

## STUDIO SPETTROFOTOMETRICO DI 12 LACERTAE

Nota di MARGHERITA HACK (\*)

*(Osservatorio astronomico di Merate - Centro di astrofisica del C.N.R.)*

RIASSUNTO. — Lo studio quantitativo degli spettrogrammi presi durante un intero ciclo (dispersione 35 A/mm ad H $\gamma$ ) mette in evidenza delle leggere variazioni spettrali in dipendenza delle variazioni di temperatura e di pressione; in particolare varia l'intensità delle righe del Si III e dell'He I. Le righe 4471 e 4026 ( $2^3P-n^3D$ ) variano in fase con la curva di luce, mentre la 4388,4144,4009 ( $2^1P-n^1D$ ) variano in opposizione di fase. Questo strano comportamento è interpretato come una maggior dipendenza delle prime due dalla pressione elettronica per effetto Stark,  $P_e$  essendo massima al massimo di luce, mentre le altre tre dipenderebbero soprattutto dalla temperatura, e poichè le righe dell'He I raggiungono la massima intensità in corrispondenza del tipo B3, sarebbero più intense al minimo di luce e quindi al minimo di temperatura. E' confermata la variazione nella larghezza di alcune righe, specialmente del Si III, già precedentemente osservata da O. Struve. Per le caratteristiche dell'atmosfera stellare si trova:  $T_{ion} = 22500^{\circ}K$ ;  $\log P_e = 2.70$ ;  $\log g = 4.23$ ;  $\log H/He = 1.42$ . Il tipo spettrale più probabile è B2 V. Sembra sicuro che questa variabile tipo  $\beta$  C Ma sia proprio una nana e non una subgigante o una gigante come la maggioranza delle variabili di questo tipo, la cui classe di luminosità è III o IV.

Lo studio qualitativo degli spettri presi durante altri tre cicli, per cui  $2K > 55$  Km/sec conferma i risultati già ottenuti dallo studio quantitativo, per ciò che concerne le variazioni di intensità e di larghezza delle righe. Due cicli per cui  $2K < 45$  Km/sec non presentano variazioni apprezzabili durante il periodo.

ABSTRACT. — The quantitative study of the spectrograms of a complete cycle (the dispersion is 35 A/mm at H $\gamma$ ) shows the existence of slight spectral variations depending on temperature and pressure changes: Si III and He I lines are variable in intensity.  $\lambda\lambda$  4471 and 4026 ( $2^3P-n^3D$ ) change in phase with the light curve, while  $\lambda\lambda$  4388, 4144, 4009 ( $2^1P-n^1D$ ) show an opposite behaviour. This strange behaviour suggests that the two first lines are depending specially on the electron pressure (Stark effect) which is larger at the maximum of light. The other lines are depending specially on the temperature: since the He I lines attain their maximum of intensity for the spectral type B3, the three lines are stronger at the minimum of light when the temperature is lower. The width variation of the Si III lines, previously observed by O. Struve, is confirmed.

The parameters for the stellar atmosphere are:  $T_{ion} = 22500^{\circ}K$ ;  $\log P_e = 2.70$ ;  $\log g = 4.23$ ;  $\log H/He = 1.42$ . The most probable spectral type is B2 V. It seems sure that this  $\beta$  C Ma variable is really a dwarf, while generally the variables of this type are subgiants (IV) or giants (III). The qualitative study of spectra taken during three cycles with  $2K > 55$  Km/sec confirms the results of the quantitative study for what concerns the lines variation in intensity and width. Two cycles with  $2K < 45$  Km/sec do not show appreciable changes during the period.

12 Lacertae è una variabile del tipo  $\beta$  C Ma (o  $\beta$  Cep). Come è noto queste stelle sono caratterizzate dall'aver una variazione di splendore di piccola ampiezza (0.03-0.25) e un periodo compreso fra 4 e 6 ore, e una curva di velocità radiale avente lo stesso periodo della curva di luce.

(\*) Ricevuta il 20 marzo 1958.

Alcune di queste stelle sono caratterizzate dall'aver due periodi, sia per la curva di luce che per quella di velocità radiale; i due periodi differiscono di pochi minuti l'uno dall'altro. Ne segue che l'ampiezza delle curve di luce e di velocità radiale varia con un periodo di battimento dell'ordine di qualche diecina di giorni. Il loro tipo spettrale è vicino a B1-B3 e la classe di luminosità III o IV. In particolare 12 Lacertae ha le seguenti caratteristiche:  $P_1 = 0^d.197367$   $P_2 = 0^d.19308883$ . Periodo di battimento  $P_3 = 8^d.91$  <sup>(1)</sup>,  $m_v = 5.18$ . Lo spettro è B2 III secondo la classificazione di Yerkes e quella  $\lambda_1D$  di Chalonge e Divan, mentre secondo la classificazione  $H_\delta D$  di Hack risulterebbe B1 IV o V <sup>(2)</sup>.

Il massimo della curva di velocità radiale cade fra il minimo ed il massimo della curva di luce, e il minimo di velocità radiale fra il massimo ed il minimo di luce. Cioè al massimo di luce si ha il minimo raggio, se la curva di velocità radiale è interpretata come effetto di una pulsazione. Al massimo di luce si ha anche la temperatura dal colore più alta <sup>(1)</sup>.

E' stato per la prima volta mostrato da Struve <sup>(3)</sup> che le righe spettrali di 12 Lacertae variano in larghezza durante il periodo, e certe volte, quando l'ampiezza della curva di velocità radiale è forte si notano anche degli sdoppiamenti. L'intensità delle righe, secondo Struve <sup>(3)</sup>, resterebbe invece costante. Analoghi fenomeni sono presenti in qualche altra stella di questa classe di variabili.

In occasione della campagna internazionale del 29 agosto-12 settembre 1956 per l'osservazione di 12 Lacertae sono stati presi a Merate 70 spettri di questa stella, con la dispersione di 35 Å/mm ad  $H_\gamma$ , suddivisi in 8 cicli.

In una precedente nota si sono dati i risultati delle misure di velocità radiale <sup>(4)</sup>. Ma poichè questa stella è stata molto studiata per quanto riguarda la curva di luce e la velocità radiale, mentre per quanto riguarda lo spettro si trovano solo notazioni qualitative attestanti la variazione in larghezza piuttosto che in intensità delle righe spettrali, ci è sembrato utile studiare quantitativamente un intero periodo, scelto fra quelli corrispondenti ad una maggior ampiezza della curva di velocità radiale, e fra quelli con spettrogrammi migliori come esposizione e definizione.

Lo scopo della presente ricerca è:

a) studiare le caratteristiche dell'atmosfera di 12 Lacertae, per tentare di stabilire con maggior precisione la sua posizione nel diagramma HR. Ricordiamo infatti che è incerta la sua appartenenza alla classe di luminosità III, IV o V.

b) cercare di mettere in evidenza variazioni d'intensità delle righe spettrali, nel corso di un intero periodo, provanti la variazione della temperatura e della pressione elettronica, e determinare le eventuali variazioni di larghezza delle righe. Non è pensabile poter scoprire gli sdoppiamenti osservati da Struve a causa della troppo piccola dispersione.

La serie di spettri scelti per uno studio quantitativo è quella della notte fra l'11 e il 12 settembre 1956. Si tratta di una serie di 10 spettri

TABELLA I. — *Serie di spettrogrammi studiati quantitativamente.*

Sp. N.	Data giuliana	Tempo di posa
421	2435728.364	30 <sup>m</sup>
422	.387	30
423	.408	30
424	.430	30
425	.455	30
426	.481	45
427	.510	30
428	.533	30
429	.557	30
430	.580	30

compresi fra le date giuliane 2435728,364 e ...28,580 (Tabella I). Dei quattro cicli osservati aventi un'ampiezza 2K della curva di velocità radiale superiore a 55 km/sec, questa serie offre gli spettri migliori. 2K è eguale a 65 km/sec.

Durante questo periodo si disponeva anche di osservazioni fotoelettriche fatte contemporaneamente da Broglia <sup>(5)</sup> al rifrattore Merz dell'Osservatorio di Merate. La conoscenza precisa della posizione del massimo e del minimo di luce è necessaria per cercare di mettere in evidenza un'eventuale variazione dello spettro con la fase. Curva di luce e curva di velocità radiale relative a questo periodo sono riportate in fig. 1.

#### *Caratteristiche dell'atmosfera di 12 Lacertae.*

Nella Tabella II sono riportati i risultati delle misure delle larghezze equivalenti delle principali righe spettrali; essi sono valori medi relativi

TABELLA II

	$\lambda$	W (in A)
$R_c$ (H $\gamma$ , H $\delta$ , H7, H8) = 0.45	4575 Si III	0.35
D = 0.099	4568 Si III	0.37
n = 16	4553 Si III	0.41
W (H $\gamma$ ) = 4.4 A	4481 Mg II	0.44
W (H $\delta$ ) = 3.6 A	4471 He I	1.12
	4388 He I	0.74
	4267 C II	0.25
	4144 He I	0.66
	4131 Si II	0.10
	4128 Si II	0.11
	4026 He I	1.01
	4009 He I	0.54
	3995 N II	0.15
	3934 Ca II	0.23

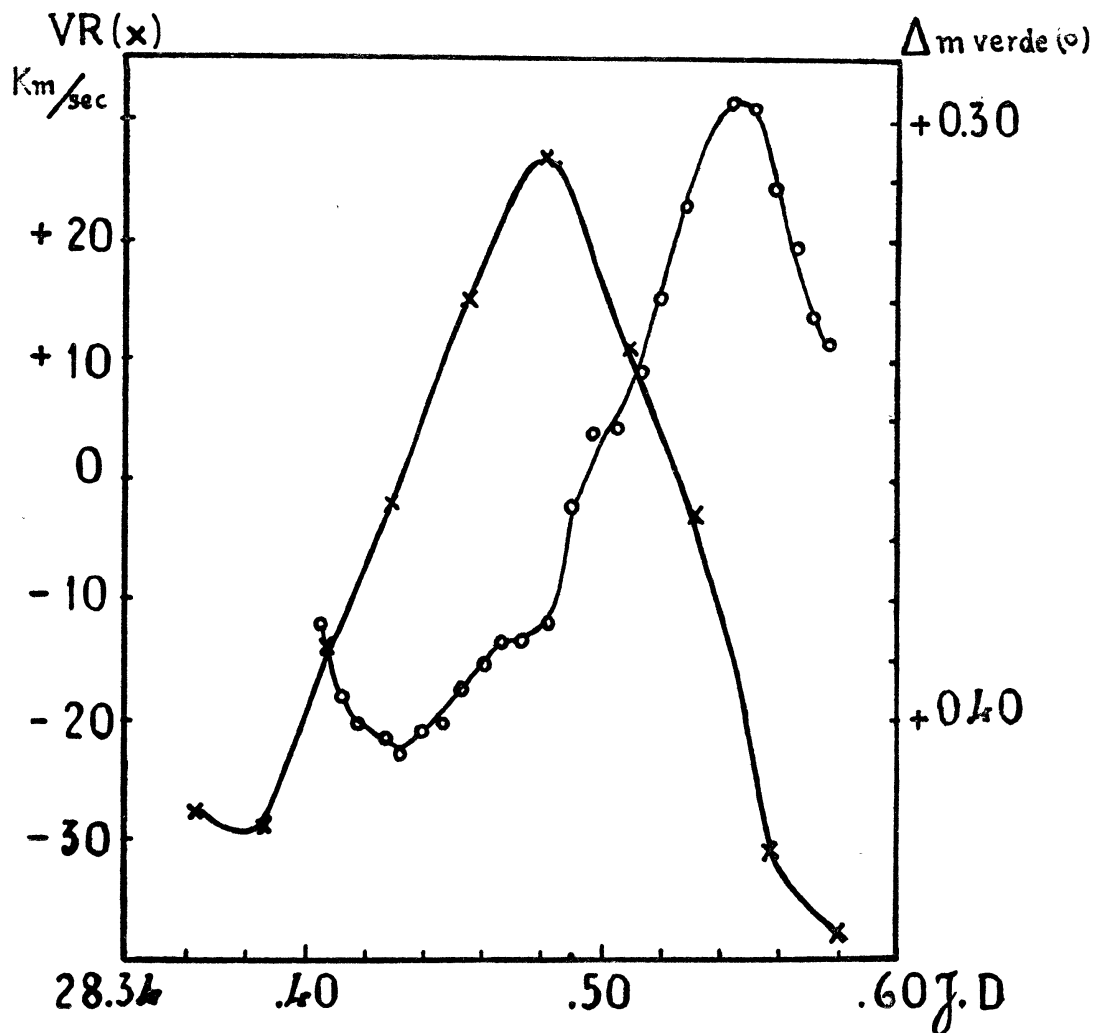


Fig. 1

ai 10 spettrogrammi considerati. Si danno inoltre le profondità centrali per le righe di Balmer, la discontinuità di Balmer determinata da Chalonge e Divan (<sup>6</sup>) e il numero di righe di Balmer visibili.

Dalla formula di Minnaert si ricava il numero di atomi di idrogeno neutro nello stato eccitato 2 presenti in una colonna di altezza  $h$  eguale all'altezza efficace dell'atmosfera, e base  $1 \text{ cm}^2$ . Si trova

$$\log N_{0,2}h = 16.43$$

Per la determinazione del rapporto fra numero totale di atomi di idrogeno e numero totale di atomi di elio, trattandosi di stella di tipo spettrale certamente compreso fra B0 e B3, in cui perciò tanto H che He sono praticamente tutti una volta ionizzati, è possibile applicare le due relazioni di Unsöld

$$\log \frac{He}{H} = 2.5 \log \frac{W_{4471}}{W_{4340}} - 0.23 \theta + 0.55$$

$$\log \frac{He}{H} = 2.5 \log \frac{W_{4026}}{W_{4102}} - 0.23 \theta + 0.50$$

pochissimo dipendenti dalla temperatura.

Amnesso per  $\theta$  valori compresi fra 0.20 e 0.25 (corrispondenti secondo la scala di Kuiper ai tipi B0 e B2) si trova

$$\log \frac{H}{He} (H\gamma \text{ e } 4471) = \begin{cases} 1.39 (\theta = 0.20) \\ 1.50 (\theta = 0.25) \end{cases}$$

$$\log \frac{H}{He} (H\delta \text{ e } 4026) = \begin{cases} 1.35 (\theta = 0.20) \\ 1.46 (\theta = 0.25) \end{cases}$$

Si assume come valore più probabile

$$\log \frac{H}{He} = 1.42$$

La densità elettronica è data sia dalla relazione di Holtmark, sia dalla formula di Inglis e Teller. Si trova

$$\log N_e = 14.28 \text{ (Holtmark, } H \gamma \text{)}$$

$$\log N_e = 14.14 \quad \text{,,} \quad H \delta \text{)}$$

$$\log N_e = 14.23 \text{ (Inglis e Teller)}$$

Si prende come valore più probabile

$$\log N_e = 14.23$$

La temperatura di ionizzazione si può ricavare dalle righe del Si III (4553, 4568, 4576) e Si II (4128 e 4131). Poichè, per la scarsità delle righe misurabili, non è possibile costruire empiricamente la curva di crescita, si calcolano le quantità  $\log \frac{W}{R_c 2 \Delta \lambda_D}$  e  $\log \frac{f}{R_c \Delta \omega_D}$  per le righe del Si III e Si II. Con la prima grandezza si entra sulla curva di crescita teorica, determinando per ciascuna riga la corrispondente ascissa  $\log \frac{N h f}{R_c \Delta \omega_D}$  e di conseguenza ricavando anche  $\log \frac{N h_{2,4s}}{N h_{1,3d}}$

Però non si conosce la velocità di turbolenza e quindi nel calcolo di  $\Delta \lambda_D$  e  $\Delta \omega_D$  si è tenuto conto solo della velocità di agitazione termica degli atomi. Questo fatto però non porta grande errore in  $\log \frac{N h_{2,4s}}{N h_{1,3d}}$ . Infatti nessuna delle cinque righe considerate cade sul ramo Doppler della curva di crescita, sia che si ammetta  $\xi_T = 0$ , sia che si ammetta  $\xi_T > 0$ , come lo dimostra il fatto che le larghezze equivalenti delle tre

righe del Si III e le due righe del Si II hanno circa la stessa larghezza equivalente malgrado che  $\log f'$  vari nel primo caso di 0.70 e nel secondo di 0.18. Perciò la differenza  $\log Nh_{2,4s} f - \log Nh_{1,3d} f$  resta inalterata qualunque sia il valore di  $\xi_T$ . Una maggior causa d'errore è portata dal non conoscere il valore della costante di smorzamento. Infatti le righe del Si III cadono o sul pianerottolo o all'inizio del terzo ramo della curva di crescita. Si trovano i seguenti risultati:

$$\log Nh_{2,4s} - \log Nh_{1,3d} = \begin{cases} + 1.50 & (a = \frac{\gamma}{\Delta\omega_D} = 10^{-1}) \\ + 1.90 & (a = 10^{-2}) \end{cases}$$

Amnesso che  $a$  sia più vicina a  $10^{-2}$  si prende come valore più probabile  $\log Nh_{2,4s} - \log Nh_{1,3d} = + 1.80$ .

La formula di Saha-Boltzmann, in cui si introducono valori della temperatura tali da dare valori di  $\log N_e$  in accordo con quelli trovati prima, porta al valore  $\theta = 0.225$   $T_{\text{ion}} = 22500^\circ\text{K}$  e  $\log P_e = 2.70$ .

Ma anche ammettendo  $a = 10^{-3}$  risulterebbe  $T_{\text{ion}} = 23000^\circ\text{K}$ , perciò il valore della temperatura di ionizzazione può considerarsi abbastanza sicuro.

Da questi valori di  $T$  e  $P_e$  segue

$$\begin{aligned} \log Nh(H) &= 22.79 \text{ e quindi dal valore trovato per } \log H/He \\ \log Nh(He) &= 21.39. \end{aligned}$$

Per la gravità determinata spettroscopicamente si trova

$$\log g = 4,23$$

In base a questi parametri,  $T_{\text{ion}}$  e  $g$  determinati spettroscopicamente segue per la grandezza assoluta  $M_v = -2$  o al massimo  $-3$ , ammettendo per la temperatura effettiva un valore di  $25000^\circ\text{K}$ . 12 Lacertae si piazza perciò sulla sequenza principale. Anche secondo la parallasse data dal catalogo di Schlesinger (7) risulta  $M_v = -2.2$ . Si ritiene perciò che la classe di luminosità sia V piuttosto che IV.

Le intensità totali delle principali righe spettrali confrontate con i dati di Williams (8), (9) danno i seguenti risultati:

Criterion	Spectral type
$H_\gamma, H_\delta$	B2 V
4026 e 4471 He I	B1 V
4144 He I	B2 V
4481 Mg II	B3 V
4128 e 4131 Si II	B2
4267 C II	B2

Si conclude che il tipo spettrale più probabile per 12 Lac è B2 V. Anche il valore  $U - B = -0.86$  determinato da Mc Namara e Williams <sup>(10)</sup> conferma un tipo spettrale B2. In base alla lunghezza del periodo,  $4^{\text{h}}40^{\text{m}}$  circa, 12 Lacertae si dovrebbe piazzare, nella sequenza delle variabili tipo  $\beta$  C Ma, leggermente al di sopra della sequenza principale <sup>(11)</sup> (fig. 2). La posizione che invece vi occupa corrisponderebbe meglio ad un periodo di  $4^{\text{h}}$ . Anche il valore  $\log H/He = 1.42$  conferma il carattere di nana di 12 Lacertae. Ricordiamo che questo valore è stato trovato in media eguale a 0.4 per le stelle supergiganti, a 0.6 per le giganti e a 1.0 per le nane <sup>(12)</sup>.

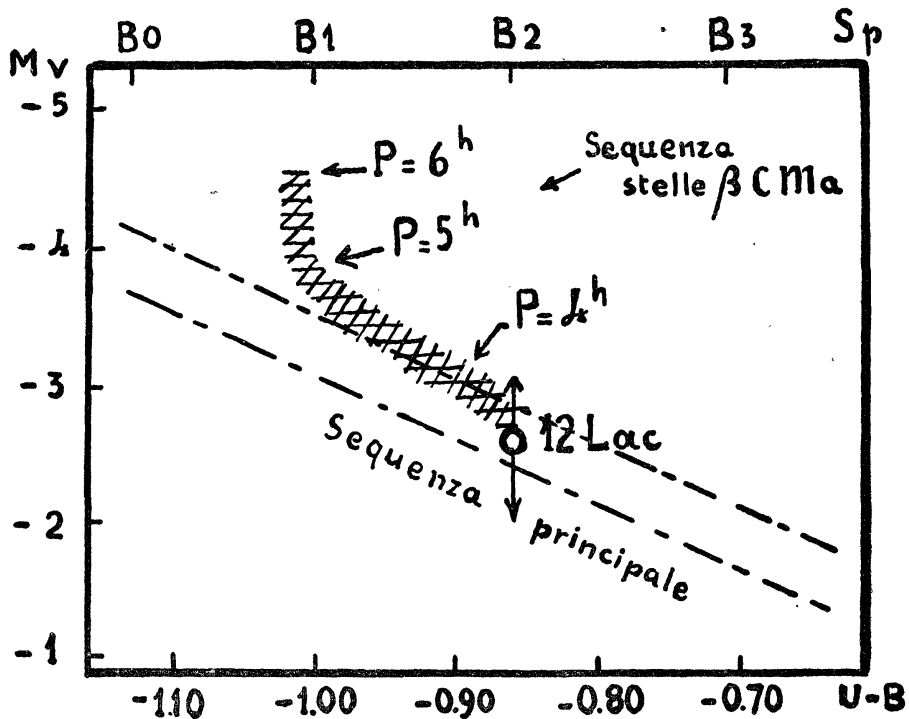


Fig. 2

### *Variazioni dello spettro durante il periodo.*

In fig. 3 sono riportate le curve che danno la variazione d'intensità delle righe spettrali durante un periodo. Le variazioni sono piuttosto piccole, e la variazione in larghezza della riga può essere una causa di errore per le intensità variando il grado di blend con le righe vicine. Comunque appare sicura la variazione d'intensità delle righe del Si III, che sono più intense al minimo di luce. Il rapporto fra la massima e minima intensità è: 2 per la 4553; 1.8 per la 4568 e 2.5 per la 4575. Poiché al massimo di luce la temperatura è massima e poiché le righe del Si III raggiungono la massima intensità per  $T = 19000^{\circ}\text{K}$ , questo fatto conferma che la tem-

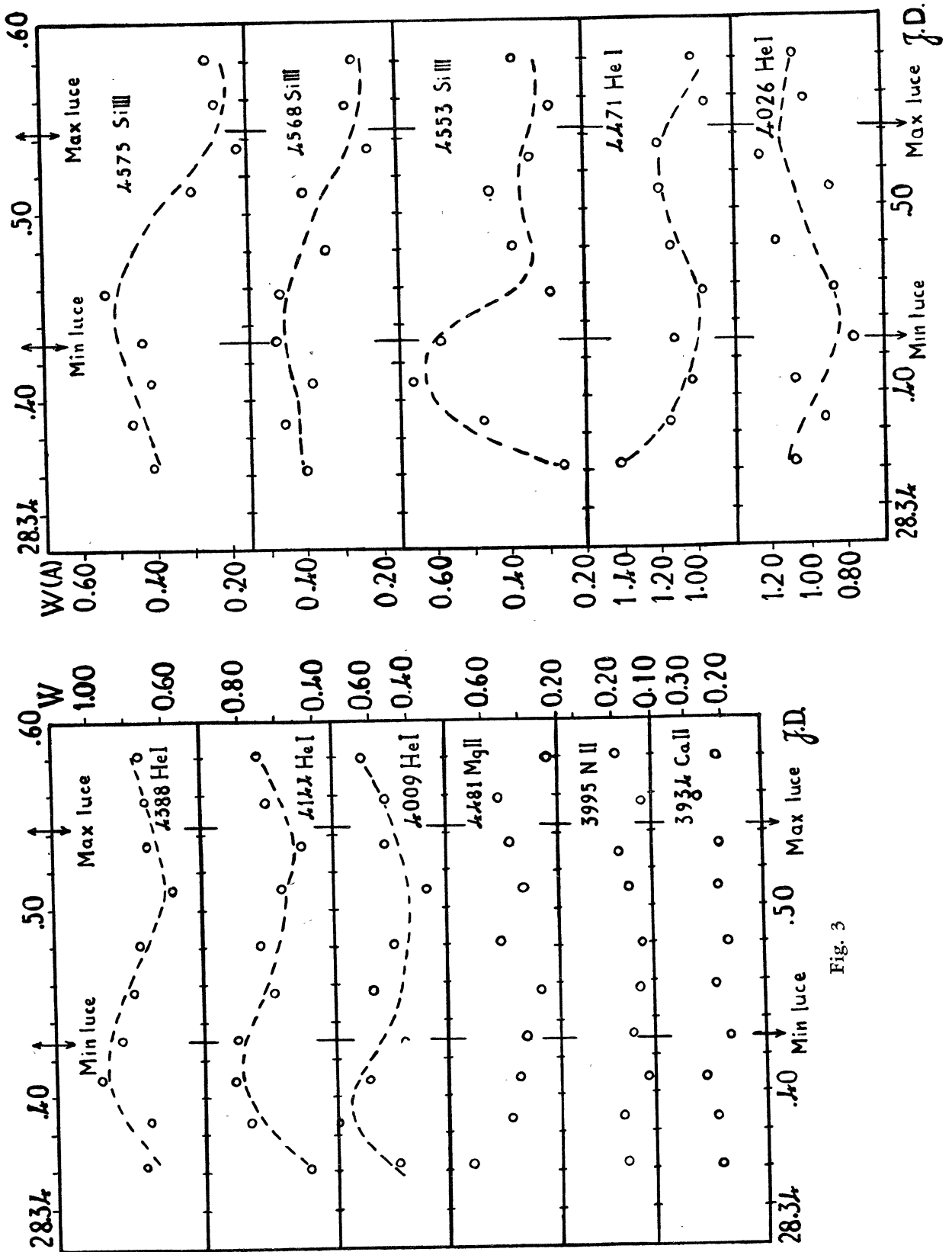


Fig. 3



peratura di 12 Lacertae è superiore ai 19000°K. Praticamente costante sembra l'intensità di 3995 N II, 4481 Mg II e della 3933 Ca II, che è però interstellare, e la sua non variabilità serve perciò soprattutto come verifica della precisione delle misure.

Anche le righe di Balmer non presentano variazioni apprezzabili. Più strano appare il comportamento delle righe dell'He I: la 4026 e la 4471 hanno la minima intensità al minimo di luce, mentre la 4009, la 4144 e la 4388 hanno la massima intensità al minimo di luce. Questo comportamento può forse interpretarsi tenendo conto non solo dell'effetto della variazione di temperatura, ma anche della pressione elettronica. Al minimo di luce il raggio è massimo e quindi la pressione elettronica minima; la 4026 e la 4471 appartenenti alla serie  $2^3P-n^3D$  sono maggiormente sensibili all'effetto Stark e quindi la loro variazione d'intensità, in fase con la curva di luce, può essere spiegata ammettendo una loro maggior dipendenza dalla pressione elettronica che dalla temperatura: quando la pressione elettronica e quindi il campo elettrico è massimo, anche la loro intensità è massima. La 4388, la 4144 e la 4009 appartenenti alla serie  $2^1P-n^1D$  risentirebbero invece maggiormente della variazione di temperatura, e poichè il massimo d'intensità per le righe dell'He I è raggiunto in corrispondenza del tipo B3, al minimo di luce e quindi al minimo di temperatura sono più intense che non al massimo di luce.

In fig. 4 sono riportate le variazioni delle larghezze  $\Delta\lambda$  delle righe, misurate in corrispondenza di  $R_c/2$ . Difficilmente interpretabili e poco

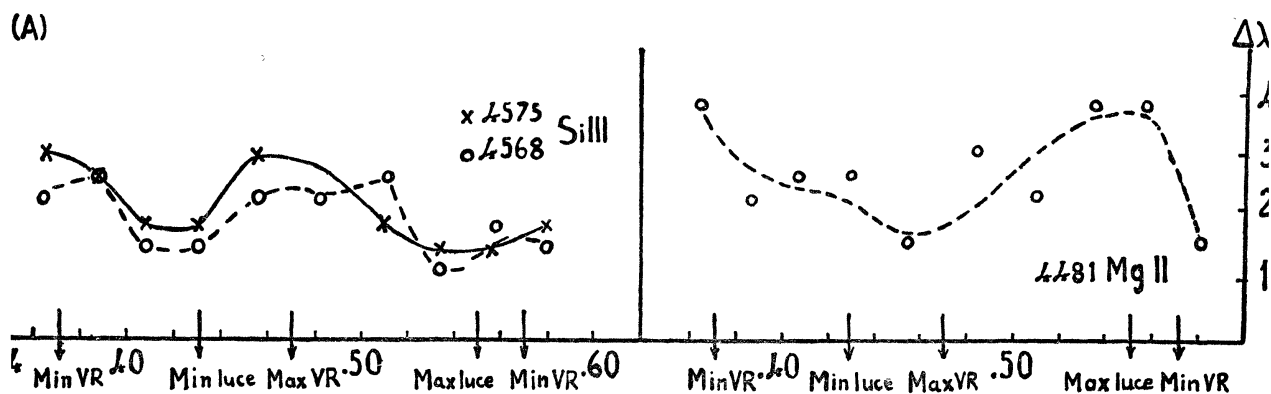


Fig. 4

sicure sono le variazioni delle righe dell'He I. Il Si III presenta righe nettamente più larghe in corrispondenza del massimo e del minimo di velocità radiale, in accordo con quanto rilevato da Struve, che a tali epoche notava addirittura uno sdoppiamento delle righe. La 4481 Mg II è invece più sottile al massimo di velocità radiale e più larga al minimo.

Le variazioni di intensità e di larghezza delle righe spettrali sono state studiate sugli spettri relativi ad altri cinque cicli, esaminando gli ingrandimenti fotografici degli spettrogrammi e dando delle stime soggettive di intensità o di larghezza. Per i cicli del 30 agosto, 10 settembre e 12 settembre 1956, in cui  $2K > 55$  km/sec le variazioni di intensità e soprattutto di larghezza, delle righe sono ben apprezzabili e generalmente in accordo con i risultati dati dal ciclo studiato quantitativamente. Non apprezzabili invece le variazioni corrispondenti ai due cicli del 7 e 8 settembre per cui  $2K < 45$  km/sec.

#### BIBLIOGRAFIA

- (<sup>1</sup>) C. de Jager - Sterrewacht Utrecht, Overdruk n. 19, 1953.
- (<sup>2</sup>) M. Hack - Ann. Astroph. 16, 417, 1953.
- (<sup>3</sup>) O. Struve - P.A.S.P. 62, 263, 1950.
- (<sup>4</sup>) M. Hack - Mem. S.A.I. 28, 135, 1957.
- (<sup>5</sup>) P. Broglia - Mem. S.A.I. 28, 121, 1957.
- (<sup>6</sup>) D. Chalonge e L. Divan - Ann. Astroph. 15, 201, 1952.
- (<sup>7</sup>) F. Schlesinger - General Catalogue of stellar parallaxes. Yale Un. Obs. 1935.
- (<sup>8</sup>) E. G. Williams - Ap. J. 83, 279, 1936.
- (<sup>9</sup>) B. Casati e M. Hack - Mem. S.A.I. 27, 307, 1956.
- (<sup>10</sup>) D. H. Mc Namara e A. D. Williams - Ap. J. 121, 51, 1955.
- (<sup>11</sup>) O. Struve - P.A.S.P. 67, 135, 1955.
- (<sup>12</sup>) M. Hack - Mem S.A.I. 25, 17, 1954.