

APPARATO PER SPERIMENTAZIONI DI BIOLOGIA IN LUCE POLARIZZATA.

A. Parretta (ENEA), F. Petrucci (Uni. Ferrara), G. Beltrami (Uni. Ferrara), C. Bertolucci (Uni. Ferrara), A. Foà (Uni. Ferrara), L. Landi (Uni. Ferrara).

INDICE

RIASSUNTO

DESCRIZIONE

STATO DELL'ARTE PER IL SETTORE DELL'INVENZIONE

Generalità sull'orientamento di alcuni animali sotto illuminazione polarizzata.

Descrizione dell'apparato sperimentale a lampade

Descrizione degli esperimenti di biologia con l'apparato sperimentale a lampade

DESCRIZIONE DETTAGLIATA DELL'INVENZIONE

Descrizione della nuova sorgente di luce polarizzata e sue caratteristiche

Dettagli del nuovo apparato sperimentale e descrizione degli esperimenti di biologia

Risultati e discussione

CONCLUSIONI

RIVENDICAZIONI

RIASSUNTO

Apparato sperimentale (1) (Fig. 1a) per la produzione di un cielo artificiale di luce linearmente polarizzata (2), per mezzo del quale effettuare esperimenti di biologia dell'evoluzione miranti allo studio dell'orientamento di animali in luce solare diffusa polarizzata, caratterizzato da un box (3) all'interno del quale è posto un recinto (4), in particolare una piscina o vasca nel caso si tratti di esperimenti su lucertole, nel quale vengono effettuate le sedute di allenamento degli animali e le prove (test) di orientamento, essendo tale box (3) mantenuto ad una temperatura costante, a tenuta di luce dall'ambiente esterno grazie a dei tendaggi neri laterali (16), e illuminato da una finestra (5) creata per mezzo del diaframma (6) posto sulla parte superiore (7) del box (3) su cui è adagiato, in modo da coprirlo interamente, lo schermo a cristalli liquidi (LCD) (8) di un monitor (9), in particolare lo schermo di un televisore a cristalli liquidi (TV-LCD), pilotato da un computer (10) ad esso collegato e posto nelle immediate vicinanze del box e al di fuori di esso in modo da essere facilmente accessibile ad un operatore ed operabile senza possibilità di interferenze con l'ambiente interno al box, detto schermo (8) essendo quindi in grado di poter produrre un'illuminazione con un profilo ed un colore desiderato, in particolare un'illuminazione uniforme, semplicemente impostando attraverso il computer (10) e con l'ausilio di un software appropriato i tre livelli di colore (R, G, B), in modo tale che sul piano operativo (11) del recinto si venga a determinare una intensità media ed un profilo d'illuminamento controllati sia dal suddetto livello di emissione dello schermo (8) che dalla forma e dalle dimensioni della finestra (5), nonché dalla distanza dello schermo (8) rispetto al piano operativo (11) del recinto, mentre l'orientazione del piano d'incidenza verticale della luce sul recinto, coincidente con il piano di polarizzazione e contenente l'asse di vibrazione del campo elettrico (e-vector), è determinato dall'orientazione azimutale α (12) dello schermo sul piano (7) della finestra, orientazione che potrà essere modificata nel corso degli esperimenti agendo sulla leva (13), vincolata alla corona circolare (14), la quale può ruotare con basso attrito sul diaframma (6) e che è solidale con il monitor LCD (9), essendo la tenuta di luce del box assicurata, anche durante la movimentazione del monitor (9), da una guarnizione (15) avente la forma della finestra (5).

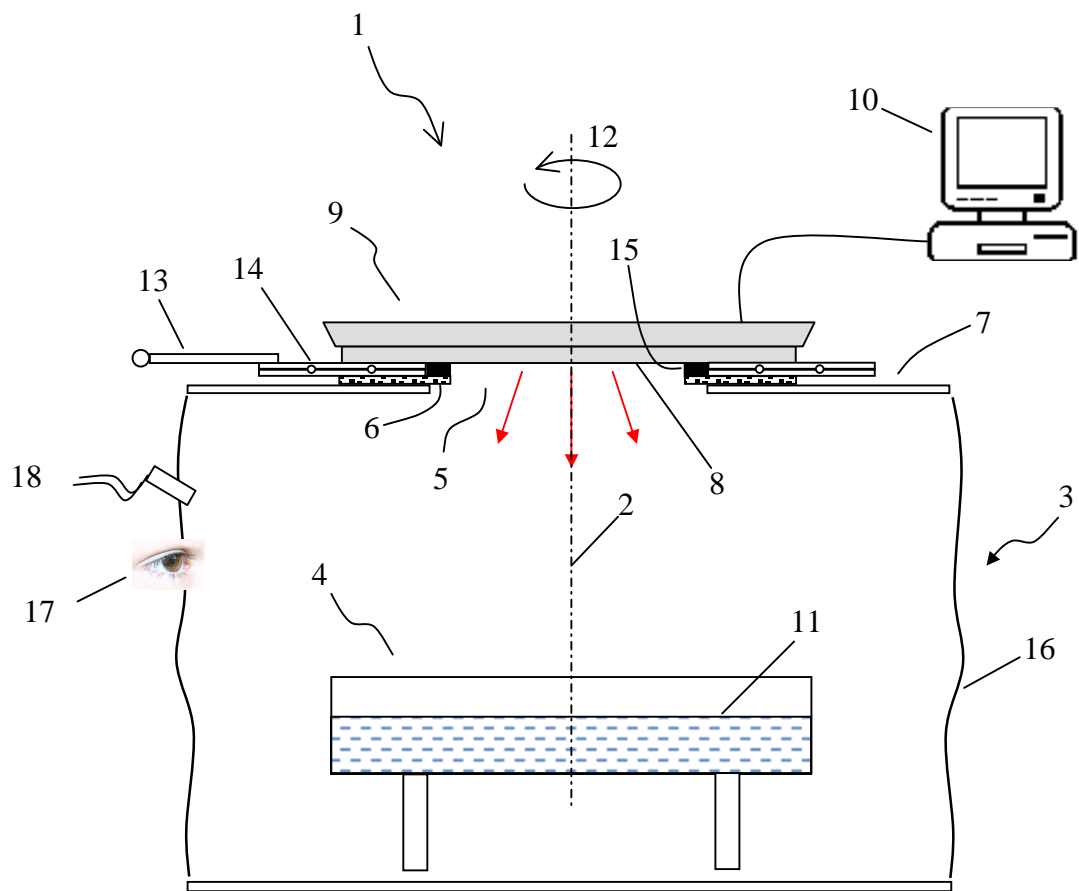


Figura 1a. Schema principale dell'apparato oggetto della presente invenzione.



Figura 1b. *Podarcis Sicula*.

DESCRIZIONE

E' descritto un metodo ed il relativo apparato sperimentale per la produzione di una illuminazione nel campo del visibile, che sia spazialmente estesa e caratterizzata da uno stato di polarizzazione lineare tale da produrre un illuminamento con caratteristiche controllate di: i) intensità, ii) colore, iii) profilo e iv) stato di polarizzazione sul piano di un recinto dove vengono eseguite delle sperimentazioni con animali allo scopo di studiarne i meccanismi che sono alla base del loro orientamento in luce naturale, essendo l'apparato, con la sua illuminazione artificiale, una riproduzione dell'ambiente naturale esterno.

Svariati lavori di letteratura [1-5] riportano esperimenti di orientamento in luce polarizzata di varie specie di animali, invertebrati (ragni, formiche, scarabei, farfalle) o vertebrati (tritoni, salamandre, lucertole, scincidi, passeriformi). Nel presente lavoro noi ci riferiremo ad esperimenti di tipo indoor condotti su lucertole *Podarcis Sicula* (Fig. 1b) [6].

Lavori precedenti eseguiti su questo tipo di animali hanno portato alla scoperta di un loro orientamento direzionale seguendo la bussola solare [6]. E' stato inoltre scoperto recentemente [7] che una bussola solare utilizzata da *Podarcis Sicula* è basata sulla percezione dell'e-vector della luce polarizzata della volta celeste, per effetto della diffusione di Rayleigh della luce solare diretta da parte delle molecole dell'atmosfera terrestre. Questo risultato è stato raggiunto attraverso una sperimentazione eseguita in laboratorio all'interno di un box nel quale è stata prodotta un'illuminazione artificiale in luce bianca polarizzata linearmente che illumina una piscina all'interno della quale sono condotti gli esperimenti di orientamento degli animali e che simula la luce solare diffusa polarizzata. L'illuminazione in luce polarizzata è stata realizzata impiegando due lampade fluorescenti che illuminavano una finestra costituita da un diffusore di luce accoppiato ad un filtro polarizzatore del tipo H-sheet (polaroid®). L'illuminazione al livello dell'acqua nella piscina degli esperimenti è stata esaminata effettuando misure di profilo di illuminamento (in lux), nonché di grado di polarizzazione e di orientazione del vettore campo elettrico. Le misure hanno dimostrato che la configurazione sperimentale descritta precedentemente è sufficiente per condurre gli esperimenti di biologia con un soddisfacente livello di affidabilità.

Nonostante i risultati positivi raggiunti negli esperimenti di orientamento in luce bianca, la configurazione sperimentale adottata si è dimostrata poco adatta per essere estesa ad esperimenti in vari colori, ovvero con spettro selezionato, che richiede necessariamente l'impiego di filtri dicroici o passa banda. Svariati sono infatti gli svantaggi che la configurazione lampade + filtri + diffusore + polarizzatore comporta: i) svantaggi di tipo economico in quanto si tratta di acquisire una serie di filtri dicroici o passa-banda di dimensioni non trascurabili; ii) necessità di innalzare la potenza delle

singole lampade per compensare l'attenuazione prodotta dai singoli filtri, con la conseguenza di dissipare maggiore calore all'interno dell'ambiente nel quale è contenuto il box e quindi di dover intervenire ventilando l'ambiente per mantenerne inalterata la temperatura; iii) rischi di surriscaldare i filtri per effetto dell'irraggiamento supplementare richiesto alle lampade; iv) difficoltà a selezionare con accuratezza la banda spettrale su cui produrre l'illuminazione, ovvero difficoltà a reperire filtri con le caratteristiche richieste; v) necessità di regolare la potenza delle singole lampade introducendo dei dispositivi elettronici costosi al fine di ottenere sul livello della vasca il corretto illuminamento; vi) difficoltà ad ottenere un profilo d'illuminamento assialsimmetrico rispetto all'asse ottico verticale dell'apparato (questa difficoltà esiste anche nella sperimentazione in luce bianca, e quindi in assenza di filtri).

In questo brevetto viene proposto un diverso metodo per l'illuminazione del box ed il relativo apparato sperimentale, il quale si differenzia da quello tradizionale testé descritto essenzialmente nella parte che riguarda l'illuminazione del recinto degli esperimenti, ovvero della piscina nel caso in cui si tratti di esperimenti su sauri quali *Podarcis Sicula*. Esistono già infatti sorgenti estese di luce linearmente polarizzata che possono essere impiegate al posto del complesso sistema lampade + filtri + diffusore + polarizzatore. Sorgenti di questo tipo sono tutti gli schermi basati sulla tecnologia dei cristalli liquidi, ovvero schermi del tipo LCD, che si possono trovare sia come monitor di computer che di televisori. I vantaggi che questi schermi presentano rispetto alla configurazione tradizionale testé citata sono chiaramente evidenti considerando che lo schermo di per sé è una sorgente di luce estesa che può essere impostata in modo da essere spazialmente altamente uniforme, e le cui caratteristiche di intensità di emissione e di spettro sono facilmente ed immediatamente regolabili direttamente dal computer associato se si tratta di monitor di computer, oppure da un computer di controllo aggiuntivo qualora si tratti di un monitor di televisore, attraverso l'uso di programmi noti.

L'uso quindi di uno schermo LCD di computer o televisore per illuminare il recinto degli esperimenti di biologia elimina, come meglio sarà discusso nelle sezioni successive, d'un sol colpo tutte le difficoltà che sono state individuate nell'uso della configurazione tradizionale e rende altresì estremamente veloci le impostazioni dei diversi esperimenti, grazie alla velocità di esecuzione dei comandi che vengono trasmessi semplicemente attraverso un computer.

STATO DELL'ARTE PER IL SETTORE DELL'INVENZIONE

Generalità sull'orientamento di alcuni animali sotto illuminazione polarizzata.

Le evidenze sperimentali a favore dell'esistenza di una bussola cronometrica e di una bussola a polarizzazione nei Sauri sono molteplici. In questo lavoro prendiamo in considerazione tre esperimenti il cui scopo è dimostrare l'esistenza di una bussola cronometrica e di una bussola a polarizzazione nei Sauri. Il primo esperimento dimostra l'esistenza di una bussola cronometrica in *Uma notata* e verifica della capacità di percepire l'e-vector di luce polarizzata [3]. Adler e Phillips fornirono, nel 1985, la prima dimostrazione dell'esistenza di una sensibilità alla luce polarizzata in un rettile, in particolare nel lacertide *Uma notata*. Essi partirono dall'osservazione della risposta di fuga di queste lucertole diurne, che vivono nel deserto dell'Arizona. Quando allarmate da predatori, esse mostrano un chiaro orientamento direzionale su riferimenti astronomici. Per testare l'ipotesi dell'esistenza di un sistema di orientamento della bussola di questo tipo, le lucertole vennero (1) sottoposte ad uno sfasamento di sei ore dell'orologio fisiologico endogeno (esperimento di clock-shift) e (2) addestrate a cercare rifugio esponendole al pattern di polarizzazione naturale. I risultati ottenuti confermano l'ipotesi dell'esistenza di un meccanismo di orientamento che necessita di un meccanismo di compensazione cronometrica. Le lucertole addestrate a raggiungere un rifugio in presenza del pattern di polarizzazione naturale, sono state poi testate in condizioni controllate in un ambiente interno, in presenza di una luce polarizzata artificiale. La sorgente di luce polarizzata era progettata in questo modo: cilindro nero contenente un filtro polaroid (polaroid corp. HN38) con una lampadina a bulbo a incandescenza da 100W; la parte terminale del cilindro era coperta da un diffusore. La porzione di disco di luce polarizzata vista dalle lucertole era del diametro di 14 cm. L'angolo tra il disco e la testa degli animali era di circa 20°. In queste condizioni gli animali hanno mostrato un chiaro orientamento bidirezionale dipendente dall'orientazione dell'e-vector.

Questi esperimenti dimostrano: 1. l'esistenza di un meccanismo cronometrico di orientamento alla bussola nei lacertidi; 2. la capacità di utilizzare l' e-vector della luce polarizzata nell'orientamento alla bussola.

Il secondo esperimento preso in considerazione vuole dimostrare la capacità di *Tiliqua rugosa* di orientarsi utilizzando la direzione dell'e-vector di luce polarizzata [4]: dapprima gli animali sono stati addestrati in corridoi con pareti rialzate posti all'esterno; gli animali avevano accesso alla luce diffusa del cielo (quindi alla luce polarizzata) ma il disco solare non era loro direttamente visibile. Sono stati in seguito testati in un'arena circolare, sempre posizionata all'esterno, nelle stesse condizioni (disco solare non direttamente visibile). Gli animali mostrano un orientamento con una distribuzione bimodale lungo un asse molto prossimo all'asse di addestramento. Nessuna evidenza

suggerisce che le lucertole abbiano utilizzato un altro tipo di riferimento, oltre all'e-vector della luce polarizzata.

Nella seconda fase, per accertare la dipendenza della scelta direzionale dall'e-vector, gli animali sono stati addestrati e testati, con lo stesso apparato sperimentale, in un ambiente chiuso, in presenza di una fonte artificiale di luce polarizzata, con un e-vector in una singola direzione. La sorgente di luce polarizzata era costituita da una scatola di compensato (30x30x20 cm) con un foro di 28 cm di diametro al centro del pavimento della scatola. All'interno del box, sospesa, è stata attaccata una lampadina a bulbo ad incandescenza da 75W a 5 cm dal diffusore, costituito da una lastra di vetro satinato spessa 5mm posizionata vicina ad un filtro polarizzatore (Polaroid corp. HN38), posto sul pavimento della scatola. Al momento del test la direzione dell'e-vector è stata ruotata di 45° rispetto al training. I risultati sono coerenti con il tentativo, da parte delle lucertole, di utilizzare la direzione dell'e-vector per orientarsi.

Questo studio fornisce, una prova dell'esistenza dei meccanismi sensoriali e cognitivi necessari per una bussola cronometrica di questo tipo.

Descrizione dell'apparato sperimentale a lampade

Esperimenti in luce bianca di orientamento animale in *Podarcis Sicula* (Fig. 1b) sono stati già condotti con successo dal gruppo di Etologia del Dip.to di Biologia dell'Università di Ferrara [7]. Essi hanno fatto uso di una configurazione sperimentale convenzionale simile a quella citata da altri autori e illustrata in maniera schematica nella Fig. 2. L'apparato sperimentale (10) è costituito da un box (30) all'interno del quale è posto il recinto (40), sede degli esperimenti sugli animali, illuminato dall'alto dalla luce prodotta dalle lampade (90) e trasmessa al box dalla finestra (50), delimitata dal diaframma (60). Se si esclude la finestra (50), il box è isolato otticamente dall'ambiente esterno per mezzo, nell'alto, del tetto opaco (70) e, lateralmente, di un tendaggio nero e spesso (160). Sulla tenda (160) sono praticati alcuni piccoli fori attraverso i quali è permessa l'osservazione dell'esperimento da parte dell'operatore (170) e la sistemazione di una piccola videocamera (180) per la registrazione del percorso degli animali sul piano (110). L'illuminazione è realizzata con due fari (90) contrapposti, ciascuno equipaggiato con quattro lampade del tipo "energy saving" da 32 W e 1920 lm cadauna, posizionate sul tetto (70) del box ed orientate a 45° in direzione della finestra (50). La finestra (50) è costituita da un'apertura circolare di diametro 48 cm o quadrata di lato 48 cm, sulla quale è posto un "sandwich" (80) costituito da due lastre di vetro, quella superiore (200) smerigliata e quella inferiore (220) liscia, tra le quali è posta una lamina polarizzatrice di tipo H-sheet (polaroid®) (190). La luce proveniente dai fari (90) viene diffusa dalla prima lastra di vetro

(200), che così distribuisce in maniera più omogenea la luce direzionale delle lampade, e attraversa la lamina polaroid® da cui è polarizzata totalmente lungo un piano verticale, e infine è trasmessa dalla lastra (220) all'interno del box (30). L'angolo azimutale del piano di polarizzazione (120) è misurato rispetto ad un riferimento fisso sul tetto (70) del box ed è controllato attraverso la rotazione della leva (130), solidale alla corona circolare (140) sulla quale è poggiato il filtro polarizzatore (80). Durante la rotazione della finestra, la tenuta di luce del box (30) è assicurata dalla guarnizione (150).

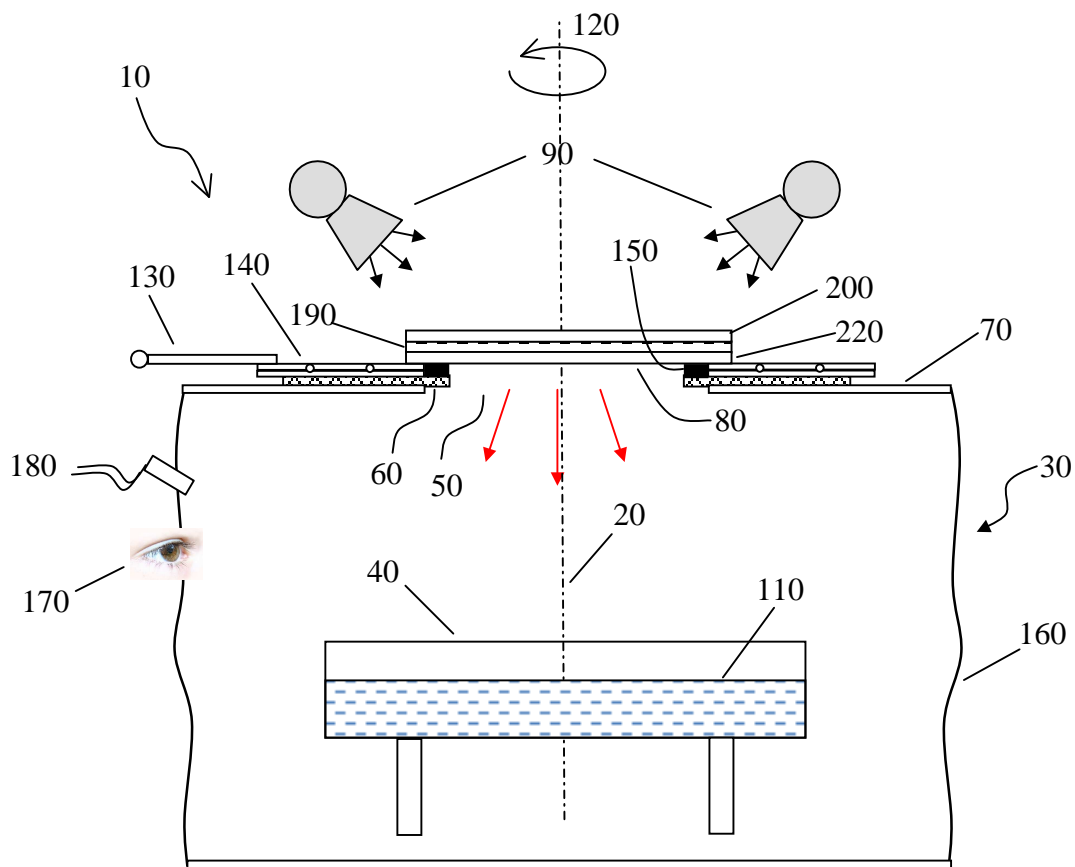


Figura 2. Schema di un apparato convenzionale a lampade.

La Fig. 3 mostra le foto dell'apparato sperimentale convenzionale a lampade usato a Biologia (Ferrara), come si presenta durante gli esperimenti in luce bianca. I primi esperimenti sono stati condotti con la finestra (80) di forma quadrata di 48 cm di lato; di seguito, per avere una maggiore simmetria assiale, si è passati ad una finestra di forma circolare di 48 cm di diametro, la stessa che è stata successivamente usata per le misure con l'apparato nella nuova configurazione. La foto (a) mostra il box (30) chiuso dal tendaggio (160) e i due fari (90) contrapposti e orientati verso il centro della finestra (80). La foto (b) mostra il box (30) aperto e il particolare della finestra di forma

quadrata di lato 48 cm in cui è posto il polarizzatore (80). La figura (c) mostra uno schema completo dell'apparecchiatura, con tutti i componenti principali dell'apparato. Le foto (d) mostrano la vasca (40) degli esperimenti (Morris water maze [8]), di forma esagonale, all'interno della quale sono visibili le piattaforme che rappresentano i traguardi negli esperimenti di orientamento; esse sono poste a contatto di due lati opposti dell'esagono e definiscono l'orientamento 0°-180°, che è per definizione l'asse di training. Le descrizione dettagliata della vasca e degli esperimenti condotti al suo interno è fatta nel paragrafo: *Dettagli del nuovo apparato sperimentale e descrizione degli esperimenti di biologia.*



Figura 3. Foto dell'apparato a lampade, con il particolare della vasca "Morris water maze".

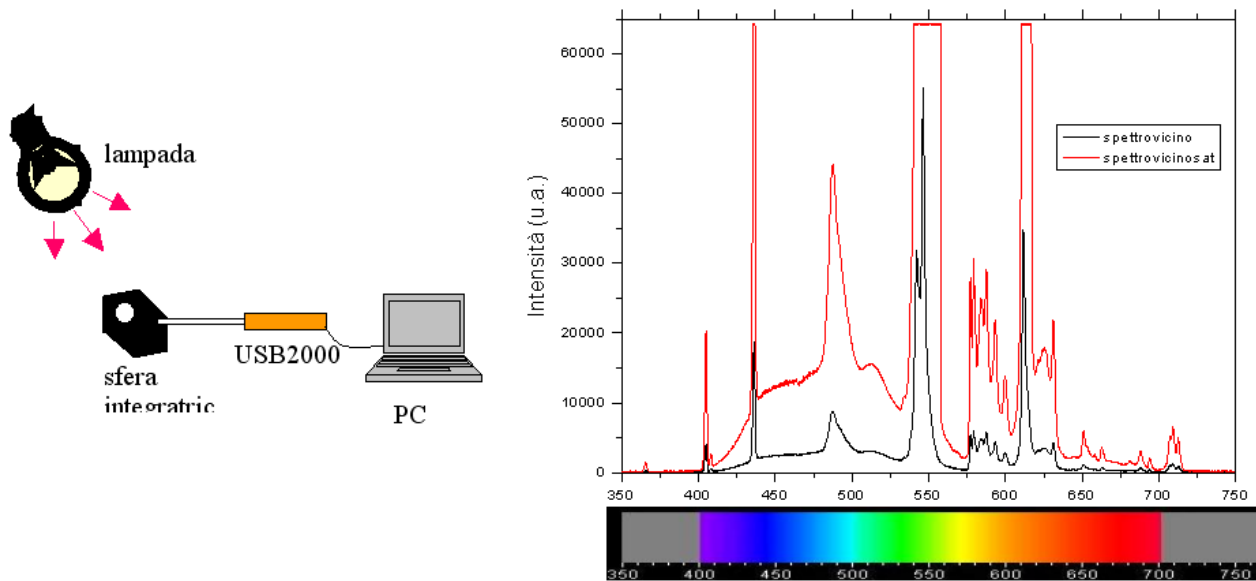


Figura 4. Schema della misura dello spettro delle lampade e spettro delle lampade (90).

Lo spettro della luce emessa dalle lampade (90) è stata misurata con lo spettrometro Ocean Optics USB2000 per mezzo di una sfera integratrice (vedi Fig. 4). Lo spettro è quello caratteristico di una sorgente con temperatura di colore di 5500-6000 K, con sovrapposti i picchi delle transizioni atomiche del gas contenute al suo interno. Lo spettro delle lampade è lievemente modificato dalla presenza del filtro polaroid®, la cui curva di trasmittanza spettrale è mostrata in Fig. 5. Il filtro inoltre attenua sensibilmente la luce, essendo la trasmittanza media sull'intervallo 350-750 nm pari a circa il 36% (un polarizzatore ideale avrebbe un'attenuazione pari al 50%, uniforme su tutto lo spettro).

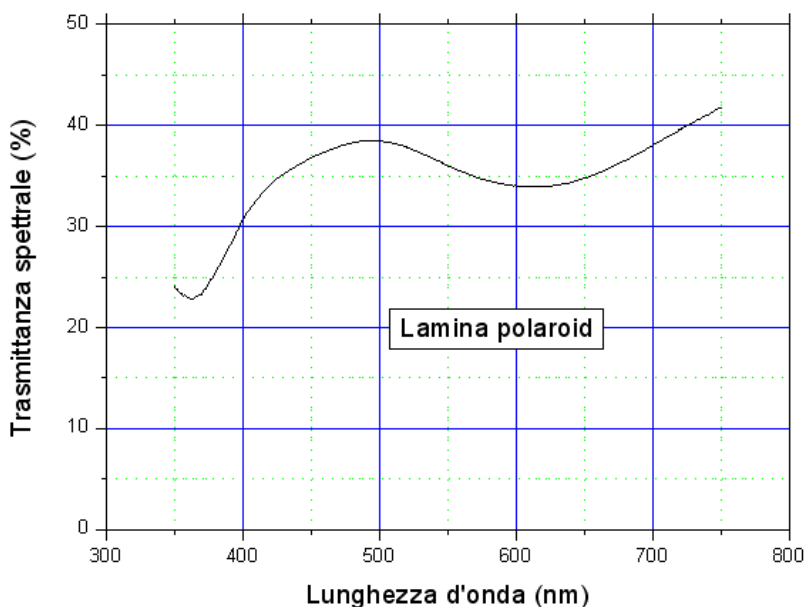


Figura 5. Curva di trasmittanza spettrale del filtro polaroid®.

All'interno della vasca (40), in assenza del liquido al suo interno e a distanze regolari di 10 cm sul piano (110), sono state effettuate misure di intensità, grado e direzione di polarizzazione della luce impiegando il luxmetro Konica-Minolta T-10. In Fig. 6a è mostrata la pianta della vasca con indicate le direzioni di misura, corrispondenti alle congiungenti i punti intermedi dei lati opposti: A-D, B-E, C-F.

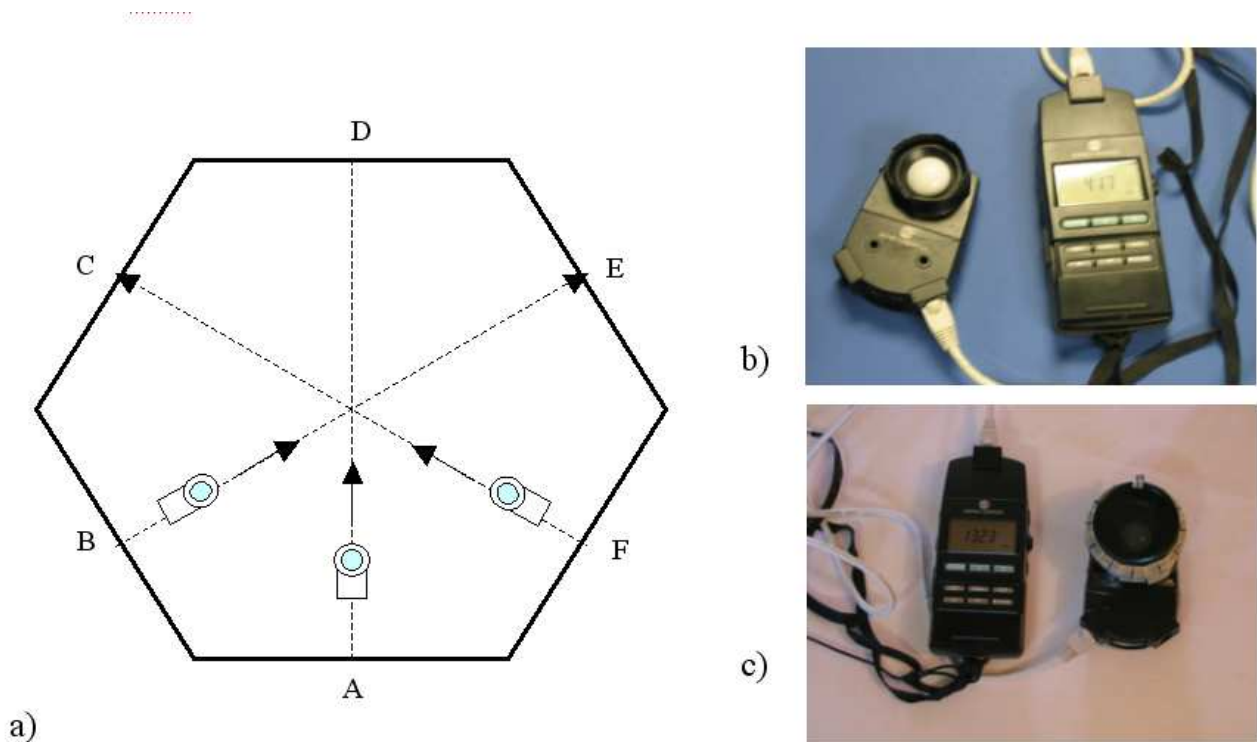


Figura 6. a) Tratti della vasca su cui sono state fatte le misure ottiche. b) Luxmetro per misure di illuminamento. c) Luxmetro per misure di polarizzazione.

Per le misure di illuminamento E_v (lux) è stato usato il luxmetro come mostrato in Fig. 6b, dove è visibile la tastiera e la testa di misura con il sensore posto al di sotto della calotta bianca che funge da correttore di coseno. Per le misure di grado e direzione di polarizzazione, invece, il sensore è stato accoppiato ad un filtro polaroid® (vedi Fig. 6c) che veniva ruotato sopra di esso per misurare E_{min} ed E_{max} , i valori medi minimi e massimi di E_v (lux), ed α_{min} ed α_{max} , i valori medi degli angoli azimutali corrispondenti. Il valore $\alpha_{max} \pmod{\pi}$ identifica la direzione azimutale del piano di polarizzazione (verticale) della luce, mentre il grado di polarizzazione p è dato da:

$$p = \frac{\overline{E}_{max} - \overline{E}_{min}}{\overline{E}_{max} + \overline{E}_{min}} \quad (1)$$

Per una luce totalmente, ovvero linearmente, polarizzata il grado di polarizzazione è 1, in quanto $E_{min} = 0$.

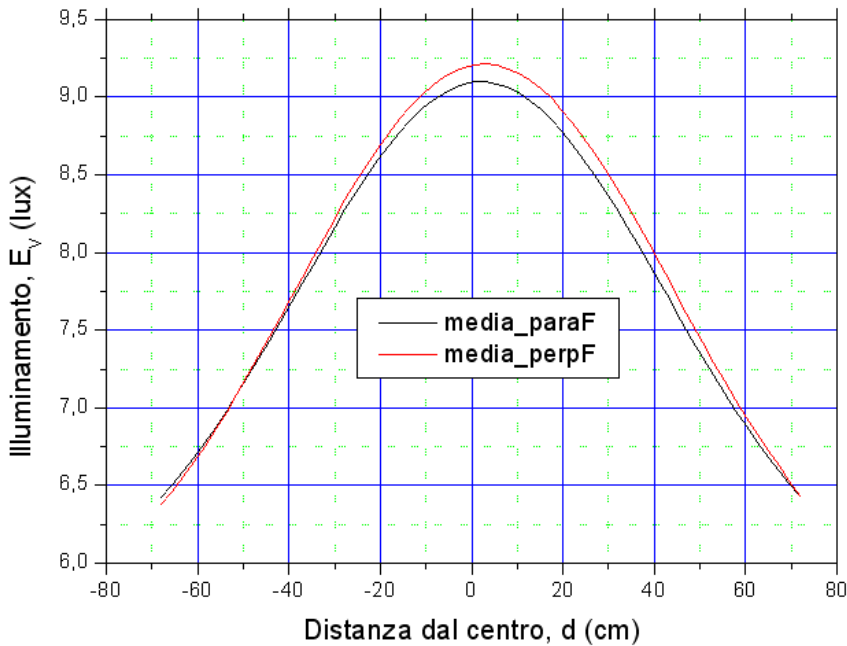


Figura 7. Profilo medio d'illuminamento per polarizzatore parallelo o perpendicolare al lato F.

I profili d'illuminamento sul piano della vasca sono riportati in Fig. 7 in funzione della distanza dal centro della vasca. Il primo (nero) si riferisce al profilo medio lungo le tre direzioni A-D, B-E, C-F, quando il polarizzatore è orientato con l'asse parallelo al lato F, mentre il secondo (rosso) si riferisce al profilo medio lungo le stesse direzioni quando il polarizzatore è orientato con l'asse perpendicolare al lato F (vedi Fig. 8).

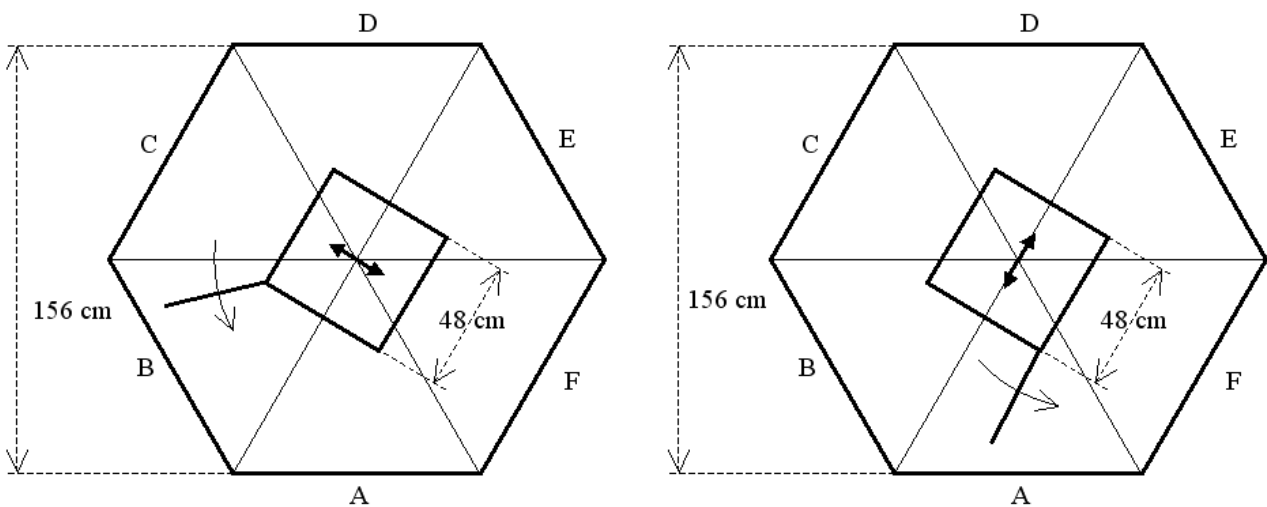


Figura 8. Orientazione del polarizzatore perpendicolare e parallela al lato F.

Il profilo d'illuminamento E_v è sufficientemente simmetrico rispetto all'asse ottico della finestra (80), anche se l'intensità scende dal valore centrale di ~ 9.2 lx a ~ 6.3 lx sul perimetro della vasca (Fig. 7). Il grado di polarizzazione su tutti i punti misurati è pari a 1. L'orientamento dell'asse di polarizzazione della luce, ovvero dell'e-vector, è mostrato nelle Fig. 9 per le due orientazioni del filtro polarizzatore.

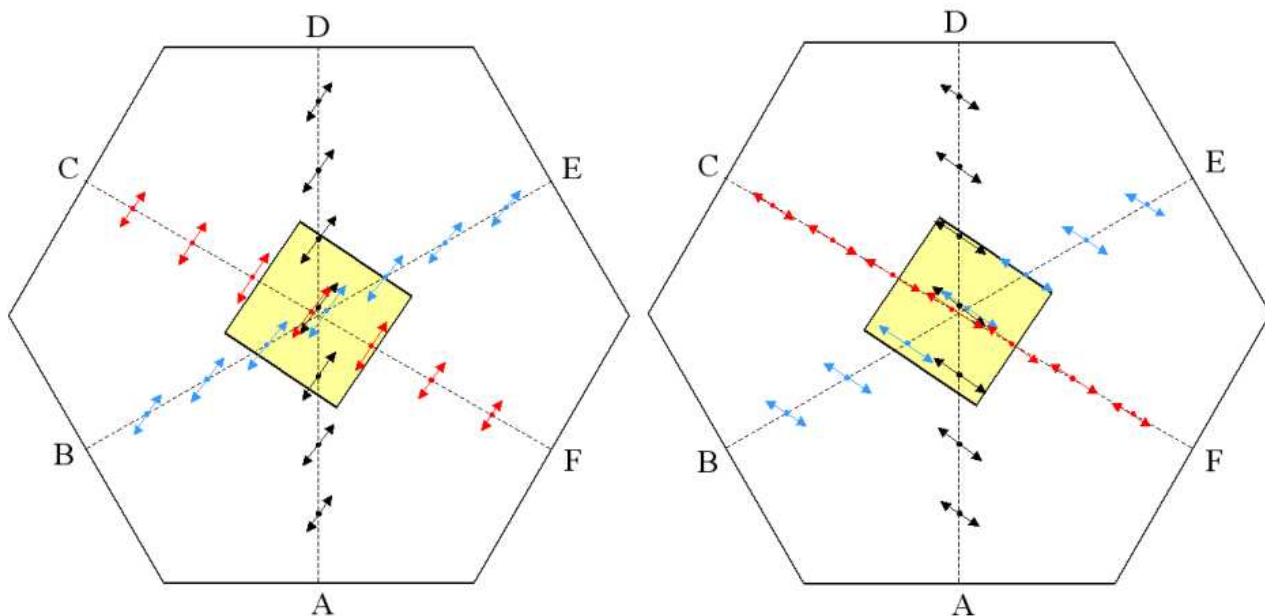


Figura 9. Risultati delle misure d'illuminamento con polarizzatore rispettivamente parallelo e perpendicolare al lato F.

La lunghezza delle frecce è proporzionale all'illuminamento, mentre il loro orientamento indica la direzione della polarizzazione (e-vector). Come si può vedere dalla Fig. 9, l'orientamento dell'e-vector sul piano operativo (110) è sempre perfettamente parallelo all'asse del polarizzatore.

La verifica della polarizzazione della luce trasmessa dalla finestra (80) è stata fatta anche servendosi di una macchina fotografica provvista di un filtro polarizzatore e facendo diverse foto della finestra (80) per diverse posizioni angolari del filtro (vedi Fig. 10). Nella Fig. 10 sono mostrate quattro serie di foto eseguite da quattro diverse posizioni attorno alla vasca, ogni serie essendo costituita da 13 foto, eseguite sull'angolo giro e variando di 30° ogni volta la posizione del filtro, e sovrapponendo l'ultima foto alla prima di ciascuna serie. Tra una serie di foto e l'altra è lasciato un fotogramma nero. Come si può notare, la luminosità della finestra, pur non essendo sempre perfettamente omogenea, varia comunque con regolarità in ciascuna serie, attraversando un minimo molto marcato che dà luogo ad un nero molto intenso, a dimostrazione del fatto che la luce trasmessa è totalmente polarizzata. La luminosità non omogenea della finestra può essere attribuita al fatto che le foto sono state prese dal bordo vasca: la lucertola, dall'interno della vasca percepisce una luminosità della finestra sicuramente più omogenea.



Figura 10. Serie di foto della finestra prese dall'interno del box con l'uso di un filtro polarizzatore.

Descrizione degli esperimenti di biologia con l'apparato sperimentale a lampade

Gli esperimenti in luce bianca su *Podarcis Sicula*, descritti in maniera molto sintetica, consistono essenzialmente di una fase di addestramento (training) e di una fase di test. Esistono anche le fasi di pre-training e di training intermedio che qui non verranno discusse. La fase di training consiste nell'addestrare un primo gruppo di animali ad orientarsi lungo una direzione di training "parallela" all'e-vector, il quale è orientato lungo la direzione 0° - 180° . Un secondo gruppo di animali è addestrato ad orientarsi lungo una direzione di training "perpendicolare" all'e-vector, il quale è orientato lungo la direzione 90° - 270° . In entrambi i casi, quindi, la direzione di training coincide sempre con la direzione delle due piattaforme, indicata come direzione 0° - 180° . La direzione dell'e-vector, invece, coincide sempre con l'asse del polarizzatore, che per il training "parallelo" è orientato nella direzione 0° - 180° , mentre per il training "perpendicolare" è orientato nella direzione 90° - 270° (vedi Fig. 11). L'addestramento consiste in una lunga serie di esperimenti, o lanci, nei quali la lucertola è liberata al centro della vasca, priva di sostegni, e lasciata nuotare liberamente al suo interno alla ricerca di una delle due piattaforme sommerse, e quindi invisibili a causa dell'acqua resa torbida dalla farina fossile. Le due piattaforme sono orientate, per il primo gruppo, lungo la direzione dell'e-vector, mentre per il secondo gruppo esse sono orientate in direzione perpendicolare all'e-vector (vedi Fig. 11). In entrambi i casi, le lucertole sono addestrate a raggiungere la meta che è una delle due piattaforme. Le piattaforme sono immerse ad un livello tale che la lucertola che vi dovesse giungere può mantenersi colà con il capo fuori dell'acqua.

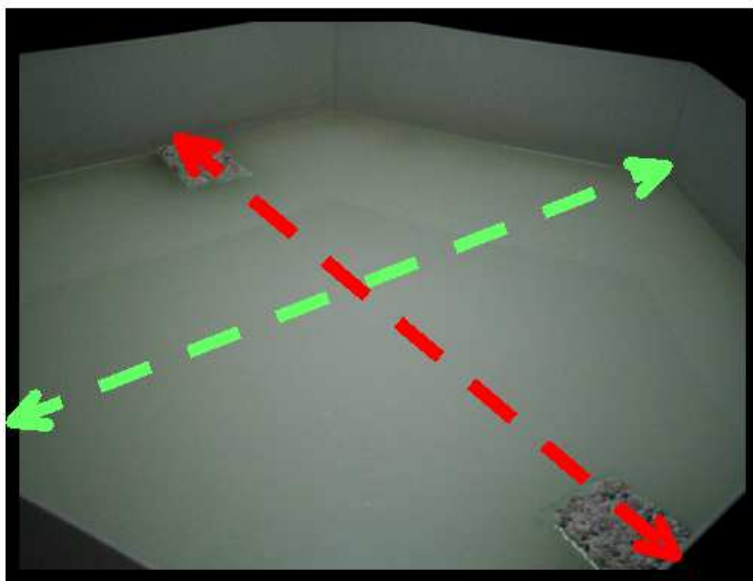


Figura 11. Sulla vasca sono mostrate le due piattaforme emerse e la direzione dell'e-vector, parallela (freccia rossa) e perpendicolare (freccia verde) alle due piattaforme, durante il training del gruppo rispettivamente "parallelo" e "perpendicolare".

La piattaforma, cioè, rappresenta per la lucertola la “salvezza”, tenendo conto però che l’operatore è sempre pronto ad intervenire con un retino per soccorrerla nel caso che essa, dopo vari tentativi, non riuscisse a raggiungere una delle due piattaforme. L’esperimento consiste nel registrare il punto del bordo vasca sul quale avviene il primo contatto, chiamato scelta direzionale, e nell’assegnare un punteggio che tiene conto della vicinanza del punto alle piattaforme (vedi lo schema di Fig. 12). Il punteggio va da un massimo di 1.5 (raggiungimento diretto della piattaforma entro $\pm 5^\circ$ dall’asse 0° - 180°) ad un minimo di 0.

Il training cui sono sottoposte le lucertole è di tipo assiale, ovvero esse sono istruite a seguire una particolare direzione, indipendentemente dal verso che è lasciato libero (simmetria bimodale). Il raggiungimento della piattaforma è accompagnato da un premio: il livello dell’acqua è abbassato in pochi secondi e la lucertola è lasciata all’asciutto per un po’ di tempo prima di essere recuperata. Il risultato del training, per ciascun animale, è valutato in termini di “criterio di apprendimento”, secondo il quale l’animale passa dalla fase di training a quella di test se in sei lanci consecutivi raggiunge il punteggio minimo di se, con un solo risultato ≤ 0.5 e con l’ultimo risultato ≥ 1 . I risultati complessivi per gli animali “promossi” dei due gruppi, parallelo e perpendicolare, sono riportati nella Fig. 13, sotto forma di un diagramma, nel quale i cerchi numerati contraddistinguono i singoli animali e la loro posizione angolare rispetto all’asse 0° - 180° rappresenta il livello di apprendimento raggiunto.

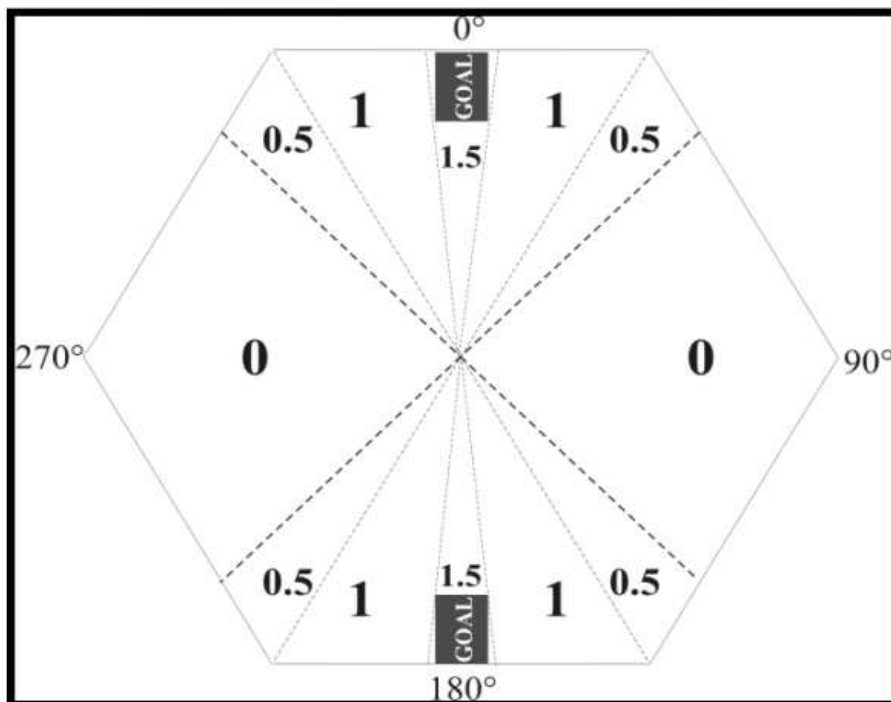


Figura 12. Diagramma per l’assegnazione del punteggio.

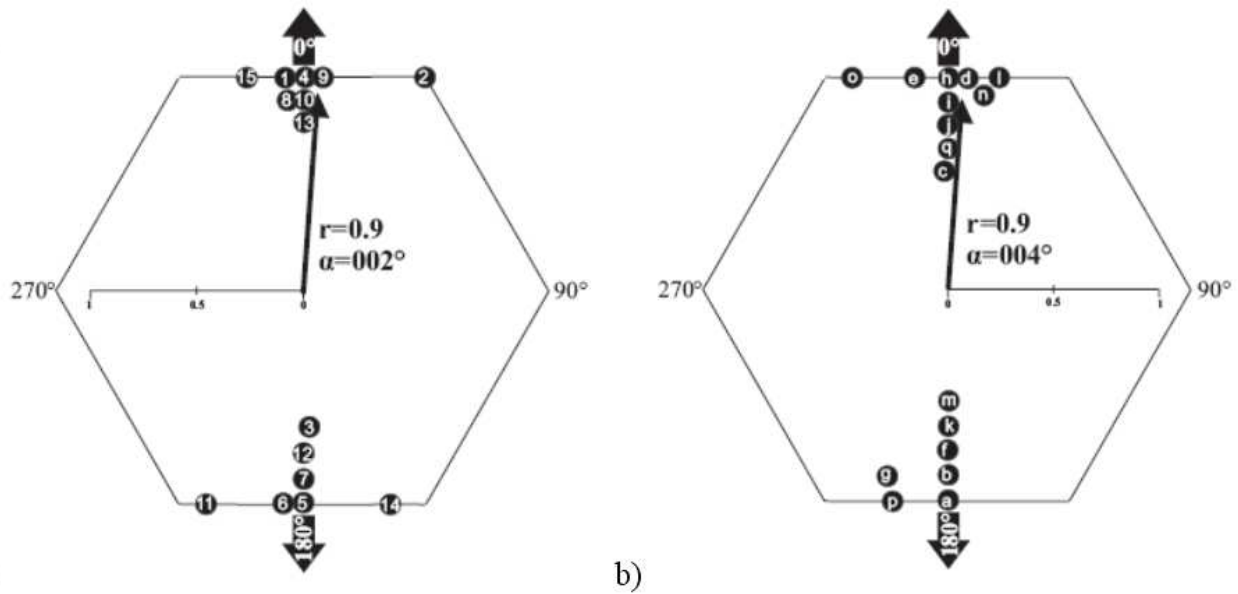


Figura 13. Risultati del training “parallelo” e “perpendicolare”.

I diagrammi di Fig. 13 mostrano una distribuzione bimodale dei risultati, come era previsto. Da essi, attraverso una duplicazione degli angoli, si costruisce un vettore risultante (la freccia riportata nel diagramma) che rappresenta il livello di apprendimento risultante per il gruppo ed è caratterizzata dai parametri r e α . Complessivamente si osserva un elevato livello di apprendimento, simile per entrambi i gruppi.

Alla fase di training è fatta seguire la fase di “test”, ma solo per gli animali che hanno superato il criterio di apprendimento. La fase di test consiste di tre tipi diversi di test. Il primo test ha lo scopo di verificare il ruolo della luce polarizzata e consiste di un solo lancio, senza piattaforme, per ciascun animale. In questo unico lancio la direzione dell’e-vector è ruotata di 90° rispetto alla direzione che aveva durante il training. I risultati della prima prova di test sono riportati in Fig. 14 per i due gruppi di lizards. Da essi si vede come la rotazione di 90° dell’e-vector abbia determinato un orientamento medio per tutte le lizard lungo la direzione 90° - 270° , ovvero lungo una direzione ruotata di 90° rispetto alla direzione di training.

Il secondo test (PAR-P test) ha lo scopo di verificare il ruolo dell’occhio parietale, il quale viene coperto per l’occasione con una vernice nera. Il test consiste in un solo lancio in assenza di piattaforme e in presenza di luce polarizzata. Il risultato è mostrato in Fig. 15, dalla quale si può notare la sparizione completa di qualsiasi direzione preferenziale di orientamento. Da qui si deduce il ruolo fondamentale svolto dall’occhio parietale nel processo di orientamento.

Il terzo ed ultimo test ha lo scopo di verificare l’assenza di qualsiasi altra bussola per l’orientamento degli animali, al di fuori dell’e-vector della luce polarizzata.

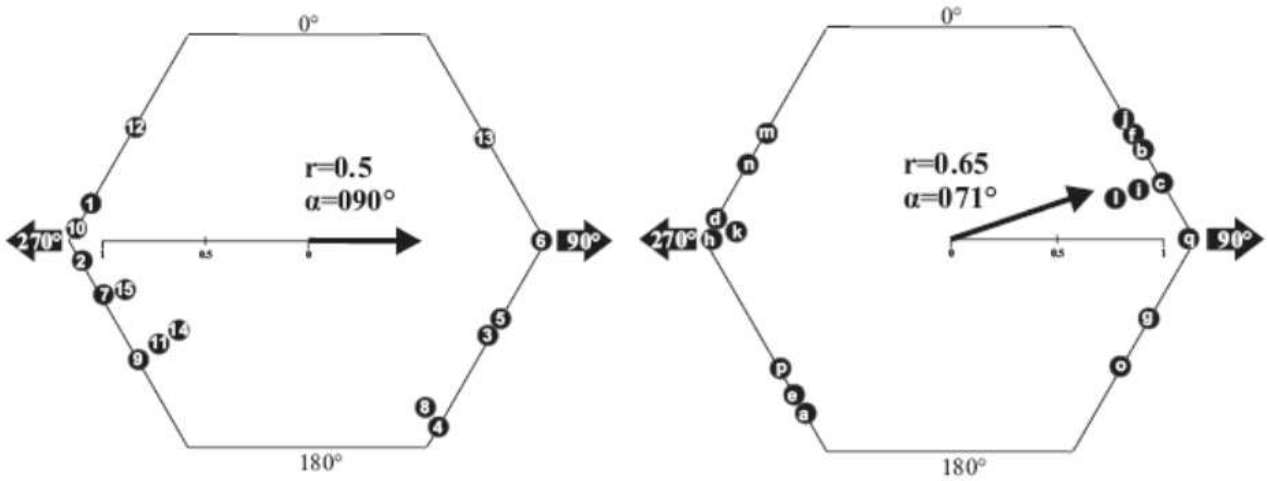


Figura 14. Risultati del test “parallelo” e “perpendicolare”.

Questo test è chiamato “control test” ed è condotto in assenza di filtro polarizzatore, il quale è semplicemente rimosso dal sandwich tra i due vetri e contemporaneamente l’intensità della luce è abbassata per riportarla al livello della luce polarizzata. Il risultato, riportato in Fig. 16 mostra che in assenza di e-vector la distribuzione dei vari percorsi è uniforme rispetto alle varie direzioni.

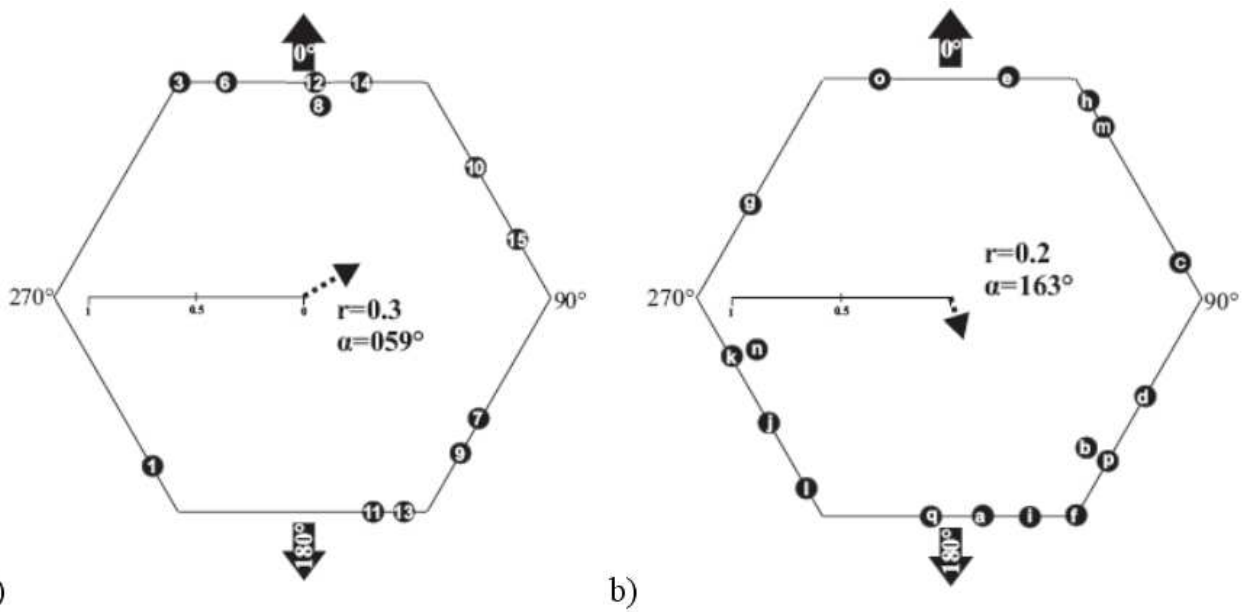


Figura 15. Risultati del PAR-P test per il gruppo “parallelo” (a) e “perpendicolare” (b).

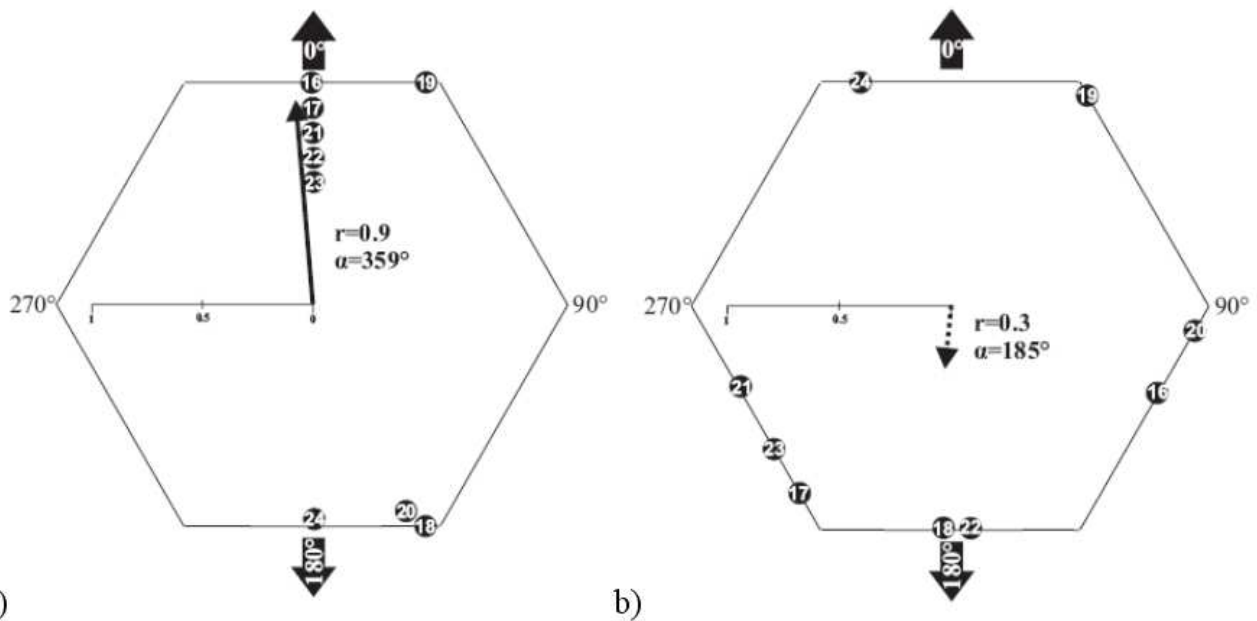


Figura 16. Risultati del control test per il gruppo “parallelo”; (a) con polarizzatore, (b) senza polarizzatore.

L'apparato sperimentale impiegato negli esperimenti descritti, pur essendo da noi catalogato come “convenzionale”, è in realtà un apparato tecnologicamente avanzato, progettato nel migliore dei modi tenendo conto del tipo di esperimenti che dovevano essere condotti con esso. Nonostante ciò, la configurazione sperimentale presenta dei punti di criticità da parte dei componenti della struttura, se si tiene conto degli obiettivi da raggiungere: i) ottenere un determinato livello di illuminamento medio sul recinto, ii) ottenere un determinato profilo di questo illuminamento, iii) ottenere un determinato spettro della luce incidente. Un primo inconveniente è la non perfetta omogeneità della sorgente luminosa (80). Essendo la finestra (80) costituita da un sandwich contenente il filtro polaroid®, questo è soggetto con il tempo, soprattutto a causa dell'irraggiamento, a subire delle alterazioni. Questo si può notare ingrandendo alcune delle foto di Fig. 10, riportate in Fig. 17. Le ondulazioni visibili nella finestra sono l'effetto di un'alterazione della planarità del polaroid®.

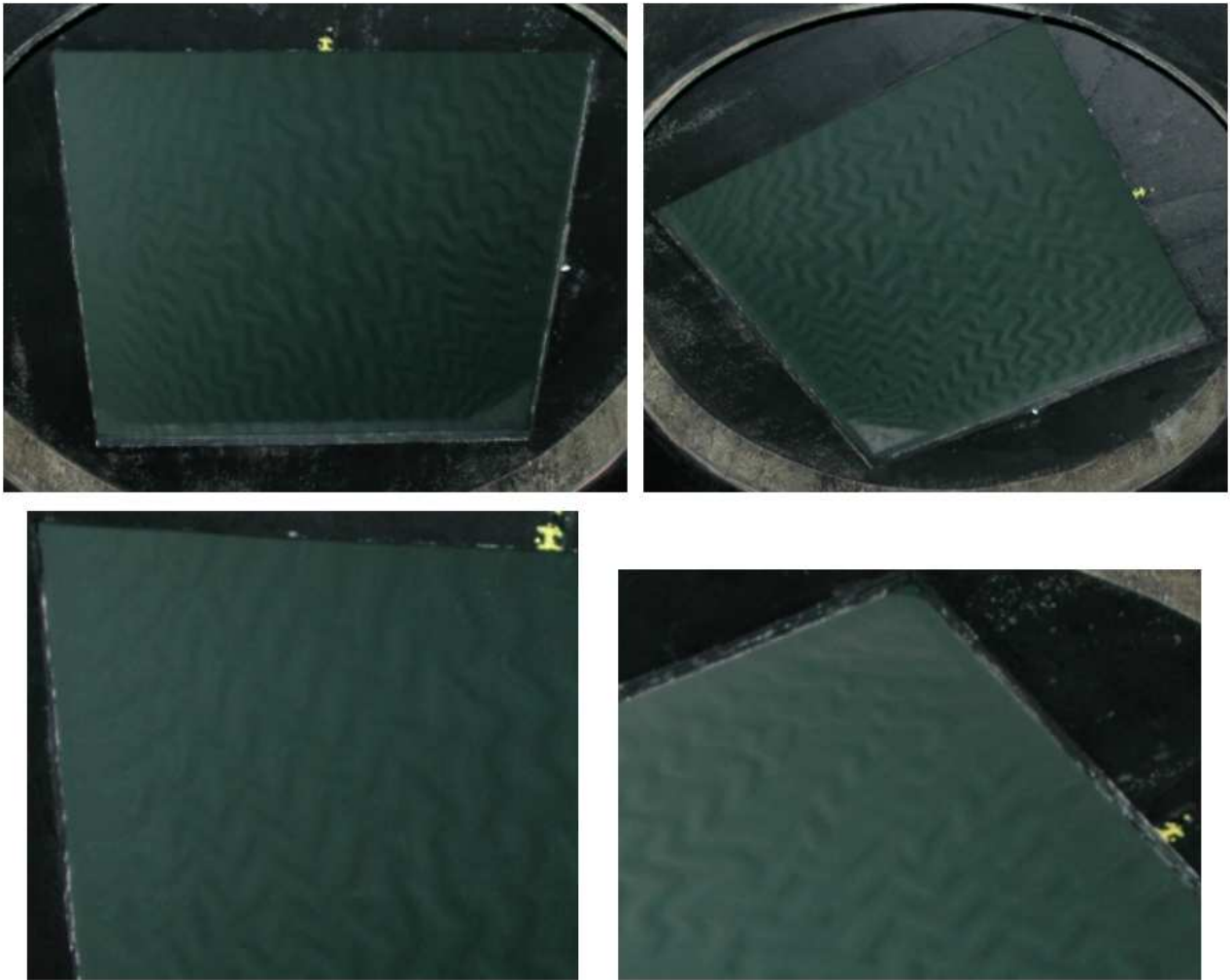


Figura 17. Finestra luminosa (sopra) e alcuni particolari di essa.

La struttura, così come è stata presentata negli esperimenti, funziona bene in luce bianca, la cui intensità può essere innalzata ulteriormente impiegando una seconda coppia di lampade, e permette di ottenere un buon profilo d'illuminamento sul recinto senza che vi sia un sensibile calo di esso alla sua periferia. Il più importante limite, però, che questa configurazione presenta è quello di non essere particolarmente adeguata ad esperimenti in luce monocromatica, o in generale in luce di diversi colori. Questo perché l'impiego di luce colorata comporta necessariamente l'uso di filtri da porre tra lampade e box. I problemi che essi pongono sono molteplici: i) costo dei filtri; ii) mancanza di un filtro dalle specifiche particolari; iii) riduzione dell'intensità trasmessa dai filtri; iv) necessità di innalzare la potenza o il numero delle lampade per avere più alti livelli d'intensità; v) possibili surriscaldamenti dei filtri e loro danneggiamento; vi) possibili surriscaldamenti dell'ambiente di lavoro; vii) difficoltà nella regolazione combinata di spettro ed intensità della luce incidente. Questi problemi, o punti critici, pur non presentandosi necessariamente tutti insieme all'atto pratico, però rappresentano una concreta difficoltà pratica cui far fronte nell'eseguire gli

esperimenti in luce colorata. D'altronde gli esperimenti in luce spettralmente selezionata sono la naturale continuazione di quelli illustrati in luce bianca, e sono importanti per conoscere la sensibilità spettrale delle lucertole ai fini del loro orientamento nell'ambiente esterno.

Esiste un'alternativa alla configurazione descritta finora, che è semplicemente quella di utilizzare uno schermo LCD come sorgente di luce polarizzata per gli esperimenti di cui sopra. Uno schermo LCD può essere il monitor di un computer o un televisore a cristalli liquidi. In entrambi i casi lo schermo LCD potrà essere comandato o dal computer corrispondente o da un computer associato. Nel paragrafo seguente sarà dimostrato come l'uso di uno schermo LCD come sorgente di luce polarizzata, che rappresenta la parte sostanziale della proposta di brevetto, presenta una serie innumerevole di vantaggi pratici, i più importanti essendo la semplicità dell'apparato e l'estrema velocità delle misure, soprattutto quando si lavori in luce spettralmente selezionata.

DESCRIZIONE TECNICA DETTAGLIATA DELL'INVENZIONE

Descrizione della nuova sorgente di luce polarizzata e sue caratteristiche

Tutti gli svantaggi elencati nel corso della descrizione della configurazione convenzionale a lampade dell'apparato di biologia vengono meno se si adotta come sorgente di luce estesa e polarizzata uno schermo a cristalli liquidi (LCD) per mezzo del quale, e attraverso l'intermediazione di un computer, è possibile effettuare tutte le possibili regolazioni sulla luce emessa in termini di intensità di emissione (emettanza) in W/m^2 , di profilo lungo una determinata direzione in W/m^3 o su una determinata area in W/m^4 , di colore ovvero di spettro di emissione su una determinata banda spettrale in $W/m^2\mu m$, e di direzione azimutale del piano d'incidenza corrispondente al piano di vibrazione del campo elettrico (e-vector). Tutte le grandezze citate possono essere controllate in maniera semplice e diretta attraverso la gestione di un software standard per computer, nonché in tempi brevissimi in considerazione del fatto che l'apparato di illuminazione è costituito da un solo componente e che quindi è richiesto soltanto il tempo necessario all'introduzione dei comandi nel computer. Un ulteriore vantaggio di questa soluzione sperimentale sta nel fatto che il computer può essere usato per programmare una determinata sequenza di operazioni, cui corrisponderà una determinata sequenza di stati di emissione della luce, con l'ulteriore vantaggio di poter effettuare in tempi brevi sequenze di esperimenti programmati senza la necessità di interporre intervalli per la impostazione di volta in volta delle nuove condizioni d'illuminazione. La programmazione delle sequenze d'illuminazione predispone lo strumento a

svolgere sequenze di sperimentazione molto più complesse, in quanto, qualora necessario, la sequenza delle illuminazioni potrà essere associata ad altri tipi di operazioni a scelta dell'operatore e che coinvolgano altri dispositivi, tutti mantenuti sotto il controllo dello stesso programma generale. Prima di descrivere il nuovo sistema è utile soffermarsi sul funzionamento di uno schermo LCD, allo scopo di capire meglio il suo uso.

Lo schema di principio di uno schermo LCD quale sorgente di luce linearmente polarizzata è riportato in Fig. 18. Una sorgente di luce bianca, costituita da piccoli bulbi fluorescenti, è posta sul retro dello schermo (backlight). La luce prodotta da questi bulbi è diffusa in modo tale da produrre una illuminazione uniforme sul polarizzatore posteriore (back), il quale trasmette una luce linearmente polarizzata con il vettore campo elettrico allineato lungo la direzione indicata dalla freccia. La luce bianca attraversa celle individuali che sono attivate, ovvero poste in condizioni "on" oppure "off", per mezzo dell'applicazione di una tensione ad un transistor a film sottile (TFT) corrispondente alla cella considerata (Fig. 19). L'applicazione della tensione al TFT determina la rotazione dell'orientazione dei cristalli liquidi nello strato corrispondente, come rappresentato nella Fig. 18 dai cilindretti gialli, e la corrispondente rotazione del piano di polarizzazione della luce, come rappresentato nella Fig. 18 dalla freccia gialla. La luce bianca attraversa dei filtri colorati che selezionano uno dei tre colori principali additivi: R = rosso, V = verde e B = blu (Fig. 19). La luce così filtrata perviene al secondo polarizzatore (front) il quale trasmetterà la luce che ha subito la rotazione di 90° del piano di polarizzazione da parte dello strato LCD, ovvero la luce che ha attraversato la cella LCD attivata dal TFT, mentre bloccherà la luce che non ha subito la rotazione del piano di polarizzazione da parte dello strato LCD, ovvero la luce che ha attraversato la cella LCD non attivata dal TFT.

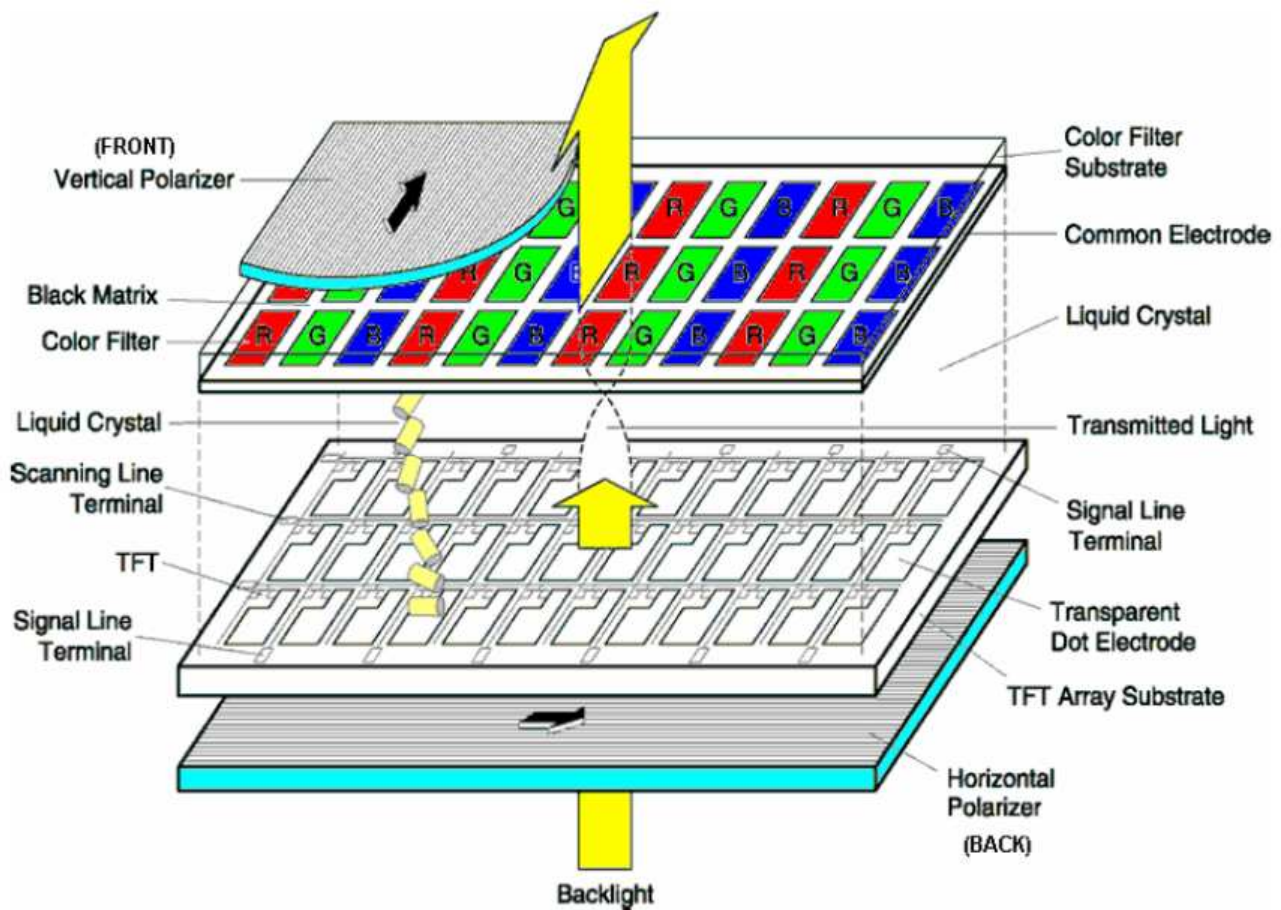


Figura 18. Diagramma schematico della struttura di uno schermo LCD a matrici attive.

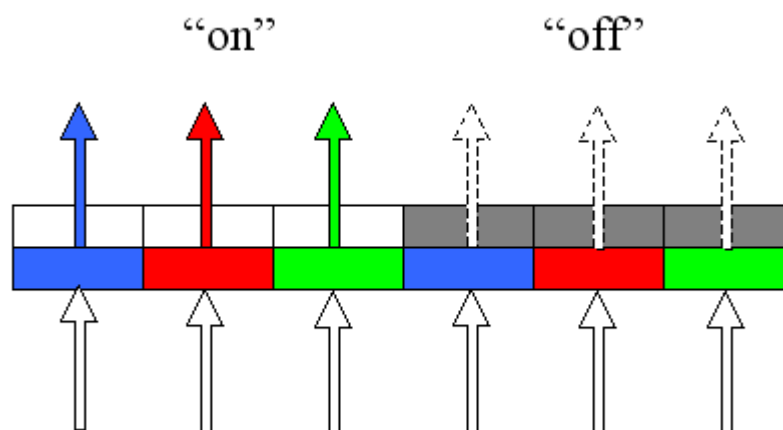


Figura 19. Quando una cella è attivata (on) la luce polarizzata bianca, dopo essere stata filtrata in modo da produrre luce ad un solo colore R, G o B, attraversa il polarizzatore frontale (celle di sinistra), mentre quando una cella non è attivata (off) la luce polarizzata bianca viene bloccata.

Da quanto descritto sopra, si può capire che lo stato di polarizzazione della luce emessa dallo schermo LCD non è una proprietà necessaria ai fini dell'immagine da proiettare, quanto l'effetto di un processo di controllo dell'intensità di emissione, che avviene per l'appunto grazie al fatto di disporre di due polarizzatori incrociati e di regolare l'intensità emessa, per mezzo dello strato a cristalli liquidi, attraverso la regolazione dell'angolo di rotazione del piano di polarizzazione della luce linearmente polarizzata.

L'intensità della luce emessa avviene secondo la legge di Malus:

$$I(\theta) = I_0 \cdot \cos^2 \theta \quad (2)$$

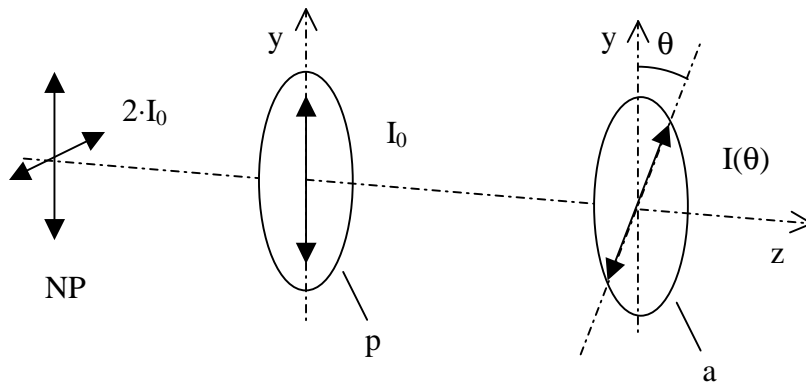


Figura 20. Schema di principio per la misura dello stato di polarizzazione di un fascio di luce.

La legge di Malus si comprende facilmente considerando la Fig. 20. Un fascio di luce non polarizzata (NP) di intensità $2 \cdot I_0$, schematizzata con due vettori di uguale intensità I_0 ed ortogonali tra loro, è fatta incidere su un polarizzatore (p) avente l'asse di polarizzazione orientato lungo l'asse y. La luce trasmessa dal polarizzatore (p) è linearmente polarizzata con asse di polarizzazione coincidente con l'asse y. Questa luce viene analizzata da un analizzatore (a) che corrisponde ad un polarizzatore lineare come (p). Se l'asse di polarizzazione di (a) è orientato ad un angolo θ rispetto all'asse di polarizzazione di (p), allora l'intensità della luce trasmessa dall'analizzatore (a) sarà data dalla legge di Malus.

Negli schermi LCD il polarizzatore posteriore svolge le funzioni di (p) polarizzando la luce incidente non polarizzata proveniente dai bulbi fluorescenti (Fig. 20). Il secondo polarizzatore svolge le funzioni di (a) con un angolo di orientazione rispetto a (p) mantenuto a 90° . Se la luce emessa da (p) non subisce rotazioni durante il tragitto tra (p) ed (a), ovvero nello strato a cristalli liquidi (stato "off"), allora perverrà ad (a) con una differenza angolare $\theta=90^\circ$, e quindi secondo la

legge di Malus, non sarà trasmesso da (a). Se invece la luce emessa da (p) subisce una rotazione α nello strato LC, allora perverrà ad (a) con una differenza angolare $(90^\circ - \alpha)$ e quindi secondo la legge di Malus sarà trasmessa da (a) con una intensità:

$$I(90^\circ - \alpha) = I_0 \cdot \cos^2(90^\circ - \alpha) = I_0 \cdot \sin^2(\alpha) \quad (2')$$

che sarà massima per una rotazione α di 90° (stato “on”). Per angoli α intermedi tra 0° e 90° , l'intensità trasmessa sarà intermedia tra 0 ed I_0 .

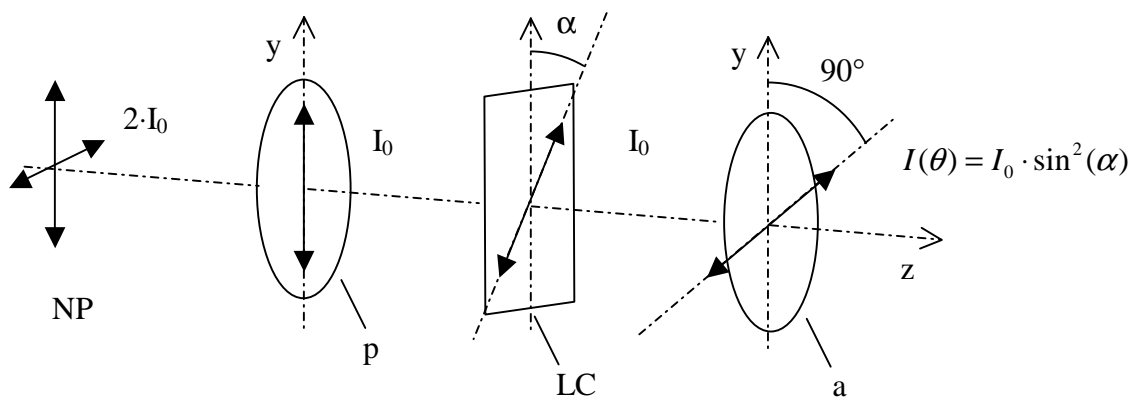


Figura 21. Schema di principio di funzionamento dello schermo LCD.

Tutti gli schermi a colori di tipo LCD di computer o di televisori operano in maniera simile a quella descritta in Fig. 18. Quindi tutti gli schermi a colori di tipo LCD di computer o di televisori sono idonei ad essere impiegati quali sorgenti di luce estesa linearmente polarizzata, e quindi idonei ad essere impiegati negli esperimenti di biologia dell'evoluzione riguardanti lo studio dell'orientamento di animali alla luce naturale polarizzata.

I diversi schermi a colori di tipo LCD si differenziano su alcuni particolari tra i quali uno è la direzione azimutale del piano di polarizzazione, quest'ultimo sempre ortogonale al piano dello schermo, rispetto ad un riferimento fissato sullo schermo stesso (Fig. 22). In alcuni casi tale direzione è parallela ad uno dei lati dello schermo, come quello orizzontale nel caso del TV-LCD Daewoo da 46" (Fig. 23a), in altri è posta lungo una diagonale dello schermo stesso, come si osserva su alcuni monitor di computer (Fig. 23b), oppure lungo la diagonale opposta (Fig. 23c). Le foto di Fig. 23 mostrano un polarizzatore (lamina polaroid®) utilizzata quale analizzatore dello stato di polarizzazione della luce emessa dallo schermo. Quando l'analizzatore trasmette il massimo

della luce, l'asse bianco tracciato su di esso identifica la direzione del vettore elettrico (direzione di polarizzazione o e-vector come usato in biologia); la direzione ortogonale a questa corrisponde alla minima trasmissione di luce, ovvero zero trasmissione se l'analizzatore è dotato di un alto rapporto di estinzione [9]. Come si può notare dalla Fig. 24, inoltre, la direzione azimutale del piano di polarizzazione della luce emessa da uno schermo rimane inalterata al variare del colore impostato.

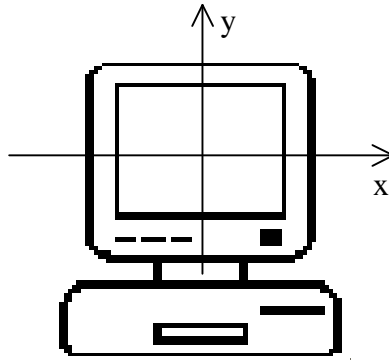


Figura 22. Riferimento cartesiano posto sul piano dello schermo LCD.

Le Figg. 23 e 24 mostrano chiaramente come, in condizioni di massima trasmissione, la trasmittanza dell'analizzatore non sia del 100%. Questo è un effetto della non idealità del polarizzatore-analizzatore. La curva di trasmittanza spettrale della lamina polaroid, riportata in Fig. 5, mostra infatti una trasmittanza media con luce depolarizzata incidente pari a $T = 36 \pm 2 \%$ nell'intervallo del Visibile 400-700 nm, inferiore al valore teorico del 50% previsto per un polarizzatore ideale, come è stato anticipato nelle Figg. 20 e 21 (passaggio da $2I_0$ a I_0). Il valore di $T = 36 \pm 2 \%$ in luce non polarizzata corrisponde ad un valore di $T = 72 \pm 4 \%$ per luce incidente polarizzata linearmente. La curva di Fig. 5 è stata ottenuta con lo spettrometro Lambda 900 della Perkin Elmer.

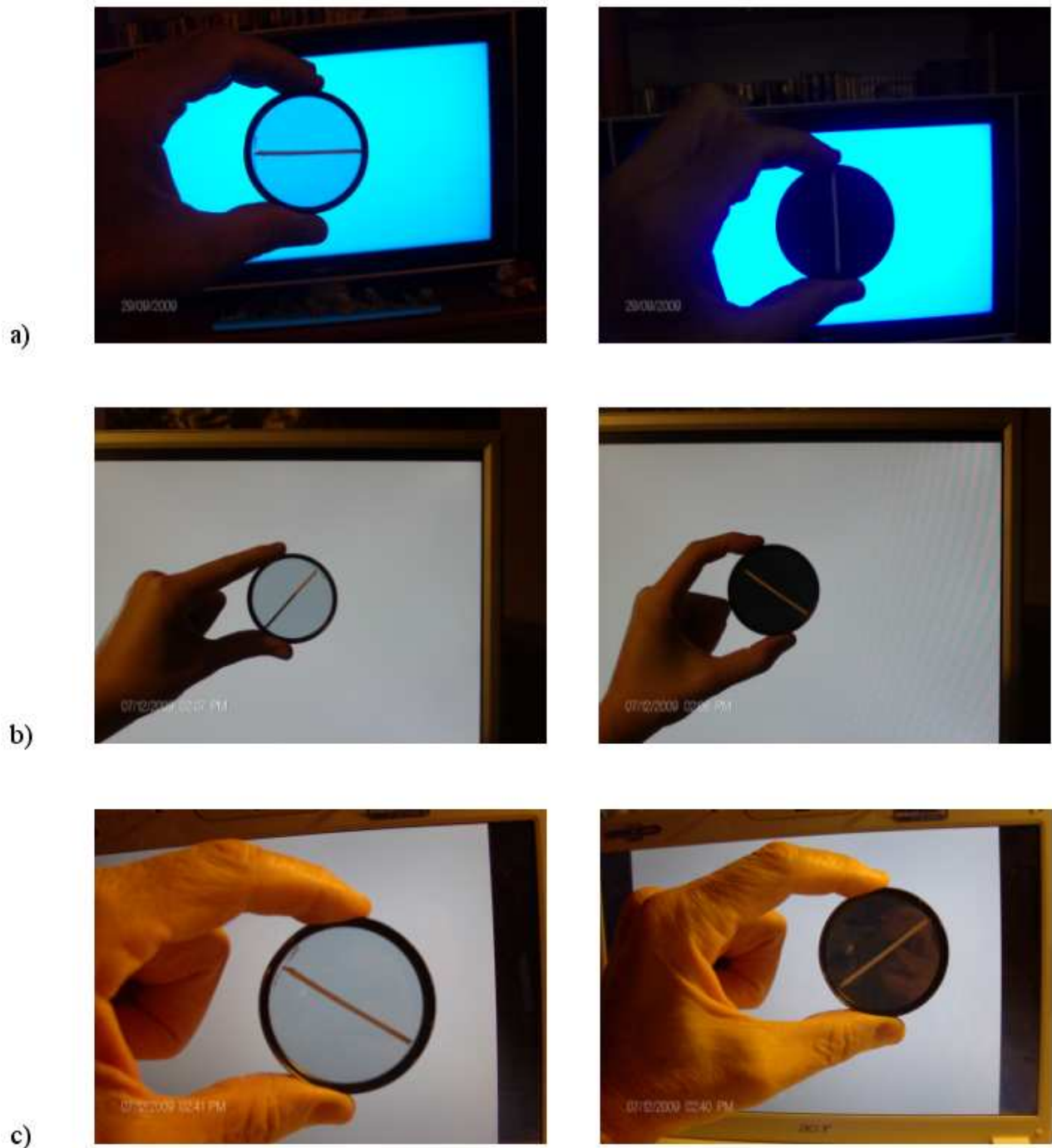


Figura 23. E' mostrata la direzione azimutale del piano di polarizzazione della luce emessa dallo schermo: a) orizzontale (asse x); b) diagonale (asse x/y); c) diagonale (asse x/-y).

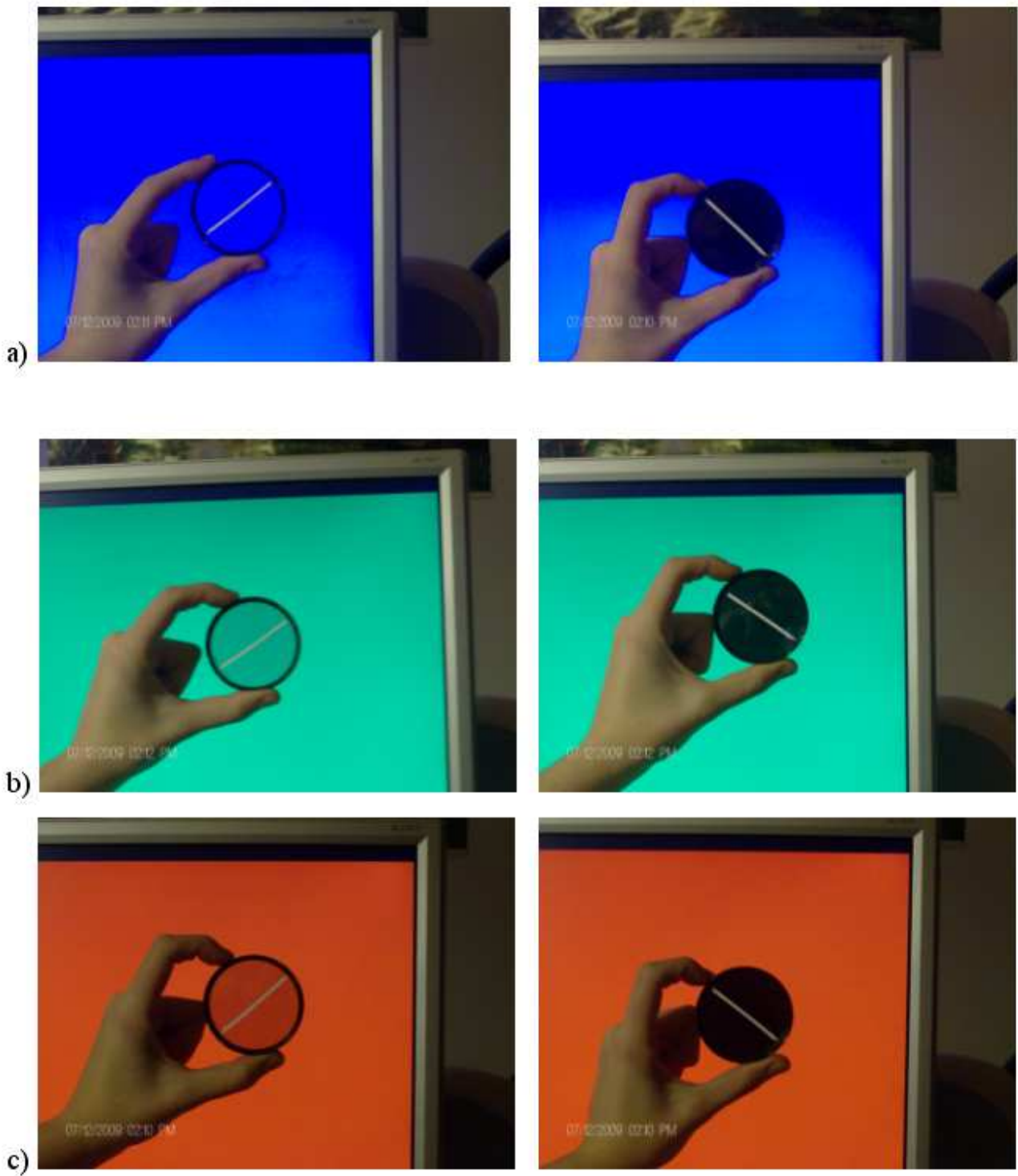
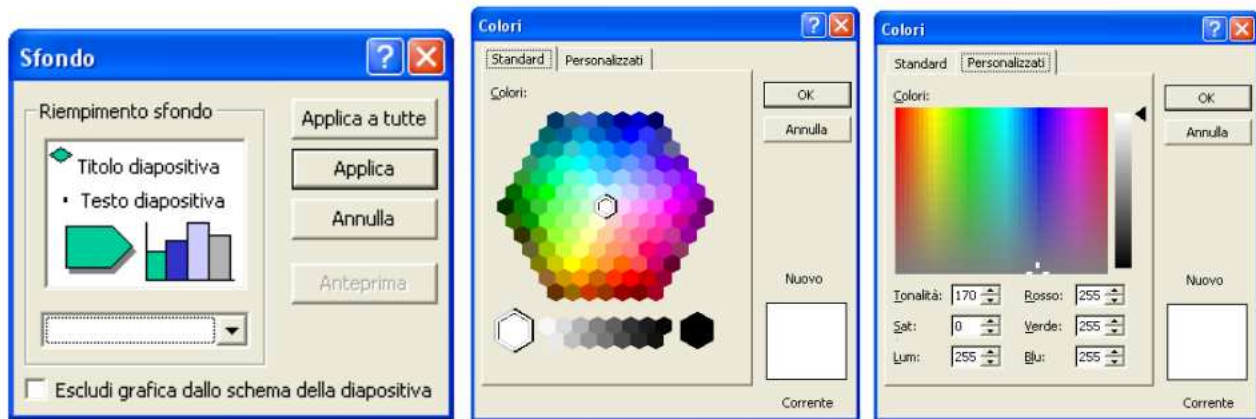


Figura 24. La direzione azimutale del piano di polarizzazione della luce emessa da uno schermo rimane inalterata al variare del colore impostato: a) blu; b) verde; c) rosso.

Il colore sullo schermo si può impostare in maniera estremamente semplice aprendo un programma del tipo Power Point e impostando le coordinate di colore R, G, B, attraverso i comandi riportati nell'esempio di Fig. 25.



Sfondo ... Altri colori ... Personalizzati ...

Figura 25. Sequenze di comandi da impostare su Power Point per scegliere il colore desiderato.

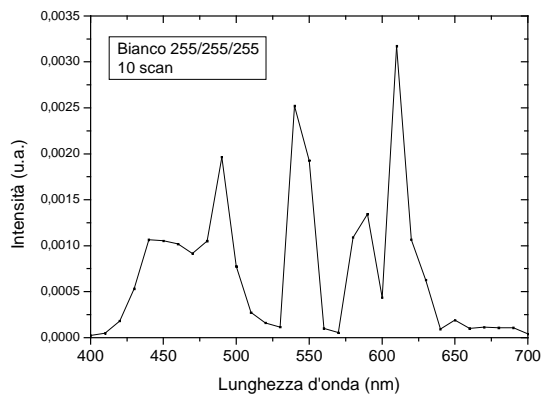
Nel caso della Fig. 25 è mostrata la selezione del colore bianco. Alcuni esempi di valori assegnati alle coordinate di colore sono riportati nella Tabella 1 in funzione del colore scelto tra i colori principali additivi e sottrattivi. I corrispondenti colori sono affiancati alla Tabella 1.

Colore	Rosso	Verde	Blu	Tonalità	Saturazione	Luminosità	
Bianco	255	255	255	170	0	255	
Rosso	255	0	0	0	255	128	
Verde	0	255	0	85	255	128	
Blu	0	0	255	170	255	128	
Ciano	0	255	255	127	255	128	
Magenta	255	0	255	213	255	128	
Giallo	255	255	0	42	255	128	

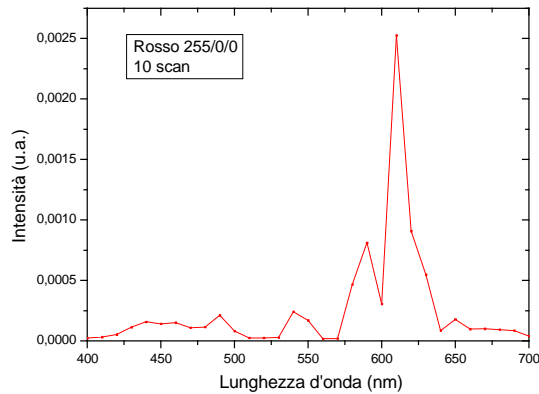
Tabella 1. Coordinate di colore associate ai vari colori riportati sulla destra.

La scelta del colore deve essere sempre accompagnata dalla conoscenza dello spettro della luce emessa. Le stesse coordinate di colore, infatti, possono dar luogo a spettri di luce diversi quando

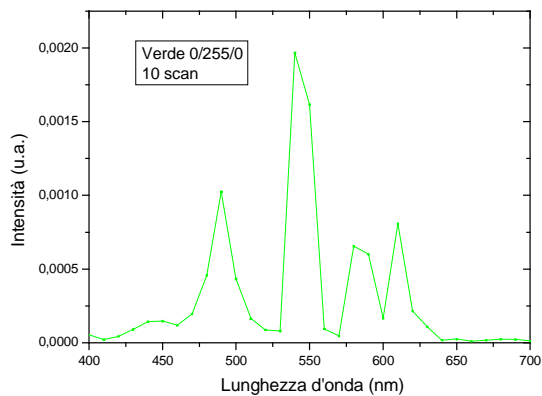
sono impostati su schermi diversi. In Fig. 26 sono riportati, a titolo d'esempio, gli spettri associati al colore bianco ed ai tre colori principali additivi misurati con lo spettrometro LICOR LI-1800 sullo schermo LCD del computer Toshiba Satellite A100-097.



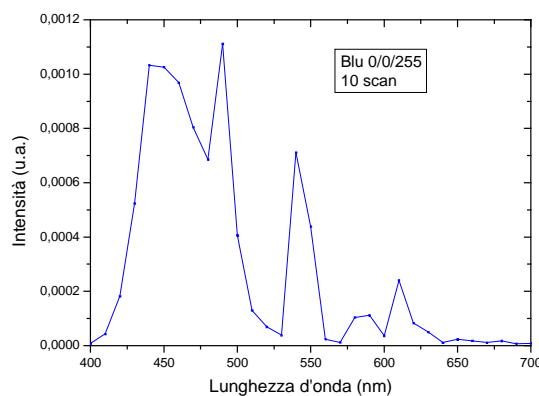
a)



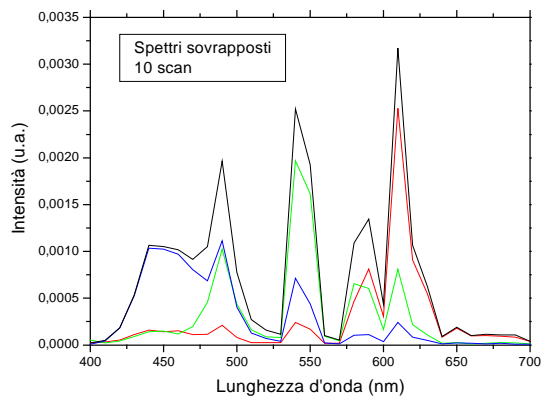
b)



c)



d)



e)

Figura 26. Spettri misurati sullo schermo del computer Toshiba Satellite A100-097 con lo spettrometro LICOR LI-1800: a) bianco; b) rosso; c) verde; d) blu; e) tutti i colori. Risoluzione sulla lunghezza d'onda: 10 nm.

La Fig. 26a mostra la forma dello spettro bianco corrispondente alla luce emessa dai bulbi fluorescenti. Lo spettro è piuttosto irregolare, ma contiene le tre bande fondamentali dei colori principali. Le stesse bande si trovano negli spettri dei singoli colori. In effetti lo spettro bianco corrisponde allo spettro della luce emessa dai bulbi fluorescenti, mentre gli spettri dei singoli colori sono il risultato del filtraggio della luce bianca attraverso i singoli filtri passa-banda posti sulle varie celle dello schermo (vedi Fig. 18). Analizzando le Figg. 26b, c e d si nota comunque che l'azione dei tre filtri non è estremamente selettiva, in quanto ciascun colore contiene una parte di spettro degli altri due. Questo è poco evidente nel colore rosso e nel colore blu, mentre il colore verde contiene una sensibile traccia dei colori rosso e blu. L'azione dei singoli filtri è resa manifesta calcolando il rapporto tra i singoli spettri e lo spettro bianco, che fornisce la trasmittanza del filtro, come riportato in Fig. 27.

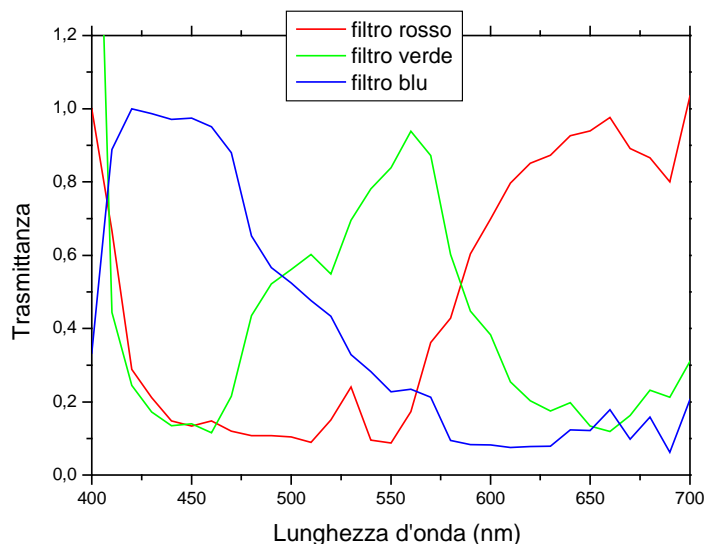


Figura 27. Trasmittanza dei singoli filtri, ricavata dal rapporto tra gli spettri dei singoli colori e lo spettro della luce bianca per lo schermo Toshiba Satellite A100.

Per conoscere l'illuminamento $E_v(P)$ ($lx=lm/m^2$) prodotto dallo schermo sui punti P di un piano qualsiasi posto di fronte allo schermo stesso, e quindi in particolare sul piano di lavoro del recinto, è necessario effettuare una serie di caratterizzazioni ottiche sullo schermo LCD, come riportato di seguito.

La principale caratterizzazione ottica riguarda la misura della luminanza, o luminosità L_v (in $lm/m^2sr = cd/m^2$) in corrispondenza dei vari colori (bianco, colori additivi, colori sottrattivi, ecc.) e in funzione della direzione di emissione nell'emisfero frontale dello schermo. La direzione di emissione è individuata in base a due angoli, denominati il primo θ angolo di emissione zenitale e il secondo ϕ angolo di emissione azimutale (vedi Fig. 28).

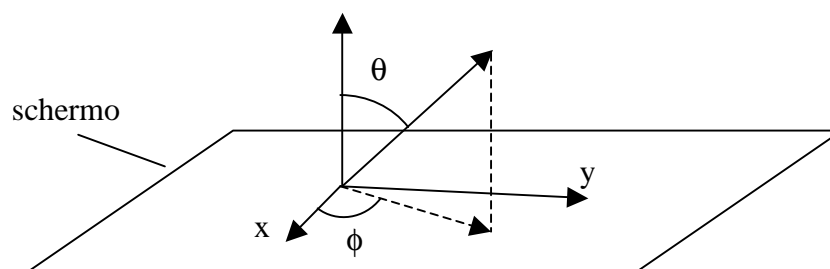


Figura 28. Definizione di angolo di emissione zenitale (θ) e azimutale (ϕ).

Per effettuare la misura della luminanza, essendo questa una caratteristica dello schermo uguale per tutti i suoi punti, è sufficiente isolare una piccola porzione dello schermo stesso, presa ad esempio nella parte centrale, ed effettuare misure di illuminamento nelle diverse direzioni e alla stessa distanza.

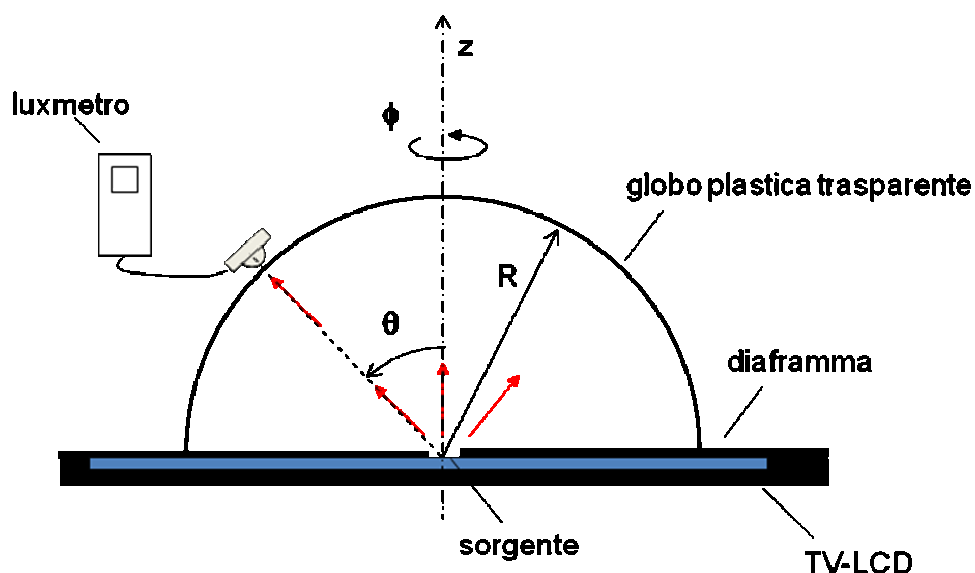


Figura 29. Schema di principio della misura di luminanza $L_v(\theta, \phi)$ dello schermo.

La Fig. 29 mostra lo schema della misura di luminanza. Lo schermo è posto sul piano orizzontale di un banco ottico. La selezione dell'area illuminata è fatta ricoprendo lo schermo con un cartoncino nero, eccetto che nell'area selezionata per la misura. Sullo schermo viene poi posizionato un globo trasparente in plastica sul quale sono state tracciate con tratto leggero di pennarello delle linee equivalenti ai meridiani e ai paralleli, che identificano rispettivamente l'angolo di emissione azimutale e zenitale. Il globo di plastica è posizionato sullo schermo in modo che il suo centro corrisponda al centro dell'area selezionata, un cerchio di diametro D_S ; se questo non è possibile, come verificatosi nel nostro caso, le misure debbono essere opportunamente corrette. Per accendere

lo schermo LCD, se si tratta di un televisore TV-LCD, occorre collegare il TV ad un computer e tramite quest'ultimo selezionare un programma, ad esempio Power Point, e impostare intensità e colore dello schermo, come faremmo se si dovesse pilotare il TV-LCD nel box di biologia. La misura di illuminamento va fatta poi usando un luxmetro, nel nostro caso un Konica-Minolta, il cui sensore, o testa di misura, è fatta scorrere sul globo di plastica in corrispondenza dei punti d'incrocio tra meridiani e paralleli, corrispondenti ad una particolare coppia di angoli (θ , ϕ). Dopo aver oscurato l'ambiente, le misure vengono effettuate su tutti i punti del globo, variando θ da 0° a 90° e ϕ da 0° a 360° .



Figura 30. Sono mostrate le varie fasi della preparazione della misura di luminanza.

Le foto della Fig. 30 mostrano le varie fasi della misura: a) collegamento del TV-LCD Daewoo ad un personal computer; b) mascheratura dello schermo e selezione di una sua porzione circolare per l'emissione della luce; c) un lampione dell'Università di Ferrara è realizzato con un globo in plastica del diametro di 300 mm che è perfettamente adeguato alle nostre misure di luminanza; d) il globo di plastica è sottoposto a misure di trasmittanza in luce bianca; e) sul globo di plastica vengono disegnate le linee meridiane e parallele; f) il TV-LCD è posto orizzontalmente su un tavolo ottico e su di esso è centrato il globo di plastica sul quale viene posizionato il sensore del luxmetro Konica Minolta. Il TV selezionato per le misure è il Daewoo TV LCD DLT-46U1 FH, da 46". Questo TV infatti ha lo schermo sufficientemente ampio da consentire l'illuminazione di una finestra circolare di 48 cm di diametro che fa da sorgente luminosa per il box di biologia. Le caratteristiche principali TV Daewoo sono riportate nella Tab. 2.

Dimensione schermo	46 pollici
Formato	16:9
Risoluzione	1920x1080
Luminosità	500 cd/m ²
Rapporto di contrasto	6000:1
Angolo di visuale	178°/178°
Standard Colore	PAL/SECAM
Standard Video	PAL-B/G, D/K, I, SECAM, NTSC (AV)
Dimensioni con Stand (LxAxP) mm	1144x810x348
Dimensioni senza Stand (LxAxP) mm	1144x745,5x127,5

Tabella 2. Caratteristiche principali del TV Daewoo.

Il TV Daewoo è mostrato in Fig. 31 dove è anche riportata la direzione, verticale, del piano di polarizzazione della luce emessa.

Prima di effettuare le misure di luminanza, è necessario conoscere la trasmittanza del globo ai vari colori. A tal fine, il globo è posto verticalmente sul banco ottico, una sorgente di luce ne illumina una parte e dietro di esso è posto il luxmetro. Tra sorgente e globo è poi interposto un filtro colorato per conoscere la trasmittanza in funzione del colore adottato. La misura di trasmittanza è illustrata schematicamente in Fig. 32. La luce bianca della lampada (la) è filtrata dal filtro (fi) e perviene al globo (gl) dietro il quale è posto il sensore (se) del luxmetro (lx). In luce bianca il filtro è rimosso.

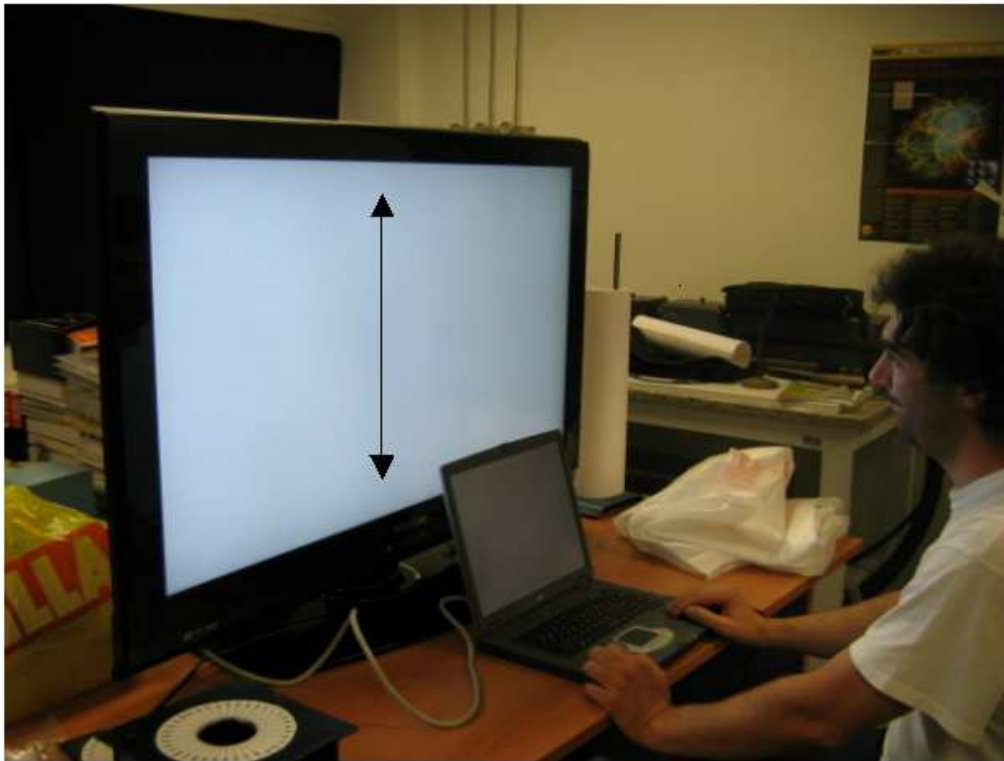


Figura 31. Foto del TV Daewoo con la direzione dell'e-vector.

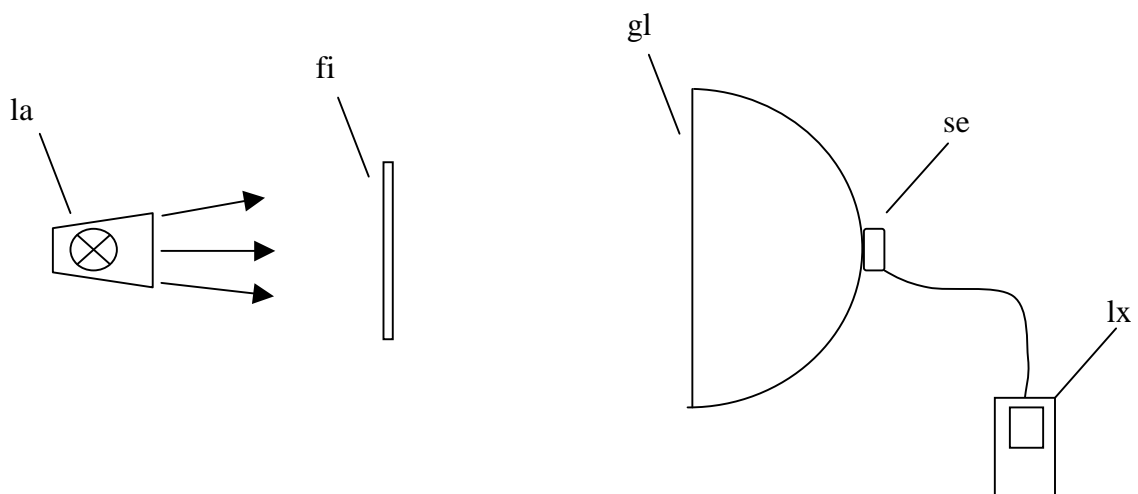


Figura 32. Schema della misura della trasmittanza del globo di plastica.

La misura dell'illuminamento è fatta, per ciascun filtro, prima in presenza e poi in assenza del globo (gl). Il rapporto tra le due misure fornisce la trasmittanza della parete del globo. Le misure di trasmittanza in luce bianca e nei vari colori fondamentali hanno fornito un valore pressoché costante e pari a $T \approx 0.91$.

Nelle condizioni in cui le dimensioni lineari della sorgente, l'area circolare selezionata sullo schermo, sono piccole (circa 1/10) rispetto alla distanza tra sorgente e luxmetro, la misura di illuminamento $E_v(\theta, \phi)$ fornisce con adeguata accuratezza la luminanza $L_v(\theta, \phi)$ dello schermo. Nel nostro caso abbiamo la sorgente di raggio $R_S = 2$ cm, mentre il globo ha un raggio $R_G = 30$ cm, 15

volte maggiore. Se l'illuminamento è misurato in luce monocromatica, avremo la luminanza spettrale:

$$L_v(\theta, \phi, \lambda) = \frac{E_v(\theta, \phi, \lambda) \cdot R_G^2}{T_G(\lambda) \cdot A_S \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

Dove $T_G(\lambda)$ è la trasmittanza spettrale del globo. Se l'illuminamento è misurato per uno spettro s della luce, avremo la luminanza per un certo spettro s della luce:

$$L_v(\theta, \phi, s) = \frac{E_v(\theta, \phi, s) \cdot R_G^2}{T_G(s) \cdot A_S \cdot \cos \theta} \quad (3')$$

Dove $T_G(s)$ è la trasmittanza del globo in corrispondenza dello spettro s . Le misure sullo schermo TV-LCD Daewoo sono state eseguite per tutti i colori fondamentali additivi e sottrattivi e per il bianco lungo la direzione normale alla superficie, mentre le misure di illuminamento angolare sono state eseguite solo in luce azzurra. Il profilo della luminanza angolare, comunque, non dovrebbe cambiare da colore a colore, e quindi si può considerare valido anche per gli altri colori dello schermo. I risultati delle misure in direzione perpendicolare sono riportati in Fig. 33. I dati di luminanza perpendicolare sono calcolati a partire dall'equazione:

$$L_v(0, s) = \frac{E_v(0, s) \cdot R_G^2}{T_G(s) \cdot A_S} \quad (3'')$$

Dove, essendo $\theta = 0^\circ$, non ha senso specificare l'angolo azimutale.

Come si può notare dalla Fig. 33, la luce bianca ha dato una luminanza perpendicolare di 360 cd/m^2 , sensibilmente diversa dalla luminosità dichiarata dal costruttore di 500 cd/m^2 . Inoltre, i diversi colori mostrano valori sensibilmente diversi di luminanza perpendicolare, ovvero valori molto bassi sul blu, e via via crescenti per i colori nell'ordine: rosso, magenta, verde, ciano, giallo. Il rapporto di luminosità tra giallo e blu è notevole, e pari a circa 9.

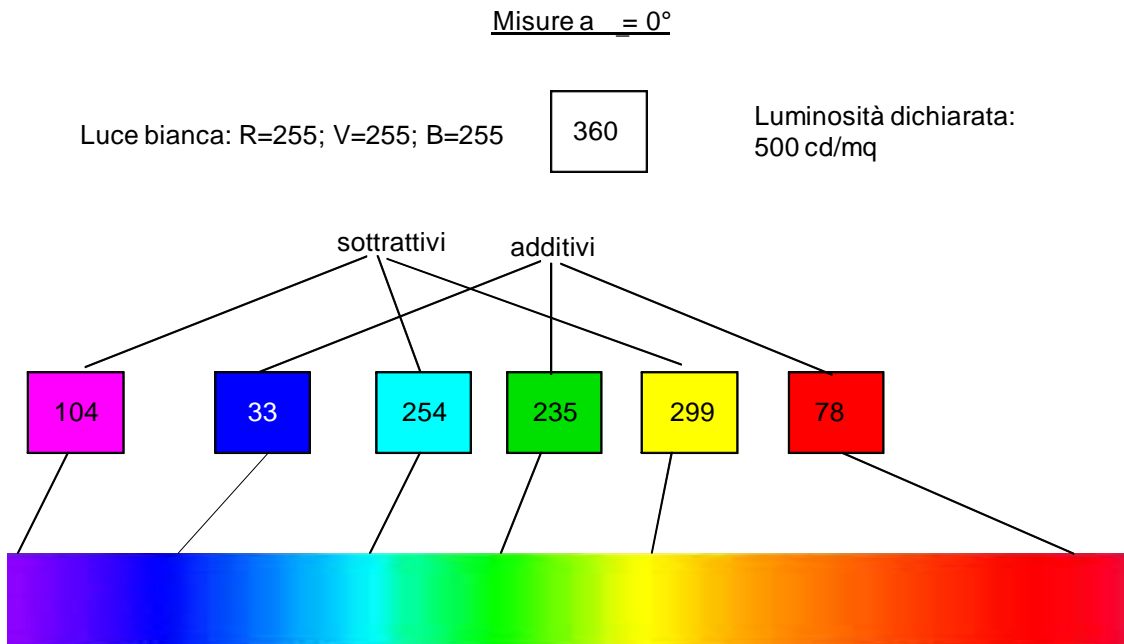


Figura 33. Risultati delle misure di luminanza in direzione perpendicolare allo schermo ($\theta=0^\circ$).

Le misure di illuminamento in luce azzurra (R=187, V=224, B=227) ha dato 168 cd/ m².

I risultati d'illuminamento angolare sono riassunti nel grafico riportato in Fig. 34, in cui sono mostrate le varie curve di $E_v(\theta, \phi)$ ottenute in funzione di θ per i diversi valori di ϕ . Gli angoli θ e ϕ sono variati di 10° ogni volta.

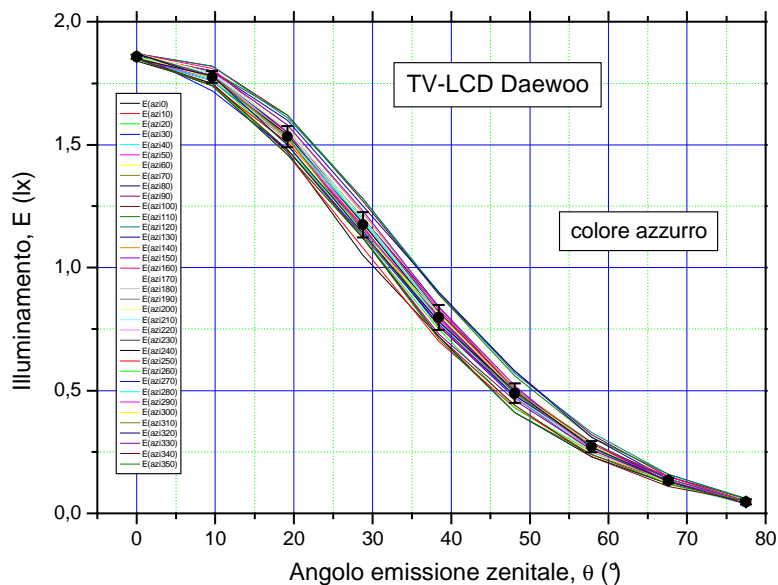


Figura 34. Curve di $E_v(\theta, \phi, \text{azzurro})$ tracciate in funzione di θ da 0° a 90° ogni 10° per i diversi valori di ϕ tra 0° e 360° ogni 10°.

Le curve di $E_v(\theta, \phi)$ non cambiano molto al variare dell'angolo azimutale. Facendo la media delle misure prese allo stesso valore di angolo d'emissione zenitale e ricavandone la deviazione standard, si ottengono i punti contrassegnati con cerchi neri in Fig. 34. Essi, come si vede, non corrispondono a valori esatti di angolo zenitale in quanto, come già detto, il globo non poteva essere perfettamente centrato rispetto alla sorgente. Dalle curve di $E_v(\theta, \phi)$ di Fig. 34, applicando l'Eq. (3), si ricavano le curve di luminanza $L_v(\theta, \phi)$, che sono riportate in Fig. 35 insieme al valor medio e alla deviazione standard. Per capire la qualità dello schermo in termini di luminanza angolare, basta considerare il fatto che uno schermo Lambertiano avrebbe una luminanza costante con l'angolo zenitale. Un tale risultato non è possibile aspettarselo per uno schermo a cristalli liquidi e il risultato è per l'appunto il grafico di Fig. 35, il quale mostra come, allontanandosi dalla normale allo schermo di circa 40° , lo schermo ci apparirà con una luminosità dimezzata. Lo schermo comunque rimane visibile, seppur con bassa luminosità, fino a circa 90° come d'altronde indicato nelle specifiche della Tabella 2 (angolo di visuale).

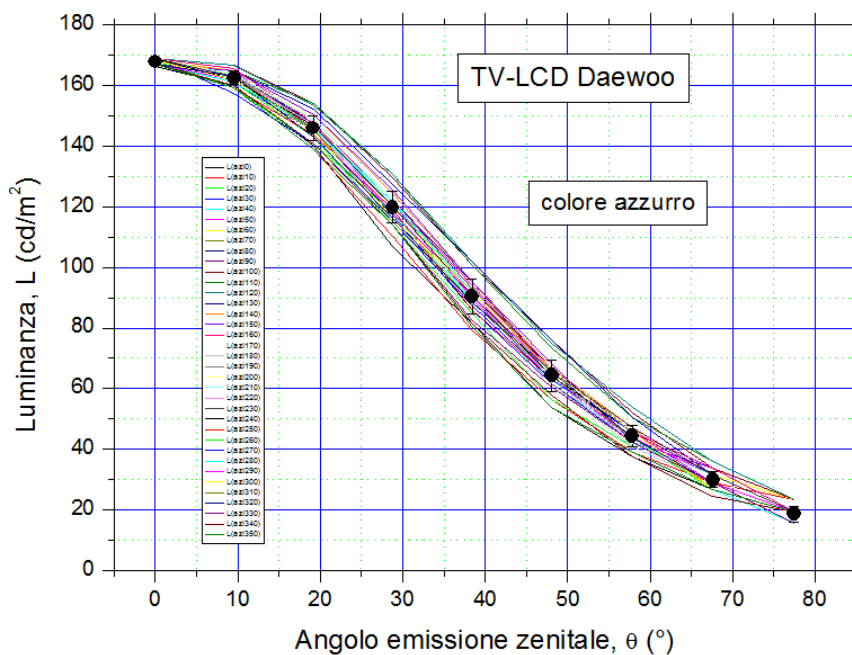


Figura 35. Curve di luminanza $L_v(\theta, \phi, \text{azzurro})$ tracciate in funzione di θ da 0° a 90° ogni 10° per valori di ϕ tra 0° e 360° ogni 10° .

La rappresentazione polare della luminanza media del TV-LCD Daewoo per il colore azzurrino è mostrata in Fig. 36.

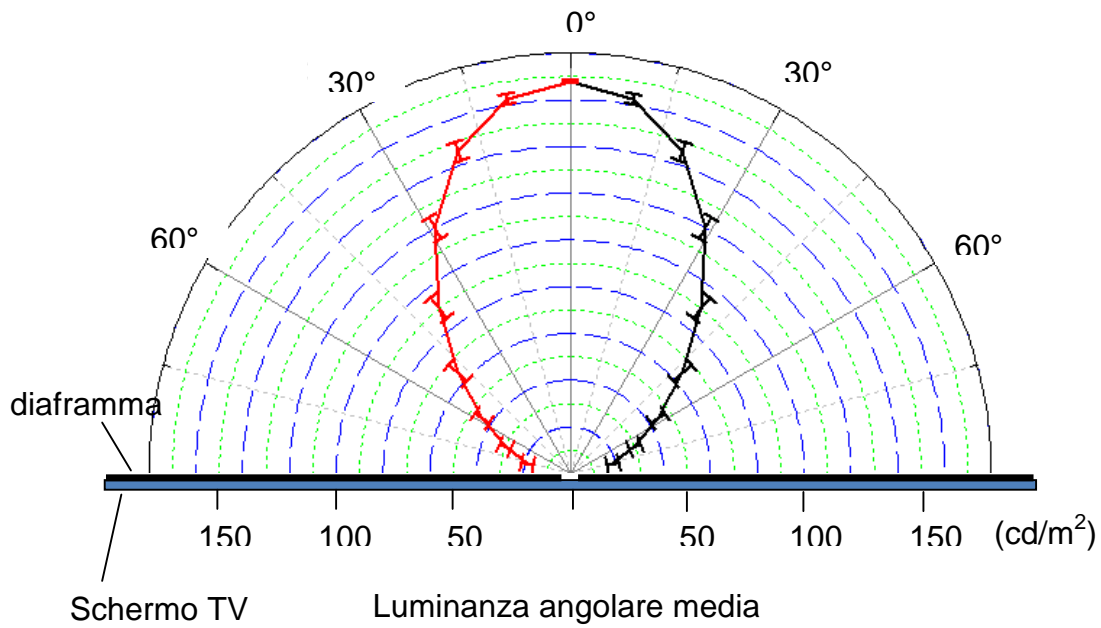
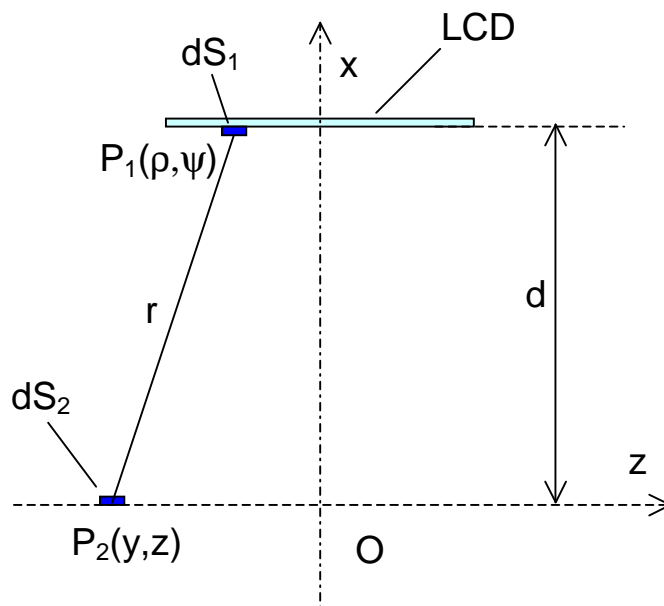
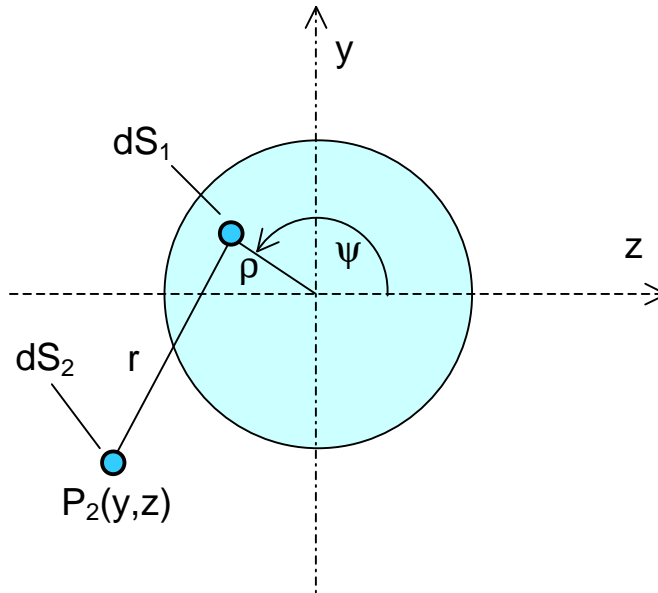


Figura 36. Rappresentazione polare della luminanza media del TV-LCD Daewoo.

L'importanza della conoscenza di $L_v(\theta, \phi, \lambda)$ sta nel fatto che essa consente di calcolare l'illuminamento prodotto da una qualsiasi porzione dello schermo su tutti i punti di una superficie qualsiasi posta in una posizione qualsiasi dello spazio e comunque orientata rispetto allo schermo. In Fig. 37 è riportato, a titolo d'esempio, lo schema di illuminazione dei punti di un piano parallelo ad uno schermo circolare di diametro D e distante d da esso.



a)



b)

Figura 37. Uno schermo LCD circolare di diametro D illumina i punti $P(y,z)$ di un piano parallelo allo schermo e posto a distanza d da esso.

In questo caso lo schermo simula quello da porre nel box di biologia e il piano simula il livello dell'acqua nella piscina dedicata agli esperimenti sulle lucertole. Consideriamo il piano illuminato coincidente con il piano y/z di una terna cartesiana ortonormale. I punti sul piano y/z sono quindi individuati da coppie di valori (y, z) . L'asse x positivo sia coincidente con la semiretta passante per il punto centrale dello schermo e perpendicolare allo schermo stesso. Sia d la distanza tra schermo e piano y/z e R il raggio dello schermo. I punti sullo schermo siano individuati da un riferimento polare (ρ, ψ) , con ρ variabile da 0 a R e ψ variabile da 0 a 2π . Consideriamo ora il trasferimento di flusso dall'elemento di superficie dS_1 centrato su $P_1(\rho, \psi)$ all'elemento dS_2 centrato su $P_2(y, z)$.

Avremo:

$$d^2\Phi_{12} = L(\theta, \phi) \cdot \frac{\cos^2 \theta}{r^2} \cdot dS_1 \cdot dS_2 \quad (4)$$

dove $L(\theta, \phi)$ è la radianza del punto $P_1(\rho, \psi)$ in direzione (θ, ϕ) , dove θ è l'angolo formato dalla retta contenente il vettore r con la retta perpendicolare allo schermo e passante nel punto P_1 , mentre ϕ è l'angolo azimutale del vettore r sul piano y/z . L'illuminamento prodotto sul punto $P_2(y, z)$ per effetto del flusso trasmesso dall'elemento dS_1 è dato da:

$$dE_{12} = \frac{d^2\Phi_{12}}{dS_2} \quad (5)$$

L'illuminamento totale prodotto dallo schermo sul punto $P_2(y, z) = P(y, z)$ si otterrà integrando su tutta la superficie dello schermo:

$$E(y, z) = \int_{dS_1} \frac{d^2 \Phi_{12}}{dS_2} = \int_{dS_1} dS_2 \cdot L(\theta, \phi) \cdot \frac{\cos^2 \theta}{r^2} = \dots$$

$$\dots = \int_0^{2\pi} d\psi \cdot \int_0^R d\rho \cdot L(\theta, \phi) \cdot \frac{d^2 \cdot \rho}{[d^2 + (\rho \cdot \cos \psi - z)^2 + (\rho \cdot \sin \psi - y)^2]^2} \quad (6)$$

L'integrale (6) non è di facile soluzione e quindi soltanto dei metodi numerici possono essere usati per risolverlo. Possiamo semplificare il problema andando ad isolare soltanto il profilo dell'illuminamento lungo una direzione, ad esempio quello lungo l'asse z, equivalente al profilo lungo l'asse y data la simmetria quasi circolare dello schermo LCD (vedi Fig. 35). In tal caso avremo:

$$E(z) = \int_0^{2\pi} d\psi \cdot \int_0^R d\rho \cdot L(\theta, \phi) \cdot \frac{d^2 \cdot \rho}{[(d^2 + z^2) + \rho^2 - 2\rho z \cdot \cos \psi]^2} \quad (7)$$

Non avendo a disposizione al momento la soluzione dell'integrale (6) o (7), passiamo a misurare direttamente l'illuminamento sul piano di lavoro. La Fig. 38 mostra la configurazione sperimentale schermo LCD/vasca in scala 1:1 come si presenta nel box di biologia. Il diametro della finestra luminosa è fissata in questo caso a 55 cm e la distanza schermo-LCD/vasca a 133 cm. La misura d'illuminamento è stata simulata nel laboratorio di ottica in scala ridotta: 1:1.73, quindi con lo schermo avente una maschera circolare di diametro $D=31.7$ cm e una distanza $d=77$ cm (vedi Fig. 39). E' stato simulato anche uno schermo quadrato di lato 55 cm, utilizzando una maschera quadrata di lato $l=31.7$ cm. Il TV-LCD è stato posto verticalmente sul tavolo ottico e affacciato ad una parete del laboratorio, sulla quale era fissato un cartoncino con sopra un riferimento y-z con l'origine posta alla stessa altezza del centro della maschera circolare o quadrata e una griglia di punti a distanza di 10 cm uno dall'altro. Sulla parete, nei vari punti della griglia, è stato poi posizionato il sensore del luxmetro per le misure d'illuminamento. Alcune foto del laboratorio durante le misure sono riportate in Fig. 40. E' facile capire che l'illuminamento simulato misurato in scala ridotta sul piano x/y (Fig. 39) corrisponde esattamente all'illuminamento che si misurerebbe in scala 1:1 sul piano x/y nel box di biologia (Fig. 38), purchè le distanze x/y siano opportunamente

espansive di scala. In sostanza l'illuminamento è lo stesso nei punti P_1 di Fig. 38 e P_2 di Fig. 39 quando i corrispondenti angoli di emissione zenitale θ_1 e θ_2 sono uguali, a parità ovviamente di angoli di emissione azimutali.

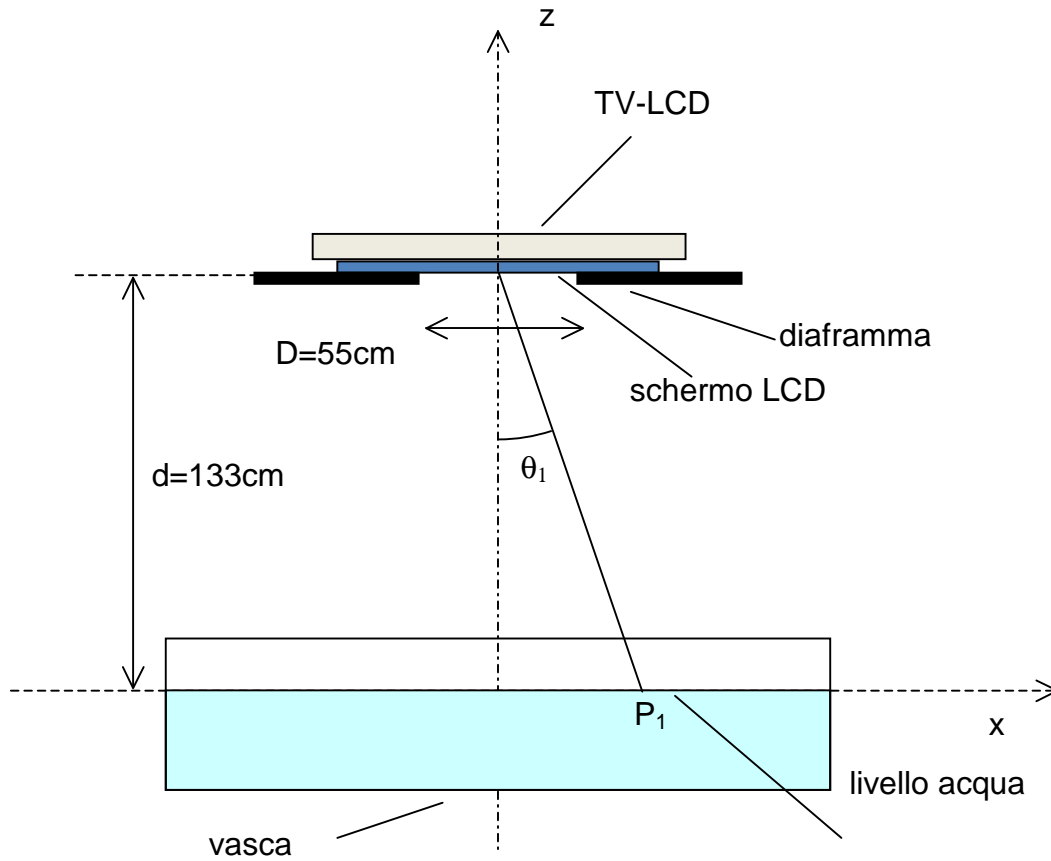


Figura 38. Configurazione sperimentale TV-LCD/vasca nel box di biologia.

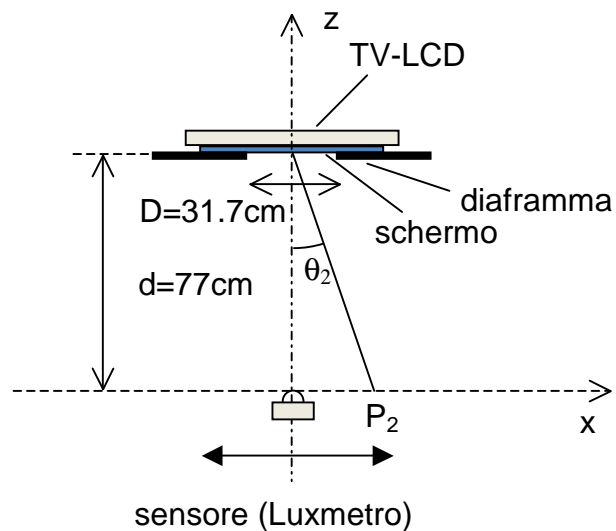


Figura 39. Configurazione sperimentale TV-LCD/parete nel laboratorio di ottica.



a)



b)



c)



d)

Figura 40. Laboratorio di ottica con le immagini prese durante la misura d'illuminamento sul piano, con maschera sullo schermo di forma circolare e quadrata.

Nella Tab. 3 sono riportati i valori d'illuminamento presi per i vari colori al centro del riferimento x/y , ovvero sull'asse ottico del sistema, per lo schermo circolare e per quello quadro. E' riportato anche il rapporto tra gli illuminamenti relativi ai due schermi, prossimo al valore $4/\pi$.

Colore	R	V	B	L(tondo) (lx)	L(quadro) (lx)	Rapporto ($4/\pi=1.273$)	
Bianco	255	255	255	40.2	52.0	1.293	
Rosso	255	0	0	9.1	11.9	1.308	
Verde	0	255	0	28.4	36.6	1.290	
Blu	0	0	255	4.0	5.2	1.300	
Ciano	0	255	255	32.6	41.5	1.273	
Magenta	255	0	255	13.1	16.8	1.284	
Giallo	255	255	0	37.0	47.9	1.295	
Azzurrino	187	224	227	28.8	37.3	1.293	

Tabella 3. Valori d'illuminamento misurati al centro della griglia per i due tipi di schermo.

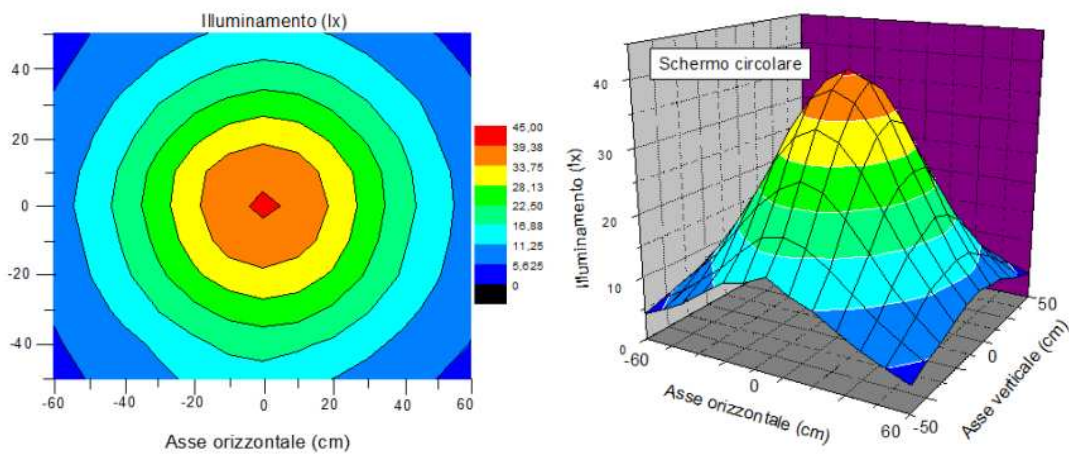


Figura 41. Mappa di $L_v(\theta, \phi)$ in luce bianca per lo schermo circolare.

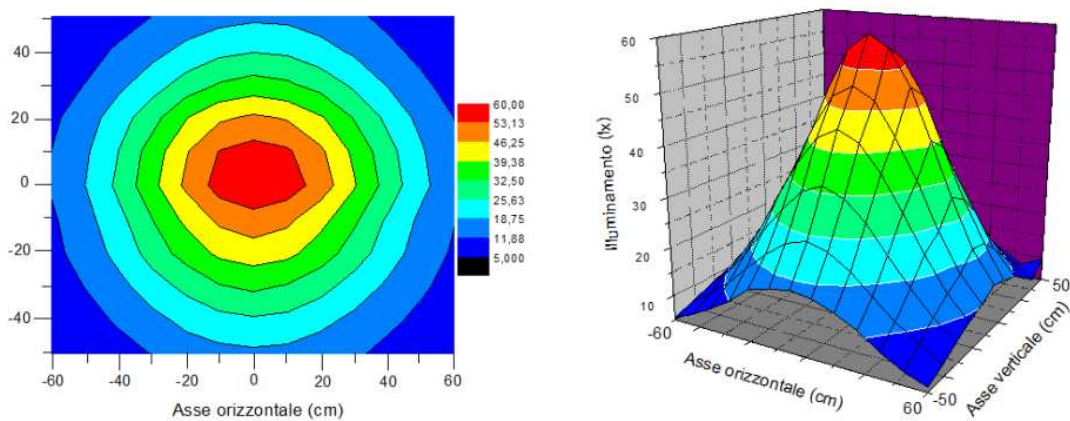


Figura 42. Mappa di $L_v(\theta, \phi)$ in luce bianca per lo schermo quadro.

Dalla Tab. 3 si nota come i valori d'illuminamento per lo schermo quadro siano più grandi che per lo schermo tondo, in quanto lo schermo quadro ha un'area più grande di un fattore $4/\pi=1.273$. In Tab. 3 è allora riportato ai vari colori anche il rapporto tra i due illuminamenti.

Nella Fig. 41 sono riportate le mappe d'illuminamento (in lux) in luce bianca misurate su tutta la griglia per lo schermo con maschera tonda. Le mappe corrispondenti per lo schermo di forma quadra sono riportate in Fig. 42. Dal confronto tra le due mappe si vede chiaramente come l'uso di uno schermo, o finestra luminosa, a forma circolare garantisca una simmetria migliore. L'illuminamento non è uniforme sulla superficie esaminata, e quindi non lo sarà nella vasca; d'altronde un illuminamento uniforme richiederebbe l'uso di finestre (schermi) di dimensioni paragonabili o addirittura maggiori di quelle della vasca, il che è impossibile da realizzare in pratica a causa dell'assenza di schermi LCD di grandi dimensioni. Il risultato fondamentale rimane quello dell'ottima omogeneità del profilo di $L_v(\theta, \phi)$ per i diversi valori dell'angolo azimutale, ovvero per l'ottima simmetria del profilo rispetto all'asse ottico, nel caso dello schermo tondo.

Dettagli del nuovo apparato sperimentale e descrizione degli esperimenti di biologia

Il nuovo apparato sperimentale si differenzia da quello a lampade descritto precedentemente soltanto nella parte che riguarda la sorgente luminosa. Le lampade e il filtro polarizzatore vengono sostituite "tout court" con uno schermo TV-LCD. L'apparato sperimentale complessivo è descritto di nuovo qui con maggiore dettaglio. Il nuovo apparato sperimentale (vedi Fig. 1a e 43a) consiste in un Morris water maze (vedi Figg. 3, 10) [8], vasca di forma esagonale (diagonali 182 cm, lati 93 cm di lunghezze e 40 cm di altezza) costituita da cloruro di polivinile (PVC) opaco (grigio), montata su un supporto anch'esso di PVC che la sostiene ad un'altezza di circa 80 cm dal suolo.



Figura 43. a) Nuovo apparato sperimentale con sorgente TV-LCD. b) Vasca con resistenze riscaldanti (b).

La vasca viene riempita d'acqua per 15 cm circa. L'acqua viene mantenuta a temperatura costante ($29\pm 1^\circ\text{C}$) grazie a due resistenze da acquario (modello Tetrathec HT300) (vedi Fig. 43b), le quali vengono tolte durante lo svolgimento degli esperimenti, e viene resa opaca aggiungendo farina fossile (vedi Fig. 3 e 10). Due piattaforme (le mete che gli animali devono raggiungere) vengono posizionate a diretto contatto della parete, al centro di due lati opposti della vasca, lungo l'asse di addestramento 0° - 180° (Fig. 3 e 11). Le piattaforme sono di plexiglas®, hanno forma rettangolare (23,7 x 16 x 2,5 cm) e sono montate su un piedistallo poggiato sul fondo della vasca (vedi Fig. 43b). La vasca, posizionata all'interno del laboratorio etologico dell'Università di Ferrara, è completamente circondata da uno spesso telo di stoffa nera (altezza 220cm) (vedi Fig. 3 e 43a) che impedisce all'animale che si trova nella vasca di avere qualsiasi riferimento visivo per orientarsi. La struttura è sovrastata da uno schermo LCD (modello Daewoo Electronics 46" TFT-LCD-TV) (vedi Fig. 44) collegato ad un computer (vedi Fig. 45). L'LCD emette luce già linearmente polarizzata. La Fig. 46 mette a confronto la finestra del vecchio apparato a lampade con quella del nuovo apparato con LCD: si vede chiaramente che la seconda presenta una luminosità estremamente più omogenea della prima. mostra come appare la finestra (5) dopo l'inserimento dello schermo LCD. Come già detto, sia l'intensità che il colore dello schermo (8) sono regolati in maniera estremamente semplice operando su un computer collegato al TV-LCD (vedi Figg. 45). Lo stato di polarizzazione della luce emessa dallo schermo si può controllare facilmente con un filtro polaroid® direttamente dall'interno del box (vedi Fig. 47). La luminosità all'interno della struttura è stata mantenuta a circa 10 lux (vedi Fig. 48). Nel tendone che circonda la vasca sono stati ricavati piccoli fori spia, che consentono agli sperimentatori di osservare il comportamento dell'animale, e un foro in corrispondenza del quale è stata posizionata una videocamera digitale (modello JVC Everio GZ-MG21E), poggiata su un apposito cavalletto esternamente al telo.



Figura 44. Schermo del TV-LCD posizionato sull'apertura (5) del box.

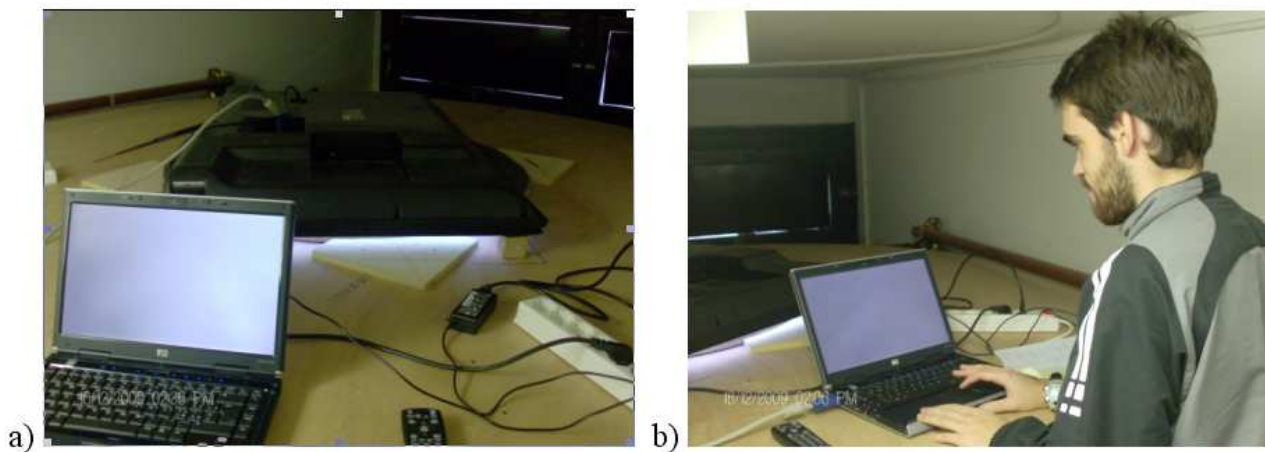


Figura 45. Il TV-LCD è pilotato da un computer.

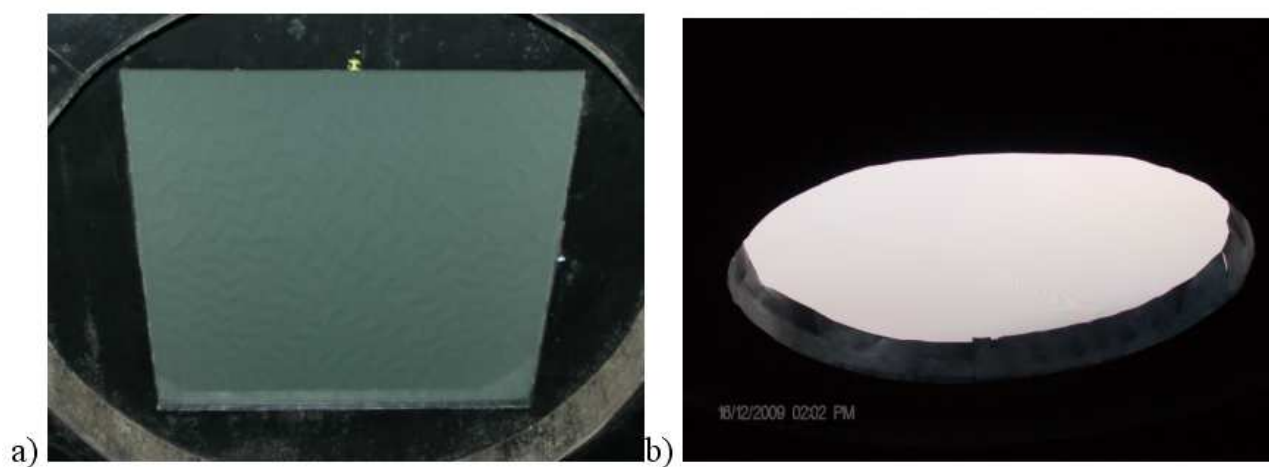


Figura 46. Finestra vista dall'interno del box: a) finestra con lampade; b) finestra con LCD.



Figura 47. Con un filtro polaroid® si controlla la polarizzazione della luce emessa dallo schermo LCD.

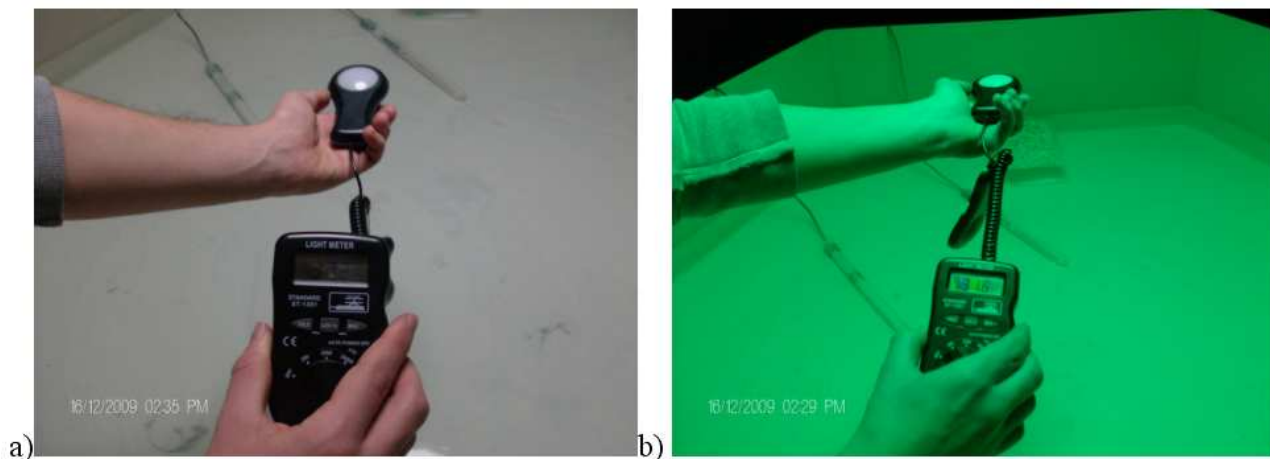


Figura 48. E' mostrata la fase di misura dell'illuminamento in luce bianca (a) e verde (b).

La videocamera, che non è visibile dagli animali che si trovano nella vasca, ha permesso di documentare sia la fase di addestramento sia i test eseguiti successivamente. La vasca è dotata di due rubinetti, posti sul fondo in prossimità di uno dei lati, che permettono di abbassare velocemente il livello dell'acqua, facendo emergere le piattaforme quando è necessario premiare l'animale.

Le condizioni di rilascio e procedure sono descritte nel seguito. Gli animali vengono prelevati dai terrari 15 – 20 minuti prima dell'inizio degli esperimenti e collocati in due terrari da campo posti nel laboratorio in cui si trova la vasca, nei quali restano per tutta la durata degli esperimenti giornalieri. Questa procedura riduce lo stress causato dal brusco passaggio da un ambiente asciutto ad uno bagnato: infatti, i due terrari contengono acqua a temperatura simile a quella della vasca. In questi terrari, quindi, gli animali vengono a contatto con l'acqua e possono acclimatarsi. L'acqua dei terrari da campo viene mantenuta alla stessa temperatura di quella presente nella vasca ($29 \pm 1^\circ\text{C}$). La temperatura dell'acqua della vasca e dei terrari da campo viene misurata utilizzando un termometro a sonda (DualT TCT103 optics & service-centrostyle). L'animale che deve essere rilasciato nel Morris water maze viene prelevato dal terrario da campo e, dopo aver misurato ventralmente la sua temperatura corporea, viene adagiato in una apposita scatola di rilascio a forma di parallelepipedo (21 x 8 x 4 cm), dotata di coperchio (Fig. 49). Il fondo della scatola è dotato di numerosi fori e due piccoli pesi (125g) sono stati legati esternamente con un filo di nylon in modo che, una volta appoggiata sul pelo dell'acqua e tolto il coperchio, la scatola affondi gradualmente (6-7 secondi circa), obbligando l'animale a nuotare. Lo sperimentatore che posiziona la lucertola nel Morris water maze ("lancio") toglie velocemente il coperchio della scatola, una volta che questa è appoggiata sull'acqua, e si nasconde altrettanto velocemente sotto il bordo della vasca in modo da non rendersi visibile all'animale. Il recupero dell'animale che si trova nella piattaforma viene effettuato mediante l'utilizzo di un retino (14,5 x 12,5 cm), costituito da due fogli di rete a maglie

strette incollati tra loro per tre lati, lasciando frontalmente una fessura che invoglia l'animale ad entrarvi (vedi Fig. 49). L'utilizzo del retino permette di evitare lo stress da manipolazione e rappresenta un rinforzo positivo per l'animale.



Figura 49. Sono mostrate le varie fasi dell'esperimento, dal rilascio della lucertola, alla sua navigazione verso il goal (piattaforma nascosta), alla ricompensa dopo il suo raggiungimento e infine al recupero con il retino.

Una volta recuperato l'animale, lo sperimentatore misura la direzione scelta da esso, che corrisponde al primo punto della vasca che questi ha toccato. I gradi corrispondenti alle direzioni scelte sono scritti sul bordo esterno della vasca su di una scala metrica che corre lungo tutto il perimetro esterno: questo accorgimento facilita la misurazione da parte degli sperimentatori. L'esatto percorso (traiettoria) compiuto da ogni singolo animale viene registrato su una scheda di campo, in cui vengono anche annotati data, ora, temperatura dell'acqua, temperatura e sigla identificativa dell'animale.

Le procedure di addestramento sono riportate nel seguito. Gli animali (tot. 56) sono stati addestrati con il piano di polarizzazione della luce parallelo all'asse su cui si trovano le due piattaforme (asse

di addestramento), con luce bianca. Gli animali che hanno raggiunto il criterio di apprendimento sono stati utilizzati per svolgere il Test 1, in presenza di luce polarizzata monocromatica rossa e con e-vector identico a quello presentato durante l'addestramento. Gli animali che non hanno raggiunto il criterio di addestramento sono stati liberati nel luogo di cattura, mentre quelli che sono stati sottoposti al test 1 sono stati nuovamente stabulati, in attesa di essere utilizzati per svolgere il Test 2 (luce polarizzata bianca ma con e-vector ruotato di 90°).

La fase di pre-training è descritta nel seguito. Questa fase consente all'animale di esplorare la vasca e di prendere confidenza con essa, oltre che di individuare la posizione delle due piattaforme.

Infatti, in questa fase le piattaforme sono emerse e posizionate l'una opposta all'altra lungo l'asse di training degli animali (0° - 180°). Per ogni animale vengono effettuati 12 lanci, indirizzandolo verso l'una o verso l'altra meta. Nei primi 4 lanci la scatola di rilascio viene posta a diretto contatto con la piattaforma, nei successivi 4 la scatola di rilascio viene posta a circa 10cm dalla piattaforma e negli ultimi 4 si posiziona la scatola al centro della vasca.

La fase di training è descritta nel seguito. In questa fase le due piattaforme vengono poste appena sotto il livello dell'acqua, in modo che non siano visibili dall'animale. La scatola di rilascio viene posizionata sempre al centro della vasca, in direzioni casuali. Ogni lancio viene ripreso con la videocamera e uno sperimentatore registra sulla scheda di campo il percorso compiuto dall'animale, ponendo particolare attenzione al primo punto della parete della vasca toccato da esso. Per poter stabilire un criterio di apprendimento, superato il quale gli animali possono essere testati, ad ogni punto del perimetro della vasca è stato attribuito un punteggio (Fig. 11). Le lucertole che raggiungono una delle piattaforme senza aver toccato altri punti della vasca ottengono 1,5 punti e vengono premiate con un immediato abbassamento del livello dell'acqua, che fa emergere la piattaforma in 5 – 6 secondi (vedi Fig. 49): come rinforzo positivo, l'animale viene lasciato all'asciutto sulla piattaforma per circa 20 secondi, prima di essere recuperato con il retino. Se l'animale si dirige verso uno dei due lati meta a $\pm 5^\circ$ dalla piattaforma, esso viene comunque premiato: il livello dell'acqua viene abbassato, facendo emergere la piattaforma e l'animale viene accompagnato dallo sperimentatore verso di essa. Se la lucertola tocca uno dei due lati meta al di fuori della zona a $\pm 5^\circ$ dalla piattaforma ottiene 1 punto. Se l'animale tocca i lati adiacenti ai lati meta nei 15° più prossimi ad essi, ottiene 0,5 punti e non viene premiato. Tutti gli altri possibili punti toccati nel perimetro della vasca corrispondono ad un punteggio pari a 0.

Il criterio di apprendimento è descritto nel seguito. E' stato stabilito come criterio di apprendimento, e quindi come requisito per poter essere sottoposto a test, il raggiungimento, da parte dell'animale, di un minimo di sei punti in sei lanci consecutivi, con al massimo un solo lancio ≤ 0.5 e con un

punteggio ≥ 0.5 nell'ultimo rilascio. Il numero dei lanci di training, quindi, non è fisso, ma dipende dalla capacità di apprendimento dell'animale.

La fase di test è descritta nel seguito. Una volta raggiunto il criterio di apprendimento la lucertola viene testata in diverse condizioni sperimentali. In particolare sono stati svolti tre diversi test, ognuno dei quali consisteva in un solo lancio. Nel Test 1 l'orientamento delle lucertole è stato saggiato in luce monocromatica blu ed e-vector parallelo all'asse di addestramento. Nel Test 2 l'orientamento delle lucertole è stato saggiato in luce monocromatica verde ed e-vector parallelo all'asse di addestramento. Nel Test 3 l'orientamento delle lucertole è stato saggiato in luce monocromatica rossa ed e-vector parallelo all'asse di addestramento. Nel Test 4 l'orientamento delle lucertole è stato saggiato in luce monocromatica rossa ed e-vector parallelo all'asse di addestramento. In Tab. 4 sono riportate le coordinate RGB (o RVB) impiegate negli esperimenti di training e di test.

Colore	R	G	B
Grigio	95	95	95
Rosso	221	0	0
Verde	0	119	0
Blu	0	0	221
Azzurro	0	255	255

Tabella 4. Coordinate RGB impiegate negli esperimenti di training e di test, operando sul programma Power Point.

Risultati e discussione

Di seguito sono riportati i risultati del training e del test.

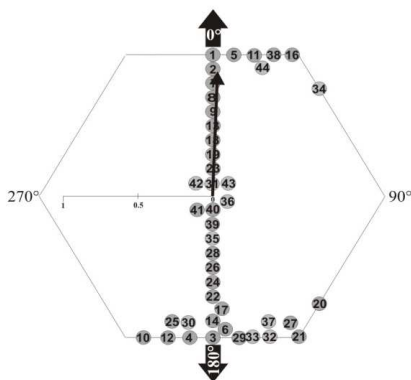


Figura 46. Ultimo lancio di training in luce bianca.

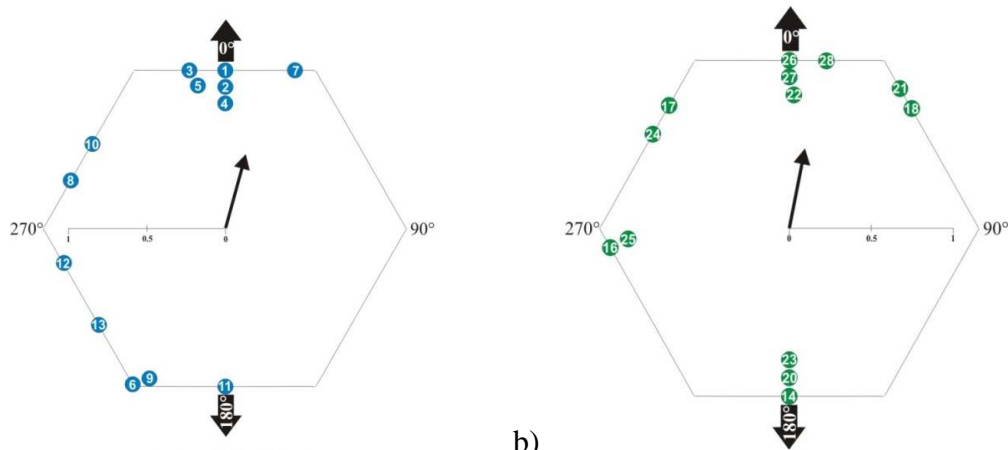


Figura 47. a) Lancio di test in luce blu. b) Lancio di test in luce verde.

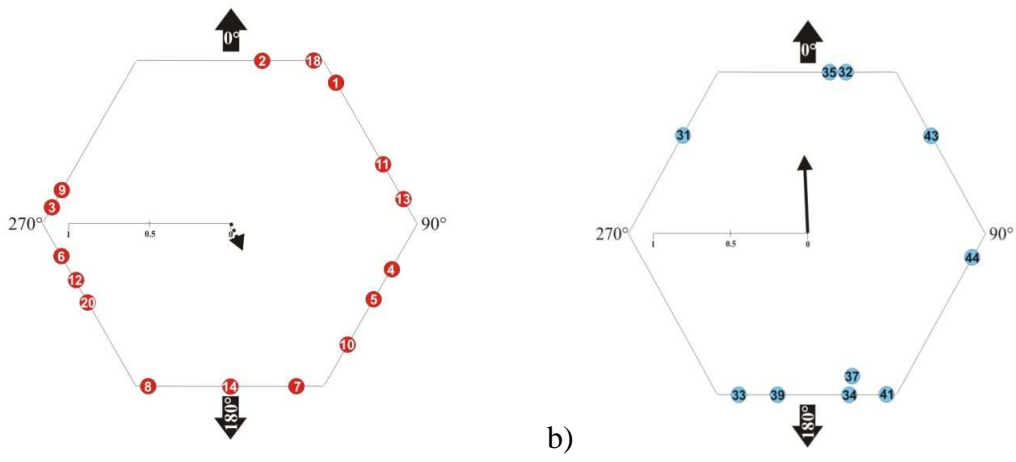


Figura 48. a) Lancio di test in luce rossa. b) Lancio di test in luce azzurra.

CONCLUSIONI

Il nuovo apparato sperimentale con LCD è stato provato innanzitutto in luce bianca. Sono stati ottenuti risultati simili a quelli ottenuti con l'apparato a lampade, a dimostrazione che è possibile semplificare grandemente l'apparato impiegando una sorgente LCD. L'uso dello schermo LCD ci ha permesso di effettuare subito e per breve tempo la sperimentazione in luce di diversi colori. I risultati complessivi ottenuti dimostrano che l'LCD è un'ottima sorgente per "testare" la percezione della luce polarizzata in *Podarcis sicula* e il suo utilizzo per l'orientamento, soprattutto per quanto riguarda i test a lunghezze d'onda selezionate, molto più complicati da effettuare con il precedente sistema "lampade + filtro polarizzatore".

BIBLIOGRAFIA

- [1] Horváth G. and Varjú D. (2003). “*Polarized Light in Animal Vision: Polarization Patterns in Nature*”. Berlin: Springer-Verlag.
- [2] Freake, M. J. (2001). “*Homing behaviour in the sleepy lizard (Tiliqua rugosa): the role of visual cues and the parietal eye*”. Behav. Ecol. Sociobiol. 50, 563-569.
- [3] Adler, K. and Phillips, J. B. (1985). “*Orientation in a desert lizard (Uma notata): time-compensated compass movement and polarotaxis*”. J. Comp. Physiol. 156, 547-552.
- [4] Freake, M. J. (1999). “*Evidence for orientation using the e-vector direction of polarised light in the sleepy lizard Tiliqua rugosa*”. J. Exp. Biol. 22, 1159-1166.
- [5] Ellis Quinn, B. A. and Simon, C. A. (1991). “*Lizard homing behaviour: the role of the parietal eye during displacement and radio-tracking, and time-compensated celestial orientation in the lizard Sceloporus jarrovi*”. Behav. Ecol. Sociobiol. 28, 397-407.
- [6] Foà, A., Basaglia, F., Beltrami, G., Carnacina, M., Moretto, E. and Bertolucci, C. (2009). “*Orientation of lizards in a Morris water-maze: roles of the sun compass and the parietal eye*”. J. Exp. Biol. 212, 2918-2924.
- [7] Beltrami, G., Bertolucci, C., Parretta, A., Petrucci, F., Foà, A. (2010). “*A sky polarization compass in lizards: the central role of the parietal eye*”. Journal of Experimental Biology, in press.
- [8] Morris, R. (1984). “*Developments of a water-maze procedure for studying spatial learning in the rat*”. J. Neurosci. Methods 11, 47-60.
- [9] W.A. Schurcliff, “*Polarized Light: Production and Use*”, University Press, Cambridge (1962).

RIVENDICAZIONI

1. Apparato (1) per sperimentazioni di etologia sotto illuminazione polarizzata, comprendente un ambiente oscurato (3) al cui interno è posto un recinto per gli esperimenti (4), illuminato con luce polarizzata prodotta dallo schermo (8) del monitor LCD (9), opportunamente orientato rispetto al recinto (4), e controllato dal computer (10)

2. Apparato secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto di essere impiegato per esperimenti di etologia che consistono nello studio dell'orientamento animale sotto luce polarizzata.

3. Apparato secondo le rivendicazioni 1 e 2, caratterizzato dal fatto che il recinto per gli esperimenti (4) è costituito da una vasca contenente acqua oscurata con farina fossile, da due piattaforme sommerse che costituiscono il traguardo del percorso animale e che il recinto (4) è tenuto sotto costante osservazione per mezzo di una telecamera (18).

4. Apparato secondo le rivendicazioni 1 e 2, caratterizzato dal fatto che l'ambiente oscurato (3) è un box realizzato con una copertura superiore o tetto (7) provvisto di una finestra (5) per l'inserimento del monitor LCD (9) e di una tenda laterale nera (16).

5. Apparato secondo le rivendicazioni 1 e 2, caratterizzato dal fatto che lo schermo (8) fa parte di un monitor LCD (9) del computer (10) oppure che lo schermo (8) fa parte del monitor di un TV-LCD pilotato da un computer esterno (10).

6. Apparato secondo le rivendicazioni 1-5, caratterizzato dal fatto che la rotazione del piano di polarizzazione della luce emessa dallo schermo LCD (8) è realizzata ruotando il monitor (9) rispetto al tetto (7) del box (3).

7. Apparato secondo le rivendicazioni 1-6, caratterizzato dal fatto che gli esperimenti di etologia si possono effettuare sia in luce bianca che in luce colorata e per vari livelli d'intensità, regolando in maniera diretta e semplice l'intensità e le coordinate cromatiche dello schermo (8) attraverso il computer (10) per mezzo di uno qualsiasi dei programmi di grafica già presenti al suo interno.

