

2016年度 春学期 火V限

地学概論

4. 膨張する宇宙

5. ビッグ・バンと インフレーション

6. ダーク・エネルギー

- ・西浦担当分については、受講態度・試験結果から総合的に評価する。
- ・講義資料は、以下のWEBページ上で公開しているので、事前・事後にダウンロードし、参考にすることを推奨する。

→<http://astro.u-gakugei.ac.jp/~nishiura/>

→「西浦ケンの講義室」からPDF版をDL可



東京学芸大学 自然科学系
宇宙地球科学分野 講師
西浦 慎悟

4. 膨張する宇宙

- ・古代ギリシャ時代以降の宇宙観
恒星は、最も外側の天球の裏に貼り付いている。
→有限の広さの宇宙



ただし、恒星の年周視差が検出されなかったため、恒星までの距離は途方も無く遠いと考えられていた。

- ・1576年：トマス・ディゲス
「夜空は何故暗いのか？」という疑問
→「オルバースのパラドックス」のオリジナル・アイディア
- ・1611年：ヨハネス・ケプラー
「暗い夜空が有限の宇宙の証拠」
→恒星の本当の明るさがずっと暗い可能性についても言及。
- ・1687年：アイザック・ニュートン
万有引力の発見
→有限の宇宙では、天体が互いに引き合って、潰れてしまう。
→無限の広さの宇宙を要請

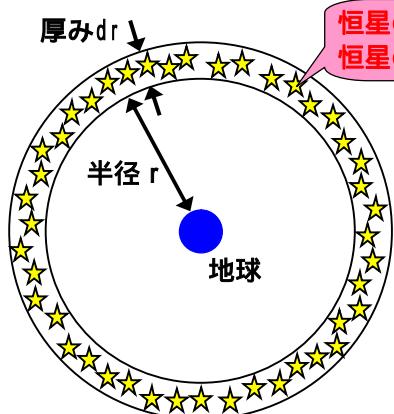
「未来永劫に不变で、無限に広がる宇宙」という概念が確立する。

4. 膨張する宇宙

1826年: オルバースのパラドックス

「夜空は何故暗いのか?」を再提起

恒星の平均の光度を L 、個数密度を n で一定として、地球から r だけ離れた厚み dr の球殻を考える。



1つの恒星の光度 L は、距離 r だけ離れると半径 r の球面状に広がるので、「見かけの明るさ」 f は、

$$f = \frac{L}{4\pi r^2}$$

球殻中に存在する恒星からの見かけの明るさの合計は、

$$4\pi r^2 dr n \times f = n L dr$$

宇宙の広さを無限と考えると、宇宙に存在する全ての恒星からの光の合計は、

$$\int_0^\infty n L dr = [n L r]_0^\infty = \infty$$

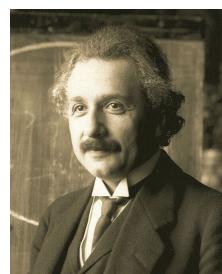
となり、夜空は無限大に明るくなる。
しかし、実際の夜空は暗い。何故か？

→「宇宙の広さは有限、星の数も有限」

4. 膨張する宇宙

膨張宇宙の登場

・ 1915年: アルベルト・アインシュタイン、一般相対性理論を構築・発表。



アインシュタイン
(Wikipediaより)

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

アインシュタインの重力場方程式

当初、宇宙項 λ はゼロだったが、
これでは宇宙が自分自身の重力(万有引力)で収縮し潰れてしまうため、
これを妨げる反発力(万有斥力)として導入した。



ルメートル
(Wikipediaより)

・ 1922年: アレクサンドル・フリードマン、アインシュタイン方程式の解として膨張宇宙モデルを導く。

・ 1927年: ジョルジュ・ルメートル、独立に膨張宇宙モデルを導き「宇宙は、原初の高密度の小さな「宇宙の卵」が膨張した」という説を提唱。

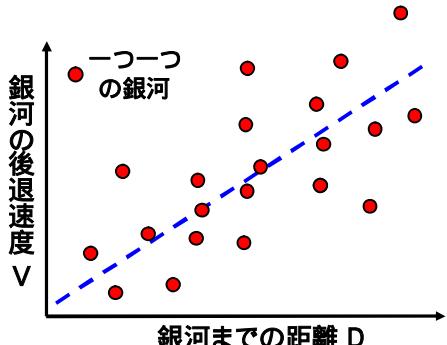
4. 膨張する宇宙

1912年: ヴェスト・メルビン・スライファーが渦巻銀河のスペクトルが赤方偏移していることを見出す。

1929年: エド温・ハッブルとミルトン・ラセル・ヒューメイソンは18個の銀河の距離を導出し、これと後退速度との相関関係(ハッブルの法則)を発見した。



ハッブル ヒューメイソン
(Cosmic Journey HPより)



$$V = H_0 \times D$$

V: 後退速度 (km/s)

D: 距離 (Mpc)

H_0 : ハッブル定数 (km/s/Mpc)

「銀河の後退速度は、その銀河までの距離に比例する」

「全ての銀河が元々は同じ場所にあり、ある瞬間に同時に四方八方に動き始めた」と考えるとうまく説明できる

4. 膨張する宇宙

「我々の銀河(銀河系)は宇宙の中心なのか?」

・銀河系から銀河1と銀河2を観測する

$$v_1 = H_0 d_1$$

$$v_2 = H_0 d_2$$

・銀河1から銀河2を観測する

$$\text{後退速度} = v_{21} = v_2 \cos$$

$$\begin{aligned} \text{距離} &= d_{12} = d_2 \cos = (v_2 / H_0) \cos \\ &= v_2 \cos / H_0 = v_{21} / H_0 \end{aligned}$$

従って、

$$v_{21} = H_0 d_{21}$$

となり、銀河1についても、全く同じ関係が成り立つ。

→ 「膨張宇宙」の状況証拠の一つ

アインシュタイン「宇宙項(宇宙定数)の導入は生涯で最大の過ちである」

4. 膨張する宇宙

ハッブル定数と膨張宇宙の年齢

$$V = H_0 \times D \quad (\text{ハッブルの法則})$$

V : 銀河の後退速度(km/s)
 D : 銀河までの距離(Mpc)
 H_0 : ハッブル定数(km/s/Mpc)

ハッブル定数の逆数は、近似的な膨張宇宙の年齢(ハッブル時間)を示している。

$$\frac{1}{H_0} = \frac{D}{V} = \frac{\text{道のり}}{\text{速さ}} = \text{要した時間}$$

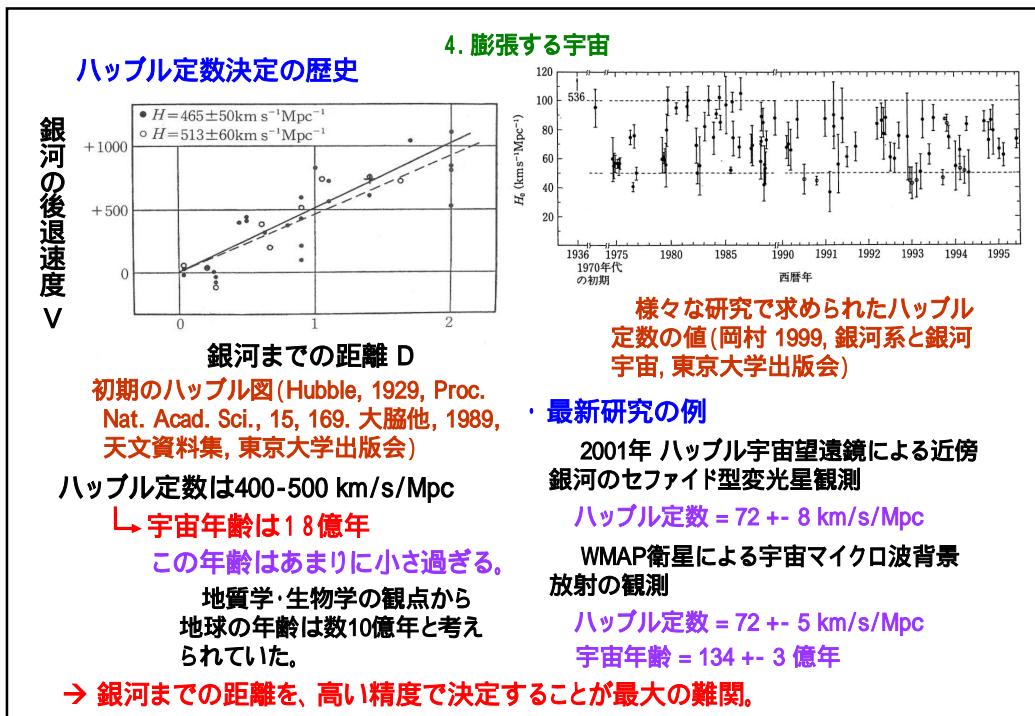
(例) $H_0 = 75 \text{ km/s/Mpc}$ の場合

$$1\text{Mpc} = 3.09 \times 10^{19} \text{ km}$$

$$1\text{年} = 3.16 \times 10^7 \text{ s}$$

ハッブル時間 = $1/H_0 = 1 / 75 \text{ (s Mpc/km)}$

$$= 1 / 75 / (3.16 \times 10^7) [\text{s} \rightarrow \text{年}] \times (3.09 \times 10^{19}) [\text{Mpc} \rightarrow \text{km}]$$

$$= 1.30 \times 10^{10} \text{ 年} = 130\text{億年}$$


5. ビッグ・バンとインフレーション

超高温・超高密度の火の玉

膨張する宇宙 → 過去の宇宙は物質が一点に集まつた、
超高密度で超高温な状態にあった。

1947年：ジョージ・ガモフが、「宇宙初期の火の玉が冷える
過程で、重い元素が合成された」と提唱。

ガモフ：中性子のみ、林忠四郎：陽子と中性子



フレッド・ホイル
(Wikipediaより)

フレッド・ホイルほか多くの研究者：

定常宇宙論 = 宇宙は膨張しているが、
真空中から物質が生まれることで、密度
は一定に保たれている。そのため、
宇宙に始まりや終わりは無い。

「元素は、恒星内部で次々に核融合
反応が進行して合成された。」



ジョージ・ガモフ
(Wikipediaより)

「ビッグ・バン」理論

↓
名付け親はホイル

→ Heが合成された段階で、初期宇宙は既に希薄になってしまい、
これ以上元素を合成できなくなってしまう。

5. ビッグ・バンとインフレーション

宇宙背景放射の発見

ビッグ・バン宇宙論の予言：初期宇宙が超高温であれば、
現在でも5K程度の余熱があるはず。

1964年：ペル研のアーノ・ベンジアスとロバート・ウッドロウ・
ウィルソンが波長7cmの電波放射を発見。

・元々は中性の水素原子が放射する
波長21cmの電波のための実験だった。

・電波は、空のありとあらゆる方向から
同じ強度で届いている。

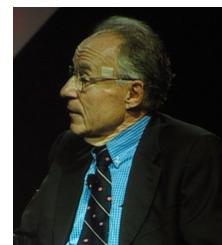
・1年の間に方向や強さが変わらない。

・アンテナに営巣したハトも除去。

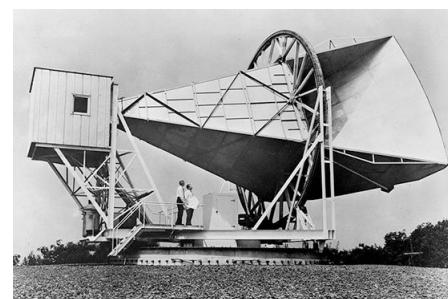
→ 電波放射は温度にして約3.5 K。

「宇宙マイクロ波背景放射」

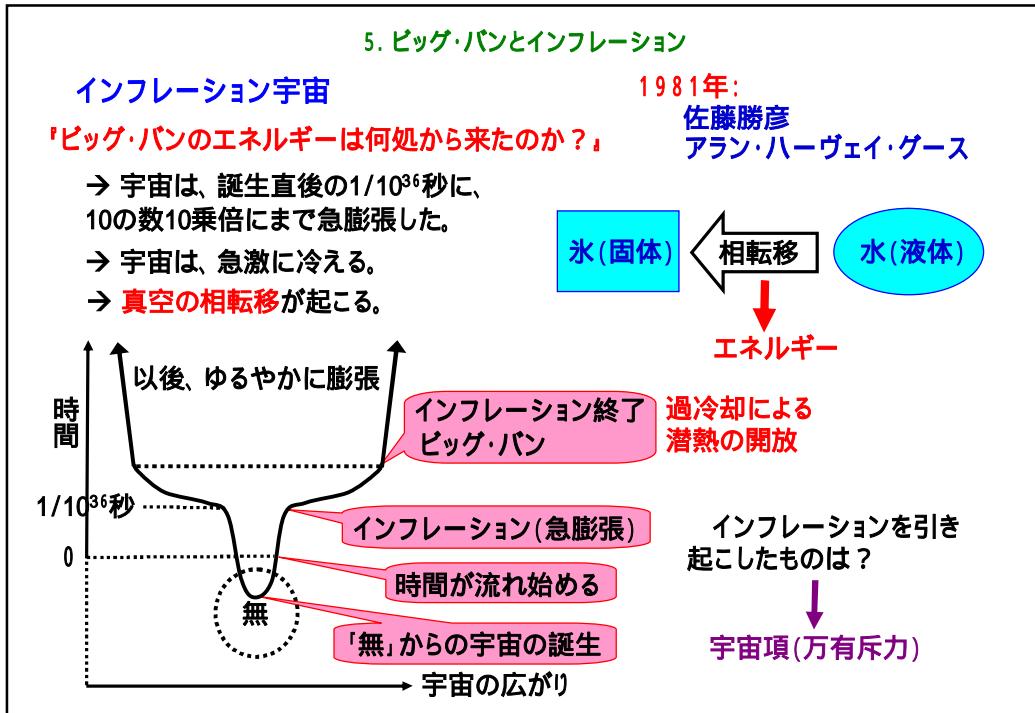
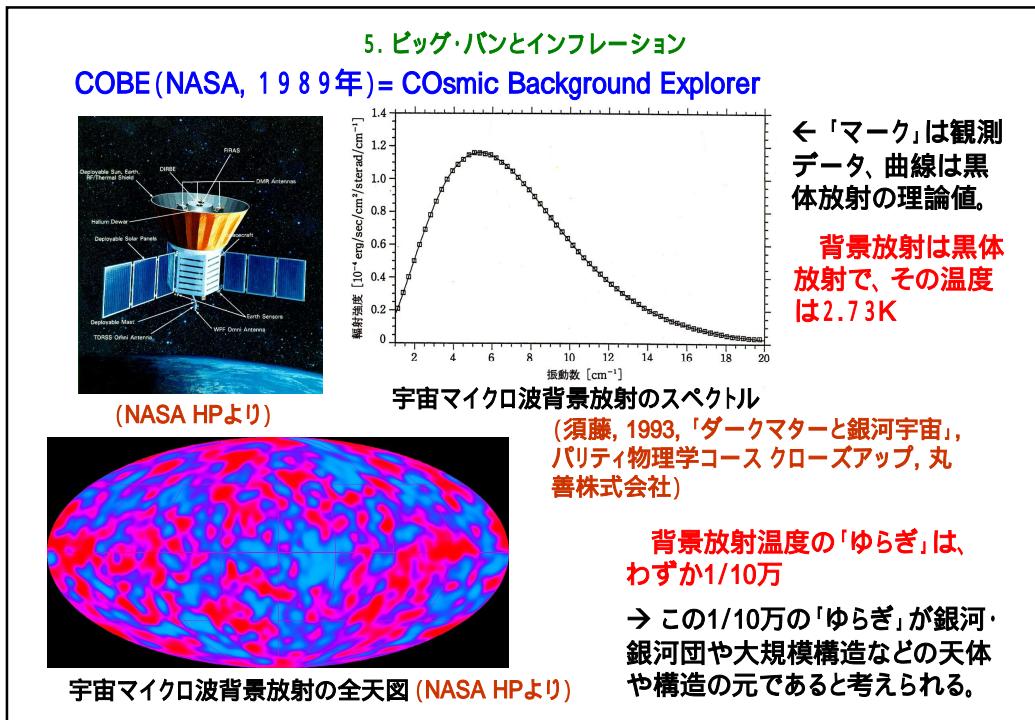
→ ビッグ・バン宇宙の証拠

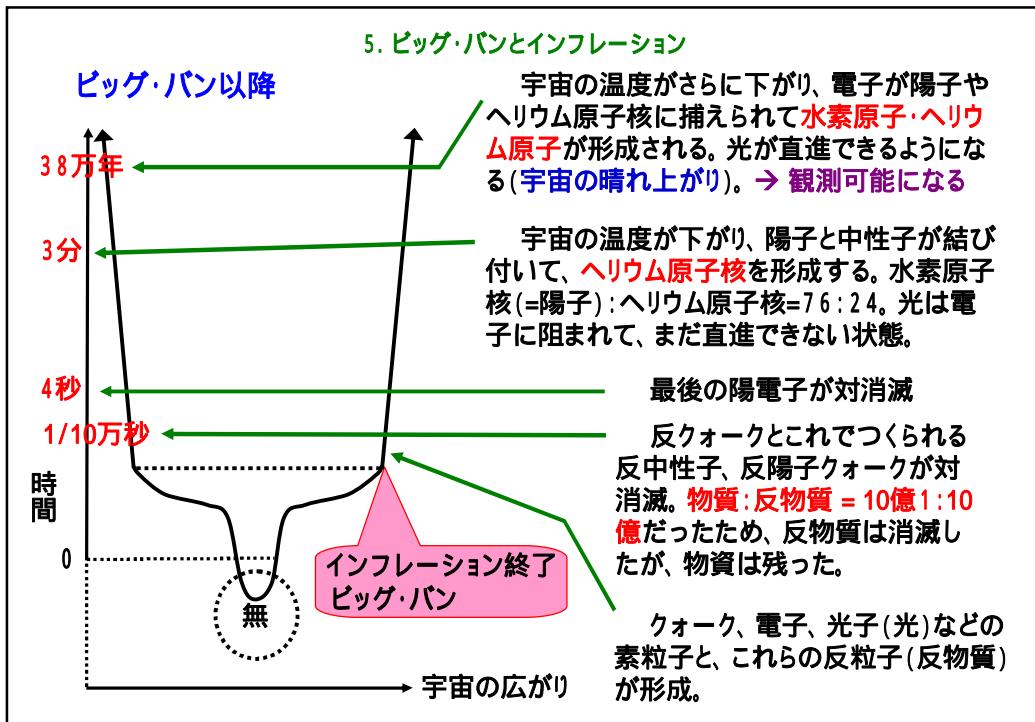


アーノ・ベンジアス
(Wikipediaより)



宇宙背景放射を最初に検出したアンテナ





5. ビッグ・バンとインフレーション

宇宙の晴れ上がり(誕生から38万年後)

宇宙が晴れ上がって、直進できるようになった光。我々が観測できる最遠・最初の宇宙。
→ 宇宙マイクロ波背景放射

宇宙最初の恒星の誕生(誕生から数億～10億年後)

- ・水素とヘリウムからなる大質量星であると考えられている。
- ・この恒星の中で、より**重たい元素**が次々と合成され、超新星爆発によって、宇宙に重元素がばらまかれ、次世代の恒星の素になった。

→ 銀河の誕生もこの頃？

宇宙の再電離(誕生から～10億年後？)

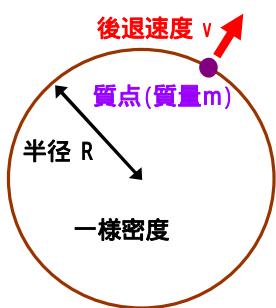
- ・初代の天体からの紫外線放射のエネルギーにより、晴れ上がり時に中性化した水素などが、再度電離(イオン化)し、現在に至っている。
- ・誕生後、約**9億年**後の宇宙には、既に**ケーサー**(超大質量ブラックホールを中心核とする銀河)が形成されており、そのスペクトルから、この時期にはほぼ**再電離**が完了していることが分った。

6 ダーク・エネルギー

宇宙の密度

→ 宇宙の将来(未来)を決める重要な要素

- 単純な力学モデルを考える。



$$(全エネルギー) = \underbrace{\frac{1}{2} m v^2}_{\text{運動エネルギー}} - \underbrace{\frac{G \cdot \frac{4}{3} \pi R^3}{R} m}_{\text{ポテンシャルエネルギー}}$$

(全エネルギー) > 宇宙は膨張を続ける
(全エネルギー) < 宇宙は収縮に転じる

- (全エネルギー) = 0 の場合:

$$= \frac{3 v^2}{8 \pi R^2 G} = \frac{3 (H_0 R)^2}{8 \pi R^2 G} = \frac{3 H_0^2}{8 \pi G}$$

この密度を宇宙の臨界密度と呼ぶが、宇宙論では一般に、物質密度をこの臨界密度で規格化した密度パラメータ Ω_0 を用いる。なお、臨界密度は、 $\sim 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ という極めて小さな値である。

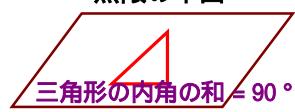
4. 膨張する宇宙

$K > 0$: 閉じた宇宙

球の表面



$K = 0$: 平坦な宇宙
無限の平面



$K < 0$: 開いた宇宙
鞍形の表面



- 重力場方程式より、

運動方程式 :

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{GM(a)}{a^2} \left(1 + \frac{3P}{c^2 a}\right) + \frac{1}{3} c^2 a$$

万有引力の法則

→ $P=0, P \ll c^2 a$ の時、万有引力の法則と一致する。

エネルギー保存則 :

$$\underbrace{\frac{1}{2} \left(\frac{da}{dt}\right)^2 - \frac{GM(a)}{a} - \frac{1}{6} c^2 a^2}_{\text{全エネルギー}} = -\frac{1}{2} K c^2$$

a: 宇宙の大きさ

: エネルギー密度

G: 万有引力定数

: 圧力

c: 光速度

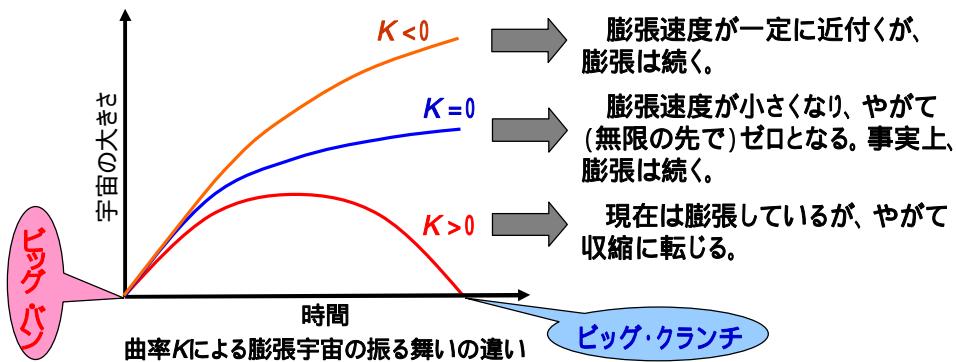
: 宇宙項

M(a): a内の宇宙の質量

: 空間の曲率

6. ダーク・エネルギー

宇宙の将来:



光(電磁波)の速度が有限(約30万km/s)であるため、遠方の宇宙を観測することは、宇宙の過去を観測することと同じである。

→ 宇宙膨張を捕えるためには、より遠く、より過去の宇宙を観測する必要がある。

6. ダーク・エネルギー

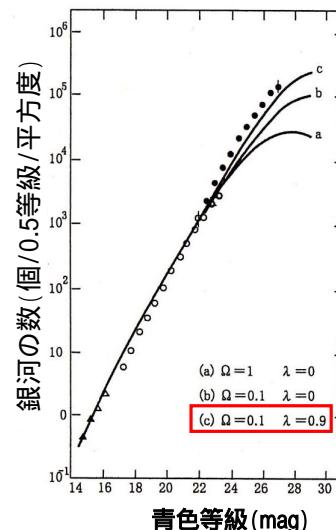
銀河のナンバー・カウント

幾つかの仮定が必要となるが、観測から得られる「銀河の見かけの明るさと数の関係」を、理論による計算結果と比べることで、宇宙論のテストを行うことが可能である。

ただし、非常に暗い銀河までを均一かつ完全に検出する必要があるため、従来の写真乾板よりも、はるかに高感度なCCDカメラの登場が必要だった(1980年代に実現)。

1990年: 福来等は、タイソンが行った銀河の深い撮像観測の結果と、理論に基づく計算結果を比較することで、宇宙項の存在を示唆した。

他にも多くの研究者によって、ナンバー・カウントによるテストが行われたが、銀河の進化など複雑な要素を導入する必要があり、様々な結果が提出された。



(Fukugita et al. 1990, ApJL, 361, 1, より一部を改変、吉井, 2006, 論争する宇宙 - 「アインシュタイン最大の失敗」が甦る, 集英社新書)

6. ダーク・エネルギー

Ia型超新星

白色矮星
赤色巨星

超新星爆発

NGC 4526に出現した超新星
SN 1994D (HST:NASA)

遠方銀河に現れたIa型超新星の観測
から、**宇宙項**の存在が示唆された。

- 宇宙膨張は加速している
- ・ 加速の要因は**宇宙項(ダーク・エネルギー)**

白色矮星と赤色巨星の連星系において、赤色巨星から白色矮星への物質の流入が起こり、チャンドラ・セカール限界を超えることで、中心部の炭素の核反応が暴走して、星全体が爆発する。この種の超新星は、絶対光度が一定であると考えられており、極めて明るく、どのような銀河にも発生し得る。

Expansion History of the Universe

Perlmutter, Physics Today (2003)

relative brightness

Scale of the Universe
Relative to today's scale

After inflation, the expansion either...
first decelerated, then accelerated
...or always decelerated

past ← today → future

Billions Years from Today

6. ダーク・エネルギー

WMAP (NASA, 2001年) = Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

COBEよりも高い精度で、宇宙マイクロ波背景放射の全天観測を行った。→ 宇宙初期の密度揺らぎを反映

WMAP(左)とWMAPによる宇宙マイクロ波背景放射の全天図(右)
(NASA HPより)

宇宙年齢 = $(13.7 \pm 0.2) \times 10^9$ 年
ハッブル定数 = $(71 \pm 4) \text{ km/s/Mpc}$
宇宙の再電離 = 誕生から約2~4億年後

PLANCK (ESA, 2009年)

WMAPよりも高い精度で、宇宙マイクロ波背景放射の全天観測を行った。宇宙年齢 = 138億年

通常物質 4 %

ダーク・マター 23 %

ダーク・エネルギー (宇宙項) 73 %

ダーク・マターとは何か?

ダーク・エネルギーとは何か?

WMAPが得た宇宙の組成