



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA GALILEO GALILEI
Corso di Laurea triennale in Astronomia

Inquinamento luminoso: Spettri del cielo di Asiago

Laureando:

Zara Marco

Relatore:

*Ortolani
Sergio*

Correlatore:

Andrea Bertolo

Anno Accademico 2015/2016

Indice

Bibliography	1
1 Perchè parlare di inquinamento luminoso	2
1.1 Introduzione	2
1.2 Definizione di inquinamento luminoso	3
2 Brillanza del cielo notturno	6
2.1 Introduzione	6
2.2 Luce stellare integrata	7
2.3 Luce Galattica diffusa	7
2.4 Fondo cosmico integrato	8
2.5 Luce aurorale	8
2.6 Luce zodiacale	8
2.6.1 Contributo della Luna	9
3 Effetti dell'atmosfera sulla radiazione luminosa	11
3.1 Introduzione	11
3.2 Assorbimento e diffusione dell'atmosfera	11
4 Propagazione dell'inquinamento luminoso nell'atmosfera	15
4.1 Introduzione	15
4.2 Descrizione del modello	16
4.3 Parametri usati nel modello standard	18
4.3.1 Brillanza del cielo in funzione del carico di aerosol	19
4.3.2 Influenza dello scattering del secondo ordine e di piccoli ostacoli sulla brillanza	20
4.3.3 Influenza del LOP sulla brillanza	21
4.3.4 Influenza della lunghezza d'onda sulla brillanza	22
4.3.5 Conclusioni	22
5 Come si produce l'inquinamento luminoso	26
5.1 Introduzione	26
5.2 Apparecchi di illuminazione	26

6	Spettro del cielo di Asiago	35
6.1	Introduzione	35
6.2	Come è cambiato lo spettro del cielo di Asiago nel tempo	36
6.3	Confronto con altri osservatori	47
6.3.1	Spettro del cielo di La Palma	47
6.3.2	Confronto con Mount Hopkins e Kitt Peak	50
6.3.3	Confronto con Mount Hamilton	56
6.4	Conclusioni	64

Bibliografia

Sommario

Si è scelto di fare una tesi sull'inquinamento luminoso per sottolineare l'importanza di una problema poco conosciuto, e che sta diventando sempre più rilevante negli ultimi anni. Tale problema non riguarda soltanto gli astronomi ma l'intero ecosistema (flora, fauna, uomo). Nel capitolo 1 si è cercato di dare una descrizione generale dell'inquinamento luminoso, spiegando che cosa è e perchè è importante parlarne. Nel capitolo 2 è stata discussa la brillantezza naturale del cielo; in particolare si sono discusse tutte quelle componenti naturali che provocano un aumento della luminosità del cielo notturno. Nel capitolo 3 si è discussa l'interazione tra l'atmosfera terrestre e la radiazione luminosa. Si è detto che l'atmosfera gioca un ruolo cruciale nel determinare l'inquinamento luminoso; senza di essa tale inquinamento non esisterebbe. Nel capitolo 4 si è cercato di spiegare in che modo l'inquinamento luminoso si propaga nell'atmosfera. Per descrivere tale propagazione esistono diversi modelli (Garstan 1989, Aubè 2007, Cinzano 2012); di questi modelli si è scelto di descrivere quello proposto da Aubè. Nel capitolo 5 si sono descritti i principali dispositivi usati nell'illuminazione pubblica e privata. Il capitolo 6 costituisce la parte più importante della tesi. Per prima cosa si è cercato di capire come è cambiato nel tempo lo spettro del cielo di Asiago. Per fare questo si sono andati a considerare gli spettri di Asiago dal 1979 al 2015, messi a disposizione dal Prof. Ortolani (Dipartimento di Astronomia, Padova). Di tali spettri è stata, poi, fatta l'identificazione delle righe, cioè si cercato di associare ad ogni riga spettrale l'elemento chimico che le ha prodotte. Dopodichè si è andati a confrontare lo spettro del cielo di Asiago con lo spettro di altri osservatori (La Palma, Kitt Peak, Mount Hopkins, Mount Hamilton), cercando di mettere in evidenza eventuali differenze o aspetti comuni.

Dichiarazione di La Palma (2007) - Art.1:

Un cielo notturno incontaminato tale da consentire la contemplazione del firmamento dovrebbe essere considerato un diritto inalienabile dell'umanità al pari di altri diritti quali quelli ambientali, culturali e sociali, a causa del forte impatto che ha sullo sviluppo delle popolazioni e sulla conservazione della biodiversità.

Capitolo 1

Perchè parlare di inquinamento luminoso

1.1 Introduzione

Il 10 giugno 2016 è stata pubblicata l'edizione aggiornata dell'atlante mondiale dell'inquinamento luminoso [2]. Tale atlante mostra che più dell' 80% della popolazione del mondo e più del 99% della popolazione americana ed europea vive sotto cieli inquinati (cioè dove la brillantezza del cielo allo zenith è $> 14 \mu\text{cd}/\text{m}^2$) [2]. La Via Lattea risulta invisibile a più di 1/3 dell'umanità, inclusi il 60% degli europei e circa l'80% dei Nord Americani [2]. L'Italia risulta essere il Paese del G20, insieme alla Corea del sud, con il più alto livello di inquinamento luminoso, mentre l'Australia è il meno inquinato [2].

L'efficacia di un telescopio nel misurare deboli sorgenti diminuisce gradualmente all'aumentare del livello di inquinamento luminoso [3]. In particolare, per poter osservare un oggetto astronomico con lo stesso rapporto segnale - rumore, *il tempo di posa deve crescere linearmente con l'aumento del fondo.* [3]. Supponiamo, ad esempio, di considerare un oggetto astronomico che è appena più brillante del fondo in cui si trova; se il fondo aumenta del 10 % gli astronomi avranno bisogno di un tempo di posa maggiore del 10 % per osservare un oggetto con lo stesso rapporto segnale - rumore [3]. Se la luminosità del cielo dovesse continuare ad aumentare allora le sorgenti più deboli diventeranno inosservabili entro i limiti di tempo pratici [3]. Si calcola che la popolazione degli Stati Uniti si sta sviluppando ad un tasso medio dell'1.5 % per anno, mentre la quantità di luce artificiale sta aumentando ad un tasso annuo del 6 %; invece, i parchi, in media, vengono illuminati 5 o 10 volte in più rispetto a 20 anni fa [3]. Questo dà un'idea dell'impatto dell'illuminazione sull'astronomia.

1.2 Definizione di inquinamento luminoso

Si parla di **inquinamento luminoso** quando la luce proveniente dalle sorgenti artificiali viene dispersa e raggiunge il cielo notturno [1]. Queste sorgenti artificiali possono essere impianti di illuminazione esterna notturna (impianti stradali), oppure possono essere gli impianti di illuminazione delle vetrine dei negozi o anche dei veicoli [1].

Accanto alla definizione di inquinamento luminoso possiamo anche dare quella di inquinamento ottico: si parla di **inquinamento ottico** quando la luce, proveniente dalle sorgenti artificiali, viene dispersa e illumina un' area o un soggetto che non deve essere illuminato [1]. Questo causa un notevole disturbo a tutti i soggetti che non usufruiscono dell'impianto stesso (ad esempio a tutti coloro che, abitando accanto a centri sportivi, possono essere disturbati dall'eccessiva illuminazione dei proiettori) [1].

Osserviamo che l'inquinamento luminoso è diverso dal concetto di **abbagliamento** [1]. Si parla di abbagliamento quando la luce proveniente dalle sorgenti artificiali viene dispersa e va a investire direttamente un soggetto che è un utente dell'impianto di cui fa parte la sorgente [1].

Un esempio di abbagliamento è il disturbo prodotto agli atleti dai proiettori che illuminano un campo sportivo; un esempio di inquinamento ottico è il disturbo prodotto dagli stessi proiettori ad una persona che passeggia in un viottolo buio di campagna [1].

In senso generico, per inquinamento luminoso si intende una qualunque alterazione della quantità naturale di luce presente di notte nell'ambiente esterno, al di fuori degli spazi che è necessario illuminare, e causata dall'uomo [1].

Figura 1.1: *In figura si può notare come è cambiato l'inquinamento luminoso all'osservatorio Kitt Peak (Tucson, Arizona, USA.) dal 1959 al 2003 [12].*

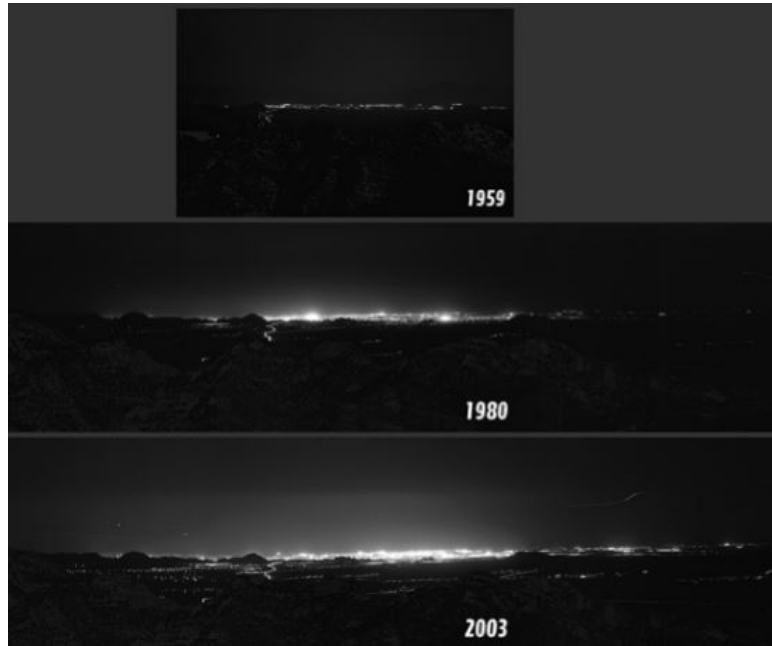


Figura 1.2: In figura è riportato l'andamento dell'inquinamento luminoso in Italia dal 1971 al 2025. [13].

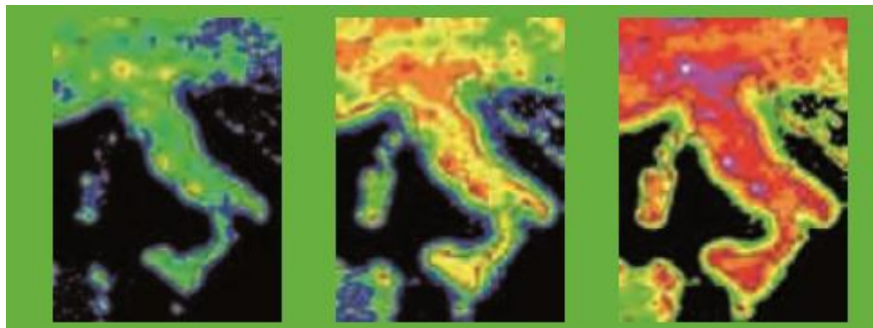
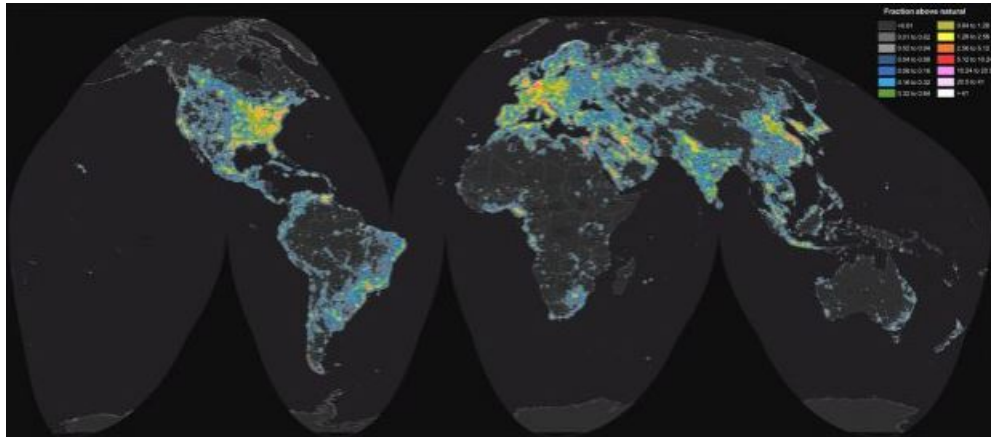


Figura 1.3: *In figura è riportato l'atlante mondiale della brillantezza artificiale del cielo [2].*



Capitolo 2

Brillanza del cielo notturno

2.1 Introduzione

Anche in un qualunque sito buio, lontano da qualunque sorgente di luce artificiale, il cielo notturno non è completamente buio [6]. Questo è dovuto al fatto che ci sono molte sorgenti che contribuiscono alla sua luminosità:

- Luce integrata di tutte le stelle della nostra galassia
- Luce galattica diffusa da polvere interstellare
- Fondo cosmico integrato
- Luce zodiacale
- contributo della Luna
- Luce aurorale (*airglow*)

Le prime cinque sono di natura extraterrestre e sono facilmente prevedibili, in quanto variano con la posizione nel cielo; l'ultima è di origine terrestre ed è dovuta a fenomeni che avvengono nella parte alta dell'atmosfera terrestre [6]. Quest'ultima componente dipende da un largo numero di parametri (stagione, posizione geografica, ciclo solare, etc.), pertanto risulta difficilmente prevedibile [6].

In astronomia, la luminosità del cielo notturno è chiamata *brillanza*. Per misurare la brillantezza del cielo si possono usare diverse unità di misura: un unità di misura molto usata è la *magnitudine per unità di area angolare* $\frac{mag}{arcsec^2}$; più basso è il valore della magnitudine (cioè della brillantezza) del cielo e più alta è la luminosità del cielo [1]. Un'altra unità di misura frequentemente usata è l'unità S_{10} ; essa rappresenta il numero di stelle di decima magnitudine per grado quadrato, osservate attraverso una massa d'aria limpida, che produrrebbero la stessa brillantezza osservata [1].

Figura 2.1: *L'immagine mostra gli effetti del crescente aumento dell'inquinamento luminoso sulla brillantezza del cielo a partire da un sito non inquinato (a destra) fino ad arrivare a centri urbani inquinati. La perdita di visibilità degli oggetti celesti risulta evidente [14].*

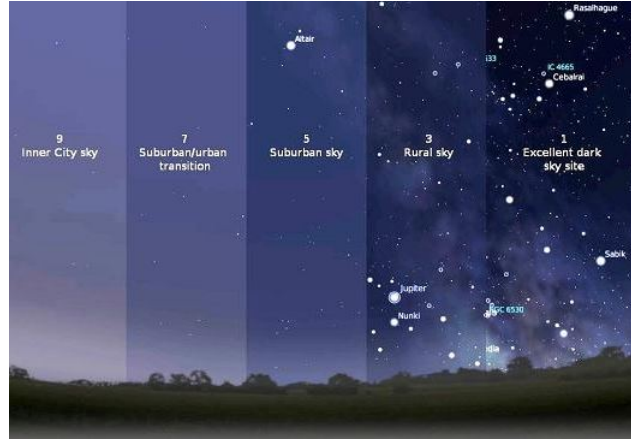


Tabella 2.1: *In tabella è riportata la brillantezza prodotta da ciascuna componente naturale allo zenith e la brillantezza minima [1].*

Sorgente	Zenith ($S_{10,vis}$)	Zenith ($10^{-6}cd\ m^{-2}$)	min. ($S_{10,vis}$)	min. ($10^{-6}cd\ m^{-2}$)
Luce Zodiacale	130 (100- 180)	91	80	56
Luce stellare int	110	77	30	21
Luce Galattica	20	14	8	5.6
Airglow (minimo)	50	35	50	35
Fondo cosmico	<1	<0.7	<1	<0.7
Totale	310	217	168	118

2.2 Luce stellare integrata

Tutte le stelle della nostra galassia che sono troppo deboli per essere osservate ad occhio nudo contribuiscono alla luminosità del cielo [1]. La brillantezza dovuta alla luce integrata di queste stelle varia fortemente con la direzione di osservazione da un minimo di circa $20 \cdot 10^{-6}cd\ m^{-2}$, osservando nelle direzioni dei poli galattici, ad un massimo di circa $250 \cdot 10^{-6}cd\ m^{-2}$ nelle zone più luminose della Via Lattea [1].

2.3 Luce Galattica diffusa

La luce galattica diffusa da particelle di polvere interstellare è una componente piuttosto debole. La brillantezza prodotta da questa componente oscilla tra $6 \cdot 10^{-6}cd\ m^{-2}$ e $14 \cdot 10^{-6}cd\ m^{-2}$ [1].

2.4 Fondo cosmico integrato

Il fondo cosmico integrato prodotto dall'insieme delle sorgenti cosmiche che emettono nell'ottico è di grande interesse cosmologico ma fornisce un contributo alla luminosità del cielo notturno che per i nostri interessi può essere sicuramente trascurato [1].

2.5 Luce aurorale

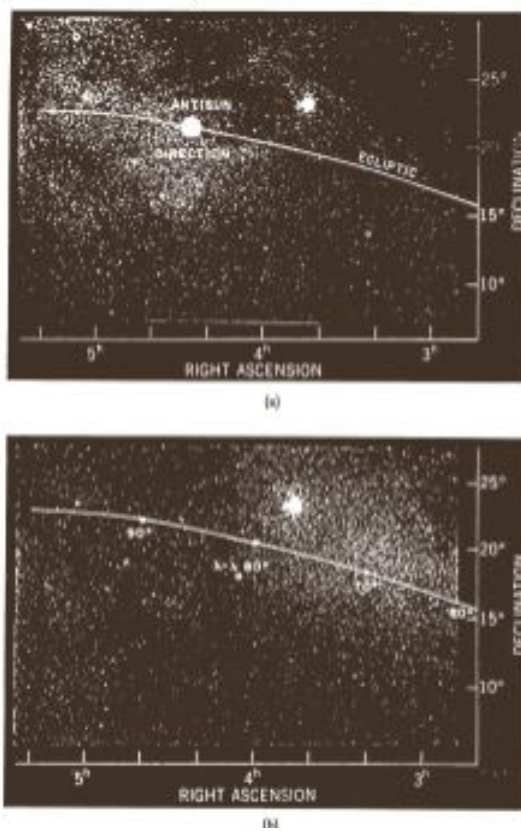
La luce aurorale (chiamata anche *airglow*) è invece un tipo di luce che si produce nella parte alta dell'atmosfera terrestre (intorno ai 100 km di quota) ed è dovuta al fatto che gli atomi e gli ioni dell'atmosfera si ricombinano e si diseccitano a causa della radiazione ultravioletta solare [15]. Ha un tipico spettro a righe e la sua intensità è fortemente influenzata dall'attività solare [15]. La diseccitazione che ne consegue produce, nel corso della notte, delle righe di emissione, la più brillante delle quali è la riga dell'ossigeno neutro OI 5577 Å; l'intensità di queste righe è legata al ciclo solare, tuttavia la loro distribuzione geografica risulta relativamente uniforme con due massimi alle latitudini subpolari e all'equatore. La luce aurorale può contribuire fino al 30% della luminosità totale del cielo [15].

2.6 Luce zodiacale

La luce zodiacale è una debole luminosità che appare lungo l'eclittica, in particolare nelle vicinanze del Sole. Il periodo migliore per osservarla è la primavera, dopo che luci del tramonto sono completamente scomparse, mentre d'autunno subito prima dell'alba. Tale luce è dovuta alla luce solare che viene diffusa dalle polveri interplanetarie nel visibile, in particolare quelle che si trovano nella fascia degli asteroidi. Poiché tali particelle sono distribuite sul piano del sistema solare, la brillantezza da esse prodotta è concentrata in un'area lungo l'eclittica con valori massimi di circa $120 \cdot 10^{-6} \text{ cd m}^{-2}$ e valori minimi, in direzione dei poli dell'eclittica, attorno a $56 \cdot 10^{-6} \text{ cd m}^{-2}$ [1]. La luce zodiacale produce un'emissione di corpo nero 160 - 220 K nell'infrarosso, e può contribuire fino al 70% della luminosità totale del cielo [15]. Inoltre, è possibile osservarla ad occhio nudo fino a valori di brillantezza di circa $21.3 \text{ magnarcsec}^{-2}$; quando il cielo raggiunge valori di brillantezza più bassi di questo (cioè quando diventa più luminoso) diventa impossibile osservarla.

La luce zodiacale e aurorale sono le due componenti che dominano il fondo naturale per le osservazioni da Terra; tali componenti producono, nel visibile, una magnitudine massima del cielo notturno (cioè una luminosità minima) pari a $V = 22 \frac{\text{magn}}{\text{arcsec}^2}$ [15].

Figura 2.2: Nelle due figure è riportata l'intensità della luce zodiacale [15].



2.6.1 Contributo della Luna

Un altro contributo non trascurabile alla luminosità del cielo notturno è dato dalla Luna. La presenza della Luna può dare un contributo massimo di 3 magnitudini ad una distanza di 45 gradi. Tale quantità è ovviamente variabile a seconda della fase, posizione, direzione di osservazione e delle caratteristiche locali [15]. In tabella 2.2 sono riportate le magnitudini del cielo nelle bande U, B, V, R, I a seconda della fase lunare. Da notare come dalla fase di luna nuova alla fase di luna piena la brillantezza del cielo in banda V passa da $21.7 \text{ magnarcsec}^{-2}$ a $20.0 \text{ magnarcsec}^{-2}$.

Tabella 2.2: *In tabella è riportato il contributo alla brillantezza del cielo durante le varie fasi lunari, nelle bande U,B,V,R,I [16].*

Giorni dopo luna nuova	U	B	V	R	I
0	22.0	22.7	21.8	20.9	19.9
3	21.5	22.4	21.7	20.8	19.9
7	19.9	21.6	21.4	20.6	19.7
10	18.5	20.7	20.7	20.3	19.5
14	17.0	19.5	20.0	19.9	19.2

Capitolo 3

Effetti dell'atmosfera sulla radiazione luminosa

3.1 Introduzione

L'atmosfera terrestre gioca un ruolo cruciale nel determinare l'inquinamento luminoso; senza di essa il problema dell'inquinamento luminoso non esisterebbe. Questo è dovuto al fatto che quando la luce (sia la luce proveniente dal Sole e dalle altre stelle che la luce proveniente dalle sorgenti artificiali) si propaga all'interno dell'atmosfera subisce tutta una serie di fenomeni fisici come *assorbimento*, *riflessione*, *rifrazione*. In altre parole, quando la radiazione si propaga nello spazio ad un certo punto incontra delle particelle di materia; in conseguenza di questo può succedere che la radiazione venga assorbita dalle particelle, oppure che venga diffusa. Se l'atmosfera terrestre non ci fosse la luce proveniente dal sole non subirebbe questi processi di diffusione e quindi vedremmo il sole e le stelle su di un cielo completamente buio, come se fossimo di notte. Analogamente, senza atmosfera, neanche la luce artificiale subirebbe l'assorbimento e la diffusione e quindi non si avrebbe il problema dell'inquinamento luminoso. In questo contesto discuteremo solo l'assorbimento e la diffusione dell'atmosfera.

3.2 Assorbimento e diffusione dell'atmosfera

L'atmosfera terrestre è opaca alle radiazioni elettromagnetiche, tranne che in due *finestre* dello spettro, la finestra ottica e la finestra radio [17]. Tra le due finestre è situata la zona infrarossa dello spettro, nella quale l'atmosfera è in parte trasparente (in limitate bande) soprattutto a grandi altezze, dove la presenza del vapore d'acqua è molto ridotta [17]. Nell'ultravioletto e nella regione X e gamma l'opacità dell'atmosfera al livello del mare è totale [17]. Dal punto di vista fisico, l'assorbimento è causato dall'interazione della radiazione con gli elettroni atomici e molecolari; siccome questi si presentano in stati discreti di

energia, allora anche l'assorbimento sarà presente a lunghezze d'onda discrete [17]. Nel caso delle molecole invece, i livelli energetici sono talmente numerosi da formare delle bande (bande molecolari) [17].

Nella banda ottica e nel vicino infrarosso l'assorbimento atmosferico è dovuto a tre distinti processi [15]:

1. scattering di Rayleigh
2. scattering di Mie
3. assorbimento molecolare

Lo scattering di Rayleigh è dovuto a tutte quelle molecole o particelle che hanno dimensione piccola rispetto alla lunghezza d'onda della luce visibile, ed è governato dalla seguente equazione

$$\frac{I}{I_0} = c \frac{1 + \cos^2 \phi}{\lambda^4}$$

dove

- λ è la lunghezza d'onda
- ϕ è l'angolo tra la direzione del fascio incidente e la direzione di osservazione
- c è una quantità che dipende dalla quota, dalla pressione e dalla temperatura, ed è definita come

$$c = \frac{8\pi^4}{R^2} N$$

dove

- N è il numero di interazioni delle molecole lungo la linea di vista
- R è la distanza dall'osservatore

La cosa interessante da osservare nell'equazione precedente è la forte dipendenza dell'intensità dalla quarta potenza della lunghezza d'onda. Tale dipendenza implica che la luce di minore lunghezza d'onda viene diffusa in modo maggiore; questo significa che la luce blu viene diffusa in modo maggiore rispetto alla luce rossa [15]. Questo è il motivo per cui il nostro cielo appare blu [15]. A questo punto risulta naturale chiedersi il motivo per cui il cielo è blu anziché viola poiché, in accordo con la legge di Rayleigh, sarebbe naturale aspettarsi un cielo di questo colore. Uno dei fattori è dato dal fatto che l'occhio umano risulta essere più sensibile alla lunghezza d'onda corrispondente alla luce blu anziché a quella viola avendo dei fotorecettori che possiedono una sensibilità maggiore per questo colore.

Figura 3.1: *Rappresentazione del cielo fatta con il programma Stellarium utilizzando la simulazione della diffusione dovuta all'atmosfera terrestre.*



Osserviamo inoltre che, se non ci fosse l'atmosfera, la luce proveniente dal Sole non subirebbe il fenomeno della diffusione (scattering di Rayleigh) e quindi vedremmo il Sole e le stelle su un cielo completamente nero. (vedi figura 3.2).

Lo scattering di Mie è dovuto a particelle che hanno dimensioni paragonabili o superiori alla lunghezza d'onda. Tale scattering ha una dipendenza complessa dalla lunghezza d'onda, ma in prima approssimazione si può considerare che vari in modo quasi costante con quest'ultima ($K_{\text{Mie}} = 0,006\lambda^{-0,8}$).

Nella banda ottica, in atmosfera libera, priva di nubi e inquinanti locali, lo scattering di Rayleigh è dominante rispetto allo scattering di Mie. La conseguenza di questo fatto è che nella banda ottica l'assorbimento dipende soprattutto dall'altezza del sito di osservazione (ovvero dallo spessore dell'atmosfera sovrastante). Maggiore è l'altezza a cui si trova il sito di osservazione e minore è lo spessore dell'atmosfera sovrastante, cioè minore è lo scattering subito dalla luce, quindi maggiore sarà la trasmissione della luce.

In figura 3.3 è riportato un confronto tra lo scattering di Rayleigh e lo scattering di Mie in funzione della lunghezza d'onda e a diverse altitudini del sito di osservazione (livello del mare, 1366m, 2286m):

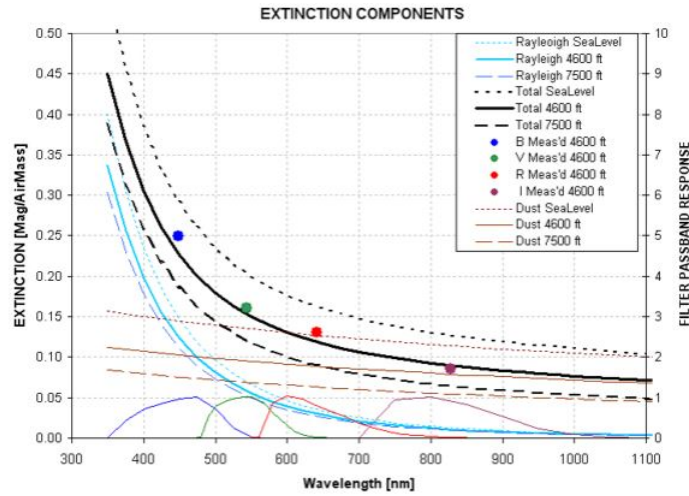
Osservando il grafico si può vedere che la curva delle polveri, ovvero la componente relativa allo scattering di Mie (evidenziata in rosso) ha un andamento quasi costante con la lunghezza d'onda; invece la componente relativa allo scattering di Rayleigh (evidenziata in azzurro) ha un andamento molto ripido. La curva nera rappresenta invece l'assorbimento atmosferico totale, ovvero l'assorbimento che è dato dalla composizione dei primi due; come si può vedere, tale

Figura 3.2: *Rappresentazione dello stesso cielo nello stesso momento eliminando la simulazione dovuta all'atmosfera terrestre.*



assorbimento risente molto della forte dipendenza dalla lunghezza d'onda dello scattering di Rayleigh. I punti evidenziati con colori diversi (coerenti con le bande sottostanti) si riferiscono al valore della lunghezza d'onda delle bande.

Figura 3.3: Confronto tra lo scattering di Rayleigh e di Mie [18].



Capitolo 4

Propagazione dell'inquinamento luminoso nell'atmosfera

4.1 Introduzione

I primi studi sull'inquinamento luminoso ebbero inizio nel 1970 [5]. Lo scopo di tali studi era capire che impatto potesse avere questo inquinamento sul cielo stellato [5]. Col passare del tempo ci si rese conto che non si trattava soltanto di un problema astronomico ma anche di un problema ambientale, con notevoli ripercussioni sulla flora e la fauna e sulla salute dell'uomo[5]. Per poter caratterizzare la relazione tra ALAN (*artificial light at night*) e il suo impatto sugli organismi biologici dobbiamo prima *comprendere il meccanismo fisico con cui la luce artificiale si propaga nell'ambiente*[5]. Tale propagazione è influenzata da diverse variabili:

1. Le proprietà ottiche dell'atmosfera, le quali includono lo scattering e l'assorbimento delle molecole. Alcuni costituenti atmosferici (come l'acqua, il vapore, l'ozono e l'anidride carbonica) mostrano una significativa variabilità spaziale e temporale. Questa variabilità complica la propagazione della luce artificiale nell'atmosfera.
2. Le proprietà di riflessione spettrale del suolo
3. La presenza di eventuali ostacoli (come alberi, montagne, edifici)
4. Le caratteristiche dei dispositivi di luce

La comprensione di questo meccanismo è resa difficile dal fatto che ALAN interagisce in maniera complessa e non lineare con l'ambiente[5]. Per superare questa difficoltà sono stati sviluppati diversi modelli numerici del trasporto

radiativo[5]. Tra questi, è importante menzionare il modello sviluppato da Garstang nel 1989, e quello di Cinzano del 2012 [5]. In questa sezione discuteremo invece il modello del trasporto radiativo sviluppato da Aubè nel 2007. In particolare saranno esaminati i seguenti fatti:

- lo scattering e l'assorbimento dovuto alle molecole e alle particelle di aerosol
- lo scattering del secondo ordine
- la topografia e gli ostacoli
- la riflessione prodotta dal suolo
- lo spettro dei dispositivi di luce e le loro funzioni di emissione angolare

4.2 Descrizione del modello

Il modello del trasporto radioattivo usato in questo studio è chiamato Illumina[5]. Illumina si comporta come un software ray-tracing in cui un certo numero di fotoni viene emesso dai punti luce, e poi raggiunge il campo di vista dell'osservatore (FOV) seguendo quattro differenti percorsi[5]. Pertanto, l'intensità spettrale della luce risultante è espressa dalla seguente equazione, ed è illustrata nella figura 4.1 (a).

$$I_{no} \approx I_1 + I_{r1} + I_2 + I_{r2}$$

dove

1. I_1 è l'intensità della radiazione dopo il primo scattering prodotto dalle molecole e dall'aerosol nel *voxel* della linea di vista ¹
2. I_{r1} è l'intensità della radiazione dopo il primo scattering che si ha dopo la riflessione del suolo
3. I_2 è l'intensità della radiazione dopo il secondo scattering nel *voxel* della linea di vista dopo il primo scattering prodotto dal voxel atmosferico contenuto nel volume circostante
4. I_{r2} è l'intensità della radiazione dopo che ha seguito lo stesso percorso del punto 3 ma dopo una riflessione sul pixel del suolo.

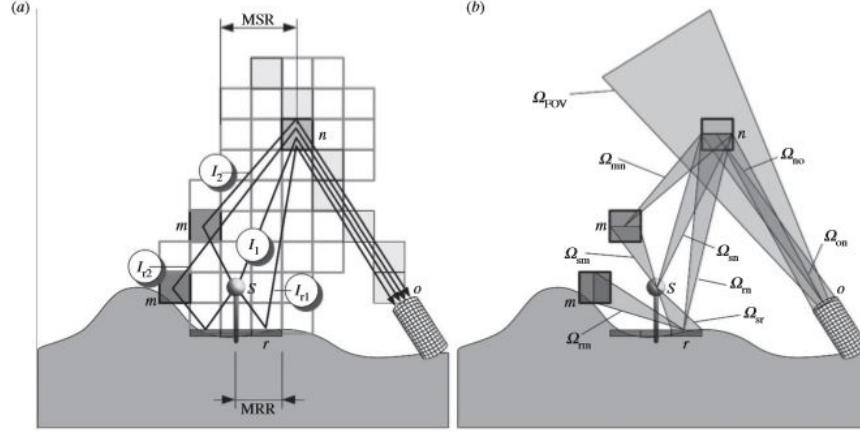
¹Un voxel (volumetric pixel o più precisamente volumetric picture element) è un elemento di volume che rappresenta un valore di intensità di segnale o di colore in uno spazio tridimensionale, analogamente al pixel che rappresenta un dato di un'immagine bidimensionale [22].

Il flusso spettrale totale (Wnm^{-1}) percepito da un osservatore simulato è modellato dalla seguente equazione:

$$\Phi_m = \sum_n I_{\text{no}} \Omega_{\text{no}} \frac{\Omega_{\text{FOV}}}{\Omega_{\text{on}}}.$$

I vari angoli solidi che compaiono in tale equazione sono illustrati nella figura 4.1 (b).

Figura 4.1: *In figura è riportato il modello geometrico e i principali contributi al flusso percepito da un osservatore. MRR (massimo raggio di riflessione) è equivalente alla distanza media tra gli ostacoli; MSR è il raggio massimo relativo al secondo ordine di scattering[5].*



Lo scattering del secondo ordine può avere un impatto significativo sulla radianza del cielo, soprattutto quando l'osservatore è lontano dai centri abitati[5]. Infatti, la propagazione della luce artificiale è molto diversa dalla propagazione della luce solare, perchè le sorgenti di luce artificiale sono diffuse su una superficie più larga rispetto alla distanza dall'osservatore [5].

4.3 Parametri usati nel modello standard

In questo studio specifico sono state fatte delle semplificazioni sulle proprietà geografiche del dominio del modello, come mostrato in figura 4.2 [5]. In particolare si è andati a considerare una città circolare dal raggio di 10 km, e delle lampade con proprietà costanti; la riflessione prodotta dal suolo è stata resa uniforme su tutto il dominio del modello [5]. L'elevazione del suolo è stata posta a zero per gran parte dei punti ad eccezione di una montagna alta 2000m e avente la forma di una gaussiana a tre dimensioni (larghezza a metà altezza pari a 10km); tale montagna è collocata a 30 km ad est dal centro della città [5]. La risoluzione spaziale usata per questo studio è di 1km per pixel, e il dominio copre una superficie di 301 per 301 km, centrata sulla città. Il flusso di luce entro la città è di 1000 W per pixel per ogni linea spettrale usata [5]. L'idea è stata quella di studiare il comportamento dell'inquinamento luminoso escludendo il fatto che le righe spettrali del flusso variano a secondo del tipo di lampade installate. Le cinque righe spettrali usate sono: 436, 498, 546, 569, 616 nm; ciascuna riga corrisponde ad una comune riga per lampade al sodio ad alta pressione, per gli alogenuri metallici, e per i vapori di mercurio [5]. Le righe spettrali sono state selezionate in modo da non interferire con qualunque importante caratteristica di assorbimento molecolare [5]. Il sistema di riferimento e i parametri standard sono stati definiti in modo da essere in grado di confrontare le variazioni delle variabili. Il sistema di riferimento è riassunto nella tabella 1 [5]. Per ricavare l'impatto di ciascuna variabile identificata è stato definito un set di valori per ciascuna variabile (vedi tabella 2).

Figura 4.2: *In figura è riportata una rappresentazione in 3 dimensioni del modello di elevazione e dell'area illuminata. La forma della gaussiana rappresenta una montagna di 2000m di altezza; il disco grigio centrato nel punto (150,150) è una città di 10km di raggio. Gli osservatori simulati da delle croci nere lungo la direzione E - W [5].*

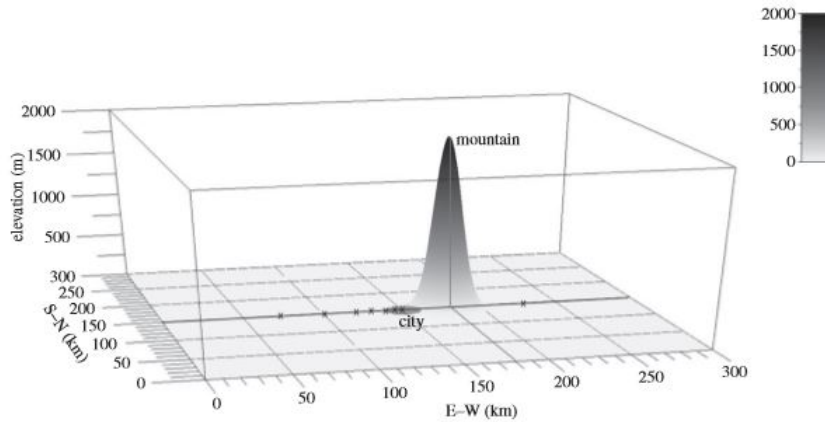


Figura 4.3: In tabella 1 è riportato il set di parametri standard usato come riferimento [5].

parameter name	value	units
aerosol model—Urban		
relative humidity	70	%
ground-level pressure	101.3	kPa
mesh size	1	km
aerosol optical depth	0.1	
ground reflectance	0.1	
light fixture model—Cobrahead		
lamp height relative to ground	7	m
sub-grid obstacle height	10	m
average distance between obstacles	15	m
reference wavelength	569	nm
distance from city centre	0	km
zenith angle	0	deg

Figura 4.4: In tabella 2 sono riportati i parametri usati per le analisi [5].

parameter name	no. values	set of values	units
aerosol optical depth	5	0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0	—
ground reflectance	3	0.1, 0.2, 0.8	—
light fixture model	2	Cobrahead, Helios	—
sub-grid obstacle height	3	0, 5, 10	m
reference wavelength	5	436, 498, 546, 569, 616	nm
distance from city centre	13	−80, −50, −30, −20, −10, −5, 0, 5, 10, 20, 30, 50, 80	km
zenith angle	7	0, 30, 50, 60, 70, 75, 85	°
azimuth angle	2	90, 270	°
second order of scattering	2	on, off	—

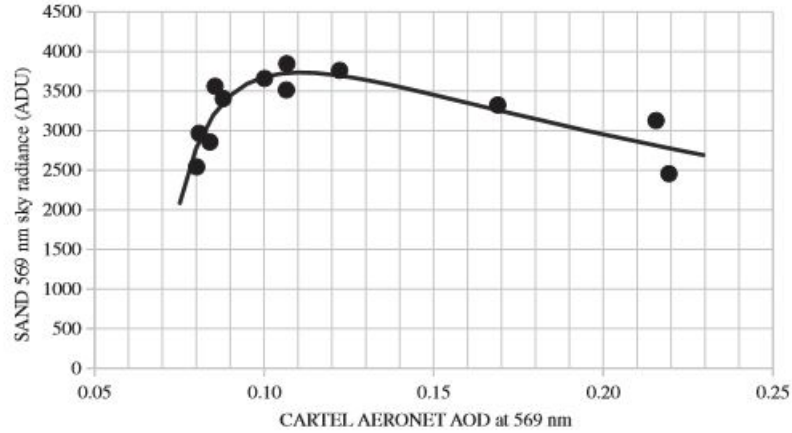
4.3.1 Brillanza del cielo in funzione del carico di aerosol

Sono pochi gli studi che hanno ricavato la dipendenza della brillanza del cielo dal carico di aerosol; tuttavia un esperimento condotto da Tian *et al* (2014) ha mostrato che per una sorgente di luce costante la luminosità delle sorgenti di luce antropica è fortemente dipendente da AOD (aerosol optical depth). Secondo Tian *et al* per siti collocati nelle periferie o città la brilarza del cielo diventa meno dipendente da AOD [5].

Pun & So (2012) hanno provato a trovare sperimentalmente una relazione tra la brillantezza del cielo e il contenuto atmosferico di aerosol confrontando un enorme mole di dati ottenuti con il SQM [5]. I dati acquisiti non mostrano una chiara relazione tra il carico di aerosol e la brillantezza del cielo ($R^2 = 0,0667$ con una bassa pendenza). Questa bassa dipendenza è consistente con i risultati ottenuti da Tian *et al.* per città e periferie [5].

Durante l'inverno del 2009 Martin Aubè ha provato a trovare la relazione tra la brillantezza del cielo e AOD usando il SAND (spectrometer for aerosol night detection). La metodologia usata ha confrontato la brillantezza notturna della riga del sodio 569 nm con le misure AERONET AOD (CARTEL site). La relazione trovata ha mostrato un significativo incremento di AOD (range 0- 0.1) seguito da un rapido decremento (vedi figura 4.5). I risultati teorici di Tian *et al.* sono consistenti con queste osservazioni.

Figura 4.5: In figura è riportata la relazione tra la brillantezza del cielo nella riga del sodio a 569 nm, misurata con il SAND e con l'AERONET sun-photometer (CARTEL site) a Sherbrooke, Canada, nel Marzo del 2009 [5].



4.3.2 Influenza dello scattering del secondo ordine e di piccoli ostacoli sulla brillantezza

Lo studio che descriveremo mostra che l'importanza dello scattering del secondo ordine è altamente dipendente dalla presenza di ostacoli la cui altezza è maggiore dei punti luce [5]. Questo è consistente con l'idea che gli ostacoli bloccano la luce che raggiunge la linea di vista zenitale. Le figure 4.6 e 4.7 mostrano come il contributo percentuale dello scattering del secondo ordine varia con la distanza per un fissato valore del carico di aerosol ($AOD = 0.1$, $AOD = 1$) [5]. La curva

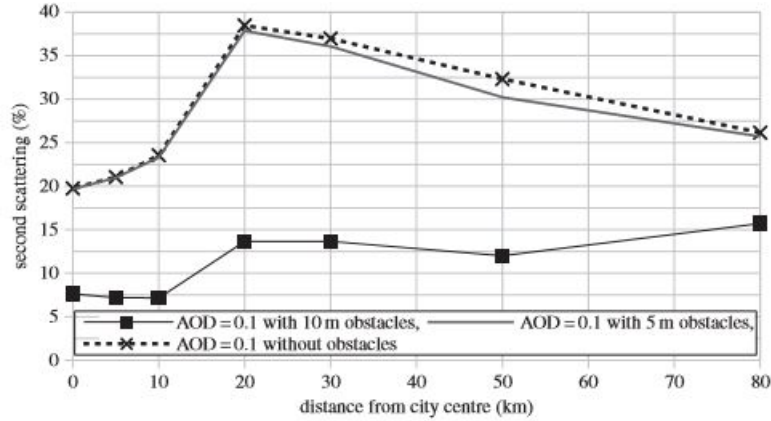
con i quadrati neri (in figura 4.6) corrisponde ai parametri standard riportati in tabella 1. Si noti che in entrambe le figure (4.6 e 4.7) i casi senza ostacoli e con ostacoli più bassi dei punti luce mostrano un comportamento simile. Per bassi carichi di aerosol ($AOD = 1$) il contributo del secondo ordine di scattering è generalmente più basso entro il perimetro della città (circa il 7% con ostacoli); tuttavia tale valore tende a salire rapidamente quando si esce dalla città. Il massimo contributo del secondo ordine di scattering è ottenuto vicino al limite della città, dove può raggiungere il 38% senza l'effetto bloccante prodotto dagli ostacoli. Se si aggiungono gli ostacoli che sono più alti dei punti luce questo contributo scende al 14%. In ogni caso, il contributo dello scattering del secondo ordine è trascurabile e deve essere preso in considerazione. Quando AOD cresce, la percentuale di scattering del secondo ordine oltre i limiti della città aumenta. In figura 4.7 le percentuali ottenute sono del 62% senza ostacoli più alti dei punti luce, e 32% con ostacoli più alti dei punti luce. L'importanza dello scattering del secondo ordine decresce molto rapidamente con la distanza per atmosfere molto inquinate [5].

4.3.3 Influenza del LOP sulla brillantezza

In questa sezione viene esaminata l'influenza della distribuzione angolare della luce che esce dai punti luce per ostacoli più alti e più bassi di ques'ultimi [5]. Inizialmente si pensava che la percentuale di luce che viaggia vicino all'orizzonte aveva un'influenza notevole sulla luminosità del cielo [5]. Tuttavia, nel 2007 Aubé mostrò che le cose non stavano proprio così: la luce che viaggia vicino all'orizzonte non è così critica come si pensava. In seguito, tale affermazione fu confermata da Luginbuhl *et al* [5]. Nel 2011 falchi trovò che la luce diretta (cioè ULOR) era il principale contribuente alla luminosità artificiale del cielo allo zenith [5].

Per cercare di capire l'impatto che hanno i LOP (*light output pattern*) sulla brillantezza utilizziamo i files forniti da Illuminating Engineering Society of North America [5]. I due punti luce usati sono molto comuni in Canada: il punto luce Cooper Cobrahead con distribuzione di tipo III (IES file RY15H3AL.IES) e il punto luce Lumec - Schreder Helios di tipo III (IES file A210S2.IES) [5]. Il punto luce Helios ha un ULOR $< 1\%$, mentre Cobrahead ha un ULOR di circa 7% [5]. Le figure 4.8 e 4.10 mostrano le relazioni di distanza ottenute per $z = 0$ e $z = 60^\circ$, e per ostacoli alti 5m e 10m [5]. Come ci si aspettava, le fessure Cobrahead generalmente producono un aumento maggiore di luminosità del cielo rispetto alle fessure Helios, nel caso di ostacoli più bassi delle fessure di luce. Anche gli ostacoli alti giocano un ruolo importante: ad esempio, quando gli ostacoli sono più alti delle fessure di luce, il Cobrahead diventa quasi identico all' Helios, poiché il Cobrahead è concentrato vicino all'orizzonte e questa parte del flusso è efficientemente bloccata dagli ostacoli. La figura 4.10 mostra che il rapporto di brillantezza Cobrahead/Helios è vicino all'unità in città, ma può aumentare di un ordine di magnitudine lontano dal confine della città.

Figura 4.6: In figura è riportato l'andamento dello scattering del secondo ordine in funzione della distanza dal centro della città con AOD = 01 (chiaro) [5].



4.3.4 Influenza della lunghezza d'onda sulla brillantezza

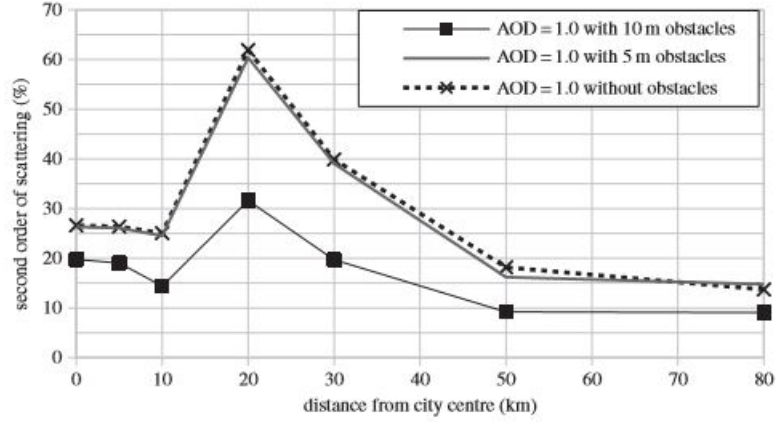
Come abbiamo visto nel capitolo 3 la lunghezza d'onda ha un forte impatto sul processo di scattering nell'atmosfera; la teoria di Rayleigh ci dice che le molecole diffondono la luce con una probabilità che è proporzionale a λ^{-4} [5]. Invece, le molecole di aerosol, che sono più grandi, diffondono la luce con una probabilità che è proporzionale a $\lambda^{-\alpha}$, con $\alpha \approx 1$, dove α è l'esponente Angstrom. Tale esponente varia con la dimensione di distribuzione della popolazione di aerosol [5]. Essendo AOD dipendente dalla lunghezza d'onda allora le analisi sono state condotte usando un esponente pari a 1.3 [5]. La riflessione prodotta dal suolo è stata considerata indipendente dalla lunghezza d'onda ed è stato adottato un valore pari a 0.1 [5]. In figura 4.11 è riportata la brillantezza del cielo in funzione della lunghezza d'onda, per tre distanze diverse dal centro della città (0 km, 30 km, 80 km) [5].

4.3.5 Conclusioni

Il principale obiettivo di questo capitolo era quello di identificare le variabili che hanno una particolare influenza sulla brillantezza del cielo notturno. Per raggiungere questo obiettivo è stato definito un semplice scenario comprendente una città circolare avente proprietà costanti. I principali risultati di queste analisi sono riassunti qui di seguito:

- Utilizzando i parametri standard (AOD = 0.1, lunghezza d'onda = 569 nm, riflessione = 0.1, ostacoli alti 10 m) la brillantezza del cielo allo zenit decresce come $1/r^{3.33}$ all'esterno del perimetro della città.
- La brillantezza del cielo allo zenit è debolmente dipendente da AOD entro la città ($R(\text{AOD} = 1) / R(\text{AOD} = 0.1)$ oscilla tra 0.96 e 1.10), ma è for-

Figura 4.7: In figura è riportato l'andamento dello scattering del secondo ordine in funzione della distanza dal centro della città $AOD = 1.0$ (inquinato) [5].



temente dipendente da AOD all'esterno del limite della città ($R(AOD = 1)/R(AOD = 0.1) \approx 0.023$ a 80 km dal centro della città).

- Lo scattering del secondo ordine è importante per alti valori di AOD e quando la luce viene bloccata dagli ostacoli. Secondo il set di parametri utilizzati, lo scattering del secondo ordine contribuisce approssimativamente al 7% della brillantezza del cielo entro la città e al 14% all'esterno della città. Per $AOD = 1.0$, lo scattering del secondo ordine contribuisce approssimativamente al 20% della brillantezza del cielo entro la città, ma può raggiungere più del 30% all'esterno. Il valore diminuisce all'aumentare della distanza.
- All'interno del perimetro della città, la brillantezza allo zenit senza ostacoli è circa il doppio della brillantezza ottenuta con ostacoli più alti dei punti luce (i.e 10 m di altezza). L'importanza della radianza senza ostacoli in confronto con la radianza con 10 m di ostacoli aumenta con la distanza, fino a diventare 7 volte più importante a 80 km dal centro della città; questo indica che il blocco prodotto dagli ostacoli diventa più efficiente nel ridurre la brillantezza del cielo allo zenit quando le distanze sono aumentate. Il caso di ostacoli più piccoli dei punti luce è quasi equivalente al caso senza ostacoli, sia all'interno che all'esterno della città.

Figura 4.8: In figura è riportata la radianza (brillanza) del cielo allo zenit in funzione della distanza dal centro della città nel caso di due differenti fessure di luce (Cobrahead ULOR = 7% e Helios ULOR = 1% per AOD = 0.1. [5]

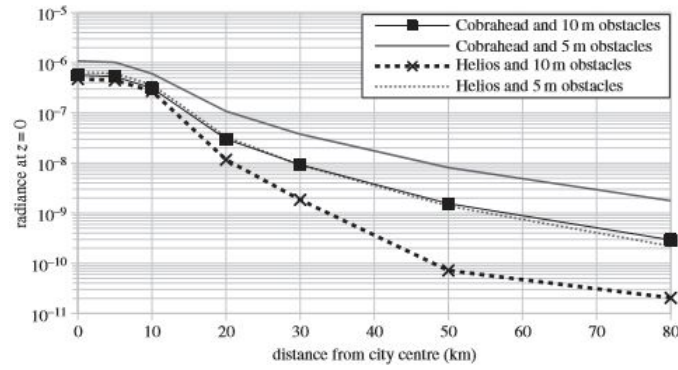


Figura 4.9: In figura è riportata la radianza (brillanza) del cielo per distanze dallo zenit $z < -60^\circ$ in funzione della distanza dal centro della città nel caso di due differenti fessure di luce (Cobrahead ULOR = 7% e Helios ULOR = 1% per AOD = 0.1 [5].

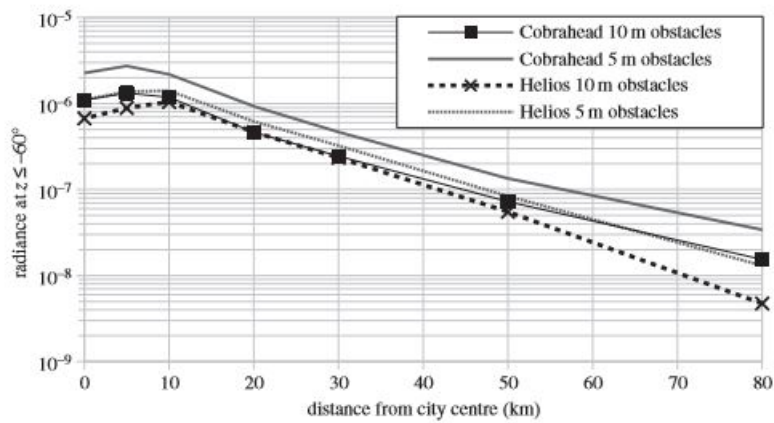


Figura 4.10: In figura è riportato il rapporto Cobrahead / Helios in funzione della distanza dal centro della città. [5].

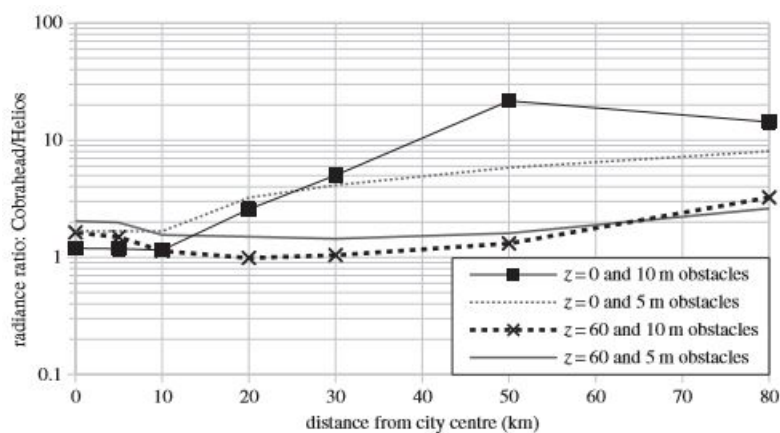
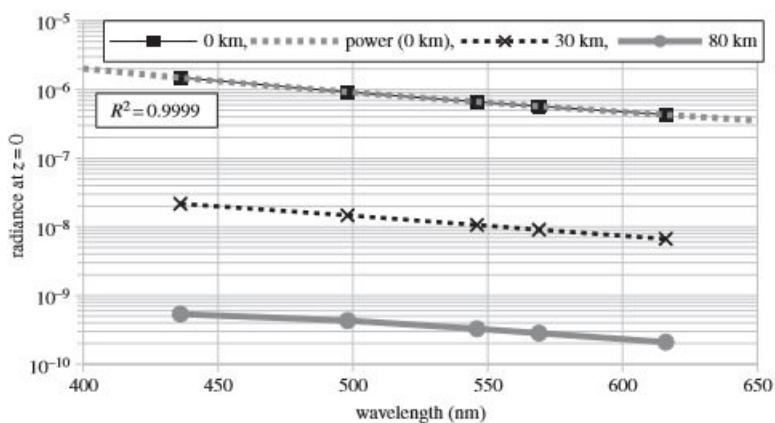


Figura 4.11: In figura è riportata la brillantezza del cielo allo zenit in funzione della lunghezza d'onda, per tre distanze diverse dal centro della città. La linea grigia è una legge di potenza dei dati con alta correlazione $R^2 = 0.9999$ [5].



Capitolo 5

Come si produce l'inquinamento luminoso

5.1 Introduzione

La limitazione dell'inquinamento luminoso non è un qualcosa di semplice da realizzare. Infatti, anche quando si progetta e si installa un impianto di illuminazione ottimale (prendendo tutte le precauzioni possibili in modo da limitare l'emissione della luce verso l'alto), una certa quantità di luce viene comunque dispersa nel cielo. L'unica soluzione possibile è ridurre il flusso irradiato dall'apparecchio dopo una determinata ora della notte in tutte quelle zone in cui la sicurezza non viene compromessa. Questo comporta non solo una diminuzione dell'inquinamento luminoso ma anche un notevole risparmio energetico. Attualmente, in molti comuni vengono addirittura oscurati interi quartieri per cercare di ridurre lo spreco di energia elettrica; purtroppo tale metodo non garantisce la giusta sicurezza per i cittadini. Pertanto sarebbe meglio usare lampade che durante la notte si spengano. A volte vengono usati apparecchi ad *illuminazione mista*, la quale consiste nell'utilizzare una lampada al sodio a bassa pressione (che garantisce l'illuminazione sull'intera zona), ed una ad alta pressione (che consente di distinguere la tonalità); queste due lampade funzionano insieme tutta la notte permettendo così la percezione dei colori e riducendo l'inquinamento luminoso. Ancora più efficace è l'*illuminazione alternata*, basata anch'essa sull'uso contemporaneo delle lampade al sodio ad alta e a bassa pressione, ma sfruttate in maniera alternata; nelle ore in cui è necessario distinguere i colori si utilizza la prima, mentre negli altri orari si sfrutta la seconda.

5.2 Apparecchi di illuminazione

Un apparecchio di illuminazione è composto da due componenti fondamentali: la lampada e l'armatura. La lampada costituisce la vera e propria sorgente di

luce. L'armatura, invece, costituisce il supporto della lampada. L'armatura è composta da un sistema ottico che ha lo scopo di convogliare il flusso di luce della lampada nella direzione richiesta; inoltre è composta da una parte meccanica che serve a sorreggere la lampada. Il sistema ottico deve anche essere strutturato in modo che le sue parti, o la lampada stessa, non raggiungano temperature superiori a quelle che possono sopportare.

Nella maggior parte dei casi si preferisce utilizzare apparecchi poco schermati (o addirittura non schermati) pensando di ottenere solo in questo modo ampi angoli di emissione della luce. Così facendo si ottengono dei dispositivi che diffondono verso l'alto una grande quantità di luce (ad esempio, nel caso dell'illuminazione per arredo urbano si può arrivare a disperdere sopra l'orizzonte più del 50% del flusso irradiato).

Un modo per limitare l'inquinamento luminoso è utilizzare impianti di illuminazione che, una volta installati, non emettono luce al di sopra di un ideale piano orizzontale passante per il centro della lampada. Apparecchi di questo tipo sono detti *totalmente schermati* (full cut off).

Esistono diversi tipi di dispositivi di illuminazione:

- Lampade ad incandescenza:

Dal punto di vista storico sono le più antiche e ancora oggi le più diffuse specialmente negli ambienti domestici e sempre più spesso nella versione con alogenuri. Il loro successo nel tempo è dovuto ad un compromesso tra prezzo economico, vita media, efficienza specifica e indici di resa cromatica [11]. Si basano sul principio di irraggiamento dei fotoni generato dal surriscaldamento di un elemento metallico. In sostanza, quando la corrente elettrica percorre un filamento di Tungsteno, contenuto all'interno di un'ampolla di vetro sotto vuoto, lo riscalda rendendolo incandescente; in conseguenza di tale riscaldamento si ha che la lampada emette luce, percepita di un colore bianco [1]. L'emissione della luce segue in prima approssimazione la distribuzione di *Corpo nero* corrispondente in genere alla temperatura T del filamento (in genere circa 2700 K) [1]. Tale luce è molto inquinante, essendo composta da emissioni di tutte le lunghezze d'onda del visibile e delle bande vicine [1]. Tali lampade sono state utilizzate negli impianti stradali fino al 1976, per poi essere sostituite dalle lampade a scarica [1].

- Lampade ai vapori di mercurio

L'emissione luminosa prodotta da questo tipo di lampade è dovuta ai vapori di mercurio contenuti all'interno di un tubo di quarzo; tali vapori vengono ionizzati dalla corrente di ioni ed elettroni che si produce tra due elettrodi [1]. L'emissione di luce avviene principalmente nell'ultravioletto, tuttavia la polvere fluorescente presente nell'ampolla esterna della lampada trasforma le radiazioni ultraviolette in radiazione visibile [1]. Proprio per questo motivo le lampade di questo tipo disturbano molto le osservazioni astronomiche e sono considerate estremamente inquinanti (le leggi e

le ordinanze che si occupano di inquinamento luminoso vietano espressamente il loro uso all'esterno). Tali lampade producono una forte emissione nella regione blu dello spettro, mentre nel rosso il loro contributo è minore [1].

- Lampade a ioduri metallici

Si tratta di un'evoluzione della lampada ai vapori di mercurio e ha un analogo principio di funzionamento [1]. Si differenziano da queste sostanzialmente per il tipo di gas contenuto nel tubo di scarica e per la forma e finitura dell'ampolla [1]. Il tubo di scarica contiene al proprio interno, oltre al mercurio, ioduri di sodio di tallio e indio [1]. Nelle lampade più evolute vengono inserite anche le terre rare come il disprosio, l'olmio, il tulio e il cesio che permettono una migliore distribuzione spettrale e di efficienze luminose spettrali [1]. Tali lampade sono caratterizzate da un'alta temperatura di colore (che determina l'emissione di una luce bianchissima) e da un'elevata resa cromatica. Inoltre hanno dimensioni molto ridotte, ma con un'efficienza luminosa pari a 40-100 lumen per watt. Tali lampade contaminano notevolmente le bande fotometriche astronomiche, pertanto devono essere considerate altamente inquinanti [1].

- Lampade al sodio a bassa pressione (LPS)

Il principio di funzionamento si basa su una scarica elettrica innescata inizialmente in un ambiente gassoso composto da neon [1]. Una volta raggiunta una temperatura sufficientemente alta (intorno ai 200° C) il sodio contenuto nell'ampolla tubolare evapora, inizia a ionizzarsi e la lampada si accende [1]. Osserviamo che sono necessari alcuni minuti per avere la lampada a pieno regime (10, 14 min); tuttavia in caso di spegnimento fortuito essa si accende subito [1].

L'emissione di luce è dovuta al sodio eccitato, pertanto è limitata esclusivamente al doppietto del sodio (5890- 5896 Å), che cade in una zona in cui l'occhio umano raggiunge la massima sensibilità, e ai due doppietti a 5683-5688 Å, e 6154-6161 Å [1]. Per questo motivo queste lampade hanno la maggiore efficienza in assoluto (pari a circa 125-200 lumen/W) [1]. La luce di queste è, tuttavia, monocromatica giallo - arancio e non consente la percezione dei colori [1]. Per questo motivo queste lampade sono impiegate, generalmente, in strade extraurbane, svincoli autostradali, e zone industriali o periferiche [1]. Dal punto di vista astronomico sono da preferirsi fortemente per l'illuminazione stradale in quanto il disturbo è concentrato nei tre doppietti del sodio ed è quindi eliminabile con un filtro [1]. Esse inoltre non disturbano la zona dello spettro elettromagnetico sotto i 7500 Å, perciò non interferiscono con le bande fotometriche astronomiche B e U [1].

- Lampade al sodio ad alta pressione (HPS)

Le lampade al sodio ad alta pressione sfruttano il fatto che con una pressione maggiore degli atomi di sodio ed una temperatura di circa 700° C

si ottiene un'efficienza inferiore ma una distribuzione della luce pressoché continua (luce bianco-oro) che permette di distinguere i colori [1]. Questo è dovuto al fenomeno dell'autoassorbimento per cui il vapore di sodio più freddo che si trova lontano dalla zona ove avviene la scarica assorbe parte delle radiazioni emesse dal vapore in prossimità della scarica e riemette l'energia assorbita in parte come calore e in parte come una moltitudine di righe di emissione che riempie lo spettro visibile [1]. In corrispondenza del doppietto di emissione del sodio appare quindi un doppietto in assorbimento (autoinversione) [1]. Perciò le lampade HPS hanno un'emissione molto larga tra i 5400 e 6500 Å [1]. Esse, tuttavia, disturbano poco nella zona sotto i 4500 Å, a parte una riga di emissione a 3302-3303 Å, e non molto nella zona tra i 4500 Å e i 5400 Å [1]. Dal punto di vista astronomico, tali lampade contaminano in modo modesto la banda fotometrica B [1].

- Lampade fluorescenti compatte (CFL)

Si tratta di un tipo di lampade a scarica basate sull'interazione tra il flusso di elettroni (provenienti dal catodo) e gli atomi di mercurio (presenti all'interno della lampada); tali atomi, una volta eccitati, emettono luce ultravioletta. Quando questa luce entra in contatto con il materiale fluorescente con cui è rivestita internamente la lampada, si trasforma in luce visibile. Questo tipo di lampada viene utilizzato per illuminare gli spazi interni o le vetrine dei negozi.

- Lampade agli alogenuri metallici (MHL)

Una lampada agli alogenuri metallici è una lampada elettrica che produce luce per mezzo di un arco elettrico attraverso una miscela gassosa di mercurio vaporizzato e alogenuri metallici (metal halides). Tali lampade, entrate in commercio negli anni 90, si differenziano per il tipo di gas contenuto nel tubo di scarica e per la forma dell'ampolla. Il tubo di scarica contiene al proprio interno, oltre al mercurio, ioduri di sodio di tallio e indio. Nelle lampade più evolute vengono inserite anche le terre rare come il disprosio, l'olmio, il tulio e il cesio che permettono una migliore distribuzione spettrale e di efficienze luminose spettrali. Le lampade ad alogenuri in genere hanno una posizione di funzionamento obbligatoria e dei tempi di accensione e riaccensione simili a quelli delle lampade ai vapori di mercurio. La temperatura di colore subisce variazioni che vanno dai 2.000 ai 3.000 kelvin, il valore dell'indice di resa cromatica (Ra) varia tra 65 a 95. L'efficienza luminosa oscilla tra gli 80 e gli oltre 95 lm/W al variare della potenza e della tipologia della lampada. Una lampada ad alogenuri metallici ha una durata di vita teorica stimata intorno alle 6.000 ore.

- LED

Un LED (*Light Emitting Diode*) è un semi-conduttore che converte energia elettrica in luce visibile. Nati nel 1962 e in commercio dal 1990, i LED sono costituiti da una sottile strato di semiconduttore drogato, il quale, se sottoposto ad una tensione diretta, è in grado di produrre fotoni

[11]. Il principio fisico su cui si basa questa tecnologia è molto semplice: il semi-conduttore viene modificato per cambiare il bilanciamento interno tra cariche positive e negative. Quando ciò accade uno degli elettroni più esterni viene a mancare in modo da creare una *lacuna* che viene successivamente riempita da un altro elettrone per farla ridiventare l'atomo stabile; l'eccesso di energia viene liberato sotto forma di fotone (ovvero luce).

I primi LED erano disponibili solo nel colore rosso, poi in seguito sono stati sviluppati anche i LED con luce gialla e verde; soltanto verso gli anni 90 l'efficienza dei LED è aumentata così come la gamma di colori compreso il blu.

I LED, molto probabilmente, saranno la luce del futuro [19]. Hanno a loro favore molti aspetti, fra i quali il fatto di consumare pochissima energia, di poter essere accesi e spenti immediatamente (al contrario delle luci usate attualmente, che richiedono un certo tempo di riscaldamento) e sono di dimensioni molto ridotte [19]. Inoltre hanno un'efficienza nettamente superiore a quella delle lampade MHL e al mercurio; i LED più efficienti sono quelli che hanno una *temperatura di colore* più elevata (vedi tabella 5.1) ¹ Tuttavia, non sono la soluzione all'inquinamento luminoso. Secondo Falchi (2016), un eventuale passaggio dalle lampade HPS ai LED non ridurrebbe l'inquinamento luminoso, addirittura lo peggiorerebbe, a causa del fatto che i LED contengono una forte componente blu [2]. Sempre secondo Falchi (2016), assumendo costanti il flusso fotopico e l'emissione di luce verso l'alto, si ha che un LED a 4000 K è 2.5 volte più inquinante di una lampada al sodio HPS; sorgenti con temperatura di colore correlata (CCT) più elevata sono più inquinanti [2]. Questo significa che se l'emissione di luce blu non viene ristretta, il passaggio dalle lampade HPS ai LED produrrebbe un aumento della luminosità del cielo superiore a due volte [2]. La componente blu non è solo un problema per l'astronomia ma anche per la salute dell'uomo. In figura 5.6 si può notare come la componente di emissione blu, tipica dei LED, coincide con la curva di sensibilità circadiana; questo significa che la luce blu è quella che interferisce di più sul nostro ritmo circadiano [19]. Un altro aspetto negativo dei LED, è l'elevata concentrazione del fascio di luce emanato, il quale ha come conseguenza una fastidiosa e pericolosa illuminazione a chiazze (vedi figura 5.2) [19]. Per risolvere il problema si dovrebbe aumentare il numero dei pali ma così facendo si aumenterebbero troppo i costi d'impianto rispetto agli impianti tradizionali [19]. Il lampione a LED è inoltre molto più fastidioso e abbagliante di un analogo lampione al sodio (vedi figure 5.2 e 5.3) [2]. Se installassero LED con temperatura di colore di 3000 K o meno allora la luce sarebbe molto più confortevole, ma ad oggi l'efficienza di questi LED è ancora abbastanza bassa (Falchi, 2016) [2].

¹La temperatura di colore di una luce è un parametro che consente di distinguere tra i diversi tipi di luce. Le luci bianche hanno una temperatura di colore elevata e per questo si dicono *luci fredde*; le luci giallo-rosse hanno una temperatura di colore bassa e si dicono *luci calde*

Tabella 5.1: *In tabella sono riportate alcuni dati relativi alle caratteristiche tecniche dei vari tipi di lampade. La lettera I indica lampade a bulbo chiaro, la lettera II indica lampade a bulbo con strato diffusore. Con s.b ci si riferisce a lampade senza ballast, con c.b a lampade con ballast.*

Tipo lampada	Watt	Eff lum (s.b)	Eff. lum (l.b)	Lumin	Color
Incand I (normali)	100	14	no ballast	700	bianco caldo
Incand I (alogene)	1000	22	no ballast	1000	bianco caldo
HPM I	400	52	49	460	blu-bianco
HPM III	400	57	54	12	bianco
MHL I	400	80	71	750	bianco
MHL II	400	75	67	15	bianco
HPS I	400	120	110	550	giallo-bianco
HPS II	400	117	107	25	giallo - bianco
LPS I	180	180	150	10	giallo
LED (2200K)	28	62	no ballast	?	giallo
LED (4000k)	28	94	no ballast	?	azzurro

In tabella 5.1 sono state riportate alcune caratteristiche delle lampade più comuni: Watt (W), efficienza luminosa (lm/W), luminanza (cd/cm^2), colore.

Figura 5.1: *In figura sono riportati degli esempi di lampade inquinanti [19].*



Figura 5.2: *In figura è riportata una comune lampada al sodio HPS e il relativo spettro [20].*

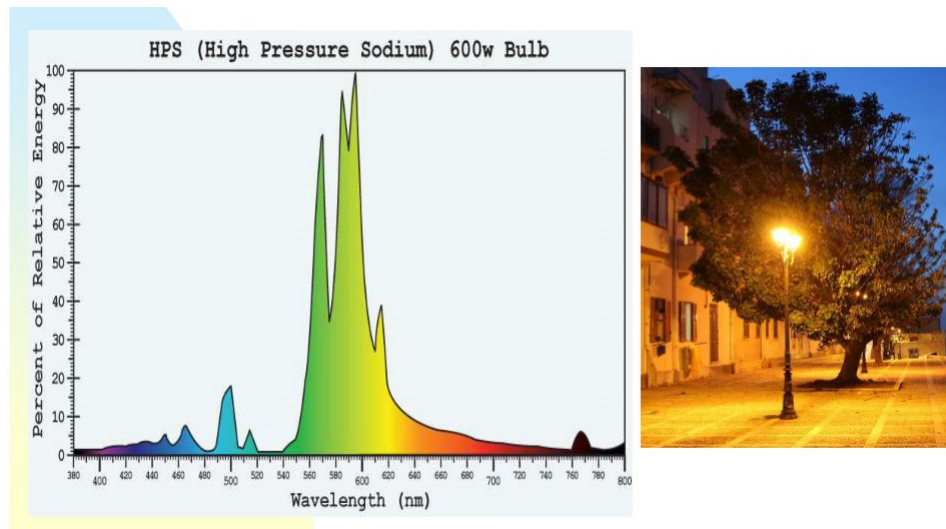


Figura 5.3: *In figura è riportato un esempio di dispositivo LED e il relativo spettro [20] .*

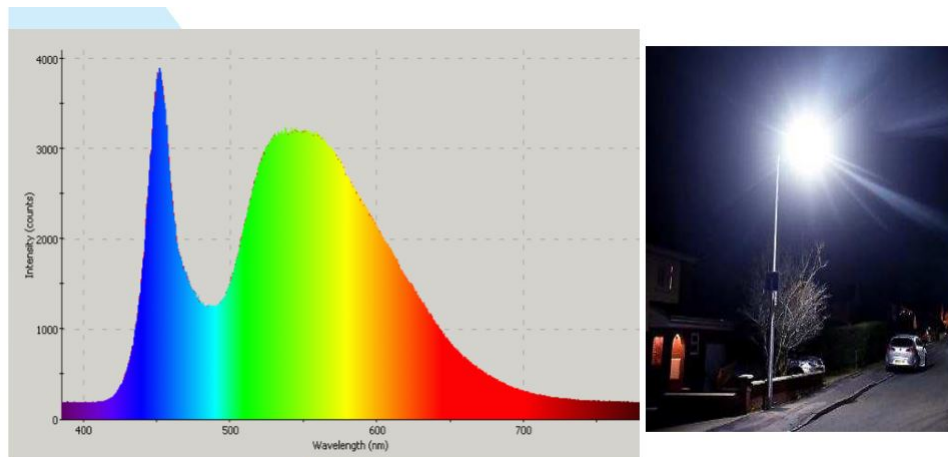


Figura 5.4: *In figura sono riportati degli esempi di lampioni con illuminazione a LED [19].*



Figura 5.5: *In figura è riportato lo spettro delle lampade piu comuni [19].*

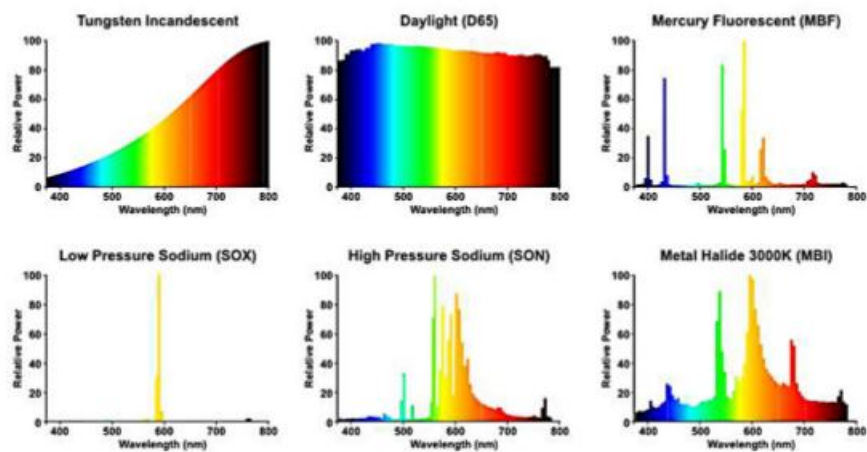
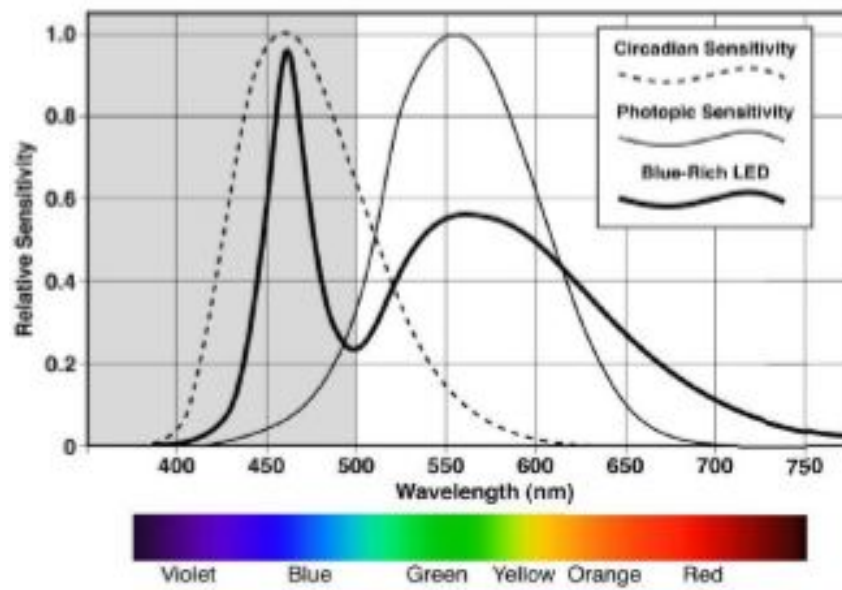


Figura 5.6: In figura è riportata la curva di emissione prodotta da una luce LED [19].



Capitolo 6

Spettro del cielo di Asiago

6.1 Introduzione

Dal 1930 ad oggi l'industria illuminoelettrica ha utilizzato diversi dispositivi per l'illuminazione delle strade e delle strutture private. In conseguenza di questo fatto si ha che, se si va ad analizzare lo spettro del cielo di un determinato luogo si osserveranno delle variazioni; in particolare si osserveranno delle variazioni di intensità delle righe spettrali oppure si potranno osservare anche nuove righe spettrali. Da un punto di vista storico, le prime lampade introdotte furono le lampade ai vapori di mercurio ad alta pressione (HPM) (1935). Successivamente, intorno all'1965, sono state introdotte le prime lampade al sodio ad alta pressione (HPS); siccome queste lampade hanno un'efficienza che è il doppio di quella delle lampade al mercurio si sono diffuse rapidamente, in particolare in quelle aree caratterizzate da risorse limitate. Sebbene le lampade al sodio non emettano luce al di sotto dei $4400\text{\AA}$, molti astronomi hanno espresso qualche perplessità circa una possibile interferenza con il doppietto del sodio ($5890\text{ \AA}$, $5895\text{ \AA}$) presente negli spettri [7]. Tuttavia, dovendo scegliere tra le lampade al mercurio e quelle al sodio gli astronomi tendono a preferire queste ultime, in quanto le righe del mercurio sono più numerose di quelle del sodio e sono sparpagliate in un intervallo spettrale maggiore [7]. Se si va ad osservare lo spettro di Asiago del 1979 si osserveranno poche righe, in particolare quelle del mercurio e del sodio. Tra gli anni 80 e 90 furono introdotte le lampade a fluorescenza compatta (CFL), e poi di recente (2010) hanno cominciato a diffondersi anche i LED. A tal proposito bisogna sottolineare che negli spettri di Asiago che abbiamo esaminato (successivi al 2008) non si riesce a vedere l'emissione prodotta dai LED; questo è dovuto al fatto che tali dispositivi emettono un'emissione continua, la quale si confonde con il rumore di fondo.

Nei paragrafi successivi andremo ad analizzare lo spettro del cielo di Asiago, cercando di capire come è cambiato nel corso degli anni. Inoltre, andremo a confrontare tale spettro con quello di altri osservatori.

Tabella 6.1: *In tabella sono riportati i dati relativi allo spettro di Asiago 1979*

Dati	Asiago 1979
Telescopio	182 cm, cima Ekar
Data	3 Maggio 1979
Ora (UT)	22 h e 53 min
Strumenti	reticolo 600 tratti/mm,ITT, lastra fotografica
Tempo di posa	80min

Tabella 6.2: *In tabella sono riportati i dati relativi allo spettro di Asiago 1982*

Dati	Asiago 1982
Telescopio	120 cm, Pennar
Data	25 Marzo 1982
Ora (UT)	23 h e 44 min
Strumenti	reticolo 600 tratti/mm,VARO, lastra fotografica
Tempo di posa	65min

6.2 Come è cambiato lo spettro del cielo di Asiago nel tempo

Per analizzare l'evoluzione del cielo di Asiago nel tempo sono stati confrontati sei spettri del cielo di Asiago presi in anni diversi: 1979, 1982, 1995, 2003, 2008, 2015.

Osservando gli spettri si possono fare le seguenti considerazioni:

- In tutti gli spettri compaiono le righe naturali del cielo OI 5577, OI 6300, OI 6330 e il doppietto del sodio Na 5890, Na 5895. Si noti che quest'ultime due righe di emissione sono anche prodotte da sorgenti di inquinamento luminoso (cioè oltre al contributo naturale del cielo abbiamo anche un contributo artificiale, per cui la riga totale osservata nello spettro risulta essere la somma dei due contributi). Un'ultima considerazione riguarda la riga naturale dell'azoto NI 5199 osservata negli spettri di Kitt Peak, Mount Hopkins, Mount Hamilton, La Palma. Negli spettri di Asiago 1979, 1982, 1995, 2003, 2008 non è distinguibile dal continuo a causa della sua

Tabella 6.3: *In tabella sono riportati i dati relativi allo spettro di Asiago 2003*

Dati	Asiago 2003
Telescopio	182 cm, cima Ekar
Data	23 Aprile 2003
Ora (UT)	21 h e 31min
Strumenti	CAMERA AFOCS Grism GR 04
Tempo di posa	60min

bassa intensità. Per poterla vedere con chiarezza occorre una risoluzione spettrale maggiore.

La prima di queste due righe è dovuta alla ricombinazione di tre atomi di ossigeno che formano una molecola di O_2 e un atomo di ossigeno eccitato; tale atomo decade emettendo così la tipica radiazione a $5577 \text{ \AA}$. Questa reazione avviene soprattutto attorno a 90 Km di quota ed è causata dalla scomposizione dell'ossigeno dovuta alla radiazione ultravioletta solare. L'ossigeno può produrre anche un secondo gruppo di righe nella zona rossa dello spettro a 6300 e $6364 \text{ \AA}$ che possono essere prodotte solo verso i 300 Km di quota. E' da notare il fatto che le righe naturali del cielo devono avere sempre la stessa intensità, pertanto possono essere prese come punti di riferimento per quantificare la variazione delle righe prodotte da inquinamento luminoso. A tal proposito bisogna dire che nello spettro del 1995 la riga OI 5577 sempre essere molto più intensa rispetto agli anni precedenti. Questo è dovuto al fatto che non è stata calibrata.

- Lo spettro del 1979 è dominato dalle righe del mercurio Hg 4046 , Hg 4358 , Hg 5461 , Hg 5769 , Hg 5790 ; tali righe sono prodotte dalle lampade ai vapori di mercurio, ampiamente utilizzate in quel periodo. Nello spettro è presente anche la riga del sodio Na 5890 prodotta da una tipica lampada al sodio a bassa pressione. In tale spettro la riga non è molto intensa (è circa $2/3$ della riga OI 5577); tuttavia se si va ad osservare gli spettri successivi si ha che la sua intensità aumenta in maniera notevole. Questo significa che nel giro di pochi anni si è utilizzato un numero sempre maggiore di lampade al sodio a bassa pressione. La prevalenza delle righe del mercurio è dovuta al fatto che in quel periodo l'industria illuminotecnica prevedeva quasi esclusivamente l'utilizzo di lampade al mercurio. Col passare degli anni furono poi introdotte sul mercato le lampade al sodio a bassa pressione; negli spettri successivi si osserveranno infatti un numero sempre più grande di righe del sodio.
- Lo spettro del 1982 contiene le stesse righe dello spettro precedente. Una considerazione sulle righe del mercurio Hg 5461 , Hg 4358 : nello spettro precedente, la prima di queste due righe era circa $2/3$ della riga OI 5577 ; in tal caso, invece, la riga risulta più intensa (un po' più bassa della riga OI 5577), questo significa che dal '79 all'82 è stato utilizzato un numero sempre maggiore di dispositivi al mercurio (che emettono a quella lunghezza d'onda). Se invece si va a guardare la seconda riga si nota che nello spettro dell'82 sembra essere meno intensa rispetto allo spettro del '79. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che in quegli anni si è cominciato a ridurre i dispositivi al mercurio e a sostituirli con quelli al sodio (che emettono a quella lunghezza d'onda). Come già detto prima, la riga del sodio 5890 Na risulta essere molto più intensa rispetto allo spettro del 1979, addirittura leggermente superiore alla riga OI 5577 .
- Nello spettro del 1995 compaiono altre due righe del sodio: NaI 4983 , NaI 5688 , NaI 6154 , NaI 6160 prodotte dalle lampade al sodio ad alta pressio-

ne (HPS). Sebbene tali lampade siano state introdotte nel 65, tali righe non si osservano negli spettri del 79 e 82 poichè in quegli anni c'erano pochi dispositivi di questo tipo, e dunque l'emissione è difficilmente rilevabile negli spettri. Negli anni 90 il numero delle lampade HPS è cresciuto notevolmente, pertanto la loro emissione spettrale è perfettamente osservabile. Inoltre comincia anche ad intravedersi la riga Eu^{3+} 6116, da attribuire con molta probabilità all'Europio, un elemento chimico utilizzato nelle lampade a fluorescenza compatta (CFL); poi cominciano anche ad essere visibili altre righe del sodio NaI 6154 e NaI 6160 prodotte da lampade HPS (quest'ultime erano troppo deboli per poter essere rilevate negli spettri precedenti, confondendosi col rumore di fondo). Questa è una cosa abbastanza ragionevole dato che questo tipo di lampade si è iniziato ad utilizzarle negli anni 80. Un'altra riga assente negli spettri precedenti è la 4515, di natura sconosciuta. E' probabile che tale riga sia prodotta da alcuni dispositivi MHL contenenti alcuni elementi chimici delle terre rare. In tale spettro risulta difficile quantificare l'intensità delle righe dato che la riga OI 5577 sembra essere più intensa rispetto agli spettri precedenti.

- Nello spettro del 2003 compaiono altre righe: NaI 4665, NaI 5149, NaI 5153, Sc 5354, Li 6700. Le prime 3 sono prodotte da lampade HPS. Quelle più interessanti sono le ultime due. Queste due righe potrebbero essere attribuibili, rispettivamente, con buona probabilità allo scandio e al litio, due elementi chimici utilizzati nelle lampade MHL. Ciò che però bisogna assolutamente sottolineare è il *notevole aumento di intensità delle righe spettrali*. Nel giro di un ventennio (dagli anni 80 agli anni 2000) tutte le righe spettrali presenti negli spettri precedenti hanno vistosamente aumentato la loro intensità. Basti osservare le righe del mercurio Hg 4046 e Hg 4358; nello spettro del 1982 tali righe avevano un'intensità circa 1/6 più bassa rispetto alla riga OI 5577, risultando leggermente distinguibili dal rumore di fondo. Nello spettro del 2003 tali righe sono diventate, rispettivamente, il doppio e il quadruplo della riga 5577. Questo fa capire che nel giro di 20 anni l'inquinamento luminoso è peggiorato in maniera drastica.
- Gli spettri del 2008 e 2015 risultano molto simili a quello del 2003 per quanto riguarda il tipo di righe che lo caratterizzano. Per quanto riguarda l'intensità relativa sembra esserci qualche cambiamento. In particolare, quasi tutte le righe presenti nello spettro del 2008 sembrano avere un'intensità minore rispetto a quelle presenti nello spettro del 2003.

Figura 6.1: *In figura è riportato lo spettro del cielo di Asiago 1979.*

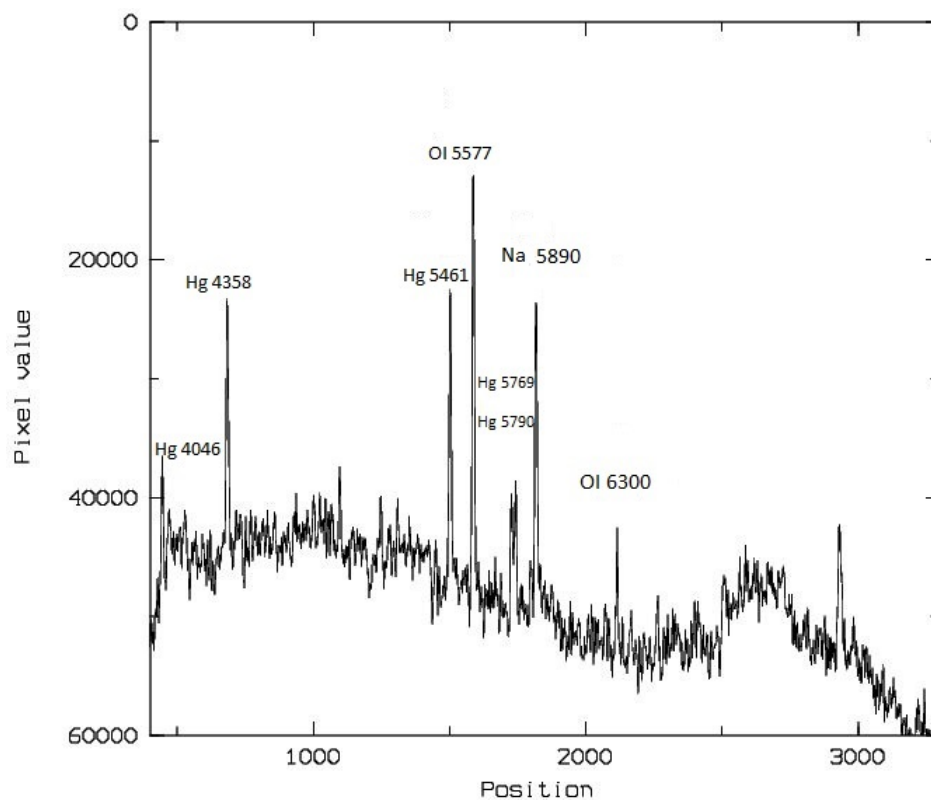


Tabella 6.4: *Tabella relativa allo spettro del 1979*

Lunghezza d'onda	Elemento	Origine
4046	HgI	Hg Lamp
4358	HgI	Hg lamp
5461	HgI	Hg lamp
5577	OI	cielo
5769	HgI	Hg lamp
5790	HgI	Hg lamp
5890	NaI	naturale/ LPS
6300	OI	cielo

Figura 6.2: In figura è riportato lo spettro del cielo di Asiago 1982.

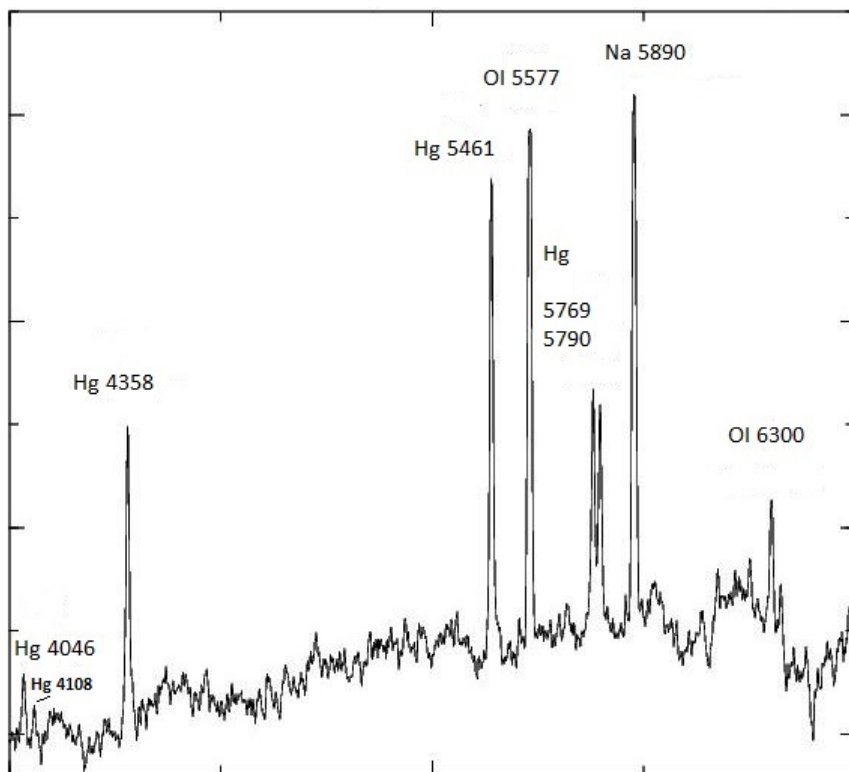


Tabella 6.5: Tabella relativa allo spettro del 1982

Lunghezza d'onda	Elemento	Origine
4046	HgI	Hg Lamp
4108	HgI	Hg lamp
4358	HgI	Hg lamp
5461	HgI	Hg lamp
5577	OI	cielo
5769	HgI	Hg lamp
5790	HgI	Hg lamp
5890	NaI	naturale/ LPS
6300	OI	cielo

Figura 6.3: In figura è riportato lo spettro del cielo di Asiago 1995. Poichè lo spettro è stato tagliato ai 4000Å, allora le righe del mercurio Hg 4046, Hg 4108, pur essendo presenti, non sono visibili.

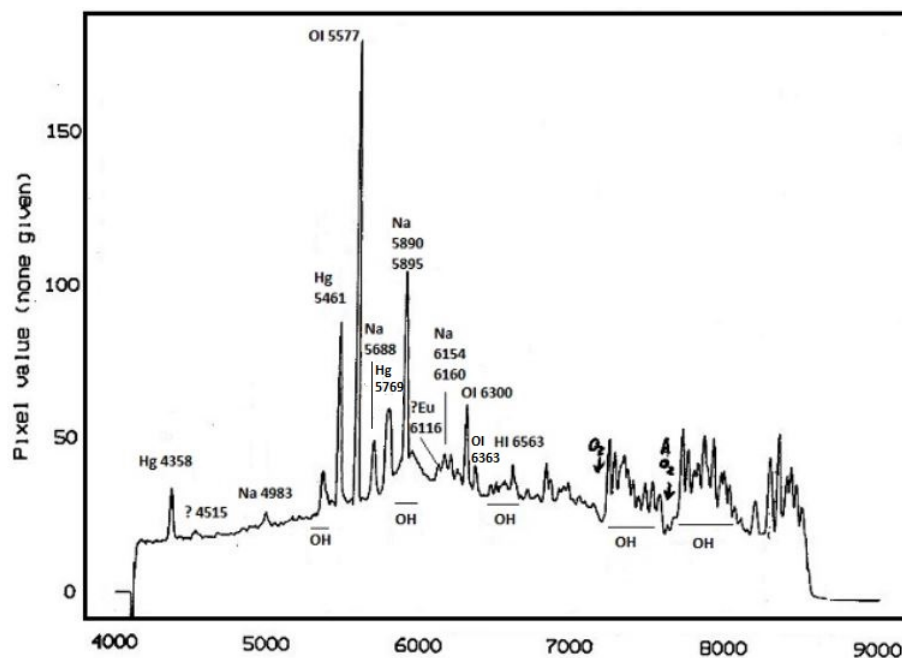


Tabella 6.6: Tabella relativa allo spettro del 1995

Lunghezza d'onda	Elemento	Origine
4046	HgI	Hg Lamp
4108	HgI	Hg lamp
4358	HgI	Hg lamp
4515 (si intravede)	?	?
4983	NaI	HPS
5461	HgI	Hg lamp
5577	OI	naturale
5688	NaI	HPS
5769	HgI	Hg lamp
5790	HgI	Hg lamp
5890	NaI	naturale/ LPS
5895	NaI	naturale/ LPS
6116 (si intravede)	Eu ³⁺	CFL
6154	Na	HPS
6160	Na	HPS
6300	OI	naturale
6363	OI	naturale

Figura 6.4: In figura è riportato lo spettro del cielo di Asiago 2003.

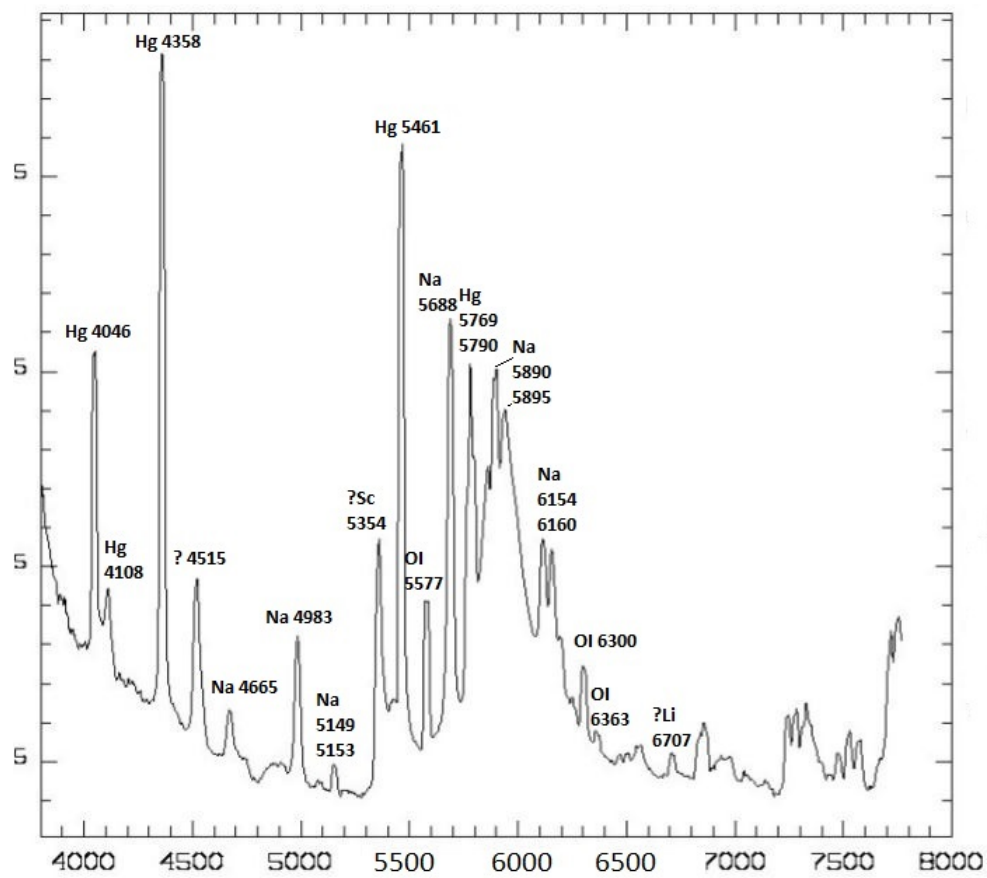


Figura 6.5: *In figura è riportato lo spettro del cielo di Asiago 2008.*

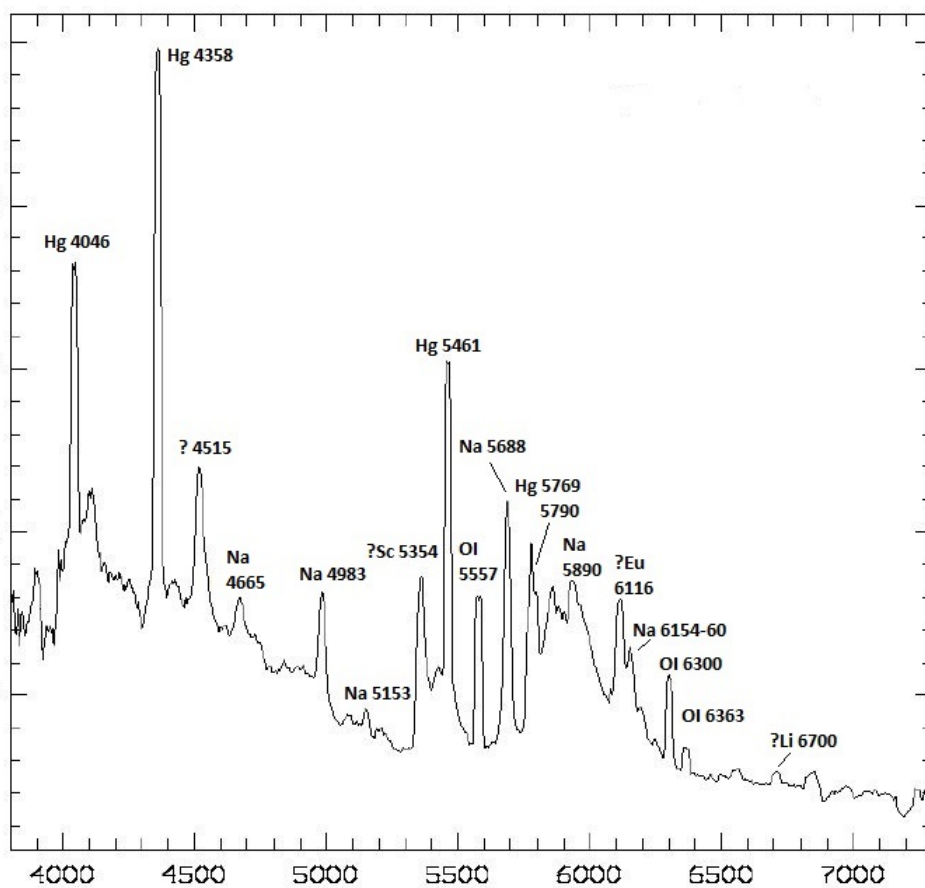


Figura 6.6: *In figura è riportato lo spettro del cielo di Asiago 2015.*

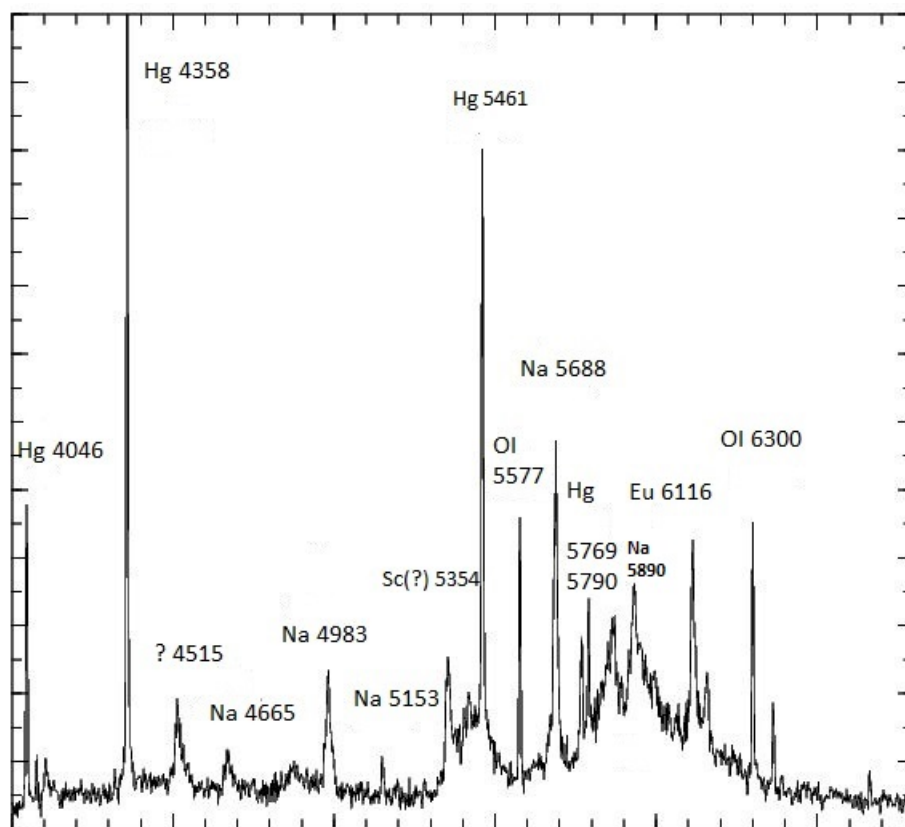


Tabella 6.7: *Tabella relativa allo spettro del 2003*

Lunghezza d'onda	Elemento	Origine
4046	HgI	Hg Lamp
4108	HgI	Hg lamp
4358	HgI	Hg lamp
4515	?	?
4665	NaI	HPS
4983	NaI	HPS
5149	Nai	HPS
5153	NaI	HPS
5354	Sc ?	MHL
5461	HgI	Hg lamp
5577	OI	cielo
5688	NaI	HPS
5769	HgI	Hg lamp
5790	HgI	Hg lamp
5890	NaI	naturale/ LPS
5895	NaI	naturale LPS
6116	Eu ³⁺	CFL
6154	Na	HPS
6160	Na	HPS
6300	OI	naturale
6363	OI	naturale
6707	LiI ?	naturale / MHL

Tabella 6.8: *Tabella relativa allo spettro del 2008*

Lunghezza d'onda	Elemento	Origine
4046	HgI	Hg Lamp
4108	HgI	Hg lamp
4358	HgI	Hg lamp
4515	?	?
4665	NaI	HPS
4983	NaI	HPS
5149	Nai	HPS
5153	NaI	HPS
5354	Sc ?	MHL
5461	HgI	Hg lamp
5577	OI	cielo
5688	NaI	HPS
5769	HgI	Hg lamp
5790	HgI	Hg lamp
5890	NaI	naturale/ LPS
5895	NaI	naturale LPS
6116	Eu ³⁺	CFL
6154	Na	HPS
6160	Na	HPS
6300	OI	naturale
6363	OI	naturale
6707	LiI ?	naturale / MHL

Tabella 6.9: *Tabella relativa allo spettro del 2015*

Lunghezza d'onda	Elemento	Origine
4046	HgI	Hg Lamp
4108	Hg	Hg Lamp
4358	HgI	Hg lamp
4515	?	?
4665	NaI	HPS
4877	Tb ³⁺	CFL
4983	NaI	HPS
5153	NaI	HPS
5354	Sc ?	MHL
5461	HgI	Hg lamp
5577	OI	cielo
5688	NaI	HPS
5769	HgI	Hg lamp
5790	HgI	Hg lamp
5890	NaI	naturale/ LPS
5895	NaI	naturale LPS
6116	Eu ³⁺	CFL
6300	OI	cielo
6707	LiI	naturale / MHL

6.3 Confronto con altri osservatori

Nei paragrafi seguenti si è cercato di confrontare l'inquinamento luminoso presente nel sito dell'osservatorio di Asiago con quello di altri importanti osservatori come quello di La Palma, Kitt Peak, Mount Hopkins, Mount Hamilton.

6.3.1 Spettro del cielo di La Palma

Prima di confrontare lo spettro di Asiago con lo spettro di La Palma cerchiamo di capire come si presenta il cielo a La Palma. A tal proposito è utile citare un articolo (Pedani, 2005) in cui viene data una descrizione delle sorgenti di inquinamento luminoso presenti in questo sito.

Tutti gli spettri del cielo di La Palma sono stati presi nel 2003 da Agosto a Dicembre con il Telescopio Nazionale Galileo (3.58) utilizzando i DoLoRes (Device Optimised for Low Resolution) [8]. L'osservatorio del Roque de Los Muchacos (ORM), situato nell'isola di La Palma (Canarie), è il più grande Osservatorio Europeo dell'emisfero settentrionale [8]. Il sito gode di stabili condizioni di osservazione durante i 3/4 dell'anno grazie ad un'inversione di strato atmosferico attorno ai 1300m - 1700m [8]. Nel 1992 è stata introdotta una legge (The Canary Sky Law) che pone dei vincoli molto stretti sul tipo di lampade che possono essere usate per l'illuminazione esterna. Secondo tale legge, dopo

Figura 6.7: In figura sono riportati lo spettro 1 e lo spettro 2 del cielo di La Palma. Lo spettro 1 è la media di 8 spettri ed è quello che rappresenta meglio le condizioni di osservazione medie presenti nell'osservatorio ORM. Lo spettro 2 è stato preso in direzione nord-ovest, che è la zona di cielo meno inquinata a ORM [8].

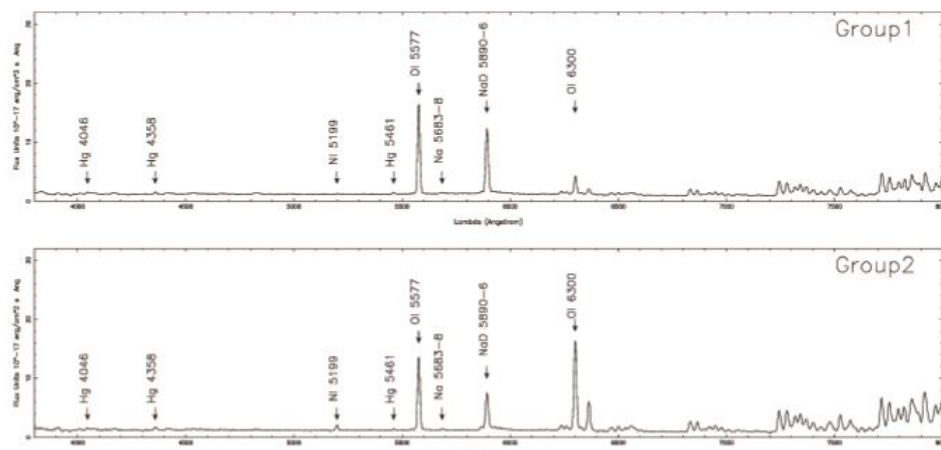


Figura 6.8: In figura è riportatato lo spettro 3 del cielo di La Palma [8].

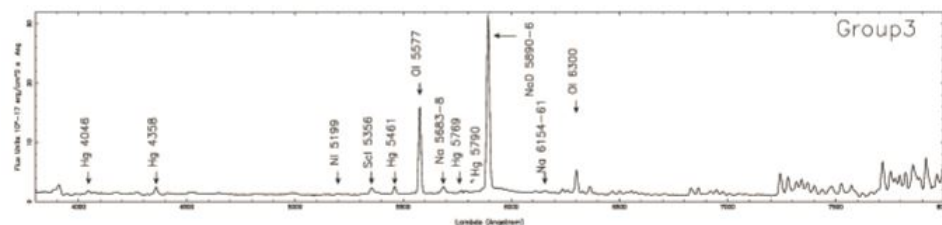


Figura 6.9: In figura è riportatato lo spettro 4 del cielo di La Palma [8].

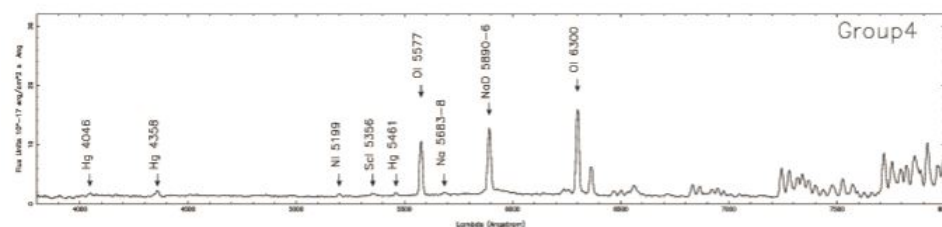


Tabella 6.10: *In tabella sono riportate le lunghezze d'onda delle righe spettrali presenti nello spettro 1 e 2 e i rispettivi flussi. I valori dei flussi sono stati espressi in R (rayleigh, vedi BE98 per alcune utili formule di conversione). Quando una riga non è stata rilevata viene indicata con la sigla n.d. Se invece una riga è troppo debole o era sovrapposta ad un'altra riga viene indicata con n.a. [8].*

Lunghezza d'onda	Elemento	Flusso 1	Flusso 2
4046	HgI	3.4	5.2
4358	HgI	5.6	7.9
5199	NI	1.5	15.4
5461	HgI	4.4	5.5
5577	OI	310	256
5688	NaI	3.5	6.3
5769	HgI	n.d	n.d
5790	HgI	n.d	n.d
5890	NaD	189 (156)	148 (89)
6154	NaI	n.a	n.d

Tabella 6.11: *In tabella sono riportate le righe spettrali presenti negli spettri 3 e 4 del cielo di La Palma e del cielo di Asiago*

Riga	Spettro 3	Spettro 4	Asiago
4046 HgI	presente	presente	presente
4358 HgI	presente	presente	presente
4515 ?	assente	assente	presente
4748 NaI	assente	assente	presente
4983 NaI	assente	assente	presente
5153 NaI	assente	assente	presente
5199 NI ?	presente	presente	assente
5354-6 Sc	presente	presente	presente
5461 HgI	presente	presente	presente
5577 OI cielo	presente	presente	presente
5683-8 NaI	presente	presente	presente
5769 HgI	presente	assente	presente
5790 HgI	presente	assente	presente
5890 NaI	presente	presente	presente
5895 NaI	assente	assente	presente
6116 Eu ³⁺	assente	assente	presente
6300 OI	presente	presente	presente
6707 LiI	assente	assente	presente

la mezzanotte locale, molte delle lampade al sodio ad alta pressione HPS e delle lampade al mercurio devono essere spente. Le lampade LPS possono essere usate ad eccezione delle aree urbane (in cui sono ammesse le lampade HPS)[8]

I benefici di questa legge si possono notare confrontando lo spettro 1 (preso dopo la mezzanotte locale) con lo spettro 2 (preso prima della mezzanotte); quello che si osserva è che nello spettro preso dopo la mezzanotte le righe spettrali risultano essere meno intense rispetto rispetto all'altro spettro [8]. Sebbene lo spettro 2 sia stato preso in una regione di cielo meno inquinata mostra circa il 40% in più di emissioni di mercurio rispetto allo spettro 1 [8].

Un'altra cosa interessante da osservare è il confronto tra l'inquinamento luminoso presente nel cielo di La Palma con quello presente nel cielo di Asiago. Per fare questo si possono considerare altri due spettri: uno spettro 3 preso prima della mezzanotte in una regione del cielo molto inquinata, ed uno spettro 4 preso prima della mezzanotte in una regione del cielo moderatamente inquinata. Tali spettri sono stati confrontati con lo spettro di asiago del 2003. Osservando i due spettri si vede che:

- Nello spettro di Asiago sembra mancare la riga naturale NI 5199 presente in La Palma. In realtà, come già detto in precedenza tale riga è presente ad Asiago, tuttavia a causa della sua bassa intensità si confonde con il rumore di fondo.
- Nello spettro di La palma mancano le righe (?)4515, NaI 4665, NaI 4983, NaI 5153, NaI 5895, Eu $^{3+}$ 6116, LiI 6707 presenti ad Asiago.

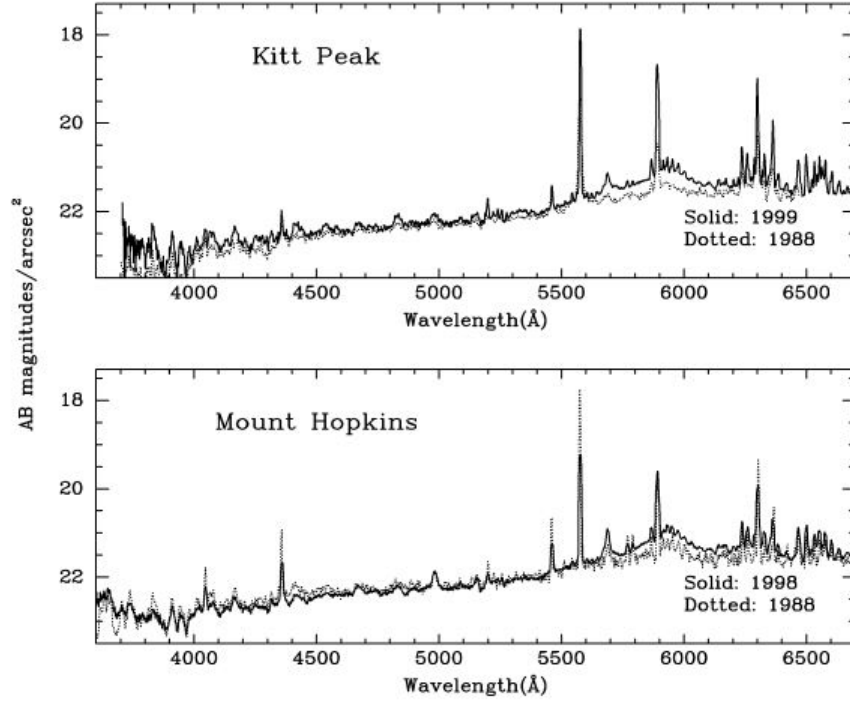
Questo ci fa capire che a La Palma non vengono usate lampade a fluorescenza compatta CFL, lampade MHL al Litio; inoltre molte lampade HPS usate ad Asiago non si trovano a La Palma. Per quanto riguarda invece l'intensità delle righe si ha che: a La Palma tutte le righe, ad eccezione della 5890, risultano essere nettamente meno intense della riga 5577. Questo indica che, in questo luogo, vengono utilizzate pochissime lampade al mercurio e al sodio, rispetto ad Asiago. In virtù di queste considerazioni possiamo concludere dicendo che il cielo di La Palma osservato nel 2003 risulta essere di gran lunga meno inquinato rispetto al cielo di Asiago del 2008.

6.3.2 Confronto con Mount Hopkins e Kitt Peak

Un altro confronto interessante che si può fare è quello con gli osservatori di Fred Lawrence Whipple (Mount Hopkins, Arizona) e di Kitt Peak (Arizona, 88 km da Tucson).

Prima di confrontare Asiago con questi due osservatori è interessante confrontare Mount Hopkins e Kitt Peak tra loro. A questo proposito è utile citare un articolo pubblicato da Astronomical Society of the Pacific (Massey e Foltz, 1999). In tale articolo viene riportato uno studio in cui si confrontano due set di dati ottenuti in periodi differenti (1988 e 1999). Quello che si evince è che

Figura 6.10: In figura sono riportati gli spettri di Kitt Peak (1988 e 1999) e Mount Hopkins (1988 e 1999) [10].



durante il periodo che va dal 1988 al 1999 la luminosità del cielo notturno di questi siti è aumentata solo in maniera modesta [10]. In particolare a Kitt Peak l'incremento è stato di circa $0.1\text{--}0.2\text{ mag arcsec}^{-2}$ nella parte blu del visibile [10]. Se invece si guarda la zona del cielo che punta verso Tucson l'incremento è stato maggiore, circa $0.5\text{ mag arcsec}^{-2}$ [10]. Attualmente la luminosità del cielo allo zenit nell'intervallo spettrale compreso tra i $3700\text{--}6700\text{ Å}$ è essenzialmente la stessa in entrambi i siti; inoltre il contributo delle lampade al sodio ad alta pressione nella banda V è di circa $0.2\text{ mag arcsec}^{-2}$, paragonabile alla forte riga del cielo OI 5577 [10].

Tutte le osservazioni sono state fatte sia allo zenith che a piccole distanze dallo zenith ($50^\circ\text{--}60^\circ$); inoltre sono state fatte in modo tale da essere lontane almeno 15° dal piano galattico [10]. Per quanto riguarda Kitt Peak si ha che il primo set di dati è stato preso il 18 Febbraio 1988 (UT) ed è descritto da MGP [10]. Le osservazioni sono state fatte con un Reticolo di Scanner Intensificato montato su un telescopio di 0.9 m con una FWHM di 10 Å , nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra $3800\text{--}6500\text{ Å}$ [10].

Figura 6.11: *In figura sono riportati i valori di luminosità del cielo nelle bande B e V [10].*

SKY BRIGHTNESS MEASURES (mag arcsec ⁻²)						
LOCATION	BROADBAND ^a			NARROWBAND ^b		
	B	V	HPS ^c	λ4250	λ4550	λ5150
1998 Mount Hopkins:						
Zenith (ZD = 5°)	22.63	21.46	0.17	22.69	22.40	22.17
North (ZD = 48°)	22.39	21.19	0.32	22.48	22.18	21.92
East (ZD = 34°)	22.34	21.30	0.18	22.42	22.10	21.87
South (ZD = 50°)	22.48	21.29	0.26	22.58	22.27	22.02
West (ZD = 53°)	22.47	21.27	0.23	22.57	22.26	22.00
1988 Mount Hopkins:						
Zenith (ZD = 2°)	22.52	21.55	0.04	22.58	22.29	22.11
1999 Kitt Peak:						
Zenith (average of 4; ZD = 1°–3°)	22.63	21.44	0.17	22.67	22.39	22.14
Tucson (average of 2; ZD = 58°–60°)	22.17	20.90	0.21	22.25	21.95	21.68
Phoenix (average of 2; ZD = 59°–60°)	22.38	21.08	0.22	22.44	22.15	21.88
Nogales (average of 2; ZD = 59°–60°)	22.36	21.08	0.16	22.44	22.14	21.84
1988 Kitt Peak:						
Zenith (average of 2; ZD = 4°–10°)	22.80	21.66	0.04	22.89	22.49	22.25
Tucson (average of 2; ZD = 53°–54°)	22.67	21.37	0.21	22.81	22.45	22.12
Phoenix (ZD = 61°)	22.75	21.45	0.19	22.85	22.50	22.22
Nowhere (average of 2; ZD = 56°–61°)	22.68	21.55	0.04	22.77	22.41	22.17

^a Broadband synthetic “B” and “V” were computed using the response curves from Allen 1973 and applying a 0.14 mag arcsec⁻² in order to match the standard system. The convolutions were performed after replacing the variable O I λ5577 line by an averaged value.

^b Narrowband magnitudes were computed using a constant response over a 100 Å interval centered at the specified wavelengths.

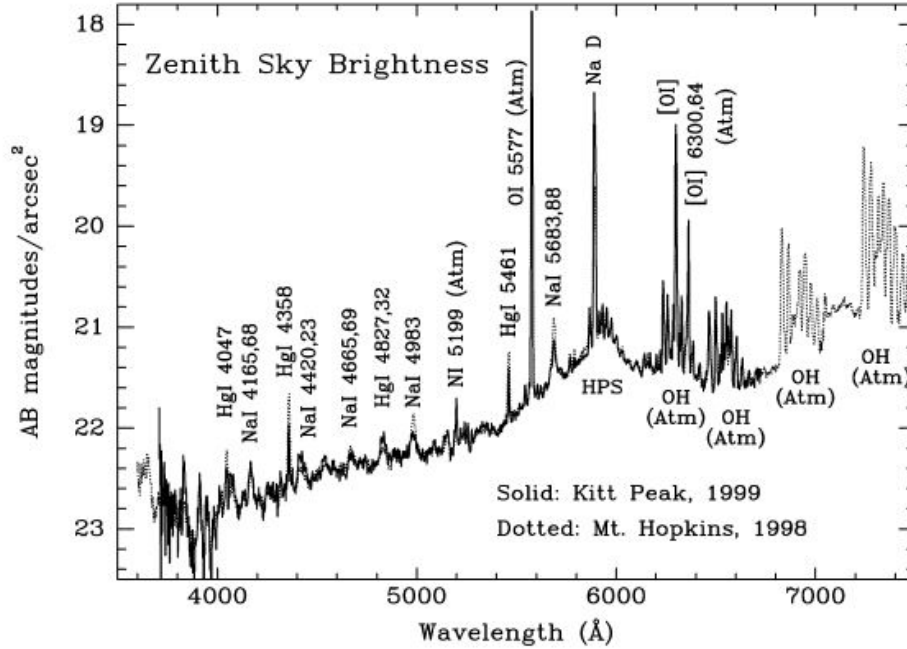
^c “HPS” denotes the contribution to the V magnitude made by high-pressure sodium.

Il secondo set di dati si è cercato di prenderlo nel modo più simile al primo set (dato che nel corso del tempo sono cambiate le strumentazioni); i dati sono stati ottenuti il 5, 8 e 10 Novembre 1999 (UT) usando lo stesso telescopio da 0.9 m e con lo spettrometro GoldCam CCD [10]. Inoltre si è utilizzato un grating con risoluzione 600 tratti per millimetro insieme ad un filtro GG375 che blocca tutte le lunghezze d’onda comprese tra 3700 e 6700 Å [10]. I tempi di esposizione erano tipicamente intorno ai 900s [10].

Per quanto riguarda invece Mount Hopkins si ha che il primo set di dati è stato preso la notte del 6 Giugno del 1988 (UT) con il telescopio da 4.5m MMT (Multiple Mirror Telescope), usando il Blue Channel dello spettrografo MMT ed il Reticolo detector intensificato [10]. Inoltre si è utilizzato un grating con una risoluzione di 300 per millimetro senza filtri bloccanti [10]. La risoluzione spettrale è di circa 10Å(FWHM); il tempo di esposizione di 300 s è stato preso con due aperture circolari di 5” di diametro [10].

Il secondo set di dati è stato ottenuto da P.Berlind il 25 Novembre del 1998 usando lo spettrografo FAST e il CCD detector montati sul Telescopio Tillin-ghast dell’osservatorio Fred Lawrence Whipple [10]. Inoltre è stato utilizzato un grating con risoluzione da 300 tratti per millimetro senza filtri di blocco [10]. I tempi di esposizione sono stati di 1800 s e sono stati presi usando una slit avente apertura di 5” posta nello zenith e nei quattro punti cardinali [10].

Figura 6.12: In figura è riportato lo spettro del cielo notturno (zenith) di Kitt Peak (linea continua) e Mount Hopkins (linea tratteggiata [10]).



Osservando la figura 6.12 si può vedere l'accordo tra lo spettro di Kitt Peak del 1998 con lo spettro di Mount Hopkins del 1999. Sebbene siano state usate strumentazioni diverse i dati sono praticamente indistinguibili; la brillantezza del cielo dei due siti nelle bande B e V è $B = 22.63 \text{ mag arcsec}^{-2}$ e $V = 21.45 \text{ mag arcsec}^{-2}$ [10]. Bisogna però anche dire che l'accordo tra i due siti è stato un po' fortunato dato che nel corso delle varie osservazioni fatte si hanno delle variazioni notturne di luminosità del cielo di circa $0.05 - 0.10 \text{ mag}$ [10]. Vale anche la pena chiedersi quale è la percentuale di luminosità del cielo notturno che è dovuta alle lampade al sodio ad alta pressione (HPS) [10]. Per fare questo è stato creato un modello delle lampade HPS che si estende dai $5250 \text{ \AA}$ fino ai $6650 \text{ \AA}$; il modello è stato poi scalato e sottratto dallo spettro individuale [10]. Si noti come allo zenith le lampade HPS contribuiscono con circa $0.17 \text{ mag arcsec}^{-2}$ in ogni sito [10].

Un'altra cosa che è interessante capire è se ci sono stati dei cambiamenti nello spettro di Kitt Peak e Mount Hopkins nel corso dei dieci anni. In figura 6.10 (Kitt Peak) si può notare un incremento dell'intensità delle righe nella porzione di spettro compresa tra i 5500 e i $6300 \text{ \AA}$, e si nota anche un aumento del flusso relativo nella zona dell'ultravioletto [10]. L'aumento quantitativo della brillantezza del cielo a Kitt Peak è pari a $\Delta B = -0.17 \text{ mag arcsec}^{-2}$ e $\Delta V = -0.22 \text{ mag arcsec}^{-2}$ [10]. Questo incremento è dovuto ad un aumento dei dispositivi HPS utilizzati.

Tabella 6.12: *In tabella sono riportate le lunghezze d'onda delle righe spettrali presenti negli spettro di Kitt Peak (1999) e nello spettro di Mount hopkins (1998). Si osservi come le righe spettrali sono le stesse in entrambi gli spettri*

Lunghezza d'onda	Elemento
4046	HgI
4165	NaI
4358	HgI
4420	NaI
4665	NaI
4827	HgI
4983	NaI
5199	NI (Atm)
5461	HgI
5577	OI (Atm)
5683	NaI
5890	NaD
6300	OI (Atm)

Per quanto riguarda Mount Hopkins si ha esattamente il contrario, ovvero nello spettro dle 1999 le righe risultano meno intense rispetto a quello del 1988; in altre parole il cielo di Mount Hopkins del 1999 risuta essere più buio di quello del 1988. Questo potrebbe essere dovuto a degli effetti di calibrazione strumentale [10].

A questo punto possiamo confrontare gi spettri di Kitt Peak e Mount Hopkins del 1999 (figura 6.12) con lo spettro di Asiago del 2003 (figura 6.3). Nello spettro di Kitt/Hopkins sembrano essere assenti le righe ? 4515, NaI 5153, Eu 6116. Nello spettro di Asiago sembrano essere assenti le righe NaI 4420, NaI 5153, NI 5199. Per quanta riguarda l'intensità delle righe si ha che ad Asiago le righe hanno un intensità relativa molto alta; quasi tutte sono più alte della riga OI 5577. A Kitt Peak e Mout Hopkins accade il contrario, ovvero tutte le righe sono più basse della riga OI 5577. In virtù di queste considerazioni possiamo dire che il cielo di Asiago del 2003 è molto più inquinante di quello di Kitt Peak e Mount Hopkins del 1999. Infine, osservando la probabile riga dell'Europio 6116 possiamo dire che a Kitt/Hopkins non venivano usate lampade MHL in quel periodo, al contrario di quanto succede ad Asiago.

Tabella 6.13: *In tabella sono riportate le righe spetttrali presenti negli spettri del cielo di Kitt Peak/ Mount Hopkins e nel cielo di Asiago*

Riga	Kitt /Hopkins	Asiago
4046 HgI	presente	presente
4165 NaI	presente	? assente
4358 HgI	presente	presente
4420 NaI	presente	assente
4515 ?	assente	presente
4665 NaI	presente	? assente
4827 HgI	presente	assente
4983 NaI	presente	presente
5153 NaI	assente	assente
5199 NI	presente	assente
5461 HgI	presente	presente
5577 OI cielo	presente	presente
5683-8 NaI	presente	presente
5769 HgI	? presente	presente
5790 HgI	? presente	assente
5890 NaI (NaD)	presente	presente
5895 Na (NaD)	presente	presente
6116 Eu ³⁺	assente	presente
6300 OI	presente	presente

Tabella 6.14: *In tabella sono riportate le righe del Hg [9].*

Lunghezza d'onda	Elemento
4046	HgI
4077	HgI
4358	HgI
4916	HgI
5461	HgI
5769	HgI
5790	HgI

Tabella 6.15: *In tabella sono riportate le righe del Na [9].*

Lunghezza d'onda	Elemento
4978	NaI
4982	NaI
5682	NaI
5688	NaI
5889	NaI
5895	NaI
6154	NaI
6160	NaI
8183	NaI
8194	NaI

6.3.3 Confronto con Mount Hamilton

L'osservatorio Lick è un osservatorio astronomico di proprietà dell'università della California. E' situato sulla sommità del monte Hamilton (1280m) ad est di San Jose, California. Prima di confrontare lo spettro di Asiago con lo spettro di Mount Hamilton cerchiamo di capire come si presenta il cielo all'osservatorio del Lick (Mount Hamilton). A tal proposito è utile citare un articolo (Slanger and Cosby, 2003) in cui viene data una descrizione delle sorgenti di inquinamento luminoso presenti in questo sito. In questo articolo viene descritto il lavoro condotto all'osservatorio del Lick da un gruppo di ricerca, avente come scopo quello di ottenere una lista di tutte le lunghezze d'onda presenti nello spettro del cielo del Lick, utile per la calibrazione delle righe [9]. Tutti gli spettri sono stati presi con il CAT nel 1999 nella notte tra il 31 Ottobre e il primo Novembre; in particolare sono stati presi gli spettri di tre regioni del cielo: uno spettro in direzione sud-ovest verso san Jose (la principale sorgente di inquinamento luminoso presente al Lick), un secondo in direzione del meridiano (dove l'inquinamento luminoso è più debole), un terzo in direzione sud-est lontano da san Jose (dove l'inquinamento è ancora più debole) [9]. Gli ultimi due sono stati presi per distinguere le righe prodotte da inquinamento luminoso dalle righe naturali del cielo (come quelle dell' OH, O, O₂). I tempi di esposizione degli

Figura 6.13: In figura è riportato lo spettro ovest (intervallo spettrale compreso tra i 5070 e 5100 Å) [9].

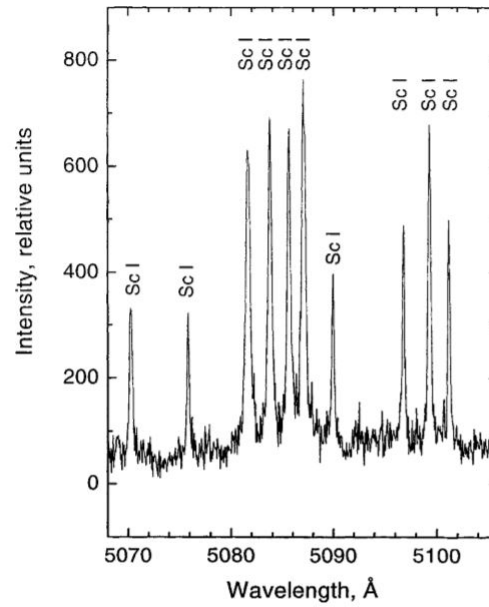


Figura 6.14: In figura è riportato lo spettro ovest (intervallo spettrale compreso tra i 5450 e 5500) [9].

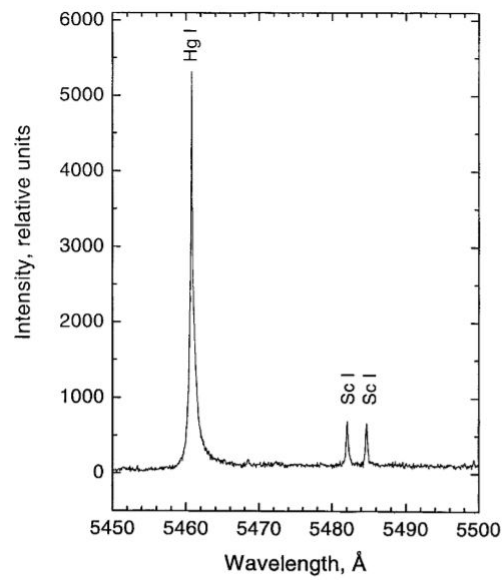


Figura 6.15: In figura è riportato lo spettro (intervallo spettrale compreso tra 5670 e 5700 Å) [9].

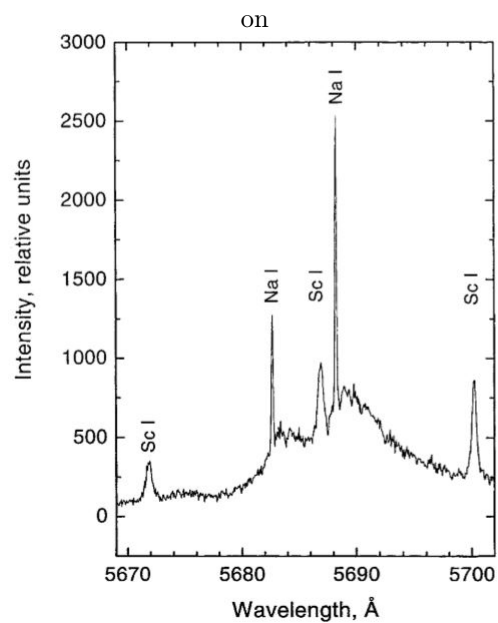


Figura 6.16: In figura è riportato lo spettro ovest (intervallo spettrale compreso tra 5750 e 5800 Å) [9].

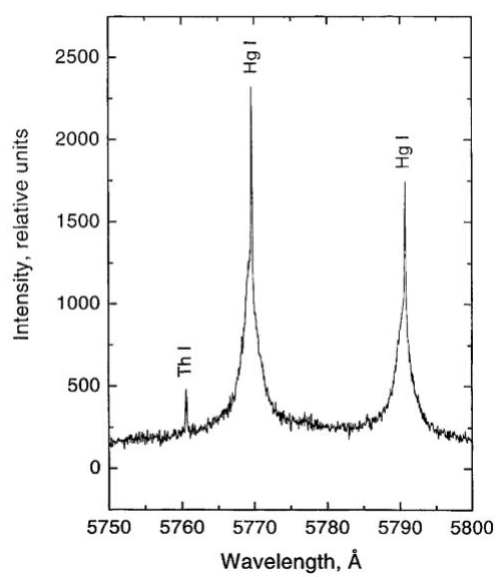


Figura 6.17: In figura è riportato lo spettro ovest (intervallo spettrale compreso tra 6700 e 6725 Å). [9]

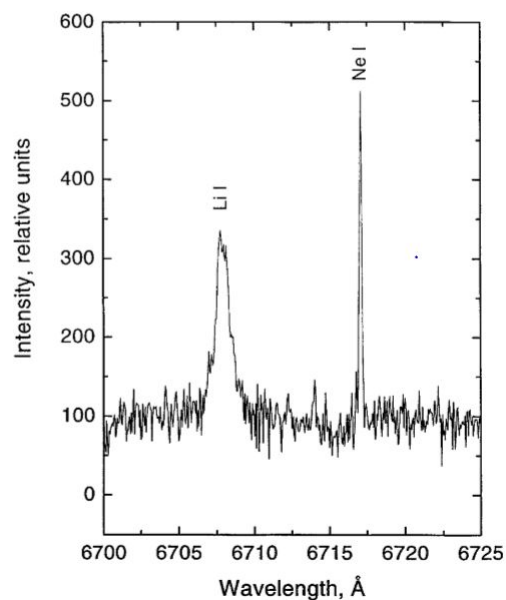


Figura 6.18: In figura è riportato lo spostamento a lunghezze d'onda più grandi delle righe ScI [9]

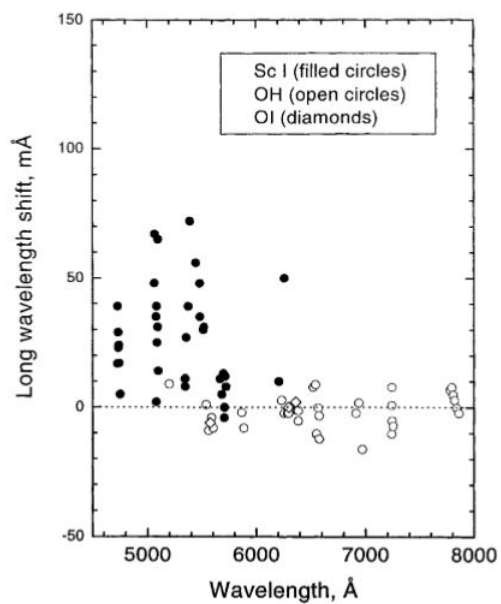


Tabella 6.16: *In tabella sono riportate le righe del Ne [9].*

Lunghezza d'onda	Elemento
5852	NeI
5944	NeI
6074	NeI
6143	NeI
6163	NeI
6217	NeI
6266	NeI
6304	NeI
6334	NeI
6382	NeI
6402	Ne
6506	Ne
6598	Ne
6678	Ne
6717	Ne
6929	Ne
7032	Ne
7173	Ne

spettri sono di 45 minuti ciascuno [9]. Ciascuna esposizione è stata poi ridotta da R. T. Waters, divisa per le esposizioni flat-field, estratta e poi allineata; poi gli spettri delle tre direzioni sono stati uniti (usando i metodi sottolineati da da Goodrich & Veilleux (1988)), in modo tale da formare tre spettri finali denominati *spettro ovest*, *meridiano* e *spettro est* [9]. Le lunghezze d'onda delle righe più forti sono state poi misurate da Stone e Misch, e poi sono state identificate da Osterbrok [9]. Negli spettri ottenuti sono state identificate molte righe dovute all' inquinamento luminoso, tra le quali sono incluse quelle del KI, NeI e molte altre deboli righe del NaI; inoltre, sono state anche identificate (contro ogni aspettazione) molte righe dello scandio ScI [9].

In figura 6.17 si osserva una porzione di spettro ricca di righe del ScI. In figura 6.14 si nota la riga Hg 5461; da notare la forte intensità di questa riga in confronto a quella del scandio ivi presente. Le righe del Hg sono listate in Tabella 6.14 [9]. In figura 6.15 si nota il doppietto del sodio NaI 5682, 5688 di debole intensità; tali righe sono abbastanza strette nel *core* dell' emissione, tuttavia ci sono anche ampi continui associati ad esse (le righe del sodio osservate sono listate in Tabella 6.15). In figura 6.16 si nota che il doppietto del mercurio Hg 5770, 5791 esibisce la tipica forma Lorenziana [9]. La figura 6.17 mostra la riga identificata come Li 6708. Il litio è stato usato come additivo in certi tipi di lampade piuttosto che come impurità; pertanto può produrre inquinamento negli spettri. Da notare inoltre, in figura, la riga del neon Ne I 6717 [9].

E' interessante osservare la notevole varietà di righe del neon presente nello spettro inquinato; tra tutte queste righe risulta interessante la riga NeI 5852, poi-

Tabella 6.17: *In tabella sono riportate le righe del ScI [9].*

Lunghezza d'onda	Elemento
4056	ScI
4087	ScI
4100	ScI
4133	ScI
4140	ScI
4152	ScI
4165	ScI
4233	ScI
4238	ScI
4728	ScI
4729	ScI
4732	ScI
4734	ScI
4737	ScI
4741	ScI
4743	ScI
4753	ScI
4779	ScI
4827	ScI
4833	ScI
4839	ScI
4840	ScI
4847	ScI
4852	ScI
4880	ScI
4909	ScI
4922	ScI
4934	ScI
4935	ScI
4941	ScI
4973	ScI
4980	ScI
4983	ScI
5018	ScI
5021	ScI
5064	ScI
5070	ScI
5075	ScI
5081	ScI
5083	ScI
5087	ScI
5089	ScI
5096	ScI
5099	ScI

Tabella 6.18: *In tabella sono riportate le righe del ScI [9].*

Lunghezza d'onda	Elemento
5101	ScI
5109	ScI
5112	ScI
5116	ScI
5210	ScI
5219	ScI
5285	ScI
5301	ScI
5331	ScI
5339	ScI
5342	ScI
5349	ScI
5356	ScI
5375	ScI
5392	ScI
5425	ScI
5442	ScI
5446	ScI
5451	ScI
5482	ScI
5484	ScI
5541	ScI
5564	ScI
5591	ScI
5623	ScI
5624	ScI
5649	ScI
5671	ScI
5686	ScI
5700	ScI
5708	ScI
5711	ScI
5717	ScI
5724	ScI
6193	ScI
6210	ScI
6239	ScI
6258	ScI
6276	ScI
6306	ScI
6378	ScI
6413	ScI

Tabella 6.19: *In tabella sono riportate le righe del ScII [9].*

Lunghezza d'onda	Elemento
4246	ScII
4294	ScII
4314	ScII
4320	ScII
4325	ScII
4374	ScII
4400	ScII
4415	ScII
4670	ScII
5031	ScII
5239	ScII
5657	ScII

Tabella 6.20: *In tabella sono riportate le righe del ThI [9].*

Lunghezza d'onda	Elemento
4112	ThI
4458	ThI
4723	ThI
4831	ThI
4840	ThI
4872	ThI
4894	ThI
5002	ThI
5176	ThI
5199	ThI
5231	ThI
5258	ThI
5326	ThI
5343	ThI
5417	ThI
5539	ThI
5587	ThI
5760	ThI
6007	ThI
6182	ThI
6203	ThI
6342	ThI
6411	ThI
6457	ThI
6583	ThI
6588	ThI

Tabella 6.21: *In tabella sono riportate le righe del ThII [9].*

Lunghezza d'onda	Elemento
4116	ThII
4208	ThII
4863	ThII
4919	ThII
4840	ThII
5017	ThII

chè, mentre nelle sorgenti di emissione risulta essere una delle righe più intense, se si va a guardare gli spettri risulta essere relativamente debole.

Invece, all'osservatorio Keck (Hawaii) tale riga risulta essere la più forte tra quelle de neon. Questo farebbe pensare che non sono le luci della città a provocare quella riga ma potrebbe essere implicata un'altra sorgente di luce locale.

Per quanto riguarda le righe dello scandio è interessante osservare alcune cose: per prima cosa le lunghezze d'onda osservate negli spettri risultano essere spostate rispetto a quelle misurate in laboratorio (lo spostamento è intorno a 75 m Å, vedi figura 6.18). Inoltre gran parte delle righe ScI ha una larghezza maggiore rispetto alle altre. Questo non è un fatto inatteso poichè le lampade MHL associate a queste emissioni vengono utilizzate a pressioni di circa 4 atmosfere di mercurio. L'allargamento tipico delle righe atomiche è di 0.008 cm^{-1} per atm, valore rozzamente consistente con le osservazioni.

Le righe del Sc II (tabella 6.19) risultano essere, invece, più strette di quelle del ScI e prive di spostamento, producendo così un interessante contrasto. Inoltre, sembra che le righe del ThI possano presentare un piccolo spostamento positivo di lunghezza d'onda, non ancora osservato nelle righe del ThII.

In tabella 6.20 e 6.21 sono riportate le righe del ThI e ThII, le quali risultano generalmente più deboli di quelle del ScI.

Per quanto riguarda il confronto tra lo spettro di Asiago del 1995 e quello di Mount Hamilton 1999 possiamo subito dire che quest ultimo risulta essere molto più inquinato del primo. Tutte le righe spettrali presenti ad Asiago sono presenti anche a Mount Hamilton; inoltre a MH sono anche presenti le righe del ScI, ScII, ThI, ThII, NeI (assenti ad Asiago).

6.4 Conclusioni

L'obiettivo principale della tesi era quello di capire come è cambiato l'inquinamento luminoso nel corso degli anni. Sulla base di tutti gli spettri che abbiamo esaminato possiamo trarre le seguenti conclusioni:

- **Negli anni 80** i livelli di inquinamento luminoso ad Asiago erano abbastanza modesti; in quegli anni i dispositivi di illuminazione erano costitui-

ti quasi esclusivamente dalle lampade ai vapori di mercurio e pochissime lampade al sodio LPS. Osservando lo spettro del 1979 si nota che è caratterizzato da pochissime righe provenienti da sorgenti artificiali, 5 delle quali sono da attribuire al mercurio e una attribuibile solo in parte al sodio. Tutte queste righe hanno un'intensità nettamente più bassa della riga naturale del cielo OI 5577. Dal 79 all'82 la situazione è rimasta sostanzialmente invariata; guardando lo spettro dell'82 si possono osservare le stesse righe di tre anni prima e con le stesse intensità. L'unico cambiamento che si può notare è l'incremento di intensità della riga Na 5890, attribuibile ad un aumento del numero di dispositivi LPS utilizzati; l'altezza di questa riga ha superato (seppur di poco) quella della riga OI 5577.

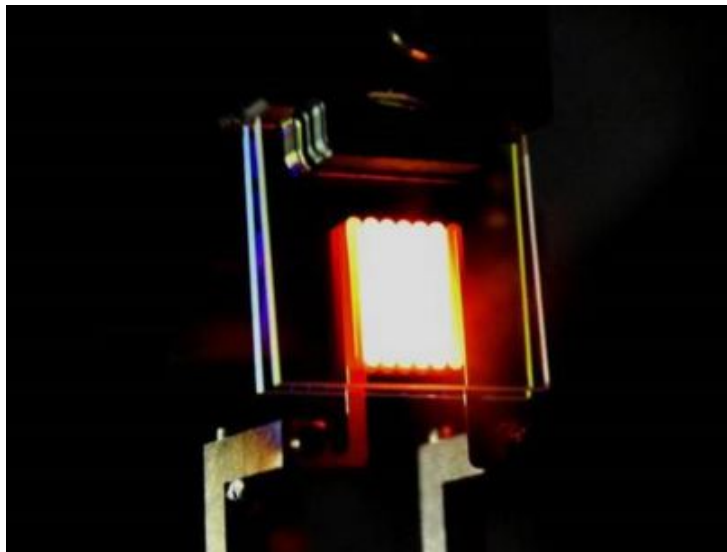
- **Negli anni 90** i livelli di inquinamento luminoso ad Asiago aumentano ulteriormente a causa dell'introduzione di nuovi dispositivi di illuminazione, quali le lampade al sodio HPS e CFL, producendo così nuove righe di emissione. Osservando lo spettro del 1995 si possono notare molte più righe rispetto agli spettri degli anni 80.
- **Negli anni 2000** l'inquinamento luminoso ha raggiunto valori più elevati. Pur senza un significativo aumento della popolazione (dal 1980 al 2011 si è passati da 4.400.000 a 4.800.000 abitanti nel Veneto) l'aumento dei dispositivi di illuminazione utilizzati ha prodotto un peggioramento drastico. Per rendersi conto di questo basta osservare lo spettro del 2003. Il numero delle righe spettrali si è triplicato rispetto a 20 anni prima. Se nello spettro del 79 si potevano contare a malapena 6 righe ora si arriva anche a 20. Ma la cosa che colpisce di più è l'enorme incremento dell'intensità delle righe spettrali. Negli anni 80 le righe Hg 4046, Hg 4358, Hg 5461, Hg 5769-90, Na 5890 erano rispettivamente $1/5$, $2/3$, $2/3$, $1/5$, $2/3$ della riga OI 5577. Ora invece, quest'ultima riga risulta essere una delle righe più basse. In particolare, le righe sopraccitate sono diventate rispettivamente il doppio, il quadruplo, il triplo della riga OI 5577.
- **dal 2003 al 2015** l'inquinamento luminoso sembra essersi complessivamente stabilizzato. Gli spettri del 2008 e 2015 sembrano mostrare le stesse righe dello spettro del 2003. Per quanto riguarda l'intensità relativa delle righe sembra esserci qualche cambiamento: quasi tutte le righe presenti nello spettro del 2008 sembrano essere meno intense rispetto a quello del 2003. Nello spettro del 2015 alcune righe spettrali sembrano essere più intense, altre sembrano aver ridotto la loro intensità rispetto allo spettro del 2008, e alcune sembrano avere la stessa intensità. Ad esempio le righe Hg 4358, Hg 5461, sembrano essere più intense, le righe Hg 4046, ? 4515, Na 5790, sembrano aver avuto un crollo, mentre la riga Na 5688 sembra essere all'incirca uguale. Questo andamento apparentemente contraddittorio potrebbe essere spiegato, almeno in parte, dicendo che molte lampade al sodio e al mercurio stanno cominciando ad essere sostituite con i LED; abbiamo già detto che tali dispositivi producono un'emissione continua, la quale tende a confondersi col rumore di fondo. Di conseguenza lo

spettro finale sarà formato da una componente di emissione dei LED invisibile e da righe spettrali meno intense. E' interessante notare che dal 2010 al 2014 il numero dei dispositivi LED utilizzati a Padova è passato da circa 200 a circa 1000 (comunicazione privata); tale numero è troppo basso per poter giustificare da solo la diminuzione di intensità delle righe degli spettri del 2008 e 2015. Un'altra possibilità è che tale diminuzione derivi dalla sostituzione di vecchi impianti con quelli più moderni a minor impatto ambientale, in accordo con la recente legge regionale veneta sul controllo dell'inquinamento luminoso.

- Tra i vari spettri esaminati relativamente agli anni 2000, quelli di Kitt Peak e Mount Hopkins sembrano presentare più righe degli spettri di Asiago; questo non è dovuto al fatto che il nostro sito è più inquinato del loro, ma al fatto che nel loro caso è stato utilizzato un migliore rapporto segnale rumore. In entrambi i siti vengono utilizzate (anni 2000) lampade HPS, LPS, lampade al mercurio. La differenza è che a Kitt Peak e Mount Hopkins sembrano non essere presenti lampade CFL. Per quanto riguarda invece Mount Hamilton, si può dire che tra i siti esaminati è quello con il *più alto livello di inquinamento luminoso*; nel 1970 la brillantezza del cielo di Mount Hamilton in banda V è $20.37 \text{ mag arcsec}^{-2}$ [21]. Guardando le tabelle (6.14 fino a 6.21) si nota la presenza di righe del mercurio, sodio, neon, scandio e torio. Ad Asiago è presente solo una riga dello scandio, ma non si osservano né righe del neon, quantomeno quelle del torio. Al contrario, ad Asiago sembra essere presente una riga del litio, non rilevata a Mount Hamilton. Il sito con il più basso livello di inquinamento sembra essere quello di La Palma. Le righe principali sembrano essere quelle del mercurio, qualche riga del sodio e una riga dello scandio.

In futuro, con molta probabilità, molti dei dispositivi di illuminazione attuali saranno sostituiti con i LED, pertanto un possibile spettro del cielo di Asiago sarà privo di righe e caratterizzato da un andamento continuo. A tal proposito, tuttavia, è interessante notare che i LED non costituiscono l'unica alternativa ai vecchi dispositivi di illuminazione. Nel 2015, infatti, un gruppo di ricerca guidato da Soljacic ha ideato un dispositivo che consente di "riciclare" la luce prodotta dalle vecchie lampadine. Sappiamo che il funzionamento di una lampadina tradizionale sfrutta un filamento metallico (chiamato tungsteno) che quando viene attraversato dall'elettricità diventa incandescente e emette luce. L'aspetto negativo è che soltanto il 2-3% dell'energia viene trasformata in luce visibile, mentre la restante parte si disperde in calore, sotto forma di luce infrarossa. L'idea sviluppata dal gruppo di ricerca è stata quella di avvolgere il filamento di tungsteno con un guscio formato da cristalli fotonici, il quale lascia passare la luce visibile e riflette quella infrarossa [4]. Tale luce, una volta riflessa, ritorna nel filamento; questo assorbe calore e produce nuova luce e calore. Tutto questo consentirebbe di raggiungere efficienze luminose di circa il 40 %, ben superiori a quelle dei LED [4].

Figura 6.19: *In figura è riportato il dispositivo sviluppato da Soljacic nel 2015 [4] .*



Bibliografia

- [1] Cinzano P (1996), *Inquinamento luminoso e protezione del cielo notturno*, ISTITUTO VENETO DI SCIENZE, LETTERE ED ARTI.
- [2] Falchi *et al* (2016), *The new world atlas of artificial night sky brightness*, Science Advances.
- [3] Luginbuhl C *et al* (2009), *Lighting and astronomy*, Physics Today.
- [4] Soliacic M *et al* (2016), *Tailoring high temperature radiation and the resurrection of the incandescent source*, Nature Nanotechnology.
- [5] Aube' M *et al* (2015), *Physical behaviour of anthropogenic light propagation into the nocturnal environment*, The Royal Society.
- [6] Patat F (2015), *The effects of improper lighting on professional astronomical observations*, European Organizations for Astronomical Research in the Southern Hemisphere, Germany, International Astronomical Union.
- [7] Fletcher J.M and Crampton D (1973), *An astronomical view of high pressure sodium lamps*, Astronomical Society of Pacific.
- [8] Pedani M (2005), *An updated view of the lighting pollution at the Roque the Los Muchachos Observatory*, The Ing Newsletters.
- [9] Slanger T.G and Cosby P.C (2003), *The high resolution light polluted night sky spectrum at Mount Hamilton, California*, The Astronomical Society of the Pacific.
- [10] Massey P and Foltz C.B (2000), *The spectrum of the night sky over Mount Hopkins and Kitt Peak: Changes after a Decade*, The Astronomical Society of the Pacific.
- [11] Moncada Lo Giudice G e De Lieto Vollaro (2007), *Illuminotecnica*, Casa editrice Ambrosiana.
- [12] <https://www.arpa.piemonte.gov.it/arpa-comunica/events/eventi-2016/atti-convegno-agenti-fisici/ortolani.pdf>
- [13] <http://www.lightpollution.it/cinzano/page94.html>

- [14] <http://www.osservatoriogorga.org/index.php?page=inqlum>
- [15] Ortolani Sergio, 2007, Complementi di Astronomia.
- [16] <http://www.ls.eso.org/lasilla/Telescopes/2p2/D1p5M/misc/SkyBrightness.html>
- [17] <http://www.dpgi.unina.it/giudice/atmosfera.pdf>
- [18] <http://brucegary.net/PlutoOcc/x.htm>
- [19] [http://www.attivarti.org/bmp/out/docsito/Intro Inquinamento luminoso.pdf](http://www.attivarti.org/bmp/out/docsito/Intro%20Inquinamento%20luminoso.pdf)
- [20] <http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/agenti-fisici/file-e-allegati/inquinamento-luminoso/FalchiAsiago2016.pdf>
- [21] Garstang, 1989
- [22] <https://it.wikipedia.org/wiki/Voxel>