

ROZDZIAŁ CZWARTY

Eksponaty i metodologie

4.1. Komplementarne funkcje poznawcze eksponatu

Ogólne aspekty pedagogiczne dydaktyki interaktywnej omówiliśmy w poprzednich rozdziałach. W tym rozdziale przedstawimy kilka aspektów merytorycznych wystaw z fizyki. Realizację trzech funkcji poznawczych najłatwiej prześledzić na przykładach prostych eksponatów, wykorzystywanych przez autora tak na wystawach interaktywnych, jak i na wykładach. Wiele z tych eksponatów należy do kolekcji autora (realnej i wirtualnej) „Fizyka zabawek”¹ lub było projektowanych przez autora dla celów wystaw dydaktycznych i wykładów interaktywnych na różnym poziomie nauczania². O ile eksponaty opisane można spotkać w wielu centrach nauki, nie ma w tych centrach, obleganych przez zwiedzających, miejsca na pogłębienie różnorodności dydaktycznej określonego eksponatu. Poniżej omówimy kilka eksponatów i ich możliwe funkcje – dydaktyczne, ludyczne i naukowe.

Przykład 1. Lejek grawitacyjny

Zacznijmy od lejka grawitacyjnego obecnego nie tylko w wielu centrach nauki ale również np. na lotnisku w Stansted, gdzie służy do zbierania monet na cele charytatywne od osób opuszczających terytorium Wielkiej Brytanii, zob. fot. 4.1. Działanie lejka jest bardzo proste – wpuszczona moneta lub kulka kręci się na obwodzie lejka i stopniowo zbliża się do jego środka, coraz bardziej przyspieszając.

Na lotnisku w Stansted³ lejek ma średnicę około 80 cm, stoi na niskim postumencie stanowiącym skarbonkę, jest eksponatem wyprodukowanym przemysłowo. Monety są wpuszczane przez otwór w plastikowej przezroczystej pokrywie. Dla podkreślenia aspektu widowiskowego wewnątrz lejka jest namalowana jednokolorowa spirala zbiegająca się ku jego środkowi. Podobny lejek w Spectrum w Berlinie, umiejscowiony przy wejściu na wystawy, ma górną średnicę około półtora metra, a spadająca kulka toczy się prawie przez minutę. We wszystkich przypadkach funkcja ludyczna, przykucia uwagi przechodnia lub widza, jest znakomicie spełniona. Prześledźmy po kolei wszystkie trzy funkcje poznawcze tego eksponatu.



Fot. 4.1. Różne funkcje takiego samego eksponatu: **a)** ludyczny (i skarbonki) w hali odlotów lotniska w Stansted; **b)** dydaktyczny: profesor fizyki wyjaśnia zasadę działania lejka wnukom, (wystawa autora „On the Track of Modern Physics” na Uniwersytecie Gdańskim, maj 2006); **c)** naukowy: ruch kulki w lejku przypomina eliptyczny ruch planet dookoła Słońca (wystawa „Spectrum” w Deutsches Museum w Berlinie, fot. GK)

¹ G. Karwasz i in., *Fizyka zabawek*, <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki> (30.12.2011); G. Karwasz, A. Kamińska, *Physics and Toys*, <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1> (30.12.2011).

² Zob. G. Karwasz, *Feeding and fishing, czyli o popularyzacji i o rekrutacji*, „Głos Uczelni”, nr 6(292)/2010, s. 12, UMK Toruń

³ Jeszcze innym miejscem, w którym znajdziemy podobny lejek, jest ogród zoologiczny w Płocku, gdzie służy on do zbierania pieniędzy na karmę dla zwierząt (2012 r.).

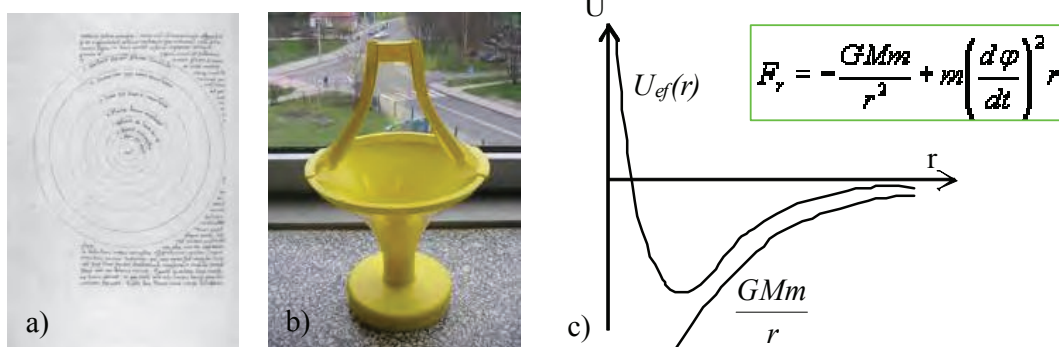
Aspekt ludyczny

Moneta krążąca dookoła i zbliżająca się ku środkowi przykuwa uwagę widza nie tylko z powodu stopniowego przyspieszania ruchu, ale też z uwagi na jej oddalanie się od widza. Stopniowo niejako, z każdym obrotem utrata monety staje się bezpowrotna, ale jednocześnie fascynuje widza. Moneta się toczy ruchem coraz szybszym, aż do zniknięcia. „Spróbujemy jeszcze raz?”

Efekt przykucia uwagi przez toczącą się monetę jest właściwie poza naszą kontrolą, jak obserwacja płomienia ogniska. Ludyczność eksponatu wynika też z prostoty jego obsługi oraz nieskończonej wręcz ilości różnych trajektorii, które zatoczyć może moneta w zależności od warunków początkowych startu.

Aspekt dydaktyczny (1) – dzieło Kopernika i III prawo Keplera

Najprostszym użyciem lejka grawitacyjnego w procesie dydaktycznym jest pokazanie analogii między ruchem monety, przyspieszającej w miarę zbliżania się do środka, a ruchem planet w Układzie Słonecznym – im bliżej Słońca, tym planety szybciej je obiegają. Zależność zaobserwowana już przez Kopernika i przedstawiona nawet na dawnym banknocie 1000 zł. Na własnoręcznym rysunku Kopernik zapisał po łacinie: „Mars okrąża Słońce w 2 lata, Jowisz w 11 lat, a Saturn w 30 lat”, zob. ryc. 4.2.



Ryc. 4.2. Przejście od aspektów ludycznych do dydaktycznych i naukowych: **a)** dzieło Kopernika – im bliżej Słońca, tym planeta porusza się szybciej, jak kulka bliżej centrum lejka; **b)** kształt lejka – hiperboliczny w przekroju, przypomina potencjał grawitacyjny $V \sim 1/r$ (wystawa „On the Track of Modern Physics”, École Centrale Paris, grudzień 2005 (fot. MK); **c)** rozwiązanie równania z potencjałem $V \sim 1/r$ daje orbity eliptyczne, jak w zabawkowym lejku grawitacyjnym

Johannes Kepler nadał tej obserwacji Mikołaja Kopernika (a wywodzącej się z obserwacji astronomicznych od czasów babilońskich) zależność matematyczną, nazywaną obecnie III prawem Keplera: „kwadraty okresów obiegu planet dookoła Słońca mają się do siebie jak sześciiany ich odległości od Słońca” $T^2/R^3 = \text{const}$. Przyspieszający ruch monety w miarę zbliżania się do centrum lejka (a dla planet – zbliżania się do Słońca) obrazują zacieśniające się spirale w lejku na lotnisku w Standsted, zob. fot. 4.1.

Aspekt dydaktyczny (2) – I prawo Keplera

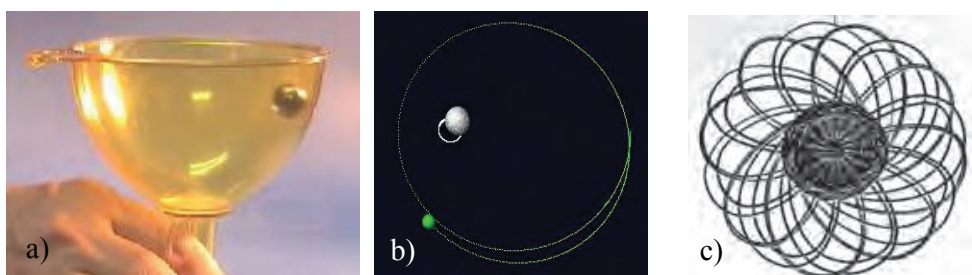
Za pomocą lejka grawitacyjnego można pokazać również pierwsze prawo Keplera, mówiące, że orbity planet są elipsami. Jest to jednak nieco trudniejsze do pokazania. Ba! Wręcz ukryte przez konstruktorów lejka. Otóż w lejku grawitacyjnym sprzedawanym w USA do szkół, monety nie są spuszczone z *jakakolwiek* prędkością, ale z prędkością ściśle określoną, a dokładniej są spuszczone ze ściśle określonej wysokości, z początku rampy nad lejkiem, zob. fot. 4.1c. Gwarantuje to taką prędkość, że orbita monety pozostaje kołowa. Jednakże niektóre tylko planety, jak np. Ziemia, mają orbity (prawie) kołowe. Ogólnie w polu

grawitacyjnym orbity są eliptyczne, a nawet otwarte – paraboliczne lub hiperboliczne, jak orbity komet. Jak to pokazać?

Lejek grawitacyjny pozwala na pokazanie zarówno orbit eliptycznych, jak i hiperbolicznych. Kluczem do przeprowadzenia pokazu jest znajomość fizyki lub astronomii. Wiedząc, że orbity hiperboliczne (lub eliptyczne wydłużone) wykazują ciała niebieskie nadlatujące z kosmosu z dużymi prędkościami w pobliżu Słońca, orbity hiperboliczne można pokazać wrzucając kulkę w lejek z daleka. O ile nie trafimy centralnie, kulka „odbije” się od lejka lub, dokładniej, zakrzywi a nawet zawróci swoją trajektorię w obszarze lejka i wróci w „kosmos”, jak to czynią niektóre komety⁴.

Aspekt naukowy (1) – ogólna teoria względności A. Einsteina i kosmosy alternatywne

Z prostego doświadczenia z lejkiem grawitacyjnym (tym o kształcie hiperbolicznym) można wyprowadzić jeszcze inny, znacznie trudniejszy problem naukowy. Porównanie lejka *hiperbolicznego* z jakimkolwiek lejkiem innego kształtu (zob. fot. 4.3), wskazuje na wyjątkowy charakter pola grawitacyjnego Słońca, a raczej ogólnie pola Newtona (zob. fot. 4.1c). Pole to jest jedyne w swoim rodzaju – zapewnia *zamknięte* trajektorie kulek (lub planet). W ten sposób dochodzimy do drugiego prawa Keplera: „planety poruszają się po orbitach eliptycznych (czyli zamkniętych), a Słońce znajduje się w jednym z ognisk elipsy”. Każdy inny kształt lejka, czyli kształt „potencjału”, jak np. na fot. 4.3a lub 4.3b, nie daje orbit zamkniętych⁵. W centrach nauki, mimo popularności lejka grawitacyjnego, możliwe aspekty *dydaktyczne* i *naukowe* są rzadko wykorzystywane⁶. Niezależnie od kontynentu, kraju i rodzaju centrum przeważają aspekty ludyczne.

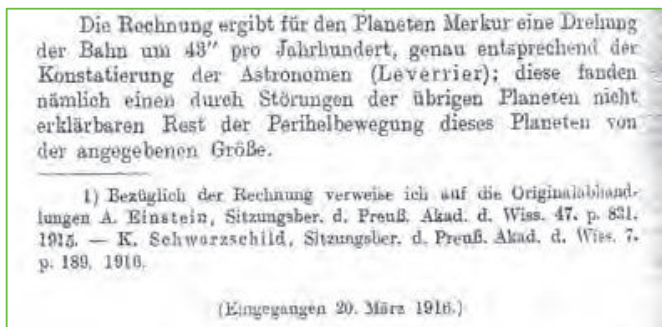


Fot. 4.3. Funkcje naukowe prostych eksponatów – otwarte orbity planet: **a)** zwykły lejek kuchenny i wirująca w nim metalowa kulka fascynują, ale mogą też służyć do ilustracji skomplikowanych pojęć jak ruch w polu siły o innej zależności od odległości niż siła grawitacji (czyli o innym kształcie potencjału); **b)** program symulacji ruchu planet w potencjałach odbiegających od zależności $V \sim 1/r$ (M. Brunato i autor); **c)** poglądowość eksponatu – otwartą orbitę Merkurego, w dalekiej analogii ilustruje ta ludowa wyplatanka z Białorusi (źródło i fot. GK)

⁴ Sposób konstruowania tego doświadczenia jest znakomitym przykładem paradygmatu działań naukowych (i dydaktycznych również): na początku każdego doświadczenia stoi *teoria*. Przeprowadzając badania naukowe, najpierw formułujemy kategorię pojęciową (w tym przypadku „ruch komety”), następnie na podstawie teorii stawiamy hipotezę roboczą („kulka wrzucona niecentralnie z dużą prędkością powinna zatoczyć orbitę hiperboliczną”), a na końcu ją weryfikujemy, wrzucając kulki z różną prędkością, aż do znalezienia tej właściwej, że kulka zatoczy fragment orbity, nie wyskoczy od razu, nie przewróci lejka itd. Zob. w tej kwestii J. Kruk, G. Karwasz, *Reprezentacja, przyczynowość i badania eksperymentalne jako znaczące punkty „mapy poznawczej” dydaktyki ogólnej*, „Forum Oświatowe”, nr 2(33)/2005; G. Karwasz, *Koniec nauki? Na razie nam nie grozi!*, „Edukacja Filozoficzna”, nr 52/2011, 5–17.

⁵ Bardzo naukowo, językiem mechaniki klasycznej (zwanej we Francji lub Włoszech mechaniką *racjonalną*) powiedzielibyśmy, że tylko w przypadku potencjału Newtona, typu $1/r$, i potencjału harmonicznego, typu r^2 , operator potencjału *komutuje* z operatorem momentu pędu. (Wyjaśnienie prof. Enrico Pagani).

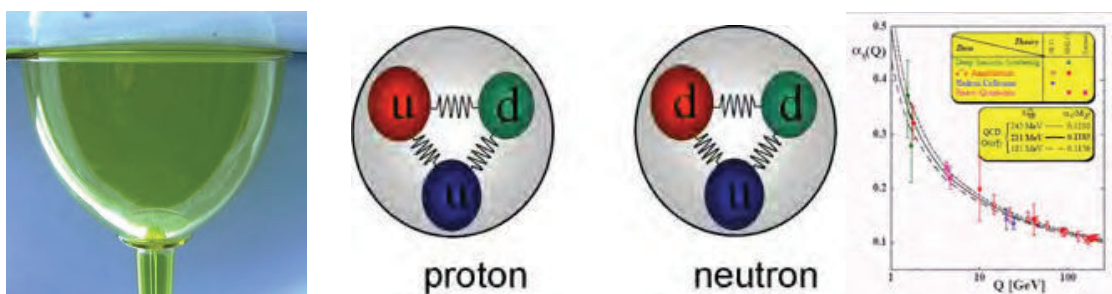
⁶ Ciekawy przykład podwójnego lejka grawitacyjnego z Centrum Nauki „Kopernik” w Warszawie opisujemy w rozdziale VIII.



Ryc. 4.4. Realistyczne dopełnienie funkcji naukowej lejka nie-grawitacyjnego – kopia oryginalnego artykułu A. Einsteina z 1916 r. z tekstem o odchyłaniu się osi elipsy o 43” na stulecie, czyli o tym, że orbita Merkurego jest orbitą *otwartą*: lejek na fot. 4.3 ilustruje pole inne niż pole Newtona, tak że II prawo Keplera przestaje obowiązywać i orbity są nie elipsami, ale krzywymi *otwartymi*

Aspekt naukowy (2) – uwięzienie kwarków

Jeszcze ciekawsze są rozważania o lejkach i fizyce współczesnej. O ile lejek na fot. 4.1c ma ścianki o coraz mniejszym nachyleniu w miarę oddalania się od centrum, o tyle lejki na fot. 4.3a i 4.5a mają ścianki coraz bardziej strome. W polu lejka grawitacyjnego rzucona kulka, a w polu grawitacyjnym Słońca nadlatująca kometa lub rakieta „Voyager” wystrzelona z Ziemi mają szansę uciec w daleki kosmos. Z lejka jak na fot. 4.3a kulka nie ucieknie. Obrazowo jest to sytuacja, jakiej doświadczają kwarki w cząstkach elementarnych – protonie lub neutronie. Im dalej kwarki znajdują się od siebie, tym bardziej rośnie siła ich wzajemnego przyciągania. Mówimy o „asymptotycznym uwięzieniu kwarków” w nukleonach.



Fot. 4.5. Coraz bardziej złożone funkcje naukowe prostych eksponatów – od lejka do kwarków: podnoszące się ścianki lejka przypominają siłę oddziaływania, które (odmiennie niż dla pola grawitacyjnego) rośnie z odległością, nieco podobnie jak siła sprężyny. Z tego powodu nie jest możliwe wydzielenie kwarków z protonu, jak to pokazują wyniki badań za pomocą akceleratorów cząstek elementarnych⁷

Oczywiście analogia między lejkiem a kwarkami jest bardzo odległa, ale tendencja do wirtualizacji zjawisk, mitologizacji światów dla nas niewidzialnych oraz pseudo-racjonalizacji osądów jest zabójcza dla twórczego myślenia. Osobiście skłaniamy się raczej ku nadinterpretacji zasady pogładowości niż do przyjmowania prostych, banalnych wręcz schematów myślenia, w których i elektron, i proton, i kwark to małe, bezpostaciowe kulki.

Przykład 2. Wyścigi samochodów i kaczek

Innym typowym eksponatem ludycznym są różnego rodzaju zjeżdżalnie, obecne praktycznie we wszystkich centrach nauki. Podobnie jak w przypadku lejka, nieodwracalny ruch w dół fascynuje widzów. Zjeżdżalnie mają więc najróżniejsze formy – metalowe, drewniane, długie, krótkie, ale obecne są wszędzie, we wszystkich znanych nam centrach nauki. Służą głównie zabawianiu widzów, tak dorosłych, jak i dzieci.

⁷ Źródło: G. Karwasz, T. Wróblewski, A. Niedzicka, W. Niedzicki, M. Brunato, *Physics in funnels*, 3rd GIREP Workshop, Lublana (Słowenia), 06–09.09.2005, Book of Abstracts, ed. G. Planinšič, A. Mohorič, S. Lasič, S. Oblak, Ljubljana 2005, s. 57.

Na licznych pokazach dla dzieci autorowi udało się wzbogacić funkcję ludyczną zjeżdżalni o funkcję dydaktyczną, polegającą na pokazaniu, że ruch po równi nie zależy od masy schodzących zwierzątek czy staczających się wózków. Było to zasadnicze odkrycie Galileusza, praktycznie pierwsze prawo nowożytnej mechaniki. Na wystawach dydaktycznych pokazujemy liczne eksponaty ilustrujące to prawo, zob. fot. 4.6a i 4.6b.



Fot. 4.6. Zjeżdżalnie – aspekty dydaktyczne i ludyczne: **a)** samochodziki o różnych masach zjeżdżają po równi z tą samą prędkością; **b)** skomplikowana zjeżdżalnia z kulkami – w górę i pod górę, ilustrująca zasadę zachowania energii; **c)** podobny eksponat w lunaparku (autor GK)

Zjeżdżalnie – eksponaty proste i bezpieczne, dają duże możliwości do samodzielnego eksperymentowania, a właściwie pomyślane – również do samodzielnej nauki praw ruchu.

Funkcje poznawcze a wiek odbiorcy

Z obu powyższych przykładów – lejka grawitacyjnego i schodzących kaczek – wynika jeszcze inne uporządkowanie trzech funkcji *poznawczych* eksponatów (i całych wystaw oraz centrów nauki) – z uwagi na wiek odbiorcy. I tak, funkcja ludyczna służy do przekazu najprostszych treści, prawie że na poziomie sensoryczno-motorycznym: „Uwaga! Schodząc z góry łatwo się przewrócić, jak to się zdarza kaczce za mocno popchniętej” (na przykładzie kaczek) lub „Uwaga! Taki wir w wodzie może wciągnąć do środka!” (na przykładzie lejka grawitacyjnego). Przekaz treści na poziomie ludycznym nie wymaga specjalnej wiedzy odbiorcy ani użycia skomplikowanych opisów. Są to niejako eksponaty dla widza od 0 do 99 lat. Dwa przykłady wystaw interaktywnych opartych głównie na funkcji ludycznej, „W czasie deszczu dzieci się nudzą” w Biurze Wystaw Artystycznych przy Molo w Sopocie w sierpniu 2004 roku oraz wystawę „Z górki na pazurki” w *korytarzu dydaktycznym* na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w kwietniu 2007 roku, przedstawiamy w rozdziale VII.



Fot. 4.7. Zjeżdżalnie, cd. – aspekty ludyczne eksponatów *dydaktycznych*; **a)** wyścigi kaczek, Festiwal Nauki Warszawa 2007, siła tarcia jako powód jednostajnego ruchu kaczek; **b)** wyścigi samochodów, niezależność przyspieszenia od masy, pokazy na Uniwersytecie I Wieku, Tuchola 2009; **c)** samodzielne eksperymentowanie po wykładzie interaktywnym UniKids, Zielona Góra 2010 (autor GK)

W scenariuszach wykładów interaktywnych dla dzieci podwójna równia z kaczkami wywala jeszcze inne emocje w widzach – nie tylko fascynacji, ale i współzawodnictwa. Zabawa polega na kibicowaniu dwóm kaczkom schodzącym po równi. Jedną z kaczek dopinguje połowa widowni, a drugą – pozostała część. Kaczki są identyczne i schodzą

oczywiście powolnym ruchem jednostajnym, niezależnie od dopingowania widowni. Efekt zabawowy gwarantowany, ale i cel dydaktyczny też jasny: kaczki nie reagują na doping widowni, bo ich ruch jest rządzone przez *prawa fizyki*.

4.2. Współzależności między funkcjami poznawczymi eksponatu interaktywnego

Eksponat *sam w sobie* nie stanowi jeszcze o jego funkcjach w konkretnych sytuacjach dydaktyczno-wystawowych: może pełnić każdą z trzech funkcji, w zależności od wyboru projektanta wystawy. Przykładem jest wahadło „chaotyczne” wykorzystywane na naszych wystawach „Fizyki zabawek”⁸, ale będące także eksponatem na wystawie matematyki współczesnej w Cité de Sciences w Paryżu. W nawet niezbyt skomplikowanych układach mechanicznych mała zmiana parametrów początkowych ruchu prowadzi do zupełnie innej dynamiki układu. Zjawisko to nosi nazwę chaosu klasycznego.



Fot. 4.8 Funkcja ludyczna prowadzi do funkcji naukowej – wahadło „chaotyczne”: **a)** wahadło ze zbiorów „Fizyki zabawek” – układ 6 magnesów w podstawie wypycha wahającą się piłkę w przypadkowe (pozornie) położenie (T. Wróblewski); **b)** takie samo wahadło, profesjonalnie wykonane, na wystawie matematyki współczesnej w Cité des Science w Paryżu; **c)** trajektoria ruchu wahadła – fotografia ekranu układu pomiarowego po kilku przebiegach; **d)** ilustracja chaosu klasycznego (fot. GK)

Samo wahadło chaotyczne spełnia funkcję ludyczną – jak wszystkie poruszające się obiekty przyciąga uwagę. Funkcja dydaktyczna jest ograniczona, dopóki nie wprowadzimy naukowego pojęcia chaosu i obrazowo nie zarejestrujemy różnych trajektorii ruchu przy różnych warunkach początkowych, tak jak to uczyniliśmy z wahadłem w Cité des Sciences, fot. 4.8c. Multimedialne zobrazowanie zmierzonych przebiegów pozwala na porównanie z teoretycznymi trajektoriami, obliczonymi dla podobnego (matematycznie) typu wahadła.

Wzajemne przeplatanie się trzech funkcji poznawczych jest trudne do określenia *a priori*. Eksponaty same w sobie mogą być wykorzystane na różne sposoby. Dopiero praktyczne realizacje wystaw i prowadzenie obserwacji pozwala na odkrycie całej różnorodności funkcji pedagogicznych ukrytych w eksponatach. Okazuje się, że nawet najmłodsi odbiorcy są zdolni do działań badawczych w nie mniejszym stopniu jak naukowcy o bardzo szerokiej wiedzy. Podamy tu dwa zdarzenia zaobserwowane na wspomnianej wystawie „Z górki na pazurki”. Dwa bardzo podobne urządzenia – oba zawierające po kilka kulek na równi przechodzącej w poziomy tor – miały dwa różne cele *dydaktyczne*. W trakcie wystawy, ku zdziwieniu twórców, odbiorcy w zupełnie oryginalny sposób wynaleźli nowe funkcje poznawcze.

⁸ T. Wróblewski, *Dopóki piłka w grze*, [w:] G. Karwasz i in., *Fizyka i zabawki*, CD-ROM, PAP, Słupsk 2005, <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/elmag/pilkarz.html> (30.12.2011).