

## **Laboratorio sui fenomeni luminosi**

Marco Ciminale, Milena D'Angelo\*, Enrichetta M. Fiore  
Dipartimento Interateneo di Fisica – Università degli Studi di Bari,  
Via Amendola 173, 70126 – Bari

### **I. Introduzione**

Scopo del presente articolo è descrivere il percorso realizzato nel “Laboratorio sui Fenomeni Luminosi” [1], Laboratorio PLS di tipo A realizzato, a partire dal 2010, all'interno del Piano Lauree Scientifiche dal Corso di Laurea in Fisica dell'Università degli Studi di Bari.

### **II. Motivazioni e finalità**

La scelta di incentrare il percorso sullo studio dell'ottica nasce dalla consapevolezza che questa tematica viene spesso trascurata a livello scolastico, nonostante rivesta un ruolo sempre più importante in ambito scientifico e tecnologico e contenga elementi chiave per la comprensione di molti fenomeni sia della fisica “quotidiana” sia della fisica moderna (dalla meccanica quantistica, alle tecnologie fotoniche, dalla fisica medica alle telecomunicazioni).

L'ottica si presta inoltre molto bene ad un approccio di natura sperimentale, in cui la scoperta e l'analisi dei fenomeni osservati conducono sia alla formulazione di modelli interpretativi e leggi fisiche, sia all'assimilazione di concetti di base, spesso difficili da comprendere attraverso uno studio puramente teorico.

E' nata così l'idea di un percorso che, partendo dall'osservazione di alcuni fenomeni luminosi, ne affrontasse lo studio integrando sussidi didattici differenti (quali esperienze da cattedra, applet, filmati, fotografie, ed esperienze di laboratorio). Gli incontri sono stati progettati con l'obiettivo di evidenziare gli aspetti metodologici tipici della fisica ed esplicitare il processo di costruzione e verifica di modelli, siano essi descrittivi o fisico-interpretativi, anche con l'ausilio di considerazioni di carattere storico-epistemologico. Il tipico processo seguito è il seguente: osservazione guidata e analisi dei fenomeni → formulazione di modelli interpretativi e previsioni → progettazione di esperienze di laboratorio → scoperta di leggi fisiche/verifica-falsificazione del modello → analisi delle conseguenze.

L'utilizzo dei diversi supporti didattici sopra citati ci ha consentito di proporre ai docenti un esempio concreto (e facilmente trasferibile nelle scuole) di didattica laboratoriale e di apprendimento per indagine e per scoperta. Inoltre, per favorire la crescita professionale degli insegnanti, si è cercato di lavorare in un'ottica di co-progettazione, sperimentazione e valutazione dei percorsi.

### **III. Metodologia e contenuti**

L'attività ha coinvolto, dal 2010/11 al 2012/13, classi del 4° e del 5° anno di una decina di scuole (licei e istituti tecnici) di Bari e provincia, 18 docenti e un centinaio di studenti.

Gli studenti sono stati impegnati in 10 incontri per un totale di 24 ore: 10 ore dedicate ad esperienze da cattedra, discussioni di gruppo, lezioni frontali ed esercitazioni; 10 ore impegnate per esperienze quantitative di laboratorio eseguite da loro; 2 ore dedicate al rafforzamento delle conoscenze e competenze acquisite; 2 ore dedicate alla prova di verifica finale.

I docenti sono stati impegnati per 30 ore di cui: 6 ore dedicate alla co-progettazione del percorso, con particolare attenzione alle attività sperimentali e alla trasferibilità dell'attività proposta nelle scuole; 22 ore dedicate all'accompagnamento e all'affiancamento degli studenti; 2

ore dedicate alla valutazione congiunta dell'attività svolta e della modalità di verifica finale. Ai docenti è stata, inoltre, richiesta l'elaborazione di un progetto didattico, sviluppato a partire dalle attività realizzate durante il Laboratorio PLS e incentrato su un'esperienza di laboratorio. Parte dell'ultimo incontro è stata dedicata alla realizzazione delle esperienze progettate dai docenti, per valutarne la fattibilità e discuterne la modalità di attuazione nella scuola.

### III.1. Costruzione del modello a raggi e analisi delle sue conseguenze

Per quanto concerne i contenuti si è partiti dall'osservazione di alcuni fenomeni luminosi tipici dell'esperienza quotidiana e, con l'ausilio di esperienze da cattedra (ombre, sorgenti puntiformi ed estese, ...), si è giunti alla costruzione del "modello a raggi" per la luce. In questa costruzione del modello si è posta particolare attenzione al processo di astrazione, che porta dall'osservazione controllata di un fenomeno alla sua formalizzazione (ad esempio, la sostituzione della sorgente "piccola" - rispetto alle distanze caratteristiche del sistema considerato - con il concetto di punto geometrico, o la sostituzione del fascetto luminoso con il concetto di retta), portando così gli studenti a riconoscere nella geometria il quadro teorico-formale di riferimento per un certo tipo di fenomeni luminosi. Questo modello è stato utilizzato per "progettare" i setup successivamente utilizzati dagli studenti per condurre due esperienze di laboratorio dedicate alla scoperta delle leggi della riflessione e della rifrazione. Tali esperienze sono state realizzate direttamente dagli studenti suddivisi in 10 gruppi.

La discussione riguardo le conseguenze delle leggi scoperte circa il comportamento del singolo raggio luminoso ha condotto all'introduzione del concetto di immagine fisica. In particolare è stato proposto agli studenti di dimostrare geometricamente come, dei due sistemi ottici indagati sperimentalmente (lo specchio piano ed il diottro piano), solo lo specchio sia propriamente un sistema stigmatico (Fig. 1).

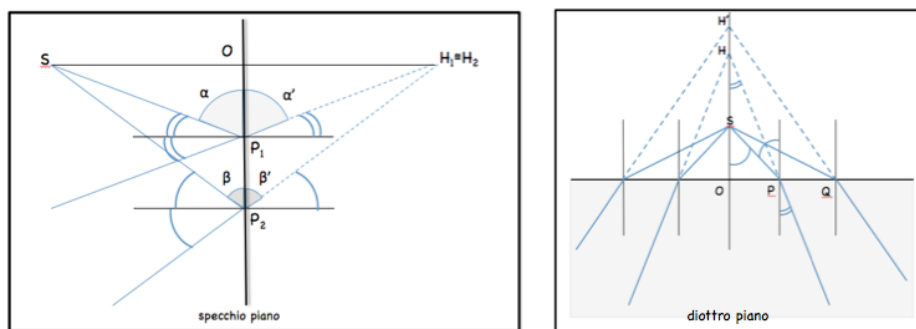


Figura 1: verifica geometrica della possibilità di ottenere immagini nel caso di uno specchio piano e di un diottro piano

L'interpretazione dei risultati sperimentali è stata accompagnata dall'introduzione dell'indice di rifrazione relativo come caratterizzazione dell'interfaccia tra due mezzi. Su tale base, definendo l'indice di rifrazione assoluto come riferito all'interfaccia vuoto-mezzo, si è potuto mostrare come l'indice di rifrazione relativo risulti dal rapporto degli indici di rifrazione assoluti dei due mezzi che costituiscono l'interfaccia.

Al fine di evidenziare la potenza dell'osservazione sperimentale coniugata al ragionamento teorico si è proposto agli studenti il seguente percorso, per giungere a formulare la legge dei punti coniugati delle lenti sottili: attraverso esperienze da cattedra qualitative o semi-quantitative si sono presentate le lenti come mezzi rifrangenti che, opportunamente sagomati, diventano sistemi focalizzanti in grado di produrre immagini di punti sorgente e di far convergere raggi paralleli in un

punto chiamato fuoco. In particolare si sono caratterizzate le lenti sottili attraverso la simmetria dei due fuochi rispetto alla lente stessa; sulla base di tali osservazioni, del modello a raggi e del principio di invertibilità dei raggi ottici, si è ricavata la relazione che sussiste tra la posizione della sorgente e quella dell'immagine, rispetto alla lente (Fig. 2). Infine, la relazione trovata è stata verificata in laboratorio dagli studenti, sempre suddivisi in gruppi.

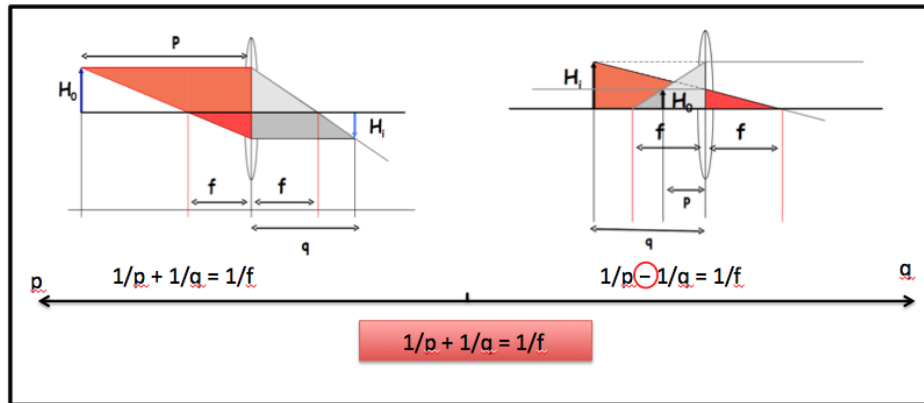


Figura 2: deduzione geometrica della legge dei punti coniugati a partire dall'osservazione di similitudini tra triangoli rettangoli

### III.2. Il problema della natura fisica della luce: previsioni del modello Newtoniano con l'ausilio del *Cabrillo tracker*

Dopo aver affrontato la questione di come la luce si propaghi si è proposta l'elaborazione di un modello fisico-interpretativo di cosa sia la luce e del perché si propaghi secondo le regole determinate, passando così da una descrizione "cinematica" dei fenomeni luminosi ad una loro interpretazione "dinamica". In tal modo si è introdotto il modello corpuscolare newtoniano, discutendone le caratteristiche in relazione alle osservazioni fatte circa il modo di propagarsi della luce, in particolare in relazione ai fenomeni della riflessione e della rifrazione (Fig. 3).

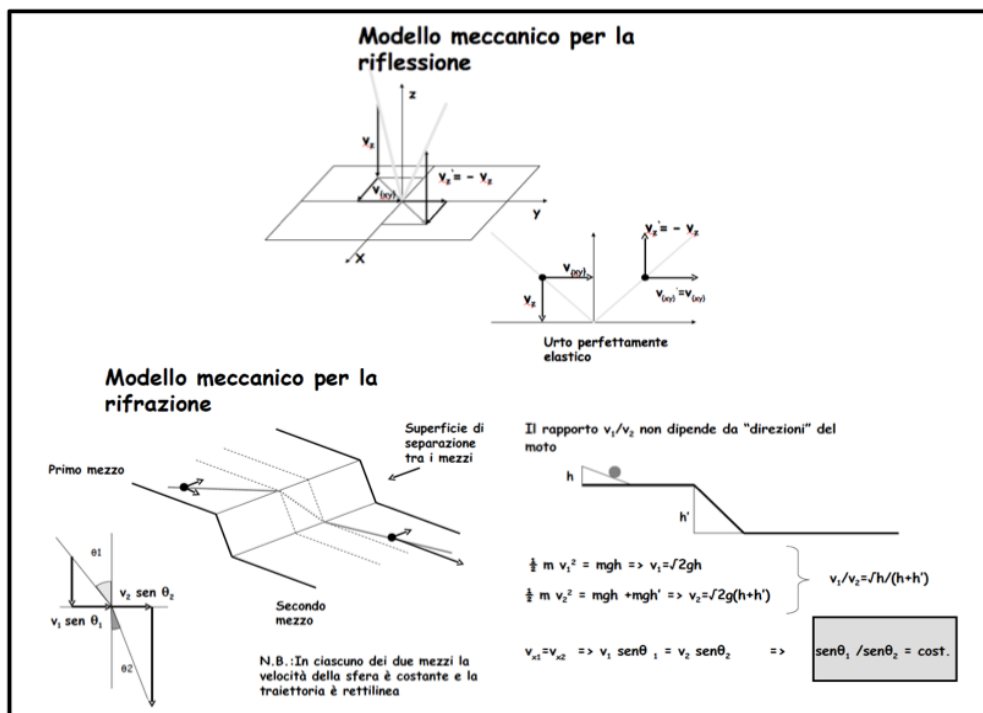


Figura 3: modello meccanico per riflessione e rifrazione

Si è presentato il modello meccanico per la rifrazione attraverso l'esperienza PSSC del piano inclinato, che è stata realizzata da cattedra, per osservare qualitativamente le analogie con il fenomeno della rifrazione; per l'analisi quantitativa dell'esperimento si è sostituita la carta carbone del vecchio esperimento PSSC con filmati di diversi lanci sul piano inclinato (ad angoli diversi) che sono stati poi analizzati in aula con l'ausilio del software Cabrillo Tracker (Fig. 4).

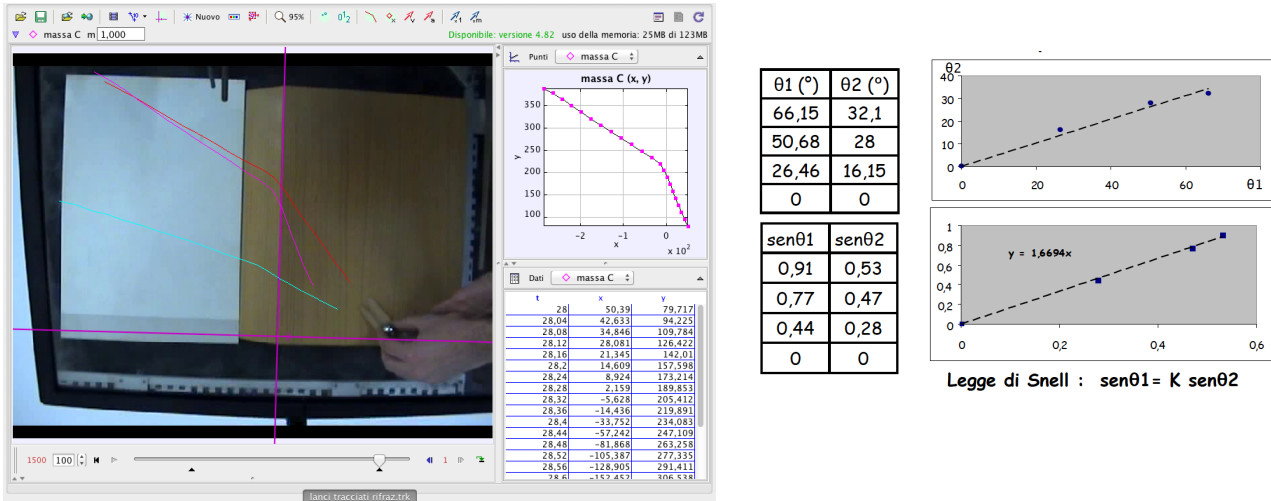


Figura 4: studio del modello meccanico per la rifrazione con Cabrillo Tracker ed esempi dei dati ottenuti.

Un aspetto estremamente interessante di questo modello, da un punto di vista propriamente epistemico, è la sua capacità di produrre una precisa predizione (all'epoca della formulazione non verificabile) circa il cambiamento della velocità della luce nel passaggio da un mezzo ad un altro, che successivamente verrà smentita sperimentalmente.

### III.3. Il principio di Fermat

Oltre all'approccio induttivo tipico della scoperta sperimentale di una regolarità della natura (che una volta corroborata da un gran numero di riproduzioni dell'esperimento diventa legge) si è voluto proporre agli studenti un ulteriore approccio altrettanto caratteristico della Fisica, quello logico-deduttivo. Si è dunque mostrato come sia possibile riottenere le leggi della riflessione e della rifrazione postulando il principio di minimo cammino ottico (principio di Fermat) e la minor velocità della luce in un mezzo più rifrangente.

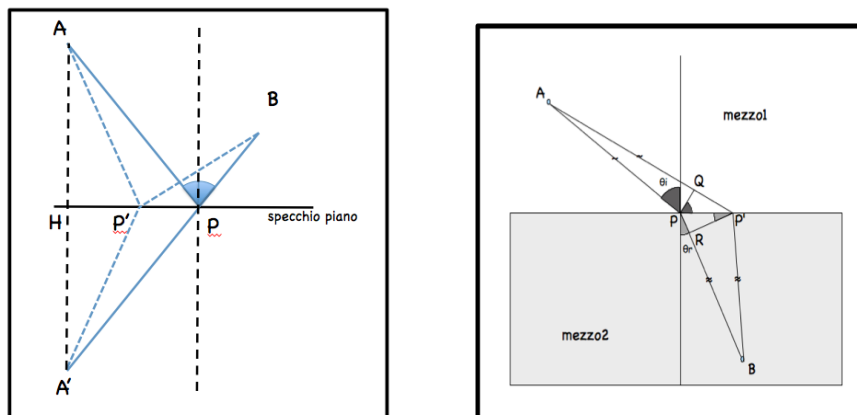


Figura 5: deduzione geometrica delle leggi di riflessione e rifrazione a partire dal principio di Fermat

Dopo aver discusso con gli studenti il significato di cammino ottico minimo, o più propriamente stazionario, nei due casi della riflessione (propagazione nello stesso mezzo) e della rifrazione (propagazione in mezzi differenti), si è proceduto a dimostrare come il principio di minimo

selezioni, tra tutte le traiettorie possibili di un raggio luminoso, proprio le traiettorie dettate dalle leggi determinate sperimentalmente. Tale dimostrazione è stata sviluppata ancora in termini geometrici.

#### **III.4. Dalla crisi del modello a raggi allo studio sperimentale dei fenomeni di interferenza e diffrazione ottica**

Il passaggio dall'ottica geometrica all'ottica fisica è stato proposto attraverso la "crisi del modello a raggi" (emersa a partire da esperienze da cattedra e filmati [2], incentrati sui fenomeni di diffrazione e di interferenza) e la conseguente necessità di un modello più sofisticato per la descrizione della luce. Il modello ondulatorio è scaturito dalla discussione con gli studenti come un possibile modello della luce, alternativo all' "altrettanto possibile" modello corpuscolare. Si è colta l'occasione per fare gli opportuni richiami storici sul tema e per motivare gli studenti ad affrontare lo studio del comportamento delle onde, al fine di pervenire ad una previsione (relativa ai fenomeni di interferenza e diffrazione) che potesse essere verificata sperimentalmente nell'ambito dell'ottica.

L'ondoscopio è stato utilizzato per realizzare una serie di esperienze da cattedra [3] (propagazione delle onde in un mezzo omogeneo, leggi della riflessione e della rifrazione, fenomeni di diffrazione e di interferenza), che sono state abbinate ad applet [4] e a continui richiami circa gli equivalenti fenomeni luminosi già scoperti o osservati. In particolare, in relazione alla legge della rifrazione, è stato realizzato il confronto tra le previsioni del modello corpuscolare newtoniano e quelle dell'"eventuale" modello ondulatorio della luce. A tal proposito sono stati richiamati gli esperimenti che hanno dato ragione al modello ondulatorio della luce e si è accennato al ruolo giocato dagli esperimenti cruciali.

E' stata inoltre sottolineata la possibilità di utilizzare i fenomeni di diffrazione come metodo per stimare l'ordine di grandezza della lunghezza d'onda delle "eventuali" onde luminose; in particolare, si è posta l'enfasi sulle condizioni che rendono facilmente osservabile il fenomeno della diffrazione delle onde d'acqua all'interno dell'ondoscopio e sul loro confronto con le condizioni necessarie per osservare facilmente il fenomeno della diffrazione della luce.

Gli studenti, sempre suddivisi in gruppi di tre, hanno poi condotto in laboratorio uno studio quantitativo dei fenomeni di diffrazione e interferenza della luce; l'esperienza è essenzialmente consistita nell'individuazione delle posizioni dei minimi di diffrazione e di interferenza e nel loro confronto con le previsioni teoriche ottenute a partire dallo studio delle onde d'acqua.

Durante il primo anno di realizzazione del percorso gli studenti hanno anche realizzato un'esperienza di laboratorio sulla polarizzazione della luce (verifica della legge di Malus), essenzialmente mirata a rafforzare l'idea della natura trasversale delle onde luminose e ad analizzarne alcune conseguenze principali. In entrambe queste esperienze la rivelazione dell'intensità luminosa è stata effettuata mediante il "lucegrafo" (fotodiodo amplificato montato su una slitta traslazionale, connessa ad una resistenza lineare, al fine di consentire misure di intensità verso posizione), sviluppato dal gruppo di ricerca di M. Michellini, presso l'Università di Udine e commercializzato dalla Next s.r.l. [5].

Il percorso si è concluso con esercitazioni in classe, mirate a facilitare la sintesi e il rafforzamento dei concetti e dei risultati principali del corso. Agli studenti è stata inoltre offerta la possibilità di sostenere una prova di verifica finale, finalizzata al riconoscimento di 2 CFU; la prova è consistita in un quiz a risposta multipla, con richiesta di giustificazione delle risposte. I quesiti utilizzati sono stati estratti dai quesiti disponibili sulla piattaforma web PLAT (Physics Learning Assessment) sviluppata da G. Selvaggi e R. Stella, dell'Università di Bari [6].

#### IV. Analisi dei risultati e conclusioni

L'attività ha visto una partecipazione assidua ed attiva da parte di studenti e docenti. Il 95% degli studenti ha ricevuto l'attestato di frequenza e il 90% dei docenti ha prodotto un percorso didattico incentrato su un'esperienza di laboratorio, da svolgere all'interno della propria scuola nell'anno scolastico successivo.

L'efficacia delle attività svolte è stata valutata anche mediante la prova finale, che ha dato risultati generalmente molto soddisfacenti, con punte di eccellenza.

Le principali criticità emerse consistono nella difficoltà nel coinvolgimento attivo dei docenti e nelle difficoltà di assimilazione, da parte degli studenti, di alcuni aspetti dell'ottica fisica.

Il primo problema è stato affrontato offrendo un supporto via via maggiore alla progettazione didattica da parte dei docenti e prestando il materiale e le attrezzature da noi sviluppate per consentire loro di proporre il percorso all'interno delle scuole.

La seconda criticità è stata affrontata apportando di anno in anno le opportune modifiche al percorso. In particolare, a partire dal secondo anno di realizzazione del percorso: (1) l'esperienza sulla polarizzazione è stata eliminata per lasciare maggiore spazio ad aspetti ritenuti più fondamentali, relativamente ai fenomeni di natura ondulatoria; (2) particolare enfasi è stata messa sul concetto di ampiezza di un'onda e sul suo legame con l'intensità luminosa, al fine di facilitare la transizione tra onde nell'acqua e onde luminose; (3) molta cura è stata dedicata al tentativo di favorire l'assimilazione da parte degli studenti dell'analogia tra i minimi di interferenza/diffrazione ottica (zone di "buio") e i minimi di interferenza/diffrazione di onde d'acqua (zone *imperturbate*).

Particolare successo ha riscosso l'incontro di orientamento "*Prospettive di lavoro per i laureati in Fisica*", realizzato nell'ambito del PLS 2012-13, in risposta alla richiesta avanzata da alunni e docenti del presente Laboratorio PLS.

La valutazione del percorso e i risultati dei questionari docenti e studenti indicano che il percorso, nel suo complesso, è risultato interessante, stimolante ed efficace. Questa conclusione è corroborata dalla costanza con cui le scuole hanno aderito, di anno in anno, a questo Laboratorio.

Gli Autori sono grati alla Prof.ssa Chiara Evangelista per il prezioso contributo offerto durante la progettazione del percorso e nella discussione dei risultati.

\* milena.dangelo@uniba.it

#### V. Referenze

[1] <http://beta.fisica.uniba.it/cdlf/Licei/PianoLaureeScientifiche/LaboratoriosuiFenomeniLuminosi.aspx>

[2] <http://www.youtube.com/watch?v=fQJM9GWUpe0>

[3] <http://www.youtube.com/watch?v=4T5nwZnwghs>

[4] <http://www.ba.infn.it/~fisi2005/evangelista/piccolo/tesi/Simulazione1.html> -

[Simulazione2p.html](http://www.ba.infn.it/~fisi2005/evangelista/piccolo/tesi/Simulazione2p.html) - [Simulazione3p.html](http://www.ba.infn.it/~fisi2005/evangelista/piccolo/tesi/Simulazione3p.html), [http://fisicaondemusica.unimore.it/Cos\\_un\\_onda.html](http://fisicaondemusica.unimore.it/Cos_un_onda.html),

[http://fisicaondemusica.unimore.it/Onde\\_trasversali\\_e\\_longitudinali.html](http://fisicaondemusica.unimore.it/Onde_trasversali_e_longitudinali.html),

<http://www.ba.infn.it/~fisi2005/evangelista/fr3.html>

[5] M. Gervasio, M. Micheli "Lucegrafo. A simple USB data acquisition system for diffraction experiments", <http://www.fisica.uniud.it/URDF/mpt114/ftp/fulltext/T6124LucegrafoMPTLMM.pdf>

[6] V. Picciarelli, G. Selvaggi, and R. Stella, A multipurpose interactive system for promoting and assessing the learning of physics, *Physics Education* vol. 48, pp. 378-389 (2013)