

惑星気象学—金星と巨大惑星の気象力学を中心として*

松田 佳久**・矢野 順一***

1. 序

1960年代以後、多くの惑星探査衛星の観測により、惑星気象学が気象学の一分野として発展する基礎が与えられた。地球大気と比べると、観測は極めて限られているにもかかわらず、地球の常識では予想出来ないような、興味深い色々な現象が、発見されている。このような現象を物理的に説明するのが惑星気象学の課題である。地球の気象学に比すと量的には少ないが、色々な興味深い研究がなされている。

しかし、80年代に入って、惑星気象の研究が70年代ほど多彩でなくなった印象を受ける。その理由は、米国で学問外の事情で惑星気象を研究する人が減少したということだけではなさそうである。惑星探査等で発見や確認された現象に対して、70年代においては、それを説明する種々のおもしろい理論が提出されたが、その種々なる理論の妥当性を検証出来る程には、観測は進んでいない。特に、気象力学の場合は、流れや温度の三次元構造が問題となるのだから、一つや二つの惑星探査機の観測で、理論の検証に十分な結果を出すのは、容易ではない。しかし、80年代においても、データ解析や理論的研究において、地道な努力が続けられていたので、90年代には、惑星気象学の静かな展開が期待出来ると思われる。

2. 惑星大気全般

一口に惑星気象学と言っても、対象となる惑星やその中の現象等、多岐に渡っている。従って、本稿では著者の専門分野の関係上、金星と巨大惑星(木星と土星)の気象力学を中心として文献を紹介していきたい。その議論に入る前に、本節では惑星大気全般にわたる文献を紹介

しておきたい。

日本語の文献には1と2がある。1は一人の著者による個性的な本であり、2は複数の研究者の分担執筆による総合解説である。

3は気象以外も含めた太陽系全体にわたる解説であり、多くの美しい写真や図が掲載されている。

アリゾナ大学出版会からシリーズで出ている、木星、金星、土星、天王星に関する本(4, 5, 6, 7)には、大気に関する解説が含まれているので参考になる。

8は主な惑星の大気及びその気象学のかかなり詳しい解説を内容とした本である。9もいくつかの惑星の大気の解説であるが、トピックス的な内容の本である。10は化学を中心として、惑星大気を解説した本である。

3. 惑星気象の統一理論

10を越える惑星ないし衛星の気象現象、特に、惑星規模の大気大循環が段々わかってくると、それらを整理し、一般理論の中に位置付けたいという要請が生じてくるのは当然である。しかし、この惑星気象の統一理論は、余り多くの試みがなされていないだけでなく、その少数の試みも成功しているとは言いがたい状況にある。しかし、統一理論の観点は重要なので、その試みをここで紹介しておきたい。

統一理論の一つの方向は次元解析的発想によるものである(11)。大気の代表的風速等を、惑星大気の複数の外部パラメータ(例えば、大気量等)で直接、簡単な式で表現する発想は大変ユニークであるが、次元解析的手法単独では、11以上の発展はあまり望めないであろう。

一方、地球大気を念頭において発展した大気大循環モデルを用いて、種々の惑星の大気大循環を統一的に説明しようという試みもある(12, 13, 14)。しかし、このWilliamsの数値実験は専ら惑星自転速度を、機械的に変えたものであって、その数値実験の結果を地球以外の惑星に直ちに適用することは出来ない。

* Meteorology of planetary atmospheres—dynamic meteorology of Venus and giant planets.

** Yoshihisa Matsuda, 東京大学理学部.

*** Jun-ichi Yano, NCAR.

11の次元解析的発想と数値実験以外の方法による(又は両者の組み合わせによる)統一理論の構築は出来ないものであろうか。

4. 金星の気象学

先ず、ソ連の惑星探査衛星ヴェネラ8号以後の観測結果の報告を紹介しておきたい。ヴェネラ8号の観測結果は15、マリナー10号の観測結果は16を参照してもらいたい。パイオニア・ヴィーナスの観測結果に関しては1980年のJ. Geophys. Res. (17)の諸論文を参照していただきたい。特に、以下に述べる気象力学的現象にとって興味深いのは18, 19, 20である。ヴェネラ9号と10号の観測に関しては21を、二つの気球を放ったヴェガの観測に関しては1986年のScience (22)の中の諸論文を参照していただきたい。

パイオニア・ヴィーナスから得られたデータの比較的最近の解析結果(23, 24)は以下に述べる雲層高度の気象力学的現象の理解にとって重要である。

金星の大気で最も興味深い現象の一つは、750K 近い金星地表面の高温である。今の所、その原因として、温室効果以外の原因は考えられない。実際、いくつかの鉛直一次元輻射対流平衡のモデルも温室効果による説明を支持している(25, 26, 27)。

気象力学が中心であるが、28と29は金星大気に関する総合報告である。

気象力学に話を限定すると、固体部分の自転よりはるかに速い速度で(65 km 高度では約60倍)、大気が回転している現象が金星最大の問題であると思われる。その原因について多くの研究がなされて来たが、現在においても、はっきりした原因がわかっていない。研究者も少し持て余し気味なのか、最近では70年代のような、この現象のメカニズムの説明を正面から試みようという研究が少なくなって来た。しかしながら、地道な努力は続けられている。

高速東西流(super-rotation)を説明する理論は二つに大別出来る。一方は、経度方向の夜昼間の加熱・冷却によって励起される対流や潮汐に注目するものであり、他方は、子午面循環に着目するものである。

前者は夜昼間の対流に注目して、その傾きから、高速東西流を加速・維持しようという“moving flame”のメカニズムから出発した(30, 31, 32, 33)。しかし、その後は、夜昼間の対流の代りに、熱潮汐を考えるのが主流となって来た(34, 35, 36)。これは、地表付近(高

度約15 km 以下)を除いて、だいたい大気が安定成層していること(18)、熱潮汐が雲層(約45~65 km)より上部で実際に観測されるようになったからであろう(35)。

一方、子午面循環の角運動量輸送に着目して、高速東西流を加速・維持するメカニズムも提出されている(37, 38, 39, 40, 41)。その後の観測により、雲層上部において、子午面循環の一部と解釈され得る極向きの流れが発見された点はこの理論に有利であるが、まだ理論としても必ずしも完結していない。

42は高速東西流維持の運動量バランスの観点から、子午面循環の効果を議論したものである。

高速東西流の根本原因を正面から扱ったものではないが、雲層高度の熱潮汐と子午面循環による運動量バランスを理論的及び数値的に研究したものが、43と44である。

このように、子午面循環の効果と夜昼間の加熱差による運動の両方を考えて、高速東西流の説明を試みる必要がある。

大気大循環モデルを用いた金星大気の大循環のシミュレーションも色々試みられている(45, 46, 47, 48)。45と46は少し古いが、金星の下層大気を対象としたものである。これらの研究の中で、一応、雲層の高速東西流(super-rotation)がモデルで再現されているのは、47のみである。しかし、その妥当性は38で否定的に議論されている。

5. 巨大惑星(木星、土星)大気

惑星大気、特に外惑星の大気というのは、多くの探査機が飛ぶ様な現代においても、気象学の中では実にあやしげな分野である。確かに、木星の大赤斑などは実に魅力的な存在で、誰もがテーマにしてみたいと思うものである。しかし、その魅力に単純にとりつかれてこの分野にのめりこんでいった者からすれば「木星の大赤斑を本当は研究したかったが状況的に許されなかった」という人の話を聞く度に、実に幸運な人だと思うものである。

このような分野でまじめにものを考えようとすれば、大変地味な結論しか出てこないことが多い(49, 50)。もちろん、一方でNature か Science に論文を出して、世界中に名を馳せたいと思うならば大赤斑ほど格好の題材はない。以下に挙げる文献もそのような視点でながめていけば、実に人間味あふれる世界がくっきりと浮かび上がってくるだろう。

巨大惑星に関する、最もまとまった総合報告としては、4, 6, 7がある。いくつかの雑誌の特集号(51, 52, 53, 54, 55)も参考になる。4つの外惑星(冥王星は除く)の大気力学の総合報告としては56がある。

以下では、大循環に関連した内部対流の問題と大赤斑のモデルに特に焦点をしばって、具体的な文献を紹介していく。

2.1 内部対流と大気大循環

ポイジャー探査以前に書かれた木星の大気大循環に関する最もすぐれた論文は、57である。木星の大気大循環を球面上に載った二流元乱流で擬したモデルである。エネルギーの逆カスケードによって、小スケールの乱流から、観測されている様な周期型帯状流が生み出される。

しかし、ポイジャー探査の結果が整理されるにつれて、木星の大気大循環は57のモデルで仮定されている様に薄い大気の層に限定されているものではなく、むしろ、内部深くまで及んで内部熱源によって駆動されているという認識が広がっていった(観測データからの分析として、58, 59; イデオロギーの理論武装の試みとして、60; エネルギー論的考察として、49—伝統的視点から、これに抵抗する立場として、61。

62は、かんたんな解析のモデルで内部対流が周期型帯状流を駆動しうることを示している。もっとも、少しはいねいに過去の文献を見直してやると、62は実に皮肉な論文で、63の手法を借用して解析解が可能なりまい極限で、64の線形解析を基礎として、弱非線形理論を展開している。しかし、64の解析は最低次で誤っており、改訂された解析が65で与えられている。もっとも、ここまで深入りすれば、これは応用数学の世界で、もはや惑星大気の世界ではないかも知れない。より数値的かつ直観的に結果を見たいと思う人は、66, 67を参照すれば良い。もっとも、これらのモデルが巨大惑星の内部対流の良いモデルになっているかは、別問題である。少し頭を使えばいくらでも悪口を書きならべることができる。しかし、少しましな方法を考え出そうとすると、よほど頭をしばってやらねばならない。

巨大惑星大気における傾圧不安定は未解決の問題である。現状でのレベルについては、68及びその中の引用文献を参照してほしい。下部境界条件の扱いに問題が残されている。

2.2 大赤斑、その他

木星の大赤斑、及び白斑についてのポイジャー探査の結果については、69, 70がある。対流圏上部までの平均

場については比較的良く分かったが、下部構造全体の鉛直スケールについては全く未確定のままで残されている。この為、今でも新しい非線形孤立渦の理論が出ればすぐに大赤斑のモデルに仕立て上げられ、室内回転実験できれいな孤立渦が作れば大赤斑のアナログということが、堂々とまかり通っている。

そのような最近の理論のリストとしては、soliton(71), modon(72), 中規模渦(73), 渦斑(74)がある。室内実験で見い出された大赤斑もどきとしては、傾圧渦(75), 自由傾圧渦(76), シアによって生成された中規模渦(77, 78)がある。79は、浅水モデルでの数値実験によって、これらの理論モデルの近似有効性、安定性、比較検討を試みている。室内実験屋の立場からの解説(80)もある。大赤斑の理論をするということは、地球流体中の孤立渦の理論をするということに等しいから、最初のとっかかりとしては、81, 82を見ることになる(また、『ソリトンとモドン』を特集とした気象研究ノートが編集集中である)。中規模渦に関するロシア学派の理論、実験にわたる研究は注目しておいて良い(83, 84, 85)。

実は、これらのモデルに共通した弱点は、大赤斑の鉛直構造が陽に考慮されていないことである。86は、これらのモデルに鉛直構造を陽に入れてやると、大赤斑に模されている傾圧孤立渦は順圧 Rossby 波を放射しながら急激に減衰していくという実に悲観的結果を出している。87, 49で与えられている理論的束縛条件を考慮に入れつつ傾圧不安定、内部対流、潜熱加熱、放射などの様々な物理過程をきちんと組み入れた整合的なモデルの構築が待たれる。

現象が劇的であるのにもかかわらず、大赤斑のはなばなしの影でほとんど省みられないままでは、木星表面上で発現する様々な攪乱現象である。88は、モデル数値実験によってこの現象の解明を試みたユニークな論文である。

巨大惑星大気に関する最近の最も大きな発見は、海王星の Great Dark Spot(89)であろう。これに関する理論的研究がすでに論文になっている(90)から、惑星大気分野の研究の動きは、速いと言えば速い。そういう中で、本当はそれでどこまでものがきちんと分かったのか—を注意深くさぐり始めるのが、まじめな惑星大気研究の第一歩であろう。

参考文献

- 1) 森山 茂, 1981: 大気の歴史, 気象学のプロムナード1, pp. 220, 東京堂出版。

- 2) 森山 茂編, 1987: 惑星大気, 気象研究ノート, 155, pp. 206, 日本気象学会.
- 3) Beatty, J.K., B. O'Leary, and A. Chaikin, (ed.), 1982: *The New Solar System*, 2nd. ed., pp. 240, Sky Publishing Corporation & Cambridge University Press. (J.K. ビアティ, B. オレアリー, A. チャイキン共編 (伊藤謙哉, 桜井邦朋監訳): 新太陽系—パイオニア, ボイジャー……が明かす最新像—, 培風館)
- 4) Gehrels, T., (ed.), 1976: *Jupiter*, pp. 1254, University of Arizona Press.
- 5) Hunten, D.M., L. Colin, T.M. Donahue, and V.I. Moroz, (eds.), 1983: *Venus*, pp. 1143, University of Arizona Press.
- 6) Gehrels, T. and M.S. Matthews, (eds.), 1984: *Saturn*, pp. 968, University of Arizona Press.
- 7) Bergstralh, J.T., E.D. Miner, and M.S. Matthews, (eds.), 1991: *Uranus*, pp. 1076, University of Arizona Press.
- 8) Kondratyev, K.Y. and G.E. Hunt, 1981: *Weather and Climate on Planets*, pp. 755, Oxford, Pergamon.
- 9) Hunt, G.E. (ed.), 1985: *Recent Advances in Planetary Meteorology*, pp. 161, Cambridge University Press.
- 10) Chamberlain, J.W., 1987: *Theory of Planetary Atmospheres: an Introduction to their Physics and Chemistry* (2nd ed.), pp. 481, Academic Press.
- 11) Golitzyn, G.S., 1970: A similarity approach to the general circulation of planetary atmospheres. *Icarus*, 13, 1-24.
- 12) Williams, G.P. and J.L. Holloway, 1982: The range and unity of planetary circulations. *Nature*, 297, 295-299.
- 13) Williams, G.P., 1988: The dynamical range of global circulations—I. *Climate Dyn.*, 2, 205-260.
- 14) ———, 1988: The dynamical range of global circulations—II. *Climate Dyn.*, 3, 45-84.
- 15) Marow, M. Ya, V.W. Avduevsky, V.V. Kerzhanovich, M.K. Rozhdestvensky, N.F. Borodin, and O.L. Ryabov, 1973: *Venera 8: Measurements of temperature, pressure, and wind velocity on the illuminated side of Venus*. *J. Atmos. Sci.*, 30, 1210-1214.
- 16) Murray, B.C., M.J. Belton, G.E. Danielson, M.E. Davies, D. Gault, B. Hopke, B. O'Leary, R.G. Storm, V. Suomi and N. Trask, 1974: *Venus: Atmospheric motions and structure from the Mariner 10 pictures*. *Science*, 183, 1307-1315.
- 17) *J. Geophys. Res.*, 1980, 85, 7573-8337.
- 18) Schubert, G., C. Convey, A. Del Genio, L.S. Elson, G. Keating, A. Seiff, R.E. Young, J. Apt, C.C. Counselman III, A.J. Kliore, S.S. Limaye, H.E. Revercomb, L.A. Sromovsky, V.E. Suomi, F. Taylor, R. Woo, and U. von Zahn, 1980: Structure and circulation of the Venus atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 85, 8007-8025.
- 19) Counselman III, C.C., S.A. Gourevitch, R.W. King, G.B. Loriot, and E.S. Ginsberg, 1980: Zonal and meridional circulation of the lower atmosphere of Venus determined by radio interferometry. *J. Geophys. Res.*, 85, 8026-8030.
- 20) Rossow, W.B., A.D. Del Genio, S.S. Limaye, L.D. Travis, and P.H. Stone, 1980: Cloud morphology and motions from Pioneer Venus images. *J. Geophys. Res.*, 85, 8107-8128.
- 21) Keldysh, M.V., 1977: Venus exploration with the Venera 9 and Venera 10 spacecraft. *Icarus*, 30, 605-625.
- 22) *Science*, 1986, 231, 1407-1424.
- 23) Genio, A.D., and W.B. Rossow, 1990: Planetary-scale waves and the cyclonic nature of cloud top dynamics on Venus. *J. Atmos. Sci.*, 47, 293-318.
- 24) Rossow, W.B., A.D. Del Genio and T. Eichler, 1990: Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images. *J. Atmos. Sci.*, 47, 2053-2084.
- 25) Pollack, J.B. and R.E. Young, 1975: Calculations of the radiative and dynamical state of the Venus atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 32, 1025-1037.
- 26) Matsuda, Y. and T. Matsuno, 1978: Radiative-convective equilibrium of the Venusian atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 56, 1-18.
- 27) Pollack, J.B., O.B. Toon, and R. Boese, 1980: Greenhouse models of Venus' high surface temperature, as constrained by Pioneer Venus measurements. *J. Geophys. Res.*, 85, 8223-8231.
- 28) Golitsyn, G.S., 1984: Some problems of Venus atmospheric dynamics. *Icarus*, 60, 289-306.
- 29) Rossow, W.B., 1985: Atmospheric circulation of Venus., *Issues in atmospheric and oceanic modeling. Part A. Adv. in Geophy.*, 28, 347-379.
- 30) Schubert, G. and J.A. Whitehead, 1967: Moving flame experiment with liquid mercury: Possible implications for the Venus atmosphere. *Science*, 163, 71-72.
- 31) Schubert, G., R.E. Young and E.J. Hinch, 1971: Prograde and retrograde motion in a fluid layer: consequences for thermal diffusion in the Venus atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 76, 2126-2130.
- 32) Young, R.E. and G. Shubert, 1973: Dynamical

- aspects of the Venus 4-day circulation. *Planet. Space Sci.*, 21, 1563-1580.
- 33) Thompson, R., 1970: Venus general circulation is a merry-go-round. *J. Atmos. Sci.*, 27, 1107-1116.
 - 34) Fels, S.B. and R.S. Lindzen, 1974: The interaction of thermally excited gravity waves with mean flows. *Geophys. Fluid Dyn.*, 6, 149-191.
 - 35) Pechmann, J. and A.P. Ingersoll, 1984: Thermal tides in the atmosphere of Venus: Comparison of model results and observations. *J. Atmos. Sci.*, 41, 3290-3313.
 - 36) Fels, S.B., 1986: An approximate analytical method for calculating tides in the atmosphere of Venus. *J. Atmos. Sci.*, 43, 2757-2772.
 - 37) Gierasch, P., 1975: Meridional circulation and the maintenance of the Venus atmospheric rotation. *J. Atmos. Sci.*, 32, 1038-1044.
 - 38) Matsuda, Y., 1980: Dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 58, 443-470.
 - 39) ———, 1982: A further study of dynamics of the four-day circulation in the Venus atmosphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 245-254.
 - 40) Mayr, H.G., I. Harris, K.H. Schatten, D.R. Stevens-Rayburn, and K.L. Chan, 1988: Venus' superrotation, mixing length theory and eddy diffusion: a parametric study. *Earth, Moon, and Planets*, 41, 45-76.
 - 41) Safray, A.S. and D.V. Chalikov, 1989: a qualitative theory for the superrotation of the atmosphere of Venus. *Cosmic Res.* 27, 466-475.
 - 42) Hou, A.Y. and R.M. Goody, 1985: Diagnostic requirements for the super-rotation on Venus. *J. Atmos. Sci.*, 42, 413-432.
 - 43) Leovy, C.B., 1987: Zonal winds near Venus' cloud top level: an analytic model of the equatorial wind speed. *Icarus*, 69, 193-201.
 - 44) Baker, N.L. and C.B. Leovy, 1987: Zonal winds near Venus' cloud top level: a model study of the interaction between the zonal mean circulation and the semidiurnal tide. *Icarus*, 69, 202-220.
 - 45) Chalikov, D.V., A.S. Monin, A.S. Safray, V.G. Turikov, and S.S. Zilitinkevich, 1975: Numerical simulation of the general circulation of the Cytherean lower atmosphere. *Icarus*, 26, 178-208.
 - 46) Safray, A.S., 1977: Calculation of the circulation in the Venusian troposphere in a 20-level model. *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, 13, 143-145.
 - 47) Young, R.E. and J.B. Pollack, 1977: A three-dimensional model of dynamical processes in the Venus atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 34, 1315-1351.
 - 48) Rossow, W.B., 1983: A general circulation model of a Venus-like atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 40, 273-302.
 - 49) Yano, J.I., 1987a: Rudimentary considerations of the dynamics of Jovian atmospheres. Part I: The depth of motions and energetics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65, 313-327.
 - 50) Yano, J.I., 1987b: Rudimentary considerations of the dynamics of Jovian atmospheres. Part II: Dynamics of the atmospheric layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65, 329-340.
 - 51) *Science*, 1 June issue, 204 (1979).
 - 52) *Nature*, 30 August issue, 280 (1979).
 - 53) *Science*, 23 November issue, 206 (1979).
 - 54) *J. Geophys. Res.*, September 30 issue, 86, A10 (1981).
 - 55) *Icarus*, 65, No. 2/3 (1986), "The Jovian atmospheres".
 - 56) Ingersoll, A.P., 1990: Atmospheric dynamics of the outer planets. *Science*, 248, 308-315.
 - 57) Williams, G.P., 1978: Planetary circulations: 1. Barotropic representation of Jovian and terrestrial turbulence. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1339-1426.
 - 58) Smith, B.A., *et al.*, 1982: A new look at the Saturn system: The Voyager 2 images, *Science*, 215, 504-536; Gierasch, P.J., Conrath, B.J. and J.M. Magalhães, 1986: Zonal flow properties of Jupiter's upper troposphere from Voyager infrared observations. *Icarus*, 67, 456-483.
 - 59) Magalhães, J.M., A.L. Weier, B.J. Conrath, and P.J. Gierasch, 1990: Zonal motion and structure in Jupiter's upper troposphere from Voyager infrared and imaging observations. *Icarus*, 88, 39-72.
 - 60) Ingersoll, A.P., and Pollard, D., 1982: Motion in the interior and atmospheres of Jupiter and Saturn: Scale analysis, anelastic equations, barotropic instability criterion. *Icarus*, 52, 62-80.
 - 61) Williams, G.P., 1985: Jovian and comparative atmospheric modeling. *Adv. Geophys.*, 28A, 381-429.
 - 62) Busse, F.H., 1983: A model of mean zonal flows in the major planets. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 23, 153-174.
 - 63) Soward, A.M., 1977: On the finite amplitude thermal instability of a rapidly rotating fluid sphere. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, 9, 19-74.

- 64) Busse, F.H., 1970: Thermal instabilities in rapidly rotating systems. *J. Fluid Mech.*, **44**, 441-460.
- 65) Yano, J.I., 1992: Asymptotic theory of thermal convection in rapidly rotating systems, *J. Fluid Mech.*, **243**, 103-131.
- 66) Zhang, K.K. and F.H. Busse, 1987: On the onset of convection in rotating spherical shells. *Geophys. Astrophys. Fluid Dyn.*, **39**, 119-147.
- 67) Gilman, P.A. and Miller, J., 1986: Nonlinear convection of a compressible fluid in a rotating spherical shell. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **61**, 585-608.
- 68) Conrath, B.J., P.J. Gierasch, and N. Nath, 1981: Stability of zonal flows on Jupiter. *Icarus*, **48**, 256-282.
- 69) Flaser, F.M., B.J. Conrath, J.A. Pirraglia, P.C. Clark, R.G. French, and P.J. Gierasch, 1981: Thermal structure and dynamics of the Jovian atmosphere 1: The Great Red Spot, *J. Geophys. Res.*, **86A10**, 8759-8767.
- 70) Mitchell, J.L., R.F. Beebe, A.P. Ingersoll and G.W. Garneau, 1981: Flow fields within Jupiter's Great Red Spot and White Oval BC, *J. Geophys. Res.*, **86A10**, 8751-8757.
- 71) Maxworthy, T. and L.G. Redekopp, 1976: A solitary wave theory of the Great Red Spot and other observed features in the Jovian atmosphere. *Icarus*, **29**, 261-271; see also Redekopp, L.G. 1977: On the theory of solitary Rossby waves, *J. Fluid Mech.* **87**, 725-745.
- 72) Ingersoll, A.P., and P.G. Cuong, 1981: Numerical model of long-lived Jovian vortices. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 2067-2076.
- 73) Williams, G.P., and T. Yamagata, 1984: Geostrophic regimes, intermediate solitary vortices and Jovian eddies. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 453-478.
- 74) Marcus, P.S., 1988: Numerical simulation of Jupiter's Great Red Spot. *Nature*, **331**, 693-696; see also Marcus, P.S., 1990: Vortex dynamics in a shearing zonal flow. *J. Fluid Mech.*, **215**, 393-430.
- 75) Read, P.L. and R. Hide, 1983: Long-lived eddies in the laboratory and in the atmospheres of Jupiter and Saturn. *Nature*, **302**, 126-129.
- 76) Sommeria, J., S.D. Meyers, and H.L. Swinney, 1988: Laboratory simulation of Jupiter's Great Red Spot. *Nature*, **331**, 689-693.
- 77) Antipov, S.V., M.V. Nezlin, E.N. Snezhkin, and A.S. Trubnikov, 1986: Rossby autosoliton and stationary model of the Jovian Great Red Spot. *Nature*, **323**, 238-240.
- 78) Williams, G.P., and R.J. Wilson, 1988: The stability and genesis of Rossby vortices. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 207-241.
- 79) Dowling, T.E., and A.P. Ingersoll, 1989: Jupiter's Great Red Spot as a shallow water system. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3256-3278.
- 80) Read, P.L., 1986: Stable, baroclinic eddies on Jupiter and Saturn: A laboratory analog and some observational tests. *Icarus*, **65**, 304-334.
- 81) Malanotte-Rizzoli, P., 1982: Planetary solitary waves in geophysical flows, *Adv. Geophys.*, **24**, 147-224.
- 82) Flierl, G.R., 1987: Isolated eddy models in geophysics, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **19**, 493-530.
- 83) Nezlin, M.V. and G.G. Sutyrin, 1989: Long-lived solitary anticyclones in the planetary atmospheres and oceans, in laboratory experiments and in theory. in *Mesoscale/Synoptic Coherent Structures in Geophysical Turbulence* (eds., J.C.J. Nihoul and B.M. Jamart), Elsevier.
- 84) Nezlin, M.V., A. Yu. Rylov, A.S. Trubnikov, and A.V. Khutoretzki, 1990: Cyclone-anticyclone asymmetry and a new soliton concept for Rossby vortices in the laboratory, oceans and the atmospheres of giant planets. *Geophys. Astrophys. Fluid Mech.*, **52**, 211-247.
- 85) Nezlin, M.V., 1986: Rossby solitons (Experimental investigations and laboratory model of natural vortices of the Jovian Great Red Spot type). *Sov. Phys. Usp.*, **29(9)**, Sept., 907-842.
- 86) Yano, J.-I., and G.R. Flierl: The modon as a model of Jupiter's Great Red Spot, in preparation.
- 87) Flierl, G.R., M.E. Stern, and J.A. Whitehead, Jr., 1983: The physical significance of modons: laboratory experiments and general physical constraints, *Dyn. Atmos. Oceans*, **7**, 233-263.
- 88) Asada, T., 1985: Numerical experiments of the intermediate scale eddies and the STrD on Jupiter. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 359-376.
- 89) Smith, B.A. *et al.*, 1989: Voyager 2 at Neptune: Imaging science results. *Science*, **246**, 1422-1449; see also Ingersoll, A.P., 1990: Atmospheric dynamics of the outer planets. *Science*, **248**, 308-315.
- 90) Polvani, L.M., J. Wilson, E. DeJong, and A.P. Ingersoll, 1990: Simple dynamical models of Neptune's Great Dark Spot. *Science*, **249**, 1393-1398.