

太陽の脈動

尾崎 洋二 (天文)

太陽の偏平度を測っていたアリゾナ大学の Hill のグループは、最近約一時間の周期の太陽の振動を観測した。この太陽の振動は位相の安定性・周期などから判断して、太陽自身の固有振動(脈動)と考えられる。もし本当に太陽自身が脈動しているとすると、この事が太陽の内部構造と進化の問題に与える影響は大変大きい。というのは後で述べる太陽ニュートリノの問題と関連して、太陽で現在あるいは過去に、ある種の脈動が励起されている可能性のある事を、私達東大天文学教室(海野教授、大学院の柴橋さんと私)、ケンブリッジ大学、リエージュ大学の三つのグループが独立に発見していたからだ。もちろん Hill 達の観測した振動の詳細はまだわかっていないので、私達が指摘した固有振動のモードと一致しているかどうかは、現在のところ断定できない。

恒星の内部構造と進化の理論は1950年代から1960年代にかけて、目覚ましい成功を収め、一時は太陽は中心で pp chain と呼ばれる水素融合反応によりエネルギーを賄っているごく平凡な星で、その内部構造はほとんど完全にわかってしまったものと思われた。ところが核融合によるエネルギー発生と星の内部構造の理論を直接観測的に検証しようとして行なわれた太陽ニュートリノの観測において、理論的モデル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。

太陽の中心で原子核反応によって発生した熱は γ 線として放射されるが、この γ 線は太陽内部の物質によって吸収と再放射を繰返しながら表面まで達し、そこから可視光として外の空間に放射される。光子の場合中心から表面まで random walk によって達するのに約一千万年かかるが、核反応の際発生するニュートリノは物質との相互作用が弱いので、途中を素通りして直接地球に達する。太陽ニュートリノの観測はこのようなニュートリノをとらえる事によって、直接太陽内部における核反応を確かめようとしたものであった。この太陽ニュートリノの観測において理論と測定の間大きな矛盾がある事が明らかになって以来、太陽モデルについて再検討がなされるようになったが、理論値を測定値まで下げるのは容易ではない事がわかった。

いずれにしろ太陽系の年齢である45億年という長い期間太陽が輝いているには、核エネルギーの補給は不可欠であるのだが、一方ニュートリノの観測からは核融合によってエネルギーを賄っているとして計算した太陽モデルの理論通りには現在の太陽はニュートリノを出していないという困った結果になった。

この矛盾を解決するのに、太陽中心での核融合反応は連続的に働いているのではなく、火が着いたり消えたりという状態を繰返していて、現在は丁度火が消えた状態にあるためニュートリノの発生が少ないのだという考えが提唱された。これを裏づけるた

めには太陽の核反応が間欠的に起る事を示さなければならぬ。私達が見つけたのは、太陽で周期約一時間の非動径振動と呼ばれる固有振動が励起される可能性である。あとで説明するが、この固有振動の励起が太陽で核反応を点滅させるきっかけをなすと考えられる。

恒星の固有振動のモードとしては動径脈動と呼ばれる星全体が球形を保ったまま膨張したり収縮したりする振動もあるが、ここで出てくる非動径振動と言うのは、例えば(その内でも四重極振動と呼ばれるものは)星が円盤状になったりラグビーボール状になったりするような振動である。太陽で励起される可能性のあるのは非動径振動の内の双極振動で、さらにその内でも重力波モードと呼ばれているものである。重力波というのは、例えば海の波もその一つで、重力場の中で重い流体の上に軽い流体がのっている“安定な成層”を作っている場合に出来る振動で、気象や海洋などにも出てくる。

さて太陽が45億年前、星間ガスから生まれて中心で核反応によってエネルギーを賄うようになると、核反応によって出来た灰であるヘリウムが中心部分に徐々に溜ってくる。ヘリウムは水素にくらべて平均分子量が大きいから、これは重い流体が中心に溜ってくる事に対応し、重力波モードの振巾の大きい場所が水素燃焼の行われている内部に移ってくる。太陽の固有振動を弦楽器の振動に例えれば、これはもっとも大きく振える弦の腹の部分が太陽の核反応の行なわれている場所に移動していくと考えてよい。

一般に核反応はこのような固有振動を励起しようとする傾向があり、太陽の場合の水素融合反応であるpp chainの内でも(${}^3\text{He}$, ${}^3\text{He}$)反応は温度に敏感で、振動を強く撥ね返す性質を持っている。恒星の固有振動も楽器の場合と同じで仮りに外から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減衰する。ところが太陽の場合固有振動の振巾の大きいところが丁度核反応の起っている場所に移ってくるため、(${}^3\text{He}$, ${}^3\text{He}$)反応による振動を強く撥ね返す力が、振動エネルギーの漏れる割合に比べて打勝つ程大きくなる。このようになると太陽という楽器は外からたたいてやらなくても、ひとりだけで鳴り出すという現象が起る。

このシナリオをさらに進めて、ニュートリノ問題にまでもっていくと次のようになる。

上述のようにして重力波モードが太陽内部で励起され振動の振巾が増大していくと、ついに太陽内

部で物質の混合が起る。この混合により太陽の中心に新鮮な水素や ${}^3\text{He}$ が運ばれて、灰である ${}^4\text{He}$ に取ってかわる。すると一時的に太陽の中心は核反応が盛んになり、表面から輻射で放出される以上に核反応によりエネルギーが発生し、同時に沢山のニュートリノも放射される。しかし太陽には核反応を自動制御する働きが備わっていて、核反応でエネルギーが出過ぎると膨張して中心温度を下げ、逆に核反応も衰えニュートリノの発生も止る。その後はゆっくり平衡状態に戻り、又中心にヘリウムが蓄積されていく。このような事が数千万年から数億年程度の間隔で繰返されるといふわけだ。

この考えによれば現在の太陽は核反応が弱まってニュートリノの発生も少ない時期という事になる。ニュートリノは途中を素通りしてくるので現在の太陽内部の状態をそのまま表わしているが、太陽の熱エネルギーの方は表面まで伝わってくるのに約1千万年かかるので、核反応のスイッチを切ったとしても太陽がすぐ暗くなってしまふ事はない。しかしもし太陽の中心で核反応の火が数千万年から数億年の間隔で点滅しているとすれば、太陽の明るさも一定ではなく、同程度の間隔で明るくなったり暗くなったりする事になる。このような太陽の明るさの変動が地球上の氷河期に関係しているのではないかという考えもある。

以上いかにも、もっともらしい仮説としてこの理論を紹介したが、実際にはまだ色々不完全な点があるので、本当に上述したようにうまくいくのかどうか分からない。まず第一に太陽で重力波モードが励起される可能性があると言ったが、振動が励起されるかどうかを決めている核反応による振動を起こす効果と漏れの効果との競争はかなり微妙で、ほんのわずかだけ核反応による励起の効果が勝っている状態である。一方太陽の場合半径でいって外側の約20%は対流で熱が運ばれている対流層になっている。ところが対流と脈動の相互作用の問題は現在のところはまだよく解明されていないので、実は私達の計算もこの対流層を除いた太陽内部の80%についてだけから得られた結果である。従って将来対流と脈動の相互作用が解明された場合、あるいは結論が変わってくる事もある。第二の点は、例え重力波モードの固有振動が励起されたとしても、本当に物質の混合が起るところまで振巾が成長するかどうかは、非線型の問題で現在のところ何とも言えない。

太陽ニュートリノを説明しようとする多くの試み

はいずれもうまくいかず悲観的だが、上に紹介した核反応点滅説はまだ生残っている数少ないものの一つで、この説の第一段階の点滅のきっかけとして、太陽で固有振動の励起される可能性が示され、また観測的にも最初に述べたように太陽に固有振動らしきものも発見されたので希望が持てる。

それにしても地球物理学あるいは地質学の立場から見て、太陽の明るさが数千万年あるいは数億年の間隔で変動しているという考えは如何なるものであろうか？ このような太陽の明るさの変動を証拠づけるような地質学的あるいは地球物理学的事実が色々出てくれば面白いと思う。