

# LA LUCE BLU

OSCAR SANTILLI

*Architetto*

## **Riassunto**

Nel 2014 il premio per la Fisica è stato assegnato a 3 ricercatori giapponesi, inventori della tecnologia per la realizzazione del LED blu. Il trattamento della notizia, soprattutto da parte dei media, non ha sufficientemente chiarito le motivazioni dell'assegnazione. La ricerca intende illustrarle, con riferimento alla presentazione accademica e tecnica degli esperti: il LED blu ha consentito la realizzazione del led bianco. Sono stati combinati gli effetti elettroluminescenti del LED blu con gli effetti fotoluminescenti dei fosfori. La ricerca intende, inoltre, esaminare i riverberi positivi e critici delle applicazioni sia in ambienti interni che esterni. I riverberi sono soprattutto relativi alle modalità bio-percettive della luce, al comfort visivo e ad una ridefinizione dei parametri che sono alla base delle valutazioni e progettazione della luce, soprattutto in visione mesopica e scotopica, contribuendo ad una più consapevole definizione delle connotazioni cromatiche delle scene urbane. Inoltre combinando luce blu e fosfori saranno illustrate alcune applicazioni relative al mondo del design e della divulgazione.

**Parole chiave:** Luce blu, LED blu, fotoluminescenza, visione scotopica e mesopica, light drawing, light painting.

## **La luce blu dei LED**

Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura sono i 3 ricercatori giapponesi cui è stato assegnato il premio Nobel per la Fisica 2014 per l'invenzione del LED blu. Sono stati premiati per la tenacia con cui hanno insistito nell'individuazione della tecnologia che stabilizzasse l'emissione della luce blu nel LED. Più del 95% dei ricercatori era orientata in una direzione diversa da quella battuta dai tre giapponesi [1]. Le scelte dei tre sono risultate, come visto, vincenti. L'attesa era quella di riuscire a realizzare il LED blu che combinato poi con il LED rosso e verde avrebbe consentito la realizzazione di un LED in grado di emettere luce bianca. Ma l'attesa maggiore è stata quella di disporre di una luce blu, ovvero di una luce ad onda corta ad alto contenuto energetico; unica in grado di eccitare alcuni materiali specifici: quelli contenenti fosfori.[2].

I materiali, quando sono investiti dalla luce, assorbono, riflettono o trasmettono la stessa luce. Rispondono in modo passivo. Alcuni materiali, invece, quelli contenenti i fosfori, danno una risposta fotoluminescente, ovvero attiva. Ricevono luce e quindi rilasciano luce. La luce attivatrice, però, deve essere qualificata: solo la luce cosiddetta blu. Cosiddetta blu perché in realtà la luce ad onda corta che riesce ad eccitare i fosfori copre un range che va dai raggi UV e s' inoltra nel visibile fino al blu passando per i violetti.

I fosfori erano già conosciuti nel XII secolo dagli alchimisti arabi. Dopo altre sperimentazioni e scoperte, nel 1800 e 1900 nei secoli della maturità industriale combinando in modo fruttuoso ricerca e applicazione furono concepite lampade che sfruttavano la miscela di raggi ad onda corta e fosfori. I raggi corti, prodotti da una scarica o induzione magnetica, e i fosfori come rivestimento dei bulbi [3]. Erano queste le tecnologie di riferimento per i pervicaci ricercatori della luce blu dei LED. Però niente scarica o induzione, ma l'elettroluminescenza del LED (Light Emitting Diode). I primi LED bianchi sono stati realizzati nel 1996 miscelando la luce del LED blu, con uno spettro come in Figura 1, con quella dei fosfori gialli ottenendo uno spettro in grado di emettere lunghezze d'onda estese a tutte le radiazioni del visibile (vedi Figura 2).

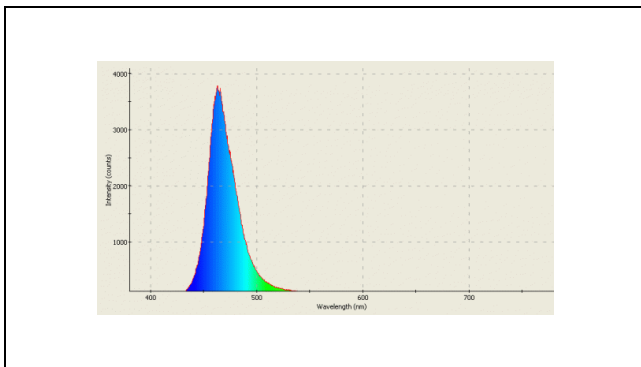


Figura 1: Spettro di emissione tipico di un LED BLUE 450 and 473nm InGaN (fonte LED Museum)

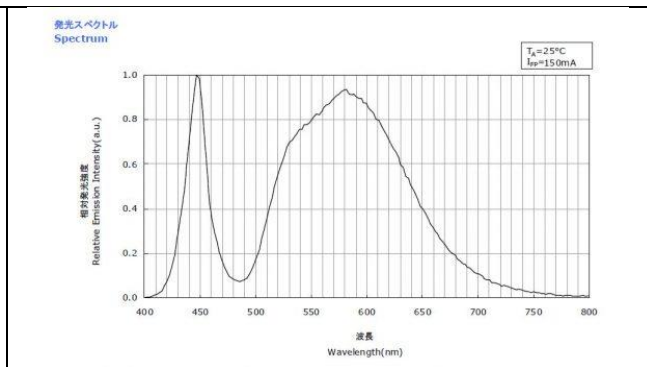


Figura 2: Spettro di emissione tipico di un LED ad emissione di luce bianca Ra tipico >90 (Fonte Nichia)

Dopo un paio di anni di grande eccitazione per la disponibilità di una nuova sorgente luminosa, con aspettative favorite dagli entusiasmi [4], emersero delle criticità. Alcune sono ancora perduranti.

Il picco della presenza della luce blu, acuto ed intenso, ha suscitato articolati e accesi dibattiti. La criticità più importante si è manifestata nell'adozione della luce bianca del LED per consentire l'adempimento dei compiti visivi, soprattutto nei luoghi di lavoro. L'IRC o CRI, ovvero l'indice della capacità di restituire i colori, del LED bianco non raggiunge il valore 100, come nelle lampade ad incandescenza. L'occhio ed anche i processi biologici della postproduzione dell'immagine sono un mezzo di valutazione molto più raffinato ed esigente dei protocolli normativi per la valutazione dell'IRC. Questi protocolli sono approssimativi e piuttosto indulgenti. Si è pensato che fosse sufficiente incrementare il valore dell'Ra9 (rosso scuro), ma non è stato sufficiente. Si è anche diffusa la convinzione che bastasse abbassare la temperatura colore a 2700 K per equilibrare con i giallo-rossi la forte presenza dei blu. Erroneamente si è anche lasciato credere che T risolvesse il problema dello scarso IRC. T ed IRC non hanno relazione vincolante. Due sorgenti con lo stesso valore di T (fra l'altro T sul diagramma delle cromaticità non è un punto ma un segmento) possono avere composizioni spettrali completamente diverse e quindi capacità di restituire i colori in modo altrettanto diverso. L'occhio non ha la capacità di rilevare in modo discreto le presenze dei colori osservando direttamente la sorgente. E' in grado di rilevarne la presenza attraverso la risposta (o non risposta) cromatica delle superfici.

**La luce blu del giorno e la luce blu della notte**

Il sole è una stella bianca. I suoi raggi impattano sulla nostra atmosfera. Spiega Sir John William Rayleigh che le particelle sospese nella parte alta dell'atmosfera hanno una dimensione talmente piccola che riescono ad interferire con le onde più corte del visibile, le onde dei blu. Le onde vengono diffratte, la coltre atmosferica è quindi blu, il cielo è blu. Il sole bianco, privato della sua componente blu, assume il colore giallo. Il giallo è il complementare del blu. Le superfici bianche sulla terra sono in grado di apparire tali quando sono esposte alla sintesi additiva del giallo della luce diretta del sole e del blu della luce soffusa del cielo. Le parti che non riescono ad essere illuminate in modo diretto o indiretto, per riflessione, dalla luce gialla del sole, riceveranno solo la luce omnidirezionale del cielo blu e appariranno blu. Le ombre in daylight sono blu, il fenomeno è molto evidente sulle nevi. Le superfici bianche sono in grado di riflettere tutte le radiazioni e non possono ricevere altri contributi da parte di altre superfici riflettenti (vedi Figura 3).

Il fenomeno è meno visibile su altre superfici in altri contesti e ore del giorno, ma lo è (vedi Figura 4). E' visibile per gli artisti che ne hanno magnificato la presenza e, come sempre, ci hanno invitato ad approfondire la nostra capacità di osservazione Vedi in Figura 5 Der Blaue Reiter (Il Cavaliere Azzurro) di Wassily Kandinsky.



Figura 3: Le superfici in ombra sono blu. Ricevono solo la luce della cappa celeste.



Figura 4: Alba, il sole è basso. Le superfici in ombra sono blu. Ricevono solo la luce della cappa celeste.



Figura 5: Wassily Kandinsky, 1903, *The Blue Rider (Der Blaue Reiter)*, oil on canvas, 52.1 x 54.6 cm, Stiftung Sammlung E.G. Bührle, Zurich

All'alba, al tramonto e ai relativi crepuscoli, i raggi del sole penetrano nelle parti dell'atmosfera più vicine alla crosta terrestre dove le particelle sono più grossolane e, spiega Sir Rayleigh, sono in grado d'interferire con le onde più lunghe. Il cielo illuminato dalla luce diretta del sole diventa giallo e rosso. Un suggerimento dei colori della notte per le quote basse, sotto al blu del cielo (vedi Figure 6 e 7).



Figura 6: Crepuscolo (civile) dell'alba. A destra il colore blu della notte che sta per finire



Figura 7: Crepuscolo (civile) del tramonto. A sinistra il colore blu della notte che sta per iniziare.

### La visione fotopica, mesopica e scotopica

L'occhio e i processi di elaborazione della visione si sono strutturati nel corso dei millenni in relazione all'offerta delle luci naturali, quelle del giorno e quelle della notte. Gli studiosi dei processi della visione hanno individuato questi processi, li hanno qualificati, misurati e hanno redatto tabelle e grafici. In relazione della risposta dell'occhio ai livelli ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) della luminanza ( $L$ ) ambientale sono state individuate tre fasi:

1. Visione fotopica:  $L \geq 3 \text{ cd}/\text{m}^2$
2. Visione mesopica:  $3 \text{ cd}/\text{m}^2 \leq L \leq 0,001 \text{ cd}/\text{m}^2$
3. Visione scotopica:  $L \leq 0,001 \text{ cd}/\text{m}^2$

Di fatto sono le fasi che si sviluppano dal giorno (fotopica) alla notte (scotopica) passando per la fase crepuscolare (mesopica). Il grafico e i valori che rappresentano la visibilità delle frequenze luminose in fase fotopica e scotopica sono quelli illustrati e indicati nelle Figura 8 e nella Figura 9.

Il tempo di adattamento dell'occhio per il passaggio dalla fase fotopica a quella scotopica, e viceversa, è di fatto quello dei crepuscoli. Da 20 minuti ad 1 ora circa [5].

La fase fotopica è quella considerata più importante. E' quella della luce solare. E' quella che consente l'adempimento dei compiti visivi funzionali negli esterni e negli interni. E' quella che ha informato i valori dei parametri di valutazione delle sorgenti luminose e degli apparecchi illuminanti: quantità di flusso luminoso emesso, efficienza luminosa delle sorgenti e quindi rendimento degli apparecchi, curve fotometriche, IRC (Indice di Resa Cromatica) e UGR (Unified Glare Rating – valutazioni degli abbagliamenti). Ha informato le metodologie di calcolo e verifica illuminotecnica. Le fasi scotopica e mesopica, conosciute dai cultori della luce, per primo lo studioso ceco J.E.Purkynje hanno avuto per ora scarsa considerazione dai manipolatori della luce: lighting designer, architetti, ingegneri, etc. Sono comunque sperimentate da tutti gli esseri viventi almeno una volta al giorno. Come si vede dal grafico della Figura 8 le differenze tra le due fasi sono stupefacenti; sia dal punto di vista qualitativo che dal punto di vista quantitativo. I fotorecettori del "buio" (i bastoncelli) hanno sensibilità notevolmente più alta dei fotorecettori fotopici (i coni). Ad esempio, per ogni Watt di radiazione alla lunghezza d'onda di 507 nm in visione fotopica l'occhio è in grado di percepire 303 lumen, mentre in visione scotopica percepisce 1700 lumen. Circa 5,6 volte di più! Come si vede la lunghezza d'onda dei 507 nm è qualificabile come appartenente al segmento cromatico dei blu. Il blu è il colore della notte.

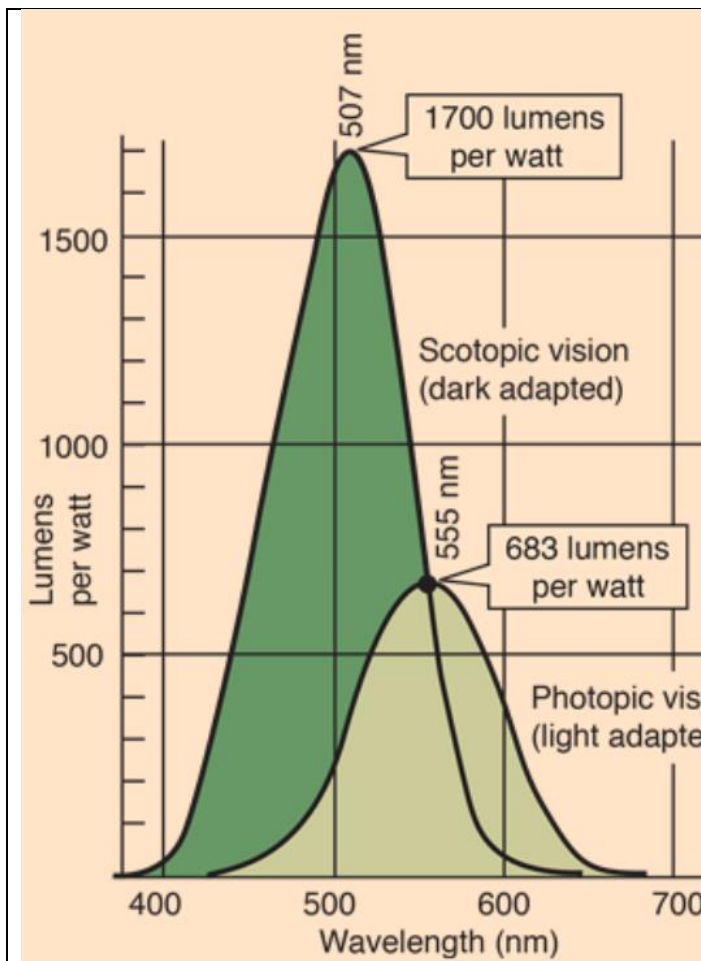


Figura 8: Curve della sensibilità dell'occhio in visione fotopica e scotopica

| 8                         |  |                          |   |                          |
|---------------------------|--|--------------------------|---|--------------------------|
| Wavelength $\lambda$ (nm) | Photopic Luminous Efficacy $V_{\lambda}$ | Photopic Conversion lm/W | Scotopic Luminous Efficacy $V'_{\lambda}$ | Scotopic Conversion lm/W |
| 380                       | 0.000039                                 | 0.027                    | 0.000589                                  | 1.001                    |
| 390                       | 0.000120                                 | 0.082                    | 0.002209                                  | 3.755                    |
| 390                       | 0.000120                                 | 0.082                    | 0.002209                                  | 3.755                    |
| 400                       | 0.000396                                 | 0.270                    | 0.009290                                  | 15.793                   |
| 410                       | 0.001210                                 | 0.826                    | 0.034840                                  | 59.228                   |
| 420                       | 0.004000                                 | 2.732                    | 0.096600                                  | 164.220                  |
| 430                       | 0.011600                                 | 7.923                    | 0.199800                                  | 339.660                  |
| 440                       | 0.023000                                 | 15.709                   | 0.328100                                  | 557.770                  |
| 450                       | 0.038000                                 | 25.954                   | 0.455000                                  | 773.500                  |
| 460                       | 0.060000                                 | 40.980                   | 0.567000                                  | 963.900                  |
| 470                       | 0.090980                                 | 62.139                   | 0.676000                                  | 1149.200                 |
| 480                       | 0.139020                                 | 94.951                   | 0.793000                                  | 1348.100                 |
| 490                       | 0.208020                                 | 142.078                  | 0.904000                                  | 1536.800                 |
| 500                       | 0.323000                                 | 220.609                  | 0.982000                                  | 1669.400                 |
| 507                       | 0.444310                                 | 303.464                  | 1.000000                                  | 1700.000                 |
| 510                       | 0.503000                                 | 343.549                  | 0.997000                                  | 1694.900                 |
| 520                       | 0.710000                                 | 484.930                  | 0.935000                                  | 1589.500                 |
| 530                       | 0.862000                                 | 588.746                  | 0.811000                                  | 1378.700                 |
| 540                       | 0.954000                                 | 651.582                  | 0.655000                                  | 1105.000                 |
| 550                       | 0.994950                                 | 679.551                  | 0.481000                                  | 817.700                  |
| 555                       | 1.000000                                 | 683.000                  | 0.402000                                  | 683.000                  |
| 560                       | 0.995000                                 | 679.585                  | 0.328800                                  | 558.960                  |
| 570                       | 0.953000                                 | 650.216                  | 0.207600                                  | 357.000                  |

Figura 9: Valori tabellari normalizzati delle curve di visibilità dell'occhio in visione fotopica e scotopica con indicazione dei massimi.

Source: Table 6-1 of Williamson & Cummins, Light and Color in Nature and Art, Wiley, 1983. The Photopic conversion (lm/W) is obtained by multiplying  $V_{\lambda}$  by 683 and the Scotopic conversion is obtained by multiplying  $V'_{\lambda}$  by 1700 as suggested by those authors.

Vedere bene la luce notturna significa percepire bene il colore blu e viceversa. Dal diagramma e dai valori della Figura 8 e Figura 9 si vede bene come l'occhio percepisca con difficoltà tutte le lunghezze d'onda a destra dei 555 nm (la massima visibilità in fase fotopica); i colori penalizzati sono i gialli e i rossi ovvero i colori del crepuscolo. Sono i ricordi cromatici del giorno che è passato e sono i colori di apertura del giorno che arriva.

Durante il giorno (visione fotopica) sono valorizzati colori diversi da quelli della notte. Il giorno è prevalentemente giallo (visione fotopica - fotorecettori del rosso e del verde) e la notte è blu.

### Le sorgenti e gli apparecchi per illuminare la notte

I flussi luminosi emessi dalle sorgenti, ovvero i lumen, ovvero i Watt visibili delle radiazioni, sono misurati in visione fotopica. In visione mesopica e scotopica, questi flussi potrebbero diminuire o aumentare (a parità di potenza assorbita) secondo gli spettri di emissione delle sorgenti.

I valori del rapporto numerico, S/P ratio, che esprime questo aumento o riduzione, in relazione alle sorgenti, in visione scotopica sono illustrati nella Figura 10

I livelli di luminanza richiesti dalle norme per le illuminazioni degli ambienti esterni collocano la progettazione in ambito mesopico, ovvero tra il fotopico e lo scotopico. E' stato quindi elaborato un altro parametro: ELF (Effective Luminance Factor). Questo parametro considera il guadagno o perdita dell'efficienza delle sorgenti e degli apparecchi in relazione ai livelli di luminanza ambientale (mesopica), richiesti dalle norme o comunque progettuali.

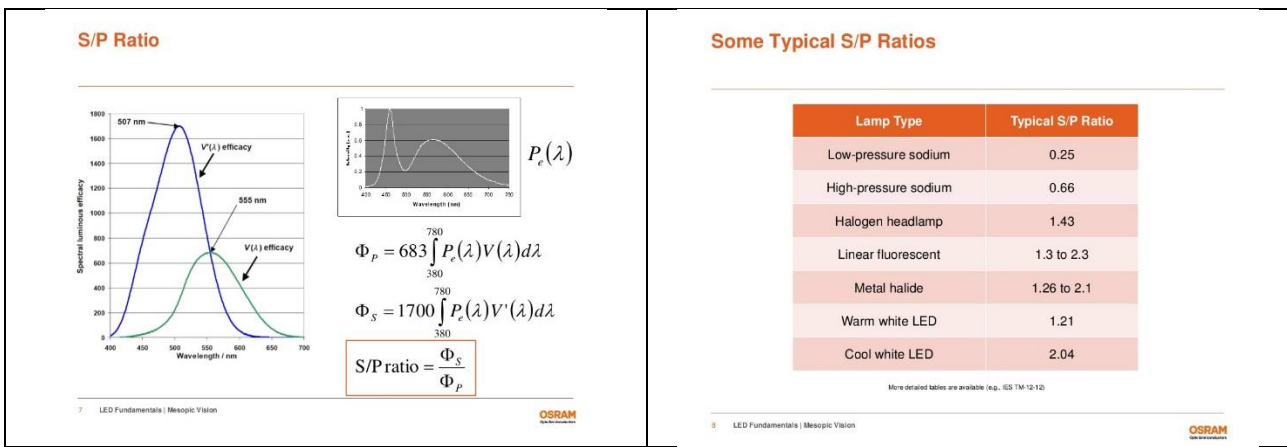


Figura 10: Metodo di valutazione del rapporto S/P in visione scotopica e i valori relativi ad alcune sorgenti (Fonte OSRAM)

Le sorgenti che hanno una forte componente blu sono più performanti. Nella fase di valutazione progettuale degli illuminamenti e delle luminanze, disponendo di flussi amplificati dalla percezione visiva, si possono ottenere risparmi energetici importanti.

Gli esterni da illuminare sono vari. Non è difficile mettersi d'accordo sull'illuminazione di strade, parcheggi, etc., ovvero luoghi squisitamente funzionali. E' invece più complesso illuminare ambiti urbani con funzionalità molteplici e complesse. Illuminare le città ha consentito la dilatazione dei tempi di fruizione. Dove circola la gente circola il denaro. La luce contribuisce alla crescita del PIL. La circolazione delle persone deve essere incoraggiata garantendo sicurezza e godibilità. Gli apparecchi con le proprie sorgenti sono gli oggetti che insieme alle quinte degli edifici, alle piantumazioni, monumenti, etc. contribuiscono alla formazione della scena urbana. In alto, il cielo blu. Osservare la luce significa osservare i colori. I colori della notte non sono quelli del giorno. Il progetto deve verificare gli equilibri e rendere significativo il racconto mediante la luce. In modo statico e dinamico.

Per molteplici e fondate ragioni (longevità, accensioni e spegnimenti immediati, efficienza luminosa) c'è una tendenza, piuttosto diffusa, a sostituire gli apparecchi illuminanti dotati di lampade a scarica (ioduri, mercurio, sodio) con apparecchi a LED. E' necessario, però, fare alcune riflessioni. Come rappresentato in Figura 11 le frequenze dei blu dello spettro del LED bianco si collocano in modo importante all'interno delle curve scotopica e mesopica. Nella stessa figura si vede come i gialli e i rossi vengano mortificati.

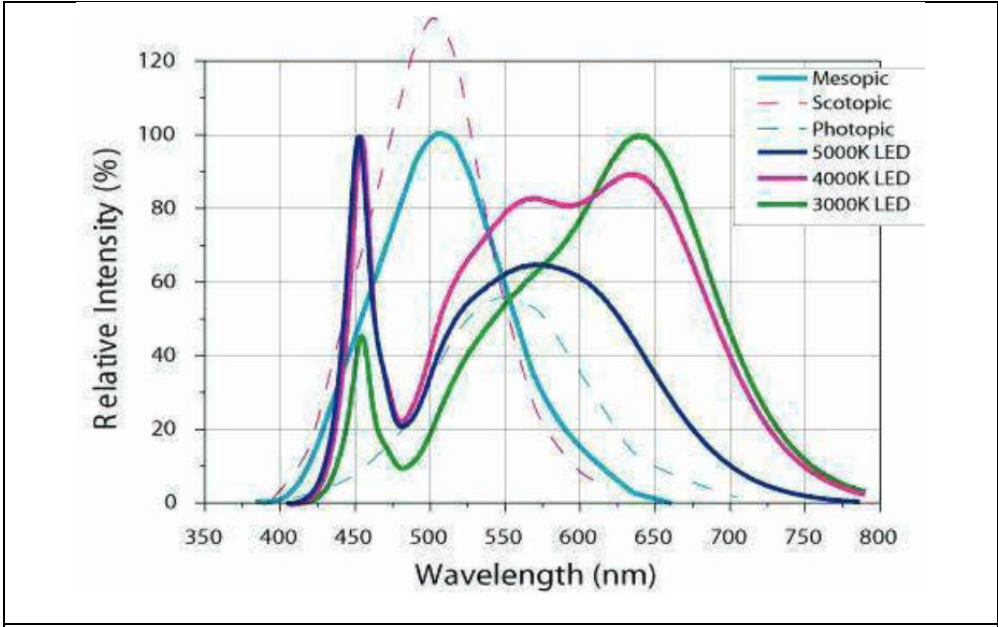
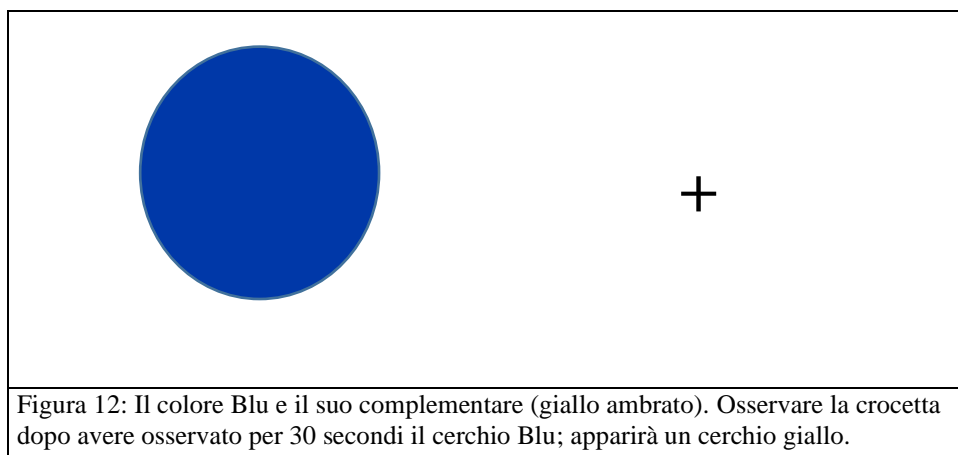


Figura 11: Le curva mesopica e scotopica “ignorano” i giallo-rossi e valorizzano i blu (Fonte vedi nota [6])

Le scene urbane illuminate dai LED bianchi avranno inevitabilmente una dominante cromatica blu. Questa dominante si combina in modo isterico con il blu diffratto del cielo. All'occhio viene offerta una overdose di blu. L'occhio vede in modo sincretico, non è in grado di discernere le componenti cromatiche; ma tutti i

dispositivi della postproduzione dell'immagine hanno cognizione delle presenze e assenze (vedi esperimento della Figura 12). I fotorecettori dell'occhio sono nutriti nella loro totalità e ognuno intende svolgere la propria funzione; è un'esigenza biologica e funzionale.

Qualora le scene non offrissero a tutti i fotorecettori la possibilità di svolgere la loro funzione, l'occhio e i suoi bio-neuro-collaboratori esprimerebbero il disagio con un qualche malessere. Si potrebbe fare l'esempio di un'orchestra dove non a tutti gli orchestrali convocati viene offerta la possibilità di suonare. Questo non avrebbe senso!



E' chiaro che non si possono esaurire le complessità, alla base di una progettazione della luce nelle scene urbane, con le denotazioni cromatiche del blu della notte e il giallo delle sorgenti. I bravi artisti e progettisti (Vedi Figure 13 e 14) compongono tutti i fattori, naturali e artificiali, per arricchire il cosiddetto immaginario collettivo, secondo una narrazione efficace ed emozionante.





Figura 14: Un esempio di narrazione efficace dove gli elementi di una buona prosa e poesia sono modulati componendo i colori “caldi” (superfici delle facciate) e “freddi” (globi dei pastorali) nel rispetto del monumento prevalente illuminato dalla luce bianca dei LED - Piazza del Duomo Milano

Parafrasando E.A. Poe, possiamo quindi sostenere che: “Coloro che vedono di notte conoscono cose che sfuggono a coloro che vedono solo di giorno!”.

### Uno spin off per il design e per la divulgazione della luce come espressione dell’energia

Sfruttando i poteri della luce blu si può scrivere e disegnare sulle superfici fotoluminescenti. Utilizzando questa bella proprietà sono stati progettati tavolini di forme e colori diversi sui quali con proiettorini di luce blu attraverso il disegno si può modulare la luce, offrendo messaggi grafici e suggestioni ambientali (v. Figura15)

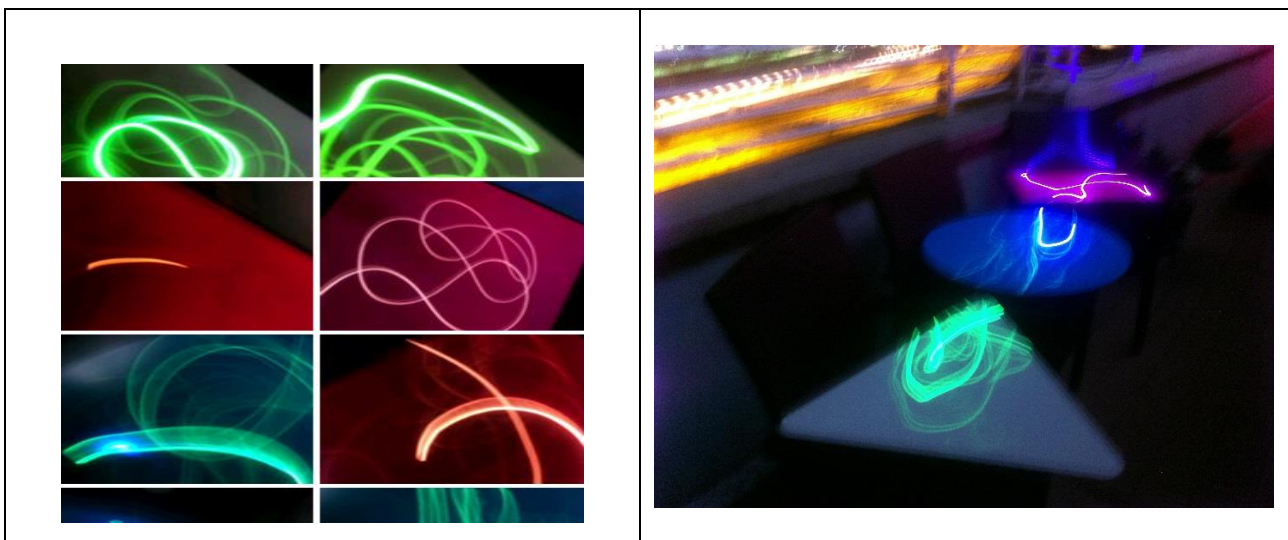


Figura 15: Oggetti di design (tavolini) su cui disegnare con la luce (blu), in ambiente mesopico.

Inoltre, a supporto della dissertazione e importanza della luce blu è stata ideata e realizzata un’installazione denominata “Luce a Km Zero”. La prima installazione è stata realizzata nel 2015 presso la Luiss di Roma



nell'ambito di un contest, organico ad un evento TedTalk, sui temi ambientali. E' stata poi replicata in altri contesti. L'installazione ha finalità artistiche e divulgative. I temi sviluppati sono quelli del rapporto tra l'energia (Human Power) e la luce (la luce blu) (vedi Figura 16). La luce è energia visibile. Le metafore sono molteplici e le suggestioni altrettante. Entrambe hanno la dignità e la corposità di una specifica ricerca.

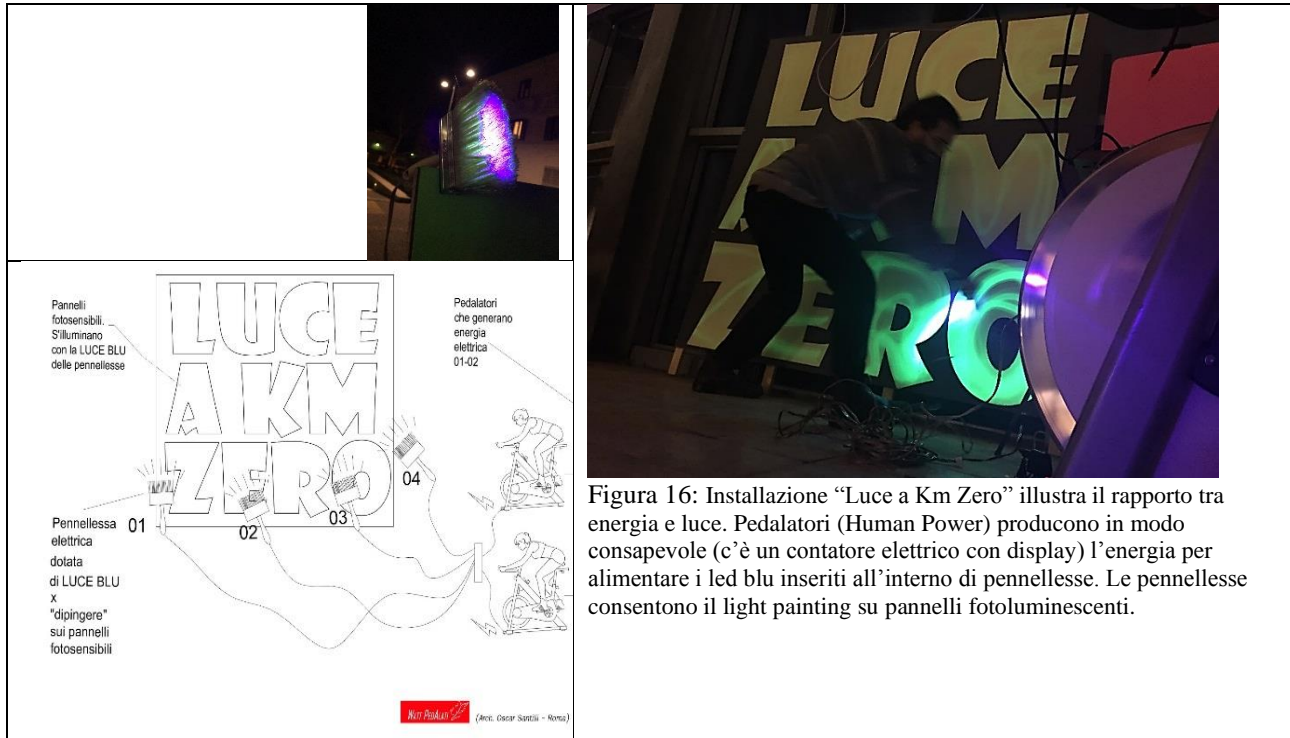


Figura 16: Installazione “Luce a Km Zero” illustra il rapporto tra energia e luce. Pedalatori (Human Power) producono in modo consapevole (c'è un contatore elettrico con display) l'energia per alimentare i led blu inseriti all'interno di pennellesse. Le pennellesse consentono il light painting su pannelli fotoluminescenti.

## Note e riferimenti bibliografici

- [1] Shuji Nakamura Premio Nobel per la fisica nel 2014: *Lectio Magistralis Convegno CIRIAF*, Università di Perugia, 2019
- [2] Conferenza per la presentazione del Premio Nobel per la Fisica, <https://www.youtube.com/watch?v=jhAwH4fqDb8> Stoccolma, 2014
- [3] Le lampade a scarica furono presentate da N.Tesla e G.Westinghouse nell'Esposizione mondiale di Chicago del 1893
- [4] Dopo circa 2 anni dal 1996, ovvero dopo circa 20.000 ore, le persone addette alla pubblicizzazione e commercio dei LED, sostenevano che le nuove sorgenti avrebbero avuto una vita di circa 100.000 ore, almeno 11 anni.
- [5] Descrizione e tabella excel dei tempi della luce, della notte e dei tempi dei crepuscoli. [http://wave.surfreport.it/almanacco\\_calendario\\_solare\\_calcolo\\_online\\_alba\\_tramonto.php](http://wave.surfreport.it/almanacco_calendario_solare_calcolo_online_alba_tramonto.php)
- [6] <https://www.emerson.com/documents/automation/white-paper-methods-for-comparing-visual-illumination-between-led-luminaires-to-optimize-visual-performance-in-low-light-environments-appleton-en-5071338.pdf>