

太陽の内部を音波で見る

柴橋 博資*

高田 将郎†

概要

スイカを叩いてその音色を聞き分け、食べごろを調べる。これは音を使って、スイカの内部を直接目で見ずに診断している訳である。これと同じ原理を使って、太陽表面の振動を観測・解析して、太陽の内部を探る研究（「日震学」と呼ぶ）が進んでいる。その結果、音波を使って太陽の内部を透視することが出来るようになった。これまでの主な成果は、

- 太陽表面では対流が起きているが、対流層の深さが明らかになったこと、
- 太陽中心部では水素の核融合が起きていると考えられているが、確かに水素が減少していることが明らかになったこと、
- 核融合に伴って発生するニュートリノ量をこの方法で見積もれるようになり、結果は、測定値より多く、深刻な問題であることをはっきりさせたこと、
- 内部での自転の様子を明らかにしたこと、
- 内部の音速や温度の様子を明らかにしたこと、

などである。

こうして明らかになった太陽内部には、標準的な太陽モデルと比べて、対流層の直下に、音速が速い層がある。この層で音速が速いのは、自転の様子急激な変化に伴う、攪拌のためではないかと、考えられた。今回、学会で発表する研究で、元素組成も、対流層直下で、非一様になっていることが判り、攪拌が起きているらしいこと、が確認された。

今回の研究発表だけでなく、新しい研究である「日震学」全般について紹介する。

1 太陽に関する謎

太陽は、多面的に研究されてきたが、にも拘わらず、多数の重要な問題が謎のまま残されている。幾つかを列挙してみると

- 太陽ニュートリノ問題：太陽の中心部では、水素原子核がヘリウム原子核に変わる核融合が起きてエネルギーが発生しているが、その際ニュートリノという素粒子も発生する。発生したニュートリノは直ちに地球に到達するが、その量を測定すると、測定値は理論値の約半分でしかない。一方発生したエネルギーは、約 1000 万年かかって太陽表面に達し、それが日光として地球に注がれている。すなわち、太陽からの光は、1000 万年前の太陽中心の様子を反映しているものに過ぎないが、ニュートリノは今の太陽中心の様子を教えている。ニュートリノの測定値が少ないという事は、今現在は、我々が考えている

*東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院理学系研究科天文学教室. shibahashi@astron.s.u-tokyo.ac.jp

†ケンブリッジ大学天文学教室. takata@ast.cam.ac.uk

ほどには、太陽中心で核融合があまり起こっていないのかも知れないという事すら示唆している。或いは、ニュートリノの理論に大きな変革が必要なのかも知れない。

- 太陽内部の自転：太陽や星の自転は表面の様子しか測ることが出来ない。中心部が高速自転していると星の構造や進化にも影響するだろう。果たして太陽内部はどのように自転しているのだろうか？
- 太陽の自転の進化：太陽が誕生してからその進化の過程で、中心部は収縮していく。フィギュアスケートのスピンをする時、腕の広がりやすぼめて速くスピンをさせるが、同様に太陽の中心部も収縮するにつれ、回転は速くなっていくだろう。一方表面では、太陽風が外に吹き出しているので、次第に回転が遅くなっていくだろう。果たして、どうだろうか？
- 非一様自転：星はガスなので、一様に自転している必要はない。実際、太陽の表面の自転は緯度と共に遅くなっている。なぜだろうか？3次元的には流れはどうなっているのだろうか？
- リチウム問題：太陽の表面の化学組成を調べると、リチウムの量が、太陽系の組成比に比べて少ない。これは、リチウムが、核融合を起こして減少したのだと考えられるが、表面付近では、温度が低すぎて、リチウムの核融合は起きない。核融合が起きる程に温度が高い深い層に、なんらかのメカニズムで運ばれたに違いないが、そのメカニズムは説明出来ていないし、進化理論にも考慮されていない。
- コロナ：表面温度 6000 度の光球上空に、100 万度のコロナがどうして存在するのか？光球とコロナ間にある彩層の構造は、どうなっているのか？その構造や不均一性に磁場がどう関与しているのか？
- 太陽活動：黒点周期に代表される太陽活動が、なぜ起きるのか、なぜ磁場が反転するのか？これは、太陽の外側半径にして約 3 割で起こっている対流と自転の相互作用で磁場が作られ、その作用が 11 年周期で変化するためであると考えられている。この考えが想定する対流層内の自転は、大雑把に言うと、自転軸からの距離に依っている。このような自転と黒点活動を説明する考えを検証出来るだろうか？
- 種々の表面現象：黒点は一体何なのか？白斑は、スピキュールは、...？フレアのエネルギー解放機構は何か？

これらの問題の多くは、太陽の内部に関係している。表面現象ですら、その元を質せば、その本質も太陽の内部にある。とはいえ、残念ながら、従来は、太陽内部を探查するなどは不可能であった。しかし、事態は、太陽の表面の振動を使うことによって、大きく変わった。今や、我々は太陽内部を「見る」新しい眼を持つようになったのである。

2 太陽表面の振動：太陽の唸り声

西瓜を叩いて、その音色を聞き分けて西瓜の熟れ具合を知ることをご存知であろう。これは、音波という振動を使って西瓜の内部を診断している訳である。この原理を使って、太陽内部を

探る事が出来る。太陽面ではいつも約5分ぐらいの周期の振動が起こっている。太陽の表面近くで起こっている対流運動によって太陽全体がいつも叩かれているから振動しているのだと考えられている。この波動を使って太陽の内部を探る研究を、「日震学」と呼ぶ。観測されている振動は、ガス圧力を復元力とする音波である。振動を使って太陽内部を探るといのは太陽の音色を聞き分ける事なのだ。

太陽面から音を下に向けて発したとしよう。中の方が温度が高く音速も速いから、音波は段々外向きに屈折して進み、ある深さまで達すると、遂に外に向けて反転してしまう。表面まで戻ると、再び反射されてまた下に反転する(図1)。こうして反射を繰り返す波の位相が丁度うまく合った場合が、太陽の固有振動である。図2に、太陽の表面の固有振動パターンの例を示す。図1に見るように、細かなパターンの音波モードは太陽の比較的外側の層で反射され、深い領域まで達しない。それに対し、大きなパターンの音波モードは、かなり中心領域まで達する。

3 太陽振動を捉える

実際に観測される太陽の振動は、これらの固有振動が沢山重なり合ったものである。振動は、表面の明るさの変化か、運動となって現れる。太陽の音を聞き分けるには、太陽の表面の明るさか運動を通して太陽面をパターン解析をして、図2で示したようなそれぞれの固有モードのパターンの成分の強さを求め、その強さの時間変化を見れば良い。こうして太陽の固有振動が観測的に求められる。

と言っても、事はそう簡単ではない。個々の振動モードの振幅は極めて小さいからだ。そんなに小さな振幅でも観測・測定出来るのは、振動が周期的だからである。周期成分を探すには、太陽全面を広く眺める事と、長時間にわたって観測を続けるという事が重要になる。そこで、地上数箇所に観測ステーションを配してネットワーク観測を行うか、衛星から昼夜の途切れのない観測を行うようになった。前者の例は、米国国立太陽天文台が中心となって行っている GONG プロジェクト¹ であり、後者は、NASA と ESA の共同で 1995 年 12 月に打ち上げられた衛星 SOHO² である。いずれも 1996 年からフル稼働し始めた。図3に SOHO 観測データを掲げる。

4 太陽内部の音速診断

沢山の固有振動数が精度良く測られれば太陽の内部診断が出来ようというものだ。振動を解析する事により、太陽内部の音速分布が判る。図4に、最近のデータを基にこうして求めた太陽内部の音速分布を示す。誤差の帯の幅は、観測された振動数の誤差に対応している。中心近くで、単調でないのは、中心部で、ヘリウムが外より多く含まれていることを示していて、中心核での核反応の証拠と見なす事が出来る。また、太陽の年齢をこれから決める事が出来る。太陽の音色を聴くだけで年齢が判るなんて、画期的でしょう！太陽中心部で核融合で発生したエネルギーは輻射で運ばれるが、ある程度より外側では対流で運ばれる。中心から約0.7太陽半径ぐらいのところで、図の傾きがガクッと急に変わっているところが輻射層と対流層の境である。太陽の対流層がどれ位深いかという事は理論的に正確には決める事が出来なかった。日

¹ Global Oscillation Network Group の略。世界6箇所に観測ステーションを置く。

² Solar and Heliospheric Observatory の略。地球-太陽間のラグランジュ(L₁)点にあって、太陽を常時観測する。

震学による音速診断から初めて太陽の対流層の深さを見る事が出来たのである。

これまでの標準太陽モデルの音速分布と、こうして求めた現実の太陽内部の音速分布を比べてみよう。図5は、ある標準太陽モデルと図4に示した現実の太陽の相対的差を図示したものである。モデルとの差は高々0.5%。それに対し、図に見るように、観測データが異なっているもほぼ同じ結果が得られていて、観測誤差、決定誤差は高々0.1%で、モデルとの差異は有意である。輻射層の上部 ($r/R \sim 0.65$) に特徴的な差が顕著である。

5 標準太陽モデル過信すべからず

恒星の誕生から死に至るまでの一生の過程を追う理論に基づいて作られた太陽モデルを標準太陽モデルと称する。前に述べた太陽ニュートリノ問題とは、現実には測定した太陽ニュートリノ量が、こうして作った標準太陽モデルから予測される値に比べて少ないという問題なのである。しかし、太陽が誕生してから現在までに起きたかもしれない内部構造の不安定性の影響や、高速自転をしているかも知れない中心核の進化や、対流の不完全な取り扱い等、このモデルは完璧なものではない。また、日震学による音速診断で見る通り、現実の太陽と標準太陽モデルの一致は完全ではない。

6 太陽内部のスナップショット

そこで、これまでの太陽モデル作りの様に過去の歴史についての仮定を使うことなく、日震学でなされた音速診断データを、質量、半径、光度に次ぐ精度良い実験測定データとして、太陽モデルを規定する条件として採用する。これらは、全て現在の太陽に関する観測量であるので、より実験データに基づく、現在の太陽のスナップショット・モデルを作るのだ。こうして、太陽内部構造が、信頼に足る実験データと信頼度の高い理論的要請によってのみで、構築出来るようになった。太陽ニュートリノ問題では、太陽が誕生以来現在までの過去の歴史についての仮定が悪いという可能性があったが、日震学に基づく太陽モデルから、検出されるニュートリノ・フラックスが確かに少ないこと、その原因が太陽モデルの不備にあるのではなく、ニュートリノの物理にあるらしいと言えるようになった。ニュートリノの物理で太陽ニュートリノ問題を説明する試みで有望視されている理論は、ニュートリノの質量がゼロでないとする説である。ニュートリノの質量等は理論的には決める事が出来ない。太陽ニュートリノの測定値と日震学に基づく理論値の比較から決めるのが正当的であろう。

7 太陽内部の自転診断

太陽が自転している事が振動数に影響する。そこで、詳細に解析すれば、自転の様子が深さや緯度の関数としてどんな風になっているかを求める事が出来る。図6は、最近の結果を、太陽を自転軸を含む様に輪切りにした面上で、自転角速度 (2π をそれで割ったのが自転周期である) を等高線で表わしたものである。(もっと深い領域の自転角速度が示されていないのは、意味のある結果を引き出すのが難しいからである。)

この結果は、驚きと戸惑いをもたらした。予想とは異なり、対流層内の自転は、大雑把に言うところ、回転速度は自転軸からの距離に依っているのではなく、内部の輻射層は、ゆっくりした

剛体回転だったからである。また、対流層内の自転角速度の変化率も、考えられていた程には大きくなかった。これは、太陽活動を説明する理論や内部自転に関するナイーヴな考えに大きな修正を迫るものである。これが契機となって、より詳しいモデルの計算や基礎過程の再検討が行なわれるようになってきている。日震学による自転診断のより正確化も必要であろう。

8 自転と攪拌

この対流層の非一様回転から輻射層のほぼ一様な回転への遷移層は非常に薄い。このような遷移層では特異な流れが期待されよう。もしこの様な流れがあれば、対流層と物質を混合させ、図5に見られる対流層直下の音速のコブを説明出来るかも知れない。また、この流れはリチウムを対流層から温度の高い輻射層に運び込むのにも有効であろう。1章で述べたリチウム問題の解決に有効かも知れない。また、そのような特異な流れが乱流を生じ、角運動量を輻射層から効果的に抜き取るのにも有効であるとの考え方が出てきている。今回、学会で発表する研究で、元素組成も、遷移層で、非一様になっている事が判り、攪拌が起きているらしいこと、が確認された(図7)。

9 走時曲線を使った局所的日震学

地球の内部構造の研究では、固有振動数よりも、震源からの距離と波の伝播時間の測定結果(走時曲線)が主たる情報源である。地震学でポピュラーなこの手法でも太陽振動を解析する試みがなされるようになった。太陽面のある一点で発生した音波は太陽内部を伝播して別の点に到達する。到達時間は、音波が伝わる経路の物理状態に依っているから、この情報から逆に物理情報が得られる。こうして、光球面より深いところでのガスの運動、温度の斑などが詳細に見えるようになった(図8)。黒点は磁束管が光球面に現れた、その切り口だと考えられている。従って、その根は深いところにある筈で、対流層下部には大元の磁束管が横たわっていると考えるのが自然であろう。このような光景を実際に見える様にするのが、走時曲線解析の一つの目標である。

10 何が太陽を揺すっているか

そもそも太陽はどうして沢山のモードで振動しているのだろうか？太陽が自然に振動しているという事実そのものも太陽の内部を調べるのに役に立たないだろうか？太陽振動の励起機構は、現在は、対流層での乱対流による音波の発生機構であると考えられている。しかし、対流の理論の方から励起される音波のエネルギーを計算すると、観測的に決めたものに比べ、値自身は何桁も小さいのである。

日震学で使える情報源には3種類ある。一つは固有振動数、もう一つは走時曲線、それにもう一つがここで述べた励起機構に関する情報である。このうち固有振動数を情報源として用いる方は、前節までで述べてきたように、今や天体物理学としては例外的な精密科学となっている。他方、励起機構に関する方は、未だに桁さえ合わせるのに苦労している。励起機構に関する日震学的アプローチが成功すれば、走時曲線による研究と共に、対流構造を明かすのに有効だと期待される。

11 長期変動

太陽の多数の固有振動モードが精度良く測られるようになって10年以上経った。この間に11年周期の太陽活動の極大期も極小期もあった。当然のごとくに、太陽振動が太陽活動と共に変わっているか、変化があるとすればどのように変わっているか、という事が調べられるようになった。

観測された固有振動数の長期変動の詳しい解析から、太陽内部の構造変化は、光球面下約200kmより外層でのみ起こっている事が明らかになった。ただ、その変化が物理的に何なのか、或いは更にその原因は何なのかは、未だに良く判っていない。これらの理解のためには、太陽からの全輻射量の変化、対流パターンの変化、磁場の変化等を総合的に理解する事が必要であろう。定性的定量的解釈解析は今後の課題の一つである。

12 日震学の重要性

日震学が太陽の中を見るのに威力を発揮している事はお解りいただけたであろう。あらためて強調しておきたい事は、日震学は太陽の中を見る唯一の方法だという事である。太陽表面で華々しく見られる磁場に絡んだ諸現象も元を質せば、その本質も太陽の内部にある。その本質的理解にせまる道具立てとしても日震学は欠かせないものとなる。

13 参考文献

おわりに、日震学に興味をもたれた方のために幾つかの参考文献を挙げておく。

1. Leibacher, J. W., Noyes, R. W., Toomre, J., & Ulrich, R. K. 1985, Scientific American, 253, 34. [日江井栄二郎訳 日経サイエンス, 15, 1985年11月号.]
2. 柴橋博資 1985, 科学, 55, 551.
3. 柴橋博資 1988, 日本物理学会誌, 43, 680.
4. 柴橋博資, 関井 隆 1993, 天文月報, 86, 416 及び 461.
5. Harvey, J. 1995, Physics Today, 48, [柴橋博資訳 パリティ, 11, 1996年9月号.]
6. Science, 272, 1996年5月号. 日震学の特集号.
7. 関井 隆 1998, 天文月報, 91, 92.
8. 柴橋博資 1998, パリティ, 13, 1998年12月号, 63.
9. 尾崎洋二 1999, 「活動する宇宙：天体活動現象の物理」柴田一成, 福江純, 松元亮治, 嶺重慎 編 (裳華房、東京), p.33.

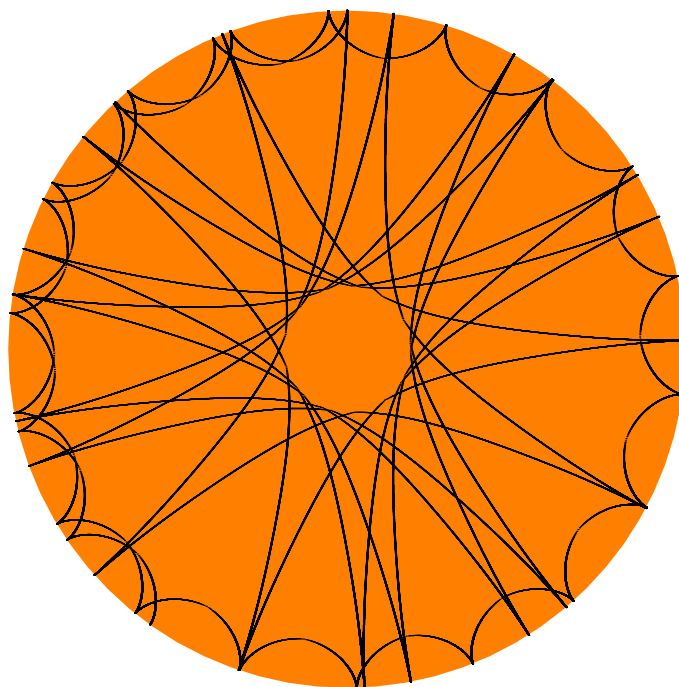


図 1: 太陽内部を伝わる音波の様子。同じ振動数でも、細かなパターンの音波モードは太陽の比較的外側の層で反射され、深い領域まで達しない。それに対し、大きなパターンの音波モードは、かなり中心領域まで達する。

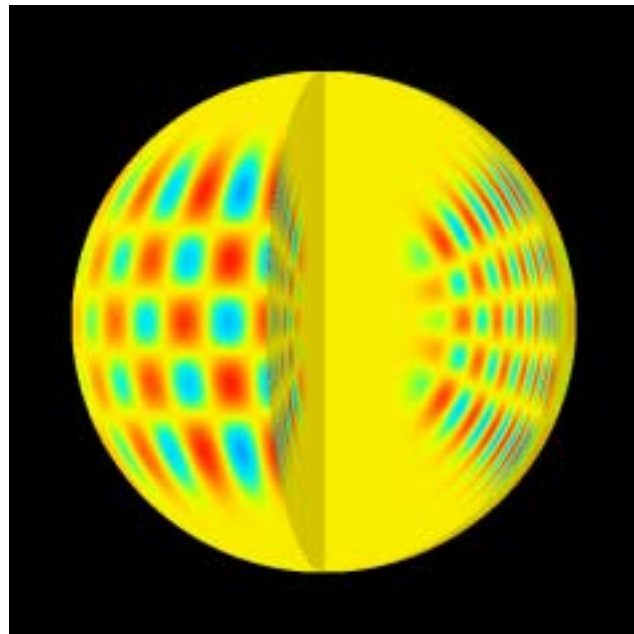
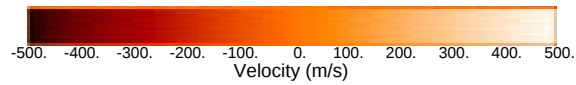


図 2: 固有モードの太陽表面でのパターンの例。青の部分が振動で膨張（収縮）している時、赤の部分は収縮（膨張）している。色の濃い方が振幅が大きい。青と赤の境界が節線になっている。Kosovichev, A. G. et al. 1997, Solar Phys., 170, 43 より転載。

Single Dopplergram Minus 45 Images Average

(30-MAR-96 19:54:00)



SOI / MDI

Stanford Lockheed Institute for Space Research

図 3: 太陽振動の観測データ。 <http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/MDI/mdi002.gif> より転載。

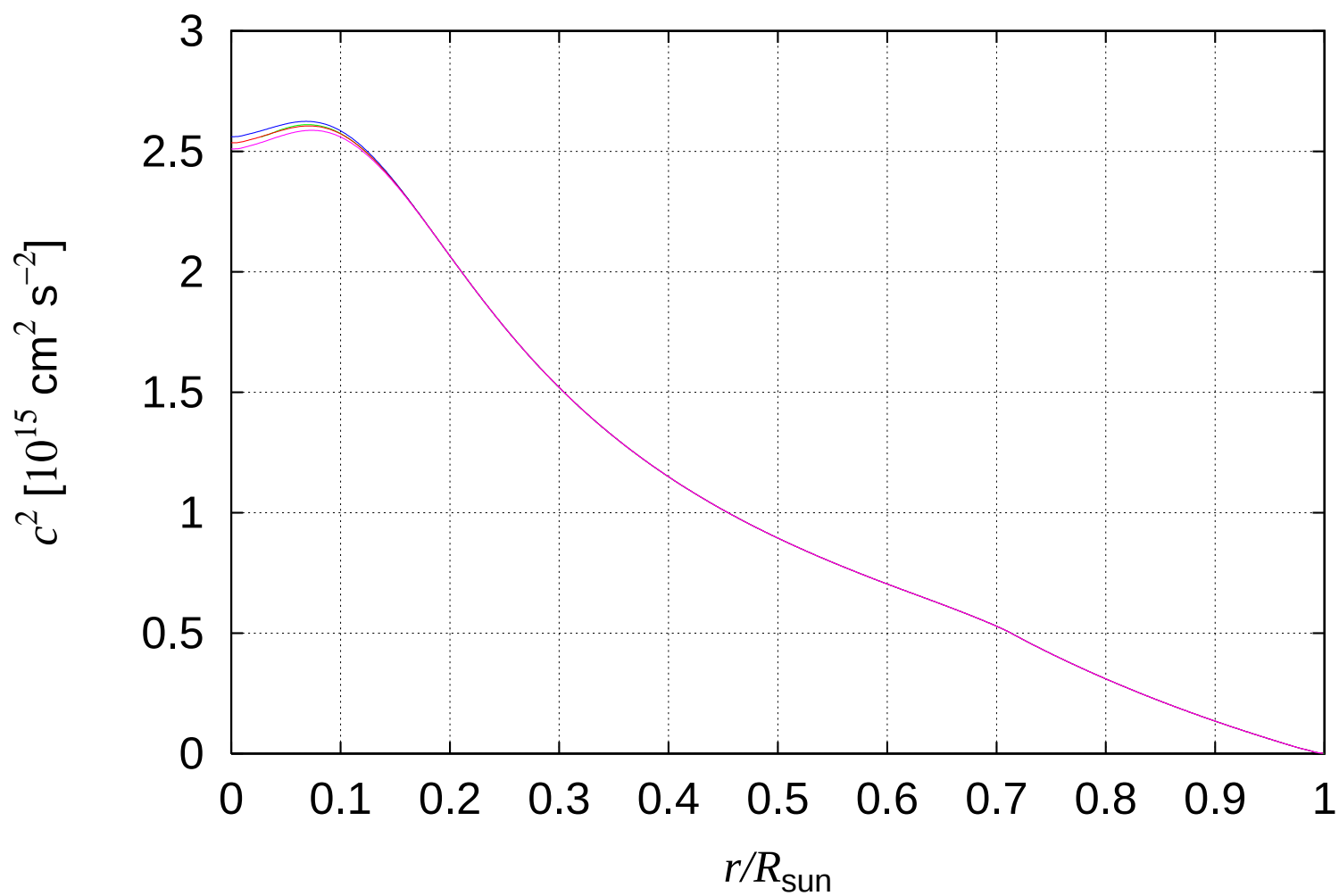


図 4: 太陽の固有振動から求めた太陽内部の音速の二乗の分布。

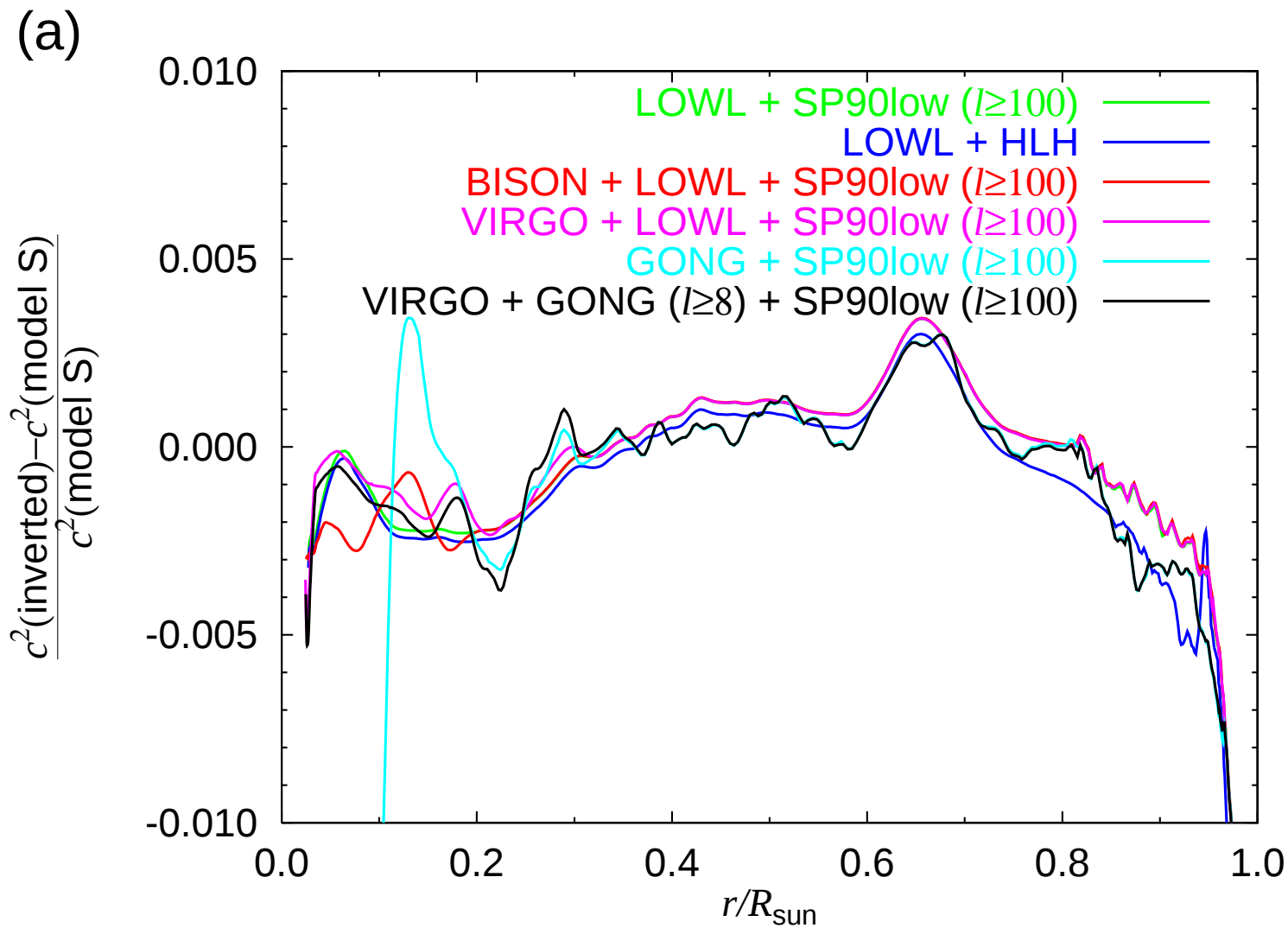


図 5: 固有振動から求めた太陽内部の音速の二乗と従来の太陽モデルとの相対差。観測データ毎に、違う線で表示しているが、全体の傾向は一致している。Takata , M. & Shibahashi, H. 1998, ApJ, 504, 1035 から転載。

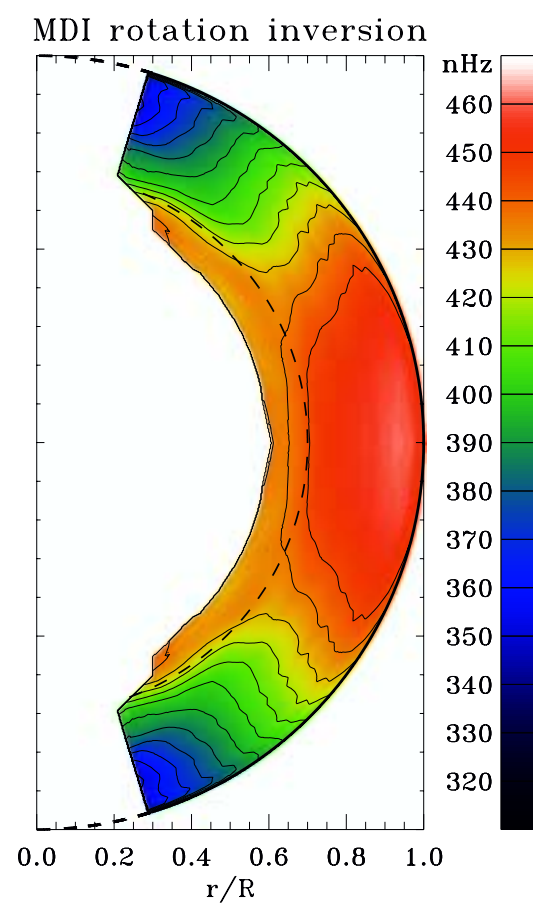


図 6: 太陽の振動を解析して明らかになった、太陽内部の自転角速度。破線 ($r/R = 0.7$) が対流層の底で、この層で角運動量分布も急に変化している事が判る。関井 隆 1998, 天文月報, 91, 92 より転載 (Schou, J. et al. 1998, ApJ, 505, 390 参照)。

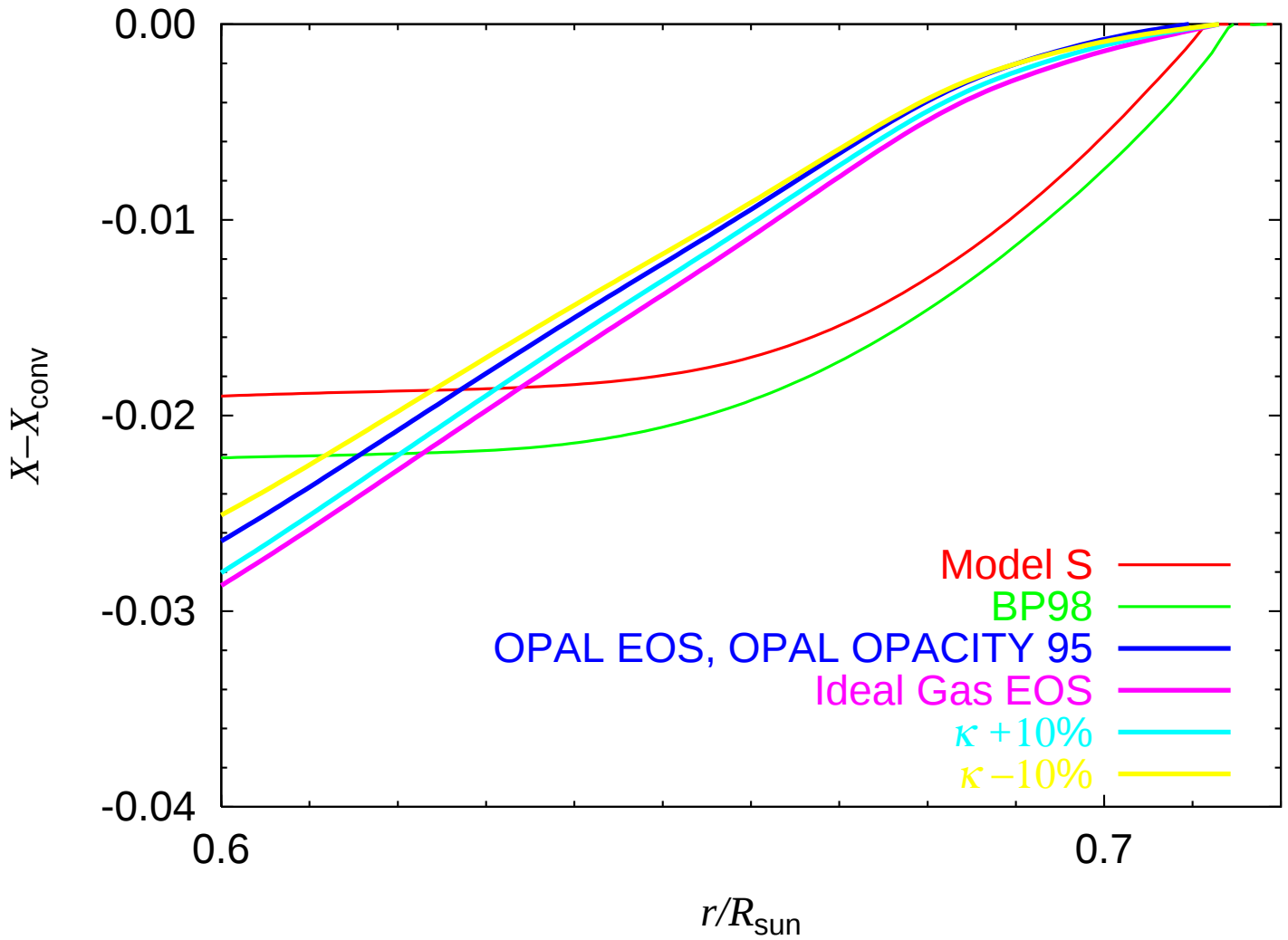


図 7: 太陽の振動を解析して明らかになった、遷移層付近の水素分布。物理パラメーターを変えて解析した 4 つの場合について示したが、いずれも上に凸な曲線になっている。攪拌を考慮しない太陽モデル（典型的な 2 つのモデルについて図示した。下に凸な 2 本の曲線）とは、明らかな違いが見られる。

Convective Flows Below The Sun's Surface

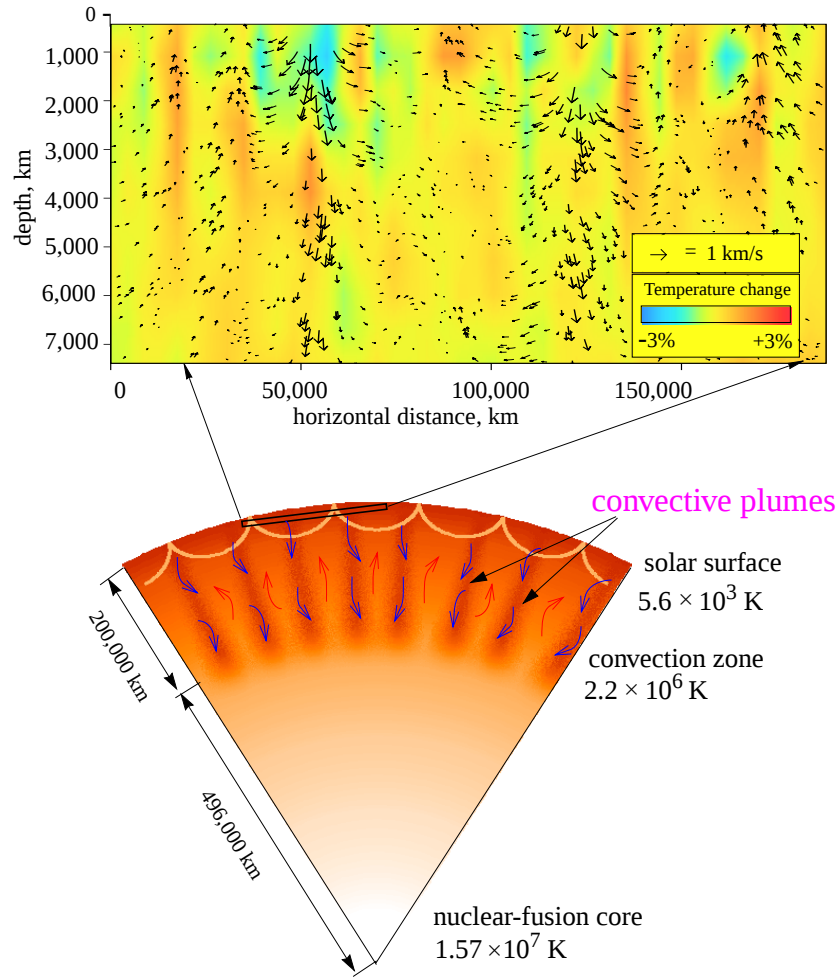


図 8: 走時曲線を使った局所的日震学で見えるようになった対流層の物理。色の違いは温度の違いを表わし、矢印は流れを表わす。 http://soi.stanford.edu/papers/One.year/figure_09.gif より転載。