

## 紫外線でみた水銀-マンガン星

定 金 晃 三\*

### 1. 水銀-マンガン星とは

夜空をかざる星々の中に水銀-マンガン星という妙な名前をもつ一群の星があります。これらの星はB型星の中で比較的低温のグループ(B5型からB9型の間)に属し、主系列に近いところにあります。当初はこれらの星のスペクトルの中に一回電離したマンガン(Mn II)の吸収線が異常に強いことが注目されていました。マンガンの吸収線が強いことは、その星の表面の大気の中にマンガンという元素が異常に多く含まれていると考えられるからです。またこれらの星のスペクトルには、波長3984オングストロームに他の星で観測されたことのない不思議な吸収線があって問題になっていました。後にこの吸収線は一回電離した水銀(Hg II)によることが同定され、それ以来マンガンと水銀の吸収線が異常に強い星々を水銀-マンガン星(Hg-Mn Stars)と呼ぶようになりました。さて、Hg-Mn星には次のような性質が知られています。

(1) 主系列の帯の中でB5型からB9型までの間の星の約15%はHg-Mn星の特徴を示す。15%という頻度はHg-Mn星が極めて例外的なものではないことを示しています。

(2) 自転速度がおそい。星の自転速度はスペクトルの中の吸収線の幅から測定されます。星の自転軸の向きは直接知ることはできませんから、測定できるのは、星の赤道自転速度と視線と自転軸のなす角*i*の正弦( $\sin i$ )の積( $v \times \sin i$ )ということになります。多くのHg-Mn星の $v \times \sin i$ の平均値は $30 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 位で、ふつうの晩期B型星での平均値 $150 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ に比べて格段に小さな値です。Hg-Mn星の出現頻度は自転速度と関係があつて、 $v \times \sin i$ の値が $40 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下の晩期B型星のうち半分近くにもなります。一方、 $v \times \sin i$ が $100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ をこえるHg-Mn星はほとんど知られていません。そこでHg-Mn星ができる原因と自転速度とは密接な関係があると考えられています。

(3) 強い磁場が観測されない。B型星の中には数千ガウスから数十千ガウスに及ぶ強い磁場を示し、同時にケイ素などの吸収線が異常な一群の星が知られています(磁変星)。現在までのところ、Hg-Mn星で百ガウス以上の磁場は観測されていません。

(4) 化学組成の面では、マンガン(Mn)と水銀(Hg)が太陽の化学組成と比べて大幅に多いほか、チタン(Ti)、ガリウム(Ga)、イットリウム(Y)などが多いことが知られています。クロム(Cr)や鉄(Fe)の量は太陽とほぼ同じで、ヘリウム(He)やマグネシウム(Mg)は不足している星があることも知られています。今までに化学組成が詳しく研究されたHg-Mn星は約20個位しかありません。しかも、地上観測で可視光線のスペクトル分析からは、いくら頑張っても元素の周期律表にのっている90種以上のうち、せいぜい10ないし15種類の存在量しか分かりません。地上からは観測できない紫外線領域(波長3000オングストローム以下)では、今まで観測されたことのない元素の吸収線が研究できる可能性があります。その中から何か思いがけない発見があるかもしれないと考えて、今から6年ほど前から恒星の紫外線スペクトルの研究をはじめました。本稿ではHg-Mn星についてのいくつかの結果を紹介しします。

### 2. 化学組成の異常はなぜおこるか

新しい観測事実の説明の前に、Hg-Mn星のような星の表面の化学組成の異常はなぜおこるかという問題が、現在どのように考えられているかを簡単に紹介しておきます。1970年にミショーという人が星の大気中での元素の拡散過程によって化学組成の異常が説明できるという説を発表し、その考えが現在まで主流を占めています。ミショーの説は次のようなものです。自転のおそいB型星やA型星の表面近くは、太陽のような対流層がないことから、大気の状態は安定で静かであると考えられます。そのような状態では、大部分が水素でできている星の大気中に浮かぶ不純物としての重い元素は、重力のために除々に大気の底に沈んでゆきます。一方、星の大気の中では、下から上へと光が流れていて、その光は大気中の原子やイオンと相互作用をします。いま、ある原子又はイオンが、大気中での光の流れの強い波長に強い吸収線をもてば、その原子又はイオンは光の圧力のため上向きの力を受けます。もし、この上向きの力が重力より大きければ、その元素は大気の底に沈むかわりに表面に集中し、化学組成の異常として観測されるようになります。この考え方では、ある元素が浮かぶか沈むかは、その元素の原子又はイオンが適当な波長に吸収をもつかどうかで決まります。ミショーたちはこの考え方に基いて、ヘリウム、カルシウム、マンガン、水銀などの予想

\* 大阪教育大 Kozo Sadakane: Mercury-Manganese Stars Observed in the Ultraviolet Region

されるふるまいを精力的に計算しました。その結果、ある元素の異常が特定の温度はんいの星にしか見られない等の観測事実を説明するのに成功しました。

3. 紫外線での高分散分光観測

Hg-Mn 星などの化学組成の研究を紫外線領域で行うには、地上の大型望遠鏡を使ってするのと同じ程度の波長分解能をもった分光観測が必要です。ところが、紫外線は地球大気にじゃまされて地上に達しないので、観測は大気圏外から行わなくてはなりません。1978年に天体の紫外線分光観測を行うための人工衛星 IUE (International Ultraviolet Explorer) が打ち上げられました。(表紙参照) この衛星は口径 45 cm の反射望遠鏡を積んでおり、6~7等位までの明るい星なら約1時間の露出で、波長分解能  $10^4$  程度の高分散スペクトルを観測することができます。この衛星の観測時間割り当ては、国際的な公募制でしたので、筆者を含む日本のグループも応募して、今までに数回割り当てを受けることができました。現在までに他の観測者がとったデータも含めて約30個の Hg-Mn 星と比較のために使うふつうの星約10個のデータが集まりました。なお、IUE 衛星については、天文月報73巻第6号に筆者の解説が、また77巻第1号に近藤陽次氏の解説がのっています。

4. 紫外線での観測結果

第2節でも説明したように、紫外線波長で観測すると、地上観測では見つからない元素の吸収線がみられます。以下それらのいくつかについて最近わかったことを順次説明します。

4.1 ホウ素 (B)

ホウ素 (B) は原子番号5番の軽い元素で原子番号3番、4番のリチウム (Li)、ベリリウム (Be) と共に自然界には極く微量しか存在しません。それでこれらの元素の吸収線を検出するのは大変むずかしいのですが、ホウ素の場合、紫外線の波長 1362.46 オングストローム (Å) に一回電離したホウ素 (B II) の強い吸収線があって、その線を利用することにしました。23個の Hg-Mn 星でこの線を調べた結果、次のようなおもしろい事実がわかりました。B II の線は、23個のうち9個のみえており、うちいくつかでは大変強く、のこり14個ではこの線は検出されませんでした。図2は、2つの Hg-Mn 星と B7 型の比較星との B II の線を比較したものです。比較星のスペクトルと比べて、Hg-Mn 星のうち上の星では B II が強く、下の星では逆に弱いことが明らかです。比較星でのホウ素の量は太陽と大体同じと推定されていますから、線が強い星ではホウ素が多すぎ、弱い星では不足していることとなります。

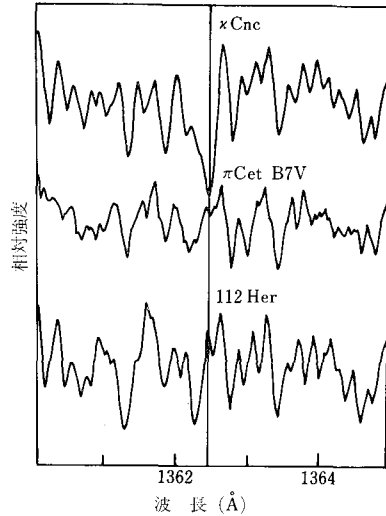


図2 κ Cnc (Hg-Mn 星, 上), π Cet (B7 型主系列星で比較星) と 112 Her (Hg-Mn 星, 下) 中央での B II の線 (波長 1362.46 Å) のようす。

一方、第2節で説明した拡散モデルでの予想では次のようになっています。ホウ素はB型星の大気の深い所では2回、浅い所では1回電離しており、紫外線に強い吸収線があります。そのため、ホウ素のイオンは光の圧力をうけて星の表面に浮び上がってきます。ホウ素は軽いので、星の最も外側まできたときでも光の圧力のため生じる加速度は重力加速度より大きいと予想されています。すると、星の表面に磁場などイオンの運動をじゃまするものがなければ、ホウ素は星からにげてしまいます。Hg-Mn 星では磁場は弱いと考えられていますから、これらの星の表面にホウ素はないはずということになります。ところが実際に観測してみると、23個の Hg-Mn 星のうち9個にホウ素の吸収線がみえ、うち6個はホウ素の量が太陽より確実に多いという結果になりました。60% は予想とあって 40% はあわなかったわけです。なぜそうなのかは今のところ説明がついていません。仮に、ホウ素の多い星と不足している星がある温度を境にして分れているならば、解釈しやすいかもしれませんが、事実はそうなっていません。理論的な予想と一致しない場合が 40% というのは、例外として無視するには大きすぎる数字と思われるます。

4.2 亜鉛 (Zn)

次に、中位に重い元素亜鉛 (Zn, 原子番号 30) について、最近筆者が行った解析の結果を記します。亜鉛の次の元素ガリウム (Ga) が、Hg-Mn 星で多い (化学組成異常) ことは地上観測から知られていましたが、亜鉛については星の大気中でどうなっているのか全く知られていませんでした。亜鉛も紫外線スペクトルを観測できるようになって初めてその姿を現わしたわけです。一回電

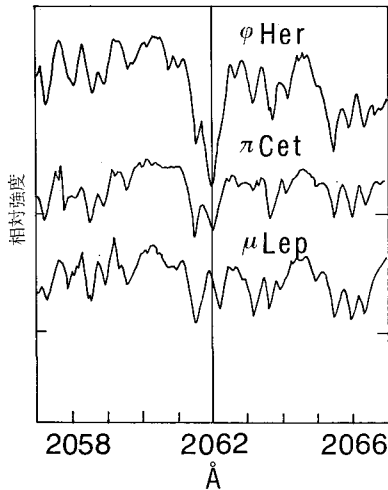


図3  $\phi$  Her (Hg-Mn 星, 上),  $\pi$  Cet (中央) と  $\mu$  Lep (Hg-Mn 星, 下) での Zn II の線 (波長 2062.00 Å) のようす。

離した亜鉛 (Zn II) は波長 2062.00 Å に強い吸収線があって、これは比較的他の元素の吸収線の影響をうけていないので、この線を使って解析を行いました。図3は、2個の Hg-Mn 星と B7 型の比較星での亜鉛の吸収線のようすを示しています。比較星と比べて、上の星では亜鉛の線が強く、下の星では非常に弱い (ほとんどみえない) ことが一目でわかります。観測データのある 22 個の Hg-Mn 星について調べた結果、ふつうの星に比べて、5 個の星で亜鉛の線が強く、9 個の星で弱く、のこり 8 個では大体同じ強さを示すことがわかりました。吸収線の強さから亜鉛の量を求める計算を行った結果、亜鉛の線の最も強い星では、太陽に比べて亜鉛の量が少なくとも 100 倍多いことがわかりました。逆に亜鉛の吸収線の最も弱い星では太陽に比べて 100 分の 1 以下という結果になりました。亜鉛の場合も、星の温度の高い低いと亜鉛の量の間には、はっきりした関係はみられません。つまり、どの星でどうなっているか予測がつかないわけです。また、亜鉛については、拡散理論による詳しい計算はされていませんので、理論的にはどうなるはずというところは今のところわかりません。

#### 4.3 水銀 (Hg)

水銀は化学組成異常を示す重元素 (原子番号 80) の代表格で、地上観測からすでに多くのデータが出ていますが、ここでは水銀のない Hg-Mn 星をとり上げます。こう書くと何か矛盾しているようですが、以前から Hg II の 3984 Å の線がみえない星がいくつか知られていました。例えば、53 Tau という星は、マンガンの吸収線は大変強いのに、水銀の線 (3984 Å) は全くみえないので、Hg-Mn 星の Hg をとった Mn 星という分類にな

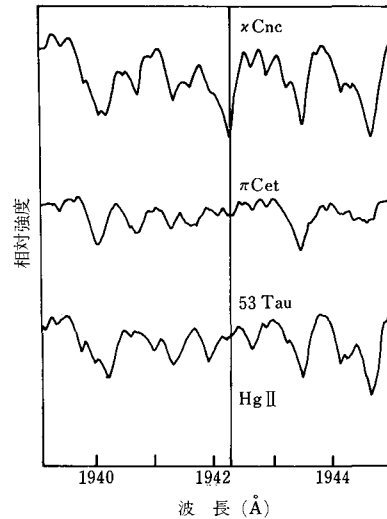


図4  $\kappa$  Cnc (上),  $\pi$  Cet (中央) と 53 Tau (Mn 星, 下) での Hg II の線 (波長 1942.27 Å) のようす。

っています。ここで問題なのは、53 Tau のような星に水銀がどれほど少いかということです。いいかえれば、マンガンは多いという特徴を示す星の間で水銀の量はどれほどのひらきがあるか、定量的に決めたいわけです。紫外線スペクトルを使うことによって次のような新しい結果を得ることができました。解析に使ったのは波長 1942.28 Å にある一回電離した水銀 (Hg II) の吸収線です。図4は、この線のようすを2つの Hg-Mn 星と比較星について示したものです。この図によると、53 Tau の波長 1942.28 Å でのようすは、比較星とほとんど同じということがわかります。このことから、53 Tau での水銀の量の上限が新しく求められました。それは、次のような事情によります。波長 3984 Å の Hg II の吸収線は、高い励起状態からおこりますから、この線が見えないことから導かれる水銀の量の上限は、太陽での量より 1000 倍多い、又はそれ以下ということしかわかりませんでした。ところが、波長 1942 Å の吸収線は基底状態からおこりますので、この上限値を大幅におとすことができます。図5はその解析を示した図です。この図では、色々な水銀の量に対して、1942 Å の線 (破線) と 3984 Å の線 (実線) の予想される強さ (等価幅) を星の温度に対してプロットしてあります。この図の中には水銀の線の強いいくつかの星の測定された等価幅も入れてありますが、水銀の量は非常に多い (1 万倍程度) ことを示しています。さて、53 Tau では、1942 Å の線がほとんどみえないことから、この線の等価幅は最大 30 mÅ と推定しました。すると、図5から、この星での水銀の量の上限値は、太陽と同じという結論になります。すなわち、3984 Å の線から求めた上限値を 3 ケタ小さくす

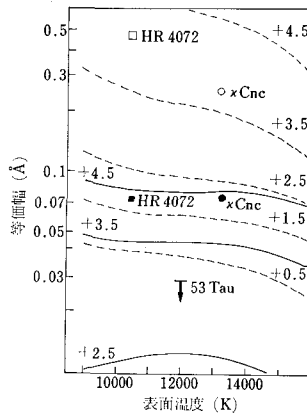


図5 Hg II の線(波長 1942 Å: 破線, 波長 3984 Å: 実線)の予想される等価幅(たて軸)と表面温度(横軸)の関係。図中の数字は、太陽での水銀の量との比(対数)で、左は 3984 Å の線、右は 1942 Å の線に対するもの。2つの Hg-Mn 星での測定された等価幅(白ぬきは 1942 Å, 黒は 3984 Å)がプロットしてある。Mn 星 53 Tau の 1942 Å の線の等価幅の上限値を下向きの矢印で示した。

ることができました。このことは、新しい問題をおこします。今までは、波長 3984 Å の線の観測から、Hg-Mn 星での水銀の量は、太陽での量の 1000 倍から 1 万倍の間と思われていたのに、中には水銀が全く多くない星があることがわかり、その原因を説明しなくてはなりません。

#### 4.4 その他の元素

これまでのべてきた元素の他に、紫外線の観測で初めて研究されたものが5種類ほどあります。軽い元素からいきますと、チッ素(原子番号 7)、アルミニウム(同 13)、イオウ(同 16)の吸収線の研究から、これらの元素は Hg-Mn 星では、ふつうの星と同じか又は少ないということがわかりました。次に銅(原子番号 29)とビスマス(同 83)については、イギリスの研究者が解析しました。銅はほとんどの星で多いが、たった一個だけ少く、ビスマスの線はたった一個の星でしか見えないと発表しました。

表1は、今までのべた結果を定性的に星別に示したものです。この表では、太陽に比べて多い場合に +、少ない場合に -、ほぼ同じ場合に 0 で示してあります。特に目立つ(異常の度合いが大きい)場合は ++ 又は -- で示した。この表から気付くことは、Hg-Mn 星としてまとめられている星の中でも、元素の組成については、多くの例外があることです。いいかえると、Hg-Mn 星は星一個一個に何かの特徴(個性)があって、うり二つのような全く同じ性質の星は見当らないことがわかります。

#### 5. 理論との比較から生じる疑問

Hg-Mn 星の原因については、ミショーの発案した拮

表1 自転速度のおそい Hg-Mn 星の定性的性質

| 星              | 表面温度 (K) | B (5) | N (7) | Al (13) | S (16) | Cu (29) | Zn (30) | Hg (80) | Bi (83) |
|----------------|----------|-------|-------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 87 Psc         | 13100    | -     | -     | --      | 0      | +       | 0       | ++      | 0-      |
| 20 Tau         | 13000    | +     | -     | --      | -      | 0       | ++      | 0-      | 0-      |
| 53 Tau         | 12100    | +     | --    | --      | 0      | ++      | -       | 0-      | 0-      |
| $\mu$ Lep      | 12800    | -     | -     | --      | 0      | ++      | --      | ++      | 0-      |
| HR 1800        | 11200    | -     | --    | --      | 0      | ++      | -       | ++      | 0-      |
| HR 2676        | 13900    | ++    | -     | --      | -      | 0       | --      | 0-      | 0-      |
| HR 2844        | 13800    | -     | -     | --      | 0      | ++      | -       | ++      | 0-      |
| $\nu$ Cnc      | 10400    | -     | --    | -       | 0      | +       | +       | ++      | 0-      |
| $\kappa$ Cnc   | 13300    | ++    | --    | --      | -      | ++      | --      | ++      | 0-      |
| HR 4072        | 10500    | -     | --    | -       | 0      | +       | --      | ++      | 0-      |
| $\gamma$ Crv   | 12000    | ++    | --    | -       | 0      | +       | +       | +       | 0-      |
| $\chi$ Lup     | 10700    | -     | -     | -       | 0      | 0       | --      | ++      | 0-      |
| $\zeta$ CrB    | 11000    | -     | --    | --      | 0      | ++      | 0       | ++      | 0-      |
| $\upsilon$ Her | 11900    | -     | --    | --      | 0      | ++      | 0       | ++      | 0-      |
| $\phi$ Her     | 11500    | -     | --    | --      | 0      | +       | ++      | ++      | 0-      |
| HR 6997        | 14000    | -     | -     | --      | 0      | ++      | 0       | ++      | 0-      |
| 112 Her        | 13000    | -     | -     | --      | -      | --      | 0       | ++      | 0-      |
| HR 7143        | 12100    | ++    | --    | --      | 0      | ++      | -       | ++      | 0-      |
| HR 7361        | 13500    | ++    | -     | --      | -      | ++      | 0       | ++      | 0-      |
| 46 Aql         | 12900    | +     | -     | --      | -      | ++      | +       | +       | 0-      |
| HR 7775        | 10800    | ?     | ?     | -       | 0      | ++      | 0       | +       | ++      |
| $\beta$ Scl    | 12500    | -     | --    | --      | 0      | ++      | --      | ++      | 0-      |

? はデータなし, 0 - は太陽又はそれ以下(上限値)を示す。

散理論が大きな成功をおさめ、ほとんど定着しかかっているように見えます。しかし、上のような観測事実を目にすると、まだ説明のつかない問題点がたくさんあることを理解していただけたらと思います。現在の拡散理論のワク組みの中では、ある元素が多い星もあれば、少ない星もあるといったことを説明するのは困難なことです。そのワク組みというのは次のようにまとめられます。ある星の表面で特定の元素がどのようにふるまうかは、その星の表面温度、表面重力、自転速度、磁場の状態などを与えれば決ってしまいます。すなわち、同じ初期の化学組成をもち、同じ質量、角運動量、磁場をもつ2つの星があったとして、ほぼ同じ年齢であるならば、その2つの星の表面にみられる化学組成の異常は全く同じであるはずで、表1の中でそのような組がいくつかあります。例えば、 $\kappa$  Cnc と 112 Her という2つの星は、表面温度は共に約 13,000 度 K、表面重力もほぼ同じ、自転速度も同じ、周期約6日の分光連星という点でも共通しています。双方ともに、マンガン、カリウム、そして水銀が大幅に多いことは共通していて、その点では立派な Hg-Mn 星です。ところが、紫外線での観測の結果、 $\kappa$  Cnc はホウ素、銅が多いのに、112 Her ではこの両方とも少ないという、まるで鏡に写したような関係になっています。このような例はまだ他にもあります。特にむずかしそうなのは、多くの星に共通しているのに、たった1つが例外（例えば、112 Her の銅、HR 7775 のビスマス）になっている場合です。もっとも、より多くの星

をしらべれば仲間があるかもしれません。現在考えられている説明の描像では、このような星の個性をうまく理解できません。それに対して、拡散過程は時間の要素が重要で、星の表面の特徴が時と共に変わるかもしれないという意見があります。舞台の上で短時間のうちに衣裳を変えて、七変化をする役者のような姿を見ているのではないか、というわけです。この考えは今のところお話しにすぎません。しかし、このような星の現象を解明するには、流体力学的過程を入れた拡散理論をきちんと考える必要があると、理論家たちは考えはじめたようです。このような理論ができて、個性豊かな星がどのようにしてできるかが理解できるようになれば、観測された星の特徴から、その星の生いたち、歴史を逆にたどれるようになるかも知れません。そうすると、現在の姿から過去を知る一つの手段になるわけで、“星の考古学”が可能になるわけです。もちろん、そうなるまでにはまだ相当の時間がかかるでしょう。現在重要なことは、できるだけたくさんのデータを用いて、Hg-Mn 星の間にみられる共通性、また個性についての知識を積み上げてゆくことと、筆者は考えています。紫外線の観測で、かなりの数の元素についての新しいデータが得られましたが、元素の周期表には、星のスペクトルでまだ解析されたことのないものが多くのことっています。それらのひとつひとつを追跡する仕事を、筆者は今後も当分続けてゆくことになるでしょう。

## お知らせ

### 宇宙科学研究所教官公募

この度、下記の要領により、教官公募を行ないますので、広く適任者の推薦、応募を求めます。

1. 公募人員 教授 1名
2. 所属部門及び内容  
宇宙圏研究系：高エネルギー天体物理学第1部門 教授  
飛翔体を用いた、高エネルギー放射線（X線ガンマ線等）の観測による天体物理学の研究、及び測定技術の開発  
同研究系には、現在、高エネルギー天体物理学第1、第2、第3各部門及び赤外線天体物理学部門があります。
3. 着任時期 決定後、昭和61年度内の成るべく早い着任を希望
4. 必要書類 (1)略歴 (2)研究歴 (3)論文リスト及び主要論文別刷 (4)研究計画書（自薦の場合

のみ) (5)他薦の場合：推薦書2通、自薦の場合：本人について意見を述べられる人2名の氏名、連絡先。

5. 締 切 昭和61年8月15日
6. 宛 先 宇宙科学研究所 所長 小田 稔  
〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1  
電話（代表）03-467-1111
7. 問 合 せ 不明の点、及び資料の請求は下記に願います。  
宇宙圏研究系主幹 田中靖郎 内線 308
8. 選 考 選考は、宇宙科学研究所運営協議会議において行ないます。応募者に適任がない場合、決定を保留することがあります。
9. そ の 他 当該分野の責任者として、高エネルギー天体物理学第2、第3部門と緊密に協力しつつ、研究を主導すると共に、当該分野の科学衛星計画及び共同利用プログラムの遂行に主導的な役割を果す方を希望します。