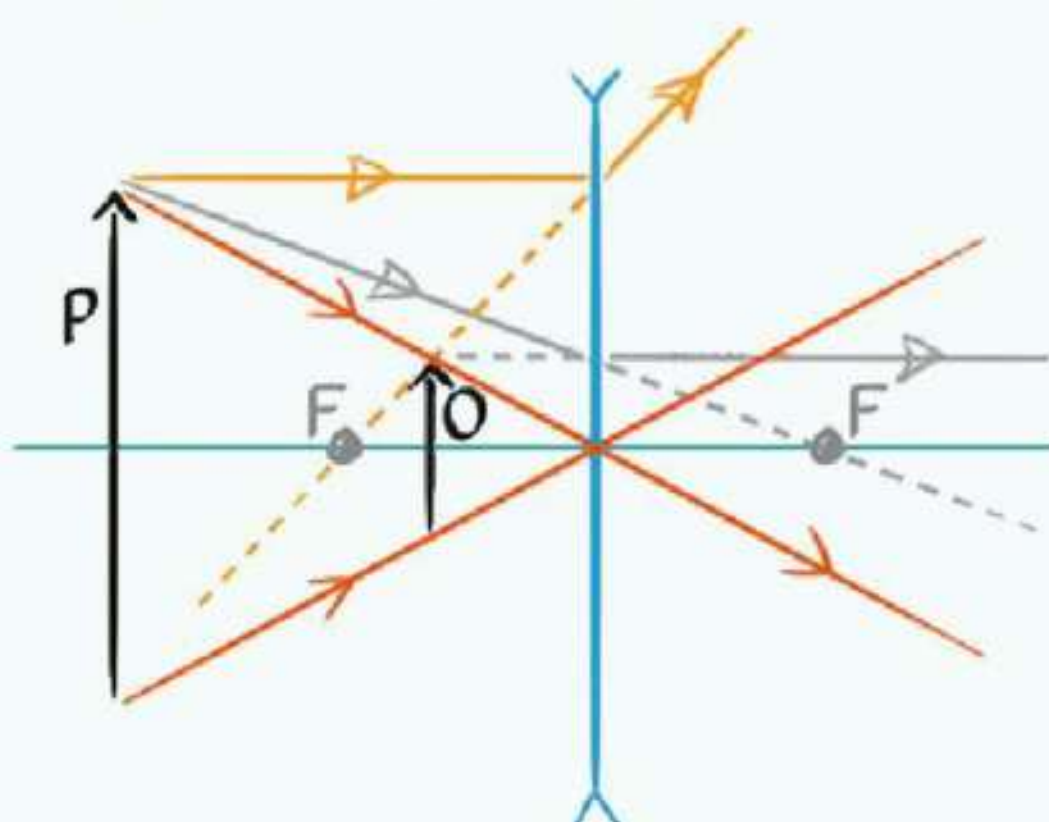
Uwaga. Kiedy rysujesz na papierze w kratkę, korzystaj z kratek → s. 23.

Krok 4. Zastanawiamy się, czego jeszcze nie narysowaliśmy i czego nam do tego brakuje

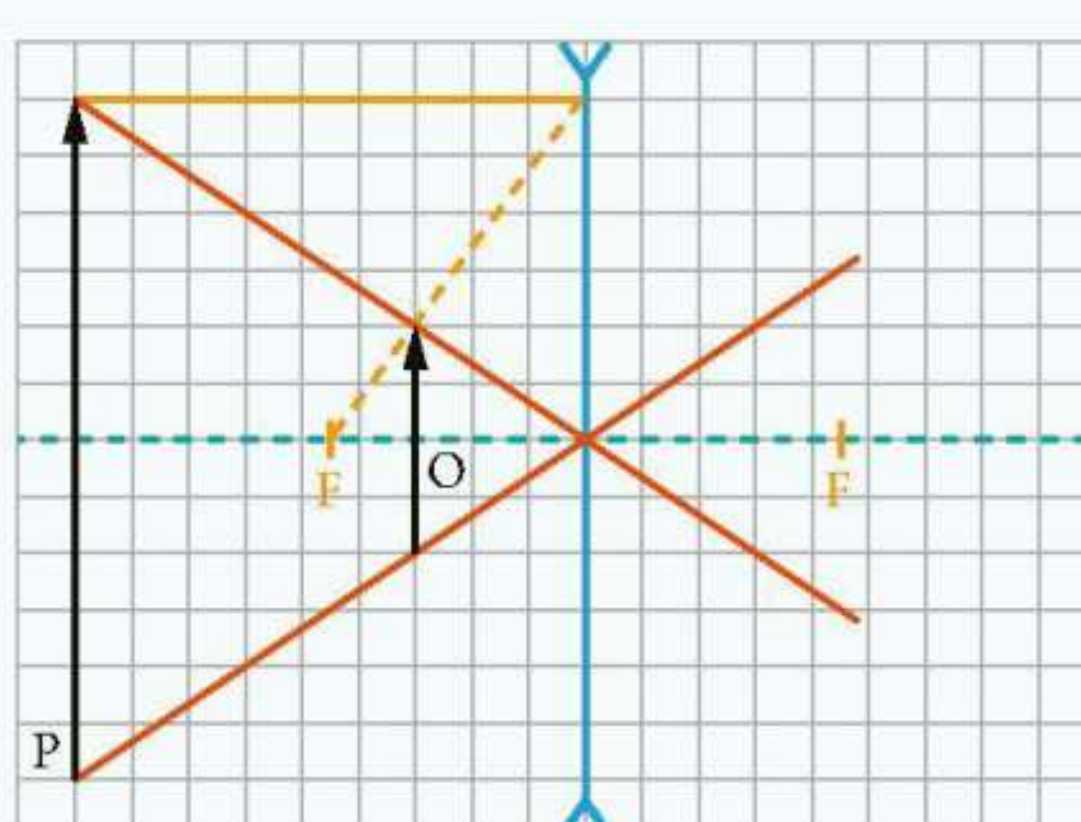
Pozostało nam znalezienie ognisk. Jak widzisz, ognisko po lewej stronie soczewki można znaleźć wtedy, gdy skonstruujemy promień zaznaczony na rysunku e) na pomarańczowo oraz jego przedłużenie. Sam promień załamany nie będzie nam już potrzebny, wystarczy jego przedłużenie.

Łatwo wyznaczyć jego początek – wystarczy narysować odcinek z górnego końca przedmiotu równoległe do osi optycznej. Gdy dojdziemy do soczewki, nie wiemy od razu, jak mocno w górę powinien odchylić się promień, ale wiemy, że jego przedłużenie przechodzi przez górny koniec obrazu, więc możemy je narysować.

e)



f)



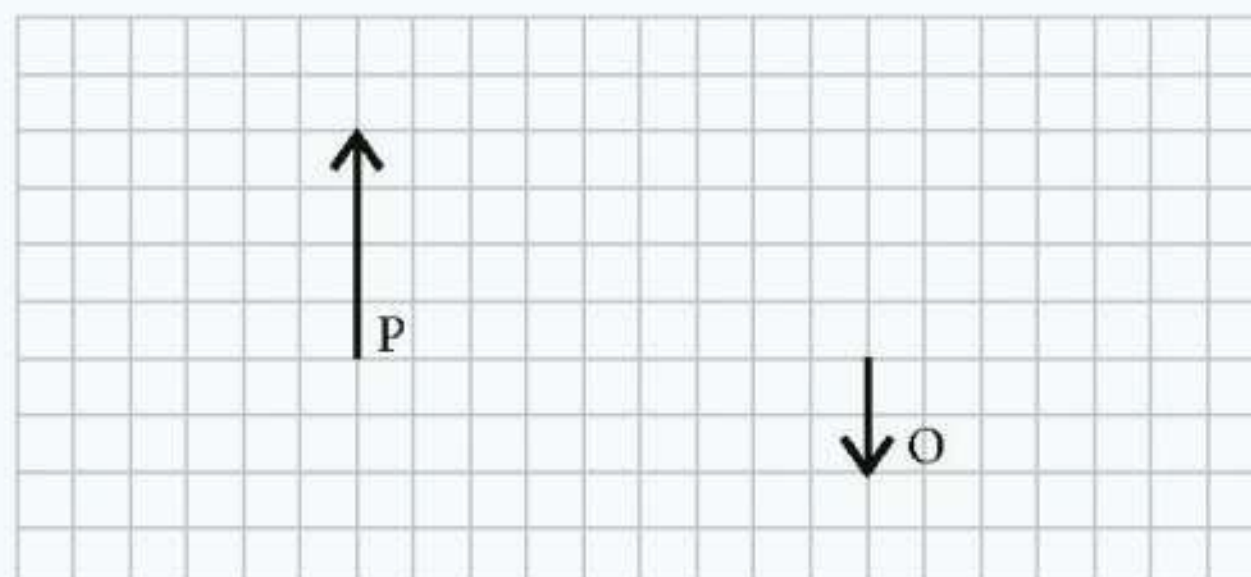
Drugie ognisko można wyznaczyć za pomocą kolejnego promienia, ale łatwiej je znaleźć w tej samej odległości od soczewki po jej drugiej stronie.

Odpowiedź: Konstrukcję przedstawia rysunek f) powyżej.



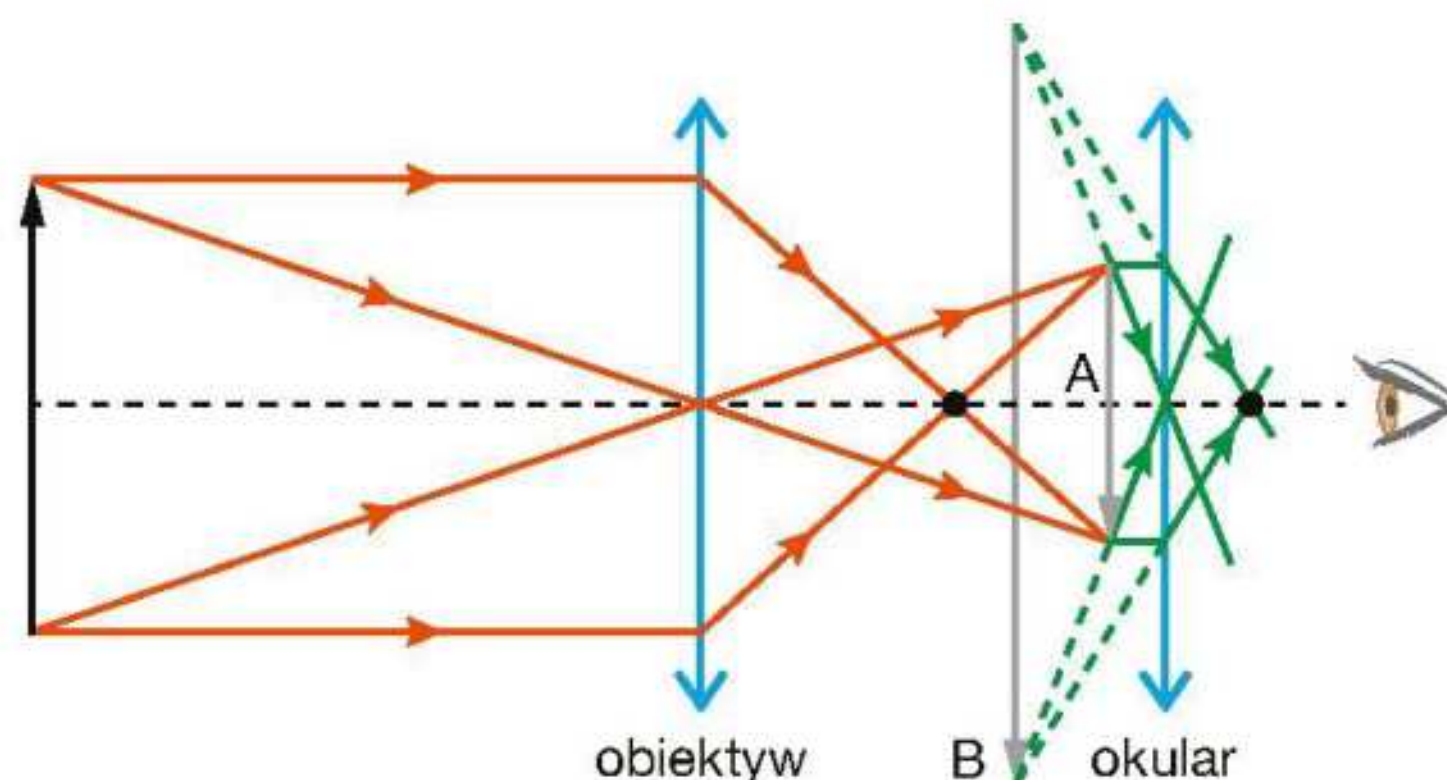
Sprawdź, czy rozumiesz

- 1 Sprawdź, że dla sytuacji w przykładzie powyżej jest spełnione równanie soczewki. Pamiętaj o znakach wielkości występujących w tym równaniu.
- 2 Na rysunku przedstawiono przedmiot P oraz jego obraz O tworzony przez soczewkę. Przerysuj ilustrację do zeszytu. Skonstruuj soczewkę, jej oba ogniska i oś optyczną. Odczytaj z rysunku ogniskową. Jedna kratka na rysunku oznacza 10 cm.
- 3 Sprawdź, że w sytuacji z zadania 2. jest spełnione równanie soczewki.



F ■ Luneta i mikroskop

Luneta astronomiczna to przyrząd złożony z dwóch soczewek. Soczewka bliższa oku to okular, a soczewka dalsza – obiektyw. Choć w obu przypadkach wykorzystujemy soczewki skupiające, każda z nich działa inaczej. Obiektyw tworzy obraz rzeczywisty odległych przedmiotów, który następnie oglądamy przez okular jak przez lupę (rys. 18.28).



Rys. 18.28. Pierwsza soczewka (obiektyw) tworzy obraz A, który oglądamy przez drugą soczewkę (okular), użytą jako lupę. Widzimy powiększony obraz B małego obrazu A

Najprostszym modelem takiej lunety są dwie soczewki trzymane w dłoniach (rys. 18.29). Jednak zastosowanie obudowy pozwala zasłonić dostęp do oka promieniom padającym na okular z boku, które zakłócają obserwację.

Mikroskop optyczny działa na podobnej zasadzie. Także w tym przyrządzie obiektyw tworzy rzeczywisty, odwrócony obraz przedmiotu, który oglądamy przez okular jak przez lupę.

Różnica polega na tym, że w przypadku mikroskopu przedmiot znajduje się tuż za ogniskiem obiektywu, a jego obraz tworzony przez obiektyw jest już powiększony. Okular powiększa go dodatkowo, co łącznie pozwala na osiągnięcie powiększenia nawet 1000 razy.



Rys. 18.29. Najprostszy działający model lunety astronomicznej

Pytania i zadania

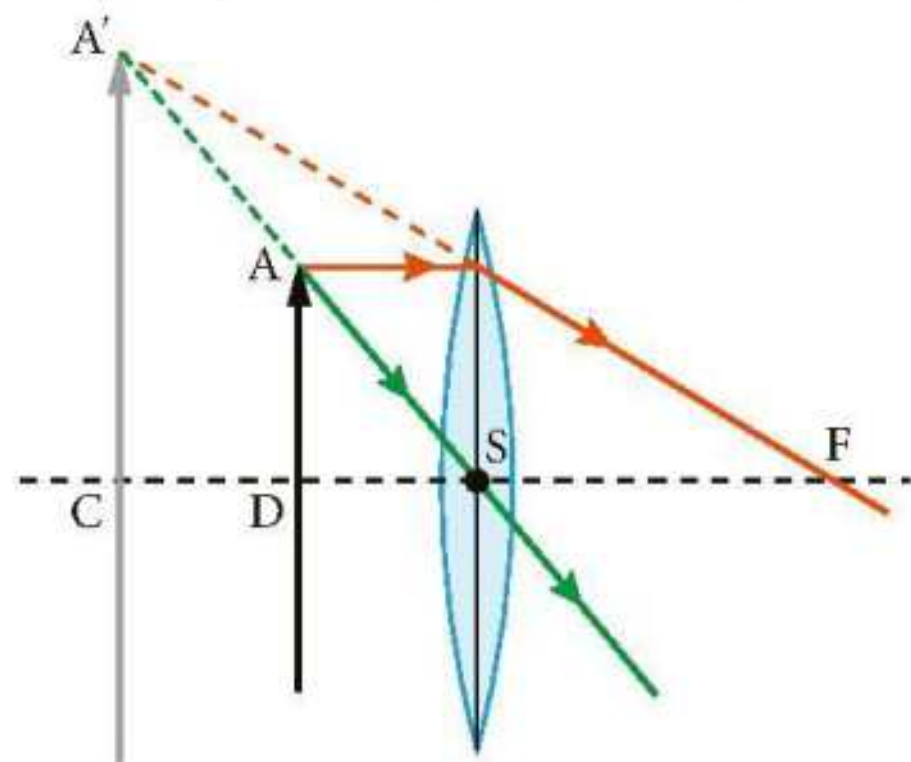
ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Skonstruuj w zeszycie w odpowiednio dobranej skali obraz przedmiotu o wysokości 10 cm znajdującego się w podanej odległości x od soczewki o ogniskowej 20 cm, a następnie oblicz odległość obrazu od soczewki i jego wysokość. Porównaj wyniki obliczeń z wielkościami zmierzonymi na rysunku.

a) $x = 5$ cm b) $x = 10$ cm c) $x = 15$ cm

Wskazówka. Aby obliczyć wysokość obrazu, skorzystaj z podobieństwa trójkątów ACS i ADS (patrz rys. poniżej).



2. Narysuj w zeszycie w odpowiednio dobranej skali obraz przedmiotu o wysokości 10 cm znajdującego się w podanej odległości x od soczewki o ogniskowej -20 cm, a następnie oblicz położenie i wysokość obrazu. Porównaj wyniki obliczeń z wielkościami zmierzonymi na rysunku.

a) $x = 10$ cm

b) $x = 20$ cm

c) $x = 30$ cm

3. Jaki obraz powstaje, gdy przedmiot znajduje się dokładnie w ognisku soczewki skupiającej? Wykonaj w zeszycie odpowiednią konstrukcję, aby uzasadnić odpowiedź.
4. Soczewka o ogniskowej 5 cm wytworzyła obraz pozorny pewnego przedmiotu.

Powstał on w odległości 4 cm od soczewki. Narysuj tę sytuację i wykonaj konstrukcję przedmiotu. Następnie wyznacz położenie przedmiotu na podstawie równania soczewki i porównaj wyniki.

Wskazówka. Naszkicuj najpierw, jak w sytuacji opisanej w zadaniu wygląda zwykła konstrukcja obrazu, gdy mamy dany przedmiot (patrz „Sposób na zadanie”). Zwróć uwagę, że obraz powinien się znaleźć między soczewką a ogniskiem. Jeśli tak nie jest na twoim rysunku, zmień położenie przedmiotu.

5. Natalia patrzyła przez soczewkę o ogniskowej -60 cm na kwiatek o wysokości 15 cm. Przez soczewkę kwiatek wydawał się trzy razy mniejszy niż w rzeczywistości. Wyznacz za pomocą obliczeń odległość kwiatka od soczewki.

Wskazówka. Zwróć uwagę na znaki $+$ i $-$.

6. Przeczytaj opis doświadczenia i spróbuj przewidzieć jego wynik. Uzasadnij swoje przypuszczenia. Następnie wykonaj opisany eksperyment i sprawdź, czy twoja hipoteza się sprawdziła. Wyjaśnij, z czego wynikają ewentualne różnice.

a) Przygotuj soczewkę skupiającą (np. szkło powiększające) i duże zwierciadło płaskie (np. lustro na ścianie).

b) Trzymaj soczewkę w wyciągniętej ręce i zbliż ją do zwierciadła tak, aby widzieć przez nią odbicie odległego przedmiotu (np. obrazka na przeciwległej ścianie).

c) Zaobserwuj, czy obraz w zwierciadle widziany przez soczewkę jest prosty czy odwrócony.

**Ważne w tej lekcji:**

- rozszczepienie światła przy załamaniu,
- powstawanie tęczy i halo.

Przypomnij sobie:

- Światło ulega załamaniu na granicy ośrodków.
- Światło białe jest mieszaniną fal o różnych częstotliwościach, czyli o różnych barwach.

Załamanie światła –
„Przypomnij sobie” → s. 7

Wiesz już, że barwa światła odpowiada jego częstotliwości. Wiesz również, że światło białe jest mieszaniną fal o różnych barwach. Rozszczepienie światła na poszczególne barwy może nastąpić na skutek interferencji, np. na kropelkach wody podczas zjawiska iryzacji chmur.

■ Rozszczepienie światła w pryzmacie

Ten sam efekt można uzyskać dzięki zjawisku załamania światła. Co więcej, zjawisko załamania pozwala ponownie połączyć poszczególne barwy w światło białe.

Zróbmy więc teraz proste doświadczenie z wykorzystaniem pryzmatu i soczewek, aby to zaobserwować.

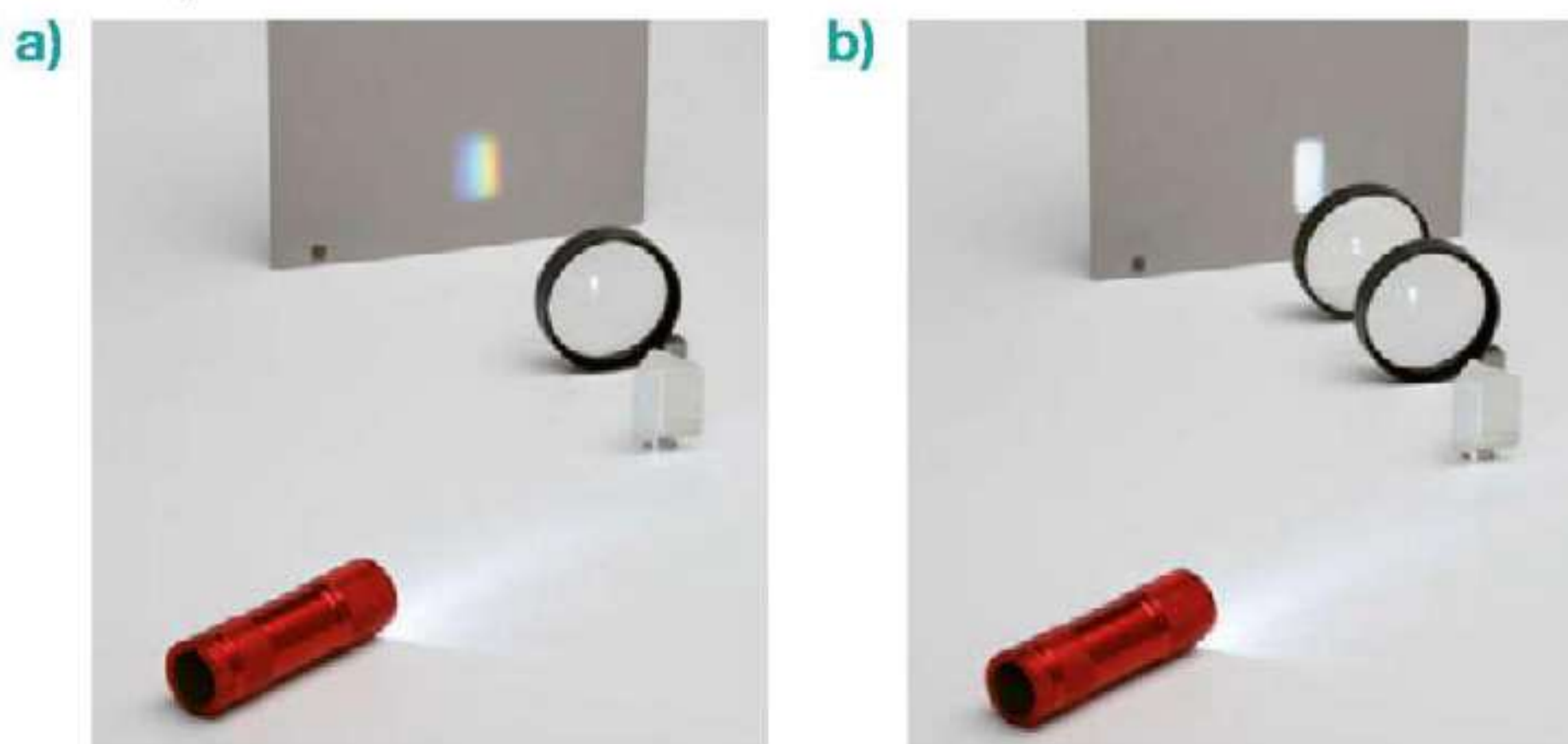
Doświadczenie 7

1. Przygotuj pryzmat, latarkę, ekran i dwie soczewki skupiające.
2. Ustaw latarkę i pryzmat tak, aby światło padało na pryzmat.
3. Za pryzmatem ustaw ekran i obracaj pryzmatem tak, aby na ekranie uzyskać kolorowe widmo światła.

Jeśli wiązka światła z latarki jest bardzo rozbieżna, to pomiędzy latarką a pryzmatem ustaw tekturkę z otworem przepuszczającym tylko część wiązki.



4. Między pryzmatem a ekranem (bliżej pryzmatu) ustaw jedną soczewkę – dzięki temu wiązka rozszczepionego światła wychodząca z pryzmatu będzie mniej rozbieżna (zdjęcie a).
5. Ustaw drugą soczewkę między ekranem i pierwszą soczewką (zdjęcie b). Co obserwujesz?



W pierwszej części doświadczenia na ekranie można było zaobserwować barwne widmo światła. Ustawienie drugiej soczewki na drodze wiązki światła sprawiło, że na ekranie pojawiła się jasna plama białego światła – rozszczepione światło zostało połączone w światło białe.

■ Przyczyna rozszczepienia światła

Rozszczepienie światła w pryzmacie wynika z faktu, że prędkość światła w szkło, a więc także współczynnik załamania, zależą od długości fali (tabela 18.2).

Tabela 18.2. Współczynniki załamania, λ – długość fali w próżni

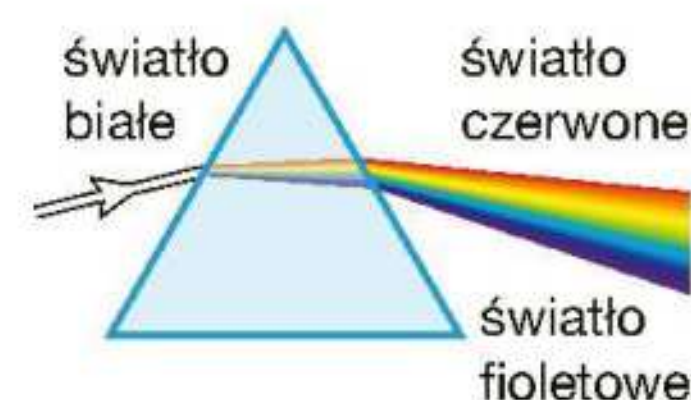
λ , nm	400	450	500	550	600	650	700	750
Woda	1,3433	1,3393	1,3363	1,3340	1,3326	1,3311	1,3302	1,3292
Szkło (typu flint lekki)	1,603	1,591	1,584	1,577	1,574	1,571	1,569	1,567

■ Działanie pryzmatu

Przy przejściu przez pryzmat światło załamuje się dwukrotnie: podczas przejścia z powietrza do szkła i podczas przejścia ze szkła do powietrza.

Gdy jest to światło białe, przy każdym załamaniu następuje rozszczepienie światła, dlatego łączny efekt jest większy i łatwy do zaobserwowania (rys. 18.30). W części 2. podręcznika, gdy badaliśmy jednokrotne załamanie, mogliśmy go pominąć.

Światło może ulec rozszczepieniu nie tylko w pryzmacie. Na tej samej zasadzie powstaje tęczą (patrz infografika na s. 40–41).



Rys. 18.30. Podwójne załamanie światła w pryzmacie

W każdej z kropli część promieni słonecznych zawraca. Dzieje się tak dlatego, że promień światła ulega **załamaniu** na krawędzi kropli, a następnie **odbija się** od jej wewnętrznej powierzchni i ponownie ulega **załamaniu**, gdy wychodzi z kropli do powietrza.

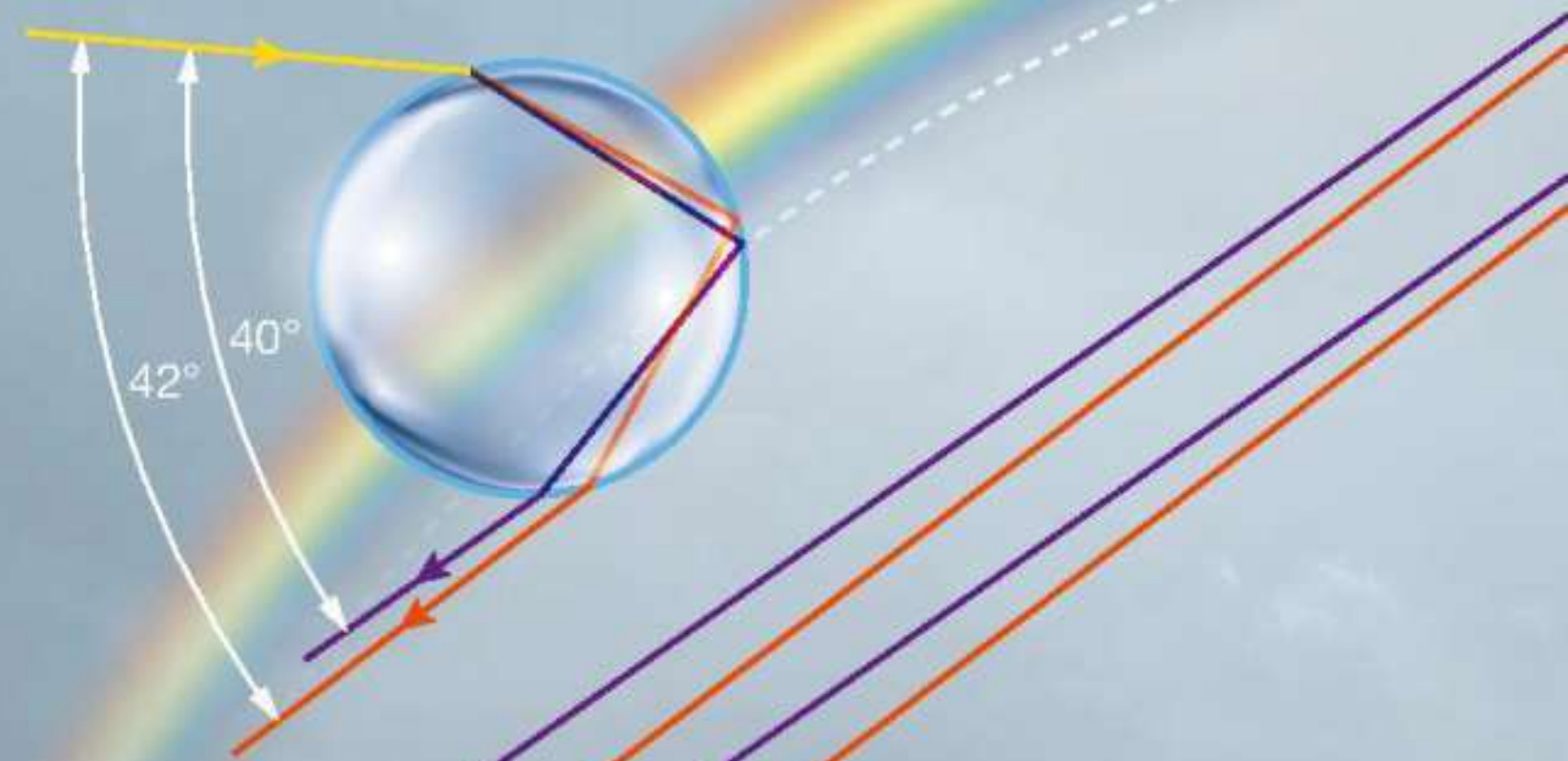


Diagram illustrating the formation of a rainbow. A person stands on a grassy hill, looking at a rainbow. The sun is behind the person. The diagram shows the path of light rays from the sun, reflecting off water droplets, and reaching the observer's eye. The angle between the sun's rays and the line of sight is labeled 40° and 42° . The diagram also shows the geometry of the rainbow arc, with the center of the arc below the horizon.

Łuk tęczy

Środek łuku tęczy znajduje się poniżej linii horyzontu.

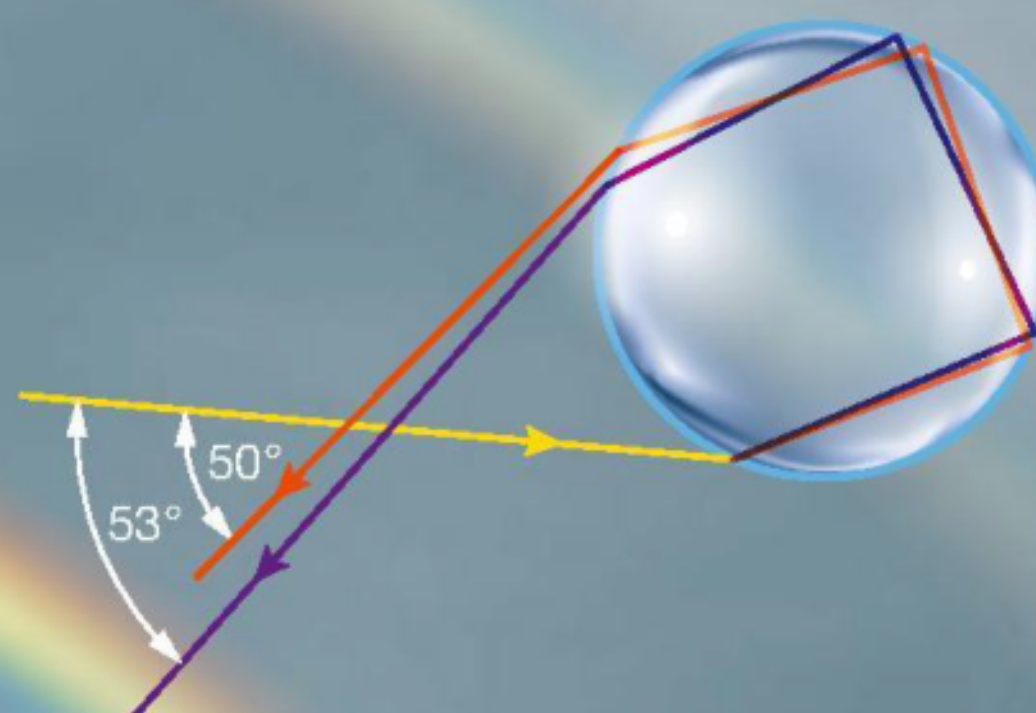
Tęczę możemy obserwować, gdy światło słoneczne zza naszych

40

Do naszego oka z niektórych kropeł dociera światło czerwone, z innych światło fioletowe, a z jeszcze innych o pozostałych barwach.

DRUGI ŁUK TĘCZY

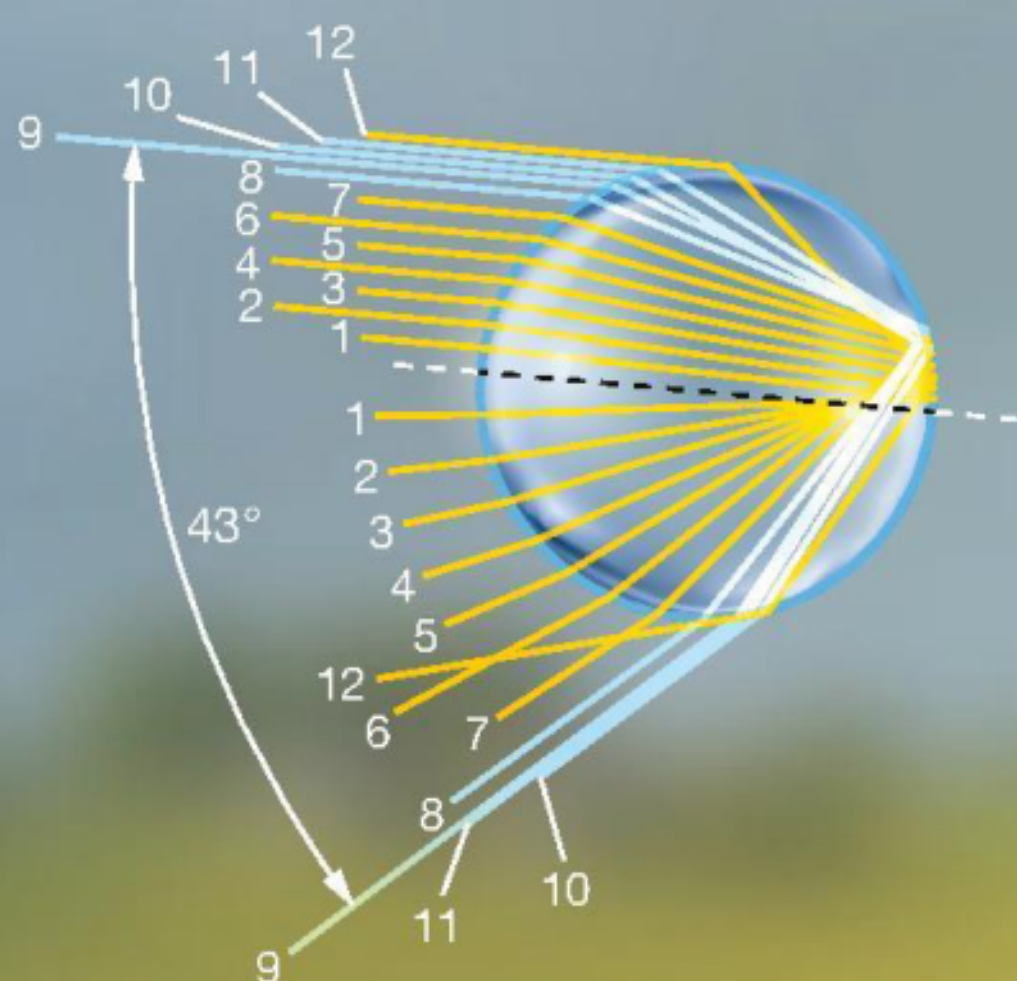
Z niektórych kropeł do oka dociera światło odbite wewnątrz kropli dwukrotnie. Właśnie te promienie tworzą drugi łuk tęczy, w którym barwy układają się w odwrotnej kolejności. Jest on znacznie słabiej widoczny.



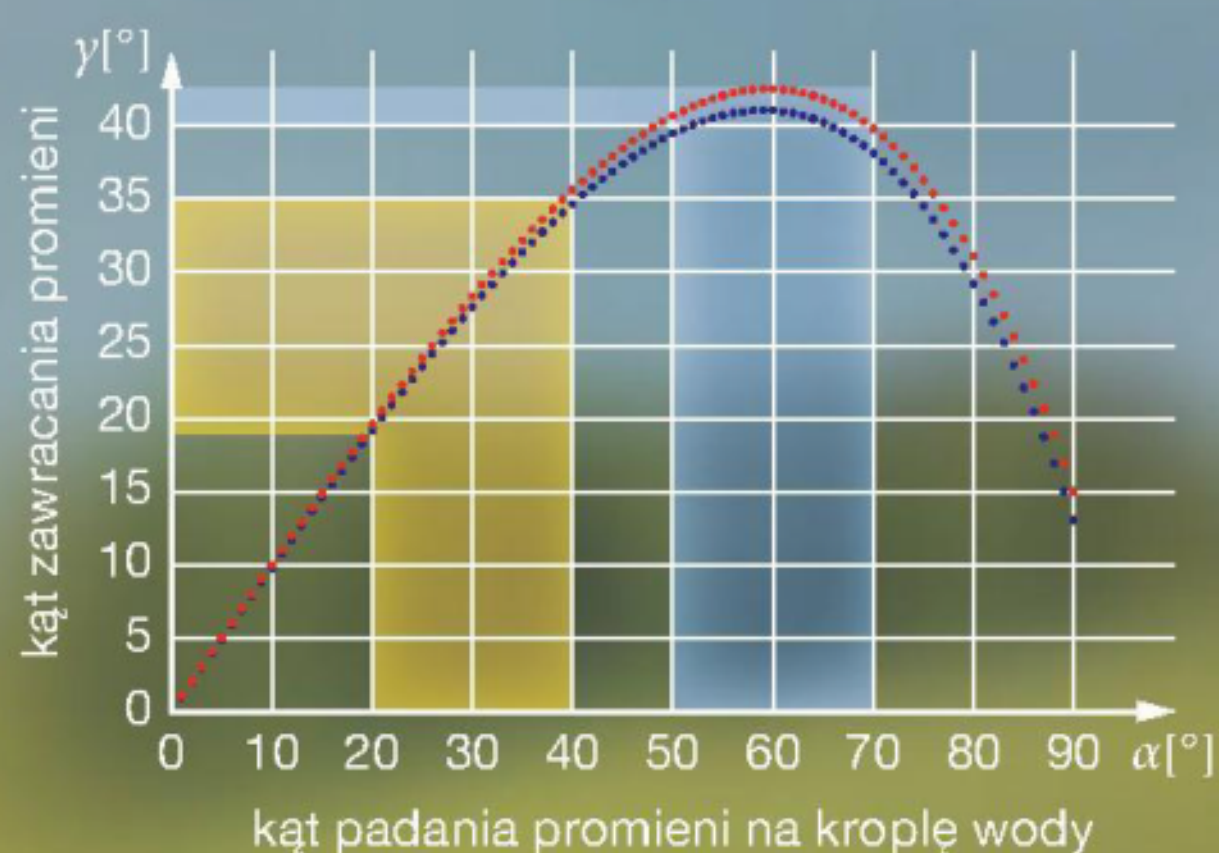
ROZJAŚNIENIE WEWNĄTRZ TĘCZY

Kąt γ , pod jakim w kropli światło zawraca, zależy od tego, w jakiej odległości od środka kropli promień wniknął do jej wnętrza, czyli od kąta padania α . Przykładowo, promienie wychodzące światła czerwonego tworzą wachlarz od 0 do $42,3^\circ$, przy czym maksimum intensywności przypada na 42° (patrz wykres).

Łuki poszczególnych kolorów tęczy obserwujemy w zakresie od 40° do 42° , ponieważ właśnie w tym przedziale poszczególne barwy osiągają swoje maksimum intensywności. Poniżej 40° barwy mieszają się ze sobą, co w efekcie daje światło białe, obserwowane jako rozjaśnienie wewnątrz tęczy.



Za tworzenie tęczy odpowiadają promienie 8–11. Pozostałe promienie są skierowane pod kątem mniejszym niż 42° .



■ Promienie, których kąt padania α jest inny (np. od 20° do 40°), zawracają w znacznie szerszym przedziale kątów γ .

■ Promienie padające na krople pod kątem α w przedziale od 50° do 70° zawracają pod kątem ok. 42° .

Gdy obserwujesz halo, pamiętaj, aby zasłonić Słońce (np. dłonią).

Halo

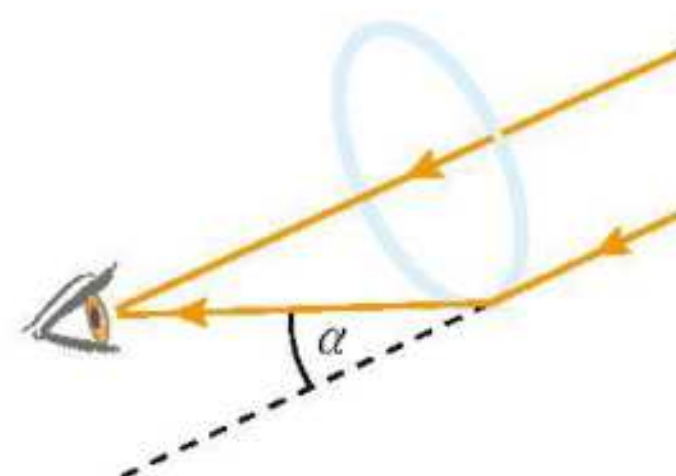
Ciekawym zjawiskiem jest też halo (rys. 18.31), czyli jasny pierścień tworzący się na niebie wokół Słońca w mroźny, słoneczny dzień. Powstaje on w podobny sposób jak tęcza, z tą różnicą, że zamiast w kroplach deszczu światło załamuje się w sześciokątnych kryształkach lodu. Kryształki powodują odchylenie promieni słonecznych o ok. 22° .

Ten kąt w bardzo małym stopniu zależy od długości fali, dlatego barwy widać o wiele słabiej niż w przypadku tęczy. Jeśli jednak uda się nam je dostrzec, zauważymy, że są one ułożone odwrotnie niż w tęczy – czerwony znajduje się wewnątrz.

a)



b)



Rys. 18.31. Halo słoneczne (a) i schemat jego powstawania (b)

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



Przykład

Pryzmat wykonany ze szkła typu flint lekki ma kształt graniastosłupa, którego podstawa jest trójkątem równobocznym. Promień światła białego pada na jedną ze ścian bocznych tego pryzmatu pod kątem $\alpha = 70^\circ$. Oblicz kąt między promieniami czerwonym i fioletowym opuszczającymi pryzmat.

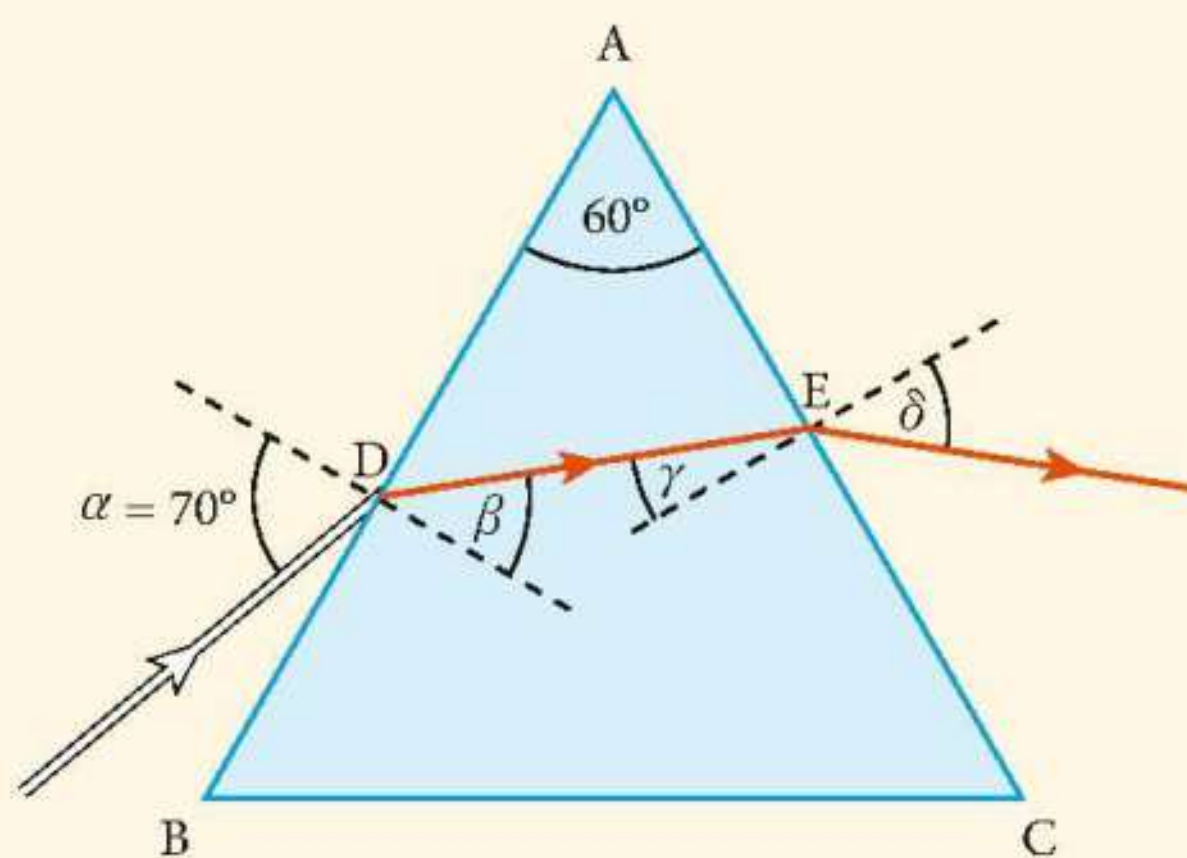
Dane: $\alpha = 70^\circ$ – kąt padania

Szukane: $\Delta \delta$ – kąt między wychodzącymi z pryzmatu promieniami czerwonym i fioletowym

Rozwiązanie:

Wykonujemy rysunek

Zaczynamy od narysowania graniastosłupa widzianego z góry, a następnie rysujemy bieg promienia światła. Na rysunku wprowadzamy także oznaczenia punktów i kątów, które mogą nam się przydać.



➔ Znajdujemy kąt beta

Zacznijmy od barwy czerwonej.

Korzystamy z prawa Snelliusa dla załamania w punkcie D:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta_{cz}} = \frac{n_{cz}}{1}$$

gdzie n_{cz} jest współczynnikiem załamania światła barwy czerwonej dla szkła flint lekkiego.

Światło o takiej barwie ma długość 750 nm, w tablicach sprawdzamy, że $n_{cz} = 1,567$. Stąd obliczamy:

$$\sin \beta_{cz} = \frac{\sin \alpha}{n_{cz}} \approx 0,5997 \rightarrow \beta_{cz} = 36,85^\circ$$

Sprawdź, czy kalkulator jest ustawiony na stopnie.

Znajdujemy kąt gamma

Do tego celu wystarczy elementarna geometria. Trójkąt ADE ma kąty 60° , $90^\circ - \beta$, $90^\circ - \gamma$, a sumę jego kątów możemy zapisać:

$$60^\circ + 90^\circ - \beta + 90^\circ - \gamma = 180^\circ$$

stąd:

$$\gamma = 60^\circ - \beta \rightarrow \gamma_{cz} = 23,15^\circ$$

Znajdujemy kąt delta

Ponownie korzystamy z prawa Snelliusa, tym razem jednak światło przechodzi ze szkła do powietrza, więc po prawej stronie równania współczynniki znajdą się w odwrotnej kolejności:

$$\frac{\sin \gamma_{cz}}{\sin \delta_{cz}} = \frac{1}{n_{cz}}$$

Stąd:

$$\delta_{cz} = 38,03^\circ$$

Wykonujemy analogiczne obliczenia dla światła fioletowego

Dla tego światła współczynnik załamania wynosi 1,603, a co za tym idzie:

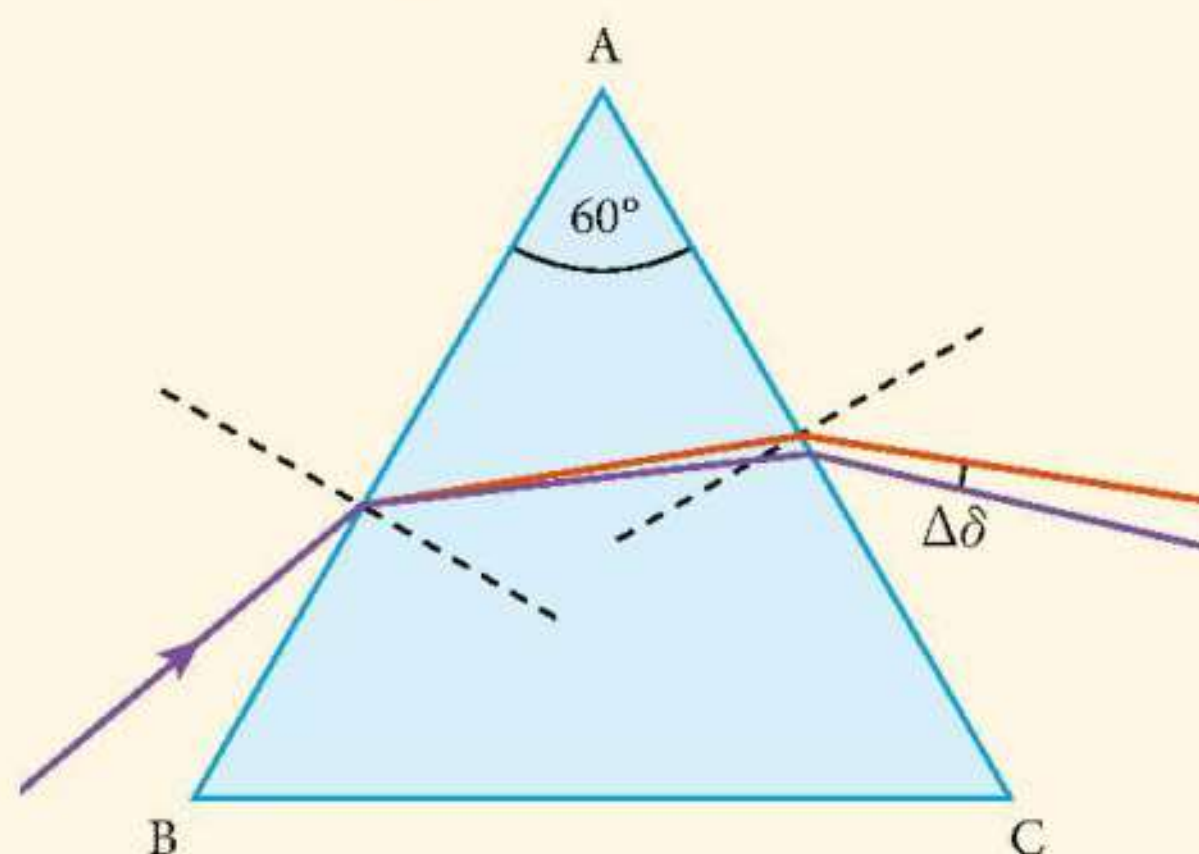
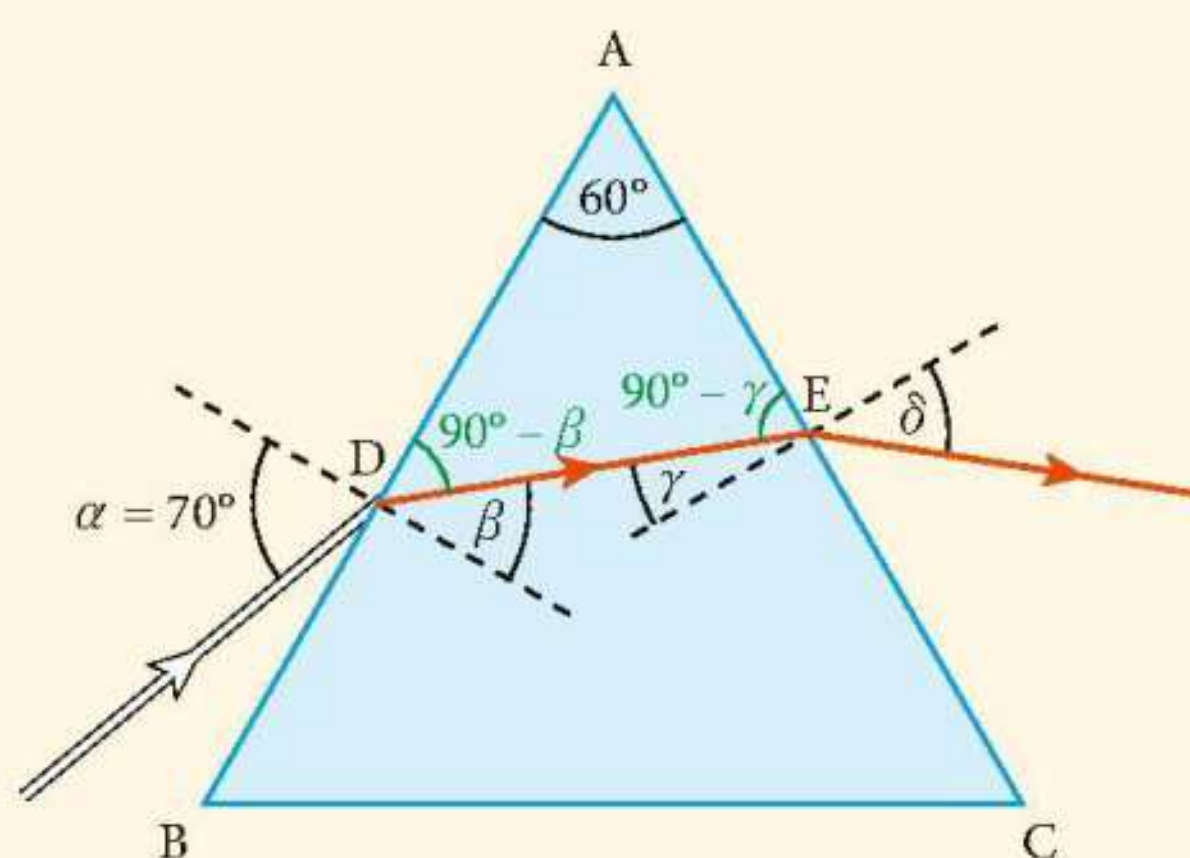
$$\delta_f = 40,91^\circ$$

Obliczamy szukany kąt

Kąt między promieniami załamanymi jest równy różnicy kątów załamania i wynosi:

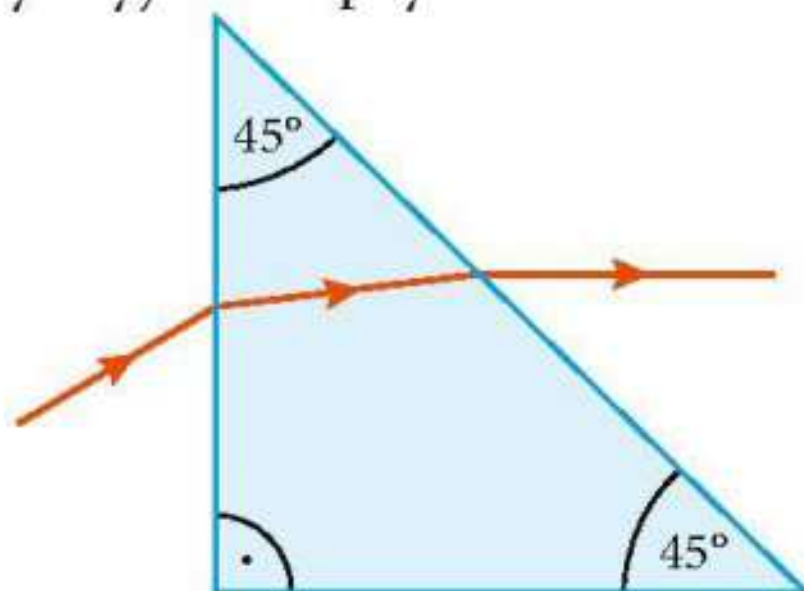
$$\Delta\delta = \delta_f - \delta_{cz} = 2,9^\circ$$

Odpowiedź: Kąt między załamanymi promieniami czerwonym i fioletowym wynosi $2,9^\circ$.

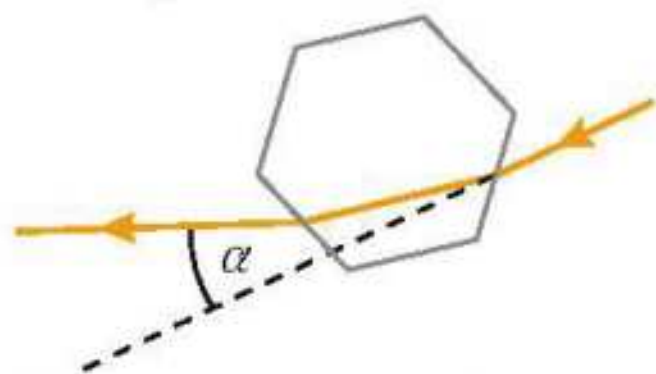


Pytania i zadania

1. Podaj przykłady sytuacji, w których udało ci się zaobserwować rozszczepienie światła.
2. Wykonaj pominięte w przykładzie szczegółowe obliczenia dla promienia fioletowego.
3. **P** Na rysunku przedstawiono schematycznie przejście jednobarwnego promienia światła przez pryzmat wykonany ze szkła flint lekkiego. Kąt padania wynosił 30° . Promień zastąpiono promieniem światła białego. Oblicz kąt między promieniem czerwonym a fioletowym:
 - a) po pierwszym załamaniu po wejściu do pryzmatu,
 - b) przy wyjściu z pryzmatu.



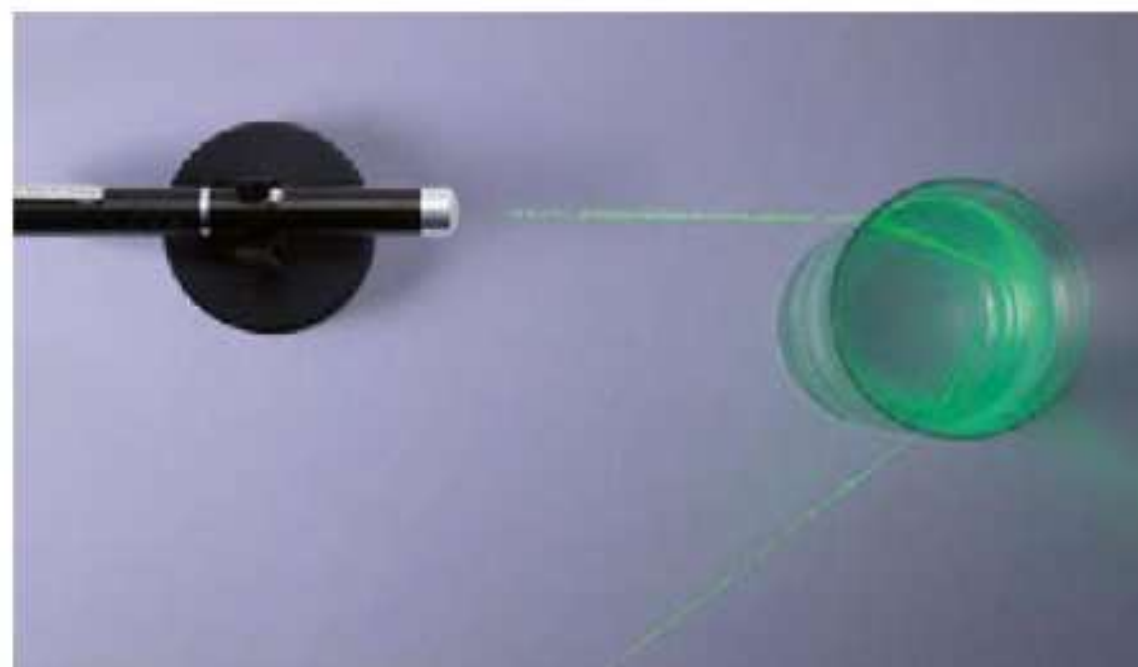
4. Promień światła białego pada z powietrza do wody pod kątem 30° . Oblicz kąt między załamanym promieniem fioletowym a załamanym promieniem czerwonym.
5. Na rysunku przedstawiono schemat załamania światła w kryształku lodu. Taki bieg promienia prowadzi do powstawania halo. Kryształek ma kształt graniastosłupa prawidłowego sześciokątnego, a wewnątrz kryształka promień biegnie równoległe do ściany bocznej.



Uzasadnij za pomocą odpowiednich obliczeń, że promień światła słonecznego zostaje odchylony o kąt 22° (na rysunku oznaczony jako α).

6. **i** Bezpośrednie badanie biegu światła przez kroplę wody nie jest łatwe, ponieważ nie da się utrzymać w bezruchu dużej kulistej kropli wody. Znacznie łatwiej wykorzystać szklankę z wodą. Ponieważ jej ścianki są cienkie i nie mają większego wpływu na bieg światła, możemy założyć, że światło biegnie tak, jakby przechodziło bezpośrednio z powietrza do wody i z powrotem. Woda w szklance o pionowych ściankach ma kształt walca, ale widziana z góry wygląda tak samo jak przekrój kropli (patrz rysunek z lewej strony infografiki na s. 40–41).

- a) Zbadaj za pomocą opisanego wyżej modelu, jak rozchodzi się promień światła laserowego wpadający do kropli wody. Samodzielnie zaplanuj szczegóły eksperymentu.
- b) Na tym rysunku zaznaczono punkt, w którym następuje wewnętrzne odbicie światła na granicy ośrodków. Czy jest ono całkowite czy częściowe? Sprawdź to doświadczalnie, a następnie za pomocą obliczeń.
- c) Wyznacz kąt między promieniem padającym na wodę a promieniem wychodzącym z wody (kąt γ na wspomnianym rysunku). Powtórz swoje pomiary kilkakrotnie dla różnych (ale równoległych) położeń lasera. W jakich granicach zmienia się mierzony kąt? Porównaj wynik doświadczenia z wiadomościami z lekcji.



18.6

Natura fal elektromagnetycznych



Ważne w tej lekcji:

- odkrycie i natura fal elektromagnetycznych,
- wektory $\vec{E}$ i $\vec{B}$ w fali elektromagnetycznej,
- fala elektromagnetyczna jako fala poprzeczna.

Przypomnij sobie:

- Światło jest falą elektromagnetyczną.
- Fale elektromagnetyczne to rozchodzące się zaburzenia pola elektrycznego i magnetycznego.
- W fali poprzecznej kierunek drgań jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali.

Wiele o naturze fal elektromagnetycznych

W drugiej części podręcznika powiedzieliśmy, że w falach elektromagnetycznych okresowym zmianom ulegają pole elektryczne i pole magnetyczne. Teraz, gdy wiesz już więcej o polu elektrycznym i magnetycznym, możesz dowiedzieć się więcej na temat natury tych fal.

Transformator bez uzwojeń?

Przypomnijmy sobie w tym celu zasadę działania transformatora.

1. Prąd zmienny w uzwojeniu pierwotnym powoduje, że powstaje zmienne pole magnetyczne.
2. Zmienne pole magnetyczne jest przyczyną indukowania się zmiennego pola elektrycznego, dzięki czemu w uzwojeniu wtórnym przepływa prąd zmienny.

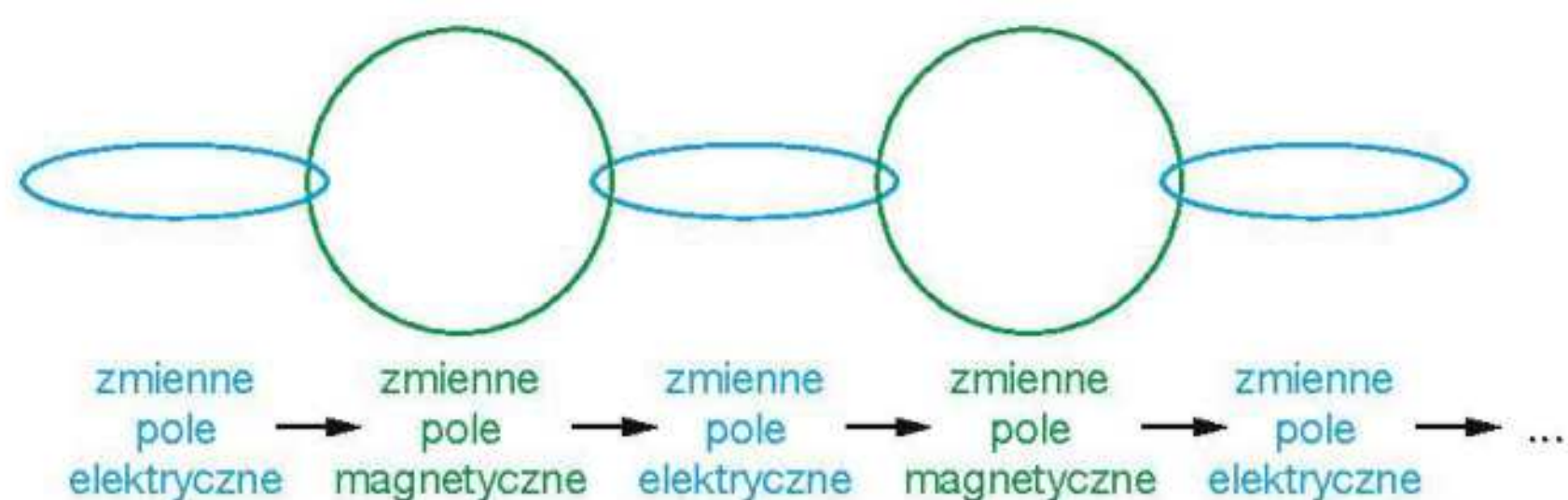
Okazuje się, że analogiczne zjawiska zachodzą nawet wtedy, gdy nie ma przewodnika, w którym mógłby płynąć prąd. Wystarczy, że w przestrzeni istnieje zmienne pole elektryczne.

Transformator,
podręcznik cz. 3 → s. 326

Zmienne pole elektryczne jest przyczyną powstawania pola magnetycznego. Zmienne pole magnetyczne jest przyczyną indukowania się pola elektrycznego.

Bardzo duże! Światło gwiazd widzimy z odległości miliardów lat świetlnych.

Zatem jeśli gdziekolwiek w przestrzeni powstaje zmienne pole elektryczne, powoduje ono powstawanie pola magnetycznego, które na ogół jest zmienne. Z kolei zmienne pole magnetyczne powoduje powstawanie pola elektrycznego itd. (rys. 18.32). Tak powstała fala może rozchodzić się na duże odległości.



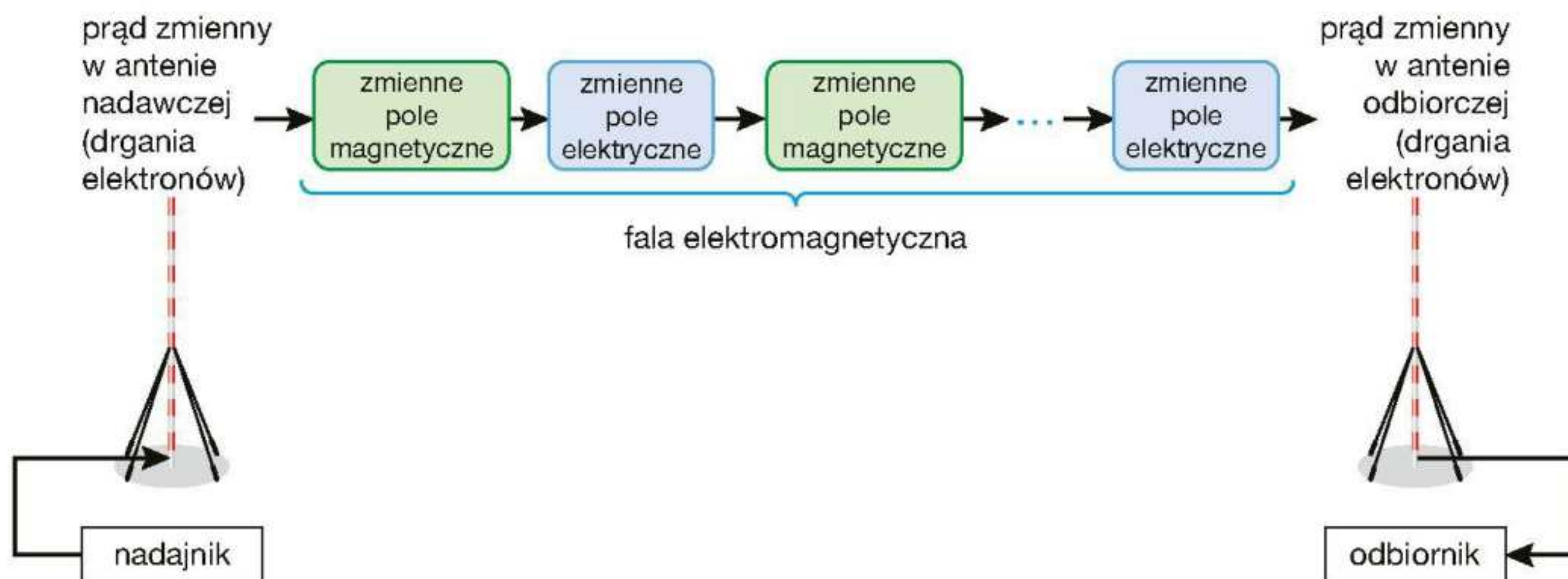
Rys. 18.32. Schemat powstawania fali elektromagnetycznej

■ Wytwarzanie fal elektromagnetycznych

Skąd wziąć zmienne pole elektryczne albo magnetyczne, które zapoczątkuje rozchodzenie się fali?

Jedną z możliwości jest prąd zmienny płynący w przewodzie. Jak wiesz, wokół przewodnika z prądem powstaje pole magnetyczne, a kiedy jest to prąd zmienny, zmienia się także indukcja tego pola.

Tak właśnie działa nadajnik radiowy (rys. 18.33).



Rys. 18.33. Schemat nadawania i odbierania fal radiowych

Z kolei kiedy w obszarze rozchodzenia się fali elektromagnetycznej umieścimy przewodnik, zmienne pole elektryczne spowoduje w nim drgania elektronów, czyli przepływ prądu zmiennego. Tak działa odbiornik radiowy.

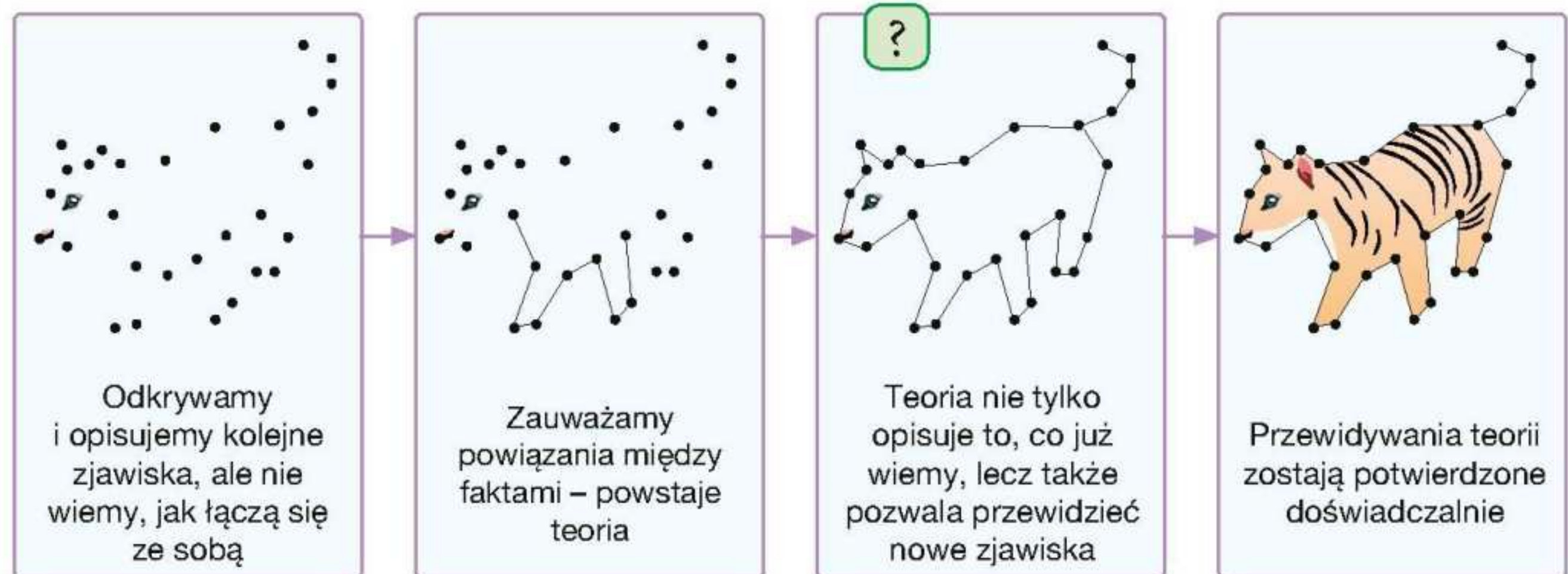
To aż teoria!

W języku potocznym o niesprawdzonych przypuszczeniach mówimy: „to tylko teoria”. W fizyce i innych naukach przyrodniczych należy raczej mówić: „to aż teoria”. Wyjaśnijmy, co oznacza to pojęcie w nauce.

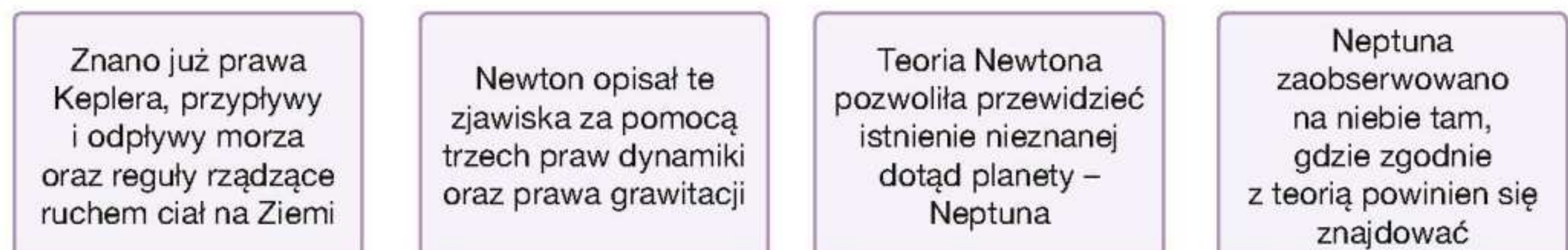
Otóż w miarę rozwoju fizyki uczeni odkrywają nowe prawa oraz porządkują wiedzę i dostrzegają wspólne przyczyny różnych znanych już zjawisk. Taki uporządkowany system wiedzy, sprawdzony w wielu doświadczeniach, nazywamy w nauce teorią.

Od teorii wymaga się nie tylko uporządkowania znanych faktów, lecz także przewidywania nowych.

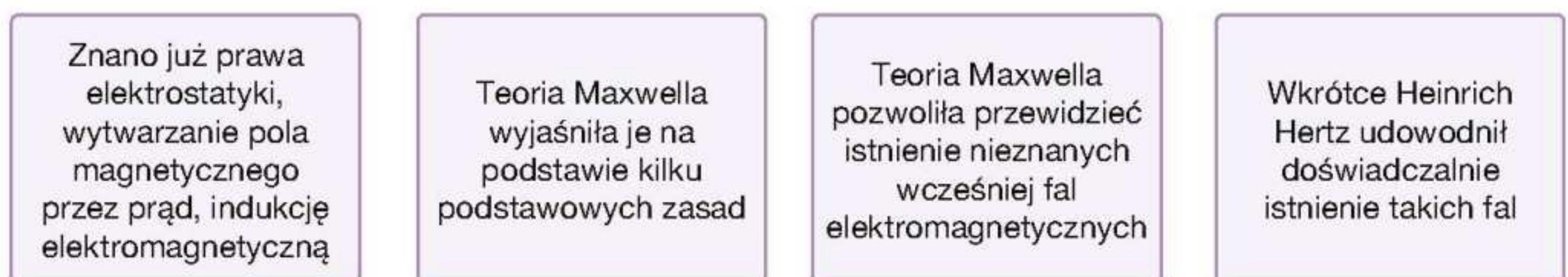
Możemy to schematycznie przedstawić za pomocą diagramu.



Znany ci już przykład to teoria grawitacji Newtona.



Podobnie było z teorią zjawisk elektrycznych i magnetycznych, stworzoną w XIX w. przez Jamesa Clerka Maxwella.



W doświadczeniu Hertza nadajnik i odbiornik znajdowały się w tym samym pokoju. Ale już 12 lat później na dachu Poczty Głównej w Londynie zainstalowano pierwszy nadajnik radiowy. Dziś zastosowania fal radiowych i mikrofal obejmują także telewizję, telefony komórkowe, wifi, Bluetooth i wiele innych wynalazków.

Fale podłużne i poprzeczne, podręcznik cz. 2 → s. 261–264

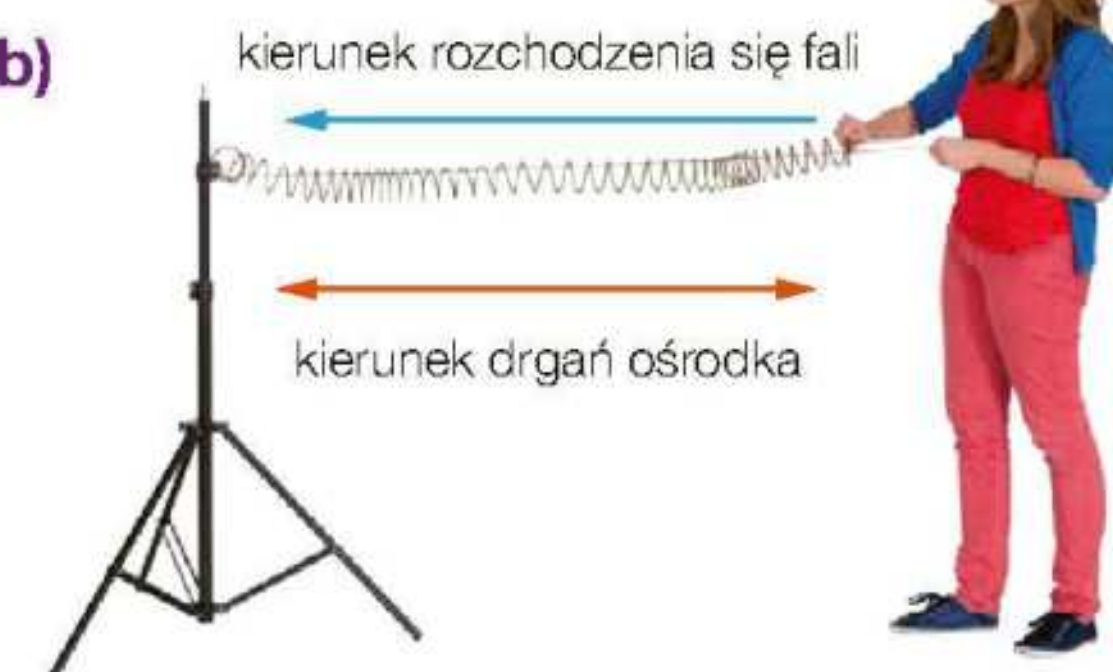
Fale elektromagnetyczne jako fale poprzeczne

Przypomnijmy, że wśród fal mechanicznych wyróżnialiśmy fale poprzeczne i podłużne. W tych pierwszych drgania cząsteczek są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali (rys. 18.34a), a w drugich – są do niego równoległe (rys. 18.34b).

a)



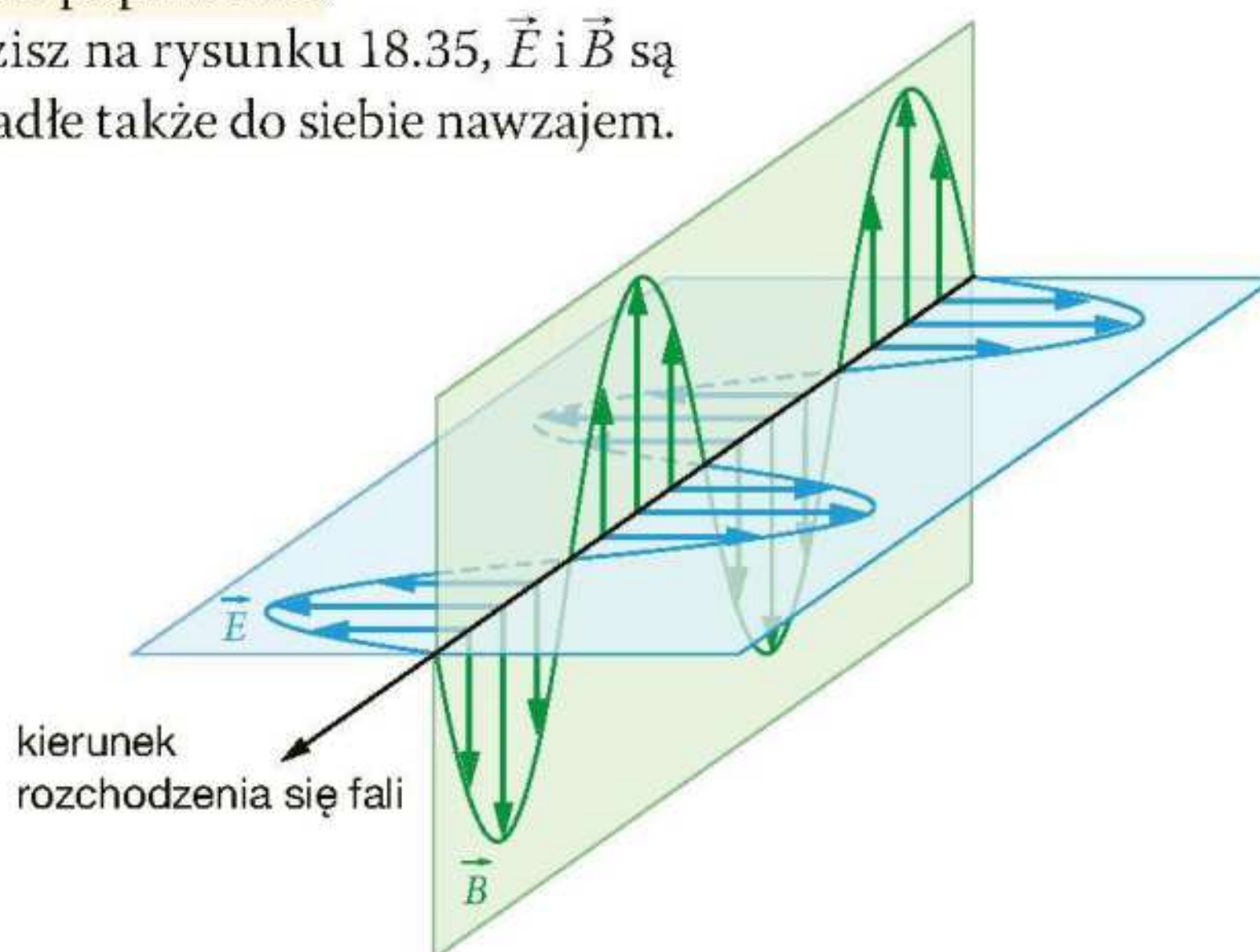
b)



Rys. 18.34. Fala na sprężynie: a) poprzeczna, b) podłużna

W przypadku fali elektromagnetycznej zarówno wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$, jak i wektor indukcji magnetycznej $\vec{B}$ są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. Dlatego fale elektromagnetyczne uważamy za fale poprzeczne.

Jak widzisz na rysunku 18.35, $\vec{E}$ i $\vec{B}$ są prostopadłe także do siebie nawzajem.



Rys. 18.35. Wektory natężenia pola $\vec{E}$ i indukcji magnetycznej $\vec{B}$ w fali elektromagnetycznej w danej chwili

Schemat fali na rysunku 18.35 pozwala nam także określić, co rozumiemy przez grzbiet fali elektromagnetycznej – jest to miejsce, gdzie w danej chwili pole elektryczne jest najsilniejsze. Odległość między kolejnymi tak rozumianymi grzbietami to długość fali.

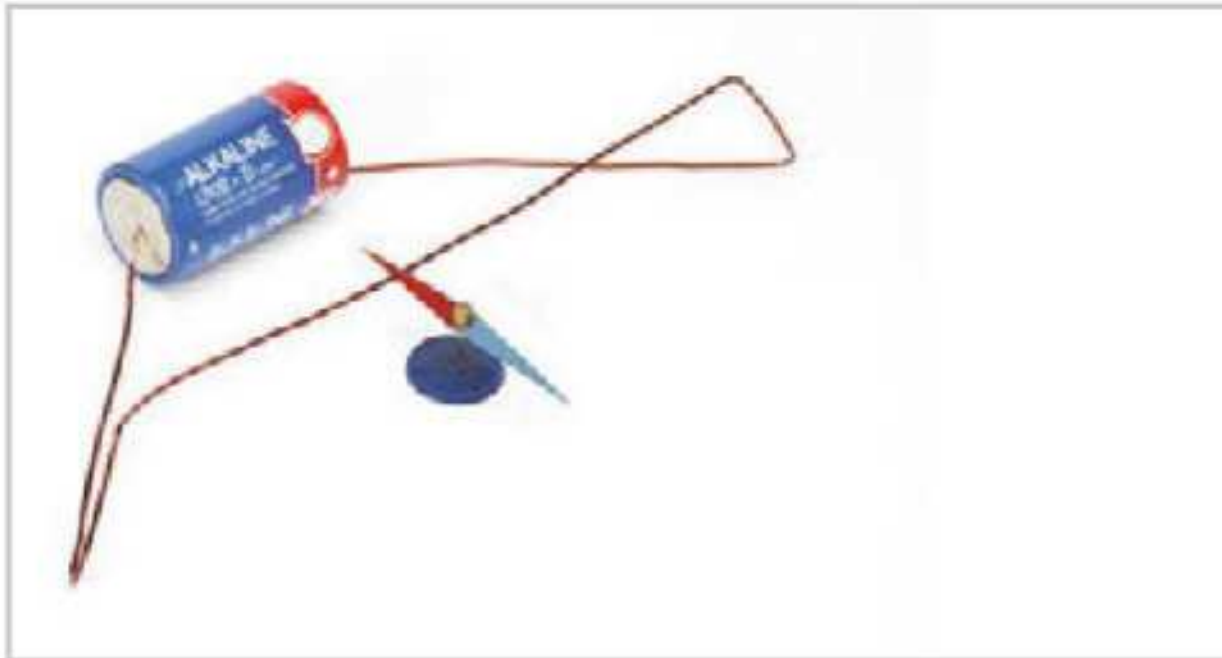
Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Zdjęcia przedstawiają dwa doświadczenia z cz. 3. podręcznika.

- a) Przypomnij, jak przebiegały te doświadczenia.
- b) Wyjaśnij, jaki mają one związek z tą lekcją.



- 2. W historycznym doświadczeniu Heinricha Hertza częstotliwość wytworzonej fali radiowej wynosiła 50 MHz. Oblicz długość tej fali.
- 3. Maszt radiowy w Konstantynowie o wysokości 646 m, stanowiący antenę nadawczą Polskiego Radia, był przez wiele lat najwyższą konstrukcją na świecie. Był tak wysoki, ponieważ nadawał na falach długich, a antena nadaje najlepiej, kiedy jej długość

jest równa połowie długości fali. Dlaczego jednak nie położono odpowiedniej długości przewodu na ziemi? Okazuje się, że fale radiowe są nadawane przez antenę głównie na boki, a w kierunku równoległym do anteny nadajnik działa słabo.

- a) Oblicz częstotliwość fal nadawanych przez ten nadajnik.
- b) Wyjaśnij, dlaczego antena nadaje bardzo słabo w kierunku równoległym do swojej długości.
- c) Wyjaśnij, dlaczego laptop znajdujący się bardzo blisko routera może odbierać sygnał wifi słabiej niż wtedy, gdy znajduje się dalej.



OBSERWACJE W RÓŻNYCH ZAKRESACH FAL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Ciała niebieskie wysyłają promieniowanie w całym zakresie widma elektromagnetycznego. Obserwowanie nieba w różnych przedziałach częstotliwości fal elektromagnetycznych pozwala dostrzec to, czego nie widać w zakresie widzialnym. Na każdej z ilustracji przedstawiono całe niebo widziane z Ziemi (podobnie jak na mapie w kształcie elipsy przedstawia się powierzchnię Ziemi).



obserwacje prowadzone przez teleskop naziemny

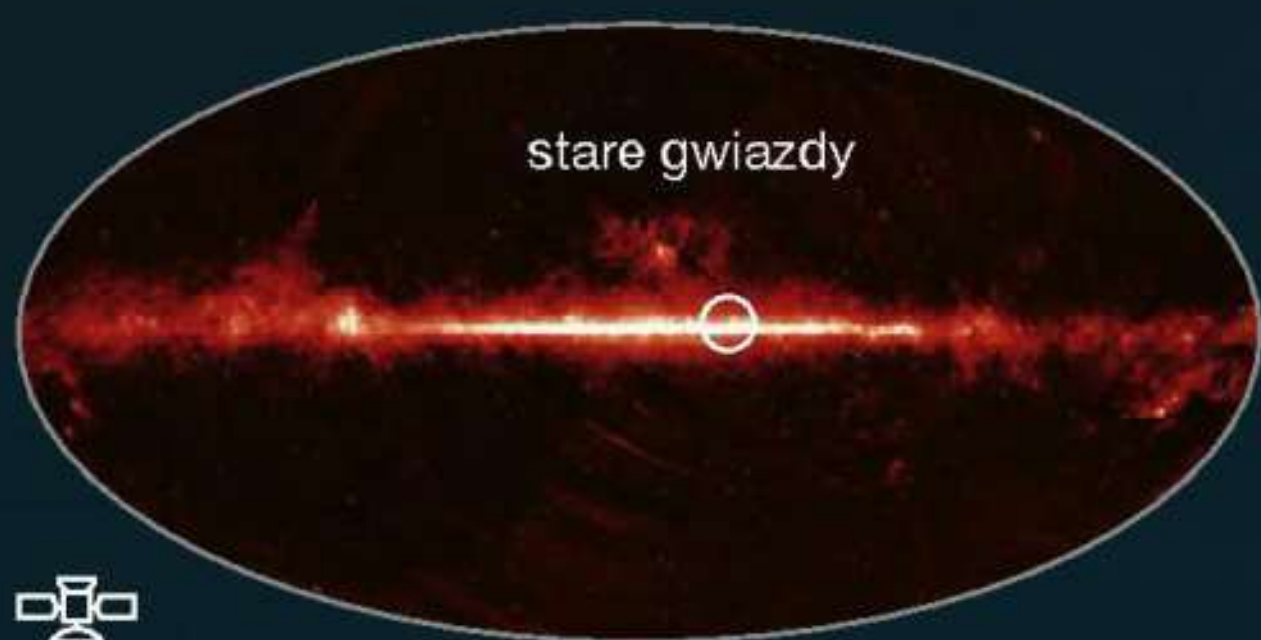


obserwacje prowadzone za pośrednictwem satelity



PROMIENIOWANIE WIDZIALNE

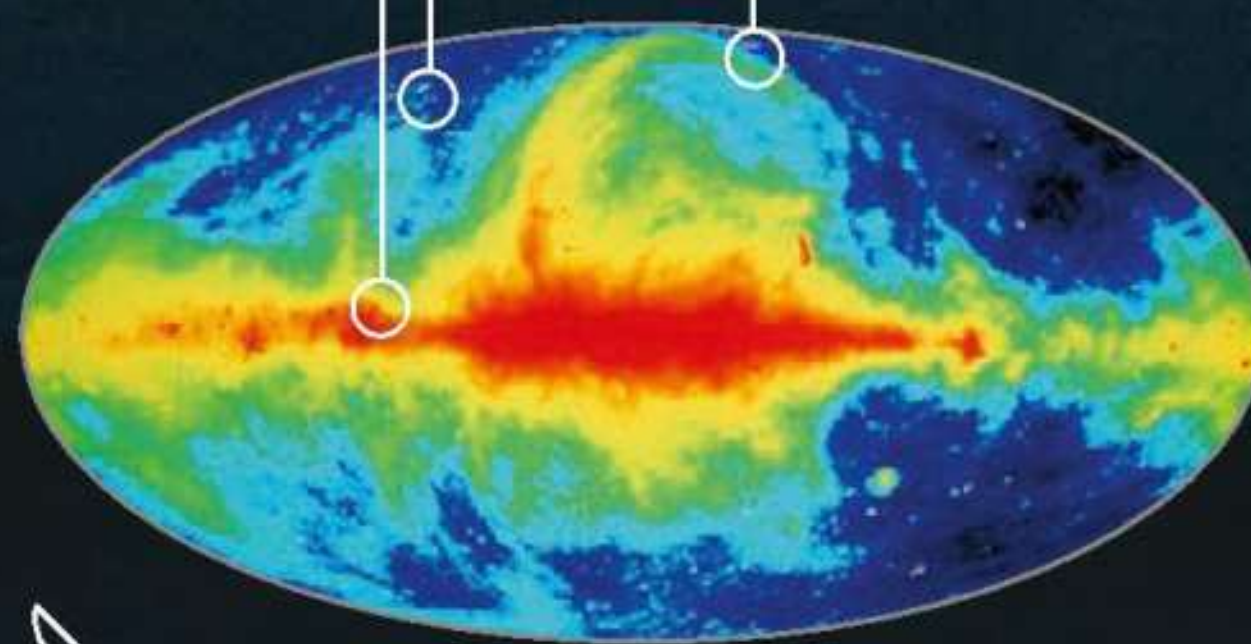
Obserwacje w świetle widzialnym są dla nas najbardziej naturalne, ale mają swoje ograniczenia. Przykładowo, obłoki międzygwiazdowego pyłu i gazu, pochłaniające światło gwiazd znajdujących się za nimi, skutecznie utrudniają obserwację dalekich obiektów.



DALEKA I ŚREDNIA PODCZERWIEN

Jasne obszary w ramionach spiralnych to miejsca, gdzie rodzą się gwiazdy, ogrzewające pył i gaz, które wskutek tego emitują promieniowanie podczerwone. W najjaśniejszym obszarze Galaktyki (w zgrubieniu centralnym) gromadzą się stare gwiazdy.

obszary intensywnego formowania się gwiazd
radiogalaktyki
kwazary



PROMIENIOWANIE RADIOWE 408 MHz

Dzięki falom radiowym, które przenikają przez obłoki pyłu przesłaniające nam widok w zakresie promieniowania widzialnego, możemy dostrzec obszary intensywnego formowania się gwiazd, pozostałości po wybuchach supernowych, kwazary oraz radiogalaktyki.

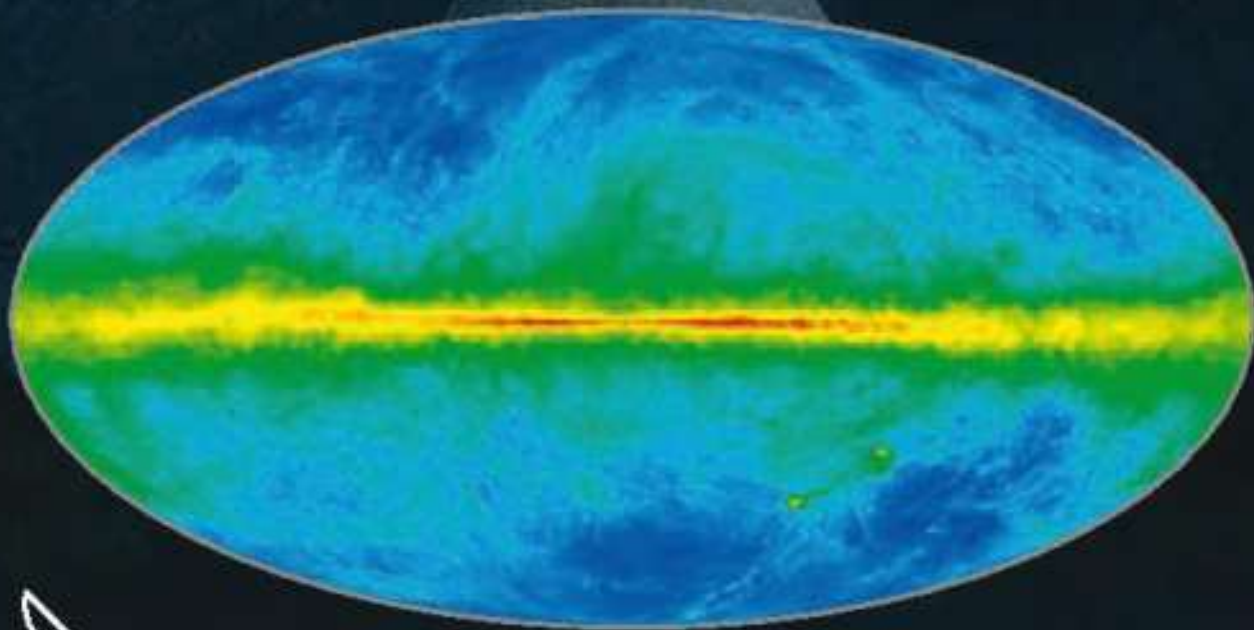


BLISKA PODCZERWIEN

Pył jest przezroczysty i widać przez niego chłodne, małowymagowe gwiazdy (zbyt zimne, aby mogły być wyraźnie obserwowane w świetle widzialnym) oraz odległe galaktyki.

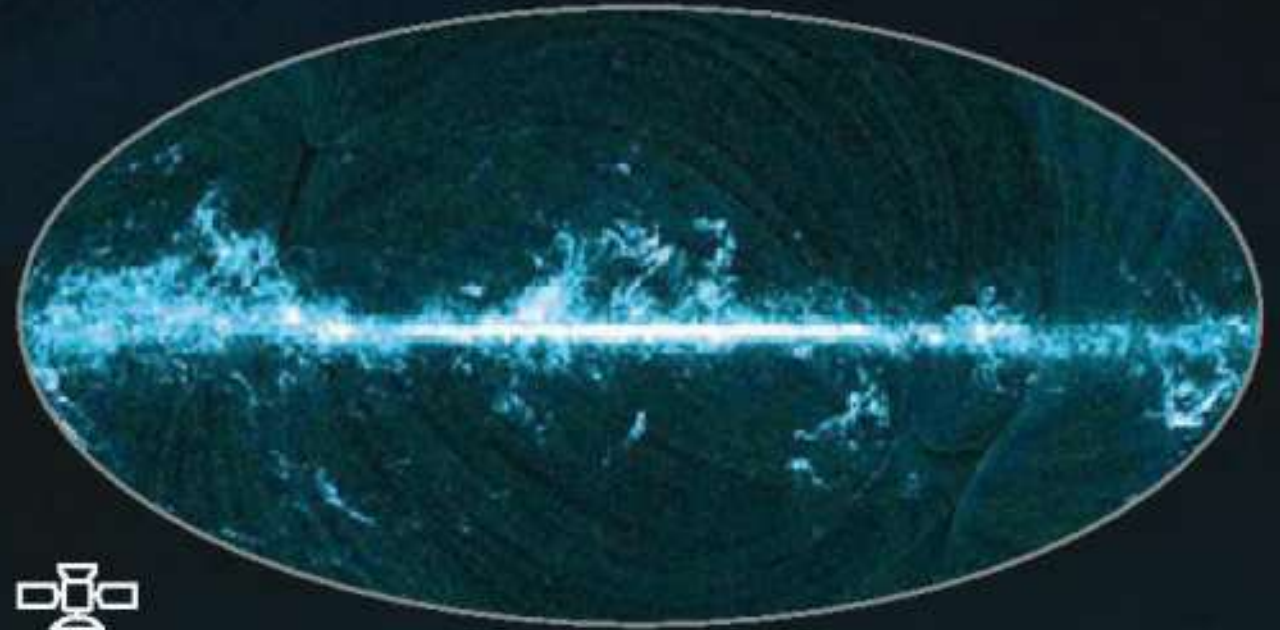


Tylko część promieniowania elektromagnetycznego dociera do powierzchni Ziemi, reszta jest pochłaniana i rozpraszana przez atmosferę. Aby więc uzyskać pełny obraz Wszechświata, teleskopy umieszcza się nie tylko na powierzchni planety, lecz także na satelitach w przestrzeni kosmicznej.



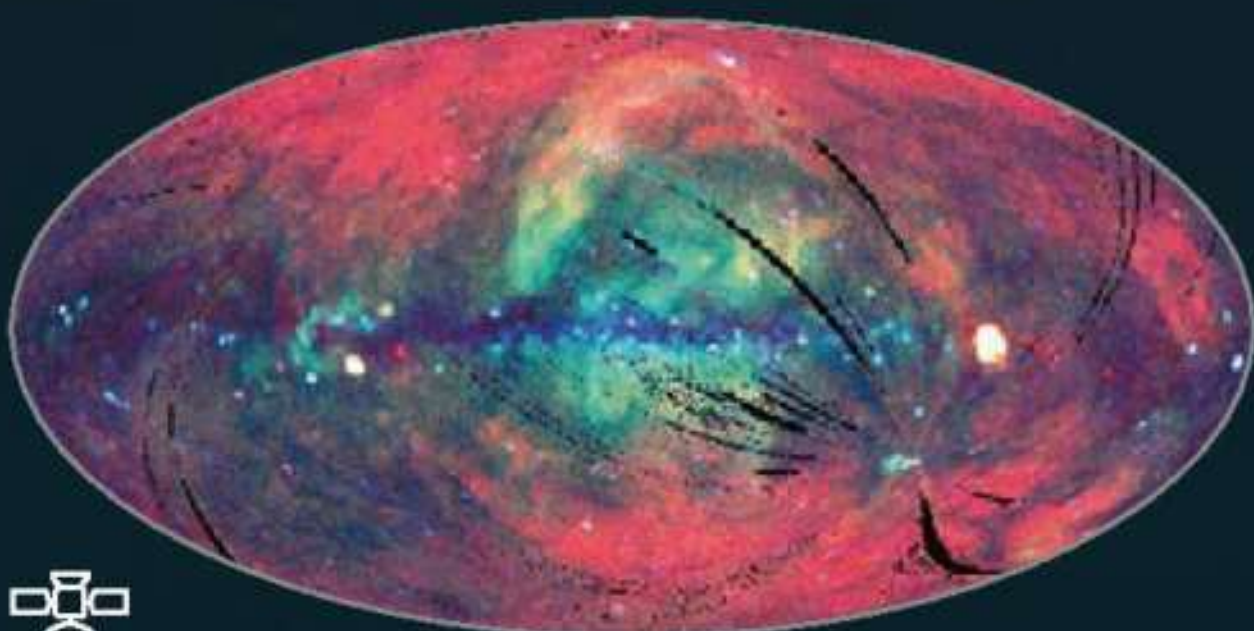
PROMIENIOWANIE RADIOWE 1420 MHz

Za pomocą obserwacji w tym zakresie uwidoczniono rozmieszczenie wodoru atomowego – najliczniejszego pierwiastka we Wszechświecie i głównego składnika gwiazd. Kolor czerwony wskazuje obszary, gdzie wodoru jest najwięcej. Na tej mapie nie widać gwiazd, a jedynie obłoki gazu rozciągające się wzdłuż płaszczyzny Galaktyki.



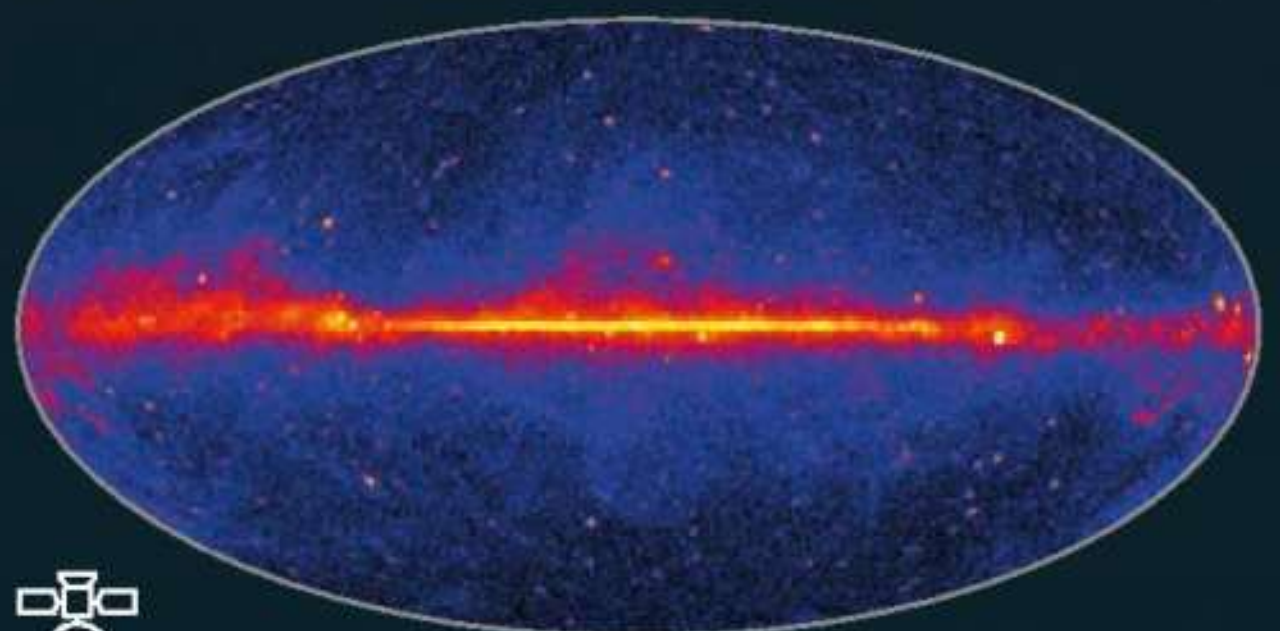
PROMIENIOWANIE MIKROFALOWE

Badania w zakresie mikrofali o częstotliwości 115 GHz pokazują rozmieszczenie chłodniejszego wodoru cząsteczkowego, czyli obszarów, w których rodzą się gwiazdy.



PROMIENIOWANIE RENTGENOWSKIE

W tym zakresie promieniowania są dobrze widoczne pozostałości po wybuchach supernowych i niektóre układy podwójne gwiazd. Kolor czerwony wskazuje obszary stosunkowo chłodne (o temperaturze ok. 100 tys. K). Kolorem białym wyróżniono miejsca, gdzie temperatura przekracza 20 mln K.



PROMIENIOWANIE GAMMA

Detekcja promieniowania gamma pozwala obserwować jego silne źródła, m.in. pulsary, aktywne jądra galaktyk oraz pozostałości po supernowych.

18.7 Polaryzacja



Ważne w tej lekcji:

- kierunek polaryzacji,
- działanie polaryzatorów liniowych,
- amplituda a natężenie światła.

Przypomnij sobie:

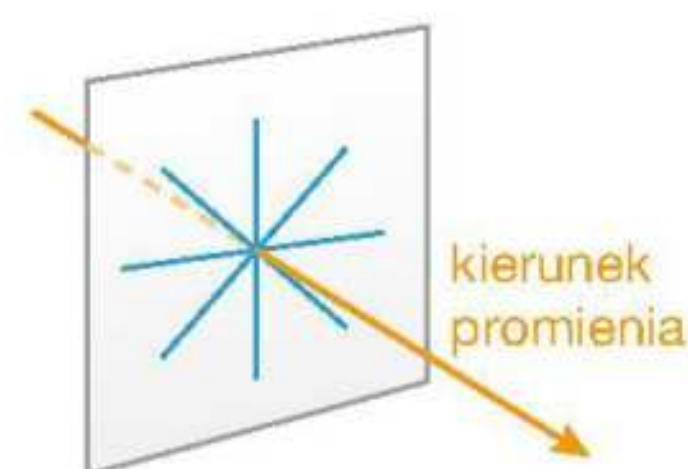
- Światło jest falą elektromagnetyczną.
- Fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi.
- Natężenie fali to energia docierająca do 1 m^2 powierzchni prostopadłej do kierunku fali w czasie 1 s.

Polaryzacja światła

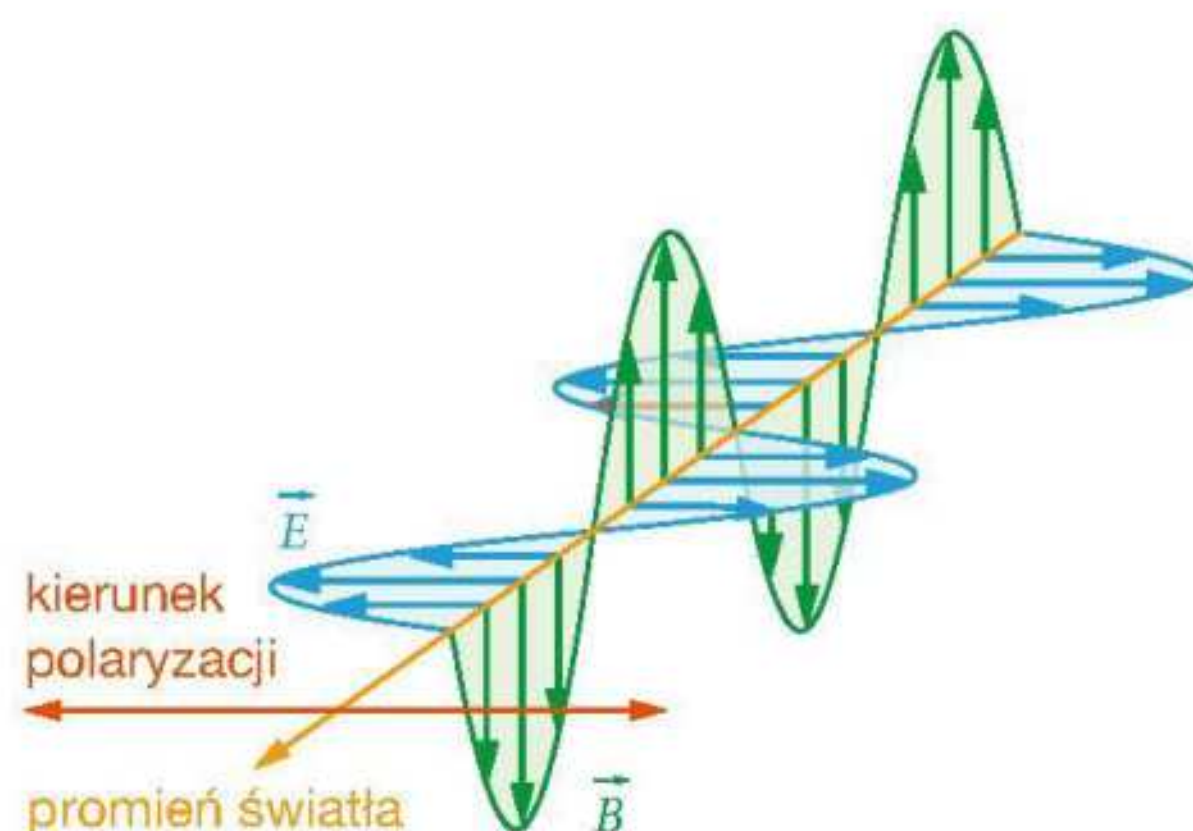
Jak wiesz, światło jest falą elektromagnetyczną, a więc zgodnie z tym, co powiedzieliśmy na poprzedniej lekcji, jest falą poprzeczną – drgania wektora $\vec{E}$ następują prostopadle do kierunku rozchodzenia się fali. Jednak kierunków prostopadłych do promienia światła jest nieskończenie wiele (rys. 18.36). Wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ może być skierowany wzdłuż dowolnego z nich. Co więcej, jego kierunek może się zmieniać w czasie.

Jeśli w fali elektromagnetycznej pole elektryczne drga tylko w jednym określonym kierunku, to mówimy, że fala jest spolaryzowana liniowo.

W tej sytuacji także pole magnetyczne drga tylko w jednym kierunku, ponieważ jest ono prostopadłe do kierunku pola elektrycznego. Przyjęło się jednak, że za kierunek polaryzacji przyjmujemy kierunek drgań wektora $\vec{E}$ (rys. 18.37 na następnej stronie).



Rys. 18.36. Kierunków prostopadłych do promienia światła jest nieskończenie wiele



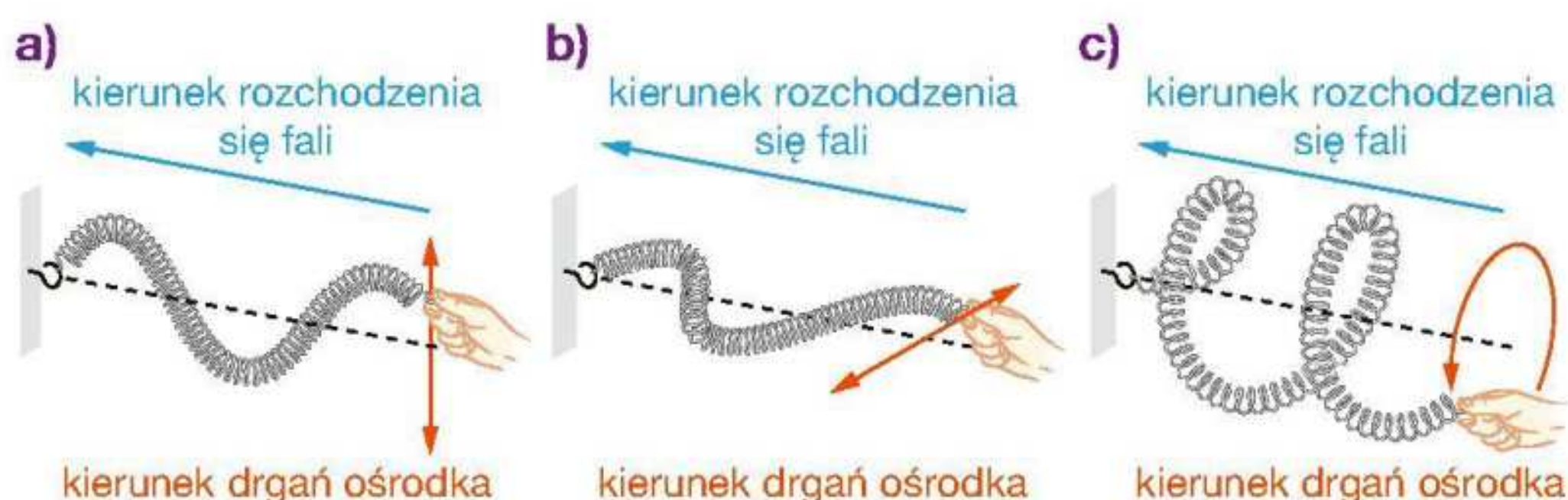
Rys. 18.37. Kierunek polaryzacji światła to kierunek drgań wektora natężenia pola elektrycznego

■ Mechaniczny model polaryzacji światła

Polaryzację łatwo wyjaśnić na przykładzie fali poprzecznej rozchodzącej się na sprężynie (rys. 18.38 a i b). Kierunek drgań sprężyny to właśnie kierunek polaryzacji takiej fali.

Istnieje też inna możliwość wytwarzania takiej fali. Zamiast poruszać dłonią tylko w jednym kierunku, możemy nią kręcić, a wtedy na sprężynie rozchodzi się fala spolaryzowana kołowo. Światło także może być spolaryzowane kołowo – wtedy w danym miejscu wektor $\vec{E}$ obraca się, zamiast drgać.

Dalej będziemy jednak mówili tylko o polaryzacji liniowej.

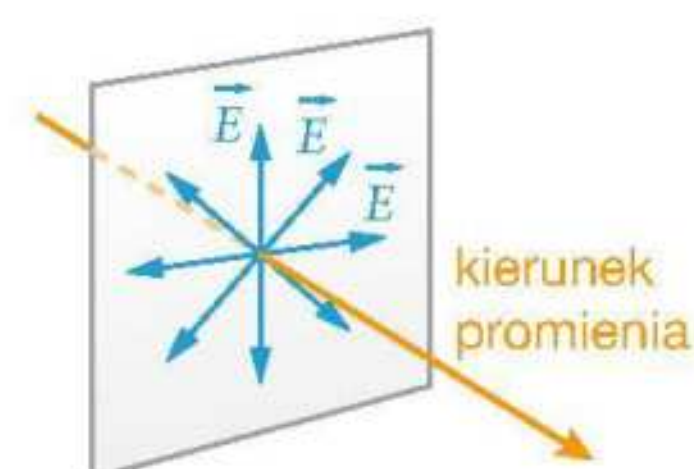


Rys. 18.38. Polaryzacja fali poprzecznej na sprężynie: a) i b) dwie różne polaryzacje liniowe, c) polaryzacja kołowa

■ Światło niespolaryzowane

Światło na ogół nie jest spolaryzowane (rys. 18.39). Oznacza to, że jest ono mieszaniną wielu fal o różnych, przypadkowych kierunkach wektora natężenia pola elektrycznego.

Łatwo to zrozumieć, ponieważ światło zwykle składa się z zwykle fal wytwarzanych niezależnie od siebie przez różne atomy. W przypadku światła słonecznego te atomy może dzielić odległość setek tysięcy kilometrów.

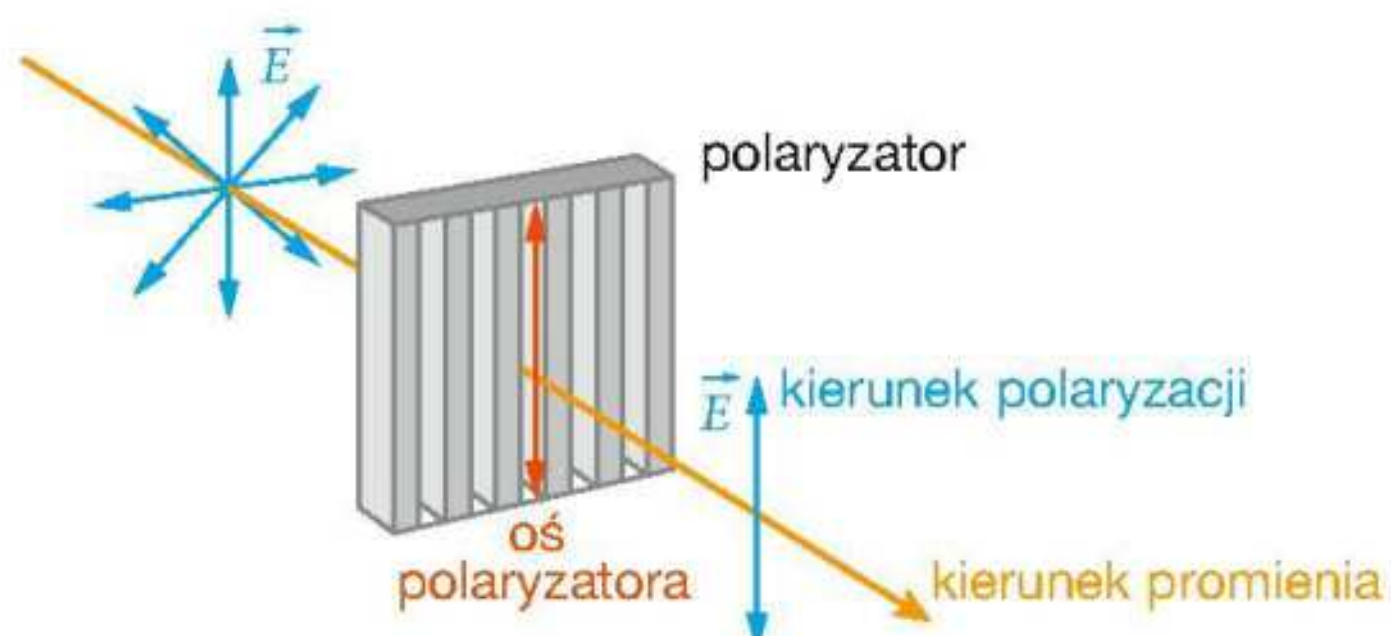


Rys. 18.39. Schematyczne przedstawienie światła niespolaryzowanego składającego się z fal o różnej polaryzacji

Istnieją także polaryzatory kołowe, nimi jednak nie będziemy się zajmować.

Filtry polaryzacyjne (polaryzatory)

Niektóre substancje mają tę właściwość, że przepuszczają tylko światło o wektorach pola elektrycznego drgających w jednym kierunku. Z takich materiałów można wytwarzać **filtry polaryzacyjne**, czyli **polaryzatory**. Po przejściu przez nie światło staje się spolaryzowane (rys. 18.40).



Rys. 18.40. Schemat działania filtra polaryzacyjnego (polaryzatora)

Badanie światła spolaryzowanego

Za pomocą polaryzatorów zbadamy teraz niektóre właściwości światła spolaryzowanego.

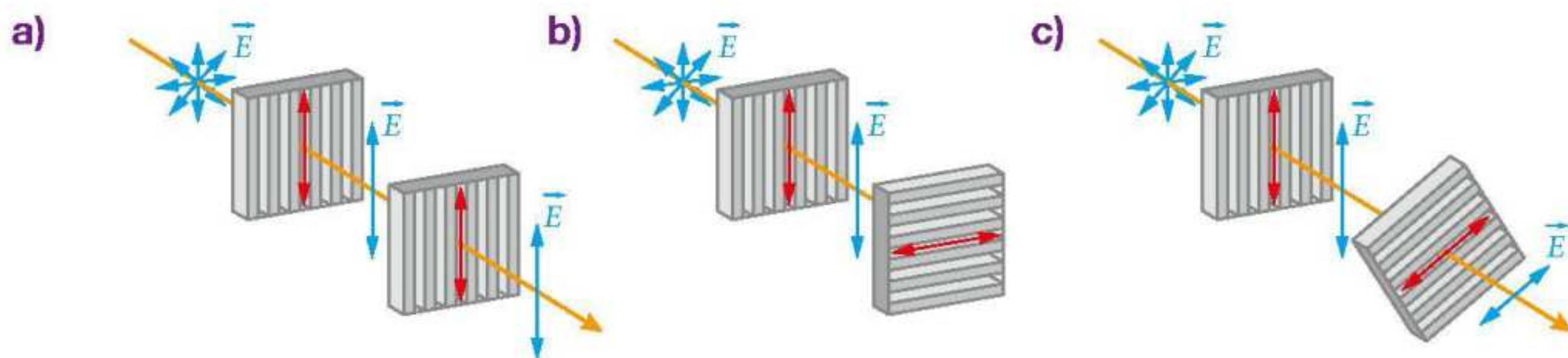


Doświadczenie 8 – obowiązkowe

Obserwacja zmiany natężenia światła po przejściu przez dwa polaryzatory

1. Przygotuj dwa polaryzatory. Możesz kupić folię polaryzacyjną w sklepie internetowym albo delikatnie zdjąć ją z wyświetlacza zepsutego kalkulatora lub zegarka cyfrowego. Możesz także używać okularów polaryzacyjnych (nie musisz ich demontować).
2. Weź polaryzatory, trzymaj jeden za drugim i popatrz przez nie w stronę jasnego nieba albo lampy. Obracaj jeden z polaryzatorów. Co widzisz?

W doświadczeniu mogliśmy zaobserwować, że gdy ustawimy dwa polaryzatory jeden za drugim, od ich wzajemnego położenia zależy, czy światło przechodzi przez taki układ. Dlaczego tak jest? Aby to wyjaśnić, skorzystamy z rysunku 18.41.



Rys. 18.41. Przejście światła przez dwa polaryzatory: a) równoległe, b) prostopadłe, c) ustawione pod pewnym kątem ostrym

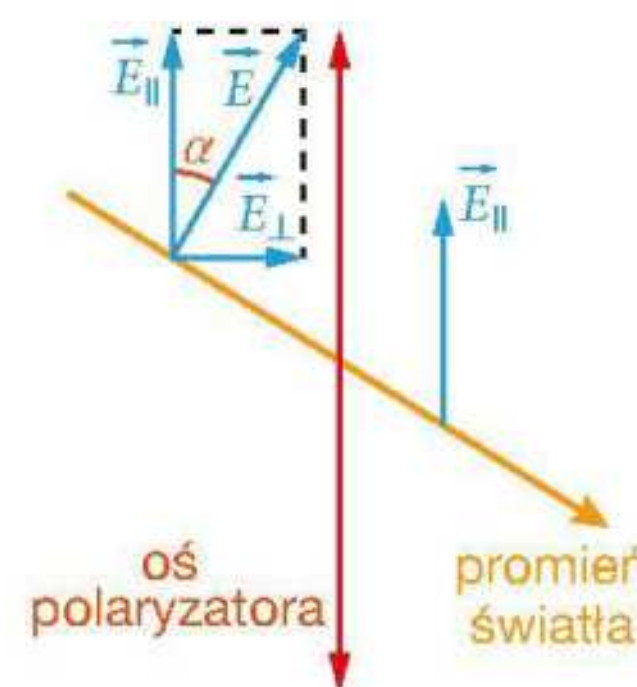
- Po przejściu przez pierwszy polaryzator światło jest już spolaryzowane, więc jeśli drugi polaryzator jest ustawiony tak samo jak pierwszy, światło przejdzie przez niego bez przeszkód (rys. 18.41a).
- Jeśli jednak drugi polaryzator jest obrócony o 90° w stosunku do pierwszego (rys. 18.41b), nie przepuści światła.
- W pozostałych ustawieniach, czyli gdy drugi polaryzator jest obrócony o kąt inny niż 90° (rys. 18.41c), przepuszcza on część światła.

■ Wyjaśnienie częściowego przepuszczania światła

Powiedzieliśmy, że polaryzator przepuszcza tylko światło o jednej polaryzacji. **Nie oznacza** to jednak, że całkowicie blokuje światło spolaryzowane choćby trochę inaczej. Przeciwnie, w doświadczeniu widzieliśmy, że między ustawieniem równoległym a prostopadłym natężenie światła przepuszczonego zmniejszało się stopniowo.

Aby to wyjaśnić, musimy się odwołać do opisu polaryzacji światła za pomocą wektorów natężenia pola elektrycznego (rys. 18.42).

Wektor $\vec{E}$ fali świetlnej możemy rozłożyć na składowe: równoległą do osi polaryzatora $\vec{E}_{\parallel}$ oraz prostopadłą do tej osi $\vec{E}_{\perp}$. Polaryzator przepuszcza składową równoległą, a pochłania prostopadłą.



Rys. 18.42. Polaryzator przepuszcza tylko jedną ze składowych wektora $\vec{E}$ padającego światła

Im większy kąt α między kierunkiem polaryzacji światła padającego a osią polaryzatora, tym mniejsza część światła przechodzi przez polaryzator. Ilościowo opiszemy tę zależność w dalszej części lekcji.



Przypomnij sobie

NATĘŻENIE FALI

Natężenie fali opisuje, jaka energia fali dociera do określonego miejsca w jednostce czasu (jest to oczywiście tylko część energii emitowanej przez źródło).

Ściślej mówiąc, jest ono liczbowo równe energii docierającej w ciągu 1 s do powierzchni 1 m^2 prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali.

Obliczamy je ze wzoru:



$$I = \frac{E}{tS}$$

natężenie fali

energia docierająca do danej powierzchni

czas, w którym fala przechodzi przez powierzchnię S

powierzchnia prostopadła do kierunku rozchodzenia się fali

Zgodnie z tym wzorem jednostką natężenia światła jest $\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

■ Zaskakujące doświadczenie z trzema polaryzatorami

Jeśli przyzwyczaiłeś się, że dołożenie do układu kolejnego polaryzatora zmniejsza natężenie światła, wynik kolejnego eksperymentu może cię zaskoczyć.



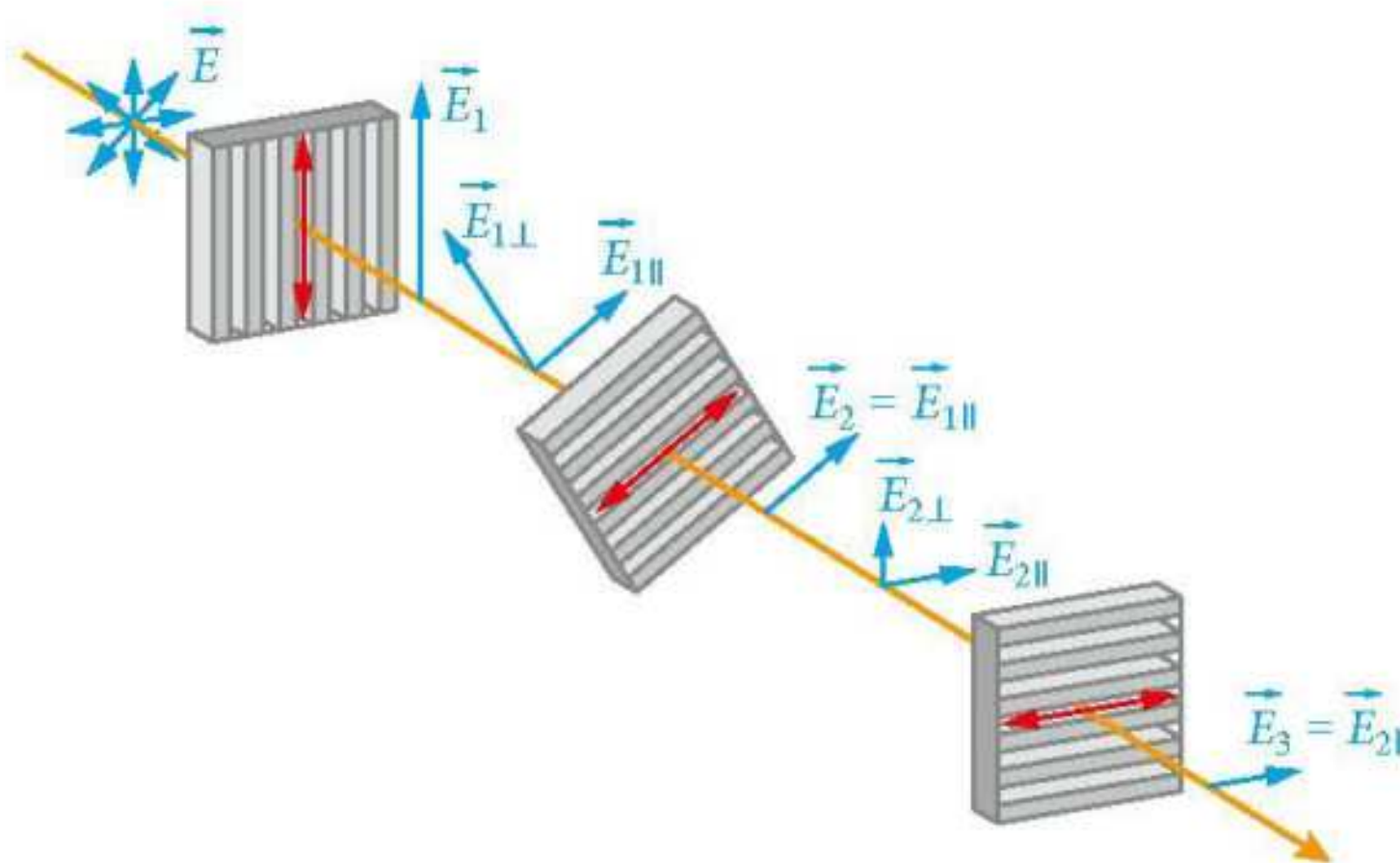
Doświadczenie 9

1. Przygotuj trzy polaryzatory liniowe.
2. Ustaw dwa z nich tak, aby nic nie było przez nie widać.
3. Wsuń pomiędzy nie dodatkowy polaryzator obrócony pod kątem ok. 45° względem pozostałych. Ponownie spójrz przez polaryzatory na lampę. Czy coś się zmieniło?

Po dodaniu nowego polaryzatora obraz się rozjaśnił. Aby to zrozumieć, ponownie odwołamy się do rozkładu wektora $\vec{E}$ na składowe (rys. 18.43).

- Na pierwszy polaryzator padało światło niespolaryzowane.
- Światło po przejściu przez pierwszy polaryzator było spolaryzowane równoległe do jego osi. W pewnej chwili wektor natężenia pola elektrycznego jest równy $\vec{E}_1$.
- Ten wektor możemy rozłożyć na składową równoległą i prostopadłą do drugiego polaryzatora:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{1\perp} + \vec{E}_{1\parallel}$$



Rys. 18.43. Przejście światła przez trzy polaryzatory

- Drugi polaryzator przepuszcza tylko składową $\vec{E}_{1\parallel}$. Oznaczamy ją krótko $\vec{E}_2$ i rozkładamy na składowe równoległą i prostopadłą do trzeciego polaryzatora:

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{2\perp} + \vec{E}_{2\parallel}$$

- Trzeci polaryzator nie zablokował całego padającego światła, ale przepuścił jego część odpowiadającą wektorowi $\vec{E}_{2\parallel}$.

■ Natężenie światła a wektor $\vec{E}$

W doświadczeniu 8. obserwowaliśmy, jak zmienia się natężenie światła podczas obracania jednego z polaryzatorów, przez który przechodziło światło. Jak opisać te zmiany ilościowo?

Aby to zrobić, przypomnijmy fakty dotyczące drgań oraz fal mechanicznych:

- energia ruchu harmonicznego jest proporcjonalna do kwadratu amplitudy drgań,
- natężenie fali mechanicznej jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy drgań ośrodka w danym miejscu.

Okazuje się, że dla fal elektromagnetycznych zasada jest analogiczna:

Natężenie fali elektromagnetycznej jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy zmian natężenia pola elektrycznego.

Zależność natężenia fali od amplitudy, podręcznik cz. 2
→ s. 299

■ Zmiana natężenia światła przy przejściu przez polaryzator

Rozważmy teraz dwa polaryzatory, których osie są ustawione względem siebie pod kątem α (rys. 18.44).

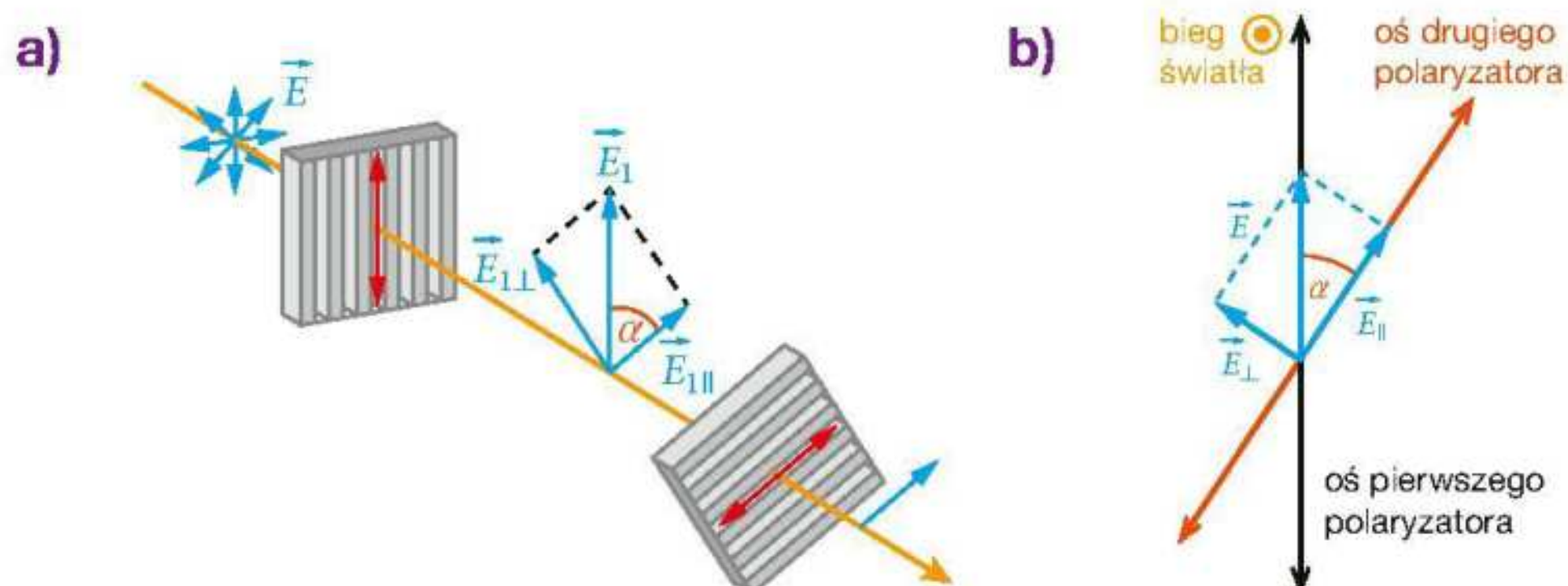
- Po przejściu przez pierwszy z nich światło jest spolaryzowane.
- Wektor pola elektrycznego w takim świetle jest skierowany zgodnie z osią pierwszego polaryzatora, czyli pod kątem α względem osi drugiego polaryzatora.

Jak wiesz, wektor $\vec{E}$ możemy rozłożyć na składowe równoległą i prostopadłą do osi drugiego polaryzatora. Wektor ten zmienia się w czasie, ale tak samo możemy rozłożyć wektor $\vec{E}$ w chwili, gdy przyjmuje największą wartość, czyli amplitudę zmian pola elektrycznego $\vec{E}_{\max}$. Składowa równoległa ma wartość:

$$E_{\max\parallel} = E_{\parallel} \cos \alpha$$

Ponieważ natężenie światła jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy pola elektrycznego, więc natężenie światła I po przejściu przez drugi polaryzator zmniejszy się do:

$$I' = I \cos^2 \alpha$$



Rys. 18.44. Polaryzacja światła dla polaryzatorów ustawionych pod kątem: a) rysunek przestrzenny, b) rysunek w płaszczyźnie prostopadłej do promienia światła



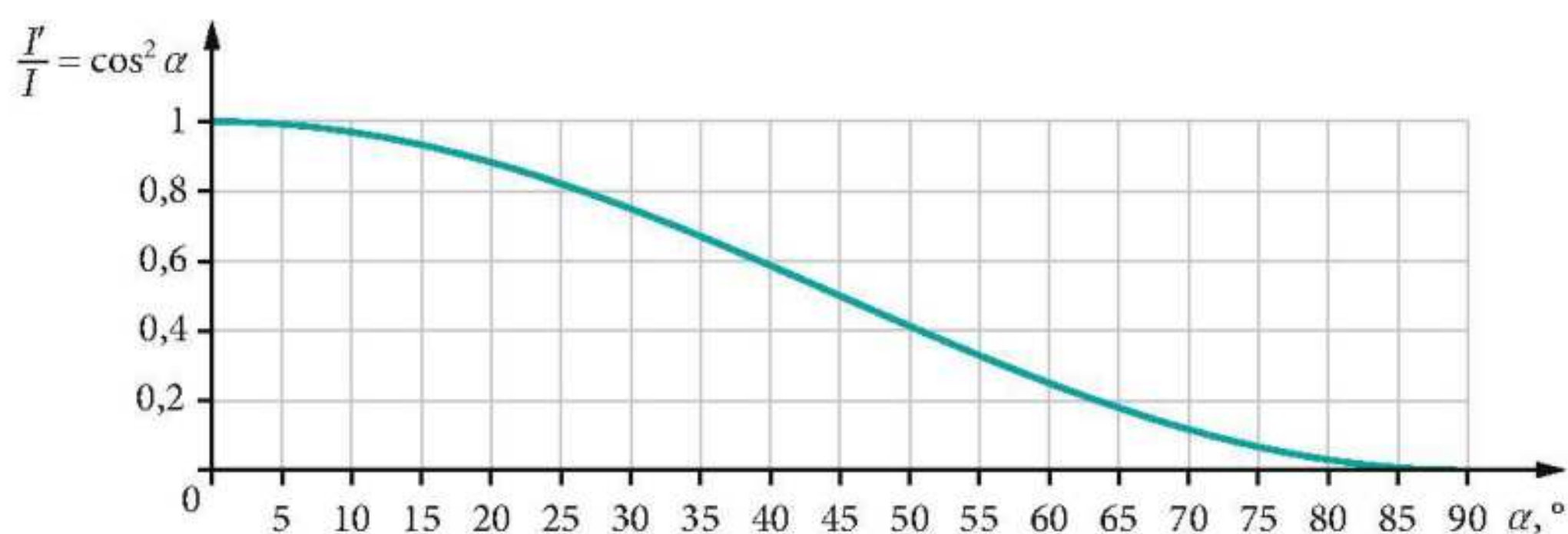
A to ciekawe

Niektóre ptaki, owady i inne zwierzęta widzą kierunek polaryzacji. Dzięki temu nawet w mocno zachmurzony dzień mogą ocenić, gdzie znajduje się słońce, co pomaga im orientować się w terenie. Zauważono, że pszczoły, które znalazły miejsce obfitujące w nektar, za pomocą specjalnego tańca przekazują swoim towarzyszkom informację o tym, pod jakim kątem względem kierunku do słońca należy lecieć, aby znaleźć pożywienie. Kąt między kierunkiem tańca a pionem jest równy kątowi między kierunkiem lotu do pokarmu a kierunkiem do słońca. Biologowie wykazali doświadczalnie, że lotem pszczół można sterować, jeśli na drodze oświetlającego je światła ustawi się filtry polaryzacyjne.

Wnioski ze wzoru

Zauważ, że:

- dla $\alpha = 0^\circ$ całe światło przechodzi przez polaryzator ($\cos 0^\circ = 1$, więc $I' = I$),
 - dla kątów α rosnących od 0° do 90° przechodzi coraz mniejsza część światła (patrz wykres funkcji $\cos^2 \alpha$ na rys. 18.45),
 - dla $\alpha = 90^\circ$ światło nie przechodzi wcale ($\cos 90^\circ = 0$),
- tak jak obserwowaliśmy w doświadczeniu.



Rys. 18.45. Część natężenia światła pozostająca po przejściu przez drugi polaryzator

Ekrany LCD

Ważnym praktycznym zastosowaniem polaryzatorów są ekrany ciekłokrystaliczne (LCD – *liquid crystal display*), powszechnie używane w telefonach, komputerach i telewizorach.

Ich działanie wyjaśnia infografika na s. 60–61.

F Polaryzacja przy odbiciu

Istnieje także inna metoda otrzymywania światła spolaryzowanego: polaryzacja przy odbiciu. Zbadamy ją doświadczalnie. Polaryzator posłuży nam jedynie do badania tego zjawiska.

Doświadczenie 10

1. Przygotuj lampkę biurkową, polaryzator oraz gładką powierzchnię (mogą to być: szyba, blat biurka, panele podłogowe lub okładka tego podręcznika).
2. Skieruj światło lampki na gładką powierzchnię (jak na zdjęciu a).
3. Patrz na światło odbite, obracając polaryzator (zdjęcia b i c). Co obserwujesz?



W doświadczeniu mogliśmy zaobserwować, że światło odbite jest częściowo spolaryzowane w kierunku równoległym do płaszczyzny odbijającej światło.

W życiu codziennym najczęściej mamy do czynienia ze światłem odbitym od tafli wody albo śniegu. W takim przypadku płaszczyzna polaryzacji jest pozioma. Dlatego właśnie tak przydatne – zwłaszcza nad morzem czy podczas jazdy na nartach – są okulary z filtrem polaryzacyjnym. Ograniczają one natężenie światła odbitego od wody lub śniegu, dzięki czemu światło nas nie oślepia, a jednocześnie widzimy wyraźnie obiekty znajdujące się w cieniu, słabo widoczne po założeniu zwykłych okularów przeciwsłonecznych.

Również światło błękitnego nieba, czyli światło słoneczne rozproszone w atmosferze, jest spolaryzowane. Dlatego filtry polaryzacyjne wykorzystuje się w fotografii (rys. 18.46), np. w celu wzmocnienia kontrastu chmur na tle nieba. Mogą one też służyć do wygaszania niepotrzebnych refleksów światła (rys. 18.47).



Rys. 18.46. Zastosowanie filtra polaryzacyjnego



Rys. 18.47. Zdjęcie, w którym część jest wykonana bez filtra polaryzacyjnego (a), a część z filtrem polaryzacyjnym (b)

EKRAN LCD

Działanie ekranu ciekłokrystalicznego, czyli LCD (ang. *Liquid Crystal Display*), jest możliwe dzięki wykorzystaniu niezwykłych właściwości ciekłych kryształów. Poznaj je i dowiedz się, w jaki sposób na ekranach LCD powstaje obraz.

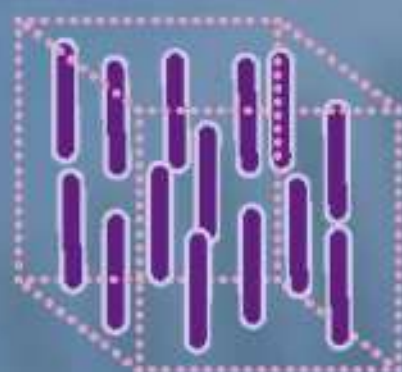
CIEKŁE KRYSZTAŁY

Ciekłe kryształy to substancje zbudowane z cząsteczek o kształcie pałeczek lub dysków, będące w fazie pośredniej między ciekłym a stałym – krystalicznym stanem skupienia. Ciekłe kryształy łączą charakterystyczną dla cieczy zdolność do przemieszczania się cząsteczek z uporządkowaną strukturą przestrzenną, typową dla kryształów.

WZROST TEMPERATURY



CIECZ



CIEKŁY
KRYSZTAŁ



KRYSZTAŁ

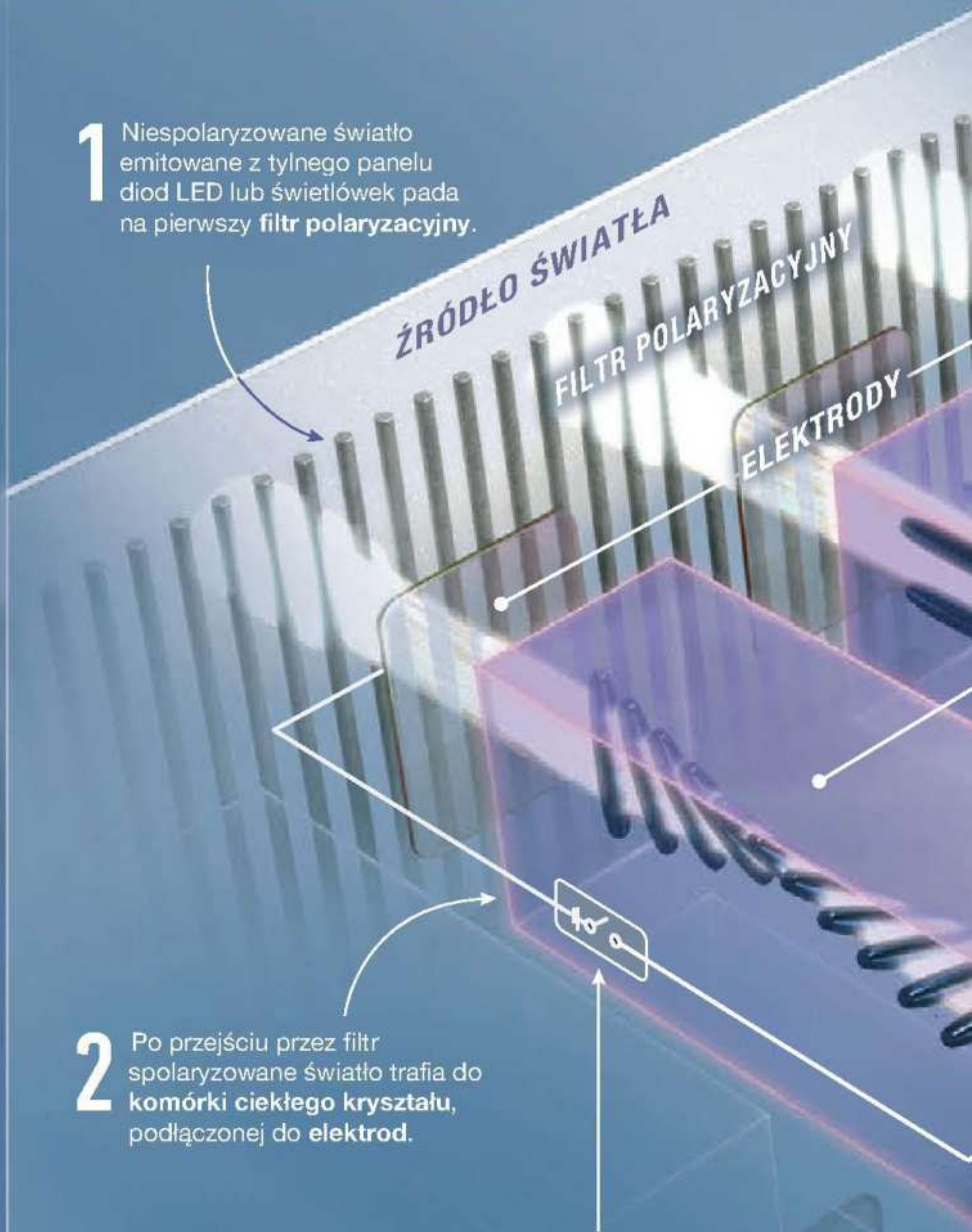
Ciekłe kryształy mają jeszcze jedną ciekawą właściwość: pod wpływem przyłożonego napięcia ich cząsteczki zmieniają swoją orientację w przestrzeni. Tę właśnie cechę wykorzystano w ekranach LCD.

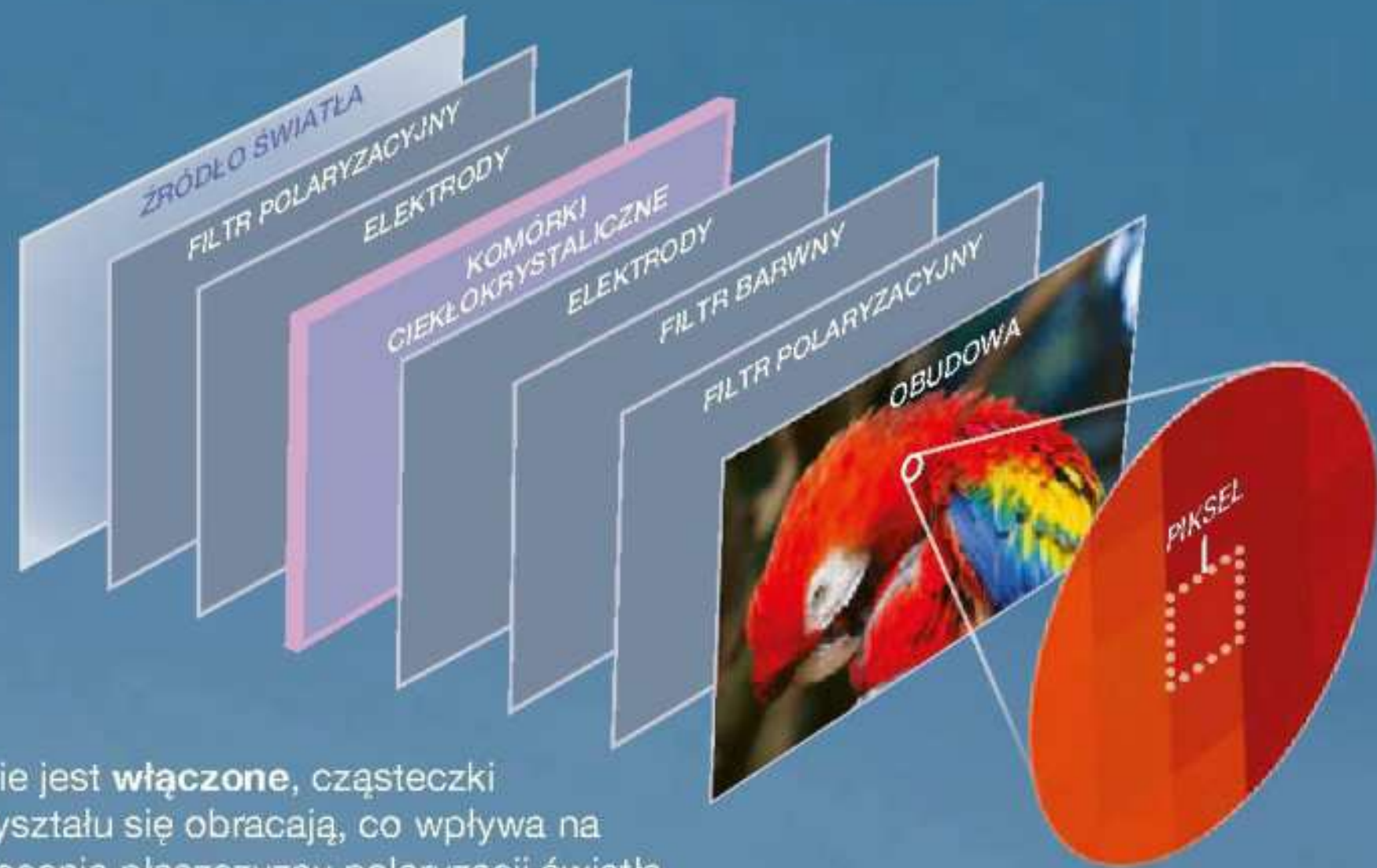
DZIAŁANIE KOMÓREK CIEKŁOKRYSTALICZNYCH W POJEDYNCZYM PIKSELU

1 Niespolaryzowane światło emitowane z tylnego panelu diod LED lub świetlówek pada na pierwszy **filtr polaryzacyjny**.

2 Po przejściu przez filtr spolaryzowane światło trafia do **komórki ciekłego kryształu**, podłączonej do **elektrod**.

3a Kiedy napięcie jest **wyłączone**, naturalny układ cząsteczek w komórce ciekłego kryształu sprawia, że płaszczyzna polaryzacji światła zostaje skreślona o 90°.



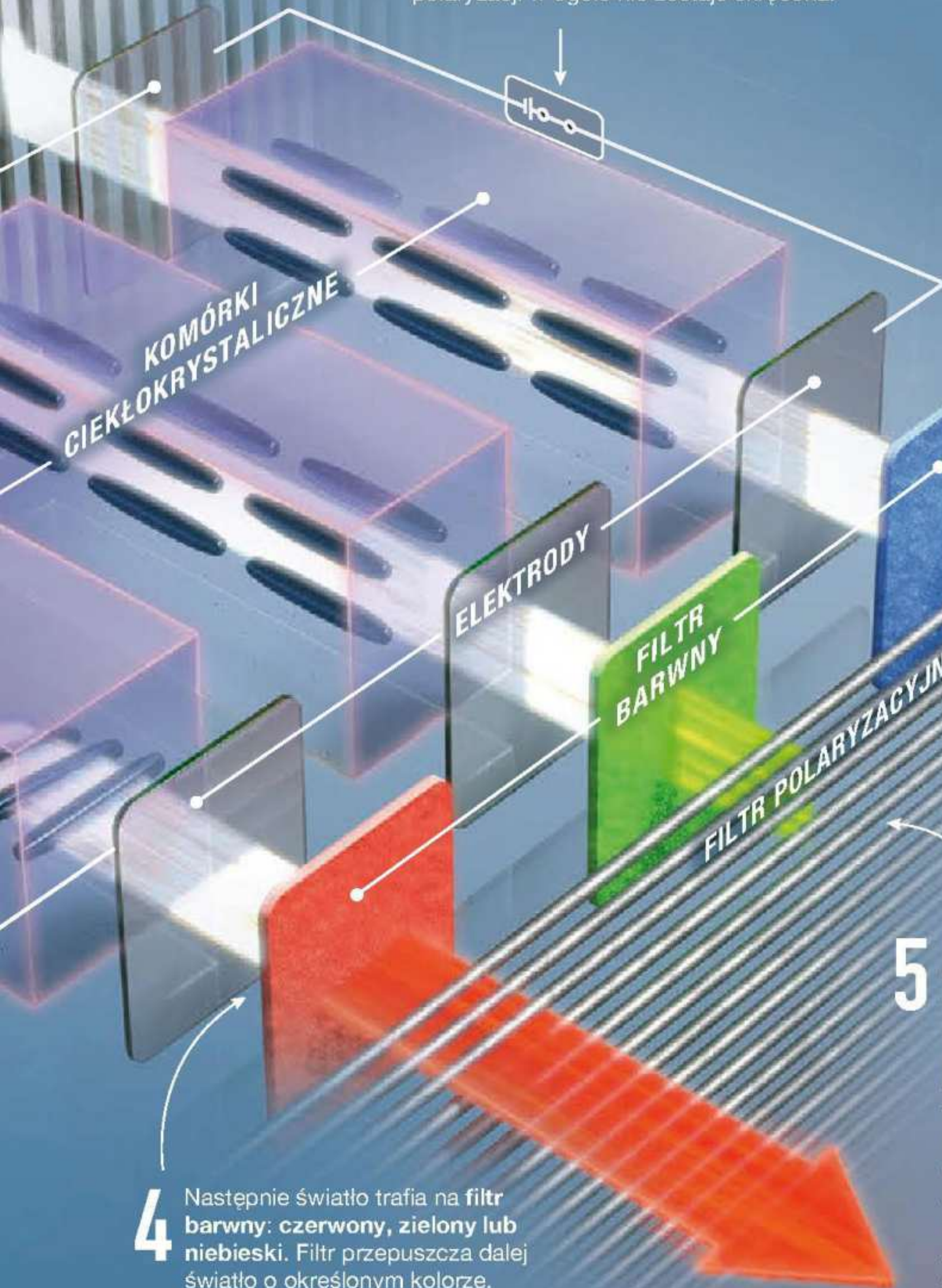


3b

Gdy napięcie jest **włączone**, cząsteczki ciekłego kryształu się obracają, co wpływa na stopień skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła. Im wyższe napięcie, tym mniejszy kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji. Jeżeli napięcie ma maksymalną możliwą wartość, to płaszczyzna polaryzacji w ogóle nie zostaje skręcona.

6

Za pomocą regulacji intensywności światła we wcześniejszych warstwach ekranu sterujemy natężeniem poszczególnych kolorów: czerwonego, zielonego i niebieskiego. Kolory te są wyświetlane na ekranie w postaci pikseli – najmniejszych elementów cyfrowego obrazu o określonej barwie. Na pojedynczy piksel składają się trzy **subpiksele**: czerwony, zielony i niebieski. Dzięki temu, że każdy z nich wyświetla swój kolor z różnym natężeniem, możemy uzyskać pełną paletę barw, które widzimy na ekranie.

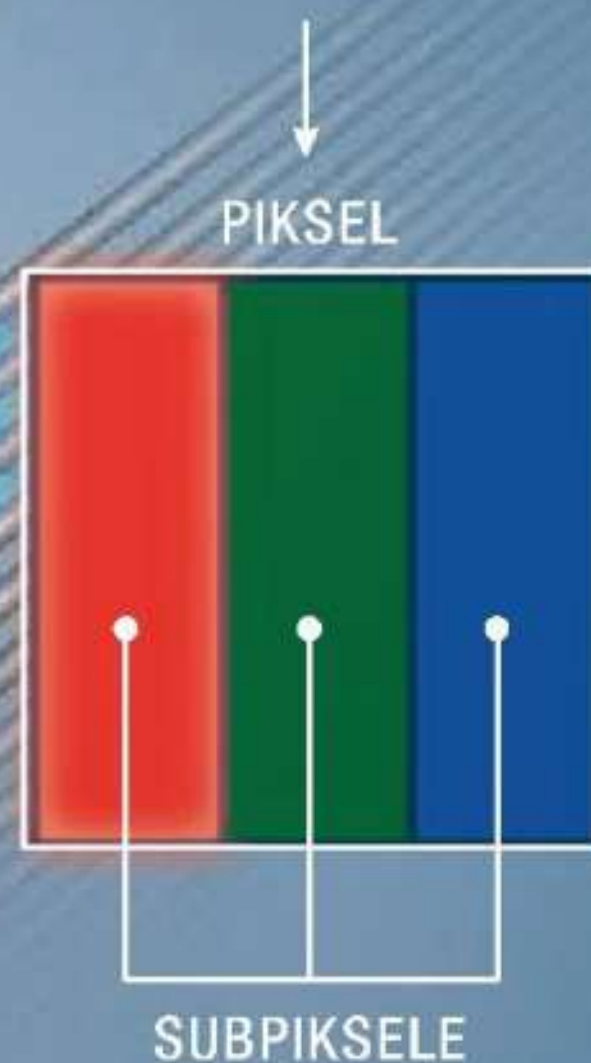


4

Następnie światło trafia na **filtr barwny: czerwony, zielony lub niebieski**. Filtr przepuszcza dalej światło o określonym kolorze.

5

Światło o danej barwie dociera do drugiego **filtra polaryzacyjnego**, który względem pierwszego jest ustawiony pod kątem 90° . W zależności od tego, pod jakim kątem została wcześniej skręcona płaszczyzna polaryzacji, filtr przepuści inną ilość światła. Jeśli płaszczyzna polaryzacji została skręcona o 90° , przez filtr przejdzie 100% światła. Jeśli kąt skręcenia był mniejszy, filtr przepuści proporcjonalnie mniej światła. A jeśli płaszczyzna polaryzacji nie została skręcona, światło nie przejdzie wcale.





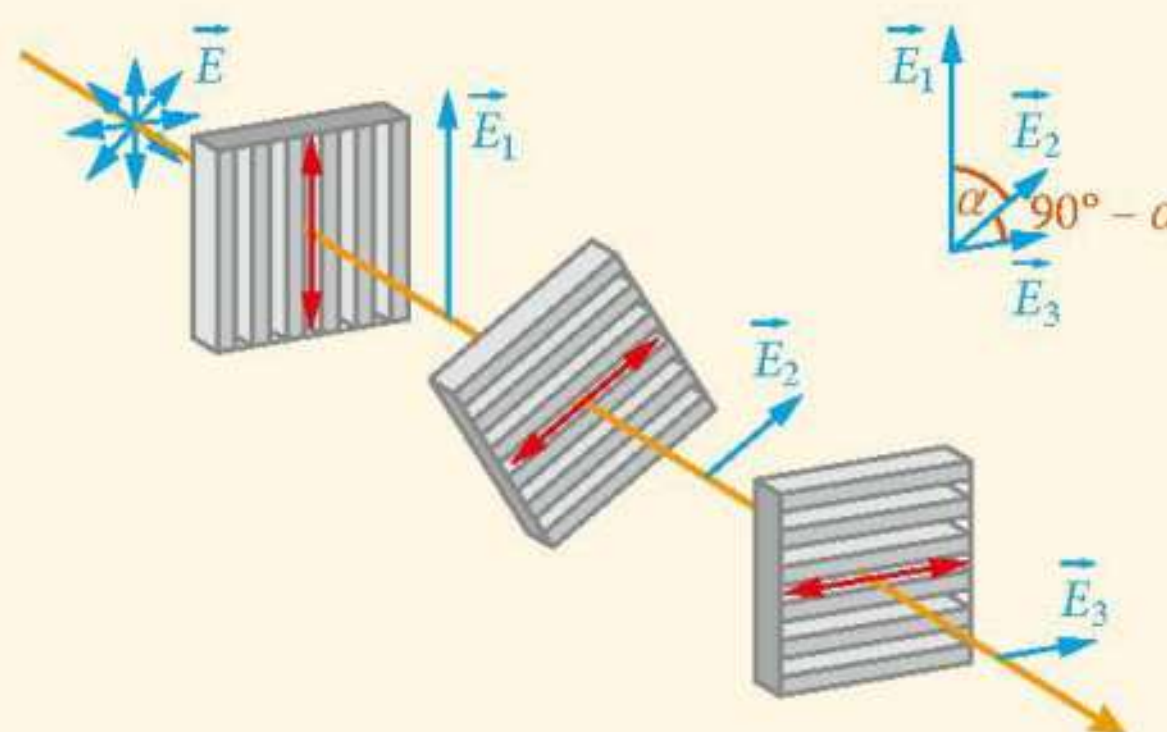
■ Przykład

Pomiędzy dwa polaryzatory o prostopadłych osiach wstawiono trzeci pod kątem α do pierwszego z nich. Uzasadnij, że natężenie światła po przejściu przez wszystkie trzy polaryzatory będzie największe dla kąta $\alpha = 45^\circ$.

Rozwiązanie:

Analizujemy sytuację

Zadanie dotyczy sytuacji z doświadczenia 9. Przypomnijmy więc jej szkic (teraz jednak nie zakładamy, że $\alpha = 45^\circ$).



Wyprowadzamy wzór na natężenie światła

Niech I_1 oznacza natężenie światła po przejściu przez pierwszy polaryzator. Ukośnie ustawiony polaryzator zmniejszy natężenie światła do:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha$$

Trzeci polaryzator jest ustawiony względem drugiego pod kątem $90^\circ - \alpha$, więc po przejściu przez niego natężenie światła zmniejszy się do:

$$I_3 = I_2 \cos^2 (90^\circ - \alpha) = I_1 \cos^2 \alpha \cos^2 (90^\circ - \alpha)$$

Dowodzimy tezę

Mamy udowodnić, że I_3 jest największe dla $\alpha = 45^\circ$. We wzorze na I_3 mamy jednak dwa czynniki, z których jeden maleje ze wzrostem kąta α , a drugi – rośnie. Skorzystamy więc z tożsamości trygonometrycznych.

Najpierw podstawiamy: $\cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha$ i otrzymujemy:

$$I_3 = I_1 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha$$

a następnie korzystamy z zależności $2 \cos \alpha \sin \alpha = \sin 2\alpha$:

$$I_3 = I_1 (\cos \alpha \sin \alpha)^2 = I_1 \left(\frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)^2 = \frac{1}{4} I_1 \sin^2 2\alpha$$

czyli:

$$I_3 = \frac{1}{4} I_1 \sin^2 2\alpha$$

To wyrażenie przyjmuje największą wartość wtedy, gdy sinus jest równy 1, czyli gdy argument funkcji sinus jest równy 90° . Tym argumentem jest jednak 2α , a więc:

$$2\alpha = 90^\circ \rightarrow \alpha = 45^\circ$$

czego należało dowieść.

1. Okulary polaryzacyjne mają wiele zalet, ale też jedną wadę: nie zawsze można w nich czytać z wyświetlaczy LCD, co może być potrzebne na przykład w czasie jazdy samochodem. Gdy jeden z autorów tej książki chce w okularach polaryzacyjnych odczytać podczas jazdy samochodem godzinę z zegara cyfrowego na tablicy rozdzielczej, musi przekrzywić głowę o 45° w prawo, kiedy natomiast chce odczytać wskazanie licznika kilometrów – w lewo. Określ płaszczyznę polaryzacji światła emitowanego przez wyświetlacze zegara i tablicy rozdzielczej w samochodzie, którym jeździ autor.

Wskazówka. Najpierw określ sposób ustawienia folii polaryzacyjnej w okularach.

2. **P** Spolaryzowane światło o natężeniu $10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ pada na polaryzator, którego oś jest ustawiona pod kątem 20° do kierunku polaryzacji padającego światła. Oblicz natężenie światła po przejściu przez polaryzator.
3. Na polaryzator pada niespolaryzowane światło o natężeniu I . Oblicz natężenie światła po przejściu przez polaryzator. W tym celu załóż, że światło niespolaryzowane to suma fal o jednakowym natężeniu i polaryzacji pod kątem $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, \dots, 90^\circ$ względem osi polaryzatora.

Wskazówka. Zaczynaj od udowodnienia tożsamości $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$.

4. Za pomocą filtra polaryzacyjnego zbadaj doświadczalnie, które z wymienionych niżej światel jest spolaryzowane:
 - a) światło ekranu laptopa,
 - b) światło żarówki,
 - c) światło odbite od białej kartki.

5. Wykonaj dwa doświadczenia, a następnie porównaj i wyjaśnij ich wyniki.

a) Sprawdź za pomocą polaryzatora, czy światło błękitnego nieba jest spolaryzowane, gdy na niebo patrzymy:

- niemal bezpośrednio w kierunku słońca (ale nie bezpośrednio na słońce!),
- mając słońce za plecami,
- stojąc bokiem do słońca.

b) Do szklanki z wodą wlej kilka kropel mleka i wymieszaj. Między latarką a szklanką umieść kartonik z otworem. Poświeć przez otwór latarką na szklankę i zbadaj, czy przechodzące przez roztwór światło jest spolaryzowane, gdy patrzymy na nie:

- na wprost, tzn. gdy świecimy latarką w swoją stronę,



- pod kątem 90° .



Projekt Zwierciadła wklęsłe i wypukłe

Cel projektu

Zbadasz właściwości i poznasz zastosowania zwierciadeł sferycznych. Poćwiczysz umiejętność wykonywania doświadczeń z optyki i utrwalisz podstawowe pojęcia z tej dziedziny.

Zadania doświadczalne



1. Przygotuj zwierciadło wklęsłe. Może to być np. lusterko powiększające do makijażu.
 - a) Ustal, w jakich warunkach tworzy ono obraz powiększony i czy jest to obraz rzeczywisty czy pozorny.
 - b) Ustal także, jaki obraz tworzy takie lusterko w innych sytuacjach.
2. Przygotuj zwierciadło wypukłe. Może to być lusterko zewnętrzne od samochodu albo roweru. Zbadaj, jakie obrazy tworzy takie zwierciadło.
3. Sprawdź, czy któryś z rodzajów badanych zwierciadeł pozwala skupić światło.

Zadania teoretyczne

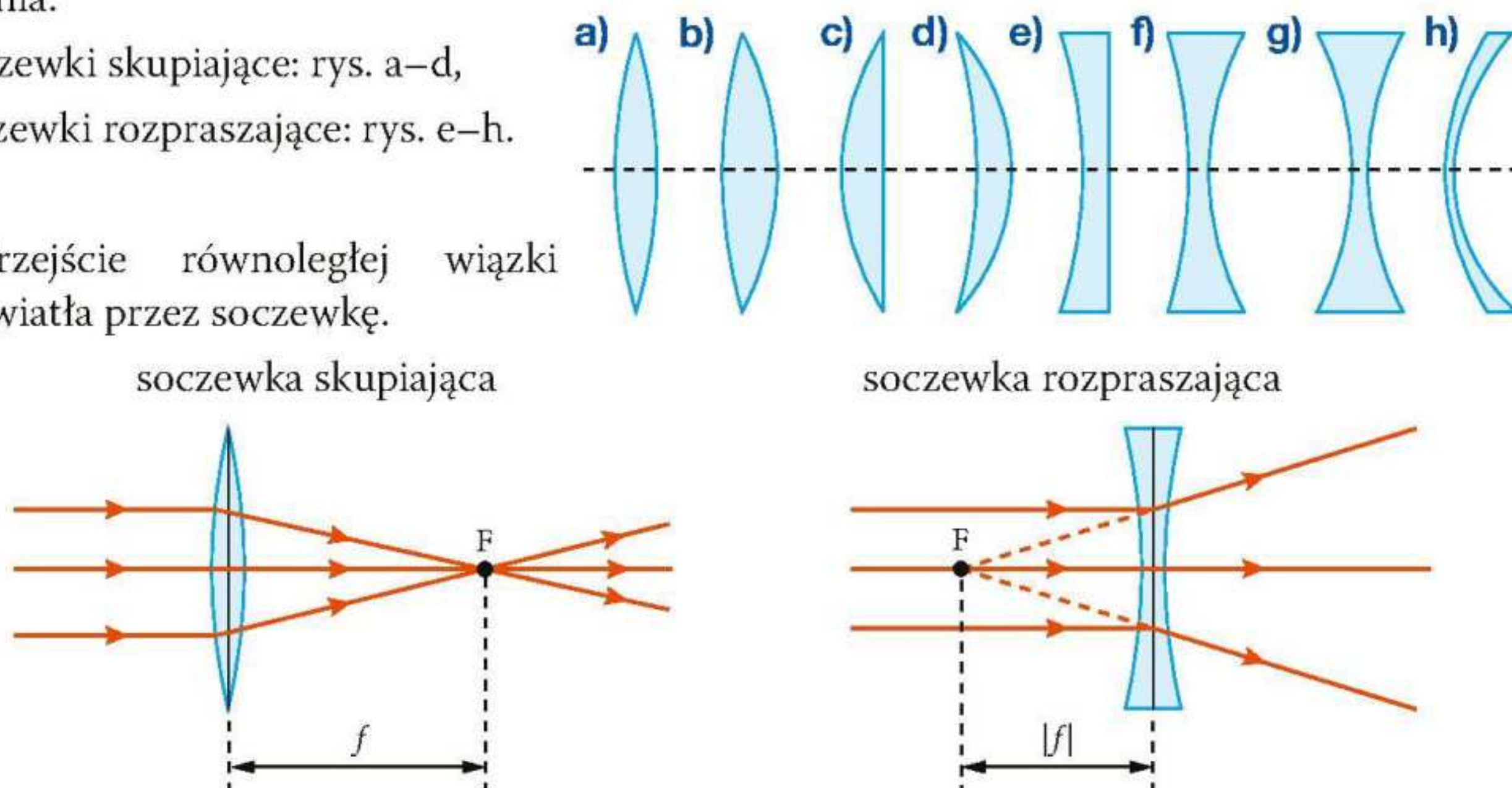
1. Podsumuj swoje ustalenia doświadczalne i na tej podstawie porównaj zwierciadła z soczewkami. Które ze zwierciadeł można porównać do soczewki skupiającej, a które do rozpraszającej?
2. Czasami na lusterku zewnętrznym samochodu znajduje się napis: „Obiekty w lusterku wydają się dalej, niż są w rzeczywistości”.
 - a) Z jakiej cechy obrazu tworzonego przez zwierciadło wypukłe wynika to złudzenie?
 - b) Jakie zagrożenie z niego wynika?
 - c) Dlaczego mimo tego zagrożenia w samochodach instaluje się takie lusterka?
3. Dowiedz się, jakie jeszcze są zastosowania zwierciadeł wklęsłych i wypukłych.
4. Dowiedz się, u jakich zwierząt obraz w oku tworzy się dzięki działaniu zwierciadła (a nie soczewki, jak u człowieka). Jakie to zwierciadło: płaskie, wklęsłe czy wypukłe?
5. Dowiedz się, czy któryś z tych rodzajów zwierciadeł ma swoje odpowiedniki dla innych rodzajów fal (np. dla mikrofali używanych w telekomunikacji, dla dźwięku).

Podsumowanie Optyka

- **Soczewka** działa dzięki dwukrotnemu załamaniu światła: promień załamuje się zarówno przy przechodzeniu z otoczenia do soczewki, jak i przy przechodzeniu z soczewki do otoczenia.

Soczewki skupiające: rys. a–d,
soczewki rozpraszające: rys. e–h.

- Przejście równoległej wiązki światła przez soczewkę.



F – ognisko, f – ogniskowa

- Dla soczewki rozpraszającej przyjmujemy $f < 0$.
- Zdolność skupiająca soczewki to odwrotność jej ogniskowej:

$$Z = \frac{1}{f}$$

Jednostką zdolności skupiającej jest dioptria: $1 \text{ D} = \frac{1}{\text{m}}$.

Obrazy w soczewkach



- Obraz rzeczywisty możemy zobaczyć na ekranie lub gołym okiem. Powstaje on w miejscu, gdzie spotykają się promienie, które wyszły z tego samego punktu przedmiotu, a potem załamały się w soczewce.

► Obraz pozorny możemy zobaczyć tylko gołym okiem, a nie na ekranie. Widzimy go w miejscu, gdzie przecinają się przedłużenia promieni, które wyszły z tego samego punktu przedmiotu, a potem załamały się w soczewce.

► Obraz prosty to obraz, który nie jest odwrócony.

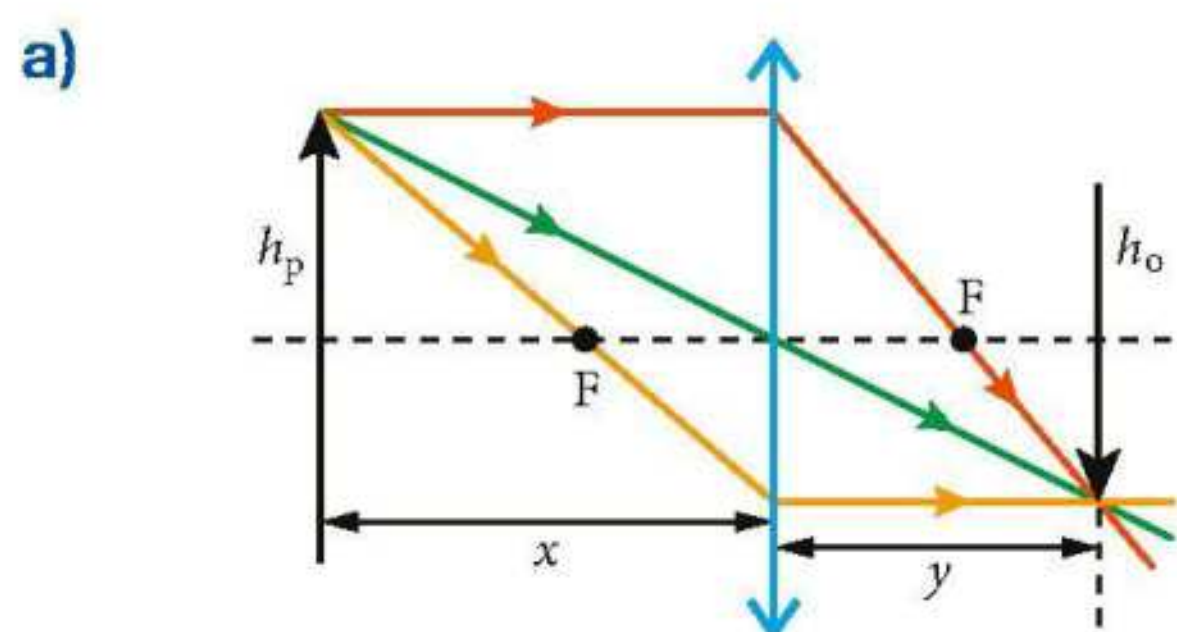
■ Równanie soczewki:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}$$

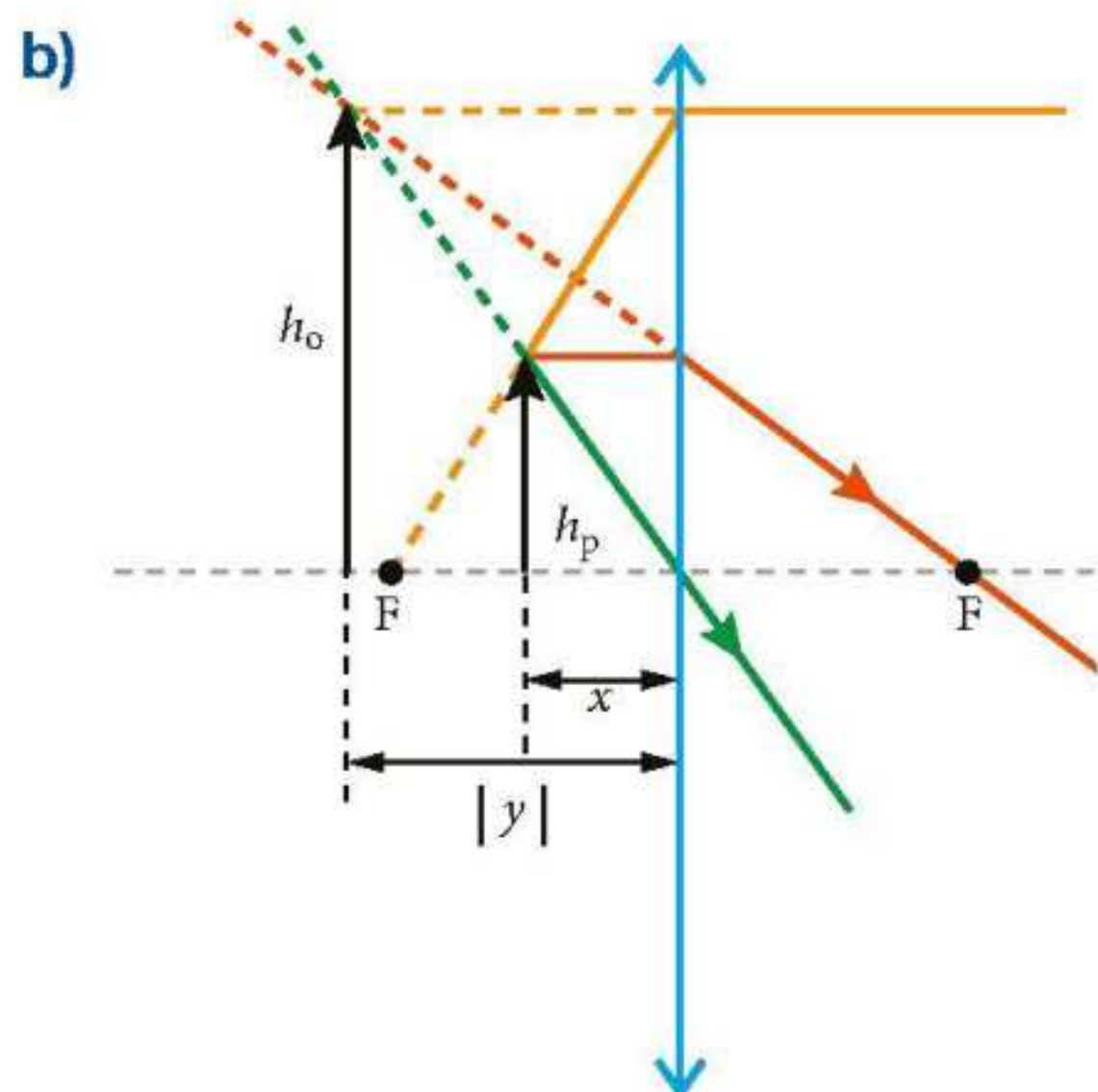
gdzie: x – odległość przedmiotu od soczewki, $|y|$ – odległość obrazu od soczewki, f – ogniskowa soczewki

► Dla obrazu rzeczywistego przyjmujemy $y > 0$, dla pozornego $y < 0$.

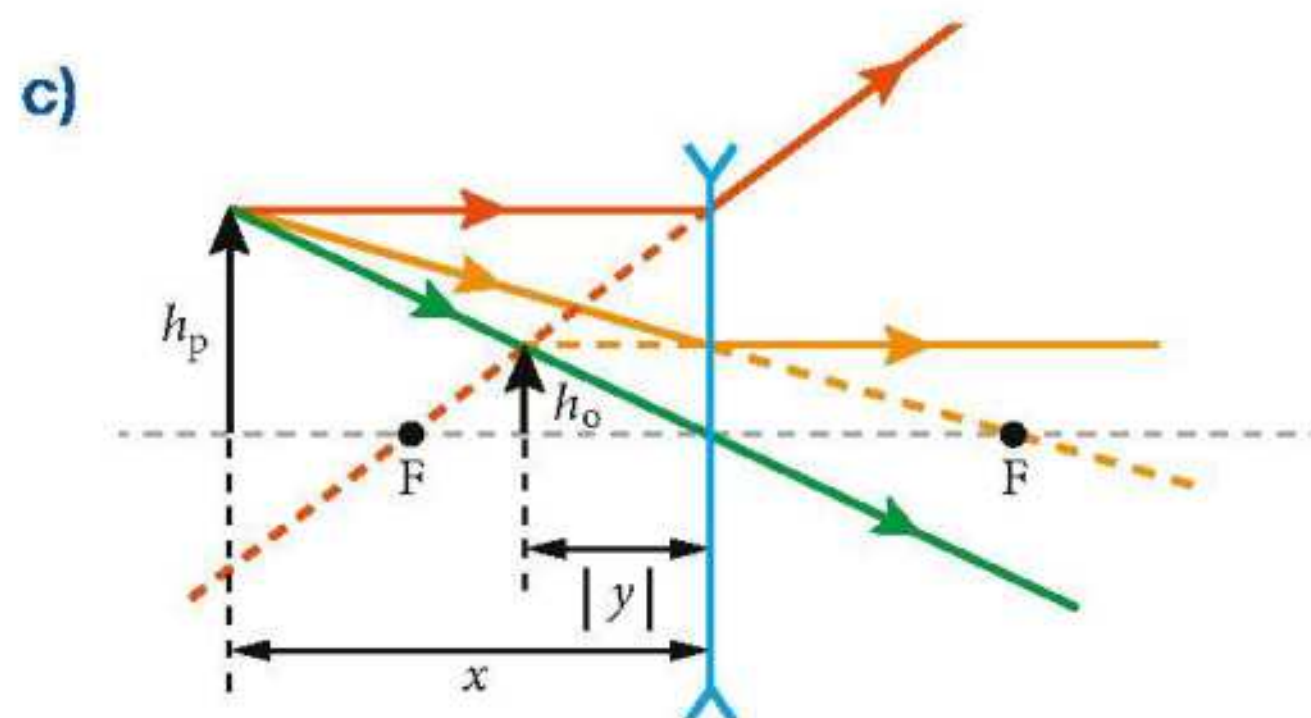
■ Konstrukcja obrazu dla: soczewki skupiającej (rys. a i b), soczewki rozpraszającej (rys. c).



1. Promień równoległy do osi optycznej po przejściu przez soczewkę przechodzi przez ognisko.
2. Promień przechodzący przez środek soczewki nie zmienia kierunku.
3. Promień przechodzący przez ognisko po przejściu przez soczewkę jest równoległy do osi optycznej.

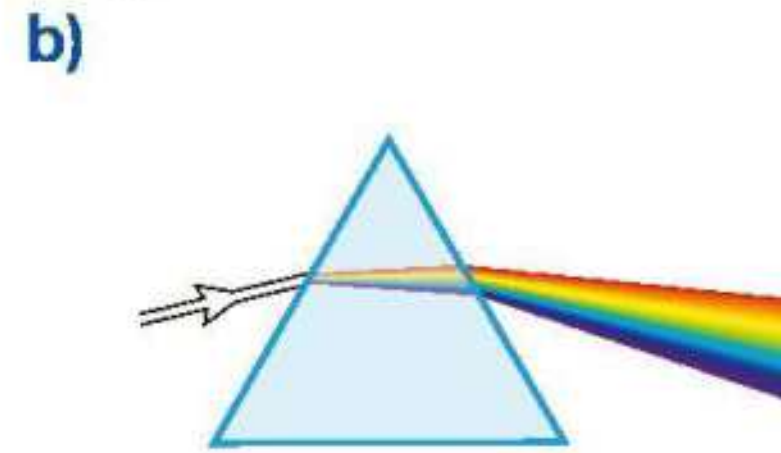
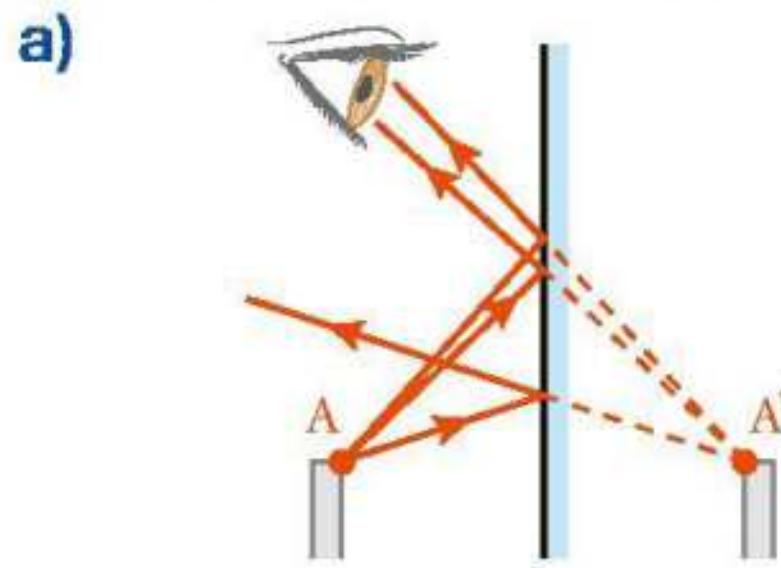


1. Promień równoległy do osi optycznej po przejściu przez soczewkę przechodzi przez ognisko.
2. Promień przechodzący przez środek soczewki nie zmienia kierunku.
3. Promień, którego przedłużenie wychodzi z ogniska, po przejściu przez soczewkę biegnie równoległe do osi optycznej.



1. Promień równoległy do osi optycznej po przejściu przez soczewkę biegnie tak, że jego przedłużenie przechodzi przez ognisko pozorne.
2. Promień przechodzący przez środek soczewki nie zmienia kierunku (a więc pokrywa się ze swoim przedłużeniem).
3. Promień biegnący w stronę ogniska (znajdującego się po przeciwnej stronie soczewki) po przejściu przez soczewkę jest równoległy do osi optycznej.

- **Zwierciadło płaskie** tworzy obraz pozorny, prosty, naturalnej wielkości, położony symetrycznie do przedmiotu względem zwierciadła (rys. a poniżej).



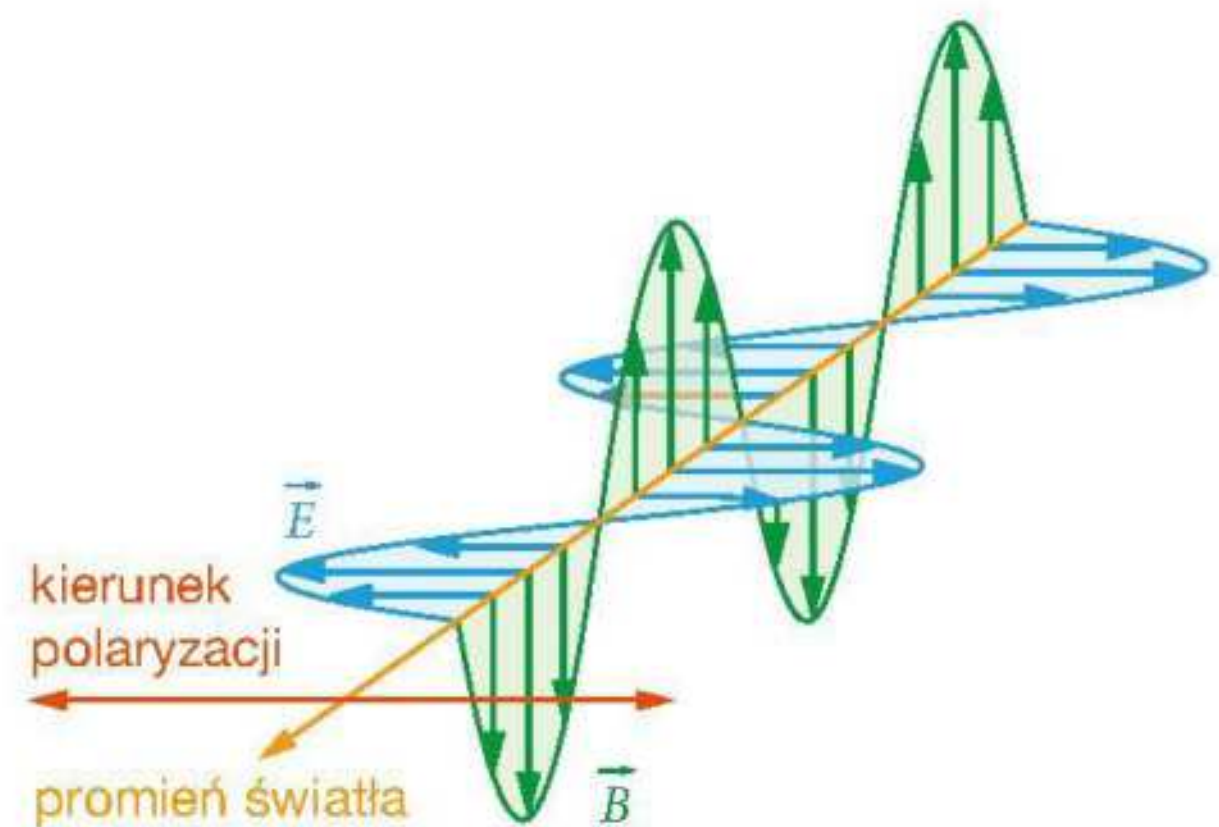
■ Bieg światła przez pryzmat

Rozszczepienie światła w pryzmacie wynika z faktu, że prędkość światła w szkle zależy od długości fali (rys. b powyżej).

- Dzięki rozszczepieniu światła w kropli wody powstaje tęcza.

- **Fala elektromagnetyczna** to rozchodzące się w przestrzeni okresowe zmiany zależnych od siebie pól: elektrycznego i magnetycznego.

- Fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną. Przyjmuje się, że grzbiet fali to miejsce, w którym wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ osiąga maksymalną wartość.

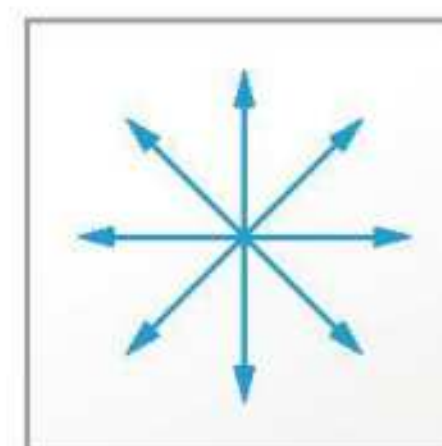


■ Polaryzacja światła

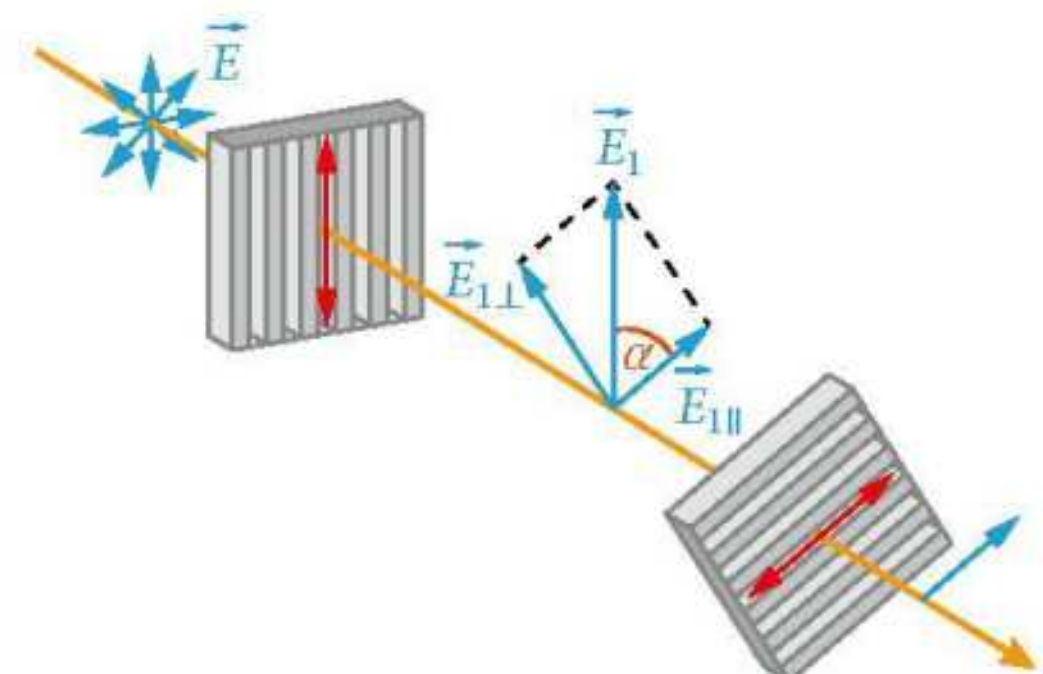
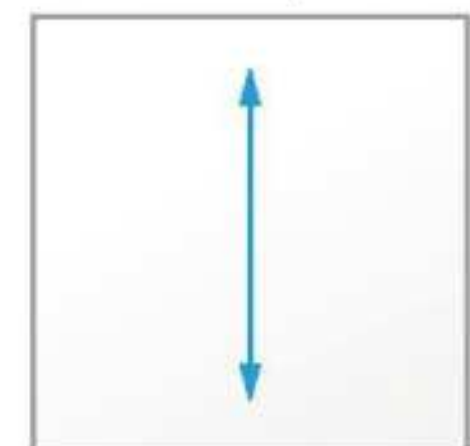
- w fali elektromagnetycznej pole elektryczne (a zatem także magnetyczne) drga tylko w jednym określonym kierunku, to fala jest **spolaryzowana**.

- **Polaryzator** przepuszcza tylko światło o określonej polaryzacji, równoległej do **osi polaryzatora**. Jeśli padające światło jest spolaryzowane w innym kierunku, wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ możemy rozłożyć na składowe równoległą i prostopadłą do osi polaryzatora. Polaryzator przepuszcza tylko składową równoległą.

a) światło niespolaryzowane



b) światło spolaryzowane w kierunku pionowym



- Kiedy światło spolaryzowane o natężeniu I pada na polaryzator, którego oś jest nachylona pod kątem α do płaszczyzny polaryzacji światła, to po przejściu przez polaryzator natężenie światła wynosi:

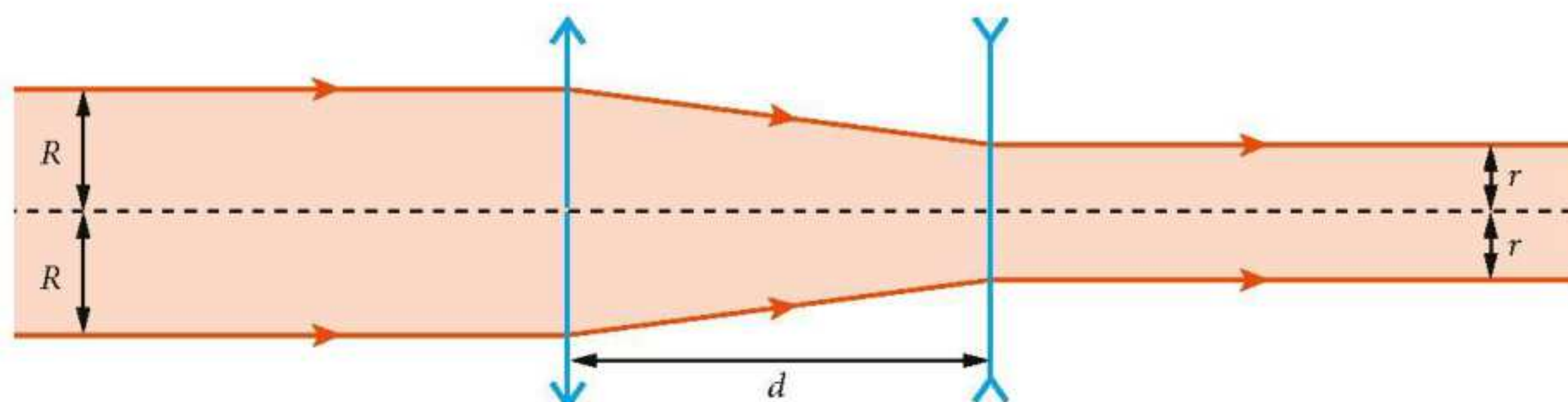
$$I' = I \cos^2 \alpha$$

Sposób na zadanie

Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. Na rysunku przedstawiono dwie soczewki ustawione tak, że ich osie optyczne się pokrywają, oraz równoległą wiązkę światła o średnicy $2R$ padającą na jedną z tych soczewek wzdłuż ich osi. Pierwsza z soczewek ma ogniskową $f_1 > 0$, a druga $f_2 < 0$. Odległość między soczewkami wynosi d .

Po przejściu przez obie soczewki wiązka światła nadal jest równoległa i ma ten sam kierunek, ale teraz jej średnica wynosi $2r < 2R$.



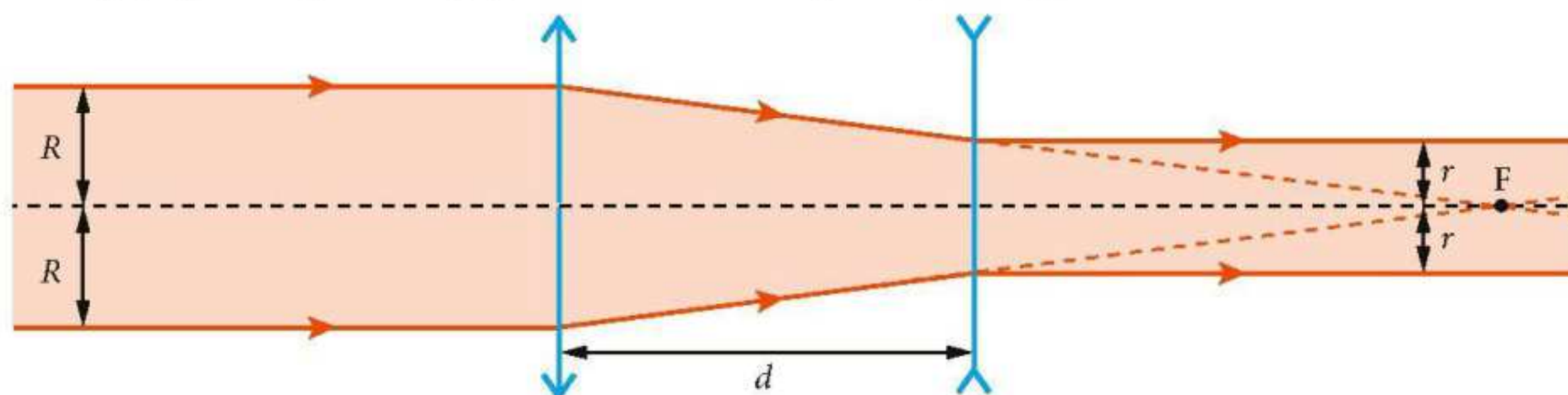
Zadanie 1.1 (0–3)

Udowodnij, że $d = f_1 + f_2$.

Ponieważ $f_2 < 0$, to $f_1 + f_2$ to tak naprawdę różnica odległości.

Rozwiązanie:

Dorysujmy do naszej ilustracji, jak biegłyby skrajne promienie światła załamane w pierwszej soczewce, gdyby nie było drugiej (czerwone linie przerywane).



Punkt, w którym promienie się przecinają, to ognisko pierwszej soczewki, dlatego oznaczyliśmy je F.

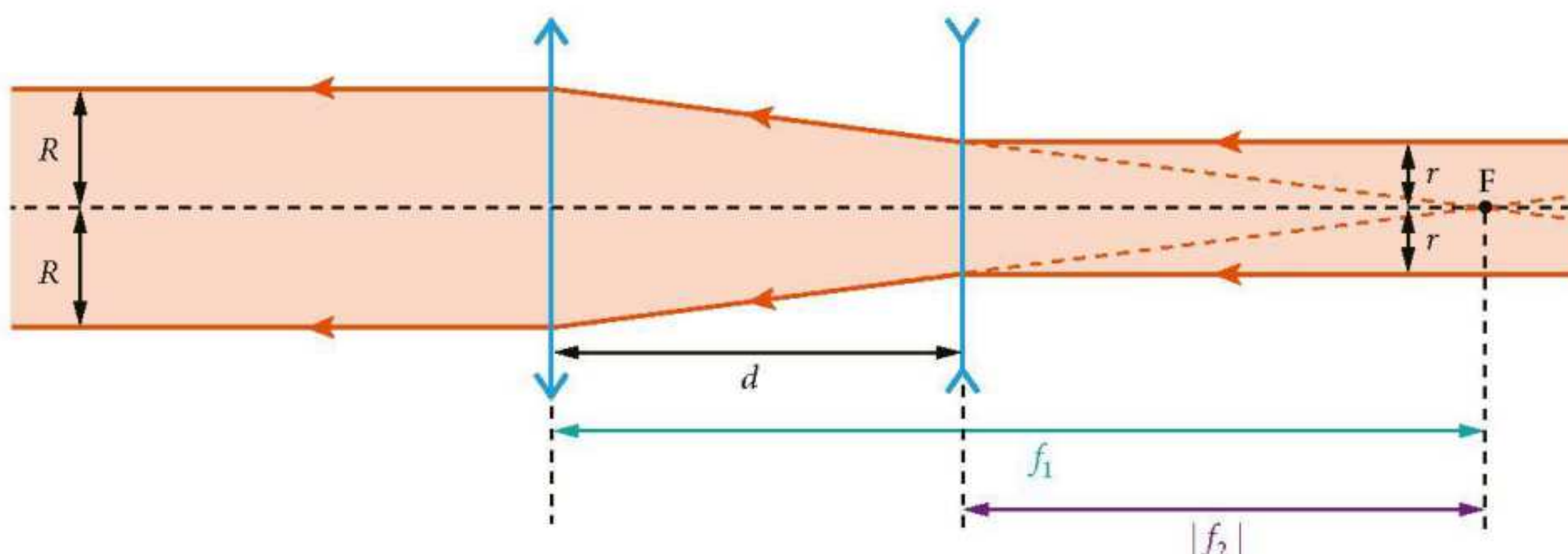
Jest to ognisko pozorne.

Zastanówmy się teraz, gdzie znajduje się ognisko drugiej soczewki.

Aby wyznaczyć ognisko drugiej soczewki, możemy rozważyć równoległą wiązkę światła padającą na tę soczewkę. Taka wiązka padałaby na nią wtedy, gdyby światło w rozważanym przykładzie biegło w drugą stronę.

A zawsze możemy odwrócić kierunek biegu światła.

Widzimy, że przedłużenia promieni załamanych przecinają się w punkcie F, a więc jest to również ognisko drugiej soczewki.



Z porównania długości na rysunku widzimy, że:

$$f_1 = d + |f_2|$$

czyli:

$$d = f_1 - |f_2| = f_1 - (-f_2) = f_1 + f_2$$

$f_2 < 0$, więc $|f_2| = -f_2$, np. $|-30 \text{ cm}| = 30 \text{ cm}$

co było do udowodnienia.

Zadanie 1.2 (0-2)

Wyprowadź wzór pozwalający obliczyć stosunek $k = \frac{R}{r}$ w zależności od ogniskowych soczewek. Skorzystaj z równości udowodnionej w zadaniu 1.1.

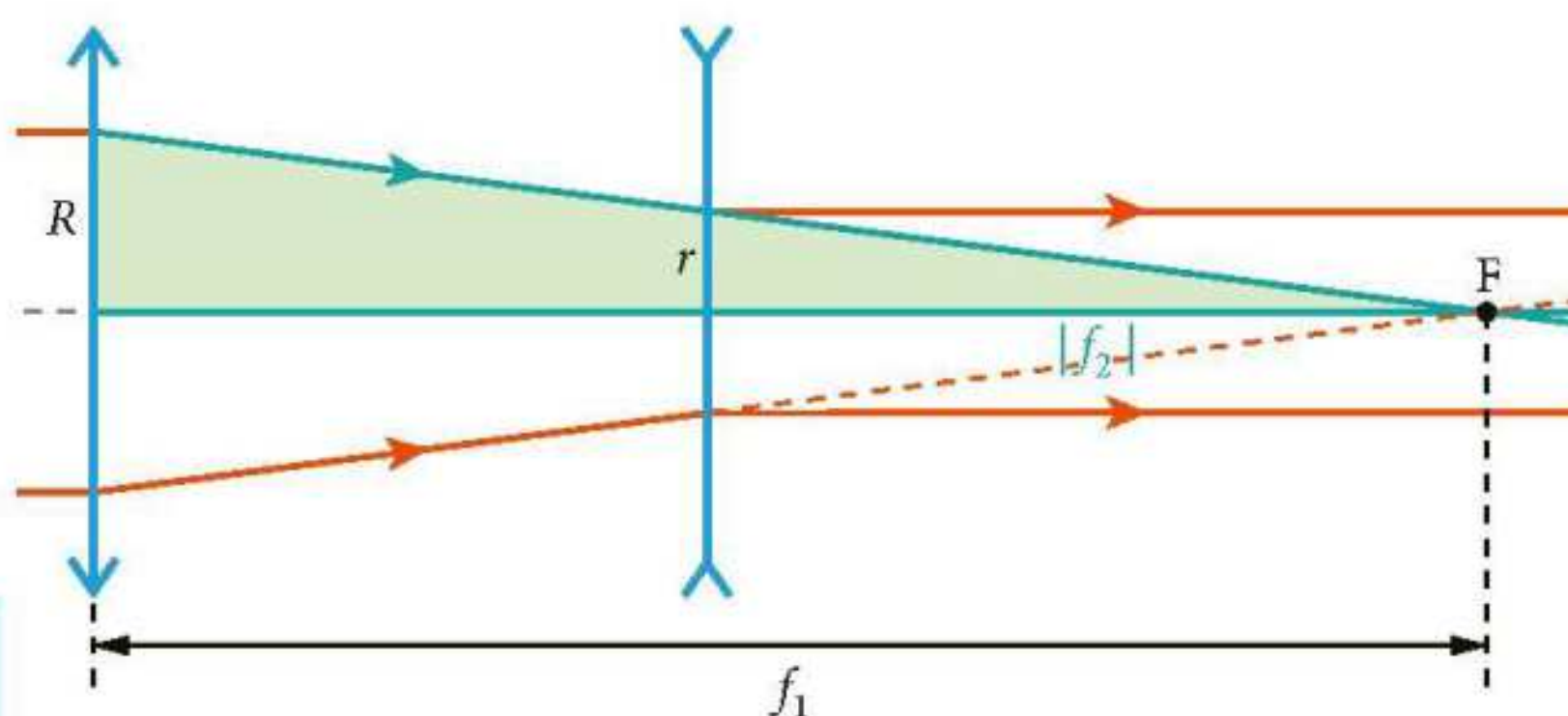
Rozwiązanie:

Na naszym rysunku możemy znaleźć trójkąty podobne.

Możemy więc zapisać proporcję:

$$\frac{R}{f_1} = \frac{r}{|f_2|}$$

Aby sprawdzić poprawność przekształcenia, możesz każdą z proporcji wymnożyć na krzyż.



Stosunek długości? Może przyda się podobieństwo trójkątów.

Przekształćmy ją tak, aby z lewej strony występował szukany iloraz:

$$\frac{R}{r} = \frac{f_1}{|f_2|} \rightarrow k = \frac{f_1}{|f_2|}$$

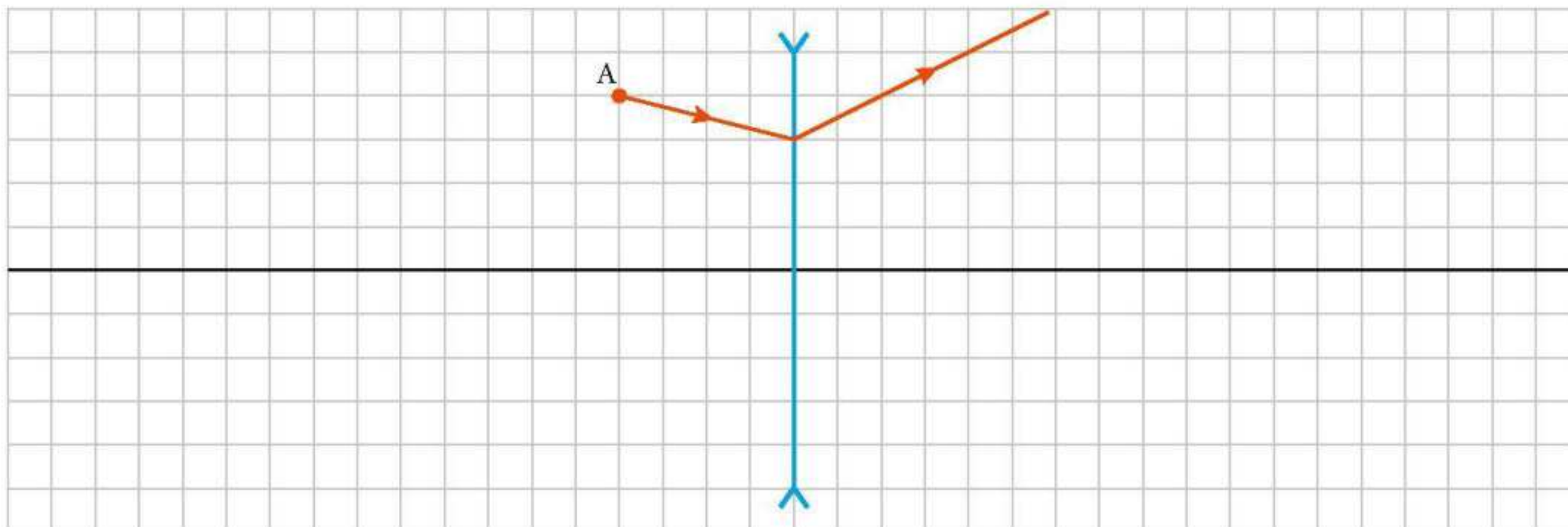
Odpowiedź: Szukana zależność ma postać $\frac{f_1}{|f_2|}$.

Warto zapamiętać!

- Jeśli promień światła biegnie z punktu A do B, to z punktu B do A mógłby biec po tej samej drodze.
- Kiedy masz wyznaczyć stosunek długości, przydatne może być podobieństwo trójkątów (albo twierdzenie Talesa).

Zadanie 2. (0–2)

Rysunek przedstawia soczewkę rozpraszającą oraz jeden z promieni światła, biegnący z punktu A i załamujący się w soczewce. **Wyznacz zdolność skupiającą soczewki.** Skala na rysunku: 1 kratka – 5 cm.



Rozwiązanie:

Planujemy rozwiązanie

Mamy wyznaczyć zdolność skupiającą, a ona jest równa odwrotności ogniskowej. Aby odczytać ogniskową, wystarczy odnaleźć ognisko. Aby to zrobić, spróbujemy najpierw znaleźć obraz punktu A.

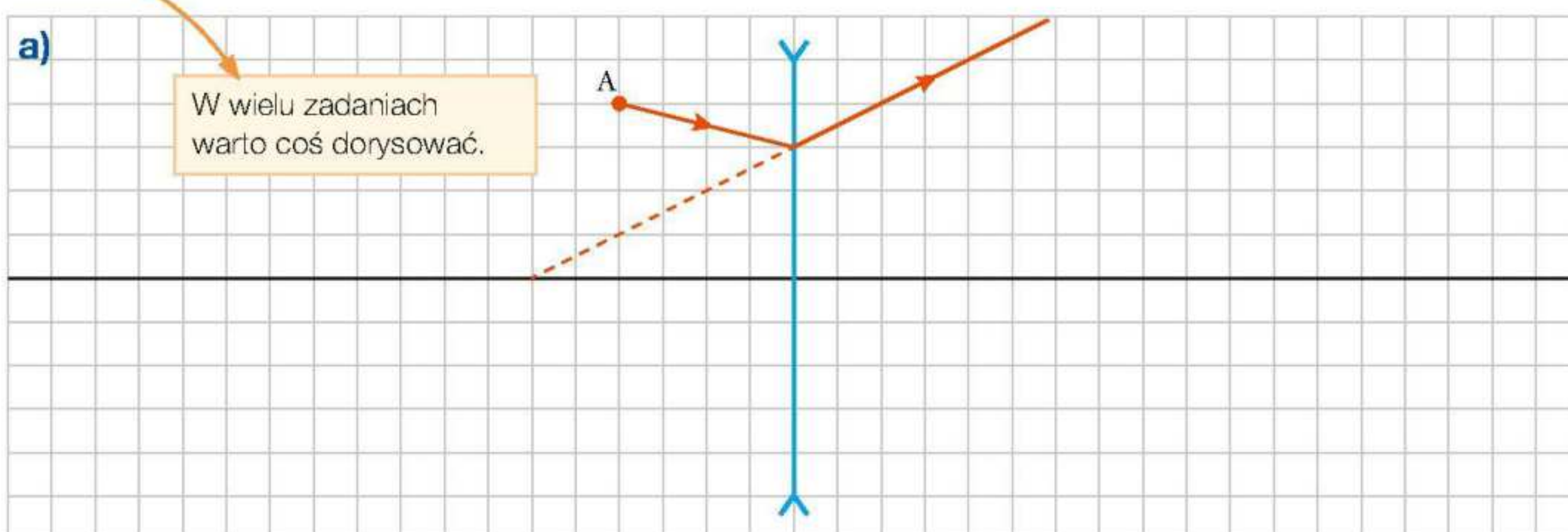
Szukamy obrazu punktu A

Soczewka rozpraszająca zawsze tworzy obraz pozorny. Obraz ten tworzy się na przecięciu przedłużeń wszystkich promieni załamanych w soczewce (czyli tam, skąd pozornie zdaje się biec światło).

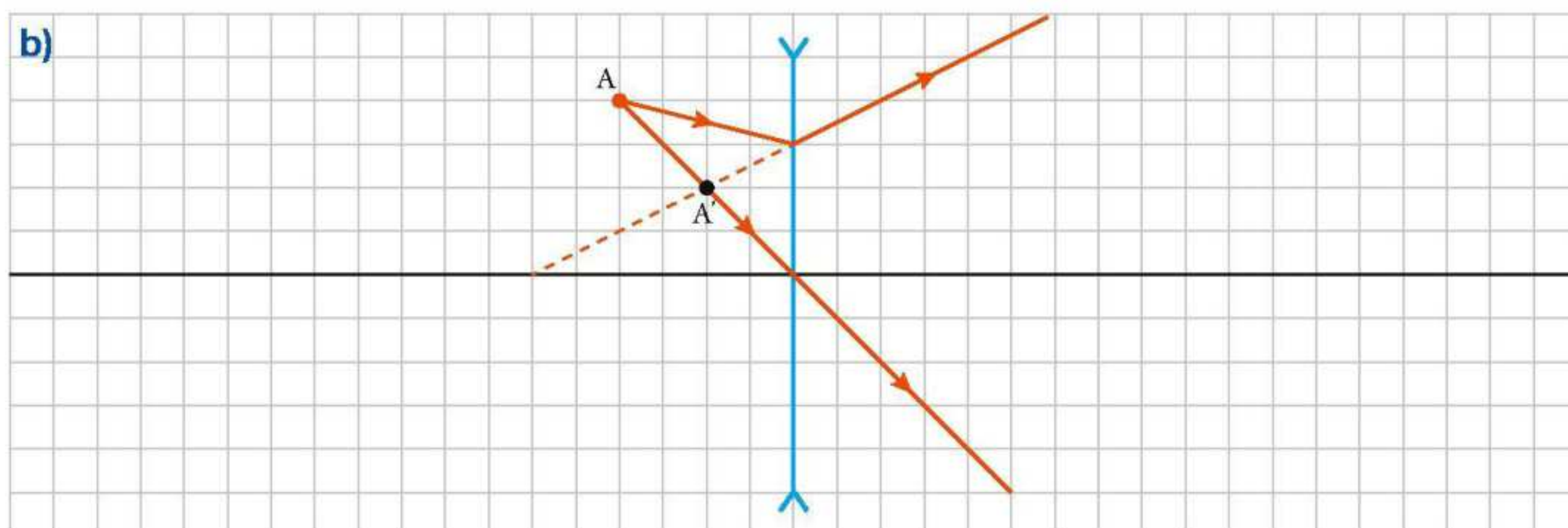
Rozwiązujemy zadanie „od końca”.

A nie tylko charakterystycznych promieni z konstrukcji obrazu.

Dorysujmy przedłużenie promienia załamane w soczewce (przerywana linia rys. a).



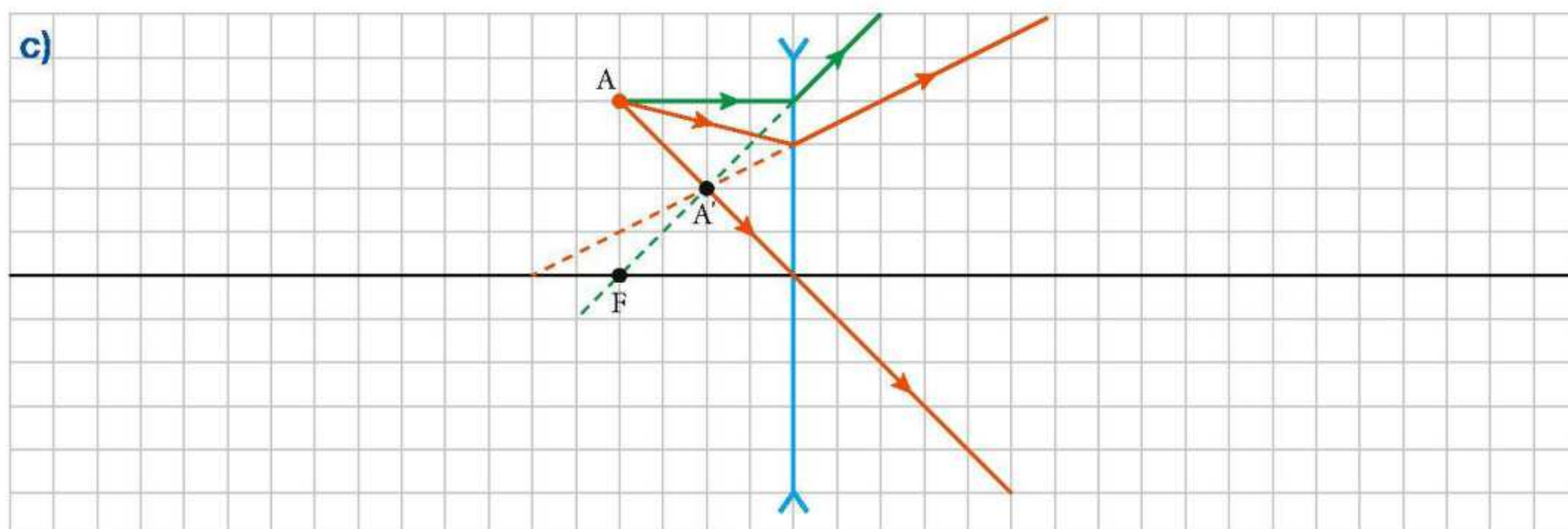
Aby znaleźć ognisko, będzie nam potrzebny jeszcze jeden promień. Jak go skonstruować, gdy nie znamy ogniska? Możemy narysować promień biegnący przez środek soczewki. Nie zmienia on kierunku, więc jego część od strony przedmiotu jest jednocześnie przedłużeniem części po załamaniu. W ten sposób wyznaczamy punkt A', obraz punktu A (rys. b na następnej stronie).



Szukamy ogniska soczewki

Skoro wiemy, gdzie leży obraz A' punktu A , to umiemy narysować przedłużenie dowolnego promienia wychodzącego z punktu A i załamane w soczewce. Narysujmy więc promień biegnący z punktu A równoległe do osi optycznej (zielona linia). Po załamaniu promień musi biec tak, aby jego przedłużenie przechodziło przez punkt A' .

Jednak przedłużenie tego promienia przechodzi także przez ognisko pozorne soczewki – jest nim punkt F leżący na osi optycznej soczewki (rys. c).



Dzięki podanej skali możemy odczytać z rysunku, że ogniskowa soczewki wynosi:

$$f = -20 \text{ cm} = -0,2 \text{ m}$$

(ogniskowa soczewki rozpraszającej jest ujemna), a więc zdolność skupiająca wynosi:

$$Z = \frac{1}{f} = \frac{1}{-0,2 \text{ m}} = -\frac{1}{\frac{1}{5} \text{ m}} = -5 \text{ D}$$

Odpowiedź: Zdolność skupiająca soczewki wynosi -5 D .

Warto zapamiętać!

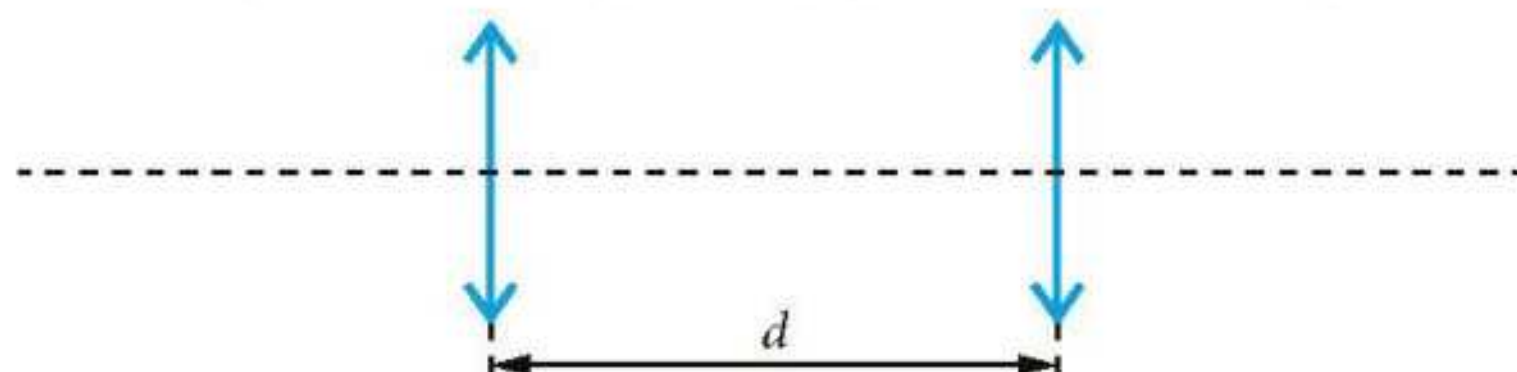
- W obrazie rzeczywistym punktu przecinają się wszystkie promienie światła wychodzące z tego punktu i załamujące się w soczewce.
 - Analogicznie w obrazie pozornym przecinają się przedłużenia wszystkich promieni.
- W konstrukcjach wykorzystujemy tylko niektóre, charakterystyczne promienie, ale czasami musimy rozważyć ich więcej.

Zadania analogiczne

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



Zadanie 1. Dwie soczewki skupiające ustawiono tak, że ich osie optyczne się pokrywają. Odległość między soczewkami wynosi d , a ich ogniskowe są równe f_1 oraz f_2 . Na pierwszą soczewkę pada równoległa wiązka światła wzdłuż osi optycznej obu soczewek. Po przejściu przez obie soczewki wiązka znowu jest równoległa, ale jej średnica zmniejsza się k razy.

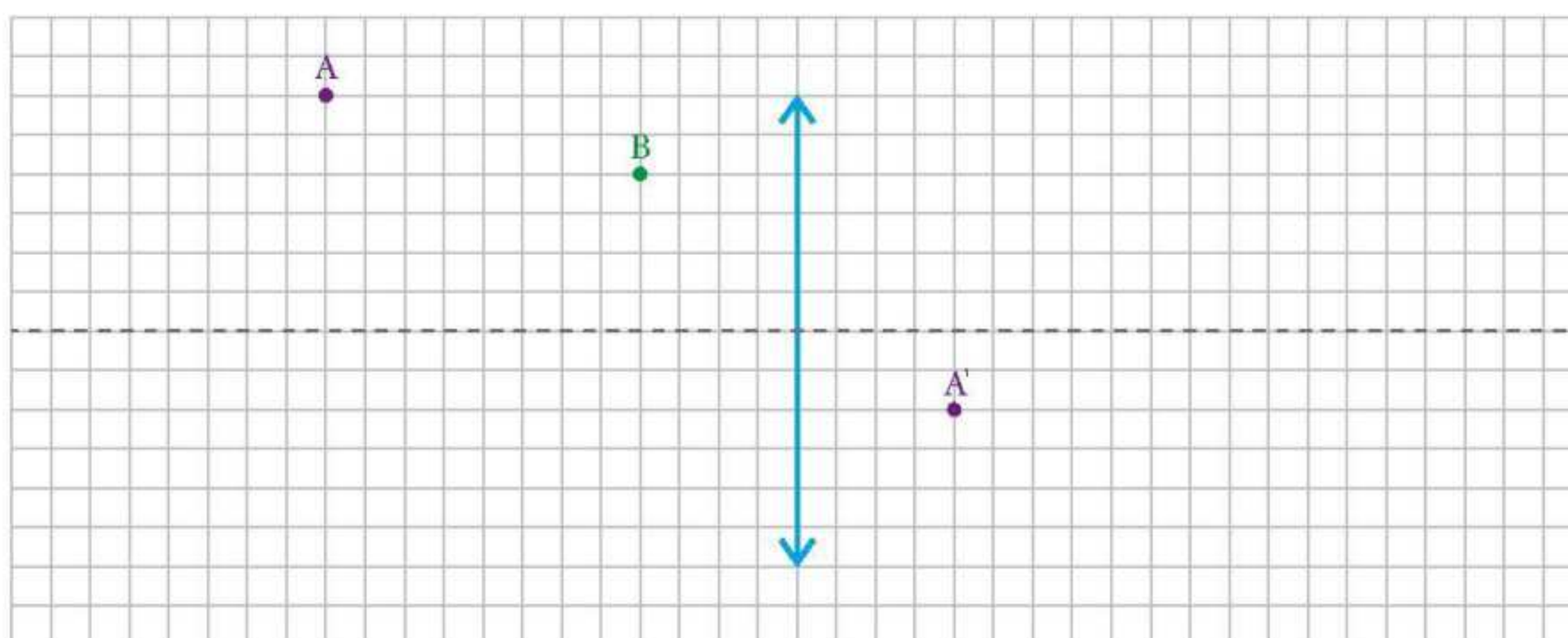


Zadanie 1.1. Wyznacz d w zależności od f_1 oraz f_2 .

Zadanie 1.2. Wyznacz k w zależności od f_1 oraz f_2 .

Wskazówka. Najpierw przerysuj ilustrację do zeszytu i dorysuj do niej bieg promieni światła.

Zadanie 2. W rozwiązującym zadaniu 2. (s. 70–71) znaleźliśmy na rysunku punkt A' . Moglibyśmy wtedy zamiast konstruować ognisko, obliczyć ogniskową z równania soczewki. **Wykonaj takie obliczenia i porównaj swój wynik z wielkością otrzymaną za pomocą konstrukcji w przykładzie.**



Zadanie 3. Rysunek przedstawia soczewkę, dwa punkty i obraz jednego z nich. Został wykonany w skali 1 kratka – 10 cm.

Przerysuj ilustrację do zeszytu i **skonstruuj obraz drugiego punktu**. Z rysunku odczytaj ogniskową soczewki i sprawdź, że dla obu punktów spełnione jest równanie soczewki. Oblicz zdolność skupiającą soczewki.

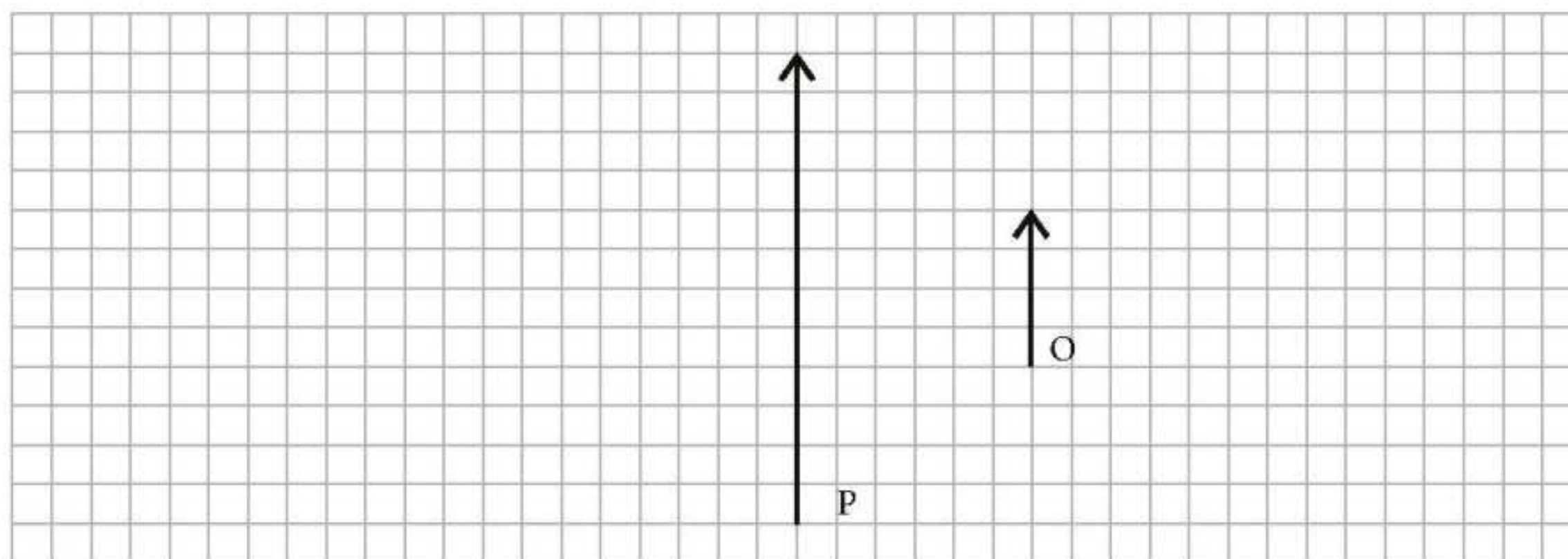
Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



Zadanie 1. Obraz i przedmiot

Na rysunku przedstawiono przedmiot P oraz jego obraz O tworzony przez soczewkę szklanką umieszczoną w powietrzu. Przerysuj ilustrację do zeszytu.



Zadanie 1.1. Wybierz właściwe uzupełnienia zdania A lub B oraz C lub D.

Obraz był **A/ B** i tworzyła go soczewka **C/ D**.

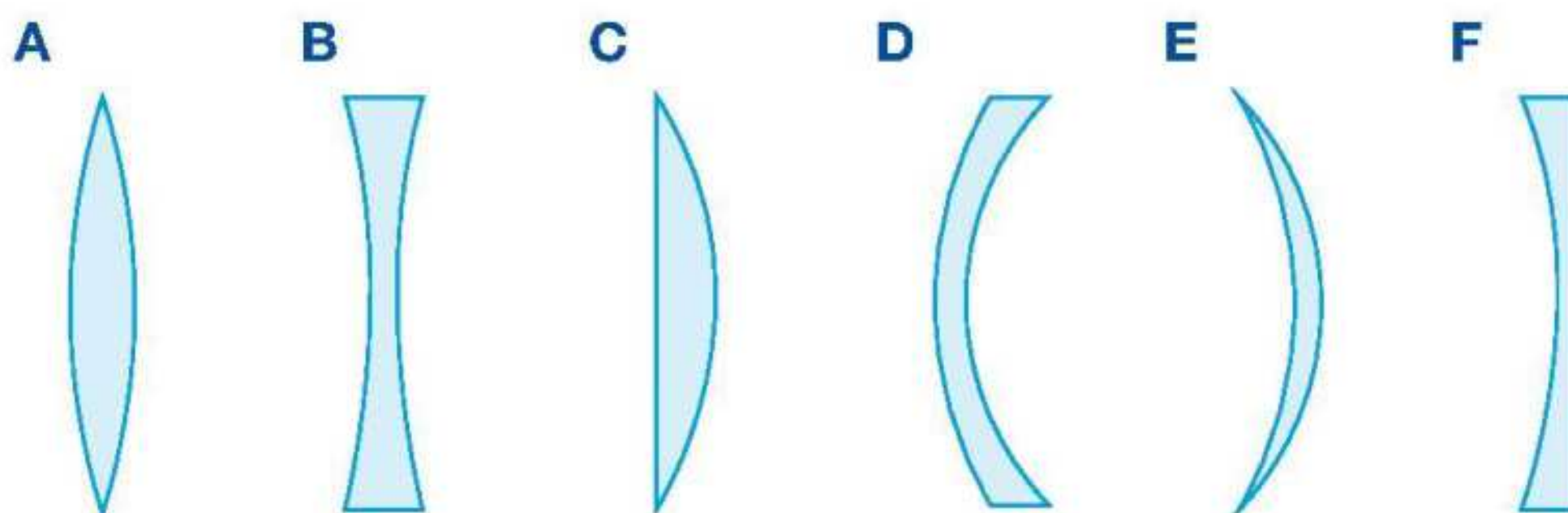
A. rzeczywisty

B. pozorny

C. skupiająca

D. rozpraszająca

Zadanie 1.2. Jaki kształt mogła mieć soczewka? Wymień wszystkie poprawne odpowiedzi.



Zadanie 1.3. Na swoim rysunku w zeszycie skonstruuj soczewkę, jej oba ogniska i oś optyczną.

Zadanie 1.4. Odczytaj z rysunku ogniskową. Jedna kratka na rysunku oznacza 5 cm.

Zadanie 1.5. Sprawdź, że dla sytuacji z rysunku jest spełnione równanie soczewki.

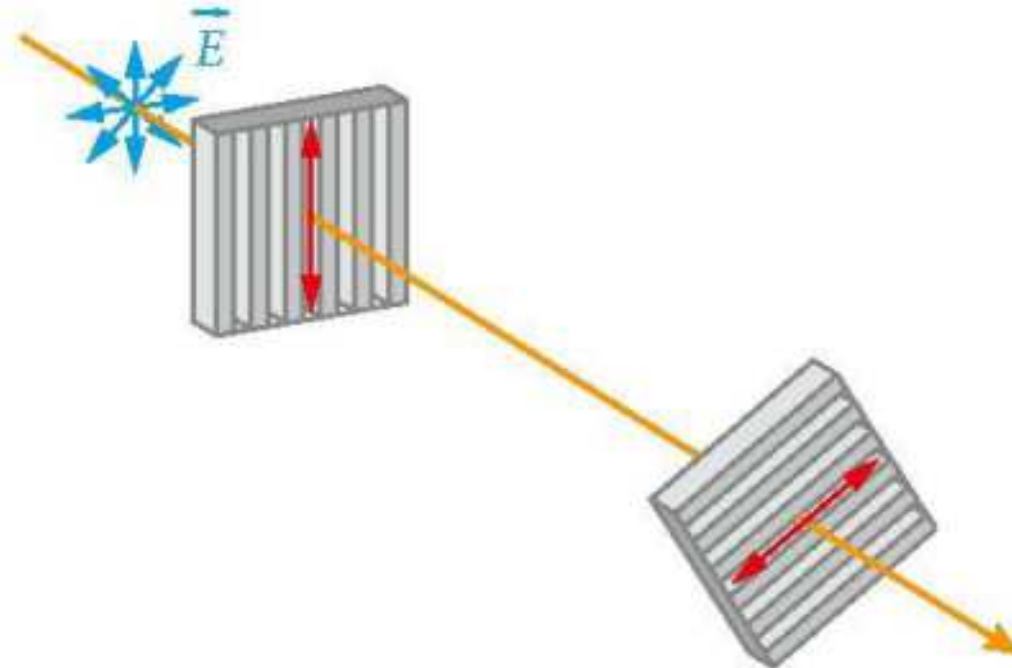
Zadanie 2. Ogniskowa soczewki

W odległości 160 cm od białej ściany stała świeczka. Kiedy pomiędzy świeczką a ścianą ustawiono soczewkę, na ścianie powstał odwrócony obraz świeczki powiększony 3 razy.

Oblicz ogniskową soczewki.

Zadanie 3. Ustawienie polaryzatora

Polaryzator liniowy, na który pada światło niespolaryzowane, osłabia natężenie jego światła 2 razy. Kiedy dołożymy do niego drugi, ustawiony pod innym kątem, następuje kolejne osłabienie światła.



Zadanie 3.1. Światło niespolaryzowane pada na dwa polaryzatory liniowe, których płaszczyzny polaryzacji są ustawione pod kątem 45° .

Który z polaryzatorów w takim doświadczeniu w większym stopniu zmniejsza natężenie światła?

- A.** pierwszy **B.** drugi **C.** oba tak samo

Zadanie 3.2. Pod jakim kątem w stosunku do pierwszego polaryzatora należy ustawić drugi, aby zmniejszał on natężenie światła 4 razy?

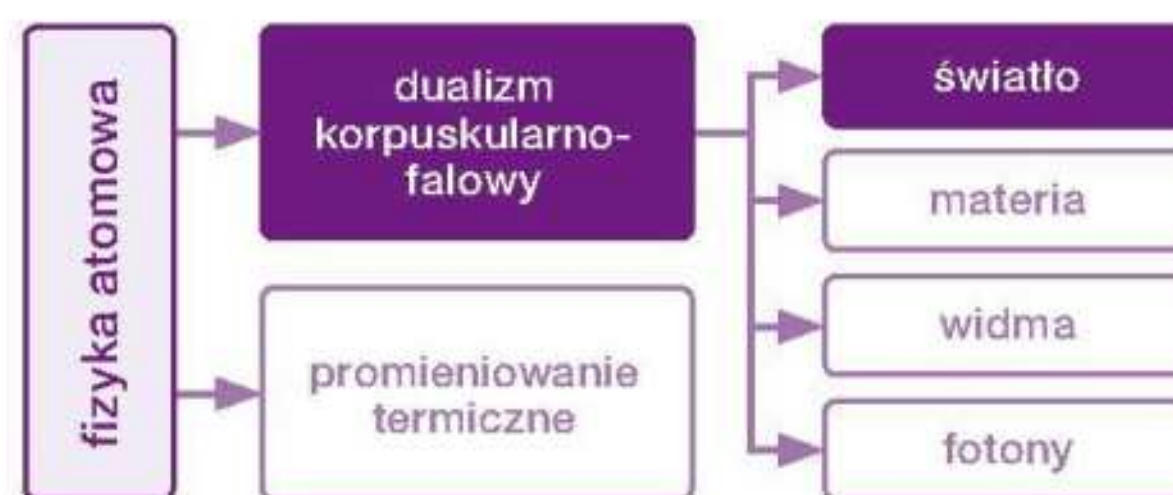
19. Fizyka atomowa

1. Zjawisko fotoelektryczne
2. Falowa natura materii
3. Widmo liniowe
4. Foton jako cząstka
5. Promieniowanie termiczne
6. Efekt cieplarniany



19.1

Zjawisko fotoelektryczne



Ważne w tej lekcji:

- mechanizm zjawiska fotoelektrycznego,
- zależność od częstotliwości,
- foton i jego energia,
- praca wyjścia.

Przypomnij sobie:

- Światło ulega dyfrakcji i interferencji, co dowodzi, że jest falą.
- Natężenie fali jest proporcjonalne do kwadratu jej amplitudy.

Fizyka na przełomie XIX i XX wieku

Pod koniec XIX w. panowało przekonanie, że prawa fizyki są dobrze poznane i nie ma już zbyt wiele do odkrycia.

- Znajomość praw mechaniki pozwalała zarówno na konstrukcję maszyn, jak i na przewidywanie zjawisk astronomicznych.
- James Clerk Maxwell (rys. 19.1) w ramach jednej teorii opisał zjawiska elektryczne, magnetyczne i optyczne, a do tego przewidział istnienie fale radiowych.
- Termodynamika pozwoliła budować lepsze silniki cieplne (parowe i spalinowe). Jednocześnie zastosowanie statystyki matematycznej do ruchu wielkiej liczby cząsteczek pozwoliło udowodnić, że prawa termodynamiki wynikają z zasad rządzących ruchem poszczególnych cząsteczek.

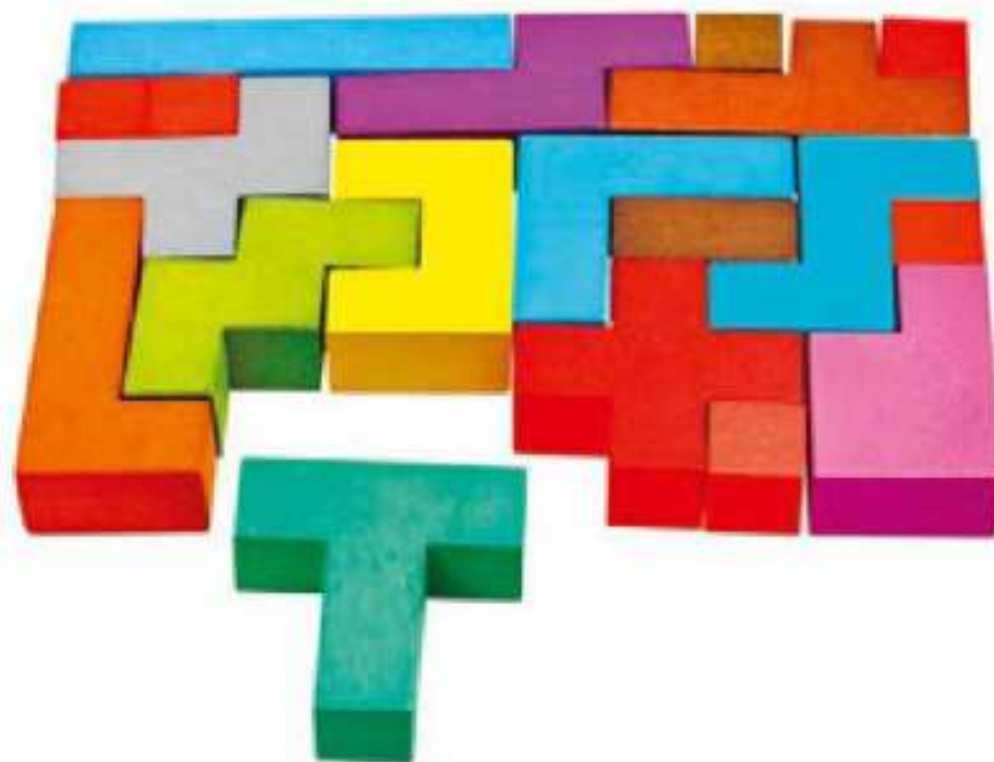
Co prawda prowadzono badania nad kilkoma niewyjaśnionymi zjawiskami, ale uważano je za zagadnienia szczegółowe, które zostaną wkrótce wytłumaczone na gruncie znanych już praw podstawowych.

Jak się jednak okazało, właśnie te szczegóły doprowadziły do całkowitej zmiany naszego myślenia o naturze świata. Można to porównać do



Rys. 19.1. James Clerk Maxwell doprowadził m.in. do unifikacji oddziaływań elektrycznych i magnetycznych

łamigłówki, w której udało nam się ułożyć prawie wszystkie elementy, ale ten ostatni, niepasujący, spowodował, że całą zabawę musieliśmy zacząć od początku (rys. 19.2).



Rys. 19.2. Skoro ostatni element nie pasuje, to znaczy, że trzeba przestawić także pozostałe

Efektem tego poukładania na nowo wiedzy o świecie były dwie nowe teorie fizyczne: mechanika kwantowa i teoria względności.

Powstały one na początku XX w. Od tego czasu, choć fizyka bardzo się rozwinęła, nie zostały one zastąpione żadną lepszą, dokładniejszą lub bardziej uniwersalną teorią fundamentalną.

■ Rola fizyki klasycznej dzisiaj

Dziś fizykę znaną do końca XIX w. nazywamy fizyką klasyczną. Poznałeś jej najważniejsze prawa, choć najczęściej w wersji uproszczonej pod względem matematycznym.

Fizyka klasyczna wystarcza do opisu znacznej części otaczających nas zjawisk. Jak zobaczysz, w tych przypadkach przewidywania nowych teorii są praktycznie takie same jak w fizyce klasycznej, więc ich stosowanie jest niepotrzebną komplikacją.

Są jednak takie zjawiska, których za pomocą fizyki klasycznej wyjaśnić się nie da. Gdyby nie fizyka XX w., nie mielibyśmy także wielu wynalazków, bez których trudno nam sobie wyobrazić współczesny świat – zwłaszcza urządzeń elektronicznych (rys. 19.3).

W dalszej części podręcznika poznasz elementy fizyki stworzonej w XX w.

■ Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne

Poznasz teraz jedno ze zjawisk, których nie da się wyjaśnić na gruncie fizyki klasycznej.

Jest to zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne, czyli wybijanie elektronów z powierzchni metalu przez fale elektromagnetyczne.

W najprostszej wersji można je zaobserwować nawet za pomocą przyrządów ze szkolnej pracowni.



Rys. 19.3. Trudno dziś sobie wyobrazić świat bez laptopa czy telefonu

„Foto-” sugeruje, że chodzi o światło, ale światłem nazywamy nie tylko światło widzialne, lecz także m.in. nadfiolet.

Doświadczenie 11

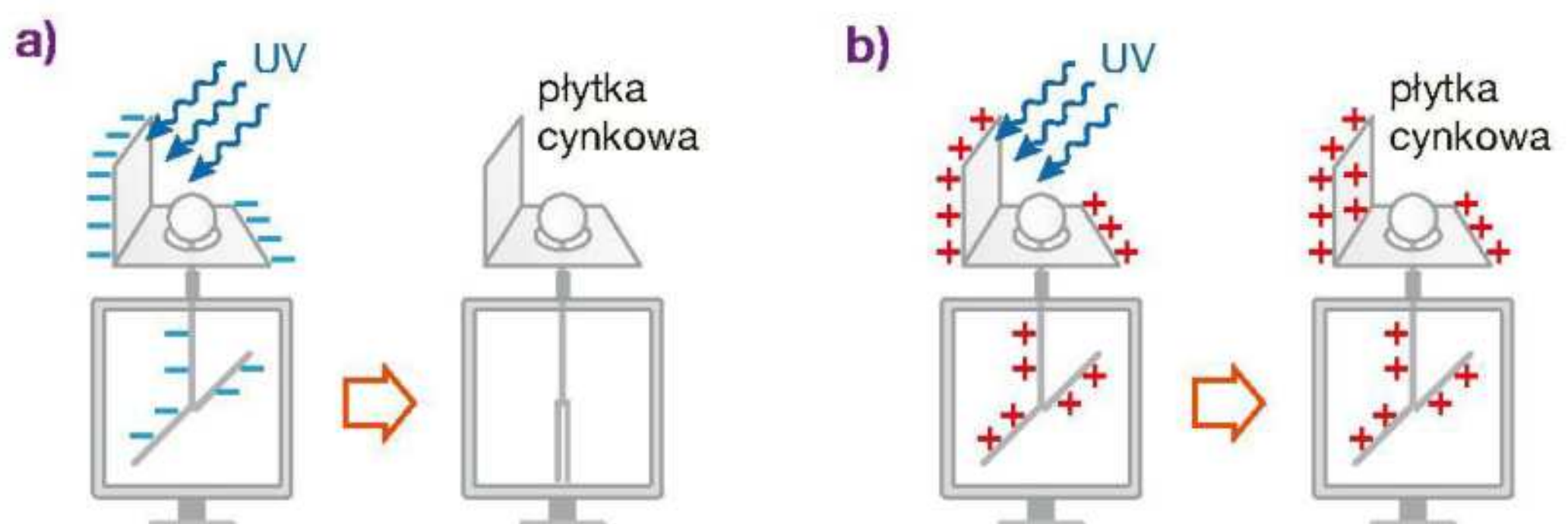
1. Przygotuj czuły elektroskop, balonik, płytkę cynkową (2 cm x 4 cm lub większą), papier ścierny, taśmę klejącą, fragment odzieży z wełny lub polaru oraz mocną lampę ultrafioletową (UV; może to być lampa do utrwalania lakieru do paznokci, ale o mocy 150 W lub większej). Doświadczenie wykonuj w suchym pomieszczeniu.
2. Wyczyść papierem ściernym jedną stronę płytki cynkowej, aż stanie się błyszcząca. Oznacza to, że z powierzchni metalu został usunięty jego tlenek.
3. Przyczep płytkę cynkową do kulki elektroskopu za pomocą taśmy klejącej błyszczącą stroną do góry tak, aby taśma zakrywała jak najmniejszą część płytki.
4. Naelektryzuj ujemnie balonik, trąc go o tkaninę. Przesuń balonikiem po płytce, aby zebrać jak największy ładunek.
5. Sprawdź, jak długo utrzymuje się ładunek.
6. Ponownie naelektryzuj ujemnie balonik i za jego pomocą elektroskop. Sprawdź, jak długo utrzymuje się ładunek, gdy płytkę cynkową jest mocno oświetlona za pomocą lampy UV.
7. Naelektryzuj teraz elektroskop dodatnio. Możesz znowu wykorzystać balonik, ale tym razem naelektryzować elektroskop przez indukcję. Sprawdź, jak długo ładunek utrzymuje się wtedy, gdy płytkę cynkową jest mocno oświetlona za pomocą lampy UV.

Wnioski z doświadczenia

Promieniowanie ultrafioletowe powodowało szybsze rozładowanie elektroskopu, ale tylko wtedy, gdy był naładowany ujemnie. Dlaczego tak się stało?

Otóż promieniowanie ultrafioletowe, które niesie pewną energię, wybija elektrony z płytki cynkowej.

- Kiedy elektroskop jest naładowany ujemnie, elektronów jest zbyt dużo, dlatego po wybiciu niektórych z nich elektroskop staje się obojętny elektrycznie (rys. 19.4a).
- Kiedy elektroskop i płytkę są naładowane dodatnio, wybite elektrony są do niego przyciągane i bardzo szybko wracają. Gdyby jednak zostały wybite z taką prędkością, że udałoby im się uciec, spowodowałoby to zwiększenie ładunku elektroskopu (rys. 19.4b).



Rys. 19.4. Wyniki doświadczenia 11. a) dla punktu 6, b) dla punktu 7

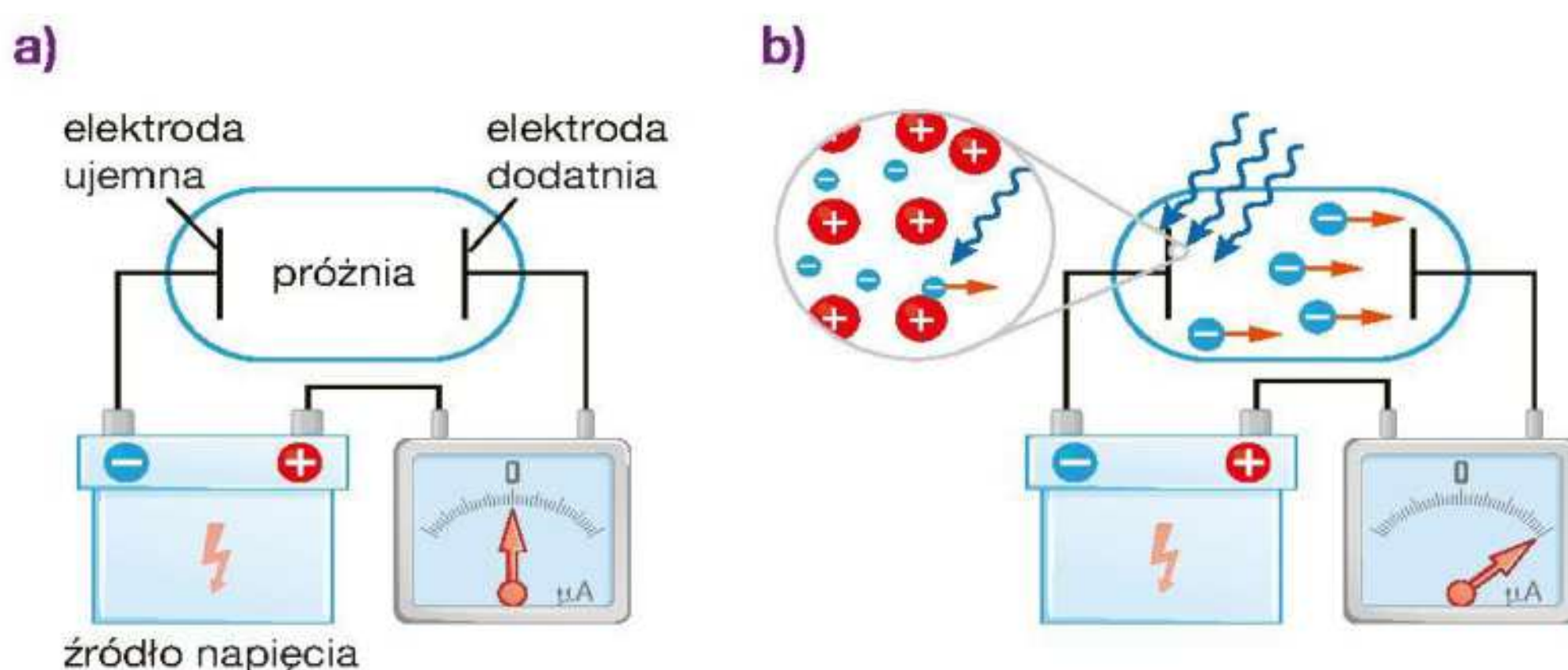
Fotokomórka

Do dokładniejszego badania zjawiska fotoelektrycznego służy fotokomórka, czyli bańka opróżniona z powietrza i wyposażona w dwie elektrody (rys. 19.5). Załóżmy na razie, że elektrody są wykonane z cezu. Podłączamy je przez mikroamperomierz do akumulatora.

Początkowo (rys. 19.5a) prąd nie płynie, co nas nie dziwi, skoro w bańce jest próżnia. Jednak kiedy oświetlimy elektrodę ujemną niebieskim światłem (rys. 19.5b), prąd zaczyna płynąć. Dzieje się tak, ponieważ:

- światło wybija elektrony z elektrody ujemnej,
- elektron wyrwany z metalu jest odpychany przez elektrodę ujemną, a przyciągany przez dodatnią,
- elektron zaczyna się poruszać.

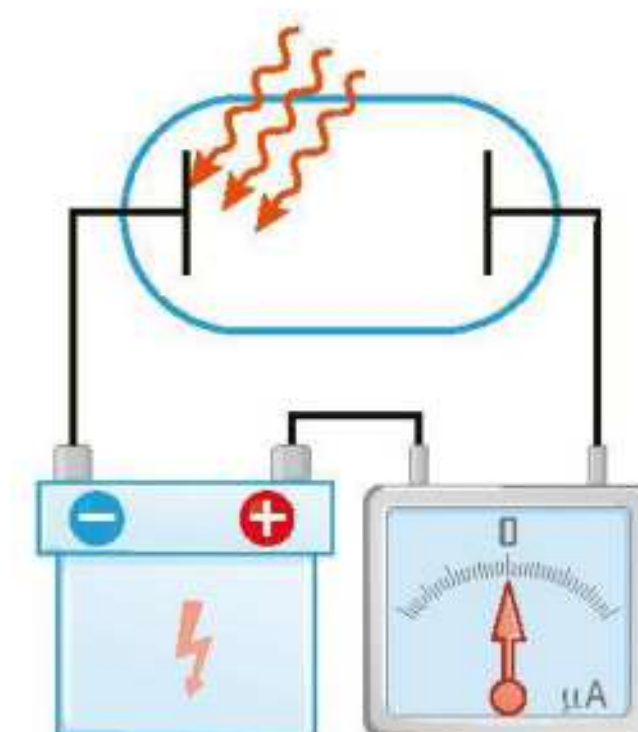
Ponieważ takich elektronów jest wiele – płynie prąd.



Rys. 19.5. Układ do badania zjawiska fotoelektrycznego

Zależność od częstotliwości światła

Sam fakt, że światło niesie energię, która może posłużyć do wyrwania elektronu z metalu, był zrozumiały już na gruncie fizyki klasycznej. Okazało się jednak, że jeśli światło niebieskie oświetlające elektrodę z cezu zastąpimy czerwonym, to prąd nie płynie, nawet przy bardzo dużym natężeniu światła (rys. 19.6)



Rys. 19.6. Jeżeli elektrody fotokomórki są zbudowane z cezu, to oświetlanie światłem czerwonym nie powoduje przepływu prądu

A to ciekawe

Fotokomórka umożliwiła powstanie filmu dźwiękowego oraz dokładny pomiar czasu na zawodach sportowych.

Dzisiaj fotokomórki zostały zastąpione przez fotodiody, których zasada działania opiera się na zjawisku fotoelektrycznym wewnętrznym, a nie zewnętrznym. Oznacza to, że elektrony zyskują energię, która pozwala im poruszać się po całej objętości materiału, ale go nie opuszczają.

Bańkę próżniową zastąpił tańszy i mniej delikatny kryształek półprzewodnika. Zastosowania jednak pozostały te same, dlatego potocznie fotodiody nazywamy fotokomórkami.



Dla metalu innego niż cez graniczna częstotliwość, od której możemy zaobserwować przepływ prądu, jest inna. Dla wielu metali potrzebne jest promieniowanie ultrafioletowe, aby przez fotokomórkę mógł popłynąć prąd – tak było z cynkiem w doświadczeniu 11.

Zasada jest jednak taka sama: promieniowanie musi mieć wystarczająco wysoką częstotliwość, a jeśli ten warunek nie jest spełniony, to zwiększanie natężenia promieniowania nic nie daje.

Zjawisko fotoelektryczne zachodzi tylko dla dostatecznie wysokiej częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego.

Tego wyniku nie da się wyjaśnić za pomocą fizyki klasycznej. Światło czerwone o dużym natężeniu może dostarczać większej energii niż światło niebieskie o małym natężeniu, więc nie ma powodu, aby nie powodowało wybijania elektronów.

Za wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego za pomocą kwantów światła Albert Einstein otrzymał w 1921 r. Nagrodę Nobla.

■ Kwanty światła

Zjawisko fotoelektryczne wyjaśniono dzięki założeniu, że istnieją najmniejsze porcje promieniowania elektromagnetycznego, zwane kwantami światła albo fotonami.

Energia pojedynczego fotonu jest proporcjonalna do częstotliwości fali. Współczynnik proporcjonalności h jest zwany stałą Plancka.

Tak więc wzór na energię pojedynczego kwantu światła ma postać:

$$E = hf$$

energia fotonu $\rightarrow$ h stała Plancka
 f częstotliwość

Stała Plancka jest równa $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s. Jej niezwykle mała wartość wyjaśnia, dlaczego w codziennych sytuacjach postrzegamy światło tak, jakby było emitowane w sposób ciągły, a nie stanowiło serię maleńkich błysków. Pojedynczy foton światła widzialnego ma energię co najwyżej $5,2 \cdot 10^{-19}$ J. Tak więc nieciągła natura światła jest dla nas na co dzień niewidoczna z tego samego powodu, z którego nie dostrzegamy nieciągłej natury materii – zarówno kwanty światła, jak i atomy są dla nas po prostu za małe.

$$\begin{aligned} E &= hf \\ h &= 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \\ f &= 7,9 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \\ E &= 5,2 \cdot 10^{-19} \text{ J} \end{aligned}$$

■ Wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego

Opisana wyżej zależność pozwala wyjaśnić przyczynę zjawiska fotoelektrycznego. Elektron w metalu pochłania tylko jeden foton i zyskuje jego energię. Jeśli jest ona wystarczająca do wyrwania elektronu z metalu

– zachodzi zjawisko fotoelektryczne, a jeśli nie jest – zjawisko nie zachodzi. Prawdopodobieństwo, że elektron pochłonie jednocześnie dwa fotony (lub więcej), jest znikomo małe.

Z punktu widzenia zjawiska fotoelektrycznego istotna jest więc energia pojedynczego fotonu, związana z jego częstotliwością, a nie łączna energia wszystkich fotonów, uzależniona od ich liczby.

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne polega na wybijaniu elektronów z powierzchni metalu przez fotony. Zachodzi ono tylko dla fotonów o dostatecznie dużej energii.

Zjawisko fotoelektryczne możemy porównać do próby rozbicia szyby: nie stłuczemy jej, jeśli będziemy w nią rzucać bardzo wieloma kulkami z papieru, ale bez problemu to zrobimy, kiedy rzucimy w nią jedną stalową kulką, nawet jeśli jej energia jest mniejsza niż łączna energia wszystkich kulek z papieru.

■ Jonizacja i zrywanie wiązań chemicznych

Innym przykładem zjawiska, które da się wyjaśnić za pomocą kwantów światła, jest jonizacja atomów, czyli wyrywanie elektronów z ich atomów pod wpływem promieniowania elektromagnetycznego.

Z kolei wybicie elektronu z atomu wchodzącego w skład cząsteczki chemicznej oznacza zerwanie wiązania. Również te zjawiska zachodzą tylko dla dostatecznie wysokiej częstotliwości promieniowania, czyli dla fotonów o dostatecznie dużej energii. Mogą one zostać wywołane przez promieniowanie ultrafioletowe, rentgenowskie albo gamma, ale nie przez światło widzialne, choćby bardzo silne.



Rys. 19.8. Nadfiolet nadaje skórze opalenizny, ale może także wywołać raka. Nie stwierdzono natomiast, aby takie działanie miały mikrofały używane do łączności komórkowej



Rys. 19.7. Dzięki efektowi fotoelektrycznemu działają niektóre wykrywacze płomienia. Są to czujniki promieniowania nadfioletowego, nieczułe na światło widzialne

W efekcie fotoelektrycznym wyrywane są elektrony swobodne, a nie te związane na stałe z konkretnym atomem.



Rys. 19.9. Ultrafiolet jest używany do sterylizacji pomieszczeń, a także sprzętu medycznego i kosmetycznego

Ma to duże znaczenie praktyczne. Zniszczenie cząsteczek wchodzących w skład organizmu człowieka może prowadzić – nawet po wielu latach – do chorób nowotworowych. Przyczyną takiej choroby bywa właśnie promieniowanie o częstotliwości wyższej niż światło widzialne.

Praca wyjścia

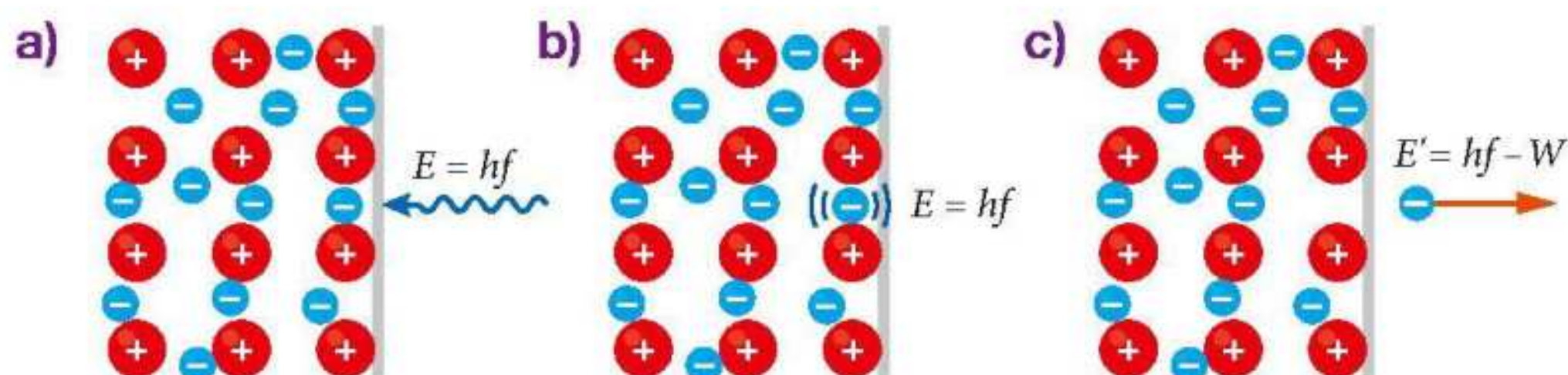
Powiedzieliśmy, że:

- aby elektron został wybity z metalu, musi osiągnąć pewną minimalną energię,
- energię tę elektron zyskuje po pochłonięciu fotonu,
- dla różnych metali różna jest graniczna częstotliwość światła, przy której zachodzi zjawisko fotoelektryczne, a więc także – graniczna energia fotonu.

Tę graniczną energię tradycyjnie nazywamy pracą wyjścia i oznaczamy W . Zatem elektron po pochłonięciu fotonu promieniowania o częstotliwości f zyskuje energię:

$$E = hf$$

której część zostaje wykorzystana na pracę wyjścia (rys. 19.10).



Rys. 19.10. Bilans energetyczny zjawiska fotoelektrycznego: a) foton o energii hf pada na powierzchnię metalu, b) elektron pochłania energię fotonu, c) wybity elektron ma energię kinetyczną mniejszą o W od energii fotonu

Oznacza to, że po wybiciu z metalu energia elektronu jest równa co najwyżej:

$$E' = hf - W$$

W przypadku dodatkowych strat energii, np. gdy elektron przed opuszczeniem metalu zderza się z jego jonami, energia elektronu jest mniejsza.

Elektronowolt

Wyrażanie energii elektronu w dżulach jest niewygodne, ponieważ trzeba posługiwać się bardzo małymi liczbami. W fizyce mikroświata częściej używamy znacznie mniejszej jednostki – elektronowoltów.

Elektronowolt (1 eV) to energia, jaką zyskuje elektron rozpędzający się w polu elektrycznym pod napięciem 1 V.

Tabela 19.1. Praca wyjścia dla wybranych metali

Metal	Praca wyjścia, eV
Arsen	5,1
Bar	2,5
Cez	2,1
Cynk	4,3
Glin (aluminium)	4,2
Lit	2,4
Miedź	4,5
Ołów	4,0
Platyna	5,3
Potas	2,2
Rubid	2,2
Sód	2,75
Srebro	4,7
Stront	2,5
Wolfram	4,6
Złoto	4,4

Tak więc:

$$1 \text{ eV} = e \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ J} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$

Aby lepiej zrozumieć, dlaczego elektronowolt jest jednostką energii, warto sobie przypomnieć, że zgodnie z definicją wolta $1 \text{ J} = 1 \text{ C} \cdot 1 \text{ V}$, a więc dżul można by inaczej nazwać kulombowoltem.

W tabeli 19.1 podajemy prace wyjścia dla różnych metali w elektronowoltach. W obliczeniach przydatna będzie także stała Plancka przeliczona na jednostkę $\text{eV} \cdot \text{s}$:

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV} \cdot \text{s} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

Podsumujmy:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad 1 \text{ J} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV} \quad h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$$

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



■ Przykład

Światło fioletowe wybija z elektrody cezowej elektrony, które następnie są rozpędzane w polu elektrycznym pod napięciem $U = 10 \text{ V}$. Ile maksymalnie może wynosić końcowa prędkość wybitego elektronu?

Dane: $U = 10 \text{ V}$ – napięcie, $\lambda = 400 \text{ nm}$ – długość fali światła fioletowego,
 $W = 2,1 \text{ eV}$ – praca wyjścia z cezu

Szukane: v – maksymalna prędkość wybitego elektronu

Rozwiązanie:

Aby obliczyć prędkość elektronu, najpierw musimy obliczyć jego energię. Przeanalizujemy zatem przemiany energii zachodzące w omawianym zjawisku. Elektron:

- najpierw zyskuje energię, gdy pochłania foton,
- następnie traci jej część, równą pracy wyjścia, aby wyrwać się z metalu,
- może tracić energię także na przykład podczas zderzeń z jonami, jednak te straty możemy pominąć, ponieważ interesuje nas prędkość – a więc też energia – maksymalna,
- na koniec zyskuje dodatkową energię w polu elektrycznym.

Zacznijmy od obliczenia energii fotonu:

$$E_{\text{fot}} = hf$$

Ponieważ znamy długość fali, a nie jej częstotliwość, korzystamy z zależności $f = \frac{c}{\lambda}$ i otrzymujemy wzór:

$$E_{\text{fot}} = \frac{hc}{\lambda}$$



➔ Długość fali światła fioletowego (oraz wartości stałych c i h) możemy odczytać z tablic na końcu podręcznika. Interesująca nas długość fali wynosi $\lambda = 400 \text{ nm}$. Obliczamy energię fotonu światła fioletowego:

$$E_{\text{fot}} = \frac{4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{400 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 3,1 \text{ eV}$$

Aby obliczyć energię po wybiciu elektronu z cezu, musimy uwzględnić jego pracę wyjścia. Odczytujemy jej wartość z tablic: $W = 2,1 \text{ eV}$. Stąd:

$$E_e = 3,1 \text{ eV} - 2,1 \text{ eV} = 1 \text{ eV}$$

Zgodnie z definicją elektronowolta: w polu elektrycznym pod napięciem 10 V elektron zyskuje energię 10 eV , więc jego końcowa energia kinetyczna wyniesie:

$$E_k = 11 \text{ eV} = 1,76 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Gdy wyznaczymy prędkość ze wzoru na energię kinetyczną:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}}$$

i podstawimy masę elektronu znaną z tablic: $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$, otrzymamy:

$$v = 1,97 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1970 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

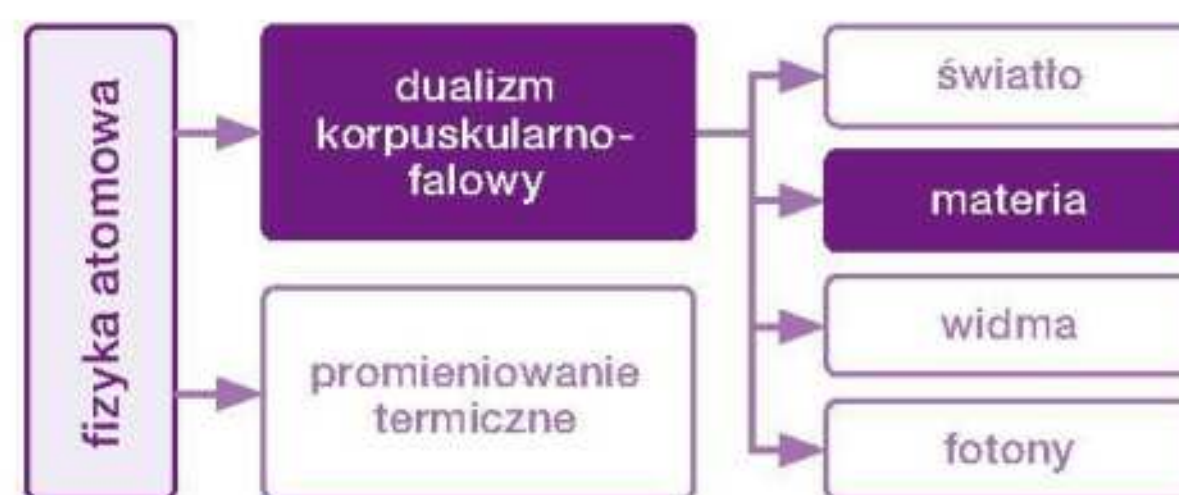
Odpowiedź: Elektron będzie się poruszał z prędkością co najwyżej $1970 \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

1. Oblicz maksymalną energię i minimalną energię fotonów światła widzialnego, czyli światła o długości fali między $\lambda_1 = 380 \text{ nm}$ i $\lambda_2 = 780 \text{ nm}$. Odpowiedź podaj w elektronowoltach.
2. Oblicz długość fali promieniowania, jakim trzeba oświetlić elektrodę z platyny, aby wyrwane z niej elektrony poruszały się z prędkością większą niż $1000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Do jakiego zakresu fal należy takie promieniowanie?
3. **P** Oblicz maksymalną prędkość elektronu wybitego z rubidu przez światło zielone o długości fali $\lambda = 550 \text{ nm}$.
4. Oszacuj, ile fotonów emituje w ciągu sekundy lampa LED o mocy 10 W i sprawności 50% .



19.2

Falowa natura materii



Ważne w tej lekcji:

- dyfrakcja i interferencja cząstek materii,
- długość fali de Broglie'a,
- fizyka klasyczna i kwantowa.

Przypomnij sobie:

- Światło ulega dyfrakcji i interferencji, więc jest falą.
- Wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego jest możliwe przy założeniu, że światło składa się z fotonów.

■ Podwójna natura światła

Przez wiele lat fizycy zastanawiali się nad tym, czy światło jest falą czy strumieniem cząstek. Wydawało się, że na początku XIX w. ostatecznie wyjaśniono tę kwestię: dyfrakcja i interferencja dowiodły, że światło jest falą. Jednak sto lat później odkryto, że światło składa się z niepodzielnych kwantów, które pod wieloma względami zachowują się jak cząstki. Ostatecznie ustalono, że światło jest obiektem zupełnie nowego rodzaju, który ma część własności podobnych do cząstek, a część – do fal. Tę podwójną naturę nazwano dualizmem korpuskularno-falowym.

Dyfrakcja i interferencja, podręcznik cz. 2
→ s. 355–365

Corpusculum to po łacinie cząstka, małe ciało.

■ Czy tylko światło?

Skoro jednak taką podwójną naturę ma światło, to może podobnie jest ze zwykłą materią? Okazuje się, że tak właśnie jest:

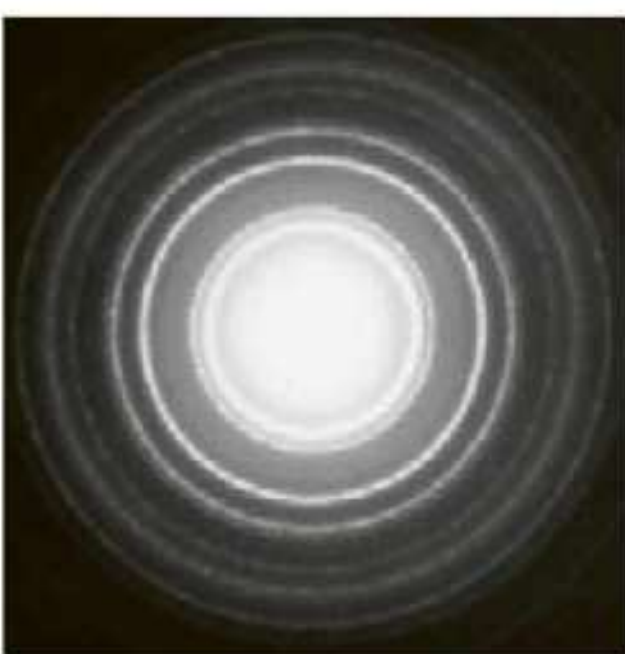
Każdej cząstce odpowiada fala materii o długości:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

stała Plancka
pęd cząstki



Rys. 19.11. Louis de Broglie – laureat Nagrody Nobla w 1929 r. za odkrycie falowej natury cząstek



Rys. 19.12. Obraz interferencyjny uzyskany po dyfrakcji elektronów na sieci krystalicznej cyrkonu

Jednostka masy atomowej:
 $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

Równanie to było wzorowane na wzorze na pęd fotonu, o którym powiemy w następnej lekcji.

Na cześć fizyka, który postawił hipotezę o falowej naturze materii, długość fali obliczoną z tego równania nazywamy **długością fali de Broglie'a**.

■ Fala materii obiektu makroskopowego

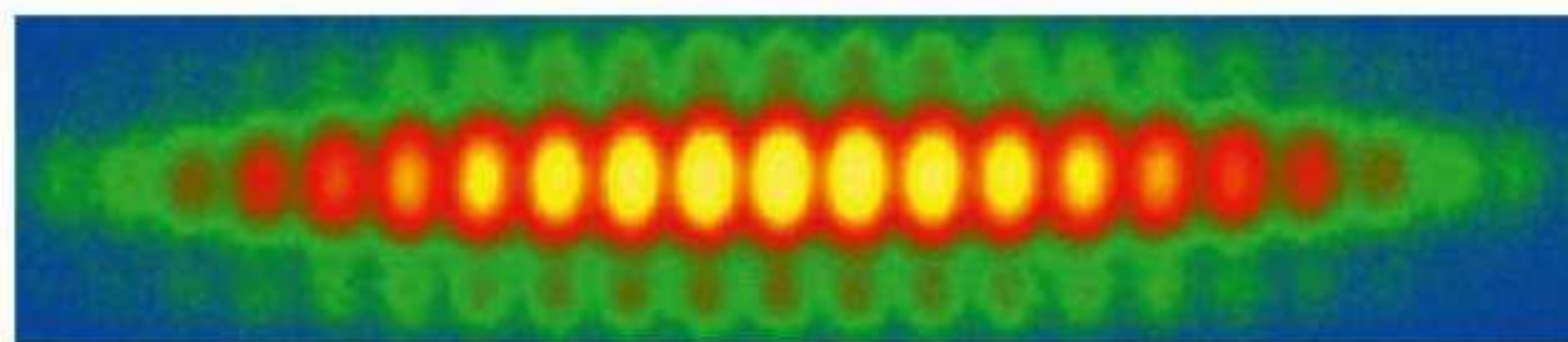
Ponieważ stała Plancka jest wyrażana bardzo małą liczbą, obiekty makroskopowe mają bardzo małe długości fali de Broglie'a. Na co dzień obserwujemy jedynie ich korpuskularną naturę.

Przykładowo z pociskiem o masie 3,4 g lecącym z prędkością $900 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ jest związana fala o długości rzędu 10^{-34} m . Aby zaobserwować jego falową naturę, np. dyfrakcję na szczelinie, musielibyśmy dysponować szczeliną o szerokości zbliżonej do długości tej fali, czyli tyle razy mniejszą od atomu, ile razy atom jest mniejszy od Układu Słonecznego. Tymczasem sam pocisk ma rozmiary ok. 10^{-2} m .

Dlatego właśnie pocisk zawsze zachowuje się jak cząstka.

■ Doświadczalny dowód falowej natury materii

Okazuje się jednak, że dla cząstek o bardzo małej masie można zaobserwować efekty falowe. Co prawda wymaga to użycia siatki dyfrakcyjnej o odległości między szczelinami zbliżonej do wielkości atomów, ale na szczęście takich siatek nie musimy wytwarzać sztucznie. Tę rolę mogą odgrywać kryształy (rys. 19.12).



Rys. 19.13. Obraz interferencyjny z doświadczenia Younga dla elektronów (kolory są dobrane umownie)

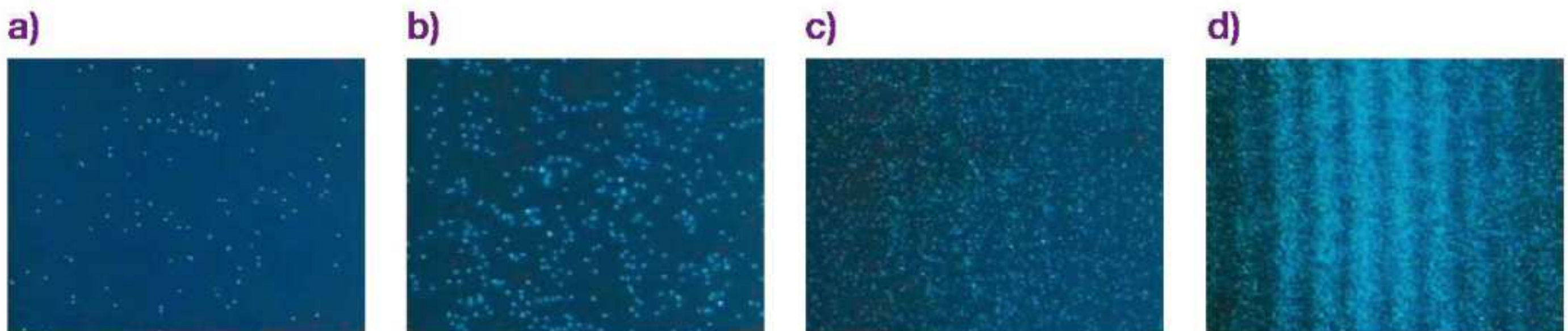
W ciągu ostatnich 100 lat fizykom udało się zaobserwować właściwości falowe coraz większych cząsteczek. Rekord (2025 r.) to złożona cząsteczka organiczna o masie cząsteczkowej 25 000 u.

■ Falowa natura pojedynczej cząstki

Stosunkowo nietrudno zaakceptować falową naturę strumienia elektronów. Można sobie wtedy wyobrazić, że elektrony interferują ze sobą nawzajem. **Nie jest** to jednak prawidłowe wyjaśnienie, o czym przekonuje nas następujący eksperyment.

Jeśli w doświadczeniu podobnym do doświadczenia Younga na przesłone z dwiema szczelinami będziemy kierować pojedyncze elektrony, przykładowo co 1 sekundę, także powstanie obraz interferencyjny. Stanie się tak, mimo że w chwili wysyłania kolejnego elektronu poprzedni będzie już dawno pochłonięty przez ekran.

Doświadczenie Younga,
podręcznik cz. 2 → s. 363



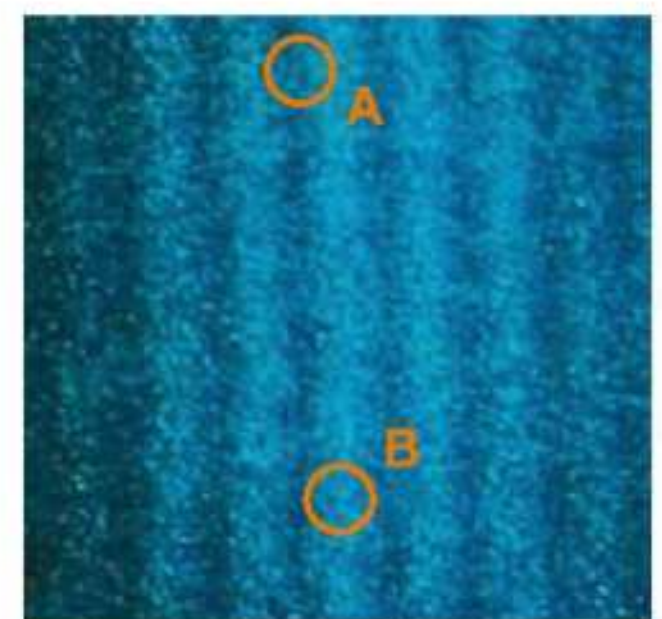
Rys. 19.14. Tworzenie obrazu interferencyjnego przez elektrony

Właśnie ta obserwacja potwierdza, że właściwości falowe ma nie tylko strumień elektronów, lecz także pojedynczy elektron.

Nie oznacza to jednak, że każdy elektron z osobna tworzy prążki interferencyjne. Na rysunku 19.14 przedstawiono kolejne etapy powstawania takiego obrazu. Każdy elektron trafia w losowe miejsce ekranu i tworzy pojedynczą jasną plamkę.

Jednak prawdopodobieństwo takiego zdarzenia nie jest takie samo dla każdego punktu ekranu. Tam, gdzie jest większe, trafia statystycznie więcej elektronów i tam tworzą się prążki.

Analogicznie jest w przypadku fotonów. Gdy natężenie światła jest tak małe, że z jego źródła co kilka sekund są emitowane pojedyncze fotony, nie widzimy od razu prążków interferencyjnych, a jedynie ślady uderzeń pojedynczych fotonów. Dopiero po bardzo dużej liczbie uderzeń te ślady układają się w wyraźne prążki.



Rys. 19.15. Szansa, że elektron trafi w kółko A, jest niewielka, więc trafiło tam niewiele elektronów. Szansa, że elektron trafi w kółko B, jest znacznie większa, więc trafiło tam znacznie więcej elektronów

■ Co w tych falach faluje?

Fale mechaniczne polegają na rozchodzeniu się drgań mechanicznych, czyli na okresowych zmianach położenia cząsteczek ośrodka, a fale elektromagnetyczne – na rozchodzeniu się okresowych zmian pola elektrycznego i pola magnetycznego.

Czy fala materii także jest związana z okresowymi zmianami jakiejś wielkości? Tak, jednak zmienia się wielkość, której do tej pory nie omawialiśmy. Jest to amplituda fali prawdopodobieństwa. Jest to wielkość pozwalająca obliczyć prawdopodobieństwo tego, że cząstka znajdzie się w danym czasie w danym miejscu.

Prawa fizyki rządzące zachowaniem cząstek mających właściwości falowe – a więc wszystkich bardzo małych cząstek materii – opisuje teoria o nazwie mechanika kwantowa.

MIKROSKOP ELEKTRONOWY

Zdolność rozdzielcza mikroskopu optycznego jest ograniczona przez długość fali światła, jaką możemy zastosować, czyli ok. 400 nm, co pozwala oglądać m.in. bakterię o wielkości 2 μm (czyli 2000 nm), ale nie wirusa o wielkości 50 nm.

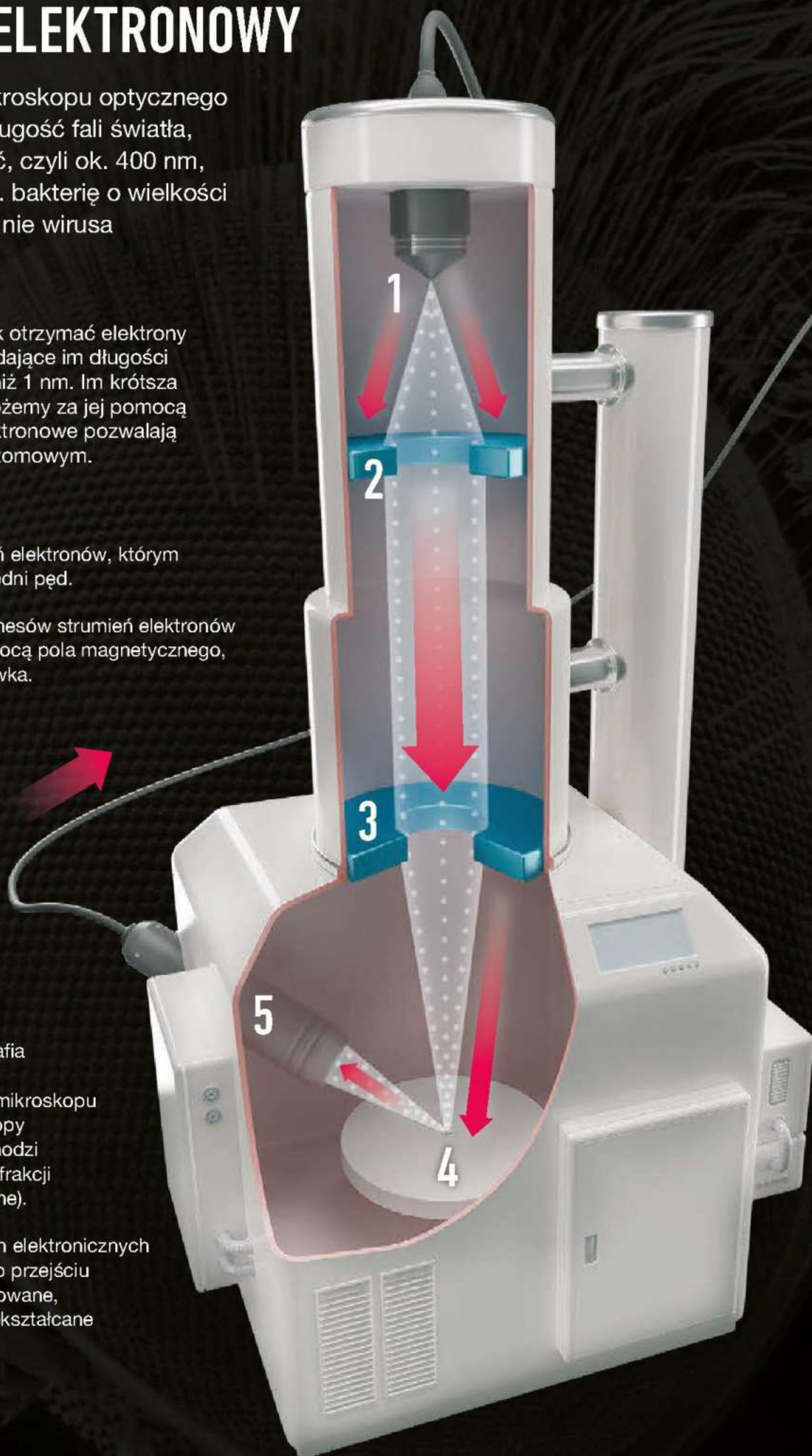
Stosunkowo łatwo jest jednak otrzymać elektrony o pędach takich, że odpowiadające im długości fali de Broglie'a są mniejsze niż 1 nm. Im krótsza fala, tym mniejsze obiekty możemy za jej pomocą zobrazować. Mikroskopy elektrony pozwalają badać materię na poziomie atomowym.

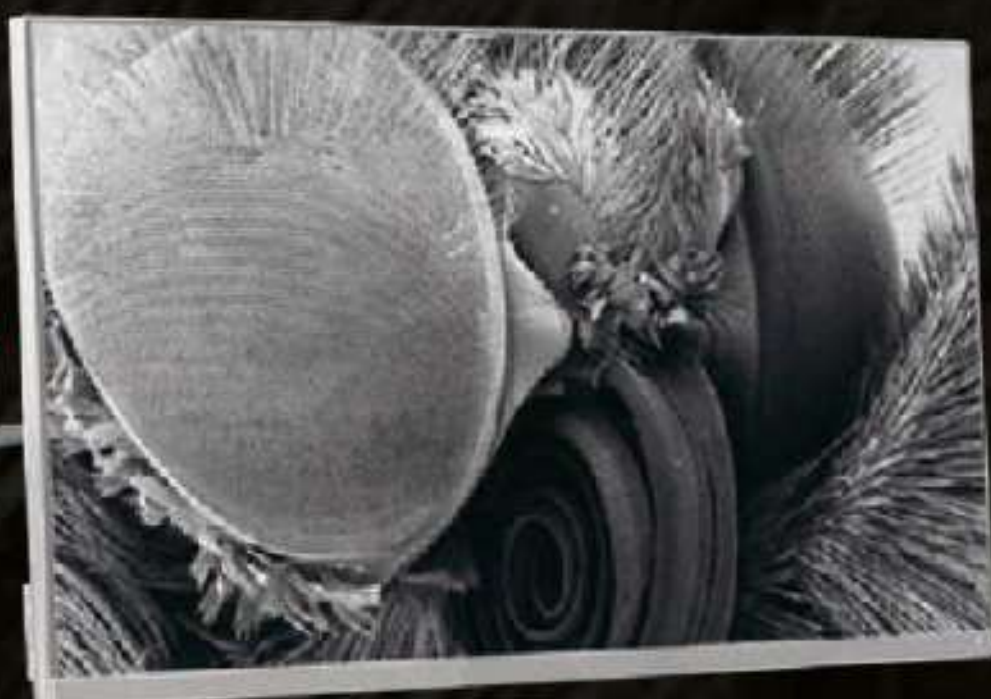
- 1** Źródło emituje strumień elektronów, którym nadawany jest odpowiedni pęd.
- 2** W układzie elektromagnesów strumień elektronów jest formowany za pomocą pola magnetycznego, działającego jak soczewka.

- 3** W kolejnym układzie elektromagnetycznym wiązka jest skupiana.

- 4** Strumień elektronów trafia na powierzchnię próbki i w zależności od typu mikroskopu ulega odbiciu (mikroskopy skaningowe) lub przechodzi przez próbkę i ulega dyfrakcji (mikroskopy transmisyjne).

- 5** W specjalnych układach elektronicznych elektrony po odbiciu lub przejściu przez próbkę są rejestrowane, a uzyskane dane – przekształcane na obraz powierzchni.





↓ głowa motyla



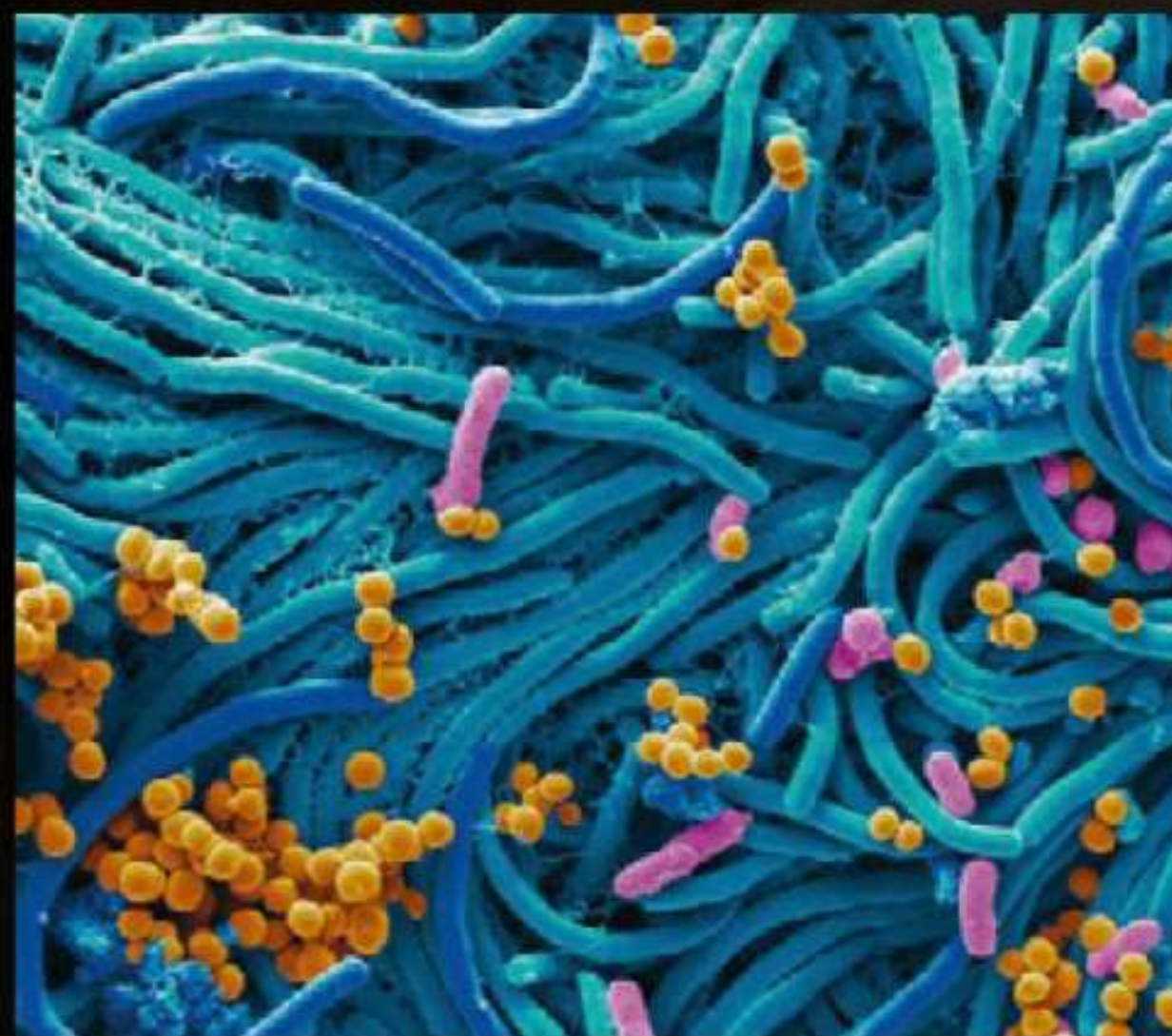
6 Na monitorze jest wyświetlany czarno-biały obraz powierzchni w powiększeniu nawet 10 mln razy.

7 Kolory na zdjęciu uzyskuje się w wyniku cyfrowej obróbki obrazu.

↓ kość



↓ bakterie na telefonie



↓ liść pomidora



↓ azotan sodu



Mówimy, że fizyka klasyczna jest deterministyczna, a fizyka kwantowa – indeterministyczna.

■ O mechanice kwantowej

Warto wiedzieć, że zgodnie z mechaniką kwantową nie da się jednoznacznie przewidzieć, w jaki sposób zajdzie zjawisko fizyczne, a jedynie obliczyć prawdopodobieństwo jego zajścia. Na przykład możemy obliczyć prawdopodobieństwo uderzenia elektronu w daną część ekranu i zweryfikować swoje obliczenia dzięki zbadaniu wielu elektronu. Nie przewidzimy jednak, gdzie uderzy jeden konkretny elektron.

Czy dla ciał makroskopowych również można stosować prawa fizyki kwantowej? Tak, choć byłoby to niepotrzebnym utrudnieniem. W tym przypadku prawdopodobieństwo, że zachowają się one zgodnie z prawami fizyki klasycznej, różni się od 1 w tak niewielkim stopniu, że rozsądniej jest tę różnicę pominąć.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



■ Przykład

Początkowo dyfrakcję i interferencję elektronów obserwowano tylko na kryształach, jednak dzisiaj prowadzi się już doświadczenia z wykonaną sztucznie przesłoną z dwiema szczelinami. W jednym z takich doświadczeń elektrony rozpędzone pod napięciem $U = 600 \text{ V}$ trafiały na przesłonę z dwiema szczelinami, między którymi odstęp wynosił $d = 270 \text{ nm}$. Oblicz, pod jakim kątem ugięła się wiązka tworząca czwarty jasny prążek (czyli odpowiadająca wzmocnieniu czwartego rzędu).

Dane: $U = 600 \text{ V}$, $d = 270 \text{ nm} = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

Szukane: θ_4 – kąt ugięcia wiązki tworzącej czwarty jasny prążek

Rozwiązanie:

Obliczamy długość fali de Broglie'a

Skoro mowa o interferencji, potrzebna będzie długość fali materii odpowiadająca elektronowi w opisanym doświadczeniu. Informacja o napięciu pozwala natychmiast zapisać energię elektronu:

$$E = 600 \text{ eV}$$

Przeliczmy ją na dżule:

$$E = 600 \text{ eV} = 600 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 9,6 \cdot 10^{-17} \text{ J}$$

Masę elektronu znajdujemy w tablicach. Jego prędkość wyznaczmy ze wzoru:

$$E = \frac{m_e v^2}{2} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2E}{m_e}}$$

Podstawiamy dane i przeliczamy jednostki:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,6 \cdot 10^{-17} \text{ J}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$[v] = \sqrt{\frac{\text{J}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}}{\text{kg}}} = \sqrt{\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$





Ostatecznie otrzymujemy: $v = 1,45 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Gdy znamy prędkość, możemy wyznaczyć pęd elektronu i długość fali:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Podstawiamy dane i przeliczamy jednostki:

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 4,59 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$[\lambda] = \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{m}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}} = \text{m}$$

Ostatecznie otrzymujemy: $\lambda = 5,0 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 50 \text{ pm}$.

Obliczamy szukany kąt

Korzystamy ze wzoru na kąt, pod jakim ugina się fala (podręcznik cz. 2 → s. 370):

$$\sin \theta_n = \frac{n\lambda}{d}$$

czyli w naszym wypadku:

$$\sin \theta_4 = \frac{4 \cdot 5,0 \cdot 10^{-11} \text{ m}}{2,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 7,4 \cdot 10^{-4}$$

Ostatecznie: $\theta_4 = 0,042^\circ$.

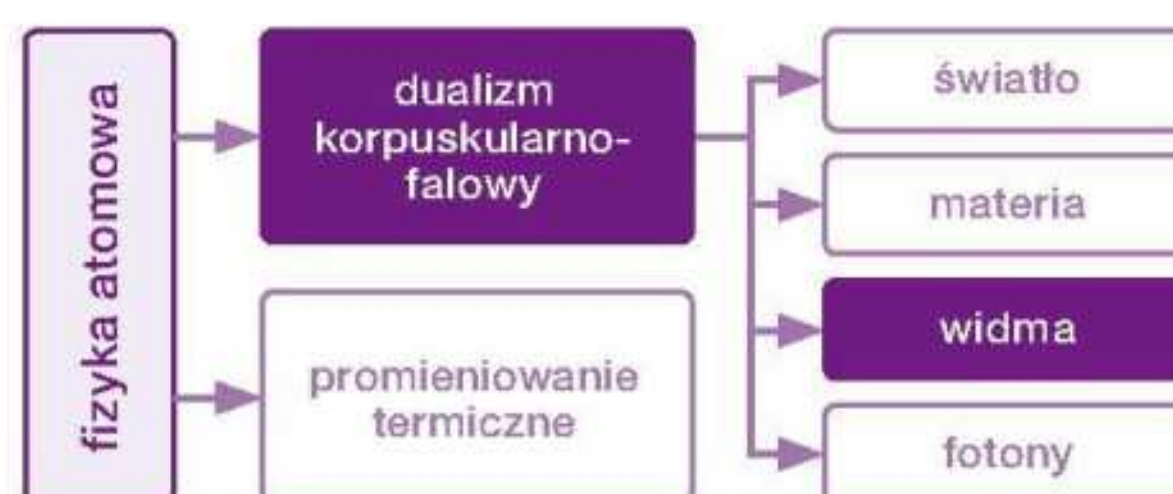
Odpowiedź: Kąt ugięcia tej wiązki wynosił $0,042^\circ$ (czyli ok. 2,5 minuty kątowej).

1. Ile wynosi długość fali de Broglie'a elektronu przyspieszanego różnicą potencjałów 100 V?
2. Jaką prędkość musiałby mieć elektron, aby długość odpowiadającej mu fali de Broglie'a była równa długości fali światła żółtego?
3. Oblicz długość fali de Broglie'a dla piłki tenisowej o masie 65 g i prędkości $60 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (z taką mniej więcej prędkością porusza się ona tuż po mocnym serwisie). Wyjaśnij, dlaczego nie obserwujemy dyfrakcji ani interferencji, gdy piłka trafi w siatkę pośrodku boiska.
4. **P** W 1991 r. przeprowadzono doświadczenie, w którym zaobserwowano interferencję

atomów helu przy przejściu przez przesłonę z dwiema szczelinami. Odległość między szczelinami wynosiła $8 \mu\text{m}$, a ekran był położony 64 cm za przesłoną. Atomy helu poruszały się z prędkością $1785 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

- a) Oblicz odległość między położeniem zerowego a pierwszego maksymalnego wzmocnienia na ekranie.
- b) W tym doświadczeniu atomów nie można było rozpędzać w polu elektrycznym, dlatego wykorzystano ich ruchy termiczne. W drugiej części doświadczenia gaz ochłodzono. Jak zmieniła się wtedy odległość między prążkami: zmalała czy wzrosła?

19.3 Widmo liniowe



Ważne w tej lekcji:

- widmo ciągłe i dyskretne,
- emisja i absorpcja fotonu,
- obliczanie długości fali.

Przypomnij sobie:

- Z rozszczepienia światła białego otrzymujemy tęczę, czyli barwy płynnie przechodzące od czerwonej do fioletowej.
- Energia fotonu jest proporcjonalna do jego częstotliwości.

W naukach ścisłych „dyskretny” znaczy „nieciągły”.

■ Widma ciągłe i dyskretne

W drugiej części podręcznika badaliśmy rozkład światła białego na poszczególne barwy (częstotliwości) dzięki zjawisku załamania. Otrzymaliśmy widmo ciągłe – barwy płynnie przechodzące jedna w drugą. Okazuje się jednak, że istnieją także widma nieciągłe, inaczej: dyskretne. Zbadamy to w prostym doświadczeniu.

■ Doświadczenie 12

Obserwacja widma atomowego za pomocą siatki dyfrakcyjnej

1. Przygotuj lampę ze świetlówką (np. kompaktową; im tańsza, tym lepsza do tego doświadczenia) oraz lampę z tradycyjną żarówką. Jeśli w pracowni macie rurki Plückera, możesz ich użyć zamiast świetlówek.
2. Przygotuj siatkę dyfrakcyjną. Jeśli jej nie masz, weź płytę CD.
3. Popatrz na każdą z lamp przez siatkę dyfrakcyjną albo na jej odbicie w CD. Czym różnią się obserwowane widma?

Widmo światła emitowanego przez rozgrzane ciało (włókno żarówki) jest widmem ciągłym – jedna barwa przechodzi płynnie w następną.

Inaczej jest ze światłem emitowanym przez gaz pobudzony do świecenia przez wyładowania elektryczne, tak jak w rurce Plückera albo w świetlówce (rys. 19.16).



Rys. 19.16. Przykładowe widmo świetlówki kompaktowej

Widmo gazu pobudzonego do świecenia jest widmem dyskretnym (nieciągłym) – składa się z pojedynczych linii.

Linie te są charakterystyczne dla danej substancji, co możemy wykorzystać w praktyce do jej analizy jakościowej (rys. 19.17). Analiza widma jest wykorzystywana w chemii, biologii, astrofizyce, a także w kryminalistyce (patrz „A to ciekawe” na dole strony).



Rys. 19.17. Widmo helu, czyli światła emitowanego przez hel pobudzony do świecenia

Ponieważ widmo to składa się z pojedynczych linii nazywamy je **widmem liniowym**. A ponieważ powstaje przy emisji światła przez pobudzony gaz: **widmem emisyjnym**.

■ Skąd bierze się widmo dyskretnne?

Aby wyjaśnić, jak powstaje widmo liniowe, poświęćmy chwilę budowie atomu.

W uproszczeniu wyobrażamy sobie nieraz, że elektron krąży wokół jądra atomowego jak planeta wokół gwiazdy. Trzeba jednak pamiętać o tym, że jest to bardzo uproszczony sposób wyobrażenia sobie atomu.

- Elektron ma naturę falową, nie jest więc zlokalizowany w jednym punkcie. Fala materii związana z elektronem otacza jądro atomowe ze wszystkich stron.
- Określenie „ze wszystkich stron” w poprzednim zdaniu dotyczy przestrzeni trójwymiarowej, podczas gdy orbita planety wokół gwiazdy leży tylko w jednej płaszczyźnie.

A to ciekawe

Kiedy na miejscu przestępstwa policja znajdzie choćby śladową ilość niezidentyfikowanej substancji, sprawdza jej skład. Jeśli jest jej zbyt mało do przeprowadzenia klasycznej analizy chemicznej, stosuje się analizę widma. Polega ona na badaniu promieniowania substancji doprowadzonej do postaci gazowej poprzez ogrzewanie. Pozwala to określić skład badanej próbki, co ułatwia ustalenie źródła pochodzenia podejrzanej substancji.



- Planeta może się znaleźć w dowolnej odległości od Słońca, a więc może mieć także dowolną energię. Energia elektronu również zależy od orbity, na której się on znajduje. Jest jednak zasadnicza różnica:

Energia elektronu w atomie nie może być dowolną liczbą, ale przyjmuje jedną spośród ściśle określonych wartości.

Mówimy, że energia elektronu jest **skwantowana**. Na przykład w atomie wodoru może wynosić:

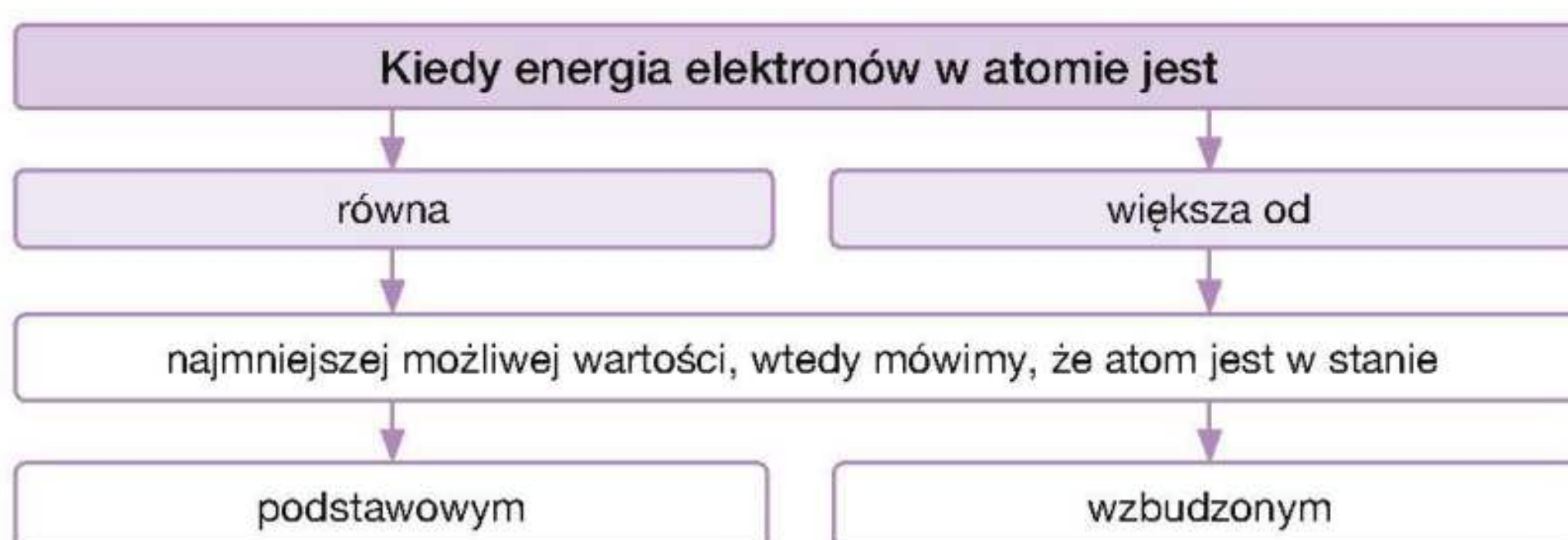
$$\frac{-13,6 \text{ eV}}{1^2} = -13,6 \text{ eV}, \frac{-13,6 \text{ eV}}{2^2} = -3,4 \text{ eV}, \frac{-13,6 \text{ eV}}{3^2} = -1,5 \text{ eV}...$$

Nie może jednak osiągać wartości pośrednich, np. -10 eV .

Te dozwolone wartości nazywamy **poziomami energetycznymi**.

Energie te są ujemne, ponieważ za zero przyjmujemy energię w sytuacji, gdy elektron jest całkowicie oderwany od atomu, (patrz podręcznik, cz. 3 → s. 58 i 111).

■ Stan podstawowy i stan wzbudzony



Stan wzbudzony nie jest trwały – elektron pozbywa się nadmiaru energii.

Gdy elektron w atomie zmienia poziom energetyczny na niższy, emituje foton.

Zgodnie z zasadą zachowania energii, energia fotonu jest równa różnicy energii elektronu na poziomie, z którego „spada”, i na poziomie, na którym „ląduje” (rys. 19.20a na stronie obok).

Czasami elektron emituje całą nadmiarową energię w jednym fotonie. Czasami jest ich kilka, ponieważ elektron „robi przystanki” na pośrednich poziomach energetycznych (orbitach).

Jednak zawsze należy pamiętać, że elektron nie może przyjmować pośrednich wartości energii nawet tymczasowo, podczas przeskoku. Tak więc nie tyle przeskakuje z jednej orbity na drugą, co znika z jednej i jednocześnie pojawia się na drugiej.

Ponieważ energia elektronu jest skwantowana, więc także energia emitowana przy przeskokach przyjmuje skończoną liczbę wartości.

Właśnie dlatego widmo emisyjne jest dyskretne.

Widma emisyjne i absorpcyjne

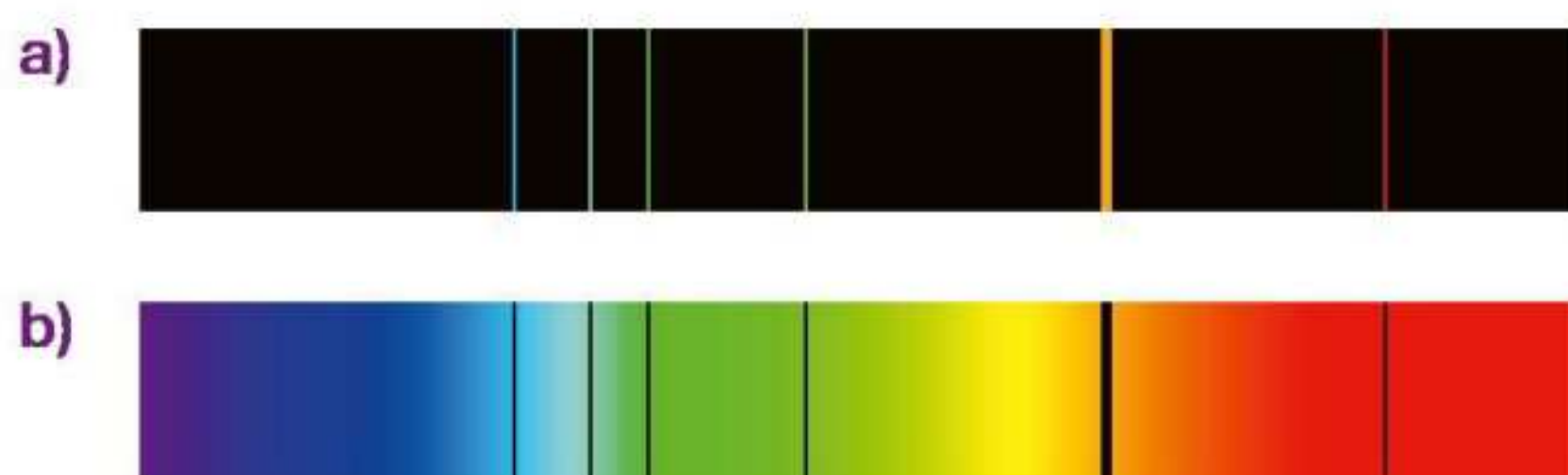
Do tej pory zajmowaliśmy się widmem promieniowania emitowanego (wysyłanego) przez gaz.

Rozważmy teraz inną sytuację: pochłanianie (absorpcję) promieniowania przez taki sam gaz. Okazuje się, że pochłania on tylko fale o wybranych częstotliwościach, a wszystkie pozostałe – przepuszcza.

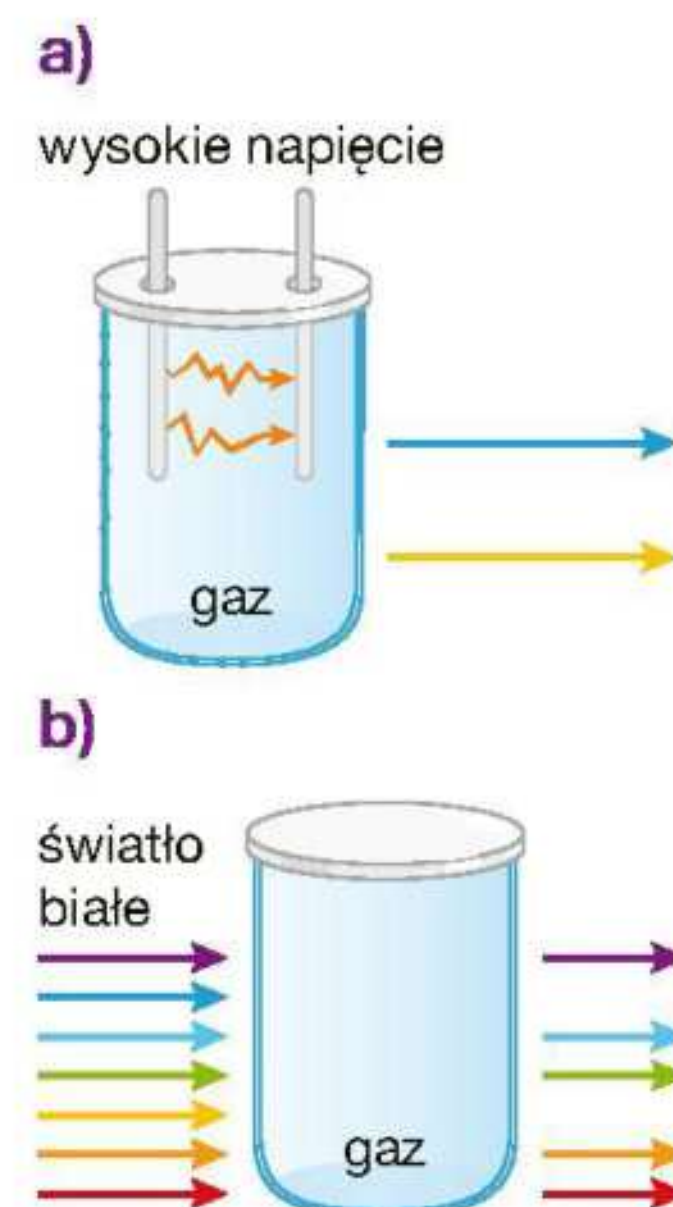
Które konkretnie fale pochłania? Zasada jest bardzo prosta:

Gaz pochłania fale o tych samych częstotliwościach, które emituje wtedy, gdy jest pobudzony do świecenia.

W ten sposób powstaje widmo absorpcyjne, złożone z prawie wszystkich częstotliwości, z wyjątkiem pochłoniętych przez gaz (rys. 19.18 i 19.19).



Rys. 19.18. Widmo węgla w stanie gazowym: a) emisyjne, b) absorpcyjne

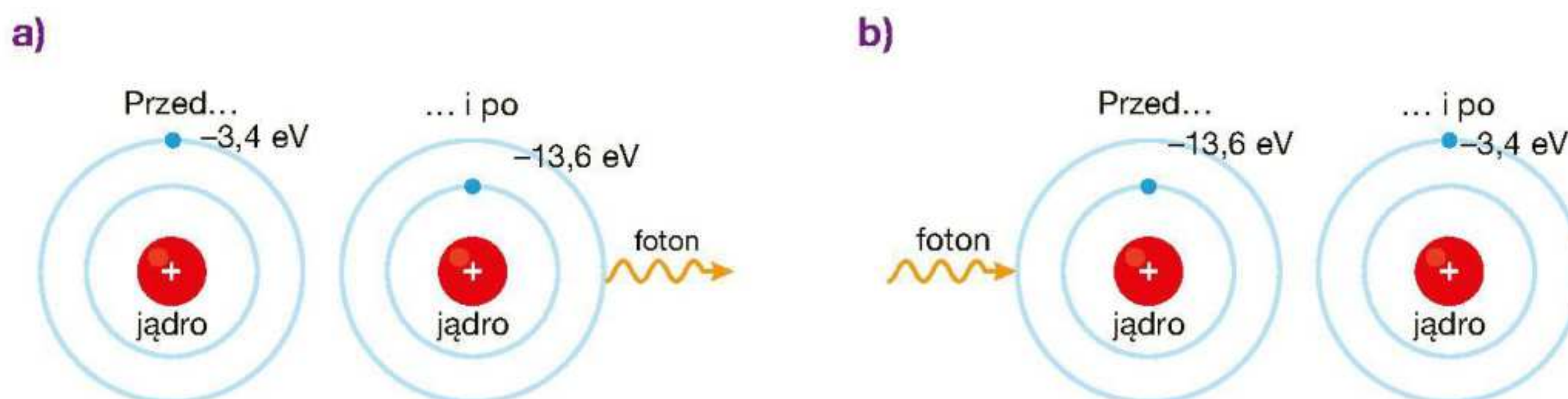


Rys. 19.19. Powstawanie widma: a) emisyjnego, b) absorpcyjnego

Powstawanie widma absorpcyjnego

Dlaczego tak jest? Skoro atom emituje energię w postaci fotonu wtedy, gdy jeden z jego elektronów zmniejsza swoją energię, to łatwo wyobrazić sobie sytuację odwrotną: gdy elektron pochłania energię w postaci fotonu, zwiększa swoją energię (a atom staje się wzbudzony).

Jednak energia elektronu jest skwantowana, więc elektron może pochłaniać fotony tylko o takiej energii, aby mógł wskakiwać na konkretne wyższe poziomy energetyczne, czyli o energii równej różnicy między poziomami energetycznymi. A przecież także emitowany foton ma energię równą takiej różnicy.



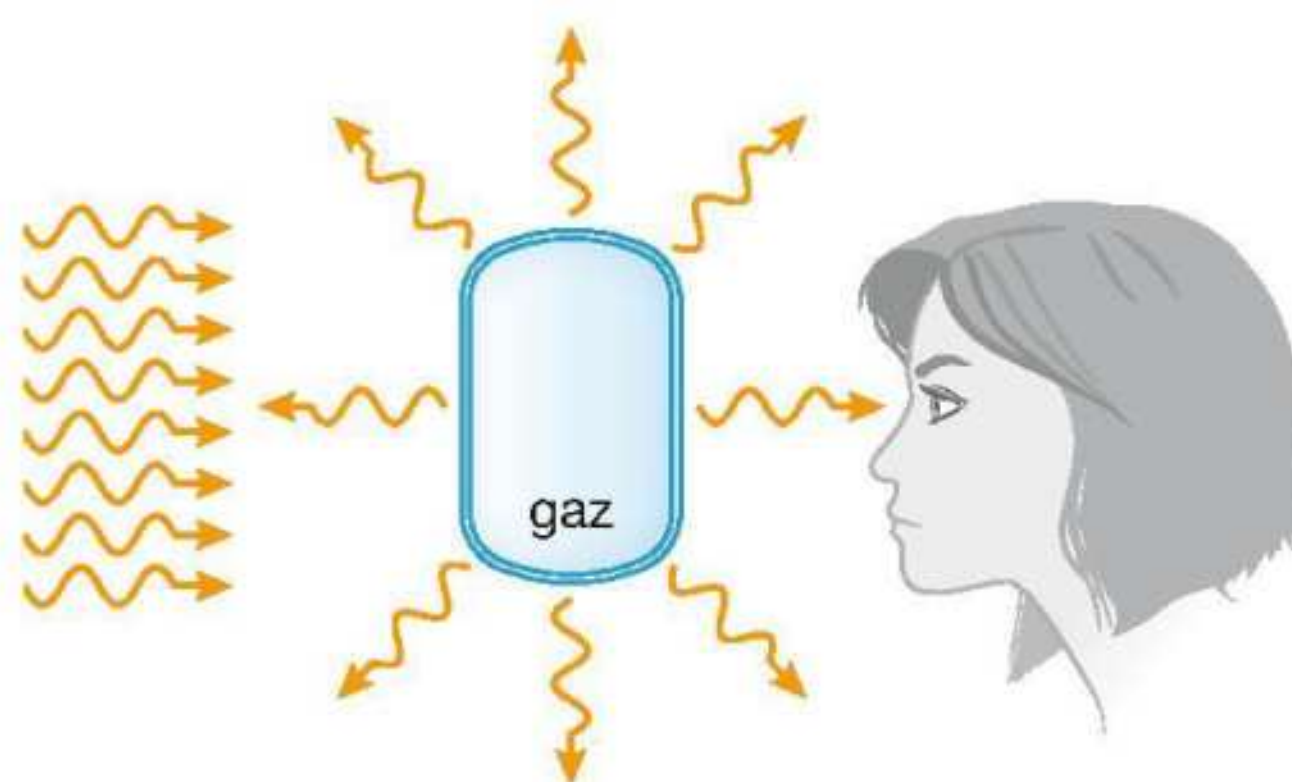
Rys. 19.20. a) wysyłanie (emisja) fotonu, b) pochłanianie (absorpcja) fotonu

Jest to zgodne z zasadą zachowania pędu, ponieważ atom może zacząć się poruszać → s. 102).

■ Co się dzieje z pochłoniętą energią?

Po pochłonięciu fotonu atom wkrótce pozbywa się nadmiaru energii i emituje jeden albo więcej fotonów. Gdy foton jest jeden (a dla sąsiednich poziomów energetycznych to jedyna możliwość), ma on taką samą energię jak ten, który został wcześniej pochłonięty. Jednak wyemitowany foton może zostać wysłany w dowolną stronę, a nie tylko w tę, w którą leciał foton pochłonięty.

Dlatego do obserwatora dociera tylko bardzo niewiele fotonów i widzi on ciemną (niemal czarną) linię w widmie.



Rys. 19.21. Absorpcja i emisja światła przez gaz

■ Widmo atomu wodoru

Najprostsze w opisie widmo ma atom wodoru, ponieważ ma on tylko jeden elektron. Jak napisaliśmy wyżej, energia tego elektronu może wynosić:

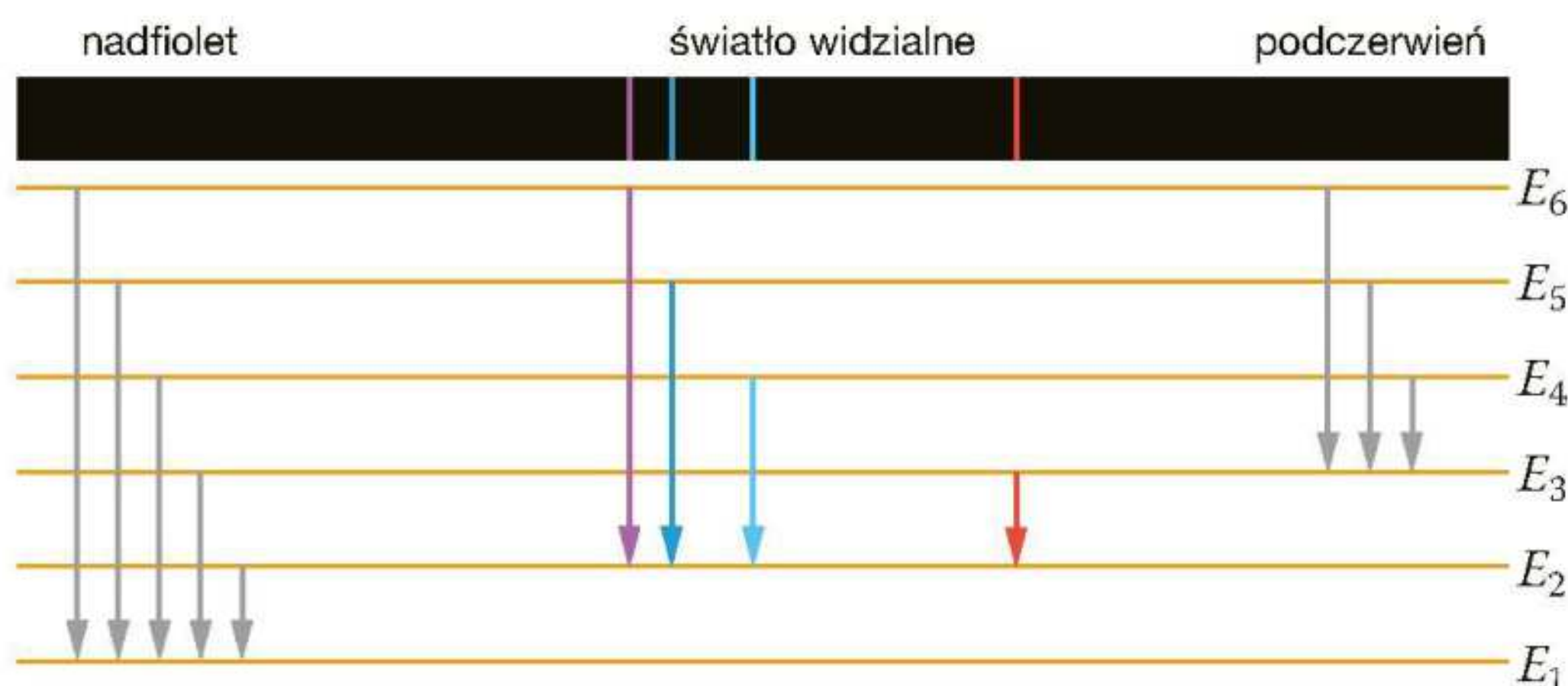
$$E_1 = -\frac{13,6 \text{ eV}}{1^2}, E_2 = -\frac{13,6 \text{ eV}}{2^2} \text{ itd.}$$

czyli ogólnie:

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2}$$

gdzie n jest numerem stanu energetycznego (czyli orbity), a $E_0 = 13,6 \text{ eV}$. Zauważ, że skoro najniższa możliwa energia elektronu wynosi $-E_0$, to po dostarczeniu mu energii E_0 elektron może się oderwać od atomu. Tak więc $E_0 = 13,6 \text{ eV}$ jest energią jonizacji atomu wodoru.

Skoro umiemy obliczyć każdą z możliwych energii, to także łatwo możemy znaleźć ich różnice. Przykładowo gdy elektron w atomie wodoru „spada” z orbity 4. na 2., wtedy zmniejsza energię z E_4 na E_2 , a różnicy (równej $E_4 - E_2$) pozbywa się w postaci fotonu o energii $E_4 - E_2$ (patrz przykład po lekcji).



Rys. 19.22. Przeskoki elektronów między poziomami energetycznymi (orbitami) w atomie wodoru

■ Powstawanie widma ciągłego

Wyjaśniliśmy, jak powstaje dyskretne widmo rozrzedzonego gazu. Skoro jednak cała materia jest zbudowana z atomów, to dlaczego nie wszystkie widma są dyskretne?

Okazuje się, że atomy ciała stałego, cieczy lub gazu pod wysokim ciśnieniem również emitują fotony przy przejściu elektronu z wyższego poziomu energetycznego na niższy. Jednak elektrony oddziałują nie tylko z jądrem własnego atomu, lecz także między sobą, a nawet z sąsiednimi atomami.

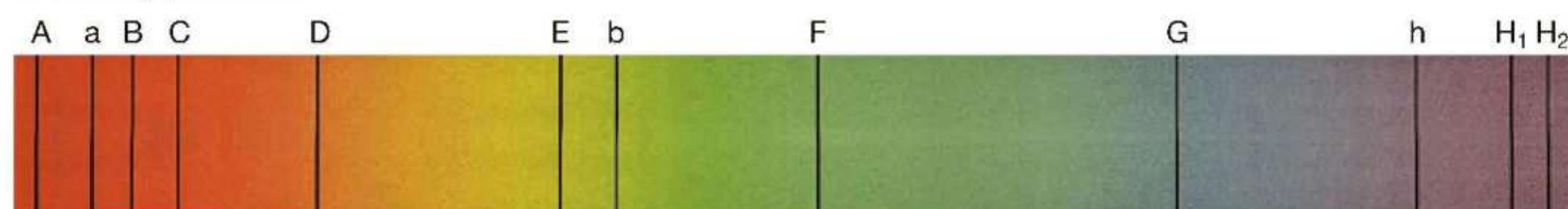
Możliwych stanów energetycznych jest tak wiele, że emitowane widmo składa się z ogromnej liczby linii, które zlewają się ze sobą i tworzą widmo ciągłe.

A to ciekawe

Gdy patrzymy na tęczę, nie widzimy w niej żadnych przerw. Jednak dokładniejsza analiza widma światła słonecznego za pomocą spektroskopu pozwala dostrzec w nim wąskie, cienkie linie.

Odkrył je na początku XIX w. Joseph von Fraunhofer i od jego nazwiska nazywamy je liniami Fraunhofera (patrz rys. poniżej).

W 1868 r. zauważono, że brakujące długości fal w widmie Słońca odpowiadają liniom w widmie gazów, i słusznie skojarzono ich powstawanie z pochłanianiem niektórych fal w zewnętrznych warstwach Słońca lub w atmosferze Ziemi. Dzięki temu ustalono, z jakich pierwiastków są zbudowane Słońce i inne gwiazdy. Odkryto też nowy pierwiastek, który – jak się wówczas wydawało – nie występuje na Ziemi. Nadano mu nazwę hel (od gr. *helios* – słońce). Dopiero 27 lat później okazało się, że hel występuje także na naszej planecie.

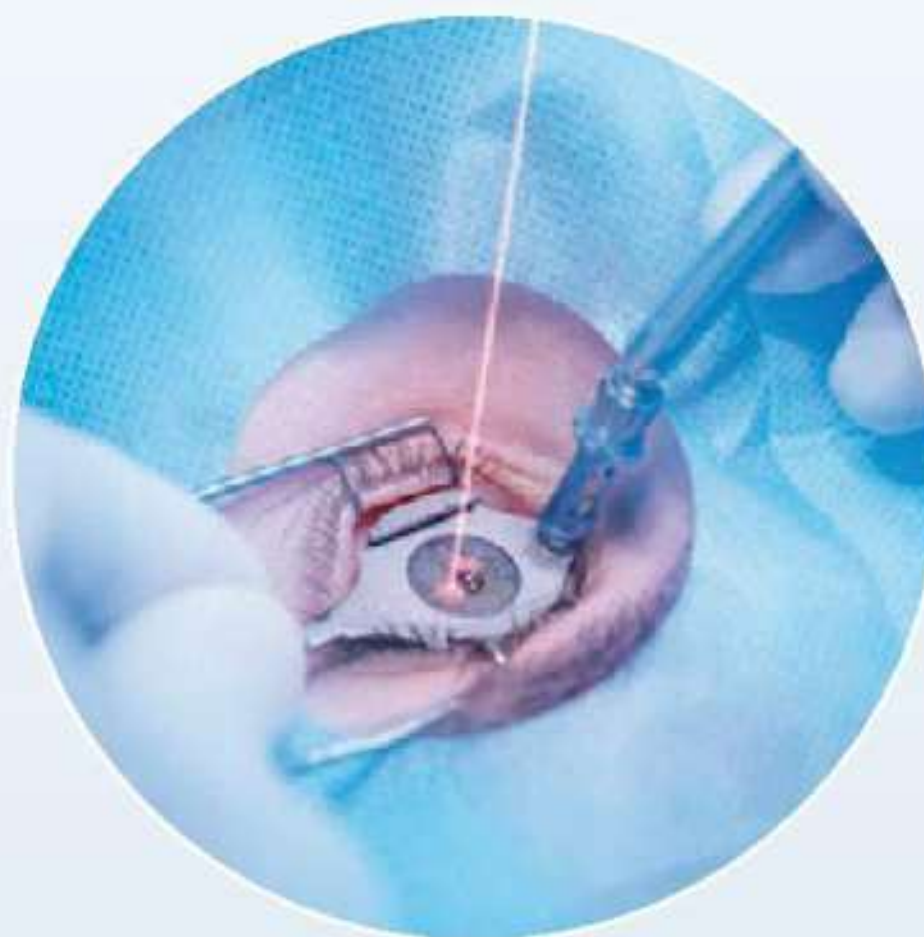


Zastosowania laserów

Lasery to jedne z najbardziej fascynujących wynalazków współczesnej nauki — potrafią przecinać stal, operować ludzkie oko, zmierzyć odległość do Księżyca, a nawet badać skład odległych planet. To technologia, która przenika niemal każdy aspekt współczesnego życia.

Medycyna

Lasery umożliwiają bezkrwawe i bardzo precyzyjne cięcie w chirurgii, wykorzystuje się je w okulistyce do korekcji wad wzroku, w dermatologii do usuwania zmian skórnych (również tatuaży), w stomatologii do precyzyjnego wiercenia i usuwania próchnicy, a także w terapii nowotworów (terapia fotodynamiczna – PTD).



Nauka, technologia i przemysł

Lasery wykorzystuje się m.in. do badania składu chemicznego próbek, analizy zanieczyszczeń powietrza, cięcia i spawania metali, obróbki materiałów, grawerowania, pomiarów odległości, a także tworzeniu precyzyjnych mikro i nanostruktur np. produkcji mikroprocesorów.



Pomiary i obrazowanie laserowe

LiDAR (light detection and ranging) to urządzenie będące połączeniem dalmierza laserowego i skanera 3D pozwalające na trójwymiarowe mapowanie terenu z pomiarem odległości. Znajduje zastosowania w wojskowości, samochodach autonomicznych, oceanografii, a także w przemyśle rozrywkowym i multimedialach.



Telekomunikacja światłowodowa

Źródłem światła przenoszącego informacje na ogromne odległości są lasery i diody laserowe. Dzięki nim można przesyłać dane z prędkościami sięgającymi setek gigabitów na sekundę. Odporność na zakłócenia elektromagnetyczne i możliwości monitorowania bardzo długich odcinków światłowodu, sprawia, że telekomunikacja światłowodowa jest niezwykle istotna w systemach bezpieczeństwa.



Laser podłączony do światłowodu

F Emisja wymuszona

Wiesz już jak powstaje widmo ciągłe i dyskretne. A jak powstaje światło laserowe, złożone z fal o jednej długości, a do tego spójne?

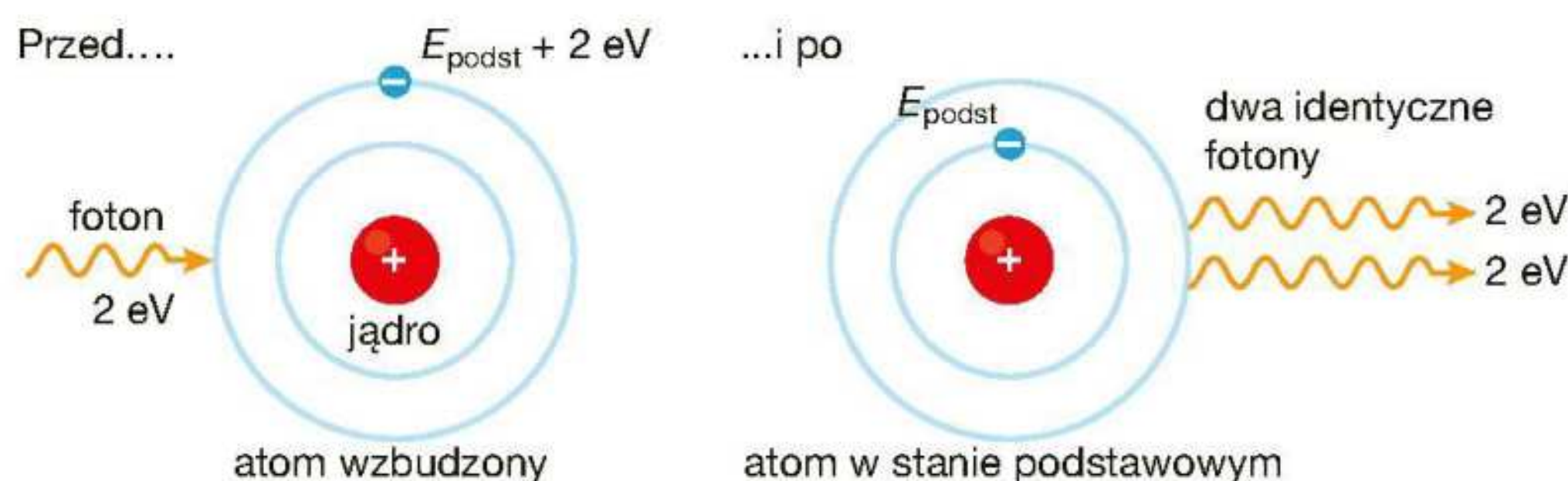
Zasada działania lasera jest zapisana w jego nazwie, która pochodzi od skrótu LASER: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* – wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania.

Zjawisko to schematycznie przedstawiono na rysunku 19.23. Najpierw mamy **wzbudzony** atom z elektronem o energii o 2 eV wyższą niż w stanie podstawowym. Zbliżający się do niego foton też ma energię 2 eV. Mógł on zostać wyemitowany przez inny atom w takim samym stanie wzbudzonym. Nadlatujący foton powoduje, że atom emituje drugi, identyczny foton. Każdy z tych dwóch fotonów może znowu spowodować emisję wymuszoną i w sumie otrzymamy cztery fotony, następnie osiem itd.

Aby w ośrodku mogła zachodzić emisja wymuszona, musi się tam znajdować wiele atomów w stanie wzbudzonym – więcej niż w stanie podstawowym, które pochłaniałyby powstające fotony. Spełnienie tego warunku nie jest proste: elektrony mają tendencję do wracania do stanu podstawowego. W różnych typach laserów osiąga się to w różny sposób.

Światło spójne,
podręcznik cz. 2 → s. 362

Obecnie także po angielsku *laser* piszemy i czytamy jako zwykłe słowo.



Rys. 19.23. Schemat emisji wymuszonej

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



■ Przykład

Oblicz częstotliwość i długość fali emitowanej przez atom wodoru, kiedy jego elektron przeskakuje bezpośrednio z szóstej na drugą orbitę. Czy promieniowanie o takiej długości jest widzialne dla ludzi?

Rozwiązanie:

Energia fotonu wynosi: początkowa $E_6 = -\frac{E_0}{6^2}$ końcowa $E_2 = -\frac{E_0}{2^2}$

Energia fotonu równa jest różnicy tych energii:

$$E = E_0 \cdot \left(-\frac{1}{36} - \left(-\frac{1}{4} \right) \right) = 13,6 \text{ eV} \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{36} \right) = 3,02 \text{ eV}$$

Na podstawie tej energii możemy obliczyć częstotliwość:

$$E = hf \rightarrow f = \frac{E}{h}$$

Podstawiamy dane:

$$f = \frac{3,02 \text{ eV}}{4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}} = 7,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

➡ a stąd długość fali:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{7,3 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{s}}} = 4,11 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 411 \text{ nm}$$

Jest to więc światło widzialne (fioletowe).

Odpowiedź: Emitowane światło ma częstotliwość $7,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ i długość 411 nm . Jest to światło widzialne barwy fioletowej.

1. **P** Oblicz częstotliwość i długość fali jasnoniebieskiej linii widmowej wodoru.

2. W wielu szkolnych pracowniach wykorzystujemy laser zwany helowo-neonowym. Foton jest w nim emitowany przy przejściu elektronu z orbity o energii $-0,9 \text{ eV}$ na orbitę o energii $-2,85 \text{ eV}$. Jaka jest długość fali światła emitowanego przez ten laser? Jaką barwę ma to światło?

Jeśli w twojej szkole znajduje się taki laser, sprawdź, czy jego światło rzeczywiście ma barwę zgodną z twoimi obliczeniami. Jeśli go tam nie ma, poszukaj informacji w książkach lub internecie.

3. Jakemu przeskokowi elektronu w atomie wodoru odpowiada fala o długości 1090 nm ? Do jakiego zakresu fal elektromagnetycznych należy takie promieniowanie?

4. Elektron w pewnym atomie przeskakuje z orbity 5 na 3 i emituje falę o częstotliwości f_{53} i długości λ_{53} . Analogicznie wprowadzamy oznaczenia f_{43} oraz λ_{43} .

a) Która z częstotliwości jest wyższa: f_{53} czy f_{43} ?

b) Która z długości fal jest większa: λ_{53} czy λ_{43} ?

5. Z orbity n na orbitę 1 elektron może spaść bezpośrednio i wyemitować przy tym promieniowanie o długości λ_{n1} . Może też najpierw spaść na orbitę k ($1 < k < n$), a dopiero stamtąd na orbitę 1 i wyemitować najpierw promieniowanie o długości λ_{nk} , a potem promieniowanie o długości λ_{k1} . Uzasadnij,

że pomiędzy tymi długościami fal zachodzi związek:

$$\frac{1}{\lambda_{n1}} = \frac{1}{\lambda_{nk}} + \frac{1}{\lambda_{k1}}$$

6. Wykonaj doświadczenie.

a) Przygotuj szczyptę soli, kilka centymetrów cienkiego miedzianego przewodu bez izolacji oraz kombinarki. Będziesz także potrzebować dostępu do kuchni gazowej.

b) Złap kombinerkami miedziany przewód i umieść go w płomieniu gazowym. Przypatrz się płomieniowi: jakie barwy możesz w nim zauważyć?



c) Zwilż koniec kombinerek i dotknij nim soli, aby się przyczepiła, a następnie umieść sól w płomieniu. Jaka teraz jest barwa płomienia?

d) Znajdź widma miedzi, sodu i chloru (sól kuchenna to chlorek sodu). Możesz użyć np. darmowego programu Spektruś, dostępnego w internecie.

e) Które barwy z widma miedzi było widać w płomieniu? Czy barwa płomienia po umieszczeniu w nim soli to promieniowanie chloru czy sodu?

19.4

Foton jako cząstka



Ważne w tej lekcji:

- pęd fotonu,
- odrzut atomu.

Przypomnij sobie:

- Światło składa się z niepodzielnych porcji, zwanych kwantami światła albo fotonami.
- Energia fotonu zależy od jego częstotliwości zgodnie ze wzorem $E = hf$, gdzie h jest stałą Plancka.

Foton

Początkowo fizycy mówili po prostu o kwantach, czyli porcjach światła lub innego promieniowania elektromagnetycznego. Później jednak kwant promieniowania uznano za cząstkę i nadano mu nazwę foton, brzmiącą podobnie jak proton czy elektron. Nazwa ta pochodzi od greckiego słowa *fos*, w dopełniaczu *fotos*, które oznacza światło.

Słowo *światło* może oznaczać albo tylko światło widzialne, albo także podczerwień i nadfiolet.

Pęd fotonu

Ważną cechą fotonu, która upodabnia go do innych cząstek, jest posiadanie pędu. Pędu fotonu nie da się jednak obliczać ze znanej ci zależności $p = mv$.

Pęd fotonu o częstotliwości f i energii E wyznaczamy z zależności:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{E}{c}$$

Podobnie jak w przypadku innych ciał, wektor pędu fotonu jest skierowany w stronę, w którą porusza się foton.

Wzór $p = mv$ nie obowiązuje także dla innych cząstek poruszających się z prędkościami zbliżonymi do prędkości światła. W takich przypadkach używamy wzoru wynikającego z teorii względności.

■ Pęd fotonu w życiu codziennym

Spróbujmy oszacować pęd światła, z jakim mamy do czynienia na co dzień. Przeciętna lampa LED o mocy 10 W i sprawności 50% emituje w ciągu 1 s światło o energii 5 J, czyli fotony o łącznej energii 5 J. Załóżmy, że jest ono emitowane w jednym kierunku (w tym celu można posłużyć się odpowiednim zwierciadłem).

Skoro dla każdego fotonu zachodzi zależność $p = \frac{E}{c}$, to taka sama zależność zachodzi dla łącznej energii i łącznego pędu.

Podstawiamy podane dane do wzoru na pęd i przeliczamy jednostkę:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{5 \text{ J}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$[p] = \frac{J}{\frac{m}{s}} = \frac{J \cdot s}{m} = \frac{N \cdot m \cdot s}{m} = N \cdot s = \text{kg} \cdot \frac{m}{s^2} \cdot s = \text{kg} \cdot \frac{m}{s}$$

Łączny pęd fotonów wynosi zatem:

$$p = \frac{E}{c} = 1,67 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot \frac{m}{s}$$

Gdy świecimy taką lampą na ciemne pudełko, absorbuje (pochłania) ono fotony i przejmuje ich pęd, a więc zgodnie z drugą zasadą dynamiki działa na nie siła:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{1,67 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot \frac{m}{s}}{1 \text{ s}} = 1,67 \cdot 10^{-8} \text{ N}$$

Nic więc dziwnego, że po włączeniu lampki pudełko nie zacznie się przesuwac – siła wywołana przez światło jest miliony razy za mała, aby przezwyciężyć tarcie.

Mimo tak niewielkiej wartości pęd światła znalazł praktyczne zastosowanie (patrz „A to ciekawe” poniżej).

■ Odrzut przy emisji fotonu

Jednym z pierwszych zjawisk demonstrowanych przy okazji omawiania zasady zachowania pędu dla ciał makroskopowych jest zjawisko odrzutu. Wypuszczony z ręki nadmuchany, ale niezawiązany balonik lata bezładnie po całym pokoju, a strzelba zaczyna się poruszać wstecz, gdy wystrzeli pocisk.

A to ciekawe

Jeżeli w przestrzeni kosmicznej rozepniemy dużą, cienką odblaskową folię, zwaną żaglem słonecznym, to światło słoneczne wprawi ją w ruch, ponieważ pęd fotonów przy odbiciu zmienia się na przeciwny. W kosmosie nie ma tarcia ani oporu ośrodka, który równoważyłby siłę wynikającą z nacisku fotonów, a nawet niewielka siła, ale działająca przez dłuższy czas, może poruszać obiekty. Pierwszym pojazdem kosmicznym napędzanym żaglem słonecznym była japońska sonda kosmiczna IKAROS, która w 2010 r. dotarła do Wenus.

Zakładamy, że kierunek i zwrot pędów wszystkich fotonów są jednakowe, a więc ich wartości można dodawać.

Druga zasada dynamiki w postaci z pędem, podręcznik cz. 1 → s. 232

Nawet dla małego pustego pudełka na gładkim stole tarcie wynosi ponad 0,1 N.

Odrzut, podręcznik cz. 1 → s. 219



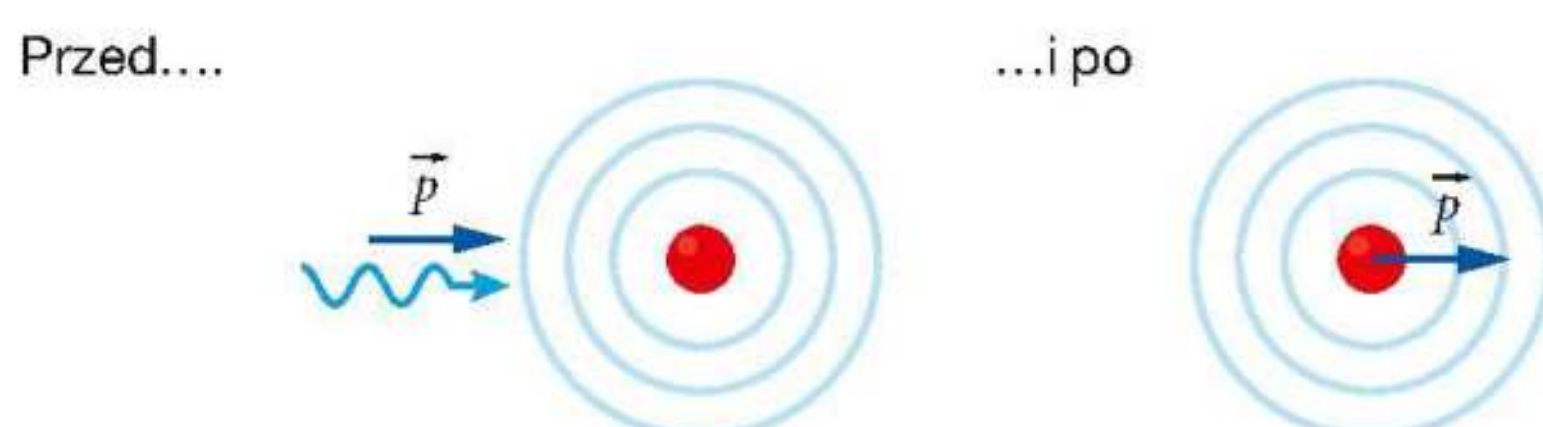
Odrzut przy włączeniu latarki jest zbyt słaby, aby go obserwować, ponieważ masa latarki w skali atomowej jest ogromna. Jednak na poziomie poszczególnych atomów można zaobserwować zjawisko odrzutu. Skoro foton ma swój pęd, to z zasady zachowania pędu wynika, że:



Rys. 19.24. Zmiana pędu atomu przy emisji fotonu

- atom emitujący foton zyskuje pewien pęd i zaczyna się poruszać w przeciwną stronę niż wyemitowany foton (rys. 19.24),

Zasada zachowania pędu,
podręcznik cz. 1 → s. 220



Rys. 19.25. Zmiana pędu atomu przy absorpcji fotonu

- atom absorbujący foton zyskuje pewien pęd i zaczyna się poruszać w tym samym kierunku, w którym wcześniej poruszał się foton (rys. 19.25).

Przy badaniu odrzutu atomu – podobnie jak dla ciał makroskopowych – korzystamy z zasady zachowania pędu. W przypadku atomu możemy korzystać ze wzoru $p = mv$, a w przypadku fotonu ze wzoru $p = \frac{h}{\lambda}$.

■ Odrzut atomu a energia fotonu

Kiedy w poprzedniej lekcji mówiliśmy o energii emitowanego fotonu, zakładaliśmy, że cała różnica energii elektronu między poziomami energetycznymi zamienia się w energię fotonu. Teraz możemy uściślić, że skoro atom ulega odrzutowi, to część energii zmienia się w energię kinetyczną atomu wynikającą z odrzutu.

Wobec tego foton emitowany przez swobodny atom ma nieco mniejszą energię niż foton emitowany przez atom związany w kryształ, który nie może się łatwo poruszyć.

Okazuje się jednak, że energia kinetyczna atomu jest zwykle tak niewielka, że nie musimy jej brać pod uwagę (przykład na następnej stronie). Dlatego rozważania z poprzedniej lekcji z bardzo dobrą dokładnością pasują nawet do fotonu emitowanego przez swobodny atom.



Rys. 19.26. Nazwa hakownicy pochodzi od haka, który można było oprzeć o mur, dzięki czemu zmniejszało się odrzut, a tym samym – część energii przejmowanej przez broń a nie pocisk. Dla atomów analogiczną rolę pełnią oddziaływania z innymi atomami w kryształach



■ Przykład

Spoczywający atom sodu wyemitował foton światła o długości fali 569 nm (takie fotony emituje sód w latarniach sodowych – patrz zdjęcie). Oblicz prędkość atomu po wyemitowaniu fotonu oraz stosunek energii kinetycznej uzyskanej przez atom do energii fotonu.



Dane: $\lambda = 569 \text{ nm} = 5,69 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ – długość fali wyemitowanego fotonu

Szukane: v_{at} – prędkość atomu, $\frac{E_k}{E_f}$ – stosunek energii kinetycznej atomu do energii fotonu

Rozwiązanie:

Obliczamy masę atomu

Do rozwiązania będziemy potrzebować masy atomu sodu. W układzie okresowym sprawdzamy, że wynosi ona: $m = 23 \text{ u}$. Przeliczamy tę wielkość na kilogramy:

$$m = 23 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,82 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

Początkowo atom spoczywał, a więc jego pęd wynosił 0. Po emisji fotonu łączny pęd nadal był równy zeru, a więc pęd uzyskany przez atom i pęd fotonu miały równe wartości, tylko przeciwne zwroty:

$$p_{\text{at}} = p_f \rightarrow mv_{\text{at}} = \frac{h}{\lambda} \rightarrow v_{\text{at}} = \frac{h}{m\lambda} \quad (1)$$

Podstawiamy dane i sprawdzamy jednostkę:

$$v_{\text{at}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{3,82 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \cdot 5,69 \cdot 10^{-7} \text{ m}}$$

$$[v_{\text{at}}] = \frac{\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{kg} \cdot \text{m}} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{kg}} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{s}}{\text{kg}} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ostatecznie otrzymujemy: $v_{\text{at}} = 0,0305 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Teraz możemy wyznaczyć stosunek energii:

$$\frac{E_k}{E_f} = \frac{\frac{1}{2}mv_{\text{at}}^2}{hf} = \frac{\frac{1}{2}mv_{\text{at}}^2}{\frac{hc}{\lambda}} = \frac{mv_{\text{at}}^2\lambda}{2hc}$$

Dalej obliczenia można prowadzić dwoma sposobami.

Sposób I

Obliczoną prędkość wraz z pozostałymi danymi podstawiamy do powyższego wzoru:

$$\frac{E_k}{E_f} = \frac{3,82 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \cdot (0,0305 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot 5,69 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{2 \cdot 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 5,08 \cdot 10^{-11}$$

Sposób II

Podstawmy wyznaczony wzór na prędkość (1) do wzoru na stosunek energii:

$$\frac{E_k}{E_f} = \frac{mv_{\text{at}}^2\lambda}{2hc} = \frac{m\left(\frac{h}{m\lambda}\right)^2\lambda}{2hc} = \frac{mh^2\lambda}{2m^2\lambda^2hc} = \frac{h}{2mc\lambda}$$

➡ Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$\frac{E_k}{E_f} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{2 \cdot 3,82 \cdot 10^{-26} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 5,69 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 5,08 \cdot 10^{-11}$$

W sposobie II. uproszczenie wzorów pozwoliło wykonywać prostsze rachunki na liczbach. Przede wszystkim jednak ostateczny wzór na szukaną wielkość pozwala dostrzec, w jaki sposób zależy ona od danych. Na przykład widzimy, że stosunek energii jest odwrotnie proporcjonalny do długości fali związanej z fotonem.

Odpowiedź: Atom zaczął się poruszać z prędkością ok. $3 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$. Jego energia kinetyczna stanowi ok. 50 bilionowych części energii fotonu.

1. Wartość pędu fotonu o energii E można zapisać w postaci $p = \frac{E}{c}$. Czy dla ciał makroskopowych jest podobnie, tzn. czy ich pęd równy jest $\frac{E_k}{v}$, gdzie E_k jest energią kinetyczną, a v – prędkością?

2. Na lodowisku stoi pingwin na płozach, służący dzieciom do nauki jazdy. Zakładamy, że może się on poruszać po lodzie bez tarcia. W pingwina uderza od tyłu piłka o masie 200 g. Tuż przed zderzeniem i tuż po nim piłka porusza się poziomo. Załóżmy, że to zderzenie jest sprężyste. Oblicz, jaką część energii utraci piłka, jeśli masa pingwina wynosi:

a) 2 kg,

b) 8 kg.



3. **P** Spoczywający swobodny atom zaabsorbował foton światła o długości fali 471 nm w wyniku czego zaczął się poruszać z prędkością $21 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$. Jaki to mógł być atom?

4. Foton jest emitowany przez atom, który na skutek odrzutu uzyskuje prędkość v .

a) Wykaż za pomocą odpowiednich przekształceń wzorów, że stosunek energii kinetycznej atomu do energii fotonu wynosi:

$$\frac{E_k}{E_f} = \left(\frac{v}{2c} \right)$$

Wskazówka. Możesz skorzystać z obliczeń, które zostały wykonane w przykładzie.

b) Oblicz stosunek $\frac{E_k}{E_f}$ dla sytuacji z przykładu na podstawie uzasadnionego przez siebie wzoru i porównaj go z wynikiem uzyskanym w przykładzie.

5. Obejrzyj film *How does laser cooling work?* na kanale *Physics Girl* w serwisie YouTube. Zapisz odpowiedź na tytułowe pytanie w kilku zdaniach. Wyjaśnij poniższe zagadnienia.

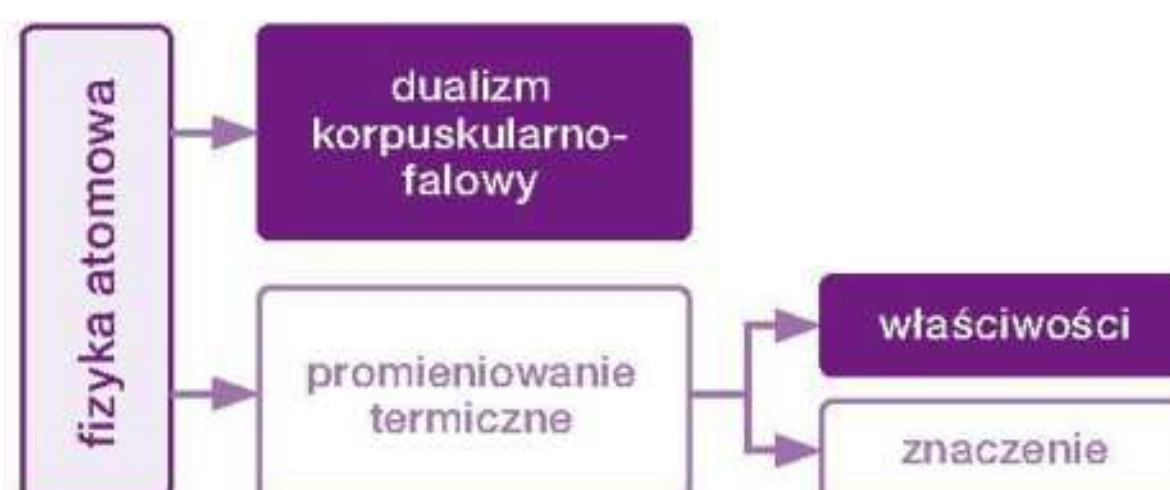
a) Dlaczego atom gazu absorbuje foton światła laserowego tylko wtedy, gdy zbliża się do lasera, a nie wtedy, gdy się od niego oddala?

b) Foton zostaje zaabsorbowany, a więc jego energia zostaje pochłonięta przez atom. Jednak atom zwalnia, a więc jego energia kinetyczna się zmniejsza. Jak to pogodzić z zasadą zachowania energii?

c) W jaki sposób z gazu odpływa energia nawet nieco większa niż dostarczona przez lasery?

d) Jakie praktyczne zastosowanie ma ta metoda?

Promieniowanie termiczne



Ważne w tej lekcji:

- zależność mocy od temperatury,
- zależność długości fali od temperatury,
- ciało doskonale czarne.



Przypomnij sobie:

- Jednym ze sposobów przekazywania energii w postaci ciepła jest promieniowanie cieplne (termiczne).
- Ciepło przepływa z ciała o wyższej temperaturze do ciała o niższej temperaturze (druga zasada termodynamiki).

Wiesz już, że każde ciało emituje promieniowanie termiczne (cieplne), zależne od swojej temperatury. Nazwa *promieniowanie termiczne* nie oznacza jakiegoś szczególnego rodzaju promieniowania, ale określa sposób, w jaki ono powstaje. Takim promieniowaniem może być podczerwień, światło widzialne czy ultrafiolet.

Promieniowanie termiczne to fale elektromagnetyczne emitowane przez ciało na skutek ruchów termicznych jego cząsteczek.

To promieniowanie jest jedynym sposobem przekazywania ciepła przez próżnię, na przykład ze Słońca na Ziemię. Jest istotne także w innych sytuacjach.

Przykładowo, gdy zbliżamy rękę do rozgrzanego żelazka (rys. 19.27), mamy wrażenie ciepła właśnie dlatego, że energia jest przekazywana do dłoni w postaci promieniowania.

Przewodnictwo cieplne powietrza jest przecież małe, a konwekcja powoduje ruch rozgrzanego powietrza w górę.



Rys. 19.27. Z żelazka do dłoni energia jest przekazywana przede wszystkim przez promieniowanie

Promieniowanie termiczne a druga zasada termodynamiki

Trzeba podkreślić, że promieniowanie termiczne jest wysyłane przez każde ciało, także takie o niskiej temperaturze. Blok lodu o temperaturze -10°C także wysyła promieniowanie cieplne w stronę zbliżonej do niego dłoni (rys. 19.28a).

Czy nie jest to niezgodne z drugą zasadą termodynamiki? Przecież właśnie stwierdziliśmy, że ciepło jest przekazywane w postaci promieniowania od lodu o temperaturze -10°C do dłoni o temperaturze $+36^{\circ}\text{C}$. Jak się okazuje, nie ma w tym sprzeczności, ponieważ nie uwzględniliśmy wszystkich zjawisk. Musimy wziąć pod uwagę zarówno promieniowanie wysyłane przez lód w stronę dłoni, jak i przez dłoń w stronę lodu (rys. 19.28b).

Dłoń emituje w tym samym czasie więcej energii w stronę lodu niż lód w stronę dłoni, czyli wypadkowy przekaz energii następuje z ciała gorętszego do chłodniejszego. Dotyczy to nie tylko dłoni i lodu, lecz także każdych dwóch ciał o różnych temperaturach.

Im wyższa temperatura, tym większa moc promieniowania termicznego.

Okazuje się jednak, że moc nie jest jedyną wielkością zależną od temperatury ciała emitującego promieniowanie.

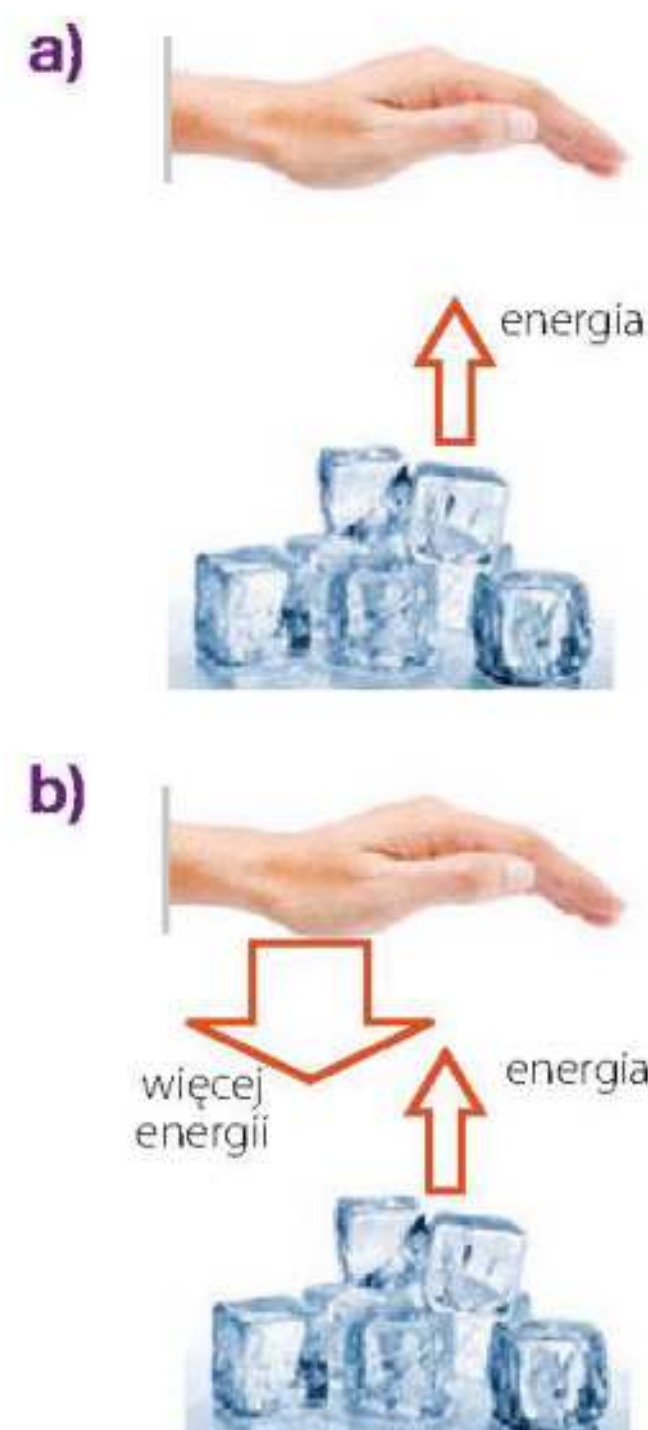
Badanie promieniowania termicznego

Jak wiesz, fale elektromagnetyczne opisujemy m.in. za pomocą długości fali. Jaką długość fali ma więc promieniowanie termiczne? Aby odpowiedzieć na to pytanie, wykonajmy doświadczenie.

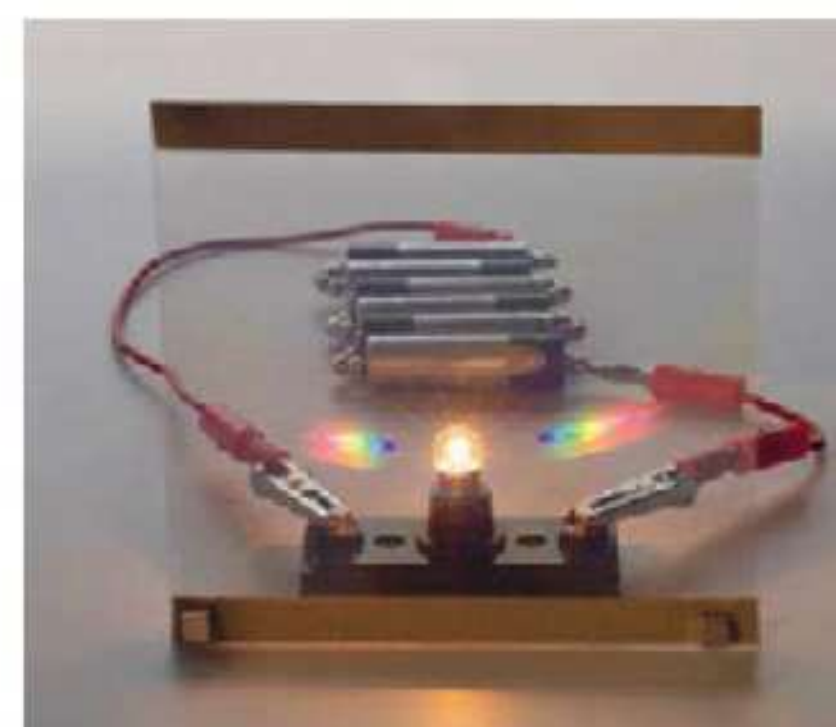
Doświadczenie 13

1. Przygotuj żarówkę 6,3 V, przewody, 9 baterii 1,5 V oraz siatkę dyfrakcyjną. Jeśli nie masz fabrycznej siatki, możesz oglądać odbicie żarówki w płycie CD.
2. Podłącz żarówkę do pojedynczego ogniwa. Obserwuj światło żarówki przez siatkę dyfrakcyjną. Jakie barwy widać? Którą z nich widać najsilniej?
3. Powtórz obserwacje z punktu 2. dla żarówki podłączonej do dwóch, trzech, sześciu i dziewięciu ogniw połączonych szeregowo.
4. Jak zmieniają się twoje obserwacje w zależności od liczby ogniw?

Światło emitowane przez rozgrzane włókno żarówki to część jej promieniowania termicznego (poza tym znaczną część tego promieniowania



Rys. 19.28. Wymiana ciepła przez promieniowanie między lodem a dłonią: a) schemat niepełny, b) schemat uwzględniający promieniowanie obu ciał



stanowi podczerwień). Jak zaobserwowałeś, takie promieniowanie można rozszczepić na różne barwy, czyli na fale o różnych długościach. Niektóre z barw widać wyraźniej niż inne.

Promieniowanie termiczne składa się z fal o różnych długościach i emitowanych z różnym natężeniem.

W naszym doświadczeniu temperaturę włókna żarówki mogliśmy zwiększać przez podłączanie dodatkowych ogniw:



Okazało się, że światło bardziej rozgrzanego włókna jest nie tylko jaśniejsze, lecz także ma inną barwę.

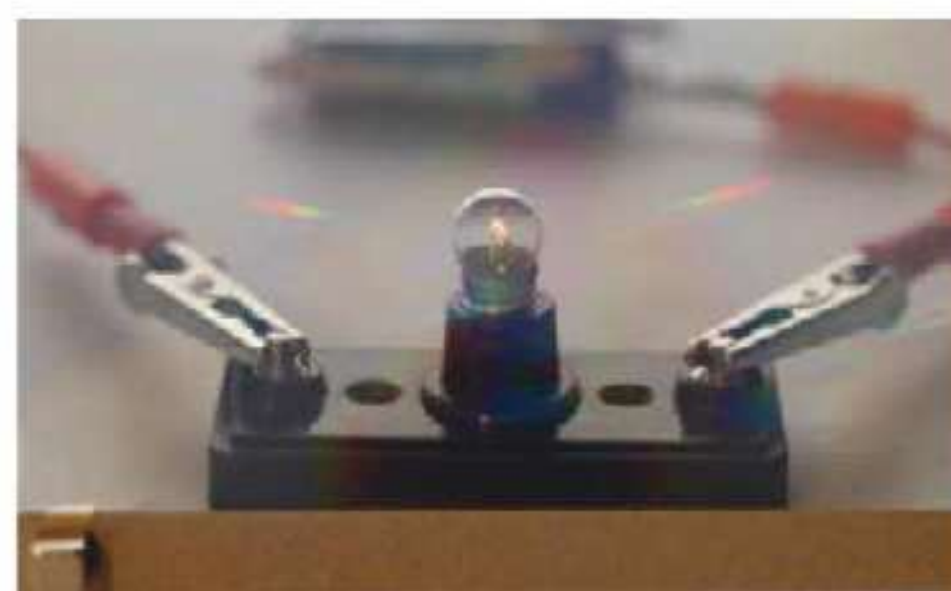
- Początkowo dominuje kolor czerwony (najdłuższe fale), a fioletowego wcale nie widać.
- Przy większej liczbie ogniw najsilniejsze jest światło pomarańczowe, a krótkie fale zaczynają się stopniowo pojawiać.

Kiedy maleje długość fali, zwiększa się jej częstotliwość i energia fotonu.

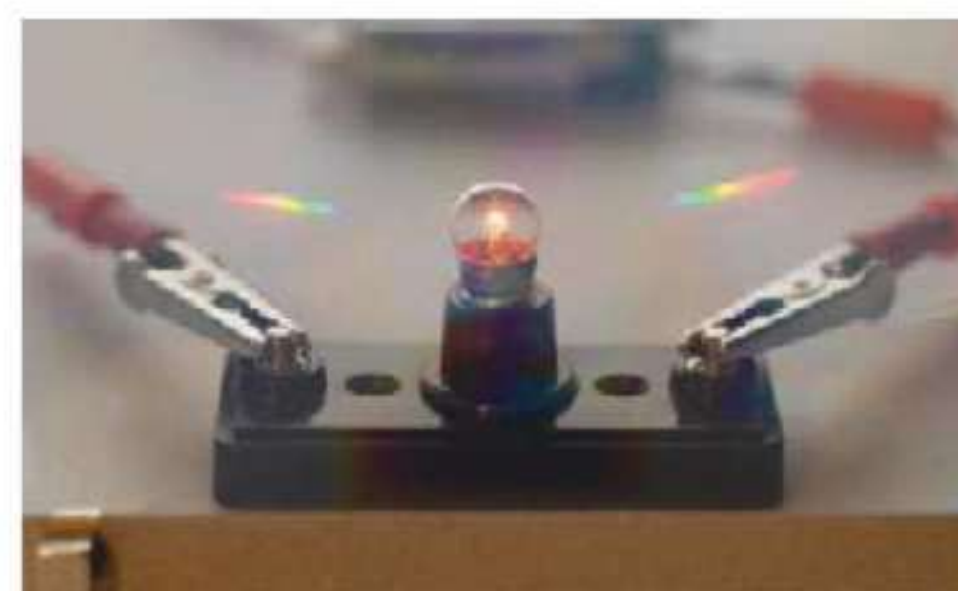
Długość fali, dla której moc promieniowania jest maksymalna, maleje wraz ze wzrostem temperatury ciała.

Obserwujemy jednak, że po zamianie jednego ogniwa (rys. 19.29a) na trzy (rys. 19.29b) barwa czerwona co prawda przestaje dominować nad innymi, ale jej natężenie i tak się zwiększa.

a)
1,5 V

b)
4,5 V

Rys. 19.29. Prawa żarówka emituje więcej światła pomarańczowego niż czerwonego, ale i tak światła czerwonego emituje więcej niż żarówka lewa

■ Ciało doskonale czarne

Aby móc ilościowo opisać zaobserwowane zależności, wprowadzimy teraz model ciała doskonale czarnego. Jak zapewne wiesz, ciała o ciemnych barwach pochłaniają większą część padającego na nie światła

(rys. 19.30 i 19.31). Zwykle przy tym pochłaniają także promieniowanie elektromagnetyczne o innych częstotliwościach – podczerwień i nadfiolet. W wyidealizowanym przypadku możemy rozważać ciało, które pochłania całe promieniowanie.

Ciało doskonale czarne to ciało pochłaniające całe padające na nie promieniowanie.

■ Czarne a świeci?

Ciało doskonale czarne pochłania promieniowanie padające na nie z zewnątrz, jednak – jak każde inne ciało – samo także emituje (wysyła) własne promieniowanie cieplne. Dlatego ciało to może nie być czarne w potocznym sensie.

Na przykład Słońce jest z bardzo dobrą dokładnością ciałem doskonale czarnym, ponieważ pochłania promieniowanie padające na nie z zewnątrz (np. światło innych gwiazd). Samo jednak emituje białe światło, dlatego nie powiemy na co dzień, że Słońce jest czarne.

Okazuje się, że większość ciał wysyła promieniowanie zbliżone do promieniowania ciała doskonale czarnego, dlatego ten model jest tak użyteczny.

Nawet skóra człowieka promieniuje mniej więcej tak jak ciało doskonale czarne. Może się to wydawać zaskakujące w przypadku osób o jasnej karnacji, jednak nasza skóra emituje podczerwień, a zatem ważne jest nie to, że odbija światło widzialne, ale to, że pochłania podczerwień (czyli dla podczerwieni w praktyce jest czarna w opisanym tu sensie).

■ Jak ciało doskonale czarne emituje promieniowanie

Okazuje się, że ciało ciemniejsze nie tylko lepiej pochłania promieniowanie, lecz także lepiej je emituje. Tę ostatnią zależność najłatwiej zrozumieć wtedy, gdy pomyślimy o ciele idealnie białym, które odbija całe padające promieniowanie. Takie ciało nie mogłoby samo promieniować, ponieważ traciłoby energię i samoczynnie chłodziło się poniżej temperatury otoczenia, co byłoby sprzeczne z drugą zasadą termodynamiki. Właśnie dlatego, że ciało doskonale czarne zarówno najłatwiej pochłania promieniowanie, jak i najłatwiej je emituje, jest ono modelem służącym do opisu promieniowania termicznego.

■ Wykres promieniowania termicznego

Oko ludzkie nie jest dokładnym przyrządem do badania promieniowania, ponieważ w ogóle nie reaguje na podczerwień i nadfiolet, a w zakresie światła widzialnego na niektóre barwy jest bardziej czułe niż na inne.



Rys. 19.30. Asfalt pochłania promieniowanie słoneczne (zarówno światło widzialne, jak i podczerwień), więc mocno rozgrzewa się w słoneczny dzień



Rys. 19.31. Żrenica oka jest po prostu otworem, przez które światło wpada do wnętrza oka. Ponieważ już się stamtąd nie wydostaje, żrenica jest czarna



Rys. 19.32. Nawet relatywnie słabe promieniowanie UV Słońca może mieć poważne skutki

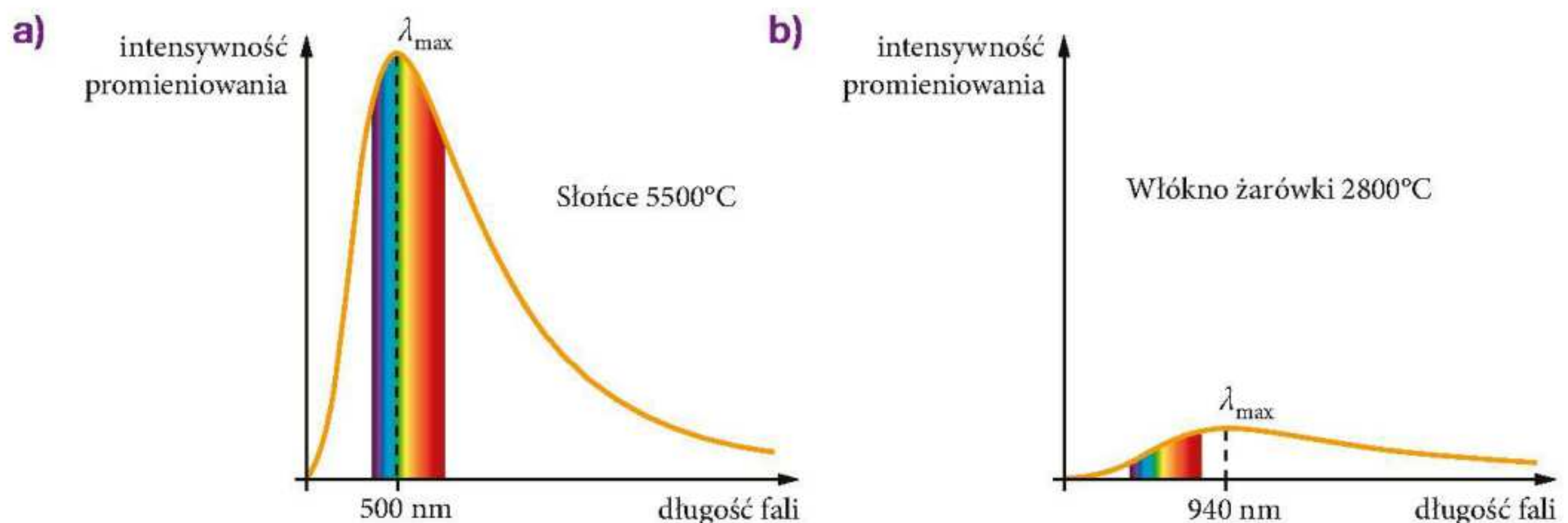
Dlatego w badaniach fizycznych do pomiaru natężenia promieniowania używamy odpowiednich przyrządów. Wyniki takich badań możemy w czytelny sposób przedstawić na wykresach.

Wykres na rysunku 19.33a przedstawia promieniowanie Słońca. Jak widzisz, nasza gwiazda z największą mocą emituje światło widzialne.

Porównaj teraz rysunek 19.33a z rysunkiem 19.33b. Drugi wykres także przedstawia promieniowanie termiczne, ale ciała znacznie chłodniejszego niż Słońce – rozgrzanego włókna tradycyjnej żarówki. Jak widzisz, w tym przypadku maksimum mocy promieniowania przypada na podczerwień.

Właśnie dlatego żarówka ma niską sprawność. Z punktu widzenia oświetlania pomieszczeń emisja podczerwieni to marnowanie energii, ponieważ formą użyteczną jest tylko światło widzialne.

Z wykresu 19.33b wynika także, że w świetle widzialnym żarówki przeważają fale o większej długości. Zgadza się to z obserwacją gołym okiem: światło tradycyjnych żarówek nie jest białe, ale żółtawe.



Rys. 19.33. Promieniowanie termiczne Słońca (a) i tradycyjnej żarówki (b)

Wnioski z wykresów zgadzają się z tym, co powiedzieliśmy wcześniej:

Im wyższa temperatura, tym większa moc promieniowania i tym krótsze fale dominujące w promieniowaniu.

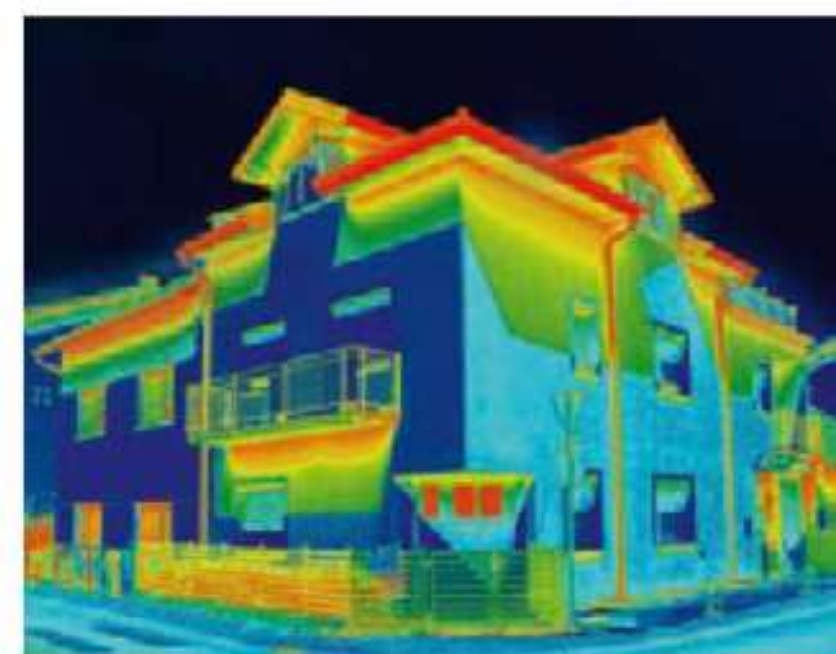
Zauważ też, że gdy wykresy narysujemy w jednym układzie współrzędnych, nie przetną się one (patrz infografika → s. 112–113). Oznacza to, że jeśli temperatura ciała wzrośnie, to moc jego promieniowania zwiększy się w każdej częstotliwości.

Jeśli przykładowo podgrzejemy ciało promieniujące głównie światło czerwone, to wprowadzie w jego widmie ta barwa przestanie dominować, ale i tak będzie jej więcej niż przed ogrzaniem ciała. Takie też były nasze obserwacje w doświadczeniu 13. (rys. 19.29 na s. 108).

■ Kamera termowizyjna

Ciała, z którymi mamy do czynienia na co dzień, praktycznie całe promieniowanie cieplne emitują w zakresie podczerwieni. Ich promieniowania nie możemy więc obserwować gołym okiem. Jest to jednak możliwe, gdy użyjemy kamery termowizyjnej, zamieniającej poszczególne częstotliwości podczerwieni na różne barwy światła widzialnego (patrz zdjęcie s. 106).

Taka kamera pozwala na przykład badać izolację termiczną budynku. Miejsca, w których z domu ucieka dużo energii, są cieplejsze niż otoczenie (rys. 19.34).



Rys. 19.34. Dom widziany w podczerwieni

■ Ciała rozgrzane do czerwoności i do białości

Mocno rozgrzane ciała, np. gwóźdź włożony do płomienia, zaczynają emitować światło widzialne. Z początku jest ono głównie czerwone – mówimy, że gwóźdź jest rozgrzany do czerwoności.

Jeżeli nadal będziemy zwiększać jego temperaturę, możemy go rozgrzać do białości, czyli do stanu, w którym żelazo emituje także światło widzialne o wyższych częstotliwościach (rys. 19.36). Mieszanie różnych częstotliwości obserwujemy właśnie jako światło białe.



Rys. 19.35. Pomiar długości fali dominującej w promieniowaniu termicznym skóry człowieka pozwala zmierzyć temperaturę szybko i bez kontaktu

■ Promieniowanie cieplne gwiazd

Z jeszcze wyższymi temperaturami mamy do czynienia w przypadku gwiazd. Maksimum promieniowania Słońca przypada na światło widzialne, ale są gwiazdy gorętsze, promieniujące głównie w nadfiolecie (rys. 19.37), a nawet takie, które emitują głównie promieniowanie rentgenowskie.



Rys. 19.37. Syriusz, najjaśniejsza poza Słońcem gwiazda widoczna z Ziemi, ma tak wysoką temperaturę, że maksimum mocy jego promieniowania przypada na nadfiolet. Jednak w świetle widzialnym moc promieniowania Syriusza także jest bardzo duża



Rys. 19.36. Gołym okiem widzimy, które części spirali są najbardziej rozgrzane



Rys. 19.38. Wilhelm Wien otrzymał w 1911 r. Nagrodę Nobla za badania związane z ciałem doskonale czarnym

Każda taka gwiazda i tak wypromieniowuje więcej światła widzialnego na jednostkę swojej powierzchni niż np. Słońce, tyle że w stosunku do jej całkowitej mocy jest to stosunkowo niewielki procent.

■ Prawo Wiena

Ilościowy opis omówionej wyżej zależności nazywamy prawem Wiena (od nazwiska uczonego, który je sformułował, rys. 19.38) i jest on bardzo prosty.

Długość fali, dla której moc promieniowania ciała doskonale czarnego jest maksymalna, jest odwrotnie proporcjonalna do jego temperatury bezwzględnej.

Tę zależność możemy zapisać także za pomocą wzoru.

PROMIENIOWANIE TERMICZNE I TEMPERATURA BARWOWA

Na opakowaniach żarówek albo w fotografii, podczas ustawiania balansu bieli, spotykamy się z pojęciem temperatury barwowej, podawanej w kelwinach. Im wyższa jest wartość temperatury barwowej, tym chłodniejszy odcień bieli. Ale jak to w ogóle jest możliwe, że światło białe, które jest mieszaniną wszystkich długości fal z przedziału 380–780 nm, może mieć różne odcienie?

■ PROMIENIOWANIE TERMICZNE

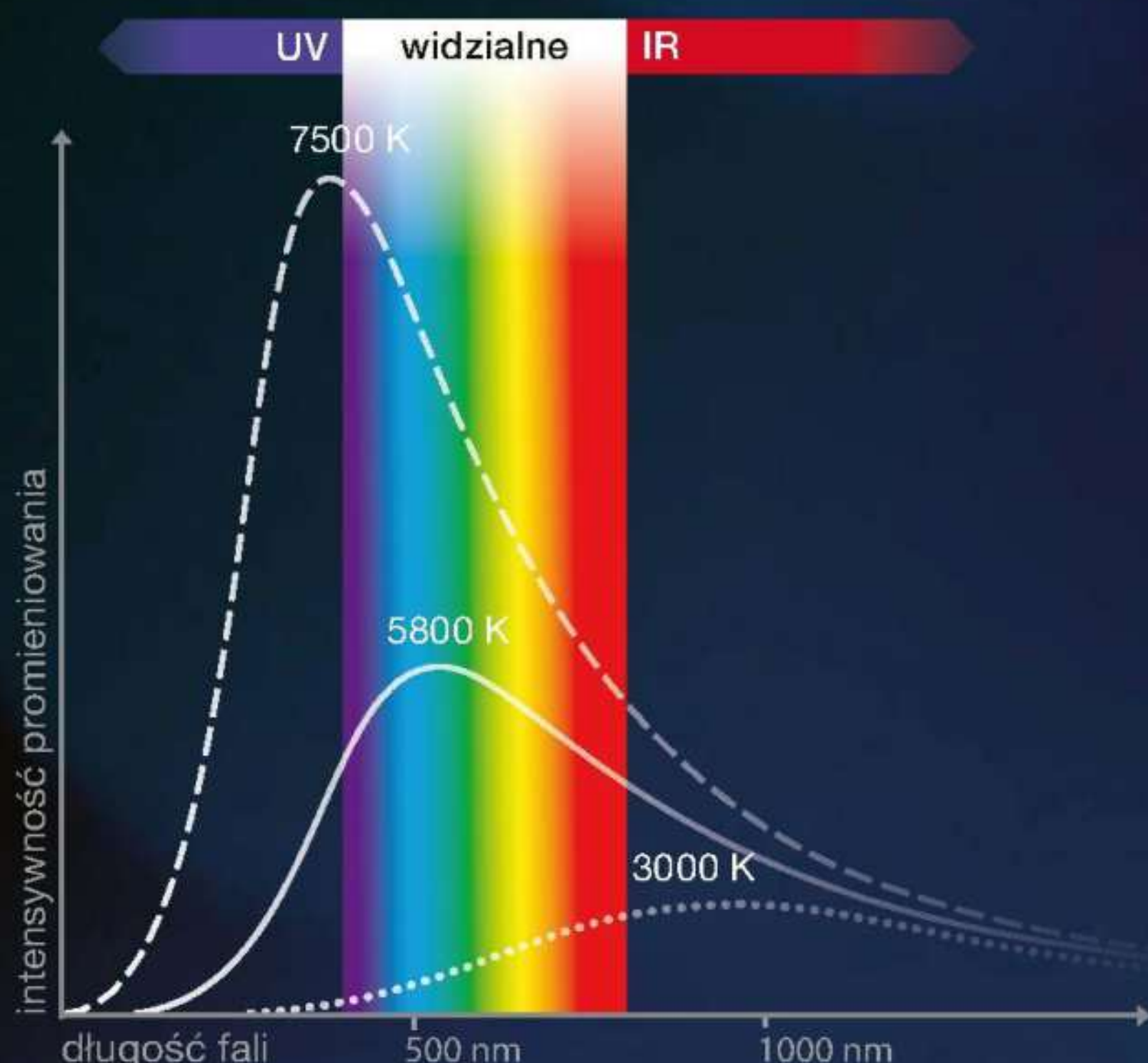
Każde ciało emituje promieniowanie elektromagnetyczne, którego zakres oraz intensywność zależą od temperatury.

Długość fali λ_{max} , przy której ciało świeci najmocniej, maleje wraz ze wzrostem temperatury zgodnie z zależnością odkrytą w 1893 r. przez Wilhelma Wiena:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T}$$

gdzie: b – stała Wiena; $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$,
 T – temperatura ciała w kelwinach.

Jeśli masz temperaturę ciała $36,6^\circ\text{C}$ (ok. 310 K), to zgodnie ze wzorem świecisz w podczerwieni, z maksimum promieniowania w $9,4 \text{ } \mu\text{m}$.



długość fali odpowiadająca
maksymalnej mocy
promieniowania

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

stała

temperatura (w kelwinach)

Stała we wzorze wynosi $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$ i nazywamy ją stałą Wiena.

■ Promieniowanie termiczne a kwanty światła

Choć promieniowanie ciała doskonale czarnego omawiamy pod koniec działu, historycznie to właśnie ono było pierwszym zagadnieniem, którego wyjaśnienie wymagało wprowadzenia hipotezy o istnieniu kwantów światła.

Samo istnienie tego promieniowania można zrozumieć na gruncie fizyki klasycznej. W każdym ciele drgają cząsteczki zawierające ładunki elektryczne, a drgające ładunki powodują emisję fali elektromagnetycznej.

■ TEMPERATURA BARWOWA, CZYLI ODCIENIE BIELI

Światło jest idealnie białe wtedy, gdy fale z zakresu widzialnego występują w równych ilościach. Jeśli któraś z długości fal dominuje, pojawia się zabarwienie światła białego, które często jest niepożądane, np. w fotografii.

Idealna biel



Światło idealnie białe nie może zostać wytworzone przez naturalne źródło. Światło słoneczne (ok. 5800 K), do którego jesteśmy najbardziej przyzwyczajeni, również nie jest idealnym światłem białym (patrz wykres na sąsiedniej stronie).

3200 K



Jeżeli dominują fale dłuższe, to odcień bieli jest żółtawy lub czerwony, a na opakowaniach żarówek emitujących takie światło można spotkać określenie „ciepła biel”.

6500 K



Gdy więcej jest fal krótszych, biel jest niebieskawa, a na opakowaniach żarówek o takim świetle pojawia się określenie „chłodna biel”.

Potoczne określenia „ciepła biel” i „zimna biel”, pojawiające się m.in. na opakowaniach żarówek, odpowiadają temperaturze barwowej. Przeciwnie: światło określane jako ciepłe ma niską temperaturę barwową, a zimne – wysoką. Im bardziej jest rozgrzane ciało, tym bardziej niebieskawe światło emituje. Określenia „ciepłe” i „zimne” wynikają ze stosowania ich w malarstwie, gdzie za barwy ciepłe uznaje się czerwienie, pomarańcze i żółcie, a za barwy zimne – fiolety, odcienie niebieskiego i zielenie.





Rys. 19.39. Max Planck otrzymał w 1918 r. Nagrodę Nobla, m.in. za odkrycie kwantów energii

Co więcej, w wyższej temperaturze drgają one szybciej, więc powinny – zgodnie z obserwacjami – wytwarzać falę o wyższej częstotliwości i mniejszej długości.

Problem pojawia się przy opisie ilościowym (matematycznym). Z obliczeń wykonanych na podstawie praw fizyki znanych w XIX w. wynika absurdalny wniosek, że każde ciało powinno promieniować z nieskończoną mocą, czyli nawet w krótkim czasie wypromieniowywać nieskończoną energię.

Rozwiązanie problemu podał pod koniec XIX w. Max Planck (rys. 19.39). Założył on, że ciała nie wysyłają promieniowania w sposób ciągły, ale w porcjach o energii proporcjonalnej do częstotliwości tego promieniowania. Dlatego stała h ze wzoru opisującego energię kwantu światła (fotonu) nazywamy do dziś imieniem tego uczonego.

Choć sam Planck uważał swoje założenie za formalny wybieg, bez znaczenia fizycznego, to – ku zaskoczeniu samego uczonego – jego założenie posłużyło do stworzenia mechaniki kwantowej, czyli teorii, która diametralnie zmieniła sposób myślenia o naturze świata.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Odpowiedz na pytania.

- a) Czy do oświetlenia przytulnej kawiarni wybierzesz żarówki LED opisane jako 2500 K czy 4000 K? Uzasadnij swoją odpowiedź.
- b) W plastyce mówi się, że czerwony to barwa ciepła, a niebieski – zimna. Czy zgadza się to z zależnością częstotliwości od temperatury?
- c) Gdyby włókno żarówki rozgrzać do temperatury 5000 K, emitowałoby ono znacznie więcej promieniowania w zakresie światła widzialnego. Taka

żarówka miałaby więc dużo wyższą sprawność. Dlaczego nie stosuje się takiego rozwiązania?

- 2. Oblicz długość fali odpowiadającej maksymalnej mocy promieniowania termicznego śniegu o temperaturze -10°C . Porównaj ją z długością fali czerwonego światła widzialnego oraz z długością mikrofal z kuchenki ($f = 2450 \text{ MHz}$).
- 3. Oblicz maksymalną i minimalną temperaturę ciała, którego maksymalna moc promieniowania przypada na światło widzialne.

19.6 Efekt cieplarniany



Ważne w tej lekcji:

- mechanizm efektu cieplarnianego,
- sprzężenia zwrotne,
- przeciwdziałanie globalnemu ociepleniu.

Przypomnij sobie:

- Promieniowanie termiczne ma różną moc dla różnych częstotliwości.
- Długość fali, dla której moc promieniowania termicznego jest największa, maleje wraz ze wzrostem temperatury ciała.

Z pewnością słyszałeś już o efekcie cieplarnianym i jego wpływie na zwiększanie się średniej temperatury naszej planety.

Dzięki wiadomościom na temat promieniowania termicznego możesz teraz zrozumieć, na czym polega to zjawisko.

■ Działanie szklarni

Nazwa efektu cieplarnianego odwołuje się do cieplarni, czyli szklarni, w której zachodzi to samo zjawisko. Zacznijmy więc od wyjaśnienia jej działania.

W jaki sposób w szklarni bez dogrzewania można utrzymać temperaturę wyższą niż na zewnątrz? Czy nie jest to sprzeczne z drugą zasadą termodynamiki?

Przyjrzyj się najpierw diagramowi (na górze następnej strony), który przedstawia rozgrzewanie się gleby na otwartej przestrzeni.

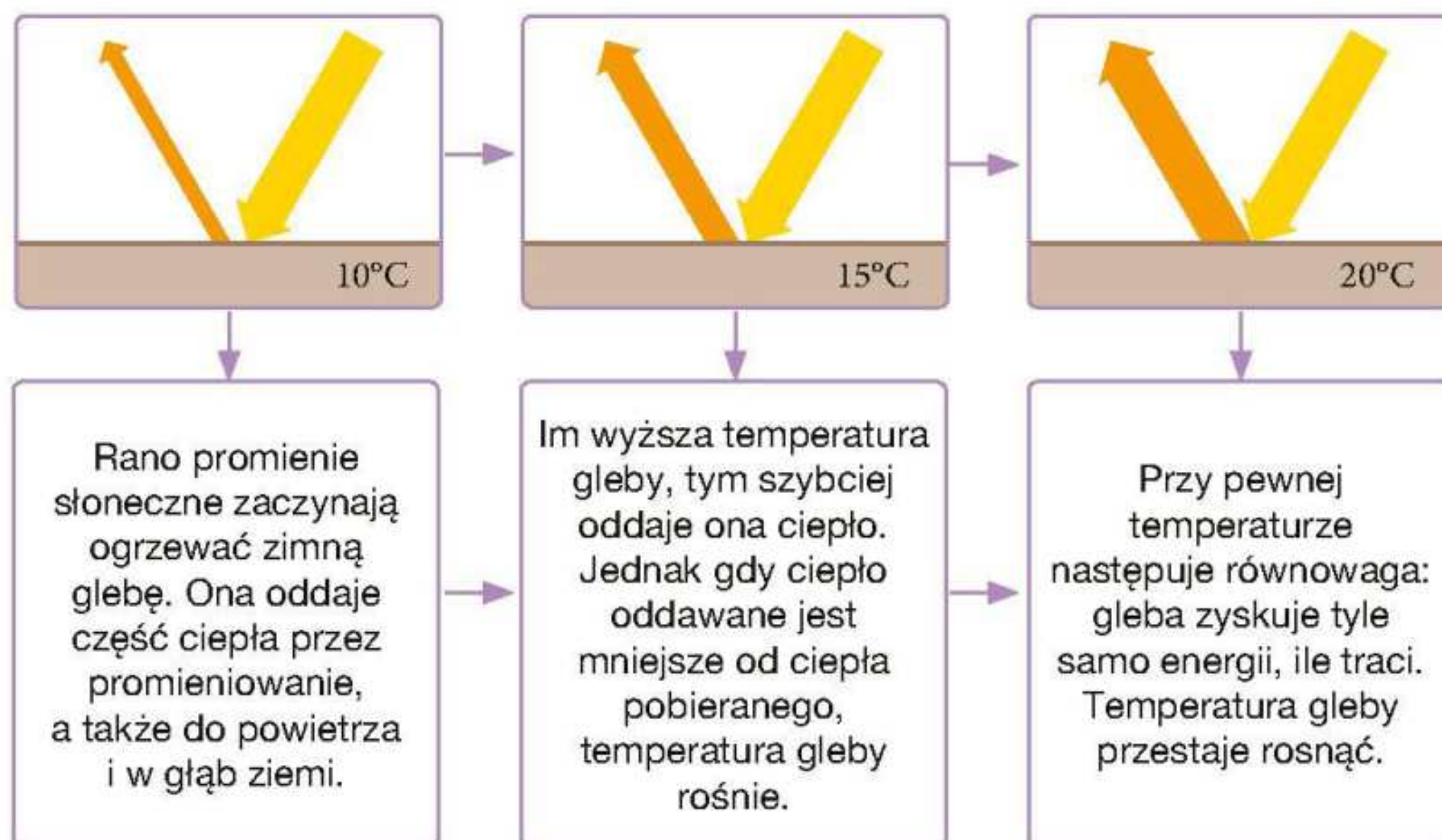


Rys. 19.40. Powodzie zdarzały się zawsze, jednak na skutek zmian klimatu zdarzają się teraz częściej

Druga zasada termodynamiki, podręcznik cz. 2 → s. 108



Rys. 19.41. Dzięki szklarni można wydłużyć sezon upraw, ponieważ utrzymuje wyższą temperaturę niż jest na zewnątrz



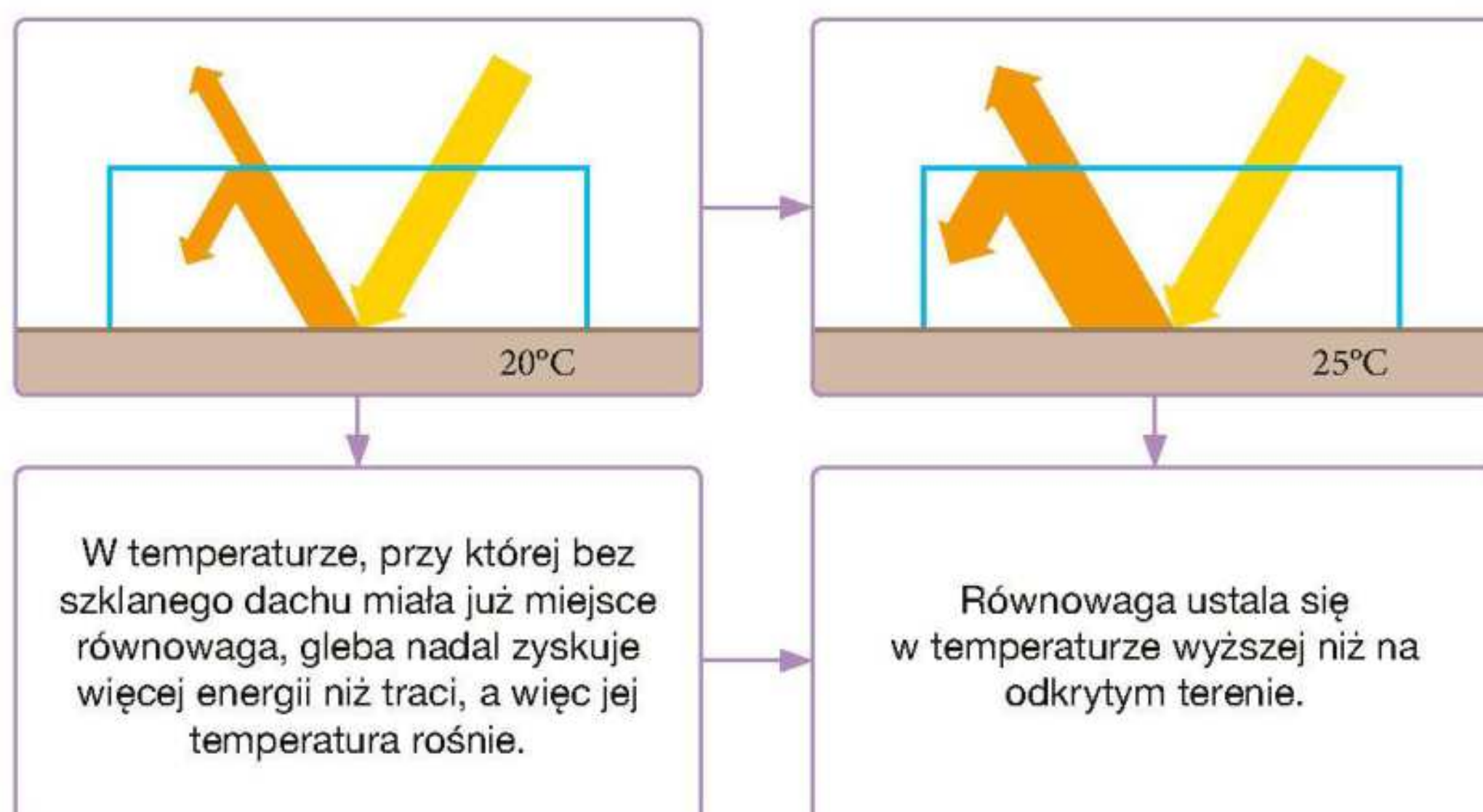
Sytuacja zmienia się wtedy, gdy gleba znajduje się w szklarni.

Szkło przepuszcza większość promieniowania słonecznego, a w każdym razie jego zasadniczą część – światło widzialne i bliską podczerwień.

Ponieważ temperatura gleby jest znacznie niższa niż temperatura Słońca, więc jej promieniowanie ma znacznie niższą częstotliwość – należy do dalekiej podczerwieni.

Okazuje się, że szkło odbija część tego promieniowania z powrotem do szklarni (a mówiąc ściślej, pochłania je, a następnie wypromieniowuje część na zewnątrz, a część do wewnątrz).

Spójrz na drugi diagram, który przedstawia tę sytuację.



Rys. 19.42. Pozostawienie zwierzęcia w samochodzie w upalny dzień może być dla niego śmiertelne

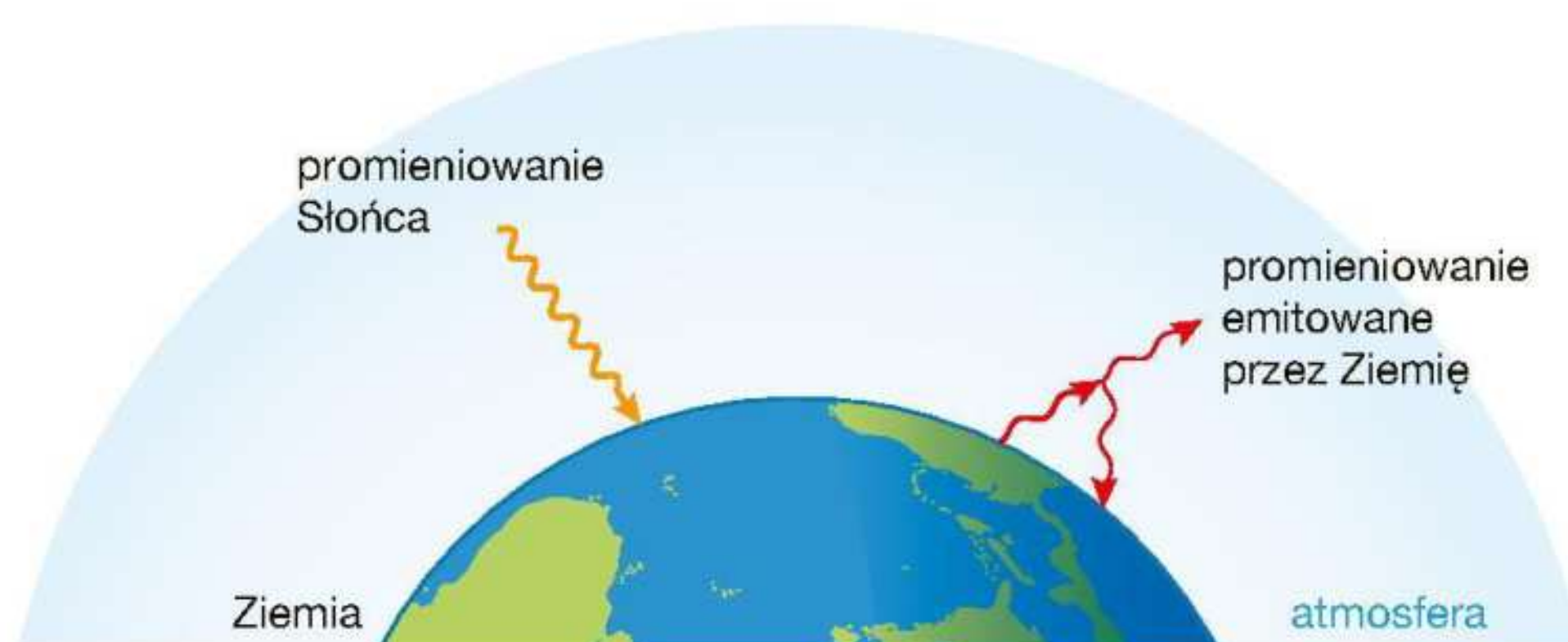
A co z drugą zasadą termodynamiki? Zwróć uwagę na to, że energia do szklarni dociera nie z otoczenia, ale wprost ze Słońca, które oczywiście ma znacznie wyższą temperaturę.

Podobne zjawisko zachodzi w budynkach, zwłaszcza tych z dużymi południowymi oknami, oraz w pojazdach (rys. 19.42).

■ Efekt cieplarniany w atmosferze

Działanie szklarni omówiliśmy tak dokładnie dlatego, że efekt cieplarniany zachodzący w atmosferze ma podobną naturę. Funkcję szyby spełniają gazy cieplarniane, m.in. dwutlenek węgla, para wodna i metan.

Gazy zawarte w atmosferze pochłaniają promieniowanie podczerwone emitowane przez Ziemię, a następnie emitują jego część z powrotem w stronę Ziemi. Powoduje to podniesienie temperatury Ziemi. To zjawisko nazywamy efektem cieplarnianym.



Rys. 19.43. Efekt cieplarniany w atmosferze Ziemi

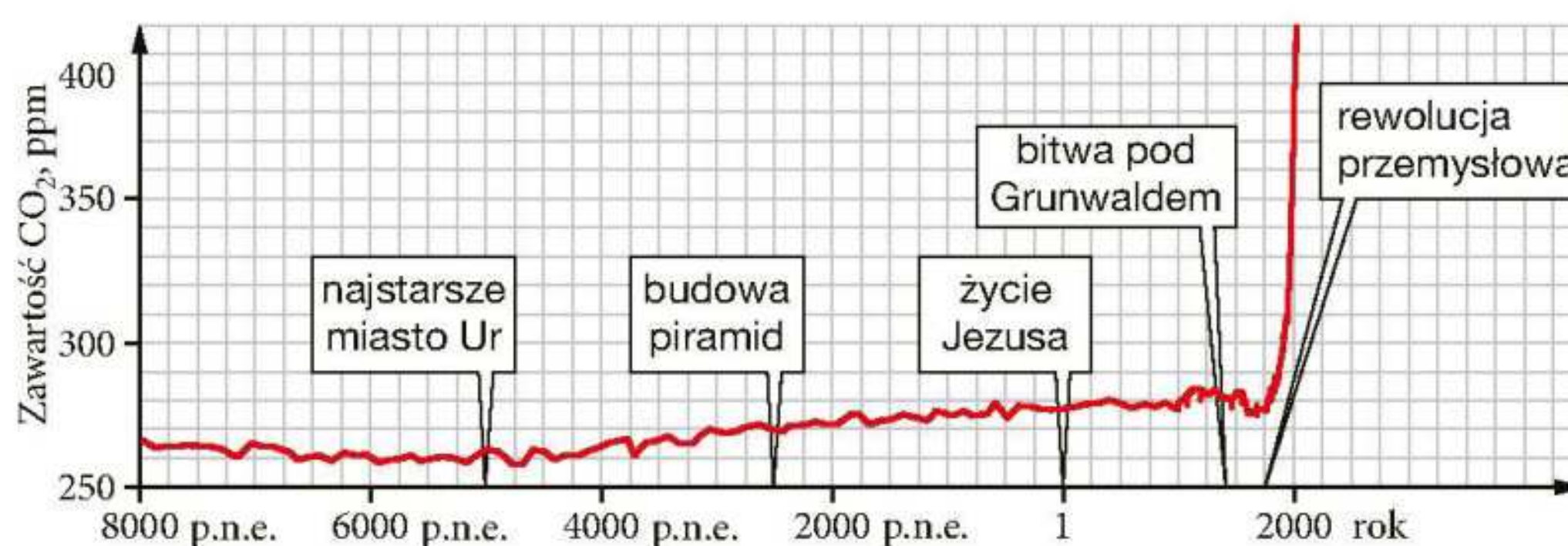
Ziemia jako planeta jest otoczona próżnią, więc wymienia energię z otoczeniem tylko przez promieniowanie.

■ Globalne ocieplenie

Gdyby Ziemia była pozbawiona atmosfery, średnia temperatura naszego globu byłaby o ponad 30°C niższa niż obecnie. Tak więc naturalnie występujący efekt cieplarniany jest zjawiskiem korzystnym: bez niego byłoby znacznie zimniej niż w epoce lodowcowej.

Sytuacja drastycznie zmienia się wtedy, gdy do atmosfery wprowadzamy dodatkowe gazy cieplarniane. O ile dodatkowa para wodna natychmiast się skrapla, o tyle dwutlenek węgla i metan pozostają w atmosferze i powodują nasilenie efektu cieplarnianego.

Odkąd rozpoczęła się rewolucja przemysłowa i zaczęliśmy spalać paliwa kopalne emitujemy do atmosfery duże ilości CO₂ (rys. 19.45).



Rys. 19.45. Koncentracja CO₂ w atmosferze wyrażona w częściach milionowych (ppm – ang. *parts per million*)



Rys. 19.44. Z powodu efektu cieplarnianego Wenus jest najgorętszą planetą Układu Słonecznego ze średnią temperaturą prawie 500°C

Paliwa kopalne: węgiel, ropa naftowa, gaz ziemny.

Powoduje to **globalne ocieplenie**, czyli zwiększenie się średniej temperatury powierzchni Ziemi.

Globalne ocieplenie, czyli zwiększanie się średniej temperatury powierzchni Ziemi, jest wywołane emisjami gazów cieplarnianych, głównie dwutlenku węgla.

■ Rola metanu

Oprócz dwutlenku węgla wprowadzamy do atmosfery metan. Nie ma go dużo, ale za to jest on silniejszym gazem cieplarnianym od CO_2 .

Metan to główny składnik gazu ziemnego, uwalnia się on z nieszczelnych instalacji gazowych.

Jego drugim źródłem jest przemysłowy chów przeżuwaczy (bydło, owce, kozy) oraz wielbłądów, ponieważ metan powstaje w skomplikowanym przewodzie pokarmowym tych zwierząt (rys. 19.46).



Rys. 19.46. Chów zwierząt odpowiada za ok. 15% emisji gazów cieplarnianych, czyli tyle samo, ile cały transport lądowy, wodny i lotniczy. Największym problemem są przeżuwacze, które wytwarzają metan

■ Czy 1°C to dużo?

Od początku rewolucji przemysłowej średnia temperatura Ziemi podniosła się o ok. 1°C . Uczeń uważają, że granicą bezpieczeństwa jest $1,5^\circ\text{C}$, w najlepszym razie 2°C .

Jeżeli nie zmniejszymy tempa emisji CO_2 , do tej granicy dojdziemy ok. 2050 r. Natomiast ok. 2100 r. przyrost średniej temperatury Ziemi wyniesie ok. 4°C .

Takie zmiany temperatury mogą się wydawać niewielkie, ponieważ odruchowo myślimy o zmianie **pogody**. Od południa do wieczora jednego dnia temperatura często zmienia się o znacznie więcej niż 4°C . Jednak tutaj chodzi o zmianę **klimatu**, czyli o średnią temperaturę całego globu w długim okresie.

Aby uzmysłowić sobie, że w tym przypadku 4°C to bardzo dużo, wystarczy zauważyć, że taka właśnie zmiana nastąpiła między szczytem ostatniej epoki lodowcowej a czasami dzisiejszymi.

Jeśli nie zmniejszymy emisji gazów cieplarnianych, to wzrost temperatury od czasów przedprzemysłowych do 2100 r. będzie tak duży, jak od szczytu epoki lodowcowej do dziś.

■ Sprzężenia zwrotne

Nasilenie się efektu cieplarnianego wyzwala zjawiska, które przyczyniają się do dalszego ocieplania. W takiej sytuacji mówimy o **dodatnim sprzężeniu zwrotnym**.

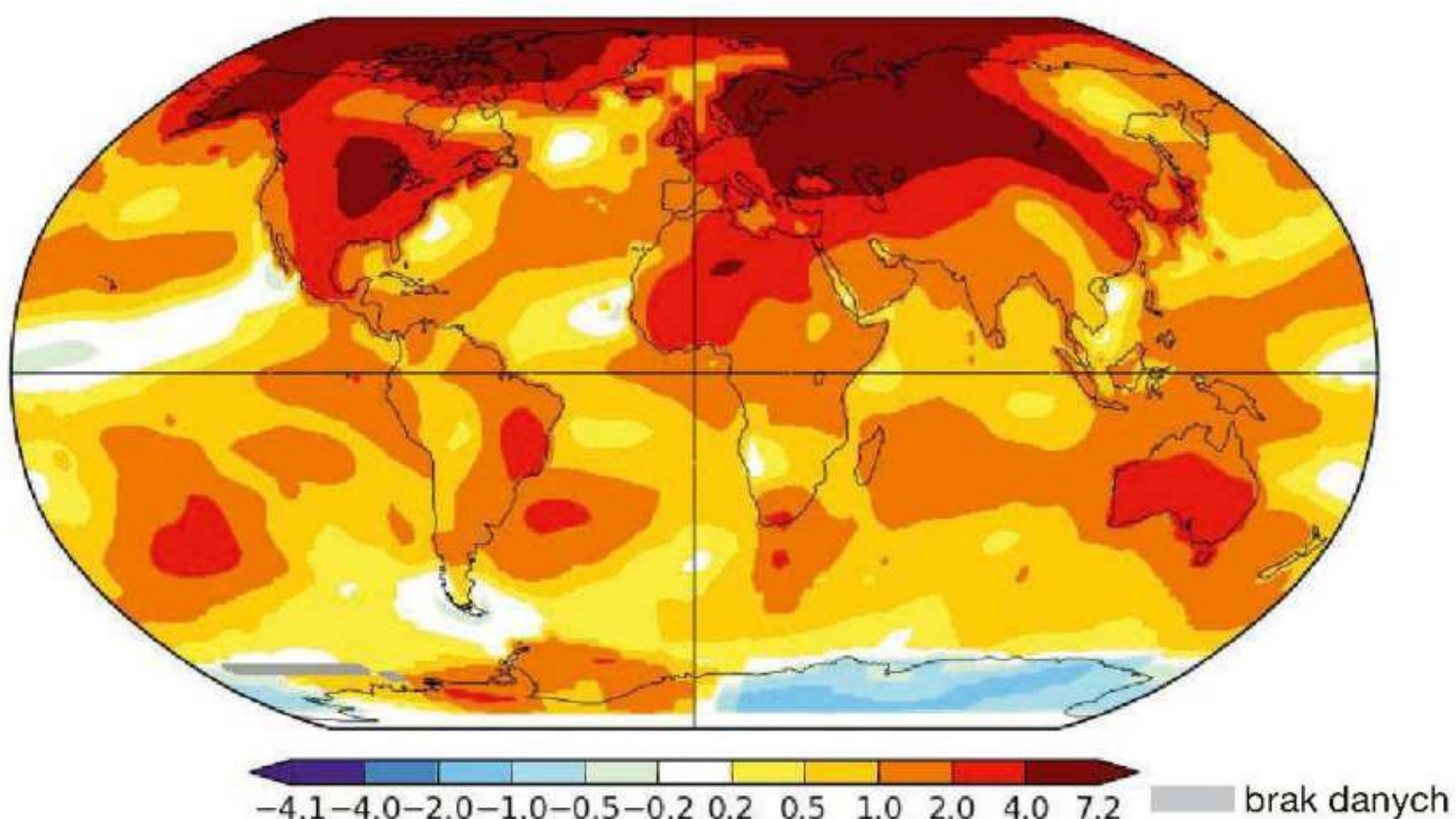
Klimat opisuje przebieg pogody w dłuższym okresie, natomiast **pogodę** określamy dla danej chwili.

Oprócz dodatnich istnieją także **ujemne sprzężenia zwrotne**. Przede wszystkim przy większej zawartości CO_2 w powietrzu rośliny szybciej rosną i pochłaniają więcej tego gazu. Niestety, sprzężenia ujemne nie równoważą sprzężeń dodatnich.



Zmiany średniej temperatury Ziemi

Mapka pokazuje zmianę średniej temperatury różnych obszarów Ziemi między średnią dla lat 1951–1980 a rokiem 2024. Jak łatwo zauważyć, ocieplenie nie jest równomierne: najbardziej ogrzały się okolice północnego bieguna Ziemi. Natomiast ochłodzenie mórz wokół Antarktydy wynika ze spływania do nich zimnej wody z topniejących lodowców.

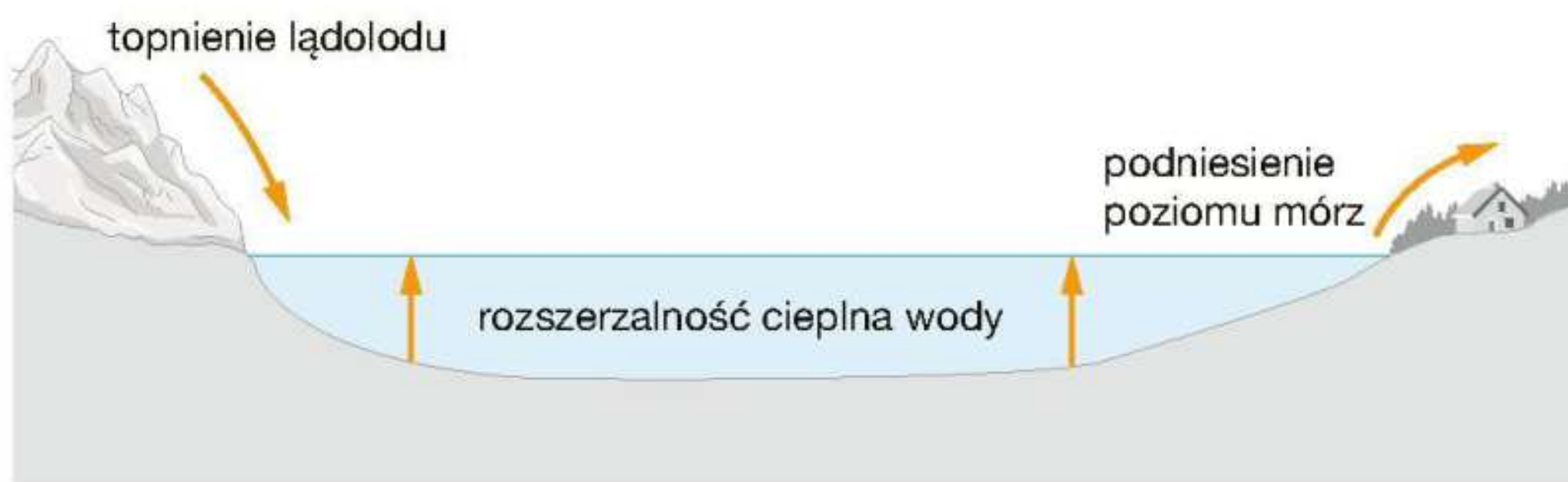


■ Skutki dla człowieka

Na skutki ocieplenia najbardziej są narażone obszary, gdzie już obecnie jest gorąco. W ciągu kilkudziesięciu lat znaczna część Afryki i część Azji nie będą nadawały się do zamieszkania. To oznacza, że ich mieszkańcy zaczną masowo migrować do chłodniejszych rejonów. Mowa nawet o setkach milionów ludzi.

W Polsce już niewielki wzrost średniej temperatury oznacza zwiększenie się liczby dni wyjątkowych upałów. Tymczasem wystarczy kilka szczególnie gorących dni w czasie wzrostu roślin uprawnych albo nawałnica tuż przed żniwami, aby całkowicie zniszczyć zbiory.

Ważnym i już obserwowanym skutkiem globalnego ocieplenia jest także podnoszenie się poziomu mórz (rys. 19.47) oraz ich zakwaszanie.



Rys. 19.47. Za wzrost poziomu morza odpowiadają w równym stopniu zwiększająca się ilość wody i jej rozszerzanie się pod wpływem rosnącej temperatury. Słona woda rozszerza się wraz ze wzrostem temperatury zawsze, także poniżej 4°C

Rozszerzalność cieplna wody,
podręcznik cz. 2 → s. 40

■ Ocieplenie czy zmiany klimatu?

Pamiętajmy, że podwyższanie się średniej temperatury Ziemi jest wynikiem gromadzenia się większej energii w atmosferze i oceanach. To zwiększenie zgromadzonej energii ma także inne skutki, jak występowanie ekstremalnych zjawisk pogodowych, do których zaliczamy nawałnice, burze, wichury, trąby powietrzne. Te zjawiska obserwujemy już obecnie, a będą one przybierać na sile.

Dlatego właśnie naukowcy częściej używają ogólniejszego pojęcia „zmian klimatu”, a nie tylko „globalnego ocieplenia”.

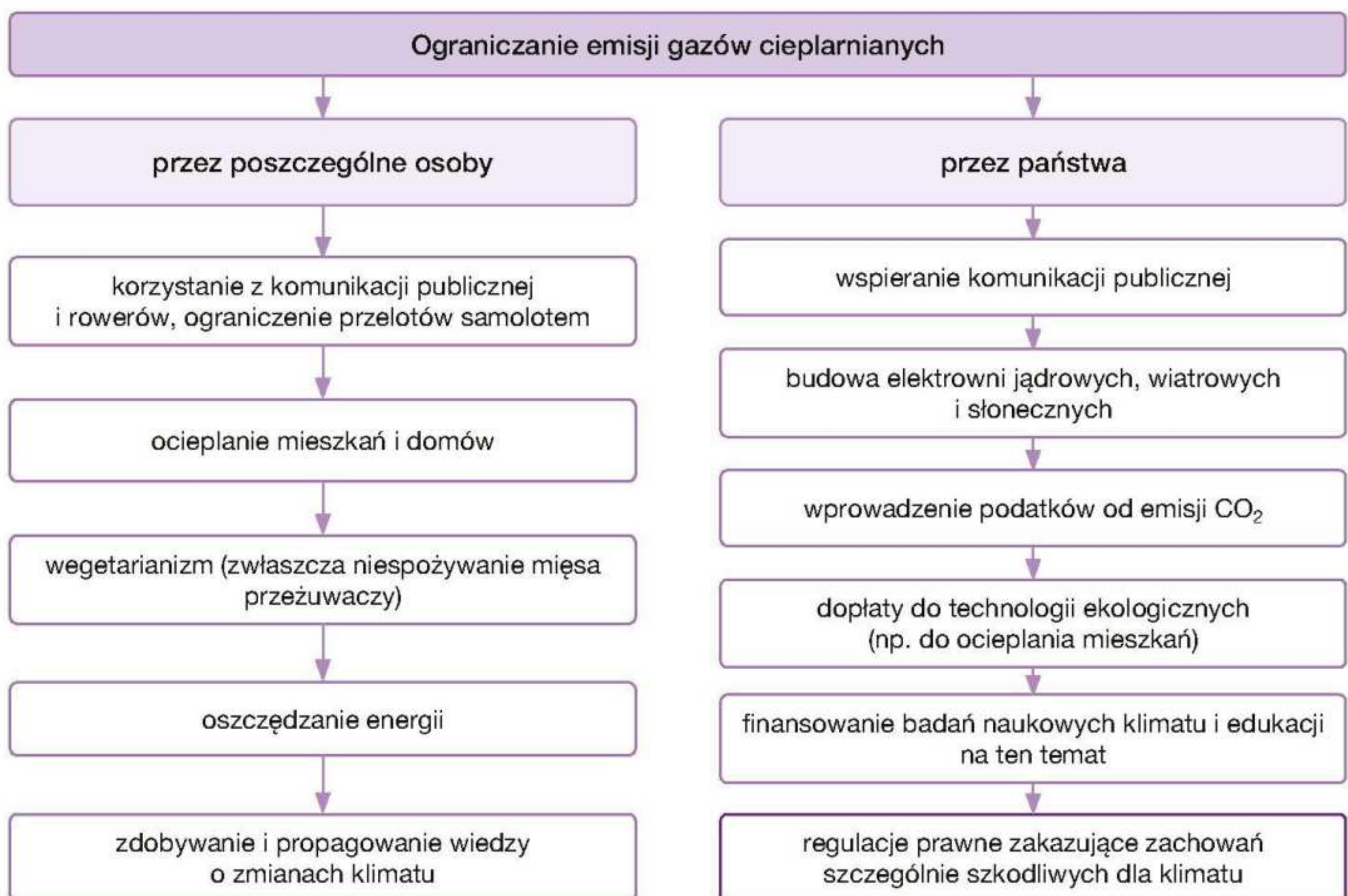


Rys. 19.48. Coraz częściej obserwujemy silne burze nad Polską

■ Sposoby zapobiegania globalnemu ociepleniu

Globalnemu ociepleniu można zapobiegać. Niektóre spośród możliwych sposobów ograniczania emisji CO₂ i innych gazów cieplarnianych przedstawiono w diagramie na następnej stronie.

Jak widzisz, nawet jako jednostka możesz zrobić wiele dla klimatu. Inne działania mogą podejmować jedynie państwa, ale przecież jako pełnoletni obywatel i wyborca także ty masz lub niebawem będziesz miał wpływ na politykę swojego kraju.



Smog a efekt cieplarniany

Efekt cieplarniany bywa mylony ze smogiem. Choć oba te zjawiska mają związek z zanieczyszczeniem powietrza, są zupełnie różne. Porównajmy je.

	SMOG	EFEKT CIEPLARNIANY
Przyczyna fizyczna	Pył (drobne cząstki stałe) zawieszony nisko w atmosferze	Gazy, np. CO ₂ , para wodna, metan, wysoko w atmosferze
Przyczyna po stronie ludzi	Niska emisja – spalanie w domowych piecach złej jakości węgla, spalanie śmieci, silniki Diesla	Spalanie paliw kopalnych i substancji organicznych. Niszczenie roślin, zwłaszcza wycinka drzew
Skutki	Choroby ludzi i zwierząt	Zmiana klimatu, susze, topnienie lodowców, podniesienie poziomu mórz
Zasięg	Lokalny – palenie śmieci w Puławach i okolicach powoduje smog w tym mieście, ale nie na przykład w Lublinie	Globalny – spalanie węgla w Chęcinach i w Melbourne ma wpływ na klimat w Amsterdamie
Skala czasowa	Po kilku dniach smog się rozwiewa	Klimat może ulec zmianie nawet na tysiąclecia
Dodatnie sprzężenie zwrotne	Nie występuje – obecność smogu nie powoduje, że przyroda sama wytwarza dodatkowy smog	Występuje – ocieplenie klimatu wzmacnia naturalną emisję gazów cieplarnianych, zanikają lodowce odbijające promieniowanie słoneczne

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Zastanów się, co zrobisz, gdy zobaczysz dziecko albo zwierzę pozostawione w upalny dzień w samochodzie.
2. Wyjaśnij, dlaczego żadne z podanych poniżej faktów nie są argumentami ani za, ani przeciwko istnieniu globalnego ocieplenia.
 - a) 6 stycznia 2023 r. w Białymstoku był mróz nawet w południe i padał śnieg.
 - b) W Boże Narodzenie 2023 r. w Białymstoku padał deszcz, a temperatura była dodatnia.
3. Pojęcia dodatniego i ujemnego sprzężenia zwrotnego są używane w wielu dziedzinach wiedzy, nie tylko w fizyce atmosfery. Wyjaśnij, które z podanych niżej przykładów oznaczają dodatnie, a które – ujemne sprzężenie zwrotne i dlaczego.
 - a) Kula śniegowa staczająca się z góry powiększa się tym szybciej, im jest większa.
 - b) Pewien uczeń zaczął się uczyć, dostał szóstkę, zachęciło go to do pracy, więc uczy się jeszcze więcej.
 - c) Inny uczeń zaczął się uczyć, dostał szóstkę, uznał, że nie grozi mu już jedynka, i przestał się uczyć.
 - d) Gdy bankowi zaczyna brakować pieniędzy, wszyscy klienci chcą wypłacić z niego swoje oszczędności.
 - e) Gdy jest zbyt dużo chętnych do kupna jakiegoś towaru, sprzedawca podnosi cenę, a wtedy niektórzy rezygnują z zakupu.
4. W upalny dzień asfalt może się rozgrzać nawet do temperatury 50°C .
 - a) Oblicz długość fali promieniowania cieplnego asfaltu, dla której jest ono najsilniejsze.
 - b) Oblicz, ile razy większa jest ta długość fali od długości światła odpowiadającego maksimum mocy promieniowania słonecznego (patrz rys. 19.33 na s. 110).

5. Które ze zdań dotyczą smogu, a które efektu cieplarnianego?
 - a) Jest wywołany obecnością drobnych cząstek stałych blisko w atmosferze.
 - b) Jest przyczyną podnoszenia poziomu morza.
 - c) Występuje tylko w bezpośrednim otoczeniu miejsca emisji zanieczyszczeń do atmosfery.
 - d) Ma działanie rakotwórcze.
 - e) To zjawisko przedstawiono na zdjęciu poniżej.



6. Stronę internetową *Nauka o klimacie* prowadzą fizycy atmosfery z Uniwersytetu Warszawskiego. Poszukaj tam odpowiedzi na podane niżej pytania oraz na dwa inne pytania dotyczące zmian klimatu, postawione przez siebie.
 - a) Czy wulkany emitują mniej czy więcej CO_2 niż ludzie? Ile razy mniej lub więcej?



- b) Czy obserwowane zmiany klimatu można wyjaśnić zmianami aktywności Słońca?

Projekt Spektroskop

Zadania

1. Zbuduj spektroskop zgodnie z poniższą instrukcją.
2. Skieruj spektroskop szczeliną w kierunku lampy i zajrzyj do okienka. Zobacysz widmo światła. Oko trzeba przyłożyć do okienka tak, aby do wnętrza przyrządu nie dostawało się światło z zewnątrz. Możesz także nakryć głowę ciemną tkaniną, tak jak robili dawni fotografowie. Spod tkaniny powinna wystawać tylko część spektroskopu ze szczeliną.
3. Zbadaj w ten sposób światło z różnych źródeł, np. różnych rodzajów lamp, płomienia ze spalania różnych substancji, błękitnego nieba, świecącego na niebiesko monitora LCD.

Uwaga. Nie patrz za pomocą spektroskopu (ani żadnych innych przyrządów) na Słońce – możesz stracić wzrok! Widmo Słońca można obserwować na ekranie. Zastanów się, jak wykorzystać cień spektroskopu, aby ustawić go szczeliną w stronę Słońca.

4. Opisz swoje obserwacje jak najdokładniej. Widmo światła lamp możesz porównać z informacjami na stronach internetowych producentów, a widmo płomieni – z widmami pierwiastków wchodzących w skład spalanych substancji. A jakie barwy widać w niebieskim świetle monitora?

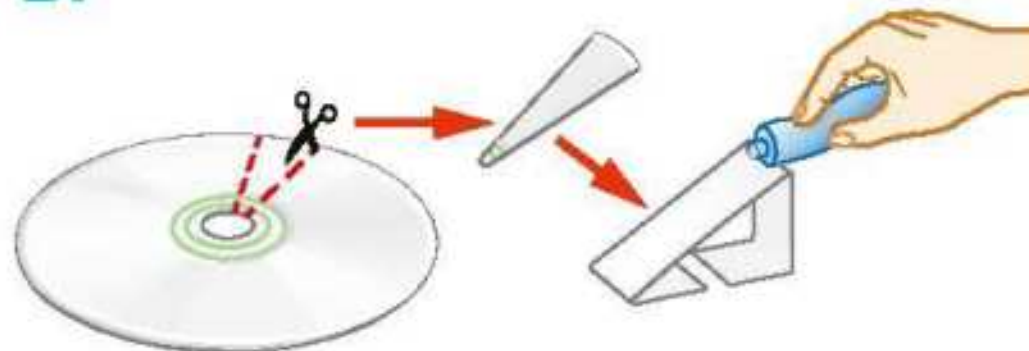
Instrukcja budowy spektroskopu

1. Znajdź albo sklej z kartonu podłużne pudełko o długości 20–30 cm i pozostałych wymiarach 5–10 cm. Możesz pomalować je od środka na czarno, choć nie jest to konieczne.
2. Wytnij fragmenty pudełka w sposób pokazany na rysunku A.
3. Ze starej płyty CD wytnij wycinek o szerokości ok. 3 cm (rys. B).
4. Za pomocą kleju i paska kartonu umocuj kawałek płyty naprzeciwko okienka wyciętego w bocznej ścianie pudełka (rys. C).
5. Na odcięte denko załóż folię aluminiową (uważaj, aby jej nie pognieść) i ostrym nożykiem delikatnie wykonaj w niej wąskie nacięcie (rys. D).

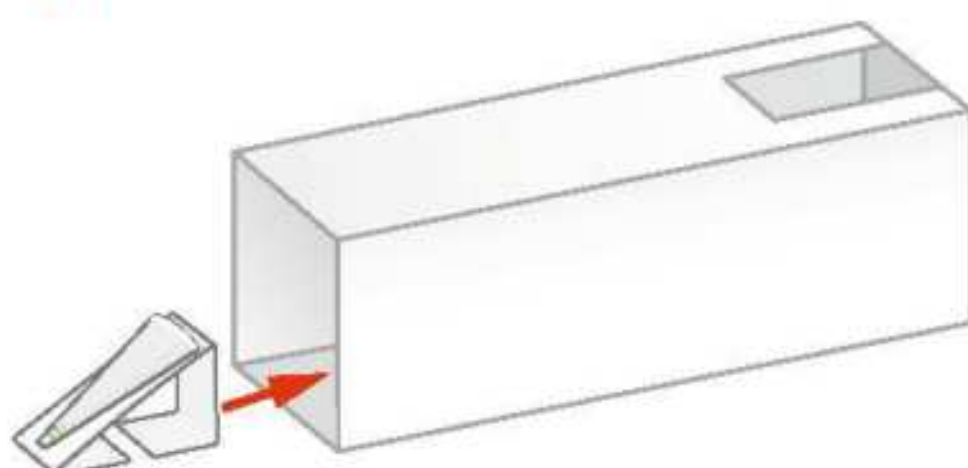
A.



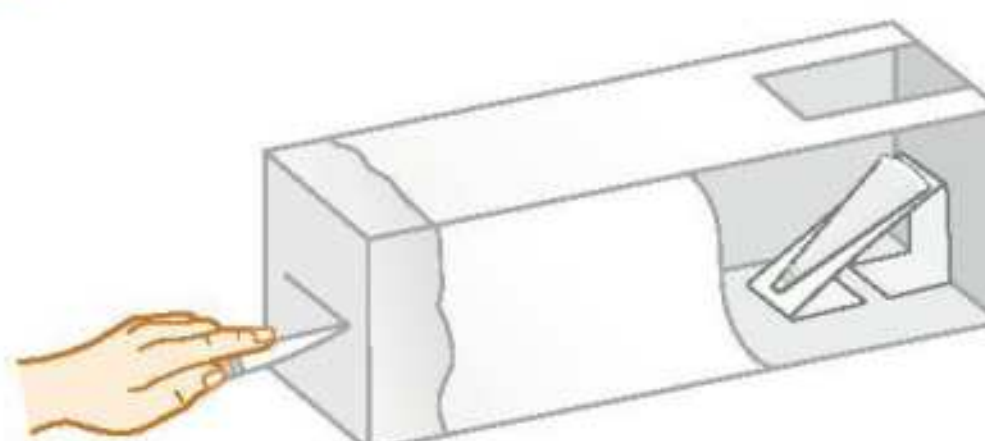
B.



C.



D.



Podsumowanie Fizyka atomowa

- Elektronowolt to jednostka energii równa energii uzyskiwanej przez elektron w polu elektrycznym o różnicy potencjałów 1 V:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- Energia E jednego fotonu, czyli **kwantu** (najmniejszej ilości) promieniowania elektromagnetycznego, jest równa:

$$E = hf$$

gdzie: h – stała Plancka, $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$, f – częstotliwość promieniowania.

- Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne polega na wybijaniu elektronów z powierzchni metalu przez fotony. Zachodzi ono tylko dla promieniowania o częstotliwości większej od pewnej częstotliwości granicznej, czyli dla fotonów o energii większej od pewnej wartości zwanej **pracą wyjścia** W . Po wybiciu elektronu z metalu energia elektronu jest równa co najwyżej:

$$E' = hf - W$$

- Foton ma pęd o wartości:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hf}{c}$$

gdzie: h – stała Plancka, λ – długość fali, f – częstotliwość, c – prędkość światła w próżni.

- W zjawiskach **absorpcji i emisji fotonu** (jak we wszystkich zjawiskach w przyrodzie) jest spełniona zasada zachowania pędu.
- Materia ma własności zarówno cząsteczkowe, jak i falowe (dualizm korpuskularno-falowy). Każdemu ciału możemy przypisać falę materii o długości:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

gdzie: h – stała Plancka, p – pęd ciała.

- Energia elektronu w atomie nie może być dowolna, ale zawsze przyjmuje tylko jedną z wartości zwanych **poziomami energetycznymi**. Najniższy dozwolony poziom energetyczny to stan podstawowy, a pozostałe poziomy to stany wzbudzone.
- W atomie wodoru energia elektronu na poziomie energetycznym numer n wynosi:

$$E_n = -\frac{E_0}{n^2}$$

gdzie $E_0 = 13,6 \text{ eV}$ jest energią jonizacji (a tym samym $-E_0$ jest energią na poziomie podstawowym).

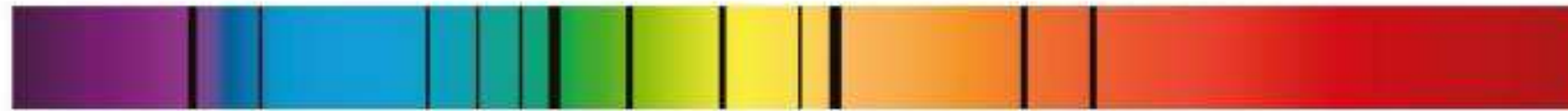
- Widmo światła emitowanego przez rozgrzane ciało jest **widmem ciągłym** – każda barwa płynnie przechodzi w następną.



- Widmo światła emitowanego przez wzbudzony gaz złożony z pojedynczych atomów jest **widmem dyskretnym** (liniowym) – składa się z pojedynczych linii, które są charakterystyczne dla danej substancji.



- ▶ Poszczególne linie widmowe odpowiadają przejściom elektronów między poziomami energetycznymi.
- ▶ Gdy oświetlimy gaz światłem o widmie ciągłym, pochłania on fale o tych samych częstotliwościach, które emituje wtedy, gdy jest wzbudzony. W ten sposób powstaje widmo absorpcyjne.



- Każde ciało wytwarza **promieniowanie termiczne (cieplne)** złożone z fal o różnej długości. Długość fali, dla której promieniowanie jest najsilniejsze, zależy od temperatury zgodnie z **prawem Wiena**:

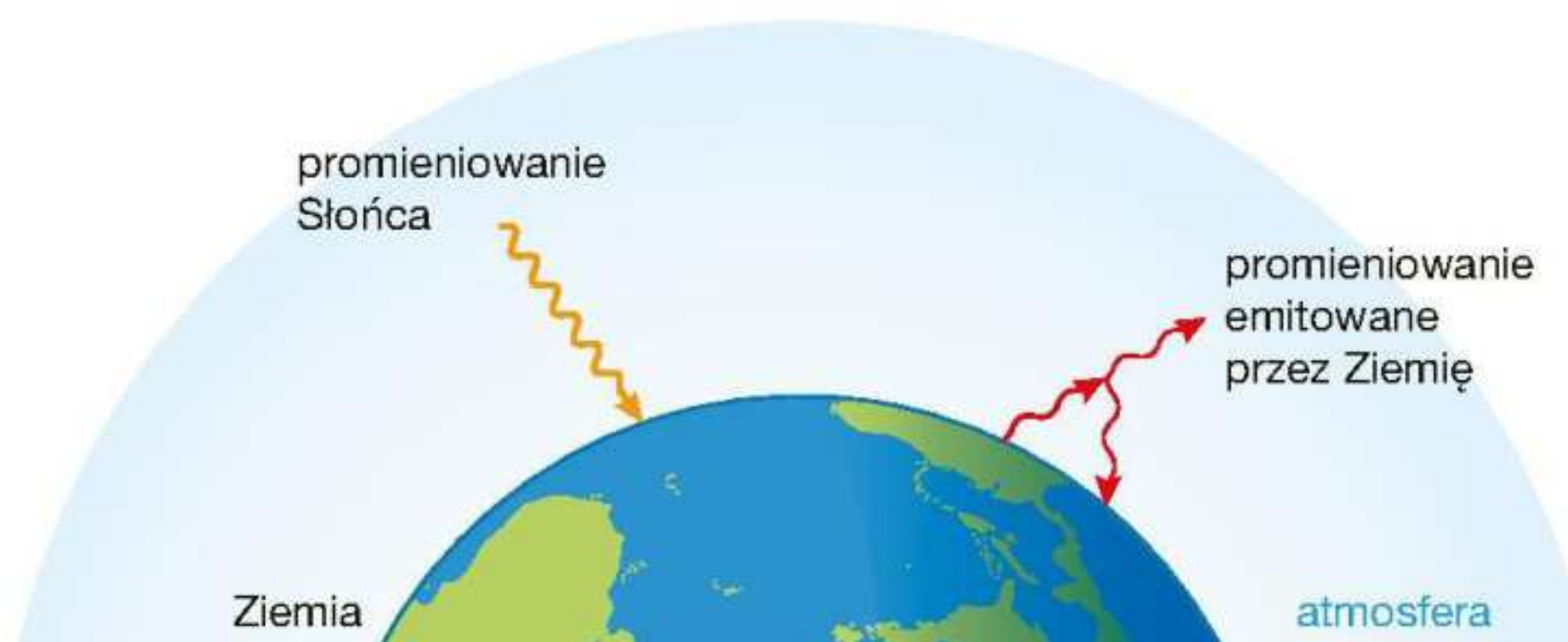
$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

gdzie: $\lambda_{\max}$ – długość fali odpowiadająca maksymalnej mocy promieniowania, T – temperatura bezwzględna ciała (w kelwinach), b – stała $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$.

- ▶ **Ciało doskonale czarne** to ciało, które pochłania całe padające na nie promieniowanie. Takie ciało może jednocześnie emitować własne promieniowanie cieplne, również w świetle widzialnym.

■ Efekt cieplarniany

Gazy zawarte w atmosferze (zwłaszcza dwutlenek węgla, metan, para wodna) przepuszczają światło widzialne, ale odbijają w stronę Ziemi część emitowanego przez nią promieniowania podczerwonego.



- ▶ Nasilenie efektu cieplarnianego zostało wywołane przez działalność człowieka, głównie przez spalanie paliw kopalnych oraz przemysłową hodowlę przeżuwaczy. Jego skutkiem jest globalne ocieplenie – zmiana klimatu całej Ziemi.
- ▶ W systemie klimatycznym istnieje wiele sprzężeń zwrotnych, powodujących, że zwiększenie średniej temperatury Ziemi uruchamia zjawiska przyczyniające się do jej dalszego zwiększania.

Sposób na zadanie

Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk oraz ilustracji praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. (0–3)

Czyli swobodny – jego ruchu nie krępuje oddziaływanie z innymi ciałami.

Spoczywający pojedynczy atom neonu w stanie podstawowym absorbuje foton o długości fali 540 nm, a następnie emituje foton w przeciwną stronę i wraca do stanu podstawowego.

a) Oblicz prędkość atomu po emisji fotonu.

b) Oblicz, o ile mniejszą częstotliwość będzie miał foton wyemitowany w stosunku do fotonu pochłoniętego.

Energie zgromadzone wewnątrz atomu przed zjawiskiem i po nim są więc jednakowe.

Uwagi.

1. Przez długość fali rozumiemy tu jej długość w próżni.
2. Wszystkie wielkości określamy w układzie odniesienia laboratorium, w którym atom początkowo spoczywał.
3. Prędkość uzyskana przez atom w wyniku odrzutu jest na tyle mała, że możesz korzystać ze znanych ci wzorów na pęd i energię kinetyczną.

Dzięki temu będziemy mogli obliczyć częstotliwość fali o danej długości.

A nie ze wzorów wynikających z teorii względności.

Rozwiązanie:

Przyjmijmy oznaczenia:

λ_1 – długość fali zaabsorbowanego fotonu, f_1 – częstotliwość zaabsorbowanego fotonu, Δf – różnica częstotliwości fotonu zaabsorbowanego i wyemitowanego, v – prędkość atomu po emisji fotonu, f_2 – częstotliwość wyemitowanego fotonu, m – masa atomu sodu.

Skąd ta różnica częstotliwości?

Zawsze najpierw zastanów się nad zjawiskiem, a dopiero potem zaczynaj obliczenia.

Atom zaabsorbował foton i przeszedł ze stanu podstawowego do wzbudzonego, a następnie wyemitował foton i wrócił do stanu podstawowego.

Wiemy, że w tej sytuacji energia (a więc i częstotliwość) fotonów jest jednakowa. Skąd więc różnica, o którą zapytano w zadaniu?

Otóż oba fotony mają jednakową energię, w sytuacji, w której atom nie może się poruszać (np. wchodzi w skład siatki krystalicznej i oddziaływanie z innymi atomami praktycznie uniemożliwia jego ruch).

Natomiast w sytuacji rozważanej w tym zadaniu atom zaczyna się poruszać na skutek odrzutu, a więc część energii zaabsorbowanego fotonu zostanie zmieniona w energię kinetyczną atomu.

Korzystamy z zasady zachowania energii

Powyższe rozważania pozwalają nam wyznaczyć różnicę energii fotonu pochłoniętego i wysłanego na podstawie zasady zachowania energii. W naszym przypadku z tej zasady wynika równość:

$$hf_1 = \frac{1}{2}mv^2 + hf_2$$

a więc ta różnica jest równa energii kinetycznej atomu:

$$hf_1 - hf_2 = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Energia kinetyczna atomu

Korzystamy z zasady zachowania pędu

Zwrot pędu wyemitowanego fotonu był przeciwny do zwrotu pędu pochłoniętego fotonu, więc pęd atomu zmienił się o:

$$\Delta p = \frac{hf_1}{c} + \frac{hf_2}{c}$$

a ponieważ początkowo atom spoczywał, to końcowy pęd atomu wynosił:

$$p = 0 + \Delta p = \frac{hf_1}{c} + \frac{hf_2}{c}$$

Tak więc:

$$mv = \frac{h}{c}(f_1 + f_2) \quad (2)$$

Częstotliwość pochłoniętego fotonu możemy łatwo obliczyć jako $f_1 = \frac{c}{\lambda_1}$, mamy więc tylko dwie niewiadome: v oraz f_2 .

Rozwiązujemy układ równań i obliczamy prędkość

Przekształcamy równania (1) i (2) i otrzymujemy układ:

$$\begin{cases} mvc = h(f_1 + f_2) \\ \frac{1}{2}mv^2 = h(f_1 - f_2) \end{cases}$$

Wystarczy dodać je stronami, aby uzyskać zależność:

$$mvc + \frac{1}{2}mv^2 = 2hf_1$$

Po uporządkowaniu i wstawieniu wzoru na f_1 otrzymujemy równanie kwadratowe z niewiadomą v :

$$\frac{1}{2}mv^2 + mcv - 2h\frac{c}{\lambda_1} = 0$$

Gdy je rozwiążemy, otrzymamy:

Są dwa rozwiązania, ale dla jednego $|v| > c$.

$$v = \sqrt{c^2 + \frac{4hc}{m\lambda_1}} - c$$

Po podstawieniu wartości liczbowych dostajemy:

$$v = 7,33 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Obliczamy różnicę częstotliwości

Teraz ze wzoru (1) możemy od razu wyznaczyć interesującą nas różnicę $f_1 - f_2$:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h(f_1 - f_2)$$

$$f_1 - f_2 = \frac{mv^2}{2h}$$

Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymujemy:

$$f_1 - f_2 = 136 \text{ kHz}$$

Odpowiedź: Atom zacznie się poruszać z prędkością $73 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$. Częstotliwości fotonów pochłoniętego i wysłanego różnią się o 136 kHz.

Uwaga. Obliczona różnica częstotliwości fotonów jest ok. 4 mld razy mniejsza od częstotliwości fotonu padającego (mimo to nawet taką różnicę potrafimy zmierzyć).

Warto zapamiętać!

- Przy emisji fotonu swobodny atom ulega odrzutowi. Podobnie przy absorpcji fotonu atom przejmuje jego pęd.
- W obliczeniach dotyczących tego zjawiska można korzystać z zasady zachowania pędu oraz zasady zachowania energii.

Zadania analogiczne

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



Zadanie 1. Spoczywający początkowo atom wodoru wyemitował foton światła o długości $\lambda = 433 \text{ nm}$, co spowodowało jego odrzut.

Oblicz, z jaką prędkością zaczął poruszać się atom po wyemitowaniu fotonu. W którą stronę zaczął się poruszać?

Zadanie 2. Spoczywający początkowo atom wodoru wyemitował foton światła o długości $\lambda_1 = 433 \text{ nm}$, a następnie foton promieniowania o długości $\lambda_2 = 121 \text{ nm}$. Fotony te zostały wysłane w kierunkach wzajemnie prostopadłych.

Oblicz wartość prędkości atomu po obu emisjach i wyznacz kierunek, jaki tworzy ta prędkość z kierunkiem emisji pierwszego fotonu.

Zadanie 3. Jaką masę musiałoby mieć swobodne ciało, aby odbijający się od niego foton światła fioletowego zmieniał się w foton światła niebieskiego?



Zadania powtórzeniowe



Zadanie 1. Dwie diody

Diody LED czerwona i zielona mają jednakowe moce i jednakowe sprawności. **Wskaż właściwe zakończenie zdania spośród A–C oraz jego uzasadnienie spośród 1–3.**

W porównaniu z zieloną diodą czerwona dioda emituje:

A.	tyle samo fotonów,	ponieważ	1.	moc wytwarzanego światła jest jednakowa.
B.	mniej fotonów,		2.	światło zielone ma wyższą częstotliwość.
C.	więcej fotonów,		3.	każdy foton światła o danej barwie ma jednakową energię.

Zadanie 2. Interferencja elektronów

Źródło elektronów wytwarza jeden elektron na sekundę. Każdy z powstających elektronów zostaje rozpędzony w polu elektrycznym pod napięciem $U = 1$ kV, pada na przesłonę z dwiema cienkimi szczelinami odległymi o $d = 150$ nm, a następnie na ekran, umieszczony za nią w odległości $L = 10$ m. Ekran jest początkowo czarny, ale trwale przebarwia się na białą w miejscu, na które pada elektron. Z czasem na ekranie zarysowuje się obraz podobny do prążków powstających w wyniku interferencji światła.

Zadanie 2.1. Uzasadnij, że m źródłem a ekranem nigdy nie znajdował się więcej niż jeden elektron.

Zadanie 2.2. Wyjaśnij, dlaczego przebieg doświadczenia pozwala wykluczyć hipotezę, że powstawanie prążków jest wynikiem wzajemnego oddziaływania elektronów.

Zadanie 2.3. Po zakończeniu eksperymentu chcemy włączyć źródło elektronów jeszcze na 1 s. **Wskaż właściwe zakończenie zdania.**

Na podstawie układu prążków możemy:

- A. przewidzieć, w które miejsce padnie kolejny elektron, jeśli znów włączymy źródło.
- B. spodziewać się, że elektron padnie z większym prawdopodobieństwem na jeden z białych prążków niż na jeden z czarnych.
- C. spodziewać się, że elektron padnie z mniejszym prawdopodobieństwem na jeden z białych prążków niż na jeden z czarnych.

Zadanie 2.4. Oblicz, w jakiej odległości od środkowego (zerowego) prążka powstaje pierwszy jasny prążek.

Zadanie 2.5. Dokończ zdanie. Zaznacz odpowiedź A, B lub C i jej uzasadnienie 1, 2 albo 3.

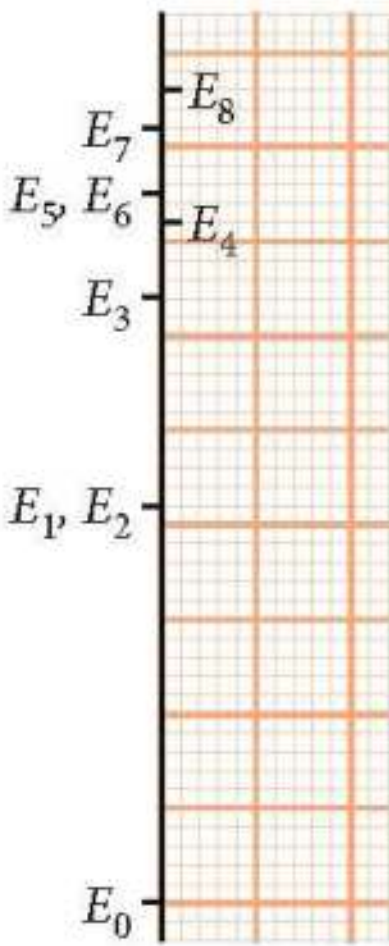
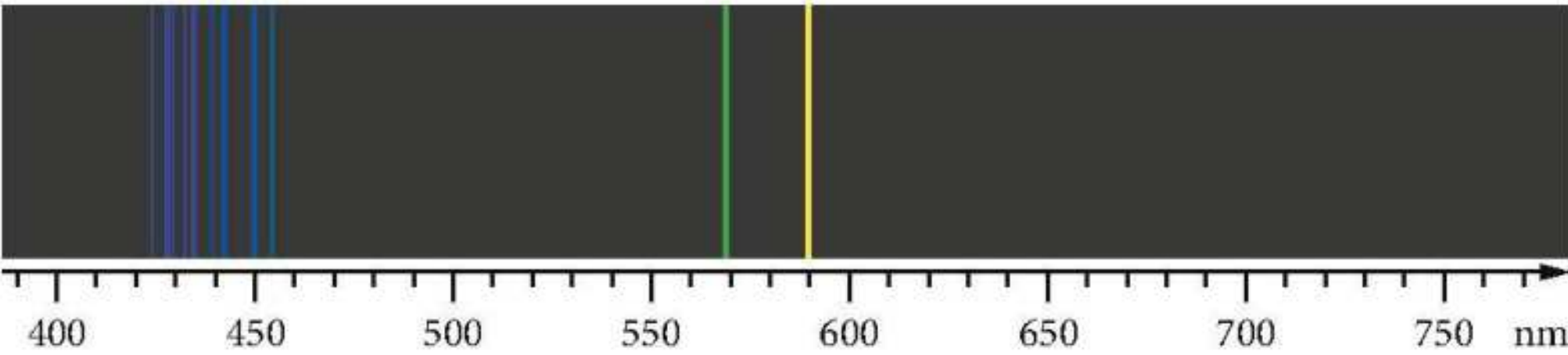
Jeśli zwiększymy napięcie rozpędzające elektrony z 1 kV do 2 kV, to odległości między prążkami interferencyjnymi:

A.	nie zmienia się,	ponieważ	1.	długość fali de Broglie'a jest odwrotnie proporcjonalna do pędu elektronu.
B.	zwiększą się,		2.	elektrony rozpędzone większym napięciem przebywają dłuższą drogę w tym samym czasie.
C.	zmniejszą się,		3.	ładunek elektronu nie zależy od jego prędkości.

Zadanie 3. Poziomy energetyczne w atomie sodu

Rysunek na papierze milimetrowym przedstawia najniższe poziomy energetyczne atomu sodu w skali 1 cm – 1 eV. Poziom E_0 to poziom podstawowy. Równość poziomów na rysunku oznacza, że ich różnica jest zbyt mała, aby była widoczna w tej skali.

Na drugim rysunku (poniżej) przedstawiono widmo sodu w zakresie widzialnym.



Zadanie 3.1. Oceń prawdziwość poniższych stwierdzeń. Wybierz P, jeśli stwierdzenie jest prawdziwe, albo F – jeśli jest fałszywe.

1.	Zielona linia widmowa odpowiada większej energii fotonu niż każda z linii niebieskich.	P	F
2.	Żółta linia to w rzeczywistości dwie linie położone bardzo blisko siebie.	P	F
3.	Atom sodu może emitować także foton podczerwony.	P	F

Zadanie 3.2. Atom sodu wyemitował foton odpowiadający zielonej linii widma. Przeskoczył on między dwoma spośród poziomów energetycznych zaznaczonych na rysunku. **Które to poziomy?**

Wskazówka. Zastanów się, jak zaplanować obliczenia, aby były najprostsze.

20. Izotopy i promieniowanie

1. Jądro atomowe
2. Reakcje jądrowe
3. Promieniowanie jądrowe
4. Czas połowicznego rozpadu



20.1 Jądro atomowe

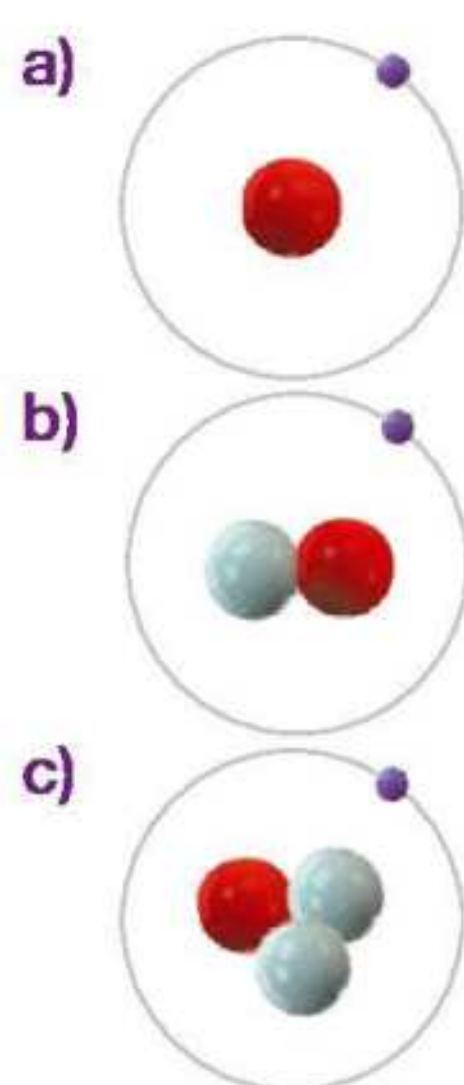


Ważne w tej lekcji:

- pierwiastek a izotop,
- liczba atomowa i liczba masowa.

Przypomnij sobie:

- Atom składa się z jądra i otaczających go elektronów.
- Jądro atomu jest zbudowane z protonów i neutronów.
- Elektron ma ładunek elektryczny $-e$, proton ma ładunek $+e$, a neutron jest obojętny elektrycznie.



Rys. 20.1. Izotopy wodoru w przyrodzie: a) prot (zwykły wodór) – 99,985%, b) deuter – 0,015%, c) tryt – śladowe ilości

W poprzednim dziale mówiliśmy o atomach. Interesowały nas jednak głównie ich elektrony przeskakujące z jednej orbity na drugą. Teraz zajmiemy się dokładniej budową jądra atomowego.

■ Budowa jądra atomowego

Wiesz już, że jądro składa się z protonów i neutronów, które łącznie nazywamy **nukleonami** (od łac. *nucleus* – jądro).

Atomy różnych pierwiastków są zbudowane z jednakowych części składowych (na przykład protony w jądrze węgla i protony w jądrze tlenu są identyczne).

Czy wszystkie atomy jednego pierwiastka są jednakowe? Nie zawsze. Pierwiastek może występować w wielu odmianach zwanych izotopami.

Jądra atomów tego samego pierwiastka zawierają tyle samo protonów. Mogą się one jednak różnić liczbą neutronów – w takim przypadku mówimy o różnych izotopach tego samego pierwiastka.

Nazwa *izotop* pochodzi od greckiego wyrażenia oznaczającego „to samo miejsce”. Chodzi o miejsce w układzie okresowym pierwiastków.

Izotopy tego samego pierwiastka mają praktycznie jednakowe właściwości chemiczne.

Jest tak, ponieważ:

- Atom zawiera tyle samo elektronów, ile protonów.
- Przy jednakowej liczbie elektronów taki sam jest również ich układ na orbitach, w tym także na orbicie walencyjnej.
- O właściwościach chemicznych decydują elektrony walencyjne.

Izotopy w przyrodzie

W przyrodzie występują różne izotopy wielu pierwiastków znanych z życia codziennego. Na przykład jądro atomu węgla zawiera 6 protonów, ale w przyrodzie występują jego różne izotopy, o różnej liczbie neutronów:

- w prawie 99% atomów jest ich po 6,
- tylko w ok. 1% atomów jest ich po 7,
- w niewielkiej, pozostałej części jest ich po 8.

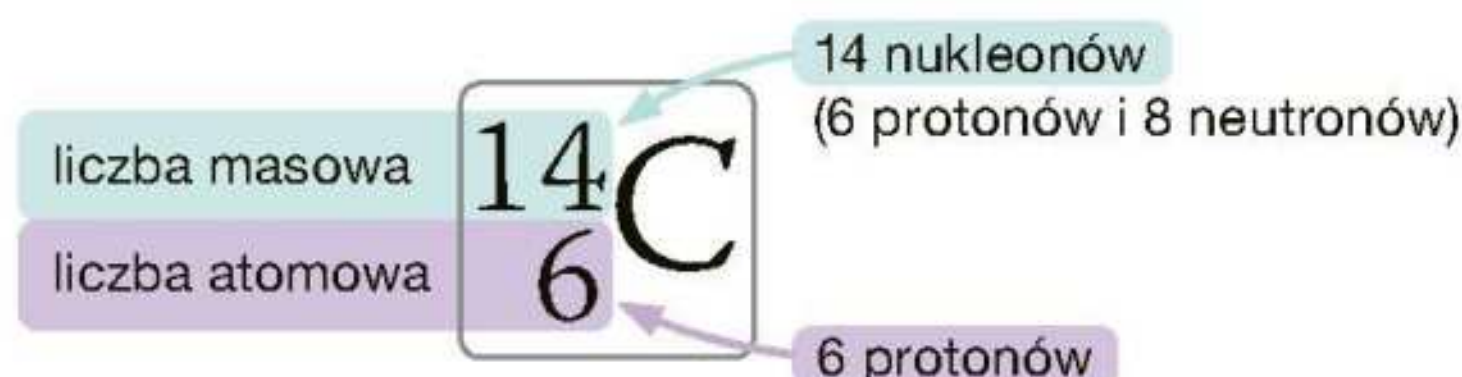
Wszystkie te izotopy występują w CO₂ w atmosferze, są przyswajane przez rośliny w procesie fotosyntezy, trafiają do naszego pokarmu, więc ostatecznie nasze organizmy są zbudowane z nich wszystkich.

Liczba atomowa i liczba masowa

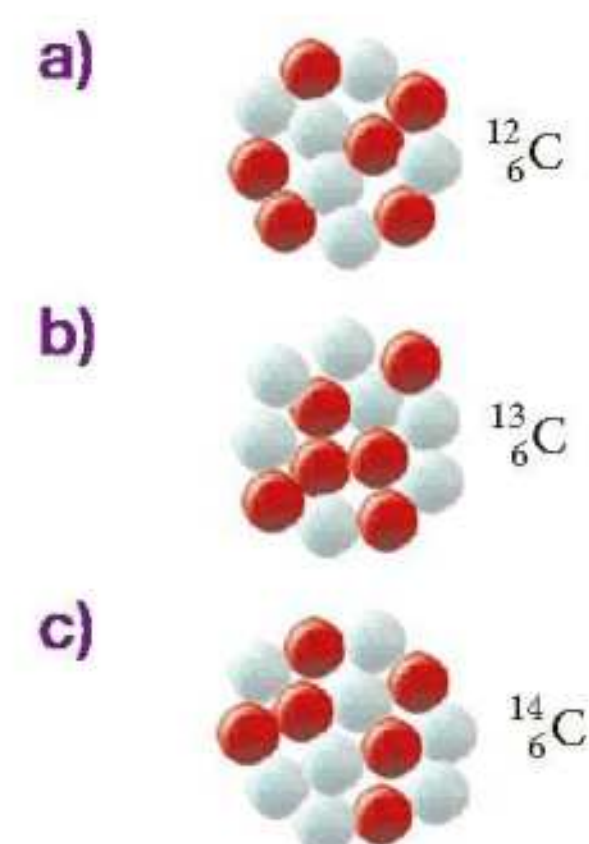
Do opisu izotopów służą dwie wielkości.

Liczba atomowa (Z) oznacza liczbę protonów w jądrze, a liczba masowa (A) – liczbę nukleonów (łącną liczbę protonów i neutronów).

Przykładowo izotop węgla o 6 protonach i 8 neutronach ma liczbę atomową $Z = 6$ oraz liczbę masową $A = 6 + 8 = 14$. Liczbę atomową i masową zapisujemy po lewej stronie symbolu chemicznego (jak poniżej).

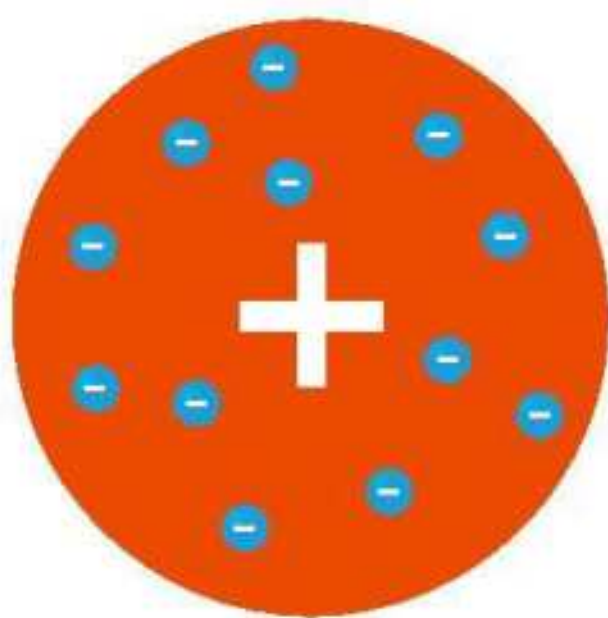


Liczba atomowa jest jednocześnie numerem pierwiastka w układzie okresowym. Ponieważ każdy pierwiastek ma jednoznacznie określoną liczbę atomową, często pomijamy ją w symbolu i zamiast ${}^{14}_6\text{C}$ piszemy ${}^{14}\text{C}$. Ten sam izotop bywa też określany jako C-14 albo węgiel-14.



Rys. 20.2. Schematyczny rysunek jąder różnych izotopów węgla (protony zaznaczono na czerwono)

Oznaczenia A i Z mogą być dla nas mylące, ponieważ pochodzą z niemieckiego: Z jak *Zahl* (liczba), A jak *Atomgewicht* (masa atomowa).

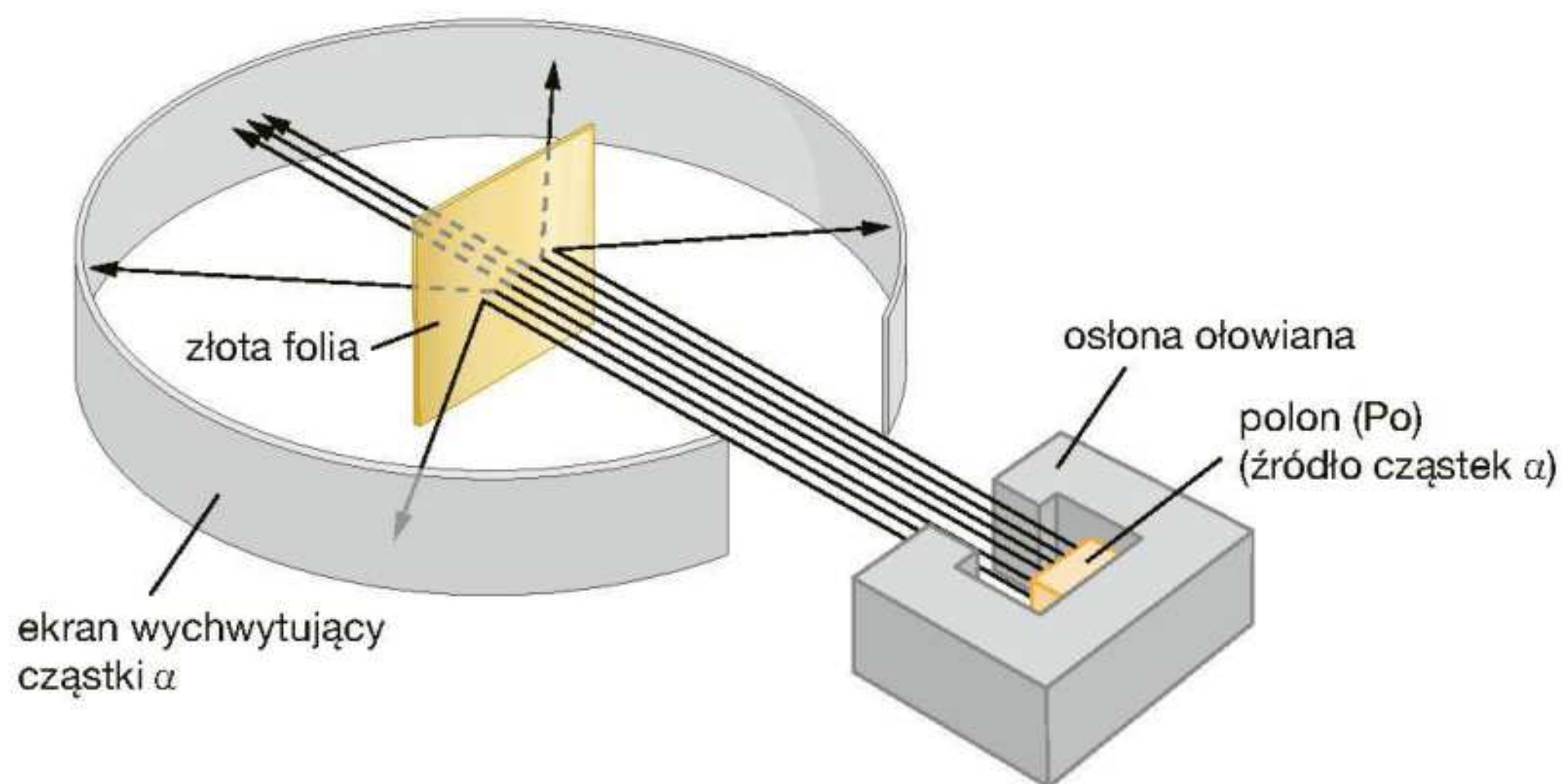


Rys. 20.3. Model atomu jako „ciasta z rodzynkami”

■ Odkrycie jądra atomowego

Zanim odkryto jądro atomowe, wiadano, że atom zawiera ujemnie naładowane elektrony. Domyślano się więc, że musi zawierać także ładunek dodatni. Na ogół jednak atom wyobrażano sobie jako ciągłą, dodatnio naładowaną masę, w której jak rodzynki w cieście są rozmieszczone elektrony (rys. 20.3).

Ten pogląd uległ zmianie dopiero w 1911 r., po opublikowaniu przez Ernesta Rutherforda wyników pewnego doświadczenia (rys. 20.4).



Rys. 20.4. Schemat doświadczenia Rutherforda

Bombardował on bardzo cienką złotą folię cząstkami alfa (jądrami helu). Większość cząstek przechodziła przez nią bez zmiany kierunku lub zmiana ta była nieznaczna. Jednak niektóre odbijały się pod kątem niemal 180°.

Rutherford wspominał później, że to „było tak, jakby piętnastocalowy pocisk wystrzelony w kawałek bibułki odbił się od niej i trafił w strzelającego”.

Doświadczenie Rutherforda dowodziło, że atom jest w znacznej części pusty, ale zawiera także dużą masę skupioną w małej objętości. Dalsze doświadczenia wykazały, że jest ona naładowana dodatnio. Tę dodatnio naładowaną masę nazwano jądrem atomowym.

A to ciekawe

Izotopy niektórych pierwiastków występują w glebie w różnych proporcjach w zależności od skał występujących w danej okolicy. Dzięki temu archeologowie na podstawie badania zawartości tych izotopów mogą określić, skąd pochodziło zwierzę, którego szczątki znaleźli. W ten sposób w 2025 r. odkryto, że żyjąca w okresie neolitu krowa, której ząb został znaleziony w Stonehenge, pochodziła z Walii. Archeologowie podejrzewają, że było to jedno ze zwierząt, które przyciągnęły kamienie na budowę wielkiego kręgu.



Liczba masowa a masa jednego atomu

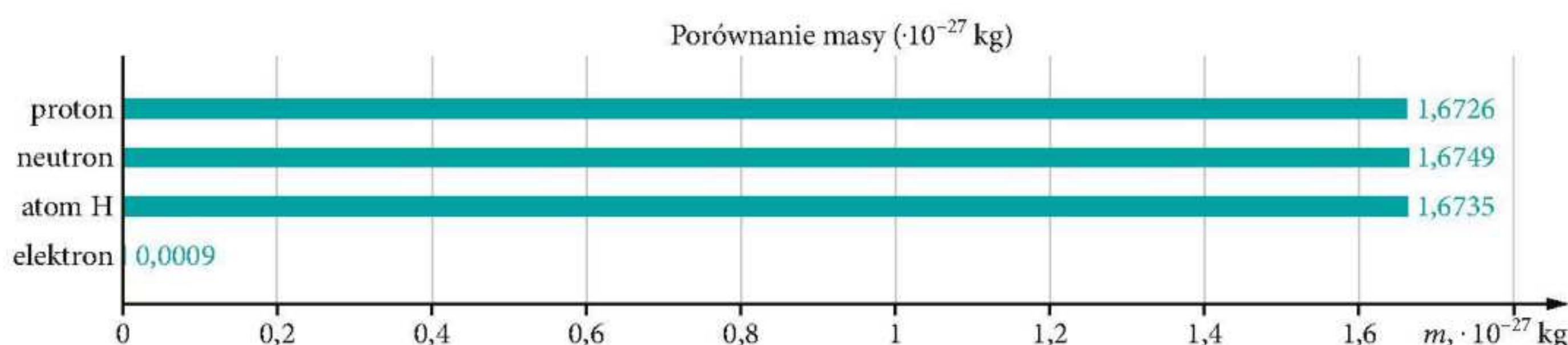
Sama nazwa „liczba masowa” sugeruje, że ma ona związek z masą atomu. Tak rzeczywiście jest, a wynika to z następujących faktów:

Proton i neutron mają zbliżone masy. Elektron ma masę ok. 2000 razy mniejszą od każdego z nukleonów.

Podaliśmy te masy na marginesie, ale w szybkiej orientacji, o jaką proporcję chodzi, pomoże rysunek 20.5.

Tabela 20.1. Masa cząstek

Cząstka	Masa $\cdot 10^{-27}$ kg
proton	1,6726
neutron	1,6749
atom wodoru	1,6735
elektron	0,0009



Rys. 20.5. Na wykresie nie widać różnic między masą nukleonów i masą atomu wodoru (prot), z kolei masa elektronu jest zbyt mała, aby ją w tej skali odczytać

Tak więc w przybliżonych obliczeniach możemy pomijać zarówno różnicę między masą protonu i masą nukleonu, jak i różnicę między masą jądra a masą całego atomu.

Jeśli za jednostkę masy przyjmimy masę jednego atomu wodoru ${}^1_1\text{H}$, to z dokładnością poniżej 1%:

- atom berylu ${}^9_4\text{Be}$ ma masę 9 takich jednostek,
- atom żelaza ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ ma masę 56 takich jednostek, itd.

Tak pierwotnie została zdefiniowana jednostka masy atomowej (1 u). I choć dzisiaj jej ścisła definicja jest nieco inna, to różnica między tymi definicjami jest niewielka (patrz tabela 20.1 i rys. 20.5).

Obecnie jednostka masy atomowej to $\frac{1}{12}$ masy atomu węgla ${}^{12}_6\text{C}$, czyli $1,6605 \cdot 10^{-27}$ kg.

Masa atomowa pierwiastka

W układzie okresowym lub tablicach chemicznych można sprawdzić, że masa atomowa węgla wynosi 12,011 u. Czy nie jest to sprzeczne z definicją jednostki masy atomowej?

Otóż atom **izotopu** ${}^{12}_6\text{C}$ z definicji ma masę równą dokładnie 12 u. Natomiast przyjmowana w chemii masa atomowa pierwiastka to średnia dla różnych izotopów, wziętych w takich proporcjach, w jakich występują one w przyrodzie.

Taka definicja jest wygodna w przypadku przemian chemicznych, w których nie możemy rozróżnić izotopów jednego pierwiastka.

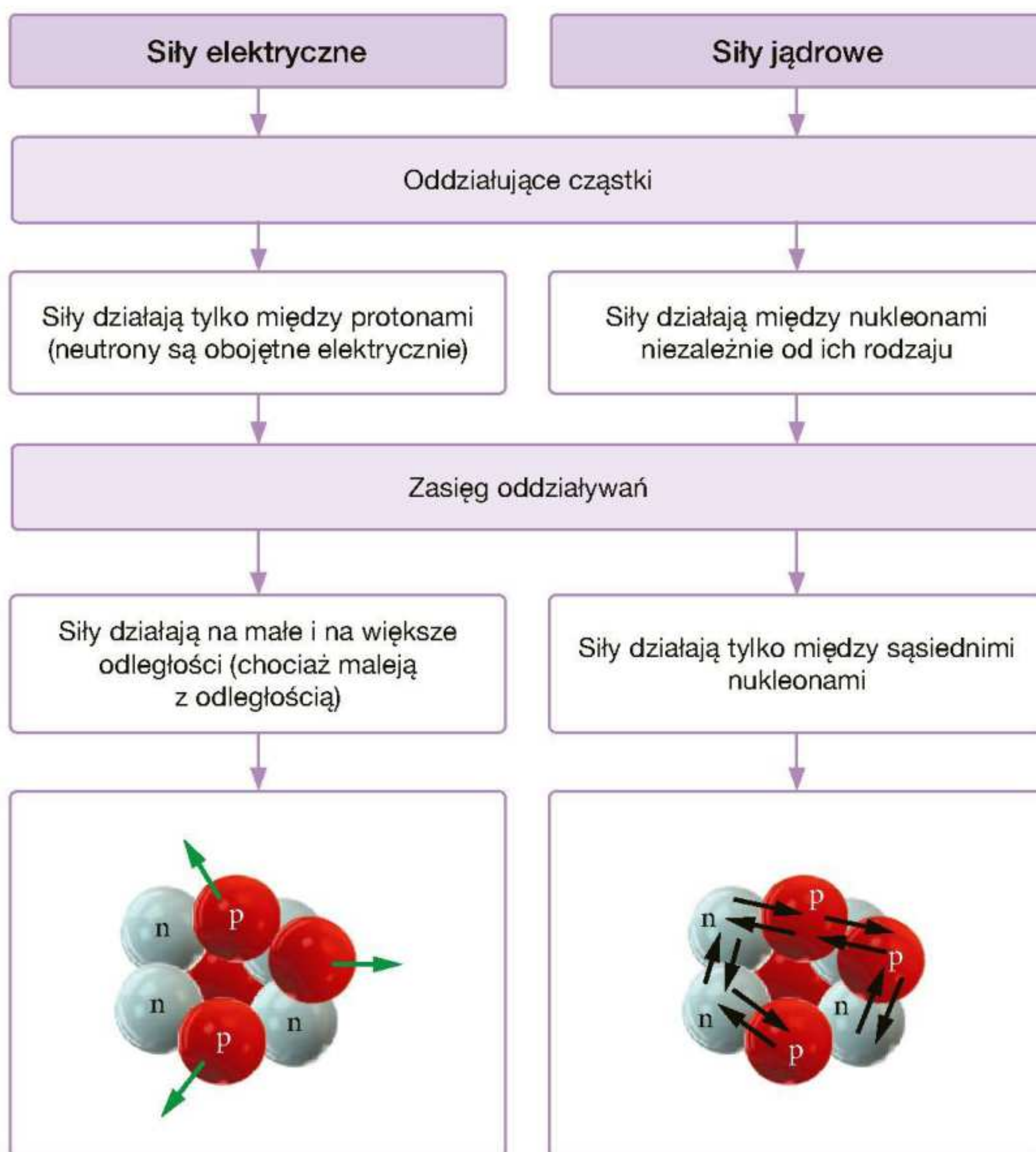
Atomy ${}^{13}_6\text{C}$ i ${}^{14}_6\text{C}$ zawyżają średnią masę atomów węgla, ale tylko nieznacznie, ponieważ w przyrodzie jest ich ok. 1%.

■ Oddziaływania jądrowe

Wszystkie protony są naładowane dodatnio, więc odpychają się siłami elektrycznymi. Nie powoduje to jednak natychmiastowego rozpadu każdego jądra, ponieważ odpychanie elektryczne nie jest jedyną siłą występującą między nukleonami.

Między nukleonami działają przyciągające siły oddziaływania jądrowego.

Porównajmy te dwa oddziaływania.



Nukleony składają się z cząstek zwanych kwarkami, które nie występują jako cząstki swobodne.

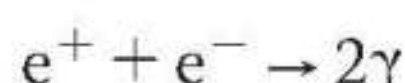
■ Cząstki elementarne

Nukleony, elektron, a także foton nazywamy cząstkami elementarnymi, co oznacza, że nie da się ich podzielić na mniejsze cząstki. Istnieją jeszcze inne cząstki elementarne. Wkrótce powiemy o jednej z nich – neutrinie.

■ Materia i antymateria

Dla prawie każdej cząstki elementarnej istnieje jej antycząstka, pod wieloma względami podobna, ale o przeciwnym ładunku elektrycznym. Antyelektron, zwany także pozytonem, ma więc ładunek dodatni. Swojej antycząstki nie ma natomiast foton.

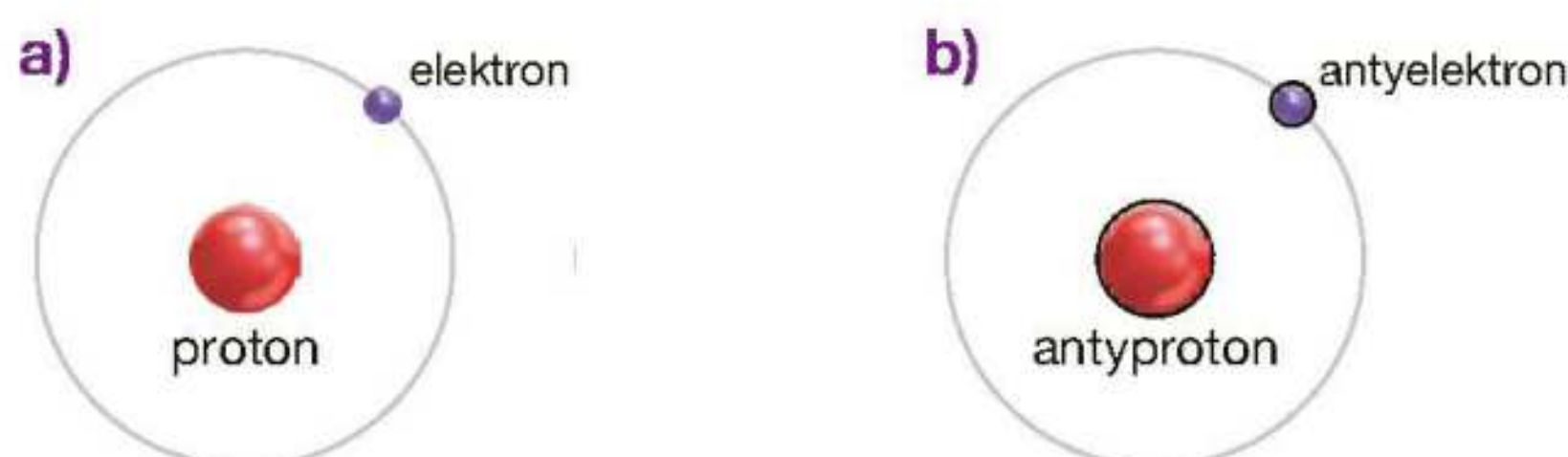
Gdy cząstka i jej antycząstka się spotkają, anihilują. Dosłownie oznacza to, że znikają, jednak nie znikają całkowicie – zmieniają się w energię w postaci fotonów. Oto przykładowe równanie anihilacji elektronu i pozytonu:



Jest to bardzo duża energia. Jej obliczeniem zajmiemy się w następnym dziale.

■ Dlaczego antymaterii jest tak mało?

Materia i antymateria mają analogiczne właściwości (rys. 20.6). Mogłoby się więc wydawać, że we Wszechświecie powinno być tyle samo jednego i drugiego rodzaju cząstek. Najprawdopodobniej tak jednak nie jest, chyba że gdzieś w bardzo dalekich obszarach kosmosu istnieją całe antygalaktyki, zbudowane z antymaterii. Na to nic jednak nie wskazuje, choć z drugiej strony nie jesteśmy w stanie z daleka odróżnić materii od antymaterii, ponieważ mają identyczne linie widmowe. Fizycy nie potrafią jeszcze do końca wyjaśnić źródła asymetrii między materią i antymaterią.



Rys. 20.6. Antycząstki mogą się łączyć w antyatomy: a) atom wodoru, b) analogiczny antyatom

A to ciekawe

Obecnie fizycy potrafią już wytworzyć 20 000 atomów antywodoru w ciągu doby. To wystarcza, aby przeprowadzić z nimi wiele doświadczeń.

W 2018 r. zmierzono częstotliwość jednej z linii widmowych antywodoru z dokładnością do 12 cyfr znaczących – i z tą dokładnością okazała się ona równa odpowiedniej częstotliwości dla wodoru.

Z kolei w 2023 r. badano spadek swobodny antyatomów – również tym razem się okazało, że spadają one z takim samym przyspieszeniem g jak materia (choć na razie pomiar był obciążony sporą niepewnością).

Na zdjęciu: część urządzenia do zmniejszania prędkości antyprotonów w CERN.





■ Przykład

Oszacuj stosunek gęstości gazów: helu i wodoru na podstawie własności ich atomów. Porównaj swój wynik z wartościami znalezionymi w tablicach fizycznych.

Rozwiązanie:

Wodór występuje w przyrodzie prawie wyłącznie w postaci izotopu ${}^1_1\text{H}$, w cząsteczkach dwuatomowych. Natomiast hel jest gazem szlachetnym i jego cząsteczki są jednoatomowe, a w przyrodzie występuje niemal wyłącznie jako izotop ${}^4_2\text{He}$.

W dobrym przybliżeniu masa cząsteczki wodoru jest więc równa masie dwóch protonów, a masa cząsteczki helu jest równa masie czterech protonów.

Ponieważ 1 mol każdego gazu ma taką samą objętość (patrz podręcznik cz. 2, s. 67), w danej objętości wodoru znajduje się tyle samo cząsteczek, co w takiej samej objętości helu. To oznacza, że hel ma gęstość około dwukrotnie większą niż wodór.

Z tablic fizycznych wynika, że ten stosunek to w warunkach normalnych dokładniej:

$$\frac{d_{\text{He}}}{d_{\text{H}}} = \frac{0,164 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,0823 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1,993$$

Odpowiedź: Zgodnie z oszacowaniem hel ma gęstość dwukrotnie większą niż wodór, co z bardzo dobrą dokładnością zgadza się z danymi tablicowymi.

1. Wykonaj polecenia i odpowiedz na pytania:

- Podaj nazwę pierwiastka, którego symbol zastąpiono literą X w symbolu izotopu ${}^{56}_{26}\text{X}$? Ile protonów i ile neutronów jest w jądrze atomu tego izotopu?
- Znajdź w układzie okresowym pierwiastek, którego jądro zawiera pięć protonów. Jeden z izotopów tego pierwiastka ma w jądrze sześć neutronów. Zapisz jego symbol.
- Czy izotopy różnych pierwiastków mogą mieć jednakową liczbę masową? Jeśli nie, wyjaśnij dlaczego, a jeśli tak – podaj przykład.
- Czy ciało człowieka zawiera więcej protonów czy neutronów? Uzasadnij odpowiedź.

2. W naturalnie występującym chlorze (na zdjęciu widzimy dodawanie związków chloru do wody w basenie) znajdują się izotopy ${}^{35}\text{Cl}$ oraz ${}^{37}\text{Cl}$, przy czym pierwszy stanowi 76% masy naturalnego chloru, a drugi 24%.

Oblicz średnią liczb masowych tych izotopów z uwzględnieniem częstości ich występowania. Porównaj wynik z masą atomową chloru, wynoszącą 35,45 u.



3. Jeśli w doświadczeniu Rutherforda zamienimy cząstki alfa na protony, to również zaobserwujemy odbicie niektórych cząstek od folii. Natomiast w przypadku neutronów takie zjawisko nie zachodzi. Skąd bierze się ta różnica?

Wskazówka. Proton odchyła się nie tylko wtedy, gdy trafi w samo jądro, lecz także gdy znajdzie się w pobliżu. Dlaczego?

4. **P** Oszacuj, ile razy lżejszy od powietrza jest wodór (czyli ile razy gęstość wodoru jest mniejsza od gęstości powietrza w tych samych warunkach). Przyjmij, że 80% cząsteczek powietrza to dwuatomowe cząsteczki azotu, a pozostałe – to dwuatomowe cząsteczki tlenu. Wodór również występuje w cząsteczkach dwuatomowych. Porównaj swoje oszacowanie z obliczeniami na podstawie danych z tablic gęstości.

5. Jeśli w cząsteczce wody przynajmniej jeden z atomów wodoru został zastąpiony przez deuter, to taką cząsteczkę wody nazywamy ciężką wodą.

a) Jak myślisz, w jaki sposób można by oddzielić ciężką wodę od zwykłej? Swoje przypuszczenia skonfrontuj z informacjami z internetu.

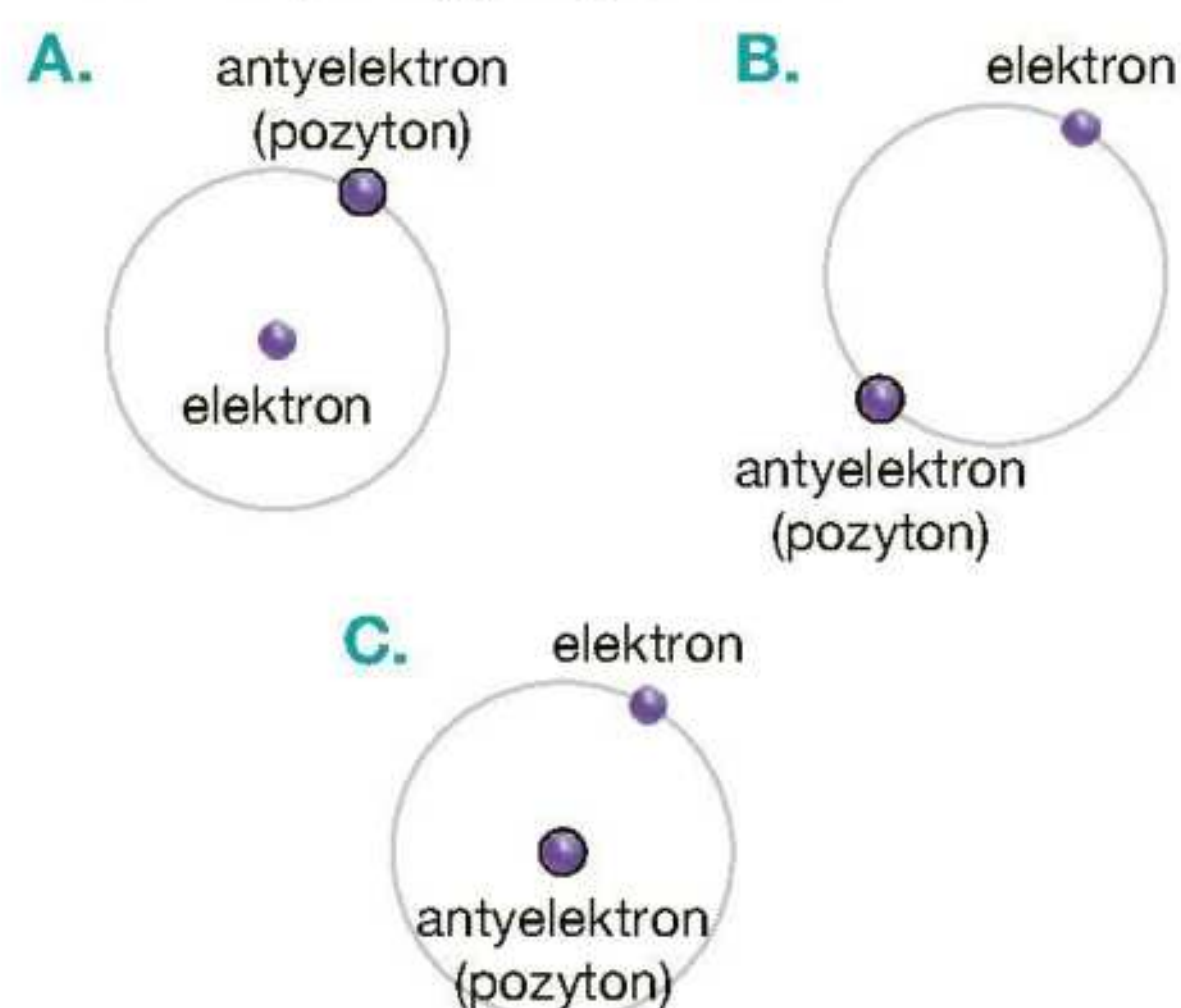
b) Zdjęcie przedstawia kadr z filmu *Bitwa o ciężką wodę* opartego na autentycznych wydarzeniach z czasów II wojny światowej. Dowiedz się, dlaczego ciężka

woda była strategicznym surowcem dla Niemiec hitlerowskich.



6. Pozytonium to układ złożony z elektronu oraz pozytonu (antyelektronu). Odpowiedz na pytania i uzasadnij swoje odpowiedzi.

a) Który z rysunków prawidłowo przedstawia uproszczony schemat tego układu? Uzasadnij swoją odpowiedź.



b) Pozytonium jest bardzo nietrwałe – żyje krócej niż 1 μs . Jak sądzisz, dlaczego?

20.2 Reakcje jądrowe



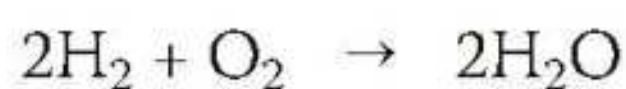
Ważne w tej lekcji:

- jądra stabilne i niestabilne,
- rozpady: alfa, beta minus, beta plus,
- zasady zachowania.

Przypomnij sobie:

- Jądro atomowe składa się z nukleonów: protonów i neutronów.
- Liczba protonów w jądrze, nazywana liczbą atomową, pozwala określić, do jakiego pierwiastka należy atom. Łączną liczbę nukleonów w jądrze nazywamy liczbą masową.
- Różne izotopy tego samego pierwiastka mają tyle samo protonów w jądrze, a więc jednakową liczbę atomową, ale różnią się liczbą neutronów, a więc także liczbą masową.

Jak wiesz, w reakcjach chemicznych nie ulegają zmianie pierwiastki biorące w nich udział. Gdy zapisujemy równanie reakcji chemicznej, po każdej stronie musi występować taka sama liczba atomów danego pierwiastka. Przykładem może być reakcja spalania wodoru, w której powstaje woda:



w sumie 4 atomy H i 2 atomy O $\rightarrow$ w sumie 4 atomy H i 2 atomy O,
tylko inaczej połączone

Dzieje się tak dlatego, że w reakcjach chemicznych biorą udział tylko elektrony, a jądra atomów się nie zmieniają. Inaczej jest w przypadku reakcji jądrowych.

W reakcjach jądrowych zmianie ulegają jądra atomowe, więc jedne pierwiastki zmieniają się w inne.

■ Historia poglądów na przemiany pierwiastków

Możliwość przekształcania jednych pierwiastków w drugie pokazuje, że czasem pogląd początkowo odrzucony przez uczonych może okazać się prawdziwy, a do tego w kontekście nowej, szerszej wiedzy – nabrać nowego znaczenia.

Przez całe wieki alchemicy (rys. 20.7) próbowali zmieniać metale nieszlachetne (np. ołów i rtęć) w złoto. W ich mniemaniu nie oznaczało to jednak zmiany jednego pierwiastka w inny, ponieważ za pierwiastki uważali wodę, powietrze, ziemię i ogień, a metale – za substancje złożone z tych pierwiastków.

Dopiero na przełomie XVIII i XIX w. ustalono, że zarówno ołów, rtęć, jak i złoto są pierwiastkami, a jednych pierwiastków nie da się zmieniać w inne.

Sto lat później okazało się jednak, że pierwiastki – wbrew swojej nazwie – nie są niczym pierwotnym, natomiast atomy – znów wbrew nazwie – dają się podzielić, a z ich części mogą powstać inne atomy. Po angielsku do dziś używa się starego alchemicznego określenia *transmutacja* na przemianę jednych pierwiastków w inne.

Po grecku *atomos* znaczy: niepodzielny, taki, który nie da się przeciąć.



Rys. 20.7. Obraz Jana Matejki *Alchemik Sędziwój* przedstawia historyczną postać Michała Sędziwoja, pokazującego królowi Zygmuntovi III Wazie złoto, rzekomo otrzymane ze srebra

Tak więc alchemicy mieli w zasadzie rację, nie mieli tylko odpowiedniej wiedzy i odpowiednich narzędzi, aby zrealizować swój cel.

Fizycy już w 1940 r., aby symbolicznie zrealizować marzenie alchemików, wytworzyli złoto z rtęci. Koszt przeprowadzenia takiej reakcji jest jednak znacznie wyższy niż cena otrzymanego złota, które współcześnie jest relatywnie tanie. Tak więc dzisiaj nie jest to pomysł na opłacalną ekonomicznie produkcję.

Znacznie droższe są za to izotopy stosowane w badaniach naukowych i medycynie. Ich wytwarzanie na dużą skalę jest więc opłacalne.

■ Promieniotwórczość

Niektóre z reakcji jądrowych zachodzą w przyrodzie samorzutnie. Nazywamy je rozpadami promieniotwórczymi, ponieważ podczas nich jest emitowane promieniowanie. Takim rozpadom ulegają jądra niektórych izotopów.

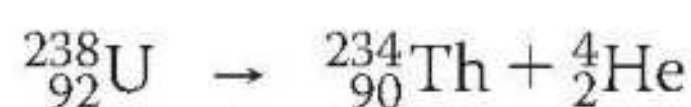


Omówimy teraz najważniejsze rodzaje takich reakcji.

■ Rozpad alfa (α)

Najprostszym do zrozumienia przykładem reakcji jądrowej jest rozpad jądra atomowego na dwie części.

Szczególnie często zdarza się rozpad, w którym jednym z powstałych jąder jest jądro helu. Oto przykład:



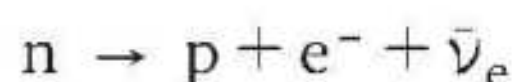
Jądro helu jest nazywane **cząstką alfa**, a strumień takich cząstek wytwarzanych podczas rozpadu jąder atomowych to **promieniowanie alfa**.

W reakcjach rozpadu zamiast ${}_2^4\text{He}$ często zapisuje się po prostu α .

■ Rozpad beta minus (β^-)

W rozpadzie beta minus jądro emituje **promieniowanie beta**, które jest po prostu strumieniem elektronów. To o tyle zagadkowe, że w jądrze nie ma elektronów. Więc w jaki sposób mogą one opuszczać jądro?

Okazuje się, że w odpowiednich warunkach neutron może się zmienić w proton i elektron oraz przenikliwą cząstkę, zwaną antyneutrinem elektronowym $\bar{\nu}_e$.

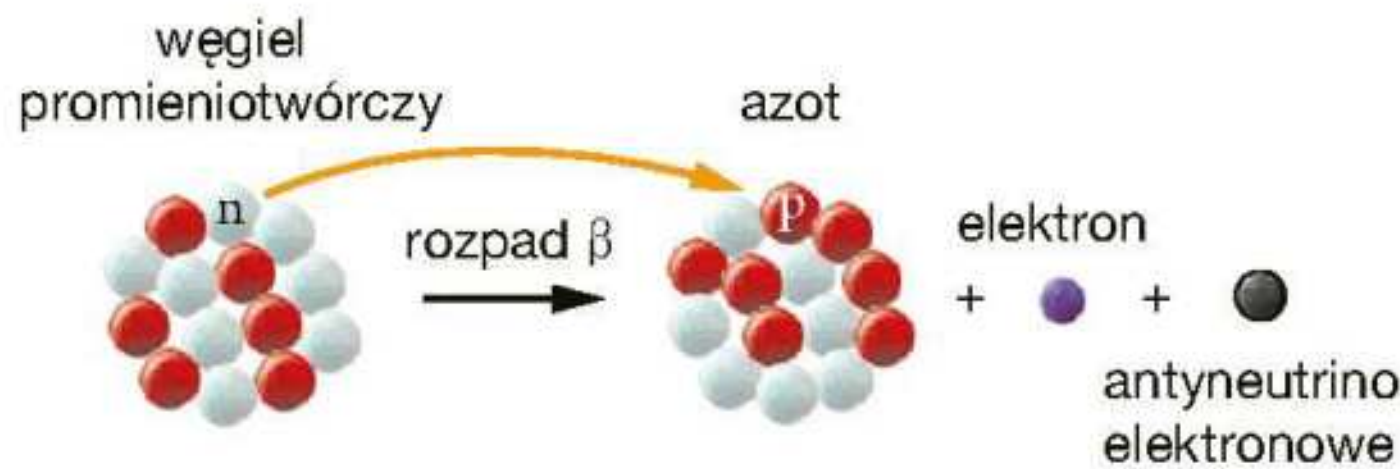
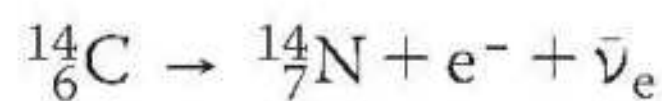


Rys. 20.9. Schemat rozpadu beta minus pojedynczego neutronu



Rys. 20.8. Rozpad beta minus strontu-90 wykorzystujemy w bateriach izotopowych, m.in. do zasilania latarni morskiej Aniwa na Sachalinie

Właśnie takiemu rozpadowi ulega promieniotwórczy izotop węgla ^{14}C :



Rys. 20.10. Schemat rozpadu beta minus węgla-14

Z lekcji 20.4. dowiesz się, w jaki sposób opisany tutaj rozpad węgla-14 pozwala archeologom określać wiek zabytków.

■ Liczba atomowa jako ładunek

Reakcję rozpadu węgla-14 często zapisujemy w następujący sposób:



Jaki sens ma liczba -1 zapisana przy symbolu elektronu? Aby to wyjaśnić, przypomnijmy, że ładunek każdego protonu jest jednakowy, równy ładunkowi elementarnemu. Dlatego:

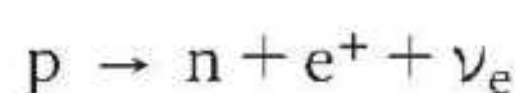
Liczba atomowa oznacza jednocześnie ładunek elektryczny jądra wyrażony w ładunkach elementarnych.

Przykładowo jądro węgla zawiera 6 protonów, więc jego ładunek wynosi $+6e$. Zapisana przy elektronie liczba -1 oznacza jego ładunek $(-1e)$. Przy obojętnym elektrycznie antyneutrinie piszemy zero.

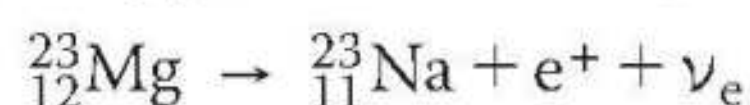
Natomiast zera w miejscu liczby masowej przy elektronie i neutrinie można rozumieć dosłownie: te cząstki po prostu nie zawierają nukleonów.

■ Rozpad beta plus (β^+)

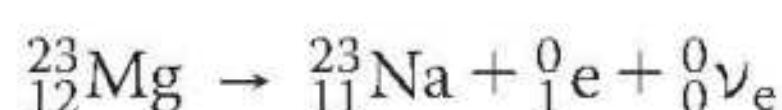
Rozpadem w pewnym sensie symetrycznym do rozpadu beta minus jest rozpad beta plus. Tym razem z protonu powstaje neutron, antyelektron (pozyton) oraz neutrino elektronowe ν_e :



Przykładem izotopu podlegającemu temu rozpadowi jest magnez-23:



czyli:



Rys. 20.11. Za badanie nad promieniotwórczością Nagrodę Nobla w 1903 r. otrzymali Henri Becquerel, Pierre Curie oraz Maria Skłodowska-Curie

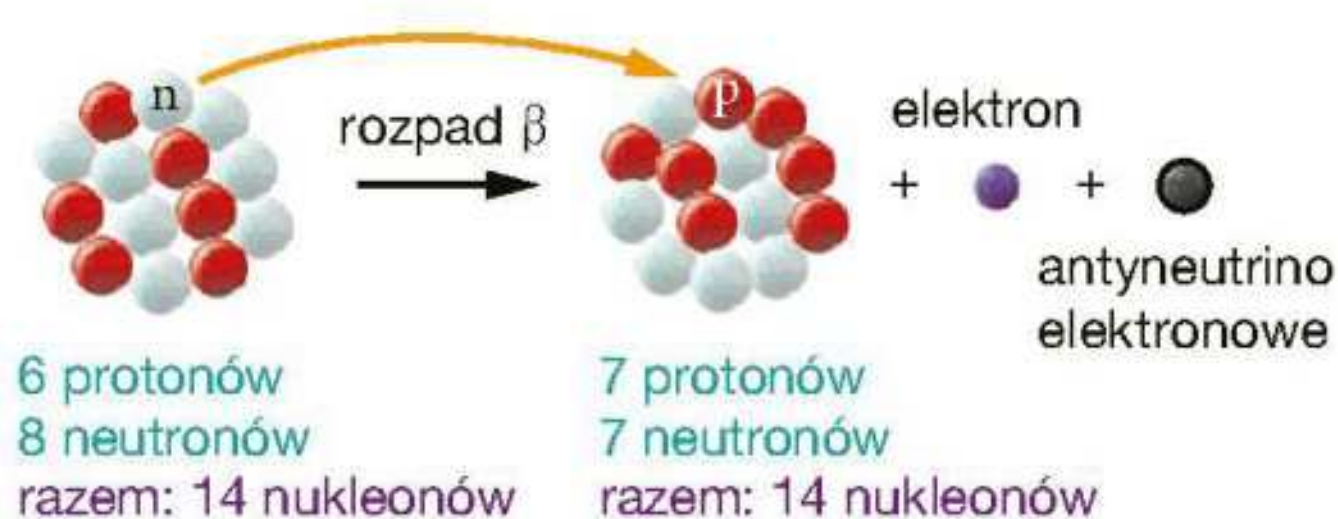
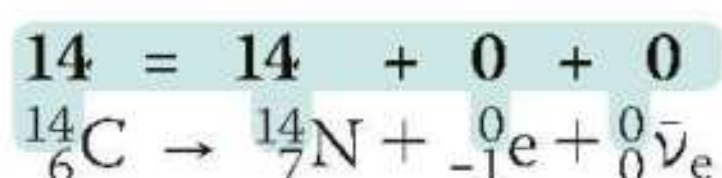
■ Zasada zachowania liczby nukleonów

W żadnym z omawianych rozpadów nie zmienia się liczba nukleonów.

- W rozpadzie alfa nie zmienia się ani liczba protonów, ani liczba neutronów w układzie, a więc także nie zmienia się ich suma.

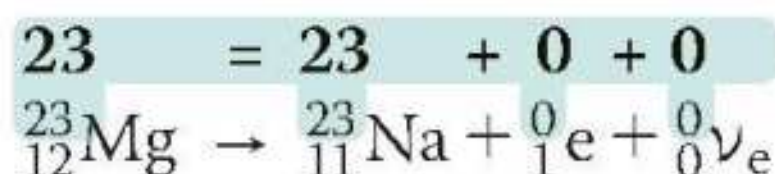


- W rozpadzie beta minus neutron zmienia się w proton, więc neutronów jest mniej, a protonów – więcej, jednak łączna liczba nukleonów pozostaje bez zmian.



Rys. 20.12. Rozpad beta minus z wypisaniem liczby nukleonów

- Analogicznie w rozpadzie beta plus proton zmienia się w neutron, więc liczba nukleonów się nie zmienia.



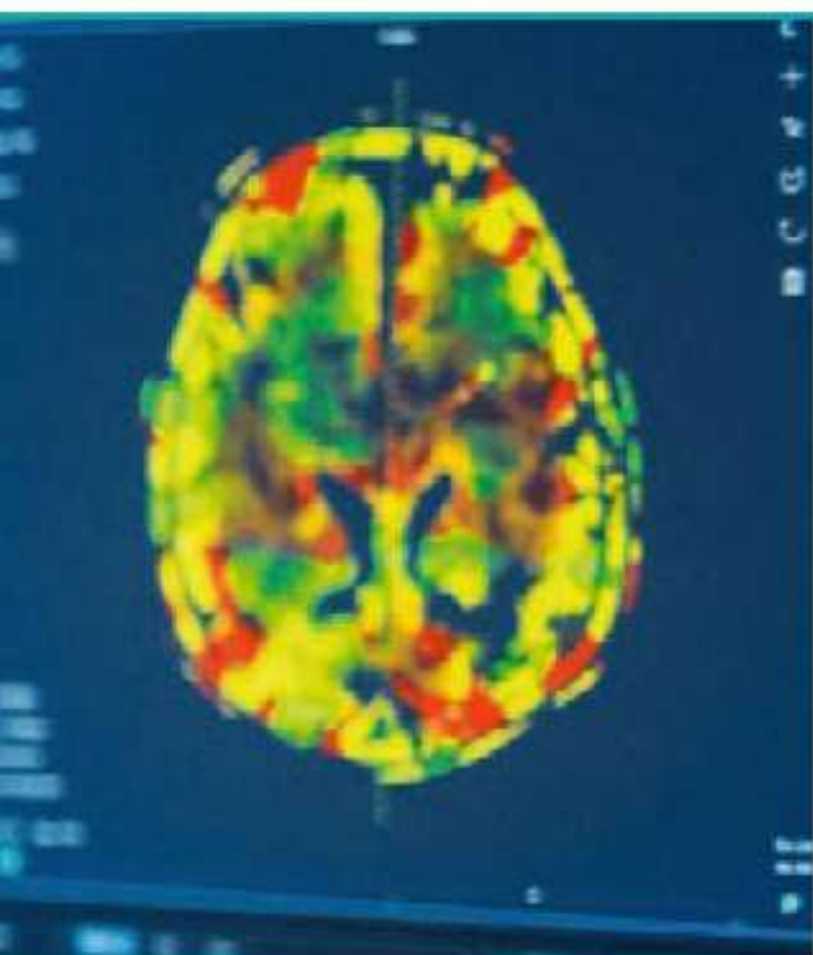
Okazuje się, że jest to ogólna zasada obowiązująca we wszystkich przemianach jądrowych.

Zasada zachowania liczby nukleonów: W reakcjach jądrowych nie zmienia się całkowita liczba nukleonów.

A to ciekawe

Przed badaniem metodą pozytonowej tomografii emisyjnej (PET) pacjent dostaje cukier wzbogacony we fluor-18. Jest on pochłaniany przez komórki o najszybszym metabolizmie, a do nich należą komórki rakowe. Ten izotop ulega rozpadowi beta plus. Emitowane podczas rozpadu pozytony natychmiast anihilują z elektronami z ciała pacjenta. Powstałe w reakcji anihilacji fotony są rejestrowane przez detektory otaczające ciało pacjenta, co pozwala określić położenie najaktywniejszych metabolicznie obszarów w ciele.

Zdjęcie rozpoczynające tę lekcję przedstawia lekarzy oglądających wyniki badania PET.



Zasada zachowania ładunku

Tę zasadę już znasz z rozdziałów o elektrostatyce i prądzie elektrycznym. Jednak wtedy była ona raczej oczywista: nie zmieniała się liczba protonów i elektronów, a więc także nie zmieniał się ładunek. Podobnie oczywista pozostaje ona w przypadku rozpadu alfa, gdzie również cząstki nie zmieniają się w inne.

Warto więc podkreślić, że zasada zachowania ładunku obowiązuje także w zjawiskach, w których cząstki zmieniają się w inne, np. w rozpadzie beta⁻ i beta⁺.

Jest ona spełniona we wszystkich znanych nam zjawiskach.



Sprawdź, że zasada zachowania ładunku obowiązuje także w przypadku anihilacji elektronu i pozytonu.

Rys. 20.13. Zachowanie ładunku w rozpadzie beta minus

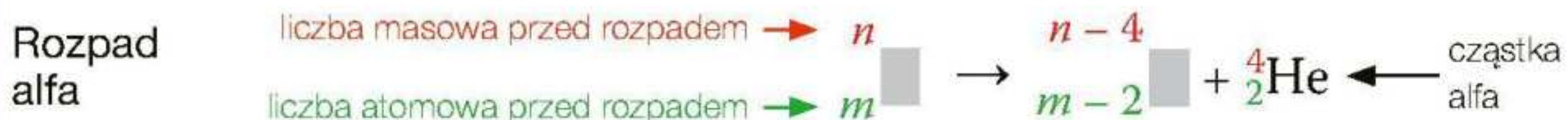
Porównanie reakcji rozpadu

Porównajmy teraz poznane reakcje rozpadu promieniotwórczego – patrz ramka poniżej.

Nie ucz się jednak tego typu schematycznych zapisów na pamięć, ponieważ prędzej czy później pogubisz się w plusach i minusach. Jeśli zapamiętasz, jak fizycznie dana przemiana przebiega, to bez problemu zapiszesz jej równanie w konkretnym przypadku.

Równania reakcji jądrowych

Konkretne przykłady rozpadów alfa i beta podaliśmy powyżej, zapiszmy je teraz w bardziej ogólny sposób.



■ Jaki rozpad nastąpi?

Jeśli chcemy wiedzieć, czy dany izotop jest stabilny i ewentualnie w jaki sposób się rozpada, możemy to sprawdzić w tablicach, na przykład na stronie Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej (adres podaliśmy na s. 246).

Warto jednak zwrócić uwagę na kilka regularności:

- Ciężkie izotopy często podlegają rozpadowi alfa. Dzieje się tak dlatego, że siły przyciągania jądrowego działają tylko między sąsiednimi nukleonami, a siły odpychania elektrycznego – między wszystkimi protonami w jądrze.
- Często jeśli izotop ma więcej neutronów niż stabilne izotopy tego samego pierwiastka, to jeden z neutronów zamienia się w proton, a więc następuje rozpad beta minus.
- Jeśli z kolei neutronów jest mniej niż w stabilnych izotopach, to jeden z protonów zamienia się w neutron, a więc następuje rozpad beta plus.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE

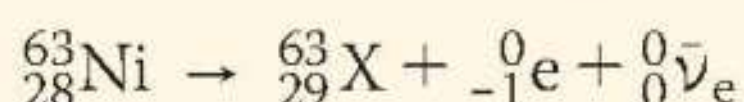


■ Przykład

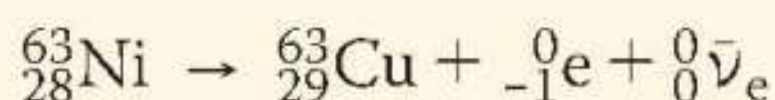
Promieniotwórczy izotop niklu ${}^{63}_{28}\text{Ni}$ ulega przemianie beta minus. Zapisz równanie tej przemiany. Jaki pierwiastek i jaki jego izotop w niej powstaje?

Rozwiązanie:

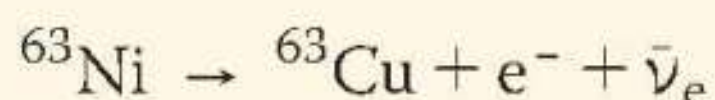
W przemianie beta minus jeden z neutronów zmienia się w proton (oraz elektron i antyneutrino elektronowe), a więc liczba protonów zwiększa się o 1 (do 29), natomiast łączna liczba protonów i neutronów pozostaje niezmienną (równa 63).



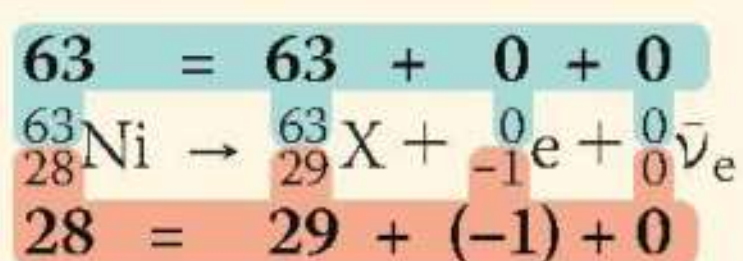
Pozostaje nam sprawdzić w układzie okresowym, jaki pierwiastek ma liczbę atomową równą 29. Jest to miedź (symbol: Cu). Tak więc równanie przyjmuje postać:



co można także zapisać w postaci:



Aby wykryć ewentualne pomyłki, warto sprawdzić, że zachowana jest zarówno liczba nukleonów, jak i ładunek elektryczny.



Odpowiedź: Powstaje izotop miedzi ${}^{63}_{29}\text{Cu}$.

1. **P** W organizmie człowieka i innych zwierząt znajduje się promieniotwórczy izotop potasu $^{40}_{19}\text{K}$. Większa część tego izotopu rozpada się w przemianie beta minus, a mniejsza – w przemianie beta plus. Zapisz równania obu tych przemian. Jakie pierwiastki powstają w ich wyniku?
2. Przeczytaj poniższy tekst i odpowiedz na pytania.
 - a) Jaki izotop powstaje z azotu-14 po wybiciu neutronu?
 - b) Jakiemu rozpadowi ulega ten powstały izotop?
 - c) Jaki izotop powstaje w wyniku tego rozpadu?
3. W wyniku rozpadu alfa pewnego izotopu powstaje tor $^{225}_{90}\text{Th}$. Z jakiego izotopu powstaje tor-225?
4. Zapoznaj się z informacjami na temat badania PET (s. 144).
 - a) Jaki izotop powstaje podczas rozpadu izotopu fluoru w badaniu PET? Zapisz reakcję tego rozpadu.
 - b) Sprawdź, czy ten izotop ulega dalszemu rozpadowi promieniotwórczemu.
 - c) Dwa fotony powstające w reakcji anihilacji spoczywających cząstek (elektronu i pozytonu) mają jednakową energię i poruszają się w przeciwne strony. Z jakiego prawa fizyki to wynika?



20.3

Promieniowanie jądrowe



Ważne w tej lekcji:

- promieniowanie jonizujące i niejonizujące,
- wpływ na organizmy,
- ochrona przed promieniowaniem,
- zastosowania.



Przypomnij sobie:

- Jądra niektórych izotopów się rozpadają.
- W rozpadzie alfa powstają cząstki alfa, czyli jądra helu, w rozpadzie beta minus – elektrony, a w rozpadzie beta plus – antyelektrony (pozytony).
- Promieniowanie gamma to fale elektromagnetyczne o wysokiej częstotliwości, a więc o dużej energii fotonu.

■ Powstawanie promieniowania alfa i beta

Przypomnijmy, jak powstają te rodzaje promieniowania.

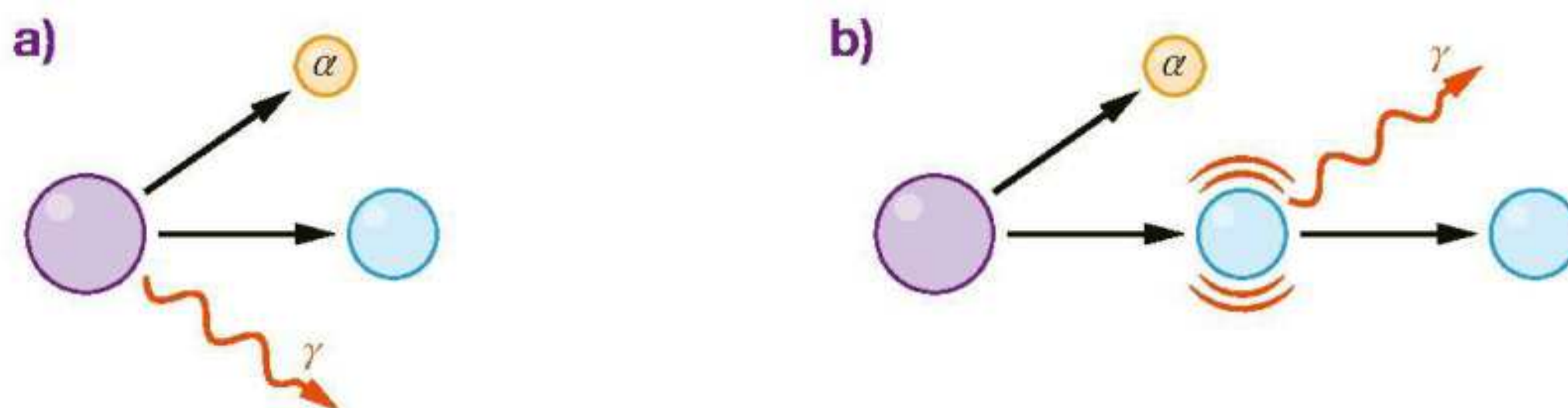


Pozytony powstające w rozpadzie beta natychmiast anihilują z napotkanymi elektronami, więc nie obserwujemy promieniowania złożonego z pozytonów. Dlatego strumień elektronów nazywamy po prostu promieniowaniem beta (a nie promieniowaniem beta minus).

■ Powstawanie promieniowania gamma

A jak powstaje promieniowanie gamma? Istnieją dwa mechanizmy:

- Promieniowanie gamma powstaje podczas rozpadu razem z cząstkami alfa lub beta (rys. 20.14a)
- Jądra powstające w wyniku rozpadu alfa lub beta często mają dużą energię i pozbywają się jej w postaci promieniowania gamma (rys. 20.14b).



Rys. 20.14. Schemat dwóch mechanizmów powstawania promieniowania gamma przy rozpadzie alfa

■ Inne rodzaje promieniowania

Oprócz promieniowania alfa, beta i gamma istnieje jeszcze wiele innych jego rodzajów, ponieważ każdy strumień cząstek (np. protonów czy neutronów) można określić jako promieniowanie. Mówimy więc np. o promieniowaniu protonowym albo neutronowym.

■ Przenikliwość promieniowania jądrowego

Przez przenikliwość rozumiemy zdolność do przenikania danego promieniowania przez materię. Można powiedzieć, że przenikliwość promieniowań alfa, beta, gamma rośnie w kolejności alfabetycznej:

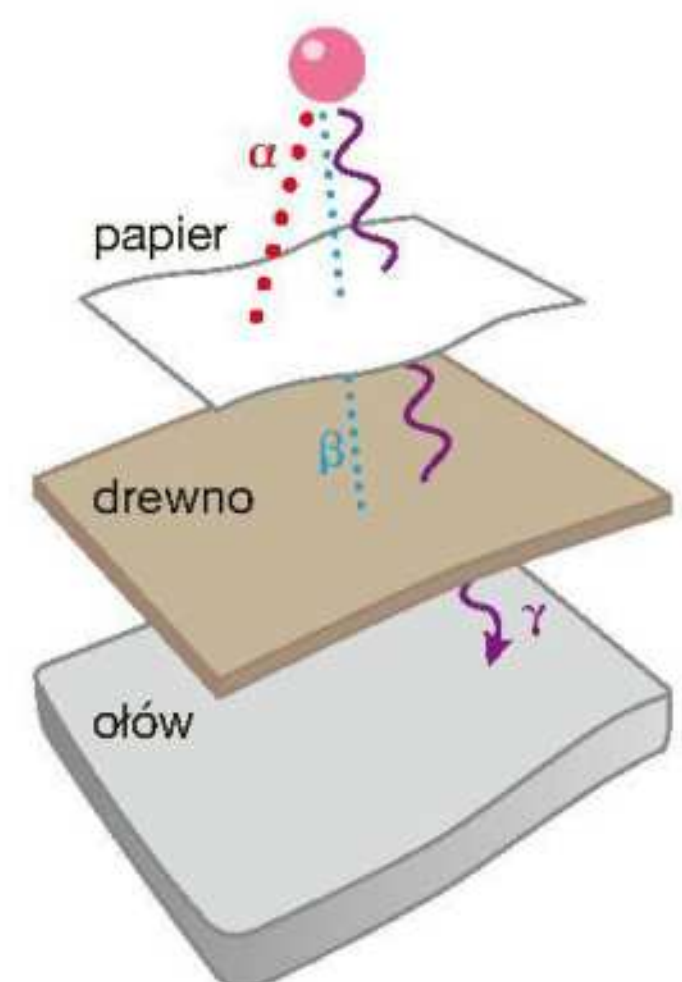
- aby osłonić się przed promieniowaniem alfa, wystarczy kartka papieru, a w przypadku organizmu – komórki naskórka,
- przed promieniowaniem beta chroni cienka blaszka albo drewniana deska, a w tkanki organizmu wnika ono na kilka milimetrów,
- promieniowanie gamma daje się zatrzymać tylko grubą ołowianą lub betonową tarczą, natomiast przez nasze organizmy przenika bez problemu.

Schematycznie przedstawia to rysunek 20.15.

Fakt, że promieniowanie alfa jest mało przenikliwe, nie oznacza, że jest nieszkodliwe. Cząstki alfa bardzo silnie jonizują ośrodek, przez który się poruszają, więc mogą powodować w organizmie duże szkody.

Szczególnie groźne są one wtedy, gdy ich źródło znajdzie się wewnątrz organizmu.

Jednym z takich źródeł jest polon-210, używany jako trucizna przez rosyjskie służby specjalne, a przez wiele osób dobrowolnie wdychany z dymem papierosowym.



Rys. 20.15. Przenikliwość poszczególnych rodzajów promieniowania



A to ciekawe

Energię rozpadu radioaktywnego wykorzystujemy w praktyce w bateriach izotopowych (zwanych także bateriami jądrowymi).

Ich podstawową zaletą jest bardzo długi czas pracy bez konieczności wymiany. Dlatego służą do zasilania statków kosmicznych, łazików marsjańskich, a także trudno dostępnych latarni morskich.

Ich wadą jest obecnie wysoka cena, chociaż trwają już prace nad doskonalszymi i tańszymi bateriami, które mogłyby służyć do zasilania samochodów elektrycznych.

Jonizacja → s. 81

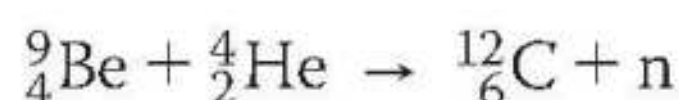
Promieniowanie jonizujące i niejonizujące

Jak pamiętasz, zdolność promieniowania elektromagnetycznego do jonizacji materii zależy od jego częstotliwości, co jest jednym z dowodów istnienia fotonów.

Okazuje się, że także promieniowanie jądrowe może powodować jonizację (mówimy krótko, że jest promieniowaniem jonizującym).

Promieniowanie wywołujące przemiany jądrowe

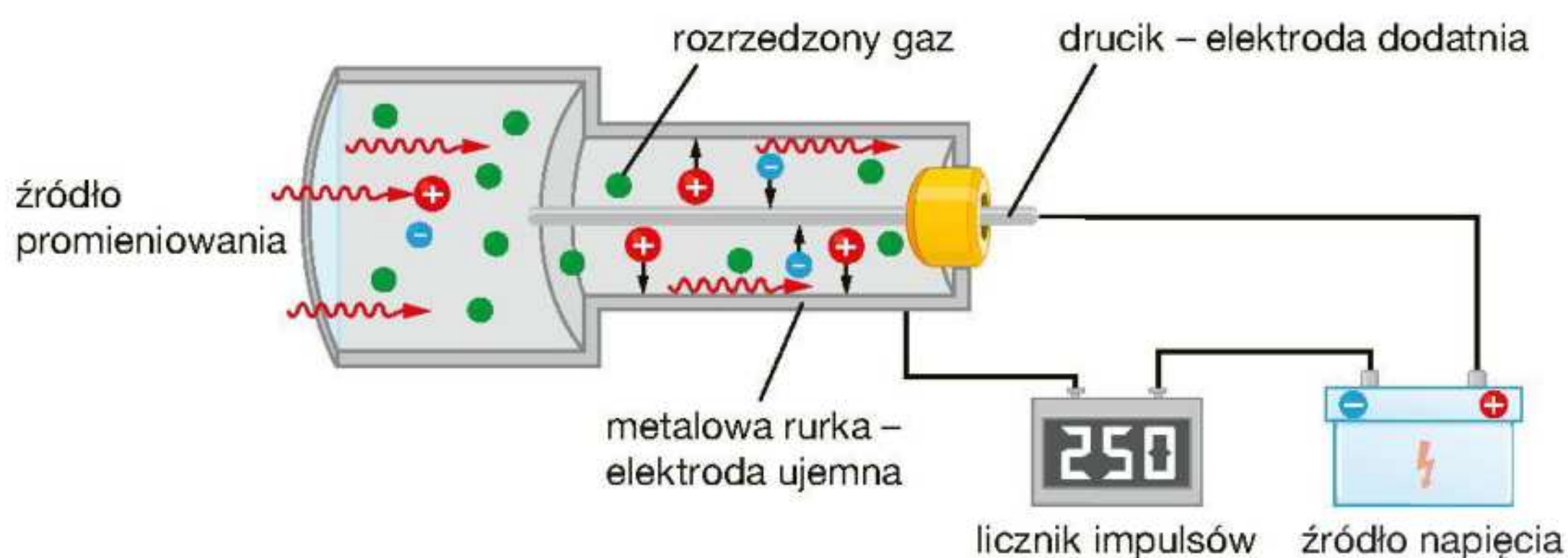
Co więcej, promieniowanie jądrowe może wywoływać reakcje jądrowe. Na przykład promieniowanie alfa wywołuje przemianę berylu w węgiel z emisją neutronu:



Tę przemianę wykorzystujemy w praktyce: mieszanina plutonu (emitującego promieniowanie alfa) i berylu jest źródłem neutronów do badań naukowych.

Wykrywanie promieniowania jądrowego

Do wykrywania promieniowania i pomiaru jego intensywności często wykorzystuje się licznik Geigera–Müllera (zwykle w skrócie nazywany licznikiem Geigera). Jego schemat przedstawiono na rysunku 20.16.



Rys. 20.16. Licznik Geigera–Müllera

Urządzenie jest zbudowane z bańki wypełnionej rozrzedzonym gazem oraz z dwóch elektrod, do których jest stale przyłożone napięcie.

- W przypadku braku promieniowania prąd przez gaz nie płynie. Nic dziwnego – nie ma nośników ładunku, które mogłyby się poruszać.
- Promieniowanie powoduje zjonizowanie cząsteczek gazu (wyrwanie elektronów z atomów). Ponieważ pomiędzy okładkami jest wysokie napięcie, więc elektrony się rozpędzają i jonizują kolejne atomy. W ten sposób powstaje wyładowanie elektryczne, które obserwujemy jako przepływ prądu.

Wyładowanie powstaje więc podobnie jak piorun, podręcznik cz. 3 → s. 126–127

Nazwa *licznik* pochodzi od pierwszych modeli, które rzeczywiście zliczały pojedyncze nadlatujące cząstki. Dzisiejsze liczniki oprócz samej liczby cząstek podają wynik pomiaru w postaci liczbowej w odpowiednich jednostkach (s. 155).

■ Badanie promieniowania

Zbadajmy, czy w pracowni szkolnej także jesteśmy narażeni na promieniowanie.

Doświadczenie 14

1. Przygotuj licznik Geigera–Müllera oraz różne substancje, np. próbki granitu lub innych skał, sól z potasem albo leki zawierające potas, warzywa, suszone grzyby, wodę, wolframowe pręty do spawania zawierające tor. Jeśli to możliwe, przygotuj także zegarek z fosforyzującymi wskazówkami pochodzący sprzed 1960 r.
2. Po włączeniu licznika ustaw jego zakres tak, aby reagował nawet nieprzyłożony do żadnych próbek.
3. Sprawdź, jak zachowuje się licznik zbliżony do różnych substancji, które przygotowałeś, oraz do ścian, a także do ciała człowieka. Co zauważasz?



W wyjaśnieniu wyników doświadczenia pomogą ci wiadomości z ramki na następnej stronie.

A to ciekawe

Bardziej skomplikowane mierniki promieniowania pozwalają zmierzyć energię fotonów gamma. Ponieważ w różnych reakcjach jądrowych powstają fotony o różnej energii, możemy rozpoznać, jaki izotop ulega rozpadowi.

Ten fakt wykorzystuje się m.in. przy poszukiwaniu złóż złota. Gdy w głąb ziemi skierujemy wiązkę neutronów i wykryjemy promieniowanie 412 keV, to znaczy, że natrafiliśmy na złoto. Dzieje się tak, ponieważ część neutronów przyczepia się do jąder złota, a przy rozpadzie powstałego cięższego izotopu powstaje właśnie promieniowanie 412 keV. Nie musimy przy tym kopać, wiercić w skale ani pobierać jakichkolwiek próbek.



Naturalne źródła promieniowania

Promieniowanie ze źródeł naturalnych otaczało ludzkość od tysięcy lat, choć dopiero od nieco ponad stu lat zdajemy sobie z tego sprawę.

Warzywa, owoce i my sami



W przyrodzie tylko 0,012% atomów potasu to promieniotwórczy **potas-40**, ale to właśnie on odpowiada za promieniowanie soli z potasem, leków zawierających ten pierwiastek, kości ludzi i zwierząt, a także bananów czy pomidorów.

Ciężarówka bananów może uruchomić na przejściu granicznym alarm wykrywający promieniowanie.

Skąły, ściany, terakota



W skałach, także tych, z których budujemy domy, np. w granicie, występują niewielkie ilości uranu i toru. Promieniotwórcze są nie tylko one same, lecz także produkty ich rozpadu.

W różnych regionach promieniotwórczość skał jest różna. Przykładowo w Polsce najsilniejsza jest ona w Sudetach.

Z kolei glina zawiera potas-40, który pozostaje w wytworzonych z niej produktach, np. płytkach terakoty.

Promieniotwórczy gaz



Występujący w skałach, a także w ścianach domów **rad-226** rozpada się do promieniotwórczego **radonu-222**. Radon jest gazem, przenika przez skały i rozpuszcza się w wodzie. Dlatego jest go stosunkowo dużo w piwnicach, w łazienkach i w niewietrzonych pomieszczeniach. Wdychany, może przez dłuższy czas znajdować się w płucach, przez cały ten czas promieniując.

Prostą, ale skuteczną metodą pozbywania się nadmiaru radonu jest wietrzenie pomieszczeń.

Promieniowanie kosmiczne



Promieniowanie dociera do nas także z kosmosu. Znaczna jego część to wiatr słoneczny, ale niektóre cząstki pochodzą z głębi kosmosu. Promieniowanie jest częściowo pochłaniane przez atmosferę, dlatego jego intensywność rośnie z wysokością. Jest też silniejsze w pobliżu biegunów (podręcznik cz. 3 ➔ s. 256).

Promieniowanie powstaje także w samej atmosferze na skutek zderzeń cząstek promieniowania kosmicznego z cząsteczkami powietrza.

Promieniowanie a organizmy żywe

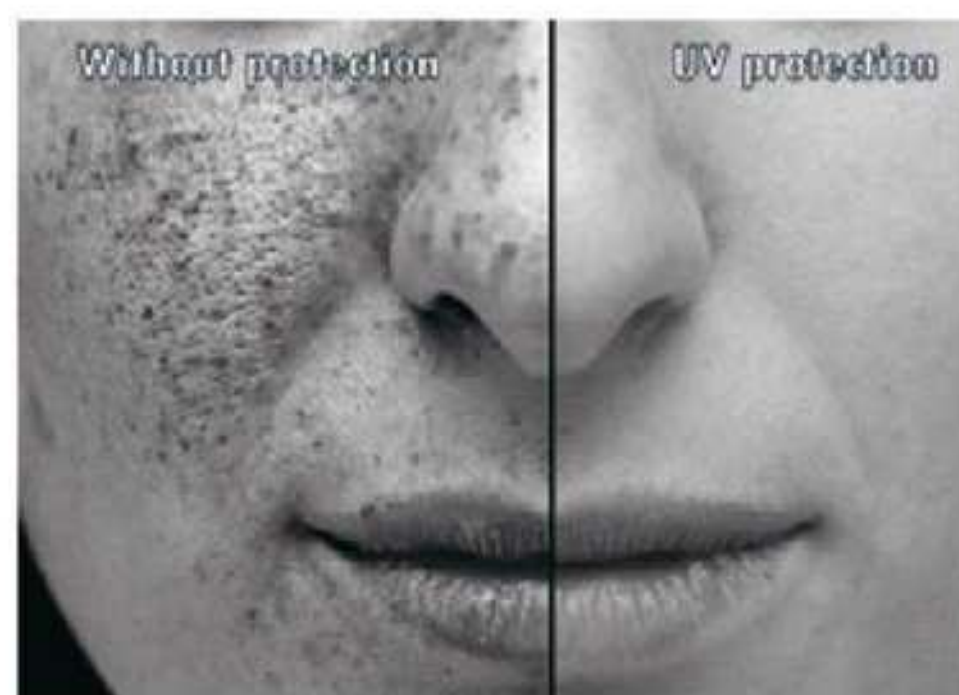
Skutki promieniowania zależą przede wszystkim od jego ilości.

- Niewielka ilość docierająca do nas na co dzień nie ma wpływu na nasze zdrowie. Nie obserwuje się chorób związanych z promieniowaniem u osób mieszkających w rejonach, w których skały są bardziej radioaktywne. W Polsce są to Sudety (rys. 20.16), ale na świecie są obszary o stukrotnie silniejszym promieniowaniu naturalnym.
- Silniejsze promieniowanie może spowodować nowotwór, i to nawet po długim czasie. Wynika to z faktu, że promieniowanie jonizujące powoduje uszkodzenia DNA. Warto podkreślić, że takie skutki ma nie tylko promieniowanie jądrowe, lecz także nadfiolet (rys. 20.17).
- Bardzo silne promieniowanie, występujące np. na skutek katastrofy jądrowej albo dostania się do organizmu dużej ilości izotopu, może spowodować chorobę popromienną i śmierć.

Silniejsze promieniowanie oznacza większe **prawdopodobieństwo** nowotworu, a nie jego cięższy przebieg.



Rys. 20.17. W nieczynnych kopalniach uranu na Dolnym Śląsku powstały trasy turystyczne



Rys. 20.18. Wygląd skóry twarzy, której część przez dłuższy czas pozostawała bez ochrony przed promieniowaniem UV w porównaniu ze skórą chronioną

Reguła czterech „P”

Po stwierdzeniu, że możemy mieć kontakt z substancjami promieniotwórczymi, postępujemy podobnie, jak przy zapobieganiu chorobom wirusowym. Chociaż zagrożenie jest zupełnie innego rodzaju, w obu wypadkach chodzi o to, aby niepożądane substancje nie dostały się do organizmu.

W zapamiętaniu tych reguł pomoże ci reguła czterech „P”:



Post (nic nie jeść i nie pić)



Prysznic



Pranie



Przysłoń usta i nos



A to ciekawe

Zbudowana ok. 2500 r. p.n.e. piramida Cheopsa to najstarsza, największa i najslawniejsza z egipskich piramid. Mimo intensywnych prac archeologicznych ciągle może kryć przed nami wiele tajemnic. W 2017 r. fizycy prześwietlili ją za pomocą promieniowania kosmicznego, a dokładniej – za pomocą występujących w nim cząstek elementarnych zwanych mionami. Ponieważ miony są częściowo pochłaniane przez skały, z których zbudowano piramidę, detektory cząstek umieszczone wewnątrz i na zewnątrz piramidy pokazują jej wewnętrzną strukturę. W ten sposób odkryto nieznaną wcześniej komorę.

■ Promieniowanie a ciąża

Promieniowanie jest szczególnie szkodliwe dla komórek, które podlegają częstym podziałom. Dlatego na negatywne skutki promieniowania są narażone komórki rozrodcze i komórki płodu. Dotyczy to promieniowania nie tylko jądrowego, ale nawet rentgenowskiego.

Pacjentka, która jest w ciąży lub tylko ją podejrzewa, powinna koniecznie poinformować o tym fakcie lekarza albo technika wykonującego prześwietlenie.

F ■ Zastosowania promieniowania w medycynie

Najważniejsze zastosowania promieniowania jądrowego dotyczą medycyny. Promieniowanie stosuje się zarówno w diagnostyce (badaniach), jak i w leczeniu (rys. 20.19).

a)



b)



c)



Rys. 20.19. Izotopy promieniotwórcze w medycynie: a) podawanie pacjentowi izotopu promieniotwórczego. Pielęgniarka ma ołowiany fartuch ochronny, a strzykawkę jest w specjalnej osłonie, b) badanie za pomocą gamma-kamery – urządzenia rejestrującego promieniowanie jądrowe, c) obraz uzyskany z gamma-kamery pokazuje, gdzie zgromadził się izotop, a więc potencjalne ogniska chorobowe

Ponieważ izotopy tego samego pierwiastka mają identyczne właściwości chemiczne, są także w taki sam sposób rozprowadzane w organizmie. Komórki nowotworowe bardzo szybko się dzielą, więc dociera do nich więcej podawanego izotopu niż do zdrowych komórek organizmu. Dzięki promieniowaniu emitowanemu przez izotop można wykryć, gdzie znajdują się ogniska chorobowe.

Większe dawki izotopów promieniotwórczych stosuje się w **radioterapii**. Również w tym przypadku izotop wbudowuje się w komórki nowotworowe, jednak tym razem silne promieniowanie je zabija. Radioterapia szkodzi także zdrowym komórkom, jednak często jest jedyną szansą na uratowanie życia pacjenta.

Metodą pozwalającą ograniczyć działanie promieniowania na zdrową tkankę jest **nóż gamma** – urządzenie naświetlające guz wieloma wiązkami z różnych stron. Przedstawia go zdjęcie na początku tej lekcji.

F Sterylizacja za pomocą promieniowania

Promieniowanie zabija bakterie i wirusy, więc jest wykorzystywane do sterylizacji żywności. Ponieważ przechodzi ono przez opakowanie, żywność można najpierw hermetycznie zapakować, a następnie poddać działaniu promieniowania – w ten sposób nowe drobnoustroje już się do niej nie dostaną.

Oczywiście dawki promieniowania nie są na tyle duże, aby mogły spowodować, że sama żywność stanie się promieniotwórcza.

W podobny sposób sterylizuje się strzykawki i inne przyrządy wykorzystywane w medycynie.

F Wielkości i jednostki miar opisujące promieniowanie

Oto kilka wielkości związanych z promieniowaniem.

Wielkość fizyczna	Opis wielkości	Jednostka	Symbol	Definicja
Aktywność promieniowania	Jak intensywne jest promieniowanie (jak szybko rozpada się izotop)	bekerel	Bq	1 Bq to jeden rozpad na sekundę
Dawka pochłonięta	Energia pochłoniętego promieniowania na jednostkę masy substancji pochłaniającej	grej	Gy	$1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$
Równoważnik biologiczny dawki pochłoniętej	Dawka z uwzględnieniem skutków dla organizmu człowieka	siwert	Sv	1 Sv to dawka mająca skutek taki sam jak 1 Gy promieniowania beta



Rys. 20.20. Dawki promieniowania

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Papierosy zawierają ołów-210, który ulega rozpadowi beta minus, a z kolei produkt tego rozpadu sam także ulega rozpadowi beta minus, aż wreszcie w wyniku rozpadu alfa powstaje stabilny izotop ołowiu.

- Zapisz równania wszystkich tych reakcji.
- W którym etapie powstaje polon-210?
- Dlaczego polon-210 wprowadzony do wnętrza organizmu jest bardzo szkodliwy?
- Promieniowanie gamma powstające przy rozpadzie polonu-210 jest bardzo słabe, dlatego ten izotop łatwo przemyścić przez bramki wykrywające promieniowanie na lotnisku. Dlaczego jednak bramki nie wykrywają powstającego w jego rozpadzie promieniowania alfa?

2. W wyniku rozpadu promieniotwórczego często powstaje izotop, który także jest promieniotwórczy. W ten sposób ciąg kolejnych przemian kończy się dopiero na izotopie trwałym. Oto przykład:

radon-219 $\rightarrow$ polon-215 $\rightarrow$ ołów-211 $\rightarrow$ bizmut-211 $\rightarrow$ tal-207 $\rightarrow$ ołów-207 (trwały)

W których przemianach powstaje promieniowanie alfa, w których beta minus, a w których beta plus?

3. Odpowiedz na pytania:

- Kto otrzymuje większą dawkę promieniowania: osoba lecąca samolotem przez Atlantyk czy osoba spędzająca rok w okolicy elektrowni jądrowej?

b) Dlaczego lot z Europy do Ameryki Północnej powoduje większe narażenie na promieniowanie niż lot o tej samej długości bliżej równika?

Wskazówka. Spójrz na mapę. Dlaczego wydaje się, że samolot nie leci po linii prostej?



c) Co mógłbyś powiedzieć przeciwnikowi budowy elektrowni jądrowych, który korzysta z solariów?

4. Porównaj licznik Geigera–Müllera z fotokomórką. Wskaż podobieństwa i różnice.

5. Aktywność kilograma granitu wynosi 1 kBq. Wynika ona z zawartości w tym mineralu potasu-40, uranu-238 oraz toru-232. Gęstość granitu to $2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Plac o powierzchni 2000 m^2 wyłożono granitowymi kostkami o grubości 10 cm. Jaka liczba jąder atomowych w tej ilości granitu rozpada się w ciągu godziny?

20.4 Czas połowicznego rozpadu



Ważne w tej lekcji:

- losowość rozpadu jąder,
- prawo rozpadu promieniotwórczego,
- obliczenia z czasem połowicznego rozpadu.

Przypomnij sobie:

- Jądra niektórych izotopów rozpadają się, tzn. zmieniają w inne jądra i emitują przy tym promieniowanie.
- Podstawowe typy rozpadów to alfa, beta plus, beta minus.

Rozpad promieniotwórczy jako zjawisko losowe

Jądra izotopów niestabilnych rozpadają się samorzutnie. Od czego zależy, kiedy nastąpi taka reakcja? Okazuje się, że jest to zjawisko losowe.

Nie da się przewidzieć, kiedy rozpadnie się dane jądro izotopu niestabilnego.

W przypadku dużej liczby jąder izotopu (a nawet miligram oznacza ich dużą liczbę) możemy przewidzieć jedynie, **ile** w przybliżeniu jąder ulegnie rozpadowi w określonym czasie. Nie jesteśmy natomiast w stanie przewidzieć tego, **które** to będą jądra.

Możemy tę sytuację przyrównać do gry w kości. Nie wiemy, ile wypadnie oczek, zanim nie rzucimy kostką (rys. 20.21). Gdy jednak rzucimy 1200 sześciennymi kostkami, możemy przewidywać, że na ok. 200 z nich wypadnie jedno oczko, chociaż przed rzutem nie wskażemy, które to będą kostki.



Rys. 20.21. Nie wiemy, co dokładnie wypadnie na kostkach, zanim ich nie rzucimy

Warto jednak zwrócić uwagę na to, że w przypadku rzutu kostką losowość jest wyłącznie skutkiem naszej niewiedzy. Gdybyśmy znali dokładnie położenie, prędkość i moment pędu podrzuconej kostki oraz własności mechaniczne podłoża, moglibyśmy na podstawie praw rządzących ruchem bryły sztywnej opisać jej dalszy ruch.

Natomiast w przypadku jąder atomowych losowość wynika z samych praw przyrody, podobnie jak w przypadku interferencji pojedynczych elektronów albo pojedynczych fotonów nie możemy przewidzieć, w które miejsce ekranu uderzy dana cząstka.

■ Czas połowicznego rozpadu

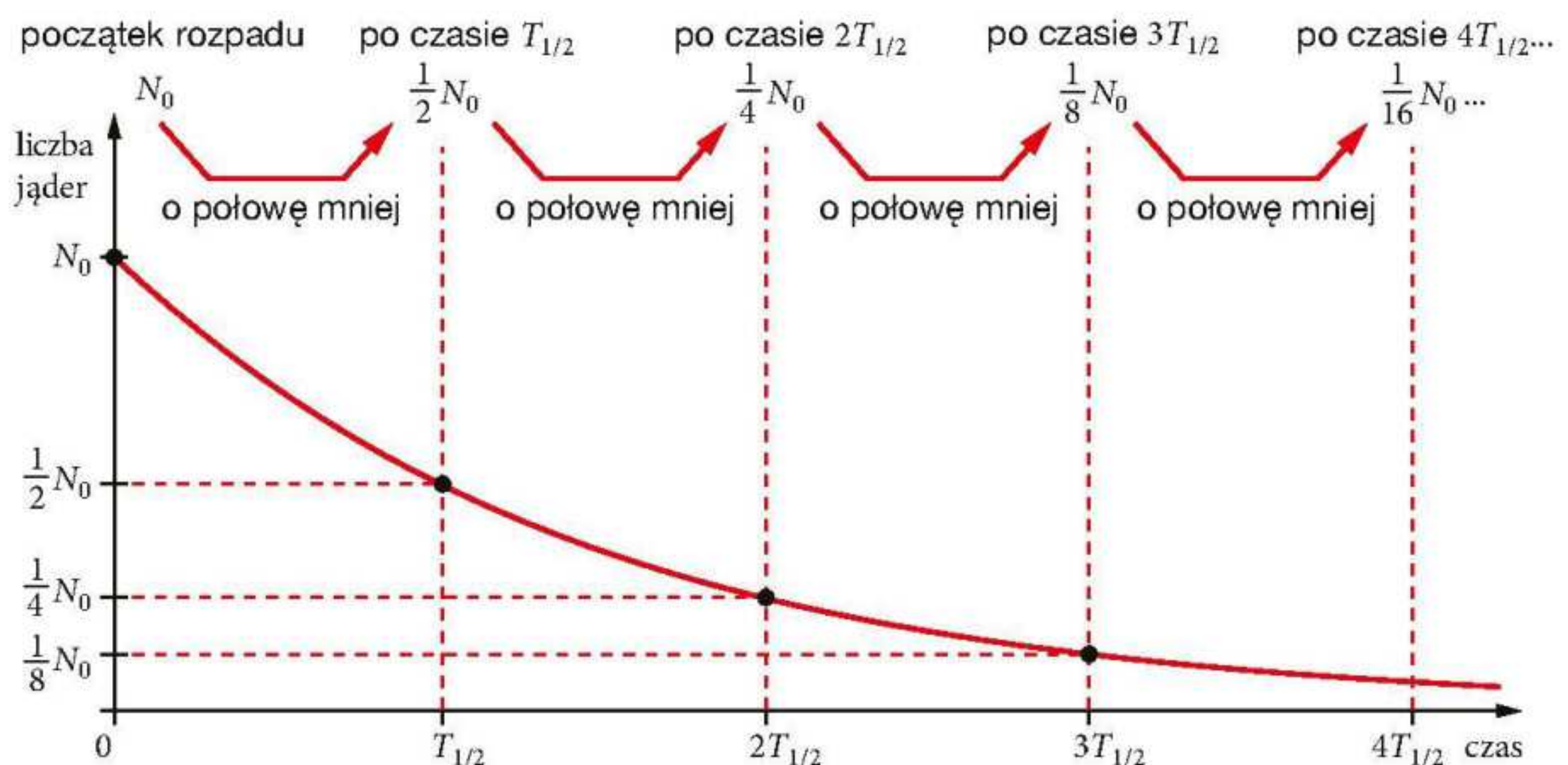
Jądra niektórych izotopów rozpadają się szybciej niż innych. Na przykład z uranu-235 obecnego na Ziemi w chwili jej powstania, czyli 4,5 mld lat temu, pozostała jeszcze połowa, podczas gdy z próbki jodu-131 już po miesiącu zostaje tylko kilka procent.

Wielkością fizyczną służącą do opisu tempa rozpadu promieniotwórczego jest czas połowicznego rozpadu (zwany także okresem połowicznego rozpadu).

Czasem połowicznego rozpadu $T_{1/2}$ nazywamy czas, po jakim z próbki danego izotopu pozostanie średnio połowa jąder.

Przykładowo dla izotopu jodu ^{131}I okres połowicznego rozpadu wynosi 8 dni. To oznacza, że jeśli mamy 1000 jąder tego izotopu, to po 8 dniach rozpadnie się mniej więcej połowa z nich, a druga połowa – czyli ok. 500 – zostanie.

Po kolejnych 8 dniach rozpadnie się połowa z tego, co zostało, a więc pozostanie ok. 250 jąder itd.



Rys. 20.22. Wykres zależności liczby jąder materiału promieniotwórczego od czasu

Falowe własności pojedynczej cząstki → s. 87

Czas połowicznego rozpadu różnych izotopów jest bardzo różny. Np. dla wodoru-7 jest to $2 \cdot 10^{-23}$ s, czyli czas, w jakim światło pokonuje odległość równą średnicy jądra atomowego, a dla ksenonu-134 jest to $6 \cdot 10^{22}$ lat, czyli o wiele dłużej, niż istnieje Wszechświat.

Okres połowicznego rozpadu nie zależy od wielkości próbki. Po 8 dniach z dowolnej liczby jąder jodu-131 pozostanie połowa, czyli np. ze 100 to będzie ok. 50, a z 30 jąder – ok. 15 (patrz rys. 20.22).

Czasu połowicznego rozpadu nie można w żaden sposób zmienić. Nie wpływa na niego ani temperatura, ani to, czy atom izotopu wchodzi w skład jakiegoś związku chemicznego. Jądro węgla-14 rozpada się w takim samym tempie, gdy jego atom wchodzi w skład CO_2 , glukozy i kiedy nie jest połączony z innymi atomami.

■ Prawo rozpadu promieniotwórczego

Z rozważań powyżej i na poprzedniej stronie widzimy, że:

- po czasie $t = 1 \cdot T_{1/2}$ pozostaje $\frac{1}{2}$ początkowej liczby jąder,
- po czasie $t = 2 \cdot T_{1/2}$ zostaje ich $\frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^2$,
- po czasie $t = 3 \cdot T_{1/2}$ już tylko $\frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^3$.

$\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots$
to kolejne potęgi $\frac{1}{2}$

Ogólnie:

- po czasie $t = n \cdot T_{1/2}$ pozostaje $\left(\frac{1}{2}\right)^n$ początkowej liczby, czyli $\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$ tej liczby.

Możemy więc zapisać równanie:

$$N(t) = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

$N(t)$ – liczba jąder
promieniotwórczych
pozostałych po czasie t

Okazuje się, że **prawo rozpadu promieniotwórczego** obowiązuje nie tylko dla t będących wielokrotnością $T_{1/2}$, lecz także dla dowolnego t , tyle że wtedy musimy korzystać z potęg o wykładniku niecałkowitym. Możesz je obliczać za pomocą kalkulatora naukowego.

■ Prawo rozpadu a masa izotopu

Ponieważ jądra danego izotopu mają jednakową masę, analogiczny wzór możemy zapisać dla masy pozostałej części izotopu:

$$m(t) = m_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

W praktyce częściej korzystamy z tego drugiego wzoru, ponieważ częściej umiemy określić masę próbki niż liczbę zawartych w niej jąder.

■ Prawo rozpadu a promieniowanie

Zwróćmy jednak uwagę na to, że również określenie masy próbki izotopu nie zawsze jest proste. Za pomocą wagi można ją zmierzyć tylko wtedy, gdy mamy do czynienia z czystym izotopem, co zdarza się rzadko.

A jeśli nawet się zdarzy, to na skutek samego rozpadu promieniotwórczego próbka może przestać być czysta – zwykle pozostają w niej produkty rozpadu. Ponieważ jednak aktywność promieniotwórcza (liczba rozpadów na sekundę) jest proporcjonalna do liczby jąder, więc możemy zapisać równanie dla aktywności:

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

■ Zastosowania czasu połowicznego rozpadu

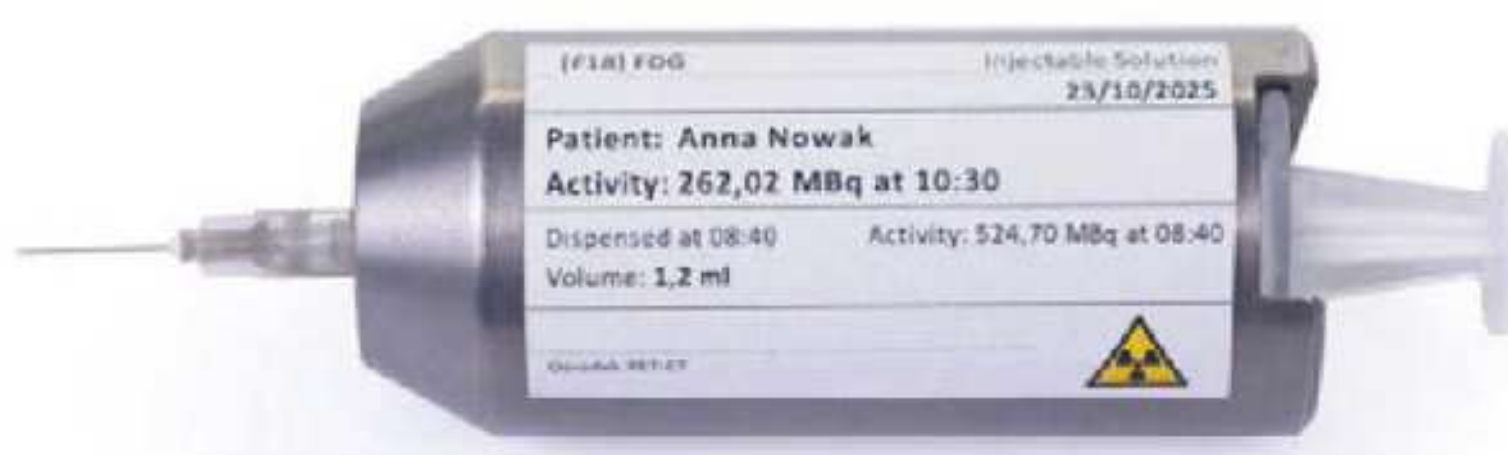
Znajomość czasu połowicznego rozpadu izotopów jest ważna z praktycznego punktu widzenia.

• Przewidywanie intensywności promieniowania

Gdy wiemy, ile jąder ulegnie rozpadowi w określonym czasie, możemy obliczyć, jak intensywne będzie promieniowanie emitowane przez rozpadające się jądra. To ważne, gdy chcemy zaplanować, jak długo trzeba przechowywać odpady radioaktywne, zanim przestaną być niebezpieczne, lub gdy chcemy wiedzieć, kiedy podać pacjentowi lek zawierający izotop promieniotwórczy (rys. 20.24), a także wtedy, gdy projektujemy baterię izotopową dla statku kosmicznego (rys. 20.23).



Rys. 20.23. Sondy Voyager wysłane zostały w 1977 r. Dzięki bateriom izotopowym nadal działają i przesyłają informacje na Ziemię



Rys. 20.24. Aby dawka podana pacjentowi była odpowiednia, na strzykawce z fluorem F-18 o czasie połowicznego rozpadu 2 h podano m.in. godzinę, o której preparat powinien być podany pacjentowi

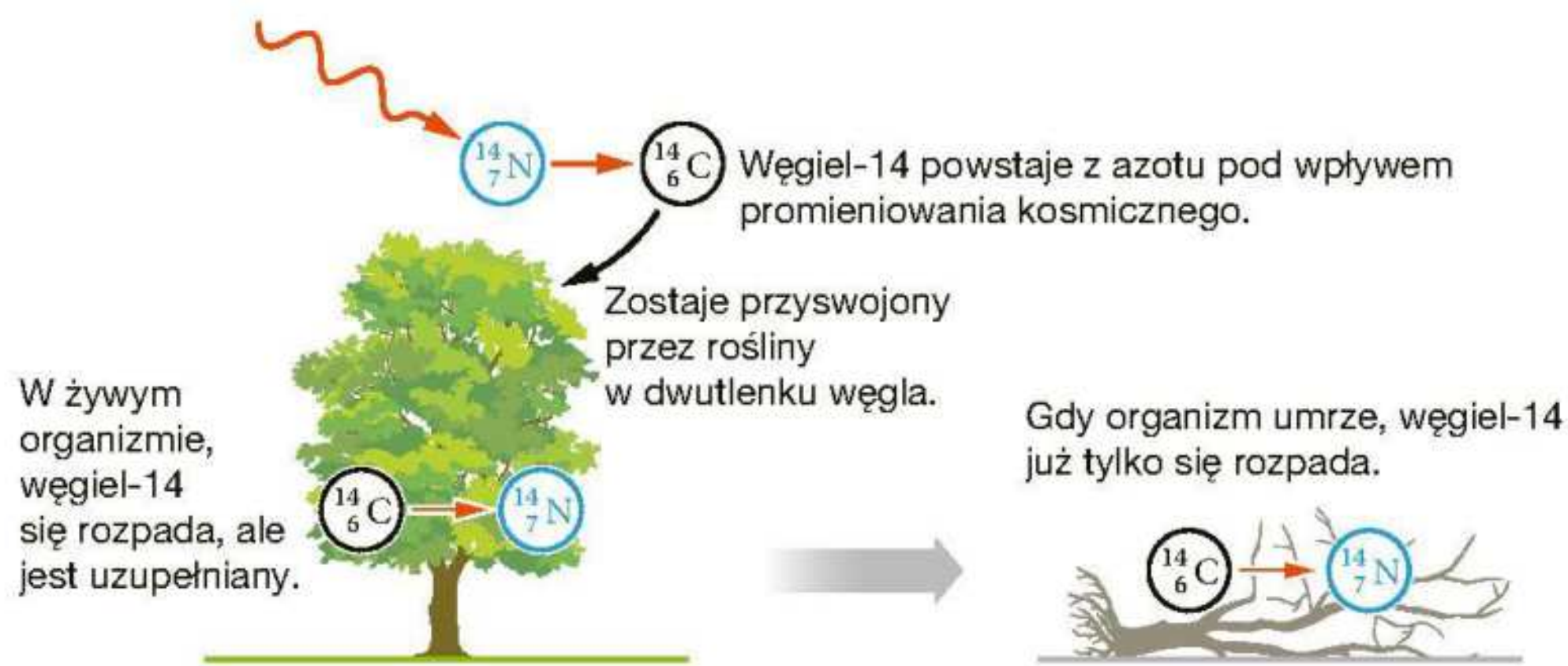
• Datowanie radiowęglowe

W dwutlenku węgla zawartym w atmosferze oprócz stabilnych izotopów węgla ^{12}C i ^{13}C występuje także niewielka ilość promieniotwórczego ^{14}C . Ponieważ pod wpływem promieniowania kosmicznego węgiel-14 cały czas tworzy się w atmosferze, ustaliła się równowaga: izotopu przybywa tyle, ile go ubywa, a zatem jego stężenie jest stałe.

C-14 – tak samo jak inne izotopy węgla – jest przyswajany przez rośliny w procesie fotosyntezy, a potem podróżuje wzdłuż łańcucha pokarmowego (patrz rys. 20.25 na następnej stronie).

Tak długo jak organizm żyje, izotop ^{14}C jest do niego na bieżąco dostarczany, co równoważy jego ubytek na skutek rozpadu. Po śmierci wymiana substancji ustaje, a ten promieniotwórczy izotop zawarty w organizmie jedynie się rozpada. Dlatego dzięki badaniu zawartości węgla C-14 w szczątkach organizmu można określić czas jego śmierci.

Przypomnijmy, że izotopy jednego pierwiastka mają takie same właściwości chemiczne.



Rys. 20.25. Tworzenie i rozpad ^{14}C w organizmach

Tą samą metodą określa się wiek przedmiotów wykonanych z substancji organicznych, np. drewna, rogów lub skóry (patrz przykład 1). Zdjęcie rozpoczynające tę lekcję przedstawia statek Wikingów, którego czas powstania ustalono tą metodą na IX w.

• Datowanie skał

Dzięki zjawisku rozpadu promieniotwórczego możemy także badać wiek skał, a nawet ustalić czas uformowania się Układu Słonecznego. Do tych zastosowań węgiel-14 się nie nadaje, ponieważ rozpada się zbyt szybko. Wykorzystujemy więc uran-238, którego czas połowicznego rozpadu wynosi 4,5 mld lat, w przybliżeniu tyle, ile istnieje nasza planeta.

■ Przykład 1.

W 1942 r. w himalajskim jeziorze Roopkund na terenie Indii odnaleziono szczątki kilkuset osób. Zbadana w 2004 r. zawartość ^{14}C była w nich na poziomie 87% wartości typowych dla żywych ludzi. Kiedy zmarli tajemniczy ludzie z jeziora?

Dane: 0,87% z m_0 – ilość węgla ^{14}C pozostała z jego początkowej ilości

Szukane: t – czas, kiedy zmarli znalezieni ludzie

Rozwiązanie:

Korzystamy ze wzoru na masę:

$$m = m_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Podstawiamy do niego $m = 0,87m_0$, upraszczamy i otrzymujemy:

$$0,87m_0 = m_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \rightarrow 0,87 = 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Obliczamy logarytm dziesiętny obu stron powyższego równania, a potęgę liczby logarytmowanej wyciągamy przed logarytm (posługujemy się wzorem $\log a^b = b \log a$):

$$\log 0,87 = -\frac{t}{T_{1/2}} \log 2$$

Stąd:

$$t = -\frac{\log 0,87}{\log 2} T_{1/2}$$

Obliczenia wykonujemy za pomocą kalkulatora naukowego i otrzymujemy: $t = 1146$ lat.

Odpowiedź: Ludzie z jeziora żyli ok. 1150 lat przed 2004 r., czyli w połowie IX w. n.e.



■ Przykład 2.

Po 20 dniach od produkcji moc baterii izotopowej spadła o 1%. Jaki był czas połowicznego rozpadu izotopu użytego w baterii? Po jakim czasie od produkcji moc spadnie o 60%?

Dane: $t_1 = 20$ dni – czas, po jakim moc spadła o 1%,

$P_1/P_0 = 0,99$ – stosunek mocy po czasie t_1 do mocy początkowej (równy 99%),

$P_2/P_0 = 0,4$ – stosunek mocy po szukanym czasie t_2 do mocy początkowej (równy 40%)

Szukane: $T_{1/2}$ – czas połowicznego rozpadu, t_2 – czas, po jakim moc spadnie do 40%

Rozwiązanie:

Obliczamy czas połowicznego rozpadu

Moc baterii izotopowej jest proporcjonalna do pozostałego w niej izotopu, a więc spada zgodnie z prawem rozpadu promieniotwórczego:

$$P(t) = P_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad (1)$$

W takim razie moc po 20 dniach możemy wyrazić wzorem:

$$P_1 = P_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Tak więc:

$$0,99P_0 = P_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \rightarrow 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 0,99$$

Po zlogarytmowaniu stronami otrzymujemy:

$$-\frac{t_1}{T_{1/2}} \cdot \log 2 = \log 0,99$$

Wyznaczamy stąd szukany czas połowicznego rozpadu:

$$T_{1/2} = -t_1 \cdot \frac{\log 2}{\log 0,99}$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$T_{1/2} = -20 \text{ dni} \cdot \frac{0,301}{-0,00436} = 1379 \text{ dni} \approx 3 \text{ lata } 9 \text{ miesięcy}$$

Obliczanie szukanego czasu

Możemy znowu skorzystać ze wzoru (1):

$$P_2 = P_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

i wyznaczyć z niego t_2 jak w przykładzie 1 (s. 161):

$$t_2 = -\frac{\log 0,4}{\log 2} T_{1/2} = 1823 \text{ dni} \approx 5 \text{ lat}$$

Odpowiedź: Czas połowicznego rozpadu wynosi 1379 dni. Moc spadnie o 60% po 1823 dniach (ok. 5 lat).

Uwaga. Czas, po jakim moc spadnie o 60%, jest ponad 90 razy dłuższy od czasu, po jakim spadnie ona o 1%. To nic dziwnego, ponieważ rozpad promieniotwórczy opisuje funkcja wykładnicza, a nie liniowa.

Uwaga. Skorzystaj z tablicy czasów połowicznego rozpadu na s. 238.

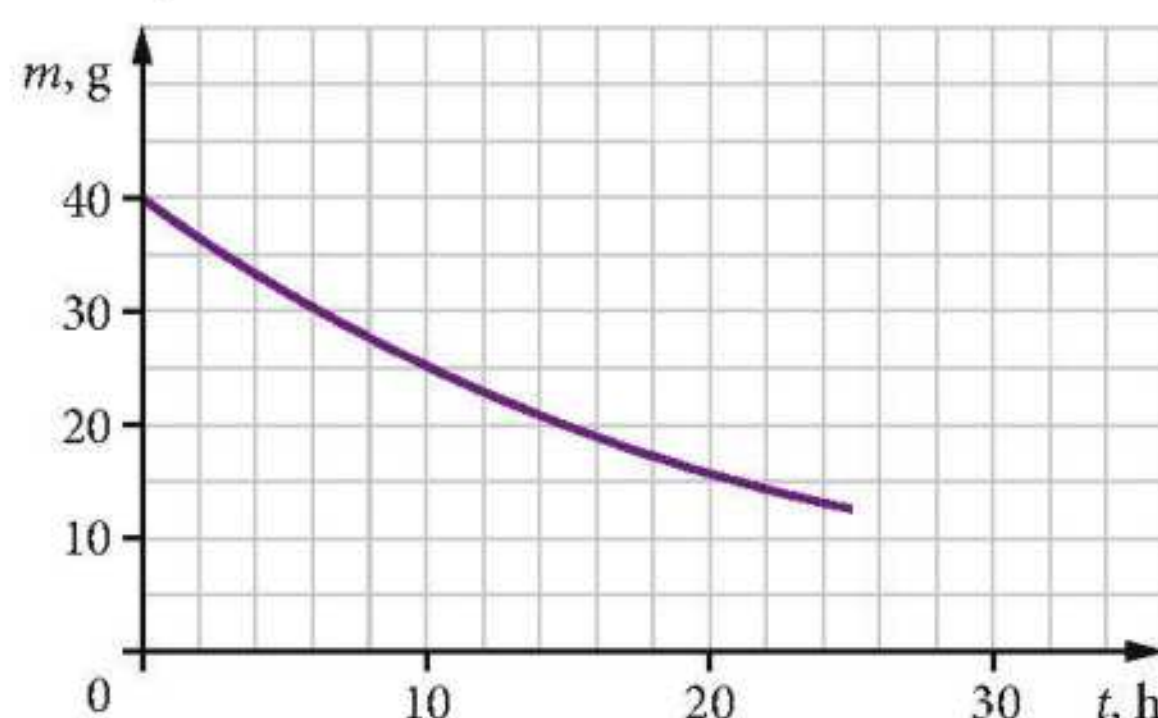
1. Jednym z izotopów uwolnionych do atmosfery w czasie katastrofy elektrowni jądrowej w Czarnobylu w 1986 r. był cez-137. Jaka część tego izotopu zdążyła się rozpaść do 2026 r.?
2. **P1** W piramidzie faraona Dżesera znaleziono przedmioty wykonane z drewna akacji. W 1950 r. zawierały one tylko 57% ilości węgla ^{14}C , jaka jest obecna w żywych drzewach. Oblicz przybliżoną datę śmierci faraona. Załóż, że akacja została ścięta niedługo przed jego śmiercią.



3. **P2** Po 4 h aktywność próbki izotopu zmniejszyła się o 40%. Jaki jest czas połowicznego rozpadu tego izotopu?
4. Próbkę zawiera trwały izotop jodu ^{127}I oraz promieniotwórczy ^{131}I w stosunku wagowym 9 : 1. Jakie izotopy jodu i w jakich proporcjach będzie zawierała ta próbka po 24 dniach?

Uwaga. Na skutek rozpadu ^{131}I nie powstaje dodatkowy izotop ^{127}I .

5. Wykres przedstawia zależność ilości pozostałego w próbce izotopu od czasu. Odczytaj z niego czas połowicznego rozpadu izotopu.



- *6. Istnieją dwa typy baterii izotopowych. W jednych wykorzystuje się ciepło powstające przy rozpadzie promieniotwórczym. W innych, zwanych betawoltaicznymi, elektrony emitowane w rozpadzie beta osadzają się na elektrodzie, która staje się ujemnym biegunem baterii, a pozbawiony ich izotop staje się biegunem dodatnim. Produkowane są już przemysłowo baterie betawoltaiczne wykorzystujące nikiel-63, jednak ich moc jest bardzo mała.

Oblicz, ile musiałaby ważyć taka bateria, aby pozwalała zasilać telefon, czyli dawała prąd o natężeniu 0,2 A. Załóż, że bateria miałaby odpowiednie napięcie i że zostałyby wykorzystane wszystkie emitowane elektrony.

Wskazówka. Oblicz najpierw, jaki ładunek mają elektrony wyemitowane przez 1 mol izotopu w ciągu roku. Załóż, że w czasie 1 roku aktywność izotopu jest stała.

Maria Skłodowska-Curie

Trudno powiedzieć, jak potoczyłaby się historia, gdyby Maria Skłodowska-Curie nie zdecydowała się w końcu 1897 r. podjąć systematycznych badań tak „nieciekawego” zagadnienia, jakim wydawało się wówczas promieniowanie uranu. Życiorys tej wielkiej uczzonej jest w Polsce bardzo dobrze znany, przypomnijmy tu więc tylko najważniejsze fakty.

Po ukończeniu w 1883 r. gimnazjum w Warszawie, gdzie się urodziła, i dwóch latach nauki w nielegalnym „Uniwersytecie Latającym”, Maria przez trzy lata pracowała jako guwernantka na wsi w okolicach Płocka. Potem uzupełniała wiedzę z chemii i fizyki, korzystając z laboratorium Muzeum Przemysłu i Rolnictwa w Warszawie. W 1891 r. wyjechała do Paryża i rozpoczęła studia fizyki na Sorbonie. Tam poznała starszego o osiem lat fizyka francuskiego, Pierre’a Curie, i w 1895 r. wyszła za niego za mąż.

Jej pierwsza samodzielna praca na temat promieniotwórczości – termin właśnie przez nią zaproponowany – stanowiła prawdziwe zerwanie z praktykami ówczesnych badaczy nowych promieni. Po pierwsze, Maria Skłodowska-Curie użyła do badań precyzyjnego i czułego elektrometru – zamiast metody fotograficznej, która ze względu na jakość ówczesnych klisz dawała tylko wyniki jakościowe, mało powtarzalne i często (...) błędne. Po drugie, postanowiła przeprowadzić systematyczne badania dostępnych minerałów, skał i innych substancji.

To zerwanie z przeszłością przyniosło od razu przełomowy wynik, albowiem okazało się, że natężenie promieniowania

w różnych minerałach zawierających uran nie jest proporcjonalne do zawartości tego pierwiastka. Na tej podstawie Maria Skłodowska-Curie wysunęła śmiałą hipotezę, że istnieje nowy, nieznany pierwiastek promieniotwórczy. Ponadto, dzięki systematycznym badaniom stwierdziła, że promieniotwórczość wykazuje także tor (tego odkrycia dokonał niezależnie niemiecki fizyk Gerhard Schmidt). Jej praca została przedstawiona na posiedzeniu Akademii Nauk w Paryżu w dniu 12 kwietnia 1898 r. Oto ważny wyjątek z jej tekstu:

„Badałam przewodnictwo powietrza pod wpływem promieni uranowych odkrytych przez Pana Becquerela i poszukiwałam innych, poza solami uranowymi, ciał, które byłyby zdolne do czynienia powietrza przewodnikiem elektryczności. W badaniach tych stosowałam kondensator płaski, którego jedna z płytek była pokryta jednorodną warstwą uranu lub innej sproszkowanej substancji. Między płytkami była utrzymywana różnica potencjałów 100 woltów. Absolutna wartość prądu przepływającego przez kondensator była wyznaczana za pomocą elektrometru i kwarcu piezoelektrycznego. Zbadałam dużą liczbę metali, soli, tlenków i minerałów...

Wszystkie badane związki uranu są bardzo aktywne; są one w ogólności tym bardziej aktywne, im więcej zawierają uranu. Bardzo aktywne są związki toru. Tlenek toru przewyższa aktywnością tor metaliczny. Należy zauważyć, że dwa najbardziej aktywne pierwiastki uranu i tor, to te o największym ciężarze atomowym... Dwie rudy uranu, blenda smolista (tlenek uranu) i chalkolit (fosfat miedzi i uranu), są znacznie bardziej aktywne niż sam uran. Jest to fakt zdumiewający i nasuwa przypuszczenie, że minerały te mogą zawierać pierwiastek znacznie bardziej aktywny od uranu...”

Niespodziewane wyniki podane w tej pracy Marii Skłodowskiej-Curie, ogłoszonej drukiem w maju 1898 r., ponownie skierowały uwagę badaczy na promienie Becquerela.

„Okazało się, że wyniki, do jakich mnie ta praca doprowadziła, odsłaniają widoki tak ciekawe, że pan Curie, odstępując od swych robót,

będących w biegu, przyłączył się do mnie i od-
tąd wspólnie nasze usiłowania skierowaliśmy
ku wydobyciu nowych ciał promieniotwór-
czych i ich zbadaniu” – napisała Maria Skło-
dowska-Curie we wstępie do swej rozprawy
doktorskiej. Małżonkowie Curie rozpoczęli
wiec wspólnie poszukiwania nowego pier-
wiastka promieniotwórczego. W lipcu tegoż
roku donieśli o odkryciu polonu, a w grudniu
– o odkryciu radu.

W komunikacie o odkryciu polonu, przed-
stawionym w Akademii Nauk w dniu
18 lipca 1898 r., znalazło się zdanie o wydźwię-
ku politycznym, zwracające uwagę na pozosta-
jącą pod zaborami Polskę.

„...Niektóre rudy, zawierające uran i tor (blenda smo-
lista, chalkolit, uranit) są bardzo aktywne pod wzglę-
dem emisji promieni Becquerela. W poprzedniej pra-
cy jedno z nas wykazało, że ich aktywność jest nawet
większa od aktywności uranu i toru i wyraziło opinie,
że fakt ten należy przypisać jakiejś innej, nadzwyczaj
aktywnej substancji, która znajduje się w tych rudach
w bardzo nieznacznej ilości... Przypuszczamy, że cia-
ło, które wyodrębniliśmy z blendy smolistej, zawiera
nieznany jeszcze metal, zbliżony do bizmutu pod
względem właściwości chemicznych. Jeśli istnienie
tego metalu się potwierdzi, proponujemy dla niego
nazwę „polon” od nazwy ojczyzny jednego z nas.”

W okresie, w którym kobiety miały trud-
ności w dostaniu się na wyższe uczel-
nie i kiedy odmawiano im wielu praw, zwłasz-
cza uczestniczenia na równi z mężczyznami
w naukach ścisłych, wielu ludziom wydawało się
mało prawdopodobne, by wspaniały pomysł
systematycznego badania promieniotwórczości
mógł się zrodzić samodzielnie w głowie młodej
badaczki przybyłej z Polski. Wśród Francuzów
częste było wtedy przekonanie, że to wybitny
uczony Pierre Curie podsunął swej żonie temat
badan i czuwał nad nimi; Marii pozostawiano
w zasadzie tylko rolę pomocniczą.

Jednak wszystkie znane fakty świadczą
o tym, że jest to przekonanie nieprawdziwe
i niesprawiedliwe. Maria Skłodowska-Curie,
według powszechnej opinii osoba niezwykle
skromna, a przy tym kochająca żona, niemal
zawsze podkreślała, że odkrycia w dziedzinie
promieniotwórczości są wspólnym dziełem
jej i męża. Z jednym wyjątkiem: właśnie gdy
chodziło o sam pomysł zajęcia się promie-
niotwórczością.

Andrzej Kajetan Wróblewski,
Historia fizyki, wyd. PWN,
wybrane fragmenty s. 405–408

Pytania i zadania do tekstu

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



- Oceń prawdziwość zdań.
 - Maria Skłodowska-Curie jako pierwsza osoba badała zjawisko promieniotwórczości.
 - Pierre Curie już przed poznaniem Marii zajmował się fizyką.
 - Pierre Curie już przed poznaniem Marii zajmował się badaniem promieniotwórczości.
 - Maria Skłodowska-Curie jako pierwsza osoba badała zjawisko promieniotwórczości w sposób ilościowy.
- W pierwszym cytacie Maria Skłodowska-Curie stwierdza, że badała ciała, które „byłyby zdolne do czynienia powietrza przewodnikiem elektryczności”.
 - W jaki sposób ciała promieniotwórcze powodują, że powietrze może przewodzić prąd?
 - Opisz podobieństwa i różnice między układem doświadczalnym opisanym w cytowanym tekście a licznikiem Geigera-Müllera.
- W obu cytatach uczona podkreśla, że niektóre rudy uranu są bardziej promieniotwórcze niż czysty uran. Dlaczego ten fakt uznała za „zdumiewający”?

Podsumowanie Izotopy i promieniowanie

Jądro atomowe

- Jądro atomowe składa się z **nukleonów**: protonów i neutronów.
- Liczba protonów (i równa jej liczba elektronów) decyduje o tym, z jakim pierwiastkiem mamy do czynienia, więc odpowiada także za jego właściwości chemiczne. Jądra tego samego pierwiastka mogą mieć różną liczbę neutronów – takie odmiany pierwiastka nazywamy izotopami.

liczba masowa

– liczba nukleonów w jądrze

$^{12}_6\text{C}$

symbol pierwiastka

liczba atomowa

– liczba protonów w jądrze

- W jądrze między nukleonami działają siły przyciągania jądrowego (rys. a). Równoważą one odpychające siły elektrostatyczne działające między protonami (rys. b).
- W reakcjach jądrowych zmieniają się jądra atomowe, więc jeden pierwiastek może zmienić się w inny. Różni je to od reakcji chemicznych, w których jądra atomowe, a więc także pierwiastki, nie ulegają zmianie.

Rozpad promieniotwórczy:

- alfa** (α) – powstaje promieniowanie alfa, czyli jądra helu

Przykładowo: $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}$

- beta minus** (β^-) – powstaje promieniowanie beta, czyli strumień elektronów

Przykładowo: $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + ^0_{-1}\text{e} + \bar{\nu}_e$

- beta plus** (β^+) – powstaje promieniowanie beta plus, czyli strumień pozytonów (anty-elektronów)

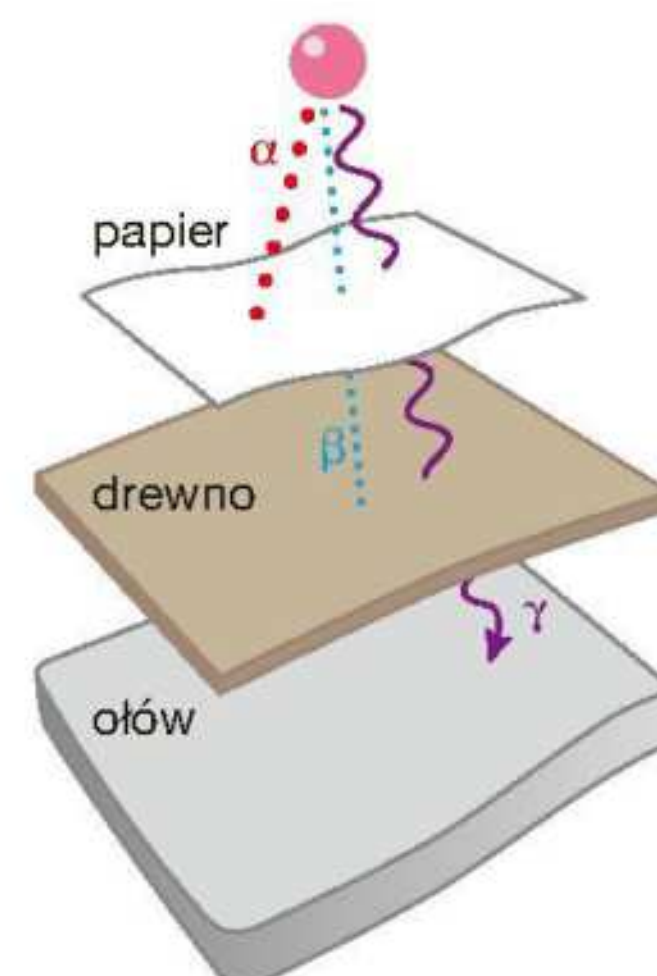
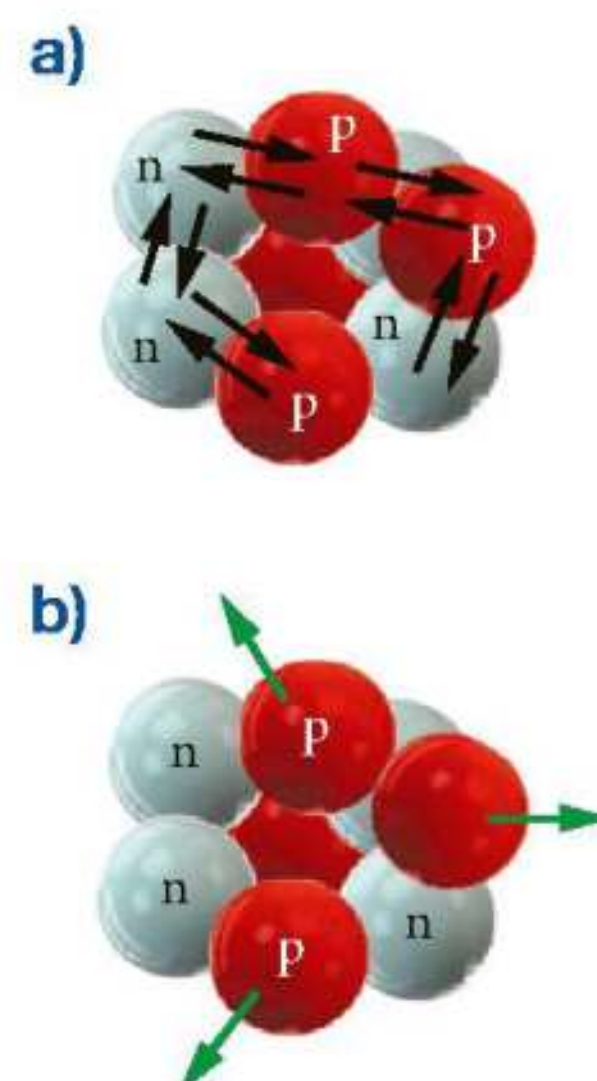
Przykładowo: $^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{22}_{10}\text{Ne} + ^0_1\text{e} + \nu_e$

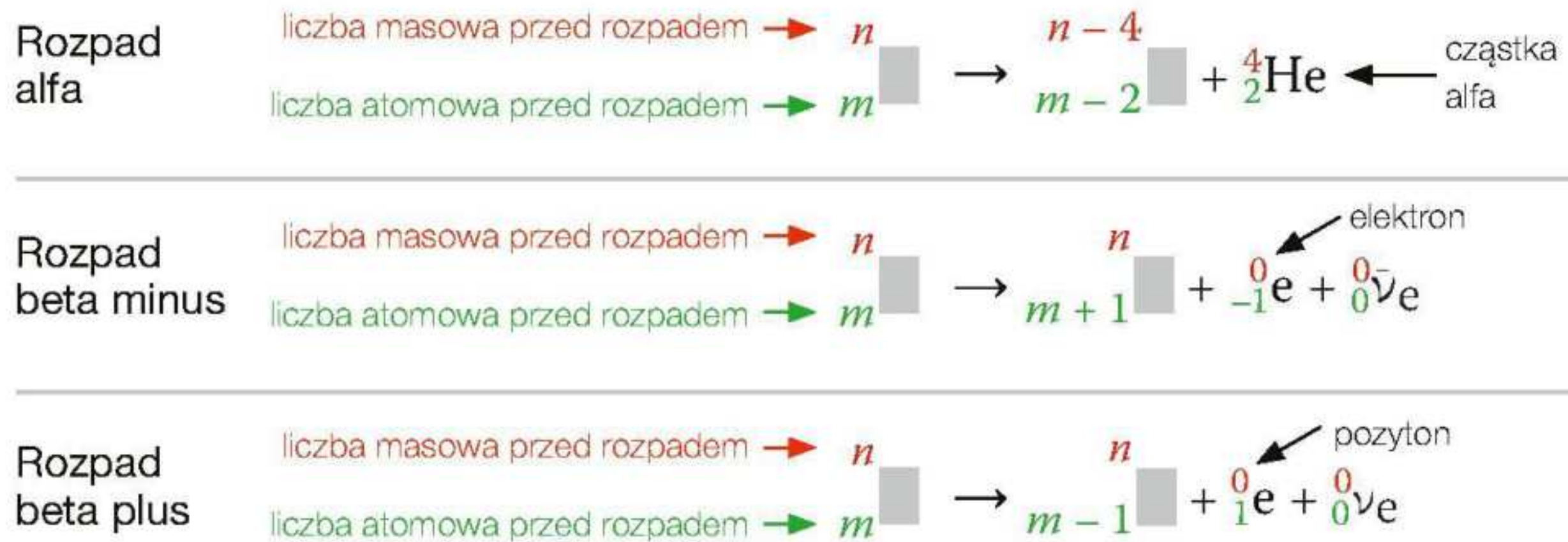
- Promieniowanie gamma** jest emitowane razem z cząstkami alfa i beta albo wtedy, kiedy jądra powstałe po rozpadzie alfa lub beta mają bardzo dużą energię.

- Najbardziej przenikliwe** jest promieniowanie **gamma** – do osłony przed nim potrzeba grubej tarczy.

Mniej przenikliwe jest promieniowanie **beta** – w powietrzu może przebyć kilka metrów, a w materii do kilku milimetrów.

Najmniej przenikliwe jest promieniowanie **alfa**, które w powietrzu może przebyć kilka centymetrów, a w tkance – ułamek milimetra.



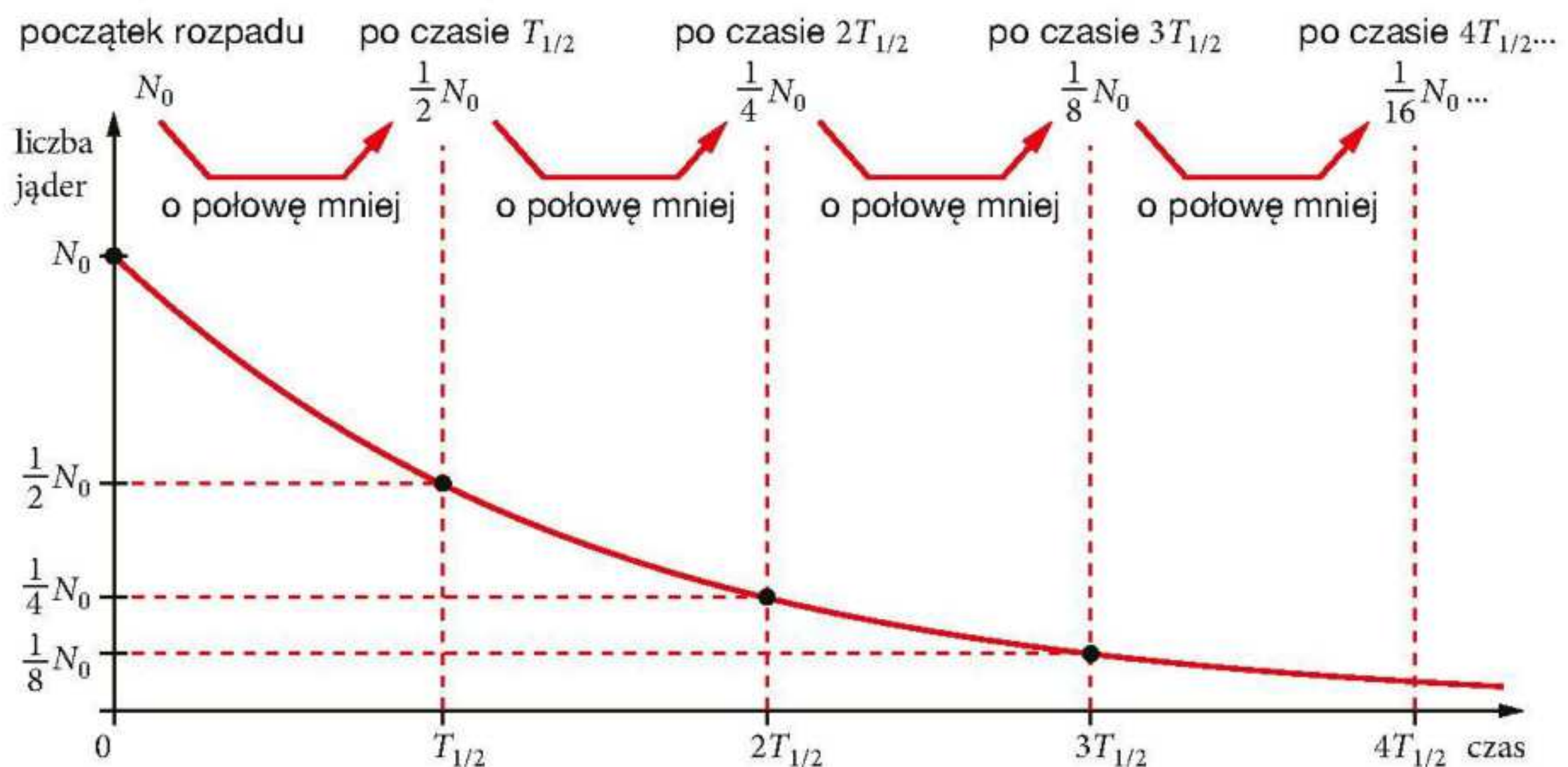


- Nie da się przewidzieć, w którym momencie rozpadnie się dane jądro atomowe, jednak można obliczyć, w jakim czasie rozpadnie się dany procent dużej liczby jąder. Czas, w jakim rozpada się średnio połowa danej liczby jąder, nazywamy **czasem połowicznego rozpadu** $T_{1/2}$.

► Prawo rozpadu promieniotwórczego:

$$N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

gdzie: N – liczba jąder pierwiastka po czasie t , N_0 – początkowa liczba jąder.



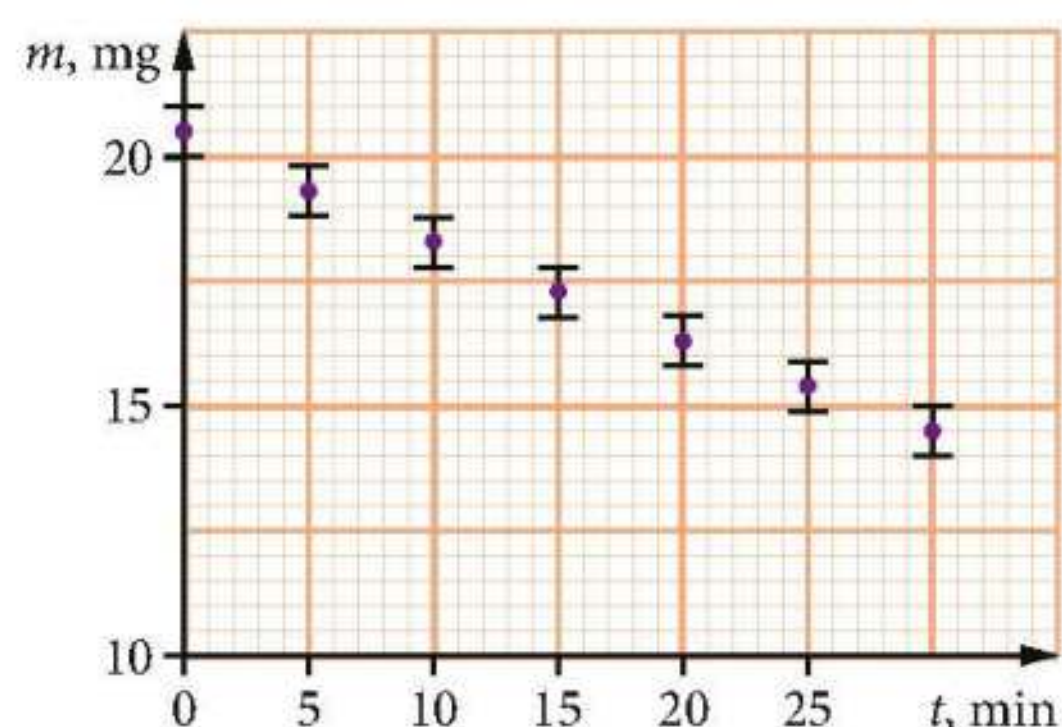
- Proporcjonalnie do liczby jąder zmniejsza się masa wyjściowego izotopu (ale nie masa całej próbki, w której pozostają produkty rozpadu) oraz jego aktywność promieniotwórcza (liczba rozpadów na sekundę).
- Promieniowanie w niewielkich dawkach nie jest szkodliwe dla organizmu, ale w dużych może prowadzić do choroby popromiennej, a w skrajnych przypadkach – do śmierci. Skutkiem promieniowania może być też uszkodzenie komórek, a w jego konsekwencji – nowotwór, ujawniający się nawet wiele lat po napromieniowaniu.

Sposób na zadanie

Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych

Zadanie 1. (0–3)

Na wykresie przedstawiono masę próbki pewnego izotopu promieniotwórczego, wyznaczaną co 5 minut. Na podstawie tego wykresu **oblicz czas połowicznego rozpadu izotopu**.



Jak w zadaniu 5. na s. 163.

Rozwiązanie:

Z wykresu nie możemy bezpośrednio odczytać czasu połowicznego rozpadu, ponieważ przedstawia on zbyt krótki przedział czasu i masa izotopu nie zdążyła się zmniejszyć o połowę.

Ponieważ nie jest to prosta.

Nie umiemy też w łatwy sposób przedłużyć wykresu.

Możemy jednak odczytać z niego, że po czasie 30 min od rozpoczęcia pomiarów masa izotopu w próbce zmniejszyła się z $m_0 = 20,5$ mg do $m_1 = 14,5$ mg.

Zgodnie z prawem rozpadu promieniotwórczego zapisujemy:

$$m_1 = m_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \rightarrow \frac{m_1}{m_0} = 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}$$

czyli po zlogarytmowaniu stronami mamy:

$$\log \frac{m_1}{m_0} = -\frac{t}{T_{1/2}} \log 2$$

Najpierw przekształciliśmy równanie, ponieważ logarytmować można tylko liczby bez jednostek.

a stąd wyznaczamy czas połowicznego rozpadu:

$$T_{1/2} = -\frac{\log 2}{\log \frac{m_1}{m_0}} t$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$T_{1/2} = 60 \text{ min}$$

Odpowiedź: Czas połowicznego rozpadu badanego izotopu wynosi ok. 60 minut.

Warto zapamiętać!

- Rozpad promieniotwórczy opisuje funkcja wykładnicza.
- Nawet jeśli wykres opisujący taki rozpad dla krótkiego czasu jest zbliżony do prostej, to nie można go przedłużać, ponieważ im dalej, tym mniejsze jest jego nachylenie.
- Do obliczania czasu połowicznego rozpadu (albo czasu rozpadu o dany procent) wykorzystujemy logarytmy.



Zadanie analogiczne

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



Zadanie. Na wykresie w zadaniu na stronie obok zaznaczono niepewności pomiarowe.

a) Odczytaj z niego, w jakim zakresie mieściła się początkowa masa m_0 próbki oraz masa m_1 próbki po 30 minutach.

b) Oblicz $T_{1/2}$ dla każdej ze skrajnych wielkości ilorazu $\frac{m_1}{m_2}$ i zapisz ostateczną odpowiedź do zadania wraz z niepewnością jako $T_{1/2} = 60 \text{ min} \pm \dots \text{ min}$.

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



Zadanie 1. Rozpad jodu-128

W naturze występuje tylko jeden trwały izotop jodu, o liczbie masowej 127. Poprzez naświetlanie neutronami można z niego otrzymać nietrwały i niewystępujący w przyrodzie izotop ^{128}I .

Przeważająca część – aż 93% – jodu-128 podlega rozpadowi beta minus, w którym powstaje trwały izotop ksenonu. Na skutek tego rozpadu powstaje promieniowanie gamma złożone z kwantów o różnych energiach, wśród których największą ma kwant o energii 443 keV.

Pozostałe 7% izotopu rozpada się do telluru. Czas połowicznego rozpadu jest jednakowy dla obu możliwości rozpadu i wynosi 25 minut.

Zadanie 1.1. Zapisz równanie reakcji, w której do jądra jodu-127 jest dołączany dodatkowy neutron, oraz równania reakcji rozpadu powstałego jodu-128.

Zadanie 1.2. Oblicz częstotliwość i długość fali promieniowania gamma złożonego z kwantów o energii 443 keV.

Zadanie 1.3. Przygotowano próbkę 2 g czystego jodu-128. Ile izotopu pozostało w próbce po 1 godzinie?

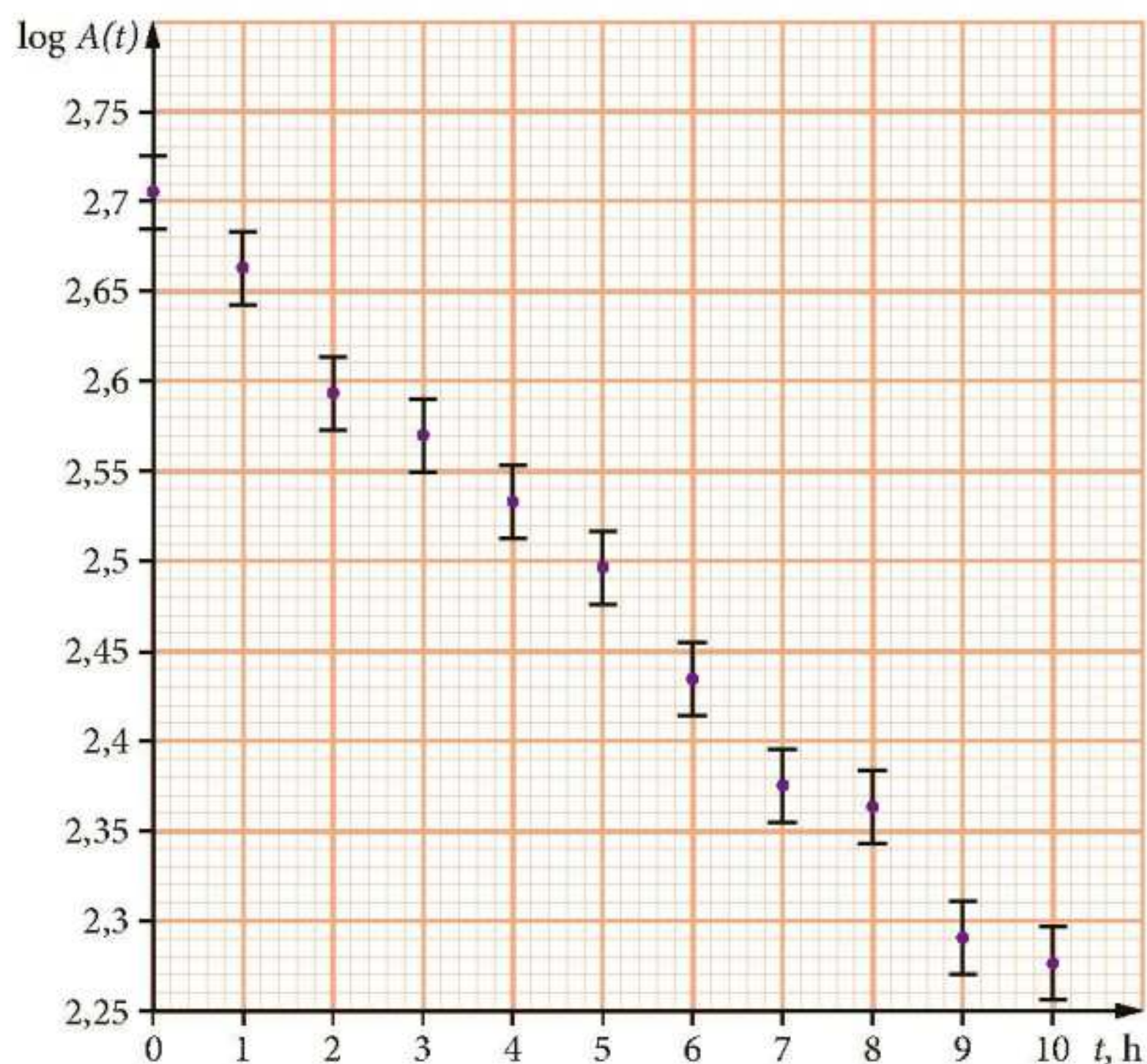
Zadanie 1.4. O godzinie 10:05 stwierdzono, że próbka jodu-128 emituje 50 kwantów o energii 443 keV na sekundę. O której godzinie próbka emitowała 500 takich kwantów?

Zadanie 1.5. O godzinie 10:00 w laboratorium uzyskano próbkę 10 g czystego jodu-128. Oblicz, ile ksenonu powstanie w próbce do godziny 12:05. Pomiń masę powstałych elektronów.

Zadanie 1.6. Naszkicuj, jak wraz z upływem czasu zmienia się procentowa zawartość ksenonu w próbce złożonej początkowo z czystego jodu-128. Pomiń masę powstałych elektronów.

Zadanie 2. Wyznaczanie czasu połowicznego rozpadu

Fizycy wyznacжали okres połowicznego rozpadu pewnego izotopu. Co godzinę mierzyli jego aktywność. Wykres przedstawia zależność logarytmu aktywności (liczby rozpadów na sekundę) od czasu.



Zadanie 2.1. Uzasadnij, że zgodnie z prawem rozpadu promieniotwórczego przedstawiona na tym zakresie zależność jest liniowa. Załóż, że w czasie pomiaru własności badanego izotopu nie uległy zmianie.

Zadanie 2.2. Do punktów na wykresie dopasuj prostą i wyznacz jej współczynnik kierunkowy. Na tej podstawie oblicz czas połowicznego rozpadu badanego izotopu.

21. Energia jądrowa

1. Teoria względności
2. Masa a energia
3. Energia całkowita
4. Energia reakcji jądrowych
5. Energia rozszczepienia
6. Energia syntezy termojądrowej
7. Życie gwiazd
8. Galaktyki i Wszechświat



21.1

Teoria względności



Ważne w tej lekcji:

- stałość prędkości światła c ,
- **F** względność równoczesności,
- c jako maksymalna prędkość.

Przypomnij sobie:

- Ruch jest względny – położenie i prędkość ciała zależą od wyboru układu odniesienia.

Nazwisko Alberta Einsteina i nazwę *teoria względności* słyszeli wszyscy, ale niewielu umie powiedzieć o niej coś więcej. Masz wreszcie okazję dowiedzieć się o niej nieco więcej.

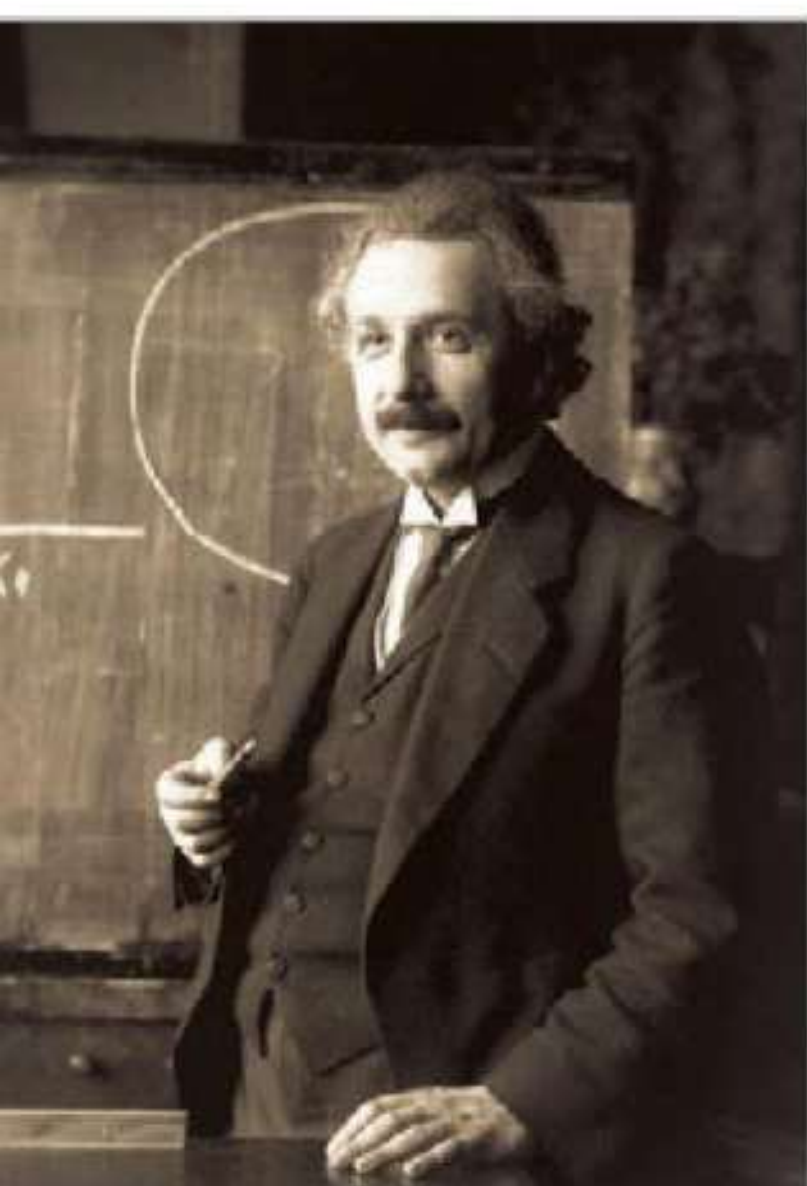
■ „O elektrodynamice ciał w ruchu”

Taki tytuł nosiła przełomowa praca Einsteina na temat podstaw teorii względności. Tytuł nawiązywał do jednego z największych nierozwiązanych problemów fizyki XIX w.

Jak już wiesz, teorię opisującą elektromagnetyzm sformułował James Clerk Maxwell. Pozwoliła ona przewidzieć istnienie nieznanych wcześniej fal elektromagnetycznych. Warto jeszcze wspomnieć, że teoria Maxwella pozwalała obliczyć prędkość tych fal. Ponieważ okazało się, że jest ona równa prędkości światła, Maxwell trafnie uznał światło za falę elektromagnetyczną.

Pominęliśmy jednak ważne pytanie: rozpatrujemy prędkość światła – ale w jakim układzie odniesienia?

Wyobraźmy sobie samochód (czy też w czasach Maxwella – parowóz) jadący z prędkością $20 \frac{m}{s}$ z zapalonym przednim reflektorem.



Rys. 21.1. Albert Einstein (1879–1955), laureat Nagrody Nobla za 1921 r.

Czy prędkość światła z reflektora obliczona na podstawie teorii Maxwella to prędkość względem pojazdu czy względem ziemi? Ta druga wielkość powinna być większa o $20 \frac{m}{s}$.

Prędkość w różnych układach odniesienia, podręcznik cz. 1 → s. 119

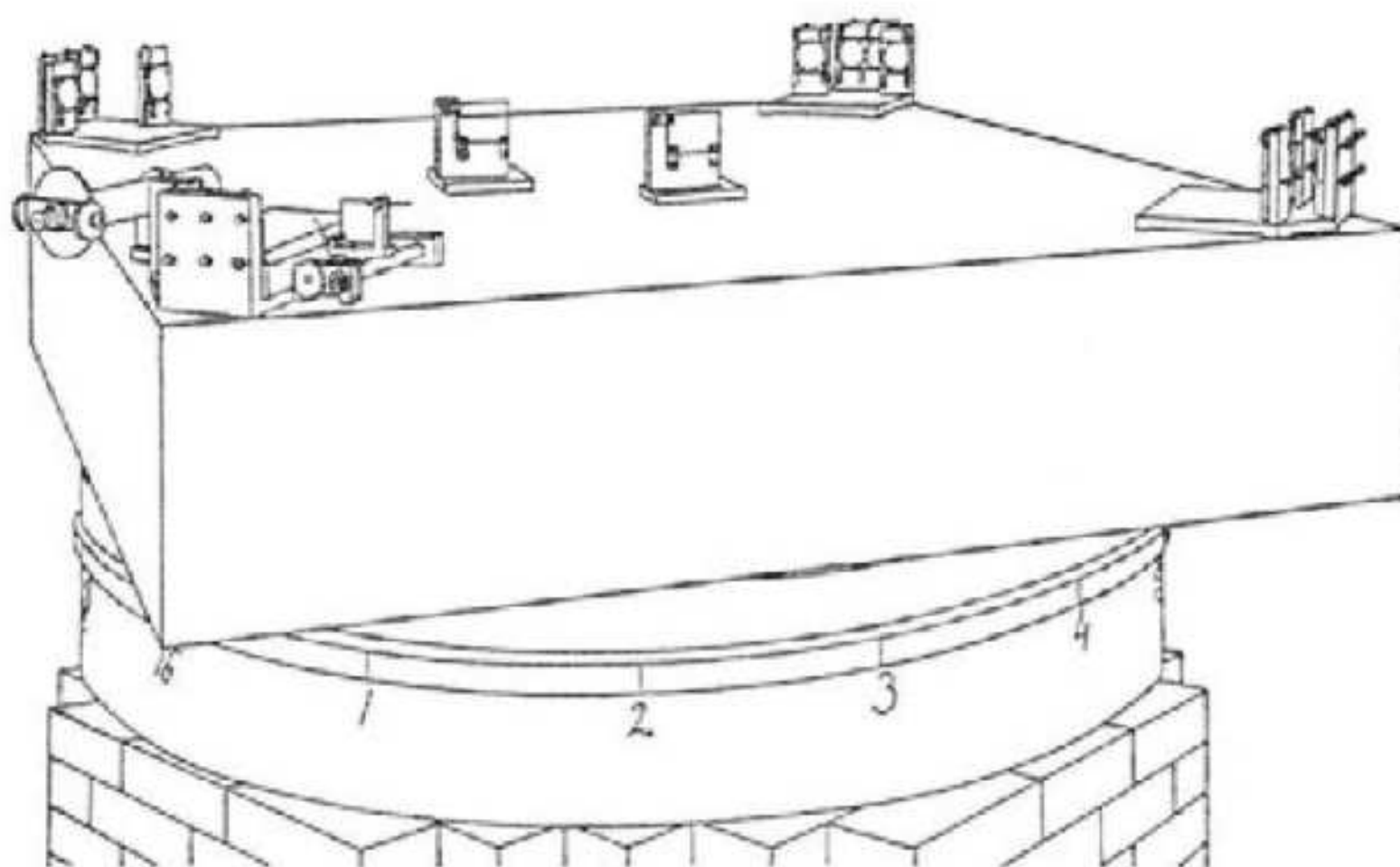
■ Hipoteza eteru światłonośnego

Początkowo fizycy uważali, że każda fala musi rozchodzić się w jakimś ośrodku, więc skoro światło jest falą, to także potrzebuje ośrodka. Prędkość światła – podobnie jak prędkość dźwięku – jest zatem jej prędkością w układzie odniesienia związanym z ośrodkiem.

Oczywiście wiadano o zdolności światła do poruszania się w próżni – w ten sposób dociera do nas przecież światło słoneczne. Wyjaśniano jednak, że nawet to, co nam wydaje się próżnią, jest w rzeczywistości wypełnione tajemniczą substancją, zwaną eterem światłonośnym.

Kiedy jednak próbowano zbadać ruch Ziemi względem eteru, okazało się, że najwyraźniej nie tylko przemieszcza się on w kosmosie razem z naszą planetą, lecz także razem z nią się obraca, ponieważ nie wykryto ruchu Ziemi względem eteru (rys. 21.2 z oryginalnej pracy z 1887 r.).

Nazwa *eter* nie ma nic wspólnego ze związkiem chemicznym o tej samej nazwie.



Rys. 21.2. W tym przyrządzie promienie światła poruszające się w prostopadłych kierunkach spotykały się i interferowały ze sobą. Zmiana powstających prążków pozwoliłaby wykryć różnice w prędkości wynikające z ruchu Ziemi (i przyrządu) względem eteru

■ Einstein: prędkość światła jest stała

Coraz bardziej pokrętna teoria eteru zupełnie nie odpowiadała Albertowi Einsteinowi. Jak wiesz, od dawna już była znana:

Zasada względności Galileusza: Zjawiska mechaniczne zachodzą tak samo we wszystkich układach inercjalnych.

Układy inercjalne i nieinercjalne, podręcznik cz. 1 → s. 177

Einstein uważał, że powinna ona obowiązywać nie tylko w mechanice, lecz także w innych dziedzinach fizyki. Uogólnił ją więc do postaci nazywanej dziś jego nazwiskiem.

Zasada względności Einsteina: Wszystkie zjawiska fizyczne zachodzą tak samo we wszystkich układach inercjalnych.

Oznaczałoby to jednak, że prędkość światła obliczona na podstawie praw elektromagnetyzmu nie zależy od układu odniesienia. Innymi słowy, światło wysyłane przez reflektor na czole parowozu porusza się względem maszynisty z taką samą prędkością jak względem dróżnika stojącego przy torach (rys. 21.3).

Pomijamy tu niewielką różnicę między prędkością światła w próżni a jego prędkością w powietrzu.



Rys. 21.3. Dwa mierniki prędkości światła, jeden na wagonie pchanym przez lokomotywę, a drugi na ziemi, wskazują dokładnie tę samą wartość, mimo że są względem siebie w ruchu

To założenie Einsteina okazało się słuszne.

Prędkość światła w próżni c jest jednakowa we wszystkich układach odniesienia.

■ Względność rozmiarów ciał i upływu czasu

Jak jednak pogodzić stałość prędkości światła ze wzorami na przeliczanie prędkości? Otóż przy ich uzasadnieniu w pierwszej części podręcznika przyjęliśmy dwa założenia, które wydawały się nam oczywiste, podobnie jak wydawały się oczywiste wszystkim fizykom aż do początku XX w. Były to następujące założenia:

- czas płynie jednakowo dla wszystkich obserwatorów,
- długości mierzone przez wszystkich obserwatorów są jednakowe.

Jest to zgodne z codziennym doświadczeniem, ale nie do pogodzenia z zasadą względności Einsteina.

Okazuje się, że w poruszającym się układzie odniesienia zarówno upływ czasu, jak i rozmiary ciał w kierunku ruchu są inne niż w spoczywającym układzie odniesienia.

I choć jest to zaskakujące, zostało to wielokrotnie potwierdzone w precyzyjnych doświadczeniach.

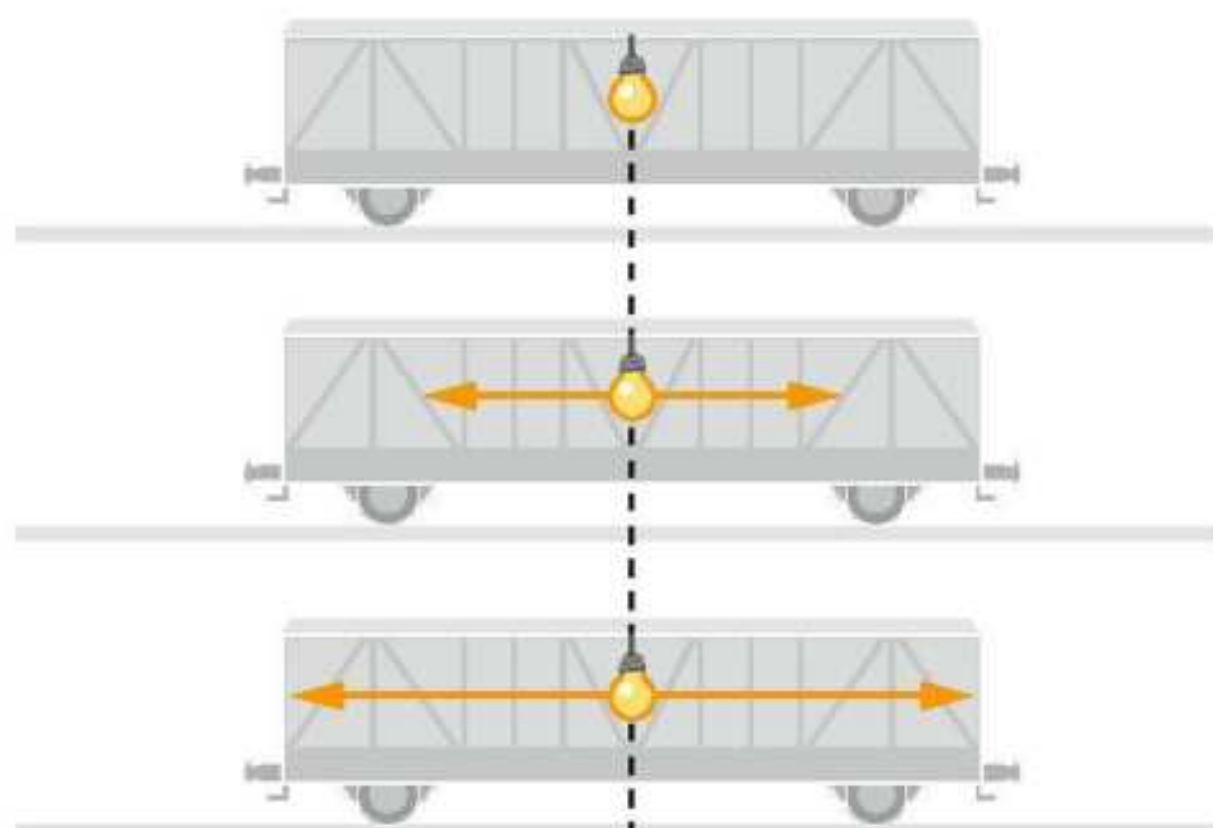
■ Względność równoczesności

Z różnym upływem czasu w różnych układach odniesienia związany jest jeszcze jeden ważny fakt opisywany przez teorię względności: odpowiedź na pytanie, czy dwa zdarzenia mające miejsce w różnych punktach przestrzeni wydarzyły się w tym samym czasie, zależy od układu odniesienia.

Od stałości prędkości światła do względności równoczesności

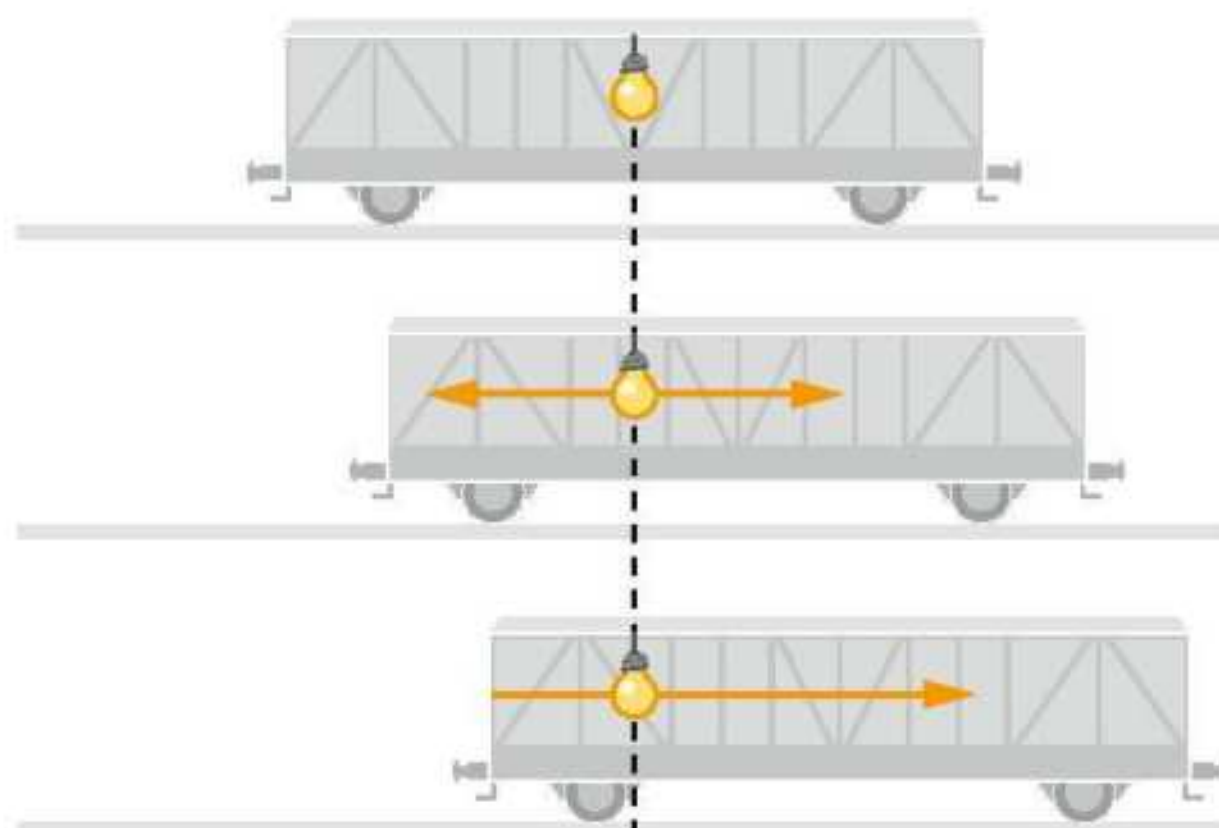
Wyobraź sobie jadący wagon towarowy, w którym włączono lampę zawieszoną na środku sufitu. Jak rozchodzi się światło? Rozważmy to w dwóch układach odniesienia.

Układ odniesienia pociągu



Światło rozchodzi się w obie strony z taką samą prędkością i równocześnie dociera do przedniej i tylnej ściany wagonu.

Układ odniesienia torów i ziemi



Światło rozchodzi się w obie strony z taką samą prędkością, ale wagon się przesuwa, więc do tylnej ściany światło dociera wcześniej.

Kto ma rację? Obaj obserwatorzy. Równoczesność jest względna, zatem w układzie odniesienia wagonu równoczesne są inne zdarzenia niż w układzie odniesienia ziemi.

■ Prędkość światła jako prędkość maksymalna

Jeśli równoczesność jest względna, to czy jest możliwa jeszcze dziwniejsza sytuacja, w której zostaje odwrócona kolejność zdarzeń?

Tak, chociaż wydaje się to paradoksalne. Może to oznaczać, że z punktu widzenia jakiegoś układu odniesienia ktoś umarł, potem odmłodził, a jeszcze później się urodził. Okazuje się jednak, że do obserwacji takiego zjawiska musielibyśmy poruszać się szybciej niż światło. Właśnie dlatego uważa się ruch ciał z prędkością nadświatłową za niemożliwy.

Prędkość światła w próżni jest największą możliwą prędkością dla materii i informacji.

O tym, dlaczego nie da się rozpędzić ciała do prędkości światła, powiemy także w lekcji 21.3.

■ Teoria względności a codzienne obserwacje

Dlaczego więc na co dzień nie obserwujemy efektów wynikających z teorii względności? Otóż założenie o jednakowym upływie czasu i jednakowych odległościach dla różnych obserwatorów jest spełnione w przybliżeniu. Przy małych prędkościach – nie tylko w przypadku pociągów, ale nawet rakiet kosmicznych – to przybliżenie jest na ogół zupełnie wystarczające. Jednak gdy zbliżamy się do prędkości światła, newtonowska fizyka zaczyna zawodzić.

W rakiecie lecącej z drugą prędkością kosmiczną ($11 \frac{\text{km}}{\text{s}}$) czas płynie wolniej tylko o sekundę na 24 lata.

DROGA DO TEORII WZGLĘDNOŚCI

Na przełomie XIX i XX w. wśród fizyków panowało przekonanie, że w naukach ścisłych niewiele pozostało do zbadania. Jednak w 1905 r. Albert Einstein opublikował artykuły, które zmieniły obraz fizyki. Okazało się, że nie tylko w przypadku Izaaka Newtona sprawdziły się jego słynne słowa: „widzę dalej, ponieważ stoję na ramionach olbrzymów”.



Arystoteles

(384–322 p.n.e.)

był przekonany, że naturalnym stanem na niebie jest ruch, a na Ziemi – spoczynek. Cokolwiek poruszymy na Ziemi, po pewnym czasie się zatrzyma, ale ruch gwiazd na firmamencie będzie trwać bez końca.



Galileusz

(1564–1642)

sformułował zasadę, zgodnie z którą ciało raz wprowadzone w ruch będzie się poruszać ruchem jednostajnym prostoliniowym, o ile nie istnieje siła (np. tarcie) zdolna je zatrzymać. Uznał też, że każdy obserwator poruszający się ruchem jednostajnym prostoliniowym musi tak samo opisywać prawa fizyki, a wszystkie ciała w polu grawitacyjnym są przyspieszane w ten sam sposób.



Kartezjusz

(1596–1650)

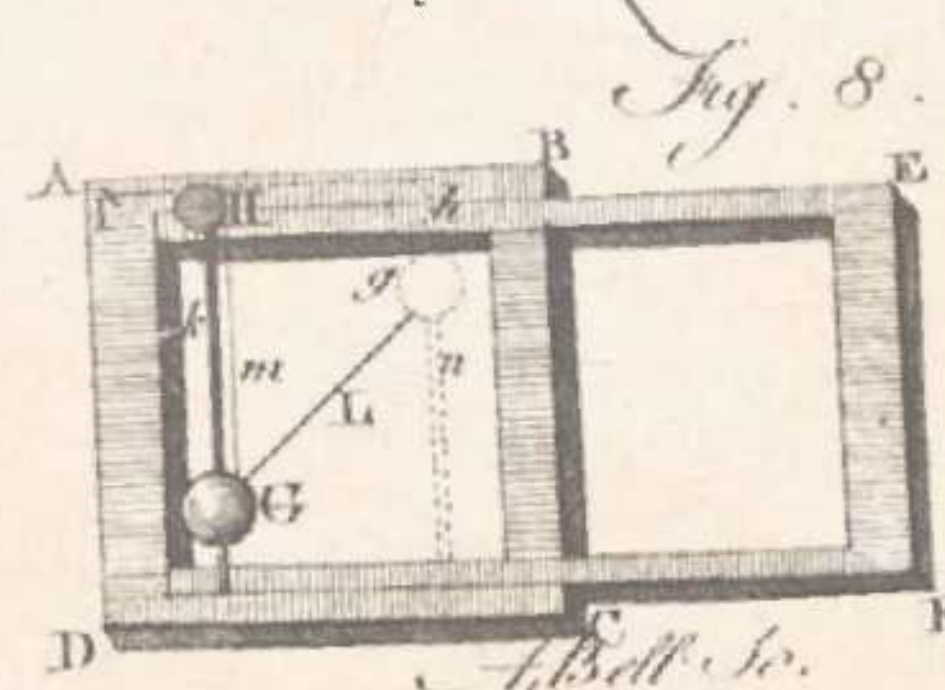
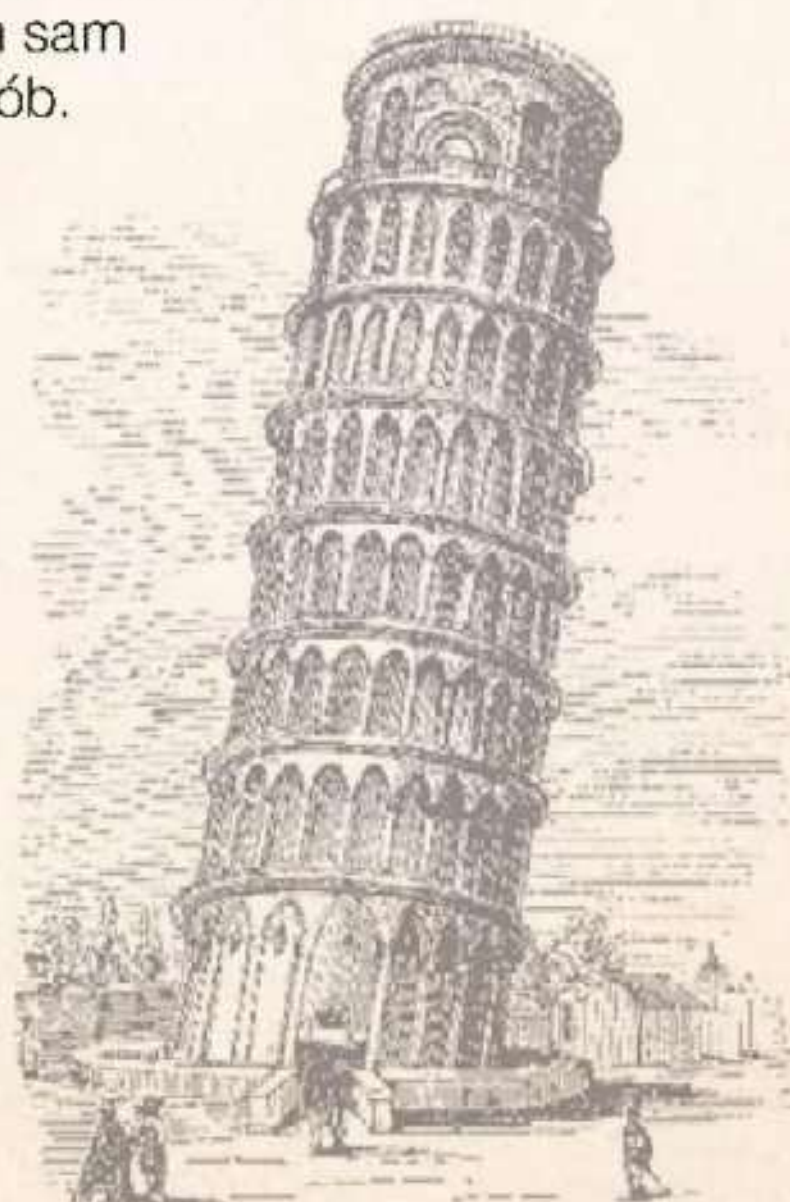
jako pierwszy zdał sobie sprawę z tego, że ruch jednostajny prostoliniowy ciała – jeśli nie podlega ono wpływom zewnętrznym – jest stanem ciała, podobnie jak spoczynek.



Izaak Newton

(1642–1727)

założył, że czas i przestrzeń są absolutne (w każdym punkcie we Wszechświecie przestrzeń i czas mają takie same własności). Sformułował prawa ruchu, które stały się fundamentem fizyki. Pierwsze (zasada bezwładności) – jest powtórzeniem spostrzeżeń Kartezjusza. Drugie – mówi o tym, że zmiana ruchu jest proporcjonalna do przyłożonej siły. Trzecie – stwierdza, że każdemu działaniu towarzyszy przeciwdziałanie. Newton sformułował także prawo powszechnego ciążenia.



Doświadczenie myślowe Einsteina

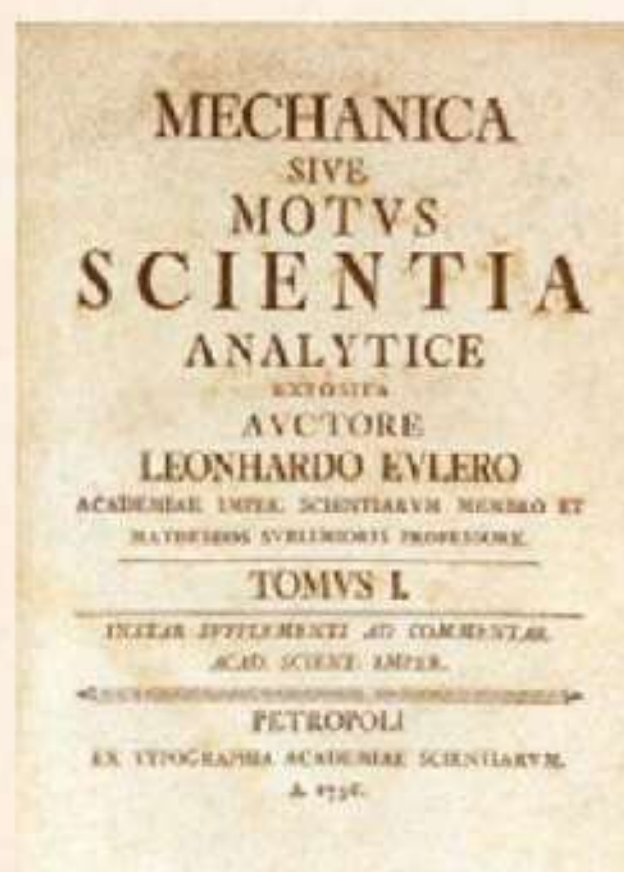
wykazujące, że siły bezwładności wynikające z przyspieszenia układu równoważą siłę grawitacji:

Wyobraź sobie, że jesteś w rakiecie bez okien. W takiej sytuacji nie możesz rozstrzygnąć, czy znajdujesz się w pobliżu Ziemi i spoczywasz, czy poruszasz się w górę ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem $9,81 \text{ m/s}^2$ w przestrzeni kosmicznej z dala od ciał niebieskich.



Leonhard Euler
(1707–1783)

napisał pierwszy podręcznik mechaniki zawierający równania. Ani Galileusz, ani Newton nie znali pojęcia prędkości jako stosunku drogi do czasu. Euler wprowadził obecną definicję prędkości i jej jednostkę. To on jako pierwszy podał równanie $F = m \cdot a$.



Loránd Eötvös
(1848–1919)

w 1887 r. wykazał doświadczalnie, że masa bezwładna jest równa (z dokładnością rzędu 10^{-14}) masie grawitacyjnej. To oznacza, że siły bezwładności i siły grawitacyjne działają na ciała w taki sam sposób, a my bez dodatkowych wskazówek nie jesteśmy w stanie ocenić, która z tych sił na nas działa. Z tego wniosku Einstein wywiódł ogólną teorię względności.

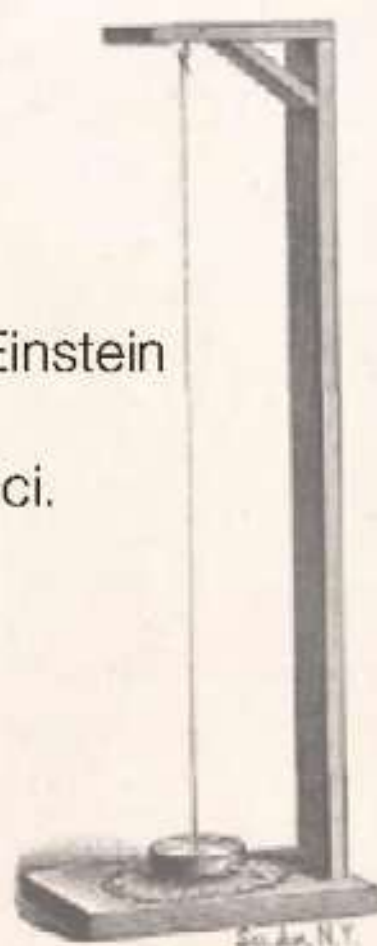
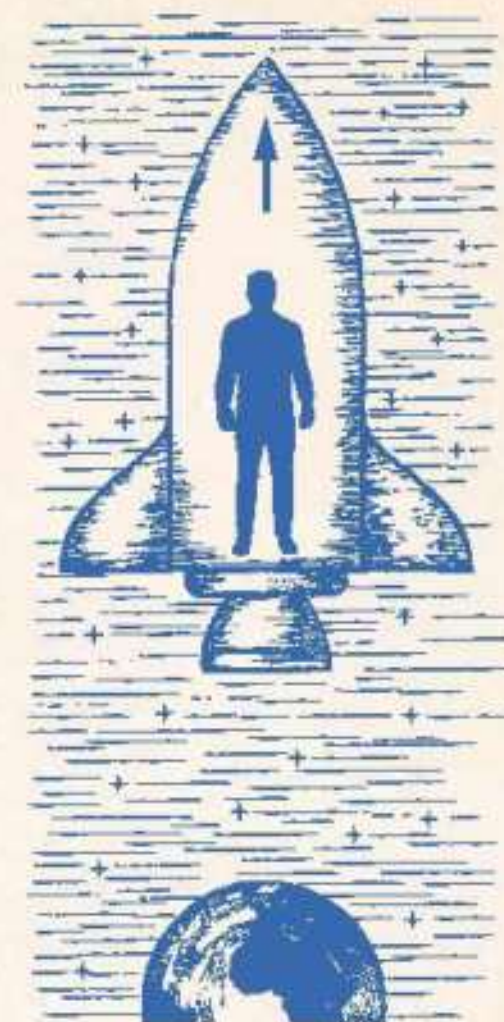
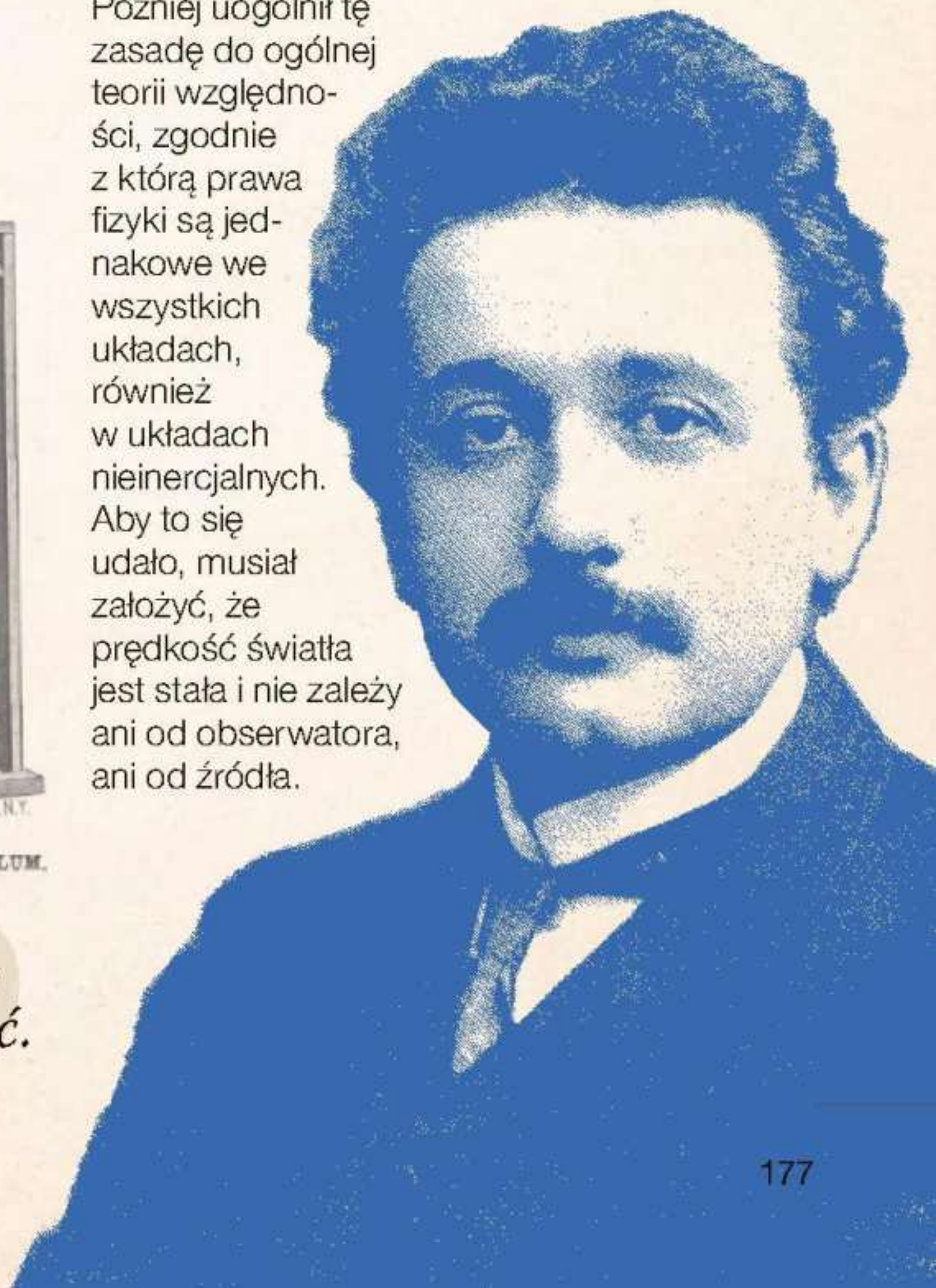


Fig. 8.
TORSION PENDULUM.



Albert Einstein
(1879–1955)

w szczególnej teorii względności uwzględnił za Galileuszem, że równania opisujące ruch we wszystkich inercjalnych układach odniesienia związanych z dwoma ciałami poruszającymi się jednostajnie prostoliniowo nie mogą się różnić. Później uogólnił tę zasadę do ogólnej teorii względności, zgodnie z którą prawa fizyki są jednakowe we wszystkich układach, również w układach nieinercjalnych. Aby to się udało, musiał założyć, że prędkość światła jest stała i nie zależy ani od obserwatora, ani od źródła.



*Najbardziej niezrozumiałe jest to,
że Wszechświat da się zrozumieć.*

Albert Einstein



A to ciekawe

Ty także testujesz zgodność teorii względności z rzeczywistością. Dzieje się tak wtedy, gdy korzystasz z systemu GPS. Działa on dzięki pomiarowi czasu przelotu fal radiowych z satelity do odbiornika. Dokładność 1 m uzyskujemy, gdy czas mierzymy z dokładnością do $1/300\,000\,000$ s. Przy tej dokładności musimy wziąć pod uwagę inny upływ czasu w satelitach niż na Ziemi.

F ■ Idea ogólnej teorii względności

Mówiliśmy dotąd o szczególnej teorii względności, opisującej ruch ciał. Ogólna teoria względności opisuje także grawitację. Jej ideę omówimy w dwóch krokach.

1. Ruch przyspieszony a grawitacja

Czy zwróciłeś kiedyś uwagę na fakt, że tak naprawdę nie odczuwamy siły ziemskiej grawitacji, ale tylko równoważący ją nacisk podłoża? Gdy spadamy swobodnie, czujemy, jakbyśmy nic nie ważyli (rys. 21.4a). W stanie nieważkości znajdują się też pasażerowie dowolnego statku kosmicznego, który leci z wyłączonymi silnikami, nawet jeśli przyspiesza on pod wpływem grawitacji pobliskiej planety (rys. 21.4b).

a)



b)



Rys. 21.4. Gdy poruszamy się **tylko** pod wpływem siły grawitacji, czujemy, że jesteśmy w stanie nieważkości

Z kolei kiedy już odczuwamy grawitację, nie jesteśmy w stanie odróżnić jej od sił bezwładności, wynikających z przyspieszenia naszego układu odniesienia (rys. na górze s. 177).

I nie dotyczy to tylko naszych subiektywnych odczuć.

Żadne doświadczenie prowadzone w niewielkim zamkniętym pomieszczeniu nie pozwoli nam odróżnić sił grawitacji od sił bezwładności wynikających z przyspieszonego ruchu układu.

To stwierdzenie stanowiło dla Alberta Einsteina punkt wyjścia do stworzenia ogólnej teorii względności. A jakie są jego konsekwencje?

Odczuwanie ciężaru
i stanu nieważkości,
podręcznik cz. 1 → s. 177–184

2. Grawitacja a czas i przestrzeń

Skoro jednak ruch ciał wpływa na to, jak mierzymy czas i odległości przestrzenne, a grawitacji nie można odróżnić od efektów ruchu, to również grawitacja powoduje zmiany długości i upływu czasu. Dokładniej: w teorii względności mówimy nie o sile grawitacji, ale o tym, że masa powoduje zmiany długości w przestrzeni i upływu czasu, zwane zakrzywieniem czasoprzestrzeni. Te zmiany odpowiadają za te same zjawiska, które w fizyce newtonowskiej wyjaśnia się istnieniem siły grawitacji. Prostym modelem oddziaływania za pośrednictwem zakrzywionej czasoprzestrzeni są dwie kulki leżące na membranie bębna (rys. 21.5).

W lutym 2022 r. potwierdzono doświadczalnie, że zegar umieszczony nawet kilka milimetrów nad ziemią, gdzie grawitacja jest nieznacznie słabsza, chodzi szybciej. Eksperyment wymagał wykonania pomiarów z dokładnością do 21 cyfr znaczących.



Rys. 21.5. Każda z kulek ugina membranę, co powoduje, że kulki poruszają się w swoją stronę, jakby się przyciągały

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Odpowiedz na pytania. Wyjaśnij różnicę między opisanymi sytuacjami.

a) Karabin wyrzuca pociski z prędkością u . Żołnierz siedzący w samochodzie jadącym z prędkością v strzela z niego w kierunku jazdy. Z jaką prędkością porusza się pocisk względem samochodu, a z jaką – względem drogi?

b) Dźwięk rozchodzi się z prędkością u . Nietoperz leci z prędkością v i emituje ultradźwięki w kierunku lotu. Z jaką prędkością rozchodzi fala ultradźwiękowa względem nietoperza, a z jaką – względem ziemi?

c) Światło w próżni rozchodzi się z prędkością c . Statek kosmiczny leci przez próżnię z prędkością v względem najbliższej planety. Na jego dziobie włączono reflektor świecący do przodu. Z jaką prędkością rozchodzi się światło z reflektora względem statku, a z jaką – względem planety?

2. Gdyby Słońce znikło, światło wysłane przed jego zniknięciem jeszcze przez ok. 8 minut docierałoby do Ziemi. Jednak zniknięcie

Słońca spowodowałoby również zanik przyspieszenia dośrodkowego w ruchu Ziemi wokół naszej gwiazdy. Taki zanik można by wykryć za pomocą odpowiedniego przyrządu. Czy w takim razie wiedzielibyśmy 8 minut wcześniej, że nastąpi ciemność?

3. Podróż do planety pozasłonecznej oddalonej od nas o 1000 lat świetlnych musiałaby trwać ponad 1000 lat. To jednak czas t w układzie odniesienia Ziemi (albo Słońca, albo środka Galaktyki – to nie jest duża różnica). Dla astronautów minąłby tymczasem czas:

$$t' = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

gdzie v jest prędkością ich statku kosmicznego względem Ziemi.

a) Ile czasu minęłoby na statku kosmicznym pokonującym (z punktu widzenia Ziemi) odległość 1000 lat świetlnych z prędkością równą połowie prędkości światła?

b) Z jaką prędkością należałoby się poruszać, aby pokonać tę drogę w czasie 2 lat? Ile czasu minęłoby wtedy na Ziemi?

21.2 Masa a energia



Ważne w tej lekcji:

- zmiana masy a zmiana energii,
- energia spoczynkowa,
- energia potencjalna jako energia układu ciał.

Przypomnij sobie:

- Energia kinetyczna ciała zależy od jego masy i prędkości.
- Prędkość światła w próżni, $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$, jest największą możliwą prędkością.

Pozostałe prace dotyczyły:

- nowego sposobu wyznaczania rozmiarów cząsteczek,
- wyjaśnienia ruchów Browna,
- kwantowej natury światła.

W 1905 r. Albert Einstein opublikował pięć prac, z których każda z osobna zapewniłaby mu miejsce wśród najwybitniejszych fizyków.

■ Zmiana energii to zmiana masy

Jedną z nich był wspomniany w poprzedniej lekcji artykuł „O elektrodynamice ciał w ruchu”. W innej dowodził słynnej zależności $E = mc^2$. W notacji używanej współcześnie ten wzór ma postać:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

Oznacza on, że:

Gdy ciało zyskuje lub traci energię wewnętrzną, odpowiednio zmienia się jego masa. Zmiana masy Δm i zmiana energii ΔE są do siebie proporcjonalne, a współczynnikiem proporcjonalności jest kwadrat prędkości światła.

„Masa ciała jest miarą zawartej w nim energii” – wyjaśnił to Einstein.

To dotyczy każdego zjawiska, w którym ciało zyskuje lub traci energię wewnętrzną. Na co dzień nie zauważamy tych zmian, ponieważ współczynnik c^2 wyrażony w jednostkach SI jest ogromny, a jego odwrotność – bardzo mała.

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$\text{więc } c^2 = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Tę ostatnią jednostkę można zapisać także w innej postaci:

$$[c^2] = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{\text{kg}} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Zatem $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{J}}{\text{kg}}$, czyli:

- zmiana masy o 1 kg odpowiada zmiana energii o $9 \cdot 10^{16} \text{ J}$ (rys. 21.6),
- zmiana energii o 1 J odpowiada zmiana masy o:

$$\frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \text{ kg} \approx 1,1 \cdot 10^{-17} \text{ kg}$$

co jest równe masie małego wirusa.



Rys. 21.6. Masie 1 kg odpowiada energia $9 \cdot 10^{16} \text{ J}$, czyli 25 TWh. Tyle energii elektrycznej zużywa cała Polska przez prawie 4 miesiące

■ Zmiana masy w reakcjach chemicznych

Nawet w reakcjach chemicznych związanych z uzyskaniem dużej energii zmiana masy jest minimalna.

Na przykład przy spaleniu litra benzyny wydzielą się energia 35 MJ. To oznacza, że powstałe spaliny mają masę mniejszą od benzyny i zużytego tlenu zaledwie o $0,4 \mu\text{g}$. Tak niewielką różnicę niezwykle trudno byłoby zmierzyć.

Dopiero w przemianach jądrowych zmiana masy jest zauważalna, choć i w nich masa zmienia się zaledwie o ułamek procenta.

Będziemy tutaj używać pojęcia „energia wewnętrzna” w szerszym znaczeniu niż w termodynamice, obejmującym nie tylko ruch cząsteczek i ich oddziaływania, lecz także energię oddziaływań atomów (energję chemiczną) i nukleonów (energję jądrową).

Masę zbliżoną do $0,4 \mu\text{g}$ ma pantofelek (mikroorganizm).

■ Masa a energia spoczynkowa

Wniosek Einsteina, że „masa ciała jest miarą zawartej w niej energii”, sugeruje nagromadzenie w każdym ciele ogromnej energii, którą można wyzwolić przy jednoczesnym zmniejszeniu masy ciała do zera, czyli doprowadzeniu do jego zniknięcia.

Okazuje się, że tak rzeczywiście jest. Możemy to zaobserwować podczas zjawiska anihilacji materii i antymaterii (więcej powiemy o tym w dalszej części lekcji).

Energię E odpowiadającą masie m ciała zgodnie ze wzorem $E_0 = mc^2$ nazywamy energią spoczynkową tego ciała.

■ Energia spoczynkowa a inne formy energii

Z wcześniejszej nauki znasz różne formy energii. Jaki jest związek między nimi a nowym pojęciem *energia spoczynkowa*?

Otóż do energii spoczynkowej wlicza się cała energia zgromadzona **wewnątrz ciała**:

- energia spoczynkowa cząstek, z których są zbudowane atomy (związana z masą tych cząstek),
- energia oddziaływań tych cząstek w atomie i oddziaływań między atomami, a także ruchu atomów i cząstek.

Natomiast energia kinetyczna ciała jako całości nie wlicza się do energii spoczynkowej. Oznacza to także, że zmiana prędkości ciała nie powoduje zmiany jego masy.

■ Energia spoczynkowa a energia potencjalna

Bardziej skomplikowana jest kwestia energii potencjalnej. Zwykle mówimy w uproszczeniu, że jest to energia jakiegoś jednego ciała (np. jabłka na drzewie przyciąganego przez Ziemię albo magnesu przyciąganego przez inny magnes). Faktycznie jednak energia potencjalna to energia układu ciał: Ziemi i jabłka albo obu magnesów traktowanych jako jeden układ.

Wyobraźmy sobie dwa magnesy, z których każdy ma masę 100 g. Gdy je połączymy i zważymy, to domowa waga pokaże, że taki układ ma masę 200 g.

Jeśli jednak rozczepienie magnesów wymaga wykonania pracy 9 J, to znaczy, że ich energia potencjalna po złączeniu wynosi -9 J (względem sytuacji, gdy znajdują się w dużej odległości).

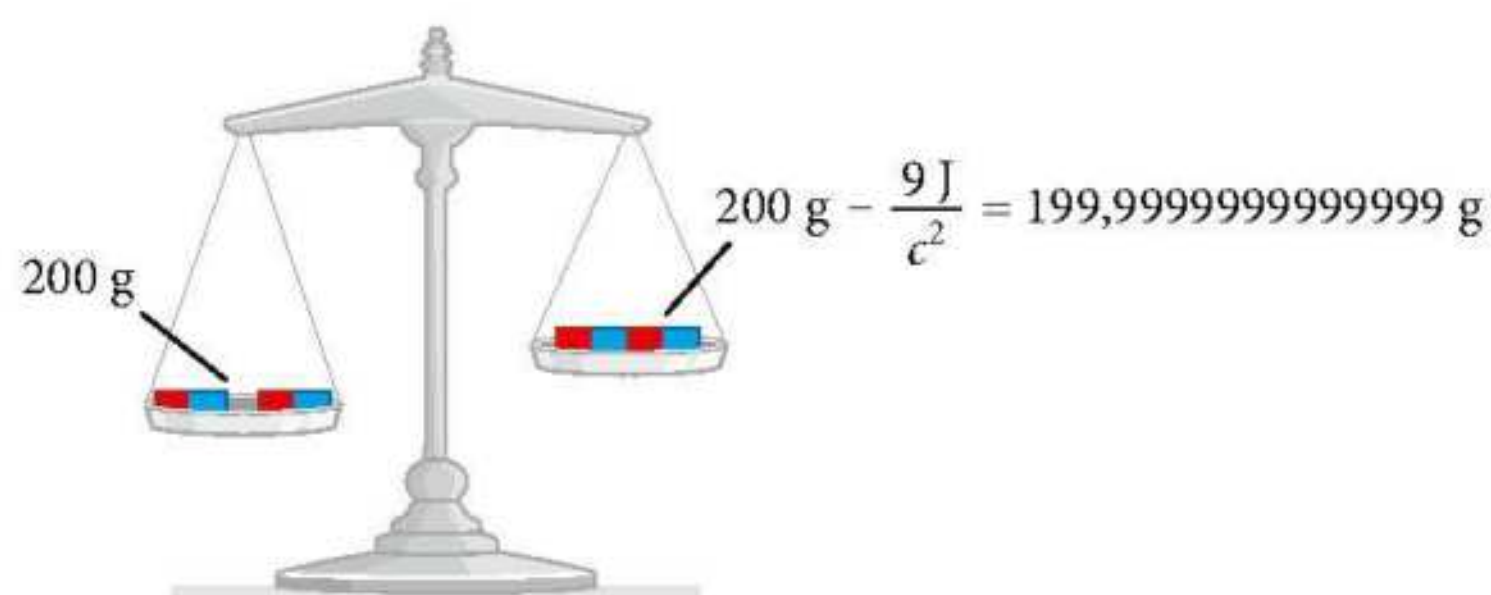
Odpowiada to ubytkowi masy:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{9 \text{ J}}{9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = 10^{-16} \text{ kg} = 10^{-13} \text{ g}$$

W starszych książkach możesz przeczytać, że masa ciała zwiększa się z prędkością. Mowa jest wtedy o masie w innym znaczeniu: masie relatywistycznej.

Także w przypadku sił grawitacji i przyciągania elektrostatycznego energia potencjalna jest ujemna wtedy, gdy przyjmujemy, że energii równej zero odpowiada duża odległość ciał.

Tak więc idealnie dokładna waga pokazałaby nie 200 g, ale zaledwie 199,9999999999999 g (rys. 21.7).



Rys. 21.7. Masa dwóch połączonych magnesów jest minimalnie mniejsza niż masa magnesów niepołączonych

■ Wzór $E_0 = mc^2$ a zasada zachowania energii

Czasami używa się skrótu myślowego: zgodnie ze wzorem $E_0 = mc^2$ masę można zamieniać w energię. Takie sformułowanie może być jednak mylące, ponieważ sugeruje, że zasada zachowania energii nie obowiązuje: skoro wytwarzamy energię z masy (z czegoś, co nie jest energią), to całkowita energia układu się zwiększa.

To jednak błędny wniosek. Tak naprawdę mamy do czynienia wyłącznie z przemianą różnych form energii. Energia spoczynkowa ciała zmienia się w inne formy, np. energię promieniowania.

Ponieważ masa jest wielkością proporcjonalną do energii spoczynkowej, więc także ona ulega zmianie.

Wzór $E_0 = mc^2$ nie jest sprzeczny z zasadą zachowania energii.

Trzeba tylko pamiętać, że również energia spoczynkowa jest jedną z form energii.

Natomiast masa nie jest wielkością zachowaną, ponieważ jest związana tylko z energią spoczynkową. W chemii mówimy o zasadzie zachowania masy, ponieważ zmiany tej wielkości na skutek reakcji chemicznych są zbyt małe, aby je zmierzyć (patrz przykład na końcu lekcji). Musimy jednak pamiętać, że jest to jedynie przybliżenie. Wkrótce opiszemy zjawiska, do których nie da się go zastosować.

ⓕ ■ Wzór $E_0 = mc^2$ a anihilacja

Zależność między masą a energią spoczynkową wraz z innymi prawami fizyki pozwala przewidzieć przebieg reakcji anihilacji.

Rozważmy anihilację pary elektron-pozyton (antyelektron). Załóżmy, że cząstki początkowo się nie poruszają albo poruszają tak wolno, że możemy to zaniedbać.

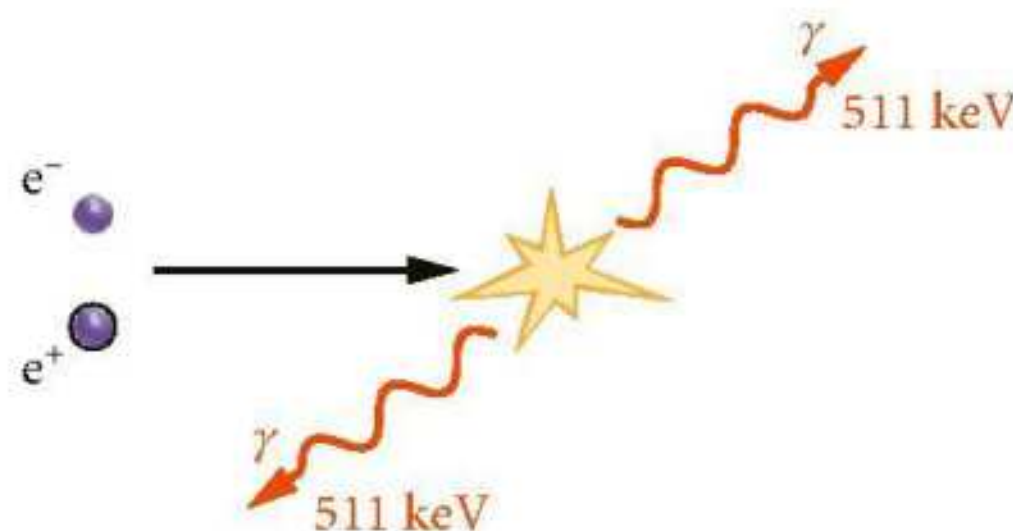
Nawet gdyby elektron i pozyton początkowo się poruszały, to w układzie odniesienia wspólnego środka masy suma ich pędów byłaby równa zero.

Masa każdej z tych cząstek wynosi $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, a to oznacza, że jej energia spoczynkowa to:

$$E_0 = mc^2 = 8,2 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 511 \text{ keV}$$

Tak więc gdy takie dwie cząstki anihilują, powstałe fotony muszą mieć łącznie energię $2 \cdot 511 \text{ keV}$ (rys. 21.8). Czy mogłoby się zdarzyć, że powstaje po prostu jeden foton o energii 1022 keV? Nie byłoby to sprzeczne z zasadą zachowania energii, jednak taką reakcję wyklucza zasada zachowania pędu: foton zawsze ma pewien pęd.

Wyjątkiem jest sytuacja, gdy anihilujące cząstki oddziałują z innym obiektem, np. jądrem atomowym, które przejmuje różnicę pędu.



Rys. 21.8. Przebieg anihilacji swobodnego elektronu i pozytonu. Fotony zawsze biegną w przeciwnie strony

F ■ Kreacja cząstek

Zjawiskiem odwrotnym do anihilacji jest kreacja, czyli zamiana fotonów w cząstki materii i antymaterii, np. w elektron i pozyton. Zauważ, że nie jest możliwe, aby z fotonów powstał **tylko** elektron albo tylko pozyton, ponieważ wtedy z kolei nie byłaby spełniona zasada zachowania ładunku.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



■ Przykład 2.

Chemik zmieszał w temperaturze pokojowej 2 kg wodoru i 16 kg tlenu. Produktem gwałtownego spalania tej mieszaniny była woda. Ile wyniosła masa wody powstałej po skropleniu pary i ochłodzeniu jej do temperatury pokojowej? Ciepło spalania wodoru wynosi $143 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$.

Dane: $m_1 = 2 \text{ kg}$ – masa wodoru, $m_2 = 16 \text{ kg}$ – masa tlenu

$Q_s = 143 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ – ciepło spalania wodoru

Szukane: m – masa powstałej wody

Rozwiązanie:

Mogłoby się wydawać, że odpowiedź to dokładnie 18 kg. Jednak nie uwzględnia ona utraty masy związanej z utratą energii. Tę zmianę masy obliczymy ze wzoru:

$$\Delta m = \frac{E}{c^2}$$



➔ Wyzwolona energia jest równa: $E = m_1 Q_s$, a więc:

$$\Delta m = \frac{m_1 Q_s}{c^2}$$

Podstawiamy dane i przeliczamy jednostkę:

$$\Delta m = \frac{2 \text{ kg} \cdot 143 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}}{(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}$$

$$[\Delta m] = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{J}}{\text{kg}}}{\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} = \frac{\text{J} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^2} = \text{kg}$$

Ostatecznie otrzymujemy:

$$\Delta m \approx 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ kg} = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ g} = 3,2 \mu\text{g}$$

Tak więc otrzymana woda będzie mieć masę:

$$m = m_1 + m_2 - \Delta m = 17,9999999968 \text{ kg}$$

Odpowiedź: Chemik otrzymał 17,9999999968 kg wody.

Uwaga. Mieszanina wodoru z tlenem w stosunku wagowym 1 : 8 ze względu na wybuchowe spalanie jest nazywana mieszaniną piorunującą (nigdy nie eksperymentuj z nią samodzielnie!). Mimo znacznej energii wyzwolonej podczas reakcji ubytek masy jest niezauważalny.

1. Stukilowa sztaba żelaza ostygła od 100°C do 20°C. Jak zmieniła się jej masa? Ciepło właściwe żelaza wynosi $450 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$.

2. Ile antymaterii potrzeba, aby energia wyzwolona przy jej anihilacji była równa energii bomby atomowej zrzuconej na Hiroszimę, równej 50 TJ?

Wskazówka. Należy uwzględnić nie tylko energię spoczynkową antymaterii, lecz także energię spoczynkową materii, która weźmie udział w reakcji anihilacji.

3. **P** Ciepło spalania metanu, głównego składnika gazu ziemnego, wynosi $56 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$. Podczas spalania 1 kg metanu połączył się z 4 kg tlenu. Oblicz masę powstałych produktów reakcji.

4. Słońce wypromieniowuje energię z mocą $4 \cdot 10^{26} \text{ W}$. Masa Słońca wynosi $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

a) O ile ton w ciągu jednej sekundy zmniejsza się masa Słońca z powodu jego promieniowania?

b) Słońce w obecnej postaci będzie istniało jeszcze ok. 6 mld lat. O ile procent zmieni się w tym czasie jego masa?

5. Poruszające się ze znikomą prędkością proton i antyproton anihilują. Powstają z nich dwa identyczne fotony. Oblicz ich energię.

6. Wyjaśnij, dlaczego żadna z opisanych niżej reakcji anihilacji nie może zachodzić.

a) pozyton + proton $\rightarrow$ 2 fotony

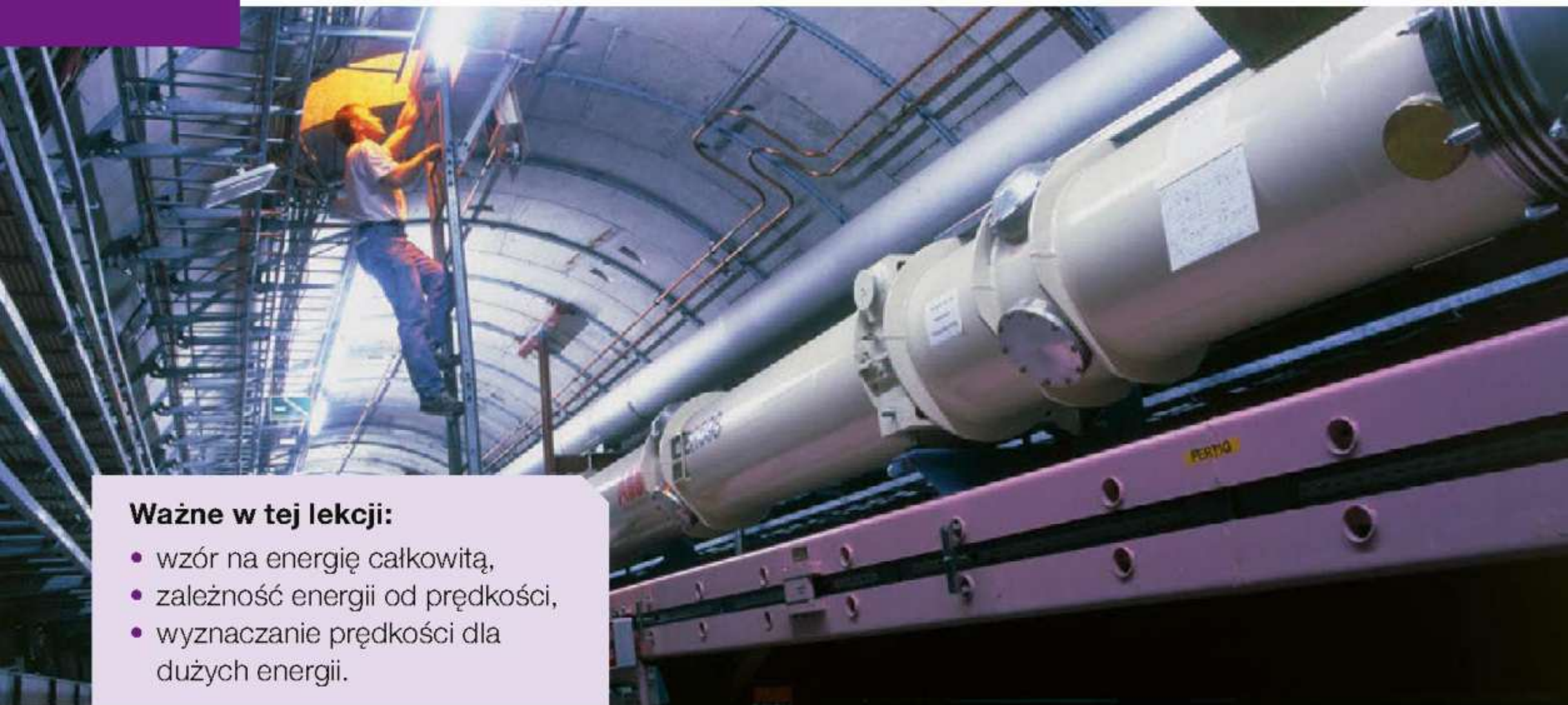
b) pozyton + pozyton $\rightarrow$ 2 fotony

c) elektron + proton $\rightarrow$ 2 fotony

d) 2 fotony $\rightarrow$ proton + pozyton

e) foton $\rightarrow$ proton + antyproton

21.3 Energia całkowita



Ważne w tej lekcji:

- wzór na energię całkowitą,
- zależność energii od prędkości,
- wyznaczanie prędkości dla dużych energii.

Przypomnij sobie:

- Energia spoczynkowa ciała o masie m wynosi $E = mc^2$.
- Ruch ciała z prędkością większą niż prędkość światła jest niemożliwy.

■ Rozpędzamy ciało do prędkości nadświatłowej?

Jeszcze raz spróbujemy rozpędzić ciało do prędkości nadświatłowej. Jak wiesz z poprzedniej części podręcznika, akceleratory pozwalają nadać wielką energię cząstkom elementarnym. Przykładowo akcelerator HERA w ośrodku DESY w Hamburgu (na zdjęciu powyżej) nadaje elektronom energię kinetyczną aż 27,5 GeV. Jeśli wyznaczymy prędkość ze wzoru $E_k = \frac{1}{2} mv^2$ i podstawimy te dane, otrzymamy wynik ponad 300 razy większy od prędkości światła.

W fizyce słowo „relatywistyczny” oznacza „dotyczący teorii względności”. Nie ma to nic wspólnego z relatywizmem w sensie filozoficznym ani tym bardziej etycznym.

■ Energia relatywistyczna

Gdzie jest błąd? Być może już się domyślasz, że w szczególnej teorii względności nie obowiązuje wzór $E_k = \frac{1}{2} mv^2$. Wzór na energię całkowitą (czyli sumę energii spoczynkowej i kinetycznej) ma postać:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Zauważ, że z tego wzoru możemy odczytać następujące informacje:

- Jeżeli podstawimy $v = 0$, to otrzymujemy $E = mc^2$, czyli samą energię spoczynkową.
- Jeżeli $v > 0$, energia rośnie, jednak w miarę zbliżania się tej prędkości do prędkości światła energia nie zbliża się do określonej wartości, ale rośnie w nieskończoność.

Samą energię kinetyczną możemy obliczyć, odejmując energię spoczynkową od całkowitej:

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

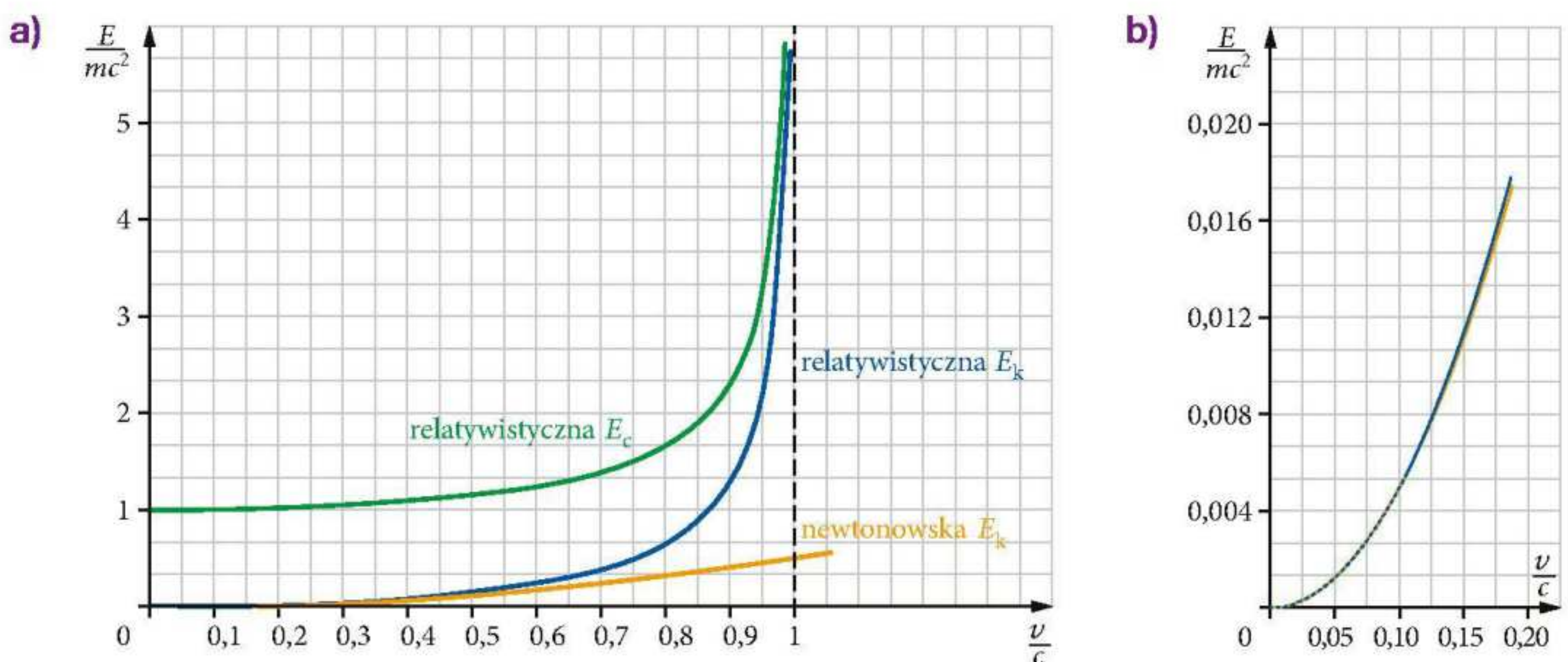
Na podstawie tego wzoru można obliczyć prędkość elektronów w akceleratorze. Jak zobaczysz w rozwiązaniu przykładu na następnej stronie, jest ona mniejsza (choć nieznacznie) od prędkości światła.

■ Zależność energii kinetycznej od prędkości

Wykres energii kinetycznej przedstawiono na rysunku 21.9. Zauważmy, że aż do prędkości $v = 0,1c$ nie widać różnicy między energią kinetyczną obliczoną ze wzoru newtonowskiego $\frac{1}{2}mv^2$ a tą samą energią obliczoną ze wzoru relatywistycznego.

Jednak im bliżej prędkości światła, tym ta różnica jest większa. Według fizyki newtonowskiej dla $v = c$ energia kinetyczna po prostu osiąga wartość $\frac{1}{2}mc^2$ i dalej rośnie dla większych prędkości. W rzeczywistości jednak – zgodnie z teorią względności – energia rośnie coraz szybciej i dla v zbliżającego się do c dąży do nieskończoności.

Innymi słowy, niezależnie od tego, jak bardzo zwiększymy energię, prędkość nie przekroczy c .



Rys. 21.9. Porównanie zależności energii od prędkości. Na rysunku b) powiększony początkowy obszar wykresu

■ Znaczenie praktyczne

Jak powiedzieliśmy, nawet dla rakiet kosmicznych różnica między wzorem poznanym w tej lekcji a doskonale znanym ci wzorem $\frac{1}{2}mv^2$ jest niezauważalna, więc lepiej korzystać z tego drugiego – jako ze znacznie prostszego.

Jednak w fizyce cząstek elementarnych, a także przy badaniu wysoko-energetycznych cząstek promieniowania kosmicznego, różnica ta ma zasadnicze znaczenie.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



■ Przykład

W akceleratorze HERA elektrony uzyskują energię kinetyczną 27,5 GeV.

a) Oblicz prędkość tych elektronów.

b) Jak zwiększyłaby się prędkość tych elektronów, gdyby ich energia kinetyczna wzrosła dwukrotnie?

Dane: $E_k = 27,5 \text{ GeV}$ – energia elektronu

Szukane: v – prędkość elektronu, v' – prędkość elektronu, po tym jak jego energia kinetyczna wzrosła dwukrotnie

Rozwiązanie:

a) Skorzystamy ze wzoru:

$$E_k = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

Po przekształceniach otrzymujemy z niego:

$$\frac{E_k}{mc^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \quad \rightarrow \quad \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{E_k}{mc^2} + 1$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{\left(\frac{E_k}{mc^2} + 1 \right)^2} \quad \rightarrow \quad \frac{v^2}{c^2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{E_k}{mc^2} + 1 \right)^2}$$

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{E_k}{mc^2} + 1 \right)^2}} \quad (1)$$

Energia spoczynkowa elektronu wynosi:

$$mc^2 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 8,2 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 5,1 \cdot 10^5 \text{ eV}$$

Po podstawieniu tej wartości do wzoru (1) otrzymujemy:

$$\frac{v}{c} = 0,99999999983$$



- ➔ **b)** Dla dwa razy większej energii kinetycznej – podstawiamy $E_k = 55 \text{ GeV}$ – z tego samego wzoru otrzymamy:

$$\frac{v'}{c} = 0,999999999957$$

Odpowiedź: Prędkość elektronów w akceleratorze HERA wynosi $0,9999999983c$, a dla dwukrotnie większej energii kinetycznej wynosiłaby $0,999999999957c$.

Uwaga. Dwukrotnemu wzrostowi energii odpowiadał niewielki przyrost prędkości. Dalsze zwiększanie energii powodowałoby, że prędkość zbliżałaby się do c , ale nigdy nie przekroczyłaby tej wartości. Wynika to z samej postaci wzoru (1): pod pierwiastkiem jest liczba mniejsza od 1, a pierwiastek z takiej liczby także jest mniejszy od 1.

Uwaga. Masę cząstek elementarnych znajdziesz w tabeli na końcu książki.

- 1.** Proton porusza się z prędkością $0,8c$. Przy jakiej prędkości jego energia kinetyczna będzie dwa razy większa?

Rozwiąż zadanie dwoma sposobami:

- a)** na podstawie wzoru,
b) graficznie, na podstawie rysunku 21.9 (na s. 187).
- 2. P** Elektron zostaje rozpędzony różnicą potencjałów 2 MV . Jaką prędkość osiągnie?

Oblicz, jaki wynik otrzymamy za pomocą wzoru z teorii względności, a jaki za pomocą wzorów z fizyki klasycznej. Który wynik jest poprawny?

- 3.** Jaki procent energii całkowitej elektronów opisanych w przykładzie stanowi ich energia spoczynkowa? A jak jest dla rakiety kosmicznej lecącej z prędkością $11 \frac{\text{km}}{\text{s}}$?
- 4.** Przy jakiej prędkości elektronu jego energia całkowita jest dwukrotnie większa od spoczynkowej? A jak jest dla protonu? Spróbuj uogólnić swoje obserwacje.

21.4

Energia reakcji jądrowych



Ważne w tej lekcji:

- energia wiązania,
- deficyt masy,
- obliczanie energii reakcji jądrowej.

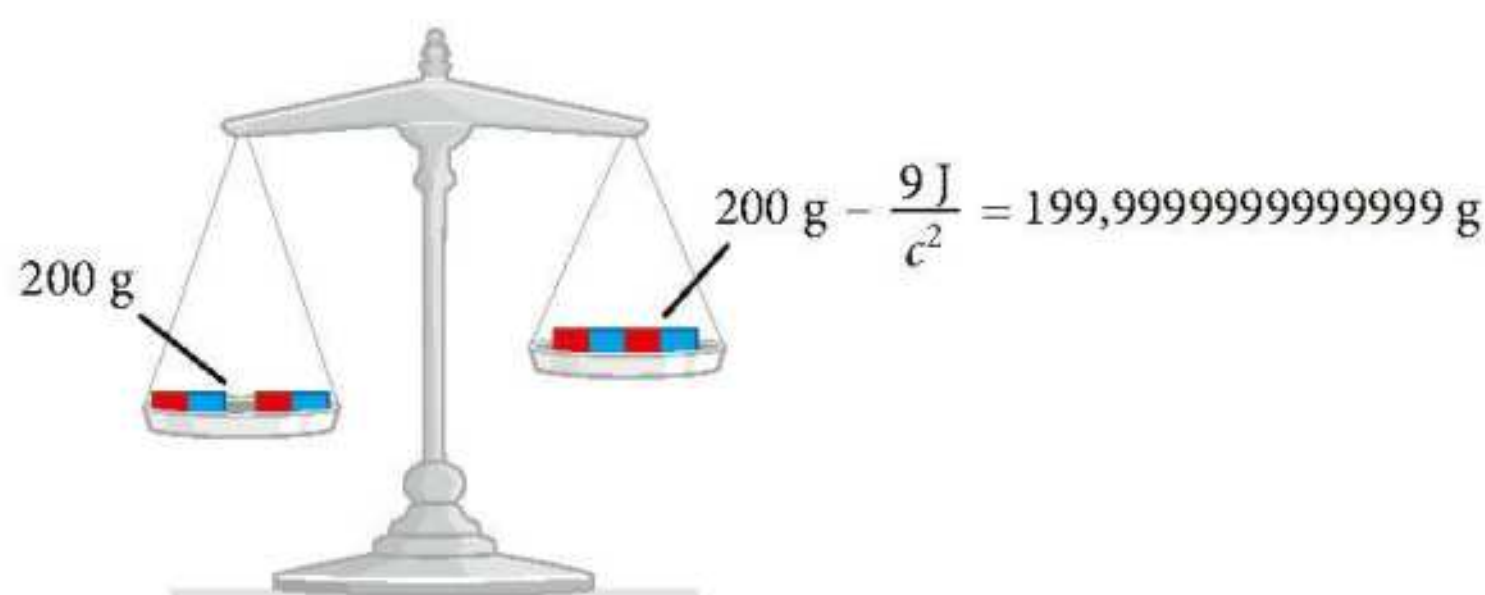
Przypomnij sobie:

- Gdy ciało zyskuje energię, zwiększa się jego masa, a gdy ją traci – jego masa się zmniejsza.
- Zmiana energii ΔE oraz zmiana masy Δm powiązane są wzorem $\Delta E = \Delta mc^2$.
- Energia spoczynkowa ciała to energia odpowiadająca całej jego masie: $E_0 = mc^2$.

■ Oddziaływanie i zmiana masy

W lekcji 21.2 rozważaliśmy zmianę masy magnesów, które łączą się ze sobą dzięki przyciąganiu (rys. 21.10). Przypomnijmy, że:

- gdy chcemy rozczepić magnesy, musimy wykonać pewną pracę W ,
- jeżeli puścimy magnesy, aby się połączyły, to mogą one wykonać taką samą pracę W , np. przesunąć przyczepione do nich przedmioty.



Rys. 21.10. Jeśli przy rozłączaniu magnesów wykonujemy pracę 9 J, to masa złączonych magnesów jest o $9 \frac{J}{c^2} = 10^{-13} \text{ g}$ mniejsza niż rozłączonych

Oznacza to, że energia złączonych magnesów jest mniejsza o $\Delta E = W$ niż po ich rozczepieniu. A w takim razie także ich masa jest mniejsza po złączeniu niż przed nim o wartość $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$.

Ten przykład pozwoli nam wprowadzić dwa ważne pojęcia.

Energia wiązania to energia potrzebna do rozdzielenia układu na jego składniki.

W powyższym układzie była to energia 9 J.

Zmiana masy związana z tą energią ma własną nazwę:

Deficyt masy to różnica między sumą mas obiektów wchodzących w skład układu a masą tego układu.

Zgodnie z powyższymi rozważaniami deficyt masy Δm jest związany z energią wiązania ΔE zależnością $\Delta E = \Delta mc^2$.

■ Inne przykłady

Aby lepiej zrozumieć te pojęcia, prześledźmy przykłady z różnych dziedzin fizyki.

- Ziemia i Księżyc przyciągają się siłami grawitacji. Aby zwiększyć odległość Księżyca od Ziemi, należałoby wykonać pracę, a więc dostarczyć energii do układu Ziemia–Księżyc. To znaczy, że podczas oddalania Księżyca od Ziemi zwiększyłaby się również masa tego układu (skoro energia pochodziłaby spoza niego, np. od przelatującej w pobliżu planety).

A zatem układ Ziemia–Księżyc ma masę mniejszą niż suma mas Ziemi i Księżyca. Deficyt masy w naszym, ziemskim pojęciu jest całkiem spory (patrz zadanie 4 → s. 194), jednak stanowi znikomą część sumy mas Ziemi i Księżyca.

- Gdy do protonu dołącza się elektron i powstaje atom wodoru, wtedy elektron emituje foton, a więc traci energię. To znaczy, że powstały atom wodoru ma masę mniejszą niż suma mas protonu i elektronu.
- Energia nukleonów połączonych w jądro jest mniejsza niż przed ich połączeniem, a zatem także masa jądra jest mniejsza niż suma mas jego składników.

Energia wiązania wodoru to $\Delta E = 13,6 \text{ eV} = 2,176 \cdot 10^{-18} \text{ J}$.

Różnica mas to

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = 2,4 \cdot 10^{-35} \text{ kg}.$$

To tylko 14 miliardowych części masy atomu.

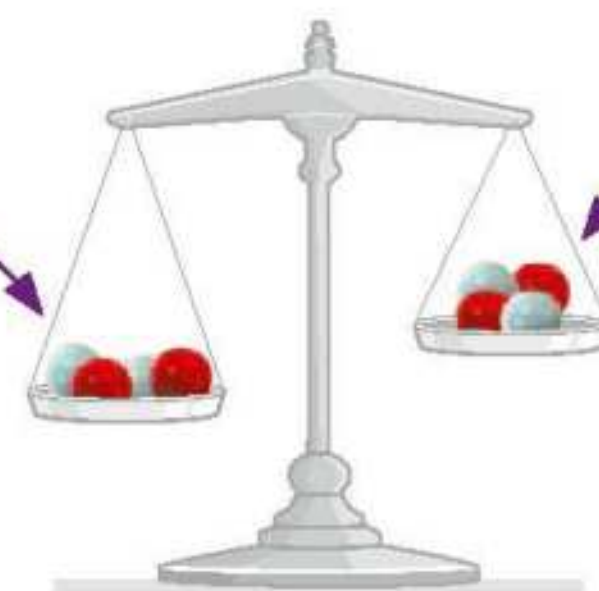
■ Jak duży może być deficyt masy

W większości codziennych sytuacji deficyt masy jest tak niewielką częścią masy układu, że możemy go pominąć.

Deficyt masy w jądrze helu

łączna masa składników jądra helu:

$$\begin{aligned} 2m_{\text{protonu}} + 2m_{\text{neutronu}} &= \\ &= 2 \cdot 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} + 2 \cdot 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = \\ &= 6,6950 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$



masa jądra helu:

$$6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Deficyt masy: $\Delta m = 6,6950 \cdot 10^{-27} \text{ kg} - 6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0,0503 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 5,03 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$

W stosunku do łącznej masy cząstek przed połączeniem różnica ta wynosi:

$$\frac{\Delta m}{2m_{\text{protonu}} + 2m_{\text{neutronu}}} = \frac{0,0503 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{6,6950 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \approx 0,008 = 0,8\%$$

Okazuje się jednak, że deficyt masy jądra atomowego stanowi zauważalną część masy jądra – kilka promili. Przykładowe obliczenia przedstawiono w ramce powyżej.

Właśnie dlatego w reakcjach jądrowych wydzielą się tak duża energia, że okręt z napędem jądrowym (zdjęcie na górze s. 190) może pływać bez uzupełniania paliwa przez wiele lat, a broń jądrowa jest o wiele groźniejsza od konwencjonalnej.

■ Energia rozpadu promieniotwórczego

Wiesz już, że przy rozpadzie alfa i beta wyzwala się energia. Jej część jest emitowana w postaci promieniowania, a reszta zwiększa energię kinetyczną jądra, co obserwujemy jako rozgrzewanie się izotopu.

Teraz możemy wyjaśnić, skąd ta energia pochodzi. Otóż nawet w przemianie alfa, w której nukleony nie ulegają zmianom, energia wiązania rozpadającego się jądra różni się od energii wiązania produktów rozpadu. Właśnie ta różnica stanowi energię wydzieloną w trakcie rozpadu. Aby ją obliczyć, najłatwiej skorzystać z mas jąder i mas powstających cząstek, tak jak przedstawiamy w przykładzie na końcu lekcji.

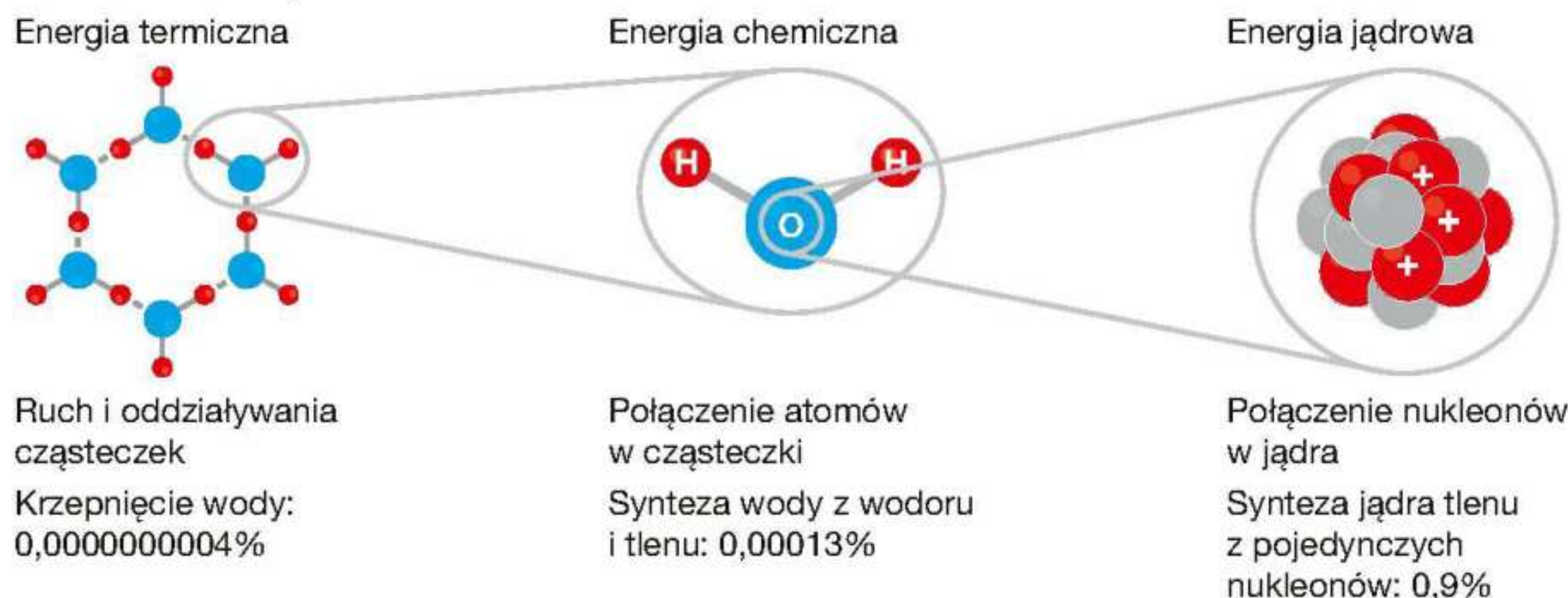
■ Porównanie energii – przemiany chemiczne a przemiany jądrowe

Energia jonizacji wodoru,
→ s. 177–184

Do wyrwania elektronu z atomu wodoru wystarcza kilkanaście elektronowoltów. Również w innych atomach energia wiązania elektronów walencyjnych nie przekracza kilkudziesięciu eV. Wszystkie reakcje chemiczne polegają na oddziaływaniu elektronów walencyjnych, więc także w ich przypadku energia jest rzędu 10 eV.

O ile procent zmienia się masa?

Im bardziej zagłębiamy się w strukturę materii, z tym większą energią reakcji mamy do czynienia i tym większa zmiana masy następuje w czasie reakcji. Orientacyjne wielkości przedstawiono na rysunku.



Natomiast w przemianach jądrowych energie są miliony razy większe. Widać to dobrze w przykładzie podanym po tej lekcji: w rozpadzie jednego jądra radu wydziela się energia 4,84 MeV.

Wkrótce przekonasz się, że jak na reakcje jądrowe to i tak stosunkowo niewiele.

W przemianach chemicznych możemy uzyskać energię od kilku do kilkudziesięciu eV na jeden atom, a w przemianach jądrowych – wiele milionów eV na atom.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



■ Przykład

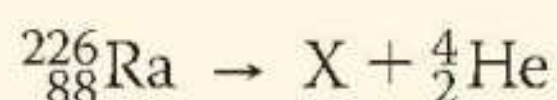
Oblicz energię wyzwoloną podczas rozpadu alfa radu-226:

- dla jednego atomu radu (wynik podaj w elektronowoltach),
- dla 1 g radu (wynik podaj w dżulach i kilowatogodzinach).

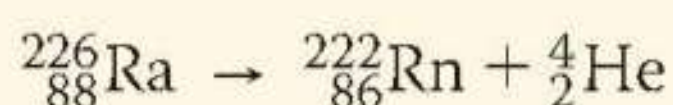
Rozwiązanie:

a) Zapisujemy równanie reakcji

Zacznijmy od zapisania równania reakcji rozpadu:



Z zasady zachowania ładunku i zasady zachowania liczby nukleonów możemy wyznaczyć liczbę atomową i liczbę masową powstającego izotopu.



Liczbę atomową radu znajdujemy w układzie okresowym.

Ponownie korzystamy z układu okresowego – pierwiastek o liczbie atomowej 86 to radon.



➔ Obliczamy zmianę masy

Teraz w tablicach sprawdzamy masy jąder występujących w tym równaniu:

$$m_{\text{Ra}} = 375,2439 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, m_{\text{Rn}} = 368,5905 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, m_{\text{He}} = 6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

W wyniku reakcji masa substancji zmniejszyła się o:

$$\Delta m = m_{\text{Ra}} - (m_{\text{Rn}} + m_{\text{He}}) = 0,00870 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 8,70 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

Obliczamy energię wyzwoloną w pojedynczym rozpadzie

Korzystamy ze wzoru:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

Po podstawieniu danych otrzymujemy wynik:

$$\Delta E = 7,83 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 4,89 \cdot 10^6 \text{ eV} = 4,89 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} \rightarrow \text{s. 236}$$

b) Obliczamy energię wyzwoloną w rozpadzie 1 g radu

Policzmy, jaką część masy atomu radu stanowi ubytek masy:

$$\frac{\Delta m}{m_{\text{Ra}}} = \frac{0,00870 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{375,2439 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 0,000023$$

Różnica masy między atomem a jądrem jest pomijalna, ale jeśli chcesz, możesz doliczyć masę 86 elektronów.

O taki sam ułamek zmienia się masa dowolnej ilości radu. Dla grama jest to różnica masy:

$$\Delta m_{1\text{g}} = 0,000023 \text{ g}$$

a więc wyzwolona energia wynosi:

$$\Delta E_{1\text{g}} = \Delta m_{1\text{g}} c^2 = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 2,1 \cdot 10^9 \text{ J} = 570 \text{ kWh}$$

Odpowiedź: Podczas rozpadu jednego jądra radu-226 wydzielą się energia 4,89 MeV, a w rozpadzie 1 g tego izotopu – energia 2,1 GJ, czyli 570 kWh.

Uwaga. Drugą część zadania można rozwiązać także mnożąc $7,74 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ przez liczbę atomów w gramie radu.

1. Oblicz energię spoczynkową, deficyt masy i energię wiązania dla jądra tlenu-16. Energię wiązania podaj w dżulach i w megaelektronowoltach.
2. **P** Oblicz energię wyzwoloną podczas rozpadu 1 g węgla-14. Pomiń energię unoszoną przez antyneutrino.
3. W laboratorium znajduje się próbka 10 g jodu-131. Ten izotop podlega rozpadowi beta minus. Ile energii wydzielą się z próbki w czasie 6 godzin?
Wskazówka. Oblicz najpierw, jaka część izotopu ulegnie w tym czasie rozpadowi.
4. Oblicz deficyt masy układu Ziemia–Księżyc, czyli różnicę między łączną masą Ziemi wraz z Księżycem a masą, jaką miałyby te ciała niebieskie, gdyby spoczywały w bardzo dużej odległości od siebie. Pamiętaj, aby uwzględnić zarówno energię potencjalną, jak i kinetyczną.
Następnie oblicz, jaką część masy układu Ziemia–Księżyc stanowi ten deficyt masy.
Wskazówka. Przypomnij sobie wiadomości z cz. 3 podręcznika, s. 56–61.



Ważne w tej lekcji:

- reakcja rozszczepienia,
- elektrownia jądrowa.

Przypomnij sobie:

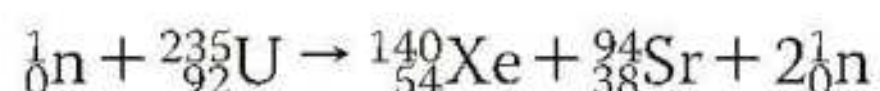
- Zmiana energii ΔE oraz zmiana masy Δm powiązane są wzorem: $\Delta E = \Delta mc^2$.
- W reakcjach jądrowych zmiana masy jest zauważalna, a zatem odpowiadająca jej energia jest bardzo duża.

W poprzedniej lekcji obliczyliśmy, jak wielka energia wydziela się przy rozpadzie promieniotwórczym. Okazuje się, że jeszcze bardziej wydajną reakcją jest rozszczepienie jąder uranu lub plutonu. Dlatego ta reakcja ma tak duże znaczenie praktyczne. Na niej opiera się działanie elektrowni jądrowych.

Elektrownie jądrowe nazywa się tradycyjnie także elektrowniami atomowymi.

Rozszczepienie jądra uranu

Jak przebiega taka reakcja? Skupimy się tu na uranie – dla plutonu zasada jest podobna. Wyobraź sobie, że w jądro uranu ^{235}U uderza neutron. Jest on pochłaniany, a powstałe jądro ^{236}U natychmiast rozpada się na dwa mniejsze jądra, czemu towarzyszy wyemitowanie dwóch lub trzech neutronów (patrz infografika → s. 198–199). Oto jedna z możliwych reakcji:

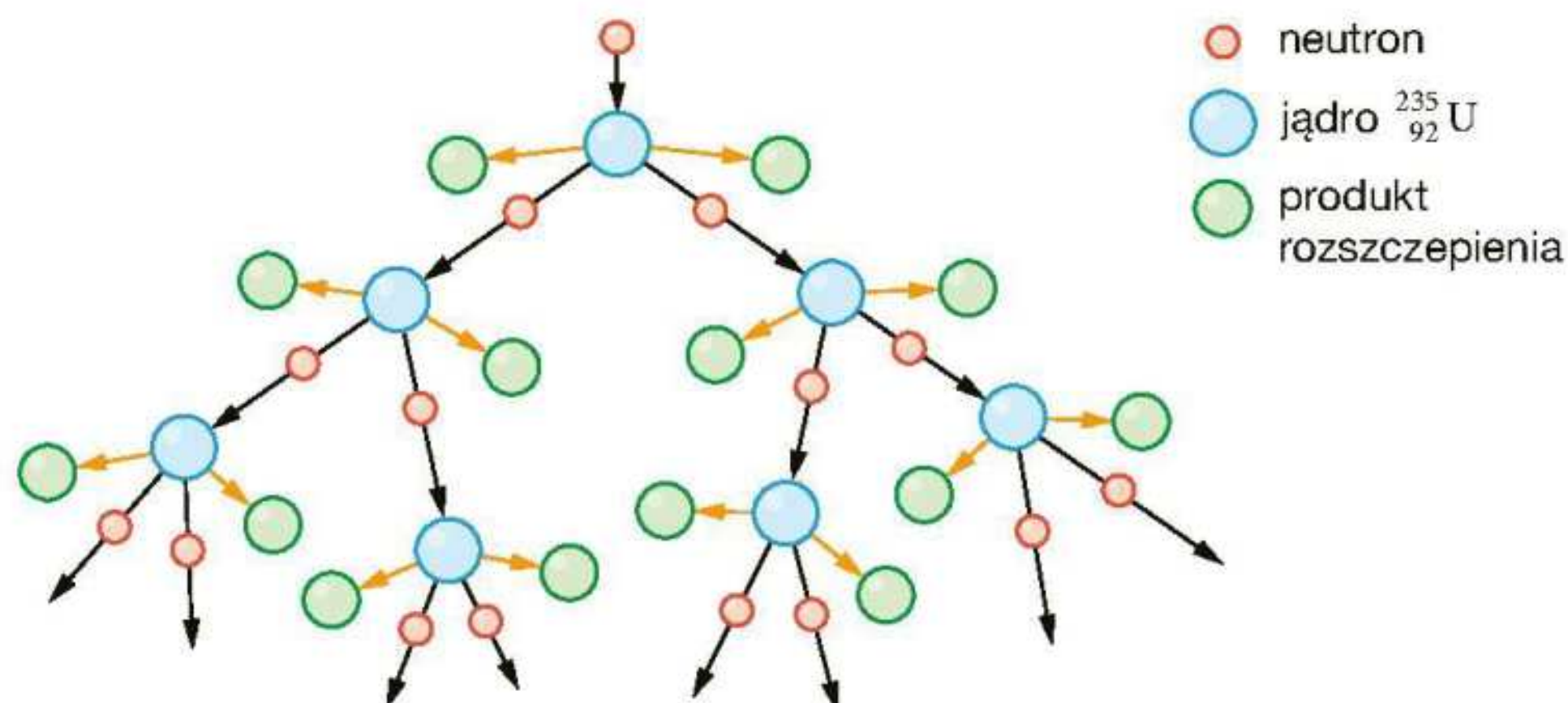


Każdy z neutronów powstających w tej reakcji może spowodować rozpad kolejnego jądra uranu (rys. 21.12 na następnej stronie). Tego typu reakcję nazywamy **reakcją łańcuchową**.



Rys. 21.11. W bombie jądrowej mamy do czynienia z niekontrolowaną reakcją jądrową. Na zdjęciu jeden z niewielu budynków w Hiroshimie częściowo ocalałych po wybuchu bomby jądrowej 6 sierpnia 1945 r.

Pierwszego neutronu, potrzebnego do zapoczątkowania reakcji, nie trzeba wytwarzać sztucznie. Niewielka liczba neutronów powstaje stale w wyniku naturalnego powolnego rozpadu uranu.



Rys. 21.12. Schemat reakcji łańcuchowej zachodzącej w bryle uranu $^{235}_{92}\text{U}$ (bez zachowania skali). Czarne strzałki przedstawiają tory ruchu neutronów, powodujących rozszczepienie kolejnych jąder uranu

■ Masa krytyczna i bomba jądrowa

Zatem aby zaszła reakcja łańcuchowa, wystarczy zgromadzić w jednym miejscu wystarczającą jego ilość. Nazywa się ją **masą krytyczną**.

Dla uranu ^{235}U uformowanego w kulę wynosi ona 52 kg. Gdy uranu jest mniej, zbyt duża liczba neutronów ucieka z bryły na zewnątrz, zanim zdąży uderzyć w kolejne jądro i wywołać reakcję rozszczepienia.

Niekontrolowana reakcja łańcuchowa zachodzi w bombie jądrowej (atomowej). Jej wybuch trwa zaledwie 10^{-8} s, ale może zniszczyć całe miasto.

F ■ Elektrownia jądrowa

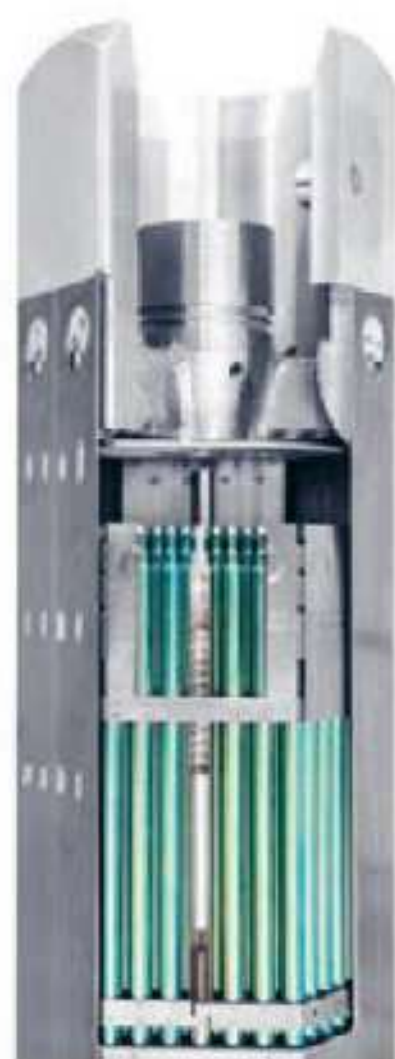
W przypadku elektrowni jądrowej zależy nam na tym, aby reakcja zachodziła wolniej i aby dało się ją kontrolować. Służy do tego kilka elementów jej konstrukcji.

Pręty paliwowe i kontrolne

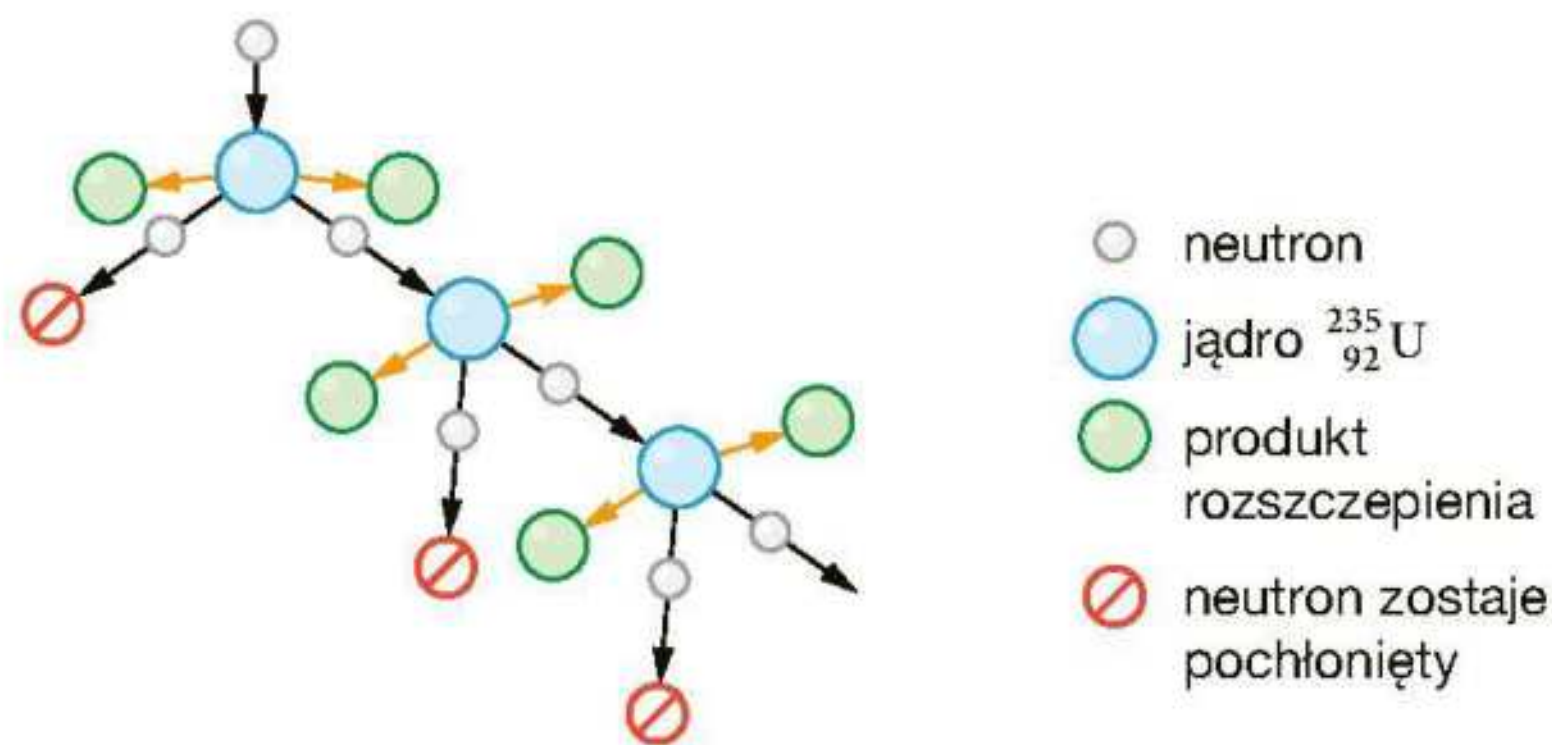
W tym celu w reaktorze jądrowym oprócz **prętów paliwowych** (rys. 21.13), zawierających uran lub pluton, umieszcza się **pręty kontrolne**, zawierające substancję pochłaniającą neutrony. Położenie tych prętów można kontrolować, wsuwając i wysuwając je z reaktora.

Jeżeli ustawiamy pręty paliwowe w takim położeniu, aby pochłanianie neutronów równoważyło ich przyrost wynikający z reakcji łańcuchowej, to reaktor pracuje ze stałą mocą.

Po całkowitym opuszczeniu prętów kontrolnych pochłanianie neutronów przeważa i reaktor zostaje wygaszony.



Rys. 21.13. Fragment wiązki paliwowej



Rys. 21.14. Schemat kontrolowanej reakcji jądrowej

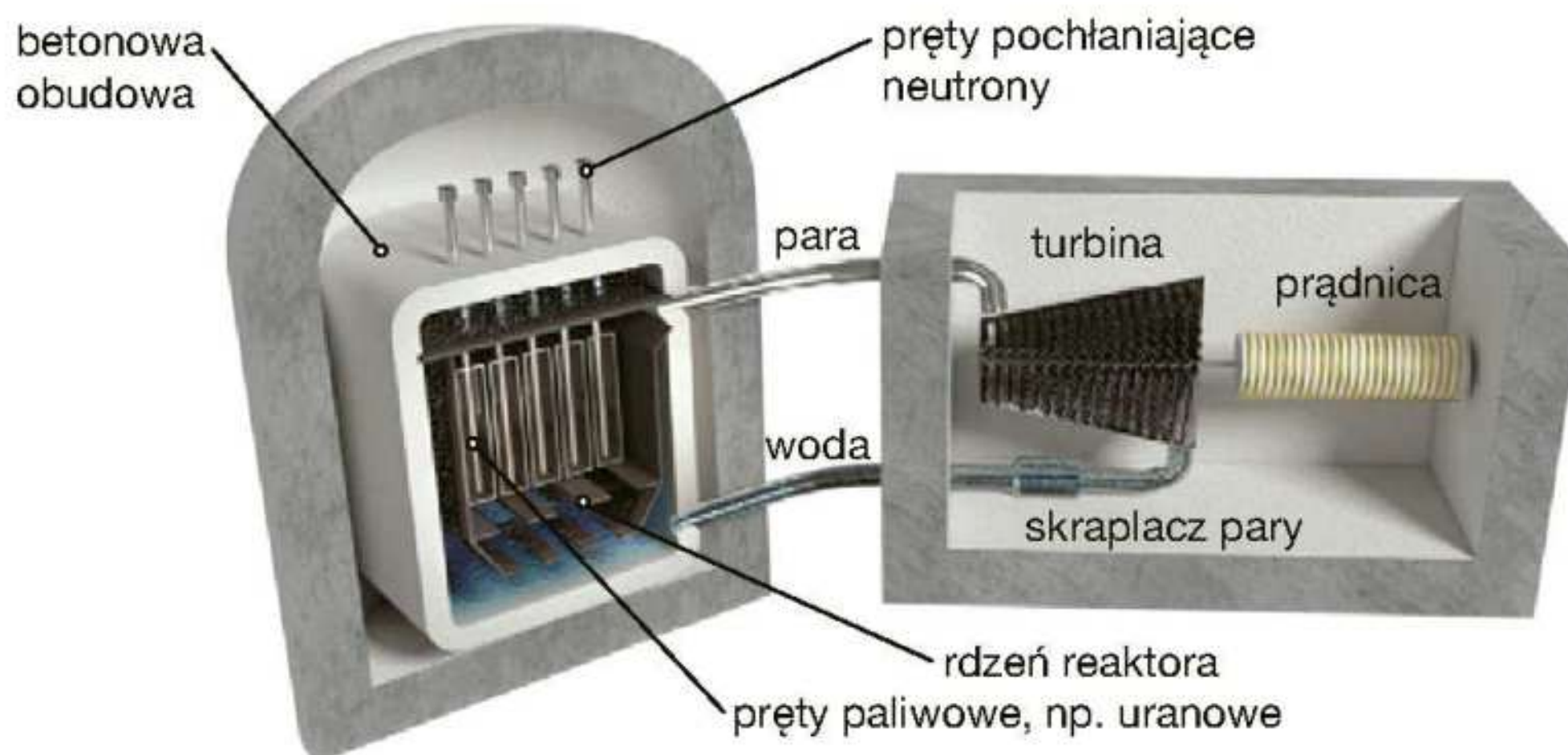
Moderator

Ważnym elementem reaktora jest także **moderator**, czyli substancja spowalniająca neutrony. Okazuje się, że neutrony powstające w reakcji łańcuchowej na ogół są zbyt szybkie, aby zostać pochłonięte przez jądra uranu.

Dopiero po zderzeniu z jądrem innej substancji, np. wodoru, tracą znaczną część energii kinetycznej, dzięki czemu zwiększa się prawdopodobieństwo pochłonięcia ich przez uran.

Jako moderatora najczęściej używa się wody ze względu na zawarty w niej wodór.

Rozwiązanie zadania 1. pomoże ci zrozumieć, dlaczego w zderzeniu z jądrem wodoru neutron traci szczególnie dużo energii.



Rys. 21.15. Uproszczony schemat elektrowni jądrowej. Dziś stosuje się konstrukcje bardziej skomplikowane, ale dzięki temu – bezpieczniejsze

Warto dodać, że elektrownia jądrowa jest elektrownią cieplną, podobnie jak węglowa. W obu przypadkach ciepło służy do otrzymania gorącej pary, która obraca turbinę napędzającą prądnicę.

Różnicą jest natomiast sposób uzyskiwania ciepła: w elektrowni jądrowej paliwo się rozgrzewa, ponieważ produkty rozpadu mają dużą energię kinetyczną.

ROZSZCZEPIENIE JĄDRA ATOMOWEGO

Rozszczepienie jądra atomowego to reakcja jądrowa polegająca na przemianie jednego ciężkiego jądra atomu w dwa (rzadziej w więcej) mniejsze jądra o zbliżonych masach. Po przyłączeniu elektronów stają się one atomami lżejszych pierwiastków. Reakcja rozszczepienia może zajść samorzutnie lub w sposób wymuszony: na skutek uderzenia neutronu, protonu lub innej cząstki.

PRZEBIEG PRZYKŁADOWEJ WYMUSZONEJ REAKCJI ROZSZCZEPIENIA



1 Neutron uderza w jądro atomowe ciężkiego pierwiastka, np. uranu-235.

2 Po wchłonięciu neutronu jądro staje się niestabilne.

3 Jądro dzieli się na dwa mniejsze podobnie, jak kropla wody.



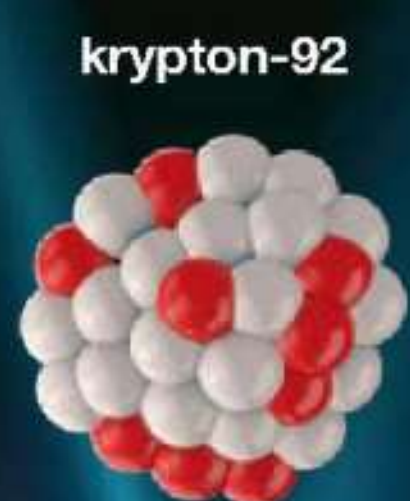
Reakcja łańcuchowa

Neutrony emitowane przez rozszczepione jądro zderzają się z kolejnymi jądrami i w sprzyjających warunkach powodują kolejne rozszczepienia – takie zjawisko nazywamy reakcją łańcuchową. Wyemitowany neutron z większym prawdopodobieństwem spowoduje kolejne rozszczepienie, jeśli będzie miał odpowiednio małą prędkość: ok. $2,2 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Tymczasem bezpośrednio po rozszczepieniu leci z prędkością rzędu $20\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Jeśli próbka materiału rozszczepialnego będzie odpowiednio duża, zanim neutrony z niej uciekną, zdążą w trakcie zderzeń wytracić energię, a prawdopodobieństwo, że spowodują kolejne rozszczepienia, wzrośnie.



ENERGIA W ROZSZCZEPIENIU U-235

Z rozszczepienia jednego jądra uranu powstaje ok. 200 MeV energii. Energia ta pochodzi ze zmiany energii wiązania, zgodnie ze wzorem $E = \Delta mc^2$ (łączna masa produktów po rozszczepieniu jest mniejsza niż masa jądra przed rozszczepieniem). Dla porównania, ze spalania 1 atomu węgla otrzymujemy energię 4 eV, czyli 50 mln razy mniej.



4 Powstają lżejsze jądra, np. kryptonu i baru, czemu towarzyszy emisja od 1 do 3 neutronów. W tej reakcji wyzwala się bardzo dużo energii.

Powstałe neutrony oddalają się w różnych kierunkach z bardzo dużą prędkością.



Jądra powstałe z rozszczepienia są nietrwałe i ulegają dalszym rozpadom promieniotwórczym β^- .

Naturalny reaktor jądrowy

Pierwszy „reaktor jądrowy” powstał ok. 2 mld lat temu bez udziału człowieka w dzisiejszym Gabonie, w Afryce. W złożach uranu rozpoczęła się reakcja łańcuchowa, podtrzymywana przez ok. 150 mln lat w sposób samorzutny.





A to ciekawe

Czy elektrownia jądrowa może zmienić się w bombę jądrową?

Naturalnie występujący uran zawiera poniżej 1% użytecznego izotopu $^{235}_{92}\text{U}$.

W paliwie dla elektrowni jest go ok. 3%. Tymczasem do wybuchu bomby jądrowej jest potrzebny uran o zawartości kilkudziesięciu procent $^{235}_{92}\text{U}$.

Dlatego nie jest możliwe, aby elektrownia wybuchła jak bomba jądrowa. Mimo to ten typ elektrowni wymaga zabezpieczeń, ponieważ w wypadku katastrofy może dojść do skażenia środowiska substancjami promieniotwórczymi.



Rys. 21.16. Zarówno energia z wiatru, jak i ze Słońca zależą od warunków zewnętrznych, a zapotrzebowanie na energię jest ciągłe

F ■ Zalety i wady energetyki jądrowej

Elektrownie jądrowe mają wiele zalet. Najważniejszą jest brak emisji gazów cieplarnianych. W tej chwili energetyka jądrowa stanowi najlepszą możliwość rozwiązania kryzysu klimatycznego, ponieważ same odnawialne źródła energii nie zaspokoją potrzeb ludzkości (rys. 21.16).

Ponadto dzięki elektrowniom jądrowym można uniknąć konieczności wydobywania węgla, która wiąże się z dużym obciążeniem dla środowiska: zapadliskami, szkodami górniczymi (m.in. pękające domy i jezdnie), hałdami itd. Uran także trzeba wydobywać spod ziemi, ale w znacznie mniejszych ilościach.

Ważnym problemem energetyki jądrowej jest składowanie odpadów promieniotwórczych, czyli zużytych prętów paliwowych. Początkowo przechowuje się je na terenie elektrowni, a po rozpadzie izotopów o krótkim okresie połowicznego rozpadu pozostałą część zabezpiecza się np. w tunelach wyżłobionych w górach.

F ■ Inne zastosowania reaktorów



Rys. 21.17. Reaktor Maria

Nie wszystkie reaktory służą wyłącznie do uzyskiwania energii. Głównym celem niektórych z nich, np. polskiego reaktora Maria w Świerku koło Warszawy, jest wytwarzanie izotopów potrzebnych w medycynie i przemyśle. Różnią się one od reaktorów w elektrowniach jądrowych.

Choć nie buduje się ich z myślą o produkcji energii, to w procesie wytwarzania różnych izotopów wydziela się jej duża ilość, którą także można wykorzystać.

F ■ Katastrofy jądrowe

Mimo licznych zalet energetyka jądrowa ma swoich przeciwników. Podstawowym źródłem niechęci do niej jest obawa przed możliwymi skutkami katastrofy w takiej elektrowni.

Do tej pory taka sytuacja miała miejsce dwa razy.

1. Czarnobyl

W 1986 r. w elektrowni w Czarnobylu w Związku Radzieckim (obecnie w Ukrainie) na skutek licznych przekroczeń zasad bezpieczeństwa nastąpił wybuch reaktora. Chociaż nie był to wybuch jądrowy, ale zerwanie obudowy przez parę wodną pod ciśnieniem, jednak doszło do skażenia promieniotwórczego znacznej części Europy.

Władze radzieckie informowały oficjalnie o 31 ofiarach śmiertelnych, jednak niezależne źródła szacują ich liczbę na ok. 4000. Dokładne określenie tej liczby nie jest możliwe, ponieważ w większości przypadków przyczyną zgonów były nowotwory. Nie zawsze da się ocenić, czy wywołało je promieniowanie – możemy tylko stwierdzić, że liczba zgonów w populacji znacząco się zwiększyła.

2. Fukushima

Inna katastrofa elektrowni jądrowej miała miejsce w Fukushimie w Japonii w 2011 r. Jej przyczyną była wyjątkowo wysoka fala tsunami, która zalała elektrownię. W efekcie katastrofy doszło do skażenia środowiska, a wiele osób musiało opuścić swoje domy.

Bezpośrednich ofiar śmiertelnych nie było, ale kilkadziesiąt osób zmarło na skutek problemów przy ewakuacji. Jednocześnie w wyniku samego tsunami i trzęsienia ziemi będącego jego przyczyną zginęło kilkadziesiąt tysięcy osób.



Rys. 21.18. Nowa osłona (sarkofag) czwartego reaktora w Czarnobylu

Tsunami,
podręcznik cz. 2 → s. 343

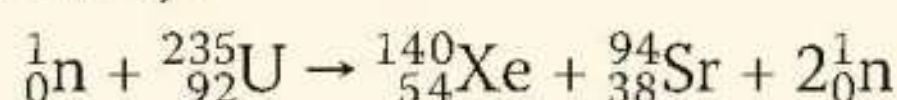
Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



■ Przykład

Oblicz energię wyzwoloną w reakcji:



- a) w elektronowoltach na jeden atom uranu,
- b) w kilowatogodzinach na 1 g paliwa zawierającego 3% uranu-235.

Rozwiązanie:

W tablicach znajdujemy masy poszczególnych substratów i produktów: $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ kg, $m_U = 390,2158 \cdot 10^{-27}$ kg, $m_{\text{Xe}} = 232,2962 \cdot 10^{-27}$ kg, $m_{\text{Sr}} = 155,9155 \cdot 10^{-27}$ kg.

- a) Zmiana masy w reakcji wynosi:

$$\Delta m = (1,6749 + 390,2158 - 232,2962 - 155,9155 - 2 \cdot 1,6749) \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 0,3292 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\Delta m = 3,292 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

Tej zmianie odpowiada energia:

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 3,292 \cdot 10^{-28} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 2,96 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 1,85 \cdot 10^8 \text{ eV} = 185 \text{ MeV}$$

- b) W gramie paliwa mamy 0,03 g uranu-235, czyli:

$$n = \frac{3 \cdot 10^{-5} \text{ kg}}{390 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 7,7 \cdot 10^{19} \text{ atomów}$$



➔ W takim razie energia, jaką można uzyskać z tego paliwa, wynosi:

$$E_c = nE = 7,7 \cdot 10^{19} \cdot 2,96 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 2,28 \text{ GJ} = 630 \text{ kWh}$$

Odpowiedź: Energia wyzwolona w reakcji na jedno jądro uranu wynosi 185 MeV, a energia wyzwolona przez 1 g paliwa o wzbogaceniu 3% to 630 kWh.

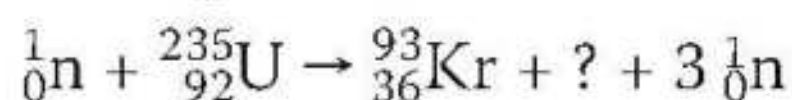
Uwaga. Wyzwolenie 630 kWh energii w reaktorze elektrowni nie oznacza, że do sieci energetycznej trafi 630 kWh energii elektrycznej – na każdym z etapów przemian energii następują pewne straty. Ponadto uran rozpada się w wielu różnych reakcjach o różnej wydajności. Wynik daje jednak przynajmniej przybliżone wyobrażenie o wydajności reakcji jądrowych.

1. Aby wyobrazić sobie straty energii neutronu przy jego zderzeniu z jądrem wodoru lub węgla, oblicz, jaką część energii straci piłeczka o masie m w zderzeniu centralnym sprężystym ze spoczywającą początkowo piłeczką o masie M .

a) $M = 0,998m$ b) $M = 12m$

Uwaga. Przypomnijmy, że w zderzeniu sprężystym energia kinetyczna jest zachowana, a więc energia stracona przez jedną piłeczkę jest oddawana drugiej piłeczce. Więcej – patrz podręcznik cz. 1, s. 223–230.

2. **P** Jedną z reakcji rozszczepienia uranu zachodzących w reaktorach jądrowych jest rozpad zgodnie z następującym równaniem, w którym znak zapytania zastąpiono pewnym izotopem:



- a) Jaki izotop kryje się pod znakiem zapytania?
- b) Oblicz energię powstającą w tej reakcji. Wyraż ją w elektronowoltach na jeden atom ${}^{235}\text{U}$.
- c) Jaką energię możemy uzyskać w tej reakcji z 1 g uranu ${}^{235}\text{U}$? Wyraż ją w dżulach i w kilowatogodzinach.

3. Innym rodzajem paliwa jądrowego jest pluton ${}_{94}^{239}\text{Pu}$. W przyrodzie występuje tylko w śladowych ilościach, więc jest wytwarzany sztucznie z uranu ${}_{92}^{238}\text{U}$ przez bombardowanie go neutronami. Po pochłonięciu neutronu przez uran powstaje cięższy izotop uranu, który następnie ulega rozpadowi beta, a produkt tego rozpadu znów ulega rozpadowi beta. Zapisz równania tych reakcji.

4. Pierwszy na świecie „reaktor jądrowy” powstał ok. 2 mld lat temu (patrz s. 199 na dole). Oczywiście nie zbudowali go ludzie, ponieważ nie było ich jeszcze na Ziemi. Reaktor ten zaczął działać samorzutnie, ponieważ w tamtych czasach w naturalnie występującym uranie było więcej izotopu ${}^{235}\text{U}$. Ma on czas połowicznego rozpadu krótszy niż ${}^{238}\text{U}$, dlatego jego zawartość w złożach uranu stopniowo się zmniejszała i obecnie wynosi 0,7%.

Wykaż, że przed 2 mld lat izotop ${}^{235}\text{U}$ stanowił ponad 3% masy uranu.

Wskazówka. Zwróć uwagę, że rozpadają się oba izotopy.

21.6

Energia syntezy termojądrowej



Ważne w tej lekcji:

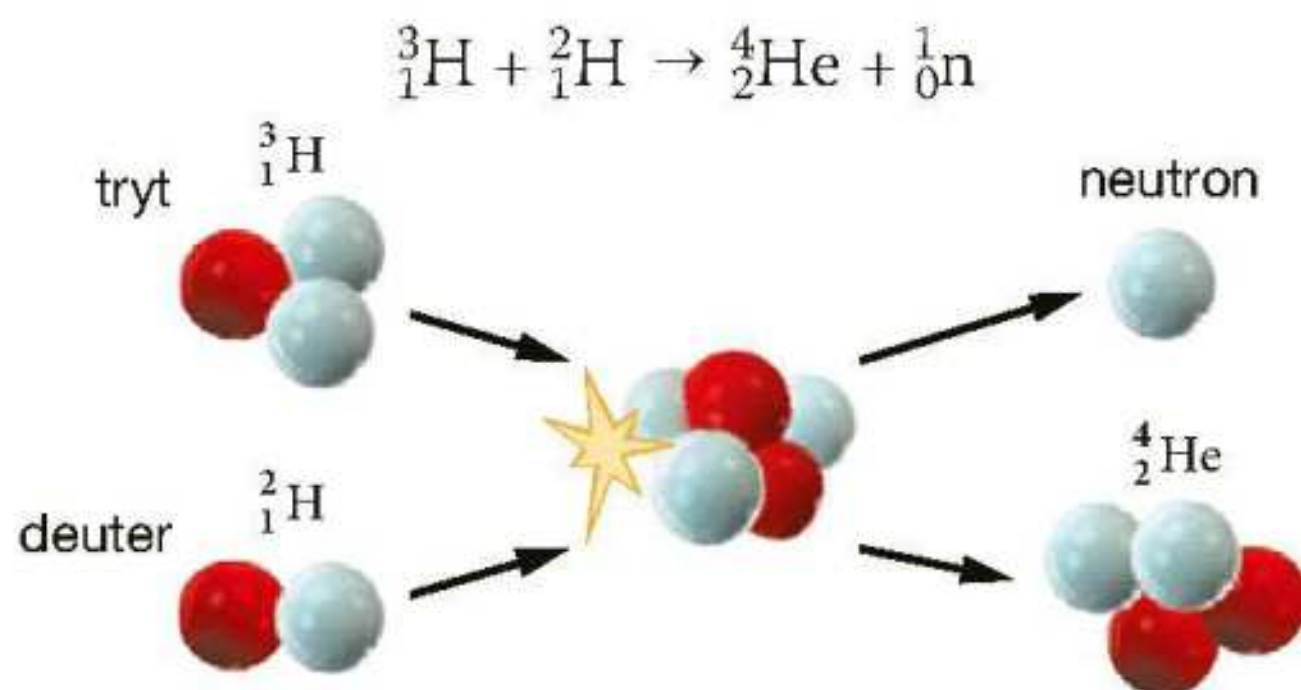
- reakcja syntezy,
- obliczanie energii,
- źródło energii Słońca,
- problemy w budowie elektrowni termojądrowej.

Przypomnij sobie:

- Jądro atomowe ma mniejszą masę niż suma mas jego składników.
- Ta różnica odpowiada energii wiązania zgodnie ze wzorem $E = mc^2$.

Synteza termojądrowa

Z ciężkich pierwiastków energię uzyskujemy w procesie rozpadu jąder. W przypadku pierwiastków lekkich jest odwrotnie – energia wydzielą się, gdy jądra się łączą. Podstawowym przykładem takiej syntezy jest przemiana wodoru w hel, np.:



Rys. 21.20. Reakcja syntezy jąder trytu i deuteru

Jak widzisz, używamy do niej cięższych izotopów wodoru: ${}^2\text{H}$, zwanego deuterem, oraz ${}^3\text{H}$, zwanego trytem.



Rys. 21.19. Na atolu Eniwetak 1 listopada 1952 r. przeprowadzono pierwszy test bomby termojądrowej. Jednym z jej twórców był polski matematyk Stanisław Ulam

Tabela 21.1. Porównanie elektrowni węglowej, jądrowej i termojądrowej

	Elektrownia węglowa	Elektrownia jądrowa	Elektrownia termojądrowa
Zasada działania	Spalanie węgla	Rozszczepianie jąder ciężkich pierwiastków (jak uran, pluton)	Łączenie się jąder lekkich pierwiastków (wodoru w hel)
Wydajność (energia elektryczna na kilogram paliwa)	3 kWh (węgiel kamienny) 1 kWh (węgiel brunatny)	40 000 kWh (na 1 kg naturalnego uranu)	> 1 mln kWh
Dostępność paliwa	Występuje w niektórych krajach. W Polsce tanie w eksploatacji pokłady węgla zostały wyczerpane	Tylko w niektórych krajach znajdują się rudy uranu. W Polsce występują, ale są trudno dostępne	Deuter można tanio uzyskiwać z wody morskiej, tryt wytwarzać z litu. Są one dostępne dla większości państw
Produkty reakcji	Duże ilości odpadów składowanych na hałdach	Wiele izotopów, także o długim czasie rozpadu	Stabilny izotop helu, nieszkodliwy dla środowiska
Liczba działających elektrowni na świecie	Ponad 6000	Ponad 400	0

Z jednego kilograma mieszanki deuteru i trytu można otrzymać 338 TJ energii, czyli ponad 94 GWh.

Synteza termojądrowa jest jeszcze wydajniejszym źródłem energii niż rozpad pierwiastków ciężkich.

Niestety, choć umiemy wywołać ją w sposób niekontrolowany w bombie termojądrowej (wodorowej), to nie udało się jeszcze zbudować elektrowni termojądrowej mimo trwających od kilkudziesięciu lat prac.

■ Problemy z syntezą termojądrową

Wysoka temperatura to wysoka energia i duża prędkość cząstek.

Przemiana wodoru w hel zachodzi w ogromnej temperaturze. Jest ona niezbędna, aby dodatnio naładowane jądra wodoru przewycięły odpychanie elektryczne i zbliżyły się do siebie na odległość, w której siły jądrowe przeważają nad elektrycznymi.

W przypadku bomby termojądrowej używa się zapalnika, którym jest... bomba jądrowa. W przypadku elektrowni nie jest to możliwe. Potrzebną energię można dostarczyć jądrom wodoru m.in. za pomocą lasera. Problemem jest jednak utrzymanie plazmy rozgrzanej do milionów stopni bez kontaktu ze ścianami reaktora, aby nie uległy one zniszczeniu.

F ■ Tokamak

Proponowanym rozwiązaniem problemu izolacji plazmy od otoczenia jest umieszczenie jej w próżni w polu magnetycznym.

Jak pamiętasz z części 3. podręcznika, wewnątrz długiej cewki podłączonej do źródła napięcia występuje jednorodne pole magnetyczne o liniach równoległych do osi cewki.

Równoważnik trotylowy

Kiedyś jako jednostkę mocy wprowadzono konia mechanicznego, ponieważ nabywca maszyny parowej chciał wiedzieć, ile koni zostanie zastąpionych przez nowe urządzenie. Podobnie stało się z energią broni jądrowej: wojskowi chcieli wiedzieć, ile ton trotylu (trójnitoluenu, TNT) zastąpi nowa bomba, więc energię zaczęto wyrażać w tonach trotylu.

W przypadku bomb jądrowych opartych na rozszczepieniu zwykle jako jednostki używa się kiloton TNT (kt TNT), a w przypadku bomb termojądrowych (wodorowych) – megaton TNT (Mt TNT).

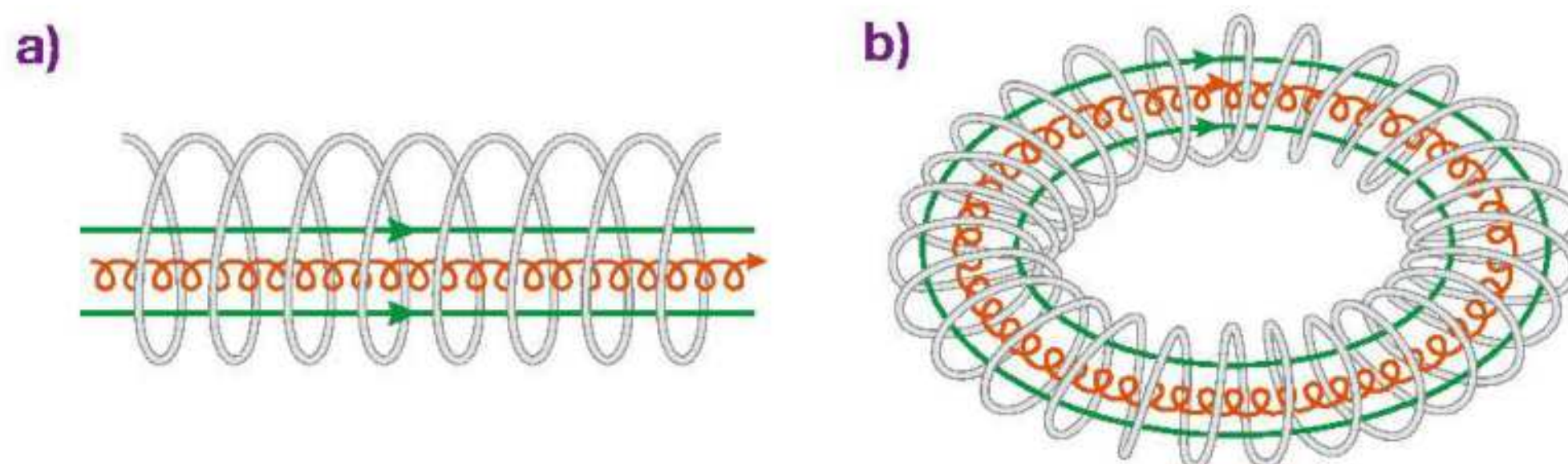
$$1 \text{ t TNT} = 1 \text{ mln kcal} = 4,2 \cdot 10^9 \text{ J} = 4,2 \text{ GJ}$$

W wybuchu bomby jądrowej Little Boy, zrzuconej na Hiroshimę, została wyzwolona energia ok. 15 kt TNT. Największa bomba wodorowa, radziecka Car Bomba (słowo *car* tradycyjnie dodawano do nazw różnych wielkich konstrukcji), eksplodowała z energią ok. 50 Mt TNT.

W takim polu cząstki naładowane poruszają się po liniach śrubowych, co zapobiega ich uderzeniu o ścianki (rys. 21.21a). Zjawisko jest podobne do ruchu naładowanych cząstek w polu magnetycznym Ziemi, powodującym znoszenie ich ku biegunom.

Opisany układ powodowałby jednak uderzanie cząstek plazmy w denka rury. Aby tego uniknąć, możemy zwinąć rurę w torus (obwarzanek), a wtedy plazma będzie w nim krążyć (rys. 21.21b).

Ruch w polu magnetycznym, podręcznik cz. 3 → s. 254

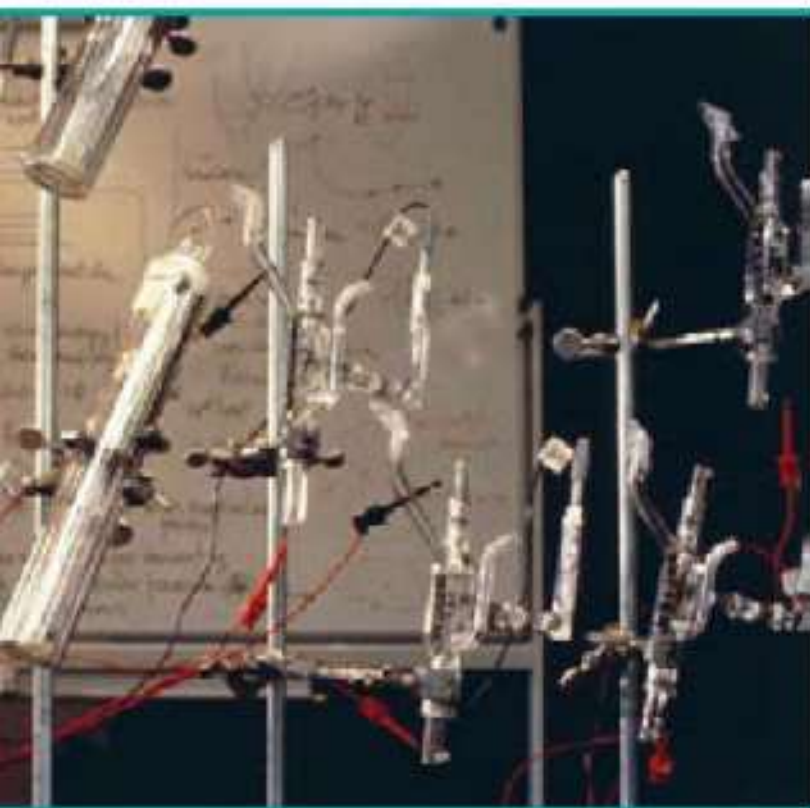


Rys. 21.21. Plazma w długiej zwojnicy (a) i w tokamaku (b). Zielone linie oznaczają linie pola magnetycznego, a czerwone – tor naładowanej cząstki

Problemem jest fakt, że zwoje po wewnętrznej stronie torusa będą ułożone w mniejszych odstępach niż po zewnętrznej, więc pole nie będzie jednorodne. Możemy jednak temu zaradzić przez zastosowanie dodatkowych magnesów. W ten sposób powstaje **tokamak**. Jego nazwa jest skrótem od rosyjskiego wyrażenia oznaczającego toroidalną komorę z cewkami magnetycznymi.

Toroidalny – w kształcie torusa (obwarzanka)

Niestety, choć tokamaki są budowane od lat 50. XX w., wciąż energia potrzebna do ich zasilania (zwłaszcza do podgrzewania plazmy) jest większa niż energia otrzymywana w reakcji. Urządzenie służy więc wyłącznie do badań i nie może być jeszcze zastosowane jako źródło energii.



A to ciekawe

W 1989 r. wydawało się przez chwilę, że reakcję syntezy termojądrowej można przeprowadzić także w temperaturze pokojowej. Mieli tego dokonać dwaj amerykańscy chemicy. Niestety, gdy ich eksperyment próbowano powtórzyć w innych laboratoriach, nikomu się to nie udało.

Nie oznacza to, że niedoszli odkrywcy byli oszustami – prawdopodobnie błędnie zinterpretowali wyniki swoich doświadczeń. Właśnie dlatego w fizyce i innych naukach przyrodniczych zanim doniesienie o nowym odkryciu zostanie przyjęte, jest dokładnie sprawdzane przez innych uczonych.

Iter to jednocześnie łacińskie słowo oznaczające drogę, ścieżkę.

F ■ Tokamak ITER

Duże nadzieje wiąże się z ogromnym tokamakiem ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), budowanym na południu Francji (rys. 21.22 oraz zdjęcie na górze s. 203). Ma on zacząć działać w 2039 r. i powinien produkować dziesięć razy więcej energii niż potrzeba do jego zasilania.

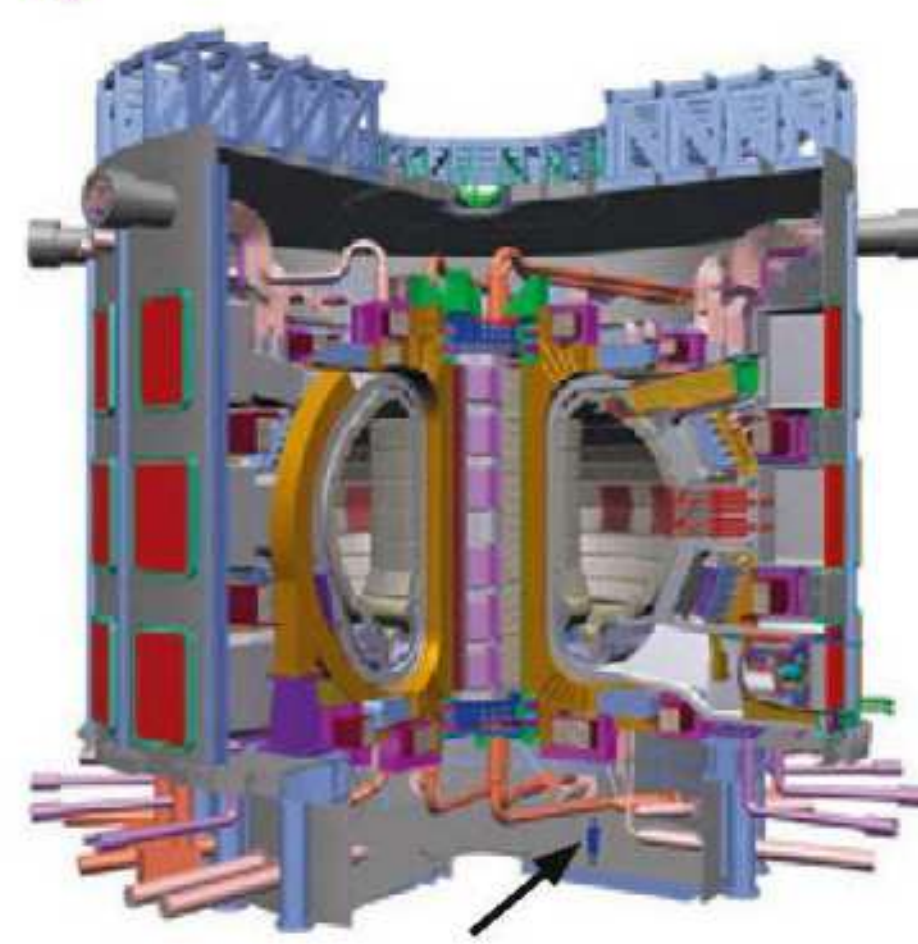
Będzie to jednak, jak sama nazwa wskazuje, dopiero reaktor eksperymentalny, który pozwoli wykonać doświadczenia niezbędne do budowy komercyjnie dostępnych reaktorów termojądrowych dla elektrowni.

Nie mamy więc dość czasu, aby czekać z transformacją energetyczną na budowę elektrowni termojądrowych.

a)



b)



Rys. 21.22. a) plac budowy ITER (zdjęcie z 2022 r.), b) rysunek tokamaka ITER – zwróć uwagę na niebieską sylwetkę człowieka, umieszczoną w celu pokazania skali

■ Dlaczego Słońce świeci

Na podstawie energii promieniowania dochodzącego od Słońca do Ziemi można obliczyć całkowitą moc Słońca (patrz zad. 2., s. 241). Podobne szacunki robiono już w XIX w., jednak ich wyniki były trudne do wyjaśnienia. Nie znano źródła energii tak wydajnego, aby mogło zasilać gwiazdę. Wiedzano jedynie, że gdyby na Słońcu spalał się węgiel, dawno zabrakłoby paliwa.

Znano co prawda zjawisko bardziej wydajne od przemian chemicznych: wyzwalamie energii uzyskanej kosztem grawitacyjnego zapadania się Słońca, czyli kosztem energii potencjalnej oddziaływań grawitacyjnych między jego fragmentami. Jednak i ono nie pozwalało wyjaśnić całej mocy promieniowania słonecznego.

Dopiero odkrycia z dziedziny fizyki jądrowej pozwoliły rozwiązać ten problem.

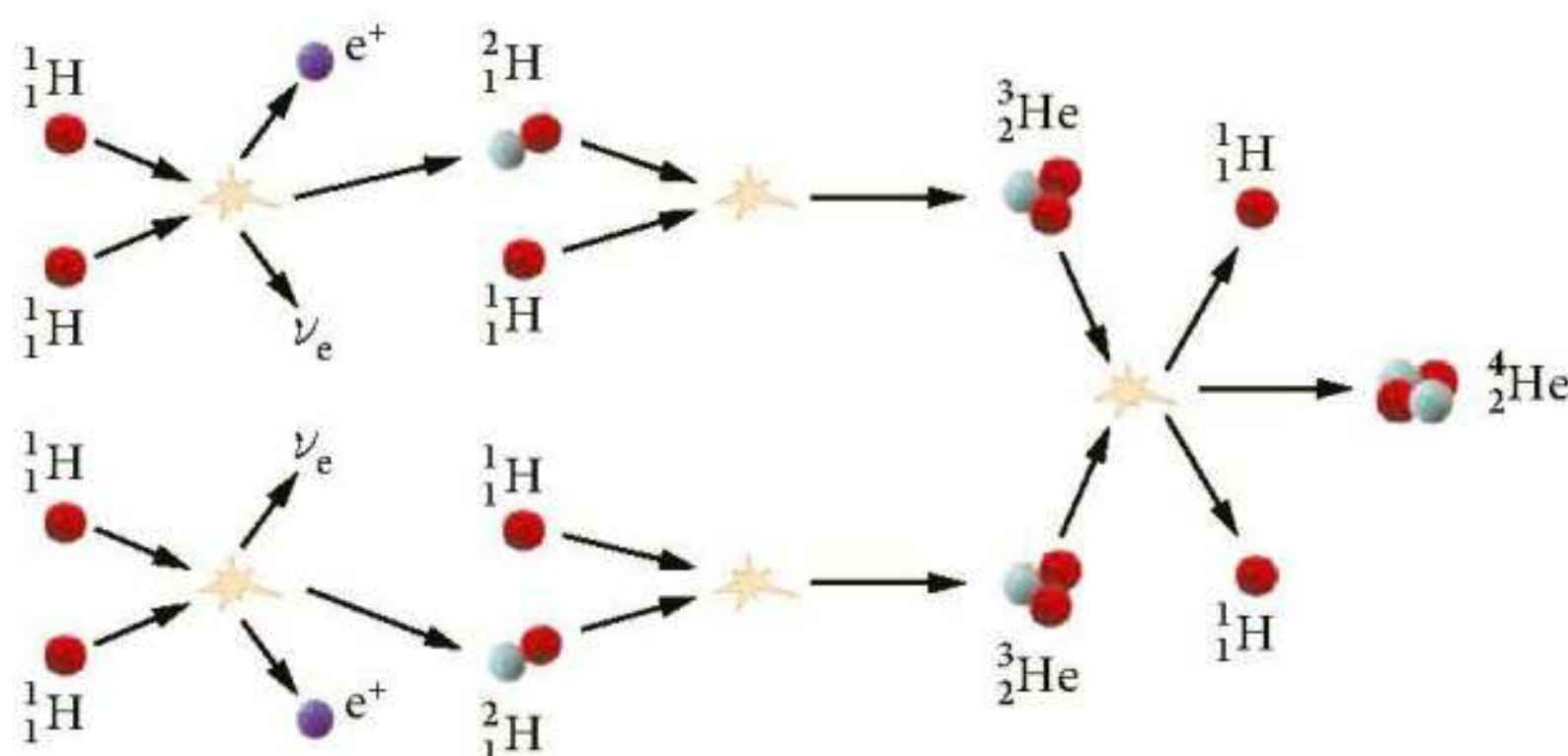
Słońce i inne gwiazdy świecą dzięki zachodzącym w nich przemianom termojądrowym.

Jedną z przemian termojądrowych jest łączenie się jąder wodoru w jądra helu, a więc reakcja podobna do reakcji zachodzącej w bombie termojądrowej (wodorowej) i w przyszłych elektrowniach termojądrowych.

Jest to główne źródło energii większości gwiazd przez większość czasu ich istnienia.

Jednak w miarę upływu czasu Słońce będzie się zmieniać. Dalszymi losami naszej i innych gwiazd zajmiemy się w następnej lekcji.

Schemat reakcji zachodzącej na Słońcu przedstawiono na rysunku 21.23.



Rys. 21.23. Uproszczony schemat syntezy wodoru w hel

Rozpad beta plus:
 $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$, gdzie
 e^+ to pozyton, czyli
 antyelektron, a ν_e to
 neutrino elektronowe.

Powstałe w reakcji
 pozytony anihilują
 z napotkanymi
 elektronami, co jeszcze
 zwiększa wydzieloną
 energię.

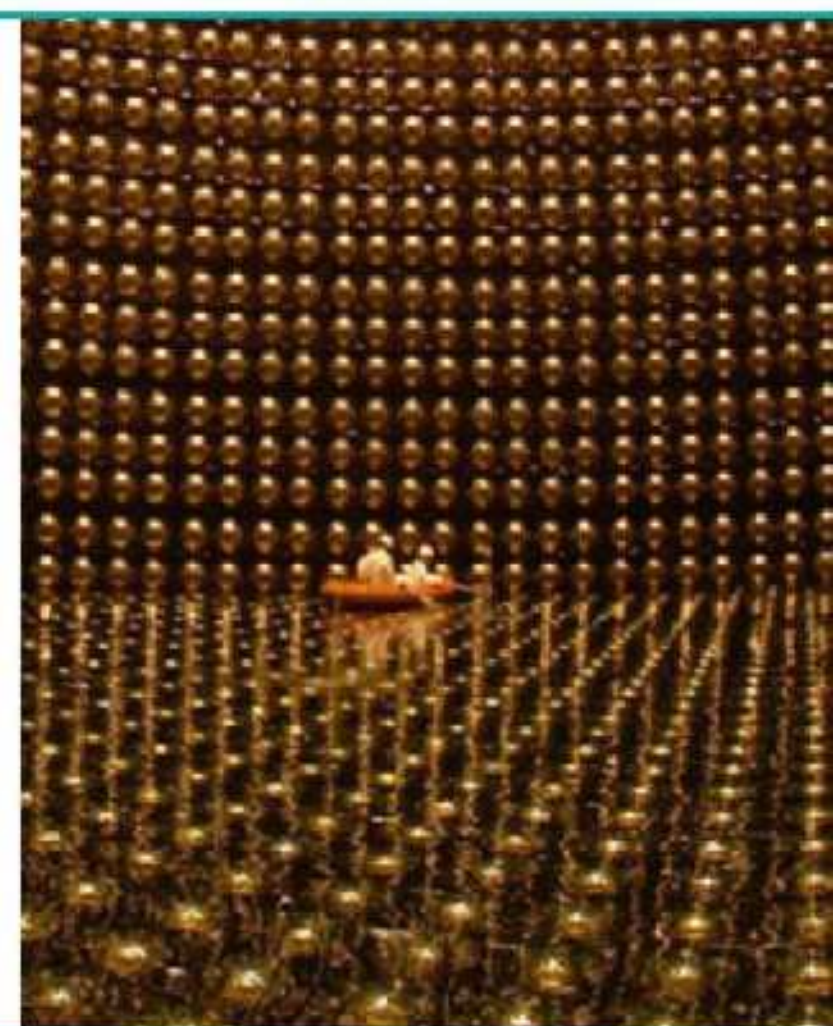
A to ciekawe

Gdy dwa protony łączą się w jądro deuteru, jeden z nich zmienia się w neutron, podobnie jak w przemianie beta plus. I podobnie jak w tej przemianie, emitowane jest neutrino. Strumień słonecznych neutrin przechodzi stale przez Ziemię i nas samych, są one jednak tak przenikliwe, że nie tylko są bezpieczne, lecz także niezwykle trudne do wykrycia.

Japoński detektor tych cząstek o nazwie Super Kamiokande zawiera 50 000 ton wody i wykrywa promieniowanie powstające, gdy neutrino trafi w którykolwiek z elektronów lub jąder wszystkich atomów wodoru i tlenu.

Mimo tak ogromnej ilości wody zdarza się to średnio raz na godzinę.

Na zdjęciu widzisz obsługę detektora, która po częściowym spuszczeniu wody pływa pontonem i sprawdza działanie urządzenia.





■ Przykład

Moc promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez Słońce wynosi $P = 3,8 \cdot 10^{26}$ W. Jaka ilość wodoru ulega przemianie w hel w ciągu $t = 1$ s? Załóż, że na neutrino przypada 2% powstającej energii. Potrzebne masy odczytaj z tablic na końcu podręcznika.

Dane: $P = 3,8 \cdot 10^{26}$ W – moc promieniowania Słońca, $t = 1$ s – czas promieniowania

Szukane: m – masa wodoru, który uległ przemianie w ciągu 1 s

Rozwiązanie:

W pojedynczej reakcji cztery protony (czyli cztery jądra wodoru) zamieniają się w jądro helu. Dodatkowo dwa elektrony anihilują z pozytonami powstającymi w tej reakcji. Powstaje wtedy energia:

$$E_1 = \Delta mc^2 = (4m_p - m_{\text{He}} + 2m_e)c^2$$

$$E_1 = (4 \cdot 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} - 6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg} + 2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}) \cdot (3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 5,75 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

Całkowita energia wydzielona przez Słońce w czasie 1 s to $E = P \cdot t = 3,8 \cdot 10^{26}$ J. Jest ona równa energii wydzielonej w N reakcjach po odjęciu energii przypadającej na neutrino:

$$E = N \cdot 0,98 \cdot E_1$$

Stąd mamy:

$$N = \frac{E}{0,98E_1} = 6,7 \cdot 10^{37}$$

W każdej z N reakcji biorą udział 4 jądra wodoru, a więc łączna masa wodoru wynosi:

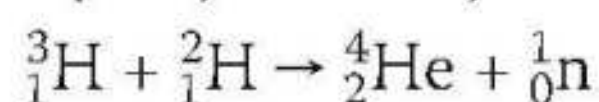
$$m = 4 \cdot N \cdot m_{\text{H}} = 4,5 \cdot 10^{11} \text{ kg}$$

Odpowiedź: Na Słońcu w ciągu 1 s przemianie w hel ulega $4,5 \cdot 10^{11}$ kg (czyli 450 mln ton) wodoru.

Uwaga. Ta ilość wodoru, wielka z punktu widzenia człowieka, to zaledwie $2,3 \cdot 10^{-19}$ masy Słońca. Oznacza to, że przez 100 lat przemianie ulega mniej niż miliardowa część masy naszej gwiazdy.

1. Oblicz, jaka masa zmieniła się w energię w wybuchu bomby Little Boy oraz Car Bomby. Potrzebne dane znajdziesz w ramce na s. 235.

2. **P** Jednym z rodzajów syntezy termojądrowej, który wydaje się najłatwiejszy do zastosowania w przyszłych elektrowniach termojądrowych, jest reakcja:



a) W jakim stosunku wagowym należy mieszać tryt z deuterem, aby uzyskać paliwo do tej reakcji?

b) Oblicz energię, jaką można uzyskać z 1 g paliwa.

3. Oblicz całkowitą energię dostarczaną Ziemi przez Słońce w ciągu roku.

Wskazówka. Skorzystaj z informacji o mocy Słońca podanej w przykładzie.

21.7 Życie gwiazd



Ważne w tej lekcji:

- powstawanie gwiazdy,
- dalsze etapy życia – zależność od masy,
- powstawanie pierwiastków.

Przypomnij sobie:

- Gwiazdy świecą własnym światłem dzięki zachodzącym w nich przemianom jądrowym.
- W Słońcu zachodzi przemiana termojądrowa wodoru w hel.

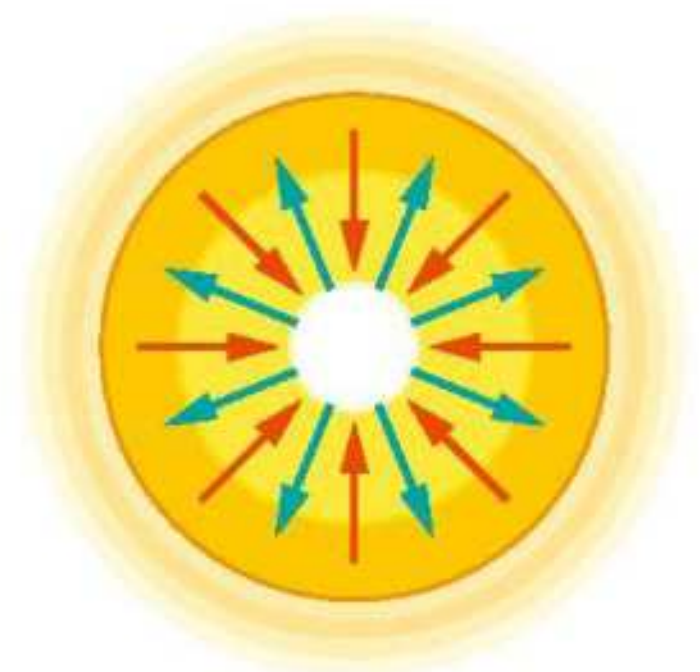
W poprzedniej lekcji mówiliśmy, że w Słońcu zachodzi przemiana termojądrowa wodoru w hel. Jednak nie zawsze tak było i nie zawsze tak będzie.

■ Powstawanie gwiazdy

Każda gwiazda powstaje z obłoku pyłu i gazu, który kurczy się pod wpływem własnej grawitacji. Cząstki pyłu i gazu rozpędzają się kosztem energii potencjalnej grawitacji i rozgrzewają podczas zderzeń i tarcia o siebie. Obłok zapada się coraz szybciej, ponieważ wraz ze zmniejszaniem się odległości między jego fragmentami działają coraz większe siły grawitacji.

Rośnie przy tym temperatura obłoku oraz ciśnienie w jego wnętrzu. W końcu osiągają one takie wartości, że we wnętrzu zaczyna zachodzić reakcja termojądrowa zamiany wodoru w hel.

Chociaż jest to reakcja tego samego rodzaju co w bombie wodorowej, gwiazda nie zostaje rozerwana, ponieważ ciśnienie gazu we jej wnętrzu jest równoważone przez nacisk grawitacyjny jej zewnętrznych warstw (rys. 21.24).

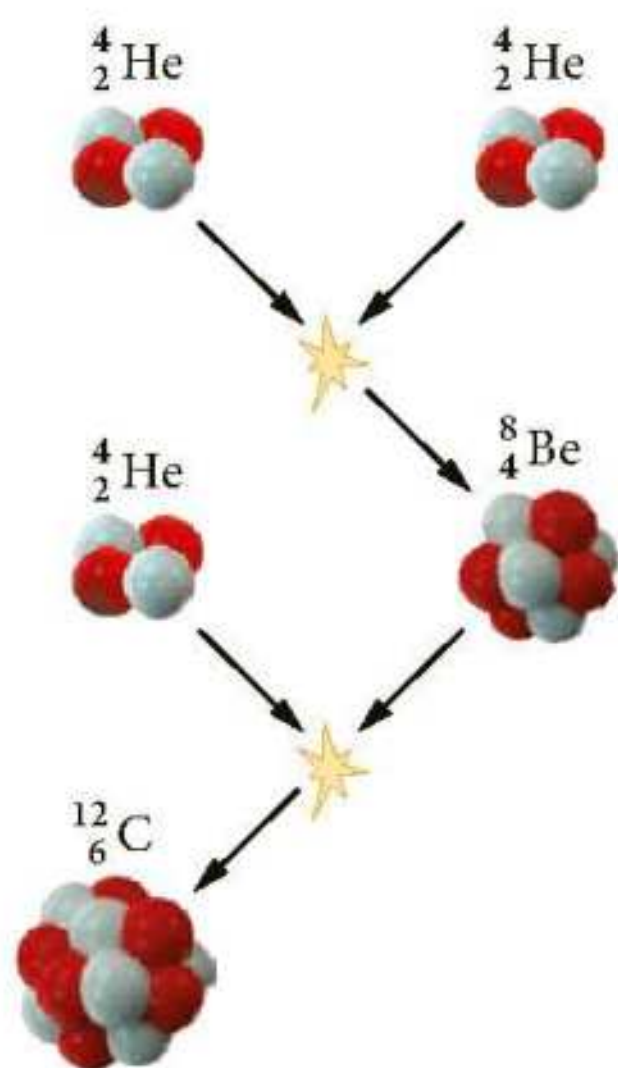


Rys. 21.24. Równowaga ciśnień w Słońcu: czerwone strzałki symbolizują nacisk wynikający z grawitacji, niebieskie – ciśnienie powstające na skutek przemian termojądrowych

Dalsze etapy życia gwiazdy różnią się w zależności od jej rodzaju.

Cykl życia gwiazdy zależy od jej masy.

Masa Słońca to ok.
 $2 \cdot 10^{30}$ kg.



Rys. 21.25. Schemat reakcji przemiany helu w węgiel

Wiatr słoneczny,
podręcznik cz. 3 → s. 256–257

Przyjrzyjmy się więc najpierw gwiazdom podobnym do Słońca.

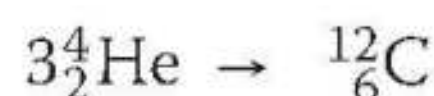
Słońce dzisiaj

Słońce ma ok. 4,5 mld lat i jeszcze długo będzie funkcjonować tak jak dziś – w jego jądrze będzie zachodziła przemiana wodoru w hel.

Czerwony olbrzym

Dopiero za 6 mld lat wodór w jądrze Słońca się skończy, a reakcja syntezy termojądrowej zacznie zachodzić w otoczce jądra. Wtedy:

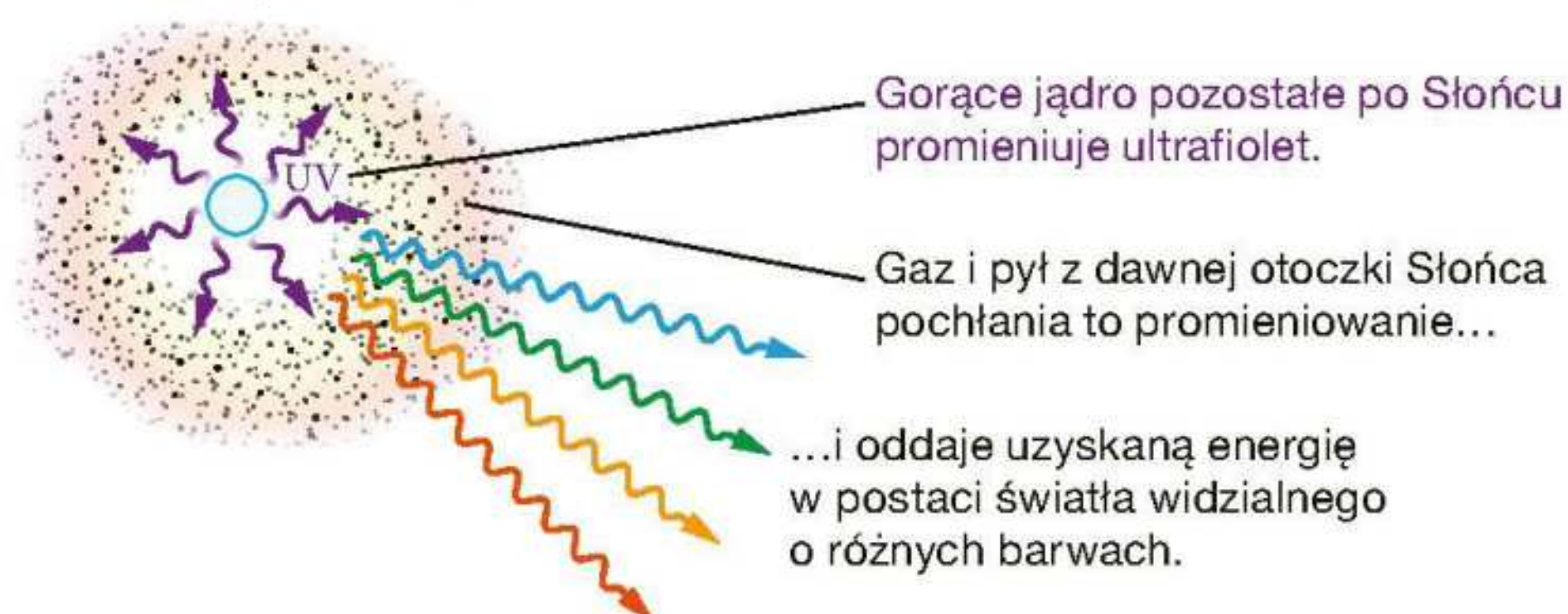
- Słońce powiększy się tak bardzo, że pochłonie orbitę Wenus, a może także naszej planety. Pozostało nam jednak sporo czasu, aby przygotować się do przeprowadzki – prawdopodobnie do życia będą się już wtedy nadawać wielkie księżycy Jowisza i Saturna.
- Zewnętrzne warstwy Słońca będą się rozszerzać i nieco ostygnać, dlatego nasza gwiazda zacznie świecić na czerwono. Nic dziwnego, że taką gwiazdę nazywamy czerwonym olbrzymem.
- W trakcie tego etapu życia w jądrze Słońca rozpocznie się przemiana helu w węgiel:



Po wyczerpaniu zapasów helu w jądrze, ta sama przemiana zacznie zachodzić w otoczce. Wiatr słoneczny stanie się znacznie silniejszy niż dziś i na skutek jego działania Słońce straci zauważalną część masy.

Mgławica planetarna

Kiedy hel się wyczerpie (co potrwa ok. 100 mln lat), zewnętrzne warstwy Słońca ostatecznie się rozproszą, a promieniowanie stygnącego jądra pobudzi do świecenia odrzucony gaz (rys. 21.26). W ten sposób powstanie mgławica planetarna – obiekt świecący różnymi kolorami (rys. 21.27 na następnej stronie).



Rys. 21.26. Schemat mgławicy planetarnej



Rys. 21.27. Mgławica Kocie Oko

Wbrew swojej nazwie, mgławica planetarna nie ma nic wspólnego z planetami. Ta nazwa powstała w czasie, gdy nie wiadano, jak taki obiekt powstaje, a przez ówczesne teleskopy widać było tylko mgiełkę, która – podobnie jak planeta, a w odróżnieniu od gwiazd – nie była pojedynczym punktem.

Biały karzeł

Odsłonięte jądro Słońca będzie niezwykle gęste – zachowa mniej więcej połowę masy Słońca przy rozmiarach zbliżonych do Ziemi. Ponieważ już nie będą w nim zachodzić reakcje jądrowe, więc będzie tylko stygło – taki obiekt nazywamy **białym karłem**.

Czarny karzeł

Z powodu niewielkiej powierzchni białego karła, jego stygnięcie potrwa miliardy lat, zanim gwiazda ostygnie na tyle, że zmieni się w **czarnego karła**. Dziś takich obiektów jeszcze we Wszechświecie nie ma – jest zbyt młody, aby zdążyły powstać.

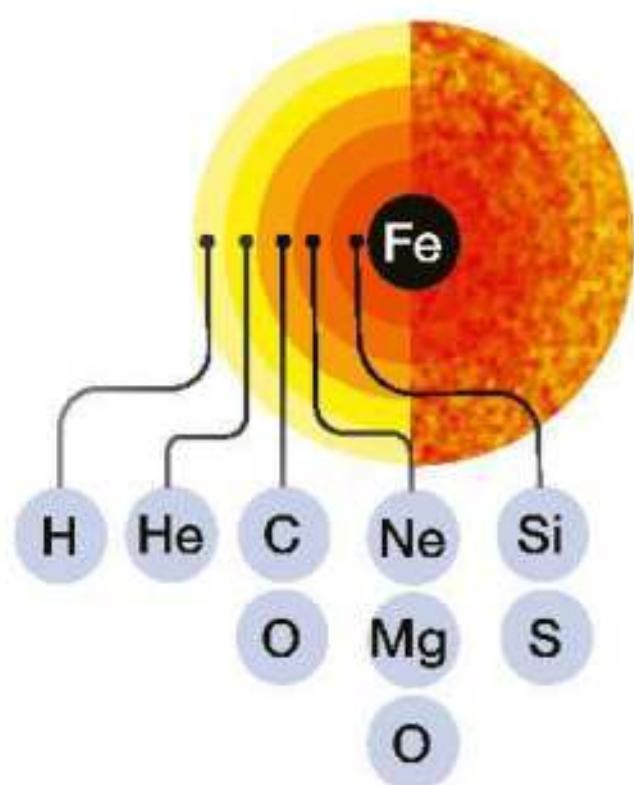
■ Gwiazdy znacznie lżejsze od Słońca

Gwiazdy o tak małej masie nie osiągają etapu czerwonego olbrzyma – od razu po zakończeniu przemianu wodoru w hel stają się białymi karłami.

■ Ciężkie gwiazdy

Ciekawiej przedstawia się los gwiazd znacznie cięższych od Słońca (patrz s. 214–215). Kiedy w jądrze skończy się wodór, termojądrowa przemiana wodoru w hel zaczyna zachodzić w otocze jądra, a gwiazda zostaje czerwonym olbrzymem.

Gdy także ten etap dobiegnie końca, przybiera ona postać przypominającą cebulę: gwiazda składa się z kolejnych, coraz głębszych i coraz gęstszych warstw.



Rys. 21.28. Cięższe pierwiastki występują w gwiazdzie na większej głębokości

Bliżej powierzchni z helu tworzy się węgiel, a głębiej z niego powstają kolejne pierwiastki (rys. 21.28).

Wybuch supernowej

Gdy w gwiazdnym jądrze powstanie żelazo, dalsze pozyskiwanie energii z syntezy termojądrowej nie jest już możliwe. Grawitacja, której nie równoważy już promieniowanie, powoduje zapadanie się jądra gwiazdy. Jej zewnętrzne warstwy się zapadają, a następnie odbijają się od jądra.

Jest to proces tak gwałtowny, że gwiazda wybucha jako **supernowa**. Jedna supernowa może być jaśniejsza niż cała galaktyka, złożona z miliardów gwiazd. Niektóre supernowe obserwowano z Ziemi gołym okiem (rys. 21.29).



Rys. 21.29. Gołym okiem z Ziemi supernowa była widziana ostatnio ok. 40 lat temu, w 1987 r. Zdjęcie przedstawia pozostałości po tym wybuchu (wykonano je w 2022 r.)

Mgławica pozostała po takim wybuchu może być widoczna jeszcze długo. Na s. 218 widzisz Mgławicę Krab, która pozostała po supernowej i była obserwowana z Ziemi w 1054 r.

Gwiazda neutronowa

Po wybuchu supernowej z jej zapadniętego jądra często pozostaje **gwiazda neutronowa**, rzeczywiście złożona głównie z neutronów. Ma ona niewyobrażalną gęstość: rzędu $10^{17} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, czyli 100 mln ton w 1 cm^3 .



A to ciekawe

Kiedy w 1967 r. po raz pierwszy odebrano sygnał pochodzący od pulsara, podejrzewano, że regularne błyski są nadawane przez pozaziemską cywilizację. Z tego powodu ich źródło nazwano żartobliwie *Little Green Men* (ang. zielone ludziki), w skrócie LGM-1. Dopiero później astronomowie zrozumieli naturalne pochodzenie sygnału.

Na zdjęciu: Jocelyn Bell, która jako pierwsza zaobserwowała sygnały z pulsarów.

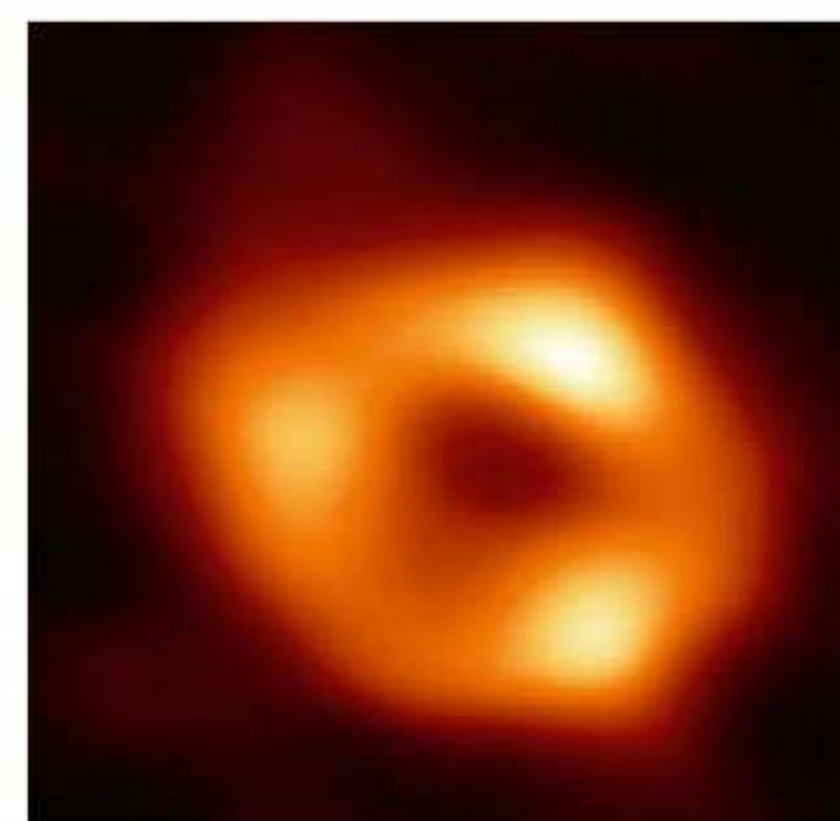
Niektóre gwiazdy neutronowe obracają się nawet kilkaset razy na sekundę. Z okolic ich biegunów magnetycznych wybiegają wiązki promieniowania, więc obserwowane z daleka, emitują regularne błyski – na takiej samej zasadzie jak obracająca się głowica latarni morskiej. Takie gwiazdy nazywamy **pulsarami**.



Rys. 21.30. Pulsar Kraba w Mgławicy Kraba, połączenie zdjęć w świetle widzialnym (czerwone kolory) i rentgenowskim (niebieskie kolory)

Czarna dziura

W przypadku najmasywniejszych gwiazd z jądra pozostałego po wybuchu supernowej powstaje czarna dziura. W jej pobliżu grawitacja jest tak silna, że nie może z niej uciec nawet światło (ani inne promieniowanie elektromagnetyczne). Czarne dziury możemy jednak obserwować pośrednio, badając ich wpływ na materię w otoczeniu.



Rys. 21.31. Zdjęcie czarnej dziury w centrum naszej Galaktyki – widzimy nie samą czarną dziurę, ale wpadającą do niej materię

■ Powstawanie pierwiastków

W kilka minut po początku Wszechświata (o jego powstaniu powiemy dokładniej w następnej lekcji) znajdowały się w nim głównie wodór (ok. 76%), hel i nieznaczne ilości litu.

Prawie wszystkie cięższe pierwiastki powstały we wnętrzach gwiazd. W niektórych z nich synteza kolejnych pierwiastków trwa aż do chwili, gdy powstanie żelazo. Z łączenia jego jąder nie da się już uzyskać energii. Jak zatem powstały pierwiastki cięższe od żelaza? Otóż tworzą się one zwykle podczas wybuchów supernowych i innych gwałtownych wydarzeń, takich jak zderzenia gwiazd neutronowych.

W każdej z tych sytuacji przynajmniej część masy gwiazdy zostaje od razu lub z czasem odrzucona i staje się pyłem, z którego potem powstają kolejne gwiazdy a także ich układy planetarne.

Wszystkie pierwiastki cięższe od litu obecne na Ziemi, w tym także w naszych organizmach, powstały więc wewnątrz gwiazd, które dawno wygasły, wybuchły albo zderzyły się z innymi gwiazdami.

Wodór (${}_1\text{H}$), hel (${}_2\text{He}$) i lit (${}_3\text{Li}$) to pierwiastki o najmniejszych liczbach atomowych.

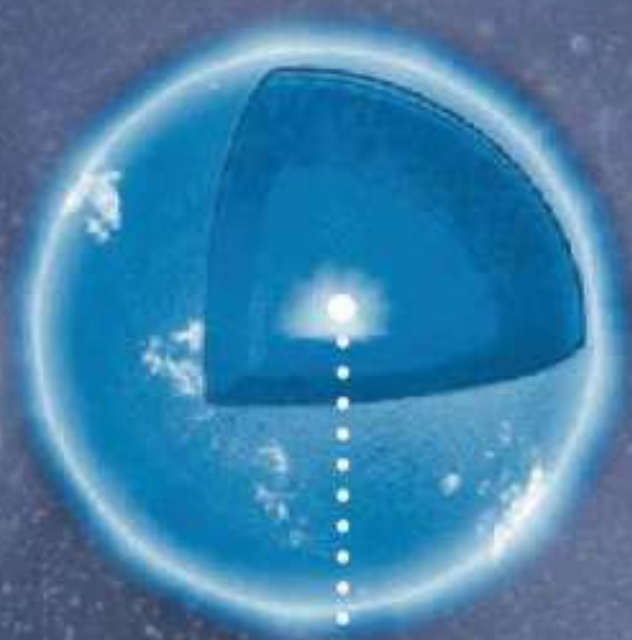
EWOLUCJA MASYWNEJ GWIAZDY

Choć masywne gwiazdy mają większy zapas wodoru, stanowiącego ich paliwo, to zużywają go znacznie szybciej. W efekcie żyją krótko – kilkanaście, a czasami zaledwie kilka milionów lat, czyli około tysiąca razy krócej niż Słońce.

1 Obłok gazowo-pyłowy

🕒 0,5 mln lat

Początek życia wszystkich gwiazd, niezależnie od ich masy, jest taki sam – formują się one z obłoku zawierającego przede wszystkim wodór, a także hel i niewielkie ilości innych pierwiastków.



2 Błękitny olbrzym

🕒 10 mln – 100 mln lat

Podobnie jak w przypadku Słońca, większą część życia masywnej gwiazdy stanowi etap przemiany wodoru w hel w jej jądrze. Ponieważ jednak zachodzi ona szybciej niż w przypadku lżejszych gwiazd, błękitny olbrzym jest gorętszy od Słońca i świeci na niebiesko.



3 Czerwony nadolbryzm

Po wypaleniu się wodoru zaczyna zachodzić synteza kolejnych, coraz cięższych pierwiastków, aż do żelaza.

4 Supernowa

⌚ < 1 sekunda

Gdy zakończą się reakcje jądrowe, ciśnienie wytwarzane w ich wyniku nie będzie już równoważyć nacisku zewnętrznych warstw gwiazdy. Początkowo spadną one na jądro, aby następnie od niego się odbić. Takie zjawisko nazywamy wybuchem supernowej. Jej energia jest tak wielka, że świeci jaśniej, niż cała galaktyka złożona z miliardów gwiazd.

⌚ 0,5 mln lat



⌚ 500 lat



⌚ 0,5 roku



⌚ 1 dzień



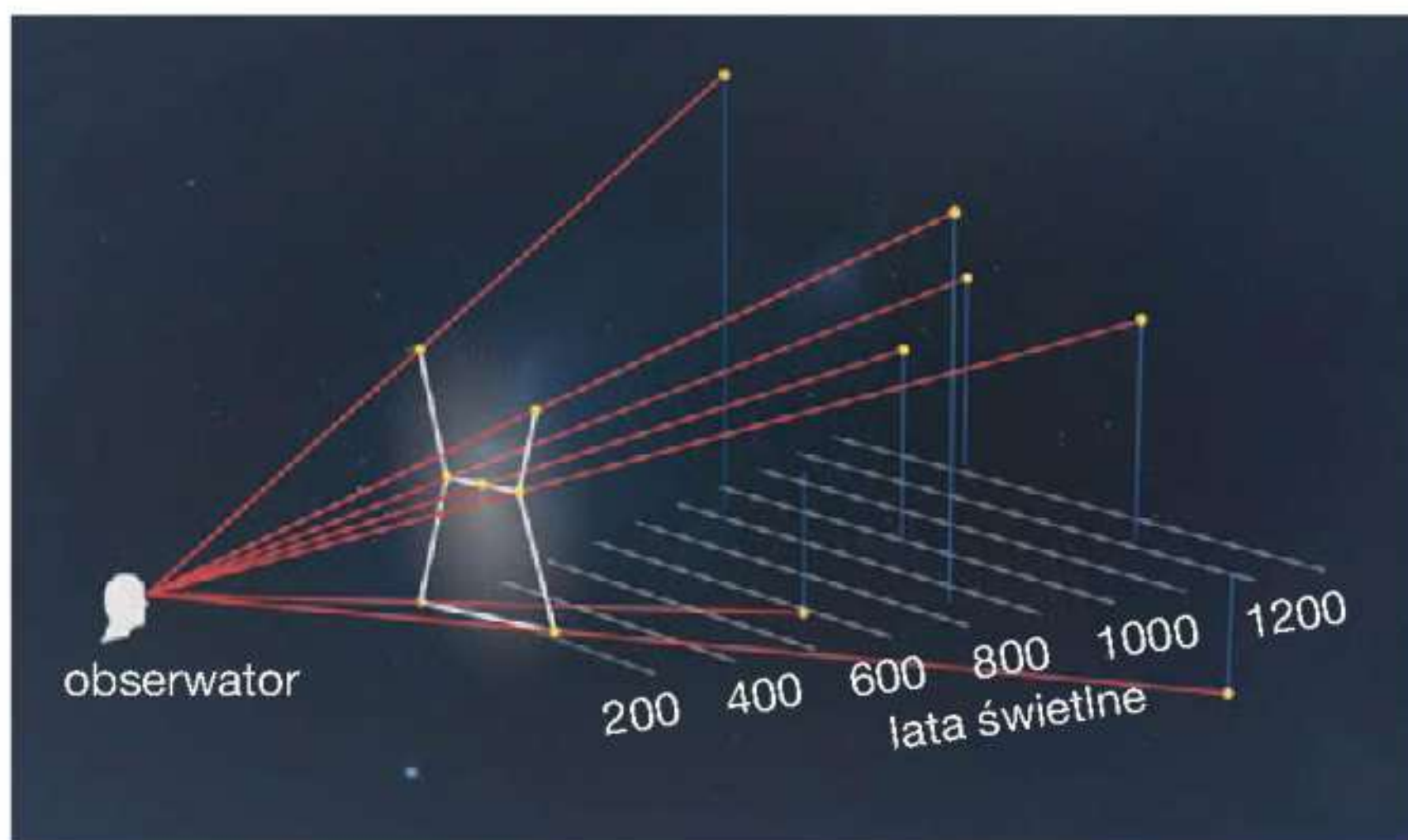
Gwiazdozbiory

Niektóre układy gwiazd mogą się kojarzyć z rysunkami ludzi, zwierząt i przedmiotów. W ten sposób powstały gwiazdozbiory. Tradycyjne gwiazdozbiory w każdej kulturze są inne, jednak dziś astronomowie na całym świecie posługują się przede wszystkim gwiazdozbiorami nazwanymi przez starożytnych Greków.

Gwiazdy wchodzące w skład jednego gwiazdozbioru nie są na ogół fizycznie powiązane.

Gwiazdy w gwiazdozbiorach najczęściej znajdują się w zupełnie różnych miejscach we Wszechświecie i w różnych odległościach od Ziemi.

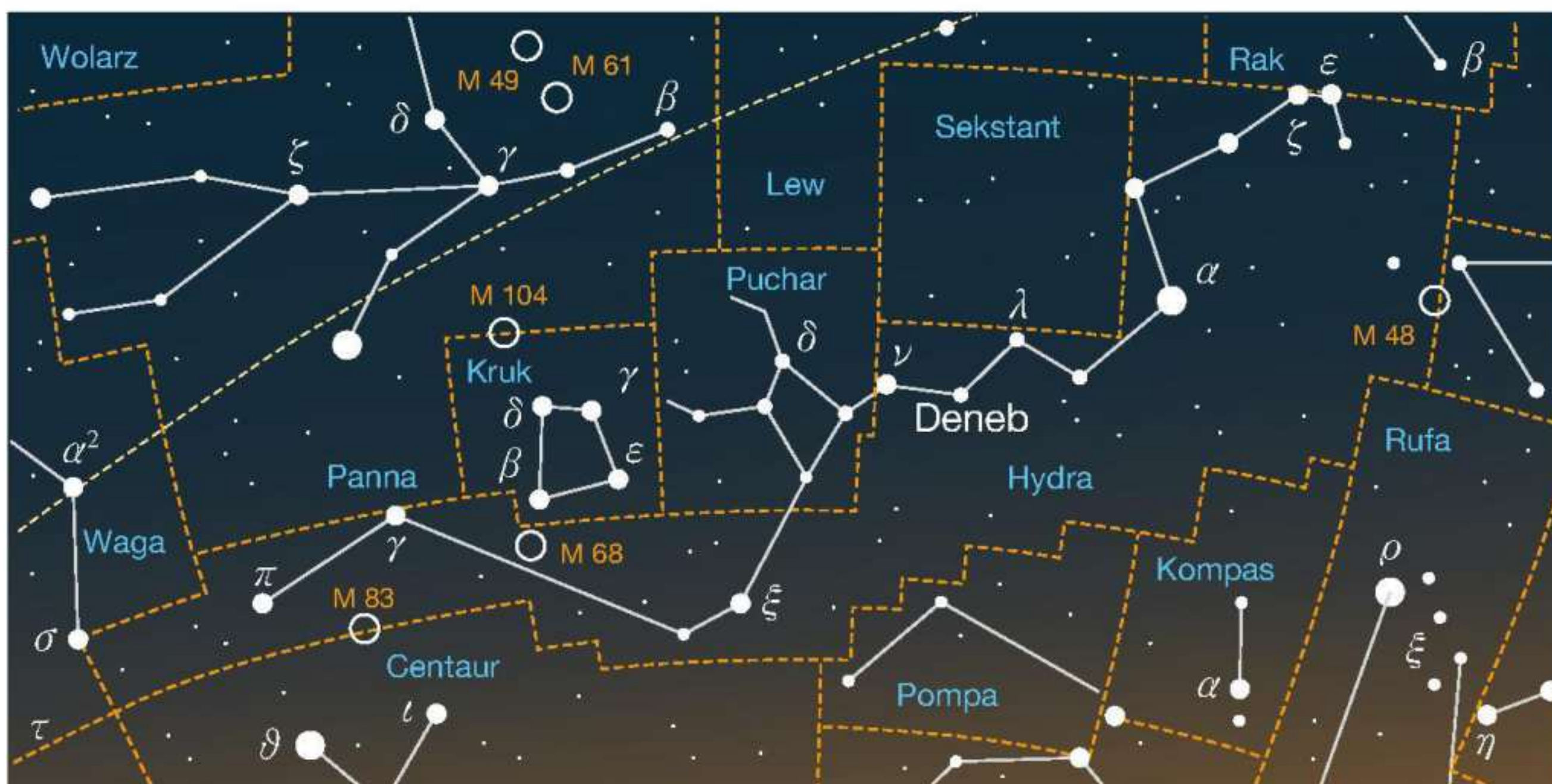
Jedynie z naszej planety widzimy je blisko siebie (patrz rysunek obok).



Obecnie w astronomii gwiazdozbiorem nazywa się nie tyle układ gwiazd, co obszar na niebie. Cała sfera niebieska została podzielona na 88 takich obszarów. Na mapach nieba są one oddzielone liniami przypominającymi granice państw na mapie.

Każdy nowy obiekt odkryty przez astronomów automatycznie trafia do jednego z gwiazdozbiorów, nawet jeśli nie pasuje do pierwotnego rysunku.

Na rysunku poniżej przedstawiono kilka gwiazdozbiorów widocznych okresowo na polskim niebie.



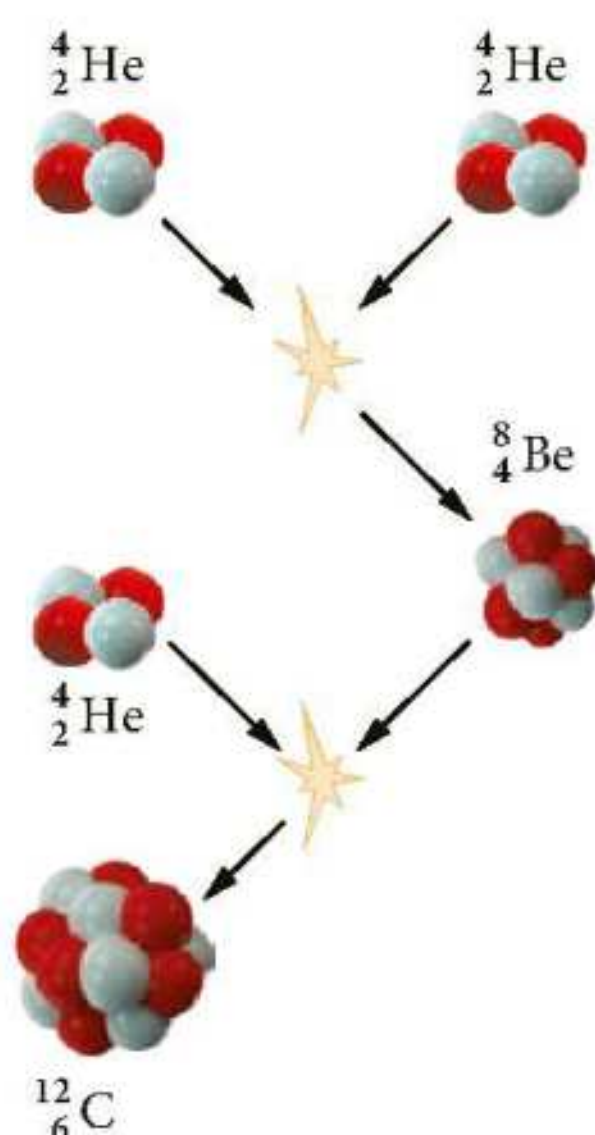
Przykładowo w kwietniu i na początku maja możemy w całości zobaczyć gwiazdozbiór Hydry – największy na niebie.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



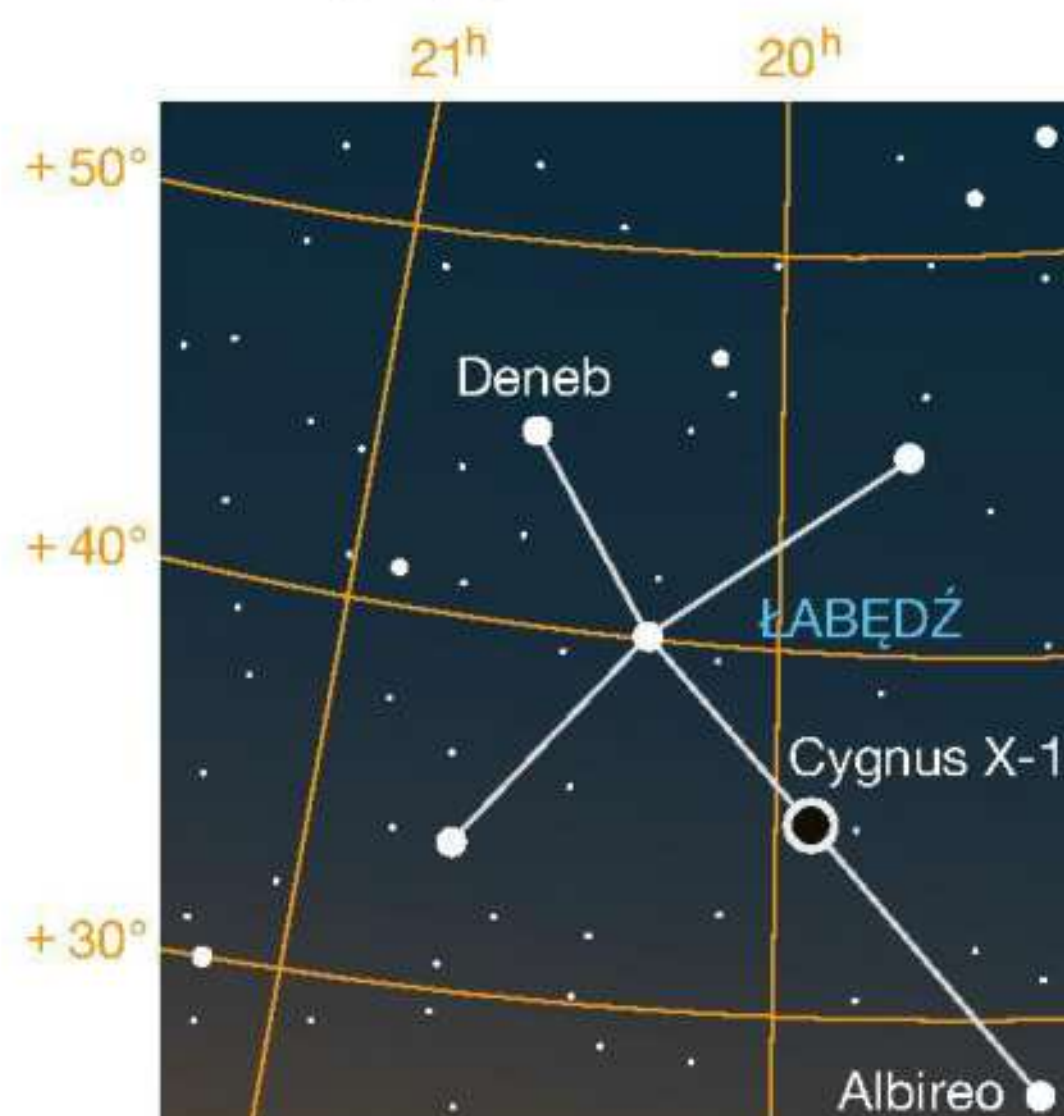
1. W 1970 r. Joni Mitchell napisała piosenkę *Woodstock*, której refren zaczyna się słowami: „We are stardust” (jesteśmy gwiazdowym pyłem). Czy to tylko poetycka metafora, czy też mają one uzasadnienie naukowe?
2. Dowiedz się, co to jest stała słoneczna i jaką ma wartość. Na tej podstawie oblicz moc Słońca (moc emitowanego przez nie promieniowania). Sprawdź, czy twój wynik zgadza się z danymi tablicowymi.
3. Gdy Słońce stanie się czerwonym olbrzymem, w jego jądrze będzie zachodzić przemiana helu w węgiel (patrz schemat). Obecnie taka przemiana zachodzi m.in. w Betelgezie, najjaśniejszej gwiazdzie widocznego w zimie gwiazdozbioru Oriona. Oblicz, ile energii wydziela się w takiej przemianie podczas powstawania:
 - a) jednego jądra węgla,
 - b) 1 kg węgla.



4. Promień Słońca wynosi w tej chwili ok. $7 \cdot 10^8$ m. Kiedy stanie się ono czerwonym olbrzymem, jego masa pozostanie niemal taka sama, ale promień zwiększy się do

mniej więcej obecnej odległości Ziemi od Słońca ($1,5 \cdot 10^{11}$ m). Gdy z kolei zostanie ono białym karłem, jego promień skurczy się do rozmiarów tylko nieznacznie większych od promienia Ziemi (ok. 9000 km), podczas gdy masa zmniejszy się dwukrotnie i będzie wynosiła ok. 10^{30} kg. Oblicz średnią gęstość Słońca:

- a) obecnie,
 - b) gdy będzie czerwonym olbrzymem,
 - c) gdy będzie białym karłem.
5. Czarnych dziur nie da się zaobserwować bezpośrednio, jednak możesz znaleźć na niebie miejsce, gdzie znajduje się jedna z nich.
 - a) Znajdź na niebie gwiazdozbiór Łabędzia pokazany na mapie (w Polsce jest to możliwe od wiosny do jesieni).
 - b) W połowie szyi łabędzia oznaczono punkt Cygnus X-1 – to miejsce, gdzie znajduje się czarna dziura, a dokładniej: układ podwójny, w którym czarnej dziurze towarzyszy gwiazda.



**Ważne w tej lekcji:**

- galaktyki,
- przesunięcie ku czerwieni,
- prawo Hubble'a,
- Wielki Wybuch.

Przypomnij sobie:

- Układ Słoneczny składa się ze Słońca, ośmiu planet, planet karłowatych i satelitów planet, a także z drobnych ciał, takich jak planetoidy i komety.
- Jednostka astronomiczna to jednostka długości równa średniej odległości Ziemi od Słońca:
 $1 \text{ au} \approx 149,6 \text{ mln km} \approx 150 \text{ mln km}$.



Rys. 21.32. Głębokie Pole z teleskopu Webba, czyli zdjęcie niewielkiego obszaru z pozoru pustego nieba. Po dłuższym naświetlaniu widać tam dużo odległych galaktyk

W poprzedniej części podręcznika mówiliśmy o budowie Układu Słonecznego. Choć w ludzkiej skali wydaje się olbrzymi, z punktu widzenia odległości w kosmosie jest niewielki.

■ Galaktyka

Z pewnością znasz słowo *galaktyka*. Określa ono grupę wielu (milionów lub nawet miliardów) gwiazd tworzących w kosmosie skupisko. Nasza galaktyka nazywa się po prostu Galaktyką (pisaną dużą literą, podobnie jak księżyc Ziemi nazywa się Księżycem) lub Drogą Mleczną.

Ta ostatnia nazwa pochodzi od widoku Galaktyki na ziemskim niebie (rys. 21.33a na następnej stronie). W pogodną noc w miejscu oddalonym od świateł, np. w czasie górskiej wycieczki, możemy zobaczyć słabą jasną smugę na niebie, przypominającą strumyk rozlanego mleka. I tak też Drogę Mleczną postrzegali starożytni, którzy nadali jej tę poetycką nazwę.

Jednak za pomocą teleskopu, a nawet zwykłej lornetki możemy się łatwo przekonać, że Galaktyka składa się z ogromnej liczby gwiazd, które tylko gołym okiem wyglądają jak jednolita smuga.

■ Kształt Galaktyki

Nasza Galaktyka ma w rzeczywistości kształt dysku (rys. 21.33b). Taką obserwują ją astronomowie z innych galaktyk, jeśli istnieją.

Słowo *galaktyka* pochodzi od starogreckiego słowa *gala* – mleko.

a)



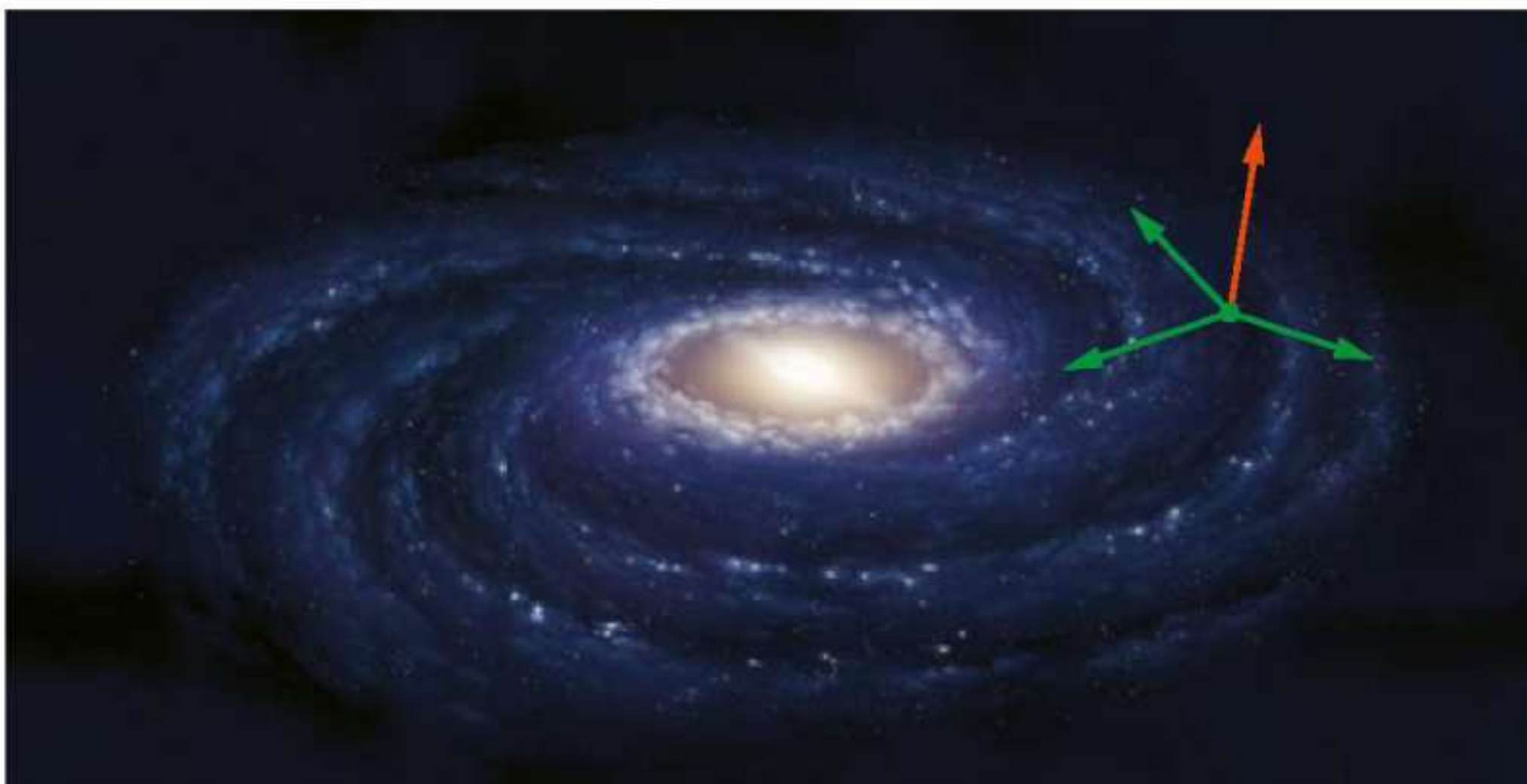
b)



Rys. 21.33. Galaktyka, czyli Droga Mleczna: a) widziana na ziemskim niebie, b) rysunek przedstawiający widok z zewnątrz

My jednak patrzymy na nią od wewnątrz.

Na rysunku 21.34 zaznaczono różne kierunki, w które może spojrzeć osoba znajdująca się na Ziemi. Wzdłuż linii czerwonej widzi światło niewielu gwiazd. Natomiast gdy patrzy wzdłuż jednej z zielonych linii, dociera do niej światło bardzo wielu gwiazd widoczne jako świetlisty pas.



Rys. 21.34. Jak powstaje obraz Galaktyki z jej wnętrza

Jednostka
astronomiczna
 $1 \text{ au} \approx 150 \text{ mln km}$
to średnia odległość
Ziemi od Słońca.



Rys. 21.35. Galaktyka Andromedy widziana z Ziemi. Podobnie wygląda nasza galaktyka, Droga Mleczna, widziana z zewnątrz

■ Rok świetlny

W opisie Układu Słonecznego najwygodniej posługiwać się jednostką astronomiczną. Jednak do podawania odległości między gwiazdami albo rozmiarów Galaktyki nawet ta jednostka jest zbyt mała, aby było to wygodne. Dlatego używamy większej jednostki: lat świetlnych (ly od *light year*).

Rok świetlny to odległość pokonywana przez światło w próżni w czasie jednego ziemskiego roku.

$$1 \text{ ly} \approx 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km} \approx 10^{16} \text{ m}$$

■ Galaktyki we Wszechświecie

Droga Mleczna składa się z ponad 200 miliardów gwiazd. Wiele z nich ma swoje układy planetarne. Wciąż nie wiemy, czy w którymś z nich istnieje życie, a tym bardziej – życie inteligentne.

Średnica dysku naszej Galaktyki wynosi ponad 150 000 ly. W jej pobliżu – co oznacza odległość 2,5 mln ly – znajduje się galaktyka podobna do naszej, zwana Galaktyką Andromedy, ponieważ z Ziemi jest widoczna w gwiazdozbiorze o takiej nazwie.

Widać ją nawet gołym okiem, a przy dobrym wzroku i ciemnym niebie da się ją odróżnić od gwiazdy: jest widoczna jako rozmyta mgiełka, a nie punkt.

Przez lornetkę można ją obejrzeć jeszcze dokładniej. Jej zdjęcia wykonane przez silne teleskopy (rys. 21.35) pomagają nam sobie wyobrazić, jak wygląda nasza własna Galaktyka.

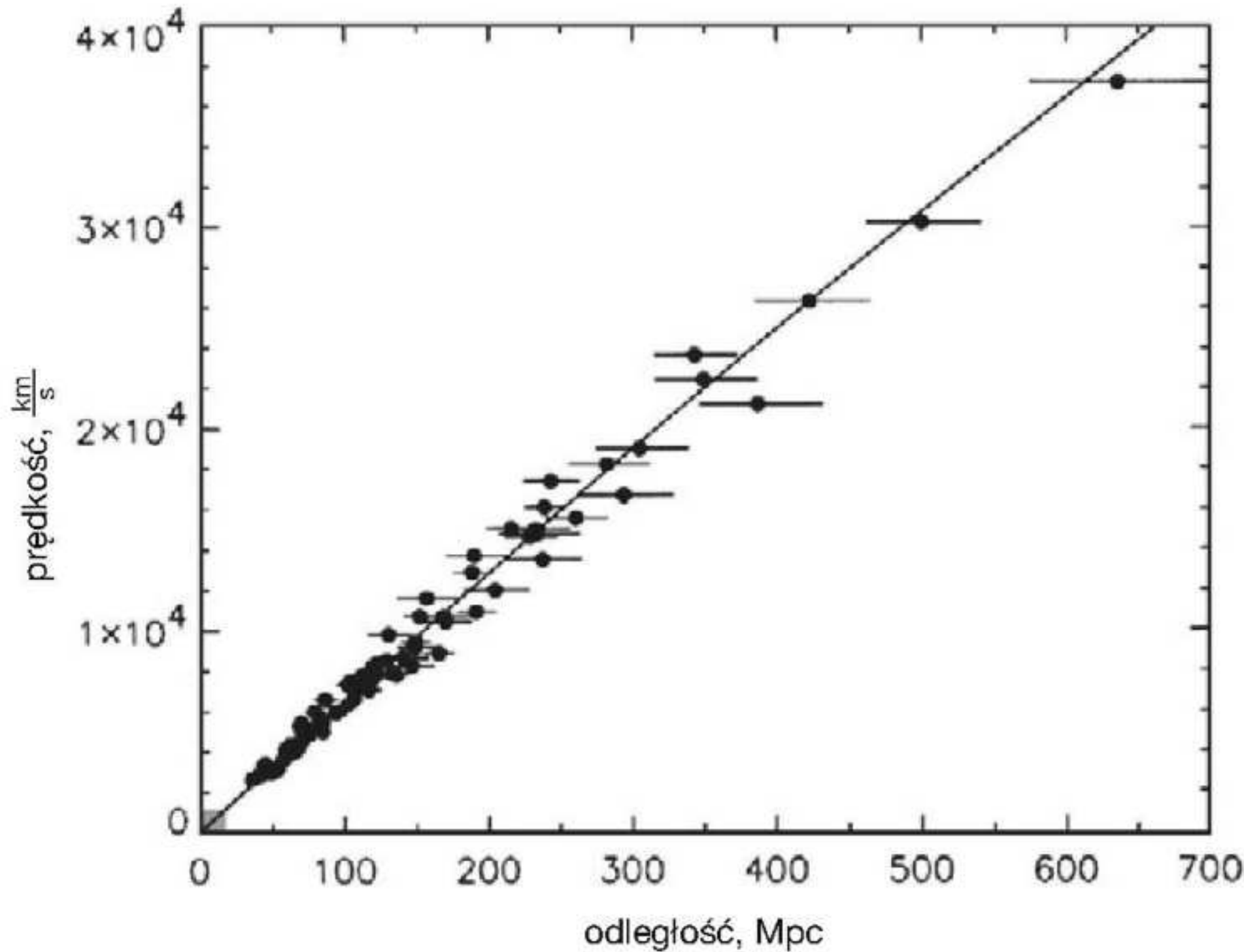
Mimo swojego ogromu galaktyki łączą się w jeszcze większe twory – gromady galaktyk. Między gromadami znajdują się galaktyki łączące je w ogromną pajęczynę.

■ Przesunięcie ku czerwieni

Na początku XX w. astronomowie zaobserwowali, że widmo światła gwiazd z odległych galaktyk jest zbliżone do widma Słońca, ale poszczególne linie widmowe są w nim przesunięte w stronę większych długości fal. W obrębie światła widzialnego najdłuższe fale odpowiadają czerwieni, stąd mówimy o przesunięciu ku czerwieni. Takie widmo może powstać tylko w jeden sposób: dzięki efektowi Dopplera. Okazuje się więc, że odległe galaktyki się od nas oddalają.

Odległość do galaktyk potrafimy więc mierzyć. Prędkość oddalania się wyznaczamy ze wzorów opisujących efekt Dopplera. Dzięki temu możemy zbadać zależność między tą prędkością a odległością.

Taką zależność przedstawia rysunek 21.36. Jak widzisz, punkty odpowiadające poszczególnym galaktykom układają się wzdłuż prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych. Oznacza to, że wielkości te są proporcjonalne.



Copyright (2004) National Academy of Sciences, U.S.A.

Rys. 21.36. Zależność między odległością do galaktyki a prędkością jej oddalania się od nas. Odległość na osi poziomej wyrażono w megaparsekach, 1 Mpc = 3 260 000 ly

Powyższy wniosek nazywamy prawem Hubble'a albo Hubble'a–Le-maitre'a.

Prawo Hubble'a:

Prędkość ucieczki jest wprost proporcjonalna do odległości między galaktyką a obserwatorem.

Innymi słowy: im dalej od nas jest galaktyka, z tym większą prędkością się od nas oddala.

Tę proporcjonalność możemy opisać wzorem:

$$v = H \cdot d$$

gdzie v to prędkość ucieczki, d to odległość do galaktyki, natomiast stała proporcjonalności H została nazwana stałą Hubble'a. Według obserwacji:

$$H \approx \frac{21 \frac{\text{km}}{\text{s}}}{1\,000\,000 \text{ ly}}$$

Mówimy o odległych galaktykach, ponieważ w przypadku bliższych galaktyk lokalne ruchy mogą zaburzać ogólną prawidłowość.

Przykładowo Galaktyka Andromedy się do nas zbliża.

EWOLUCJA WSZECHŚWIATA

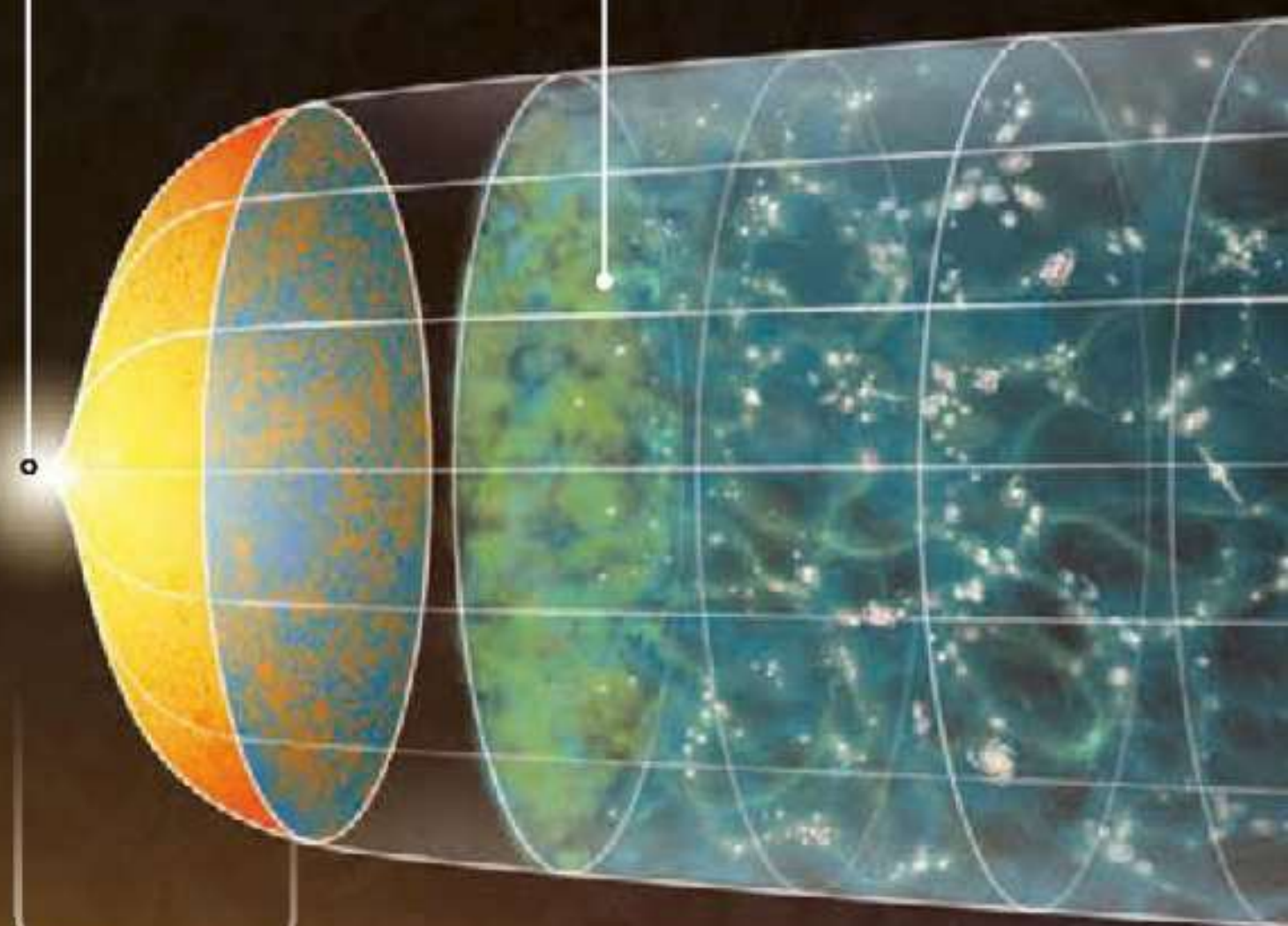
Ewolucja Wszechświata jest logarytmiczna – przez pierwszy ułamek sekundy jego istnienia wydarzyło się więcej niż przez kolejne 14 mld lat. Rozwój teorii fizycznych i wyniki przeprowadzanych eksperymentów pozwalają dziś precyzyjnie określić wiek, rozmiar i inne własności Wszechświata, a także poznać jego historię od bilionowej części (10^{-12}) sekundy od Wielkiego Wybuchu.

WIELKI WYBUCH

To nazwa chwili, od której rozpoczęło się rozszerzanie i stygnięcie Wszechświata, trwające do dziś. Wszechświat powstał z punktu skupiającego ogromną energię, ale mniejszego od atomu.

200 mln lat

Powstały pierwsze gwiazdy i galaktyki. Duże gwiazdy wybuchały w postaci supernowych. Z rozproszonej w ten sposób materii formowały się następne gwiazdy, w tym nasze Słońce.



EPOKA PLANCKA

Energia była tak duża, że nie ma teorii, która opisywałaby to, co się w tym czasie działo. Prawdopodobnie powstała wtedy czasoprzestrzeń.

10^{-43} s 10^{32} K

EPOKA INFLACJI

Wszechświat zaczął się gwałtownie rozszerzać. W tym czasie powstały drobne niejednorodności, które dały początek galaktykom. Średnica Wszechświata zwiększyła się 10^{30} razy i pod koniec tego okresu miał średnicę 3 m.

10^{-35} s 10^{27} K

EPOKA PLAZMY

Materia składała się z cząstek elementarnych, których energia była zbyt wysoka, aby mogły się połączyć. Dziś są to maksymalne energie, jakie człowiek potrafi uzyskać laboratoryjnie w Wielkim Zderzaczu Hadronów w Genewie.

10^{-14} s 10^{19} K

KWARK
FOTON
ELEKTRON
POZYTON

9 mld lat

Ukształtował się nasz Układ Słoneczny.

10 mld lat

Na Ziemi powstały pierwsze prymitywne formy życia.

13,8 mld lat

Pojawił się człowiek.

92 mld lat
światlnych

EPOKA HADRONÓW

Kwarki połączyły się i utworzyły hadrony (cząstki zbudowane z kwarków), m.in. protony i neutrony. W tym samym czasie ogromne ilości cząstek i antycząstek ulegały anihilacji, w której wyniku powstawały kolejne fotony. Po tym czasie na jeden nukleon (czyli proton lub neutron) przypadało ok. miliarda fotonów.

EPOKA NUKLEOSYNTESY

Temperatura spadła na tyle, że możliwe stało się łączenie neutronów i protonów w jądra atomowe lekkich pierwiastków: wodoru i helu oraz w śladowych ilościach litu.

EPOKA FOTONÓW

Temperatura obniżyła się do 3000 K. Utworzyły się atomy, dzięki czemu fotony przestały oddziaływać ze swobodnymi elektronami i zaczęły się swobodnie rozprzestrzeniać. Uwolnione wtedy fotony dziś rejestrujemy jako promieniowanie tła.

10^{-3} s

10^{11} K

3 minuty

10^9 K

380 tys. lat

3000 K

NEUTRON

PROTON

JĄDRO
WODORU
(PROTON)

JĄDRO
HELU

WODÓR

HEL



Rys. 21.37. Kropki na baloniku symbolizują galaktyki. Jeżeli będziemy dalej nadmuchiwać balonik, każda kropka będzie się oddalać od każdej innej – tym szybciej, im większa dzieli je odległość

Sprawdzianem dla teorii Newtona była obserwacja nowych planet, dla elektrodynamiki Maxwella – istnienie fal elektromagnetycznych, a dla teorii Lemaître'a – mikrofalowe promieniowanie tła.

Przyczynę przyspieszonego rozszerzania Wszechświata nazywa się ciemną energią. To jednak tylko nazwa, a nie wyjaśnienie zjawiska, ponieważ nie wiemy, czym jest ta energia.

■ Rozszerzanie się Wszechświata

Ani Ziemia, ani Słońce, ani nawet Droga Mleczna nie znajdują się w środku Wszechświata. Co prawda wszystkie galaktyki się od nas oddalają, ale to samo mogą stwierdzić mieszkańcy innych galaktyk, jeśli ktoś je zamieszkuje.

Po prostu wszystkie galaktyki się od siebie oddalają, ponieważ cały Wszechświat się rozszerza. Często do wyjaśnienia tego zjawiska używa się modelu nadmuchiwanego balonika (rys. 21.37).

■ Wielki Wybuch

Skoro Wszechświat stale się rozszerza, to znaczy, że kiedyś był znacznie mniejszy niż obecnie. A być może jego istnienie zaczęło się od chwili, gdy cały był skupiony w jednym punkcie.

Taką hipotezę postawił w latach 30. XX w. belgijski astronom Georges Lemaître. Jej przeciwnicy nazwali ją prześmiewczo „teorią wielkiego bum” (ang. *Big Bang Theory*), co ostatecznie zostało uznane za pełnoprawny termin naukowy. Polska nazwa Wielki Wybuch nie była już tak ironiczna.

■ Mikrofalowe promieniowanie tła

Lemaître nie ograniczył się do podania ogólnego pomysłu, ale przedstawił matematyczną teorię ewolucji Wszechświata, opisującą jego rozszerzanie od stanu maksymalnego zagęszczenia.

Teoria została rozwinięta przez innych uczonych. Analiza pierwszych chwil Wszechświata doprowadziła do wniosku, że cały kosmos powinien być dziś wypełniony promieniowaniem mikrofalowym wyemitowanym wkrótce po powstaniu Wszechświata.

Ponieważ takiego promieniowania badacze wcześniej nie zaobserwowali, zaczęto prowadzić próby jego wykrycia. Gdy to się stało (patrz ramka na następnej stronie), teoria Wielkiego Wybuchu została powszechnie przyjęta.

Jak wiesz, najlepszym sprawdzianem dla każdej teorii fizycznej jest potwierdzenie nowego, nieznanego wcześniej zjawiska, którego występowanie zostało przewidziane na jej podstawie.

■ Dalsze rozszerzanie się Wszechświata

Jeszcze pod koniec XX w. uczeni zakładali, że rozszerzanie się Wszechświata musi zachodzić coraz wolniej, ponieważ jest hamowane przez grawitację.

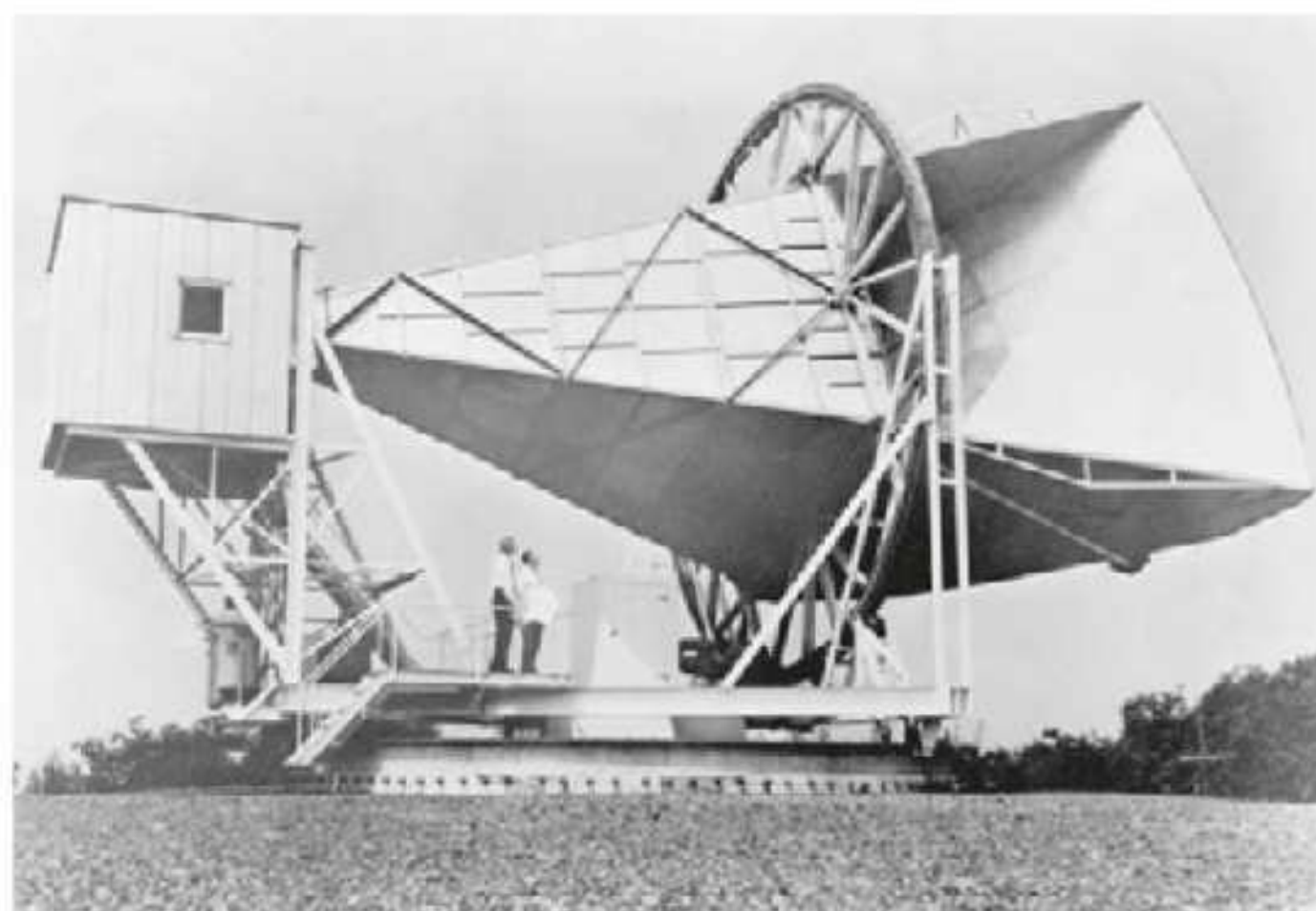
Dziś już wiadomo, że rozszerzanie Wszechświata nie tylko nie zwalnia, ale wręcz przyspiesza. Nie rozumiemy tylko, dlaczego tak się dzieje.

Mikrofalowe promieniowanie tła

Zgodnie z teorią Wielkiego Wybuchu cały Wszechświat wypełnia promieniowanie wyemitowane niecałe 400 tys. lat po jego powstaniu. Powstało ono, gdy elektrony przyłączyły się do protonów i jąder helu, tworząc pierwsze atomy w historii Wszechświata. Na skutek rozszerzania się Wszechświata fale tego promieniowania uległy wydłużeniu na tyle, że dziś należy ono już do zakresu mikrofal i jest zbliżone do promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze 2,7 K.

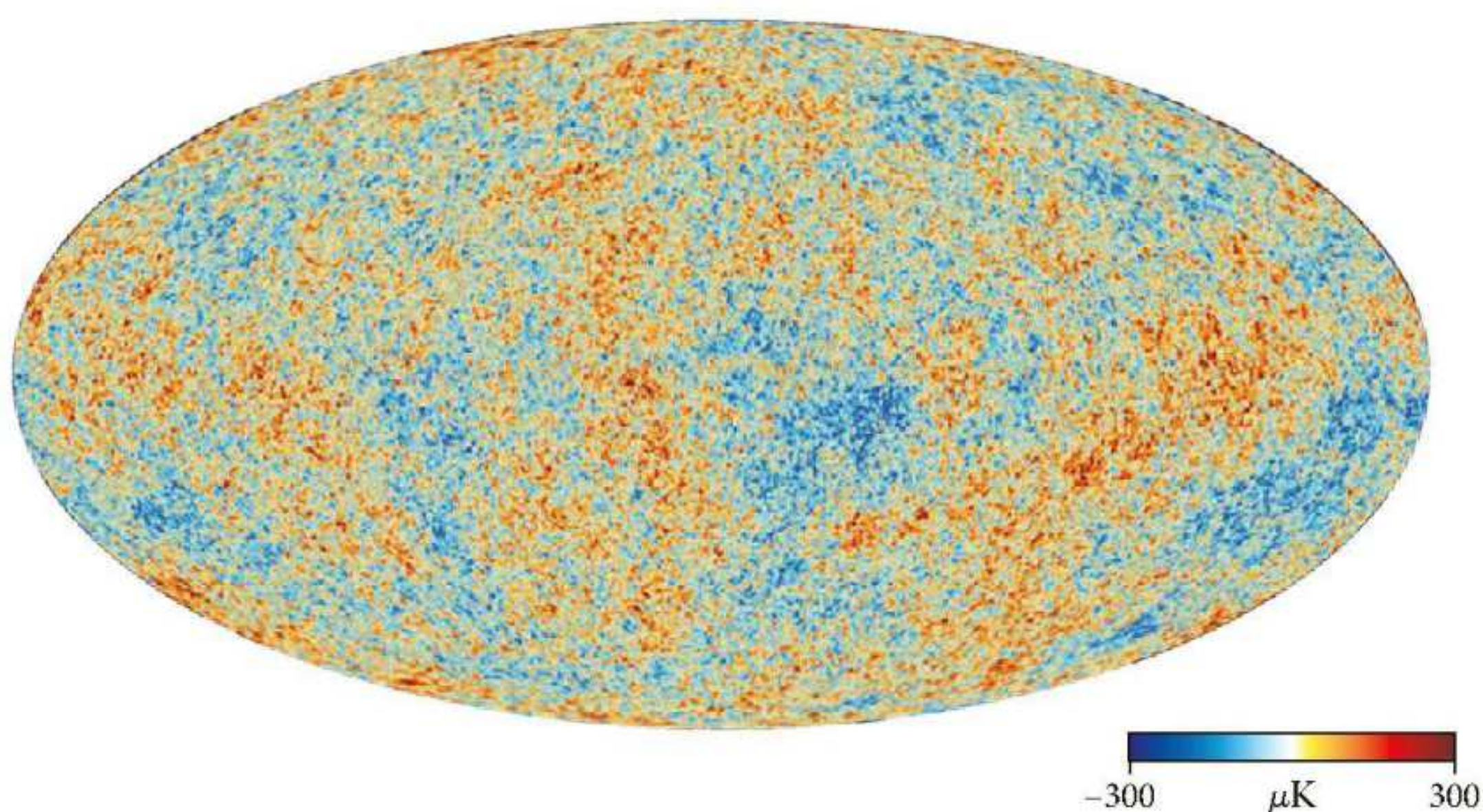
Astronomowie przez dłuższy czas bezskutecznie próbowali wykryć takie promieniowanie. Pomoc przyszła z niespodziewanej strony.

Promieniowanie tła odkryli w latach 60. XX w. dwaj młodzi pracownicy Bell Labs: Arno Penzias i Robert Wilson. Prowadzili radiowe obserwacje za pomocą anteny zbudowanej pierwotnie w celu utrzymywania łączności poprzez sztuczne satelity (patrz zdjęcie). Jednak badania utrudniał im radiowy szum. Dopiero gdy naukowcy przypadkiem dowiedzieli się, że taki szum jest już od ponad roku bezskutecznie poszukiwany przez astronomów, zrozumieli jego istotę.



Antena rogowa wykorzystana przez Penziasa i Wilsona do odkrycia mikrofalowego promieniowania tła

Na umieszczonej poniżej mapie promieniowania tła poszczególnymi kolorami zaznaczono odchylenia od średniej temperatury. Mapa została opracowana dzięki pomiarom wykonanym przez kosmiczny teleskop Plancka. Urządzenie umieszczono na orbicie wokółsłonecznej, więc jego pracy nie zakłóca ziemska atmosfera.



Wiek Wszechświata

Jeśli założymy, że zmiany tempa rozszerzania Wszechświata są niewielkie, możemy oszacować jego wiek.

Założmy, że jakaś odległa galaktyka w czasie T (równym wiekowi Wszechświata) oddaliła się od nas na odległość d ze stałą prędkością v .

Możemy zapisać:

$$v = \frac{d}{T}$$

Porównajmy tę zależność z prawem Hubble'a:

$$v = H \cdot d$$

Wynika stąd, że $H = \frac{1}{T}$, czyli $T = \frac{1}{H}$.

Wiek Wszechświata jest w przybliżeniu równy odwrotności stałej Hubble'a.

Obliczmy więc tę wielkość. W tym celu stałą Hubble'a wyrazimy w jednostkach układu SI:

$$H = 21,4 \frac{\frac{\text{km}}{\text{s}}}{1\,000\,000 \text{ ly}} = \frac{21\,000 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10^6 \cdot 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}} = 2,22 \cdot 10^{-18} \frac{1}{\text{s}}$$

$$T = \frac{1}{H} = \frac{1}{2,22 \cdot 10^{-18} \frac{1}{\text{s}}} = 4,5 \cdot 10^{17} \text{ s} \approx 14 \text{ mld lat}$$

Ten wynik zgadza się z wiekiem Wszechświata obliczonym innymi metodami, np. na podstawie wieku najstarszych skupisk gwiazd.

Pytania i zadania

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Odpowiedz na pytania:

- a) Czy podczerwień obecna w widmie gwiazdy także ulega przesunięciu ku czerwieni?
- b) W 1922 r. amerykański poeta Robert Frost napisał wiersz, w którym rozważa, czy świat skończy się w ogniu czy w lodzie. Do jego wiersza chętnie nawiązywali astronomowie, gdy na popularnych wykładach podejmowali się próby odpowiedzi na nierozstrzygnięte wtedy pytanie, czy Wszechświat zawsze będzie się rozszerzał, czy też kiedyś zacznie się kurczyć. Jaki jest związek między wierszem a pytaniem z astronomii? Jaką odpowiedź uznajemy dzisiaj za prawdziwą?

2. Przeanalizuj rysunek 21.36.

- a) Która z wielkości: odległość do galaktyki czy jej prędkość została wyznaczona dokładniej w przypadku większości galaktyk? Jak sądzisz, dlaczego?
- b) Na podstawie wykresu wyznacz stałą Hubble'a. Porównaj swój wynik z wielkością podaną w tekście.

3. Wyobraźmy sobie, że chcemy nakręcić film popularnonaukowy trwający 13,7 min, przedstawiający w proporcjonalnym skrócie historię Wszechświata. W którym momencie filmu znalazłoby się pojawienie promieniowania tła? Kiedy w filmie pojawiliby się ludzie?

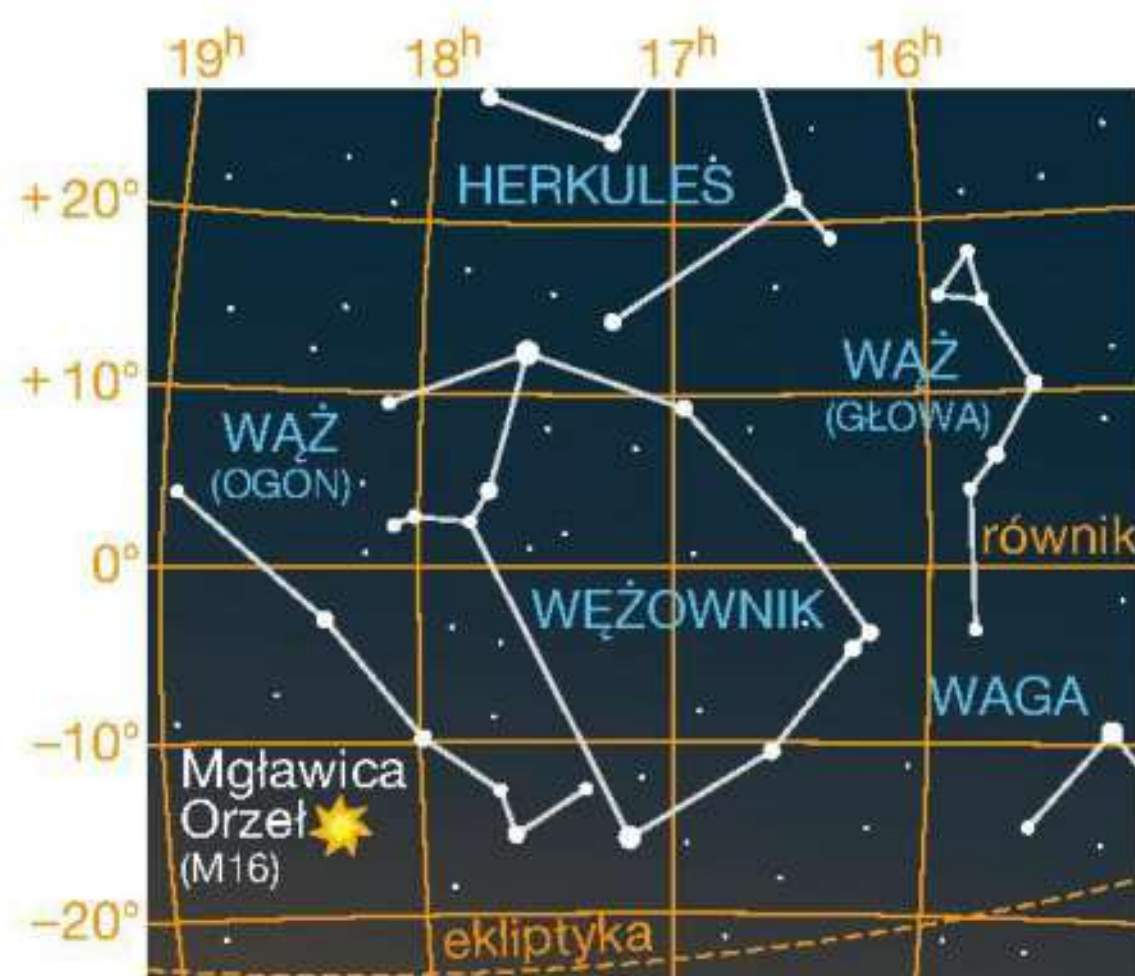
4. Ponieważ prędkość światła jest skończona, dalekie obiekty oglądamy takimi, jakie były kiedyś. Rozważmy galaktykę, której światło biegnie do nas 2 mld lat.

a) Jaka była odległość tej galaktyki od Ziemi w chwili, gdy wysyłała obserwowane przez nas światło? Podaj wynik w latach świetlnych.

b) Z jaką prędkością oddalała się ona wtedy od nas?

5. Wykonaj obserwacje. Zrób je latem, kiedy na polskim niebie widać gwiazdozbiór Węża.

a) Skorzystaj z zamieszczonej mapki.



W lewym dolnym rogu zaznaczono na niej miejsce, gdzie na niebie można znaleźć Mglawicę Orzeł. Znajdź tę mglawicę na niebie. Jest to obszar, w którym powstają nowe gwiazdy. Przy bezchmurnej pogodzie

i z dala od świateł nawet gołym okiem zobaczysz ją jako lekką mgiełkę, a za pomocą lornetki – trochę wyraźniej.

b) Znajdź w internecie zdjęcia tej mglawicy wykonane za pomocą dużych teleskopów.

6. Przeprowadź obserwację innej galaktyki.

a) W jesienny wieczór poza obszarem miejskich świateł poszukaj na niebie gwiazdozbioru Kasjopei, przypominającego niezbyt dużą, ale bardzo wyraźną literę W.

b) Potraktuj prawą połówkę litery jak strzałkę w dół i przesunь wzrok mniej więcej na odległość równą szerokości całej litery. Przy dobrej, bezchmurnej pogodzie odnajdziesz tam słabą, rozmytą plamkę – Galaktykę Andromedy, oddległą od nas aż o 2,5 mln lat świetlnych.



Świat zdrowo zafalował

Z prof. Tomaszem Bulikiem z Obserwatorium Astronomicznego Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, członkiem zespołu LIGO-Virgo (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory, Interferometr Virgo), o odkryciu fal grawitacyjnych rozmawia Przemek Berg.

1 Czy istnieje prawdopodobieństwo, że to, co odkryto w interferometrach LIGO w USA, i co zelektryzowało nie tylko środowiska naukowe, ale też światową opinię publiczną, to nie są fale grawitacyjne?

Prawdopodobieństwo to jest niezwykle małe. Obliczono, że przypadkowe zaobserwowanie silnego sygnału w dwóch interferometrach LIGO jednocześnie i pomyłkowe uznanie go za falę grawitacyjną może się wydarzyć raz na 200 tys. lat. Czyli raczej należy sądzić, że po raz pierwszy zidentyfikowano falę grawitacyjną, zwłaszcza że kształt zarejestrowanego sygnału jest zaskakująco zbieżny z oczekiwaniami naukowców.

2 Jak działają detektory LIGO?

Zbudowano dwa takie detektory. Znajdują się one w USA i dzieli je odległość 3 tys. km. Oba laserowe interferometry są takie same i składają się z dwóch ramion o długości

4 km każde, ustawionych pod kątem prostym. W miejscu połączenia ramion wysyłany jest sygnał laserowy, który jest następnie dzielony na dwa sygnały, każdy podążający swoim torem. Ten sygnał jest jeszcze odbijany wiele razy (używa się luster), by w ten sposób istotnie wydłużyć mierzoną odległość. [...]

Normalnie nie ma między wartościami ramion żadnej różnicy. Ale gdy przez detektor przechodzi fala grawitacyjna, nieznacznie zmienia ona długość ramion o rząd jednej tysięcznej średnicy protonu. To bardzo mało, ale da się zmierzyć. W obu oddalonych od siebie interferometrach zarejestrowano to samo – różnicę długości jednego ramienia w stosunku do drugiego. Jedno ramię się wydłużyło, drugie uległo skróceniu.

To oznacza, że przestrzeń w tych miejscach uległa ugięciu, a więc wykryto i tym samym potwierdzono istnienie fal grawitacyjnych. [...]



3

Co było źródłem wykrytej fali?

Kolizja dwóch dość masywnych czarnych dziur, do której doszło w odległości ponad miliarda lat świetlnych od nas. W jej wyniku powstała jedna czarna dziura o masie ponad 60 Słońc. Fakt, że istnieją dwa interferometry LIGO i w obu wykryto ten sam efekt, pomógł wstępnie ustalić krąg na niebie, w którym do tej kolizji doszło. [...]

4

Czyli wieloletnie poszukiwanie fal grawitacyjnych, które było jednym z ważniejszych wyzwań astrofizyki, zakończyło się wielkim sukcesem?

W ogólnej teorii względności Albert Einstein zauważył, że istnieje rozwiązanie falowe jego równań, ale nie był przekonany, że dotyczy ono fal niosących ze sobą energię. Później wielu naukowców zajmowało się teorią fal grawitacyjnych, w tym kilku wybitnych teoretyków polskich, np. prof. Trautman, i udało im się pokazać, że równania Einsteina opisują prawdziwą falę. I to taką, która niesie energię. [...]

Na podstawie artykułu: Przemek Berg,
„Wiedza i Życie” 2016, nr 4.

Pytania i zadania do tekstu

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



1. Oceń prawdziwość zdań. Zaznacz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F – jeśli jest fałszywe. Wskaż fragmenty tekstu, które pozwalają na taką ocenę.

1.	Prawdopodobieństwo, że w interferometrach LIGO zaobserwowano fale grawitacyjne, jest bardzo małe.	P	F
2.	W pracach nad obserwacjami fal grawitacyjnych brał udział przynajmniej jeden uczony z Polski.	P	F

2. Oblicz, ile razy:

- a) ramię interferometru jest dłuższe od połowy długości fali światła czerwonego,
b) połowa długości fali światła czerwonego jest dłuższa od jednej tysięcznej średnicy protonu.

Uwaga. Średnica protonu wynosi $1,68 \cdot 10^{-15}$ m.

3. Wyjaśnij, dlaczego w zadaniu 2. do porównań użyliśmy połowy długości fali światła, a nie całej takiej długości.
4. Kiedy doszło do kolizji czarnych dziur będącej przyczyną powstania pierwszej zaobserwowanej fali grawitacyjnej? Wybierz i uzasadnij odpowiedź.
- A. kilkanaście lat temu
- B. ok. miliarda lat temu
5. Artykuł opublikowano po pierwszej obserwacji fal grawitacyjnych. Od tego czasu dalej trwały badania. Znajdź informacje o kolejnych odkryciach, a także o laureatach Nagrody Nobla przyznanej za pierwszą obserwację fal grawitacyjnych.

Podsumowanie Energia jądrowa

■ Zgodnie ze szczególną teorią względności:

- ▶ We wszystkich inercjalnych układach odniesienia prawa fizyki są jednakowe.
- ▶ Jednakowa jest też prędkość światła w próżni c mierzona w różnych inercjalnych układach odniesienia, nawet jeżeli poruszają się one względem siebie.
- ▶ Żadne ciało ani informacja nie mogą się poruszać z prędkością większą od c .

■ Masa i energia

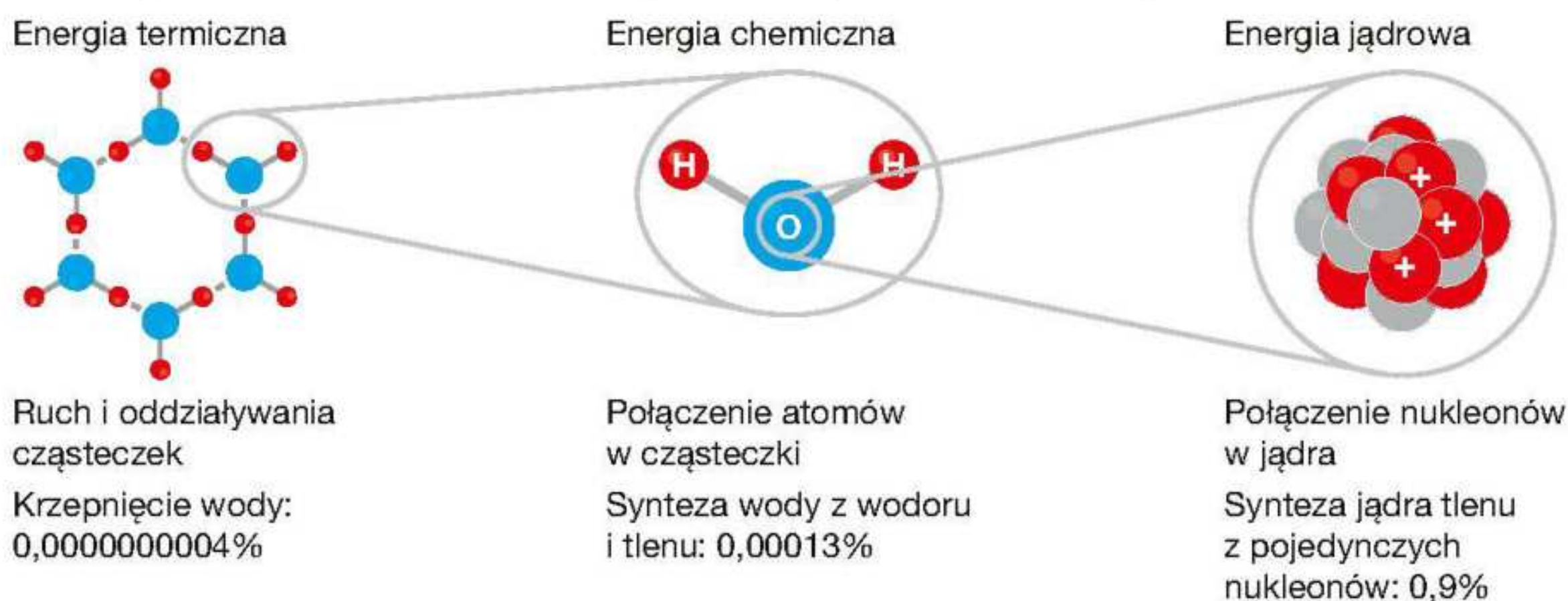
- ▶ Kiedy ciało zyskuje energię wewnętrzną, zwiększa się jego masa. Gdy traci energię wewnętrzną, jego masa się zmniejsza. Zależność między zmianą energii wewnętrznej a zmianą masy jest opisana wzorem:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

- ▶ Energia spoczynkowa ciała to energia odpowiadająca całej jego masie zgodnie ze wzorem $E_0 = mc^2$.

- ▶ **Deficyt** (defekt) masy to różnica między sumą mas części składowych układu oraz masą całego układu (np. między sumą mas cząstek wchodzących w skład jądra atomowego a jego masą).

- ▶ **Energia wiązania** jądra E_w to energia potrzebna do podzielenia układu na poszczególne składniki. Jej wartość wiąże się z deficytem masy Δm wzorem $E_w = \Delta mc^2$.

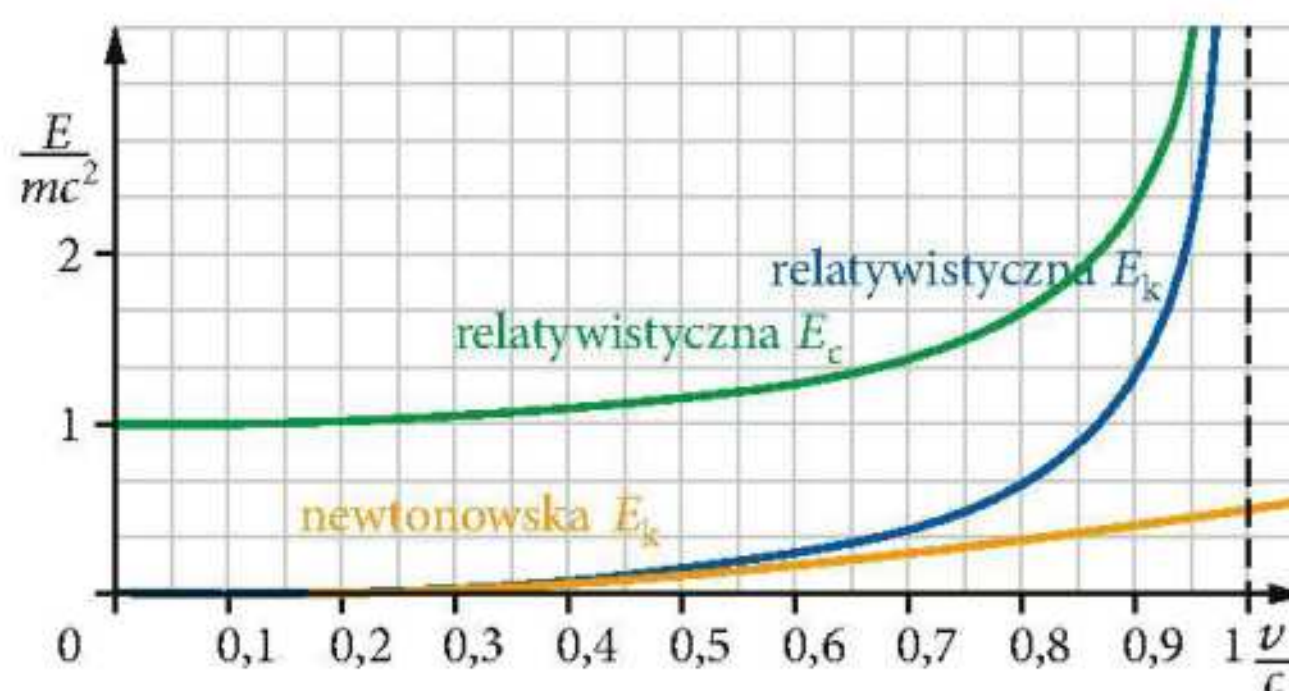


■ Energia relatywistyczna

- ▶ Całkowita energia ciała (spoczynkowa + kinetyczna) zależy od prędkości v tego ciała zgodnie ze wzorem:

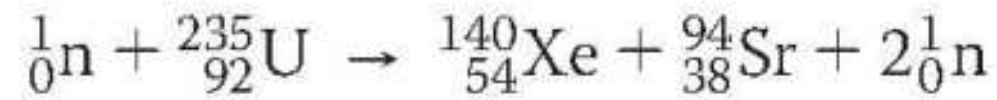
$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- ▶ Kiedy prędkość ciała zbliża się do c , jego energia dąży do nieskończoności. Dlatego ciało o niezerowej masie nie da się rozpędzić do prędkości światła.



■ Przykłady reakcji jądrowych, w których wydzielą się energia:

- ▶ rozpad promieniotwórczy,
- ▶ reakcja rozszczepienia ciężkich pierwiastków (wykorzystywana w elektrowniach jądrowych i w bombie jądrowej). Przykładowa reakcja rozszczepienia jądra uranu:



- ▶ reakcja syntezy (łączenia) jąder lekkich pierwiastków (zachodząca w gwiazdach, wykorzystywana w bombie wodorowej, czyli termojądrowej, a w przyszłości – w elektrowniach termojądrowych). Przykładowa reakcja syntezy jądrowej:



■ Ewolucja gwiazd

- ▶ Każda gwiazda powstaje z obłoku pyłu skupiającego się pod wpływem grawitacji.
- ▶ W większości gwiazd przez większą część czasu ich istnienia ma miejsce reakcja przemiany wodoru w hel. Na takim etapie życia obecnie jest Słońce i pozostanie na nim jeszcze przez kilka miliardów lat.
- ▶ Dalsze losy gwiazdy zależą od jej masy. Najmasywniejsze gwiazdy wybuchają jako supernowe, po czym zmieniają się w gwiazdy neutronowe lub w czarne dziury.

■ Jednostki odległości w astronomii

- ▶ Jednostka astronomiczna – średnia odległość Ziemia–Słońce:

$$1 \text{ au} \approx 150 \text{ mln km}$$

- ▶ Rok świetlny – odległość pokonywana w próżni przez światło w ciągu roku:

$$1 \text{ ly} \approx 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km} \approx 10^{16} \text{ m}$$

■ Wielki Wybuch

- ▶ Zgodnie z obecną wiedzą Wszechświat rozpoczął się 14 mld lat temu od Wielkiego Wybuchu, czyli od stanu, gdy cała jego masa była skupiona w bardzo małej objętości.
- ▶ Teoria Wielkiego Wybuchu wyjaśniła m.in. przesunięcie ku czerwieni w widmie gwiazd i pozwoliła przewidzieć istnienie mikrofalowego promieniowania tła.
- ▶ Dalekie galaktyki oddalają się od nas (i od siebie nawzajem) z prędkością proporcjonalną do ich odległości.

Sposób na zadanie

Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk

Zadanie 1. (0–4)

Uważaj na oznaczenia, będzie mowa także o energii.

Elektron w próżni został rozpędzony w jednorodnym polu elektrycznym o natężeniu $E = 50\,000 \frac{\text{N}}{\text{C}}$ na drodze $s = 10 \text{ m}$. Oblicz, do jakiej prędkości się rozpędził. Podaj wynik w postaci ułamka prędkości światła.

Rozwiązanie:

Obliczamy energię kinetyczną

Napięcie U w polu jednorodnym możemy obliczyć z zależności:

$$E = \frac{U}{s} \rightarrow U = Es$$

Przypomina nam o niej jednostka: $\frac{\text{N}}{\text{C}}$ to inaczej $\frac{\text{V}}{\text{m}}$.

Po podstawieniu danych otrzymujemy:

$$U = 50\,000 \frac{\text{N}}{\text{C}} \cdot 10 \text{ m} = 50\,000 \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot 10 \text{ m} = 500\,000 \text{ V} = 500 \text{ kV}$$

Od razu możemy podać energię kinetyczną elektronu w eV:

$$E_k = 500 \text{ keV}$$

E_k można było także obliczyć w dżulach jako Ue .

Przeliczmy ją na dżule:

$$E_k = 5 \cdot 10^5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 8 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

Obliczamy energię spoczynkową

Korzystamy z masy elektronu znalezionej w tablicach:

$$E_0 = mc^2 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 8,2 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

Porównujemy energię kinetyczną i spoczynkową

Te dwie wielkości są do siebie zbliżone, dlatego musimy korzystać ze wzorów relatywistycznych.

Przekształcamy wzór na energię całkowitą

Wzór ten ma postać:

$$E_c = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Czyli wynikających z teorii względności.

Energia całkowita to suma energii spoczynkowej i kinetycznej, a mc^2 to energia spoczynkowa, a więc:

$$E_k + E_0 = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Z tego wzoru wyznaczamy v .

Jeśli boisz się błędów w przekształcaniu wzorów, podstaw wartości liczbowe z lewej strony.

$$\frac{E_k + E_0}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow \frac{E_k}{E_0} + 1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{\frac{E_k}{E_0} + 1}$$

Obie strony równania podnosimy do kwadratu.

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{\left(\frac{E_k}{E_0} + 1\right)^2} \rightarrow \frac{v^2}{c^2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{E_k}{E_0} + 1\right)^2}$$

Ostatecznie wzór na prędkość przyjmuje postać:

Zauważ, że zawsze $v < c$.

$$v = \sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{E_k}{E_0} + 1\right)^2}} \cdot c$$

Obliczamy iloraz energii:

$$\frac{E_k}{E_0} = \frac{8 \cdot 10^{-14} \text{ J}}{8,2 \cdot 10^{-14} \text{ J}} = 0,9756$$

Podstawiamy ten iloraz do wzoru na prędkość i otrzymujemy: $v = 0,86c$.

Odpowiedź: Elektron rozpędził się do 0,86 wartości prędkości światła w próżni.

Warto zapamiętać!

- Cząstki elementarne (np. elektrony, protony) w wielu zjawiskach poruszają się tak szybko, że do ich opisu musimy korzystać ze wzorów relatywistycznych.
- Ze wzorów fizyki newtonowskiej możemy korzystać tylko wtedy, gdy energia kinetyczna cząstki jest znacznie mniejsza od jej energii spoczynkowej.

Zadanie 2. (0–3)

Pluton-239 ulega rozpadowi alfa. Oblicz energię wydzielaną podczas całkowitego rozpadu 10 g tego izotopu.

Rozwiązanie:

Zapisujemy równanie reakcji

Sprawdzamy to w układzie okresowym.

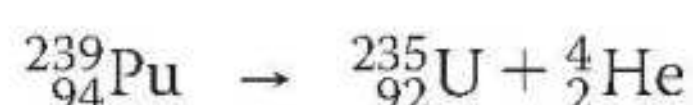
Neutrony nie mają wpływu na liczbę atomową.

Liczba atomowa plutonu wynosi 94. Po rozpadzie alfa ubywają z jego jądra dwa protony, a więc pojawia się pierwiastek o liczbie atomowej 92. Jest to uran.

Liczba masowa zmniejsza się o 4, ponieważ z jądra ubywają 2 protony i 2 neutrony.

Zapisujemy równanie reakcji:

Cząstka alfa to jądro ${}^4_2\text{He}$.



Obliczamy, o jaką część zmniejszyła się masa

Sprawdzamy w tablicach masę wszystkich jąder biorących udział w tej reakcji:

$$m_{\text{Pu}} = 396,8698 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, m_{\text{U}} = 390,2158 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, m_{\text{He}} = 6,6447 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.$$

Masa zmniejszyła się o:

$$\frac{\Delta m}{m_{\text{Pu}}} = \frac{m_{\text{Pu}} - (m_{\text{U}} + m_{\text{He}})}{m_{\text{Pu}}} = 1 - \frac{m_{\text{U}} + m_{\text{He}}}{m_{\text{Pu}}}$$

Po podstawieniu danych liczbowych:

$$\frac{\Delta m}{m_{\text{Pu}}} = 2,34 \cdot 10^{-5}$$

Taka sama część jak z masy jądra.

Wyznaczamy energię wyzwalaną przy rozpadzie 10 g plutonu

Skoro w czasie rozpadu ubywa $2,34 \cdot 10^{-5}$ masy każdego jądra, to z 1 g ubywa masa $2,34 \cdot 10^{-5} \text{ g}$, a więc z 10 g ubywa $2,34 \cdot 10^{-4} \text{ g} = 2,34 \cdot 10^{-7} \text{ kg}$.

Masę elektronów możemy pominąć.

Wyzwala się energia:

$$E = 2,34 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 = 2,1 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

Odpowiedź: Podczas rozpadu wyzwala się energia 21 GJ.

Uwaga. Przy czasie połowicznego rozpadu ponad 24 000 lat musielibyśmy mieć bardzo dużą próbkę, aby czasie eksperymentu trwającego nawet kilka lat rozpadło się aż 10 g.

Warto zapamiętać!

- Energię wydzielaną w przemianach jądrowych obliczamy na podstawie różnicy mas substancji przed przemianą i po niej.

Zadanie analogiczne

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



Zadanie 1. Oblicz prędkość z zadania 1. (s. 232) inną metodą: zgodnie z komentarzem do

wzoru $\frac{E_k + E_0}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ podstaw wartość liczbową lewej strony.

Zadanie 2. Oblicz prędkość cząstki, której energia kinetyczna jest 4 razy większa od energii spoczynkowej.

Zadanie 3. Cząstka porusza się z prędkością równą 94% prędkości światła. Oblicz stosunek energii kinetycznej do energii spoczynkowej.

Zadanie 4. Potas-40 ulega rozpadowi beta minus. Oblicz energię wydzieloną w wyniku całkowitego rozpadu 2 mg tego pierwiastka. Pomiń energię antyneutrino.

Uwaga. Przy obliczaniu zmiany masy nie pomijaj masy elektronu. Jest ona niewielka w stosunku do masy jądra, ale znacząca w stosunku do różnicy mas jąder potasu i produktu rozpadu. Pomiń natomiast masę antyneutrino.

Zadania powtórzeniowe

ROZWIĄZANIA I ODPOWIEDZI ZAPISZ W ZESZYCIE



Zadanie 1. Dodawanie prędkości

Na dziobie statku kosmicznego lecącego w kierunku Jowisza z prędkością $v = 10 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ włączono reflektor świecący do przodu.

Oceń prawdziwość zdań. Zaznacz P, jeśli zdanie jest prawdziwe, lub F – jeśli jest fałszywe. Symbolem c oznaczono prędkość światła w próżni.

1.	Fotony biegnące z reflektora poruszają się względem Jowisza z prędkością $c + v$.	P	F
2.	Fotony biegnące z reflektora poruszają się względem statku z prędkością $c - v$.	P	F

Zadanie 2. Ruch elektronu

Elektron jest rozpędzany w polu elektrycznym pod napięciem 1 MV.

Zadanie 2.1. Wykaż, że obliczanie prędkości takiego elektronu z klasycznego wzoru na energię kinetyczną $E_k = \frac{1}{2} mv^2$ prowadzi do absurdalnego wyniku.

Zadanie 2.2. Oblicz prędkość tego elektronu ze wzorów relatywistycznych.

Zadanie 3. Rozpad beta plus

Azot-12 ulega rozpadowi beta plus. Oblicz energię wydzieloną podczas:

- a) rozpadu jednego jądra (w MeV),
- b) całkowitego rozpadu 3 g izotopu (w kWh).

Uwaga. Nie pomijaj masy elektronu przy obliczaniu zmiany masy. Jest ona niewielka w stosunku do masy jądra, ale znacząca w stosunku do różnicy mas jąder azotu i produktu rozpadu. Pomiń natomiast energię całkowitą neutrino.

Zadanie 4. Rozpad alfa

Polon-218 ulega głównie rozpadowi alfa. Zapisz równanie reakcji tego rozpadu. Oblicz energię wydzieloną w czasie pojedynczego rozpadu. Podaj wynik w elektronowoltach.

Tabele

Tabela 1. Wielokrotności i podwielokrotności jednostek

Przedrostek		Mnożnik	Przedrostek		Mnożnik	Przedrostek		Mnożnik	Przedrostek		Mnożnik
E	eksa	10^{18}	M	mega	10^6	d	decy	10^{-1}	n	nano	10^{-9}
P	peta	10^{15}	k	kilo	10^3	c	centy	10^{-2}	p	piko	10^{-12}
T	tera	10^{12}	h	hekto	10^2	m	mili	10^{-3}	f	femto	10^{-15}
G	giga	10^9	da	deka	10^1	μ	mikro	10^{-6}	a	atto	10^{-18}

Tabela 2. Stałe fizyczne, jednostki

Prędkość światła w próżni	$c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (wartość dokładna) $\approx 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Ładunek elementarny	$e = 1,6021176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (wartość dokładna) $\approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Stała Plancka	$h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ (wartość dokładna) $\approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$
Stała Avogadro	$N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$ (wartość dokładna) $\approx 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$
Stała Wiena	$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$
Stała Hubble'a	$2,22 \cdot 10^{-18} \frac{1}{\text{s}}$
Jednostka masy atomowej	$1 \text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Masa elektronu	$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Masa protonu	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Masa neutronu	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Jednostka astronomiczna	$1 \text{ au} = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$
Rok świetlny	$1 \text{ ly} = 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m}$
Elektronowolt	$1 \text{ eV} = 1 \text{ e} \cdot 1 \text{ V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Energia równoważna jednostce masy atomowej	$1 \text{ u} \cdot c^2 = 1,4924 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 931,5 \text{ MeV}$
Masa równoważna energii 1 eV	$1 \frac{\text{eV}}{c^2} = 1,7827 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$

Tabela 3. Współczynnik załamania światła o długości fali 590 nm dla wybranych substancji

Substancja	Współczynnik załamania
Lód	1,31
Woda	1,33
Alkohol etylowy	1,36
Szkło kwarcowe	1,46
Oliwa z oliwek	1,47
Pleksi	1,49
Szkło typu kron	1,50
Chlorek sodu	1,54
Szkło typu flint lekki	1,58
Cyrkonia	2,16
Diamant	2,42

Tabela 4. Współczynniki załamania światła w zależności od długości fali dla wody i szkła typu lekki flint

λ , nm	Woda	Szkło flint lekki
400	1,3433	1,603
450	1,3393	1,591
500	1,3363	1,584
550	1,3340	1,577
600	1,3326	1,574
650	1,3311	1,571
700	1,3302	1,569
750	1,3292	1,567

Tabela 5. Praca wyjścia wybranych substancji

Metal	Praca wyjścia, eV
Arsen	5,1
Bar	2,5
Cez	2,1
Cynk	4,3
Glin (aluminium)	4,2
Lit	2,4
Miedź	4,5
Ołów	4,0
Platyna	5,3
Potas	2,2
Rubid	2,2
Sód	2,75
Srebro	4,7
Stront	2,5
Wolfram	4,6
Złoto	4,4

Tabela 6. Prędkość światła w zależności od częstotliwości fali w różnych ośrodkach

Częstotliwość fali, Hz	Prędkość światła, $\frac{\text{km}}{\text{s}}$		
	w próżni	w powietrzu	w wodzie
$7,5 \cdot 10^{14}$	299 792	299 708	223 176
$5,0 \cdot 10^{14}$	299 792	299 709	224 968
$4,3 \cdot 10^{14}$	299 792	299 710	225 374

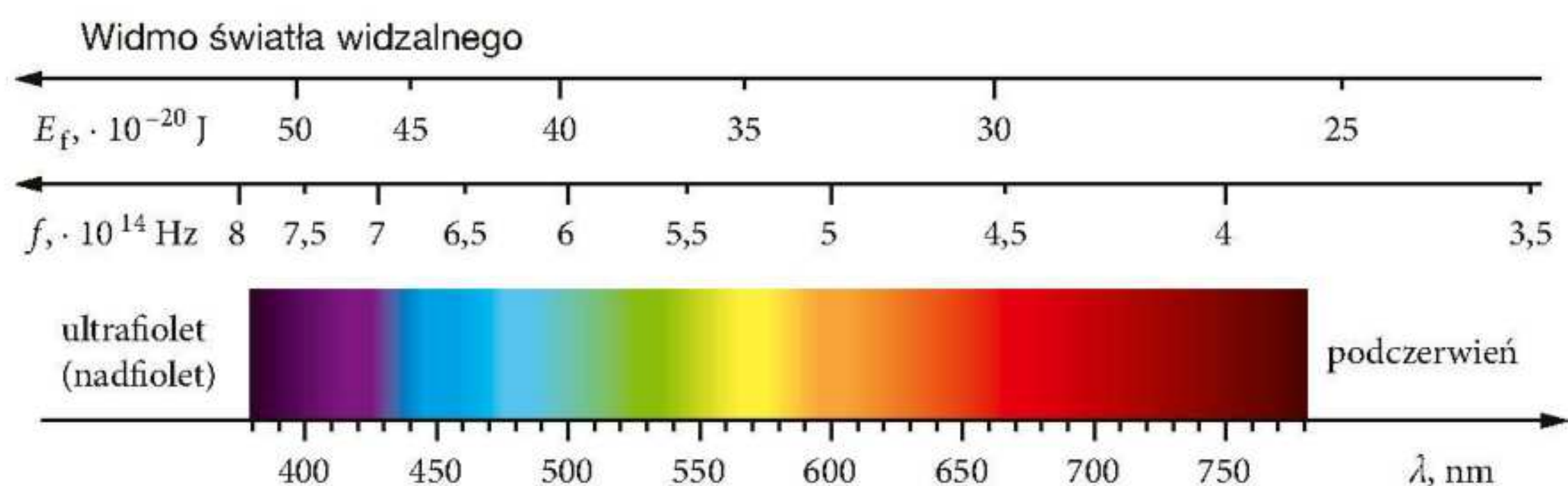


Tabela 7. Czasy połowicznego rozpadu izotopów

Izotop	Nazwa	Czas połowicznego rozpadu
${}^3_1\text{H}$	Wodór (tryt)	12 lat
${}^8_3\text{Li}$	Lit	0,8 s
${}^{12}_5\text{B}$	Bor	7,2 s
${}^{14}_6\text{C}$	Węgiel	5730 lat
${}^{12}_7\text{N}$	Azot	0,02 s
${}^{13}_7\text{N}$	Azot	0,011 s
${}^{16}_7\text{N}$	Azot	10 min
${}^{18}_9\text{F}$	Fluor	110 min
${}^{40}_{19}\text{K}$	Potas	1,3 mld lat
${}^{63}_{28}\text{Ni}$	Nikiel	100 lat
${}^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$	Technet	6 h
${}^{131}_{52}\text{Te}$	Tellur	25 min
${}^{128}_{53}\text{I}$	Jod	25 min
${}^{131}_{53}\text{I}$	Jod	8 dób
${}^{133}_{54}\text{Xe}$	Ksenon	5 dób
${}^{137}_{55}\text{Cs}$	Cez	30 lat
${}^{218}_{84}\text{Po}$	Polon	45 s
${}^{222}_{86}\text{Rn}$	Radon	3,8 doby
${}^{226}_{88}\text{Ra}$	Rad	1600 lat
${}^{238}_{92}\text{U}$	Uran	4,5 mld lat
${}^{235}_{92}\text{U}$	Uran	704 mln lat

Tabela 8. Masa, liczba atomowa i liczba masowa jąder wybranych izotopów

Nazwa	Symbol	Liczba atomowa	Liczba masowa	Masa jądra ($\cdot 10^{-27}$ kg)
wodór	H	1	1	1,6726
wodór (deuter)	H	1	2	3,3436
wodór (tryt)	H	1	3	5,0074
hel	He	2	4	6,6447
węgiel	C	6	12	19,921
węgiel	C	6	14	23,2475
azot	N	7	12	19,951
azot	N	7	14	23,2463
tlen	O	8	16	26,5529
potas	K	19	40	66,3445
wapń	Ca	20	40	66,3412
krypton	Kr	36	92	152,6142
krypton	Kr	36	93	154,283
stront	Sr	38	90	149,2607
stront	Sr	38	94	155,9155
itr	Y	39	90	149,2588
cyrkon	Zr	40	100	165,8813
tellur	Te	52	130	215,667
jod	I	53	131	217,3265
ksenon	Xe	54	131	217,3238
ksenon	Xe	54	140	232,2962
bar	Ba	56	140	232,276
bar	Ba	56	141	233,9429
bar	Ba	56	144	238,9387
ołów	Pb	82	214	355,2803
polon	Po	84	218	361,9359
radon	Rn	86	222	368,5905
rad	Ra	88	226	375,2439
uran	U	92	233	386,8876
uran	U	92	235	390,2158
uran	U	92	238	395,2088
pluton	Pu	94	239	396,8698

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 1 wodor 1,008	2 He 2 hel 4,003	3 Li 3 lit 6,941	4 Be 4 beryl 9,012	5 B 5 bor 10,811	6 C 6 węgiel 12,011	7 N 7 azot 14,007	8 O 8 tlen 15,999	9 F 9 fluor 18,998	10 Ne 10 neon 20,180	11 Na 11 sód 22,990	12 Mg 12 magnez 24,305	13 Al 13 glin 26,982	14 Si 14 krzem 28,085	15 P 15 fosfor 30,974	16 S 16 siarka 32,065	17 Cl 17 chlor 35,453	18 Ar 18 argon 39,948
19 K 19 potas 39,098	20 Ca 20 wapń 40,078	21 Sc 21 skand 44,956	22 Ti 22 tytan 47,867	23 V 23 wanad 50,942	24 Cr 24 chrom 51,996	25 Mn 25 mangan 54,938	26 Fe 26 żelazo 55,845	27 Co 27 kobalt 58,933	28 Ni 28 nikiel 58,693	29 Cu 29 miedź 63,546	30 Zn 30 cynk 65,38	31 Ga 31 gal 69,723	32 Ge 32 german 72,63	33 As 33 arsen 74,922	34 Se 34 selen 78,96	35 Br 35 brom 79,904	36 Kr 36 krypton 83,798
37 Rb 37 rubid 85,468	38 Sr 38 stront 87,62	39 Y 39 itr 88,906	40 Zr 40 cyrkon 91,224	41 Nb 41 niob 92,906	42 Mo 42 molibden 95,96	43 Tc 43 technet 97,905	44 Ru 44 ruten 101,07	45 Rh 45 rod 102,906	46 Pd 46 pallad 106,42	47 Ag 47 srebro 107,868	48 Cd 48 kadm 112,411	49 In 49 ind 114,818	50 Sn 50 cyna 118,710	51 Sb 51 antymon 121,760	52 Te 52 tellur 127,60	53 I 53 jod 126,904	54 Xe 54 ksenon 131,293
55 Cs 55 cez 132,905	56 Ba 56 bar 137,327	57 La 57 lantan 138,905	72 Hf 72 hafn 178,49	73 Ta 73 tantal 180,948	74 W 74 wolfram 183,84	75 Re 75 ren 186,207	76 Os 76 osm 190,23	77 Ir 77 iryd 192,217	78 Pt 78 platyna 195,084	79 Au 79 złoto 196,967	80 Hg 80 rtęć 200,59	81 Tl 81 tal 204,383	82 Pb 82 ołów 207,2	83 Bi 83 bismut 208,980	84 Po 84 polon 208,982	85 At 85 astat 209,987	86 Rn 86 radon 222,018
87 Fr 87 frans 223,020	88 Ra 88 rad 226,025	89 Ac 89 aktyn 227,028	104 Rf 104 rutherford 263	105 Db 105 dubn 268	106 Sg 106 seaborg 266	107 Bh 107 bohr 270	108 Hs 108 has 277	109 Mt 109 meitner 278	110 Ds 110 darmstadt 281	111 Rg 111 roentgen 281	112 Cn 112 kopernik 285	113 Nh 113 nihon 286	114 Fl 114 flerow 289	115 Mc 115 moskow 289	116 Lv 116 liwermor 292	117 Ts 117 tenes 294	118 Og 118 oganeson 294
		58 Ce 58 cer 140,116	59 Pr 59 prazeodym 140,908	60 Nd 60 neodym 144,242	61 Pm 61 promet 144,913	62 Sm 62 samar 150,36	63 Eu 63 europ 151,964	64 Gd 64 gadolin 157,25	65 Tb 65 terb 158,925	66 Dy 66 dysproz 165,500	67 Ho 67 holm 164,930	68 Er 68 erb 167,259	69 Tm 69 tul 168,934	70 Yb 70 iterb 173,04	71 Lu 71 lutet 174,967	102 No 102 nobel 259,101	103 Lr 103 lorens 262,110
		90 Th 90 tor 232,038	91 Pa 91 protaktyn 231,036	92 U 92 uran 238,029	93 Np 93 neptun 237,048	94 Pu 94 pluton 244,064	95 Am 95 ameryk 243,061	96 Cm 96 kiur 247,070	97 Bk 97 berkel 247,1	98 Cf 98 kaliforn 251,080	99 Es 99 einstein 252,088	100 Fm 100 ferm 257,095	101 Md 101 mendelew 258,098	102 No 102 nobel 259,101	103 Lr 103 lorens 262,110		

metale

niemetale

liczba atomowa
(liczba porządkowa)

gazy szlachetne

symbol pierwiastka
chemicznego

nazwa pierwiastka
chemicznego

masa atomowa, u

Spis doświadczeń obowiązkowych

Doświadczenia	Numer doświadczenia	Strona
Badanie związku między ogniskową soczewki a położeniem przedmiotu i obrazu	3	18
Obserwacja zmiany natężenia światła po przejściu przez dwa polaryzatory	8	54
Obserwacja widma atomowego za pomocą siatki dyfrakcyjnej	12	92

Spis infografik

1. Tęcza	40–41
2. Obserwacje w różnych zakresach fal elektromagnetycznych	50–51
3. Ekran LCD	60–61
4. Mikroskop elektronowy	90–91
5. Zastosowania laserów	98
6. Promieniowanie termiczne i temperatura barwowa	112–113
7. Droga do teorii względności	176–177
8. Rozszczepienie jądra atomowego	200–201
9. Ewolucja masywnej gwiazdy	214–215
10. Ewolucja Wszechświata	224–225

Odpowiedzi i wskazówki do wybranych zadań

18. Optyka

18.1. Soczewki

Zadanie 1. a) $f = 0,25 \text{ m}$, b) $f = -0,20 \text{ m}$

Zadanie 2. **Wskazówka.** Skorzystaj z podobieństwa trójkątów. Najłatwiej obliczyć najpierw odległość szukanego miejsca od ogniska soczewki.

$$x_1 = 6 \text{ cm}, x_2 = 14 \text{ cm}$$

Zadanie 4. **Wskazówka.** Skorzystaj z odwracalności biegu promienia światła.

18.2. Obraz rzeczywisty

Zadanie 1. $y = 30 \text{ cm}$, $H = 10 \text{ cm}$

Zadanie 2. $y_\infty = 1 \text{ cm}$, $y_{30} = 1,03 \text{ cm}$

Zadanie 3. a) $y_\infty = 2,5 \text{ mm}$, $y_{10} = 2,56 \text{ mm}$,
c) $h_o = 0,5 \text{ mm}$

18.3. Obraz pozorny tworzony przez zwierciadło płaskie

Zadanie 1. a) B, b) B, c) C

Zadanie 3. $\beta = 50^\circ$

Zadanie 4. $h_{\min} = 90 \text{ cm}$, nie zależy

18.4. Obraz pozorny tworzony przez soczewki

Jest na to sposób

Zadanie 2. $x = 60 \text{ cm}$, $y = 30 \text{ cm}$, $f = 20 \text{ cm}$

Zadanie 1. $\frac{1}{y} = \frac{1}{f} - \frac{1}{x}$, $h_o = h_p \frac{|y|}{x}$,

a) $|y| \approx 6,7 \text{ cm}$, $h_o \approx 13,3 \text{ cm}$,

b) $|y| = 20 \text{ cm}$, $h_o = 20 \text{ cm}$,

c) $|y| = 60 \text{ cm}$, $h_o = 40 \text{ cm}$

Zadanie 2. a) $|y| \approx 6,7 \text{ cm}$, $h_o \approx 6,7 \text{ cm}$,

b) $|y| = 10 \text{ cm}$, $h_o = 5 \text{ cm}$,

c) $|y| = 12 \text{ cm}$, $h_o = 4 \text{ cm}$

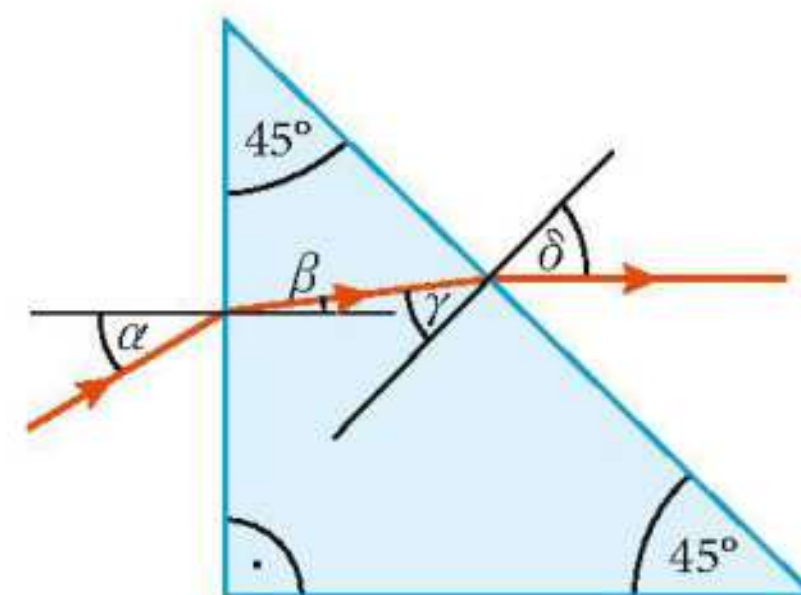
Zadanie 3. Obraz nie powstaje.

Zadanie 4. $x = \frac{20}{9} \text{ cm}$

Zadanie 5. $x = 120 \text{ cm}$

18.5. Rozszczepienie światła

Zadanie 3. **Wskazówka.** Dla każdej z barw oblicz po kolei kąty β , γ , δ .



a) $\beta_{cz} - \beta_f \approx 0,4^\circ$, b) $\delta_{cz} - \delta_f \approx 2,2^\circ$

Zadanie 4. $\beta_{cz} - \beta_f \approx 0,2^\circ$

18.6. Natura fal elektromagnetycznych

Zadanie 2. $\lambda = \frac{c}{f} = 6 \text{ m}$

Zadanie 3. a) $f = \frac{c}{\lambda} = 232 \text{ kHz}$

18.7. Polaryzacja

Zadanie 2. $I = I_0 \cos^2 \alpha = 8,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Zadanie 3. $I' = \frac{1}{2} I$

Zadania analogiczne

Zadanie 1.1. $d = f_1 + f_2$

Zadanie 1.2. $k = \frac{f_1}{f_2}$

Zadanie 3. **Wskazówka.** Na rysunku możesz dowolnie powiększyć soczewkę. Nawet maleńka soczewka w aparacie telefonu tworzy taki sam obraz domu, jak ogromna soczewka, większa od domu, byle o takiej samej ogniskowej.

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1.1. B, C

Zadanie 1.2. A, C, E

Zadanie 1.3. $f = 22,5 \text{ cm}$

Zadanie 2. $f = 30 \text{ cm}$

Zadanie 3.1. C

Zadanie 3.2. $\alpha = 60^\circ$

19. Fizyka atomowa

19.1. Zjawisko fotoelektryczne

Zadanie 1. $E_1 = \frac{hc}{\lambda_1} = 3,27 \text{ eV}$, $E_2 = \frac{hc}{\lambda_2} = 1,59 \text{ eV}$

Zadanie 2. Energia fotonu musi wynosić co najmniej $E_{\min} = W + \frac{m_e v^2}{2}$, gdzie: m_e – masa elektronu, W – praca wyjścia, a więc długość fali musi być mniejsza niż $\lambda_{\max} = \frac{hc}{E_{\min}} = 153 \text{ nm}$; jest to promieniowanie ultrafioletowe

Zadanie 3. $v_{\max} = \sqrt{\frac{2(\frac{hc}{\lambda} - W)}{m_e}} = 143 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

Zadanie 4. W zależności od sposobu szacowania możemy otrzymać różne liczby, ale wynik powinien być rzędu 10^{19}

19.2. Falowa natura materii

Zadanie 1. $E = 100 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-17} \text{ J}$,

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2Em}} = 0,12 \text{ nm}$$

Zadanie 2. $\frac{h}{m\lambda} = 1250 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (podstawiono długość fali światła żółtego: $\lambda = 580 \text{ nm}$)

Zadanie 3. $\lambda = \frac{h}{mv} = 1,7 \cdot 10^{-34} \text{ m}$, rozmiary oczek są znacznie większe od obliczonej długości fali de Broglie'a

Zadanie 4. a) $\lambda = \frac{h}{p} = 56 \text{ pm}$, $\sin \theta_1 = \frac{n\lambda}{d} = 7 \cdot 10^{-6}$, $x = 4,5 \mu\text{m}$, b) wzrosła

19.3. Widmo liniowe

Zadanie 1. $m=2$ oraz $n=4$, zatem:

$$f = \frac{c}{\lambda} = E_0 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \approx 6,16 \cdot 10^{14} \text{ Hz},$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \approx 4,87 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 487 \text{ nm}$$

Zadanie 2. $\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{hc}{\lambda}$,

stąd: $\lambda = \frac{hc}{E_1 - E_2} = 637 \text{ nm}$, światło ma barwę czerwoną

Zadanie 3. Przejście między 6 a 3 orbitą – promieniowanie podczerwone.

Zadanie 4. a) f_{53} , b) λ_{43}

Zadanie 5. **Wskazówka.** Skorzystaj z zasady zachowania energii.

19.4. Foton jako cząstka

Zadanie 2. **Wskazówka.** Zderzenie jest sprężyste, zachowane są więc zarówno pęd, jak i energia kinetyczna (więcej w części 1. podręcznika). Nie zapominaj, że zmienia się zwrot pędu piłeczki – wartość zmiany pędu piłeczki to suma wartości pędu przed zderzeniem i po nim. Zamiast wyprowadzać ogólny wzór, można też podstawić dane liczbowe do równości wynikających z zasad zachowania i rozwiązać układ równań.

Ogólny wzór ma postać: $\frac{|\Delta E_k|}{E_k} = \frac{4Mm}{(M+m)^2}$,

gdzie: m – masa piłki, M – masa pingwina,

a) $\frac{|\Delta E_k|}{E_k} = 0,33$, b) $\frac{|\Delta E_k|}{E_k} = 0,095$

Zadanie 3. Hel. **Wskazówka.** Aby odpowiedzieć na pytanie, oblicz masę atomu i wyraż ją w jednostkach masy atomowej. Potem możesz skorzystać z układu okresowego.

19.5. Promieniowanie termiczne

Zadanie 2. $T_s = -10^\circ\text{C} = 263 \text{ K}$, czyli: $\lambda_s = \frac{b}{T_s} \approx 11 \mu\text{m}$,

długość fali światła czerwonego (średnia):

$\lambda_{cz} = 0,7 \mu\text{m} \approx 0,064\lambda_s$, dla promieniowania kuchenki:

$$\lambda_k = \frac{c}{f} \approx 12,2 \text{ cm} = 11\,000\lambda_s$$

Zadanie 3. $T = \frac{b}{\lambda_{\max}}$, dla światła czerwonego:

$$T_{cz} = \frac{b}{\lambda_{cz}} = 3700 \text{ K (temperatura minimalna)},$$

dla światła fioletowego: $T_f = \frac{b}{\lambda_f} = 7600 \text{ K}$ (temperatura maksymalna)

19.6. Efekt cieplarniany

Zadanie 3. dodatnie: a, b, d, ujemne: c, e

Zadanie 4. a) $\lambda_{\max} = \frac{b}{T} = \frac{0,0029 \text{ m} \cdot \text{K}}{323 \text{ K}} = 9 \mu\text{m}$,

b) 18 razy

Zadanie 5. smog: a, c, d, e

Zadania analogiczne

Zadanie 1. $v = \frac{h}{\lambda m_p} = 0,92 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Zadanie 2. $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = 3,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Zadanie 3. **Wskazówka.** Możesz wyznaczyć zarówno pęd, jak i energię kinetyczną ciała, a na tej podstawie – jego masę.

$$m = \frac{h(f_1 + f_2)^2}{2c^2(f_1 + f_2)} \approx 6 \cdot 10^{-35} \text{ kg (dla światła}$$

fioletowego o długości 380 nm i niebieskiego o długości 450 nm). To masa kilkadziesiąt tysięcy razy mniejsza od masy elektronu.

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1. C, 2

Zadanie 2.3. B

Zadanie 2.4.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2eUm}} = 0,039 \text{ nm}, \sin \alpha = \frac{\lambda}{d} = 2,6 \cdot 10^{-4},$$

$$x = L \tan \alpha \approx L \sin \alpha = 2,6 \text{ mm}$$

Zadanie 2.5. C, 1

Zadanie 3.1. FPP

Zadanie 3.2.

$$E = \frac{hc}{\lambda} = 2,2 \text{ eV, stan nr 8}$$

20. Izotopy i promieniowanie

20.1. Jądro atomowe

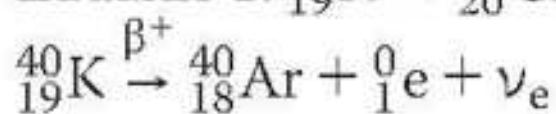
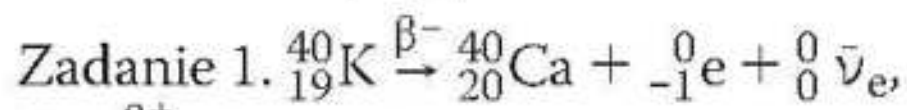
Zadanie 1. d) protonów

$$\text{Zadanie 2. } 0,76 \cdot 35 + 0,24 \cdot 37 = 35,48$$

$$\text{Zadanie 4. } 28,8 \text{ u} / 2 \text{ u} = 14,4$$

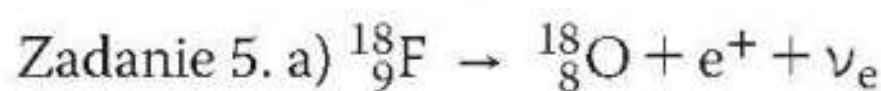
Zadanie 6. a) B (dlaczego?)

20.2. Reakcje jądrowe



Zadanie 2. węgiel-13

Zadanie 3. uran-229



20.3. Promieniowanie jądrowe

Zadanie 1. b) polon-210 powstaje w wyniku drugiego rozpadu beta minus

$$\text{Zadanie 5.: } n = 1,94 \cdot 10^{12}$$

20.4. Czas połowicznego rozpadu

Zadanie 1. ok. 60%

Zadanie 2. faraon zmarł ok. 2700 r. p.n.e.

$$\text{Zadanie 3. } A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 0,6A_0, \text{ stąd}$$

$$T_{1/2} = -t \cdot \frac{\log 2}{\log 0,6} = 5,4 \text{ h}$$

$$\text{Zadanie 4. } \frac{m_{127}}{m'_{131}} = \frac{9}{\frac{1}{8}} = \frac{72}{1}$$

$$\text{Zadanie 5. } T_{1/2} = 15 \text{ h}$$

$$\text{Zadanie 6. } m = 600 \text{ kg}$$

Zadanie analogiczne

$$\text{Zadanie. } T_{1/2} = 60 \text{ min} \pm 12 \text{ min}$$

Zadania powtórzeniowe

$$\text{Zadanie 1.2. } f = \frac{E}{h} = 1,07 \cdot 10^{20} \text{ Hz, } \lambda = \frac{c}{f} = 2,8 \text{ pm}$$

$$\text{Zadanie 1.3. } m = m_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = 0,38 \text{ g}$$

Zadanie 1.4. o godzinie 8:42

$$\text{Zadanie 1.5. } \Delta m = 0,93 \cdot m_0(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}) = 9 \text{ g}$$

$$\text{Zadanie 2. } T_{1/2} = 155 \text{ s}$$

Rozdział 21. Fizyka jądrowa

21.1. Teoria względności

$$\text{Zadanie 3. a) } 1732 \text{ lata, b) } v = 0,999998c,$$

$$t = 1000 \text{ lat } 18 \text{ h}$$

21.2. Masa a energia

$$\text{Zadanie 1. } \Delta m = \frac{\Delta E_w}{c^2} = \frac{mc_{\text{Fe}} \Delta T}{c^2} \approx$$

$$\approx 4 \cdot 10^{-11} \text{ kg} = 0,04 \mu\text{g}$$

$$\text{Zadanie 2. } m = \frac{E}{2c^2} \approx 0,28 \text{ g}$$

$$\text{Zadanie 3. zmiana masy } \Delta m = \frac{E}{c^2} = 6,2 \cdot 10^{-10} \text{ kg,}$$

gdzie $E = 56 \text{ MJ}$, czyli masa produktów:
 $m' = 5 \text{ kg} - 6,2 \cdot 10^{-10} \text{ kg} = 4,99999999938 \text{ kg}$

Zadanie 4.

$$\text{a) } \Delta m = \frac{E}{c^2} = 4,4 \cdot 10^9 \text{ kg} = 4,4 \text{ mln ton,}$$

$$\text{gdzie } E = Pt = 4 \cdot 10^{26} \text{ J,}$$

$$\text{b) } t = 6 \text{ mld lat} = 1,9 \cdot 10^{17} \text{ s,}$$

$$\Delta M = 4,4 \cdot 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 1,9 \cdot 10^{17} \text{ s} = 8,4 \cdot 10^{26} \text{ kg,}$$

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{8,4 \cdot 10^{26} \text{ kg}}{2 \cdot 10^{30} \text{ kg}} = 0,00042 = 0,042\%$$

Zadanie 5. 940 MeV każdy

21.3. Energia całkowita

$$\text{Zadanie 1. a) } E_k = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = \frac{2}{3} mc^2$$

$$E'_k = 2E_k = \frac{4}{3} mc^2 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v'^2}{c^2}}} - 1 \right)$$

$$\text{stąd } v' = \frac{2\sqrt{10}}{7} c \approx 0,904c$$

$$\text{Zadanie 2. } E_k = eU = 2 \text{ MeV} \approx 3,2 \cdot 10^{-13} \text{ J,}$$

$$\text{z teorii względności: } E_k = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right),$$

$$\text{stąd: } v = c \sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{E_k}{mc^2} + 1 \right)^2}} \approx 0,98c,$$

$$\text{z fizyki klasycznej: } E_k = \frac{mv^2}{2},$$

$$\text{stąd } v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} \approx 2,8c$$

Zadanie 3. dla elektronów:

$$\frac{E_s}{E_c} = \frac{E_s}{E_s + E_k} \approx 0,0029\%,$$

$$\text{dla rakiety: } \frac{E_s}{E_c} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 99,99999993\%$$

21.4. Energia reakcji jądrowych

$$\text{Zadanie 1. } E_0 = 2,39 \cdot 10^{-9} \text{ J} = 14,9 \text{ GeV,}$$

$$\Delta m = 2,271 \cdot 10^{-28} \text{ kg}, E_w = 127,7 \text{ MeV}$$

$$\text{Zadanie 2. } E = 1,12 \text{ GJ}$$

$$\text{Zadanie 3. } E = 159 \text{ MJ}$$

Zadanie 4. Wskazówka. Możesz skorzystać z zależności $E_p = -2E_k$, obowiązującej dla każdego ciała krążącego po orbicie, lub obliczyć osobno E_p i E_k . Aby obliczyć prędkość Księżyca w jego ruchu wokół Ziemi, znajdź jego odległość od naszej planety oraz okres obiegu.

$$\Delta m = \left| \frac{E_k + E_p}{c^2} \right| = \left| \frac{-E_k}{c^2} \right| = 4,3 \cdot 10^{11} \text{ kg} = 430 \text{ mln t},$$

$$\frac{\Delta m}{M_Z + M_K} = 7 \cdot 10^{-14}$$

21.5. Energia reakcji rozszczepiania

Zadanie 1. Wskazówka. Patrz wskazówka do zadania 2. w temacie 19.4.

$$\frac{|\Delta E|}{E_{\text{pocz}}} = \frac{4mM}{(m+M)^2}$$

$$\text{a) } \frac{|\Delta E|}{E_{\text{pocz}}} \approx 0,999999, \text{ b) } \frac{|\Delta E|}{E_{\text{pocz}}} \approx 0,28$$

Zadanie 2. a) bar-140,

$$\text{b) } E = \Delta mc^2 \approx 2,8 \cdot 10^{-11} \text{ J} \approx 173 \text{ MeV},$$

$$\text{c) } \Delta M = \frac{\Delta m}{m_U} \cdot 0,001 \text{ kg} \approx 7,86 \cdot 10^{-7} \text{ kg},$$

wyzwolona energia:

$$E_M = \Delta Mc^2 \approx 7,1 \cdot 10^{10} \text{ J} \approx 20 \text{ 000 kWh}$$

Zadanie 4. Wskazówka. Rozważ 100 g uranu z dzisiejszych złóż. Ile gramów poszczególnych izotopów zawiera ta masa? Ile gramów tych izotopów było 2 mld lat temu?

21.6. Energia syntezy termojądrowej

$$\text{Zadanie 1. Little Boy: } \Delta m = \frac{E}{c^2} \approx 0,7 \text{ g},$$

$$\text{Car Bomb: } \Delta m = \frac{E}{c^2} \approx 2,3 \text{ kg}$$

Zadanie 2. a) 3:2,

b) zmiana masy podczas jednej reakcji

$$\Delta m = 3,14 \cdot 10^{-29} \text{ kg} = 0,00376m, \text{ gdzie } m \text{ jest}$$

łączną masą substratów jednej reakcji; stąd

$$E = 0,00376 \text{ g} \cdot c^2 \approx 3,4 \cdot 10^{11} \text{ J} \approx 94 \text{ 000 MWh}.$$

$$\text{Zadanie 4. } 2,7 \cdot 10^{36} \text{ J}$$

21.7. Życie gwiazd

Zadanie 3. a) $\Delta m = 3m_{\text{He}} - m_{\text{C}} = 1,3 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$,
wydzielona energia:

$$E_1 = \Delta mc^2 \approx 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ J} \approx 7,4 \text{ MeV},$$

$$\text{b) } n = \frac{1 \text{ kg}}{m_{\text{C}}} = 5,02 \cdot 10^{25}, \text{ wydzielona energia:}$$

$$E = nE_1 = 5,9 \cdot 10^{13} \text{ J} \approx 1,6 \cdot 10^7 \text{ kWh}$$

$$\text{Zadanie 4. } d = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3},$$

$$\text{a) } d \approx 1400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (nieco więcej niż woda),}$$

$$\text{b) } d \approx 1,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (ok. 9000 razy mniej niż powietrze)}$$

$$\text{c) } d \approx 3,3 \cdot 10^8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (czyli ponad tona na łyżeczkę)}$$

21.8. Galaktyki i Wszechświat

$$\text{Zadanie 4. b) } v = Hd = 42 \text{ 000 } \frac{\text{km}}{\text{s}} = 0,14c$$

Analiza tekstu

Zadanie 2.

$$\text{a) } \frac{L_{\text{int}}}{\frac{1}{2}\lambda_{\text{cz}}} = \frac{4000 \text{ m}}{\frac{1}{2} \cdot 700 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 1,1 \cdot 10^{10} = 11 \text{ mld},$$

$$\text{b) } \frac{\frac{1}{2}\lambda_{\text{cz}}}{\frac{1}{1000}d_p} \approx 2,1 \cdot 10^{11} = 210 \text{ mld}$$

Zadania analogiczne

$$\text{Zadanie 2. } v = 0,98c = 2,94 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Zadanie 3. } \frac{E_k}{E_0} = 1,93$$

$$\text{Zadanie 4. } E = mc^2 = 6,5 \text{ MJ}$$

Zadania powtórzeniowe

Zadanie 1. FF

Zadanie 2.2.

$$E_k = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) = eU,$$

$$\text{stąd } v = c \sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{eU}{mc^2} + 1 \right)^2}} = 0,94c$$

$$\text{Zadanie 3. a) } E_1 = 16,4 \text{ MeV}, \text{ b) } E_{3g} = 109 \text{ 500 kWh}$$

$$\text{Zadanie 4. } E = mc^2 = 9,8 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 61 \text{ MeV}$$

Indeks

A

aberracja chromatyczna 12
– sferyczna 12
absorpcja fotonu 95
anihilacja 137
antymateria 137
aparat fotograficzny 16

B

Broglie, Luis de 86

C

ciało doskonale czarne 108–109
czarna dziura 215
czasoprzestrzeń 177
czas połowicznego rozpadu 158

D

dalekowzroczność 21
datowanie radiowęglowe 160
deficyt masy 190
dioptria 10
doświadczenie Younga 87
dualizm korpuskularno-falowy 85

E

efekt cieplarniany 115
Einstein, A. 80, 172, 176
ekran LCD 58, 60–61
elektronowolt 82
elektrownia jądrowa (atomowa) 196
emisja fotonu 95
– wymuszona 99
energia jonizacji 96
– relatywistyczna 186
– spoczynkowa 182
– wiązania 191
eter 173
ewolucja gwiazdy 210–211

F

fala elektromagnetyczna 45, 46, 48
– grawitacyjna 228
– materii 85
filtr polaryzacyjny 54

fizyka klasyczna 77
fotokomórka 79
foton 80

G

galaktyka 218
globalne ocieplenie 117, 118
gwiazda neutronowa 213

H

halo 42

I

izotop 132, 133

J

jądro atomowe 132
– niestabilne 142
– stabilne 142
jednostka astronomiczna 220
jonizacja 81

K

kamera termowizyjna 111
klimat 118
konstrukcja obrazu pozornego, soczewka skupiająca 31
–, soczewka rozpraszająca 32
– rzeczywistego, soczewka skupiająca 17
kreacja 184
krótkowzroczność 21
kwant 80

L

Lemaître, G. 221, 222
liczba atomowa 133
– masowa 133
licznik Geigera–Müllera 150
luneta astronomiczna 36

M

masa krytyczna 196
Maxwell, J. Clerk 47, 76
mechanika kwantowa 77
mikrofalowe promieniowanie tła 225
mikroskop elektronowy 90–91

optyczny 36
moderator 197

N

natężenie fali 55
neutron 132
nukleon 132

O

obiektyw lunety 36
obraz pozoryny 26
odbicie światła 38
odrzut 102, 103
odwracalność biegu promienia 11
ognisko 9
– pozorne 9
ogniskowa 9
ogólna teoria względności 176
okular lunety 36
oś optyczna 6

P

pęd fotonu 101
Planck, M. 114
pogoda 118
polaryzacja światła 52
– przy odbiciu 58–59
polaryzator 54
powstawanie gwiazdy 209
praca wyjścia 82
prawo Hubble'a 221
– Snelliusa 7
– Wiena 112
– załamania 7
pręt kontrolny 196
– paliwowy 196
projektor 17
promieniowanie gamma 149
– jonizujące 150
– niejonizujące 150
– termiczne 106
proton 132
pryzmat 38, 39
przenikliwość promieniowania jądrowego 149

R

reakcja łańcuchowa 195, 196
reaktor jądrowy 196, 197
rok świetlny 220
rozpad alfa 142
– beta minus 142
– beta plus 143
– promieniotwórczy 142
rozszczerzenie jądra 195
– światła 38
równanie soczewki 19, 33
równoczesność zdarzeń 174
Rutherford, E. 134

S

siły jądrowe 136
smog 121
soczewka asferyczna 12
– rozpraszająca 7, 8
– sferyczna 12
– skupiająca 7, 8
spektroskop 123

sprężenie zwrotne 118, 119
stała Hubble'a 221
stałość prędkości światła 175
stan podstawowy 94
– wzbudzony 94
supernowa 211
synteza termojądrowa 203
szklarnia 115, 116

Ś

światło niespolaryzowane 53
– spolaryzowane 52

T

temperatura barwowa 113
teoria względności 77, 174
tęcza 39–41
tokamak 203, 205
transformator 45

W

wady wzroku 21
widmo absorpcyjne 95

– atomu wodoru 96
– ciągle 92
– dyskretne (liniowe) 92, 93
– emisyjne 95
Wielki Wybuch 222, 224–225
współczynnik załamania światła 7

Z

załamanie światła 7
zasada zachowania liczby nukleonów 144
– ładunku elektrycznego 145
zastosowania laserów 98
zdolność skupiająca 10
zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne 79
– zewnętrzne 77
zwierciadło płaskie 25

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej:

<https://nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>

Rysunek 21.2 ze s. 175 pochodzi z artykułu Michelson, A. A., & Morley, E. W. (1887). On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, s3-34(203), 333–345. <https://doi.org/10.2475/ajs.s3-34.203.333>

Indeks nazw obcojęzycznych z wymową

<i>Atomgewicht</i> , czyt. atomg ^o wi ^o śt	<i>Hubble–Lemaître</i> , czyt. habl-lemetr
<i>Becquerel</i> , czyt. bekerel	<i>Lemaître, Georges</i> , czyt. lemetr żorż
<i>Bell, Jocelyn</i> , czyt. bel, dżoslin	<i>Maxwell, James Clerk</i> , czyt. maksłel dżejms klerk
<i>Brogie, Luis de</i> , czyt. broj, lui de	<i>Mitchell, Joni</i> , czyt. miczyl, dżoni
<i>Corpusculum</i> , czyt. korpuskulum	<i>nucleus</i> , czyt. nukleus
<i>Curie, Pierre</i> , czyt. kiri, pier	<i>Planck, Max</i> , czyt. plank, maks
<i>Enewetak</i> , czyt. enilitok	<i>Plücker</i> , czyt. pliker
<i>Eötvös, Loránd</i> , czyt. etwesz, lorand	<i>Penzias, Arno</i> , czyt. pencjas, arno
<i>Euler, Leonhard</i> , czyt. ojler, leonhard	<i>Roopkund</i> , czyt. rupkund
<i>Fraunhofer, Joseph von</i> , czyt. frałnhofer, josef fon	<i>Rutherford, Ernest</i> , czyt. raderford, ernest
<i>Fukushima</i> , czyt. fukuszima	<i>Schmidt, Gerhard</i> , czyt. szmit, gerhard
<i>Geigera–Müllera</i> , czyt. gajgera-milera	<i>Wien, Wilhelm</i> , czyt. win, wilhelm
<i>Hertz, Heinrich</i> , czyt. herc, hajnrís	<i>Wilson, Robert</i> , czyt. łilson, robert
<i>Hiroshima</i> , czyt. hiroszima	<i>Woodstock</i> , czyt. łudstok
<i>Hubble</i> , czyt. habl	<i>Zahl</i> , czyt. cal

Spis działów w pozostałych częściach

Część 1

1. Wprowadzenie
2. Ruch prostoliniowy
3. Ruch krzywoliniowy
4. Ruch i siły
5. Energia i pęd
6. Hydrostatyka

Część 2

7. Wstęp do zjawisk cieplnych
8. Termodynamika
9. Bryła sztywna
10. Ruch drgający
11. Fale
12. Zjawiska falowe

Część 3

13. Grawitacja i elementy astronomii
14. Pole elektryczne
15. Prąd stały
16. Pole magnetyczne
17. Indukcja elektromagnetyczna i prąd przemienny

Wydawnictwo Nowa Era oświadcza, że podjęło starania mające na celu dotarcie do właścicieli i dysponentów praw autorskich wszystkich zamieszczonych utworów. Wydawnictwo Nowa Era, przytaczając w celach dydaktycznych utwory lub fragmenty, postępuje zgodnie z art. 27¹ ust. 1 ustawy o prawie autorskim. Jednocześnie Nowa Era oświadcza, że jest jedynym podmiotem właściwym do kontaktu autorów tych utworów lub innych podmiotów uprawnionych w przypadkach, w których twórcy przysługuje prawo do wynagrodzenia.

Zdjęcie na okładce: Getty Images/Stocktrek Images.

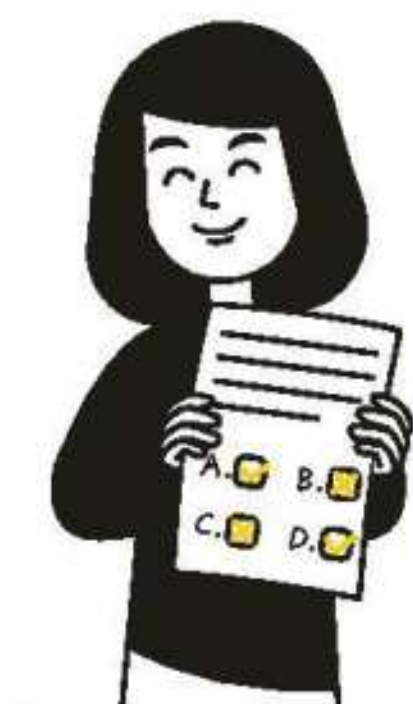
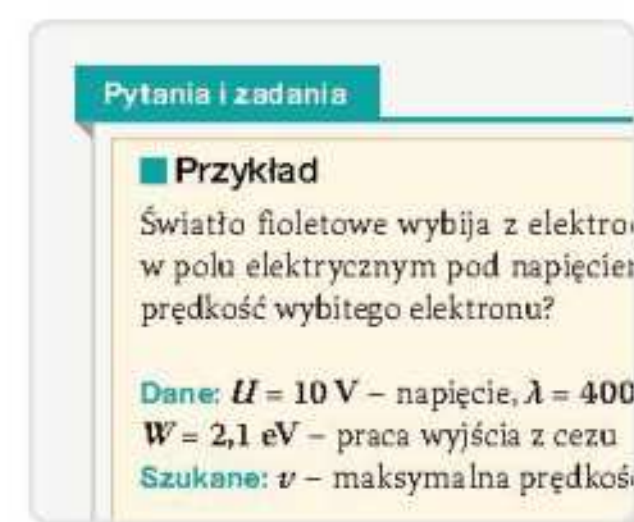
Zdjęcia: **BE&W:** Alamy Stock Photo - Archive PL s. 112, David Stock s. 137, GL Archive s. 174 (Albert Einstein), s. 225 (Arno Allan Penzias), Historic Images s. 181 (Eötvös Loránd Morelli), Javier LARREA s. 154 (badanie za pomocą gamma-kamery), Jupe s. 217 (Supernowa), mauritius images GmbH s. 153 (kopalnia uranu), mcool s. 143 (Maria Skłodowska-Curie), Melvyn Longhurst s. 157 (łódź Wikingów), NASA Image Collection s. 51 (Droga Mleczna w promieniowaniu gamma), NG Images s. 210, PA Images s. 114 (Max Planck), Paul Thompson Images s. 131, Penta Springs LLP s. 181 (doświadczenia z mechaniki), Science History Images s. 204 (wybuch bomby), The Picture Art Collection s. 141, Universal Images Group North America LLC s. 180 (drugie prawo Newtona), BSIP RM/ASTIER - CHRU LILLE s. 148, IAM Ltd/WORLD HISTORY ARCHIVE s. 180 (doświadczenie Kartezjusza z mechaniki), MARY EVANS PICTURE LIBRARY/HERO FILM/ Ronald Grant Archive s. 139, Photo12 s. 180 (układ geocentryczny Ziemi Arystotelesa), SCIENCE SOURCE - E. R. Degginger s. 86 (obraz interferencyjny uzyskany po dyfrakcji elektronów na sieci krystalicznej cyrkonu), GIPhotoStock s. 93 (widmo świetłówki kompaktowej), NASA s. 150, Ted Kinsman s. 93 (widmo helu); **East News:** Andrzej Zbraniecki s. 120 (huragan), Phanie/BURGER s. 154 (podawanie pacjentowi izotopu promieniotwórczego), REPORTER/LECH GAWUC s. 109 (temperatura); **Forum:** HERMANN HISTORICA GmbH/Interfoto s. 103, Romuald Broniarek s. 49, SSPL/Daily Herald Archive/National Science & Media Museum s. 213; **Getty Images:** 500px - Andrey Aksenov s. 147, Katerina Namavira s. 16, Anadolu s. 197, Brand X Pictures/Science Photo Library - NASA/ESA/STScI/J. HESTER & A. LOLL, ASU s. 216, DigitalVision Vectors - dial-a-view s. 14 (klatka filmowa), Grafissimo s. 180 (Kartezjusz), ilbusca s. 180 (Krzywa Wieża w Pizie), Nastasic s. 180 (Izaak Newton), ZU_09 s. 180 (Arystoteles, Galileusz), E+ - ewg3D s. 183, ferrantraite s. 50-51 (radioteleskop), MarioGuti s. 6, Six_Characters s. 98 (pomiar laserem), EyeEm - Jakob Radlgruber s. 40-41 (pole, góry w tle), Xrth Choti Thaen Sila s. 201 (wybuch), Gamma-Rapho/Jean-Marie HOSATTE s. 204 (ITER), Hulton Archive/NASA/Handout s. 160 (Voyager), iStock Editorial/Getty Images Plus/aerovista lucht fotografie s. 207 (ITER – plac budowy), iStock/Getty Images Plus - AegeanBlue s. 64 (zwierciadło wklęsłe), Bill Oxford s. 45, DominikBall s. 79, Evgeniy Skripnichenko s. 106 (żelazko), Fred Chaveton s. 63, MAXIM ZHURAVLEV s. 152 (piwnica), Oat_Phawat s. 151 (samorodek złota), Oleksii Hlembotskyi s. 202, Stefan Lenz s. 5, ThomasShanahan s. 111 (rozgrzana sprężyna), yuriz s. 109 (oko), ZU_09 s. 97, Moment - Antonio Zanghi s. 122 (wulkan), Boy_Anupong s. 138, Douglas Sacha s. 113 (światła), Grace Cary s. 152 (umywalka), Maya Karkalicheva s. 25, Science Photo Library/STEVE GSCHMEISSNER s. 85, Stone/Martin Ruegner s. 58, Tetra images s. 92 (neon), The Asahi Shimbun s. 192, Visual China Group/VCG s. 182; **Indigo:** Mary Evans Picture Library Ltd/Natural History Museum s. 91 (oko owada), Science Photo Library RF - s. 91 (skórka pomidora SEM), STEVE GSCHMEISSNER s. 91 (bakterie SEM), Science Photo Library - s. 50 (Droga Mleczna w promieniowaniu radiowym o częstotliwości 408 Hz), s. 86 (Louis de Broglie), s. 207 (zimna fuzja), s. 216-217 (warstwy Słońca), Collection Abecasis s. 181 (Leonhard Euler), David Parker s. 188, ETH-Bibliothek Zurich s. 181 (Albert Einstein), Eye Of Science s. 91 (kryształy azotanu sodu SEM), SCIENC s. 91 (kość SEM), IBM Research s. 132, Royal Astronomical SO s. 181 (Mechanika Eulera); **Shutterstock:** 7Seven s. 152 (banany), Abrar Sharif s. 40-41 (krajobraz), Aleksandar Malivuk s. 118, Alex Staroseltsev s. 107 (kostki lodu), angellodeco s. 98 (czytnik kodów paskowych), AnotherPerfectDay s. 107 (dłoni), AntonSokolov s. 142, Ariene Studio s. 59 (zdjęcie z filtrem polaryzacyjnym i bez), Artiom Photo s. 109 (poparzenie po opalaniu), Artsiom P s. 117, BAZA Production s. 30 (lupa), Benvenuto Cellini s. 50-51 (ikony satelity, radaru), Blan-k s. 153 (ikona pranie), CeltStudio s. 119 (chmury), Cezar911 s. 153 (ikona prysznic), Dave0 s. 134, dekazigzag s. 77 (dziewczyna z laptopem), Denis Belitsky s. 219 (człowiek obserwujący Drogę Mleczną), Dizfoto s. 98 (laserowe wycinanie w metalu), EaglePOV s. 154 (piramida Cheopsa), eightstock s. 113 (żarówka), Ela73 s. 115 (powódź), Eliricon s. 104, Elkhophoto s. 105, encierro s. 40 (postać), ETgohome s. 52, Freedom Life s. 91 (monitor), Gelpi JM s. 55, Gorodenkoff s. 140, 144, Ground Picture s. 81 (dziewczyny na plaży), Halk-44 s. 157 (kostki do gry), iconation s. 153 (ikona post), Iren_Geo s. 33, Ivan Smuk s. 111 (budynek w termowizji), janispalulis s. 40-41 (tęcza), Joao Serafim s. 75, Joe White s. 151 (licznik Geigera-Mullera), Johannes Rigg s. 38, KLM_WSRP s. 42, Maleo s. 64 (zwierciadło wypukłe), Mary_Morgan s. 222-223 (woda, bąbelki w tle), Matsumoto s. 111 (Syriusz), Menna s. 116 (szklarnia), michal812 s. 152 (granit), Mike Mareen s. 122 (smog), MoFarouk s. 95, Mr.PK s. 81 (czujnik płomienia), muratart s. 119 (śnieg i lód), s. 152 (samolot), Natalia Gavrilova s. 119 (zmarzlina), Natursports s. 76 (biegacze), Nicku s. 76 (James Clerk Maxwell), Oleg Krugliak s. 113 (chili), Olena Serzhanova s. 116 (pies w samochodzie), Parilov s. 198 (fragment pręta paliwowego), PedroNevesDesign s. 153 (ikona przysłoń usta i nos), Pixel 4 Images s. 14 (kamera filmowa), PongMojj s. 106 (zdjęcie z termokamery), Pressmaster s. 93 (kryminalistyka), Reshetnikov_art s. 111 (termometr IR), Sacho films s. 98 (płyta CD), Sashkin s. 24, SCOTTCHAN s. 59 (filtr polaryzacyjny), Soonthorn Wongsaita s. 199, sruilk s. 153 (twarz), StefaniaArca s. 154 (obraz z gamma-kamery), Steve Allen s. 198 (ruiny w Hiroszynie), Summit Art Creations s. 174 (kula ziemską), Svitlana Hulko s. 82, Terelyuk s. 98 (laserowa korekcja wzroku), Thx4Stock team s. 178, Viktor Malyschchys s. 220, Vladimir Sukhachev s. 84, vvoe s. 77 (niepasujący element), WitR s. 163; **ESA:** ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO s. 50 (Droga Mleczna w promieniowaniu widzialnym); ESA and the Planck Collaboration s. 222 (mikrofalowe promieniowanie tła), s. 225 (mikrofalowe promieniowanie tła); ESA/JAXA s. 50 (Droga Mleczna w podczerwieni); ESA/NASA/Planck Collaboration s. 51 (Droga Mleczna w promieniowaniu mikrofalowym o częstotliwości 115 GHz); **NASA:** NASA/Courtesy of Dr. T.H. Jarrett (IPAC/Caltech) s. 50 (Droga Mleczna w bliskiej podczerwieni); NASA/LAMBDA Archive Team s. 51 (Droga Mleczna w promieniowaniu radiowym o częstotliwości 1420 Hz); NASA/MPE/S. Digel and S. Snowden (GSFC), ROSAT Project s. 51 (Droga Mleczna w promieniowaniu rentgenowskim); NASA/Aero Animation/Ben Schweighart s. 101, 102; NASA Goddard Space Flight Center s. 115 (mapa świata); NASA s. 119 (mapa świata); NASA/ESA/STScI s. 173; NASA (link <https://apod.nasa.gov/apod/ap100912.html>)/Robert D. Loss s. 201 (naturalny reaktor jądrowy, Gabon, Oklo); NASA s. 211; NASA, ESA, CSA, Mikako Matsuura (Cardiff University), Richard Arendt (NASA-GSFC, UMBC), Claes Fransson (Stockholm University), Josefin Larsson (KTH); Image Processing: Alyssa Pagan (STScI) s. 212; NASA, ESA, CSA, and STScI s. 218 (głębokie pole Webba); NASA s. 219 (Droga Mleczna z zewnątrz); **Hitachi Research Center:** s. 87; Copyright (2004) **National Academy of Sciences, U.S.A.** (PNAS nie ponosi odpowiedzialności za dokładność tłumaczenia) s. 221 (zależność między odległością do galaktyki a prędkością jej oddalania się od nas – wykres); **U.S. Department of Energy** s. 207 (ITER – przekrój reaktora); link www.nature.com s. 86 (obraz interferencyjny z doświadczenia Younga dla elektronów); **Anna Budzyńska:** s. 14 (doświadczenie), s. 18, 20, 30 (doświadczenia), s. 32, 49 (doświadczenia), s. 59 (doświadczenia), s. 61, 179; **Miłosz Budzyński:** s. 8, 26, 36, 39, 44, 56, 55, 78, 92 (doświadczenie), s. 100, 107 (doświadczenie), s. 108, 160 (strzykawka z izotopem promieniotwórczym); **Maciej Wróbel:** s. 48; **Agnieszka Żak:** s. 29, 224. otwierające – galaktyka s. 218

Za co polubisz podręcznik **NOWE Zrozumieć fizykę 4?**



Powód 1

Dużo przykładów rozwiązanych zadań. Czy to przydatne?
Tak. Łatwiej poradzisz sobie z samodzielnym rozwiązaniem podobnych zadań.



Powód 2

Ważne w tej lekcji i podsumowania po działach. Wiesz, czego się nauczyć na kartkówkę i sprawdzian. Łatwo możesz sobie przypomnieć i przećwiczyć to, co najważniejsze.



Powód 3

Matura. Dobrze jest mieć podręcznik, który uczy rozwiązywania takich zadań, jakie pojawiają się na maturze. Dzięki temu możesz mieć pewność, że **Wiesz, umiesz, zdasz.**

