

シリーズ

「宇宙と原子」

第八回 原子も歪む超強磁場

—地球磁場の強さが一兆倍になったら—

市川行和

yukitikawa@nifty.com

平成 25 年 4 月 24 日原稿受付

宇宙にはいたるところに磁場がある。ただしその強度は平均的には弱い(太陽表面で 10^4 T , 銀河系全体で 10^{-10} T 程度)。一方宇宙の大部分はプラズマ状態にある。このプラズマと磁場の絡み合いがさまざまな構造を作り出し、特異な現象(たとえば、太陽フレア)を引き起こす。

磁場を含んだプラズマは第ゼロ近似では理想的磁気流体力学に従う。すなわち磁場はプラズマに凍結しており、プラズマが動けば磁場も動き、その逆もある。プラズマ状態にあるガスが重力収縮すると磁場も収縮しその強さが増す。磁場をもつ星が収縮すると、磁束の保存からその磁場の強さは星の半径の二乗に逆比例して強くなる。軽い(太陽質量程度の)星は進化の最終段階で白色矮星になるが、その半径は地球(6.38×10^3 km)程度である。重い星は超新星爆発を起こして中性子星となり、その半径は 10 km とされている。太陽(半径 6.96×10^5 km)の平均磁場を 10^4 T 程度とすると、白色矮星、中性子星それぞれは 1 T, 10^6 T の平均磁場をもつことになる。太陽でも黒点では 10^1 T 程度の強い磁場が存在し、白色矮星では 10^5 T , 中性子星では 10^8 T の磁場が存在することがすでに確認されている。地球磁場は 10^{-5} T であるから、その 1-10 兆倍の磁場が宇宙には存在するのである。

以上のことからわかるように磁場中の原子の振る舞いを知ることは天体物理にとって重要なことである [1]。磁場が弱いときはいわゆるゼーマン効果でスペクトル線は分裂する。太陽黒点のスペクトルの詳しい観測からゼーマン効果を見つけ、太陽に磁場があるのがわかったのが 1908 年であり、これが宇宙に磁場があることが分かった

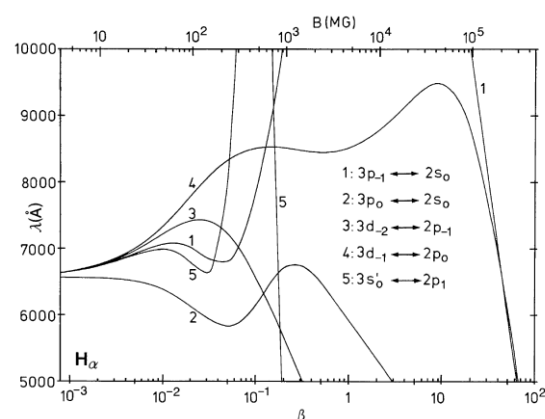


図 1: 水素 $H\alpha$ 線の磁場による分裂の様子の一部。各線に対応する遷移は表中に示してある。横軸は磁場の強さで上部の目盛は絶対値 ($1 \text{ MG} = 10^2 \text{ T}$) , 下部の目盛は $2 B_{\text{au}}$ を単位とする相対値である。(文献 [3] より ESO の許可を得て転載)

最初である。

一般に磁場中の電子は磁力線に巻きついてサイクロトロン運動をする。その回転の振動数は

$$\omega_c = e B / m_e$$

で与えられる。ここで e および m_e はそれぞれ電子の電荷の絶対値および質量である。量子論では磁場に垂直な平面内の運動が量子化され離散的なエネルギーを持つようになり(ランダウ準位), その準位間のエネルギー差は

$$E_c = \hbar \omega_c$$

となる。これは磁場中の電子がもつエネルギーの目安をあたえる。原子内の電子に原子核がおおよぼスクロン相互作用のエネルギーは 1 原子単位(27.1 eV)である。そこで E_c が 1 原子単位程度になると磁場の力と核からの力とが同程度にな

り、それ以上に磁場が強くなると磁場の効果が勝る。 E_c が 1 原子単位となるときの磁場の強さは

$$B_{\text{au}} = 2.3505 \times 10^5 \text{ T}$$

であり、磁場(磁束密度)の原子単位として知られている。そこでこの値よりも磁場が強ければ、原子内電子の運動は大きくゆがむ。

強い磁場の中での原子の構造については詳しい計算がある。磁場の効果は主に以下の 2 点である。

- (1) 原子内電子の束縛が強くなる
- (2) 原子は磁力線の方に細長く伸びた構造をとる

水素原子についての Kravchenko ら [2] の計算によると $B = B_{\text{au}}$ のときに、電子の束縛エネルギー(磁場は z 方向にかかっている。また、下記のようにスピン依存性は無視する)は基底状態 $1s_0$ ($n=1, \ell=0, m=0$) で 0.831 au ($B=0$ では 0.5 au), 励起状態 $2s_0$ ($n=2, \ell=0, m=0$), $2p_0$ ($n=2, \ell=1, m=0$), $2p_{-1}$ ($n=2, \ell=1, m=-1$) でそれぞれ 0.160 au, 0.260 au, 0.457 au (いずれも $B=0$ では 0.125 au)である。なお、 $2p_1$ ($n=2, \ell=1, m=1$) はこのような強磁場では束縛状態とならない。文献 [2] ではスピンを無視した計算を行っているが、磁場中の電子はスピンの z 成分に比例した磁気モーメントをもちそれと磁場との相互作用からくるエネルギーをもつ。しかしスピンの z 成分は(非相対論の範囲では)核のクーロン力では変化しないのでこのエネルギーはすべての準位に加わる定数となる。以下の議論では遷移の波長を問題にするのでこの定数は影響しない。

以上のようにエネルギー準位は磁気量子数に強く依存するので、スペクトル線は複雑に分裂する。たとえば $H\alpha$ 線($n=3 \rightarrow 2$ に伴う発光。磁場がないときの波長は 6565 Å)は 15 本に分かれる。そのうちの 5 本について磁場による波長の変化を示したのが図 1 である [3]。この 5 本は磁場の強さの関数として極値を持つ。その極値の近くでは磁場が変わっても発光線の波長はあまり変化しない。天体の磁場は決して一様ではなく、時間的にも変動している。それに対応して出てくる光のスペクトルも変動する。しかしこの極値の付近では磁場の変化に対して鈍感なので、観測にかかりやすい。なお文献 [3] には発光線の強度も

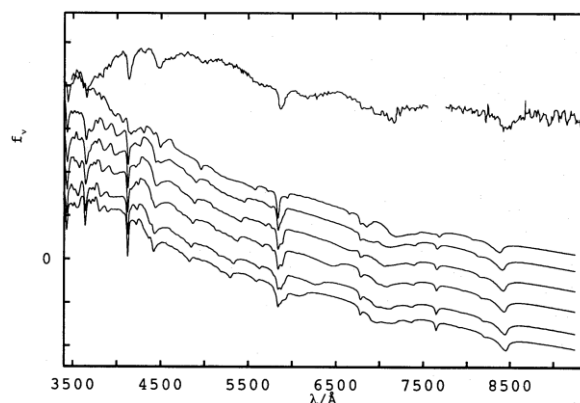


図2: 白色矮星 Grw+70° 8247 のスペクトル。1 番上の曲線は観測値、以下はモデル計算で上から 2.80, 3.10, 3.20, 3.30, 3.40, 3.50 $\times 10^4$ T の磁場がある場合である。縦軸は光の強度の相対値(線形目盛)で、0 は観測値に対応し、計算値は見やすいようにゼロ点をずらして描いてある。(文献 [5] より ESO の許可を得て転載)

計算してある。

白色矮星の分光観測は古くから行われている。Wickramasinghe と Ferrario [4] は 2000 年にそのまとめを報告しているが、その中には 65 個の白色矮星が記載されている。それらのもつ磁場は $3 \times 10^0 - 1 \times 10^5$ T にわたっている。一例として図 2 に Grw+70° 8247 という番号がついている白色矮星のスペクトルをモデル計算と比較して示す [5]。モデルは水素大気を仮定し、磁場の強さをいろいろに変えて計算したものである。連続スペクトルで決まる全体の形はともかくとして、線スペクトル(大気による吸収に相当する)の構造はモデル計算で良く再現されている。たとえば、5900Å 付近の強い吸収線は図 1 の $3p_0 - 2s_0$ に相当するものである。最も観測に合う計算から磁場の強さは 3.20×10^4 T とされた。

図2でスペクトルの全体の形がモデルと合わないのは磁場中における水素原子の光電離の計算が困難なためとされている。強い磁場中に置かれた水素原子の連続状態の波動関数を決めるのは大変むずかしい。 $r \rightarrow \infty$ における電子は強い磁場の中の自由電子に近づく。すなわちそこでは磁場に巻きついた状態を表すいわゆる Landau 準位の影響を受ける。その影響は電子のエネルギーによって微妙に異なり、光電離断

面積は複雑になる。現在では詳しい計算がなされているが、白色矮星のスペクトル解析に応用された例は見当たらない [6].

中性子星の中には普通の星と組んで連星系をなしているものがある。相手の星の周囲にあるガスが中性子星の強い重力に引かれてはげしく落ち込み、ガス粒子同士の摩擦で高温になると X 線を発生する。強い X 線を出している星の多くはこれである。X 線のエネルギーが、中性子星の磁場に巻きついている電子のサイクロトロンエネルギーに一致すると、共鳴して X 線は吸収される。宇宙からやってくる X 線のスペクトルにそのような共鳴による吸収(サイクロトロン吸収)が観測されることがある [7]。共鳴が観測される波長は一つではなく高調波が観測されることもある。それはこの吸収がサイクロトロン共鳴によるものであることの証拠になる。なお、これまでにサイクロトロン共鳴の観測されている磁場の強さはおおむね 10^8 T の程度である。

参考文献

- [1] A.R.P. Rau, *Astronomy-Inspired Atomic and Molecular Physics* (Kluwer 2002) Chapter 4.
- [2] Yu.P. Kravchenko, M.A. Liberman and B. Johansson, *Phys. Rev. A* **54**, 287 (1996).
- [3] G. Wunner et al., *Astron. Astrophys.* **149**, 102 (1985).
- [4] D.T. Wickramasinghe and L. Ferrario, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **112**, 873 (2000).
- [5] S. Jordan, *Astron. Astrophys.* **265**, 570 (1992).
- [6] L.B. Zhao and P.C. Stancil, *Phys. Rev. A* **74**, 055401 (2006).
- [7] 最近の例では T. Yamamoto et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, S751 (2011).