

宇宙はどこまで解明されたか

- 4月25日 天文学と宇宙物理学：観測技術の進展と星までの距離の測定
- 5月23日 惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？
- 6月27日 星とブラックホールと惑星系と銀河：構造形成は何か先か？
- 7月25日 **超新星爆発と宇宙論：6つのパラメータで描かれる膨張宇宙**
- 8月29日 初期宇宙と素粒子物理：高次元モデルが描くビッグバン以前
- 9月26日 重力波と重力理論：アインシュタインはどこまで正しいか？

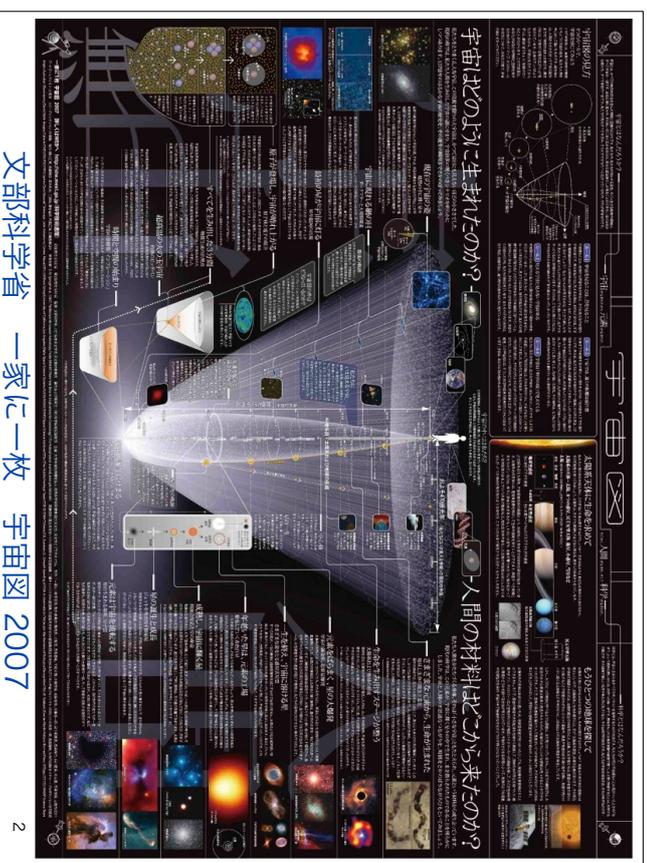
真貝寿明 (しんかい ひさあき)

大阪工業大学 情報科学部 教授

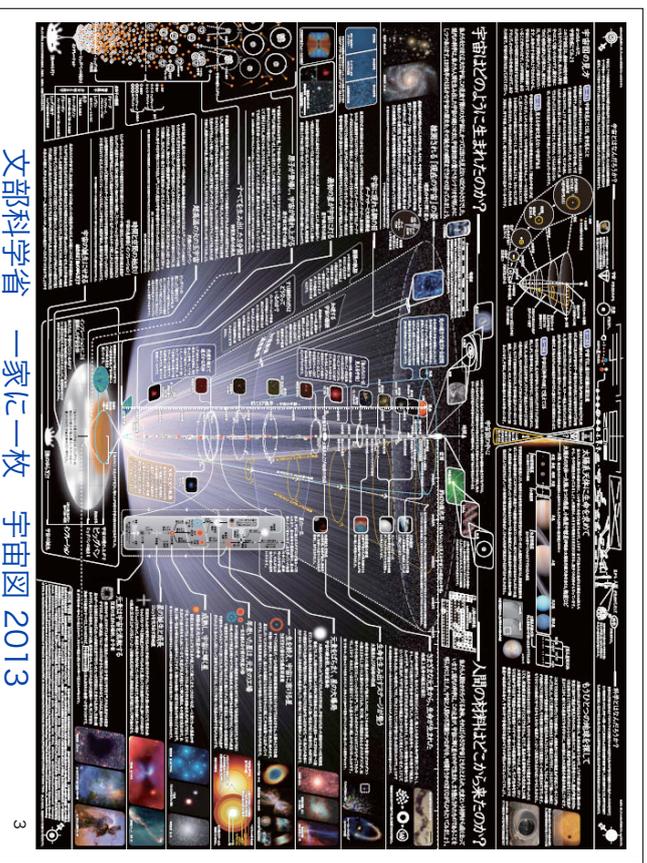
武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainichi/>



文部科学省 一家に一枚 宇宙図 2007

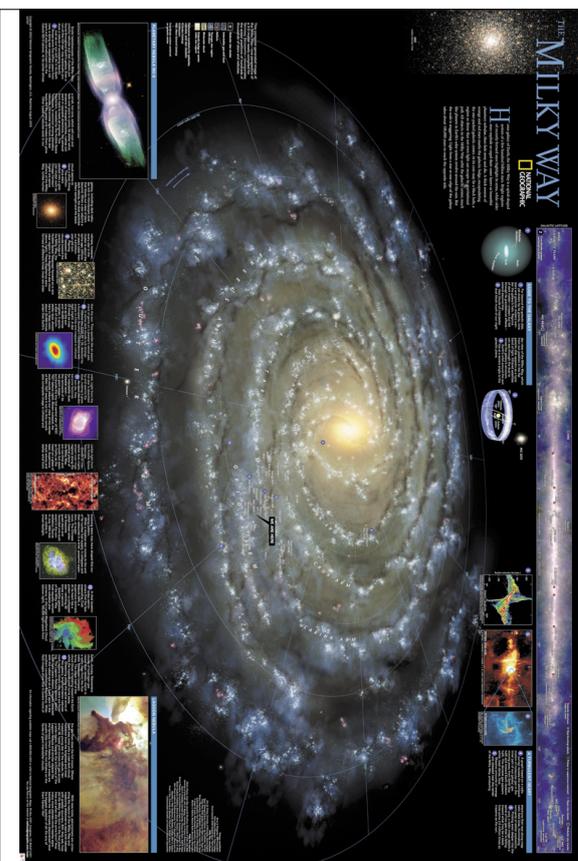


文部科学省 一家に一枚 宇宙図 2013

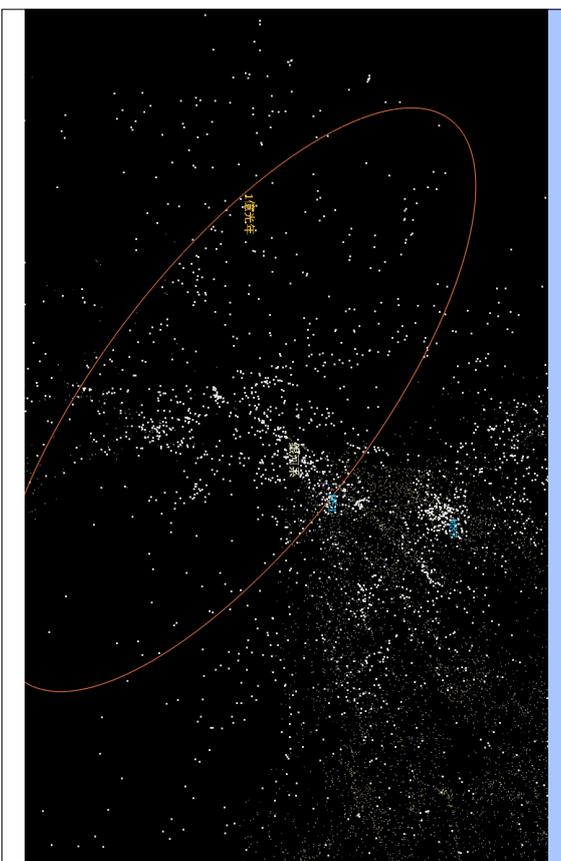


宇宙図2018 <http://www.nao.ac.jp/study/uchuz2018/>

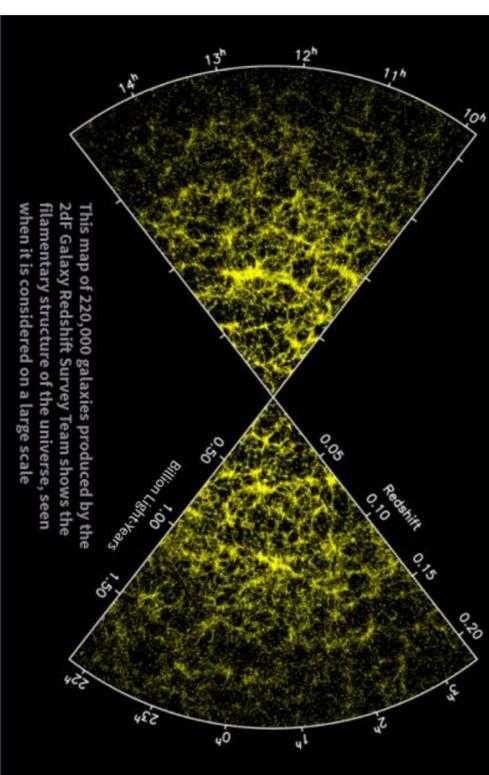
天の川銀河 (our Galaxy)



銀河団



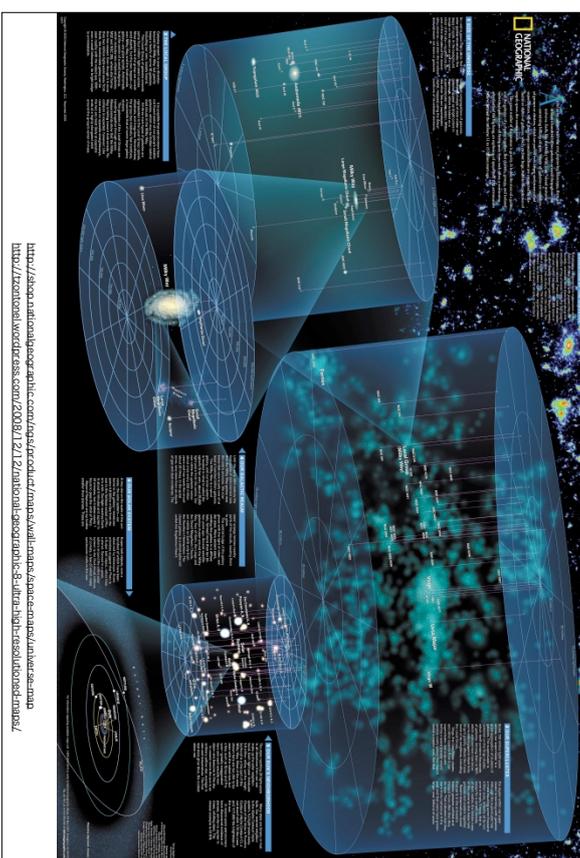
LARGE-SCALE STRUCTURE: GALAXIES ACCORDING TO REDSHIFT
 The deeper astronomers look into the universe, the more they see that the expansion of the universe has stretched light, shifting it toward the red end of the spectrum. By measuring the amount of redshift, astronomers can determine how far away a given galaxy is.



This map of 220,000 galaxies produced by the 2df Galaxy Redshift Survey Team shows the filamentary structure of the universe, seen when it is considered on a large scale.

SOURCES: HUBBLE SPACE TELESCOPE; EUROPEAN SPACE AGENCY; ROYAL OBSERVATORY EDINBURGH

THE UNIVERSE



<http://dena.aibn.com/blog/wp-content/uploads/2008/12/12/universe-structure-1024x768.jpg>
<http://zoox.com/wordpress.com/2008/12/12/universe-structure-1024x768.jpg>

宇宙原理 (cosmological principle)

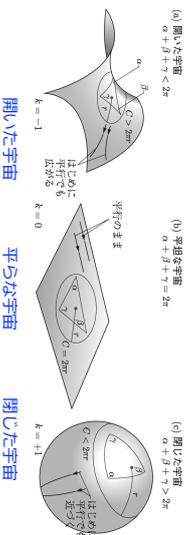
宇宙原理 (大意)

私たちは宇宙の中で特別な位置にいるわけではない。(人間が宇宙の中心にいるわけではない)

宇宙原理 (物理用語バージョン)

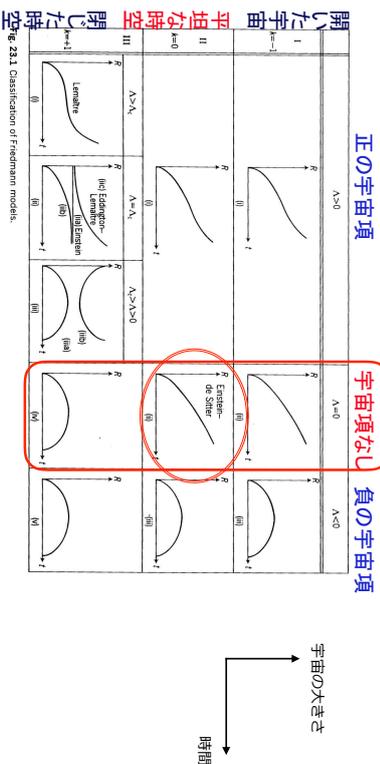
宇宙は巨視的なスケールでは空間的に一様・等方である, すなわち宇宙空間のすべての点には本質的に同等である.
(宇宙は空間的にどこどこがなく, どちらを向いても同じである.)

球対称時空として, 3つのタイプが許される



宇宙全体は膨張・収縮する？

一般相対性理論 (時空の方程式) を使って, 3つのタイプを計算すると, 膨張したり収縮したりする宇宙の解になった



宇宙は不変のもの, と考えていたアインシュタインは困った

宇宙全体は膨張・収縮する？

アインシュタインは膨張宇宙を信じなかった



「宇宙は本来未知不変であるべきだ」

⇒ 定常的な宇宙モデルをつくるために, 方程式を修正 (宇宙項, cosmological constant)

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

⇒ 重力 (引か) 作用に反対する斥力を導入
ただし, 不安定な宇宙しか作れない
アインシュタインは引かない

アインシュタインは膨張宇宙を信じなかった



「宇宙は膨張するものだと信じてます」 (Lemaître)

「膨張宇宙を信じたのは、膨張宇宙を信じていた人々 (their calculation is correct, but your physical insight is incorrect)」

宇宙膨張の証拠 (1)

ハッブル・ルメートルの法則 (遠方天体ほど赤方偏移)

宇宙膨張の発見!

「遠方の星ほどドップラー効果で赤方偏移している」

Edwin Powell Hubble (1889-1953)



ハッブルの宇宙膨張の法則 (1929年)

$$v = H_0 d \quad (5.9)$$

銀河の後退速度 = ハッブル定数 H_0 × 銀河までの距離

$$H = 530 \text{ km/s/Mpc}$$

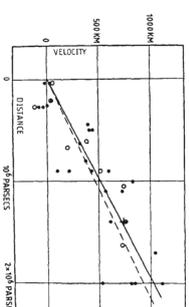
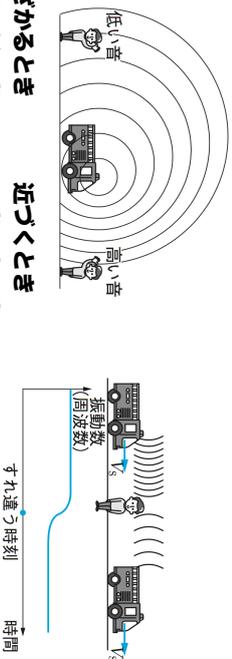


図 5.7 ハッブルが 1929 年に発表した図。横軸は距離、縦軸は銀河の後退速度。このグラフの傾きがほぼ一定になることが、ハッブルの法則である。ハッブルが報告した値は、 $H_0 = 530 \text{ km/s/Mpc}$ だった。現在値は $H_0 = 68 \text{ km/s/Mpc}$ 。

距離の単位 [赤方偏移, red shift parameter z]

名	記号	長さ	定義
天文単位	AU	1億5000万 km	地球と太陽の距離
光年	ly	9.46×10^{12} km	光が1年間に進む距離
パーセク	pc	3.09×10^{13} km = 3.26 ly	地球からの年間視差が±1秒角
赤方偏移 z			本来の光の波長のずれの比

光のドップラー効果から星の遠ざかり方を知り、宇宙膨張則から距離を測る



遠ざかるとき
音：低い音
光：赤方偏移

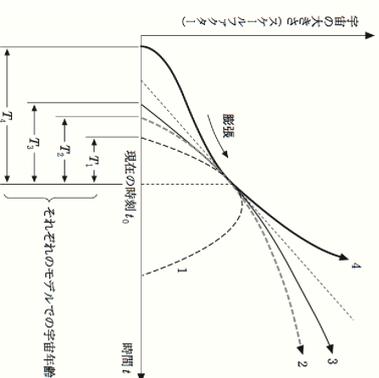
近づくとき
音：高い音
光：青方偏移

光速を超えて遠ざかる遠方の銀河は見えない = 宇宙の地平線



光速を超えて遠ざかる遠方の銀河は見えない = 宇宙の地平線

膨張宇宙モデル, 現在考えられているのは?



1. 閉じた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = +1$.
2. 平坦な宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = 0$.
3. 開いた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = -1$.
4. 平坦な宇宙で宇宙項あり. $\Lambda > 0, k = 0$.

宇宙全体は膨張・収縮する?

アインシュタイン,
膨張宇宙をついに信じる



Einstein, 1947

「宇宙の膨入はわが人生最大の謎であった」
Introduction of cosmological constant in
the biggest blunder in my life.

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

宇宙膨張はハッブルの発見か

コラム30 宇宙膨張はハッブルの発見か

宇宙膨張を報告したのは1929年のハッブルの論文だというが、実は、速度と距離の比例定数をハッブル定数 H_0 というのも広く知られている。しかし、ルメートルの1927年のフランス語の論文では、すでに銀河の後退速度が宇宙膨張によるものと述べられていて、「ハッブル定数」がほぼ同じ値で計算されていた。という事実が、2011年になって研究者間で話題になった。

ルメートルの論文はほとんど知られていなかったが、1931年に英訳されて英国王立天文学会誌に掲載されている。だが、その際に、ハッブルの業績と重なる部分は故意に訳されずに、抜け落ちていることも指摘された。ハッブル定数の計算に関する式の一部と、本文および脚注がずぼりと抜け落ちているのである。

ハッブルの観測結果は、図5.7で紹介したが、以前から「これだけまばらなデータから、宇宙膨張を十分に結論したのはなぜか」という疑問は物理学者の間でよく話題になっていた。ハッブルの慧眼だと説明されることも多かったが、直前にルメートルの業績を知っていたなら理解できる。ルメートルは博士でもあったので、「謙虚で超越した聖人 vs 科学発見の先取権に強欲な悪人」という構図も考えられ、かくして、ハッブル本人の悪人感や、ハッブルを怒らせることを恐れた英国王立天文学会悪人感などといういろいろな思測が飛び交うことになった。

2011年の最後になって、この疑問に教止符を打つ報告があった。英訳したのは、ルメートル本人であり、該当箇所を削除したのもルメートルだというのだ。その理由については不明であるが、ハッブル悪人説は解されたことになる（悪人ではなかったことが証明されたわけではない）。いずれにせよ、ルメートルの業績について再評価が進んでおり、1927年の彼の論文の引用件数も増加している。

参考：須藤雅，日本物理学会誌，2012年5月号，p811

ビッグバン宇宙論 VS 定常宇宙論

「宇宙には始まりがあった」

「宇宙に始まりも終わりもない」

宇宙誕生後、3分で軽元素の合成がされた

宇宙膨張をしても新たに物質が生成していれば大丈夫



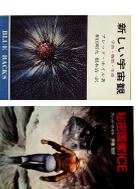
ガモフ
George Gamow
(1904-1968)

彼らは宇宙が大きな爆発(ビッグバン)から始まったと言っている
ビッグバン、いい名前だ。
ビッグバン宇宙論、と呼ぶことにしよう



ホイル

Fred Hoyle
(1915-2001)



火の玉宇宙論の誕生

宇宙膨張が本当なら、過去は小さな宇宙だったはず。宇宙のはじまりは、すべての物質とエネルギーが集まり、非常に高温で高密度の状態だったことになる。



ガモフ

1946年、ガモフ、「宇宙が高温高密度の火の玉の状態だったときに、短時間で元素が合成されていった」

1948年、 $\alpha\beta\gamma$ 、「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で、すべての元素がつくられる」

1950年、宇宙初期はじめての3分間で、 H, He まで合成される。(林忠四郎)



しかし、当時の観測データからは、宇宙年齢は18億年 vs 地球の岩石からは、地球年齢は30億年

The Origin of Chemical Elements

K. A. Mather, R. A. Sargent, R. Fisher, University of California, San Diego, CA
J. H. I. Readhead, University of Cambridge, UK
G. J. Mathews, University of Cambridge, UK
G. J. Mathews, University of Cambridge, UK

A.S. printed out by one of the authors under specific terms corresponding to a certain temperature and density. The process involved by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must mention gas (overheated neutral matter) which started decaying into protons and neutrons when the gas Physical Review, 1948/4/1

ビッグバン宇宙論 VS 定常宇宙論

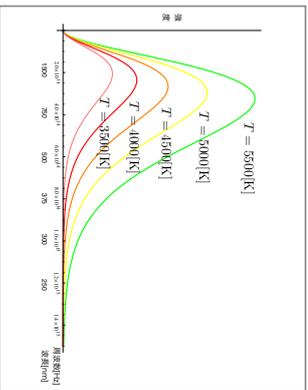
「宇宙には始まりがあった」

「宇宙に始まりも終わりもない」

表5.1 ビッグバン宇宙モデルと定常宇宙モデルの比較。

ビッグバン宇宙モデル	定常宇宙モデル
宇宙膨張	膨張を続けているが、物質生成がつかねを続けている。過去は高温高密度の火の玉だったが、現在は膨張のため、温度が低下した。
宇宙へインフラ背景放射	過去の火の玉宇宙の名残りとして5K存在する必要はない。
元素の存在比	元素合成の理論から、軽元素(H, He)の存在比は説明できた。それ以外はまだまだできていない。
宇宙年齢	宇宙膨張を観測することによって、宇宙年齢が決定する。
宇宙誕生	宇宙は大局的に不変なので、宇宙年齢を議論する必要はない。

宇宙背景マイクロ波背景放射 (CMB)



黒体放射 (黒体輻射)
= 物体は、温度に応じて
熱を電磁波の形で放射する

過去に宇宙が高温だったら、
その証拠の「放射」があるはず

宇宙誕生後、30万年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるよ
うになる。その時の温度が放射されて残っているはず。

約3000 K 宇宙膨張で温度下がって 5-7K 位

273 K (ケルビン) = 0℃; 0 K = -273℃

1964年、宇宙背景マイクロ波背景放射 (CMB) の発見

ガモフがペンジンスとウイルソンに宛てた手紙



3 Kの論文は素晴らしいが、初期の歴史の部分が完全ではありません。現在「火の玉宇宙論」として知られている理論は1946年の私の業績です。

Dear Dr. Penzias,
I'm glad to hear that you are publishing your paper on 3 K radiation. It is very nicely written except that early history is not quite complete. The theory of what you now know as primary "fireball" was first developed by me in 1946 (Phys. Rev. 26, 572, 1946) & 26, 505, 1946; Nature 162, 680, 1948). The prediction of the numerical value of the present CMB radiation temperature had been first found by Alpher & Herman's paper (Phys. Rev. 25, 1053, 1949) who estimate it was 5 K, and in my paper (Kovalevich & Szeles 27, 410, 1950) with the estimate of 7.5 K. I have in my popular book "Evolution of Universe" (Wiley, 1952) you can find (approx) the formula $T = 1.5 \times 10^{-4} \sqrt{t}$ K, and the upper limit of 50 K. (Anyway you see the world did not start with diamondy discs, although I believe)



1964年、宇宙背景マイクロ波背景放射 (CMB) の発見



Arno A. Penzias (1933-)
Robert W. Wilson (1936-)

ベル研究所、電波通信の実験
「どうしても取り除けないノイズがある」
「昼夜によらず、季節によらず、方向によらないノイズがある」

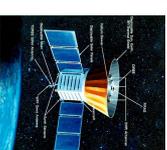
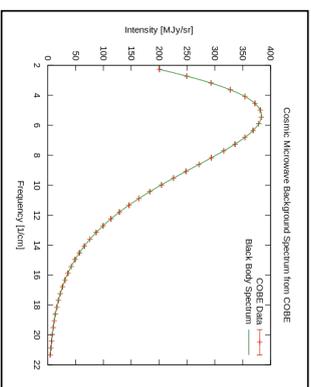
1978年、ノーベル物理学賞受賞

宇宙誕生後、30万年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるよ
うになる。その時の温度が放射されて残っているはず。

約3000 K 宇宙膨張で温度下がって 5-7K 位

273 K (ケルビン) = 0℃; 0 K = -273℃

1992年、COBE衛星によるCMBの測定



John C. Mather (1946-)
George F. Smoot III (1945-)

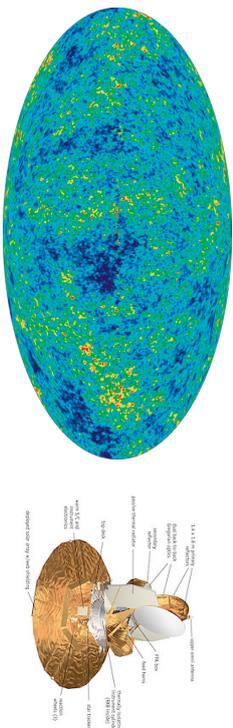
2006年、ノーベル物理学賞受賞

宇宙誕生後、30万年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるよ
うになる。その時の温度が放射されて残っているはず。

約3000 K 宇宙膨張で温度下がって 5-7K 位

273 K (ケルビン) = 0℃; 0 K = -273℃

2002年, WMAP衛星によるCMBの測定

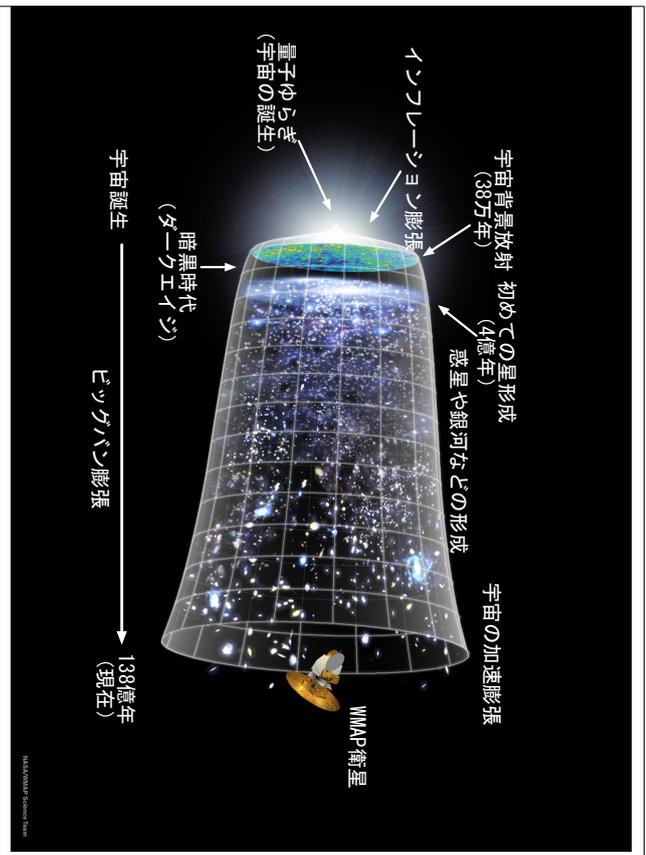


37万9000年

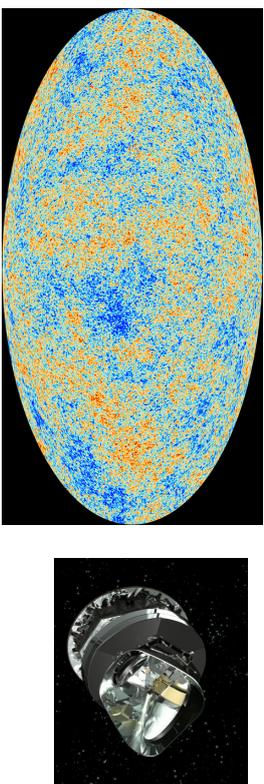
宇宙誕生後, 37万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. その時の温度が放射されて残っているはず.

約3000 K 宇宙膨張で温度下がって ~~2.72548~~ K 位

2.72548±0.00057 K



2013年, Planck衛星によるCMBの測定



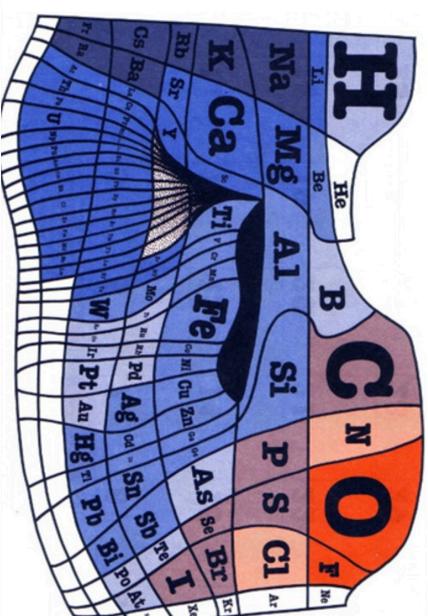
38万年

宇宙誕生後, 37万9000年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. その時の温度が放射されて残っているはず.

約3000 K 宇宙膨張で温度下がって 2.72548±0.00057 K 位

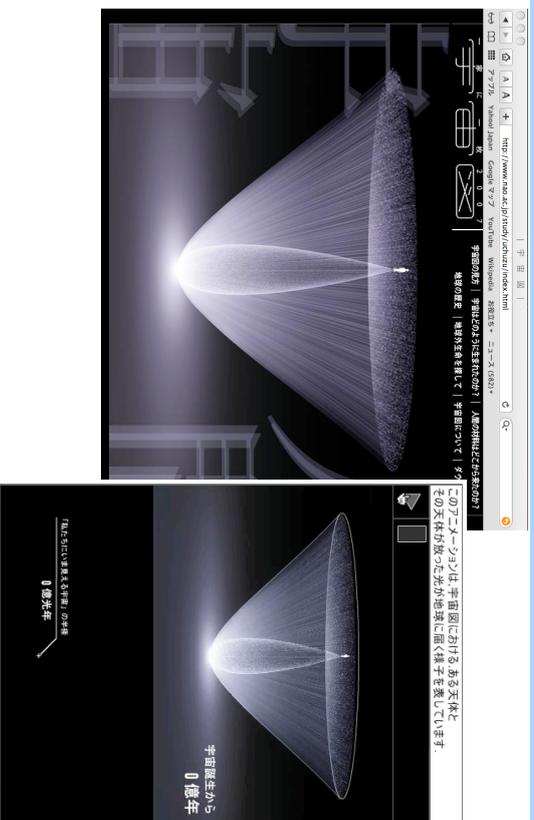
2.72548±0.00057 K

水素, 重水素の存在比の観測と理論が合う



宇宙図の見方

<http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu/rule.html>



真岡啓明 「宇宙はどこまで説明されたか」【第4回】最新観測の宇宙論 2019/7/25 毎日文化センター(編)

30

宇宙図の見方

<http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu/rule.html>

ルール1 宇宙を見ることは、昔を見ること
太陽は、8分ほど昔の姿、すばる(散開星団M45)は400年ほど昔の姿、遠くを見るほど、過去の姿をみている。

ルール2 見える宇宙と見えない宇宙がある
我々は「現在の宇宙」を見ることはできない、見えるのは、中央の「しずく」の部分。

ルール3 宇宙では、遠くの距離は要注意
我々が見える一番遠くからきた光は、「137億光年」先、しかし、そのときに放たれた光源は、宇宙膨張によって、470億光年のかなた。



私たちに見える宇宙=しずく形の表面。

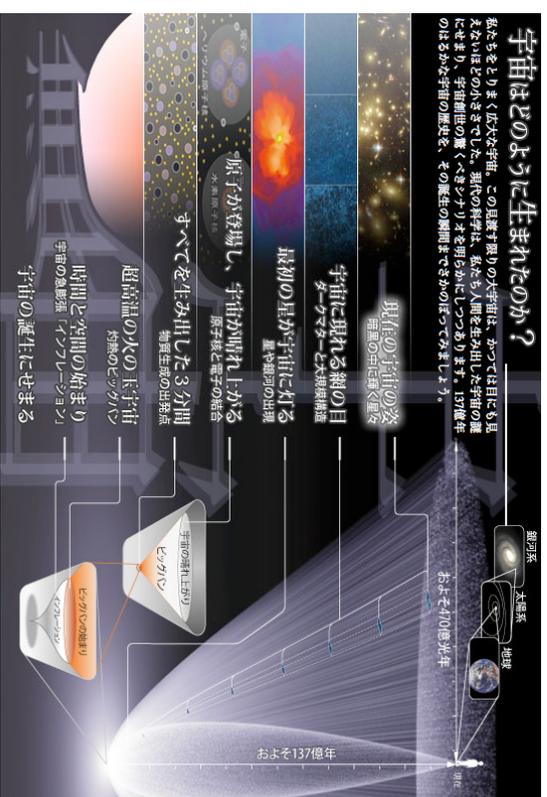
宇宙がどうやって誕生したのか =ラッパ形の底の部分がどうなっているのか。
宇宙がどのように広がってきたか=ラッパ形の表面の形はどうなっているのか。
宇宙は我々の宇宙だけか =ラッパ形の向こうにも宇宙は他にいいのか。

真岡啓明 「宇宙はどこまで説明されたか」【第4回】最新観測の宇宙論 2019/7/25 毎日文化センター(編)

31

宇宙図の見方

<http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu/rule.html>



真岡啓明 「宇宙はどこまで説明されたか」【第4回】最新観測の宇宙論 2019/7/25 毎日文化センター(編)

32

宇宙図の見方

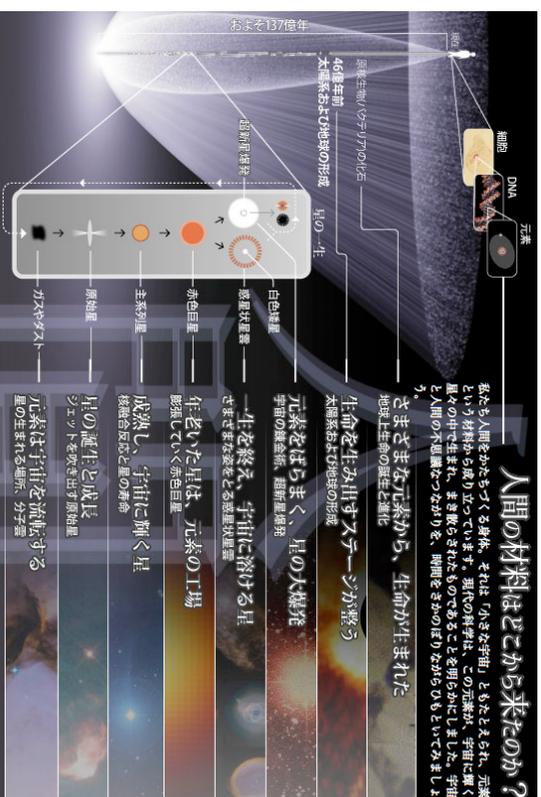
<http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu/rule.html>

人間の材料はどこから来たのか?
私たち人間をおかちつぐを身体、それは「小さな宇宙」ともたとえられ、元素という材料から成り立っています。現代の科学は、この元素が、宇宙に属く星々の中で生まれ、まき散らされたものであることを明らかにしました。宇宙と人間の不思議なつながりを、時間をさかのぼりながらひもといてみましょう。

さまざまな元素から、生命が生まれました
地球上生命の誕生と進化
生命を生み出す「星の火種」
太陽系および地球の形成
元素をばらまく「星の大爆発」
宇宙の誕生期、超新星爆発
一生を終え、宇宙に溶ける星
さまざまな姿をとる超新星爆発

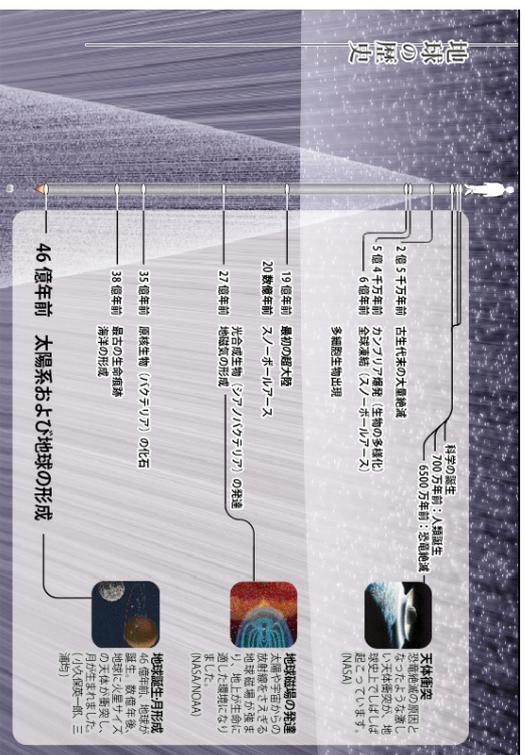
年老いた星は、元素の工場
膨張していく赤色巨星
成熟し、宇宙に輝く星
核融合反応と星の寿命

星の誕生と成長
シエラを吹き出す星雲
元素は宇宙を旅転する星の生まれる場所、分子雲



真岡啓明 「宇宙はどこまで説明されたか」【第4回】最新観測の宇宙論 2019/7/25 毎日文化センター(編)

33



真岡啓明 「宇宙はどこまで説明されたか」 [第4回] 最新宇宙観と宇宙論 2019/7/25 毎日文化センター(編田)

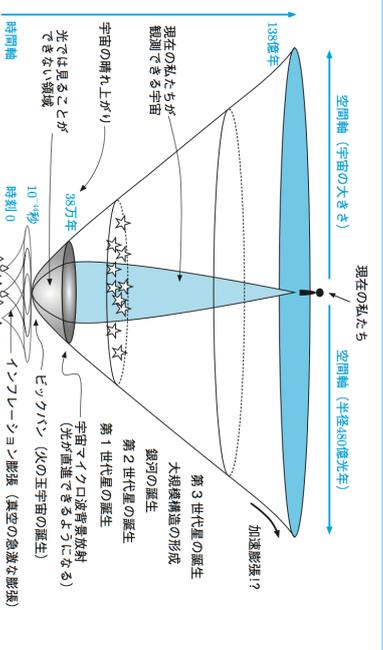


図 5.18

ビッグバン宇宙モデルの概略図。時間の進み方を上向き、空間の広がりを中心軸にして示す。現在の私たちは図の上の中央部分に在る。宇宙誕生直後にはインフレーションと呼ばれる急膨張を起こす。インフレーション後に高温高密度の火の玉宇宙が出現する。38万年後に光が直進できるようになる。電磁波では、この時点以降の観測が可能になる。最近では、宇宙は加速膨張をしていることが明らかになった。宇宙が広がる様子が示されているが、実際に私たちが見られる宇宙は、中央の部分に限られる。

真岡啓明 「宇宙はどこまで説明されたか」 [第4回] 最新宇宙観と宇宙論 2019/7/25 毎日文化センター(編田)

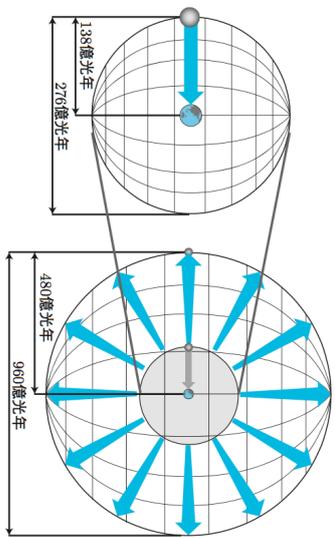


図 5.19

(左) 宇宙誕生直後から進む光を見て、私たちは宇宙の年齢を 138 億年と理解する。(右) しかし、宇宙は膨張しているので、現時点での宇宙の大きさは半径 480 億年になる。

真岡啓明 「宇宙はどこまで説明されたか」 [第4回] 最新宇宙観と宇宙論 2019/7/25 毎日文化センター(編田)

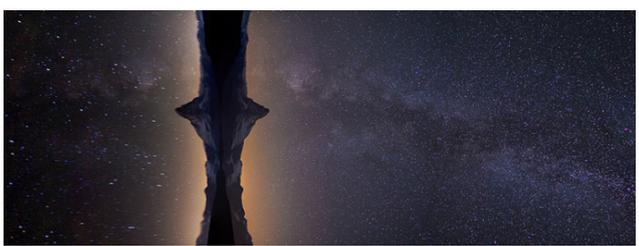
宇宙はどうやってはじまったのか。

宇宙に終わりはあるのか。

宇宙は何でできているのか。

宇宙の法則は何か。

宇宙にどうして我々がいるのか。

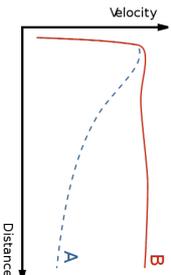


ダークマター問題
未知の物質？
ダークエネルギー問題
加速膨張の原因？
ダークエイジ問題
初代の星はどうやってできた？

見えていない質量が存在する



Vera C Rubin (1928-2016)



楕円銀河の回転速度は、
「光る星の6倍以上の質量が存在する」
ことを示す。

◆Advanced 人工衛星の動きから地球の質量がわかる

ダークマターの存在は、銀河系の星の運動から推測された。その理由はニュートン力学で説明できる。質量 m の人工衛星が地球 (質量 M) の万有引力を受けながら、速度 v で半径 r の円運動をしているとき、運動方程式

$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2} \quad (5.10)$$

より、 $v = \sqrt{GM/r}$ の関係が得られる。つまり、 v は人工衛星の質量に無関係で、 M と r によってのみ決まる。このことは人工衛星の動きから地球の質量がわかることを意味している。

同じことを銀河系で行ったのが、図 5.33 (右) の (A) のグラフである。見えていない星は中心部分に集中しているのでこのグラフになりそうだが、実際は観測すると (B) のグラフになった。これはダークマターの質量が銀河全体に広がっているため、と考えられている。

ダークマターの候補

素粒子論からのダークマターの候補

- ニュートリノ ○微少な質量を持つことがわかっている
- ×宇宙全体では量が不足、銀河形成モデルとも合致せず
- ニュートラリーノ ○超対称性理論を仮定すれば自然に登場する粒子
- ×未発見。
- アクシオン 温度ゼロの仮定の粒子 ×未発見。

天体物理学からのダークマターの候補

- ブラックホール・白色矮星・中性子星
- 恒星進化の最後の姿だが、どの位存在するのかが未知。
- 褐色矮星・惑星 恒星へなれなかつた小さな星。これも存在量が未知。

結局、不明のまま。
未知の素粒子は何か、に期待が高まっている

重カレンズによるダークマターの検出

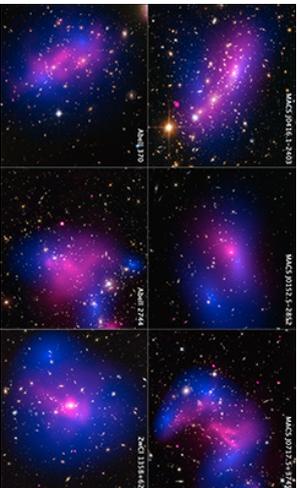
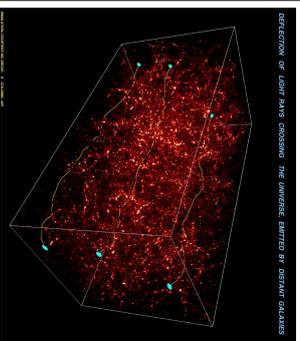
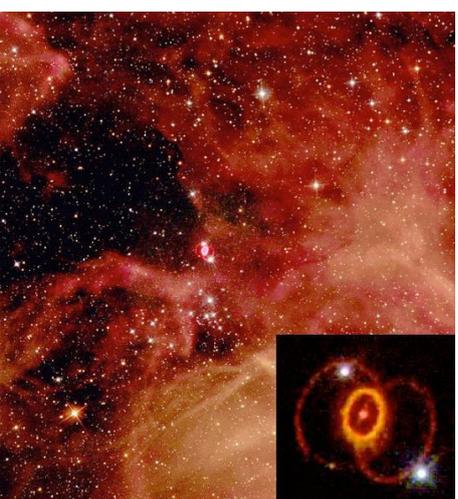


図 6.11: [左] 銀河団のシミュレーション結果に、光の経路が重む様子を描き込んだ図。ダークマターを含んだ銀河によって、光の経路が重む様子がわかる。

[http://www.cch.hawaii.edu/News/Lensing/]
[右] 銀河団の衝突による質量分布。ピンク色が高温ガスの分布、青い部分がダークマターの分布を表す。ダークマターが銀河と重なって分布していることがわかる。
[http://hubblestic.org/newscenter/archive/releases/2015/10/fall/]

超新星爆発統計による宇宙の加速膨張の発見

超新星爆発
= 燃え尽きた星の
最後の爆発

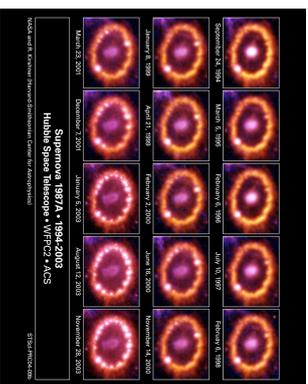


SN1987Aの2007年の画像

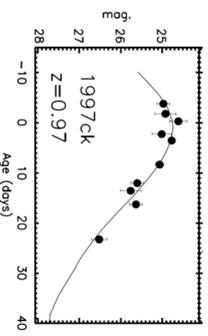
超新星爆発 = スタンダーディカンディブル

爆発のメカニズムは物理的に決まっている。どの超新星爆発もほぼ同じ質量の星が爆発するので、放出されるエネルギーも同じ。

爆発後の減光のしかたも同じ。超新星爆発ではカルシウムや鉄、ニッケルなど、重い元素がほとんど作られるが、その変化のしかたも同じになる。スペクトルから元素の構成比を観測することで、爆発後のどの時期に相当するのかもわかる。



観測される明るさから
距離が正確に判定できる



加速膨張の原因は何か？

重力場の方程式 (一般相対性理論)

空間の曲がり方がモノの運動を決める ⇔ モノがあると空間が曲がる

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

<空間の歪み> <モノの分布>

②アインシュタインの理論を修正する

修正重力理論

我々は特殊な位置

③フリードマン宇宙モデルの前提となつた「宇宙原理」を疑う

膨張宇宙の解

ダークエネルギー

①斥力を及ぼす特殊な物質を考える。

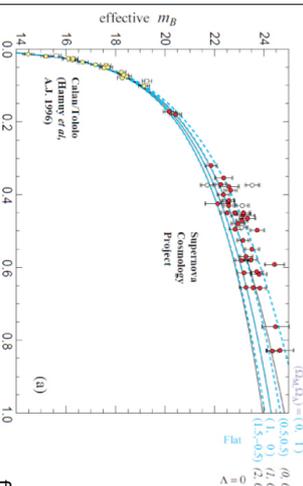
ビッグバンモデル

①観測結果を疑う

加速膨張の発見

超新星爆発 = スタンダーディカンディブル

超新星爆発が起きている距離を並べると宇宙が加速膨張していると考える方が、分布曲線がフィットする。



for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae. 2011年ノーベル物理学賞受賞

COBE衛星 (1992), WMAP衛星 (2003), Planck衛星 (2013)

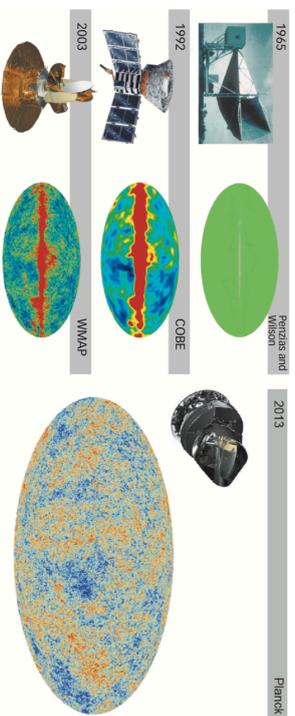


図 5.38 (本文 186 ページ)
CMB で描いた全天図を観測年代ごとに比較したもの。中心の水平軸は天の川銀河面を示す。1965 年のペンシウスとウィルソンの観測では「全天から一様な CMB」。1992 年の COBE 衛星は「10 万分の 1 程度のゆらぎ」が報告された。2003 年の WMAP 衛星、2013 年の Planck 衛星の観測結果は、ゆらぎの観測の角度分解能が格段に上がり、より精密なデータが得られるようになった。

CMBの2点相関関数から宇宙論パラメータを決定する

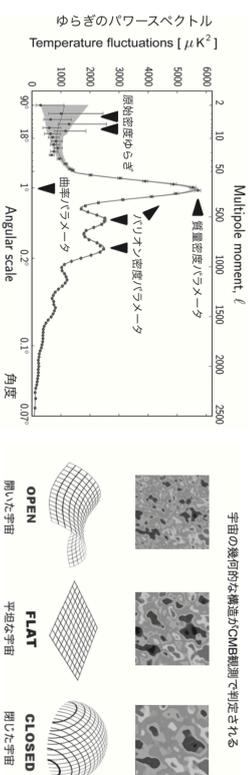


図 5.39 [左] CMBの角度相関関数を理論曲線に重ねて示した図。1度スケールにピークがあり、この大きさから質量密度パラメータ、この位置から曲率パラメータがわかる。[右] CMBの温度ゆらぎを統計解析することで、宇宙の曲率が、開いている・平坦・閉じているのいずれかが判定できる。結果は、「平坦」であった。(NASA/ESAのサイトを加工した)

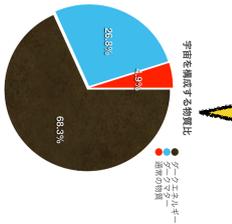
CMBの2点相関関数から宇宙論パラメータを決定する

表 5.3 Planck 衛星による観測チームが発表した宇宙論パラメータ (2015 年)。左側の P は Λ CDM モデルを決める6つの基本的なパラメータ、C はモデルを決めると計算されるパラメータ、F はモデルを決めるために設定したパラメータを示す。

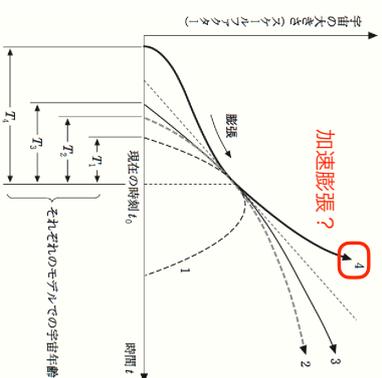
パラメータ	記号	値
P: ハビオン密度	$\Omega_b h^2$	0.022269 ± 0.00014
P: ダークマター密度	$\Omega_c h^2$	0.1188 ± 0.0010
P: 曲率ゆらぎ振幅	ΔR	$2.441_{-0.062}^{+0.062} \times 10^{-9}$
P: 宇宙年齢	t_0	137.99 億年 ± 2100 万年
P: CMB放射の光学的深さ	τ	0.006 ± 0.012
P: スカラースペクトル指数	n_s	0.9687 ± 0.0040
C: ハビオンパラメータ	H_0	67.74 ± 0.46 [km/s/Mpc]
C: ハビオン (通常の物質)	Ω_b	4.86 ± 0.10%
C: 冷たいダークマター	Ω_{CDM}	25.89 ± 0.37%
C: ダークエネルギー	Ω_Λ	68.11 ± 0.62%
C: 臨界密度	ρ_{crit}	$(8.62 \pm 0.12) \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$
C: CMB放射の赤方偏移	z_{dec}	1089.90 ± 0.23
C: CMB放射の宇宙年齢	t_{eq}	37.7 万年 ± 3200 年
C: 再イオン化の赤方偏移	z_{reion}	$8.5_{-1.1}^{+1.1}$
C: $8\pi h^{-1} Mpc$ でのゆらぎ振幅	σ_8	0.8159 ± 0.0086
F: 非標準方程式パラメータ	w	-1
F: テンソル・スカラー比	r	0
F: 全密度パラメータ	Ω_{tot}	1

宇宙年齢は、**137.99億年±2100万年**

正体不明のダークエネルギーは、**68.3%**



膨張宇宙モデル、現在考えられているのは？



1. 閉じた宇宙で宇宙項なし。 $\Lambda = 0, k = +1$.
2. 平坦な宇宙で宇宙項なし。 $\Lambda = 0, k = 0$.
3. 開いた宇宙で宇宙項なし。 $\Lambda = 0, k = -1$.
4. 平坦な宇宙で宇宙項あり。 $\Lambda > 0, k = 0$.

宇宙の最期

ビッグクランチ
どこかで加速膨張が終わり、やがて重力が強くなって最期には再び収縮する。ビッグバンの逆戻りとなって、すべてが再び融合する。

ビッグフリーズ、ビッグチャリ
現在のまま宇宙は永遠に膨張を続け、すべての銀河が孤立し、やがて星は燃え尽きて温度ゼロ状態の「熱的な死」、
ビッグリップ
今後もますます加速膨張をつづけ、やがては時空自体が引き裂かれ、銀河も星も何も構造が残らない。

