

Strumenti e metodi per l'apprendimento della diffrazione ottica: un fenomeno ponte nella storia della fisica

Marisa Michelini - Unità di Ricerca in Didattica della Fisica, Università di Udine - marisa.michelini@uniud.it

Lorenzo Santi - Unità di Ricerca in Didattica della Fisica, Università di Udine - lorenzo.santi@uniud.it

Alberto Stefanel - Unità di Ricerca in Didattica della Fisica, Università di Udine - alberto.stefanel@uniud.it

Abstract: La diffrazione ottica rappresenta un fenomeno ponte nella storia della fisica. fissa il limite risolutivo di strumenti ottici e delle osservazioni stellari; fonda la base interpretativa per una molteplicità di applicazioni, come la diffrazione del suono, dei raggi X, di elettroni e di neutroni. Nel curriculum di fisica dei giovani può giocare un ruolo importante come referente concettuale su diversi piani: epistemologico, formale e di costruzione del pensiero teorico, applicativo. Le proposte didattiche della tradizione scolastica e dei libri di testo non ne focalizzano il ruolo centrale soprattutto per le difficoltà insite in una trattazione formale. Con apparati semplici, si possono effettuare semplici esplorazioni fenomenologiche di tipo tradizionale per rilevare con incertezze accettabili le posizioni dei minimi e dei massimi. Per un'analisi della distribuzione di intensità, oggi, si possono utilizzare le opportunità offerte dall'uso delle nuove tecnologie e in particolare da sensori collegati in linea con l'elaboratore. Abbiamo sviluppato un sistema di acquisizione dati di intensità luminosa e posizione e ambienti software per simulazioni costruite su modelli basati su principi primi. Una proposta didattica utilizza tali strumenti per l'analisi della distribuzione di intensità luminosa, allo scopo di costruire le leggi del fenomeno ed un parallelo lavoro di interpretazione da principi primi per quel confronto tra teoria ed esperimento che costituisce una delle basi epistemiche della fisica. La sperimentazione didattica effettuata in diversi contesti ha permesso di mettere a punto specifiche indicazioni per la scuola.

Keywords: Ricostruzione didattica, Diffrazione, Modelli storici, Natura della luce.

1. Introduzione

La diffrazione ottica rappresenta un fenomeno ponte nella storia della fisica: ha tracciato il passaggio tra il modello corpuscolare e quello ondulatorio nell'interpretazione della natura della luce e propone la comprensione dell'interferenza quantistica in un conte-

sto familiare. Essa è l'esempio reale di interferenza, fissa il limite risolutivo degli strumenti ottici sia nelle osservazioni microscopiche, sia in quelle stellari. Fonda la base interpretativa per una molteplicità di applicazioni, come la diffrazione del suono, dei raggi X, di elettroni e di neutroni. Permette, inoltre, di comprendere nella sua potenzialità interpretativa il principio di Huygens-Fresnel, offrendo significativa occasione di raccordo tra ipotesi interpretative (modellizzazione e simulazione) ed esperimento. (Gonzales 1993; Michelini *et al.* 2006).

Nel curriculum di fisica dei giovani può giocare un ruolo importante come referente concettuale su diversi piani: epistemologico, formale e di costruzione del pensiero teorico, applicativo. Le proposte didattiche della tradizione scolastica e dei libri di testo non ne focalizzano il ruolo centrale soprattutto per le difficoltà insite in una trattazione formale. Semplici esplorazioni fenomenologiche, di tipo tradizionale, possono essere condotte con materiali di basso costo come puntatori laser, un capello, fenditure auto-costruite o i bordi di lame. Tali esperimenti permettono di rilevare con incertezze accettabili le posizioni dei minimi e dei massimi. Difficili e costosi diventano esperimenti con strumentazione tradizionale, in cui siano misurabili le intensità di massimi e minimi. È questo il caso in cui le tecnologie dell'informazione e comunicazione possono dare un contributo significativo e importante per la didattica (Mascellani *et al.* 1988; Hirata 1985).

Come contributo di Ricerca e Sviluppo (Lijense 1995), abbiamo messo a punto un sistema di acquisizione dati di intensità luminosa in funzione della posizione collegato alla porta USB dell'elaboratore (Gervasio, Michelini 2009). Software e ambienti di simulazione sono stati appositamente progettati, affinché gli studenti possano implementare modelli basati su principi primi concentrandosi sulle assunzioni concettuali alla base del modello e sul confronto con gli esiti sperimentali, sgravandoli della gestione degli aspetti computazionali (Santi *et al.* 1993). Lo sviluppo di tali strumenti didattici ha consentito di mettere a punto una proposta di percorso didattico, che prospetta l'analisi dei dati allo scopo di costruire le leggi del fenomeno e un parallelo lavoro di interpretazione da principi primi, per quel confronto teoria-esperimento che costituisce base epistemica della fisica (Corni *et al.* 1993; Mascellani *et al.* 1988, 1992; Michelini 2010b; Michelini *et al.* 2002, 2006).

In questo lavoro se ne presentano le caratteristiche generali, discutendo le basi teoriche dell'approccio di ricerca seguito. Si presentano infine le specifiche indicazioni per la scuola emerse dalle sperimentazioni di ricerca condotte con gli studenti sulle seguenti domande: RQ1: Come descrivono gli studenti i fenomeni quotidiani di diffrazione? RQ2: Qual è il ruolo dell'esplorazione qualitativa di fenomeni di diffrazione? RQ3: Quale è il ruolo di un'analisi quantitativa della figura di diffrazione di luce?

2. Impostazione dell'approccio di ricerca

Il nostro lavoro si basa sullo sviluppo di proposte basate sulla ricerca didattica in prospettiva culturale, focalizzando sulla fondazione dei concetti di base così come sui metodi e le applicazioni nella ricerca in fisica. Pur con carattere fortemente innovativo, tali

proposte sono progettate per integrarsi nel curriculum di fisica. Offrono esperienza di come la fisica moderna opera nella ricerca attiva e recupera conoscenze e modelli della fisica classica integrandoli con approcci basati sulle teorie sviluppate nel '900 (Michellini *et al.* 2015). Nei progetti didattici, si identificano percorsi verticali, che fungono da corridoi di proposte didattiche (Di Sessa 2004; Meheut, Psillos 2004) per traiettorie di apprendimento individuali e modalità di appropriazione per micro-passi concettuali (Michellini 2010a).

Il nostro approccio, secondo il riferimento teorico del *Model of Educational Reconstruction* (Duit *et al.* 2005), si basa su: A) l'individuazione della rilevanza disciplinare del contesto di studio; B) l'analisi delle modalità con cui gli studenti tipicamente apprendono, ragionano, si rapportano all'ambito disciplinare specifico; C) la ricostruzione in chiave didattica dei concetti fondanti tenendo conto di A) e B).

Si ri-analizza in termini problematici il contenuto scientifico, che si vuole affrontare, ri-costruendolo successivamente in prospettiva didattica. Ciò si integra con diversi tipi di ricerca: ricerche empiriche sui ragionamenti degli studenti durante l'apprendimento; *Design Based Research* (DBR) nella progettazione didattica; ricerca-azione in dialettica collaborativa scuola-università (Lijnse 1995; Di Sessa 2004). Gli approcci nel nostro lavoro sono basati non solo sul contenuto disciplinare (Fischer, Klemm 2005) per identificare strategie di cambiamento concettuale (Vosniadou 2008). Si pone attenzione a identificare angoli strategici e dettagli critici usati dalla conoscenza di senso comune per interpretare la fenomenologia (Viennot 1996), studiare in termini dinamici i ragionamenti dei ragazzi (Michellini 2010a), trovare nuovi approcci alla conoscenza della fisica (Viennot 1996; McDermott 2006; Michellini 2010a). Si sceglie di evitare il riduzionismo, per offrire coerenti percorsi formativi, occasioni per costruire personali apprendimenti, gestire concetti fondamentali, acquisire competenze di strumenti e metodi.

Nel caso specifico, si è già delineata nell'introduzione la rilevanza della diffrazione ottica sia nella vita quotidiana, sia nella storia della conoscenza scientifica e nelle applicazioni dell'ottica. L'interpretazione del fenomeno della diffrazione della luce richiede un'ipotesi ondulatoria sulla natura della luce e l'assunzione del solo principio di Huygens-Fresnel, secondo cui, ciascun punto di un fronte d'onda si comporta come una sorgente puntiforme secondaria. L'onda propagata è data punto per punto dalla sovrapposizione di tutte le onde sferiche secondarie. In genere la trattazione elementare della diffrazione viene effettuata nelle condizioni semplificate di Fraunhofer che si realizzano quando ad interferire sono onde piane, oppure in modo approssimato per grandi distanze D fenditura-schermo ($D > 2m$ per fenditure $a < 0,5$ mm). Un'analisi più completa del fenomeno richiede una trattazione alla Fresnel in cui si assumono fronti d'onda sferici (o di forma arbitraria), aperture e ostacolo qualsiasi, distanze arbitrarie. Nel nostro approccio, si propongono simulazioni che si basano sull'applicazione del principio di Huygens-Fresnel a un numero finito N di sorgenti puntiformi posizionate lungo la fenditura e che generano onde secondarie, la cui somma interferenziale (al quadrato) nel punto di osservazione ha come esito l'intensità della luce rilevata in quel punto. Al software è devoluto il calcolo della somma della sovrapposizione delle onde secondarie,

implementate indifferentemente come onde piane, sferiche o di forma arbitraria (Santi *et al.* 1993).

Sul piano dei processi di apprendimento, in questo ambito, la letteratura ha evidenziato tra i principali nodi: la tendenza degli studenti ad usare il modello geometrico per interpretare fenomeni di diffrazione, o modelli ibridi o contraddittori in situazioni diverse (Ambrose *et al.* 1999; Rabe, Mikelskis 2006); difficoltà a includere in uno schema coerente i concetti di fronte d'onda e raggio (Colin, Viennot 2000); difficoltà a considerare un'onda come una perturbazione che si propaga, esito dello spostamento dall'equilibrio del mezzo di propagazione (Wittmann 2002). Il nostro approccio, oltre che affrontare questi nodi, affronta le difficoltà legate all'uso del formalismo matematico, essenziale per la comprensione del fenomeno, ma complesso nella gestione analitica, alla rappresentazione spazio-temporale del fenomeno, al riconoscimento della relazione fra cammino ottico e fase, al ruolo fondamentale della fase nella determinazione della figura di interferenza.

3. La proposta didattica

La proposta didattica si basa sull'impiego del dispositivo Lucegrafo (Fig.1) (Corni *et al.* 1993; Gervasio, Michelini 2009), di specifici software di modellizzazione (Santi *et al.* 1993), di schede tutoriali di lavoro basate su un approccio *Inquiry Based Learning* (McDermott 2006; Michelini, Stefanel 2015). Mira a rendere familiari gli studenti con i tipici fenomeni dell'ottica fisica, far guadagnare loro competenza nel processo di costruzione di modelli e avere esperienza nel processo di costruzione di interpretazioni, imparare a formulare ipotesi e confrontarle con gli esiti sperimentali (Michelini 2010).

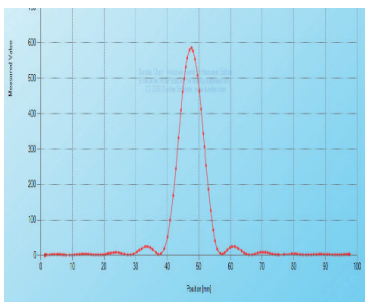
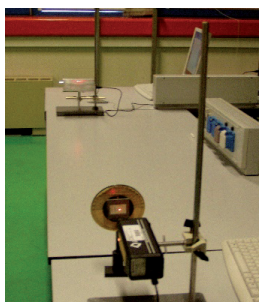


Fig. 1. L'apparato Lucegrafo e la distribuzione dell'intensità di luce diffratta

Il monitoraggio dei percorsi di apprendimento degli studenti viene effettuato con schede tutoriali stimolo di tipo IBL, che implementano il ciclo Previsione-Esperimento-Confronto (ciclo PEC) e questionari a risposte aperte progettati per essere utilizzati come pre/post test (McDermot 2006; Michelini 2010; Michelini, Stefanel 2015).

Nel percorso didattico, la diffrazione ottica viene proposta come contesto rilevante di per sé e come esemplificazione delle caratteristiche dei diversi fenomeni di diffrac-

zione. Si richiamano alcuni contesti in cui si osservano fenomeni di diffrazione, a partire dai più comuni fenomeni di diffrazione della luce (la luce diffratta da un CD, dalle foglie degli alberi), alla diffrazione di onde meccaniche sonore o sulla superficie dell'acqua, alla diffrazione su cristalli di raggi X o particelle quali elettroni o neutroni. Si presentano le principali conseguenze della diffrazione legate al limite del potere risolutivo degli strumenti ottici, come i microscopi, telescopi, ma anche l'occhio umano, come è stato ad esempio sfruttato dai puntinisti a cui erano noti gli studi sulla percezione del colore in particolare come esito di sovrapposizione della luce prodotta da pennellate accostate.

Lo studio specifico delle caratteristiche della diffrazione ottica viene effettuato a partire dalla acquisizione di una distribuzione di intensità di luce laser diffratta da singola fenditura con il sistema Lucegrafo (Gervasio, Michellini 2009). L'esame qualitativo della figura di diffrazione, permette di individuare le caratteristiche globali della figura quali simmetria e regolarità della distanza tra minimi (massimi). Questo motiva ad un'analisi quantitativa della distribuzione di intensità individuando le relazioni tra numero d'ordine $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, e posizione dei minimi x_m e rispettivamente posizione dei massimi X_M .

Si riconosce in tale modo che tra $(x_m - X_0)/D$ e m vi è una relazione di proporzionalità diretta (Fig. 2a). Al variare della larghezza a della fenditura, si ottengono rette interpolanti di pendenza diversa, il cui coefficiente angolare κ è inversamente proporzionale ad a . Il prodotto costante κa , cambia al cambiare della sorgente laser, caratterizzando quindi una lunghezza tipica della luce utilizzata (la lunghezza d'onda λ).

L'analisi svolta sui minimi suggerisce di costruire il grafico di $(x_M - X_0)/D$ in funzione di M . Per varie fenditure si trova che il coefficiente angolare è uguale a λ/a ed è sempre di un valore circa doppio dell'intercetta (Fig. 2b). L'analisi dei massimi di intensità evidenzia che il picco centrale è tanto più stretto quanto più è larga la fenditura e che l'intensità dei massimi varia come l'inverso del quadrato di $(x_m - X_0)/D$ (Fig. 2c). Nel caso ci si fermi a questa esplorazione fenomenologica, si usa la simulazione per fittare i dati e valutare i parametri in gioco (ad esempio λ o a). Per proseguire invece si può o assumere $[\sin a/a]^2$ (con $\alpha = a \sin \theta/\lambda$), come funzione che rappresenta la distribuzione di intensità verificandone la sovrapponibilità con la simulazione di 50 sorgenti e/o si può attuare un approccio tramite una modellizzazione numerica o il metodo dei fasori (Michellini 2010b).

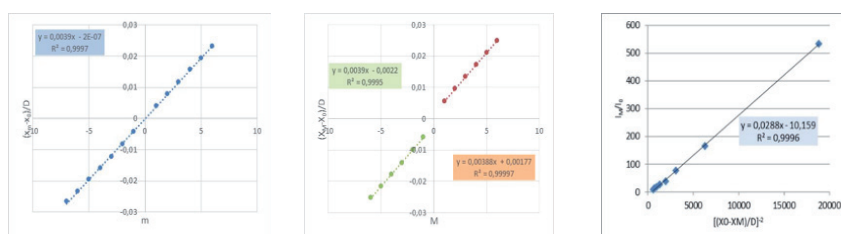


Fig. 2. Elaborazioni dei dati

4. Le sperimentazioni di ricerca nelle scuole

Sono state condotte sperimentazioni di ricerca in diverse scuole e ambiti. Qui si possono riepilogare i dati comuni a un insieme omogeneo di 85 studenti di quattro classi di 5 Liceo Scientifico con cui sono state condotte sperimentazioni controllate basate sullo stesso percorso e un numero confrontabile di 10-11 ore di attività laboratoriale e pre-post test.

L'analisi degli strumenti di monitoraggio ha evidenziato che un'ampia maggioranza di studenti acquisisce competenza nel caratterizzare l'andamento qualitativo della distribuzione di intensità della diffrazione (>80%), come nel descriverla con le adeguate relazioni lineari tra posizione di massimi/minimi e numero d'ordine (80%). La relazione inversa tra intensità e posizione dei massimi è gestita correttamente dalla maggioranza (60%), è problematica per chi resta ancorato alla proporzionalità (40%).

È emerso più frequentemente che gli studenti caratterizzano la diffrazione come "allargamento" della luce, piuttosto che come successione di massimi e minimi (aspetto che emerge successivamente). In qualche sporadico caso nelle descrizioni viene utilizzato il concetto di raggio o che la diffrazione è associata alla formazione dei colori, non distinguendola dalla rifrazione (RQ1). Emerge come indicazione che nel percorso didattico è importante estendere l'osservazione qualitativa di situazioni in cui si ha diffrazione, ma anche di situazioni in cui non si ha diffrazione, ma che può essere con essa confusa.

In merito al ruolo dell'esplorazione qualitativa di fenomeni di diffrazione, emerge che tale esplorazione influenza il modo con cui viene effettuata l'analisi delle misure sperimentali e l'impatto che detta analisi ha sulle concezioni degli studenti (RQ2). Nel percorso didattico è, quindi, importante dedicare più tempo e attenzione all'esplorazione fenomenologica e alla discussione di ipotesi alla base delle previsioni.

L'analisi quantitativa della figura di diffrazione di luce laser da singola fenditura viene effettuata con differente attenzione agli aspetti rilevanti e senza gerarchia di quelli caratteristici del fenomeno. Il riconoscimento della regolarità della distribuzione attiva negli studenti l'esigenza di individuare come renderne conto. Il ciclo PEC e l'analisi della distribuzione di intensità attivano in modo generalizzato un cambiamento nel modo di osservare la fenomenologia della luce, nella capacità di effettuare previsioni corrette. Attiva solo in pochi (15%) la necessità di un cambiamento di modello sulla natura della luce (RQ3). Un'attività di modellizzazione e fit di dati può aiutare gli studenti a cambiare il proprio paradigma sulla natura della luce. (Michelini, Stefanel 2015).

5. Conclusioni

Con l'obiettivo di costruire l'identità del fisico, è stata progettata, messa a punto e sperimentata una proposta didattica che contribuisca a dare esperienza su diversi piani:

- Epistemologico, in merito al significato di una legge del fenomeno (alla Fourier), al ruolo di un modello interpretativo e del *fitting* dei dati sperimentali, alle potenzialità predittive di una teoria

- Storico, nell'andare a vedere i limiti dell'ottica geometrica, il potere interpretativo del modello ondulatorio, le potenzialità e i limiti di ciascuna di tali interpretazioni, il dibattito sul piano storico
- Disciplinare, costruendo una proposta didattica che contribuisca a dare esperienza sui diversi piani
- Dei contenuti, discutendo le caratteristiche del fenomeno sul piano qualitativo e quantitativo, le leggi che lo caratterizzano, i modelli che lo consentono di interpretare sulla base di ipotesi teoriche di tipo ondulatorio classico (nei limiti di Fraunhofer, Fresnel), come pure basandosi su modelli puramente quantistici.
- Dei metodi, con metodologie di misure, di previsione teorica, di analisi di potenzialità e limiti di una interpretazione, potere analogico del formalismo ondulatorio
- Didattico, nel costruire una proposta organica, basata su una metodologica di ricerca (il MER) e che mira al superamento dei nodi concettuali noti in letteratura.

Ci serve il contributo di altre competenze qualificate per completarlo sul piano storico.

Bibliografia

- Ambrose B.S., Shaffer P.S., McDermott L.C. (1999). "An investigation of students understanding of single slit diffraction". *American Journal of Physics*, 67, pp. 146-155.
- Colin P., Viennot L. (2000). "Les difficultés d'étudiants post-bac pour une conceptualization cohérente de la diffraction et de l'image optique". *Didaskalia*, 17, pp. 29-54.
- Corni F., Mascellani V., Mazzega E., Michelini M., Ottaviani G. (1993). *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, pp. 381-388.
- Di Sessa A. (2004). *Contextuality and conceptual change*, in Redish E., Vicentini M. (eds.), *Research on Physics Education*. Bologna-Amsterdam: Italian Physical Society-IOS Press, pp. 137-150.
- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U. (2005). *Toward science education research: The MER*, in Fisher H.E. (ed.), *Developing Standard in RSE*. London: Taylor, pp. 1-9.
- Fischer H.E., Klemm K. (2005). "Framework for Empirical Research on Science Teaching and Learning". *Journal of Science Teacher Education*, 16, pp. 309-349.
- Gervasio M., Michelini M. (2009). *Lucegrafo. A Simple USB Data Acquisition System for Diffraction Experiments*, in Lamboune B., Mathelitsch L., Michelini M. (eds.), *MPTL14 Proceeding, CD-ROM* [online]. URL: <<http://www.fisica.uniud.it/URDF/mptl14/contents.htm>> [data di accesso: 01/04/2016].
- Gonzales A.M. (1993). *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, pp. 38-80.

- Hirata K. (1985). *How can we use microcomputers effectively in teaching and learning physics?* In Marx G., Szucs P. (eds.), *Microcomputers in Science Education*, Vol. 1. Veszprem: International Center for Education Technology, pp. 79-84.
- Lijnse P.L. (1995). "Developmental research as a way to an empirically based didactical structure of science". *Science Education*, 79, pp. 189-199.
- Mascellani V., Mazzega E., Michelini M. (1988). *L'elaboratore on-line per lo studio di figure di diffrazione ottica*, in Vicentini M. (a cura di), *Atti del Convegno GNDF*. Pavia: SIF, pp. 251-262.
- Mascellani V., Mazzega E., Michelini M. (1992). "Un sistema per esperienze di ottica on-line". *La Fisica nella Scuola*, XXV (1), p. 132.
- McDermott L.C. (2006). "Preparing K-12 teachers in physics: Insights from history, experience, and research". *American Journal of Physics*, 74, pp. 758-762.
- Meheut M., Psillos D. (2004). "Teaching-learning sequences". *IJSE*, 26 (5), pp. 515-535.
- Michelini M. (2010a). *Building bridges between common sense and physics description*, in Menabue L., Santoro G. (eds.), *New Trends in STE*. Bologna: CLUEB, pp. 257-274.
- Michelini M. (2010b). *Diffrazione: appunti per l'attività sperimentale*, in Michelini M. (a cura di), *Proposte didattiche sulla fisica moderna*. Udine: Lithostampa, pp. 127-141
- Michelini M., Santi L., Stefanel A. (2002). *Un percorso di esperimenti con sensori*, in Dileo V. (a cura di), *Nuovi obiettivi, curricoli e metodologie didattiche*. Bari: ADT, p. 146.
- Michelini M., Santi L., Stefanel A. (2006). *Esperimenti e modelli in ottica fisica*, in Griggio C. (a cura di), *Incontri di discipline per la didattica*. Milano: Franco Angeli, pp. 365-392.
- Michelini M., Stefanel A. (2015). *Upper secondary students face optical diffraction using simple experiments and on-line measurements*, in Kajfasz E. Masson T., Triay R. (eds.), *Proceedings of the Conference "Frontiers of Fundamental Physics"* (Marseille, July 15-18) [online]. URL: <http://pos.sissa.it/archive/conferences/224/240/FFP14_240.pdf> [data di accesso: 01/04/2016].
- Michelini M., Santi L., Stefanel A. (2015). *Teaching modern physics in secondary school*, in Kajfasz E. Masson T., Triay R. (eds.), *Proceedings of the Conference "Frontiers of Fundamental Physics"* (Marseille, July 15-18) [online]. URL: <http://pos.sissa.it/archive/conferences/224/231/FFP14_231.pdf> [data di accesso: 01/04/2016].
- Rabe T., Mikelkis H.F. (2007). *The Role of Language in Learning Physics*, in Pintò R., Couso D. (eds.), *Science Education Research*. Barcelona: Springer, pp. 489-502.
- Santi L., Mazzega E., Michelini M. (1993). *Understand Interference by means of computer model*, in Pereira L.C., Ferreira J.A., Lopes H.A. (eds.), *Light and Information*. Braga: Univ. do Minho, pp. 372-380.
- Viennot L. (1996). *Raisonnement en physique*. Paris-Bruxelles: De Boeck Université.
- Vosniadou S. (2008). *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York: Routledge.
- Wittmann M.C. (2002). "The object coordination class applied to wave pulses: analysing student reasoning". *International Journal of Science Education*, 24 (1), pp. 97-118.