

磁気特異星 HR 6958 のスペクトル線解析

加藤 賢一

kato@sci-museum.jp

概要

磁場を帯びた化学特異星に分類されている HR 6958 (HD 170973, MV Ser) の可視域スペクトルの解析を行った。使用したスペクトルはフランス・オートプロバンス天文台の ELODIE 分光器で得られた波長域 4100~6700 Å 高分散スペクトルで、スペクトル合成法によりスペクトル線の同定を行い、他の線による影響の少ないクリーンな線を 640 本、未同定線を 347 本リストアップした。特に 2 階電離したランタノイド系列の希土類元素の線を同定することができたのが本研究の特徴で、Pr III、Nd III、Gd III、Ho III、Er III について検出に成功した。磁場に影響を受けやすいとされる線に磁場の効果は見られず、磁場は弱いものと推察される。ヘリウム線は期待されるほどの強度を示さず、ヘリウム欠乏を示唆している。求められた元素量は、CNO については太陽値、鉄族を中心とした金属は 10~100 倍、希土類元素は 1 万倍程度である。

1. はじめに

スペクトルに通常見えないスペクトル線が卓越している恒星を特異星あるいは化学特異星とよんでいる。中でも B、A、F 型スペクトルを示す特異星には水銀・マンガン星、金属線星、磁気特異星などがあり、本報告誌において筆者はすでに磁気特異星 HR 7575 (加藤・定金 1993a)、水銀・マンガン星 ν Cnc (加藤・定金 1993b)、金属線星 14 Del (加藤・定金 1997) について報告を行ってきた。その後 HR 7575 についてはさらに精細な解析を行い、その結果を日本天文学会欧文研究報告誌に発表した (Kato and Sadakane 1999)。

以上の研究から、低温の磁気特異星 HR 7575 では太陽大気に比べ、Ca、Ti、Ni、Sr は 0.4~0.8 dex、Fe は約 1.0 dex、Mn は約 1.8 dex、Cr、La、Ce、Pr、Eu、Gd については 2.0 dex 以上含まれていると示さなければならないことが示された。ただし、4000 ガウスの磁場がかかっているとしてゼーマン効果を考慮すると、Cr と Fe では 0.7 dex 程度下がり、Cr では太陽値に比べ +1.7 dex、Fe では +0.1 dex ほどになり、鉄は太陽値と考えると良いことが明らか

になった。しかし、ゼーマン効果により見かけ上スペクトル線が強く見えるようになるとしても、La 以下の希土類元素については太陽値以上を仮定しないかぎりその強度を説明することは依然難しい。HR 7575 に磁場によるゼーマン効果が効いていることは Mathys (1990) が具体的に、直接的に、明らかにした。中性鉄の 6149.24 Å 線が完全に分岐していることが観測されたのである。その後、未同定線のいくつかは 2 階電離した希土類元素によることを示唆する観測結果が得られ、Mathys and Cowley (1992) が 2 階電離した Pr (Pr III) の 6160.2 Å 線を同定した。

その後、ベルギーの Biemont ら (たとえば、<http://www.umh.ac.be/~astro/dream.shtml>) が 2 階電離したランタノイド系列元素について遷移確率の理論計算を精力的に行い、それに基づき特異星のスペクトルに Pr III や Nd III を検出したことがいくつか報告されている (たとえば、水銀・マンガン星等については Palmeri et al. (2000) や Dolk et al. (2002) など)。ランタノイド系列元素の第 2 イオン化電位は 10~13 eV 程度であるから、A~

F型星程度の温度領域で(7000~11000 度程度)も量さえ多ければ見えることが期待される。11000 度程度の有効温度を持つ磁気特異星 HR 6958 ではこうした元素線は見えるのであろうか?見えるなら、これまで未知の線として同定されなかったスペクトル線をどの程度同定できるか、興味のあるところである。

本研究ではHR 6958のスペクトル線同定を行い、中でも2階電離したランタノイド系列の希土類元素に焦点を当てて調査してみることにする。

2. 磁気特異星 HR 6958 について

今回の対象とした磁気特異星 HR 6958 の一般的特性について表 1 にまとめておいた。

分光測光は Adelman et al. (1989) によって行われて、Adelman and Rayle (2000) がそれに関して議論を行った。彼らは uvby β 測光データから有効温度 T_{eff} として 11676K、表面重力加速度 $\log g$ として 3.69 を求め、これから分光測光データとモデル計算を比較して、 $T_{\text{eff}} = 10750\text{K}$ 、 $\log g = 3.50$ を得た。ただし、金属量として太陽の 10 倍を採用した。しかし、ライマン連続部と、H-ガンマ線から 5200 Å 部の強い吸収部あたりまではモデル放射と合うものの、それを越えた長い波長域では観測値はモデルより系統的に強く出ている。Adelman and Rayle (2000) が示した磁気特異星の中でもこの HR 6958 の放射分布は特徴があるようであるが、原因などは分っていない。

高分散のスペクトルを用いた HR 6958 の元素量解析は Lopez-Garcia et al. (2001) により行われている。彼らは Adelman and Rayle (2000) に従い、大気モデルとして(有効温度、表面重力加速度、金属量) = (10750、3.50、+1.0dex) を用いた。微少乱流速度 *microturbulent velocity* ξ として Fe I から 0.6km/s、Fe II から 0.0km/s、Ti II から 1.0km/s、Cr II から 1.4km/s を得た。微少乱流速度 ξ が 0 で、元素量が磁場に依存しないという条件を課して磁場強度を評価してみたところ、Fe I と Fe II から 0.4K ガウス、Ti II から 1.8K ガウス、Cr II から 1.5K ガウスが得ら

れたという。また、He I 線が見えず、ひどくヘリウムが欠乏している星と見られることを指摘し、他に C II 以下 26 種類の元素について定量を行い、ケイ素を除く軽元素は太陽値で、ニッケルを除く銩元素はそれより多く、鉄族で約 10 倍、ストロンチウムが数 1000 倍、イットリウムとジルコニウムが数 100 倍で、希土類は 1000 倍からそれ以上多いという結果を得ている。

こうして見ると、放射分布は正常星や他の磁気特異星とも違った奇妙な特徴を見せ、He 欠乏で、金属は太陽の 10~数 1000 倍もある典型的な磁気特異星の特徴を示しているが、磁場はそう強くはない、ということが言えそうである。

3. 使用したスペクトル

今回の解析に使用したスペクトルはフランス・オートプロバンス天文台の ELODIE 分光器で得られたもので、同天文台のインターネット・ホームページ <http://www.obs-hp.fr/www/welcome.html> 上で公開されているデータを使用した。観測日は 1999 年 7 月 22 日で、露光は 40 分、公開されているデータの波長域は 4100~6700 Å で、0.05 Å 毎に 54001 点のデータから構成されている。

ELODIE 分光器はオートプロバンス天文台の 1.93m 望遠鏡に付属している高分散のエシエル分光器で、1995 年 10 月、世界で最初に太陽系外惑星を 51 Peg に見出したことで世界的によく知られるようになった。その規格・性能については Baranne et al. (1996) が記しているので、その概略を表 2 に記しておく。岡山天体物理観測所の HIDES と同程度の性能と思えば良いようであるが、ELODIE は光ファイバーを使って光を導いているところが大きく違っている。代表的な分解能が 42000 だから、波長域の中間の 5500 Å で 0.13 Å の解像度ということになる。

ELODIE のデータは TGMET ライブラリーと FITS フォーマット・データという 2 種類の形式で公開されている。TGMET ライブラリーはデータ数が限定されている簡易版であるのに対し、FITS フォーマットデータの方は ELODIE の本格版というこ

ろである。908 データ (星数はこれより少ない) が採録されていて、1 データは、スペクトル、ノイズなどの4 データから成っている。筆者はこれをいったん LINUX 上の天文学データ処理プログラム IRAF の rfits で処理した後 Windows へ転送して nijiboshi (京都天体物理研究所の蓮井隆さんが開発された恒星スペクトルデータ処理ソフト。http://www.dl.dion.ne.jp/~yamaneco/を参照のこと) などで処理している。このデータは連続部の規格化 (continuum fitting) まで行われているが、一応の処理であり、実際には改めて行う必要がある。その点、nijiboshi は使いやすい。

4. スペクトル線の同定と大気パラメータ

スペクトル線の同定は竹田洋一氏 (國學院大學) が開発された分光データ解析ソフト群 sptool 中の spshow を用いて行った。これは Kurucz (1993b) のスペクトル合成用プログラム SYNTH をベースにして Windows の画面上に理論的に合成されたスペクトルと観測データを合わせて表示できるように改造したプログラムである。

基礎データとなるスペクトル線データは Kurucz and Bell (1995) を基本とし、それに Biemont らのランタノイド系列元素のデータ (DREAM データ) を加えた。

以上の2点に欠けているデータについては米国度量衡局 NIST の線リストも用いたが、これには遷移確率が知られていないものが多く、線強度を直接比較することができないので、補助的な使用にとどめた。

以上のプロセスにより他の線の混合が見られなにか、あるいは極めて少ないと判断されたもの640本、どの元素に由来するか不明な未同定線として347本を測定した。そのうちランタノイド系列元素についてのみ表3にリストしておいた。

元素量や線強度を求めるのに採用した大気パラメータは Lopez-Garcia et al. (2001) と同様に Adelman and Rayle (2000) の求めたデータを採用した。すなわち、(有効温度、表面重力加速度、金属量) = (10750, 3.50, +1.0dex) である。また、

微小乱流速度 ξ は 0.0km/s とした。元素量計算には Kurucz (1993a) の開発したプログラム WIDTH9 と同じく Kurucz (1993a) が計算した大気モデルを用いた。

5. 結果

1) 磁場の特徴

Mathys and Lanz (1992) はある種の磁気特異星では1階電離した鉄イオンの 6149.2 Å 線がゼーマン効果によって分離していることを示したが、HR 6958 では分離していたり、他の鉄の線に比べて太くなっているような様子は見えない。また、ほぼ同じ遷移確率を持っているがゼーマン効果が大きく異なる線のペアとして知られている1階電離した鉄イオンの 4385.38 Å 線 (ランダの g 因子=1.333) と 4416.81 Å 線 (ランダの g 因子=0.833) の等価幅はそれぞれ 107 Å と 104 Å であり、ほぼ等しい。前に解析した HR 7575 では数千ガウスの磁場を持っているとされており、187m Å と 162m Å であったことを想起すれば、HR 6958 の磁場強度は極めて弱いことが推察される。これは Lopez-Garcia et al. (2001) の結論を支持するものである。

2) 2階電離したランタノイド系列元素

Biemont らの DREAM データにより、ランタノイド系列元素については1階電離イオンに加え、2階電離イオンの線を同定することができた。表3にランタノイド系列元素の線とそれから求めた元素量を示しておいた。また、図1~4に Nd, Pr, Gd, Ho, Er の例を掲げた。グラフの上段が HR 6958 で、比較のため下段におおぐま座 ϵ 星 (HR 4905, A0pCr, $v \sin i = 38$ km/s) のスペクトルを載せておいた。これも磁気特異星に分類されているが、自転速度が早いいためスペクトル線が広がり、特徴があまり分らなくなっている。

長らく磁気特異星の複雑なスペクトルは恒星物理学者を悩ませていたが、相当部分が2階電離したランタノイド系列元素によるものと考えられることができるようである。まだ実験室でのデータが不足しており、その遷移確率や超微細構造などの物

理的性質を欠いているものが多く、それらが整備されればなお複雑なスペクトルの解明に近づくものと期待される。

3) 元素量

本解析はまだ予備的なものであり、線の等価幅や線の物理データ等にきちんとした吟味を加えているわけではないのでまったくの参考程度であるが、これまで得られた元素量の計算結果を表4に示しておいた。微少乱流速度を0 km/s とし、ダンピングの効果を考慮していないことなどが手伝って、Lopez-Garcia et al. (2001) の結果より全般的に大きく出ている。

その他、ヘリウム線が期待されるほどの強度が見られず、弱ヘリウム星の特徴を示していることは Lopez-Gracia et al. (2001) の指摘のとおりである。

スペクトル線強度が磁場により影響を受け、元素量に換算すると見かけ上10倍程度多くなったように観測されることがあることを Kato and Sadakane (1999) が例示したが、この HR 6958 については磁場の影響は期待できず、太陽値の10~1万倍という量は実際に HR 6958 の大気中にあるものと考えざるを得ない。このような元素量の選択的集積は、いわゆる拡散説によって説明されている。静穏な大気中では放射圧の影響が相対的に大きくなり、複雑な原子構造を持った希土類元素などは放射圧により浮上するという考えである。HR 6958 の元素量分布も基本的にはこれで説明されるのであろうが、ヘリウム欠乏という特徴もあり、統一的に解釈できるものか、興味深いところである。

参考文献

- Adelman S. J., Pyper D. M., Shore S. N., White R. E., Warren W. H. Jr., 1989, A&AS 91, 221
Adelman S. J., Rayle K. E. 2000, A&A 355, 308
Anders E., Grevesse N. 1989, Geochim. Cosmochim. 53, 197
Baranne A., Queloz D., Mayor M., Adrianzyk G., Knispel G., Kohler D., Lacroix D., Meunier J.-P., Rimbaud G., and Vin A. 1996, A&AS 119, 373
Dolk L., Wahlgren G. M., Lundberg H., Li Z. S., Litzen U., Ivarsson S., Ilyin I., Hubrig S., 2002, A&A 385, 111
Hauck B., Mermilliod M. 1990, A&AS 86, 107 (ADC CD-ROM No. 1)
Hoffleit D., Jaschek C. 1982, The Bright Star Catalogue, 4th Revised Edition (Yale University Obs., New Haven)
Kato K., Sadakane K. 1999, Publ. Astron. Soc. Japan 51, 23
Kurucz R. L. 1993a, ATLAS9 Stellar Atmosphere Programs and 2km/s Grid (Kurucz CD-ROM No. 13), Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA
Kurucz R. L. 1993b, SYNTHE spectrum synthesis programs and line data (Kurucz CD-ROM No. 18), Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA
Kurucz R. L., Bell B. 1995, Kurucz CD-ROM No. 23, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA
Lopez-Garcia Z., Adelman S. J., Pintado O. I. 2001, A&A 367, 859
Mathys G. 1990, A&A 232, 151
Mathys G., Cowley C. R. 1992, A&A 253, 199
Mathys G., Lanz T. 1992, A&A 256, 169
Palmeri P., Quinet P., Fremat Y., Wyart J.-F., Biemont E., 2000, ApJ 129, 367
加藤賢一、定金晃三 1993a、大阪市立科学館研究報告 3、1
加藤賢一、定金晃三 1993b、大阪市立科学館研究報告 3、35
加藤賢一、定金晃三 1997、大阪市立科学館研究報告 7、1

表 1. HR 6958 = HD 170973 = MV Ser の基礎データ

赤経: 18h 32m 07.0s	赤緯: +03° 39' 35"	(2000 年分点)	1
実視等級: 6.43	B-V: -0.04	U-B: -0.26	1
b-y: -0.024	m ₁ : +0.176	c ₁ : +0.808	2
β: 2.764			2
スペクトル型: A0pSiCr			1
視線速度: -8V? km/s	自転速度 $v \sin i$: 15 km/s		1
変光周期: 0.945099 日	変光幅: 0.03 等 (U等級)		1

Reference 1 Hoffleit & Jashek (1982) 2 Hauck & Mermilliod (1990)

表 2. ELODIE の主な性能一覧

代表的な分解能 ($\lambda/\delta\lambda$)	42000
FWHM に相当するピクセル	1.9-2.45
波長域	3906-6811 Å
エシエルのオーダー数	67
1 オーダー当たりの高さ	3 ピクセル

表 3. ランタノイド系列元素のスペクトル線強度と元素量

Atom	λ (Å)	χ (eV)	log gf	EW	log ϵ	Atom	λ (Å)	χ (eV)	log gf	EW	log ϵ
La II	4238.39	0.403	-0.280	8.8	4.04	4460.23	0.478	0.320	30.1	5.02	
	4740.24	0.126	-0.940	28.4	5.37		4463.43	0.957	0.080	19.8	5.11
				<log ϵ >	4.71		4483.94	0.864	0.150	20.6	5.02
Ce II	4137.68	0.517	0.440	46.8	5.77	4523.06	0.517	-0.030	27.6	5.27	
	4137.68	0.516	0.246	46.8	5.95	4527.35	0.320	-0.110	24.4	5.12	
	4137.68	1.582	-2.350	46.8	9.13	4560.29	0.910	0.310	25.4	5.07	
	4144.50	0.478	-0.230	26.6	5.45	4560.90	0.684	-0.170	10.0	4.76	
	4152.00	1.251	-2.840	35.1	8.86	4562.38	0.478	0.230	31.5	5.15	
	4165.63	0.910	0.530	41.5	5.62	4606.44	1.244	-2.590	34.6	8.54	
	4185.40	0.417	-0.560	8.5	4.93	5187.45	1.212	0.150	71.4	7.31	
	4185.40	1.406	-1.340	8.5	6.25	5274.26	1.044	0.150	31.6	5.54	
	4214.03	0.609	-0.470	23.6	5.64	5601.25	1.784	-0.900	20.2	6.54	
	4248.68	0.684	0.140	24.8	5.11				<log ϵ >	6.04	
	4373.80	0.561	-0.360	12.8	5.04	Pr III	4284.50	1.549	-1.450	58.0	6.57
	4382.18	0.684	0.200	17.7	4.75		4437.61	0.000	-3.400	12.1	5.67
4429.29	1.088	0.330	36.2	5.62	4453.85		0.173	-3.570	15.3	6.09	

Atom	λ (Å)	χ (eV)	log gf	EW	log ϵ	Atom	λ (Å)	χ (eV)	log gf	EW	log ϵ
	4612.01	1.759	-1.260	28.3	5.17		5294.13	0.000	-0.650	92.0	5.87
	4642.26	0.960	-1.770	17.6	4.80		5677.18	0.631	-1.410	49.3	5.64
	4725.59	2.078	-1.320	28.2	5.39		5845.00	0.631	-1.130	57.1	5.69
	4775.30	1.947	-1.280	22.8	5.06		6145.05	0.296	-1.290	56.7	5.61
	4929.14	4.140	-2.320	23.5	7.28		6327.26	0.141	-1.360	55.2	5.53
	4964.58	0.173	-2.210	25.4	5.16		6690.86	0.461	-2.310	28.6	5.60
	5128.69	1.458	-2.170	63.5	7.43				<log ϵ >		5.57
	5165.68	2.464	-2.700	66.8	8.60						
	5299.99	0.359	-0.530	79.8	5.71	Eu II	6645.03	1.380	0.204	22.7	4.42
	5449.38	0.359	-2.190	29.8	5.43				<log ϵ >		4.42
	5462.18	0.173	-2.950	27.8	6.00						
	5765.30	1.549	-1.100	22.0	4.69	Gd II	5733.93	1.372	-0.893	9.1	5.18
	5844.45	1.244	-0.850	52.5	5.54				<log ϵ >		5.18
	5998.95	0.173	-1.800	44.0	5.52						
	6053.03	0.000	-1.840	58.0	6.06	Gd III	4177.33	----	----	19.9 ?	----
	6090.00	0.359	-0.820	60.0	5.32		4684.23	----	----	19.9 ?	----
	6160.24	0.173	-0.980	60.6	5.39		5091.73	----	----	41.1 ?	----
	6195.63	0.000	-1.040	63.0	5.44		5553.43	----	----	12.5 ?	----
	6361.66	0.173	-2.080	19.5	4.83						
	6500.08	1.722	-1.140	26.5	5.06	Dy II	4689.75	1.847	-0.714	6.9	5.37
	6501.54	1.458	-1.400	35.5	5.53				<log ϵ >		5.37
	6501.54	1.244	-1.880	35.5	5.89						
	6616.53	1.549	-1.720	15.8	5.09	Ho III	4298.20	1.072	-1.570	22.3	4.52
	6706.75	0.552	-1.640	31.9	5.12		4416.25	0.000	-1.550	29.1	4.25
	6775.45	1.244	-3.650	12.6	6.71		4494.51	0.000	-1.360	50.8	5.11
				<log ϵ >	5.92					<log ϵ >	4.68
Nd II	4156.15	0.182	0.200	67.9	7.14	Er III	4356.63	1.639	-1.460	31.1	5.12
	4156.15	0.000	-0.830	67.9	8.05		4422.41	0.000	-1.740	32.9	4.61
	4227.75	0.471	-0.560	27.8	6.18		4540.70	0.000	-2.540	18.1	4.74
	5130.60	1.304	0.570	33.8	5.72		4735.51	0.630	-1.580	20.7	4.24
	4706.58	0.000	-0.880	10.2	5.46		6488.43	1.337	-2.260	48.5	6.67
				<log ϵ >	5.59					<log ϵ >	5.46
Nd III	4483.40	0.631	-1.340	48.1	5.53						
	4567.86	0.000	-3.280	17.1	5.75						
	4781.14	0.141	-1.690	8.8	3.83						
	4927.49	0.461	-0.830	62.7	5.53						
	4962.68	0.000	-3.450	18.9	6.01						
	5085.00	0.296	-0.660	71.6	5.55						
	5102.44	0.631	-0.380	87.2	5.83						
	5126.99	0.296	-1.080	117.7	6.82						
	5286.76	0.631	-1.510	73.4	6.65						

表4. HR 6958 の元素量比較。LG(2001)は Lopez-Garcia et al. (2000)の結果、太陽値は Anders & Grevesse (1989)

元素	n	本研究	LG(2001)	Sun
C II	2	8.74	8.27	8.56
N I	1	8.59		8.05
O I	2	9.08		8.93
Ne I	1	9.89	---	8.09
Na I	1	7.43		6.33
Mg II	4	7.99	7.48	7.58
Al II	1	7.31		6.47
Si I	1	9.72	----	7.55
Si II	10	9.08	8.18	7.55
P II	1	6.36	----	5.45
S II	7	8.55	7.81	7.21
Cl II	3	8.34	---	5.5
Ca I	1	7.00	---	6.36
Ca II	1	8.09	7.09	6.36
Sc II	1	3.80	3.93	3.1
Ti II	66	7.53	6.89	4.99
Cr I	1	7.27	---	5.67
Cr II	64	7.92	7.2	5.67
Mn II	15	6.83	6.92	5.39
Fe I	49	9.24	8.83	7.5
Fe II	308	9.27	8.5	7.5
Fe III	5	9.32	9.09	7.5
Co II	2	6.94	---	4.92
Ni II	1	7.30	6.27	6.25
Sr II	2	6.04	6.26	2.9
Ba II	1	4.95	---	2.13
La II	2	4.71	---	1.22
Ce II	25	5.69	5.74	1.55
Pr III	28	5.73	---	0.71
Nd II	5	6.13	5.52	1.5
Nd III	15	5.70	---	1.5
Eu II	1	4.42	5.73	0.51
Gd II	1	5.18	5.31	1.12
Gd III	3	---		1.12
Dy II	1	5.37	5.59	1.1
Ho III	3	4.63	---	0.26
Er III	5	5.08	---	0.93

Nd III and Pr III lines at 5290Å

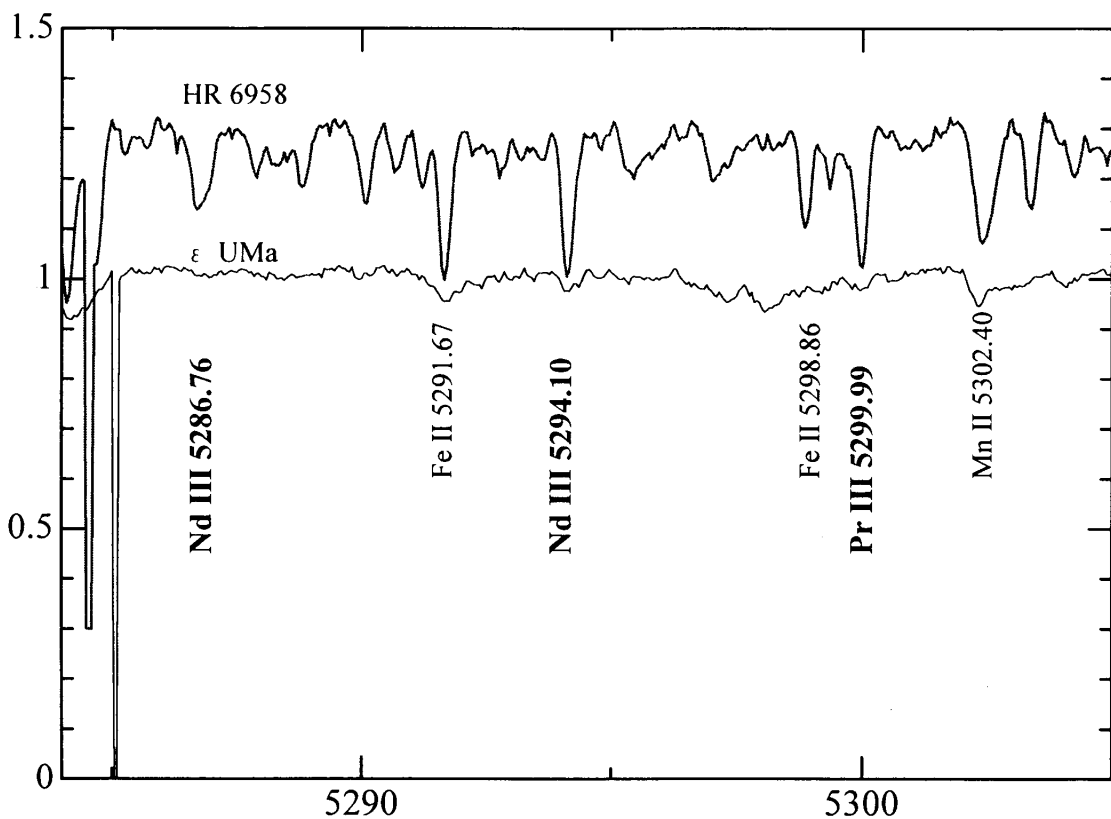


図 1. 5290 Å 付近に見える Nd III と Pr III による吸収線

Gd III line at 4177Å

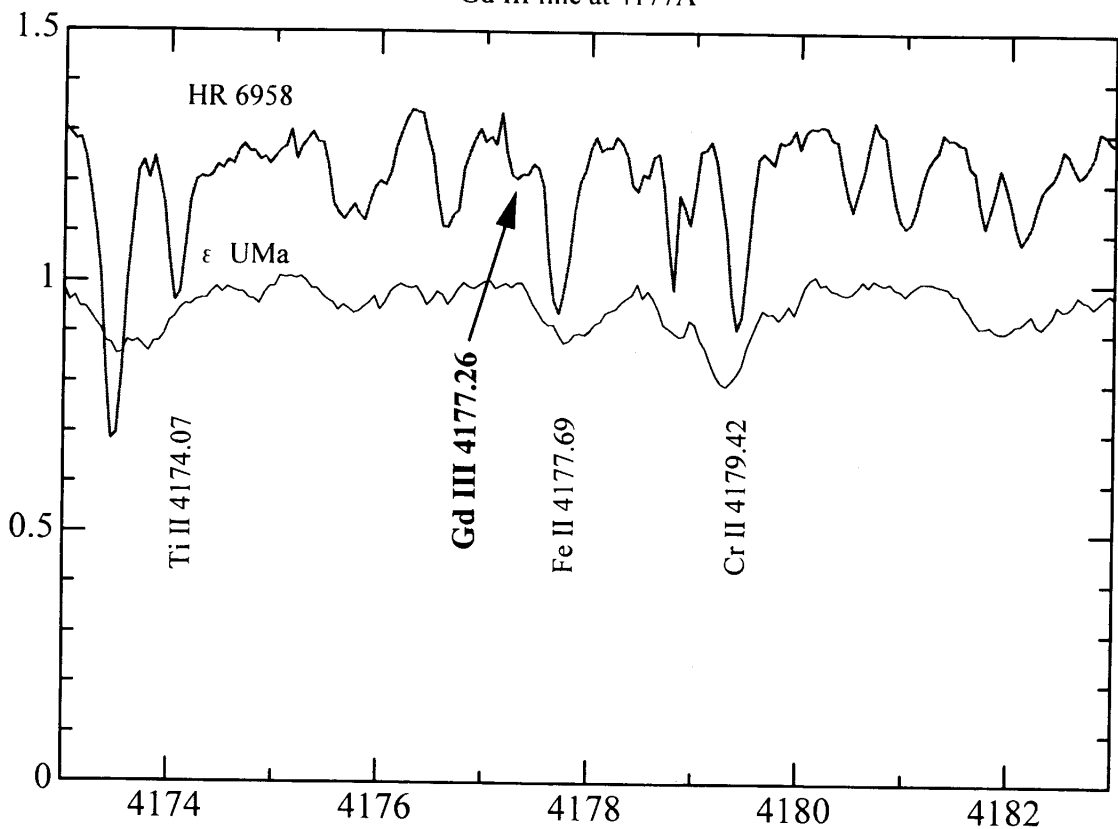


図 2. 4177 Å 付近に見える Gd III による吸収線

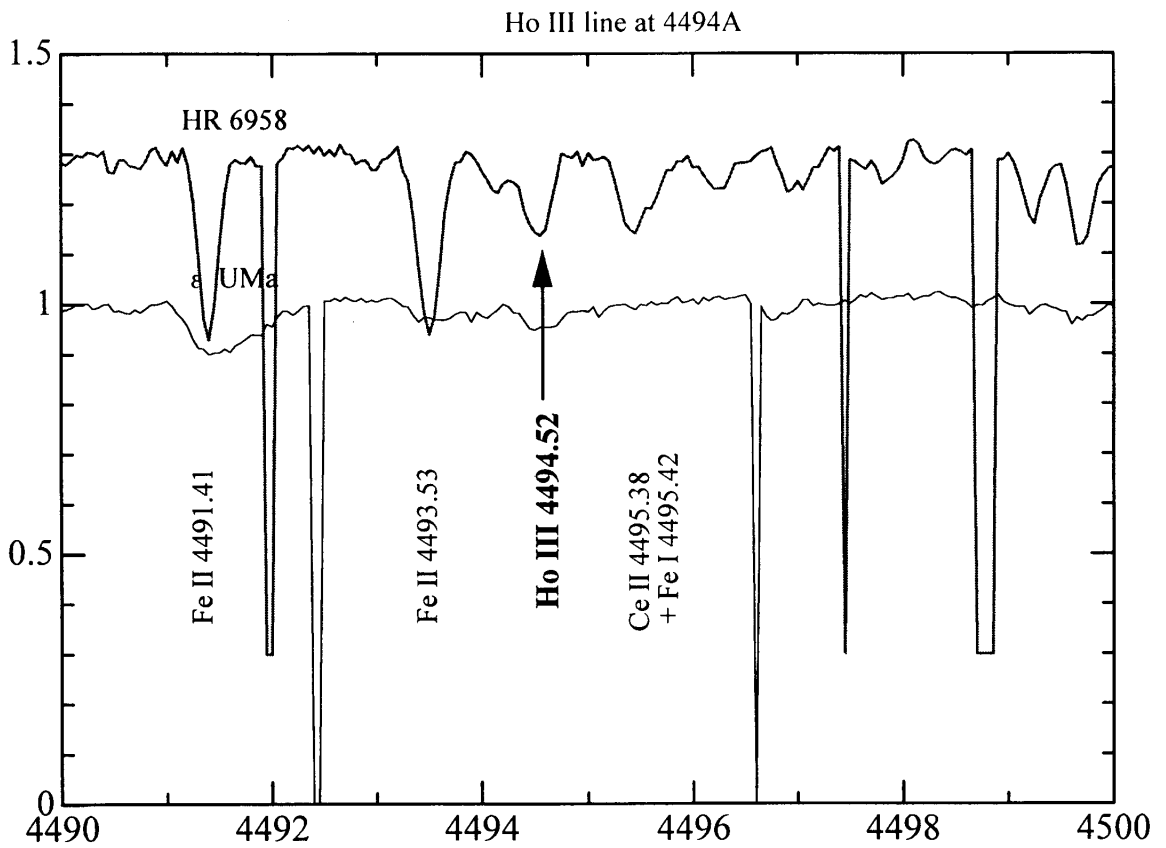


図3. 4494Å付近に見えるHoⅢによる吸収線

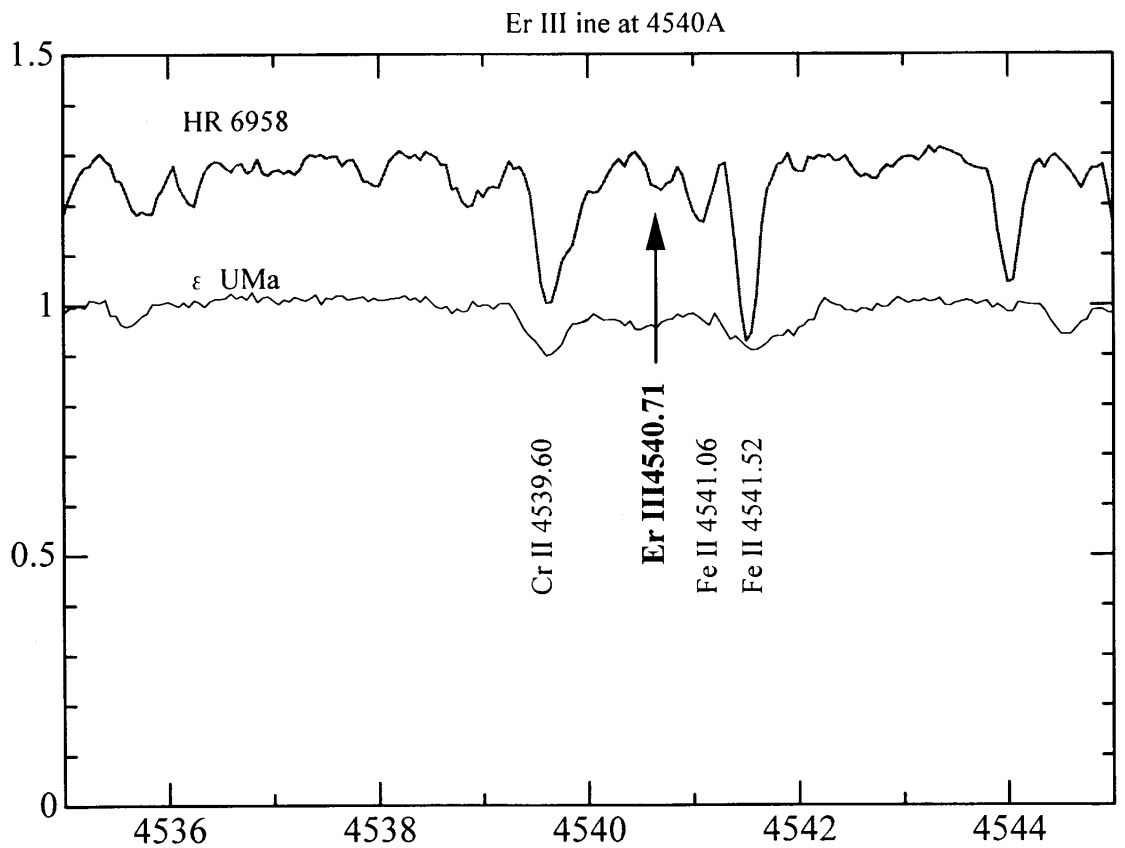


図4. 4540Å付近に見えるErⅢによる吸収線

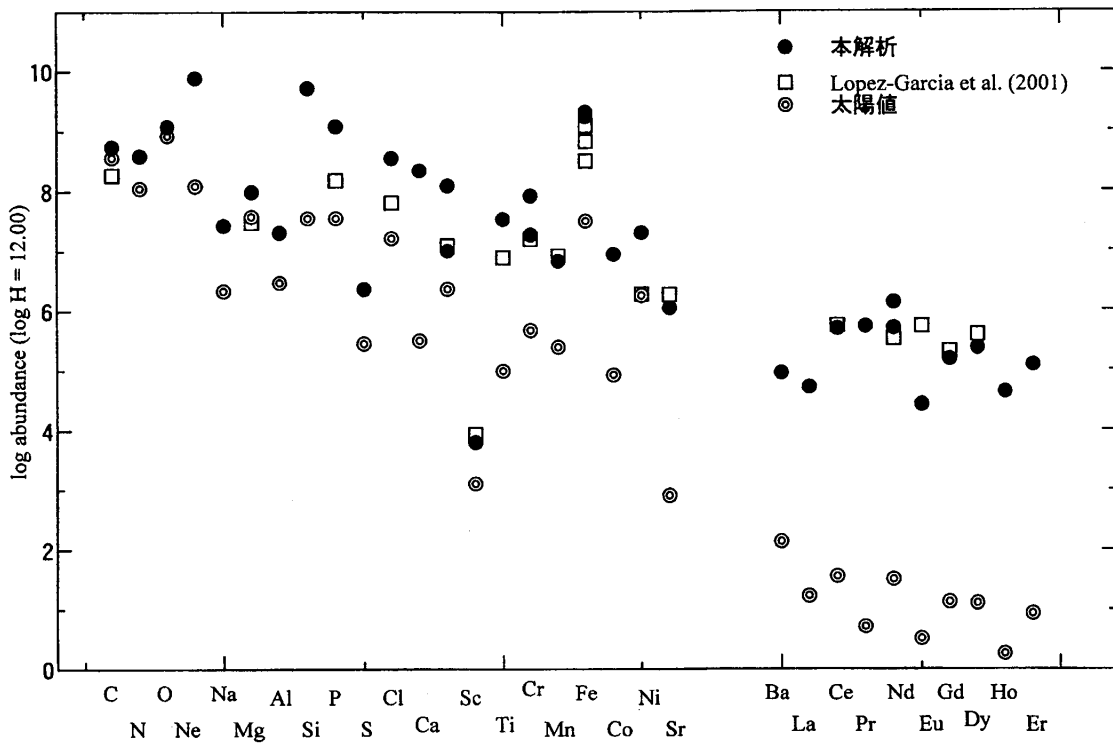


図5. HR 6958 の元素量分布。 10^{12} 個の水素に対する量を対数値で図示した。