

不惑の宇宙論？

須藤 靖¹

1. 2001年6月30日： 21世紀精密宇宙論の幕開け

米国東部時刻にして、2001年6月30日午後3時46分46秒、いよいよ21世紀の観測的宇宙論が本格的に始動した。米国航空宇宙局(NASA)とプリンストン大学が中心となって計画してきた宇宙マイクロ波背景輻射観測衛星MAP(Microwave Anisotropy Probe)がフロリダのケネディースペースフライトセンターから打ち上げられたのである。

1965年のペンジラスとウィルソンによる宇宙マイクロ波背景輻射(以降CMB: Cosmic Microwave Background)の発見は、それまで異端とみなされていたガモフのビッグバン理論の強力な観測的証拠となった。本格的な観測宇宙論の開始をその時点と定義すれば、以来40年近くたち、観測的宇宙論もそろそろ「不惑」を迎えつつある。

CMBに関する次の大きなブレイクスルーは、4半世紀後の1992年4月23日。宇宙マイクロ波背景輻射観測衛星COBE(COSmic Background Explorer)による、CMB温度ゆらぎ(天球面上での温度の角度非等方性)の発見である。COBEが描いて見せたCMB全天温度地図は、現在の宇宙の構造の種ともいべき温度ゆらぎの存在を証明したことで、「重力不安定」という構造形成シナリオを確立したのである。

これら2つの発見はいずれも、我々の宇宙進化に関する描像を確定させたという意味でまさに歴史に残る画期的成果であることは論を待たない。もちろん研究

者は貪欲であるから、その発見を受けて、さらに詳細なデータを渴望するようになる。実際、COBEの角度分解能は7度角程度しかなく、理論モデルの詳細を制限するような温度ゆらぎの小角度(10分から1度程度)スケールでの情報は得られない。MAPはまさにそのような精密な宇宙論標準モデル検証(あるいは否定?)を目的として打ち上げられた衛星である。1, 2年後には、1/4度角スケールの分解能を持つCMB全天温度地図が完成するはずである。数年後公開予定のCMB地図は、21世紀宇宙論における最も基礎的なデータベースとして期待されている。

さて1990年代後半の観測的宇宙論は、多くの専門家の予想をいい意味で裏切るほどのスピードで進展を遂げてきた。例えば、宇宙論研究大御所の一人であるプリンストン大学のP.J.E. Peeblesは、1993年に出版した教科書[1]の677ページに、

Since people have been working on the problem for more than sixty years, perhaps the most surprising result would be that in the next decade a consistent and believable picture for the values of the cosmological parameters is at last established.

という、期待しているのやらさめているのやらわからないような見解を表明している。しかしながら、実際にはその後、21世紀を待たずして、我々の宇宙を特徴づける基本パラメータ(宇宙年齢、質量密度、空間曲率、など)の多くはかなりの信頼度で決定されてきた。確かに、特に20世紀最後の10年間以降、極めて重要な宇

1 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻

2 重力は常に引力であるため、宇宙の平均密度に比べて高密度の領域は収縮してさらに高密度になり、逆に低密度領域は相対的により低密度になる。このようにして宇宙初期に存在した極めて小さな空間的非一様性は局所的にその振幅を増大させ、やがて宇宙膨張を振りきって自己重力系となり天体諸階層が誕生したものと考えられる。このシナリオは、質量密度の平均値からのずれが重力によって増幅する、という意味で重力不安定理論と呼ばれている。

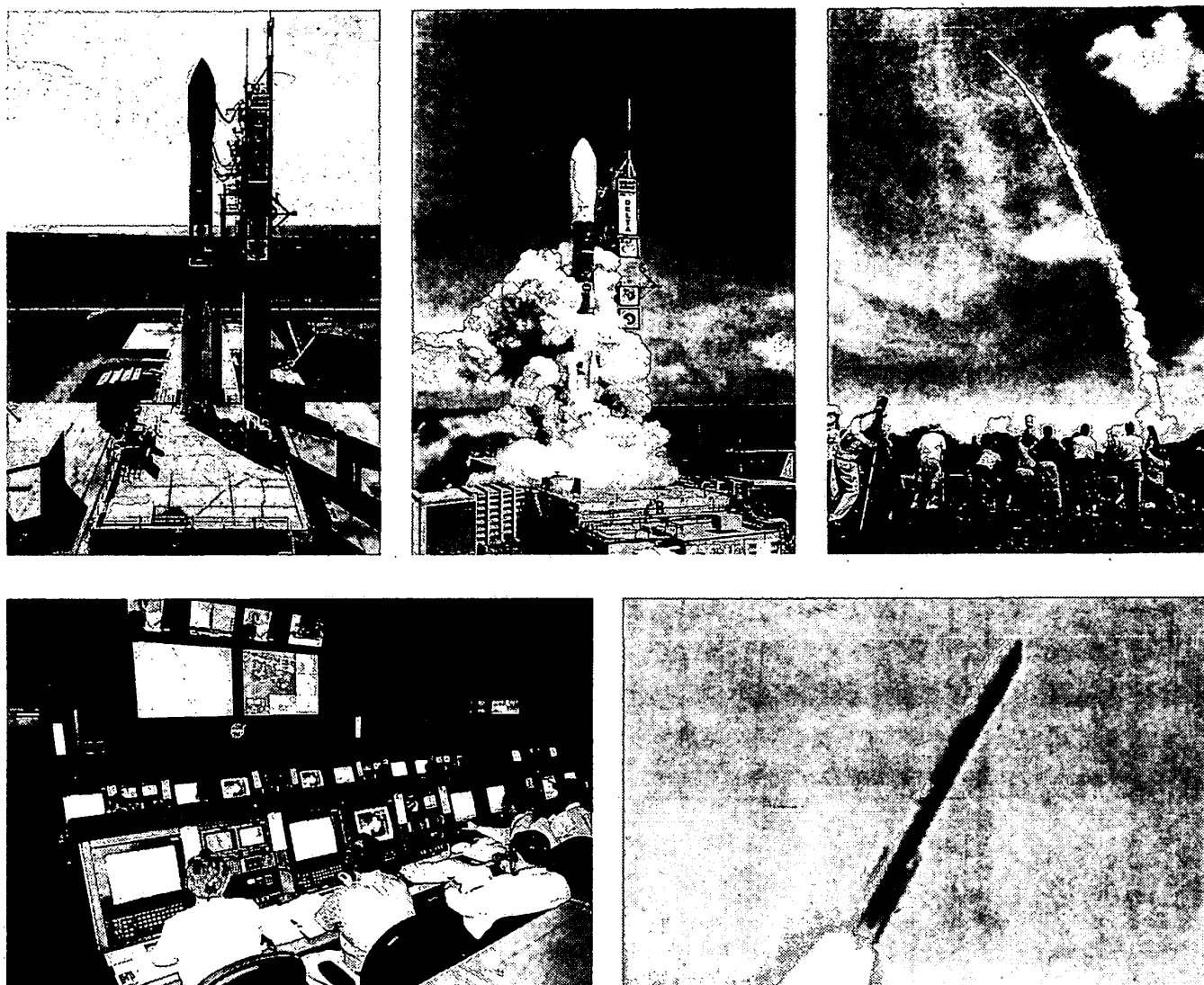


図1：デルタIIロケットによるMAPの打ち上げ (<http://map.gsfc.nasa.gov/>)

宇宙論的発見が相次いだおかげで、「21世紀は惑うことなく精密宇宙論」というのが宇宙論研究の本流と言った印象すらある。そこであえて不惑の年齢を過ぎてしまっている私ではあるが、不惑を2、3年後に控えた観測的宇宙論の現状を紹介するとともに個人的な展望を述べさせて頂くことにしたい。

2. 宇宙の組成

最初に、100億年にもおよぶビッグバン宇宙の歴史をごく簡単に概観する。図2の横軸は対数スケールでの時間、縦軸が対数スケールでの宇宙の「大きさ」のようなものであると(とりあえず)考えて欲しい。ビッグバン宇宙

論の証拠であると述べたCMBはこの図で宇宙の中性化と書かれた宇宙誕生後数十万年の時期の熱輻射が現在我々に到達したものである。ガモフがビッグバン理論を考え出したのは、宇宙の元素の起源の考察からであり、それはいわゆる「宇宙誕生最初の3分間」の出来事であった。これ以前のプランク時間($\sim 10^{-43}$ 秒)スケールの初期宇宙の進化は素粒子論宇宙論・量子宇宙論の範疇であるのでここでは論じないでおく。

20世紀の観測的宇宙論の研究を通じて得られた特筆すべき成果は数多い。その一部は他の解説[2,3]ですでに紹介したことがあるので、ここでは特に、宇宙を満たしている「物質」の組成に焦点をあててみたい。結果は図3にまとめてあるように、「宇宙の質量密度の

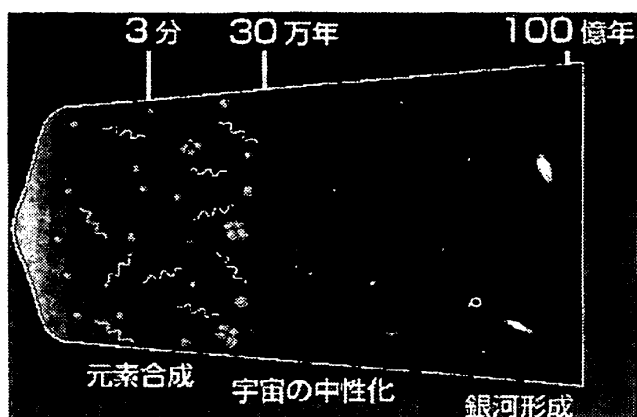


図2：宇宙の年譜

宇宙の平均エネルギー密度の内訳

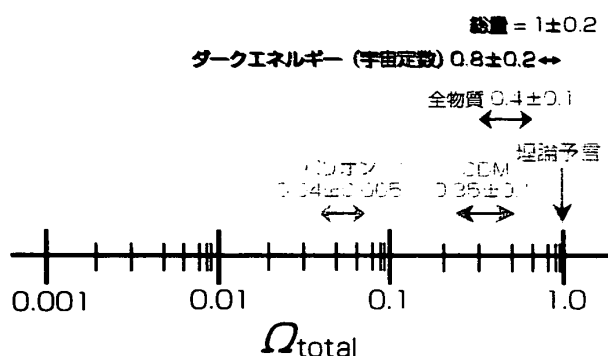


図3：宇宙の組成

大部分は、バリオン以外のダークマターからなる。さらに宇宙のエネルギー密度の大部分は、ダークエネルギー(例えば、アインシュタインの宇宙定数や真空のエネルギー密度など)からなる」という驚くべき結果に要約される。しかし、このように結果を述べるだけでにわかには納得して頂けるとは思えないので、以下その説得を試みる。

2.1 バリオン質量密度：軽元素の起源

宇宙に存在する「普通の」物質の質量のほとんどは、クォークからなる複合粒子であるバリオンによって占められている。このバリオンの宇宙での平均質量密度 ρ_b を、臨界密度

$$\begin{aligned} \rho_{c0} &\equiv 3H_0^2 / (8\pi G) \sim 1.9 \times 10^{-29} h^2 \text{ g/cm}^3 \\ &\sim 2.8 \times 10^{11} h^2 M_\odot / \text{Mpc}^3 \end{aligned} \quad (1)$$

の単位で測ったものが、バリオン密度パラメーター Ω_b :

$$\Omega_b \equiv \rho_b / \rho_{c0} \quad (2)$$

である。 $H_0 \equiv 100 h \text{ km/sec/Mpc}$ は宇宙の膨張率を示すハッブル定数で、観測的には $h \sim 0.7$ 程度であるとされている。また

$$\frac{1}{2} v^2 = \frac{1}{2} (H_0 r)^2 = \frac{GM(<r)}{r} = \frac{4\pi G \rho_{c0} r^3}{3r} \quad (3)$$

からわかるように、 ρ_{c0} はハッブル膨張速度を脱出速度としたときの質量密度に対応する。宇宙の質量密度が十分大きければ重力が強くなり、現在膨張している宇宙もやがては収縮に転ずる。一方、もしも質量密度が小さければ宇宙は永遠に膨張を続けることになる。この境目となる値が臨界密度である。したがって、まず重要な問いは「 Ω_b は1より大きいのか小さいのか？」である。

Ω_b を推定する最も信頼度の高い方法は、ビッグバン軽元素合成理論の予言と観測される軽元素存在量との比較である。宇宙初期にはバリオンは、核子(陽子pと中性子nの総称)として存在していたが、その後宇宙の温度が下がるにつれて、重水素(D)、ヘリウム(^4He)、リチウム(^7Li)、といった質量数の大きい原子核をつくり始める。核子が複数個同時にぶつかって、一挙に質量数の大きい元素を形成することは難しいので、軽元

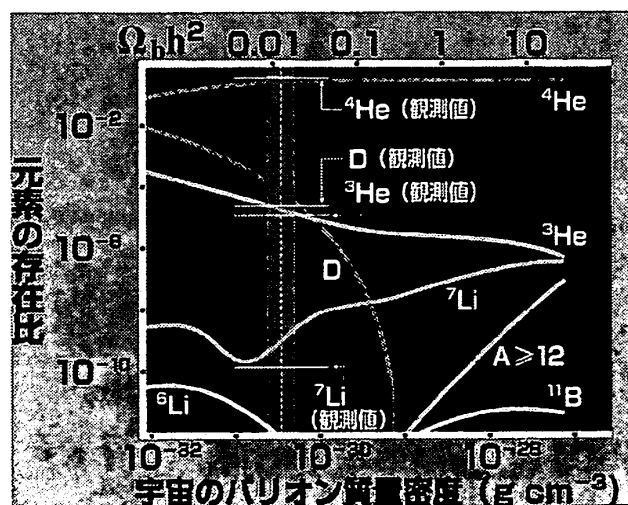


図4：軽元素の存在量とビッグバン元素合成理論予言との比較

素の合成は、まず、重水素の生成反応を経由する。ところが、Dはその結合エネルギーがわずか2.2MeVしかなく、宇宙を満たしている光子(現在その名残が、CMBとして観測されている)と衝突して容易に分解してしまう。核子あたりの光子の数が多ければこの光分解反応はより進みやすくなる。その結果、重水素の生成量が減り、結局ヘリウムが存在量が小さくなる(ただし、ヘリウムになりそこねた最終的な重水素の量は逆に大きくなる)。軽元素合成は宇宙誕生後、およそ1分後に開始し3分後にはほぼ終了する。これは、「The First Three Minutes」というワインバーグの著名な宇宙論啓蒙書のタイトルにもなっている。

このように、軽元素の存在予言値は、核子と光子の個数密度比に応じて敏感に変化する。実は核子と光子の個数密度比は宇宙の保存量であるので、現在の光子の温度(2.7K)と組み合わせると、核子すなわちバリオンの質量密度が推定できる。図4は、総バリオンに対する ^4He の質量密度比と、D, ^3He , ^7Li の水素に対する個数密度比をプロットしたものである。これら4つの元素の観測的存在量を同時に満足する領域(縦に延びた帯状の部分)が存在する事自体ビッグバン理論の大成功と言えるが、さらにそれから $\Omega_b h^2 = 0.02$ 程度であることが結論される。ところで、図3に示してあるように、このバリオンはすべてが星となっているわけではなく、むしろその大半は、星間ガスや銀河間ガス、さらには、星になりそこなった小天体などとして分布する。現在の宇宙で、このバリオンがどのような形態で存在しているかは必ずしも完全にわかっているわけではなく、それ自身興味あるテーマであるが、軽元素合成理論はそのような詳細には無関係にバリオンの総量が推定できるという意味で強力な方法である。

2.2 ダークマター：宇宙の質量密度

では、「宇宙の主成分はバリオンであるのか」という疑問が湧いてくるが、答えは「きっぱり否」ということになっている。最も信頼性の高いのは渦巻銀河の回転

曲線の観測を用いた解析である。渦巻銀河の円盤にある星やガス雲は銀河中心のまわりに全体として回転運動している。したがって、我々の視線方向が円盤面と平行に近い遠方の銀河を選んでやれば、可視域あるいは電波領域での特性線のドップラー効果を利用して円盤の回転速度を中心からの距離の関数として求めることが出来る。これを渦巻銀河の回転曲線と呼ぶ。こうして求められた回転曲線はほとんどの銀河に対して可視光から定義された光学的銀河半径 R_{opt} をはるかに越える距離まで一定である(平坦な回転曲線：図5)。

簡単のために球対称分布を仮定すれば、中心からの距離 R 内に存在する銀河の質量 $M(R)$ は回転速度 $V(R)$ と

$$V(R) = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}} \quad (4)$$

の関係にある。したがって、 $V(R)$ が $R < R_{\text{opt}}$ までも一定であることは、その領域では銀河の質量が、 R に比例して増大することを意味する。銀河のなかで光り輝く成分、すなわち星の分布は、定義より $R < R_{\text{opt}}$ に強く集中しているのだから、このより広い領域に分布している質量はそれ以外の物質、つまり、銀河に付随する暗黒物質の存在を示す。

得られた結論は宇宙のあらゆる階層の構造にかなり共通している。すなわち、(i)天体諸階層で、光度分布に

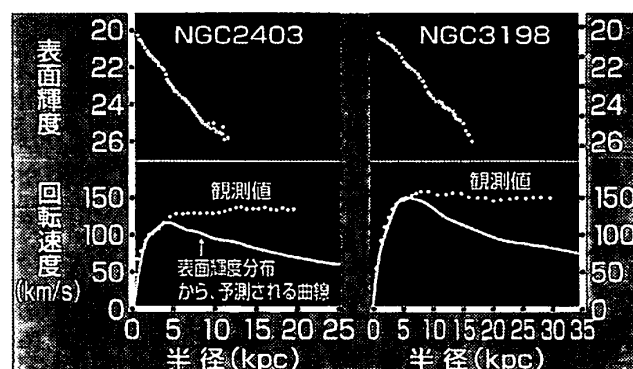


図5: 渦巻銀河(左: NGC2403, 右: NGC3198)の表面輝度(Fバンド: 上)と、中性水素の21cm電波輝線から求められた回転曲線(下)。 $h=0.75$ を仮定。記号が観測データで、下図の実線は、光っている物質の質量分布だけから予想される回転曲線(van Albada, T.S. & Sancisi, R. 1986, Phil. Trans. R. Soc. London A320, 447のデータをもとに改変)

比べてはるかに広がった質量が分布している。(ii)その存在量は光学的質量より一桁以上大きい。これが観測的立場からの宇宙の暗黒物質の要約である。後で述べるように、定量的にはバリオンと暗黒物質をあわせた全質量密度を ρ_0 としたとき、無次元の質量密度パラメータ $\Omega_0 \equiv \rho / \rho_0$ は0.2~0.4程度であるとされている(厳密に言えば、暗黒物質だけの寄与は $\Omega_{DM} = \Omega_0 - \Omega_b$ ということになる)。

2.3 ダークエネルギー：真空のエネルギー密度？

Ia型超新星は、その輝く絶対光度がほぼ一定であることが知られており、宇宙の距離決定のための標準光源として有用である。超新星は発生頻度が小さい上、せいぜい数ヶ月程度の短い期間しか輝き続けない反面、一つの銀河全体に匹敵する最大光度をもつため、他の方法では困難な遠宇宙の距離を決定できる。そのような宇宙論的距離では、後退速度(赤方偏移)はハッブルの法則のような単純な比例関係ではなく、宇宙を満たす物質の量とその時間進化に依存し、特にいわゆる「宇宙定数」の存在に敏感である。

この宇宙定数なるものをちゃんと定義するためには一般相対論を持ち出さざるを得なくなる。しかし、厳密さを問わなければ重力場の方程式が

$$\Delta\phi = 4\pi\rho \rightarrow \Delta\phi = 4\pi(\rho + 3p) \quad (5)$$

と変更される点が本質である。つまり、一般相対論によれば、物質の質量密度(ρ)だけでなく圧力(p)もまた重力場の源となる。したがって、宇宙の進化を議論する際には、宇宙を占める物質の ρ だけではなく、その状態方程式をも与える必要がある。通常の非相対論的粒子では $p=0$ であり、これが、ダークマターに対応する。一方、「宇宙定数」 Λ は、 $p=-\rho$ という奇妙な状態方程式に従う「物質」として定義される。このような状態方程式が物理的に許されるものかどうか疑問に思われるのは当然であるが、アインシュタインが導入し

た「宇宙定数」はこの状態方程式に従っていると解釈できる。実はもっと興味深いことに、インフレーション宇宙論で重要となるスカラー場のエネルギーも近似的にこの状態方程式を満たしており、その意味で現在では、後者の「真空のエネルギー」を「宇宙定数」と同一視することが多い。

(5)式からわかるように、(正の)宇宙定数は $\Delta\Phi < 0$ となり、万有斥力の役割を果たす。宇宙定数を考えない宇宙は、その重力のために宇宙膨張が徐々に減速されるが、宇宙定数の寄与が大きい場合には逆に宇宙膨張は加速される。そのため、直感的な言い方をすれば“相対的に大きな”宇宙となる。端的には、宇宙年齢が(宇宙定数が0の場合に比べて)増加する。また、現在からある赤方偏移の地点までの距離が宇宙定数がない場合に比べてより長くなる。したがって、絶対光度が別の手段で既知であるIa型超新星をある赤方偏移の地点においた場合、観測されるその見掛けの明るさを無次元の宇宙定数 $\Omega_\Lambda \equiv \Lambda / (8\pi G \rho_0)$ と質

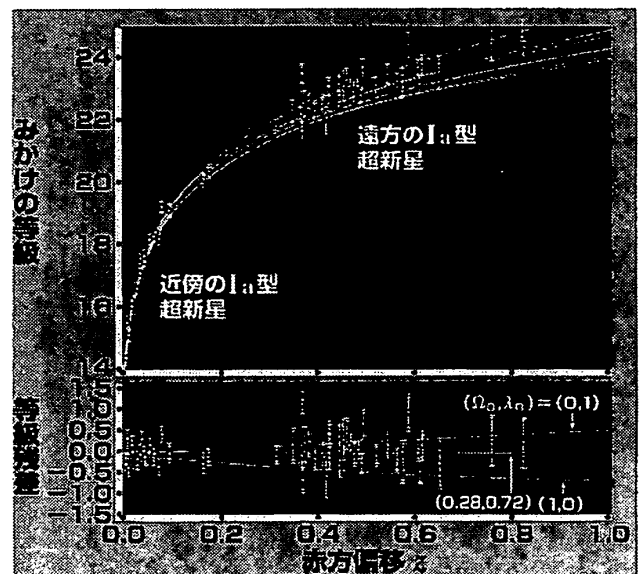


図6：超新星の光度赤方偏移関係。上：観測されたIa型超新星の見かけの等級を赤方偏移にたいしてプロットしたもの。複数の線は、異なる宇宙論パラメータを仮定した場合の理論予言である。下： $\Omega_0=0.28$, $\Omega_\Lambda=0.27$ のモデルを基準として、それからの見かけの等級のずれを縦軸として上図を描き直したもの。参考として、 $\Omega_0=0$, $\Omega_\Lambda=1$ および $\Omega_0=1$, Ω_Λ の場合がどの程度ずれるかを線で示した。(Riess, A. G. et al. 1998, AJ 116, 1009; Perlmutter, S. et al., 1999, ApJ 517, 565 のデータをもとに改変)

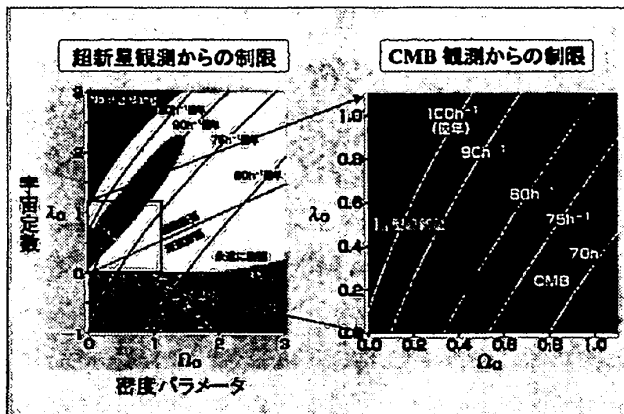


図7：超新星の光度赤方偏移関係から得られた Ω_0 と Ω_Λ への制限。 $\Omega_0 + \Omega_\Lambda > 1$ が、閉じた空間、 $\Omega_0 + \Omega_\Lambda < 1$ が、開いた空間をもつ宇宙に対応し、その境である $\Omega_0 + \Omega_\Lambda = 1$ は平坦な宇宙と呼ばれる。 $\Omega_\Lambda > (<) \Omega_0/2$ は、現在の宇宙($z=0$)が加速(減速)膨張している条件に対応する。左図で右上に伸びた領域が、超新星観測から示唆される。この図の中心部を拡大して、CMB観測からの制限を組み合わせたものが右図であり、 $\Omega_0 \sim 0.3$ かつ $\Omega_\Lambda \sim 0.7$ 付近が超新星とCMBの結果を同時に説明できることがわかる。

量密度パラメータ Ω_0 の関数として予想することができる。

図6が示すように、遠方の超新星は、近傍の超新星のデータからの宇宙定数の存在を仮定しない場合の予想値よりも系統的に暗い。これを、宇宙の幾何学的性質に因るものと解釈すれば、「相対的に大きな」宇宙が必要となり、まさに、万有斥力の役割を果たす(正の)宇宙定数の存在により実現できる。図7は、この超新星データから予想される Ω_0 と Ω_Λ の値の推定領域である。この結果は Ω_Λ という可能性を排除する。特に $\Omega_0 \approx 0.3$ であるとするれば、 $\Omega_\Lambda \geq 0.4$ が要請される。宇宙定数は時間的にその大きさは変化しないもので、歴史的にはアインシュタインが静的宇宙解を得るためにアインシュタイン方程式の左辺に導入したものである。最近では、これを真空自体のもつエネルギー密度と解釈することが普通で、さらにもう少し一般的にして「ダークエネルギー」とよぶことが流行っている。ところで、有名なアインシュタインの関係 $E=mc^2$ によれば、エネルギーと質量は等価であるはずで、わざわざ「ダークエネルギー」を「ダークマター」と区別する必要はなさそうに思える。しかし、これは上述の状態方程式の違いによるも

のである。

3 精密宇宙論のさき

いままで紹介してきたように、特に20世紀最後の数年間で宇宙論観測データは飛躍的に増大し、すでに宇宙論パラメータの推定値はかなりの信頼度を持つに至った。のみならず、現在すでに進行中の多くの観測プロジェクトによって、近い将来これらの精度がさらに向上することまで保証されている。例えば、遠方銀河やクエーサーに関しては、英豪共同の2dF(Two-Degree Field)サーベイが約25万個の銀河と3万個のクエーサー、また日米独共同のスローン・デジタルスカイサーベイ(SDSS:Sloan Digital Sky Survey)が、数年後には100万個の銀河と10万個のクエーサーの3次元宇宙地図を完成させる予定である。図8は、これら宇宙論的大規模サーベイの「時間進化」を示す。宇宙の泡構造やグレートウォールという言葉をも有名にした1980年中

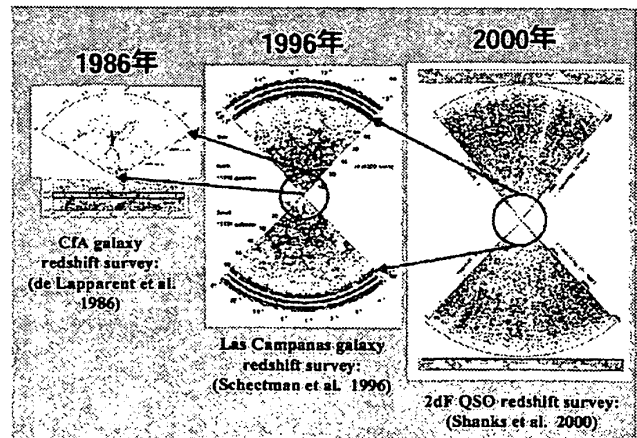


図8：宇宙の大構造観測データの進展。扇状の図は、中心が我々の位置で、銀河を示す各点と中心との距離が、それぞれの銀河までの距離に対応する“地図”である。いうまでもないが、遠方で銀河の個数密度が小さく見えるのは、見かけの明るさがある大きさ以上の銀河を選んでることによる見かけ上の効果。CfA(Center for Astrophysics)銀河赤方偏移サーベイはこの中心部分の構造を「宇宙のグレートウォール」と名付けた。ラスカンパナス赤方偏移サーベイは1988年から1994年にかけて北天、南天それぞれに3つずつ $1.5^\circ \times 80^\circ$ の領域の上下に3つずつある帯状の領域が天球上の射影を選び、その中の銀河総計26418個の赤方偏移を観測した。CfAサーベイの観測領域の大きさはこの中心の円程度である。さらに、2dFクエーサー赤方偏移サーベイは、まさに宇宙の果てまで見通しつづける。その中心の円がラスカンパナスサーベイの観測領域の大きさに対応する。

頃のCfA銀河サーベイは、我々から約5億光年以内の観測である。その約10年後のラスカンパナス銀河サーベイは、その奥行きが4倍の20億光年程度まで広がった。さらに、現在進行中の2dFクエーサーサーベイでは、現在の宇宙年齢である150億光年近くまでが観測されつつある。まさに宇宙の果てまで迫りつつあるといっても過言ではない。

表1: Expanding the expanding universe (文献[2])

0-th order	一様等方宇宙モデル (宇宙論パラメータ, Ω_Λ , λ_0 , h の理解)
1st order	密度揺らぎの線形摂動論 (宇宙の大構造, マイクロ波背景輻射)
2nd order	非線型重力進化 (ダークマターの構造形成)
3rd order	バリオンガスの進化 (第一世代天体と元素の起源)
4th order	銀河, 星, 惑星の形成と進化 (光り輝く銀河宇宙の誕生) ...
L -th order	生物を誕生させ得る惑星系の誕生 (宇宙論的生物発生学) ...
M -th order	知的生命体への進化 (宇宙論的生物進化学) ...
N -th order	文化・文明・宗教の形成と進化 (宇宙論的生物社会学) ...
∞	宇宙の終焉

これに加えて、冒頭で紹介したMAPのデータは、図9に示されているように、CMB温度地図(COBEの結果以外は予想図)のレベルを格段に向上させるであろう。その科学的ゴールとしては、宇宙の組成比を解明することが強調されているようである(図10)。一方、ここまで宇宙論が精密化してくると、「どこまで知りたいのか」,

さらには「どこでやめるか」、という判断も重要となってくる。つまり、有効数字の桁をあげることが、単なる定量的な知識の更新にとどまらず新たな科学的ブレイクスルーにつながりうるのか、という問題である。Peeblesは、1章でも取り上げた文献[1]の683ページで

The historical record here and in other physical sciences suggests that as the puzzles and conundrums we know about are laid to rest, they will be replaced by still more interesting ones.

という今度はかなりお気楽な見解を示している。しかし、学問が進歩すればするほど、専門家が重要(“more interesting”)だと考えることと一般の人々の価値観とのズレが、急速にひろがっていくこともまた事実である。その意味で、すでに十分成熟した精密宇宙論ではなく、10年、20年スケール先を見据えた新たな科学的ゴールを開拓していくことは本質的である。

さらに、宇宙論の研究テーマを

$$\text{Cosmology} = \sum_{n=0}^{\infty} (\text{Cosmology})_{(n)} \quad (6)$$

のように展開すれば、表1に示したようにまだ3次程度の極めて低い次数のレベルに留まっているのも事実であり、宇宙論という定義を限定的にとらえる必要などどこにもない。

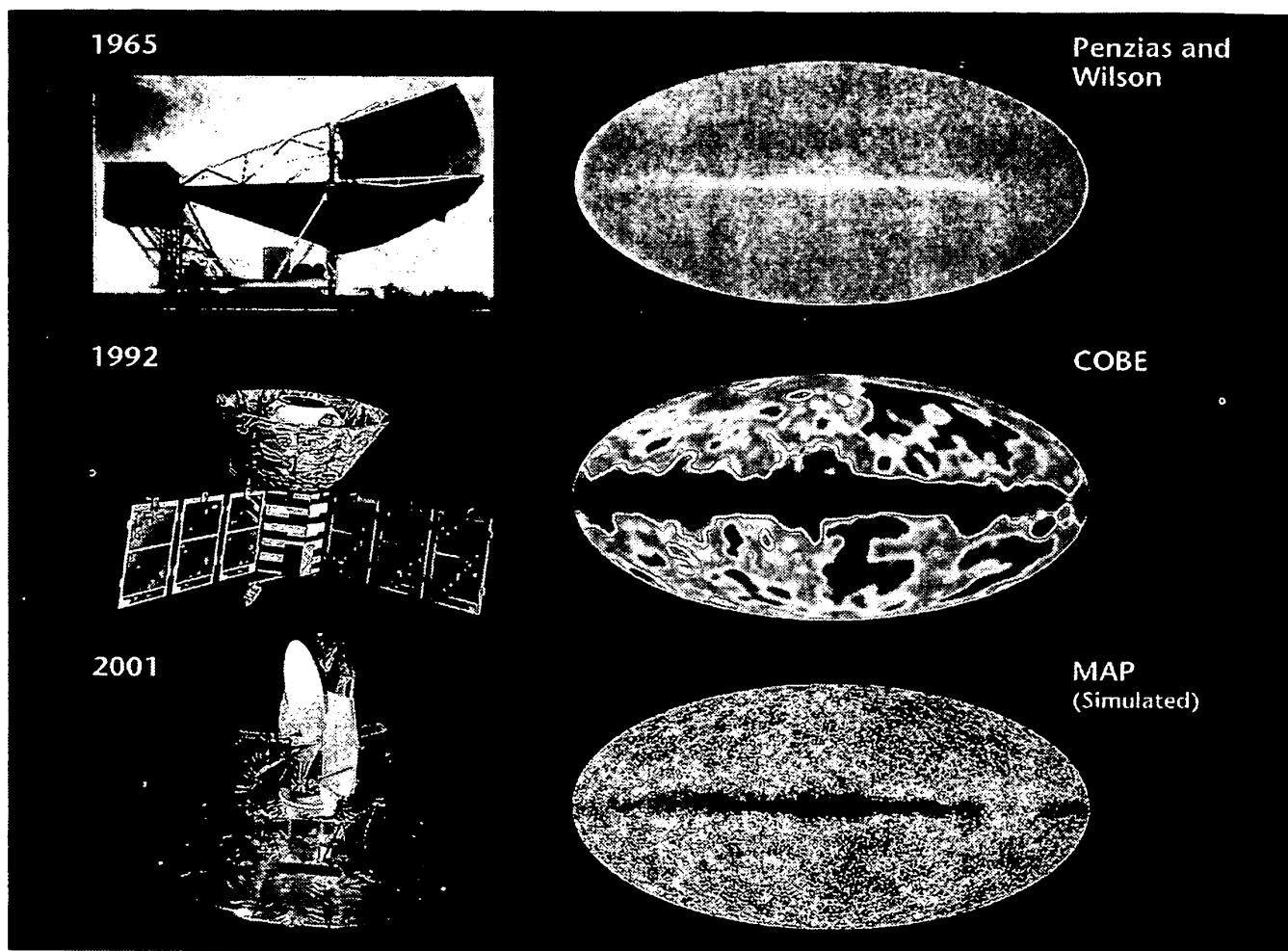


図9：CMB全天温度地図の感度と角度分解能の比較マップ。 (<http://map.gsfc.nasa.gov/>)

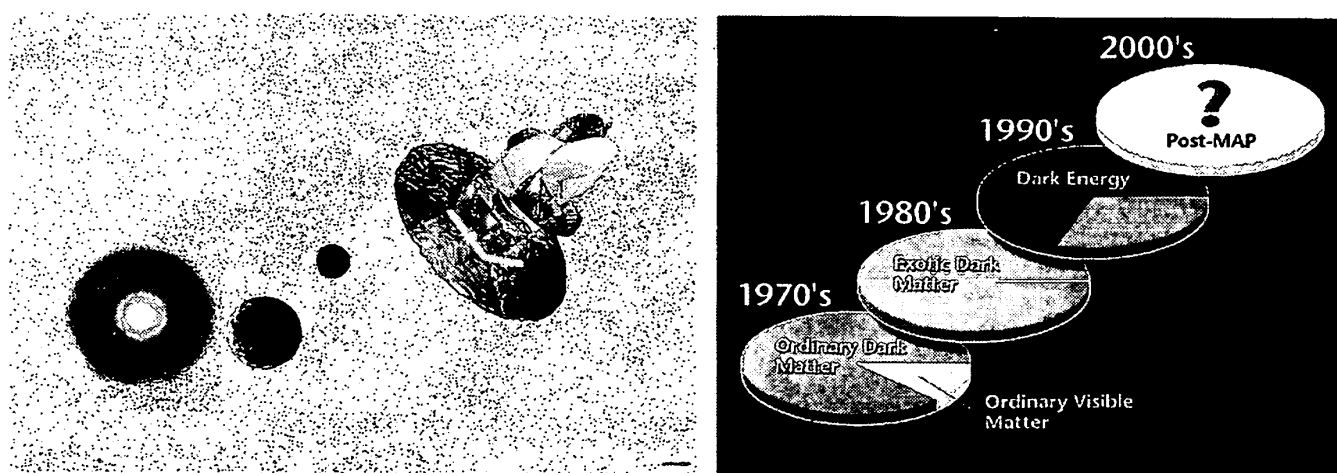


図10：左：MAP衛星軌道想像図。右：宇宙の組成比 (<http://map.gsfc.nasa.gov/>)

4 太陽系外惑星探査

さて実はここまではむしろ序で、ここからが本論である。歴史的には、太陽系が宇宙であった時期もある。したがって、太陽系のさきはどうなっているのかという思考の延長線が宇宙論そのものというべきであろう。こう考えれば、太陽系外惑星探査は宇宙論の原点回帰ともいうべきテーマであり、個人的には21世紀の「宇宙論」の格好の研究対象であると考えている。以下、太陽系外惑星探査の現状紹介を試みるが、本誌の読者の方々には私より適役の方が数多くいらっしゃるであろう。ということで、以下は、「狭義の宇宙論屋」からみた解説と解釈してご容赦頂ければ幸いである。また、興味のある方は文献[4,5]およびウェブサイト <http://exoplanets.org/>, <http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html> も参照されたい。

4. 1 太陽系外惑星検出方法

天文学・宇宙論の最も基本的な命題ともいえる太陽系外惑星が初めて発見されたのは、なんと1992年のことである(しかもこれはパルサーを主星とした惑星系の発見であり、主系列星を回る系外惑星の初発見はさらに3年後の1995年)。この困難さを理解するために、考えられる検出方法と必要となる精度を少し評価してみよう。以下、添字plと*でそれぞれ惑星(planet)と主星(star)に対する量を区別する。主星としては太陽を、惑星としては木星を典型的な例とし、太陽系から10pc程度の距離 d_{pl} に位置する星のまわりを円軌道で公転している場合を念頭と置く。したがって、予備知識として必要な数値は、太陽質量 $M_{\odot} \sim 2 \times 10^{33} \text{g}$ 、木星質量 $M_J \sim 10^{-3} M_{\odot}$ 、太陽半径 $R_{\odot} \sim 7 \times 10^5 \text{km}$ 、木星半径 $R_J \sim 0.1 R_{\odot}$ 、木星の軌道長半径 $a_J \sim 5.2 \text{AU}$ (1AUは約1.5億km)、である。

惑星の直接撮像

惑星は基本的には主星からの光を惑星大気が反射することで光っている。したがって、惑星光度と主星光

度の比は、惑星大気の性質で決まる波長に依存した反射率 p と、観測者と惑星系との位置関係で決まる位相因子 f を別にすれば、惑星の公転半径と表面積から簡単に

$$\begin{aligned} L_{pl}/L_* &= p \times f \times (R_{pl})^2 \\ &\sim 8 \times 10^{-9} p f (R_{pl}/R_J)^2 (a_J/a_{pl})^2 \end{aligned} \quad (7)$$

と書ける。さらに、主星と惑星の距離を見込む角度は、 $a_{pl}/d_{pl} \sim 0.5 (a_{pl}/a_J) (10 \text{pc}/d_{pl})$ 秒角となる。地上の光学望遠鏡の角度分解能はまさに0.5秒角程度がせいぜいであるから、「像を分解できないほど近くにある明るい主星の横の1億倍以下の暗さの天体を検出せよ」、が要求される。主星をマスクする巧妙な技術を完成させない限り、不可能と言わざるを得ない。

主星のドップラー速度変動

もちろん厳密には、惑星と主星はその重心の回りを互いに運動している。ケプラーの法則より主星の公転速度の振幅は、

$$\begin{aligned} v_* \sin i &\sim 30 \text{m/s} (P_{\text{orbit}}/\text{year})^{-1/3} \\ &\quad (M_{pl} \sin i/M_J) (M_*/M_{\odot})^{-2/3} \end{aligned} \quad (8)$$

となる P_{orbit} は公転周期、 i は公転軌道面の法線方向と観測者の視線方向のなす軌道傾斜角)。実は最近では3m/sのレベルまでこの速度変動を検出することが可能となっており、これが系外惑星発見を成功させた。

主星の位置変動

主星のケプラー運動による速度変動が観測できるのであれば、位置変動はどうか、と考えたくなる。まず、主星の公転半径は

$$\begin{aligned} a_* &= a_{pl} (M_{pl}/M_*) \\ &\sim R_{\odot} (M_{pl}/M_J) (M_{\odot}/M_*) (a_{pl}/a_J) \end{aligned} \quad (9)$$

となり、そもそも主星の半径と同程度でしかない。さらに、これを10pcの距離から観測したときの角度変動は、わずか0.5ミリ秒角である。もちろんこれは地上光学観測では不可能で、衛星観測が必要となる。1989年8月に打ち上げられ3年以上の観測を続けたヒッパルコス

衛星は、約10万個の星の位置を2ミリ秒角程度の精度で決定したが、惑星探査のためにはさらに一桁以上の分解能が要求される。

主星の光度変動

観測者が偶然、惑星が主星の前を横切る食が観測できるような位置関係にいる場合はそれに伴う主星の光度変動(食の間、暗くなる)が観測できる。そのような確率は、 $0.06(a_p/a_{pl})(R_*/R_\odot)\%$ 程度と高くはないが、この条件が満たされていれば、食の持続時間 ΔT_{occ} とその際の減光の割合は、

$$\Delta T_{occ} \sim P_{orbit} (R_*/a_{pl}) \sim 30 \text{ hours} \\ (a_{pl}/a_J)^{-1/2} (M_\odot/M_*)^{-1/2} (R_*/R_\odot), \quad (10)$$

$$\Delta L_*/L_* \sim 0.01 (R_{pl}/R_J)^2 (R_\odot/R_*)^2 \quad (11)$$

となり、現在の地上観測の測光変動検出精度である0.1パーセントと比べると十分観測可能である。後述のように、現時点で一例だけこの方法による観測が成功している。

主星からの信号到達時間変動

最後に、主星の位置変動(式[9])は、そこからの信号到着時間に換算すると、

$$\Delta t_* = a_* \sin i / c \\ \sim 2.5 \text{ sec} (M_{pl}/M_J) (M_\odot/M_*) (a_{pl}/a_J) \quad (12)$$

の振幅の変動に対応する。これは原理的には十分検出可能な時間スケールではあるが、残念なことに通常の星では、この時間変動の標準を与えてくれるような信号は存在しない。

4. 2 太陽系外惑星の発見

さて以上の簡単な考察から明らかなように、太陽系外惑星発見は、精密宇宙論と同じあるいはそれ以上に高精度の観測技術を要する。最初に発見された系

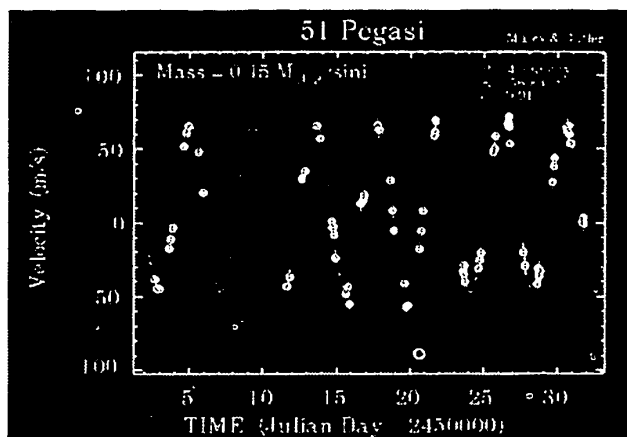


図11: 主系列星として初めて惑星を持つことが発見された51Pegの速度変動. (<http://exoplanets.org/>)

外惑星は、PSR1257+12という名前のパルサーのまわりの2つの惑星である[6]。パルサーはその自転周期に対応した極めて規則正しい電波パルスを放射する(このPSR1257+12の場合周期は6.2ミリ秒)ため、前述の信号到達時間変動を観測しうるユニークな天体であると言える。一方、そのような系ではもともと惑星があったとしても、超新星爆発の際に吹き飛ばされてしまうと考えるのが常識的であ(った)ろう。その意味においても、最初に発見されたこの系外惑星の存在は驚くべきものであった。

しかし、生命を誕生させ得る環境としての惑星に興味をもつとすれば、やはり太陽のような通常の主系列星に付随した惑星ということになる。その最初の例は1995年、MayorとQueloz[7]がペガサス座51番星の速度変動から発見した。図11は、この星の速度変動だけを取り出したデータである。丸で表された多数のデータ点を最も良く再現するようなモデルフィットから、惑星51Peg b(惑星の名前は、主星の名前の末尾にbをつける慣用となっている。第2惑星以降は、c,d,となる)について、次のような驚くべき結果が明らかになった。

$$P_{orbit} = 4.23 \text{ days}, M_{pl} \sin i = 0.47 M_J, \\ a_{pl} = 0.05 \text{ AU}. \quad (13)$$

つまり、木星と同程度の質量の惑星が、何とわずか4日

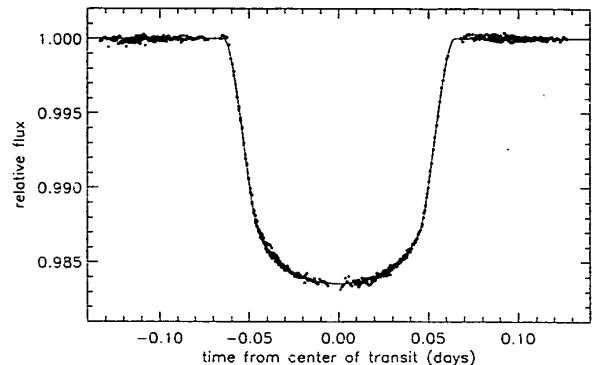
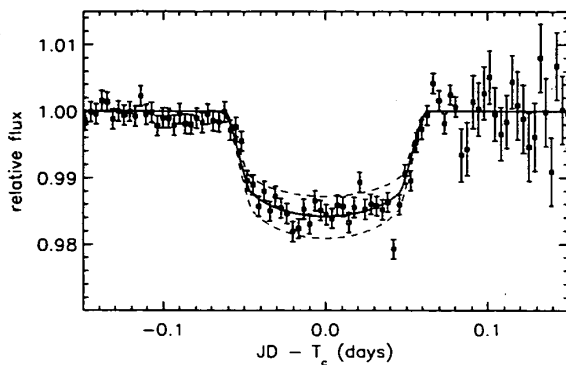


図12: HD209458bが主星の前を横切る際の光度変化. 左は、地上観測(文献[9]), 右はその後のHST観測による光度曲線(文献[10]).

程度で主星の周りを公転しているのである。我が太陽系を説明することを第一義的目的とした従来の惑星系形成理論が、このような短い公転半径に木星質量程度の大惑星があることを予想していなかったのは当然と言える。

その後、この主星の速度変動を用いる方法で(2002年3月現在)70個を超える数の惑星発見が報告されているが、これらはあくまで間接的なものであることも事実である。例えば、主星の表面振動や、非一様な表面が自転によって何らかの速度変動に似た信号を生んでいる可能性も否定は出来ないかもしれない。その意味で画期的なのは、惑星が主星の前を通過する“食”が測光的に観測されている唯一の例HD209458である(図12) [8,9,10]。これはすでに発見されていた主星の速度変動から推察される惑星運動のパラメータ($P_{\text{orb}}=3.52474 \pm 0.00004$ 日)に同期して主星光度が1.5%程度暗くなることを直接確認した美しい観測データであり、惑星の存在以外で速度変動を説明しようとする解釈をほとんど否定してしまう。のみならず、このデータから惑星の起動傾斜角と半径が初めて独立に推定できることとなり、

$$\begin{aligned} i &= 86.7^\circ, M_{\text{pl}} = 0.63M_J, R_{\text{pl}} = 1.35R_J \\ a_{\text{pl}} &= 0.046\text{AU}, \rho_{\text{pl}} = 0.3\text{g/cm}^3 \end{aligned} \quad (14)$$

という結果が得られた。特に重要なのは平均密度で、

この惑星が木星のようなガス状巨大惑星であることが確定したことである。主星のごく近くをガス状巨大惑星が回転しているという結果もまた、従来の惑星系形成理論の「常識」を覆す。

4. 3 惑星大気の見え

さて、通常の宇宙論的観測対象と比べると惑星を宿す主星は、どうしても明るく明い。主星と惑星を分離できない以上、明るすぎて普通の測光観測は不可能である。このため、HD209458(V等級7.65)の食の観測では、望遠鏡の焦点をわざとぼかせて光を多数のCCDに分散させる、あるいは、いったん超高分解能分光モードで観測を行ってからそれらを足し合わせて光度曲線をもとめる、といった方法をとるしかない。特に

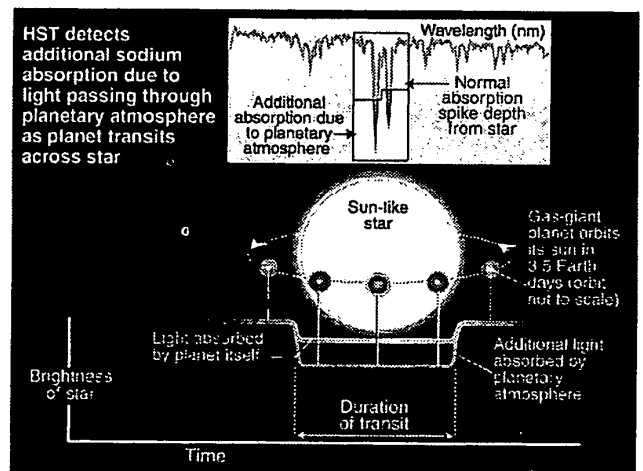


図13: HD209458の光度曲線と大気スペクトル観測の概念図 (<http://opposite.stsci.edu/pubinfo/2001/38/index.html>). Ann Feild (STScI) の許可を得て転載。

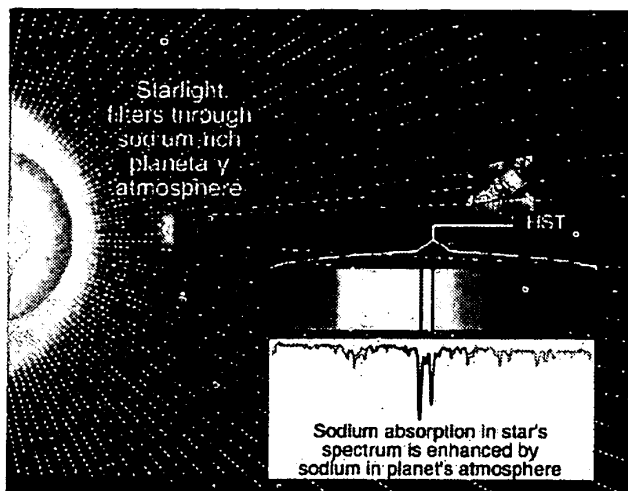


図14: HD902458bの大気中のナトリウム発見方法の概念図
(<http://oposite.stsci.edu/pubinfo/2001/38/index.html>).
Ann Feild (STScI) の許可を得て転載。

後者は、感度によっては惑星大気による吸収の兆候を検出できる可能性もあるという意味で、一石二鳥である。実際、Charbonneauら[11]はHSTで食を起こしているときと起こしていないときのHD209458の分光スペクトルを比較することで惑星HD209458bの大気中のナトリウムによると思われる吸収線を発見したのである(2001年11月; 図13)¹。さらにこのナトリウムの吸収量は、すでに発表されていた理論モデルに比べて1/3程度しかなかったことから、惑星大気モデルの問題提起あるいは惑星大気上空の雲の存在?、など今後の方向性をも示唆している。この発見のニュースは、e-mail・TV報道等を通じてまたたく間に世界中に伝わった。HSTウェブサイトを見ると、図表・音声・アニメーション動画を駆使したわかりやすい解説が丁寧になされており一見の価値がある(図14)。また、このように最新の科学成果を納税者に還元する姿勢は日本でももっと積極的にとりいれるべきであろう。

4. 4 惑星探査の現状と展望

図15に、現在知られている系外惑星の質量とその公転軌道長半径の関係を示す。1995年が最初の発見であることを考えればまさに発見ラッシュと言ってよい。これらはすべて主星の速度変動を用いる方法で発見

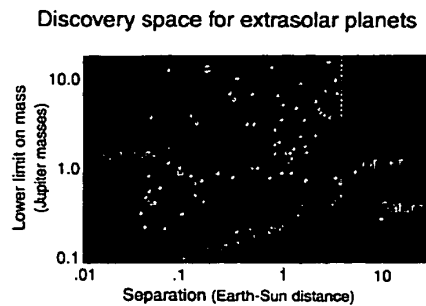


図15: 現在知られている太陽系外惑星の質量・軌道長半径関係。主星の速度変動を用いて推定できるのは、惑星の質量とその公転面の軌道傾斜角*i*からきまる*i*である(<http://oposite.stsci.edu/pubinfo/2001/38/index.html>). Ann Feild (STScI) の許可を得て転載。

されたものであり、質量が大きく公転半径が小さいものほど発見されやすいという選択バイアスを受けているのは事実である。しかし、このように近接軌道の惑星が多いこと、さらにはそれらも含めて離心率*e*の大きい(円からずれた楕円)軌道が多いことはいずれも以前の予想を裏切るものである。これはまさに§3で紹介したPeeblesの見解と一致した例と言えるかも知れない。このような進展を背景として、欧米では、より系統的な系外惑星探査プロジェクトが次々と提案され、宇宙科学研究の大きな流れの一つとなりつつある。次の目標は、単なる巨大ガス惑星の発見ではなく、地球型惑星さらには「habitable planets」の発見、そしてそれらがどのような性質を持っているかを統計的に探ること(characterization)である。例えば、惑星の温度は? 大気は存在するか? 酸素は?、海は?、そして、生命体の存在の兆候を探ることはできないか?(図16)など、

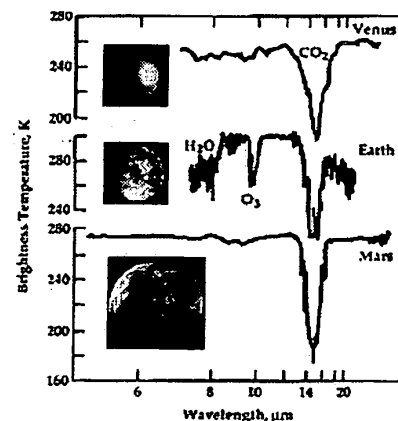


図16: 火星・金星・地球の分光スペクトルの比較

3 実は、我々もこのHD209458bの反射光をすばるで高分解能分光観測で検出する提案を行ってきたのであるが、2期続けて落されてしまった。その副産物として、食を起こしているときとないときの分光スペクトルの比較から惑星大気組成を探る可能性は明記していたのだが、... 確かに筆者のような「非専門家」がPIとしてこのような限界的な観測に挑戦することに不安があることは確かであるが、もしも認められていれば今回の発表に先駆けてすばるで惑星大気の兆候をつかんでいた可能性も否定できず残念さは残る。

極めて重要な疑問が山積している。そして、10年から20年のスケールで、これらの問いに答えるべく、超大型観測装置が大気圏外へと放たれることであろう。

5 四十而惑星

論語巻第一爲政第二の、「十有五而志乎學，三十而立，四十而不惑，五十而知天命，六十而耳順，七十而從心所欲，不踰矩」は、現在の研究者人生にもなぞることができる。つまり、「高校生に入学する頃に研究者を志し，30才頃に学位をとって職を得る。40才ぐらいになるとある分野においてそれなりの評価を受けようになってしまうため，逆にかなりの勇気がない限り別の分野への転向に消極的になってしまう。50才ともなると，自らの意志かどうかは別として様々な研究以外の仕事を命ぜられることが多くなり，60才あたりで無事定年を迎える。その後，70才ともなれば何をやっても別に学問的インパクトを与えることはなくなる，，，」言うまでもなくこれは私のようなごく平凡な研究者だけに成り立つ解釈かもしれない。しかし実は孔子の人生もまたこの言葉とは程遠く，40代後半からはむしろ惑いだらけであったと形容した方がよさそうに思える[12]。孔子ですらそうなのであるから，我々は安心して惑いながらの人生を送るべきなのかも知れない。

さて，冒頭に述べたように，ペンジアス・ウィルソンのCMB発見から数えるとすれば観測的宇宙論は2002年で37才ということになる。不惑目前である。精密宇宙論に邁進することこそまさに「不惑」として推奨されるべきなのかも知れないが，ここは大いに「系外惑星探索に惑う」ことを期待する。生物が誕生する条件を満たすような惑星系は存在するのか，さらには，惑星系の観測から生命が存在する何らかの兆候を知ることは可能なのか。これらの謎に答えることは，21世紀の科学において，未開拓のしかも決して夢ではなくなりつつある課題である。いささかうがちすぎの感はあるが，これをさして，「有朋自遠方来不亦樂乎の宇宙論」と呼び[3]，「四十にして惑星。宇宙論研究に不惑なし。」をす

でに不惑を乗り越してしまった自分自身への警句としたいと考えている。

本解説は，文献[3]の内容を遊・星・人の読者向けに書き直して欲しいという編集長からの依頼を受けて書き始めた。しかし実際にはかなり大幅な変更を行うとともにその後の進展を付け加えた。結果的には，いろいろな意味で，文献[3]と相補的なものとなり，いわばその続編といった感じに仕上がった。したがって，機会があればそれと合わせてお読み頂ければ幸いである。最後ではあるが，本解説で用いた図の転載を快く許可して頂いた以下の方々に厚く感謝させて頂きたい；

NASA/MAP Science Team,

<http://map.gsfc.nasa.gov> (図1, 図9, 図10), Geoff

Marcy, <http://exoplanets.org/science.html> (図11),

David Charbonneau (図12),

Ann Feild, STScI (図13~図15)。

参考文献

- [1] P. J. E. Peebles, 1993, Principles of Physical Cosmology, Princeton University Press (Princeton University Press).
- [2] 須藤 靖, 1999, 天文月報 **92**, 76.
- [3] 須藤 靖, 2001, 科学 **71**, 1036.
- [4] 井田 茂, 1997, 遊・星・人 **6**, 4.
- [5] 観山 正見, 2002, 太陽系外惑星に生命を探せ(光文社新書)。
- [6] Wolszczan, A. and Frail, D. A., 1992, Nature, **355**, 145,
- [7] Mayor, M. and Queloz, D., 1995, Nature, **378**, 355.
- [8] Henry, G. W. et al., 2000, ApJ, **529**, L41.
- [9] Charbonneau, D. et al., 2000, ApJ **529**, L45.
- [10] Brown, T. M. et al., 2001, ApJ **552**, 699.
- [11] Charbonneau, D. et al. 2002, Apj, **568**, 377.
- [12] 例えば, 坂田 新, 2000, 論語紀行 (日本放送出版協会)