



# Introduzione alla fisica delle onde con Google Earth

(Pervenuto il 11.3.2012, approvato l'11.5.2012)

## ABSTRACT

We show how the illustrations of various natural phenomena visible in Google Earth can be used in school not only for teaching geography and geology but also for introducing the physics of waves.

## 1 Introduzione

La fisica delle onde che viaggiano sull'acqua è piuttosto complicata: le onde marine sono spesso utilizzate come esempio di fenomeno ondulatorio nei corsi elementari di fisica, ma come Feynman ha scritto in un suo famoso libro "esse sono il peggior esempio possibile, poiché in nessun caso sono come le onde sonore e luminose; esse hanno tutte le complicazioni che le onde possono avere". [1]

Per esempio, dal momento che con la pressione in gioco l'acqua si comporta come un fluido incompressibile, un'onda sulla sua superficie non può essere puramente trasversale: mentre l'onda procede in avanti, l'acqua si sposta dalla gola verso la cresta e le particelle d'acqua vicino alla superficie si muovono approssimativamente in circoli. [2] Anche stabilire la velocità di tale onda non è un facile problema. [3] Se l'acqua è profonda (più di una lunghezza d'onda), e la lunghezza d'onda  $\lambda$  è grande (più di un metro) la velocità di fase  $v_f = \omega/k$  (dove  $k = 2\pi/\lambda$ ) di un'onda approssimativamente sinusoidale è proporzionale alla radice quadrata di  $\lambda$ :

$$v_f = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (\text{acqua profonda, onde di gravità}), \quad (1)$$

dove  $g$  è l'accelerazione gravitazionale. Un'onda con più grande  $\lambda$  va più veloce di una con una più breve lunghezza d'onda.

Per esempio, il vento di una tempesta in mare aperto produce onde con varie  $\lambda$ : le onde con una più grande  $\lambda$  raggiungono la spiaggia prima delle altre. Il medesimo fenomeno accade quando è una barca o una nave a perturbare la superficie dell'acqua: le onde con lunghezza d'onda più lunga arrivano sulla battigia seguite da quelle con lunghezza d'onda più breve.

Se le onde sono molto piccole, come le increspature prodotte in un ondoscopio, la principale forza di richiamo non è la forza gravitazionale ma la tensione superficiale. Per tali onde, dette di capillarità, la velocità di fase è pari a

$$v_f = \sqrt{\frac{2\pi\tau}{\lambda\rho}} \quad (\text{onde di capillarità}), \quad (2)$$

dove  $\tau$  è la tensione superficiale e  $\rho$  la densità dell'acqua. Dunque, per questo tipo di onde, la velocità è più elevata in corrispondenza di lunghezze d'onda più brevi. Le onde di capillarità in acqua hanno lunghezze d'onda di 1 cm o meno.

In generale sulle onde abbiamo sia l'azione della forza gravitazionale che della tensione superficiale, per cui la formula che descrive meglio quel che avviene in realtà tiene conto di entrambi questi effetti [1]:

$$v_f = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} + \frac{2\pi\tau}{\lambda\rho}} \quad (\text{acqua profonda}). \quad (3)$$

Tuttavia qui di seguito prenderemo in considerazione solo onde in cui è la gravità a giocare il ruolo preponderante.

La velocità di gruppo  $v_g = d\omega/dk$  può essere dedotta dalle precedenti relazioni: da essa segue che per onde di gravità la velocità di gruppo è minore della velocità di fase, mentre per onde di capillarità la velocità di gruppo è più alta della velocità di fase. Ciò è la causa delle differenti forme di scie che si osservano quando le onde sono causate da una barca o da un bastone in moto nell'acqua [4].

Se l'acqua è molto bassa, cioè quando la profondità  $d$  è molto minore della lunghezza d'onda, è necessario prendere in considerazione gli effetti di attrito del fondo. In tal caso una migliore approssimazione per la velocità delle onde di gravità è conseguita dalla formula

$$v_f = \sqrt{gd} \quad (\text{acqua bassa, onde di gravità}). \quad (4)$$

Pertanto, in acqua bassa, onde con differenti lunghezze d'onda viaggiano alla medesima velocità, che dipende dalla profondità dell'acqua. Verso la spiaggia la profondità dell'acqua diminuisce e le onde che si avvicinano alla battigia tendono a rallentare.



Figura 1. Diffrazione attraverso un'apertura: a) Alessandria d'Egitto, 12/14/2010, coordinate: 31° 12' 28.56" N, 29° 53' 34.66" E; b) Théoule-sur-Mer, Francia, 10/26/2006, coordinate: 43° 31' 54.86" N, 6° 56' 59.41" E; c) Erosione circolare della spiaggia causata dalla diffrazione delle onde: Campo di Mare, Italia, 4/18/2010, coordinate: 40° 32' 27.33" N, 18° 04' 09.17" E. (Nel riportare le date a cui risalgono le immagini si è utilizzata la notazione americana di Google Earth, dove l'indicazione del mese precede quella del giorno).



Figura 2. a) Diffrazione prodotta da una nave: Cipro, 7/7/2007, coordinate:  $34^{\circ} 56' 27.21''$  N,  $33^{\circ} 39' 17.36''$  E; b) Diffrazione delle onde causata da una barriera di protezione: La Grande-Motte, Francia, 8/21/2006, coordinate:  $43^{\circ} 33' 18.71''$  N,  $4^{\circ} 05' 20.01''$  E.



Figura 3. Esempi di rifrazione, le onde cambiano la loro direzione di propagazione avvicinandosi alla spiaggia: a) Villaricos, Spagna, 4/26/2002, coordinate:  $37^{\circ} 14' 04.59''$  N,  $1^{\circ} 47' 04.79''$  E; b) Sardegna, 8/18/2010, coordinate:  $39^{\circ} 46' 12.64''$  N,  $8^{\circ} 27' 28.82''$  E; c) Chichiriviche, Venezuela, 4/27/2006, coordinate:  $10^{\circ} 55' 29.88''$  N,  $68^{\circ} 15' 26.93''$  W.

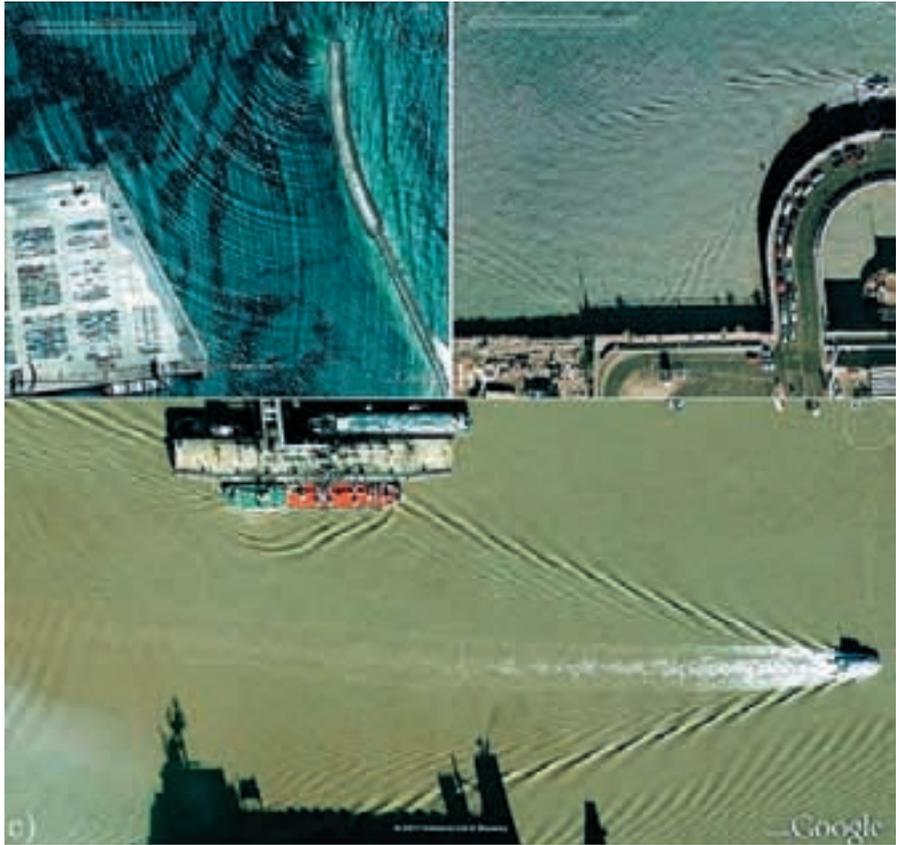


Figura 4. Esempi di diffrazione e riflessione di onde circolari: a) Port Elizabeth, Sud Africa 11/8/2006, coordinate:  $33^{\circ} 57' 19.98'' S$ ,  $25^{\circ} 38' 33.05'' E$ . Riflessioni della scia di una barca causate da un ostacolo: b) Tamigi, Londra, 11/06/2006, coordinate:  $51^{\circ} 29' 42.06'' N$ ,  $0^{\circ} 03' 37.86'' E$ ; c) Tamigi, Londra, 11/06/2006, coordinate:  $51^{\circ} 28' 05.40'' N$ ,  $0^{\circ} 15' 18.12'' E$ .

A dispetto della difficoltà della materia, molti dei fenomeni che accadono sulla superficie dell'acqua possono essere qualitativamente descritti con i principi elementari insegnati a scuola e con alcuni dei concetti appena introdotti. Come già suggerito altrove [5] - [8], *Google Earth* può essere uno strumento di grande utilità per l'insegnamento della fisica. Gli studenti in genere trovano le immagini delle onde che appaiono sulla superficie del mare, dei laghi o dei fiumi più interessanti delle usuali illustrazioni presenti nei manuali, normalmente prese da esperimenti con l'ondoscopio o semplicemente disegnate. Per questa ragione crediamo che *Google Earth* [9] possa aiutare a introdurre in modo più efficace e coinvolgente alcuni concetti fondamentali della fisica ondulatoria. Per esempio, in *Google Earth* è possibile trovare molte belle illustrazioni di fenomeni come la riflessione, la rifrazione, la diffrazione e l'interferenza delle onde.

## 2 Alcuni esempi

Secondo il principio di Huygens [10], un fronte d'onda che colpisce i punti di un mezzo rende questi ultimi centri di nuovi disturbi e sorgenti di onde secondarie. La variazione dell'ampiezza di un'onda secondaria è massima nella direzione di propagazione e nulla nella direzione perpendicolare. Possiamo immagi-



Figura 5: Interferenza tra i fronti d'onda di due scie: a) Tamigi, Londra, 11/06/2006, coordinate:  $51^{\circ} 27' 40.79'' N$ ,  $0^{\circ} 16' 05.69'' E$ . Interferenza tra onde circolari provenienti da due aperture: b) Rimini, 5/28/2002, coordinate:  $44^{\circ} 05' 15.02'' N$ ,  $12^{\circ} 32' 26.07'' E$ . Interferenza tra due sorgenti di onde secondarie: c) Chao Phraya River, Bangkok, Thailandia, 8/20/2010, coordinate:  $13^{\circ} 36' 40.11'' N$ ,  $100^{\circ} 34' 46.60'' W$ .

nare un fronte di un'onda costituito da tante onde di Huygens secondarie. Quando il fronte raggiunge un punto vicino ad un ostacolo, o in generale un altro punto del mezzo, quel punto diviene la sorgente di un'altra onda secondaria circolare. In questo modo possiamo comprendere intuitivamente l'allargamento delle onde nel passaggio attraverso un'apertura o perché esse possono scavalcare una barriera.

Per esempio, in Fig. 1 abbiamo esempi di diffrazione che ci ricordano l'esperienza della singola fenditura: le barriere di protezione dei porti e delle spiagge diffrangono onde approssimativamente piane trasformandole in onde circolari. Le onde diffratte distribuiscono la loro energia su fronti d'onda circolari. Ciò produce la caratteristica erosione delle spiagge mostrate in Fig. 1c. In Fig. 2a e Fig. 2b sono presenti altri esempi di come le onde possono superare degli ostacoli sfruttando l'effetto della diffrazione.

Se le onde raggiungono un'area dove l'acqua è più bassa, l'attrito con il fondo le fa rallentare (vedi la formula (3)). Le onde in acqua più bassa si propagano più lentamente e la loro lunghezza d'onda diminuisce. Esse possono quindi cambiare la loro direzione di propagazione ed essere soggette a rifrazione. Quando i fronti d'onda si avvicinano ad una spiaggia formando con essa un certo angolo,

essi si piegano e tendono a divenire paralleli alla linea della spiaggia. Esempi di rifrazione delle onde marine sono rappresentati nelle immagini di Fig. 3.

Lo strumento "righello" di Google Earth (nella barra superiore degli strumenti) ci permette di misurare la distanza tra due punti geografici. Gli studenti possono quindi misurare la lunghezza d'onda e calcolare la velocità di un'onda in acqua profonda applicando l'Eq. (1). Per esempio, per  $\lambda = 100$  m abbiamo una velocità  $v_{fase} = 12,5$  m/s. Se è possibile stimare la profondità dell'acqua, gli studenti possono anche calcolare la velocità in acqua bassa con l'Eq. (4): con  $d = 1$  m otteniamo  $v_{fase} = 3,1$  m/s.

Quando le onde incontrano un grande ostacolo come una scogliera o una barriera artificiale esse si riflettono indietro. Nella Fig. 4 ci sono esempi di tali riflessioni. Esaminando le immagini di Google Earth gli studenti possono verificare la legge di riflessione: l'angolo di incidenza delle onde è pari all'angolo di riflessione.

Qualche volta le onde riflesse interferiscono con le onde entranti, come possiamo osservare in queste fotografie (in acqua bassa anche rifrazione e diffrazione sono spesso combinate insieme. Per esempio, questo probabilmente accade nelle Fig. 2 e Fig. 3c).

La sovrapposizione di creste o di gole tra due onde rende le creste ancora più alte e le gole ancora più profonde. La sovrapposizione di una cresta con una gola tende a cancellare la perturbazione ondulatoria. Questa è l'interferenza tra onde che può osservarsi in Fig. 5. La Fig. 5b potrebbe essere un divertente esempio dell'esperimento di interferenza ondulatoria con due fenditure, mentre in Fig. 5c abbiamo l'interferenza tra onde circolari provenienti da due sorgenti secondarie.

### 3 Conclusioni

Gli studenti potrebbero cercare in Google Earth i propri esempi di fenomeni ondulatori: ciò sarebbe istruttivo e allo stesso tempo divertente. Essi, con l'aiuto degli insegnanti, potrebbero quindi paragonare le foto trovate con le tradizionali immagini presenti nei manuali.

Suggeriamo di esaminare le foto satellitari di Google Earth prese sulle grandi città costiere, sui grandi porti, sulle località marine più famose e sui grandi fiumi.

Per introduzioni semplici alla fisica delle onde si possono consultare i libri [2, 3]. Per altre meno elementari presentazioni si vedano invece, per esempio, [11, 12]. Introduzioni generali possono trovarsi in [13]-[16].

### Bibliografia

- [1] FEYNMAN R.P., LEIGHTON R.B. & SANDS M. 1989, *The Feynman Lectures on Physics* Vol. 1 (Reading MA: Addison-Wesley) pp. 51/7-51/10. Edizione bilingue It-Ing.: *La Fisica di Feynman* Vol. 1 parte 2 (Amsterdam: Inter European Editions) pp. 51/10-51/14.
- [2] BARBER N.F. 1969, *Water Waves* (London: Wykeham Publications).
- [3] BASCOM W. 1964, *Waves and Beaches* (Garden City, New York: Anchor Books). Trad. it.: *Onde e spiagge* (Bologna: Zanichelli) 1966.
- [4] LIGHTHILL J. 2001, *Waves in Fluids* (Cambridge: Cambridge University Press) pp. 269-79.
- [5] RYDER B.A., 2007, "Journey to the Ends of the Earth", *Phys. Educ.* **42** pp. 435-7.
- [6] AGUIAR C.E. and SOUZA A.R. 2009, "Google Earth Physics", *Phys. Educ.* **44** pp. 624-626.
- [7] LOGIURATO F. and DANESE B. 2010, "Physics of Waves with Google Earth", *AIP Conf. Proc.* **1263** pp. 208-211.
- [8] Una versione più breve del presente lavoro è pubblicata in inglese in: LOGIURATO F. 2012, "Teaching Waves with Google Earth", *Phys. Educ.* **47** pp. 73-77. (e-print in: arXiv:1201.0001v1 [physics.ed-ph])
- [9] Il software Google Earth è scaricabile dal sito <http://earth.google.com/>  
Le immagini di Google Earth sono gratuite e possono essere usate liberamente per fini non commerciali. Ricordiamo che Google Earth aggiorna periodicamente le sue foto, cosicché queste possono cambiare nel tempo. Tuttavia un'opzione nel software ci permette di vedere anche le vecchie immagini in archivio (icona orologio nella barra superiore degli strumenti).

- [10] FRENCH A.P. 1971, *Vibrations and Waves* (London: Thomas Nelson and Sons LTD).
- [11] COULSON C.A. 1977, *Waves - A Mathematical Account of the Common Types of Wave Motion* (New York: Longman Inc).
- [12] STOKER J.J. 1957, *Water Waves* (New York: Publishers LTD).
- [13] PIERCE J.R. 1981, *Almost All About Waves* (The Massachusetts Institute of Technology).
- [14] CROWELL B. 2006, *Vibrations and Waves - Light and Matter 2.2 ed.*, Vol. 3, manuale scaricabile liberamente all'indirizzo: [www.lightandmatter.com](http://www.lightandmatter.com).
- [15] HALLIDAY D., RESNICK R. and WALKER J. 2005, *Fundamentals of Physics 7th ed.* (New York: John Wiley & Sons). Trad.It.: *Fondamenti di fisica 6 ed.* 2006. Onde 1 pp. 356-381, Onde 2 pp. 384-407.
- [16] SCHILLER C. 2011, *Motion Mountain - The Adventure of Physics 25 ed*, Vol. 1, manuale scaricabile liberamente all'indirizzo: [www.motionmountain.net](http://www.motionmountain.net).

# NATURALMENTE

notizie settembre 2012

Ricordo di S. J. Gould a 10 anni dalla scomparsa  
25 anni di NATURALMENTE - eccezionalmente ancora in vita  
Limonaia, vicolo del Ruschi - Pisa: 4 Dicembre, ore 15.30-19.30

Prosegue l'organizzazione con la Limonaia di Pisa dell'iniziativa su Gould,  
alla quale sarà affiancato l'omaggio ai 25 anni della rivista.

## Tavola rotonda nel pomeriggio alla Limonaia

In via di definizione l'articolazione della tavola rotonda  
che si svolgerà alla Limonaia il 4 Dicembre ore 15.30-19.30

## NATURALMENTE ha 25 anni: cosa farà da grande?

### In ricordo di S. J. Gould, un darwinista fuori dal coro

Introduzione (M. Turchetto)

*Stephen J. Gould, l'uomo, la ragione e la passione* (A. M. Rossi)

*Gli equilibri punteggiati messi alla prova* (M. Ferraguti)

*Gli strumenti dell'evoluzionista* (P. Francalacci)

*Gli insegnamenti di S. J. Gould* (B. Danesi)

In preparazione *Il ricordo di Gould*, un volume con i contributi di:

ROSSI A. M., *Stephen J. Gould: l'uomo, la ragione e la passione*

FERRAGUTI M., *Gli equilibri punteggiati messi alla prova*

ROSSI A. M., *Adattamento e esattamento: un dibattito incandescente*

LANGENECK J., *S. J. Gould e James Lovelock*

CAVAZZINI A., *Storia delle scienze e conoscenza oggettiva. Stephen Jay Gould*

GUALANDI A., *Ever since Gould. Verso un nuovo paradigma nelle scienze dell'uomo*

GAGLIASSO E., *Determinare o delimitare?*

BUIATTI M., *Un evoluzionista agnostico nel dibattito tra scienza e religione*

BELLO G., *Gould's progress Ovvero Stephen Jay Gould biometrista*

DANESI B., *Gli insegnamenti di S. J. Gould*

TURCHETTO M., *De minimis scientia curat.* Sul fascino degli scritti divulgativi di Stephen J. Gould

CONSIGLIERE S., *La scienza e gli avverbi*

FANTINI F., *La vita è un film?*

GALLO P., *Diecimila atti di gentilezza*

