

45

INSTYTUT FIZYKI  UNIWERSYTET JAGIELLOŃSKI  
SEKCJA NAUCZYCIELSKA POLSKIEGO TOWARZYSTWA FIZYCZNEGO

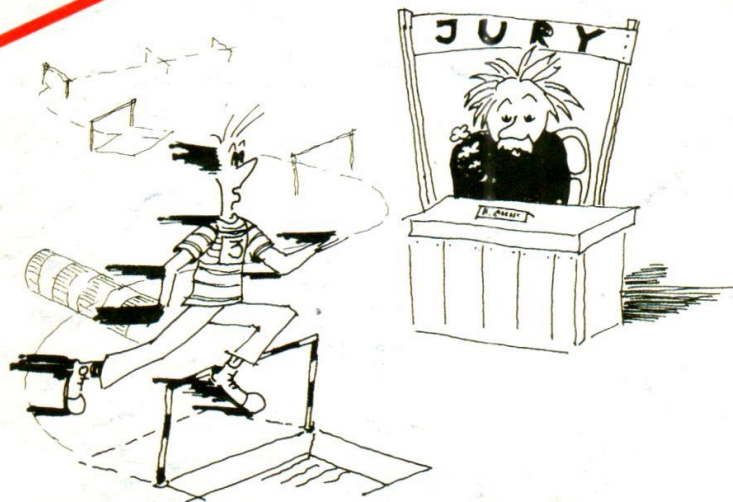
ZESZYT 2

1996

# FOTON

ZESZYT DYDAKTYCZNY

O przeszkodach  
poznawczych w  
nauczaniu fizyki



---

# Przeszkody poznawcze w nauczaniu początkowym fizyki

Zofia Gołąb-Meyer

## Spis treści

1. Postępy w nauczaniu fizyki w XX w. ....	2
2. Przeszkody epistemologiczne .....	4
3. Zderzenie „gotowej nauki” z widzeniem świata przez dziecko .....	7
3.1. Ignorowanie problemów intrygujących dzieci .....	7
3.2. Globalne struktury nauki <i>contra</i> lokalne struktury dziecka .....	10
3.3. Bariera pierwszych pojęć, pierwszych wrażeń i doznań .....	12
3.4. Bariera przekraczania skal .....	13
3.5. Widzenie zmian i różnic. Niezauważanie stanów stacjonarnych .....	14
3.6. Bariera języka.....	15
3.7. Bariera rozwoju myślenia formalnego .....	17
3.8. Bariera wiedzy matematycznej .....	18
3.9. Zakończenie .....	20
4. Albert Einstein pokonywacz przeszkód poznawczych.....	21
5. Trudności poznawcze występujące w czasie demonstracji fizycznych.....	24
6. Przeszkody poznawcze uczniów przy lekturze komiksu cernowskiego.....	27
7. Przeszkody występujące przy opisie ruchu .....	35
8. Trudności w rozróżnianiu układów inercjalnych i nieinercjalnych.....	46
9. Uwagi o trudnościach w rozumieniu pojęcia pracy.....	52
Literatura .....	56
Co czytać .....	59

## 1. Postępy w nauczaniu fizyki w XX w.

Dwudziestowieczna dydaktyka fizyki bazuje na całym szeregu osiągnięć psychologii i dydaktyki [1]. Powstały doskonałe szkoły średnie, w których uczyli wybitni nauczyciele. W *Fotonach* zamieszczono opisy takich szkół (Niemcy – Szkoła Heisenberga [2], Austria – Szkoła Schrödingera [3], USA – Szkoła w Bronx [4]; w Polsce za modelową szkołę można uznać przedwojenną Rydzynę – w której uczył Arkadiusz Piekara [5]). Na rozwój współczesnej dydaktyki wpłynęły ogromnie, choć ze znacznym opóźnieniem prace szwajcarskiego psychologa Jeana Piageta [6] [7] [8] [9].

Jakkolwiek by się dzisiaj interpretowało wyniki Piageta – to znaczenie jego wyników dla dydaktyki fizyki i co najważniejsze zebrany przez niego i jego współpracowników materiał doświadczalny jest trudny do przecenienia. W szczególności nauczyciel fizyki dowiedział się od Piageta i jego następców, że:

1. Dziecko, kilkuletni uczeń – nie tyle wie mniej i mniej potrafi niż dorosły, ale rozumuje inaczej. Piaget potrafił wskazać na czym ta inność polega.
2. Piaget zwrócił uwagę na pewne niezmiennie i następujące po sobie etapy w rozwoju myślenia formalnego używanego w matematyce i fizyce.
3. Zauważył, że przechodzenie (rozwój dziecka) z etapu na etap trwa w czasie i wymaga wysiłku ze strony uczącego się.
4. Piaget przebadał rozwój rozumienia pewnych pojęć z fizyki i matematyki.
5. Jeśli uczący się nie osiągnął w swoim rozwoju myślenia formalnego odpowiedniego poziomu, to daremny jest trud nauczania go pewnych abstrakcyjnych pojęć.
6. Prace Piageta spowodowały postawienie całego szeregu innych problemów i rozwój tzw. dydaktyk szczegółowych.

Piaget w przeciwieństwie do Wygotskiego [10] tak jakby nie doceniał nauczania i wpływu na rozwój dziecka. Taka jest przynajmniej zwulgaryzowana opinia o wynikach Piageta. Piaget, istotnie koncentrował się na spontanicznym rozwoju dziecka. To jednak prace Piageta spowodowały rozwój metod eksploracyjnych, to jest programów nauczania typu: „dziecko – mały uczony sam odkrywa świat”. Metody te idealne dla małych dzieci wniosły również ożywcze idee do skostniałych metod i legły u podstaw tzw. nauczania problemowego.

To właśnie w pracach Piageta tkwią źródła potężnego działu badań nad tzw. prekoncepcjami i błędnymi koncepcjami dzieci [11]. To dzięki Piagetowi zwrócono uwagę na to, że należy wsluchiwać się w wypowiedź dzieci i starannie obserwować ich zachowanie.

Pokrótkie można podsumować ostatnie osiągnięcia dydaktyki fizyki:

1. Wzrosła wiedza o sposobie myślenia dzieci. Wyodrębniono etapy w rozwoju myślenia formalnego.
2. Określono i przebadano użyteczne w dydaktyce pojęcia jak prekoncepty i błędne koncepcje.
3. Wykorzystano wyniki z ogólnych teorii uczenia się, z badań nad pamięcią.
4. Poczyniono porównawcze badania nad sposobem rozwiązywania zadań przez dzieci i młodocianych oraz ekspertów.
5. Przebadano użyteczność rozmaitych strategii nauczania, np. nauczanie w grupach, indywidualne, problemowe, programowane.
6. Opracowano mnogość doświadczeń, demonstracji, programów – specjalnie do celów dydaktycznych.
7. Opracowano cały szereg programów nauczania i podręczników dostosowanych do różnego wieku uczniów, do ich różnych zainteresowań.

Pomimo tych wszystkich osiągnięć globalnie należy uznać, iż istnieje regres w nauczaniu fizyki. Jest on wynikiem wzrostu powszechności nauczania, eksponencyjnym wzrostem fizyki jako nauki, obniżeniem poziomu i prestiżu nauczycieli, na końcu tendencjami antyscjentycznymi w społeczeństwach [12]. Przed dydaktyką stoi wyzwanie, jakie narzuciły jej dzisiejsze czasy:

Jak w najkrótszym czasie, przy ograniczonych środkach materialnych, zaizolować możliwie najszerszą warstwę społeczną z fizyką.

„Warunki brzegowe” są tak napięte, że nauczania nie stać na rozrzutność (a to zawsze miało miejsce).

Trzeba bardzo starannie zaplanować programy nauczania, stworzyć przemyślane podręczniki, wyprodukować doskonałe pomoce naukowe, skorzystać z nowych mediów. To wymaga sięgnięcia do wyników psychologii, przeanalizowania dotychczasowych osiągnięć w nauczaniu fizyki, a w szczególności warunków, w jakich one były osiągnięte, przeanalizowania niepowodzeń.

Ważne jest dokładne przeanalizowanie trudności, na jakie napotyka uczyć się. Wyodrębnienie niektórych z tych trudności jest celem tego artykułu.

Dopiero dogłębna analiza trudności uczniów pozwoli uniknąć budowania programów i pisania podręczników opartych na pobożnych życzeniach – a powodujących marnotrawstwo potencjału intelektualnego uczniów.

## 2. Przeszkody epistemologiczne

Pojęcie przeszkody epistemologicznej wprowadził w 1938 roku Gaston Bachelard w pracy *La formation de l'esprit scientifique* [13]. Bachelard uważał przeszkody epistemologiczne za bardzo użyteczne pojęcie do badania historii nauki, a zwłaszcza jej przednaukowego okresu, a ściślej okresu przepoczwarczenia się

nauki do stanu rozwiniętego (w terminologii Thomasa Kuhna [14] w przejściach od okresu przedparadygmatycznego do normalnego).

Badacze historii koncentrują się głównie nie tyle na okresach normalnego rozwoju nauki, ile właśnie na narodzinach nauki, narodzinach nowych pojęć i nowych teorii. Oczywiście narodziny nowej nauki wiążą się zawsze z pokonywaniem przeszkód poznawczych. Po pracach z epistemologii psychologii genetycznej Piageta stało się jasne, że pojęcie przeszkody epistemologicznej jest ważnym pojęciem dla badania rozwoju jednostek, jest ważnym dla nauczania.

Przeszkody epistemologiczne w nauczaniu matematyki rozpoznał Brousseau, a następnie zbadała Anna Sierpińska [15]. A oto przykłady przeszkód podanych przez Bachelarda:

1. Przeszkoda pierwszych wrażeń, za którą Bachelard uważa wynoszenie **świadczeń zmysłów** ponad krytyczną analizę. Ta przeszkoda świadczeń zmysłów jest poważną przeszkodą szczególnie u początkujących uczniów. W tym artykule jednak przeszkodę pierwszych wrażeń będziemy rozumieć bardziej ogólnie.
2. **Wiedza ogólna jako przeszkoda wiedzy naukowej** – wynik myślenia usystematyzowanego. Oznacza to np. tęsknotę do unifikacji – i to nie tylko w okresie przednaukowym, w którym „dla umysłu przednaukowego, urok jedności wyjaśniania zjawisk poprzez jeden rys jest wszechmocny”, lecz może oznaczać blokadę i odrzucanie faktów nie pasujących do ogólnie przyjętych teorii w okresie nauki normalnej. Jest to przeszkoda przeciwna do pierwszej, może prowadzić do odrzucenia empiryzmu.

*Przeszkody bardziej konkretne:*

3. **Przeszkoda werbalna**, polegająca na używaniu do opisu zjawisk metafor odwołujących się do znajomości swojskich obrazów i odczuć. Bachelard daje przykład z historii fizyki, a mianowicie przyrównywania powietrza do gąbki, ponieważ daje się ono ścieśniać, rozpręża się i zdolne jest do absorpcji substancji płynnych. Ta przeszkoda występuje bardzo wyraźnie w procesie poznawania przez dzieci świata naturalnego.
4. **Przeszkoda animistyczna**, która fetyszyzuje życie. Zjawiska biologiczne służą do wyjaśniania zjawisk fizycznych. Jest rzeczą znamieną, że ta przeszkoda, w miarę zmiany otoczenia naturalnego dzieci, które w dzisiejszych czasach zrobiło się techniczne, uległa odwróceniu. To przyrodę ożywioną dzieci tłumaczą poprzez działanie maszyn i urządzeń.
5. **Przeszkoda pragmatyczna**, a mianowicie uzasadnianie istnienia zjawisk poprzez ich użyteczność. Ta przeszkoda występuje u dzieci na etapie przedlogicznym (badania Piageta).
6. **Przeszkody wiedzy jakościowej:**

a/ Odrzucanie matematyki jako środka opisu zjawisk fizycznych. Przeszkoda ta występowała w historii. Np. Newtonowi zarzucano, że jego fizyka była zbyt zmatematyzowana, a zatem niczego nie wyjaśnia. Można zaryzykować stwierdzenie, że współcześnie przeszkoda ta występuje głównie u projektantów programów nauczania fizyki, którzy wyolbrzymiają jej rolę u nieletnich uczniów.

b/ Brak poczucia skali wielkości.

c/ Odmawianie prawa do zaniedbywania. Ta przeszkoda jest uzasadnieniem bardziej szczegółowej przeszkody związanej ze zrozumieniem pojęcia granicy.

#### 7. Przeszkody wiedzy ilościowej:

a/ Matematyzacja zbyt mętna.

b/ Matematyzacja zbyt ścisła lub nawet fałszywie ścisła. Tutaj Bachelard podaje przykłady z fizyki używania nadmiernej dokładności w rachunkach, gdy dokładność pomiaru była mała.

Jak już powiedziano, sformułowania Kuhna [4] o rewolucyjnym charakterze odkryć naukowych i jego opis przechodzenia z jednego etapu *normalnego* do innego usprawiedliwiają poszerzenia zastosowania pojęcia przeszkody do opisu przejść pomiędzy kolejnymi okresami *nauki normalnej*. A nawet więcej, przeszkody epistemologiczne mogą wnieść więcej w rozumienie kierunku rozwoju nauki, co u Kuhna jest najslabszym elementem. Jednak na podstawie epistemologii, a przede wszystkim psychologii genetycznej Piageta mamy prawo zastosować pojęcie przeszkody epistemologicznej do badania procesów towarzyszących uczeniu się fizyki. Przeszkody epistemologiczne w uczeniu się i nauczaniu matematyki, opierając się na pracach Brousseau, zbadała Anna Sierpińska [15]. Pokazała ona, że przeszkody te są bardzo użytecznym narzędziem w badaniu procesu uczenia się matematyki. Są one nie tylko narzędziem diagnostycznym, lecz również oferują wskazówki dla nauczycieli.

Sierpińska [15] wymienia następujące cechy przeszkód epistemologicznych związanych z nauczaniem matematyki:

1. Pojęcie przeszkody jest pojęciem względnym.
2. Przeszkody występują parami. Odrzucenie jednej przeszkody powoduje ryzyko wpadnięcia w inną.
3. Przeszkoda na pewnym etapie rozwoju może być podporą.
4. Przeszkoda to nie błąd rozumowania, nieporozumienie czy brak informacji.
5. Przeszkody nie muszą być ujawnione. Mogą się ujawnić *a posteriori*.

Powyższe cechy (o ile nie potraktować „par” zbyt dosłownie), mają również przeszkody występujące w uczeniu fizyki. Można mieć nadzieję, że badanie przeszkód epistemologicznych w uczeniu się i nauczaniu fizyki będzie równie płodne jak w matematyce, Pole do badań jest wprost ogromne.

W następnym rozdziale zajmiemy się głównie **przeszkodami wynikającymi z konfliktu pomiędzy sposobami widzenia świata przez dorastające dzieci i struktury gotowej fizyki.**

Będziemy śledzić manifestowanie przeszkód natury ogólnej, jak np. bariera pierwszych wrażeń, jak i barier bardziej szczegółowych dotyczących konkretnych zjawisk. Wyniki prac Piageta będą pomagały w rozumieniu źródła istnienia poszczególnych przeszkód.

Chcemy podkreślić z całą mocą, że pojęcie przeszkody jest relatywne, przeszkoda może wystąpić u nieletniego studium, a być niezauważona przez dorosłego. W określaniu środków dydaktycznych chodzi nie o omijanie przeszkód, ile o ich pokonywanie.

### **3. Zderzenie „gotowej nauki” z widzeniem świata przez dziecko**

#### **3.1. Ignorowanie problemów intrygujących dzieci**

Nauka szkolna oferuje odpowiedzi na pytania, których dziecko nie zadaje, natomiast IGNORUJE zupełnie te zagadnienia, które dziecko intrygują. A oto zestaw przypadkowych pytań często zadawanych przez dzieci od 6 do 17 lat [16] [17] [19] [20]:

Co się dzieje, gdy wpadnie do czarnej dziury?

Co stanie, gdy ciało wpadnie do czarnej dziury?

Czy neutrino potrafi przelecieć przez czarną dziurę?

Czy neutrino wywierają wpływ na życie człowieka i zwierząt?

Co było przed początkiem świata?

Gdzie świat się kończy?

Co jest poza granicą świata?

Czy są inne światy?

Czy da się wynaleźć antyczłowieka?

Po co krowa ma rogi?

Po co rosa.

Jak fruwa ptak?

Jak działa telewizor?

Jak powstaje płatek śniegu?

Dlaczego sadza jest czarna?

Dlaczego palec piecze jak się wsadzi do wrzątku?

Dlaczego woda kapie?

Dlaczego czajnik szumi?

Dlaczego czarne (wystawione na słońce) jest gorące?

Dlaczego coś jest słodkie?

Dlaczego jest kawałek tęczy?

Dlaczego coś śmierdzi?  
Dlaczego coś się ugina, a co innego nie?  
Dlaczego piórka tak śmiesznie szybują?  
Dlaczego chmury są pierzaste, a kiedy indziej kłębiaste?  
Dlaczego woda z mydłem się pieni?  
Dlaczego coś pęka?  
Z czego coś zrobione? (b. częste pytanie)  
Dlaczego drzewo po złamaniu ma drzazgi?  
Czy kosmonauta może siusiać?  
Jak kamień jest wyrzucany?  
Jak on to robi, że leci?  
Jak szybuje?  
Co się zdarza przy upadku?  
Czy są możliwe podróże w czasie?  
Czy jest możliwa teleportacja?  
Czy to prawda, że cząstki mają kolor?

Nie często (nigdy) słyszy się pytania:

Dlaczego wszystkie przedmioty spadają tak samo?  
Dlaczego księżyc się kręci wokół Ziemi?  
Dlaczego magnesy raz się przyciągają, a raz odpychają?  
Dlaczego suma kątów w trójkącie wynosi 180 stopni?  
Dlaczego tory kamieni mają zawsze podobny kształt?

Na ogół przy tych ostatnich pytaniach dzieci zadawałają się odpowiedzią „bo tak jest”.

Powyższe pytania możemy z grubsza podzielić na trzy kategorie:

- a/ pytania natury filozoficzno-kosmologicznej,
- b/ pytania dotyczące struktury materii,
- c/ pytania o funkcjonowanie urządzeń, przebieg zdarzeń, a u młodszych dzieci o celowość.

Pytania natury filozoficzno-kosmologicznej pojawiają się bardzo wcześnie – najpierw w naiwnej postaci [19], potem w bardziej dojrzałej formie. Utrzymują się one w zasadzie do końca życia prawie każdego myślącego człowieka. Z tego zainteresowania się problemami ontologicznymi wynika ogromne powodzenie książek popularnonaukowych, takich jak np. *Pierwsze Trzy Minuty* Weinberga, czy *Krótką Historia Czasu* Hawkinga, książek niewątpliwie za trudnych dla masowego odbiorcy, ale niestety też wynika z tego powodzenie wszelakiego rodzaju pseudonaukowych pozycji, np. *Daenikella* czy nawet wręcz pseudonaukowego bełkotu.



Zostawianie tych problemów poza nawiasem szkoły to marnowanie okazji. Zarówno marnowanie okazji do pokazania uczniom naukowych hipotez i teorii, jak i marnowanie szansy na kształtowanie naukowego światopoglądu, jak i w końcu marnowanie szansy na wzbudzenie autentycznego zainteresowania fizyką, astronomią i kosmologią. Niedokształceni uczniowie są łatwym żerem pseudonaukowych bujdz. Prawdą jest, że włączenie tematów do programu szkolnego natrafia na trudności. **Występuje tutaj bowiem konflikt epistemologiczny, który polega na tym, że jest trudno mówić o genezie świata uczniom rozumującym na poziomie konkretnym, uczniom z pustką faktograficzną** (chodzi o potrzebne do tłumaczenia teorii fizyczne). W historii nauki kosmologia była domeną filozofii; problemy te nurtowały ludzkość od zarania dziejów, nic zatem dziwnego, że nasze dzieci mają podobne problemy. Tymczasem jest możliwe i bardzo potrzebne wprowadzenie tych zagadnień od początku nauczania fizyki.

I tak jak omijanie pytań natury ontologiczno-kosmologicznej jest tylko tracącą okazją, tak IGNOROWANIE pytań grupy b/ jest poważnym BŁĘDEM, ponieważ pozostawia w uczniach wrażenie, że fizyka zajmuje się światem sztucznym, wymyślonym dla siebie [16] [17]. Wrażenie to potęguje się dlatego, iż przedstawia się uczniom w to miejsce problemy, które ich zupełnie nie interesują! – i w tym może tkwi najgłębsza przeszkoda epistemologiczna w nauczaniu fizyki. Psycholog Wygotski [10] podkreślał wpływ zainteresowania na uczenie się dziecka. O tym wie każda matka, a twórcy programów szkolnych tak jakby tego nie wiedzieli.

**Trudność tkwi w tym, że fizyka rozwinęła się tylko dzięki temu, iż zaczęła stawiać i rozwiązywać pytania niejako z innej strony.** Część spraw zostawiono filozofom, a przyrodnicy zamiast interesować się ruchem opadającego piórka czy monety, zainteresowali się spadaniem WSZYSTKICH ciał. Najpierw rozwiązali problem cieczy idealnej, a dopiero potem lepkiej (kropelki). Najpierw była mechanika punktu materialnego, a potem bryły sztywnej. Fizyka ciała stałego, dająca odpowiedź na „dziecinne problemy” wymaga mechaniki kwantowej, fizyki statystycznej, które i rozwijały się później, a studiować je można w pewnej nie dowolnej sekwencji. **I w tym tkwi konflikt epistemologiczny, jest on nieusuwalny!** Dydaktyka fizyki może poszukiwać dróg złagodzenia konfliktu, co więcej powinna poszukiwać dróg pokonania tej przeszkody.

Tak więc konflikt ten to zderzenie struktury „gotowej nauki” z brakiem struktury czy niedojrzałymi strukturami w myśleniu dziecka czy nowicjusza. David Bohm pisze [21]:

Studiowanie jakiegokolwiek dziedziny zaczyna się od naturalnego aktu abstrakcji, aby skoncentrować swe ZAINTERESOWANIE na pewnych aspektach zjawiska.

Tak więc, aby można poświęcić uwagę czemuś, trzeba koniecznie wyabstrahować czy wyizolować pewne cechy z całej nieskończoności i fluktuującej złożoności cech tła zjawiska. A dzieci wybierają inne aspekty niż fizycy [17] [22].

### 3.2. Globalne struktury nauki *contra* lokalne, bogate, krótkoskalowe struktury dziecka

Jak wykazały badania Piageta [6] [7], a w gruncie rzeczy także Wygotskiego [10] i wielu innych badaczy, umysł dziecka nie jest gotów do budowania ogólnych struktur hierarchicznych. Dziecko ma doskonałą pamięć i kolekcjonuje w niej nowe dane, wrażenia niejako „obok” starych [10] [23]. Rozumienie abstrakcyjnych pojęć z fizyki jest tożsame z plasowaniem tych pojęć w odpowiednim „miejscu wiedzy”, jest niekiedy przeorganizowaniem dotychczasowych związków i zależności i ustanowieniem nowych (Piaget). Pojęcia w nauce mają strukturę hierarchiczną. I tak np. rozumienie pojęcia „pędu” to nie tylko znajomość definicji – „pęd jest iloczynem masy i prędkości ciała”, lecz rozumienie jego roli w drugiej zasadzie Newtona, zrozumienie uniwersalnej zasady zachowania pędu. Pęd ma być wstawiony w strukturę zawierającą takie pojęcia jak: masa, prędkość, siła, popęd, energia, układ izolowany. Dziecko, a zwykle i młodociany, nie jest dojrzały do dostrzegania globalnych, hierarchicznych struktur. Fakt tej niedojrzałości był już dostrzegany na początku naszego stulecia, skoro Marian Smoluchowski w swym *Poradniku dla samouków* [24] [25] w 1917 roku pisał *expressis verbis*, że dziecko ma dojrzeć do abstrakcyjnych definicji. Wiele uwagi poświęcił temu zagadnieniu w swym klasycznym dziele *Od logiki dziecka do logiki młodzieży* [8]. Wypowiadając się na temat nauczania matematyki znany matematyk Hans Freudenthal powiedział co następuje [26] (obszerniej na ten temat pisaliśmy w poprzednim zeszycie [1]):

Dzieło Piageta nie dostarcza żadnego argumentu ze strony psychologii rozwojowej na rzecz propagowania nauczania ustrukturuwanego według jakiejś nauki. Przeciwnie, istnieją argumenty przeciwne... Wszystkie systemy matematyczne ukazują hierarchię wychodzącą od struktur ubogich i prowadzącą ku wzbogaconym... Struktury ubogie są w matematyce wysoce abstrakcyjne... W praktyce konkretyzacja bywa sztuczna czy wręcz fałszywa... Uczniom należy pokazać struktury niematematyczne po to, by zapoznać ich ze strukturyzacją, zubażaniem, matematyzacją, aby im dać odkryć siłę struktur ubogich wewnątrz bogatych.

Otóż „gotowa” fizyka też ma silnie zhierarchizowaną strukturę. Na szczęście w fizyce raczej nie ma mowy o fałszywej konkretyzacji, aczkolwiek może mieć miejsce niewłaściwa np. poprzez nietrafny dobór przykładów paradygmatycznych, poprzez ich nieodpowiednią kolejność w programie nauczania. Taką strukturą niematematyczną, o której mówi Freudenthal, może być po prostu fizyka.

Gwoli sprawiedliwości historycznej, trzeba przypomnieć, że tak znamienity psycholog jak Wygotski wysoko cenił nauczanie idące od struktur ubogich ku bogatym [10]. Wszelako, z wieloma obwarowaniami! Dostrzegał on bardzo wyraźnie największe niebezpieczeństwo tego podejścia, a mianowicie werbalizację.

Bogate struktury u dzieci i młodzieży – to jest zainteresowanie budową i strukturą materii, efektami drugiego rzędu przy pominięciu efektów pierwszego rzędu (np. tarcie). To zainteresowanie zjawiskami w zasięgu czasowym i przestrzennym dostępnym dla dziecka (z wyjątkiem wspomnianych wcześniej problemów ontologicznych), często nieistotnymi dla zrozumienia przebiegu zjawiska.

Jest to nieusuwalna, bardzo istotna bariera epistemologiczna. Można w prawidłowo prowadzonym procesie nauczania łagodzić skutki tej przeszkody. Można wykorzystać doskonałą pamięć dzieci (*mnemosyne period*) i zatem ich zdolność do gromadzenia szeroko pojętych faktów doświadczalnych, ich prostego opisu. Ta baza jest początkowo organizowana bez hierarchicznej struktury, nowe fakty są w pamięci niejako „obok” starych. Ta szeroka baza jest niezbędna przy nauce fizyki. Fizyka może doskonale rozpoczynać naukę od budowy szerokiej bazy – w sensie dosłownym bazy eksperymentalnej, jak i bazy paradygmatycznych przykładów zadań.

### 3.3. Bariera pierwszych pojęć, pierwszych wrażeń i doznań

Przez „pierwsze pojęcia”, czy raczej trzymając się terminologii Wygotskiego, pierwsze pseudopojęcia, pierwsze wrażenia, pierwszy sposób zrozumienia, mamy na myśli takie, które wryły się w pamięć, zostały dobrze świadomie zasymilowane i służą następnie jako punkty odniesienia dla następnych wydarzeń myślowych.

Bariera „pierwszych wydarzeń myślowych” występuje wtedy, gdy nowych nie można bezkonfliktowo tak po prostu „dołożyć” do starego zbioru. I tu w zasadzie są dwie możliwości: „nowe” jest dokładane do kolekcji jako „nowy” ośrodek kondensacji (np. rozszczepienie światła w pryzmacie widziane po raz pierwszy świadomie) lub „nowe” wymaga przeorganizowania dotychczasowej wiedzy (opisane u Piageta). W jednym i drugim przypadku dołączenie „nowego” wymaga wysiłku intelektualnego. Niemożność pokonania bariery nowości powoduje często zjawisko nazywane błędnymi koncepcjami (*misconception*) [11].

I chociaż wiedza dziecka jest jeszcze bardzo słabo ustrukturowana to jednak występują w niej ośrodki kondensacji, wydarzenia kondensujące i zarazem odpychające „nowe” zdarzenia. Te ośrodki kondensacji to „pierwsze świadome” wydarzenia intelektualne. „Nowe” są albo podobne, albo „przeciwne”, albo muszą stać się nowymi „pierwszymi”. W wielu przypadkach ten awans na bycie

„pierwszymi” wiąże się z rewolucją, przestrukturowaniem dotychczasowej wiedzy (Piaget) – ale to wymaga już znaczniejszego stopnia rozwoju.

Bywa, że te „pierwsze wydarzenia” spełniają bardzo pożyteczną rolę i są skarbnicą, z której korzysta nauczyciel [16]. Takimi „pierwszymi wydarzeniami” korzystnymi w nauczaniu będzie wspomniane rozszczepienie światła w pryzmacie czy obserwacja unoszącego się balonika, czy też działanie puszki Faradaya.

Opanowanie w pierwszej kolejności dzielenia liczb większych przez mniejsze jest barierą przy rozumieniu sensu dzielenia mniejszych liczb przez większe. barierą jest rozumienie wartości średniej arytmetycznej przy nauce średniej prędkości, barierą jest obserwacja, że ciśnienie wzrasta, gdy rośnie temperatura (dwie zmienne), dla zrozumienia równania stanu gazu doskonałego, to jest sytuacji, w których trzy zmienne  $p$ ,  $T$  i  $V$  są ze sobą związane.

**Zrozumienie i zasymilowanie mechaniki klasycznej newtonowskiej dla wielu uczniów jest barierą przy poznawaniu mechaniki relatywistycznej i kwantowej [27].**

### 3.4. Bariera przekraczania skal

Psycholog Stanley Hall powiedział, że dziecko interesuje się tym, co jest w zasięgu jego ręki. Ten horyzont dostępnych zdarzeń powiększa się w miarę rozwoju jednostki. Jednakowoż bez specjalnego wysiłku ze strony uczącego się, bez świadomego uczenia się, pozostaje on ograniczony nie tylko do zjawisk i skal makroświata, lecz nawet w tym makroświecie do zjawisk z bardzo wąskiego pasma czasoprzestrzeni i widma energetycznego. Większość jednostek fizycznych  $kg$ ,  $m$ ,  $godzina$ ,  $kWh$  jest tak dobrana, że małe liczby opisują dobrze obznajomione zjawiska i wielkości. I to jest dobrze. Uczniowie mają jednak kłopoty, barierę do pokonania, kiedy jednostki nie są „dopasowane” do zjawisk i trzeba operować bardzo dużymi lub bardzo małymi liczbami. I wprawdzie ilość mąki potrzebnej do wypieku ciasta to jeden czy dwa  $kg$ , ale masa wagonu czy statku to mogą być tysiące  $ton$ . Ciśnienie trzeba określać w  $hPa$ , prąd elektryczny w  $mA$ , a pojemność w  $pF$ . Często w takich wypadkach „duże” jednostki funkcjonują niejako oddzielnie od podstawowych, np.  $tona$  i  $kg$ ,  $sekunda$ ,  $doba$ ,  $hektar$  i  $metr kwadratowy$ . Umiejętność wiązania tych oddzielnych jednostek wymaga wprawy i ćwiczenia.

Duże liczby, niewyobrażalne, sprawiają dzieciom trudność, dzieciom jest obojętne czy jest mowa o milionie, czy o miliardzie. Z drugiej strony występuje fascynacja dużymi liczbami (ma ona ontologiczne podłoże).

Zabiegi dydaktyczne służące ułatwianiu przekraczania bariery skal są dość dobrze opracowane. Klasyczną pozycją stara książeczka Keesa Boeke [29]. W książce tej autor wychodzi od zdjęcia dziewczynki siedzącej na krześle na boisku szkolnym i w kolejnych zdjęciach ukazuje świat w powiększeniach (co

dziesięć), by dojść do odległych galaktyk, i w kolejnych pomniejszeniach, by dojść do budowy jąder. Wielu nauczycieli ma swoje własne dobre metody. Dobre efekty przynoszą metody modelowe (układ słoneczny). „Szokujące” przykłady też odnoszą pożądane skutki. Dieter Nachtigall proponuje gry i zgadywanie.

### 3.5. Widzenie zmian i różnic. Niezauważanie stanów stacjonarnych

Dzieci, jak zresztą i dorośli zwracają uwagę przede wszystkim na różnice. Są to obserwacje dobrze udokumentowane przez neurologów i psychologów.

Dostrzega się ruch, granicę między jasnym a ciemnym. Reaguje się na ciała o temperaturze innej niż otoczenie – ciepłe lub zimne. Natomiast rzeczy i zjawiska pozbawione cech szczególnych, podobne do otoczenia, umykają uwadze.

Dziecko, obserwując kolegę na huśtawce, widzi przede wszystkim zmiany: początek huśtania, rozpędzanie huśtawki, hamowanie, zanik ruchu (tarcie). Szkolna mechanika klasyczna oferuje opis zjawisk inwariantnych wobec transformacji odbicia czasu ( $t \rightarrow -t$ ): np. ruch harmoniczny z zachowaniem energii mechanicznej. Takie zjawiska nie są obserwowane przez dziecko, ponieważ nie zachodzą w życiu codziennym. W demonstrowanych w szkole sytuacjach modelowych uwaga dziecka koncentruje się też na zmianach, a nie na regularności ruchu. Ruch jednostajny jest nieciekawym natomiast problemem JAK DO NIEGO DOSZŁO jest ciekawy i ważny. A akurat ten problem jest często przez nauczycieli pomijany.

Istnieją podejścia do nauczania mechaniki i termodynamiki bazujące na tej właśnie cesze umysłu. Np. propozycja Jona Ogborna [28] naukę o ciepłe rozpoczyna od termodynamiki nierównowagowej. Rozpoczynanie nauki o elektryczności od omawiania prądów, a nie od elektrostatyki, jak czynił to już dawno Piekara, a lansuje w Stanach Melvin Steinberg [30], jest zgodne z właściwością dziecięcej spostrzegawczości i zainteresowań. Dość konsekwentnie przestrzega tego szkoła Karlsruhe (Falk i Herrmann) [31].

### 3.6. Bariera języka

#### 3.6.1. Interferencja języka potocznego i naukowego

Interferencja języka potocznego i naukowego jest bardzo istotną przeszkodą poznawczą. Zjawisko to zostało dość dobrze zbadane jeśli idzie o pojęcia z mechaniki i nauki o ciepłe oraz optyki. Ośrodki amerykańskie, angielski, francuski dużo uwagi poświęciły temu zagadnieniu. W Polsce ośrodek poznański prowadzi badania w tej dziedzinie. Problem ten jest ściśle związany z tzw. wiedzą potoczną uczniów. Szczególnie drastycznie problem tej interferencji

występuje w mechanice i nauce o ciepłe. Takie słowa jak siła, moc, praca, energetyczny, mocny, silny mają nie tylko szersze i niezbyt ściśle określone znaczenie potoczne, ale wręcz sprzeczne z fizyczną definicją (np. praca, która jest na ogół rozumiana jako wydatkowanie energii, wysiłek). W potocznym znaczeniu „moc” nie zawiera elementu czasowego, a oznacza coś bliższego raczej energii potencjalnej czy wewnętrznej. „Pęd” jest bliższy energii kinetycznej w potocznym rozumieniu. Jak wykazały badania Szkoły Karlsruhe „ciepło” jest raczej rozumiane jako entropia. Łatwo sobie wyobrazić do jakiego zamieszania pojęciowego to prowadzi. Takie zamieszanie manifestuje się powstawaniem u uczniów tzw. „błędnych koncepcji (*misconceptions*)” np. [11]. Sprawa wbrew pozorom nie jest prosta do rozwiązania. Nie można bowiem od początku procesu nauczania posługiwać się ścisłym, naukowym językiem. Niektóre definicje są zbyt trudne, by je na początku podawać *explicite*, trzeba je wprowadzać stopniowo. Po drugie, i może co ważniejsze, musimy się z uczniami porozumiewać językiem dla nich zrozumiałym, czyli potocznym, a więc niejako w założeniu używającym nieprawidłowo pojęć fizycznych. Przy wielkiej czujności, można jednak wyprowadzać uczniów z tej pułapki, za każdym razem w takim wypadku, bardzo starannie zaznaczając, że „tak mówi się w życiu potocznym” i mówiąc następnie to samo w języku poprawnej fizyki. Jest to dokładnie tak, jak uczenie nowego języka w kontekstach. Można mieć nadzieję, że język ścisły fizyki uściśli potoczny i nikt np. nie będzie mówił, że „w oceanie jest zgromadzone ciepło”, tylko że jest zgromadzona energia. Nazywanie tego, co widać nad dzióbkiem czajnika „parą”, chociaż nieprawidłowe, jest w gruncie rzeczy mało szkodliwe, ponieważ nie prowadzi do żadnego zamieszania pojęciowego. Nie dawałabym za to dzieciom dwój, nie sądzę bowiem, by w tej materii uległo zmianie potoczne słownictwo.

### 3.6.2. Wyrazy obcego pochodzenia

Następną przeszkodą jest nasycenie słownictwa naukowego wyrazami obcego pochodzenia, dotyczącymi pojęć i własności abstrakcyjnych. W dzisiejszych czasach młodzież nie uczy się łaciny ani greki a początki angielskiego też nie są pomocne, bo zakres słownictwa, który młodzież poznaje na lekcjach angielskiego niekoniecznie pokrywa się z naukowym. Dzieci nie znają znaczenia przedrostków „ekwi”, „izo”, „bi”, „dys”, „anty”, „a”, „pro”, „contra”. Nie znają znaczenia słów „globalny”, „lokalny”, „uniwersalny”, „zunifikowany”, „deterministyczny”, „implikacja”, „alternatywa”, „indukcja”, „homogeniczny”, „heterogeniczny” i wielu, wielu innych pojęć potrzebnych nie tylko na lekcjach fizyki. W mojej praktyce szkolnej nie zdarzało mi się, by uczniowie spontanicznie pytali o znaczenie tych słów. Uczą się ich z kontekstu. Jeśli jednak jest to w kontekście nowego, jeszcze niezrozumiałego pojęcia fizycznego, to trudność zrozumienia wzrasta niebotycznie. O tym się zapomina, bo dla nas są to od

dawna znane i zadomowione pojęcia. Moje badania wskazują, że nawet dzieci z kręgów inteligentnych w pierwszej klasie licealnej nie znają powyższych słów obcego pochodzenia.

### 3.6.3. Język logiki

Poważną przeszkodą, jest potoczne używanie spójników logicznych w inny sposób niż w języku naukowym [32]. Alternatywa w języku potocznym rozumiana jest zawsze jako alternatywa z wykluczeniem. Rozróżnienie pomiędzy implikacją a tożsamością zależy od kontekstu, nawet jeśli używane są „łączniki”, „jeśli, to”, nie mówiąc już o „bowiem”, „ponieważ”. Mylna jest zależność przyczynowa z logiczną. Formalne, świadome używanie reguł logicznych oderwanych od kontekstu wymaga, jak to wykazał Piaget, pełni rozwoju myślenia formalnego, które nie jest przez wszystkich osiągnięte. Wydaje się, że znaczna część społeczeństwa nigdy tego stanu nie osiąga. Stosuje rozumowania poprawne logicznie jedynie w znanych sobie sytuacjach. Dziesięć lat temu przeprowadzałam standardowe testy w grupie 11-latków, piętnastolatków (klasa uniwersytecka) i dorosłych. Zdziwiająco spora część (porównywalna z dorosłymi), bo około 40% jedenastolatków radziło sobie z zadaniami. Najlepsze wyniki mieli licealiści. Wszystkie błędy wynikały z nieumiejętności oderwania się od kontekstu i zastosowania formalnego (dla wszystkich grup) reguł logiki.

### 3.6.4. Przedwczesna werbalizacja, formalizacja

Przedwczesna werbalizacja, a zwłaszcza wymaganie od uczniów werbalnego odtwarzania wiedzy powoduje nie tylko uczenie się na pamięć, lecz w ogóle blokuje proces myślenia, który ma służyć pełnemu zrozumieniu pojęć fizycznych. Smoluchowski w 1917 roku w swoim *Poradniku dla Samouków* przestrzegał przed podawaniem dzieciom definicji, gdy są jeszcze do nich nieprzygotowane. Fizyka operuje abstrakcyjnymi pojęciami, które są ze sobą powiązane zależnościami, które mają ścisły sens jako abstrakty, lecz w przeciwieństwie do pojęć matematycznych mają mieć związek z fizyczną rzeczywistością. Jeśli się zbyt szybko zwerbalizuje pojęcie, poda jego ścisłą definicję, bez należytego uzasadnienia jego korzeni w rzeczywistości fizycznej, to potem nie ma szans, by uczeń był w stanie dokonywać odwrotnej operacji, to jest stosować dane pojęcie do opisu rzeczywistości. Jeśli do tego dokłada się słabe rozumienie używanych struktur matematycznych, to uczniowi nic innego nie pozostaje, jak werbalne pamiętanie bez rozumienia. Wprawdzie Wygotski uważa, że werbalne nazwanie, definicja, ułatwia dochodzenie do rozumienia, jednak może ono mieć zastosowanie jedynie do przypadków, kiedy uczeń ma szansę ćwiczyć dane pojęcie w ogromnej liczbie przykładów. Może to dotyczyć np. kwestii cen i kosztów, pola powierzchni [33] [34] [35] [36]. Japończycy w ten sposób uczą dzieci dzia-

łań na ułamkach. Dzieci wykonują dziesiątki przykładów, recytując chórem odpowiednie reguły. U nas też się tak dawniej uczyło. Nowoczesna dydaktyka zarzuca ten sposób.

### 3.7. Bariera rozwoju myślenia formalnego

**Aby uczyć się fizyki trzeba być gotowym do tworzenia i rozumienia pojęć abstrakcyjnych, do organizowania ich w struktury.** Jak wykazał w swych eksperymentach dydaktycznych Piaget, dziecko i małe uczeń nie są jeszcze do tego procesu dojrzałe. Jak wykazały badania amerykańskie [37] studenci college'ów, którzy nie uczyli się uprzednio fizyki ani w wystarczającym stopniu matematyki, też nie są dojrzałe do takiego procesu. I to jest bardzo istotna przeszkoda.

Jednakowoż jest możliwe nauczanie, mimo że poziom myślenia formalnego nie jest osiągnięty. Bo chociaż uczeń nie jest w stanie rozumować formalnie w oderwaniu od kontekstu, robi to dobrze w konkretnych sytuacjach. Z tego powodu kurs propedeutyczny jest możliwy. Co więcej jest on bardzo potrzebny. Dzięki niemu uczeń będzie przygotowany do właściwej nauki. Wedle Wygotskiego dzięki takiej nauce kształci się nawet umiejętność myślenia formalnego.

Etapy rozwoju myślenia formalnego zostały podane w pracach Piageta [8]. Jego najważniejsza teza to stwierdzenie, że etapy rozwoju przechodzi każde dziecko w określonej kolejności (najwyżej nie osiąga najwyższych etapów) jest dobrze potwierdzona i zbadana przez rzeszę następných badaczy. Dla uczących fizyki niesłychanie ważne jest to, że Piaget przeprowadzał swoje badania nad rozwojem myślenia formalnego na materiale niejako doświadczeń z fizyki. Otóż dzieci w różnym wieku dostawały do rozwiązania problemy fizyczne. Weszły one do kanonu piagetowskich doświadczeń, które stale są używane w nieco zmodyfikowanych wersjach. A oto przykładowe problemy: równość kątów padania i odbicia, pływanie ciał, giętkość belki, drgania wahadła, spadek po równi, rola niewidocznego magnesu, równowaga dźwigni dwustronnej.

W szkole rozpoczyna się naukę fizyki, gdy uczeń jest na ogół jeszcze na etapie II klasyfikacji piagetowskiej. Myśli konkretami. Jak to wygląda na poszczególnych etapach, przy rozwiązywaniu poszczególnych zadań – jest u Piageta ilustrowane cytatami. Przeprowadzone przeze mnie badania (doświadczenie z pływaniem, równowaga na dźwigni, zsuwanie się ciał) pokazują, iż wypowiedzi i komentarz dzieci badanych przez Piageta, pokrywają się z wypowiedziami badanych przeze mnie dzieci. Rezultaty Piageta sugerują, iż nauczanie ze zbyt wczesnym formalizmem matematycznym skazane jest na niepowodzenie. Nauczanie odkrywające ma wiele zalet, zwłaszcza w nauczaniu wstępnym, co więcej, na etapie wstępnym może być jedynym słusznym. Należy jednak pamiętać, że jest to jedynie przygotowywanie do nauki.



### 3.8. Bariera wiedzy matematycznej

Bariera wiedzy matematycznej jest nierozzerwalnie związana z rozwojem fizyki. Rozwój fizyki odbywa się na ogół przez znalezienie odpowiedniego aparatu matematycznego potrzebnego do zbudowania modelu, teorii. Nic zawsze matematyka czekała „gotowa” na zastosowanie. Wielokroć w historii to fizyka wymuszała rozwój odpowiedniego działu matematyki. Tak było z rachunkiem różniczkowym i całkowym. I jeśli nawet matematyka była gotowa, to i tak fizyk musiał ją odkryć dla siebie. Tak było w przypadku Einsteina, który uczył się geometrii nieuklidesowej doskonale znanej Hilbertowi, któremu z kolei brakło wiedzy i intuicji fizycznej. Fizyka jest nierozzerwalnie splątana z matematyką. Jednakowoż potoczne powiedzenie, że matematyka jest narzędziem fizyki, jest bardzo spływające – i to nie tylko dlatego, że matematyka czerpała inspirację z fizyki. Relacja ta jest bardziej skomplikowana. Trudno sobie wyobrazić czym byłyby matematyka bez empirii, np. geometria. Freudenthal mówi o matematyzacji rzeczywistości. Wprawdzie fizyka nie usurpuje sobie wypełnienia całej rzeczywistości – lecz niewątpliwie cała fizyka jest przykładem takiej matematyzacji. Taka interpretacja jest bliższa poznawaniu i konstruowaniu matematyki razem ze sformułowaniem modeli rzeczywistości – a więc nie najpierw matematyka, a dopiero potem jej zastosowania. Zeldowicz swój wykład rachunku różniczkowego i całkowego prowadzi na przykładzie kinematyki. Zakłada, że intuicyjne rozumienie pojęcia fizycznego będzie pomocne w budowaniu pojęć matematycznych (różniczki, całki). W takim kierunku idzie propozycja Freudenthala wprowadzania eksponenty – poprzez przykład rozpadu radioaktywnego.

W praktyce jednak, w nauczaniu fizyki, wcześniejsze oswojenie ucznia z pojęciami matematycznymi jest niezbędne. Niezbędna jest też pewna rzemieślnicza biegłość, nawyki. Poczynając od rozumienia zwykłej proporcji, pojęcia pola powierzchni, objętości w szkole podstawowej aż do funkcji specjalnych przy studiowaniu mechaniki kwantowej – **brak odpowiedniej wiedzy matematycznej** stanowi przeszkodę w rozumieniu nowych pojęć. **Braki w wiedzy matematycznej, mogą powodować przeszkodę nie do przebycia.** Bariera wiedzy matematycznej ujawnia się w tych działach fizyki, w których stosowanie odpowiedniego aparatu matematycznego jest w szkole niemożliwe. Te działy to mechanika i elektrodynamika. Już takie zwykłe pojęcie, jak prędkość zawiera w sobie przejście graniczne, elementy rachunku różniczkowego i całkowego. W elektrodynamice jest jeszcze trudniejsza sytuacja, bo jest zaangażowana geometria różniczkowa. Do sformułowania praw Maxwella są potrzebne zaawansowane pojęcia, nie są one łatwe do modelowego przedstawienia. To jest bardzo istotna przeszkoda. Nasi uczniowie nie mają na ogół geniuszu Faradaya, który obchodził się bez Maxwellowskiego formalizmu. Trudności te zostały w znacznym stopniu rozpoznane przez dydaktyków matematyki.

Zapominanie o tej przeszkodzie jest poważnym błędem dydaktycznym. Zapoznanie się z matematyką najeżone jest tak, jak i fizyka trudnościami poznawczymi. Lwia ich część przenosi się na fizykę. Jest to jednak przeszkoda, którą przy starannie ułożonym programie można w znacznym stopniu zniwelować. Wedle zdania niektórych fizyków (np. Ginzburga [38]), niezbędne są duże ilości ćwiczeń rachunkowych, po prostu musztry rachunkowej. Natomiast unikanie za wszelką cenę opisu matematycznego, przynajmniej w niektórych działach fizyki (np. mechanika) jest bardzo krótkotrwałą receptą, nieskuteczną w długofalowym nauczaniu.

Z wszelką pewnością karygodnym błędem jest stosowanie fałszywych uproszczeń matematycznych. Nie tylko nie prowadzą do lepszego rozumienia, lecz dają uludę rozumienia. Następny zeszyt będzie poświęcony między innymi rozumieniu wzorów matematycznych.

### 3.9. Zakończenie

Omówione powyżej przeszkody poznawcze i naszkicowane równocześnie metody ich obchodzenia mają kolosalne znaczenie dla toku nauczania fizyki. Zarówno dla organizacji nauczania, to jest ułożenia programu – co, kiedy, w jakim zakresie, w jakiej kolejności – jak i dla takich aktywności, jak eksperymentowanie z uczniami, rozwiązywanie zadań, układanie sprawdzianów.

Przeszkody poznawcze manifestują się przy nauczaniu konkretnych działów, czy wręcz pojęć fizycznych. Manifestują się poprzez błędne koncepcje i pułapki epistemologiczne. Taką pułapką jest np. wcześniejsze zrozumienie pojęcia średniej arytmetycznej, która jest przeszkodą w rozumieniu prędkości. Pułapką może być potoczne rozumienie słowa moc.

Rozpoznanie wymienionych w artykule przeszkód pozwala, *a priori* rozpoznać np. wadliwe programy nauczania, niedostosowane do wieku uczniów podręczniki, niedostosowane zadania, czy „nie w czasie” eksperymenty.

Rozpoznanie przeszkód nie daje recepty na dobre nauczanie, lecz stanowi niezbędny jego warunek.

### 4. Albert Einstein – pokonywacz przeszkód poznawczych

Einstein pokonał jedną z najtrudniejszych przeszkód poznawczych w fizyce, a mianowicie wyjście w opisie rzeczywistości fizycznej poza geometrię Euklidesa i fizykę Newtona.

W polecanych na końcu zeszytu *Zapiskach autobiograficznych* [39] Einstein uchyla rąbka tajemnicy swych zmagania intelektualnych z tą przeszkodą. Poniżej przytoczymy krótki fragment z *Zapisków* dotyczący dzieciństwa Einsteina i jego „zdziwień”. Zdziwienie, które pojawia, gdy „nieoczekiwana rzecz wchodzi w konflikt ze światem zastanych pojęć” – to nic innego, jak dostrzeżenie

przeszkody epistemologicznej. Ucieczka od zdziwienia – to pokonywanie przeszkody, rozwój pojęć.

A oto cytaty z *Zapisków* Einsteina (s. 13–16):

**[...] Co dokładnie znaczy „myśleć”?**

Gdy pod wpływem doznań zmysłowych w umyśle tworzą się obrazy, nie jest to jeszcze „myślenie”. Gdy obrazy te układają się w ciągi i każdy element wywołuje następny, wciąż nie jest to „myślenie”. Jednakże gdy pewien obraz pojawia się w wielu ciągach, wtedy – właśnie przez to powracanie – staje się on elementem organizującym, w tym sensie, że łączy ciągi, które same w sobie nie są powiązane. Taki element staje się narzędziem, pojęciem. Sądzę, że mniej lub bardziej dominująca rola „pojęć” jest charakterystyczna dla przejścia od wolnych skojarzeń lub „marzeń” do myślenia. Nie jest konieczne powiązanie pojęcia z istnieniem reprodukowalnego znaku (słowa) dostępnego percepcji zmysłowej; ale gdy znak taki istnieje, myślenie staje się komunikowalne.

Jakim prawem – zapyta czytelnik – ten człowiek tak nieostrożnie i prymitywnie operuje pojęciami na tak problematycznym terytorium, nie czyniąc najmniejszego wysiłku, aby cokolwiek udowodnić? Bronię się następująco: wszelkie myślenie ma naturę swobodnej gry pojęciami; ta gra jest tym bardziej uzasadniona, im lepiej potrafimy za jej pomocą zrozumieć nasze doznania zmysłowe. Pojęcia „prawdy” nie da się zastosować do tego rodzaju tworu; według mnie pojęcia tego można użyć tylko wtedy, gdy istnieje już daleko idące porozumienie (konwencja) dotyczące elementów i reguł gry.

Nie mam wątpliwości, że nasze myślenie w przeważającej części zachodzi bez udziału znaków (słów) i ponadto w dużej mierze podświadomie. Jak inaczej mogłoby się zdarzyć, że czasami całkiem spontanicznie „dziwimy” się na widok czegoś niespodziewanego? To „zdziwienie” pojawia się, gdy nieoczekiwana rzecz wchodzi w konflikt ze światem dostatecznie ugruntowanych pojęć. Kiedy ostro i intensywnie przeżywamy taki konflikt, wpływa on w decydujący sposób na nasz świat pojęć. Rozwój tego świata pojęć jest w pewnym sensie ciągłą ucieczką od „zdziwienia”.

Niespodzianki tego rodzaju doświadczyłem jako cztero- lub pięcioletnie dziecko, gdy mój ojciec pokazał mi kompas. Stanowcze zachowanie igły nie miało żadnego odpowiednika w podświadomym świecie pojęć (ukształtowanych przez bezpośredni „dotyk”). Wciąż pamiętam – a przynajmniej sądzą, że pamiętam – że doświadczenie to zrobiło na mnie głębokie i trwałe wrażenie. W naturze rzeczy musiało tkwić coś głęboko ukrytego. To, co człowiek ma przed oczyma od dzieciństwa, nie powoduje tego rodzaju reakcji; nie dziwi go upadek ciał, wiatr i deszcz ani księżyc, ani fakt, że księżyc nie spada, ani różnica między materią żywą i nieożywioną.

W wieku dwunastu lat przeżyłem drugą niespodziankę, całkiem odmiennej natury: w małej książeczce o Euklidesowej geometrii płaszczyzny, która wpadła mi w ręce na początku roku szkolnego. Miałem przed sobą twierdzenia, na przykład o przecięciu trzech wysokości trójkąta w jednym punkcie, które – aczkolwiek w żadnym razie nie oczywiste – można było udowodnić z taką pewnością, że wszelkie wątpliwości wydawały się wykluczone. Ta jasność i pewność zrobiła na mnie nieopisane wrażenie. Nie niepokoiło mnie, że aksjomaty zostały przyjęte bez dowodu. W każdym razie wystarczyło mi, że mogłem oprzeć dowody na przesłankach, których słuszność wydawała mi się niewątpliwa. Pamiętam na przykład, że usłyszałem o twierdzeniu Pitagorasa od wuja, zanim święta księga geometrii wpadła mi w ręce. Po wielkich wysiłkach udało mi się „udowodnić” to twierdzenie na podstawie podobieństwa trójkątów; przy tym wydawało mi się „oczywiste”, że stosunki boków w trójkątach prostokątnych muszą być całkowicie określone przez jeden z ostrych kątów. Jedynie to, co nie było w podobny sposób „oczywiste”, wydawało się wymagać jakiegokolwiek dowodu. Ponadto obiekty, z którymi geometria ma do czynienia, wydawały się niczym nie różnić od obiektów dostępnych percepcji zmysłowej, „widocznych i dotykalnych”. To prymitywne ujęcie, które prawdopodobnie leży także u podstaw słynnego kantowskiego pytania o możliwość „sądów syntetycznych *a priori*”, opiera się niewątpliwie na podświadomej obecności związku między pojęciami geometrycznymi a obiektami doświadczenia (szybki pręt, odcinek itp.).

**Przyzupuszczenie, że można uzyskać pewną wiedzę o przedmiotach doświadczenia na drodze czystego rozumowania, opierało się na błędzie. Niemniej dla każdego, kto doświadczył tego po raz pierwszy, jest rzeczą wystarczająco cudowną, że człowiek potrafi osiągnąć taki stopień pewności i czystości w myśleniu, jaki po raz pierwszy Grecy ukazali w geometrii (wytluszczenie od redakcji).**

#### [...] **Epistemologiczne *credo* Einsteina**

*Credo* to rozwijało się powoli, ukształtowało się później i nie odzwierciedla moich poglądów z lat młodości.

Z jednej strony widzę ogół doznań zmysłowych, a z drugiej ogół pojęć i twierdzeń zawartych w książkach. Relacje w grupie pojęć i twierdzeń są natury logicznej, a sztuka logicznego myślenia jest ograniczona do ustalenia zależności między pojęciami i twierdzeniami, zgodnie ze ścisłymi regułami, którymi trudni się logika. Pojęcia i twierdzenia nabierają „znaczenia” lub „treści” tylko poprzez swój związek z doznaniem zmysłowymi. Związek ten jest czysto intuicyjny i nie ma natury logicznej. Stopień pewności, z jaką ten związek, to intuicyjne połączenie, może być przyjęte, stanowi o różnicy między pustą fantazją a „prawdą” naukową. System pojęć jest tworem człowieka łącznie z regułami syntaktycznymi, które stanowią strukturę systemów pojęciowych. Systemy

pojęciowe są wprawdzie logicznie całkowicie arbitralne, ale ogranicza je dążenie do możliwie najbardziej prawdopodobnej (intuicyjnej) i pełnej koordynacji z ogółem doznań zmysłowych; po drugie dążą do możliwie najoszczędniejszego wyboru logicznie niezależnych elementów (pojęć pierwotnych i aksjomatów), czyli niezdefiniowanych pojęć i nieudowodnionych przesłanek.

Dane twierdzenie jest w ramach danego systemu logicznego prawdziwe, jeżeli zostało wyprowadzone zgodnie z przyjętymi regułami logicznymi. Prawdopodobieństwo i zupełność jego zgodności z ogółem doznań zmysłowych stanowi o prawdziwości systemu logicznego. Poprawne twierdzenie zapożycza „prawdziwość” od systemu logicznego, do którego należy.

Uwaga na temat rozwoju historycznego. Hume wyraźnie dostrzegął, że pewnych pojęć, na przykład przyczynowości, nie da się wyprowadzić z materiału doświadczalnego za pomocą metod logicznych. Kant, przeświadczony o niezbędności pewnych pojęć, uznał je – takie jakie są – za konieczne przesłanki wszelkiego myślenia empirycznego. Jestem jednak przekonany, że to rozróżnienie jest błędne, a w każdym razie nie oddaje problemu w sposób naturalny. Wszystkie pojęcia, nawet te najbliższe doświadczeniu, z punktu widzenia logiki są swobodnie wybranymi postulatami, dokładnie tak samo, jak pojęcie przyczynowości, które było zresztą punktem wyjścia tych rozważań.

## 5. Trudności poznawcze występujące w czasie demonstracji fizycznych

Brak czasu na wykonywanie w czasie lekcji fizyki rutynowych doświadczeń i demonstracji spowodował organizowanie dla uczniów skondensowanych seansów z demonstracjami. Stały się one okazją do zaobserwowania trudności poznawczych uczniów.

7 grudnia 1994 roku w Instytucie Fizyki UJ odbył się godzinny pokaz demonstracji dla uczniów szkół podstawowych. Tytuł pokazów „O przyczynach ruchu”. W konstrukcji logicznej wykładu wzięto pod uwagę sposób postrzegania ruchów przez dzieci, a więc następujący schemat:

- jak wprawić ciało w ruch
- jak utrzymać ciało w ruchu
- hamowanie.

Po zademonstrowaniu – bez omawiania – całego szeregu ruchów spowodowanych **różnymi** siłami (grawitacja, siły elektryczne, magnetyczne) przystąpiono do krótkiego przedstawienia idei wykładu (zgodnie z zaleceniem Zofii Krygowskiej, by dzieci wiedziały *a priori* do czego zmierza dany tok rozumowania).

W dużym skrócie polegało to na tym, że powiedziano dzieciom, iż powyższe patrzenie zastąpimy innym punktem widzenia. Widzenie arystotelesowskie zastąpimy newtonowskim. Powiedziano uczniom, że najpierw zajmiemy się opisem ruchu, koniecznością wprowadzenia układu współrzędnych, przyważymy względność ruchu, przyważymy wyróżnioną rolę ruchów ze stałą prędkością, rozważymy wszechobecne tarcie i jako ukoronowanie przypomnimy zasadę Newtona. Po ty jeszcze raz obejrzano wszystkie już raz demonstrowane i dodatkowe doświadczenia. Następnie przeanalizowano je wedle pierwszego schematu, ale sprawdzając słuszność praw Newtona.

Uczniom rozdano około stu ankiet, w których zapytano uczniów o najciekawsze doświadczenia, doświadczenia budzące zdumienie oraz poproszono o wskazanie niezrozumiałych doświadczeń i części wykładu.

Pomimo iż sala wykładowa była przepełniona należy uznać, że dzieci z uwagą i zaciekawieniem śledziły zarówno wykład (z dialogiem) jak i przede wszystkim same demonstracje.

Na pytanie „Co ci się najbardziej podobało?” dzieci odpowiadały – demonstracje. Z poszczególnych demonstracji wymieniano najczęściej ruch grającej piłki, doświadczenie z kołem rowerowym, doświadczenie na linii powietrznej z wagonikami, ruch ciężkiej kuli (żyroskop), Właściwie prawie każde z pokazywanych doświadczeń komuś podobało się najbardziej. Doświadczenia, które podobały się najbardziej to były te same, które najbardziej zadziwiły.

80% dzieci odpowiedziało, że zrozumiało wszystko, co było na wykładzie. Jednak część wyartykułowała niezrozumiałe fakty. Dotyczyły one ruchu żyroskopu, koła rowerowego i zjawisk elektromagnetycznych (ruch ramki z prądem w polu magnetycznym). Wprawdzie nieliczna, ale jednak nie zaniedbywalna część twierdziła, że nie zrozumiała słownego wykładu. Część uczniów narzekała, że najpierw były skomasowane doświadczenia bez objaśnień (jedna dziewczynka nawet napisała, że doświadczenia były chaotyczne), a tłumaczenia następowały dopiero później.

Oczywiście to bardzo dobrze, gdy doświadczenia podobają się i jak zadziwiają. Między innymi po to właściwie urządza się takie pokazy. Źle jest jednak, gdy zaciekawia i intryguje nie to co ma służyć konkretnemu celowi – w wypadku chodziło o egzemplifikacje praw Newtona.

Ewidentnym błędem było użycie grającej piłki (piłki do demonstracji efektu Dopplera) do pokazywania rzutów i dyskusji rzutu. Dzieci skoncentrowały się na dźwięku i na pewno wielu z nich umknęło uwagi to, że trajektoria piłki była identyczna z trajektorią wody tryskającej z węża gumowego, i że była identyczna z krzywą wytyczoną przez drewniane kuleczki wiszące na sznurkach o długościach wyliczonych z funkcji kwadratowej.

Celem doświadczeń było pokazanie ogólnej własności ruchu w polu sił jednorodnych – dzieci skupiały zainteresowanie na nieistotnych do tego opisu

szczegółach. Jest to typowy przykład omawianej uprzednio przeszkody zderzenia opisu rzeczywistości przez gotową naukę z opisem jej przez dzieci.

Chybione było doświadczenie ze spuszczeniem z balkonu dwóch lin z kulkami drewnianymi: jednej z kulkami w równych odstępach, a drugiej z odstępami kwadratowymi. Efekt był słabo słyszalny i dzieci nie wiedziały co ma to doświadczenie pokazywać. Nie widziały celu doświadczenia, bowiem to nie była prosta obserwacja zjawisk zachodzących w życiu (gdy np. demonstrowaliśmy ruchy wagonika z różnym tarcie) lecz doświadczenie ustawione, aby coś pokazać. Dzieci nie uchwyciły celu.

Nie będą te doświadczenia zmarnowane, jeśli nauczyciele do nich na wrócą na lekcjach i bez pośpiechu przeanalizują je.

Dzieciom niesłychanie podobały się doświadczenia na linii powietrznej oraz giroskop na poduszce powietrznej. *Nota bene* tylko jedno dziecko zapamiętało nazwę giroskopu. Pomimo, iż wydawało mi się, że zwrócono uwagę na to, że to nie powietrze porusza giroskop oraz wagoniki na linii, to jednak dzieci tego nie zaakceptowały. O giroskopie napisały „kula poruszana powietrzem”. Giroskop był użyty w czasie tych demonstracji jako element ludyczny (i to się sprawdziło) i jako przykład eliminowania czy zmniejszania tarcia (tak jak i linia powietrzna). Ten cel został osiągnięty. Doświadczenia na linii powietrznej są dla uczniów intrygujące, jednakże by odniosły zamierzone cele nie mogą przeprowadzane w pośpiechu. Najpierw uczniowie muszą się zapoznać z działaniem linii i rolą poduszki powietrznej.

Doświadczenie pokazujące siłę elektrodynamiczną umieszczone w zestawie doświadczeń i pokazane w pośpiechu bez możliwości oswojenia się z tą siłą oraz bez należytego wy tłumaczenia pozostawiły w uczniach wrażenie chaosu – według niektórych uczniów doświadczenia te nie pasowały do reszty. Czyli fiasko dydaktyczne, chodziło przecież o wskazanie różnych sił powodujących ruch.

Okazuje się, że dzieci nie są jeszcze gotowe na takie globalne spojrzenie na fizykę, a już na pewno nie w trakcie jednej godziny wykładu i demonstracji! Czy to jednak oznacza, że nie należy od początku czynić prób globalnego patrzenia na dynamikę? Chyba nie, raczej jest to wskazówka, iż droga ta jest trudna i powinna być przebywana bez pośpiechu. Piękna logiczna konstrukcja wykładu **była jasna dla prowadzącego wykład** – dzieci jej nie dostrzegły. I chociaż dalej uważam, iż dynamikę należy pokazywać przez rozważanie trzech faz ruchu (zaczynając od końca, czyli od hamowania) to jednak musi się to odbywać małymi kroczkami. Skróty mogą prowadzić na manowce. Uczniowie odniosą korzyść z wyżej opisanych demonstracji tylko wtedy, gdy nauczyciele później, w toku nauczania odniosą się do oglądanych demonstracji i przeanalizują je z uczniami.

Elegancja i logiczna konstrukcja wykładu czy lekcji służą zadowoleniu wykładowcy i nauczyciela. Myśli ucznia meandrują w różne strony, uczeń jest „po

drodze” zainteresowany ubocznymi z punktu widzenia głównego wątku szczegółami. Uczeń wtedy nic nadaża za głównym tokiem wykładu i lekcji, gubi się. Jest wielką sztuką antycypacja ważniejszych uczniowskich meandrów – pozwala to szybciej i efektywniej prowadzić uczniów do celu – jakim jest również poznanie „gotowej fizyki”.

## 6. Przeszkody poznawcze uczniów przy lekturze komiksu cernowskiego

### 6.1. Wstęp

Około 2000 uczniów szkół podstawowych i średnich zostało zaproszonych do przeczytania komiksu cernowskiego „Świat cząstek” [40]. Następnie uczniowie zostali między innymi poproszeni o sformułowanie pytań do fizyków, jakie nasunęły im się w związku z lekturą komiksu. Wypowiedziało się 680 uczniów w wieku 11–18 lat.

Jak piszą autorzy we wstępie, komiks próbuje odpowiadać na pytania:

„Z czego zbudowany jest nasz Wszechświat?”

„Jak powstał?”

„Dlaczego zachowuje się tak a nie inaczej?”

Analiza odpowiedzi uczniów zostanie przedstawiona w innej publikacji (jeden z następnych *Fotonów*).

Możemy jednak stwierdzić, iż pytania autorów stały się pytaniami czytelników, którzy w komiksie szukali na nie odpowiedzi. W tym artykule skoncentrujemy się na niektórych wypowiedziach uczniów, charakterystycznych dla ich młodego wieku i pokazujących trudności, na jakie napotykają zapoznając się ze światem cząstek elementarnych.

Należy sobie zdać sprawę, iż nawet uważna lektura komiksu to nie jest uczenie się pewnego działu fizyki. Komiks jest opowiadaniem o fizyce cząstek elementarnych oraz o pracy fizyków. Doświadczenia opisane w komiksie są odległe od doświadczeń, które uczeń może sam wykonać lub nawet mieć tylko okazję zaobserwować. Są odległe i niepodobne do niczego, co uczeń poznał do tej pory. Teorie i modele wzmiankowane w komiksie są nie tylko bardzo trudne i abstrakcyjne, lecz przede wszystkim dramatycznie różne od klasycznych. Rytynowe nauczanie fizyki można na szczęście prowadzić odwołując się do doświadczeń uczniów, do obserwacji i eksperymentów przez nich wykonanych.

W czasie procesu nauczania uczeń jednak często staje przed nowością: zjawiskiem, pojęciem abstrakcyjnym, modelem i teorią. Fizyka mikroświata wnosi potężne bariery przełamania myślenia euklidesowego i newtonowskiego.

Wypowiedzi uczniów zawierają cechy charakterystyczne dla ich sposobu myślenia, odgrywającego ważną rolę przy uczeniu się fizyki.



## 6.2. Grupa pytań natury filozoficznej. Ontologia i epistemologia rozumowania dzieci

Spośród kilkuset pytań zadawanych przez dzieci około dwieście było pytaniami natury filozoficznej dotyczących Wszechświata, jego powstania, rozwoju, sposobów opisu i granic poznania. Widzimy tutaj paralelizm pomiędzy rozwojem nauki a rozwojem jednostki [41] [1]. W pytaniach ujawnia się tendencja operowania dużymi kwantyfikаторami, tęsknota za unifikacją, dążenie do zrozumienia granic [19]. Prawa fizyki chce się rozumieć jako **absolutne prawdy**.

A oto wybrane przykładowe pytania:

Czy w najbliższej przyszłości poznamy **całą** prawdę?

Z czego tak **naprawdę** zbudowany jest Wszechświat?

Jak **naprawdę** powstał Wszechświat?

Skąd się w przyrodzie wzięły atomy?

Skąd się wzięły jądra?

Czy Wszechświat jest ograniczony?

Czy można **cały** Wszechświat objąć rozumem ludzkim?

Czy będzie można opisać Świat przy pomocy **jednej zasady**?

Czy możliwe, by Wszechświat był zbudowany z **jednej** energii?

Czy **nawet** Wszechświat zbudowany jest z cząstek?

Czy jest możliwe, aby czarna dziura była **materią absolutną**?

Wszechświat powstał z **praatomu**, prawda? (8 lat)

Jaka jest **najmniejsza** cząstka we Wszechświecie?

Jaka jest **największa** cząstka we Wszechświecie?

Jak **najszybciej** może się cząstka poruszać?

**Wszystko musi** być z czegoś zbudowane, a więc z czego zbudowany jest kwark?

Czy kwark, **najmniejszy** składnik materii można rozłożyć na **coś mniejszego**?

Czy są granice zwiększania energii cząstek w akceleratorze, czy można ją zwiększać w **nieskończoność**?

Skąd możemy mieć **pewność**, że neutrina wylatują ze Słońca?

Chciałbym zobaczyć **prawdziwe** przyrządy.

Czy cząsteczki rzeczywiście wymieniają fotony między sobą jak żonglerzy, jak to wygląda?

Czy każda cząstka ma jednakowy kształt?

Z ilu cząstek składa się **cały** Wszechświat?

Jaki jest cel istnienia neutrin? (student 20 lat – teleologiczne poznawanie)

Pytania wyżej cytowane w mniejszym lub większym stopniu, na pewnym etapie rozwoju interesują większość dzieci.

U niektórych dzieci o typie filozoficznym, zainteresowania tego typu utrzymują się przez dłuższy czas, nurtują dzieci bez przerwy. Dzieci chcą dostać

uniwersalną odpowiedź, coś w rodzaju kamienia filozoficznego. U tego typu dzieci może wystąpić bariera tego co Bachelard [13] nazywa barierą wiedzy ogólnej.

Nie ma zbyt wielkiego sensu roztrząsanie problemu czy rozumowanie dzieci jest bliższe empiryzmowi czy racjonalizmowi, ponieważ i tak jest ono niespójne.

Przykładowe pytania dzieci wskazują na te elementy, które dzieci interesują. Podejście Keesa Boekego [29], oferowana dzieciom w książce *Wszechświat w 40 skokach* dlatego cieszy się takim powodzeniem iż trafia dokładnie w sedno zainteresowań uczniów.

Na zakończenie tej części jako ilustrację typu rozumowania uczniów przytoczymy jeszcze jeden przykład. Dwaj chłopcy (8 lat) na spacerze na wsi zobaczyli mały wiatrak napędzający turbinkę elektryczną. Zostali poinformowani o działaniu turbinki wytwarzającej prąd. Wywiązała się dyskusja:

- „Co będzie jak będzie wiał silniejszy wiatr?”

\* „Turbinka będzie się szybciej obracać i będzie wytwarzać więcej prądu”

- „A jeszcze silniejszy wiatr?”

\* „To będzie jeszcze więcej prądu”

- „A **jeszcze więcej wiatru**, taki potwornie duży wiatr?” (nieporadne pytanie o nieskończony)

Tu wtrącił się drugi kolega, realista:

„Coś ty głupi, wiatrak się rozleci!”

Bardzo dużo pytań dotyczyło pracy fizyków. Tu były pytania dotyczące istoty pracy naukowej, inspiracji, zadowolenia z pracy, pytania dotyczące celowości pracy zarówno z punktu widzenia filozoficznego jak i pragmatycznego.

Była też bardzo duża liczba pytań świadcząca o realizmie życiowym młodego pokolenia. Wiele pytań dotyczyło przyziemnych warunków pracy, takich jak wynagrodzenie, pogodzenie pracy z życiem rodzinnym.

### **6.3. Pytania świadczące o niedojrzałości dzieci i niezrozumieniu prezentowanych w komiksie modeli**

Szacujemy, iż około 4% wszystkich pytań stawianych przez dzieci świadczyła o ich niedojrzałości do zrozumienia modeli prezentowanych w komiksie. Dzieci odnosiły opisywane w komiksie sytuacje do znanych sobie lepiej sytuacji ze świata istot żywych.

A oto przykładowe pytania (6–13 lat):

Ile nóg mają elektrony?

Czy cząsteczki robią miny?

Czy jak się zderzają jest to wynikiem złości?

Czy cząsteczki same rosną?

Czy mogą się poruszać **wbrew naszej** woli?  
 Czy jak się podzielią na pół to powstają dwie żywe?  
 Jak cząsteczki mogą **nieść** siłę?  
 Jaką mają nazwę cząsteczki, które mówią jak ma postępować rodzina cząstek?  
 Czy jeśli cząstka się sama rusza w akceleratorze to znaczy, że jest żywa?  
 Dlaczego neutrina czują niechęć do innych cząstek?  
 Czy kwarki mają coś w swym wnętrzu?  
 Czy kurz występuje w cząsteczkach?  
 W pytaniach tych rozpoznajemy przeszkodę animistyczną (wg Bachelarda), widzimy też jak uczniowie tkwią w rozumowaniu arystotelesowskim (przyczyny ruchu). Rozpoznajemy przeszkodę **pierwszego** poznania, rozumienia (podział komórek – rozpad cząstek).

#### 6.4. Pytania odwołujące się do dotychczasowych doświadczeń uczniów, do ich dotychczasowej wiedzy

Są to pytania typu:

Jak zmierzyć? Jak wygląda? Jak przechować? Jak jest zbudowane? Co jest we wnętrzu?

Oto przykłady:

Jaki duży jest kwark?

Jak można go zmierzyć?

Jaki ma kształt?

Jak wygląda? Jaki ma kolor?

Chciałabym na własne oczy zobaczyć najmniejszą cząstkę układu słonecznego.

Chciałabym zobaczyć na własne oczy lub pod mikroskopem cząsteczki.

Czy będą okulary, które pozwolą zobaczyć budowę atomu?

Dlaczego cząsteczki mają akurat kształt kulisty?

Ile **zjadamy cząstek dziennie**?

Jaka jest **praktyczna** rola neutrina?

Czy istnieje szansa, aby zbudować choćby mały antyprzedmiot?

Co jest we wnętrzu kwarku?

Chciałabym zobaczyć jakąś cząstkę, łatwiej byłoby zrozumieć.

Chciałabym zobaczyć, z jakich cząstek są zbudowane różne przedmioty, których używamy na co dzień.

Jak można przechować neutrino?

Jak można przechować cząstki?

W jaki sposób do jądra są wtłaczane dodatkowe cząstki?

Z powyższych przykładowych pytań wynika, iż uczeń przedmiot swych badań chciałby wziąć do ręki, **zobaczyć**, ewentualnie zmierzyć, zważyć, aschować sobie (np. do późniejszych badań).

Ta chęć „schowania sobie” czegoś może prowadzić do tragicznych skutków, jak w wypadku ucznia, który chciał sobie wziąć do butelki pary zimnego azotu.

Program szkolny z fizyki powinien być tak ułożony, by dać nieletnim uczniom szansę własnoręcznego eksperymentowania. Uczniowie 14–17 lat są już gotowi do rozumienia modeli, potrafią wyłuskać z modelu jego istotne cechy, aczkolwiek łatwo też wpadają w pułapki. Modele odpowiednie dla uczniów to głównie modele zmieniające skalę i upraszczające zjawisko. Doświadczenie modelowe – mieszanie kaszy z grochem – jak wykazały badania Stachórskiej i Jaśkowskiego i potwierdzone przez panią Luty [42] jest dobrze przyjmowane przez 14-letnich uczniów. Uczniowie wręcz wypowiadają się iż „doświadczenie pozwoliło im zrozumieć i **zobaczyć** to czego nie widać i zatem jest trudno zrozumiałe”.

W pytaniach uczniów widzimy trudność przekraczania skal, przywiązanie do makroskopowego opisu (jaki kolor, jaki kształt, co jest we wnętrzu).

Wszystkie pytania zadawane przez uczniów są właściwe dla naszej przestrzeni i fizyki klasycznej. Widzimy tutaj podstawowe trudności rozumienia fizyki kwantowej, która stawia **inne** pytania. Między innymi celem komiksu jest **oswajanie** uczniów z **innymi** pytaniami.

Arcymistrzowski przykład osvajania uczniów ze stawianiem innych pytań jest model *Krzesła Piekary*, przedrukowany przez nas w *Fotonie* i przetłumaczony na wiele języków.

## 6.5. Uczniowie wyłapują brak precyzji tekstu i jego niedomówienia

Każdy tekst popularny z fizyki, tekst, który nie jest podręcznikiem, lecz opowiadaniem o fizyce musi zawierać pewne nieścisłości i niedomówienia, używa bowiem języka potocznego i nie może odwoływać się do teorii (np. równań).

Okazuje się – co oczywiście jest zjawiskiem bardzo pożytecznym, bowiem dzięki niemu można prowadzić aktywne nauczanie – że czytelnicy wyłapują te niedomówienia.

A oto parę przykładów:

Uczeń klasy VI, a więc taki, który jeszcze nie poznał zasad Newtona, lub dopiero co się z nimi zaznajomił, zadaje pytanie: „Dlaczego w zderzeniu centralnym zostaje więcej energii do dyspozycji do produkcji cząstek niż w zderzeniu ze spoczywającą tarczą”.

Uczeń ten jest w pełni gotowy do zrozumienia prawa zachowania pędu i energii – do roli układu współrzędnych w opisie zjawiska. Z tym zagadnieniem mają trudności nawet studenci fizyki, słuchacze wstępu do fizyki cząstek

elementarnych, którzy źle rozwiązują zadania typu pytania o energię dostępną do produkcji cząstek w czasie zderzeń w układzie laboratoryjnym [43].

A oto inne pytania:

Co znaczy, że silna siła jest silna?

Co znaczy, że słaba siła jest słabsza?

Co znaczy, że cząstka **niesie** siłę?

Jak duża jest siła „silna”?

Jak wielka jest siła elektromagnetyczna fotonu?

Dlaczego pola elektryczne ciągną antyprotony w przeciwnym kierunku?

Foton jest cząstką i tworzy falę, czy inne cząstki też?

Jaką rolę pełni nadmiar kwarków?

Czy możliwe są mniejsze od elektronu cząstki obdarzone ładunkiem?

Jakiej wielkości są cząstki, które mówią jak ma postępować rodzina?

Czy elektrony są zbudowane z kwarków?

Jak rozpoznaje się kolory kwarków?

Widzimy, że pytania dotyczą podstawowych praw fizyki. Na niektóre z nich współczesna fizyka nie odpowiada, tylko stwierdza, że tak jest. Dla niektórych uczniów jest to trudne do zaakceptowania, bowiem stawiają oni nieskończony ciąg pytań „dlaczego?”. Większość uczniów jednak akceptuje odpowiedź typu: „Tak jest zawsze”, „Natura jest taka, że tak jest”.

## 6.6. Konkluzje

Analiza pytań uczniów pozwala stwierdzić, iż opis fizyki cząstek językiem potocznym nie wprowadził istotnych błędnych koncepcji w rozumieniu tego działu fizyki. Te które wystąpiły, można w miarę dojrzewania uczniów wyprostować.

Okazało się, że temat komiksu jest dla uczniów fascynujący. Komiks został zaferowany w lipcu 1996 dwóm dwudziestoletnim studentom ekonomii. Po lekturze studenci zadawali dziesiątki pytań, tych samych które zadawali młodszy od nich uczniowie. Studenci wyrazili ubolewanie, iż tak mało czasu poświęcili w szkole na fizykę! Komiks sprowokował uczniów do stawiania właściwych pytań. Wypowiedzi uczniów potwierdziły istnienie barier poznawczych przy poznawaniu nowego działu fizyki.

## 7. Przeszkody występujące przy opisie ruchu

W tym rozdziale skoncentrujemy się głównie na konstruowaniu trajektorii. Osobny rozdział w jednym z następnych zeszytów będzie poświęcony rozróżnianiu takich pojęć jak tor, droga czy przesunięcie.

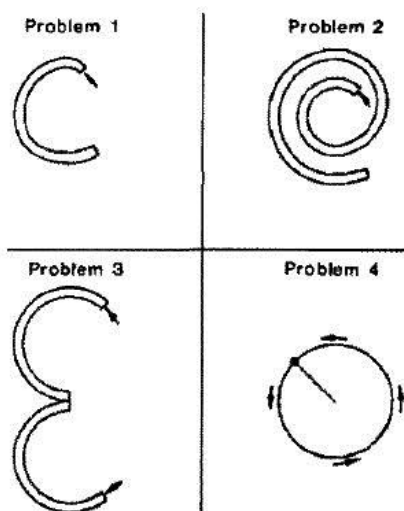
W tym rozdziale najpierw przedstawimy wyniki paru testów, a następnie omówimy krótko trudności uczniów występujące przy opisie ruchów w układach poruszających się, a w szczególności w nieinercjalnych.

## 7.1. Wyniki paru testów

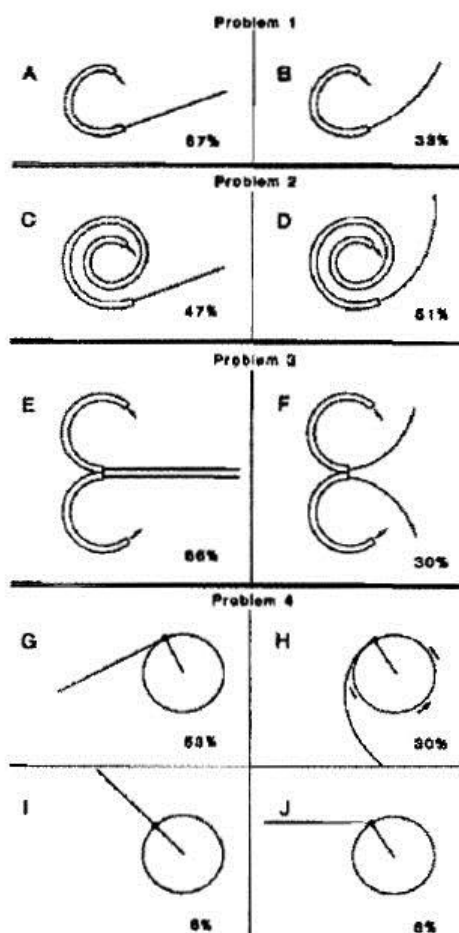
### 7.1.1. Test z Uniwersytetu Johnsa Hopkinsa

50 studentów z Uniwersytetu Johnsa Hopkinsa poproszono, by naszkicowali tor obiektu (marmurowej kulki) w paru podanych im sytuacjach [32]. Rysunek poniżej to widok z góry śliskich prowadnic i kulki na sznurku.

Problem 1 Problem 2



Okazało się, że ponad połowa studentów, a pośród nich wielu po kursie fizyki, wykonała nieprawidłowe szkice.



Przekłask odpowiedzi

Odporozkzi prawiłowe to: A C E I G

U wielu studentów pokutuje przekonanie, iż obiekt w nieobecności sił zewnętrznych kontynuuje ruch po krzywym torze. Autorzy pracy w wywiadach ze studentami stwierdzili typ argumentacji średniowiecznej (teorię *impetus Buridana*). Autorzy podkreślali, że w tym, jak i w podobnych testach z mechaniki, nauczanie fizyki nie przełamuje bariery myślenia arystotelesowskiego, czy średniowiecznego. Można mieć bardzo uzasadnione przekonanie, że jest to wynik złego nauczania. Jeden krótki kurs fizyki nie zastąpi długoletniej pracy i pokonywania przeszkód krok po kroku.

Moi uczniowie klasy I licealnej, z którymi na lekcji omawiałam ten test, zapytali o **szczegóły techniczne sytuacji** przedstawionej na rycinie E. Chodziło

im o to, że w przypadku **braku idealnej** równoległości wyprowadzających rurek, kulki mogą się zderzyć.

Widzimy wyraźnie u uczniów zainteresowanie szczególnie, widzenie – zresztą bardzo poprawne – konkretnej sytuacji, podczas gdy autorzy zadania mieli na myśli jakąś abstrakcyjną, wyidealizowaną sytuację.

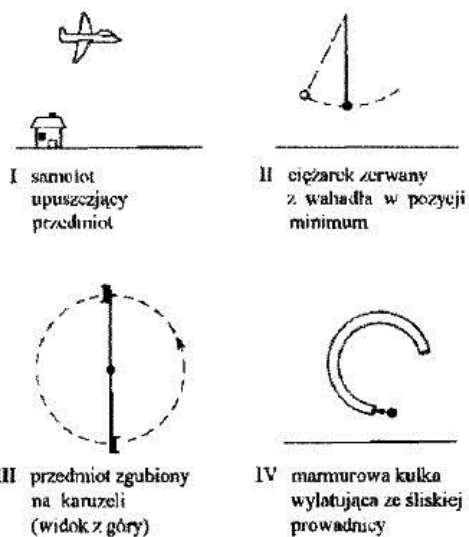
Temat zadania dotyczył sytuacji, w której siła grawitacji nie odgrywa roli. Okazuje się jednak, że wyobrażenie sobie takiej sytuacji przez nieletnich uczniów jest trudne.

Krakowscy uczniowie poproszeni o narysowanie toru zgubionej na karuzeli czapki, przede wszystkim rysowali widok z boku toru – czyli ruch pod wpływem grawitacji. Widok z góry (tego się na ogół nie ma okazji zaobserwować) był narysowany dopiero na drugim miejscu i też czasem był lekko krzywy (szkice).

Trzeba zwrócić uwagę, iż sytuacje przedstawione w teście nie są bezpośrednio obserwowalne w życiu codziennym.

### 7.1.2. Opis ruchu przez uczniów klasy I LO

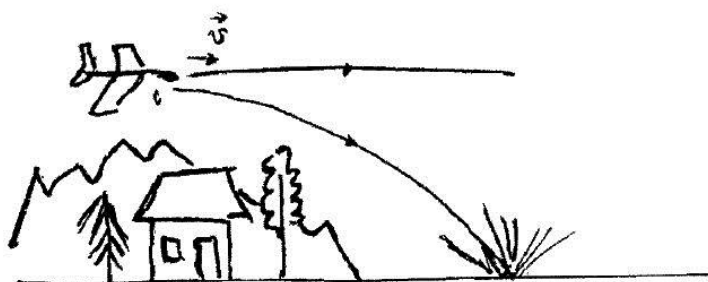
W celu uzyskania wyników porównawczych 28 uczniom I LO (1982;) po kursie kinematyki dano do rozwiązania podobne do powyższych zadanie. Poproszono uczniów o narysowanie toru obiektu w następujących czterech sytuacjach:



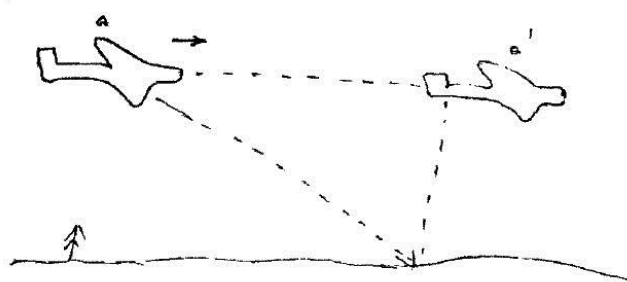
Rezultaty: Zadanie wypadło dobrze.



Zadanie I zostało prawidłowo przedstawione przez 26 uczniów. U wielu widać jeszcze dziecięce zainteresowanie nieistotnymi szczegółami. Na rysunkach mamy domki, drzewka, upuszczony przedmiot rozbija się o ziemię.



Dwóch uczniów narysowało proste trajektorie, np.

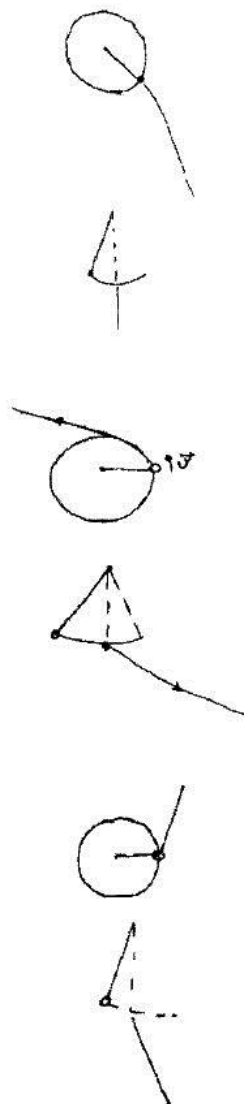


Zadanie IV dotyczące toru kulki wylatującej z prowadnicy było wykonane przez wszystkich uczniów dobrze. Na niektórych niechlujnych szkicach tor był lekko krzywy na początku, ale ze słownych objaśnień uczniów wynikało, iż była to niedokładność szkicu.

Wydaje się, że uczniowie dosyć dobrze wyobrażali sobie przedstawioną w zadaniu sytuację.

Zadania II i III paru uczniom przysporzyły trudności. Sytuacja przedstawiona w zadaniach nie jest obserwowalna w życiu codziennym, a jeśli nawet, to zdarzenie trwa zbyt krótko by je dokładnie zaobserwować.

Oto przykłady nieprawidłowych odpowiedzi:



### 7.1.3. Opis ruchu w różnych układach odniesienia

Oto zadanie testowe rozwiązywane przez 22 uczniów wolontariuszy z klasy I i II LO (1995). Tak jak i w poprzednich testach uczniów poproszono o naskicowanie torów obiektów w rozmaitych sytuacjach. Celowo tematy zadań nie były wspomagane ilustracją, chodziło bowiem o to by sprawdzić, czy uczniowie sobie poradzą samodzielnie z problemem. Celowo też nie precyzowano założeń np. o roli tarcia.

Oto zadania:

### **Zadania I**

**A.** Stoisz na platformie doskonałego pociągu (nie trzęsie) jadącego ze stałą prędkością np. 150 km/h. Rzucasz piłkę pionowo do góry. Narysuj tor piłki tak jak go widzisz.

Wyrzucasz (ostrożnie upuszczasz) ogryzek (a fuj!) przez okno. Narysuj tor ogryzka tak jak go widzisz.

**B.** Stoisz na peronie i widzisz koleś stojącego na platformie pędzącego po-  
jazdu. Koleś wyrzuca pionowo w górę piłeczkę. Narysuj tor piłeczki.

Niechluj kolega wyrzuca (upuszcza przez okno) ogryzek. Narysuj tor tego ogryzka.

### **Zadania II**

**A.** Z lecącego na wysokości np. 10 km samolotu oderwał się w pewnej chwili kawałek guanka, który pozwolił sobie zrobić ptaszek na lotnisku. Opisz słowami co widzi Jacek, obserwujący ten fakt przez okno. Narysuj tor guanka, tak jak to widzi Jacek.

**B.** Olek „Sokole Oko” stojący na Ziemi, obserwował samolot. W pewnej chwili zaobserwował spadające guanko. Opisz słowami co widzi Olek. Zrób rysunek toru guanka.

### **Zadania III**

Z samolotu wyskoczył skoczek spadochronowy. Opisz ruch skoczka, (słowami i rysunkami) tak jak go obserwuje pasażer samolotu i obserwator na Ziemi.

Opisz co widzi skoczek spadochronowy obserwujący samolot, który kontynuuje swój lot ze stałą prędkością. Zrób rysunek.

### **Zadania IV**

**A.** Przeciwnicy poglądu Kopernika o ruchu obrotowym Ziemi argumentowali, że gdyby ruch ten był prawdziwy, to kamień upuszczony z wysokiej wieży nie spadłby u podnóża, tylko „zostawał z tyłu”.

Ustosunkuj się do tego argumentu. Jeśli odpowiednie rysunki pomogą Ci w objaśnieniu – zrób je.

**B.** Przeciwnicy poglądu Kopernika o ruchu rocznym Ziemi dookoła Słońca argumentowali, że gdyby on był prawdą, powinno się obserwować różnicę w położeniu na niebie gwiazd stałych.

Tego w czasach Kopernika nie obserwowano. Uzasadnij, czy rzeczywiście powinno się obserwować różnicę. Czy masz jakiś pogląd na to, że w czasach Kopernika tego zjawiska (paralaksy) nie obserwowano.

### **Zadania V**

**A.** Olek obserwuje ruch plakietki, która oderwała się na wirażu z pędzącego samochodu. Opisz słowami ten ruch, zrób rysunek.

**B.** Jacek zgubił na karuzeli czapkę. Opisz słowami, co widzi Jacek (chodzi o ruch czapki). Zrób rysunek z pozycji Jacka. Wydarzenie obserwował Olek stojący na Ziemi. Opisz słowami co widzi Olek, zrób rysunek.

Oto uwagi dotyczące rozwiązań.

- 1 Uderza u wszystkich uczniów wielka niestaranność i nieumiejętność posłużenia się rysunkiem i wykresem. Jest to niewątpliwie wynik braku odpowiedniej edukacji. Parę lat temu robiłam badania na inny temat w wielu szkołach podstawowych. Okazuje się, że uczniowie niektórych szkół podstawowych w znacznym stopniu opanowali sztukę robienia wykresów i rysunków.
- 2 Poprawnie przez wszystkich uczniów został przedstawiony tor przedmiotu upuszczonego z przelatującego samolotu (zad. II B). Uczniowie rysowali parabolę często „upiększoną” (tak samo jak czynili to uczniowie w poprzednim teście). Analogiczne zadanie z ogryzkiem z punktu widzenia obserwatora na peronie było przedstawiane na ogół w postaci ukośnej linii prostej, która faktycznie w skali czasowo-przestrzennej zdarzenia, nie jest złym opisem. U paru uczniów w klasie II wystąpił komentarz: *zadanie analogiczne do zadania z samolotem.*

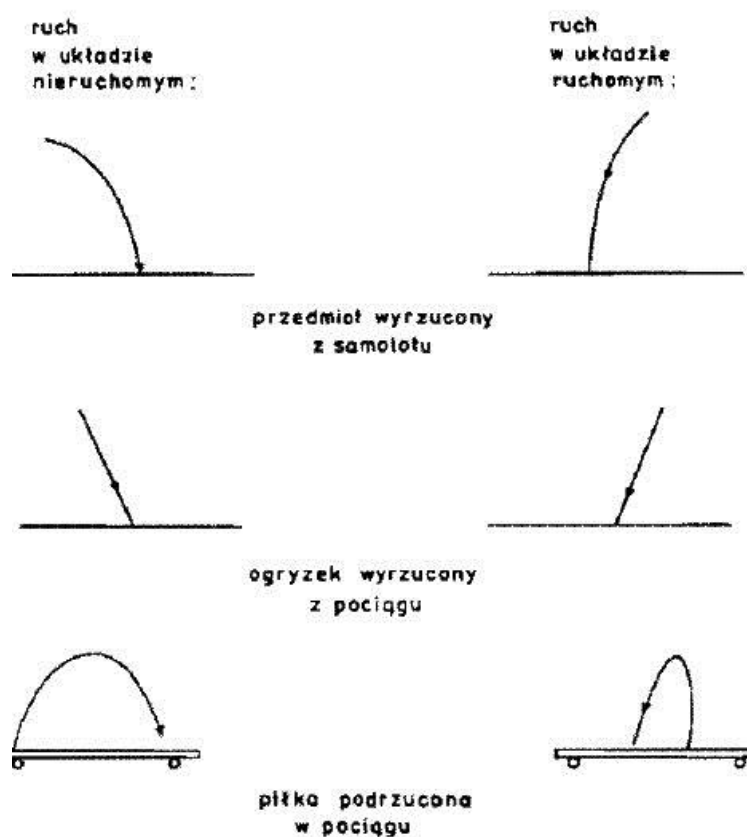
W zadaniu ze skoczkiem spadochronowym opis ruchu w układzie nieruchomym był też prawidłowy. Tutaj uczniowie spontanicznie koncentrowali się na wpływie oporów powietrza – w zasadzie prawidłowo. Prawidłowo też był przedstawiony ruch piłki w układzie peronu.

- 3 Ruch w układzie poruszającym się.  
Zaledwie parę (7) odpowiedzi było prawidłowych przy opisie ruchu piłki w pociągu. Ani jedna odpowiedź dotycząca ruchu ogryzka, guanka i spadochroniarza nie przedstawiała toru jako linii prostej pionowej.  
Wielu uczniów uzasadniało swoją odpowiedź – tłumacząc „zostawianiem w tyle” porzuconego obiektu – oporami powietrza (przypuszczenie *a priori* rozsądne).  
Jest to ważna wskazówka dla uczących. Uczniom jest bardzo trudno idealizować ruch do bezoporowego. Odbija to znany fakt, że faktycznie niewiele rzeczywistych ruchów przypomina ruchy modelowe: np. ruch punktu materialnego w jednorodnym polu grawitacyjnym czy ruch wahadła matematycznego. Dlatego nauczanie mechaniki jest trudne. Fizyka bowiem proponuje kierunek od prostych przypadków, abstrakcyjnych beztarciovych, do coraz bardziej rzeczywistych ruchów z oporami. W celu poprawnego rozwiązania zadania uczniowie muszą pokonać barierę bezpośrednich obserwacji.

Wydaje się, że rozwiązywanie równań ruchu z udziałem komputerów, gdzie opory można od razu uwzględnić, może pomóc uczniom. Wracając do układów współrzędnych – przejście z jednego układu np. Ziemia do drugiego np. lecący samolot, utrudnia obecność trzeciego ośrodka, jak woda, powietrze. Ten ośrodek nie tylko wprowadza dodatkowe siły, lecz w wielu wypadkach jest trzecim układem odniesienia (wiatr, prąd wody).

- 4 Poszukiwanie symetrii, równoważności układów inercjalnych. Spora ilość uczniów (przeszło połowa) podawała rozwiązanie – to jest opis ruchu w układzie ruchomym i nieruchomym w postaci symetrycznej.

**Przykładowe odpowiedzi uczniów:**



Jest to ciekawy przykład, w którym uczeń rozwiązujący zadanie już przynajmniej częściowo przestaje odwoływać się do bezpośredniego doświadczenia (rozumowanie konkretne), lecz odwołuje się do wyobraźni i spekulacji. W rozumowaniu występuje tendencja (słuszna) potraktowania obu układów równoważnie – i chociaż samo rozwiązanie jest niepo-

prawne – rokuje ono nadzieję, że pod wpływem analizy zadania z nauczycielem, uczniowie łatwo zrozumieją prawidłowe rozwiązanie.

- 5 W zadaniach dotyczących ruchu przedmiotu oderwanego od karuzeli czy czapki zgubionej na wirażu z samochodu, opis ruchu z punktu widzenia obserwatora zewnętrznego w zasadzie był poprawny (z dokładnością do staranności rysunku – niektóre tory jednak podejrzanie zakrzywiały się) – to jest uczniowie jako trajektorię rysowali prostą, styczną do toru. Wielu z uczniów rozważało też poprawnie ruch przedmiotów w płaszczyźnie pionowej. Spontanicznie zainteresowali się tym zagadnieniem. Jest to wskazówka dla układających zadania egzaminacyjne. Temat i pytanie musi być jasno postawione.  
Natomiast ruch czapki widziany z układu ruchomego prawidłowo opisało mniej niż połowa uczniów. Ci uczniowie będą mieć trudności ze zrozumieniem sił bezwładności. Uczniowie nie umieją **postawić się w pozycji obserwatora** w układzie ruchomym. Nie mają ani wystarczającej zebraanej bazy doświadczalnej, ani możliwości intelektualnych rozwiązania problemu w myśli.
- 6 Zadanie IV dotyczące poglądów na opis ruchu kamienia puszczonego z wysokiej wieży (ruch obrotowy Ziemi), jak i punkt B dotyczący różnicy położen gwiazd stałych, był rozwiązany prawidłowo. Odpowiedzi sprawiały wrażenie, jakby ten problem był w szkole uprzednio przerabiany i został zrozumiany.
- 7 Powyższe wyniki nie różnią się zasadniczo (są jednak lepsze) od analogicznych, przeprowadzonych przeze mnie parę lat temu, ani od wyników innych badaczy (GIREP 91, Toruń) [48].

## 7.2. Przeszkody występujące w prawidłowym opisie ruchu ciał

1. Brak potrzeby opisu i brak wprawy w opisie geometrycznym.
2. Rozproszenie uwagi na szczegóły nieistotne dla postawionego zagadnienia (tarcie), zderzenie z Ziemią.
3. Niemożność odwołania się do własnego przeżycia i obserwacji. Chodzi o opis zjawisk bądź nigdy nieobserwowanych, bądź zachodzących w zbyt krótkiej skali czasowej.
4. Niedojrzałość do dostrzeżenia uniwersalności i dokonania transferu od jednej sytuacji do innej (analogicznej).

Z tych wyników płyną następujące wnioski:

- uczniowie rozwiązują poprawnie te zadania, w których mogą odwołać się do własnego doświadczenia, Nie u wszystkich występuje umiejętność zastosowania wiedzy ogólnej.

- problem opisu ruchu w układach ruchomych jest trudny i wymaga wielu ćwiczeń i przykładów. Te ćwiczenia nie mogą ograniczyć się tylko do „omawiania”, ale muszą być poparte wykonaniem konkretnych rysunków czy wykresów.
- fakt opanowania i zrozumienia jednego przykładu nie przenosi się automatycznie na następne.
- uczniowie „widzą” cały czas siły oporu i obecność ośrodka, w którym poruszają się ciała. Trzeba temu problemowi poświęcić uwagę i nie ignorować go.
- dla uczniów ustawienie obserwatora w układzie ruchomym jest problemem trudnym.
- w układach nieinercjalnych uczniom zaciemniają **obraz różne** skutki działania sił bezwładności, spowodowane różną strukturą obiektów, na które, one działają (np. powierzchnia cieczy zmienia formę, krople śmietany wylatują w wirówce, ludzie spadają z karuzeli, sprężyna ulega ściskaniu, ale np. fotelik karuzeli nie zmienia kształtu, poręcz nie odrywa się).
- niewątpliwie w tym dziale fizyki olbrzymią pomocą mogą służyć odpowiednie programy i symulacje komputerowe (zwolnienie przepływu czasu, zmiana skali, równoczesny obraz w dwóch układach).
- braki w geometrii są przeszkodą w przyswajaniu pojęć związanych z ruchomymi układami odniesienia.

## 8. Trudności w rozróżnianiu układów inercjalnych i nieinercjalnych

### 8.1 Wprowadzenie

W rozdziale tym zaanonsujemy trudności, jakie pojawiają się przy rozróżnieniu układów inercjalnych i nieinercjalnych. Do zagadnienia tego powrócimy w jednym z następnych rozdziałów poświęconych rozumieniu pojęcia pędu.

Pojęcie układu inercjalnego rodziło się w historii fizyki w wielkich bólach. Najtęższe głowy wysiłały swój intelekt, by to kluczowe dla mechaniki pojęcie zrozumieć. Dopiero ogólna teoria względności ze swoim zaawansowanym aparatem matematycznym i pojęciowym wprowadziła jasność w sens tych pojęć na gruncie mechaniki newtonowskiej.

Nie jest celem tego artykułu wskazanie trudności historycznych, już przebadanych, ani pokazywanie wyraźnego paralelizmu z trudnościami uczenia (Viennot) [44]. Przypomnienie trudności historycznych ma jedynie na celu wyraźne uświadomienie faktu, że występuje tutaj obiektywna trudność poznawcza – mówiąc po prostu – jest to trudne zagadnienie. Jest to problem trudny zarówno do zrozumienia, jak i do prezentacji.

Podręczniki szkolne i uniwersyteckie, jak to wskazała Viennot [45] pełne są nieprawidłowych sformułowań. Praktyka pokazuje, że nauczyciele omijają ten temat, zakładając *implicite*, że scena wydarzeń fizycznych jest układem inercyjnym, laboratoryjnym, nieruchomym. Jest to jakieś wyjście z sytuacji, ale płynie z tego cały szereg nieporozumień, niemożność zrozumienia wielu zjawisk. Ominięcie jednej przeszkody kreuje inną. Uczni w taki sposób studenci, nie widzą sensu I zasady Newtona. Jest ona dla studentów jedynie szczególnym przypadkiem II zasady.

Współcześni studenci mają nad starożytnymi uczonymi i nawet nad uczonymi XIX-wiecznymi przewagę w możliwości:

- a/ bogatszego zebrania osobistych przeżyć i obserwacji dotyczących zjawisk w różnych układach współrzędnych
- b/ przeżywania wewnętrznego zjawisk i doświadczeń symulowanych na komputerze, pokazywanych na filmach
- c/ przeprowadzania specjalnie do tego celu zaprojektowanych doświadczeń i demonstracji
- d/ mają gotowy geometryczny formalizm, z którym mają szansę zaznajomić i oswoić się wcześniej.

## 8.2 Trudności w opisie ruchu w układach poruszających się

Aczkolwiek trudno jest rozważać trudności występujące przy rozumieniu sensu układów inercjalnych bez całego tła mechaniki, to jednak można wskazać na pewne charakterystyczne, występujące tu trudności. Są nimi:

1. Trudności ze zrozumieniem potrzeby wyspecyfikowania układu współrzędnych bez gruntownego przygotowania matematycznego, bez ćwiczeń z mapą na lekcjach geografii. Bez odpowiednich gier i zabaw, wprowadzenie układu współrzędnych na lekcjach fizyki w rozsądnym czasie, jest niemożliwe. Natomiast praktyka szkolna pokazuje, że problem operowania układem współrzędnych, wektorami położeń, pojęciem trajektorii, jest do przyjęcia dla paronastoletnich uczniów – właśnie pod warunkiem (patrz artykuł A. Nemeth w *Fotonie* 42) długiego i starannego wprowadzenia [46].
2. Kolejną przeszkodą jest porównywanie opisu ruchu w **dwóch różnych** układach współrzędnych, początkowo wglądem siebie nieruchomych. Szczegółowe badanie na temat tej trudności przeprowadził Karplus. Zaproponował on zestaw ćwiczeń i zabaw, które mają pomóc w zrozumieniu tego zagadnienia. Przykłady z geometrii, geografii czy lekcji rysunków, są bardzo pomocne. Głównie chodzi o pokazanie uczniom **potrzeby zmiany** układu współrzędnych i **oswojenie** ich z tym problemem. Wielu nauczycieli uważa, że 12-, 13-latkowie nie są jeszcze w stanie zajmować się i zrozumieć ten pro-



blem. Przykłady wskazują, że pod warunkiem poświęcenia temu zagadnieniu sporej ilości czasu, jest to możliwe [47], [48].

3. Kolejną przeszkodą, naprawdę trudną do pokonania, jest przejście do opisu zjawisk w układach poruszających się. To wychodzi poza zwykle osobiste doświadczenie fizyczne uczniów i na ogół zawsze wymaga **uruchomienia wyobraźni**.  
Większość zjawisk, które uczniowie do tej pory obserwowali, objaśniali, odbywało się w nieruchomym układzie laboratoryjnym, w którym **uczeń – obserwator spoczywał**.
4. Doświadczenia osobiste z układów poruszających, dotyczące sedna sprawy zamaskowane są zjawiskami towarzyszącymi (tarcie, opory, wstrząsy) lub odbywają się w nieodpowiedniej do obserwacji skali czasowej, np. zbyt szybko.

Badania (własne, GIREP [48]) pokazują, że paronastoletni uczniowie prawidłowo opisują ruch (złożenie ruchów) z punktu widzenia obserwatora nieruchomego – a więc to, co znają z obserwacji. Prawidłowo dokonują też transferu na sytuacje nowe, posługując się wyobraźnią, np. ruch bomby wyrzuconej z samolotu, pojemnika wyrzuconego ze spadochronu, łódki, czapki zgubionej na karuzeli.

Trudność występuje, gdy trzeba opisać ruch w **układzie poruszającym się**. To nie jest już tak mocno związane z osobistym doświadczeniem, **musi być uruchomiona wyobraźnia**.

W opisanym w poprzednim paragrafie teście uczniowie (15, 16 lat) byli poproszeni o przedstawienie toru piłki wyrzuconej pionowo do góry przez chłopca jadącego na platformie, poruszającej się ze stałą prędkością w układzie peronu i w układzie platformy. Wiele odpowiedzi było symetrycznych.

Jak już pisaliśmy tak jakby **rozumowanie było już zupełnie oderwane od własnego doświadczenia** (bo przecież zdarzało się każdemu coś podrzucić w pociągu) i zastąpiła je analiza teoretyczna – wystąpiło wyczucie pewnej symetrii, czy równoważności ruchów. Jest to etap w rozwoju myślenia formalnego, w którym uczeń próbuje już rozumować zupełnie formalnie, lecz robi to jeszcze bardzo nieporadnie. Gdyby uczeń trzymał się konkretnego i ufał swemu fizycznemu doświadczeniu, wykonałby prawidłowy rysunek. (Zupełnie podobne zjawisko wystąpiło przy badaniu zdolności myślenia logicznego, o czym w następnym rozdziale.

Ten etap w rozwoju ucznia jest ważny, gdyż właśnie w nim nieprawidłowe nauczanie może wyrządzić najwięcej szkody. Jest on dla nauczyciela bardzo trudny, ponieważ nie wszyscy uczniowie równocześnie przechodzą przez ten etap.

Jak już mówiliśmy, na nieprawidłowy opis ruchu w układzie ruchomym ma też wpływ własne doświadczenie ucznia, które z technicznych powodów jest

„rozmażane”. Ogryzek wylatujący przez okno jest **za krótko** obiektem obserwacji, podobnie czapka zgubiona na karuzeli. Uczniowie nie za wiele mają okazji do przebywania na ruchomych schodach czy chodnikach.

Jeśli idzie o opis ruchu w układach ruchomych inercjalnych i nieinercjalnych, nie ma tutaj żadnej istotnej koncepcyjnej różnicy, poza tym, że opis w układach nieinercjalnych jest na ogół bardziej złożony.

Trudności z opisem ruchu w układach poruszających odbijają się na trudnościach ze rozumieniem składania prędkości i niezależności ruchów. W rzeczy samej to są **te same** trudności. Przy rozróżnianiu układów ruchomych od nieruchomych **trudność identyfikacji tego drugiego ruchomego** układu, jest istotna.

Uczeń często protestuje przeciwko uznaniu za układ odniesienia siebie siedzącego na huśtawce czy na karuzeli, chociaż już poprzednio uznał za układ odniesienia jadący pociąg (bo ma on naturalne osie współrzędnych, tak jak i sala lekcyjna). Taki uczeń nie rozumie później co znaczy układ własny wpadającego do atmosfery mezonu, chociaż jest skłonny uznać za układ odniesienia rakietę, w której siedzi kosmonauta. Wydaje się, że dla ucznia układ współrzędnych jest czymś absolutnym, zewnętrznym do obserwatora. Poza tym nie występuje jeszcze, co jest charakterystyczne dla niedojrzałości w myśleniu formalnym, przeniesienie rozumienia z jednych przypadków na drugie.

### 8.3. Dynamika w układach poruszających się

Sam opis ruchu w układach nieruchomych i poruszających się jest pewną grą intelektualną, która ma dopiero doprowadzić do istoty zagadnienia, czyli do dynamiki. Dopiero tutaj uczeń napotyka na istotne trudności. Standardowo bowiem uczeń słyszy wypowiedaną I zasadę Newtona – jako zasadę Galileusza, a mianowicie, że „nie można na statku poruszającym się ruchem jednostajnym stwierdzić, czy się on porusza, czy też nie”.

Uczeń ma trudności, bowiem **nie potrafi oderwać się od nieruchomego obserwatora**: widzi on tor piłki jako parabolę, a już z drugiej strony wie, że obserwator w samolocie widzi tor prosty, tak jak i podrzucający piłkę w pociągu. „A więc to nie jest to samo” – argumentuje uczeń.

Tego etapu nauczania absolutnie nie można przyspieszyć, nie wystarczy jeden krótki przykład: „ja podrzucam na peronie piłkę i łapię ją z powrotem – i ty robisz to samo w pociągu”, „na peronie waha się wahadełko, ono identycznie waha się w pociągu”.

Uczeń musi i poobserwować zjawiska (lub trzeba mu przywołać jego przeżycia np. z podróży łódką, samolotem), i **musi je przetrwać** w umyśle.

Uczniowie „filozofujący” (niewielu takich jest, ale są) na pewno będą się interesować istnieniem absolutnego układu inercjalnego – ten nie rozwiązany problem będzie „ich uwierał”.

#### 8.4. Układy nieinercjalne. Siły bezwładności

Nie można skutecznie uczyć dynamiki w układach nieinercjalnych bez odwołania się do doświadczeń uczniów. Znowu powraca podstawowy problem układu ruchomego i ustawienia w nim obserwatora (o czym była mowa poprzednio).

W obserwacji słynnego doświadczenia Newtona z obracającym się wiaderkiem, uczeń zawsze obserwuje to **z zewnątrz**. Jeśli myśli o hamującym tramwaju – to mimo, że zna doświadczenie z tramwaju, **też** to widzi z zewnątrz. Pasażerowie „lecą do przodu” (widzi też, że przy normalnym hamowaniu, fotele **nie** lecą do przodu).

Uczeń obserwuje innego ucznia biegnącego z pionem. Przy hamowaniu wahadełko „leci do przodu” – to widzą **obaj** obserwatorzy. Trzymający wahadełko pozostaje prosty.

Występują tu trzy trudności:

1. Trudność w utrzymaniu konsekwentnie opisu w układzie ruchomym nieinercjalnym – utrudniony przez **podglądanie** wydarzeń z punktu widzenia układu nieruchomego i **mieszanie opisów**.
2. Nieugruntowane zasady Newtona – one dopiero dojrzewają w umyśle ucznia. Uczniowie już przy opisie ruchu odwołują się do przyczyn ruchu.
3. Obserwacje dotyczą nie punktów materialnych tylko rozmaitych rzeczywistych ciał, które niekoniecznie zachowują się, jak bryły sztywne. Siły sprężystości więzów, tarcia, niezrozumiałe nalezycie w układach inercjalnych, powodują zupełne zamazanie opisu (człowiek „leci do przodu”, ale fotele nie, ściany pociągu też pozostają prostopadłe). Opis i zrozumienie zjawisk, biorący pod uwagę strukturę ciał, to wyższy stopień wtajemniczenia.

Podstawowym celem nauczania o układach nieinercjalnych uświadomienie uczniom realności sił bezwładności.

Po pierwsze przez **doświadczenie wykonane** przez uczniów. Musi ich być dużo. Wiele cennych doświadczeń i demonstracji opisano we wzmiankowanych już raportach GTREP-u z Torunia [48]. Nauczyciel powinien przywoływać własne przeżycia uczniów z samochodu, tramwaju, karuzeli. Następnie powinna nastąpić dyskusja powyższych zjawisk **z punktu widzenia obserwatora** w układzie nieinercjalnym. Dyskusja możliwości eksperymentalnego stwierdzenia nieinercjalności. Dopiero po trzecie – może wystąpić odpowiedni rachunek – opis ruchu w układzie nieinercjalnym – który prowadzi do wystąpienia w równaniach ruchu sił bezwładności.

#### 9. U wagi o trudnościach w rozumieniu pojęcia pracy

W rozdziale tym zajmiemy się trudnościami poznawczymi, jakie ma większość uczniów zapoznająca się z abstrakcyjnym, zaawansowanym matematycznie pojęciem pracy.

Praca definiowana jako  $L = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r}$ , a w przypadku działania stałej siły  $\vec{F}$

przesuwającej ciało wzdłuż prostej o przesunięcie  $\vec{d}$ ,  $L = \vec{F} \cdot \vec{d}$ , to dla ucznia jedno z trudniejszych, abstrakcyjnych pojęć fizyki. I to nie tylko dlatego, że

- a/ nie zachodzi współgranie znaczenia potocznego i formalnego tego pojęcia,
- b/ definicja zawiera nowość z punktu widzenia matematyki, a mianowicie iloczyn skalarny i całkę krzywoliniową,
- c/ lecz przede wszystkim dlatego, że pojęcie pracy jest uwikłane w całą strukturę fizyki. Zrozumienie pojęcia pracy wymaga **jednoczesnego** zrozumienia pojęcia układu izolowanego, układu otwartego, granic układu, przepływu energii, przemian energii, prawa zachowania energii.

W trudności ze zrozumieniem pojęcia pracy manifestuje się większość trudności jakie uczniowie napotykają w uczeniu się fizyki.

Problem rozmiękania się znaczenia potocznego pracy ze znaczeniem naukowym oraz problem mieszania pracy z energią, pędem i siłą, został już szczegółowo przebadany (literatura zebrana przez H. Pfund i R. Duita [49]).

W poniższym rozdziale skoncentrujemy się na przeszkodach związanych

- a/ ze zrozumieniem znaku pracy i sensu zerowej pracy,
- b/ z koncepcyjną trudnością związaną z pomyleniem fizycznej przyczynowości z logiczną, oraz
- c/ zwrócimy uwagę na trudność występującą przy przechodzeniu (a w praktyce szkolnej wręcz mieszaniu) od mechaniki punktu materialnego do mechaniki ciał rzeczywistych, deformowalnych, o różnych własnościach (ostro występuje to przy rozważaniu np. tarcia i reakcji więzów).

Trudności ze zrozumieniem pojęcia pracy mają uczniowie poddani prawidłowemu tokowi nauczania i nie tylko uczniowie bardzo słabi. W artykule podjęto próbę wyszukania typowych błędnych ścieżek myślowych uczniów, które utrudniają prawidłowe rozumienie pojęcia pracy.

Potocznie praca jest rozumiana jako wydatkowany wysiłek, wykonanie pewnej czynności fizycznej (czy „umysłowej”) w celu uzyskania pewnego **efektu**. Uczeń rozumuje: „nie ma żadnego efektu, to nie ma wykonanej pracy”.

Tak więc potoczne rozumienie wnosi dwa elementy potrzebne, by wykonana praca była niezerowa:

1. jakieś działanie – które dość łatwo uczeń później uściśla w obecność działającej siły,
2. **efekt** działania, wynik pracy. Po pierwszym szkolnym, paradygmatycznym przykładzie uczeń jest skłonny za efekt uważać **przesunięcie**,

Za efekt działania siły uczeń uznaje również nabytą (czy straconą) energię kinetyczną, nagrzanie, zniszczenie ciała i po prostu wysiłek, o ile to człowiek wykonuje pracę (prawidłowe intuicje, które należy wykorzystać).

Proszę zwrócić uwagę, że o ile działanie siły i wystąpienie przesunięcia są zawarte w formalnej definicji pracy – o tyle „inne skutki” działania siły – to są formy energii (druga strona równości). Następuje pomylenie przyczyny ze skutkiem, oraz *definiens* z *definiendis* (logiczne pomieszanie).

Z formalnej definicji pracy wynika, że niezerowa praca jest wykonana tylko gdy  $\vec{F} \neq 0$ , przesunięcie  $\vec{d} \neq 0$  oraz gdy siła nie jest prostopadła do przemieszczenia. Ta konieczność spełnienia trzech warunków wpada w konflikt z potocznymi intuicjami.

Uczniowie mają trudność ze zrozumieniem sensu zerowej pracy wykonanej przez wypadkową zerową siłę. Dla ucznia bowiem „zerowa praca” oznacza, że „nic się nie dzieje”, siła „nic nie robi”, a na ciało poruszające się ze stałą prędkością „działa przecież siła ciągu silnika”. Kolejna trudność wystąpi nieuchronnie w zrozumieniu sensu zerowej pracy, wykonanej przez siły potencjalne na drodze zamkniętej. Aby to zrozumieć, uczeń musi wcześniej zrozumieć sens ujemnej pracy.

Wielu z uczniów ma trudność ze zrozumieniem sensu ujemnej pracy – bowiem w tym przypadku znak minus nie pełni roli znanej uczniowi z poprzednich przykładów z fizyki.

W toku nauczania zwykle jako pierwszy (a więc niejako paradygmatyczny) rozważa się przykład działania stałej siły  $\vec{F}$ , przesuwałcej po prostej o odcinek  $d$  jakiegoś obiektu o masie  $m$ . Na początek rozważa się przypadek bez tarcia.

Przykład (głęboko zapadający w świadomość) jest dobrze przyjmowany przez uczniów, u których jeszcze bardzo często pokutuje przeświadczenie o sile jako sprawczyni ruchu. A więc siła przesunęła ciało o odcinek  $d$ . „Jest efekt” – „a więc jest i praca wykonana” – rozumie uczeń.

Im dłuższy odcinek tym większa praca, im większa siła, tym praca też większa. Nie ma konfliktu z dotychczasowymi schematami w fizyce i z potocznym sensem.

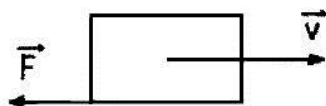
W tym miejscu niestety nie zwykło się od razu przypominać, że ciało również (przy przemieszczeniu) nabiera prędkości, rozpędza się.

Przypadek siły skierowanej pod kątem ostrym do przesunięcia również nie powoduje konfliktu, pod warunkiem, że uczeń jest obznajomiony z rozkładaniem wektorów na składowe albo z iloczynem skalarnym.

W tym przypadku dla ucznia jest naturalnym, że składowa prostopadła nie pracuje – nie jest ona sprawczynią ruchu, Trudność jednak występuje w przy-

padku rozważania ruchu jednostajnego po okręgu. Uczeń rozumie: „Tu siła prostopadła do toru jest siłą sprawczą ruchu – a więc powinna pracować.

Kłopoty koncepcyjne występują gdy pojawia się pytanie o pracę sił „które nie są sprawcami ruchu”. W większości przypadków jest to siła tarcia i siły



reakcji (np. przy niesieniu walizki). W rozważanym przypadku przedstawionym na poniższym rysunku zwykle mówi się uczniom: „siła tarcia przeciwna do kierunku ruchu wykonała ujemną pracę”.

Dla ucznia „ujemna praca” skojarzona jest więc (pierwszy, paradygmatyczny przykład) z siłą „przeszkadzającą” ruchowi, przeciwną do ruchu. Uczniowie przyjmują to jako konwencję z trudnością.

Trudność polega na tym, że dotychczasowe konwencje znaków „+” i „-” wielkości fizycznych miały dla ucznia przejrzyste znaczenie. Omawiane uprzednio przykłady to: temperatura, ładunek, współrzędne wektorów. Choć i w tych przypadkach, tak przecież różnych, uczniowie też mieli trudności koncepcyjne, które dają znać o sobie później np. w rozumieniu pojęcia ciepła i temperatury bezwzględnej. W przypadku definicji pracy uczeń zrazu nie rozumie celowości konwencji znaków. Nie widzi bowiem „znoszenia się” efektów pracy dodatniej i ujemnej, tak jak jest to dla ładunków dodatnich i ujemnych i ruchów w lewo i prawo.

W przypadku ruchu np. saneczek ze stałą prędkością, a więc wtedy gdy tarcie równoważy siłę „poruszającą” saneczki, uczeń nie akceptuje faktu zerowej pracy przy przesuwaniu sanek. Praca siły „poruszającej” i tarcia nie kasują się w umyśle ucznia, a nawet wręcz dodają.

„Przecież trudniej ciągnąć sanki, gdy jest większe tarcie”, argumentują uczniowie, „trzeba się więcej napracować”. Ta trudność koncepcyjna odbija się na zrozumieniu I zasady Newtona.

Uczeń intuicyjnie czuje, że zjawiska związane z efektami tarcia wykraczają poza mechanikę punktu materialnego.

Nauczyciel ma do pokonania niejako błędne koło: zrozumienie celowości definicji pracy i konwencji znaków przychodzi, gdy zrozumie się prawo zachowania energii, zarówno energii mechanicznej w układach z siłami potencjalnymi, jak i energii całkowitej, to jest I zasady termodynamiki, gdzie ciało jest już samo układem fizycznym. Z kolei niemożliwe jest zrozumienie sformalizowanego prawa zachowania energii bez rozumienia definicji pracy, z sensem ujemnej pracy.

Trudności o których wspomniano są trudnościami istotnymi, one są nie do uniknięcia. Można się starać tak ułożyć tok nauczania, by trudności te przeszły nie zauważone (niektórzy nauczyciele twierdzą, że im się to udaje). Wydaje się

jednak, że do dogłębnego zrozumienia jest nawet niezbędnym popadnięcie w dyskomfort niezrozumienia, ponieważ pobudza on ucznia do procesu, który Piaget nazywa adaptacją [8].

Różnorodność podejść w różnych podręcznikach świadczy o skali trudności. Wydaje się, że nie ma idealnego rozwiązania – niwelowanie jednej trudności, zwykle zwiększa inną. Nierozstrzygnięty jest problem, czy lepiej zaczynać klasycznie od mechaniki punktu materialnego i zasady zachowania energii mechanicznej, czy raczej rozpoczynać naukę od wprowadzenia energii (tak jak to czyni Feynman [50] i Falk i Herrmann [31] i prawa zachowania energii tak, by dopiero potem przejść do zachowania energii mechanicznej i sił potencjalnych.

Arons [37] proponuje w ogóle rozróżnianie pomiędzy pojęciem *pracy* występującej w pierwszej zasadzie termodynamiki oraz *pseudopracy*, występującej w klasycznym wzorze na przyrost energii kinetycznej spowodowany działaniem siły wypadkowej.

Polecamy Państwu wprowadzenie do pojęcia pracy i energii Arkadiusza Piekary. W *Fotonie* 17 (marzec 1993, s. 12), przedrukowaliśmy rozdział dziesiąty i jedenasty z książki „Nayiaśniejszemu y Naypotężniejszemu Panu” (PAX 1984) [51], w którym pan Feluś spełnia obietnicę daną Olesiovi i tłumaczy mu, co to jest praca, i mówi, że jest to bardzo, a bardzo ważne „pojęcie”, ale nie zdążył wyjaśnić dlaczego. Istnieją podręczniki, które próbują prowadzić ostrożnie ucznia poprzez wymienione przez nas trudności – dobrze jest jednak zdawać sobie z tych trudności sprawę.

Podsumowując:

Pojęcie pracy jest trudne, wymaga wielu przykładów starannie dobranych „do oswojenia”. Nawet uczniowie, którzy zaczęli rozróżniać potoczne pojęcie pracy i formalne naukowe, mają trudność ze zrozumieniem sensu ujemnej pracy i zerowej pracy (konieczny warunek: logiczny iloczyn trzech elementów). Wnioski wysuwano na podstawie obserwacji uczniów z I i V LO w Krakowie oraz LO w Rabce.

W artykule ograniczono się, poza nielicznymi wyjątkami, do pozycji w języku polskim, dostępnych w kraju.

## Literatura

- [1] Z. Gołąb-Meyer, *Wkład psychologii w rozwiązywanie problemów dydaktycznych*, *Foton* 43, Zeszyt dydaktyczny 1, (1996).
- [2] Z. Gołąb-Meyer, *Foton* 8, 9 (1992).
- [3] W. Florek, *Foton* 28, 20 (1994).
- [4] Z. Gołąb-Meyer, *Foton* 7, tłumaczenie z Newsletter GIREP, 10 (1992).
- [5] A.H. Piekara, *Nayiaśniejszemu y Naypotężniejszemu Panu*, PAX, (1884).
- [6] J. Piaget, *Mowa i myślenie dziecka*, PWN, Warszawa, (1992).

- 
- [7] J. Piaget, *Równoważenie struktur poznawczych*, PWN, Warszawa, (1975).
- [8] J. Piaget, B. Inhelder, *Od logiki dziecka do logiki młodzieży*, PWN, Warszawa, (1970).
- [9] D. Stachórska, *Prace Piageta a nauczanie fizyki*, *Fizyka w Szkole* Nr 3, 149 (1981).
- [10] L.S. Wygotski, *Myślenie i mowa*, PWN, (1989).
- [11] J.D. Novak, *Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*, Cornell University, Ithaca NY USA, vol. III, (1987).
- [12] Z. Gołąb-Meyer, *Strącanie nauki z piedestału*, *Foton* 20, 2 (1993).
- [13] G. Bachelard, *La formation l'esprit scientifique*, Paris, Vrin, (1938).
- [14] T. Kuhn, *Dwa bieguny*, PWN, W-wa, (1985).
- [15] Sierpińska, *Pojęcie przeszkody epistemologicznej w nauczaniu matematyki*, *Dydaktyka matematyki* 8, 103 (1987).
- [16] Z. Gołąb-Meyer, *Rola obserwacji, demonstracji i eksperymentowania w nauczaniu fizyki*, *Foton* 12, 8 (1992).
- [17] Z. Gołąb-Meyer, *O uczeniu na skróty*, *Foton* 35, 21 (1994).
- [18] Z. Gołąb-Meyer, *Zeszyty Naukowe, Problemy Dydaktyki Fizyki* 9, Uniwersytet Gdański, 45 (1995).
- [19] Z. Gołąb-Meyer, *Cosmology in propedeutic courses of science – missed opportunity*, In *GIREP 86 Conference, Cosmos – an Educational Challenge*, (1986).
- [20] również *Children Ideas in Science*, edited by R. Driver, E. Guesne, A. Tiberghien, Milton Keynes-Philadelphia, Open University Press, (1985).
- [21] D. Bohm, D.F. Peat, *Science, Order and Creativity*, Routledge, London, (1987).
- [22] D. Adamczewska-Królikowska, *Z praktyki szkolnej*, *Foton* 2, (1991).
- [23] Z. Gołąb-Meyer, *Thinking* 9, 43 (1991).
- [24] M. Smoluchowski, *Poradnik dla Samouków*, tom II, Michalski i S-ka, Warszawa (1917).
- [25] Z. Gołąb-Meyer, *Foton\**, 2 (1993).
- [26] H. Freudenthal, *Co znaczą struktury naukowe i struktura nauki w rozwoju poznawczym i w nauczaniu*, Z wykładu wygłoszonego na Naukowej Sesji WSP w Krakowie, tłum. S. Turnau, 333/M/84 (1984).
- [27] Z. Gołąb-Meyer, *Comments on teaching quantum physics in a secondary school*, In J. Pišut, A. Nogova, *Physics at Secondary School*, Institute of Physics EPRC, Bratislava, 67 (1984).
- [28] J. Ogborn, *Energia, zmiana i różnica*, GIREP ENERGY – Risk 1989, *Foton* 31, 10 (1994).
- [29] Kees Boeke, *The Universe in 40 Jumps*, The John Day Company, NY (1957), (4th edition).
- [30] Melvin Steinberg, et al., *Electricity Visualized*, The CASTLE Project, Roseville, California, Pasco Scientific, (1992).



- 
- [31] F. Herrmann, G. Falk, *Konzepte eines zeitgemässen Physikunterrichts*, Schrödel Verlag (1977–1982).
- [32] M. Ciosek, *Praca doktorska*, WSP, Kraków.
- [33] Z. Gołąb-Meyer, *Foton* 24, 3 (1993).
- [34] Z. Gołąb-Meyer, *Foton* 25, 13 (1994).
- [35] Z. Gołąb-Meyer, A. Batko-Łazarska, *Foton* 28, 16 (1994).
- [36] Z. Gołąb-Meyer, preprint TPJU 17/96.
- [37] A.B. Arons, *A Guide to introductory Physics Teaching*, John Wiley & Sons, NY, (1990).
- [38] Wywiad z W. Ginzburgiem przeprowadzony przez W. Siwińskiego, *Problemy*, 495, Oct. 1987.
- [39] Albert Einstein, *Zapiski autobiograficzne*, ZNAK, Kraków, (1996).
- [40] B. Southworth, G. Boixader, *Świat cząstek*, PAA 1996, tłum. z ang., wyd. CERN.
- [41] J. Piaget, *Psychologia i epistemologia*, PWN, W-wa, (1971).
- [42] Luty, *Doświadczenia z materią sypką w szkole*, praca dyplomowa, IFUJ, (1996).
- [43] K. Fiałkowski, informacje prywatne o wynikach egzaminu na Uniwersytecie Jagiellońskim ze *Wstępu do fizyki cząstek*.
- [44] L. Viennot, *Spontanous reasoning in elementary dynamics*, European Journal of Science Education **1**, 205 (1979).
- [45] L. Viennot, *Czy akcje i reakcje są naprawdę równe i przeciwnie skierowane?*, *Fizyka w szkole* **3**, 183 (1987), (tłum. franc.).
- [46] Nemeth, *Wprowadzanie pojęcia względności w szkole podstawowej*, *Foton* 42, 33 (1996).
- [47] R. Karplus, *Education and Formal Thought – A Modest Proposal*, w *New Direction in Piagetian Theory & Practice*, s. 285, Sigel, Brodziński, Gallinkoff (Redaktorzy), Lawrence Erlbaum. Assoc. Hillsdale, New Jersey, 1981.
- [48] *Układy odniesienia, od Kopernika do Einsteina*, GIREP – Toruń 1991, UMK Toruń 1992, pod redakcją M. Staszela, J. Turło, M. Berndt.
- [49] *Bibliography Students' Alternative Frameworks and science Education*, opracowane przez H. Pfundt i R. Duita, IPN Reports in Brief, 3 Edition, (1991).
- [50] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M.C. Sanders, *Feynmana wykłady z fizyki*, PWN, W-wa (1970); także *Co to jest nauka*, R.P. Feynman, *Fizyka w szkole*, 167 (1989).
- [51] *Jak Piekara wprowadza pojęcie pracy i energii*, *Foton* 17, 11 (1993).



**OFICYNA EDUKACYJNA  
KRZYSZTOF PAZDRO**

**00-345 WARSZAWA  
ul. Drewniana 5  
tel. 635 51 31 w. 225**

---

---

*Poszukuję fizyków, autorów podręczników szkolnych  
dla uczniów szkół podstawowych i średnich,  
zeszytów ćwiczeń, zbiorów zadań,  
książek popularnonaukowych,  
hasel do słowników i encyklopedii.*

*Gwarantuję wysokie honoraria,  
odpowiedni poziom edytorski,  
możliwość konsultacji ze specjalistami,  
ale mam też duże wymagania:  
przede wszystkim dydaktyczne i językowe,  
a także merytoryczne.*

*Krzysztof Pazdro*