

Qui di seguito illustreremo alcuni aspetti del tema della visione e della formazione delle immagini: l'obiettivo specifico che ci proponiamo è quello di una revisione teorica e didattica delle usuali definizioni di immagine reale e virtuale, sollecitata, e per certi versi imposta, dallo sviluppo di una analogia sempre più stringente tra fenomeni ottici presentati usualmente come separati o quanto meno giustapposti. Sarà chiaro in quanto segue che il percorso proposto ha in sé molti altri obiettivi: in primo luogo, l'applicazione di quei processi euristici ed induttivi cui abbiamo fatto cenno sopra; poi, gli innumerevoli agganci interdisciplinari alla letteratura, all'arte e alla matematica che danno allo studente liceale – non a parole ma in una declinazione concreta – il senso dell'unitarietà della conoscenza, del suo fascino e della sua complessità; *last but not least*, quanto sperimentato ci ha consentito di ottenere l'obiettivo più alto e cioè quello dello stimolo della curiosità e della motivazione di ragazzi che non avrebbero mai smesso di "fare fisica" e hanno, per qualche tempo, odiato la campanella.

Quanto descriveremo qui di seguito costituisce una proposta didattica concreta che contiene risultati e definizioni non individuati con chiarezza in alcun libro di testo di nostra conoscenza. Ci avviamo ora a sviluppare nel dettaglio questo carattere di novità, facendolo emergere dalla descrizione delle varie fasi del percorso proposto.

2. Il percorso didattico

2.1 I FASE (3 ore): messa a punto di locali e materiali (senza alunni)

Abbiamo cercato nella scuola una stanza che fosse completamente oscurabile e abbiamo trovato, nel seminterrato, un locale di rimessa. Abbiamo sfilato la porta dai cardini e l'abbiamo sostituita con un grosso cartone pesante sul quale abbiamo predisposto un forellino, inizialmente chiuso.

Abbiamo poi disposto nel locale un numero sufficiente di sedie e, di fronte ad esse, un tavolo sul quale abbiamo appoggiato due sostegni verticali destinati a fissare a mo' di schermo un foglio di carta da forno traslucida. Dietro a questo schermo abbiamo predisposto alcuni oggetti (un piccolo modellino in legno del corpo umano, dei contorni metallici tridimensionali, sagome trasparenti...), varie candele ed una vecchia lampada a filamento incandescente fissata su un portalampane collegato alla corrente. Ci siamo poi muniti di una piccola torcia a LED.

L'idea è stata quella di partire dal buio, anziché dalla luce; in principio era "la tenebra che ricopriva l'abisso"; il "fiat lux" è un atto successivo e le sorgenti di luce (Sole, Luna e stelle) sono create ancora più tardi, al quarto giorno.

2.2 FASE (2 ore): la caverna di Platone

Senza alcuna introduzione, abbiamo fatto scendere la classe nel seminterrato, avendo cura di tenere in penombra il corridoio che portava alla nostra stanza e facendo entrare un ragazzo alla volta che veniva guidato alla sedia con l'aiuto della torcia. Fondamentale in questa fase ci è sembrato che i ragazzi non vedessero nulla della stanza. La parte che è seguita, in un clima di serietà che non avevamo previsto, è stata molto bella: abbiamo invitato a concentrarsi sugli altri sensi, l'udito primo fra tutti, e a riflettere su che cosa fosse la luce. Uno di noi, poi, ha declamato "L'infinito" di Leopardi, per sottolineare come l'impedimento della vista (*la siepe che da tanta parte dell'ultimo orizzonte il guardo esclude*) dischiude agli occhi della mente (*io nel pensier mi fingo*) *gli interminati spazi, i sovraumani silenzi e la profondissima quiete*. È stata una prima opportuna riflessione sulle immagini (virtuali) prodotte dal cervello.

Terminata l'esperienza del buio, abbiamo acceso una candela dietro lo schermo; i ragazzi seduti davanti allo schermo erano in condizione di vedere soltanto le ombre degli oggetti proiettate sulla carta da forno. Li abbiamo posti in tal

modo in una situazione analoga agli schiavi incatenati nella caverna di Platone, impossibilitati a vedere tanto gli oggetti quanto la sorgente di luce e condannati a percepire solo immagini bidimensionali e in chiaroscuro.

A questo punto, abbiamo acceso in successione più candele dietro l'oggetto, assistendo alla "clonazione" delle ombre (passaggio che si rivelerà assai importante per capire l'analogia con la formazione delle immagini che avverrà successivamente nella camera oscura). Ogni candela accesa produce un'ombra che va a sovrapporsi (non perfettamente, però) con le ombre precedenti; si determina in tal modo una zona centrale più scura (solitamente indicata come ombra dell'oggetto) ed un alone più chiaro (sbrigativamente indicato come penombra). Parlare olisticamente al singolare di ombra e penombra, impedisce di comprendere fino in fondo la complessa relazione geometrica esistente tra l'ombra e la sorgente; considerare, invece, ombra e penombra come "inviluppo" di ombre elementari consente di arrivare a concepire la sorgente estesa come insieme di sorgenti puntiformi, di definire più precisamente il concetto di nitidezza dell'ombra come grado di sovrapposizione delle ombre "elementari" e, soprattutto, di capire che in quella zona grigia della cosiddetta penombra sono contenute informazioni non solo sulla estensione della sorgente, ma anche sulla sua forma geometrica; stiamo, in altri termini, ponendo le basi per chiarire che l'ombra non è soltanto ombra del corpo, ma anche ombra della sorgente.

Giunti a questo punto abbiamo rimosso lo schermo traslucido, ponendo gli allievi in una condizione analoga a quella dello "schiavo liberato" di Platone che, una volta uscito dalla caverna, può scoprire in qual modo le sorgenti e gli oggetti materiali siano all'origine delle ombre proiettate sul fondo della caverna. A differenza degli schiavi, costretti fin dalla nascita ad osservare soltanto ombre piatte, i nostri allievi avevano già una lunga consuetudine con le ombre degli oggetti tridimensionali; ciò nonostante hanno potuto riconoscere la complessità delle operazioni che portano alla ricostruzione mentale della forma tridimensionale dell'oggetto a partire dalla conoscenza parziale (e talora ingannevole) delle sue proiezioni su una superficie piana (oggetti diversi che producono la stessa ombra, ombre diverse dalla stesso oggetto, ...).

Per consentire loro di calarsi ulteriormente nella parte dello schiavo liberato, li abbiamo invitati ad immaginare gli oggetti circostanti come ombre tridimensionali e colorate proiettate da un mondo a quattro dimensioni (a questi allievi durante le ore di matematica era già stata proposta qualche tempo prima la lettura di *Flatlandia* di E. A. Abbott, un'ottima introduzione al problema).

Conclusa questa fase della discussione, abbiamo introdotto una piccola variante al mito della caverna. Con l'apertura del forellino della porta di cartone si determina una sorpresa che entusiasma in egual misura tanto i bambini piccoli quanto i ben più smaliziati ragazzi di una quarta liceo: uno schermo di carta, posto ad una certa distanza dal foro "acchiappa" l'immagine rovesciata di chi cammina nel corridoio! Se il foro è piccolo il risultato è stupefacente anche per chi conosca benissimo la teoria della camera oscura. Il passaggio successivo consiste nel mostrare la perfetta analogia con quanto si era osservato con le ombre. Cosa succederà se accanto al forellino se ne apre un secondo, poi un terzo e così via? I ragazzi risponderanno spontaneamente che ad ogni nuovo foro aperto corrisponderà una nuova immagine sullo schermo, leggermente discosta dalle precedenti. L'effetto della sovrapposizione sarà quello di creare una immagine complessiva non perfettamente nitida, così come l'accensione di più candele produceva più ombre sovrapposte ed un'ombra complessiva non perfettamente nitida. Anche qui le immagini elementari determinano, con il loro inviluppo, l'immagine complessiva e la sua nitidezza.

In questa lezione non abbiamo dato alcun modello di interpretazione di quanto succedeva, né per le ombre né per la camera oscura: per ora sta tutto lì, nella testa dei ragazzi, che avranno qualche giorno prima della lezione successiva per ripensare a quanto visto e a lasciarsene incuriosire. Anche questo è importante: i nostri figli possono “vedere” tutto subito, possono accedere alle informazioni in modo velocissimo, ma questo talora preclude loro *gli interminati spazi e i sovrumani silenzi* dove si coltiva la curiosità e la fantasia.

Prima di passare alla lezione successiva in cui descriveremo una prima sistematizzazione teorica, vorremmo brevemente soffermarci su alcune considerazioni. Vorremmo cioè far osservare che la lezione appena descritta apre molte prospettive. Da un lato, da un punto di vista pratico, a seconda del tempo che si ha a disposizione, si possono proporre agli alunni varie attività: si può tirare fuori una lente e migliorare la nitidezza dell'immagine della camera oscura; si può pensare a come si incide una pellicola dentro una macchina fotografica; si può anche prendere nel laboratorio di biologia un grande modello di occhio e far capire che il foro della porta è la pupilla; oppure si può mostrare l'occhio di un bue che il macellaio vi ha gentilmente regalato e voi avete tenuto sotto spirito; infine, si possono tirare fuori delle immagini di macchine prospettiche rinascimentali, con le quali i pittori si aiutavano a dipingere, e che si basano in effetti sul principio della camera oscura.

Da un versante più teorico, ci limitiamo a segnalare gli svariati collegamenti alla poesia, all'arte, alla filosofia e alla matematica che possono dar vita qui a percorsi interdisciplinari estremamente interessanti.

2.3 III FASE: il modello “a raggi” (1 ora)

Con l'aiuto di una lavagna, abbiamo proposto il naturale modello di propagazione rettilinea per raggi, riflettendo sulla loro provenienza (e quindi introducendo la classica distinzione fra sorgente primaria e secondaria) e sul fenomeno della diffusione. Abbiamo poi considerato la formazione delle ombre e chiarito come una sorgente idealmente puntiforme crea ombre nitide, mentre una sorgente estesa (o, addirittura, più sorgenti vicine come le candele di cui sopra) creano ombre dai contorni sfumati. L'ombra si crea per l'interruzione dei raggi luminosi, per dualità l'immagine della camera oscura si crea per il passaggio di alcuni raggi: se il foro è piccolo i contorni dell'immagine sono nitidi, se lo si ingrandisce si perde presto la definizione dell'immagine.

A questo punto le cose sono mature per porre una domanda cruciale: l'ombra è ombra di che cosa? L'immagine è immagine di che cosa? La domanda sembra un po' banale. È ovvio che l'ombra è ombra dell'oggetto e che l'immagine della camera oscura è l'immagine capovolta di ciò che è all'esterno. Ma le cose non sono così semplici. Se le sorgenti luminose sono essenziali per la creazione dell'ombra, come è possibile che l'ombra non sia anche ombra della sorgente? Come è possibile che l'ombra non ci dia alcuna informazione sulla sorgente? E, infatti, le cose non stanno proprio così. Basta sospendere una pallina, illuminandola con tre candele disposte in modo da formare un triangolo equilatero. Sullo schermo appariranno tre ombre della pallina, ma esse saranno disposte secondo un triangolo equilatero rovesciato rispetto a quello delle candele.

Dunque, l'ombra risultante contiene sia la forma “diritta” dell'oggetto, sia quella “rovesciata” della sorgente. Dipenderà dalle distanze e dalle dimensioni relative tra sorgente, schermo ed oggetto che la forma dell'uno sia più riconoscibile dell'altra.

Analogamente si dimostra che l'immagine complessiva in una camera oscura contiene sia l'immagine rovesciata del paesaggio esterno (la sorgente lumino-

sa estesa che manda luce) sia l'immagine diritta del foro. La pallina e il foro sono due semplici sistemi ottici, perfettamente analoghi, con l'unica differenza che le immagini della prima sono in negativo (ombre) quelle della seconda in positivo (luce e colori).

**2.4 IV FASE:
lo specchio piano
(2 ore)**

Con lo specchio piano si entra in un capitolo apparentemente nuovo e separato dagli argomenti precedenti. Solitamente i libri di testo lo affrontano dando per scontato che l'unica immagine osservabile in uno specchio piano sia quella virtuale che appare dietro lo specchio. Se si chiede agli alunni dove vedono la loro immagine essi risponderanno, quasi senza eccezione, che l'immagine sta sullo specchio, attaccata all'argentatura, come se fosse una foto. Bisogna appoggiare lo specchio al naso dell'intervistato e poi allontanarlo, per costringerlo ad ammettere che l'immagine si allontana andando "dietro" lo specchio. C'è, insomma una resistenza psicologica molto forte ad ammettere che l'immagine arretri, attraversando il muro al quale lo specchio è appoggiato.

Qualcuno più tenace e agguerrito tenterà di mantenere l'immagine sullo specchio ipotizzando che lo specchio, come i pittori, crei l'illusione della profondità mediante il graduale rimpiccolimento degli oggetti che si allontanano. Anche in questo caso sarà sufficiente un semplice esperimento: l'allievo accosta il proprio viso allo specchio e l'insegnante ne segna l'altezza con un pennarello, poi l'allievo comincia ad indietreggiare lentamente. Si accorgerà in tal modo che l'immagine mantiene sempre la stessa altezza e non subisce alcun "rimpiccolimento" (l'unica accortezza è quella di controllare con una livella che lo specchio sia ben perpendicolare al pavimento).

Il punto cruciale ora diventa: che cos'è che vediamo dietro lo specchio se sappiamo bene che là dietro non può esserci nulla? Non è sicuramente un'immagine del tipo di quelle che si formano nella camera oscura. Qualche studente più intraprendente suggerirà che l'immagine lì ce la crea l'occhio. Questa è un'occasione d'oro per ripensare al processo della visione: l'immagine è qualche cosa che per crearsi necessita di energia luminosa sotto forma di raggi (va ancora bene il modello geometrico) che, selezionati dalla pupilla, vanno a sollecitare i "pixel" della retina e stimolano il nervo ottico. Quindi tutte le immagini vengono create dal cervello e quella della camera oscura non è, in questo senso, più reale di quella che si vede dietro uno specchio piano (anche essa, infatti, benché fissata sullo schermo, è destinata, in ultima analisi, ad essere vista dal cervello).

Per questa ragione, l'esperienza dello specchio risulta ancor più fondamentale per la comprensione della natura dell'immagine. Se con la camera oscura si determina un primo decisivo "distacco" dell'immagine dall'oggetto, è con lo specchio che si arriva alla consapevolezza della sua natura "psichica". Come sostiene Enrico Bellone nel suo bel libro *Qualcosa, là fuori – Come il cervello crea la realtà*, ciò che vediamo (l'immagine) è il risultato di una complessa elaborazione che il cervello effettua degli stimoli luminosi ricevuti attraverso gli occhi.

Alla luce di questa maggiore consapevolezza della dimensione psichica dell'immagine, alcune definizioni correnti nell'ottica geometrica (in particolare la distinzione tra immagine reale e virtuale) sembrano mostrare limiti sempre più evidenti.

Ci permettiamo, ad esempio, di notare qui come in molti libri di testo la definizione di immagine virtuale fa riferimento al fatto che essa venga creata da "raggi divergenti", cosa decisamente non pertinente. Basterebbe l'immagine raccolta sullo schermo della camera oscura a smentire questo criterio; pur essendo formata da raggi divergenti, nessuno si sognerebbe di dire che si tratti di un'im-

immagine virtuale, dal momento che l'energia luminosa transita in quel punto e la rende perfettamente fotografabile. Si dovrebbe ammettere che si tratta di una immagine "reale", ma la definizione di immagine reale compare normalmente solo in una fase successiva, con gli specchi curvi, e viene legata alla "convergenza" dei raggi luminosi.

Se l'attenzione viene spostata sul sistema occhio-cervello, il vero produttore dell'immagine, si dovrà ammettere che esso riceve sempre raggi "divergenti", sia che essi provengano direttamente dall'oggetto (visione diretta), sia che vengano diffusi dallo schermo della camera oscura, sia che vengano riflessi da uno specchio. In tutti questi casi il cervello procede ad una estrapolazione "all'indietro" che localizza l'immagine in una posizione non necessariamente coincidente con quella dell'oggetto. Tutte queste localizzazioni sono di natura cerebrale, cioè virtuale.

La distinzione tra immagine reale e virtuale rischia di perpetuare l'equivoco di una immagine (quella reale) che in qualche modo viene ritenuta più "aderente" alla realtà degli oggetti di quanto non lo sia quella virtuale. Assumendo che tutte le immagini sono per loro natura virtuali, l'unica distinzione che a questo punto ci sembra pertinente è quella che riguarda le modalità di osservazione: diretta, tramite schermi o supporti (fotografia), tramite specchi o lenti.

Secondo la trattazione corrente, inoltre, gli specchi piani sembrano produrre solo immagini virtuali e, difatti (si dice), se si mette uno schermo davanti allo specchio piano non sarà possibile raccogliere alcuna immagine (reale) su di esso. Vedremo nel passaggio successivo che questo non è vero e che davanti allo specchio è possibile osservare immagini rovesciate degli oggetti circostanti.

La cosa desta una qualche sorpresa e un certo imbarazzo, facilmente superabili, del resto, perché si tratta della naturale conseguenza di quanto abbiamo già visto nelle ombre e nella camera oscura.

2.5 V FASE: le immagini "davanti allo specchio" piano (1 ora)

Per questo incontro, svoltosi in laboratorio, abbiamo preventivamente costruito un modellino di camera oscura (con una scatola di cartone): infatti, abbiamo associato ai discorsi sullo specchio piano le prime considerazioni sulla camera oscura in un modo che illustreremo e che darà dei risultati inaspettati.

Con l'aiuto di una lavagna abbiamo riproposto gli schemi (presenti in tutti i libri) di formazione dell'immagine virtuale dietro uno specchio piano, avendo sempre cura di disegnare un occhio che guarda, senza il quale – ormai tutti gli alunni hanno capito – questi disegni non hanno senso.

Ma ora si può fare un altro passo importante e, a nostra conoscenza, innovativo. Sulla base di quanto abbiamo imparato sinora sulle immagini della camera oscura, si può proporre agli studenti una domanda diretta: che cosa avverrà se dietro al foro stenopeico della camera oscura noi appoggiamo uno specchio piano? La risposta abbastanza naturale è che i raggi che prima entravano incrociandosi nel foro, dando origine all'immagine rovesciata sullo schermo, ora saranno riflessi verso l'esterno dal frammento di specchio che si affaccia sul foro. Ciò che prima avveniva all'interno della camera dovrebbe adesso verificarsi all'esterno; uno schermo posto davanti al frammento (che chiameremo specchio stenopeico) dovrebbe mostrarci l'immagine rovesciata degli oggetti esterni. L'unica difficoltà sta nel fatto che all'esterno c'è troppa luce e la debole immagine viene "coperta" dal forte illuminamento. La difficoltà può essere superata con opportune schermature ed utilizzando un oggetto fortemente illuminato o, ancora meglio, una sorgente luminosa come una candela o una lampada a filamento.

La verifica sperimentale conferma l'ipotesi fatta: lo specchio piano stenopeico fa apparire sullo schermo l'immagine rovesciata della candela o del filamento.

È una immagine identica in tutto e per tutto a quella che riappare nella camera oscura non appena si rimuove lo specchio che tappa il foro stenopeico. Anch'essa è formata da raggi divergenti, ma non è una immagine virtuale, perché può essere fotografata grazie all'energia luminosa che trasporta.

Perché un piccolo frammento dello specchio è capace di fare quello che non riesce a fare uno specchio intero? Per la stessa ragione per la quale una finestra spalancata illumina fortemente la stanza senza riuscire a mostrarci sulle sue pareti una immagine nitida di ciò che è all'esterno. Abbiamo già visto che l'apertura di un nuovo foro stenopeico produce una nuova immagine, che si sovrappone alle precedenti; quando i fori diventano così numerosi da costituire una vera e propria finestra, le immagini diventano così numerose da ricoprire in maniera uniforme le pareti. Così avviene nello specchio: ad ogni nuovo frammento scoperto una nuova immagine va a sovrapporsi alle precedenti illuminando uniformemente lo schermo, quando lo specchio sarà completamente scoperto. Non è vero che davanti allo specchio non si formano immagini. È vero il contrario: ce ne sono troppe e sono confuse tra loro. Per renderle visibili bisogna isolarle singolarmente, oppure sovrapporle tutte nello stesso punto, cosa che si potrà fare dando allo specchio una opportuna curvatura. Ciò che pensiamo di aver dimostrato è che non si deve aspettare di passare agli specchi curvi per parlare di immagini "davanti allo specchio".

**2.6 VI FASE:
definizione
di immagine
reale e virtuale
(1 ora)**

Come definire e distinguere l'immagine raccolta sullo schermo posto davanti allo specchio, da quella virtuale che l'occhio vede dietro lo specchio?

La scelta ormai consolidata è stata quella di definire la prima come immagine reale. C'è in questa scelta una netta contrapposizione con l'immagine virtuale, ribadita e rafforzata continuamente nei quesiti con i quali si vorrebbe verificare l'apprendimento delle nozioni di ottica geometrica. Uno specchio convesso, si chiede, produce un'immagine reale o virtuale? Mettendo un oggetto ad una certa distanza da uno specchio concavo si produce un'immagine reale o virtuale? Tutto il percorso compiuto finora ci mostra, invece, una struttura unitaria tra fenomeni apparentemente diversi e l'opportunità di ripensare il rapporto tra immagine reale e virtuale in termini di complementarità e compresenza, piuttosto che di contrapposizione e di esclusività (o c'è l'una o c'è l'altra). Ci sono entrambe, cambiano soltanto le modalità di osservazione: le une, quelle virtuali, sono quelle percepite direttamente dall'occhio dell'osservatore ed elaborate dal suo cervello (quelle che Keplero definì come *imagines intentionales*); le altre, quelle reali, sono quelle che l'osservatore percepisce con l'ausilio di uno schermo o di una lastra fotografica (quelle che Keplero, in mancanza della fotografia, definì come *picturae*). In entrambi i casi è sempre l'osservatore che crea l'immagine. In tal senso tutte le immagini sarebbero da considerare virtuali, se con virtuale si intende la elaborazione da parte del cervello degli stimoli luminosi ricevuti attraverso la retina.

Uno studioso del virtuale come il filosofo Pierre Lévy sviluppa una analisi approfondita del fenomeno, mostrando come il processo di virtualizzazione sia connaturato con il processo stesso della ominazione e sia alla base della nascita del linguaggio, della tecnica e del contratto sociale. Contrariamente a quanto si pensa, anche per le preoccupazioni legate all'espansione e invasività delle tecnologie informatiche, la virtualizzazione è il modo che l'uomo ha costruito per una interazione sempre più efficace con la realtà del mondo in cui vive.

Alla luce di questa analisi ci sentiamo incoraggiati a cercare di sostituire il termine "immagine reale" con un termine che riconosca all'immagine raccolta

sullo schermo un grado intermedio di virtualità, tra la realtà dell'oggetto e la virtualità dell'immagine elaborata dal cervello. Si tratta di una immagine fissata su un supporto materiale che acquista una caratteristica di "intersoggettività" (o se si preferisce di "oggettività") e di permanenza nel tempo, mentre l'immagine percepita direttamente è soggettiva, labile, legata all'*hic et nunc*.

A questo punto della nostra elaborazione una definizione provvisoria potrebbe essere mutuata da quella kepleriana, sostituendo al termine "immagine reale" quello di "immagine fisica" (le *picturae kepleriane*) e intendendo le "immagini virtuali" come immagini virtuali psico-fisiologiche. L'avviso che vorremmo lanciare ai naviganti nell'ottica geometrica è che quando si parla di immagini si sconfinava inevitabilmente nel mare dell'ottica fisiologica e in quello dell'ottica psicologica; bisogna quindi usare una qualche cautela nelle zone di confine dove gli strumenti di navigazione (definizioni e concetti) potrebbero aver bisogno di qualche opportuno aggiustamento.

3. Conclusioni

L'attività che abbiamo svolto è documentata dal materiale sperimentale che abbiamo costruito per i nostri scopi e che si trova a disposizione (opportuna-mente catalogato) nel laboratorio della scuola. Sul sito dell'AIF (www.aif.it) sono pubblicate anche la prova di verifica dell'attività svolta con alcuni nostri commenti. Gli esiti del percorso proposto sono stati per noi estremamente stimolanti su più piani: ciò che più ci preme dire è che tutti in classe sono stati entusiasti del percorso svolto e hanno subito il fascino della vera indagine scientifica; i temi trattati hanno poi dato vita ad una collaborazione con l'insegnante di Storia dell'Arte che ha approfondito il tema della macchine per la prospettiva (camere oscure) e ha motivato l'introduzione (seppur breve) nell'ambito della matematica delle proiezioni, che costituiscono una stimolante generalizzazione di quanto normalmente proposto circa le trasformazioni geometriche affini del piano euclideo; infine, abbiamo constatato come, alla fine del percorso, gli alunni fossero in grado di risolvere con scioltezza problemi "teorici" anche molto elaborati con sistemi ottici contenenti simultaneamente più lenti e specchi.

Alla fine del percorso svolto abbiamo, in forma anonima, chiesto agli alunni di scrivere alcuni commenti personali sull'esperienza fatta. Riportiamo qui di seguito una tavola riassuntiva delle osservazioni più interessanti.

COMMENTI PERSONALI	
1	1) Interessante e coinvolgente perché permette di "cogliere" i principi per poi arrivare alla loro enunciazione. 2) L'insegnante si pone a livello dell'alunno permettendogli di fare considerazioni e di giungere autonomamente a darsi delle risposte.
2	1) Esperienza estremamente utile, più interessante delle "spiegazioni alla lavagna". 2) Costatare di persona i fenomeni crea una diversa consapevolezza. 3) Dimostra che la scuola può essere divertente ed istruttiva al tempo stesso.
3	Descrizione puntuale delle esperienze fatte e dei concetti discussi: 1) L'esperienza del buio e le cosmogonie antiche. 2) Le ombre: nitidezza ed estensione delle sorgenti; proporzionalità tra distanze e dimensioni. 3) Propagazione rettilinea e raggio laser. 4) Immagini nella camera oscura.

COMMENTI PERSONALI	
4	1) Ho osservato con occhi diversi e più consapevoli fenomeni della realtà quotidiana. 2) Più sorgenti formano più ombre; una sorgente puntiforme produce un'ombra nitida. 3) Il raggio laser attraverso la polvere. 4) Le immagini rovesciate della camera oscura.
5	1) È stimolante e produttiva l'attenzione posta sui nostri ragionamenti e le nostre conclusioni, corretti o errati che siano. 2) Interessante e "spiazzante" non fare riferimento a conoscenze precedenti. 3) Mi è molto gradito spaziare in modo non scolastico su altri argomenti connessi all'ottica. 4) Stupito dalla consapevolezza dei fenomeni che sono riuscito ad acquisire.
6	1) Da molte piccole esperienze abbiamo capito che tutta la quotidianità è ricca di fenomeni ottici dei quali abbiamo una percezione confusa e soprattutto poco consapevole, che si può migliorare attraverso una analisi più attenta della realtà. 2) Interessanti: l'esperienza del buio (affinamento dell'udito), il raggio laser, la diffrazione, le immagini nella camera oscura.
7	1) Un modo diverso di affrontare i problemi della fisica, sostituendo al piano teorico quello pratico. 2) Siamo entrati in contatto diretto con la realtà. 3) Attraverso esperimenti pratici abbiamo rappresentato un fenomeno che poi abbiamo "constatato" sia attraverso spiegazioni teoriche sia attraverso relazioni fisiche. 4) La "caverna" e le immagini dell'esterno.
8	1) L'esperienza è stata importante per renderci più consapevoli di ciò che quotidianamente diamo per scontato. 2) La conoscenza pratica ci permetterà di affrontare meglio i problemi di fisica. 3) Il semplice libro non ha questa potenzialità. 4) Nel nostro istituto c'è una scarsa funzionalità dei laboratori. 5) Le ombre permettono di ricostruire solo gli oggetti piani. 6) Le grandezze fotometriche. 7) Le immagini nella camera oscura.
9	1) Gli esperimenti diretti sono necessari per acquisire la consapevolezza che un fenomeno accade come è riportato nei libri. 2) Questa attività ci rende più consapevoli di ciò che studiamo. Andrebbe proposta fin dal primo anno, compatibilmente con il normale svolgimento del programma. 3) Questo rende la lezione più interessante, "leggera" (e forse anche più utile). 4) Le esperienze più interessanti: la camera oscura.
10	1) Non amo le formule perché mi riesce difficile applicarle, per questo mi affascina di più l'esperienza diretta. 2) L'esperienza della "caverna di Platone" ci ha permesso di collegare lo studio dell'ottica con quello delle altre materie.
11	1) L'esperienza del buio mi ha molto colpito. 2) È un metodo coinvolgente e piacevole. 3) Si è capito meglio il rapporto di proporzionalità tra grandezze e distanze nelle ombre. 3) Facendo il "valletto" ho potuto vedere meglio la diffrazione.
12	1) Attività pluridisciplinare molto interessante perché originale, non canonica e non scolastica. 2) Partendo dagli esperimenti abbiamo "supposto" alcune ipotesi per poi arrivare alle formule, riproducendo nel nostro piccolo il comportamento di un vero fisico. 3) È stato emozionante "rivivere" il mito della "caverna di Platone e vedere le immagini nella camera oscura.

COMMENTI PERSONALI	
13	1) Non avrei mai immaginato che con mezzi così semplici si potessero fare degli esperimenti da restare a bocca aperta! Ho capito l'argomento con immediatezza senza starci a pensare troppo come sono solita fare.
14	1) Abbiamo anteposto un approccio più pratico e diretto ad uno più teorico: invece di partire dal "vestito matematico" del fenomeno siamo partiti dalla osservazione di esso. 2) Stupito ed affascinato dalla possibilità di produrre fenomeni ed esperienze interessanti con mezzi di uso quotidiano. 3) È ammirevole il peso che l'insegnante attribuisce alle nostre considerazioni, rendendoci partecipi e coinvolti.
15	1) Mi colpisce come si possano fare esperienze di fisica con semplici oggetti di uso quotidiano. 2) Nonostante sia molto divertente e spassoso, a mio parere permette di apprendere meglio. 3) È difficile trovare delle leggi senza una guida, perché si cade spesso in contraddizione.
16	1) È semplice studiare un fenomeno a tavolino o applicare delle formule, ma vivere l'esperienza è davvero tutta un'altra cosa. 2) Le esperienze più emozionanti sono state quelle della "caverna di Platone" e quella della camera oscura, nella quale mi sono sentita come all'interno di un occhio.
17	1) Esperienza interessante e piacevole. 2) Permette di acquisire con maggiore facilità i concetti dell'ottica e di diventare più consapevoli dei fenomeni luminosi con cui siamo quotidianamente a contatto. 3) La camera oscura, l'occhio e la visione.

4. **Approfondimenti bibliografici**

Qui di seguito riportiamo (ovviamente senza alcuna pretesa di esaustività) alcune opere per approfondire e sviluppare i temi trattati.

- AA.VV., *La visione*, *Le Scienze*, Quaderno n. 29, (1986).
 ARONS, A.B., *Guida all'insegnamento della fisica*, Zanichelli, Bologna, 2010.
 ABBOT, E.A., *Flatlandia*, Adelphi, Milano, 2009.
 BALTRUSAITIS, J., *Lo specchio*, Adelphi, Milano, 1981.
 BENJAMIN, W., *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica*, Einaudi, Torino, 2011.
 CASATI, R., *La scoperta dell'ombra*, Mondadori, Milano, 2000.
 CATÀ, A., *La luce*, La Palma, Palermo, 2000.
 FEDELI, E., "Sulla definizione di immagine reale e virtuale", Atti dell'XI Congresso Nazionale di storia della fisica, Trento, 8-13 ottobre 1990.
 LÉVY, P., *Il virtuale*, Cortina, Milano, 1997.
 LUCREZIO, T.L., *De rerum natura*, Libro IV (La teoria dei simulacri), Einaudi, Torino, 1980, traduzione di Alessandro Marchetti.
 MALDONADO, T., *Reale e virtuale*, Feltrinelli, Milano, 1993.
 PLATONE, *Repubblica*, Libro VII (Il mito della caverna), a cura di G. Reale e R. Radice, Bompiani, Milano, 2009.
 RONCHI, V., *Storia della luce*, Laterza, Roma Bari, 1983.
 ZEKI, S., "L'elaborazione dell'immagine visiva", *Le Scienze*, 291 (1992), pagg. 36-44.