

第1回 さまざまな天体とその構成元素

1. いろいろな天体

- ・ 太陽系
- ・ 銀河系
- ・ 銀河、宇宙

2. 原子の世界

- ・ 原子とその構造
- ・ 元素
- ・ 原子スペクトル

3. 恒星のスペクトル

- ・ 恒星の構造
- ・ 恒星大気とスペクトル
- ・ 恒星のスペクトル分類

第2回 恒星の基本的性質、吸収線の同定

1. 恒星の基本的性質

1.1) 恒星を測る

年周視差

固有運動

明るさ

色

スペクトル

1.2) 恒星の距離

年周視差、絶対等級と距離指数

分光視差

周期光度関係

運動に基づく視差

1.3) 連続スペクトルと温度

熱放射

恒星の連続放射

測光

恒星の温度

1.4) 恒星のスペクトル線による分類

スペクトル分類

H-R図

1.5) 恒星の運動と自転

空間運動

自転速度の測定

いろいろな星の自転

1.6) 恒星の質量と直径

恒星の質量

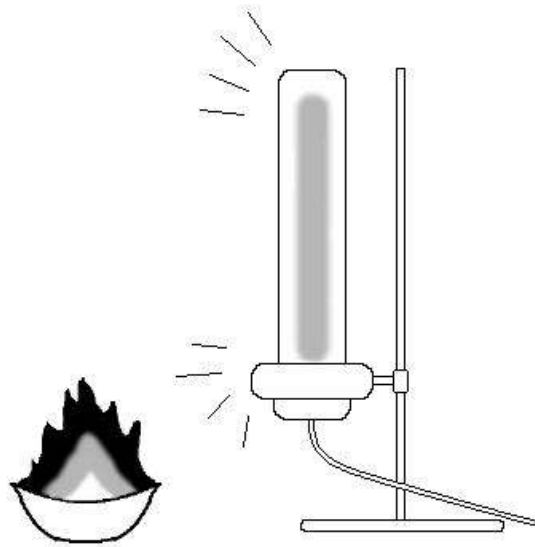
質量光度関係

視直径

いろいろな恒星の質量と直径

## 2. 実習 1

### キルヒホオ・ブンゼンの実験



## 3. 実習 ー スペクトル線の同定

$\gamma$  Gem

3.1) 視線速度  $v$  ー 同定表と微妙に波長  $\lambda$  がずれている

$$\Delta \lambda = \lambda \times (v/c)$$

ここで  $C$  は光速度 30 万 km/s。  $\Delta \lambda$  から  $v$  が求まる。

3.2) スペクトル線同定

同定表を参考に

3.3) 等価幅測定

Fe II

## 2. 恒星の大気と放射

### 2.1) 恒星の大気

吸収と散乱

光学的深さ

放射強度、流束

### 2.2) 連続放射の伝える情報

光度

星間赤化

周辺減光

吸収係数、電離と再結合

地球大気の影響

### 2.3) 線スペクトルの伝える情報

線吸収係数

同定

### 2.4) 大気の構造

有効温度

表面重力加速度

化学組成

モデル大気

### 2.5) 熱の流れ

カッパ機構

### 2.6) 大気の流出

### 2.7) 大気の化学組成

正常な星

CP 星 (化学特異星)

金属欠乏星

第3回  $\gamma$  Gem (ふたご座ガンマ星) の特性と成長曲線の作成

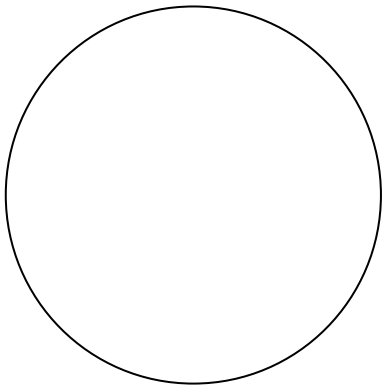
1. 視線速度  $v_{rad}$  — 同定表と微妙に波長  $\lambda$  がずれている

$\Delta \lambda = 0.20 \text{ \AA}$  (オングストローム)、 $\lambda = 6100 \text{ \AA}$  として

$$\Delta \lambda = \lambda \times (v/c)$$

から  $V = (\Delta \lambda / \lambda) \times c = 0.2 / 6100 \times 30000 = 9.8$

ざっと 10km/s で遠ざかっている。(波長が長くなっているから)



星の赤経 (06h37m45.5s) と赤緯 (+16° 23' 52')  $\Rightarrow$  黄経 (99.12°)、黄緯 (-6.74°)

$\Rightarrow$  黄緯が小さいのでほぼ地球公転面 (黄道面) にあるとしてよい。

観測日時 (2003-04-15、'20:04:31.2') の太陽経度は 25.04°

$\Rightarrow$  地球の進行方向と星とは  $90 - (99.12 - 25.04) = 90 - 74.08^\circ$

地球公転速度は 29.8km/s だから星方向の速度は  $29.8 \times \sin(74.08) = 28.7 \text{ km/s}$

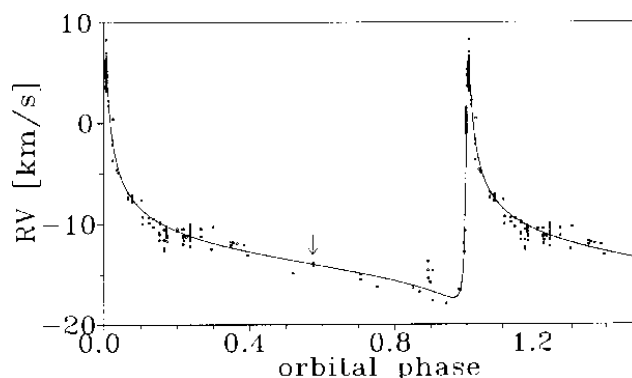
$\Rightarrow$  星は  $28.7 - 9.8 = 18.9 \text{ km/s}$  の速度で地球に近づいている!

ところが、カタログを見ると 視線速度は 12km/s !! はれ? 7km/s も違う!

実は・・・

●A&A 383, 558-567 (2002), H. Lehmann et al. "The spectroscopic binaries 21 Her and  $\gamma$  Gem"

P = 4614.51 日 = 12.6 年



当観測 JD=2452745。1 P 前のデータと合う(1km/s 位は違う), Kamper & Beardsley 1987, AJ 94, 1302

## 2. これまでのスペクトル線の同定と解析

文献調査 — 5500-6700Å という赤い領域のまともな報告はない!

1) Albrecht (1930), 4250-4723Å, 同定だけ

*H $\gamma$*  is by far the strongest line, followed by  $Mg^+$  4481. Two hundred and seventy-six identified lines with intensity  $>0$  are due in nearly equal proportions to ionized and neutral atoms. Included in the former are  $Fe^+$ , 27 lines;  $Ti^+$ , 36;  $Cr^+$ , 11;  $Sc^+$ , 7;  $Ce^+$ , 15;  $Zr^+$ , 7;  $Sa^+$ , 5;  $Rb^+$ , 5;  $V^+$ , 4;  $Mo^+$ , 4;  $Mn^+$ , 4;  $Mg^+$ , 3;  $Pr^+$ , 3. Among the latter are  $Fe$ , 42;  $Ti$ , 17;  $Cr$ , 17;  $Mn$ , 9;  $Ca$ , 7;  $V$ , 5; and  $Ni$ , 4. Other elements which have measured lines are  $Al^+$ ,  $Ba$  and  $Ba^+$ ,  $La^+$ ,  $Bi$  and  $Bi^+$ ,  $Ni^+$ ,  $Ru$ ,  $Pb$ ,  $Nd$ ,  $Y^+$ ,  $Cs^+$ ,  $Eu^+$ ,  $Sb$ , and  $Er$ .  $Pt$ ,  $As$ ,  $Os$ ,  $Ho$ , and  $Yb$  seem to be absent, while  $Gd^+$ ,  $Zn^+$ ,  $Te$ ,  $Sr$ ,  $Nb$ ,  $Ir$ ,  $Co$ ,  $Ag^+$ ,  $S$ , and  $Cl$  are indeterminate. About 80 "distinctive" lines are present.

2) Aller (1942), 3925-4700, COG,

同定と等価幅 : Mg I, II, Al I, Si II, Ca II, Sc II, Ti II, V II, Cr I, II, Mn I, Fe I,

II, Ni II, Sr II, Ba II

## CURVES OF GROWTH FOR THE A DWARFS, $\gamma$ GEMINORUM AND SIRIUS.

LAWRENCE H. ALLER<sup>1</sup>

### ABSTRACT

Curves of growth are derived for  $\gamma$  Geminorum and Sirius from plates taken at the McDonald and Mount Wilson observatories. The excitation temperature of these stars turns out to be about 6000° and the ionization temperature about 8700°, as compared with an effective temperature of 10,000°. The electron pressure derived from the broadening of the hydrogen lines is about  $1.2 \times 10^2$  dynes, as compared with about  $7 \times 10^2$  dynes predicted by theory. If iron is half-ionized in the sun, the amount of metallic vapor above the photosphere of the sun is about twenty times the amount above the photosphere of Sirius. This result is in good agreement with that obtained by Adams and Russell in 1928. The amount of hydrogen in the A dwarfs is found to be about a thousand times the amount of iron (by weight).

Fe は  $\log N(H)=12.00$  に対し、 $\log N(Fe)=7.00$

- 3) Sadakane & Nishimura (1979), 3610-4900A, Vega に相対的な元素量を (絶対量ではない)  
大気モデル法、 $\xi_t = 2.0$  km/s

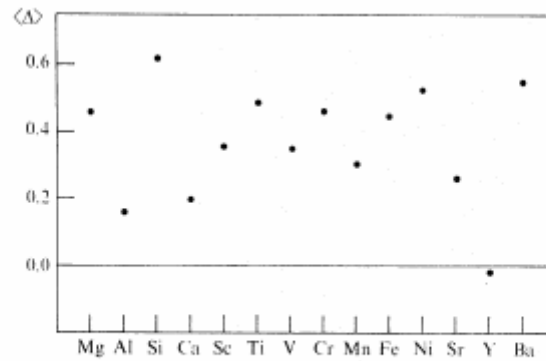


Fig. 4. The mean difference in abundances  $\langle \Delta \rangle$  between  $\gamma$  Gem and  $\alpha$  Lyr for the 14 elements observed.

- 4) Guthrie (1984), 3900-4650A, HgMn 星を  $\gamma$  Gem に相対的に。COG 法

**Summary.** The abundances of 14 elements in the atmospheres of 20 sharp-lined Hg-Mn stars were derived from published equivalent widths and microdensitometer tracings of high-resolution spectra covering the wavelength range from 3900 to 4650 Å. The Hg-Mn stars were compared with the normal A0 IV star  $\gamma$  Gem by the differential curve-of-growth method. Numerous weak lines were used in the analysis. There are large excesses of P, Sc, Mn, Ga, Sr, Y, Zr, Pt and Hg in some stars, but Mg and Ni are generally deficient and Sc and V are deficient in the cooler stars. No correlation of the abundances with the periodic table was found. Although there are large

- 5) Adelman & Davis Philip (1992), 3910-4265A, 最初の絶対的定量  
大気モデル法、 $\xi_t = 1.2$  km/s

TABLE 5  
Comparison of  $\gamma$  Gem Abundances (log N/H)

Species	This Paper DAO Scale	Sadakane and Nishimura
Mg I	-4.32	-4.09
Al I	-5.97	-6.35
Si II	-4.38	-4.58
Ca I	-5.61	-6.02
Sc II	-9.07	-9.05
Ti II	-6.62	-6.91
V II	-7.83	-8.02
Cr I	-5.95	-6.17
Cr II	-5.99	-6.11
Fe I	-4.43	-4.70
Fe II	-4.46	-4.55
Ni II	-5.66	-5.81
Sr II	-9.02	-9.62
Y II	-10.07	-10.04

- 6) Adelman & Davis Philip (1994), 4433-4597A,  
大気モデル法、 $\xi_t = 1.5$  km/s(Fe I), 2.0 km/s(Fe II)

Spec.	$\gamma$ Gem †	Sun
He I	...	-1.00
C II	...	-3.34
O I	...	-3.07
Mg I	-4.27	-4.42
Mg II	-4.66	-4.42
Al I	-5.94	-5.53
Si II	-4.40	-4.45
Si III	...	-4.45
S II	-4.56	-4.79
Ca I	-5.70	-5.64
Ca II	...	-5.64
Sc II	-9.08	-8.90
Ti I	-6.37	-7.01
Ti II	-6.75	-7.01
V II	-7.76	-8.00
Cr I	-5.94	-6.33
Cr II	-5.96	-6.33
Mn I	...	-6.61
Mn II	-6.32	-6.61
Fe I	-4.38	-4.52
Fe II	-4.42	-4.52
Ni I	-5.55	-5.75
Ni II	-5.64	-5.75
Sr II	-9.04	-9.10
Y II	-10.02	-9.76
Zr II	-9.08	-9.40
Ba II	-9.38	-9.87
Teff 1	9260	
log g	3.60	
$\xi$ (km/s)	1.2	

7) Adelman & Davis Philip (199), 4246-4455A, CCD  
 大気モデル法、 $\xi_t = 1.5$  km/s(Fe I), 2.0 km/s(Fe II)

**Table 6.** Comparison of derived abundances for  $\gamma$  Gem ( $\log N/H$ ).

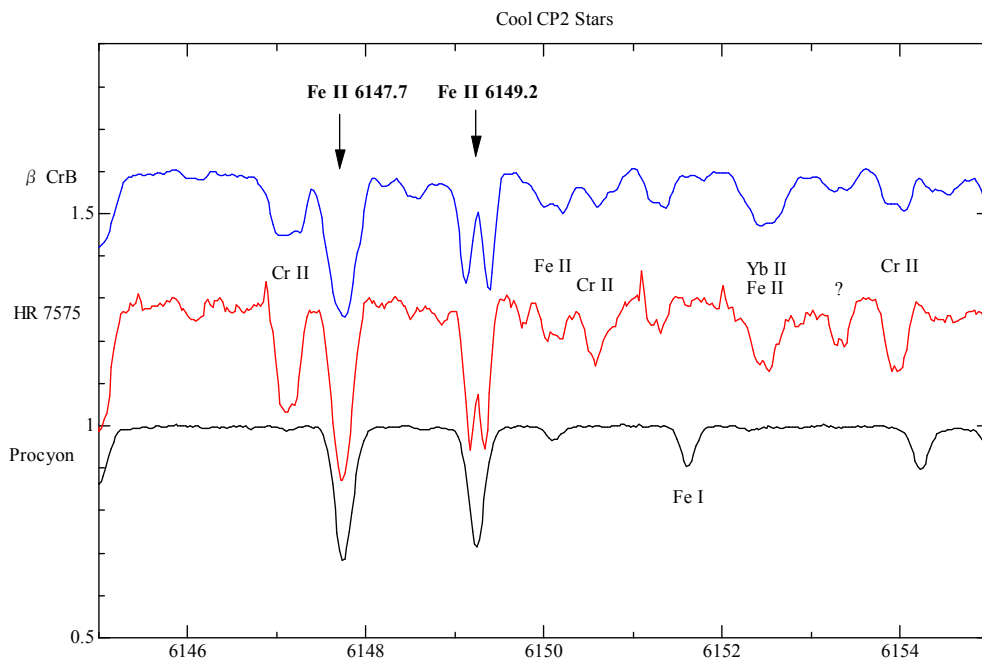
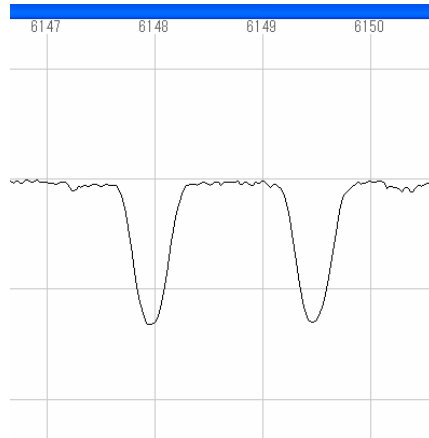
Ion(s)	A&P(1996)	H&L(1993)	N&S(1994)
Mg I, II	-4.33	-4.10	-4.28
Al I	-5.99	...	-6.10
Si II	-4.39	-4.39	-4.59
Ca I	-5.66	-5.61	-5.57
Sc II	-9.08	...	-9.03
Ti II	-6.83	-6.81	-6.91
V II	-7.74	-7.74	-7.58
Cr I, II	-6.06	-6.25	-6.19
Fe I, II	-4.37	-4.41	-4.42
Ni I	-5.64	-5.63	-5.36
Sr II	-9.17	...	-9.55
Y II	-9.77	-9.62	-9.39
Ba II	-9.40	-9.26	-9.28

Notes: A & P (1996) = this paper; H & L (1993) = Hill & Landstreet (1993); N & S (1994) = Nishimura & Sadakane (1994), visual region.



### 3. スペクトル線の同定

・ 磁場 — ゼーマン効果



・ 見えた元素

### 3. Fe II 線の等価幅測定

T<sub>ex</sub>= 9000

$\theta = 0.56$

$\lambda$	log g f	$\chi$ (eV)	予想 EW	測定波長	EW 測 定	rem	$\Delta \lambda$	log(W/ $\lambda$ )	log gf $\lambda -$ $\chi \theta$
5506.20	0.95	10.52	31	5506.39	28		-3.45066E-05	-5.29	-9.20
5529.93	-1.87	6.73	13	5530.12	14		-3.43585E-05	-5.60	-9.90
5534.85	-2.92	3.24	71	5535.03	64		-3.25212E-05	-4.94	-8.99
5567.84	-1.88	6.73	12	5568.02	12		-3.23285E-05	-5.67	-9.90
5588.22	0.09	10.6	6	5588.39	9		-3.04211E-05	-5.79	-10.10
5627.50	-4.36	3.39	6	5627.68	9	:	-3.19858E-05	-5.80	-10.51
5643.88	-1.45	7.65	9	5644.08	11		-3.54366E-05	-5.71	-9.98
5645.39	0.09	10.56	7	5645.62	10	:	-4.07412E-05	-5.75	-10.07
5657.94	-4.09	3.42	10	5658.09	24		-2.65114E-05	-5.37	-10.25
5780.13	0.33	10.68	9	5780.35	12		-3.80614E-05	-5.68	-9.89
5783.63	0.21	10.71	7	5783.84	8		-3.63094E-05	-5.86	-10.03
5813.68	-2.74	5.57	9	5813.9	12		-3.78418E-05	-5.69	-10.09
5835.49	-2.37	5.91	13	5835.69	8		-3.4273E-05	-5.86	-9.91
5902.82	0.43	10.71	10	5903.04	10		-3.72703E-05	-5.77	-9.80
5952.51	-2.03	5.96	22	5952.72	15		-3.52792E-05	-5.60	-9.59
5961.70	0.70	10.68	17	5961.93	20	:	-3.85796E-05	-5.47	-9.51
5991.38	-3.55	3.15	36	5991.58	28		-3.33813E-05	-5.33	-9.54
6045.47	-2.41	6.21	8	6045.67	7		-3.30826E-05	-5.94	-10.11
6084.11	-3.80	3.20	22	6084.32	19		-3.45161E-05	-5.51	-9.81
6113.32	-4.15	3.22	11	6113.52	11		-3.27154E-05	-5.74	-10.17
6147.74	-2.72	3.89	56	6147.96	47		-3.57855E-05	-5.12	-9.11
6149.26	-2.72	3.89	56	6149.46	47		-3.25242E-05	-5.12	-9.11
6175.15	-1.98	6.22	17	6175.36	18		-3.40073E-05	-5.54	-9.67
6179.38	-2.60	5.57	12	6179.56	13		-2.91291E-05	-5.68	-9.93
6233.53	-2.93	5.48	7	6233.78	6		-4.01057E-05	-6.02	-10.20
6238.39	-2.63	3.89	61	6238.61	50		-3.52655E-05	-5.10	-9.01
6247.56	-2.32	3.89	79	6247.76	76	:	-3.20125E-05	-4.91	-8.70
6248.90	-2.69	5.51	10	6249.13	10		-3.68065E-05	-5.80	-9.98
6317.98	-1.99	5.51	36	6318.22	32		-3.79868E-05	-5.30	-9.28

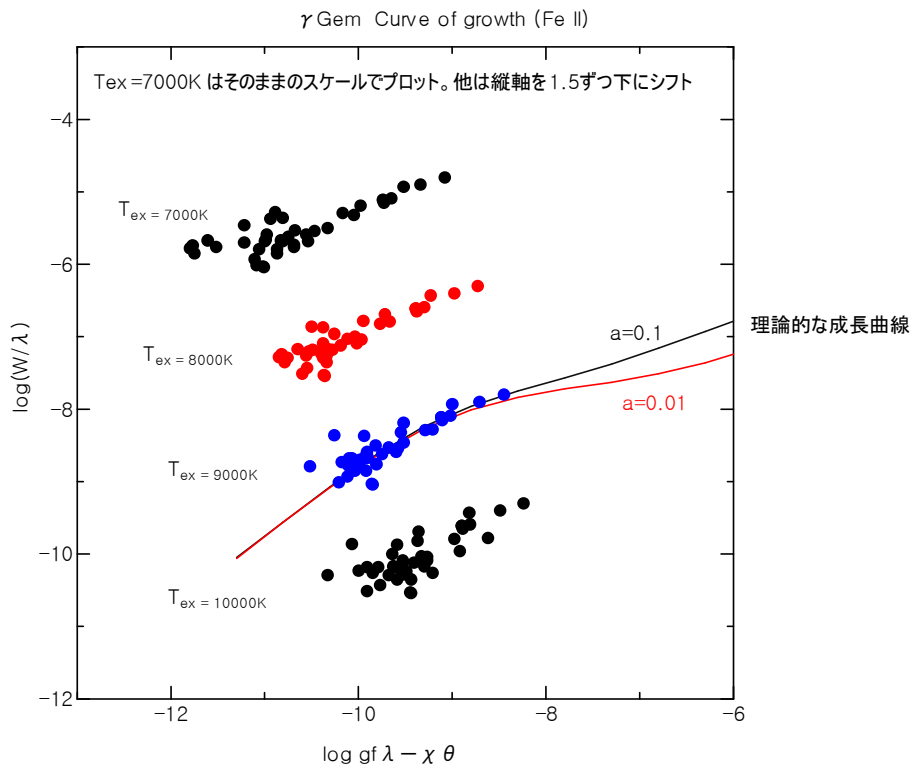
6369.46	-4.25	2.89	14	6369.69	13		-3.61098E-05	-5.69	-10.06
6383.72	-2.27	5.55	22	6383.96	18		-3.75956E-05	-5.55	-9.57
6385.45	-2.61	5.55	12	6385.68	13		-3.60194E-05	-5.69	-9.91
6407.25	-3.69	3.89	11	6407.47	11		-3.43361E-05	-5.77	-10.06
6416.92	-2.73	3.89	55	6417.15	44		-3.58427E-05	-5.16	-9.10
6432.68	-3.70	2.89	37	6432.93	41		-3.88641E-05	-5.20	-9.51
6446.41	-2.07	6.22	14	6446.64	15		-3.56788E-05	-5.63	-9.74
6456.38	-2.07	3.90	93	6456.61	100	:	-3.56237E-05	-4.81	-8.44
6482.20	-2.26	6.22	10	6482.42	27		-3.39391E-05	-5.38	-9.93
6627.26	-1.60	7.27	10	6627.43	6		-2.56516E-05	-6.04	-9.85
6677.31	-1.59	7.27	10	6677.51	6		-2.99522E-05	-6.05	-9.84
Mean							-3.45839E-05		
V=							-10.37518076		

#### 4. 成長曲線

EW=100mA を越えるような強い線がないので直線部から水平部へのつながりや、減衰部のようすがわからず、理論曲線との重ね合わせは確定しない。

この方法で元素量を求めるのは難しい！

励起温度は 9000 度位で良いようだ。  $\theta = 5040/9000 = 0.56$



ここでは、励起温度 9000 度で、図のように理論曲線と合わせたとしよう。すると、

縦軸のずれ = 5.0, 5.2  
 横軸のずれ = 9.3, 9.6  
 といった組み合わせに。

<参考> Aller (1942, ApJ 96, 321) の COG

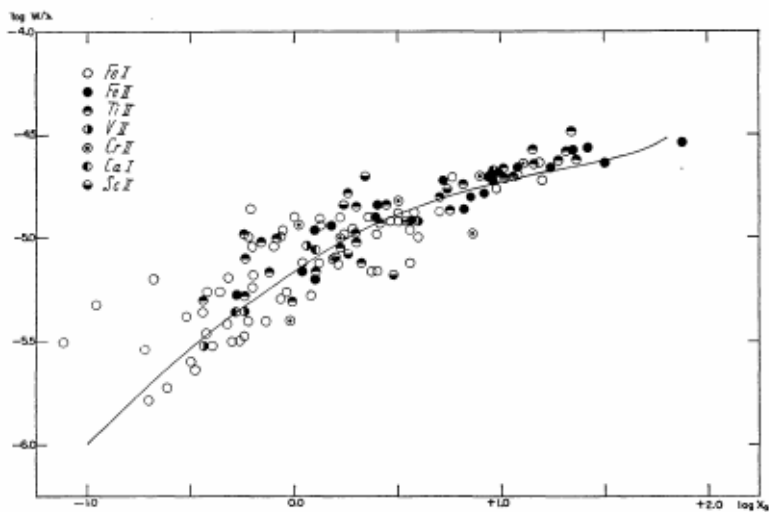


FIG. 2.—The curve of growth for  $\gamma$  Geminorum. The line is the theoretical curve

5. 縦軸差 — 小規模乱流速度 Microturbulent Velocity  $\xi_t$

(16) 式から  $\log(\xi/c) = -5.0$ 、よって  $\xi = 3 \text{ km/s}$ 。

熱運動による速度  $v = \sqrt{2kT/M}$

$$= \sqrt{2 * 1.38e-16 * 9000 / (55.8 * 1.66e-24)}$$

$$= 1.64 \text{ (km/s)}$$

鉄 II はこんな熱運動を

$$\xi_t = \sqrt{3 * 3 - 1.64 * 1.64} = 2.5 \text{ km/s}$$

さらにこんな奇妙な動きを！ 今だに??

<比較>

Adelman & Davis Philip は  $\xi_t = 2.0 \text{ km/s}$ 。 — 2.5 はやや大きいですが、まあ、いい値

6. 横軸差 — 悩ましきずれ

・ 確定しない a の値 — 0.1 にしてみましょう。

・ (20)式

$$\log c = -1.824 + \log N - \log \xi U(t) - \log \kappa_0$$

のうち、 $\log N$  が求める値、

$\log c = 9.3$  (横軸差)、 $\xi = 3.0 \text{ km/s}$  は既知、

従って

$U(t)$  と  $\kappa_0$  を求めなければならない。

・ 分配関数  $U(t)$

テキスト表 3 より、 $\theta = 0.56$  は範囲外。1.61 ( $\theta = 1$ ) と 1.73 ( $\theta = 2$ ) から比例配分で外挿して求める。

$$U(t) = 1.61 - (1.73 - 1.61) * (1 - 0.56) = 1.61 - 0.05 = 1.56$$

・中性水素原子の数密度

$$(12) \text{式 } a = \Gamma \lambda^2 / (4\pi \Delta \lambda_D)$$

$$\lambda^2 = (6000 \times 10^{-8})^2 = 3.6 \times 10^{-9} \quad (\text{cm}^2)$$

$$\Delta \lambda_D = 1.64 / 300,000 \times (6000 \times 10^{-8}) = 3.28 \times 10^{-10} \quad (\text{cm})$$

$a=0.1$  とすると、

$$\begin{aligned} \Gamma &= a (4\pi c \Delta \lambda_D) / \lambda^2 = 0.1 \times (4 \times 3.14 \times 3 \times 10^{10} \times 3.28 \times 10^{-10}) / 3.6 \times 10^{-9} \\ &= 3.43 \times 10^9 \end{aligned}$$

$$(7) \text{式 } \Gamma = 17 \times C^{2/5} \times \xi^{3/5} \times N_H$$

$$\text{ここで、(8)式から、} C = (13.6 / (13.6 - 2.0))^2 \times 10^{-32} = 1.37 \times 10^{-32}$$

$$\begin{aligned} (8) \text{式から、} \quad 3.43 \times 10^9 &= 17 \times (1.37 \times 10^{-32})^{0.4} \times (3 \times 10^5)^{0.6} \times N_H \\ &= 17 \times 1.80 \times 10^{-13} \times 1933 \times N_H \\ &= 5.91 \times 10^{-9} \times N_H \end{aligned}$$

$$\text{よって、} \quad N_H = 5.80 \times 10^{17} \quad (\text{中性水素の数密度})$$

・水素の電離度と電子数

(22)式から水素がどの程度電離しているか、見積もってみる。

大気中の自由電子は水素原子から供給されているものがほとんど見なすことができるだろう。すると、電子圧  $P_e = n_e kT$  の  $n_e$  は電離した水素の数密度  $N_p$  に等しいとおくことができる。この仮定を許せば(22)式の左辺は  $\log(N_p^2 kT / N_H)$  となり、

$$\begin{aligned} \log(N_p^2 kT / N_H) &= 2\log(N_p) + \log(1.38 \times 10^{-16} \times 9000 / 5.80 \times 10^{17}) \\ &= 2\log(N_p) - 29.669 \end{aligned}$$

である。一方、右辺は

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= (-5040 \times 13.6 / 9000) + 2.5\log(9000) - 0.48 + \{\log(2) + 0.0 - 0.30\} \\ &= -7.62 + 9.89 - 0.48 \\ &= 1.79 \end{aligned}$$

以上から、

$$\log(N_p) = (1.79 + 29.669) / 2 = 15.730 \quad N_p = 5.36 \times 10^{15} \quad (=n_e)$$

これは中性水素の1%程度であり、 $\gamma$  Gem 大気中の水素は99%が中性ということになる。

・鉄の電離度

水素の場合と同じように鉄の電離度を求めてみる。中性鉄と電離鉄の数密度を  $N_0$ 、 $N_1$  としておく、

(22)式の右辺は

$$\begin{aligned} \log(N_1 n_e kT / N_0) &= \log(N_1 / N_0) + \log(5.36 \times 10^{15} \times 1.38 \times 10^{-16} \times 9000) \\ &= \log(N_1 / N_0) + 3.823 \end{aligned}$$

である。右辺は、同様に、

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= (-5040 \times 7.87 / 9000) + 2.5\log(9000) - 0.48 + \{\log(2) + 1.61 - 1.42\} \\ &= -4.407 + 9.89 - 0.48 + 0.49 \\ &= 5.493 \end{aligned}$$

となり、結局、

$$\log(N_1/N_0)=1.67, \quad N_1/N_0=46.8$$

である。中性鉄と電離鉄の数密度の比は 1 : 47 ということであり、鉄はほとんどが電離した状態となっていることがわかった。

つまり、電離鉄の量が  $\gamma$  Gem 大気中の鉄の量を表していると言える。

・連続吸収係数

この話をし始めると大変なので、話を省略してプログラムを提供。

それぞれ変数を代入して求めると、

$$\log \kappa_c = -6.36$$

となる。

・電離鉄の量

(20)式の変数は全て確定した。それぞれを代入してみると、

$$\log c = -1.824 + \log N - \log \xi U(t) - \log \kappa_c \text{ は}$$

$$9.3 = -1.824 + \log N - \log(3 \times 10^5) - \underline{1.56} + 6.36$$

これから、

$$\log N = 9.3 + 1.824 + 5.48 + 1.56 - 6.36 = 11.80, \quad N = 6.31 \times 10^{11}$$

となる。これが吸収に関与した FeII の量である。中性鉄はこの電離鉄の 47 分の 1 で、約 2% に過ぎず、鉄の総量は

$$6.44 \times 10^{11}$$

となる。

## 7. 水素量との比較

中性水素の数密度は  $N_H = 5.80 \times 10^{17}$  であった。上で求めた鉄の量は水素に比較すると

$$6.44 \times 10^{11} / 5.80 \times 10^{17} = 1.11 \times 10^{-6}$$

である。水素 1 兆個 =  $10^{12}$  (log で 12) に対しては約 110 万個 (対数表示で 6.05) である。

・一桁以上少ない！ 金属欠乏星か？ — 悩ましき横軸

現代的な研究では  $\log N(\text{Fe}) = 7.50$  程度。6.05 は一桁以上小さい。Aller(1942)は 7.0。

横軸のずれはそのまま元素量に反映。ずれを 9.6 にとると  $\log N(\text{Fe})$  で 0.3 上がる。

$a = 0.1$  は大きい！ 0.05 にとると

計算間違い？

## 8. まとめ

元素量を求めるということは、その星の大気状態をきちんと決めるということ。

・成長曲線法の特徴

— 一層近似 (簡便、ただし不正確)

— 人力で計算できる

・現代の手法

\*\*\*\*\*

6. 横軸差 — 悩ましきずれ

・ a の値 — 0.05 にしてみましょう。そして  $\log c = 9.6$  に！

・ (20)式

$$\log c = -1.824 + \log N - \log \xi U(t) - \log \kappa_0$$

のうち、 $\log N$  が求める値、

$\log c = 9.6$  (横軸差)、 $\xi = 3.0\text{km/s}$  は既知、

従って

$U(t)$  と  $\kappa_0$  を求めなければならない。

・ 分配関数  $U(t)$

テキスト表3より、 $\theta = 0.56$  について見ると、ない！ 仕方がないので、1.61 ( $\theta = 1$ ) と 1.73 ( $\theta = 2$ ) から比例配分で外挿して求める。

$$U(t) = 1.61 - (1.73 - 1.61) * (1 - 0.56) = 1.61 - 0.05 = 1.56$$

・ 中性水素原子の数密度

(12)式  $a = \Gamma \lambda^2 / (4\pi \Delta \lambda_D)$

$$\lambda^2 = (6000 \times 10^{-8})^2 = 3.6 \times 10^{-9} \quad (\text{cm}^2)$$

$$\Delta \lambda_D = 1.64 / 300,000 \times (6000 \times 10^{-8}) = 3.28 \times 10^{-10} \quad (\text{cm})$$

$a = 0.05$  とすると、

$$\begin{aligned} \Gamma &= a (4\pi c \Delta \lambda_D) / \lambda^2 = 0.05 \times (4 \times 3.14 \times 3 \times 10^{10} \times 3.28 \times 10^{-10}) / 3.6 \times 10^{-9} \\ &= 1.72 \times 10^9 \end{aligned}$$

(7)式  $\Gamma = 17 \times C^{2/5} \times \xi^{3/5} \times N_H$

$$\text{ここで、(8)式から、} C = (13.6 / (13.6 - 2.0))^{2/5} \times 10^{-32} = 1.37 \times 10^{-32}$$

$$\begin{aligned} \text{(8)式から、} \quad 1.72 \times 10^9 &= 17 \times (1.37 \times 10^{-32})^{0.4} \times (3 \times 10^5)^{0.6} \times N_H \\ &= 17 \times 1.80 \times 10^{-13} \times 1933 \times N_H \\ &= 5.91 \times 10^{-9} \times N_H \end{aligned}$$

よって、 $N_H = 2.91 \times 10^{17}$  (中性水素の数密度)

・ 水素の電離度と電子数

(22)式から水素がどの程度電離しているか、見積もってみる。

大気中の自由電子は水素原子から供給されているものがほとんど見なすことができるだろう。すると、電子圧  $P_e = n_e kT$  の  $n_e$  は電離した水素の数密度  $N_p$  に等しいとおくことができる。この仮定を許せば(22)式の左辺は  $\log(N_p^2 kT / N_H)$  となり、

$$\log(N_p^2 kT / N_H) = 2\log(N_p) + \log(1.38 \times 10^{-16} \times 9000 / 2.91 \times 10^{17})$$

$$= 2\log(N_p) - 29.370$$

である。一方、右辺は

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= (-5040 \times 13.6 / 9000) + 2.5\log(9000) - 0.48 + \{\log(2) + 0.0 - 0.30\} \\ &= -7.62 + 9.89 - 0.48 \\ &= 1.79 \end{aligned}$$

以上から、

$$\log(N_p) = (1.79 + 29.370) / 2 = 15.58, \quad N_p = 3.80 \times 10^{15} \quad (=n_e)$$

・鉄の電離度

水素の場合と同じように鉄の電離度を求めてみる。中性鉄と電離鉄の数密度を  $N_0$ 、 $N_1$  としておく、(22)式の右辺は

$$\begin{aligned} \log(N_1 n_e kT / N_0) &= \log(N_1 / N_0) + \log(3.80 \times 10^{15} \times 1.38 \times 10^{-16} \times 9000) \\ &= \log(N_1 / N_0) + 3.674 \end{aligned}$$

である。右辺は、同様に、

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= (-5040 \times 7.87 / 9000) + 2.5\log(9000) - 0.48 + \{\log(2) + 1.61 - 1.42\} \\ &= -4.407 + 9.89 - 0.48 + 0.49 \\ &= 5.493 \end{aligned}$$

となり、結局、

$$\log(N_1 / N_0) = 1.819, \quad N_1 / N_0 = 65.92$$

・連続吸収係数

この話をし始めると大変なので、話を省略してプログラムを提供。

それぞれ変数を代入して求めると、

$$\log \kappa_c = -6.62$$

となる。

・電離鉄の量

(20)式の変数は全て確定した。それぞれを代入してみると、

$$\begin{aligned} \log c &= -1.824 + \log N - \log \xi U(t) - \log \kappa_c \quad \text{は} \\ 9.6 &= -1.824 + \log N - \log(3 \times 10^5) - 1.56 + 6.62 \end{aligned}$$

これから、

$$\log N = 9.6 + 1.824 + 5.48 + 1.56 - 6.62 = 11.84, \quad N = 6.92 \times 10^{11}$$

となる。これが吸収に参与した FeII の量である。中性鉄はこの電離鉄の 66 分の 1 で、2%弱に過ぎず、鉄の総量は

$$7.02 \times 10^{11}$$

となる。



**番外編**

Tex = 800

OK としてやってみる。

$$\text{Log } a = -1.2, \quad a = 0.063$$

$$\text{縦軸のずれ} = -5.2$$

$$\text{横軸のずれ} = -10.0$$

**5. 縦軸差 — 小規模乱流速度 Microturbulent Velocity  $\xi_t$** 

(16) 式から  $\log(\xi/c) = -5.2$ 、よって  $\xi = 1.9 \text{ km/s}$ 。

熱運動による速度  $v = \sqrt{2kT/M}$

$$= \sqrt{2 \times 1.38 \times 10^{-16} \times 8000 / (55.8 \times 1.66 \times 10^{-24})}$$

$$= \underline{1.54 \text{ (km/s)}}$$

鉄 II はこんな熱運動を

$$\xi_t = \sqrt{1.9^2 - 1.54^2} = \underline{1.1 \text{ km/s}}$$

**6. 横軸差 — 悩ましきずれ**

・ a の値 — 0.063

・ (20) 式

$$\log c = -1.824 + \log N - \log \xi U(t) - \log \kappa_c$$

のうち、 $\log N$  が求める値、

$$\log c = 10.0 \text{ (横軸差)、} \xi = 1.9 \text{ km/s は既知、}$$

・ 分配関数  $U(t)$

テキスト表 3 より、 $\theta = 5040/8000 = 0.63$  は範囲外。1.61 ( $\theta = 1$ ) と 1.73 ( $\theta = 2$ ) から比例配分で外挿して求める。

$$U(t) = 1.61 - (1.73 - 1.61) \times (1 - 0.63) = 1.61 - 0.04 = 1.57$$

・ 中性水素原子の数密度

$$(12) \text{ 式 } a = \Gamma \lambda^2 / (4\pi \Delta \lambda_D)$$

$$\lambda^2 = (6000 \times 10^{-8})^2 = 3.6 \times 10^{-9} \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$\Delta \lambda_D = 1.9 / 300,000 \times (6000 \times 10^{-8}) = 3.80 \times 10^{-10} \text{ (cm)}$$

$a = 0.063$  とすると、

$$\begin{aligned} \Gamma &= a (4\pi c \Delta \lambda_D) / \lambda^2 = 0.063 \times (4 \times 3.14 \times 3 \times 10^{10} \times 3.80 \times 10^{-10}) / 3.6 \times 10^{-9} \\ &= 8.35 \times 10^8 \end{aligned}$$

$$(7) \text{ 式 } \Gamma = 17 \times C^{2/5} \times \xi^{3/5} \times N_H$$

$$\text{ここで、(8) 式から、} C = (13.6 / (13.6 - 2.0))^2 \times 10^{-32} = 1.37 \times 10^{-32}$$

$$\begin{aligned} (8) \text{ 式から、} \quad 8.35 \times 10^8 &= 17 \times (1.37 \times 10^{-32})^{0.4} \times (1.9 \times 10^5)^{0.6} \times N_H \\ &= 17 \times 1.80 \times 10^{-13} \times 1470 \times N_H \\ &= 4.50 \times 10^{-9} \times N_H \end{aligned}$$

よって、  $N_H = 1.86 \times 10^{17}$  (中性水素の数密度)

・水素の電離度と電子数

(22)式。

大気中の自由電子は水素原子から供給されているものがほとんどと見なすことができるだろう。すると、電子圧  $P_e = n_e kT$  の  $n_e$  は電離した水素の数密度  $N_p$  に等しいとおくことができる。この仮定を許せば(22)式の左辺は  $\log(N_p^2 kT / N_H)$  となり、

$$\begin{aligned}\log(N_p^2 kT / N_H) &= 2\log(N_p) + \log(1.38 \times 10^{-16} \times 8000 / 1.86 \times 10^{17}) \\ &= 2\log(N_p) - 29.227\end{aligned}$$

である。一方、右辺は

$$\begin{aligned}\text{右辺} &= (-5040 \times 13.6 / 8000) + 2.5\log(8000) - 0.48 + \{\log(2) + 0.0 - 0.30\} \\ &= -8.568 + 9.76 - 0.48 \\ &= 0.71\end{aligned}$$

以上から、

$$\log(N_p) = (0.71 + 29.227) / 2 = 14.97 \quad N_p = 9.30 \times 10^{14} \quad (=n_e)$$

これは中性水素の1%以下であり、 $\gamma$  Gem 大気中の水素は99%以上が中性ということになる。

・鉄の電離度

水素の場合と同じように鉄の電離度を求めてみる。中性鉄と電離鉄の数密度を  $N_0$ 、 $N_1$  としておくと、(22)式の右辺は

$$\begin{aligned}\log(N_1 n_e kT / N_0) &= \log(N_1 / N_0) + \log(9.3 \times 10^{14} \times 1.38 \times 10^{-16} \times 8000) \\ &= \log(N_1 / N_0) + 3.011\end{aligned}$$

である。右辺は、同様に、

$$\begin{aligned}\text{右辺} &= (-5040 \times 7.87 / 8000) + 2.5\log(8000) - 0.48 + \{\log(2) + 1.61 - 1.42\} \\ &= -4.958 + 9.76 - 0.48 + 0.49 \\ &= 4.81\end{aligned}$$

となり、結局、

$$\log(N_1 / N_0) = 1.79, \quad N_1 / N_0 = 62.9$$

である。中性鉄と電離鉄の数密度の比は 1 : 63 ということであり、鉄はほとんどが電離した状態となっていることがわかった。

つまり、電離鉄の量が  $\gamma$  Gem 大気中の鉄の量を表していると言える。

・連続吸収係数

この話をし始めると大変なので、話を省略してプログラムを提供。

それぞれ変数を代入して求めると、

$$\log \kappa_c = -5.50$$

となる。

・電離鉄の量

(20)式の変数は全て確定した。それぞれを代入してみると、

$$\log c = -1.824 + \log N - \log \xi U(t) - \log \kappa_0 \quad \text{は}$$

$$10.0 = -1.824 + \log N - \log(1.9 \times 10^5) - 1.56 + 5.50$$

これから、

$$\log N = 10.0 + 1.824 + 5.28 + 1.56 - 5.50 = 13.16 \quad N = 1.44 \times 10^{13}$$

となる。これが吸収に関与した FeII の量である。中性鉄はこの電離鉄の 63 分の 1 で、約 1.6% に過ぎず、鉄の総量は

$$1.46 \times 10^{13}$$

となる。

### 7. 水素量との比較

中性水素の数密度は  $N_H = 1.86 \times 10^{17}$  であった。上で求めた鉄の量は水素に比較すると

$$1.46 \times 10^{13} / 1.86 \times 10^{17} = 7.86 \times 10^{-5}$$

である。水素 1 兆個 =  $10^{12}$  (log で 12) に対しては約 7860 万個 (対数表示で 7.90) である。

**これで太陽の 2 倍 (!) となった!**