



POLITECNICO DI MILANO

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Elettrica

LA MISURA DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO  
NELLE OSSERVAZIONI ASTRONOMICHE

Relatore

Chiar.mo Prof. Alessandro FERRERO

Elaborato di Laurea di

Matteo PERSICO

Matr. Nr. 646544

Anno Accademico 2002/2003



*E quindi uscimmo a riveder le stelle.*

(Dante)



# Sommario

<b>SOMMARIO</b> .....	<b>V</b>
<b>PREFAZIONE</b> .....	<b>1</b>
<b>1. L'INQUINAMENTO LUMINOSO</b> .....	<b>3</b>
1.1 INTRODUZIONE .....	3
1.2 L'INQUINAMENTO LUMINOSO E L'INQUINAMENTO OTTICO.....	6
1.3 ALCUNE RAGIONI PER EVITARE L'INQUINAMENTO LUMINOSO .....	7
<b>2. COME SI PRODUCE L'INQUINAMENTO LUMINOSO</b> .....	<b>9</b>
2.1 L'ILLUMINAZIONE NOTTURNA .....	9
2.1.1 <i>Illuminazione stradale</i> .....	9
2.1.2 <i>Illuminazione di impianti sportivi</i> .....	12
2.1.3 <i>Illuminazione di edifici e di monumenti</i> .....	14
2.2 LA DISPERSIONE DI LUCE.....	15
2.2.1 <i>Emissione diretta di luce sopra l'orizzonte</i> .....	15
2.2.2 <i>Diffusione nel percorso tra la lampada e la superficie</i> .....	16
2.2.3 <i>Riflessione dall'area illuminata</i> .....	17
2.2.4 <i>Distribuzione spettrale della luce</i> .....	19

2.3 LA LUMINOSITÀ DEL CIELO NOTTURNO .....	23
2.3.1 <i>La luminosità naturale</i> .....	23
2.3.2 <i>La luminosità artificiale</i> .....	25
<b>3. GLI EFFETTI DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO SULLE OSSERVAZIONI ASTRONOMICHE .....</b>	<b>27</b>
3.1 IL DISTURBO ALLE OSSERVAZIONI A OCCHIO NUDO.....	27
3.1.1 <i>Effetti dell'inquinamento luminoso</i> .....	28
3.1.2 <i>Effetti dell'inquinamento ottico</i> .....	29
3.2 IL DISTURBO ALLE OSSERVAZIONI AL TELESCOPIO.....	29
3.2.1 <i>Limiti imposti dalla brillantezza del cielo alle osservazioni fotometriche</i> .....	30
3.2.2 <i>Osservazioni fotometriche di oggetti estesi</i> .....	31
3.2.3 <i>Osservazioni spettroscopiche</i> .....	31
<b>4. GLI EFFETTI DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO SUGLI ESSERI VIVENTI.....</b>	<b>33</b>
4.1 IMPATTO SULLA FLORA.....	33
4.2 IMPATTO SULLA FAUNA .....	34
4.3 IMPATTO SULL'UOMO .....	37
<b>5. LA MISURA DELL'INQUINAMENTO LUMINOSO .....</b>	<b>41</b>
5.1 LA MAGNITUDINE .....	41
5.2 L'ESTINZIONE ATMOSFERICA.....	43
5.3 I CCD (CHARGE COUPLED DEVICES).....	43
5.4 LE TECNICHE DI MISURA.....	48
5.4.1 <i>Misure fotometriche</i> .....	48
5.4.2 <i>Esempio di tecnica di misura della brillantezza del cielo notturno</i> .....	50
5.5 AUTOMAZIONE DELL'ELABORAZIONE DEI DATI .....	54
5.5.1 <i>Prima di andare in osservatorio</i> .....	55
5.5.2 <i>Le riprese</i> .....	56
5.5.3 <i>L'elaborazione dei dati</i> .....	58
5.6 CONCLUSIONI.....	66
<b>APPENDICE .....</b>	<b>67</b>

---

A.1 GRANDEZZE ILLUMINOTECNICHE.....	67
A.2 CCD DATASHEETS.....	75
A.3 COORDINATE CELESTI .....	79
A.4 IL FORMATO FTTS.....	82
A.5 LEGGE 27 MARZO 2000 – N. 17 DELLA REGIONE LOMBARDIA .....	83
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>95</b>



# Prefazione

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.

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 limitati nelle loro possibilità di osservazione, si è cominciato a sviluppare un concreto impegno nella lotta all'inquinamento luminoso.



# 1. L'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 dall'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. 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 costituirà sempre più uno spreco di risorse.



*La Terra di notte, fotografata da satellite.*

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 200 milioni di euro ogni anno sul territorio Italiano (secondo studi della Commissione Nazionale Inquinamento Luminoso - Unione Astrofili Italiani). 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 illuminotecnici 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: si può 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. 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**

Si definisce ora cosa si intende per inquinamento luminoso e per inquinamento ottico.

Per inquinamento luminoso in senso stretto si intende ogni forma di irradiazione di luce artificiale che si disperda al di fuori delle aree a cui essa è funzionalmente dedicata e, in particolar modo, se orientata al di sopra della linea dell'orizzonte. Di solito la causa è costituita dagli 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.

Per inquinamento ottico si intende quella luce, dispersa da una sorgente artificiale, che illumina direttamente un'area o un soggetto che non è utente dell'impianto e che quindi non è richiesto di illuminare. Il disturbo che ne consegue è legato al valore assoluto dell'intensità della luce che arriva dalla sorgente.

Il disturbo prodotto dall'inquinamento ottico è diverso dal concetto di abbagliamento. Quest'ultimo, infatti, 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 la sorgente. Il disturbo è allora 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.

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'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 degli 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 Alcune ragioni per evitare l'inquinamento luminoso***

Le ragioni per ridurre l'inquinamento luminoso sono numerose e valide. Sono raccolte qui, in un breve elenco, alcune sufficienti, da sole, a richiedere un generale impegno per la riduzione del problema.

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".
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.

## 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.

#### 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 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 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 del cielo. E alla luce inviata in cielo dalla superficie illuminata si aggiunge la luce dispersa nel cielo direttamente dalle sorgenti.

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

### **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 in apposite tabelle (norma UNI 10439:2001 – Requisiti illuminotecnici delle strade con traffico motorizzato).

### **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.

### **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, avendosi il massimo 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 alla verticale, altrimenti questa luce arriva negli occhi dell'automobilista che ne viene abbagliato. Occorre cercare un compromesso tra queste due opposte esigenze.

L'abbagliamento si distingue in fisiologico e psicologico. Il primo si quantifica come rapporto percentuale tra la differenza di luminosità della sorgente di abbagliamento e dello sfondo rispetto alla 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'Éclairage (CIE 1972, 1976) nelle sue raccomandazioni richiede che  $(\Delta L/L) \leq 0.05$  e  $G \geq 7$  nelle autostrade,  $(\Delta L/L) \leq 0.10$  e  $G \geq 6$  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.

### **Limitazione dell'inquinamento luminoso**

Gli apparecchi di illuminazione e gli impianti devono avere caratteristiche tali da ridurre il più possibile l'inquinamento luminoso, inteso come "ogni forma di irradiazione di luce artificiale che si disperda al di fuori delle aree a cui essa è funzionalmente dedicata e, in particolar modo, se orientata al di sopra della linea dell'orizzonte." (LR 17/00 – Regione Lombardia – Misure urgenti in tema di risparmio energetico ad uso di illuminazione esterna e di lotta all'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. 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.

L'illuminazione degli impianti sportivi è vincolata da precise esigenze di giocatori, spettatori, giudici, arbitri, sponsor, autorità di pubblica sicurezza, 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.

Prestazione e comfort visivi impongono inoltre che le lampade abbiano una buona resa cromatica così da consentire una buona riproduzione dei colori, sia per le esigenze di atleti e pubblico, sia in relazione alle riprese televisive a colori

---

(norma UNI 9316:1989 – Impianti sportivi – Illuminazione per le riprese televisive a colori - Prescrizioni).

Quindi non si possono 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. 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 alla disposizione dei corpi illuminanti. 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 che 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 alla 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  $30^\circ$  -  $40^\circ$  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.

### 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'illuminotecnico 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. La progettazione 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. Accade che monumenti illuminati in modo poco parsimonioso e poco commisurato alla necessità finiscono per restare al buio 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.

Si esaminano ora i tre fenomeni citati che costituiscono la sorgente della luminosità artificiale del cielo notturno.



*Bergamo di notte dal colle di S. Vigilio: in primo piano Città Alta, sullo sfondo la città bassa e a destra l'aeroporto di Orio al Serio. (CieloBuio, Coordinamento per la protezione del Cielo Notturno)*

### 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 si distinguono 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 strutturato 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 legati alla durata dell'armatura, alla conservazione delle caratteristiche fotometriche nel tempo, alla sicurezza, alla facilità di installazione e manutenzione, e, infine, all'estetica.

Sono diversi i motivi per cui ci può essere emissione diretta di luce ad angoli maggiori di zero rispetto all'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.

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 è in genere molto elevato. Fanno naturalmente eccezione le zone ove sono in vigore norme contro la dispersione di luce e l'inquinamento luminoso.

### 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. Se una lampada illumina dall'alto in basso con un fascio non molto inclinato rispetto alla 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. 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 alla direzione di incidenza 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). 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 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 esempio 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  $\beta$  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. 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 al 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 suggeriti dalla normativa in Italia sono quelli della norma UNI 10439 (Luglio 2001). 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.



*L'Italia di notte, vista 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 mette in evidenza le aree del nostro Paese più illuminate.*

*(Pierantonio Cinzano, Inquinamento luminoso e protezione del cielo notturno, IVSLA - 1997)*

#### 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. Si esaminano 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:

$$P = RI^2 = \frac{dQ}{dt}$$

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 K) ed è continua in tutto lo spettro visibile. La lunghezza d'onda del massimo dell'intensità dipende dalla temperatura. Il colore delle lampade ad incandescenza è in genere bianco caldo. La loro efficienza è assai modesta: in genere qualche decina di lumen/watt. 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 più avanti, sono più efficienti e di maggiore durata. Ove sono in vigore

norme antinquinamento 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 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. Queste lampade producono inquinamento luminoso dominante nella regione blu dello spettro mentre nel rosso il loro contributo è generalmente piccolo rispetto a quello delle lampade al sodio. 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 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.

### **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 °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 perciò è limitata esclusivamente alle due bande di emissione (doppietto) del sodio a 5890-5896 Å, che cadono nella zona ove l'occhio umano raggiunge la massima sensibilità, ed ai due doppietti a 5683-5688 Å ed 6154-6161 Å. Per questo motivo queste lampade hanno la maggiore efficienza in assoluto. Queste lampade, arrivano ad efficienze dell'ordine di 200 lm/W. 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 generalmente 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

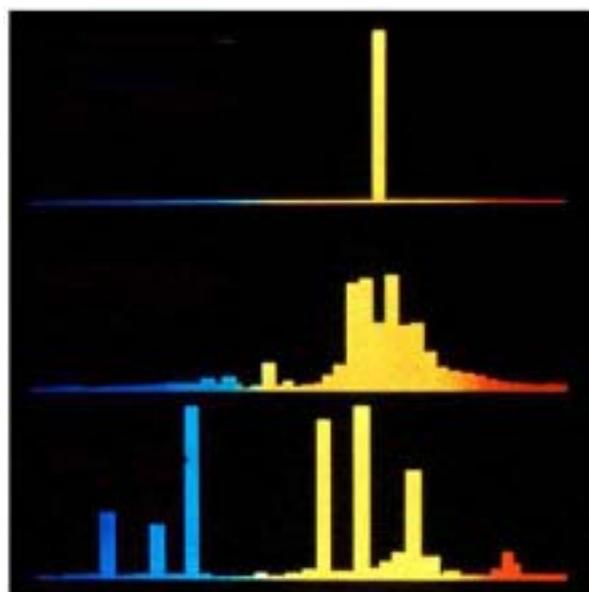
i bastoncini, cambia la sua curva di sensibilità spettrale e il doppietto del sodio a 5890-5896 Å viene a trovarsi non più al centro ma ai margini di tale curva, la luminosità del cielo prodotta da queste lampade disturba poco anche l'osservazione astronomica visuale.

### **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 °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 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 sia effettivamente necessaria. Esistono diversi tipi commerciali di lampade al sodio ad alta pressione 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 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 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.

### Spettri di lampade stradali a confronto



Lampada al sodio a bassa pressione

Lampada al sodio ad alta pressione

Lampada a vapori di mercurio

Marco Beretta, 1998

(CieloBuio, Coordinamento per la protezione del Cielo Notturno)

## 2.3 La luminosità del cielo notturno

### 2.3.1 La luminosità naturale

Il cielo notturno non è completamente buio. Esso ha una sua luminosità naturale dovuta all'effetto globale di un insieme di diverse componenti:

#### 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 nelle direzioni dei poli galattici, ad un massimo 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.

### **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.

### **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 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

### **Airglow**

Una importante sorgente della luminosità del cielo notturno è chiamata "night airglow" o "nightglow". Si tratta di un bagliore diffuso, un costante involuppo 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 che eccita gli ioni durante il giorno, e quindi dalla fase del ciclo di attività solare. Essendo prodotto nell'alta atmosfera il contributo dell'airglow alla brillantezza del cielo notturno cresce dallo zenit all'orizzonte per effetto dell'aumento dello spessore della massa d'aria attraversata dalla linea di vista. 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.

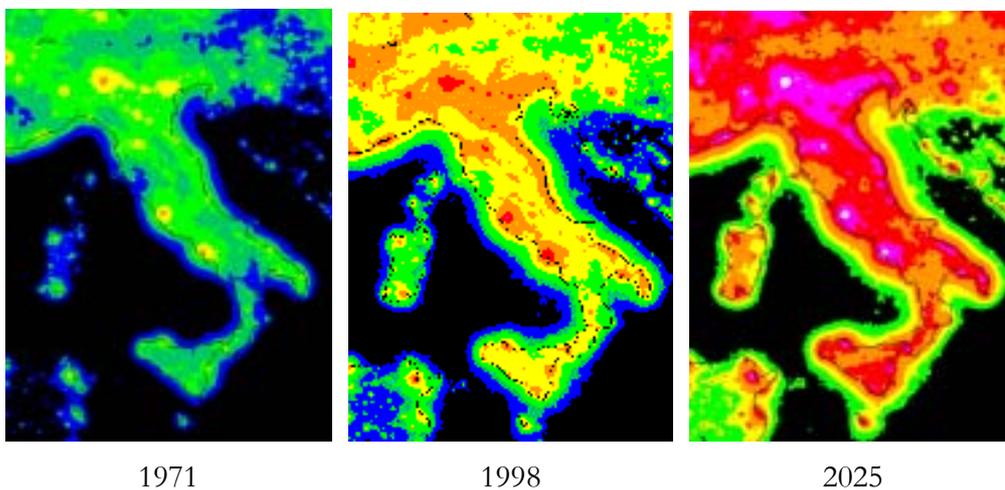
### **Aurore**

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.

#### 2.3.2 La luminosità artificiale

La luminosità del cielo dovuta all'illuminazione artificiale è la luce proveniente da una unità di area angolare del cielo 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 proviene originariamente dalla stessa sorgente ma è stata già diffusa più volte.

L'aumento della luminosità artificiale è legato all'aumento della popolazione e all'espansione dei centri abitati. Nelle figure seguenti la situazione dell'Italia negli anni 1971 e 1998 e la previsione per il 2025.



*(CieloBuiro, Coordinamento per la protezione del Cielo Notturno)*

## 3. Gli effetti dell'inquinamento luminoso sulle osservazioni astronomiche

### ***3.1 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, 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.

### 3.1.1 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. Per una luminosità del cielo corrispondente alla luminosità naturale è possibile vedere ad occhio nudo le stelle con magnitudine fino a 6 - 6.5. La più alta magnitudine osservabile prende il nome di magnitudine limite. Quando il cielo limpido è illuminato dalla luna con età di 10 giorni e al meridiano, si vedono al massimo stelle di magnitudine 4.2 circa. Naturalmente la magnitudine limite va corretta per il fenomeno dell'estinzione atmosferica (a proposito si veda il paragrafo 5.2). 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.

In presenza di inquinamento luminoso il numero di stelle visibili scende facilmente a percentuali sotto il 10%:

Brillanza [mag/arcsec <sup>2</sup> ]	Magnitudine Limite	% Stelle Visibili		Numero Stelle sopra i 30°
7.62	0.0	0.02	0.03	
8.85	1.0	0.1	0.2	3
10.23	2.0	0.5	0.8	10
12.03	3.0	1.7	3	36
15.71	4.0	6.3	11	130
18.71	4.5	11	19	230
19.35	5.0	19.5	33.9	400
20.10	5.5	33.1	57.5	690
20.88	6.0	57.5	100	1200
21.80	6.5	100		2100

L'aspetto della Via Lattea, un imponente spettacolo a cui ormai non siamo più abituati, dipende molto dalla luminosità del cielo.

### 3.1.2 Effetti dell'inquinamento ottico

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 entro cui sono immersi, spesso completamente occultati, gli oggetti di debole luminosità che si vorrebbe osservare. La luminosità superficiale (apparente) prodotta dalla luce diffusa nell'occhio umano 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. Questo significa che da una strada o da un piazzale illuminato 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.

## ***3.2 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 rappresentata dalla loro emissione elettromagnetica. 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 del New Technology Telescope dell'European Southern Observatory (ESO), ai

$2 \cdot 10^6 \text{ cm}^2$  di apertura equivalente del Very Large Telescope dell'ESO. I telescopi classici hanno aree nell'intervallo  $7.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$  ( $\varnothing$  1m) -  $7.1 \cdot 10^4 \text{ cm}^2$  ( $\varnothing$  3m). I telescopi degli astrofili in Italia hanno superfici di raccolta tra i  $3.1 \cdot 10^2 \text{ cm}^2$  ( $\varnothing$  20cm) -  $5.0 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$  ( $\varnothing$  80cm). Per confronto, l'area di raccolta dell'occhio, quando la pupilla è alla sua massima estensione ( $\varnothing$  8mm), 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. 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.

### 3.2.1 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 zenit arrivano in un  $\text{cm}^2$  a livello del mare in media circa 80 fotoni ogni secondo per ogni dieci angstrom di larghezza della banda in cui si osserva (nella zona attorno ai  $5500 \text{ \AA}$ ). Se si raccogliessero tutti i fotoni che arrivano in un  $\text{cm}^2$  la cui lunghezza d'onda sia compresa entro  $850 \text{ \AA}$  dalla lunghezza d'onda centrale della banda fotometrica  $V$  (praticamente tutti quelli che cadono entro la banda  $V$ ), si otterrebbero circa 13600 fotoni per secondo. Da una stella di magnitudine

$V = 22$ , invece, arriva su un  $\text{cm}^2$  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 fornisce sul piano focale dello stesso telescopio circa 13 fotoni 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 copra una zona di cielo di un secondo d'arco quadrato, allora soltanto circa il 57% dei fotoni ricevuti appartiene alla stella. Questo valore diminuisce notevolmente all'aumentare della brillantezza del cielo.

### 3.2.2 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, costante è perciò anche il rapporto tra il numero di fotoni che arriva dall'oggetto e dal fondo cielo. 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.

### 3.2.3 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-cielo. Tuttavia, anche qui, se l'emissione del fondo-cielo 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. Gli effetti dell'inquinamento luminoso sugli esseri viventi

### ***4.1 Impatto sulla flora***

L'impatto che le fonti luminose possono avere sulla vegetazione non è stato ancora valutato anche se si conosce il fondamentale ruolo che questa forma di energia gioca per l'esistenza di questi esseri viventi. Le prime ricerche che hanno evidenziato il fenomeno del fotoperiodismo (il succedersi di processi fisiologici, ecologici e comportamentali in relazione alla durata delle ore luce) sono state realizzate proprio utilizzando dei vegetali. Un prolungamento artificiale del giorno, meccanismo frequentemente utilizzato per le coltivazioni produttive in serra, crea sicuramente profonde alterazioni all'intera biologia dei vegetali. In particolare alcuni studi hanno dimostrato una riduzione dell'efficienza fotosintetica delle foglie esposte di notte alla luce delle lampade a vapori di mercurio.

## ***4.2 Impatto sulla fauna***

In termini tecnici l'essere attratto da una fonte luminosa viene chiamato fototropismo positivo. Tutti noi, durante qualche serata estiva, abbiamo avuto occasione di osservare una falena, entrata dalla finestra lasciata aperta, svolazzare impazzita intorno alla lampada che illumina la stanza per poi cadere esausta sul pavimento. Si pensi all'impatto che migliaia di lampioni e di insegne luminose possono provocare sulle popolazioni di lepidotteri notturni.

Nelle vicinanze di Matera vi è una lampada a vapori di mercurio da 2000 W, utilizzata per l'illuminazione di una statua, che purtroppo è divenuta tristemente famosa. Nel 1992 è stato calcolato dall'entomologo tedesco Axel Hausmann che ogni notte, da maggio a settembre, circa 5000 farfalle notturne vi vadano a morire. L'intero sistema di illuminazione della zona attrae circa 5 milioni di individui l'anno.

Un altro aneddoto famoso è ciò che accadde l'8 maggio 1946 a Parigi quando, dopo sei anni di oscuramento a causa della guerra, fu illuminato l'Arc de Triomphe con dei riflettori militari per festeggiare il primo anniversario della Vittoria. Milioni di farfalle notturne coprirono in pochi minuti il monumento ma, ripristinata l'illuminazione pubblica, nel giro di pochi mesi non fu più possibile osservare neppure una farfalla.

Ogni anno il nostro paese è sorvolato da una moltitudine di farfalle notturne migratrici, tra cui alcune Sfingi che sono nate in Africa; sulla loro rotta trovano una serie ininterrotta di luci pronte ad ammaliarle e a condurle a morte sicura.

Quando nel 1880 Edison mise a punto la sua prima lampada a incandescenza e quando l'illuminazione pubblica a gas lasciò il posto a quella elettrica, per molte specie iniziò un rapido declino.

Non soltanto i lepidotteri, ma anche coleotteri, ditteri, efemotteri e una miriade di altri insetti utilizzano la luna e le stelle fisse come riferimento per orientarsi nei loro voli notturni che conseguentemente vengono alterati da qualsiasi fonte luminosa artificiale. L'intensità della luce lunare, quando questa è piena e si trova a 90° è di 0.371 lux, quella delle stelle varia tra 0.0108 e 0.0003 lux, quella di

qualsiasi lampadina di bassa potenza supera ampiamente questi valori. Le lampade stradali che attirano maggiormente gli insetti sono quelle che emettono un'alta percentuale di radiazione ultravioletta; in assoluto quelle più pericolose sono quelle a vapori di mercurio, ma anche quelle al sodio, ad alta o bassa pressione, provocano danni alle comunità animali.

Anche tra i vertebrati l'inquinamento luminoso provoca profonde alterazioni dei cicli vitali. Sono purtroppo famosi i casi di Tartarughe marine appena uscite dall'uovo che, scambiando le luci delle costruzioni edificate alle spalle della spiaggia per il riflesso delle stelle sulla superficie del mare, invece di dirigersi nella direzione di questo, andarono a morire, disseccate, una volta sorto il sole, tra le dune dell'entroterra. L'aumento del turismo sulle coste greche e turche, dove ancora numerose vanno a riprodursi le tartarughe marine, provoca danni anche di notte quando i bagnanti hanno abbandonato le spiagge e si sono ritirati negli alberghi, nei ristoranti e nelle villette che, sfavillanti di luci, sono sorti nell'immediato entroterra.

E' da tempo noto l'effetto attrattivo che la luce effettua nei confronti dei pesci e di altri organismi marini. La pesca con le lampare era una pratica molto diffusa nel nostro Paese fino a poco tempo fa. Che effetto avranno sulle comunità di organismi marini le centinaia di migliaia di luci che dalle coste e dalle imbarcazioni rischiarano le acque dei nostri mari?

Ancora in buona parte sconosciuti e per ora difficilmente quantificabili, sono i danni che l'inquinamento luminoso provoca agli uccelli. In questa classe di vertebrati esiste una particolare sensibilità nei confronti della luce. La ghiandola pineale, situata nel cervello e particolarmente sviluppata, riesce a percepire la presenza di luce che penetra attraverso le pareti del cranio anche se gli occhi sono stati bendati. Non a caso questa ghiandola è stata chiamata fin dall'antichità "terzo occhio".

E' noto che molte specie di migratori notturni, generalmente passeriformi che superano difficilmente i 20 grammi di peso, utilizzano la luna e le stelle fisse come riferimento per mantenere la rotta durante i loro voli. Quando queste sono superate in intensità da fonti luminose artificiali il volo di migrazione, che permette solamente piccolissimi errori di rotta, può essere radicalmente deviato. Il

rischio di trovarsi in alto mare o in pieno deserto senza carburante, il grasso sottocutaneo che l'uccello deve accumulare ad ogni sosta, diviene così estremamente probabile. Da recenti studi, che hanno evidenziato le basi genetiche della migrazione, parrebbe risultare che anche le aree di sosta e di "rifornimento" siano impresse nel patrimonio cromosomico degli uccelli; se così fosse la possibilità di adattarsi ad un "atterraggio di fortuna" nell'eventualità di trovarsi fuori rotta, diverrebbe poco praticabile.

Nell'Oasi di Palo si cercò alcuni anni fa di svolgere una ricerca sulle tecniche di orientamento degli uccelli migratori utilizzando particolari gabbie in cui, sugli individui ospitati per breve tempo, era possibile raccogliere dati relativi alla direzione di volo. A causa della vicinanza con Roma e all'intenso chiarore che da questa si diffondeva nel cielo, gli esperimenti furono tutti invalidati. Gli uccelli che in primavera avrebbero dovuto avere una direzione di volo migratorio verso nord – est si dirigevano invariabilmente a sud – est, appunto in direzione della luce di Roma.

Non esistono dati circostanziati ma sicuramente l'impatto nei confronti delle popolazioni di migratori, sommandosi agli altri elementi di alterazione ambientale, è estremamente deleterio e teoricamente potrebbe portare alla estinzione di intere popolazioni.

In letteratura sono comunque noti i danni che l'attrazione per la luce dei fari, specialmente nelle notti di nebbia, possono causare all'avifauna. Per risolvere il problema, o se non altro per affievolirlo, su molti fari posti lungo le rotte migratorie del mar del nord, sono stati posti dei posatoi, illuminati da una serie di piccole lampade, che non disturbano il normale funzionamento del faro. Prima dell'utilizzo di tali dispositivi si potevano rinvenire ogni mattina centinaia di uccelli morti ai piedi del faro con addirittura punte di 500 beccacce in una notte.

Esistono anche casi in cui una specie animale può trarre vantaggio per fini alimentari dalla presenza di fonti di illuminazione; si tratta comunque sempre di fenomeni di alterazione della biologia di una specie che vanno a discapito della specie preda. Anche all'interno di grandi città come Roma possono essere osservate varie specie di pipistrelli che, compiendo veloci incursioni nel fascio luminoso dei lampioni stradali, catturano gli insetti che sono stati attratti dalla

luce. Si conoscono addirittura casi in cui specie prettamente diurne come le rondini e i balestrucci hanno cambiato le loro abitudini per sfruttare questa insolita fonte di cibo. Ancora più eclatante fu il caso riscontrato alla periferia di Cagliari di un falco pellegrino che, appollaiato sui tralicci di una raffineria di petrolio, attendeva gli uccelli migratori notturni che venivano attratti da un potentissimo faro che illuminava a giorno gli impianti per motivi di sicurezza.

### ***4.3 Impatto sull'uomo***

L'inquinamento luminoso ha molteplici effetti negativi sull'uomo e sul mondo che lo circonda, di tipo:

**a) culturale** - la cultura popolare del cielo è ormai ridotta ad eventi particolari di tipo astronautico; perdendo il contatto diretto con il cielo l'uomo si è impoverito rispetto alle culture millenarie degli antichi popoli orientali; la differenza è esattamente la metà: gli antichi vedevano la terra ed il cielo, noi guardiamo solo in basso. A titolo di esempio si pensi che gran parte degli scolari vedono le costellazioni celesti solo sui libri di scuola, e gli abitanti delle grandi città non hanno mai visto una stella. Si pensi che la notte successiva all'ultimo grande terremoto che colpì la città di Los Angeles, una miriade di chiamate intasò i centralini telefonici degli istituti scientifici della California per sapere che cosa fosse accaduto in cielo. In realtà si trattava solo del fatto che la momentanea sospensione di energia elettrica in molte zone della città e la parziale distruzione di molti impianti di illuminazione avevano reso visibile ai cittadini quel cielo stellato che i più non avevano mai visto;



*La cometa Hale–Bopp, visibile dall'Italia nel 1997.*

*Per consentirne l'osservazione molte Amministrazioni Comunali hanno spento le luci cittadine.*

*Tornerà a "farci" visita nel 4518.*

**b) artistico** - passeggiando nei centri storici delle città o nelle loro zone artistiche si noterà come l'uomo con una illuminazione cervellotica riesca a deturpare tanta bellezza, studiata e realizzata con abnegazione dagli artisti; luci e poi luci, fari che illuminano a giorno le piazze. In molte città, negli ultimi anni, sono stati installati degli orrendi impianti di illuminazione, spesso rivolti verso il cielo, deturpando così i già degradati centri storici. L'illuminazione delle zone artistiche e dei centri storici deve essere mirata e deve integrarsi con l'ambiente circostante in modo che le sorgenti illuminanti diffondano i raggi luminosi in maniera soffusa o come si suol dire "a raso" dall'alto verso il basso, così da mettere in risalto le bellezze dei monumenti;

**c) scientifico** - dell'effetto scientifico già si è accennato, si pensi che anche a causa l'inquinamento luminoso, gli astronomi sono stati costretti ad inviare un telescopio in orbita attorno alla Terra per scrutare i confini dell'universo: con la

spesa sostenuta si sarebbero potuti costruire almeno 100 osservatori astronomici sul nostro pianeta. Per non parlare del danno ricevuto dagli astrofili (amanti del cielo o astronomi dilettanti), che per poter osservare il cielo sono spesso costretti a spostarsi di molti chilometri;

**d) psicologico** - nell'uomo i riflessi sono metabolici e psichici; la troppa luce o la sua diffusione in ore notturne destinate al riposo provoca "disturbi della personalità"; quante persone di notte, nella propria casa, per riposare sono costrette a chiudere completamente le serrande? Oltre che dal rumore e dall'inquinamento atmosferico, l'uomo deve difendersi dalla luce;

**e) risparmio energetico** - una razionalizzazione degli impianti di illuminazione, una ottimale scelta del tipo di lampade (ad alta efficienza e basso consumo), la schermatura delle lampade, l'illuminazione a raso, porterebbero ad una migliore qualità della vita e ad un notevole risparmio energetico. Riferendoci alla nostra nazione citiamo ad esempio: l'illuminazione stradale, le torri luminose illuminanti gli snodi stradali-ferroviari-portuali, gli impianti sportivi, gli impianti industriali, le insegne luminose, le giostrine luminose con raggi che arrivano ad altezze di decine di chilometri, ecc. Sarebbe bene che le Amministrazioni regolamentassero l'emissione luminosa ed i proprietari o i gestori delle fonti sopraccitate, siano essi pubblici o privati, avviassero uno studio di dettaglio dei loro impianti luminosi, correggendo gli errori di progettazione. Si potrebbe così risparmiare danaro migliorando la qualità della vita nell'ambiente circostante;

**f) economico** - gli impianti di illuminazione debbono essere installati laddove sono veramente indispensabili e con i dovuti accorgimenti, magari riducendone l'intensità quando non si ha bisogno della piena potenza, in modo da risparmiare tra i 200 e 300 milioni di euro all'anno per la sola Italia. Inoltre, se a ciò si aggiunge che gli osservatori astronomici nazionali costruiti con denaro pubblico non possono operare al massimo delle prestazioni, allora il danno economico sale alle "stelle".



## 5. La misura dell'inquinamento luminoso

### ***5.1 La magnitudine***

Gli astronomi che osservano nella banda ottica usano quasi sempre il sistema delle magnitudini per indicare le misurazioni delle luminosità osservate. Le radici storiche del sistema delle magnitudini risalgono molto addietro nel tempo, sin dal primo catalogo stellare compilato dallo studioso greco Ipparco, circa 2200 anni fa. Questi suddivise le stelle in sei classi di luminosità, e chiamò le stelle più luminose (ad occhio nudo, ovviamente), di prima magnitudine, mentre le più deboli, appena percepibili, di sesta magnitudine. Molto più tardi, quando gli astronomi furono in grado di effettuare misurazioni più accurate, si resero conto che la scala di Ipparco era di tipo logaritmico. Ciascun gradino di magnitudine corrispondeva ad un rapporto o fattore di luminosità fisso. Le stelle di prima magnitudine erano 2,5 volte più brillanti di quelle di seconda magnitudine, quelle di seconda erano 2,5 volte più luminose di quelle di terza, e così via. Basandosi sul sistema di magnitudini di Ipparco, ma utilizzando moderni sistemi di misura, gli astronomi hanno deciso di definire un sistema in cui 5 magnitudini corrispondono esattamente ad un rapporto di 100. Perciò, ogni magnitudine risulta esattamente  $100^{1/5}$  volte (circa 2.512) più luminosa della successiva.

Si può senz'altro pensare alle magnitudini come ad un modo rapido per descrivere un rapporto di grandezze. Prendiamo due stelle, con flussi luminosi  $f_1$  ed  $f_2$ ; si può definire la differenza di magnitudine nel modo seguente:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10} \left( \frac{f_1}{f_2} \right)$$

Se il rapporto è uguale a 100 la differenza di magnitudine equivale a 5. L'equazione sopra è quella fondamentale per definire e trattare le magnitudini in astronomia.

L'uso più comune della magnitudine è quello per esprimere la luminosità apparente delle stelle. Per ottenere un valore preciso per la magnitudine di una stella (invece della differenza di magnitudine tra due stelle), si deve stabilire un punto di partenza, o un punto di zero per il sistema di magnitudini. Per rendere tutto alquanto più semplice si sceglie la stella Vega e le si attribuisce un valore di magnitudine 0.00. Allora, la magnitudine di ogni altra stella sarà, di conseguenza, correlata al rapporto tra i flussi luminosi di tale stella e di Vega nel modo che segue:

$$m_1 = -2.5 \log_{10} \left( \frac{f_1}{f_{\text{Vega}}} \right)$$

La magnitudine di Vega non compare perché è stata impostata a 0.00. Queste magnitudini vengono dette magnitudini apparenti in quanto sono relative al flusso della stella o alla sua luminosità apparente. La magnitudine assoluta è relativa alla luminosità effettiva di un oggetto. Per determinare la magnitudine assoluta, si deve misurare la magnitudine apparente, ed anche conoscere la distanza ed il valore dell'attenuazione introdotta dalla presenza di eventuali polveri oscuranti interposte tra l'oggetto e l'osservatore.

## ***5.2 L'estinzione atmosferica***

Si può pensare all'estinzione atmosferica come ad uno strato assorbente. Il raggio di luce che da qualche stella arriva a colpire lo specchio del telescopio, appena al di fuori dell'atmosfera ha un certo flusso incidente  $f_{inc}$ . Il flusso osservato dal telescopio ( $f_{oss}$ ) di questo raggio risulta inferiore a causa dell'assorbimento e della diffusione della luce operati dall'atmosfera. Ovviamente, se il telescopio è puntato allo zenit il percorso della luce attraverso l'atmosfera è il più breve. Ad un angolo  $\theta$  dallo zenit (chiamato distanza zenitale) l'ammontare dell'aria attraverso cui si osserva è dato dalla secante dell'angolo  $\theta$ . Quando si punta lo zenit, si dice che si sta osservando attraverso "1 massa d'aria". Ad altri angoli allo zenit, si guarda attraverso "sec( $\theta$ ) masse d'aria". In senso stretto la formula della secante  $\theta$  si applica solo nell'ipotesi di uno strato di atmosfera infinitamente piatto. Poiché l'atmosfera è curva (a causa della curvatura terrestre), la massa d'aria non è esattamente secante di  $\theta$ , ma la differenza tra la reale massa d'aria e la secante di  $\theta$  è significativa solo vicino all'orizzonte (dove  $\theta$  si avvicina a  $90^\circ$ ). Per distanze zenitali maggiori di  $70^\circ$  è bene utilizzare la formula più accurata:

$$\text{masse d'aria} = \sec \vartheta (1 - 0.0012 \tan^2 \vartheta)$$

## ***5.3 I CCD (Charge Coupled Devices)***

Un CCD (Dispositivo ad accoppiamento di carica) è un chip di silicio sensibile alla luce elettricamente diviso in un gran numero di parti indipendenti chiamati pixel (contrazione di "picture element"). I CCD oggi in commercio hanno una superficie sensibile composta da una matrice da 512 x 512 (262.144) fino a 4096 x 4096 (16.777.216) singoli pixel, e la cui dimensione lineare varia da 0.5 fino a 10 cm (la dimensione tipica di ciascun pixel va dai 10 ai 30 micron di lato). In campo astronomico i CCD sono utilizzati per misurare quanta luce cade su ciascun pixel. Il risultato è un'immagine digitale, che consiste di una matrice di

numeri, uno per pixel, in cui ciascun numero è legato direttamente alla quantità di luce che incide su quel pixel. Naturalmente, una delle comodità del CCD è che l'immagine, che si ottiene in forma digitale, è rapidamente manipolata, misurata e analizzata al computer. Parecchi concetti sono alla base dell'uso dei CCD come rilevatori di bassi livelli di illuminazione in astronomia. Quanto segue dovrebbe dare sufficienti informazioni che permettano di comprendere le ragioni dei vari passi di riduzione dei dati al computer, cosa che affronteremo successivamente.

### **Efficienza quantica (QE)**

Un CCD rileva singoli fotoni, ma perfino il migliore dei CCD non rivelerà ogni singolo fotone che andrà a colpirlo. La frazione di fotoni incidenti su di un CCD e che sono effettivamente rilevati dal CCD è chiamata efficienza quantica (QE) ed è di solito espressa in forma percentuale. Il QE è una funzione della lunghezza d'onda.

### **Conteggi**

I numeri letti dal CCD non corrispondono al numero effettivo dei fotoni che incidono su ciascun pixel. Una parte è uno scostamento (offset) chiamato "bias" e una parte può essere dovuta alla "dark current" (corrente di buio). Dopo aver sottratto queste componenti il segnale è relativo al numero di elettroni liberati dai fotoni su ciascun pixel. Solo una frazione QE di fotoni generano elettroni, cosicché il numero di elettroni è: (numero di fotoni) x QE. Per ragioni tecniche, i numeri che il CCD genera sono legati al numero di elettroni e ad un numero frazionario chiamato guadagno (normalmente è un numero piccolo maggiore di 1). Il numero di fotoni che incidono su un pixel è legato al numero in uscita (chiamato anche DN, data number) come segue:

$$\text{Fotoni} = \frac{\text{numero di } e^-}{\text{QE}} = \frac{\text{guadagno} \cdot \text{DN}}{\text{QE}}$$

dove il numero di elettroni è solo quello che proviene dai fotoni, cioè il bias e il contributo del dark sono stati sottratti. Nel fare la fotometria astronomica, normalmente non viene calcolato il numero effettivo di fotoni per pixel poiché le misurazioni vengono effettuate rapportando il DN dell'oggetto in esame con il DN di stelle (chiamate stelle standard fotometriche) di cui si conosce il flusso.

In astronomia il numero in uscita, associato al singolo pixel, viene usualmente chiamato “numero di conteggi” del pixel, o semplicemente “conteggi”. Nel seguito il termine verrà utilizzato con questo significato.

### **Tempo di integrazione**

Il CCD funziona sul principio dell'integrazione. Il segnale (gli elettroni liberati dal silicio quando ciascun pixel viene colpito dai fotoni) si accumula con il tempo. Il tempo di integrazione (o tempo di posa) è controllato da un otturatore meccanico (come in una macchina fotografica) o elettricamente (cambiando la tensione nel CCD).

Per maggiori dettagli sul funzionamento del CCD si rimanda ai datasheets in appendice.

### **Rumore di lettura**

Read noise. Dopo un'integrazione (posa), il CCD deve essere “letto” per trovare il valore del segnale in ciascun pixel; poiché il segnale può essere debole (pochi elettroni per pixel) questo passo coinvolge amplificatori molto complessi che sono parte del CCD stesso. Sfortunatamente, ma inevitabilmente, il processo stesso di lettura genera rumore elettronico. Il rumore medio per pixel è chiamato rumore di lettura. I CCD moderni hanno tipicamente un rumore di lettura da 5 a 20 elettroni per pixel per lettura (il rumore di lettura è il medesimo sia con esposizioni di 0.1 s che di 3 ore).

**Bias frame**

Fotogramma di bias. Se si legge il CCD senza fare alcuna integrazione (in altre parole un'esposizione con zero secondi di posa), ci sarà un segnale detto di bias. Questo segnale deve essere misurato (dipende ad esempio dalla temperatura del CCD) e sottratto dalle immagini che vengono registrate. Poiché c'è rumore di lettura per qualsiasi lettura del CCD, perfino i bias frame hanno un rumore di lettura associato con essi. Per ridurre al minimo il rumore quando si sottrae il bias, si devono riprendere molti bias frame e quindi combinarli tra loro per abbattere il rumore (se il rumore è stazionario e a valore medio nullo, la media lo abbatte).

**Dark frame**

Fotogramma di buio. Eseguendo un'integrazione del CCD per un certo tempo senza che la luce lo colpisca, ci sarà un segnale (più precisamente un rumore associato a quel segnale) causato dall'eccitazione termica degli elettroni nel CCD. Questo è chiamato "segnale di buio" (o semplicemente "dark"). Il dark è molto sensibile alla temperatura (minore temperatura = minore dark), per questo motivo i CCD utilizzati in astronomia sono raffreddati (spesso alla temperatura dell'azoto liquido). Anche raffreddati, alcuni CCD hanno una corrente di buio non trascurabile. Questa infatti deve essere misurata e sottratta dall'immagine. Come per il bias, è consigliabile prendere molti dark e combinarli tra loro per abbattere il rumore.

**Flat frame**

Fotogramma piatto. Tutti i CCD hanno delle disuniformità. In altre parole, se il CCD viene illuminato in maniera uniforme, non si genera lo stesso segnale in ogni pixel. Disuniformità a piccola scala sono causate da una leggera differenza nelle dimensioni di ciascun pixel. Quelle a maggior scala sono causate da piccole variazioni dello spessore del silicio lungo il chip, o da una non uniforme illuminazione causata dalle ottiche del telescopio. Queste possono arrivare fino al

10% sull'intero chip. Per correggere queste variazioni è necessario esporre il CCD ad una luce uniforme e vedere come si presenta il segnale (l'immagine). Il fotogramma che si ottiene, chiamato flat, può essere quindi utilizzato per correggere queste disuniformità dividendo l'immagine per il flat.

L'insieme delle operazioni svolte per "pulire" l'immagine acquisita prende il nome di "riduzione" dell'immagine.

Riassumendo, le fasi essenziali nel riprendere e ridurre un'immagine CCD presa al telescopio sono le seguenti:

- si prende un certo numero di bias frame, si fa la media di questi fotogrammi per ottenere un singolo bias con basso rumore;
- si prende un certo numero di dark frame al buio, con tempo di integrazione finito uguale al tempo di integrazione che verrà usato per gli oggetti. Se la corrente di buio non è trascurabile, i dark devono essere combinati tra loro per ottenere un singolo dark con basso rumore (ovviamente dopo aver sottratto il bias);
- si prende un flat frame. I flat possono essere presi puntando il telescopio sul cielo del crepuscolo o all'interno della cupola. Sia i bias che i dark (nel caso in cui la corrente di buio non sia trascurabile nell'intervallo di tempo della posa del flat) devono essere sottratti dal flat. Il livello del segnale nel flat è arbitrario: tutto ciò di cui si ha bisogno è l'informazione delle differenze di segnale attraverso il chip. Quindi si normalizza il flat in modo tale che il segnale medio in ciascun pixel sia 1.00 (ciò si ottiene semplicemente dividendo per il segnale medio);
- si sottraggono il bias a basso rumore e il dark a basso rumore dal fotogramma dell'oggetto, quindi si divide per il flat normalizzato.

In sintesi:

$$\text{immagine ridotta} = \frac{\text{immagine grezza} - \text{bias} - \text{dark}}{\text{flat normalizzato}}$$

Spesso, i dark (di durata uguale a quella dell'oggetto) sono ripresi sia prima che dopo ciascun oggetto. Questi sono quindi mediati e sottratti dal fotogramma dati. In questo caso i dark sono effettivamente dark + bias e quindi non è necessario riprendere un bias separato. Il problema con questo tipo di procedura è che è inefficiente per il tempo d'uso del telescopio; infatti molto tempo è dedicato alla ripresa di dark durante la notte. L'immagine ridotta si ottiene da:

$$\text{immagine ridotta} = \frac{\text{immagine grezza} - \frac{[(\text{dark} + \text{bias})_{\text{prima}} + (\text{dark} + \text{bias})_{\text{dopo}}]}{2}}{\text{flat normalizzato}}$$

## ***5.4 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 e 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. Questo è inutile per siti ove la brillantezza naturale è trascurabile rispetto a quella artificiale.

### **5.4.1 Misure fotometriche**

La misura della brillantezza del cielo è un'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 e dal sistema di filtri che contribuiscono a determinare la curva di sensibilità del sistema. 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 messa a punto 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, occorre 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 ( $m_{\text{std}}$ ) si determina così la magnitudine sopra l'atmosfera dell'oggetto in esame ( $m_*$ ):

$$m_* = m_{\text{std}} - 2.5 \log_{10} \frac{n_* - n_{\text{sky}}}{n_{\text{std}} - n_{\text{sky}}}$$

Con  $n_{\text{std}}$  si indicano i conteggi della stella standard, con  $n_*$  i conteggi dell'oggetto in esame e con  $n_{\text{sky}}$  quelli del fondo cielo.

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”. Si può 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 bisogna 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 “notte fotometriche” ossia in notti le cui caratteristiche siano costanti per la gran parte della notte oppure effettuare la misura dell’estinzione ripetutamente. La misura dell’estinzione è una operazione delicata che richiede una serie di operazioni che richiedono tempo. Per quanto riguarda la scelta dei punti nel cielo ove fare le misure, in genere i più importanti sono lo zenit, e i punti collocati ad un’altezza di  $45^\circ$  sull’orizzonte. Sono altresì interessanti le zone che si trovano basse sull’orizzonte perché mettono in evidenza le principali sorgenti dell’inquinamento luminoso. Un buono schema di mappatura del cielo, ad esempio, prevede misure in 21 punti: lo zenit, 8 punti situati a  $45^\circ$  di altezza (separati da  $45^\circ$  di azimut) e 12 punti a  $20^\circ$  di altezza (separati da  $30^\circ$  di azimut). È necessario accompagnare 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 visto, dipende dalla zona di cielo che si sta osservando.

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

Qui di seguito è riportata la procedura da seguire per misurare la brillantezza del cielo suggerita nel progetto “Misurare la brillantezza del cielo con il CCD” della International Dark-Sky Association.

---

Per la misura si utilizza un rivelatore CCD montato su un telescopio, attrezzatura 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 meteorologiche 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 zenit, 8 zone a 45 gradi di altezza e distanti tra loro 45 gradi in azimut, e infine 12 zone a 20 gradi di altezza distanti tra loro 30 gradi in azimut.
3. Scegliere un certo numero (almeno una decina) di stelle standard fotometriche 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 zenit o, comunque, sopra i  $60^\circ$ . 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 (visibile) o B (blu), 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.
- f) Nelle immagini delle stelle standard, misurare il numero di conteggi totale 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 dai pixel considerati. Scalare il numero di conteggi totale in quell'area a quello in un secondo 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:

$$x = \sec(z) = \frac{1}{\cos(z)}$$

e di:

$$y = m_{\text{cat}} + 2.5 \log_{10}(I_{\text{stella}})$$

dove  $z$  è la distanza zenitale della stella,  $m_{\text{cat}}$  la sua magnitudine di catalogo e  $I_{\text{stella}}$  il numero di conteggi al secondo misurati.

- b) Costruire il grafico di  $y(x)$  e determinare i coefficienti  $a$  e  $b$  della retta:

$$y = a + b \cdot x$$

che meglio interpola i dati.

- c) Poiché la magnitudine apparente “sotto l’atmosfera” di una stella standard è:

$$m_{\text{app}} = m_{\text{cat}} + \frac{k}{\cos(z)} = C - 2.5 \log_{10}(I_{\text{stella}})$$

dove  $k$  è il coefficiente di estinzione in magnitudini per masse d’aria e  $C$  il fattore di scala fotometrico, si ottiene che:

$$m_{\text{cat}} + 2.5 \log_{10}(I_{\text{stella}}) = C - \frac{k}{\cos(z)}$$

ossia

$$y = C - k \cdot x$$

da cui:

$$C \approx a$$

$$k \approx -b$$

6. Calcolare la brillantezza delle zone di cielo misurate con la formula seguente:

$$m_{\text{cielo}} = C - 2.5 \log_{10}(I_{\text{cielo}})$$

dove  $I_{\text{cielo}}$  è il numero di conteggi del cielo per secondo d’arco quadrato. La brillantezza del cielo che si ottiene è in magnitudini per secondo d’arco quadrato. Le misure vanno accompagnate con la loro data e ora, la località di osservazione, l’altezza sul livello del mare, le coordinate altazimutali e quelle celesti.

### 5.5 Automazione dell'elaborazione dei dati

Dalla descrizione svolta nei paragrafi precedenti è facile intuire che l'analisi dei dati al fine di valutare la brillantezza del cielo, necessita di una grande quantità di tempo a causa dell'elevato numero di immagini da elaborare.

Al fine di evitare noiosi calcoli e inutili perdite di tempo da parte di chi volesse effettuare questo genere di rilievi, nell'ambito di questa tesi è stato sviluppato un software in grado di svolgere autonomamente buona parte delle fasi della procedura illustrata.

Vengono ora ripresentati i passi da seguire applicati ad un caso concreto, descrivendo le soluzioni informatiche adottate.

Le immagini elaborate sono state gentilmente fornite dal sig. Falchi Fabio e sono state riprese a Gorgo, in provincia di Mantova. Alcune delle immagini riportate nelle pagine seguenti sono state riprese da me, con l'aiuto del prof. Banfi Massimo, attraverso il telescopio dell'Osservatorio Astronomico delle Prealpi Orobiche di Aviatico, Bergamo. Su richiesta del Circolo Astrofili Bergamaschi avrei dovuto misurare l'inquinamento luminoso che interessa l'osservatorio di Aviatico, ma a causa delle condizioni meteorologiche, ciò non è stato possibile prima della stesura definitiva di questa tesi.



*Gorgo (Mantova)*



*Aviatico (Bergamo)*

### 5.5.1 Prima di andare in osservatorio

Al fine di ottimizzare il tempo a disposizione per l'osservazione è necessario decidere a priori quali sono gli oggetti che si vogliono riprendere. In particolare per le stelle fotometriche standard è richiesto che siano distribuite a diverse altezze e, se possibile, in vicinanza di ogni zona di cielo in cui si vuole valutare la brillantezza artificiale.

È necessario avere a disposizione un elenco di stelle fotometriche che riporti le coordinate equatoriali dell'astro e la sua magnitudine nella banda di interesse. Dalle coordinate equatoriali, data, ora e luogo di osservazione è possibile calcolare le coordinate altazimutali della stella attraverso le formule di conversione riportate in appendice. Il valore dell'altezza, se negativo indica che la stella è al di sotto della linea dell'orizzonte, e pertanto non può essere ripresa, se positivo aiuta nella scelta degli oggetti da riprendere. Il valore della magnitudine è necessario, oltre che per la misura, per stabilire indicativamente il tempo di integrazione (esposizione) del CCD.

A sostegno di questa prima fase si è inserito in un foglio elettronico un elenco di stelle fotometriche standard e un algoritmo di calcolo che effettua la conversione delle coordinate in sincronia con l'orologio di sistema o ad una data e ora impostate dall'utente. Ecco un estratto del foglio di calcolo:

Latitudine:	45,80	Giuliano:	2452827,283
Longitudine:	9,79	T:	0,035106995
Giorno:	6	GMST:	395278,7025
Mese:	7	LST:	216,7832048
Anno:	2003		
Ore	Minuti	Secondi	h
20	47'	32"	18
			m
			47
			s
			32

Fotometriche Standard									
	STAR	RA	DEC	Altezza	Azimut	V	B-V		
		1996,5				(da N orario)			
	bet Hyl	0 25,4	-77 17,0	-57 18,01	167 45,68	2,80	0,62		
Ankaa	alp Phe	0 26,2	-42 20,0	-68 5,70	90 7,62	2,39	1,09		
	del And A	0 39,2	30 50,0	-10 26,40	23 16,28	3,27	1,28		
Schedar	eta Cas	0 40,3	56 31,0	14 43,87	14 51,34	2,23	1,17		
Diphda	bet Cet	0 43,5	-18 1,0	-55 7,92	46 14,07	2,04	1,02		
	eta Cas A	0 49,0	57 48,0	15 34,90	13 16,78	3,44	0,57		
	bet Phe AB	1 5,9	-46 44,0	-76 11,87	95 10,55	3,31	0,89		

### 5.5.2 Le riprese

Prima che faccia buio si può sfruttare la luce del crepuscolo per ottenere il flat frame. Più tardi è possibile iniziare le riprese. Al fine di ridurre gli effetti delle variazioni meteorologiche durante la notte può essere utile riprendere inizialmente i dark frame e le stelle fotometriche, quindi passare alle immagini di fondo cielo, per poi riprendere nuovamente i dark frame e le stelle fotometriche. Il dark utilizzato in sede di riduzione sarà la media tra i due.

Il software di controllo dei CCD per uso astronomico effettua automaticamente la riduzione delle immagini. Nonostante ciò la fase delle riprese è quella che richiede maggior tempo a causa degli ampi spostamenti del telescopio e, soprattutto dei lunghi tempi di esposizione richiesti dalle immagini di fondo cielo, per le quali è fondamentale ottenere un buon rapporto segnale rumore. Le immagini ridotte vengono salvate dallo stesso software in formato astronomico FITS (Flexible Image Transport System).



*Un dark frame (tempo di integrazione 300s): sono visibili due tipi di rumore, uno diffuso uniformemente su tutto il CCD dà origine ad alcuni pixel che appaiono bianchi, l'altro, che si presenta come un alone chiaro proveniente dall'angolo inferiore sinistro, è legato ad un difetto di raffreddamento o alla vicinanza di un componente che dissipa potenza sotto forma di calore.*



*Un'immagine di fondo cielo prima della riduzione (tempo di integrazione 300s): è visibile un rumore analogo a quello presente nel dark frame.*

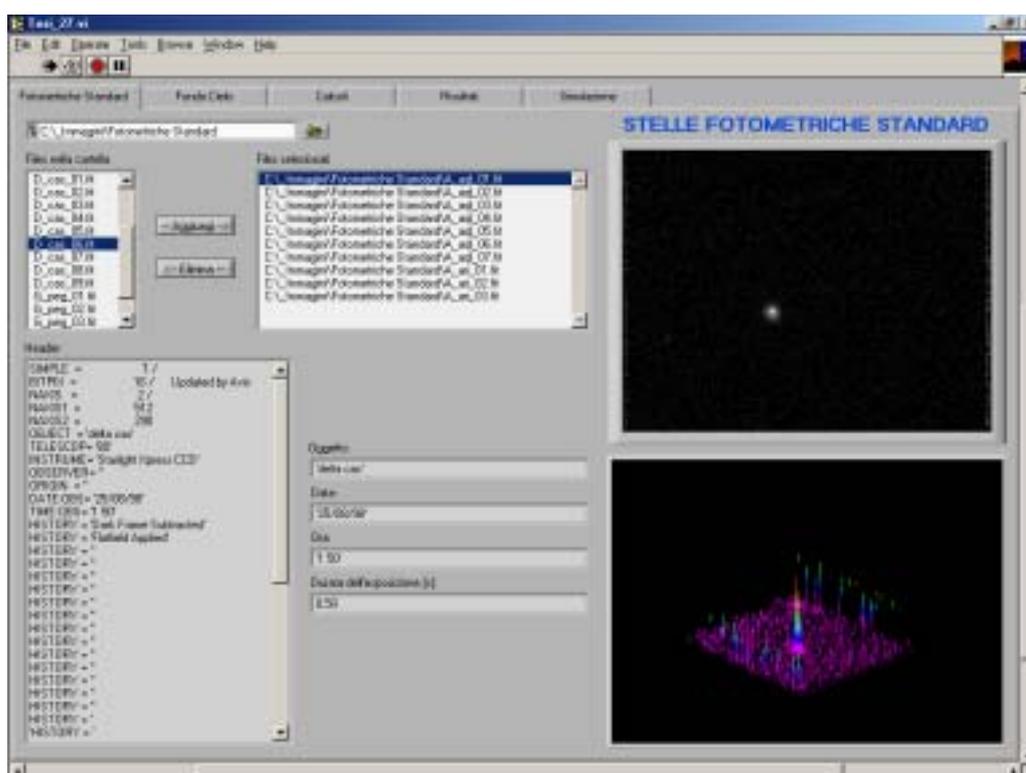


*La stessa immagine dopo la riduzione: il rumore è stato fortemente ridotto (è ora impercettibile), il fondo cielo appare più uniforme.*

### 5.5.3 L'elaborazione dei dati

Per l'elaborazione automatica delle immagini di stelle fotometriche standard e di fondo cielo non esistono software dedicati. Allo scopo si è realizzato uno strumento ad hoc con il linguaggio di programmazione LabVIEW™. Fra i vari linguaggi in commercio si è preferito LabVIEW™ per la sua semplice modalità di programmazione visuale e per la grande quantità di controlli e funzioni per la gestione di files, matrici e immagini, oltre a funzioni matematiche e statistiche già pronti all'uso, a disposizione del programmatore.

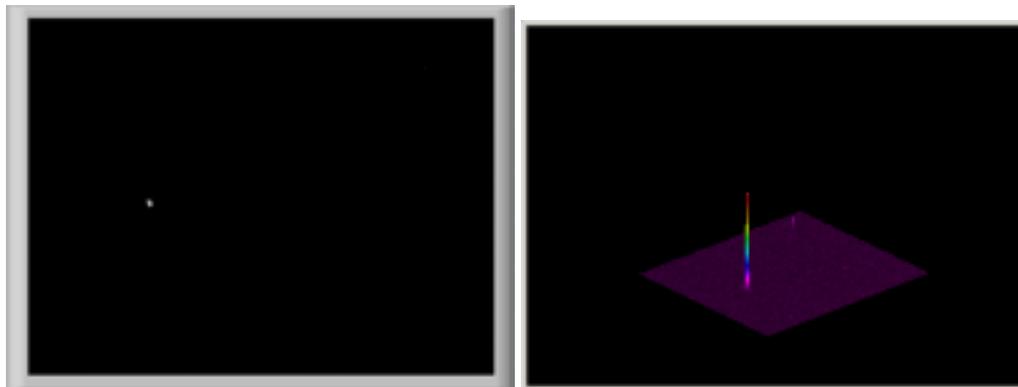
#### La pagina “Fotometriche Standard”



In questa pagina, una volta scelta la cartella contenente le immagini delle fotometriche standard, si deve scegliere quali utilizzare per il calcolo del fattore di scala fotometrico, aiutati dalla possibilità di vedere l'immagine e di leggere la testata del file che contiene le informazioni sull'oggetto fotografato, in particolare

il nome della stella, la data e l'ora della ripresa (necessari per risalire alla posizione nel cielo) e il tempo di esposizione.

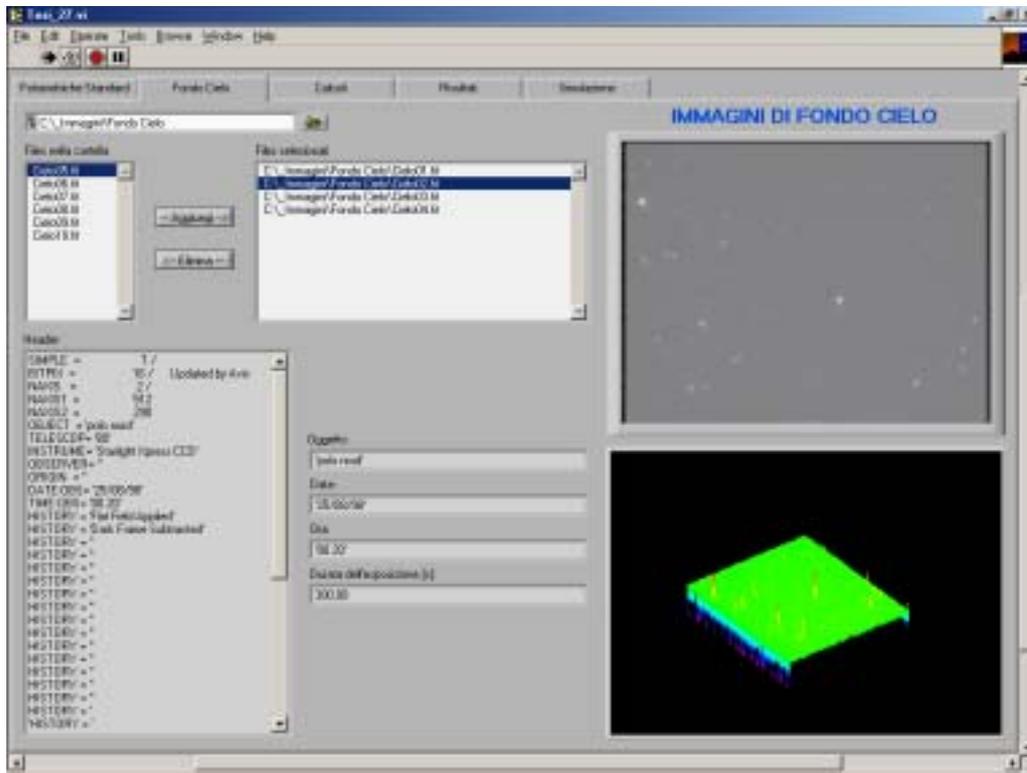
Vengono visualizzate due immagini della stella. Una bidimensionale classica dove la matrice dei pixel del CCD corrisponde alla matrice dei pixel dell'immagine, mentre il numero di conteggi di ciascun pixel è convertito in una tonalità nella scala dei grigi. Per visualizzare correttamente l'immagine si è dovuto ricordare che i sensi dell'uomo, sono sensibili al logaritmo dello stimolo, pertanto, se il numero di conteggi per pixel corrisponde indicativamente al numero di fotoni che lo ha colpito, è il logaritmo del numero di conteggi convertito in scala di grigi a dare la corretta percezione dell'immagine. La seconda immagine, tridimensionale, ha come valori x e y la posizione del pixel nella matrice del sensore e come valore z il numero di conteggi di quel pixel. Questa immagine mette in evidenza la distribuzione normale dei fotoni nell'intorno del centro della stella (punto di massimo). Inoltre consente di verificare che i pixel non siano saturati e l'eventuale presenza di disturbi.



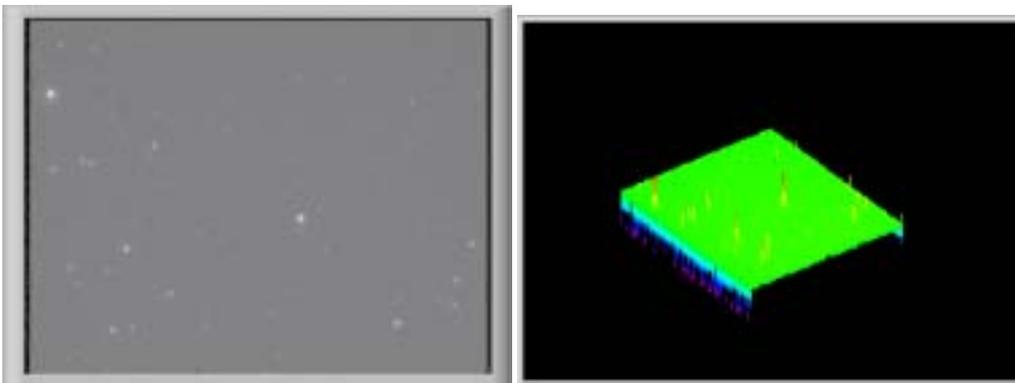
*Arturo, la stella  $\alpha$  della costellazione del Boote nelle due raffigurazioni.*

*È confermata l'utilità della vista tridimensionale: grazie ad essa è infatti possibile individuare la presenza nell'immagine di una seconda stella, più piccola, che potrebbe falsare la misura se fosse troppo luminosa.*

## La pagina “Fondo Cielo”

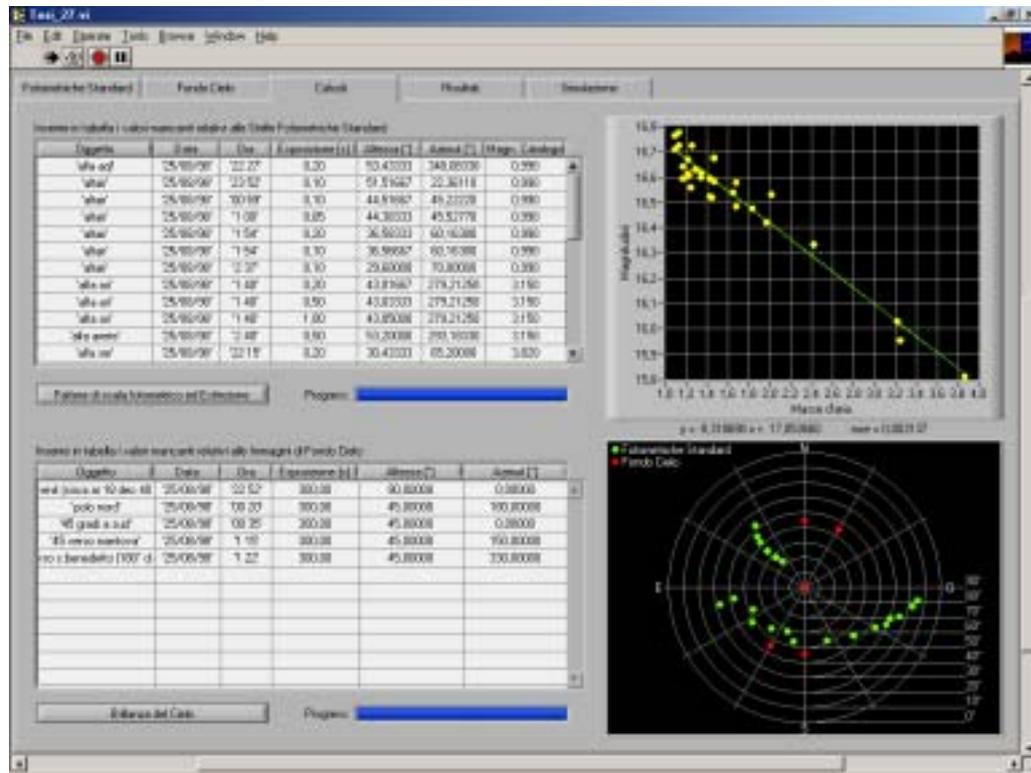


L'interfaccia è identica a quella della pagina “Fotometriche Standard”. Qui vengono selezionate le immagini di fondo cielo che si vogliono elaborare. Devono essere scartate immagini che abbiano troppe stelle (le stelle non devono coprire più di un quarto del campo ripreso). Una soluzione può essere quella di ridurre il tempo di esposizione, ma così facendo si riduce anche il rapporto segnale rumore, aumentando l'errore sulla misura.



*L'immagine del paragrafo 5.5.2 nelle due raffigurazioni*

## La pagina “Calcoli”



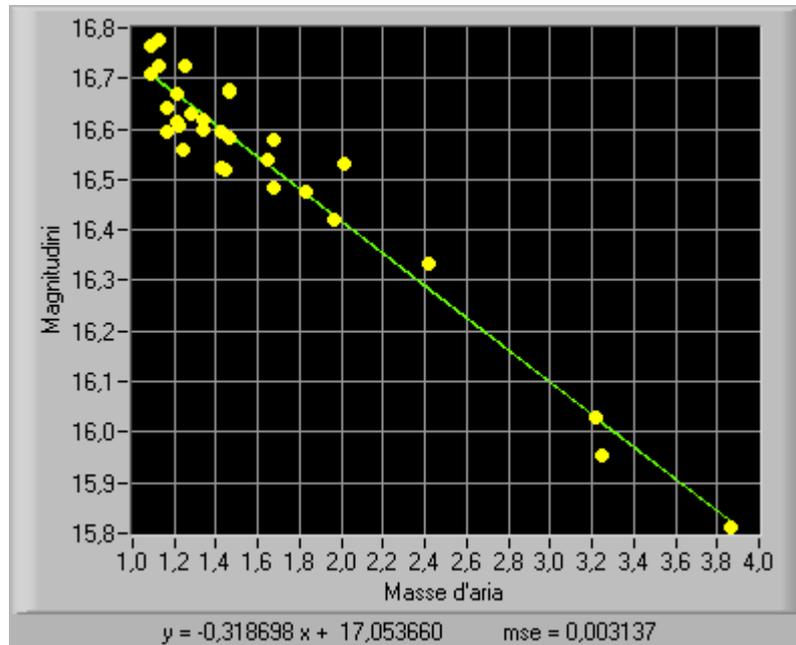
Il programma ricerca automaticamente nella testata dei files d'immagine i dati di cui ha bisogno. Questi dati, che corrispondono alle intestazioni delle colonne, possono essere inseriti nella testata del file FITS all'istante della sua creazione o in un secondo momento, usando un software in grado di manipolare i files in questo formato. In alternativa è possibile inserirli direttamente in tabella, andando a riempire le celle vuote. Inseriti tutti i dati si può procedere con i calcoli: prima vanno elaborate le immagini relative alle fotometriche standard per ricavare il fattore di scala fotometrico; successivamente si analizzano le immagini di fondo cielo per il calcolo della brillantezza.

La procedura per l'estrapolazione dei dati dalle immagini è già stata presentata nei paragrafi precedenti. Certe operazioni però non sono facilmente riconducibili a semplici algoritmi (si pensi ad esempio alla ricerca di un'area priva di stelle in un'immagine di fondo cielo), pertanto è stato necessario ricorrere ad altri metodi. Per il calcolo dell'intensità di una stella fotometrica si sommano i valori dei pixel

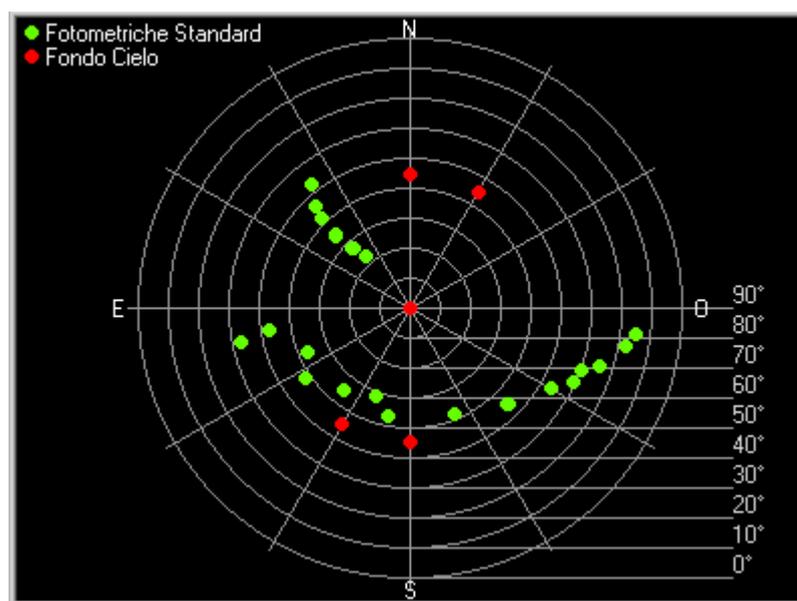
contenuti in una finestra di lato 40 pixel centrata nel pixel di intensità massima e si sottrae il valore medio di un pixel all'esterno, moltiplicato per l'area della finestra. Nelle immagini di fondo cielo, per il calcolo dell'intensità media di un pixel non appartenente ad una stella, si è trovata una soluzione semplice ed efficace considerandolo pari alla mediana dei valori, questo vale quando la superficie coperta dalle stelle non è troppo estesa.

Poiché certe immagini provenienti da CCD presentano lungo il bordo un disturbo, si è inserito un filtro che "taglia" il contorno dell'immagine, andando a considerare un'immagine più piccola di quella di partenza.

Al termine dei calcoli vengono creati due grafici: il primo mette in relazione, per ogni stella fotometrica, la grandezza  $y$  misurata in magnitudini con le masse d'aria corrispondenti. L'equazione della retta interpolante, scritta sotto al grafico, ha come coefficiente angolare il coefficiente di estinzione cambiato di segno, e come ordinata all'origine il fattore di scala fotometrico.

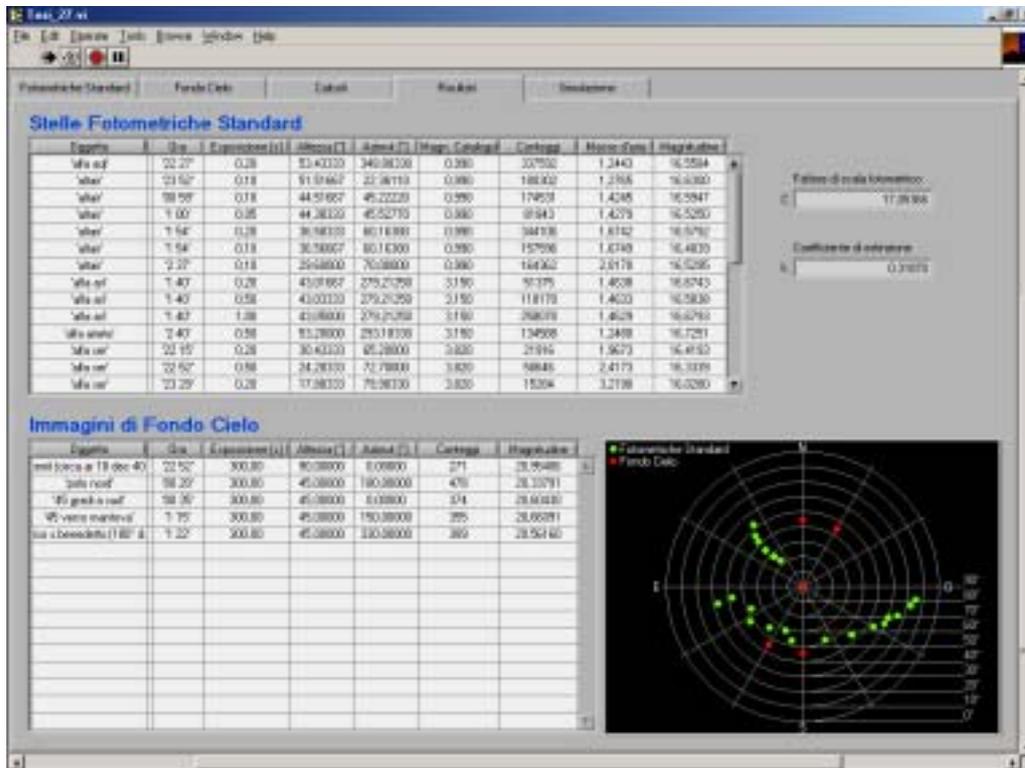


Su un secondo grafico che rappresenta la volta celeste sono indicati i punti del cielo che sono stati fotografati, al fine di accertare l'uniforme distribuzione delle riprese, sia delle stelle fotometriche standard, sia del fondo cielo.



Nell'esempio sono state riprese solo cinque stelle fotometriche standard, ma in orari diversi (e quindi ad altezze diverse). Il grafico sopra evidenzia questo fatto: si possono infatti intuire le traiettorie del moto apparente degli astri.

## La pagina “Risultati”



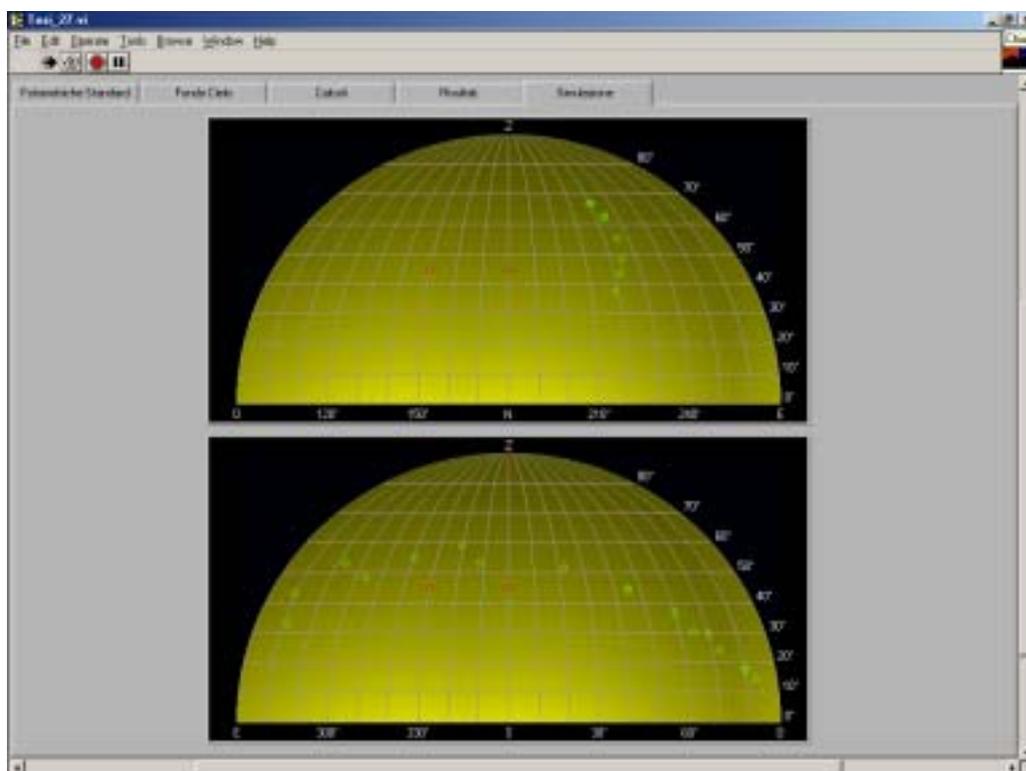
In questa pagina vengono presentati i risultati numerici derivati dall'elaborazione delle immagini. Il risultato finale è contenuto nell'ultima colonna della tabella “Immagini di Fondo Cielo” che contiene, per ogni zona di cielo ripresa, il valore assoluto della brillantezza del cielo, espressa in magnitudini/arcsec<sup>2</sup>.

I valori medi per la brillantezza naturale del cielo sono:

- in banda V            21.7 mag/arcsec<sup>2</sup>
- in banda B            22.8 mag/arcsec<sup>2</sup>

In presenza di inquinamento luminoso la magnitudine misurata assume un valore inferiore. Un aumento di luminosità del cielo comporta una riduzione della magnitudine limite (a proposito si veda il paragrafo 3.1.1).

## La pagina “Simulazione”



In quest'ultima pagina sono riportati due grafici che vogliono rappresentare la porzione di cielo visibile da un osservatore rivolto verso nord e da uno rivolto verso sud. Il cielo viene colorato con diverse tonalità di giallo a seconda della brillantezza del cielo più o meno intensa in quel punto, andando ad estrapolare dai valori ricavati dalle misure, il possibile andamento sull'intero emisfero. Alcuni segni indicano inoltre le zone di cielo che sono state riprese.

Come evidenziato dalla simulazione, le principali fonti di inquinamento luminoso che interessano il cielo di Gorgo sono le città di Mantova e Verona a Nord e le città di Reggio Emilia e Modena a Sud. Tuttavia la corrispondenza con la realtà è limitata dal numero ridotto di misure effettuate sul fondo cielo.

## **5.6 Conclusioni**

La misura della brillantezza artificiale del cielo, soprattutto se effettuata per tutte le bande fotometriche, costituisce, per l'astronomo, un mezzo indispensabile per valutare la fattibilità delle osservazioni e per giudicare i risultati delle misure. Questo software vuole soddisfare l'esigenza di ottenere buoni risultati nel minor tempo possibile. È infatti possibile effettuare una mappatura del cielo e conoscere subito i risultati, decidendo di conseguenza quale tipo di misura è compatibile con le condizioni rilevate. Senza l'ausilio del software si dovrebbe scegliere tra svolgere i calcoli manualmente, riducendo il tempo residuo a disposizione per le misure, o effettuare le misure senza sapere se le condizioni sono favorevoli, rischiando di fare un lavoro inutile.

L'interfaccia grafica è estremamente intuitiva, e allo stesso tempo completa, in grado di soddisfare sia la necessità di precisione, con i risultati numerici riportati nelle tabelle, sia il bisogno di immediatezza, con la simulazione grafica.

I grafici relativi alla simulazione, infatti, costituiscono un modo rapido per comprendere quali sono le maggiori fonti di inquinamento luminoso e, confrontando misure effettuate in tempi diversi, consentono di verificare l'efficacia dei provvedimenti legislativi volti a ridurlo. Inoltre possono aiutare l'astronomo a sapere a priori se gli sarà possibile riprendere un oggetto in una data posizione del cielo, o se dovrà attendere che si trovi in una zona "migliore".

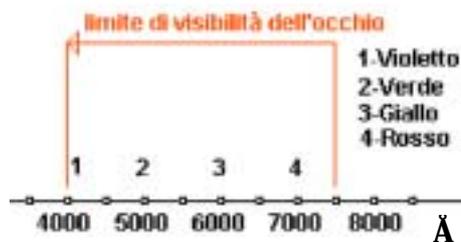
Sono previsti miglioramenti futuri del software, con l'aggiunta di un catalogo di stelle fotometriche e dell'algoritmo di conversione delle coordinate celesti. In questo modo nella testata dei files FITS sarà sufficiente inserire solamente il nome dell'astro la data, l'ora e la durata dell'esposizione, riducendo ulteriormente il lavoro dell'astronomo. L'introduzione di metodi più sofisticati di elaborazione digitale delle immagini, attraverso le tecniche di image processing e l'uso di filtri bidimensionali, potrà ridurre gli errori nelle misure, e consentirà di eliminare dalle riprese il disturbo legato all'inquinamento luminoso.

# Appendice

## ***A.1 Grandezze illuminotecniche***

### **Radiazione visibile**

La radiazione visibile dall'uomo è compresa in media fra le lunghezze d'onda 400 e 760 nm o 4000 e 7600 Å con punte di 3600 e 8000 Å.



*(CieloBuio, Coordinamento per la protezione del Cielo Notturno)*

In figura è rappresentato lo spettro visibile: alle minori lunghezze d'onda corrisponde il violetto e alle maggiori il rosso (nell'ordine: violetto, indaco, azzurro, verde, giallo, arancione, rosso). L'occhio umano è più sensibile alla lunghezza d'onda di circa 5500 Å (giallo - verde). La differenza di lunghezza d'onda percepibile dall'occhio umano va da 10 - 30 Å fra 5000 e 6000 Å a circa

60 Å verso il rosso. Le pellicole fotografiche hanno un comportamento diverso dall'occhio umano e le varie tipologie presenti sul mercato presentano sensibilità differenti, più o meno marcate verso certe lunghezze d'onda. La lunghezza d'onda è data dal prodotto della velocità della luce ( $c$ ) per il periodo dell'onda ( $T$ ) o dal rapporto fra la velocità della luce ( $c = 300.000.000$  m/s) e la frequenza:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}$$

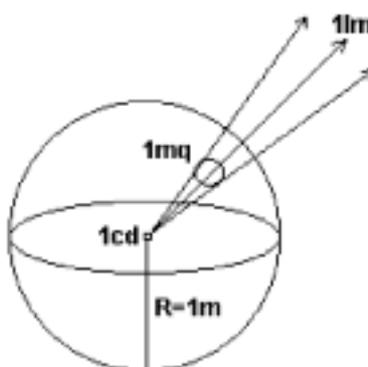
quindi 4000 / 7600 Å corrispondono alle frequenze di 750 / 395 THz.

### **Flusso luminoso**

Il flusso luminoso rappresenta la quantità di luce od energia raggiante emessa da una sorgente nell'unità di tempo:

$$\Phi = \frac{Q}{t}$$

da cui si deduce che il flusso luminoso è una potenza (energia diviso tempo). L'unità di misura del flusso luminoso è il lumen (lm) che corrisponde al flusso luminoso emesso da una sorgente di luce puntiforme di intensità ( $I$ ) pari ad una candela (cd) ed uscente dalla superficie di un metro quadrato di superficie sferica con raggio pari a un metro (steradiante).



(CieloBuio, Coordinamento per la protezione del Cielo Notturno)

## Efficienza luminosa

L'efficienza luminosa è pari al rapporto fra il flusso luminoso emesso da una sorgente luminosa e la potenza elettrica assorbita:

$$\eta = \frac{\Phi}{P}$$

L'efficienza luminosa, come appunto dice anche la parola, esprime l'efficienza di una lampada, si misura in lm/W ed è una funzione variabile con il tipo di lampada:

- lampade ad incandescenza	6 – 18 lm/W
- lampade al mercurio	40 – 60 lm/W
- lampade agli alogenuri	60 – 100 lm/W
- lampade al sodio ad alta pressione	60 – 150 lm/W
- lampade al sodio a bassa pressione	100 – 190 lm/W

Per avere il valore preciso bisogna consultare i cataloghi dei costruttori di lampade. Il flusso in uscita dalla lampada è minore della potenza assorbita in quanto ci sono le perdite. La potenza perduta è dovuta al processo non ideale di trasformazione della potenza elettrica in potenza raggiante a causa delle seguenti perdite: addizionali (esempio contatti), per effetto Joule (nelle lampade ad incandescenza tale effetto, riguardo al filamento, non costituisce solo una perdita ma bensì la base di funzionamento), per riflessione ed assorbimento della luce

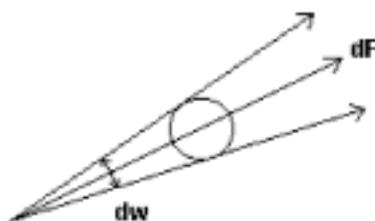
emessa da parte del bulbo in vetro che si trasforma in calore disperso dal bulbo stesso per conduzione verso l'esterno, interne per convezione, per emissione nel campo dell'invisibile (raggi ultravioletti ed infrarossi), per una scarica non ideale dei gas. In pratica la lampada è un convertitore di energia: l'energia elettrica in entrata viene trasformata in energia raggiante, chiaramente con rendimento minore di 1. Un'efficienza luminosa elevata significa un processo di trasformazione migliore dell'energia elettrica in energia raggiante.

### Intensità luminosa

L'intensità luminosa si calcola con la formula:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

dove  $d\Phi$  è il flusso luminoso in una direzione, emesso dalla sorgente luminosa all'interno di un piccolo cono e  $d\omega$  è l'angolo solido del cono stesso. In pratica l'intensità luminosa non è altro che la densità di flusso in una certa direzione.



*(CieloBuio, Coordinamento per la protezione del Cielo Notturno)*

L'unità di misura dell'intensità luminosa è la candela (cd) e corrisponde all'intensità luminosa emessa da un corpo nero ad una temperatura di 1766 °C (fusione del platino), alla frequenza di  $540 \times 10^{12}$  Hz, in direzione perpendicolare ad un foro di uscita con un'area pari a 1/600 000 metri quadrati sotto la pressione di 101325 Pa.

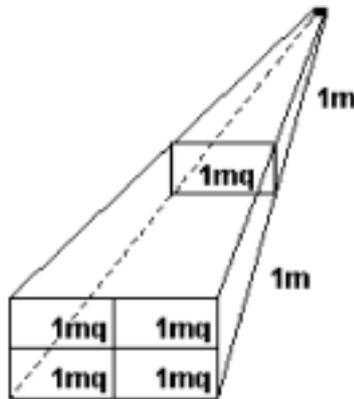
## Illuminamento

L'illuminamento è pari al rapporto fra il flusso luminoso incidente ortogonalmente su una superficie e l'area della superficie che riceve il flusso.

È quindi una densità di flusso:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

L'unità di misura dell'illuminamento è il lux ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ). Il lux è definito come il flusso luminoso emesso da una sorgente luminosa (situata al centro di una sfera) con una intensità luminosa di 1 candela che illumina una superficie di  $1 \text{ m}^2$ . L'illuminamento varia con l'inverso del quadrato della distanza dalla sorgente luminosa:



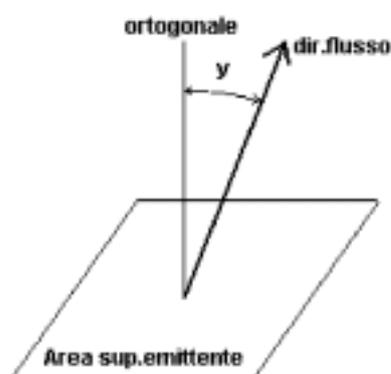
*(CieloBuio, Coordinamento per la protezione del Cielo Notturno)*

## Luminanza

La luminanza è pari al rapporto fra l'intensità luminosa emessa in una certa direzione e l'area della superficie emittente perpendicolare alla direzione:

$$L = \frac{dI}{dA}$$

La luminanza si misura in  $\text{cd}/\text{m}^2$ ;  $1 \text{ cd}/\text{m}^2$  equivale al flusso luminoso emesso per unità di angolo solido (intensità luminosa di 1 candela) entro un'area unitaria perpendicolare alla direzione del flusso luminoso. Nel caso che il flusso luminoso non sia perpendicolare alla superficie, allora bisogna dividere  $U$  per  $\cos(y)$ , dove  $y$  è l'angolo fra flusso ed ortogonale alla superficie:



(CieloBuio, Coordinamento per la protezione del Cielo Notturno)

Nell'illuminazione stradale la luminanza è importante in quanto deve essere sufficiente ed uniforme al fine di riconoscere il percorso, i pedoni ed eventuali ostacoli. Valori troppo elevati di luminanza delle sorgenti portano a abbassare il contrasto e quindi ad uno scarso riconoscimento dei pedoni od ostacoli. In pratica, la sensazione visiva dell'occhio umano, quando percepisce la luce direttamente emessa da una sorgente o riflessa da una superficie, è funzione della luminanza. Si forniscono, come esempio, alcuni valori indicativi di luminanza ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ):

Sole a Mezzogiorno	$16 \times 10^9$
Lampada ad incandescenza (potenza minore di 100 W)	$5 \times 10^6$
Lampada agli alogenuri (potenza minore di 100 W)	$1,5 \times 10^7$

## **Rendimento luminoso**

Il rendimento luminoso è dato dal rapporto fra il flusso luminoso emesso dalla lampada verso l'esterno ed il flusso luminoso emesso dalla sorgente (esempio filamento della lampada ad incandescenza):

$$\eta_L = \frac{\Phi}{\Phi_s}$$

dove  $\Phi$  è il flusso emesso verso l'esterno e  $\Phi_s$  il flusso luminoso emesso dalla sorgente.

## **Resa cromatica e indice di resa dei colori**

La resa dei colori o resa cromatica è una valutazione qualitativa sull'aspetto cromatico degli oggetti illuminati ed è pari a:

ottimo

buono

soddisfacente

L'indice di colore "Ra" permette di ottenere una valutazione oggettiva riguardo alla resa di colore della sorgente luminosa emittente. L'indice Ra è posto pari a 100 quando la sorgente emittente la luce ha lo stesso effetto della sorgente luminosa di riferimento. L'indice di resa cromatica è funzione indiretta della differenza di resa dei colori, cioè tanto minori sono i valori di Ra tanto più grande è la differenza nella resa dei colori.

## **Temperatura di colore**

La temperatura di colore, la cui unità di misura è il grado kelvin (K), ha come riferimento l'emissione del corpo nero. La parte della radiazione visibile preponderante è funzione diretta della temperatura di colore "Tc", cioè tanto più grande è Tc tanto più si accentua la parte azzurra della radiazione, mentre per

valori piccoli di  $T_c$  si accentua la parte rossa della radiazione visibile. Ad esempio, la luce emessa da una lampada ad incandescenza ha  $T_c$  pari a circa 2.700 K, mentre la luce diurna a mezzogiorno presenta un valore di  $T_c$  pari a 6.000 K.

### **Tonalità di luce**

La tonalità di luce è funzione della temperatura di colore. Si riportano alcune grandezze indicative:

- tono caldo < 3.300 K
- tono neutro < 3.300 - 5000 K
- tono bianchissimo 4.000 K
- luce diurna > 5.000 K

Un esempio può chiarire il significato delle ultime tre grandezze trattate: in una lampada agli alogenuri contraddistinta dalla sigla 1A - Ra 90-100 - > 5000 K; 1A è il grado di resa dei colori, 90 - 100 rappresenta l'indice di resa dei colori, > 5.000 K è la temperatura di colore che da indirettamente la tonalità di luce, nel caso diurna.

## A.2 CCD datasheets

**TC245**  
**786- × 488-PIXEL CCD IMAGE SENSOR**  
SOCS019A – DECEMBER 1991

- High-Resolution, Solid-State Image Sensor for NTSC B/W TV Applications
- 8-mm Image-Area Diagonal, Compatible With 1/2" Vidicon Optics
- 755 (H) x 242 (V) Active Elements in Image-Sensing Area
- Advanced On-Chip Signal Processing
- Low Dark Current
- Electron-Hole Recombination Antiblooming
- Dynamic Range . . . More Than 70 dB
- High Sensitivity
- High Photoresponse Uniformity
- High Blue Response
- Single-Phase Clocking
- Solid-State Reliability With No Image Burn-in, Residual Imaging, Image Distortion, Image Lag, or Microphonics

DUAL-IN-LINE PACKAGE  
(TOP VIEW)

NC – No internal connection

### description

The TC245 is a frame-transfer charge-coupled device (CCD) image sensor designed for use in single-chip B/W NTSC TV applications. The device is intended to replace a 1/2-inch vidicon tube in applications requiring small size, high reliability, and low cost.

The image-sensing area of the TC245 is configured into 242 lines with 786 elements in each line. Twenty-nine elements are provided in each line for dark reference. The blooming-protection feature of the sensor is based on recombining excess charge with charge of opposite polarity in the substrate. This antiblooming is activated by supplying clocking pulses to the antiblooming gate, which is an integral part of each image-sensing element. The sensor is designed to operate in an interlace mode, electronically displacing the image-sensing elements in alternate fields by one-half of a vertical line during the charge integration period, effectively increasing the vertical resolution and minimizing aliasing. The device can also be operated as a 755 (H) by 242 (V) noninterlaced sensor with significant reduction in the dark signal.

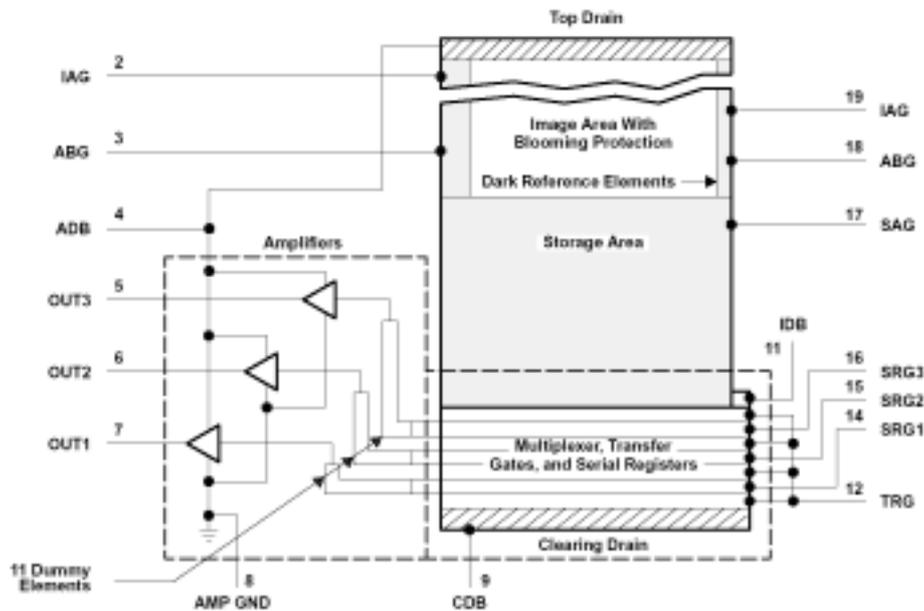
A gated floating-diffusion detection structure with an automatic reset and voltage reference incorporated on-chip converts charge to signal voltage. The signal is further processed by a low-noise, state-of-the-art correlated clamp-sample-and-hold circuit. A low-noise, two-stage, source-follower amplifier buffers the output and provides high output-drive capability. The image is read out through three outputs, each of which reads out every third image column.

The TC245 is built using TI-proprietary virtual-phase technology, which provides devices with high blue response, low dark signal, good uniformity, and single-phase clocking. The TC245 is characterized for operation from  $-10^{\circ}\text{C}$  to  $45^{\circ}\text{C}$ .

## TC245 786- $\times$ 488-PIXEL CCD IMAGE SENSOR

90CS019A - DECEMBER 1991

### functional block diagram



### detailed description

The TC245 consists of four basic functional blocks: (1) the image-sensing area, (2) the image-storage area, (3) the multiplexer block with serial registers and transfer gates, and (4) the low-noise signal-processing amplifier block with charge-detection nodes. The location of each of these blocks is identified in the functional block diagram.

## TC245 786 × 488-PIXEL CCD IMAGE SENSOR

SDC9019A—DECEMBER 1991

### image-sensing and storage areas

Figure 1 and Figure 2 show cross sections with potential well diagrams and top views of image-sensing and storage-area elements. As light enters the silicon in the image-sensing area, free electrons are generated and collected in the potential wells of the sensing elements. During this time, blooming protection is activated by applying a burst of pulses to the antiblooming gate inputs every horizontal blanking interval. This prevents blooming caused by the spilling of charge from overexposed elements into neighboring elements. After integration is complete, the signal charge is transferred into the storage area.

There are 29 full columns and one half-column of elements at the right edge of the image-sensing area that are shielded from incident light; these elements provide the dark reference used in subsequent video processing circuits to restore the video black level. There are also one full column and one half-column of light-shielded elements at the left edge of the image-sensing area and two lines of light-shielded elements between the image-sensing and image-storage areas (the latter prevent charge leakage from the image-sensing area into the image-storage area).

### multiplexer with transfer gates and serial registers

The multiplexer and transfer gates transfer charge line by line from the storage-area columns into the corresponding serial registers and prepare it for readout. Figure 3 illustrates the layout of the multiplexing gate that vertically separates the pixels for input into the serial registers. Figure 4 shows the layout of the interface region between the serial-register gates and the transfer gates. Multiplexing is activated during the horizontal blanking interval by applying appropriate pulses to the transfer gates and serial registers; the required pulse timing is shown in Figure 5. A drain is also included to provide the capability to clear the image-sensing and storage areas of unwanted charge. Such charge can accumulate in the imager during the start-up of operation or under special circumstances when nonstandard TV operation is desired.

### correlated clamp-sample-and-hold amplifier with charge-detection nodes

Figure 6 illustrates the correlated clamp-sample-and-hold amplifier circuit. Charge is converted into a video signal by transferring the charge onto a floating diffusion structure in detection node 1 that is connected to the gate of MOS transistor Q1. The proportional charge-induced signal is then processed by the circuit shown in Figure 6. This circuit consists of a low-pass filter formed by Q1 and C2, coupling capacitor C1, dummy detection node 2, which restores the dc bias on the gate of Q3, sampling transistor Q5, holding capacitor C3, and output buffer Q6. Transistors Q2, Q4, and Q7 are current sources for each corresponding stage of the amplifier. The parameters of this high-performance signal-processing amplifier have been optimized to minimize noise and maximize the video signal.

The signal processing begins with a reset of detection node 1 and restoration of the dc bias on the gate of Q3 through the clamping function of dummy detection node 2. After the clamping is completed, the new charge packet is transferred onto detection node 1. The resulting signal is sampled by the sampling transistor Q5 and is stored on the holding capacitor C3. This process is repeated periodically and is correlated to the charge transfer in the registers. The correlation is achieved automatically since the same clock lines used in registers  $\phi$ -S2 and  $\phi$ -S3 for charge transport serve for reset and sample. The multiple use of the clock lines significantly reduces the number of signals required to operate the sensor. The amplifier also contains an internal voltage reference generator that provides the reference bias for the reset and clamp transistors. The detection nodes and the corresponding amplifiers are located some distance away from the edge of the storage area. Therefore, eleven dummy elements are incorporated at the end of each serial register to span the distance. The location of the dummy elements, which are considered to be part of the amplifiers, is shown in the functional block diagram.

TC245  
786- × 488-PIXEL CCD IMAGE SENSOR

SOCS019A—DECEMBER 1991

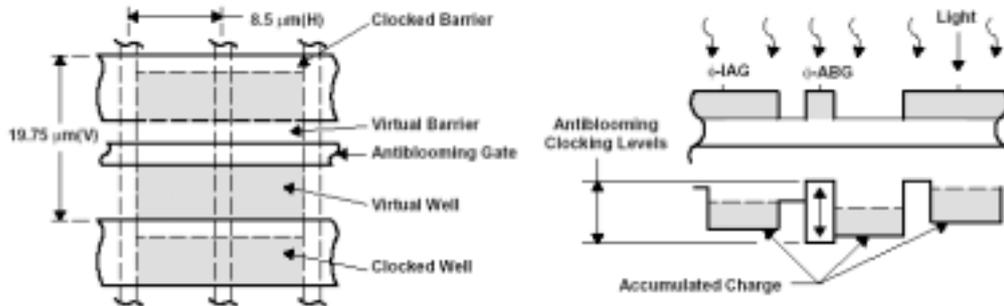


Figure 1. Charge-Accumulation Process

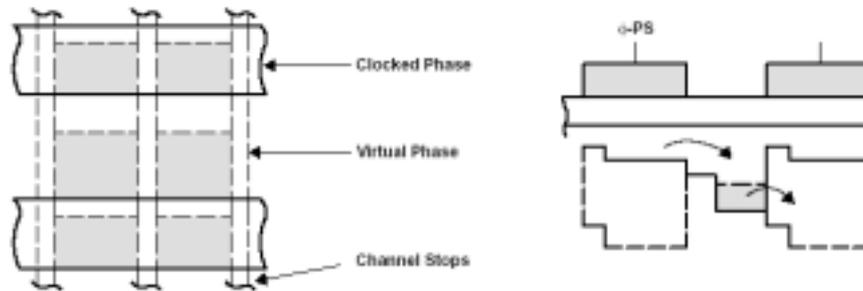


Figure 2. Charge-Transfer Process

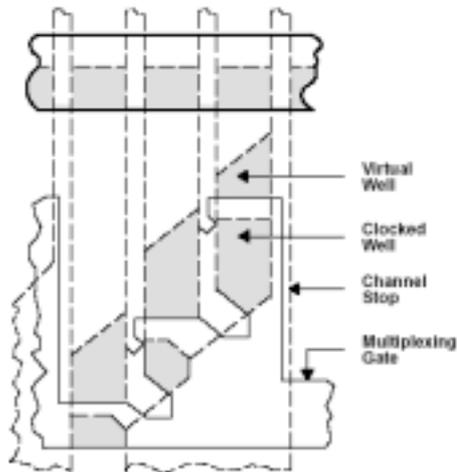


Figure 3. Multiplexing-Gate Layout

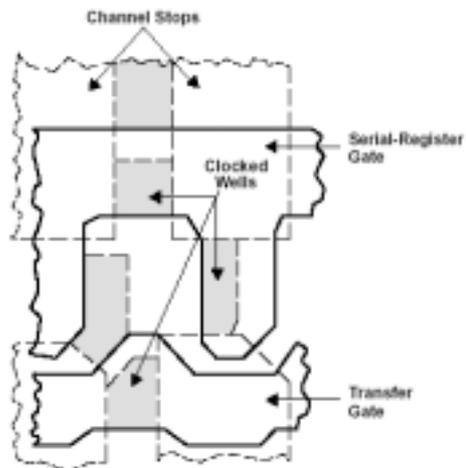


Figure 4. Interface-Region Layout

**TC245**  
**786 × 488-PIXEL CCD IMAGE SENSOR**

SOC9019A – DECEMBER 1991

**optical characteristics,  $T_A = 40^\circ\text{C}$ , integration time = 16.67 ms (unless otherwise noted)**

PARAMETER			MIN	TYP	MAX	UNIT
Sensitivity	No IR Filter	Measured at $V_{LJ}$ (see Notes 10 and 11)	197			mV/k
	With IR Filter		24			
Saturation signal, $V_{SAT}$ (see Note 12)	Antiblooming disabled, interlace off		320			mV
Maximum usable signal, $V_{USE}$	Antiblooming enabled, interlace on		180			mV
Blooming overload ratio (see Note 13)	Interlace on		100			
	Interlace off		200			
Image-area well capacity			$80 \times 10^3$			electrons
Smear (see Note 14)			See Note 15			0.0004
Dark current	Interlace off		$T_A = 21^\circ\text{C}$			0.027
Dark signal (see Note 16)	$T_A = 45^\circ\text{C}$		TC245-30			5.5
			TC245-40			8
Pixel uniformity	Output signal = 50 mV $\pm$ 10 mV		TC245-30			3.5
			TC245-40			5
Column uniformity	Output signal = 50 mV $\pm$ 10 mV		TC245-30			0.5
			TC245-40			0.7
Shading			Output signal = 100 mV			15%

- NOTES: 10. Sensitivity is measured at an integration time of 16.67 ms with a source temperature of 2856 K. A CM-500 filter is used.  
 11.  $V_{LJ}$  is the output voltage that represents the threshold of operation of antiblooming.  $V_{LJ} = 1/2$  saturation signal.  
 12. Saturation is the condition in which further increase in exposure does not lead to further increase in output signal.  
 13. Blooming overload ratio is the ratio of blooming exposure to saturation exposure.  
 14. Smear is a measure of the error induced by transferring charge through an illuminated pixel in shutterless operation. It is equivalent to the ratio of the single-pixel transfer time during a fast dump to the exposure time using an illuminated section that is 1/50 of the image-area vertical height with recommended clock frequencies.  
 15. Exposure time is 16.67 ms, the fast-dump clocking rate during vertical timing is 3.58 MHz, and the illuminated section is 1/10 of the height of the image section.  
 16. Dark-signal level is measured from the dummy pixels.

### ***A.3 Coordinate celesti***

Come sulla superficie terrestre, due cerchi massimi individuano un punto anche sulla sfera celeste. In astronomia, però, si usano vari tipi di sistemi di coordinate che prendono come riferimento coppie di cerchi massimi diverse. I più noti sono il sistema altazimutale e il sistema equatoriale mobile.

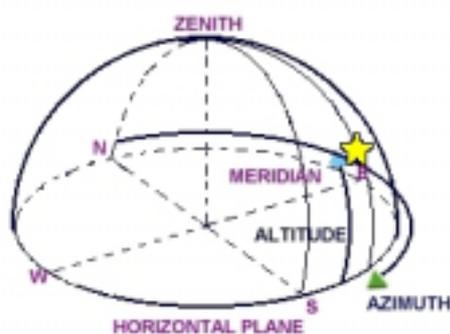
#### **Sistema altazimutale**

Si assumono come riferimento l'orizzonte celeste e il meridiano del luogo. Il primo è la proiezione sulla sfera celeste dell'orizzonte dell'osservatore, il secondo è il meridiano che passa attraverso il Nord, lo Zenit (cioè il punto in cui la verticale del luogo tocca la sfera celeste), il Sud e il Nadir (diametralmente opposto allo Zenit) dell'osservatore.

Le coordinate sono:

- l'azimut ( $A$ ), che si misura in gradi (con valori compresi tra  $0^\circ$  e  $360^\circ$ ) sull'orizzonte, a partire dal punto Sud (o dal Nord a seconda della convenzione) in direzione del moto della stella (Est - Ovest);
- l'altezza ( $h$ ), che si misura in gradi, a partire dall'orizzonte lungo il cerchio di altezza (cioè passante per lo Zenit, il Nadir e per la stella). I valori dell'altezza sono compresi tra  $90^\circ$  e  $-90^\circ$ : sono positivi se la stella è sopra l'orizzonte, altrimenti sono negativi.

Questo sistema permette di individuare una stella conoscendo la direzione del punto cardinale Sud (Nord). Queste coordinate, però, essendo legate all'orizzonte dell'osservatore, variano sia al variare della posizione dell'osservatore sulla Terra, sia nel tempo (per effetto della rotazione terrestre). L'unico valore che resta comunque fisso è l'altezza del Polo Nord nell'emisfero Nord e del Polo Sud nell'emisfero Sud: essa corrisponde alla latitudine del luogo.



*Sistema altazimutale*

### **Sistema equatoriale mobile**

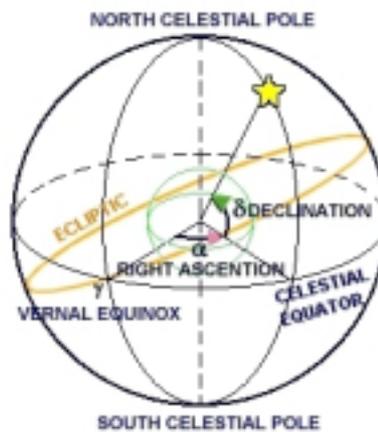
Il sistema di coordinate equatoriale mobile è indipendente dal luogo di osservazione. I cerchi di riferimento sono l'equatore celeste e il cerchio orario (cioè il cerchio passante per i poli celesti) che passa per il punto  $\gamma$  (o punto dell'equinozio di primavera, o punto vernale, o punto di Ariete: è uno dei due

punti in cui l'eclittica, cioè la traiettoria dell'orbita terrestre intorno al Sole, s'interseca con l'equatore celeste).

In questo sistema le coordinate di una stella sono:

- l'ascensione retta ( $\alpha$ ), che si misura sull'equatore a partire dal punto  $\gamma$  in direzione opposta al moto della stella (cioè verso Est). Essa si misura in ore minuti e secondi con valori compresi fra  $0^h$  e  $24^h$ ;
- la declinazione ( $\delta$ ), che si misura sul cerchio orario passante per la stella a partire dall'equatore, in gradi, primi e secondi, con valori compresi fra  $90^\circ$  e  $-90^\circ$ .

In una prima approssimazione i valori di  $\alpha$  e di  $\delta$  sono costanti nel tempo e indipendenti dall'osservatore. Il punto  $\gamma$ , infatti, gira intorno all'asse polare con la stessa velocità angolare delle stelle.



*Sistema equatoriale mobile*

### **Conversione da coordinate equatoriali a coordinate altazimutali**

Per la conversione tra i due sistemi di coordinate si usano le seguenti formule:

$$A = \arctan\left(\frac{\cos(\text{Latitudine}) \cdot \sin(\delta) - \sin(\text{Latitudine}) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(t)}{-\cos(\delta) \cdot \sin(t)}\right)$$

$$h = \arcsin(\sin(\text{Latitudine}) \cdot \sin(\delta) + \cos(\text{Latitudine}) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(t))$$

Con Latitudine si intende la latitudine del luogo di osservazione, con t si indica l'angolo orario della stella, dato dal tempo siderale locale diminuito dell'ascensione retta dell'astro.

#### ***A.4 Il formato FITS***

Il formato FITS fu sviluppato negli anni '70 come mezzo per l'archiviazione e lo scambio dei dati astronomici. È in grado di memorizzare array multidimensionali o matrici bidimensionali, contenenti righe e colonne di dati.

Un file FITS è formato da una testata (Header) e da una zona dati (Data Units).

La testata è in formato ASCII, ha dimensione multipla di 2880 bytes ed è composta da un numero qualsiasi di record da 80 bytes ciascuno, aventi la forma standard:

$$\text{KEYWORD} = \text{value} / \text{comment string}$$

Keyword deve essere di 8 caratteri e può contenere solo le lettere maiuscole, le cifre (0-9), il trattino (-) e il carattere underscore (\_). Keyword solitamente è seguita dal segno = e da uno spazio, per un totale di 10 caratteri. Segue il valore assegnato alla keyword, che può essere un numero intero o a virgola mobile, una stringa di caratteri racchiusa tra due apici, oppure un valore booleano (lettere T o F).

L'ultima keyword della testata è "END" e non prevede né valore assegnato, né commento.

La testata inizia con una serie di keywords obbligatorie, che specificano le dimensioni e il formato della zona dati. Per esempio per un array bidimensionale che contiene i dati relativi ad un'immagine si ha:

---

SIMPLE =	T / il file è conforme allo standard FITS
BITPIX =	16 / numero di bit per ogni pixel
NAXIS =	2 / numero di dimensioni dell'array (assi)
NAXIS1 =	440 / lunghezza dell'asse 1
NAXIS2 =	300 / lunghezza dell'asse 2

A queste keywords obbligatorie possono seguirne altre opzionali che servono a fornire ulteriori informazioni sui dati archiviati, ad esempio, nel caso di riprese astronomiche, il giorno e l'ora dell'osservazione e il tempo di esposizione.

Le keywords impiegate sono numerose e standard; gli elenchi completi sono disponibili in internet.

La zona dati segue immediatamente l'ultimo blocco di 2880 bytes della testata ed ha le dimensioni in essa specificate.

### ***A.5 Legge 27 marzo 2000 – n. 17 della Regione Lombardia***

La LR 17/00 ad oggi è tra le più restrittive al Mondo, infatti vieta l'emissione di flusso luminoso oltre il livello dell'orizzonte ed impone l'uso di lampade ad alta efficienza luminosa.

## **LEGGE REGIONALE 27 MARZO 2000 - N. 17 MISURE URGENTI IN TEMA DI RISPARMIO ENERGETICO AD USO DI ILLUMINAZIONE ESTERNA E DI LOTTA ALL'INQUINAMENTO LUMINOSO**

IL CONSIGLIO REGIONALE  
ha approvato  
IL COMMISSARIO DI GOVERNO  
ha apposto il visto  
IL PRESIDENTE DELLA GIUNTA REGIONALE  
promulga

### Articolo 1

#### (Finalità)

1. La presente legge, ai fini di quanto stabilito dall'articolo 3, comma 3, punti 7, 8, 9 dello Statuto della Regione Lombardia, ha per finalità la riduzione sul territorio regionale dell'inquinamento luminoso e dei consumi energetici da esso derivanti e, conseguentemente, la tutela dell'attività di ricerca scientifica e divulgativa svolta dagli osservatori astronomici professionali di rilevanza regionale o provinciale o di altri osservatori scientifici nonché la conservazione degli equilibri ecologici sia all'interno che all'esterno delle aree naturali protette.
2. Ai fini della presente legge viene considerato inquinamento luminoso dell'atmosfera ogni forma di irradiazione di luce artificiale che si disperda al di fuori delle aree a cui essa è funzionalmente dedicata e, in particolar modo, se orientata al di sopra della linea dell'orizzonte.

### Articolo 2

#### (Compiti della Regione)

1. La Regione incentiva l'adeguamento degli impianti di illuminazione esterna esistenti anche in relazione alle leggi 9 gennaio 1991, n. 9 (Norme per l'attuazione del nuovo Piano energetico nazionale: aspetti istituzionali, centrali idroelettriche ed elettrodotti, idrocarburi e geotermia, autoproduzione e disposizioni fiscali) e 9 gennaio 1991, n. 10 (Norme per l'attuazione del piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia) per l'attuazione del Piano energetico nazionale.
2. Tutti i capitolati relativi all'illuminazione pubblica e privata devono essere conformi alle finalità della presente legge.

### Articolo 3

#### (Compiti delle province)

1. Le province:
  - a) esercitano il controllo sul corretto e razionale uso dell'energia elettrica da illuminazione esterna e provvedono a diffondere i principi dettati dalla presente

legge;

b) curano la redazione e la pubblicazione dell'elenco dei comuni nel cui territorio esista un osservatorio astronomico da tutelare; tale elenco comprende anche i comuni al di fuori del territorio provinciale purché ricadenti nelle fasce di protezione indicate.

#### Articolo 4

##### (Compiti dei comuni)

1. I comuni:

a) si dotano, entro tre anni dalla data di entrata in vigore della presente legge, di piani dell'illuminazione che disciplinano le nuove installazioni in accordo con la presente legge, fermo restando il dettato di cui alla lettera d) ed all'articolo 6, comma 1;

b) sottopongono al regime dell'autorizzazione da parte del Sindaco tutti gli impianti di illuminazione esterna, anche a scopo pubblicitario; a tal fine il progetto deve essere redatto da una delle figure professionali previste per tale settore impiantistico; dal progetto deve risultare la rispondenza dell'impianto ai requisiti della presente legge e, al termine dei lavori, l'impresa installatrice rilascia al comune la dichiarazione di conformità dell'impianto realizzato alle norme di cui agli articoli 6 e 9, oppure, ove previsto, il certificato di collaudo in analogia con il disposto della legge 5 marzo 1990, n. 46 (Norma per la sicurezza degli impianti), per gli impianti esistenti all'interno degli edifici; la procedura sopradescritta si applica anche agli impianti di illuminazione pubblica; la cura e gli oneri dei collaudi sono a carico dei committenti degli impianti;

c) provvedono, tramite controlli periodici di propria iniziativa o su richiesta di osservatori astronomici, o di altri osservatori scientifici, a garantire il rispetto e l'applicazione della presente legge sui territori di propria competenza da parte di soggetti pubblici e privati; emettono apposite ordinanze, entro sessanta giorni dalla data di entrata in vigore della presente legge, per la migliore applicazione dei seguenti principi per il contenimento sia dell'inquinamento luminoso che dei consumi energetici derivanti dall'illuminazione esterna, con specifiche indicazioni ai fini del rilascio delle licenze edilizie;

- d) provvedono, anche su richiesta degli osservatori astronomici o di altri osservatori scientifici, alla verifica dei punti luce non corrispondenti ai requisiti previsti dalla presente legge, disponendo affinché essi vengano modificati o sostituiti o comunque uniformati ai criteri stabiliti, entro 1 anno dalla notifica della constatata inadempienza, e, decorsi questi, improrogabilmente entro sessanta giorni;
- e) applicano, ove previsto, le sanzioni amministrative di cui all'articolo 8 impiegandone i relativi proventi per i fini di cui al medesimo articolo.

#### Articolo 5

(Disposizioni in materia di osservatori astronomici)

1. Sono tutelati dalla presente legge gli osservatori astronomici ed astrofisici statali, quelli professionali e non professionali di rilevanza regionale o provinciale che svolgano ricerca scientifica e/o divulgazione.
2. La Giunta Regionale, entro centoventi giorni dall'entrata in vigore della presente legge:
  - a) aggiorna l'elenco degli osservatori di cui all'art.10 anche su proposta della Società Astronomica Italiana e dell'Unione Astrofili Italiani;
  - b) provvede con apposita delibera a determinarne la relativa fascia di rispetto.
3. La Giunta Regionale provvede inoltre, entro centoventi giorni dall'entrata in vigore della presente legge, ad individuare mediante cartografia in scala adeguata le zone di protezione, inviando ai comuni interessati copia della documentazione cartografica.
4. Gli osservatori astronomici:
  - a) segnalano alle autorità territoriali competenti le sorgenti di luce non rispondenti ai requisiti della presente legge, richiedendone l'intervento affinché esse vengano modificate o sostituite o comunque uniformate ai criteri stabiliti;
  - b) collaborano con gli enti territoriali per una migliore e puntuale applicazione della presente legge secondo le loro specifiche competenze.

## Articolo 6

(Regolamentazione delle sorgenti di luce e dell'utilizzazione di energia elettrica da illuminazione esterna)

1. Per l'attuazione di quanto previsto dall'articolo 1, 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 sono eseguiti a norma antinquinamento luminoso e a ridotto consumo energetico; per quelli in fase di esecuzione, è prevista la sola obbligatorietà di sistemi non disperdenti luce verso l'alto, ove possibile nell'immediato, fatto salvo il successivo adeguamento, secondo i criteri di cui al presente articolo.
2. Sono considerati antinquinamento luminoso e a ridotto consumo energetico solo gli impianti aventi un'intensità luminosa massima di 0 cd per 1000 lumen a 90° ed oltre; gli stessi devono essere equipaggiati di lampade con la più alta efficienza possibile in relazione allo stato della tecnologia; gli stessi inoltre devono essere realizzati in modo che le superfici illuminate non superino il livello minimo di luminanza media mantenuta previsto dalle norme di sicurezza, qualora esistenti, e devono essere provvisti di appositi dispositivi in grado di ridurre, entro le ore ventiquattro, l'emissione di luci degli impianti in misura non inferiore al trenta per cento rispetto al pieno regime di operatività. La riduzione va applicata qualora le condizioni d'uso della superficie illuminata siano tali che la sicurezza non ne venga compromessa; le disposizioni relative ai dispositivi per la sola riduzione dei consumi sono facoltative per le strutture in cui vengano esercitate attività relative all'ordine pubblico, alla amministrazione della giustizia e della difesa.
3. E' concessa deroga per le sorgenti di luce internalizzate e quindi non inquinanti, per quelle con emissione non superiore ai 1500 lumen cadauna in impianti di modesta entità (fino a tre centri con singolo punto luce), per quelle di uso temporaneo che vengano spente entro le ore venti nel periodo di ora solare e entro le ore ventidue nel periodo di ora legale.
4. L'illuminazione delle insegne non dotate di illuminazione propria deve essere realizzata dall'alto verso il basso.
5. L'uso di riflettori, fari e torri-faro deve uniformarsi, su tutto il territorio regionale, a quanto disposto dall'articolo 9.

6. Nell'illuminazione di impianti sportivi e grandi aree di ogni tipo devono essere impiegati criteri e mezzi per evitare fenomeni di dispersione di luce verso l'alto e al di fuori dei suddetti impianti.
7. La modifica dell'inclinazione delle sorgenti di luce secondo i criteri indicati nel comma 2 del presente articolo deve essere attuata entro diciotto mesi dall'entrata in vigore della presente legge.
8. Le case costruttrici, importatrici o fornitrici devono certificare, tra le caratteristiche tecniche delle sorgenti di luce commercializzate, la loro rispondenza alla presente legge mediante apposizione sul prodotto della dicitura "ottica antinquinamento luminoso e a ridotto consumo ai sensi delle leggi della Regione Lombardia", e allegare, inoltre, le raccomandazioni di uso corretto.
9. E' fatto espresso divieto di utilizzare, per meri fini pubblicitari fasci di luce roteanti o fissi di qualsiasi tipo.
10. Nell'illuminazione di edifici e monumenti devono essere privilegiati sistemi di illuminazione dall'alto verso il basso. Solo nel caso in cui ciò non risulti possibile e per soggetti di particolare e comprovato valore architettonico, i fasci di luce devono rimanere di 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 di potenza impiegata entro le ore ventiquattro.

#### Articolo 7

##### (Norme Finanziarie)

1. All'autorizzazione delle spese previste dalla presente legge si provvederà con successivo provvedimento di legge.

#### Articolo 8

##### (Sanzioni per le zone tutelate)

1. Chiunque, nelle fasce di rispetto dei siti degli osservatori tutelati dalla presente legge, impiega impianti e sorgenti di luce non rispondenti ai criteri indicati negli articoli 6 e 9 incorre, qualora non modifichi gli stessi entro sessanta giorni

dall'invito dei Comandi di polizia municipale del comune competente, nella sanzione amministrativa da lire 400.000 a lire 1.200.000.

2. Si applica la sanzione amministrativa da lire 700.000 a lire 2.100.000 qualora detti impianti costituiscano notevole fonte di inquinamento luminoso, secondo specifiche indicazioni che sono fornite dagli osservatori astronomici competenti, e vengano utilizzati a pieno regime per tutta la durata della notte anche per semplici scopi pubblicitari o voluttuari.

3. I proventi di dette sanzioni sono impiegati dai comuni per l'adeguamento degli impianti di illuminazione pubblica ai criteri di cui alla presente legge.

4. I soggetti pubblici, ivi compresi i comuni, che omettano di uniformarsi ai criteri di cui alla presente legge, entro i periodi di tempo indicati, sono sospesi dal beneficio di riduzione del costo dell'energia elettrica impiegata per gli impianti di pubblica illuminazione fino a quando non si adeguano alla stessa e, entro e non oltre quattro anni, alla normativa vigente.

5. Il provvedimento di cui al comma 4 è adottato con deliberazione della Giunta Regionale, previa ispezione e su segnalazione degli osservatori astronomici territorialmente competenti.

## Articolo 9

### (Disposizioni relative alle zone tutelate)

1. Entro quattro anni dalla data di entrata in vigore della presente legge tutte le sorgenti di luce non rispondenti agli indicati criteri e ricadenti nelle fasce di rispetto devono essere sostituite e modificate in maniera tale da ridurre l'inquinamento luminoso e il consumo energetico mediante l'uso di sole lampade al sodio di alta e bassa pressione.

2. Per l'adeguamento degli impianti luminosi di cui al comma 1, i soggetti privati possono procedere, in via immediata, all'installazione di appositi schermi sulla armatura, ovvero alla sola sostituzione dei vetri di protezione delle lampade, nonché delle stesse, purché assicurino caratteristiche finali analoghe a quelle previste dal presente articolo e dall'articolo 6.

3. Per la riduzione del consumo energetico, i soggetti interessati possono procedere, in assenza di regolatori del flusso luminoso, allo spegnimento del 50

per cento delle sorgenti di luce entro le ore ventitre nel periodo di ora solare e entro le ore ventiquattro nel periodo di ora legale. Le disposizioni relative alla diminuzione dei consumi energetici sono facoltative per le strutture in cui vengono esercitate attività relative all'ordine pubblico e all'amministrazione della giustizia e della difesa.

4. Tutte le sorgenti di luce altamente inquinanti già esistenti, come globi, lanterne o similari, 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, nonché di vetri di protezione trasparenti. E' concessa deroga, secondo specifiche indicazioni concordate tra i comuni interessati e gli osservatori astronomici competenti per le sorgenti di luce internalizzate e quindi, in concreto, non inquinanti, per quelle con emissione non superiore a 1500 lumen cadauna (fino a un massimo di tre centri con singolo punto luce), per quelle di uso temporaneo o che vengano spente normalmente entro le ore 20 nel periodo di ora solare e entro le ore 22 nel periodo di ora legale, per quelle di cui sia prevista la sostituzione entro quattro anni dalla data di entrata in vigore della presente legge. Le insegne luminose non dotate di illuminazione propria devono essere illuminate dall'alto verso il basso. In ogni caso tutti i tipi di insegne luminose di non specifico e indispensabile uso notturno deve essere spente entro le ore ventitre ed entro le ore ventidue nel periodo di ora solare.

5. 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 0 cd per 1000 lumen a 90° ed oltre.

6. La modifica dell'inclinazione delle sorgenti di luce, secondo i criteri indicati, deve essere applicata entro sei mesi dalla data di entrata in vigore della presente legge.

## Articolo 10

## (Elenco degli osservatori)

1. Gli osservatori astronomici, astrofisici professionali da tutelare:
  - Osservatorio astronomico di Merate (LC)
  
2. Gli osservatori astronomici non professionali di grande rilevanza culturale, scientifica e popolare d'interesse regionale da tutelare sono:
  - Osservatorio astronomico Serafino Zani di Lumezzane (BS)
  - Osservatorio astronomico G.V. Schiaparelli di Campo dei Fiori (VA)
  - Osservatorio astronomico di Sormano (CO)
  
3. Gli osservatori astronomici, astrofisici non professionali di rilevanza provinciale che svolgono attività scientifica e/o divulgazione da tutelare sono:
  - Osservatorio Astronomico delle Prealpi Orobiche di Aviatico (BG)
  - Osservatorio Astronomico "Presolana" di Castione della Presolana (BG)
  - Osservatorio Astronomico Sharru di Covo (BG)
  - Civica Specola Cidnea di Brescia (BS)
  - Osservatorio privato di Bassano Bresciano (BS)
  - Osservatorio di Cima Rest - Masaga (BS)
  - Osservatorio sociale del Gruppo Astrofili Cremonesi di Cremona (CR)
  - Osservatorio Pubblico di Soresina (CR)
  - Osservatorio Astronomico provinciale del Lodigiano (LO)
  - Osservatorio sociale "A. Grosso" di Brugherio (MI)
  - Osservatorio Città di Legnano (MI)
  - Osservatorio Astronomico Pubblico di Gorgo San Benedetto Po (MN)
  - Osservatorio Pubblico Giuseppe Piazzi di Ponte in Valtellina (SO)

## Articolo 11

## (Disposizioni finali)

1. Entro centottanta giorni dall'entrata in vigore della presente legge la Giunta Regionale emana i criteri di applicazione della medesima.
2. E' concessa facoltà, anche ai comuni il cui territorio non ricada nelle fasce di rispetto di cui all'articolo 9, comma 1, di adottare integralmente i criteri previsti dall'articolo medesimo mediante l'approvazione di appositi regolamenti.

## Articolo 12

## (Entrata in vigore)

La presente legge entra in vigore sessanta giorni dopo la sua pubblicazione sul Bollettino ufficiale della Regione Lombardia.

La presente legge regionale è pubblicata nel bollettino ufficiale della Regione.

E' fatto obbligo a chiunque spetti di osservarla e farla osservare come legge della Regione lombarda.

Milano, 27 Marzo 2000

Roberto Formigoni

(approvata dal consiglio regionale nella seduta del 23 Febbraio 2000 e vistata dal commissario di governo con nota del 21 Marzo 2000, prot. n.23102/617)



*La nebulosa di Orione*



## Bibliografia

- AAVV, *Atlante del Cielo*, Giunti – 2002
- Cinzano Pierantonio, *Inquinamento luminoso e protezione del cielo notturno*, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti - 1997
- ENEL - Federelettrica, *Guida per l'esecuzione degli impianti di illuminazione pubblica*, 1990
- Falchi Fabio, Federici Alessandro, Cinzano Pierantonio, *Misurare la brillantezza del cielo con il CCD*, International Dark-Sky Association
- Fraticelli Fulvio, Palella Adriano, *Svelare la notte – Ovvero – La riduzione dell'inquinamento luminoso*, Dossier WWF – 1995 – CieloBuio, Coordinamento per la protezione del Cielo Notturmo
- Norma UNI 10439, *Illuminotecnica – Requisiti illuminotecnici delle strade con traffico motorizzato*, Luglio 2001
- Norma UNI 10819, *Luce e illuminazione – Impianti di illuminazione esterna – Requisiti per la limitazione della dispersione verso l'alto del flusso luminoso*, Marzo 1999
- Norma UNI 9316, *Impianti sportivi – Illuminazione per le riprese televisive a colori – Prescrizioni*, Aprile 1989
- Regione Lombardia, *Legge Regionale 27 marzo 2000 - N. 17 - Misure urgenti in tema di risparmio energetico ad uso di illuminazione esterna e di lotta all'inquinamento luminoso*

- Roman A., Cinzano P., Giacometti G. M., Giulini P. 2000, *Light pollution and possible effects on higher plants*, in *Measuring and modelling light pollution* (ed. P.Cinzano), Memorie della Società Astronomica Italiana
- Roman Andrea, *Gli effetti dell'inquinamento luminoso sulla fauna e sulla flora* – CieloBuio, Coordinamento per la protezione del Cielo Notturno
- Romanishin William, *An Introduction to Astronomical Photometry Using CCDs*, University of Oklahoma - 2001
- Rossi Carlo, *Nozioni di illuminotecnica*, VISUAL Regolamento di Attuazione LR 17/2000, CieloBuio, Coordinamento per la protezione del Cielo Notturno – Regione Lombardia – 2002