



Giuseppe Colicchia

Didattica della Fisica
Università di Monaco,
Germania

Modello di occhio nell'insegnamento dell'ottica

(Pervenuto il 10.09.02, approvato il 5.10.03)

ABSTRACT

A simple eye model having a structure very similar to a real eye is described. The model allows students to understand geometrical optics in a biological context.

Molti studenti mostrano poco interesse per la fisica. Essi trovano la fisica scolastica "arida", non direttamente collegata con il loro mondo, con la propria persona, con il proprio corpo. Ma proprio lo studio con interesse è ritenuto dalla moderna ricerca come necessario per raggiungere grandi e duraturi successi d'apprendimento.

Ricerche dimostrano che l'interesse degli studenti dipende fortemente dal contesto in cui concetti e leggi fisiche vengono trattati; con contesti medico-biologici si è constatato che l'interesse degli studenti aumenta significativamente [1].

La proposta didattica che segue vuole contribuire ad aumentare l'interesse degli studenti per lo studio dell'ottica. Essa consiste nella costruzione in classe di un semplice modello, per un maggior effetto motivazionale molto simile all'occhio reale, con il quale eseguire esperienze, interpretare e discutere i risultati in stretto collegamento con anatomia e fisiologia dell'occhio.

La parte medica certamente è da dosare: poca medicina impoverisce la lezione vanificando lo sperato effetto sull'interesse, mentre molte divagazioni mediche fanno perdere il quadro d'insieme dei concetti di fisica da apprendere.

A. Informazioni di base e modello d'occhio

A. 1 L'occhio come sistema ottico

In fig. 1 sono raffigurati i fasci di luce provenienti dai punti estremi S_1 e S_2 di un oggetto ed i relativi punti immagine S'_1 e S'_2 che si formano sulla retina di un occhio. La luce entra nell'occhio attraverso la cornea (indice di rifrazione $n = 1,376$; spessore poco meno di 1 mm; raggio di curvatura $r = 7,8$ mm), attraverso l'umor acqueo (fluido acquoso con $n = 1,336$), il cristallino (lente di materiale fibroso con $n = 1,38$ ai bordi e fino a $n = 1,42$ al centro), l'umor vitreo

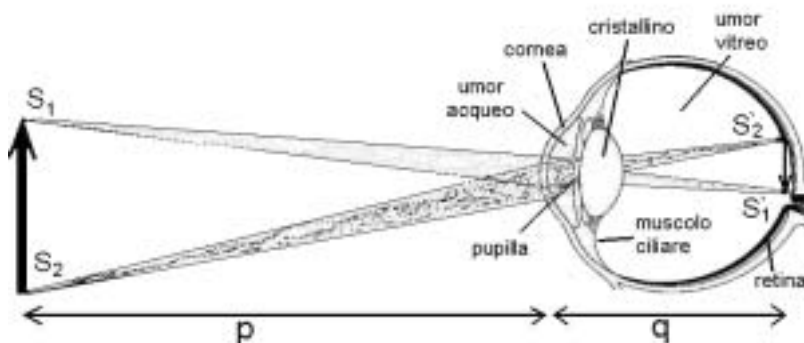


Figura 1. Formazione dell'immagine sulla retina.

(gelatina con $n = 1,337$) e infine incide sulla retina. Sulla retina si forma un'immagine dell'oggetto reale, capovolta e rimpicciolita di un fattore uguale al rapporto delle distanze dell'oggetto e dell'immagine dal centro ottico dell'occhio, che giace a circa 6 mm dalla cornea.

L'occhio può essere approssimativamente considerato come un diottro contenente una lente sottile. Il diottro si può ritenere costituito dal sistema aria/umor acqueo, giacché la cornea non è spessa e, inoltre, possiede un indice di rifrazione non molto diverso da quello dell'umor acqueo ed umor vitreo [2].

Considerando solamente il diottro con $n_1 = 1$ (aria) e $n_2 = 1,336$ (umor acqueo), dalla formula dei punti coniugati $n_1/p + n_2/q = (n_2 - n_1)/r$, per $p = \infty$, si ricava una lunghezza focale $f_D = q = r \cdot n_2/(n_2 - n_1) = 0,78 \text{ cm} \cdot 1,336/(1,336 - 1) = 3,1 \text{ cm}$.

In un occhio emmetrope, il cristallino nella sua forma più piatta, ossia con il potere diottrico minimo di cui è capace, riduce la distanza focale da 3,1 cm a 2,2 cm, che è approssimativamente la distanza della retina dalla cornea, cosicché oggetti posti all'infinito si focalizzano esattamente sulla retina. Se detta distanza è però maggiore della distanza focale, l'immagine di un oggetto posto all'infinito si focalizza davanti la retina (*Miopia*). Se, invece, è minore, l'immagine si focalizzerebbe dopo la retina (*Ipermetropia*). Quando il muscolo ciliare si contrae, il cristallino assume una forma più arrotondata con conseguente aumento del potere diottrico, permettendo quindi la messa a fuoco di oggetti vicini (accomodazione). Il potere diottrico variabile del cristallino compensa il difetto di un'ipermetropia leggera, a carico però di un permanente sforzo di contrazione del muscolo ciliare.

Quando i muscoli ciliari sono deboli o quando il cristallino perde elasticità, il cristallino non s'incurva abbastanza (fisiologico se s'incomincia a notare dopo i 40 anni) e la capacità di mettere a fuoco oggetti vicini diminuisce (*Presbiopia*).

Se, infine, i raggi passanti per i diversi meridiani della cornea non subiscono la stessa rifrazione, l'immagine si focalizza deformata (*Astigmatismo*).

A. 2 Modello d'occhio

Il modello proposto è composto da un globo trasparente di raggio $r = 3 \text{ cm}$ riempito d'acqua ($n_2 = 1,33$). In esso è posta, a piccola distanza d dalla superficie, una lente di plastica L_1 con indice di rifrazione $n_1 = 1,5$ e distanza focale $f = 3 \text{ cm}$. In fig. 2 è schematizzato il modello che mette a fuoco, a distanza q dalla superficie anteriore del globo, l'immagine di un oggetto posto in aria ($n_1=1$) a distanza p .

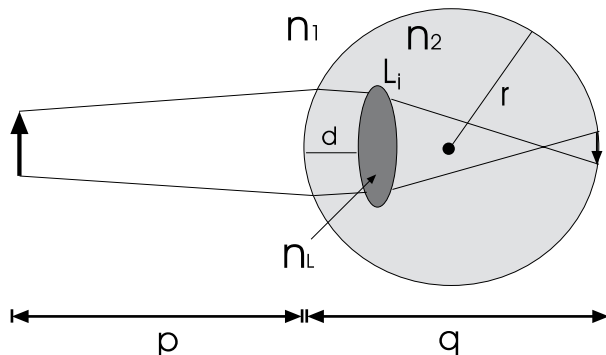


Figura 2. Formazione dell'immagine nel modello.

La luce proveniente dall'oggetto entrando nel globo subisce una prima rifrazione. Se il guscio del globo non è spesso, ossia se il raggio interno è poco più piccolo di quello esterno, non gioca in pratica alcun ruolo e la rifrazione si può considerare dovuta al passaggio dall'aria all'acqua. Per questa rifrazione, dalla formula dei punti coniugati del diottero, si ricava una lunghezza focale $f_G = r \cdot n_2 / (n_2 - n_1) = 12$ cm.

La luce viene poi rifratta ulteriormente dalla lente L_i , la cui distanza focale da 3 cm diventa nel globo 12 cm circa. Infatti, la distanza focale f_L della lente posta in un mezzo d'indice di rifrazione n , è data da $1/f_L = [(n_1/n) - 1] \cdot [(1/r_1) - (1/r_2)]$, ove r_1 e r_2 sono i raggi di curvatura. Se all'aria ($n = 1$) si sostituisce acqua ($n = 1,33$), la distanza focale f_L diventa quattro volte più grande.

La distanza focale del modello, data dal sistema delle due lenti, è

$$f_M = f_G \cdot f_L / (f_G + f_L - d/n)$$

ove n è l'indice di rifrazione della sostanza tra i due mezzi ottici e d la distanza tra essi [3]. Trascurando il termine negativo perché piccolo, si trova $f_M = 6$ cm, che è proprio il diametro del globo. Pertanto, oggetti abbastanza lontani formano sulla superficie posteriore semitrasparente del globo una figura nitida, rimpicciolita e capovolta.

Il modello simula un occhio non accomodante, ossia un occhio con cristallino rigido.

Per la costruzione del modello sono consigliati i seguenti materiali [4]:

- guscio di plastica trasparente del diametro di 6 cm (si trova facilmente nei negozi di giocattoli o nelle cartolerie), formato da due semigusci che si chiudono ermeticamente. Il guscio riempito d'acqua rappresenta il bulbo oculare.
- Una lente di plastica, per es. di diametro 15,6 mm, con $f = 3$ cm. Essa rappresenta il cristallino.
- Carta vetrata molto fine.
- 2 adesivi rotondi del diametro di circa 1 cm e due del diametro di circa 3 cm.
- Pennarelli di colore bianco e nero resistenti all'acqua.
- Siringa senza ago per riempire d'acqua il modello.
- Nastro adesivo resistente all'acqua.

Istruzioni per la costruzione

Si veda la fig. 3 ove è mostrato uno spaccato del modello derivato da una sfera di plastica.

- 1) Si faccia in uno dei due semigusci un piccolo foro, necessario per riempire d'acqua il globo ottenuto dai due pezzi.
- 2) Si strofini una superficie di un semiguscio con carta vetrata bagnata. Esso diventerà semitrasparente e sarà la parte posteriore del modello. Al centro di questo semiguscio s'incolli un adesivo grande (3 cm) internamente e uno esternamente, per protegge-

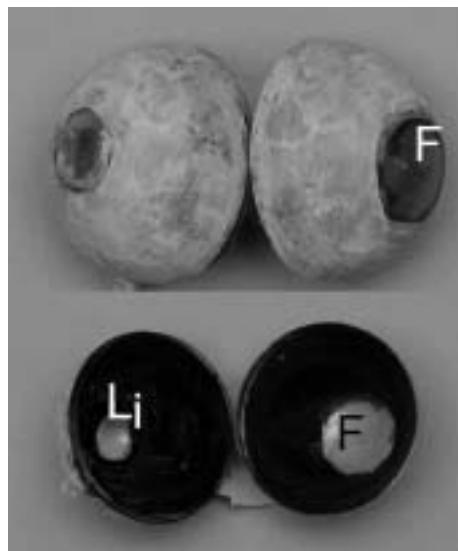


Figura 3. Esterno (sopra) e interno (sotto) del modello. L_i è la lente interna e F il fondo semitrasparente.

re dalla coloritura una calotta del guscio che resterà semitrasparente e diventerà la "retina" del modello.

- 3) Sull'altro semiguscio s'incolla un adesivo piccolo (1 cm) internamente e uno esternamente, sempre per proteggere dalla coloritura una piccola calotta che resterà trasparente e sarà contemporaneamente "cornea" e "pupilla" del modello.
- 4) Si colora di nero le superfici interne (per eliminare la luce diffusa) e di bianco le esterne, per dare al modello maggiore rassomiglianza all'occhio. Si tolgono gli adesivi.
- 5) Internamente al semiguscio contenente la "pupilla" si appoggia e si fissa, dietro di essa, con nastro adesivo, la lente convergente L_1 .
- 6) Si mettono insieme i due semigusci e, se necessario per una migliore tenuta ermetica, si fissano insieme con nastro adesivo. Si riempia d'acqua il modello ottenuto.

Il primo passo deve essere eseguito dall'insegnante. Per risparmio di tempo, anche i passi da 2) a 4) possono essere velocemente fatti dall'insegnante, che per la coloritura contemporanea di tutti i modelli può al posto dei pennarelli usare uno spray.

Modelli di altre dimensioni sono naturalmente possibili. Da tener presente che modelli piccoli presentano immagini difficili da riconoscere, mentre modelli grandi richiedono un lavoro di costruzione maggiore.

Modello d'occhio miope

Per ottenere un modello d'occhio miope si ricompongono, utilizzando un nastro adesivo largo e rigido, i due mezzi gusci lasciando tra essi una distanza di circa 2 cm. Si riempie nuovamente con acqua il modello, che adesso ha un asse di 8 cm (fig. 4). Per mettere a fuoco oggetti lontani con questo modello, si deve anteporre ad esso una lente divergente con $f = -24$ cm circa, giacché anche la distanza focale totale del modello da 6 cm deve essere portata a 8 cm. Oggetti vicini (25 cm) sono invece focalizzati abbastanza bene senza lenti aggiuntive.



Figura 4. Modello d'occhio miope, ottenuto allungando l'asse del modello normale.

Modello semplificato

Un modello non contenente acqua è molto più semplice da costruire. In fig. 5 è mostrato uno spaccato di un modello derivato da una sfera di polistirolo del diametro di 10 cm:

- in un semiguscio della sfera (se ne trovano anche di plastica con diametri da 6 cm fino a 40 cm nei negozi di giocattoli e nelle cartolerie), si faccia un foro e si alloggi la lente L_1 . Detta lente rappresenta la cornea.
- Dentro la sfera, subito dietro la prima lente L_1 , si appoggia e si fissa dietro di essa con nastro adesivo un'altra lente L_2 , la quale rappresenta il cristallino. La lunghezza focale data dal sistema delle due lenti deve essere uguale al diametro della sfera. Per esempio, può essere usata la combinazione di una lente con $f = 170$ mm e una con $f = 225$ mm.
- Al centro della semisfera senza lente si faccia un foro di alcuni centimetri e si copra con carta semitrasparente F.

Questo modello è meno vicino all'occhio reale del modello precedente, tuttavia esso permette, utilizzando le appropriate lenti correttive, di eseguire le esperienze proposte. In esso, inoltre, è relativamente facile sostituire la lente interna, che rappresenta il cristallino, con una lente accomodante [1].

A. 3 Esame del fondo oculare

Il colore scuro della pupilla porta a ritenere che il fondo dell'occhio sia di colore nero, che assorbe senza riflettere tutta la luce incidente su di esso. Ma gli occhi di diversi animali come anche gli occhi degli albinisti splendono e tale brillare svanisce nel buio completo, come se provenisse da riflessione di luce da parte del fondo oculare. Ma dove risiede allora il motivo del colore scuro della pupilla?

Il fisico e medico H. von Helmholtz riconobbe che i raggi di luce incidenti sul fondo oculare vengono riflessi sullo stesso cammino d'arrivo (In fig. 1, la luce diffusa per es. dall'elemento di superficie S'_1 può ritornare solo all'elemento di superficie S_1) e che per intercettare i raggi riflessi, l'osservatore dovrebbe poter portare il suo occhio sopra il loro cammino, senza interrompere i raggi incidenti. Helmholtz trovò per primo nel 1850 una soluzione. Egli si servì di vetri complanari per illuminare il fondo dell'occhio e nello stesso tempo intercettare i raggi riflessi. In fig. 6 è indicato il cammino dei raggi luminosi: la luce proveniente da una sorgente S cade su 3-4 vetri complanari V . Una parte della luce L_i viene riflessa e illumina il fondo oculare. Parte della luce L_r diffusa dal fondo oculare attraversa i vetri e cade nell'occhio dell'osservatore.

Gli specchi complanari furono la geniale trovata per la costruzione dell'oftalmoscopio (fig. 7a) ma non la soluzione ottimale, perché solo una parte della luce proveniente dal fondo oculare raggiunge l'occhio dell'osservatore. In fig. 7b è mostrato un altro semplice oftalmoscopio, che ebbe maggior successo tra i medici. Esso è costituito da uno specchio per la riflessione della luce e un foro centrale per l'osservazione.

Con la scoperta dell'oftalmoscopio incominciò un semplice metodo d'indagine che consentì di osservare direttamente e con un opportuno ingrandimento il fondo oculare e di riconoscere i difetti della vista. Oggi la moderna tecnica mette a disposizione nuovi complicati apparecchi e metodi per l'esame dell'occhio. Tuttavia l'oftalmoscopio, pur con molte modifiche, rimane un poco costoso e abbastanza facile mezzo d'indagine [5].

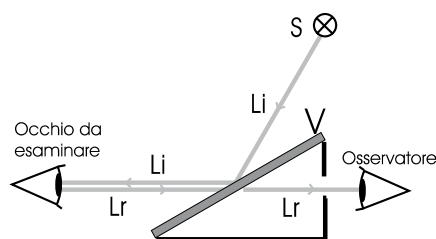


Figura 6. Geometria d'osservazione del fondo oculare. S sorgente di luce, L_i luce incidente, L_r luce riflessa dall'occhio, V vetri complanari.

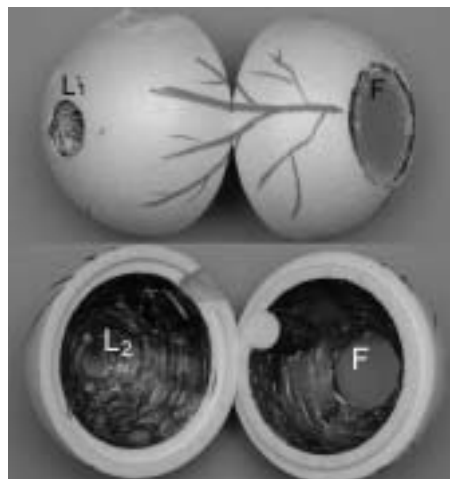


Figura 5. Esterno (sopra) e interno (sotto) del modello. L_1 è la lente esterna, L_2 la lente interna e F il fondo semitrasparente.

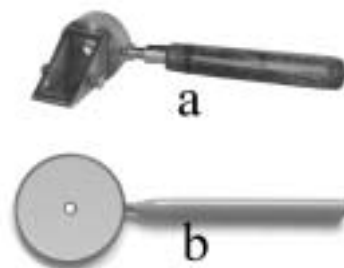


Figura 7. Oftalmoscopio di Helmholtz (a) e oftalmoscopio secondo Anagnostakis (b).

B. Attività didattiche proposte

Le seguenti attività possono costituire parte dell'unità didattica sull'ottica. Oltre il materiale per la costruzione dei modelli d'occhio, per ogni gruppo di studenti sono necessarie:

- Una lente (anche da vecchi occhiali) convergente con $f = 33,3$ cm corrispondente a 3 diottrie e una divergente con $f = -25$ cm corrispondente a -4 diottrie. (La diottria esprime il potere diottrico delle lenti. Definita come il reciproco della distanza focale espressa in metri, è molto usata pur non essendo un'unità di misura del SI).
- Una lampada tascabile che non allarghi molto il fascio di luce.
- Uno specchietto di plastica (10 cm x 10 cm) al centro del quale è stato praticato un foro di circa 0,5 cm oppure uno specchietto di vetro al quale è stato asportato un cerchietto centrale d'argentatura.

B. 1 Osservazioni con il modello "emmetrope"

Gli studenti inquadreranno con il modello costruito oggetti posti a varie distanze. Essi constateranno che oggetti lontani formano sulla parte semitrasparente del modello (retina in un occhio reale) un'immagine nitida, rimpicciolita e capovolta. Oggetti vicini ($< 0,5$ m) formano, invece, un'immagine sfocata. Gli studenti potranno verificare come tale immagine migliori con un'aggiunta di potere rifrattivo. A questo scopo porranno davanti al modello una lente convergente con $f = 33,3$ cm corrispondente a 3 diottrie, se l'oggetto si trova a circa 30 cm. Con lenti divergenti gli studenti noteranno invece un peggioramento di messa a fuoco.

Si chiedi agli studenti di fare un'ipotesi su come l'occhio reale, al contrario del modello, possa mettere a fuoco sia oggetti vicini che lontani.

B. 2 Osservazioni con il modello "miope"

Costruito il modello d'occhio "miope", gli studenti constateranno che con questo modello più lungo del normale, oggetti lontani sono focalizzati sulla retina sfocati mentre oggetti vicini sono messi a fuoco bene ("occhio lungo, vista corta").

Per ottenere un'immagine nitida di oggetti posti lontano, gli studenti porranno davanti al modello una lente divergente con $f = -25$ cm (-4 diottrie). Un miglioramento dell'immagine si ottiene in ogni caso ponendo davanti al modello gli occhiali degli studenti miopi.

L'insegnante preciserà che la causa dei vizi della vista è il rapporto sbagliato tra la lunghezza dell'occhio e il suo potere di rifrazione. Il vizio della vista che si corregge in pratica variando il potere di rifrazione, teoricamente potrebbe essere corretto spostando la retina.

Poiché la miopia è un difetto molto diffuso anche tra gli studenti, sono da aspettarsi delle domande del tipo:

- Quali sono le cause della miopia? (Le cause della miopia non sono ben note. Di sicuro influiscono fattori ereditari e fattori ambientali, come guardare costantemente oggetti vicini).
- Quanto è più lungo del normale il bulbo di un occhio miope? (1 mm circa per ogni 3 diottrie delle lenti che correggono il difetto).
- In che consiste l'intervento correttivo con il LASER? (Nell'asportare uno strato di cornea per aumentarne il raggio di curvatura).

B. 3 Esame del fondo dell'occhio

Prima dell'inizio della lezione l'insegnante copre completamente la parte posteriore semitrasparente dei modelli d'occhio normale e incolla sul fondo interno un piccolo disegno colorato (per es. un francobollo). Come introduzione si mostri agli studenti, mediante una diapositiva o sul foglio di lavoro, il fondo oculare visto dagli oculisti (scaricabile da diversi siti internet).

Gli studenti, dopo aver riempito d'acqua i modelli, cercheranno di osservare attraverso l'apertura anteriore ("pupilla"), così come fanno gli oculisti, il fondo del modello. Per l'illuminazione possono servirsi di una lampada tascabile.

Gli studenti non riusciranno a scrutare nell'interno del modello. Nella ricerca della spiegazione del perché non si riesce a vedere il fondo del modello, l'insegnante li aiuterà a capire che il problema nasce dal dover illuminare ed allo stesso tempo osservare senza che la testa dell'osservatore si trovi nel cammino del fascio di luce.

Si dica poi della semplice ma geniale invenzione di Helmholtz. Si distribuiscono gli specchietti e s'invitano gli studenti ad osservare il fondo del modello con la geometria d'osservazione di fig. 7. Per evitare perdite di tempo, è meglio che l'insegnante mostri la posizione che la sorgente di luce e lo specchietto devono assumere (fig. 8).

Anche in presenza del disturbo della luce riflessa dalla "cornea" del modello, gli studenti potranno identificare il disegno, che appare ingrandito.

In principio, anche gli studenti, come gli oculisti, potrebbero osservare il fondo dell'occhio. Senza però una fonte luminosa adatta, senza esperienza e con la pupilla che si riduce con l'aumento della luminosità, sarebbe una prova senza successo e un'eccessiva sollecitazione dell'occhio da esaminare.



Figura 8. Disposizione per l'osservazione del fondo del modello.

B. 4 Discussione

L'insegnante riassume sommariamente il funzionamento dell'occhio umano e apre una discussione sui modelli costruiti, sulle similitudini e sulle differenze di funzionamento con l'occhio reale. Si introduce anatomia e messa a fuoco dell'occhio nei pesci. Per allargare ed animare la conversazione, le seguenti domande possono essere utili:

- *Perché esistono in natura occhi con differenti anatomie e fisiologie?* (Perché ogni animale si è adattato al suo ambiente, ove occupa nell'ecosistema una precisa posizione, che rende necessaria una precisa forma e fisiologia dell'occhio).
- *Perché i pesci accomodano in maniera diversa dagli uomini?* (Sott'acqua il contributo di rifrazione della cornea diminuisce fortemente. Il cristallino, pur con il minimo raggio di curvatura che riesce a realizzare, specialmente con la faccia anteriore il cui raggio da 10 mm diminuisce fino a circa 5 mm, non è in grado di sopperire completamente alla rifrazione mancante e la vista è indistinta. Per questo motivo gli animali acquatici adottano normalmente un meccanismo di messa a fuoco differente. I pesci, per esempio, accomodano variando la di-

- stanza della retina dal cristallino, il quale è sferico, non deformabile e di grande potere rifrangente).
- *La cornea degli animali il cui habitat è sia l'aria che l'acqua è poco o molto incurvata?* (Poco incurvata affinché la differenza di rifrazione in aria e in acqua sia piccola).
 - *Tali animali sono sulla terra miopi o ipermetropi?* (In aria il potere diottrico dell'occhio è maggiore che in acqua. Pertanto, animali che vivono sia in acqua che sulla terra possono essere in aria miopi, come per esempio la foca, ma non sono mai ipermetropi).
 - *Sott'acqua, vedono meno nitido i bambini o i vecchi?* (I bambini vedono sott'acqua meglio, perché il cristallino del loro occhio riesce a raggiungere raggi di curvatura più piccoli e quindi a compensare meglio la rifrazione perduta dalla cornea).
 - *Cambia sott'acqua il potere di rifrazione con l'utilizzo della maschera?* (Con una maschera da subacqueo la cornea rimane a contatto con aria e il potere rifrattivo dell'occhio non diminuisce).
 - *Giova portare anche sott'acqua gli occhiali da vista?* (Gli occhiali perdono sott'acqua circa il 75% del potere diottrico e quindi la loro efficacia diminuisce. Tuttavia, poiché sott'acqua l'occhio ha un insufficiente potere diottrico, le lenti convergenti migliorano la vista mentre le lenti divergenti la peggiorano).

Bibliografia

- [1] G. COLICCHIA, Physikunterricht im Kontext von Biologie und Medizin, dissertazione Università di Monaco 2002, reperibile in <http://edoc.ub.uni-muenchen.de/archive/00000274/>. Materiale didattico di fisica in contesto medico-biologico si trova anche nel sito di didattica della fisica, Università di Monaco: <http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/>
- [2] F. BORSA, D. SCANNICCHIO, *Fisica con applicazioni in biologia e medicina*, Edizioni Unicopli, Milano (1997).
- [3] R.J. MEYER-ARENDT, *Introduzione all'ottica classica e moderna*, Zanichelli, Bologna (1976).
- [4] Lenti, sfere di plastica trasparente e di polistirolo possono essere ordinate da: <http://www.opitec.it/>; oppure: <http://www.astromedia.de/>
- [5] A. SCHETT, *The Ophthalmoscope*, Wayenborgh, Oostende, Belgio (1996).

LUDOTECASCIENTIFICA

SPERIMENTANDO SOTTO LA TORRE IN FISICA E DINTORNI

dal 18 aprile al 16 maggio 2004

-

tutti i giorni dalle 9 alle 18

presso il Museo degli Strumenti per il Calcolo
via Nicola Pisano 25 – Pisa

visitate il sito web www.ipcf.cnr.it/ludotecascientifica e prenotate on-line

Per informazioni e prenotazioni:

tel. 050/3152527 (dal lunedì al venerdì h.9-12/13-16)

050/2215265 (in orari di apertura della mostra)

mail: [<ludotecascientifica@ipcf.cnr.it>](mailto:ludotecascientifica@ipcf.cnr.it)