

Le TIC per studiare fenomeni di diffrazione ed interferenza ottica

Daniele Buongiorno, Marisa Michelini, Lorenzo Santi, Alberto Stefanel¹

¹Unità di Ricerca in Didattica della Fisica, Università degli Studi di Udine

Via delle Scienze 206, 30100 Udine

buongiorno.daniele@spes.uniud.it, marisa.michelini@uniud.it, lorenzo.santi@uniud.it,
alberto.stefanel@uniud.it

Le nuove tecnologie giocano un ruolo sempre più importante nella vita quotidiana, pertanto il loro utilizzo nell'insegnamento della fisica ha una valenza metodologico-didattica legata alle moltissime opportunità offerte nel laboratorio sperimentale, di modellizzazione o di simulazione, ma hanno anche una valenza epistemica in quanto vengono utilizzate in tutti i laboratori di ricerca per condurre le misure. Nel campo specifico dell'insegnamento dell'ottica fisica, l'elaboratore offre delle opportunità particolarmente significative, perché consente un'analisi fenomenologica completa e permette delle attività di modellizzazione anche in merito al riconoscimento della natura della luce. È stata sviluppata una proposta didattica sulla diffrazione ottica da singola e doppia fenditura e da reticoli di diffrazione basata sull'utilizzo di un sistema di acquisizione via USB appositamente progettato e sviluppato e di software e ambienti di simulazione che consentono di costruire modelli interpretativi basati sui principi primi della fenomenologia.

1. Introduzione

Le tecnologie dell'informazione e della comunicazione (TIC) sono sempre più parte integrante della vita sociale di tutti, e ancor più hanno un ruolo determinante per l'educazione scientifica e della fisica in particolare, nella quale sono strumento e metodo di lavoro. Da un punto di vista epistemologico, gli studenti hanno la possibilità di entrare a contatto con i metodi e gli strumenti caratterizzanti la ricerca fisica, dal momento che l'acquisizione automatica dei dati è oggi il metodo per eseguire le misure in qualunque laboratorio di ricerca sperimentale [Michelini, 1992]. Simulazioni parametrizzate aiutano le esplorazioni di ipotesi e la progettazione di esperimenti, mentre la modellizzazione è uno degli strumenti cardine della moderna fisica teorica. Non è quindi a caso che le risorse basate sulle TIC sono diventate strumenti didattici come i libri di testo [Van den Berg et al, 2007], accompagnate dagli altrettanto potenti nuovi metodi di interazione docente-studente come ambienti web

interattivi [Challapalli et al, 2012a] per attività sincrone e asincrone e lavagne interattive multimediali [Challapalli et al, 2012b; 2012c] per la discussione dei diversi concetti affrontati anche in lezioni partecipate a grande gruppo [Sokoloff e Thornton, 1997]. La funzionalità didattica di tali strumenti è tanto più grande quanto più riescono a integrarsi nella trattazione di singoli temi. È perciò importante preparare gli studenti ad un impiego significativo delle TIC per l'indagine fisica, offrendo loro la possibilità di comprenderne il ruolo disciplinare specifico, oltre a quello di facilitazione di carattere generale, in modo che usino consapevolmente tali strumenti.

Uno dei principali contributi per l'apprendimento scientifico discusso in letteratura è l'acquisizione dati con la visualizzazione in tempo reale in forma grafica [Sokoloff et al, 2007; Sokoloff e Thornton, 1997; Sassi, 2001; Sassi, 2002]. Esso offre la possibilità di effettuare una risonanza cognitiva tra l'osservazione del fenomeno nel suo evolversi e il modo in cui la fisica lo rappresenta formalmente mediante grafici [Sassi, 2001; Benciolini et al, 2002; Stefanel et al, 2002]. Ciò aiuta gli studenti nella costruzione del pensiero formale e nella conquista di competenza nella lettura dei grafici e nell'individuazione di variabili e relazioni, ispirando nuovi grafici che portano verso un livello interpretativo per la descrizione fisica dei fenomeni [Van den Berg et al, 2007]. Gli strumenti di analisi dati, come anche il diffuso e versatile foglio elettronico, aiutano gli studenti a muovere i primi passi verso quel ragionamento funzionale di correlazione tra le variabili e di distinzione tra variabili e parametri che permette in fisica di redigere leggi e caratterizzare andamenti da confrontarsi con ipotesi o teorie.

Il presente contributo illustra una proposta di ricerca didattica in cui si integrano le valenze sopra descritte delle TIC nel contesto dell'ottica fisica. Si presenta in particolare una proposta didattica sui fenomeni ottici di diffrazione e interferenza della luce focalizzando in particolar modo sul ruolo didattico delle nuove tecnologie e dell'elaboratore, sia nel laboratorio sperimentale sia in quello di modellizzazione.

2. Le basi della proposta

La diffrazione ottica è un fenomeno ponte tra diverse teorie, in particolare tra ottica geometrica e ondulatoria e tra ottica ondulatoria e interpretazione quantistica della luce. Rappresenta il caso reale di interferenza e ha un ruolo centrale nel definire il potere risolutivo degli strumenti ottici. La sua interpretazione per mezzo del principio di Huygens-Fresnel ne permette di capire le potenzialità interpretative nel raccordo tra ipotesi ed esperimento [Gonzales, 1993; Michelini et al, 2006], inoltre può costituire il riferimento per lo studio di diversi fenomeni, come la diffrazione del suono, dei raggi X, di elettroni e di neutroni. Il fenomeno gioca un ruolo importante nell'apprendimento della fisica su diversi piani (epistemologico, formale, di costruzione del pensiero teoretico e applicativo) come finalmente anche previsto nei curricula di fisica delle scuole secondarie superiori.

Una difficoltà legata alla sua trattazione a questo livello scolastico è rappresentata dal riuscire a collegare aspetti fenomenologici e teorico/interpretativi: la ricerca sul piano dei processi di apprendimento ha infatti evidenziato la tendenza degli studenti ad usare il modello geometrico per interpretare fenomeni di diffrazione [Ambrose et al, 1999; Rabe e Mikelskis, 2006], la difficoltà a includere in uno schema coerente i concetti di fronte d'onda e raggio [Colin e Viennot, 2000] e quella di considerare un'onda come una perturbazione che si propaga nello spazio [Wittmann, 2002].

Le nuove tecnologie danno un contributo importante al superamento di queste difficoltà offrendo contemporaneamente la possibilità di avere esperienza di raccolta e analisi dati, fare previsioni teoriche, capire cosa significa fare un fitting di dati sperimentali e non soltanto una descrizione di un andamento in termini formali (smoothing). La loro integrazione fa guadagnare competenza metodologica e non soltanto conoscenza sul fenomeno.

La proposta didattica sviluppata si inquadra in ricerche che hanno come riferimento teorico per la progettazione quello del Model of Educational Reconstruction (MER) [Duit et al, 2005] che prevede la ricostruzione in chiave didattica dei contenuti dopo aver individuato la rilevanza del tema trattato e le tipiche difficoltà degli studenti. Essa pone inoltre attenzione agli angoli strategici e ai dettagli critici, evitando il riduzionismo, per offrire percorsi concettuali coerenti, occasioni per costruire personali apprendimenti, gestire concetti fondamentali e acquisire competenze di strumenti e metodi per affrontare anche le difficoltà legate all'uso del formalismo matematico, analiticamente complesso ma essenziale per la comprensione del fenomeno.

Questa proposta offre un'esplorazione qualitativa del fenomeno seguita dall'individuazione delle relative leggi, sulla quale si innesca in termini problematici l'interpretazione da gestire in tre modalità: quella classica basata sul modello ondulatorio, nell'approssimazione di Fraunhofer e quella tradizionale basata sul metodo dei fasori, ma soprattutto proponendo due approcci originali completamente diversi, in particolare quello di derivare le condizioni per i massimi e per i minimi in termini formali per leggerne il significato fisico e quella, all'opposto, di ricavare le conseguenze del modello di Huygens-Fresnel senza nessuna approssimazione. Si portano quindi gli studenti ad avere diretta esperienza della propagazione di una perturbazione nello spazio sia in termini di direzione che in termini di ampiezza, enfatizzando sul ruolo concettuale del formalismo piuttosto che sui tecnicismi legati al calcolo.

La proposta presentata sviluppa quella già messa a punto sulla diffrazione da singola fenditura [Mascellani et al, 1992; Corni et al, 1993] e sperimentata sia con studenti di scuola secondaria [Michelini e Stefanel, 2015] che nella formazione insegnanti [Michelini et al, 2004; 2006] ampliando l'analisi al caso della doppia fenditura, per rendere conto in termini fisici della modulazione tra la distribuzione di interferenza e quella di diffrazione e per giustificare infine le caratteristiche diffrangenti di un reticolo ottico. Essa si basa sull'utilizzo del dispositivo Lucegrafo [Gervasio e Michelini, 2009], un sistema di acquisizione dati di intensità luminosa in funzione della posizione collegato alla porta USB

dell'elaboratore, oltre che sull'utilizzo di modelli e simulazioni. La proposta si pone l'obiettivo di rendere familiari gli studenti con i tipici fenomeni dell'ottica fisica, di far guadagnare loro competenza nel processo di costruzione di modelli e di far acquisire loro esperienza nel processo di costruzione di interpretazioni, imparando a formulare ipotesi e a confrontarle con gli esiti sperimentali [Michelini, 2010].

3. Hardware - il sistema Lucegrafo

In Fig. 1 è rappresentato il sistema "Lucegrafo" [Gervasio e Michelini, 2009], costituito da un fotodiodo inserito in un supporto di alluminio solidale con il cursore di un potenziometro lineare, in modo tale che il segnale ottico sia correlato con la posizione in funzione della resistenza del potenziometro. Entrambi i sensori (potenziometro e fotodiodo) sono collegati all'elaboratore via USB. La distribuzione globale di intensità luminosa può essere qualitativamente analizzata osservandola sullo schermo di alluminio, di dimensioni 12 cm x 2 cm, dietro al quale è alloggiato il fotodiodo, solidale con il sensore. Per diaframmare il sensore, al centro dello schermo è presente una fenditura verticale di dimensioni 0,4 mm x 10 mm. L'intensità misurata, rappresentata sia in forma grafica che tabulare, è espressa in unità arbitrarie proporzionali all'intensità luminosa incidente sul sensore. Il cursore si muove scorrendo su una vite senza fine, azionata manualmente agendo su un'apposita manopola (a sinistra nel dispositivo di Fig. 1). Il software di acquisizione registra così le coppie di valori intensità-posizione.

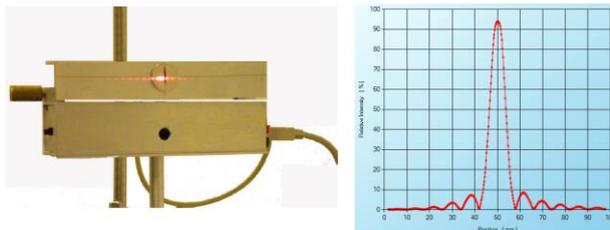


Fig. 1 - Dispositivo Lucegrafo ed esempio di acquisizione dati di distribuzione di intensità luminosa dovuta a diffrazione da singola fenditura

4. Modellizzazione e simulazione

Le potenzialità di calcolo e di visualizzazione grafica offerte dall'elaboratore permettono anche una serie di attività didattiche basate sulla modellizzazione e sulla simulazione particolarmente importanti nel caso dell'ottica fisica.

Lo scopo della modellizzazione è quello di rappresentare una situazione fisica per mezzo di un sistema astratto descritto dalle equazioni interpretative che legano le variabili in gioco. I concetti fondamentali alla base del fenomeno possono essere visualizzati in maniera semplice e intuitiva, anche se richiedono complicate manipolazioni formali, partendo da principi primi. In questa

prospettiva è stato sviluppato un software scritto in linguaggio C++ [Santi et al, 1993] che rende conto della distribuzione di intensità luminosa causata dall'interferenza di un numero dato di sorgenti puntiformi, semplicemente facendo un'ipotesi ondulatoria sulla natura della luce e sfruttando il principio di Huygens, che afferma che qualsiasi fenditura può essere pensata come un insieme di sorgenti secondarie sferiche e le distribuzioni di intensità osservate possono essere riprodotte come esito dell'interferenza di tutte le onde secondarie. All'interno dell'algoritmo sono definiti due cicli, uno relativo a tutte le sorgenti, l'altro relativo a ogni punto sullo schermo; in particolare, in ogni punto dello schermo la distribuzione di intensità osservata si può ottenere come quadrato della somma delle ampiezze delle singole onde. Su foglio elettronico lo si può invece implementare come segue: i dati numerici che il modello elabora vengono organizzati in forma tabulare, in cui ogni sorgente occupa una casella di una riga, e ogni punto dello schermo occupa una casella di una colonna. Lo studente gestisce l'implementazione della matrice delle onde secondarie replicando, quante volte necessario, il contenuto delle celle.

Sono inoltre disponibili simulazioni (<http://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=8888>) come per esempio quelle sviluppate in Easy Java Simulation (EJS) che permettono di visualizzare la distribuzione di intensità luminosa in funzione della posizione come pattern, ma anche come grafico. Tali applicazioni sono pertanto estremamente utili per riconoscere in tempo reale le conseguenze di una variazione di parametri di base, quali in questo caso, lunghezza d'onda della luce, distanza e larghezza delle fenditure e loro numero; di contro, l'utente non ha però accesso al modello.

5. La proposta didattica

La proposta didattica parte dal riconoscimento della diffrazione nella quotidianità e si sviluppa nell'esplorazione con il Lucegrafo delle distribuzioni di intensità luminosa prodotte da singola e da doppia fenditura per ricavare le leggi empiriche che le descrivono, consentendo così infine di rendere conto delle regolarità e delle caratteristiche della distribuzione di intensità luminosa prodotta dall'interazione della luce con un reticolo ottico.

Lo studio delle caratteristiche della figura di diffrazione viene effettuato partendo dall'acquisizione tramite Lucegrafo di una distribuzione di intensità di luce laser diffratta da una singola fenditura come descritto in [Mascellani et al, 1992; Corni et al, 1993]. Come nuovo contesto si propone di utilizzare una coppia di fenditure, ciascuna di larghezza a e distanti b . La distribuzione di intensità sullo schermo, posto a distanza D dalla coppia di fenditure, ha un involuppo caratteristico della figura di diffrazione da singola fenditura di larghezza a , con regolarità ben individuabili all'interno in termini di una serie regolare di massimi (M) e minimi (m) di intensità luminosa (Fig. 2).

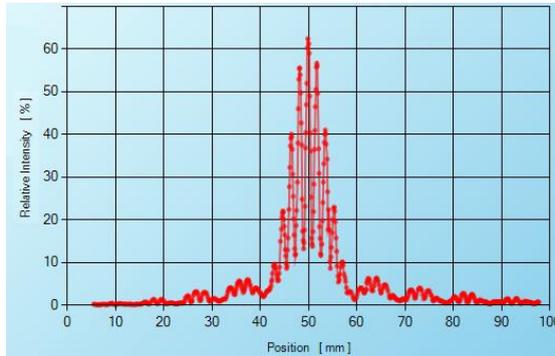


Fig. 2 - Interferenza da doppia fenditura: distribuzione dell'intensità luminosa acquisita con il Lucegrafo

Un'analisi più approfondita mostra come la retta interpolante che descrive le posizioni dei massimi passa per l'origine, mentre le posizioni dei minimi sono descritte da una retta il cui coefficiente angolare è circa il doppio dell'intercetta. In particolare, i due andamenti sono descritti rispettivamente dagli andamenti: $(x_M-x_0)/D = k'M$ e $(x_m-x_0)/D = k'm \pm k'/2$, con $k'=\lambda/b$. Entrambi gli andamenti sono simmetrici rispetto all'origine (Fig. 3).

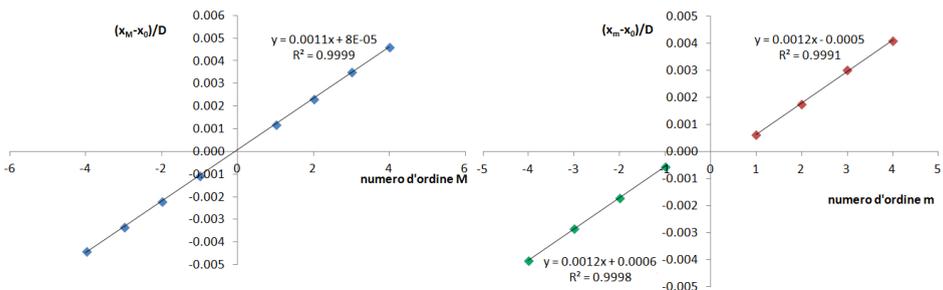


Fig. 3 - Analisi dati relativa alla figura di interferenza da doppia fenditura (massimi a sinistra, minimi a destra)

Se si diminuisce la distanza tra le fenditure, mantenendone invariata la larghezza si osserva che la separazione angolare tra i massimi aumenta; inoltre, a parità di condizioni, aumentando il numero di fenditure (per esempio utilizzandone tre) si nota come la posizione dei massimi di intensità luminosa rimanga la stessa, ciò che cambia è la loro definizione, dal momento che diventano più stretti e intensi (Fig.4).

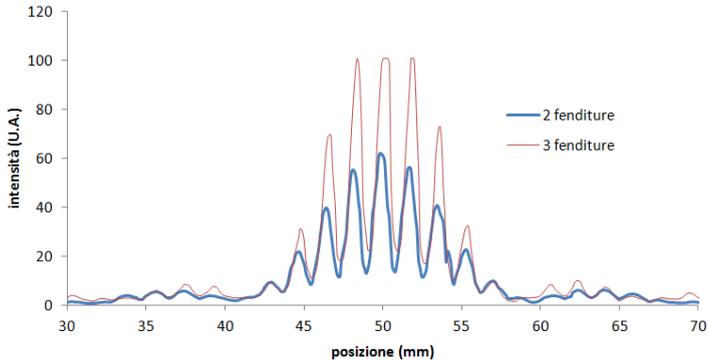


Fig. 4 - Distribuzione di intensità nel caso di due e tre fenditure elaborata con il foglio elettronico

Queste esplorazioni forniscono le basi fenomenologiche per prevedere il tipo di distribuzione che si ottiene nel caso di un reticolo di diffrazione, in cui la distanza tra le moltissime fenditure è molto piccola; ci si aspetta perciò che la distribuzione di intensità luminosa sia più allargata, ma con le stesse regolarità già osservate per quanto riguarda le posizioni dei massimi. Queste previsioni sono confermate dall'evidenza, anche perché si nota come sia necessario, a causa dell'elevata apertura angolare della distribuzione di intensità luminosa, avvicinare di molto il reticolo al sensore per osservare anche solo i massimi del primo ordine (Fig. 5). La distribuzione di intensità prodotta da un reticolo mostra dei picchi ben concentrati e separati, e si nota perciò, come in questo limite, prevalga il fenomeno dell'interferenza su quello della diffrazione. Si crea in questo modo una continuità interpretativa che rende conto della transizione dalla figura di diffrazione da singola fenditura a quella causata da un reticolo.

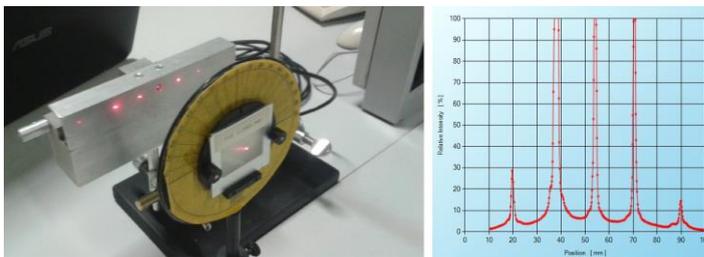


Fig. 5 - Distribuzione di intensità luminosa causata dalla diffrazione su un reticolo

L'esplorazione fenomenologica e le analisi descritte possono motivare a ricercare un modello interpretativo. Nella proposta qui presentata tale processo viene effettuato facendo solamente l'assunzione di base che la luce possa essere descritta come un'onda di cui il principio di Huygens ne descrive la propagazione. Si propone pertanto una modellizzazione basata su questi

principi primi [Santi et al, 1993] in cui allo studente viene semplicemente richiesto di specificare la situazione fisica considerata (numero di fenditure, larghezza e separazione delle stesse, distanza fenditure-schermo), il numero di sorgenti secondarie posizionate lungo ciascuna fenditura e il tipo di onda (piana nell'approssimazione di Fraunhofer o sferica nell'approssimazione di Fresnel). Al software è devoluto il calcolo della somma della sovrapposizione delle onde secondarie, e lo studente è quindi sgravato dal calcolo specifico, potendosi focalizzare solamente sull'implementazione del modello e sul confronto tra i risultati sperimentali e quelli del modello.

Tale attività di modellizzazione, fondamentale per passare dal piano fenomenologico a quello interpretativo viene implementata in modo semplice in questi ambienti software specificamente dedicati, su foglio elettronico, o in ambienti appositamente sviluppati per la creazione di simulazioni all'elaboratore, come ad esempio EJS. In particolare questa simulazione permette di riconoscere gli effetti salienti che la transizione dalla doppia fenditura al reticolo ha sulla distribuzione di intensità luminosa, motivando così l'interpretazione delle proprietà diffragenti di un reticolo.

6. Conclusioni

La rilevanza della diffrazione ottica sul piano disciplinare, epistemologico e storico ne pone la centralità in un curriculum di fisica. Le note difficoltà di apprendimento degli studenti in tale ambito vengono tipicamente affrontate dagli approcci formali utilizzati comunemente e coadiuvate da esperimenti che si limitano ad analizzare posizioni di massimi e minimi. Per dare esperienza sul piano dei contenuti, discutendo le caratteristiche del fenomeno sul piano qualitativo e quantitativo, le leggi che lo caratterizzano e i modelli che consentono di interpretarlo, è stata sviluppata la proposta didattica qui presentata, che si avvale del contributo didattico che le tecnologie dell'informazione e comunicazione possono offrire. È stato sviluppato un sistema di acquisizione via USB (Lucegrafo) per lo studio sperimentale delle distribuzioni di intensità prodotte dalla diffrazione di luce. Le leggi fenomenologiche che descrivono tali distribuzioni emergono da semplici analisi dei dati sperimentali. Software di modellizzazione consentono di costruire modelli interpretativi della fenomenologia basati su principi primi passando dal piano descrittivo della fenomenologia a quello interpretativo, offrendo agli studenti la possibilità di concentrarsi sugli aspetti concettuali dei modelli che implementano piuttosto che su quelli formali. Le simulazioni disponibili, infine, rendono conto della fenomenologia in tempo reale, sfruttando le potenzialità visuali e di interazione in tempo reale di tale strumento, potendosi così concentrare sui risultati della simulazione.

Bibliografia

Ambrose B.S., Shaffer P.S., McDermott L.C., An investigation of students understanding of single slit diffraction. *Am. J. of Physics*, 67, 1999, 146-155.

Benciolini L., Michelini M., Odorico A., Formalizing thermal phenomena at 3-6 year old: action research in a teacher training activity, in *Developing Formal Thinking in Physics*, in Michelini M. e Cobal M. (eds.) *Girep Book of selected papers*, Forum, Udine, 2002, 391-396.

Challapalli S.R.C.P., Fera G., Michelini M., Pugliese E., Stefanel A., Vercellati S., E-learning nella formazione all'innovazione didattica in fisica moderna in *Tecnologie informatiche per la Didattica*, *Didamatica* 2012, <http://mondodigitale.aicanet.net/2012-2/didamaticaPAPER/FULL/F138.pdf>, 2012a.

Challapalli S.R.C.P., Michelini M., Mossenta A., Stefanel A., Vercellati S., La LIM per favorire l'apprendimento: proposte di attività per futuri insegnanti primari sui fenomeni elettrostatici e magnetici, in *Tecnologie informatiche per la Didattica*, *Didamatica* 2012, <http://mondodigitale.aicanet.net/2012-2/didamaticaPAPER/FULL/F154.pdf>, 2012b.

Challapalli S.R.C.P., Michelini M., Stefanel A., 2012, Dall'esperimento al modello con la LIM nella scuola di base: il caso dell'ottica, in *Tecnologie informatiche per la Didattica*, *Didamatica*, <http://mondodigitale.aicanet.net/2012-2/didamaticaPAPER/FULL/F153.pdf>, 2012c.

Colin P., Viennot L., Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualization cohérente de la diffraction et de l'image optique. *Didaskalia*, 17, 2000, 29-54.

Corni F., Mascellani V., Mazzega E., Michelini M., Ottaviani G., A simple on-line system employed in diffraction experiments, in Pereira L.C., Ferreira J.A., Lopes H.A. (eds.), *Light and Information*. Braga: Univ. do Minho, 1993, 381-388.

Duit R., Gropengießer H., Kattmann U., Toward science education research: The MER, in Fisher H.E. (ed.), *Developing Standard in RSE*. London: Taylor, 2005, 1-9.

Gervasio M., Michelini M., Lucegrafo. A USB Data Acquisition System, in Lamboune B. et al. (eds.), *MPTL14 Proc.* <http://www.fisica.uniud.it/URDF/mptl14/contents.htm>, 2009.

Gonzales A.M., Light stories: a brief history of light, in Pereira L.C., Ferreira J.A., Lopes H.A. (eds.), *Light and Information*. Braga: Univ. do Minho, 1993, 38-80.

Mascellani V., Mazzega E., Michelini M., Un sistema per esperienze di ottica online. *La Fisica nella Scuola*, XXV (1), 1992, 132.

Michelini M., L'elaboratore nel laboratorio didattico di fisica: nuove opportunità per l'apprendimento. *Giornale di Fisica*, XXXIII, 4, 1992, 269.

Michelini M., Stefanel A., Santi L., Teacher training strategies on physical optics, in *Quality Development in the Teacher Education and Training*, Michelini M. ed., Forum, Udine, 2004, 568-576.

Michelini M., Santi L., Stefanel A., Esperimenti e modelli in ottica fisica, in Griggio C. (a cura di), *Incontri di discipline per la didattica*. Milano: Franco Angeli, 2006, 365-392.

Michelini M. (2010), Building bridges between common sense and physics description, in Menabue L., Santoro G. (eds.), *STE*. Bologna: CLUEB, 2010, 257-274.

Michelini M., Stefanel A., Upper secondary students face optical diffraction using simple experiments and on-line measurements, in Triay R. (ed.), *FFP14*, 2015.

Rabe T., Mikelkis H.F., The Role of Language in Learning Physics, in Pintò R., Couso D. (eds.), *Science Education Research*. Barcelona: Springer, 2007, 489-502.

Santi L., Mazzega E., Michelini M., Understand Interference by means of computer model, in Pereira L.C., et al. (eds.), *Light & Information*. Braga: Univ. do Minho, 1993, 372-380.

Sassi E., Computer supported lab-work in physics education: Advantages and problems. *Physics Teacher Education Beyond 2000*. R. Pinto, Surinach, S. Paris, Elsevier, 2001, 57-64.

Sassi E., Real-Time approaches in the development of formal thinking in physics, in Michelini M. e Cobal M. (eds.) *Proc. of First International Girep Seminar 2001 "Developing Formal Thinking in Physics"*, Forum Editrice Udine, 2002, 40-51.

Sokoloff D. R., Thornton R. K., Using interactive lecture demonstrations to create an active learning environment, *AIP Conf. Proc.* 399, 1997, 1061.

Sokoloff D.R., Thornton R. K., Laws P.W., *RealTime Physics: Active Learning Labs Transforming the Introductory Laboratory*. *Eur. J. of Phys.*, 28, 2007, 83-94.

Stefanel A., Moschetta C., Michelini M., Cognitive Labs in an informal context to develop formal thinking in children, in *Developing Formal Thinking in Physics*, in Michelini M. e Cobal M. (eds.) *Girep Book of selected papers*, Forum, Udine, 2002, 276-283.

Van den Berg E., Ellermeijer T., Slooten O., *Modelling in Physics and Physics Education*, GIREP-Conference, Amstel, Univ. of Amsterdam, Amsterdam, 2007.

Wittmann M.C., The object coordination class applied to wave pulses: analysing student reasoning. *International Journal of Science Education*, 24 (1), 2002, 97-118.