

STUDIO DI HD 188209

Nota di MARGHERITA HACK (*)

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

RIASSUNTO. — Per mezzo di spettrogrammi presi allo spettrografo Zeiss applicato al riflettore da 1 m. dell'Osservatorio di Merate, si sono studiate le caratteristiche fisiche e chimiche dell'atmosfera di HD 188209. La principale particolarità dello spettro di questa stella è l'eccezionale intensità della 4097 N III. Per la temperatura di ionizzazione, pressione elettronica, turbolenza, gravità si trova: $T = 29000^{\circ}\text{K}$, $\log P_e = 2.51$, $\xi_T = 40$ km/sec, $\log g = 3.76$. Il $\log H/He$ risulta eguale a 0.40. I risultati sono confrontati con quelli relativi a 10 Lac. Si trova un eccesso nell'abbondanza dell'azoto. Si calcola poi un modello di atmosfera che dia un valore della discontinuità di Balmer in accordo con quello osservato. I parametri che soddisfano a questa condizione sono $\theta_0 = 0.18$ $\log g = 3.7$.

ABSTRACT. — Spectrograms taken with the Zeiss spectrograph at the Merate reflector (dispersion 35 Å/mm at H_γ) provide data for an investigation of the atmosphere of this star.

The ionisation temperature, the electron pressure, the turbulence, the gravity and the chemical composition are estimated: $T_{\text{ion}} = 29000^{\circ}\text{K}$, $\log P_e = 2.51$ $\xi_T = 40$ km/sec, $\log g = 3.76$, $\log H/He = 0.40$.

The results are compared with those relative to 10 Lacertae. An excess of nitrogen is found.

A model of atmosphere is calculated, which gives the better agreement with the observed Balmer discontinuity; the parameters $\theta_0 = 0.18$ and $\log g = 3.7$ are found.

Le intensità di alcune delle principali righe spettrali di una quarantina di stelle di tipo O sono state misurate da Williams ⁽¹⁾, da Petrie ⁽²⁾, e infine da Underhill ⁽³⁾, per la ricerca di criteri di classificazione spettrale. Questi criteri, basati essenzialmente sui rapporti H/He II e He I/He II, conducono ad una buona determinazione del tipo spettrale, ma non danno indicazioni sulla classe di luminosità. La determinazione di quest'ultima è particolarmente difficile, come è noto, per le stelle di tipo meno avanzato che O9, dove sequenza principale e retta delle supergiganti, si congiungono praticamente in un unico ramo. Di questa quarantina di stelle, d'altronde, solo una, 10 Lacertae, è stata studiata dettagliatamente da Aller ⁽⁴⁾, allo scopo di determinarne le condizioni fisiche dell'atmosfera.

(*) Ricevuta il 15 ottobre 1956.

Ci si propone ora di iniziare un programma di osservazione di stelle di tipi O5-O9, di grandezza inferiore alla settima, per determinare la costituzione dell'atmosfera, e quindi in base ai valori che si trovano per la gravità e per la temperatura, stabilire tipo spettrale e classe di luminosità, ed andare poi a cercare quali delle righe spettrali si prestino meglio per essere impiegate come criteri di luminosità.

La prima stella studiata è stata HD 188209. Questa è stata classificata da Morgan O9I ⁽⁵⁾ e da Chalonge e Divan, nella loro classificazione bidimensionale basata sui parametri λ_1 D, O9Ia ⁽⁵⁾. La scrivente, nella sua classificazione basata su D e H_δ ⁽⁶⁾ trova invece, causa l'eccessiva intensità di H_δ, che HD 188209 si piazza nella parte di piano relativa alle stelle O9V. Si notava allora che l'intensità di H_δ era anormalmente forte rispetto a quella che si poteva dedurre dalle relazioni H_γ H_δ e H_δ H8. Questa anormale intensità, su spettri aventi una dispersione di 220 Å/mm viene spiegata dallo studio qui svolto, su spettri aventi una dispersione di 35 Å/mm ad H_γ: è evidente che sugli spettri di piccola dispersione H_δ risultava blend con la 4097 dell'N III, la quale (e questa è la principale caratteristica dello spettro di HD 188209), è eccezionalmente intensa, rispetto a quanto si verifica negli spettri delle altre stelle dello stesso tipo. Dalle misure di Williams risulta che la massima intensità della riga è raggiunta in corrispondenza del tipo O9 e la larghezza equivalente non supera 0.60 Å; per 10 Lac si trova soltanto 0.25 Å mentre per HD 188209 si ha 0.70 Å. E' possibile che la 4097 presenti anche un effetto di luminosità; infatti per quanto poche siano le stelle O date da Williams, tutte le O9 che hanno più intensa la 4097 sono supergiganti, mentre le nane, come 10 Lac hanno valori molto più bassi.

MATERIALE D'OSSERVAZIONE.

Gli spettrogrammi (Tabella I) sono stati presi dalla scrivente al riflettore Zeiss di Merate, con lo spettrografo Zeiss ad un prisma, nella combinazione camera media (35 Å/mm ad H_γ) impiegando lastre Ferrania Orto Blù.

TABELLA I

Data	Lastra	Spettro	Posa	Fenditura
10-8-54	H11	45	120 ^m	40 microm
11-8-54	13	48	90	80
12-8-54	15	51	90	60
16-8-54	16	54	90	40

La calibrazione e la riduzione sono state eseguite impiegando i soliti metodi descritti in precedenti note.

Nelle tabelle II e III sono riportate le righe identificate, divise per elementi e per multipletti, le larghezze equivalenti e le forze degli oscillatori.

TABELLA II

H					
λ	A	λ	A	λ	A
H β	2.0	H9	1.7	H14	1.5
H γ	2.1	H10	1.8	H15	1.1
H δ	1.7	H11	1.5	H16	1.4
H7	1.3	H12	1.7	H17	—
H8	1.2	H13	1.9		
He I					
λ	A	λ	A	λ	A
3888.65	—	4471.48	0.92	4921.93	1.00
		.69		4387.93	0.42
3964.73	0.22	4026.19	0.91	4143.76	0.42
		.36		4009.27	0.29
4713.14	0.53	3819.61	0.87	3926.53	0.14
.37		.76		3871.82	(0.18)
4120.81	0.32	3705.00	—	3805.76	—
.99		.14			
3867.48	0.26			4437.55	0.13
.63				4168.97	0.13
He II					
λ		A	f	$\log N_{1,3h}$	$\log N_{1,4h}$
4685.68	3 ² D — 4 ² F ecc.	0.42	0.842	12.41	12.24
4541.59	4 ² F — 9 ² G ecc.	0.36	0.017		14.06
4199.83	— 11 ² G ecc.	0.43	0.008		14.54
4100.04	— 12 ² G ecc.	—			

CARATTERISTICHE FISICHE E CHIMICHE DELL'ATMOSFERA.

Abbondanze dell'idrogeno e dell'elio. Temperatura e pressione elettronica. — Seguendo il metodo di Unsöld (7) si determina il numero di

atomi di idrogeno presenti in una colonna di base 1 cm^2 e altezza eguale all'altezza efficace dell'atmosfera.

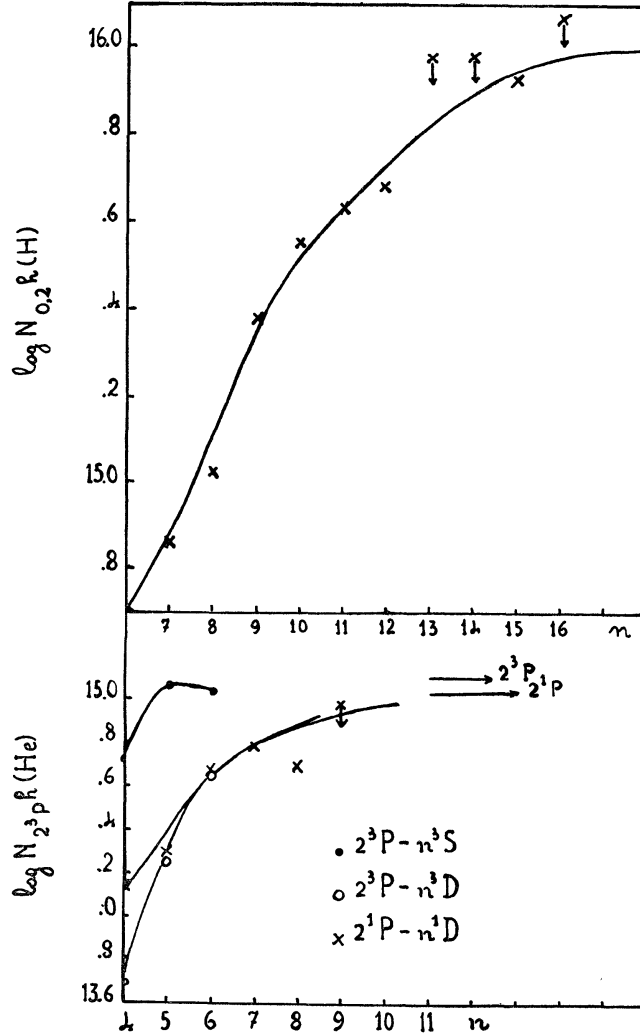


Fig. 1

Dall'equazione del primo ramo della curva di crescita si determina $\log N_{0,2}h$ in funzione del numero quantico n . Si trova (fig. 1) il valore limite inferiore.

$$\log N_{0,2}h \geq 16.00.$$

Impiegando invece il valore della discontinuità di Balmer, nell'ipotesi dello strato sottile, prendendo il valore dato da Chalonge e Divan (⁵) $D = 0.027$, si ha

$$\log N_{0,2}h = 15.64.$$

Infine, applicando la più completa formula di Minnaert, che tien conto dello spessore finito dello strato assorbente, ed assumendo per la profondità centrale il valore $Rc = 0.45$ (fig. 2) si ha

$$\log N_{0,2}h = 15.70.$$

Dei tre valori trovati per $\log N_{0,2}h$ l'ultimo è quello che dovrebbe avere un maggior peso in quanto evita l'ipotesi approssimata dello strato sottile che è contenuta invece nei due precedenti, i quali darebbero perciò solo dei valori approssimati per difetto. Si nota invece che il primo valore risulta superiore di 0.30 in logaritmo al terzo valore. La causa è probabilmente dovuta all'incertezza con cui si può tracciare la posizione del continuo verso il limite della serie di Balmer, con conseguente errore, che può essere anche molto forte, nella determinazione delle larghezze equivalenti, ed anche al maggior numero di blend che si hanno alle brevi lunghezze d'onda.

Una prova di ciò si ha esaminando l'andamento delle larghezze equivalenti con n (Tabella II). L'intensità totale di H7 e H8 è rispettivamente 1.3 e 1.2 A, mentre le successive H9-H13 hanno valori compresi fra 1.7 e 1.9, mentre c'era da attendersi un decremento regolare di intensità. Per stimare quale possa essere l'errore in $\log N_{0,2}h$ dovuto a questa causa, si pone per H 12-H 14, $A = 1.3$, per H 15 e H 16, $A = 0.9$. Si trova $\log N_{0,2}h \geq 15.90$.

Un'altra fonte d'errore può essere data dall'incertezza con cui si conosce D ; tenendo conto che Chalonge e Divan danno un errore non inferiore a 0.01, si ha che $\log N_{0,2}h$ può variare da 15.71 a 15.56.

In conclusione, tenendo conto dei possibili errori per eccesso nelle intensità totali, a partire da H9 e seguenti, e della forte incertezza nella discontinuità, che è molto piccola e quindi difficilmente misurabile, si stima che il valore più probabile sia

$$\log N_{0,2}h = 15.80 \pm 0.10.$$

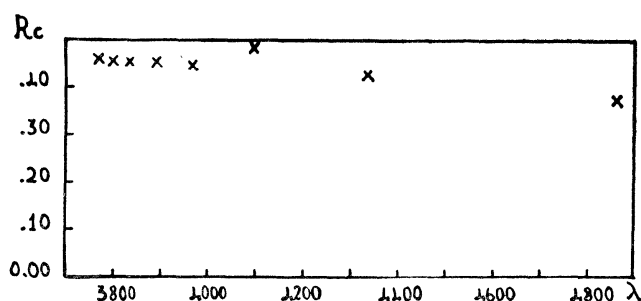


Fig. 2

Una stima del valore della densità elettronica può farsi determinando l'influenza dell'effetto Stark sullo spettro dell'idrogeno, sia per mezzo della formula di Inglis e Teller, sia in base alla teoria di Holtsmark.

Si trova

$$\begin{aligned}\log N_e &= 13.81 \text{ (H}_\beta \text{ Holtsmark)} \\ \log N_e &= 14.10 \text{ (H}_\gamma \text{ Holtsmark)} \\ \log N_e &= 13.95 \text{ (H}_\delta \text{ Holtsmark)} \\ \log N_e &= 14.04 \text{ (Inglis e Teller, } n = 17\text{)}.\end{aligned}$$

In media assumiamo

$$\log N_e = 13.99.$$

Per la determinazione del numero di atomi di elio presenti in una colonna di altezza h e base 1 cm^2 , si è ricorso, tanto nel caso dell'elio neutro (fig. 1) che dell'elio ionizzato, all'equazione del primo ramo della curva di crescita e quindi all'ipotesi dello strato sottile.

Nel caso dell'He II, trattandosi di atomo idrogenoide, per gli f si sono presi i valori relativi alla P_∞ per la 4686 e alle B9 e B11 per la 4541 e la 4200. In tabella II sono riportati i risultati.

Si trova che la 4686 porta ad un valore di $\log N_{1,4} h$ 100 volte minore di quello dato dalle altre due righe dell'He II. Analogo risultato è stato trovato da Aller per 10 Lacertae, ed è probabilmente attribuibile al fatto che la 4686 ha una componente in emissione. Si assume perciò come valore limite inferiore per il numero di atomi di He II nello stato eccitato 4, quello dato dalla 4200.

Applicando la legge di Saha a He I e He II, si trova che il valore della temperatura che conduce ad un valore della densità elettronica in buon accordo con quello precedentemente trovato è $T = 29000^\circ\text{K}$ da cui $\log P_e = 2.51$.

Questi valori, introdotti nelle formule di Saha e di Boltzmann, permettono di risalire al numero totale di atomi di idrogeno e di elio presenti in una colonna di altezza h e base 1 cm^2 . Si trova

$$\log. Nh(H) = 22.77 \qquad \log Nh(He) = 22.26$$

da cui $\log H/He = 0.51$.

Poichè H e He sono tutti praticamente ionizzati una volta, si può applicare il metodo di Unsöld di confronto diretto fra 4471 e H $_\gamma$ e fra 4026 e H $_\delta$ (⁸) per determinare per altra via il rapporto H/He .

Si trova $\log H/He = 0.39$ (4471 e H $_\gamma$)

$$\log H/He = 0.22 \text{ (4026 e H}_\delta\text{)},$$

e quindi in media

$$\log H/He = 0.40.$$

E' interessante notare qui che per 10 Lacertae Aller trova $\log H/He = 0.90$.

Ricordiamo che Unsöld (⁹) e in seguito anche la scrivente (¹⁰) avevano trovato che $\log H/He$ ha valori intorno ad 1.0 per le stelle della sequenza principale e intorno a 0.5 per le supergiganti.

TABELLA III

λ	multipletto	A	f	$\log \frac{1}{R_c} \frac{A}{2 \Delta \lambda}$	$\log \frac{1}{R_c} \frac{Nhf}{\Delta \omega}$	$\log Nh$
C III						
4647.40	1	0.54 blend				
4650.16	1	0.40 »				
4651.35	1	— »				
4187.05	18	0.18	1.345	— 0.46	+ 0.76	12.08
N III						
4097.31	1	0.70	0.055	+ 0.15	+ 2.00	14.72
4103.37	1	— blend				
O II						
4649.14	1	— blend				
4641.81	1	0.20 »				
4349.43	2	0.16	0.02	— 0.53	+ 0.67	13.80
4075.87	10	0.18	0.07	— 0.45	+ 0.76	13.37
4072.16	10	— blend				
4069.90	10	— »				
4069.64	10	— »				
O III						
3961.59	17	0.13	0.08	— 0.58	+ 0.60	13.17
4569.60	36	0.20 blend				
Mg II						
4481.33	} 4	0.36	0.95	— 0.18	+ 1.12	12.56
.13						
Si IV						
4088.86	1	0.71	0.76	+ 0.15	+ 2.00	13.58
4116.10	1	0.47	0.38	— 0.02	+ 1.46	13.34
4631.38	6	0.09	1.09	— 0.80	+ 0.36	11.73
4654.14	7	0.05	1.66	— 1.06	+ 0.06	11.26
Ca II						
3933.66	1	0.30 interstellare				
3968.47	1	blend »				

VELOCITA' DI TURBOLENZA ED ABBONDANZA DEGLI ALTRI ELEMENTI.

Per la determinazione delle abbondanze degli altri elementi si usa di solito riportare i $\log A/\lambda$ in funzione dei $\log f$ e costruire così una curva di crescita empirica, che permette di determinare i valori della temperatura cinetica e quindi della velocità di turbolenza, in base alla traslazione verticale da dare alla curva empirica per riportarla sulla teorica, e le abbondanze Nh in base alle traslazioni orizzontali. Nel caso nostro per nessun elemento era disponibile un sufficiente numero di righe dello stesso multipletto, di cui fosse nota la larghezza equivalente, così da poter costruire un ramo abbastanza esteso della curva di crescita. Per la determinazione della velocità di turbolenza si è allora ricorso al metodo descritto da Voigt ⁽¹¹⁾ nel suo studio su 55 Cygni. Esso consiste nell'impiegare quelle righe dell'elio di cui è nota la costante C dell'effetto Stark, e grazie a questa determinare la costante di smorzamento γ ; quindi calcolare $\log \frac{1}{R_c} \frac{A}{2 \Delta \lambda}$ nell'ipotesi che non vi sia turbolenza, ed entrare con questo valore sulla curva di crescita. Si trova cioè un valore di $\log \frac{1}{R_c} \frac{Nhf}{\Delta \omega}$ da cui si ricava $\log Nh$. Poichè questo valore è stato ricavato nell'ipotesi che la velocità di turbolenza sia nulla risulterà $\log Nh$ (senza turb.) \geq $\log Nh$ (con turb.). Ma il valore di $\log Nh$ con turbolenza è stato trovato precedentemente dallo studio delle serie spettrali. Si introducono allora per la turbolenza dei valori maggiori di zero fino a trovare accordo fra i due valori di Nh .

Fra le righe dell'elio disponibili occorre scegliere quelle che soddisfano alle due condizioni: che sia nota la costante dell'effetto Stark, e che sia stato determinato il valore di $\log Nh$ col metodo precedente delle serie spettrali. La sola 4713 soddisfa alle due condizioni. Malgrado l'incertezza che il metodo comporta, soprattutto potendo applicarlo ad una sola riga, una conferma della sua attendibilità è data dal confronto dei valori della velocità di turbolenza determinati in questo modo dalla scrivente ⁽¹⁰⁾, e da Goldberg ⁽¹²⁾ col metodo usuale della curva di crescita, per una diecina di stelle di tipo O e B; l'accordo risulta buono. Nel caso di HD 188209 si giunge al risultato

$$\xi_T = 40 \text{ km/sec.}$$

Una volta noto ξ_T è possibile calcolare $\log \frac{1}{R_c} \frac{A}{2 \Delta \lambda}$ per tutte le righe di cui si è potuto misurare A , e quindi entrando con questo valore sulla curva di crescita, determinare $N_{r,s}h$ quando sia noto f . In tabella III e IV sono riportati i risultati, dai quali si determina il valore della gravità efficace in base alla nota relazione

$$4 P_e^2 = g m_H \Sigma Nh P_e \mu$$

TABELLA IV

elemento	log N h		
	HD 188209	10 Lac	τ Sco
H	22,77	22,53	22,27
He	22,26	21,46	21,52
C	18,84	18,54	18,51
N	20,11	18,58	18,85
O	20,36	19,22	19,26
Mg	18,95	18,04	18,03
Si	17,88	18,05	18,07

dove m_H è la massa del protone e μ il peso atomico dei vari elementi.

Si trova

$$\log g = 3.76,$$

e poichè l'errore in $\log Nh(H)$ è stato stimato in ± 0.10 , e quello in $\log Nh(He)$ può ammettersi non superiore a ± 0.50 , calcolato il valore di $\log g$ nelle quattro combinazioni possibili dei valori estremi di $\log Nh(H)$ e $\log Nh(He)$, si ha per $\log g$ i valori estremi 3.41 e 4.04, da cui

$$\log g = 3.76 \pm 0.30.$$

In conclusione lo studio quantitativo di HD 188209 dà per l'atmosfera le seguenti caratteristiche fisiche, che sono confrontate con quelle di 10 Lacertae :

TABELLA V

	HD 188209	10 Lacertae
$\log N_e$	13.99	14.10
T ion	29000	29600
$\log P_e$	2.51	2.80
ξ_τ	40	19
$\log g$	3.76	4.52

Nella tabella IV sono riportate le abbondanze degli elementi per HD 188209, 10 Lacertae e τ Scorpii. La fig. 3 mette in evidenza due fatti : i $\log Nh$ per HD 188209 sono sempre superiori a quelli per 10 Lac e τ Sco, che sono invece praticamente coincidenti. Questo indica che l'opacità atmosferica di HD 188209 è inferiore a quella delle due stelle nane. Inoltre l'eccezionale intensità della 4097 dell'N III si traduce in un eccesso di abbondanza di questo elemento, eccesso che pensiamo sia reale. Per l'ossigeno invece l'eccesso che risulta dalla fig. 3 è dovuto al fatto che tutte le righe di questo elemento impiegate nelle determinazioni di abbondanza sono più o meno blend.

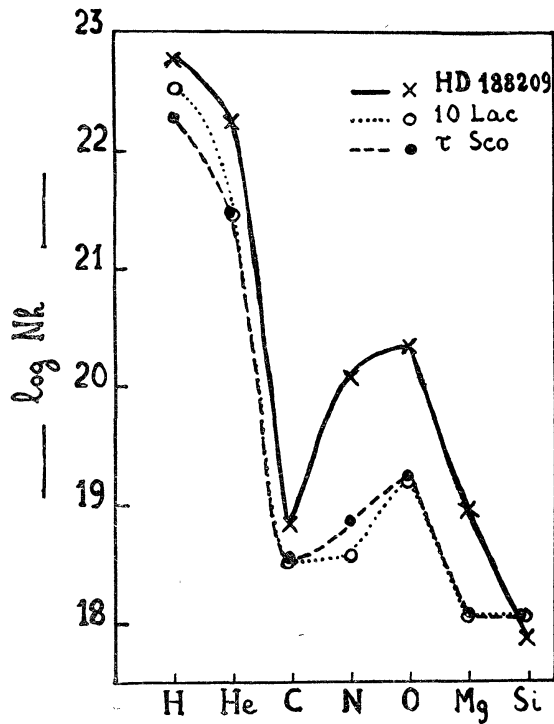


Fig. 3

RICERCA DI UN MODELLO PER L'ATMOSFERA DI HD 188209.

Ci si propone di trovare un modello d'atmosfera che renda conto del valore della discontinuità osservato. Si calcolano perciò i modelli di parametri

$$\theta_0 = 0.18 \quad \log g = 3.5; \quad \theta_0 = 0.18 \quad \log g = 3.9;$$

$$\theta_0 = 0.20 \quad \log g = 3.9$$

che danno rispettivamente

$$D = 0.026, D = 0.028, D = 0.041.$$

Si vede che la dipendenza della discontinuità dalla temperatura è maggiore che dalla gravità. Pertanto lo scopo è di vedere, con valori di g entro l'intervallo di incertezza, e cioè compresi all'incirca fra $\log g = 3.5$ e $\log g = 3.9$, quale valore di θ_0 dà il miglior accordo fra discontinuità osservata e calcolata; si può così vedere a quale profondità ottica corrisponde θ_{ion} e quindi quale è lo strato efficace nella formazione delle righe dell'elio, che ha permesso appunto la determinazione della temperatura di ionizzazione.

Si conclude che il parametro $\theta_0 = 0.18$ porta all'accordo fra i valori della discontinuità osservati e calcolati, e che il valore $\theta_{\text{ion}} = 0.175$ corrisponde alla profondità ottica $\tau = 0.10$.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Williams - Ap. J. **83**, 279, 305, 1936.
- 2) Petrie - Publ. Victoria **7**, 321, 1947.
- 3) Underhill - Contr. Victoria n. 35, 1953.
- 4) Aller - Ap. J. **104**, 347, 1946.
- 5) Chalonge e Divan - Ann. Astroph. **15**, 201, 1952.
- 6) Hack - Ann. Astroph **16**, 417, 1953.
- 7) Unsöld - Z. f. Ap. **21**, 22, 1941.
- 8) Unsöld - Z. f. Ap. **23**, 75, 1944.
- 9) Unsöld - Z. f. Ap. **23**, 100, 1944.
- 10) Hack - Mem. S.A.I. **25**, 17, 1954.
- 11) Voigt - Z. f. Ap. **31**, 48, 1952.
- 12) Goldberg - Ap. J. **89**, 623, 1939.

