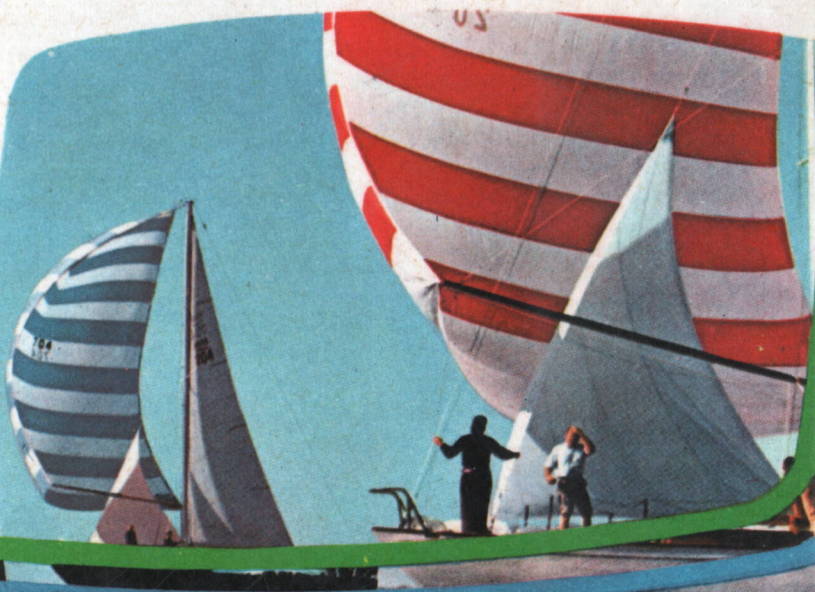




1

CORSO DI TELEVISIONE A COLORI

NTSC
PAL
SECAM



COORDINATO DA ALESSANDRO BANFI

CORSO INTEGRALE
DI
TELEVISIONE A COLORI

IN 8 VOLUMI

CORSO INTEGRALE
DI
TELEVISIONE A COLORI

Coordinato da Alessandro Banfi

CON LA COLLABORAZIONE DI

ANTONIO NICOLICH

NATALE STUCCHI

HENRY SALAN

DONALD S. FLEMING



EDITRICE

MILANO

CORSO INTEGRALE
DI
TELEVISIONE A COLORI

TUTTI I DIRITTI RISERVATI
ALLA EDITRICE IL ROSTRO

©

CON LA COLLABORAZIONE DI
ANTONIO NICOLINI
NATALE STUCCO
HENRY SALAN
DONALD S. FLEMING

PRESENTAZIONE

Nel 1950 la nostra Casa Editrice ha lanciato il «1° Corso Nazionale di Televisione» per corrispondenza, che ha contribuito alla formazione di migliaia di tecnici specialisti nella televisione allora poco conosciuta nell'ambiente dei radiotecnici. E tale corso di specializzazione si rivolgeva appunto ai radiotecnici già esperti, desiderosi di allargare la loro attività professionale.

Un'analoga situazione si sta presentando ora, con l'avvento della TV a colori.

Il presente «Corso Integrale di TV a colori» è rivolto a tutti quei tecnici già specializzati nella TV in bianco-nero, desiderosi di inquadrarsi in una nuova attività di progettisti, collaudatori, riparatori di televisori a colori.

La tecnica della TV a colori, pur basandosi fondamentalmente sulla già nota tecnica della TV monocroma, esige però una profonda conoscenza di nuovi vasti settori di fisica e fisiologia, riguardanti l'esatta percezione e l'accoglimento del colore da parte dei nostri organi sensori.

La tecnica del colore partecipa sia dei fenomeni fisici astratti ben determinati, sia dei fenomeni puramente fisiologici derivanti dalle reazioni dell'organismo umano. I primi capitoli di questo corso sono appunto dedicati a questi argomenti importanti e fondamentali per la comprensione della TV a colori e della tecnica colorimetrica.

I successivi capitoli sono dedicati allo studio di un televisore a colori, prendendo come campione l'unico televisore oggi prodotto commercialmente in serie, quello americano della R.C.A.

Poichè tale televisore è basato sul sistema NTSC ufficialmente adottato negli U.S.A. da oltre una dozzina di anni, e d'altronde in Europa sono in concorrenza altri due sistemi di TV a colori, il PAL ed il SECAM, nei capitoli successivi sono ampiamente e dettagliatamente trattati questi due sistemi, ed è anche illustrata la realizzazione dei rispettivi televisori.

È comunque da considerare che il sistema NTSC largamente trattato nei primi capitoli costituisce la base fondamentale degli altri due sistemi concor-

renzi. È da zepersi inoltre presente che più dell'80% della tecnologia di un televisore a colori è praticamente indipendente dal sistema adottato.

Per la vastità di argomenti trattati, e la precisa e dettagliata documentazione tecnica, il presente Corso di TV a colori può ritenersi unico nel suo genere anche in campo internazionale ed è tale da giustificare l'attributo di « integrale » nel suo titolo.

Fuori testo sono allegati vari schemi circolari quotati di televisori a colori e diverse tavole a colori a complemento degli argomenti trattati.

Milano, Aprile 1966.

BIBLIOGRAFIA

Dati, informazioni e notizie riportati in questo Corso sono stati estratti dalle seguenti opere:

- DONALD G. FINK, *Color Television Standards*, McGraw-Hill Book Co., New York.
DONALD G. FINK, *Television Engineering*, McGraw - Hill Book Co., New York.
JOHN W. WENTWORTH, *Color Television Engineering*, McGraw-Hill Book Co., New York.
CHARLES E. DEAN, *Color Television Receiver Practice*, John F. Rider Publisher Inc., New York.
MILTON S. KIVER, *Color Television Fundamentals*, McGraw-Hill Book Co., New York.
WILLIAM F. BOYCE, *Fundamentals of Color Television*, Howard W. Sams Co. Inc., Indianapolis.
BOUMA P. J., *Physical Aspects of Colour*, Philips Technical Library, Eindhoven.
HAZELTINE STAFF, *Principles of Color Television*, John Wiley Co., New York.
JUDD D. B., *Color Business, Science and Industry*, John Wiley Co, New York.
CARNT P. S. e TOWNSEND G. B., *Colour Television*, Iliffe Books Ltd., London.
MEAGHER J. R., *Color TV Troubleshooting Pict-O-Guide*, Radio Corporation of America.
Practical Color Television, Radio Corporation of America.
Color Television Home Study Course, Radio Corporation of America.

Fascicoli tecnici informativi editi dalle Ditte: Philips - Telefunken - Compagnie Française de Télévision - R.C.A. - Graetz - Körting.

Riviste tecniche periodiche:

- « Wireless World », Iliffe Books, London.
« Electronics Weekly », Heywood Publications Ltd, London.
« Television », Société Editions Radio, Paris.
« Electronics », McGraw-Hill Book Co., New York.

INDICE

Presentazione

Bibliografia

CAPITOLO 1

| | |
|--|---|
| Aspetti fisici della luce e del colore | 1 |
| L'occhio | 2 |
| La retina | 6 |
| Acuità visiva | 9 |

CAPITOLO 2

| | |
|---|----|
| L'aspetto fisico della luce | 13 |
| Caratteristiche fisiche del colore | 15 |
| Unità di misura fotometriche | 17 |
| Luminosità ed altre quantità fotometriche | 18 |

CAPITOLO 3

| | |
|---|----|
| Colorimetria | 23 |
| Il colorimetro | 25 |
| Diagramma spaziale dei colori | 32 |
| La teoria colorimetrica | 39 |
| Diagramma di cromaticità | 45 |
| Contributo alla luminosità da parte dei primari | 51 |
| La bicromia semplice e la bicromia di Land | 58 |

CAPITOLO 4

| | |
|--|----|
| I precedenti dell'attuale TV a colori | 61 |
| Fondamenti tecnici dei sistemi attuali di televisione a colori | 62 |
| Costituzione schematica di un sistema TV a colori | 64 |
| Correzione di gamma | 78 |
| Nuova telecamera a colori a 4 canali | 80 |

CAPITOLO 1

Aspetti fisici della luce e del colore

Il colore è il necessario complemento di un'immagine in bianco-nero riprodotte una scena naturale.

L'immagine in bianco-nero è irrealistica e fittizia: il mondo intorno a noi è un mondo di colori. L'immagine televisiva a colori affatica molto meno la vista di quella in bianco-nero: il colore, oltre ad accrescere i dettagli, aggiunge alle scene riprodotte vita e rilievo.

La visione a colori è visione naturale. Le immagini appaiono ai nostri occhi nei loro pieni colori. D'altronde la percezione dei colori è un fenomeno che interessa unicamente l'occhio ed il relativo sistema nervoso. Accade anche che talune persone siano « cieche » per certi colori e ne percepiscano uno per l'altro (daltonismo): in luogo dei colori esse percepiscono varie tonalità di grigio.

In termini televisivi tali anomalie corrispondono ad una visione fornita da una telecamera in bianco-nero, mentre una telecamera a colori fornirà la visione naturale come viene percepita dall'occhio normale. Per una corretta comprensione della televisione a colori è indispensabile accostarsi alla teoria del colore o *colorimetria*, in relazione alle reazioni fisiologiche dell'occhio.

In particolare gli studi e le ricerche relativamente recenti sulla TV a colori hanno portato a stabilire delle variazioni di *luminosità* o *brillanza* e variazioni di *colore*, quali caratteristiche separate ed indipendenti di un'immagine.

Tale impostazione tecnica della visione di un'immagine offre un duplice vantaggio.

Anzitutto, considerando che unicamente le informazioni indispensabili devono essere trasmesse, si sfruttano in modo particolare certe caratteristiche dell'occhio umano.

Sotto tale profilo, le esigenze dell'occhio non sono le stesse rispetto alle variazioni di *luminosità* e alle variazioni di *colore*: pertanto i procedimenti di trasmissione tengono conto di queste distinte esigenze.

In secondo luogo, si perviene a soddisfare il tanto desiderato requisito della « compatibilità », cioè la possibilità di ricevere in bianco-nero coi normali televisori le trasmissioni di TV a colori.

È ovvio, infatti, che le variazioni di luminosità possono essere riferite ad analoghe ed univoche variazioni di un segnale elettrico.

Di conseguenza, nella televisione in bianco-nero o nelle telefoto, un dispositivo fotoelettrico traduce in un segnale elettrico le variazioni di luminosità rilevate da un'immagine dal processo di scansione.

Il colore, invece, è una caratteristica della luce molto più complessa e tale comunque da non permettere un'analogia semplice e diretta correlazione con il segnale elettrico derivante.

Per comprendere pertanto il procedimento di trasmissione e ricezione dell'informazione cromatica, occorre anzitutto considerare il colore in termini di quantità misurabili, ed in qual modo la sensazione del colore può essere riprodotta, essendo note tali quantità. Saranno comunque sempre queste quantità misurabili ad essere tradotte in segnale elettrico, e non il colore in se stesso.

La scienza della misura e della valutazione dei colori è chiamata *colorimetria* e ci proponiamo di esaminarne gli aspetti essenziali, che ogni tecnico della TV a colori deve assolutamente conoscere.

Ma prima di entrare nei dettagli della colorimetria, sarà opportuna qualche considerazione sulla percezione sensoria del colore.

Noi tecnici siamo solitamente avvezzi a ragionare su basi ed entità precise e ben determinate, ma quando si tratta del colore (rosso, giallo, verde, blu e così via), tutto è subordinato alla reazione fisiologica del nostro occhio, che può essere normale, ma anche anormale o difettoso.

È ben vero che fisicamente ogni colore può essere determinato da una precisa lunghezza d'onda entro lo spettro luminoso, ma ciò non ci esime dal considerare che il traguardo finale del colore rimane sempre la nostra percezione visiva: il colore è uno degli aspetti della luce che penetra nei nostri occhi.

L'occhio

Per comprendere il colore è necessario pertanto conoscere bene l'occhio umano ed il suo comportamento. L'occhio è di per sé un

organo che l'uomo non è sinora riuscito, neppure approssimativamente, ad imitare nelle sue telecamere (anche se come vedremo innanzi è affetto da qualche manchevolezza).

L'occhio cerca e focalizza spontaneamente sulla retina l'immagine dell'oggetto che interessa, adattandosi istintivamente alla sua luminosità entro vasti limiti, trasformandola da immagine ottica in un complesso di reazioni nervose, trasmesse al cervello per mezzo di un vero e proprio cavo multiplo (nervo ottico).

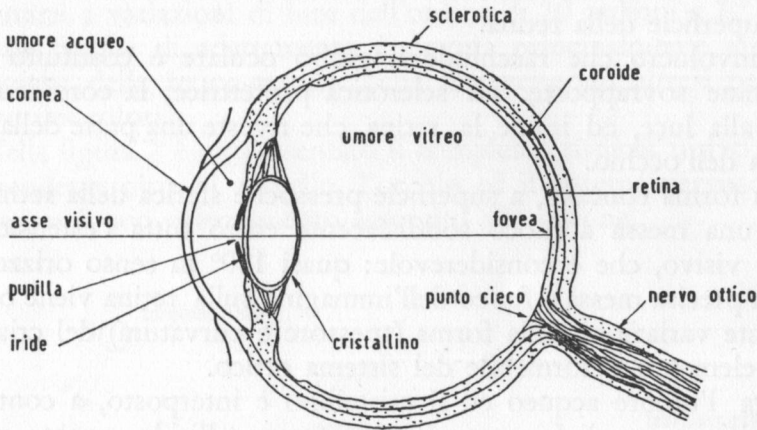


FIG. 1. Sezione dell'occhio umano.

La figura 1 mostra una sezione dell'occhio. La sua forma, pressochè sferica, è determinata dalla sclerotica, sufficientemente rigida ed opaca alla luce, che costituisce la camera oscura di una sorta di apparecchio fotografico al quale può essere paragonato il nostro occhio.

Il globo oculare è interamente riempito da mezzi rifrangenti liquidi e solidi, analogamente all'apparecchio fotografico, che è costituito da un obiettivo di cristallo a contatto dell'aria da entrambe le parti.

I raggi luminosi, penetrando nell'occhio, subiscono una forte rifrazione a causa della notevole differenza fra gli *indici* relativi alla cornea ed all'aria esterna: rifrazione analoga a quella che si verifica sulla prima superficie di un sistema ottico composito. In seguito, tali raggi, nel loro cammino attraverso l'occhio, non sono sottoposti che alle rifrazioni causate dai diversi « indici » dei mezzi incontrati lungo il percorso.

A partire dalla superficie della cornea trasparente (fig. 1) sino alla retina i raggi luminosi attraversano una serie di mezzi più o meno rifrangenti; cornea, umore acqueo, cristallino, umore vitreo. La cornea, l'umore acqueo ed il cristallino costituiscono l'obiettivo composto del nostro occhio.

Si è visto che la cavità interna dell'occhio è riempita da un liquido detto umore vitreo, che ha anche la funzione di mantenere la sua forma sferica, e quindi invariata la distanza della retina dal cristallino.

Sulla parete interna contrapposta al sistema ottico si nota l'entrata del nervo ottico, che si dirama in numerose terminazioni distribuite sulla superficie della retina.

L'involucro che racchiude il globo oculare è costituito da tre membrane sovrapposte. La sclerotica protettiva, la coroide nera ed opaca alla luce, ed infine la retina che riveste una parte della parete interna dell'occhio.

La forma concava, a superficie pressochè sferica della retina, permette una messa a fuoco soddisfacente entro tutta l'estensione del campo visivo, che è considerevole: quasi 180° in senso orizzontale.

La precisa messa a fuoco dell'immagine sulla retina viene ottenuta mediante variazioni della forma (spessore e curvatura) del cristallino, unico elemento deformabile del sistema ottico.

Fra l'umore acqueo ed il cristallino è interposto, a contatto di quest'ultimo, un diaframma circolare opaco, l'iride, avente un foro (pupilla) al centro, che può restringersi o allargarsi (sino ad 8 mm circa di diametro) in relazione alla luminosità dell'oggetto osservato, regolando in tal modo ad un valore ottimo la luce entrante nell'occhio.

L'effetto della pupilla, oltre che sulla quantità di luce che entra nell'occhio, si manifesta altresì sulla nitidezza e qualità dell'immagine visiva, inquantochè, contraendosi la pupilla e riducendo pertanto il diametro del foro, viene interessata otticamente una limitata porzione centrale della lente cristallina, con riduzione dell'aberrazione sferica ed aumento della profondità focale. Con un'immagine più luminosa, la qualità della visione pertanto migliora.

Le variazioni di diametro del foro pupillare dell'iride, come pure la contemporanea deformazione del cristallino per la precisa messa a fuoco dell'immagine sulla retina, sono effettuate da fascetti di muscoli eccitati direttamente dai centri sensori cerebrali.

Il complesso occhio-nervo ottico-cervello, costituisce un perfetto, incomparabile sistema di servomeccanismo ad azione riflessa ultrarapida.

Il sistema ottico cornea-umore acqueo-cristallino - umore vitreo - retina costituisce anch'esso un perfetto obiettivo composto, del tipo a immersione, a progressione continua degli indici di rifrazione dei vari mezzi e minima riflessione fra le loro superfici di separazione, con un rendimento luminoso elevatissimo. È inoltre da rilevare che la variazione del diametro pupillare dal minimo al massimo corrisponde solo in piccola parte alla facoltà di adattamento dell'occhio ad una vastissima estensione di illuminazione. Infatti, mentre la variazione di luce incidente sulla retina per azione della variabilità del diametro pupillare corrisponde ad una estensione di circa 20 a 1, l'occhio è in grado di adattarsi a variazioni di luce dell'ordine di 10 milioni a 1.

Tale facoltà di adattamento è dovuta principalmente a reazioni fisiologiche della retina-cervello, che intervengono altresì nella percezione dei colori.

Nella figura 2 è rappresentato il complesso sistema visivo umano, comprendente oltre al cervello, l'occhio ed il sistema nervoso e muscolare per il suo orientamento asservito alla visione.

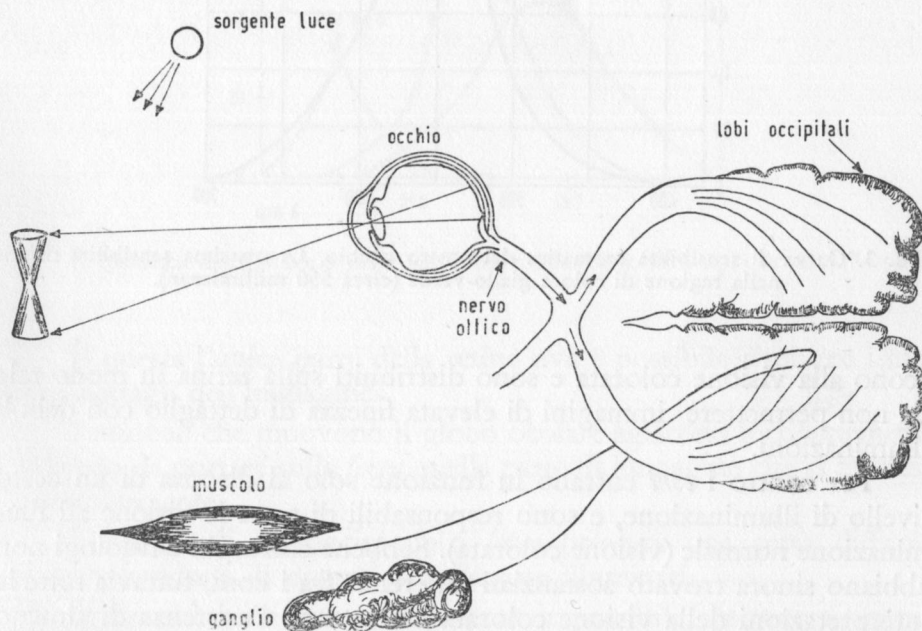


FIG. 2. Rappresentazione schematica del sistema fisiologico della visione umana. Si noti come i collegamenti occhio-cervello sono incrociati. Per chiarezza è stato rappresentato solamente un occhio.

La retina

La conoscenza della struttura della retina, oltre a quella del suo comportamento funzionale, è essenziale per la comprensione del meccanismo della visione umana, in correlazione con la TV a colori.

La retina costituisce l'organo fotosensibile dell'occhio ed è composta da un fitto mosaico di cellette di due tipi: *coni* e *bastoncini*.

Sono in numero di 6 o 7 milioni per ciascun occhio: il loro diametro è piccolissimo, all'incirca 500 millimicron, mentre la loro lunghezza è di circa 5 centesimi di millimetro.

Sembra che i *bastoncini* siano più sensibili a bassi livelli di illuminazione; comunque sono i soli responsabili della visione notturna.

Inoltre i bastoncini, pur essendo sensibilissimi, non contribui-

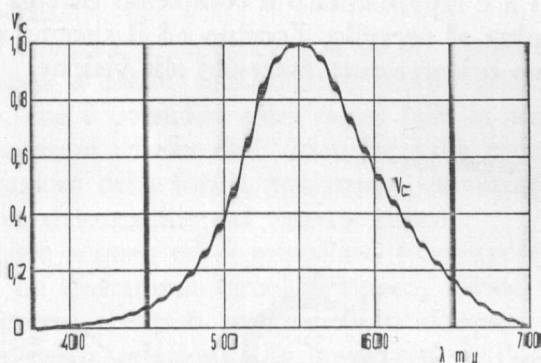


FIG. 3. Curva di sensibilità cromatica del nostro occhio. La massima sensibilità risiede nella regione di colore giallo-verde (circa 550 millimicron).

scono alla visione colorata e sono distribuiti sulla retina in modo tale da non permettere immagini di elevata finezza di dettaglio con deboli illuminazioni.

Per contro i *coni* entrano in funzione solo al disopra di un certo livello di illuminazione, e sono responsabili di tutta la visione ad illuminazione normale (visione colorata). Sebbene chirurghi e fisiologi non abbiano sinora trovato sostanziali differenze fra i *coni*, tuttavia tutte le interpretazioni della visione colorata ammettono l'esistenza di almeno tre tipi distinti di *coni* dotati di curve di sensibilità cromatica non coincidenti (figg. 3 e 4). La distribuzione dei bastoncini e dei *coni* sulla superficie della retina non è uniforme. Vi è una totale assenza di ba-

stoncini e coni nel punto di entrata nell'occhio del nervo ottico, comprendente oltre 1 milione di fibrille nervose che vanno a terminare sulla retina. Questo punto è il cosiddetto «punto cieco» o «macchia di Mariotte» e si trova generalmente spostato dall'asse visivo centrale.

Un altro punto caratteristico della retina è una piccolissima area di circa 2 mm di diametro, di colore giallo (*macula lutea*) centrata sull'asse ottico, ed avente al centro una minuscola depressione (circa 0,5 mm di diametro) chiamata *fovea centralis*. Nella *macula lutea* i bastoncini sono totalmente assenti, mentre i coni sono addensatissimi: si è potuto anzi stimare che nella *fovea centralis* i coni possono essere anche più di 30.000.

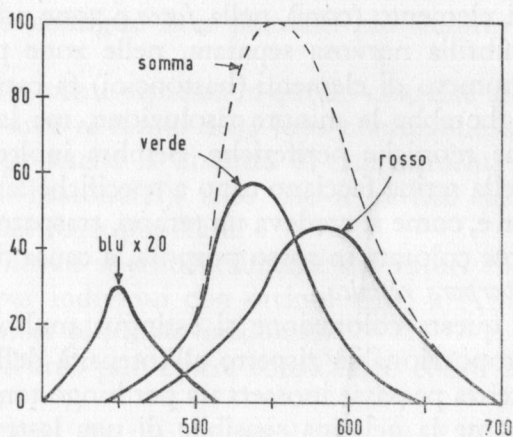


FIG. 4. Ipotetica distribuzione della sensibilità cromatica in vari tipi di coni della retina.

È questa l'unica parte della retina ove è possibile risolvere i massimi dettagli dell'immagine.

I muscoli che muovono il globo oculare agiscono inconsciamente, in modo da portare sulla *fovea* quella parte di immagine che ci interessa particolarmente.

L'assenza di bastoncini nella *fovea* provoca una certa difficoltà nell'osservazione di oggetti scarsamente illuminati.

Nella visione notturna è sovente impossibile discernere un piccolo oggetto fissandolo direttamente: esso diviene però visibile appena si dirige l'occhio da un lato, interessando l'area retinica provvista di bastoncini, maggiormente sensibile.

Anche nelle zone circostanti la *macula lutea* i coni tendono a concentrarsi verso il centro della retina: nella zona periferica sono presenti solamente bastoncini.

Le aree periferiche del campo visivo sono principalmente utili alla sensazione del moto, mentre l'area centrale serve massimamente per la percezione dei dettagli e del colore.

Non si conosce molto sul comportamento del cervello sotto gli impulsi provenienti dagli elementi fotosensibili della retina, mentre si sono potuti accertare vari particolari circa il modo con cui tali elementi sono collegati al cervello stesso. Di fronte ai 6 o 7 milioni di elementi fotosensibili sulla retina, c'è solamente un milione di fibrille nervose contenute nel nervo ottico.

Mentre ogni elemento (coni), nella *fovea* e zone adiacenti, fa capo ad una singola fibrilla nervosa separata, nelle zone periferiche della retina un certo numero di elementi (bastoncini) fa capo ad una stessa fibrilla. Ciò spiegherebbe la minore risoluzione, ma la maggiore sensibilità delle zone retiniche periferiche. Sembra inoltre accertato che specifiche aree della retina facciano capo a specifiche zone del cervello.

La retina non è, come si credeva un tempo, trasparente ed incolore, bensì intensamente colorata in rosso porpora, a causa della presenza in superficie della *porpora retinica*.

Il fatto che questa colorazione si estingua molto rapidamente e con una certa proporzionalità rispetto all'intensità della luce ha fatto sì che la sua esistenza passasse inosservata per lungo tempo. Essa agisce pertanto quasi come la gelatina sensibile di una lastra fotografica. È l'importanza della *porpora retinica* si è andata riconoscendo ed affermando sempre più nel fenomeno generale della vista ed in particolare della sensibilità ai vari colori, per la quale agisce quasi da filtro cromatico compensatore.

Secondo una recente teoria fisiologica, sembra che il meccanismo fondamentale della nostra vista sia legato alla scomposizione per azione della luce di una proteina (rodopsina), presente nelle cellule che sono nel nostro occhio, in retinene (che è poi un derivato della vitamina A) e in un'altra proteina (opsina). All'oscuro il retinene si ricombina con l'opsina riformando rodopsina.

La retina dell'occhio funzionerebbe quindi come una lastra fotografica.

Dal comportamento della *porpora retinica* dipendono i fenomeni della persistenza delle immagini sulla retina e la sensazione del cosiddetto *flicker* o sfarfallio.

Questi due fenomeni tipici della nostra vista sono già ben conosciuti dai tecnici che si occupano di televisione in bianco e nero e non staremo pertanto a ricordarli oltre, mentre è molto importante esaminare qualitativamente e quantitativamente la sensibilità e la reazione ai vari colori del nostro occhio.

Acuità visiva

La facoltà dell'occhio di risolvere i più minuti dettagli di un'immagine è legata a due fattori concomitanti. Un primo fattore è di natura geometrica e corrisponde alla distanza di osservazione alla quale due piccole aree contigue non possono più venire separate visualmente.

L'acuità visiva viene espressa in questo caso dall'angolo sotteso dai centri delle due aree al limite della loro risoluzione.

Ciò coinvolge anche la distanza di due elementi retinici sensibili contigui (coni o bastoncini), dato che il vertice dell'angolo visuale sotteso risiede nel foro pupillare.

Sono stati rilevati sperimentalmente dei valori che vanno da 0,25 minuti d'arco, per individui con ottima vista, a 5 minuti d'arco per individui dalla vista piuttosto mediocre.

Un minuto d'arco può essere considerato come una buona media di acuità visiva.

Ciò corrisponde alla risoluzione di due punti distanti 0,3 mm posti ad una distanza dall'occhio di 1 metro.

Il secondo fattore è di natura fisiologica, in dipendenza dal complesso, reciproco comportamento dei vari organi costituenti l'occhio, ed in modo particolare della retina.

L'esatta valutazione dell'acuità visiva media del nostro occhio, assume un'enorme importanza per la televisione ed in particolare per la televisione a colori.

Occorre infatti adeguare l'entità dell'informazione televisiva all'effettivo potere di accoglimento di essa da parte dell'occhio.

L'acuità visiva sopra citata di circa 1 minuto d'arco, valida per oggetti ben illuminati e contrastanti in bianco-nero, diminuisce molto (circa 1/5) per la risoluzione di piccole aree colorate. È questo il motivo per il quale nella televisione a colori l'informazione cromatica viene trasmessa con una banda video piuttosto ridotta (1,5 MHz per il rosso e 0,5 MHz per il blu).

Un altro importante fattore che interviene nell'acuità visiva (risoluzione) relativa alle immagini a colori risiede nel fatto che il nostro occhio apprezza prevalentemente differenze di brillantezza (luminosità), piuttosto che differenze di colore.

Tale constatazione ha portato alla realizzazione del procedimento cosiddetto «mixed-highs», per opera del Bedford (R.C.A.) e successivamente del Dome (G.E.), che è la base fondamentale comune ai tre sistemi attuali di TV a colori, NTSC, SECAM e PAL: la suddivisione, cioè, dell'informazione TV nei due canali distinti, di luminanza e cromaticità.

Non va comunque confusa l'acuità visiva dell'occhio per vari colori (strettamente collegata con la brillantezza dell'oggetto osservato) con l'incapacità di distinguere l'esatto colore di una piccola area.

Il potere risolutivo dell'occhio permette di distinguere i vari oggetti, le varie aree colorate fino a certe minime dimensioni di queste. Tale potere è limitato dalla dimensione e dalla distanza reciproca delle cellule ricettrici nell'interno dell'occhio.

Il potere risolutivo dell'occhio non diminuisce del medesimo valore per tutti i colori; ma è in relazione al colore delle aree ed oggetti osservati.

Per esempio, osservando oggetti di dimensioni tali che sottendano un angolo di 10'-15' si distinguono solo i colori rosso-arancio ed i blu-verde; per dimensioni inferiori di tali oggetti l'occhio distingue solo i verdi-blu fino a che, per dimensioni ancora inferiori, l'occhio nota solo dei grigi e le relative variazioni di luminosità.

Il potere risolutivo si manifesta anche riguardo alla possibilità di distinguere le minime variazioni di colore, cioè di apprezzare le variazioni di lunghezza d'onda dello stimolo che colpisce l'occhio fino ad un certo minimo « $\Delta\lambda$ ». A parità di sensazione visiva il « $\Delta\lambda$ » risulta minimo per i colori rosso-arancio e blu-verde e massimo per i colori verdi e per i blu.

Un fenomeno legato a questo potere risolutivo si osserva comunemente quando, ad esempio in uno stadio, si guarda la folla che si trova sugli spalti al lato opposto del campo. Le persone sembrano vestite unicamente di grigio con tutte le varie tonalità, si vedono le variazioni di luminosità dei vari vestiti, ma si apprezzano poco i colori. Osservando invece con un binocolo la stessa scena, si ha come risultato l'osservazione di aree più estese e quindi l'occhio apprezza bene anche i colori di queste aree.

I limiti del potere risolutivo dell'occhio hanno influenzato la scelta

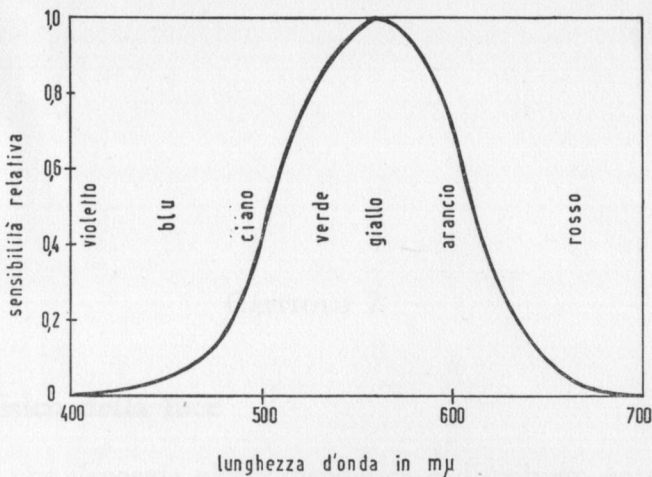


FIG. 5. Sensibilità spettrale della visione umana.

della larghezza di banda dei segnali elettrici della TV bianco-nero e la variazione di tale potere risolutivo riguardo i colori condizionerà la scelta della larghezza di banda dei segnali elettrici inerenti le informazioni dei colori stessi.

Le reazioni dell'occhio alla visione cromatica possono venire spiegate supponendo l'esistenza di tre distinti tipi di coni nella retina. Questa supposizione, per quanto molto plausibile, non è stata però mai confermata da constatazioni pratiche nel senso che non si sono mai potuti isolare i diversi tipi di coni.

Pertanto, pur mancando la conferma dell'esattezza di questa teoria della visione cromatica, si può pensare che i tre tipi di coni posseggano delle curve di sensibilità ricoprentesi in parte (fig. 4), in modo che la loro somma coincida con la curva di sensibilità luminosa dell'occhio entro la gamma spettrale della luce.

L'occhio presenta infatti differenti sensazioni per i vari colori dello spettro solare. La curva di figura 5 rappresenta i valori relativi di sensazione (a parità di energia ricevuta), in funzione della lunghezza d'onda dei vari colori dello spettro.

Il massimo di tale curva corrisponde a $\lambda = 0,55$ micron. L'occhio ha quindi il suo massimo di sensibilità per un colore situato all'incirca tra il verde ed il giallo.

La sensibilità dell'occhio diviene nulla sotto $\lambda = 0,39$ micron (inizio dell'ultravioletto) ed oltre $\lambda = 0,80$ micron (inizio dell'infrarosso).

CAPITOLO 2

L'aspetto fisico della luce

È noto che l'energia elettromagnetica è distribuita entro un vastissimo spettro di frequenze che alle attuali nostre conoscenze ha come limite inferiore un valore di 10^{-11} Hz (cicli cosmici) e come limite superiore 10^{22} Hz (raggi cosmici).

Si è già visto che la porzione di tale spettro, relativa ai fenomeni luminosi percepiti dal nostro occhio, è compresa fra l'infrarosso e l'ultravioletto (all'incirca fra 400 e 700 millimicron di lunghezza d'onda).

Entro questo spettro sono distribuiti i colori cosiddetti prismatici o puri (i 7 colori dell'iride: rosso, arancione, giallo, verde, turchino, indaco e violetto), tali cioè che ognuno di essi sia caratterizzato da una singola determinata frequenza (fig. 6).

Ad esempio il verde è prodotto da energia elettromagnetica alla frequenza di $5,2 \times 10^{14}$ Hz e non contiene nessun'altra energia a frequenza diversa. I colori prismatici sono relativamente pochi, mentre in pratica percepiamo decine di migliaia di colori differenti.

Come può avvenire ciò? La risposta è data dalla stessa costituzione della luce bianca, che non è altro che una miscela di colori.

Ed infatti l'azione di scomposizione di un raggio solare mediante un prisma ottico nella gamma dei colori dell'iride è senz'altro reversibile: è possibile cioè miscelare tali colori ottenendo luce bianca.

È evidente pertanto che si potranno ottenere innumerevoli colori diversi, miscelando opportunamente fra di loro alcuni colori puri: un semplice calcolo di previsione mostra che si possono ottenere oltre 40.000 colori diversi con tali miscele.

A questo punto è necessario prendere in considerazione la differenza che esiste fra la luce diretta proveniente da una sorgente luminosa e la luce riflessa da una superficie.

Quando osserviamo direttamente una sorgente di luce, l'energia luminosa entrante nel nostro occhio provoca la sensazione risultante di tutte le frequenze o colori presenti nella sorgente, esattamente come si verifica nel caso della luce bianca.

Se un vetro rosso viene frapposto fra l'occhio e la sorgente, questa appare rossa perché lascia passare unicamente la luce rossa, respingendo ogni altra luce di diverso colore.

Tale filtro luminoso si comporta esattamente come un filtro di banda in un radiocircuito.

Consideriamo ora il caso di un oggetto di colore rosso, illuminato da luce bianca solare. Se la sua superficie assorbisse la luce rossa, come avveniva per il filtro ottico del caso precedente, nessuna luce rossa verrebbe riflessa verso l'occhio e l'oggetto non apparirebbe affatto rosso. Se ne deduce che il processo fisico che si verifica non è identico a quello del filtro rosso.

La superficie colpita dalla luce bianca assorbe tutte le frequenze spettrali componenti, ad eccezione di quella corrispondente alla luce rossa che viene respinta o riflessa.

L'entità fisica presente nella superficie che provoca questa reiezione di colore è nota sotto la denominazione di *pigmento*.

Tali pigmenti costituiscono la base cromatica della pittura e della stampa.

È possibile infatti impiegando unicamente tre pigmenti di colore ben determinato, e miscelati opportunamente, ottenere praticamente qualsiasi colore dell'intera gamma cromatica.

L'impiego di questi tre pigmenti, noti come *colori primari sottrattivi* o riflettenti, è regolato da particolari norme fisiche della colorimetria.

Opportunamente miscelati in adatte proporzioni possono dare il bianco. I colori primari sottrattivi sono quelli più noti e familiari nella pratica corrente (pittura e stampa), rosso, giallo e blu.

Essi però non interessano la televisione a colori, che si avvale invece dei *colori primari addittivi* nella miscela di sorgenti luminose.

Coi colori primari sottrattivi solamente la luce respinta dalla superficie riflettente entra nell'occhio, mentre coi colori primari addittivi tutte le frequenze presenti nella sorgente luminosa entrano nell'occhio e non si verifica reiezione alcuna.

Si è visto infatti che i colori prismatici derivanti dalla scomposizione della luce solare possono venire ricombinati per dare luce bianca. Ma

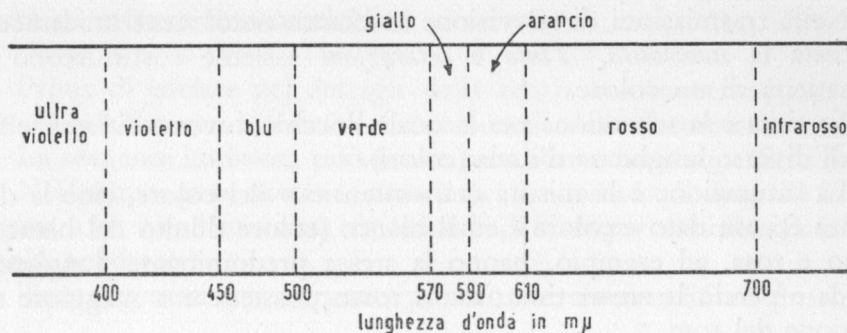


FIG. 6. Spettro cromatico della luce.

si è altresì constatato e confermato in accurate prove sperimentali soggettive che il bianco, come pure qualsiasi altro colore entro lo spettro visibile, si poteva ottenere da una appropriata combinazione di tre colori primari di frequenza ben determinata.

Questi tre colori, esattamente definiti in termini del diagramma di cromaticità del C.I.E. (Commission Internationale de l'Éclairage), che esamineremo più innanzi ⁽¹⁾, hanno con molta approssimazione le seguenti lunghezze d'onda: *rosso* 610 millimicron, *verde* 540 millimicron e *blu* 470 millimicron.

Tali sorgenti luminose, costituiscono i tre colori primari addittivi impiegati nella TV; con essi è possibile riprodurre praticamente qualsiasi colore in natura.

E tale processo cromatico addittivo della TV, consente di ottenere una gamma di colori naturali ancor più ampia del miglior procedimento sottrattivo di stampa.

Caratteristiche fisiche del colore

Un *colore* possiede tre caratteristiche: *luminosità*, *tinta* (hue) e *saturazione*.

⁽¹⁾ L'organizzazione internazionale per la tecnica dell'illuminazione, creata nel 1924, assume le seguenti denominazioni presso vari Paesi: Francia, Inghilterra, Italia, Olanda: C.I.E. (Commission Internationale de l'Éclairage); Germania: I.B.K. (Internationale Beleuchtungs Kommission); Stati Uniti d'America: I.C.I. (International Commission of Illumination).

Nelle trasmissioni di televisione in bianco-nero viene unicamente utilizzata la *luminosità*. *Tinta* e *saturazione* assieme costituiscono la cromaticità di un colore.

La *tinta* è la sensazione per la quale l'occhio avverte differenze fra luci di diverse lunghezze d'onda (colori).

La *saturazione* è la misura dell'«intensità» del colore, cioè la differenza fra un dato «colore» ed il bianco (colore diluito dal bianco). Rosso e rosa, ad esempio, hanno la stessa predominante lunghezza d'onda e perciò la stessa *tinta*; ma il rosso possiede una maggiore saturazione del rosa.

Con espressione più tecnica si può dire che la *tinta* corrisponde all'aspetto fisico di «frequenza» e la *luminosità* o *brillanza* corrisponde all'aspetto fisico di «ampiezza».

Ma ciò che rende ancor più complessi i problemi del colore è il comportamento dell'occhio riguardo agli stimoli cromatici. Sotto questo profilo, infatti, (e lo si è già visto nel Capitolo I), alcuni colori appaiono più luminosi di altri anche se proiettati con uguale energia. Pertanto, ogni riproduzione cromatica deve tenere nel dovuto conto questa caratteristica dell'occhio.

L'occhio non riesce a distinguere fra una luce di una determinata lunghezza d'onda ed una miscela di luci di diverse lunghezze d'onda.

Pertanto una miscela di luce verde e luce rossa non può essere distinta dal giallo (derivante da tale miscela) nello spettro della luce bianca.

Un'altra importante differenziazione nella teoria dei colori risiede nel fatto, già considerato sopra, che mentre per la luce i tre colori «primari» sono verde, rosso e blu, per i pigmenti i colori «primari» sono giallo, rosso e blu.

Ciò, perchè, come si è visto, la luce forma delle miscele *addittive*, mentre i pigmenti (vernici, inchiostri) formano delle miscele *sottrattive*.

Se due luci di diverso colore vengono proiettate insieme su uno schermo bianco, ne risulta un colore dato dalla loro somma. Ad esempio, luce rossa più luce verde formano il giallo.

Teoricamente, un pigmento dovrebbe riflettere un solo colore ed assorbire tutti gli altri. In pratica i pigmenti commerciali riflettono la luce in una gamma più ampia del colore nominale. Se si mescolano tra loro ad esempio i pigmenti giallo e blu, il colore risultante è verde che è comune ad entrambi. Se tali pigmenti fossero assolutamente puri, la miscela dei due apparirebbe nera.

Unità di misura fotometriche

Prima di entrare nei dettagli della teoria colorimetrica, sarà opportuno richiamare i concetti fondamentali della fotometria.

La sorgente luminosa può essere puntiforme od a superficie finita.

Nel primo caso occorre introdurre il concetto di *intensità di radiazione*, che viene misurata in termini di *Watt per steradian* (unità di angolo solido-*str*).

Trattandosi di una sorgente puntiforme che irradia un flusso lu-

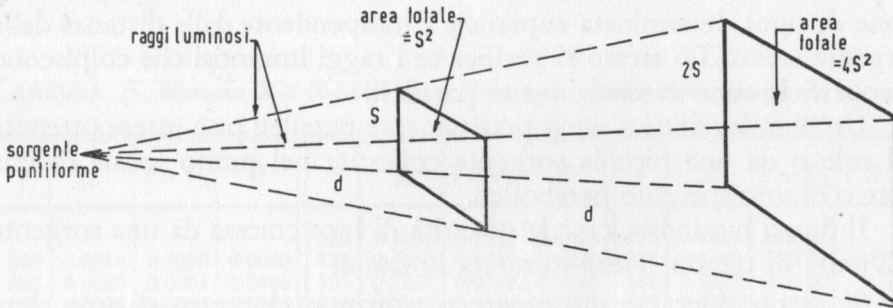


FIG. 7. Nel caso di una sorgente puntiforme l'illuminazione di una superficie varia inversamente al quadrato della distanza.

minoso uniforme in tutte le direzioni, per produrre un'intensità di 1 *Watt per steradian*, dato che in una sfera vi sono 4π steradian, è necessaria una potenza totale emessa di 4π *Watt*.

Nel caso di una sorgente luminosa o superficie riflettente di area finita, sarà invece conveniente riferirsi alla *densità di flusso radiante*, misurata in *Watt per cm²* (o *Watt per square foot* per gli anglosassoni).

L'intensità di una sorgente ad area finita è, in generale, dipendente dalla direzione di osservazione, ed è determinata dal suo diagramma di radiazione.

Gran parte delle sorgenti luminose ad area finita e molte superfici riflettenti hanno diagrammi di radiazione o di riflessione molto vicini alla cosiddetta *radiazione a legge cosinoidale*. Ciò significa che la radiazione in qualsiasi direzione è proporzionale al coseno dell'angolo fra la direzione in questione e la normale alla superficie (legge di Lambert).

Il diagramma di radiazione di tali superfici è una sfera tangente alla superficie; la massima radiazione si verifica in direzione normale alla superficie e vi è radiazione nulla parallelamente ad essa.

Ritornando per un momento al caso teorico della sorgente puntiforme isolata nello spazio, occorre ricordare che l'illuminazione di una data superficie varia inversamente al quadrato della distanza dalla sorgente stessa (fig. 7).

Naturalmente questo caso teorico non si verifica mai in pratica; però nel caso di una sorgente ad area finita, ogni punto della sua superficie può considerarsi come una sorgente puntiforme separata.

In quest'ultimo caso, l'illuminazione decresce con la distanza dalla sorgente, in minore proporzione che non secondo la legge quadratica. Se poi la sorgente luminosa ha un'area infinitamente estesa, l'illuminazione di ogni determinata superficie è indipendente dalla distanza dalla sorgente stessa. Lo stesso si verifica se i raggi luminosi che colpiscono la superficie sono essenzialmente paralleli.

Un'illuminazione a raggi praticamente paralleli può essere ottenuta dal sole o da una piccola sorgente collocata nel punto focale di una lente o di uno specchio parabolico.

Il flusso luminoso, cioè la quantità di luce emessa da una sorgente nell'unità di tempo, viene misurata in *lumen*.

Se si considera una sorgente puntiforme al centro di una sfera suddivisa in 4π angoli solidi unitari o steradian (misurati dal rapporto fra l'area della superficie sferica sottesa ed il quadrato del raggio), il *lumen* è il flusso luminoso compreso entro un angolo solido unitario.

Una superficie luminosa è caratterizzata dalla sua *brillanza* o *luminosità*. Tre coefficienti intervengono a definire la *brillanza*: il genere di superficie, la sua area e la quantità di luce emessa.

Il *foot-lambert* è l'unità di luminosità e viene definito come la luminosità di una superficie perfettamente diffondente che emette un lumen per piede quadrato (square-foot).

Una superficie *perfettamente diffondente* è quella che appare di uguale luminosità da qualsiasi angolo venga osservata.

La maggior parte degli schermi TV a visione diretta (tubi catodici) soddisfano a tale requisito; la massima luminosità di uno schermo TV di questo genere varia generalmente da 50 a 80 foot-lambert.

Luminosità ed altre quantità fotometriche

Riepilogando, possiamo pertanto ritenere che la *luminosità* di una determinata sorgente di luce è proporzionale alla potenza irradiata per cm^2 di superficie (nella direzione dell'osservatore).

Per paragonare diverse sorgenti luminose viene impiegato il diagramma di luminosità relativa V_c (fig. 3) inteso come V_λ , i cui valori numerici sono riportati nella tabella A nella colonna $\bar{Y} = V_\lambda$.

Al diagramma V_λ (fig. 8) si riferiscono tutte le considerazioni relative alla luminosità e relative unità fotometriche.

La definizione matematica della luminosità B , è la seguente:

$$B = M \Sigma V_\lambda E_\lambda$$

ove la sommatoria deve essere estesa a tutte le lunghezze d'onda del campo visivo interessante la sorgente, mentre V_λ e E_λ rappresentano

TABELLA A. Sistema X-Y-Z-CIE - 1931. Valori di tristimolo a parità di energia.

| λ | \bar{X} | $\bar{Y} = V_\lambda$ | \bar{Z} | λ | \bar{X} | $\bar{Y} = V_\lambda$ | \bar{Z} | λ | \bar{X} | $\bar{Y} = V_\lambda$ | \bar{Z} |
|-----------|-----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|-----------|
| 380 | 0.0014 | 0.0000 | 0.0065 | 525 | 0.1096 | 0.7932 | 0.0573 | 675 | 0.0636 | 0.0232 | |
| 385 | 0.0022 | 0.0001 | 0.0105 | 530 | 0.1655 | 0.8620 | 0.0422 | 680 | 0.0468 | 0.0170 | |
| 390 | 0.0042 | 0.0001 | 0.0201 | 535 | 0.2257 | 0.9149 | 0.0298 | 685 | 0.0329 | 0.0119 | |
| 395 | 0.0076 | 0.0002 | 0.0362 | 540 | 0.2904 | 0.9540 | 0.0206 | 690 | 0.0227 | 0.0082 | |
| | | | | 545 | 0.3597 | 0.9803 | 0.0134 | 695 | 0.0158 | 0.0057 | |
| 400 | 0.0143 | 0.0004 | 0.0679 | 550 | 0.4334 | 0.9950 | 0.0087 | 700 | 0.0114 | 0.0041 | |
| 405 | 0.0232 | 0.0006 | 0.1102 | 555 | 0.5121 | 1.0002 | 0.0057 | 705 | 0.0081 | 0.0029 | |
| 410 | 0.0435 | 0.0012 | 0.2074 | 560 | 0.5945 | 0.9950 | 0.0039 | 710 | 0.0058 | 0.0021 | |
| 415 | 0.0776 | 0.0022 | 0.3713 | 565 | 0.6784 | 0.9786 | 0.0027 | 715 | 0.0041 | 0.0015 | |
| 420 | 0.1344 | 0.0040 | 0.6459 | 570 | 0.7621 | 0.9520 | 0.0021 | 720 | 0.0029 | 0.0010 | |
| 425 | 0.2148 | 0.0073 | 1.0391 | 575 | 0.8425 | 0.9154 | 0.0018 | 725 | 0.0020 | 0.0007 | |
| 430 | 0.2839 | 0.0116 | 1.3856 | 580 | 0.9163 | 0.8700 | 0.0017 | 730 | 0.0014 | 0.0005 | |
| 435 | 0.3285 | 0.0168 | 1.6230 | 585 | 0.9786 | 0.8163 | 0.0014 | 735 | 0.0010 | 0.0004 | |
| 440 | 0.3483 | 0.0230 | 1.7471 | 590 | 1.0263 | 0.7570 | 0.0011 | 740 | 0.0007 | 0.0003 | |
| 445 | 0.3481 | 0.0298 | 1.7826 | 595 | 1.0567 | 0.6949 | 0.0010 | 745 | 0.0005 | 0.0002 | |
| 450 | 0.3362 | 0.0380 | 1.7721 | 600 | 1.0622 | 0.6310 | 0.0008 | 750 | 0.0003 | 0.0001 | |
| 455 | 0.3187 | 0.0480 | 1.7441 | 605 | 1.0456 | 0.5668 | 0.0006 | 755 | 0.0002 | 0.0001 | |
| 460 | 0.2908 | 0.0600 | 1.6692 | 610 | 1.0026 | 0.5030 | 0.0003 | 760 | 0.0002 | 0.0001 | |
| 465 | 0.2511 | 0.0739 | 1.5281 | 615 | 0.9384 | 0.4412 | 0.0002 | 765 | 0.0001 | 0.0000 | |
| 470 | 0.1954 | 0.0910 | 1.2876 | 620 | 0.8544 | 0.3810 | 0.0002 | 770 | 0.0001 | 0.0000 | |
| 475 | 0.1421 | 0.1126 | 1.0419 | 625 | 0.7514 | 0.3210 | 0.0001 | 775 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 480 | 0.0956 | 0.1390 | 0.8130 | 630 | 0.6424 | 0.2650 | 0.0000 | | | | |
| 485 | 0.0580 | 0.1693 | 0.6162 | 635 | 0.5419 | 0.2170 | 0.0000 | | | | |
| 490 | 0.0320 | 0.2080 | 0.4652 | 640 | 0.4479 | 0.1750 | 0.0000 | | | | |
| 495 | 0.0147 | 0.2586 | 0.3533 | 645 | 0.3608 | 0.1382 | 0.0000 | | | | |
| 500 | 0.0049 | 0.3230 | 0.2720 | 650 | 0.2835 | 0.1070 | 0.0000 | | | | |
| 505 | 0.0024 | 0.4073 | 0.2123 | 655 | 0.2187 | 0.0816 | | | | | |
| 510 | 0.0003 | 0.5030 | 0.1582 | 660 | 0.1649 | 0.0610 | | | | | |
| 515 | 0.0291 | 0.6082 | 0.1117 | 665 | 0.1212 | 0.0446 | | | | | |
| 520 | 0.0633 | 0.7100 | 0.0782 | 670 | 0.0874 | 0.0320 | | | | | |

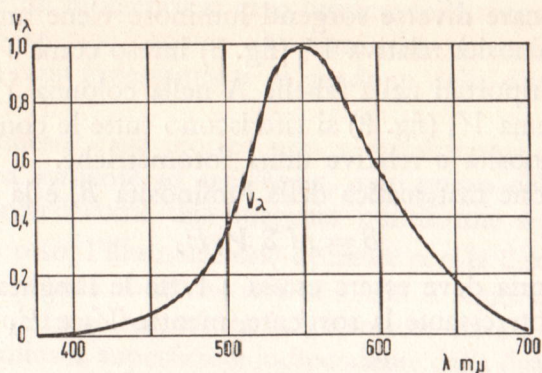


FIG. 8. Diagramma internazionale di luminosità relativa. (Vedi tabella A).

rispettivamente il diagramma internazionale di luminosità relativa (fig. 8) e la potenza.

La costante M (equivalente meccanico della luce) è convenzionalmente fissata in base ad un determinato valore relativo ad una sorgente tipica ben definita.

Se E_λ viene espresso in Watt per cm^2 , il valore di M è circa 660. L'unità fotometrica così corrispondente a B è chiamata *stilb*.

L'intensità luminosa di un oggetto (sorgente luminosa o superficie illuminata) in una data direzione viene ottenuta moltiplicando la luminosità verso quella direzione per l'area vista da tale direzione. L'intensità luminosa è pertanto la misura della quantità di luce irradiata per secondo in una data direzione.

L'unità di intensità luminosa, che è tuttora indicata col vecchio termine di « candela », viene definita come l'intensità di 1 cm^2 di superficie che possiede la luminosità di 1 stilb, ciò che equivale a dire che la superficie irradia 1 candela per cm^2 . Pertanto si può dire che:

$$1 \text{ stilb} = 1 \text{ candela}/\text{cm}^2.$$

L'illuminamento di una superficie è la quantità di luce che la superficie riceve per m^2 in 1 secondo.

L'unità d'illuminamento è il *lux*, che è l'illuminazione che riceverebbe una piccola superficie da una sorgente luminosa distante 1 metro e avente un'intensità luminosa, nella direzione della superficie stessa, di 1 candela.

Il flusso luminoso è la totale quantità di luce irradiata da una sorgente luminosa, ovvero ricevuta da una superficie per secondo.



Spettro luminoso



Filtro rosso



Filtro verde



Filtro blu

TAVOLA A - Lo spettro luminoso ed i filtri dei tre colori primari delle telecamere.

L'unità corrispondente è il *lumen*, che è il flusso luminoso ricevuto da una superficie per m^2 , sotto un illuminamento di 1 lux.

Ne consegue che:

$$1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen}/m^2.$$

Prendiamo ora una sorgente di luce avente un'intensità luminosa di 1 candela in tutte le direzioni. Tale sorgente posta al centro di una sfera immaginaria di 1 metro di raggio, la colpisce con un illuminamento di 1 lux.

Ma la superficie della sfera è 4π metri quadrati: perciò la sfera riceve un flusso luminoso di 4π lumen.

Per una sorgente luminosa che irradia una uguale quantità di luce in tutte le direzioni, il flusso luminoso (in lumen) è dato dal prodotto dell'intensità (in candele) per il fattore 4π . Se l'irradiazione non è uguale in tutte le direzioni, il flusso totale è allora dato da 4π volte l'intensità luminosa media.

Riassumendo le definizioni di unità fotometriche, avremo pertanto:

Flusso: Lumen.

Quantità di luce: Lumen/secondo.

Intensità luminosa: Candela internazionale: Lumen/str.

Illuminamento: Lux: Lumen/ m^2 : 0,0929 Foot-Candle.

Luminosità: Nit: Lumen. m^2 /str: Candle/ m^2 : π Apostilb: 0,0929 Candle/Sq. Ft.: π . 0,0929 Foot-Lambert.

Corrispondenza fra i valori delle unità di luminosità.

| Unità | Nit | Apostilb | Candle Square-Foot | Foot Lambert |
|--------------|--------|----------|--------------------|--------------|
| Nit | 1 | π | 0,0929 | 0,2919 |
| Apostilb | 0,3183 | 1 | 0,02957 | 0,0929 |
| Candle Sq-Ft | 10,764 | 33,82 | 1 | 3,142 |
| Foot Lambert | 3,426 | 10,764 | 0,3183 | 1 |

CAPITOLO 3

Colorimetria

Si sa che ogni pittore riproduce sulla tela una vasta gamma di tinte pur avendo a disposizione non certo un numero di tubetti di colore identico al numero di tinte che appaiono sulla tela. Questo può essere fatto dall'artista perchè lo studio, la pratica ed il senso artistico l'hanno portato a conoscere le caratteristiche principali inerenti i miscugli, le combinazioni dei colori fondamentali. L'esempio dello studio delle caratteristiche e delle possibilità di comparazione di colori tanto necessario all'artista diventa indispensabile su un altro piano per la comprensione di tutti i problemi inerenti la produzione, la ripresa, la trasmissione e la riformazione sul televisore dell'immagine a colori.

Ricordiamo che le più importanti caratteristiche del colore sono: la *tinta*, la *luminosità* o *brillanza*, e la *saturazione*.

La *tinta* è quella caratteristica fisiologica per cui si distingue il Rosso dal Verde, dal Giallo, ecc. In termini fisici e ritornando alla figura 6 si nota che la tinta è la caratteristica del colore che viene determinata dalla lunghezza di onda dell'energia luminosa.

La *luminosità* è fisiologicamente l'ammontare dello stimolo che riceve l'occhio e che fa porre il colore in una gamma che va dal Bianco al Nero attraverso tutta una sequenza di luminosità intermedie. Fisicamente questa caratteristica è determinata dalla quantità di energia luminosa irradiata e, a parità di questa, dalla frequenza di questa energia (in considerazione delle varie sensibilità dell'occhio alle varie lunghezze di onda) fig. 8.

La *saturazione* è considerata fisiologicamente come la purezza del colore, cioè la maggiore o minore quantità di bianco presente nel colore in esame.

Uno stesso colore, per questa caratteristica, può apparire più o

meno intenso, o più o meno pallido. Fisicamente ciò dipende dalla larghezza di banda della radiazione considerata; la figura 9 mostra appunto le variazioni di saturazione di un Giallo.

Queste tre caratteristiche le ritroveremo poi nelle descrizioni dei sistemi di TV a colori perchè si presenteranno come tre informazioni elettriche da inserire nel segnale video.

Per la identificazione pratica dei colori esistono dei « cataloghi » e delle « raccolte » di campioni cromatici quali riferimenti visivi corrispondenti a determinate sigle cifrate.

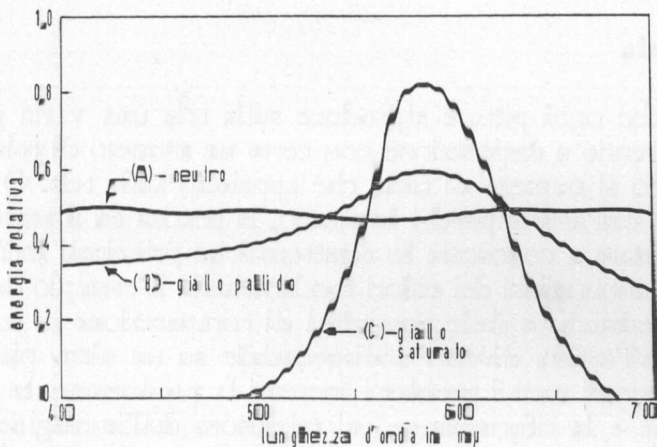


FIG. 9. Variazioni di saturazione del colore giallo.

Sotto questo aspetto è molto noto ed usato il sistema di identificazione cromatica di Munsell (fig. 10). In esso le tinte sono ripartite in 10 settori di un cerchio, una accanto all'altra, nella stessa progressione dello spettro solare in modo che i settori opposti siano complementari.

Ciascun settore è suddiviso in 10 parti uguali. La saturazione o *chroma* è data dalla distanza dal centro. Per introdurre il fattore *luminanza*, il cerchio si è trasformato nel cilindro di Munsell, il cui asse è stato suddiviso in 10 parti uguali, dal « nero » al « bianco » (100% riflettente.) (Fig. 11). Con questo sistema ogni colore è identificato con una notazione tipica: ad es. 7 GY 5/8 si riferisce ad un colore di luminanza 5, di tinta verde-giallo (GY) nella 7ª parte del settore corrispondente e la cui saturazione corrisponde a 8 divisioni dal centro in fuori.

Vi sono dei cataloghi Munsell di colori standard con sigle di identificazione del tipo ora citato; tali cataloghi, detti anche *colori Munsell*, sono riprodotti sia con superfici lucide che opache onde aderire alle più svariate esigenze cromatiche della pratica corrente. Un altro campionario tipico di colori, molto noto ed impiegato in pratica, è quello *Wraizen*, particolarmente usato sotto forma di filtri cromatici.

Il colorimetro

Esaminiamo ora la possibilità di conoscere la composizione di tutti i colori presenti in natura in rapporto ai tre colori primari *Rosso-Verde-Blu* considerati analizzando le caratteristiche dell'occhio, per arrivare alla riproduzione di tutti i colori con il « miscuglio » degli stessi primari.

Lo strumento usato a questo scopo è il *colorimetro* (vedi fig. 12a). È composto da uno schermo opportunamente sagomato; un lato di tale schermo viene illuminato dalla luce che deve essere analizzata e l'altro lato viene illuminato contemporaneamente da tre sorgenti di luce rispettivamente di tinta *Rossa-Verde-Blu* (primari). L'intensità luminosa di ognuna di queste tre sorgenti è regolata con appositi attenuatori. Si agisce su questi fino ad arrivare a produrre sulla metà dello schermo illuminato dai primari un colore identico (a giudizio dell'osservatore) a quello incognito proiettato sull'altra metà dello schermo. A questo punto si può scrivere l'uguaglianza matematica:

$$C_1 = mR + nV + pB$$

dove:

C_1 = luce incognita;

R, V, B = unità dei primari;

m, n, p = quantità di unità dei primari.

Prima di proseguire in questa ricerca è bene chiarire cosa si intende con la parola *unità* usata nella spiegazione della formula. Tali *unità* si possono esprimere e misurare in diversi modi, per esempio:

A) Si possono usare delle unità di misura fisiche, ad esempio i Watt/superficie unitaria e stabilire la quantità di queste unità di misura necessaria per riprodurre sullo schermo del colorimetro una luce identica in tinta, luminosità e saturazione, alla luce incognita da esaminare. Per uguagliare 1 Watt di radiazione luminosa per ogni lunghezza d'onda dello spettro occorre un certo numero di Watt per ogni primario in funzione della lunghezza d'onda di tale radiazione (fig. 13).

Come si vede i rapporti di potenza tra le varie sorgenti luminose possono stare in rapporto da 1 a 100.

B) I Watt, valori fisici, possono essere « pesati » secondo la luminosità dei singoli primari, cioè secondo la sensibilità dell'occhio ed ottenere quindi delle unità fisiologiche; le curve di figura 14 *lampare per Watt*⁽¹⁾ indicano appunto i valori di figura 13 « pesati ». Anche in questi casi i valori delle *unità* dei primari sono molto dissimili.

C) Per evitare le complicazioni dovute ai forti divari dei valori fisici ($W \times W$) e fisiologici ($Watt \times Lumen$) dei singoli primari, divari che porterebbero alla costruzione di diagrammi non certo unidimensionali, è stato deciso internazionalmente di accettare come unità di misura le *unità dei primari*. Con questo si intende la « quantità »⁽²⁾ dei singoli primari necessaria per uguagliare sullo schermo del colorimetro il Bianco C stabilito dalla C.I.E. con una luminosità di 1 foot-lambert (fig. 15).

Le sorgenti naturali di luce non sono monocromatiche, ma comprendono spettri continui di molte frequenze di radiazioni luminose. Quando lo spettro abbraccia tutto il campo visibile, la luce appare bianca. Teoricamente la luce bianca può definirsi quella corrispondente ad una distribuzione costante di energia entro tutto lo spettro luminoso: è questo il « bianco di uguale energia », che viene sovente adottato come campione teorico di riferimento in colorimetria.

In sede pratica, sono stati normalizzati dei campioni con la denominazione di « bianco » o « illuminante » A, B, C, il cui spettro luminoso è riprodotto nella fig. 16.

Il « bianco A » è generato da una lampada al tungsteno a 2854

(1) Una sorgente di luce avente una distribuzione spettrale identica alla curva di sensibilità dell'occhio, per emettere un Lumen deve irradiare 0,00147 Watt. Da questo si ha:

$$1 \text{ Watt} = 680 \text{ Lumen}$$

(2) La parola « quantità » in questo caso non ha un significato paragonabile a un'unità di misura; ma vuole significare l'esistenza di una certa energia dei singoli primari. È importante che quelle certe quantità dei singoli primari (m, r, p , che poi per altri scopi potranno essere misurate in Watt o in Lumen) vengano assunti come valore unitario perchè il loro miscuglio produce il Bianco C con luminosità già descritta. La necessità di avere un Bianco standard è evidente perchè ogni osservatore ed ogni bianco osservato sono estremamente influenzati dalla luce ambiente, dai paragoni, e dai contrasti.

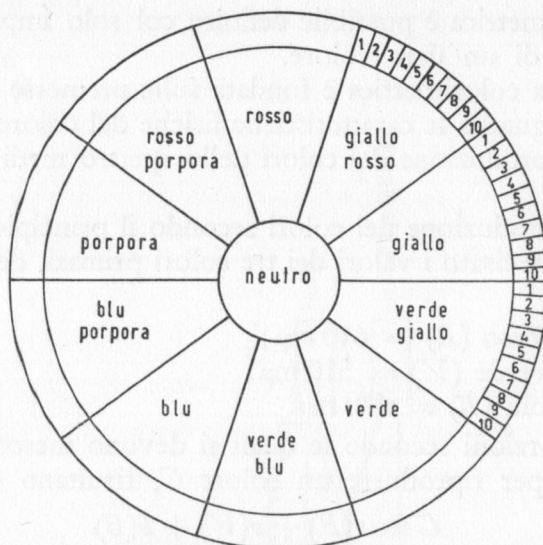


Fig. 10. Sistema di identificazione cromatica di Munsell. Cerchio di Munsell.

gradi Kelvin. Gli altri due « bianchi » sono derivati dal bianco *A* attraverso filtri con particolari caratteristiche di assorbimento.

Il bianco *B* si approssima alla luce solare a mezzogiorno e corrisponde all'incirca al colore del cosiddetto « corpo nero » portato alla temperatura di 4800 K°.

Il bianco *C* (simile al colore bianco-azzurro di molti schermi di cinescopi in bianco-nero) si avvicina alla luce del giorno (luce solare più luce riflessa dal cielo).

Il bianco *C* è stato adottato come bianco di riferimento per la televisione a colori.

Il suddetto « bianco di uguale energia » risulta compreso fra il « bianco *B* » ed il « bianco *C* ».

Si tenga comunque presente che la definizione del bianco non dipende dalla intensità di radiazione, ma dipende unicamente dalla distribuzione dell'energia spettrale.

Con tale criterio quindi, una stessa superficie bianca può apparire luminosissima od appena visibile, in completa indipendenza dalla sua luminosità.

La colorimetria è la tecnica che si occupa della definizione e della misura dei colori in termini numerici. In altre parole, mediante la

tecnica colorimetrica è possibile definire col solo impiego di numeri, l'equivalente di un dato colore.

La tecnica colorimetrica è fondata sulle premesse già illustrate sia per quanto riguarda le caratteristiche fisiche del colore, sia per quanto riguarda la riproduzione dei colori dello spettro mediante i tre colori primari.

Per la riproduzione dei colori secondo il principio della *trivromia*, la C.I.E. ha precisato i valori dei tre colori primari, denominandoli *R*, *V* e *B*:

per il rosso (*R*) = 610 m μ ;
 per il verde (*V*) = 510 m μ ;
 per il blu (*B*) = 470 m μ .

Le proporzioni secondo le quali si devono mescolare i tre colori *R*, *V*, e *B*, per riprodurre un colore *C*, risultano dall'espressione:

$$C \equiv r(R) + v(V) + b(B) \quad (1)$$

astrazione fatta dalla luminanza del colore. Ciò significa che il colore risultante *C* è cromaticamente uguale a *r* volte l'unità di *R*, più *v* volte l'unità di *V*, più *b* volte l'unità di *B*. In questa espressione, i coefficienti *r*, *v* e *b* sono chiamati coordinate tricromatiche del colore *C*.

Scrivendo l'espressione ora accennata, ci siamo riferiti unicamente alla tinta del colore *C*. È noto però che per definire un colore, è indispensabile precisare anche la sua brillantezza o luminanza.

Mescolare dei colori non significa praticamente nulla, se non si precisa la luminanza dei componenti interessati nella miscela.

È per questo motivo che la C.I.E., allo scopo di fissare un valore di luminanza a ciascuna delle unità di colore *R*, *V*, e *B*, ha stabilito la seguente norma: la miscela delle tre unità deve essere cromaticamente equivalente ad un bianco di riferimento considerato come zona sorgente di uguale energia luminosa entro tutta la gamma dello spettro visibile.

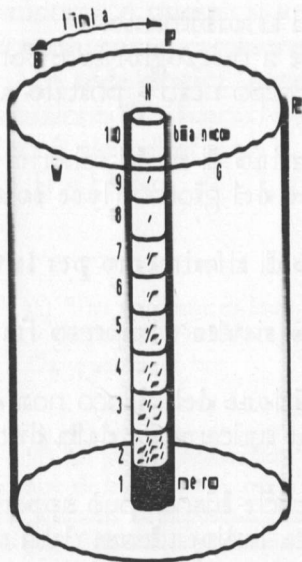


FIG. 11. Cilindro di Munsell per l'identificazione della luminosità (luminanza).

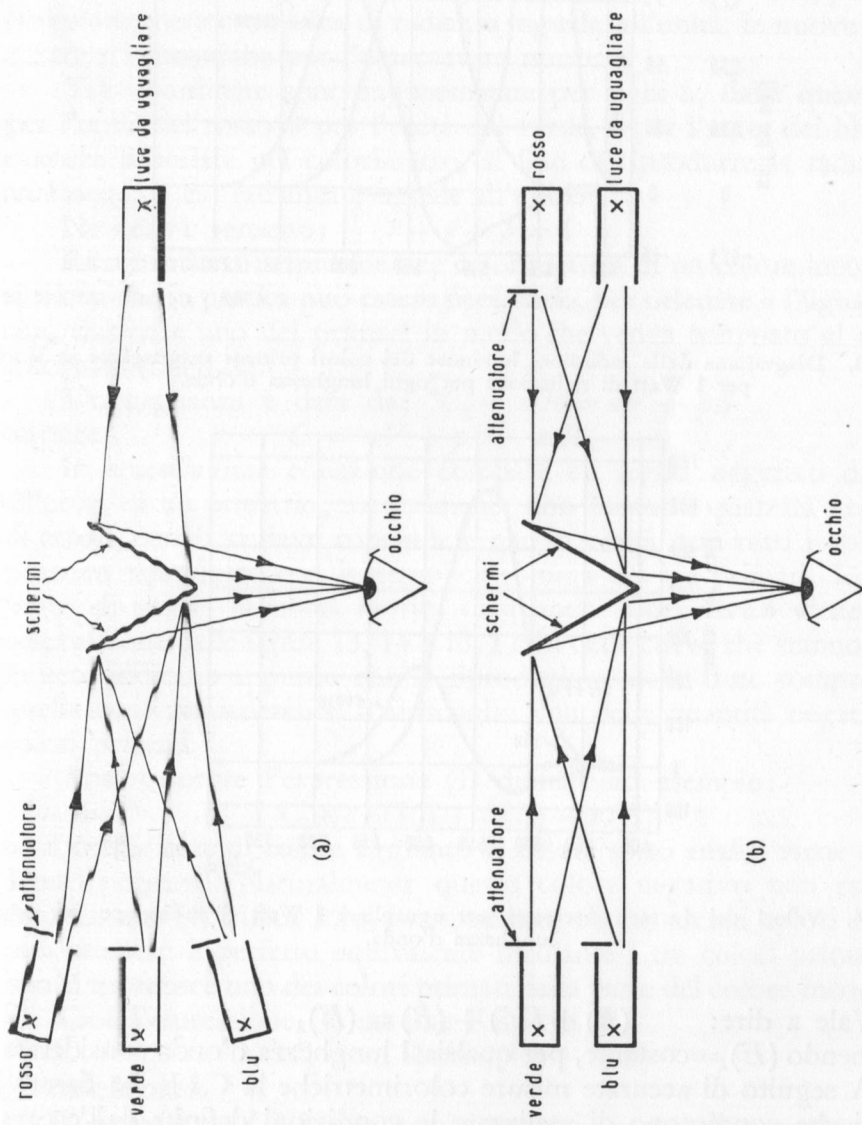


Fig. 12. Rappresentazione schematica di due tipi di colorimetri. a) Confronto fra somma dei tre primari e colore incognito. b) Trasferimento di un primario col colore incognito.

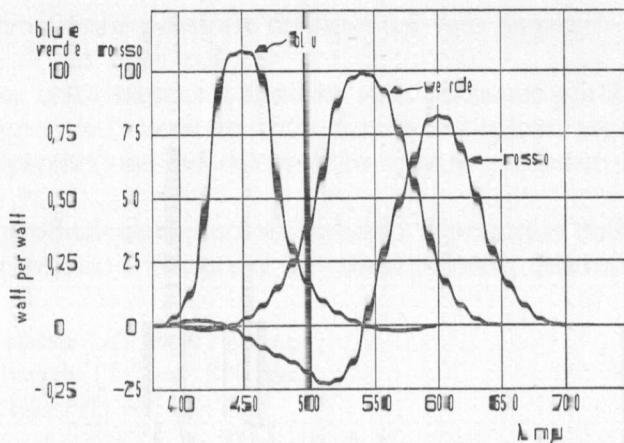


FIG. 13. Diagramma delle radiazioni luminose dei colori primari ragguagliate in Watt per 1 Watt di radiazione per ogni lunghezza d'onda.

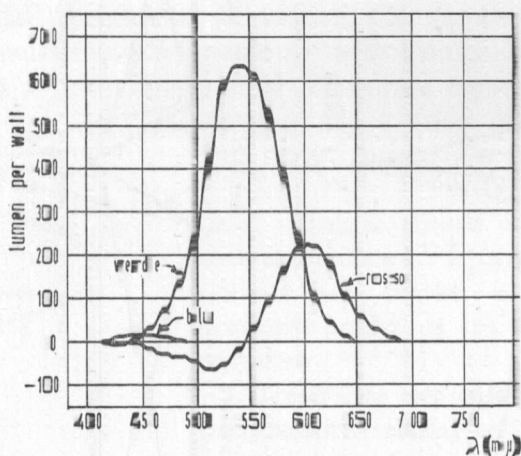


FIG. 14. Valori dei Lumen necessari per uguagliare 1 Watt di radiazione per ogni lunghezza d'onda.

Vale a dire: $(R) + (V) + (B) = (E)_\lambda$ (2)
 assumendo $(E)_\lambda = \text{costante}$, per qualsiasi lunghezza d'onda considerata.

A seguito di accurate misure colorimetriche la C.I.E. ha fissato i valori che consentono di realizzare le condizioni definite dall'espressione ora accennata.

Tali valori espressi in lumen sono:
 per l'unità (R) 1 lumen;

per l'unità (V) 4,59 lumen;
 per l'unità (B) 0,06 lumen.

Questi valori sono denominati *fattori di luminanza*. Una volta definita la luminanza di ciascuna sorgente, si è cercato di fissare, per ogni emissione monocromatica di radianza uguale all'unità, le nuove coordinate tricromatiche per l'osservatore normale.

Tali coordinate sono rappresentate per ogni λ , dalle quantità \bar{r} , per l'unità del rosso, \bar{v} per l'unità del verde, \bar{b} per l'unità del blu, che occorre miscelare nel colorimetro, al fine di riprodurre la radiazione analizzata, la cui radianza è uguale all'unità.

Ne deriva pertanto: $\bar{r} + \bar{v} + \bar{b} = 1$ (3)

Ritornando alla riproduzione colorimetrica di un colore incognito, si rileva che in pratica può essere necessario, per ottenere « l'uguaglianza », trasferire uno dei primari in modo che venga sommato al colore incognito (fig. 12b).

L'uguaglianza è data da: $C_2 + mR = nV + pB$
 oppure: $C_2 = nV + pB - mR$.

In quest'ultima equazione compare un segno negativo davanti all'unità di un primario; naturalmente non esistono quantità negative di colori, perciò si deve concludere che in realtà non tutti i colori si possono riprodurre con la semplice somma dei tre primari. La conferma di questa necessità teorica di quantità « negative » viene dalla osservazione delle figure 13, 14 e 15. I lobi delle curve che stanno sotto lo zero indicano appunto che la riproduzione delle tinte comprese in quelle zone richiederebbe il miscuglio con delle quantità negative di colori primari.

Analogamente l'espressione (1) diviene ad esempio:

$$C_1 \equiv v_1(V) + b_1(B) - r_1(R) \quad (4)$$

ed il coefficiente di colore aggiunto al colore sotto analisi viene considerato negativo. Naturalmente questo colore negativo non esiste e l'espressione (4) indica solo, lo ripetiamo, che di alcuni colori non si può ottenere il perfetto equivalente mediante i tre colori primari, se non si trasferisce uno dei colori primari dalla parte del colore incognito.

Cioè l'espressione (4) assume l'aspetto di:

$$C_1 + r_1(R) \equiv v_1(V) + b_1(B)$$

già considerato.

L'espressione (1) è conosciuta sotto il nome di equazione del *tristimolo*: i coefficienti r , v e b , detti valori di tristimolo, indicano l'esistenza di tre componenti associati per stimolare la sensazione del colore nell'occhio.

Diagramma spaziale dei colori

La rappresentazione spaziale delle tre caratteristiche del colore descritta dal cilindro di Munsell (fig. 11) è una rappresentazione unicamente informativa; le dimensioni del cilindro non sono legate da alcuna unità fisica. Ora invece, con tre elementi variabili rappresentati dalle unità primarie, indicando ogni primario con un vettore, si può costruire un solido del colore, con dimensioni che sono correlate con le unità primarie. I tre vettori dei (tre) primari, posti nello spazio a 90° tra loro (potrebbe valere qualunque posizione reciproca), comprendono nell'ottante da loro delimitato tutti i colori, rappresentabili da vettori partenti dal punto di unione dei tre vettori primari e che sono funzioni lineari delle unità primarie. Se si prendono i tre vettori di uguale lunghezza (cioè $r = v = p = 1$) e si stabilisce che tale lunghezza è proporzionale a 1 unità primaria, si può costruire il « cubo unitario » (fig. 17). Il vertice dal quale iniziano i tre vettori unitari corrisponde al nero ed il vertice opposto corrisponde al bianco che in ragione dell'entità dei primari scelti può essere il bianco unitario (come nel nostro caso, perchè $= 1R + 1V + 1B$). La diagonale del cubo rappresenta tutti i colori neutri, cioè le variazioni dal nero al bianco.

Il cubo unitario include i punti corrispondenti ai colori che si possono riprodurre con il miscuglio di unità positive dei primari; la fun-

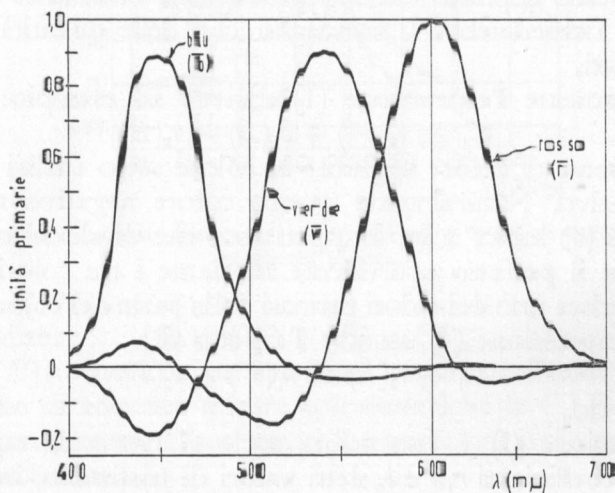


FIG. 15. Diagramma internazionale in unità primarie CIE, necessario per uguagliare l'unità radiante per ogni lunghezza d'onda.

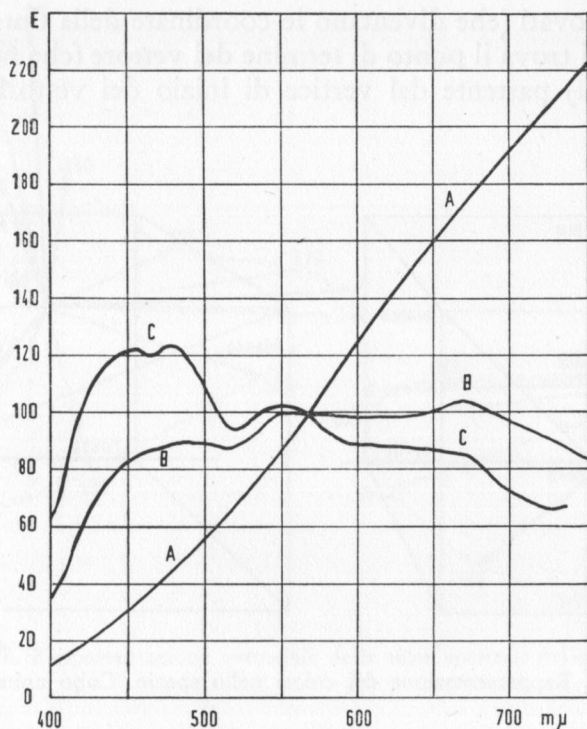


FIG. 16. Distribuzione spettrale nei campioni normalizzati di luce bianca. Bianco A, Bianco B, Bianco C. Il Bianco C è stato adottato come riferimento nella TV a colori.

zione del cubo unitario come elemento di studio si completa riportando in tale cubo i valori delle unità per ogni lunghezza d'onda dei primari RVB di figura 15.

In altre parole un colore può essere specificato come già visto:

$$C = mR + nV + pB$$

Quando

$$m = n = p = 1$$

si ha il bianco unitario; per tutti gli altri valori di m , n , p , si avranno, come risultato del miscuglio, infinite altre tinte.

Per esempio per la tinta di $500 \text{ m}\mu$ si ha (da fig. 15):

$$C = -0,17R + 0,35V + 0,13B$$

Tenendo presente che i vettori originali sono di valore 1 e ripor-

tando i dati trovati (che diventano le coordinate della tinta di 500 mg.) nello spazio, si trova il punto di termine del vettore (che rappresenta la tinta a 500 mg.) partente dal vertice di inizio dei vettori primari (v. fig. 18).

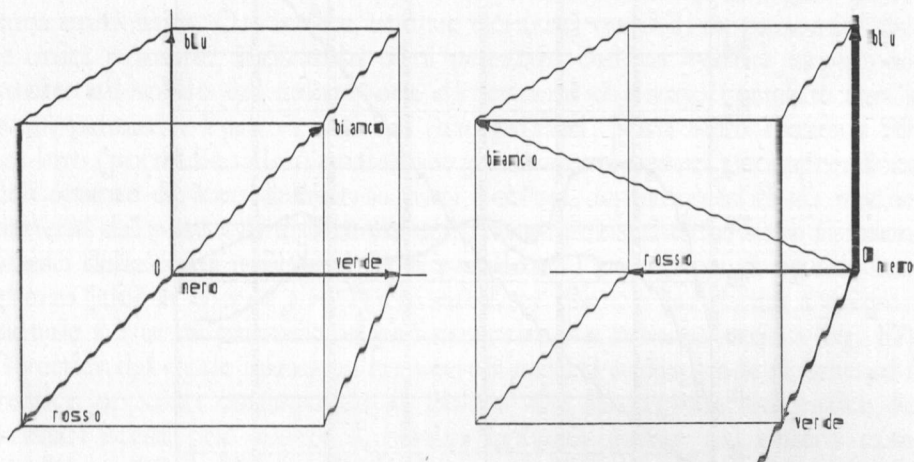


FIG. 17. Rappresentazione dei colori nello spazio. Cubo unitario.

Analogamente si possono disegnare tutti gli altri vettori, cioè tradurre in rappresentazione spaziale le curve di fig. 15.

In questa rappresentazione spaziale esiste un piano particolare che è il luogo di tutti i colori aventi coefficienti primari la cui somma è 1 (cioè $\bar{r} + \bar{g} + \bar{b} = 1$). Tale piano (piano unitario) interseca il cubo come è mostrato in figura 19. I vettori delle singole tinte (considerando anche i colori nella cui composizione entrano quantità negative) incontrano tale piano originando la curva illustrata in figura 20. Il piano unitario, delimitato da questa curva, forma con la parte rimanente del cubo, il cono dei colori spettrali, cioè compresi in tutto lo spettro di frequenza di fig. 16. Si possono fare le seguenti considerazioni.

a) Nel cono dei colori realizzabili la direzione dei vettori è in relazione alla tinta dei colori rappresentati mentre la lunghezza dei vettori è in relazione alla loro luminanza.

b) Le caratteristiche del colore che interessano dal punto di vista colorimetrico sono unicamente quelle cromatiche, cioè la tinta e la saturazione dei colori in esame; la terza caratteristica, la luminanza, è legata unicamente al livello di illuminazione, cioè alla potenza delle

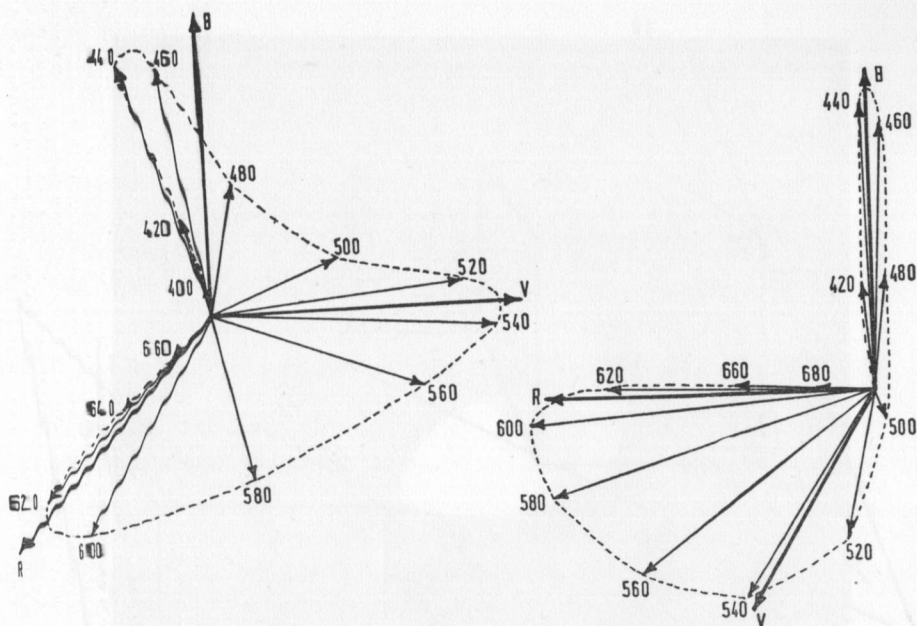


FIG. 18. Rappresentazione vettoriale delle tinte spettrali nello spazio.

sorgenti luminose e, da un punto di vista teorico (che si avvicina molto anche alla pratica), non influisce sulle prime due. Facendo un paragone radiotecnico, sarebbe come considerare solo la frequenza e la larghezza di banda di un'emissione di un trasmettitore senza occuparsi della potenza in gioco.

È chiaro pertanto che la cromaticità di un colore può essere legata alla direzione di un vettore rappresentativo: la luminanza dello stesso colore sarà espressa dall'intensità del vettore, cioè dalla sua lunghezza.

Possiamo perciò passare dallo spazio tridimensionale ad una superficie bidimensionale per una rappresentazione più semplice e più facile dei colori, se ci accontentiamo di rappresentare solo la tinta e la saturazione, trascurando la luminanza.

In altre parole rappresentando il colore solo con la sua cromaticità e trascurando la luminanza, si otterranno dei diagrammi di cromaticità con informazioni complete sulla tinta e sulla saturazione, ma nessuna informazione sulla luminosità.

Questa semplificazione è però lecita, poiché l'equivalenza fra i tre colori primari componenti ed il colore risultante viene conservata qua-

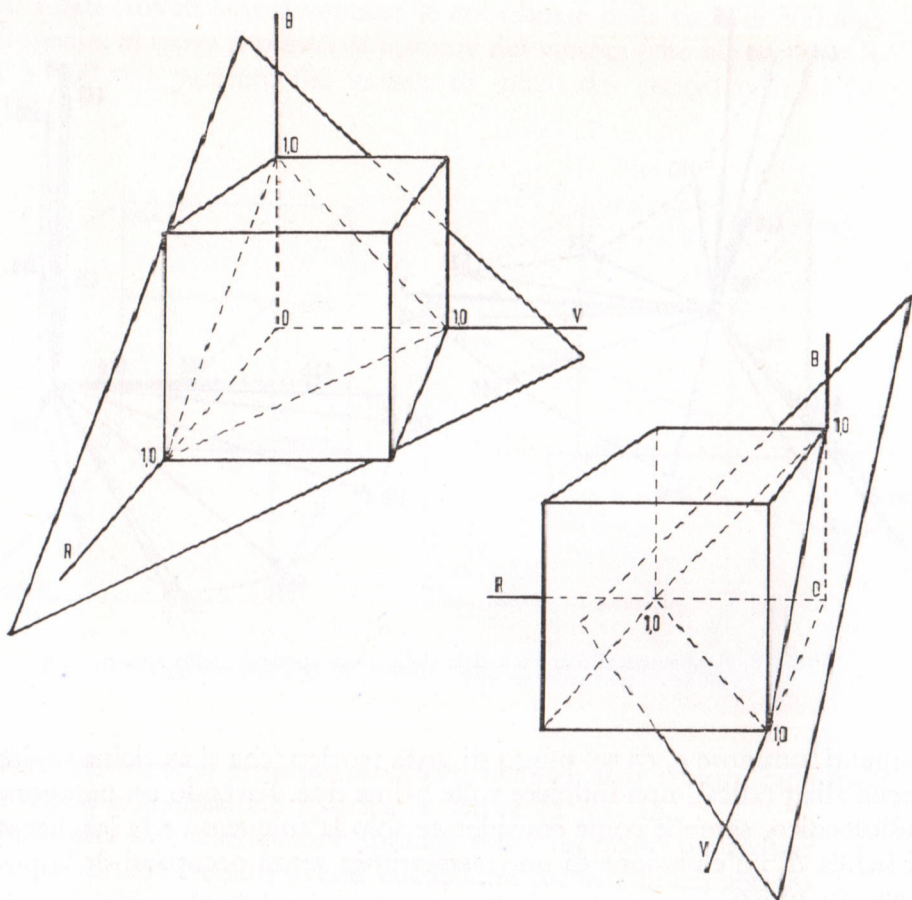


FIG. 19. Intersezione del cubo unitario da parte del piano unitario.

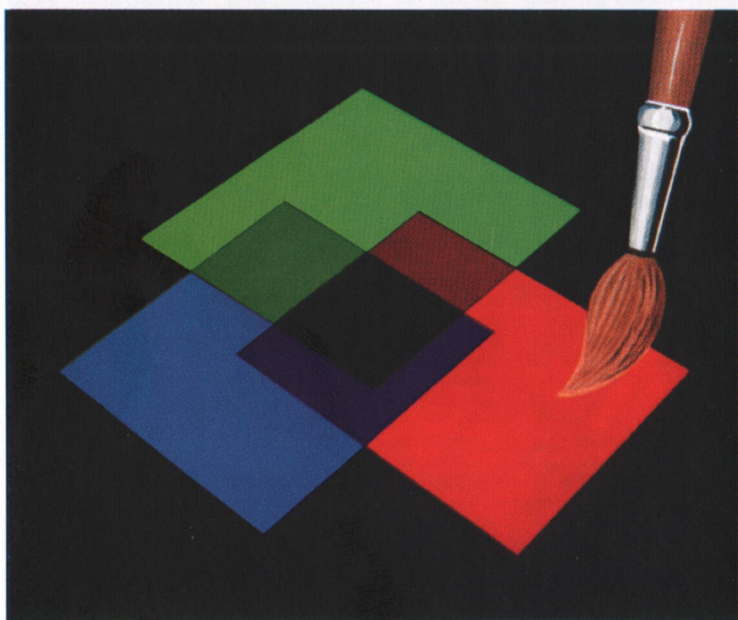
lora si moltiplichino la luminanza di ciascun colore per uno stesso coefficiente.

Accettato che la caratteristica « luminanza » non è determinante ai fini che ci siamo proposti e ricordando quanto detto al punto a), ne segue che la lunghezza dei vettori del cono dei colori è un elemento che non interessa al nostro studio; da questo si deduce che possiamo interessarci solo della posizione dei vettori, posizione che può essere determinata su un piano e non più nello spazio.

Il piano sul quale vengono considerate le posizioni dei vettori è il piano unitario già visto (figg. 19-20); come già detto, ogni punto di



a)



b)

TAVOLA B - a) Il procedimento di sintesi tricromatica additiva. La somma dei tre colori dà il bianco (televisione). — b) Il procedimento di sintesi tricromatica sottrattiva. La somma dei tre colori dà il nero (stampa).

questo piano corrisponde alla direzione di un vettore nello spazio e quindi è in relazione alle caratteristiche cromatiche del colore rappresentato.

Il piano viene preferibilmente tracciato come se fosse visto da un osservatore posto sul prolungamento dell'asse B (fig. 21): il triangolo RVB che risulta è evidentemente rettangolo.

Ogni colore può essere individuato su questo piano (diagramma di cromaticità) senza ricorrere alla costruzione spaziale. Questo si ottiene mantenendo l'ammontare delle unità dei primari del colore al valore 1 (secondo quanto già detto sul piano unitario).

Quindi un colore è così specificato:

$$C = mR + nV + pB.$$

Tale colore può essere portato sul piano unitario moltiplicando i coefficienti per un identico valore in modo da avere:

$$km + kn + kp = 1.$$

Il valore di k è $1/(m + n + p)$. Il colore kC risultante è un colore con le stesse caratteristiche cromatiche di C , ma con una luminosità tale per cui viene a giacere sul piano unitario. I coefficienti km , kn , kp daranno le coordinate per segnare il punto corrispondente al colore

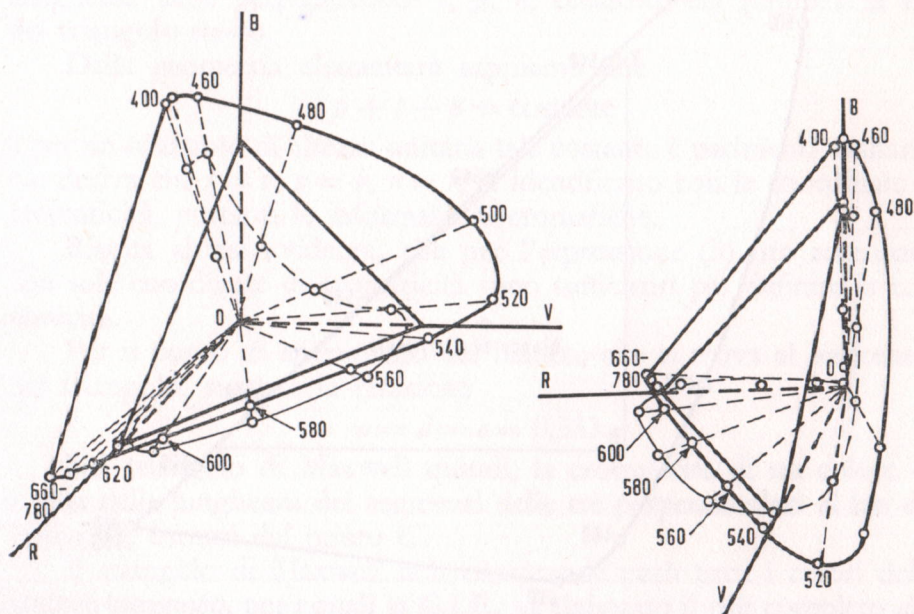


FIG. 20. Intersezione dei singoli vettori col piano unitario.

kC sul piano unitario; essendo però $km + kn + kp = 1$ saranno sufficienti solo due di questi coefficienti per individuare il punto sul piano. Tali coefficienti (di un certo colore) sono denominati *coordinate di cromaticità* del colore, e sono indicate dalle lettere piccole r, v, b . Essendo: $k = 1/(m + n + p)$ si ha:

$$\begin{aligned} km &= m/(m + n + p) = r \\ kn &= n/(m + n + p) = v \\ kp &= p/(m + n + p) = b. \end{aligned}$$

Il diagramma di cromaticità di figura 21 viene costruito (eliminando il passaggio attraverso la rappresentazione spaziale) inserendo i valori di r, v, b in un diagramma di coordinate cartesiane (fig. 19). Si può usare qualunque coppia di coordinate dei colori; ma normalmente vengono usate le coordinate r e v . I punti spettrali, cioè i punti riguardanti tutte le frequenze (tinte), vengono segnati su tale diagramma, calcolando le coordinate per ogni singola lunghezza d'onda in base ai valori delle curve di figura 15.

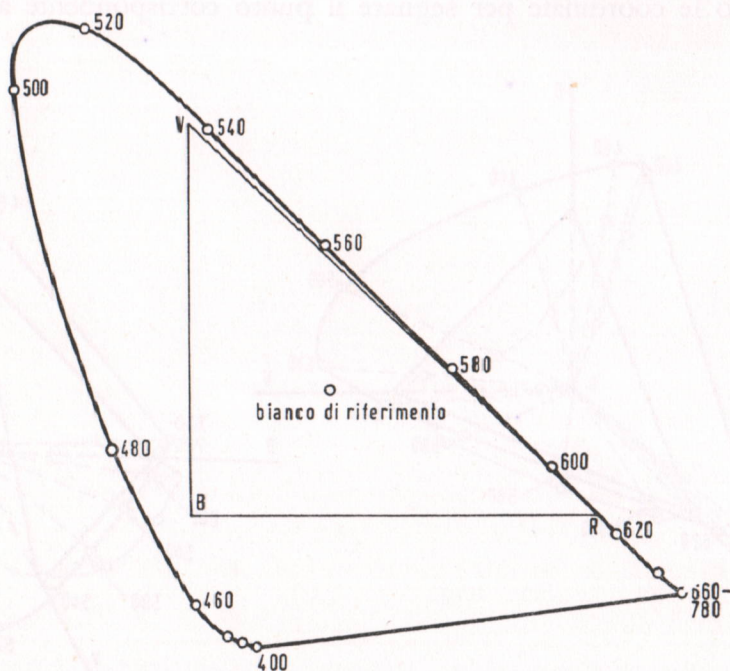


FIG. 21. Piano unitario e triangolo RVB. Diagramma di cromaticità.

La teoria colorimetrica

Sulla base di quanto premesso circa la sintesi tricromatica del colore, ed a seguito di studi e ricerche sperimentali di vari scienziati fra cui Chevreuil, Grassmann e Maxwell, si è pervenuti a stabilire un particolare diagramma a due dimensioni a coordinate trilineari.

I tre assi di coordinate sono scelti in modo da formare un triangolo equilatero, noto sotto il nome di triangolo di Maxwell.

I tre colori primari R , V e B sono posti ai vertici del triangolo in base alla espressione sopraccennata (1) ove

$$\bar{r} + \bar{v} + \bar{b} = 1 \quad (5)$$

In tale triangolo (fig. 22) la cromaticità di un colore C è data dalla lunghezza delle perpendicolari t , p , n , condotte dal punto c ai lati del triangolo stesso.

Dalla geometria elementare sappiamo che

$$p + t + n = \text{costante}$$

e per un triangolo di altezza unitaria tale costante è parimenti unitaria. Ne deriva che $t = v$, $p = b$, $n = r$, si identificano con le coordinate di cromaticità, portanti le informazioni cromatiche.

Risulta altresì evidente, che per l'espressione (5) ora accennata, due sole coordinate di cromaticità sono sufficienti per definire la cromaticità.

Per il punto di riferimento del bianco, che si trova al baricentro del triangolo, sussiste la relazione

$$a = d = c = 0,333.$$

Nel triangolo di Maxwell quindi, la cromaticità di un colore C , è data dalla lunghezza dei segmenti delle tre perpendicolari ai lati del triangolo, uscenti dal punto C .

Il triangolo di Maxwell non comprende però tutti i colori dello spettro luminoso, per i quali la C.I.E. ha elaborato il più completo *diagramma di cromaticità*.

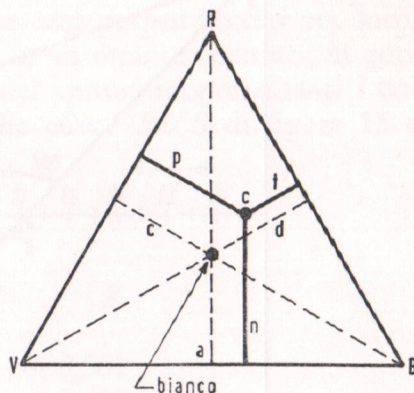


FIG. 22. Triangolo di Maxwell.

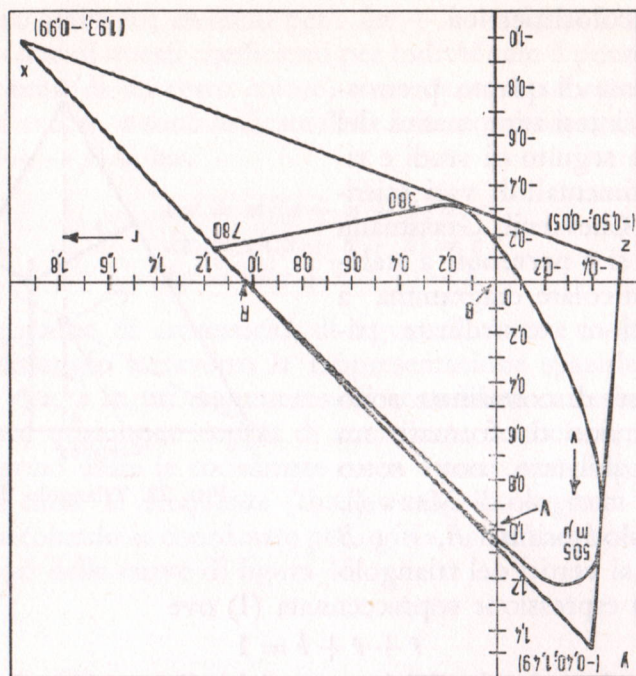


FIG. 23. Coordinate R, V , del triangolo degli stimoli $X-Y-Z$.

La terna dei primari usati finora (triangolo RVB) è compresa nel diagramma di cromaticità, mentre, per non avere coordinate negative, si dovrebbe avere quest'ultimo compreso nel triangolo delimitato dai tre primari.

Per soddisfare questa condizione bisogna scegliere tre primari diversi dai precedenti, primari che devono trovarsi fuori della curva dei punti dei colori spettrali e che perciò devono essere dei colori fittizi.

La C.I.E. ha scelto tre primari denominati $X Y Z$ che hanno le coordinate RVB mostrate in figura 23. Il fatto che appunto tali primari cadano fuori dal luogo dei colori spettrali indica che sono colori fittizi, meglio denominati « stimoli ». I valori di tali stimoli nello spettro della luce sono indicati dalle curve dei valori « tristimolo » di figura 24.

Tralasciando per il momento queste curve, osserviamo il triangolo XYZ di figura 23. Perchè questo triangolo possa essere facilmente usato deve essere portato ad assumere una forma rettangolare.

A questo risultato si perviene attraverso le vie già seguite per ottenere il triangolo RVB .

Ponendo XYZ nello spazio su tre assi perpendicolari tra loro, tutti i colori spettrali saranno compresi in un ottante positivo; in questo spazio si stabiliscono le posizioni dei vettori rappresentanti i colori spettrali, prendendone i valori dalle curve RVB di figura 15 e considerando le seguenti relazioni.

Specchio I

| | X | Y | Z |
|-----|---------|---------|---------|
| r | 1,93 | - 0,398 | - 0,501 |
| v | - 0,989 | 1,485 | - 0,050 |
| z | 0,059 | - 0,50 | 1,550 |

Specchio II

$$\begin{aligned}
 R &= 0,606 X + 0,298 Y + 0 Z \\
 V &= 0,147 X + 0,587 Y + 0,066 Z \\
 B &= 0,201 X + 0,115 Y + 1,102 Z
 \end{aligned}$$

Ogni colore generico

$$C = mR + nV + pB$$

può essere specificato anche come segue:

$$C = iX + jY + bZ$$

tenendo presenti le relazioni descritte nello specchio III.

Specchio III

$$\begin{aligned}
 i &= 0,606 m + 0,174 n + 0,201 p \\
 j &= 0,298 m + 0,587 n + 0,115 p \\
 b &= 0 m + 0,066 n + 1,120 p
 \end{aligned}$$

Questo colore generico ($iX + jY + bZ$) viene portato sul piano unitario XYZ con lo stesso sistema usato per il piano unitario RVB ; gli incontri dei vettori dei colori spettrali con tale piano unitario XZY danno origine alla curva che delimita il luogo dei colori spettrali (fig. 25) ed è contenuta nel triangolo XYZ . Questa curva, vista sul pro-

lungamento dell'asse Z , è mostrata in fig. 26; essa rappresenta appunto il diagramma di cromaticità $X-Y$.

Questo diagramma di cromaticità può essere costruito anche con un secondo metodo, come fatto per il diagramma $R-V$.

Ogni colore $C = iX + jY + bZ$ può essere portato sul piano unitario moltiplicando i suoi addendi per un medesimo fattore k , tale che

$$ki + kj + kb = 1$$

da cui

$$k = 1/(i + j + b)$$

Da questo si ha:

$$ki = i/(i + j + b) = x$$

$$kj = j/(i + j + b) = y$$

$$kb = b/(i + j + b) = z$$

I fattori i, j, b rappresentano l'ammontare delle unità di XYZ che sulle curve tristimolo di fig. 24 sono indicate rispettivamente con $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$.

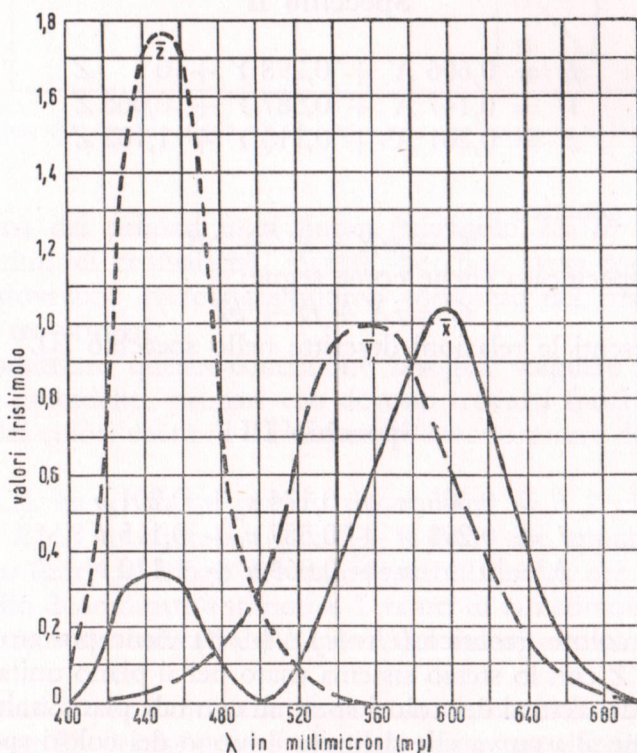


FIG. 24. Curve dei valori degli stimoli $X-Y-Z$.

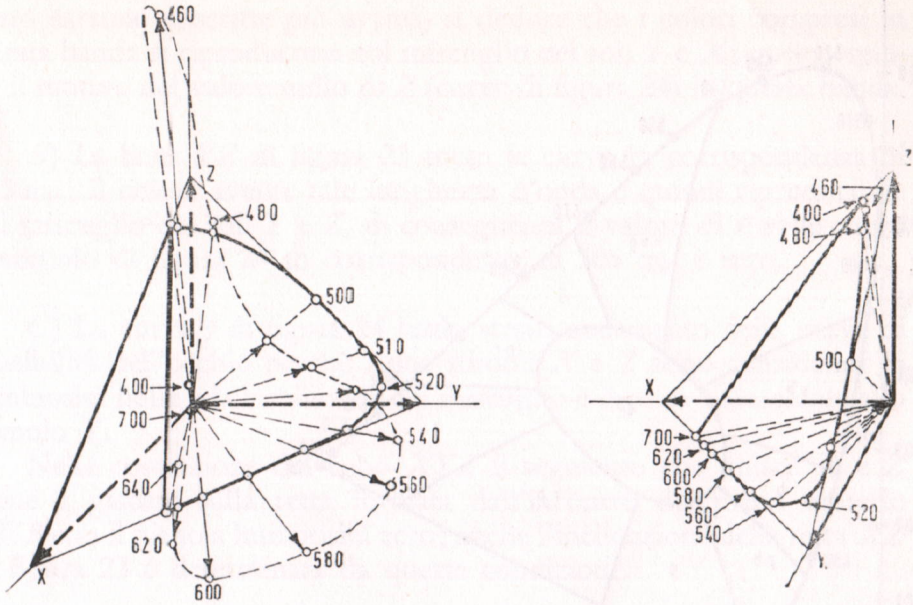


FIG. 25. Intersezione dei singoli vettori, ricavati dalle curve di fig. 24, col piano unitario X - Y - Z .

Riportando i valori delle curve di figura 24, per ogni lunghezza d'onda, nelle formule che danno $x \cdot y \cdot z$, si ottengono le coordinate per la costruzione del diagramma di cromaticità di figura 26.

Si fa ora un esempio pratico: leggendo i valori di \bar{x} e di \bar{y} sulle curve tristimolo di figura 24 in corrispondenza di $550 \text{ m}\mu$ si ha:

$$x = 0,43 / (0,43 + 1 + 0) = 0,43 / 1,43 = 0,3$$

$$y = 1 / (0,43 + 1 + 0) = 1 / 1,43 = 0,7.$$

Questi valori di coordinate, riportati sul diagramma di cromaticità, si incrociano appunto in corrispondenza della lunghezza d'onda di $550 \text{ m}\mu$.

La proprietà e le possibilità d'uso di questo diagramma saranno descritte più avanti.

Ora si pongono a confronto le figure 23 e 24 per poter meglio capire ambedue i diagrammi rappresentati.

A) La linea XY di figura 23 è tangente alla parte della curva dei colori spettrali aventi lunghezza d'onda da circa $550 \text{ m}\mu$ a $780 \text{ m}\mu$. Da una delle proprietà del diagramma di cromaticità (che come già

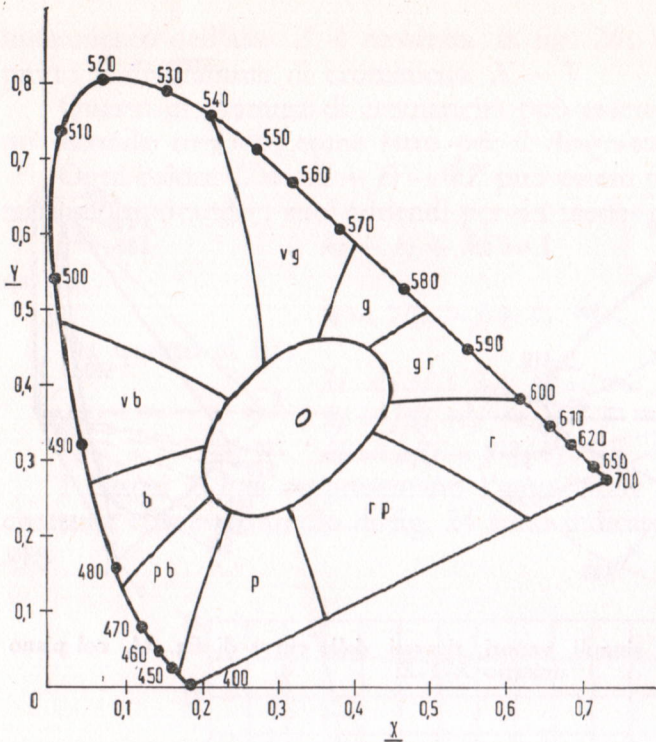


FIG. 26. Diagramma di cromaticità X-Y.

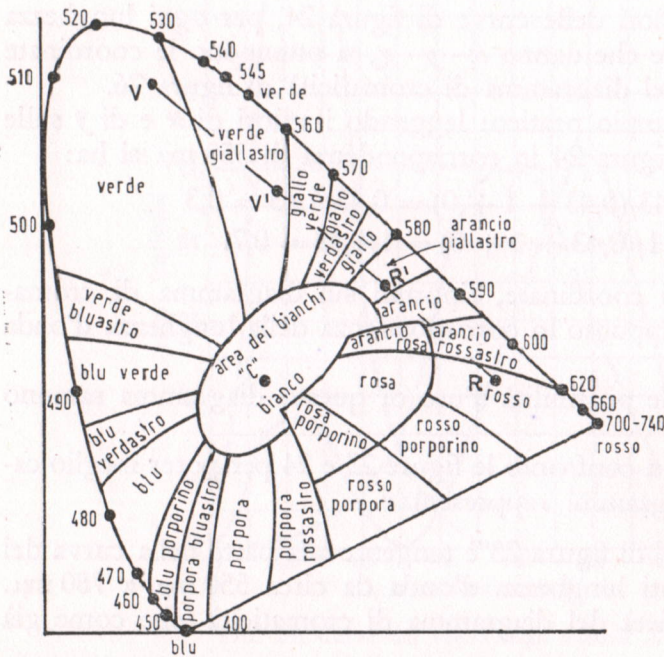


FIG. 27. Diagramma di cromaticità. La linea R-V attraversa i colori ottenibili con la miscela dei primari R e V.

detto saranno descritte più avanti) si deduce che i colori compresi in questa banda si riproducono col miscuglio dei soli Y e X ; questo spiega il motivo del valore nullo di Z (curve di figura 24) in questa banda.

B) La linea YZ di figura 23 tocca la curva in corrispondenza di $505 \text{ m}\mu$; il colore avente tale lunghezza d'onda è quindi riproducibile col miscuglio dei soli Y e Z , di conseguenza il valore di \bar{x} sulle curve tristimolo di figura 24 in corrispondenza di $505 \text{ m}\mu$ è zero.

C) La curva \bar{y} di figura 24 ha lo stesso andamento della curva di sensibilità dell'occhio perchè i due stimoli X e Z sono considerati di luminosità nulla e la luminosità del miscuglio è dovuta unicamente allo stimolo Y .

Nella costruzione del cubo XYZ il segmento che unisce X e Z viene a giacere sulla retta formata dall'incontro del piano unitario RVB con il piano a luminosità zero; anche l'inclinazione della retta XZ di figura 23 è determinata da questa condizione.

Diagramma di cromaticità

Si considerano ora alcune proprietà ed applicazioni del diagramma di cromaticità (figg. 25, 26, 27). In queste figure le tinte principali sono distinte; i colori saturi si trovano alla periferia della figura lungo la curva che la delimita; man mano che si considerano i colori sempre più vicini al centro, questi sono di saturazione sempre inferiore (per es.: si passa dal verde intenso al verde pastello, al verde pallido). L'area centrale comprende i colori con bassissima saturazione, cioè i colori pallidi che possono considerarsi come bianchi.

I numeri (da 400 a 740), segnati nella curva delimitante il diagramma, indicano le rispettive lunghezze d'onda dei colori in millimicron ($1 \text{ m}\mu = 10^{-9} \text{ m}$) dal viola-blu al rosso.

La linea retta che chiude la base rappresenta la gamma dei porpora, e non è segnata da alcuna lunghezza d'onda perchè non rappresenta colori spettrali, ma solo colori reali, riproducibili con miscuglio di rosso e di viola.

Si fanno ora alcune considerazioni sull'uso del diagramma:

A) Un segmento di retta che congiunge due punti corrispondenti a due colori (fig. 27) indica che tutti i colori attraversati da tale segmento

sono riproducibili con il miscuglio dei due colori di origine del segmento stesso (nella fig. 27, *V* e *R*).

Tale miscuglio, nel nostro caso, a seconda dei rapporti in cui vengono sommati i due colori d'origine, può essere giallo-verde, giallo-arancio, arancio-rosso, ecc.

B) Un segmento di retta che parte dal punto *C* (fig. 28) e si congiunge ad un colore saturo indica, lungo il suo percorso, le variazioni della quantità di bianco presente nei colori rappresentati dai punti che tocca; in altre parole indica la saturazione di questi colori da bianco a verde saturo (*A*) attraverso il verde pallido, pastello, intenso, (saturo).

C) Ancora un segmento di retta che congiunge due punti corrispondenti a due colori, passando dal punto *C* (v. fig. 29, *F* e *G*)

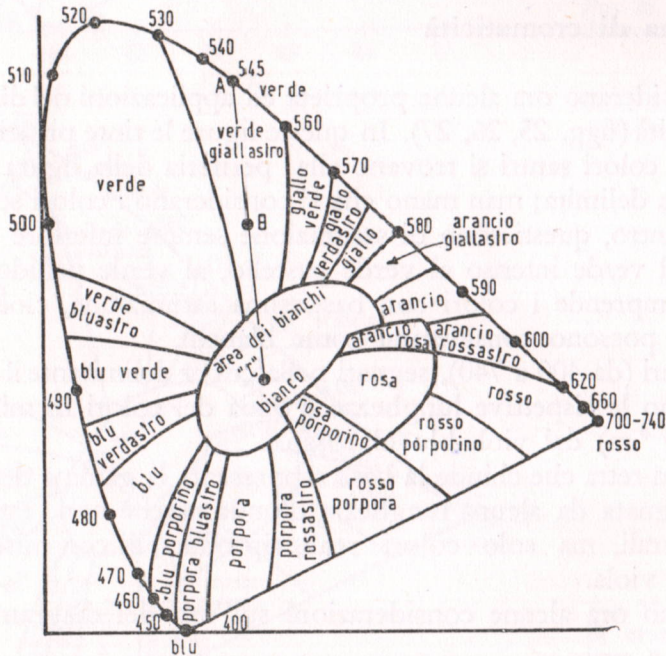


FIG. 28. Diagramma di cromaticità. La linea indica la saturazione del verde, dalla saturazione massima (punto *A*) alla saturazione zero (punto *C*).

indica che un miscuglio di questi due colori (fatto nel rapporto in cui stanno i due segmenti $C-F$ e $C-G$) dà come risultato il bianco; questi due colori sono « complementari ». Sono tali tutti i colori che sommati danno appunto il bianco; sul diagramma di cromaticità si notano perchè possono essere congiunti con una linea retta che passa per il punto C .

D) Il potere risolutivo dell'occhio in merito alle minime variazioni di tinta si può constatare sul diagramma di cromaticità di fig. 30. Tali limiti sono stati definiti sperimentalmente e, applicati al diagramma di cromaticità, hanno dato come risultato le ellissi di fig. 30. La distanza tra il puntino centrale e la periferia di ogni ellisse rappresenta circa cento volte la distanza corrispondente ad una minima percezione di variazione di tinta; ciò vale a dire che l'occhio, passando dall'osservazione della tinta corrispondente al punto centrale ad una tinta in

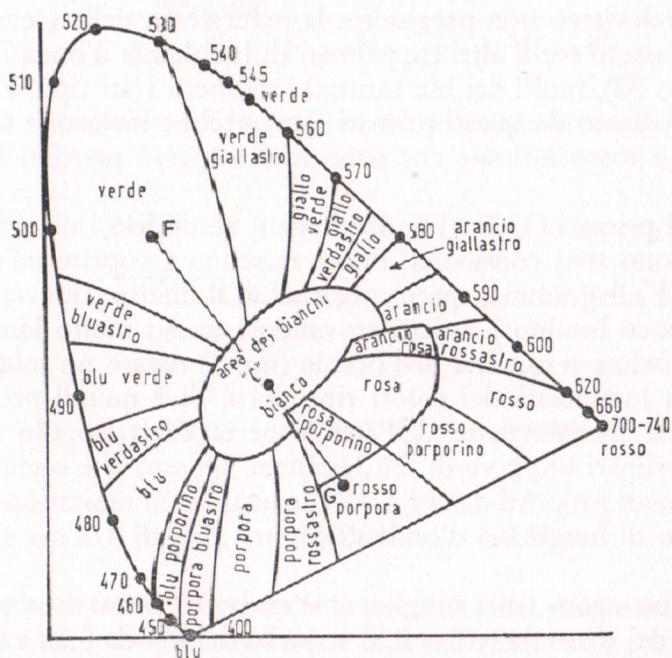


FIG. 29. Diagramma di cromaticità. La linea indica i colori ottenibili con la miscela dei colori F e G . Questi colori si dicono complementari perchè la loro miscela può dare come risultato il bianco (punto C).

corrispondenza di un punto sul perimetro di un'ellisse, può notare 100 variazioni di tinta.

Il fatto che le ellissi abbiano l'asse maggiore orientato nel senso della congiungente i verdi e i blu e l'asse minore orientato nel senso della congiungente i rosso-arancione e i blu-verde indica che l'occhio percepisce variazioni più piccole delle tinte che si trovano lungo quest'ultimo asse.

Questa caratteristica sarà poi richiamata in causa quando si dovranno descrivere le larghezze di banda delle informazioni del colore.

E) I colori primari scelti dalla C.I.E. sono il rosso di 700 $m\mu$, il verde di 541,1 $m\mu$, il blu di 435 $m\mu$ che sistemati sul diagramma di cromaticità formano il triangolo *RVB* (fig. 21) che copre circa $2/3$ dell'area racchiusa dai punti spettrali.

I colori non compresi in questo triangolo non possono essere riprodotti dalla combinazione addittiva dei tre primari standard. L'area fuori triangolo include i verdi e i blu saturati; però questi colori difficilmente si trovano in natura e quindi la loro assenza dallo schermo del ricevitore televisivo non pregiudica la naturalezza delle scene.

Se si fossero scelti altri tre primari di lunghezza d'onda 700, 500 e 460 $m\mu$ (fig. 32), molti dei blu saturati sarebbero stati riprodotti, ma il triangolo formato da questi primari non avrebbe incluso le tinte arancio, giallo e rosso saturate che sono molto spesso presenti in natura.

F) I primari C.I.E. (blu 435,8 $m\mu$ - verde 546,1 $m\mu$ - rosso 700 $m\mu$) che sono stati considerati finora riescono a coprire un'estesa superficie del diagramma, però presentano il difetto di avere il rosso ed il blu poco luminosi. Infatti trovandosi questi molto lontani dalla zona di massima sensibilità dell'occhio (fig. 3) danno un minimo contributo alla luminosità dei colori riprodotti. Si è quindi preferito sacrificare una piccola parte dell'area coperta dal triangolo *RVB* ed avere dei primari blu e verdi più luminosi. Questo si è ottenuto adottando i primari proposti dalla F.C.C. (Federal Communication Commission): rosso di lunghezza d'onda di 610 $m\mu$, blu di 472 $m\mu$ e verde di 520 $m\mu$.

Il cambiamento della lunghezza d'onda dei primari ha portato la luminosità del rosso da 0,01 a 0,51 e quella del blu da 0,02 a 0,11 (vedi la curva di luminosità relativa all'occhio di fig. 3). In conseguenza a questo spostamento pure le coordinate dei tre primari sul diagramma di cromaticità si spostano.

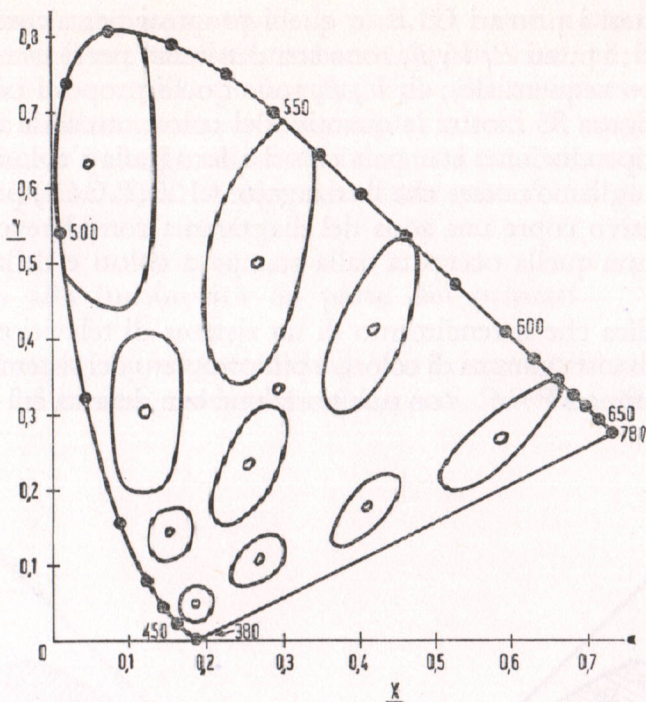


FIG. 30. Comportamento della sensibilità dell'occhio alle variazioni di colore.

Ecco ora le coordinate dei tre primari nei due sistemi (fig. 33).

| Primari | C.I.E. | | F.C.C. | |
|---------|--------|--------|--------|-------|
| | X | Y | X | Y |
| Rosso | 0,735 | 0,265 | 0,670 | 0,33 |
| Verde | 0,274 | 0,717 | 0,210 | 0,710 |
| Blu | 0,167 | 0,0089 | 0,140 | 0,080 |

Tenendo presenti le precedenti proprietà del diagramma di cromaticità, noi siamo ora in condizione di localizzare tutti i colori primari scelti per qualunque sistema di riproduzione di colore e l'area che detti primari possono racchiudere e quindi sapere quali sono i colori riproducibili. Le figg. 34 e 35 mostrano dei tipici esempi. Nella fig. 34

sono mostrati i primari C.I.E. e quelli proposti per alcuni sistemi di TV a colori; i punti $R_1 V_1 B_1$ sono standardizzati per il sistema a colori CBS (campo sequenziale); $R_2 V_2 B_2$ sono quelli proposti per il sistema RCA. La figura 35 mostra la quantità dei colori ottenibili da due altri sistemi di riproduzione: stampa a colori e fotografia a colori (Eastman-Kodak). Vogliamo notare che il triangolo RVB (F.C.C.) proposto per l'uso televisivo copre una zona del diagramma considerevolmente più larga che non quella occupata dalla stampa a colori e dalla fotografia a colori.

Questo indica che il rendimento di un sistema di televisione a colori, dal punto di vista gamma di colori, è più completo dei sistemi di stampa.

I tre primari F.C.C. con una posizione ben definita sul diagramma

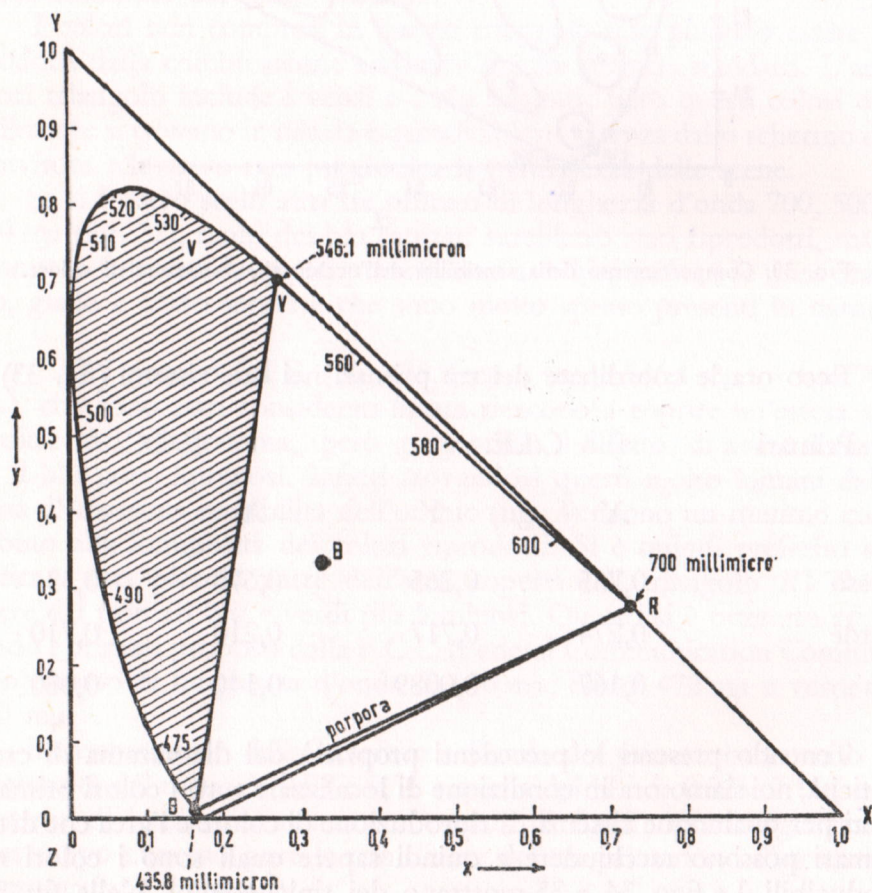


FIG. 31. Area dei colori riproducibili con i primari CIE.

di cromaticità, stabiliscono anche la tinta dei colori a cui i tubi di ripresa debbono essere sensibili mediante appositi filtri, ed il tipo di fosforo che deve essere usato nella costruzione dei tubi riceventi affinché i tre primari abbiano caratteristiche costanti in tutti gli equipaggiamenti ripresa-visione e quindi i colori riprodotti sul tubo ricevente debbano essere esattamente quelli compresi nel triangolo RVB di fig. 34.

Contributo alla luminosità da parte dei primari

È importante sapere il contributo che i singoli primari danno alla luminosità del bianco standard perchè questi contributi saranno pres;

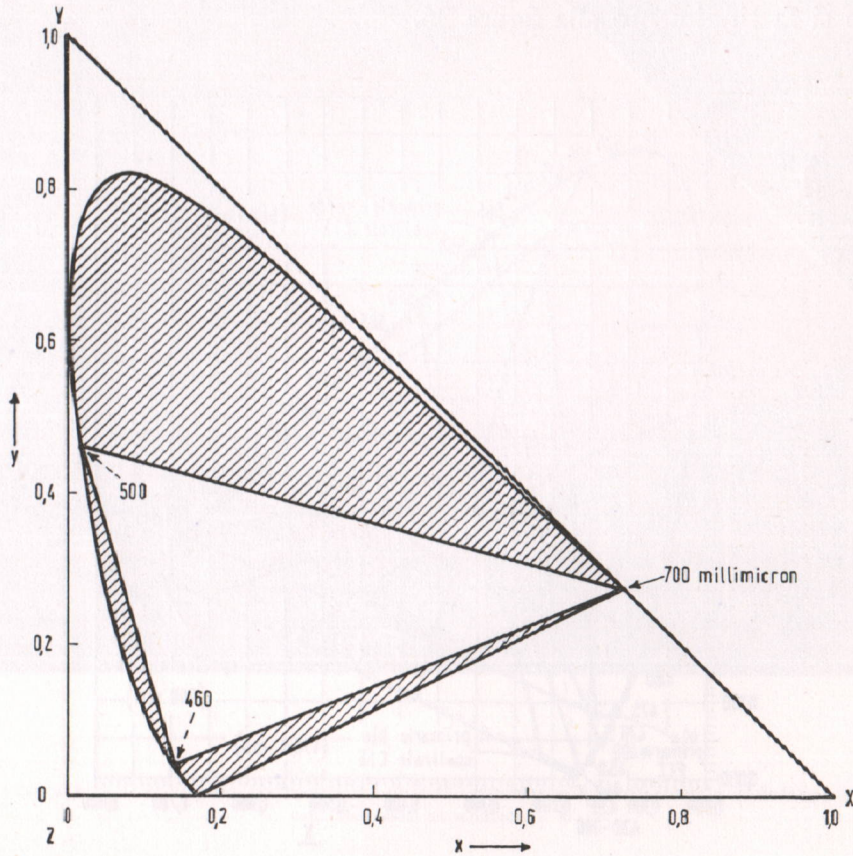


FIG. 32. Area dei colori riproducibili con tre primari qualsiasi, diversi da quelli CIE.

poi in considerazione e determineranno i valori dei segnali elettrici inerenti ai tre primari necessari per formare il segnale elettrico della luminosità. Naturalmente quest'ultimo argomento sarà trattato molto più estesamente quando si descriveranno i sistemi di TV a colori.

Il contributo è proporzionale alle luminosità dei singoli primari; queste luminosità possono essere rilevate mediante un fotometro a *flicker*, oppure calcolate matematicamente in base alle curve dei primari *RVB* ed alla curva di sensibilità dell'occhio, od anche calcolate graficamente dal diagramma di cromaticità.

Il fotometro a *flicker* dà l'indicazione di luminosità di una sorgente luminosa rispetto ad una luminosità nota confrontando l'effetto di *flicker* che due sorgenti anche di tinta diversa producono sull'occhio dell'osservatore medio.

Si illustra ora il metodo grafico. Per sviluppare questo metodo grafico si fa riferimento alla figura 36.

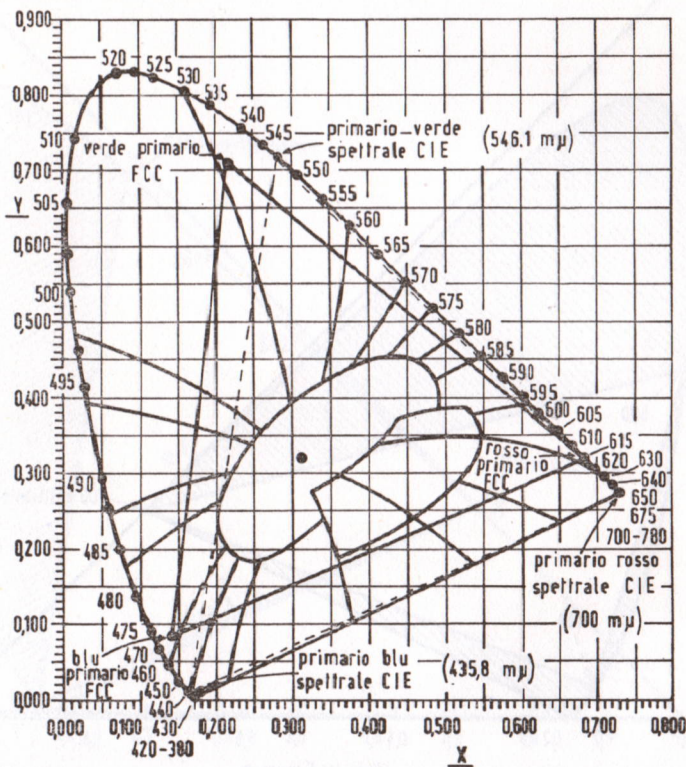


FIG. 33. Confronto fra le posizioni dei due triangoli *RVB* della CIE e della FCC.

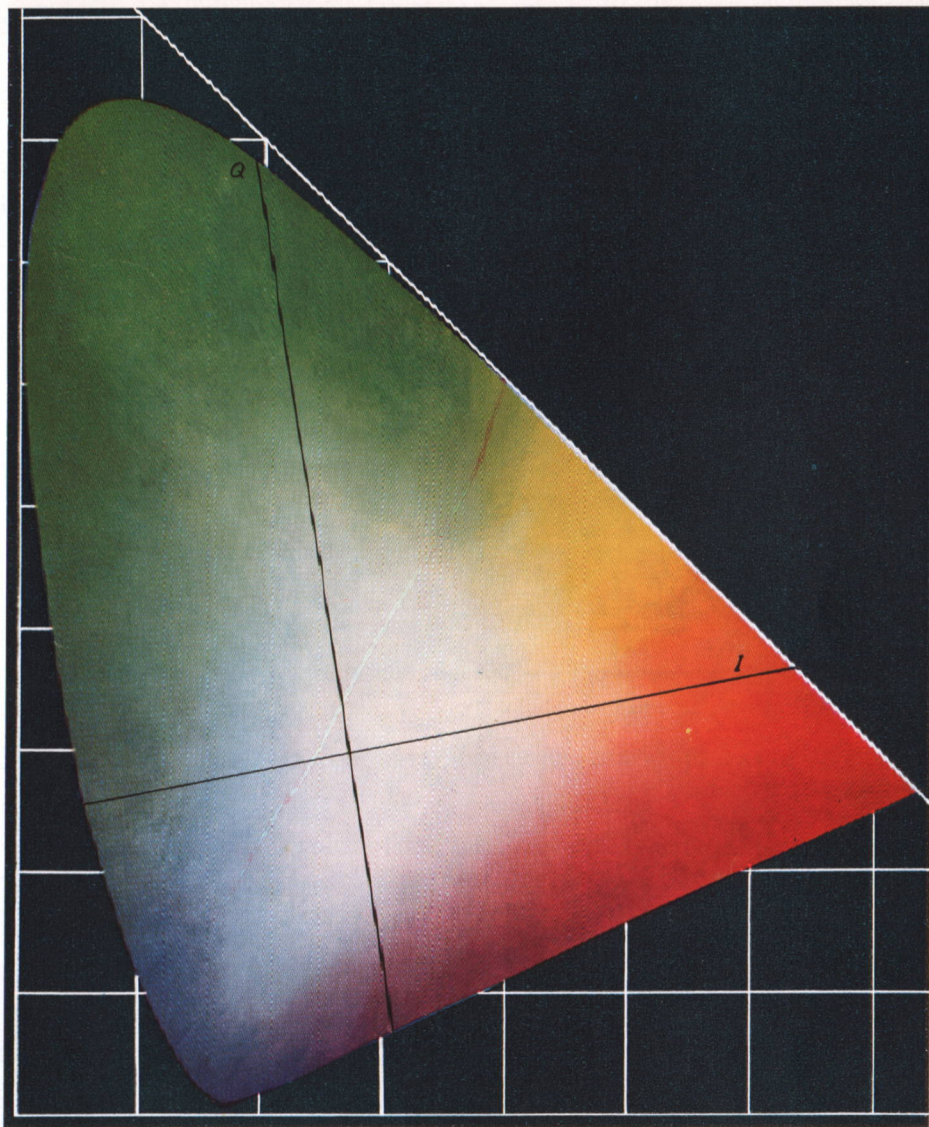


TAVOLA C - Il triangolo tricromatico della Commission Internationale Eclairage (C.I.E.)
con gli assi cromatici I e Q .

In questa figura i tre primari F.C.C. sono denominati: $A_1 - A_2 - A_3$ ed il bianco è denominato A_{123} .

Le coordinate di cromaticità sono le seguenti:

| | x | y |
|-----------------------------------|-------|-------|
| Bianco (sorgente standard C.I.E.) | 0,310 | 0,316 |
| Rosso | 0,670 | 0,330 |
| Verde | 0,210 | 0,710 |
| Blu | 0,140 | 0,080 |

Con questo metodo si ottiene quanto prefissato, « pesando » i valori tristimoli di $A_1 A_2 A_3$ (che rappresentano i tre primari RVB) a seconda delle distanze di tali primari da A_{123} (Bianco).

Si nota che A_{123} è posto sulla congiungente A_{12} ed A_3 . A_{12} riceve un certo contributo da A_1 a A_2 ; calcoliamo ora questo contributo:

$$1) y_1 = \text{coordinata } y \text{ di } A_1 = \frac{Y_1}{X_1 + Y_1 + Z_1} = \frac{Y_1}{D_1};$$

$$2) y_2 = \text{coordinata } y \text{ di } A_2 = \frac{Y_2}{X_2 + Y_2 + Z_2} = \frac{Y_2}{D_2};$$

D_1 e D_2 rappresentano una semplificazione, quindi si ha:

$$3) D_1 = Y_1/y_1 \quad D_2 = Y_2/y_2.$$

Ricordando che i valori tristimoli di ogni colore sono uguali alla somma vettoriale dei valori tristimolo dei colori che lo compongono si ha:

$$4) y_{12} = \frac{Y_1}{X_1 + Y_1 + Z_1} + \frac{Y_2}{X_2 + Y_2 + Z_2} = (\text{somma vettoriale})$$

$$5) y_{12} = \frac{Y_1 + Y_2}{X_1 + Y_1 + Z_1 + X_2 + Y_2 + Z_2} = \frac{Y_1 + Y_2}{D_1 + D_2}$$

$$y_{12} = \frac{Y_1/y_1 + Y_2/y_2}{(Y_1/y_1) + (Y_2/y_2)}$$

da cui:

$$6) (Y_1/y_1)(y_{12} - y_1) = (Y_2/y_2)(y_2 - y_{12}).$$

Tenendo presente che nel triangolo rettangolo l'ipotenusa è proporzionale alla lunghezza dei cateti si ha:

$$\frac{Y_1/j_1}{Y_2/j_2} = \frac{j_2 - j_1}{j_2} = \frac{A_2 - A_{12}}{A_2}$$

dove $A_2 - A_{12}$ e $A_{12} - A_1$ rappresentano le distanze tra i punti A_2 , A_{12} e A_1 ; distanze che si possono facilmente misurare in figura 36.

In modo analogo, considerando A_{12} inserito tra A_2 ed A_{13} si calcola il contributo di A_1 ed A_3 verso A_{12} ; si ha:

$$7) \frac{Y_1/j_1}{Y_3/j_3} = \frac{A_3 - A_{12}}{A_{12} - A_1}$$

Si hanno ora i rapporti Y_2/j_2 e Y_3/j_3 in termini misurabili come semplici distanze sul diagramma di cromaticità, ed in termini di Y_1/j_1 . Si ha dunque:

$$8) \frac{Y_1/j_1}{Y_2/j_2} = \frac{38,5}{35} = 1,1; \quad \frac{Y_1/j_1}{Y_3/j_3} = \frac{28}{44} = 0,630$$

da cui:

$$9) \begin{aligned} Y_2/j_2 &= Y_1/j_1 \cdot 1,1 \\ Y_3/j_3 &= Y_1/j_1 \cdot 0,63 \end{aligned}$$

Da queste si ricava Y_1

$$10) Y_1 = Y_2 \left(\frac{j_1}{j_2} \right) 1,1$$

$$Y_1 = Y_3 \left(\frac{j_1}{j_3} \right) 0,630$$

Inserendo i noti valori di $j_1 - j_2 - j_3$ (vedi coordinate) si ha:

$$11) Y_1 = Y_2 \frac{0,330}{0,710} \cdot 1,1 = 0,50 Y_2$$

$$Y_1 = Y_3 \frac{0,330}{0,080} \cdot 0,630 = 2,58 Y_3$$

Dando a Y_1 un valore arbitrario di 1, dipendendo gli altri due valori da Y_1 , si ha:

$$Y_1 = 1$$

$$Y_2 = \frac{1}{0,5} = 2$$

$$Y_3 = \frac{1}{2,58} = 0,388$$

per cui sommando Y_1 , Y_2 e Y_3 si ottiene:

$$Y_{123} = 3,400 \text{ (circa)}$$

I rispettivi contributi sono quindi:

$$12) \quad Y_1/Y_{123} = \frac{1}{3,400} \cdot 100 = \text{(circa) } 29\%$$

$$Y_2/Y_{123} = \frac{8}{3,4} \cdot 100 = \text{(circa) } 59\%$$

$$Y_3/Y_{123} = \frac{0,388}{3,4} \cdot 100 = \text{(circa) } 11\%$$

Questo vuol dire che la luminosità del bianco standard è dovuta per il 29% al primario Rosso, per il 59% al primario Verde e per l'11% al primario Blu (primari F.C.C.).

Da tutto quanto precede possiamo riassumere quanto segue.

I colori spettrali puri, definiti teoricamente dalle loro lunghezze d'onda, sono distribuiti lungo una curva chiamata *spectrum loci* cioè il luogo dello spettro visibile.

Tale curva passa evidentemente per i punti R , V e B già citati, relativi ai tre colori primari.

Qualsiasi colore può essere rappresentato nel diagramma, mediante coordinate cartesiane.

L'area interna del diagramma può essere suddivisa in zone cromatiche derivanti dalle miscele dei vari colori tra loro e col bianco, rispettando pertanto anche il concetto di saturazione del colore.

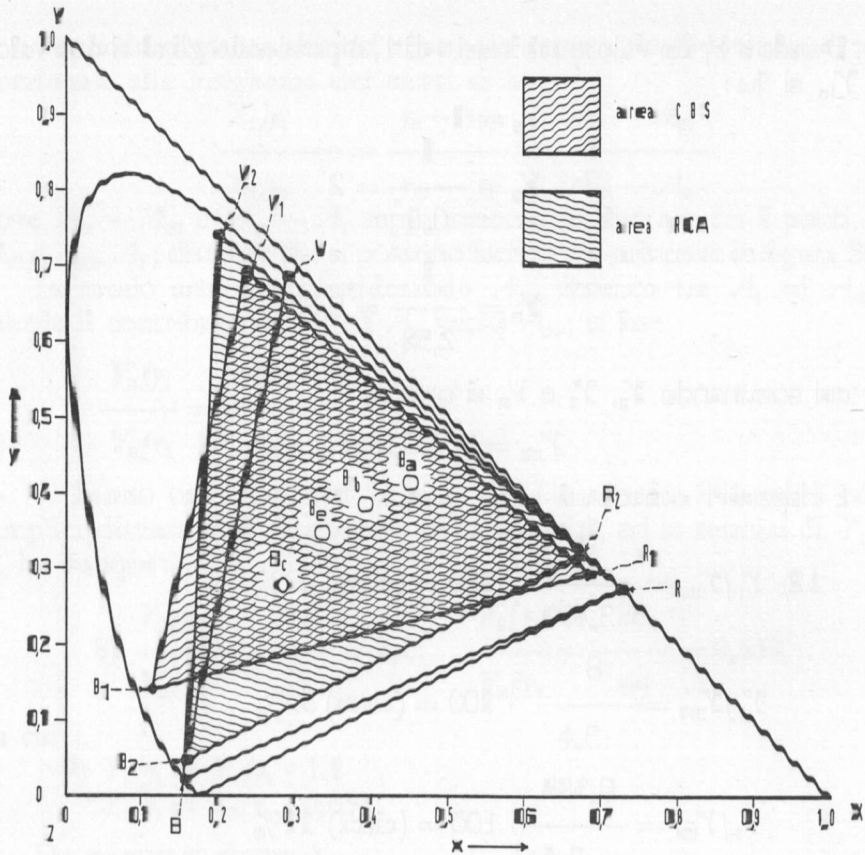


FIG. 34. Aree occupate da vari sistemi di TV a colori.

La zona centrale tende verso il bianco: il punto C rappresenta il bianco puro.

Qualsiasi retta tracciata sul diagramma e passante per C , incontra la curva delimitante il diagramma (spectrum loci) in due punti opposti corrispondenti a colori complementari, due colori, cioè, che mescolati tra loro formano il bianco.

Se su tale diagramma fissiamo tre punti corrispondenti ai tre colori primari adottati nella TV a colori, questi delimitano un triangolo (vedi fig. 37). Qualsiasi colore giacente all'interno di tale triangolo può essere riprodotto con gli attuali sistemi di televisione tricromatici.

Non vi è comunque da preoccuparsi per la mancata riproduzione

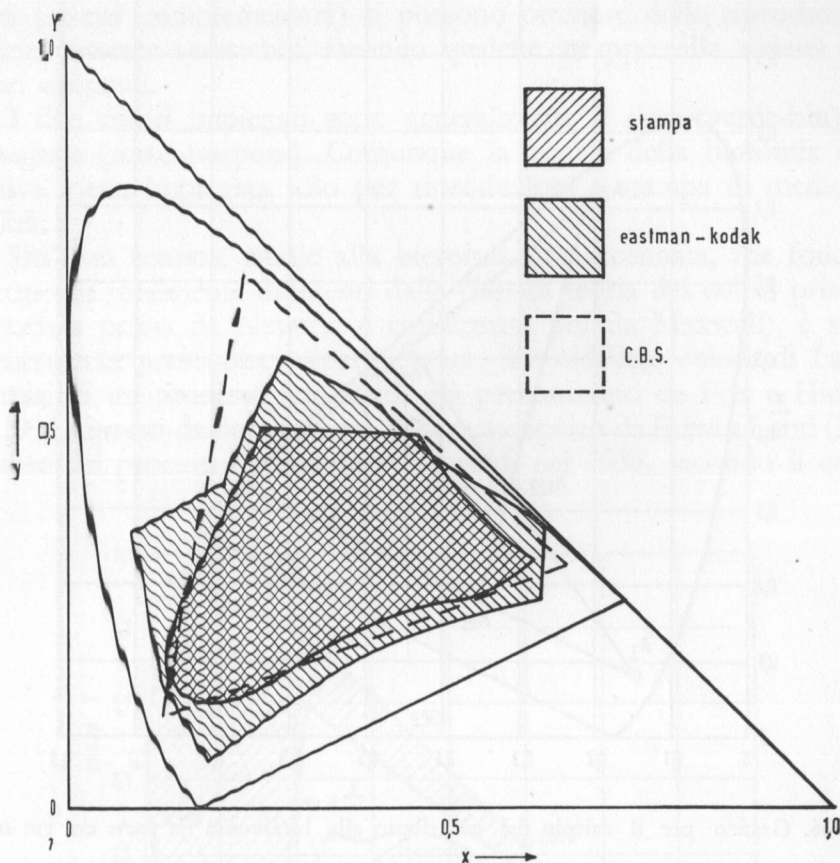


FIG. 35. Aree occupate da diversi sistemi di riproduzione di colori.

dei colori del diagramma, esterni al triangolo. In pratica è più importante che un'immagine a colori sia « gradevole », anzichè strettamente fedele all'originale.

Per altro la gamma di colori riproducibili dalla stampa (inchiostri) è ancor più limitata: la zona a linea sinuosa internamente al triangolo (fig. 37) della TV, ne delimita infatti l'estensione: eppure noi tutti sappiamo quali ottime e piacevoli riproduzioni a stampa si possano ottenere.

Per stampe a colori di estrema accuratezza, si fa comunque talvolta ricorso all'adozione di 4 colori, tre colori più il nero, come correttivo della riproduzione cromatica complessiva.

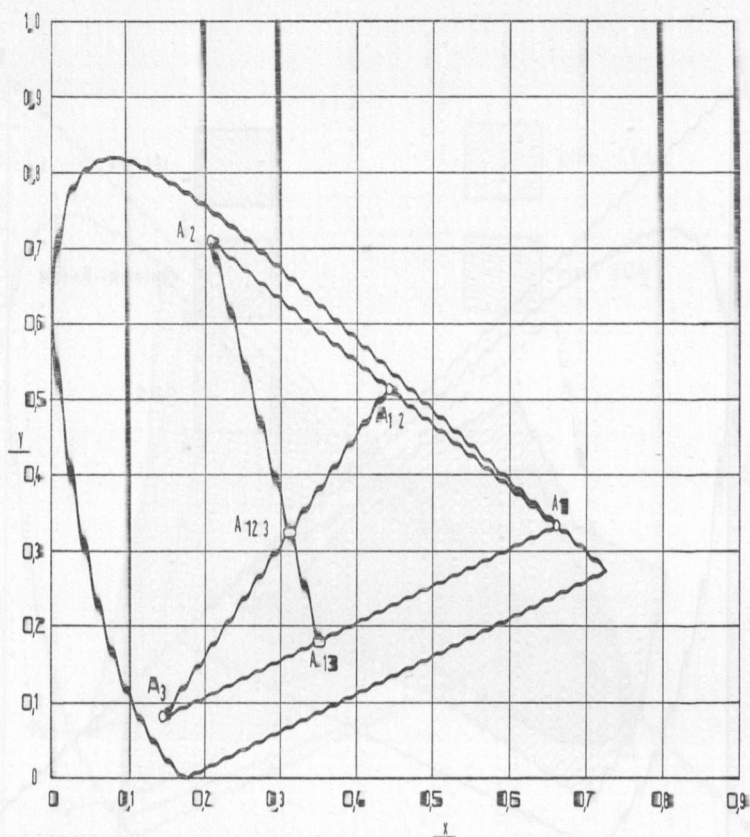


FIG. 36. Grafico per il calcolo del «contributo» alla luminosità da parte dei tre colori primari.

Occorre infine considerare che il diagramma di cromaticità è costruito su colori virtuali, teorici, molti dei quali (ad esempio i verdi ed i blu molto saturati) raramente si incontrano in pratica.

La bicromia semplice e la bicromia di Land

Sfruttando le facoltà di adattamento e di percezione cromatica del nostro ancora parzialmente misterioso senso della vista, e restringendo entro limiti accettabili o tollerabili le esigenze di fedeltà della riproduzione cromatica, è possibile ottenere delle immagini a colori, impiegando solamente due colori primari: la cosiddetta *bicromia*.

Impiegando infatti un'adatta miscela di due colori opportunamente scelti (colori complementari) si possono ottenere delle riproduzioni sufficientemente accettabili, facendo qualche strappo alla fedeltà dei colori originali.

I due colori impiegati sono generalmente il *ciano* (verde-blu) ed il *magenta* (rosso-porpora). Comunque la tecnica della bicromia sottrattiva viene impiegata solo per riproduzioni a stampa di mediocre qualità.

Un'altra tecnica, simile alla bicromia ora accennata, ma fondata su concetti totalmente differenti dalla classica teoria dei colori primari (enunciata prima da Newton e confermata poi da Maxwell), è stata recentemente presentata e sperimentata: il cosiddetto colore di Land. Trattasi di un processo additivo, già preconizzato da Fox e Hickey nel 1914, ripreso da Bernardi nel 1929 e riscoperto da Edwin Land (l'inventore del processo fotografico Polaroid) nel 1955, secondo il quale

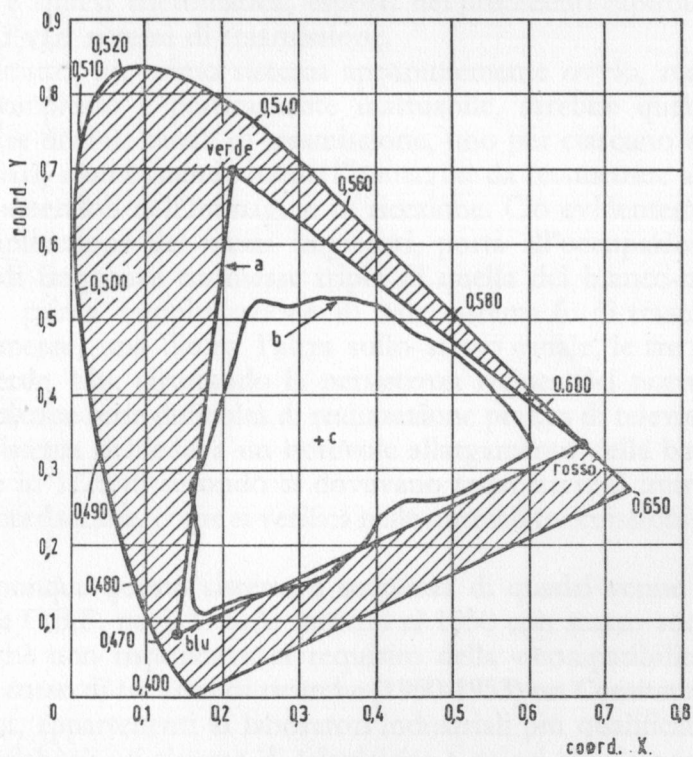


FIG. 37. Diagrammi di cromaticità della TV a colori (a) e della stampa a colori (b).

con la miscela di due soli colori (ed anche con la miscela di un solo colore col bianco) è possibile ottenere delle buone riproduzioni entro tutta la gamma dei colori visibili.

Ottimi e sorprendenti risultati sperimentali sono stati ottenuti secondo questo nuovo ed insolito procedimento, limitatamente però a proiezioni di due immagini variamente filtrate, sovrapposte su uno schermo di visione.

Varie ipotesi interpretative di tali risultati sono state avanzate; tutte però basate su presupposte reazioni fisiologiche del complesso occhio-cervello, assolutamente indipendenti dalla classica teoria del tristimolo accennata in precedenza. Il colore del Land però, pur avendo appassionato in molteplici discussioni tecnici e fisici, non ha trovato sinora applicazioni pratiche nella TV a colori.

CAPITOLO 4

I precedenti dell'attuale TV a colori

Sin dall'inizio dei primi esperimenti di televisione in bianco-nero, si pensò alla possibilità del colore. E sulla base dei concetti della colorimetria e sintesi tricromatica, esposti nei precedenti capitoli, vennero escogitati vari sistemi di trasmissione.

Anzitutto, un primo sistema apparentemente ovvio, ma estremamente complesso e praticamente inattuabile, sarebbe quello di impiegare tre distinti canali di trasmissione, uno per ciascuno dei tre colori primari, scomponendo in essi l'immagine da trasmettere alla ripresa e ricomponendoli nell'immagine in ricezione. Ciò evidentemente oltre alla complicazione dei mezzi impiegati, porta all'occupazione di una gamma di frequenze trasmesse tripla di quella del bianco-nero.

Una prima semplificazione di tale sistema fu di trasmettere sequenzialmente, una dietro l'altra sullo stesso canale, le tre immagini, rossa, verde, blu, sfruttando la persistenza retinea del nostro occhio. A parte alcune serie difficoltà di realizzazione pratica di televisori adatti, questo sistema richiedeva un notevole allargamento della banda video dato che in 1/25 di secondo si dovevano trasmettere 3 immagini, anziché 2 interlacciate, come si verifica nelle normali trasmissioni in bianco-nero.

Comunque questo sistema a sequenza di quadri venne sperimentato dalla C.B.S. negli U.S.A. intorno al 1950 con scarso successo, anche perchè non rispondeva al requisito della « compatibilità ».

Nel corso di tre anni di ricerche (1950-1953) un Comitato di esperti americani, appartenenti ai laboratori industriali più qualificati nel campo TV, elaborò un sistema di televisione a colori simultaneo compatibile, che prese il nome di NTSC (National Television System Committee).

Nel gennaio 1954 il massimo organismo U.S.A. per le telecomunicazioni, la F.C.C. (Federal Communication Commission), approvò ed adottò ufficialmente lo standard NTSC per la televisione a colori.

A questo punto è opportuno accennare alla relativamente recente comparsa di due nuovi sistemi di TV a colori, il sistema francese SECAM ed il sistema tedesco PAL, i quali, basati sui medesimi concetti fondamentali del sistema americano NTSC (luminanza costante-crominanza) se ne differenziano però in alcuni particolari di trasmissione del segnale di crominanza.

Fondamenti tecnici dei sistemi attuali di televisione a colori

Applicando razionalmente i vari concetti basilari che caratterizzano la funzionalità della nostra sensazione visiva (miscela delle alte frequenze *mid-highs*, e scarsa risoluzione delle piccole aree di colore), negli attuali sistemi di TV a colori (NTSC - SECAM - PAL), la trasmissione di un'immagine colorata viene realizzata secondo due distinti canali: un canale di luminanza e un canale di crominanza. Quest'ultimo poi viene ulteriormente suddiviso nelle due componenti di cromaticità (rosso-blu) che vengono trasmesse simultaneamente.

Si è convenuto di denominare con Y la componente di luminanza (¹⁾, con I la componente rossa e con Q la componente blu.

La componente di luminanza Y ha la stessa larghezza di banda video (5 MHz) delle normali trasmissioni TV monocromatiche (C.C.I.R.).

La componente di cromaticità I ha una larghezza di banda di 1,5 MHz.

La componente di cromaticità Q ha una larghezza di banda di 0,5 MHz.

Ma la caratteristica di maggiore peculiarità, che ha dato origine al sistema NTSC, è quella di essere riusciti a contenere le tre informazioni ora accennate (ciascuna con una propria larghezza di banda), entro la banda di frequenza video di 5 MHz dello standard della normale TV monocroma, senza sacrificio apprezzabile della qualità dell'immagine trasmessa, ed assicurando contemporaneamente la completa compatibilità dei televisori in bianco-nero.

(¹) Nuovo simbolo usato per distinguere questo segnale: pur essendo uguale al simbolo di uno dei tre stimoli X , Y , Z non ha riferimento con questi; Y identifica in questo caso una tensione.

Tale brillante risultato è stato ottenuto adottando il principio dell'interlacciamento di bande di frequenze (interleaving), interpolando gli spettri di frequenze delle due componenti cromatiche (I e Q) nello spettro di frequenze della luminanza (Y), che si presenta discontinuo (Mertz e Gray).

Analizzando lo spettro di frequenza di un segnale TV monocromo (segnale di luminanza, nel nostro caso) si è constatato che esso è costituito da gruppi di armoniche della frequenza di riga (15625 Hz) associate a bande laterali.

Ciascun gruppo occupa solo una limitata porzione dello spettro dell'intera banda di frequenze video (5 MHz) lasciando fra l'uno e l'altro degli intervalli non utilizzati e quindi praticamente disponibili per inserirvi i segnali di cromaticità (fig. 38).

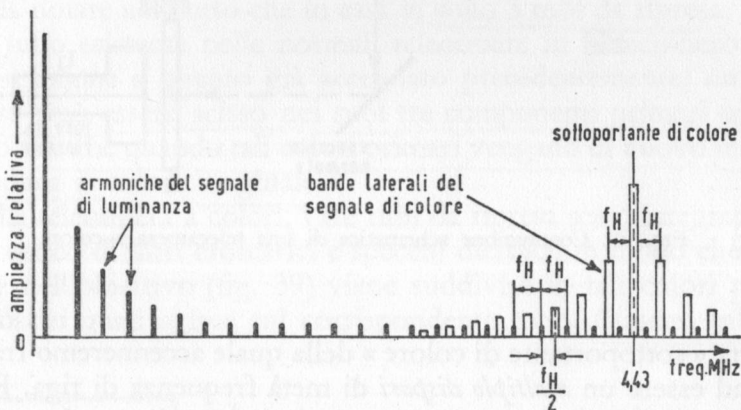


FIG. 38. Spettro di frequenze di un segnale TV in bianco-nero (luminanza).

Per esaminare più da vicino tale questione, sarà opportuno riferirsi alla metà della frequenza di riga (7812,5) anziché a quella di 15625 Hz.

Sotto questo profilo, si può operare in modo che lo spettro di un'immagine normale in bianco nero sia costituito da gruppi di armoniche localizzate attorno a *multipli pari* di metà frequenza di riga, mentre l'informazione cromatica da aggiungersi sia costituita da gruppi di armoniche attorno a *multipli dispari* di metà frequenza di riga.

Per soddisfare a questo requisito si fa in modo che la frequenza di

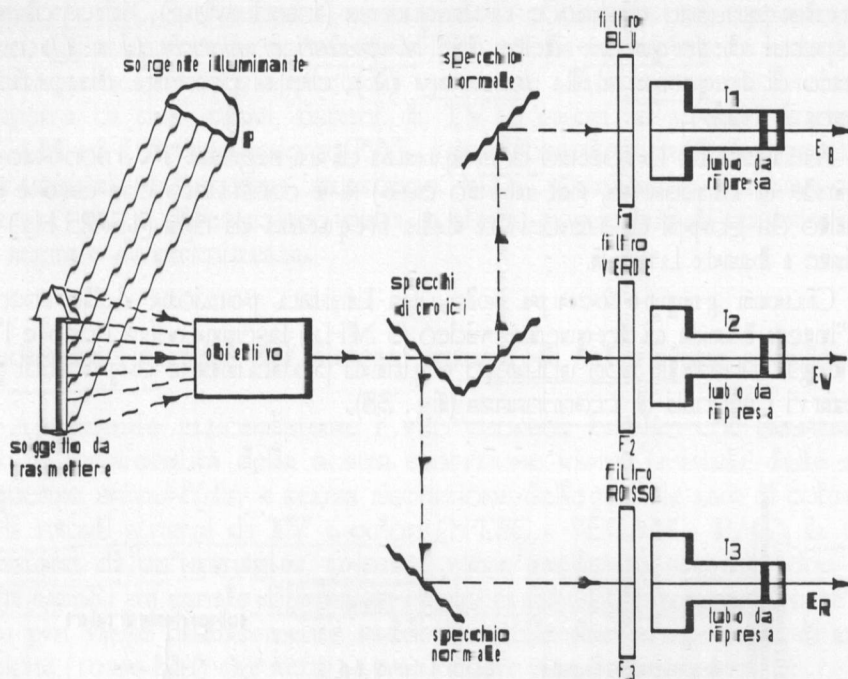


FIG. 39. Costituzione schematica di una telecamera a colori.

una certa « sottoportante di colore » della quale accenneremo fra breve, venga ad essere un *multiplo dispari* di metà frequenza di riga. Ritourneremo comunque più innanzi con maggiori dettagli su tale questione.

Costituzione schematica di un sistema TV a colori

Ricordiamo ancora che una trasmissione di TV a colori sarà caratterizzata dall'esistenza di due distinti canali: il canale di luminosità che assicura l'aspetto di brillanza e risoluzione geometrica generale dell'immagine, ed il canale di cromaticità (tinta e saturazione) che ne assicura l'aspetto cromatico (colore).

Ne consegue che il segnale video, normalmente usato per la trasmissione in bianco-nero, viene chiamato segnale di luminosità nella TV a colori, mentre un segnale aggiuntivo per la trasmissione dell'informazione dei colori, viene chiamato segnale di cromaticità. In altre parole,

l'immagine a colori è costituita da un'immagine normale in bianco nero, sulla quale vengono applicate le necessarie « pennellate » di colore.

La TV a colori conserva quindi tutte le funzioni basiche e circuitali della normale TV in bianco-nero con l'aggiunta dei circuiti dei segnali di crominanza, di sincronizzazione di tali segnali, e cosa principale, del tubo catodico speciale (cinescopio) a 3 colori. Il tubo catodico d'immagine a colori, che viene illustrato più avanti, è pertanto l'organo che provvede a realizzare la miscela addittiva dei tre colori primari, secondo i processi colorimetrici esaminati nei precedenti capitoli.

Nel dispositivo di ripresa televisiva, nella telecamera cioè, occorre però realizzare le funzioni che assicurino la triplice esigenza della luminanza, della tinta e della saturazione.

La fig. 39 rappresenta la costituzione schematica di una telecamera a colori.

È da notare anzitutto che in essa vi sono 3 tubi da ripresa, anziché l'unico tubo esistente nelle normali telecamere in bianco-nero.

In relazione a quanto già accennato precedentemente, un raggio luminoso può essere scisso nei suoi tre componenti primari addittivi, in modo tale che quando tali colori primari vengano di nuovo miscelati, si riproduca il colore originale.

Nella telecamera a colori, i tre tubi da ripresa sono integrati da un sistema ottico di filtri cromatici e specchi dicroici, in modo che la luce entrante nell'obiettivo (fig. 39) viene suddivisa in tali colori primari, ciascuno dei quali agisce sul corrispondente tubo. Ciascun tubo per-

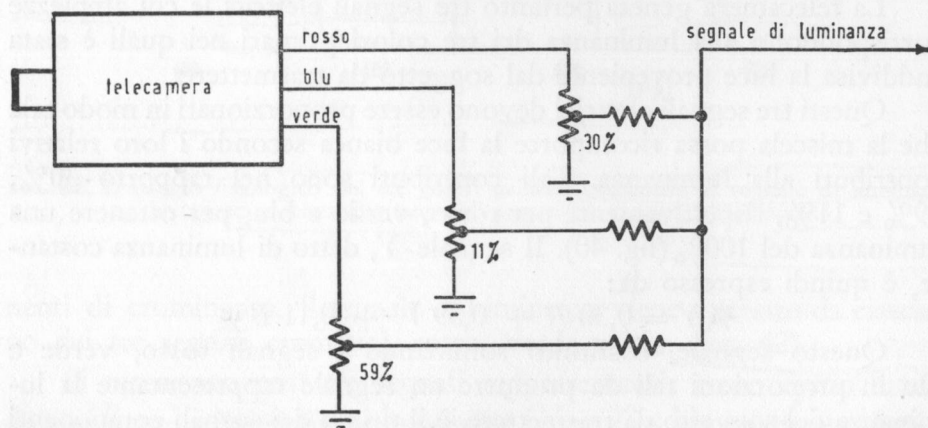


FIG. 40. Dosaggio elettrico dei tre segnali cromatici R , V , B costituenti il segnale di luminanza Y .

tanto reagisce unicamente alla luminanza relativa di ciascun colore, le cui frequenze sono determinate dalla banda passante dei rispettivi filtri ottici. Naturalmente le bande passanti di tali filtri corrispondono ai 3 colori primari addittivi, secondo il diagramma di cromaticità esaminato precedentemente, in accordo coi tre corrispondenti colori primari riprodotti nel cinescopio del ricevitore.

Quest'ultima esigenza dovuta, principalmente alla resa cromatica dei fosfori impiegati nella costruzione dei cinescopi a colori, vincola praticamente la scelta dei tre colori primari selezionati dai filtri ottici nella telecamera, colori che nel diagramma di cromaticità C.I.E. sono individuati dalle coordinate cartesiane:

| | X | Y |
|---|------|------|
| R | 0,67 | 0,33 |
| V | 0,21 | 0,71 |
| B | 0,14 | 0,08 |

Vediamo ora come funziona una telecamera a colori. L'oggetto da riprendere (fig. 39), illuminato da luce bianca del proiettore P , riflette parte di tale luce divenendo a sua volta una sorgente luminosa. La luce così riflessa attraversa l'obiettivo O e viene ripartita in tre canali con un adatto sistema di specchi normali e semitrasparenti (specchi dicroici). Ciascun canale di luce attraversa poi un filtro ottico F_1, F_2, F_3 (rosso, verde, blu), prima di agire sui corrispondenti tubi analizzatori da ripresa T_1, T_2, T_3 .

La telecamera genera pertanto tre segnali elettrici le cui ampiezze corrispondono alla luminanza dei tre colori primari nei quali è stata suddivisa la luce proveniente dal soggetto da trasmettere.

Questi tre segnali elettrici devono essere proporzionati in modo tale che la miscela possa ricomporre la luce bianca secondo i loro relativi contributi alla luminanza. Tali contributi sono nel rapporto 30%, 59% e 11%, rispettivamente per rosso, verde e blu, per ottenere una luminanza del 100% (fig. 40). Il segnale Y , detto di luminanza costante, è quindi espresso da:

$$* Y = 0,30 R + 0,59 V + 0,11 B *$$

Questo segnale, costituito sommando i segnali rosso, verde e blu in proporzioni tali da produrre un segnale rappresentante la luminanza del soggetto da trasmettere, è il primo dei segnali componenti il canale di trasmissione della TV a colori: il segnale di luminanza.

La figura 41 indica le proporzioni di rosso, verde e blu in corrispondenza della curva di sensibilità dell'occhio.

I tre segnali elettrici recanti le informazioni di luminanza delle componenti rossa, verde e blu del soggetto da trasmettere, all'uscita della telecamera, vengono indicati con:

$$E_R \quad E_V \quad E_B.$$

Secondo quanto esposto nel capitolo 2, sussiste inoltre la relazione: $E_R = E_V = E_B$, in corrispondenza al bianco C , individuato dalle coordinate cromatiche C.I.E.: $X = + 0,310$; $Y = 0,316$.

Per limitare a due sole le informazioni cromatiche da trasmettere, poiché il segnale di luminanza contiene già mescolate le tre compo-

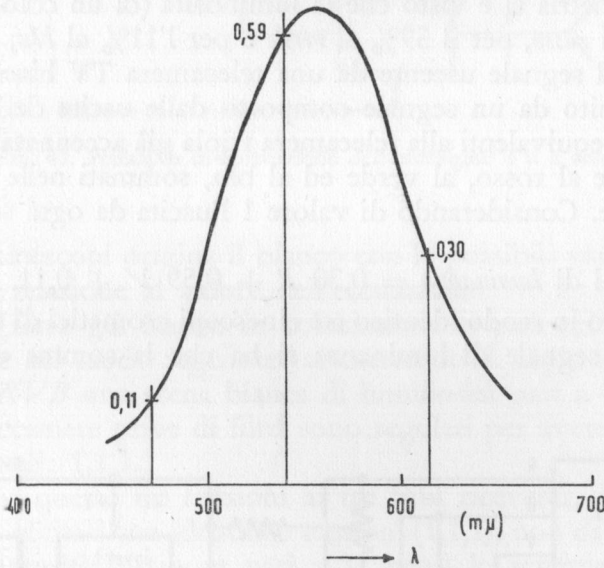


FIG. 41. Dosaggio fisiologico dei tre colori primari costituenti il segnale di luminanza, in corrispondenza alla curva di sensibilità cromatica dell'occhio.

ponenti di cromaticità, il segnale di luminanza viene sottratto da ciascuno dei tre segnali cromatici, rosso, verde e blu. (fig. 42).

Si ottengono così tre segnali rappresentanti: rosso meno luminanza ($R - Y$), verde meno luminanza ($V - Y$) e blu meno luminanza ($B - Y$).

Non è però necessario trasmettere quattro informazioni e cioè Y , $R - Y$, $V - Y$, $B - Y$: ne bastano evidentemente tre.

$$Y = R + B + V \quad V - Y = R + B$$

$$R - Y \quad B - Y = V - Y$$

Si è convenuto di trasmettere i segnali Y , $R - Y$, $B - Y$: il segnale verde si può ottenere infatti sottraendo la somma dei segnali rosso e blu, dal segnale di luminanza.

Questa operazione è detta «matrizzazione».

Riepilogando, quindi: in una normale ripresa bianco-nero il tubo della telecamera ha una curva di sensibilità che si avvicina a quella dell'occhio; all'uscita della telecamera perciò si ha un segnale elettrico di ampiezza proporzionale alla luminosità della scena ripresa.

Applicando questo segnale al cinescopio dei ricevitori bianco-nero si ha la riproduzione della scena ripresa con tutte le variazioni di luminosità proporzionali all'intensità dell'illuminazione di tale scena e in relazione alla particolare sensibilità della telecamera alle varie tinte. Dalla colorimetria si è visto che la luminosità (di un colore) è dovuta per il 30% al rosso, per il 59% al verde e per l'11% al blu; da questo si deduce che il segnale uscente da una telecamera TV bianco-nero può essere sostituito da un segnale composto dalle uscite delle tre telecamere colore (equivalenti alla telecamera tripla già accennata) sensibili rispettivamente al rosso, al verde ed al blu, sommati nelle proporzioni già accennate. Considerando di valore 1 l'uscita da ogni telecamera, si ha:

$$\text{Segnali di Luminanza} = 0,30 R + 0,59 V + 0,11 B = Y.$$

Eccitando in modo identico tre cinescopi cromatici di un ricevitore a colori col segnale di luminanza si ha che la somma delle luci ir-

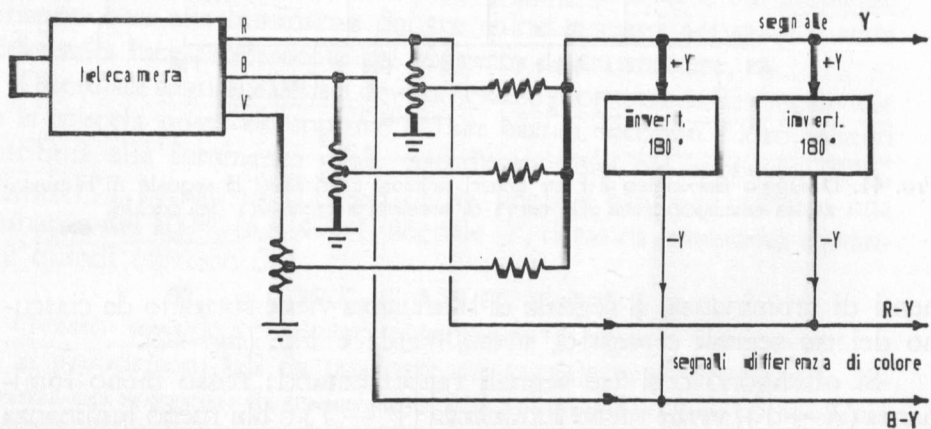


FIG. 42. Principio del circuito elettrico di sottrazione del segnale Y , per l'ottenimento dei segnali cromatici $R - Y$ e $B - Y$ (matrizzazione).

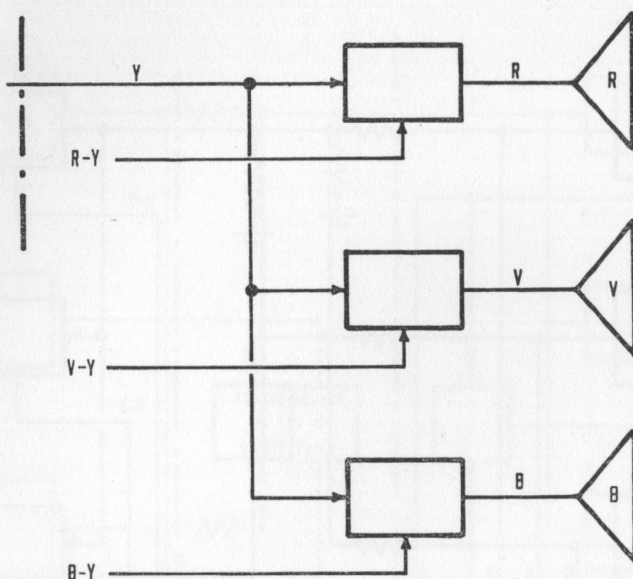


FIG. 43. Principio di formazione dell'immagine TV a colori

radiate dai cinescopi origina il bianco con le possibili variazioni di luminosità in relazione al valore dell'eccitazione.

Questo fatto già notato in colorimetria si può spiegare praticamente anche nel modo seguente: ammettendo di esplorare con le tre telecamere RVB una scena bianca di luminosità pari a 1, i guadagni delle tre telecamere prive di filtri sono regolati per avere in uscita tre tensioni uguali: 1,1,1.

Inviando queste tre tensioni ai tre tubi riceventi, RVB , questi, pur essendo eccitati con identiche tensioni (1,1,1), non danno singolarmente un'intensità luminosa pari a 1; bensì lo schermo rosso darà 0,30, quello verde darà 0,59 e quello blu darà 0,11 per avere quindi in totale il bianco di luminosità pari a 1.

Se vengono applicati i filtri ottici alle telecamere, le rispettive uscite saranno 0,30, 0,59, 0,11; riportando però ogni uscita al valore 1,1,1, come effettivamente si deve fare, si ricade nel caso precedente.

Ora, sommando a queste tre tensioni eccitatrici proporzionali alla luminosità altre tre informazioni-colore si annullerà l'uguaglianza delle tre tensioni applicate ai tubi e quindi la somma delle luci irradiate dai tre cinescopi darà come risultato la scena a colori con le dovute tinte, saturazioni e luminosità (fig. 43).

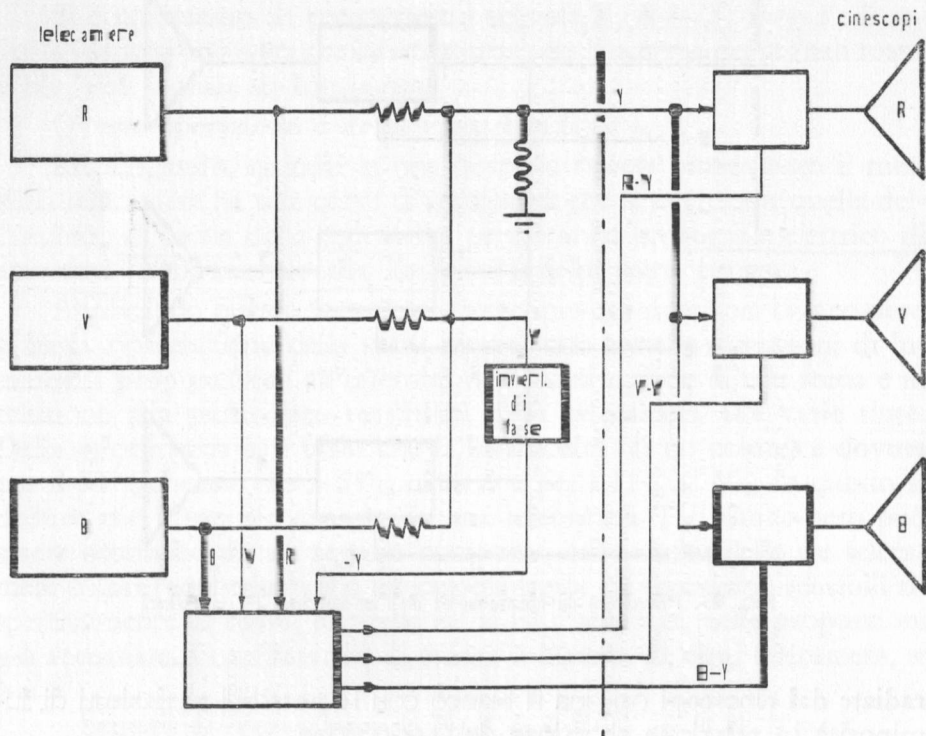


Fig. 44. Formazione dei segnali cromatici nella TV a colori (differenza di colore).

Ricordando che il segnale di luminosità può essere ottenuto dalla somma in dovute proporzioni dei segnali uscenti dalle telecamere RVB si può completare il sistema di ripresa come mostrato in figura 42.

I valori dei simboli usati in questa figura sono:

$$\begin{aligned}
 Y &= 0,30 R + 0,59 V + 0,11 B \\
 R - Y &= 0,70 R - 0,59 V - 0,11 B \\
 V - Y &= 0,30 R + 0,41 V - 0,11 B \\
 B - Y &= -0,30 R - 0,59 V + 0,89 B
 \end{aligned}$$

Il problema della trasmissione delle informazioni viene ulteriormente semplificato, constatando che il segnale di luminanza Y contiene le informazioni dei tre colori primari. L'informazione inerente uno di questi colori può quindi essere omessa ed essere poi ricavata in ricezione.

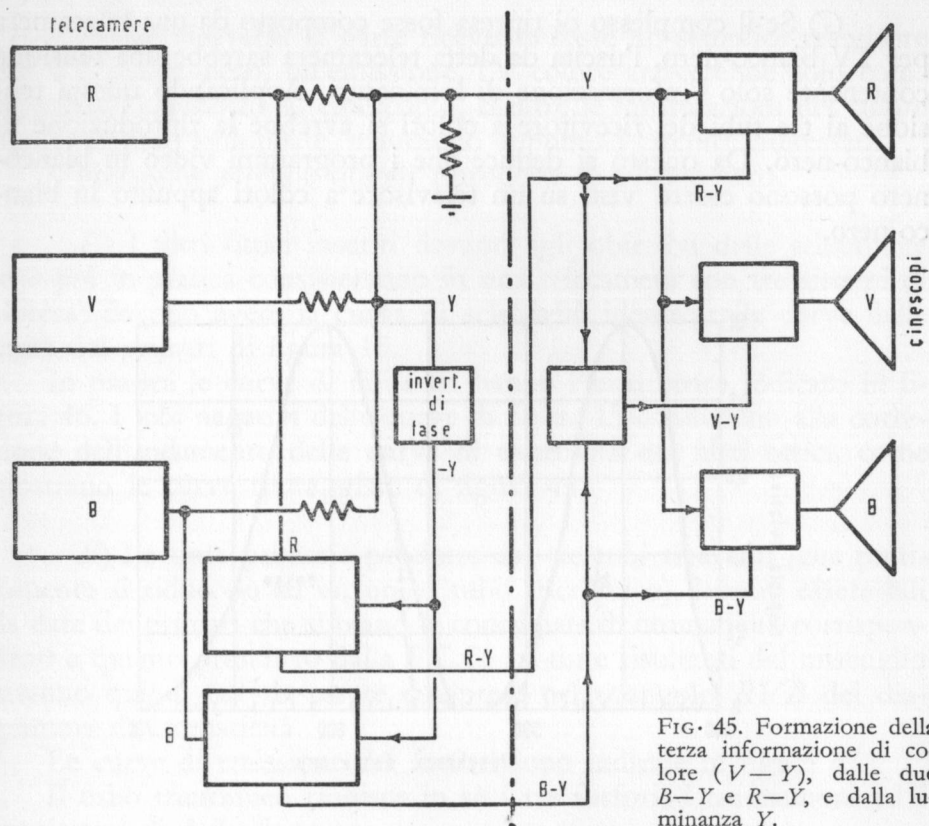


FIG. 45. Formazione della terza informazione di colore ($V-Y$), dalle due $B-Y$ e $R-Y$, e dalla luminanza Y .

La figura 45 illustra questo nuovo sistema; dai valori di $R-Y$ e di $B-Y$ si ricava:

$$V-Y = -0,51(R-Y) - 0,19(B-Y)$$

Esaminando il sistema schematizzato in figura 45 si possono fare le seguenti constatazioni:

A) il sistema di ripresa deve dare le informazioni relative ai tre colori primari e l'informazione relativa alla luminanza; queste quattro informazioni sono contenute in tre tensioni, di cui una contiene l'informazione della luminanza e le altre due contengono le informazioni di tinta e di saturazione dei colori.

B) In ricezione, la tensione contenente l'informazione di luminanza governa contemporaneamente le luminosità dei tre tubi RVB ; dalle altre due tensioni vengono ricavate le informazioni dei tre colori primari, ognuno dei quali pilota separatamente il proprio tubo.

C) Se il complesso di ripresa fosse composto da una telecamera per TV bianco-nero, l'uscita da detta telecamera sarebbe una tensione contenente solo l'informazione di luminanza. Applicando questa tensione ai tre tubi del ricevitore a colori si avrebbe la riproduzione in bianco-nero. Da questo si deduce che i programmi video in bianco-nero possono essere visti su un televisore a colori appunto in bianco-nero.

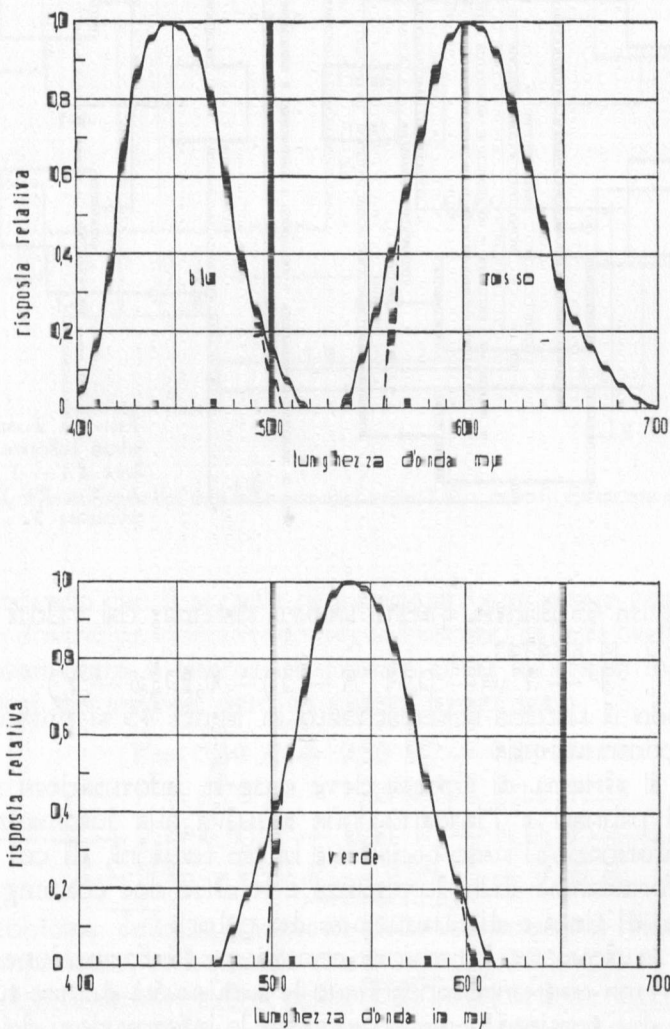


FIG. 46. Curve di risposta dei filtri ottici usati nelle telecamere a colori.

D) Se viceversa la parte ricevente fosse un semplice televisore per TV bianco-nero, un'emissione TV colore arriverebbe solo come segnale di luminosità al cinescopio, mentre le informazioni del colore non sarebbero sviluppate, mancando appunto i circuiti interessati.

L'immagine sarebbe quindi riprodotta in bianco-nero.

E) I filtri ottici inseriti davanti agli obiettivi delle telecamere (che poi in pratica consistono in una telecamera con tre sistemi di ripresa) devono avere la curva di selettività identica alle curve delle unità dei primari di figura 15.

In pratica le curve di tali filtri hanno l'andamento indicato in figura 46. I lobi negativi delle curve di figura 15 conducono alla correzione dell'andamento delle curve di selettività dei filtri ottici, come mostrano le curve tratteggiate di figura 46.

F) Le tinte primarie prodotte dai tre tubi riceventi (che praticamente si riducono ad un unico tubo tricromico) devono essere tali da dare dei primari che abbiano le coordinate di cromaticità corrispondenti a quanto prescritto dalla F.C.C. Le tinte risultanti dal miscuglio saranno quindi tali da essere comprese nel triangolo *RVB* del diagramma di cromaticità.

Le curve di emissione dei fosfori sono indicate in figura 47.

Il tubo tricromico riunisce in sè i tre fosfori, i tre cannoni ed i tre sistemi di deflessione.

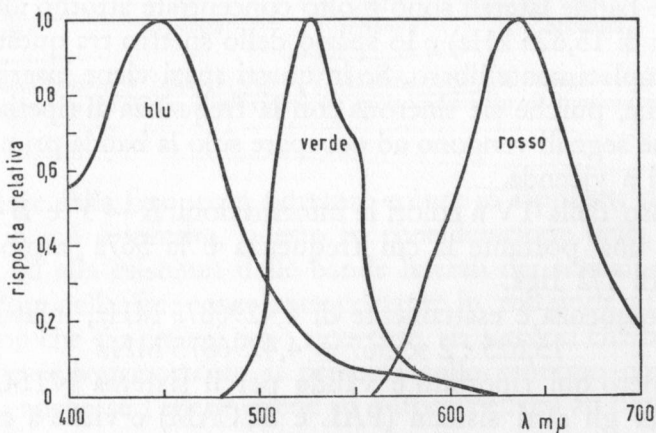


FIG. 47. Curve di emissione dei tre fosfori usati per lo schermo fluorescente di cinescopi tricromici.

G) Ricordando quanto detto circa i limiti del potere risolutivo e della visione tricromatica dell'occhio, si è potuto diminuire la larghezza di banda dell'informazione colore, senza per questo peggiorare le prestazioni del sistema di riproduzione. Infatti la banda dell'informazione colore viene limitata ad una larghezza massima di 1,5 MHz.

H) Questa banda di frequenza che deve essere trasmessa assieme a quella del segnale di luminanza Y (banda di 5,5 MHz) ha creato un certo numero di difficoltà, perchè uno dei presupposti per la compatibilità del sistema (ed anche per la non eccessiva disponibilità di bande libere) è la condizione che la larghezza di banda non deve essere maggiore di quella occupata dai sistemi TV bianco-nero ed ancora che la banda occupata dall'informazione luminanza (Y) non deve essere più stretta di 5,5 MHz.

A prima vista questa somma di condizioni fa sembrare insolubile il problema; però in realtà il problema è stato risolto ed ogni condizione è stata rispettata con l'artificio dell'«interleaving» già sommariamente accennato in precedenza.

Quando si dice che un segnale televisivo si estende da 0 a 5,5 MHz, non si deve pensare che questo occupi ogni ciclo di tutto lo spettro; in altre parole l'energia non è distribuita con continuità da un estremo all'altro della banda, ma è esistente sotto forma di pacchetti di energia, ognuno distanziato dal pacchetto vicino di 15,625 kHz (vedi fig. 48).

I raggruppamenti attorno ad ogni armonica di 15,625 kHz sono costituiti da un certo numero di bande laterali dovute alla scansione di quadro dell'immagine.

Queste bande laterali sono molto concentrate attorno alle portanti (armoniche di 15,625 kHz) e lo spazio dello spettro tra queste portanti è quasi completamente libero. Se in questi spazi viene inserita un'altra informazione, purchè sia sincrona con la frequenza di ripetizione della prima, i due segnali vengono ad occupare solo la banda primitiva senza influenzarsi a vicenda.

Nel caso della TV a colori le informazioni $R - Y$ e $B - Y$ sono affidate ad una portante la cui frequenza è la 567a armonica della frequenza di 1/2 riga.

Tale frequenza è esattamente di 4,4296875 MHz, infatti:

$$15,625 : 2 \times 567 = 4,4296875 \text{ MHz}$$

Il numero qui riportato è valido per il sistema NTSC europeo, ma non per gli altri sistemi (PAL e SECAM) e viene a capitare tra la 566a e la 568a armonica di 1/2 riga e cioè tra la 283a e la 284a armonica della frequenza di riga.

Tenendo presente che anche il segnale colore ha come frequenza fondamentale la stessa frequenza di riga è chiaro che tutte le armoniche e le relative bande laterali vengono a trovarsi distanti 15,625 kHz dalla sottoportante cioè dalla 567a armonica di 1/2 riga e quindi l'informazione di colore si viene a trovare tra i pacchetti di energia del segnale televisivo bianco-nero.

I) La scelta della frequenza della sottoportante colore di 4,43 MHz (nel sistema TV americano a 525 righe è di 3,58 MHz) è il risultato di compromessi tra varie necessità. Ne riportiamo alcune come esempio:

— rapporto tra la frequenza della portante colore e la larghezza di banda dei canali di cromaticità;

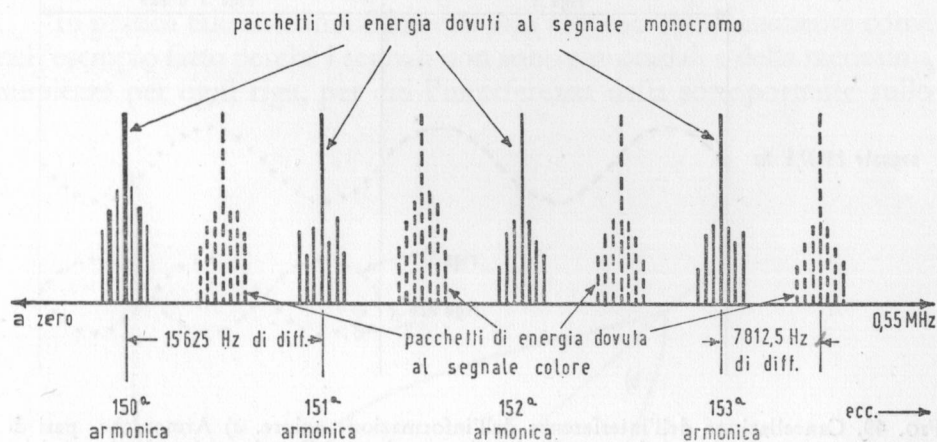


FIG. 48. Procedimento « interleaving ». L'informazione del colore viene inserita negli spazi esistenti fra l'informazione monocromatica di luminanza.

— valore della frequenza portante colore in rapporto alla banda di 5,5 MHz in cui è inserita, questo in considerazione della risposta in frequenza ed alla esistenza delle bande laterali dei segnali colore;

— valore della frequenza sottoportante in relazione alla visibilità del disturbo che si nota sul tubo ricevente, sia a colori che bianco-nero, perchè questa sottoportante si presenta sullo schermo come una interferenza, anche se l'effetto viene ad autocancellarsi ad ogni riga dello schermo.

Come semplice prova di questa autocancellazione consideriamo

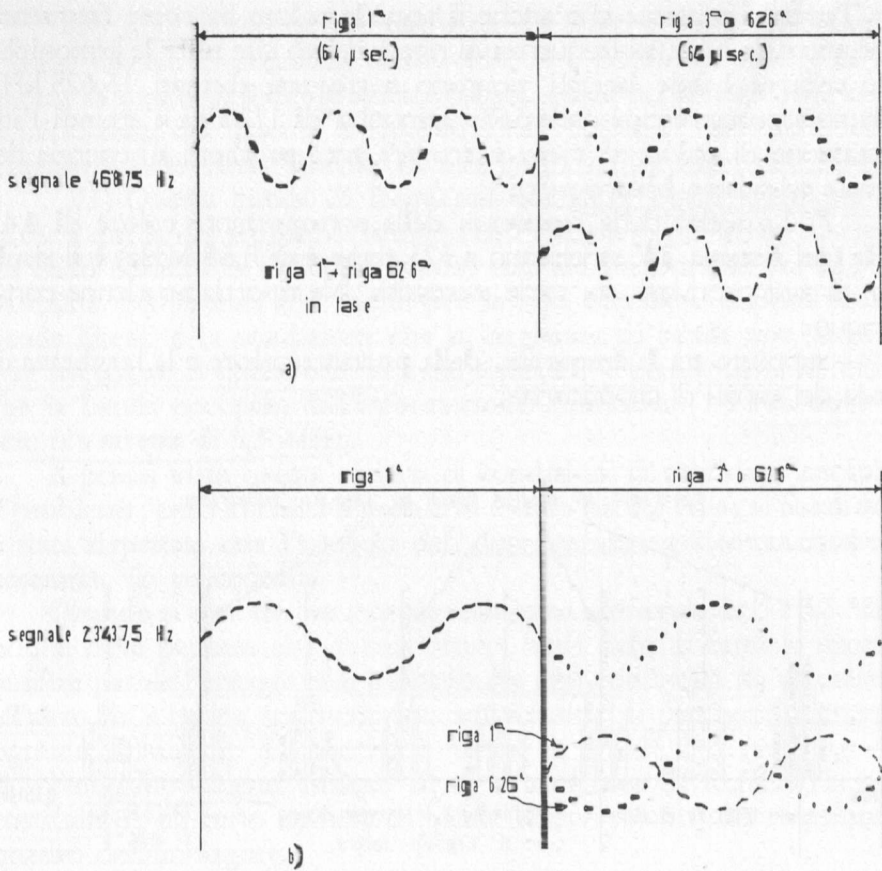


FIG. 49. Cancellazione dell'interferenza dell'informazione colore. a) Armoniche pari di mezza frequenza di riga rinforzano l'immagine prodotta dalla prima riga. b) Armoniche dispari si cancellano a vicenda.

un segnale video, per esempio una sinusoidale, la cui frequenza sia pari alla terza armonica di 15,625 cioè 46,875 kHz.

Durante la scansione della prima riga del tubo del ricevitore vengono applicati tre completi cicli alla griglia del tubo stesso. Ogni mezzo ciclo negativo produce un'area scura ed ogni mezzo ciclo positivo una area chiara; ogni riga contiene gli stessi tre cicli e, dopo il primo semiquadro, il secondo semiquadro non fa altro che rinforzare l'immagine formatasi durante il primo. Infatti si vede dalla figura 49, che il diagramma tracciato dalla riga successiva alla prima (la terza) o dalla 626a è identico a quello della prima riga.

Consideriamo invece ora un segnale video la cui frequenza sia un multiplo dispari di mezza frequenza di riga (23,4375 kHz); durante la scansione della prima riga viene presentato alla griglia un ciclo e mezzo, durante la riga successiva (la terza) la stessa tensione è presentata sfasata di 180° , alla quinta riga il segnale ritorna in fase con quello della prima riga ed alla settima in fase con quello della terza, ecc.. Così ad ogni riga si inverte la fase del segnale.

Essendo la sottoportante colore di frequenza multipla di mezza frequenza di riga, si avrà l'autoannullamento della interferenza come mostrato nell'esempio.

Durante la 626a riga viene presentato un segnale di fase opposto a quello applicato alla prima riga e quindi gli effetti dei due segnali tendono ad annullarsi. In questo modo le variazioni di luminosità tendono ad annullarsi ad ogni riga ed a ogni semiquadro.

In pratica tale autoannullamento non avviene completamente come nell'esempio fatto perchè i segnali non sono sinusoidali e della medesima ampiezza per ogni riga, per cui l'interferenza della sottoportante sullo

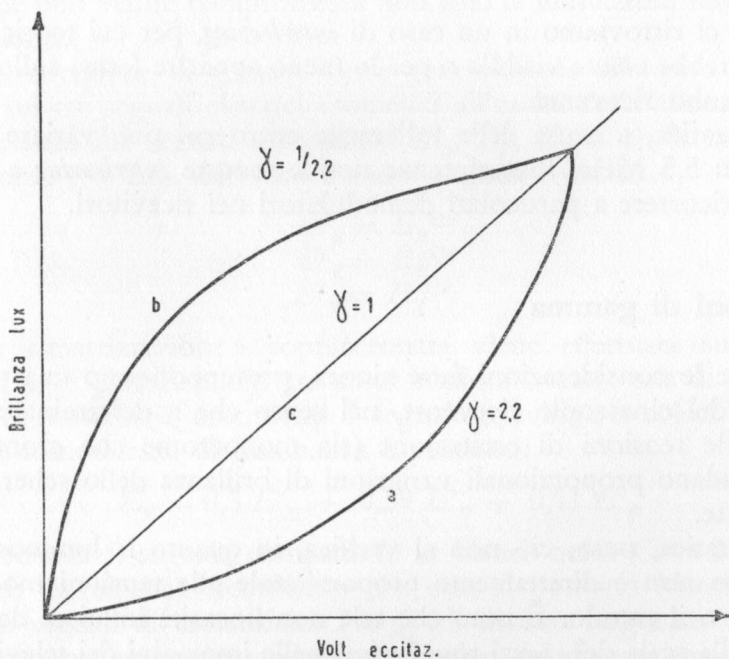


FIG. 50. Curve del « gamma»: a) « gamma » del cinescopio; b) « gamma » di correzione in trasmissione; c) « gamma » lineare risultante.

schermo dei ricevitori ci sarà, anche se di basso valore. Un altro fattore che contribuisce a diminuire l'interferenza sullo schermo dei ricevitori è il fatto che la sottoportante (come si vedrà meglio in seguito) viene eliminata nello stesso processo di modulazione e vengono trasmesse solo le bande laterali (sistemi NTSC e PAL). La soppressione della portante colore serve anche a fare in modo che non venga trasmesso alcun segnale di sottoportante quando non c'è informazione colore, come nel caso di una ripresa bianco-nero.

Un'altra ragione per cui non viene trasmessa la sottoportante è che questa darebbe origine ad un'interferenza di 1,07 MHz, battendo alla rivelazione video con la portante suono di 5,5 MHz. Si avrebbe esattamente:

$$5,5 - 4,4296875 = 1,0703125 \text{ MHz}$$

È vero che la frequenza di 5,5 batte ugualmente con i prodotti di modulazione; ma questi sono di entità inferiore e quindi l'interferenza prodotta è più tollerata; inoltre essa è un multiplo dispari di mezza frequenza di riga (infatti:

$$1,0703125 / 0,0078125 = 137)$$

e quindi ci ritroviamo in un caso di *interleaving*, per cui teoricamente non dovrebbe essere visibile o per lo meno apparire ferma sullo schermo del tubo ricevente.

In pratica, a causa delle tolleranze entro cui può variare la frequenza di 5,5 MHz, l'interferenza non è sempre *interleaving* e quindi bisogna ricorrere a particolari demodulatori nei ricevitori.

Correzioni di gamma

Tutte le considerazioni fatte sinora, presuppongono una perfetta linearità del cinescopio ricevente, nel senso che a determinate variazioni delle tensioni di eccitazione (sia monocrome che cromatiche) corrispondano proporzionali variazioni di brillantezza dello schermo luminescente.

In pratica, però, ciò non si verifica, in quanto la luminosità del cinescopio non è direttamente proporzionale alle tensioni modulanti la griglia o il catodo. È noto che tale non linearità influisce dannosamente sulla scala dei mezzi toni (grigi) nelle immagini dei televisori in bianco-nero, in modo da rendere necessaria una predistorsione in senso opposto alla trasmissione.

Questo comportamento è definito dalla relazione:

$$L = K(V)^\gamma \quad (2)$$

ove L è la luminosità, K è una costante, V è la tensione modulante e γ è un esponente il cui valore normale è intorno a 2,5.

In pratica si usa dire che il « gamma » (γ) del cinescopio è 2,5.

Tradotta in diagramma la relazione (2) assume l'aspetto della figura 50a.

Per correggere tale mancanza di linearità si usa introdurre in trasmissione una "non linearità" di senso opposto (fig. 50b), in modo che la composizione delle due curve dia una risultante praticamente rettilinea ($\gamma = 1$) (fig. 50c).

Questa operazione, chiamata « correzione di gamma », è correntemente applicata nella TV monocroma, ma assume particolare importanza nella TV a colori, dato che la non linearità del cinescopio altera sostanzialmente la cromaticità dei colori.

Pertanto, nella TV a colori è necessario avere una correzione di gamma molto più accurata di quella della TV in bianco-nero, per il fatto che può venire compromessa non solo la luminanza, ma anche la crominanza.

La correzione di gamma viene generalmente effettuata separatamente sui tre segnali elettrici cromatici all'uscita della telecamera.

Pertanto dai segnali suaccennati E_R , E_V , E_B dopo la correzione di gamma ($\gamma = 2,2$), derivano i nuovi segnali corretti:

$$\begin{aligned} E'_R &= E_R^{1/\gamma} \\ E'_V &= E_V^{1/\gamma} \\ E'_B &= E_B^{1/\gamma}. \end{aligned}$$

La « matricizzazione » sopraccennata viene effettuata sui segnali E'_R , E'_V , E'_B realizzando tre combinazioni lineari: una di *luminanza* e due di *crominanza*, costituenti il segnale televisivo a colori.

La componente di luminanza è pertanto:

$$E_Y = 0,3 E'_R + 0,59 E'_V + 0,11 E'_B$$

e rappresenta il segnale compatibile in bianco-nero. Circa le componenti di crominanza ricordiamo che esse si possono identificare sia coi due segnali di cromaticità I e Q (di diversa larghezza di banda) che giacciono lungo due assi perpendicolari del diagramma di cromaticità C.I.E., arancio-verde blu (I) e porpora-verde giallo (Q), sia coi segnali differenza di colore $R - Y$ e $B - Y$.

Per maggiore chiarezza in termini di cromaticità, sarà inoltre opportuno ricordare che le relazioni fra i coefficienti R , V , B (C.I.E.) ed i segnali differenza di colore sono:

$$\begin{aligned} R - Y &= 0,70 R - 0,59 V - 0,11 B \\ B - Y &= -0,30 R - 0,59 V + 0,89 B \\ V - Y &= -0,30 R + 0,41 V = 0,11 B \end{aligned}$$

$R - Y$, $B - Y$, $V - Y$ verranno in seguito indicati rispettivamente con $E'_R - E'_Y$, $E'_B - E'_Y$, $E'_V - E'_Y$ per indicare i segnali elettrici di colore, con la correzione di gamma, come sopra accennato.

Nuova telecamera a colori a 4 canali.

Recenti sviluppi tecnici hanno portato alla realizzazione di un nuovo tipo di telecamera a colori che, pur aderendo sempre al principio fondamentale di « canale di luminanza » e « canale di cromaticità », si differenzia in pratica dal tipo originale illustrato in questo capitolo. Ecco di che si tratta.

Anzichè affidare al contributo dosato dei tre tubi da ripresa rosso, verde e blu la formazione del canale di luminanza, è stato introdotto un quarto tubo da ripresa esclusivamente dedicato al canale di luminanza. Ovviamente tale nuovo tubo fornisce un'immagine esattamente simile a quella di una normale telecamera in bianco-nero, col vantaggio di migliorare la compatibilità nei comuni televisori, e di migliorare la qualità e la definizione delle immagini a colori grazie all'indipendenza dell'immagine base di luminanza dalla registrazione ed accurata sovrapposizione delle tre immagini cromatiche.

Nella nuova telecamera quindi, un tubo da ripresa fornisce il segnale di luminanza indipendente, mentre gli altri tre tubi provvedono ai tre segnali cromatici R , V , B , che opportunamente matricizzati col segnale di luminanza forniscono i due segnali modulanti di cromaticità.

In questo tipo di telecamera vengono usati dei nuovi tubi da ripresa noti sotto il nome di Plumbicon o Selenicon.

PROBLEMI CON SOLUZIONE A QUIZ.

Ciascuna delle domande formulate qui di seguito comporta quattro distinte risposte, una sola delle quali è quella esatta. Dopo aver considerato attentamente tutte e quattro le risposte riportate, selezionate quella che vi sembra giusta, tracciando un trattino sulla lettera corrispondente.

Le soluzioni dei quiz sono riportate nel volume successivo.

Esempio:

Un metro è suddiviso in: *a*) 5 decimetri; *b*) 10 decimetri; *c*) 20 decimetri; *d*) 10 centimetri.

a ~~*b*~~ *c* *d*

Domanda

Risposta

1) Un raggio di luce solare che attraversa un prisma ottico si scompone in: *a*) 5 colori principali e 2 secondari; *b*) 7 colori puri; *c*) 8 colori principali; *d*) 4 colori puri e 3 colori composti.

a *b* *c* *d*

2) Un millimicron è: *a*) un centomillesimo di mm; *b*) un decimilionesimo di mm; *c*) un milionesimo di mm; *d*) un miliardesimo di mm.

a *b* *c* *d*

3) Per la riproduzione di tutti i colori naturali sono sufficienti: *a*) 3 colori primari più 2 colori secondari; *b*) 3 colori primari più un colore ausiliario; *c*) 3 colori primari; *d*) 4 colori primari.

a *b* *c* *d*

4) Se una sorgente luminosa emette un raggio di luce concentrata in lunghezze d'onda prossime ai 450 millimicron, tale luce sarà: *a*) luce rossa; *b*) luce verde; *c*) luce blu; *d*) luce gialla.

a *b* *c* *d*

5) Le espressioni « rosa », « rosso vivo », « rosso pallido » significano: *a*) luce rossa a differenti livelli di

luminosità; *b*) luce rossa a diverse lunghezze d'onda componenti; *c*) luce rossa a diversi gradi di saturazione; *d*) diverse tonalità di colore.

a b c d

6) In un processo di sintesi sottrattiva, la miscela dei tre colori primari dà luogo al: *a*) bianco; *b*) nero; *c*) ciano; *d*) magenta.

a b c d

7) Nel processo di sintesi sottrattiva i 3 colori primari sono: *a*) rosso, giallo, blu; *b*) rosso, verde, blu; *c*) rosso, magenta, ciano; *d*) giallo, verde, blu.

a b c d

8) In un processo di sintesi additiva, la miscela dei 3 colori primari dà luogo al: *a*) bianco; *b*) nero; *c*) magenta; *d*) ciano.

a b c d

9) Nel processo di sintesi additiva i 3 colori primari sono: *a*) rosso, giallo, blu; *b*) rosso, giallo, verde; *c*) rosso, verde, blu; *d*) giallo, verde, blu.

a b c d

10) Tre raggi di luce rossa, verde e blu sono proiettati sovrapposti su uno schermo in proporzioni tali da ottenere un'area bianca. Per rendere grigia tale area bianca occorre: *a*) modificare diversamente l'intensità dei tre raggi; *b*) ridurre ugualmente l'intensità dei tre raggi; *c*) ridurre l'intensità dei raggi luminosi nelle seguenti proporzioni: 30% rosso, 59% verde, 11% blu; *d*) inserire dei filtri colorati.

a b c d

11) Tre raggi di luce rossa, verde e blu sono proiettati su uno schermo in proporzioni tali da ottenere un'area bianca. Se quest'area diviene gialla si può ripristinare il bianco accrescendo l'intensità del: *a*) raggio rosso; *b*) raggio verde; *c*) raggio blu; *d*) entrambi i raggi rosso e blu.

a b c d

12) Il nostro occhio è più sensibile alla: *a*) luce rossa; *b*) luce blu; *c*) luce gialla; *d*) luce verde.

a b c d

13) La risoluzione geometrica (possibilità di distinguere i minimi dettagli di un'immagine) del nostro occhio è rappresentata dall'angolo visuale di circa: *a*) 10 minuti primi; *b*) 1 minuto primo; *c*) 5 minuti primi; *d*) $\frac{1}{2}$ minuto primo.

a b c d

14) Le terminazioni sensibili alla luce del nervo ottico facente capo al nostro occhio sono ripartite sulla retina: *a*) nella zona centrale i «coni»; *b*) nella zona centrale i «bastoncini»; *c*) uniformemente distribuite; *d*) nella zona periferica in prevalenza «coni».

a b c d

15) Il nostro occhio percepisce tutti i colori: *a*) nelle piccolissime aree; *b*) nelle grandi aree; *c*) in aree di medie dimensioni con colori miscelati; *d*) solo se i colori sono saturi.

a b c d

16) La saturazione di un colore è data: *a*) dalla sua intensità; *b*) dalla sfumatura della sua tinta; *c*) dalla miscela con un colore complementare; *d*) dalla sua diluizione con la luce bianca.

a b c d

17) Il segnale *Y* presente nelle trasmissioni di TV a colori: *a*) non viene usato nei televisori a colori; *b*) è praticamente identico a quello delle trasmissioni in bianco-nero; *c*) provvede alla cromaticità delle aree grandi dell'immagine; *d*) contiene unicamente i segnali sincronizzanti.

a b c d

18) L'informazione cromatica completa di un'immagine TV a colori, basata sui tre colori primari, può essere trasmessa con: *a*) tre segnali di differenza di colore; *b*) segnali cromatici arancio e ciano; *c*) due segnali di differenza di colore; *d*) segnale *Y* più due segnali di differenza di colore.

a b c d

19) L'ampiezza del segnale di cromaticità è determinata da: *a*) tinta dell'oggetto ripreso; *b*) saturazione del colore dell'oggetto ripreso; *c*) luminosità dell'oggetto

ripreso; d) ampiezza della sottoportante a 4,43 MHz applicata al modulatore.

a b c d

20) Durante la trasmissione di un'area bianca, il segnale: a) Y è zero; b) di crominanza è zero; c) « burst » è in fase con la sottoportante a 4,43 MHz; d) la sottoportante a 4,43 MHz ha la massima ampiezza.

a b c d

EDITRICE IL ROSTRO VIA MONTE GENEROSO 6/A MILANO