

2009年度 卒業論文

宇宙膨張と宇宙論パラメータ

情報科学部 情報科学科

A05053 黒田 雅敏

目次

1	序論	1
1.1	背景	1
1.2	本研究の目的	1
2	標準ビッグバン宇宙論を支える観測的証拠	2
2.1	ハッブルの法則	2
2.2	宇宙マイクロ波背景放射	3
2.3	軽元素の存在比	3
3	宇宙膨張を導く方程式	4
3.1	アインシュタイン方程式	4
3.2	フリードマン方程式	5
4	宇宙論パラメータ	6
4.1	ハッブル定数	6
4.2	密度パラメータ	6
4.3	減速パラメータ	6
4.4	宇宙項	7
4.5	曲率	7
4.6	臨界密度	7
5	アプリケーションの仕様	8
5.1	概要	8
5.2	プログラム	8
5.3	計算手法	9
5.4	使用方法	10
6	結果	11
6.1	宇宙項0の宇宙モデル	11
6.2	密度0の宇宙モデル	12
6.3	その他の宇宙モデル	13
6.4	観測から得られる宇宙モデル	14
7	結果	15
8	プログラム	16

1 序論

1.1 背景

20世紀の初期では、宇宙は一定不変であると考えられていた。そのため、アインシュタインが自らが構築した一般相対性理論に基づいて導いたアインシュタイン方程式に宇宙項という定数を入れて静的な宇宙を実現しようとした。

ところが、1929年、ハッブルが銀河の赤方偏移を発見した。これは遠方の銀河が我々から遠ざかりつつあることを意味しており、その現象はあらゆる方向で観測された。また、その後退速度は距離に比例していることも分かった。この発見によりわれわれの住む宇宙が膨張していることが判明したのである。このことを知ったアインシュタインが宇宙項を導入したことを人生最大の失敗」と嘆いたことは非常に有名である。

さらに近年では、遠方の超新星を用いた観測によって宇宙膨張は加速していることが明らかにされた。しかし、加速膨張の原因はわかっておらず、アインシュタイン方程式では物質の引力によって膨張が減速することは表現できるが、加速膨張することは表現できない。加速膨張の原因になる斥力を持った物質を仮定し、ダークエネルギーと呼んでいる。そのダークエネルギーは宇宙項を用いて表現している。

1.2 本研究の目的

本研究では、宇宙論パラメータから宇宙の膨張、収縮の様子を視覚化するアプリケーションを作成し標準ビッグバンモデルにおけるスケール因子の変化の様子を容易にし、パラメータの変化がスケール因子にどのような影響を与えるのかを比較できるようにした。

また、現在扱われている宇宙論パラメータを用いて、スケール因子の変化を調べた。

2 標準ビッグバン宇宙論を支える観測的証拠

われわれの宇宙は、今からおよそ 140 億年前に熱い火の玉とでも言うべき状態から誕生し、膨張とともに温度を下げながら、現在に至る過程で多様な天体の諸階層を生み出してきたと考えられている。この理論を標準ビッグバン理論と呼ぶのだが、この理論を支える 3 つの観測的証拠がある。3 つの観測的証拠とは

1. ハッブルの法則
2. 宇宙マイクロ波背景放射
3. 軽元素の存在比

である。

この章では [1],[2],[3] を参考にした。

2.1 ハッブルの法則

遠方の銀河を観測すると、我々の銀河に対して何らかの相対運動をしている。この相対速度 v は、遠方の銀河の発する輝線、吸収線の波長がドップラー効果によって変化することから決定される。遠方の銀河が我々から遠ざかりつつあれば、その波長は引き伸ばされ、近づいていけば縮んで観測される。波長 λ をもっていた光が波長 λ' で観測された場合、我々から遠ざかる向きを速度の正の方向にとると

$$\frac{v}{c} = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} \equiv z \quad (1)$$

という関係式が成り立つ。ここで、 c は光速である。 z は波長が引き伸ばされると光が赤くなることに由来して、赤方偏移と呼ばれている。

1929 年、ハッブルは当時距離が推定できた 20 数個の遠方の銀河に対して後退速度 v を決定し距離との関係を調べると

$$v = H_0 d \quad (2)$$

という結論に至った。この関係式を「ハッブルの法則」、比例定数 H_0 を「ハッブル定数」と呼ばれている。

ハッブルの法則は我々から見てあらゆる方向で成り立つということは、宇宙のどの場所においてもハッブルの法則が成り立つことを意味する。このことから宇宙が一様等方に膨張していると考えられる。

また、ハッブル定数は、現在の宇宙の膨張率を表すパラメータであり、時間の逆数の次元を持っている。2 点が一定の後退速度 v のまま運動したとすれば、現在から $d/v = H_0$ だけ過去にさかのぼれば宇宙全体が 1 点に収縮することになるため、ハッブルの法則により宇宙が有限の過去に始まったことがわかる。

2.2 宇宙マイクロ波背景放射

初期の宇宙が暑い火の玉状態にあったとされているが、その名残である光子が、宇宙膨張とともに温度を下げながら現在の宇宙を満たしているというものである。1989年に打ち上げられた人工衛星 COBE によって宇宙マイクロ波背景放射のピークを含む短波長帯におけるスペクトルの精密測定を行い、宇宙マイクロ波背景放射が温度 $2.275 \pm 0.001K$ の黒体放射であることを示した。この値が過去の高温であった宇宙の名残と考えられるのである。

2.3 軽元素の存在比

現在の宇宙に存在する元素は、ある普遍的な存在比を示していることが知られており、全元素の約 $1/4$ がヘリウムである。水素以外の元素はすべて、何らかの核融合の過程を経て合成されたはずである。

宇宙初期では、宇宙は高温高密度の状態であり、さらに自由中性子が多数存在していると考えられる。そのような場合の核融合では恒星で作られるよりもはるかに短い時間でヘリウムが合成される。合成が行われるのは、宇宙の温度が 10^9K であるわずか数分間であるが、その時点に存在していた自由中性子はほとんどがヘリウム原子核にとりこまれる。その結果、全核子に対するヘリウムの質量比は 0.25 と見積もられ、観測から得られた $0.23-0.25$ という値を再現している。また、この反応は宇宙全体で起きることになり、ヘリウムの偏在も同時に説明されることになる。

3 宇宙膨張を導く方程式

この章ではスケール因子を導くための方程式について説明する。

3.1 アインシュタイン方程式

1905年に、アインシュタインは「特殊相対性理論」を発表した。特殊相対性理論とは以下の2つの原理を土台にした理論である。

1. お互いに等速度で運動しているすべての慣性系において、すべての基本的物理法則は、まったく同じ形で表される。それらの慣性系のなかから、なにか特別なものを選び出すことはできない。
2. 真空中の光の速さは、光源の運動状態に影響されない一定値 c である。

1は相対性原理と呼ばれ、2は光速不変の原理と呼ばれる。また、特殊相対性理論は重力を含まない理論である。さらに10年後には重力が働く状況下でも成り立つ「一般相対性理論」を発表した。

一般相対性理論では等価原理を土台に特殊相対性理論をさらに発展させ考えられた理論である。等価原理とは、加速度運動する観測者からすると慣性力と重力を同じとみなすことができる。つまり重力を慣性力と考える原理である。

アインシュタイン方程式は、アインシュタインの重力場の方程式と呼ばれ、一般相対性理論で導いた、万有引力・重力場を記述する場の方程式で、以下のように表す。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (3)$$

左辺は、時空がどのように曲がっているのかを表す曲率であり、右辺は物質場の分布を表す。

左辺は $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu}$ としてアインシュタインテンソルと呼ばれ、右辺の $T_{\mu\nu}$ はエネルギー・運動テンソルである。左辺の $R_{\mu\nu}$ はリッチの曲率テンソル、 R はリッチの曲率スカラーであり、どちらも時空多様体の計量テンソル $g_{\mu\nu}$ から計算される幾何学量である。 G は万有引力定数、添え字 μ 、 ν は、それぞれ時空の座標を特定するもので、時間1次元と空間3次元の4成分を動き、 $g_{\mu\nu}$ は10個の独立成分を持つ 4×4 の対称テンソルである。

星のような物質またはエネルギーを右辺に代入すれば、その星の周りの時空がどういう風に曲がっているかを読み取ることが出来る式である。

また、アインシュタインは1917年の論文に宇宙項 Λ を加え次のようにした。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (4)$$

宇宙項の無い式では、右辺が引力を生み出すために宇宙は永劫不変にならない。そこで斥力を持つ宇宙項を用いて引力を打ち消し、静的な宇宙モデルを提唱したのである。

3.2 フリードマン方程式

フリードマン方程式とは、2つの仮定を行うことにより、標準ビッグバンモデルでの宇宙膨張を表す方程式である。

1つは、アインシュタイン方程式の厳密解の一つであるロバートソン・ウォーカー計量を仮定する。ロバートソン・ウォーカー計量とは一様等方な時空を表し、

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + R(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right] \quad (5)$$

と表される。 c は光速、 R はスケール因子、 k は宇宙の曲率で、 k が負、0、正により-1、0、1の値をとる。

もう1つは、物質分布は完全流体であると仮定する。つまりエネルギー運動量テンソルを

$$T_{\mu\nu} = (\rho c^2 + P) u_\mu u_\nu \quad (6)$$

とする。ここで、 u_μ は流体の4元速度で、 $u^\mu = (1, 0, 0, 0)$ である。 ρ は密度、 P は圧力である。

以上の仮定を行って得られる2本の式が

$$8\pi\rho GP = \frac{3}{R^2} [kc^2 + (R')^2] - \Lambda \quad (7)$$

$$8\pi\rho GPc^{-2} = -2\frac{R''}{R} - \frac{1}{R^2} [kc^2 + (R')^2] + \Lambda \quad (8)$$

である。ここで、 G は万有引力定数、 Λ は宇宙項である。

これら2つの方程式は、時間に関する3つの未知関数スケール因子 $R(t)$ 、平均密度 $\rho(t)$ 、平均圧力 $P(t)$ を含んでいるため問題が規定できない。

そこで本研究では初期宇宙を除き物質エネルギーが放射エネルギーを凌駕している物質優勢時代が続いていることから、圧力なしのモデルを考える。

また、宇宙の総質量が一定でなければならないので

$$\rho_0 R_0^3 = \rho(t) R(t)^3 \quad (9)$$

という条件と $P = 0$ を用いて上の2本の式をまとめると

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -4\pi G \rho_0 \frac{R_0^3}{3R^2} + \frac{\Lambda R}{3} \quad (10)$$

となる。

4 宇宙論パラメータ

観測できる宇宙の組成から推定される値であり、初期宇宙において形成された物理指標値のことである。1929年のハッブルの宇宙膨張発見以来様々なパラメータが推定されてきた。現在では宇宙探索機 WMAP によって過去の観測装置で得られた値よりも高い精度で宇宙論パラメータが推定されている。

以下に出てくる式で、下付き添字の 0 は、 $t = 0$ での物理量の値を表すものである。

また、この章では [1],[2] を参考にした。

4.1 ハッブル定数

2章で述べたようにハッブルは他の銀河の後退速度が距離と比例して大きくなっていることを発見した。 v を後退速度、 D を我々からその銀河までの距離としたとき、

$$v = H_0 D \quad (11)$$

と表わされる。ここで、比例定数 H_0 をハッブル定数と呼ぶ。

WMAP の観測によって推定された値は $H_0 = 0.73$ である。

4.2 密度パラメータ

Ω_0 で表わされる平均密度に比例したパラメータで、以下の式になる。

$$\Omega_0 = \frac{8}{3}\pi\rho_0GH_0^{-2} \quad (12)$$

WMAP の観測によって $\Omega_0 h_100^2 = 0.128 \pm 0.008$ という値が得られている。 $h_100 = 0.73$ と仮定すると $\Omega_0 \simeq 0.24$ となる。

4.3 減速パラメータ

q_0 で表し、スケール因子の相対的な加速度を与えるものである。

$$q_0 = -\frac{R_0''}{R_0}H_0^{-2} \quad (13)$$

4.4 宇宙項

遠方の超新星や宇宙背景放射の観測結果とアインシュタイン方程式に照らし合わせるならば宇宙項の存在が必要になる。もともと宇宙項はアインシュタインが静的な宇宙モデルを実現するために導入したものである。

WMAPの観測によればわれわれの宇宙は4われわれの知っている通常の物質は、たった4

近年では遠方の超新星を用いた観測によって宇宙膨張は加速していることが示されている。現在の宇宙膨張を加速させている斥力として、ダークエネルギーが提案されている。ダークエネルギーが宇宙項の斥力としての役割を果たしているのではないかと考えられるのである。宇宙項は Λ で表し

$$\Lambda = 3H_0^2(\Omega_0 - q_0) \quad (14)$$

である。ここで、 Λ が正なら力は外向きに働き、負ならば内向きに働く。

4.5 曲率

膨張宇宙では、宇宙内部に含まれる物質やエネルギーによって作られる重力場によって宇宙膨張が減速を受ける傾向にある。宇宙に多くの質量が存在すれば、膨張は最終的に止まって宇宙は収縮に向かい、ビッグクランチと呼ばれる特異点に達する。このような宇宙の時空は正の曲率を持ち、「閉じた宇宙」と呼ばれる。質量が少なければ、宇宙は永遠に膨張を続けることになる。このような宇宙の時空は負の曲率を持ち、「開いた宇宙」と呼ばれる。両者の中間ならば宇宙は曲率0の時空を持ち、「平坦な宇宙」と呼ばれ、このような宇宙のエネルギー密度 ρ_c を臨海密度と呼ぶ。曲率は以下の式の正負で求めることができる。

$$k = (3\Omega_0 - q_0 - 1) \text{の符号} \quad (15)$$

WMAPの観測によってほぼ0であるとされており、平坦な宇宙と考えることができる。

また、密度パラメータと曲率をWMAPで推定された値とすると、減速パラメータは-0.64となる。

4.6 臨界密度

曲率 $k = 0$ となる密度を臨界密度と呼び、 ρ_c で表す。 ρ_c は

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (16)$$

で求めることができる。

5 アプリケーションの仕様

5.1 概要

本研究で開発したアプリケーションでは、密度パラメータと減速パラメータの2つのフリーパラメータをユーザが入力することによってスケール因子の変化をグラフで表示させる。また、任意でハッブル定数も変更できるようにした。

5.2 プログラム

式(10)を Ω_0 と q_0 だけをフリーパラメータとして含まれる式に変換し、解きやすくしておく。

まず、スケール因子の現在値 R_0 を単位とし、変数を Y とすると

$$Y = \frac{R}{R_0} \quad (17)$$

となり、現在のスケール因子は $Y_0 = 1$ となる。

また、時間の単位を H_0^{-1} とし、変数を X とすると

$$X = H_0 t \quad (18)$$

となり、現在の時間を $X_0 = 0$ と置く。

また、時間の単位は $H_0^{-1} = (9.778/h_100) \times 10^9$ となるので、 $h_100 = 0.73$ ならば 1.34×10^{10} 年となる。

さらに、式(17)、(18)を用いると、初期の膨張率 $\frac{dY_0}{dX}$ は

$$\frac{dY_0}{dX} = 1 \quad (19)$$

となる。

式(10)を (X, Y) 座標に変換し、 ρ_0 、 Λ 、 k 、 H_0 の代わりに Ω_0 、 q_0 を用いると

$$\frac{d^2 Y}{dX^2} = -\frac{\Omega_0}{Y^2} + (\Omega_0 - q_0)Y \quad (20)$$

となる。

スケール因子の変化を調べるために、式(20)を数値的に解いていく。

まず、 $X_0 = 0$ 、 $Y_0 = 1$ 、 $Y'_0 = 1$ という初期条件から負の時間幅により過去に向かって計算し、その後もう一度初期条件から正の時間幅により未来をに向かって計算する。本研究では2階微分方程式を中点法で解いている。その際時間幅 dX の値は0.02とする。ただし、膨張率 Y' が $Y' > 2$ 、もしくは $Y' < -2$ 場合は時間幅を0.01と置き、誤差を抑える。

スケール因子の他にも宇宙項、曲率のパラメータを決定する。また、ユーザが理解しやすくするためにビッグバンビッグクランチが起こった時間を表示するようにした。

5.3 計算手法

以下のように計算していく。

1. Ω_0 と q_0 の値を決定する。
2. $X = 0$ 、 $Y_0 = 1$ 、 $Y'_0 = 1$ の初期条件から出発して過去に向かって式 (20) を数値的に解く。
3. もし、 Y が 0 以下になったり、 X が $-\infty$ になるようなら計算を終了する。
4. 未来に向かって $X = 0$ 、 $Y_0 = 1$ 、 $Y'_0 = 1$ の初期条件から出発し、式 (20) を数値的に解く。
5. もし、 Y が 0 以下になったり、 X が ∞ になるようなら計算を終了する。
6. 物理的パラメータを決定する。

5.4 使用方法

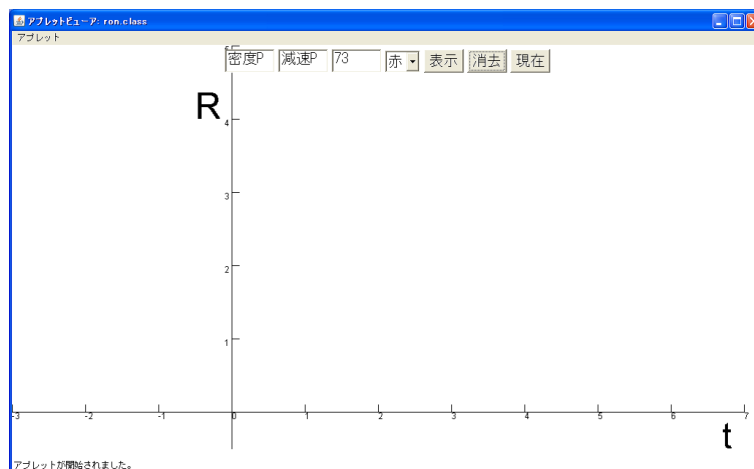


図 1: 操作画面

図 1 は、アプリケーションの操作画面である。上部にある「密度 P」、「減速 P」はそれぞれユーザーが密度パラメータと減速パラメータを入力する。「73」となっているのはハッブル定数で初期値は 73 となっているが、ユーザーの任意で適当に変えることもできるようにしてある。「赤」となっている部分はユーザーが選択することによって、スケール因子の軌跡の色を変えることができる。色は赤、青、黄、桃、緑の 5 色を用意している。「表示」部分は、ユーザーが密度パラメータ、減速パラメータを入力した後、表示ボタンをクリックすることによって結果を出力する。「消去」は今まで描いた軌跡を消すボタンである。「現在」ボタンは、WMAP によって得られている宇宙論パラメータを用いて、スケール因子の増減を出力する。

また、出力するものはスケール因子の軌跡、密度パラメータの値、減速パラメータの値、宇宙項、曲率である。さらに、ビッグバンビッグクランチが起きる宇宙モデルならば起きる時間も出力するようにした。

6 結果

6.1 宇宙項0の宇宙モデル

パラメータ	k	Λ
$\Omega_0 = q_0 = 0$	-1	0
$\Omega_0/2 = q_0 < 0.5$	-1	0
$\Omega_0/2 = q_0 = 0.5$	0	0
$\Omega_0/2 = q_0 > 0.5$	1	0

表 1: 宇宙項0のモデルの表

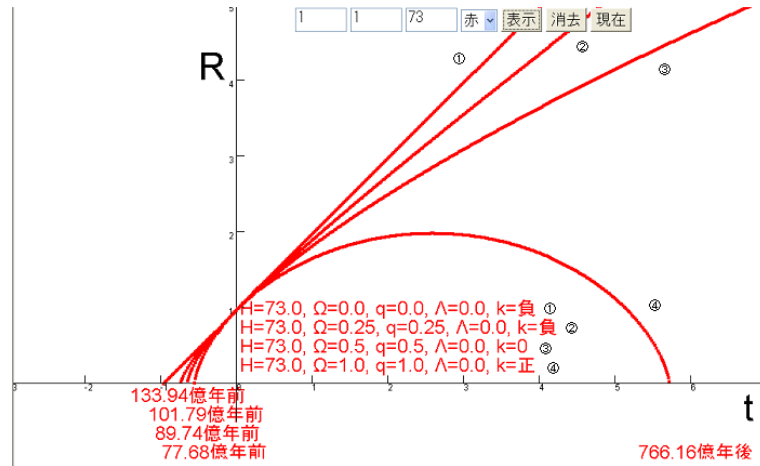


図 2: 宇宙項0のモデルのスケール因子の振る舞い

図2は、宇宙項が0のモデルをアプリケーションを用いて描いたものである。

$k = 0$ である $\Omega_0/2 = q_0 = 0.5$ の時に臨界密度となる。また、密度パラメータが0ということは、重力しか存在していないモデルと考えることができる。そのため、加速膨張が起きず、現在の観測と一致しない。このモデルは、アインシュタイン・ジッター宇宙と呼ばれる。宇宙は空間的に平坦であり、宇宙項が無く重力によって支配される。

また、 $\Omega_0 = q_0 = 0$ のモデルをミルン宇宙という。このモデルは、重力場をもった物質も宇宙項も存在しないため一定に膨張を続けることになる。

これらのモデルがすべて加速膨張を起こさないため、現在観測されている宇宙の加速膨張を再現するには斥力が必要ながわかる。

6.2 密度0の宇宙モデル

パラメータ	k	Λ
$\Omega_0 = 0; q_0 > 0$	-1	負
$\Omega_0 = 0; q_0 < -1$	1	正
$\Omega_0 = 0; q_0 = -1$	0	正
$\Omega_0 = 0; -1 < q_0 < 0$	-1	正

表 2: 密度パラメータ0のモデルの表

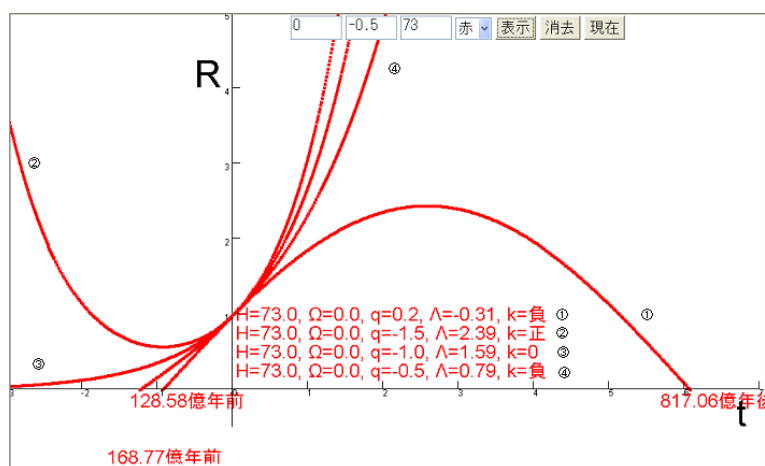


図 3: 密度パラメータ0のモデルのスケール因子の振る舞い

図3は、密度パラメータが0のモデルをアプリケーションを用いて描いたものである。密度パラメータが0ということは重力場をもった物質が存在していないことを意味する。

$k = 0$ である $\Omega_0 = 0, q_0 = -1$ の 때가臨界密度となる。また、密度と圧力がともに0で、宇宙項が正の値をとる宇宙であるこのモデルはド・ジッター宇宙と呼ばれる。このモデルでは、宇宙は空間的に平坦であり、普通の物質を無視し、そして宇宙の力学は宇宙項により支配されている。

6.3 その他の宇宙モデル

k	Λ
-1	負
1	正

表 3: その他のモデルの表

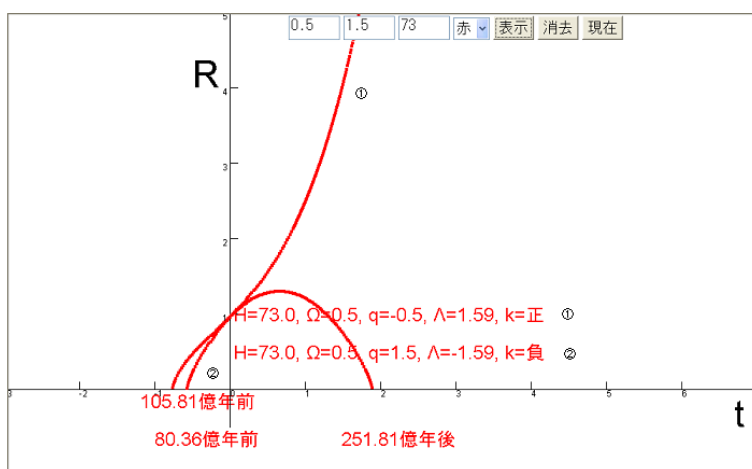


図 4: その他のモデルのスケール因子の振る舞い

図 4 は、前 2 つの条件に当てはまらないものであるが、この中で $k = 1$ 、 $\Lambda =$ 正のときのモデルをル・メートル宇宙と呼ばれている。このモデルは、物質も宇宙項も考えた、最も一般的なモデルであると言える。ビッグバンの後、減速膨張に差し掛かるが、斥力である宇宙項が大きくなり加速膨張に転じる。

6.4 観測から得られる宇宙モデル

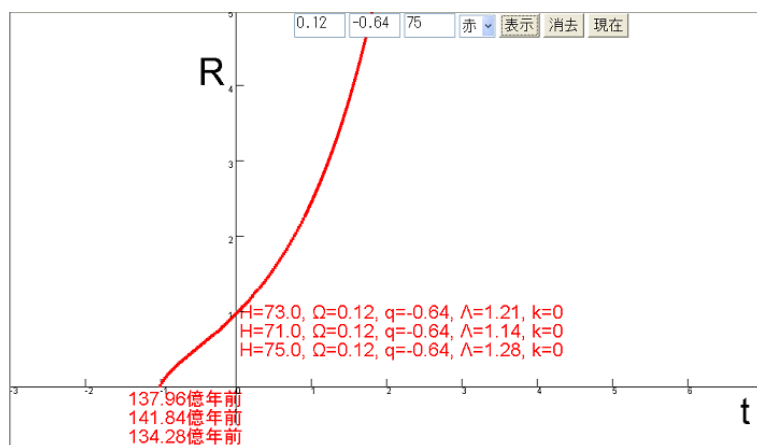


図 5: 現在の宇宙のモデル

WNAP の観測から得られた、 $\Omega_{m,0} = 0.24$ と $k = 0$ を仮定すると、式 (15) から $q_0 = \frac{3}{2}\Omega_0 - 1 = -0.64$ となる。これらの値をプログラムに入力すると、上の図 5 となり、ル・メートル宇宙であることがわかる。そして 137 億年前にビッグバンが起き、宇宙が始まっている。

また、ハッブル定数を変えて計算を行った。現在宇宙年齢は 137 億年と言われているが、ハッブル定数は ± 2 程度の誤差がある。誤差を含めると宇宙年齢は 4 億年ほどの誤差になった。

7 結果

今回、スケール因子の振る舞いの計算を行うプログラムの作成を行ったが、これを視覚的に見ることによってパラメータの違いによる変化を比較しやすくなった。それによって、宇宙項などのパラメータがスケール因子にどのような影響を与えているかがわかる。

また、現在の観測から得たパラメータによる計算を行ったが、宇宙が現在、加速膨張をしていることがわかる。

参考文献

- [1] ポール・ヘリングス, 川端 潔 『パソコンで宇宙物理学』, 国書刊行会, 2008 年
- [2] 二間瀬敏史, 池内了, 千葉柁司 『宇宙論 』, 日本評論社, 2007 年
- [3] 伏見賢一 『宇宙物理学入門』, 大学教育出版, 2008 年

8 プログラム

```
import java.awt.*;
import java.applet.*;
import java.awt.event.*;
import javax.swing.*;

public class ron extends Applet implements ActionListener, ItemListener {

    TextField sigma,mitsudo,hubble;
    Button buttonh,buttons,buttong;
    Choice ch=new Choice();
    int color=0;
    int fs1=50 , fs2=25;
    int count=-fs2;
    int i, k;
    double H,h;
    double S,S2,s,q;
    double x , y , z;
    double x12, y12 ,z12 ,dx;
    double[] hairetsux = new double[500];
    double[] hairetsuy = new double[500];
    String kyokuritsu;

    void pause(int time){
        try { Thread.sleep(time);}
        catch (InterruptedException e) {}
    }

    void field(){
    Graphics g=getGraphics();
        g.setColor(Color.black);
    g.drawLine(0, 500, 1000, 500);
    g.drawLine(300, 0, 300, 550);
    for(int i=0;i<11;i++){
```

```

g.drawLine(i*100, 490, i*100, 500);
int i2=i-3;
g.drawString(i2+"", i*100, 510);
}
for(int j=0;j<6;j++){
g.drawLine(300, 0+j*100, 310, 0+j*100);
int j2=5-j;
if(j2>0){
g.drawString(j2+"", 290, j*100+10);
}
}
g.setFont(new Font("PLAIN",Font.PLAIN,fs1));
g.drawString("t",970,550);
g.drawString("R",250,100);
    g.dispose();
}

    double bouchou(double dx){
        x12=x+0.5*dx;
        y12=y+0.5*dx*z;
        z12=z+0.5*dx*(-s/y/y+(s-q)*y);

        x=x+dx;
        y=y+dx*z12;
        z=z+dx*(-s/y12/y12+((s-q)*y12));
        return x;
    }

public void init(){
sigma=new TextField("密度 P",4);
sigma.setFont(new Font("", Font.PLAIN, 20));
add(sigma);
mitsudo=new TextField("減速 P",4);
mitsudo.setFont(new Font("", Font.PLAIN, 20));
add(mitsudo);
hubble=new TextField("73",4);
hubble.setFont(new Font("", Font.PLAIN, 20));
add(hubble);

```

```

ch.setFont(new Font("", Font.PLAIN, 20));
ch.add("赤");
ch.add("青");
ch.add("黄");
ch.add("桃");
ch.add("緑");
add(ch);
ch.addItemListener(this);

buttonh=new Button("表示");
buttonh.setFont(new Font("", Font.PLAIN, 20));
buttonh.addActionListener(this);
add (buttonh);
buttons=new Button("消去");
buttons.setFont(new Font("", Font.PLAIN, 20));
buttons.setBounds(0 , 500 , 100 , 20);
buttons.addActionListener(this);
add (buttons);
buttong=new Button("現在");
buttong.setFont(new Font("", Font.PLAIN, 20));
buttong.addActionListener(this);
add (buttong);
}

```

```

public void actionPerformed(ActionEvent e){
if (e.getSource() == buttonh) {
S=Double.parseDouble(sigma.getText());
q=Double.parseDouble(mitsudo.getText());
h=Double.parseDouble(hubble.getText());

H=h/100;
count=count+fs2;
repaint();
}
if (e.getSource() == buttons) {
Graphics g=getGraphics();
g.setColor(getBackground());
Dimension d = size();

```

```

        g.fillRect(0,0,d.width,d.height);
        field();
        count=-fs2;
    }
    if (e.getSource() == buttong) {
    S=0.24;
    q=-0.64;
    h=73;
    H=h/100;
    count=count+fs2;
    repaint();
    }
}

public void itemStateChanged(ItemEvent e) {
String selected = ch.getSelectedItem();
if(selected=="赤"){
color=0;
}if(selected=="青"){
color=1;
}if(selected=="黄"){
color=2;
}if(selected=="桃"){
color=3;
}if(selected=="緑"){
color=4;
}
}

public void update(Graphics g) {

field();

g.setFont(new Font("PLAIN2",Font.PLAIN,fs2));

if(color==0){
g.setColor(Color.red);
}if(color==1){

```

```

g.setColor(Color.blue);
}if(color==2){
g.setColor(Color.yellow);
}if(color==3){
g.setColor(Color.pink);
}if(color==4){
g.setColor(Color.green);
}

x=0;
y=1;
z=1;
dx=-0.02;
i=0;
s=S/2;

while(y>0){
hairetsux[i]=x;
hairetsuy[i]=y;

x=bouchou(dx);

if(x<-3 || y>5){
break;
}
if(z>2 || z<-2){
dx=-0.01;
}else{
dx=-0.02;
}
i++;
}

if(y<=0){
g.drawString(-(double)(int)(x*9.778/H*1000)/100+"億年前",260+(int)(x*100), 525+count);
}

for(int j=i-1;j>0;j--){
g.fillRect(300+(int)(hairetsux[j]*100), 500-(int)(hairetsuy[j]*100), 4, 4);
}

```

```

pause(20);
}

if(3*s-q-1==0){
k=0;
}else if(3*s-q-1<0){
k=-1;
}else if(3*s-q-1>0){
k=1;
}
if(k==0){
kyokuritsu="0";
}if(k==-1){
kyokuritsu="負";
}if(k==1){
kyokuritsu="正";
}
g.drawString("H="+h+",   "+S+", q="+q+",   "+((double)(int)(100*3*(H*H)*(s-q))/1000));
System.out.println("H="+h+",   "+s+", q="+q+",   "+((double)(int)(100*3*(H*H)*(s-q))/1000));

x=0;
y=1;
z=1;
dx=0.02;

while(y>0){
g.fillRect(300+(int)(x*100), 500-(int)(y*100), 4, 4);

x=bouchou(dx);

if(x>10 || y>5){
break;
}
if(z>2 || z<-2){
dx=0.01;
}else{
dx=0.02;
}
pause(20);
}

```

```
}
```

```
if(y<=0){
```

```
g.drawString((double)(int)(x*9.778/H*1000)/100+"億年後",260+(int)(x*100), 525+count  
}
```

```
}
```

```
}
```