

# COELVM

PERIODICO BIMESTRALE PER LA DIVULGAZIONE DELL'ASTRONOMIA  
FONDATA DA GUIDO HORN-D'ARTURO  
EDITO DALL'OSSERVATORIO ASTRONOMICCO UNIVERSITARIO DI BOLOGNA

## LA NOSTRA COPERTINA

Gruppo di Galassie nel Pavone (NGC 6872). Foto eseguita il 18 settembre 1976 al primo fuoco del telescopio di 4 m di Cerro Tololo (Cile); emulsione IIIaJ+GG385, posa 105", osservatori Chincarini, Tarenghi.

### SOMMARIO:

PIERO TEMPESTI - La fotografia celeste attraverso le tappe fondamentali della sua storia.

GUGLIELMO RIGHINI - Un moderno e pratico astrolabio.

RENATO DE SANTIS - Le distanze delle stelle.

NOTIZIARIO: Rassegna delle Riviste e Notizie brevi (*Paolo Maffei*). — Rubrica dei lettori: Osservazioni di Giove durante l'opposizione 1974 (*Giancarlo Favero*). — Sospetto flare nella variabile V Sge (*Mauro Da Lio, Giampaolo Gambato*). — La tavola rotonda di Parigi sulle stelle novae ed oggetti affini (*Piero Rafanelli*). — Unione Astrofili Italiani (*Alfio Betti*). — Unione Astrofili Napoletani. - Gruppo Beneventano Astrofili. — Occasioni. — Recensione (*Corrado Bartolini*). — Avviso. — Fenomeni celesti del bimestre novembre-dicembre 1976; i principali fenomeni celesti dell'anno 1977; fenomeni celesti del bimestre gennaio-febbraio 1977 (*Alfio Betti*).

Abbonamento annuale al Periodico, anno 1977, compreso l'Almanacco di 72 pagine: Italia L. 8.000; Estero L. 10.000; numero separato L. 1.500; arretrati il doppio.

Inserzioni L. 500 per riga - Cambio indirizzo L. 150.  
Prezzo dell'Almanacco 1977 per i non abbonati L. 5.000.

Servirsi del Conto Corrente Postale 8/3853

Indirizzare tutta la corrispondenza a: Osservatorio Astronomico Universitario  
Redazione di « Coelum » - Casella Postale 596 - 40100 Bologna.

Spedizione in abbonamento postale - Gruppo 4\*

## La fotografia celeste attraverso le tappe fondamentali della sua storia

di PIERO TEMPESTI

### *I primordi.*

Le prime fotografie degli astri risalgono ai tempi delle dagherrotipie, cioè all'apparire della prima tecnica in grado di fornire immagini fotografiche paragonabili alle attuali come fedeltà e finezza di dettagli. Lo stesso DAGUERRE fece un tentativo di fotografare la Luna nel 1839, l'anno medesimo in cui la sua invenzione era stata presentata da ARAGO all'Accademia delle Scienze ed a quella delle Arti riunite a Parigi in seduta comune; sulla lastra apparve tuttavia solo un debole chiarore di forma approssimativamente circolare. Ma già l'anno seguente il tentativo riuscì a J. W. DRAPER che ottenne su una lastra dagherrotipica esposta per 20 minuti al fuoco di un rifrattore di 33 cm di apertura una buona immagine della Luna di 25 mm di diametro: la fotografia astronomica era nata.

Il procedimento di DAGUERRE consisteva nel registrare l'immagine, proiettata dall'obbiettivo nel piano focale della camera oscura, sopra una lastra di rame sulla quale era stato depositato per evaporazione uno strato di ioduro d'argento; la luce, com'è noto, agisce sulle molecole di ioduro separando l'iodio dall'argento (anche i sali d'argento di altri alogeni hanno efficace azione fotografica, ed oggi prevalentemente si usa il bromuro); tale fenomeno, detto *fotolisi*, interessa tuttavia un numero

troppo piccolo di molecole perché l'annerimento prodotto dall'argento liberato sia percettibile ad occhio, ed è necessario un successivo processo di amplificazione. Attualmente questa amplificazione si ottiene mediante il bagno di sviluppo, o rivelazione, che moltiplica per un fattore enorme il numero di molecole dissociate; l'azione della luce infatti dissocia solo pochissime molecole di un granulo di alogenuro e l'azione del rivelatore estende la dissociazione a tutte le molecole del granulo, lasciando invece inalterate quelle dei granuli non « intaccati » dalla luce; poiché un granulo contiene qualcosa come un miliardo di molecole, si comprende la entità dell'amplificazione (1). Nelle dagherrotipie invece l'amplificazione si otteneva sottoponendo la lastra, dopo l'esposizione alla luce, all'azione di vapori di mercurio il quale, amalgamandosi con l'argento liberato, formava minutissime goccioline più addensate dove la luce aveva agito maggiormente e più rade altrove. L'amplificazione fisica così ottenuta era molto più debole di quella usata in seguito e dovuta all'azione chimica del rivelatore; perciò per avere un'immagine sufficientemente contrastata occorre tempo di posa centinaia di volte maggiori di quelli odierni.

Nel 1842 LEREBOURS ottenne una dagherrotipia del Sole nella quale appariva il fenomeno dell'oscuramento al bordo: poiché si dubitò trattarsi non di una reale proprietà del disco solare, ma bensì di un fenomeno di solarizzazione (effetto fotografico già allora noto), FOUCAULT e FIZEAU si proposero di effettuare una fotografia con esposizione molto bassa ed il 2 aprile 1845 riuscirono ad ottenere con un tempo di posa per quei tempi brevissimo — 1/60 di secondo — un'immagine del Sole nella quale apparivano gruppi di macchie e che permise di escludere che l'oscuramento al bordo fosse un effetto fotografico. Questa fotografia si trova riprodotta in incisione nell'*Astronomie Populaire* di ARAGO ed è la prima fotografia astronomica di cui si abbia una riproduzione.

La fotografia di un'eclisse solare fu tentata da MAJOCCHI a Milano l'8 luglio 1842 con uno dei comuni apparecchi per dagherrotipie allora già assai diffusi; mentre riuscì ad ottenere, con due minuti di posa, l'immagine della sottile falce solare pochissimi minuti prima del secondo contatto, la stessa posa, durante la totalità, non bastò a mostrare la corona. Per l'eclisse del 28 luglio 1851 l'osservazione fotografica fu accuratamente programmata dagli astronomi tedeschi: A. BUSCH, con un riflettore di 60 mm di apertura e 79 cm di focale, ottenne con una posa di

(1) Per estese informazioni sul meccanismo del processo fotografico si veda l'articolo di Bonoli e Fusi-Pecchi a pag. 49 di questo stesso volume.

24 secondi una bella immagine dagherrotipica della corona e delle protuberanze. Questa fotografia, che si trova riprodotta nel volume 28 delle *Beobachtungen der K. Sternwarte zu Koenigsberg*, è la prima fotografia astronomica, e forse anche la prima fotografia scientifica, che ancora oggi si conservi.

Il 17 luglio 1850 gli americani W. BOND e J. A. WHIPPLE erano riusciti intanto nella prima fotografia stellare, ottenendo in due minuti di posa una dagherrotipia di Wega con il riflettore di 38 cm di apertura dell'Osservatorio di Cambridge; nel 1857 G. P. BOND, figlio del precedente, con lo stesso telescopio, usando anziché la dagherrotipia il nuovo e più sensibile procedimento al collodio su lastre di vetro con rivelazione chimica dell'immagine, fotografò in 8 secondi la stella doppia ζ Ursae Majoris (Mizar) ottenendo immagini così nitide delle due componenti da poter effettuare misure con la precisione di 0",1 d'arco su una singola fotografia: da più lastre dedusse il valore 14",49 per la distanza angolare fra le due stelle e 147°,50 per l'angolo di posizione; le misure micrometriche visuali di STRUVE davano 14",50 e 147°,40.

Nello stesso anno W. de LA RUE, usando lastre al collodio con un riflettore newtoniano di 33 cm di apertura e 300 di focale, otteneva, con i due astri alla stessa altezza, buone immagini della Luna in 9 secondi ed immagini di Giove di uguale annerimento in 12 secondi; poiché si sapeva che la Luna ha una luminanza visuale più che doppia di quella del disco di Giove, ne dedusse che il potere attinico, o chimico, della luce cresce sensibilmente in rapporto a quello ottico nel passare dal colore bianco-giallo della Luna a quello più bluastro del pianeta. Si cominciò così a rendersi conto della necessità di tenere in considerazione nell'osservazione astronomica (o forse dovremmo dire, già allora, astrofisica?) del diverso comportamento cromatico dell'occhio e della lastra fotografica.

Quanto già allora il nuovo mezzo di osservazione astronomica apparisse promettente si può dedurre da ciò che lo stesso G. P. BOND, che è stato uno dei maggiori pionieri in questo campo, scriveva nel 1857 a W. MITCHELL: « ... l'impegno in tempo, manipolazioni chimiche ecc. è assai considerevole... ma i risultati che si possono ricavare già dalle esperienze finora fatte sono del più alto interesse ed aprono per il futuro possibilità che possiamo appena osare di figurarci. Anche se soltanto potesse essere raggiunto un progresso uguale a quello fatto dal 1850, sarebbe senza dubbio di importanza incalcolabile per l'Astronomia.

Lo stesso oggetto, a Lyrae, che nel 1850 richiedeva 100 secondi per dare un'immagine ancora imperfetta, viene ora fotografato istantaneamente come un dischetto simmetrico adattissimo per misure microme-

triche. Allora si era limitati ad un paio di dozzine delle stelle più splendide ed ora si possono fotografare tutte quelle visibili ad occhio nudo. Possiamo avvertire progressi decisivi da una settimana all'altra, ... La quantità di materiale che può essere raccolto in una bella notte è sorprendente. Le lastre una volta ottenute possono essere conservate per lo studio futuro di giorno e con comodo. Il risultato è là, senza posto per dubbi od errori di registrazione, fedelmente conservato. È lecito pensare che se portassimo il nostro telescopio su un'alta montagna potremmo raggiungere l'ottava grandezza.

Quale più meraviglioso metodo potrebbe essere escogitato per lo studio delle stelle fisse e per la soluzione dei problemi della parallasse annua, se potessimo ottenere le immagini di stelle fino alla decima grandezza? Pensi Ella che gruppi di 10 e perfino di 50 stelle quali sono presenti nel campo visuale, possono essere fotografate altrettanto rapidamente — magari in pochi secondi — quanto una sola stella e che ciascuna può dopo essere misurata con straordinaria precisione. E non ho ancora toccato due importanti aspetti della fotografia stellare: l'uno è che le intensità e le dimensioni delle immagini, in relazione al tempo durante il quale la lastra è rimasta esposta, consentono di misurare la grandezza stellare; l'altro è che le misure delle distanze e degli angoli di posizione nelle stelle doppie, quali abbiamo ricavato dalle nostre migliori lastre, sono della stessa precisione delle migliori misure micrometriche visuali. Le nostre future fotografie saranno assai più perfette e daranno risultati ancora migliori.

Al tempo delle dagherrotipie solo gli astri più splendidi — Il Sole, la Luna e le stelle di prima magnitudine — potevano essere fotografati; con l'uso del collodio quale supporto dell'alogenuro sensibile, introdotto da F. S. ARCHER nel 1851 e che aveva consentito di sfruttare pienamente la potenzialità dell'amplificazione chimica dell'immagine latente, cioè del processo di sviluppo ideato da F. TALBOT alcuni anni prima, si era potuto cominciare a fotografare il cielo stellato. Era stato dato il nome di *collodio* ad una soluzione vischiosa ottenuta sciogliendo nitrocellulosa in alcool; da questa soluzione, spalmata in strato sottile su di una superficie, il solvente evapora rapidamente lasciando una pellicola plastica e trasparente di nitrocellulosa; per l'uso fotografico si dissolveva nel collodio una piccola quantità di ioduro di potassio, poi si spalmava questa soluzione su una lastra di vetro e mentre lo strato era ancora molle si immergeva la lastra in un bagno di nitrato d'argento per far precipitare nel collodio l'ioduro d'argento. La lastra così preparata doveva essere utilizzata immediatamente, perché la pellicola di collodio, una volta secca, diviene impermeabile all'acqua e non possono quindi più

agire i bagni di sviluppo e di fissaggio. Con queste lastre la sensibilità del processo fotografico fu accresciuta per un fattore di oltre 100 rispetto al procedimento di DAGUERRE, ma il progresso decisivo si ebbe nel 1871, anno in cui l'inglese R. L. MADDOX introdusse l'uso della gelatina animale contenente incorporato il bromuro d'argento e spalmata su una lastra di vetro; questo nuovo materiale sensibile, che fondamentalmente è quello stesso odierno, consentì la rapida diffusione della fotografia, e nell'applicazione astronomica permise ben presto di spingere l'osservazione a profondità celesti dove l'occhio, anche armato dei maggiori telescopi, non era mai arrivato.

#### *Le innovazioni strumentali.*

L'osservazione fotografica aveva reso necessaria un'innovazione tecnica avvenuta nel 1864: l'introduzione dell'obbiettivo acromatizzato per la regione fotografica dello spettro, cioè per il blu-violetto. È noto infatti che una lente semplice non concentra nel medesimo fuoco la luce di diversa lunghezza d'onda, ma bensì concentra in un fuoco più vicino la luce di minor lunghezza d'onda, cioè quella dell'estremo violetto, ed in un fuoco più lontano quella dell'estremo rosso; alla luce dei colori intermedi — azzurro, verde, giallo, ecc. — corrispondono fuochi intermedi. Questo fenomeno si dice *aberrazione cromatica* ed è chiaro che in queste condizioni, sia guardando ad occhio attraverso un cannocchiale munito di una lente semplice, sia fotografando l'immagine data da un tale obbiettivo, non si riesce mai, per quanto si tenti di aggiustare la distanza dell'oculare o della lastra dall'obbiettivo, ad avere l'immagine nitida di una stella (né di qualsiasi altro oggetto che emetta luce di più colori). Questa aberrazione viene corretta utilizzando un obbiettivo costituito da due lenti di vetro diverso, uno pesante detto *flint* e l'altro leggero detto *crown*; le curvature delle quattro superficie possono essere calcolate in modo tale che il sistema ottenuto sia convergente e che le radiazioni comprese entro una prescelta ed ampia regione dello spettro abbiano tutte con sufficiente approssimazione lo stesso fuoco. Un tale sistema si dice *acromatizzato* od *acromatico*, ed a seconda della regione spettrale entro la quale l'aberrazione cromatica è corretta si distinguono diverse specie di obbiettivi acromatici.

Il primo obbiettivo acromatico fu realizzato da DOLLOND nel 1753 e da allora, per oltre un secolo, siccome l'osservazione veniva fatta solamente ad occhio, gli obbiettivi venivano calcolati in modo che la regione spettrale «corretta» fosse quella dove l'occhio ha la massima sensibilità, cioè quella del verde e giallo, fra 4800 e 6000 Ångstrom

circa<sup>(2)</sup>: l'obbiettivo così corretto è il ben noto *doppietto visuale* del quale sono muniti la stragrande maggioranza dei cannocchiali astronomici e terrestri. La radiazione di 4861 Å (corrispondente alla riga azzurro-verde H<sub>β</sub> dell'idrogeno) e quella di 6563 Å (riga rossa H<sub>α</sub> dell'idrogeno) hanno nel doppietto visuale lo stesso fuoco, quello per cui è stato calcolato l'obbiettivo; fra questi due estremi la lunghezza focale varia pochissimo ed ha un minimo attorno a 5600 Å, al di là invece comincia a crescere rapidamente, sia dalla parte delle maggiori lunghezze d'onda (rosso), sia, ed ancor più rapidamente, da quella delle minori (violetto). Gli obbiettivi «acromatici» non sono quindi perfettamente corretti; la variazione di focale è però ridotta, nella regione spettrale che interessa, a valori accettabili e la residua aberrazione degli obbiettivi corretti si suol chiamare *spettro secondario*.

Se si vuol porre al fuoco di un doppietto visuale una lastra fotografica, non si riesce a trovare un fuoco medio fotografico soddisfacente; infatti l'alogenuro d'argento è sensibile dall'ultravioletto (cioè da sotto i 4000 Å) fino al verde (5000 Å); l'ultravioletto è assorbito dal vetro delle lenti e non ci dà fastidio, ma comunque la lastra lavora fra 4000 e 5000 Å, con il massimo di sensibilità nel violetto, proprio dove la variazione di focale del doppietto è massima. Per la fotografia si deve calcolare il doppietto in modo che la focale abbia la minima variazione entro questa regione, che è detta appunto regione fotografica dello spettro; al di fuori di questa, e specialmente nel giallo-rosso, la focale allora varia rapidamente, ma per queste radiazioni l'alogenuro d'argento è cieco. Un obbiettivo così corretto si dice *doppietto fotografico*, oppure, se si vuol precisare meglio, *astrografico* perché è utilizzato solo per uso astronomico; per la comune fotografia l'obbiettivo viene calcolato con una correzione cromatica diversa. Gli obbiettivi astrografici quando furono introdotti, ed ancora per molti decenni, si dissero acromatizzati per la *radiazione chimica* o *attinica*; nei trattati di Fisica di fine secolo si può leggere infatti, a proposito dell'energia radiante, di raggi calorifici (radiazione infrarossa), di raggi attinici (radiazione violetta ed ultravioletta), ecc. Ed ancora nel 1922, nell'ottimo trattato divulgativo del NEWCOMB-ENGELMANN *Populäre Astronomie* si parla di obbiettivi *corretti per i raggi chimici*.

Naturalmente, se si usano le emulsioni fotografiche sensibili anche al giallo ed al rosso che entrarono in uso nei primi anni di questo secolo,

<sup>(2)</sup> L'Ångstrom è un'unità di misura di lunghezza molto usata in Ottica ed in Spettroscopia; vale un decimillesimo di millimetro e si abbrevia Å. La radiazione dello spettro visibile è compresa fra 4000 ed 8000 Å di lunghezza d'onda.

il doppietto astrografico non è più idoneo, a meno di non ricorrere ad opportuni accorgimenti cui accenneremo più avanti.

Siccome le condizioni di acromatizzazione e di convergenza utilizzate per il calcolo impegnano una sola superficie per ciascuna delle due lenti, le curvature delle rimanenti due superficie del doppietto vengono calcolate in modo da correggere altre aberrazioni (aberrazione di sfericità, coma ecc.). In seguito furono utilizzati nella fotografia astronomica anche obbiettivi con tre lenti, come il famoso tripletto Taylor, e con quattro e più lenti, come il quadrupletto *Zeiss Vierlinser*. Con obbiettivi di più di due lenti si potrebbe, volendo, portare approssimativamente ad un medesimo fuoco l'intera regione spettrale del visibile, dall'estremo violetto a quello rosso; si preferisce invece di solito correggere l'aberrazione cromatica per una più ristretta regione spettrale utilizzando a a questo scopo solo due delle sei od otto curvature disponibili e calcolare le rimanenti in modo da correggere le aberrazioni geometriche ancora meglio che nel doppietto; tanto più che se si ha l'esigenza di un perfetto acromatismo è meglio ricorrere ai riflettori che sono del tutto esenti da aberrazione cromatica. I moderni quadrupletti forniscono immagini stellari praticamente perfette su un campo di diversi gradi: il *Vierlinser* di 20 cm di apertura e 114 di focale, progettato dalla Zeiss di Jena ed in funzione da una dozzina di anni negli Osservatori di Torino e di Teramo, fornisce ottime immagini su un campo di 5°, ed immagini leggermente deformate ma sempre ben utilizzabili per fotometria stellare corrente, entro 8°.

Il problema dell'aberrazione cromatica non esiste, come abbiamo detto, per i riflettori, però il loro impiego per la fotografia è limitato dal fatto che il campo di un comune parabolico è estremamente ridotto per la presenza della coma, deformazione delle immagini fuori dell'asse ottico che aumenta rapidamente col crescere della distanza da questo; a titolo di esempio, diremo che il riflettore di 60 cm di apertura e 210 di focale dell'Osservatorio di Lojano presenta immagini perfette entro un campo di non più di 20'. Per oltre mezzo secolo, finché non fu escogitata per i riflettori una soluzione di cui parleremo più avanti, la fotografia stellare a grande campo fu possibile solo con i rifrattori.

Le immagini delle stelle appaiono sulla lastra fotografica come piccolissimi dischetti dal bordo sfumato, più grandi per le stelle più splendide e più piccoli per quelle più deboli, tanto che fino a quarant'anni or sono la misura del diametro delle immagini era il metodo più usato per la determinazione delle magnitudini fotografiche. La dimensione del dischetto è dovuta essenzialmente ad effetto di diffusione della luce nella gelatina (l'azione fotografica si allarga a macchia d'olio attorno alla mi-



Fig. 1 - La nebulosa di Orione fotografata con l'astrografo *Zeiss Vierlinser* di 20 cm di apertura dell'Osservatorio di Teramo. Attorno alla stella più splendente è ben visibile l'alone; la lastra era fornita di strato antihalo, ma la stella (di magnitudine fotografica 2,7), eccessivamente splendente per la posa (60 minuti con lastra Kodak 103a-0), mostra ugualmente il fenomeno.

croscopica immagine ottica della stella) nonché all'agitazione atmosferica (il cosiddetto *seeing*). L'effetto di diffusione è predominante per le stelle più luminose (si parla, ovviamente di luminosità apparente), mentre dell'agitazione atmosferica risentono di più le immagini deboli; infatti per le stelle più luminose la figura dovuta all'agitazione, cioè al continuo spostarsi casualmente qua e là dell'immagine, resta affogata dentro la ben più grande figura di diffusione della luce dentro la gelatina. Il movimento dovuto all'agitazione atmosferica è statisticamente simmetrico e la diffusione è simmetrica per la natura stessa del fenomeno; perciò l'immagine stellare assume una forma circolare, purché naturalmente il moto orario del telescopio sia perfetto e non ci siano errori di guida da parte dell'osservatore. Per effettuare le fotografie astronomiche, che spesso richiedono lunghe pose, occorre che il telescopio segua il movimento apparente della sfera celeste e perciò ci si deve servire dell'assetto equatoriale con un motore ben regolato e con un dispositivo per le correzioni micrometriche, cioè quello che comunemente si chiama dispositivo di *guida*. Per *guidare* lo strumento per lo più ci si vale di un telescopio visuale accoppiato rigidamente a quello fotografico ed attrezzato con un crocicchio oculare ove una stella sufficientemente luminosa possa essere centrata e mantenuta fissa mediante il dispositivo di correzione per tutta la durata della posa. Per grandi riflettori parabolici talvolta la guida viene effettuata disponendo un oculare in posizione eccentrica sul piano focale dello stesso telescopio fotografico e centrando sul crocicchio una stella marginale che forma la propria immagine fuori dal porta lastra.

Il diametro dell'immagine, a pari perfezione ottica dello strumento, cresce col crescere della lunghezza focale. Come dato orientativo, diremo che il quadrupletto *Zeiss Vierlinser* 20/114 fornisce con 40 minuti di posa, su lastre Kodak 103a-0, immagini di 0,1 mm per stelle di 11<sup>a</sup> magnitudine e di 0,05 mm per stelle di 14<sup>a</sup>; le stelle di 3<sup>a</sup> magnitudine appaiono, con tali pose, come enormi dischi di diffusione di quasi un millimetro. A pari lunghezza focale, le immagini date da un riflettore, in prossimità dell'asse ottico, sono più piccole di quelle date da un rifrattore e ciò soprattutto per la completa assenza di aberrazione cromatica. Talvolta le immagini delle stelle più splendide appaiono circondate da un anello delimitato nettamente verso l'interno e sfumato verso l'esterno: si tratta dell'alone dovuto alla riflessione totale della luce della stella sulla faccia dell'alone dovuto alla riflessione totale della luce della stella sulla faccia posteriore del vetro della lastra, e viene eliminato nelle lastre munite posteriormente di un apposito strato antihalo. Nelle fotografie ottenute con i riflettori le immagini delle stelle più luminose presentano per lo

più quattro caratteristici raggi perpendicolari tra loro e che sono dovuti a diffrazione da parte dei quattro bracci che sostengono lo specchio secondario, od il portalastra, anteposto, sul percorso della luce proveniente dalle stelle, allo specchio principale.

Il riflettore parabolico, se ha lo svantaggio del campo utile molto piccolo, tuttavia, potendo raggiungere diametri di gran lunga maggiori che non il rifrattore, ha un potere di penetrazione assai superiore. Quindi per la fotografia di campi ristretti — diciamo, a titolo orientativo, non più di mezzo grado — si usano i riflettori; per le fotografie a campo esteso un tempo si potevano usare solo i rifrattori fotografici, o *astrografi*, poi fu trovata un'altra soluzione di cui parleremo più avanti. Gli oggetti debolissimi e di piccola estensione apparente, come le galassie lontane, gli ammassi globulari, le nebulose planetarie, venivano fotografate solamente con i riflettori parabolici. L'astrografo invece trovò il suo campo specifico di impiego nell'osservazione di campi di stelle variabili, nelle fotografie di sorveglianza del cielo (le *patrol plates* degli astronomi di lingua inglese), nonché nei lavori di astrometria (posizioni stellari, moti propri, parallassi ecc.); rifrattori muniti di un doppietto fotografico di grandi dimensioni, come quello di 66 cm di apertura ed 11 metri di focale dell'Osservatorio di Yale negli Stati Uniti, sono usati per ottenere fotografie di piccolo campo ma di grande scala per uso astrometrico: determinazione di parallassi stellari, misure su stelle doppie ecc.

La lastra fotografica viene collocata per lo più direttamente nel piano focale dell'obiettivo del telescopio, senza far uso dell'oculare; è il telescopio stesso cioè che funge da macchina fotografica e certe lenti che in qualche caso si antepongono alla lastra, come ad esempio la lente correttiva di Ross, servono per correggere certe residue aberrazioni dell'obiettivo. Qualche volta è vero si applica, all'estremità oculare di piccoli telescopi, un comune apparecchio fotografico senza obiettivo: questo apparecchio serve però solo per disporre dell'otturatore a tempi brevissimi oppure per il meccanismo di scorrimento della pellicola.

La scala della fotografia dipende dalla lunghezza focale del telescopio; chiamando  $f$  questa lunghezza, ad una distanza angolare  $\alpha$  sul cielo, corrisponde sulla lastra una lunghezza data dalla formula

$$d = f \operatorname{tg} \alpha$$

e siccome nella fotografia telescopica nella maggior parte dei casi si ha a che fare con campi di piccola estensione angolare — da poche decine di primi a 5 o 6 gradi — si può usare con ottima approssimazione la formula  $d = f \alpha$ , con  $\alpha$  misurato in radianti, oppure

$$d = 0,00029 \alpha f \quad (*)$$

con  $\alpha$  misurato in primi d'arco. Così si trova, ad esempio, che la Luna, la quale ha in media il diametro angolare 31', dà con un telescopio di un metro di focale un'immagine di 9 millimetri. Da qui la regola mnemonica, per calcoli approssimativi a mente, che l'immagine del Sole e della Luna ha un diametro in centimetri uguale alla lunghezza focale del telescopio in metri. Perciò si valuterà subito a mente che un comune apparecchio fotografico con obiettivo di 50 mm di focale fornisce un'immagine della Luna di mezzo millimetro, ed un obiettivo di 5 metri di focale darà invece un'immagine di 5 centimetri. Dalla formula (\*) si ricava, ponendo  $d = 1$ , che la scala di una fotografia, misurando  $f$  in millimetri, risulta  $3438/f$  primi d'arco; così, ad esempio, un telescopio di un metro di focale fornisce una scala di 3',44 per millimetro.

Gli astrografi con più di due lenti, ben corretti per un campo esteso, hanno focale relativamente corta, in generale non superiore a due metri. Ricordiamo qui però che un moderno rifrattore fotografico di 38 cm di apertura e 688 cm di focale, progettato dall'Ing. C. MORATS e che fornisce un campo perfetto di quasi due gradi, è stato installato quattro anni fa all'Osservatorio di Pino Torinese dove è utilizzato per osservazioni astrometriche. Fino a non molti anni fa l'astrometria, cioè la determinazione di posizioni, moti propri, parallassi, ecc., era dominio incontrastato dei rifrattori; recentemente si sono cominciati ad utilizzare con successo anche riflettori appositamente progettati: nello stesso Osservatorio di Pino nel 1974 è stato installato un riflettore astrometrico di un metro di apertura e 10 metri di focale.

#### *L'inizio della ricerca fotografica sistematica.*

Nel 1864, col primo obiettivo astrografico — un doppietto di 28 cm di apertura — L. M. RUTHERFORD fotografò su lastre al collodio e pose di 3 minuti, stelle fino alla 9<sup>a</sup> magnitudine; il progresso era stato notevolissimo e dovuto sia alla maggiore sensibilità del nuovo processo fotografico, sia al perfetto foceggiamento consentito dall'obiettivo. Pochi anni più tardi, l'avvento dell'emulsione di bromuro d'argento in gelatina, permise di raggiungere con pochi minuti di posa stelle di 14<sup>a</sup> magnitudine: i progressi confermarono rapidamente le entusiastiche previsioni di BOND!

Oltre alla maggiore sensibilità, le lastre con gelatina presentavano su quelle a collodio un enorme vantaggio operativo che fu decisivo per la rapida diffusione della fotografia nella ricerca scientifica e per farla diventare in pochi decenni un'attività di massa. Mentre l'emulsione in

gelatina viene utilizzata allo stato secco e quindi le lastre possono essere prodotte da un fabbricante ed acquistate pronte per l'impiego dall'utente, le lastre al collodio, come sappiamo, dovevano essere impressionate dalla luce prima che lo strato di collodio, appena preparato, seccasse; e perciò il fotografo doveva prepararsi le lastre pochi minuti prima dell'esposizione, con grande dispendio di tempo e con necessità di apposite attrezzature nonché di addestramento.

L'introduzione di questa nuova tecnica fotografica divide l'epoca della fotografia astronomica occasionale da quella dell'uso sistematico del nuovo mezzo di osservazione. Nel 1880 H. DRAPER, con un obiettivo astrografico di 18 cm di apertura ed una posa di 51 minuti, ottenne la prima fotografia della nebulosa di Orione che mostrò particolari di struttura ed un'estensione prima insospettati; negli anni successivi fu iniziato da vari astronomi un programma di fotografie di nebulose (con riflettori) e della Via Lattea con rifrattori a grande campo, imprese che culminarono, a cavallo fra i due secoli, nelle celebri serie di fotografie di E. E. BARNARD e di M. WOLF che rivelarono innumerevoli nubi stellari e nebulose oscure della Via Lattea e mostrarono che le plaghe oscure già note da tempo non erano « vuoti » di stelle, ma nubi cosmiche di tenue materia diffusa interstellare.

Le nebulose fino ad allora erano apparse disegnate in modo approssimativo e con struttura amorfa; solo Lord ROSSE col suo grande telescopio a specchio di 180 cm di apertura aveva, nel 1845, rilevato la conformazione a spirale di alcune poche. La fotografia mise subito in evidenza finezze di struttura: quella che ancora per molti decenni si sarebbe continuata a chiamare « nebulosa » di Andromeda e che all'osservazione visuale, anche con i grandi telescopi, appare una nebulosità ellittica di luminanza decrescente verso il bordo, senza che si possa in alcun modo arguirne la configurazione spaziale, nelle fotografie mostrò evidente la natura di spirale appiattita vista obliquamente. Inoltre le nebulose apparvero in numero insospettato: mentre il *Catalogo Generale di nebulose ed ammassi stellari* (*New General Catalogue*) pubblicato da J. L. DREYER nel 1888 elencava 8 mila di tali oggetti, alla fine del secolo si stimava che le nebulose fotografabili dai massimi telescopi di allora fossero 200 mila; e l'enorme maggioranza di queste risultavano essere spirali, proprio il tipo che all'epoca dell'osservazione visuale appariva una rara eccezione.

Nel campo dell'Astronomia del sistema solare, già nel 1860, in occasione dell'eclisse totale del 18 luglio, SECCHI e W. de LA RUE avevano potuto mostrare, in base a misure fatte sulle fotografie, che le protuberanze, scoperte e descritte da B. VASSENIUS più di un secolo prima, sono fenomeni solari, e non lunari o addirittura terrestri come molti ritene-



Fig. 2 - In questa fotografia della nebulosa *Trifida* nel Sagittario, ottenuta con 2<sup>h</sup>30<sup>m</sup> di posa dai noti dilettanti Vacchi, Sassi e Sette al loro Osservatorio a S. Vittore (Bologna), si vede in basso la traccia lasciata dal pianetino *Ophelia* di 14<sup>a</sup> magnitudine (opposizione del 1973).

vano. La constatazione che su una serie di fotografie dell'eclisse le protuberanze mantenevano inalterata la loro posizione rispetto al Sole mentre la Luna vi scorreva davanti fu decisiva. Con notevole successo la fotografia fu applicata sistematicamente a partire dal 1891 da M. WOLF alla ricerca dei pianetini. Poiché questi minuscoli astri attorno all'epoca dell'opposizione si muovono rapidamente rispetto alle stelle, su una fotografia fatta con posa sufficientemente lunga, in mezzo alle immagini puntiformi delle stelle appare la traccia allungata lasciata dall'asteroide. Mediamente un pianettino in vicinanza dell'opposizione si sposta di 1' in due ore; perciò su una fotografia ottenuta con posa di due ore con un telescopio di 150 cm di focale, in mezzo alla moltitudine dei dischetti delle stelle aventi 5 o 10 centesimi di millimetro di diametro appare un segmento della lunghezza di mezzo millimetro, facilmente individuabile anche su una lastra dove appaiono migliaia di stelle. Mentre nel trentennio 1861-1890 erano stati scoperti visualmente 240 pianetini, nei trenta anni successivi all'introduzione della tecnica fotografia di ricerca ne furono scoperti 631, benché evidentemente col crescere del numero dei pianetini conosciuti diventi di per sé sempre più difficile scoprirne ancora.

Anche la cartografia lunare con la fotografia entrò in una nuova era: l'atlante fotografico della Luna realizzato con le bellissime fotografie fatte da LOEWY e PUISEUX dell'Osservatorio di Parigi tra la fine del secolo scorso ed il principio di questo, segna una tappa importante nella storia della selenografia. Solo dopo quasi 60 anni questo atlante veniva superato da quello pubblicato da J. P. KUIPER con fotografie ottenute in vari Osservatori (Pic du Midi, M. Wilson, Mc Donald, Lick, Yerkes) e che rappresenta l'emisfero lunare in 230 carte.

A proposito delle osservazioni nell'ambito del sistema solare, ci piace qui ricordare che in occasione dell'eclisse totale di Sole del 1° gennaio 1889 numerosi fotografi dilettanti si dislocarono lungo la linea della centralità in California per ottenere una serie di fotografie della corona su un arco di tempo quanto più possibile lungo; alcuni, utilizzando grandi obbiettivi da ritratto (si usavano allora a questo scopo anche obbiettivi fino a 15 cm di apertura ed 80 cm di focale!), ottennero ottimi risultati.

Modesti risultati dette invece la fotografia delle superficie planetarie, soprattutto per la scarsa definizione delle immagini causata dall'agitazione dell'atmosfera terrestre; anche le immagini fotografiche fornite dai maggiori telescopi erano fino a pochi decenni or sono ben lungi dal mostrare la ricchezza di dettagli rilevata, in special modo per Marte, dai grandi osservatori visuali quali SCHIAPARELLI, LOWELL, CERULLI, ANTONIADI; solo con gli strumenti installati ad alta quota, come quelli del

Pic du Midi, di Lick e del Palomar, si poté in epoche recenti ottenere fotografie utili per il tracciamento di mappe planetarie; senza considerare ovviamente i recentissimi risultati ottenuti con le stazioni orbitanti o in loco.

La fotografia astronomica fu utilizzata per effettuare durante le eclissi totali di Sole una verifica della teoria della relatività generale negli anni immediatamente seguenti la sua enunciazione. Secondo la relatività infatti, a causa del campo gravitazionale solare, la luce delle stelle che passa rasente il Sole deve essere deviata dalla propagazione in linea retta di  $1''{,}745$  (secondi d'arco) e l'entità della deviazione è inversamente proporzionale alla distanza angolare della stella dal centro del disco solare; ad esempio, una stella visibile durante l'eclisse a  $15'$  dal bordo del Sole deve apparire allontanata da questo di  $0''{,}87$  ed una che si trova ad un grado di distanza deve subire uno spostamento di  $0''{,}35$ . Per la verifica dell'effetto relativistico occorre misurare lo spostamento di numerose stelle che appaiono vicine al Sole durante l'eclisse, rispetto alla posizione osservata quando appaiono di notte lontano dal Sole onde accertare se lo spostamento eventualmente presente segue la legge ora detta. E qui si sfrutta una delle caratteristiche prerogative della fotografia, cioè di fissare la situazione in un dato istante e di consentire poi con comodo in laboratorio il confronto con la situazione analogamente fissata in un altro istante. La presenza dell'effetto relativistico si stabilisce misurando le posizioni relative delle immagini fotografiche di stelle circostanti il Sole eclissato, su due lastre, una esposta durante la fase totale e l'altra alcuni mesi prima o dopo, quando la regione del cielo dove avviene l'eclisse appare alla stessa altezza di notte. Le fotografie devono essere fatte col medesimo strumento, meglio ancora se lasciato nella medesima postazione, e con numerosi accorgimenti per evitare le cause di errori sistematici. Naturalmente, per ottenere sulla lastra spostamenti misurabili occorre usare telescopi di lunghezza focale non troppo piccola (perché un secondo d'arco corrisponda sulla lastra ad almeno un centesimo di millimetro ci vuole un obbiettivo di almeno due metri di focale).

Il primo tentativo fu effettuato in occasione dell'eclisse del 29 maggio 1919 da due spedizioni: CROMMELIN-DAVIDSON nel Brasile ed EDDINGTON-COTTINGHAM nella Nuova Guinea, le quali usarono rispettivamente obbiettivi di 5,70 e di 3,44 metri di focale. L'occasione era molto favorevole perché il Sole si trovava presso le Jadi e quindi vicino a numerose stelle di 5<sup>a</sup> e 6<sup>a</sup> magnitudine facilmente fotografabili. Infatti nel Brasile, con l'obbiettivo diaframmato a soli 10 cm per attenuare la luce del cielo e quella della corona, furono prese due fotografie con 20 secondi di posa sulle quali risultarono misurabili 7 stelle, la più vicina a  $10'$  dal disco

solare e la più lontana a 2°. Sulle fotografie della Nuova Guinea apparvero invece solo 5 stelle misurabili. A metà luglio, quando le Jadi cominciarono ad essere visibili di notte alla stessa altezza, furono prese altre fotografie con gli stessi strumenti; queste fotografie notturne furono ottenute esponendo la lastra dalla parte del vetro, così da poterle porre sulle lastre dell'eclisse gelatina contro gelatina in modo da far quasi coincidere le corrispondenti immagini ed averle tutte e due a fuoco nell'oculare dello strumento di misura; rese le due lastre ben solidali, misurando le posizioni relative delle due immagini di ciascuna stella è possibile verificare se esiste uno spostamento, durante l'eclisse, dell'entità prevista alle varie distanze dal Sole. La variazione della lunghezza focale per la differenza di temperatura fra il momento dell'eclisse e la notte delle fotografie di confronto causa, sulla fotografia dell'eclisse, un allontanamento delle immagini stellari dal Sole, spostamento che va a sovrapporsi a quello cercato. Però i due effetti — quello relativistico e quello strumentale — sono separabili con procedimenti matematici perché seguono due leggi diverse: mentre l'effetto relativistico diminuisce con la distanza dal Sole, l'effetto dell'allungamento della focale dà spostamenti proporzionali alla distanza dal centro del Sole (supponendo il Sole al centro della lastra). Bisogna poi tener conto delle varie cause note che modificano la posizione apparente delle stelle durante i mesi intercorrenti fra le due serie di fotografie: parallasse, aberrazione ecc.. Si tratta di misure estremamente delicate: fra la stella più vicina al Sole e quella più lontana misurate da CROMMELIN e DAVIDSON lo spostamento cercato variava da 1",07 a 0",20 che sulle lastre di maggiore scala corrispondono rispettivamente a 30 ed a 6 millesimi di millimetro; spostamenti che vanno isolati da quelli già accennati di altra natura che vi si sovrappongono.

L'elaborazione del materiale di osservazione delle due spedizioni portò a stabilire l'esistenza di spostamenti che estrapolati al bordo del Sole davano la deviazione 1",85, non molto discosta da quella prevista da EINSTEIN. Questo risultato sollevò gran rumore nel mondo scientifico: i relativisti gridarono vittoria, mentre gli avversari, ancora legati alle dottrine tradizionali, avanzarono contro questa verifica critiche infondate che ricordano le argomentazioni dei dotti di tre secoli prima per negare ogni validità alle scoperte astronomiche di GALILEO. Prescindendo da questi atteggiamenti conservatori di ostilità viscerale, molte critiche valsero a mettere in evidenza fonti di errore nell'esperimento ed incertezze nelle deduzioni, per cui altre verifiche apparvero necessarie.

Nel secondo tentativo, effettuato dagli americani CAMPBELL e TRÜMPER il 21 settembre 1922, fu possibile fotografare con due minuti di posa

stelle fino alla magnitudine 10,6 e furono misurate, su queste lastre e su quelle di confronto ottenute nel maggio precedente, ben 92 stelle fino ad 8° di distanza dal Sole. Delle stelle più lontane dal disco solare, per le quali la deviazione relativistica poteva ritenersi nulla, ci si valse per determinare la variazione di distanza focale; le altre consentirono di ricavare l'esistenza di una deviazione decrescente con la distanza e che estrapolata al bordo del Sole assumeva il valore 1",75 con l'incertezza di 9 centesimi di secondo, in buon accordo quindi col valore teorico. Altre determinazioni furono effettuate in successive eclissi, con risultati mediamente in soddisfacente accordo con la teoria. Analogamente al caso del fenomeno dello spostamento verso il rosso delle righe spettrali delle galassie lontane, che si è tentato, senza troppo successo, di interpretare diversamente da un effetto di velocità di allontanamento, così si è cercato di interpretare senza ricorrere all'effetto relativistico gli spostamenti osservati per le stelle durante le eclissi solari; ma anche qui senza successo. Queste osservazioni, sulle quali ci si è soffermati un po' estesamente, costituiscono il primo caso in cui la fotografia ha consentito di effettuare, per via astronomica, un'esperienza di importanza fondamentale per la Fisica.

Negli ultimi decenni del secolo scorso la fotografia aveva intanto cominciato a conquistare un ruolo importante nella nascente Astrofisica. Ci limitiamo qui a ricordare che nel 1890 VOGEL e SCHEINER ottennero dalle immagini fotografiche di spettri stellari, dette spettrogrammi, le prime misure di velocità radiali, cioè delle velocità di allontanamento o di avvicinamento delle stelle; dal variare periodico delle velocità ricavate dalle righe spettrali di Algol poterono stabilire la natura doppia di questa stella e mostrare così che le variazioni periodiche di luminosità, note da oltre un secolo, di questa e delle altre stelle della stessa specie, erano dovute ad eclissi.

Lo spettro degli astri si fotografa fissando al telescopio uno spettrografo, per lo più munito di prisma, in modo che la fenditura d'ingresso sia posta esattamente al fuoco dell'obbiettivo; sulla lastra posta all'uscita dello spettrografo si ottiene l'immagine dello spettro dell'astro foccheggiato sulla fenditura. È usata anche un'altra tecnica, che è quella di porre il prisma, tagliato circolarmente con diametro uguale all'apertura del telescopio, dinanzi all'obbiettivo; in tal modo sulla lastra fotografica, posta al fuoco dell'obbiettivo, invece delle immagini stellari si ottengono altrettanti spettri; questo dispositivo si chiama *prisma-obbiettivo*. Gli spettri così ottenuti hanno minor dispersione di quella ottenibile con lo spettrografo a fenditura e per lo più anche minor definizione delle righe; però in un'unica esposizione si fotografano centinaia ed anche migliaia

di spettri. È stato col prisma-obiettivo che si è potuto compilare il primo grande catalogo di spettri stellari: l'*Henry Draper Catalogue* (comunemente indicato con la sigla HD) pubblicato dall'Osservatorio di Harvard fra il 1918 ed il 1924 e che con la sua successiva estensione (*Henry Draper Extension: HDE*) fornisce il tipo spettrale di 269 mila stelle; ancora oggi il *Draper Catalogue* costituisce l'unica fonte d'informazione sullo spettro di numerosissime stelle.

*Le prime grandi imprese fotografiche.*

Un ruolo insostituibile conquistò la fotografia negli ultimi due decenni dell'800 nel campo della cartografia celeste e della catalogazione delle stelle. Nel 1885 D. GILL, Astronomo reale a Città del Capo, pose mano, in collaborazione con l'olandese KAPTEYN, alla realizzazione del primo catalogo stellare fotografico. A parte i cataloghi di precisione, che elencavano le posizioni di pochissime migliaia di stelle, di grandi rassegne del cielo stellato che elencassero centinaia di migliaia di stelle esisteva allora soltanto la *Bonner Durchmusterung* (*Rassegna di Bonn*), compilata trenta anni prima da ARGELANDER con osservazioni visuali, che comprendeva tutte le stelle fino alla 9<sup>a</sup> magnitudine dell'emisfero boreale e che fu estesa successivamente da SCHOENFELD fino a  $-23^\circ$  di declinazione. L'idea di un grande catalogo fotografico che elencasse tutte le stelle dell'emisfero sud fino alla 10<sup>a</sup> magnitudine fu concepita da GILL in seguito al successo ottenuto nel fotografare con un piccolo doppietto di 60 mm di apertura la grande cometa del 1882 (la 1882 II, detta « la grande cometa di settembre »), utilizzando le lastre ad emulsione di bromuro d'argento in gelatina entrate nell'uso da una decina di anni. Scrive GILL nell'introduzione al catalogo: « A parte l'interesse scientifico della rappresentazione stessa della cometa, queste fotografie hanno ben maggiore interesse per il fatto che malgrado la scarsa potenza ottica dello strumento con il quale sono state ottenute, mostrano così tante stelle, e così ben definite in un'area tanto estesa, da suggerire l'idea di impiegare un mezzo simile, ma più potente, per la costruzione di mappe stellari su qualsiasi opportuna scala ». Una breve memoria su queste considerazioni venne inviata, insieme con alcune copie della fotografia della cometa, all'ammiraglio MOUCHEZ, direttore dell'Osservatorio di Parigi, che ne dette comunicazione all'Accademia delle Scienze nel dicembre 1882; fu in seguito all'esperienza ed al suggerimento di GILL che MOUCHEZ si fece poco dopo promotore della grande impresa internazionale della *Carta del Cielo*.

GILL dette inizio al lavoro della mappa fotografica del cielo australe

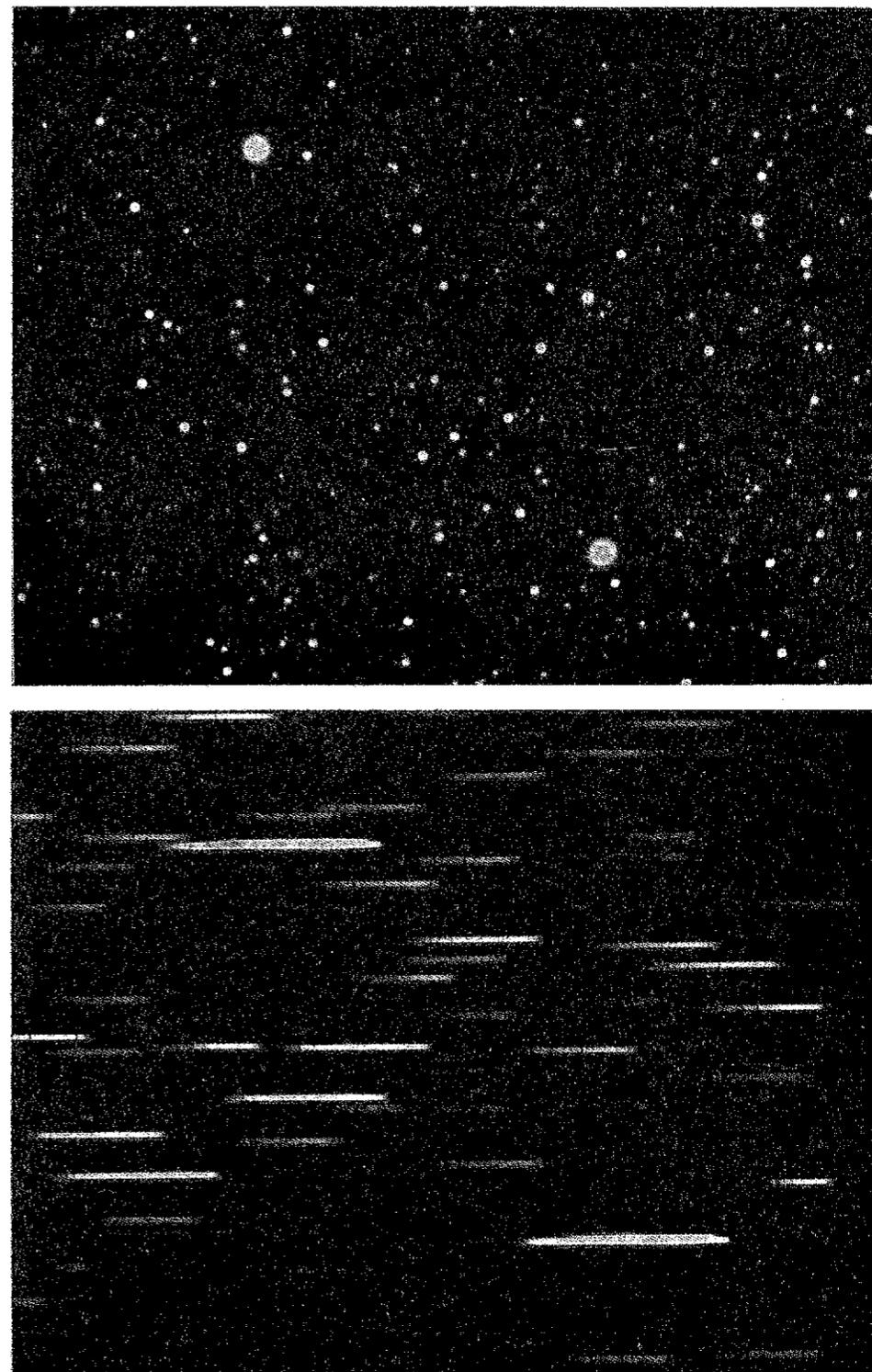


Fig. 3 - Sopra: un campo stellare attorno alle stelle  $\zeta$  e  $\xi$  Orionis. Sotto: lo stesso campo fotografato con un prisma-obiettivo (foto dell'Osservatorio dell'Alta Provenza).

nel 1885 con un doppietto fotografico di 15 cm di apertura e 135 di focale; il cielo dal polo sud fino a  $-18^\circ$  di declinazione fu coperto con 613 fotografie di  $5^\circ \times 5^\circ$  ottenute con pose comprese fra 30 e 45 minuti a seconda della trasparenza del cielo e dell'altezza sull'orizzonte. Il programma di osservazione fu completato alla fine del 1890 e le misure sulle lastre furono effettuate nel Laboratorio di Astrofisica di Groninga. Il catalogo, noto come *Cape Photographic Durchmusterung (Rassegna Fotografica del Capo*, abbreviata in CPD), fu pubblicato in tre volumi negli Annali dell'Osservatorio del Capo fra il 1896 ed il 1900; elenca 454.875 stelle fino alla magnitudine fotografica 10,5 e risulta completo fino a 9,5. Il primo catalogo stellare fotografico uguagliava quindi come numero di stelle i grandi cataloghi di rassegna fino ad allora compilati visualmente, superandoli però nettamente in precisione: le posizioni venivano infatti date con l'errore medio di  $3''$  d'arco di fronte ai  $12''$  di errore medio del catalogo tedesco. Ci riferiamo qui naturalmente ai cataloghi di *rassegna*, intesi a fornire un mezzo di identificazione e di riferimento approssimativo, e non ai cataloghi di precisione basati sulle osservazioni meridiane, i quali fornivano allora posizioni con errore inferiore a  $0'',5$  però, come abbiamo detto, solo per poche migliaia di stelle.

Nel 1887 fu dato inizio in Francia alla gigantesca impresa della carta fotografica di tutto il cielo, detta *Carte du Ciel*, che avrebbe dovuto contenere tutte le stelle fino alla  $14^a$  magnitudine delle quali avrebbero dovuto essere catalogate con la posizione precisa tutte quelle fino alla  $12^a$ ; il catalogo, detto *Catalogo astrografico*, avrebbe dovuto elencare qualcosa come due milioni di stelle, mentre sulla Carta avrebbero dovuto apparirne 7 milioni e mezzo! All'impresa parteciparono 18 Osservatori opportunamente distribuiti in latitudine a ciascuno dei quali venne assegnata una zona di cielo delimitata fra due paralleli di declinazione (in Italia partecipò a quest'opera l'Osservatorio di Catania, allora diretto da A. Riccò, al quale venne affidata la fascia compresa fra  $45^\circ$  e  $55^\circ$  di declinazione boreale). Tutti questi Osservatori vennero forniti di uno strumento otticamente identico: un doppietto fotografico di 33 cm di apertura e 344 di focale, scelta appositamente questa per avere sulla lastra la scala di  $1'$  d'arco per millimetro, e si adoprano lastre di formato  $16 \times 16$  cm che abbracciano su questa scala un campo di  $2^\circ \times 2^\circ$ . Per il catalogo fu stabilita una posa di 5 minuti e per le fotografie destinate alla Carta una posa assai più lunga onde raggiungere la magnitudine stabilita. L'impresa andò avanti lentamente tra varie vicissitudini: il catalogo è stato eseguito da tutti i partecipanti (gli ultimi hanno portato a termine l'opera nel 1965!); il progetto della Carta, forse troppo ambizioso per la sua epoca, è stato invece realizzato solo in minima parte e già

trent'anni or sono ci si era resi conto che prefiggersi di portarlo a termine sarebbe stato inutile. Ciò che non era riuscito nel corso di 60 anni per difficoltà di natura organizzativa ed economica, è stato realizzato in pochissimi anni, ed in misura assai più vasta, anche se per evidente ragione è stata omessa la regione più australe del cielo, non appena è entrato in opera il telescopio *Schmidt* del M. Palomar. Sull'Atlante del Palomar, com'è comunemente chiamata quest'opera la cui denominazione è *Palomar Sky Survey*, torneremo ancora più avanti.

Le lastre ed i dati del *Catalogo astrografico* costituiscono tuttavia un prezioso materiale per la determinazione dei *moti propri*, cioè degli spostamenti secolari apparenti delle stelle sulla sfera celeste<sup>(3)</sup>. Infatti le prime fotografie risalgono all'ultimo decennio del secolo scorso e le ultime al quarto decennio di questo; mediamente quindi risalgono a 60 anni fa, e dal confronto con fotografie ottenute oggi, e meglio ancora in futuro, è possibile ricavare i moti propri con notevole precisione per centinaia di migliaia di stelle. Prima dell'impiego della fotografia, i moti propri venivano esclusivamente ricavati dal confronto fra le posizioni assolute (ascensione retta e declinazione) ottenute con osservazioni al cerchio meridiano; questi, così determinati, sono detti moti propri *assoluti* perché misurati rispetto ai riferimenti fondamentali dell'Astronomia: il punto d'Ariete ed il polo. Con il metodo fotografico invece si determinano moti propri *relativi*. Si misura cioè sulla lastra la posizione di una stella rispetto ad un'opportuna rete di stelle di riferimento; ripetuta questa misura su un'altra lastra esposta alcuni decenni dopo (e più sono e meglio è) si ricava, se è abbastanza grande da essere misurabile, lo spostamento relativo della stella in esame rispetto all'insieme delle stelle di riferimento. Se di queste stelle si conosce il moto proprio assoluto (ricavato col cerchio meridiano), si può ottenere per differenza il moto proprio assoluto della stella in esame. Si tratta di misure di grande precisione essendo gli spostamenti secolari delle stelle estremamente piccoli: la stella più veloce del cielo (apparentemente) è la famosa *stella di Barnard* nella costellazione di Ofioco, che ha un moto proprio di  $10''$  e cioè si sposta in un anno di questa quantità (si dice appunto moto proprio lo spostamento angolare in un anno); si tratta però di un

<sup>(3)</sup> Si suol chiamare *secolare* in Astronomia ogni variazione che si mantiene costante per lunghissimi periodi di tempo; il termine *secolare* acquista quindi il significato di *non periodico*. Ad esempio, lo spostamento di una stella dovuto alla parallasse, che si ripete identico ogni anno siderale, non è un fenomeno secolare, mentre lo è lo spostamento progressivo delle stelle dovuto al loro moto rispetto al Sole, che appare costante per decine di migliaia di anni finché il cambiamento di prospettiva non comincia ad avere effetto sensibile.

caso eccezionale, essendo gli spostamenti delle stelle in generale molto più piccoli. Si conoscono solo poche centinaia di stelle aventi moto proprio superiore ad  $1''$ , e nella stragrande maggioranza dei casi si tratta di ricavare dalle lastre moti propri dell'ordine di pochi centesimi od anche millesimi di secondo! per avere un'idea della delicatezza delle misure si consideri che su due fotografie della scala di quelle del *Catalogo astrografico* e fatte a 50 anni di distanza una dall'altra, una stella avente moto proprio  $0''.01$  appare spostata di 8 millesimi di millimetro.

Della cartografia stellare fotografica, che dalla fine del secolo scorso ha sostituito completamente quella visuale, ricorderemo ancora le *Photographische Sternkarten* di WOLF e PALISA che riportano, alla scala di  $15'/\text{cm}$ , le stelle fino alla  $16^{\text{a}}$  magnitudine lungo la fascia zodiacale e che hanno permesso la scoperta di numerosi pianetini; le *Franklin-Adams Charts*, 206 tavole su carta fotografica che riproducono fotografie ottenute fra il 1903 ed il 1912 con astrografi di 24 cm di apertura piazzati uno in Inghilterra e l'altro nel Sud Africa. Questo è stato il primo atlante fotografico che ricoprì tutto il cielo; ciascuna carta abbraccia un campo di  $15^{\circ} \times 15^{\circ}$  alla scala di  $40'/\text{cm}$  e vi sono visibili stelle fino alla magnitudine 15,5 per un totale, nell'intero atlante, di 100 milioni.

Tutte le carte finora ricordate sono state ottenute utilizzando astrografi, cioè rifrattori. Non essendo possibile costruire rifrattori sufficientemente corretti per fotografie a grande campo aventi dimensioni pari almeno a quelle dei medi riflettori, fino a pochi decenni fa era impresa irrealizzabile una carta fotografica che mostrasse le stelle fino ai limiti di magnitudine raggiungibili con tali riflettori<sup>(4)</sup>. La soluzione di questo problema si ebbe nel 1935 quando B. SCHMIDT, tecnico dell'Osservatorio di Bergedorf, ideò il sistema ottico che porta il suo nome e che conferisce un esteso campo corretto ad un obiettivo a specchio. I sistemi *Schmidt* usano uno specchio sferico: la coma è corretta da un diaframma, più piccolo dello specchio, posto al centro di curvatura di questo, e l'aberrazione di sfericità viene corretta da una lastra di vetro avente una superficie piana e l'altra di opportuna curvatura, alloggiata esattamente nel diaframma. Con il telescopio *Schmidt* si hanno insieme i vantaggi del rifrattore fotografico (campo esteso) e quelli del riflettore (assenza di aberrazione cromatica e possibilità di dimensioni relativamente gran-

(4) Il concetto di medio telescopio si è rapidamente evoluto: trenta anni fa, alla fine della guerra, quando il telescopio più grande era quello del M. Wilson con 250 cm di apertura, per medio telescopio poteva intendersi uno strumento, diciamo, di 80 cm; oggi che il più grande in attività è quello di 5 metri del Palomar e che presto sarà messo in opera il riflettore sovietico di 6 metri, per medio telescopio si può intendere uno strumento sui due metri di apertura.

di). La diffusione degli *Schmidt* tardò alquanto per il sopraggiungere della guerra, ma negli ultimi trent'anni ne sono entrati in funzione un notevole numero; il più grande è stato per molti anni quello del M. Palomar, avente un'apertura di 126 cm (lastra corretrice) ed una focale di 307 cm, ed ora è stato uguagliato da un altro installato a Siding Spring, in Australia. In Italia i più grandi *Schmidt* sono quelli di Asiago e di Campo Imperatore, rispettivamente con 67 e 60 cm di apertura. L'acromatismo, negli *Schmidt*, non è a rigore perfetto, perché un'appena percettibile aberrazione cromatica è introdotta dalla lastra corretrice, che lavora per trasparenza; però in misura nettamente inferiore alla residua aberrazione (spettro secondario) presente nei rifrattori anche nella regione spettrale per cui sono corretti.

Con il grande *Schmidt* del M. Palomar, fra il 1949 ed il 1951, venne fotografato tutto il cielo fra il polo nord e  $-33^{\circ}$  di declinazione; in totale 936 campi di  $6^{\circ},5$  di lato di ognuno dei quali sono state fatte due fotografie, una in luce « blu » utilizzando la cosiddetta emulsione « ordinaria » di cui diremo più avanti, e l'altra con lastra pancromatica ed opportuno filtro in modo da fotografare solo in luce rossa. Con pose da 10 a 15 minuti per le fotografie « blu » e da 40 a 60 minuti per quelle « rosse », sono state raggiunte le stelle di  $21^{\text{a}}$  magnitudine. L'atlante, che prese il nome di *Palomar Sky Survey* (rassegna celeste del Palomar), consiste di riproduzioni originali per contatto aventi il formato  $35 \times 35$  cm; in totale, nella prima edizione del 1962-66, ben 1872 carte contenenti un miliardo di stelle. Attualmente è in corso di pubblicazione l'estensione dell'atlante fino al polo sud con fotografie ottenute mediante il grande Schmidt dell'*European Southern Observatory* (ESO) installato a Cerro Tololo nel Cile. Quest'opera costituisce uno strumento importantissimo di ricerca: vi sono già state effettuate numerose indagini di carattere statistico su stelle e galassie, identificazioni di pre-novae, individuazione ottica di radio sorgenti ecc.. L'atlante, stampato nel numero di esemplari prenotato, non è in commercio e si trova solo presso Istituti di ricerca specializzati; diversi Osservatori astronomici italiani ne sono in possesso.

Nel campo dell'astrometria, la fotografia, insostituibile per le stelle deboli (i cerchi meridiani non penetrano oltre la  $10^{\text{a}}$  magnitudine), ha trovato negli ultimi cinquant'anni sempre più vasta applicazione anche nell'osservazione di stelle raggiungibili con gli strumenti meridiani visuali. Basti ricordare il secondo catalogo dell'*Astronomische Gesellschaft* (la Società astronomica tedesca), noto come AGK2, che contiene le posizioni di 180 mila stelle fino all' $11^{\text{a}}$  magnitudine, determinate fotograficamente con misure differenziali rispetto ad una rete di stelle di riferimento le cui posizioni erano state ottenute con il cerchio meridiano.

Le fotografie furono fatte fra il 1929 ed il 1932 con astrografi quadrupletti di 16 cm di apertura e le osservazioni al cerchio meridiano delle 14 mila stelle di riferimento furono effettuate in quegli stessi anni per evitare di introdurre nelle posizioni ricavate dalle lastre gli errori dovuti all'imperfetta conoscenza dei moti propri. Il catalogo fu pubblicato dagli Osservatori di Bergedorf e di Bonn fra il 1950 ed il 1956: alla fine degli anni '50 si pose mano alla ripetizione delle osservazioni per approntare il terzo catalogo — l'AGK3 — i cui volumi sono in distribuzione attualmente.

Anche per la determinazione delle parallassi stellari, cioè in definitiva delle distanze delle stelle, si è fatto largo uso della fotografia, utilizzando in questo caso rifrattori di grande lunghezza focale onde avere una grande scala e confrontando fra loro fotografie prese a circa 6 mesi di distanza, quando la Terra si trova approssimativamente a due estremi opposti della propria orbita.

Ma dove l'avvento della fotografia aveva portato un progresso enorme in pochissimi decenni fu nella conoscenza delle nebulose, degli ammassi stellari, della Via Lattea. Dalla fine dell'800, epoca alla quale la fotografia cessò di essere un mezzo ausiliario della ricerca astronomica per divenirne uno strumento essenziale, in trent'anni l'osservazione fotografica portò l'Astronomia siderale dallo studio della regione stellare immediatamente circostante il Sole all'esplorazione degli spazi galattici ed extragalattici, estendendo gli scandagli dell'universo dalle decine di anni-luce delle parallassi trigonometriche ai milioni di anni-luce indicati dalle *cefeidi* che apparirono nelle fotografie delle galassie.

È stato già accennato alla prima fotografia nebulare, quella della nebulosa di Orione, ed alla scoperta dell'enorme numero delle « nebulose » spirali; aggiungiamo qui che fu la fotografia dello spettro che consentì a SCHEINER nel 1899 di provare che la « nebulosa » di Andromeda non era affatto una nebulosa come quella di Orione, quella del Granchio ecc., ma bensì un sistema stellare. Infatti lo spettro non mostrava le righe di emissione caratteristiche delle nubi cosmiche di gas, ma appariva come uno spettro stellare composito, dovuto indubbiamente al sovrapporsi di numerose, forse miriadi di stelle. Naturalmente niente si sapeva sulla distanza di quel sistema stellare, se fosse « lontano », al di là del mondo stellare in cui ci troviamo, oppure « vicino », interno a questo mondo stellare che oggi chiamiamo Galassia; questo problema dette origine in seguito da una celebre disputa cui disse la parola fine HUBBLE nel 1925, quando scoprì sulle fotografie della « nebulosa » di Andromeda la presenza delle *cefeidi*.

Nel 1895 BAILEY dall'esame di una serie di fotografie scoprì l'esi-

stenza di stelle variabili a corto periodo negli ammassi globulari, quelle che poi furono chiamate variabili del tipo RR Lyrae e che tanta importanza avrebbero assunto nello studio di quei sistemi. In generale le stelle variabili, che prima erano considerate un fenomeno estremamente raro, all'osservazione fotografica apparvero ben presto in gran numero: alla fine del '700 si conoscevano due sole variabili: Mira Ceti ed Algol; nel

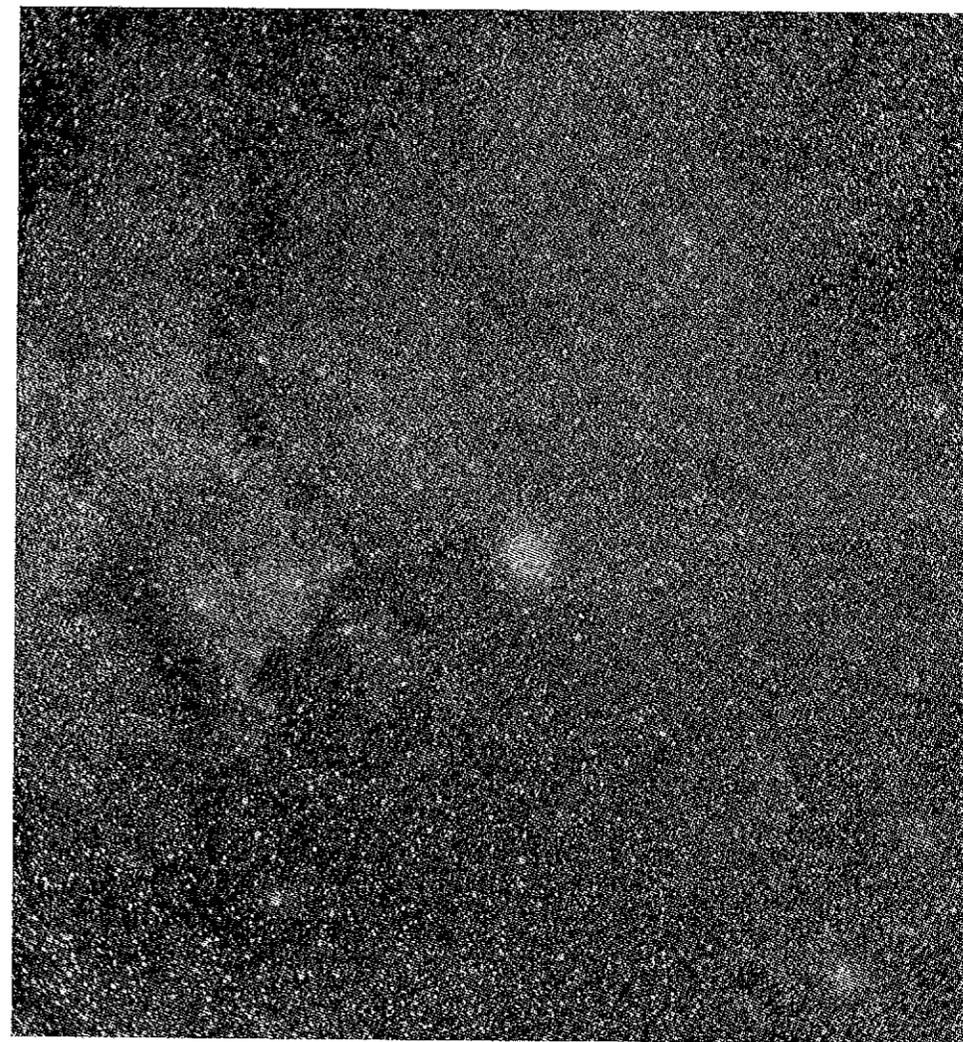


Fig. 4 - Campo stellare del Cigno di ben 11° di ampiezza fotografato da Barnard nel 1894 per la sua famosa serie di fotografie della Via Lattea. Obiettivo da ritratto di 15 cm di apertura e 78 cm di focale; tempo di posa 3'15". La stella al centro è  $\alpha$  Cygni ed è ben appariscente la nebulosa Nord America.

1884, circa l'epoca d'inizio dell'osservazione fotografica sistematica, se ne conoscevano 18 mentre vent'anni dopo il loro numero era salito ad oltre 700 e nel 1969 il Catalogo Generale delle stelle variabili ne elencava 20.437. Lo studio di queste stelle, condotto nel primo cinquantennio del nostro secolo essenzialmente per via fotografica, ha portato un sensibile contributo alle indagini sulla fisica e sull'evoluzione delle stelle ed ha fornito il mezzo essenziale per quei grandi scandagli dell'universo, cui abbiamo accennato, che portarono in breve volger di tempo a stabilire le dimensioni della Galassia e la scala delle distanze extragalattiche.

I conteggi stellari furono estesi sulle lastre fotografiche a ben più gran numero di stelle ed a ben maggiore profondità di quanto aveva potuto fare visualmente HERSCHEL cento anni prima. La fotografia degli spettri permise di misurare le velocità radiali (cioè le velocità lungo la visuale) di numerose stelle e da queste nel 1901 CAMPBELL poté stabilire la velocità di traslazione del Sole nella Galassia. La determinazione delle parallassi e cioè delle distanze stellari fu estesa dalla fotografia ad un notevolissimo numero di stelle. Nel 1904 HARTMANN scopriva negli spettrogrammi di  $\delta$  Orionis le famose *righe stazionarie* del calcio, dimostrando così l'esistenza della materia diffusa interstellare e confermando i risultati dell'esplorazione fotografica della Via Lattea condotta in quegli anni da BARNARD e da WOLF. Tutto questo poderoso insieme di dati convergeva nella faticosa costruzione del modello di struttura della Via Lattea che rapidamente cresceva in mano agli astronomi.

Nel 1912 Miss LEAVIT dallo studio di una serie di fotografie delle Nubi di Magellano scoprì la relazione fra periodo di variazione e luminosità assoluta delle stelle variabili *cefeidi*, relazione che fece divenire queste stelle utilissimi indicatori di distanza permettendo a SHAPLEY di stabilire, attraverso le distanze degli ammassi globulari, le dimensioni della Galassia. Le fotografie ottenute col nuovo grande riflettore di 250 cm installato a M. Wilson nel 1917 permisero di « risolvere » le più vicine spirali, cioè di distinguerne in parte le singole stelle, e HUBBLE poté su una serie di queste fotografie scoprire alcune cefeidi nella « nebulosa » di Andromeda e stabilirne il periodo; da questo, mediante la relazione fra periodo e magnitudine assoluta, poté determinare, per confronto con la magnitudine apparente, la distanza di quel sistema stellare che risultò un milione di anni-luce. Si trattava quindi di un'altra galassia, al di là del nostro sistema che si sapeva estendersi per 100 mila anni-luce. La comunicazione di HUBBLE che dava notizia di questo risultato fu letta il 1° gennaio 1925 a Washington durante un congresso della Società Astronomica Americana; questa data resta come una delle pietre miliari della storia dell'Astronomia e in generale del pensiero: dopo la rivoluzione

copernicano-galileiana, la scoperta di HUBBLE rappresenta il più grande balzo in avanti nella conoscenza dell'universo. Un venticinquennio più tardi le ricerche di W. BAADER, effettuate sulle fotografie ottenute con il riflettore di 5 metri del M. Palomar installato appena due anni prima, portarono a raddoppiare le distanze di HUBBLE; ma nel 1925 era stato raggiunto il risultato fondamentale che le « nebulose » spirali erano in realtà altrettante galassie e che le stelle del nostro cielo e la Via Lattea non compongono altro che un'isola di un universo di isole.

Nel 1929, in base allo spostamento verso il rosso delle righe spettrali di numerose galassie misurate da SLIPHER sempre col riflettore di 250 cm,

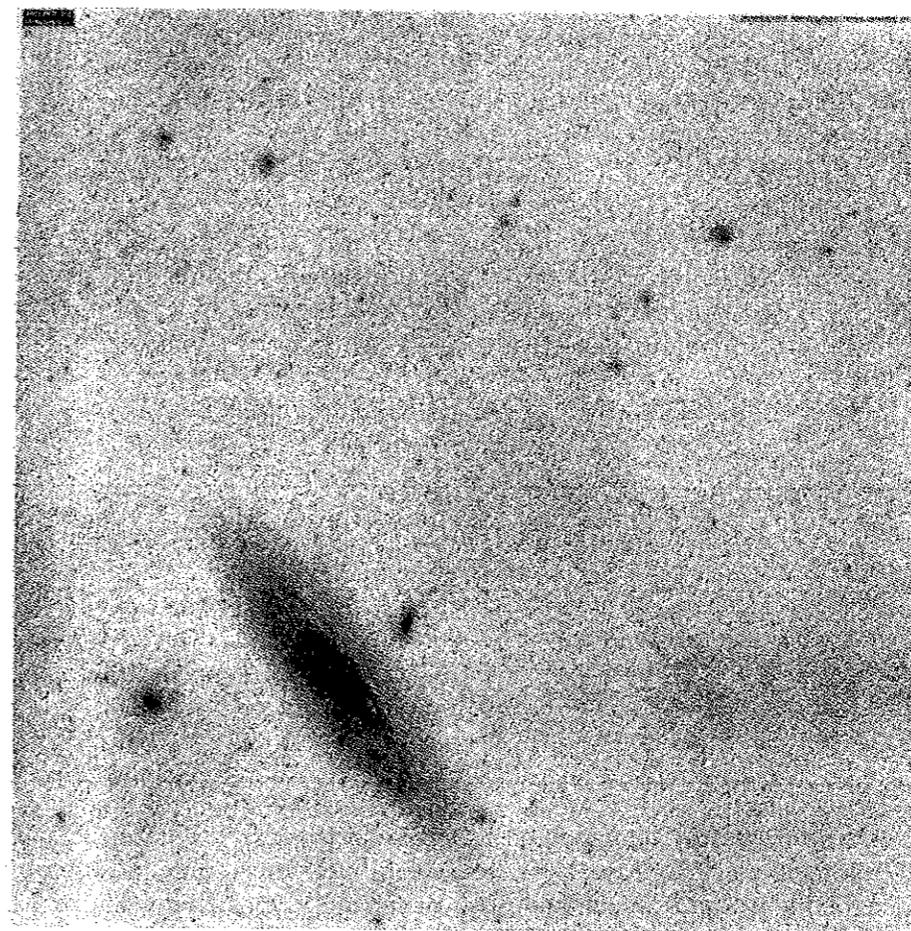


Fig. 5 - Campo stellare in Andromeda contenente la galassia omonima, fotografato col telescopio di Schmidt di Monte Palomar. Il campo coperto è  $5^\circ \times 5^\circ$  e la lastra originale misura 36 x 36 cm.

HUBBLE accertò la proporzionalità fra la velocità di allontanamento e la distanza: la scoperta della « fuga » delle galassie dette corpo fisico alle allora nascenti teorie sull'universo in espansione.

Trent'anni or sono, all'epoca dell'introduzione della tecnica radio-astronomica che si rivelò subito un penetrantissimo mezzo di esplorazione dello spazio galattico ed extragalattico, l'osservazione meridianale e l'indagine fotografica avevano già portato a stabilire nelle linee fondamentali la dinamica e la geometria della Galassia e ad avere un'immagine generale della struttura dell'universo ancor oggi essenzialmente valida.

#### *La fotografia astronomica oggi.*

La durata della posa di una fotografia astronomica può andare da una frazione di secondo per il Sole e la Luna fino a decine di minuti ed anche molte ore per gli astri più deboli. Il limite di posa, e quindi di penetrazione ad oggetti sempre più deboli, è posto, per un dato strumento e con date lastre, dalla luce del fondo del cielo che, ad un certo punto, comincia ad annerire eccessivamente la lastra, rendendo prima inefficace, e successivamente dannoso l'ulteriore aumento del tempo di posa. A titolo orientativo, diamo qui le più deboli magnitudini raggiungibili con posa adeguata mediante telescopi fotografici di varia apertura (si intendono immagini ancora atte a misure fotometriche).

#### *Limite di magnitudine fotografica raggiungibile con telescopi di varia apertura*

Apertura in cm	Magn. limite	Apertura in cm	Magn. limite
10	13,9	60	18,0
20	15,4	100	19,1
30	16,4	200	20,5
50	17,5	500	22,5

Per abbreviare i tempi di posa si usa sottoporre le lastre, da parte dell'utente, a speciali processi di ipersensibilizzazione, come, ad esempio, il riscaldamento a 50° per alcune ore prima dell'esposizione (lastre « arrostite »), oppure, per lastre sensibili all'infrarosso, l'immersione immediatamente prima dell'esposizione in una soluzione di ammoniaca. Nel 1974 gli astronomi di Edinburgo hanno ottenuto un notevole accresci-

mento della rapidità senza aumento del velo tenendo le lastre immerse, prima dell'esposizione, in atmosfera di azoto secco a temperatura ambiente: fotografie ottenute mediante il telescopio *Schmidt* di Siding Spring con lastre così trattate hanno permesso di raggiungere con due ore di posa la magnitudine fotografica 22,7 ed è presumibile che il riflettore di 5 metri del Palomar potrebbe raggiungere 23,5.

Le lastre fotografiche usate oggi in Astronomia sono per lo più di apposita fabbricazione per uso scientifico e vanno ordinate al fabbricante, in conveniente quantità, con diversi mesi di anticipo. Le lastre molto rapide infatti non possono essere tenute pronte in magazzino dal produttore perché si altererebbero e presenterebbero poi un sensibile velo. Vengono considerate fresche lastre prodotte da non più di sei mesi e conservate in frigorifero; tuttavia per lavori di non alta esigenza possono essere utilizzate anche dopo un anno o due. Il prezzo di tali lastre è molto elevato: una confezione di 36 lastre *Kodak Spectroscopic* (le più largamente usate in Astronomia sia per la fotografia diretta che per la spettrografia) formato 9x12 cm costa ben 60 mila lire. Si usano talvolta anche pellicole, come nel caso in cui si vogliono fare numerose fotografie di piccolo formato in rapida successione; anche alcuni telescopi *Schmidt* richiedono l'uso di pellicole: infatti la superficie focale dello *Schmidt* non è piana ma sferica, e così quindi deve essere la superficie dello strato sensibile; ma nei grandi *Schmidt* però si preferisce usare ugualmente lastre di vetro adattandole alla superficie sferica mediante un dispositivo che le mantiene curvate durante tutta la posa.

Come abbiamo già detto, la sensibilità cromatica delle emulsioni di alogenuri di argento va dall'ultravioletto al verde (5000 Å); per lunghezze d'onda maggiori, e cioè per il giallo, l'arancione ed il rosso, l'emulsione è cieca. Verso la fine del secolo scorso si cominciarono a produrre emulsioni con aggiunta di sostanze capaci di estendere la sensibilità fino al giallo; ottenendo le cosiddette lastre *ortocromatiche* (cioè con sensibilità cromatica *corretta*) e successivamente la sensibilità fu estesa fino al rosso, ottenendo le cosiddette lastre *pancromatiche* (cioè sensibili a tutti i colori); infine si raggiunse anche l'infrarosso, cioè si spinse la sensibilità oltre gli 800 Å, ed il limite estremo attuale si trova a 13 mila Ångström. Nell'uso comune della fotografia, ci si serve oggi quasi esclusivamente di emulsioni pancromatiche le quali danno una resa delle luminanze (cioè dei « contrasti » secondo il gergo dei fotografi) la più aderente possibile alla sensazione visiva; l'emulsione « ordinaria », senza aggiunta di sostanze sensibilizzanti ai colori al di là del verde (i colori « caldi », sempre secondo la lingua dei fotografi e dei pittori), si trova sul comune mercato solo accoppiata a bassissima rapidità, nelle lastre

per la riproduzione di disegni in bianco e nero, per diapositive ed in generale per il lavoro di riproduzione. In Astronomia invece l'emulsione « ordinaria » è di corrente uso perché il sistema di magnitudini fotografiche, cui accenneremo fra breve, è stato definitivo usando tale tipo di emulsione ed anche perché i rifrattori fotografici sono corretti solo per il blu-violetto. Nei cataloghi delle Case che producono materiale sensibile per uso scientifico, esiste però un'ampia gamma di emulsioni adatte all'uso astronomico: « ordinarie » di alta e di bassa rapidità, sensibilizzate fino al giallo, fino al rosso più o meno spinto, fino all'infrarosso ecc..

Abbiamo già visto che utilizzando le lastre « ordinarie » con un telescopio visuale si ottengono immagini aberrate e che per ottenere immagini ben « focate » occorre usare un obiettivo astrografico. Se però con un tale obiettivo si usassero lastre ortocromatiche, o peggio ancora pancromatiche, si avrebbero ugualmente immagini fortemente aberrate, e precisamente si avrebbe un dischetto centrale, che è l'immagine « a fuoco » data dalla luce blu-violetta per la quale l'obiettivo è corretto, circondato da un alone causato dalla luce gialla (ed anche rossa se la lastra è pancromatica) che resta « fuori fuoco ». È possibile viceversa utilizzare fotograficamente un doppietto acromatico visuale utilizzando una lastra ortocromatica ed antepoendo un filtro giallo che tagli via tutta la luce sotto i 4800 Å circa; in tal caso infatti la luce che agisce sull'emulsione è quella compresa fra 4800 e 5800 Å (limite medio di sensibilità di una lastra « orto ») ed in tutta questa regione l'obiettivo visuale è ben corretto. Vedremo più avanti che la combinazione lastra « orto » e filtro giallo ha avuto una notevole importanza nella fotometria stellare.

Con i riflettori non è necessario usare emulsioni « ordinarie » né ricorrere a filtri per eliminare le aberrazioni cromatiche: i vari tipi di emulsioni ed i filtri si usano in tal caso non per ragioni tecniche ma per limitare opportunamente la regione spettrale che si vuole fotometrare.

Le magnitudini fotografiche, fin dall'inizio della fotometria fotografica sistematica, furono ottenute con emulsioni « ordinarie ». Nel primo catalogo fotografico, la *Cape Photographic Durchmusterung*, queste magnitudini furono determinate in modo alquanto rudimentale, non disponendosi a quell'epoca (ultimo decennio del secolo scorso) di metodi di fotometria fotografica. Nei cataloghi visuali già esistenti per l'emisfero sud, come la *Bonner Durchmusterung* fino a  $-23^\circ$  ed il *Catalogo di Cordoba* fino al polo, erano date le magnitudini visuali per moltissime stelle ma ci si era resi conto che non si poteva semplicemente risolvere il problema attribuendo a ciascuna stella magnitudine fotografica uguale

a quella visuale. A causa infatti della diversa sensibilità cromatica dell'occhio e della lastra, le magnitudini visuali non possono coincidere con quelle fotografiche per tutte le stelle, la differenza fra le due specie di magnitudini dipendendo dal colore della stella. Si può infatti fissare arbitrariamente per una qualsiasi stella che la magnitudine fotografica sia uguale a quella visuale, però un'altra stella visualmente di splendore uguale, ma di diverso colore, non risulterebbe uguale sulla lastra; oppure se la seconda stella apparisse visualmente di splendore — poniamo — doppio della prima, potrebbe fotograficamente apparire anche più debole.

GILL e KAPTEYN escogitarono una soluzione approssimativa del problema basandosi sul fatto che *mediamente* il diametro dell'immagine stellare diminuisce con l'aumentare della magnitudine *visuale* e cioè con l'indebolirsi della stella; ciò significa, in altre parole, che considerando un grande numero di stelle, malgrado i sensibili scarti individuali, *in media* quelle più deboli visualmente sono più deboli anche fotograficamente. Per ciascuna lastra suddivisero le stelle in tanti gruppi: quelle le cui immagini avevano un diametro inferiore ad un centesimo di millimetro, quelle con diametro compreso fra uno e due centesimi, quelle fra due e tre centesimi, e così via, ed a ciascun gruppo attribuirono magnitudine fotografica uguale alla media delle magnitudini visuali; detto con le parole di KAPTEYN, *le stelle di uguale potere attinico vengono definite di magnitudine m, essendo m la loro magnitudine visuale media*; uguale potere attinico ovviamente significava uguale diametro dell'immagine (si consideravano trascurabili le differenze di diametro entro ciascun gruppo). In tal modo le differenze dovute al colore venivano mediate e si ottenne una scala di magnitudini fotografiche che soddisfaceva mediamente con buona approssimazione la ben nota relazione di POGSON che vuole che alla differenza di una magnitudine corrisponda il rapporto 2,51 fra le intensità apparenti. È evidente però che le magnitudini delle singole stelle possono presentare scarti sensibili dal giusto valore, e siccome le magnitudini della *Cape Photographic Durchmusterung* vengono talvolta utilizzate ancora oggi dagli osservatori di stelle variabili dell'emisfero australe, dove sovente non si trovano sulla lastra campioni fotometrici migliori, sono state trovate formule empiriche che, in base al colore della stella, trasformano la magnitudine data dalla CPD nella magnitudine fotografica nel sistema internazionale successivamente adottato. Tuttavia la CPD non è un catalogo fotometrico, ma bensì una *rassegna*; il primo catalogo di magnitudini stellari fotografiche determinate con metodi precisi, anche se una lista di stelle-campione universalmente accettata non era stata ancora stabilita, fu la *Göttinger Actinometrie* pubblicata da K. SCHWARZSCHILD nel 1910.

Le magnitudini fotografiche furono definite rigorosamente nei primi due decenni di questo secolo soprattutto ad opera di E. PICKERING e di Miss LEAVITT dell'Osservatorio di Harvard. Questo risultato fu reso possibile oltre che da un immenso lavoro fotometrico sul cielo, dall'enorme opera di classificazione di spettri stellari effettuata in quegli stessi anni nel medesimo Osservatorio su di un abbondantissimo materiale fotografico ottenuto con prismi-obbiettivi e che dette corpo a quella monumentale opera che è il *Draper Catalogue* cui abbiamo già accennato. Fu stabilita una sequenza di stelle-campione in prossimità del polo nord e si fissò che la magnitudine fotografica fosse uguale a quella visuale per le stelle bianche, e precisamente quelle di tipo spettrale A<sub>0</sub> di quella sequenza; con questa convenzione fu determinata la magnitudine fotografica di tutte queste stelle.

La *sequenza polare* comprende stelle fra la magnitudine fotografica 2,55 e 20,10 e fu adottata ufficialmente dall'Unione Astronomica Internazionale nel congresso di Roma del 1922. Fu la disponibilità di campioni fotometrici stellari fino a così deboli magnitudini che pochissimi anni dopo consentì a HUBBLE di stabilire la magnitudine apparente delle *cefeidi* della « nebulosa » di Andromeda e da quella dedurre la distanza. In seguito i valori originali adottati a Roma hanno subito alcune lievi correzioni, soprattutto ad opera di F. H. SEARES dell'Osservatorio di M. Wilson; si deve tuttavia tener presente che la precisione raggiungibile nella fotometria fotografica corrente è, al più, mezzo decimo di magnitudine.

Naturalmente, per stelle di tipo spettrale diverso da A<sub>0</sub> — e quindi di colore diverso — la magnitudine fotografica è diversa da quella visuale: le stelle rosse risultano più deboli fotograficamente e quelle azzurre più splendide. Alla differenza tra la magnitudine fotografica e quella visuale si dette il nome di *indice di colore*, ed è chiaro il perché. Le stelle gialle e rosse hanno indice di colore positivo, quelle azzurre negativo; le stelle bianche (tipo spettrale prossimo ad A<sub>0</sub>) hanno indice di colore pressoché zero. La stretta correlazione esistente fra indice di colore e tipo spettrale consente di conoscere con buona approssimazione il tipo spettrale di una stella anche senza averne lo spettro, ma semplicemente per via fotometrica dalla differenza fra la magnitudine fotografica e quella visuale. Essendo la magnitudine visuale difficilissima o addirittura impossibile ad ottenersi per stelle molto deboli, si è escogitato un mezzo per ricavare un valore equivalente per via fotografica: ciò si ottiene mediante fotografie fatte con lastra ortocromatica e filtro giallo; in tal modo la lastra è impressionata solo dalla luce gialla e verde, per la quale l'occhio ha la massima sensibilità. Tale combinazione di lastra e filtro

costituisce un sistema avente una risposta di fronte al variare del colore delle stelle molto prossima a quella dell'occhio. Le magnitudini così determinate, che sostituiscono con buona approssimazione quelle visuali per le stelle deboli, si dicono *fotovisuali*.

È stato dalla differenza fra le magnitudini fotografiche e quelle fotovisuali che si è potuto ricavare importantissime informazioni sulla popolazione stellare degli ammassi globulari per i quali sarebbe impossibile osservare gli spettri delle singole stelle. Infatti per questi lontanissimi sistemi, al posto del *diagramma di Hertzsprung-Russell*, che porta in ascissa la classe spettrale delle stelle ed in ordinata la magnitudine assoluta e che costituisce uno strumento fondamentale per lo studio dell'evoluzione stellare, la fotografia permise di sostituire il diagramma equivalente *indice di colore-magnitudine assoluta*, comunemente detto *diagramma colore-grandezza*.

Le tecniche fotometriche e spettrografiche approntate entro gli ultimi due decenni del secolo scorso ed i primi due di questo, consentirono il passaggio dall'era della fotografia astronomica descrittiva e di rassegna a quella dell'osservazione quantitativa rigorosa, in grado di fornire dati traducibili in modelli fisici e matematici. Il primo esempio si ebbe nel 1890 con la scoperta della duplicità di Algol, e da allora l'incidenza dell'osservazione fotografica nella ricerca astronomica è diventata dominante: a questa si deve l'impetuoso progresso delle conoscenze sulla struttura dell'universo che ha caratterizzato i primi tre decenni del '900. A metà del secolo, quando entrarono in campo la radio-astronomia e la fotometria fotoelettrica, ben pochi campi dell'Astronomia erano rimasti affidati, in tutto o in parte, all'osservazione visuale: le determinazioni di posizione assoluta degli astri e quelle di tempo, con gli strumenti meridiani; le misure sulle stelle doppie visuali con il micrometro filare od a birifrangenza; la descrizione delle superficie planetarie (ora fornita dalle stazioni orbitanti); la fotometria di stelle variabili, soprattutto ad opera di valorose schiere di dilettanti ai quali si deve in gran parte la conoscenza della storia completa, lungo molti decenni, di numerose stelle variabili irregolari o semiregolari.

Ancora oggi che nuove raffinate e potenti tecniche di osservazione hanno preso il campo, quali la radio-astronomia e la fotometria fotoelettrica, l'osservazione fotografica conserva un posto che, anche se non più quasi esclusivo come trent'anni fa, resta pur tuttavia essenziale. È insostituibile per la cartografia e per l'identificazione ottica di sorgenti radio, sorgenti X ecc.; per la scoperta di supernovae; per lo studio del comportamento di novae e supernovae precedentemente alla loro scoperta. Per le ricerche sulle stelle variabili il fotometro fotoelettrico, an-

corché dieci volte più preciso, consente di osservare una stella per volta, mentre su di una lastra fotografica si possono osservare simultaneamente centinaia di variabili. Nella spettroscopia lo spettrografo può essere sostituito dallo spettrofotometro fotoelettrico e negli ultimissimi anni, dopo l'avvento dei calcolatori elettronici, anche dall'interferometro; questi strumenti consentono un guadagno di precisione e di potere risolutivo, però a prezzo di grande dispendio di tempo e solo per oggetti sufficientemente luminosi; per non parlare del prisma-obiettivo che consente di fotografare in un sol colpo gli spettri di centinaia e perfino di migliaia di stelle; anche se ciascuno spettro fornisce una minore quantità di informazioni di quella ottenibile con lo spettrografo a fenditura il quale osserva una stella per volta, la quantità totale di informazioni su tutte le stelle di una lastra esposta col prisma-obiettivo è molto più grande di quella fornita dallo spettrografo per la singola stella. Anche nell'osservazione meridiana la fotografia ha cominciato negli ultimi anni a trovare la sua applicazione, come nelle determinazioni di alta precisione della latitudine dove si è sostituito al telescopio zenitale visuale il cosiddetto *tubo fotografico zenitale*; tuttavia in questo campo l'osservazione visuale è stata superata preferenzialmente dai dispositivi fotoelettrici che, accoppiati con calcolatori elettronici, consentono un elevato grado di automazione.

D'altra parte se le tecniche di automazione possono oggi consentire l'applicazione di metodi di osservazione altrimenti inattuabili, è anche vero che le stesse tecniche consentono di sfruttare in misura prima impensabile la lastra fotografica, come nelle misure di posizione e nella fotometria di centinaia di migliaia di immagini stellari. Basterà ricordare la macchina chiamata *galaxy*, realizzata sette anni fa all'Osservatorio di Edinburgo, che automaticamente in un'ora trova e misura 1000 immagini stellari: le posizioni, rispetto ad un sistema di assi cartesiani prestabilito, con la precisione di 1 micron e le magnitudini con la precisione di 1 centesimo (precisione dello strumento: ovviamente ci sono errori insiti nella fotografia che rendono assai più incerta la determinazione, particolarmente quella fotometrica). Accenniamo ancora all'impiego della fotografia con i tubi intensificatori di immagini: fotografando lo schermo fluorescente si ottengono in pochi minuti, ad esempio spettri che altrimenti richiederebbero tempi di posa di diverse ore.

Infine è da ricordare l'importanza assunta negli ultimi dieci anni dall'osservazione fotografica nell'infrarosso: dato che col crescere della lunghezza d'onda diminuisce l'assorbimento operato dal pulviscolo interstellare, è possibile osservare nell'infrarosso regioni dello spazio inaccessibili alla fotografia nel blu perché nascoste da dense nubi cosmi-

che. Inoltre sono stati scoperti oggetti che solo nell'infrarosso hanno emissione rilevabile. Le fotografie infrarosse hanno consentito di osservare in direzione del centro della Galassia nubi stellari altrimenti invisibili ed è con la fotografia infrarossa che è stato possibile scoprire nella costellazione di Cassiopea le galassie *Maffei I e II* che pur essendo molto vicine (sulla scala delle distanze extragalattiche) restano nascoste alla fotografia « blu » dalla materia interstellare galattica. E con questo mezzo che sono state scoperte numerosissime *stelle infrarosse*, cioè stelle di bassissima temperatura che appaiono luminosissime nell'infrarosso mentre sono inosservabili nella regione « visuale » dello spettro, e che si è constatato che molte di queste sono variabili a lungo periodo (centinaia di giorni).

È vero che i più sensazionali risultati dell'Astronomia dell'infrarosso sono stati prevalentemente ottenuti con tecniche fotoelettriche (come le cellule al solfuro di piombo) che consentono di spingere l'osservazione alle lunghezze d'onda di alcuni micron, dove certi fenomeni si manifestano con particolare evidenza, mentre la sensibilità dell'emulsione fotografica non si spinge oltre 1,3 micron (13000 Å); ma anche qui si rivela uno dei vantaggi essenziali dell'osservazione fotografica: in virtù della sua *panoramicità*, la fotografia consente di osservare simultaneamente vaste regioni del cielo e di tenere sotto sorveglianza continuativa centinaia e anche migliaia di oggetti. Le tecniche fotoelettriche non avrebbero ad esempio consentito la scoperta e lo studio sistematico di così gran numero di stelle variabili infrarosse, né la scoperta delle due nuove galassie.

Per concludere, e questa ci sembra una considerazione di ordine non secondario, diremo che la fotografia consente inoltre di *visualizzare* la struttura dell'universo siderale, cioè di condurre a livello sensoriale ciò che in gran parte resterebbe altrimenti solo un cumulo di dati numerici, di leggi fisiche e di costruzioni matematiche adatti tutt'al più ad essere memorizzati su un « cervello » elettronico.