

恒星の非動径振動

尾崎 洋 二*

1. はじめに

私はここ3, 4年恒星の非動径振動の問題に取り組んでいる。非動径振動という言葉は英語の nonradial oscillation の直訳で、天文ではほかにも非灰色とか non-LTE とか言った表現をする用語があるが、いずれもその語感がいかにも取っ付きにくく難解な印象を与えるので、この記事も表題を見ただけで読む気がしない読者もいるのではないかと思う。

しかし星の非動径振動というのは星の固有振動の事で、星の固有振動を調べる研究は、星をスイカに見たてれば、八百屋さんの店先でスイカをたたいて中の熟れ具合を調べるあのやり方であり、また地震波を使って地球の内部構造を調べる地震学とも相通ずる。海野先生の言葉を借りれば、恒星は一つ一つが色々の楽器であり、チェロもあればヴァイオリンもありといった具合で、また同じヴァイオリンでも安物のヴァイオリンからストラドヴァリウスまで一つ一つ微妙に音色が違うように、恒星もその質量や進化の段階によって、固有振動の音色は微妙に異なっている。恒星の非動径振動についての私達の研究は、星の楽器としての性質を調べ、ひとりで鳴りだす不思議なヴァイオリンを探し求める仕事であるとも言える。

星の固有振動としては、星が球形を保ったまま膨張したり収縮したりする動径脈動があり、これまでは星の脈動論と言えば、もっぱらこの動径脈動を問題にしたものであった。確かにケフェウス型変光星や琴座 RR 型変光星などは動径脈動を行なっていると考えられる脈動変光星であり、また理論の方から言っても、まず扱いやすい動径脈動から目鼻をつけるのが順序というものであろう。しかし最近ではケフェウス座ベータ型変光星とか白色矮星の変光星など非動径振動の考えられる変光星についての観測が沢山出てきたこと、太陽表面の波動現象特に“5分振動”の非動径振動としての解釈、太陽ニュートリノ問題と関連して太陽の中心核の非動径振動に対する不安定性等、恒星の非動径振動についての問題がいくつか出てきている。一方理論の方であるが、大型計算機の登場と、それに適した「ヘニエ方法」と呼ばれる固有値問題の新しい数値解法とにより、非動径振動の波動方

程式を数値的に解く事は少くとも線型の範囲内では可能となり、星の非動径振動の性質はかなりよく理解出来るようになってきた。ここでは最近私達東大天文学教室のグループ（海野，安藤，柴橋および筆者）が行なってきた研究を中心にして恒星の非動径振動が関連した問題について述べよう。

2. 星をたたいてみよう

新しく楽器を買ったら、誰れでも床の間に飾っておくだけではなく鳴らしてみる。星も外から見ただけではどんな音色なのかかわからないので、たたいてみる必要がある。しかし本当の星をたたくわけにはいかないので、私達は電子計算機の中でこれを行なう。すなわち星の平衡モデルを作って、それを振動させてみる。すると星はそれぞれ固有の振動数でもって振動する。このような星の固有振動はどのようなものか考えることにしよう。

まずもっとも簡単な固有振動は前にも出て来た動径脈動で、この場合星は球形を保ったまま膨張したり収縮したりする。もっと一般の場合には振動の際星の形は球形からずれるような運動をし、これが星の非動径振動である。少し式を使って説明すると、恒星の内部のある物理量例えば密度 ρ を考え、その平衡における値を、 ρ_0 、それからの微小なずれを ρ' とすると、 $\rho = \rho_0 + \rho'$ と書かれる。非動径振動の固有函数は量子力学の波動函数などに出てくる場合と同様に、極座標 (r, θ, φ) 時刻 t を使って

$$\rho'(r, \theta, \varphi, t) = \rho'_l(r) Y_l^m(\theta, \varphi) e^{i\omega t} \quad (1)$$

という形に表わされる。ここで $Y_l^m(\theta, \varphi)$ は球面調和函数で、角振動数 ω は3つの量子数 (k, l, m) によって代表されるとびとびの値をとる固有値である。式で書いてしまうと、どんな振動なのかよくわからないので、もっとも簡単な固有振動として $l=2, m=0$ のモードを例にとって考えると、これは星がラグビーボール型に変形したり円盤型に変形したりする振動を表わしている。 $l=3$ の振動では星の表面に出来るこぶの数が3つ、 $l=4$ では4つという具合になっている。このように量子数 (l, m) は固有函数の (θ, φ) 方向への依存性、すなわち星の表面に出来る凸凹を表わすが、量子数 k は固有函数の半径方向への依存性を表わしている。

そもそも星をたたくと振動するのは、星を平衡状態か

* 東大理天文

Y. Osaki: Nonradial Oscillations of Stars.

らずらそうとすると元へ戻そうとする力が働くからである。この力を復元力と呼んでいる。恒星の非動径振動の場合、復元力として2つの異なった性質の力が働いており、それに対応して2つの波動モードが存在する。

その一つは恒星を作っているガスの圧縮膨張に伴う復元力で、これは音波に相当する振動で音波モードあるいは圧力波モード(略して p モード)と呼んでいる。管に閉じ込めた空気の振動はこの音波モードに対応する。一般に固有振動の際動かない点を“節”, 一番大きく振動する点を“腹”と呼んでいる。星の振動の場合にも管の中の空気の振動と同様に、星の内部に節の1つもない基準振動 (f モード), 節が1つの第一倍振動 (p_1 モード), 節が2つの第二倍振動 (p_2 モード), ……がある。星の動径脈動は非動径振動の p モードの特別な場合と考えられる。他の一つは非動径振動に固有なもので、重力波モード(略して g モード)と呼ばれているものである。重力波というのは重力場の中で流体が安定な成層を作っている場合(すなわち実験室での問題でいえば、重い流体が下に、軽い流体が上になっている状態), 対流に対して安定であり、この成層をこわそうとすると元へ戻そうとする力が働く。この力は流体に働く重力に起因するので、このような振動を重力波と呼ぶ。重力波の一番わかりやすい例は海の上の波で、これは水と空気という密度の違う2つの流体の境界に出来る表面重力波である。一種類の流体で密度が連続的に変わる場合にも重力波は起こり、表面波と区別するため内部重力波と呼んでいる。海の内部や地球大気中にも内部重力波は存在する。恒星の場合の重力波はこの内部重力波であるが、星の内部に密度の不連続的なとびがある場合には、この不連続面に対応した表面重力波も存在する。重力波モードの場合にも、星の内部に節の1つある g_1 モード, 2つある g_2 モード, ……等がある。

動径脈動の固有値(角振動数 σ_k)は基準振動 σ_0 , 第1倍振動 σ_1 等、一つの整数 k により指定され比較的簡単であるが、非動径振動のモードは3つの整数 (k, l, m) を指定する必要がある、更に整数 k に関しては圧力波モードと重力波モードの2つの系列があり、それだけ複雑である。しかし星に自転や磁場などを考えない場合には平衡モデルは球対称で、そのような星では量子数 (k, l) が共通で m だけが異なるモードの角振動数 σ は等しく縮退している。 m は $-l$ から $+l$ まで $(2l+1)$ 個の整数の値を取り得るので、 $(2l+1)$ 重に縮退している事になる。実際の星は速い遅いの違いはあれかならず自転しているので、その場合これらのモードの縮退は解けて、振動数が等間隔の $(2l+1)$ 個のモードに分かれる。この場合2つの相隣り合う固有振動の振動数の間隔は、星の自転の角速度 Ω に比例する。この辺の事情は

磁場がある場合の原子のエネルギー準位のゼーマン分離と同一である。

また、この場合固有振動のモードは、 m の符号の正負によりそれぞれ星の表面を自転と同方向あるいは逆方向に伝播する波動になっている。

さて非動径振動の際、星の内部はどのように振動しているのだろうか。これを決めるのが非動径振動の波動方程式であり、その解が波動関数である。波動関数の水平方向 (θ, φ 方向) への依存性、すなわち星の表面の凹凸の具合は、(1)式ですすで出て来た球面調和関数で与えられる。従って問題は波動関数の動径部分[例えば(1)式の $\rho'_k(r)$] であり、これを支配する波動方程式は動径座標 r の4階の常微分方程式になっている。実際の問題では、与えられた星の平衡モデルについてこの波動方程式を適当な境界条件のもとで数値的に解き、固有値、固有関数を求めるという事になる。

この説明だけでは実際の振動の様子はよくわからないと思うが、幸い星の非動径振動の波動方程式は量子力学のポテンシャル問題におけるシュレーディンガー方程式とある程度の対応がつき、実際に数値積分しなくても、どのようなモードでは星のどの部分がよく振動するかという大体の見通しがつく。この見通しをよくするのに役立つ非動径振動の伝播図と呼んでいる図がある。後で説明するが、この図は量子力学の一次元のポテンシャル問題でポテンシャルの形を図示したものに対応している。図1は10倍の太陽質量の主系列星の四重極振動 ($l=2$) に対する伝播図である。この伝播図は横軸に恒星内部の場所を示す動径座標 r/R を取り、縦軸には振動数 σ の二乗を目盛る(図1では振動数 σ のかわりに、無次元化された振動数 ω を使い、縦軸横軸とも対数目盛を使っている)。そして非動径振動の内水平方向の波数を表わす l についてある特定の値のものに着目

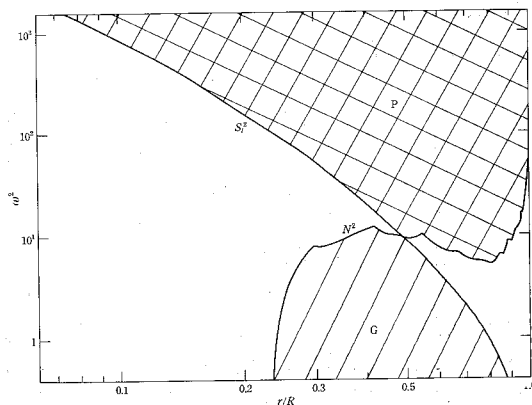


図1 10倍の太陽質量の主系列星の伝播図(但し $l=2$)

し (図1では $l=2$)、その波数をもった音波の水平方向への伝播を特徴づける振動数 S_l^2 (または ω_l^2 と書く) の二乗を r の関数として図示し、また星の内部の各点における成層の安定度を特徴づけるプラント・ヴァイサラ振動数 N と呼ばれる量の二乗についても同じように星の内部の場所の関数として図示するのである。このプラント・ヴァイサラ振動数 N という量は水平方向に伝播する局所的重力波の振動数を表わし、対流層の中やレイリー・ティラー不安定な層では純虚数になっている (言いかえれば $N^2 < 0$)。図1で斜線を引いた領域が2つあり、その内の上半分は $\omega^2 > N^2$ 、 $\omega^2 > S_l^2$ の関係が成り立ち圧力波 (音波) が伝播出来る領域を表わし、下半分では $\omega^2 < N^2$ 、 $\omega^2 < S_l^2$ の関係が成り立ち重力波が伝播出来る領域になっている。それ以外の白紙のままになっているところは、波が伝播出来ない領域 (エヴァネセント波領域と呼ばれている) を表わしている。斜線をほどこした波の伝播出来る所が、量子力学のポテンシャルの井戸の部分に対応しており、白紙のままのエヴァネセント波領域がポテンシャルの壁の部分に対応している。固有振動は定在波であるから、両側を壁に囲まれた井戸の部分に“波が立つ”わけである。実際非動径振動の波動方程式を解いて固有函数を求めてみると、確かに固有函数はこの井戸の部分で大きな値を持ち、このような井戸に“波が閉込められる”事がわかる。ここで量子力学の問題と一番違う点は、星の非動径振動の場合ポテンシャルの井戸にあたる領域として上を向いた井戸 (圧力波領域) と下を向いた井戸 (重力波領域) の2種類があるところだ。そして圧力波モードの場合、 p_1 モード、 p_2 モード、……と振動の節の数が増えていくに従い振動数が増大するのに対して、重力波モードでは g_1 モード、 g_2 モードと節の数が増えていくとは逆に振動数は減少していく。また p_1 モードと g_1 モードの間に節が1つもない f モードと呼ばれる固有振動が1つ存在する。

前に星はヴァイオリンと同じように一つ一つ個性が違い、その質量や進化の段階によって固有振動の音色が違ふと述べた。これは対流に対する安定度を測るプラント・ヴァイサラ振動数 N の星の内部での函数型が星ごとに微妙に異なるからである。例えば同じ主系列の星でも中心に対流核を持ち外層が輻射平衡にある大質量星と中心部が輻射平衡にあり外層に対流層を持つ小質量星とでは、函数 $N(r)$ の形が異なり、従って非動径振動の固有函数の様式も違って来る。主系列の星の場合の非動径振動はまだ比較的簡単であるが、進化した星の場合には相当複雑になってくる。この事情を $10M_{\odot}$ の進化した星を例にとりて説明しよう。 $10M_{\odot}$ の主系列近傍の星の場合中心に対流核があり、そこでは水素が核反応により

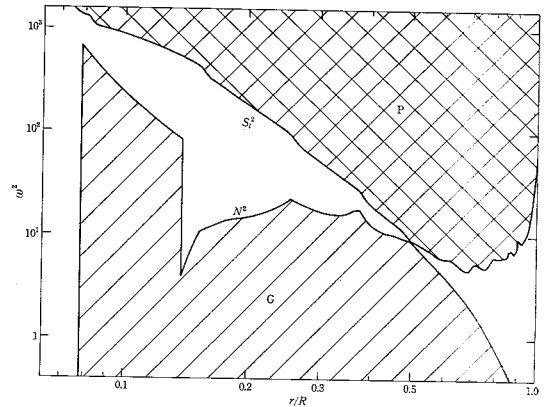


図2 10 倍の太陽質量の進化した星 ($X_0=0.07$) の伝播図 (但し $l=2$)

消費されてヘリウムの灰が溜っていく。このような星ではヘリウムの豊富な対流核と水素の豊富な外層との中間に平均分子量が連続的に変化する μ -勾配層と呼ばれる領域が出来る。平均分子量の大きいヘリウムが中心に溜って出来たこの μ -勾配層は“重い流体”が下へ溜ったわけであるから、プラント・ヴァイサラ振動数の高い非常に安定な成層を作る。図2は中心での水素の重量比 X_0 が0.07にまで減少した $10M_{\odot}$ の進化した星のモデルの伝播図である。図1とくらべてみると、 N^2 の曲線に台形の山が星の内部に付け加わっており、これが μ -勾配層である事がわかる。この μ -勾配層は大変安定な層になっていて、対流の“つきぬけ”や自転に伴う子午面環流に対しては“ μ の壁”としての役割をはたす。すなわち中心の対流層から対流が外の輻射層にまで突き貫けて物質の混合を起こさせようとしたり、また、星の自転により生じたエディントン・スウィート環流が対流核と外層の物質の混合を起こさせようとした場合、この μ -勾配層の所で止められ、そこを横切る事が出来ないのである。ところがこの同じ μ -勾配層は非動径振動に対しては、逆に重力波を閉込める井戸として働く、すなわち重力波では μ -勾配層が大きく振動し、そのまわりはあまり振動しないという事になる。

さて図2で ω^2 の値が10から100の間にくるような振動に対する星の振舞を考えてみよう。図2からわかるようにこのような振動に対して μ -勾配層は重力波を閉込める井戸の働きをするが、一方外層にも圧力波を閉込める井戸があり、これは量子力学のポテンシャル問題で有限の高さの壁で仕切られた2つの隣接する井戸の場合に対応している。この場合星の固有振動としてはそれぞれの井戸に対応するような固有振動が現われるが、非動径振動自身波であるから、一方の井戸に主に閉込められた固有振動でも、壁をトンネル効果によりすりぬ

けてもう一方の井戸にも現われるという現象が起こる。すなわちそちらの井戸でも振幅は小さいがある程度ゆれるという事になる。量子力学の場合2つの井戸の境になっている壁の厚みと高さが増してくると、2つの井戸は段々独立性が強くなり、それぞれ別個の井戸として振舞うようになるが、同じような事情が星の非動径振動の場合にもあり、この場合水平方向の波数 l の値が大きくなるに従い壁の厚さと高さが増すようになっている。従ってある程度大きな l では星の内部と外部のカップリングが切れて、それぞれ独立に重力波と圧力波の波が立つ。

3. 自然に鳴り出す不思議な楽器：恒星の自励振動

これまでのところでは星の楽器としての性質について考えてきた。確かにすべての星は前節で説明したような楽器の性質を具えているが、星が楽器と違う点は私達が勝手に星をたたいてやるわけにはいかない事である。私達は自然が演奏する音楽を鑑賞する事は出来ても、自らが演奏家になる事は出来ない。しかし注意深く耳を傾けると、自然が演奏する音楽が聞えてくる。これは恒星の自励振動と言って、星の中には外からたたいてやらなくても、ひとりでの鳴り出す不思議な星があり、そのような星の固有振動が脈動変光星などの形で観測されるのである。

恒星も楽器の場合と同じでたとえ外から星をたたいてやっても、普通は振動のエネルギーが少しずつ漏れてしまうため、やがて減衰してしまう。ところが星の内部には核エネルギーや熱エネルギーを振動のエネルギーに転換する自動車のエンジンの働きをするいくつかの機構が隠されている。例えば核融合反応もその一つであり、また、星の外層にある水素やヘリウムの電離領域もエディントンのバルブ機構と呼ばれる振動を強める働きを持つ事がある。そして条件さえ整えば、このような振動を強める働きが振動エネルギーの漏れの効果に打勝って、星という楽器がひとりでの鳴り出すという現象が起きる。ケフェウス型脈動変光星は HR 図の非常に狭い帯状の所だけに存在する。これは星の動径脈動についての自励振動の条件がこれらの星で満たされた結果、脈動し変光星として観測されるためである。

ある与えられた星で自励振動が起きるかどうかを理論的に調べる事を私達は星の振動安定性を調べると言い、そして星のある固有振動が自励振動になっている場合星は振動不安定であるという言い方をする。星の振動安定性を調べるには、その星の平衡モデルを使って固有振動の波動関数を求め、振動を強める働きと振動を減衰させる働きとどちらが大きいか判定してやる。一般に振動を強める働きをする機構は星の内部のある限られた所だけ

で働き、それ以外の所は振動を減衰させる方向に働く。例えば核反応による振動を強める働きは当然核反応の行なわれている場所だけに限られている。恒星の自励振動を得るには、こうした振動を強める働きを最大限に利用し、振動を減衰させる働きを出来るだけおさえる事である。例えば核反応によって自励振動を起こさせるには、星の固有振動の振幅の大きい場所が星の核反応の行なわれている場所と一致し、それ以外の場所では振幅が小さくなるような場合である。星の固有振動の波動関数は前節でふれたように、星の質量や進化の段階によって微妙に異なっている。丁度このようなまい条件が満たされる星で自励振動が起きるのである。

4. 非動径振動の関連した問題

この節では現実の星で非動径振動が関係した問題について考える。

(1) ケフェウス座ベータ星型変光星

この変光星はスペクトル型が B0-B2, 光度階級が III-IV, 周期4時間から6時間の脈動変光星で、よく知られた星としては乙女座のスピカがこのグループに入る。このグループの星は HR 図上で大質量星 ($M \sim 10-20 M_{\odot}$) が中心での水素燃焼段階から球殻中での水素燃焼段階へ移行するあたりに位置している。この星の変光が脈動によるものである事は疑問の余地がないが、その脈動が動径脈動であるのか非動径振動であるのかという点になると、研究者の間でも意見の分かれるところである。この星の脈動が非動径振動であると考えられる根拠は、①変光や視線速度曲線の振幅が数日程度の周期で大きくなったり小さくなったりする“唸り”の現象があり、この唸りは周期がほんのわずかにだけ異なる2つの固有振動の重ね合わせとして理解される。このような周期の接近した2つの固有振動のモードの存在は、動径脈動としては説明が難かしいが、非動径振動の場合第2節で説明したように量子数 (k, l) が共通で m だけ異なる2つのモードとして無理なく説明できる。②このグループの星の中には吸収線の輪郭や幅が変光と同じ周期で規則的に変化するものがある。このような現象は非動径振動の内星の表面上を自転と同じ向きに伝播する $l=2, |m|=2$ の波動モードによりうまく説明出来る。ケフェウス座ベータ型星の場合なぜ脈動するのかという脈動励起機構が問題になるが、これまでのところいくつかの仮説は提案されているがまだ定説はなく、恒星の脈動理論にとって未解決の大きな問題の一つになっている。

(2) 白色矮星の変光星

最近の観測技術の進歩により、超短周期変光星と呼ばれる一連の星が発見され、現在その数は10数個になっている。その変光周期は約20秒から約1000秒にわた

っており、パルサーやX線パルサーを除けばもっとも周期の短い変光星になっている。これらの星の中にはそのスペクトルから白色矮星である事がはっきりしているものもあり、また U Gem 型と呼ばれる小規模新星 (dwarf nova) のように白色矮星を成分星にもっていると思われる近接連星などが多く、多分その大部分は白色矮星の変光星と考えられる。このグループの中で一番有名な星は DQ Her と呼ばれる 1934 年に爆発した新星で、この星は現在 71 秒の周期で変光している。このグループの星は一般に変光の振幅が小さく、生の観測データを眺めただけでは変光の周期性はわからないが、電子計算機を使った周期解析により周期性がわかるというものが多い。しかし中には変光の振幅の大きいものもあり、HL Tau-76 という星では変光の振幅が 0.3 等級にもなり、きれいな光度曲線が得られている。また、これらの星の中には多重周期を持つものや、周期変化を示すものもある。

さてこのグループの星の変光の原因であるが、現在有力なモデルとして一つは (1) 白色矮星の非動径振動モデル、もう一つは (2) 白色矮星の斜回転モデルの二つが考えられている。変光原因としては白色矮星の動径脈動の可能性がまず最初に頭に浮ぶが、質量が $0.5 \sim 1 M_{\odot}$ の代表的白色矮星の動径脈動の基準振動の周期は 5 秒から 20 秒くらいで、観測される周期よりもずっと短かくうまいかない。ところが非動径振動の g モードの場合一般に動径脈動よりも周期が長く、特に白色矮星のような電子が縮退した星の場合縮退が強くなるに従って周期がどんどん長くなる。これは前に出てきたプラント・ヴァイサラ振動数 N が縮退の進行とともに減少し、完全縮退の極限では 0 に収斂するためである。白色矮星では光度がさがる程縮退が強くなるので、 g モードの周期と白色矮星の光度との間に周期光度関係が成立つが、これはケフェウス型変光星の周期光度関係とは丁度逆で星が暗い程周期が長いという関係になっている。そして実際の白色矮星程度の明るさの場合 $l=2$ の g_1 モード、 g_2 モードの周期は 50~200 秒程度になっている。これは観測されている超短周期変光星のいくつかの周期を説明するのに丁度よい値になっている。また、多重周期性を説明するのに、非動径 g モードは都合がよい。しかし 700 秒とか 1000 秒という長い周期は非動径 g モードをもってしても長すぎる値で、このモデルでの難点の一つである。

もう一つの可能性は星の自転周期を使うもので、パルサーや磁変星との類推から磁場を持った白色矮星で磁軸と回転軸とが一致していない場合の“斜回転モデル”がそれで、この場合白色矮星の自転周期としては 10 秒より長ければ 100 秒でも 1000 秒でも許されるわけで、その点好都合である。この斜回転モデルを支持する観測

として最近 DQ Her で光の偏光の変化が観測され、その偏光変化の周期が光の変光周期 71 秒の丁度 2 倍の 142 秒である事が発見された事である。斜回転モデルではこの偏光観測を無理なく説明出来、DQ Her に関する限り変光原因は磁場を持った白色矮星の自転によるものと考えてまず間違いのないようである。斜回転モデルの場合周期は自転周期のみであるから、その他の星で見られる複雑な多重周期性等は説明出来ない。以上見てきたように、一口に白色矮星の変光星と言ってもこれらの星の変光にはかなりバラエティがありかならずしも均質なグループとは考えられないので、その変光原因もただ一つのモデルですべてを説明するというわけにはいかないであろう。

(3) 太陽の 5 分振動

太陽表面に周期約 300 秒の振動速度場が観測されており、太陽の“5分振動”と呼ばれている。この振動速度場のパワースペクトルは周期 300 秒の所に鋭いピークを持ち、水平方向の波長としては 1000 km から 50,000 km までの広い波長域を含んでいる。また、振動の動きは主に上下方向である。この 5分振動の説明としてこれまで色々のモデルが提案されているが、その中の有力なモデルの一つとして、5分振動は太陽の対流外層に閉じ込められた音波の固有振動、すなわち太陽の非動径振動の内 l が極端に大きい ($l \sim 100-1000$) p モードであるという考えがある。(同じような定在波であるが、これとは少し違って太陽の温度極小のところに閉じ込められた重力波であるとする内田豊氏 [1965] の提案もある。) すでに見たように星の非動径振動は星全体の固有モードであるが、水平方向の波数 l を大きくしていくと、星の内部で振動する重力波モードと星の表面直下に閉じ込められた圧力波モードとに、はっきりわかれてくる。太陽の 5分振動を太陽の対流層に閉じ込められた音波モードとする見方はこのような l が極端に大きい p モードが太陽で励起されていると考えるものである。このモデルの有利な点は太陽で p モードが前節でふれた自励振動になっている可能性のある事だ。この場合振動が自然に励起されてくるわけで、わざわざ振動をひきおこす外力をさがさなくてもよい事になる。ところが太陽の固有振動の p モードというのは色々あり、周期も 300 秒近辺だけでなくもっと長いのも短いものもあるわけで、なぜ 300 秒あたりの振動だけが太陽で観測されているのかという事が問題になる。安藤と尾崎 (1975) は現実的太陽外層モデルを使って対流層に閉じ込められた p モードの固有値を求めその振動安定性を調べた。その結果太陽では l の大きな p モードが自励振動になっている事が確かめられた。太陽の場合光球直下に水素の電離領域があり、この水素電離領域はケフェウス型変光

星の脈動を維持するのとまったく同じ機構により太陽の p モードを維持するのに働く。また、この計算で l の値の広い範囲で周期約 300 秒近くの固有振動が一番強く励起される事がわかった。これは周期 300 秒近くの固有振動がもっとも有効に水素電離領域の振動を強める働きを利用出来るためである。この計算の一番の問題点は太陽の固有振動である p モードと対流との相互作用が考慮されていない点で、この脈動と対流との相互作用の問題は現在までのところよく解明されていなく将来に残された大きな問題の一つである。

(4) 太陽ニュートリノ問題と太陽内部の安定性

太陽内部での核融合反応の際ニュートリノが発生する。このニュートリノを検出しようとする試みが近年アメリカで行なわれたところ、理論から予測されるだけのニュートリノが測定されなかったため、太陽ニュートリノ問題として現在天文学上の大問題になっている。このニュートリノ問題を解決する一つの可能性として、太陽の核融合反応は連続的に働いているのではなく核反応の火が着いたり消えたりという状態を繰返して、現在は丁度火が消えた状態のためニュートリノの発生が少ないのだという考えがファウラー (1971) によって提唱された。このような核反応の点滅を起こさせるきっかけとして太陽の中心部が非動径振動の g モードに対して不安定で、その結果太陽の内部で数億年ごとに物質の混合が起こるためであるという考えをディルクとゴフ (1972) が提案した。しかしこれらの議論は定性的なものであり、実際に太陽で非動径モードが振動不安定 (過安定とも言う) になるかどうかは、太陽の進化の道筋に沿って太陽の内部構造モデルを作り g モードの固有函数を求めてその安定性を調べてやる必要がある。柴橋・尾崎・海野 (1975) はこのような計算を行なった結果、太陽は最初安定であるが進化の途中で $l=1$ の g_1 モード、 g_2 モードに対して振動不安定になり、その後進化のずっと進んだ段階では再び安定になるという事を見いだした。振動不安定の起こる原因であるが、太陽が進化していくと中心部分に分子量の大きい (すなわち“重い”) ヘリウムの灰が溜ってくる結果、プラント・ヴァイサラ振動数 N の山の位置が太陽の核融合の行なわれている内部に移ってくる。それに伴ない非動径 g モードのもっとも大きく振動する“腹”の部分もこの場所に移ってくる。太陽の核融合反応である pp chain の内の (He^3 , He^3) 反応は大変温度に敏感でこのような振動を強く撥ね返す性質があり、この振動を撥ね返す効果が振動を減衰させる漏れの効果に打勝った結果 g モードが振動不安定になるのである。同じような計算を独立にケンブリッジ大学とリエージュ大学のグループも行なっており、三者の計算結果は基本的には一致しているので、この結果はかなり

信頼できるものと思われる。ところで太陽の場合半径でいって外側の約 20% は対流層になっている。前に太陽の 5 分振動の話でも出て来た事であるが、対流と振動との相互作用の問題はまだ未解決の問題であるので、実は上述した私達の計算もこの対流層を除いた太陽内部の 80% についてだけ得られた結果にもとづくものである。従って将来対流と振動との相互作用を正しく考慮出来るようになった場合あるいは結論が変わってくる事も考えられる。この問題を別にしても、振動不安定になった g モードの振幅が十分大きくなり物質の混合を起こさせる事が出来るかどうか、また、この混合によって核反応の火をうまく点滅出来るかどうかといった問題がまだ残されており、太陽ニュートリノ問題を解決するにはまだまだ道は遠いようである。

さて最近太陽自身の脈動 (固有振動) が観測されたという報告が出されて注目を浴びている (天文月報本年 8 月号雑報参照)。もしこれが本当だとすれば、太陽ニュートリノとは別の面から太陽の内部構造を探る手掛りが出来るわけでその意義は大変大きい。しかしまだこれらの観測には疑問があるという話もあるので、もう少し様子を見る必要がありそうだ。

5. おわりに

これまでのところでは非動径振動の関係していると思われるいくつかの問題を簡単に紹介した。しかし非動径振動の関連した問題はその他にも色々あり、例えば対流現象は一種の不安定な非動径 g モードと見なされるし、又星に磁場や回転のある場合の振動対流とか μ -勾配層でのセミコンヴェクションの問題は非動径 g モードの過安定性の問題であり、また、連星系での潮汐の問題は非動径モードの強制振動の問題である事などがあげられる。星の動径脈動の場合は星全体が膨張したり収縮したりするため、脈動変光星などの形で比較的容易に観測されるが、非動径振動の場合遠くの星は一点にしか見えないため星の表面に出来た凹凸も互いに打消し合って、なかなかはっきりした形では観測にかからないという事情がある。しかし星の内部や大気における色々の動的現象の基礎には非動径振動が深く関係しているので、これら星の活動現象を理解するのに非動径振動の研究は今後も不可欠であると考えられる。最後に渦状銀河の密度波は広い意味で銀河の非動径振動とも考えられるので、星の非動径振動も銀河の密度波理論から学ぶところが色々あるだろうし、また、銀河の密度波理論にも恒星の非動径振動についての知見が役立つ事があるのではないかと考えている。