



<i>Rodzaj dokumentu:</i>	<b>Sprawozdanie za rok 2023</b>
<i>Egzamin:</i>	<b>Egzamin maturalny</b>
<i>Przedmiot:</i>	<b>Fizyka</b>
<i>Poziom:</i>	<b>Poziom rozszerzony</b>
<i>Termin egzaminu:</i>	19 maja 2023 r.
<i>Data publikacji dokumentu:</i>	19 września 2023 r.

**Opracowanie**

Mariusz Mroczek (Centralna Komisja Egzaminacyjna)  
dr Lidia Szymczak-Mazur (Okręgowa Komisja Egzaminacyjna w Jaworznie)  
Urszula Łuczniak (Okręgowa Komisja Egzaminacyjna w Warszawie)

**Redakcja**

dr Wioletta Kozak (Centralna Komisja Egzaminacyjna)

**Opracowanie techniczne**

Andrzej Kaptur (Centralna Komisja Egzaminacyjna)

**Współpraca**

Beata Dobrosielska (Centralna Komisja Egzaminacyjna)  
Agata Wiśniewska (Centralna Komisja Egzaminacyjna)  
Pracownie ds. Analiz Wyników Egzaminacyjnych okręgowych komisji egzaminacyjnych

**OKRĘGOWA KOMISJA EGZAMINACYJNA W WARSZAWIE**

01-233 WARSZAWA ul. Józefa Bema 87

tel. (22) 457-03-35 fax (22) 457-03-45

<http://www.oke.waw.pl> e-mail [info@oke.waw.pl](mailto:info@oke.waw.pl)

**Spis treści**

Opis arkusza maturalnego .....	4
Dane dotyczące populacji zdających .....	4
Przebieg egzaminu .....	5
Podstawowe dane statystyczne .....	6
Komentarz .....	14
Wnioski i rekomendacje .....	46

## Opis arkusza egzaminu maturalnego

W roku szkolnym 2022/2023 egzamin maturalny z fizyki został przeprowadzony na podstawie wymagań egzaminacyjnych określonych w rozporządzeniu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 10 czerwca 2022 r.<sup>1</sup>

Arkusz egzaminacyjny z fizyki na poziomie rozszerzonym zawierał ogółem 30 zadań (ujętych w 11 grup/wiązek tematycznych), na które składało się 10 zadań zamkniętych i 20 zadań otwartych. Zadania sprawdzały wiadomości oraz umiejętności ujęte w pięciu obszarach wymagań ogólnych:

- I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości (11 zadań łącznie za 15 punktów, w tym: 8 zadań zamkniętych łącznie za 10 punktów oraz 3 zadania otwarte łącznie za 5 punktów).
- II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych (9 zadań łącznie za 19 punktów, w tym: 2 zadania zamknięte łącznie za 2 punkty oraz 7 zadań otwartych łącznie za 17 punktów).
- III. Planowanie i przeprowadzanie obserwacji oraz doświadczeń i wnioskowanie na podstawie ich wyników (3 zadanie otwarte łącznie za 8 punktów).
- IV. Posługiwanie się informacjami pochodzącymi z analizy materiałów źródłowych, w tym tekstów popularnonaukowych (2 zadanie otwarte łącznie za 3 punkty).
- V. Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk oraz ilustracji praw i zależności fizycznych (5 zadań otwartych łącznie za 15 punktów).

Zdający mogli korzystać z *Wybranych wzorów i stałych fizykochemicznych na egzamin maturalny z biologii, chemii i fizyki* oraz linijki i kalkulatora naukowego. Za rozwiązanie wszystkich zadań można było otrzymać 60 punktów.

## Dane dotyczące populacji zdających

**TABELA 1.** ZDAJĄCY ROZWIĄZUJĄCY ZADANIA W ARKUSZU STANDARDOWYM\*

Liczba zdających (Formuła 2023)		2521
Zdający rozwiązujący zadania w arkuszu standardowym	ze szkół na wsi	47
	ze szkół w miastach do 20 tys. mieszkańców	242
	ze szkół w miastach od 20 tys. do 100 tys. mieszkańców	555
	ze szkół w miastach powyżej 100 tys. mieszkańców	1677
	ze szkół publicznych	2258
	ze szkół niepublicznych	269
	kobiety	707
	mężczyźni	1814
	bez dysleksji rozwojowej	2058
	z dysleksją rozwojową	463
	o których mowa w art. 2 ust. 1 ustawy <sup>2</sup> (obywatele Ukrainy)	1

\* Dane w tabeli dotyczą tegorocznych absolwentów.

<sup>1</sup> Rozporządzenie Ministra Edukacji i Nauki z dnia 10 czerwca 2022 r. w sprawie wymagań egzaminacyjnych dla egzaminu maturalnego przeprowadzanego w roku szkolnym 2022/2023 i 2023/2024 (poz. 1246).

<sup>2</sup> Ustawa z dnia 12 marca 2022 r. o pomocy obywatelom Ukrainy w związku z konfliktem zbrojnym na terytorium tego państwa (poz. 583, z późn. zm.).

Z egzaminu w Formule 2023 i Formule 2015 zwolniono 56 osób – laureatów i finalistów Olimpiady Fizycznej.

**TABELA 2.** ZDAJĄCY ROZWIĄZUJĄCY ZADANIA W ARKUSZACH DOSTOSOWANYCH

Zdający rozwiązujący zadania w arkuszach dostosowanych	z autyzmem, w tym z zespołem Aspergera	41
	słabowidzący	2
	niewidomi	0
	słabosłyszący	2
	niesłyszący	1
	z niepełnosprawnością ruchową spowodowaną mózgowym porażeniem dziecięcym	0
	z zaburzeniem widzenia barw	2
	<b>Ogółem</b>	<b>48</b>

## Przebieg egzaminu

**TABELA 3.** INFORMACJE DOTYCZĄCE PRZEBIEGU EGZAMINU

Termin egzaminu		19 maja 2023	
Czas trwania egzaminu dla arkusza standardowego		180 minut	
Liczba szkół		242	
Liczba zespołów egzaminatorów		4	
Liczba egzaminatorów		48	
Liczba obserwatorów <sup>3</sup> (§ 8 ust. 1)		2	
Liczba unieważnień <sup>4</sup>	w przypadku:		
	art. 44zzv pkt 1	stwierdzenia niesamodzielnego rozwiązywania zadań przez zdającego	0
	art. 44zzv pkt 2	wniesienia lub korzystania przez zdającego w sali egzaminacyjnej z urządzenia telekomunikacyjnego	0
	art. 44zzv pkt 3	zakłócenia przez zdającego prawidłowego przebiegu egzaminu	0
	art. 44zzw ust. 1	stwierdzenia podczas sprawdzania pracy niesamodzielnego rozwiązywania zadań przez zdającego	0
	art. 44zzy ust. 7	stwierdzenie naruszenia przepisów dotyczących przeprowadzenia egzaminu maturalnego	0
	art. 44zzy ust. 10	niemożność ustalenia wyniku (np. zaginięcie karty odpowiedzi)	0
Liczba wglądów <sup>4</sup> (art. 44zzz)		181	

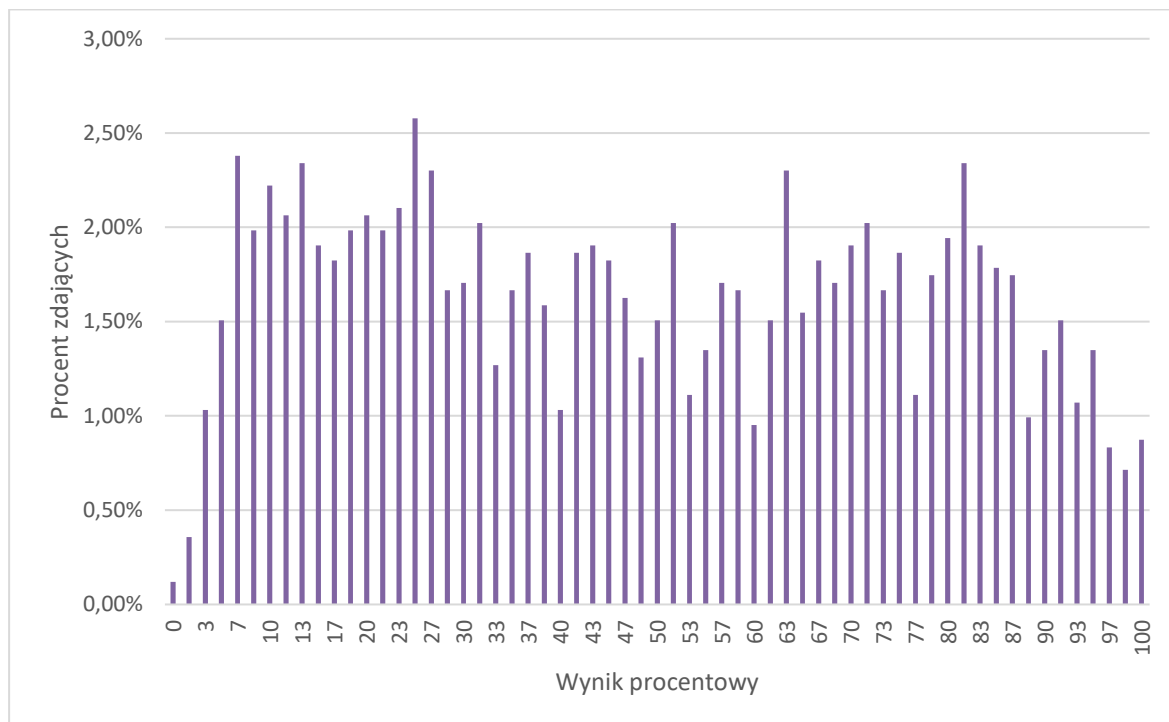
<sup>3</sup> Rozporządzenie Ministra Edukacji i Nauki z dnia 1 sierpnia 2022 r. w sprawie egzaminu maturalnego (poz. 1644) – podano łącznie dla Formuły 2023 i Formuły 2015.

<sup>4</sup> Ustawa z dnia 7 września 1991 r. o systemie oświaty (Dz.U. z 2022 r. poz. 2230).

## Podstawowe dane statystyczne

### Wyniki zdających

**WYKRES 1.** ROZKŁAD WYNIKÓW ZDAJĄCYCH



**TABELA 4.** WYNIKI ZDAJĄCYCH – PARAMETRY STATYSTYCZNE\*

Zdający	Liczba zdających	Minimum (%)	Maksimum (%)	Mediana (%)	Modalna (%)	Średnia (%)	Odchylenie standardowe (%)
Ogółem Formuła 2023	2521	0	100	47	25	48	28

\* Dane dotyczą tegorocznych absolwentów. Parametry statystyczne są podane dla grup liczących 30 lub więcej zdających.

## Poziom wykonania zadań

TABELA 5. POZIOM WYKONANIA ZADAŃ

Wymagania egzaminacyjne 2023			
Nr zad.	Wymagania ogólne	Wymagania szczegółowe <i>Gdy wymaganie dotyczy treści szkoły podstawowej, dopisano (SP), a gdy zakresu podstawowego szkoły ponadpodstawowej – dopisano (P).</i>	Poziom wykonania zadania (%)
1.	II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.	Zdający: II.4) opisuje ruchy prostoliniowe jednostajne i jednostajnie zmienne, posługując się zależnościami położenia, wartości prędkości i przyspieszenia oraz drogi od czasu.	61
2.1.	I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.	Zdający: I.6) tworzy [...] rysunki schematyczne lub blokowe dla zilustrowania zjawisk bądź problemu [...]. II.13) stosuje zasady dynamiki do opisu zachowania się ciał; II.16) rozróżnia i analizuje zderzenia sprężyste i niesprężyste.	29
2.2.	I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.	Zdający: I.7) wyodrębnia z tekstów, [...] rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu [...]. II.13) stosuje zasady dynamiki do opisu zachowania się ciał; II.15) wykorzystuje zasadę zachowania pędu do opisu zachowania się izolowanego układu ciał; II.16) rozróżnia i analizuje zderzenia sprężyste i niesprężyste.	59
3.1.	I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.	Zdający: I.7) wyodrębnia z tekstów, [...] rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu [...]. II.20) posługuje się pojęciami [...] energii kinetycznej, energii potencjalnej wraz z ich jednostkami; stosuje zasadę zachowania energii mechanicznej [...]. III.2) stosuje pojęcie bryły sztywnej; opisuje ruch obrotowy bryły sztywnej wokół osi; III.5) oblicza energię ruchu bryły sztywnej jako sumę energii kinetycznej ruchu postępowego środka masy i ruchu obrotowego wokół osi przechodzącej przez środek masy.	58

3.2.	V. Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk oraz ilustracji praw i zależności fizycznych.	Zdający: II.4) opisuje ruchy prostoliniowe jednostajne i jednostajnie zmienne, posługując się zależnościami położenia, wartości prędkości i przyspieszenia oraz drogi od czasu; II.9) stosuje do obliczeń związku między promieniem okręgu, prędkością kątową, prędkością liniową [...]; II.11) opisuje ruch niejednostajny po okręgu; II.13) stosuje zasady dynamiki do opisu zachowania się ciał. III.4) stosuje zasady dynamiki dla ruchu obrotowego; posługuje się pojęciami przyspieszenia kąowego oraz momentu bezwładności [...].	20
4.1.	I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.	Zdający: I.7) wyodrębnia z tekstów, [...] rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu [...]. XII.1) wskazuje niezależność prędkości światła w próżni od prędkości źródła i prędkości obserwatora.	54
4.2.	I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.	Zdający: I.7) wyodrębnia z tekstów, [...] rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu [...]. X.11) analizuje efekt Dopplera dla fal w przypadku, gdy źródło lub obserwator poruszają się znacznie wolniej niż fala; podaje przykłady występowania tego zjawiska.	83
4.3.	II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.	Zdający: VIII.5) [szkoła podstawowa] posługuje się pojęciami [...] częstotliwości i długości fali do opisu fal oraz stosuje do obliczeń związku między tymi wielkościami wraz z ich jednostkami. I.7) wyodrębnia z tekstów, [...] rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu [...]. X.11) analizuje efekt Dopplera dla fal w przypadku, gdy źródło lub obserwator poruszają się znacznie wolniej niż fala; podaje przykłady występowania tego zjawiska.	57
4.4.	V. Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk oraz ilustracji praw i zależności fizycznych.	Zdający: I.2) posługuje się [...] kartą wybranych wzorów i stałych fizykochemicznych; I.7) wyodrębnia z tekstów, [...] rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu [...]. X.11) analizuje efekt Dopplera dla fal w przypadku, gdy źródło lub obserwator poruszają się znacznie wolniej niż fala; podaje przykłady występowania tego zjawiska.	56

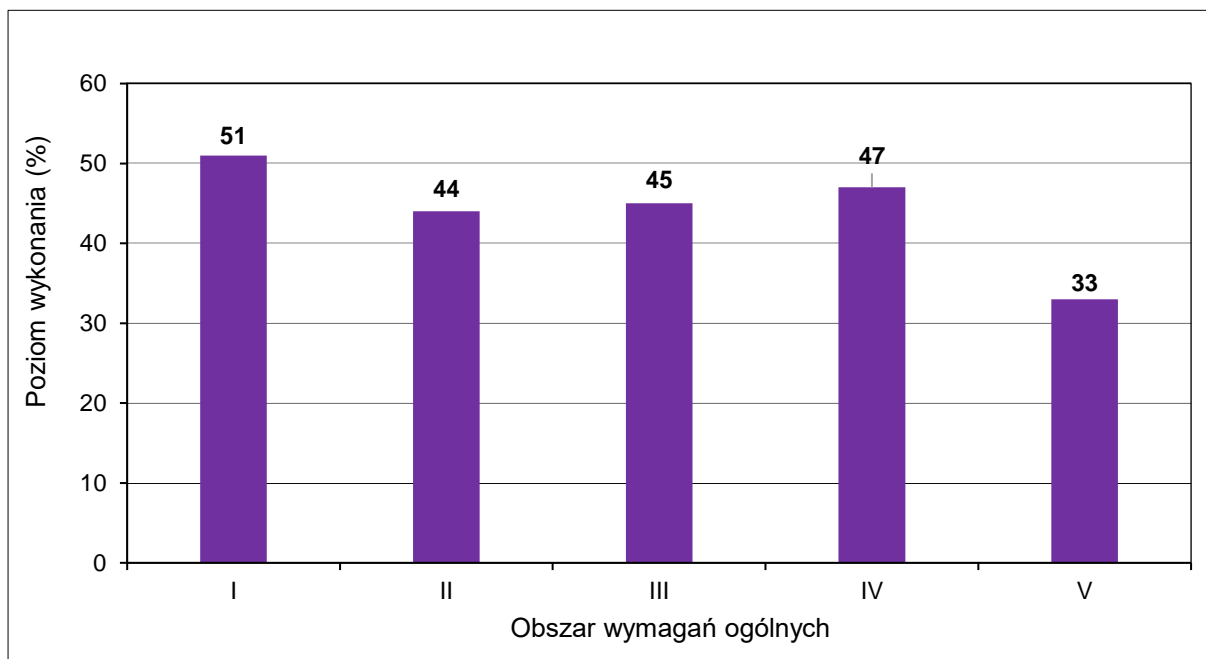


5.1.	I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.	Zdający: II.3) opisuje ruchy postępowe, posługując się wielkościami wektorowymi: [...] przyspieszeniem [...]; II.13) stosuje zasady dynamiki do opisu zachowania się ciał. IV.1) posługuje się prawem powszechnego ciężenia do opisu oddziaływania grawitacyjnego [...]; IV.3) analizuje jakościowo wpływ siły grawitacji Słońca na niejednostajny ruch planet po orbitach eliptycznych [...].	41
5.2.	II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.	Zdający: II.6) posługuje się pojęciem momentu pędu punktu materialnego [...]; II.7) stosuje zasadę zachowania momentu pędu. IV.6) interpretuje II prawo Keplera jako konsekwencję zasady zachowania momentu pędu.	62
5.3.	IV. Posługiwanie się informacjami pochodzącymi z analizy materiałów źródłowych, w tym tekstów popularnonaukowych.	Zdający: I.2) posługuje się materiałami pomocniczymi, w tym [...] kartą wybranych wzorów i stałych fizykochemicznych. IV.3) analizuje jakościowo wpływ siły grawitacji Słońca na niejednostajny ruch planet po orbitach eliptycznych [...].	48
5.4.	V. Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk oraz ilustracji praw i zależności fizycznych.	Zdający: IV.4) wskazuje siłę grawitacji jako siłę dośrodkową w ruchu po orbicie kołowej, oblicza wartość prędkości na orbicie kołowej o dowolnym promieniu [...]; IV.5) interpretuje III prawo Keplera jako konsekwencję prawa powszechnego ciężenia; stosuje do obliczeń III prawo Keplera dla orbit kołowych.	48
6.1.	I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.	Zdający: V.3) (SP) posługuje się pojęciem parcia (nacisku) oraz pojęciem ciśnienia w cieczech i gazach wraz z jego jednostką; stosuje do obliczeń związek między parciem a ciśnieniem. VI.9) opisuje związek pomiędzy temperaturą w skali Kelvina a średnią energią ruchu cząsteczek [...]; VI.11) stosuje równanie gazu doskonałego (równanie Clapeyrona) do wyznaczenia parametrów gazu.	47
6.2.	I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.	Zdający: VI.7) stosuje pierwszą zasadę termodynamiki do analizy przemian gazowych; rozróżnia przemiany: izotermiczną, izobaryczną, izochoryczną i adiabatyczną gazów; VI.9.) opisuje związek pomiędzy temperaturą w skali Kelvina a [...] energią wewnętrzną gazu doskonałego.	47
6.3.	V. Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk oraz ilustracji praw i zależności fizycznych.	Zdający: VI.7) stosuje pierwszą zasadę termodynamiki do analizy przemian gazowych; rozróżnia przemiany: izotermiczną, izobaryczną, izochoryczną i adiabatyczną gazów; VI.9.) opisuje związek pomiędzy temperaturą w skali Kelvina a [...] energią wewnętrzną gazu doskonałego; VI.12) posługuje się pojęciem ciepła molowego gazu; interpretuje związek między ciepłem molowym przy stałym ciśnieniu a ciepłem molowym w stałej objętości dla gazu doskonałego.	36

7.1.	I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.	Zdający: II.9) stosuje do obliczeń związku między promieniem okręgu, prędkością kątową, prędkością liniową oraz przyspieszeniem dośrodkowym. IX.2) posługuje się pojęciem wektora indukcji magnetycznej wraz z jego jednostką, analizuje oddziaływanie pola magnetycznego na [...] poruszającą się cząstkę naładowaną (siła elektrodynamiczna, siła Lorentza); IX.3) analizuje tor cząstki naładowanej w jednorodnym polu magnetycznym.	67
7.2.	II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.	Zdający: II.13) stosuje zasady dynamiki do opisu zachowania się ciał; II.20) posługuje się pojęciami pracy mechanicznej, [...] energii kinetycznej, [...] stosuje zasadę zachowania energii mechanicznej do obliczeń. IX.2) posługuje się pojęciem wektora indukcji magnetycznej wraz z jego jednostką, analizuje oddziaływanie pola magnetycznego na [...] poruszającą się cząstkę naładowaną (siła elektrodynamiczna, siła Lorentza).	34
7.3.	II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.	Zdający: IX.2) posługuje się pojęciem wektora indukcji magnetycznej wraz z jego jednostką, analizuje oddziaływanie pola magnetycznego na [...] poruszającą się cząstkę naładowaną (siła elektrodynamiczna, siła Lorentza); IX.3) analizuje tor cząstki naładowanej w jednorodnym polu magnetycznym.	43
8.1.	III. Planowanie i przeprowadzanie obserwacji oraz doświadczeń i wnioskowanie na podstawie ich wyników.	Zdający: I.2) posługuje [...] kartą wybranych wzorów i stałych fizykochemicznych; I.7) wyodrębnia z tekstów [...] lub wykresów [...] informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach; I.9) [...] interpretuje nachylenie [...] prostej i punkty przecięcia z osiami. VIII.4) [...] omawia zależność oporu od temperatury dla metali [...].	45
8.2.	III. Planowanie i przeprowadzanie obserwacji oraz doświadczeń i wnioskowanie na podstawie ich wyników.	Zdający: I.7) wyodrębnia z tekstów [...] lub wykresów [...] informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach. VIII.5) stosuje do obliczeń proporcjonalność natężenia prądu stałego do napięcia dla przewodników (prawo Ohma); VIII.8) stosuje do obliczeń związek mocy wydzielonej na oporniku (ciepła Joule'a-Lenza) z natężeniem prądu i oporem oraz napięciem i oporem. IX.9) wykorzystuje dane znamionowe urządzeń elektrycznych do obliczeń.	55

8.3.	II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.	Zdający: I.7) wyodrębnia z tekstów [...] informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach. VIII.3) analizuje zależność oporu od wymiarów przewodnika, posługuje się pojęciem oporu właściwego materiału i jego jednostką.	51
9.1.	I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.	Zdający: I.7) wyodrębnia z tekstów, [...] rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach. X.6) stosuje prawo odbicia i prawo załamania fal na granicy dwóch ośrodków [...].	48
9.2.	III. Planowanie i przeprowadzanie obserwacji oraz doświadczeń i wnioskowanie na podstawie ich wyników.	Zdający: I.7) wyodrębnia z tekstów, [...] rysunków schematycznych lub blokowych informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach. X.6) stosuje prawo odbicia i prawo załamania fal na granicy dwóch ośrodków; posługuje się pojęciem współczynnika załamania ośrodka [...].	50
10.1.	I. Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości.	Zdający: I.7) wyodrębnia z tekstów [...] lub wykresów [...] informacje kluczowe dla opisywanego zjawiska bądź problemu; przedstawia te informacje w różnych postaciach. XII.2) posługuje się związkiem między energią całkowitą, masą cząstki i jej prędkością; posługuje się pojęciem energii spoczynkowej.	68
10.2.	V. Budowanie modeli fizycznych i matematycznych do opisu zjawisk oraz ilustracji praw i zależności fizycznych.	Zdający: XII.2) posługuje się związkiem między energią całkowitą, masą cząstki i jej prędkością; posługuje się pojęciem energii spoczynkowej; XII.3) opisuje równowagę masy i energii spoczynkowej.	46
10.3.	II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.	Zdający: I.1) przedstawia jednostki wielkości fizycznych, opisuje ich związki z jednostkami podstawowymi [...]. II.20) posługuje się pojęciami pracy mechanicznej, mocy, energii kinetycznej, energii potencjalnej wraz z ich jednostkami; stosuje zasadę zachowania energii mechanicznej do obliczeń. VII.6) analizuje pracę jako zmianę energii potencjalnej podczas przemieszczenia ładunku w polu elektrycznym. XII.2) [...] posługuje się pojęciem energii spoczynkowej.	30

11.1.	IV. Posługiwanie się informacjami pochodzącymi z analizy materiałów źródłowych, w tym tekstów popularnonaukowych.	Zdający: I.2) posługuje się materiałami pomocniczymi, w tym tablicami fizycznymi i chemicznymi oraz kartą wybranych wzorów i stałych fizykochemicznych. XII.5) posługuje się pojęciami pierwiastek, jądro atomowe, izotop, proton, neutron, elektron; opisuje skład jądra atomowego na podstawie liczb masowej i atomowej; XII.6) zapisuje reakcje jądrowe stosując zasadę zachowania liczby nukleonów i zasadę zachowania ładunku.	56
11.2.	II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.	Zdający: I.2) posługuje się materiałami pomocniczymi, w tym tablicami fizycznymi i chemicznymi oraz kartą wybranych wzorów i stałych fizykochemicznych. XII.5) posługuje się pojęciami pierwiastek, jądro atomowe, izotop, proton, neutron, elektron; opisuje skład jądra atomowego na podstawie liczb masowej i atomowej; XII.6) zapisuje reakcje jądrowe stosując zasadę zachowania liczby nukleonów i zasadę zachowania ładunku; XII.9) [...] opisuje rozpady alfa [...].	67
11.3.	II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych.	Zdający: I.2) posługuje się [...] tablicami fizycznymi i chemicznymi oraz kartą wybranych wzorów i stałych fizykochemicznych. XII.7) stosuje zasadę zachowania energii do opisu reakcji jądrowych; posługuje się pojęciem energii wiązania; XII.8) oblicza dla dowolnego izotopu energię spoczynkową, deficyt masy i energię wiązania.	36

**WYKRES 2.** POZIOM WYKONANIA ZADAŃ W OBSZARZE WYMAGAŃ OGÓLNYCH

## Komentarz

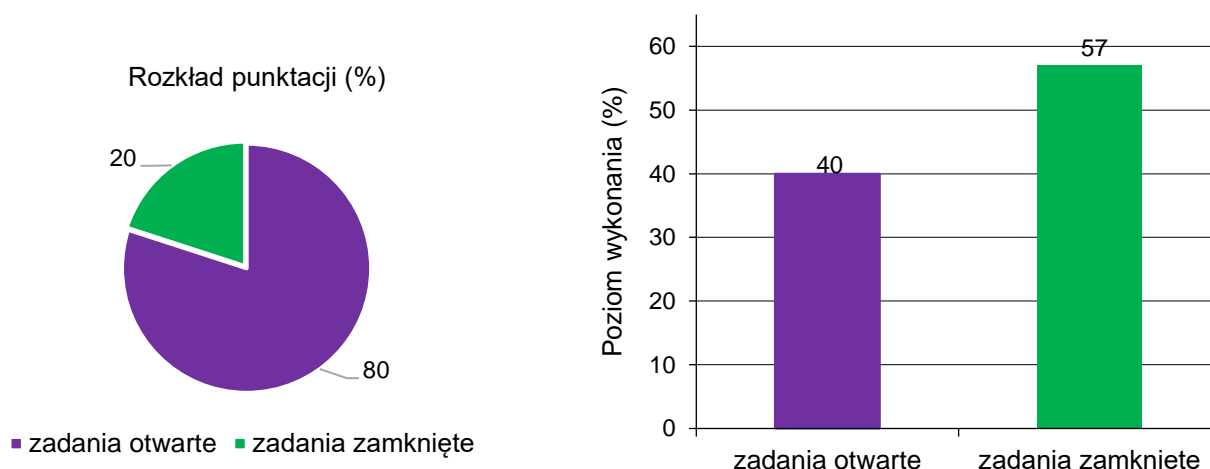
W roku 2023 do egzaminu maturalnego z fizyki w Formule 2023 przystąpili po raz pierwszy absolwenci liceów ogólnokształcących. Egzamin odbył się tylko na poziomie rozszerzonym i okazał się trudny. Średni wynik, jaki osiągnęli absolwenci liceów na Mazowszu to 48 %.

### Analiza jakościowa zadań

Tegoroczny arkusz maturalny z fizyki składał się ogółem z 30 pojedynczych zadań ujętych w 11 grup (wiązek) tematycznych, za które można było uzyskać łącznie 60 punktów. Jedno zadanie w arkuszu okazało się dla zdających bardzo trudne (tzn. poziom wykonania<sup>4</sup> zadania jest niższy lub równy 19%), 17 zadań było dla zdających trudne (tzn. poziom wykonania zadań zawiera się w przedziale od 20% do 49%), 11 zadań okazało się umiarkowanie trudne (tzn. poziom wykonania zadań mieści się w przedziale od 50% do 69%), a 1 zadanie było łatwe (tzn. poziom wykonania mieści się w przedziale od 70% do 89%). Zadań o poziomie wykonania powyżej 89% (czyli bardzo łatwych) nie było w arkuszu.

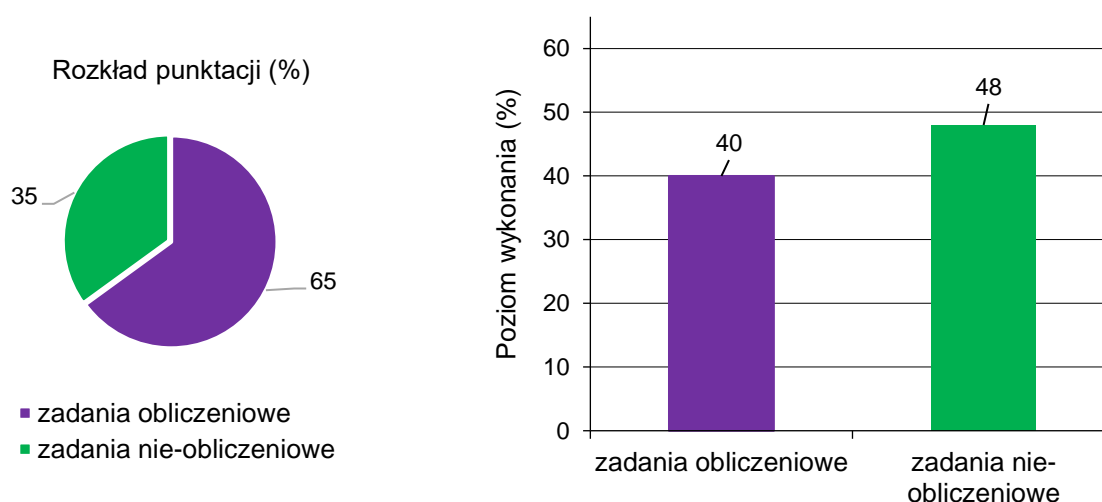
Rozkład punktacji na poszczególnych poziomach trudności przedstawia się następująco: całkowita liczba punktów, jakie można było uzyskać w sumie za zadania bardzo trudne, wynosiła 4 (co stanowi około 6,7% maksymalnej liczby punktów możliwych do zdobycia); całkowita liczba punktów, jakie można było uzyskać w sumie za zadania trudne, wynosiła 37 (to jest około 61,7% punktów możliwych do osiągnięcia); całkowita liczba punktów, jakie można było uzyskać w sumie za zadania umiarkowanie trudne wynosiła 18 (czyli 30,0% punktów możliwych do zdobycia), a liczba punktów możliwych do uzyskania za zadania łatwe była równa 1 (około 1,7% punktów w arkuszu). Z przedstawionej statystyki wynika, że większość zadań w arkuszu była dla zdających trudna.

Arkusz maturalny z fizyki w tym roku zawierał 20 zadań otwartych, za które można było dostać w sumie 48 punktów (co stanowi 80% całkowitej punktacji), oraz 10 zadań zamkniętych, za które można było dostać łącznie 10 punktów (co stanowi 20% całkowitej punktacji). Poziom wykonania wszystkich zadań otwartych wyniósł w tym roku 40%, a poziom wykonania wszystkich zadań zamkniętych wyniósł około 57%.



<sup>4</sup> Poziom wykonania zadania to parametr, który określa się jako iloraz (wyrażony w procentach) średniego wyniku za dane zadanie i maksymalnej liczby punktów możliwych do uzyskania za to zadanie.

Przyjmujemy do naszej analizy, że zadania obliczeniowe to te zadania otwarte, w których zdający – aby uzyskać punkty za rozwiązanie – musiał wykonać i zapisać jakiejkolwiek obliczenia lub przekształcenia algebraiczne wzorów. W arkuszu znalazło się 14 zadań obliczeniowych (spośród wszystkich 30 zadań). Można było za nie uzyskać łącznie 39 punktów, co stanowi 65% maksymalnej liczby punktów możliwych do zdobycia. Poziom wykonania wszystkich zadań obliczeniowych w arkuszu wyniósł około 40%, a poziom wykonania zadań nie-obliczeniowych – około 48%. Podobnie jak w ubiegłych latach, tak i w tym roku zadania obliczeniowe okazały się dla zdających zdecydowanie trudniejsze.



Wyniki, jakie osiągnęli zdający (w tym także za najtrudniejsze zadania), dobrze korelowały z wynikami uzyskanymi za cały arkusz. Przekonują o tym wartości tzw. współczynników korelacji liniowej Pearsona dla poszczególnych zadań. Współczynnik ten może przyjmować wartości od  $-1$  do  $1$  i jest miarą stopnia zależności/powiązania/korelacji liniowej między zmiennymi losowymi (w naszym przypadku parami zmiennych losowych są: wyniki zdających za dane zadanie i odpowiadające im wyniki tychże zdających za cały arkusz). W praktyce pomiaru dydaktycznego dodatnie wartości współczynnika korelacji powyżej  $0,5$  oznaczają bardzo dobre powiązanie wyniku zadania z wynikiem za cały arkusz – tzn. że wzrost wartości wyniku za dane zadanie w populacji zdających wiąże się ze wzrostem wartości wyniku za cały arkusz.

Większość zadań w arkuszu (21 zadania spośród 30) osiągnęła współczynnik korelacji liniowej wyższy lub równy  $0,5$ . Ponadto aż 15 zadań miało ten współczynnik wyższy lub równy  $0,65$ . Nie było zadań o współczynniku korelacji poniżej  $0,3$ . Dobra i silna korelacja wyniku za zadania z wynikiem za cały arkusz oznacza, że zadania bardzo dobrze różnicowały populację zdających.

W arkuszu egzaminacyjnym nie było zadań bardzo łatwych o poziomie wykonania powyżej 90% oraz nie było zadań bardzo trudnych o poziomie wykonania poniżej 10%.

## Zadania, z którymi zdający poradzili sobie najłabiej

W tej części *Komentarza* omówimy zadania, z którymi zdający poradzili sobie najłabiej. Przyjmiemy do analizy zadania, których poziom wykonania jest poniżej (lub jest równy) 36%.

Do każdego zadania omawianego w dalszej części komentarza, będziemy podawali dwa parametry: 1) poziom wykonania zadania (współczynnik łatwości wyrażony w %); 2) współczynnik korelacji liniowej Pearsona. Parametry te określone są dla całej populacji zdających egzamin maturalny z fizyki w 2023 roku w terminie głównym (w formule 2023).

Zadania, których poziom wykonania jest niższy lub równy 43%, licząc kolejno od najtrudniejszego, to (w nawiasach obok parametrów statystycznych zapisano jakiej tematyki dotyczy zadanie oraz rodzaj zadania):

1. Zadanie 3.2. (20%, 0,63, dynamika bryły i punktu materialnego, zadanie otwarte)
2. Zadanie 2.1. (29%, 0,50, dynamika (zderzenia), zadanie otwarte z luką – graficzne)
3. Zadanie 10.3. (30%, 0,65, fizyka relatywistyczna, zadanie otwarte z luką)
4. Zadanie 7.2. (34%, 0,73, magnetyzm oraz dynamika, zadanie otwarte z uzasadnieniem)
5. Zadanie 6.3. (36%, 0,71, termodynamika, zadanie otwarte)
6. Zadanie 11.3. (36%, 0,73, fizyka jądrowa, zadanie otwarte)
7. Zadanie 5.1. (41%, 0,49, grawitacja oraz dynamika, zadanie otwarte z luką – graficzne)
8. Zadanie 7.3. (43%, 0,79, magnetyzm oraz dynamika, zadanie otwarte)

Wszystkie z wymienionych powyżej najtrudniejszych zadań w arkuszu to zadania otwarte. Trzy z nich to zadania z luką, jedno na uzasadnienie a pozostałe to zadania obliczeniowe. W dwóch zadaniach z luką należało jedynie uzupełnić rysunek o poprawnie narysowany wektor siły/sił. Rozwiązanie tych zadań wymagało wyodrębnienia zjawiska z opisanego kontekstu, stworzenia fizycznego i matematycznego modelu zjawiska, zastosowania odpowiedniej zasady / prawa fizycznego, czy też innych zależności fizycznych bądź matematycznych. Te czynniki, niezależnie od działu fizyki, którego dotyczyło zadanie, miały największy wpływ na niski poziom wykonania tych zadań.

Poniżej omówimy najtrudniejsze zadania w arkuszu i opiszemy błędy, jakie najczęściej popełniali zdający w swoich rozwiązaniach.

### Omówienie zadania 3.2. (20%, 0,63)

Wiązka zadań **3.1.–3.2.** dotyczyła zagadnień związanych z dynamiką bryły sztywnej na przykładzie poruszającego się układu ciał złożonego z ciężarka i walca. Ciężarek był zawieszony na nici i opadał w pionie. Drugi koniec nici był odpowiednio przymocowany do osi walca. Ten walec – ciągnięty przez linkę na skutek opadania ciężarka – toczył się coraz szybciej bez poślizgu po poziomej powierzchni stołu.

Pierwsze zadanie tej wiązki (**3.1.**) było zamknięte. Należało w nim ocenić prawdziwość stwierdzeń związanych z kinematyką ruchu walca oraz z różnymi formami energii układu. To zadanie okazało się szóstym pod względem łatwości (poziom wykonania 58%).



**Zadanie 3.2.** uzyskało najniższy poziom wykonania (20%) i okazało się najtrudniejszym zadaniem w całym arkuszu. W zadaniu należało wyprowadzić wzór pozwalający wyznaczyć wartość  $a$  przyspieszenia opadającego ciężarka w zależności tylko od wartości  $g$  przyspieszenia ziemskiego. Żeby rozwiązać zadanie należało: (1) poprawnie zidentyfikować siły działające na walec i ciężarek, (2) poprawnie napisać równanie wyrażające drugą zasadę dynamiki dla ruchu postępowego walca, (3) poprawnie napisać równanie wyrażające drugą zasadę dynamiki dla ruchu obrotowego walca, (4) poprawnie napisać równanie wyrażające drugą zasadę dynamiki dla ruchu postępowego ciężarka, (5) zastosować związek między przyspieszeniem liniowym układu a przyspieszeniem kątowym walca oraz wzór na moment bezwładności walca. Rozwiązanie zadania (w skrócie, z pominięciem przekształceń) przedstawia się następująco:

$$\begin{cases} ma = F - T \\ I\epsilon = RT \\ ma = F_g - F \\ a = \epsilon R \\ I = \frac{1}{2}mR^2 \end{cases} \rightarrow a = \frac{2}{5}g$$

Zadanie to można było również rozwiązać stosując zasadę zachowania energii. W tym celu należało: (1) przyrównać energie mechaniczne układu w chwili początkowej i końcowej, (2) poprawnie określić i zapisać energie mechaniczne walca i ciężarka, (3) zastosować związek między prędkością liniową układu a prędkością kątową walca, (4) zastosować związek między prędkością a przyspieszeniem i drogą w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej. Rozwiązanie zadania tą metodą (w skrócie, z pominięciem przekształceń) przedstawia się następująco:

$$\begin{cases} mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}mv^2 \\ v = \omega R \\ v^2 = 2ah \\ I = \frac{1}{2}mR^2 \end{cases} \rightarrow a = \frac{2}{5}g$$

Należy podkreślić, że do zadania podana była wskazówka, aby skorzystać albo z zasady zachowania energii mechanicznej układu albo z zasad dynamiki ruchu postępowego i obrotowego.

Zasadniczą trudnością dla rozwiązujących zadanie za pomocą zasad dynamiki było prawidłowe określenie sił działających na walec i ciężarek oraz prawidłowe zapisanie równań wynikających z zasad dynamiki ruchu obrotowego i postępowego. Zdający często mylili zwrot siły tarcia lub przyjmowali równość wartości siły tarcia i wartości siły naciągu nici. Trudnością w metodzie energetycznej było natomiast poprawne zapisanie zasady zachowania energii oraz poprawne zastosowanie związku między prędkością a przyspieszeniem i drogą w ruchu jednostajnie przyspieszonym bez prędkości początkowej. Większość błędów popełniana przez zdających, którzy podjęli rozwiązanie, wiązała się właśnie z pokonaniem tych trudności.



### Przykład 1 – rozwiązania zdających

W przedstawionym przykładzie zdający rozwiązuje zadanie korzystając z zasad dynamiki. Poprawnie zapisuje równanie ruchu postępowego ciężarka. Jednak błędnie określa zwrot siły tarcia oraz błędnie zapisuje równanie wyrażające drugą zasadę dynamiki dla ruchu postępowego walca. Natomiast równanie ruchu obrotowego walca jest poprawne, ale niezgodne z przyjętym przez zdającego zwrotem siły tarcia.

$$a = \epsilon R$$

$$a = \frac{2T_s}{m \cdot R} \cdot R = \frac{2T_s}{m}$$

$$T_s + N = am$$

$$F_g - N = a \cdot m$$

$$T_s \cdot R = J \epsilon$$

$$E = \frac{T_s \cdot R}{J} = \frac{2T_s \cdot R}{m R^2} = \frac{2T_s}{m R}$$

$$T_s = am - N = am - F_g + am$$

$$T_s = 2am - mg = m(2a - g)$$

$$a = \frac{2T_s}{m} = \frac{2 \cdot m(2a - g)}{m} = 4a - 2g$$

$$2g = 3a$$

$$a = \frac{2}{3}g$$

### Przykład 2 – rozwiązania zdających

W przedstawionym przykładzie zdający rozwiązuje zadanie korzystając z zasad dynamiki. Poprawnie zapisuje równanie ruchu postępowego ciężarka. Następnie błędnie określa relacje pomiędzy siłami – zapisuje równość wartości siły tarcia i siły naciągu nici. Ten zapis jest niezgodny z faktem, że walec porusza się ruchem przyspieszonym.

$$F_w = F_c - F_N$$

$$F_w = m \cdot a$$

$$F_c = m \cdot g$$

$$F_N = T$$

$$I = \frac{1}{2} m R^2$$

$$a = \epsilon R$$

$$\epsilon = \frac{a}{R}$$

$$I \epsilon = R T$$

$$T = \frac{I \epsilon}{R} = \frac{\frac{1}{2} m R^2 \cdot \frac{a}{R}}{R} = \frac{1}{2} m a$$

$$m \cdot a = m \cdot g - \frac{1}{2} m a$$

$$a = g - \frac{1}{2} a$$

$$\frac{3}{2} a = g$$

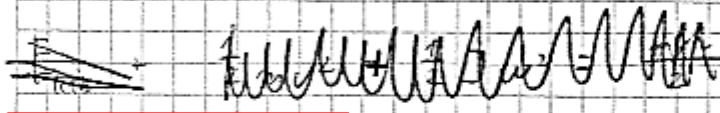
$$a = \frac{2}{3} g$$

done:  $g$   
szukane:  $a$

**Przykład 3 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający rozwiązuje zadanie korzystając z zasady zachowania energii. Stosuje poprawną strategię przyrównując energię mechaniczną układu w chwili początkowej do energii mechanicznej układu w chwili końcowej (gdy ciężarek obniży się o  $h$ ). Zdający poprawnie określa energię mechaniczną układu w chwili początkowej jako energię potencjalną ciężarka. Jednak błędnie określa energię mechaniczną układu w chwili końcowej – w zapisanym wyrażeniu nie ma wzoru na energię kinetyczną ruchu postępowego ciężarka (albo walca).

Dane:  $J; m; R;$  Szukane:  $a; \omega;$   
 Dane:  $J_{wale}; R_{wale}; m_{wale}$  •  $J_{ciężki} = m_{ciężki} r^2 = m r^2$



$$\frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} J \omega^2 = mgh$$

$$\frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} m R^2 \omega^2 = mgh$$

$$\frac{1}{2} v^2 + \frac{1}{4} R^2 \omega^2 = gh$$

$$\frac{1}{2} v^2 + \frac{1}{4} \frac{4 \pi^2}{T^2} R^2 = gh$$

$$\frac{1}{2} v^2 + \frac{R^2 T^2}{T^2} = gh$$
**Przykład 4 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający rozwiązuje zadanie korzystając z zasady zachowania energii. Stosuje poprawną strategię przyrównując energię mechaniczną układu w chwili początkowej do energii mechanicznej układu w chwili końcowej (gdy ciężarek obniży się o  $h$ ). Zdający poprawnie określa energię mechaniczną układu w chwili początkowej jako energię potencjalną ciężarka oraz poprawnie określa energię mechaniczną układu w chwili końcowej jako sumę energii kinetycznych ruchu postępowego walca i ciężarka oraz energii kinetycznej ruchu obrotowego walca.

W dalszej części rozwiązania zdający błędnie określa związek pomiędzy wysokością i prędkością końcową ciężarka, ponieważ stosuje wzór ( $h = vt$ ) na drogę dla ruchu jednostajnego prostoliniowego, a powinien zastosować wzory dla ruchu jednostajnie

przyśpieszonego:  $h = \frac{1}{2} at^2$  i  $a = \frac{\Delta v}{t} = \frac{v-0}{t}$  albo wzór z wyeliminowanym czasem  $h = \frac{v^2}{2a}$ .

$$mgh = mg \boxed{v \cdot t}$$

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{mv^2}{2} + \frac{mR^2 \omega^2}{R^2}$$

$$mgh = mv^2 + \frac{mv^2}{4} = \frac{5}{4}mv^2$$

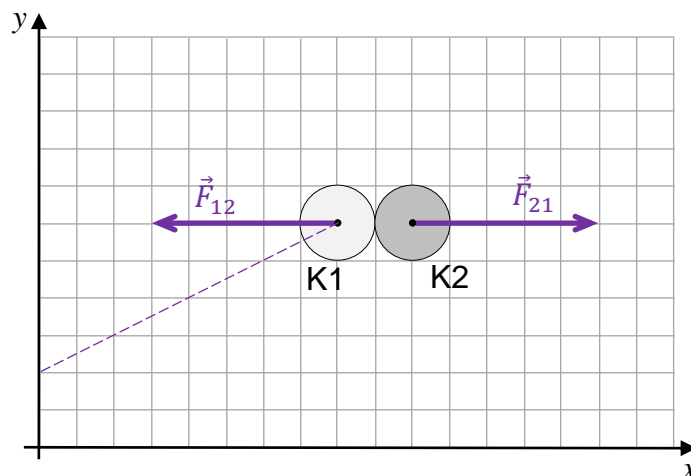
$$g \cdot t = \frac{5}{4}v$$

$$g = \frac{5v}{4t} = \frac{5}{4}a$$

$$a = \frac{4}{5}g$$

#### Omówienie zadania 2.1. (29%, 0,50)

**Zadanie 2.1.** było drugim pod względem trudności zadaniem w arkuszu. Poziom wykonania tego zadania wyniósł 29% a współczynnik korelacji 0,50. Zadanie wchodziło w skład wiązki zadań dotyczących niecentralnego zderzenia sprężystego dwóch krążków. Zadanie 2.1. było zadaniem otwartym z luką w, którym należało narysować siły wzajemnego oddziaływania krążków podczas ich zderzenia. Do tego konieczne było uwzględnienie warunku o braku tarcia pomiędzy krążkami (czyli braku sił stycznych do powierzchni styku) oraz faktu, że siły sprężystości/reakcji są prostopadłe do płaszczyzny styku. Rozwiązanie zadania przedstawiało się następująco:

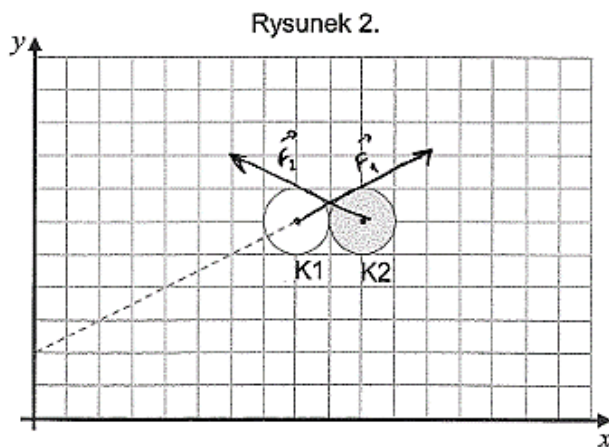


Trudnością dla zdających, którzy podejmowali rozwiązanie zadania, było poprawne określenie kierunku lub zwrotu działania obu sił. Zdający np. bezpodstawnie wiązali kierunek

sił z kierunkiem prędkości krążka K1 przed zderzeniem. Ponadto rysowali siły w różnych kierunkach, co jest sprzeczne z III zasadą dynamiki.

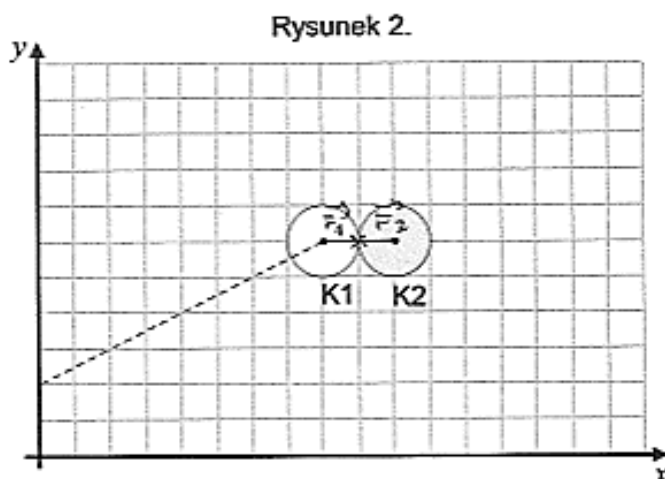
### Przykład 5 – rozwiązania zdających

W poniższym przykładzie zdający popełnia wiele błędów. Po pierwsze, błędnie określa kierunki działania obu sił – kierunek siły sprężystości  $\vec{F}_1$  wiąże z prędkością krążka K1 (co jest błędem). Po drugie, nawet przy błędnie określonym kierunku działania jednej siły, to druga siła, zgodnie z III zasadą dynamiki, powinna mieć ten sam kierunek i przeciwny zwrot – natomiast w rozwiązaniu zdającego obie siły wzajemnego oddziaływania mają różne kierunki. Dlatego też rozwiązanie jest niezgodne z fizycznym charakterem siły sprężystości oraz jest niezgodne z trzecią zasadą dynamiki. Po trzecie, wydaje się, że zdający – niezależnie od opisanych błędów – pomylił punkty przyłożenia sił. Siła sprężystości kuli K1 powinna działać na krążek K2, czyli być przyłożona do K2, a w rozwiązaniu jest ona przyłożona do krążka K1. To znaczy, że rozwiązanie zdającego jest niezgodne z konwencją oznaczania oddziaływań.



### Przykład 6 – rozwiązania zdających

W przedstawionym przykładzie zdający rysuje siły wzajemnego oddziaływania zachowując jedynie poprawny kierunek działania obu sił (tzn. linię wzdłuż której działają siły) oraz poprawną relację pomiędzy wartościami sił (równość wartości). Błędnie oznacza on zwroty obu sił. Zgodnie z rozwiązaniem zdającego krążki w trakcie zderzenia miałyby się przyciągać, podczas, gdy w rzeczywistości następuje ich odepchnięcie. Błąd ten może być konsekwencją pomylenia punktów przyłożenia sił (tzn. siła  $\vec{F}_1$  działająca na K2 i pochodząca od K1 powinna być przyłożona do K2, a siła  $\vec{F}_2$  działająca na K1 i pochodząca od K2 powinna być przyłożona do K1).



### Omówienie zadania 10.3. (30%, 0,65)

Wiązka zadań 10.1–10.3. odnosiła się do zagadnień związanych z mechaniką relatywistyczną. Zadania te zostaną szczegółowo omówione wraz z analizą rozwiązań zdających w dalszej części niniejszego opracowania w rozdziale 2. **Problem „pod lupą”**. W tym miejscu zasygnalizujemy tylko, że zadanie 10.3. było zadaniem otwartym z luką i okazało się trzecim pod względem trudności zadaniem w arkuszu – jego poziom wykonania wyniósł 25% a współczynnik korelacji z arkuszem to 0,65. Zauważmy, że drugie pod względem trudności zadanie w arkuszu także było zadaniem otwartym z luką (nie wymagającym rachunków).

### Omówienie zadania 7.2. (34%, 0,73) i 7.3. (43%, 0,79)

Wiązka zadań 7.1.–7.3. dotyczyła zagadnień związanych z dynamiką ruchu protonu w polu magnetycznym. W tekście wprowadzającym do wiązki zadań został opisany ruch protonu w próżni, w polu magnetycznym po torze składającym się z półokręgów o różnych promieniach. Wektor indukcji magnetycznej był prostopadły do płaszczyzny ruchu protonu i miał dla każdego z półokręgów stałą – ale na każdym z nich inną – wartość.

**Zadanie 7.2.** uzyskało poziom wykonania 34% i współczynnik korelacji 0,73, zajmując w arkuszu czwarte miejsce pod względem trudności. Wysoki współczynnik korelacji oznacza, że wyniki, jakie otrzymywali zdający za to zadanie bardzo dobrze korelowały z wynikami za cały arkusz. W zadaniu należało wykazać, że wartość prędkości protonu w ruchu po każdym z półokręgów jest stała (co stanowiło tezę). Dowód ten należało przeprowadzić wykorzystując założenie, którym była własność siły Lorentza, polegająca na tym, że siła ta działa zawsze prostopadle do prędkości cząstki poruszającej się w polu magnetycznym. Wnioskowanie o tym, co wynika z założenia można było przeprowadzić odwołując się do:

- II zasady dynamiki, zgodnie z którą siła prostopadła do prędkości, nie zmienia tej prędkości w kierunku stycznym do toru, czyli nie zmienia wartości tej prędkości.
- lub
- definicji pracy zgodnie z którą praca siły prostopadłej do prędkości (lub chwilowego przesunięcia) jest równa zero. Następnie po zastosowaniu związku pomiędzy pracą siły wypadkowej i zmianą energii kinetycznej można było stwierdzić, że skoro praca siły Lorentza działającej na cząstkę jest równa zero, to i zmiana energii kinetycznej cząstki jest równa zero. To z kolei oznacza, że wartość prędkości cząstki jest stała.

Zasadniczą trudności zadania było przeprowadzenie poprawnego wnioskowania o tym, co wynika z założenia o prostopadłości siły Lorentza do prędkości cząstki poruszającej się w polu magnetycznym.

Innym sposobem przeprowadzenia dowodu było wykorzystanie/wyprowadzenie wzoru na wartość prędkości cząstki w polu magnetycznym. W tym celu należało zapisać związek wyrażający siłę Lorentza jako siłę dośrodkową, następnie wyznaczyć z tego wzór na prędkość protonu na  $i$ -tym półokręgu (można było też od razu powołać się na ten wzór):

$$v_i = \frac{qB_i r_i}{m}$$

Ponieważ na każdym z półokręgów wartość indukcji pola magnetycznego jest stała i promień danego półokręgu jest stały, to iloczyn  $B_i r_i$  na  $i$ -tym półokręgu też jest stały. Zatem:

$$(B_i = \text{const} \quad r_i = \text{const}) \rightarrow v_i = \frac{qB_i r_i}{m} = \text{const}$$

Z tego wynika, że wartość prędkości cząstki na danym półokręgu jest stała.

Zdający, którzy rozwiązywali zadanie drugim z opisanych sposobów, zazwyczaj poprawnie zapisywali związek wyrażający siłę Lorentza jako siłę dośrodkową i poprawnie wyznaczyli wzór na wartość prędkości cząstki. Często jednak zdający kończyli przeprowadzanie dowodu na wyznaczeniu tego wzoru lub w niewłaściwy sposób wykazywali stałość wartości prędkości na podstawie otrzymanego wzoru.

### Przykład 7 – rozwiązania zdających

W przedstawionym przykładzie zdający wykorzystuje tezę do przeprowadzenia dowodu. Wpada w błędne koło, pokazuje, że prędkość protonu zależy od siły Lorentza, której wartość właśnie zależy od prędkości protonu w polu magnetycznym.

Handwritten student solution on grid paper:

$$v = \frac{F}{qB} \sin 90^\circ \quad q - \text{const}$$

$$v = \frac{F}{B} \quad \text{B - const}$$

prędkość zależy od ilorazu  $\frac{F}{B}$ , który dla każdego półokręgu jest const, gdy  $r$  i  $v$  się równoważą

$$\frac{B}{F \cdot r} - \text{const} \quad v - \text{const} \quad \text{c.u.d.}$$

### Przykład 8 – rozwiązania zdających

W przedstawionym przykładzie zdający poprawnie wyprowadza wzór na prędkość protonu popełnia jednak błąd rzeczowy. Zamiast odwołać się do warunków zadania, to zdający wykazuje stałą wartość pola magnetycznego na podstawie błędnego w tym przypadku wzoru

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Handwritten student solution on grid paper:

$$F_c = qvB$$

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

$$v = \frac{qBr}{m} = \frac{q \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cdot r}{m} = \frac{q \mu_0 I}{2\pi m} = \text{const}$$

wszystkie wielkości są stałe więc prędkość jest stała



**Przykład 9 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający poprawnie zapisuje, że siła Lorentza działająca na proton pełni rolę siły dośrodkowej, następnie poprawnie wyznacza wzór na prędkość protonu, jednak na tym kończy rozwiązywanie zadania. Nie odwołuje się do warunków zadania i nie przeprowadza wnioskowania dotyczącego stałości wartości prędkości.

na proton działa siła dośrodkowa, jej rolę spełnia siła Lorentza  
 proton ma też energię kinetyczną

$$\sin \alpha = \frac{v}{v_0}$$

$$Bqv = \frac{mv^2}{r}$$

$$Bq = \frac{mv}{r}$$

$$v = \frac{Bqr}{m}$$

**Przykład 10 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający poprawnie zapisuje, że siła Lorentza działająca na proton pełni rolę siły dośrodkowej, następnie poprawnie wyznacza wzór na prędkość protonu. Jednak nie odwołuje się do warunków zadania tj. stałej wartości iloczynu  $B_i r_i$  na  $i$ -tym półokręgu, z której wynika stała wartość prędkości protonu.

$$F_L = F_d$$

$$q \cdot v \cdot B = \frac{mv^2}{r}$$

$$v = \frac{q \cdot r \cdot B}{m}$$

$r_1 = 0,175 \text{ m}$   
 $r_2 = 0,1625 \text{ m}$   
 $r_3 = 0,15 \text{ m}$

$$\Delta r = \frac{1}{2} |AB| = 0,1125 \text{ m}$$

$$B \cdot r \sim \frac{1}{r}$$

$$v = \frac{q \cdot r_i}{m} \cdot r \cdot B$$

$\downarrow$  const.

jeżeli rośnie  $r$  to  $B$  proporcjonalnie maleje i na odwrot całe wyrażenie jest const.

**Zadanie 7.3.** – którego poziom wykonania wynosi 43% a współczynnik korelacji 0,79 – dotyczyło obliczenia wartości  $B_{CD}$  wektora indukcji pola magnetycznego działającego na proton, gdy poruszał się on po półokręgu  $CD$ . Zadanie to było ósme pod względem trudności zadaniem w arkuszu. Aby rozwiązać zadanie należało: (1) zapisać relację identyfikującą siłę Lorentza jako siłę dośrodkową i wyznaczyć wzór na prędkość ruchu protonu w funkcji  $B$  i  $r$ ; (2) wykorzystać fakt, że wartość prędkości protonu się nie zmienia i bazując na tym zapisać równość pomiędzy wartościami prędkości protonu (lub wynikającymi z tego wyrażeniami) w ruchu po półokręgach  $AF$  i  $CD$ . Poprawne zastosowanie wymienionych zależności, z uwzględnieniem danych z treści zadania i rysunku dołączonego do zadania prowadziło do wyniku:

$$B_{AF}r_{AF} = B_{CD}r_{CD} \quad \text{oraz} \quad (r_{AF} = \frac{3}{4}|AD| = \frac{3}{4}m \quad \text{i} \quad r_{CD} = \frac{1}{4}|AD| = \frac{1}{4}m)$$

$$0,2T \cdot \frac{3}{4}m = B_{CD} \cdot \frac{1}{4}m \quad \rightarrow \quad B_{CD} = 0,6T.$$

Zdający, którzy podejmowali rozwiązanie zadania zwykle poprawnie zapisywali związek wyrażający siłę Lorentza jako siłę dośrodkową, poprawnie wyznaczali wzór na prędkość protonu w funkcji  $B$  i  $r$ . W wielu przypadkach jednak uzyskiwali niepoprawne rozwiązania, które najczęściej związane były z błędnie odczytanymi promieniami półokręgów  $CD$  i/lub  $AF$ . W wielu przypadkach niepoprawny wynik liczbowy był skutkiem błędów rachunkowych.

### Przykład 11 – rozwiązania zdających

W przedstawionym przykładzie zdający stosuje poprawną metodę obliczenia wartości wektora indukcji magnetycznej podczas ruchu protonu po półokręgu  $CD$ , nie otrzymuje prawidłowego wyniku liczbowego ponieważ błędnie odczytuje z rysunku do zadania promień  $r_{AF}$ . Przyjmuje, że jest on równy 1 m, a powinien być równy  $\frac{3}{4}$  m.

Dane:  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $B_{AF} = 0,2 \text{ T}$ ,  $v_{AF} = 1 \text{ m/s}$   
 $r = \frac{|CD|}{2} = \frac{1 \text{ m}}{4} = 0,25 \text{ m}$ ,  $F_L = q v B \sin \alpha$   
 $p^+ = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $\sin 90^\circ = 1$

$F_{do} = F_L = \frac{v^2}{r} \cdot m$   
 $\frac{v_{AF}^2}{r_{AF}} \cdot m = p^+ \cdot B_{AF} \sin \alpha$ ,  $\frac{v_{CD}^2}{r} \cdot m = p^+ \cdot B_{CD}$

$v = \frac{B_{AF} \cdot p^+ \cdot v_{AF}}{B_{CD} \cdot m_p}$ ,  $B_{CD} = \frac{v_{CD} \cdot m_p}{r \cdot p^+}$

$B_{CD} = \frac{B_{AF} \cdot p^+ \cdot m_p \cdot v_{AF}}{r \cdot p^+ \cdot m_p}$   
 $B_{CD} = B_{AF} \cdot \frac{v_{AF}}{r} = 0,2 \text{ T} \cdot \frac{1}{\frac{1}{4}} = 0,8 \text{ T}$

**Przykład 12 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający stosuje poprawną metodę obliczenia wartości wektora indukcji magnetycznej podczas ruchu protonu po półokręgu  $CD$ , nie otrzymuje prawidłowego wyniku liczbowego ponieważ popełnia błąd rachunkowy przy obliczaniu prędkości protonu w ruchu po półokręgu  $AF$ .

$SD = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot I \cdot m \cdot S = \frac{1}{3} \cdot m$   
 $Q = \frac{F}{m} E$   
 $Q \cdot \frac{1}{m} = m \cdot \frac{v^2}{r}$   
 $F = Q \cdot m$   
 $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$   
 $\sin \alpha = 1$   
 $S = \frac{2\pi \cdot \frac{1}{3}}{2}$   
 $S = \frac{1}{3} \cdot 3,14 \text{ [m]} = 0,785 \text{ [m]}^2$   
 $\frac{v}{r} = \frac{q \cdot v \cdot B}{m}$   
 $\frac{2,5 \cdot 10^7}{0,25} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot B \cdot 0,785}{1,642 \cdot 10^{-27}}$   
 $B_{CD} = 10,032 \cdot 10^{-1} \text{ [T]} = 1,0032 \text{ [T]}$   
 $\frac{v}{r} = \frac{q \cdot B \cdot r}{m}$   
 $v = \frac{q \cdot B \cdot r}{m}$   
 $v = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,2 \cdot 0,75}{1,642 \cdot 10^{-27}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ [m/s]} < c$

**Przykład 13 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający stosuje poprawną metodę obliczenia wartości wektora indukcji magnetycznej podczas ruchu protonu po półokręgu  $CD$ , nie otrzymuje prawidłowego wyniku liczbowego ponieważ popełnia błąd podczas przekształcania wzoru na wartość wektora  $B_{CD}$ .

$v_{AF} = \frac{q \cdot B_{AF} \cdot r}{m} = \frac{q}{m} \cdot 0,2 \cdot 0,75$   
 $F_L = F_d = \frac{mv^2}{r}$   
 $q \cdot v \cdot B = \frac{mv^2}{r}$   
 $B = \frac{mv}{r \cdot q}$   
 $B_{AF} = 0,2 \text{ T}$   
 $v_{AF} = 0,75 \text{ m}$   
 $B_{AF} = \frac{mv}{r \cdot q} = \frac{4 \cdot mv}{3 \cdot q}$   
 $B_{CD} = \frac{mv}{r \cdot q} = \frac{4 \cdot mv}{q}$   
 $B_{CD} = \frac{1}{3} B_{AF} = 0,067 \text{ T}$

<b>Omówienie zadania 6.3. (36%, 0,71)</b>
---

**Zadanie 6.3.** było piątym pod względem trudności zadaniem w arkuszu. Poziom wykonania tego zadania wyniósł 36% a współczynnik korelacji 0,71. Zadanie wchodziło w skład wiązki zadań dotyczących zagadnień związanych z przemianami izochoryczną oraz izobaryczną. W cylindrze szczelnie zamkniętym ruchomym tłokiem znajdował się  $n = 1$  mol jednoatomowego gazu doskonałego. Ten gaz poddano kolejno dwóm przemianom: izochorycznej oraz izobarycznej. W każdej z tych przemian dostarczono do gazu  $Q = 100$  J ciepła. Ciepło molowe tego gazu przy stałej objętości wynosiło  $C_V = \frac{3}{2}R$ .

W zadaniu 6.3. należało obliczyć pracę siły parcia działającej na tłok w przemianie izobarycznej. Zasadniczo można wyróżnić dwa sposoby rozwiązań zadania. Pierwszy sposób rozwiązania wymagał zastosowania pierwszej zasady termodynamiki, wzoru na energię wewnętrzną, wzoru na ciepło w przemianie izobarycznej (gazu jednoatomowego) oraz związku między ciepłem molowym przy stałej objętości a ciepłem molowym przy stałym ciśnieniu. Rozwiązanie zadania tą metodą (w skrócie, z pominięciem przekształceń) przedstawia się następująco:

$$\begin{cases} \Delta U_2 = |Q_2| - |W_2| \\ \Delta U_2 = nC_V\Delta T_2 \\ Q_2 = nC_p\Delta T_2 \\ C_p = C_V + R \end{cases} \rightarrow |W_2| = \frac{2}{5}|Q_2| = \frac{2}{5} \cdot 100 \text{ J} = 40 \text{ J}$$

Drugi sposób rozwiązania zadania opierał się na zastosowaniu wzoru na pracę siły parcia przy stałym ciśnieniu, wykorzystaniu równania Clapeyrona, wzoru na ciepło w przemianie izobarycznej (gazu jednoatomowego) oraz związku między ciepłem molowym przy stałej objętości a ciepłem molowym przy stałym ciśnieniu. Rozwiązanie zadania drugą metodą (w skrócie, z pominięciem przekształceń) przedstawia się następująco:

$$\begin{cases} |W_2| = p_2|\Delta V_2| \\ p_2\Delta V_2 = nR\Delta T_2 \\ Q_2 = nC_p\Delta T_2 \\ C_p = C_V + R \end{cases} \rightarrow |W_2| = \frac{2}{5}|Q_2| = \frac{2}{5} \cdot 100 \text{ J} = 40 \text{ J}$$

Trudnością dla zdających w tym zadaniu było opracowanie strategii rozwiązania, polegającej na zastosowaniu szeregu odpowiednich praw/zasad, równań czy własności. Dlatego ci zdający, którzy podejmowali rozwiązanie zadania z obraną strategią, zazwyczaj poprawnie doprowadzali rozwiązanie do końca. Błędy, które się często zdarzały związane były z myleniem ciepła przemiany izobarycznej z ciepłem przemiany izochorycznej.

Zadanie uzyskało wysoki (0,71) współczynnik korelacji liniowej z arkuszem, co oznacza, że nie sprawiło ono trudności zdającym, którzy uzyskali wysokie wyniki za cały arkusz – czyli zdającym dobrze przygotowanym do egzaminu.

## Przykład 14 – rozwiązania zdających

W poniższych dwóch kolejnych przykładach zdający mylą ciepło przemiany.

$$W = -p \cdot \Delta V$$

$$C = \frac{Q}{n \cdot \Delta T} = \frac{3}{2} R$$

$$n = 1 \text{ mol}$$

$$\frac{3}{2} R = \frac{100 \text{ J}}{1 \text{ mol} \cdot \frac{p \cdot \Delta V}{n}}$$

$$\frac{3}{2} = \frac{100 \text{ J}}{p \cdot \Delta V}$$

$$\frac{3 \cdot p \cdot \Delta V}{2} = 100 \text{ J}$$

$$p \cdot \Delta V = \frac{200}{3}$$

$$W = -p \cdot \Delta V$$

$$W = -\frac{200}{3} \text{ J}$$

## Przykład 15

$$|W| = n |p \Delta V| \quad nV = nRT \quad n = 1 \text{ mol}$$

$$nV = RT$$

$$\frac{nR}{n} \cdot \Delta T = \frac{RT}{n} - \frac{RT}{n}$$

$$\frac{3}{2} R = \frac{Q}{n \Delta T} \quad n = 1$$

$$\frac{3}{2} R = \frac{Q}{\Delta T}$$

$$\Delta T = \frac{Q}{\frac{3}{2} R}$$

$$V = T \cdot \frac{R}{p} = \text{const.}$$

$$\Delta V = \Delta T \cdot \frac{R}{p}$$

$$\Delta V = \frac{Q}{\frac{3}{2} R} \cdot \frac{R}{p}$$

$$\Delta V = \frac{Q}{\frac{3}{2} n} \quad (2)$$

(1) i (2):  $n \Delta V = Q > 0$

$$|W| = n \cdot \left| \frac{Q}{\frac{3}{2} n} \right| = \frac{Q}{\frac{3}{2}} = \frac{2Q}{3}$$

$$W = \frac{2Q}{3} = \frac{200}{3} \text{ J}$$

odp.:  $W = \frac{200}{3} \text{ J}$

**Omówienie zadania 11.3. (36%, 0,73)**

**Zadanie 11.3.** należące do wiązki zadań 11.1.–11.3. z fizyki jądrowej uzyskało poziom wykonania 36% oraz współczynnik korelacji Pearsona równy 0,73. We wstępie do wiązki zadań podana była informacja dotycząca izotopu  $^{277}_{112}\text{Cn}$  pierwiastka kopernik. W zadaniu należało obliczyć najmniejszą energię, jaką należałoby dostarczyć do jądra  $^{277}_{112}\text{Cn}$ , aby rozbić je na oddzielne nukleony. Wynik należało podać zaokrąglony do trzech cyfr znaczących. Aby rozwiązać zadanie należało: (1) zauważyć, że energia  $E$ , jaką należy dostarczyć do jądra kopernik  $^{277}_{112}\text{Cn}$  jest równa energii wiązania tego jądra i zapisać związek pomiędzy energią wiązania a deficytem masy jądra kopernik  $^{277}_{112}\text{Cn}$ ; (2) zapisać deficyt masy jądra jako różnicę pomiędzy masą wszystkich nukleonów tworzących to jądro a masą jądra  $^{277}_{112}\text{Cn}$ ; (3) wynik liczbowy energii wiązania zapisać z jednostką w zaokrągleniu do trzech cyfr znaczących.

Zdający którzy podejmowali rozwiązanie zadania zwykle poprawnie identyfikowali energię potrzebną do rozbitcia jądra  $^{277}_{112}\text{Cn}$  jako energię wiązania tego jądra oraz poprawnie zapisywali związek pomiędzy tą energią a deficytem masy jądra kopernik. Zasadniczą trudnością zadania jak się okazało było poprawne obliczenie deficytu masy jądra  $^{277}_{112}\text{Cn}$  jako różnicy pomiędzy masą wszystkich nukleonów tworzących to jądro a masą samego jądra. Większość błędów popełniana przez zdających, którzy podjęli rozwiązanie, wiązała się właśnie z pokonaniem tej trudności. Inne najczęściej popełniane błędy przez zdających, którzy podjęli się rozwiązania zadania to błędy rachunkowe, podawanie wyniku niezgodnie z poleceniem tj. ze zbyt dużą liczbą cyfr znaczących lub zapisywanie prawidłowego wyniku z wymaganym zaokrągleniem ale bez jednostki.

**Przykład 16 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający zauważa, że energia  $E$ , jaką należy dostarczyć do jądra kopernik  $^{277}_{112}\text{Cn}$  jest równa energii wiązania tego jądra i poprawnie zapisuje związek pomiędzy energią wiązania a deficytem masy jądra kopernik  $^{277}_{112}\text{Cn}$ . Jednak niepoprawnie oblicza deficyty masy.

Handwritten student solution on grid paper:

$$E = \Delta m c^2$$

$$^{277}_{112}\text{Cn} \Rightarrow \Delta m = 8.3 \text{ u} \quad ^{285}_{112}\text{Cn}$$

$$\Delta m = m_{\text{Cn}} - 8m$$

**Przykład 17 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający zauważa, że energia  $E$ , jaką należy dostarczyć do jądra kopernik  ${}_{112}^{277}\text{Cn}$  jest równa energii wiązania tego jądra i poprawnie zapisuje związek pomiędzy energią wiązania a deficytem masy jądra kopernik  ${}_{112}^{277}\text{Cn}$ . Jednak niepoprawnie oblicza deficyty masy, podstawiając niepoprawne masy protonu i neutronu.

$$L_n = A - Z = 277 - 112 = 165$$

$$\Delta m = L_p \cdot m_p + L_n \cdot m_n - m_{\text{Cn}}$$

$$\Delta m = 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 112 + 1,6609 \cdot 10^{-27} \cdot 165 - 277 \cdot 1,6609 \cdot 10^{-27}$$

$$960,1789 \cdot 10^{-27} = 1,4324 \cdot 10^{-24}$$

$$E = \Delta m c^2 = 1,4324 \cdot 10^{-24} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 12,8916 \cdot 10^{-11} \approx 1,29 \cdot 10^{-10}$$

**Przykład 18 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający stosuje poprawną metodę obliczenia energii wiązania jądra kopernik  ${}_{112}^{277}\text{Cn}$ . W końcowym etapie rozwiązania popełnia jednak błąd rachunkowy – nie oblicza kwadratu prędkości światła – dlatego otrzymuje nieprawidłowy wynik liczbowy.

$$m_{\text{Cn}} = 463,178852 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_p = 112 \cdot 1,67262192 \cdot 10^{-27}$$

$$m_n = 165 \cdot 1,67492749 \cdot 10^{-27}$$

$$m_p + m_n = 463,6966909 \cdot 10^{-27}$$

$$m_{\text{Cn}} - (m_p + m_n) = 3,55783889 \cdot 10^{-27}$$

$$E = m c^2 = 3,55783889 \cdot 3 \cdot 10^8 =$$

$$E = m c^2 = 3,55783889 \cdot 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^8 \approx 10,7 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$





**Przykład 19 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający stosuje poprawną metodę obliczenia energii wiązania jądra kopernik  ${}_{112}^{277}\text{Cn}$ , podaje prawidłowy wynik liczbowy z jednostką jednak bez wymaganego zaokrąglenia do trzech cyfr znaczących.

clawie:

$$\begin{aligned}
 & Z = 112 \rightarrow \text{ilość protonów} & A = 277 \\
 & N = A - Z = 277 - 112 = 165 \rightarrow \text{ilość neutronów} \\
 & 1) M_{p2} = 112 \cdot 1,67262192 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 187,333655 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \rightarrow \text{masa} \\
 & 2) M_{nN} = 165 \cdot 1,67492744 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 276,363035 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad \text{wszystkich protonów} \\
 & 3) \Delta M = (M_{p2} + M_{nN}) - M_{Cn} = \underbrace{\text{masa wszystkich neutronów}} \\
 & = 463,696691 \cdot 10^{-27} \text{ kg} - 460,138852 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = \\
 & = 3,557839 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \\
 & 4) E = \Delta M c^2 = 3,557839 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = \\
 & = 32,020551 \cdot 10^{-27} \cdot 10^{16} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = 32,020551 \cdot 10^{-11} \text{ J} = \\
 & = 3,2020551 \cdot 10^{-10} \text{ J}
 \end{aligned}$$

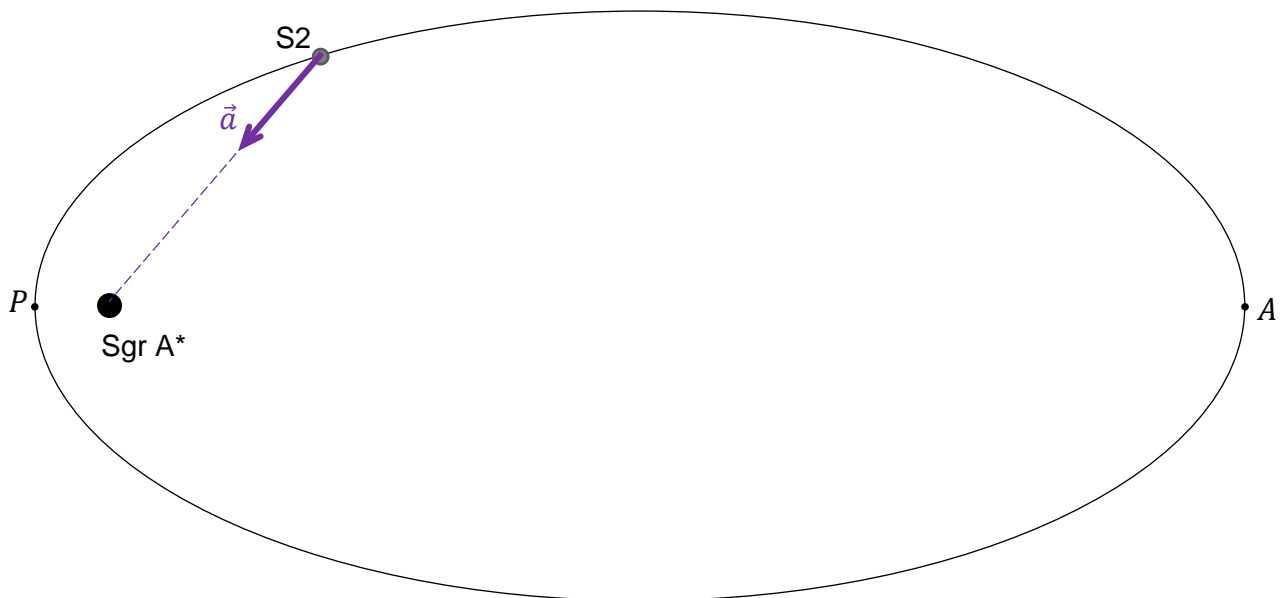
<b>Omówienie zadania 5.1. (41%, 0,49)</b>
---

**Zadanie 5.1.** (poziom wykonania – 41%, współczynnik korelacji liniowej Pearsona – 0,49) należało do wiązki zadań 5.1.–5.4. związanych z kinematyką i dynamiką ruchu po orbicie eliptycznej pod wpływem siły grawitacji. Pod względem trudności zadanie zajęło siódme miejsce w arkuszu. We wprowadzeniu do wiązki zadań opisano ruch gwiazdy o nazwie S2 po orbicie eliptycznej dookoła obiektu Sagittarius A\* (Sgr A\*), znajdującego się w centrum naszej galaktyki. Opisaną w zadaniu sytuację przedstawiono na rysunku.

W zadaniu 5.1. należało poprawnie (co do kierunku i zwrotu) narysować wektor przyśpieszenia  $\vec{a}$  środka gwiazdy S2 w oznaczonym położeniu na orbicie. Żeby poprawnie rozwiązać zadanie trzeba było uświadomić sobie dwie rzeczy:

- (1) zgodnie z II zasadą dynamiki przyśpieszenie ciała ma ten sam kierunek i zwrot co siła wypadkowa działająca na ciało;
- (2) siła grawitacji ma charakter centralny i przyciągający.

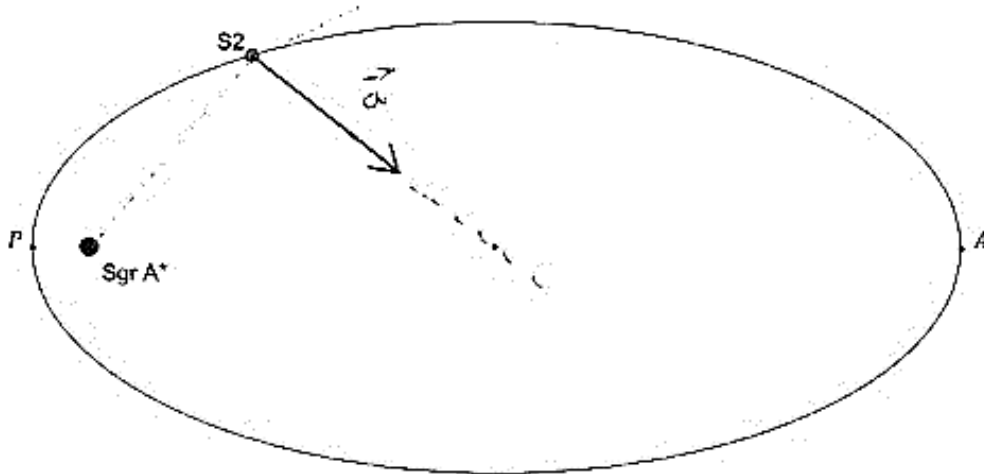
Po uwzględnieniu (1) i (2) otrzymujemy poprawne rozwiązanie jak poniżej:



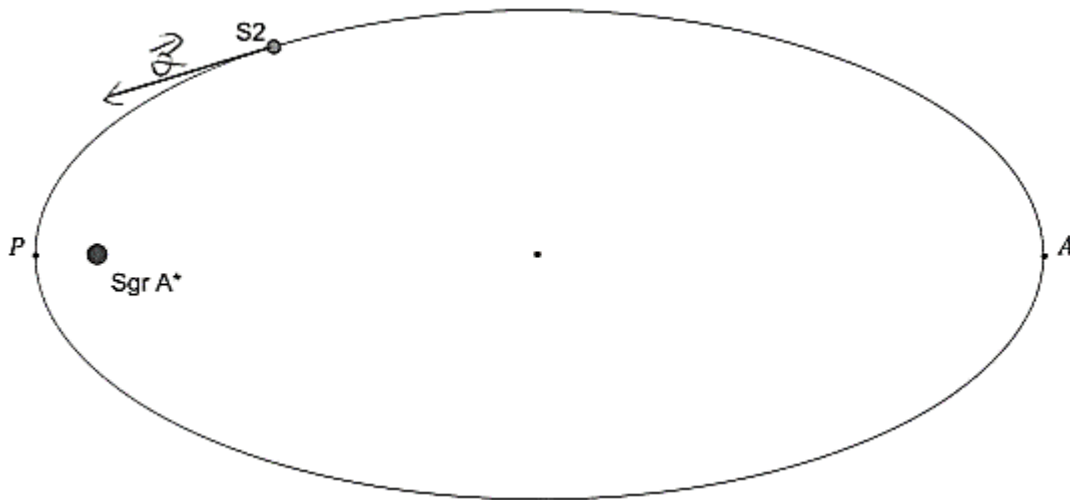
Okazuje się, że trudnością dla zdających w tym zadaniu było poprawne określenie kierunku wektora przyśpieszenia. To wynika z faktu, że albo zdający nie wiązali kierunku przyśpieszenia z kierunkiem siły grawitacji, albo błędnie określali kierunek siły grawitacji (np. do środka elipsy). Częstym błędem jest wiązanie kierunku przyśpieszenia z kierunkiem prędkości (a nie kierunkiem zmiany prędkości, równym kierunkowi siły wypadkowej).

**Przykład 20 – rozwiązania zdających**

Zdający błędnie określa przyspieszenie w kierunku do środka elipsy. Myli dynamikę ruchu zmiennego po elipsie z dynamiką ruchu jednostajnego po okręgu. Tylko w ruchu jednostajnym po okręgu jest przyspieszenie dośrodkowe, ponieważ siła działa do środka okręgu. W ruchu po orbicie eliptycznej centrum grawitacyjne jest umieszczone w ognisku elipsy a nie w jej środku, zatem przyspieszenie jest skierowane do ogniska elipsy.

**Przykład 21 – rozwiązania zdających**

Zdający błędnie określa kierunek przyspieszenia. Myli wektor przyspieszenia z jego składową w kierunku stycznym do toru ruchu.



## Zadania, z którymi zdający poradzili sobie najlepiej

W dalszej części przeanalizujemy te zadania, które okazały się dla zdających najłatwiejsze. Przyjmujemy do analizy, że są to zadania, których poziom wykonania jest wyższy od 60%.

Licząc kolejno od najłatwiejszego, są to zadania:

1. Zadanie 4.2. (83%, 0,37, fale elektromagnetyczne, zadanie zamknięte)
2. Zadanie 10.1. (68%, 0,53, fizyka relatywistyczna (energia), zadanie zamknięte)
3. Zadanie 7.1. (67%, 0,53, magnetyzm oraz dynamika, zadanie zamknięte)
4. Zadanie 11.2. (67%, 0,62, fizyka jądrowa, zadanie otwarte)

### Omówienie zadania 4.2. (83%, 0,37)

Najłatwiejszym zadaniem dla zdających okazało się **zadanie 4.2.** (poziom wykonania 83%). Zadanie to należało do wiązki zadań 4.1.–4.3. ([zobacz tutaj opis wiązki](#)), było zamknięte i dotyczyło analizy zjawiska Dopplera dla fal elektromagnetycznych. Poniżej treść zadania:

#### Zadanie 4.2. (0–1)

**Dokończ zdanie. Zaznacz właściwą odpowiedź spośród podanych.**

Zarejestrowana na Ziemi częstotliwość  $f_Z$  fali elektromagnetycznej wyemitowanej przez sondę jest równa

- A. 3,75000 GHz      B. 2,25000 GHz      C. 3,00075 GHz      **D. 2,99925 GHz**

We wprowadzeniu do wiązki zadań podana była częstotliwość  $f_{zr} = 3$  GHz źródła fali emitowanej przez sondę (oddalającą się od Ziemi) oraz podane było, że odbierana na Ziemi fala ma częstotliwość  $f_Z$  różniącą się od częstotliwości źródła fali o  $|\Delta f| = 750$  kHz.

Żeby rozwiązać zadanie 4.2. należało odpowiednio uwzględnić efekt Dopplera dla fali elektromagnetycznej, tzn. zauważyć, że: częstotliwość fali zarejestrowanej na Ziemi jest mniejsza o 750 kHz od częstotliwości fali emitowanej przez sondę – ponieważ źródło fali (sonda) oddala się od obserwatora (Ziemi):

$$f_Z = f_{zr} - |\Delta f| = 3 \text{ GHz} - 0,00075 \text{ GHz} = 2,99925 \text{ GHz} .$$

Otrzymana wartość częstotliwości to odpowiedź D.

### Omówienie zadania 10.1. (68%, 0,53)

Zadanie 10.1. należało do wiązki **zadań 10.1–10.3.** związanych z mechaniką relatywistyczną. Zadania te zostaną szczegółowo omówione wraz z analizą rozwiązań zdających w dalszej części niniejszego opracowania w rozdziale **2. Problem „pod lupą”**. W tym miejscu zasygnalizujemy tylko, że zadanie 10.1. było zadaniem zamkniętym i okazało się drugim pod względem łatwości zadaniem w arkuszu – jego poziom wykonania wyniósł 68% a współczynnik korelacji z arkuszem to 0,53.

### Omówienie zadania 7.1. (67%, 0,53)

Trzecim co do łatwości zadaniem w arkuszu było zamknięte **zadanie 7.1**. Wchodziło ono w skład wiązki zadań 7.1.–7.3. ([zobacz tutaj opis wiązki](#)) dotyczących dynamiki ruchu cząstki w polu magnetycznym. W zadaniu 7.1. należało ocenić prawdziwość poniższych zadań.

1.	Wektor indukcji pola magnetycznego wzdłuż całego toru ruchu protonu ma zwrot przed płaszczyznę rysunku (tzn. w stronę patrzącego).	<input checked="" type="radio"/> P	<input type="radio"/> F
2.	Wartość siły magnetycznej Lorentza działającej na proton jest stała na całej długości toru od punktu <i>A</i> do punktu <i>D</i> .	<input type="radio"/> P	<input checked="" type="radio"/> F
3.	Czas ruchu protonu po każdym z półokręgów <i>AF</i> , <i>FB</i> , <i>BE</i> , <i>EC</i> , <i>CD</i> jest taki sam.	<input type="radio"/> P	<input checked="" type="radio"/> F

Zadanie miało jakościowy charakter – tzn. nie wymagało obliczeń. Określenie prawdziwości podanych zdań wymagało analizy oddziaływania pola magnetycznego na cząstkę naładowaną (m.in. określenia relacji pomiędzy kierunkami, zwrotami, a także wartościami wektorów: siły Lorentza, indukcji magnetycznej, prędkości) oraz analizy ruchu tej cząstki w polu magnetycznym.

Stosunkowo wysoki poziom wykonania zadania – 67% – świadczy o dostatecznym rozumieniu zagadnienia przez zdających.

### Omówienie zadania 11.2. (67%, 0,62)

Kolejnym, czwartym pod względem łatwości zadaniem w arkuszu było **zadanie 11.2**. (poziom wykonania 67%). Zadanie to wchodziło w skład wiązki zadań 11.1.–11.3. ([zobacz tutaj opis wiązki](#)). W zadaniu należało podać nazwę pierwiastka, którego jądro powstało w wyniku sześciu kolejnych rozpadów  $\alpha$ , z których pierwszy był rozpadem jądra  $^{277}\text{Cn}$ .

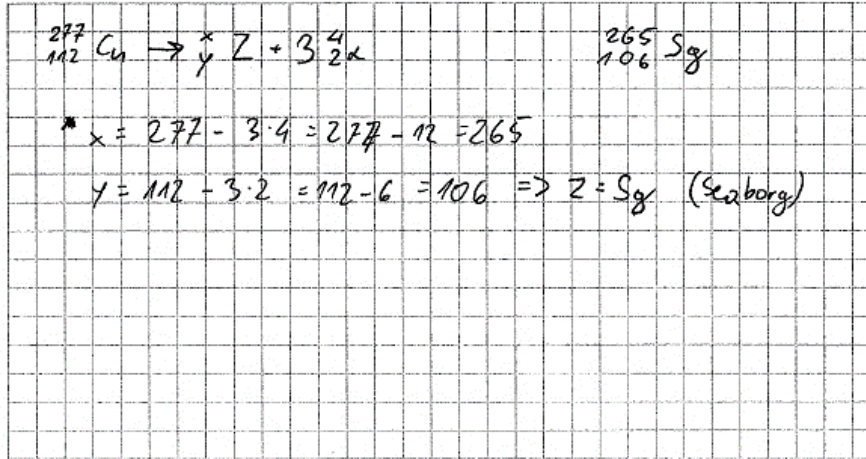
Rozwiązanie zadania jest następujące:

Po szóstym rozpadzie powstaje jądro pierwiastka  $^A_Z\text{X}$ , dla którego:  $A = 277 - 6 \cdot 4 = 253$  oraz  $Z = 112 - 6 \cdot 2 = 100$ . Powstały pierwiastek to **Ferm** ( $^{253}_{100}\text{Fm}$ ).

Poprawne rozwiązanie zadanie wymagało kilkukrotnego zastosowania: zasady zachowania ładunku (dla liczb atomowych) oraz zasady zachowania liczby nukleonów (dla liczb masowych), a także skorzystania z układu okresowego pierwiastków chemicznych. Nieliczne błędy, jakie popełniali zdający podejmujący zadanie 11.2. to błędy rachunkowe przy obliczaniu liczb atomowych lub liczb masowych jąder pierwiastków powstających w wyniku kolejnych rozpadów  $\alpha$ . Błędy te skutkowały niepoprawną identyfikacją pierwiastka, którego jądro powstało po sześciu rozpadach  $\alpha$ .

**Przykład 22 – rozwiązania zdających**

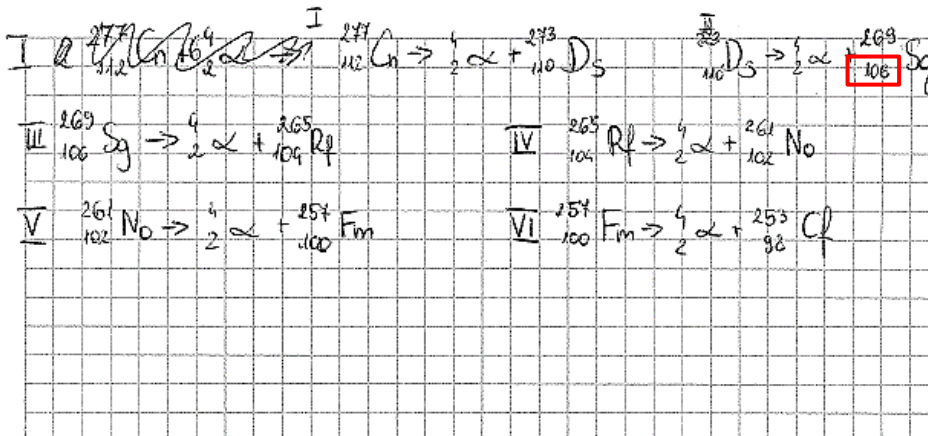
W przedstawionym przykładzie zdający niezgodnie z treścią zadania przyjmuje, że były 3 rozpady  $\alpha$ . Niepoprawnie oblicza liczby: atomową i masową jądra pierwiastka powstałego po ostatnim rozpady i w konsekwencji tego nieprawidłowo odczytuje nazwę tego pierwiastka.



Nazwa lub symbol pierwiastka: .....Seaborg.....

**Przykład 23 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający stosuje prawidłową metodę obliczenia liczby atomowej jądra, które powstaje po sześciu rozpadych  $\alpha$ . Jednak popełnia błąd rachunkowy przy obliczeniu liczby atomowej jądra pierwiastka, który powstaje po drugim rozpadych  $\alpha$ , w konsekwencji tego nieprawidłowo odczytuje nazwę jądra pierwiastka powstałego po ostatnim rozpadych.



Nazwa lub symbol pierwiastka: .....Kalforn.....

## Problem pod lupą

### Fizyka relatywistyczna

W wymaganiach egzaminacyjnych matury z fizyki w formule 2023 (i w podstawie programowej) pojawiły się treści – w tym całe bloki tematyczne – nowe w porównaniu do wymagań egzaminacyjnych w formule 2015. Jednym z takich nowych działów w wymaganiach egzaminacyjnych formuły 2023 są *Elementy fizyki relatywistycznej*. Szczególna teoria względności jest filarem całej fizyki współczesnej: relatywistycznych teorii kwantowych i ogólnej teorii względności. Ponieważ powraca ona do podstawy programowej (i wymagań egzaminacyjnych), to przeanalizujemy jak zdający egzamin z fizyki radzili sobie z treściami dotyczącymi elementów fizyki relatywistycznej. Zgodnie z wymaganiami szczegółowymi dotyczącymi tej części tematyki działu *XII*, zdający:

- XII.1) wskazuje niezależność prędkości światła w próżni od prędkości źródła i prędkości obserwatora;*
- XII.2) posługuje się związkiem między energią całkowitą, masą cząstki i jej prędkością; posługuje się pojęciem energii spoczynkowej;*
- XII.3) opisuje równoważność masy i energii spoczynkowej;*
- XII.4) wskazuje prędkość światła w próżni jako maksymalną prędkość przekazu energii i informacji.*

Zgodnie z wymaganiem *XII.1)*, zdający zna niezależność prędkości światła w próżni (względem układu inercjalnego) od ruchu źródła światła. Ten fakt można wiązać z wymaganiami *IX.12)* oraz *II.19)*: konsekwencją praw elektromagnetyzmu jest zjawisko fali elektromagnetycznej (*IX.12)* rozchodzącej się w układzie inercjalnym w pustej przestrzeni (próżni) z prędkością światła – niezależnie od prędkości jej źródła. Jeżeli zatem do zasady równoważności układów inercjalnych ze względu na opis zjawisk mechanicznych (*II.19)*, dołączymy zjawiska elektromagnetyczne – jak to wprost postulował Einstein – to otrzymujemy mało intuicyjny wniosek, że prędkość światła ma tę samą wartość w każdym układzie inercjalnym (*XII.1)*. Prędkość światła nie zmienia swojej wartości, gdy jest mierzona w różnych inercjalnych układach odniesienia, które poruszają się względem siebie ruchem jednostajnym prostoliniowym. Nie jest to odrębny postulat (jak to się błędnie i powszechnie sądzi), tylko teoretyczny wniosek wynikający z praw elektromagnetyzmu i z zasady równoważności układów inercjalnych rozszerzonej o te prawa<sup>5</sup>. Ten czysto teoretyczny wniosek Einsteina został niezależnie potwierdzony doświadczalnie.

Wymagania *XII.2)* i *XII.3)* dotyczą dynamiki relatywistycznej oraz energii relatywistycznej. Zdający posługuje się związkiem między energią całkowitą cząstki a jej masą i prędkością, a także posługuje się pojęciem energii spoczynkowej. W ten sposób pojawia się równoważność masy i energii spoczynkowej, czyli słynny einsteinowski wzór  $E = mc^2$ . Zauważmy, że treści opisane w wymaganiu *XII.3)* obowiązywały także w formule 2015 (np. stosowanie wzoru  $E_0 = mc^2$  w bilansie energii procesów/reakcji jądrowych), jednak występowały one bez kontekstu fizyki relatywistycznej.

<sup>5</sup> Albert Einstein, *5 prac, które zmieniły oblicze fizyki. Czy bezwładność ciała zależy od zawartej w nim energii*.

Zgodnie z wymaganiami XII.4) zdający wskazuje na fakt, że prędkość światła jest maksymalną prędkością przekazywania energii oraz informacji (a nie tylko niezmienniczą prędkością względem układów inercjalnych). Po pierwsze, nie można przyspieszyć cząstki masywnej do prędkości światła. Jak wynika ze wzoru na energię całkowitą, przyspieszenie cząstki do prędkości światła wymagałoby dostarczenia cząstce nieskończonej wielkiej energii. Po drugie, nie znane są cząstki (np. jakieś nie posiadające masy), które po wykreowaniu miałyby prędkość większą od prędkości światła. Warto wspomnieć, że zgodnie ze szczególną teorią względności, istnienie cząstek poruszających się szybciej niż światło, łamałoby zasadę przyczynowości.

Opisane powyżej wymagania były sprawdzone w następujących zadaniach z tegorocznego arkusza (licząc kolejno od najtrudniejszego w tej grupie zadań):

Zadanie 10.3. (30%, 0,65, fizyka relatywistyczna, zadanie otwarte z luką)

Zadanie 10.2. (46%, 0,72, fizyka relatywistyczna, zadanie otwarte)

Zadanie 4.1. (54%, 0,38, fizyka relatywistyczna/fale elektromagnetyczne, zadanie zamknięte)

Zadanie 10.1. (68%, 0,53, fizyka relatywistyczna (energia), zadanie zamknięte)

### Omówienie zadań 10.1. (68%, 0,53), 10.2. (46%, 0,72), 10.3. (30%, 0,65)

Poniżej podamy treści zadań 10.1.–10.3., przedstawimy i przeanalizujemy poprawne rozwiązanie, oraz przeanalizujemy szczegółowo wybrane rozwiązania (zadań otwartych) zdających. Wskażemy istotne trudności zadania oraz pokażemy najczęściej popełniane przez zdających błędy. Wstęp do wiązki zadań był następujący:

#### Zadanie 10.

Elektron o prędkości początkowej równej zero został rozpędzony w polu elektrycznym o napięciu  $U$  do prędkości o wartości  $v$ . Energia kinetyczna, którą uzyskał elektron, była dwa razy większa od jego energii spoczynkowej.

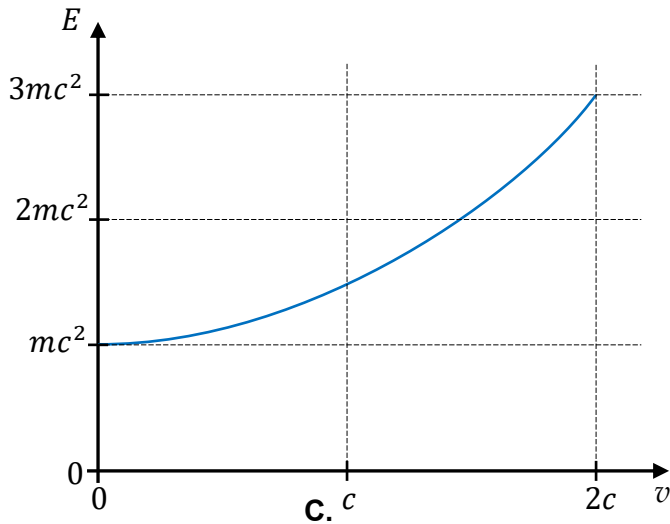
Pierwsze zadanie tej wiązki było zadaniem zamkniętym i okazało się drugim pod względem łatwości zadaniem w arkuszu – jego poziom wykonania wyniósł 68% a współczynnik korelacji z arkuszem to 0,53. Poniżej treść zadania.



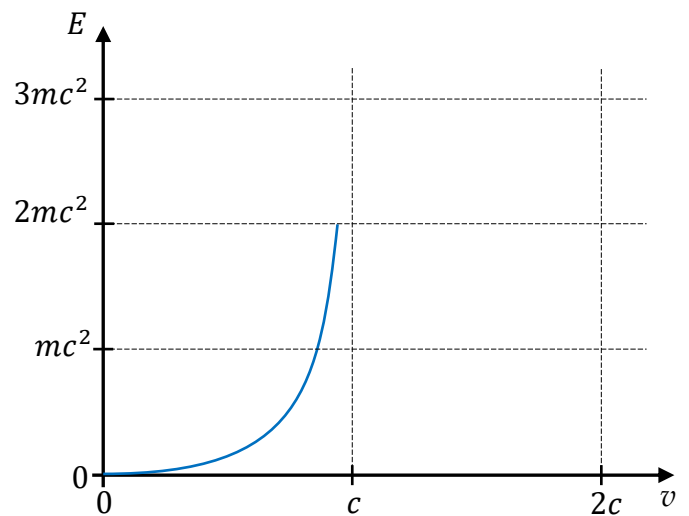
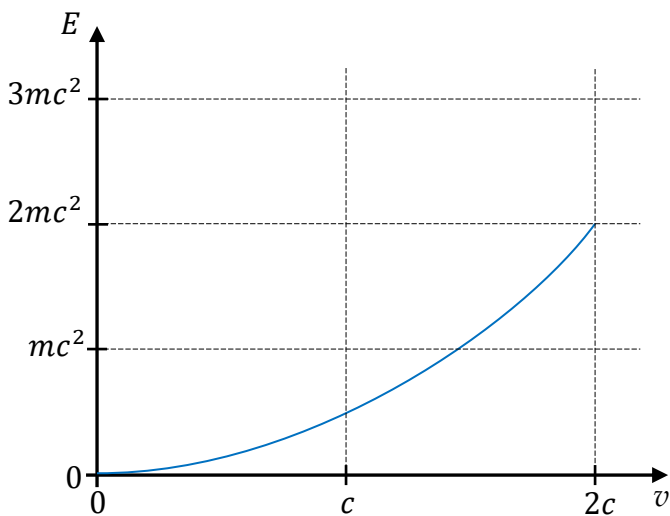
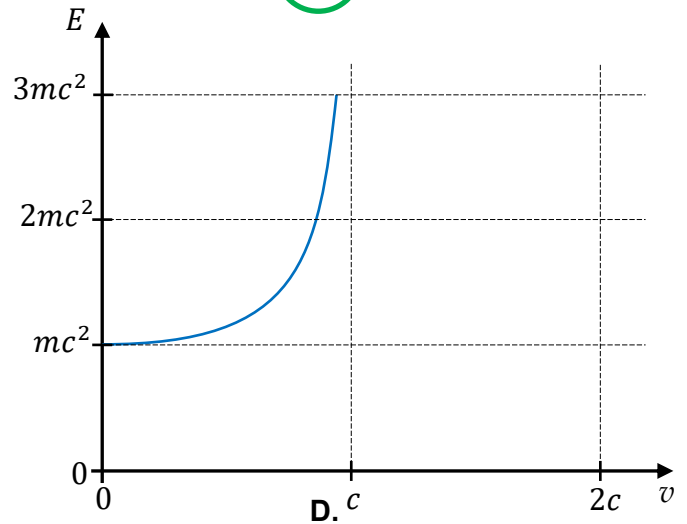
**Zadanie 10.1. (0–1)**

Na którym wykresie (spośród A–D) prawidłowo przedstawiono zależność energii całkowitej  $E$  (sumy energii kinetycznej i spoczynkowej) elektronu od jego prędkości? Zaznacz właściwą odpowiedź spośród podanych.

A.



B.



Przeanalizujemy rozwiązanie zadania. Energia całkowita relatywistyczna cząstki o masie  $m$  poruszającej się z prędkością o wartości  $v$  dana jest wzorem:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (\text{zależność na wykresie B})$$

Prawidłową odpowiedź można wybrać porównując własności odczytane z wykresu z własnościami wynikającymi ze wzoru oraz faktu nieprzekraczalności prędkości światła:

- 1) prędkość elektronu musi być mniejsza od prędkości światła:  $v < c$
- 2) dla  $v = 0$  energia jest równa energii spoczynkowej:  $E(v = 0) = E_0 = mc^2$
- 3) dla  $v \rightarrow c$  energia rośnie nieograniczenie:  $E \rightarrow \infty$

Poprawna odpowiedź to B i można ją wybrać na podstawie własności 1) i 2) albo 2) i 3).

Przeanalizujmy jaki sens mają wykresy A, C, D i zastanowimy się, dlaczego są to odpowiedzi niepoprawne. Na rysunku A przedstawiono wykres zależności następującej postaci:

$$E = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{zależność na wykresie A})$$

Wzór ten przedstawia sumę energii spoczynkowej i energii kinetycznej dla przypadku, gdy cząstka porusza się z prędkością dużo mniejszą od prędkości światła. Dla małych prędkości wzór relatywistyczny można przybliżać tym wzorem. Jednak w zadaniu jest pośrednio powiedziane, że mamy do czynienia z prędkościami relatywistycznymi, zatem takiego wzoru nie można używać dla prędkości bliskich prędkości światła. Niezależnie od tego odpowiedź A powinna być odrzucona z faktu, że zależność  $E(v)$  dopuszcza prędkości większe od prędkości światła. Mamy więc dwa niezależne powody, na podstawie których odpowiedź A powinna być odrzucona. Podobnie jest z odpowiedzią C, w której przedstawiono wykres następującej zależności:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{zależność na wykresie C})$$

Powyższy wzór jest zwykłym wzorem na energię kinetyczną w mechanice nierelatywistycznej. Tę odpowiedź odrzucamy na podstawie jednego z następujących powodów: 1) zależność  $E(v)$  dopuszcza prędkości większe od prędkości światła, 2) zależność nie uwzględnia energii spoczynkowej, a tylko energię kinetyczną (i to w formie nierelatywistycznej nawet dla dużych prędkości).

Bardziej atrakcyjna od A i C była dla niektórych zdających odpowiedź D. Zależność  $E(v)$  jest tam określona dla prędkości mniejszych od  $c$ , a ponadto dla  $v \rightarrow c$  energia rośnie nieograniczenie:  $E \rightarrow \infty$ . Zatem mamy spełnione warunki na energię relatywistyczną. Jednak w tej zależności, dla prędkości równej zero energia też jest równa zero:  $E(v=0) = 0$ . To oznacza, że nie jest uwzględniona energia spoczynkowa. Odpowiedź D przedstawia zależność energii relatywistycznej kinetycznej (a nie całkowitej) od prędkości:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - mc^2 \quad (\text{zależność na wykresie D})$$

Drugie zadanie wiązki 10.1.–10.3. było zadaniem otwartym i okazało się jedenastym pod względem trudności zadaniem w arkuszu – jego poziom wykonania wyniósł 41% a współczynnik korelacji z arkuszem to 0,72. Poniżej treść zadania.

### Zadanie 10.2. (0–3)

Oblicz iloraz  $\frac{v}{c}$ , gdzie  $c$  jest wartością prędkości światła w próżni. Zapisz obliczenia.

Wynik podaj zaokrąglony do dwóch cyfr znaczących.

W celu rozwiązania tego zadania należy wykorzystać:

- związek między energią  $E$  całkowitą elektronu a energią spoczynkową  $E_0$  i energią kinetyczną  $E_{kin}$ :

$$E = E_{kin} + E_0$$

- warunek zadania:

$$E_{kin} = 2E_0$$

- związek między energią całkowitą elektronu, energią spoczynkową i jego prędkością:

$$E = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Powyższe warunki można zapisać w jednym równaniu, z którego należy wyznaczyć iloraz  $\frac{v}{c}$ :

$$3E_0 = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad \rightarrow \quad \frac{v}{c} = \sqrt{\frac{8}{9}} = 0,942809 \dots \approx 0,94$$

Trudnością dla zdających w tym zadaniu było określenie poprawnego modelu teoretycznego (mechaniki relatywistycznej) dla opisu zjawiska, w tym określenie energii całkowitej jako sumy energii spoczynkowej i kinetycznej oraz zastosowanie wzoru relatywistycznego na energię całkowitą (albo kinetyczną). Dlatego ci zdający, którzy poprawnie określili model zjawiska (zastosowali wzory mechaniki relatywistycznej) i wykorzystali warunek zadania, zazwyczaj poprawnie doprowadzali rozwiązanie do końca. Błędy, które się zdarzały dalej tym zdającym miały charakter błędów rachunkowych.

#### Przykład 24 – rozwiązania zdających

W przedstawionym przykładzie zdający zapisuje warunek zadania, że energia kinetyczna jest dwa razy większa od energii spoczynkowej, jednak używa nierelatywistycznego wzoru na energię kinetyczną. Warunek zadania sugeruje, że prędkość elektronu musi być bliska prędkości światła – tylko wtedy energia kinetyczna jest porównywalna z energią spoczynkową. Zamiast błędnego zapisu:  $\frac{mv^2}{2} = 2mc^2$  zdający powinien użyć wzoru na energię kinetyczną relatywistyczną, czyli:  $\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - mc^2 = 2mc^2$ . W omawianym przykładzie

zdający nie wywnioskował na podstawie warunku zadania, że mechanika newtonowska nie ma zastosowania w tym przypadku. Źle dobrany model teoretyczny sprawia, że prędkość elektronu wyszła dwukrotnie większa od prędkości światła – a to jest niemożliwe fizycznie.

Handwritten student solution on grid paper showing a derivation of  $\frac{v}{c} = 2$ . The student starts with  $E = mc^2$  and  $E_k = 2mc^2$ . They use the non-relativistic formula  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ , leading to  $\frac{mv^2}{2} = 2mc^2$ . They then solve for  $v^2 = 4c^2$  and  $\frac{v}{c} = 2$ . Red circles highlight the incorrect formula and the final result  $\frac{v}{c} = 2$ .

**Przykład 25 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający stosuje poprawny model opisu zjawiska i wyprowadza poprawne równanie:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = \frac{1}{3}$$

Następnie popełnia dosyć elementarny i rażący błąd przy przekształcaniu równania.

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{1}{3}$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{9}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = \sqrt{1 - \frac{1}{9}} = 0,923$$

$$\frac{v}{c} = 0,65$$

**Przykład 26 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający stosuje poprawny model opisu zjawiska i dochodzi do poprawnych kluczowych równań:

$$\frac{v}{c} = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{E} \quad \text{oraz} \quad E = 3E_0$$

Dalej zdający popełnia dosyć rażący błąd przy obliczaniu pierwiastka kwadratowego wyrażenia pisząc, że jest on równy  $E - E_0$ .

$$\frac{v}{c} = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{E}$$

$$E = 3E_0$$

$$\frac{v}{c} = \frac{E - E_0}{3E_0} = \frac{2E_0}{3E_0} = \frac{2}{3} = 0,66$$

Trzecie zadanie wiązki 10.1. –10.3. było zadaniem otwartym z luką i okazało trzecim pod względem trudności zadaniem w arkuszu – jego poziom wykonania wyniósł 30% a współczynnik korelacji z arkuszem to 0,65. Poniżej treść zadania razem z poprawnie uzupełnioną odpowiedzią.

### Zadanie 10.3. (0–1)

Energia spoczynkowa elektronu jest równa (w zaokrągleniu)  $E_0 \approx 5,1 \cdot 10^5$  eV.

**Dokończ zdanie. Wpisz właściwą liczbę w wy kropkowanym miejscu.**

Napięcie  $U$  pola elektrycznego, w którym został rozpędzony elektron, wynosi .....  $10,2 \cdot 10^5$  V.

W celu poprawnego rozwiązania zadania należało uwzględnić następujące twierdzenia i własności:

- 1) Zmiana energii kinetycznej elektronu jest równa pracy sił pola elektrycznego, tzn.:

$$\Delta E_{kin} = eU \quad \rightarrow \quad E_{kin} - 0 = eU$$

- 2) warunek zadania:

$$E_{kin} = 2E_0$$

- 3) Zgodnie z definicją jednostki eV, elektron rozpędzony napięciem o wartości  $U = a$  V osiąga energię kinetyczną równą  $E_{kin} = a$  eV.

Zgodnie z punktem 2) powyżej, mamy:

$$E_{kin} = 2E_0 \approx 2 \cdot 5,1 \cdot 10^5 \text{ eV} \approx 10,2 \cdot 10^5 \text{ eV}$$

Następnie, na podstawie punktów 1) i 3) otrzymujemy:

$$E_{kin} \approx 10,2 \cdot 10^5 \text{ eV} \quad \rightarrow \quad U \approx 10,2 \cdot 10^5 \text{ V}$$

Bardzo niski poziom wykonania zadania (30%) wynika z tego, że zdający pomijali rozwiązanie tego zadania. Oznacza to, że nie znali własności opisanych w punktach 1) i 3) lub nie potrafili z nich poprawnie skorzystać.

### Przykład 27 – rozwiązania zdających

W przedstawionym przykładzie zdający poprawnie stosuje twierdzenie 1) i własność 3). Jednak nie wykorzystuje warunku zadania, który mówi o tym, że  $E_{kin} = 2E_0$ . Skutkuje to tym, że otrzymuje nieprawidłowy wynik liczbowy napięcia pola elektrycznego, w którym został rozpędzony elektron.

Napięcie  $U$  pola elektrycznego, w którym został rozpędzony elektron, wynosi .....  $5,1 \cdot 10^5$  V.

Brudnopis

$$E = q \cdot U$$

$$U = \frac{E}{q} = \frac{5,1 \cdot 10^5 \text{ eV}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 5,1 \cdot 10^5 \text{ V}$$

**Przykład 28 – rozwiązania zdających**

W przedstawionym przykładzie zdający poprawnie stosuje twierdzenie 1) i poprawnie wykorzystuje warunek zadania 2). Jednak popełnia błąd rachunkowy (pomija jednostkę energii eV) przy obliczaniu napięcia pola elektrycznego, w którym został rozpędzony elektron. Błąd ten skutkuje tym, że zdający otrzymuje nieprawidłowy wynik liczbowy.

Napięcie  $U$  pola elektrycznego, w którym został rozpędzony elektron, wynosi  $6,375 \cdot 10^{24}$  V.

Brudnopis

$$E_0 = 5,1 \cdot 10^5 \text{ eV}$$

$$E_{kin} = 10,2 \cdot 10^5 \text{ eV}$$

$$eU = E_{kin}$$

$$U = \frac{10,2 \cdot 10^5 \text{ eV}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,375 \cdot 10^{24}$$

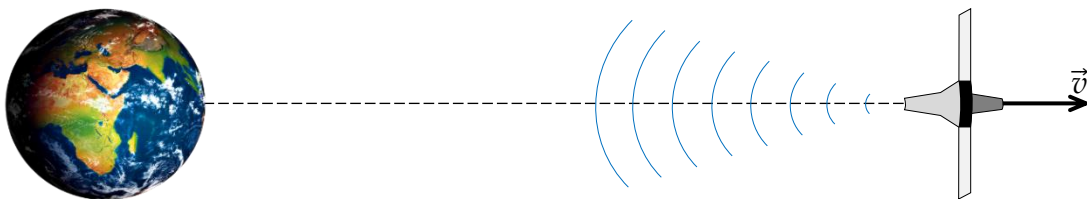
**Omówienie zadania 4.1. (54%, 0,38)**

**Zadanie 4.1.** dotyczyło niezależność prędkości światła w próżni od prędkości źródła i prędkości obserwatora i stanowiło część wiązki zadań 4.1. – 4.4. Pozostałe zadania z wiązki odnosiły się do analizy zjawiska Dopplera dla fal elektromagnetycznych. Wstęp do wiązki zadań był następujący:

**Zadanie 4.**

Sonda kosmiczna oddala się od Ziemi z prędkością  $\vec{v}$  wzdłuż prostej przechodzącej przez środek Ziemi. Ta sonda emituje w stronę Ziemi falę elektromagnetyczną o częstotliwości dokładnie  $f_{zr} = 3$  GHz (podana częstotliwość jest określona w układzie odniesienia związanym z sondą, czyli jest częstotliwością źródła fali). Sytuację ilustruje rysunek poglądowy poniżej (odległości na rysunku są umowne).

Rysunek



Odbierana na Ziemi fala ma częstotliwość  $f_z$  różniącą się od częstotliwości źródła fali o  $|\Delta f| = 750$  kHz. Wartość prędkości światła w próżni oznaczamy jako  $c$ . Przyjmij, że  $v \ll c$  oraz  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s.

Pierwsze zadanie z tej wiązki było zadaniem zamkniętym, którego poziom wykonania wyniósł 54% a współczynnik korelacji z arkuszem to 0,38. Poniżej treść zadania.

#### Zadanie 4.1. (0–1)

Dokończ zdanie. Zaznacz odpowiedź A, B albo C i jej uzasadnienie 1., 2. albo 3.

Fala elektromagnetyczna wysyłana przez sondę porusza się względem Ziemi z prędkością równą

A.	$c - v$ ,	ponieważ	1.	prędkość fali elektromagnetycznej jest niezależna od ruchu źródła tej fali.
B.	$c$ ,		2.	źródło oddalające się od Ziemi unosi ze sobą falę elektromagnetyczną i zmniejsza jej prędkość.
C.	$c + v$ ,		3.	prędkość fali elektromagnetycznej jest zawsze powiększona o prędkość źródła tej fali.

**Prawidłowa odpowiedź to B1.** Zgodnie z podstawowym postulatem teorii Einsteina prędkość światła (w próżni) jest niezależna od ruchu źródła światła – lub równoważnie – prędkość światła (w próżni) ma tę samą wartość w każdym układzie inercyjnym (co wynika z rozszerzenia zasady względności Galileusza o zjawiska elektromagnetyczne).

Trudnością zadania było uświadomienie sobie, że Galileuszowe prawo składania prędkości nie sprawdza się w modelu fizyki relatywistycznej. Wielu uczniów wskazało na odpowiedź A2 co świadczy o tym, że pozostali oni w paradygmacie fizyki klasycznej – prędkość światła składali z prędkością źródła w sposób klasyczny (prędkość światła pomniejszali o prędkość oddalającej się sondy:  $c - v$ ). To rozumowanie w duchu klasycznym jest sprzeczne z wymykającym się intuicji podstawowym postulatem teorii względności.

## Wnioski i rekomendacje

Analiza wyników egzaminu pod względem sprawdzanych treści nauczania wskazuje, że tegoroczni maturzyści najgorzej poradzili sobie z zadaniami z działów: Dynamika, Dynamika bryły sztywnej, Fizyka relatywistyczna oraz Magnetyzm. Były to zadania otwarte obliczeniowe, otwarte z luką lub otwarte z uzasadnieniem i uzyskały poziomy wykonania od 16% do 30%. Z kolei analiza rozwiązań zadań pod względem najczęściej popełnianych błędów wskazuje na słabe opanowanie sprawdzanych na egzaminie umiejętności ogólnych i przekrojowych zarówno z II jak i III poziomu edukacyjnego. Chodzi przede wszystkim o umiejętności:

- dostrzegania związków przyczynowo – skutkowych pomiędzy zjawiskami fizycznymi i zależności pomiędzy wielkościami fizycznymi opisywanymi podstawowymi prawami fizyki;
- wyodrębnienia podstawowych zjawisk fizycznych w zjawisku złożonym i wskazania czynników istotnych dla ich przebiegu w celu zbudowania poprawnego modelu danego zjawiska;
- wybrania z informacji przedstawionych w postaci tekstu, tabel, wykresów, schematów czy rysunków niezbędnych danych umożliwiających rozwiązanie zadania;
- analizowania i przetwarzania danych do zadania;
- budowania prostych modeli procesów czy zjawisk fizycznych, określenia warunków ich zajścia oraz stworzenia ich opisu matematycznego;
- przeprowadzenia przekształceń algebraicznych wyrażeń wiążących wielkości fizyczne;
- przeprowadzania złożonych obliczeń liczbowych, w tym: przeliczania wielokrotności i podwielokrotności oraz wykonywania na nich działań;
- zapisywania wyniku obliczeń wraz z jednostką, zaokrąglonego do określonej liczby cyfr znaczących i krytycznej analizy realności otrzymanego wyniku;
- wyciągania i formułowania wniosków.

Analiza poziomu wykonania poszczególnych rodzajów zadań (tj. obliczeniowych i nie-obliczeniowych) i typowych błędów popełnianych przez zdających podczas rozwiązywania zadań pozwoliła na sformułowanie następujących spostrzeżeń i wniosków:

- I. Najmniej trudności sprawiają maturzystom zadania sprawdzające pojedyncze, mało skomplikowane umiejętności. Dotyczy to głównie zadań zamkniętych, wymagających jedynie analizy jakościowej (zadania: 4.2., 10.1., 7.1.). Również typowe zadania otwarte obliczeniowe, których algorytm rozwiązywania jest znany, nie sprawiają im większych problemów (zadanie 11.2).
- II. Duże trudności sprawiają zdającym zadania dotyczące jednego zagadnienia czy zjawiska fizycznego ale przedstawionego w nietypowym kontekście lub gdy niezbędne do rozwiązania zadania dane zawarte są na wykresie (zadanie 8.2.) czy rysunku (zadanie 5.3., zadanie 7.3.).
- III. Najtrudniejsze są zadania złożone, rozwiązanie których wymaga stworzenia modelu zjawiska, określenia czynników istotnych dla jego przebiegu (założeń), stworzenia opisu matematycznego relacji jakie – zgodnie z prawami fizyki – zachodzą pomiędzy określonymi wielkościami fizycznymi i wreszcie dokonania odpowiednich przekształceń algebraicznych umożliwiających uzyskanie rozwiązania problemu fizycznego (zadania: 3.2., 4.4., 5.4., 6.3., 10.2.).



- IV. Poważną przeszkodą w uzyskaniu poprawnego wyniku, w szczególności w zadaniach otwartych, są błędy rachunkowe popełniane na każdym etapie rozwiązywania zadania. Jeśli jest to początkowa faza rozwiązywania zadania, to w wielu przypadkach niemożliwe staje się dokończenie rozwiązywania albo uzyskanie wyniku spełniającego warunki zadania.
- V. Maturzyści słabo radzą sobie z zadaniami wymagającymi wyprowadzenia wzoru (zadanie 3.2., zadanie 5.4.) oraz zadaniami wymagającymi dowodzenia czy uzasadniania twierdzeń dotyczących zjawisk fizycznych (zadanie 7.2.). W przypadku tych ostatnich błąd logiczny zdających często polega na tym, że wykorzystują tezę twierdzenia do przeprowadzenia dowodu tejże tezy.
- VI. W wielu przypadkach niepoprawne rozwiązania wynikają z niezbyt uważnego czytania treści zadań, jak i poleceń do zadań. Zauważalny jest również brak umiejętności wyciągania wniosków z informacji zawartych w analizowanym tekście (zadania: 8.2., 8.3., 9.2).
- VII. Niepowodzenia zdających spowodowane są również niestosowaniem się do polecenia zadania, np. polecenie wymaga zapisania wyniku w zaokrągleniu do trzech cyfr znaczących, tymczasem wielu z nich podaje wynik ze zbyt dużą lub zbyt małą liczbą cyfr znaczących (zadania: 9.2., 10.2., 11.3.).
- VIII. Dwa zadania otwarte w arkuszu dotyczyły uzupełnienia rysunków. Zadanie 2.1. o wektory sił wzajemnego oddziaływania krążków podczas ich zderzenia. Zadanie 9.1. o dalszy bieg promieni: odbitego w szkło i załamane na granicy szkło-powietrze i oznaczenia łukami kątów odbitego i załamane. Ponieważ dotyczyły one jedynie dorysowania wektorów, promieni bądź zaznaczeni kąta, dlatego można uważać je za proste. Łatwość ta jest jednak pozorna. Poziom wykonania tego zadania 2.1. wynosi 29% i jest ono drugim pod względem trudności zadaniem w arkuszu. Zadania 9.1. z kolei 48%, co klasyfikuje je jako zadanie trudne. Ta jak wydawałoby się prosta do wykonania czynność (np. narysowanie dwóch wektorów), wymaga rozumienia zjawisk i dostrzegania fizycznej istoty rzeczy.
- IX. Błędne rozwiązania wynikają także z faktu, że niektórzy zdający mylą kontekst zjawiska, mylą wielkości i stosują nieprawidłowe wzory. Np. w zadaniu 8.3. przy obliczaniu długości włókna wolframowego zdający mylili pole przekroju przewodnika z jego średnicą.
- X. Nieprawidłowe rozwiązania są również następstwem chaotycznego i nieczytelnego zapisu poszczególnych etapów rozwiązania.

Zapisaane powyżej wnioski i spostrzeżenia wysnute po analizie rozwiązań zadań maturalnych z fizyki w roku 2023 w dużej mierze pokrywają się z tymi z lat poprzednich. Świadczy to o tym, że tegoroczni maturzyści nie opanowali tych samych umiejętności co ich poprzednicy. I podobnie jak ich poprzednikom lepiej wychodzi im rozwiązywanie typowych zadań otwartych i zadań zamkniętych wymagających jedynie jakościowej analizy.

W związku z powyższymi wnioskami rekomenduje się, aby podczas przygotowywania uczniów do egzaminu maturalnego z fizyki na poziomie rozszerzonym zwrócić im szczególną uwagę na:

- konieczność bardzo dokładnego czytania poleceń i szczegółowej analizy treści zadania w celu wyodrębnienia: (1) warunków zadania, (2) zjawiska fizycznego z opisanego kontekstu i (3) czynności do wykonania opisanych w poleceniu;
- udzielenie odpowiedzi do zadania w taki sposób aby spełniała wszystkie wymogi określone w poleceniu;

- fakt, że rozwiązanie zadania powinno zawierać:
  - zapis niezbędnych zależności lub praw fizycznych,
  - oznaczenia, które jednoznacznie pozwalają na możliwość identyfikacji wielkości fizycznych opisanych w treści zadania i poleceniu,
  - obliczenia, które wynikają z przedstawionych zależności,
  - wyniki liczbowe zapisane z określoną dokładnością wraz z właściwymi jednostkami, zgodnie z poleceniem zadania;
- umiejętność wyodrębnienia istotnych dla zadania danych przedstawionych na wykresie, rysunku czy w tabeli;
- logicznie poprawną konstrukcję przeprowadzania dowodów i uzasadnień;
- umiejętność rozumienia wzorów fizycznych, w szczególności praw czy zasad fizycznych mających charakter wektorowy, z czym związane są geometryczne relacje pomiędzy wielkościami opisanymi danym prawem czy zasadą fizyczną;
- rozumienie znaczenia symboli występujących we wzorze;
- fakt, że jedynie ugruntowana wiedza fizyczna związana ze znajomością i prawidłową identyfikacją wielkości występujących we wzorze ułatwia rozwiązanie zadania, samo odczytanie wzoru z *Wybranych wzorów...* bez rozumienia jego fizycznego sensu nie prowadzi do uzyskania prawidłowego rozwiązania;
- staranne i uważne wykonywanie przekształceń i obliczeń. Konieczne jest również weryfikowanie poprawności otrzymanego wyniku;
- zaokrąglanie wyniku liczbowego i jego zapis z dokładnością do określonej w poleceniu liczby cyfr znaczących;
- konieczność ćwiczenia rozwiązywania zadań złożonych i nietypowych.