

DIESSE FIRENZE
Didattica e Innovazione Scolastica
Centro per la formazione e l'aggiornamento

SCIENZA FIRENZE
SESTA EDIZIONE

Docenti e studenti a confronto su:

LA LUCE, GLI OCCHI, IL SIGNIFICATO

Aula Magna
Polo delle Scienze Sociali, Università di Firenze
Firenze, 22 – 23 aprile 2009

Primo classificato – Sezione Triennio

Titolo: *La luce “... general ministra e duce” della vita dell’uomo*

Di: Chiara Bergamo, Elisabetta Mauro, Davide Mizzaro, Enrica Rossi, Gianluca Zamparo

Scuola: Liceo ‘XXV aprile’ – Portogruaro (VE)

Docente: Carla Guidotti

Motivazione: Un lavoro interessante e originale per il fenomeno scelto, poco noto ma importante per la visione: la luce inganna l’occhio, ma ecco che un limite, un difetto del nostro sensore ottico apre un mondo ricco di esperienze, dal creare immagini in movimento al poter campionare correttamente un segnale. La trattazione è ricca di riferimenti a vari modi di “vedere” la realtà che caratterizzano la conoscenza umana ed è attenta al “vedere come esperienza dell’uomo”. Il metodo scientifico è applicato correttamente e con evidente consapevolezza dei propri limiti, che vengono superati mettendo in gioco se stessi certi che la realtà, se adeguatamente interrogata, risponde svelando il significato.

La luce, “... general ministra e duce” della vita dell’uomo

La luce è senza dubbio il mezzo essenziale affinché l’uomo possa accedere al mondo che lo circonda. E’ l’entità che per eccellenza lo conduce alla vita. Tuttavia, dato questo suo “illimitato” potere, ha la capacità di ingannare in molte occasioni o, meglio, di indurre ad interpretare molti aspetti della realtà in modo differente da quello che effettivamente è. Da qui nasce l’illusione, dimensione con cui noi ci riportiamo continuamente. L’intento del nostro percorso è quello di approfondire questo specchio magico delle apparenze, che per lo più è dettato dalle limitazioni della fisiologia umana stessa e, in particolare, del nostro unico strumento di comunicazione con essa: l’occhio. Il processo di rielaborazione delle immagini infatti non inizia nel cervello, ma comincia a verificarsi già nella retina, dando vita ai primi esempi di distorsione della realtà.

Non va comunque interpretato solamente come una carenza: questa nostra sorta di limite alla potenza della natura ha permesso di far scaturire in noi un affinamento interiore, ossia la possibilità di interpretare le immagini che ci vengono presentate in un modo tutto personale, attraverso l’arte.

Ha inoltre dato l’impulso decisivo allo sviluppo tecnologico: se fossimo una sorta di macchina perfetta non potremmo apprezzare l’effetto che il cinema utilizza. E questo fenomeno ha senza dubbio permesso la nascita del mondo telematico, e quindi della società attuale, senza il quale essa non potrebbe esistere.

Dal vasto caleidoscopio di illusioni che si possono ricercare, abbiamo deciso di occuparci di un particolare effetto ottico, che ha da sempre affascinato noi e il mondo cinematografico stesso, in particolare nel passato, e che sfrutta il cosiddetto fenomeno dell’aliasing.

Pur essendo molto complicato nell’esplicazione, dato l’utilizzo di strumenti matematici non ancora in nostro possesso, abbiamo tentato comunque di darne una spiegazione, attraverso gli studi sul campionamento dell’emerito matematico e fisico Jean Baptiste Joseph Fourier.

La luce quindi, pur essendo un’entità quasi scontata per gli uomini, si è rivelata, attraverso i nostri studi, come una guida nella sopravvivenza quotidiana, di suprema importanza, una sorta di “general ministra e duce” della vita di ogni uomo. Con questo titolo, abbiamo deciso di riprendere la perifrasi dantesca riferita alla Provvidenza Divina contenuta nel canto VII dell’inferno in quanto nella sua concezione essa è il mezzo attraverso la quale il Divino si presenta, conducendo l’uomo nel cammino della vita.

La luce nella speculazione filosofica

Da fenomeno capace di affascinare l’umanità fin dai primordi, la luce è diventata nel corso del tempo oggetto di studio specifico, ponendosi al centro delle riflessioni di un pensiero umano, attratto soprattutto dalle le sue stupefacenti caratteristiche.

Si può sicuramente constatare, infatti, che la sua presenza è assolutamente necessaria per la vita sulla terra. Grazie al sole, cioè l’entità dotata di una componente evocativa più alta dal punto di vista simbolico, la propagazione della luce permette ad ogni essere vivente di nascere e crescere, più semplicemente di esistere; è quindi massima espressione delle energie positive del Bene. Ragion per cui, sin dagli albori delle società umane, essa è considerata manifestazione dell’essenza stessa del divino e fatta spesso oggetto di culto.

Fin dalle origini, assume così un ruolo centrale, costituendo il mezzo privilegiato che permette di entrare in relazione con il mondo. In particolare, quando gli uomini cominciano a sentire il bisogno di interpretare razionalmente la realtà, dando quindi vita al pensiero filosofico, il motivo della luce viene investito del significato più pregnante di espressione della stessa Verità. A tale proposito, si può ricordare che molti studiosi ricollegano il termine greco *sofòs* (cioè saggio) a *sa fès*, che significa propriamente “chiaro”, quindi esposto alla luce.

Il filosofo antico nel cui pensiero si coglie maggiormente la centralità del fenomeno della luce è senza dubbio Platone. Basti far riferimento al concetto chiave della sua speculazione, ossia il termine “idea”, che presenta innanzitutto una radice corrispondente a quella che si trova nel latino *video* e, naturalmente, nel verbo italiano *vedere*. Egli infatti incentra la propria riflessione sulla preesistenza, rispetto alla realtà, di modelli paradigmatici, le “idee” appunto, attribuendo così un ruolo decisivo alla dimensione del vedere. In questo senso, tuttavia, egli si rivolge all’aspetto soprasensibile della realtà, considerando non tanto la vista corporea, quanto gli occhi della mente. In coerenza con tutto ciò, il Bene, inteso quale vertice del processo dialettico in cui ogni idea converge, viene rappresentato mediante il sole, che nel celebre mito della caverna compare come punto di arrivo di un percorso allo stesso tempo salvifico e conoscitivo.

Lo sviluppo successivo delle dottrine filosofiche conterrà molti richiami al significato metafisico della luce, evidenti soprattutto nel Neoplatonismo. Anche il pensiero cristiano medievale non mancherà di sviluppare tale prospettiva, dato che il riferimento alla luce è presente nell’orizzonte mentale dei suoi principali rappresentanti attraverso i costanti riferimenti al testo biblico, imprescindibile fonte di ispirazione. A tale riguardo, basti citare il “Fiat lux” della Creazione, le epifanie del Divino nell’ambito dei due Testamenti (ad esempio il rovetto ardente, la trasfigurazione sul Tabor, l’ascesa dello spirito santo attraverso lingue di fuoco su Maria e gli Apostoli riuniti nel Cenacolo, la flogorazione sulla via di Damasco). Il tema della luce poi, recuperato secondo una prospettiva essenzialmente

platonica, diventa fondamentale per quanto riguarda la teoria agostiniana della conoscenza: "illuminazione" è infatti chiamata dal santo l'azione di Dio sulla nostra mente per renderla capace di cogliere la verità.

Nel Cristianesimo infatti il Bene supremo è identificato con la Trinità, e per tale motivo qualsiasi raffigurazione del Divino è circondata dalla luce, una propagazione sgargiante, abbagliante.

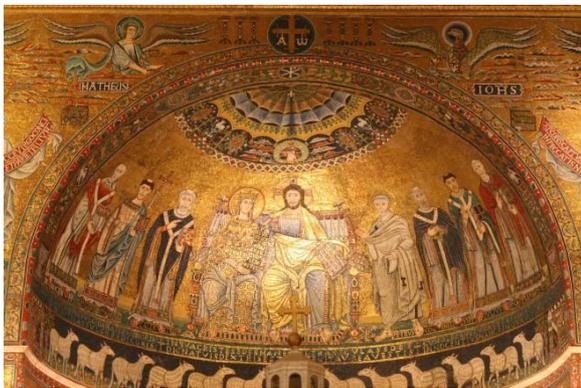
Anche Dante, nella *Commedia*, alla fine del suo difficile percorso attraverso i tre regni dell'oltretomba, quando giunge nell'Empireo, ne è accecato dallo splendore: "Come subito lampo che discetti/ li spiriti visivi, si che priva/ da l'atto l'occhio di più forti obbiettivi,/ così mi circonfuse luce viva,/ e lasciommi fasciato di tal velo/ del suo fulgor, che nulla m'appariva." (Par. XXXX, vv. 46-51). Il Paradiso è infatti spesso perifrasiato come "la cantica della luce", e questo aspetto è evidenziato in particolare nei canti XXX e XXXIII, i momenti culminanti dell'opera, in cui l'autore accede direttamente alla visione del "divino imperador". In questo senso, il tema della luce è al centro della rappresentazione dantesca della beatitudine, che si connota di un duplice significato: da un lato, l'ardore di carità; dall'altro, il lume di sapienza.

In seguito, con l'avvento della scienza moderna, il fenomeno viene analizzato dal punto di vista fisico da illustri personaggi del calibro di Isaac Newton e Christian Huygens. Vissuti tra XVII e XVIII secolo, essi sviluppano un serrato dibattito sulla natura stessa della luce. Considerata dallo scienziato inglese come una propagazione di minuscole particelle, viene interpretata da Huygens secondo un modello ondulatorio, che segue leggi assimilabili a quelle del suono. La concezione corpuscolare infatti non giustifica il verificarsi di alcune situazioni, come ad esempio la comparsa di bande di interferenza nel caso in cui un raggio venga fatto passare attraverso due fenditure. Con gli studi successivi di Thomas Young e Maxwell, fino a quelli più recenti di Plank ed Einstein si arriva a constatare che in realtà essa presenta entrambe le caratteristiche. Da ciò è derivato un decisivo impulso alla rivoluzione scientifica del XX secolo: l'introduzione della meccanica quantistica.

Ecco come la presenza di questo affascinante fenomeno, che permette alla natura stessa di manifestarsi, ha influenzato così radicalmente la vita dell'uomo, aprendo ad orizzonti sempre più vasti. Il tutto sottoforma di capacità congenita, quasi ovvia per l'essere umano, con la quale esso si rapporta sin dalla nascita: l'utilizzo della vista come strumento primario di osservazione e orientamento del mondo.

Arte e percezione

La vista è il mezzo attraverso cui possiamo percepire la realtà che ci circonda, i suoi movimenti, le trasformazioni delle sue parti e i colori che le animano. È il risultato di complesse strutture costituenti il nostro organo visivo, l'occhio. Tuttavia non bisogna soffermarsi puramente sull'aspetto meccanico-scientifico poiché l'atto in sé racchiude una componente più profonda che è l'interpretazione spontanea che ne deriva. Basti pensare a un meraviglioso panorama e di quanto esso possa influenzare i nostri pensieri e lo stesso stato d'animo. L'architettura per esempio ha preso vita dalle considerazioni attorno alla luce, gli edifici nascono in funzione di questa entità che si vuole catturare per tracciare un filo conduttore di generazione in generazione, di epoca in epoca. Pensiamo alle fessure delle piramidi o dei nuraghi, e alle proiezioni che i raggi del sole attraversandole creano: in base all'inclinazione rispetto all'asse terrestre evidenziano specifici punti di cui a noi è ancora oscuro il profondo significato. O anche facendo riferimento ai rosoni e alle vetrate delle chiese gotiche, si può ritrovare il valore simbolico della luce, che diffondendosi nella Dimora di Dio, diventa guida verso la salvezza. Così comprendiamo come sia stata oggetto di studio e interpretazioni per millenni. Ad essa si sono rivolti gli uomini, con sforzi appassionati, lasciando in secondo piano la dura lotta per la sopravvivenza. È su questa base che si è mossa anche l'arte della pittura, che studia la luce nei suoi vari comportamenti e accezioni. Dorata, bianca, divina, ha avuto ruolo di protagonista, anche per contrasto: il buio ne è la netta opposizione che accentua ancor più la sua importanza. L'obiettivo è quello di interagire con l'osservatore attraverso un linguaggio fatto di colori, giochi di luce, penombre, e simboli. La luce, che permette di assaporare la magia e la bellezza delle opere, rappresenta l'elemento-chiave dell'arte nella sua totalità in quanto assume un valore allegorico.



Il Medioevo ne è un esempio esplicito: determinante fu il contrasto apportato tra luce, sinonimo di bene illimitato, e buio, indice di peccato e negatività.

Suggestivi sono i vari mosaici pervenuti dall'arte bizantina la cui brillantezza è ottenuta dal riflesso della luce sui tasselli d'oro e la presenza di personaggi biblici dimostra l'intento degli artisti di trasmettere valori di natura religiosa; da qui la presenza di un'atmosfera luminosa caratterizzerà le figure sacre in tutti i secoli successivi.

Non serve allontanarsi di molto per incontrare la versatile personalità di Leonardo da Vinci che efficacemente abbinò la precisione delle scienze matematiche e la vasta conoscenza della anatomia umana. Rispettivamente ci si

riferisce all'utilizzo della prospettiva aerea per quanto concerne l'idea dell'infinito e della distanza e all'effetto del completamento delle immagini attuato da un processo del cervello; è una sua caratteristica infatti quella di non racchiudere le immagini in contorni definiti per garantire la libertà di interpretazione dell'osservatore. Per ottenere gli effetti desiderati l'artista gioca sulle tonalità di colori anche identici ma varianti per intensità grazie alla complicità della luce.



Madonna dei Fusi



Con Caravaggio la luce assume un ruolo-guida per l'osservatore poiché dirige la sua attenzione su quella che è la vera essenza del quadro. Ne "Il bacio di Giuda" l'artista vuole portarci a contemplare l'atto del tradimento verso Cristo riprendendo il motivo simbolico-religioso della luce, associata a un evento del testo biblico.

Il bacio di Giuda

Relativamente a quanto detto è lecito definire la luce "padrona discreta" dell'espressione dell'uomo, ossia dell'arte ma pure del mondo intero essendo la causa efficiente di tutto ciò che ha esistenza; tuttavia non è una forza tiranna che decide per noi, essa è perciò discreta.

Cinema è luce

Un'altra forma d'arte che si è sviluppata notevolmente a partire dal 1895, anno in cui fu introdotta da Thomas Edison, è la cinematografia. Il termine cinematografia deriva dal greco "*kinema*", movimento, e "*graphie*", scrittura. Possiamo definirla come tecnica della fotografia multipla per ritrarre (in una pellicola o film) una successione di immagini in movimento e della riproduzione di esse. La cinematografia si basa sul principio della persistenza delle immagini sulla retina dell'occhio umano e su quello della fusione delle immagini successive operata principalmente dal cervello. Gli elementi fondamentali sono la macchina da presa (apparecchio fotografico dotato di dispositivi automatici per l'avanzamento della pellicola negativa vergine da impressionare) e la macchina da proiezione di cui parte essenziale è il proiettore, per la proiezione delle immagini su uno schermo. La macchina da presa è formata essenzialmente da quattro elementi ovvero da una camera oscura, da un meccanismo di avanzamento e guida della pellicola, da un otturatore e da un sistema ottico. Si usano obiettivi di varia lunghezza focale. L'otturatore intercetta la luce nel periodo di sostituzione di un fotogramma con il successivo. La pellicola cinematografica è formata da una serie di fotografie statiche (fotogrammi) riprese in rapida successione. La cinecamera è uno strumento cinematografico e quando esso riprende, l'otturatore ruota, aprendosi 24 volte al secondo, per esporre ogni volta un fotogramma. La luce è il fattore fondamentale nella produzione di un film in quanto essa suscita attraverso i vari effetti le sensazioni ed emozioni che colpiscono lo spettatore. Girare un film equivale appunto a scrivere attraverso la luce con il fine di dare un significato particolare a ogni singola immagine. A dimostrazione nel connubio inscindibile tra arte pittorica e cinema vi è una citazione del grande maestro cinematografico Federico Fellini: "*Il cinema è un'arte che non ha nulla a che fare con le altre arti. Ma è imparentato geneticamente con la pittura, perché l'uno e l'altra non possono esistere senza la luce. L'immagine è luce. Il cuore di ogni cosa, sia per il cinema che per la pittura, è la luce. Nel cinema la luce viene prima del soggetto, della storia, dei personaggi, è la luce che esprime quello che un cineasta vuole dire. Nella pittura la luce viene prima del tema, della tavolozza, dei colori, è la luce che esprime quello che un pittore vuole rappresentare. Qualche critico ha detto che io sono un regista "pittorico", ma non poteva farmi un elogio più grande ...*". Attraverso la luce ogni istante raffigurato si arricchisce di un sapore proprio, di uno strato di bellezza e autenticità che rende il film assoluta opera artistica. Il regista è l'artista del mondo che crea attraverso le scene e solo grazie alle varie interpretazioni luminose lo spettatore viene proiettato in questo nuovo mondo. L'atmosfera che veleggia per tutta la durata del film non è altro che il comporsi di effetti luminosi atti a

emozionare e a ricreare ciò che il regista vuole trasmettere. La luce in questa forma di arte è semplicemente il tutto, il fondamento, è l' *archè* senza il quale non ci sarebbe cinema. Il progresso nelle tecniche cinematografiche è in continuo sviluppo. Grandi innovazioni si ebbero con il passaggio dal cinema muto a quello sonoro e in seguito dal bianco e nero al colore. Tuttora si sta sviluppando la tecnica digitale di produzione. Un altro campo in continua evoluzione è quello riguardante gli effetti speciali che sono elaborazioni di immagini per mezzo di computer. La presa cinematografica avviene in ambienti naturali (esterni, interni) e in appositi *teatri di posa*; spesso con l'ausilio di apparecchi di illuminazione (lampade), quasi sempre indispensabili per le riprese in interno, ma usati altresì nelle prese ove la luce solare costituisce la principale sorgente luminosa. Esistono vari tipi di lampade: ad arco, ad incandescenza, con diffusori a specchi sfaccettati, con specchio parabolico. Tali lampade sono indispensabili per la creazione dei vari effetti luminosi che intercorrono durante tutta la durata di un'opera cinematografica.

L'occhio: la nostra finestra sul mondo

L'occhio, con i suoi significati reali e simbolici, occupa di continuo il pensiero dell'uomo ed è indubbio il ruolo che esso gioca, non solo nella vita fisica, ma anche spirituale. Ogni forma che ne è prossima può diventare essa stessa un occhio: questa tendenza istintiva ci fa vedere occhi ovunque. Il cielo è un volto luminoso: il sole, la luna e le stelle sono i suoi occhi. Il globo terrestre non è forse un occhio enorme che erra nello spazio? La terra è coperta da occhi: sono le acque dei laghi, degli stagni, delle sorgenti, del mare. Sono i pozzi, le grotte, i crateri dei vulcani. Occhi sono alcuni fiori, esistono piante che ne prendono il nome come il garofano (oeillet). Occhi sono gli ocelli degli animali, delle farfalle, del pavone e alcune conchiglie.

Vedere significa prendere coscienza dell'ambiente: equivale a sapere, possedere il mondo, dominarlo.

L'occhio è davvero il più prezioso fra gli organi di senso. Dipende strettamente dalla luce che riceve, fonte della vita stessa, e pertanto è l'organo essenziale della vita dell'uomo.

È un recettore in quanto raccoglie gli stimoli luminosi che lo colpiscono, ma è così altamente differenziato da acquistare la dignità di organo, dal momento che gli altri recettori sono costituiti solo da semplici terminazioni nervose.

Il bulbo oculare è simile a una grossolana sfera del diametro di 22,4 mm e risulta racchiuso in tre tonache che, dall'esterno verso l'interno, sono: la sclera, robusta e fibrosa che nella parte anteriore dà luogo alla cornea, la coroide, vascolare e ricca di pigmenti, e la retina, la parte più nobile dell'organo poiché contiene le terminazioni nervose che, una volta eccitate, trasmettono l'impulso direttamente dal nervo ottico fino al cervello. Ivi l'immagine del campo visivo sarà rielaborata, dal momento che si forma esattamente sulla retina ma capovolta.

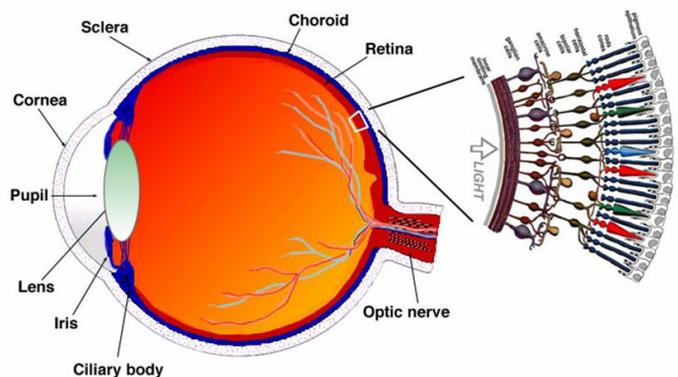
La struttura e il funzionamento dell'occhio umano spesso sono efficacemente paragonati a una macchina fotografica. I raggi luminosi infatti devono percorrere, prima di raggiungere la retina, un sistema di lenti costituito dai cosiddetti mezzi diottrici; dall'esterno all'interno essi sono: la cornea, l'umor acqueo, ovvero un liquido che riempie la camera anteriore dell'occhio, il cristallino, simile a una lente biconvessa posta immediatamente dietro l'iride, ed infine il corpo vitreo, cioè una sostanza trasparente e gelatinosa contenuta nella cavità vitreale che mantiene la consistenza e la forma del bulbo.

L'iride funge da diaframma ad apertura variabile, si restringe e si dilata a seconda che l'oggetto osservato emetta o rifletta una radiazione luminosa più o meno intensa. Questa formazione possiede una soluzione sempre circolare: la pupilla, di diametro compreso tra i 2 e gli 8 mm, che regola la quantità di luce che penetra nell'occhio.

La messa a fuoco delle immagini nell'uomo è possibile grazie alle variazioni del potere di rifrazione del cristallino, che può essere contratto o disteso ad opera dei muscoli ciliari. L'intervallo di variazione va da 1,7 mm (massima contrazione) a 23 mm (cristallino accomodato alla visione all'infinito).

Il punto focalizzato sulla retina da un occhio normale senza alcuna accomodazione è detto punto remoto, si trova oltre 6 metri a distanza infinita, dal momento che riusciamo a mettere a fuoco la luna e le stelle. Quando si osservano punti vicini deve intervenire il potere di accomodamento del cristallino, per ridurre la distanza focale del sistema ottico. La possibilità di accomodamento del cristallino è limitata, pertanto esiste una distanza minima, al di sotto della quale non è possibile mettere a fuoco gli oggetti, chiamata punto prossimo. Questo si trova a circa 15 cm dalla cornea, ma tende ad allontanarsi con il trascorrere degli anni: è un fatto fisiologico che prende il nome di presbiopia.

Le due palpebre rappresentano l'otturatore dell'occhio: quando sono chiuse arrestano la luce, quando sono aperte questa ha via libera per colpire la retina.



La retina ha una struttura anatomica molto complicata. Contiene non solo recettori ma anche altre cellule che hanno il compito di trasmettere gli eccitamenti verso i centri nervosi superiori.

La luce è lo stimolo fisico che agisce sulla retina producendo l'eccitamento dei recettori. La retina è sensibile alle lunghezze d'onda comprese tra 760 e 390 nm. In realtà l'occhio sarebbe sensibile anche alle onde ultraviolette (390-360nm) che però vengono completamente assorbite dal cristallino, non riuscendo quindi a stimolare la retina. Si tratta tuttavia di una limitatissima porzione dello spettro di vibrazioni elettromagnetiche. Il che è un bene, altrimenti noi saremmo completamente abbagliati dalla luce e non ci sarebbe più distinzione tra notte e giorno.

Della retina si considerano due foglietti: uno esterno pigmentato a contatto con la coroide e uno interno a contatto con il vitreo, denominato anche retina propriamente detta. In quest'ultima si trovano la cellule recettrici, ovvero i coni e i bastoncelli, che raccolgono lo stimolo luminoso e lo trasformano, attraverso reazioni biochimiche, in eccitamento convogliato al nervo ottico. La papilla del nervo ottico, attraverso la quale passano anche i vasi, rappresenta una zona cieca della retina in quanto sprovvista di cellule vive. Dal nervo ottico gli impulsi giungeranno a una regione del cervello nota come chiasma ottico. Qui i neuroni che portano i segnali provenienti dalla parte sinistra della retina di ciascun occhio si incontrano e proseguono paralleli fino alla parte sinistra del cervello. Analogamente, i segnali provenienti dalla parte destra di ciascuna retina viaggiano uniti verso la parte destra. Gli impulsi arrivano poi a un "ripetitore" situato nel talamo, da dove saranno trasmessi alla corteccia visiva, nella parte posteriore del cervello. La corteccia visiva primaria, insieme a un'area vicina, funge da "ufficio postale" in quanto seleziona, smista e integra le molte informazioni portate dai neuroni. Una terza area percepisce i contorni e i movimenti. Una quarta area riconosce sia la forma che il colore, mentre una quinta aggiorna di continuo mappe di dati visivi per seguire i movimenti. Si suppone che ci siano ben 30 aree cerebrali diverse che elaborano le informazioni visive raccolte dagli occhi.

Tornando alle cellule vive sappiamo che sono costituite da una parte esterna a forma di cono o bastoncello (da cui il nome) e una sottile parte interna contenente il nucleo.

La retina umana contiene 10^8 bastoncelli e $3 \cdot 10^6$ coni. I bastoncelli racchiudono un pigmento detto rodopsina sensibile alle bassissime intensità di illuminazione, consentono perciò la visione al semibuio ma restituiscono un'immagine priva di colore. I coni sono invece suddivisi in tre tipi, contenenti tre diversi pigmenti, che assorbono lunghezze d'onda corte, medie o lunghe. Sono concentrati nella macula centrale che corrisponde al punto focale dell'apparato diottrico dell'occhio e sono predisposti alla visione diurna e del colore, ma richiedono intensità luminose di un certo valore. Un solo fotone genera infatti in un bastoncello un impulso di corrente di circa 10^{-12} A, mentre un fotone in un cono genera un impulso pari a soli 10^{-14} A.

Questo fatto spiega l'impressione di accecamento che si constata quando si passa da un ambiente molto illuminato a uno poco illuminato: i coni diventano insensibili ed è necessario un certo tempo affinché i bastoncelli assumano il ruolo primario. Coni e bastoncelli conservano lo stato di eccitazione per un periodo di circa $1/10 - 1/15$ di secondo ed è per questo motivo che l'occhio umano non può distinguere movimenti che si svolgono con frequenza molto elevata, come ad esempio il moto della ruota di un'automobile o il battito d'ali di una vespa. D'altra parte questo fatto consente la visione continua di fenomeni a carattere impulsivo: è sufficiente che questi avvengano a frequenza maggiore dei 15 eventi al secondo perché si produca la sensazione di continuità.

Un altro fenomeno collegato strettamente alla stimolazione retinica è quello delle immagini postume, dovuto al fatto che nella vista intercorre un breve periodo tra la presentazione dello stimolo e la comparsa della sensazione. Quest'ultima non ha un andamento costante, ma presenta inizialmente un massimo e poi diminuisce di intensità. D'altra parte la sensazione luminosa non dilegua nel momento in cui si rimuove lo stimolo, ma persiste dopo che quest'ultimo è stato allontanato: la comparsa di immagini postume, positive e negative, è espressione di questo fatto. Con il nome di immagine postuma positiva si indica la persistenza della sensazione visiva per una frazione di secondo (per lo più $1/15$ di sec) dopo che la stimolazione è finita: l'immagine postuma positiva mantiene la colorazione e i medesimi rapporti di luce e ombra dell'oggetto. Così quando muoviamo un tizzone acceso davanti ai nostri occhi abbiamo la sensazione di un arco luminoso e non di un punto luminoso. Analogamente notiamo come continua la luce prodotta dai tubi fluorescenti (al neon) mentre in realtà è ritmica.

Come già accennato anche la cinematografia si basa sulla persistenza delle immagini visive. Con la cinepresa si scattano numerosi fotogrammi di un corpo o di un oggetto in movimento e i fotogrammi che si susseguono alla frequenza di 24 o 16 persistono per un piccolo lasso di tempo nell'osservatore, creando l'illusione del movimento. Il fenomeno della persistenza delle immagini sulla retina viene sfruttato nello stesso modo per la realizzazione dei film di animazione.

Per quanti riguarda l'immagine postuma negativa essa consiste nella persistenza di una sensazione visiva dopo che lo stimolo luminoso è cassato. In tale caso però non conserva più il colore originale; infatti l'oggetto appare nero se se era bianco, verde se era rosso, giallo se blu e viceversa. Le immagini postume negative insorgono solo dopo che lo stimolo luminoso è stato fissato per un certo tempo, almeno qualche decina di secondi. Spostando il bulbo oculare esse non si muovono; ciò fa pensare che si tratti di un fenomeno di natura centrale, probabilmente correlato all'affaticamento dei recettori.

Il nostro esperimento: l'aliasing

Di questi tempi, soprattutto attraverso i mezzi telematici quale internet, ci vengono presentate ogni sorta di bizzarre

illusioni ottiche. Tuttavia, nella trattazione di quest'ampio ambito di ricerca, abbiamo prediletto un singolare effetto ottico che ha dei continui riscontri nella quotidianità.

Guardando infatti i cerchioni di un'auto in corsa, ci è capitato spesso di osservare che ad un certo punto l'immagine sia ferma o addirittura torni indietro, mentre invece la macchina continua ad accelerare.

Quello che inizialmente sapevamo era soltanto la nomenclatura di tale atto: *aliasing*. Analizzando la radice latina del termine, *alias*, cioè "altro", potevamo solamente riscontrare che si trattava di una sorta di inganno della vista, ma c'era quindi uno studio particolare da far riemergere. Di conseguenza, abbiamo voluto andare a fondo su questo strano effetto.

Ebbene, questo singolare fenomeno è stato anche largamente sfruttato nella cinematografia, in particolare di genere western, e senza dubbio è questo l'aspetto che ci ha definitivamente convinto a svelare il misterioso arcano.

Oltretutto, all'inizio della nostra ricerca, nella rete globale non abbiamo trovato quasi alcun riscontro: ci sono pochissimi documenti che trattano dell'argomento, e ciò ha forse ancor più motivato il gruppo a continuare quella che era diventata quasi una sorta di sfida con noi stessi. Ed essendo tale, non poteva essere priva di complicazioni.

Bisogna dire infatti che si è rivelato assai arduo da ricreare in laboratorio, o meglio, trovare una modalità attraverso la quale potesse essere adeguatamente studiato, senza ricorrere a strumenti matematici troppo complessi. Il primo scoglio è sorto quindi nel reperire i materiali con cui effettuare l'esperimento: siamo passati prima da ruote di bicicletta alimentate da trapani, poi a motorini a corrente continua "fai-da-te" (abbiamo dovuto costruire un circuito elettrico con nozioni di elettrotecnica tendenti a zero!), ma nulla faceva al caso nostro. Noi difatti dovevamo ottenere un moto circolare uniforme a frequenze variabili, per riuscire ad osservare a che frequenze la nostra vista riusciva a cogliere il risultato e a verificarlo al variare della frequenze stesse.

Dopo numerosi tentativi falliti abbiamo finalmente trovato la soluzione: abbiamo deciso di utilizzare un ventilatore dotato di potenziometro.

Dunque si è potuto cominciare l'esperimento che ricreasse il fenomeno in laboratorio. Per prima cosa però è stato necessario tarare il potenziometro cosicché ad ogni tacca corrispondesse una frequenza precisa e così da conoscere la velocità delle pale rotanti in dati istanti (dopo che la velocità si fosse stabilizzata al cambiamento di potenza fornita). Per operare in tal modo abbiamo utilizzato lo stroboscopio, uno strumento apposito per la misurazione di frequenze: nel momento in cui la frequenza delle pale fosse stata la stessa indicata sullo schermo, allora si dovevano vedere ferme. Ne è seguita una tabella, in cui abbiamo riportato le misurazioni, la media e l'errore dato dai nostri occhi (ogni persona percepisce con frequenze leggermente differenti) e dagli strumenti stessi. L'operazione successiva consisteva nel capire a quali frequenze si verificasse l'aliasing, ossia quando i nostri occhi osservavano le pale muoversi prima in avanti nel senso di rotazione, poi fermarsi per tornare indietro. Per fare questo abbiamo quindi cercato di evidenziare le quattro pale in diversi modi: al primo tentativo abbiamo usato della carta rifrangente e poi dei led luminescenti, ma lasciavano entrambi una scia di luce causata dalla permanenza delle immagini sulla retina dell'occhio. Si è quindi cambiato tattica e pensato a corpi opachi: abbiamo applicato su una pala, colorata di nero, un tondino rosso, poi bianco, poi addirittura colorato a metà, ma a basse frequenze si distingueva perfettamente, mentre facendo crescere la velocità di rotazione con il potenziometro si poteva soltanto osservare una circonferenza del colore del bollino. Insomma in nessun caso si poteva avere un risultato positivo. Solamente la parte più vicina al perno mostrava l'effetto cercato ma era doveroso metterla in evidenza. Casualmente, notando una ruota per un altro esperimento in laboratorio, si è visto che anche a piccole velocità si presentava il fenomeno! Quindi l'obbiettivo era per il momento quello di trovare le differenze con il "nostro" ventilatore; evidente era la necessità, come per le ruote delle auto, di avere molti raggi per l'osservazione. Così i pallini sono stati fissati su ogni pala e anche ridotti di dimensioni per non confondere la scia nel movimento. Inoltre abbiamo notato come cambiasse l'effetto in base alla distanza dei bollini dal centro; questo risultato praticamente era la dimostrazione di $V=\omega r$ (con V velocità tangenziale, ω velocità angolare e r distanza dal centro) per cui la velocità percorsa sulla traiettoria circolare dipende dal raggio. Importante poi per l'esperimento è provare con alte velocità, quindi frequenze. In questo caso infatti l'errore dei nostri occhi è maggiore, perché maggiore è il numero di giri compiuti nello stesso intervallo di tempo iniziale, quando ancora erano visibili i segnali. Il fenomeno è percepibile proprio in questa situazione. Allora è stato possibile osservare a quale tacca del potenziometro questo accadeva e a quale frequenza corrispondeva.

Si è già detto che ciò che vediamo in queste condizioni è motivo di un errore della nostra vista; le immagini che riceviamo dal mondo esterno infatti si rinnovano ogni quindicesimo di secondo; questo è anche l'intervallo di tempo che separa un'immagine dall'altra; la nostra natura quindi non ci permette di vedere l'intero spostamento di un corpo rotante nel caso assuma frequenze più grandi di 15Hz, a meno che non siano multiple dell'unità base. Quest'ultima osservazione deriva dal fatto che in tal caso, nell'intervallo di tempo di osservazione, le pale hanno percorso solo circonferenze complete e dovremmo vederle ferme.

Tutti i dati di seguito fanno riferimento alle frequenze date dalle tacche del potenziometro:

Tacche	Freq										Media	Scarto q.m.	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X			
10	151	145,2	147	141,1	143,4	149	150	145,7	148,2	147,6	⇒	146,8	3,0400292
11	151,5	148,9	151,1	146	147,7	148	150,3	149	147,9	151		149,1	1,7970346
12	153,4	154,5	156,7	152	153,9	154,1	155	154,9	156	153,4		154,4	1,3568346
13	158,5	159,9	162,4	157	160,2	161	160	158,9	161,4	162		160,1	1,6686988
14	165,8	164,8	168,2	161,2	166	167,5	165,8	167,5	163,7	165,9		165,6	2,0522075
15	170,4	171	172,9	173,5	169,8	171,6	173	170,7	171,9	172,7		171,8	1,2554326
16	175	174	176,5	174,3	176,8	174,4	176,1	175,6	174	173,9		175,1	1,1097547
17	178,1	179,6	179,5	180,1	180,8	179	179,4	178,8	180,2	178		179,4	0,8996913
18	187,3	188,3	186,8	189	186,2	185,7	184,6	187	188	189,1		187,2	1,4499042
19	200,1	201,8	202,2	199	198,7	202,8	200	201,5	199,9	200,7		200,7	1,3695498
20	210,3	208,9	209,6	207,4	209	209,1	209,6	208,4	210,2	207,9		209,0	0,9418658

Sensibilità strumento(0,1) ⇒ Si consideri l'errore accidentale

Dalle varie osservazioni abbiamo rilevato le frequenze alle quali si verifica l'aliasing:

Tacche	Cosa succede? si vedono le pale...
1-10	⇒ ..andare avanti
11-14	⇒ ..tornare indietro
15	⇒ ..rimanere ferme
16-20	⇒ ..nuovamente proseguire in avanti
21-22	⇒ ..per poi ritornare indietro
23	⇒ ..star ferme
24-27	⇒ ..procedere in avanti

I bollini bianchi evidenziati sulle pale del ventilatore erano 4.

Fissando un solo punto sul ventilatore, in un giro lo vedremo attraversato quattro volte dai bollini. Fino a quando la frequenza non supera 7,5Hz (metà di quella di campionamento) saremo in grado di distinguere perfettamente il movimento. Se accresciamo la velocità e quindi la frequenza con il potenziometro, nello stesso punto ogni bollino passa più di una volta, le pale sembreranno rallentare e tornare indietro poiché la frequenza di campionamento dell'occhio non può indubbiamente variare ed è minore del doppio della frequenza dei punti. Questo è proprio il fenomeno dell'aliasing cercato. Quando si porterà la frequenza delle pale a 15Hz l'occhio le vedrà ferme; aumentando ulteriormente il numero di giri al secondo le pale sembreranno procedere nuovamente in avanti fino a che non si ripresenterà la stessa situazione, ma a frequenze multiple di quelle di partenza. Questo è ciò che è emerso dai dati riportati nella tabella sovrastante.

Per studiare al meglio questa manifestazione ci siamo avvalsi del significativo contributo di una zelante professoressa del nostro istituto ed è stato così "possibile" affrontarla sul piano teorico.

Esplicazione teorica

L'aliasing è un fenomeno che ci riguarda da vicino. Esso, infatti, viene riscontrato in diversi ambiti; noi ci siamo soffermati principalmente su quello visivo, ma non va dimenticato che riguarda anche un'altra nostra sfera sensoriale, quella dell'udito.

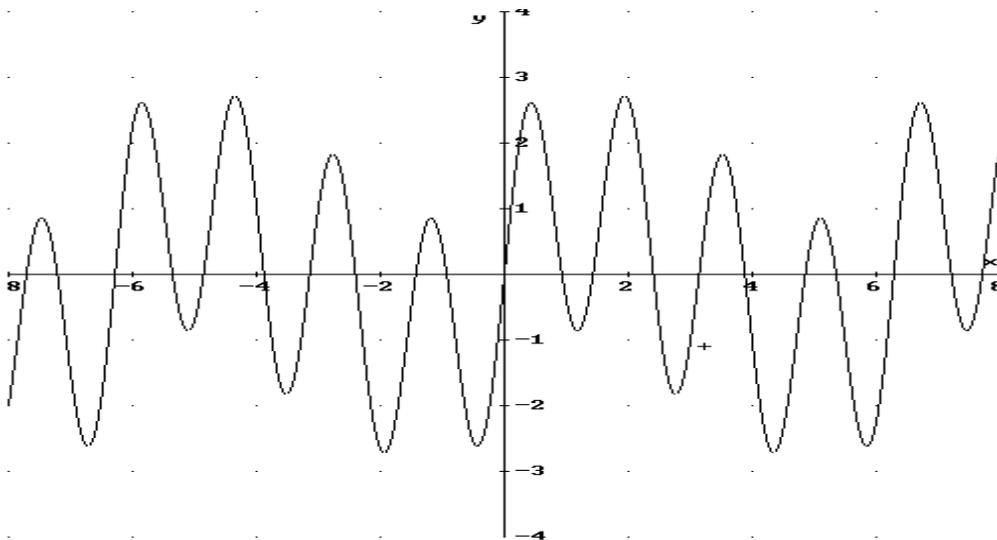
Il campo dell'acustica si regge sul Teorema di Nyquist il quale afferma che un corretto campionamento lo si ha quando la frequenza di campionamento utilizzata è almeno doppia della massima frequenza presente nel segnale da campionare. L'aliasing quindi consiste in un errore di campionamento delle frequenze; queste, introdotte in un dispositivo, non possono essere correttamente interpretate, perciò non è possibile ricreare il segnale originale. Si

crea così una distorsione armonica e per ovviare a questo problema sono stati creati degli appositi apparecchi detti anti-aliasing.

Ogni segnale è esprimibile come sovrapposizione di infiniti segnali periodici "monocromatici" (cioè semplici sinusoidi/cosinusoidi) ciascuno con una precisa frequenza, multipla del segnale di partenza; ognuno di tali segnali è "pesato" con un opportuno peso c_n . L'insieme dei coefficienti c_n si dice "spettro del segnale". Ciò viene studiato attraverso la sintesi di Fourier. Questa esprime un segnale come somma di componenti monocromatiche di frequenza multipla rispetto a quella del segnale dato. L'analisi di Fourier è il procedimento che permette di passare dal segnale continuo al suo spettro cioè dal dominio del tempo a quello delle frequenze; in altri termini, anziché rappresentare il segnale mediante il suo andamento nel tempo, lo si caratterizza in base ai pesi dei segnali monocromatici che lo compongono, ciascuno di una particolare frequenza.

Per esempio il segnale rappresentato in figura 1 è un segnale periodico descritto dalla funzione $y=\sin(x)+0,3\sin(2x)+2\sin(4x)$. Il segnale ha periodo $T=2\pi$ e quindi frequenza $f=1/2\pi$. Le sue componenti hanno rispettivamente periodo 2π , π , $\pi/2$ (tutti sottomultipli di T), dunque frequenze $1/2\pi$, $1/\pi$, $2/\pi$ (multiple di f); hanno inoltre peso 1; 0,3; 2.

Figura 1:



La sintesi di Fourier, ovvero come si determina la trasformata di Fourier di un segnale, è molto difficile dal punto di vista matematico e quindi ci siamo limitati ad una generale comprensione.

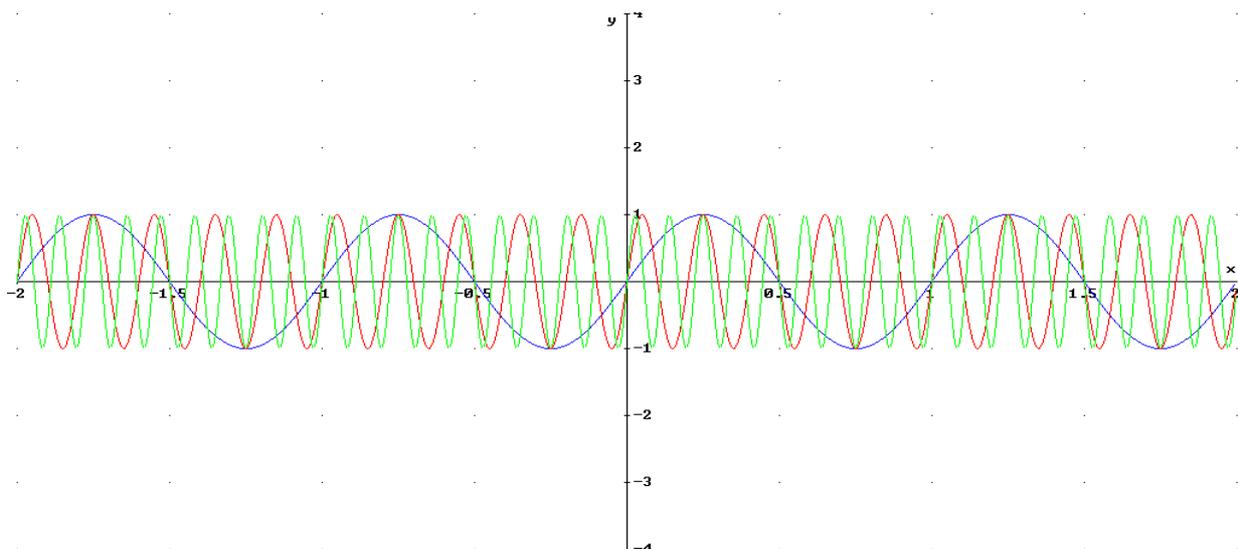
Il problema del campionamento

L'uso di qualsiasi strumento di rilevazione (compresi occhio, telecamere, ecc.) implica la necessità di trasformare un segnale analogico (continuo nel tempo) in un segnale digitale (discreto), poiché solo questo tipo di segnale può essere elaborato da uno strumento reale. Il campionamento è il procedimento che consiste nel rilevare, a intervalli di tempo regolari T_c , i valori assunti dalla funzione $f(t)$ che rappresenta il segnale da studiare. A partire dai dati rilevati mediante campionamento si cerca di ricostruire, mediante la sintesi di Fourier la funzione che rappresenta il segnale di partenza, o per lo meno una sua approssimazione. Possono sorgere dei problemi quando un intervallo di campionamento T_c troppo grande (ossia una frequenza di campionamento f_c troppo piccola) può portare a ricostruire una funzione molto diversa da quella assegnata in partenza.

In figura 2 sono rappresentate le funzioni $y=\sin(2\pi x)$, $y=\sin(10\pi x)$, $y=\sin(18\pi x)$, di periodo rispettivamente $T=1s$, $T=5s$, $T=9s$ (ogni secondo si ripetono rispettivamente 1 ciclo, 5 cicli, 9 cicli. Quindi frequenze 1 Hz, 1/5 Hz, 1/9 Hz.

Un campionamento con $T_c=0,25s$, ossia con $f_c=1/0,25\text{ Hz}=4\text{ Hz}$, rende indistinguibili tra loro i 3 segnali. Un campionamento con $T_c=0,125s$ (metà del precedente, quindi frequenza di campionamento doppia) permette di distinguere il terzo ma non i primi due tra loro.

Figura 2:



L'aliasing è l'errore che si verifica quando il campionamento di un segnale porta a ricostruire una funzione che descrive un segnale diverso rispetto a quello di partenza. L'errore di aliasing è dovuto generalmente a un T_c troppo grande, ossia ad una f_c troppo piccola, ed è irreversibile. Nel caso di figura 2, il cercare di ricostruire il segnale rappresentato dalla funzione $y=\sin(10\pi x)$ tramite un campionamento con $T_c =0,25s$ ($f_c =4$ Hz) porterebbe inevitabilmente a un errore di aliasing perché per "economia di calcolo" la funzione ricostruita tramite sintesi di Fourier sarebbe semplicemente $y=\sin(2\pi x)$, la più semplice che rispetti i dati campionati.

Per lo stesso motivo, un campionamento del segnale in figura 1 mediante intervallo $T_c =\pi/4$ porta a commettere lo stesso errore: si ricostruisce la funzione $y=\sin(x)$.

Per prevenire l'errore di aliasing tipicamente si sceglie una frequenza di campionamento $f_c >2f_M$, dove f_M rappresenta la massima tra le frequenze delle varie componenti del segnale. Ciò equivale a dire che l'intervallo di campionamento T_c deve essere meno di metà del più piccolo tra i periodi delle componenti del segnale. Questo garantisce che vengano distinte tutte le componenti del segnale (teorema del campionamento di Shannon).

Nel caso di figura 1, un campionamento con $T_c <\pi/8$ garantisce che la ricostruzione in sintesi di Fourier corrisponda alla descrizione del segnale di partenza.

L'occhio è uno strumento di rilevazione con un intervallo di campionamento $T_c =1/15s$, ossia circa 0,7 s, quindi frequenza $f_c =15Hz$. Il meccanismo della visione, un po' come il procedimento matematico nella sintesi di Fourier, cerca naturalmente la risposta "più semplice" per una sorta di "economia di ragionamento", il che talvolta induce in un errore d'interpretazione. Poiché il dato $T_c=1/15s$ è fisiologico e quindi non può essere modificato, il nostro lavoro è stato quello di osservare per quali frequenze si ottiene l'aliasing nel moto della ruota. Abbiamo rilevato 2 tipi di errore:

La ruota appare ferma: questo accade quando a ogni "campionamento" l'occhio vede nello stesso punto l'estremità di un raggio. Dovrebbe succedere se la ruota gira a frequenze uguali o multiple di 15 Hz, cioè nel caso in cui ad ogni "campionamento" si trovi nel punto osservato l'estremità del medesimo raggio, se questo è contrassegnato. Se invece nessuno dei 4 raggi è stato in qualche modo distinto dagli altri, essi appaiono tutti uguali, per cui lo stesso effetto si dovrebbe avere per frequenze uguali o multiple di 15/4 Hz, cioè se ad ogni campionamento si trova nel punto osservato l'estremità di uno qualsiasi dei raggi.

La ruota sembra girare all'indietro: succede se ad ogni campionamento l'estremità del raggio ha compiuto *quasi* un giro completo (se c'è un raggio contrassegnato), oppure *quasi* un $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{4}$ di giro (se i raggi sono indistinguibili). Per "economia di pensiero" la soluzione più semplice è pensare che in "poco" tempo la ruota abbia percorso un "piccolo" angolo all'indietro, piuttosto che un "grande" angolo in avanti (e infatti la rotazione all'indietro dovrebbe apparire molto più lenta di quanto non sia quella effettiva in avanti). Teoricamente dovrebbe accadere per frequenze "poco" più piccole dei multipli di 15 Hz o di 15/4 Hz.

Il meccanismo della visione attuato dall'occhio induce a pensare all'immenso spazio che nella nostra mente viene dato all'interpretazione. Il processo ha luogo infatti già a partire dalla retina, che è considerata un prolungamento del cervello, essa elabora i dati della realtà circostante: grazie al suo intervento la coscienza umana può poi assemblare la sequenza di percezioni e dare loro un significato. È anche per questo che l'uomo si distingue rispetto agli animali; egli riceve impulsi, ma non li accetta per come sono e vuole interpretarli, vuole trovarvi il fondamento di tutta la sua esperienza. Per questo paragona e confronta i dati, sempre pronto a cogliere il meraviglioso per farlo proprio e rinchiuderlo nello scrigno del tesoro più grande: il ricordo, che è solo suo e nulla o nessuno può rubare. Le immagini che scegliamo di vedere diventano così lo specchio della nostra persona, della nostra anima, dei nostri sentimenti: l'occhio è ciò che rende possibile questo continuo fluire di sensazioni, che ci toccano nel profondo fino ad arrivare al cuore.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

“Il simbolismo dell'occhio” di W. Deonna
“Fisiologia umana” vol. I di Gianguido Rinaldi ed Ermanno Manni

<http://www.audiomaster.it/glossario/aliasing.htm>
<http://outofthevortex.splinder.com/tag/bioingegneria>

Il resto del materiale da cui abbiamo attinto nei vari ambiti disciplinari ci è stato fornito dalle lezioni di alcuni docenti del nostro istituto