Z górki na pazurki, czyli jak interaktywnie uczyć o energii mechanicznej

Równia pochyła to taka dydaktyczna tortura dla licealistów (i studentów również). Jedna siła to sinus, druga cosinus, ale niedokładnie wiadomo, która jest która. Oczywiście, żartujemy: jeśli trzeba, to wiemy. Ale czy to stanowi główny przekaz dydaktyczny, który możemy wypracować korzystając z równi pochyłej Galileusza? Odpowiadamy w artykule: opisuje on pierwszą z naszych wystaw dydaktycznych na UMK, z 2007 roku, noszącą nazwę „Z górki na pazurki". [1]

Grzegorz **Karwasz**, Andrzej **Karbowski**

„Fizyka zeszła z nieba na ziemię

po równi pochyłej Galileusza", napisał w „Fizyce dla dociekliwych" (Oxford, 1960) E. M. Rogers. Rzeczywiście, dzięki równi udało się nadać precyzję matematyczną ruchom, które wcześniej, nawet u Kopernika, były opisane jedynie słownie. „Ale to ogólne stwierdzenie [o ruchu przyspieszonym] pozostaje bezużyteczne, jeżeli nie wiemy, w jakim porządku odbywa się ten przyrost prędkości. I tak, jeśli w pierwszym momencie kula przebędzie jedną długość w lufie, to w drugim momencie – trzy długości, później – pięć, i tak w porządku kolejnych liczb nieparzystych", parafrazując nieco przydługie i niegramatyczne po włosku zdanie Galileusza z traktatu „O dwóch największych systemach świata: Ptolemeusza i Kopernika".

Jak wyjaśniliśmy w poprzednim, nieco podobnym artykule [2], odpowiada to znanemu wzorowi

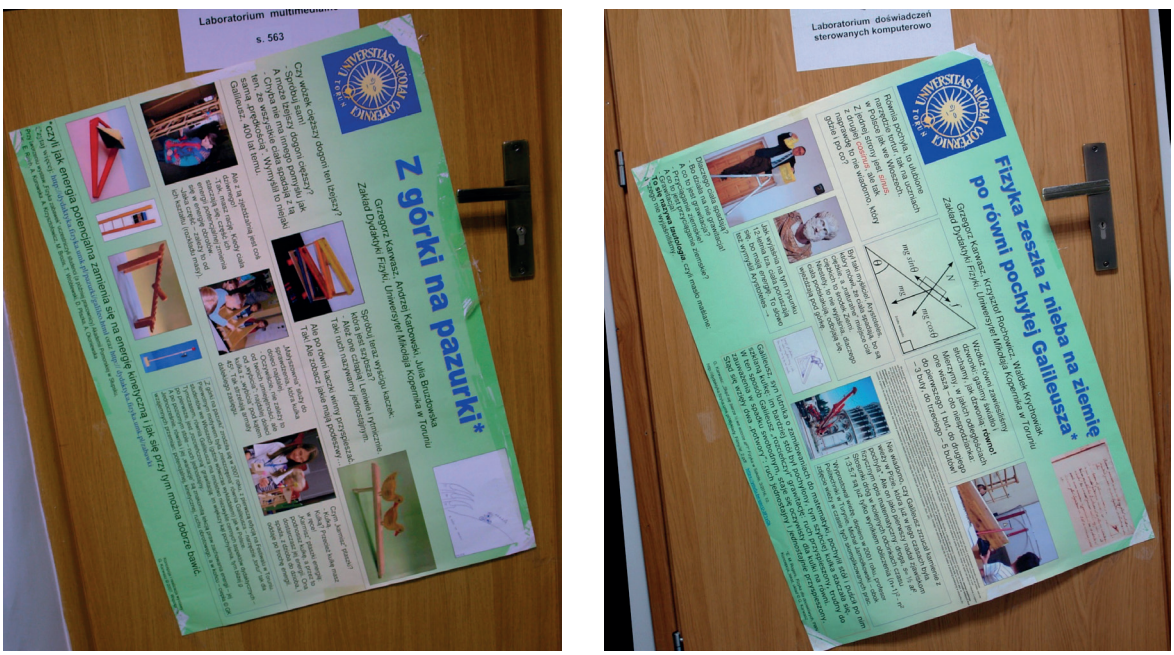
$$s\,(t) = \tfrac{1}{2}\,at^2$$

(użytych symboli w erze Internetu nie musimy precyzować).

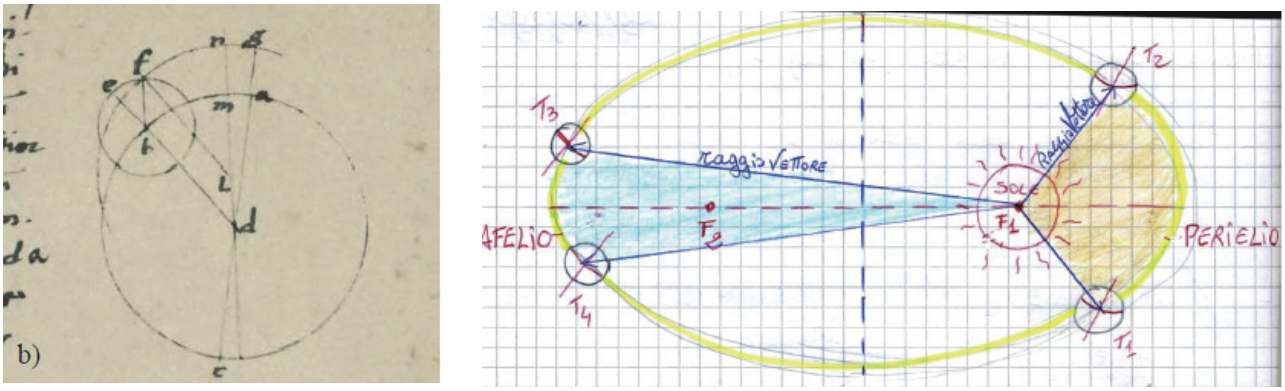
Zgodnie z zasadą dydaktyczną neo-realizmu [3], to co powiedzieliśmy, musimy natychmiast pokazać. Służy do tego długa belka z dzwonkami zawieszonymi we wzajemnych odległościach 1, 3, 5, 7, 9. Belkę taką zobaczyliśmy (GK) w Trydencie, ale okazało się, że jeszcze dłuższa czekała w Toruniu: brakowało jedynie dzwonków (a te się znalazły na rynku staroci w Berlinie), zob. foto 1 w artykule [2].

Z kolei zgodnie z drugą naszą zasadą dydaktyczną, nazwaną hyper-konstruktywizmem [3] nie pokazujemy tej belki „ot-tak-sobie" ale konstruujemy zdziwienie widzów, gasząc światło w auli i zadając pytanie: „Widzieliście belkę z dzwonkami? Teraz spuścimy po niej kulkę." Spuszczamy kulkę, wszyscy słyszą dzwonienie w równych odstępach czasu: „W jakich odległościach są dzwonki?". Jak tylko pojawi się odpowiedź „W równych", natychmiast, jak w filmie z szybką akcją, podejmujemy: „Tak! prawda, w równych. Sprawdźmy jeszcze raz!". Ale teraz zapalamy światło i zanim widzowie przyjrzą się uważnie belce, spuszczamy kulkę jeszcze raz. Sprawna dydaktyka to również emocje, na przykład – konsternacja.

Po czym komentujemy: „Ponieważ fizyka to również nauka matematyczna, teraz zmierzmy te odległości." Tu,



Ryc. 1. Drzwi do dwóch autorskich pracowni Katedry Dydaktyki Fizyki UMK: multimedialnej i doświadczeń sterowanych komputerem. Na nich dwa plakaty tej samej wystawy, „Z górki na pazurki" – jeden na poziomie podstawowym, drugi na poziomie licealnym. Plakaty, po wielu edycjach wystaw, są nieco sfatygowane.



Rys. 2. (a) Poszukiwanie elips przez Kopernika. (b) II prawo Keplera w interpretacji uczennicy gimnazjum we Włoszech, Porto Sant'Elpidio, autorki nie udało się odszukać [5].

znów w myśl hyper-konstruktywizmu, tym razem społecznego, dokonujemy podziału ról: jeden uczeń mierzy (wzrost ucznia około 120 cm, wówczas spodziewany rozmiar buta 27 cm), cała widownia liczy, a protokolant zapisuje na tablicy. Odpowiednie zdjęcia przedstawiliśmy w artykule [2] w 2016 roku.

Do wzoru na całkowitą drogę przebytą od początku ruchu do końca - jeszcze wrócimy.

Jedna belka wiosny nie czyni

Oczywiście, belka Galileusza jest jedynie punktem wyjściowym do sekwencji konstruowania narracji dydaktycznej. Reguła kolejnych liczb nieparzystych, jak to już pokazaliśmy [2] jest jedynie „przypadłością" arytmetyczną wynikającą z odejmowania $(n + 1)^2 - n^2$. Z kolei wzór $s(t) = ½\, at^2$ jest wynikiem całkowania tzw. równania ruchu (czyli równania wynikającego z II prawa dynamiki Newtona i definicji ruchu jednostajnie przyspieszonego

$$a = \mathrm{d}^2 s / \mathrm{d}^2 t^2 = \text{const}$$

A z kolei równanie bardziej złożone

$$s\,(t) = ½\, at^2 + v_0 t + s_0$$

zawiera dwie stałe całkowania (drogę początkową s_0 i prędkość początkową v_0). Jak wprowadzić te stałe, bez korzystania z pojęcia całki pokazujemy w naszym „Toruńskim po-ręczniku" do (byłej) klasy I gimnazjum [4].

Konstruując iteratywną narrację (albo interaktywny „tunel dydaktyczny" [1]) musimy, w ukryty nieco sposób, odpowiedzieć na kolejne pytania, wynikające z definicji równi pochyłej i ruchu ciała na niej.

Dwa stoły

Geniusz Galileusza jako doświadczalnika (był również znakomity astronomem i filozofem przyrody, twórcą współczesnej metody naukowej, jak go określa angielskojęzyczna Wikipedia) polega na *modelowaniu* zjawisk. Dwa rodzaje ruchu, jednostajny (przymiotnik) i jednostajnie (przysłówek) przyspieszony, o jakich, trochę znienacka. uczymy na początku kursu fizyki, są właśnie tego rodzaju modelami. Ba! cała nauka to modele – w odróżnieniu od zwykłego, fenomenologicznego oglądania świata.

Sposób myślenia wywodzi się jeszcze od Arystotelesa, który ruchy dzielił na dwa rodzaje: prostoliniowe i koliste (zob. np. *Fizyka*, 248b). Zarówno model Ptolemeusza jak Kopernika nosił dziedzictwo tej klasyfikacji. U pierwszego z nich był to system kół zębatych, jak w mechanizmie z Antykithiry (mają one jakieś swoje nazwy, ale ich celowo nie pamiętamy), u drugiego wyraźne trudności z opisem ruchu planet, ryc. 2a. Dziś wiemy, że orbity planet są elipsami, rys. 2b, ale odrzucenie (pięknego) modelu zegara wymagało nie lada wysiłku.

Galileusz, być może zrzucał kamienie z Krzywej Wieży w Pizie, gdzie za młodu wykładał matematykę, ale zauważenie, że przyrosty prędkości pozostają stałe w tego rodzaju ruchu nie jest proste. I znów proponujemy doświadczenie *ad hoc*, wręcz banalne, ale z zastosowaniem metodologii fizyki, czyli abstrakcji. Puszczamy metalową kulkę (o średnicy 2-3 cm) po poziomym (a raczej prawie poziomym) stole a uczniowie (z zamkniętymi oczyma) *słuchają*, jaki jest to rodzaj ruchu. Po czym pochylamy stół i słuchamy ruchu jednostajnie przyspieszonego. Jeden uczeń mówi „start" i łapie kulkę (oraz sprawdza, czy nie oszukujemy). Podział ról, jak w prawdziwym eksperymencie fizycznym, nawet w CERN. W konstruktywistycznym procesie dydaktycznym istotne jest rozwijanie wszystkich kompetencji ucznia, dziś, nieco bez zrozumienia, nazywanych „miękkimi". Umiejętność werbalizacji zjawiska nie do końca jasnego („Czym się różnią te dwa rodzaje ruchu?") to wymuszenie na uczniach procesu wnioskowania, różnicowania, uogólniania.

Nie jest istotna sama nazwa ruchu, bo to jest znów kwestia umowy: równy, rytmiczny, równomierny, miarowy czy jednostajny. Tocząca się kulka to pierwszy eksperyment, kolejny - to nasze miarowe człapanie po klasie, i wreszcie kaczki schodzące ruchem jednostajnym po równi (istotne jest tarcie, które zapewnia dyssypację energii i w efekcie ruch jednostajny, a nie przyspieszony, jak to byłoby dla staczającej się kulki), rys. 3a. Oczywiście, ruch jednostajny (a nie ślizganie się kaczki lub jej przewracanie) uzyskujemy tylko przy zachowaniu szczegółów konstrukcyjnych: właściwego pochylenia równi, szorstkich (pokrytych papierem ściernym) podeszw kaczki, odpowiedniego zakresu ruchu jej nóg, rozłożenia masy itd.

Podobną dyssypację energii, a przez to ruch jednostajny w dużym zakresie warunków doświadczalnych, obserwujemy w zsuwaniu się magnesu neodymowego po grubej miedziane sztabce albo w ruchu pęcherzyka powie-

Ryc. 3. (a) Kaczki schodzące po równi ruchem jednostajnym (a nie przyspieszonym, jak tego się spodziewamy) fascynują eksperymentatora, niezależnie od jego wieku i kraju. (b) Kolejne „kultowe" doświadczenie autorów: „Który wózek, cięższy czy lżejszy, zjedzie szybciej po tej równi?" Gunsan, Republika Korei, 2016, wykład GK, foto M. Karwasz.

trza w rurce z olejem. Siła oporu (wynikająca z generacji prądów wirowych, albo lepkości) są w tych doświadczeniach proporcjonalne do prędkości ruchu, co zapewnia, dla określonego pochylenia, jednostajność ruchu. Dla dorosłych dodamy, że dobrym przybliżeniem ruchu jednostajnego jest też wznoszenie się rosnącego pęcherzyka CO_2 w szklance piwa. (Podobno, z powodu specyficznych warunków lepkości i wzrastania takiego pęcherzyka, taki ruch jest lepszym przybliżeniem jednostajnego niż bąbelki w wodzie gazowej lub lampce szampana.)

Konstruowanie koncepcji dydaktycznych

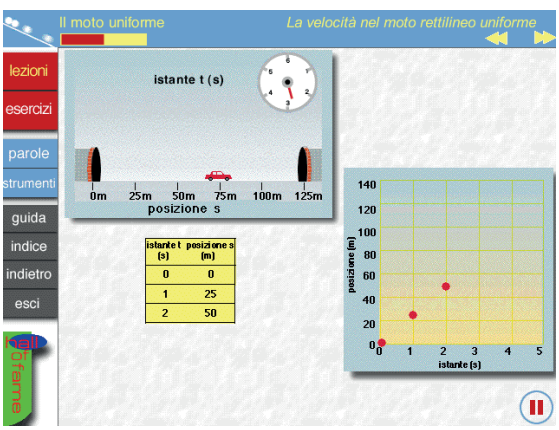
Jak powiedzieliśmy, nauka zajmuje się modelami. Dzisiaj, w dobie tzw. kognitywistyki, dodalibyśmy: dydaktyka zajmuje się konstruowaniem modeli świata, w umyśle młodego człowieka. Dydaktyka to więc konstrukcja, a nie powtórzenie wiedzy czy jej odtwarzanie. A „podręczne" doświadczenia, dostosowane do określonego momentu dydaktycznego (tj. zaistniałej trudności lub wątpliwości poznawczej) są integralną częścią tego konstruowania.

Ale nie jest to bynajmniej: „zobaczyłem ciekawe doświadczenie, więc z niego skorzystam". W ten sposób nie tworzymy nowych jakości, a jedynie je biernie odtwarzamy.

Są dwa sposoby na wykorzystanie eksponatów/ doświadczeń jako integralnego elementu narracji dydaktycznej. Pierwszy z nich to szukanie obiektów do zagadnienia, drugi – odwrotnie: szukanie różnych zastosowań dla tego samego obiektu. W pierwszej metodologii pytamy: „Jak mogę pokazać ruch jednostajny?" W dzisiejszych czasach pokusą jest skorzystanie z animacji komputerowej, jak w znakomitym, wielokrotnie przez nas cytowanym, podręczniku multimedialnym „Fisica Interattiva" Ugo Amaldiego [6] lub symulacjach z Uniwersytetu w Colorado, zob. ryc. 4.

Ale animacja to niezupełnie fizyka: to nie obiekt fizyczny - o swojej masie, kolorze, fakturze porusza się, ale piksele w pamięci komputera. Wspomniany magnes neodymowy czy pęcherzyk powietrza są znacznie bardziej pouczające: w rzeczywistym eksperymencie zawsze może się coś „nie udać", wzbudzając radość uczniów. A raczej nie „nie udać", ale przebiec w inny, niespodziewany sposób, pokazując inne niż podręcznikowe aspekty realnego świata.

Znakomity rozwiązaniem, niestety ciągle za drogim dla budżetu polskich szkół są systemy pomiarowe z wykorzystaniem czujników podłączonych do komputera, zob. rys. 5. Wózki o małych tarciu i czujniki ultradźwiękowe odległości, sprzężone z komputerem natychmiast pokazują zależność od czasu tak położenia *s* jak prędkości (przez obliczanie numeryczne pochodnej z *s*) a poprzez drugą pochodną – również przyspieszenia. Oczywiście, dla pokazania ruchu jednostajnego szynę należy nieco pochylić, dla zrekompensowania tarcia dynamicznego).



Ryc. 4. Multimedia w dydaktyce fizyki. (a) model ruchu jednostajnego: samochód na odcinku drogi między tunelami, pomiar położenia i czasu, tabelka pomiarów i punkty pomiarowe na wykresie; wszystko w sekwencji animacji [6]. (b) W warunkach oporu powietrza, wystrzelony z armaty samochód doleci dalej niż fortepian. phet.colorado.edu.

Ryc. 5. Dwie (sympatyczne) nauczycielki badają ruch jednostajny i przyspieszony za pomocą komputerowego systemu pomiarowego Pasco. Wózek (czerwony) jest wyposażony w (czarny) klosz do badania względności ruchów: sprężyna w środku klosza wyrzuca pionowo w górę małą kulkę. Jeśli wózek stoi lub porusza się ruchem jednostajnym, kulka spada do klosza. Nie jest tak, jeśli wózek przyspiesza. Laboratoria Katedry Dydaktyki Fizyki UMK wyposażone są w 15 stanowisk Pasco. Foto AK, pozuje GK. UMK 2022.

Dydaktyka to idea, a nie obiekt

Co zrobić, kiedy nie mamy długiej belki, dzwonków i dużej metalowej kuli, ani systemu Pasco? W tradycyjnej dydaktyce szkolnej była tzw. „spadkownica", tzn. urządzenie, które pozwala na pomiar czasu spadku, poprzez sumowanie serii kilku przebiegów. A jeśli nie mamy spadkownicy? Bardzo proste doświadczenie z długim sznurkiem i serią ciężkich nakrętek zawiązanych w „kolejnych, nieparzystych" odległościach. A w czasach multimediów i komórkowych kamer cyfrowych możemy obejrzeć odpowiednie filmy, ryc. 6.

„Z górki na pazurki"

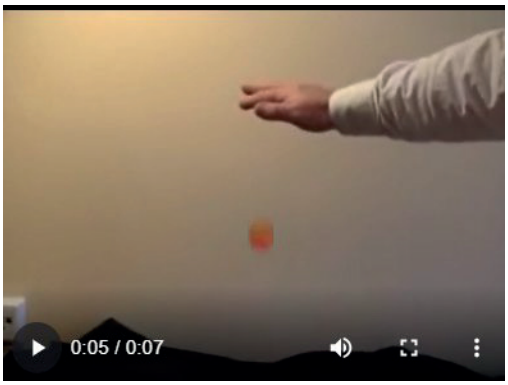
Wystawa tematyczna o przydługim tytule „Z górki na pazurki, czyli energia potencjalna zamienia się na energię kinetyczną i jak można się przy tym dobrze bawić" zrodziła się w 2007 roku jako odpowiedź na wspomniany we wstępie problem dydaktyczny. Nachylona równia Galileusza miała zasadnicze znaczenie dla narodzin fizyki. Jej wartość polega na tym, że jest to najprostsze sprawdzenie praw ruchu przyspieszonego (w tym swobodnego spadania): punkt wyjścia do praw Newtona. Równia to genialny sposób na „manewrowanie" wartością współczynnika przyspieszania ziemskiego – od zera (na poziomej równi) aż do *g* dla równi ustawionej w pionie.

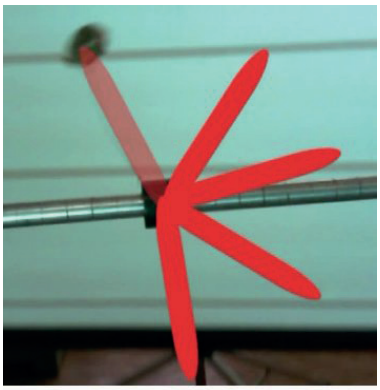
Równia stała się więc punktem wyjścia dla całego dydaktycznego „tunelu": sekwencyjnego przedstawiania różnych aspektów kinematyki. Ale jak pokazać, że ruch przyspieszony, czyli że rośnie prędkość? Nawet w systemie komputerowym z ryc. 5 prędkość nie jest mierzona bezpośrednio. Pokaz rosnącej prędkości pokazaliśmy za pomocą dziecięcej zabawki do popychania, z kolorowymi paciorkami (ryc. 7). Im szybciej posuwa się zabawka, tym bardziej odchylają się paciorki (jak w regulatorze Watta prędkości maszyny parowej).

W dyskusji o wzajemnych przemianach energii – potencjalnej w kinetyczną i kinetycznej w potencjalną nie może zabraknąć wyjaśnienia, co się dzieje „w końcu" z energią mechaniczną. Wiemy dobrze, że zamienia się w ciepło. Ale jak to pokazać? I tak, na ostatniej w tunelu równi pochyłej, chropowatej desce, zjeżdżał ciężki (około 8 kg) ołowiany klocek (sześcian). Oczywiście, ołów zbyt dobrze przewodzi ciepło, aby zauważyć, że się nagrzał. Dlatego klocek miał pod spodek dwie drewniane płozy, a podeszwy z papieru ściernego. Dwa-trzy przejazdy klocka i płozy są wyraźnie cieplejsze, zob. film [7]. Fizyka to nauka namacalna!

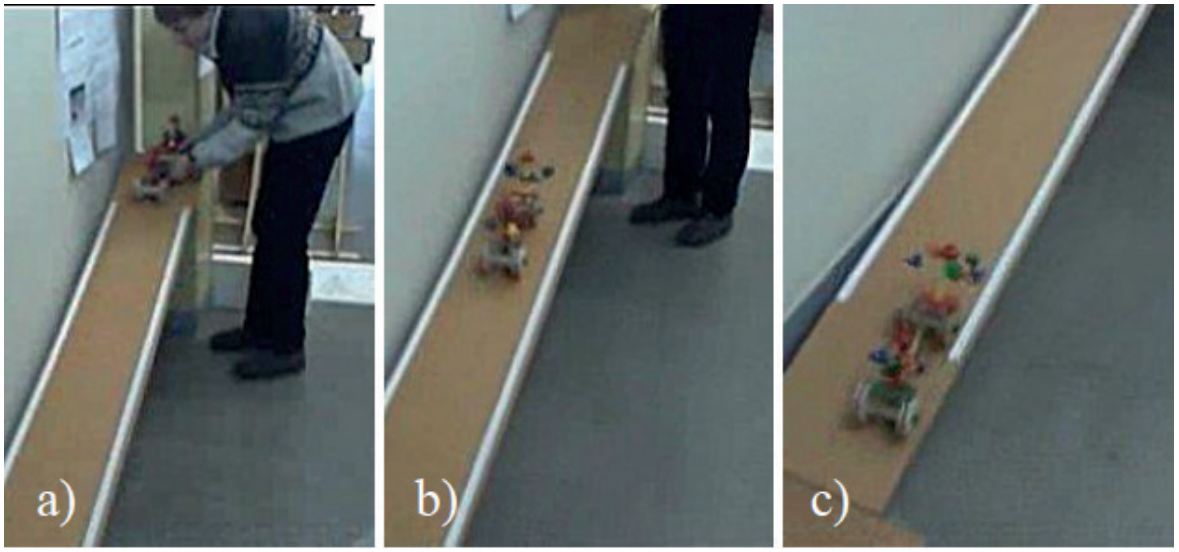
Mądrej głowie dość dwie słowie

Wystawy, muzea, galerie są przeładowane szczegółowymi opisami eksponatów – jak gdyby autor chciał opisać wszystko co wie. Po dziesiątym eksponacie widz jest kompletnie znużony. W tej wystawie zażartowaliśmy sobie z tego rodzaju „opisywaczy". Wszystkie eksponaty miały ten sam opis: "Z górki na pazurki", zob. ryc. 8. A dopiero druga część zdania mówiła dokładniej: „Ale krokami" – opisując schodzące kaczki. Szanując widza szukającego wiedzy, na dole tych super-lakonicznych opisów były podaliśmy szczegółowe wyjaśnienia fizyczne i dydaktyczne. O kaczkach piszemy tak:





Ryc.6. Filmowe tricki w nauczaniu kinematyki. (a) „Czy piłka może sama podskoczyć?" Seria trzech filmów, a w zasadzie jeden film, ale w sekwencji: odwrócony w czasie, odwrócony i spowolniony, przedstawiony poprawnie, tj. bez odwrócenia. Ograniczona rozdzielczość czasowa kamery umożliwia obserwację „skokami": przyspieszenie w spadku swobodnym jest tak duże, że nie zauważamy „gołym okiem" rosnących odległości. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/171
(b) „Jak zachowuje się wahadło w spadającej windzie" – pyta po wykładzie licealistka w Gunsan (2016). Odpowiadamy filmem: kręci się jednostajnie po okręgu, jak przy braku grawitacji. Jednocześnie, razem ze swoją ramką, wahadło spada ruchem jednostajnie przyspieszonym. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/591
Idea i filmy: GK i mgr Krzysztof Służewski, ZDF UMK.



Ryc. 7. Eksponat ilustrujący przyrost prędkości ciała zjeżdżającego po równi pochyłej: wózek z koralikami. Występuje mgr Przemek Miszta, ZDF UMK. Źródło [7] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/pazurki/filmy/z_gorki_wozek_z_karuzelami.wmv

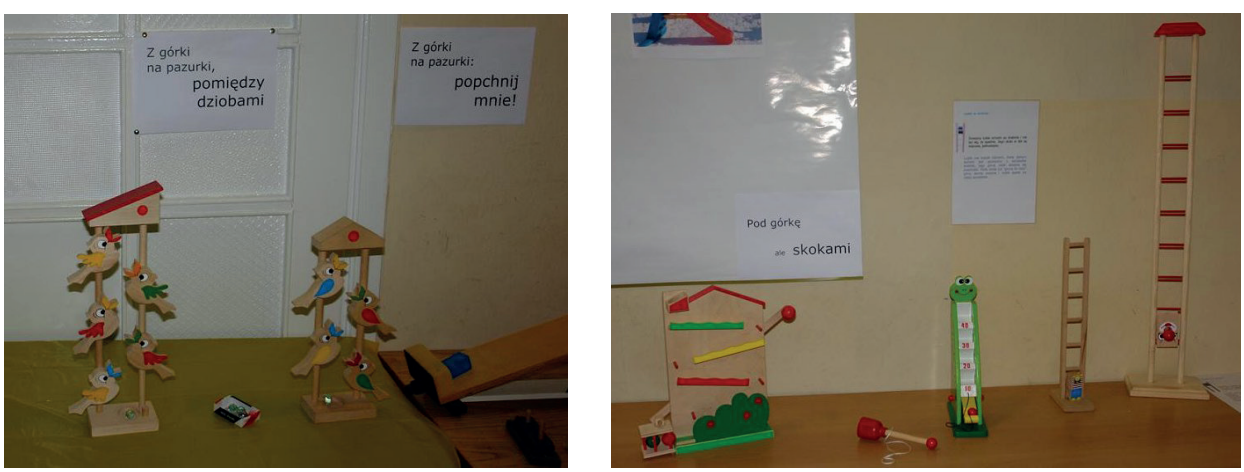
Tarcie (statyczne) modyfikuje ruch: nie jest to zsuwanie się ruchem przyspieszonym, ale schodzenie. Równowaga między składową siły ciężkości powodującą ruch a siłami dyssypacyjnymi (tarcia) powoduje, że ruch jest jednostajny. Nachylenie równi nie może być ani zbyt duże, ani zbyt małe. W przeciwnym razie zwierzaki zaczynają się zsuwać lub przewracają (w pierwszym przypadku) albo zatrzymują się (w przypadku zbyt małego nachylenia równi). Jeśli z kolei siłą tarcie jest „niewłaściwa" – zbyt duża (papier ścierny pod stopą) lub zbyt mała (równia lakierowana), to zabawka też nie działa.

Całość wystawy to nie był zbiór obiektów, ale ukierunkowana narracja, według zagadnień fizycznych i rosnącego stopnia trudności. I tak, za zjeżdżalnią z wózkami, czyli po pokazaniu, że wszystkie ciała spadają/ zjeżdżają po równi z tą samą „prędkością" (celowo poświęcamy dokładność naukowa na rzecz poglądowości języka) stoi równia z krążkami o różnych momentach bezwładności. Oczywiście, krążek o najmniejszym momencie bezwładności jest „najszybszy": najmniejsza część jego całkowitej energii kinetycznej przypada na energię ruchu obrotowego, zob. foto w [2].

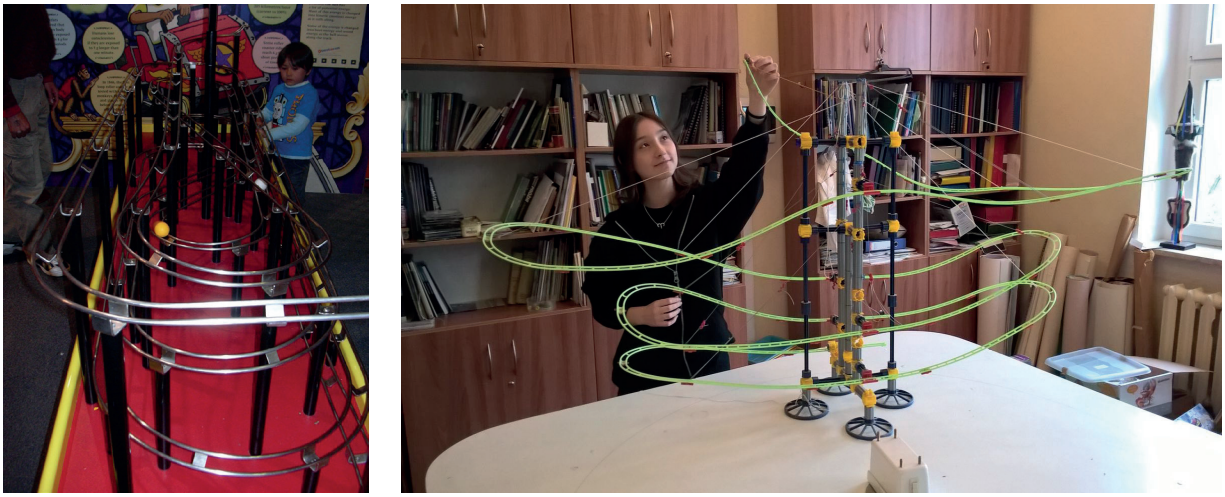
Zabawka z ptaszkami przekazującymi sobie dziobkami energię (nie kulkę, bo ta nie znika), ryc. 8a, wymaga eksponatu komplementarnego – żabki na drabince, ryc. 8b. Im większą energię kinetyczną uzyska kulka, tym na wyższą półkę wpadnie: znaleźliśmy (w Kaiserslautern) drewniany przelicznik energii kinetycznej na potencjalną.

Oczywiście, nie tylko nas fascynują obiekty zjeżdżające, zsuwające się, zawracające w górę (jak yo-yo, zwane też wahadłem Maxwella). Różnego rodzaju zjeżdżalnie są też „żelaznym" punktem we wszystkich centrach nauki. Przykład ze stolicy Australii pokazujemy na ryc. 9a.

Obiekty na wystawie umieszczono w odpowiedniej kolejności, aby wprowadzić różne aspekty kinematyki, ale z rosnącym stopniem trudności ich zrozumienia. Jasnym,



Ryc. 8. Dwa komplementarne stoły w temacie przemian energii mechanicznej. (a) Podnosząc kulkę do wysokości daszku karmnika dostarczamy energii potencjalnej. Krok po kroku ta energia zamienia się w ruch poszczególnych ptaszków. Po prawej stronie eksponat „Popchnij mnie!" – klocek na równi tak pochylonej, aby zsuwał się dopiero po popchnięciu, dla ilustracji różnicy między współczynnikiem tarcia statycznego i dynamicznego. (b) Dwie drabinki z „kominiarzami" – idea podobna do „karmnika ptaszków" oraz żaba-wrzutka, ilustrująca przelicznik energii kinetycznej na potencjalną. Eksponat po lewej, z Paryża, to dźwignia-wrzutka kulki do wielopoziomowej zjeżdżalni, eksponat w środku – gra z Japonii. Idea, eksponaty, opisy GK, realizacja ZDF UMK 2007.



Ryc. 9. Funkcja zabawowa w dydaktyce: „zjeżdżalnie" przyciągają uwagę we wszystkich centrach nauki. (a) Questacom, Canberra, Australia, foto Maria Karwasz, (b) biuro GK na UMK, pozuje Natalia Wyborska, eksponat GK, foto AK.

choć ukrytym celem dydaktycznym było nauczenie praw ruchu jednostajnego i przyspieszonego oraz trzech zasad zachowania energii, pędu i momentu pędu. W sumie zebraliśmy około 50 obiektów.

Trzy funkcje eksponatu

W pracy [8] zdefiniowaliśmy trzy funkcje eksponatu: dydaktyczną, zabawową i naukową. Funkcje dydaktyczne w temacie własności ruchu przyspieszonego i przemian energii wyjaśniliśmy już w miarę dokładnie. Oczywiście, nie mogło zabraknąć funkcji zabawowej: ilość eksponatów była wystarczająca, aby każdy uczeń w szkolnej klasie („kwantowaliśmy" wejścia grup) znalazł dla siebie wolny eksponat, ryc. 10a. A na dywanie w pokoju profesora rozłożono tory wyścigowe dla najmłodszych, ryc. 10b.

Ostatni eksperyment – trzy wózki i dwie szyny Pasco, jedna na drugiej, posłużył do pokazania względności ruchu, czyli kluczowego przejścia od fizyki Galileusza do fizyki Einsteina. Wykraczamy poza zwykłą zabawę i stawiamy ważne pytania naukowe, aby pobudzić powystawową refleksję zwiedzającego. Jego samodzielna aktywność dopełnia cele, czyli naszą dydaktykę. Jak powiedział polski dydaktyk, Z. Pietrasiński: „Myślenie jest warunkiem uczenia się, ale jest też najważniejszym wynikiem".

O ile sama wystawa jest unikalna, to eksponaty są powszechnie obecne w różnych sklepikach z zabawkami. Istotna jest koncepcja: obiekt podporządkowany dydaktycznej idei. Uczymy myślenia, fizyka jest tylko pretekstem.

[1] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/pazurki/galileo.html.
[2] G. Karwasz, Fizyka w Szkole, 3/2016, str. 10.
[3] G. Karwasz, K. Wyborska, Education Sciences, 13 (2023) 195.
[4] G. Karwasz i in. Toruński podręcznik do fizyki. Gimnazjum I klasa. Mechanika, Wyd. Nauk. UMK, 2010
[5] G. Karwasz, Toruński po-ręcznik do fizyki. Fizyka współczesna, Wyd. Nauk. UMK, 2020.
[6] U. Amaldi, F. Tibione, Fisica interattica, CD-Rom, Zanichelli, Bologna, 1998.
[7] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/pazurki/filmy/z_gorki_coraz_cieplej.wmv
[8] G. Karwasz, J. Kruk, Idee i implementacje dydaktyki interaktywnej. Wyd. Nauk. UMK, 2012.

Ryc. 10. Wystawa interaktywna „Z górki na pazurki" zorganizowana w dość brzydkim korytarzu w Instytucie Fizyki UMK, kwiecień 2007. Obiekty ślizgające się, spadające, staczające się w dół ułożone są w kolejności rosnącej trudności. (a) Jak widać na zdjęciu, dzieci nie tylko zrozumiały eksperymenty, ale także wymieniły się wyjaśnieniami. (b) osobny pokój zarezerwowano dla dzieci w wieku przedszkolnym: sama zabawa (ale z nowymi zadaniami) to także dydaktyka – pobudza kreatywność, aktywne uczestnictwo, odpowiednią a doraźną współpracę w grupie itp. Koncepcje, eksponaty, opisy obiektów GK, współpraca ZDF UMK. Zdjęcia: K. Służewski.