

ゼーマン効果を用いた赤色輝線矮星の磁場強度測定

大橋 宏 幸

〈京都大学理学研究科宇宙物理学教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: ohashi@kusastro.kyoto-u.ac.jp

赤色輝線矮星では強磁場の存在が示唆されていますが、暗さと高分散分光観測が必要なことから、磁場強度の測定はあまりされていません。我々は HIDES でこれらの星の高波長分解能の観測を行い、ゼーマン効果を用いた磁場パラメーターの導出を試みました。その結果、赤色輝線矮星として典型的な磁場パラメーターを得、また 1 星については文献値と有意に異なる結果を得ました。晩期型星では測光やスペクトル線強度の長周期変動が報告されているものがありますが、我々の結果は磁場強度の長周期変動をとらえた可能性もあり、今後の追観測が期待されます。

1. 赤色輝線矮星とフレア星

赤色輝線矮星（dMe 星）と呼ばれる一群の天体があります。これはスペクトル型が M 型の主系列星のうち、カルシウム H K 線や水素バルマー線などに輝線を示す星を指します。これらの輝線は主に彩層で形成されると考えられており、彩層輝線と呼ばれています。

一方で、フレア星と呼ばれる一群の天体があります。フレア星とは、数十秒から数分に及ぶ急激な増光とそれに続く数分から数十分に及ぶ緩やかな減光からなるフレア現象を示す星を指し、ヘルツシュプリングによる発見¹⁾以来、晩期型星を中心に多数見つかっています。フレアの増光幅は V バンドでは 1 等級程度で、これらの星の観測的な特徴としては、静穏時に彩層輝線が見られるものが多いこと、彩層輝線の強度と X 線の強度に線形的な相関が見られること²⁾、またフレア時には短波長側ほどその増光が大きいこと、といったものがありますが、スペクトル分類上の特徴としては dMe 星であるものが多いということが挙げられます。つまり dMe 星とフレア星は非常に近い関係にあるということです。

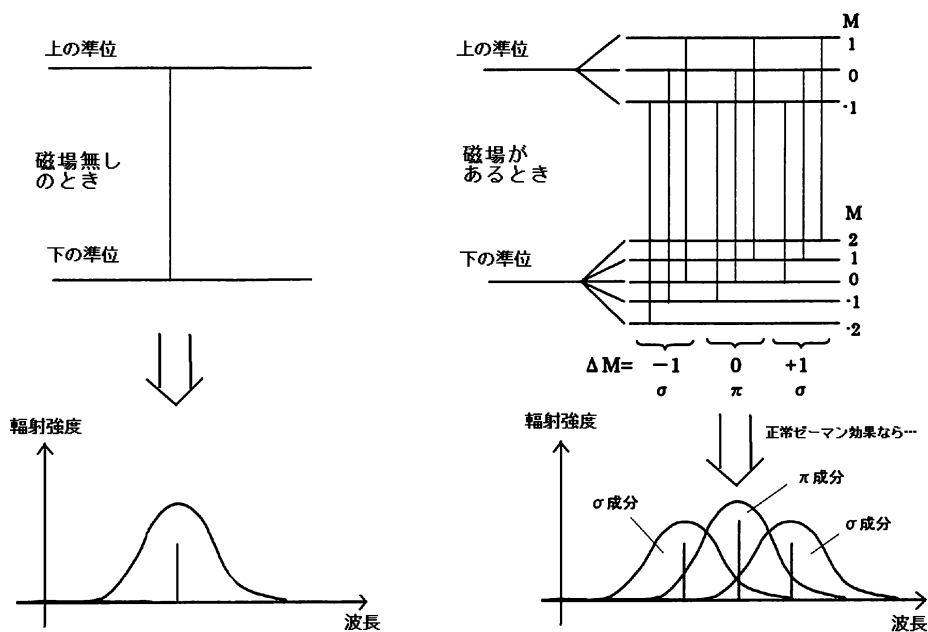
では dMe 星とフレア星を結ぶ鍵は何か？ フレアとは何か？ これらを考えるためには太陽のフレアが大きなヒントになります。太陽は地球から最も近い恒星という好条件から空間的にも波長的にも非常に精密な観測が可能であるため、太陽フレアについても詳細な研究がなされており、太陽フレアはコロナ中で磁気エネルギーが解放される現象であるという解釈がほぼ確立しています。フレアが磁気的な活動領域で発生することや、太陽周縁部で発生するフレアでは磁気ループの形状がはっきりと見えることなどがその裏づけといえます。ここで太陽フレアと恒星フレアを比較してみると、エネルギー的には恒星フレアのほうが数桁程度大きいのですが、実は先に挙げた恒星フレアの観測的特徴は太陽フレアにおいても成り立っています。また dMe 星には自転速度が大きい (>10 km/s) 星が多いこと、スペクトル型がより晩期になるほどその数が増えることが知られていますが、このような星では対流層が発達して強いダイナモが働き、強い磁場が生成されると考えられています。これらのことは恒星フレアが太陽フレアと同様に、磁気エネルギーの解放現象と考えることができることを示唆しており、dMe 星やフレア

星の大気では磁場が重要な役割を果たしていることがうかがわれます。

2. フレアと磁場

さて、フレアのエネルギー源が磁気エネルギーであるとすれば、フレアを起こす星には強磁場の存在が不可欠となります。磁場の存在を間接的に示唆するものとしては強い輝線の存在、彩層およびコロナの存在、対流層の発達、などがありますが、磁場を定量的に測定した星の数はまだ多くなく、特に dMe 星では数個程度と非常に少ないのが現状です。これは dMe 星が暗いために十分な波長分解能と S/N が得られない、自転速度が大きい星が多いため磁場強度の測定が難しい、といった観測上と解析上の困難があるためです。で

すが dMe 星の磁場活動性と自転速度の大きさの間には相関があることが指摘されており³⁾、自転速度の大きい星の磁場強度の測定は大きな意味を持っていると思われます。dMe 星の典型的な磁場強度は数 kG 程度と考えられるため⁴⁾、磁場を検出するためには 8,000 Å 付近で 0.1 Å 程度を分解する必要があり（波長分解能～80,000）、また S/N ～100 程度の高品質のデータが必要です。そこで我々は、dMe 星の中でも明るい星に関しては 188 cm 望遠鏡/HIDES ならばここまでの精度を要求する観測を達成することができると考え、dMe 星の観測とその磁場強度の測定に挑戦しました。この観測のモチベーションとしては、これらの星で磁場強度の測定が可能であることを確認し、より大規模な観測計画につなげていこうというもので



$$\text{線強度比} \quad \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma) : \frac{1}{2} \sin^2 \gamma : \frac{1}{4}(1 + \cos^2 \gamma)$$

図 1 ゼーマン効果の模式的説明。M は磁気量子数、 γ は磁場の向きと視線方向のなす角である。図の左側は磁場がないときの電子のエネルギー準位間の遷移と線輪郭を、右側は磁場があるときのそれらを表している。磁場により電子のエネルギー準位が分岐すること、磁気量子数については $\Delta M = 0, \pm 1$ の 3 通りが許されているため、電子の遷移のパターンが増え、本来 1 本である線スペクトルが複数本に分岐する。観測される線輪郭は π 成分と σ 成分を重ね合わせたものになる。

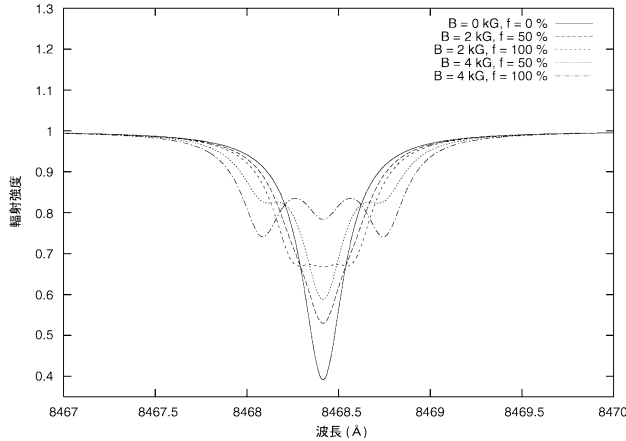


図 2 ゼーマン効果による線輪郭の変化の例。 B は磁場強度を、 f は面積占有率を表す。 $B=0$ （磁場なし）の線輪郭に適切な磁場強度、面積占有率を与えることによって線輪郭を計算した。線輪郭は磁場強度だけでなく面積占有率によっても大きく変化の様子がわかる。

すが、本稿ではその結果を簡単に報告しようと思
います。

ちなみにフレア星の研究は 1960 年代から当時の岡山天体物理観測所のスタッフの方々などにより測光、分光の双方において観測されてきたという歴史があり、岡山の伝統ある観測対象でもあるのです。そのフレア星の観測に今度は HIDES で挑むことができたのは不思議な因縁と、伝統の一角を担えるという嬉しさを感じます。

3. ゼーマン効果

磁場の研究に必須ともいえるものがゼーマン効果です。ゼーマン効果とは、磁場中に存在する原子から生じた輝線・吸収線のスペクトルが分岐して観測される現象のことをいい、天体の磁場観測に古くから用いられています。この現象は、通常は磁気量子数について縮退している電子のエネルギー準位が、磁場中では縮退が解け、エネルギー準位が等間隔に分岐するという量子力学的な効果によって説明することができます。図 1 はこれを模式的に表したものです。

分岐の本数は各スペクトル線につきそれぞれ決まっており、通常数本から数十本の分岐を示しますが（分岐しないスペクトル線もある！）、3 本に

分岐する場合を正常ゼーマン効果と呼び、観測される波長が本来の波長とずれている成分を σ 成分、ずれていない成分を π 成分と呼びます。ここで分岐の幅は波長の 2 乗、磁場強度、およびスペクトル線に固有の量（ランダウの g 因子）にそれぞれ比例しており、また π 成分と σ 成分の強度比は磁場の向きと視線方向のなす角で決まっているため、実際に観測されるスペクトルは恒星表面の各部分から出た異なる線輪郭を持つ放射を重ね合わせたものになります。つまり観測される線輪郭は磁場の強度、向き、分布、磁氣的領域の占める割合（面積占有率）によって大きく変化します（図 2）。ですから線輪郭を精密に知ることができれば、恒星表面の磁場強度や、面積占有率を逆に知ることができるのです。

4. 観測と解析

今回の観測では、暗い星が多い dMe 星の中でも比較的明るい GJ494（dM1.5e, $m_V=9.8$ 等級）、GJ803（dM2.5e, $m_V=8.6$ 等級）、GJ896A（dM4e, $m_V=10.4$ 等級）の 3 星を観測し、これらの星の磁場強度を測定しました。観測波長域は $8,000 \text{ \AA}$ 付近としましたが、これはゼーマン効果の分岐幅が波長の 2 乗に比例するため、長い波長で観測した

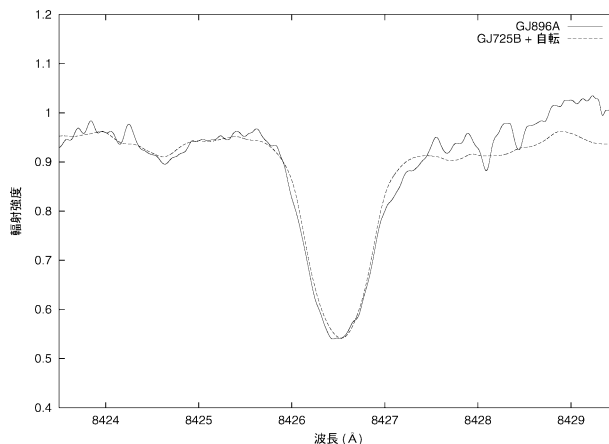


図 3 磁場感应性の低いスペクトル線（中性チタン 8683.0 Å）で dMe 星 (GJ896A) と比較星 (GJ725B) の線輪郭を比べる。このスペクトル線は磁場による線輪郭の拡がり小さいため、自転速度の測定に適している。この図ではすでに比較星の線輪郭は適当な自転速度を与えて拡げてあるが、dMe 星の線輪郭と良く一致している様子がわかる。

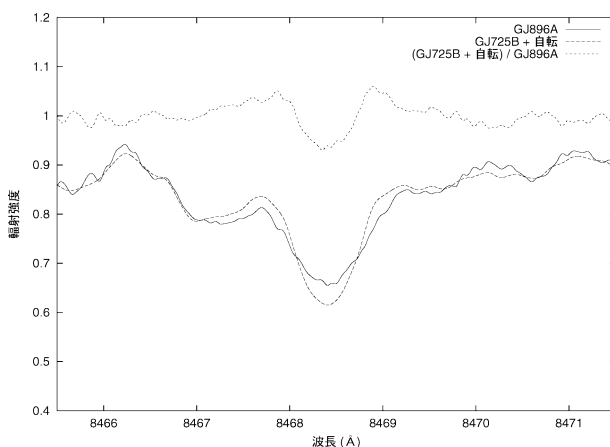


図 4 磁場感应性の高いスペクトル線（中性鉄 8468.4 Å）で dMe 星 (GJ896A) と比較星 (GJ725B) の線輪郭を比べる。このスペクトル線は磁場による線輪郭の拡がり大きいので、磁場強度と面積占有率の測定に適している。比較星の線輪郭は図 3 のものと同じ自転速度を与えて拡げてある。ここでは dMe 星と比較星の線輪郭の比も示しているが、dMe 星の線輪郭はスペクトル線の中心部 (8468.4 Å 付近) が浅くなって、逆にウイング部 (8468.0 Å, 8469.0 Å 付近) が深くなっていることが割り算の結果からわかる。これは dMe 星の線輪郭がゼーマン効果により広がっているためであり、dMe 星に十分な強さの磁場と磁氣的領域が存在することがわかる。

ほうが有利だからです。総積分時間はそれぞれの星について 3~5 時間程度とかなりの長時間が必要でしたが、いずれについても $S/N \sim 100$ 程度の、十分解析に耐えうるデータが得られました。

我々が観測した 3 星のうち、GJ494, GJ803 については過去に磁場強度の測定がなされてお

り^{4), 5)}、文献値との比較のために観測しました。さて、観測された線輪郭から磁場強度を求めるためには、まず基準となる線輪郭を用意する必要があります。つまり基準となる線輪郭を、適当な自転速度と磁場に関するパラメーターを与えることによって広げ、観測された線輪郭を再現すること

によって磁場強度と面積占有率を求めめるのです。基準となる線輪郭の選び方はいくつかの選択肢が考えられますが、少なくとも磁場の影響がない、あるいは十分小さいことが求められます。そこで我々は、スペクトル型が近く、全輻射に対するX線の輻射強度比が小さい星の線輪郭を用いました。後者の条件を挙げたのは、X線強度が強い星では磁場活動性が低いと考えられるためです。

さて実際の解析の段ではスペクトル線の自転による拡がりや、磁場による拡がりをうまく分離する必要があります。都合が良いことに、自転の効果はすべてのスペクトルに対して等しく効くのにに対し、ゼーマン効果は異なるスペクトルに対しては効き方が異なるという性質があります。ですからまず磁場の影響を受けにくい(g 因子の小さい)スペクトル線の線輪郭から自転速度を求め、その後影響を受けやすい線輪郭から磁場を求めるという手法をとりました。図3、図4はdMe星と比較星のスペクトルの一例を表しています。スペクトルには晩期型星らしく弱い分子線のブレンドが多数見られるため解析には困難とある程度の不定性を伴いましたが、例えば図4では明らかにゼーマン効果＝磁場による線輪郭の拡がりが見てとれます。

磁場に関しては(1)磁場は恒星表面に対して垂直である。(2)磁氣的領域は恒星表面に均等に分布している。(3)磁氣的領域の磁場強度は一定値をとる、すなわち恒星表面の磁場強度はゼロまたはある値のいずれかとする。といった三つの仮定をしましたが、その結果これらの星に対し、磁場強度が $2.2\sim 3.7\text{ kG}$ ($\pm 0.4\sim 0.8\text{ kG}$)、面積占有率が $65\sim 75\%$ ($\pm 20\sim 25\%$)という値を得ました。この結果に太陽のアナロジーを当てはめると、これらの星においては実に表面の $3/4$ 程度が黒点で覆われていることになるのです。

5. 磁場の長周期変動

今回の観測は大規模サーベイに向けたテストケースという位置づけになってはいますが、一つ興味深い結果が見られました。それは、GJ803における磁場強度の変化です。今回磁場を測定した星のうち2星については過去にも磁場強度の測定が行われておりますが、GJ803については我々が得た結果と大きく異なっています(我々の結果：磁場強度 $=2.2\pm 0.4\text{ kG}$ 、面積占有率 $=75\pm 20\%$ に対し、文献値：磁場強度 $=4.2\text{ kG}$ 、面積占有率 $=55\%$)^{4),5)}。はじめは解析手法の違いなどによる系統的な誤差を疑いました。ですがもし系統的な誤差ならば、すべての星に同じような誤差が生じているはずで、ですがもう1星については測定結果は誤差の範囲内で一致していました。

我々はこのような誤差が生じた可能性の一つとして、磁場強度の長周期にわたる変動を考えています。太陽では磁場活動の長周期(11年周期)変動が古くから知られていますが、dMe星を含む晩期型星についてもその等級や輝線スペクトル強度が長周期で変化することが報告されています^{6),7)}。(これについては、本特集の竹田氏の記事にも書かれています。)

そこで彩層輝線の強度とX線強度に相関があることと、X線強度が磁場の指標になることを考えると、これらの星で磁場の長周期にわたる変動が起きている可能性は十分にあるわけです。磁場変動は周期的なのか、また太陽のように輻射の変動と相関があるのか、解明にはさらなる観測が必要であり、今後への期待が高まります。

6. 今後の展望

この研究の最初の動機は、まだまだ観測が少ないdMe星の磁場強度をサーベイ的に行うことでした。しかしこの研究には高いS/N(100程度)の観測が必要で、これを満たす観測は188 cm望遠鏡をもってしても容易ではありませんでした。しか

しこれは集光力の問題であり、HIDESの高分散分光能力については申し分ない結果が得られたと考えます。今後は当初の目的であったサンプル数の増加、また今回の結果により示唆された磁場の長周期変動の解明に向け、すばる/HDSをはじめとする大口径望遠鏡への挑戦や、計画の進みつつある岡山中口径望遠鏡での観測が期待されます。

謝 辞

なお本稿は、筆者の修士論文をもとに作成したものです。ご指導いただいた京都大学・宇宙物理学教室の平田龍幸先生および京都大学・飛騨天文台の野上大作先生、共同研究者としてご助言や観測でのサポートをいただいた岡山天体物理観測所の増田盛治氏にこの場をお借りしてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Hertzprung E., 1924, BAN 2, 87
- 2) Butler C. J., Rodono M., Foing B. H., 1988, A&A 206, L1
- 3) Delfosse X., Forveille T., Perrier C., Mayor M., 1998, A&A 331, 581
- 4) Saar S. H., 1996, in Magnetodynamic Phenomena in the Solar Atmosphere, eds. Uchida Y., Kosugi T., Hudson H. S. (Kluwer, Dordrecht) p. 367
- 5) Saar S. H., 1994, in IAU Symp. 154, Infrared solar physics, eds. Rabin D. M., Jefferies J. T., Lindsey C. (Kluwer, Dordrecht) p. 493

- 6) Baliunas S. L., Vaughan A. H., 1985, ARA&A 23, 379
- 7) Bondar N. I., 1995, A&AS 111, 259

Measurement of Magnetic Fields in dMe Stars Using the Zeeman Effect

Hiroyuki OHASHI

*Department of Astronomy, Faculty of Science,
Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502*

Abstract: While it is suggested that dMe stars have strong magnetic fields, there are only few accurate measurements of the magnetic fields because of faintness of these stars and requirement of high-resolution spectroscopy. We carried out high-resolution spectroscopic observations using HIDES, and measured the strength of the magnetic fields in three dMe stars. As a result, we have obtained typical values of the field strength and the filling factor in these stars. One of these stars was revealed to have parameters inconsistent with those previously measured, which suggests a possibility of long-term variability of the magnetic field strength. We expect future continuous observations to reveal the stellar magnetic variability in the long term.