



Fizyka w wesołym miasteczku

Stefano Alberghi, SIM (Meteorological Service), Bologna

Alessandro Foschi, Liceo scientifico Fulceri Paulucci di Calboli, Forlì

Giovanni Pezzi, Liceo Torricelli, Faenza

Fabio Ortolani, Physics Department, University of Bologna

The Physics Teacher, vol. 45, December 2007, s. 536

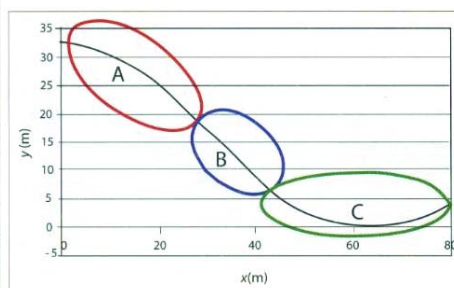
Uczyć się bawiąc, bawiąc się uczyć – wydaje się być najlepszą metodą na przyswajanie nowych, czasami bardzo nieintuicyjnych wiadomości. Szczególnie, jeżeli dotyczą one pojęć związanych z fizyką – tym przedmiotem w szkole, który spędza sen z oczu niejednemu uczniowi.

„Uczyć się bawiąc” wprowadza w życie projekt realizowany od 2003 roku w wesołym miasteczku Mirabilandia (Włochy)¹ pod nazwą „Klasa Bez Ścian”. Uczniowie, z pomocą nauczycieli (trenerów), próbują odpowiedzieć na pytanie: **czy i dlaczego bardziej ekscytująca jest jazda z przodu, czy na końcu roller coastera?**

Uczniowie rozwiązują zagadkę dzięki własnym obserwacjom, odbywając przejażdżkę na pokładzie *Sierra Tonante* (rys. 1). Jest to drewniana kolejka o maksymalnej wysokości 32,5 m. Tor o długości 1165 m pokonuje się w ciągu ok. 90 s. Maksymalna szybkość ok. 25 m/s jest osiągana na końcu zjazdu z pierwszego stoku, na którym można zauważyć: początkowy paraboliczny łuk dający imitację swobodnego spadku (A), oraz prostą linię (B), gładko łączącą się z łukiem (C) na dole toru (rys. 2).



Rys. 1. Widok na pierwszy ze stoków roller coastera Sierra Tonante w wesołym miasteczku Mirabilandia (Włochy)



Rys. 2. Profil pierwszego ze stoków roller coastera Sierra Tonante

¹ http://www.mirabilandia.it/scuole_it.htm



Rys. 3. Walizka z urządzeniami pomiarowymi: TI-84, CBL2, barometr, akcelerometr

Uczniowie w czasie podróży mają do dyspozycji „specjalistyczną” walizkę (rys. 3), w której zainstalowane są urządzenia mierzące przyspieszenie – akcelerometr i zmiany ciśnienia (wysokości) – barometr². W walizce umieszczono także graficzny kalkulator TI-84 oraz interfejs CBL2, podłączone do barometru i akcelerometru³. Akcelerometry zostały skierowane do góry od strony podłogi kolejki, w kierunku prostopadłym do toru ruchu. Przy takiej orientacji, kiedy kolejka poruszała się horyzontalnie, a akcelerometr jest stabilny, odczytano wartość $+9,8 \text{ m/s}^2$. Mierzone przyspieszenie jest równe sile normalnej, działającej na jednostkę masy, dlatego też to urządzenie podaje wartość siły reakcji podłoża, takiej jaka pochodzi od sprężyny dynamometru. Odczyty z barometru są używane do wyznaczenia wysokości n.p.m. podczas przejażdżki.

Uczniowie korzystają jednocześnie z trzech takich walizek, umieszczonych z przodu, z tyłu i w środku (blisko środka masy) kolejki. Zagadnienie jest rozpatrywane w dwóch przypadkach – podczas zjazdu kolejki i podczas wspinaczki na kolejny fragment toru.

Podczas jazdy, w zależności od trajektorii, uczniowie czasami mają wrażenie, że nic nie ważą, a czasami, że są znacznie ciężsi, niż normalnie. Dlatego jazda ta jest tak bardzo ekscytująca.

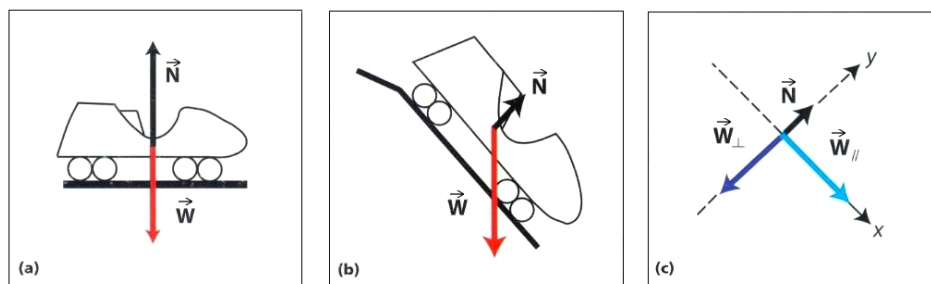
Siły działające na pasażerów

Zastanówmy się, jakie siły działają na pasażerów. Załóżmy chwilowo, że kolejka składa się tylko z jednego wagonu. Pasażer jest poddawany działaniu dwóch

² *Data Collection at the Amusement Park*, Appendix 11: „Accelerometers and Forces” at <http://www.vernier.com/cmat/datapark.html>

³ C. Escobar, *Amusement Park Physics* (AAPT, 1994).

sił (w tej dyskusji zaniebujemy siły tarcia): sile ciężkości $\vec{W} = m\vec{g}$ i sile reakcji podłoża \vec{N} , prostopadłej do toru ruchu (rys. 4 a–c).



Rys. 4. Schemat pokazujący siły reakcji podłoża \vec{N} i ciężaru \vec{W} działające na pasażera, siedzącego w wagonie poruszającym się: a) poziomo i b) w dół stoku; c) diagram sił dla przypadku (b)

Jeśli α jest kątem nachylenia stoku do powierzchni Ziemi, to wartość składowej siły ciężkości stycznej do toru wynosi $W_{\parallel} = mg \sin \alpha$. Siła ta jest odpowiedzialna za składową styczną przyspieszenia, czyli za wrażenia jazdy do przodu czy do tyłu. Przy poruszaniu się wzdłuż segmentu A (rys. 2), kąt α rośnie z czasem (tak też się dzieje z W_{\parallel}), osiągając wartość maksymalną na początku segmentu B.

Wypadkowa sił \vec{N} i \vec{W}_{\perp} jest siłą dośrodkową \vec{F}_d .

$$\vec{F}_d = \vec{N} + \vec{W}_{\perp}$$

W trakcie ruchu po fragmencie toru A siły \vec{F}_d i \vec{W}_{\perp} mają zgodne zwroty (tor ruchu jest zewnętrznym względem krzywizny), dlatego dla kierunku prostopadłego do toru (kierunek y) otrzymujemy

$$N - mg \cos \alpha = -m \frac{v^2}{r}. \quad (1)$$

Nasze urządzenie pomiarowe – akcelerometr, dostarcza informacji o wartości współrzędnej siły N , która może być albo dodatnia, albo ujemna, zgodnie z równaniem:

$$N = mg \cos \alpha - m \frac{v^2}{r} \quad (2)$$

Sytuacja jest bardziej złożona, kiedy rozpatrujemy kolejkę rzeczywistą, jako zespół wagonów połączonych ze sobą sztywno za pomocą cięgieł (łączników). Pojawia się wtedy dodatkowa siła \vec{T} pomiędzy wagonami (siła naciągu, równoległa do toru ruchu), która w każdej chwili utrzymuje wspólną szybkość i skła-

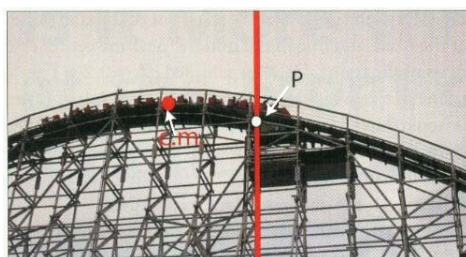
dową styczną przyspieszenia wszystkich wagonów kolejki. Wartości są takie same, jak te obliczone dla środka masy. W tym wypadku rozpatrzmy stały punkt toru. Ponieważ kolejne wagony przebywają ten punkt w różnych odstępach czasu, każdy z nich ma inną szybkość i inną składową styczną przyspieszenia, w zależności od swego położenia w stosunku do środka masy. Co więcej, w pewnej chwili wartość kąta α może być różna dla pasażerów w różnych położeniach, powodując odmienne wrażenia. Emocje, jakich doświadczają uczestnicy przejażdżki, zależą zatem i od miejsca, które zajmują w kolejce, i od położenia wagonika kolejki na torze.

Na dół...

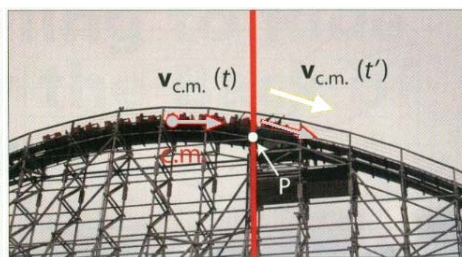
Okazuje się, że zjazd po pierwszym zboczach jest najbardziej ekscytującym fragmentem przejażdżki. Trajektorię fragmentu toru A można porównać do ruchu swobodnego spadku pocisku, wystrzelonego zadaną składową poziomą wektora prędkości, dlatego też pasażerowie doświadczają uczucia nieważkości przez pewien określony czas.

Wybermy stały punkt (punkt P na rys. 5) gdzieś w obszarze segmentu A i przeanalizujmy przejście kolejki przez ten punkt.

Pasażer siedzący dokładnie w środku masy ma tę samą prędkość, jaką ma środek masy (c.m. – *centre of mass*) układu i odczuwa stan nieważkości [$mg \cos \alpha = mv^2 / r$ w równaniu (2)]. Jednakże, dla pasażerów jadących albo z przodu, albo z tyłu kolejki, sytuacja ulega niewielkiej zmianie. W chwili uchwyconej na rys. 5 c.m. jest zlokalizowany w miejscu, gdzie tor jest prawie poziomy, składowa styczna przyspieszenia wynosi prawie zero dla wszystkich wagonów.

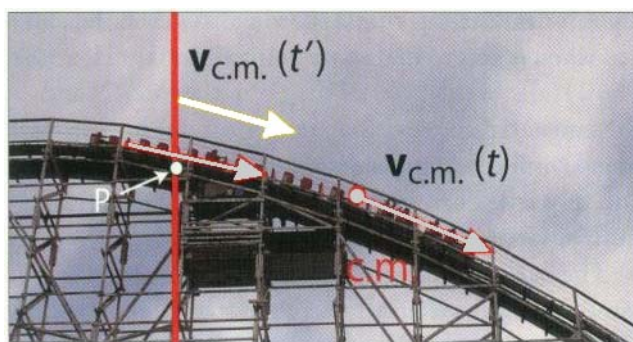


Rys. 5. Kolejka na pierwszym ze stoków rollercoastera; punkt c.m. oznacza położenie środka masy kolejki



Rys. 6. Przedni wagon w punkcie P. Szare strzałki (o równych długościach) oznaczają, że szybkość pierwszego wagonu, gdy ten osiąga zaznaczony punkt P (w czasie t) jest taka sama, jak szybkość środka masy, w chwili, gdy znajduje się on w najwyżej położonym punkcie toru. Biała strzałka pokazuje większą szybkość środka masy, którą osiąga on w punkcie P w czasie $t' > t$

Pierwszy wagon osiąga punkt P w segmencie A w chwili t z szybkością *mniejszą* niż ta, którą posiada środek masy w chwilę później (t'), gdy osiąga ten sam punkt (rys. 6). Z drugiej strony, ostatni wagon przebywa punkt P z szybkością *większą*, niż ta, którą posiada środek masy na chwilę wcześniej, zanim minie ten sam punkt (rys. 7).



Rys. 7. Tylni wagon w punkcie P. Szare strzałki (o równych długościach) oznaczają, że szybkość tylniego wagonu, gdy ten osiąga zaznaczony punkt P (w czasie t) jest taka sama, jak szybkość środka masy w chwili, gdy ten znajduje się niżej na torze zjazdowym. Biała strzałka pokazuje, że środek masy miał mniejszą szybkość przejeżdżając przez punkt P na chwilę wcześniej t'

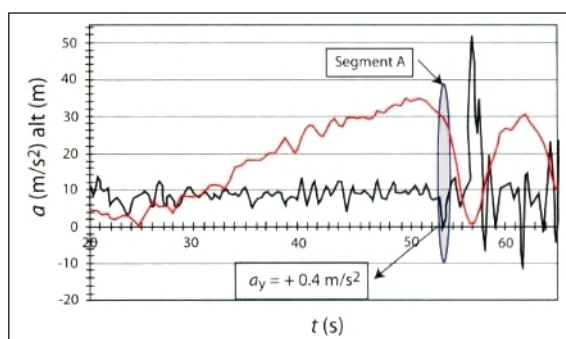
Ponieważ pierwszy wagon przebywa zaznaczone miejsca z szybkością *mniejszą* niż szybkość środka masy w tych samych miejscach, siła normalna działająca na pasażera znajdującego się w tym wagonie (z przodu) jest *większa*, niż w sytuacji, gdyby znajdował się bliżej środka masy. Każdy kolejny wagon przebywa punkt P z szybkością *większą* niż ten poprzedni. Z równania (2) jasno wynika, że jeżeli v wzrasta, to siła reakcji podłoża \vec{N} maleje. Ponieważ ruch środka masy po krzywiźnie A może być rozpatrywany jako spadek swobodny, wartość współrzędnej siły N w wagonie zlokalizowanym w środku masy wynosi zero, a pasażer siedzący tam odczuwa stan nieważkości. W miejscu pierwszego wagonu wartość współrzędnej siły $N > 0$ i dlatego też pasażer siedzący tam odczuwa mniej „porywających” doznań związanych z nieważkością. Ale w wagonie na końcu kolejki (tym, który ma największą szybkość w punkcie P) $N < 0$ i pasażer tam siedzący faktycznie odczuwa, jakby krzesło, na którym siedzi, próbowało odłączyć się od jego ciała. Pasażer jest przytrzymywany w krześle za pomocą pasów i specjalnej belki bezpieczeństwa.

Dane przedstawione na rys. 8 zgadzają się z naszymi przewidywaniami – wykres przedstawia zależność współrzędnej składowej pionowej (prostopadłej do toru ruchu) przyspieszenia (siła normalna na jednostkę masy) i wysokości od czasu, dla wagonów położonych najbliżej środka masy.

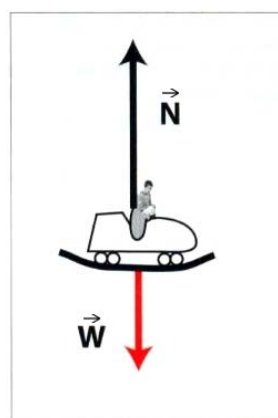
Tak jak przypuszczano, wartość współrzędnej przyspieszenia spada prawie do zera w segmencie A, (powodując wrażenie niemal stanu nieważkości).

Z odpowiednich wykresów dla składowej poziomej przyspieszenia wagonów znajdujących się z przodu i z tyłu kolejki, które mają różne szybkości w chwili przejazdu przez punkt P, wynika, że wartości ich wartości wynoszą odpowiednio $+1,9 \text{ m/s}^2$ i $-3,7 \text{ m/s}^2$.

Po krótkim prostoliniowym segmencie B, kolejka wchodzi w obszar toru po wewnętrznej stronie krzywizny (segment C), osiągając m.in. najniższy położony punkt podczas całej przejażdżki. Środek masy w tym punkcie nabiera maksymalnej szybkości, wynoszącej ok. 25 m/s . Siły działające na pasażera znajdującego się w tym położeniu wagonika przedstawione są na rys. 9.



Rys.8. W pobliżu środka masy kolejki: wartość współrzędnej poziomej składowej przyspieszenia (czarna linia) i wysokość (czerwona linia) względem czasu. Elipsa wskazuje położenie segmentu A (część paraboliczna) toru ruchu



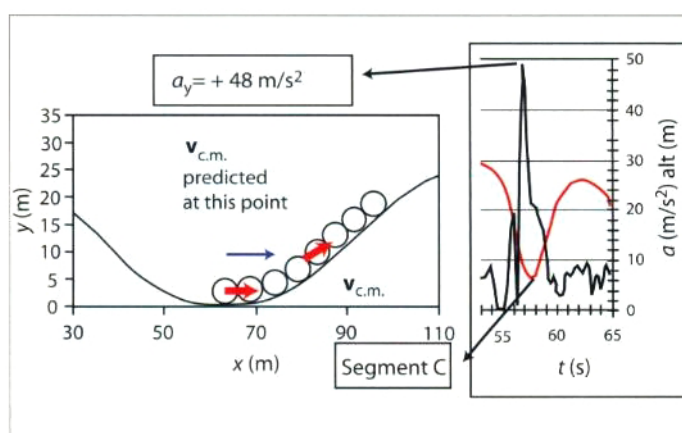
Rys.9. Schemat sił działających na pasażera znajdującego się w najniższym punkcie stoku: ciężar \vec{W} i siła reakcji podłoża \vec{N}

Dla każdego z wagonów wzdłuż łuku, wypadkową siły reakcji podłoża \vec{N} i siły ciężkości \vec{W} jest nadal siła dośrodkowa \vec{F}_d , która zakrzywia tor ruchu. Siły \vec{W} i \vec{F}_d mają jednak teraz przeciwne zwroty. (Tak jest w inercjalnym układzie odniesienia. Jeżeli popatrzymy na ten przypadek z perspektywy nieinercjalnego układu odniesienia pasażera, to działa na niego siła odśrodkowa, której zwrot jest zgodny ze zwrotem siły \vec{W} – co powoduje wrażenie zwiększenia własnego ciężaru.)

To odczucie ponownie zależy od lokalizacji pasażera w stosunku do położenia środka masy. Pierwszy wagon osiąga najniższy położony punkt toru z szybkością mniejszą niż ta, którą ma środek masy, zaś wagon ostatni także porusza się wolniej w tym miejscu, w porównaniu do środka masy, ponieważ wcześniejsze wagony poruszają się teraz do góry, zmniejszając swoją szybkość. Dlatego

też siła normalna działająca na jednostkę masy, powinna w pobliżu środka masy być większa, niż z przodu i z tyłu kolejki.

Zebrane dane potwierdzają nasze przypuszczenia. Wartości składowej pionowej przyspieszenia zmierzone z tyłu kolejki, gdy osiąga najniższy punkt stołu przedstawione są na rys. 10. Maksyma na wykresach przedstawiających zachowanie się współrzędnej składowej pionowej przyspieszenia w pobliżu środka masy i z przodu kolejki, osiągają odpowiednio wartości odpowiednio: $+52 \text{ m/s}^2$ i $+45 \text{ m/s}^2$.



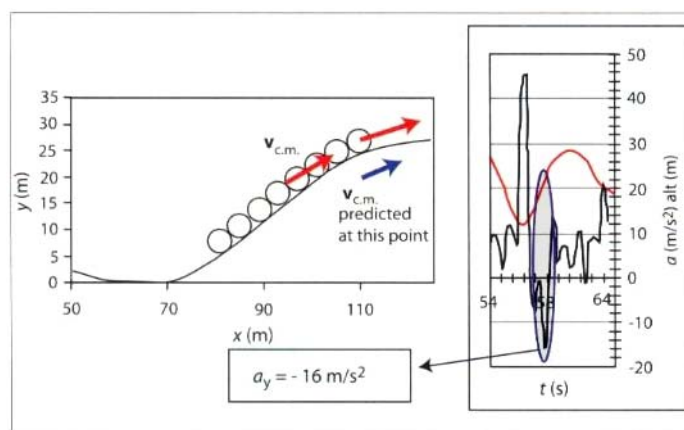
Rys. 10. Wykres po prawej stronie przedstawia zmiany przyspieszenia (czarna linia) i wysokości (czerwona linia) w czasie, dla wagonu znajdującego się z tyłu kolejki. Wartość składowej poziomej przyspieszenia na dole stołu wynosi $+48 \text{ m/s}^2$. Na schemacie po lewej stronie, równe długości grubych strzałek wskazują, że w tej samej chwili czasu, prędkość środka masy (c.m.) jest taka sama jak prędkość ostatniego wagonu. Cienka strzałka pokazuje, że środek masy miał większą prędkość, gdy znajdował się u podnóża stołu

Do góry...

Trajektoria drugiego wzniesienia zbudowana jest z wypukłego łuku na szczycie, po którym następuje odcinek prostoliniowy. Podczas wspinania się, przód kolejki osiąga punkt blisko szczytu toru z szybkością większą niż ta, którą ma środek masy, osiągający ten sam punkt toru w chwilę później (rys. 11). Z przodu kolejki siła \vec{N} i składowa styczna przyspieszenia są tak duże, że pasażer ma wrażenie bycia wyrzucanym do góry i do przodu. Dlatego też oczekiwana jest duża bezwzględna wartość ujemnej współrzędnej siły normalnej, działającej na jednostkę masy.

Z drugiej strony, tył kolejki przebywa ten sam punkt z szybkością mniejszą, niż środek masy znajdując się w tym miejscu (środek masy zwalnia, gdy kolejka zaczyna poruszać się ku górze). Siła reakcji podłoża \vec{N} i składowa styczna przyspieszenia, doświadczane przez pasażerów są dużo mniejsze i dlatego

oczekuje się, że wartość współrzędnej siły normalnej działającej na jednostkę masy będzie mieć znak dodatni.



Rys. 11. Wykres po prawej stronie przedstawia zależność przyspieszenia (czarna linia) i wysokości (czerwona linia) od czasu dla wagonu znajdującego się z przodu kolejki. Obszar tuż przed szczytem toru jest zaznaczony elipsą. Na schemacie po lewej stronie, równe długości czerwonych strzałek wskazują, że w tej samej chwili czasu, szybkość środka masy (c.m.) jest taka sama jak szybkość pierwszego wagonu. Niebieska strzałka poniżej krzywej ilustruje, że środek masy będzie miał mniejszą szybkość, gdy znajdzie się w tym samym miejscu

Wykres prezentowany na rys. 11 podaje dane doświadczalne, zmierzone z przodu i z tyłu kolejki. Widzimy na nim duże ujemne wartości, gdy wagon zbliża się do szczytu toru ruchu.

Wykresy przedstawiają zachowanie się składowej normalnej przyspieszenia wagonów umieszczonych blisko środka masy i z tyłu kolejki, a wartości są równe odpowiednio: -7 m/s^2 i $+9 \text{ m/s}^2$.

Wniosek

W tabeli zostały podsumowane wartości pionowej składowej przyspieszenia, zmierzone przez uczniów dla wagonów umieszczonych z przodu, w pobliżu środka masy i z tyłu kolejki, dla różnych lokalizacji roller coastera na torze.

Pionowa składowa przyspieszenia [m/s^2]			
	Przód kolejki	Środek masy (c.m.)	Tył kolejki
Zjazd z pierwszego stoku	1,9	0,4	-3,7
Pozycja najniższa	45	52	48
Wyjazd na drugi stok	-16	-7	9

Z analiz tych wynika, że istnieje więcej niż jedna odpowiedź na zadane początkowo pytanie. Prawdą jest, że pasażer siedzący w wagonie z tyłu kolejki, przeżywa bardziej intensywne wrażenia przez sporą część przejażdżki, ale na pewnych odcinkach, w szczególności podczas podjazdów w górę, pasażer siedzący w pierwszym wagonie odczuwa silniejsze emocje (tam, gdzie odczyt przyspieszenia dośrodkowego wskazuje wartości ujemne).

Zadanie, które omówiliśmy, jest bardzo dobrym przykładem, jak zjawiska w świecie fizyki mogą być wyjaśnione przez połączenie wymagań zajęć w szkole z zabawnymi sytuacjami, jakich można doświadczać w parku rozrywki⁴. Jest to świetny przykład na potwierdzenie tezy, że można doskonale uczyć się bawiąc i bawić się ucząc.

O autorach

Giovanni Pezzi i **Alessandro Foschi** są nauczycielami fizyki we włoskich szkołach średnich i pierwszymi autorami projektu „Fizyka, Klasa bez ścian”.

Fabio Ortolani, profesor na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Bolońskiego, od początku brał udział w projekcie.

Stefano Alberghi jest absolwentem fizyki, członkiem zespołu zajmującego się projektem oraz badaczem w regionalnym ośrodku meteorologicznym.

Tłum. Katarzyna Dziedzic-Kocurek (Instytut Fizyki UJ) za zgodą Redakcji *The Physics Teacher* i autorów.

⁴ N.A. Unterman, *Amusement Park Physics, A Teacher's Guide*, 2nd ed. (J. Weston Walch, Portland, ME, 2001).