

X線バースト・スペクトル中の吸収線

井上 一*・中村典雄*

1983年2月、我国第2の宇宙X線観測衛星「天馬」が打ち上げられて、はや3年余の年月がたった。この間「天馬」は搭載されている蛍光比例計数管のすぐれたエネルギー分解能によって、各種X線源のスペクトル観測に数多くの成果をあげてきた。これらの成果についてはもっと本誌紙面を借りて報告すべきところ。我々の怠慢で、まだほんの一部が紹介されているにすぎない。これから、できる限り報告をさせて頂くこととしたい。その一つとして、ここでは「天馬」最大の成果とも言うべきX線バーストのスペクトル中に発見された吸収線についてご紹介しよう。

1. X線バースト・スペクトル中の吸収線

X線バーストは、あるX線源からのX線が、数秒間の間に、定常的に放射されているX線強度の数10倍から数100倍の強度にまで達し、数10秒かけてゆっくりもとの強度にまでもどる現象である。この現象は、中性子星表面に降積した物質が起こす核爆発と考えられており、その詳しい解説は、これまでにも本誌に何度か紹介されているので、ここでは省略させていただく。

さて、このX線バーストの2keV以上のX線スペクトルはかなりよく黒体放射のスペクトルで近似することができる。そして、黒体放射を仮定して得られた黒体の半径がほぼ10kmになることが、X線バーストが中性子星表面での現象であることの強い証拠となっている。ところが、中性子星表面大気での輻射輸送を考えると、そこからのスペクトルは、黒体放射のものから大部ずれているはずであり、単純に黒体放射を仮定して得た黒体の半径が、中性子星の真の半径をあらわしているというわけにはいかない。そのへんのX線バースト・スペクトルの連続成分をもとにして中性子星の質量/半径を求める議論もこれから紹介する吸収線の話と不可分のものであるが、それらについては最近の戎崎による本誌紹介記事(第79巻4号)を見て頂くこととし、以後、吸収線の話に話題をしぼろう。

「天馬」は、これまで7つのX線バースト源からX線バーストを観測した。それらのバースト源のうち、スペクトル中の微細構造を探るのに十分なバーストの明るさと、バースト数を得たバースト源は、X1636-53, X1608-52, X1728-33の三つである。そしてこれらのバースト源からのバーストスペクトルを詳細に調べた結果、X

1636-53からは観測された16コのバーストのうち4コのバーストから、又、X1608-52からは17コのバーストのうち3コのバーストから吸収線を検出した。X1728-33からは、12コのバーストを受けたが、有意な吸収線は発見できなかった。有意な吸収線が検出できなかった時の、吸収線の等価幅の上限値は、数10~100eVといった値である。

X1636-53からの吸収線が検出された4つのX線バーストの、X線強度・黒体温度・黒体半径の時間変化と、それらのバースト中の吸収線の存在を示す5つのX線スペクトルを図1に示す。この(A)から(D)までの4つのバーストのうち、(A)だけは、バーストのピーク付近と、減衰部とで、違ったエネルギー位置に吸収線が見られ、その吸収線の中心エネルギーはピーク付近のものは、ほぼ5.7keV、減衰部のものは4.1keVであった。この減衰部に見られた4.1keV吸収線は他の3つのバーストの減衰部にも共通して見られ、4つのスペクトル中の吸収線中心エネルギーの荷重平均は 4.1 ± 0.1 keVであった。

一方、X1608-52からのバーストのうち、吸収線が見られた3つのX線バーストのX線強度・黒体温度・黒体半径の時間変化と、それぞれのバースト中、吸収線が見られた時間帯のスペクトルは図2に示される。この三つのスペクトルの示す吸収線の中心エネルギーは、どれもX1636-52からのバーストの減衰部に見られた吸収線の4.1keVの中心エネルギーと同じと考えて矛盾しない。

X1636-53及びX1608-52のバーストから受かった吸収線の等価幅は、どれもほぼ100~200eVである。ところで、図1, 2に見られる吸収線のプロファイルは、吸収線自身のものではなく、蛍光比例計数管のエネルギー分解能でひろげられてしまったものである。もとも、いかに幅の狭い深い吸収線であっても検出器のエネルギー分解能で図の程度にひろがった浅いものになってしまう。実際、もともと吸収線が持っていたと考える半値幅をパラメーターとして、観測されたプロファイルとあうものを捜してみると、その半値幅にはおよそ500eVの上限値が得られるにすぎない。従って、もともと吸収線が持っていたプロファイルの半値幅は、100eVから500eVの間にあることになる。

2. 吸収線の起源

では、この吸収線の起源について考察してみよう。この吸収線が、サイクロトロン吸収線である可能性も全く

* 宇宙科学研究所 Hajime Inoue, Norio Nakamura:
Absorption Lines in X-Ray Burst Spectra

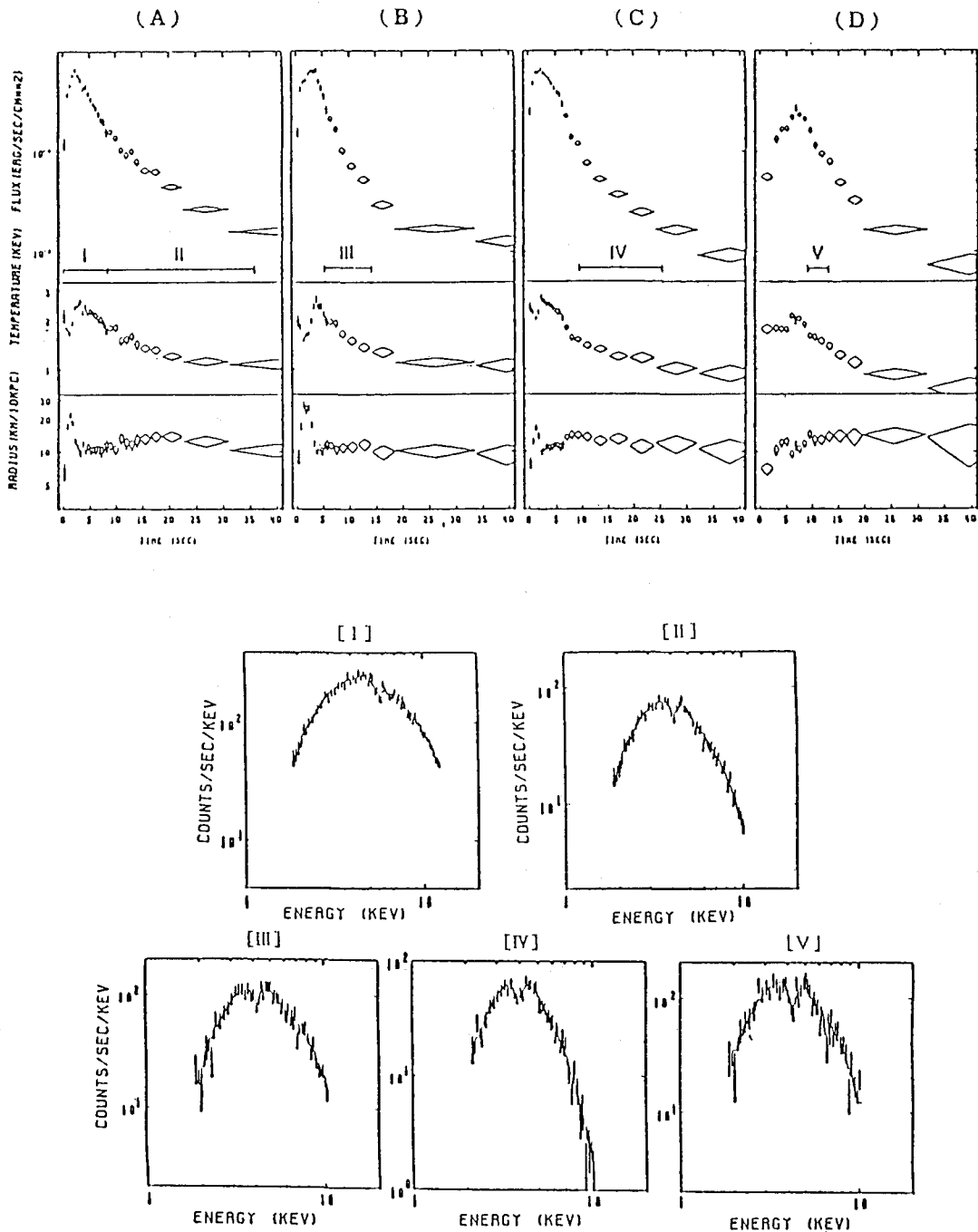


図 1 X 1636-53 からの、吸収線が見られた 4 つのバーストの X 線強度・黒体温度・黒体半径 (距離 10 kpc を仮定) の変化 (A~D) と、それらのバースト中の 5 つの場所の X 線スペクトル (I~V)。それぞれのスペクトルは、図 A~D のそれぞれに I~V で示した時間の間平均スペクトルである。

ないわけではない。しかし、数 keV といったエネルギー領域にサイクロトロン周波数があるためには、 10^{12} ガウス近い磁場が必要となる。X 線バースト源の活動の中心にある中性子星にそのような強い磁場があることは、X 線バースト源に見られる種々の性質が X 線パルサー

(ほぼ 10^{12} ガウスの磁場を持った中性子星がその活動の中心にあると考えられている。) のそれと全く異なることから、非常に考えにくい。やはり、中性子星の光球をとりまく大気中のある原子による吸収線と考える方が自然であろう。

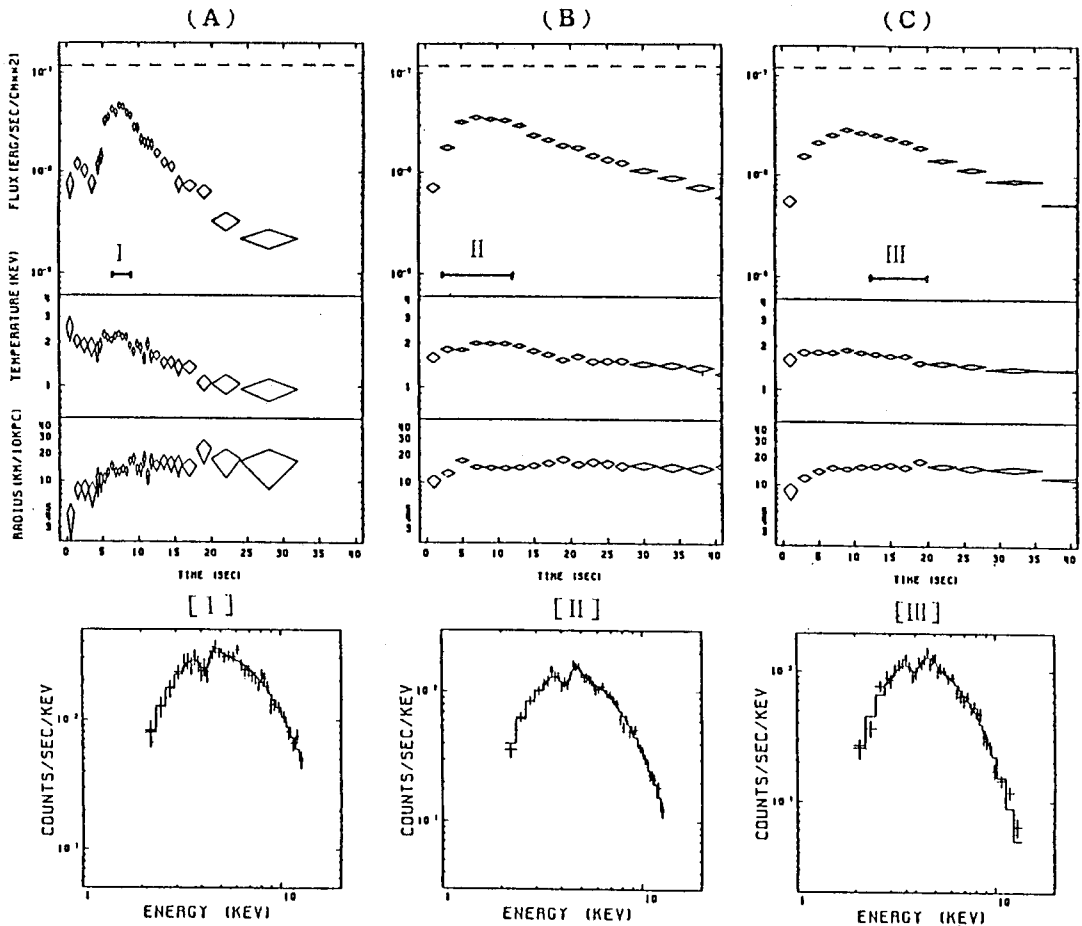


図2 X 1608-52 からの、吸収線が見られた3つのバーストと、そのスペクトル (図1の説明参照). 図A~Cに示した点線は、このバースト源から得られた最大のバーストピーク光度が示してある.

数 keV といったエネルギーに遷移のレベルを持ち得る元素はかなり重い元素である. そして温度数 keV の高温ガス中で、それらの元素はほとんど電離され、まだ電子が残っているなら、*K*殻に電子が2個残ったヘリウム様な状態にいる確率が高い. 又、中性子星表面では強い重力場による一般相対論的赤方偏移が考えられるから、その点も考慮にいれて、吸収線に寄与している元素の候補を赤方偏移の大きさの関数としてあらわしたものが図3である.

これらの候補となる元素のうち、宇宙組成に近い元素組成を持っているであろう降着物質中、最も多く含まれているのは鉄である. 相手の星から中性子星表面の単位面積あたりに降ってきている物質量は、1秒間に $10^3 \sim 10^4$ グラムにも達する. 従って、たとえ中性子星がはじめ、はだかの状態にいても、あっという間に降着物質の光学的に厚い層が中性子星をおおってしまう. そのような大気では、この吸収線は鉄原子によるものと考えるのが一番自然である.

ところが問題は、中性子星表面に降積した降着物質がバースト中、核燃焼によって重い元素ばかりの組成が変わってしまうことである. 従って、これらの核燃焼生成物が吸収線の形成に寄与しているとしたら、チタン、クロムなどの元素も吸収線形成元素の候補となり得る. しかし、核燃焼が起きるといっても、それは大気のかなり深いところのことであり、バースト中、光球面までのすべての降着物質が燃えてしまうわけではない. そのため、核燃焼生成物が吸収線形成に寄与するには、何らかの機構でそれらの物質を光球面まで露出させることが必要となる. さらに、上に述べたように降着物質は大量に次々と降ってくるから、核燃焼生成物の露出した大気がしばらくの間吸収線を形成できるためには、その間降着物質は中性子星表面をおおってしまわないようにどこかで止められていなければならない.

降着物質が中性子星表面からとりはらわれているような状況は、バースト強度がエディントン限界光度に達し輻射圧によって降着物質の大気を吹きはらうことができ

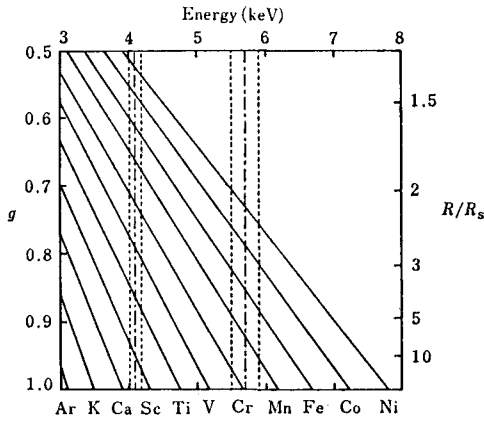


図3 赤方偏移の大きさ g の関数であらわしたアルゴンからニッケルまでのヘリウム様イオンの K_{α} 線のエネルギー. 5.7 keV と 4.1 keV 吸収線の中心エネルギーの位置をその誤差範囲と共に点線で示してある. この赤方偏移が一般相対論的重力効果によった時の, 中性子星の半径がシュワルツシルド半径 $R_s = 2GM/C^2$ との比で右側に示されている.

ることがあれば, 期待することができる. パースト中の核燃焼を起こしている物質中では水素は全くなくなっていて, 電子の数は核子の数の半分であるのに対し, 水素がほとんどを占める降着物質中では電子の数と核子の数はほぼ等しい. そのため, 核燃焼中の物質中でエディントン限界にまで達した放射量は, 水素主体の大気にとってはエディントン限界を越えたものとなり, そのような放射が内側の核燃焼中の層から外側の水素主体の層に出てくると, その大気を放射圧によって吹き飛ばすことが可能となる. 事実, そのような事が起きていることは一部のパーストで観測されている. 図1に見られる3つの高いピークを持つパーストでは, そのピーク付近で黒体半径が増大している様子が見られる. このパーストのピークは, このパースト源から観測されたすべてのパーストのピークの中で最大のもので, この面積の増大が, 水素の全くなかった大気のエディントン限界に達した放射によって降着物質の層が吹き飛ばされている様子を反映していると考えて, いろいろな現象がうまく説明される.

このように, 最大のピーク光度まで達したパーストについては, 降着物質の層が吹き飛ばされて, 核燃焼生成物が直接吸収線に寄与できるようになっていると考えられないこともない. しかし, 図1の4つめのパースト, 及び図2の3つのパースト(図2には, X1608-52からのパーストの最大のピーク光度が点線で示されている)では, そのピーク光度はエディントン限界光度にくらべて2~3倍小さく, 放射圧によって降着物質の層をとりはらうことはまず不可能と思われる. さらに図2の2つ

目のパーストでは, パーストの立ち上り部分ですでに吸収線が見えており, パーストで発生したエネルギーがまだ十分に表面にまで達しないうちに, 核燃焼生成物の方が先に表面に達しているというようなことは, 非常に考えにくいことと言わざるを得ない.

以上のような考察をしてみると, パースト・スペクトル中に見られる吸収線は, やはり, 降着物質中の鉄原子によると考えるのが一番素直な解釈に思える. そうならば, 観測された吸収線は, 電子を2個残した鉄イオンのエネルギー 6.7 keV の K_{α} 線が赤方偏移を受けたものである可能性が高い. 5.7 keV 吸収線は, エディントン限界光度に達したパーストの面積が変化している最中に見えているため, 表面大気が飛ばされていることによる影響を多分受けているだろう. しかし, 4.1 keV 吸収線は, どれも, エディントン限界光度より十分低い光度の時に見え, この吸収線は静かな中性子星表面大気で形成されていると考えてよかろう. そして, そのような状態での中性子星大気の厚みは, 中性子星の半径にくらべて十分薄いと考えられるから, 6.7 keV から 4.1 keV への赤方偏移の大きさは, 中性子星表面そのものの一般相対論的重力効果を忠実に反映していると考えるのは自然なことと思える.

一般相対論によれば, 質量 M , 半径 R の中性子星表面での赤方偏移の大きさは, 中性子星がよほどはやく回転していない限り, $g = (1 - 2GM/C^2R)^{-1/2}$ という関係であらわされる (G は重力定数, C は光速). この g の値に, 6.7 keV が 4.1 keV に動いた赤方偏移の大きさ $4.1/6.7 = 0.6$ を代入してみると, 図4のように中性子星の質量 M と半径 R との間に関係が見つかる. ところが, 図4の上には, 種々の核力のモデルにもとづく中性子星の質量-半径関係のモデル計算の結果が示してあるのだが, $g = 0.6$ という線は, ほとんどどのモデルでも, もう核力で支えきれない不安定な部分に位置してしまう. 従ってこのままでは, 上の自然に思えた解釈のどこかがまちがっているか, あるいは核力のモデルや一般相対論のどこかがまちがっていることになる.

この問題を解決するために藤本は一つのモデルを提案した. それは, 中性子星のまわりの降着円盤中を落下してきた降着物質が中性子星表面に着地するときできる境界層が吸収に寄与し, その降着物質の回転による横ドップラー効果が, 一般相対論的重力効果による赤方偏移に重なっていると考えられるものである. その効果を考慮すると, 重力効果による g 因子は 0.8 近くまで大きくなることができ, 中性子星モデルとの矛盾を解決することができる. しかし, このモデルでは回転の縦ドップラー効果による吸収線のひろがりが生じてしまう. そのため, 観測によってできる吸収線幅の上限値 ≈ 500 eV を満

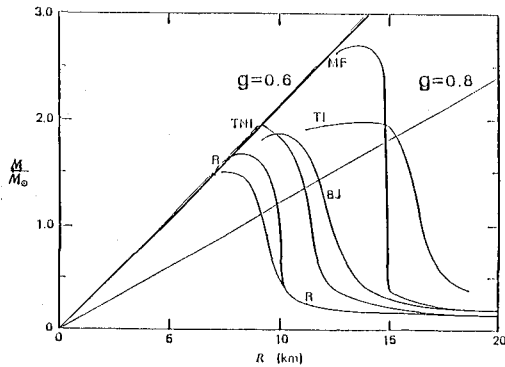


図4 赤方偏移の大きさが一般相対論的重力効果によるとした時の質量 M と半径 R の関係。 $g=0.6$ と $g=0.8$ の2つの場合が直線で示してある。各種の中性子星モデルの予想する質量-半径関係も共に示されている。

足するには、降着物質の回転軸の方向から 15° 程度以内に観測者の方向がないとならないことになる。ところが、そのような限られた方向の立体角の全立体角に対する比はほんの3%程にすぎず、「天馬」の観測した限られたバースト源の中で、X1636-53とX1608-52という2つものバースト源が吸収線を示した事実を説明するのが、確率的に困難のように思える。

雑報

黒点は太陽の台風？

“On The Maintenance of Sunspots: An Ion Hurricane Mechanism”

Kenneth H. Schatten and Hans G. Mayr

Astrophys. J. **299**, 1051 (1985)

太陽の黒点がなぜ暗いのか、なぜ安定して存在しているのか、わかっているようで実はよくわからない問題である。基本的には、磁場が対流運動をおさえて熱の流れにふたをするので暗い、とされているが、パーカーによると、それだけでは黒点の下にどんどんエネルギーがたまっていて、すぐに黒点はこわれてしまうという。なんとかして熱がたまらないように逃がしてやらなければならない。そこでこの論文では、黒点の下にゆっくりとした下降流を考える。

表面近くのガスが下降運動を続けて約2000kmの深さのところまでくると、それまで中性だった水素が電離をはじめ。その時電離過程は熱を吸収し、下降してきたガスはまわりよりも温度が低くなって、下降運動はさらに促進されることになる。同時に、下からやってくるエネルギーがさえぎられるため、表面は暗くなり、黒点が形成される。簡単な見積りによると、深さ2000

エディントン限界光度に達しなくても、何か核燃焼生成物が表面に露出することができるような他の機構があって、クロムあたりが吸収線を形成しているとすれば、やはり中性子星のモデルに対する困難をとり除くことができる。その一つの可能性として、最近花輪らが議論している降着物質と中性子星との大きな回転差でおこすケルビン-ヘルムホルツ不安定による降着物質と中性子星大気中物質との物質混合も、核燃焼生成物を降着物質中にまぜ込む要因となるかもしれない。しかし、今のところまだ詳しい評価はなされていない。

現在のところ、観測的に、これ以上、吸収線に寄与している元素をきちんと同定するには、まだ情報不足である。もっとエネルギー分解能のすぐれた検出器を用い、他のエネルギーにもっと弱い吸収線でも見つけることができれば、吸収元素の同定はもっと確度の高い議論ができるようになるだろう。同時に、このような吸収線を生じ得る中性子星表面大気温度・密度・各元素のイオン化の進み具合を探り、候補をしぼりこむことも一つの方向となろう。この問題は、答の出方によっては物理の基本法則に変更をせまるかもしれない問題だけに、将来の研究が待たれる。

kmのところでは約2m/sの下降運動があれば黒点の暗さは充分説明できることになる。一方、このような下降運動が生ずると、表面近くでは黒点へ向かう水平方向の流れがおり、大きなガスの循環が形成される。磁場は、下降運動が始まるきっかけとなり、又、このような流れを整えるのに重要な役割をするという。

このような黒点の描象は、上下を逆さまにすると、ちょうど地球の台風とよく似ていることに気づくだろう。海の上のあたためられた空気は、水蒸気をたくさん含んで上昇運動をはじめ。そしてある程度上昇してくると水蒸気が凝結して潜熱を放出するため、上昇してきた空気はまわりよりもあたたかくなってさらに上昇を続ける。これが台風が成長する理由である。もちろん地表近くでは、この上昇領域に向かって水平方向の風が吹き始め、大きな大気の循環が生まれる。太陽の黒点はちょうど台風の目にあたっている、というわけである。

黒点のまわりに、このような大きなガスの運動が、果たしてあるのかどうか、残念ながら現在のところ、観測的にはまだはっきりとはわかっていない。最近、いくつかの星には、太陽とは比較にならないくらい大きな黒点があるらしい、と言われている。なぜ黒点が安定して存在していられるのか、太陽屋としては、なんとか答えない問題である。

(一本 潔)