

ISTITUTO VENETO DI SCIENZE, LETTERE ED ARTI

PIERANTONIO CINZANO

**INQUINAMENTO  
LUMINOSO  
E PROTEZIONE  
DEL CIELO NOTTURNO**





ISTITUTO VENETO  
DI SCIENZE, LETTERE ED ARTI

---

**MEMORIE**  
CLASSE DI SCIENZE FISICHE, MATEMATICHE E NATURALI  
Volume XXXVIII

PIERANTONIO CINZANO

**INQUINAMENTO  
LUMINOSO  
E PROTEZIONE  
DEL CIELO NOTTURNO**

Memoria presentata dal s.e. Francesco Bertola  
nell'adunanza ordinaria del 26 ottobre 1996

VENEZIA  
1997

ISSN 1122-3642  
ISBN 88-86166-48-6

---

© Copyright Istituto di Scienze, Lettere ed Arti - Venezia

30124 Venezia - Palazzo Loredan, Campo S. Stefano 2945  
Tel. 041/5210177 - Telefax 041/5210598  
e. mail: [ivsla@unive.it](mailto:ivsla@unive.it)

*Direttore responsabile:* LEOPOLDO MAZZAROLI

---

Autorizzazione del Tribunale di Venezia n. 544 del 3.12.1974

# INDICE GENERALE

Relazione della Commissione giudicatrice	ix
Prefazione dell'autore	xiii
<b>1 IL PROBLEMA DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO</b>	<b>1</b>
1.1 Introduzione . . . . .	1
1.2 L'inquinamento luminoso e l'inquinamento ottico . . . . .	3
1.3 Breve storia della lotta all'inquinamento luminoso . . . . .	5
1.4 Le risoluzioni dell'International Astronomical Union . . . . .	14
<b>2 COME SI PRODUCE L'INQUINAMENTO LUMINOSO</b>	<b>19</b>
2.1 L'illuminazione notturna . . . . .	19
2.1.1 Illuminazione stradale . . . . .	19
2.1.2 Illuminazione di impianti sportivi . . . . .	22
2.1.3 Illuminazione di edifici e di monumenti . . . . .	26
2.2 La dispersione di luce . . . . .	26
2.2.1 Emissione diretta di luce sopra l'orizzonte . . . . .	29
2.2.2 Diffusione nel percorso tra la lampada e la superficie . . . . .	69
2.2.3 Riflessione dall'area illuminata . . . . .	72
2.2.4 Distribuzione spettrale della luce . . . . .	81
2.3 La propagazione della luce nell'atmosfera . . . . .	88
2.3.1 Composizione dell'atmosfera . . . . .	88
2.3.2 Diffusione Rayleigh . . . . .	91
2.3.3 Rifrazione, riflessione e diffrazione . . . . .	92
2.3.4 Diffusione della luce nel mezzo atmosferico . . . . .	93
2.4 La luminosità del cielo notturno . . . . .	97
2.4.1 La luminosità naturale . . . . .	97

2.4.2	La luminosità artificiale . . . . .	101
<b>3</b>	<b>LA MISURA DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO</b>	<b>106</b>
3.1	Le unità di misura . . . . .	106
3.1.1	Conteggi di fotoni . . . . .	107
3.1.2	Unità energetiche . . . . .	107
3.1.3	Unità fotometriche . . . . .	109
3.1.4	Magnitudini . . . . .	112
3.1.5	Unità S10 . . . . .	112
3.2	Le tecniche di misura . . . . .	113
3.2.1	Misure fotometriche . . . . .	114
3.2.2	Misure fotografiche . . . . .	122
3.2.3	Misure con strumenti visuali . . . . .	122
3.2.4	Misure a occhio nudo . . . . .	123
3.2.5	Misure spettrali . . . . .	124
3.2.6	Il monitoraggio dell'inquinamento luminoso . . . . .	125
3.3	Gli indicatori del livello globale di inquinamento luminoso . . . . .	126
3.3.1	Brillanza zenitale . . . . .	127
3.3.2	Luminosità . . . . .	127
3.3.3	Q di Walker . . . . .	127
3.3.4	$\omega$ di Matsushima . . . . .	127
3.3.5	Apertura equivalente . . . . .	127
3.4	I livelli massimi consentiti . . . . .	128
<b>4</b>	<b>L'EFFETTO DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO SULLE OSSERVAZIONI ASTRONOMICHE E SULLA VISIONE DEL CIELO</b>	<b>131</b>
4.1	La propagazione dell'inquinamento luminoso . . . . .	131
4.1.1	Relazione Brillanza-Distanza . . . . .	132
4.1.2	Relazione Brillanza-Distanza per territori ad elevata urbanizzazione . . . . .	133
4.1.3	Relazione Brillanza-Popolazione . . . . .	135
4.1.4	Relazione Brillanza-Distanza Zenitale . . . . .	136
4.1.5	Relazione Popolazione-Distanza . . . . .	136
4.2	La crescita dell'inquinamento luminoso . . . . .	136
4.2.1	Crescita della popolazione . . . . .	137
4.2.2	Crescita del flusso di luce pro capite . . . . .	138

4.2.3	Variazioni del tipo di armature e di impianti . . . . .	138
4.2.4	Variazioni nel tipo di sorgenti di luce . . . . .	139
4.3	Il disturbo alle osservazioni a occhio nudo . . . . .	140
4.3.1	Effetti dell'inquinamento luminoso . . . . .	140
4.3.2	Effetti dell'inquinamento ottico . . . . .	145
4.4	Il disturbo alle osservazioni al telescopio . . . . .	146
4.4.1	Limiti imposti dalla brillantezza del cielo . . . . .	148
4.4.2	Osservazioni fotometriche di oggetti estesi . . . . .	151
4.4.3	Osservazioni spettroscopiche . . . . .	152
4.5	L'inquinamento luminoso come spreco di energia . . . . .	152
<b>5</b>	<b>COME RIDURRE L'INQUINAMENTO LUMINOSO</b>	<b>157</b>
5.1	Gli accorgimenti nella progettazione degli impianti . . . . .	157
5.1.1	Illuminazione di strade, piazzali, svincoli e barriere o caselli autostradali . . . . .	157
5.1.2	Illuminazione di edifici . . . . .	160
5.1.3	Illuminazione di impianti sportivi . . . . .	161
5.1.4	Illuminazione di sicurezza . . . . .	162
5.2	L'applicazione degli schermi . . . . .	163
5.3	Le tecniche per limitare l'inquinamento luminoso residuo . . .	165
5.3.1	Riduzione di flusso e parzializzazione . . . . .	165
5.3.2	Illuminazione alternata . . . . .	166
5.3.3	Illuminazione mista . . . . .	167
<b>6</b>	<b>LA PROTEZIONE DEL CIELO E DEI SITI ASTRONOMI-</b>	
	<b>CI</b>	<b>169</b>
6.1	L'inquinamento luminoso e la legge . . . . .	169
6.2	Provvedimenti legislativi per un territorio urbanizzato . . . . .	172
6.3	Provvedimenti legislativi per nuovi insediamenti . . . . .	181
<b>A</b>	<b>APPENDICE</b>	<b>184</b>
A.1	La lotta all'inquinamento luminoso . . . . .	184
A.2	La International Dark-Sky Association . . . . .	185
A.3	Indirizzi utili . . . . .	187
<b>B</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>189</b>
B.1	Parte A: Inquinamento Luminoso . . . . .	189

B.2 Parte B: Altri argomenti . . . . .	212
B.3 Parte C: Quotidiani e riviste nazionali . . . . .	214
<b>INDICE DELLE TABELLE</b>	<b>219</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE</b>	<b>221</b>
<b>INDICE ANALITICO ESSENZIALE</b>	<b>224</b>



*Relazione della Commissione giudicatrice della Memoria Inquinamento luminoso e protezione del cielo notturno di Pierantonio Cinzano, approvata nell'adunanza ordinaria del 22 marzo 1997.*

*Il problema dell'inquinamento luminoso e dei mezzi posti in atto per ridurre gli effetti è diventato di notevole attualità nel nostro e in tanti altri Paesi, dove l'estensione dell'illuminazione notturna artificiale in agglomerati urbani ha raggiunto livelli intollerabili.*

*Particolarmente grave, agli effetti scientifici, ne è stato l'impatto sull'attività di ricerca svolta presso gli Osservatori Astronomici, tanto che gli astronomi sono stati via via costretti a trasferire i loro telescopi lungi dalle città, spesso in luoghi lontani e impervi.*

*Ciò è accaduto, ad es., all'Osservatorio di Padova, che ha dovuto dapprima, nel 1942, collocare i propri strumenti ad Asiago, a un ottantina di chilometri dalla sede di città, per trasferirli poi, trent'anni dopo, a causa del rapido diffondersi dell'inquinamento luminoso sull'Altopiano (conseguente al "boom" turistico), ancor più lontano, a Cima Ekar, in una posizione indubbiamente migliore, ma non del tutto esente da un residuo inquinamento dovuto alle luci di Asiago e della pianura sottostante.*

*Ma come potremmo porre rimedio agli effetti di un inquinamento luminoso sempre crescente, che forse, in un non lontano futuro ci costringerebbe ad un ulteriore esodo, all'Esterio, in luoghi ben più protetti ?*

*Il lavoro del Dr. Cinzano, che qui presentiamo, ce ne dà risposta, colmando la grave lacuna esistente in proposito nella letteratura tecnico-scientifica. Per questo, esso merita senz'altro di essere incluso tra le pubblicazioni del-*

*l'Istituto Veneto, sempre sensibile ai problemi della nostra Regione. La quale avendo, tra l'altro, il privilegio di esser sede del maggior complesso astronomico esistente in Italia, ha anche il dovere di proteggerlo.*

*L'Autore ha toccato dapprima i molteplici aspetti dell'inquinamento luminoso, esponendo poi quali sono gli strumenti e i metodi di misura impiegati per rilevarne nei vari siti gli effetti e stabilirne la dipendenza dalla distanza, dall'intensità, diffusione e tipo delle sorgenti inquinanti. Successivamente egli ha svolto un'accurata disamina dei sistemi in atto in alcuni dei Paesi più progrediti allo scopo di ridurre l'inquinamento e la dissipazione di energia che ne consegue, senza venir meno alle necessità civili di un'adeguata illuminazione notturna nelle città, nei borghi, nelle vie di grande comunicazione, etc. Suggestendo inoltre le particolari misure da prendere per proteggere dalla indiscriminata diffusione delle luci inquinanti quei centri di scienza e di cultura che sono gli Osservatori astronomici.*

*L'opera inoltre è caratterizzata da una notevole completezza anche ai fini dei criteri progettuali che devono presiedere all'installazione di opere di illuminazione delle città e delle strade. Essa è corredata di numerosi grafici, progetti e Tabelle illustrative, in gran parte originali, che dimostrano come la protezione dall'inquinamento luminoso possa raggiungersi abbastanza facilmente e senza gravi spese adottando per l'illuminazione dispositivi appropriati, ad es. lampade fluorescenti al sodio, a bassa pressione, schermate in modo che la loro luce sia sempre diretta verso il basso, così da migliorare la visibilità al suolo, eliminando al tempo stesso il flusso di luce convogliata in alto, che non serve all'illuminazione urbana ed ha perciò solo un effetto inquinante.*

*Il Dr. Cinzano ha presentato infine e discusso i provvedimenti di legge contro l'inquinamento luminoso, già adottati in alcuni Paesi (Stati Uniti, Australia, Spagna, Cile) a protezione di territori dove esistono o sono previsti Osservatori astronomici di una certa importanza, mettendone in evidenza i notevoli risultati raggiunti.*

*Il testo si conclude con una vastissima bibliografia molto utile a chi intendesse approfondire di più e magari sotto altri aspetti i temi trattati nei vari capitoli del presente libro.*

*In conclusione riteniamo ben meritevole e opportuna la pubblicazione di quest'opera che l'Autore ha saputo, senza nulla sacrificare al rigore scientifico, rendere accessibile a quanti sono interessati ai problemi dell'inquinamento luminoso. E ciò proprio nel momento in cui stanno per essere presi in esame*

*dagli organi competenti dello Stato e delle Regioni, interpellanze e provvedimenti legislativi avanzati contro l'irrazionale illuminazione notturna di tanti luoghi e lo sperpero di energia e denaro che ne consegue.*

*E non va infine dimenticato che l'inquinamento luminoso al pari di quello acustico (vietato dalle leggi vigenti) può anche avere effetti negativi sulla psiche degli individui più sensibili. Ancor oggi non sono poche le persone che preferiscono ai ritrovi notturni lo spettacolo ineguagliabile del cielo stellato e ne ritraggono un senso interiore di pace e di sollievo dalle preoccupazioni quotidiane. Ma ne è preclusa la visione a chi vive nelle città sotto la greve cappa inquinante che le sovrasta. La campagna contro il proliferare dell'inquinamento luminoso diventa quindi un servizio e un dovere da compiere a pro dei cittadini.*

*La Commissione giudicatrice*

F. Bertola

F. Mattarolo

L. Rosino



## Prefazione dell'autore

*Questo testo è un breve corso sull'inquinamento luminoso. Questa forma di inquinamento non è, come sembrerebbe a prima vista, un problema solo per gli astronomi e per qualche migliaio di appassionati che amano trascorrere la notte, per hobby, ad osservare il cielo, ma in realtà è un problema culturale profondo e di portata più vasta con riflessi non trascurabili nel campo del risparmio energetico. La International Astronomical Union, l'associazione internazionale degli astronomi, ha più volte espresso la sua forte preoccupazione per la crescita della luminosità del cielo notturno e la stessa UNESCO ha sollevato il problema all'Assemblea dell'ONU. In Italia la Società Astronomica Italiana e l'Unione Astrofili Italiani da tempo hanno istituito due apposite Commissioni per studiarlo e affrontarlo.*

*Il panorama editoriale non ha finora offerto un libro che permetta di adentrarsi nella conoscenza dei molteplici aspetti dell'inquinamento luminoso e delle problematiche ad esso connesse. Prima d'ora era uscito solo un breve testo introduttivo<sup>1</sup> dello stesso autore di questo manuale. Questo libro tenta quindi di offrire un quadro completo, ampio e aggiornato ad un pubblico eterogeneo. Esso è stato scritto in modo non troppo tecnico così da poter essere letto, tranne qualche sezione, anche da un lettore interessato ma non esperto. Tuttavia gli argomenti trattati sono stati approfonditi in modo tale che esso possa costituire una vera e propria Guida.*

*Nei primi capitoli, dopo una introduzione al problema ed un excursus storico, vengono esaminati i problemi e le necessità dell'illuminazione esterna notturna, le ragioni per cui la luce si disperde dando origine all'inquinamento luminoso, il modo in cui questa luce si propaga nell'atmosfera producendo la luminosità artificiale del cielo e i metodi per misurarla. Successivamente vengono analizzati gli aspetti macroscopici della propagazione dell'inquinamento luminoso, i fattori che provocano la sua crescita nel tempo, i suoi effetti sul-*

---

<sup>1</sup>Cinzano, P. 1992, L'inquinamento luminoso, Biroma Editore, Galliera Veneta.

*la visibilità del cielo notturno e il disturbo che esso produce alle osservazioni astronomiche. Infine vengono illustrate le ragioni per cui esso costituisce uno spreco di energia. Negli ultimi capitoli vengono presentati i metodi per ridurre la dispersione di luce e il disturbo da essa prodotta, e vengono analizzate le norme per la protezione della visibilità del cielo notturno e per la protezione di siti astronomici previste in alcuni esempi di legislazione di diversi paesi nonché dalla legislazione proposta nel nostro Paese. Completa il testo un'ampia bibliografia.*

*Questo manuale potrà essere utile a coloro che si occupano della progettazione e dell'installazione degli impianti di illuminazione esterna notturna, quali architetti, ingegneri dell'illuminazione, progettisti dell'industria elettrotecnica, installatori, tecnici comunali e di altri enti. Con esso potranno conoscere le problematiche connesse con la dispersione di luce, imparare come evitarla, conoscere le principali norme presenti nelle leggi in vigore negli altri paesi e nella proposta di legge presentata al nostro parlamento.*

*Gli amministratori pubblici e i gestori di impianti di illuminazione esterna notturna o di impianti sportivi potranno con esso apprendere possibilità di risparmio energetico finora non sfruttate e potranno adeguarsi in anticipo alle normative che verranno probabilmente adottate nei prossimi anni.*

*Questo testo inoltre sarà uno strumento indispensabile per coloro che si occupano di didattica o divulgazione, e sono interessati a questo problema, come gli insegnanti di scuola media superiore, i giornalisti scientifici, i docenti di planetari, il personale degli osservatori popolari, gli animatori di gruppi astrofili, i dirigenti di associazioni culturali e i coordinatori di organizzazioni per la salvaguardia ambientale.*

*Potrà infine essere utile nelle biblioteche degli Osservatori Astronomici per chi cercasse una rapida introduzione al problema e per consultazione.*

*Come già detto, questo libro vorrebbe offrire un quadro completo e aggiornato anche al lettore interessato ma non esperto. Gli ambientalisti e gli appassionati di astronomia vi troveranno certamente spunti interessanti. Gli astrofili, in particolare, vi troveranno suggerite alcune possibilità di ricerca.*

*L'autore si augura di essere riuscito almeno in parte nel difficile intento che si era prefisso e ringrazia tutti coloro con i quali ha discusso alcuni degli argomenti qui esposti: tra essi Sergio Ortolani e Mario Di Sora.*

*Padova, 1 Settembre 1996*

# Capitolo 1

## IL PROBLEMA DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO

### 1.1 Introduzione

L'Astronomia rappresenta un'importante via di accesso attraverso la quale la popolazione può accostarsi alla cultura scientifica. Nel caso di questa scienza il contatto della gente con il modo di affrontare i problemi tipico del ragionamento scientifico può avvenire non solo attraverso libri, riviste, documentari televisivi ma anche attraverso la semplice osservazione del cielo. Il cielo notturno è quindi un bene di tutti, da proteggere. Tutti invece possono accorgersi, alzando di notte lo sguardo, che il chiarore del cielo prodotto dalla luce dispersa dalla illuminazione esterna, sia pubblica che privata, disturba, e talvolta impedisce del tutto, l'osservazione. Spesso non si coglie la gravità di questo fatto che ci priva, poco a poco, di un importante aspetto culturale. Sono molti gli operatori che con il loro lavoro cercano di consentire alla popolazione questo tipo di contatto con la cultura scientifica: tra loro troviamo astronomi, insegnanti di scuola media e superiore, giornalisti scientifici, docenti di planetari, direttori e personale degli osservatori popolari, animatori e membri di associazioni culturali, gruppi di astrofili. Il numero

degli Osservatori popolari espressamente dedicati alla divulgazione e riuniti nel Coordinamento degli Osservatori popolari italiani (COAPI) è oggi, dopo anni di paziente lavoro di sensibilizzazione, in progressiva crescita grazie alla lungimirante collaborazione tra enti pubblici, sponsor e capaci gruppi di appassionati. La preziosa attività che queste persone svolgono in favore della comunità e la stessa possibilità di entrare in contatto con la cultura scientifica per questa semplice via accessibile a tutti sono però in grave difficoltà a causa della luminosità del cielo notturno che ne limita o ne impedisce l'osservazione. Il nostro cielo, inoltre, è parte della natura e del paesaggio che ci circonda. Quindi come le nostre montagne, i nostri laghi, i colli e le altre componenti dell'ambiente, merita di essere salvaguardato. Come si vede l'inquinamento luminoso è un problema ambientale a tutti gli effetti. Ha in comune, infatti, con gli altri tipi di inquinamento gli elementi essenziali:

1. si tratta di un effetto prodotto dall'uomo sulla natura,
2. sta creando difficoltà all'uomo stesso,
3. il suo impatto sta crescendo rapidamente in modo preoccupante,
4. se non mantenuto sotto controllo sarà molto dannoso per l'umanità.

Due fondamentali considerazioni di carattere economico sembrano non essere state ancora sufficientemente comprese. Tutta la luce dell'illuminazione esterna che viene dispersa al di fuori delle zone da illuminare, compresa quella che finisce in cielo, costituisce un enorme spreco di energia elettrica e, quindi, di denaro, per lo più denaro pubblico. Si parla di centinaia di miliardi di lire ogni anno. Non è certo il caso di permettere tali sprechi. Inoltre lo stato investe denaro nella ricerca scientifica astronomica e la società ne ha finora ottenuto un notevole ritorno in termini di conoscenza scientifica e di nuove tecnologie. Quindi è illogico e insensato da un lato finanziare la ricerca e dall'altro limitarla, non proteggendo gli studiosi da questo disturbo.

Per risolvere il problema dell'inquinamento luminoso e ridurre lo spreco di energia occorre eliminare il più possibile la dispersione di luce al di fuori delle zone da illuminare. Per ottenere questo obiettivo è importante la collaborazione degli ingegneri dell'illuminazione e dell'industria del settore, in quanto è interesse comune che i nuovi impianti installati siano ad alto contenuto tecnologico. In generale *illuminazione* è sinonimo di progresso ma la dispersione di luce e lo spreco di energia sono il risultato di un'arretratezza tecnologica e culturale.

Sono molte le nazioni in cui sono in vigore leggi e ordinanze per limitare l'Inquinamento Luminoso e risparmiare energia. Al primo posto sono gli



Stati Uniti ove, anche per lo stimolo di una potente associazione internazionale, la International Dark-Sky Association, molte amministrazioni locali e statali hanno emesso ordinanze per limitare l'inquinamento luminoso. Anche in Europa ci sono nazioni sensibili al problema: possiamo citare ad esempio la Spagna. In Italia è stata presentata in parlamento nel 1992 un'importante proposta di legge per limitare l'Inquinamento Luminoso e proteggere gli Osservatori Astronomici. Essa è stata preparata dalla "Commissione per lo studio dell'Inquinamento Luminoso" della Società Astronomica Italiana (SAIt), discussa con i rappresentanti degli Osservatori Astronomici e della Commissione per l'Inquinamento Luminoso dell'Unione Astrofili Italiani (UAI) e approvata dall'Assemblea dei Soci della SAIt. L'UNESCO e l'Unione Astronomica Internazionale hanno dedicato un Convegno a Parigi agli "Effetti avversi dell'ambiente sull'Astronomia" e la stessa UNESCO cui era stato chiesto di premere sulle nazioni membre perché si muovessero a livello legislativo, ha posto il problema all'assemblea delle Nazioni Unite.

Illuminiamo bene dove è utile e manteniamo buio il cielo notturno. Risparmiamo denaro e riscopriamo il piacere di guardare il cielo. Eliminiamo gli sprechi e conserviamo la possibilità di acquisire attraverso lo spettacolo del firmamento un godimento estetico e, insieme, una cultura scientifica. Sono conclusioni che sembrano molto semplici e molto ovvie. Ma occorre riflettere perché forse ancora non sono state capite da tutti.

## 1.2 L'inquinamento luminoso e l'inquinamento ottico

Prima di proseguire, definiamo che cosa intendiamo per inquinamento luminoso e per inquinamento ottico.

Per inquinamento luminoso in senso stretto si intendono gli effetti della dispersione nel cielo notturno di luce prodotta da sorgenti artificiali. Di solito si tratta di impianti di illuminazione esterna notturna ma in alcuni casi l'inquinamento luminoso può essere prodotto anche da illuminazione interna, ad esempio l'illuminazione di vetrine.

L'inquinamento ottico è prodotto da quella luce, dispersa da una sorgente artificiale, che illumina direttamente un area o un soggetto che non è richiesto di illuminare. Il disturbo prodotto dall'inquinamento ottico è diverso dal concetto di *abbagliamento*. Quest'ultimo, ben noto agli ingegneri dell'illumi-

Figura 1.1: Inquinamento luminoso. (foto Luigi Boschian, San Canzian d'Isonzo (GO); Posa 10 sec con Ektachrome 400 e ob. F1.4 presso Ronchi dei Legionari).

nazione, è il disturbo prodotto dalla luce dispersa da una sorgente artificiale che colpisce direttamente un soggetto che però è *utente* dell'impianto di cui fa parte<sup>1</sup> la sorgente. In questo caso il disturbo è legato al rapporto tra l'intensità della luce che arriva direttamente al soggetto dalla sorgente e quella che gli arriva dalla superficie illuminata dall'impianto. Invece nel caso dell'inquinamento ottico il soggetto non è utente dell'impianto, quindi il disturbo è legato al valore assoluto dell'intensità della luce che arriva dalla sorgente. Ad esempio, è abbagliamento il disturbo prodotto agli atleti dai proiettori che illuminano un campo sportivo, ma è inquinamento ottico il disturbo prodotto dagli stessi proiettori ad una persona che passeggia in un viottolo buio di campagna. Il disturbo prodotto dai fari di un'automobile al guidatore di un

---

<sup>1</sup>Talvolta si usa anche nel caso di un soggetto che sia utente, in quel momento, di un qualsiasi altro impianto di illuminazione.





auto che procede in senso opposto si considera abbagliamento perché, anche se in senso stretto l'utente dei fari è solo il guidatore di quella automobile, in pratica si assume che entrambi i guidatori siano utenti del sistema composto dai fari di tutte le automobili e della eventuale illuminazione della strada.

In generale è inquinamento luminoso qualunque alterazione della quantità naturale di luce presente di notte nell'ambiente esterno, al di fuori dagli spazi che è necessario illuminare, e dovuta ad immissione di luce di cui l'uomo abbia responsabilità. Perciò è compreso nel concetto di inquinamento luminoso anche l'inquinamento ottico. Produce inquinamento luminoso qualunque dispersione di luce nell'ambiente, sia da parte delle sorgenti di luce che da parte delle superfici illuminate, ivi compresa la dispersione di luce prodotta per altri scopi che non l'illuminazione esterna e in altro modo, inclusa la luce prodotta da sorgenti naturali ma di cui l'uomo abbia responsabilità. Produce altresì inquinamento luminoso ogni immissione volontaria ma ingiustificata di luce nell'ambiente. Si devono considerare dovuti all'inquinamento luminoso, ad esempio, anche i disturbi all'accrescimento delle piante prodotti dalla luce che illumina le aree verdi ai bordi degli svincoli autostradali. Tutto l'inquinamento luminoso che non sia motivato da ragioni di sicurezza e necessità dovrebbe essere il più possibile evitato.

## 1.3 Breve storia della lotta all'inquinamento luminoso

### Gli inizi

Gli studi di archeoastronomia mettono in evidenza che l'uomo osservava gli astri e ne studiava i movimenti fin da un antico passato. Per migliaia di anni solo le condizioni atmosferiche hanno limitato questo suo guardare il cielo. Nell'evo moderno, con il crescere delle concentrazioni abitative e con lo sviluppo dell'illuminazione pubblica, si è manifestato qualche primo piccolo segno dell'interferenza di questa nell'osservazione del cielo. Pare che uno dei primi a segnalarla sia stato il celebre astronomo inglese sir John Herschel (1792-1871). Tra gli altri possiamo citare l'astronomo e divulgatore francese Amedee Guillemin, che già nel 1866 faceva rilevare nei suoi libri che nei grossi centri urbani le stelle più deboli erano offuscate dall'illuminazione delle case e delle strade (Guillemin 1866), ed il londinese John A. Oliver, il quale nel 1888

lamentava che nelle città ove era in uso l'illuminazione elettrica, le parti meno luminose della luce zodiacale non erano più visibili tanto che il suo collega Searle di Boston non era più in grado di osservarla in modo soddisfacente. Ai primi del '900 anche il celebre astronomo padovano A. Antoniazzi lamentava una "difficoltà inaspettata" nelle sue osservazioni a causa dell'umidità e della polvere delle strade illuminate dai fanali della città.

In passato, la tendenza a cercare nuovi siti per i nuovi osservatori astronomici, ove vi fossero condizioni climatiche migliori e cielo più buio, ha fatto trascurare per molti anni la divulgazione del problema e l'impegno a spingere il progresso dell'illuminazione nella direzione di una sempre minore dispersione di luce. Solo quando ci si è accorti che i luoghi della terra che restavano adatti all'osservazione erano pochi e fortemente minacciati, e che tutti gli altri osservatori erano fortemente limitati nelle loro possibilità di osservazione, si cominciò a sviluppare un concreto impegno nella lotta all'inquinamento luminoso. Quando, negli anni '60 l'inquinamento luminoso iniziò a crescere precipitosamente con la popolazione, solo la città di Flagstaff aveva già promulgato (1958) un'ordinanza per il controllo della illuminazione esterna. La questione dell'inquinamento luminoso cominciò quindi a preoccupare gli astronomi.

Alla metà degli anni '60, l'astronomo Merle Walker iniziò un primo studio sullo stato del cielo in California durato ben due anni e pubblicato nel 1970 (Walker 1970). È da allora che gli astronomi iniziarono a muoversi attivamente in questo campo.

Nel dicembre 1971 lo Steward Observatory, il Kitt Peak National Observatory (KPNO) e lo Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) pubblicarono un libretto che descriveva il problema dell'inquinamento luminoso e proponeva un ordinanza per limitarlo. Il sottotitolo era *Una Guida per l'uomo d'affari e per il pubblico*. L'ordinanza proposta fu approvata nella Contea di Pima, a Tucson e a Cocomino. L'anno successivo la legislazione dell'Arizona diede la facoltà alle sue contee e alle sue città di adottare ordinanze di questo tipo (ARS vol 3 tit 9 e 11). Da allora poco alla volta anche altre Contee e città emisero simili ordinanze. Con uno studio eseguito nel 1975, Hoag (1976) mise in luce che per effetto di queste ordinanze la crescita dell'inquinamento luminoso al Kitt Peak National Observatory si era quasi arrestata. Negli anni successivi lo stesso stato dell'Arizona promulgò un'apposita legge (HB 2347 ACT 236). Alla fine dell'anno 1990 erano 33 le città e 16 le Contee dell'Arizona ove erano state promulgate ordinanze per

la limitazione dell'inquinamento luminoso.

Come abbiamo visto, l'interesse per l'inquinamento luminoso, compreso il suo aspetto di risparmio energetico, cominciò a diffondersi agli inizi degli anni '70. Negli stessi anni la Grossman Publishers di New York pubblicò un manuale intitolato *A public citizen's action manual* ove spiegava al pubblico come lo schermare le luci fa risparmiare le risorse naturali e salva denaro del contribuente. Nel 1973, Merle Walker pubblicò una più vasta ricerca sull'inquinamento luminoso in Arizona e in California, due regioni dove sono situati grossi osservatori quali quelli di Kitt Peak, Mount Hopkins, Mount Lemmon, il Lowell, il Perkins-Lowell, l'USNO, Mount Palomar, Mount Wilson, il sito di Junipero Serra Peak, ove all'epoca si pensava di installare altri grossi strumenti, e molti altri. È proprio facendo questo studio che Walker ricava la famosa legge empirica sulla dipendenza della brillantezza<sup>2</sup> del cielo dalla distanza della città che la produce, che oggi porta il suo nome.

Anche in Italia gli astronomi erano al lavoro. Tre astronomi della specola vaticana, Bertiau, de Graeve e Treanor, negli stessi anni, stavano cercando di determinare con le loro misure la dipendenza della brillantezza del cielo dalla distanza della città che la produce, allo scopo di potere poi costruire un modello della brillantezza del cielo allo zenith nelle varie località del nostro paese. Lo scopo finale dei tre astronomi era quello di determinare quale fosse il miglior sito per un telescopio nazionale. Treanor propose una celebre espressione teorica che bene interpretava quanto essi avevano osservato sperimentalmente. All'epoca in Italia, ad Asiago, sede dell'Osservatorio Astrofisico dell'Università di Padova, esisteva già da alcuni anni (1964) un ordinanza per il controllo dell'illuminazione esterna notturna.

Nella Assemblea Generale di Sidney del 1973, la International Astronomical Union decise di creare una apposita Commissione (Commissione 50: Identificazione e protezione dei siti osservativi esistenti e potenziali) con il compito di raccogliere e diffondere le informazioni riguardanti le misure di protezione dei siti da prendere in considerazione o che fossero state già adottate, raccomandare tipi di azioni protettive da intraprendere e appoggiare misure di protezione per siti specifici (v. Walker 1976). Nel 1976 la Commissione pubblicò un Rapporto sulla situazione, in base al quale l'Assemblea Generale successiva adottò una fondamentale risoluzione in cui, notando con

---

<sup>2</sup>Per la definizione di brillantezza si veda la sezione 3.1.

allarme il problema, richiedeva con urgenza alle autorità di proteggere gli osservatori da questa interferenza.

Sulla base della risoluzione dell'International Astronomical Union e grazie all'attività della Commissione 50, la Commission Internationale de l'Eclairage, l'organismo internazionale che si occupa di fissare le raccomandazioni in campo illuminotecnico, pubblicò nel giugno 1978 una dichiarazione sulla necessità di proteggere gli osservatori astronomici, limitatamente però a pochi siti particolari e non a quelli ove le condizioni del cielo fossero già deteriorate. Iniziò così una collaborazione tra la International Astronomical Union e il Comitato tecnico TC-4.6 (Road Lighting) della Commission Internationale de l'Eclairage, che poi diede luogo alla costituzione del Comitato Tecnico TC-4.21, che si occupa specificatamente dell'*Interferenza della luce sulle Osservazioni Astronomiche*, e a quella del TC-5.12 (Light Trespass), che si occupa del disturbo prodotto dalla dispersione di luce.

Negli anni seguenti l'International Astronomical Union migliorò ulteriormente i suoi rapporti con la Commission Internationale de l'Eclairage (Finch *et al.* 1979), fissò con una serie di raccomandazioni (Smith 1979) i valori massimi della luminosità del cielo che si potevano accettare e adottò una seconda più pressante raccomandazione.

Se gli astronomi si davano da fare, gli astrofili non rimasero a guardare. Nella assemblea regionale del Middle East della Astronomical League, la federazione americana dei Club di Astrofili, il 18 maggio 1974 gli astrofili decisero di entrare in campo e stabilirono un loro piano di battaglia con l'obiettivo di un provvedimento del governo (Betz 1974). In Canada, nel frattempo, anche il centro di Toronto della Royal Astronomical Society of Canada diede il via ad uno *Sky Brightness Programme* che aveva come obiettivo la misura della brillantezza del cielo nella zona del lago Ontario e lo studio dell'andamento futuro (v. le relazioni di Berry (1976) e Pike (1976)). Durante questo studio, fotometrico e visuale, Berry propose un'altra versione della legge brillantezza-distanza.

### **Gli anni '80**

Gli anni '80 iniziarono con la pubblicazione da parte dell'International Astronomical Union e della Commission Internationale de l'Eclairage di una famosa guida su come limitare la luminosità del cielo prodotta dall'illuminazione urbana in prossimità degli Osservatori Astronomici (Cayrel 1980 *Guidelines*



*for minimizing urban sky glow near astronomical observatory* ). Questo decennio vide da un lato lo sviluppo, sostanzialmente da parte di Roy Garstang, di modelli teorici al fine di studiare l'aumento della brillantezza del cielo prodotta dall'illuminazione artificiale che colpisce anche i siti astronomici più isolati e di prevederne l'andamento nel futuro (Garstang 1984, 1985, 1987, 1988, 1989), dall'altro il crescere del numero degli stati e delle contee negli USA che si preoccupavano di limitare l'inquinamento luminoso. In particolare nel 1981 partì il programma per prevenire il deterioramento del cielo al Palomar Observatory: dal 1983 tutte le luci nella contea di Riverside entro 30 miglia dall'Osservatorio devono utilizzare lampade al Sodio a Bassa Pressione (Brucato 1991), dall'anno dopo devono essere dello stesso tipo anche nella Contea di San Diego, e in seguito, in molte altre. Anche altri stati, quali la California e le Hawaii, più tardi, approvarono ordinanze per limitare l'inquinamento luminoso.

In Europa, in questi anni, venne pubblicato il primo rapporto francese sulla Protection des Observatoires astronomique e geophysique (1984) a cura di un gruppo di lavoro della Accademia Francese delle Scienze e, in Giappone, venne avviata una grossa campagna osservativa (1986) denominata SKY WATCH (Wi 1991) promossa dalla Agenzia di Protezione Ambientale giapponese e dall'Osservatorio Astronomico Nazionale di Tokyo. Questo stesso programma è stato in seguito proposto negli USA, in Gran Bretagna ed anche in Italia.

Un anno particolarmente ricco nella storia della lotta all'inquinamento luminoso è stato il 1988.

Nella XX Assemblea Generale della International Astronomical Union a Baltimora venne adottata una terza risoluzione (A2) ove si invitavano con *pressante urgenza* tutti gli astronomi a richiedere alle autorità dei loro paesi di implementare soluzioni per preservare la qualità delle condizioni osservative. Nei giorni immediatamente successivi all'assemblea si riunirono a Washington circa 120 studiosi, astronomi e ingegneri in un Colloquium organizzato dalla International Astronomical Union (IAU Colloquium 112) dalla Commission Internationale de l'Eclairage, dal *Committee on Space Research* (COSPAR) e dall'*Union Radio Scientifique Internationale* (URSI) per discutere su *inquinamento luminoso, interferenze radio e detriti spaziali*. Questo convegno è tuttora una pietra miliare nella storia della lotta all'inquinamento luminoso. Nello stesso anno, sotto la guida di David Crawford, neoletto presidente della Commissione 50 della International Astronomical Union, naque

un'organizzazione internazionale senza fini di lucro con lo scopo di aiutare a divulgare la conoscenza degli effetti dannosi dell'inquinamento luminoso : la International Dark-Sky Association . Ancora, nello stesso periodo, il Committee on the Challenge of Modern Society della NATO avviò uno studio pilota (PS 189) tra Francia, Olanda, Gran Bretagna e USA, con Canada e Spagna come osservatori, avente come tema *la protezione dei siti osservativi e geofisici*. Tale studio si è concluso alcuni anni dopo con un interessante volume (Kovalewski 1991). Infine, sempre nello stesso anno, il Re di Spagna Juan Carlos firmò la legge spagnola sull'inquinamento luminoso soprannominata *Ley du Ciel*. L'azione di controllo e di guida dell'*Oficina tecnica para la proteccion de la calidad del cielo dell'Instituto de Astrofisica de Canarias* diretta da Javier Diaz Castro sull'illuminazione notturna delle isole canarie ha permesso di sperimentare in quel luogo alcune nuove soluzioni tecniche ottenendo i migliori risultati di limitazione dell'inquinamento luminoso.

Anche l'Italia partecipò a questo fiorire di attività. Nel 1989 l'Unione Astrofili Italiani, l'associazione tecnica degli appassionati di astronomia, visto lo sviluppo dell'astronomia non professionale italiana e la crescente limitazione a tale sviluppo rappresentata dall'inquinamento luminoso, decise di intervenire attivamente sul problema. Il primo passo fu al Convegno Energia e Ambiente tenutosi nel settembre di quell'anno a Cervia.

### **Gli anni '90**

Nel Maggio 1990, proprio mentre in Australia veniva approvato l'Orana Regional Development Plan 1 che protegge il famoso Osservatorio di Siding Spring, la XXXIV Assemblea dei Soci della Società Astronomica Italiana, riunita ad Abano Terme, approvò la creazione di una Commissione di Studio sull'inquinamento luminoso il cui coordinamento venne affidato all'avvocato Mario Di Sora che ne era stato promotore. Tra i suoi scopi c'era quello di preparare il testo di una proposta di legge contro l'inquinamento luminoso da presentare al Parlamento.

La Commissione avviò la prima analisi conoscitiva sullo stato del cielo negli osservatori astronomici professionali italiani e la presentò alla successiva Assemblea dei Soci proponendo di proseguire sulla strada dello sviluppo di una proposta di legge per la salvaguardia del cielo notturno. Nel frattempo, il Consiglio Direttivo dell'Unione Astrofili Italiani (UAI), sotto la presidenza di Giancarlo Favero, aveva deciso di costituire una Commissione

per l'Inquinamento Luminoso, il cui coordinamento venne affidato all'autore di questo libro che per primo l'aveva proposta. L'attività della Commissione per l'Inquinamento Luminoso UAI si indirizzò subito in alcune direzioni ben definite e complementari all'attività della Commissione della Società Astronomica Italiana. Innanzitutto, rendere consapevoli del problema gli astrofili, dare loro una competenza di base così da permettere loro di divulgare la conoscenza del problema al grande pubblico grazie alla loro capillare diffusione nel territorio. Poi agire direttamente nei confronti del grande pubblico, anche con la collaborazione del Coordinamento degli Osservatori Popolari Italiani (COAPI). La Commissione UAI presentò ai convegni delle industrie elettrotecniche e degli installatori pressanti inviti a porre attenzione al problema e, al Convegno della Sezione Europea della International Amateurs Astronomers Union, invitò tutte le associazioni europee a coordinarsi nella lotta contro l'inquinamento luminoso.

Mentre in Gran Bretagna la *Campaign for Dark Skies*, che la British Astronomical Association (BAA) aveva fondato nel 1991, iniziava una consistente serie di attività e di contatti nonché la pubblicazione di una apposita Newsletter, un'importante serie di avvenimenti segnava, nel 1992, il corso della lotta all'inquinamento luminoso nel nostro paese e all'estero. La Commissione per lo studio dell'inquinamento luminoso della Società Astronomica Italiana giunse al termine del faticoso lavoro di preparazione della proposta di legge per la limitazione dell'inquinamento luminoso e per la protezione degli osservatori astronomici italiani professionali e non professionali. In un fondamentale convegno Mario Di Sora riunì a Guercino, per discuterne la bozza, i membri della Commissione, i rappresentanti degli Osservatori Astronomici professionali e il coordinatore della Commissione per l'inquinamento luminoso dell'Unione Astrofili Italiani. Pochi mesi dopo la proposta di legge intitolata "Misure urgenti in tema di risparmio energetico da uso di illuminazione esterna e di lotta all'inquinamento luminoso" era pronta e l'Assemblea dei Soci della Società Astronomica Italiana la approvò. Essa venne presentata al parlamento e con un'intensa serie di contatti la Commissione SAIt le guadagnò appoggio presso numerosi parlamentari di diversi partiti. Intanto per favorire la diffusione della conoscenza del problema tra la gente, la Commissione per l'Inquinamento Luminoso della Unione Astrofili Italiani diffuse un questionario intitolato *Com'è il cielo della tua città?* e iniziò a raccogliere segnalazioni, fatte da cittadini, di impianti di illuminazione esterna notturna particolarmente inquinanti o di elevato disturbo con *Schede di Segnalazione*

allo scopo preparate. Inoltre avviò anche in Italia il programma di ricerca visuale e fotografico sulla brillantezza del cielo denominato SKY WATCH di cui abbiamo già parlato. Infine raccolse una serie di raccomandazioni per gli installatori e progettisti di impianti in una *Guida alla progettazione di impianti di illuminazione a basso livello di inquinamento luminoso*.

Nel giugno dello stesso anno, a Parigi, l'UNESCO, l'International Astronomical Union e il Consiglio delle Unioni Scientifiche Internazionali (ICSU), patrocinarono un importante Convegno dal titolo "Adverse Environmental Impacts on Astronomy". Lo scopo del convegno, svoltosi nella sede dell'UNESCO, era di rendere coscienti il pubblico e le autorità di quanto l'Astronomia sia sensibile agli effetti dell'ambiente e di come l'intensità con cui l'inquinamento ambientale crea problemi all'Astronomia stia crescendo in modo allarmante. I partecipanti al convegno chiesero all'UNESCO e all'ICSU di *usare tutti i mezzi a loro disposizione* per combattere il disturbo prodotto dall'ambiente all'Astronomia e che l'UNESCO premesse sugli stati membri affinché approvassero protezioni legali ai loro Osservatori Astronomici nello sforzo di preservare le condizioni di osservazione. Il Direttore dell'UNESCO riportò tale richiesta direttamente all'assemblea dell'ONU. In tale occasione l'UAI e la BAA si trovarono d'accordo sulla necessità di creare un comitato europeo per preparare una petizione alla CEE per chiedere una direttiva comunitaria sull'argomento.

Sempre nello stesso anno, la Biroma Editore pubblicò in Italia il primo libretto sull'inquinamento luminoso (Cinzano 1992) che affrontava in modo organico e sintetico il problema.

Alla fine del 1992, vista la necessità di coordinare sia la strategia nei confronti dei mezzi di informazione per supportare la proposta di legge, che i rapporti con la componente illuminotecnica italiana e con gli enti sovranazionali ed esteri, venne creata una *Commissione Bilaterale* tra le due Commissioni della Società Astronomica Italiana e dell'Unione Astrofili Italiani che rimase attiva fino al 1994. Il suo scopo era quello di permettere interscambio di idee e programmi, nonché l'elaborazione di documenti comuni. La commissione bilaterale si riunì per la prima volta nel novembre 1992 e preparò nei mesi successivi un documento intitolato *Raccomandazioni per la progettazione di impianti di illuminazione esterna notturna*. Il 18 Settembre 1993, grazie alla collaborazione tra le due Commissioni della Società Astronomica Italiana e dell'Unione Astrofili Italiani, il Coordinamento degli Osservatori popolari italiani (COAPI), l'associazione amici dei planetari e l'Unione

Astrofili Bresciani, si svolse la prima edizione della *Giornata sul problema dell'inquinamento luminoso* che è stata poi ripetuta nell'autunno di ogni anno.

Gli ultimi anni hanno visto ampliarsi sempre di più il consenso e l'appoggio da tutto l'arco politico alla proposta di legge "Misure urgenti in tema di risparmio energetico da uso di illuminazione esterna e di lotta all'inquinamento luminoso", presentata nelle ultime tre legislature alla Camera dei Deputati (atto Camera n.1269 della XI legislatura) e al Senato della Repubblica (atto Senato n. 511 della XII legislatura e atto Senato n.751 della XIII legislatura). I provvedimenti raccolti nella proposta di legge sono stati in gran parte ripresi in altri progetti di legge, anche in ambito regionale (ad es. il progetto di legge regione Veneto no.85). Alcuni di essi hanno ispirato alcuni provvedimenti e regolamenti comunali (ad es. il regolamento dei comuni di Firenze e di Frosinone). Inoltre, per favorire quei comuni desiderosi di migliorare la qualità della loro illuminazione, Mario Di Sora ha preparato una bozza di regolamento comunale in accordo con la proposta di legge. Essa è stata presentata nel corso di un importante convegno organizzato dall'Università di Padova e dall'Osservatorio Astronomico di Padova (Asiago, 5-6/10/1995) per discutere il tema *Inquinamento luminoso: misure e possibilità di intervento* tra astronomi, architetti e ingegneri dell'illuminazione con la presenza di D. Crawford e J. Diaz Castro. Questo convegno è stato interessante non solo perché è stato fatto il punto sulle tecniche disponibili per ottenere una illuminazione di elevata qualità con il minimo inquinamento luminoso e sulle relative leggi e normative in preparazione, ma anche perché la prima giornata è stata dedicata ad un workshop scientifico, il primo in Italia, su *Monitoraggio e misura dell'inquinamento luminoso* nel quale sono stati presentati e discussi i risultati di misure ottenute da alcuni gruppi di ricerca nel nostro paese e all'estero.

Negli ultimi anni è cresciuto anche l'interesse per l'aspetto naturalistico e turistico del cielo notturno. In alcuni parchi naturali (es. il Conero) sono state avviate delle iniziative soprannominate "i parchi delle stelle" per consentire ai visitatori di godere la vista del cielo notturno. I parchi naturali infatti, in particolare quelli di grandi dimensioni, sono tra i pochi luoghi da cui è ancora possibile vedere un cielo notturno pieno di stelle. In alcuni comuni (es. Feltre, Sospirolo, Riposto) sono state svolte delle serate di osservazione pubblica del cielo con spegnimento dell'illuminazione. Talora è stato tentato un abbinamento tra visione del cielo e concerto musicale o recitazio-

ne di poesie (es. Osservatorio Serafino Zani, Lumezzane) Queste serate che hanno un analogo nelle "Night of the stars" organizzate in molti paesi (es. Australia, Belgio, Gran Bretagna, Giappone, Olanda, Spagna e USA) hanno riscosso un grande successo. L'impatto che ha sulla gente la possibilità di vedere il cielo è cresciuto a tal punto che una ditta di materiale illuminotecnico ha utilizzato nella sua campagna pubblicitaria sui maggiori quotidiani (es. La Repubblica) slogan del tipo "Chi ha rubato la Via Lattea?", "Per chi avrà la fortuna di vedere cadere una stella."

Recentemente in ambito UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione) è stato avviato lo studio di una norma tecnica sull'inquinamento luminoso cui dovranno attenersi gli impiantisti nell'allestimento degli impianti.

## 1.4 Le risoluzioni dell'International Astronomical Union

Raccogliamo qui il testo delle tre risoluzioni adottate dalla Assemblea Generale dell'International Astronomical Union (IAU).

### La risoluzione XVI/9

Risoluzione No.9 della XVI Assemblea Generale IAU (1976):

La IAU nota con allarme il livello crescente di interferenza con le osservazioni astronomiche che risulta dall'illuminazione artificiale del cielo notturno, le emissioni radio, l'inquinamento atmosferico e il transito di aerei sopra i siti astronomici.

La IAU perciò richiede urgentemente che le autorità civili responsabili intraprendano delle azioni per preservare gli osservatori esistenti e in progetto da tali interferenze. A questo fine la IAU fornirà, attraverso la Commissione 50, informazioni sui livelli di interferenza accettabili e sui possibili metodi di limitazione.

### La risoluzione XIX/B6

Risoluzione B6 "La protezione dei siti osservativi" della XIX Assemblea Generale IAU (1985):

La IAU riafferma l'importanza delle risoluzioni adottate dalle precedenti Assemblee Generali, collegate alla protezione dei siti degli osservatori e delle tecniche osservative ...(*omissis*)... e richiede che gli astronomi facciano pressione sulle autorità civili perché facciano ogni possibile sforzo per preservare la qualità delle condizioni di osservazione nei siti eccellenti rimasti su questo pianeta.

### **La risoluzione XX/A2**

Risoluzione A2 "Adverse environmental impact on Astronomy" della XX Assemblea Generale IAU (1988):

La XX Assemblea generale dell'IAU,

**OSSERVANDO CON GRAVE PREOCCUPAZIONE**

il crescente peso dell'inquinamento luminoso, delle interferenze radio, dei detriti spaziali e di altri fattori ambientali che colpiscono le condizioni di osservazione da terra e dallo spazio;

**RIAFFERMA**

l'importanza delle risoluzioni adottate dalle precedenti Assemblee generali ...(*omissis*);

**ESORTA DECISAMENTE**

a) tutti gli astronomi a richiedere alle autorità nei loro paesi di sviluppare soluzioni per preservare la qualità delle condizioni di osservazione,

b) tutte le organizzazioni nazionali a portare questi problemi alla conoscenza delle organizzazioni aderenti, delle agenzie spaziali e altro, nelle loro nazioni;

**CONSIDERA CON PARTICOLARE APPREZZAMENTO**

quelle agenzie, comunità, organizzazioni e singoli che sono diventati coscienti del problema e hanno iniziato a portare il loro aiuto;

**E RICHIEDE**

che, attraverso il Consiglio Internazionale delle Unioni Scientifiche (ICSU), il Comitato scientifico per i problemi dell'ambiente (SCOPE) studi la natura e l'ampiezza del problema e informi l'IAU dei suoi risultati.

### Breve Cronologia della lotta all'Inquinamento Luminoso.

- 1866 L'astronomo e divulgatore francese Amedee Guillemin si lamenta dell'offuscamento delle stelle prodotto dai lampioni stradali.
- 1959 Flagstaff (USA) emette la prima ordinanza per il controllo dell'illuminazione esterna.
- 1964 Il Comune di Asiago (Italia) emette un'ordinanza per proteggere l'Osservatorio.
- 1972 Tucson ed altre città americane emettono le celebri ordinanze contro la dispersione di luce.
- 1973 Un gruppo di astronomi della specola vaticana pubblica il primo studio della brillantezza del cielo in Italia.
- 1973 Walker pubblica il suo celebre studio.
- 1973 L'International Astronomical Union crea la Commissione 50 (The protection of Existing and Potential Observatory Sites).
- 1974 La Royal Astronomical Society of Canada inizia il suo programma di studio e di attività contro l'inquinamento luminoso.
- 1976 La Assemblea Generale della International Astronomical Union (IAU) dopo la pubblicazione del rapporto della Commissione 50 adotta la prima risoluzione contro l'Inquinamento Luminoso.
- 1978 La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) prende posizione sul problema e inizia la collaborazione con l'IAU.
- 1979 L'IAU fissa con una serie di raccomandazioni i parametri massimi per l'Inquinamento Luminoso e adotta una seconda risoluzione.
- 1980 IAU e CIE pubblicano i primi suggerimenti per minimizzare la brillantezza del cielo nei pressi degli Osservatori Astronomici.
- 1984 L'Accademia Francese delle scienze prepara un rapporto sul problema in Francia.
- 1986 L'Agenzia di protezione ambientale giapponese promuove la Campagna Osservativa chiamata SKY WATCH.
- 1988 La XX Assemblea Generale della IAU adotta una più pressante risoluzione.
- 1988 Si riuniscono a Washington 120 studiosi per il Colloquium 112 della IAU "Light Pollution, Radio Interference and Space Debris".
- 1988 Nasce negli USA la International Dark-Sky Association (IDA) con lo scopo di salvaguardare il cielo notturno.
- 1988 Il re di Spagna approva la LEY DU CIEL.
- 1989 L'Unione Astrofili Italiani (UAI) inizia il suo impegno nel campo dell'inquinamento luminoso.
- 1990 L'Australia approva l'Orana Regional Development Plan 1 con cui protegge l'Osservatorio di Siding Spring.



- 1990 La British Astronomical Association (BAA) fa partire la "Campaign for dark skies".
- 1990 La Società Astronomica Italiana (SAIt) crea la Commissione per lo Studio dell'Inquinamento Luminoso.
- 1990 La Unione Astrofili Italiani (UAI) crea la Commissione per l'Inquinamento Luminoso.
- 1991 Esce il rapporto dello Studio Pilota 189 della NATO sulla "Protezione dei siti Astronomici e Geofisici".
- 1992 I Rappresentanti degli Osservatori Astronomici e dell'UAI discutono a Guercino la proposta di legge della Commissione per lo studio dell'Inquinamento Luminoso della SAIt che viene presentata in parlamento.
- 1992 L'UAI raccoglie venti raccomandazioni nella "Guida alla progettazione di impianti di illuminazione esterna a basso livello di Inquinamento Luminoso".
- 1992 IAU, UNESCO e ICSU patrocinano a Parigi il Convegno "Adverse Environmental Impacts on Astronomy".
- 1992 UAI e BAA propongono la creazione di un Comitato Europeo per ottenere una direttiva dalla CEE che limiti l'Inquinamento Luminoso.
- 1992 Parte anche in Italia, sulle pagine de L'Astronomia, la campagna osservativa SKY WATCH chiamata "Salviamo il cielo".
- 1992 SAIt e UAI istituiscono la Commissione Bilaterale sull'Inquinamento Luminoso.
- 1993 Le Commissioni SAIt e UAI preparano le Raccomandazioni per la progettazione di impianti di illuminazione esterna notturna.
- 1993 Il 3 luglio la BAA organizza a Reading (UK) l'"European Colloquium on light pollution".
- 1993 Il 18 Settembre si svolge la prima Giornata sul problema dell'inquinamento luminoso
- 1994 Il 20 Agosto si svolge a L'Aia (Olanda) il convegno IAU/CIE associato all'Assemblea Generale dell'IAU "Control of light pollution - measurements, standards and practice".
- 1995 Il 5 e 6 Settembre si svolge ad Asiago il convegno "Inquinamento luminoso: misure e possibilità di intervento", organizzato dall'Università di Padova e dall'Osservatorio Astronomico di Padova-Asiago.

### **Dieci ottime ragioni per evitare l'inquinamento luminoso.**

Le ragioni per evitare l'inquinamento luminoso sono numerose e solide. Abbiamo raccolto qui, in un breve elenco, alcune ragioni che ci sembrano sufficienti, da sole, a richiedere un generale impegno per la riduzione dell'inquinamento luminoso.

1. Perdita di una via di accesso facile, diretta e affascinante alla cultura scientifica.
2. Perdita progressiva di elementi culturali nella popolazione.
3. Vanificazione dell'attività di insegnanti, di planetari, di osservatori pubblici e di tutti coloro che si impegnano nella cultura e nella divulgazione nel settore dell'Astronomia.
4. Limitazione alla ricerca scientifica amatoriale italiana, attualmente riconosciuta di elevato livello nell'ambiente scientifico internazionale.
5. Perdita per molti giovani della possibilità di trascorrere il tempo libero con un hobby educativo che raccoglie fra essi molto interesse e che svolgono con passione e impegno.
6. Limitazione delle possibilità di ricerca scientifica professionale eseguibile con i telescopi situati in Italia e conseguente diminuzione del livello qualitativo della ricerca scientifica nazionale.
7. Accorciamento della vita prevista per i telescopi situati in Italia e riduzione della loro "apertura equivalente" (v. sez. 3.3.5).
8. Perdita di un panorama, il cielo notturno, che invece per ragioni sia ambientali che turistiche andrebbe tutelato.
9. Danno biologico all'ecosistema dimostrato da numerosi studi sugli effetti della luce dispersa al di fuori dalle aree da illuminare.
10. Consumo ingiustificato di energia e conseguente spreco di denaro, in genere denaro pubblico, da parte degli enti che gestiscono gli impianti che disperdono luce.

## Capitolo 2

# COME SI PRODUCE L'INQUINAMENTO LUMINOSO

### 2.1 L'illuminazione notturna

Per comprendere come la luce possa venire dispersa e produrre l'inquinamento luminoso occorre per prima cosa vedere quale sia il processo dell'illuminazione esterna notturna e quali siano le necessità che condizionano progettisti e installatori. Faremo qui solo qualche cenno rimandando il lettore interessato ad un approfondimento ai testi specifici di illuminotecnica<sup>1</sup>.

#### 2.1.1 Illuminazione stradale

Lo scopo dell'illuminazione stradale è sostanzialmente quello di permettere alle strade di avere di notte sicurezza, scorrevolezza e capacità di traffico

---

<sup>1</sup>Per un approfondimento di illuminotecnica consigliamo la lettura del Quaderno dell'Associazione Italiana di Illuminazione *Corso base di illuminotecnica per esterni* (Maggio 1996), delle *Raccomandazioni per l'illuminazione pubblica* della stessa associazione (Ottobre 1993) e dei testi di M. Bonomo *Illuminazione delle strade e delle gallerie* (AIDI 1986), G. Forcolini *Illuminazione di esterni* (Hoepli 1993) e P. Palladino *Illuminazione architettonica in esterno* (Tecniche Nuove 1993).

Figura 2.1: Il processo della visione notturna.

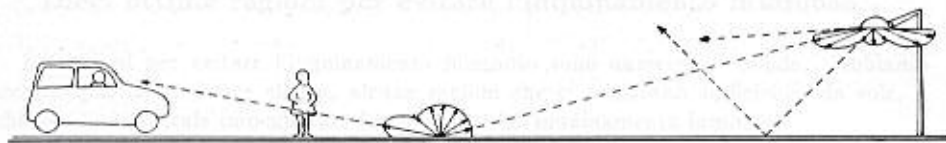
paragonabili a quelle che esse hanno nelle ore diurne.

L'occhio distingue un oggetto dallo sfondo solo se c'è un sufficiente contrasto tra la *luminanza*<sup>2</sup> dell'oggetto e quella dello sfondo. In genere nell'illuminazione stradale si preferisce realizzare una elevata luminanza della pavimentazione stradale, sfruttando le sue caratteristiche di riflessione e diffusione, e far distinguere l'oggetto come sagoma scura su sfondo chiaro che non, al contrario, illuminare l'oggetto e lasciare lo sfondo scuro. Infatti, per ottenere un'elevata luminanza dell'oggetto nella direzione in cui il traffico sopraggiunge occorrerebbero fasci di luce in direzione quasi orizzontale, come nel caso dei fari di automobile, provocando abbagliamento al traffico proveniente nel senso opposto. Inoltre le sue caratteristiche di riflessione potrebbero essere scarse e non garantire una sufficiente visibilità. La diffusione e la riflessione della luce operate dalla superficie stradale consentono la visibilità notturna facendo risaltare eventuali ostacoli come sagome scure sulla pavimentazione illuminata ma sono un'inevitabile sorgente di illuminamento<sup>3</sup> del cielo. Come vedremo, alla luce inviata in cielo dalla superficie illuminata si aggiunge la luce dispersa nel cielo direttamente dalle sorgenti. La figura 2.1 illustra questo problema.

---

<sup>2</sup>Per la definizione di luminanza o brillantezza si veda la sezione 3.1.

<sup>3</sup>Spesso accresciuto dall'uso, in caso di ripavimentazione della strada, di un tipo di asfalto avente caratteristiche di riflessione diverse da quelle previste nel progetto originale dell'impianto di illuminazione.





Le caratteristiche fondamentali di un impianto di illuminazione stradale, prescindendo da quella di disperdere poca luce, si possono riassumere così:

### **1) Luminanza adeguata**

La luminanza della pavimentazione deve essere adeguata al tipo di traffico in modo da garantire un buon contrasto. Studi statistici sul comportamento degli automobilisti hanno portato gli enti normativi a raccomandare ai costruttori di impianti di illuminazione pubblica che lo sfondo stradale di notte abbia i livelli di intensità luminosa indicati nella tabelle della sezione 2.2.1. Si veda la discussione in quella sezione.

### **2) Uniformità della luminanza**

Le caratteristiche del processo di diffusione e riflessione della luce sulla pavimentazione stradale fanno sì che chi osserva veda sulla strada una serie di macchie chiare situate in corrispondenza della posizione che avrebbe l'immagine della lampada se vi fosse riflessione pura, come quando la strada è bagnata. I punti luce vanno quindi disposti in modo che le macchie risultino contigue cosicché il necessario contrasto sia garantito in ogni punto della superficie stradale.

### **3) Limitazione dell'abbagliamento**

L'osservatore, quale ad esempio l'automobilista, riceve la luce proveniente dal fondo stradale con angoli molto piccoli rispetto al piano stradale. La semplice legge della riflessione indica perciò che per sfruttare nel modo migliore quel comportamento misto di riflessione e diffusione che ha la superficie stradale, occorre che i raggi che incidono su di essa abbiano angoli molto grandi rispetto la verticale, il massimo avendosi quando l'angolo di incidenza è uguale a quello sotto cui l'osservatore riceve tale luce. Nella ricerca di questo obiettivo, però, bisogna che l'armatura della lampada schermi bruscamente tutta la luce al di sopra di un certo angolo limite rispetto la verticale, altrimenti questa luce arriva negli occhi dell'automobilista che verrà abbagliato. Occorrerà cercare un compromesso tra queste due opposte esigenze.

L'abbagliamento si distingue<sup>4</sup> in *fisiologico* e *psicologico*. Il primo si quantifica come rapporto percentuale tra la differenza di luminosità della sorgente di abbagliamento e dello sfondo rispetto la luminosità di quest'ultimo. Il secondo, che è meno grave perché si limita a produrre un affaticamento della vista, si quantifica attraverso l'indice  $G$  che va da 1 per un abbagliamento non tollerabile a 9 per un abbagliamento non avvertibile. La Commission Internationale de l'Eclairage (CIE 1972, 1976) nelle sue raccomandazioni richiede che  $(\Delta L/L) \leq 0.05$  ed  $G \geq 7$  nelle autostrade,  $(\Delta L/L) \leq 0.10$  ed  $G \geq 6$  nelle strade di scorrimento negli abitati e  $(\Delta L/L) \leq 0.20$  ed  $G \geq 5$  in quelle residenziali e commerciali. Purtroppo i progettisti, preoccupati solo di limitare l'abbagliamento per l'automobilista, si limitano, e nemmeno sempre, a mantenere basso il precedente rapporto tra luminosità del punto luminoso visto dall'automobilista e livello dell'illuminazione della superficie stradale, senza curarsi del valore assoluto della quantità di luce che l'apparecchio invia fuori dalla zona di suolo stradale che deve illuminare. È questo valore assoluto che produce l'inquinamento ottico e l'inquinamento luminoso.

#### 4) Limitazione dell'inquinamento luminoso

Vedremo nella sezione 2.2.1 quali caratteristiche devono avere gli apparecchi di illuminazione e gli impianti stradali per evitare l'inquinamento luminoso.

### 2.1.2 Illuminazione di impianti sportivi

Dal Censimento Nazionale degli Impianti Sportivi in Italia effettuato dal CONI in collaborazione con l'Istituto Nazionale di Statistica ed il Credito Sportivo risulta che in Italia ci sono circa 119.000 impianti sportivi di vario genere, per il 61% situati al nord. Più della metà è illuminata artificialmente ma solo il 28% è al chiuso (Antonelli 1986). L'illuminazione di questi impianti ha un fine sociale importante in quanto ne consente un maggiore periodo di utilizzazione e nessuno può ragionevolmente avanzare dubbi sull'importanza che l'educazione sportiva ha nello sviluppo della personalità dell'individuo. Si calcola che un impianto situato a Milano abbia se illuminato una percentuale di utilizzazione del 40% in più.

---

<sup>4</sup>Nella norma UNI-10439 sono state definite due quantità, l'abbagliamento debilitante e l'abbagliamento molesto che esprimono rispettivamente gli effetti fisiologici e psicologici.



L'illuminazione degli impianti sportivi è vincolata da precise esigenze da cui è impossibile prescindere. Queste purtroppo lasciano poco spazio a modifiche nei progetti che possano portare ad un minore livello di inquinamento luminoso, a differenza di quanto accade per gli altri impianti di illuminazione esterna quale quella stradale che sono da questo punto di vista facilmente migliorabili. Quindi l'illuminazione degli impianti sportivi se non opportunamente e accuratamente progettata può costituire una notevole sorgente di inquinamento luminoso ed ottico.

Vediamo come le principali esigenze si riflettano sull'inquinamento luminoso tenendo presente che ogni sport dovrebbe essere esaminato singolarmente.

Possiamo supporre che atleti e giocatori desiderino principalmente vincere la gara e dare spettacolo. Per ottenere questo richiedono all'impianto di illuminazione una ottima prestazione visiva, cioè che esso permetta loro di vederci bene e di avere percezioni in tempi brevi. Hanno bisogno inoltre del migliore comfort visivo possibile. Questo significa che occorre un livello di illuminamento piuttosto alto e di conseguenza è elevata la quantità di luce diffusa in cielo dal terreno. La velocità di percezione cresce proporzionalmente all'illuminamento e raggiunge il regime massimo con qualche centinaio di lux. Il livello di illuminamento necessario dipende quindi dal tipo di sport. Infatti per vedere bene oggetti in movimento veloce o piccoli, come la pallina nelle partite di tennis agonistico che con un diametro di soli 6.5 cm raggiunge anche i 150 km all'ora, occorre un livello <sup>5</sup> maggiore che per oggetti più grandi o in movimento più lento. Stadi con grandi quantità di spettatori ove le tribune più esterne hanno una notevole distanza dal campo richiedono una maggior quantità di luce perché al crescere delle distanze gli oggetti osservati diminuiscono le dimensioni e quindi diventa più difficile individuarli per contrasto rispetto allo sfondo da parte di giudici, arbitri e spettatori. Gli sponsor inoltre vogliono ben illuminati i messaggi pubblicitari ai lati del campo e le autorità di pubblica sicurezza desiderano ben illuminate anche le aree destinate al pubblico. Nei grandi stadi il livello deve consentire di poter usare le telecamere di controllo.

Prestazione e confort visivi impongono inoltre che le lampade abbiano una buona resa cromatica così da consentire una buona riproduzione dei colori

---

<sup>5</sup>I livelli consigliati dal CONI per i vari sport si possono trovare nella normativa UNI 9316 (v. anche Spaziosport del 4 dicembre 1989).

(per esempio i giocatori devono poter distinguere facilmente le magliette degli avversari). Quindi non si potranno usare lampade monocromatiche quali quelle al sodio a bassa pressione ma si usano invece solitamente lampade del tipo agli alogenuri metallici che permettono di ottenere una distribuzione più omogenea della luce emessa alle varie lunghezze d'onda anche se a spese di una minore efficienza e di una minore durata. Le lampade al sodio ad alta pressione talvolta accompagnano le precedenti ma solo al fine di produrre una luce totale di tonalità più calda. Come vedremo lo spettro di una lampada agli alogenuri metallici è esteso in modo pressoché continuo dal rosso al blu. Quindi l'illuminazione con lampade di questo tipo è ottima dal punto di vista sportivo ma deve avere la minima dispersione possibile pena un pesante disturbo nell'osservazione del cielo che non può essere eliminato con alcun filtro.

Il tipo di sport pone pesanti condizioni anche alla disposizione dei corpi illuminanti (proiettori e lampade). Ad esempio i giocatori di calcio abbisognano di un'illuminazione laterale (detta verticale) per vedere la palla dai lati e da sotto: un'illuminazione dall'alto (detta orizzontale) non permetterebbe loro di vedere la palla se non al suolo. Inoltre è necessario sia garantita sicurezza nell'uso, la quale pone ulteriori vincoli alla disposizione dei corpi illuminanti che devono essere situati fuori dalla zona di gioco per evitare urti e rotture. Perciò negli stadi l'illuminazione proviene in genere da torri-faro non troppo alte situate ai lati del campo ove sono installati, in genere, da 6 a 24 proiettori che per illuminare il campo devono avere inclinazioni rispetto la verticale dai  $50^\circ$  ai  $68^\circ$  (valore massimo prescritto per evitare l'abbagliamento ai giocatori). Se i proiettori, pur essendo del tipo a fascio stretto, irradiano una quantità di luce tutt'altro che piccola anche oltre i  $30-40^\circ$  dal proprio asse, come spesso accade, è chiaro che le torri-faro finiscono per illuminare direttamente anche sopra l'orizzonte disturbando gli automobilisti e inquinando il cielo.

Le riprese televisive necessitano di una prestazione visiva di qualità. Questo significa livelli particolarmente alti di illuminazione soprattutto nel caso di riprese tv ad alta definizione che richiedono anche 2500 lx di illuminamento al suolo, in confronto ai 100 lx che vengono considerati generalmente sufficienti per allenamento e ai 12 lx che la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) raccomanda nelle strade a media intensità di traffico. Risulta che gli stadi italiani costruiti in occasione dei Campionati Mondiali di calcio del 1990, dove erano previste riprese in alta definizione, erano i più illumina-

ti del nostro pianeta con potenze utilizzate che vanno da 920 kW (kilowatt) (Meazza-Milano) a 1270 kW (Firenze) per illuminamenti al suolo da 1500 lx a 2800 lx contro i 25-300 kW degli usuali campi di calcio che sono illuminati con 100-1000 lx. Per fortuna alcuni di essi quali il Meazza di Milano sono stati progettati in modo moderno inserendo l'illuminazione nella copertura laterale dello stadio, cosa che dovrebbe limitare la dispersione di luce.

In questo quadro così complesso e pesantemente condizionato esistono alcuni spazi per giungere ad una diminuzione dell'inquinamento luminoso. Occorre ricordare innanzitutto che le società sportive sono interessate ad un basso costo dell'impianto e della gestione e quindi hanno comuni interessi nel risparmio energetico e nell'eliminazione della dispersione di luce. Inoltre, gli architetti cercano il migliore impatto visivo possibile ed una tecnologia avanzata. Perciò se da un lato la ricerca dell'effetto può costituire fonte di inquinamento luminoso, dall'altro l'interesse alla ricerca di soluzioni nuove poco inquinanti può costituire per essi motivo di interesse e soddisfazione.

Le possibilità tecniche di limitazione della dispersione di luce si basano sul fatto che si dovrebbe ottenere con la tecnologia quello che oggi si ottiene a suon di watt. Bisognerebbe, in particolare, utilizzare proiettori in grado di evitare l'abbagliamento e l'irraggiamento di luce verso l'alto, quali quelli asimmetrici o quelli a schermo interno. Un utile espediente progettuale consiste nell'offrire la possibilità di scalare il livello di illuminazione nei casi di alta competizione, competizione ordinaria e allenamento. Per esempio all'Olympic Coliseum di Calgary sono previste 12 differenti combinazioni che vanno dai 160 lux per l'allenamento ai 1400 lux per le riprese TV.

Gli installatori spesso sono interessati alla facilità di installazione e al rispetto della normativa vigente la quale quindi dovrebbe tenere conto anche di questo problema. In Italia il compito di elaborare e pubblicare norme in questo campo è affidato al CNR (Commissione per l'illuminazione) che si avvale per delega dell'Ente Nazionale Italiano di Unificazione UNI (Commissione impianti ed attrezzi sportivi e ricreativi) il quale collabora nella preparazione delle norme con il CONI tramite una Commissione Sport UNI/CONI. La principale norma in questo settore è la UNI 9316 (Impianti sportivi-Illuminazioni per riprese a colori-Prescrizioni) in cui è espressamente prescritto che "L'inquinamento luminoso prodotto dall'impianto di illuminazione all'esterno della struttura sportiva, non deve provocare disturbo all'ambiente e non deve compromettere la sicurezza della circolazione stradale".

### 2.1.3 Illuminazione di edifici e di monumenti

Valorizzare i beni artistici monumentali, evidenziare i particolari architettonici, incrementare il livello di sicurezza degli edifici, fare segnalazioni di tipo pubblicitario sono alcuni degli scopi che l'illuminazione architettonica esterna si prefigge. L'ingegnere dell'illuminazione deve conciliare la valorizzazione dell'oggetto illuminato, fatta utilizzando un linguaggio scenografico, con la fedeltà della riproduzione dell'oggetto secondo le sue caratteristiche storiche e artistiche. L'installazione dell'impianto non si può limitare ad un mero problema tecnico ma deve pagare un tributo alla componente architettonico artistica. Diventano quindi importanti i giochi di luce, i contrasti di luce e di colore, le ombre. Talvolta però il desiderio di ottenere un certo risultato architettonico-artistico fa prevalere questa componente e trascurare l'altro aspetto, quello illuminotecnico, che spinge ad un'illuminazione razionale ed efficiente, senza sprechi di luce e di energia elettrica, e senza eccessi che travalichino l'effettiva necessità dell'oggetto da illuminare. È già accaduto che monumenti illuminati in modo poco parsimonioso e poco commisurato alla necessità finissero per restare spenti a causa, per esempio, del costo troppo elevato di gestione.

Sono solo tre le regole semplici che permettono di limitare l'inquinamento luminoso prodotto dall'illuminazione di edifici e monumenti. Innanzitutto bisogna fare attenzione che non vi sia luce che vada oltre ai bordi della superficie da illuminare, installando gli appositi schermi o usando proiettori a riflettore asimmetrico. Bisogna inoltre porre attenzione alla direzione della luce riemessa dalla superficie illuminata. Per non sprecare luce, il massimo della luce riemessa deve essere rivolto nella direzione ove si troverà l'osservatore. Ad esempio, non si deve illuminare la parete di un edificio dal basso in alto perché così la luce viene riflessa dalla parete in gran parte verso l'alto provocando inquinamento luminoso mentre solo una piccola parte viene diffusa verso il basso ove presumibilmente si trova chi la osserva. Infine non si deve esagerare con i livelli di luminanza.

## 2.2 La dispersione di luce

La dispersione di luce nel cielo da parte di un impianto è dovuta a tre diversi fenomeni. Il primo è l'irraggiamento diretto in cielo dovuto in genere ad armature mal progettate o male installate, il secondo è la diffusione della

luce emessa dalle lampade nel suo percorso fino alla superficie da illuminare ed il terzo è la riflessione e la diffusione da parte delle superfici illuminate. Esamineremo ora i tre fenomeni citati che costituiscono la sorgente della luminosità artificiale del cielo notturno.

Detta  $\epsilon_k$  la frazione di luce dispersa direttamente sopra l'orizzonte dal punto luce  $k$ -esimo,  $\eta_k$  la frazione di luce che subisce diffusione nel percorso fra la lampada e l'area da illuminare e  $j_k$  la frazione di luce riflessa in cielo dall'area illuminata, se  $\Phi_k$  è il flusso totale emesso dal punto luce, la quantità totale di luce emessa in cielo da un impianto è:

$$L = \sum_k \Phi_k [\epsilon_k + (1 - \epsilon_k) \eta_k + (1 - \epsilon_k - (1 - \epsilon_k) \eta_k) j_k] \quad (2.1)$$

che si può scrivere anche:

$$L = \sum_k \Phi_k [\epsilon_k + (1 - \epsilon_k) (\eta_k + (1 - \eta_k) j_k)] \quad (2.2)$$

Nella pratica si può sostituire la precedente sommatoria con la espressione seguente che fa riferimento ai valori medi delle quantità  $\Phi_k, \epsilon_k, \eta_k, j_k$  :

$$L \approx n \bar{\Phi} (\bar{\epsilon} + (1 - \bar{\epsilon}) (\bar{\eta} + (1 - \bar{\eta}) \bar{j})) \quad (2.3)$$

ove  $n$  è il numero di punti luce dell'impianto.

### **La dispersione globale di luce di una città**

Per calcolare la quantità globale di luce dispersa in cielo da una intera città si può utilizzare l'espressione precedente se si conosce quale è la percentuale media di luce dispersa a causa dei tre diversi fenomeni sopraelencati e quale è il flusso totale di luce emesso da tutti i punti luce dell'illuminazione esterna notturna della città. Bisogna tenere presente che la precedente formula fornisce un risultato corretto solo se non ci sono correlazioni tra i parametri. Se, ad esempio molte lampade deboli disperdono una piccola percentuale di luce e poche lampade molto potenti disperdono una percentuale di luce elevata, la precedente espressione sottostima la quantità di luce realmente emessa nel cielo. L'espressione esatta da utilizzare sarebbe infatti la 2.2. Il tipo di lampada, di armatura, di impianto, di superficie illuminata variano da città a città e da impianto a impianto. Tuttavia dato l'elevato numero di punti luce

di una città si può in prima approssimazione supporre che la distribuzione dei vari tipi di impianti, di armature e di lampade sia non molto diversa in media da città a città ma cambi solo la quantità totale di luce erogata. In una zona di territorio ove le caratteristiche di illuminazione possano essere considerate sufficientemente omogenee, si possono considerare  $\bar{c}$ ,  $\bar{j}$  ed  $\bar{\eta}$  in prima approssimazione indipendenti dalla città considerata cosicché il flusso emesso nel cielo dipende solo dalla quantità totale di luce erogata nella città  $\Phi_T = n\bar{\Phi}$ . Essa è determinabile consultando le statistiche oppure eseguendo uno studio in loco. Alcuni autori sviluppando modelli teorici della luminosità del cielo hanno assunto che la quantità totale di luce erogata in una città sia funzione della popolazione. Walker (1977) ha ricavato da numerose fonti il flusso emesso dalla illuminazione stradale di un certo numero di città della California ed ha trovato una buona correlazione con la popolazione della città. Città esclusivamente residenziali risultavano avere una illuminazione inferiore alla media mentre città fortemente industriali risultavano avere un illuminazione superiore alla media. Bertiau e i suoi colleghi (1973) introdussero un fattore moltiplicativo detto *coefficiente di sviluppo urbano* per tenere conto che la quantità di illuminazione è spesso legata al livello di sviluppo economico. Lo studio di Walker e quelli di Garstang (1986, 1989) indicavano in California negli anni '70 una emissione di luce pro capite di circa 1000 lumen per abitante da parte degli impianti di illuminazione esterna notturna, dei quali circa 150 lumen per abitante andavano direttamente in cielo e circa altrettanti vi erano diffusi dalle superfici illuminate.

In Italia un'analisi dell'illuminazione della città di Padova (Roman, 1995) ha permesso di calcolare che il flusso luminoso emesso nella città è di 719 lumens pro capite cui va aggiunto il flusso prodotto dagli impianti non comunali, una frazione difficile da stimare con esattezza ma presumibilmente attorno al 30%. Il flusso totale pro capite a Padova è quindi dell'ordine di quello utilizzato nei modelli di Garstang. Un'analisi dell'illuminazione di un'altra città, Asiago, cittadina montana a vocazione turistica e sede dell'Osservatorio Astrofisico dell'Università di Padova, ha fornito un flusso per abitante leggermente inferiore, circa 600 lumens pro capite. Tuttavia in questo totale non sono inclusi gli impianti dipendenti da enti militari quali la sovrintendenza del locale Ossario ai caduti, forte sorgente di inquinamento luminoso il cui contributo è superiore al 10%. Città molto più illuminate di Padova ed Asiago superano facilmente i 1000 lumen pro capite. In termini di potenza consumata per abitante nelle città in genere si va da 10 a 25 w

pro capite a seconda anche dell'efficienza media dell'illuminazione installata, a sua volta dipendente dalle quantità di lampade dei diversi tipi che compongono il parco lampade. Nel caso di Padova la potenza totale pro capite è di 13.9 w e l'efficienza media è di circa 51.7 lumen/watt.

Per quanto riguarda il flusso disperso nel cielo in Italia, disponiamo delle misure della luminosità del cielo a Catania effettuate nel 1990 dal gruppo del prof. Salvatore Cristaldi della locale Università (Foti, 1991). Tali misure hanno permesso di ricavare che la potenza luminosa totale dispersa nel cielo era di  $1.1 \cdot 10^5$  watt. Riportando questo valore in lumens, con le ipotesi già illustrate nella sezione 3.1.3, e tenendo conto del numero di abitanti della città, si ottiene che il flusso luminoso disperso nel cielo di Catania<sup>6</sup> nel 1990 era di circa 224 lumen pro capite.

### 2.2.1 Emissione diretta di luce sopra l'orizzonte

All'interno di un impianto di illuminazione, le sorgenti della luce, sia quella che correttamente va ad illuminare le aree che devono essere illuminate, sia quella dispersa, in particolare quella che va ad illuminare il cielo, sono i cosiddetti *punti luce* o *centri luminosi*. In un *apparecchio di illuminazione* distingueremo la *lampada*, la vera e propria sorgente di luce dall'*armatura*, cioè quell'insieme del supporto della lampada, del guscio di protezione e del sistema ottico.

L'armatura è composta di un sistema ottico che ha lo scopo di convogliare il flusso di luce della lampada nella direzione richiesta e che è quindi il responsabile della eventuale dispersione di luce, e di una parte meccanica che serve a sorreggere la lampada e la componentistica elettrica ad a proteggerli dagli agenti atmosferici. Il sistema ottico oltre a produrre la richiesta distribuzione spaziale dell'intensità luminosa deve essere strutturata in modo che le sue parti, o la lampada stessa, non raggiungano temperature superiori a quelle che possono sopportare. L'apparecchio deve sottostare a numerosi requisiti (vedi ad es. Norme CIE 34-21/1983, Norme CIE progetto C129/1986) legati alla durata dell'armatura, alla conservazione delle caratteristiche fotometriche nel tempo, alla sicurezza, alla facilità di installazione e manutenzione, e, infine, all'estetica.

---

<sup>6</sup>Dal 1990 l'illuminazione esterna di Catania è stata modificata e migliorata.

### Misure goniometriche

La misura dell'intensità della luce emessa da un apparecchio di illuminazione nelle varie direzioni dello spazio si può fare con un *goniofotometro*. In questo strumento, l'armatura viene alloggiata in un supporto che le permette di ruotare attorno ad un asse verticale mantenendo la sua corretta posizione di funzionamento. Un dispositivo ottico che può ruotare attorno all'armatura in un piano verticale raccoglie la luce emessa e la invia ad un rivelatore. Per ogni angolo dell'armatura attorno all'asse verticale e per ogni angolo del dispositivo ottico attorno all'asse orizzontale, il rivelatore misura l'illuminamento  $E$  che riceve, da cui si calcola l'intensità emessa  $I = Ed^2$ , ove  $d$  è la distanza tra la lampada e il rivelatore. Appositi artifici ottici permettono di porsi in condizioni simili a quelle in cui la distanza tra armature e dispositivo ottico fosse così grande da poter trascurare le dimensioni della armatura rispetto alla distanza  $d$ . In questo modo si può assumere che il rivelatore veda l'apparecchio come "puntiforme".

La rappresentazione delle misure più comune è chiamata *rappresentazione  $C/\gamma$*  ed è illustrata nella figura 2.2. Consideriamo il fascio di piani che hanno come generatrice la verticale passante per la sorgente luminosa. Possiamo individuare ogni piano in base all'angolo  $C$  che esso fa con la parallela all'asse stradale o con un'altra retta del piano orizzontale. Definiamo  $\gamma$  l'angolo tra la retta verticale che passa per la sorgente e la direzione che ci interessa. Possiamo rappresentare l'intensità emessa dalla lampada nelle varie direzioni dello spazio tracciando in una serie di grafici, uno per ogni piano definito da un valore di  $C$ , le curve dell'intensità in funzione dell'angolo  $\gamma$  su quel piano. Queste curve sono chiamate curve fotometriche. Spesso le curve vengono tracciate in una rappresentazione polare. I due piani di maggior interesse per l'illuminazione stradale sono quello con  $C=0$ , parallelo all'asse stradale, e quello  $C=90^\circ$ , perpendicolare all'asse stradale. Come unità di misura dell'intensità per unità di flusso emesso dalla lampada si usano le candele per kilolumen (cd/klm).

Talvolta vengono utilizzati i *Diagrammi isocandela*. In un grafico di ascissa  $C$  e ordinata  $\gamma$  si tracciano le curve isocandela, che sono il luogo delle coppie  $C, \gamma$  ove l'intensità emessa è la stessa.

Per valutare l'effetto prodotto sulla superficie illuminata, si usano i *diagrammi di eguale illuminamento* (isolux) in cui è tracciato il luogo dei punti della superficie ove l'illuminamento è lo stesso in funzione della distanza in



Figura 2.2: Angoli  $C$  e  $\gamma$  nella rappresentazione  $C/\gamma$ .

senso trasversale e longitudinale dal piede della verticale passante per il centro della lampada. Questa distanza di solito si esprime in unità di altezza della lampada.

### Requisiti della distribuzione della luce

La distribuzione di luce di un apparecchio di illuminazione viene ottenuta grazie al sistema ottico. Un *riflettore*, in genere, di alluminio, posto nella parte superiore dell'armatura riflette la luce emessa dalla lampada che esso intercetta. La distribuzione di intensità della luce riflessa nelle varie direzioni è legata alla forma e alle caratteristiche di tale riflettore. Per modificare la distribuzione di intensità di quella parte della luce che, essendo stata emessa dalla lampada verso il basso, non si è riflessa sul riflettore si usa talvolta un *rifratore* posto in corrispondenza dell'apertura inferiore lasciata dal riflettore. Spesso i rifrattori sono costituiti da una coppa di materiale trasparente le cui superfici sono state rese diffondenti. L'applicazione di un rifratore-diffusore di quest'ultimo tipo al posto di una chiusura di protezione costituita da una semplice lastra di vetro a facce piano-parallele fa sì che l'apparecchio disperda direttamente nel cielo una quantità di luce spesso notevole.

Per garantire i requisiti necessari ad un impianto di illuminazione, come

illustrato nel capitolo 2.1, la distribuzione di luce nel piano verticale parallelo all'asse stradale deve presentare il massimo dell'emissione ad un angolo  $\gamma$  piuttosto elevato. In questo caso, il massimo dell'intensità luminosa arriva sulla strada con un angolo di incidenza<sup>7</sup> molto elevato cosicché la strada riemette il massimo dell'intensità nella direzione dell'automobilista. La figura 2.1 a pagina 20 illustra questo punto. La distribuzione deve essere allungata nei due sensi se la strada è a doppio senso di circolazione ma può essere allungata solo in un senso se la strada è a senso unico fisso (si veda l'autostrada Colonia-Bonn). Un'altra ragione per cui è importante che l'apparecchio invii il massimo della luce ad angoli  $\gamma$  piuttosto grandi è che l'apertura angolare del fascio dell'apparecchio condiziona la disposizione dei corpi illuminanti. Infatti la necessità di ottenere un'adeguata uniformità di luminanza impone un ben preciso rapporto tra l'interdistanza dei punti luce e l'altezza dei pali. Poiché il numero di punti luce influenza il costo di costruzione e di manutenzione dell'impianto, il desiderio di diminuire il costo di installazione e di manutenzione porta chi progetta l'impianto alla necessità di diminuire il numero di punti luce utilizzando apparecchi di illuminazione installati a maggior distanza tra loro, e quindi a maggiore altezza e aventi un più ampio angolo di apertura del fascio luminoso.

Una caratteristica fondamentale della distribuzione di luce, necessaria per evitare la dispersione di luce sopra l'orizzonte e l'abbagliamento, è che esista un *angolo limite* oltre il quale l'intensità emessa dal sistema ottico scenda bruscamente a zero. Abbiamo detto infatti che perché la strada invii la massima luce in direzione dell'automobilista occorre che il massimo dell'intensità sia emessa dall'apparecchio ad angoli  $\gamma$  piuttosto grandi. Perciò se oltre un certo angolo l'intensità non diminuisse notevolmente, l'automobilista ne verrebbe fortemente abbagliato. Se poi l'intensità non andasse a zero oltre un angolo di 90 gradi rispetto la verticale, parte della luce andrebbe direttamente nel cielo.

Una caratteristica molto utile della distribuzione di luce dell'ottica di un apparecchio di illuminazione è che il massimo dell'emissione di luce in senso trasversale alla superficie stradale abbia luogo ad un angolo  $\gamma$  piuttosto ampio così da poter illuminare bene ed uniformemente tutta la superficie della strada da un bordo all'altro senza necessità di inclinare l'apparecchio o

---

<sup>7</sup>L'angolo di incidenza è l'angolo tra la direzione di provenienza del flusso incidente e la verticale alla superficie.

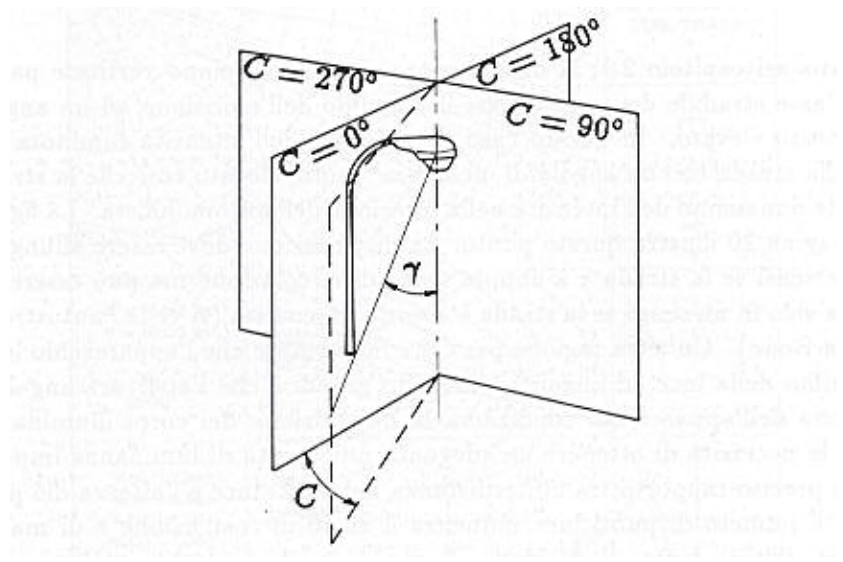
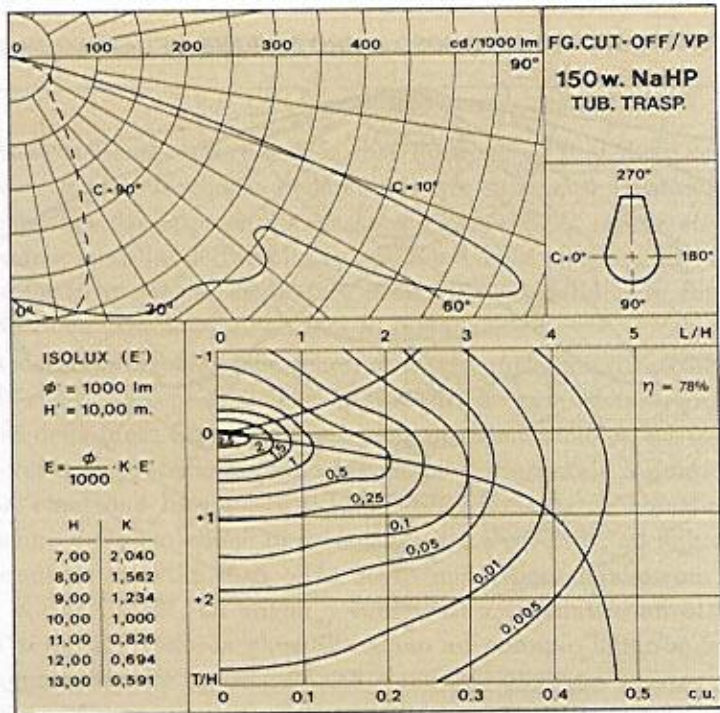




Figura 2.3: Curve fotometriche e diagramma isolux di un apparecchio stradale con vetro di protezione piano (raffigurato in basso). Si noti come in questi apparecchi la massima intensità del fascio in direzione longitudinale esca con un'elevata angolazione e consenta un'elevata interdistanza tra gli apparecchi. Per apparecchi con vetro di protezione piano incassato, come questo, l'elemento principale (assieme al posizionamento della lampada) che determina se essi risultano totalmente schermati, fortemente schermati o meno è l'inclinazione dell'ottica rispetto ad un piano orizzontale dopo l'installazione. Essa perciò dovrebbe essere sempre la più piccola possibile. (Cortesia G.C. Illumination - Alcatel, Sesto Ulteriano (MI))

Figura 2.4: Curve fotometriche di un apparecchio stradale con vetro di protezione piano. La curva per  $C = 90^\circ$  (direzione trasversale alla strada) si riferisce ad un'inclinazione dell'ottica di  $5^\circ$  sul piano orizzontale. In questa configurazione la lampada è stata posizionata in modo che il massimo dell'emissione esca con un angolo  $\gamma$  sufficiente ad illuminare una strada ampia per tutta la sua larghezza senza inclinare ulteriormente l'apparecchio. Anche in questo caso, l'apparecchio risulta totalmente schermato, o meno, a seconda dell'inclinazione dell'ottica, dopo l'installazione, rispetto ad un piano orizzontale e a seconda della posizione della lampada. Perciò è preferibile che gli apparecchi di questo tipo siano installati in modo che il vetro di protezione sia il più orizzontale possibile, sia che siano montati su palo a sbraccio che su palo diritto. (Cortesia Costruzioni Elettriche Schröder, San Gillio (TO))



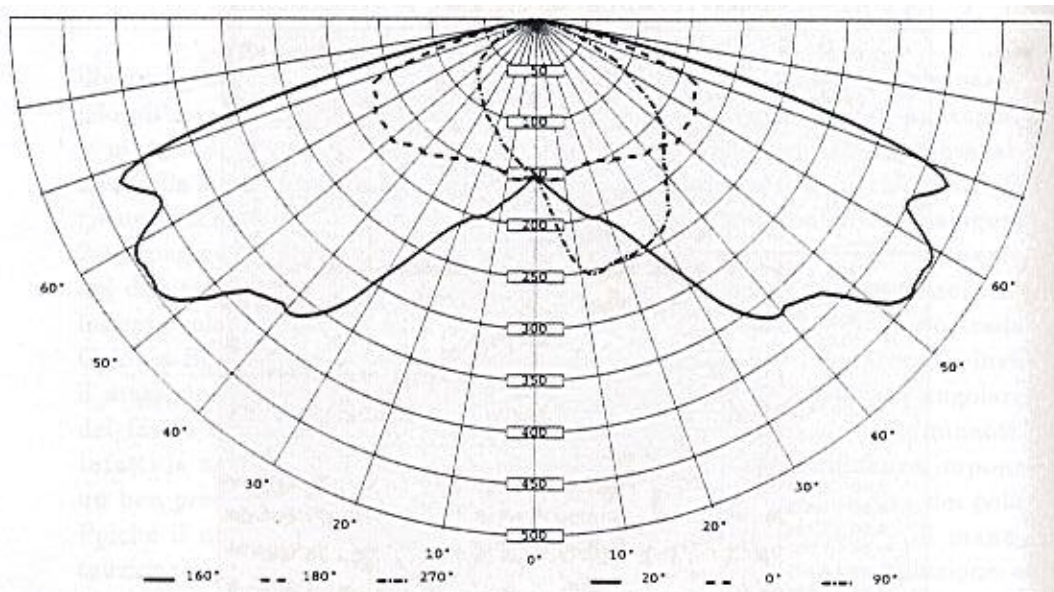
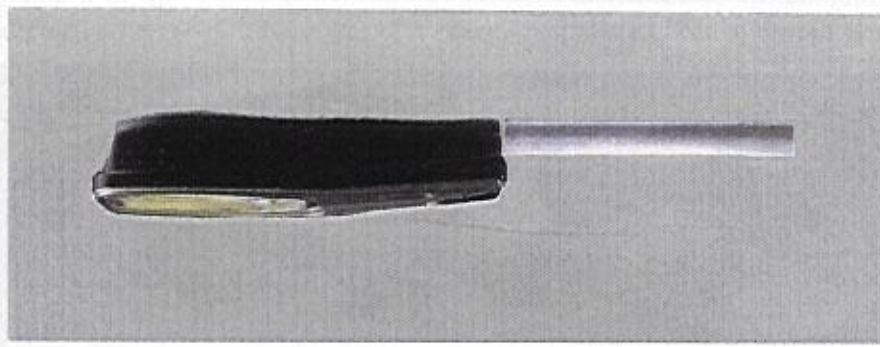


Fig. 1 :  $I(C, \gamma)$  cd/1000 lm

$\omega = 0.0^\circ$





l'ottica stessa. In senso trasversale la distribuzione di luce deve essere tale da interessare tutta la larghezza della strada con sufficiente intensità ma ridursi a zero rapidamente appena oltrepassato il bordo della strada stessa per evitare dispersione di luce. Talvolta la posizione della lampada nell'apparecchio è regolabile in modo da aggiustare l'angolo di emissione in funzione della larghezza della strada e dell'altezza di installazione.

Spesso gli apparecchi meno schermati, tipo quelli con rifrattore prismatico o con diffusore, sono preferiti perché si crede che garantiscano ampi angoli di emissione della luce. Come vedremo nella prossima sezione, esistono apparecchi con vetro di protezione piano installabile orizzontale o quasi orizzontale (che non emettono luce sopra il piano orizzontale o ne emettono poca) il cui massimo della emissione di luce cade, per  $C=0-180^\circ$ , ad angoli  $\gamma$  elevati, consentendo interdistanze di oltre 35-40 metri per installazioni a 10 m di altezza, e, per  $C=90^\circ$ , ad angoli  $\gamma$  sufficienti a consentire un'ottima illuminazione di strade anche larghe. Si vedano ad esempio le curve fotometriche degli apparecchi nelle figure 2.3, 2.6 e successive.

In genere i progettisti preferiscono sorgenti di luce (lampade) di dimensioni piccole perché esse inviano i loro raggi su ogni punto del riflettore (e dell'eventuale rifrattore) con il medesimo angolo di incidenza ed il calcolo dell'effetto di questi due componenti ottici è più semplice. Questo a sua volta consente un più rigoroso controllo della distribuzione della emissione di luce nelle varie direzioni. Lampade come quelle al sodio a bassa pressione, che sono di dimensioni rilevanti, permettono un più difficile calcolo della luce emessa. Forse anche per questo gli apparecchi di illuminazione cut-off per lampade al sodio a bassa pressione sono poco conosciuti nel nostro paese.

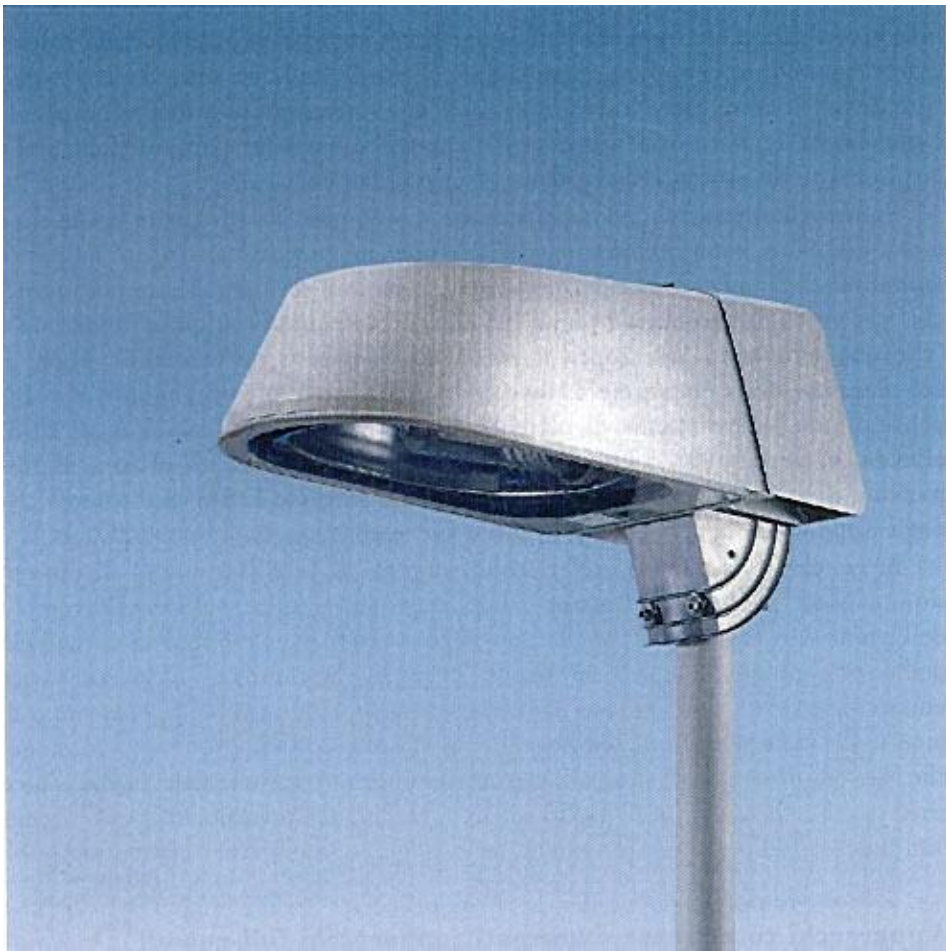
### **Apparecchi totalmente schermati (apparecchi full-cut-off)**

Per evitare quella parte di inquinamento luminoso prodotta dalla luce dispersa direttamente nel cielo dagli apparecchi stradali non c'è che una regola: **adoperare apparecchi di illuminazione che una volta installati non emettano luce sopra un piano orizzontale passante per il centro della lampada**. Questi apparecchi sono chiamati **apparecchi totalmente schermati**<sup>8</sup>. Essi sono anche chiamati **fully shielded** (Tucson Code 1987) o **full cut off** (quest'ultimo termine non ha nulla a che vedere con la definizione

---

<sup>8</sup>Si intende "totalmente schermati verso l'alto".

Figura 2.5: Apparecchio stradale con vetro di protezione piano. Se gli apparecchi con vetro di protezione piano vengono installati con un inclinazione dell'ottica, rispetto al piano orizzontale, diversa da zero (anche di soli  $3^\circ$ ), non si può più essere rigorosamente certi che essi risultino totalmente schermati per tutte le possibili configurazioni lampada-riflettore se non esaminando misure di laboratorio. Tuttavia, fintanto che l'inclinazione è piccola, questi apparecchi risultano, quanto meno, fortemente schermati. (Cortesia Philips Lighting, Monza (MI))





di cut-off della Commission Internationale de l'Eclairage con cui viene spesso confuso). È opinione <sup>9</sup> dell'autore, che si possano considerare **totalmente schermati** anche quegli **apparecchi di illuminazione che, una volta installati**<sup>10</sup>, **emettono entro la metà superiore di una sfera centrata sulla lampada e divisa a metà da un piano parallelo all'orizzonte, meno dello 0.2% del flusso totale da essi emesso.** Attualmente sono questi gli apparecchi da preferire in assoluto. Quello che disperde meno, tra quelli fatti testare dalla *Oficina tecnica para la proteccion de la calidad del cielo* dell'*Instituto de Astrofisica de Canarias*, ha un emissione nella emisfera superiore pari allo  $(0.00 \pm 0.03)\%$  dell'emissione totale.

Gli apparecchi di illuminazione che, pur non essendo totalmente schermati, **una volta installati**<sup>11</sup> **emettono entro la metà superiore di una sfera centrata sulla lampada e divisa a metà da un piano parallelo all'orizzonte, meno dello  $\sim 0.8\%$  del flusso totale da essi emesso,** si possono comunque considerare **fortemente schermati.**

Si ponga molta attenzione alla scelta degli apparecchi di illuminazione perché quasi tutte le ditte hanno contemporaneamente in catalogo ottimi apparecchi totalmente schermati, apparecchi mediamente schermati e apparecchi molto inquinanti. Uno stesso modello può essere fornito con ottiche molto diverse e con vari tipi di chiusura di protezione che possono produrre effetti opposti dal punto di vista dell'inquinamento luminoso. Inoltre può essere installato con differenti inclinazioni e con lampade di vario tipo e forma, montate in diverse posizioni. Si faccia attenzione che spesso le curve fotometriche degli apparecchi stradali sono misurate solo per  $\gamma \leq 90^\circ$  e talvolta per  $\gamma \sim 90^\circ$  le curve sono sbrigativamente fatte andare a zero anche se non è esattamente così. Inoltre le scale utilizzate sono inadatte a valutare

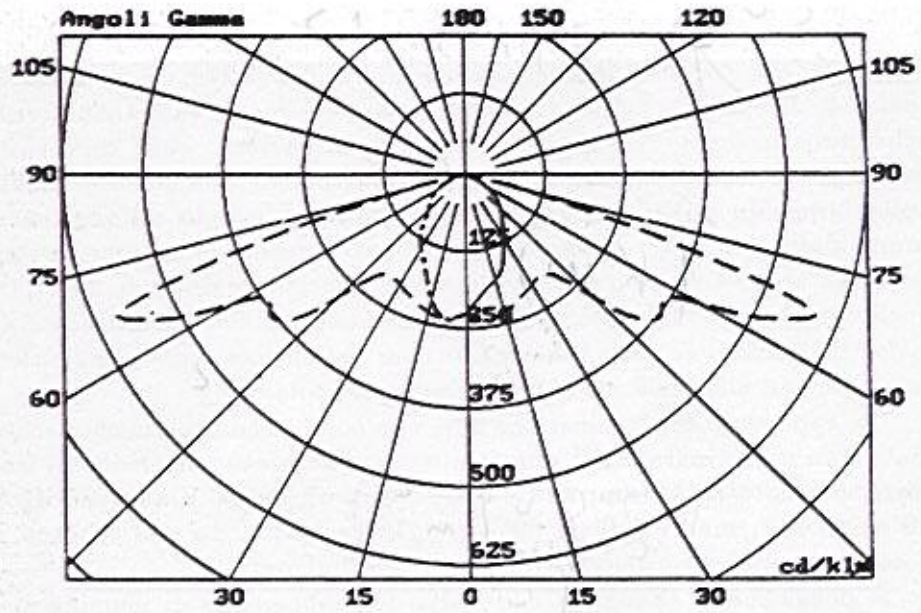
---

<sup>9</sup>Opinione non condivisa da tutti. Infatti secondo la *Oficina tecnica para la proteccion de la calidad del cielo* dell'*Instituto de Astrofisica de Canarias* potrebbero essere chiamati *full cut off* o *totalmente schermati* solo quegli apparecchi la cui emissione sopra un piano orizzontale passante per la lampada sia rigorosamente di 0 cd/klm. Tuttavia la differenza è importante solo per quelle aree che si trovano nelle vicinanze di quei siti astronomici di importanza mondiale ove si richiede che non vi sia in assoluto la benché minima emissione sopra l'orizzonte, anche per evitare l'inquinamento ottico.

<sup>10</sup>Si deve sempre specificare per quale inclinazione dell'ottica o per quale inclinazione dell'apparecchio, esso soddisfa questo requisito. Ove non specificato si assuma un'inclinazione dell'ottica uguale a zero.

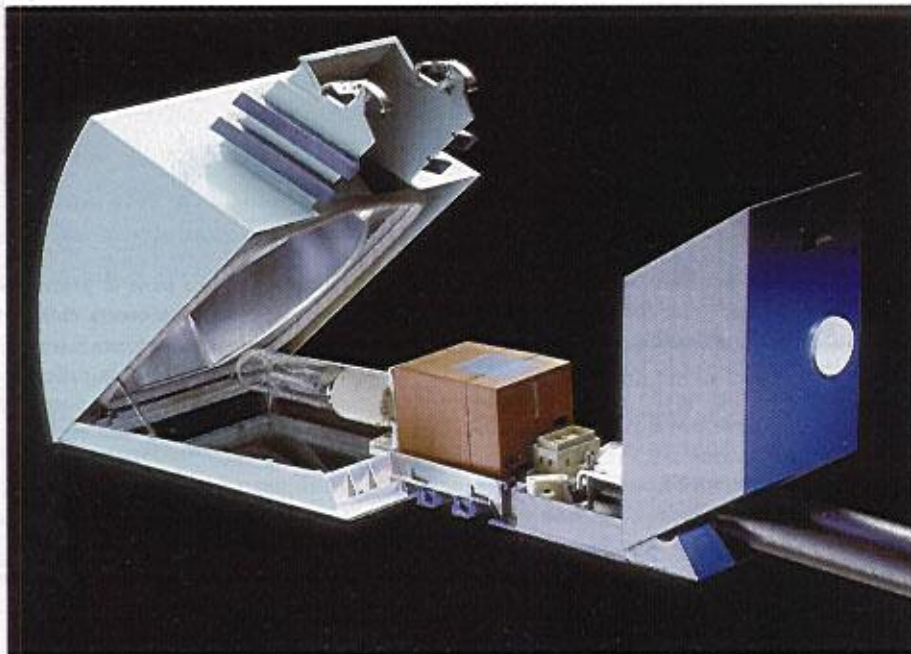
<sup>11</sup>Anche qui si deve specificare per quale inclinazione dell'ottica o per quale inclinazione dell'apparecchio

Figura 2.6: Curve fotometriche di un apparecchio stradale totalmente schermato con vetro di protezione piano espressamente costruito per installazione con ottica orizzontale anche quando montato su palo diritto a lato della strada. A destra è raffigurato l'apparecchio aperto per manutenzione. (Cortesia Cariboni Illuminazione - Fivep Robolight, Osnago (MI))



0.0° — 270.0° 170.0° — 10.0° 90.0° — 0.0°

Lampada/Lamp: 150W ST



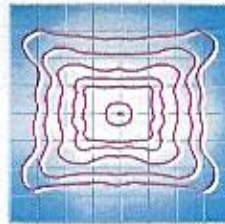
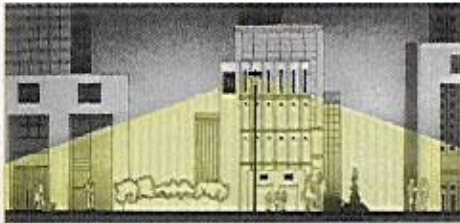
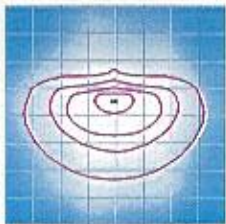
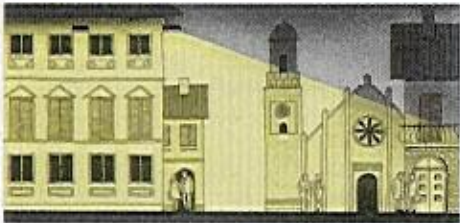
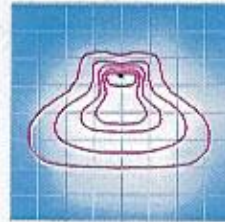
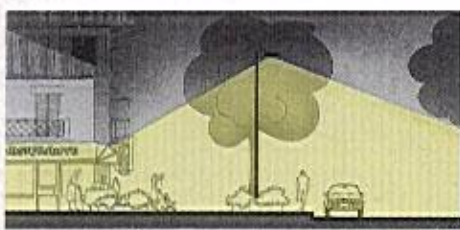
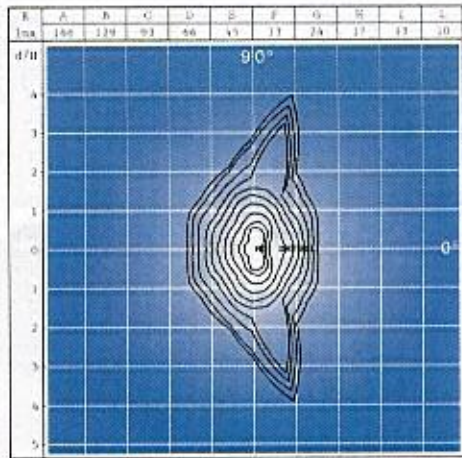
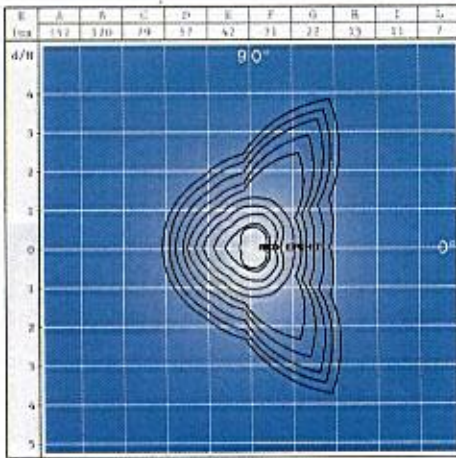
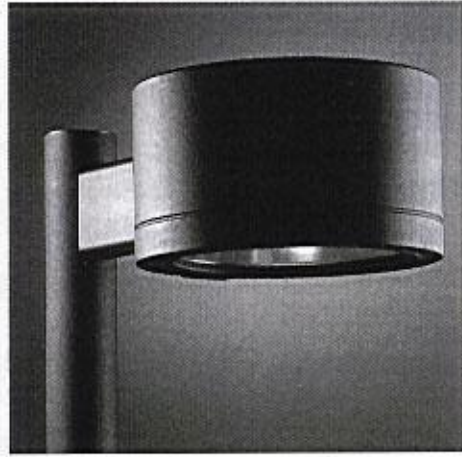
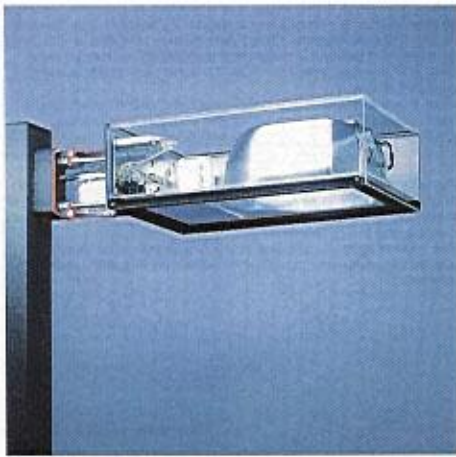




Figura 2.7: Distribuzione luminosa sul piano stradale (curve isolux) di alcune ottiche totalmente schermate di nuova generazione, fatte per essere montate orizzontali, ed esempi di impiego. Un ottica con un diagramma isolux come quello in alto a destra, ad esempio, permette di illuminare un'ampia strada con installazione su palo diritto a lato strada, pur essendo installata perfettamente orizzontale. (Cortesia iGuzzini, Recanati)

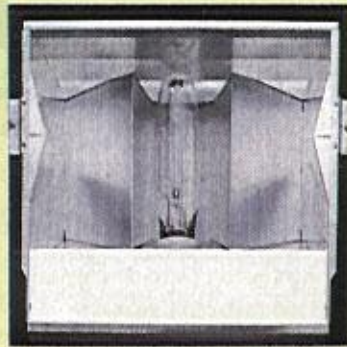
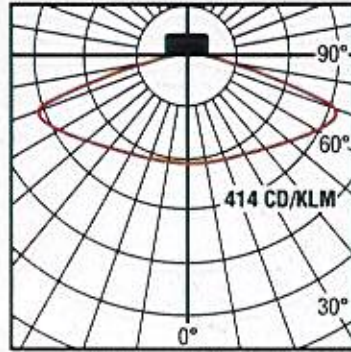
Figura 2.8: Curve isolux di due ottiche totalmente schermate del tipo illustrato nella figura precedente. Lo spaccato mostra un apparecchio totalmente schermato con queste ottiche. A fianco un apparecchio di forma diversa. (Cortesia iGuzzini, Recanati)



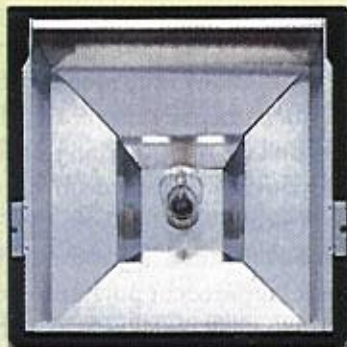
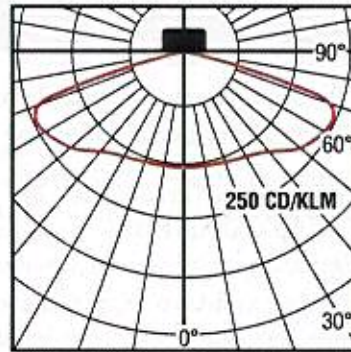
angolo dell'ottica



**SERIE PR**



**SERIE QH**



**SERIE QV**

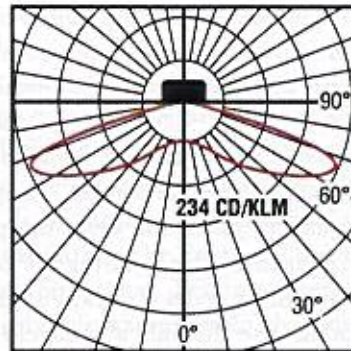


Figura 2.9: Curve fotometriche di tre ottiche totalmente schermate di tipo batwing per illuminazione stradale o di grandi aree con montaggio rigorosamente orizzontale e loro aspetto. In alto, ottica a fascio asimmetrico ( $2 \times 70^\circ$  con prevalenza lato strada); al centro, ottica a fascio simmetrico ( $2 \times 70^\circ$ ); sotto, ottica a fascio quadrato ( $4 \times 70^\circ$ ). (Cortesia Advanced Lighting Technology - Ruud Lighting, Scandicci (FI))

Figura 2.10: Apparecchio stradale totalmente schermato ad ottica aperta (senza vetro di protezione) per installazione sospesa. (Cortesia Zerbetto, Padova)

l'intensità emessa verso l'alto che, per alcuni apparecchi, può essere piccola se confrontata all'intensità prodotta verso il basso pur dando luogo ad un inquinamento luminoso non trascurabile, come si vedrà nella sezione 2.2.3.

Perciò per valutare se un apparecchio è totalmente schermato (o quanto è schermato) occorre esaminare le curve fotometriche espressamente tracciate per  $90^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$  e per  $0^\circ \leq C \leq 180^\circ$ , che solo pochi fabbricanti a richiesta forniscono, oppure affidarsi ad un esame del sistema ottico: vetro di protezione piano e possibilità di installazione con inclinazione dell'ottica nulla (o molto piccola) rispetto al piano orizzontale. In genere, ma non sempre, con un inclinazione dell'ottica uguale a zero, gli apparecchi stradali con vetro di protezione piano incassato risultano totalmente schermati, mentre con inclinazioni dell'ottica  $\leq 5^\circ$  risultano comunque fortemente schermati. Tuttavia si ricordi che solo l'analisi della fotometria della configurazione scelta consente una precisa valutazione, in quanto il risultato dipende anche da altri fattori quali la posizione della lampada all'interno del riflettore.

Per consentire un montaggio con inclinazione nulla e produrre un'adeguata uniformità sulla strada, l'ottica di alcuni apparecchi potrebbe richiedere un'installazione su pali a sbraccio che li avvicini al centro della strada. Il vetro di protezione potrebbe anche non esserci, tuttavia esso, oltre ad evitare



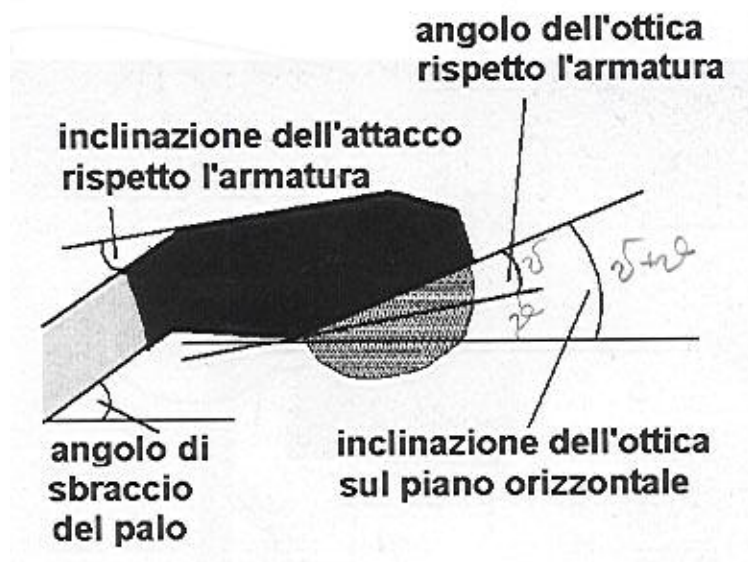




Figura 2.11: Inclinazione dell'ottica di un apparecchio stradale rispetto il piano orizzontale.

che l'ottica si sporchi, filtra le radiazioni ultraviolette eventualmente emesse dalla lampada e che contaminano la banda astronomica ultravioletta.

L'inclinazione dell'ottica di un apparecchio stradale rispetto al piano orizzontale, definita come in figura 2.11, è data dalla somma dell'inclinazione dello sbraccio rispetto al piano orizzontale con l'inclinazione dell'ottica rispetto l'apparecchio nella posizione standard meno l'inclinazione dell'attacco di montaggio del palo rispetto l'apparecchio nella posizione standard. Si faccia attenzione a non confondere questi quattro angoli diversi. nell'ambito della limitazione dell'inquinamento luminoso quando si parla di inclinazione ci si riferisce sempre a quella dell'ottica rispetto ad un piano orizzontale. La quantità di luce che un apparecchio stradale invia sopra l'orizzonte cresce al crescere dell'inclinazione dell'ottica. Essa dovrebbe essere sempre zero. per inclinazioni superiori a  $5^\circ$  l'inquinamento luminoso prodotto dall'apparecchio diventa notevole. Per fare un esempio di come giocano tra loro i quattro angoli precedenti, supponiamo che l'ottica di un apparecchio sia inclinata di  $5^\circ$  rispetto l'apparecchio nella posizione standard e che l'attacco del palo sia fisso ed inclinato di  $10^\circ$  rispetto alla stessa posizione. Per installare l'ottica orizzontale occorre utilizzare un palo con un inclinazione dello sbraccio di  $5^\circ$ .

Figura 2.12: Apparecchio di illuminazione stradale totalmente schermato con ottica aperta per installazione con ottica orizzontale su palo diritto (cima palo). (Cortesia Soc. Autostrada Venezia-Padova; Gemmo Impianti, Vicenza; Mazda Illuminazione, Monza)

### Classificazione CIE

La definizione di apparecchio di illuminazione totalmente schermato attualmente non è presente nei documenti della Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) mentre, come si vedrà più avanti, è stata inclusa in una bozza di norma CEN. La classificazione CIE degli apparecchi di illuminazione stradali si riferisce al problema dell'abbagliamento e non a quello della dispersione di luce sopra l'orizzonte.

Le classi CIE sono le seguenti:

#### 1) **Apparecchi cut-off**

Perché un apparecchio possa essere classificato cut-off secondo la definizione fissata dalla Commission Internationale de l'Eclairage occorre che il valore massimo dell'intensità a  $90^\circ$  rispetto la verticale sia inferiore o uguale a 10 cd (candele<sup>12</sup>) ogni 1000 lm (lumen) e comunque non superiore a 1000 cd, e sia inferiore o uguale a 30 cd ogni 1000 lm emessi a  $80^\circ$ . La intensità massima della luce emessa dalle armature cut-off nel piano parallelo

---

<sup>12</sup>Per la definizione di candela e lumen si veda la sezione 3.1.



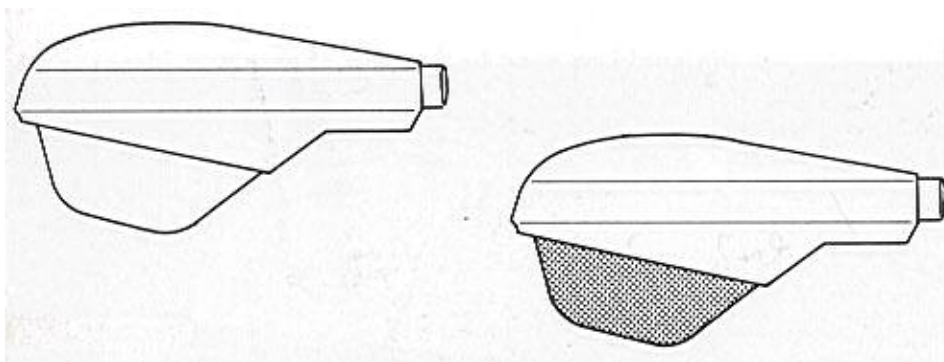


Figura 2.13: Apparecchi stradali che disperdono luce sopra il piano orizzontale: apparecchio con chiusura di protezione trasparente curva (sopra) e con diffusore o rifrattore prismatico (sotto). L'inclinazione dell'ottica aumenta il flusso emesso verso l'alto. Se il rifrattore è solo leggermente bombato il flusso sopra l'orizzonte è minore ma non assente. Per molti apparecchi i fabbricanti forniscono a richiesta la chiusura con vetro piano con cui sostituire le precedenti.

all'asse stradale sta tra zero e  $65^\circ$ . Oltre l'angolo limite di  $75^\circ$  esse tagliano bruscamente l'emissione luminosa. Apparecchi di illuminazione cut-off sono prodotti e disponibili anche per le lampade al sodio a bassa pressione ma per queste ultime si trovano raramente in Italia. In linea di principio non c'è corrispondenza biunivoca tra apparecchi totalmente schermati e apparecchi cut off CIE. Tuttavia spesso gli apparecchi cut off CIE sono anche totalmente schermati se installati con inclinazione dell'ottica uguale a zero o, comunque, fortemente schermati se installati con piccola inclinazione dell'ottica.

## 2) Apparecchi semi-cut-off

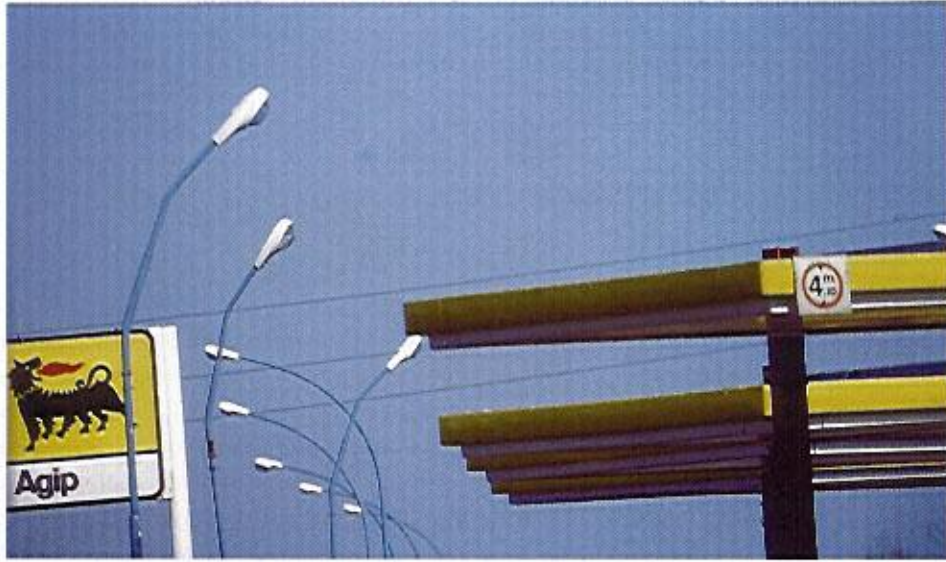
Esiste una classe di apparecchi di illuminazione stradali definiti dalla Commission Internationale de l'Eclairage *semi-cut-off* che sono più abbaglianti degli apparecchi cut-off. Il massimo dell'intensità emessa può cadere tra zero e  $75^\circ$ . Il valore massimo dell'intensità a  $90^\circ$  rispetto la verticale deve essere inferiore o uguale a 50 cd ogni 1000 lm e comunque non superiore a 1000 cd, e inferiore o uguale a 100 cd ogni 1000 lm a  $80^\circ$ . In genere essi non

Figura 2.14: Gli apparecchi con rifrattore prismatico sono già di per se molto inquinanti, ma se vengono montati con inclinazioni come quelle della foto la dispersione di luce nel cielo diventa elevatissima.

sono ben schermati per l'emissione sopra l'orizzonte e sono quindi inquinanti (spesso molto).

### **3) Apparecchi non schermati**

Per gli apparecchi non schermati (es. con rifrattore prismatico o con diffusore) la Commission Internationale de l'Eclairage prescrive un limite massimo di 1000 cd all'emissione a  $90^\circ$  dalla verticale. Le raccomandazioni della Commission Internationale de l'Eclairage prescrivono di non utilizzarli sulle strade extraurbane e sulle autostrade. Non sono tuttavia consigliabili in alcun tipo di impianto. Sono in genere estremamente dispersivi e inquinanti. I coefficienti di utilizzazione degli impianti che li adottano sono molto bassi, il che è indice di spreco energetico. Il coefficiente di utilizzazione esprime infatti il rapporto tra il flusso di luce utilizzato per illuminare l'area che interessa e il flusso totale emesso dalla lampada. Ove sono in vigore norme per la limitazione dell'inquinamento luminoso l'uso di questi apparecchi è proibito.







### **Apparecchi per arredo urbano ed aree residenziali**

Gli apparecchi di illuminazione per arredo urbano sono spesso non schermati ed estremamente dispersivi. Come vedremo, alcuni apparecchi possono arrivare a disperdere sopra l'orizzonte più del 50% del flusso da essi emesso. Come per gli altri apparecchi non schermati, i coefficienti di utilizzazione degli impianti che adottano questi apparecchi sono molto bassi, il che è indice di spreco energetico. Tuttavia esistono molti apparecchi per arredo urbano che sono totalmente schermati o fortemente schermati e uniscono a questa preziosa caratteristica un'estetica molto curata di tipo classico o moderno (vedi ad es. fig. 2.20 pag. 53).

#### **Lanterne e lanterne totalmente schermate.**

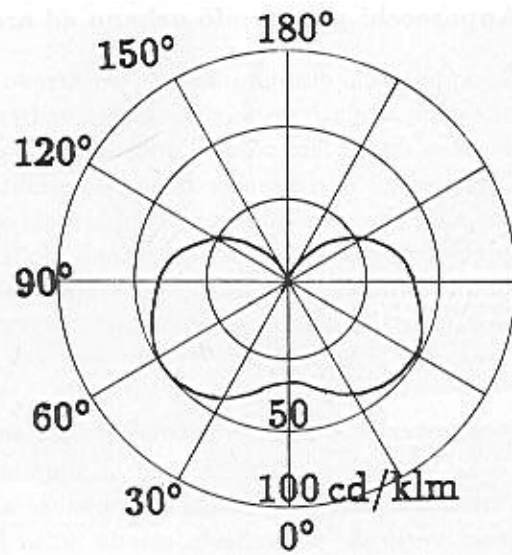
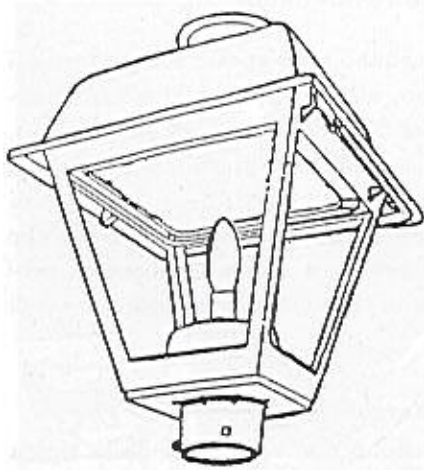
Le lanterne sono apparecchi di illuminazione non schermati dalla tipica forma "d'epoca" che fa sì che l'emissione avvenga attraverso finestre laterali, quasi verticali, cosicché la strada sotto la lanterna rimane buia, come si vede dai diagrammi fotometrici della figura 2.15. Sono molto inquinanti e abbaglianti e andrebbero riservati a pochi centri storici turistici. Infatti questi apparecchi emettono sopra l'orizzonte circa il 35%-45% del loro flusso. Anche per essere coerenti con l'ambientazione storica per cui si suppone vengano scelti, le lampade che vi vengono montate devono essere di bassa potenza. A causa dell'elevato inquinamento luminoso che queste armature producono l'unico tipo di lampada da montare è quello al sodio ad alta pressione (ma non troppo elevata) dalla calda luce giallo-oro che ben si adatta ad un'ambientazione storica e disturba meno l'osservazione del cielo. Alcune ditte di materiale illuminotecnico hanno sviluppato delle lanterne fortemente schermate.

Negli apparecchi a lanterna fortemente schermati la lampada viene montata non all'interno della lanterna ma all'interno del tettuccio, in un riflettore, in modo che i bordi del tettuccio provochino il taglio dell'emissione di luce per angoli grandi rispetto alla verticale. Come si vede in figura 2.16, essi sono ben schermati sopra l'orizzonte. Il tettuccio viene poi chiuso inferiormente da una lastra di vetro a facce piano parallele. Non è tuttavia possibile eliminare il fatto che la lanterna non illumina bene la zona sottostante a causa dell'ombra che il sostegno fa sulla superficie stradale. Inoltre è difficile eliminare le riflessioni di luce verso l'alto prodotte dal sostegno e dalle altre parti dell'apparecchio. A causa dell'intensità di queste riflessioni o di quel-

Figura 2.15: Apparecchio per arredo urbano fortemente inquinante e sua curva fotometrica: la lanterna.

le dell'eventuale vetro trasparente montato sulle finestre laterali, in genere gli apparecchi di questo tipo non arrivano ad essere "totalmente schermati" ma risultano fortemente schermati o, comunque, disperdono poca luce sopra l'orizzonte. Essi sono in commercio anche in Italia.

La città di Barlovento ha rifatto la propria illuminazione che consisteva nel 1992 di 198 lanterne (efficienza 50%) con lampade al sodio ad alta pressione da 100 W (flusso 8550 lm) che emettevano il 65% del flusso in basso ed il 35% verso l'alto. Il nuovo impianto utilizza 130 lanterne con riflettore cut off (efficienza 50%) con lampade al sodio a bassa pressione da 35 W (flusso 4800 lm) che emettono il 99.9% della luce verso il basso e lo 0.1% verso l'alto più 68 armature stradali totalmente schermate (efficienza 67%) con lampade al sodio a bassa pressione da 35 W (4800 lm) che emettono il 100% della luce verso il basso. Il flusso totale emesso verso il basso dal vecchio impianto



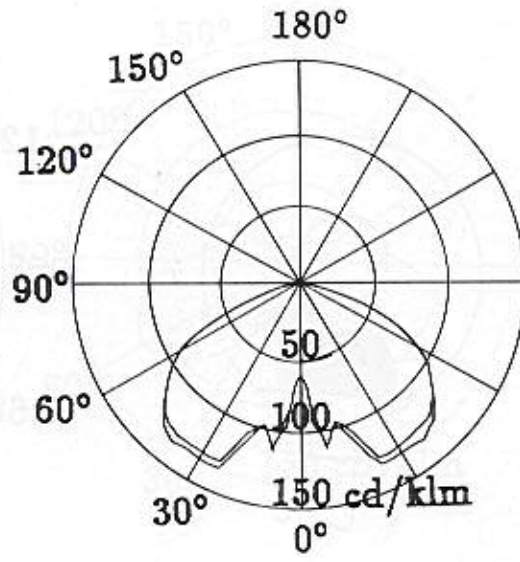
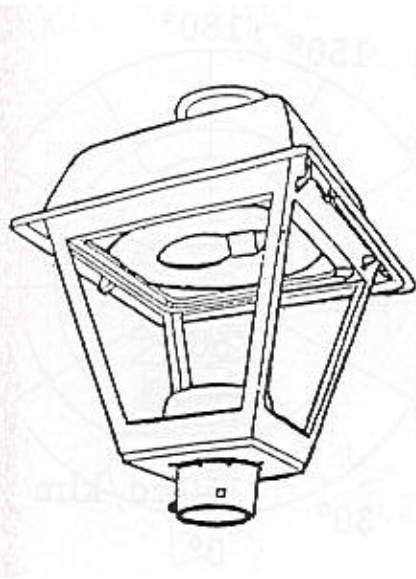


Figura 2.16: Apparecchio per arredo urbano totalmente schermato e sua curva fotometrica: lanterna con riflettore cut off. Essa è in commercio anche in Italia.

era di 550,2 klm (kilolumen). Dopo il rifacimento dell'impianto tale flusso è di 530.4 klm. Il flusso verso l'alto<sup>13</sup> emesso dal vecchio impianto era invece di 351.3 klm nel 1992 ed è sceso a 53.4 klm con il nuovo, consentendo una riduzione dell'inquinamento luminoso del 84.8% con una riduzione del flusso al suolo del 3.6% soltanto. È stato calcolato che il risparmio energetico ammonta al 65%.

#### **Globi classici e globi totalmente schermati.**

I Globi sono apparecchi con caratteristiche completamente opposte a quelle richieste per una corretta illuminazione. La lampada è contenuta in una sfera di vetro trasparente sorretta da un palo di sostegno. Il sostegno fa ombra sulla strada e la luce viene irradiata direttamente verso il cielo costi-

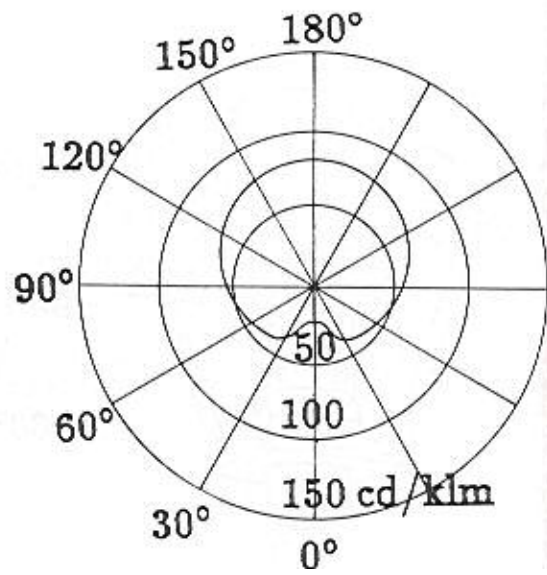
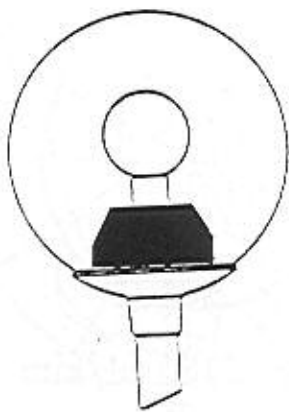
---

<sup>13</sup>compreso il 10% di flusso riflesso dal terreno

Figura 2.17: Apparecchio per arredo urbano fortemente inquinante e sua curva fotometrica: il globo.

tuendo uno spreco elevatissimo (v. figura 2.17). Inoltre per ottenere livelli di luminanza accettabili occorre utilizzare lampade con potenze molto elevate, il che aumenta ancora di più la quantità di luce dispersa. Il globo di vetro è spesso sporco, opaco ed inelegante. Nessuna ragione storica invita al loro utilizzo. Non esiste nemmeno alcuna ragione architettonica per usarli, dal momento che esistono numerosi modelli di apparecchi totalmente schermati con linee moderne, nuove ed anche particolarmente d'avanguardia. Inoltre molto spesso nei Globi non vengono nemmeno montati le apposite alette paraluce che consentono di limitare almeno una parte della elevatissima dispersione di luce (v.figura 2.18). La maggior parte delle leggi e delle ordinanze anti-inquinamento luminoso vietano i Globi.

Anche per gli apparecchi di forma sferica sono state approntate delle versioni ottimamente schermate, per quegli architetti urbani che volessero a



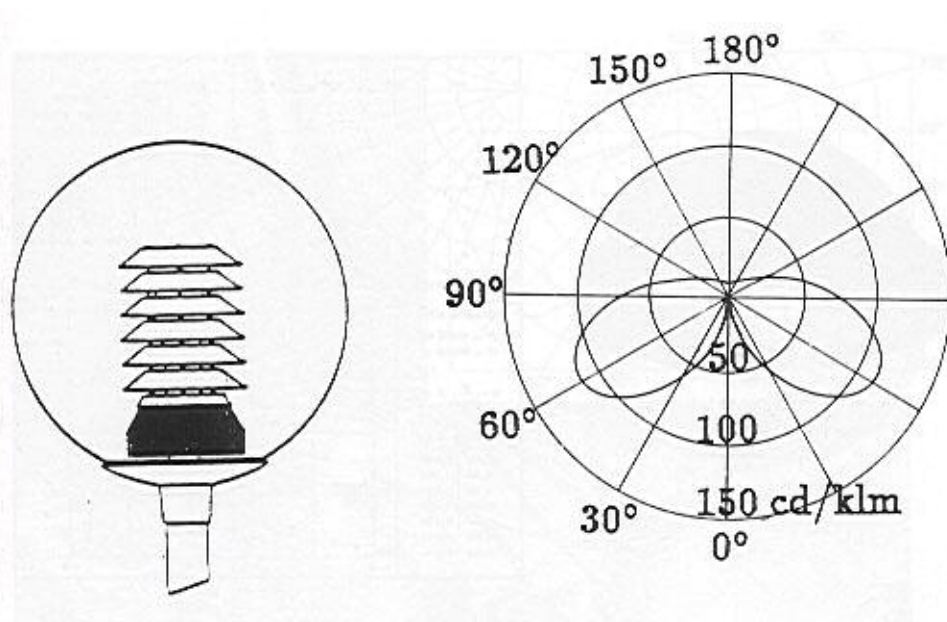


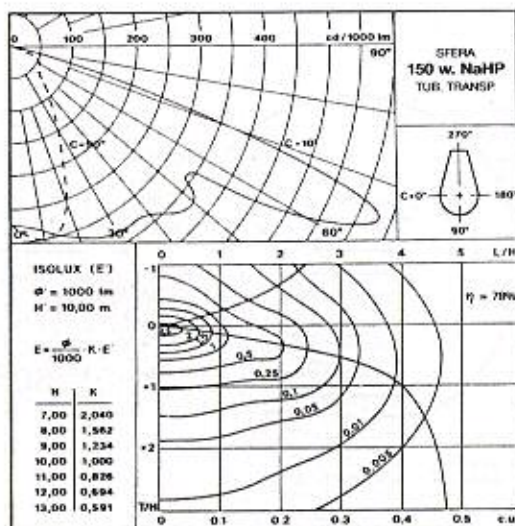


Figura 2.18: Apparecchio per arredo urbano molto inquinante e sua curva fotometrica: il globo con alette frangiluce. Le alette riducono notevolmente il flusso emesso sopra il piano orizzontale ma esso rimane rilevante.

tutti i costi armature con questa forma. Ne descriviamo qui soltanto due. La prima versione, concettualmente, è costituita da un apparecchio totalmente schermato molto compatto posto nel centro di una sfera di materiale trasparente liscio. La forma esteriore del globo rimane invariata ma la distribuzione di luce è precisa e sofisticata. La seconda versione consiste in un globo in cui la metà superiore è completamente opaca, contiene la lampada ed un riflettore con ottica totalmente schermata, mentre la parte inferiore è un emisfera di materiale liscio trasparente, come in figura 2.19. Naturalmente entrambi i tipi di apparecchio disperdono una piccola quantità di luce in cielo a causa delle riflessioni prodotte dalla emisfera di vetro trasparente inferiore e quindi non si possono definire rigorosamente "totalmente schermate". Il sostegno, a seconda del produttore, può essere posto sotto l'apparecchio come nei globi

Figura 2.19: Apparecchio accuratamente schermato a forma di globo per illuminazione stradale e per arredo urbano e sua curva fotometrica. La versione con vetro piano è totalmente schermata. (Cortesia G. C. Illumination - Alcatel, Sesto Ulteriano (MI))

classici ove fa ombra sulla strada, oppure essere costituito da un elegante braccio di sostegno a cui l'armatura è appesa. Una versione del globo del secondo tipo che sia totalmente schermata si ottiene sostituendo l'emisfera inferiore con un vetro a facce piano-parallele, ed appendendola ad un braccio di supporto. In questo modo il globo diviene un ottimo apparecchio.



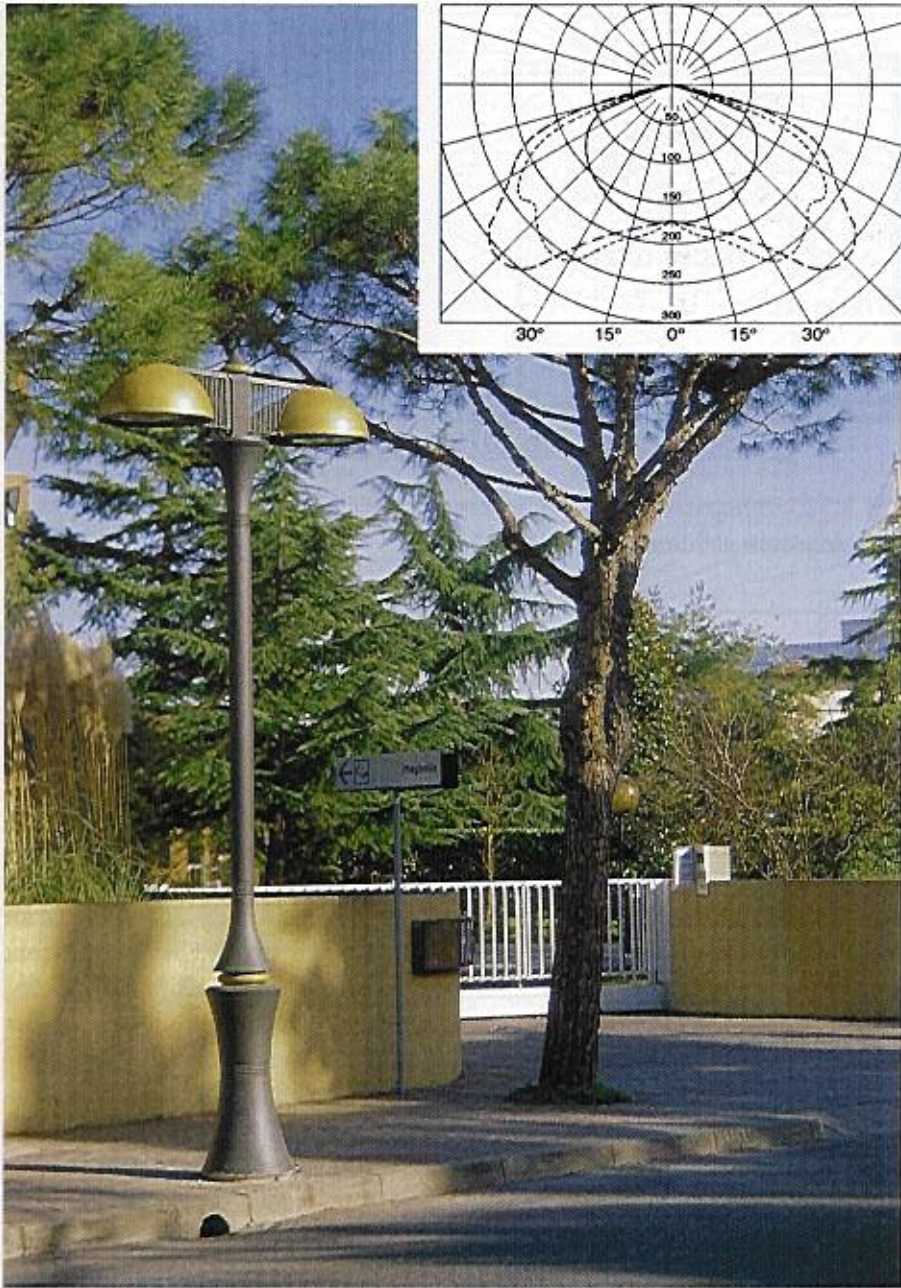


Figura 2.20: Apparecchio per arredo urbano ed aree residenziali totalmente schermato e sua curva fotometrica (Curva continua  $C=0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ ; curva tratteggiata  $C=45^{\circ}$ ; curva punteggiata  $C=90^{\circ}$ - $270^{\circ}$ .).(Cortesia Modus s.a., Gualdicciolo, Rep.S.Marino)

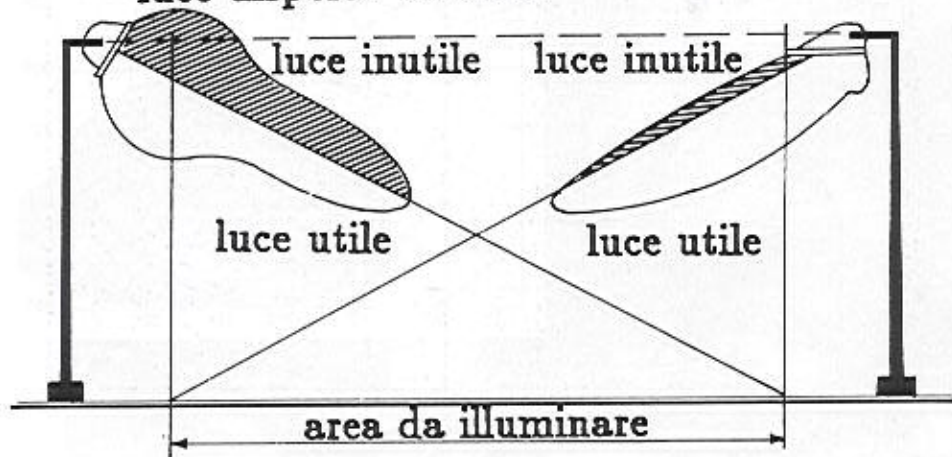
Figura 2.21: Illuminazione di un'area con un proiettore simmetrico (a sinistra) e con un proiettore asimmetrico (a destra).

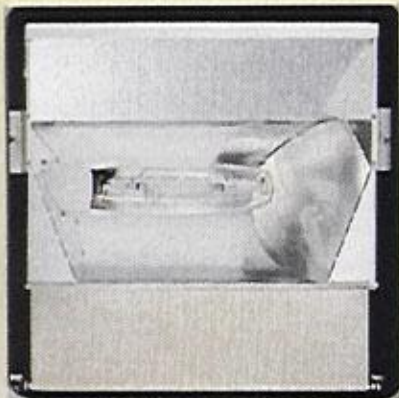
### **Proiettori simmetrici ed asimmetrici**

I proiettori sono usati nell'illuminazione di pareti di edifici e strutture architettoniche, nell'illuminazione di impianti sportivi e in quella di piazzali e aree di tipo stradale. I proiettori simmetrici raramente vengono installati con gli schermi previsti che dovrebbero limitare la dispersione di luce fuori dall'area da illuminare. Oggi sono stati superati dai proiettori a parabola asimmetrica la cui distribuzione dell'intensità luminosa consente di orientare sull'area che interessa la maggior parte del flusso di luce. Essi permettono di installare impianti con un maggior coefficiente di utilizzazione rispetto ai proiettori normali e quindi di risparmiare denaro ed energia elettrica. Essi consentono anche l'impiego di sorgenti di minor potenza a parità di illuminamento prodotto e, se correttamente installati, tagliano la emissione di luce oltre un certo angolo limite. Il loro fascio esce con un'angolazione che va da 45 gradi a 65 gradi rispetto all'asse cosicché si possono installare con il vetro di protezione orizzontale, come in figura 2.21 e nelle successive.

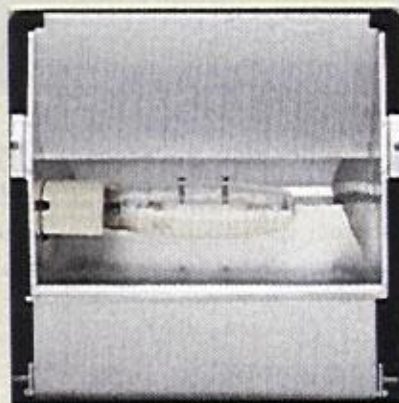
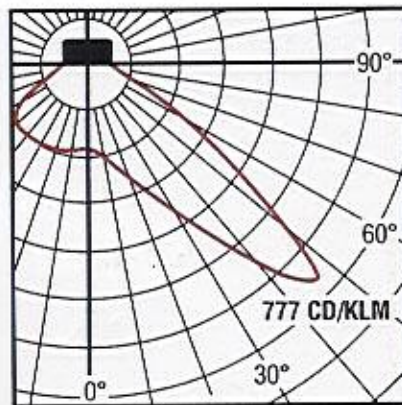
Nel caso di una torre faro, l'applicazione di una copertura superiore che contenga i proiettori (asimmetrici) consente di evitare la dispersione di luce verso l'alto anche in caso di non perfetta orizzontalità degli stessi (v. figure

luce dispersa nel cielo





**SERIE CF**



**SERIE AC**

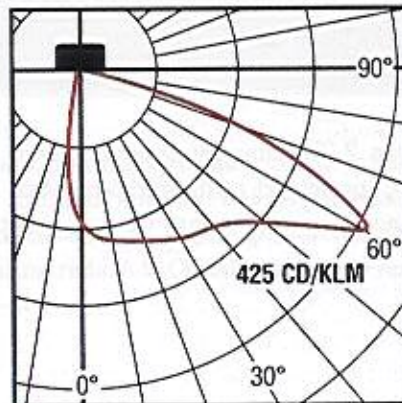




Figura 2.22: Ottica e curve fotometriche di due tipi di proiettori asimmetrici. (Cortesia Advanced Lighting Technology - Ruud Lighting, Scandicci (FI))

2.23 e 2.25). Il montaggio verticale anzichè orizzontale dei proiettori asimmetrici nell'illuminazione di grandi aree (fig. 2.29), una pratica illuminotecnica per fortuna poco usata, produce una elevata dispersione di luce sopra l'orizzonte ed è quindi da evitare assolutamente. Nel caso di aree stradali o autostradali il coefficiente di abbagliamento che si ottiene difficilmente soddisfa ai requisiti richiesti dalla norma UNI 10439 o dalle raccomandazioni CIE. Il coefficiente di utilizzazione è inferiore a quello ottenibile con altre configurazioni.

Oltre ai proiettori asimmetrici, esiste un'altra classe di proiettori che sfruttano uno schermo interno al proiettore stesso per ridurre efficacemente la quantità di luce dispersa. Questi proiettori sono consigliati nell'illuminazione degli impianti sportivi.

Figura 2.23: Illuminazione di grandi aree senza dispersione di luce sopra l'orizzonte: proiettori asimmetrici montati orizzontalmente e copertura superiore assicurano ad una torre faro una copertura perfetta. (Padova, C.so Australia)





Figura 2.24: Anche senza copertura i proiettori asimmetrici assicurano una schermatura totale sopra il piano orizzontale se installati curando la loro perfetta orizzontalità. Troppo spesso questo viene tralasciato senza averne grandi vantaggi in termini di uniformità della luminanza. (Autostrada A4, Casello Padova Ovest)

Figura 2.25: Schema di una torre faro con proiettori asimmetrici e copertura.(Cortesia Fivep-Robolight, Osnago (MI))

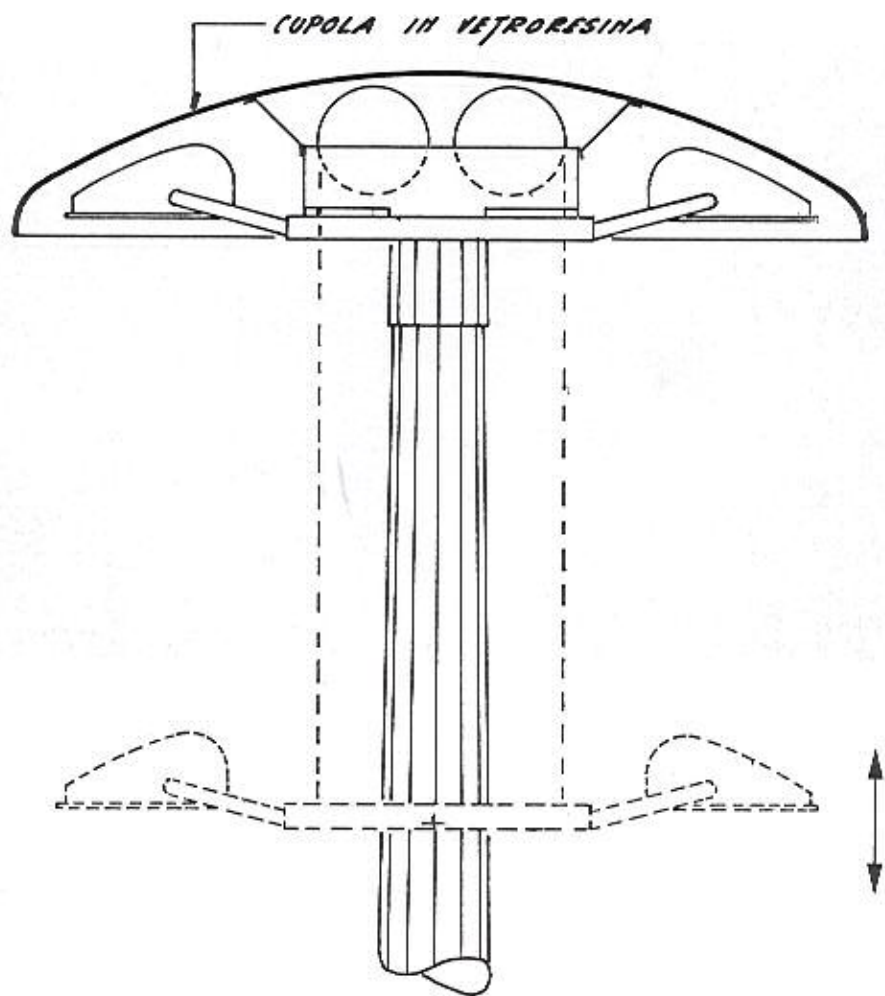






Figura 2.26: Un altro esempio di torre faro con ottiche il cui vetro di protezione è rigorosamente orizzontale. (Cortesia Soc. Autostrada Padova-Venezia; Gemmo Impianti, Vicenza; Siderpali, Crespellano (BO))

Figura 2.27: Illuminazione di aree ferroviarie senza dispersione di luce sopra il piano orizzontale. (Mestre-Venezia, area ferroviaria antistante Fincantieri)





Figura 2.28: L'utilizzo di rifrattori prismatici sugli apparecchi utilizzati per l'illuminazione di ampie aree produce una notevole dispersione di luce sopra il piano orizzontale aumentata dall'inclinazione dell'ottica rispetto allo stesso piano. Per limitarla è necessario richiedere al fabbricante la chiusura con vetro piano (in genere disponibile). Se si desidera minimizzare completamente la quantità di luce emessa sopra l'orizzonte è necessario scegliere modelli installabili con l'ottica non inclinata.

Figura 2.29: Il montaggio verticale anzichè orizzontale dei proiettori asimmetrici nell'illuminazione di piazzali e grandi aree produce un'elevatissima dispersione di luce sopra l'orizzonte ed è assolutamente da evitare.







Figura 2.30: Il fascio di questo proiettore asimmetrico punta verso l'angolo superiore destro dell'immagine ma nell'area non vi è nulla che possa intercettare un fascio così angolato. Montaggio sbagliato o illuminamento volontario del cielo ?

Figura 2.31: Apparecchi totalmente schermati per l'illuminazione di accessi di edifici (sinistra) e di percorsi pedonali in parchi e giardini (a destra). (Cortesia iGuzzini, Recanati)





### Flusso emesso direttamente nel cielo

Come abbiamo visto, sono diversi i motivi per cui ci può essere emissione diretta di luce ad angoli maggiori di zero rispetto l'orizzonte: proiettori montati senza schermi o orientati male, apparecchi non totalmente schermati, montati su bracci troppo inclinati, vetri e coppe di protezione curvi, rifrattori o meno, globi o lampioni, fasci pubblicitari, vetrine. Nella tabella 2.1 sono elencati i valori massimi, medi e minimi del rapporto tra il flusso emesso sopra l'orizzonte e il flusso totale emesso da un apparecchio di illuminazione (UFR)<sup>14</sup> misurato su un campione di apparecchi di vario tipo (Diaz Castro 1994)<sup>15</sup>. Occorre tenere presente che il campione non raccoglie tutte le armature presenti sul mercato, né necessariamente le più diffuse, per cui i valori della tabella non si possono considerare tipici per la classe di apparecchi cui si riferiscono ma sono solo indicativi. Essi si riferiscono alla posizione standard dell'apparecchio (inclinazione dell'ottica minima). Nella tabella si vede che mentre le apparecchi cut-off con vetro di protezione piano avevano un UFR attorno allo 0.1% con minimi<sup>16</sup> del 0.04%, gli apparecchi con vetro di protezione prismatico esaminati<sup>17</sup> avevano in media un UFR del 3.16%. I pochi apparecchi del campione classificabili semi-cut-off secondo la classificazione CIE avevano un UFR compreso tra 1.3% e 2.95%. Meglio si comportano quelli senza vetro di protezione<sup>18</sup> che nel campione avevano un UFR medio del 0.14%. Si tenga conto che al crescere dell'inclinazione la frazione di flusso emessa verso l'alto cresce notevolmente (anche al 10-20%). Nel caso delle lanterne l'UFR medio è il 34.7% contro il ben più piccolo 1.31% delle lanterne con riflettore cut-off. Dalle figure 2.17 e 2.18 si può stimare che i globi

---

<sup>14</sup>Il rapporto tra il flusso emesso sopra l'orizzonte e il flusso totale emesso dalla lampada quando l'apparecchio è montato nella sua posizione standard viene chiamato *Upward Light Output Ratio* (ULOR). Essendo l'ULOR riferito al flusso totale emesso dalla lampada e l'UFR al flusso totale emesso dall'apparecchio, se  $r$  è il rendimento dell'apparecchio  $UFR = ULOR/r$ . Il rendimento  $r$  è dell'ordine di 0.7-0.8 per i migliori apparecchi.

<sup>15</sup>Per i dettagli si invita il lettore a fare riferimento alla seguente pubblicazione: Diaz Castro, J., 1994 "Estudio de emision hacia el hemisferio superior de diferentes tipos de luminarias y criterios sobre el alumbrado de exterior utilizados en los alrededores del O.R.M. para evitar la potencial contaminacion luminica", IAC.

<sup>16</sup>Un armatura misurata ma non inclusa in questo studio ha un UFR di 0.029%.

<sup>17</sup>È probabile che molti apparecchi in commercio abbiano valori maggiori di quelli di questo campione.

<sup>18</sup>Attenzione che l'UFR di armature senza vetro di protezione è piccolo solo se la lampada è tutta contenuta nel riflettore e non sporge al di fuori di esso.

Tabella 2.1: Misure di UFR per un campione di armature.

Descrizione	UFR max	UFR med	UFR min
Armature con lampada entro un riflettore			
aperte, senza vetro di protezione	0.17%	0.14%	0.08%
chiuse da vetro trasparente piano	0.15%	0.11%	0.04%
chiuse da vetro trasparente curvo	0.27%	0.20%	0.14%
chiuse da plastica trasparente	2.37%	1.47%	0.91%
chiuse da vetro prismatico	3.37%	3.16%	2.95%
Altre armature			
Lanterne cut-off a pareti trasparenti	1.74%	1.31%	0.80%
Lanterne cut-off a pareti traslucide	5.22%	4.51%	3.80%
Lanterne classiche	38.6%	34.7%	30.6%

Nota: Nella posizione standard (inclinazione minima).

classici abbiano un UFR maggiore del 50% e quelli con alette paralucente un UFR del 10-15%. I Globi accuratamente schermati hanno un UFR minore del 1.5% circa.

In una città o in un territorio, il flusso disperso verso l'alto prodotto dall'illuminazione stradale (spesso composta da apparecchi di illuminazione con vetro prismatico, lampioni, lanterne, globi e altre armature molto disperdenti) si somma a quello prodotto dall'illuminazione di edifici, insegne, e altro, e quindi il rapporto tra il flusso totale disperso direttamente verso l'alto e il flusso totale emesso dagli apparecchi (chiamato Total Upper Wasted Light Ratio, total UWLR) è in genere molto elevato. Fanno naturalmente eccezione le zone ove sono in vigore norme contro la dispersione di luce e l'inquinamento luminoso. Le stime ottenute in USA (es. Garstang 1986) e in Italia (Di Sora 1990) indicano un UWLR totale almeno del 15%. Recentemente è allo studio della Commissione 50 (The protection of existing and potential observatory sites) dell'International Astronomical Union una suddivisione del territorio in zone, a seconda del tipo di osservazioni astronomiche svolte in esse. In relazione ad esse è stato proposto in seno al Comitato Tecnico 4.21 della Commission Internationale de l'Eclairage di fissare per ogni zona un livello massimo consentito del rapporto tra il flusso totale disperso direttamente verso l'alto da un apparecchio di illuminazione dopo l'installazione

Tabella 2.2: Zone astronomiche e UWLR massimo.

Attività astronomica nella zona	UWLR % max	UWLR % max dopo le ore 24
osservatori di interesse mondiale	0.1	(0)
osservatori di livello (inter)nazionale	0.2	0.1
telescopi da 1m (livello accademico)	0.5	0.2
telescopi da 1m (livello post-laurea)	1.0	0.5
telescopi da 50 cm (studenti, astrofili)	1.5	0.8
telescopi da 30 cm (astrofili)	5.3	2.5
osservazione del cielo saltuaria	14.8	7.5
nessuna osservazione astronomica	38.8	19

Nota: Valori provvisori proposti dalla OTPC-IAC.

e il flusso totale da esso emesso (Upper Wasted Light Ratio, UWLR)<sup>19</sup>. I valori dell'UWLR massimo attualmente proposti dalla *Oficina tecnica para la proteccion de la calidad del cielo* dell'*Instituto de Astrofisica de Canarias* (OTPC-IAC) per ogni tipo di zona sono illustrati nella seconda colonna della tabella 2.2. Nella terza colonna sono elencati i valori massimi dell'UWLR che sono stati proposti per l'orario dopo la mezzanotte (la metà). Sono state proposte anche delle regole sulle distanze minime tra due zone diverse. Come si vedrà più avanti, se una pavimentazione stradale riemette verso l'alto il 10% del flusso emesso dall'apparecchio (è un valore abbastanza usuale), il rapporto (in percentuale) tra il flusso disperso direttamente verso l'alto dall'apparecchio e quello emesso dalla pavimentazione è dell'ordine di dieci volte l'UWLR.

Il Comitato Europeo per la Normalizzazione (CEN) nella bozza della norma CEN/TC 169/226 JWG "Lighting applications and road equipment - Road lighting - Part 2: Performance requirements" (cap.8 "Appearance and environmental aspects") ha suddiviso in *classi di intensità* alcune geometrie dell'emissione luminosa fissandone le intensità massime a vari angoli rispetto la verticale. Non si è ancora giunti ad una versione definitiva per cui ci limitiamo a presentare nella tabella 2.3 una versione preliminare, invitando

<sup>19</sup>L'UWLR differisce dall'UFR perché si riferisce all'apparecchio dopo l'installazione nella posizione richiesta dal progetto. Si noti che qualcuno riferisce l'UWLR al flusso totale emesso dalla lampada, come l'ULOR.

il lettore a fare riferimento, quando completata, a quella definitiva. Questa classificazione è stata preparata proprio per utilizzarla quando si debba limitare l'abbagliamento o la dispersione di luce<sup>20</sup>. In questo modo si potrà richiedere che in una certa area le intensità luminose emesse a vari angoli appartengano alla classe G-esima, evitando di porre specifiche richieste sul tipo di apparecchi di illuminazione da utilizzare. Si faccia attenzione che nella classificazione definitiva le sigle delle classi possono cambiare. La classe (preliminare) G6 (0 cd/klm sopra 90°) è l'ideale dal punto di vista della dispersione di luce poiché produce un ULOR eguale a zero ed è quella da richiedere per evitare l'inquinamento luminoso. Talvolta può essere sufficiente richiedere le classi di intensità (preliminari) G4 (0 cd/klm sopra 95° e 10 cd/klm sopra 90°) e G5 (0 cd/klm sopra 95° e 10 cd/klm sopra 90°) che producono un ULOR minore dello 0.5% e lasciano agli installatori una più ampia scelta di armature. Grossomodo gli apparecchi di classe G5 e G6 producono un UFR  $\leq 0.8\%$ , cioè sono apparecchi fortemente schermati. Quando possibile, comunque, va richiesta la classe (preliminare) G6 (0 cd/klm a 90° e oltre). Nella classificazione non è presente una classe di intensità la cui emissione sia equivalente a quella degli apparecchi cut-off, secondo la definizione CIE. Tuttavia, l'imposizione che gli impianti soddisfino le classi di intensità G5 o G4 equivale, per quanto riguarda l'emissione oltre i 90° (quella che ci interessa), ad imporre l'uso di apparecchi cut off CIE.

Ci sono impianti, ad esempio in alcuni tipi di stadi sportivi, che disperdono necessariamente luce al di fuori dell'area da illuminare a causa del tipo di illuminazione richiesta (v. sez 2.1.2). La *Institution of Lighting Engineers* (ILE) ha fissato alcuni limiti massimi anche alla intensità totale della luce emessa da ogni sorgente<sup>21</sup> in direzioni diverse da quella dell'area da illuminare. I valori limite dipendono dall'area ove l'impianto si trova. Per zone considerate "buie" (ILE E1), quali i parchi nazionali, l'intensità massima è zero, per zone di bassa luminosità (ILE E2), quali le zone rurali, l'intensità massima è di 50 kcd, per zone di media e alta luminosità (ILE E3, E4), quali rispettivamente zone urbane e centri urbani, l'intensità massima è di 100 kcd. Questi limiti sono elevatissimi ma, per fortuna, dopo le ore 23.00 l'ILE raccomanda che l'intensità massima non superi, rispettivamente, le 0, 0.5,

---

<sup>20</sup>Si noti che dal punto di vista dell'inquinamento luminoso sarebbe stato meglio fissare l'UFR che non l'intensità massima.

<sup>21</sup>Per sorgente si intende ad esempio l'insieme dei proiettori di una torre-faro.



Tabella 2.3: Classi di intensità CEN (classificazione provvisoria) e valore stimato del relativo ULOR massimo.

Classe	Intensità massima				ULOR max
	70°	80°	90°	95°	
prelimin.					
G1		200 cd/klm	50 cd/klm		~31%
G2		150 cd/klm	30 cd/klm		~18.8%
G3		100 cd/klm	20 cd/klm		~12.6%
G4	500 cd/klm	100 cd/klm	10 cd/klm	0 cd/klm	~0.55%
G5	350 cd/klm	100 cd/klm	10 cd/klm	0 cd/klm	~0.55%
G6	350 cd/klm	100 cd/klm	0 cd/klm	0 cd/klm	0.0%

Note:

1. L'angolo si intende misurato a partire dalla verticale verso il basso della lampada già installata.

1.0 e 2.5 kcd. Anche questi limiti sono tuttavia molto elevati.

Non è facile calcolare come varia nelle varie direzioni dello spazio l'intensità luminosa dovuta all'emissione diretta nel cielo prodotta globalmente dall'illuminazione di una città. Per esprimere, in prima approssimazione, questa distribuzione Garstang (1986) ha usato nei suoi modelli con ottimi risultati una legge del seguente tipo:

$$I_{dir} = 0.554 \frac{\Phi_T}{2\pi} \theta^4 \quad (2.4)$$

ove  $\theta$  è l'angolo della direzione considerata con la verticale in radianti,  $I_{dir}$  è l'intensità per unità di angolo solido in lumen/sterad ed  $\Phi_T = \bar{\epsilon}\bar{\Phi}$  è il flusso totale emesso direttamente in cielo in lumen. Tale funzione vale zero allo zenith e cresce rapidamente avvicinandosi all'orizzonte.

### 2.2.2 Diffusione nel percorso tra la lampada e la superficie

La quantità di luce che viene diffusa dalle particelle dell'atmosfera cresce in modo esponenziale con il cammino ottico percorso dalla luce. Vedremo più avanti i meccanismi del fenomeno della diffusione della luce da parte delle particelle atmosferiche. La quantità di luce  $dI$  che subisce diffusione in un

Tabella 2.4: Coefficiente di diffusione al suolo per alcune condizioni meteorologiche.

Condizioni meteorologiche	Visibilità	$\beta_{sc}$ $km^{-1}$
nebbia densa	<50m	>78.2
nebbia spessa	50m - 200m	78.2-19.6
nebbia moderata	200m-500m	19.6-7.82
nebbia leggera	500m-1000m	7.82-3.91
nebbia sottile	1km-2km	3.91-1.96
foschia	2km-4km	1.96-0.954
foschia leggera	4km-10km	0.954-0.391
limpido	10km-20km	0.391-0.196
molto limpido	20km-50km	0.196-0.078
eccezionalmente limpido (aria pura)	>50km (277km)	>0.078 (0.0141 <sup>(1)</sup> )

Note:

Da Hulburt (1941).

Per confronto è riportato il valore del coefficiente di diffusione molecolare dell'aria pura, senza aerosoli.

percorso infinitesimo  $dz$  è data da:

$$dI = -IN\sigma dz \quad (2.5)$$

ove  $N$  è il numero di particelle per unità di volume che provocano la diffusione,  $\sigma$  è la loro sezione d'urto integrata ed  $I$  è l'intensità della luce incidente. La frazione di luce  $\eta$  che ha subito diffusione in un percorso di lunghezza  $d$  è quindi:

$$\eta = \frac{I_{diffusa}}{I_0} = \left(1 - e^{(-N\sigma d)}\right) \quad (2.6)$$

La frazione di luce diffusa cresce in modo esponenziale con la lunghezza  $d$  del percorso.

Se una lampada illumina dall'alto in basso con un fascio non molto inclinato rispetto la verticale, una buona parte della radiazione diffusa raggiunge lo stesso il suolo a causa della tendenza delle particelle a diffondere la luce in

una direzione vicina alla direzione originaria del flusso di luce (Front Scattering). Vedremo più in dettaglio in seguito questo fenomeno, ma l'effetto principale per percorsi brevi consiste in un allargamento del fascio. Se però il fascio punta dal basso verso l'alto come accade talvolta nell'illuminazione di pareti di edifici, oppure forma un angolo ampio con la verticale come in alcuni impianti sportivi, l'allargamento del fascio prodotto dalla diffusione fa andare una parte consistente della luce in cielo.

La quantità di luce riflessa o diffusa nella direzione opposta rispetto la direzione di incidenza (Backscattering) è piccola ma non è trascurabile quando il percorso della luce non è breve e quando la concentrazione di aerosoli nelle vicinanze del suolo è elevata (es. presenza di umidità, bruma, foschia). Consideriamo, ad esempio, una torre faro alta 30 metri. Possiamo stimare con la formula precedente la percentuale della luce emessa che viene diffusa dalle particelle atmosferiche. Assumiamo che la concentrazione e la sezione d'urto degli aerosoli a livello del suolo siano tali che il loro prodotto  $N\sigma = \beta_{sc}$  chiamato coefficiente di diffusione sia dell'ordine di  $10^{-5} cm^{-1}$  al suolo, come avviene tipicamente nel caso di foschia. Per semplificare il calcolo, assumiamo inoltre che il percorso della luce sia di 30 metri, trascurando le differenze dovute al diverso angolo di emissione. Applicando la formula si ottiene che circa il 3% della luce emessa dalla torre faro viene diffusa. Assumiamo ora che le particelle diffondano nell'emisfero centrato nella direzione opposta rispetto alla direzione della luce incidente (e quindi verso il cielo) il  $\sim 9\%$  della luce totale diffusa, come accadrebbe se fosse applicabile la funzione di diffusione illustrata più avanti in tabella 2.8. In questo caso lo 0.27% della luce emessa dalla torre viene diffuso nel cielo. Se la pavimentazione a sua volta invia nel cielo il 5% della luce emessa dalla torre-faro, la diffusione contribuisce alla quantità totale di luce inviata nel cielo per circa il 5%. Si tratta di una percentuale non trascurabile, che può crescere molto in caso di maggior densità di aerosoli. Ad esempio in presenza di nebbia moderata il coefficiente di diffusione (v. tabella 2.4) cresce a  $2 \cdot 10^{-4} cm^{-1}$  e la quantità di luce diffusa verso l'alto sale al 4.1%. In questo caso la diffusione contribuisce alla quantità totale di luce inviata nel cielo per circa il 45%, quasi la metà. Se l'elevata densità di aerosoli è presente solo in uno strato a livello del suolo mentre il cielo sopra è limpido, il fenomeno descritto contribuisce notevolmente all'inquinamento luminoso anche a grandi distanze. Se invece lo strato ad elevata densità di aerosoli è esteso verticalmente, l'assorbimento

e l'estinzione<sup>22</sup> da parte delle particelle fa sì che il disturbo provocato dalla torre-faro decresca rapidamente con la distanza. Perciò, grazie alla maggiore estinzione, un osservatore lontano dalla torre-faro ne sarà meno disturbato del solito mentre un osservatore che si trovi nelle sue vicinanze si troverà ad avere un cielo più luminoso del solito a causa della maggiore diffusione.

La dispersione diretta di luce sopra l'orizzonte e la diffusione di luce tra la sorgente e la superficie illuminata entrano in gioco nel valore del fattore di utilizzazione K di un impianto. Il fattore di utilizzazione è il rapporto tra il flusso luminoso che cade sull'area da illuminare ed il flusso totale emesso dalla sorgente luminosa. La frazione di flusso luminoso perduta è allora 1-K. Entro questa frazione c'è tutta la luce che va ad illuminare aree che non dovrebbe illuminare. Una parte è legata anche agli assorbimenti nella riflessione sul riflettore dell'armatura e nel passaggio attraverso il vetro di protezione.

### 2.2.3 Riflessione dall'area illuminata

Una frazione j del flusso che giunge sulla superficie illuminata viene inviata nuovamente verso l'alto. Essa dipende dalle caratteristiche della superficie illuminata, dalla geometria dell'impianto, oltre che dalla disposizione dell'area e dai suoi rapporti con l'ambiente circostante (ad es. la presenza di case che fanno da schermo). Una superficie perfettamente diffondente riemette la luce in modo eguale in tutte le direzioni, mentre una superficie riflettente tende a riemettere tutta la luce ad un angolo  $\theta$  rispetto alla verticale uguale all'angolo dei raggi incidenti. In genere le superfici reali si comportano in modo intermedio. Una parete illuminata dal basso tenderà ad inviare molta luce proprio verso il cielo.

In Illuminotecnica si definisce *coefficiente di luminanza* il rapporto tra la luminanza<sup>23</sup> di un'area unitaria e il suo illuminamento<sup>1</sup> *orizzontale*<sup>24</sup>. Tale coefficiente dipende (1) dalla direzione dei raggi incidenti rispetto la verticale, (2) dalla direzione dei raggi uscenti rispetto la verticale e (3) dalla direzione dei raggi uscenti rispetto il piano verticale che contiene i raggi incidenti. La figura 2.32 illustra questi angoli. Nel caso della pavimentazione stradale il coefficiente di luminanza varia col colore e con il grado di levigatura. I tipi più comuni di pavimentazione stradale si possono classificare in:

---

<sup>22</sup>Si veda più avanti.

<sup>23</sup>Per le definizioni di luminanza e illuminamento si veda la sezione 3.1.3.

<sup>24</sup>L'illuminazione orizzontale è quella prodotta illuminando dall'alto.

Figura 2.32: Angoli da cui dipende il coefficiente di luminanza.

1. molto chiara e scabra
2. chiara con scabrezza elevata o media
3. scura con scabrezza elevata o media
4. scura e levigata

La CIE ha suddiviso le pavimentazioni in due classi a seconda del valore di due parametri: la *specularità* e la *chiarezza*. Chiamati  $\gamma, \alpha, \beta$  rispettivamente nell'ordine i tre angoli precedenti da cui dipende il coefficiente di luminanza  $q$ , la *specularità*  $S_1$  è definita come:

$$S_1 = \cos^3(\arctg 2) \frac{q_1}{q_2} \quad (2.7)$$

ove  $q_1$  è il coefficiente di luminanza del punto della pavimentazione situato tra l'osservatore e il piede della perpendicolare che passa per la lampada, ad una distanza tale che la direzione di incidenza della luce faccia un angolo di 63 gradi con la verticale;  $q_2$  è il coefficiente di luminanza del punto della pavimentazione situato esattamente sotto la lampada. Se la superficie è scabra, la pavimentazione tende ad avere un buon potere diffondente e perciò

$q_2$  non è tanto maggiore di  $q_1$  e quindi  $S_1$  è piccolo. Più la superficie è liscia, più cresce il suo potere riflettente e quindi  $q_1$  tende a essere molto maggiore di  $q_2$  cosicché  $S_1$  cresce.

La *chiarezza*  $Q_0$  è definita come il valore medio del coefficiente di luminanza pesato su tutti i possibili angoli solidi utili nel processo di illuminazione:

$$Q_0 = \frac{\int_0^\Omega q(\gamma, \alpha, \beta) d\omega}{\int_0^\Omega d\omega} \quad (2.8)$$

ove l'integrale è fatto sull'angolo solido infinitesimo  $d\omega$  fino all'angolo solido  $\Omega$  che è il massimo entro il quale possono giungere radiazioni luminose utili. Più la pavimentazione è chiara, maggiore è in media  $q$  e maggiore è  $Q_0$ . La CIE ha definito una classe  $C_1$  (pavimentazione chiara e scabra) ove  $S_1 < 0.4$  (valori normali sono  $S_1=0.24$  e  $Q_0 = 0.10$ ) e una classe  $C_2$  (pavimentazione scura e levigata) ove  $S_1 \geq 0.4$  (valori normali sono  $S_1=0.97$  e  $Q_0 = 0.07$ ). Le pavimentazioni in asfalto di tipo comune si possono assimilare alla classe  $C_2$  (scuro e levigato).

Definiamo *fattore di riflessione medio* il rapporto tra la luminosità media di una superficie (in  $\text{lm}/\text{m}^2$ ) e l'illuminamento medio (in lux). Esso, in pratica, esprime la percentuale di flusso luminoso riemesso. Per una superficie che fosse perfettamente diffondente con una luminanza costante nelle varie direzioni, il fattore di riflessione si otterrebbe moltiplicando il coefficiente di luminanza per  $\pi$ . Il fattore di riflessione medio va da circa il 45-26% per pavimentazioni molto chiare e molto scabre, a circa il 39-22% per pavimentazioni chiare a scabrezza elevata (calcestruzzo), al 26-16% per pavimentazioni scure con scabrezza elevata, fino al 21-13% per pavimentazioni scure e levigate (asfalto). In caso di neve il fattore di riflessione può superare il 60%. Il fattore di riflessione medio dell'intonaco va da circa il 50% per l'intonaco chiaro a 25% per quello scuro e 10% per quello sporco. Il cemento e la pietra chiara hanno un fattore attorno al 40%, quelli scuri sullo 5-10%. Il marmo chiaro raggiunge il 60-65% ma il granito chiaro solo il 10-15%.

Abbiamo visto che la pavimentazione stradale, e più in generale ogni superficie illuminata, necessariamente emette luce. Quindi per evitare un inutile inquinamento luminoso occorre fare molta attenzione a non sovrailluminare rispetto il necessario. Occorre cioè mantenere i livelli di illuminazione al suolo, o sulle superfici interessate, ai livelli effettivamente necessari per il tipo di visibilità richiesta. Per quanto riguarda l'illuminazione stradale i livelli

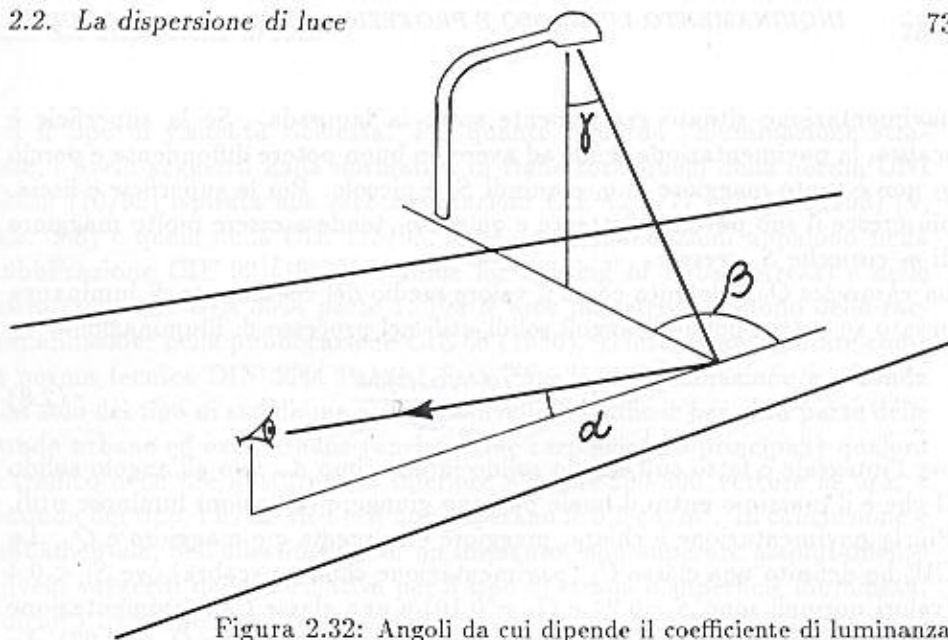


Figura 2.32: Angoli da cui dipende il coefficiente di luminanza.





suggeriti dalla normativa in Italia sono quelli della norma UNI 10439 (Ottobre 1995) riportati nella tabella 2.5 e nella pubblicazione CIE 115 (1995). Altre raccomandazioni appaiono nella pubblicazione CIE 92 (1992) (Guide for lighting of Urban Areas) e nelle norme tedesche DIN 5044 parte 1. Per le aree industriali esistono delle raccomandazioni nella pubblicazione CIE 68 (1986). È interessante notare come la norma tecnica DIN 5044 parte 1 fissa i livelli di illuminazione a seconda non solo del tipo di strada ma anche dei livelli di traffico: per gran parte delle strade urbane ed extraurbane (anche a due carreggiate o principali) qualora il traffico nelle ore notturne sia inferiore alle 100-200-300 vetture all'ora, a seconda del tipo, i livelli richiesti non superano le  $0.5 \text{ cd/m}^2$ . In conclusione è fondamentale, nell'allestimento di un impianto, non superare assolutamente i livelli suggeriti dalla normativa per il tipo di strada o superficie illuminata. Poiché i livelli di illuminazione delle strade necessari per la sicurezza sono legati ai livelli di traffico veicolare, è altresì essenziale prevedere la possibilità di una loro riduzione dopo una certa ora, laddove il traffico diminuisca (v. sez. 5.3.1). Nella tabella 2.6 presentiamo per confronto i livelli di luminanza raccomandati dopo le ore 24.00 nelle isole canarie dalla *Oficina tecnica para la proteccion de la calidad del cielo* dell'*Instituto de Astrofisica de Canarias* cui la legge spagnola 31/1988 affida il compito di soprintendere all'illuminazione esterna del luogo<sup>25</sup>. È molto importante non illuminare, oltre alla superficie desiderata, anche altre superfici che non sia richiesto illuminare. Ad esempio, l'uso di apparecchi stradali per illuminare uno svincolo autostradale è da preferire all'uso di torri-faro perché si evita di illuminare anche il terreno circostante. Oltre a provocare disturbo a vegetazione ed animali, la luce ivi dispersa viene riflessa dal terreno verso l'alto producendo un inquinamento luminoso assolutamente inutile.

### Flusso emesso nel cielo dalle superfici illuminate

In genere il fattore di utilizzazione medio di un impianto di illuminazione stradale, cioè il rapporto tra il flusso luminoso che cade sulla pavimentazione e il flusso totale emesso dalle sorgenti luminose, è compreso nell'intervallo 20%-45%, e, come abbiamo visto, il fattore di riflessione di una pavimentazione stradale scura e levigata come quella più comune in asfalto è all'incirca

---

<sup>25</sup>Si veda *Oficina tecnica para la proteccion de la calidad del cielo* dell'*Instituto de Astrofisica de Canarias*, *Directrices y recomendaciones para proyectos de alumbrado exterior - niveles luminotécnicos*, rev.2, Ottobre 1993

Figura 2.33: Italia di notte da satellite. La luce in questa immagine è quella sfuggita nello spazio (emessa per lo più in direzione verticale, cioè da superfici e pavimentazioni). L'immagine quindi mette in evidenza le aree del nostro paese più illuminate. Poiché l'inquinamento luminoso si propaga lontano dalle sorgenti, per avere un'idea del livello di inquinamento luminoso del cielo è meglio riferirsi alla mappa della sezione 4.3.

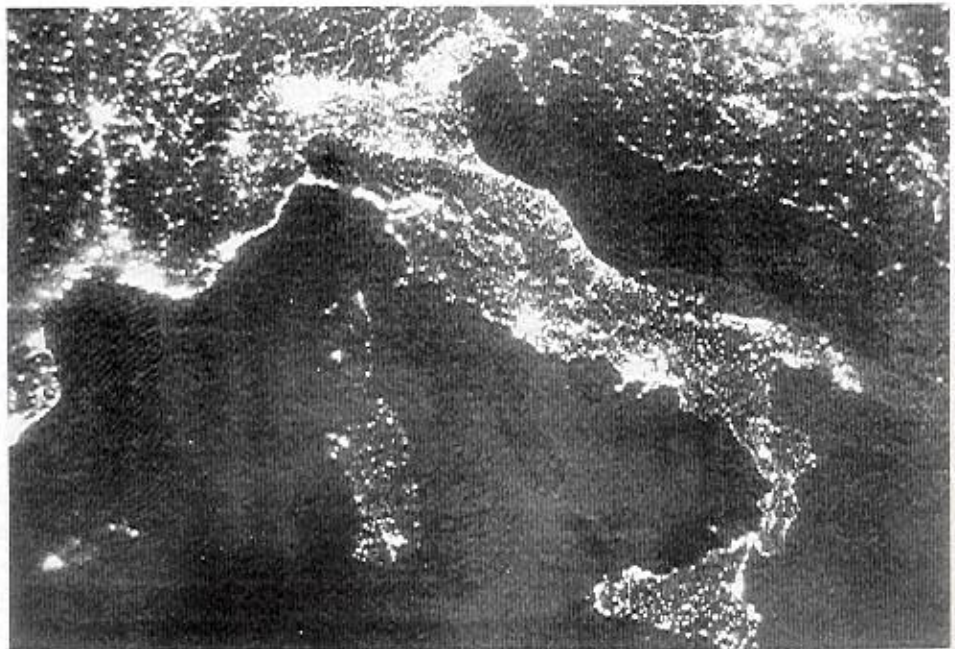




Tabella 2.5: Livelli di illuminazione stradale e requisiti di limitazione dell'abbagliamento per alcuni tipi di strade secondo le prescrizioni illuminotecniche.

Strade	zone laterali	$L_m$ cd/m <sup>2</sup>	G	TI %
autostrade extraurbane	qualsiasi	2	≥6	≤10
autostrade urbane	illuminate	2	≥5	≤10
extraurbane	illuminate	2	≥5	≤10-20
extraurbane	non illuminate	1-2	≥6-5	≤10
urbane principali	illuminate	2	≥4	≤20
urbane di servizio	illuminate	1	≥4	≤20
urbane di scorrimento	non illuminate	0.5	≥5	≤20
urbane di quartiere	illuminate	1	≥4	≤20
urbane di quartiere	non illuminate	0.5	≥5	≤20
locali	illuminate	1	≥4	≤20
locali	non illuminate	0.5	≥5	≤20

Note:

1. Per una piú dettagliata classificazione si veda la norma UNI 10439.
2.  $L_m$  è la luminanza media mantenuta (per la definizione di luminanza si veda la sezione 3.1).
3. G è l'indice di abbagliamento molesto (detto anche psicologico).
4. TI è l'indice di abbagliamento debilitante (per una definizione si veda il punto 5.4.4. della citata norma UNI 10439) che esprime il grado di abbagliamento fisiologico.

Tabella 2.6: Raccomandazioni sui livelli massimi di illuminazione stradale a partire dalle ore 24.00 nei territori sottoposti al controllo della *Oficina tecnica para la proteccion de la calidad del cielo* dell'*Instituto de Astrofisica de Canarias* (Ottobre 1993).

classe	tipo di strada	luminanza media (cd/m <sup>2</sup> )	luminanza puntuale (cd/m <sup>2</sup> )
A	autostrade a scorrimento veloce	1	1.5 (2.5)
B1	arterie principali o importanti	1	1.5 (2.5)
B2	arterie principali o importanti	0.7	1.05 (1.75)
C1	circonvallazioni o strade radiali	1	1.5 (2.5)
C2	circonvallazioni o strade radiali	0.7	1.05 (1.75)
D	strade urbane e commerciali	1	1.5 (2.5)
E1	strade di collegamento locali	0.7	1.05 (1.75)
E2	strade di collegamento locali	0.5	0.75 (1)
F	strade di quartiere e zone industriali	0.7	1.05 (1.75)
G	zone pedonali	0.5	0.75 (1)
H	cammini in parchi o giardini	0.5	0.75 (1)
I	strade di campagna di uso sporadico	0.5	0.75 (1)
J	zone storiche e monumentali	0.5	0.75 (1)
K	strade pedonali commerciali	0.5	0.75 (1)

Note:

1. Le sottoclassi indicate col numero **1** e **2** si riferiscono rispettivamente a margini stradali illuminati oppure oscuri.
2. Il valore tra parentesi è la luminanza puntuale massima consentita nel caso che il livello venga ottenuto tramite spegnimento di metà dei punti luce.

Tabella 2.7: Valori raccomandati per l'illuminamento medio orizzontale di aree di lavoro (CIE 68/1986).

tipo	classificazione	esempi	E(lux) <sup>1</sup>
sicurezza	rischio modesto	aree stoccaggio	5
sicurezza	rischio medio	deposito containers	20
sicurezza	rischio elevato	aree critiche raffineria	50
traffico	pedonale	solo pedoni	5
traffico	veicolare lento	carrelli elevatori	10
traffico	veicolare comune	strade di deposito	20
lavoro	molto grossolano	movimento terra	20
lavoro	grossolano	movimento legname	50
lavoro	normale	deposito mattoni	100
lavoro	fine	verniciatura	200

Note:

1. Valori medi in esercizio dell'illuminazione orizzontale.
2. Per avere una stima della corrispondente luminanza ( $cd/m^2$ ) moltiplicare i valori di illuminamento precedenti (lx) per il coefficiente di luminanza medio della pavimentazione (es. asfalto comune  $\sim 0.07$ ).

del 15%-20%. Quindi il rapporto tra flusso luminoso che finisce in cielo e flusso luminoso emesso dalla lampada è dell'ordine del 3-9%. Perciò una parte notevole di luce, piccola come frazione ma grande come quantità, finisce nel cielo. Essa è spesso molto più piccola della frazione di luce che le lampade disperdono direttamente in cielo (discussa nel paragrafo 2.2). Supponiamo di voler fare in modo che la luce dispersa direttamente dagli apparecchi sia trascurabile rispetto quella emessa dalla pavimentazione e supponiamo di definire "trascurabile" una percentuale inferiore al 5%. Allora occorrerà utilizzare degli apparecchi<sup>26</sup> che abbiano un ULOR, nei casi limite dell'intervallo sopra considerato, rispettivamente minore del 0.15% e del 0.45%. Se il rendimento dell'apparecchio è di circa il 70%, l'UWLR massimo dovrà essere inferiore rispettivamente a 0.2% ed a 0.64%. Ecco perché per minimizzare la dispersione di luce si invita sempre ad utilizzare apparecchi totalmente schermati. Come abbiamo visto, l'*Oficina tecnica para la proteccion de la calidad del cielo* dell'*Instituto de Astrofisica de Canarias* richiede che il flusso efficace emesso da un apparecchio nella metà superiore di una sfera centrata sulla lampada e tagliata da un piano parallelo all'orizzonte debba essere inferiore al 0.2% del flusso totale efficace emesso.<sup>27</sup>

È bene precisare che nel caso dell'illuminazione di pareti e altre superfici, come abbiamo visto all'inizio, i fattori di riflessione possono essere molto più elevati (anche del 50-60%) e possono dare luogo ad emissioni anche del 20% o più del flusso delle lampade. Tuttavia quando l'illuminazione è eseguita dall'alto verso il basso la percentuale di luce che sfugge sopra l'orizzonte scende a meno della metà. Poiché questo attualmente viene fatto raramente, quando si stima la frazione di luce  $\bar{j}$  che l'insieme delle superfici illuminate di una città invia nel cielo in genere si ottengono valori dell'ordine del 15% (v. ad es. Garstang 1986).

Non è facile calcolare quale sia la distribuzione di questa emissione nelle varie direzioni dello spazio. Nei modelli teorici si assume, in prima approssimazione, che il comportamento globale dell'insieme di superfici che costituisce la ideale "superficie" della città sia perfettamente diffondente. Allora la emissione di questa ideale "superficie" totale della città segue la legge di

---

<sup>26</sup>Montandoli nella posizione opportuna (con inclinazione minima).

<sup>27</sup>Ricordiamo ancora che l'emissione di luce sopra l'orizzonte pur essendo sorgente di abbagliamento non ha corrispondenza biunivoca con questo. L'abbagliamento infatti è legato alla differenza tra livelli di illuminazione, come abbiamo visto e non alla emissione assoluta di luce.



Lambert, ossia la sua brillantezza  $B$  è costante in tutte le direzioni. In questo caso poiché per la legge di Lambert la luminosità è  $l = \pi B$  si trova che l'intensità riemessa verso l'alto è:

$$I_{rifl} = \frac{\Phi(1 - \epsilon)(1 - \bar{\eta})\bar{j}}{\pi} \cos \theta \quad (2.9)$$

ove  $\Phi$  è il flusso totale emesso dall'impianto di illuminazione,  $\epsilon, \eta, j$  sono i coefficienti definiti in sezione 2.2,  $\theta$  è l'angolo tra la direzione del flusso avente intensità  $I_{rifl}$  e la verticale. Tale approssimazione è usata spesso nei modelli teorici che studiano la luminosità artificiale del cielo e in genere risulta adeguata.

### 2.2.4 Distribuzione spettrale della luce

La luce dispersa nel cielo può essere più o meno inquinante dal punto di vista delle osservazioni astronomiche a seconda della sua distribuzione spettrale. La distribuzione spettrale della luce dispersa è legata alla distribuzione spettrale della luce emessa che a sua volta dipende dal tipo di lampade utilizzate. Esaminiamo quindi quali sono i tipi di lampade in commercio, le loro caratteristiche, la distribuzione spettrale della luce da esse emessa e le sue potenzialità di inquinamento.

#### Lampade ad incandescenza

Si basano sul fenomeno del riscaldamento prodotto da una corrente elettrica  $I$  che percorre un filamento di resistenza  $R$ . Il calore emesso  $Q$  e la potenza  $P$  sono date da:

$$P = RI^2 \simeq \frac{dQ}{dt} \quad (2.10)$$

In pratica la corrente percorre un filamento di Tungsteno entro un ampolla di vetro sotto vuoto o in un atmosfera di gas inerti e rende tale filamento incandescente. L'emissione della luce segue in prima approssimazione la distribuzione detta di *Corpo nero* corrispondente alla temperatura  $T$  del filamento (in genere circa  $2700^\circ\text{K}$ ) ed è continua in tutto lo spettro visibile. L'emittanza<sup>28</sup> nell'intervallo di lunghezza d'onda  $d\lambda$  è data dalla statistica di

---

<sup>28</sup>L'emittanza è il flusso emesso per unità di superficie.

Planck ( 1901):

$$B(\lambda, T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{K\lambda T}} - 1 \right)} d\lambda \quad (2.11)$$

ove  $h$  è la costante di Plank,  $K$  è la costante di Boltzmann,  $c$  è la velocità della luce. La lunghezza d'onda del massimo dell'emittanza dipende dalla temperatura (Wien 1894):

$$\lambda_{max} = \frac{0.51}{T} \quad (2.12)$$

Il colore delle lampade ad incandescenza è in genere bianco caldo. La loro efficienza è assai modesta: in genere qualche decina di lumen/watt<sup>29</sup>. La loro luce è molto inquinante perché composta da emissioni di tutte le lunghezze d'onda nel visibile e nelle bande vicine. Tuttavia in genere esse non hanno potenze elevate. Queste lampade sono state usate negli impianti stradali fino ad una trentina di anni fa ed oggi sono state in parte sostituite dalle lampade a scarica la cui emissione di luce è prodotta da gas o vapori ionizzati da una corrente di elettroni e ioni che si sviluppa tra due elettrodi a cui è applicata una differenza di potenziale. Le lampade a scarica, descritte nelle prossime sezioni, sono più efficienti e di maggiore durata. Ove sono in vigore norme antiinquinamento luminoso, le lampade ad incandescenza nell'illuminazione esterna notturna sono vietate.

### Lampade a vapori di mercurio

L'emissione luminosa delle lampade a vapori di mercurio (es. HQL) è dovuta ai vapori contenuti in un tubo di quarzo che vengono ionizzati dalla corrente di elettroni e ioni che si produce tra due elettrodi. Essa avviene prevalentemente nell'ultravioletto. L'ampolla esterna della lampada perciò è ricoperta internamente di polvere fluorescente, in genere vanadato di ittrio o alluminato di ittrio, che trasforma le radiazioni ultraviolette in radiazioni ripartite abbastanza uniformemente nello spettro visibile. Proprio per questo le lampade di questo tipo disturbano molto le osservazioni astronomiche e sono considerate estremamente inquinanti tanto che tutte le leggi e le ordinanze che si occupano di inquinamento luminoso ne vietano espressamente l'uso all'esterno. La International Astronomical Union nel Rapporto della Commissione 50 (La protezione dei siti osservativi esistenti e potenziali)(Smith

---

<sup>29</sup>Per la definizione di lumen (lm) si veda la sezione 3.1.

1979) sostiene che *ogni sforzo deve essere fatto per limitare il loro uso futuro*. Queste lampade dominano l'inquinamento luminoso nella regione blu dello spettro mentre nel rosso il loro contributo è generalmente piccolo rispetto a quello delle lampade al sodio, che esamineremo in seguito. Il loro spettro è visibile in figura 2.35. La discreta resa dei colori di queste lampade è controbilanciata da una scarsa efficienza. Attualmente stanno lentamente scomparendo.

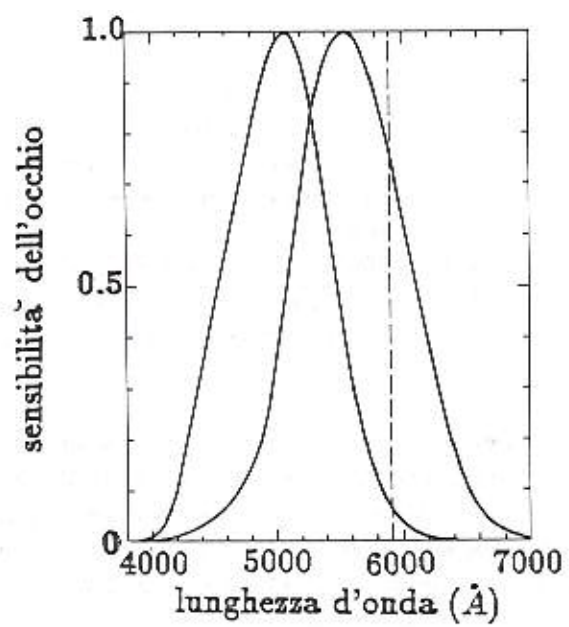
### **Lampade agli ioduri metallici**

L'introduzione di ioduri metallici (sodio, tallio, indio, disprosio, olmio, cesio, tulio) oltre al mercurio nel precedente tipo di lampade aumenta un poco l'efficienza e migliora la resa dei colori (luce bianca solare) la qual cosa rende ancora più pesante il loro effetto nell'inquinamento luminoso. La luce è più bianca perché queste sostanze alle alte temperature si scompongono e gli ioni metallici emettono luce nelle zone ove il vapore di mercurio non presenta righe di emissione. Il costo di queste lampade è elevato e la riaccensione dopo uno spegnimento fortuito non è immediata, cosa pericolosa in caso di illuminazione stradale. Di queste lampade esistono diverse versioni commerciali (MHN, MHV, HPI, MHD, HQI-NDL, HQI-WDL) caratterizzate da diverse tonalità cromatiche. Esse contaminano notevolmente le bande fotometriche astronomiche e devono quindi essere considerate altamente inquinanti (sono probabilmente le più inquinanti in commercio). In genere, anche tenendo conto della loro scarsa efficienza rispetto ad altri tipi di lampade, esse dovrebbero trovare oggi la loro applicazione principale nell'illuminazione degli impianti sportivi ove le necessità di avere una luce perfettamente bianca supera gli altri svantaggi. Il loro uso, limitato ai casi di effettiva necessità di avere una luce perfettamente bianca, richiede una grande attenzione ad eliminare tutte le possibilità che la loro luce venga dispersa. Ove sono in vigore norme per la limitazione dell'inquinamento luminoso il loro uso è strettamente regolamentato.

Figura 2.34: Confronto tra l'emissione delle lampade al sodio a bassa pressione ( $5890\text{Å} - 5895\text{Å}$ ) e le curve di sensibilità spettrale dell'occhio adattato alla luce (curva a destra) e adattato al buio (curva a sinistra)

### Lampade al sodio a bassa pressione

Nelle lampade al sodio a bassa pressione (LPS) la scarica si innesca inizialmente in ambiente di gas neon. Quando la temperatura raggiunge i  $200^{\circ}\text{C}$ , il sodio, contenuto nella loro ampolla tubolare, evapora e inizia a ionizzarsi. Sono perciò necessari alcuni minuti (10-14) perché la lampada sia a regime ma essa si riaccende subito in caso di spegnimento fortuito. L'emissione di luce è dovuta al sodio eccitato e perciò è limitata esclusivamente al doppietto del sodio a  $5890-5896\text{Å}$ , che cade nella zona ove l'occhio umano raggiunge la massima sensibilità, ed ai due doppietti a  $5683-5688\text{Å}$  ed  $6154-6161\text{Å}$ . Per questo motivo queste lampade hanno la maggiore efficienza in assoluto. Queste lampade, spesso indicate con le sigle NA, SOX ed SOX-E, arrivano ad efficienze dell'ordine di  $200\text{ lm/W}$  (v. ad es. le SOX-E-131). Difficilmente le altre lampade potranno superare l'efficienza delle lampade al sodio a bassa pressione. Ne deriva che gli oneri d'esercizio sono i più bassi. La luce di queste lampade, però, è monocromatica giallo-arancio e non consente la percezione dei colori. Per questo motivo tali lampade sono impiegate ge-





neralmente in strade extraurbane, svincoli autostradali e zone industriali o periferiche. Per le caratteristiche della loro emissione sono altresì utilizzate in zone di nebbia. Sono disponibili generalmente fino a potenze di circa 200 W (almeno 30000 lm) corrispondenti a potenze di 300-400 W delle altre lampade. 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. Esse inoltre non disturbano la zona dello spettro elettromagnetico sotto i 7500 Å, perciò non interferiscono con le bande fotometriche astronomiche B ed U. Poiché l'occhio in condizioni di bassissima luminosità ambientale, quando la visione avviene tramite i *bastoncelli*, cambia la sua curva di sensibilità spettrale e il doppietto del sodio a 5890-5896 Å viene a trovarsi non più al centro ma ai margini di tale curva, la luminosità del cielo prodotta da queste lampade<sup>30</sup> disturba poco anche l'osservazione astronomica visuale. Lo spettro di queste lampade è visibile in figura 2.35 e in figura 2.34.

In molte zone degli Stati Uniti l'amministrazione pubblica sta progressivamente sostituendo nell'illuminazione pubblica le lampade ai vapori di mercurio e al sodio ad alta pressione con le lampade al sodio a bassa pressione. In Italia tuttavia è emerso che non sono diffuse come dovrebbero. In un sondaggio sulla accettabilità da parte del pubblico delle lampade al sodio svolto nella città americana di San Josè in vista della conversione dell'illuminazione<sup>31</sup> è emerso che in zone commerciali circa il 61% dei cittadini ritiene accettabili le lampade al sodio a bassa pressione e il 50% quelle al sodio ad alta pressione. Nelle zone residenziali le percentuali diventano rispettivamente del 55% e del 57%. Quando agli intervistati furono fatte presenti le caratteristiche di risparmio energetico dei due tipi di lampada le percentuali crebbero rispettivamente al 83% e allo 87% nelle zone commerciali e al 68% ed al 75% in quelle residenziali. È interessante anche un commento del Commissario di Polizia di New York secondo cui per le autorità di pubblica sicurezza il fatto che le lampade al sodio a bassa pressione non consentano di distinguere i colori non costituisce un problema perché, dal momento che tutta l'illuminazione notturna distorce i colori, la polizia è abituata a identificare i colori utilizzando il faro in dotazione alle proprie autovetture.

---

<sup>30</sup>Quando non eccessiva, perché altrimenti l'occhio recupera la curva di sensibilità che ha in condizioni di luminosità maggiore.

<sup>31</sup>Public Response Associates inc., 1980, A Report on a public opinion survey on sodium lighting conversion in San Josè, San Francisco, Ca.

Vogliamo sottolineare ancora una volta che non è vero che le lampade al sodio a bassa pressione non consentono di raggiungere livelli di emissione sufficienti a produrre un adeguato illuminamento al suolo, come talvolta si sente dire, né è vero che non esistono armature cut-off per queste lampade. Ad esempio, l'*Oficina tecnica para la proteccion de la calidad del cielo* dell'*Instituto de Astrofisica de Canarias* ha testato (1993) l'armatura PHILIPS H-SRP-483 con vetro piano trasparente e due lampade al sodio a bassa pressione (tipo NA/SOX) da 55w ciascuna (dimensioni 425×52 mm), che producevano un flusso totale equivalente a quello prodotto da una lampada al sodio ad alta pressione da 150w ( $\sim 15\text{klm}$ ), ottenendo un UFR dello 0.15%.

### Lampade al sodio ad alta pressione

Le lampade al sodio ad alta pressione (HPS) sfruttano il fatto che con una pressione maggiore degli atomi di sodio ed una temperatura di circa  $700^{\circ}\text{C}$  si ottiene una efficienza inferiore ma una distribuzione della luce pressoché continua (luce bianco-oro) che permette di distinguere i colori. 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. In corrispondenza del doppietto di emissione del sodio appare quindi un doppietto in assorbimento (autoinversione). Perciò le lampade al sodio ad alta pressione hanno un'emissione molto larga tra 5400 e 6500 Å. 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 ed i 5400 Å. Tali lampade (perlomeno i tipi a pressione meno elevata) pur rendendo le osservazioni astronomiche spettroscopiche difficili nelle zone vicine al doppietto del sodio, contaminano in modo piuttosto modesto la banda fotometrica B. Quindi costituiscono un buon equilibrio tra potere inquinante e possibilità di distinguere i colori nei casi in cui tale caratteristica è effettivamente necessaria. Il loro spettro è visibile nella figura 2.35. Esistono diversi tipi commerciali di lampade al sodio ad alta pressione (identificate in genere con le sigle SON o NAV) che differiscono per la pressione. Essa determina la quantità di autoassorbimento e quindi la tonalità della luce che parte dal giallo-oro dei modelli standard, con pressioni del sodio di 10 kPa



Figura 2.35: Spettro di emissione di alcune lampade a scarica.

(kilopascal) ed elevata efficienza (anche 130 lm/W), e diventa sempre più bianca al crescere della pressione attraverso i modelli plus, super, confort e de luxe. Questi ultimi hanno pressioni dell'ordine di 40 kPa ma efficienze inferiori (fino a 95 lm/W). I modelli white (SDW) hanno, infine, una luce bianco-dorata, ottenuta con una pressione di 95 kPa, ma un'efficienza assai scarsa (circa 50 lm/W). L'aggiunta di impurezze nel sodio permette di ottenere una luce più bianca, in quanto appaiono altre righe, ma aumenta notevolmente il loro potere inquinante (vedi HPI).

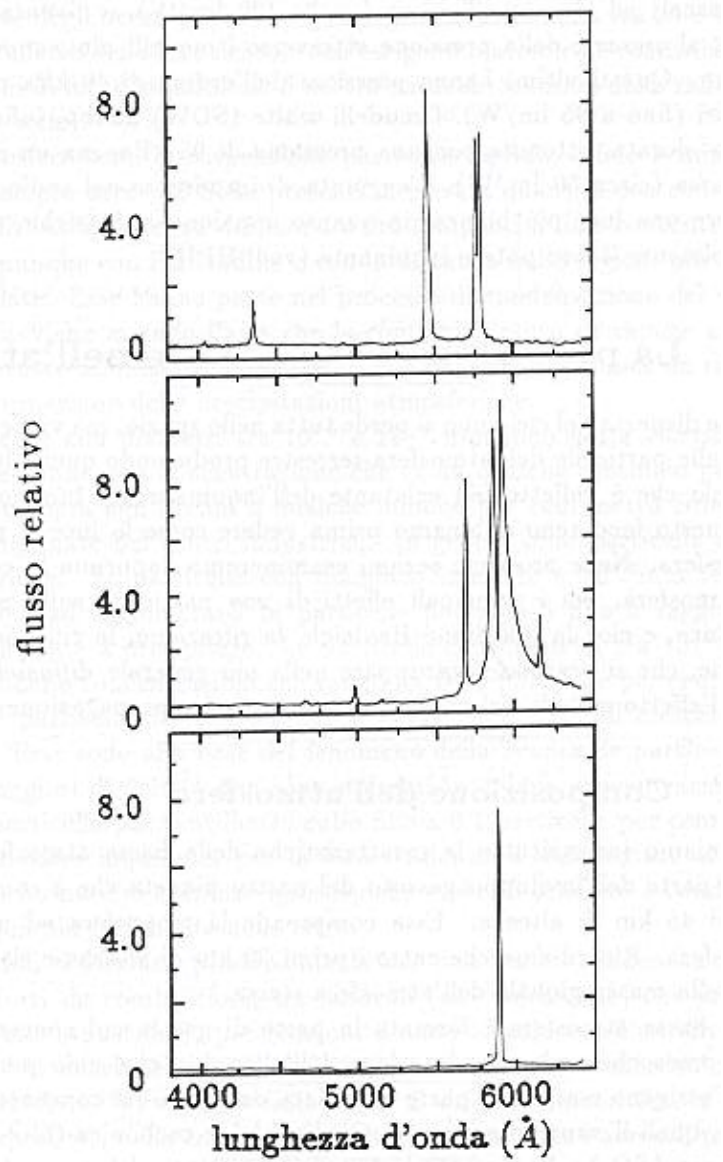
## 2.3 La propagazione della luce nell'atmosfera

La luce dispersa nel cielo non si perde tutta nello spazio, ma viene in parte diffusa dalle particelle dell'atmosfera terrestre producendo quella luminescenza del cielo che è l'effetto più eclatante dell'inquinamento luminoso. Per capire questo fenomeno dobbiamo prima vedere come la luce si propaga nell'atmosfera. Nelle prossime sezioni esamineremo dapprima la composizione dell'atmosfera, poi i principali effetti di una particella sulla propagazione della luce, e cioè la diffusione Rayleigh, la rifrazione, la riflessione e la diffrazione, che si possono raggruppare nella più generale *diffusione di Mie*, e infine l'effetto globale del mezzo atmosferico sulla propagazione della luce.

### 2.3.1 Composizione dell'atmosfera

Esaminiamo innanzitutto le caratteristiche della bassa atmosfera, ossia di quella parte dell'involuppo gassoso del nostro pianeta che è compresa entro i primi 45 km di altezza. Essa comprende la troposfera ed una parte di stratosfera. Ricordiamo che entro i primi 30 km di altezza è situato circa il 99% della massa globale dell'atmosfera stessa.

La bassa atmosfera è formata in parte di gas la cui concentrazione rimane pressoché costante al variare dell'altezza e che sono per il 99.997% azoto, ossigeno e argo. In parte è formata da gas la cui concentrazione è variabile, quali il vapor d'acqua ( $H_2O$ ), l'anidride carbonica ( $CO_2$ ), l'anidride solforosa ( $SO_2$ ) e l'ozono ( $O_3$ ). La concentrazione del vapor d'acqua varia in relazione al suo ciclo di evaporazione-condensazione-precipitazione che si svolge essenzialmente entro i primi 12 km di atmosfera. L'anidride carbonica proviene da fotosintesi, combustioni e dai processi di assorbimento ed emis-





sione da parte degli oceani. L'ozono è concentrato nella zona tra 20 e 45 km, si forma per effetto della luce del sole sull'ossigeno biatomico e costituisce con le sue reazioni di fotodissociazione il nostro naturale schermo dalle radiazioni ultraviolette solari.

Nell'atmosfera sono in sospensione particelle liquide, solide o miste che vengono chiamate *aerosoli*. Sono presenti in elevata quantità con concentrazioni variabili in dipendenza del luogo e del tempo. La loro concentrazione decresce comunque con l'altitudine e con la distanza dalle regioni più densamente popolate. Esse hanno parte nel processo di condensazione del vapore acqueo che avviene quando l'aria che le contiene, satura di vapore acqueo, subisce un brusco abbassamento di temperatura. Giocano quindi un ruolo di base nella formazione delle precipitazioni atmosferiche.

Le particelle con diametri tra  $10^{-6}$  e  $10^{-4}$  mm sono dette *Particelle di Aitken*. Esse hanno una concentrazione che va da qualche centinaio per centimetro cubo sopra agli oceani a qualche milione per centimetro cubo nelle atmosfere inquinate dei centri industriali. In genere sono particelle elettricamente cariche. Le particelle con diametro inferiore a  $10^{-4}$  mm tendono a coagularsi o ad agglomerarsi in particelle più grandi fino a raggiungere un peso sufficiente a precipitare. Le particelle con diametri tra  $10^{-4}$  mm e  $5 \cdot 10^{-3}$  mm hanno concentrazioni che vanno da 1000 particelle per centimetro cubo a  $10^{-1}$  particelle per centimetro cubo decrescenti con il crescere delle dimensioni. Esse sono alla base del fenomeno della *bruma*. Le particelle con diametri maggiori di  $5 \cdot 10^{-3}$  mm sono presenti in debole concentrazione, da circa  $10^{-6}$  particelle per centimetro cubo fino a 0.1 particelle per centimetro cubo in atmosfere inquinate, per la loro tendenza a sedimentare al suolo. Alcune sono formate di sostanze igroscopiche e perciò tendono a condensare vapore d'acqua più facilmente delle altre.

Gli aerosoli si formano principalmente per una brusca condensazione dei vapori prodotti da combustioni, sia naturali (es. vulcaniche) che prodotte dall'uomo (es. industriali), per reazioni dovute al calore, all'umidità e all'irraggiamento solare nei gas atmosferici oppure per effetto meccanico sulla superficie terrestre. Vi sono aerosoli anche di origine meteoritica, le *micro-meteoriti*, o prodotti dalla combustione delle meteore. Gas e aerosoli prodotti dalle attività umane sono fonte di inquinamento atmosferico. Alcune condizioni meteorologiche possono favorire un accumulo di gas e aerosoli dovuti all'inquinamento, come la presenza di anticloni che fanno sì che lo strato d'aria a livello del suolo sia stabile favorendo la stagnazione dell'aria di notte.

In questi casi si può produrre, a causa dell'irraggiamento al suolo, uno strato di inversione termica che aggrava il fenomeno impedendo la convezione dell'aria. Spesso tali condizioni climatiche possono favorire anche reazioni che coinvolgono le particelle dell'inquinamento ambientale (es. lo smog).

Possiamo semplificare la struttura dell'atmosfera considerandola un mezzo gassoso in equilibrio sottoposto alla attrazione gravitazionale. In questo caso vale l'equazione dell'equilibrio idrostatico. Se trascuriamo la curvatura terrestre, la forza per unità di superficie (pressione) che sostiene uno strato di atmosfera di spessore  $dz$  è uguale e contraria alla forza di gravità agente sulla massa dello strato corrispondente a quella unità di superficie:

$$dp = -g\rho dz \quad (2.13)$$

ove  $g$  è la accelerazione di gravità e  $\rho$  è la densità dello strato. Per l'aria secca vale l'equazione di stato di un gas perfetto:

$$P = \rho \frac{RT}{M} \quad (2.14)$$

ove  $R$  è la Costante dei Gas,  $M$  è la massa di una mole di aria secca (22.4 litri di aria secca in condizioni normali),  $T$  è la temperatura. Ricavando la densità dall'ultima equazione, sostituendola nella equazione (2.13) e integrando con  $T = \bar{T}$ ,  $g = \bar{g}$  ed  $M = \bar{M}$  si ottiene:

$$P = P_0 e^{\left(-\frac{\bar{M}\bar{g}}{R\bar{T}}z\right)} \quad (2.15)$$

$$\rho = \rho_0 e^{\left(-\frac{\bar{M}\bar{g}}{R\bar{T}}z\right)} \quad (2.16)$$

Quindi in prima approssimazione la densità della componente gassosa dell'atmosfera decresce in modo esponenziale con l'altezza. Anche la densità degli aerosoli decresce con l'altezza in modo pressochè esponenziale come si vede ad esempio nelle misure riportate in figura 2.36.

Gli effetti sulla propagazione della luce delle due classi principali di particelle che abbiamo esaminato, le molecole e gli aerosoli, sono fenomeni di diffusione (scattering) e fenomeni di assorbimento. Entrambi tolgono energia ad un fascio di luce. L'attenuazione che ne deriva è chiamata *estinzione*.

Figura 2.36: Andamento della densità numerica degli aerosoli nell'atmosfera con l'altitudine. Le varie curve si riferiscono a misure in luoghi e condizioni atmosferiche diverse.

### 2.3.2 Diffusione Rayleigh

Consideriamo dapprima particelle che siano piccole di dimensioni rispetto alla lunghezza d'onda della luce visibile. In genere si comportano come segue le molecole o le particelle di aerosol più piccole. In questo caso la particella si può considerare immersa in un campo elettrico omogeneo periodico  $\vec{E}_0 e^{i\omega t}$ , che la polarizza inducendo un *momento di dipolo*  $\vec{p}$  anch'esso periodico:

$$\vec{p} = \alpha \vec{E}_{applicato} = \alpha \vec{E}_0 e^{i\omega t} \quad (2.17)$$

La costante di proporzionalità  $\alpha$  è detta *polarizzabilità* ed è un tensore. Il dipolo oscillando irraggia onde elettromagnetiche in tutte le direzioni. Questo è il cosiddetto *Scattering Rayleigh*.

Per un mezzo in cui la polarizzabilità è uguale in tutte le direzioni (isotropo), l'espressione che ci dà l'intensità della radiazione dovuta alla diffusione Rayleigh in una data direzione in funzione dell'intensità del fascio incidente, dell'angolo  $\theta$  tra il fascio incidente e la direzione considerata, della polarizzabilità scalare  $\alpha'$ , della lunghezza d'onda  $\lambda$  e della distanza  $r$  è:

$$I = \frac{I_0}{r^2} (1 + \cos^2 \theta) \frac{|\alpha'|^2}{2\lambda^4} \quad (2.18)$$

Si osservi la dipendenza dell'intensità da  $\lambda^{-4}$  che implica che la luce di minore lunghezza d'onda viene diffusa in modo maggiore: il blu, ad esempio, è più diffuso del rosso nell'atmosfera cosicché il cielo di giorno appare blu. La diffusione Rayleigh ha degli effetti anche sul piano di polarizzazione della luce diffusa, per lo studio dei quali rimandiamo il lettore a testi specifici. Le molecole, infine, oltre che diffondere possono in parte assorbire la radiazione.

### 2.3.3 Rifrazione, riflessione e diffrazione

Nel caso di particelle con dimensioni che vanno dallo stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della luce visibile a dimensioni molto maggiori, la diffusione della luce è dovuta a fenomeni diversi che ora esamineremo. Rientrano in questa categoria le particelle di aerosol.

Una prima causa della diffusione della luce da parte degli aerosoli è la *rifrazione* dei raggi incidenti sulla superficie delle particelle. La distribuzione angolare e la polarizzazione della luce che è stata diffusa per rifrazione nonché la quantità di energia assorbita dipendono dalla forma, dalla composizione delle particelle, in particolare dall'indice di rifrazione del materiale, e dalle caratteristiche della loro superficie. Per una particella sferica la radiazione diffusa per rifrazione si concentra in una direzione prossima a quella in cui si propaga la radiazione incidente (Frontscatter).

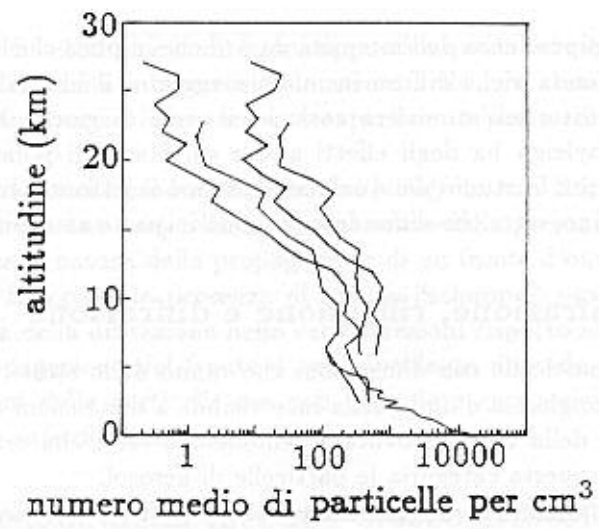
Un'altra causa di diffusione della luce è la *riflessione* da parte della superficie delle particelle. La riflessione può essere distinta in *riflessione speculare* o *riflessione diffusa*. Esaminiamo, ad esempio, il comportamento della luce sulla superficie di una particella sferica. Una particella lucida sferica che sia perfettamente riflettente invia luce in tutte le direzioni a causa della forma della superficie (scattering isotropo). Le particelle che hanno una superficie non perfettamente riflettente hanno un comportamento più complesso. Una superficie piana "bianca" che riemetta totalmente la luce incidente segue in genere la Legge di Lambert, ossia la sua brillantezza superficiale è la stessa in tutte le direzioni indipendentemente dalla direzione da cui la superficie è illuminata. Per una particella sferica "bianca", tenuto conto della geometria del sistema si trova che l'intensità della radiazione diffusa ha un'espressione del tipo <sup>32</sup>:

$$f(\theta) \propto (\sin \theta - \theta \cos \theta) \quad (2.19)$$

---

<sup>32</sup>Schoenberg 1929, handb. Astrophysik, 2, 255.







ed è massima per  $\theta \sim 180^\circ$  cioè in direzione opposta a quella dei raggi incidenti (backscatter). L'intensità è invece uguale a zero nella loro stessa direzione. Le particelle reali avranno in genere una superficie in parte riflettente e in parte diffondente.

Un altro fenomeno che produce diffusione è la *diffrazione*. Il fronte d'onda che passa ove si trova una particella viene schermato dalla presenza della particella stessa. Per la natura della propagazione di un fronte d'onda, stabilita dal principio di Huygens, la presenza di questo "schermo" produce diffrazione. L'intensità della diffrazione nelle varie direzioni rispetto alla direzione originaria di propagazione del fronte d'onda incidente dipende dalla forma e dalle dimensioni delle particelle ma non dalla loro composizione o dalla natura della loro superficie.

### 2.3.4 Diffusione della luce nel mezzo atmosferico

Vediamo come la luce viene diffusa<sup>33</sup> dalle particelle atmosferiche a causa dei fenomeni illustrati nelle due precedenti sezioni.

Chiamiamo  $\theta$  l'angolo tra la direzione di propagazione della luce e la direzione della diffusione. Possiamo definire un *coefficiente di diffusione*  $f(\theta)$ , chiamato anche funzione di diffusione, nel modo seguente:

$$f(\theta) = \frac{\text{intensità del flusso diffuso nella direzione } \theta}{\text{flusso geometricamente incidente sulla particella}} \quad (2.20)$$

Il calcolo di  $f(\theta)$ , in funzione dell'indice di rifrazione  $m$  e di un parametro  $\alpha$ , chiamato parametro dimensionale e legato alle dimensioni delle particelle, si può fare utilizzando la teoria di Mie (1908) della diffusione della radiazione. I casi estremi, che abbiamo visto nelle due precedenti sezioni, sono l'ottica geometrica (rifrazione e riflessione) quando le particelle sono molto grandi ( $\alpha \gg 1$ ) e la diffusione Rayleigh quando  $\lambda \gg d$ . Le equazioni di Mie richiedono in generale una soluzione con metodi numerici. In genere la diffusione di Mie viene rappresentata in termini di due funzioni angolari di intensità  $I_{1,2}(\theta, m, \alpha)$  legate ai coefficienti di diffusione. Se la radiazione incidente non è polarizzata, la radiazione diffusa è data da  $(I_1 + I_2)$ .

---

<sup>33</sup>Per un approfondimento si veda: P. C. Reist, Introduction to aerosol science, Macmillan, New York, 1984; E. J. McCartney, Optics of the atmosphere, Wiley, New York, 1976; H. C. van de Hulst, Light scattering by small particles, Dover, New York, 1957; H. C. van de Hulst, Multiple light scattering, voll.1 e 2, Academic Press, New York, 1980.

Vediamo qual é la forma<sup>34</sup> della funzione di diffusione  $f(\theta)$  di una particella.

La luce diffusa in direzioni vicine a quella della luce incidente ( front-scatter) è dovuta in gran parte alla diffrazione. Poiché i fotoni diffratti non sono passati all'interno della particella, essa è poco influenzata dall'indice di rifrazione della particella ma dipende invece dalla sua forma e dalle dimensioni. Teniamo fissa la lunghezza d'onda della luce incidente e consideriamo la diffusione prodotta su particelle via via più grandi. Per particelle molto piccole ( $d \ll \lambda$ ) la funzione di diffusione è quella della diffusione Rayleigh  $f(\theta) \propto (1 + \cos^2 \theta)$ . Mano a mano che si considerano particelle di dimensioni maggiori, la funzione di diffusione per effetto della diffrazione diventa sempre più concentrata in un lobo molto stretto attorno alla direzione che originalmente aveva la luce incidente. Come le dimensioni crescono ed il parametro dimensionale  $\alpha$  supera l'unità, la funzione di diffusione inizia a sviluppare picchi con una approssimativa corrispondenza tra il numero di picchi tra  $0^\circ$  e  $180^\circ$  ed  $\alpha$ , sempre restando il massimo ad  $\theta = 0$ . Quando  $\alpha$  tende a 10 si sviluppa una struttura ancor più fine e complessa. La figura 2.37 illustra quanto descritto.

La radiazione diffusa nell'emisfero posteriore (backscatter) viene influenzata soprattutto dal *coefficiente di assorbimento* che costituisce la parte immaginaria dell'indice di rifrazione. Al crescere del coefficiente di assorbimento, essa decresce fino ad un minimo, oltre il quale aumenta di nuovo perché la particella diventa riflettente. Al crescere del coefficiente di assorbimento la asimmetria della diffusione diminuisce. Infatti, come abbiamo visto, l'emissione dovuta alla riflessione tende per particelle sferiche ad essere isotropa.

La forma della funzione di diffusione di una particella consiste quindi in un lobo più o meno stretto, molto intenso centrato nella direzione di propagazione della luce incidente che si sovrappone ad una emissione meno intensa di intensità variabile a seconda della direzione in base alle proprietà ottiche della particella stessa.

L'effetto integrato di un volume di particelle, assumendo che in esso avvenga una sola interazione tra luce e particella, consiste nella somma dei contributi delle varie particelle. Le funzioni di Mie per questo elemento di

---

<sup>34</sup>Il diagramma che mostra l'andamento dell'intensità della luce diffusa con il variare di  $\theta$  si chiama diagramma di irradiazione.

Figura 2.37: Forma della funzione angolare di diffusione per tre particelle di aerosol di dimensioni crescenti ( $0.1 \mu$ ,  $0.6\mu$ ,  $1.2\mu$ ). Nella figura la luce incidente proviene dal basso.

volume si ottengono dalla somma delle funzioni di Mie delle singole particelle, ammesso che il numero di particelle sia elevato e la loro distribuzione sia completamente casuale. Per luce non polarizzata quindi è semplicemente:

$$i = \sum_n (I_{1,n} + I_{2,n}) \quad (2.21)$$

Quando la diffusione è prodotta da un volume che contiene un misto di particelle con dimensioni diverse, la funzione di diffusione globale mostra meno irregolarità perché i massimi ed i minimi sono smorzati dalla varietà di particelle esistenti, che si comportano ognuna in modo leggermente diverso dall'altra. Con le distribuzioni delle dimensioni delle particelle che si incontrano normalmente (es. distribuzione di Junge) la diffusione è caratterizzata soprattutto dalla forte intensità in direzione frontale. Se le particelle sono fortemente asferiche o irregolari ci possono essere altri minimi e massimi ma, di nuovo, se le particelle hanno forme diverse le irregolarità tendono a smorzarsi.

Nel caso di un aerosol molto denso, come la nebbia, o in generale quando la profondità ottica è molto maggiore di 1, la luce diffusa da uno strato spesso subisce più di un'interazione con le particelle (scattering multiplo). In questo

Tabella 2.8: Esempio di funzione di diffusione per un aerosol atmosferico.

$f(\theta)$	
$0 \leq \theta \leq 10^\circ$	$f(\theta) = 7.5 \exp(-0.1249 \theta^2 / (1 + 0.04996 \theta^2))$
$10^\circ < \theta \leq 124^\circ$	$f(\theta) = 1.88 \exp(-0.07226 \theta + 0.0002406 \theta^2)$
$124^\circ < \theta \leq 180^\circ$	$f(\theta) = 0.025 + 0.015 \sin(2.25\theta - 369.0)$

Note:

Vedi Garstang (1991), McClatchey *et al.*(1978).

L'angolo  $\theta$  è in gradi.

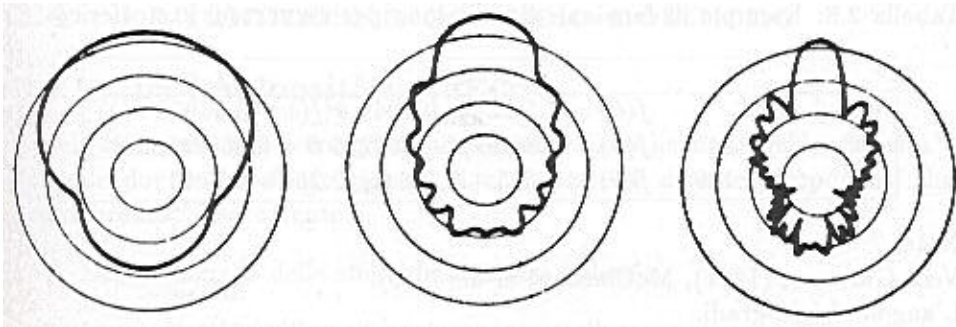
caso la funzione di diffusione che ne risulta è piuttosto indipendente da quella originaria. Le numerose interazioni successive cancellano i dettagli strutturali lasciando un andamento molto smorzato. Nebbia, nubi e aerosol non secchi hanno un maggior frontscattering rispetto a quelli secchi, ma trasmettono meno la luce. Per umidità maggiori del 70% si può assumere che la funzione di diffusione sia quella di una popolazione di particelle sferiche<sup>35</sup>.

Spesso si usa definire un coefficiente detto *sezione d'urto angolare di diffusione*,  $\sigma(\theta)$ , espresso in unità di superficie per particella per unità di angolo solido (es.  $cm^2 sr^{-1}$  per particella), che esprime la sezione (area) del fascio incidente che la particella diffonde in un'unità di angolo solido nella direzione  $\theta$ . Si definisce *sezione d'urto integrata*,  $\sigma_a$ , espressa in unità di superficie per particella, la sezione del fascio incidente che viene diffusa in qualunque direzione da una particella. Se la funzione di diffusione  $f(\theta)$  è normalizzata ad 1 per integrazione sulla sfera, allora  $\sigma(\theta) = \sigma_a f(\theta)$ .

Una tipica forma della funzione di diffusione per un volume di aerosol atmosferico si trova in tabella 2.8.

---

<sup>35</sup>vedi G. Haendel, 1976, The properties of Atmospheric aerosol particles as functions of the relative Humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding Moist Air, Adv. Geophys., 19, 74.







## 2.4 La luminosità del cielo notturno

### 2.4.1 La luminosità naturale

Il cielo notturno non è completamente buio. Esso ha una sua luminosità<sup>36</sup> naturale dovuta all'effetto globale di un insieme di diverse componenti che descriveremo<sup>37</sup> brevemente:

1. Luce integrata delle stelle della nostra galassia
2. Luce galattica diffusa da polvere interstellare
3. Luce di sorgenti cosmiche integrate.
4. Luce zodiacale, ossia luce del sole diffusa dalle particelle di polvere interplanetaria.
5. Airglow ossia luce prodotta da eccitazione fotochimica di atomi e molecole nell'alta atmosfera.
6. Aurora ossia luce prodotta da eccitazione di atomi e molecole dell'alta atmosfera da parte di particelle energetiche.

#### Luce stellare integrata

Le stelle della nostra galassia che sono troppo deboli per essere osservate a occhio nudo contribuiscono alla luminosità diffusa del cielo. Tale luminosità è concentrata nell'area di cielo che interseca il piano galattico. Perciò, la brillantezza dovuta alla luce integrata delle stelle varia fortemente con la direzione di osservazione da un minimo di circa  $20 \cdot 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$ , osservando nelle direzioni dei poli galattici, ad un massimo di circa  $250 \cdot 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$ , nelle zone più luminose della Via Lattea. Se la brillantezza del cielo, a causa dell'illuminazione artificiale, è molto superiore a tali valori, l'osservazione della Via lattea diventa impossibile. Se l'occhio di un osservatore riesce a distinguere

---

<sup>36</sup>Per la definizione di luminosità e brillantezza e le relative unità di misura si veda la sezione 3.1.

<sup>37</sup>Per un approfondimento degli argomenti trattati in questa sezione si veda: J. Chamberlain, *Physics of the Aurora and Airglow*, Academic press, New York, 1961; F. E. Roach e J. L. Gordon, *The light of the night sky*, Reidel, Dordrecht, 1974.

Tabella 2.9: Brillanza naturale del cielo e luminosità corrispondente: valori tipici allo zenith e valori minimi.

Sorgente	zenith $S_{10,vis}$	zenith $10^{-6}cd m^{-2}$	zenith nL	min. $S_{10,vis}$	min. $10^{-6}cd m^{-2}$	min. nL
Luce Zodiacale	130 (100-180)	91 (70-126)	28.6 (22-39.6)	80	56	17.6
Luce stellare int.	110 (30-400)	77 (21-213)	24.2 (6.6-66.9)	30	21	6.6
Luce galattica	20	14	4.4	8	5.6	1.76
Airglow (minimo)	50	35	11	50	35	11
Fondo cosmico	<1	<0.7	<0.22	<1	<0.7	<0.22
Totale	310	217	68.2	168	118	37.0

Nota:

Abbiamo incluso nella tabella anche i valori della luminosità corrispondente alla brillanza, intesa come "Quella luminosità che avrebbe il cielo se esso avesse una brillanza uniforme uguale a quella considerata" (si veda la discussione nel capitolo 3.1). In passato talvolta si usava esprimere le misure di brillanza allo zenith in questo modo per avere subito una stima della luminosità dell'intero cielo.

una luminosità diffusa quando il contrasto con lo sfondo è maggiore di un valore di soglia  $q$ , la brillanza massima del cielo che consente di discernere la Via lattea è  $1/q$  volte quella della Via lattea, come si vedrà nella sezione 4.3.

### Luce Galattica diffusa

La luce galattica diffusa da particelle di polvere interstellare è una componente piuttosto debole. La luce galattica diffusa è maggiore lungo la Via lattea dove sia la polvere interstellare sia le stelle raggiungono la massima concentrazione. Il contributo della luce galattica diffusa alla luminosità naturale del cielo notturno è dell'ordine di qualche nanolambert. La brillanza prodotta dalla luce galattica diffusa è tra  $6 \cdot 10^{-6}cd m^{-2}$  e  $14 \cdot 10^{-6}cd m^{-2}$ .

### 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 è trascurabile.

### Luce zodiacale

La Luce Zodiacale è la luminosità prodotta dalla luce del sole che subisce diffusione da parte delle particelle di polvere interplanetaria. 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  $56 \cdot 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$ .

### Airglow

Una importante sorgente della luminosità del cielo notturno è stata chiamata da Otto Struve *Night airglow* o *nightglow*. Si tratta di un bagliore diffuso, un costante inviluppo della Terra, dovuto a diversi fenomeni fisici, quali le reazioni chimiche tra specie neutre o ionizzate nell'alta atmosfera, che producono luce. In parte contribuisce anche quella frazione di radiazione dovuta all'eccitazione di costituenti dell'alta atmosfera che non sono entro il cono d'ombra della Terra e che sono illuminati dal sole. Tale emissione è per lo più ultravioletta e, in genere, viene assorbita. Il contributo dell'airglow diminuisce durante la notte in modo esponenziale col trascorrere delle ore dopo il crepuscolo fino a raggiungere un valore costante. Esso è strettamente dipendente dalla intensità della radiazione solare nell'estremo ultravioletto (EUV) che eccita gli ioni durante il giorno, e quindi dalla fase del ciclo di attività solare (Walker 1988). Nelle vicinanze del massimo di attività può giungere ad essere alcune volte maggiore del valore al minimo. Al minimo, l'airglow contribuisce alla luminosità del cielo notturno con una decina di nL ed alla brillantezza allo zenith con circa  $35 \cdot 10^{-6} \text{cd m}^{-2}$ . L'emissione dell'airglow varia anche con la posizione geografica ed, in particolare, con la latitudine (Roach 1974). Essendo prodotto nell'alta atmosfera il contributo dell'airglow alla brillantezza del cielo notturno cresce dallo zenith all'orizzonte per effetto dell'aumento dello spessore della massa d'aria attraversata dalla linea di vista. La legge che esprime questo fenomeno è detta funzione di van Rhijn<sup>38</sup>:

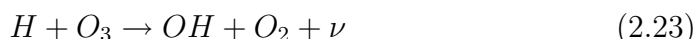
$$\nu \propto \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{r+h}\right)^2 \sin^2 z}} \quad (2.22)$$

---

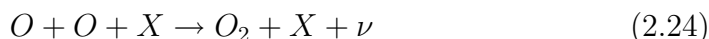
<sup>38</sup>P.J. van Rhijn, 1921, Publ. Astr. Lab. Groningen, No.31, p.1-83.

con  $r$  raggio della Terra,  $h$  altezza dello strato che emette (in genere 100-400Km) e  $z$  angolo tra la direzione considerata e la verticale.

Il meccanismo principale con cui si produce l'airglow è il seguente. La radiazione solare dissocia le specie molecolari nei loro costituenti atomici e ionizza atomi neutri e molecole creando un plasma di particelle cariche mescolate a quelle neutre che restano predominanti. A causa dei loro moti cinetici o dei movimenti a grande scala dell'atmosfera, le specie così prodotte interagiscono producendo radiazione. Molecole come  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $H_2O_2$ ,  $H_2$  vengono dissociate in N, O,  $O_2$ , OH, H. Molecole e atomi quali  $O_2$ ,  $N_2$ , O, N vengono ionizzati in  $O_2^+$ ,  $N_2^+$ ,  $O^+$ ,  $N^+$ . Nella zona tra 90 e 100 km prevalgono le reazioni tra specie neutre. Tra esse, ad esempio, le associazioni a due corpi del tipo:



che forniscono energia sufficiente ad eccitare l'emissione rotazionale e vibrazionale del radicale OH. Un altro esempio sono le collisioni a tre corpi del tipo:



ove X è un terzo corpo, atomo o molecola, che forniscono energia sufficiente ad eccitare le emissioni dell'ossigeno molecolare ed atomico. Nella zona tra 250 e 300 km prevalgono invece le reazioni ioniche. Siamo infatti nella ionosfera. Tra esse, ad esempio, le reazioni del tipo:



ed



forniscono energia sufficiente ad eccitare l'emissione degli atomi di ossigeno neutro producendo un'intensa riga a 6300/6364 Å. Quest'ultima cade tra l'altro vicino al massimo di sensibilità dell'occhio nella visione notturna.

Anche la radiazione prodotta dall'atomo di sodio è tutt'altro che trascurabile. L'atomo di sodio pur poco abbondante nell'alta atmosfera ( $\sim 100$  atomi/cm<sup>3</sup>) ha uno stato eccitato con una vita media molto breve e quindi se eccitato riesce ad emettere facilmente prima di essere de-eccitato a causa delle collisioni con un altro atomo o molecola.

### Aurore

Le Aurore sono dovute all'eccitazione dei costituenti dell'alta atmosfera dovuta a particelle cariche ad alta energia che si muovono lungo le linee di forza del campo magnetico terrestre. Le Aurore sono molto più luminose del nightglow soprattutto nel visibile e impediscono le osservazioni che richiedono cielo buio. La loro presenza è sporadica e strettamente correlata al ciclo di attività solare. Il massimo delle aurore in genere avviene circa due anni dopo il massimo del ciclo undecennale solare. Esse sono localizzate in una zona piuttosto ristretta tra i 20° ed i 25° dai poli geomagnetici.

### 2.4.2 La luminosità artificiale

Per capire come si produce la luminosità del cielo dovuta alla illuminazione artificiale, occorre tenere conto che la luce proveniente da una unità di area angolare del cielo è prodotta dalla somma della luce diffusa dalle molecole e dagli aerosoli che si trovano lungo la linea di vista. Una parte della luce incidente su tali particelle proviene *direttamente* dalla sorgente di inquinamento luminoso, ad esempio una città, un'altra parte proveniva originariamente dalla stessa sorgente ma è stata già diffusa più volte.

#### Luce proveniente direttamente dalla sorgente

La luce che incide sulle molecole e sulle particelle di aerosoli che si trovano nel punto P lungo la linea di vista di un osservatore del cielo, e che proviene direttamente dalla sorgente, ha subito lungo il percorso una variazione di intensità chiamata *estinzione* dovuta al fatto che parte della luce è stata diffusa in altre direzioni dalle particelle atmosferiche incontrate nel suo cammino.

La variazione di intensità della radiazione che attraversa per una lunghezza  $dx$  un mezzo contenente  $N$  particelle per unità di volume aventi sezione d'urto integrata  $\sigma$  è:

$$dI = -I\sigma N dx \quad (2.27)$$

Integrando si ottiene:

$$I = I_0 e^{-\sigma N d} \quad (2.28)$$

Nel caso di una radiazione che attraversa uno strato di atmosfera occorre distinguere il contributo delle molecole e degli aerosoli e la precedente diventa:

$$I = I_0 e^{-\tau} \quad (2.29)$$

con

$$\tau = (N_{mol}\sigma_{mol} + N_{aer}\sigma_{aer}) d \quad (2.30)$$

ove  $N_{mol}$ ,  $N_{aer}$ ,  $\sigma_{mol}$ ,  $\sigma_{aer}$  sono rispettivamente la densità numerica di molecole e aerosoli e le loro sezioni d'urto integrate. In un modello di atmosfera realistico la densità numerica di molecole  $N_{mol}$  e di aerosoli  $N_{aer}$  non è costante ma varia con l'altezza  $h$  per cui:

$$\tau = \int_0^{h_{max}} (N_{mol}(h)\sigma_{mol} + N_{aer}(h)\sigma_{aer}) dx \quad (2.31)$$

Poiché  $dx = dh \sec z$  ove  $z$  è l'angolo tra la direzione della luce e la verticale, si può scrivere anche:

$$\tau = \int_0^{h_{max}} (N_{mol}(h)\sigma_{mol} + N_{aer}(h)\sigma_{aer}) \sec z dh \quad (2.32)$$

Se si approssima la distribuzione verticale degli aerosoli e delle molecole con due funzioni esponenziali aventi raggi di scala  $r_{mol}$  e  $r_{aer}$  rispettivamente, la espressione precedente si può integrare e la espressione (2.29) diventa:

$$I = I_0 \exp \left( N_{0,mol}\sigma_{mol} \left( 1 - e^{h_{max}/r_{mol}} \right) r_{mol} + N_{0,aer}\sigma_{aer} \left( 1 - e^{h_{max}/r_{aer}} \right) r_{aer} \right) \sec z \quad (2.33)$$

ove  $I_0$  è l'intensità della radiazione emessa dalla sorgente. In termini di flusso per unità di superficie  $i$  (illuminamento) nel punto P prodotto dalla luce proveniente direttamente dalla sorgente S, l'espressione (2.29) si scrive:

$$i = \frac{I_0}{d^2} e^{-\tau} \quad (2.34)$$

### Luce che ha subito diffusione

Un'altra parte della luce incidente sulle particelle che si trovano lungo la linea di vista di un osservatore del cielo comprende tutta quella luce che proveniva originariamente dalla stessa sorgente ma che è stata diffusa più volte successivamente. Abbiamo chiamato questo processo diffusione multipla. Lo studio dell'effetto di diffusioni multiple è piuttosto complicato a causa di numerosi fattori fisici e geometrici che intervengono. È proprio la stima di questa parte della luce incidente che rende difficile la costruzione di modelli teorici per la propagazione dell'inquinamento luminoso che siano veramente accurati.

Figura 2.38: Illuminamento di un volume di atmosfera da luce diretta e da luce diffusa una volta.

Possiamo fare una semplice stima dell'effetto di una diffusione seguendo il metodo suggerito da Treanor (1972). Chiamiamo S la città sorgente di luce e P la particella situata lungo la linea di vista che invia all'osservatore parte della luce incidente, come illustrato nella figura 2.38. Se si suppone che le particelle che producono la diffusione diffondano la luce in un cono di apertura  $\phi$ , allora solo quelle particelle contenute nella figura di rotazione generata dalla rotazione dell'arco sotteso tra S e P di apertura  $\phi$  saranno in grado di inviare luce a P. Dividendo tale figura di rotazione in elementi perpendicolari alla linea S-P, di spessore infinitesimo  $dx$ , di sezione circolare, e aventi area  $\epsilon$ , ognuno di questi elementi invierà luce su P in proporzione al numero di particelle contenute nel volume  $\epsilon dx$ , alla sezione d'urto integrata  $\sigma$  ed alla luce incidente  $i = \frac{I_s}{x^2} e^{-kx}$ . Qui  $d$  è la distanza tra P e S,  $x$  la distanza tra la particella considerata ed S,  $e^{-kx}$  è il fattore che tiene conto dell'effetto dell'estinzione descritto nella precedente sezione,  $I_s$  è l'intensità della luce emessa dalla sorgente e  $N$  è il numero di particelle per unità di volume. Il flusso per unità di superficie (illuminamento) in P sarà allora:

$$i = \int_S^P \left[ \frac{I_s}{x^2} e^{-kx} \right] \sigma N \epsilon \left[ \frac{e^{-k(d-x)}}{(d-x)^2} \right] dx \quad (2.35)$$

ove il secondo termine tra parentesi tiene conto dell'estinzione della luce nel percorso tra P ed il volume  $\epsilon dx$  e il primo termine dell'estinzione tra lo stesso volume ed S. Con un poco di geometria si trova che :

$$\epsilon = \pi\theta^2 \frac{x^2(d-x)^2}{d^2} \quad (2.36)$$

che inserita nella (2.35) ed integrata fornisce (Treanor 1973):

$$i = \bar{\sigma} N \pi \theta^2 I_s \frac{e^{-kd}}{d} \quad (2.37)$$

Si può tener conto di altri fattori nel calcolare l'integrale precedente, quale, ad esempio, la variazione del numero di particelle di aerosol con l'altezza.

### Flusso luminoso ricevuto da un osservatore da una area angolare di cielo

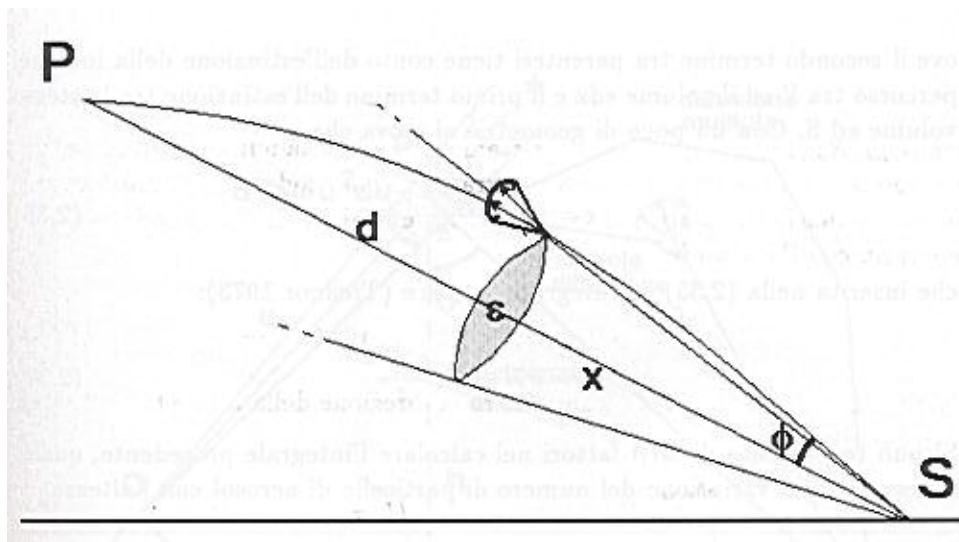
Calcoliamo ora un espressione approssimata per il flusso luminoso  $\Phi$  ricevuto da un osservatore in O in un area di superficie unitaria e proveniente da un area angolare di cielo  $\omega$ .

Consideriamo un volumetto infinitesimo di atmosfera situato lungo la linea di vista nel punto P alla distanza  $u$  da O, ad un'altitudine  $h$  e di volume  $dV = \omega u^2 du$ , come illustrato nella figura 2.39. Il volume totale da cui proviene la luce che ha subito diffusione è l'integrale dei volumi infinitesimi  $dV$ . Nel volumetto considerato arriva, come abbiamo visto, un flusso diretto per unità di superficie  $i_d = \frac{I_s}{s^2} E_{sp}$  ove  $I_s$  è il flusso emesso dalla sorgente per unità di angolo solido ed  $E_{sp}$  è l'estinzione nel percorso da S a P di lunghezza  $s$ . Un ulteriore flusso per unità di superficie  $i_{ms}$  arriva dopo aver subito diffusione più volte da parte delle particelle dell'atmosfera. Quella parte di quest'ultimo che giunge in P dopo una sola diffusione da parte degli aerosoli si può stimare, ad esempio, con l'espressione (2.37). Come abbiamo visto, le molecole contenute nel volume  $dV$  diffondono la luce incidente per diffusione Rayleigh (scattering Rayleigh) mentre gli aerosoli per diffusione di Mie. Chiamiamo  $\theta$  l'angolo  $SPO$ . La sezione d'urto angolare della diffusione Rayleigh sia:

$$\sigma_{mol}(\theta) = \sigma_{0,mol} \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2(\theta)) \quad (2.38)$$

e la sezione d'urto angolare della diffusione di Mie degli aerosoli sia  $\sigma_{aer}(\theta) = \sigma_a \times f(\theta)$  come abbiamo visto nel paragrafo 2.3.4. Se  $E_{PO}$  è l'estinzione tra





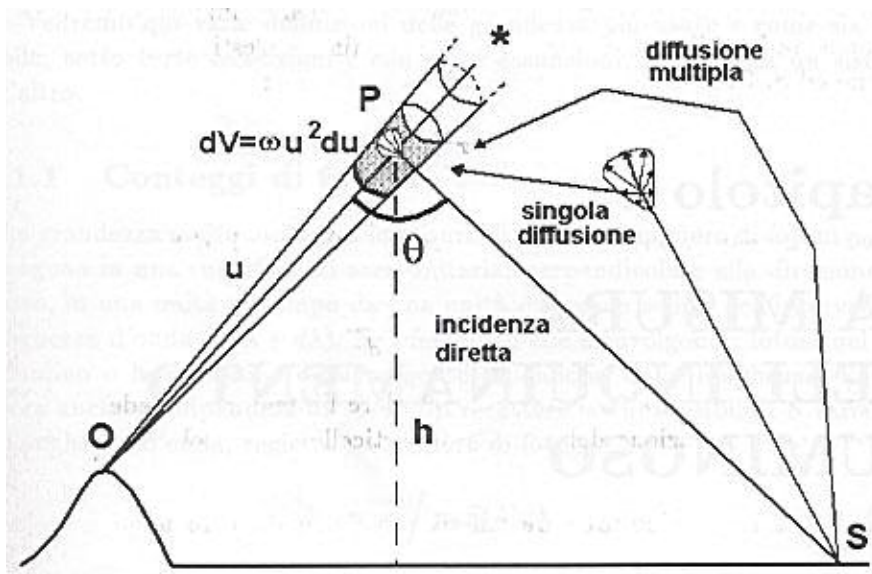


Figura 2.39: Genesi della luminosità del cielo notturno.

P e l'osservatore O, il flusso  $\Phi$  ricevuto da O in un'area unitaria da un'area angolare di cielo  $\omega$  è:

$$\Phi = \int \left( E_{SP} \frac{I_S}{s^2} + i_{ms} \right) \frac{1}{u^2} E_{PO} [N_{mol}(h)\sigma_{mol}(\theta) + N_{aer}(h)\sigma_{aer}(\theta)] \omega u^2 du \quad (2.39)$$

La brillantezza del cielo dovuta all'inquinamento luminoso non è altro che il flusso per unità di angolo solido di cielo, cioè  $\Phi/\omega$ . Questo integrale si può calcolare facilmente utilizzando le approssimazioni fatte in precedenza. La brillantezza del cielo in magnitudini si ottiene dalla somma della brillantezza "artificiale" del cielo con quella naturale:

$$m = cost - 2.5 \log(b_{nat} + b_{artif}) \quad (2.40)$$

Il valore della costante dipende ovviamente dalle unità di misura adottate e si può trovare nella sezione 3.1.

## Capitolo 3

# LA MISURA DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO

### 3.1 Le unità di misura

Un flusso di luce si può misurare facendo riferimento a differenti quantità. Perciò le unità di misura che si possono usare sono numerose e spesso il passaggio da un sistema ad un altro è tutt'altro che ovvio. Ci si può riferire, ad esempio, a:

1. numero di fotoni incidenti,
2. energia che transita in un area unitaria,
3. magnitudine apparente della stella che invierebbe lo stesso flusso di energia,
4. numero di stelle di decima magnitudine necessarie per produrre tale flusso,
5. numero di candele necessarie per produrre tale flusso

Vedremo qui varie definizioni delle grandezza più usate e come sia possibile, sotto certe condizioni e con certe assunzioni, passare da un sistema all'altro.

### 3.1.1 Conteggi di fotoni

Una grandezza molto usata per le misure di flusso è il numero di fotoni  $n_\lambda$  che giungono in una superficie di area unitaria, perpendicolare alla direzione del flusso, in una unità di tempo da una unità di angolo solido nell'intervallo di lunghezza d'onda  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ . Se i fenomeni che coinvolgono i fotoni nel loro cammino o la emissione della sorgente dipendono dalla lunghezza d'onda, allora anche  $n_\lambda$  dipenderà da essa. Un recettore la cui sensibilità  $S$  varia con la lunghezza d'onda, registra un numero di fotoni:

$$n = \int n_\lambda S(\lambda) d\lambda \quad (3.1)$$

In genere si usa come unità di misura dell'intensità del flusso di fotoni in una certa banda fotometrica astronomica un fotone per centimetro quadrato per secondo per steradiante<sup>1</sup> ( $ph\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}$ ). Talvolta si usa anche un fotone per centimetro quadrato per secondo, per secondo d'arco quadrato. Un'altra unità di misura è il Rayleigh che corrisponde a  $(\frac{1}{4\pi}) 10^6\ ph\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}$ .

### 3.1.2 Unità energetiche

Spesso è utile considerare la quantità di energia raggiante  $dE_\lambda$  in un certo intervallo di lunghezza d'onda  $(\lambda, \lambda + d\lambda)$  che è trasportata attraverso un elemento di area  $dA$ , in una direzione compresa entro l'angolo solido  $d\Omega$  il cui asse fa un angolo  $\theta$  con la normale alla superficie, in un tempo  $dt$ . Si definisce l'intensità specifica  $I_\lambda$  come:

$$I_\lambda = \frac{dE_\lambda}{(\cos\theta dA)d\lambda d\Omega dt} \quad (3.2)$$

Si può passare da unità fotoniche ad unità energetiche nel modo seguente. Supponiamo che la superficie sia perpendicolare alla direzione da cui proviene

---

<sup>1</sup>Lo steradiante è l'unità del Sistema Internazionale SI che misura gli angoli solidi. per la relazione tra steradiani e arcsec<sup>2</sup> si veda più avanti.

la luce. L'energia raggiante  $dE_\lambda$  di un flusso di fotoni di lunghezza d'onda compresa tra  $\lambda$  e  $\lambda + d\lambda$  si può calcolare moltiplicando il numero di fotoni che passa nell'area  $dA$ , nel tempo  $dt$ , provenienti dall'area angolare  $d\Omega$  e con lunghezza d'onda nell'intervallo  $\lambda$  e  $\lambda + d\lambda$  per l'energia di un fotone di quella lunghezza d'onda:

$$dE_\lambda = n_\lambda \frac{hc}{\lambda} dA d\lambda d\Omega dt \quad (3.3)$$

Quindi l'energia raggiante totale di un flusso di fotoni di diverse lunghezze d'onda che viene rivelata da un rivelatore avente una sensibilità  $S(\lambda)$  dipendente dalla lunghezza d'onda è:

$$dE = \left[ \int S(\lambda) n_\lambda(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda \right] dA d\Omega dt \quad (3.4)$$

L'espressione tra parentesi rappresenta l'energia raggiante totale rivelata da un'area unitaria di recettore di sensibilità  $S(\lambda)$  in una unità di tempo da una unità di angolo solido e si misura in watt per metro quadrato per steradiano ( $w m^{-2} sr^{-1}$ ) oppure in erg per secondo per centimetro quadrato per steradiano ( $erg s^{-1} cm^{-2} sr^{-1}$ ). Possiamo stabilire una costante di passaggio tra unità fotoniche ed unità energetiche nel modo seguente. Detta  $T(\lambda)$  la curva di emissione della sorgente, definiamo la lunghezza d'onda efficace  $\lambda_{eff}$  :

$$\lambda_{eff} = \frac{\int \lambda T(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) T(\lambda) d\lambda} \quad (3.5)$$

Possiamo assumere, in prima approssimazione, che tutti i fotoni emessi dalla sorgente abbiano lunghezza d'onda  $\lambda_{eff}$ , perciò se  $S$  è normalizzata ad 1 l'espressione 3.4 diventa:

$$dE = \frac{hc}{\lambda_{eff}} n_{\lambda_{eff}} dA d\Omega dt \quad (3.6)$$

Assumendo una lunghezza d'onda efficace di 5550 Å per i fotoni della banda astronomica *visuale* si ottiene con un semplice calcolo la seguente relazione tra unità energetiche e unità fotoniche:

$$\frac{dE}{dA_\perp d\Omega dt} [w m^{-2} sr^{-1}] = 3.578 \cdot 10^{-15} n_{5550} [ph cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}] \quad (3.7)$$

### 3.1.3 Unità fotometriche

Abbiamo visto che il risultato della misura delle grandezze precedenti è legata alla curva di sensibilità del sistema che riceve la luce ed alla curva di emissione della sorgente. Sono state definite una serie di grandezze, chiamate fotometriche, che si riferiscono ad una distribuzione dell'emissione ben definita, quella di un corpo nero alla temperatura di solidificazione del platino ( $2045^{\circ}\text{K}$ ).

Le grandezze fotometriche si basano su una grandezza fondamentale definita nel Sistema Internazionale SI, la candela. Essa è definita come l'intensità luminosa (ossia il flusso per unità di angolo solido) emessa da un corpo nero di Burgess alla temperatura di solidificazione del platino ( $2045^{\circ}\text{K}$ ) in direzione perpendicolare al foro di uscita, quando la sezione di un tale foro ha un'area di  $1/600000 \text{ m}^2$  sotto la pressione di  $101325 \text{ Pa}$  (pascal).

Il *flusso luminoso*  $\Phi$  emesso in uno steradiano da una sorgente puntiforme isotropa che abbia in quella direzione una intensità pari ad una candela è detto lumen (lm). Perciò, l'*intensità luminosa*, cioè il flusso emesso nell'unità di angolo solido,  $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$  si può misurare in candele (cd) o in lumen per steradiano ( $\text{lm sr}^{-1}$ ).

La *luminosità* è definita come il flusso luminoso emesso nel semispazio<sup>2</sup> da un'area unitaria di superficie irraggiante. Nel caso del cielo essa viene intesa come il flusso proveniente da un emisfero e che finisce entro un'area unitaria. L'unità della luminosità è il lambert (L) che equivale ad un lumen per centimetro quadrato ( $\text{lm}/\text{cm}^2$ ):

$$l = \frac{d\Phi}{dA} \quad (3.8)$$

La *brillanza* o *luminanza* esprime il flusso luminoso emesso non in tutto il semispazio ma nell'unità di angolo solido e nella direzione da esso individuata, e non più da un'area unitaria ma dalla proiezione di essa su un piano normale alla direzione della luce. Nel nostro caso esprime anche il flusso emesso da una unità di angolo solido di cielo entro un'area unitaria perpendicolare alla direzione del flusso. Se la direzione del flusso e la normale alla superficie fanno tra loro un angolo  $\theta$ , la brillanza è:

$$b = \frac{d\Phi}{d\Omega dA \cos \theta} \quad (3.9)$$

---

<sup>2</sup>Per semispazio si intende un emisfero.

La brillantezza si misura in lumen al metro quadro per steradiante ( $lm\ m^{-2}\ sr^{-1}$ ) cioè in candele per metro quadro ( $cd\ m^{-2}$ ). Se una superficie irraggia in modo isotropo nel semispazio oppure riceve luce in modo isotropo dal semispazio, allora ad una brillantezza di  $x\ lm\ m^{-2}\ sr^{-1}$  corrisponde, per la legge di Lambert, una luminosità di  $\pi x\ lm\ m^{-2}$ . In questo caso per ottenere la luminosità in nL è sufficiente moltiplicare la brillantezza, espressa in  $cd/m^2$ , per il numero  $3.14\ 10^5$  e per ottenere la brillantezza in  $cd/m^2$  è sufficiente moltiplicare la luminosità in nL per  $3.18\ 10^{-6}$ . Ad esempio una brillantezza media del cielo di  $2\ 10^{-4} cd/m^2$  (Anon 1984) corrisponde ad una luminosità di 62.8 nL. Attenzione che questa corrispondenza tende a far confondere i concetti di luminosità e di brillantezza. Perciò quando qualcuno scrive "luminosità di  $x$  lambert allo zenith" in realtà intende implicitamente riferirsi alla luminosità che avrebbe il cielo se la sua brillantezza fosse la stessa in tutto l'emisfero ed uguale a quella allo zenith. Allo stesso modo, quando qualcuno esprime la brillantezza in lambert, intende implicitamente esprimerla lumen per centimetro quadro per  $\pi$  steradiani ( $lm\ cm^{-2}\ (\pi\ sr)^{-1}$ ) (v. ad es. Garstang 1986). L'uso di esprimere la brillantezza misurata allo zenith in questo modo è giustificato dal fatto che si dà subito un'idea della luminosità totale del cielo. L'autore consiglia di usare sempre, correttamente, la brillantezza (o luminanza) e di esprimerla in  $cd\ m^{-2}$  cioè in  $lm\ m^{-2}\ sr^{-1}$ .

Un'altra quantità interessante è l'*illuminamento*, che si riferisce non ad un flusso emesso come la luminosità ma ad un flusso ricevuto, perpendicolarmente, per unità di area :

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (3.10)$$

L'illuminamento si misura in lux (lx). Un lux corrisponde all'illuminamento prodotto su una superficie di un metro quadrato dal flusso di 1 lumen incidente perpendicolarmente. Quindi  $1\ lx = 1\ lm/m^2$ . Se la superficie illuminata diffonde tutta la luce incidente, senza assorbimenti, allora con un illuminamento di un lux essa acquista una luminosità di un lumen per metro quadro, cioè  $10^{-4}$  L (lambert) (il fattore  $10^{-4}$  è dovuto al passaggio tra  $m^2$  e  $cm^2$ ).

Conoscendo la curva di emissione di un corpo nero è possibile calcolare il flusso di energia corrispondente ad un certo flusso luminoso. Si trova che  $1\ lm = 1.470\ 10^{-3}\ w$  (v. ad es. Cook 1991). Da questa relazione si ottiene



la seguente formula di passaggio:

$$b [cd m^{-2}] = 6.803 \cdot 10^2 b [w m^{-2} sr^{-1}] \quad (3.11)$$

Dalla relazione precedente, con l'espressione 3.7, si può calcolare la relazione tra lumen e fotoni al secondo per luce monocromatica a  $5550 \text{ \AA}$  o per luce avente lunghezza d'onda efficace di  $5550 \text{ \AA}$  (come i fotoni della banda astronomica visuale) che è  $1 lm = 4.12 \cdot 10^{15} ph s^{-1}$  (v. Garstang 1986). Con questa relazione si ottengono le seguenti formule di passaggio per la brillantezza:

$$b [cd m^{-2}] = 2.43 \cdot 10^{-12} n_{5550} [ph cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}] \quad (3.12)$$

$$b [cd m^{-2}] = 1.935 \cdot 10^{-7} b [Ry] \quad (3.13)$$

Assumendo che la brillantezza del cielo sia la stessa in ogni direzione, la luminosità è:

$$l [nL] = 7.634 \cdot 10^{-7} n_{5550} [ph cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}] \quad (3.14)$$

$$l [nL] = 6.075 \cdot 10^{-2} b [Ry] \quad (3.15)$$

Poiché  $1 sr = 4.2545 \times 10^{10} arcsec^2$  (v. ad es. Zombeck 2nd ed. 1990), è anche:

$$l [cd m^{-2}] = 0.103 n_{5550} [ph cm^{-2} s^{-1} arcsec^{-2}] \quad (3.16)$$

$$l [nL] = 3.248 \cdot 10^4 n_{5550} [ph cm^{-2} s^{-1} arcsec^{-2}] \quad (3.17)$$

La curva di sensibilità della banda astronomica V è leggermente diversa dalla curva di sensibilità dell'occhio e dalla curva che definisce le grandezze fotometriche, per cui, tenendo conto della sua minore larghezza, la relazione tra lumen e fotoni al secondo in banda V è leggermente diversa dalla precedente:  $1 lm = 3.419 \cdot 10^{15} ph (V) s^{-1}$  (Garstang 1989). Da questa relazione si ottengono le seguenti formule di passaggio per la brillantezza:

$$b [cd m^{-2}] = 2.925 \cdot 10^{-12} n_V [ph cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}] \quad (3.18)$$

$$l [cd m^{-2}] = 0.124 n_V [ph cm^{-2} s^{-1} arcsec^{-2}] \quad (3.19)$$

Assumendo, come prima, che la brillantezza del cielo sia la stessa in ogni direzione, la luminosità è:

$$l [nL] = 9.184 \cdot 10^{-7} n_V [ph cm^{-2} s^{-1} sr^{-1}] \quad (3.20)$$

$$l [nL] = 3.907 \cdot 10^4 n_V [ph cm^{-2} s^{-1} arcsec^{-2}] \quad (3.21)$$

### 3.1.4 Magnitudini

Una unità di misura molto usata per esprimere la brillantezza del cielo è la magnitudine per unità di area angolare. Essa si può riferire ad un grado quadrato o ad un secondo d'arco quadrato. Poiché un grado è pari a 3600 arcsec sarà:  $1 \text{ grado}^2 = 1.2960 \cdot 10^7 \text{ arcsec}^2$ . Quindi la brillantezza di un arcsec quadro sarà meno luminosa di quella di un grado quadrato per un fattore  $1.2960 \cdot 10^7$  che corrisponde, nella scala logaritmica delle magnitudini ad una differenza di magnitudine di 17.78.

Riassumendo:  $b[\text{mag}/\text{deg}^2] = b[\text{mag}/\text{arcsec}^2] - 17.78$ .

Le formule di passaggio tra la brillantezza misurata con le unità fotoniche e le magnitudini<sup>3</sup> nelle bande B e V sono state calcolate da Garstang (1986, 1989):

$$V [mag \text{ arcsec}^{-2}] = 41.438 - 2.5 \log_{10} b [ph \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}] \quad (3.22)$$

$$B [mag \text{ arcsec}^{-2}] = 41.956 - 2.5 \log_{10} b [ph \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}] \quad (3.23)$$

Dalle precedenti si ottengono, con le relazioni della sezione precedente, le seguenti formule di passaggio tra unità fotometriche e magnitudini:

$$V [mag \text{ arcsec}^{-2}] = 12.603 - 2.5 \log_{10} b [cd \text{ m}^{-2}] \quad (3.24)$$

$$V [mag \text{ arcsec}^{-2}] = 26.346 - 2.5 \log_{10} b [nL] \quad (3.25)$$

Per la banda visuale, vale invece la seguente formula di passaggio (Garstang 1986):

$$m_{vis} [mag \text{ arcsec}^{-2}] = 26.33 - 2.5 \log_{10} b [nL] \quad (3.26)$$

da cui si ricava:

$$m_{vis} [mag \text{ arcsec}^{-2}] = 12.59 - 2.5 \log_{10} b [cd \text{ m}^{-2}] \quad (3.27)$$

### 3.1.5 Unità S10

Un'altra unità usata frequentemente per esprimere la brillantezza del cielo è il numero di stelle di decima magnitudine per grado quadrato, osservate attraverso una massa d'aria limpida, che produrrebbero la stessa brillantezza

---

<sup>3</sup>1 sr = 4.2545  $10^{10}$  arcsec<sup>2</sup>

osservata (S10). La scala delle unità S10 non è logaritmica, come la magnitudine, ma lineare. Una brillantezza di 10.0 mag per grado quadrato corrisponde all'effetto di una stella di mag 10 in un grado quadrato, quindi corrisponde ad una brillantezza di una unità S10. Una luminosità 100 volte maggiore corrisponde nella scala delle magnitudini ad un aumento di 5 mag. Le relazioni tra le due scale sono (Dawson 1984; Garstang 1986):

$$b[\text{mag}/\text{deg}^2] = 10.00 - 2.5 \log_{10} b[S10] \quad (3.28)$$

$$b[\text{mag}/\text{arcsec}^2] = 27.78 - 2.5 \log_{10} b[S10] \quad (3.29)$$

e inversamente (Kalinowski *et al.* 1975):

$$b[S10] = 10^{-0.4(b[\text{mag}/\text{deg}^2]-10.00)} \quad (3.30)$$

$$b[S10] = 10^{-0.4(b[\text{mag}/\text{arcsec}^2]-27.78)} \quad (3.31)$$

Di solito le unità S10 si riferiscono a misure nella banda astronomica *visuale*. Per passare dalle unità S10<sub>vis</sub> a quelle fotometriche e viceversa:

$$b[cd\ m^{-2}] = 0.7 \cdot 10^{-6} \cdot b[S10_{vis}] \quad (3.32)$$

$$b[S10_{vis}] = 1.42 \cdot 10^6 \cdot b[cd\ m^{-2}] \quad (3.33)$$

Assumendo una brillantezza costante, si ottiene anche:

$$b[nL] = 0.22 \cdot b[S10_{vis}] \quad (3.34)$$

$$b[S10_{vis}] = 4.545b[nL] \quad (3.35)$$

Per esempio una brillantezza del cielo di 300 S10<sub>vis</sub> corrisponde ad  $2.1 \cdot 10^{-4} cd\ m^{-2}$ . Per passare alle unità energetiche, nel caso di luce a  $5500\text{\AA}$ :

$$b[w\ m^{-2}\ sr^{-1}] = 1.03 \cdot 10^{-9} \cdot b[S10_{vis}] \quad (3.36)$$

## 3.2 Le tecniche di misura

La brillantezza del cielo non è mai costante. Essa varia a breve termine a causa delle variazioni atmosferiche o, più in generale, delle variazioni climatiche stagionali. Quella naturale, inoltre, varia in relazione al ciclo undecennale di

attività solare. In genere le misure standard si riferiscono a notti limpide, spesso a quelle che gli astronomi chiamano notti fotometriche. Per minimizzare l'effetto delle variazioni atmosferiche quando possibile si fa la media di misure ottenute in più notti ed ad ore diverse durante la notte. Per ottenere la brillantezza dovuta a sorgenti artificiali nei siti ove essa non è predominante, occorre sottrarre la brillantezza naturale tenendo conto che essa dipende dalla zona di cielo osservata e dal ciclo di attività solare (v. Garstang 1989). Questo è inutile per siti ove la brillantezza naturale è trascurabile rispetto quella artificiale.

### 3.2.1 Misure fotometriche

La misura della brillantezza del cielo è una operazione molto delicata. Questa difficoltà, però, non viene dalla complessità della strumentazione necessaria. Qualunque sistema adatto alla fotometria di oggetti astronomici, stellari o estesi, può essere in linea generale, impiegato per misurare la brillantezza del cielo. In genere tali sistemi sono costituiti da un sistema ottico ( ad. esempio un telescopio) e da un sistema di rivelazione, composto a sua volta dal rivelatore vero e proprio, dal sistema di filtri che contribuiscono a determinare la curva di sensibilità del sistema e da altre parti quali diaframmi di campo, ecc. Il rivelatore vero e proprio può essere un fotocatodo, un fotodiode, un CCD o altro. A seconda del tipo di studio effettuato il sistema può essere fisso o trasportabile.

Le misure fatte da Walker (1977) in California, sono state eseguite ad esempio con un telescopio da 3 pollici con un fotometro fotoelettrico che utilizzava un fotomoltiplicatore 1P21 non raffreddato. Un diaframma di campo circolare sul piano focale delimitava un'area di cielo di un grado quadrato ed un filtro Corning 3384 di spessore standard assicurava una curva di sensibilità corrispondente alla banda fotometrica V.

Le misure fatte in Italia da Bertiau *et al.* (1973) sono state eseguite con un fotometro portatile (Treanor e Salpeter 1972) con un sistema ottico rifrattore da 42 mm di diametro che utilizzava un fotomoltiplicatore 1P21 non raffreddato ma selezionato con cura. L'alimentazione di quest'ultimo era fornita da un set di batterie a 12 Volt DC tramite un convertitore. Anche i fotometri usati da Berry (1976) erano di questo tipo.

Uno dei problemi base della fotometria è che la sensibilità del rivelatore, e più in generale tutta la risposta del sistema, può variare da notte a notte

ed anche nel corso della notte stessa. Sbalzi di tensione, variazioni di temperatura sono alcune delle principali cause. Nel caso di strumenti trasportabili, le vibrazioni dovute al trasporto, gli spegnimenti e le successive riaccensioni costituiscono una ulteriore causa di variazione. È quindi necessario effettuare una taratura del sistema fotometrico, chiamata calibrazione, più volte nel corso della notte e comunque dopo ogni riaccensione del sistema. Anche se la curva di risposta si mantiene costante, occorre determinare la corrispondenza tra la scala dello strumento e la scala della brillantezza misurata in una delle unità di solito utilizzate. Anche assumendo di conoscere la relazione tra le due scale e che essa sia costante, occorrerà quantomeno determinarne ogni volta il punto zero.

Nella fotometria stellare questo problema si evita, almeno quando non è richiesto un grado molto elevato di accuratezza, perché si procede per confronto tra il flusso ricevuto dall'oggetto studiato e quello ricevuto da alcune stelle vicine di magnitudine apparente conosciuta. Queste stelle vengono chiamate stelle standard fotometriche e sono raggruppate in *aree scelte* distribuite in tutta la sfera celeste. Dal rapporto tra i flussi ricevuti nell'unità di tempo dall'oggetto e dalle standard si ricava la differenza delle loro magnitudini. Questo modo di procedere parte dal presupposto che per stelle che distano pochi gradi tra loro l'effetto dell'estinzione, compreso quello dovuto alla presenza di veli, sia pressoché uguale. Dalla magnitudine "sopra l'atmosfera" della stella standard si determina così la "magnitudine sopra l'atmosfera" dell'oggetto in esame:

$$m_* = m_{std} - 2.5 \log_{10} \frac{(n_* - n_{sky})}{(n_{std} - n_{sky})} \quad (3.37)$$

Per un oggetto esteso si procede allo stesso modo confrontando il numero di conteggi che provengono da un'area di un arcsec<sup>2</sup> con il numero totale di conteggi provenienti da una stella standard. L'area angolare di solito si delimita applicando un diaframma, nel caso di fotometri a fotocatodo, oppure prendendo in considerazione solo un certo insieme di pixel, nel caso dei CCD. Se l'area angolare non è di un arcsec<sup>2</sup> si riportano i risultati a questo:

$$b[mag/arcsec^2] = b_{misurata} + 2.5 \log A \quad (3.38)$$

ove  $A$  è l'area angolare misurata in arcsec<sup>2</sup>.

La difficoltà della misura della brillantezza del cielo consiste nel fatto che in questo caso il flusso che interessa è quello che effettivamente arriva al sistema

di misura, non quello "sopra l'atmosfera". Possiamo confrontare il numero di conteggi che proviene da un'area unitaria di cielo con quello che proviene da una stella standard, ma per determinare la brillantezza abbiamo bisogno di conoscere il flusso della stella standard "sotto l'atmosfera". Per sapere quanto vale quest'ultimo, a partire dalla magnitudine "sopra l'atmosfera" tabulata nei cataloghi, occorre conoscere qual è l'estinzione della luce della stella standard nel percorso entro l'atmosfera fino al sistema di misura. L'estinzione varia da notte a notte ed anche nel corso della notte in dipendenza delle condizioni meteorologiche. Quindi occorre operare in "notti fotometriche" ossia in notti le cui caratteristiche siano costanti per la gran parte della notte oppure effettuare la misura dell'estinzione ripetutamente. La misura<sup>4</sup> dell'estinzione è una operazione delicata che richiede una serie di operazioni che consumano tempo. Essa si può fare durante misure della brillantezza del cielo eseguite da uno stesso osservatorio ma difficilmente si potrà ripetere ad ogni sosta nel caso di misure eseguite da più luoghi di osservazione con spostamenti successivi durante la stessa notte. Se non si è certi della costanza delle condizioni atmosferiche, una ottima soluzione è quella di ricorrere ad una sorgente standard secondaria situata nel luogo di osservazione. Tale sorgente, che deve essere molto stabile, andrà calibrata periodicamente, ad esempio con una stella standard di cui si sia determinata accuratamente l'estinzione. Ottime sorgenti standard sono quelle radioattive, che hanno un'emissione con un andamento nel tempo conosciuto e non necessitano di taratura dopo ogni trasporto. Una sorgente di questo tipo è stata usata da Bertiau *et al.* (1973) e da Martin Mateo (1983).

Per quanto riguarda la scelta dei punti nel cielo ove fare le misure, essa dipende dagli interessi di chi svolge la ricerca. In genere i punti più importanti sono lo zenith, e i punti collocati ad un'altezza di 45° sull'orizzonte, cui fanno riferimento le raccomandazioni della Commissione 50 dell'International Astronomical Union (vedi più avanti). Sono altresì interessanti le zone che si trovano basse sull'orizzonte perché mettono in evidenza le principali sorgenti dell'inquinamento luminoso. Un tipico schema di mappatura del cielo (Martin Mateo 1983), ad esempio, prevedeva misure in 21 punti: lo zenith, 8 punti situati a 45° di altezza (separati da 45° di azimuth) e 12 punti a 20° di

---

<sup>4</sup>Per una descrizione del metodo per ricavare l'estinzione e correggere le misure ottenute si veda più avanti, oppure il lavoro di S. Foti e S. Cristaldi *Studio dell'inquinamento luminoso del cielo nella zona di Catania* (Foti 1992).

altezza (separati da  $30^\circ$  di azimuth).

È necessario fare attenzione ad accompagnare sempre le misure con la loro data, ora e posizione nel cielo (sia in coordinate altazimutali che in coordinate celesti) in quanto per determinare la brillantezza del cielo originata da illuminazione artificiale bisogna sottrarre quella di origine naturale e questa, come abbiamo visto, dipende dalla zona di cielo che si sta osservando.

Nel campo della fotometria, non è interessante solo lo studio della brillantezza del cielo ma anche quello degli indici di colore (definiti come la differenza tra la brillantezza in due bande astronomiche diverse). Il colore del cielo notturno inquinato varia infatti da sito a sito a seconda di come è composta la popolazione delle lampade dell'area ove si trova il sito e varia nel tempo a seconda di come tale popolazione cambia. Il colore del cielo talvolta in certi siti può variare su breve scala in connessione con il variare dello stato dell'atmosfera che può diffondere di più o di meno luce proveniente da certe aree o da altre ove il tipo di lampada predominante è diverso.

### **Esempio di tecnica di misura della brillantezza del cielo notturno**

Qui di seguito è riportato un esempio della procedura da seguire per misurare la brillantezza del cielo. Abbiamo immaginato di utilizzare per la misura un rivelatore CCD montato su un telescopio, un'attrezzatura oggi a disposizione di moltissimi osservatori.

1. Verificare che la notte sia limpida e senza veli. Questa è una condizione necessaria sia per poter effettuare la determinazione dell'estinzione sia per poter confrontare le misure di brillantezza del cielo con misure ottenute in data diversa o in altri siti. Verificare che le condizioni metereologiche restino costanti per tutta la durata delle misure. Verificare che la luna resti sotto l'orizzonte ( $h < 10^\circ$  sotto l'orizzonte) per tutta la durata delle misure.
2. Scegliere uno o più punti ove effettuare le misure di brillantezza del cielo. Ad esempio si possono scegliere lo zenith, 8 zone a 45 gradi di altezza e distanti tra loro 45 gradi in azimuth, e infine 12 zone a 20 gradi di altezza distanti tra loro 30 gradi in azimuth.
3. Scegliere un certo numero (almeno una decina) di stelle standard fotometriche (v. ad es. le sequenze del Landolt) distribuite nel cielo ad

altezze diverse fino ad altezze di circa  $30^\circ$ . Ve ne sia quando possibile qualcuna vicino ai  $30^\circ$  e qualcuna vicino allo zenith o, comunque, sopra i  $60$  gradi. È bene scegliere anche una stella standard fotometrica vicino (il più possibile) ad ogni zona di cielo da misurare.

4. Misurare i conteggi di queste stelle e determinare, contemporaneamente, la loro altezza sull'orizzonte. Misurare i conteggi del cielo nei punti scelti. Se il tempo impiegato ad effettuare queste misure è abbastanza lungo da sospettare che le condizioni del cielo possano essere cambiate, al termine rifare le misure dei conteggi delle stelle standard e delle loro altezze. Ciò permetterà di determinare due coefficienti di estinzione (prima e dopo) e di farne la media. Se si usa un CCD si può usare per misurare i conteggi questa procedura:
  - a) Scegliere la banda o le bande ove operare e montare gli appositi filtri. Di solito si opera in banda V o B, ma sono interessanti anche le altre.
  - b) Fare, all'inizio (o alla fine), una o più pose dark e flat.
  - c) Fare le pose sulle stelle standard facendo attenzione ad esporre bene l'immagine ma a non saturarla.
  - d) Fare le pose sulle zone di cielo scelte. Evitare di inquadrare nel CCD stelle molto luminose.
  - e) Ridurre le immagini secondo la procedura standard<sup>5</sup>.
  - f) Nelle immagini delle stelle standard, misurare il numero di conteggi totale (o di ADU) in un'area che si ritenga contenere la totalità della luce della stella e sottrarvi il numero di conteggi del cielo sulla stessa area calcolato moltiplicando il numero di pixel di quell'area per il valore medio dei conteggi del cielo per pixel misurato in punti lontani dalla stella. Scalare il numero di conteggi così ottenuto, dal tempo di posa utilizzato al tempo di un secondo.
  - g) Nelle immagini del cielo, sommare il numero di conteggi di tutti i pixel che non contengono luce di stelle risolte con chiara evidenza. Prendere nota dell'area totale di cielo coperta da i pixel considerati. Scalare il numero di conteggi totale in quell'area a quello in un secon-

---

<sup>5</sup>Procedura standard di riduzione delle immagini CCD: Sottrarre il bias da tutte le immagini. Calcolare il dark medio. Calcolare il flat medio, sottrarvi il dark medio scalato al tempo di posa del flat e normalizzare al valore medio dei conteggi. Sottrarre dalle immagini delle stelle e del cielo il dark medio scalato al loro tempo di posa e dividere per il flat medio normalizzato.



do d'arco quadrato. Scalare il numero di conteggi così ottenuto, dal tempo di posa utilizzato al tempo di un secondo.

5. Eseguire il calcolo della costante di scala fotometrica dello strumento e del coefficiente di estinzione nel modo seguente (per ogni banda fotometrica utilizzata):
  - a) Calcolare per ogni stella standard fotometrica osservata il valore di  $x = 1/\cos z$  e di  $y = m_{cat} + 2.5 \log_{10} I_{stella}$  ove  $z$  è la distanza zenitale della stella,  $m_{cat}$  la sua magnitudine di catalogo e  $I_{stella}$  il numero di conteggi al secondo misurati.
  - b) Costruire il grafico di  $y$  contro  $x$  e determinare i coefficienti  $a$  e  $b$  della retta  $y = a + b x$  che meglio interpola i dati. È bene calcolare anche gli errori.
  - c) Poiché la magnitudine apparente "sotto l'atmosfera" di una stella standard è  $m_{app} = m_{cat} + k/\cos z = C - 2.5 \log I_{stella}$  ove  $k$  è il coefficiente di estinzione<sup>6</sup> in magnitudini per masse d'aria e  $C$  la costante di scala fotometrica, si ottiene che  $C - k \frac{1}{\cos z} = m_{app} - 2.5 \log I_{stella}$ , ossia  $y = C - kx$ , da cui  $C \approx a$  e  $k \approx -b$ .
6. Calcolare la brillantezza delle zone di cielo misurate con la formula seguente:  $m_{sky} = C - 2.5 \times \log_{10} I_{sky}$  ove  $I_{sky}$  è il numero di conteggi del cielo per secondo d'arco quadrato. È consigliabile trasformare la brillantezza del cielo dalle magnitudini per  $arcsec^{-2}$  alle candele al metro quadro (lumen al metro quadro per steradiante) che sono le unità fotometriche normalmente usate in questi lavori. Per la trasformazione si possono usare le formule di Garstang (1989) del capitolo 3.1. Per la banda V è:  $b[cd m^{-2}] = 10^{-0.4(V-12.60)}$ . Accompagnare sempre le misure con la loro data e ora, la località di osservazione, l'altezza sul livello del mare, le coordinate altazimutali e quelle celesti. Quando disponibile è utile specificare la frazione del ciclo di attività solare a quella data.
7. Quando si utilizza uno strumento a piccolo campo come il CCD si esclude dalla misura della brillantezza una parte della luce stellare integrata. In questo lavoro, ad esempio, è stato escluso il contributo prodotto dalla luce di tutte le stelle con magnitudine minore o uguale a quella delle più deboli stelle risolte con evidenza. Occorre quindi correggere la

---

<sup>6</sup>Si veda l'espressione 2.33.

brillanza ottenuta. La correzione dipende dalla zona di cielo misurata e, in particolare, dalla latitudine galattica. Si può ottenere una stima dell'ampiezza della correzione sommando i contributi alla luce stellare integrata, riportati in tabella 3.2.1, per tutte le magnitudini stellari escluse dalla misura, ricordando che si tratta di valori medi che possono triplicare per latitudini galattiche prossime allo zero e diminuire fino ad un terzo ai poli galattici. Come si vede dai valori in tabella la correzione è importante solo laddove la luminosità naturale non è trascurabile rispetto quella artificiale. È bene specificare sempre, quando si cita una misura di brillantezza del cielo fatta con uno strumento a piccolo campo come il CCD, se tale correzione è stata fatta oppure no.

8. Si può ottenere la brillantezza artificiale sottraendo la brillantezza naturale dalla brillantezza del cielo. In generale la brillantezza naturale dipende dal punto di cielo osservato (sia dalla posizione in coordinate celesti che dalla posizione altazimutale), tuttavia, al di fuori della via lattea e delle zone più luminose di luce zodiacale, in periodi di media attività solare, si può supporre che essa sia dell'ordine di  $2 \cdot 10^{-4} \text{cd/m}^2$  (Anon 1984).

### Fotometria rapida

È interessante studiare la luce artificiale dispersa nel cielo con l'ausilio di un fotometro rapido. Le lampade a scarica, in linea di principio, emettono luce solo quando una corrente elettrica passa attraverso il plasma. Ciò significa che quando le lampade sono alimentate da una corrente alternata, esse si "spengono" moltissime volte al secondo. Con un fotometro rapido è quindi possibile mettere in evidenza tale componente oscillante nella luce artificiale del cielo se la sorgente è costituita da impianti alimentati da corrente in fase. Questo tipo di studio è stato svolto, per esempio, da Crabtree, Westpfahl & Richer (1991) in Canada. In realtà esso è possibile solo dove non viene utilizzata per l'alimentazione dell'impianto una corrente trifasica. Inoltre non tutte le lampade diminuiscono in modo notevole la loro luminosità quando la corrente va a zero a causa del tempo di latenza necessario perché la luminescenza o la ionizzazione decadano. È stato proposto di utilizzare questo fenomeno per evitare il disturbo prodotto dall'illuminazione notturna situata nei dintorni degli osservatori alle osservazioni astronomiche, tramite

Tabella 3.1: Contributo medio alla brillantezza naturale del cielo dalla luce stellare integrata delle stelle di magnitudine  $m$ .

$m$	luce stellare integrata $10^{-6} \text{ cd } m^{-2}$
0	0.56
1	0.91
2	1.54
3	2.10
4	3.15
5	3.50
6	3.92
7	4.41
8	4.76
9	5.18
10	6.09
11	6.09
12	6.51
13	6.23
14	5.95
15	5.67
16	4.83
17	3.85
18	3.08
19	1.82
20	1.26
21	0.84
>21	1.05
TOTALE	83.3

Nota: Dati da Allen (1979).

l'applicazione agli strumenti di un otturatore rotante in fase con la corrente elettrica. Tuttavia esso non sembra rappresentare al momento una seria possibilità per eliminare il disturbo provocato dal inquinamento luminoso agli osservatori vicini alle città.

### 3.2.2 Misure fotografiche

Misure della brillantezza del cielo si possono fare anche utilizzando come rivelatore una lastra o una pellicola fotografica (vedi ad esempio i lavori di Hoag *et al.* 1973 e di Kosai e Isobe 1991). Le lastre e le pellicole possono poi essere analizzate con un microdensitometro. A causa della risposta non lineare dell'emulsione fotografica è però necessario calibrare le lastre o le pellicole con un sensitometro<sup>7</sup>. Questo apparecchio espone una serie di piccole aree in una zona laterale della lastra, con una sequenza di intensità in rapporto conosciuto tra loro. Dall'annerimento che si misura in tali zone si ricostruisce la curva di calibrazione. Se ci si accontenta di misurare la variazione di intensità con la posizione sull'immagine e non il suo valore assoluto, il problema di determinare il punto zero può essere evitato. Altrimenti occorre utilizzare, come nel caso precedente, una sorgente campione. Eventualmente si può calibrare il sensitometro.

Foti e Cristaldi (Foti 1992) hanno misurato fotograficamente la brillantezza del cielo a distanze di 8 km, 16 km e 24 km dal centro di Catania in 4 direzioni diverse utilizzando per le osservazioni una fotocamera Nikon FM/2 munita di un obiettivo da 50 mm di focale usato all'apertura di f/1.8 su cui era stato montato un sistema ottico "ad occhio di pesce" Nikkor di 50 mm di diametro che ne portava l'angolo di ripresa a circa 180 gradi. La trasmittanza del sistema ottico era stata opportunamente controllata. Il sistema veniva puntato allo zenith e venivano effettuate pose di 50 minuti su pellicola Technical Pan 2415.

### 3.2.3 Misure con strumenti visuali

Si possono fare misure nella banda astronomica *visuale*, sebbene meno precise delle precedenti, usando l'occhio come rivelatore. La Royal Astronomical Society of Canada ha avviato nel 1974 un programma di misura della brillantezza

---

<sup>7</sup>Per i dettagli del metodo si veda il lavoro già citato di Foti-Cristaldi (Foti 1992).

del cielo notturno in prossimità del lago Ontario che utilizzava uno strumento visuale consistente in un contenitore opaco con un foro in una parete e aperto dall'altra parte. L'osservatore poneva l'occhio in corrispondenza di tale foro. Uno schermo situato vicino all'apertura poteva essere illuminato in modo variabile grazie ad una lampadina a basso voltaggio alimentata da una corrente costante tramite un reostato. Lo schermo occupava una porzione di  $2^\circ$  per  $3^\circ$  nel campo di vista dell'osservatore. La posizione del reostato quando la brillantezza del cielo e dello schermo erano uguali dava la brillantezza del cielo. L'insieme osservatore più strumento veniva calibrato nell'intervallo di magnitudini considerato usando una sorgente standard di bassa luminosità dopo ogni spostamento del sito di osservazione. La sorgente standard veniva a sua volta calibrata tramite osservazioni di stelle standard eseguite con accuratezza e di frequente.

### 3.2.4 Misure a occhio nudo

Alcuni programmi di osservazione, come quello avviato dalla Agenzia di protezione ambientale in Giappone, dalla International Dark-Sky Association negli USA, dalla British Astronomical Association in Gran Bretagna e dalla Commissione per l'Inquinamento Luminoso dell'Unione Astrofili Italiani in Italia, si basano su semplici stime della magnitudine limite visuale fatte su campi di stelle di magnitudine nota. Occorre però lavorare in notti senza luna, limpide e in orari in cui la luce del sole sia del tutto sparita dal cielo. Tali stime sono sensibili alle caratteristiche variabili dell'assorbimento atmosferico e alla sensibilità dell'occhio dell'osservatore. Però se esse sono eseguite da numerosi osservatori nello stesso luogo in modo da poter fare una media, e sono proseguite per molti notti limpide durante l'anno, esse permettono di ottenere con indagine statistica una misura finale che può essere sufficientemente accurata. Una correzione anche approssimata per l'estinzione media permette quindi di ricavare la brillantezza del cielo in quel luogo. Serie di osservazioni ripetute a distanza di anni possono mettere in evidenza le variazioni di brillantezza del cielo. Studi di questo tipo sono stati fatti da Uppgren (1991) e da Isobe (1991).

Il Programma SKY WATCH è stato avviato originariamente in Giappone da parte dell'Agenzia giapponese per la protezione dell'ambiente, in seguito è stato diffuso in tutto il mondo dalla International Dark-Sky Association e in Italia dall'Unione Astrofili Italiani tramite la rivista *L'Astronomia* (Cinzano

e Vanin 1992). Esso prevede l'osservazione visuale, a occhio nudo, e/o con il binocolo oppure l'osservazione fotografica, delle Pleiadi, un gruppo di stelle facile da identificare nella costellazione del Toro, visibile dall'Italia per circa 10 mesi all'anno (La migliore visibilità si ha da Novembre a Febbraio) e che quando passa al meridiano raggiunge una settantina di gradi di altezza. Gli osservatori devono compilare un semplice rapporto osservativo<sup>8</sup> in qualunque luogo essi si trovino, sia esso un sito molto scuro che un sito urbano, centrale o periferico, purché la stima visuale sia effettuata in notti limpide, con cielo completamente sereno, senza luna, con le Pleiadi ben alte sull'orizzonte dopo aver atteso almeno 20 minuti che l'occhio si adatti all'oscurità. Sono utili più rilievi nello stesso luogo in notti diverse, o da siti diversi nella stessa notte ed osservazioni in gruppo purché ogni osservatore compili la propria scheda senza scambiare con gli altri la propria opinione, in modo da non essere influenzato dagli altri nella stima. Il programma prevede che i possessori di una macchina fotografica possano estendere il proprio contributo riprendendo tre volte le Pleiadi con una macchina fotografica montata su cavalletto, con un obiettivo da 50 mm aperto a f/4, pellicola per diapositive da 400 ISO sviluppata con processo standard, ed esposizioni da 80, 150 e 300 secondi. Le riprese devono essere fatte contemporaneamente ad una stima visuale e possono essere ripetute in notti successive o in altri luoghi. Per informazioni su questo programma di ricerca (ancora in corso) consigliamo il lettore di contattare la Unione Astrofili Italiani o la International Dark-Sky Association .

### 3.2.5 Misure spettrali

Utilizzando uno spettrografo applicato ad un telescopio è possibile studiare la distribuzione spettrale della luce del cielo notturno (vedi ad esempio Turnrose 1974; Osterbrock *et al.* 1976; Martin Mateo 1983; Massey *et al.* 1990; Osterbrock *et al.* 1992). La tecnica è la stessa che si utilizza per rica-

---

<sup>8</sup>Il rapporto osservativo richiedeva i dati anagrafici dell'osservatore, la località di osservazione, commenti sul luogo e sulle condizioni di cielo, esperienza dell'osservatore e stato della sua vista (es. normale, miope, astigmatico, ecc.), possibilità di vedere da quel luogo la Via Lattea in a) Perseo, b) Gemelli, c) Unicorno, caratteristiche dell'eventuale binocolo o dell'eventuale sistema fotografico (es. macchina fotografica, obiettivo, pellicola), indicazione su una carta delle Pleiadi delle stelle visibili a occhio nudo o col binocolo da quel luogo.

vare lo spettro di oggetti estesi. Anche qui il problema è quello di ridurre le intensità nella scala dello strumento ad unità di flusso assolute (ad es.  $\text{erg cm}^{-2} \text{arcsec}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{Å}^{-1}$ ). Questo può essere fatto utilizzando come spettro di confronto quello di una stella standard ma occorre determinare, come sempre, l'estinzione, che varia in funzione della lunghezza d'onda (vedi ad es. Gutierrez-Moreno *et al.* 1969). La calibrazione in lunghezza d'onda viene fatta con uno spettro di una sorgente campione le cui righe di emissione abbiano una lunghezza d'onda accuratamente determinata.

In genere le righe più forti nello spettro visibile dovute all'inquinamento luminoso sono quelle del sodio (NaI), che si sovrappongono a quelle naturali del cielo, e quelle del mercurio (HgI). Osterbrock (1976) ha osservato anche due righe del potassio (KI) a 7665 Å e 7699 Å. Esse probabilmente provengono dalle impurità presenti nelle lampade al sodio. La riga del litio è riportata da Chamberlain (1961) come riga naturale del cielo ma la sua intensità potrebbe in certi casi essere anch'essa dovuta ad impurità nelle lampade al sodio.

Non sempre è necessario studiare tutto lo spettro. Martin Mateo (1983), ad esempio, si è limitato a misurare l'intensità degli spettri, che aveva ottenuto con uno spettrofotometro a larga banda (4000Å- 7000Å), in quattro zone centrate su i) 4400Å, che corrisponde ad una emissione del mercurio; ii) 4900Å, che è una misura dell'inquinamento del continuo nella zona blu dello spettro; iii) 5900Å, che è la zona del doppietto del sodio; iv) 6600Å, che è una misura dell'inquinamento del continuo nella zona rossa dello spettro.

### 3.2.6 Il monitoraggio dell'inquinamento luminoso

Riassumiamo in modo sintetico le principali attività di monitoraggio dell'inquinamento luminoso che si possono fare da un osservatorio fisso e da un osservatorio mobile.

Da un osservatorio fisso si possono svolgere gli studi seguenti:

1. Studio dell'andamento della brillantezza media del cielo nel sito al variare della distanza zenitale e dell'azimuth.
2. Studio delle variazioni della brillantezza a breve termine dovute al variare delle condizioni climatiche e atmosferiche.
3. Studio delle variazioni della brillantezza durante la notte dovute a variazioni nella quantità di luce dispersa ad orari diversi.

4. Studio della variazione a lungo termine della brillantezza e della magnitudine limite dovuta all'aumento dell'inquinamento luminoso.
5. Studio della variazione dello spettro del cielo a lungo termine dovuta a variazioni nel tipo di illuminazione o agli effetti di eventuali provvedimenti legislativi.
6. Studio degli indici di colore del cielo e delle loro variazioni.

Con osservatori mobili si possono invece svolgere gli studi seguenti:

1. Studio della brillantezza del cielo entro un territorio o una nazione.
2. Studio della relazione brillantezza-popolazione (ponendosi a distanze prefissate da città con popolazioni diverse).
3. Studio della relazione brillantezza-distanza e determinazione delle costanti locali delle leggi di Walker(1973), Bertiau *et al.*(1973), Berry(1976)) e dei modelli di Garstang(1986, 1989).
4. Studio delle variazioni di precedenti parametri nel territorio di una nazione o regione.
5. Studio della relazione tra la brillantezza nei centri delle città e la popolazione.
6. Studio della relazione tra la popolazione e la distanza a cui la brillantezza raggiunge un certo valore.
7. Ricerca e catalogazione dei siti più adatti all'osservazione.
8. Studio degli effetti sull'inquinamento luminoso di impianti particolari (grossi stadi, porti, grosse industrie, ecc.)

### **3.3    Gli indicatori del livello globale di inquinamento luminoso**

La brillantezza del cielo è una grandezza che dipende dalla direzione di osservazione. Per poter, con un solo valore, dare una indicazione del livello di inquinamento luminoso del cielo di un sito osservativo vengono principalmente utilizzate le seguenti grandezze.



### 3.3.1 Brillanza zenitale

Come indicatore della qualità del cielo di un sito osservativo molti autori, tra cui Bertiau *et al.*(1973), utilizzano la brillanza del cielo allo zenith.

### 3.3.2 Luminosità

La luminosità è il flusso che arriva in un unità di superficie da tutto l'emisfero celeste. Alcuni autori la ricavano moltiplicando la brillanza del cielo per  $\pi$  (v. Garstang 1996 ed il cap. 3.1). Implicitamente essi assumono la brillanza costante in ogni direzione di osservazione ed uguale a quella allo zenith, il che non è corretto.

### 3.3.3 Q di Walker

Walker (1977) ha utilizzato come misura dell'inquinamento luminoso prodotto da una città in un sito il parametro Q. Tale parametro è la differenza tra la brillanza del cielo a 45° dallo zenith, in direzione della città e la brillanza del cielo, alla stessa distanza zenitale, nella direzione opposta.

### 3.3.4 $\omega$ di Matsushima

Per confrontare le condizioni del cielo in siti diversi, Satoshi Matsushima (1964) ha introdotto un coefficiente  $\omega$  legato alla brillanza del cielo nel modo seguente. Si divide il cielo in 432 celle di 5° per 7°.5 ciascuna e si assegna un indice intero k da zero a 4 ad ogni cella a seconda della brillanza. Poi si contano le celle a cui si è assegnato ciascun valore dell'indice. Supponiamo che esse siano  $n_k$  con k=0...4. Il coefficiente di Matsushima è definito come:

$$\omega = \frac{1}{432} \sum_0^4 kn_K \quad (3.39)$$

### 3.3.5 Apertura equivalente

L'apertura equivalente è un concetto che serve a rendere immediatamente intelligibile al pubblico l'effetto della luminosità del cielo sulla resa degli strumenti di un osservatorio astronomico. Considerando che l'aumento della luminosità del cielo rispetto il livello naturale provoca un peggioramento del

rapporto segnale-disturbo, Crawford (1992) assume che una luminosità del cielo  $k$  volte maggiore di quella naturale richieda un telescopio di area  $k$  volte maggiore per mantenere lo stesso rapporto segnale-disturbo quando il segnale è debole (a parità di tempo di integrazione). Quindi se la luminosità del cielo è  $k$  volte quella naturale, un telescopio si comporta come se avesse uno specchio con un'area equivalente  $k$  volte più piccola ma un cielo non illuminato. L'apertura equivalente, cioè il diametro dell'area equivalente, è quindi  $\sqrt{k}$  volte più piccola. Il costo di un osservatorio in genere cresce con l'apertura dello specchio del telescopio, perché con essa crescono le dimensioni dell'edificio, quelle della cupola, le necessità della strumentazione, ecc. Crawford (1992) stima che il costo di un osservatorio sia approssimativamente proporzionale all'apertura elevata alla 2.7. Questo significa che se la luminosità del cielo cresce di un fattore  $k$ , il valore dell'osservatorio scende di  $(\sqrt{k})^{-2.7}$  e la percentuale del denaro speso per costruirlo che viene sprecata è:

$$P(\%) = 100 \left(1 - k^{-1.35}\right) \quad (3.40)$$

Ad esempio, se la luminosità del cielo cresce fino a diventare il doppio di quella naturale, cioè  $k=2$ , l'apertura equivalente scende al 71% di quella originale, il valore dell'osservatorio scende al 39% e il 61% del denaro speso per costruirlo è stato sprecato.

### 3.4 I livelli massimi consentiti

Nel 1979 la Commissione 50 (Identificazione e protezione dei siti osservativi esistenti e potenziali) dell'International Astronomical Union presentò all'Assemblea Generale un rapporto (Smith 1979) contenente i livelli della luminosità artificiale del cielo che potevano essere ritenuti accettabili. Ecco il testo tradotto dei punti 2.1, 2.2 e 2.3 di tale documento:

1) L'illuminazione artificiale illumina il cielo sottoforma sia di luce continua (bianca) che di righe spettrali prodotte in diversi tipi di lampade ai vapori metallici. Questa luce è diffusa indietro dal cielo e forma un fondo luminoso contro il quale ogni sorgente astronomica deve essere rivelata. Un fondo naturale già esiste sia come luce continua da stelle, luce zodiacale e airglow atmosferico, sia come radiazione in righe spettrali dall'airglow.

2) *Luce continua*. Il limite alla sensibilità dovuto al fondo di luce bianca si aggrava in proporzione al totale dei contributi naturale ed artificiale. Un

contributo del 10% oltre il livello naturale, che quindi peggiora la sensibilità di un telescopio dello stesso fattore, è in genere considerato il limite massimo tollerabile in circostanze ideali, eccetto per gli studi dell'airglow stesso che possono richiedere condizioni più stringenti. Questo livello della brillantezza del cielo dovuto all'illuminazione artificiale si intende per una elevazione di 45° sopra l'orizzonte e per lunghezze d'onda da 300 nm a 1000 nm (nanometri). Questa considerazione conduce alla Raccomandazione No.1.

#### **Raccomandazione 1.**

**L'aumento della brillantezza del cielo ad un elevazione di 45° dovuta a luce artificiale diffusa dal cielo limpido non deve eccedere il 10% del più basso livello naturale in qualunque parte dello spettro tra 300 nm e 1000 nm (nanometri) eccetto per l'emissione discreta da lampade al sodio a bassa pressione come stabilito nella Raccomandazione 2 (nelle vicinanze della lunghezza d'onda di 550 nm)** (Il livello naturale della radiazione continua del cielo buio allo zenith, osservata da un buon sito di osservatorio, è approssimativamente 10 Rayleigh per nanometro, pari a  $2.0 \cdot 10^{-8}$  stilb o  $2 \cdot 10^{-4}$  cd m<sup>-2</sup> nell'intervallo visibile. Questo livello corrisponde ad una stella di 21.6 mag per secondo di arco quadrato. Questi valori possono essere ricavati dalla brillantezza media citata da C. W. Allen, *Astrophysical Quantities*, 3rd ed., p.134, Athlone Press, 1973. La brillantezza ad un elevazione di circa 45° è circa il 5% maggiore di quella allo zenith.)<sup>9</sup>.

3) *Radiazione in righe spettrali.* Considerazioni simili a quelle applicate alla luce bianca valgono anche per la luce artificiale concentrata in righe spettrali, come avviene nelle lampade al sodio, ai vapori di mercurio o agli ioduri metallici. Alcune delle righe spettrali nella radiazione proveniente da alcuni tipi di queste lampade sono presenti in natura nell'airglow e il criterio per stabilire il livello del disturbo deve quindi essere legato alla loro intensità nell'airglow. Le altre righe spettrali saranno generalmente più nocive. Nella regione dell'ottico, la luce da lampade al sodio a bassa pressione è per lo più confinata ad una stretta coppia di righe spettrali, le righe D del sodio, che coincidono con forti righe dell'airglow. Poiché le righe dell'airglow sono intense e variabili, è improbabile che la sensibilità delle osservazioni astronomiche sia seriamente colpita se la luminosità del cielo dovuta alle righe D del sodio dell'illuminazione artificiale non eccede la minima emissione naturale dell'airglow. Questo criterio va applicato nell'intervallo di lunghezza d'onda

---

<sup>9</sup>L'applicazione di questa raccomandazione è discussa nella sezione 7.1 del citato rapporto.

di 1 nanometro contenente le due righe D. Questa considerazione porta alla Raccomandazione 2.

**Raccomandazione 2.**

**L'aumento della brillantezza del cielo ad un elevazione di 45° dovuta alla luce artificiale di lampade al sodio a bassa pressione, intesa come intensità totale entro la banda da 588.8 nm a 589.8 nm (nanometri) di lunghezza d'onda, non deve superare il livello minimo totale della radiazione naturale entro la stessa banda** (il livello minimo in un buon sito di osservatorio può essere assunto per gli scopi di questa raccomandazione pari a 30 Rayleigh; Allen, op. cit., p.135)<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup>L'applicazione di questa Raccomandazione è discussa nella sezione 7.2 del citato Rapporto.

## Capitolo 4

# L'EFFETTO DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO SULLE OSSERVAZIONI ASTRONOMICHE E SULLA VISIONE DEL CIELO

### 4.1 La propagazione dell'inquinamento luminoso da un punto di vista macroscopico

Misurando la brillantezza del cielo con i metodi esposti nel precedente capitolo, o applicando e studiando modelli teorici, sono state messe in evidenza alcune relazioni di notevole interesse che illustrano la portata del fenomeno dell'inquinamento luminoso e mostrano come esso si propaghi a distanza elevata.

### 4.1.1 Relazione Brillanza-Distanza

La brillantezza del cielo causata da una città, ad una certa distanza angolare  $z$  dallo zenith, varia con la distanza dalla città.

Walker (1977) ha misurato la differenza  $Q$  tra la brillantezza del cielo a  $45^\circ$  dallo zenith, in direzione di una città e nella direzione opposta, per diverse distanze dalla città americana di Salinas (68600 abitanti). I valori di  $Q$  ottenuti sono ben rappresentati in funzione della distanza  $D$  dalla legge:

$$Q \propto D^{-2.5} \quad (4.1)$$

Bertiau, de Graeve e Treanor (1973) hanno misurato nel 1971 la brillantezza del cielo allo zenith a diverse distanze dalle città di Roma (2600000 abitanti), L'Aquila (61000 abitanti) e Teramo (48000 abitanti). Essi sono riusciti ad ottenere un buon accordo con le osservazioni per tutte e tre le città applicando una legge di propagazione ottenuta da Treanor (1973) con un semplice modello tenendo conto di una doppia diffusione in un modo simile a quello illustrato nella sezione 2.4.2:

$$S = aP \left( \frac{1.8}{D} + \frac{13.5}{D^2} \right) e^{-0.026D} \quad (4.2)$$

ove  $D$  è la distanza dalla sorgente di inquinamento luminoso in km,  $P$  la popolazione in unità di  $10^5$ ,  $a$  è un coefficiente di sviluppo economico, da essi introdotto, che per Roma vale 1, ed  $S$  è in unità della brillantezza naturale del cielo. Essi utilizzarono questa legge per calcolare la brillantezza del cielo prevista nel nostro Paese (Bertiau *et al.* 1973). I loro risultati sono illustrati nella figura 4.1 a pagina 143. Walker (1977) provò ad applicare la legge di Bertiau, de Graeve e Treanor (1973) alle sue osservazioni di Salinas ed ottenne un generale accordo con i valori sperimentali fatta eccezione per l'intervallo 24-35 km. Occorre tener presente però che la legge si riferisce alla brillantezza allo zenith mentre le osservazioni di Walker si riferiscono alla differenza fra le brillanze a  $45^\circ$  verso la città e dalla parte opposta. Quindi non ci si può aspettare nulla di più di un accordo approssimativo.

Un'espressione simile a quella di Bertiau, de Graeve e Treanor (1973) è stata proposta da) Berry (1976):

$$S = a_1 P \left( \frac{a_2}{D^2 + a_3^2} + \frac{a_4}{\sqrt{D^2 + a_3^2}} \right) e^{-a_5 \sqrt{D^2 + a_3^2}} \quad (4.3)$$

ove  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  e  $a_5$  sono costanti,  $P$  è la popolazione,  $D$  la distanza e la brillantezza  $S$  va misurata in S10 (si veda il capitolo sulle unità di misura). Modelli più complessi (Garstang 1986) mostrano che la brillantezza del cielo allo zenith decresce con la distanza in modo non lineare. Se si scrive

$$S = S_0 P D^\alpha \quad (4.4)$$

si trova che il coefficiente  $\alpha$  diventa più negativo al crescere della distanza e, per città molto popolate capaci di inviare luce anche molto lontano, può arrivare anche ad  $\alpha \sim -4$ . L'esponente  $\alpha$  diventa più negativo anche al crescere della percentuale di aerosoli rispetto alle molecole, cioè al diminuire della limpidezza dell'aria.

Garstang (1989) ha mostrato come l'effetto della curvatura della superficie terrestre non è trascurabile per distanze oltre i 50 km e fa sì che la brillantezza dovuta alle grandi città molto distanti decresca più di quanto accadrebbe se la terra fosse piatta. Alla distanza di 50 km la differenza nella brillantezza vicino allo zenith tra i risultati di modelli che tengano conto o meno della curvatura terrestre è del 2% circa.

L'effetto della foschia e, in generale, l'effetto di un aumento della quantità di aerosoli consiste nell'aumentare la brillantezza del cielo allo zenith nelle vicinanze delle sorgenti di inquinamento luminoso per effetto dell'aumento della diffusione. Tuttavia la brillantezza decresce in luoghi situati sufficientemente lontano dalle sorgenti per effetto dell'aumento dell'estinzione.

#### 4.1.2 Relazione Brillantezza-Distanza per territori ad elevata urbanizzazione

Le formule illustrate nel paragrafo 4.1.1 esprimono il fatto che la curva della brillantezza del cielo prodotta dalla luce dispersa da una città decresce con la distanza da questa con una pendenza piuttosto elevata. Ad esempio la legge di Walker esprime il fatto, come abbiamo visto, che il parametro  $Q$  decresce, con il reciproco della distanza elevata alla 2.5. Questa elevata pendenza può ingenerare talvolta l'errata impressione che, in territori ove non vi siano grosse metropoli capaci di produrre inquinamento luminoso a grandi distanze, solo le sorgenti di inquinamento luminoso situate nelle vicinanze di un sito siano responsabili della luminosità artificiale del cielo in quel sito. In questo ragionamento si trascura il carattere additivo dell'inquinamento luminoso,

ossia il fatto che la luminosità del cielo prodotta da più sorgenti, nel nostro caso più città, si somma. Questo fenomeno è meno appariscente in aree del globo ove la popolazione è radunata in grandi città, ma è fondamentale in aree, come ad esempio la pianura padana, ove la popolazione è distribuita in un miriade di città, paesi e paesini in modo tale da coprire pressoché interamente il territorio. In questo caso, come vedremo nell'esempio più sotto, la frazione della brillantezza del cielo prodotta da tutta la popolazione residente oltre una certa distanza dal sito decresce al crescere di questa distanza in modo molto lento. Ciò significa che zone di territorio anche molto lontane dal sito possono contribuire notevolmente alla luminosità del suo cielo. Ciò implica quindi che norme per la protezione di un sito devono poter agire anche su impianti di illuminazione situati a distanze notevoli da esso, pena l'inefficacia delle norme stesse.

Per comprendere le precedenti affermazioni calcoliamo la luminosità del cielo allo zenith di un sito prodotta da tutta la popolazione residente oltre una certa distanza  $d$  dal sito stesso. Assumiamo per semplificare che nel territorio considerato la popolazione sia distribuita in modo omogeneo con una densità di  $p$  anime per unità di superficie. Questo non è esattamente la situazione della pianura padana ove la popolazione è distribuita in paesi e paesini ma essendo questi sparsi in modo diffuso nel territorio, il nostro modello si avvicina in qualche modo alla situazione reale. Assumiamo inoltre che sia valida nell'area una legge  $I = pf(r)$  che fornisce la brillantezza  $I$  allo zenith in funzione della distanza  $r$  da una città avente una certa popolazione  $p$  e che questa legge si possa applicare ad ogni area unitaria di territorio di popolazione  $p$ .

L'area di un settore circolare infinitesimo di spessore  $dr$  posto alla distanza  $r$  dal sito sarà  $2\pi r dr$  e la sua popolazione totale sarà  $2\pi p r dr$ . La brillantezza del cielo prodotta nel sito da quel settore infinitesimo sarà dunque:

$$db = 2\pi p r f(r) dr \quad (4.5)$$

Per calcolare la brillantezza prodotta da tutto il territorio situato oltre la distanza  $d$  sarà sufficiente integrare la precedente tra  $d$  e infinito (Cinzano, 1997):

$$b = 2\pi p \int_d^{\infty} f(r) r dr \quad (4.6)$$

Si vede subito, anche senza eseguire il calcolo dell'integrale, che la pendenza di questa espressione è inferiore a quella della funzione  $f(d)$ . Tanto per



capirci, se<sup>1</sup>  $f(r) \propto r^{-2.5}$ , l'integrale precedente fornisce  $b \propto pd^{-0.5}$  che è una legge che decresce molto più lentamente della  $f(r)$ .

Facciamo un esempio. Supponiamo di voler proteggere dall'inquinamento luminoso un osservatorio creando una zona di rispetto di 20 km di raggio ove l'illuminazione sia regolamentata. Supponiamo inoltre che attorno all'osservatorio per un raggio di 5 km non ci siano sorgenti importanti di inquinamento luminoso (è il caso di un osservatorio isolato, ad es. in campagna o in collina). Il contributo alla brillantezza allo zenith proveniente dalla zona oltre i 20 km rispetto al totale, cioè al contributo proveniente da oltre 5 km è:  $\frac{b_{20}}{b_5} = \left(\frac{20}{5}\right)^{-0.5} = 50\%$  In conclusione la norma potrebbe influire solo sulla metà della brillantezza artificiale del cielo allo zenith dell'osservatorio.

### 4.1.3 Relazione Brillanza–Popolazione

Berry (1976) ha determinato una relazione, confermata anche da modelli teorici (Garstang 1986), tra la brillantezza  $b$  del cielo allo zenith osservata *dal centro* di una città e la sua popolazione. Poiché le osservazioni sono piuttosto delicate ed hanno una dispersione elevata, sono state proposte diverse dipendenze della brillantezza dalla popolazione. Berry (1976) trova che il miglior accordo con le sue misure è dato dalla:

$$b \propto \sqrt{P} \quad (4.7)$$

Garstang(1986) con alcune correzioni riesce a riprodurre l'andamento delle misure di Berry nei centri città con i suoi modelli in cui:

$$b \propto P \quad (4.8)$$

Walker(1977) definendo  $L$  come la differenza tra la luminosità del cielo a  $45^\circ$  dallo zenith verso la città e in direzione opposta in un punto situato a 16.1 km (10 miglia) dalla città ha trovato:

$$L \propto P^{0.8} \quad (4.9)$$

ma ritenne che, a causa degli errori delle misure, si possa considerare corretta anche la  $L \propto P$ .

---

<sup>1</sup>La legge di Walker si riferisce al parametro  $Q$  e non alla brillantezza allo zenith, tuttavia per i nostri scopi è una approssimazione sufficiente.

#### 4.1.4 Relazione Brillanza–Distanza Zenitale

Questa relazione è legata alla distanza della città, alla sua popolazione, e ad altri parametri, perciò non è possibile introdurre per essa alcuna espressione analitica. Essa deve quindi essere calcolata e/o ricavata sperimentalmente per ogni sito di osservazione. Variazioni dell'ordine di qualche magnitudine passando dallo zenith a distanze zenitali di qualche decina di gradi non sono inconsuete.

#### 4.1.5 Relazione Popolazione-Distanza

Walker (1970, 1973, 1977) ha derivato una relazione tra la popolazione di una città e la distanza a cui la brillantezza del cielo, a  $45^\circ$  dallo zenith in direzione della città, è aumentata di 0.2 mag rispetto al fondo naturale:

$$P \propto D^\alpha \quad \text{con } \alpha \simeq 2.5 \quad (4.10)$$

Questa relazione è ben riprodotta anche dai modelli teorici (Garstang 1986). Da questa relazione Popolazione–Distanza si vede che una città di un milione di abitanti aumenta di 0.2 mag la brillantezza del cielo a ben 100 km di distanza. Questo fa capire come la luminosità del cielo, grazie alla diffusione e nonostante gli assorbimenti, si propaga a distanze molto grandi dalla sorgente dell'inquinamento luminoso.

## 4.2 La crescita dell'inquinamento luminoso

Ciò che rende drammatico il problema dell'inquinamento luminoso è la sua continua crescita. Ciò provoca un aumento continuo della brillantezza media del cielo che talvolta si rileva anche nei siti più remoti.

Modelli dell'evoluzione nel tempo della brillantezza del cielo sono stati fatti da Pike(1976) e da Garstang(1989). Nella tabella 4.1 abbiamo riportato l'aumento previsto della brillantezza del cielo allo zenith prodotta dall'illuminazione esterna notturna nei maggiori osservatori degli USA (Garstang 1989).

La crescita dell'inquinamento luminoso è legata a quattro fattori principali:

- La crescita della popolazione.

Tabella 4.1: Aumento della luminosità del cielo prevista nei maggiori osservatori USA per i prossimi anni.

Osservatorio	Banda	1980	1990	1995	2000	2010	2020
Palomar	V	0.44	0.51	0.55	0.59	0.69	0.80
	B	0.32	0.38	0.41	0.44	0.51	0.59
Mount Wilson <sup>1</sup>	V	2.27	2.42	2.47	2.52	2.61	2.70
	B	2.22	2.37	2.43	2.48	2.57	2.67
Lick	V	1.35	1.49	1.54	1.58	1.65	1.71
	B	1.28	1.43	1.48	1.52	1.59	1.65
Kitt Peak	V	0.085	0.114	0.130	0.147	0.183	0.22
	B	0.057	0.076	0.087	0.099	0.124	0.148
Mauna Kea	V	0.023	0.027	0.030	0.032		
	B	0.022	0.026	0.028	0.030		
Mount Hopkins	V	0.137	0.184	0.21	0.24	0.32	0.41
	B	0.112	0.151	0.175	0.20	0.27	0.35
Mount Graham	V	0.045	0.055	0.060	0.065	0.076	0.086
	B	0.037	0.044	0.046	0.050	0.056	0.061

Differenze di magnitudine  $\Delta m$  allo zenith rispetto il valore naturale.

- La crescita della quantità di luce pro capite.
- Le variazioni del tipo di armature e di impianti.
- Le variazioni del tipo di sorgenti di luce.

Vediamole una ad una.

### 4.2.1 Crescita della popolazione

Come già visto, la brillantezza del cielo dovuta all'inquinamento luminoso è, in prima approssimazione, proporzionale alla popolazione secondo la  $b \propto P^\alpha$ , con  $0.8 \geq \alpha \geq 1$  a seconda dei vari autori. Quindi dalle proiezioni sull'aumento della popolazione si può facilmente stimare l'aumento della brillantezza del cielo. Si possono ottenere delle stime approssimate della popolazione futura estrapolando l'andamento degli ultimi anni. Se una grandezza aumenta

di una percentuale costante  $x$  ogni anno, il suo valore dopo  $(t - t_0)$  anni sarà:

$$a = a_0 \left(1 + \frac{x}{100}\right)^{(t-t_0)} \quad (4.11)$$

L'aumento è quindi esponenziale.

Occorre tener presente che il rapporto tra la popolazione di una città e quella dei paesi vicini può cambiare per effetto dei movimenti della popolazione e che se la brillantezza del cielo è prodotta dal contributo di tutta una serie di città e paesi vicini, per ottenere una previsione precisa dell'aumento della brillantezza occorre un modello teorico che tenga conto della disposizione geografica e dei movimenti della popolazione.

#### 4.2.2 Crescita del flusso di luce pro capite

La quantità di luce dell'illuminazione esterna notturna cambia col tempo per effetto di variazioni nelle condizioni economiche e di sviluppo commerciale e industriale. Talvolta cambia perché si modifica la caratteristica dell'abitato, per esempio da residenziale ad industriale, o perché sorgono nuovi insediamenti commerciali, industriali, artigianali, turistici o portuali. Questo era il senso di quel coefficiente di sviluppo economico già citato che Bertiau *et al.* (1973) introdussero nella loro formula che dava la brillantezza in funzione della distanza. In generale l'industria dell'illuminazione si aspetta nei prossimi anni una forte crescita della quantità di luce pro capite. L'ENEL ha constatato negli anni scorsi un incremento annuo nella quantità di energia utilizzata per illuminazione pubblica di circa il 5%.

#### 4.2.3 Variazioni del tipo di armature e di impianti

Le variazioni nel tipo di impianti e di armature sono una causa importante delle variazioni a lungo termine della quantità di inquinamento luminoso e quindi della luminosità artificiale del cielo. Questo è il punto fondamentale dove agire per una limitazione dell'inquinamento luminoso. L'approvazione in un area di leggi o direttive per la limitazione della dispersione di luce può produrre una diminuzione notevole della velocità di crescita dell'inquinamento luminoso in quanto tali leggi agiscono su quella frazione della luce emessa che nella sezione 2.2 abbiamo chiamato  $\epsilon$  e che normalmente sta tra il 10-15 % ma che con una politica di controllo può scendere fino allo zero.

Le osservazioni fatte da Hoag all'Osservatorio del Kitt Peak hanno mostrato chiaramente che la forte crescita della brillantezza del cielo in direzione della vicina città di Tucson è stata addirittura bloccata dalla severa ordinanza per il controllo dell'illuminazione esterna notturna promulgata nel Giugno 1972.

Senza una attenta normativa, invece, l'instaurarsi tra le ditte installatrici di abitudini di illuminazione poco attente al problema dell'inquinamento luminoso tende, in genere, ad aumentare la velocità di crescita dell'inquinamento luminoso. È il caso della tendenza, osservata di recente in Italia, di illuminare a giorno le barriere autostradali e gli svincoli con proiettori simmetrici a fascio largo.

#### 4.2.4 **Variazioni nel tipo di sorgenti di luce**

Le variazioni nel tipo di lampade sono una causa importante delle variazioni a lungo termine della qualità dell'inquinamento luminoso, ovvero della distribuzione spettrale della luminosità del cielo. Modifiche nelle abitudini di uso di tipi diversi di lampade possono portare ad un inquinamento luminoso più o meno pesante per le osservazioni astronomiche. Anche questo è quindi un punto importante dove agire per migliorare le condizioni del cielo notturno. Ad esempio, il cambio, in atto, delle poco efficienti lampade ai vapori di mercurio con lampade al sodio ad alta pressione può portare un primo miglioramento<sup>2</sup>, o un più lento peggioramento, alla brillantezza del cielo nella banda fotometrica astronomica B. Vista la consistente percentuale dovuta all'illuminazione stradale e di aree industriali all'interno della quantità globale di luce emessa dall'illuminazione esterna notturna, un miglioramento ancora maggiore si potrebbe avere dall'adozione di lampade al sodio a bassa pressione nell'illuminazione di strade extraurbane e urbane periferiche, di barriere, caselli e svincoli autostradali, di parcheggi e di aree industriali. Questo tuttavia dipende dalle direttive che verranno impartite dalle autorità. L'introduzione di lampade del tipo in uso negli stadi sportivi, quelle agli ioduri metallici, anche in altri tipi di illuminazione può avere invece effetti assai gravi.

---

<sup>2</sup>Sempre che i livelli di illuminamento al suolo non crescano.

### 4.3 Il disturbo alle osservazioni a occhio nudo

L'occhio è un recettore molto particolare in quanto ha la capacità di adattarsi a livelli di illuminazione diversi anche di un fattore  $10^8$ . Vari processi permettono questo. Innanzitutto l'occhio dispone di due diversi tipi di recettori:  $\sim 7 \cdot 10^6$  coni concentrati nella parte centrale della retina, la fovea, in gran parte capaci di una definizione molto accurata e di percepire i colori ma che richiedono livelli di luminosità più grandi di circa 1480 nL, e  $\sim 13 \cdot 10^7$  bastoncelli distribuiti in modo non fitto nella zona centrale ma che aumentano di numero nella periferia della retina. I bastoncelli sono sensibili a bassi livelli di illuminazione e la loro disposizione permette tra l'altro una migliore percezione di deboli sorgenti diffuse ed estese. L'occhio inoltre dispone di un diaframma, l'iride, in grado di allargarsi da circa 2 mm fino a 8 mm (in dipendenza anche dell'età), aumentando l'area di raccolta della luce. Infine la concentrazione di fotopigmenti nei bastoncelli e nei coni può variare a seconda della quantità di luce incidente. Il tempo che l'occhio impiega per adattarsi alla visione notturna, grazie ai precedenti meccanismi e ad un certo grado di adattamento psicologico, è di circa trenta minuti.

#### 4.3.1 Effetti dell'inquinamento luminoso

La capacità di vedere le stelle è dovuta non solo alla capacità di rivelare la loro radiazione ma anche al contrasto tra la luminosità della stella e quella dello sfondo. Knoll *et al.* (1946) e Hecht (1947) hanno trovato che un oggetto di dimensione stellari per essere visibile contro un fondo di luminosità  $b$  (in nL) deve produrre una illuminazione  $i$  all'occhio (espressa in footcandle) data da:

$$\log i = -9.80 + 2 \log(1 + 0.1122 b^{1/2}) \quad \log b \leq 3.17 \quad (4.12)$$

$$\log i = -8.35 + 2 \log(1 + 0.001122 b^{1/2}) \quad \log b \geq 3.17 \quad (4.13)$$

A  $b \geq 1479$  nL si ha il passaggio tra la visione extra-foveale (bastoncelli) a quella foveale (coni). Questo accade anche nell'osservazione notturna quando la magnitudine del cielo inquinato è circa 3.7 mag maggiore di quella naturale, ovvero quando la brillantezza media supera  $\sim 47 \cdot 10^{-4} \text{ cd m}^{-2}$ . Si può convertire la doppia relazione precedente in un'altra tra la magnitudine della stella nella

banda fotometrica V e la luminosità del cielo in nL (Garstang 1986):

$$V = 7.9 - 5 \log_{10} (1 + 0.1122b^{1/2}) \quad b \leq 1479 \text{ nL} \quad (4.14)$$

$$V = 4.305 - 5 \log_{10} (1 + 0.001122b^{1/2}) \quad b \geq 1479 \text{ nL} \quad (4.15)$$

Per una luminosità<sup>3</sup> del cielo corrispondente alla luminosità naturale ( $\sim 60$  nL) si trova una magnitudine limite di circa 6.5 in buon accordo con quanto si riscontra in pratica. Con un fondo-cielo di 1600 nL, che è la luminosità del cielo limpido illuminato dalla luna quando ha un età di 10 giorni ed è al meridiano, si vedono al massimo stelle di magnitudine 4.2 circa. Si noti che la magnitudine limite stabilita dalle formule precedenti va corretta per l'estinzione atmosferica. Per effetto di un aumento dell'estinzione atmosferica, dovuto alle condizioni meteorologiche (tipico esempio la presenza di veli) la magnitudine limite decresce, in modo indipendente dalla luminosità del cielo.

Esaminiamo ora l'effetto della magnitudine limite sul numero di stelle che si possono vedere a occhio nudo. Il numero di stelle medio per grado quadrato avente magnitudine apparente maggiore di un certo valore  $m$  nella banda visuale è stato calcolato da Van Rhijn (1929), Seares *et al.* (1925) e Seares e Joyner (1928). Moltiplicando per il numero di gradi quadrati dell'emisfero di cielo visibile si trova il numero totale di stelle visibili. Facendo invece il rapporto con il massimo numero di stelle che potrebbe essere visibile a occhio nudo (corrisponde ad una magnitudine limite tra 6.0 e 6.5 a seconda del luogo e della sua estinzione), si può calcolare quale percentuale delle stelle visibili a occhio nudo si può effettivamente osservare con una certa luminosità media o brillantezza media del cielo. In presenza di inquinamento luminoso si scende facilmente a percentuali sotto il 10% come si vede dalla tabella 4.2.

L'aspetto della Via lattea, un imponente spettacolo a cui ormai non siamo più abituati, dipende molto dalla luminosità del cielo. La tabella 4.3 descrive la sua visibilità per alcuni valori della luminosità media e della brillantezza media del cielo.

---

<sup>3</sup>Si può passare dalla brillantezza media in  $cd \text{ m}^{-2}$  alla luminosità in nL con le formule della sezione 3.1.

Tabella 4.2: Magnitudine limite per osservazione ad occhio nudo in funzione della brillantezza media o della luminosità del cielo limpido e frazione di stelle visibili.

brillantezza $cd\ m^{-2}$	luminosità nL	mag. lim. vis	mag. lim. appar.	% stelle visibili		n° stelle sopra 30°
98.6	$3.1\ 10^7$	0.0	0.0	0.02%	0.03%	
31.8	$1.0\ 10^7$	1.0	1.0	0.1%	0.2%	3
8.9	$2.8\ 10^6$	2.0	2.0	0.5%	0.8%	10
1.7	$5.4\ 10^5$	3.0	3.0	1.7%	3.0%	36
0.057	$1.8\ 10^4$	4.0	4.0	6.3%	11.0%	130
$3.6\ 10^{-3}$	1138	4.5	4.5	11.0%	19.0%	230
$2.0\ 10^{-3}$	624	5.0	5.0	19.5%	33.9%	400
$1.0\ 10^{-3}$	324	5.5	5.5	33.1%	57.5%	690
$4.9\ 10^{-4}$	155	6.0	6.0	57.5%	100%	1200
$2.1\ 10^{-4}$	65	6.5	6.5	100%		2100

Note:

Elaborazione su dati di Seares *et al.*(1925). Il numero di stelle riportato nell'ultima colonna non è il numero totale di stelle visibili ma il numero medio di stelle che si possono contare sopra i  $\sim 30^\circ$  di altezza ed è solo indicativo. Il numero totale di stelle visibili in un emisfero di cielo fino all'orizzonte è circa doppio.

A circa  $4.7\ 10^{-3}\ cd\ m^{-2}$  si ha il passaggio dalla visione extrafoveale (bastoncelli) a quella foveale (coni).

Nell'uso pratico la magnitudine limite va corretta per l'estinzione e la percentuale di stelle visibili varia di conseguenza.



Figura 4.1: Aumento della brillantezza del cielo rispetto il valore naturale calcolato per il 1972 da Bertiau *et al.*(da Treanor 1974) e ampiezza corrispondente stimata per il 1994.

Figura 4.2: La Via Lattea fotografata da un sito non inquinato con un obiettivo grandangolare *fish-eye*. (Cortesia International Dark-Sky Organization)

Tabella 4.3: Visibilità della Via lattea a occhio nudo per alcuni valori della luminosità e della brillantezza media del cielo limpido.

lum. nL	brill.med. $cd\ m^{-2}$	visibilità a occhio nudo della Via lattea
1150	$3.7\ 10^{-3}$	invisibile; poche centinaia di stelle visibili
500	$1.6\ 10^{-3}$	visibile in parte e solo vicino allo zenith, il resto immerso in un cielo grigio luminoso
150	$5\ 10^{-4}$	contrasto ridotto, perdita dei dettagli fini
80	$2.5\ 10^{-4}$	brillante se alta nel cielo ma invisibile avvicinandosi all'orizzonte
64	$2\ 10^{-4}$	ottima fino all'orizzonte se non c'è foschia

Nota: Elaborazione su dati di Berry (1976).



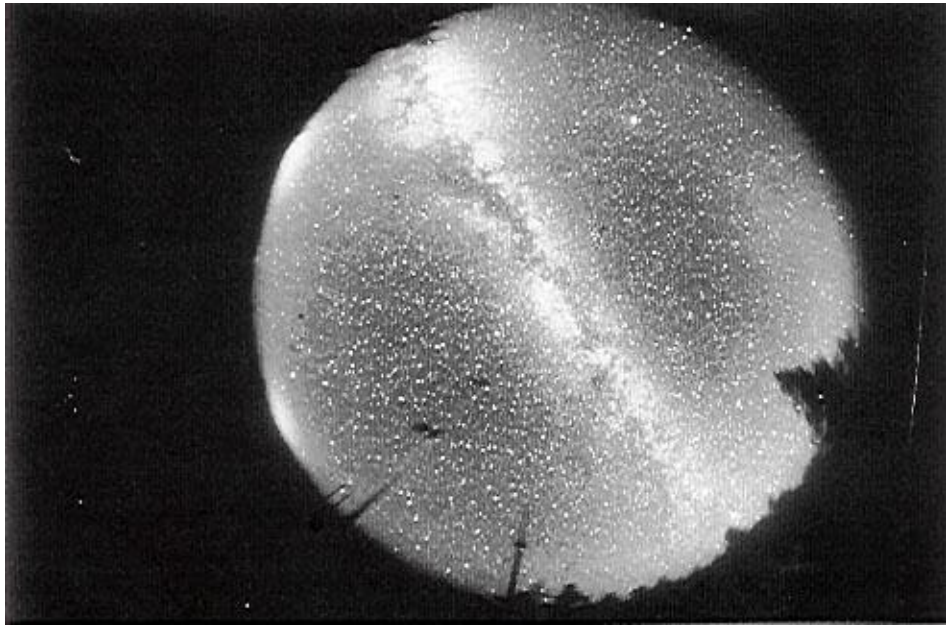


Figura 4.3: Effetto dell'inquinamento ottico sulla visibilità del cielo notturno. (Cortesia International Dark-Sky Organization)

### 4.3.2 Effetti dell'inquinamento ottico

L'inquinamento ottico è prodotto da quella luce che illumina direttamente un'area o un soggetto che non è richiesto di illuminare.

Quando si osserva il cielo nelle vicinanze di una sorgente molto brillante, quale una lampada dell'illuminazione esterna notturna, la luce emessa da questa viene diffusa nell'occhio dell'osservatore producendo uno sfondo luminoso (detto *glare*) entro cui sono immersi, spesso completamente occultati, gli oggetti di debole luminosità che si vorrebbe osservare (v. figura 4.3). La luminosità superficiale (apparente) prodotta dalla luce diffusa nell'occhio umano (Holladay 1926; Boynton, Enoch & Bush 1954; Schaefer 1991) è:

$$B_{glare} = 4.30 \cdot 10^6 I \theta^{-2} \quad (4.16)$$

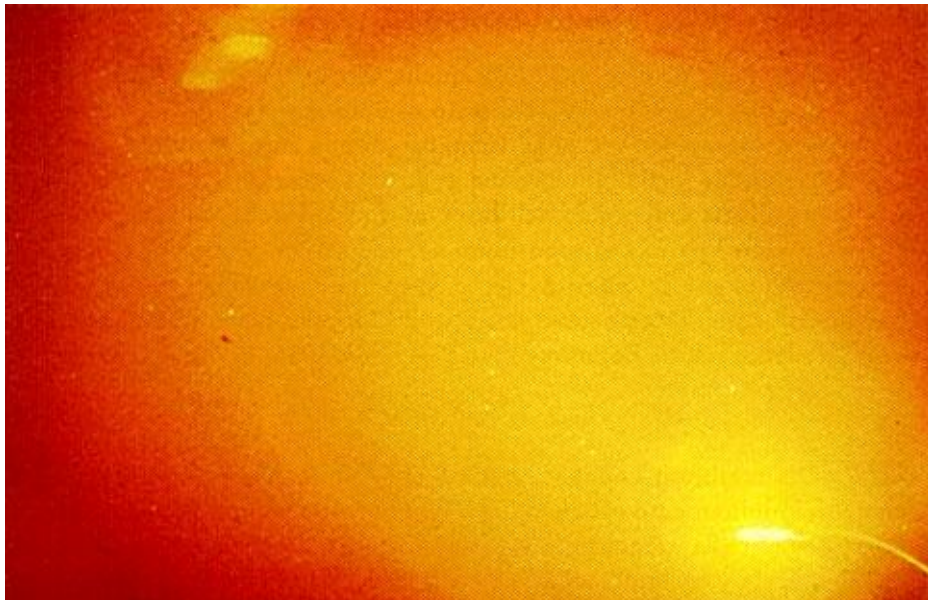
ove  $B_{glare}$  è la luminosità apparente in nL,  $I$  è l'illuminamento prodotto dalla sorgente di inquinamento ottico in lux e  $\theta$  è l'angolo apparente tra la direzione

di osservazione e la sorgente misurato in gradi. La luminosità apparente  $B_{glare}$  si somma alla luminosità reale del cielo (compresa la parte causata dall'inquinamento luminoso) ed alla luminosità prodotta dalla diffusione della luce della sorgente da parte delle particelle atmosferiche. A questo effetto si aggiunge ancora, se l'illuminamento è elevato, una riduzione di sensibilità dell'occhio.

Per esempio, supponiamo che un soggetto cerchi di osservare un corpo celeste di magnitudine  $m_{vis} = 3.7$  in una serata limpida da una strada o da un piazzale illuminato da un apparecchio di illuminazione che produca un illuminamento in quel punto di 20 lx. Supponiamo che l'estinzione della luce del corpo celeste quella notte sia di 0.3 mag. Per distinguere il corpo celeste dallo sfondo occorre che la luminosità percepita dall'osservatore sia inferiore a  $\sim 2 \cdot 10^4$  nL (v. eq. 4.14), e perciò è necessario che la direzione di osservazione faccia un angolo di almeno  $\sim 65^\circ$  rispetto alla direzione dell'apparecchio. Se i punti luce sono più di uno, non è detto che esista un punto del piazzale da cui la direzione di osservazione faccia un angolo di almeno  $\sim 65^\circ$  rispetto la direzione di tutti i punti luce. Questo significa che da una strada o da un piazzale illuminato come il precedente, potrebbe essere impossibile, anche nelle notti più limpide, effettuare osservazioni di oggetti deboli o, comunque, vedere il cielo stellato, salvo che si tenti in qualche modo di proteggersi dalla luce. Da ciò si conclude che per consentire agli abitanti di una città di vedere e osservare il cielo è necessario che vengano attrezzate aree apposite ove non siano presenti impianti di illuminazione o vi siano impianti all'uopo studiati. Qualora, in particolari occasioni quali ad esempio la *Giornata dell'inquinamento luminoso* o il passaggio di una cometa luminosa, si desiderasse offrire alla popolazione o al turista la possibilità di un'osservazione da una piazza cittadina, come è già successo, è necessario spegnere l'illuminazione nella piazza.

## 4.4 Il disturbo alle osservazioni al telescopio

Tutta l'informazione che possiamo ricevere dagli oggetti che popolano il nostro universo, al di là dei confini del sistema solare, è rappresentato dalla loro emissione elettromagnetica. Almeno fino a che i rivelatori di onde gravitazionali e di neutrini non avranno raffinato la loro tecnologia. La parte dello spettro elettromagnetico che comprende la luce visibile e l'infrarosso ed







ultravioletto vicini, è il dominio dell'Astronomia Ottica. È una parte importante, entro cui cade il massimo di emissione delle stelle normali. Date le grandi distanze in gioco, l'intensità ricevuta sulla Terra dalle sorgenti astronomiche è estremamente piccola. È quindi necessario dotarsi di strumenti capaci di raccogliere i quanti di energia luminosa, i fotoni, che incidono su un'area ampia il più possibile e di concentrarli su un rivelatore che sia il più efficiente possibile, ossia capace di registrare un'elevata percentuale di tali fotoni incidenti.

I telescopi di nuova generazione hanno superfici di raccolta che vanno dagli  $8 \cdot 10^4 \text{cm}^2$  del Telescopio Nazionale Galileo e dell'New Technology Telescope dell'European Southern Observatory (ESO), agli  $8 \cdot 10^5 \text{cm}^2$  del telescopio Keck ed arriveranno ai  $2 \cdot 10^6 \text{cm}^2$  di apertura equivalente con il Very Large Telescope dell'ESO. I telescopi classici hanno aree nell'intervallo  $7.8 \cdot 10^3 \text{cm}^2 (\varnothing 1\text{m}) - 7.1 \cdot 10^4 \text{cm}^2 (\varnothing 3\text{m})$ . I telescopi degli astrofili in Italia hanno superfici di raccolta tra i  $3.1 \cdot 10^2 \text{cm}^2 (\varnothing 20\text{cm}) - 5.0 \cdot 10^3 \text{cm}^2 (\varnothing 80\text{cm})$ . Per confronto, l'area di raccolta dell'occhio, quando la pupilla è alla sua massima estensione ( $\varnothing 8\text{mm}$ ), è circa  $0.5 \text{cm}^2$ .

Il rivelatore, oltre a registrare un'elevata percentuale dei fotoni incidenti, deve essere anche capace di misurarne con precisione la quantità. Inoltre deve essere capace di integrare la quantità di fotoni in un intervallo di tempo di lunghezza fissata (tempo di integrazione), di operare in un ampio intervallo di intensità di flusso senza saturarsi o perdere sensibilità e di memorizzare le informazioni ottenute. L'occhio non è il rivelatore ideale per vari motivi tra cui la limitata precisione di misura e la impossibilità di integrare la luce in intervalli di tempo lunghi. Il rivelatore più usato attualmente è il CCD (Charge Coupled Device) che sfrutta l'effetto dei fotoni nell'estrarre elettroni da un semiconduttore. Un altro rivelatore usato è il fototubo, che troviamo ad esempio nei fotometri fotoelettrici, che sfrutta l'emissione di elettroni da parte di un fotocatodo. Il CCD ha il vantaggio non solo di avere una risposta lineare ma anche di poter essere costruito come matrice di elementi sensibili e quindi di fornire un'immagine bidimensionale. I tempi di integrazione possono arrivare a parecchie ore nel caso di osservazione di oggetti deboli.

L'utilizzo di grandi aree di raccolta di fotoni e di lunghi tempi di integrazione fa sì che si possano raccogliere da una certa area di cielo, nel corso delle osservazioni astronomiche, un numero di fotoni alcuni miliardi di volte maggiore di quello che arriva in un centimetro quadrato in un secondo.

#### 4.4.1 Limiti imposti dalla brillantezza del cielo alle osservazioni fotometriche

Da una stella di magnitudine  $V = 5$ , appena visibile a occhio nudo, che si trovi allo zenith arrivano in un  $cm^2$  a livello del mare in media<sup>4</sup> circa 80 fotoni ogni secondo per ogni dieci angstrom di larghezza della banda in cui si osserva (nella zona attorno ai 5500 Å). Se raccogliessimo tutti i fotoni che arrivano in un  $cm^2$  la cui lunghezza d'onda sia compresa entro 850 Å dalla lunghezza d'onda centrale della banda fotometrica V (praticamente tutti quelli che cadono entro la banda V), otterremmo circa 13600 fotoni per secondo. Da una stella di magnitudine  $V=22$ , invece, arriva su un  $cm^2$  ed entro la stessa banda in media 1 fotone ogni 8 minuti. Un telescopio da 1 metro di diametro ne raccoglie circa 17 in un secondo. Un cielo non inquinato con una luminosità di 65 nL fornisce sul piano focale dello stesso telescopio circa 13 fotoni<sup>5</sup> al secondo da ogni secondo d'arco quadrato di cielo. Se la lunghezza focale del telescopio e le dimensioni del rivelatore (o di un suo elemento, nel caso del CCD) sono tali che esso copre una zona di cielo di un secondo d'arco quadrato, allora soltanto circa il 57% dei fotoni ricevuti appartiene alla stella.

Poiché la scala angolare dell'immagine, espressa come numero di secondi d'arco che corrispondono ad un mm nel piano focale del telescopio, ove si trova il rivelatore, dipende solo dalla lunghezza focale  $F$  del telescopio,  $scala(arcsec/mm) = \frac{206265}{F(mm)}$ , nell'osservazione di oggetti puntiformi potrebbe sembrare sufficiente aumentare la lunghezza focale dello strumento o ridurre il diaframma del fotometro (cioè la dimensione del campo osservato) o la dimensione dei pixel del CCD per diminuire l'influsso della luminosità del cielo. In pratica però ciò non è possibile. Infatti la risoluzione angolare dell'immagine di una stella sul piano focale è limitata dalla qualità delle ottiche e dai movimenti dell'immagine dovuti alle perturbazioni del fronte d'onda prodotte dalla turbolenza atmosferica (seeing) che per tempi di integrazione non brevissimi produce una dispersione della luce tutt'attorno al punto ove vi sarebbe l'immagine in assenza di atmosfera. Quindi un oggetto puntiforme in realtà produce un'immagine diffusa e un aumento della lunghezza focale si traduce in un aumento dell'area in cui la luce viene dispersa cosicché il rapporto tra la brillantezza di quest'area e la brillantezza del fondo-cielo resta

---

<sup>4</sup>Si veda ad es. Eccles, M.J., Sim, M. E. & Tritton, K. P., 1983, Low light level detectors in astronomy (Cambridge: Cambridge University Press).

<sup>5</sup>Come abbiamo visto nel capitolo 3.1.

costante. In genere i telescopi professionali vengono progettati per lavorare alla massima definizione possibile, con una dimensione degli elementi del recettore che è qualche frazione dell'area in cui la luce viene dispersa e quindi il sistema non è suscettibile di migliorare né aumentando la lunghezza focale né diminuendo le dimensioni del diaframma o dei pixel.

### Rapporto segnale-disturbo

Si definisce *rumore* qualunque sorgente di incertezza in un segnale. Ogni stadio del processo di misura della quantità di luce raccolta da un rivelatore introduce un qualche rumore. Un problema fondamentale, anche perché dipendente dalle caratteristiche intrinseche dei fotoni, è il *rumore fotonico*. Sotto questo nome si intendono le fluttuazioni casuali nel numero di fotoni che arrivano al recettore in intervalli consecutivi di tempo. Si può quantificare il rumore fotonico con la radice quadrata dello scarto quadratico medio del numero di conteggi. I conteggi successivi seguono la statistica di Poisson. Se chiamiamo  $m$  il valore a cui tende la media dei conteggi al crescere del numero di intervalli di tempo considerati, la radice dello scarto quadratico medio del numero di conteggi tende alla radice di  $m$ , quindi il rapporto tra il numero di conteggi del segnale e il numero di conteggi del rumore, chiamato rapporto segnale– disturbo, è:

$$(S/N)_{foton\ noise} = \frac{n_{segnale}}{\sqrt{n_{totale}}} \quad (4.17)$$

In genere un segnale è ragionevolmente confermato se esso ha un  $S/N \geq 3$ .

Torniamo ora al nostro esempio precedente. Supponiamo che il rivelatore applicato al telescopio abbia un'efficienza del 10% e che il *seeing* distribuisca la luce della stella, per semplificare, su un'area circolare di 1 secondo d'arco di raggio ossia su un'area di  $3 \text{ arcsec}^2$ . In venti secondi il nostro rivelatore riceve, da un'area di cielo di  $3 \text{ arcsec}^2$ , 340 fotoni della stella in banda V e 780 fotoni del cielo e ne "vede", ossia ne conta, 34 della stella e 78 del cielo. Poiché il segnale è legato al numero di fotoni della stella rivelati e il rumore fotonico è proporzionale alla radice del numero totale di fotoni incidenti, il rapporto tra segnale della stella ed il rumore per un'osservazione di venti secondi col telescopio e col rivelatore del nostro esempio è:

$$S/N = \frac{n_*}{\sqrt{n_{tot}}} = \frac{34}{\sqrt{34 + 78}} = 3.2 \quad (4.18)$$

Se la brillantezza del cielo raddoppia, il rapporto segnale-disturbo scende a  $S/N=2.5$ .

A parità di tempo di integrazione, lo stesso rapporto segnale-disturbo che si ottiene con un telescopio di area  $A$  ed una brillantezza del cielo  $X$  volte quella naturale ( $n_{sky}$ ), si può ottenere con un cielo non inquinato e un telescopio di area  $A/X$ . Infatti se  $n_* \ll n_{sky}$ :

$$(S/N) \approx \frac{n_*}{\sqrt{X n_{sky}}} = \frac{(n_*/X)}{\sqrt{(n_{sky}/X)}} = \frac{n'_*}{\sqrt{n'_{sky}}} \quad (4.19)$$

ove  $n' = n/X$  è il numero di fotoni raccolto da un telescopio di area  $A/X$ .

Il rapporto segnale-rumore migliora (cresce) al crescere del tempo di integrazione perché sia il numero di fotoni della stella che quello del cielo crescono allo stesso modo ma il rumore è proporzionale alla radice del numero totale di fotoni, quindi cresce più lentamente. Continuando a raccogliere fotoni per  $t$  secondi, il rapporto segnale-disturbo dell'osservazione del nostro esempio aumenterebbe di un fattore  $\sqrt{t}$ . Tuttavia il numero totale di fotoni raccolti non può superare il livello di saturazione del rivelatore. Perciò si può continuare a raccogliere fotoni solo per un tempo limitato che dipende dal numero totale di fotoni che arriva sul rivelatore. Se il numero di fotoni che arriva dal cielo è grande, il rivelatore si satura in fretta. Chiamiamo  $n_*$  e  $n_{sky}$  il numero di fotoni per secondo contati dal rivelatore per la stella e per il cielo non inquinato,  $n_{sat}$  il numero di fotoni massimo prima della saturazione del rivelatore,  $t_{max}$  il tempo di integrazione massimo prima della saturazione del rivelatore e  $X$  il rapporto tra la brillantezza del cielo effettiva e il suo valore naturale. Per la definizione di  $t_{max}$  è  $(n_* + X n_{sky})t_{max} = n_{sat}$ , da cui:

$$t_{max} = \frac{n_{sat}}{(n_* + X n_{sky})} \quad (4.20)$$

Il rapporto segnale disturbo massimo che si potrà ottenere aumentando il tempo di integrazione il più possibile è:

$$(S/N)_{max} = \frac{n_* t_{max}}{\sqrt{(n_* + X n_{sky}) t_{max}}} = \frac{n_* \sqrt{n_{sat}}}{(n_* + X n_{sky})} \quad (4.21)$$

Se chiamiamo  $(S/N)_{max,0}$  il rapporto segnale-disturbo massimo che si otterrebbe per la stella considerata quando il cielo non è inquinato, dalla

precedente espressione si ottiene:

$$\frac{(S/N)_{max}}{(S/N)_{max,0}} = \left( \frac{(n_* + n_{sky})}{(n_* + X n_{sky})} \right) \quad (4.22)$$

Per una stella con  $n_* \ll n_{sky}$ :

$$\frac{(S/N)_{max}}{(S/N)_{max,0}} = X^{-1} \quad (4.23)$$

Quindi il rapporto segnale-disturbo massimo ottenibile diminuisce in modo proporzionale al crescere della brillantezza del cielo. Al crescere di questa, gli oggetti più deboli finiscono sotto la soglia della sensibilità e non sono più osservabili. Inoltre, poiché le osservazioni astronomiche sfruttano al massimo le possibilità della strumentazione, un aumento della brillantezza del cielo si riflette sempre in un peggioramento della qualità delle misure astrofisiche effettuate. Quindi non solo gli oggetti più deboli finiscono sotto la soglia della sensibilità, come abbiamo visto nel semplice esempio precedente, ma, in generale, peggiora la qualità di tutte le osservazioni di qualunque tipo fatte su qualunque oggetto. Perciò proteggere gli osservatori astronomici dall'inquinamento luminoso è necessario per consentire il progredire della ricerca astronomica.

Gli strumenti nello spazio pur godendo di un migliore potere risolutivo limitato soltanto dalla qualità delle ottiche e dalla diffrazione prodotta dalla apertura finita dello strumento per la mancanza dei limiti imposti dall'atmosfera e pur essendo immuni (per ora) dall'inquinamento luminoso, soffrono dell'impossibilità di inviare nello spazio strumenti con ampie aperture paragonabili a quelle dei telescopi a terra che restano quindi sempre più "potenti" ove si tratti di osservare oggetti deboli. Inoltre non è possibile inviare nello spazio un numero di telescopi sufficiente a coprire le necessità di osservazione della comunità astronomica attualmente svolte dai telescopi a terra.

#### 4.4.2 Osservazioni fotometriche di oggetti estesi

Nel caso degli oggetti estesi, ad esempio le galassie, il rapporto tra la loro brillantezza e quella del cielo è costante, anche variando la lunghezza focale del telescopio o la dimensione degli elementi del recettore. Costante è perciò

anche il rapporto tra il numero di fotoni che arriva dall'oggetto e dal fondo-ciolo. Se la luminosità del cielo cresce, le zone più deboli dell'oggetto non riescono più ad essere osservate. Questo è il caso, ad esempio, delle parti esterne di una galassia.

### 4.4.3 Osservazioni spettroscopiche

Mentre nel caso di misure fotometriche fatte a banda larga la luminosità del cielo si mescola alla luce dell'oggetto in modo indistinguibile, nel caso di osservazioni spettroscopiche è possibile identificare e sottrarre, entro certi limiti, l'emissione del fondo-ciolo. Tuttavia, anche qui, se l'emissione del fondo-ciolo per effetto dell'inquinamento luminoso è molto forte oppure non è concentrata in poche righe ma distribuita in numerose righe, come nel caso delle lampade agli alogenuri metallici, o continua, la sottrazione diviene problematica e le osservazioni perdono di qualità.

## 4.5 L'inquinamento luminoso come spreco di energia

L'inquinamento luminoso rappresenta uno spreco di energia luminosa e quindi di energia elettrica, energia che deve essere prodotta o acquistata. Esso rappresenta quindi uno spreco di combustibile e di denaro. È uno spreco di danaro per gli enti che gestiscono gli impianti di illuminazione, che spesso sono enti pubblici e quindi spendono denaro dei cittadini. Può essere uno spreco anche per l'ente che distribuisce l'energia elettrica, che deve produrre tale energia o acquistarla dall'estero.

Facciamo un esempio di come si può calcolare l'ordine di grandezza dell'energia sprecata dagli impianti di illuminazione esterna notturna. Facciamo l'ipotesi che in media una frazione  $\epsilon_T$  dell'energia che esce da un punto luce sia disperso in cielo. Possiamo quantificare lo spreco di energia in modo approssimato moltiplicando il consumo annuo totale  $Q$  di energia elettrica<sup>6</sup> in una nazione per la frazione che è stata utilizzata per l'illuminazione esterna notturna  $f_{ext}$ . La quantità di energia sprecata perché va a illuminare il cielo

---

<sup>6</sup>Si misura in kilowatt/ora (kwh).

è quindi in media per una nazione:

$$E = Q f_{ext} \epsilon_T \quad (4.24)$$

Se  $l_0$  è il costo medio di un kilowatt/ora di energia, la spesa fatta dagli enti che gestiscono gli impianti in quella nazione, soltanto per illuminare il cielo, è:

$$l_T = E l_0 = Q f_{ext} \epsilon_T l_0 \quad (4.25)$$

Se un kilowatt/ora di energia richiede una quantità  $m$  di carbone per essere prodotto o una quantità  $p$  di petrolio o una quantità  $g$  di gas naturale, il consumo totale  $M$ ,  $P$ ,  $G$  di tali combustibili che è stato fatto senza trarne alcuna utilità per la comunità, è:

$$M = Q f_{ext} \epsilon_T m \quad (4.26)$$

$$P = Q f_{ext} \epsilon_T p \quad (4.27)$$

$$G = Q f_{ext} \epsilon_T g \quad (4.28)$$

Consideriamo ora lo spreco costituito dall'uso di lampade a bassa efficienza al posto di lampade ad alta efficienza. Sia  $q_{hg}$  o  $q_j$  l'efficienza media in lumen/watt di una lampada ai vapori di mercurio o agli Ioduri metallici, notoriamente lampade a bassa efficienza. Sia  $q_{LPS}$  l'efficienza media in lumen/watt di una lampada al sodio a bassa pressione (LPS) notoriamente una lampada ad alta efficienza. Il rapporto  $X$  tra il numero di watt consumati dalla lampada ai vapori di mercurio ( o agli ioduri metallici) per produrre lo stesso flusso luminoso di una lampada al sodio a bassa pressione e il consumo di quest'ultima, è:

$$X = \frac{q_{hg}}{q_{LPS}} \quad (4.29)$$

Consideriamo una lampada tipica con efficienza  $q$  (in lm/w) che emetta  $F$  lumen ed abbia un periodo medio di accensione di  $t$  ore per 365 notti all'anno. Essa consumerà la quantità  $T$  di energia elettrica in kilowatt/ora:

$$T = \frac{F}{q} 0.365 t \quad (4.30)$$

Se il costo dell'energia elettrica in lire per kilowatt/ora è, come prima,  $l_0$ , la somma di denaro spesa per il funzionamento della lampada è:

$$l = l_0 \frac{F}{q} 0.365 t \quad (4.31)$$

Se in una città o nazione vi sono  $n$  lampade di tale tipo la spesa totale è:

$$l_{tot} = n l_0 \frac{F}{q} 0.365 t \quad (4.32)$$

La cifra risparmiata sostituendo alle lampade a bassa efficienza lampade ad alta efficienza è in media:

$$\Delta l_{tot} = l_{tot}^{low} - l_{tot}^{high} = l_{tot}^{low} \left( 1 - \frac{q_{low}}{q_{high}} \right) = l_{tot}^{low} (1 - X) \quad (4.33)$$

Il risparmio percentuale è:

$$\frac{\Delta l_{tot}}{l_{tot}^{low}} (\%) = (1 - X) 100 \quad (4.34)$$

Per gli Stati Uniti, Hunter e Crawford (1991), sulla base di misure e modelli, hanno assunto che il 15% della luce emessa finisca direttamente in cielo e che un altro 15% ne venga inviato a causa della riflessione dalla superficie illuminata. Stimando nel 2.5% la percentuale della produzione di energia elettrica USA utilizzata nell'illuminazione esterna notturna, essi calcolano per l'illuminazione esterna notturna un consumo annuale di 58 miliardi di kilowatt/ora. Il 15% di tale quantità viene disperso direttamente in cielo. Si tratta di 8.7 miliardi di kilowatt/ora, equivalenti a 4.1 milioni di tonnellate di carbone o a 15 milioni di barili di petrolio. Altri circa 8.7 miliardi di kilowatt/ora corrispondono a luce riflessa in cielo dalle superfici illuminate. Stimando un costo medio di 7.40 cents per kilowatt/ora, che però sale anche a 10.21 cents per kilowatt/ora nelle strade non residenziali e nelle autostrade, essi calcolano che la collettività spenda 644 milioni di dollari all'anno solo per illuminare il cielo notturno. Altrettanti 644 milioni di dollari vengono spesi per la luce riflessa dal terreno. Questa seconda spesa è in parte necessaria perché connessa con le necessità dell'illuminazione ma, in parte potrebbe essere diminuita con uno studio più attento della disposizione dei corpi illuminanti. Ad esempio evitando di illuminare gli edifici dal basso verso l'alto. I primi 644 milioni di dollari sono totalmente dilapidati.

Per quanto riguarda l'efficienza delle lampade, Crawford ha stimato che ci siano negli USA circa 10 000 000 lampade ai vapori di mercurio da 175 w, le quali funzionano mediamente 11.23 ore al giorno e consumano circa 210 w cosicché il loro consumo annuo è di circa 860 kwh. La loro efficienza è



inferiore a 40 lm/w. Se esse fossero sostituite con lampade al sodio che arrivano ad efficienze anche di 140 lm/w, considerando che il costo dell'energia elettrica negli USA è, come abbiamo visto, in media sugli otto cent per kilowatt/ora, gli americani risparmierebbero oltre 500 milioni di dollari all'anno. E questo senza tener conto della maggior durata e quindi dei minori costi di manutenzione.

Per quanto riguarda la situazione dell'Italia possiamo stimare che per l'illuminazione esterna notturna siano stati impiegati nel 1994 dai 3 ai 6 miliardi di kwh. L'incertezza è dovuta alla difficoltà di calcolare con precisione la quantità di energia impiegata dagli impianti privati e la quantità di energia utilizzata per illuminazione pubblica non esterna. In base ai dati precedenti si può calcolare che il consumo di energia pro capite per l'illuminazione esterna notturna sia stato dell'ordine di 50-100 kwh annui. Assumendo approssimativamente, come Crawford, un accensione media di 11.2 ore al giorno, questo consumo corrisponde ad una potenza media di 12 - 24 w pro capite in accordo con i valori illustrati nella sezione 2.2. Come abbiamo visto in tale sezione, si stima che circa il 15% di questa energia sia consumata per produrre luce che finisce direttamente in cielo e costituisce uno spreco. Abbiamo visto nella sezione 2.2.3 che si stima altrettanta ne sia consumata per produrre luce che finisce in cielo a causa della riflessione delle superfici illuminate. Si può supporre che si potrebbe evitare che almeno una quantità di luce pari ad un terzo di quest'ultima finisca in cielo, senza creare danno al processo di illuminazione, se vi fosse maggior cura nel progetto degli impianti. In conclusione, la quantità di energia che si potrebbe risparmiare eliminando la dispersione di luce è dell'ordine del 20% del totale: si tratta di una quantità dell'ordine di un miliardo di kilowatt/ora ogni anno.

Calcoliamo ora, con il metodo illustrato, quale sarebbe il risparmio se l'efficienza media aumentasse, ad esempio, di un fattore 1.75, ossia se lampade con un efficienza di  $q = 80$  lm/w venissero sostituite da lampade con un efficienza  $q = 140$  lm/w o lampade con un efficienza  $q = 40$  lm/w da lampade con un efficienza  $q = 70$  lm/w. In questo caso il risparmio sarebbe pari al 43%. In conclusione, se risparmiassimo quella frazione di energia che corrisponde alla luce che viene dispersa in cielo (il 20%) e quella frazione di energia che viene consumata a causa della bassa efficienza della lampade (nel nostro esempio pari al 43%), **il risparmio totale potrebbe essere superiore al 50%**, ossia dell'ordine di alcuni miliardi di kilowatt/ora ogni anno, mantenendo gli stessi livelli di illuminazione al suolo.

Le nostre stime sono probabilmente per difetto. Ad esse va aggiunto il risparmio che si otterrebbe estendendo la parzializzazione, ossia lo spegnimento di certi impianti o la diminuzione della loro potenza negli orari in cui la potenza piena non è necessaria.

In termini economici, tenuto conto che il costo dell'energia elettrica per gli enti che gestiscono gli impianti è dell'ordine del centinaio di lire per kilowatt/ora o più, lo spreco di alcuni miliardi di kilowatt/ora ogni anno corrisponde ad una spesa inutile per enti pubblici e privati di alcune centinaia di miliardi di lire. Si parla di quattrocento miliardi sprecati nel 1994, in gran parte pagati dai contribuenti.

## Capitolo 5

# COME RIDURRE L'INQUINAMENTO LUMINOSO

### 5.1 Gli accorgimenti nella progettazione degli impianti

Raccogliamo qui alcuni suggerimenti per la progettazione di impianti di illuminazione esterna notturna basati sulle *Raccomandazioni per la progettazione di impianti di illuminazione esterna notturna* delle Commissioni SAIt e UAI (Cinzano e Di Sora 1993). Essi permettono di limitare la luce dispersa nel cielo e l'inquinamento luminoso da impianti di illuminazione esterna, ed il conseguente spreco di energia elettrica.

#### 5.1.1 Illuminazione di strade, piazzali, svincoli e barriere o caselli autostradali

1. Utilizzare esclusivamente apparecchi di illuminazione che assicurino che il flusso emesso sopra l'orizzonte sia uguale a zero. Soddiscano a questo requisito gli apparecchi totalmente schermati (vedi def. a pag. 35). Si tratta di apparecchi la cui emissione rientra nella classe di intensità

(provvisoria<sup>1</sup>) CEN G6 secondo la definizione in tabella 2.3. In via subordinata usare apparecchi di illuminazione il cui flusso emesso sopra l'orizzonte non superi lo 0.2% del flusso totale da essi emesso. Se questo non è possibile, utilizzare apparecchi il cui flusso emesso sopra l'orizzonte non superi al massimo lo 0.8% del flusso totale da essi emesso. Rispondono a questo requisito, meno stringente, quegli apparecchi la cui emissione rientra nelle classi di intensità (provvisorie) CEN G4 e G5 definite tabella 2.3 (intensità minore di 10cd/klm a 90° e zero oltre i 95°). In genere rispondono a questo requisito gli apparecchi *cut-off* secondo la definizione della Commission Internationale de l'Eclairage dotati di vetro di protezione piano, ma non quelli semi-cut-off né quelli con vetro di protezione curvo o bombato.

2. Montare sempre sulle armature vetri di sicurezza piani. Il vetro filtra le radiazioni ultraviolette e impedisce che la luce eventualmente dispersa disturbi alcune bande astronomiche. Il fatto che il vetro sia piano evita la dispersione di luce sopra l'orizzonte.
3. Ridurre al minimo possibile l'angolo dell'ottica dell'apparecchio rispetto al piano orizzontale ( $i < 5^\circ$ , ma si preferisca  $i = 0^\circ$ ) in modo da evitare la dispersione di luce sopra l'orizzonte<sup>2</sup>. Se necessario installare l'apparecchio su pali a sbraccio che lo avvicinino al centro della strada permettendo una sua minore inclinazione.
4. Nelle vicinanze di Osservatori Astronomici preferire sempre l'installazione di più punti luce di intensità limitata e su pali non troppo alti piuttosto che pochi e potenti punti luce (es. grappoli di fari) su alti tralicci. Infatti un più breve percorso della luce dalla lampada alla superficie da illuminare ne limita la quantità che viene diffusa dalle particelle atmosferiche e che disturba l'osservazione dalle zone circostanti.
5. Nel caso di illuminazione di grandi aree ove si debba necessariamente usare pochi e potenti punti luce, non utilizzare mai proiettori se non

---

<sup>1</sup>Si faccia attenzione che essendo la classificazione CEN delle intensità ancora provvisoria al momento della stesura di questo testo, le sigle delle classi possono cambiare rispetto alla definizione. Perciò è la definizione e non la sigla della classe quella a cui fare riferimento.

<sup>2</sup>Nel senso che il vetro di protezione piano deve risultare il più possibile orizzontale.

quelli che permettono di evitare la dispersione di luce verso l'alto quali quelli a riflettore asimmetrico. Questi ultimi devono essere orientati con il vetro di protezione rigorosamente orizzontale ( $i = 0^\circ$ ). Un'omogenea illuminazione si potrà creare sfruttando il fatto che il fascio in tali proiettori esce con un certo angolo rispetto l'asse e studiando opportunamente il posizionamento dei sostegni.

6. Nell'illuminazione dei centri storici e turistici evitare gli apparecchi del tipo a "globo" che, anche quando siano dotati di alette frangiluce, sono particolarmente dispersivi. Si ricordi che se particolari esigenze architettoniche richiedessero apparecchi di forma sferica o lanterne, entrambi questi tipi di armature sono prodotti in versioni ottimamente schermate. Se fossero richiesti apparecchi di particolare design, scegliere solo quelli che rispondono ai requisiti del punto 1.
7. Nelle strade extraurbane, negli svincoli, nei caselli e barriere autostradali, nelle zone industriali e artigianali, portuali, ecc. utilizzare esclusivamente lampade al sodio a bassa pressione. La loro luce quasi monocromatica è meno inquinante perché facilmente filtrabile. Anche per queste lampade esistono armature che rispondono ai requisiti del punto 1, sebbene ancora poco diffuse. Negli incroci pericolosi, nelle strade urbane più frequentate e in generale ove è realmente necessario distinguere i colori, utilizzare lampade al sodio ad alta pressione. Non utilizzare in alcun caso lampade ai vapori di mercurio, ad incandescenza o alogene. Riservare le lampade agli ioduri metallici solo all'illuminazione degli impianti sportivi ove le specifiche esigenze rendono necessaria una luce particolarmente bianca (e particolarmente inquinante). Nelle località ove reali esigenze estetiche e turistiche richiedono l'uso di apparecchi a lanterna "stile antico", usare lampade al sodio ad alta pressione (la cui luce giallo-oro è, tra l'altro, piacevolmente calda) con potenze non elevate. Questo oltre a limitare l'inquinamento luminoso rende anche più plausibile l'ambientazione storica.
8. Quando è richiesta una certa percezione del colore utilizzare la *illuminazione mista*. Un certo numero di lampade al sodio ad alta pressione tra quelle al sodio a bassa pressione rende percepibile il colore limitando l'inquinamento luminoso.

9. Non utilizzare quantità di luce superiori a quanto effettivamente necessario. Questo è caratteristico degli impianti male eseguiti. L'importanza della strada o dell'area illuminata deve essere accuratamente valutata e deve essere scelto il minore livello di illuminazione applicabile suggerito dalla normativa.
10. Utilizzare sempre sistemi per lo spegnimento o la riduzione dell'intensità dell'illuminazione dopo una certa ora, in rapporto al reale utilizzo dell'area illuminata e alle esigenze di sicurezza del traffico. Laddove la percezione dei colori o una luce particolarmente bianca sia necessaria solo per una parte della notte utilizzare l'*illuminazione alternata* (v. in seguito).
11. Evitare di illuminare fuori dalla zona dove l'illuminazione è richiesta (ad es. il terreno attorno agli svincoli autostradali). Questo oltre a limitare la quantità di luce riflessa o diffusa in cielo, evita un inutile disturbo creato alla flora ed alla fauna dall'inquinamento ottico.

### 5.1.2 Illuminazione di edifici

12. Illuminare sempre dall'alto verso il basso. Questo rende minore la quantità di luce diffusa in cielo (v. figura 5.1).
13. Il limite del fascio del proiettore non deve mai andare oltre il bordo della superficie da illuminare, specie nel caso che si sia costretti ad illuminare dal basso verso l'alto. Perciò utilizzare sempre e solo proiettori che consentano un buon controllo del fascio di luce e che permettano di tagliare l'emissione luminosa oltre un certo angolo, quali quelli a riflettore asimmetrico e spot oppure applicare sempre gli appositi schermi (v. figura 5.2).
14. Nell'illuminazione di capannoni industriali usare sempre lampade al sodio a bassa pressione mentre per edifici di interesse turistico ove si desidera distinguere i colori utilizzare lampade al sodio ad alta pressione. Non usare altri tipi da lampade.
15. Tenere conto del coefficiente di riflessione della parete nel dosare la quantità di illuminazione. Non usare mai quantitativi esagerati di lu-

Figura 5.1: Effetto del posizionamento dei corpi illuminanti sulla quantità di luce diffusa nel cielo da una superficie verticale illuminata.

ce. È la cura e l'arte nel allestire l'impianto a produrre la sensazione estetica e non la quantità di luce usata.

### **5.1.3 Illuminazione di impianti sportivi**

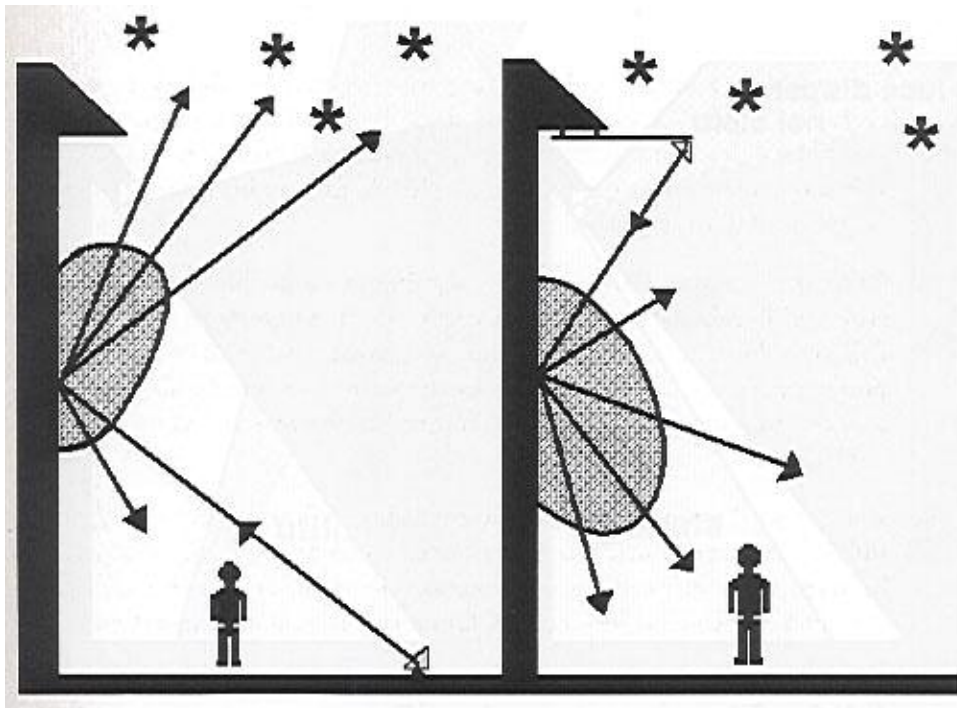
16. Usare la massima cura nell'allestire l'impianto poiché la necessità di usare lampade a largo spettro (ioduri metallici, ecc.) rende estremamente inquinante la luce dispersa.
17. Prevedere diversi livelli di illuminazione nei casi di allenamento, partita, riprese televisive normali e riprese televisive ad alta risoluzione.
18. Usare sempre proiettori a riflettore asimmetrico montati orizzontalmente o gli altri speciali proiettori schermati reperibili in commercio montati con la minor inclinazione possibile rispetto la verticale.

Figura 5.2: Effetto dell'uso di schermi per il controllo dei fasci di luce.

#### **5.1.4 Illuminazione di sicurezza**

19. Nell'illuminazione di case e accessi usare sempre sistemi con sensori a raggi infrarossi che accendano le lampade solo all'avvicinarsi di una persona.
20. Nei casi ove ciò non fosse possibile usare sempre lampade al sodio a bassa pressione applicando per gli apparecchi di illuminazione gli stessi criteri delle sezioni precedenti.
21. Nelle vicinanze di un Osservatorio Astronomico verificare con particolare accuratezza che le lampade siano totalmente schermate nella direzione dell'Osservatorio, in modo da evitare l'Inquinamento Ottico. Ciò anche nel caso di installazione di lampade di potenza non elevata, quali quelle per l'illuminazione di accessi e cortili di case private.





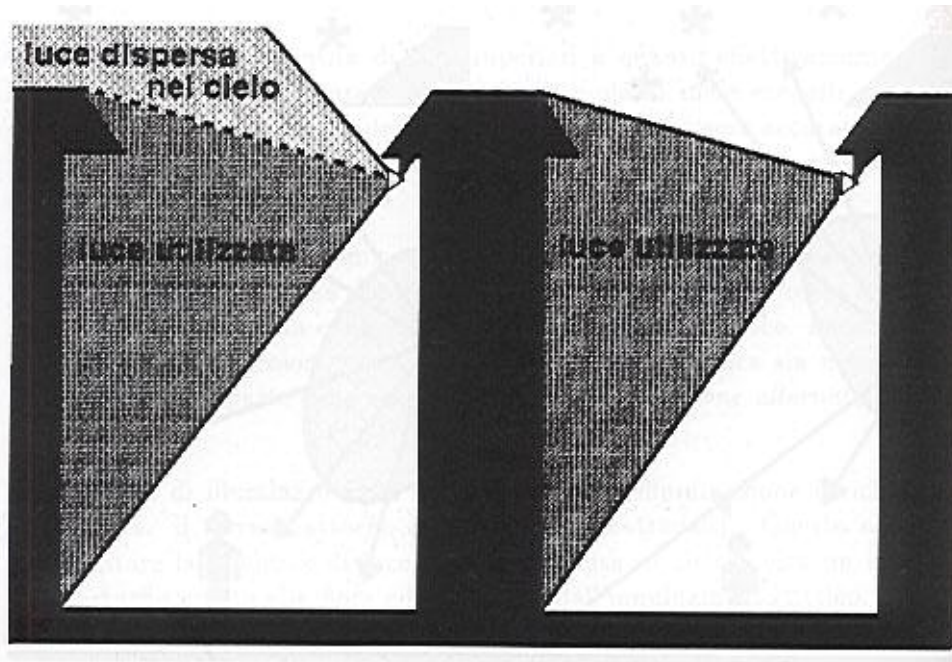


Figura 5.3: Effetto dell'uso di proiettori asimmetrici per il controllo dei fasci di luce.

## 5.2 L'applicazione degli schermi

Quando si installa un proiettore è quasi sempre necessario applicare degli schermi per eliminare la dispersione di luce al di fuori dell'area da illuminare. Gli schermi consistono in una serie di lamelle che possono essere montate verticali ed orizzontali a seconda della direzione in cui è richiesto schermare il proiettore. L'inclinazione delle lamelle può essere regolata. In certi modelli ogni lamella può essere regolata singolarmente in modo che ciascuna area in cui il proiettore risulta diviso dalle lamelle possa essere schermata in modo diverso. In altri le lamelle quando vengono inclinate restano parallele tra loro. Il tipo di schermo migliore consiste in una griglia a maglie rettangolari che consente una schermatura in tutte le direzioni come illustrato in figura 5.4.

Introduciamo un angolo chiamato *angolo di schermatura* che esprime l'angolo rispetto l'asse dello schermo al quale la luce emessa risulta completa-

Figura 5.4: Angolo di schermatura e schermo a maglie rettangolare.

mente schermata. Se  $h$  è l'altezza delle lamelle e  $l$  la distanza tra due lamelle successive, l'angolo di schermatura è:

$$\phi = \arctan \frac{h}{l} \quad (5.1)$$

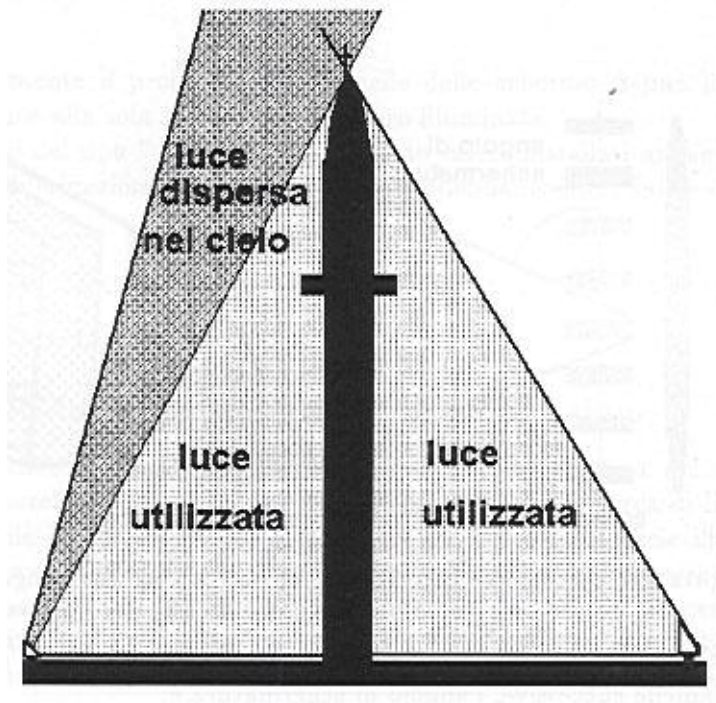
Nel caso dello schermo a griglia a maglie rettangolari, dette  $l_X$  ed  $l_Y$  le distanze tra due lamelle che delimitano una maglia ed  $h$  la loro altezza, gli angoli di schermatura lungo le direzioni dei lati della maglia e della diagonale sono rispettivamente:

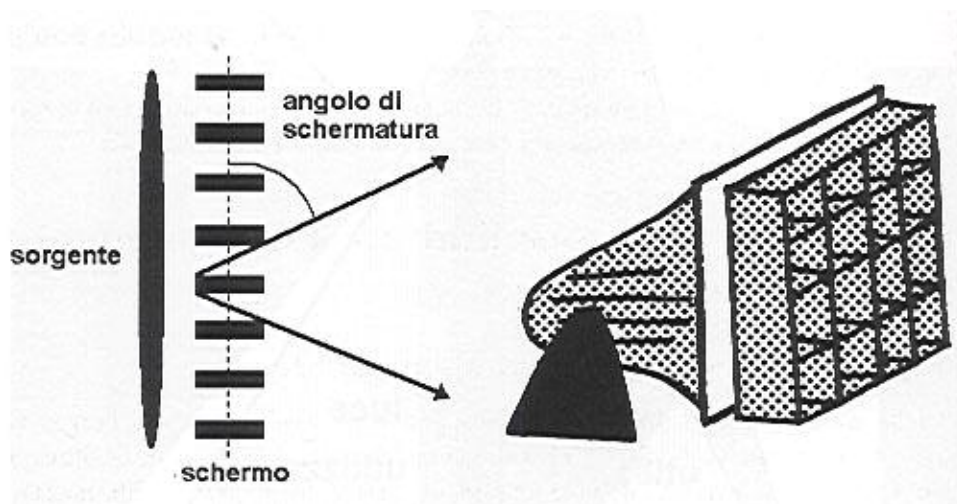
$$\phi_X = \arctan \frac{h}{l_X} \quad (5.2)$$

$$\phi_Y = \arctan \frac{h}{l_Y} \quad (5.3)$$

$$\phi_{dia} = \arctan \frac{h}{\sqrt{l_X^2 + l_Y^2}} \quad (5.4)$$

L'angolo di schermatura voluto si può ottenere variando l'altezza delle lamelle e la loro distanza. Dopo aver calcolato gli angoli di schermatura necessari ed aver montato uno schermo con gli angoli di schermatura richiesti, orientando





opportunamente il proiettore e le lamelle dello schermo si può limitare il flusso di luce alla sola area che deve essere illuminata.

Schermi del tipo " a gonnellino" possono essere installati anche su apparecchi di illuminazione stradale nel caso essi debbano essere inclinati.

## 5.3 Le tecniche per limitare l'inquinamento luminoso residuo

### 5.3.1 Riduzione di flusso e parzializzazione

Anche quando si installa un impianto ponendo molta cura nel progetto, così da avere un basso livello di dispersione di luce, e si cerca di limitare il più possibile la quantità di luce riflessa in cielo dalla superficie illuminata, tuttavia inevitabilmente una certa quantità di luce continua ad essere riflessa in cielo. Essa non si può eliminare a causa delle necessità del processo stesso di illuminazione. Per limitare anche l'inquinamento luminoso prodotto da questa restante residua dispersione di luce, un modo efficace è quello di ricorrere alla *riduzione di flusso* dell'illuminazione. Essa consiste nel diminuire il livello di illuminazione dopo una certa ora della notte. L'intervallo orario in cui applicare la riduzione di flusso dipende principalmente delle caratteristiche d'uso e di viabilità dell'area illuminata dall'impianto. Come è facile comprendere, questa tecnica consente un risparmio energetico non trascurabile.

Vari metodi vengono utilizzati per operare la riduzione di flusso. Uno di essi, chiamato *parzializzazione*, risale a molti anni fa e consiste nello spegnere una certa frazione di lampade: nell'illuminazione stradale, ad esempio, una lampada si ed una no. Questo non è un buon metodo perché crea disuniformità nella luminanza della superficie illuminata.

Un metodo migliore consiste nell'utilizzo di appositi limitatori di potenza che consentono di diminuire l'emissione di luce di tutte le lampade contemporaneamente, senza creare disuniformità. Essi permettono di regolare il livello della luminanza al valore richiesto dalla quantità di traffico o dalla intensità d'uso della superficie illuminata. La luce da essa dispersa viene quindi limitata ed il risparmio energetico è notevole senza che le altre caratteristiche dell'impianto di illuminazione vengano mutate. La regolazione della potenza della lampada, e del flusso da essa emesso, è possibile per tutti i tipi di

lampade a scarica, e si ottiene, di solito, riducendo il valore della tensione efficace della corrente di alimentazione. Il sistema che viene utilizzato è detto *taglio di fase* e consiste nel portare quasi a zero la tensione alternata di rete per pochi millisecondi durante ogni suo ciclo sinusoidale. L'emissione di luce nella lampada non si interrompe perché si provvede a mantenere una piccola corrente che evita, inoltre, di dover reinnescare la lampada. Il flusso di luce della lampada e il suo consumo risultano ridotti in modo proporzionale alla durata del taglio di fase. Le lampade inoltre durano più a lungo.

Un terzo metodo consiste nell'alloggiare due lampade di diversa potenza nella stessa armatura, come si vedrà nella sezione 5.3.2, alternando lampade di un tipo e lampade dell'altro a seconda dell'orario. Quest'ultimo metodo, quando non applicato come descritto in tale sezione, è inferiore al precedente perché la presenza di due lampade nell'armatura peggiora le sue caratteristiche di controllo dell'emissione di luce e di efficienza.

### 5.3.2 Illuminazione alternata

Può accadere che una superficie illuminata non richieda tutta la notte lo stesso tipo di luce. Per esempio, potrebbe essere richiesta nelle ore di maggiore utilizzo una certa percezione dei colori che in altri orari non è necessaria. In questo caso è possibile ridurre il disturbo prodotto dalla quota di inquinamento luminoso che resta, dopo aver eliminato tutta la dispersione dall'impianto e ridotto il più possibile la luce riflessa. Un metodo efficace è quello di usare la *illuminazione alternata*. Essa consiste nell'alloggiare nell'armatura due lampade di tipo diverso. A seconda dell'orario, a sua volta legato alle caratteristiche d'uso dell'area o della strada, si utilizza la prima o la seconda lampada. L'esempio classico è dato da una lampada al sodio ad alta pressione da utilizzare nelle ore in cui è richiesta la percezione dei colori e una lampada al sodio a bassa pressione da utilizzare negli altri orari. Il metodo è stato utilizzato con successo anche con i lampioni cut-off e consente, come è ovvio, un risparmio notevole di energia elettrica. A seconda delle caratteristiche della superficie da illuminare si può scegliere di mantenere gli stessi livelli di illuminazione al suolo, variando solo il tipo di luce o di utilizzare nelle ore previste non solo luce meno inquinante ma anche livelli di illuminazione inferiori. L'utilizzo di due lampade nella stessa armatura fa peggiorare leggermente il controllo dell'emissione di luce ma non è difficile ottimizzare l'impianto. Nonostante questo leggero peggioramento, il risparmio di energia



elettrica ed il minore disturbo prodotto compensano ampiamente questa scelta. Un esempio di area in cui questo metodo potrebbe essere applicato sono le strade dei quartieri residenziali non periferici di una città, ove nelle ore di maggior movimento si desidera una luce più bianca di quella delle lampade al sodio a bassa pressione. Un altro esempio sono i piazzali delle stazioni.

Molte ditte, su richiesta, danno la possibilità di montare due lampade, una al sodio a bassa pressione ed una al sodio ad alta pressione, nelle loro armature, siano esse armature cut-off, totalmente schermate, proiettori asimmetrici, lampioni cut-off. In Europa ad esempio, tali configurazioni sono distribuite in Spagna, contrassegnate talvolta con il termine "special IAC". In Italia non risulta finora che esse siano state richieste. Per fare qualche esempio concreto ecco due combinazioni approvate dalla *Oficina tecnica para la proteccion de la calidad del cielo* dell'*Instituto de Astrofisica de Canarias* e reperibili sul mercato spagnolo: nell'apparecchio totalmente schermato con vetro di protezione piano PHILIPS H-SRP-483 si può montare una lampada al sodio ad alta pressione da 150 W ed una a bassa pressione da 55 W, nel proiettore asimmetrico PHILIPS SNF011 si può montare una lampada al sodio ad alta pressione da 1000 W ed una a bassa pressione da 90 W.

### 5.3.3 **Illuminazione mista**

L'*illuminazione mista* è un ulteriore metodo che si può utilizzare per diminuire il disturbo prodotto dall'inquinamento luminoso prodotto da un impianto dopo aver eliminato tutte le cause di dispersione di luce e dopo aver ridotto la luce riflessa dalla superficie. Esso si applica quando un impianto debba garantire una certa percezione dei colori tutta la notte e non sia possibile, perciò, utilizzare lampade al sodio a bassa pressione o l'illuminazione alternata con le stesse lampade. Questa tecnica, ben nota agli ingegneri dell'illuminazione che la usano per correggere la tonalità cromatica di un impianto, è divenuta famosa come tecnica per limitare l'inquinamento luminoso da quando un commerciante di automobili statunitense, che aveva l'esigenza di illuminare un'ampia area esterna di esposizione delle sue vetture consentendo di distinguere i colori, decise di mescolare assieme lampade al sodio a bassa pressione e lampade al sodio ad alta pressione. Le prime costituiscono la base dell'illuminazione dell'area mentre le seconde forniscono una piccola quantità di luce non monocromatica che consente di distinguere i colori. Questa tecnica consente di usare il più possibile le lampade al sodio a bassa pressione, ri-

servando le lampade al sodio ad alta pressione per consentire la percezione del colore solo dove e quando è necessario. Le lampade dei due tipi possono essere montate in armature diverse o nella stessa armatura, come nel caso dell'illuminazione alternata, ma funzionare assieme.

## Capitolo 6

# LA PROTEZIONE DEL CIELO E DEI SITI ASTRONOMICI

### 6.1 L'inquinamento luminoso e la legge

Dato il pesante impatto dell'inquinamento luminoso sulle osservazioni astronomiche e sulla visibilità del cielo non è pensabile di lasciare alla esclusiva buona volontà di progettisti e installatori la responsabilità di applicare o meno gli accorgimenti atti a limitarlo. È necessario porre in vigore una opportuna normativa che tenga conto delle problematiche legate alla dispersione di luce nel cielo. Del resto già nel 1976, come abbiamo visto, la XVI Assemblea Generale dell'International Astronomical Union nella Risoluzione No.9 aveva richiesto "urgentemente che le autorità civili responsabili intraprendano azioni per preservare i siti degli osservatori esistenti e potenziali da tali interferenze."

Leggi e normative tese a limitare l'inquinamento luminoso e la luminosità del cielo sono state approvate un pò in tutto il mondo. Le tabelle 6.1 e 6.1 ne elencano alcune.

Finora sono stati privilegiati stati, regioni e territori ove esistono osservatori astronomici di una certa importanza. Questo in parte è dovuto al

Tabella 6.1: Provvedimenti di legge contro l'inquinamento luminoso dal 1958 al 1983.

anno di approvazione	località		nazione
1958	Flagstaff	città	USA
1963	Asiago	città	Italia
1972	Tucson	città	USA
1972	Pima	contea	USA
1973	Coconino	contea	USA
1975	Paradise Valley	città	USA
1981	Pima	contea	USA
1981	Graham	contea	USA
1981	Tucson	città	USA
1981	Thatcher	città	USA
1981	Safford	città	USA
1981	Nogales	città	USA
1982	Cochise	contea	USA
1982	Santa Cruz	contea	USA
1982	Willcox	città	USA
1982	Douglas	città	USA
1982	Tombstone	città	USA
1981	Tucson	città	USA
1981	Thatcher	città	USA
1981	Safford	città	USA
1981	Nogales	città	USA
1982	Willcox	città	USA
1982	Douglas	città	USA
1982	Tombstone	città	USA
1983	Greenlee	contea	USA
1983	Pinal	contea	USA
1983	Benson	città	USA
1983	Mesa	città	USA
1983	Casa Grande	città	USA
1983	Winslow	città	USA
1983	Coolidge	città	USA
1983	Florence	città	USA
1983	Scottsdale	città	USA

Tabella 6.2: Provvedimenti di legge contro l'inquinamento luminoso dal 1984 al 1990.

anno di approvazione	località		nazione
1984	Maricopa	contea	USA
1984	Show Low	città	USA
1984	Sierra Vista	città	USA
1984	Phoenix	città	USA
1985	Apache	contea	USA
1985	Yavapai	contea	USA
1985	Gila	contea	USA
1985	Eagar	città	USA
1985	Apache Junction	città	USA
1985	Globe	città	USA
1986	Arizona	state	USA
1986	South Tucson	città	USA
1986	Glendale	città	USA
1987	Mohave	contea	USA
1987	Oro Valley	città	USA
1987	Lake Havasu	città	USA
1988	Canarian Islands	stato	Spagna
1988	New South Wales	stato	Australia
1988	Yuma	contea	USA
1988	Navajo	contea	USA
1988	La Paz	contea	USA
1988	Yuma	città	USA
1988	Marana	città	USA
1988	Holbrook	città	USA
1989	Kingman	città	USA
1989	Chandler	città	USA
1990	Tempe	città	USA

fatto che l'esigenza di preservare le condizioni di osservazione degli osservatori astronomici, che spesso rappresentano grossi investimenti, è molto sentita nelle zone ove essi sono localizzati, mentre la necessità di preservare alla popolazione la possibilità di osservare il cielo non è ancora stata recepita da tutti. In parte è dovuto al fatto che gli osservatori astronomici di un certo peso hanno potuto sfruttare il loro ruolo entro la comunità per educare la pubblica opinione e per convincere gli amministratori della opportunità delle misure richieste. Ecco che, ad esempio, in Arizona (ove si trovano Kitt Peak e Mount Hopkins), in California (ove si trova il Lick e Mount Palomar), nelle Hawaii (ove si trova il Mauna Kea) troviamo un pullulare di leggi e leggine di stato, di contee, di città. In Australia, ad esempio, troviamo provvedimenti legislativi nel New South Wales ove si trova l'osservatorio di Siding Spring. In Europa, la legge spagnola 31/1988 del 31 Ottobre 1988 protegge gli Osservatori dell'Istituto di Astrofisica delle Canarie.

In paesi ove non sono in vigore provvedimenti legislativi, talvolta esistono codici di comportamento o raccomandazioni ministeriali che impongono speciali caratteristiche di limitazione dell'inquinamento luminoso agli impianti. È il caso della Gran Bretagna, ove *The Institution of Lighting Engineers* (ILE) ha pubblicato delle regole guida per ridurre l'inquinamento luminoso.

Nei prossimi paragrafi esamineremo il testo di alcuni provvedimenti legislativi inerenti la salvaguardia del cielo notturno e la limitazione dell'inquinamento luminoso che ci sembrano interessanti sia per il tipo di misure adottate che per il tipo di approccio legislativo. Esamineremo alcuni esempi di legislazione per territori fortemente urbanizzati, ed un esempio di provvedimento che protegge un Osservatorio situato in un territorio non ancora urbanizzato ma suscettibile di urbanizzazione.

## 6.2 Provvedimenti legislativi nel caso di un territorio fortemente urbanizzato

Presentiamo innanzitutto le parti essenziali<sup>1</sup> della legge contro l'inquinamento luminoso promulgata dalle contee di Tucson e Pima in Arizona. Essa

---

<sup>1</sup>Trattandosi di un provvedimento di legge, invitiamo il lettore nel caso di dubbi e incomprensioni a fare riferimento al testo in lingua originale reperibile ad es. in Murdin (1992).

Figura 6.1: Effetto del provvedimento di legge di Tucson sulla brillantezza del cielo a 4350 Å al Kitt Peak National Observatory.

merita di essere citata sia per la sua completezza che per il fatto di aver costituito la traccia base per moltissimi provvedimenti approvati negli anni successivi da città e contee negli USA. È il tipico esempio di normativa studiata per un'area ad alta densità abitativa. La figura 6.1 mostra come l'adozione di questo provvedimento abbia bloccato la crescita della luminosità del cielo all'Osservatorio del Kitt Peak attorno alla lunghezza d'onda di 4350 Å che, fino al 1973 era in rapida crescita.

### **Tucson and Pima County Light Pollution Code (1987)**

#### **15.12.010 Scopo e intenti**

...omissis...

È l'intendimento di questo codice incoraggiare ...omissis... abitudini e sistemi di illuminazione che riducano l'inquinamento luminoso e risparmino energia, aumentando allo stesso tempo, la sicurezza notturna, l'utilità, la sicurezza e la produttività.

...omissis...

#### **15.12.040 Definizioni**

...omissis...

d) Area A indica l'area circolare, trentacinque miglia di raggio, il centro della quale è il

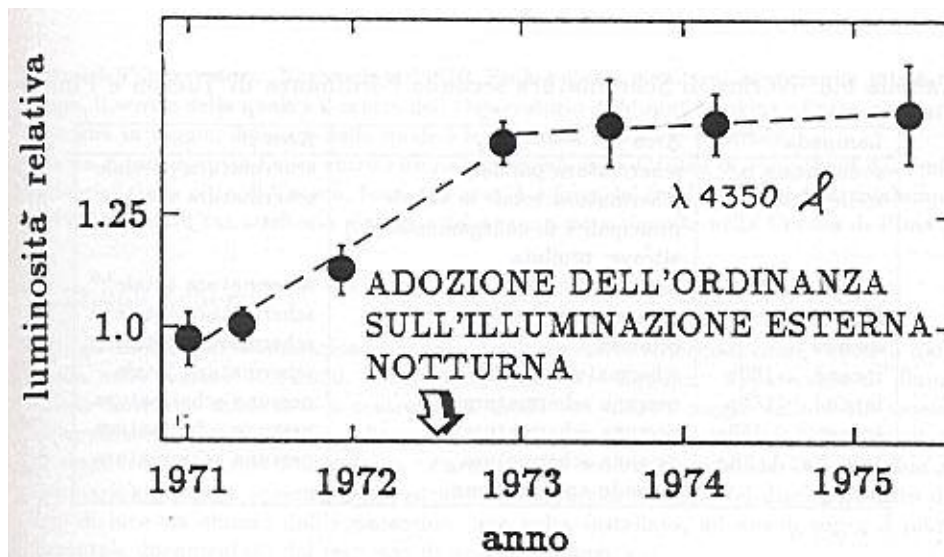
Tabella 6.3: Norme di Schermatura secondo l'ordinanza di Tucson e Pima.

Lampada	Area A	Area B
sodio bassa p. <sup>1</sup>	schermatura parziale	schermatura parziale
sodio alta p.	schermatura totale in strade principali e di collegamento (...) altrove: proibita	schermatura totale
ioduri metallici	proibita	schermatura totale <sup>2,6</sup>
fluorescente	schermatura totale <sup>3,5</sup>	schermatura totale <sup>3,5</sup>
quarzo <sup>4</sup>	proibita	schermatura totale
incand. >160w	schermatura totale	schermatura totale
incand. ≤160w	nessuna schermatura	nessuna schermatura
sorgenti ≤ 150w	nessuna schermatura	nessuna schermatura
tubi Ne, Ar, Kr	nessuna schermatura	nessuna schermatura
altre	secondo approvazione	

Note alla tabella 15.12.060:

1. Questa è la sorgente di luce preferita per minimizzare l'emissione di luce indesiderata nel cielo notturno che disturba le osservazioni astronomiche. Armature completamente schermate sono preferite ma non richieste.
2. L'illuminazione agli alogenuri metallici, usata soprattutto per esposizione, non deve essere usata per illuminazione di sicurezza dopo le 23.00 o dopo l'orario di chiusura se anteriore alle 23.00. Le lampade agli alogenuri metallici devono essere installate solo in punti luce al chiuso.
3. Insegne pubblicitarie esterne del tipo costruito in materiale translucido e illuminate dall'interno non richiedono schermatura. Per minimizzare gli effetti di disturbo si preferiscono sfondi scuri con lettere e simboli luminosi. A meno che non sia conforme alla preferenza precedente dello sfondo scuro, la potenza totale delle lampade per ogni proprietà deve essere minore di 41 watt nell'area A.
4. Per gli scopi di questo codice, le lampade al quarzo non devono essere considerate sorgenti di luce ad incandescenza.
5. Lampade di tonalità bianca-calda e naturale sono preferite per minimizzare gli effetti di disturbo.
6. Per le norme di filtraggio delle armature con lampade agli alogenuri metallici si veda la sezione 15.12.070.







centro dell'Osservatorio Nazionale del Kitt Peak e l'area circolare, venticinque miglia in raggio, il centro della quale è il centro dell'Osservatorio di Mount Hopkins e l'area circolare, 15 miglia in raggio, il centro della quale è la sommità di Monte Lemmon.

e) Area B indica tutta l'area entro i limiti territoriali della Contea di Pima fuori dai limiti territoriali della città di Tucson, fuori dall'area A e fuori dai limiti territoriali di qualunque riserva indiana il cui territorio giaccia totalmente o parzialmente nella Contea di Pima.

### **15.12.050 Schermi**

Tutti gli impianti di illuminazione non esenti devono essere schermati come richiesto dalla tabella nella sezione 15.12.050. *Totalmente schermato* significa: apparecchio di illuminazione notturna schermato o costruito in modo che nessun raggio di luce sia emesso dall'apparecchio, una volta installato, ad angoli sopra il piano orizzontale documentato dal responso di un test fotometrico. *Parzialmente schermato* significa: apparecchio di illuminazione esterna schermato o costruito in modo che non più del dieci per cento dei raggi di luce sia emesso dall'apparecchio, una volta installato, ad angoli sopra il piano orizzontale documentato dal responso di un test fotometrico.

### **15.12.060 Installazione degli schermi**

Le prescrizioni del codice sono espone nella tabella 15.12.060 (tabella 6.3).

### **15.12.070 Filtri**

Gli apparecchi di illuminazione agli alogenuri metallici devono essere filtrati. *Filtrato* significa: apparecchio di illuminazione da esterno la cui sorgente di luce sia chiusa da una lastra di vetro, materiale acrilico o translucida.

### **15.12.090 Sottomissione di progetti ed evidenza di accordo con la legge**

a) Contenuto della domanda. Il richiedente, ...omissis... deve sottomettere la documentazione che il lavoro proposto è conforme a questo codice. La domanda deve contenere ...omissis... :

1. mappa indicante la posizione e il tipo dei sistemi di illuminazione, armature, lampade, supporti, riflettori e altri apparecchi;
2. Descrizione degli apparecchi di illuminazione, armature, lampade, supporti, riflettori e altri apparecchi. La descrizione può includere, ma non è limitata a questo, estratti di cataloghi dei fabbricanti, e disegni (incluse sezioni ove richieste);
3. Dati fotometrici, come quelli forniti dai fabbricanti, o simili che mostrino l'angolo di taglio delle emissioni di luce.

b) Documentazione addizionale. I progetti, la descrizioni e i dati richiesti in questa sezione devono essere sufficientemente completi da permettere all'esaminatore del progetto

di accertare rapidamente se c'è accordo con le richieste di questo codice. Se tali progetti, descrizioni e dati non possono permettere subito tale accertamento per la natura o la configurazione degli apparecchi, il richiedente, per permettere l'accertamento, deve sottomettere anche i risultati certificati dei test ( premesso che tali test siano stati fatti e certificati da un laboratorio di analisi qualificato). ...omissis...

d) Sostituzione di lampade o armature. Per qualunque armatura per illuminazione notturna o tipo di sorgente di luce che venga modificata dopo che è stata data l'autorizzazione, è necessario inoltrare una richiesta di modifica al Building Official, corredata da adeguate informazioni che assicurino la conformità a questo codice, per la approvazione, che deve essere comunicata al richiedente prima della sostituzione.

### 15.12.100 Proibizioni

a) Apparecchi di illuminazione e lampade al mercurio. L'installazione, la vendita, il noleggio o l'utilizzo di qualunque apparecchio di illuminazione o lampada al mercurio è proibita, dopo il 1 maggio 1991. Le prescrizioni di questa legge non si applicano per le lampade di ricambio.

b) Altri tipi di apparecchi di illuminazione e lampade. L'installazione, la vendita, il noleggio o l'utilizzo di qualunque apparecchio di illuminazione esterna o lampada al sodio a bassa pressione, al sodio ad alta pressione, agli alogenuri metallici, fluorescente al quarzo o ad incandescenza, l'uso della quale non è permesso nell'area A e nell'area B dalla tabella 15.12.060 è proibito.

c) Sorgenti di luce laser. Eccetto per quanto stabilito nella sottosezione di questa sezione, l'uso di sorgenti di luce laser o altre simili luci ad alta intensità per pubblicità o intrattenimento, quando proiettate sopra l'orizzonte è proibito.

d) Fari. L'utilizzo di fari per pubblicità è proibito nell'area A ed è proibito nell'area B tra le dieci di sera e il sorgere del sole la mattina seguente.

e) Attrezzature ricreative. Nell'area A o nell'area B nessuna attrezzatura ricreativa esterna pubblica o privata deve essere illuminata dopo le undici di sera salvo che per concludere uno specifico evento sportivo o ricreativo o altra attività ivi svolta che fosse sotto svolgimento sotto tale illuminazione prima delle undici di sera. Si fa eccezione nell'area B per qualunque attrezzatura esterna ricreativa, pubblica o privata, che sia illuminata con un illuminazione esterna conforme a questo codice.

f) Segnali pubblicitari esterni. L'illuminazione esterna di segnalazioni pubblicitarie fuori sede è proibita nell'area A. L'illuminazione esterna di segnalazioni pubblicitarie fuori sede è proibita nell'area B tra le undici di sera e il sorgere del sole.

### 15.12.110 Esenzioni temporanee

a) ...omissis... Chiunque può sottoporre al Building Official una richiesta ...omissis... di esenzione temporanea...omissis...

b) ...omissis... Se approvata l'esenzione deve essere valida per non più di trenta giorni dalla data di spedizione dell'approvazione. L'approvazione è rinnovabile a discrezione del Building Official sotto considerazione di tutte le circostanze. Ciascuna di tali esenzioni

rinnovate deve essere valida per non più di trenta giorni. ...omissis...

### **15.12.120 Altre esenzioni**

a) Non conformità.

1. Le lampade a vapori di mercurio in uso per illuminazione esterna alla data della presente ordinanza non devono essere usate dopo il 1 maggio 1991.

2. Le luci per illuminazione di insegne e cartelloni pubblicitari montate nel basso non devono essere usate dopo il 31 Dicembre 1987.

3. Tutte gli altri apparecchi di illuminazione già installati regolarmente ed operativi alla data effettiva di questa ordinanza sono esenti da tutte le richieste di questo codice eccetto quelle regolate nella sottosezioni c, d ed e della sezione 15.12.100. Non devono essere effettuate modifiche nelle lampade in uso né alcuna alterazione strutturale o sostituzione senza che vi sia adeguamento a tutte le richieste di questo codice.

b) Luce da carburante fossile. Tutti gli apparecchi di illuminazione producono luce direttamente dalla combustione di gas naturale o altro combustibile fossile sono esenti dalle richieste di questo codice.

c) Attrezzature federali e dello stato. Gli apparecchi di illuminazione installati nelle attrezzature gestite dal governo federale o dallo Stato dell'Arizona o qualunque loro dipartimento, divisione, agenzia o strumento, o in connessione alle stesse, sono esenti da tutte le richieste di tale codice. Si incoraggia un volontario adeguamento alle regole di questo codice.

...omissis...

### **1.12.150 Applicazione e Penalità**

a)(solo città) Ai sensi della sezione 28-12 del Tucson Code:

1. Per una violazione di questo codice, deve essere imposta la seguente penalità:

a) Una multa di non meno di cinquanta dollari e non più di mille dollari per violazione senza sospensiva.

b) Qualunque altro provvedimento sembri necessario a discrezione dell'Hearing Officer, incluso l'arresto e l'abbattimento della violazione.

2. Il mancato adeguamento da parte di un imputato a qualunque ordine contenuto in un giudizio riferito a questo codice dà luogo ad una multa addizionale di non meno di cinquanta dollari e non più di mille dollari per ogni giorno che l'imputato tarda a mettersi in regola.

b)(solo contea) ...omissis... Per ogni violazione deve essere imposta una multa non inferiore a cinquanta dollari e non superiore a seicento dollari per ogni singolo o decimila dollari per ogni società, associazione, o altra entità legale, senza sospensiva.

Per il caso specifico dell'inquinamento luminoso prodotto da vetrine ed insegne luminose è interessante il provvedimento<sup>2</sup> emesso dal Sindaco del Co-

---

<sup>2</sup>Non risulta che sia mai stato fatto osservare.

mune di Asiago, sede dell'Osservatorio Astrofisico dell'Università di Padova, nel 1963.

### **Ordinanza del Comune di Asiago n° 1803 (18 Febbraio 1963)**

...omissis...

Con decorrenza immediata dovrà essere osservato il seguente orario per quanto ha riferimento alla pubblica illuminazione e a quella privata esterna: dal 1 Luglio al 15 Settembre alle ore 24 dovrà essere ridotta l'intensità della pubblica illuminazione e dovranno essere completamente spente le luci pubblicitarie al NEON dei privati, dal 16 Settembre al 30 Giugno alle ore 23 dovranno essere attuati e la riduzione di intensità della pubblica illuminazione e lo spegnimento delle luci pubblicitarie al neon dei privati.

...omissis...

È interessante esaminare anche gli articoli principali dei provvedimenti legislativi e dei regolamenti comunali approvati o in corso di esame in Italia. Perciò raccogliamo qui una sintesi delle principali norme riguardanti gli impianti di illuminazione esterna notturna tratte dalla Proposta di legge "Misure urgenti in tema di risparmio energetico da uso di illuminazione esterna e di lotta all'inquinamento luminoso", presentata alla Camera dei Deputati (atto Camera n.1269 della XI legislatura), al Senato della Repubblica (atto Senato n. 511 della XII legislatura e atto Senato n.751 della XIII legislatura). La proposta di legge è il frutto del lavoro svolto, in collaborazione con tecnici specializzati del settore dell'illuminotecnica, da astronomi ed astrofili e potrà apportare un contributo notevole sia al risparmio energetico che al contenimento dell'inquinamento luminoso. I provvedimenti presentati sono stati in gran parte ripresi sia in progetti di legge regionale (v. progetto di legge regione Veneto no. 85), sia in alcuni provvedimenti comunali (v. es. i regolamenti comunali di Firenze e Frosinone) e nella bozza di regolamento comunale proposta ai comuni italiani dall'avv. Mario Di Sora coordinatore della Commissione SAIt per l'inquinamento luminoso nel corso del convegno organizzato dall'Università di Padova e dall'Osservatorio Astronomico di Padova (Asiago, 5-6/10/1995) per discutere il tema *Inquinamento luminoso: misure e possibilità di intervento*.

La legge ha per finalità:

- a) il contenimento del consumo energetico derivante dall'utilizzazione di illuminazione esterna pubblica e privata;
- b) la razionalizzazione dell'uso e delle forme delle sorgenti di luce esterna e la riduzione dell'inquinamento luminoso sul territorio nazionale;

c) la tutela dei siti degli osservatori astronomici professionali e non professionali<sup>3</sup> di rilevanza regionale o interprovinciale, nonché delle zone loro circostanti, dall'inquinamento luminoso.

Essa è articolata sui seguenti punti principali.

1. utilizzazione di armature con ottiche non disperdenti luce lateralmente ed in alto, o comunque schermate;
2. adozione di dispositivi in grado di ridurre il flusso di potenza durante le ore centrali della notte;
3. impiego di lampade ad alta efficienza come quelle al sodio a bassa ed alta pressione ;
4. divieto di orientare sorgenti di luce verso l'alto od in modo errato, al di fuori dei casi e degli scopi in cui ciò sia realmente necessario e comunque sempre secondo determinate prescrizioni;
5. adozione di livelli di luminanza adeguata alle esigenze reali di illuminazione.

Presentiamo qui una sintesi delle principali norme contenute nella proposta di legge.

### **Principali norme della proposta di legge “Misure urgenti in tema di risparmio energetico da uso di illuminazione esterna e di lotta all'inquinamento luminoso ”**

- Dalla data di entrata in vigore della presente legge tutti gli impianti di illuminazione esterna pubblica e privata in fase di progettazione, o di appalto sul territorio nazionale devono essere eseguiti a norma: “antiinquinamento luminoso e a ridotto consumo energetico”. Per quelli in fase di esecuzione, ove possibile, è prevista la sola obbligatorietà di sistemi non disperdenti luce verso l'alto secondo i criteri di seguito elencati. (Art.7. Comma 1)
- Sono considerati “antiinquinamento luminoso e a ridotto consumo energetico” solo gli impianti aventi<sup>4</sup> un'intensità luminosa massima di 0 cd per lumen a 90° ed oltre. Gli stessi dovranno essere equipaggiati di lampade con la più alta efficienza possibile in relazione allo stato della tecnologia ed al tipo di impiego previsto e di appositi dispositivi in grado di ridurre, dopo le ore 24.00, l'emissione di luce degli impianti in misura non inferiore al 30 per cento e non superiore al 50 per cento rispetto al pieno regime di operatività. ...omissis... (Art.7. Comma 3)
- Tutte le sorgenti di luce altamente inquinanti, come globi, lanterne e similari, devono essere munite da parte delle case costruttrici, importatrici o fornitrici, di appositi

---

<sup>3</sup>Nella terza versione appare la specifica “osservatori non professionali pubblici”. Essi comunque devono svolgere lavori di ricerca scientifica o di divulgazione.

<sup>4</sup>Cioè “i cui punti luce sono dotati di armature aventi...”

dispositivi in grado di limitare al massimo la dispersione di luce verso l'alto e comunque non oltre 30 cd per 1000 lumen a 90° e oltre<sup>5</sup>. È concessa deroga per le sorgenti di luce internalizzate e quindi in concreto non inquinanti, per quelle con emissione non superiore a 1200 lumen cadauna per impianti di modesta entità (fino a 5 centri con singolo punto luce) che vengano spente dopo le ore 20.00 nel periodo di ora solare e dopo le 22.00 nel periodo di ora legale. (Art.7. Comma 4)

- Le insegne luminose non dotate di illuminazione propria dovranno essere illuminate dall'alto verso il basso. (Art.7. Comma 4)
- Nei diffusori per uso esterno a globo, a lanterna o simili, i vetri di protezione devono essere realizzati in materiale trasparente e liscio onde ridurre fenomeni di diffusione della luce e consentire l'effettivo controllo del flusso luminoso. (Art.7 Comma 5)
- L'uso di riflettori, fari e torri faro deve uniformarsi, su tutto il territorio nazionale, a quanto disposto nell'articolo 10. ...omissis... (Art.7 Comma 6)
- Entro 4 anni dalla data di entrata in vigore della legge tutti gli impianti non rispondenti agli indicati criteri e ricadenti nei Comuni entro il raggio delle rispettive fasce di rispetto, in linea d'aria, dalla sede degli osservatori astronomici di cui alla tabella allegata (alla legge), devono essere modificati in maniera tale da ridurre l'inquinamento luminoso ed il consumo energetico mediante l'uso di sole lampade al sodio ad alta e bassa pressione. (Art.10. Comma 1)
- Per l'adeguamento degli impianti di cui al comma 1, i soggetti pubblici e privati possono procedere, in via immediata, all'installazione di appositi schermi sulle armature, ovvero alla sola sostituzione dei vetri di protezione delle lampade, nonché delle stesse, purché assicurino caratteristiche finali analoghe a quelle previste dall'articolo 7.(Art.10. Comma 2)
- Tutte le sorgenti di luce altamente inquinanti, come globi, lanterne o simili, devono essere schermate o comunque dotate di idonei dispositivi in grado di contenere e dirigere a terra il flusso luminoso comunque non oltre 15 cd per 1000 lumen a 90° ed oltre <sup>6</sup> nonché di vetri di protezione trasparenti. È concessa deroga ... per quelle che vengano spente normalmente dopo le ore 20.00 nel periodo di ora solare e dopo le ore 22.00 nel periodo di ora legale; per quelle di cui sia prevista la sostituzione entro cinque anni dall'entrata in vigore della presente legge. Le insegne luminose non dotate di illuminazione propria dovranno essere illuminate dall'alto verso il basso. In ogni caso tutti i tipi di insegne luminose di non specifico ed indispensabile uso notturno devono essere spente dopo le ore 23.00. (Art.10. Comma 4)

---

<sup>5</sup>Questo corrisponde ad un ULOR massimo del 18.8%.

<sup>6</sup>Questo limite corrisponde ad un ULOR massimo del 9.5%. Secondo l'autore di questo libro gli impianti con questo tipo di armature dovrebbero essere dismessi entro i 4 anni del comma 1.



- Fari, torri-faro e riflettori illuminanti parcheggi, piazzali, cantieri, svincoli ferroviari e stradali, complessi industriali, impianti sportivi e aree di ogni tipo devono avere, rispetto al terreno, un'inclinazione tale, in relazione alle caratteristiche dell'impianto, da non inviare oltre 10 cd per 1000 lumen a 90° ed oltre. (Art.10. Comma 5)
- Nell'illuminazione di edifici e monumenti dovranno essere privilegiati sistemi di illuminazione ad emissione controllata e dall'alto verso il basso. Nel caso in cui ciò non risulti possibile e per soggetti di comprovato valore architettonico, i fasci di luce devono rimanere almeno un metro al di sotto del bordo superiore della superficie da illuminare e, comunque, entro il perimetro degli stessi provvedendo allo spegnimento parziale o totale, o alla diminuzione della potenza impiegata dopo le ore 24.00. (Art.10. Comma 6)
- È fatto espresso divieto nei comuni di cui al comma 1 di utilizzare, per fini pubblicitari, fasci di luce roteanti o fissi di qualsiasi tipo. (Art.10. Comma 8)

### 6.3 **Provvedimenti legislativi per un area suscettibile di nuovi insediamenti**

L'Orana Regional Environmental Plan 1 – Siding Spring regola i piani di sviluppo del territorio australiano ove si trova l'osservatorio di Siding Spring. Essa è un esempio di normativa<sup>7</sup> che si applica ad un'area poco sviluppata in cui si prevedono nuovi insediamenti. Opportunamente modificata ed adeguata alla diversa rilevanza ed alla diversa scala, potrebbe benissimo costituire un testo base di un provvedimento con cui un comune o una regione potrebbero proteggere un Osservatorio, anche piccolo, situato in un'area non abitata dagli effetti delle nuove urbanizzazioni, senza impedire nuovi insediamenti ma solo imponendo loro alcune norme riguardo l'illuminazione esterna ed interna.

#### **Orana Regional Environmental Plan n° 1 – Siding Spring**

...omissis...

#### **Obiettivi**

2. Questo piano desidera incoraggiare l'utilizzo del territorio entro l'area di applicazione in un modo che preserva all'Osservatorio le migliori condizioni per le osservazioni astronomiche. ...omissis...

---

<sup>7</sup>Per i dettagli, anche in questo caso invitiamo il lettore a fare riferimento al testo originale reperibile in Murdin (1992).

## Definizioni

...omissis...

5(2). Per gli scopi di questo piano, il livello della luminosità artificiale del cielo raggiunge un livello critico quando la quantità di luce artificiale nel cielo notturno misurata attraverso un telescopio situato nell'Osservatorio eccede il 10 per cento della luminosità naturale del cielo, quando il telescopio è inclinato di 30 gradi sopra l'orizzonte, o il 3 per cento della luminosità naturale del cielo, quando il telescopio è inclinato di 90 gradi sopra l'orizzonte.

...omissis...

## Generalità

6(1). Lo sviluppo del territorio entro 18 chilometri dall'Osservatorio senza permesso del Consiglio è proibito.

(2). Il comma (1) non si applica ad insediamenti che non saranno forniti di energia elettrica.

## Considerazioni

(7). Nel decidere su una richiesta di sviluppo di un territorio compreso in questo piano, il Consiglio dovrà prendere in considerazione la quantità ed il tipo di luce che presumibilmente verrà emesso dall'insediamento e il probabile effetto di tale emissione sul livello della luminosità artificiale del cielo all'Osservatorio.

## Consultazioni e consenso

8(1). Qualora ...omissis... venga sottoposta una domanda per permettere l'insediamento in un territorio entro la distanza dall'Osservatorio specificata nella Colonna 1 della Tabella in questo Comma (chiamata "la distanza") il Consiglio, (a) non dovrà approvare la domanda senza tenere conto del commento fatto dal Direttore dell'Osservatorio nel tempo prescritto, se si stima che la quantità di luce che sarebbe emessa dall'insediamento ( o da qualunque costruzione o attività connessa ad essa) sarebbe maggiore della quantità specificata nella Colonna 2 della tabella per quella distanza; e (b) non dovrà approvare la domanda senza il consenso del Dirigente della pianificazione se si stima che la luce emessa sarebbe maggiore della quantità specificata nella Colonna 3 della tabella per quella distanza.

...omissis...

(3). Nel decidere se dare il suo consenso secondo il Comma 1(b) il Dirigente deve considerare (a) qualunque commento fatto dal Direttore dell'Osservatorio; (b) gli effetti che l'insediamento potrebbe avere sul livello della luminosità artificiale del cielo all'Osservatorio; (c) il livello della luminosità artificiale del cielo all'Osservatorio alla data a cui la domanda viene fatta e la relazione tra tale livello e il livello critico; e (d) se l'interesse pubblico (se esistente) nel permettere che lo sviluppo sia portato avanti superi l'interesse pubblico nel preservare un ambiente favorevole alle osservazioni astronomiche nella sede dell'Osservatorio.

(4). Nulla nel Comma 1 richiede che il Consiglio (a) consulti il Direttore dell'Osservatorio; o (b) ottenga il consenso del Dirigente, prima di dare il permesso ad una domanda

di erigere una singola abitazione o una costruzione di uso agricolo finchè la domanda si riferisce ad una zona a 3 chilometri o più dall'Osservatorio; e (c) qualora la zona a cui la domanda si riferisce sia a 12 chilometri o più dall'Osservatorio, il Consiglio si accontenta che la costruzione non abbia luci esterne che emettano più di 4000 lumen; (d) qualora la zona a cui la domanda si riferisce sia a 8 chilometri o più, ma a meno di 12 chilometri dall'Osservatorio, il Consiglio si accontenta che la costruzione abbia una sola luce esterna e che essa non emetta più di 1000 lumen; (e) qualora la zona a cui la domanda si riferisce sia a 3 chilometri o più, ma a meno di 8 chilometri dall'Osservatorio, il Consiglio si accontenta che la costruzione (i) non abbia luci esterne, e (ii) qualunque altra luce sia adeguatamente internalizzata.

(5). Nel Comma 4 "internalizzata" significa confinata in o sotto una costruzione da elementi strutturali, approvati dal Direttore dell'Osservatorio che proteggano il cielo dalla luce.

Tabella 6.4: Flussi ammessi dall'Orana Plan 1.

Distanza in km dall'Osservatorio	flusso emesso (in lm) (consultazione)	flusso emesso (in lm) (consenso)
3	0	1000
8	1000	2000
12	2000	4000
18	4000	12000
30	12000	1000000
100	1000000	5000000

# APPENDICE A

## APPENDICE

### A.1 La lotta all'inquinamento luminoso

Mentre le categorie coinvolte nella progettazione e installazione degli impianti di illuminazione esterna notturna sono chiamate a dare il loro contributo alla lotta all'inquinamento luminoso tramite la loro competenza professionale e l'impegno nel lavoro di ogni giorno, anche chi non è direttamente coinvolto in tali attività può svolgere un ruolo attivo in questo campo. Non parliamo solo di quanti si occupano di divulgazione, cioè di insegnanti, astronomi, personale dei planetari e degli osservatori pubblici, giornalisti. Chiunque sia sensibile al problema dell'inquinamento luminoso può dare il proprio contributo anche se non fa parte delle precedenti categorie. Qui di seguito elenchiamo alcuni suggerimenti:

1. Approfondite la vostra conoscenza su come può essere fatto un impianto di illuminazione di qualità e trasferite agli altri la vostra competenza.
2. Educate i vostri parenti, i vostri amici, le persone che conoscete, i vostri concittadini sul problema della dispersione di luce. La maggior parte delle persone ancora non conosce nei dettagli che cosa è l'inquinamento luminoso, che cosa è l'inquinamento ottico, come si potrebbero ridurre, quali sono le problematiche dell'illuminazione, quali sono i costi dello spreco di energia e la portata del risparmio che si potrebbe fare.

3. Contattate i vostri concittadini, gli ambientalisti, i politici, gli amministratori del vostro paese, i responsabili degli enti che ne gestiscono l'illuminazione in modo che abbiano sempre presente il problema.
4. Se avete contatti con la stampa fatela parlare dell'inquinamento luminoso, facendo ben attenzione che quello che viene scritto sia corretto.
5. Se siete disturbati da un impianto, unitevi ad altri e cercate di ottenere collaborazione da parte dell'ente che gestisce l'impianto. Siate cortesi ma costanti. Non sarebbe la prima volta che, dopo molte inascoltate insistenze, un gruppo di cittadini riesce a far modificare un impianto.
6. Partecipate alla *Giornata sul problema dell'inquinamento luminoso* che viene organizzata annualmente.
7. Se vi piace osservare il cielo partecipate alla compagna osservativa dell'Unione Astrofili Italiani sulle PLEIADI denominata SKY WATCH. Più osservazioni farete e più il vostro apporto sarà importante.
8. Se conoscete la lingua inglese iscrivetevi all'International Dark–Sky Association . Vi arriverà la interessante Newsletter trimestrale di questa associazione e sarete al corrente di tutte le attività svolte negli USA e in molti paesi del mondo.

## A.2 La International Dark–Sky Association

La International Dark–Sky Association è un organizzazione internazionale senza fini di lucro nata negli USA nel 1988. Essa raccoglie astronomi, astrofili, ingegneri dell'illuminazione e quant'altri siano interessati a combattere l'inquinamento luminoso, sia come membri individuali che come associazioni o enti. Lo scopo dell'International Dark–Sky Association è quello di lavorare per fermare la crescita della luminosità del cielo, obiettivo che si propone di ottenere creando nella gente la coscienza del problema costituito dall'inquinamento luminoso e delle sue soluzioni. La convinzione che sta alla base della nascita dell'International Dark–Sky Association è che un azione coordinata su base nazionale o internazionale sia più efficace di tante singole iniziative. Questa associazione è attiva anche nel far conoscere gli altri problemi ambientali che colpiscono l'astronomia quali le interferenze radio, la crescita del

numero dei detriti spaziali e tutti quegli atti contro l'ambiente che possano distruggere la visione da parte dell'uomo dell'universo in cui vive.

La International Dark-Sky Association è attiva soprattutto nell'educazione. Essa pubblica una Newsletter trimestrale in inglese e fornisce a richiesta depliant, numerosi fogli informativi sugli aspetti economici e legislativi dell'inquinamento luminoso, documentazione di impianti di illuminazione validi o di cattiva qualità con immagini fotografiche o videocassette, esempi di progetti e informazioni collegate. Negli USA, tra le attività che l'International Dark-Sky Association svolge ci sono anche i contatti con la stampa, un "servizio conferenze" a cui si può rivolgere chi vuole organizzare una conferenza sull'inquinamento luminoso, la premiazione dei migliori impianti (Good Lighting Award). In alcuni paesi di Sezioni Locali. In molti paesi come la Gran Bretagna e l'Italia, invece, l'International Dark-Sky Association collabora con le organizzazioni ivi esistenti che si occupano dell'inquinamento luminoso. In Italia essa è tra gli enti che patrocinano la *Giornata sul problema dell'inquinamento luminoso*. Chi si volesse iscrivere può trovare l'indirizzo nella sezione A.3.

## A.3 Indirizzi utili

SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA (SAIt)  
Largo Fermi, 5  
50125 Firenze

COMMISSIONE PER LO STUDIO DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO  
della SOCIETÀ ASTRONOMICA ITALIANA  
Via Fosse Ardeatine, 234  
03100 Frosinone

UNIONE ASTROFILI ITALIANI (UAI)  
c/o Vicolo dell'Osservatorio, 5  
35122 Padova

COORDINAMENTO DEGLI OSSERVATORI ASTRONOMICI POPOLARI ITALIANI  
(COAPI-UAI)  
Viale Pedavena, 1/A  
32032 Feltre (BL)

INTERNATIONAL DARK-SKY ASSOCIATION (IDA)  
3545 N. Steward  
Tucson AZ 85716 U.S.A.  
Internet: <http://www.darksky.org/>

ASSOCIAZIONE ITALIANA DI ILLUMINAZIONE (AIDI)  
Viale Monza, 259  
20126 Milano

ASSOCIAZIONE NAZIONALE DELLE INDUSTRIE ELETTRATECNICHE ED ELET-  
TRONICHE (ANIE)  
ASSIL  
Viale Algardi, 2  
20100 Milano

L'ASTRONOMIA (rivista)  
Edizioni Media Presse  
V. Nino Bixio, 30  
20129 Milano

IL CIELO (rivista) Biroma Editore  
V. S. Pio X, 108  
35015 Galliera Veneta

ORIONE (rivista)  
Sirio s.r.l.  
V. Bronzino, 3  
20133 Milano

ASTRONOMIA UAI (rivista)  
Redazione:  
c/o Vicolo dell'Osservatorio, 5  
35122 Padova



# APPENDICE B

## BIBLIOGRAFIA

### B.1 Parte A: Inquinamento Luminoso

- a 1. Abradmyan, G.V. & Akhverdyan, L.C. 1978, Byurakan night sky observations (in Russian), *Soubshoh. Byurakan Obs.*, 50, 50-54.
- a 2. Aguas, M.P.N., Domingos, J.J.D., Furtadeo, P.S. 1995, Light Pollution in large cities: An integrated GIS-radiosity tool for advanced planning, in Proceedings of *Symposium on Pollution in large cities*, Padova 22-25th February 1995, 9-10.
- a 3. Anon. 1984, *La Protection des observatoires astronomiques et geophysiques*, Rapport du Groupe de Travail, Institut de France, Academie des Sciences, Grasse.
- a 4. Anon. 1985, A statement on astronomical light pollution and light trespass, *J. Illum. Eng. Soc.*, 14(1985), 658.
- a 5. Anon. 1992, Savons la nuit - Charte pour la preservation de l'environnement nocturne (in French), *L'Astronomie*, Juillet-Septembre 1993, 20.
- a 6. Anon. 1993, Declaration on the reduction of adverse environmental impacts on Astronomy, IAU/COSPAR/ICSU/UNESCO Meeting, Adverse environmental impacts on Astronomy: an exposition, Paris June 30-July 02, 1992, reported in *IAU Information Bull.*, 69, 10-13.
- a 7. Bartl, E., Börngen, F., Häupl, W., Högner, W., Kirsch, K., Marx, S. Woche, M. & Ziener, R. 1979, Zur Aufhellung des Nachthimmels über dem Karl-Schwarzschild-Observatorium Tautenburg (in German), *Astron. Nachr.*, Bd. 300, H. 4., 209-211.
- a 8. Beech, M. 1992, Blinded by the noise, *Astronomy Now*, 6, 11 (November 1992), 49-50.

- a 9. Berry, R. 1974, *A manual for the study of Light Pollution* (Toronto: Royal Astronomical Society of Canada, Toronto center), 1 November 1974.
- a 10. Berry, R. 1976, Light Pollution in Southern Ontario, *J. Royal Astron. Soc. Canada*, 70, 97-115.
- a 11. Berry, R. 1992, How to build a portable artificial star, *Sky and Telescope*, November 1992, 572-573.
- a 12. Bertiau, F.C.S.J., de Graeve, E.S.J. & Treanor, P.J.S.J. 1973, The artificial night-sky illumination in Italy, *Vatican Observatory Publ.*, 1, 4, 159-179.
- a 13. Bolton, C.T. 1991, Progress on light pollution control at the David Dunlop Observatory, *J. Royal Astron. Soc. Canada*, 85, 4, 216-217.
- a 14. British Astronomical Association, *Campaign For Dark Skies*, newsletter of British Astronomical Association's Campaign for Dark Skies, ed. Graham Bryant (London: BAA), periodical.
- a 15. Brucato, R. 1991, Sky preservation at Palomar Observatory, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference and Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 20-24.
- a 16. Bruni, D. 1993, City light pollution: its effect on astronomy, *I.A.P.P.P. Communications*, 53, 1-8.
- a 17. Burillier, H. et l'AFOEV 1993, Astronomie, science en péril: "Sauvons les étoiles", *L'Astronomie*, ?.
- a 18. Burstein, D., Hogan, T.D. & Kroelinger, M.D. 1984, *Astronomy and Communities: the Impact of Lighting Practices* (Tempe: Arizona State University).
- a 19. Cayrel, R. 1979, Report of IAU Commission 50: Identification and protection of existing and potential observatory sites, Reports on Astronomy, *IAU Trans.* XVIIIA, 215-223.
- a 20. Cayrel, R. 1979, Report of IAU Commission 50: Identification and protection of existing and potential observatory sites, Proceedings of the XVI General Assembly of the International Astronomical Union, ed. P.A. Wayman, *IAU Trans.* XVIIIB, 281-283.
- a 21. Cayrel, R., Smith, F.G., Fisher, A.J. & de Boer, J.B. 1980, *Guide lines for minimizing Urban Sky Glow near Astronomical Observatories*, published by International Astronomical Union & Commission Internationale de l'Eclairage, Publ. IAU/CIE No.1.
- a 22. Chester, J. 1991, The impact of light pollution on amateur astronomy and public awareness of the night sky, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference and Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 109.

- a 23. CIE 1992, Statement of the Commission Internationale de l'Eclairage concerning protection of sites for astronomical observations, in Murdin (1992), in *The Protection of Astronomical and Geophysical Sites*, ed. J. Kovalevski (Paris: Frontieres), p.197-199.
- a 24. CIE 1991, *Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations*, Commission Internationale de l'Eclairage Technical Committee 5.12 (Obtrusive Light), First draft, June 1991.
- a 25. CIE 1993, *Coping with the interference by light of astronomical observations, A CIE Design Guide*, Commission Internationale de l'Eclairage Technical Committee 4.21, Second Draft, 7 December 1993.
- a 26. CIE 1994, *Road and outdoor lighting for astronomers*, Commission Internationale de l'Eclairage, draft.
- a 27. Cinzano, P. 1992, Registrazione delle sorgenti di inquinamento luminoso in Italia (in Italian), *Astronomia UAI*, 1/2, 30+4.
- a 28. Cinzano, P. 1991, Relazione della Commissione dell'Unione Astrofili Italiani su l'inquinamento luminoso: attività svolta (in Italian), *Astronomia UAI*, 10, 23-24.
- a 29. Cinzano, P. 1992, *Guida alla progettazione di impianti di illuminazione esterna a basso livello di inquinamento luminoso* (in Italian), Unione Astrofili Italiani, Commissione inquinamento luminoso.
- a 30. Cinzano, P. 1992, *L'inquinamento luminoso* (in Italian) (Galliera Veneta:Biroma Editore).
- a 31. Cinzano, P. 1993, Rapporto Quadriennale della Commissione per l'Inquinamento Luminoso dell'Unione Astrofili Italiani (in Italian), *Astronomia UAI*, 3, 30-31.
- a 32. Cinzano, P. 1993, *References on Light Pollution and Related Fields*, Version 1: November 1993, Internal Report No.11 (Padova: Department of Astronomy, University of Padova).
- a 33. Cinzano, P. 1994, Light pollution determination in Italy, in Proceedings of the IAU/ICSU/UNESCO meeting *Adverse environmental impacts on astronomy: An exposition*, Paris 30 June - 2 July 1992, ed. D. McNally (Cambridge: Cambridge University Press), in press
- a 34. Cinzano, P. 1994, *Il manuale dell'inquinamento luminoso* (in Italian) (Thiene: preliminary edition printed by the author).
- a 35. Cinzano, P. & Di Sora, M. 1993, Light Pollution in Italy: Report on activities in our country (poster presented at the IAU/COSPAR/ICSU/UNESCO Meeting, Paris 1992) in *Mem. Soc. Astron. It.*, 64, 489-494.
- a 36. Cinzano, P. & Di Sora, M. 1993, *Raccomandazioni per la progettazione di impianti di illuminazione esterna notturna* (in Italian), Commissione per lo studio dell'Inquinamento Luminoso della Società Astronomica Italiana & Commissione per l'Inquinamento Luminoso dell'Unione Astrofili Italiani, also in *Astronomia a Brescia* (Brescia: Unione Astrofili Bresciani), September 1993, p.4.

- a 37. Cordell, F.M. 1993, Fun with lasers or street lamps I have known and hated, *I.A.P.P.P. Comm.*, 51, 20-24.
- a 38. Costero, R. 1991, Light Pollution at the Astronomical Observatories in Mexico, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris* , ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 45-47.
- a 39. Crabtree, D., Westpfahl, D. & Richer, H. 1991, 120 Hz variations in Sky Brightness Over Vancouver, B.C. , in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris* , ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p.99
- a 40. Crawford, D.L., 1983, *Astronomy's problem with light pollution*, Tucson.
- a 41. Crawford, D. 1984, Light-Pollution; the problem and solutions to it, Summer scientific meeting of the A.S.P., University of California, Santa Cruz, 9-12 July 1984.
- a 42. Crawford, D. 1985, *Light Pollution: the adverse impact of urban sky glow on astronomy and on environment*, National Optical Astronomy Observatories/ Kitt Peak National Observatory.
- a 43. Crawford, D.L. 1987, Light Pollution as a threat to optical astronomy , in *Identification, optimization and protection of optical observatory sites*, eds. R.L.Mills, O.G. Franz, H.D.Ables & C.C. Dahn (Flagstaff: Lowell Observatory), p.188-194.
- a 44. Crawford, D.L. 1988, The effect of light pollution on amateur astronomy, *IAU Colloquium 98, The contribution of amateurs to astronomy*, eds. S.Dunlop & M. Gerbaldi (Berlin:Springer), p.104.
- a 45. Crawford, D.L. 1991, IAU Commission 50 Report:Identification and Protection of Observatory Sites, Reports on Astronomy, ed. D.McNally, *IAU Trans.* XXIA, 593-598.
- a 46. Crawford, D.L. (ed.) 1991, *Light pollution, Radio interference and Space debris*, IAU Colloquium 112, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17.
- a 47. Crawford, D.L. 1991, Light Pollution-A problem for Us All , in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 7-10.
- a 48. Crawford, D.L. 1991, Help save the stars, *Sky and Telescope*, November 1991, 547-548.
- a 49. Crawford, D.L. 1991, Note about the star watching program (Tucson: International Dark-Sky Association ), 4 january 1991.
- a 50. Crawford, D.L. 1992, Light Pollution, in *The Protection of Astronomical and Geophysical Sites*, ed. J. Kovalevski (Paris: Frontieres), p.31.
- a 51. Crawford, D.L. & Hunter, T.B. 1990, The battle against Light Pollution, *Sky and Telescope*, July 1990, 23-29.

- a 52. Cunnann, J.M.L. 1991, The effect of public lighting on sky glow , in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference and Space debris* , ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 77.
- a 53. Davis, G. 1992, A city lightning engineer's tale, *Astronomy Now*, 6, 11 (November 1992), 46-48.
- a 54. Dawson, D.W. 1984, Light pollution and its measurement, in *Advances in Photoelectric Photometry* vol. 2, eds. R.C. Wolpert & R.M. Genet (Fairborn(Ohio): Fairborn Observatory), p.30-53.
- a 55. Debarbat, S. 1993, Le ciel nocturne dispara-t-il meme en Australie? (in French), *L'Astronomie*, 107 (June 1993), 190-193.
- a 56. Diana, L. *et al.* 1992, Proposta di legge: Misure urgenti in tema di risparmio energetico da uso di illuminazione esterna e di lotta all'inquinamento luminoso (in italian), *Boll. Soc. Astron. It.*, 1/2, 17-21.
- a 57. Diaz Castro, F.J. 1993, *Directrices y recomendaciones para proyectos de alumbrado exterior* (in spanish), Oficina Tecnica para la proteccion de la calidad del cielo, Instituto de Astrofisica de Canarias.
- a 58. Diaz Castro, F.J. 1993, *Resumen de criterios a seguir en las instalaciones de alumbrado que afectan a la calidad del cielo de Tenerife y La Palma* (in spanish), Oficina Tecnica para la proteccion de la calidad del cielo, Instituto de Astrofisica de Canarias.
- a 59. Diaz Castro, F.J. 1993, *Documentacion a incluir en los proyectos de alumbrado de exteriores y condiciones tecnicas* (in spanish), Oficina Tecnica para la proteccion de la calidad del cielo, Instituto de Astrofisica de Canarias.
- a 60. Diaz Castro, F.J. 1993, *Luminarias de uso especial* (in spanish), Oficina Tecnica para la proteccion de la calidad del cielo, Instituto de Astrofisica de Canarias.
- a 61. Diaz Castro, F.J. 1994, The first step in improving and mantaining the observing conditions at the Roque de los Muchacios Observatory, in *Proceedings of the European Colloquium on light pollution*, Reading 3rd July 1993, ed. J. Mason (London: British Astronomical Association), in press.
- a 62. Diaz Castro, F.J. & De La Paz Gomez, F. 1994, *Estudio de emision hacia el emisferio superior de diferentes tipos de luminarias y criterios sobra el alumbrado de exterior utilizados en los alrededores del O.R.M. para evitar la potencial contaminacion luminica* (in spanish), Instituto de Astrofisica de Canarias.
- a 63. Di Sora, M. 1990, Programma operativo per la lotta all'inquinamento luminoso (in Italian), *Boll. Soc. Astron. It.*, 3, 19.
- a 64. Di Sora, M. 1990, Mozione sull'inquinamento luminoso all'Assemblea dei soci della Societa Astronomica Italiana (in italian), *Boll. Soc. Astron. It.*, 3, 18-19.

- a 65. Di Sora, M. 1991, Inquinamento luminoso, problemi e proposte alla luce del primo censimento della qualità dei siti degli Osservatori Nazionali (in Italian), *Boll. Soc. Astron. It.*, 2, 12-14.
- a 66. Di Sora, M. 1993, Light Pollution, problems and propositions (from Italy a resolute participation), *Mem. Soc. Astron. It.*, 64, 173-177.
- a 67. Doroshenko, V.T. 1988, On the night-sky brightness at Nauchny on Crimea and on Mount Sanglok in Middle Asia (in Russian), *Tr. Gos. Astron. Inst. Shternberg*, 60, 328-337.
- a 68. Dunkle, T., 1981, Street light, Street bright, *Science*, 81, 78.
- a 69. Ennis, J. 1991, Legal defense of radioastronomy, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 310-319.
- a 70. Elsasser, H. 1974, Report of IAU Commission 21: Light of the night sky, Proceedings of the XV General Assembly of the International Astronomical Union , eds. G. Contopoulos & A. Jappel, *IAU Trans.* XV B.
- a 71. Elvey, C.T. & Roach, F.E. 1937, A photoelectric study of the light from the night sky, *Astrophys. J.*, 85, 213-241.
- a 72. Erpylev, N.P., Smirnov, M.A. & Bagrov, A.V. 1987, A night sky model (in Russian), *Nauchn. Inf.*, 64, 3-14.
- a 73. Faber, S.M., 1980, Sky Glow at Lick Observatory, *Lighting Design and Applications*, 10, 18-22.
- a 74. Fletcher, J.M. & Crampton, D. 1973, An astronomical view of high-pressure sodium lamps, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 85, 1-3.
- a 75. Finch, D.M. 1978, Atmospheric light pollution, *J. Illum. Eng. Soc.*, 7, 105-117.
- a 76. Finch, D.M., Jewell, J.E., Leite, M.J. & Nelson, B. 1979, Atmospheric light pollution, in Proceedings 19th CIE session, Kyoto 1979, *CIE Publ.* n.50 (1980), Paris.
- a 77. Fisher, A.J. & Turner, H.J. 1977, Outdoor Lighting and observatories, *IES Lighting Review*, February 1977, 25-32.
- a 78. Foti, S. 1992, Studio dell'inquinamento luminoso del cielo nella zona di Catania (italian), Thesis, University of Catania.
- a 79. Frank, K. 1991, Outdoor lighting effect on Moths , in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris* , ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 51.
- a 80. Gardco lighting, 1984, *Form ten/low pressure specifiers catalog* (San Leandro:Gardco lighting), August 1984. [catalogue of LPS full cut-off fixtures]
- a 81. Garstang, R.H. 1984, Night sky brightness and limiting naked-eye star visibility, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 96, 788.

- a 82. Garstang, R.H. 1984, Improved scattering formula for calculations of artificial night-sky illumination, *The Observatory*, 104, 196-197.
- a 83. Garstang, R.H. 1985, Visibility of stars in daylight, *Journal of British Astron. Ass.*, 95, 133.
- a 84. Garstang, R.H. 1986, Model for artificial night-sky illumination, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 98, 364-375.
- a 85. Garstang, R.H. 1987, Modeling manmade night-sky illumination , in *Identification, optimization and protection of optical observatory sites*, eds. R.L.Mills, O.G. Franz, H.D.Ables & C.C. Dahn (Flagstaff: Lowell Observatory), p. 199-202.
- a 86. Garstang, R.H. 1988, Predictions of seasonal variations in night sky brightnesses, *The Observatory*, 108, 159-161.
- a 87. Garstang, R.H. 1989, Night-sky brightness at observatories and sites, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 101, 306-329.
- a 88. Garstang, R.H. 1989, The status and prospects for ground based observatory sites, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 27, 19-40.
- a 89. Garstang, R.H. 1989, Predictions of the future light pollution for ground based observatory sites, *Bull. of American Astron. Soc.*, 21, 2, 759-760.
- a 90. Garstang, R.H. 1991, Light Pollution Modeling, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference and Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 56-69.
- a 91. Garstang, R.H. 1991, Dust and light pollution, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 103, 1109-1116.
- a 92. Garstang, R.H. 1991, The absorption and scattering properties of saharan and volcanic dust, *The Observatory*, 111, 239-243.
- a 93. Garstang, R.H. 1992, Further light pollution calculations, *Bull. of American Astron. Soc.*, 24, 740.
- a 94. Garstang, R.H. 1993, Light pollution and lighting technology, *Bull. of American Astron. Soc.*, 25, 1306.
- a 95. Gergely, T. & Kahlmann, H.C. 1992, Radio Interferences, in *The Protection of Astronomical and Geophysical Sites*, ed. J. Kovalevski (Paris: Frontieres), p.79.
- a 96. Gray, I. 1993, Light pollution and the environmental agenda, in *Proceedings of the European Colloquium on light pollution*, Reading 3rd July 1993, ed. J. Mason (London: British Astronomical Association), in press.
- a 97. Guillemin, A. 1866, *Le Ciel* (in French), 3rd ed. (Paris: Hachette), p.384-385.
- a 98. Guillemin, A. 1871, *The heavens: An illustrated handbook*, 4th ed. (New York: Scribner), p.271-173.

- a 99. Hendry, A. 1984, Light Pollution: a status report, *Sky and Telescope*, 67, 6, 504-507.
- a 100. Hoag, A.A. 1972, Observatories and City Lights - One city Fights light Pollution, *Mercury*, 1, 5, 2-3.
- a 101. Hoag, A.A. 1976, City sky-glow monitoring at Kitt Peak.II, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 88, 207-208.
- a 102. Hoag, A.A. 1985, Report of IAU Commission 50: Identification and protection of existing and potential observatory sites, Reports on Astronomy, *IAU Trans.* XIXA, 707-712.
- a 103. Hoag, A.A. 1986, Report of IAU Commission 50: Identification and protection of existing and potential observatory sites, Proceedings of the XIX General Assembly of the International Astronomical Union , ed. J.-P. Swings, *IAU Trans.* XIXB, 331-336.
- a 104. Hoag, A.A. & Peterson, A.R. 1974, *Observatories and Outdoor Lighting*, Kitt Peak National Observatory.
- a 105. Hoag, A.A., Schoening, W.E. & Coucke, M. 1973, City sky glow monitoring at Kitt Peak, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 85, 503-507.
- a 106. Huang, C. 1991, Note on Mercury Light Pollution Spectroscopic Observations , in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris* , ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 34.
- a 107. Hughes, W. 1991, City of Portland Conversion to Cut-off fixtures, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris* , ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 100.
- a 108. Hunter, T. 1992, Unlikely allies in the dark-sky movement, *Sky and Telescope*, February 1992, 217-218.
- a 109. Hunter, T. 1992, Third annual meeting of the International Dark-Sky Association, *I.A.P.P.P. Comm.*, 46, 15-16.
- a 110. Hunter, T. & Crawford, D. 1991, The economics of light pollution, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 89-96.
- a 111. Hunter T. & Crawford, D. 1992, Light pollution concerns, *Sky and Telescope*, 82, 1, p.6.
- a 112. Hunter, T., Crawford, D., Howell, L. & Knauss, D. 1991, The International Dark-Sky Association, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 110.
- a 113. IAU 1977, Resolution no.9 of the XVI General Assembly of the International Astronomical Union , Proceedings, eds. E. A. Muller and A. Jappel, *IAU Trans.* XVIB, 37.



- a 114. IAU 1986, Resolution B6 of the XIX General Assembly of the International Astronomical Union , Proceedings, ed. J.-P. Swings, *IAU Trans.* XIXB, 35-36.
- a 115. IAU 1988, Resolution A2 of the XX General Assembly of the International Astronomical Union : Adverse Environmental Impacts on Astronomy, Proceedings, ed. D. McNally, *IAU Trans.* XXB, 40-41.
- a 116. ICSU 1994, Resolution of the International Council of Scientific unions on Outer Space Advertising, *IAU Information Bull.*, 72, 2-3.
- a 117. ICSU 1994, Resolution of the International Council of Scientific unions on Electromagnetic Pollution, *IAU Information Bull.*, 72, 3.
- a 118. International Dark-Sky Association , *IDA Newsletter*, ed. D. Crawford (Tucson:IDA), periodical.
- a 119. International Dark-Sky Association 1988, Astronomy's problem with Light Pollution, *IDA Information Sheet no.1* (Tucson: IDA).
- a 120. International Dark-Sky Association 1988, Light Pollution - A problem for All of Us, *IDA Information Sheet no. 2* (Tucson: IDA).
- a 121. International Dark-Sky Association 1988, Why we don't like the 175 Watt mercury Fixture, *IDA Information Sheet no. 3* (Tucson: IDA).
- a 122. International Dark-Sky Association 1989, Operating Data And the Economics of Different Lamps, *IDA Information Sheet no. 4* (Tucson: IDA).
- a 123. International Dark-Sky Association 1989, Cities and Counties in Arizona with Outdoor Lighting Codes, *IDA Information Sheet no. 5* (Tucson: IDA).
- a 124. International Dark-Sky Association 1989, Advice on Working with Community Leaders, Officials, and Others, *IDA Information Sheet no. 6* (Tucson: IDA).
- a 125. International Dark-Sky Association 1989, As a Non-profit Organization, IDA Needs Help, *IDA Information Sheet no. 7* (Tucson: IDA).
- a 126. International Dark-Sky Association 1989, Local Sections for IDA: Why ? How ?, *IDA Information Sheet no. 8* (Tucson: IDA).
- a 127. International Dark-Sky Association 1989, Glossary of Basic Terms and Definitions, *IDA Information Sheet no. 9* (Tucson: IDA).
- a 128. International Dark-Sky Association 1989, Summary of the IAU Colloquium No.112, *IDA Information Sheet no. 10* (Tucson: IDA).
- a 129. International Dark-Sky Association 1989, Estimating the Level of Sky Glow Due to Cities, *IDA Information Sheet no. 11* (Tucson: IDA).
- a 130. International Dark-Sky Association 1989, Recommendations about Effective Outdoor Lighting, *IDA Information Sheet no. 12* (Tucson: IDA).
- a 131. International Dark-Sky Association 1989, Summary of the City of San Diego Street Lighting Conversion, *IDA Information Sheet no. 13* (Tucson: IDA).

- a 132. International Dark-Sky Association 1989, Fact Sheet on the International Dark-Sky Association , *IDA Information Sheet no. 14* (Tucson: IDA).
- a 133. International Dark-Sky Association 1989, List of Information Sheets Available as of This Date, *IDA Information Sheet no. 15* (Tucson: IDA).
- a 134. International Dark-Sky Association 1989, Slide Sets and Other Items Available from IDA, *IDA Information Sheet no. 16* (Tucson: IDA).
- a 135. International Dark-Sky Association 1989, Vast Orbiting Displays... A letter of Robert Dixon, *IDA Information Sheet no. 17* (Tucson: IDA).
- a 136. International Dark-Sky Association 1990, Theft of the Night... Text of a Dec 1989 NAS Op-ED Press Release, *IDA Information Sheet no. 18* (Tucson: IDA).
- a 137. International Dark-Sky Association 1990, The American Astronomical Society's Position on Light Pollution, *IDA Information Sheet no. 19* (Tucson: IDA).
- a 138. International Dark-Sky Association 1990, Sky Glow Effects on Existing Large telescopes, *IDA Information Sheet no. 20* (Tucson: IDA).
- a 139. International Dark-Sky Association 1990, Poster paper: Light Pollution, Another Threat to the Environment, *IDA Information Sheet no. 21* (Tucson: IDA).
- a 140. International Dark-Sky Association 1990, Sample Letter to Help Build Awareness and Ask for Help, *IDA Information Sheet no. 22* (Tucson: IDA).
- a 141. International Dark-Sky Association 1990, Campus Lighting, and Other Such Applications (Libraries, etc.), *IDA Information Sheet no. 23* (Tucson: IDA).
- a 142. International Dark-Sky Association 1990, Security Lighting.Let's Have Real Security, Not Bad Lighting, *IDA Information Sheet no. 24* (Tucson: IDA).
- a 143. International Dark-Sky Association 1990, How To Talk To Your Neighbor Who Has a Bad Light, *IDA Information Sheet no. 25* (Tucson: IDA).
- a 144. International Dark-Sky Association 1990, Economic Issues in Wasted and Inefficient Outdoor Lighting, *IDA Information Sheet no. 26* (Tucson: IDA).
- a 145. International Dark-Sky Association 1990, Control of Outdoor Lighting at Wesleyan University, by A.Upgren, *IDA Information Sheet no. 27* (Tucson: IDA).
- a 146. International Dark-Sky Association 1990, An Introduction to Light Pollution, *IDA Information Sheet no. 28* (Tucson: IDA).
- a 147. International Dark-Sky Association 1990, Turtles and Outdoor Lighting in Florida, *IDA Information Sheet no. 29* (Tucson: IDA).
- a 148. International Dark-Sky Association 1990, Partial List of Good Lighting Fixtures, *IDA Information Sheet no. 30* (Tucson: IDA).
- a 149. International Dark-Sky Association 1990, 'Does Stanford Need More Outdoor Lighting?' Letter by Dan Schroeder, *IDA Information Sheet no. 31* (Tucson: IDA).

- a 150. International Dark-Sky Association 1990, Telling the Differences Between Different Lighting Sources, *IDA Information Sheet no. 32* (Tucson: IDA).
- a 151. International Dark-Sky Association 1990, Talking Hasn't Worked. Shall I Sue Them?, *IDA Information Sheet no. 33* (Tucson: IDA).
- a 152. International Dark-Sky Association 1990, We All Need Good Outdoor Nighttime Lighting, *IDA Information Sheet no. 34* (Tucson: IDA).
- a 153. International Dark-Sky Association 1991, Billboards, *IDA Information Sheet no. 35* (Tucson: IDA).
- a 154. International Dark-Sky Association 1991, Golden Bay Outdoor Lighting Control Ordinance, *IDA Information Sheet no. 36* (Tucson: IDA).
- a 155. International Dark-Sky Association 1991, City of San Diego Lighting Control Ordinance, *IDA Information Sheet no. 37* (Tucson: IDA).
- a 156. International Dark-Sky Association 1991, Tucson/Pima County Outdoor Lighting Control Ordinance, *IDA Information Sheet no. 38* (Tucson: IDA).
- a 157. International Dark-Sky Association 1991, Koyaanisqatsi – Life Out of Balance, *IDA Information Sheet no. 39* (Tucson: IDA).
- a 158. International Dark-Sky Association 1991, How to Get Started ..., *IDA Information Sheet no. 40* (Tucson: IDA).
- a 159. International Dark-Sky Association 1991, Oh Beautiful for Spacious Skies – Not Near a City!, *IDA Information Sheet no. 41* (Tucson: IDA).
- a 160. International Dark-Sky Association 1991, Some Lighting Myths, *IDA Information Sheet no. 42* (Tucson: IDA).
- a 161. International Dark-Sky Association 1991, Some Resolutions for the Coming Year – by Frank Olsen, *IDA Information Sheet no. 43* (Tucson: IDA).
- a 162. International Dark-Sky Association 1991, IAU Colloquium, Table of Contents, *IDA Information Sheet no. 44* (Tucson: IDA).
- a 163. International Dark-Sky Association 1991, 1988 IAU Resolutions About the Issues, *IDA Information Sheet no. 45* (Tucson: IDA).
- a 164. International Dark-Sky Association 1992, State of Maine Act to Improve Outdoor Lighting, *IDA Information Sheet no. 46* (Tucson: IDA).
- a 165. International Dark-Sky Association 1992, The IES – Illuminating Society of North America (IESNA), *IDA Information Sheet no. 47* (Tucson: IDA).
- a 166. International Dark-Sky Association 1992, The CIE – Commission Internationale de l'Eclairage, *IDA Information Sheet no. 48* (Tucson: IDA).
- a 167. International Dark-Sky Association 1992, Green Lights – The EPS's New Program to Encourage Energy Efficient Lighting, *IDA Information Sheet no. 49* (Tucson: IDA).

- a 168. International Dark-Sky Association 1992, The Earth at Night – A poster showing a Satellite View of All of the Earth at Night, *IDA Information Sheet no. 50* (Tucson: IDA).
- a 169. International Dark-Sky Association 1992, Lighting and Crime, *IDA Information Sheet no. 51* (Tucson: IDA).
- a 170. International Dark-Sky Association 1992, Efficient Outdoor Lighting, *IDA Information Sheet no. 52* (Tucson: IDA).
- a 171. International Dark-Sky Association 1992, WARC-92: Principal Results of Importance to Radio Astronomy, *IDA Information Sheet no. 53* (Tucson: IDA).
- a 172. International Dark-Sky Association 1992, Dark Campus Programs Reduce Vandalism and Save Energy, *IDA Information Sheet no. 54* (Tucson: IDA).
- a 173. International Dark-Sky Association 1992, City of Tempe, Arizona, Lighting Ordinances, *IDA Information Sheet no. 55* (Tucson: IDA).
- a 174. International Dark-Sky Association 1992, County of San Diego Lighting Ordinance, *IDA Information Sheet no. 56* (Tucson: IDA).
- a 175. International Dark-Sky Association 1992, Who We Are – The IDA Board of Directors and Officers, *IDA Information Sheet no. 57* (Tucson: IDA).
- a 176. International Dark-Sky Association 1992, Star Watching Program, *IDA Information Sheet no. 58* (Tucson: IDA).
- a 177. International Dark-Sky Association 1992, Report on the Star Watching Program Results 1991/1992, *IDA Information Sheet no. 59* (Tucson: IDA).
- a 178. International Dark-Sky Association 1993, Communities Initiate Steps to Illuminate Streets, Not Skies, *IDA Information Sheet no. 60* (Tucson: IDA).
- a 179. International Dark-Sky Association 1993, Quality Street Lighting – A Talk by George Eslinger –October 1992, *IDA Information Sheet no. 61* (Tucson: IDA).
- a 180. International Dark-Sky Association 1993, Promoting Dark Skies During Public Star Parties – Luther Ross, *IDA Information Sheet no. 62* (Tucson: IDA).
- a 181. International Dark-Sky Association 1993, US Department of Justice Study of Street Lighting and Crime, *IDA Information Sheet no. 63* (Tucson: IDA).
- a 182. International Dark-Sky Association 1993, What You Get for Your Membership, *IDA Information Sheet no. 64* (Tucson: IDA).
- a 183. International Dark-Sky Association 1993, Ontario Hydro Leaflet on Light Pollution, *IDA Information Sheet no. 65* (Tucson: IDA).
- a 184. International Dark-Sky Association 1993, What To Do About Those ... Streetlights – by Terry Dickinson, *IDA Information Sheet no. 66* (Tucson: IDA).
- a 185. International Dark-Sky Association 1993, Let Us (Not) See The Light – by Dawes, Northfield & Wallace, *IDA Information Sheet no. 67* (Tucson: IDA).

- a 186. International Dark-Sky Association 1993, Help Us Save the Stars ! (A sign-up sheet for handing out to people), *IDA Information Sheet no. 68* (Tucson: IDA).
- a 187. International Dark-Sky Association 1993, *IDA Information Sheet no. 69* (Tucson: IDA).
- a 188. International Dark-Sky Association 1993, *IDA Information Sheet no. 70* (Tucson: IDA).
- a 189. International Dark-Sky Association 1993, *IDA Information Sheet no. 71* (Tucson: IDA).
- a 190. International Dark-Sky Association 1993, The BAA Campaign for Dark Skies, *IDA Information Sheet no. 72* (Tucson: IDA).
- a 191. International Dark-Sky Association 1993, Guidance Notes for the Reduction of Light Pollution in the U.K., *IDA Information Sheet no. 73* (Tucson: IDA).
- a 192. International Dark-Sky Association 1993, Keeping the Skies Dark: An Australian Plan, *IDA Information Sheet no. 74* (Tucson: IDA).
- a 193. International Dark-Sky Association 1993, IESNA Lighting Handbook, 8th edition, *IDA Information Sheet no. 75* (Tucson: IDA).
- a 194. International Dark-Sky Association 1993, Exterior Lighting: Glare and Light Trespass, *IDA Information Sheet no. 76* (Tucson: IDA).
- a 195. International Dark-Sky Association 1993, Recommended Lighting levels, Exterior Lighting, *IDA Information Sheet no. 77* (Tucson: IDA).
- a 196. International Dark-Sky Association 1993, Basic Lighting Laws and Some Notes on Pole Spacing Geometry, *IDA Information Sheet no. 78* (Tucson: IDA).
- a 197. International Dark-Sky Association 1993, "Porch Light" an Article by Justin Isherwood, *IDA Information Sheet no. 79* (Tucson: IDA).
- a 198. International Dark-Sky Association 1993, List of Slides available from IDA *IDA Information Sheet no. 80* (Tucson: IDA).
- a 199. International Dark-Sky Association 1993, Captions for Slide Set A (ASP/IDA Standard Set) *IDA Information Sheet no. 81* (Tucson: IDA).
- a 200. International Dark-Sky Association 1993, Captions for Slide Set B (Supplementary set 1) *IDA Information Sheet no. 82* (Tucson: IDA).
- a 201. International Dark-Sky Association 1993, Captions for Slide Set C (Satellite Images) *IDA Information Sheet no. 83* (Tucson: IDA).
- a 202. International Dark-Sky Association 1993, Captions for Slide Set D (Good Lighting) *IDA Information Sheet no. 84* (Tucson: IDA).
- a 203. International Dark-Sky Association 1993, Captions for Slide Set E (Light Sources) *IDA Information Sheet no. 85* (Tucson: IDA).

- a 204. International Dark-Sky Association 1993, Captions for Slide Set F (More Supplementary Slides) *IDA Information Sheet no. 86* (Tucson: IDA).
- a 205. International Dark-Sky Association 1993, Captions for Slide Set G (Mostly Bad Lighting Examples) *IDA Information Sheet no. 87* (Tucson: IDA).
- a 206. International Dark-Sky Association 1993, Sample talks One and Two, *IDA Information Sheet no. 88* (Tucson: IDA).
- a 207. International Dark-Sky Association 1993, Dark Skies and the Bible, from Wade Thompson, *IDA Information Sheet no. 89* (Tucson: IDA).
- a 208. International Dark-Sky Association 1993, Light Pollution – Theft of the Night (A Handout sheet), *IDA Information Sheet no. 90* (Tucson: IDA).
- a 209. IES 1985, A Statement on astronomical light pollution and light trespass, Subcommittee on light trespass of the IES Roadway Lighting Committee, *J. Illum. Eng. Soc.*, 12, 658.
- a 210. Isobe, S. 1993, Measurement of energy loss through world light distribution at night, preprint.
- a 211. Iye, M., Nishihara, E. and Sugai, H. 1992, Night sky spectrum at Okayama Astrophysical Observatory (in Japanese), *Rep. Natl. Astron. Obs. Jpn.*, 1, 3, 221-228.
- a 212. ILE 1992, *Guidance notes for the reduction of Light pollution* (Rugby: Institution of Lighting Engineers).
- a 213. ILE 1994, *Guidance notes for the reduction of Light pollution. Revised.* (Rugby: Institution of Lighting Engineers).
- a 214. Jiang, S.Y. 1991, Environmental Conditions of Chinese Astronomical Observatories: past, present and future, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 33
- a 215. Jenkins, C. & Unger, S. 1991, *The night sky spectrum from La Palma*, ING-La Palma Technical Note No. 82.
- a 216. Joseph, J.H., Kaufman, Y.J. & Mekler, Y. 1991, Urban light pollution: the effect of atmospheric aerosols on astronomical observations at night, *Appl. Opt.*, 30, 3047-3058.
- a 217. Kahlmann, H. 1991, Electronic smog in Europe, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 188.
- a 218. Kalinowski, J.K., Roosen, R.G. & Brandt, J.C. 1975, The night sky brightness at McDonald Observatory, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 87, 869-876.
- a 219. Kessler, D.J. 1991, Overview of the space debris issue, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 113-114.

- a 220. Klimik, V.U. and Shvalagin, I.V. 1985, Determination of artificial sky background contamination (in Russian), *Astronomicheskii Tsirkulyar*, 1370, 5-7.
- a 221. Klimik, V.U. and Shvalagin, I.V. 1987, The influence of town illumination on the night sky brightness (in Russian), *Nauchnye Informatsii Astronomicheskij Sovet*, 62, 71-79.
- a 222. Kosai, H. 1988, Observation of night-sky-brightness in Japan (in Japanese), *Astron. Her.*, 81, 11, 314-316.
- a 223. Kosai, H. 1993, Activity of CIE TC 4.21 (in Japanese), *JCIE Journal*, 97, 5-9.
- a 224. Kosai, H. & Isobe, S. 1991, Organized Observations of Night Sky Brightness in Japan, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference and Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 35-44.
- a 225. Kosai, H. & Isobe, S. 1991, Organized Observations of Night Sky Brightness in Japan during 1987-1989, *Proc. ASA*, 9(1), 180-183.
- a 226. Kosai, H. & Isobe, S. 1994, A Global network observation of night sky brightness in Japan - Method and some results, in *Proceedings of the European Colloquium on light pollution*, Reading 3rd July 1993, ed. J. Mason (London: British Astronomical Association), in press.
- a 227. Kosai, H., Isobe, S. & Nakayama, H. 1992, Night-sky brightness over Japan, *Sky and Telescope*, 11 (November 1992), 564-568.
- a 228. Kovalevsky, J. 1986, La Protection des sites astronomiques (in French), *L'Astronomie*, 100, 219-226.
- a 229. Kovalevski, J. (ed.) 1992, *The Protection of Astronomical and Geophysical Sites* (Paris: Frontieres).
- a 230. Kovalevski, J. 1992, General Introduction, in *The Protection of Astronomical and Geophysical Sites*, ed. J. Kovalevski (Paris: Frontieres), p.1.
- a 231. Kovalevski, J. 1992, Satellites, space debris, aircraft and astronomy, in *The Protection of Astronomical and Geophysical Sites*, ed. J. Kovalevski (Paris: Frontieres), p.143.
- a 232. Kovalevski, J. 1993, Les pollutions du ciel et les astronomes (in French), *L'Astronomie*, 107 (July 1993), 186-187.
- a 233. Kovalevski, J. 1993, Un ciel noir pour voir les etoiles (in French), Academie des Sciences de l'Institut de France, La Vie des Sciences, Comptes Rendu, Serie generale, tome 10 (1993), no.3, p.199-208.
- a 234. Krase, W.H. & Wolf, K. 1984, Astronomy and sodium lighting, a rand note, Rand Corporation, 8 August 1984.
- a 235. Krisciunas, K. & Schaefer, B.E. 1991, A model of the brightness of moonlight, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 103, 1033-1039.

- a 236. Lazou, J.-M. 1993, Eclairage public et astronomie (in French), *L'Astronomie*, 107 (July 1993), 188-189.
- a 237. Large, A.J. 1979, Cities' Bright lights plunge astronomers into a dark Mood, *The Wall Street Journal*, 12th January 1979.
- a 238. Levasseur-Regourd, A.C. 1992, Report of IAU Commission 21: The light of the night sky, Proceedings of the XXI General Assembly of the International Astronomical Union, ed. J. Bergeron, *IAU Trans.* XXIB, p.221-224.
- a 239. Levasseur-Regourd, A.C. 1994, Natural background radiation, the light of the night sky, in *Proceedings of the European Colloquium on light pollution*, Reading 3rd July 1993, ed. J. Mason (London: British Astronomical Association), in press.
- a 240. Lewin, I. 1973, Outdoor lighting and astronomy-A new problem, *Lighting design and application*, July 1973.
- a 241. Lewin, I. 1987, Control of light pollution- an engineer's viewpoint, in *Identification, optimization and protection of optical observatory sites*, eds. R.L.Mills, O.G. Franz, H.D.Ables & C.C. Dahn (Flagstaff: Lowell Observatory), p.195-198.
- a 242. Lewis, R.A. 1978, LPS:A growing light-source answer in energy short times, *GEE*, February 1978.
- a 243. Lewis, R.A. 1991, Light Pollution: "light" at the end of the tunnel?, *Astronomy Now*, 4, 8, 175.
- a 244. Lindley, D. 1988, Keeping astronomers in the dark, *Nature*, 331, p.205.
- a 245. Lockwood, G.W., Floyd, R.D. & Thompson, D.T. 1990, Sky glow and outdoor lighting trends since 1976 at the Lowell Observatory, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 102, 481.
- a 246. Lovi, G. 1986, Darkness and Light, *Sky and Telescope*, 71 (March 1986), 171.
- a 247. Lovi, G. 1992, Progress against light pollution, *Sky and Telescope*, 83, 3 (March 1992), p.299-300.
- a 248. Louistisserand, S., Bücher, A., Koutchmy, S. & Lamy, P. 1987, Night sky optical spectrum from a high altitude observatory, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 68, 539-543.
- a 249. Lyutyj, V.M. & Sharov, A.S. 1982, Photometric characteristics of the night sky in the Crimea (in Russian), *Astron. Zh.*, 59, 174-181.( English translation in *Soviet Astron.*, 26, 1, 105-109)
- a 250. Maley, P. 1991, Side effects of space debris on astronomical observations, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference and Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 115-125.
- a 251. Mao, J.-T. & Chen, J.Y. 1978, Brightness of the sky background (in Chinese), *Acta Sci. Nat. Univ. Pekinensis*, 3, 61-73. (abstract in *Phys. Abstr.* 83, 12540)



- a 252. Maricopa Association of governments 1984, *Impact of the Kitt Peak ordinance on streetlight rates*.
- a 253. Maricopa Association of governments 1984, *Guidelines for implementing outdoor light pollution control measures*.
- a 254. Martin Mateo, R. 1984, *Contaminacion Luminosa en los Observatorios de IAC* (in Spanish), Thesis, University of La Laguna.
- a 255. Mason, J. 1992, The quest for darker skies, *Astronomy Now*, 6, 11 (November 1992), 40-42.
- a 256. Mason, J. (ed.) 1994, *Proceedings of the European Colloquium on light pollution*, Reading 3rd July 1993, British Astronomical Association, in press.
- a 257. Massey, P. & Gronwall, C. 1989, Spectrophotometry of the Kitt Peak night sky, *Bull. of American Astron. Soc.*, 21,4,1067.
- a 258. Massey, P., Gronwall, C. & Pilachowski, C.A. 1990, The spectrum of the Kitt Peak Night Sky, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 102, 1046-1051.
- a 259. Matsushima, S. 1964, Site selection for a small observatory in the midwest, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 76, 224-230.
- a 260. McGowan, T. & Hibbs, J. 1991, A system simulation approach for the control of stray electric light , in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference and Space debris* , ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 70.
- a 261. McNally, D. 1992, Light pollution, radio noise, and space debris: A hazard for observational astronomy, *1993 Yearbook of Astronomy*, 216-222.
- a 262. McNally, D. 1992, Focus: astronomy in crisis. Introduction, *Astronomy Now*, 6, 11 (November 1992), 37-39.
- a 263. McNally, D. (ed.) 1994, *Proceedings of the IAU/ICSU/UNESCO meeting, Adverse environmental impacts on astronomy: An exposition*, Paris 30 June - 2 July 1992 (Cambridge: Cambridge University Press), in press.
- a 264. Mestel, R. 1993, Don't dazzle us with space billboards, *New Scientist*, 23 May 1993, p.6.
- a 265. Minnaert, M. 1954, *The nature of Light and Color in the Open Air* (New York: Dover).
- a 266. Mizon, B. 1994, The European Colloquium on Light Pollution, *J. British Astron. Ass.*, 104, 3, p. 148-150.
- a 267. Mood, S. & Mood, J. 1985, Palomar and the Politics of Light Pollution, *Astronomy*, 13 (November), 6.
- a 268. Mood, J. 1986, Light Pollution: situation hopeless but not serious, *Sky and Telescope*, 80, 1 (July 1990), p.4.

- a 269. Mundell, I. 1992, Star Wars - The astronomers strike back, *Nature*, 357, 430.
- a 270. Murdin, P. 1985, Nighttime skies above the Canary Islands, *Vistas in Astronomy*, 28, 449-465.
- a 271. Murdin, P. & Sanchez, F. 1987, Protection of the observatories of the canary Islands , in *Identification, optimization and protection of optical observatory sites*, eds. R.L.Mills, O.G. Franz, H.D.Ables & C.C. Dahn (Flagstaff: Lowell Observatory), p.203-206.
- a 272. Murdin, P. 1991, The threat to Astronomy by Space Art, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 139-144.
- a 273. Murdin, P. 1992, Protection of Observatories:the legal avenues, in *The Protection of Astronomical and Geophysical Sites*, ed. J. Kovalevski (Paris: Frontieres), p.159.
- a 274. Neizvestnyj, S.I. 1982, The night sky background brightness at the Special Astrophysical Observatory of the USSR Academy of Sciences (in russian), *Astrofiz. Issled. Izv. Spets. Astrofiz. Obs.*, 16, 49-52.
- a 275. Neizvestnyj, S.I. 1984, The brightness of the night sky at the USSR Academy of Sciences special astrophysical observatory, *Bull. of the special astrophysical obs. - North caucasus*, v.16, 41-44.
- a 276. Neveu, J.-S. 1992, Pollution Lumineuse - Dossier (in French), *Astronomie Quebec*, 2, 3, 14-17.
- a 277. O'Meara, S.J. 1994, Bad Lighting battled in New England, *Sky and Telescope*, 4 (April 1994), p.99-101.
- a 278. Osterbrock, D.E., Walker, M.F. & Koski A.T. 1976, The spectrum of light pollution at Mount Hamilton, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 88, 349-352.
- a 279. Osterbrock, D.E. & Martel A. 1992, Sky spectra at a Light-Polluted Site and the use of Atomic and OH sky Emission lines for wavelenght calibration, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 104, 76-82.
- a 280. Ostiller, P. 1991, Negotiating a win/win agreement with sources of radio interference and light pollution: a legal primer, *Bull. of American Astron. Soc.*, 23, 4, 1397-1398.
- a 281. Pilachowski, C., Africano, J.L., Goodrich, B.D. & Binkert, W.S. 1991, Sky Brightness at Kitt Peak National Observatory, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p.19-20.
- a 282. Pike, R. 1976, A simple computer model for the growth of light pollution, *J. Royal Astron. Soc. Canada*, 70, 116-126.
- a 283. Pike, R. & Berry, R. 1978, A bright future for the Night Sky, *Sky and Telescope*, 55, 2, 126-129.

- a 284. Pollard, N.E. 1993, Sky glow conscious lighting design, in *Proceedings of the European Colloquium on light pollution*, Reading 3rd July 1993, ed. J. Mason (London: British Astronomical Association), in press.
- a 285. Ramponi, L. 1993, Prima Giornata nazionale sul problema dell'inquinamento luminoso (in Italian), *Astronomia UAI*, 1, 38-40.
- a 286. Ramponi, L. 1993, Italian national day of Light Pollution, *Astronomy in Brescia 1993-94* (Brescia: Unione Astrofili Bresciani).
- a 287. Reed, G.S. 1993, Investing in Dark skies, *Sky and Telescope*, October 1993, 91-92.
- a 288. Reiland, T. 1989, Light soaked skies: a battle won, *Sky and Telescope*, 77, 6 (June 1989), p.583.
- a 289. Riegel, K.W. 1973, Light Pollution: Outdoor lighting is a growing threat to astronomy, *Science*, 179, 1285.
- a 290. Robinson, W.T. 1991, Outdoor lighting in Tucson: A photo record , in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris* , ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 18.
- a 291. Ross, D.K. 1973, Shedding the light: how to preserve natural resources and save tax-payers money, in *A public citizen's action manual* (New York: Grossman Publishers).
- a 292. Rousseau, B. 1991, Rendez nous notre ciel nocturne ! (in French), *Obs. Trav.*, 28, 2-4.
- a 293. Rothweiler, T. 1983, *Reducing atmospheric light pollution*, City of Phoenix planning department issue paper n.4.
- a 294. Rowlands, J. 1990, Light Pollution: throwing light on the subject, *Astronomy Now*, 4, 8, 19-21.
- a 295. Sanchez Beitia, E. 1983, *El brillo del cielo nocturno en funcion de la distancia a los nucleos urbanos en las islas de Tenerife y San Miguel de la Palma* (in Spanish), Thesis, University de La Laguna.
- a 296. Santangelo, M. 1990, Bibliografia su "Site testing" e luminosita' del cielo notturno (in Italian), *Giornale di Astron. Soc. Astron. It.*, 2, 31-32.
- a 297. Sartor, J.M. 1980, A Comprehensive Decision Analysis on the Conversion to Sodium Vapor Street Lighting, City of San Jose, 9 May 1980.
- a 298. Schaaf, F. & Kurczewski, R. 1991, Publicizing light pollution and its cures, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 78.
- a 299. Schaefer, B.E. 1986, Atmospheric extinction effects on stellar alignments, *Archaeoastronomy (JHA xvii)*, 10, S33-S42.

- a 300. Schaefer, B.E. 1990, Telescopic limiting magnitudes, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 102, 212-229.
- a 301. Schaefer, B.E. 1991, Glare and celestial visibility, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 103, 645-660.
- a 302. Schaefer, B.E. 1993, Astronomy and the limits of vision, *Vistas in Astronomy*, 36, 311-361.
- a 303. Schmidt, M. 1984, Astronomy's problem with light pollution, *Phys. Today*, 37, 12, 144.
- a 304. Schneeberger, T.J., Worden, S.P. & Beckers, J.M. 1979, The night sky conditions at the Sacramento Peak Observatory: 1. sky brightness, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 97, 530-532.
- a 305. Schreuder, D.A. 1987, Road Trespass: a matter of concern for CIE, *CIE Journal*, 6, 2, 35-40.
- a 306. Schreuder, D.A. 1987, Road lighting and light trespass, *Vistas in Astronomy*, 30, 185-195.
- a 307. Schreuder, D.A. 1991, Light Trespass Countermeasures, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference and Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 25-32.
- a 308. Schreuder, D.A. 1991, *Lighting near astronomical observatories*, Commission Internationale de l'Eclairage, Technical Committee 5.12, First Draft June 1991.
- a 309. Schreuder, D.A. (ed.) 1994, *Urban sky glow, a worry for astronomy*, *Symposium 3 April 1993*, Proceedings, in press.
- a 310. Smith, F.G. 1979, Report and Recommendations of IAU Commission 50, Reports on Astronomy, *IAU Trans.* XVIII, 218-222.
- a 311. Smith, F.G. 1982, Report of IAU Commission 50: Identification and protection of existing and potential observatory sites, Reports on Astronomy, ed. P. A. Wayman, *IAU Trans.* XVIII, 667-668.
- a 312. Smith, F.G. 1982, Report of IAU Commission 50: Identification and protection of existing and potential observatory sites, Proceedings of the XVIII General Assembly of the International Astronomical Union, ed. R.M. West, *IAU Trans.* XVIII, 319-321.
- a 313. Smith, M. & DiLaura, D. 1991, Software tools for engineering dark skies, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference and Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 71-76.
- a 314. Sperling, N. 1978, How to fight light pollution, *Sky and Telescope*, 55, 2, 133-138.
- a 315. Sperling, N. 1980, Licking Light Pollution, *Sky and Telescope*, 60, 1, 17-20.

- a 316. Sperling, N. 1986 Light Pollution: a challenge for astronomers, *Mercury*, 15, 144-150.
- a 317. Sperling, N. 1991, The disappearance of darkness, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 101-108.
- a 318. State of Florida 1981, *Better street lighting for less money*, Governor's energy office, State of Florida.
- a 319. Steward 1971, *Light Pollution: A threat to astronomy in Pima and Santa Cruz Counties*, Kitt Peak national Observatory and Smithsonian Observatory, Tucson, December 1971.
- a 320. Stock, J. & Marin, Z. 1991, Pollution and Pollution Control in the Third World, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 48-50.
- a 321. Subcommittee on light trespass of the IES roadway lighting committee 1985, A statement on astronomical light pollution and light trespass, *J. Illum. Eng. Soc.*, 12, 658.
- a 322. Sullivan, W. 1984, Endangered night skies, *The CoEvolution quarterly*, Fall 1984.
- a 323. Sullivan, W. 1984, Our endangered night skies, *Sky and Telescope*, 67, 5, 412-414.
- a 324. Sullivan, W.T., 1989, A 10 km resolution image of the entire nighttime Earth based on cloud-free satellite photographs in the 400-1100 nm band, *Intl. J. of remote sensing*, 10, 1-5.
- a 325. Sullivan, W.T. 1991, Earth at Night: An image of the Nighttime Earth Based on Cloud-free Satellite Photographs, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p.11-17.
- a 326. Sweet, W. 1984, Light pollution out West concerns optical astronomers, *Phys. Today*, 37, 12, 63-64.
- a 327. Tanner, A. 1991, Light Trespass, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 85-88.
- a 328. Tebo, A. 1993, Will light pollution kill ground-based astronomy?, *OE Reports* (Bellingham, USA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers), 118, p.1-3.
- a 329. Thomas, R.W.L., Modali, S.B. & Roosen, R.G. 1973, Estimates of the light pollution effect for realistic atmospheres, *Bull. of American Astron. Soc.*, 5, 391.
- a 330. Tien, J. 1979, Street Lighting Projects, national Evaluation program Phase 1 Report, Nat. Inst. of law Enforcements and Criminal Justice, U.S. Dep. of Justice, series A, n.21.

- a 331. Treanor, P.J.S.J. & Salpeter, E.S.J. 1972, A Portable Night-Sky Photometer, *The Observatory*, 92, 96-99.
- a 332. Treanor, P.J.S.J. 1973, A simple propagation law for artificial night-sky illumination, *The Observatory*, 93, 117-120.
- a 333. Treanor, P.J.S.J. 1974, Artificial night sky brightness in Italy, in *Rapporto OAN n.3*, Padova.
- a 334. Turnrose, B.E. 1974, Absolute spectral energy distribution of the night sky at Palomar and Mount Wilson Observatories, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 86, 545-551.
- a 335. Uppgren, A.R. 1991, The measurement of Light Pollution and the population of cities, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference and Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 79-84.
- a 336. Uppgren, A.R. 1991, Night-Sky brightness from the visibility of stars near the horizon, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 103, 1292-1295.
- a 337. Uppgren, A.R. 1992, Night sky brightness from visual observations II. A visual photometer, *Newslett. Astron. Soc. N.Y.*, 4, 3, 11.
- a 338. Uppgren, A.R. 1992, Night sky brightness from visual observations II. A visual photometer, *J. Am. Assoc. variable Star Obs.*, 20, 2, 244-247.
- a 339. Uppgren, A.R., Armandroff, T.E. & Dawson, D.W. 1981, Results of a pilot program to measure light pollution, *Bull. of American Astron. Soc.*, 13, 813.
- a 340. van Berghem-Jansen, P.M. & Vos, J. 1991, *Hinder van assimilatieverlichtung* (Disturbance caused by assimilation lighting in greenhouses), report IZF1991 C-23, IZF/TNO, Soesterberg (The Netherlands).
- a 341. van der Bergh, S. 1987, Report of IAU Commission 50: Identification and protection of existing and potential observatory sites, Reports on Astronomy, *IAU Trans.* XXA, 691-692.
- a 342. van der Bergh, S. 1988, Report of IAU Commission 50: Identification and protection of existing and potential observatory sites, Proceedings of the XX General Assembly of the International Astronomical Union, ed. D. McNally, *IAU Trans.* XXB, 365.
- a 343. van Tiggelen, B.A. 1992, *Multiple scattering and localization of light*, Doctoral Thesis, University of Amsterdam.
- a 344. Verheijen, F.J. 1985, Photopollution: artificial light optic spatial control systems fail to cope with. Incidents, causations, remedies, *Exp. Biol.*, 44, 1-18.
- a 345. Vetesnik, M. 1993, The astronomers striking alarms (in czech.), *R hvezd*, 74, 6, p.124-127.
- a 346. Waldram, J.M. 1972, The calculation of sky haze luminance from street lighting, *Lighting Res. Technol.*, 4, 21-26.

- a 347. Walker, M.F. 1970, The California Site Survey, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 82, 672-698.
- a 348. Walker, M.F. 1973, Light pollution in California and Arizona, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 85, 508-519.
- a 349. Walker, M.F. 1976, Report of IAU Commission 50: Identification and protection of existing and potential observatory sites, Reports on Astronomy, *IAU Trans.* XVII, 219-228.
- a 350. Walker, M.F. 1977, Report of IAU Commission 50: Identification and protection of existing and potential observatory sites, Proceedings of the XVI General Assembly of the International Astronomical Union, eds. E.A. Muller & A. Jappel, *IAU Trans.* XVIB, 317-320..
- a 351. Walker, M.F. 1977, The effects of urban lighting on the brightness of the night sky, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 89, 405-409.
- a 352. Walker, M.F. 1984, High quality astronomical sites around the world, in *Site Testing for Future Large Telescopes*, eds. A.Ardeberg & L.Woltier (ESO:La Silla), p.3-22.
- a 353. Walker, M.F. 1986, How good is your observing site, *Sky and Telescope*, 71, 2 (February 1986), p.139-143.
- a 354. Walker, M.F. 1988, The effects of solar activity on the V and B band sky brightness, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 100, 496.
- a 355. Walker, M.F. 1991, Past and present studies relating to urban Sky Glow, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 52-55.
- a 356. Weaver, H.F. 1947, The visibility of stars without optical aid, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 59, 232-243.
- a 357. Westpfahl, D. 1991, The relighting of Kalispell in Montana, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 97.
- a 358. Westpfahl, D. 1991, Big island cities at night, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference ans Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 98.
- a 359. Witherington, B.E. 1992, Behavioral response of nesting sea turtles to aretificial lighting, *Herpetologica*, 48(1), 31-39.
- a 360. Witherington, B.E., Bjorndal, K.A. 1991, Influences of artificial lighting on the seaward orientation of hotchling loggerhead turtles, *Biol. Conserv.*, 55, 139-149.
- a 361. Woolf, N.J. 1985, Mt. Graham Information, *Publ. Steward Obs.*, 564.
- a 362. Yocke, M.A., Hogo, H. & Lundberg, G.W. 1985, *Impacts of four proposed waste facilities on the night sky in canyonlands National Park* (San Raphael,CA: Systems Applications Inc.), Report No.86/002.

- a 363. Yocke, M.A., Hogo, H. & Henderson, D. 1986, A mathematical model for predicting night-sky glow, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 98, 889-893.
- a 364. Yongwei, H., Songzhu, L., Xiangliang, H., Fuyuan, Z., Zongli, L. 1993, Comparison between Wuling mountain and Xinglong station in night sky brightness and extinction coefficient, *Publ. Beijing Astron. Obs.*, 22, 120-123.
- a 365. Ziznnovski, J. 1987, Astronomers are looking for darkness (in Slovak), *Kosmos*, 18, 2-5.

## B.2 Parte B: Altri argomenti

- b 1. Allen, C. W. 1976, *Astrophysical Quantities* 3rd ed. reprinted (London: The Athlone Press).
- b 2. Antonelli, V. 1986, Dossier Illuminazione (italian), *Spaziosport* (Roma: CONI), 1, 31-75.
- b 3. Barlier, F. & Kovalevski, J. 1992, Pollution of geophysical sites, in *The Protection of Astronomical and Geophysical Sites*, ed. J. Kovalevski, (Paris: Frontieres), p.123.
- b 4. Bonomo, M. 1986, *L'illuminazione delle strade e delle gallerie* (in Italian) (Milano: Associazione italiana di illuminazione).
- b 5. Bruni, S. 1988, I vantaggi dei proiettori asimmetrici (in Italian), *Luce* (Milano: Associazione italiana di illuminazione), 4, 179.
- b 6. Casagrande, R. & Giulini, P. 199?, Illuminazione pubblica e verde urbano (in Italian), in *L'albero, l'uomo, la città*, Proceedings, ed. P.Giulini (Padova: Signum edizioni), 42-44.
- b 7. Chamberlain, J.W. 1961, *Physics of the Aurora and Airglow* (New York: Academic Press).
- b 8. Chandler, T. & Fox, G. 1974, *Three Thousand years of Urban Growth* (New York: Academic Press).
- b 9. Chandler, T. 1987, *Four Thousand years of Urban Growth*, (Lewinston: St. David Univ. Press).



- b 10. Chandrasekhar, S. 1950, *Radiative Transfer* (Oxford: Clarendon Press).
- b 11. CIE 1976, *Calculation and measurement of luminance and illuminance in road lighting*, CIE Publ. 30 (2nd ed. 1980) (Paris: CIE).
- b 12. CIE 1977, *International recommendations for the lighting of roads for motorized traffic*, CIE Publ. 12/2 (Paris: CIE).
- b 13. CIE 1977, *Measures of road lighting effectiveness*, CIE Symposium July 5-6, 1977, Karlsruhe.
- b 14. CIE 1981, *An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance*, CIE Publ. 19/2 (CIE:Paris).
- b 15. CIE 1988, *Road lighting and accidents*, CIE Publ. 8-2 (Paris: CIE).
- b 16. Cook, J. L. 1991, *Conversion Factors* (Oxford: Oxford University Press).
- b 17. Denneman, J.W. 1981, Low Pressure sodium discharge lamps, *IEE proceedings*, vol.128, p.397.
- b 18. De Boer, J.B. 1967, *Public lighting* (Eindhoven: Centrex).
- b 19. Divari, N.B. ed. 1970, *Atmospheric Optics* (New York: Consultants bureau).
- b 20. Elenbaas, W. 1972, *Light sources* (London: Macmillan).
- b 21. Harrison, E. 1987, *Darkness at Night* (London: Harvard Univ. Press).
- b 22. Hidy, G.M. 1984, *Aerosols: An Industrial and environmental science* (New York: Academic Press).
- b 23. Hulburt, E. O. 1941, Optics of atmospheric haze, *J. Opt. Soc. Am.*, 31, 467-476.
- b 24. Kaufman, J.E. 1981, *IES lighting Handbook* (New York: Illumination Engineering Society of North America).
- b 25. Kovalevski, J. 1991, Pollution of Geophysical sites, in *IAU Colloquium 112, Light pollution, Radio interference and Space debris*, ed. D.L. Crawford, *Astron. Soc. of Pacific Conference Series* 17, p. 321.
- b 26. Jones, H.D. et al. 1979, *Evaluation of low pressure sodium vapor illumination*, Texas State Department of Highways and public transportation research project 5-02-75-263. Report n.1, October 1979.
- b 27. Marchuk, G.I., Mikhailov, G.A., Nazaraliev, M.A., Darbinjan, R.A., Kargin, B.A. & Elepov, B.S. 1980, *The Monte Carlo Methods in Atmospheric Optics* (Berlin: Springer).
- b 28. McCartney, E.J. 1976, *Optics of the atmosphere* (New York: Wiley).
- b 29. Meinel, A. & Meinel, M. 1983, *Sunset, twilights, and evening skies* (Cambridge: Cambridge University Press).
- b 30. Philips lighting 1982, *Low pressure sodium lamps*, Philips lighting, October 1982.

- b 31. Public Response Associates Inc. 1980, A Report on a Public Opinion Survey on Sodium Lighting Conversion In San Jose (San Francisco: Public Response Associates Inc.), January 1980.
- b 32. Reist, P.C. 1984, *Introduction to aerosol science* (New York: Macmillan).
- b 33. Roach, F.E. & Gordon, J.L., 198, *The light of the night sky* (Dordrecht: Reidel).
- b 34. Sprengers, L., Campbell, R. & Kostlin, H. 1985, Low pressure sodium lamps with a luminous efficacy of 200 lm/W, *J. Illum. Eng. Soc.*, 14, 607-615.
- b 35. Sprengers, L.M. & Peters, J.I.C. 1986, SOX-E (Economy): A new generation of low-pressure sodium lamps with improved overall performance, *The lighting Journal*, 51, 27-30.
- b 36. Twomey S. 1977, *Atmospheric aerosols* (Amsterdam: Elsevier).
- b 37. van de Hulst, H.C. 1957, *Light scattering by small particles* (New York: Dover).
- b 38. van de Hulst, H.C. 1980, *Multiple Light Scattering*, 2 vol. (New York: Academic press).
- b 39. Van Vliet, J.A.J.M. & de Groot, J.J. 1981, High Pressure sodium discharge lamps, *IEE proceedings*, 128, 415.
- b 40. Zombeck, M. V. 1990, *Handbook of space astronomy and astrophysics* 2nd ed. (Cambridge: Cambridge University Press).

### B.3 Parte C: Quotidiani e riviste nazionali

- c 1. Azzaro, D. 1986, Poter vedere le stelle, *Spaziosport* (Roma: Comitato Olimpico Nazionale Italiano), 1, 83.
- c 2. Bianucci, P. 1981, Ci rubano il cielo stellato, *L'Astronomia*, 12 (September-October 1981), 22-26.

- c 3. Bianucci, P. 1991, C'e' troppa luce nei nostri cieli, *La Stampa - Tuttoscienze*, 25 September 1991.
- c 4. Bianucci, P. 1992, La notte, patrimonio da difendere, *Orione*, 6, 34-38.
- c 5. Bianucci, P. 1992, Sarà vietato oscurare le stelle, *la Stampa - Tuttoscienze*, 514 (20 may 1992), p.2.
- c 6. Bianucci, P. 1993, Riprendiamoci le stelle, *La Stampa - Tuttoscienze*, 12 May 1993, p.2.
- c 7. Bianucci, P. 1993, Le luci che cancellano l'universo, *La Stampa*, 22 September 1993.
- c 8. Bianucci, P. 1993, Luci d'Autunno, *Scienza e Vita*, Settembre 1993.
- c 9. Caraveo, P. 1991, Cambiano le lampadine e riaccendono le stelle, *Corriere della sera*, 31 December 1991, p. 27.
- c 10. Caraveo, P. 1992, Quel cielo sempre più chiaro, *L'Astronomia*, 122, 26-31.
- c 11. Cinzano, P. 1989, Gli astrofili e l'ambiente, *Astronomia UAI*, 5/6, 46.
- c 12. Cinzano, P. 1990, U.A.I. e ambiente, *L'Astronomia*, 95, 73.
- c 13. Cinzano, P. 1991, Lighting show e light pollution, *Astronomia UAI*, 3, 29.
- c 14. Cinzano, P. 1991, L'Inquinamento Luminoso, *Astronomia UAI*, 4, 3-10.
- c 15. Cinzano, P. 1991, Il problema dell'inquinamento luminoso negli impianti sportivi, *Astronomia UAI*, 5, 3-9.
- c 16. Cinzano, P. 1992, Inquinamento luminoso: rapporto sulle ultime novità, *Astronomia UAI*, 4, 37-38.
- c 17. Cinzano, P. 1992, L'inquinamento luminoso ci scippa la cultura, *Il Giornale di Vicenza*, 31 January 1992, p.7.
- c 18. Cinzano, P. 1992, Inquinamento Luminoso, congresso a Parigi, *L'Astronomia*, 126, 70-71.
- c 19. Cinzano, P. 1992, Relazione sul convegno UNESCO/IAU/ICSU "Adverse Environmental Impacts on Astronomy", *Boll. Soc. Astron. It.*, 1/2, 22-23.
- c 20. Cinzano, P. 1993, Inquinamento Luminoso: uno spreco di luce che fa dissolvere il cielo stellato, *Pangea*, IV, 9, p.13-14.
- c 21. Cinzano, P. 1994, Quella luce che "accende" il cielo, *L'Astronomia*, 139, p.46.
- c 22. Cinzano, P. & Di Sora, M. 1994, Inquinamento Luminoso: Relazione sullo stato dell'arte nel nostro paese, *Luce*, 6/94, 50-56.
- c 23. Cinzano, P. & Vanin, G. 1992, Inquinamento luminoso: che si fa in Italia ?, *L'Astronomia*, 122, 32-38.
- c 24. Cinzano, P. & Vanin, G. 1992, Salvare il cielo, *L'Astronomia*, 126, 52-54.

- c 25. Cinzano, P. & Vanin, G. 1994, Salvare il cielo: la campagna continua, *L'Astronomia*, 139, p.44-48.
- c 26. Danesi, G. 1993, Giornata anti cielo inquinato, *Il Giorno*, 18 september 1993.
- c 27. Del Greco, D. 1992, Un bagliore che inquina, *Ciociaria Oggi*, April 1992.
- c 28. Del Greco, D. 1992, Inquinamento da luce, un pericolo... oscuro, *Ciociaria Oggi*, 19 April 1992, p.14.
- c 29. Di Sora, M. 1991, Il ruolo degli astrofili nella lotta all'inquinamento luminoso. Problemi e proposte, in *II Convegno degli Osservatori Astronomici Pubblici Italiani*, San Marcello Pistoiese 24 Novembre 1991, ed. G. Vanin, Unione Astrofili Italiani, p.9-40.
- c 30. Di Sora, M. 1994, Una legge da approvare presto, *L'Astronomia*, 139, p.45.
- c 31. Faber, S. & Reed, S. M. 1980, Outdoor Lighting and Lick Observatory, Report, (Santa Cruz: University of California).
- c 32. Fazio, F. 1992, L'inchiesta: Lucean le stelle, *La nuova ecologia*, 8/92, 38-45.
- c 33. Fazio, F. 1992, Lucean le stelle, *La nuova ecologia*, 101, p.38-45.
- c 34. Foresta Martin, F. 1991, Aumentano in Italia gli amanti delle stelle, *Corriere della sera (CORRIERE/SCIENZA)*, 26 November 1991, p.31.
- c 35. Foresta Martin, F. 1993, Giornata contro l'inquinamento luminoso, *Corriere della sera (CORRIERE/SCIENZA)*, 12 September 1993, p.30.
- c 36. Foresta Martin, F. 1993, Troppi lampioni oscurano le stelle, *Corriere della Sera*, 18 september 1993, p.15.
- c 37. Foresta Martin, F. 1993, Gli studenti domandano: L'inquinamento luminoso, *Pangea*, III, 3, p.12.
- c 38. Gabici, F. 1993, Cieli senza stelle, *Le Scienze*, 301, 13-14.
- c 39. Lucatello, S. 1993, Troppa luce, addio stelle, *Il Gazzettino (ed. di Vicenza)*, 6 October 1993, 107/234, 3.
- c 40. Lucatello, S. 1994, Troppa luce, qui s'inquina, *Il 2000*, 6, 6 February 1994, p.15.
- c 41. Marchi, G.U. 1986, Inquinamento Ottico, *Spaziosport* (Roma: Comitato Olimpico Nazionale Italiano), 1, 88.
- c 42. Poggi, C. 1993, Troppi lampioni offuscano le stelle, *Il Giornale d'Italia*, 21 September 1993.
- c 43. Prestinzenza, L. 1993, giornata contro l'inquinamento luminoso, *L'Astronomia*, 138, p.10-11.
- c 44. Ramponi, L. 1993, La notte da difendere, *Brescia Oggi*, 24 August 1993.

- c 45. Romano, P. 1991, Spegnete le luci, non si vede, *Il Messaggero - Frosinone*, 20 October 1991, p. 38.
- c 46. Tempesti, P. 1993, E la luce cacciò la notte, *Pegaso* (Perugia: Associazione Astronomica Umbra), 17, p.122-123.
- c 47. Tornudd, N. 1992, Le stelle sono nere, *L'eco di Bergamo*, 21 October 1992, p.7.
- c 48. Vanin, G. 1990, Gli osservatori popolari e l'inquinamento luminoso, in *I Convegno del Coordinamento degli Osservatori Astronomici Popolari Italiani*, Montebelluna 11 November 1990, ed. G. Vanin, Unione Astrofili Italiani - Comune di Montebelluna, p. 15-17.
- c 49. Vanin, G. 1993, L'inquinamento Luminoso, in *Osservatori Pubblici - Guida alla gestione* (Galliera Veneta: BIROMA), p.17-23.



# INDICE DELLE TABELLE

2.1	Misure di UFR per un campione di armature. . . . .	66
2.2	Zone astronomiche e UWLR massimo. . . . .	67
2.3	Classi di intensità CEN (classificazione provvisoria) e valore stimato del relativo ULOR massimo. . . . .	69
2.4	Coefficiente di diffusione al suolo per alcune condizioni meteorologiche. . . . .	70
2.5	Raccomandazioni sui livelli di illuminazione stradale e sulla limitazione dell'abbagliamento secondo la norma UNI 10439 (Ottobre 1995). . . . .	77
2.6	Raccomandazioni sui livelli massimi di illuminazione stradale a partire dalle ore 24.00 nei territori sottoposti al controllo della <i>Oficina tecnica para la proteccion de la calidad del cielo</i> dell' <i>Instituto de Astrofisica de Canarias</i> (Ottobre 1993). . . . .	78
2.7	Valori raccomandati per l'illuminamento medio orizzontale di aree di lavoro (CIE 68/1986). . . . .	79
2.8	Esempio di funzione di diffusione per un aerosol atmosferico. . . . .	96
2.9	Brillanza naturale del cielo e luminosità corrispondente: valori tipici allo zenith e valori minimi. . . . .	98
3.1	Contributo medio alla brillanza naturale del cielo dalla luce stellare integrata delle stelle di magnitudine m. . . . .	121
4.1	Aumento della luminosità del cielo prevista nei maggiori osservatori USA per i prossimi anni. . . . .	137
4.2	Magnitudine limite per osservazione ad occhio nudo in funzione della brillanza media o della luminosità del cielo limpido e frazione di stelle visibili. . . . .	142

4.3	Visibilità della Via lattea a occhio nudo per alcuni valori della luminosità e della brillantezza media del cielo limpido. . . . .	144
6.1	Provvedimenti di legge contro l'inquinamento luminoso dal 1958 al 1983. . . . .	170
6.2	Provvedimenti di legge contro l'inquinamento luminoso dal 1984 al 1990. . . . .	171
6.3	Norme di Schermatura secondo l'ordinanza di Tucson e Pima.	174
6.4	Flussi ammessi dall'Orana Plan 1. . . . .	183



# INDICE DELLE FIGURE

1.1	Inquinamento luminoso. . . . .	4
2.1	Il processo della visione notturna. . . . .	20
2.2	Angoli $C$ e $\gamma$ nella rappresentazione $C/\gamma$ . . . . .	31
2.3	Curve fotometriche e diagramma isolux di un apparecchio stradale con vetro di protezione piano. . . . .	33
2.4	Curve fotometriche di un apparecchio stradale con vetro di protezione piano. . . . .	34
2.5	Apparecchio stradale con vetro di protezione piano. . . . .	36
2.6	Curve fotometriche di un apparecchio stradale totalmente schermato con vetro di protezione piano. . . . .	38
2.7	Curve isolux di ottiche totalmente schermate. . . . .	39
2.8	Curve isolux di ottiche totalmente schermate. . . . .	40
2.9	Curve fotometriche di tre ottiche batwing. . . . .	41
2.10	Apparecchio stradale totalmente schermato ad ottica aperta. . . . .	42
2.11	Inclinazione dell'ottica di un apparecchio stradale. . . . .	43
2.12	Apparecchio stradale totalmente schermato. . . . .	44
2.13	Apparecchi stradali inquinanti: con vetro curvo e rifrattore prismatico. . . . .	45
2.14	Un impianto molto inquinante. . . . .	46
2.15	Apparecchio per arredo urbano fortemente inquinante e sua curva fotometrica: la lanterna. . . . .	48
2.16	Apparecchio per arredo urbano totalmente schermato e sua curva fotometrica: lanterna con riflettore cut off. . . . .	49
2.17	Apparecchio per arredo urbano fortemente inquinante e sua curva fotometrica: il globo. . . . .	50
2.18	Apparecchio per arredo urbano molto inquinante e sua curva fotometrica: il globo con alette frangiluce. . . . .	51

2.19	Apparecchio per arredo urbano ed illuminazione stradale accuratamente schermato a forma di globo e sua curva fotometrica.	52
2.20	Apparecchio per arredo urbano ed aree residenziali totalmente schermato e sua curva fotometrica. . . . .	53
2.21	Illuminazione di un area con proiettori simmetrici ed asimmetrici. . . . .	54
2.22	Ottica e curve fotometriche di due tipi di proiettori asimmetrici.	55
2.23	Illuminazione di grandi aree senza dispersione di luce sopra l'orizzonte. . . . .	56
2.24	Torre faro con proiettori asimmetrici senza copertura. . . . .	57
2.25	Schema di una torre faro con proiettori asimmetrici e copertura.	58
2.26	Torre faro con ottiche orizzontali. . . . .	59
2.27	Illuminazione di aree ferroviarie senza dispersione di luce. . . .	60
2.28	Esempio di impianto inquinante per illuminazione di un'area estesa. . . . .	61
2.29	Esempio di impianto inquinante. . . . .	62
2.30	Esempio di impianto inquinante. . . . .	63
2.31	Illuminazione di accessi e percorsi pedonali con apparecchi totalmente schermati. . . . .	64
2.32	Angoli da cui dipende il coefficiente di luminanza. . . . .	73
2.33	Italia di notte da satellite. . . . .	76
2.34	Confronto tra l'emissione delle lampade al sodio a bassa pressione e le curve di sensibilità spettrale dell'occhio. . . . .	84
2.35	Spettro di emissione di alcune lampade a scarica. . . . .	87
2.36	Andamento della densità numerica degli aerosoli nell'atmosfera con l'altitudine. . . . .	91
2.37	Forma della funzione angolare di diffusione per tre particelle di aerosol di dimensioni crescenti. . . . .	95
2.38	Illuminamento di un volume di atmosfera da luce diretta e da luce diffusa una volta. . . . .	103
2.39	Genesis della luminosità del cielo notturno. . . . .	105
4.1	Aumento della brillantezza del cielo rispetto il valore naturale. . .	143
4.2	La Via Lattea fotografata da un sito non inquinato. . . . .	144
4.3	Effetto dell'inquinamento ottico sulla visibilità del cielo notturno. . . . .	145

5.1	Effetto del posizionamento dei corpi illuminanti sulla quantità di luce diffusa nel cielo da una superficie verticale illuminata. . .	161
5.2	Effetto dell'uso di schermi per il controllo dei fasci di luce. . .	162
5.3	Effetto dell'uso di proiettori asimmetrici per il controllo dei fasci di luce. . . . .	163
5.4	Angolo di schermatura e schermo a maglie rettangolari. . . . .	164
6.1	Effetto del provvedimento di legge di Tucson sulla brillantezza del cielo al Kitt Peak National Observatory. . . . .	173

# INDICE ANALITICO ESSENZIALE

- abbagliamento, 4, 20–22, 24, 25, 32, 44, 68, 80  
aerosoli, 70–72, 89, 90, 92, 101, 102, 104, 133  
airglow, 99  
angolo  $\gamma$ , 30  
angolo  $C$ , 30  
angolo limite, 54  
Asiago, ordinanza di, 178  
aurora, 101  
  
Berry, legge di, 8, 126, 132  
brillanza, 109  
  
chiarezza, 74  
cut off, apparecchi, 44  
  
diffusione, funzione di, 71, 93–96  
  
estinzione, 72, 90, 101, 103–105, 115, 116, 118, 119, 123, 125, 133, 141, 145  
  
fattore di riflessione medio, 74  
fondo cosmico integrato, 98  
  
globi, 49–51, 65, 66, 180  
globi totalmente schermati, 51  
goniofotometriche, misure, 30  
  
illuminamento, 110  
incandescenza, lampade ad, 81  
inclinazione (dell'ottica), 33, 34, 37, 42, 43, 45, 65  
isolux, diagrammi, 30  
  
joduri metallici, lampade agli, 83  
  
lanterne, 47, 159, 180  
lanterne fortemente schermate, 47  
legge 751, 13, 178  
luce galattica diffusa, 98  
luce stellare integrata, 97  
luce zodiacale, 99  
luminanza, 109  
luminanza, coefficiente di, 72–74  
luminosità, 109  
  
nightglow, 99  
  
Orana plan 1, 181  
  
proiettori asimmetrici, 25, 26, 54, 159–161, 167  
  
rappresentazione  $C/\gamma$ , 30  
rendimento, 65, 80  
  
segnale-disturbo, rapporto, 149  
semi-cut off, apparecchi, 45

sodio a bassa pressione, lampade  
al, 84, 129, 130, 139, 153,  
159, 166, 167, 179

sodio ad alta pressione, lampade al,  
86, 179

specularità, 73

torri faro, 54, 71, 180

totalmente schermati, apparecchi,  
35, 42

Treanor, legge di, 7, 103, 104, 132

Tucson, ordinanza di, 172

UFR, 65

ULOR, 65

utilizzazione, coefficiente di, 46, 47,  
54, 55, 72, 75

UWLR, 67

UWLR totale, 66

vapori di mercurio, lampade ai, 82

Walker, legge di, 7, 126, 132