

MISURE DI VELOCITÀ RADIALI ALL'OSSERVATORIO DI MERATE

Nota di LIVIO GRATTON

RIASSUNTO. — Si descrivono in dettaglio i metodi per la misura di velocità radiali seguiti all'Osservatorio di Merate. Speciale rilievo viene dato al sistema delle lunghezze d'onda che viene completamente rielaborato, usando alcuni spettri tipici ad alta dispersione. I primi risultati ottenuti mostrano che le misure eseguite sono tra le migliori ottenibili con spettri di dispersione pari a quella usata.

1. - Introduzione

Lo spettrografo Zeiss dell'Osservatorio di Merate (1) è, naturalmente, come tutti gli spettrografi moderni, attrezzato per la misura di velocità radiali; anzi la sua costruzione molto compatta e tale, quindi, da eliminare quasi completamente gli effetti di flessione e da rendere più facile il mantenere una temperatura costante nell'interno, lo rende particolarmente adatto per questo genere di lavori. Tuttavia, siccome il personale della Specola era stato sempre occupato in altre ricerche, pur tenendo presente l'utilizzazione del telescopio a tale fine, finora non erano state eseguite vere e proprie misure di velocità radiali, all'infuori di quelle, piuttosto grossolane, come comporta il problema stesso, eseguite nell'occasione dell'esplosione della *N Lacertae* 1936.

Così, nell'inverno 1939-40, col consenso del Direttore, lo scrivente iniziò le prime prove di misure di velocità radiali; prove che, diciamo fin da ora, risultarono così soddisfacenti da indurci senz'altro a includere tali misure nei futuri programmi di lavoro del nostro riflettore.

Scopo di questa nota è appunto di esporre i risultati di queste prove; più logicamente queste pagine avrebbero dovuto trovar posto nell'introduzione ad una lunga serie di misure di velocità radiali, ma, nelle presenti circostanze, benchè alcune centinaia di spettri (specialmente di stelle con

(1) G. CECCHINI. Pubbl. R., O. Merate, n. 2, 1929.

velocità radiale variabile) siano già stati raccolti, non sembra facile che una tale serie possa essere eseguita nei prossimi mesi. Ciò serve a giustificare la pubblicazione di una nota che tratta esclusivamente dei metodi di misura, anzi che presentare un numero rilevante di nuove misure.

2. - Controllo termico dello spettrografo

Nella nota citata del prof. CECCHINI, lo spettrografo di Merate è stato compiutamente descritto, per modo che non è qui necessario ripeterne la

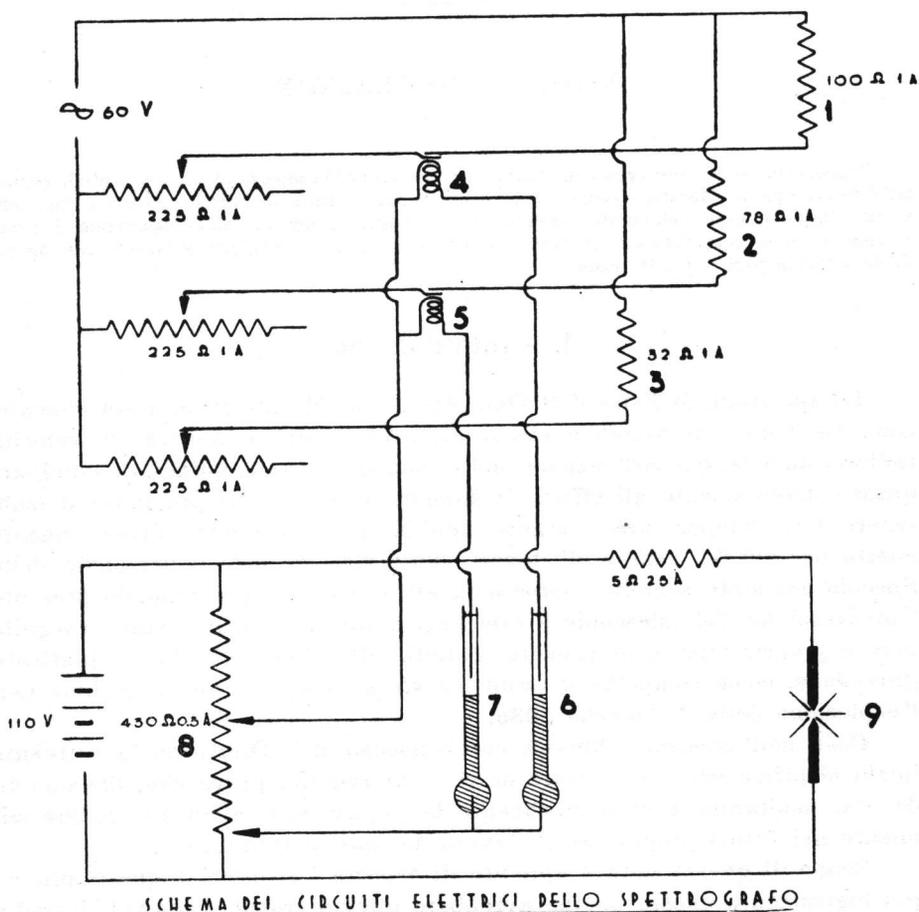


Figura 1.

1 - resistenza per il riscaldamento del corpo dello spettrografo — 2 - resistenza per il riscaldamento della cassa dei prismi — 3 - resistenza per il riscaldamento della camera di 72 cm. — 4 - relais per il corpo — 5 - relais per i prismi — 6 - termometro a contatto per il corpo — 7 - termometro a contatto per i prismi — 8 - resistenza in potenziometro — 9 - arco per lo spettro di confronto.

descrizione. Dirò solo dell'apparecchio termostatico, che è costituito da una resistenza elettrica disposta nell'intercapedine tra la cassa propriamente detta dello spettrografo e l'involucro esterno; nell'intercapedine vi sono tre circuiti indipendenti, tutti alimentati da corrente alternata a 60V: uno per il corpo dello spettrografo (resistenza 100 Ω), uno per la cassa dei prismi (78 Ω) ed un terzo che funziona solo nel caso che lo spettrografo sia usato con la camera di 72 cm. (32 Ω); una resistenza variabile, in serie con ciascuna delle resistenze per il riscaldamento, permette di rendere uguali le resistenze totali dei tre circuiti.

Il regolaggio della temperatura si effettua automaticamente al valore fissato all'inizio delle osservazioni, mediante due termometri a contatto, il cui bulbo si trova nell'intercapedine; il circuito della camera di 72 cm. non è regolato (v. fig. 1). Nell'interno dello spettrografo si trovano poi due termometri comuni, che permettono di controllare al decimo di grado la temperatura durante le osservazioni.

Fin dalle prime prove, dopo una revisione dei circuiti e dei *relais* ed un esame accurato dei termometri a contatto, l'apparecchio termostatico ha funzionato perfettamente mantenendo assai costante la temperatura nell'interno dello spettrografo. Durante pose di un'ora non si sono quasi mai verificate variazioni di temperatura superiori ad uno o due decimi di grado; tuttavia nelle forti variazioni che la temperatura dell'aria esterna subisce a Merate intorno alla mezzanotte (e qualche ora prima, durante l'inverno), il termostato non riesce a fronteggiare completamente la caduta di temperatura e l'apparecchio si va lentamente raffreddando.

Ciononostante noi riteniamo (ed il buon esito delle misure ci conferma in tale opinione) di essere riusciti a rendere minimi gli errori dovuti anche a queste lievi variazioni della temperatura, grazie anche ai seguenti accorgimenti:

a) La costruzione delle cupole di Merate con una doppia parete ed una grande intercapedine d'aria diminuisce di molto le variazioni diurne della temperatura nell'interno, la quale rimane durante il giorno molto al di sotto di quella dell'aria esterna; nell'interno dello spettrografo la temperatura non sale mai più di un paio di gradi al di sopra di quella della notte.

b) Avendo cura di aprire completamente la cupola un'ora prima di iniziare le osservazioni ed avviando il termostato ad una temperatura di circa mezzo grado inferiore a quella allora indicata dai termometri di controllo, si trova all'inizio delle osservazioni la temperatura stabilizzata ad un valore alquanto basso, corrispondente a quello dell'aria esterna, quando questa è già sensibilmente rinfrescata, per modo che la ulteriore caduta durante la notte è assai ridotta. Nell'interno dello strumento questa non supera in totale mezzo grado.

c) Il sistema usato per fotografare lo spettro di confronto, di cui si dirà in seguito, permette di annullare completamente l'effetto di variazioni termiche anche assai più forti di quelle riscontrate durante le osservazioni.

Occasionalmente, solo durante una o due pose, l'apparecchio termostatico non ha funzionato, causando una variazione irregolare della temperatura interna dello strumento. Ma anche tale inconveniente, del resto assai raro, fu poi sempre evitato in seguito, controllando spesso « de visu » la temperatura durante le pose.

Le scale dei termometri a contatto e dei termometri di controllo non consentono di leggere temperature al di sotto di $+9^{\circ}$; siccome a Merate è necessario spesso regolare la temperatura a valori molto più bassi, due nuove coppie di termometri sono stati ordinati alla Ditta Zeiss.

Come è noto, lo spettrografo di Merate può funzionare con tre camere intercambiabili, di 23, 48 e 72 cm di lunghezza rispettivamente. Le due camere di 72 e 48 cm non hanno dato luogo a nessun inconveniente e, fin dalle prime osservazioni, hanno sempre dato spettri perfetti. La camera di 23 cm invece, ha mostrato nei primi spettri un notevole astigmatismo, che peraltro si presentava saltuariamente e sembrava collegato, in modo assai irregolare, con le variazioni di temperatura. La ricerca della causa di tale astigmatismo ci fece perdere parecchie settimane e alla fine risultò piuttosto banale: una delle tre lenti della camera non era fissata regolarmente nel suo supporto, la qual cosa produceva flessioni e deformazioni nel vetro, variabili con la temperatura, dalle quali risultava l'astigmatismo osservato. Rimontata la camera mettendo le lenti ed i loro supporti perfettamente a a posto, anche gli spettri ottenuti con la camera di 23 cm risultarono splendidi e molto adatti alle misure di velocità radiali.

3. - Scelta della dispersione

Nell'emisfero boreale si conoscono attualmente le velocità radiali di tutte le stelle, o quasi, fino alla grandezza 6.5 e di molte altre più deboli. Un contributo utile in questo campo può essere dato perciò solo da misure di velocità radiali di:

a) stelle più deboli di 6.5, per le quali può bastare anche una precisione non molto grande, in quanto queste velocità devono essere usate principalmente per scopi statistici;

b) stelle doppie spettroscopiche di orbita ancora non conosciuta o, comunque, stelle di velocità radiale variabile, di cui il carattere della variabilità non è noto;

c) stelle doppie spettroscopiche di orbita conosciuta in base ad osservazioni del principio del secolo, per le quali una revisione dell'orbita può portare a scoprire la variabilità di qualche elemento.

Le misure di cui ad a) non sono certo le più adatte per valorizzare il più possibile il nostro strumento, che, accanto a moltissimi pregi, ha l'inconveniente di essere poco luminoso: infatti anche con la camera di 23 cm, se lo specchio non è più che fresco, occorre un'ora di posa per avere uno spettro sufficientemente esposto di una stella *K* di grandezza 6.5 a non grande distanza zenitale e usando una fenditura di mm 0.05 (che è quella costantemente usata in questi lavori).

Nella previsione di futuri programmi di lavoro, io ho preso perciò principalmente in considerazione le misure relative a b) e c), per le quali è necessaria una precisione che non può essere data che da spettri ottenuti con le camere di 48 e 72 cm. L'uso, però, della camera di 72 cm, con la necessità di non allungare troppo i tempi di posa, limiterebbe eccessivamente il numero delle stelle che possono essere studiate col nostro strumento, mentre la precisione data da quella camera non dovrebbe essere, a priori, molto maggiore di quella ottenibile con la camera di 48 cm. Pertanto ho stabilito di compiere queste prove con la camera di 48 cm; con questa si possono ottenere, con tempi di posa ragionevoli (sotto i 100^m), spettri ben esposti di stelle fino alla 6^a grandezza per i primi tipi spettrali e fino alla 5^a per gli ultimi, sempre che la distanza zenitale non superi la trentina di gradi (1). Ciò non significa naturalmente che per stelle particolari non debbano essere impiegate anche le altre due camere, per le quali le prime prove hanno dato pure un esito assai soddisfacente.

Dei due prismi, di cui è dotato lo spettrografo di Merate, venne scelto per le misure di velocità radiali quello di vetro O118; questo dà una dispersione lievemente minore di quella data dal prisma di vetro O112, ma questo svantaggio è largamente compensato dalla maggiore trasparenza del vetro, che consente una sensibile diminuzione dei tempi di posa.

La deviazione minima del prisma è stata fissata ad H_{γ} ; infatti per stelle *A* la regione spettrale più indicata per misure di lunghezze d'onda va da λ 3900 a λ 4500, per stelle *F-G* da λ 4000 a λ 4500 circa e per stelle *K-M* da λ 4200 a λ 4530. Queste limitazioni sono imposte da vari motivi: anzitutto l'andamento dell'intensità del fondo continuo degli spettri, poi la possibilità di trovare righe stellari adatte per la misura, infine la rapida diminuzione della dispersione al crescere della lunghezza d'onda e la mancanza di buone righe dello spettro di confronto (arco tra elettrodi di ferro) sopra λ 4550. Con le camere dello spettrografo di Merate, *chromat* dei tipi di HARTMANN e SCHWARZSCHILD, queste regioni risultano tutte ottimamente a fuoco, dando alla lastra l'inclinazione opportuna.

(1) Per distanze zenitali più forti si verifica una fortissima perdita di luminosità, non tanto per l'assorbimento atmosferico, quanto per il rapido peggioramento delle immagini verso l'orizzonte e soprattutto per la dispersione atmosferica. Quest'ultima infatti, vicino al meridiano, ha una direzione normale a quella secondo cui si dispone di solito la fenditura. Ora, nella guida, l'osservatore mantiene sulla fenditura l'immagine visibile, non quella fotografica della stella; con una lunghezza focale pari a quella del telescopio di Merate, ciò porta il baricentro dell'immagine fotografica della stella sensibilmente fuori della fenditura dello spettrografo.

In tali condizioni, con la camera di 480 mm, la dispersione dei nostri spettri risulta di 34.2 $\text{\AA}/\text{mm}$ ad H_{γ} ; dispersione che è dello stesso ordine di quella più frequentemente usata in moltissimi osservatori dediti allo studio delle velocità radiali.

Il potere separatore dello spettrografo dipende naturalmente da vari fattori, tra cui, nel nostro caso, il più importante è la larghezza della fenditura. Nelle nostre condizioni, si verifica facilmente che una fenditura di mm 0.05 dà immagini geometriche della larghezza di 0.65, 0.81 e 0.98 \AA a λ 4090, λ 4200 e λ 4400 rispettivamente; ciò significa che, se il potere separatore non fosse diminuito da imperfezioni delle parti ottiche, due righe monocromatiche, distanti tra loro di 0.98 \AA a λ 4400, darebbero immagini a contatto. Ora negli spettri del ferro si possono separare con facilità righe anche più vicine di questo limite, la qual cosa indica che le proprietà ottiche dello spettrografo sono invero di primo ordine e in ogni caso il suo potere separatore è praticamente identico a quello previsto dal semplice calcolo geometrico della larghezza della fenditura.

4. - Messa a punto dello spettrografo

Lo spettrografo di Merate fu a suo tempo messo perfettamente a punto dal prof. CECCHINI che lo ha impiegato per la raccolta di quella estesissima serie di spettri, dai quali si sta attualmente elaborando il Catalogo di Merate di parallassi spettroscopiche. Vari indizi, però, facevano ritenere che, per ragioni non ben chiare, le letture ai tamburi delle viti dei piccoli spostamenti degli obiettivi, per cui si aveva la migliore messa a fuoco, non corrispondessero più a quelle osservate dal prof. CECCHINI. Siccome per le misure di cui ci occupiamo si esige una messa a fuoco della massima precisione, ho preferito verificare nuovamente la messa a fuoco di tutto lo strumento.

Anzitutto si è verificato che la fenditura si trovasse perfettamente nel fuoco del collimatore; ciò è stato fatto osservando la fenditura attraverso il collimatore, mediante un cannocchiale di circa m 1.5 di lunghezza focale, messo precedentemente a fuoco all'infinito. La lettura al tamburo della vite, corrispondente ad un'immagine nitida, 10.8, risultò perfettamente uguale a quella indicata dalla Ditta costruttrice e già verificata dal prof. CECCHINI.

Un altro punto di somma importanza per la misura delle velocità radiali è che il collimatore sia illuminato uniformemente sia dalla luce della stella, sia da quella della sorgente terrestre di confronto. Questo è stato verificato disponendo una lastra fotografica immediatamente dietro al collimatore sul cammino dei raggi provenienti dalla fenditura e resi paralleli dal collimatore, una volta illuminando la fenditura con l'arco di confronto e una volta con la luce di una stella (α *Lyrae*). L'illuminazione sulla parte della lastra esposta risultò ragionevolmente uniforme; la differenza princi-

pale nei due casi è data naturalmente dall'ombra dello specchio secondario del telescopio, la quale occupa la parte centrale del collimatore nel caso della stella, mentre tutto il collimatore è interessato nel caso dell'arco. A tale proposito si è considerata l'opportunità di schermare con un dischetto di carta nera la parte centrale del collimatore per rendere perfettamente uguale nei due casi il percorso dei raggi luminosi; tale precauzione sembrò peraltro superflua e fu quindi omessa.

Quando si esige una grande precisione, la messa a fuoco della camera fotografica viene effettuata col ben noto metodo di HARTMANN, il quale consente anche di determinare la superficie focale. Effettivamente questo metodo fu usato un paio di volte, ottenendo tra l'altro il risultato che nella regione considerata la curvatura è praticamente trascurabile; ma siccome io mi proponevo di determinare il fuoco per varie temperature, la qual cosa mi obbligava a determinarlo sera per sera, almeno durante il primo anno, questo metodo risultò poco pratico e si preferì una stima a vista, prendendo varie pose del ferro con diverse posizioni della camera, prima di ogni serata d'osservazione. Osservando gli spettri con circa 20 ingrandimenti, è facile identificare lo spettro meglio focato. Così sono state ricavate le posizioni del fuoco per diversi valori della temperatura, indicati nella Tabella I; non è ben chiaro se la variazione osservata, d'altronde assai piccola, sia reale, per modo che questa Tabella va considerata solo come provvisoria. Naturalmente la forma particolare della dipendenza della posizione del fuoco dalla temperatura, con un minimo intorno a $+13^{\circ}$, si può spiegare facilmente, osservando che tale posizione dipende da due fattori, che in parte si compensano: la variazione degli indici di rifrazione delle lenti e la dilatazione e contrazione termiche delle parti metalliche.

TABELLA I. — *Posizioni del fuoco della camera di 48 cm.*

T	f	T	f	T	f
+ 5°	7.2	+ 12°	6.85	+ 19°	7.0
6°	7.1	13°	6.85	20°	7.1
7°	7.0	14°	6.85	21°	7.15
8°	7.0	15°	6.9	22°	7.15
9°	6.95	16°	6.9	23°	7.2
10°	6.9	17°	6.95	24°	(7.2)
11°	6.9	18°	7.0		

In ogni caso però, sarebbe difficile dire per quale motivo, la posizione della camera risulta sensibilmente diversa da quella determinata dal prof. CECCHINI nel 1928, 7.4, per la stessa posizione del prisma.

L'inclinazione migliore della lastra risultò invece praticamente identica a quella trovata nel 1928, $18^{\circ}.3$.

5. - Lo spettro di confronto

Lo spettro di confronto è costituito da un arco tra elettrodi di ferro, alimentato da una corrente continua di circa 60-80 V. La luce dell'arco viene proiettata sulla fenditura da una serie di prismetti a riflessione totale, i quali lasciano libera la parte centrale della fenditura e possono essere avvicinati e allontanati tra loro. Si hanno così due immagini dello spettro di confronto, più o meno separate fra loro, ai due lati dello spettro della stella. Tutti gli spettri sono stati presi tenendo i prismetti nella posizione più ravvicinata possibile; sulla lastra i due spettri di confronto distano tra loro circa mm 0.7 e ognuno dei due spettri è alto circa mm 0.2. Restano perciò disponibili per lo spettro della stella un po' meno di mm 0.5; siccome gli spettri stellari, a seconda delle condizioni atmosferiche, sono alti da meno di 0.1 a 0.2 mm circa, gli spettri di confronto sono ben separati da quello della stella ed è possibile prendere anche spettri stellari artificialmente allargati, senza dover muovere i prismetti.

A parte flessioni dello spettrografo e variazioni di temperatura durante la posa, le posizioni delle righe stellari rispetto a quelle di confronto sono affette da due errori:

- a) la curvatura dell'immagine della fenditura
- b) l'impossibilità pratica di disporre la fenditura rigorosamente parallela allo spigolo rifrangente del prisma.

È noto che l'errore a) si può correggere usando fenditure curve, oppure tenendo conto della forma delle righe spettrali che sono degli archi di parabola con la concavità verso le corte lunghezze d'onda. In quest'ultimo caso si può ottenere una correzione sistematica *negativa* da applicare alle velocità radiali dedotte trascurando la curvatura. Nel nostro caso questa correzione è certo da ritenersi non superiore ad alcuni decimi di km/sec e, per ora, non è stata determinata. Io mi riservo di determinare in seguito accuratamente questa correzione; nel frattempo mi limito ad osservare che, se mai, le osservazioni indicano la necessità di una lieve correzione sistematica *positiva*, cioè di senso contrario a quella dovuta alla curvatura.

L'obliquità della fenditura si corregge semplicemente riferendo la posizione delle righe stellari alla media di quelle dei due spettri di confronto, i quali nelle nostre lastre risultano spostati di circa 15 μ uno rispetto all'altro nel senso della dispersione. Perchè l'errore dovuto all'obliquità sia corretto perfettamente, sarebbe perciò necessario che lo spettro stellare fosse perfettamente nel mezzo tra i due spettri di confronto. In realtà una posizione leggermente eccentrica dello spettro stellare, purchè non eccessiva, non porta conseguenze.

Righe dello spettro di confronto troppo deboli o troppo intense sono poco adatte per una buona misura; è necessario perciò regolare con una certa precisione la posa dello spettro di confronto. A tale scopo abbiamo aggiunto all'apparecchio per la produzione dello spettro di confronto un

otturatore rudimentale che permette di regolare le pose circa al secondo; avendo cura di regolare la tensione dell'arco sempre allo stesso valore, si ottengono così spettri di confronto aventi tutti presso a poco la stessa intensità.

Una certa importanza riveste anche la determinazione esatta del momento o dei momenti durante la posa dello spettro stellare in cui deve essere eseguita la posa dello spettro di confronto, poichè in tal modo si possono ridurre al minimo errori dovuti a variazioni di temperatura e flessione dello spettrografo. Se queste variazioni fossero lineari col tempo, evidentemente basterebbe una posa dello spettro di confronto nell'istante medio della posa della stella, ma, mentre le variazioni della temperatura possono, almeno approssimativamente, ritenersi lineari col tempo, questo non è certamente il caso per la flessione.

Sia allora t il tempo contato a partire dall'istante medio della posa della stella (1), la cui durata indichiamo con T , noi potremo rappresentare la posizione x di una certa riga con una serie di potenze di t :

$$x = a + bt + ct^2 + \dots ;$$

la posizione media sarà quindi:

$$[1] \quad x_m = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} (a + bt + ct^2) dt = a + \frac{1}{12} cT^2,$$

trascurando termini di ordine superiore. Il problema è quindi quello di esporre lo spettro di confronto, in modo che la posizione media x'_m delle righe risulti uguale a quella data dalla [1].

Ora è chiaro che ciò non può essere ottenuto nè con una sola posa a $t = 0$, che darebbe una posizione media $x'_m = a$, nè con due pose di uguale durata al principio e alla fine che darebbero evidentemente $x'_m = a + \frac{1}{4} cT^2$.

Tra gli infiniti modi di soddisfare alla condizione imposta noi abbiamo scelto il seguente, la cui verifica è immediata: tre pose di uguale durata (5^s) a $0.15T$, $0.50T$ e $0.85T$ dall'inizio della posa stellare, T essendo la durata della posa. Così p. es. se la posa della stella era di 20^m, lo spettro di confronto fu esposto a 3^m, 10^m e 17^m dall'inizio, ogni volta per la durata di 5^s.

Per pose molto brevi naturalmente questo sistema non è praticabile, ma per queste le variazioni di temperatura e flessione sono evidentemente trascurabili.

(1) W. SCHRAUB, Hdbuch d. Exp. Phys, 26 Bd. Astrophysik, 242, 1937.

Con questo sistema si possono ritenere completamente eliminati tutti gli errori dovuti alla flessione e ad un imperfetto controllo della temperatura (a priori, del resto, assai piccoli).

6. - Misura degli spettrogrammi

Gli spettrogrammi esposti nelle circostanze indicate sono stati tutti sviluppati la mattina successiva in una soluzione di Rodinal ad 1 : 30 circa ; durata dello sviluppo : 8^m a + 18°.

In considerazione della possibile utilizzazione delle lastre per altri scopi ogni lastra (6 × 9) viene tagliata da una lastra più grande (9 × 12) e sull'altra metà viene impresso uno spettro per la taratura fotometrica (fenditura a gradini illuminata uniformemente da una comune lampada ad incandescenza) ; le due mezze lastre sono poi sempre sviluppate insieme.

La misura delle lastre di velocità radiale fu eseguita al misuratore Mioni dell'Osservatorio di Merate.

Questo strumento, già completamente studiato dal prof. CECCHINI, è stato recentemente sottoposto ad alcune importanti modifiche. Infatti lunghe serie di misure fotografiche di stelle doppie, cui attende in questi anni il dott. KRÜGER, hanno mostrato che gli errori progressivi e periodici delle viti non solo erano di grande entità, come aveva già trovato il prof. CECCHINI, ma, ciò che è più grave, variavano rapidamente e irregolarmente di grandezza in modo da rendere praticamente inutilizzabili le misure fatte con questo strumento.

Pazienti revisioni e misure, che tennero occupato il dott. KRÜGER per parecchi mesi degli anni 1939 e 1940, portarono finalmente ad identificare la causa dell'irregolare funzionamento dello strumento. Di questi studi dirà a suo tempo lo stesso KRÜGER nel pubblicare le sue misure fotografiche di stelle doppie ; qui basterà dire che la causa dell'inconveniente era dovuta ad un difetto di costruzione del misuratore, in cui lo scorrimento del portlastre sopra la sua guida triangolare, nonchè l'appoggio delle viti erano ottenuti mediante cuscinetti a sfere non ben registrati. Per tale motivo lo strumento venne modificato dal nostro tecnico sig. Milani, in modo da eliminare completamente i cuscinetti a sfere da tutti i suoi organi fondamentali.

Lo strumento modificato non potè essere studiato dal dott. KRÜGER richiamato alle armi fin dal principio della guerra ; per le misure di velocità radiali il metodo adottato, come si vedrà, rendeva inutile la determinazione degli errori progressivi, purchè questi rimanessero sempre gli stessi durante le misure. È invece essenziale tener conto degli errori periodici.

Pertanto, prima di iniziare le misure, ho eseguito una determinazione degli errori periodici della vite trasversale, che è quella da me usata, col

(1) G. CECCHINI. Contr. R. O. Merate, n. 19, 1934.

classico metodo di BESSEL. Gli intervalli usati erano rispettivamente di mm 0.11, 0.21, 0.32 e vennero misurati di 0.05 in 0.05 mm sulle rivoluzioni 75.0-76.0, 81.0-82.0, 92.0-93.0. Gli errori determinati sono molto piccoli e dimostrano l'enorme miglioramento subito dallo strumento dopo le anzidette modifiche; in nessun caso l'errore supera 0.0005 mm.

Le correzioni per gli errori periodici della vite trasversale sono date nella Tabella II.

TABELLA II. — *Correzioni per gli errori periodici della vite trasversale del misuratore Mioni.*

lettura (mm)	correzione (mm)
0.00	— 0.0001
.05	— 2
.10	— 2
.15	— 1
.20	— 2
.25	— 2
.30	0
.35	+ 3
.40	+ 4
.45	+ 2
.50	— 1

Siccome nelle mie misure non ho mai tenuto conto dei decimi di micron, queste correzioni non sono mai state applicate.

Quanto agli errori progressivi, dalle misure eseguite vi sono indizi che permettono di affermare che essi non sono variati sensibilmente nel corso delle misure stesse, ma non è possibile dir nulla circa il loro ammontare.

Di altre modifiche secondarie del misuratore, destinate a rendere più agevoli le misure e le letture delle viti, non è qui il caso di parlare.

Ogni spettro fu misurato due volte: una volta con le grandi lunghezze d'onda a destra (lastra diretta) e una volta con le grandi lunghezze d'onda a sinistra (lastra inversa), per eliminare errori personali dovuti alla forma curva delle righe spettrali. Le righe dello spettro di confronto furono collimate due volte per lo spettro superiore e due per lo spettro inferiore, quelle stellari tre volte. Dagli scarti tra le varie collimazioni risulta che l'incertezza dovuta alla puntata è dell'ordine di circa 0.001 mm per una riga stellare di qualità media; per righe molto larghe o assai deboli e nebulose, questa incertezza è naturalmente assai maggiore. Per le righe dello spettro di confronto l'incertezza dovuta alla puntata non supera mm 0.0005.

Dopo qualche prova ho preferito usare per le collimazioni un filo unico, malgrado che talvolta le righe risultassero più sottili del filo impiegato. Col microscopio del misuratore Mioni non è facile trovare fili abbastanza sottili; dirò anzi, a tale proposito, che il filo impiegato è il più sottile tra molti provati e scartati appunto perchè troppo grossi.

7. - Metodo di riduzione delle lastre

La misura dello spettro dà le posizioni di un certo numero di righe stellari e dello spettro di confronto in mm e riferite ad un'origine arbitraria (a meno degli errori di scala e progressivi della vite del misuratore). Si tratta ora di convertire queste posizioni in lunghezze d'onda.

La formula di HARTMANN, applicata spettro per spettro, comporta un lavoro di calcolo eccessivo, tanto più che le costanti della formula differiscono da lastra a lastra e devono essere determinate volta per volta. Tutti gli osservatori dediti alla misura di velocità radiali ricorrono perciò alla costruzione di speciali tabelle che rendano le riduzioni più facili e spedite. Noi abbiamo seguito il seguente procedimento.

Scelto uno spettro di confronto tra i migliori, si misurarono 20 righe di lunghezza d'onda ben nota, procurando di sceglierle ben isolate e di intensità adatta per la misura; a tale scopo fu molto utile la lista data da ALBITZKY e SHAJN nella prefazione alle misure di Pulkova (1). Per le righe della lista che sono anche campioni secondari di lunghezza d'onda, ho preferito usare le lunghezze d'onda consigliate dall'I. A. U. (2).

Da 3 di queste righe, tanto per lastra diretta, quanto per lastra inversa, sono state dedotte le costanti della formula di HARTMANN, usando poi tutte le righe per una correzione differenziale (calcolata col metodo dei minimi quadrati) delle costanti stesse. Le formule di HARTMANN per lastra diretta e lastra inversa risultano rispettivamente:

$$\lambda = 2187.373 + \frac{135 \ 528.7}{152.7512 - n} \quad (\text{diretta})$$

[2]

$$\lambda = 2185.006 + \frac{135 \ 858.8}{n - 29.6656} \quad (\text{inversa}),$$

n essendo la lettura al tamburo della vite del misuratore (mm).

Sopra un intervallo spettrale ampio come quello impiegato la formula di HARTMANN è insufficiente; oltre di che non abbiamo finora tenuto conto degli errori progressivi della vite. Alle lunghezze d'onda così calcolate si deve perciò aggiungere ancora una correzione $\Delta\lambda$ che si può ricavare empiricamente dagli scarti tra le lunghezze d'onda calcolate e le lunghezze d'onda vere. Per le 20 righe misurate gli scarti sono indicati nella fig. 2,

(1) Pulk. Obs. Publ. II, Vol. XLIII, 1933.

(2) Trans. I. A. U. III, 86, 1938.

insieme con le curve interpolate a vista; si osserverà che nel disegno la scala delle ordinate è molto grande specialmente nella parte delle grandi lunghezze d'onda, dove 1 cm equivale sulla lastra a poco più di mm 0.0010. È ovvio, poi, che questi scarti, oltre che dagli errori di osservazione, provengono sia dall'insufficienza della formula di Hartmann e sia dagli errori progressivi della vite del misuratore.

La Tabella III dà per le righe misurate le letture normali al misuratore.

TABELLA III. — *Posizioni normali delle righe dello spettro di confronto.*

λ	lastra diretta	lastra inversa
3865.526	71.992	110.509
3922.914	74.662	107.840
3977.746	77.053	105.448
4021.872	78.873	103.628
4076.642	81.015	101.486
4107.492	82.167	100.334
4118.549	82.572	99.930
4147.673	83.614	98.888
4191.443	85.124	97.378
4233.615	86.518	95.984
4282.406	88.061	94.441
4315.087	89.054	93.447
4337.049	89.705	92.796
4375.932	90.825	91.676
4427.312	92.246	90.255
4447.722	92.792	89.708
4494.568	94.010	88.490
4528.619	94.864	87.636
4592.655	96.405	86.094
4602.944	96.645	85.853

Mediante le formule [2] e le correzioni $\Delta\lambda$ determinate graficamente è stata poi calcolata una tabella per la conversione delle letture al misuratore in lunghezze d'onda; la quale tabella, come è evidente per quanto è stato detto fin qui, tien conto contemporaneamente della curva di dispersione dello spettrografo e degli errori di scala e progressivi della vite del misuratore.

Per adoperare questa tabella di conversione è necessario anzitutto disporre la lastra, in modo che l'origine corrisponda almeno approssimativamente con quella della tabella; a tale scopo basta muovere la lastra finchè si ha per una riga (centrale) dello spettro di confronto una lettura

uguale a quella normale della Tabella III. Secondariamente occorre tener conto della differenza di scala tra la lastra che si misura e quella che ha servito per la costruzione della tabella di conversione (dovuta in primo luogo alla differenza di dispersione causata dalla temperatura, che era di $+23^\circ$ per la lastra usata per la tabella); a tale scopo si usa un certo numero di righe dello spettro di confronto, le quali danno anche le correzioni residue per l'origine. Dalle differenze tra le posizioni misurate e quelle della Tabella III, con una semplice interpolazione si trovano le correzioni

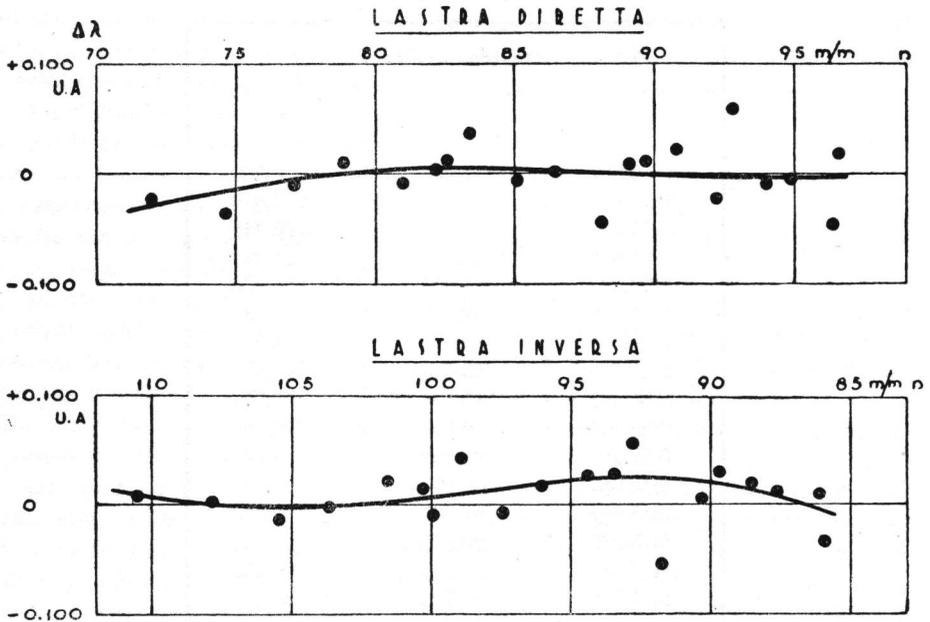


Figura 2.

Scarti tra la lunghezza d'onda calcolata mediante la formula di Hartmann e quella misurata (Temp. $+23^\circ$).

da dare alle letture fatte per le righe stellari, prima di entrare nella Tabella di conversione. Questo vien fatto separatamente per le due posizioni diretta ed inversa della lastra. Dalle lunghezze d'onda si passa poi direttamente ai valori della velocità radiale. Il metodo di riduzione può essere meglio illustrato mediante la Tabella IV, in cui ho riportato, copiando a caso dal mio quaderno delle misure, la riduzione di uno spettro di δ Draconis del 9 agosto 1940.

Le varie colonne della Tabella IV rappresentano:

1. La lunghezza d'onda tabulare della riga; su queste lunghezze d'onda dovremo tornare più avanti.

TABELLA IV. — Riduzione di uno spettrogramma.

♁ *Draconis* 9/8/1940, 1038b; Temp. + 23°9; spettro buono; righe molte e buone.

λ_{tab}	n mm	Δn	Δn	n' mm	λ_d	n mm	Δn	Δn	n' mm	λ_i	λ_o	$\Delta \lambda$	V
<i>Fe</i> 3977.746	77.049	+ 4				105.276	+ 172						
4005.21	78.208		+ 3	78.211	5.57	104.121		+ 172	104.293	5.50	4005.53	+ 0.28	+ 21.0
<i>Fe</i> 4021.872	78.870	+ 3				103.456	+ 172						
4030.64	79.235		+ 3	79.238	0.97	103.097		+ 172	103.269	0.83	4030.90	+ 26	+ 19.3
4045.78	79.838		+ 3	79.841	6.22	102.490		+ 172	102.662	6.18	4046.20	+ 42	+ 31.1
4063.56	80.535		+ 3	80.538	4.16	101.797		+ 172	101.969	4.02	4064.09	+ 55	+ 40.6
4071.74	80.837		+ 2	80.839	2.02	101.494		+ 172	101.666	1.93	4071.97	+ 23	+ 16.9
<i>Fe</i> 4076.642	81.013	+ 2				101.315	+ 171						
4092.48	81.625		+ 2	81.627	2.90	100.706		+ 172	100.878	2.81	4092.86	+ 38	+ 27.9
<i>Fe</i> 4118.549	82.570	+ 2				99.757	+ 173						
4127.89	82.918		+ 2	82.920	8.19	99.411		+ 172	99.583	8.14	4128.17	+ 28	+ 20.3
4132.31	83.073		+ 2	83.075	2.50	99.251		+ 172	99.423	2.60	4132.55	+ 24	+ 17.4
4134.48	83.151		+ 2	83.153	4.68	99.176		+ 172	99.348	4.70	4134.69	+ 16	+ 11.6
4143.75	83.489		+ 2	83.491	4.18	98.841		+ 172	99.013	4.12	4144.15	+ 40	+ 29.0
<i>Fe</i> 4147.673	83.611	+ 3				98.717	+ 171						
<i>Fe</i> 4191.443	85.124	0				97.205	+ 173						
4191.51	85.187		0	85.137	1.82	97.193		+ 173	97.366	1.79	4191.80	+ 29	+ 20.7
4202.05	85.496		0	85.496	2.52	96.835		+ 173	97.008	2.45	4202.48	+ 43	+ 30.7
4215.66	85.943		0	85.943	5.98	96.388		+ 173	96.561	5.94	4215.96	+ 30	+ 21.3
4226.88	86.312		0	86.312	7.27	96.016		+ 173	96.189	7.29	4227.28	+ 40	+ 28.4
<i>Fe</i> 4233.615	86.518	0				95.810	+ 174						
4235.94	86.602		0	86.602	6.20	95.726		+ 174	95.900	6.21	4236.21	+ 27	+ 19.1
4250.50	87.070		0	87.070	0.81	95.259		+ 174	95.433	0.77	4250.79	+ 29	+ 20.4
4260.40	87.385		0	87.385	0.75	94.945		+ 174	95.119	0.69	4260.72	+ 32	+ 22.5
4271.59	87.735		0	87.735	1.91	94.594		+ 174	94.768	1.87	4271.89	+ 30	+ 21.1
<i>Fe</i> 4282.406	88.061	0				94.267	+ 174						
4282.63	88.077		0	88.077	2.93	94.254		+ 174	94.428	2.83	4282.88	+ 25	+ 17.5
4289.56	88.289		0	88.289	9.83	94.039		+ 174	94.213	9.83	4289.83	+ 27	+ 18.9
4307.90	88.852		0	88.852	8.35	93.479		+ 174	93.653	8.24	4308.30	+ 40	+ 27.8
4314.68	89.055		0	89.055	5.11	93.274		+ 174	93.448	5.07	4315.09	+ 41	+ 28.5
<i>Fe</i> 4315.087	89.054	0				93.274	+ 173						
4337.52	89.730		0	89.730	7.90	92.600		+ 174	92.774	7.81	4337.85	+ 33	+ 22.8
<i>Fe</i> 4375.932	90.825	0				91.502	+ 174						
4383.56	91.047		0	91.047	3.79	91.282		+ 173	91.456	3.74	4383.77	+ 21	+ 14.4
4404.75	91.638		+ 1	91.639	5.07	90.690		+ 173	90.864	5.00	4405.03	+ 28	+ 19.1
4415.18	91.926		+ 1	91.927	5.57	90.402		+ 173	90.576	5.50	4415.53	+ 25	+ 17.0
<i>Fe</i> 4427.312	92.245	+ 1				90.082	+ 173						

Vel. rad.	+ 22.5	± 0.8
Riduz. al sole	+ 3.1	
V_r	+ 25.6	

2. La lettura al tamburo della vite (mm).
 3. La differenza lettura normale meno lettura osservata (col. 2), per le righe dello spettro di confronto (media dello spettro superiore e di quello inferiore).
 4. La correzione dedotta per le righe stellari.
 5. La lunghezza d'onda ricavata dalla tabella di conversione.
- Queste 4 colonne si riferiscono alla posizione diretta della lastra, le colonne 6, 7, 8, 9 contengono gli stessi elementi delle colonne 2, 3, 4, 5, relativi alla posizione inversa della lastra.
10. La media delle lunghezze d'onda misurate nelle due posizioni della lastra.
 11. La differenza tra la lunghezza d'onda osservata e quella tabulare.
 12. La velocità radiale dedotta.

Questo metodo di riduzione è sufficientemente rapido e molto preciso; la misura di uno spettro con molte righe, riduzioni comprese, prende circa 2 ore. È probabile che diminuendo il numero medio di righe per spettro (15 o 20 righe dovrebbero essere ampiamente sufficienti, v. più avanti) e aumentando col tempo la pratica dell'osservatore, questo tempo possa essere un po' diminuito. Ma in ogni caso, dato che in una notte si raccolgono comodamente dai 10 ai 20 spettri, sembra difficile che si riesca a tenere queste misure sempre aggiornate in un osservatorio con personale scarso come il nostro; d'onde la necessità di integrare un programma come questo con un altro che occupi maggiormente le ore notturne, lasciando più libere quelle diurne.

Per la riduzione al sole delle velocità misurate si sono adoperate le solite formule riportate in tutti i trattati.

8. - Sistema di lunghezze d'onda per le stelle dei tipi avanzati

Vari autori hanno pubblicato tabelle di lunghezze d'onda per le misure di velocità radiali da spettri aventi una dispersione analoga alla nostra; le più recenti sono quelle dell'Osservatorio di Victoria ⁽¹⁾ e di queste decisi inizialmente di servirmi, aggiungendo eventualmente qualche riga che risultasse molto ben visibile nei miei spettri. Ma, mentre nulla di anormale si notò per le stelle dei primi tipi, per quelle dei tipi più avanzati mi accorsi immediatamente che le velocità date dalle singole righe discordavano tra loro assai più di quanto fosse lecito prevedere, data la facilità di misurare righe così nette e definite; inoltre la medesima riga dava scarti quasi sempre dello stesso segno sia nei diversi spettri di una stessa stella e sia anche da stella a stella.

(4) W. E. HARPER, D. A. O. Publ. 6, 297, 1936.

In vista di questo fatto, dopo maturo esame, mi è sembrato naturale di attribuire una parte considerevole dello scarto osservato a differenze tra le lunghezze d'onda vere delle righe misurate e le lunghezze d'onda tabulari delle liste di Victoria; queste differenze provengono dal fatto che, col potere risolvante usato per questi lavori, quasi tutte le righe delle stelle dei tipi avanzati sono in realtà righe complesse provenienti dalla sovrapposizione di molte righe. Perciò a priori si possono avere differenze tra un complesso strumentale ed un altro e, nello stesso complesso strumentale, da stella a stella, in ragione del variare dell'intensità relativa delle varie componenti di una riga complessa. Differenze analoghe furono riscontrate, p. es., da ALBITZKY e SHAJN ⁽¹⁾ tra le lunghezze d'onda medie dei loro spettrogrammi e le liste di lunghezze d'onda dell'Osservatorio del M. Wilson.

Per studiare queste differenze ho elencato nella Tabella V le differenze in velocità radiale mostrate dalle singole righe nelle diverse stelle misurate, ordinate a seconda del tipo spettrale. Le velocità radiali adottate per le varie stelle figurano in testa ad ogni colonna e provengono da uno schedario contenente tutte le velocità radiali pubblicate prima della fine del 1940, ridotte al sistema dell'Osservatorio di Lick ⁽²⁾.

Accanto ad ogni differenza è indicato in parentesi il numero di spettri su cui la riga è stata misurata. Le ultime due colonne contengono rispettivamente le medie delle singole differenze e la lunghezza d'onda osservata, cioè la lunghezza d'onda, per cui le medie della penultima colonna si riducono a zero.

Uno sguardo alla Tabella V indica immediatamente la necessità di modificare le lunghezze d'onda tabulari anche per misure preliminari come queste; infatti, anche considerando come accidentali molti degli scarti osservati, non si può seriamente dubitare della realtà di certe differenze, come, p. es., quelle per le righe 4226.7, 4337.1, 4351.8 ecc.

Sorge così il problema di determinare le lunghezze d'onda tabulari più adatte per i nostri spettrogrammi. Evidentemente il modo più semplice di far ciò sarebbe quello di usare le lunghezze d'onda dell'ultima colonna della Tabella V, ma questo procedimento, perfettamente lecito se noi avessimo a nostra disposizione un numero grandissimo di misure, non può essere adottato con un numero così esiguo di spettri. Ho preferito perciò usare un procedimento più obiettivo, basato su alcuni spettri, considerati tipici, di cui esistono studi particolareggiati con spettrografi ad alta dispersione; questi spettri sono: quello solare (macchie e disco) ⁽³⁾, quello di α Persei (cF5) ⁽⁴⁾ e quello di α Bootis (gK0) ⁽⁵⁾.

La discussione di questi spettri è stata fatta nel modo seguente.

(1) Pulk. Obs. Publ. II, n. XLIII, 15, 1933.

(2) Lick O. Publ. vol. XVIII, 1932.

(3) Revision of Rowland's preliminary Table, Carn. Inst. Publ. n. 396, 1928.

(4) T. DUNHAM JR., Princeton Obs. Publ. n. 9, 1929.

(5) S. G. HACKER, Princeton Obs. Publ. n. 16, 1935.

TABELLA V. — *Discussione delle lunghezze d'onda tabulari.*

λ Victoria (1)	γ Cyg cF7 -7.5	η Dra gG6 -14.3	μ Peg gG6 +13.9	η Cep G7 -87.3	ζ Dra gG8 +24.7	ϵ Peg cK0 +5.0	γ Aql gK4 -2.1	γ Aql gK4 -2.1	β Peg gM2 +8.7	Medie	λ Oss.
4005.256	+ 4.3 (3)	- 7.1 (4)	- 1.8 (2)	- 3.9 (3)	- 6.4 (3)					- 3.0	4005.22
4024.670 *	+ 13.0 (3)									+ 13.0	4024.84
4030.769	- 10.3 (3)	- 12.8 (4)		- 6.0 (3)	- 11.7 (3)				- 7.6 (1)	- 9.7	4030.64
4034.49 *	- 10.1 (3)									- 10.1	4034.35
4035.683	- 1.5 (1)			- 0.2 (3)						- 0.8	4035.67
4045.818	- 1.3 (3)	- 7.4 (4)		+ 1.3 (3)	- 1.6 (3)				+ 11.7 (1)	- 2.2	4045.79
4063.621	- 6.8 (3)	- 2.8 (4)	- 6.9 (1)	- 0.9 (3)	+ 4.5 (3)				- 8.2 (1)	- 3.5	4063.57
4071.740	- 6.2 (3)	- 2.1 (4)	- 6.9 (1)	- 1.3 (3)	- 2.7 (3)				- 8.1 (2)	- 4.6	4071.68
4077.729	+ 2.2 (3)	1.1 (4)		- 4.8 (3)						- 1.2	4077.71
4092.478		- 0.5 (4)	+ 2.0 (2)	+ 1.2 (3)	+ 1.1 (3)				- 4.5 (2)	- 0.1	4092.48
4101.750	- 2.4 (4)									- 2.4	4101.72
4118.681	- 5.3 (3)	- 0.3 (4)	+ 1.6 (1)	+ 3.7 (3)			+ 7.7 (1)	+ 7.7 (1)	- 16.0 (2)	- 1.4	4118.66
4127.840		- 3.7 (4)	+ 1.7 (2)	- 1.7 (3)	+ 2.6 (3)	+ 7.7 (1)	- 12.6 (1)	- 12.6 (1)	+ 2.0 (2)	- 0.6	4127.83
4132.069	+ 19.4 (4)	+ 4.5 (4)	+ 7.1 (2)	+ 5.1 (3)	+ 7.9 (3)	+ 14.3 (1)	+ 22.9 (1)	+ 22.9 (1)	+ 6.1 (2)	+ 10.9	4132.22
4134.483	+ 15.2 (3)		- 3.0 (2)	+ 0.6 (3)	- 4.0 (3)				+ 5.0 (2)	+ 2.8	4134.52
4143.722	- 3.9 (4)	- 2.6 (4)		+ 5.0 (3)	+ 7.8 (3)	- 6.1 (1)	+ 10.5 (1)	+ 10.5 (1)		+ 1.8	4143.75
4191.555	- 5.5 (3)	+ 3.8 (4)	+ 2.7 (2)	+ 2.2 (3)	+ 0.8 (3)	- 0.8 (4)	- 6.1 (1)	- 6.1 (1)	- 9.5 (3)	- 1.5	4191.53
4202.054	+ 2.5 (4)	+ 0.6 (4)	- 2.0 (2)	- 0.3 (3)	+ 5.7 (3)	+ 11.5 (3)	- 6.5 (1)	- 6.5 (1)	+ 3.4 (2)	+ 1.9	4202.08
4215.638 *	- 2.8 (4)	+ 3.1 (4)	+ 1.4 (2)	+ 7.6 (3)	+ 3.3 (3)	+ 9.5 (5)	- 8.2 (1)	- 8.2 (1)	+ 6.1 (3)	+ 2.5	4215.67
4226.742	+ 19.2 (4)	+ 8.3 (4)	+ 13.1 (2)	+ 4.3 (3)	+ 9.4 (3)		+ 18.7 (1)	+ 18.7 (1)		+ 10.4	4226.89
4235.940	- 1.5 (4)		- 4.6 (2)	+ 3.6 (3)	- 4.4 (3)	- 2.8 (5)	- 2.6 (1)	- 2.6 (1)		- 2.1	4235.91
4246.838 *	+ 0.4 (1)					+ 8.7 (5)				+ 4.5	4246.90
4250.472	+ 1.0 (4)	+ 1.2 (3)	+ 8.2 (2)	+ 6.7 (3)	+ 6.6 (3)	+ 1.1 (6)	+ 5.6 (3)	+ 5.6 (3)	+ 2.9 (3)	+ 4.2	4250.53
4254.348				- 1.7 (3)		- 9.3 (6)	- 6.3 (3)	- 6.3 (3)	- 5.1 (3)	- 5.5	4254.27
4260.479	- 9.9 (4)	- 6.9 (4)	+ 0.8 (2)	- 6.0 (3)	- 7.3 (3)	- 3.3 (6)	- 2.7 (4)	- 2.7 (4)	+ 2.9 (3)	- 4.1	4260.42
4271.580	- 7.4 (4)	+ 1.0 (4)	+ 11.2 (2)	+ 5.8 (3)	+ 4.6 (3)	+ 8.6 (6)	- 3.7 (3)	- 3.7 (3)	+ 5.2 (2)	+ 3.2	4271.63
4274.761	+ 22.2 (3)					+ 9.3 (6)	+ 5.3 (4)	+ 5.3 (4)	+ 2.1 (3)	+ 9.7	4274.90
4282.622	- 7.0 (4)	+ 0.4 (4)	+ 6.4 (2)	+ 6.2 (3)	- 3.0 (3)	+ 0.8 (6)	- 0.7 (4)	- 0.7 (4)	+ 6.1 (3)	+ 1.1	4282.64
4289.632 *	+ 17.7 (4)			+ 3.0 (3)	- 6.0 (3)	- 4.4 (5)	- 2.2 (4)	- 2.2 (4)	- 2.6 (3)	+ 0.9	4289.65
4307.926	- 10.7 (4)	- 0.7 (4)	+ 3.2 (2)	- 0.9 (3)	+ 2.5 (3)	+ 1.8 (6)	- 5.9 (3)	- 5.9 (3)	- 8.7 (3)	- 2.4	4307.89
4314.668	- 9.3 (4)	+ 2.6 (4)	+ 13.2 (2)	+ 9.6 (3)	+ 11.2 (3)	- 5.7 (6)	+ 1.5 (2)	+ 1.5 (2)	- 1.9 (3)	+ 2.6	4314.70
4320.816	- 3.4 (4)		- 5.5 (2)			+ 2.7 (6)	+ 5.1 (4)	+ 5.1 (4)	+ 2.2 (3)	+ 0.2	4320.82
4325.635	- 19.9 (4)	- 2.3 (4)	- 1.1 (2)	+ 2.2 (3)	+ 5.4 (3)	+ 7.4 (5)	+ 4.6 (4)	+ 4.6 (4)	+ 3.8 (3)	0.0	4325.63
4337.057	+ 37.3 (4)		+ 21.6 (2)	+ 24.1 (3)	+ 35.5 (3)	+ 26.4 (6)	+ 26.4 (4)	+ 26.4 (4)	+ 38.3 (3)	+ 29.9	4337.49
4340.490	+ 8.2 (4)	+ 1.3 (4)	- 3.2 (2)			+ 1.4 (6)	- 0.9 (4)	- 0.9 (4)	- 6.7 (3)	0.0	4340.49
4351.848		- 1.5 (4)				- 24.2 (6)	- 33.0 (1)	- 33.0 (1)	- 32.0 (3)	- 22.7	4351.52
4383.562		- 3.0 (4)	- 2.5 (2)	- 7.1 (3)	- 3.6 (3)	- 4.8 (5)	+ 6.2 (4)	+ 6.2 (4)	- 5.0 (2)	- 2.8	4383.52
4404.752	+ 1.5 (4)	- 3.1 (4)	+ 1.5 (2)	- 2.5 (3)	- 2.3 (3)	- 2.1 (6)	- 3.7 (4)	- 3.7 (4)	- 0.8 (3)	- 1.6	4404.73
4408.368						+ 5.4 (5)	+ 6.1 (2)	+ 6.1 (2)	+ 6.4 (3)	+ 6.0	4408.46
4415.145	- 1.9 (4)	+ 0.2 (4)	+ 1.3 (2)	+ 2.2 (3)	- 1.5 (3)	- 5.6 (6)	- 12.9 (3)	- 12.9 (3)	- 1.3 (3)	- 2.4	4415.11
4427.258						+ 6.2 (6)	+ 2.7 (2)	+ 2.7 (2)		+ 4.4	4427.32
4435.226						+ 8.4 (5)	+ 2.9 (3)	+ 2.9 (3)	+ 12.6 (3)	+ 8.0	4435.34
4454.910						+ 2.3 (6)				+ 2.3	4454.94
4461.809						- 1.5 (6)	- 5.5 (4)	- 5.5 (4)	+ 3.3 (3)	- 1.2	4461.79
4482.214									+ 0.2 (3)	+ 0.2	4482.22
4494.575						- 9.0 (6)	- 25.5 (3)	- 25.5 (3)	+ 3.6 (3)	- 10.3	4494.42
4501.280 *						+ 21.8 (5)	- 6.1 (4)	- 6.1 (4)		+ 7.8	4501.40
4518.03 *							- 6.7 (2)	- 6.7 (2)		- 6.7	4517.93
4522.809						+ 0.5 (6)	- 7.7 (4)	- 7.7 (4)		- 3.6	4522.75

(1) Le righe segnate con un asterisco provengono da altre fonti, specialmente da D.D.O.

Anzitutto, per ogni riga complessa, si è fatto un elenco delle possibili componenti, usando a tale scopo il nuovo atlante di MINNAERT e collaboratori delle intensità delle righe dello spettro solare, tenendo presente il potere separatore dello spettrografo di Merate e la maggiore o minore possibilità che una riga risultasse confusa con le ali di un'altra.

La lunghezza d'onda media della riga complessa, è stata poi assunta uguale alla media ponderata delle lunghezze d'onda delle componenti (ricavate dalla Tabella di Rowland), prendendo come peso per ciascuna l'intensità indicata negli studi degli spettri in discussione.

Si sono così ottenute delle lunghezze d'onda che si possono considerare tipiche degli spettri F, G e K (queste ultime risultano a loro volta dalla media dello spettro di α Bootis e delle macchie solari).

Le lunghezze d'onda adottate nella nostra lista preliminare e indicate nella prima colonna della Tabella VI risultano in generale dalla media di quelle di questi tre spettri tipici, salvo qualche caso, in cui, essendo evidente la variazione della lunghezza d'onda con il tipo spettrale, si è preferito tener separato lo spettro di α Persei, considerando la lunghezza di onda relativa a questo come tipica degli spettri F e cG (cG0 e cG5); inoltre, se le osservazioni nostre si riferiscono solo a stelle di tipo avanzato, si è preferito, in qualche caso escludere α Persei dalla media. In qualche caso, infine, quando la differenza era piccola ho preferito adottare senz'altro la lunghezza d'onda di Victoria.

Per comodità nella 2^a colonna ho indicato la velocità radiale corrispondente ad una variazione di lunghezza d'onda di 1 Å.

Le lunghezze d'onda della Tabella VI sono il frutto di un esame assai minuto, accurato e sopra tutto obiettivo e si può presumere che, malgrado il loro carattere preliminare, esse possano sostituire vantaggiosamente quelle della lista di Victoria. Il miglioramento così introdotto nelle misure è poi veramente sorprendente; non solo gli scarti dovuti alle singole righe risultano sensibilmente abbassati, ma il loro carattere risulta completamente accidentale. Vi sono casi in cui lo scarto probabile delle singole righe dalla media è stato ridotto a poco più della metà; per contro in uno o due casi tale scarto è risultato leggermente aumentato.

Queste prime misure giustificano così completamente l'uso delle lunghezze d'onda preliminari della Tabella VI; è stato perciò deciso di adottarle, almeno in via provvisoria, per tutte le misure che verranno eseguite a Merate, salvo a modificarle in seguito, quando dalla misura di un numero molto grande di spettri si potrà avere qualche criterio sicuro di giudizio.

9. - Precisione delle misure

Nel discutere la precisione delle misure occorre naturalmente distinguere tra errori di natura accidentale ed errori di natura sistematica.

È evidente che i secondi possono essere discussi solo in base ad una serie di misure molto più numerosa di quella qui presentata. Tutto ciò che

TABELLA VI. — *Lista preliminare di lunghezze d'onda per le stelle di tipo avanzato.*

λ	V	Note
4005.21	74.87	Solo da \odot e macchie.
4024.82	74.50	» » » »
4030.64	74.39	» » » »
4035.68	74.30	Adottata la λ di Victoria.
4045.78	74.12	Solo da \odot e macchie.
4063.56	73.79	» » » »
4071.74	73.64	Non ci sono ragioni per modificare la λ di Victoria, ma righe nelle ali possono alterare la λ misurata.
4077.69	73.54	Solo da \odot e macchie: nei tipi F Sr+ predomina elevando alquanto il valore di λ .
4092.48	73.27	Adottata la λ di Victoria.
4101.75	73.11	Solo da \odot e macchie; righe nelle ali possono alterare la λ misurata nei tipi K.
4118.71	72.80	Solo da \odot e macchie; in β Peg influisce forse 18.16 Ce+.
4127.89	72.64	Solo da \odot , macchie e α Bootis.
4132.31	72.57	Solo da \odot , macchie e α Boo; forti incertezze circa le possibili componenti.
4134.53	72.53	Solo da \odot , macchie e α Boo.
4143.75	72.36	» » » »
4191.51	71.54	Forse contribuisce anche 92.02 di dubbia identificazione.
4202.05	71.36	Adottata la λ di Victoria.
4215.66	71.13	Incertezza sulle possibili componenti; λ incerta.
4226.88	70.94	
4235.94	70.79	Adottata la λ di Victoria.
4246.84	70.61	Da usare solo per i tipi F e cG.
4250.50	70.55	
4254.35	70.48	Forse influiscono anche altre componenti.
4260.40	70.38	
4271.49	70.20	Da usare solo per i tipi F e cG.
4271.59	70.20	» » » » G e K.
4274.94	70.15	» » » » G e K.
4275.12	70.15	» » » » F e cG.
4282.63	70.02	
4289.56	69.90	Da usare solo per i tipi G e K.
4289.81	69.90	» » » » F e cG.
4307.90	69.61	
4314.52	69.50	Da usare solo per i tipi F e cG.
4314.68	69.50	» » » » G e K.
4320.82	69.40	
4325.41	69.32	Da usare solo per i tipi F e cG; grande incertezza circa le possibili componenti.

segue TABELLA VI.

λ	V	Note
4337.52	69.14	
4340.49	69.08	
4351.55	68.90	Da usare solo per i tipi G8-M.
4351.83	68.90	» » » » G0-G5.
4383.56	68.40	Righe nelle ali possono alterare la λ misurata.
4404.75	68.08	Adottata la λ di Victoria.
4408.40	68.02	
4415.18	67.89	Adottata la λ di Victoria, benchè le misure favoriscano l'adozione di una λ minore.
4427.30	67.73	Da usare solo per i tipi K ed M.
4435.28	67.61	Regione assai complessa; λ incerta.
4461.77	67.21	α Per esclusa; λ incerta.
4482.21	66.90	
4494.48	66.72	α Per esclusa.
4501.35	66.62	α Per esclusa; λ varia probabilmente col tipo spettrale.
4517.97	66.36	
4522.74	66.30	α Per esclusa.

si può dire per ora è che non sembra che tali errori possano essere molto grandi. Confrontando le velocità dedotte per le stelle degli ultimi tipi con quella risultante dalla media di tutte le osservazioni eseguite finora in diversi osservatori, ridotte al sistema del Catalogo di Lick, risulta che le nostre velocità radiali richiedono una correzione sistematica di + 0.5 km/sec. Dato però il numero esiguo di stelle, non si può dire se questa correzione sia reale, oppure provenga da fluttuazioni statistiche. Comunque la piccolezza di questa correzione mostra che le precauzioni prese nelle misure, il metodo impiegato e il sistema di lunghezze d'onda adottato sono molto soddisfacenti nei riguardi degli errori sistematici.

Per ciò che riguarda gli errori accidentali si deve poi distinguere tra le differenze presentate tra le righe di una stessa lastra e le differenze tra le velocità radiali ricavate da lastre diverse.

Per spettri di tipo avanzato lo scarto probabile nelle misure di una singola riga oscilla tra ± 3.0 e ± 7.5 km/sec, ma lo scarto più frequente si aggira intorno a ± 4.0 km/sec. Questo scarto deriva solo in parte da errori di collimazione al misuratore, in quanto ripetendo le misure si osserva che la stessa riga dà sempre scarti dello stesso ordine. In parte esso proviene da « errori di lastra » probabilmente connessi alla granulosità della lastra fotografica e in parte da differenze reali nelle lunghezze d'onda delle singole righe da stella a stella, delle quali naturalmente non è possibile tener conto.

Quanto alle differenze tra lastra e lastra, per valutarle esattamente occorrerebbe una lunga serie di misure di una stessa stella, di cui non disponiamo. Dalle misure eseguite risulta che lo scarto probabile di una lastra dalla media si aggira intorno a ± 1.3 km/sec.

Siccome il numero medio di righe misurato in ogni spettro è di 26, è chiaro che gli errori delle singole righe contribuiscono all'errore totale di una lastra per circa ± 0.8 km/sec; ne consegue che la parte residua dell'errore dovuta a cause molteplici (variazioni di temperatura e flessione durante la posa, errori di guida, errori nel focamento dell'immagine stellare sulla fenditura, ecc...) risulta di circa ± 1 km/sec. Queste considerazioni hanno una certa importanza nel fissare il numero di righe più opportuno da misurare in ogni lastra. È chiaro infatti che non conviene elevare troppo questo numero, in quanto l'aumento di lavoro non è compensato da un corrispondente aumento di precisione.

Così, p. es., nel passare da 25 a 16 righe è prevedibile una diminuzione della precisione corrispondente ad un aumento dell'errore probabile da ± 1.3 a ± 1.4 km/sec, mentre il lavoro si riduce quasi della metà. Da tutto ciò si ricava che il numero di righe da misurare negli spettri di tipo avanzato dovrebbe essere di 15 o 20 al più. Per le stelle dei primi tipi queste considerazioni non hanno luogo, perchè in generale il numero di righe adatte per la misura è in tali spettri così esiguo che sarà sempre necessario misurare tutte le righe che si vedono.

L'errore fin qui considerato è una specie di errore interno, per ottenere l'errore vero bisognerebbe confrontare le misure con i valori veri delle velocità; questi naturalmente non si conoscono, ma noi possiamo assumere come tali le medie di tutte le osservazioni pubblicate, trascurando così l'errore di queste medie di fronte a quello delle nostre misure. Si ricava così come errore probabile « vero » di una singola lastra il valore di ± 1.5 o di ± 1.4 km/sec, a seconda che si applichi o meno la correzione sistematica di ± 0.5 km/sec, di cui si è parlato; nel calcolo di questo errore probabile è stato attribuito a tutte le lastre il medesimo peso.

Il fatto che senza correzione sistematica l'errore probabile risulti minore che con la correzione mostra il pochissimo peso che si deve attribuire alla correzione stessa. Comunque la piccola differenza fra l'errore interno e questo « errore vero » è molto interessante e mostra che agli effetti delle misure le varie lastre si possono considerare come praticamente indipendenti.

In definitiva si può ritenere che l'errore probabile di una lastra di media qualità sia dell'ordine di ± 1.4 km/sec; confrontato con gli errori probabili ottenuti in altri Osservatori per dispersioni dell'ordine di quella qui impiegata (intorno a ± 2 km/sec), questo errore probabile depone grandemente a favore dei metodi impiegati. Anche ammettendo che circostanze particolarmente favorevoli (stelle brillanti e quindi brevi tempi di posa, spettri ben esposti e con righe adatte alla misura, ...) abbiano concorso ad abbassare l'errore probabile osservato, il risultato di queste misure permette di affermare che il complesso strumentale e i metodi di misura sono

tali da assicurarci che le velocità radiali misurate a Merate saranno certamente di primissima qualità.

Tutto ciò si riferisce a stelle di tipo *G* o più avanzato; per le stelle delle classi *A* e *B* c'è da attendersi a priori una precisione assai minore. Le uniche stelle dei primi tipi misurate, ζ *Draconis* (B5) e α *Lyrae* (A0) non si prestano molto ad una discussione, perchè si tratta di stelle con righe molto migliori della media per questi tipi. L'error probabile di una singola lastra (± 2.2 km/sec) ottenuto da una serie abbastanza numerosa di spettri di α *Lyrae* mostra però che anche per queste stelle il risultato delle misure è veramente ottimo. In particolare l'error probabile di una singola lastra ricavato dall'accordo interno delle varie righe è dello stesso ordine; il che significa che per queste stelle praticamente tutto l'errore proviene dagli errori delle singole righe, siano essi errori di lastra o errori di collimazione.

In conclusione l'esito di queste prime misure di prova è più che lusinghiero e permette di formulare le migliori speranze circa i risultati che anche in questo campo potranno essere ottenuti con l'equipaggiamento strumentale dell'Osservatorio di Merate.

10. - Risultati delle misure

Seguono ora in forma tabulare i risultati delle misure.

Le varie colonne del Catalogo contengono :

1. Il nome della stella e il tipo spettrale (Harvard).
2. La data delle osservazioni.
3. La velocità radiale seguita dall'error probabile dedotto dall'accordo delle singole righe.
4. Il numero delle righe misurate.
5. La velocità radiale media con l'error probabile ricavato dall'accordo delle varie lastre.
6. Le note e, nel caso che alle singole lastre siano stati attribuiti pesi diversi, il peso con cui le singole lastre sono state combinate nella media.

Catalogo delle misure.

*	1940	V_r	n	\bar{V}_r	Note	
η Dra G5	agosto	8	-17.6 ± 0.7	27		
	»	9	$-17.1 \quad 0.7$	27		
	»	11	$-14.2 \quad 0.6$	27		
	»	11	$-14.2 \quad 0.6$	27	-15.8 ± 0.6	
ζ Dra B5	agosto	8	-11.8 ± 3.1	9		
	»	9	$-15.0 \quad 3.1$	10		
	»	9	$-17.6 \quad 2.2$	11	-14.8 ± 1.1	
α Lyr A0	agosto	8	-14.9 ± 1.8	12		
	»	8	$-13.5 \quad 3.0$	9		
	»	9	$-12.5 \quad 2.1$	12		
	»	9	$-17.0 \quad 2.9$	11		
	»	11	$-13.6 \quad 2.5$	8		
	»	11	$-17.2 \quad 3.5$	9		
	»	12	$-9.6 \quad 1.3$	11		
	»	12	$-15.5 \quad 2.0$	11		
	»	12	$-6.5 \quad 2.5$	8		
	»	12	$-16.1 \quad 2.6$	11		
	»	12	$-13.1 \quad 2.0$	11		
	»	12	$-17.0 \quad 2.3$	10		
	»	settem.	17	$-17.7 \quad 2.7$	9	
»	»	17	$-10.9 \quad 2.4$	6	-13.9 ± 0.6	
δ Dra K0	agosto	8	$+25.0 \pm 0.9$	26		
	»	9	$+23.4 \quad 0.7$	26		
	»	9	$+25.6 \quad 0.8$	26	$+24.7 \pm 0.4$	
γ Aql K2	agosto	8	-0.6 ± 1.2	14	Sp. debole; $p=1$	
	»	8	$-5.5 \quad 1.7$	20	Sp. debole; $p=1/2$	
	»	9	$+2.5 \quad 1.2$	22	Sp. debole; $p=1$	
	»	11	$-7.6 \quad 0.9$	32	-3.6 ± 1.6 $p=2$	
γ Cyg F8p	agosto	8	-8.0 ± 0.7	29	$p=1$	
	»	8	$-8.3 \quad 0.8$	34	$p=1$	
	»	9	$-7.8 \quad 0.7$	32	$p=1$	
	»	9	$-8.8 \quad 1.2$	23	-8.1 ± 0.1 Sp. debole; $p=1/2$	
η Cep K0	agosto	11	-87.3 ± 0.8	30		
	»	12	$-85.5 \quad 0.7$	30		
	»	12	$-87.9 \quad 0.7$	30	-86.9 ± 0.5	
ϵ Peg K0	agosto	11	$+5.0 \pm 1.2$	26	Sp. debole; $p=1/2$	
	»	11	$+4.2 \quad 0.8$	28	$p=2$	
	»	12	$+5.2 \quad 1.2$	22	Sp. debole; $p=1/2$	
	»	12	$+5.1 \quad 0.7$	24	$p=2$	
	»	settem.	19	$+9.3 \quad 1.0$	30	Eliminata una riga (4501.35); $p=1$
	»	»	21	$+3.6 \quad 0.9$	25	$+5.2 \pm 0.5$ Eliminata una riga (4501.35); $p=1$
μ Peg K0	settem.	21	$+11.0 \pm 1.0$	25		
	»	22	$+17.1 \quad 1.0$	23	$+14.0$	
β Peg Ma	agosto	11	$+7.2 \pm 1.1$	33		
	settem.	21	$+9.2 \quad 1.2$	21	Eliminata una riga	
	»	22	$+9.2 \quad 1.0$	29	$+8.5 \pm 0.4$ Eliminata una riga	