

2016年度 春学期 火V限

地学概論

- ・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/>

→ 「西浦クンの講義室」からPDF版をDL可

- 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



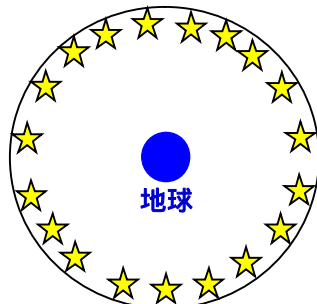
東京学芸大学 自然科学系
宇宙地球科学分野 講師
西浦 慎悟

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: トーマス・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

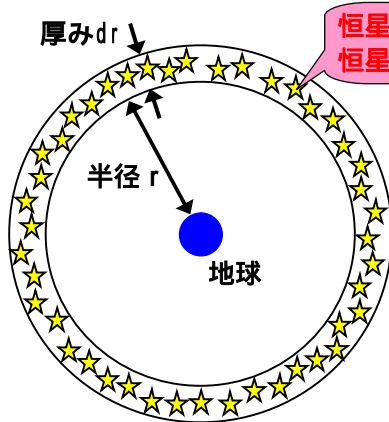
「未来永劫に不変で、無限に広がる
宇宙」という概念が確立する。

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。

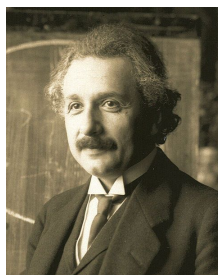
しかし、実際の夜空は暗い。何故か?

→「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)

$$R_{\mu} - \frac{1}{2} R g_{\mu} + \text{宇宙項 (ラムダ)} g_{\mu} = \frac{8}{c^4} G T_{\mu}$$

アインシュタインの重力場方程式

当初、宇宙項はゼロだったが、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。

・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。



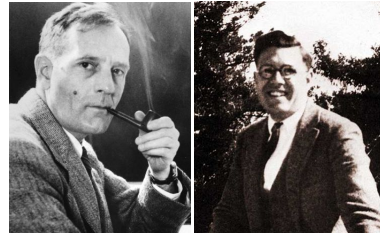
ルメートル
(Wikipediaより)

4. 膨張する宇宙

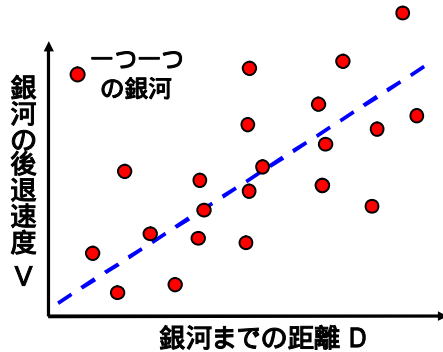
膨張宇宙の発見

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: エドウィン・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)

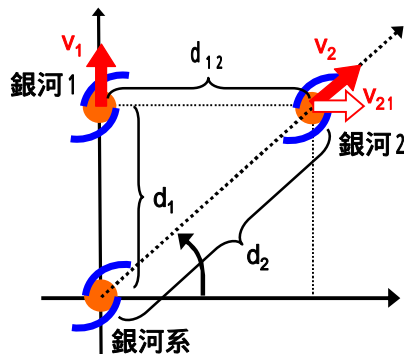
H_0 : ハッブル定数 (km/s/Mpc)

「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

$$\text{後退速度} = v_{21} = v_2 \cos$$

$$\text{距離} = d_{12} = d_2 \cos = (v_2 / H_0) \cos$$

$$= v_2 \cos / H_0 = v_{21} / H_0$$

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。

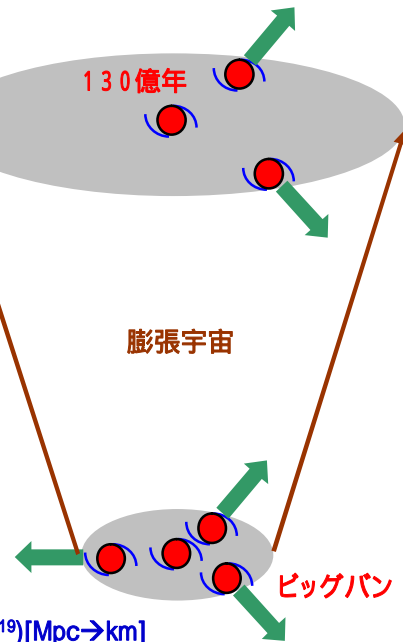
$$\frac{1}{H_0} = \frac{D}{V} = \frac{\text{道のり}}{\text{速さ}} = \text{要した時間}$$

(例) $H_0 = 75 \text{ km/s/Mpc}$ の場合

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

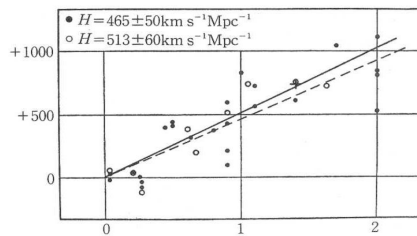
$$1 \text{ 年} = 3.16 \times 10^7 \text{ s}$$

$$\begin{aligned} \text{ハッブル時間} &= 1/H_0 = 1 / 75 \text{ (s Mpc/km)} \\ &= 1 / 75 / (3.16 \times 10^7) [\text{s} \rightarrow \text{年}] \times (3.09 \times 10^{19}) [\text{Mpc} \rightarrow \text{km}] \\ &= 1.30 \times 10^{10} \text{ 年} = 130 \text{ 億年} \end{aligned}$$



ハッブル定数決定の歴史

銀河の後退速度 V



銀河までの距離 D

初期のハッブル図 (Hubble, 1929, Proc. Nat. Acad. Sci., 15, 169. 大脇他, 1989, 天文資料集, 東京大学出版会)

ハッブル定数は400-500 km/s/Mpc

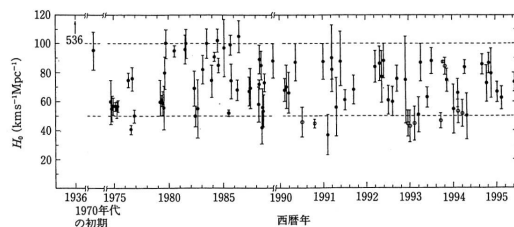
→ 宇宙年齢は18億年

この年齢はあまりに小さ過ぎる。

地質学・生物学の観点から地球の年齢は数10億年と考えられていた。

→ 銀河までの距離を、高い精度で決定することが最大の難関。

4. 膨張する宇宙



様々な研究で求められたハッブル定数の値 (岡村 1999, 銀河系と銀河宇宙, 東京大学出版会)

最新研究の例

2001年 ハッブル宇宙望遠鏡による近傍銀河のセファイド型変光星観測

ハッブル定数 = $72 \pm 8 \text{ km/s/Mpc}$

WMAP衛星による宇宙マイクロ波背景放射の観測

ハッブル定数 = $72 \pm 5 \text{ km/s/Mpc}$

宇宙年齢 = $134 \pm 3 \text{ 億年}$

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った、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。そのために、宇宙に始まりや終わりはない。

「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」

→ 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。



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

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。

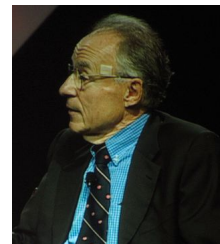
1964年: ベル研のアーノ・ペンジアスとロバート・ウッドロウ・ウィルソンが波長7cmの電波放射を発見。

- ・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。

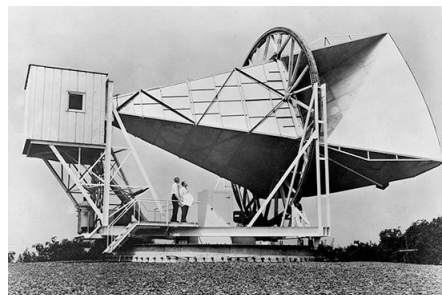
→ 電波放射は温度にして約3.5 K。

「宇宙マイクロ波背景放射」

→ ビッグ・バン宇宙の証拠



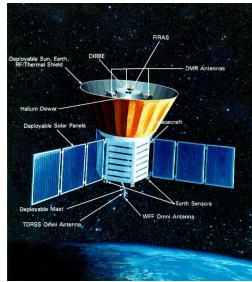
アーノ・ペンジアス
(Wikipediaより)



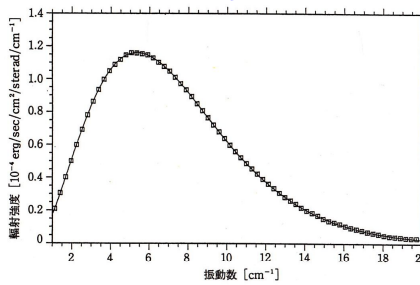
宇宙背景放射を最初に検出したアンテナ

5. ビッグ・バンとインフレーション

COBE (NASA, 1989年) = COsmic Background Explorer



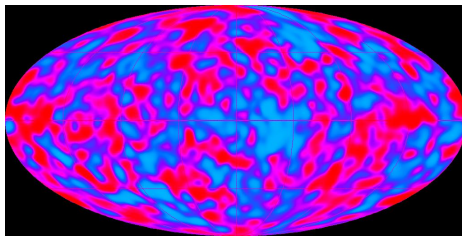
(NASA HPより)



宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル

←「マーク」は観測データ、曲線は黒体放射の理論値。

背景放射は黒体放射で、その温度は2.73K



宇宙マイクロ波背景放射の全天図 (NASA HPより)

(須藤, 1993, 「ダークマターと銀河宇宙」, パリティ物理学コース クローズアップ, 丸善株式会社)

背景放射温度の「ゆらぎ」は、わずか1/10万

→ この1/10万の「ゆらぎ」が銀河・銀河団や大規模構造などの天体や構造の元であると考えられる。

5. ビッグ・バンとインフレーション

インフレーション宇宙

「ビッグ・バンのエネルギーは何処から来たのか？」

- 宇宙は、誕生直後の $1/10^{36}$ 秒に、10の数10乗倍にまで急膨張した。
- 宇宙は、急激に冷える。
- 真空の相転移が起こる。

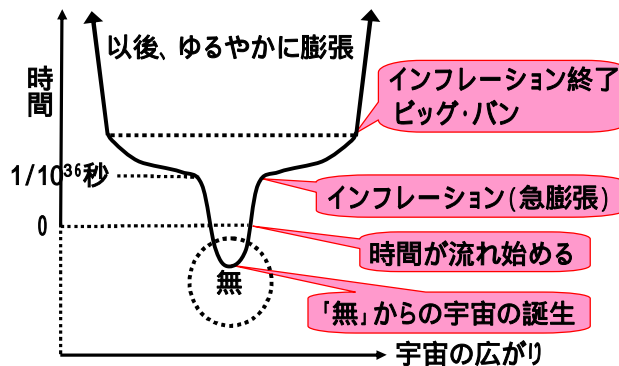
1981年:

佐藤勝彦
アラン・ハーヴェイ・ゲース



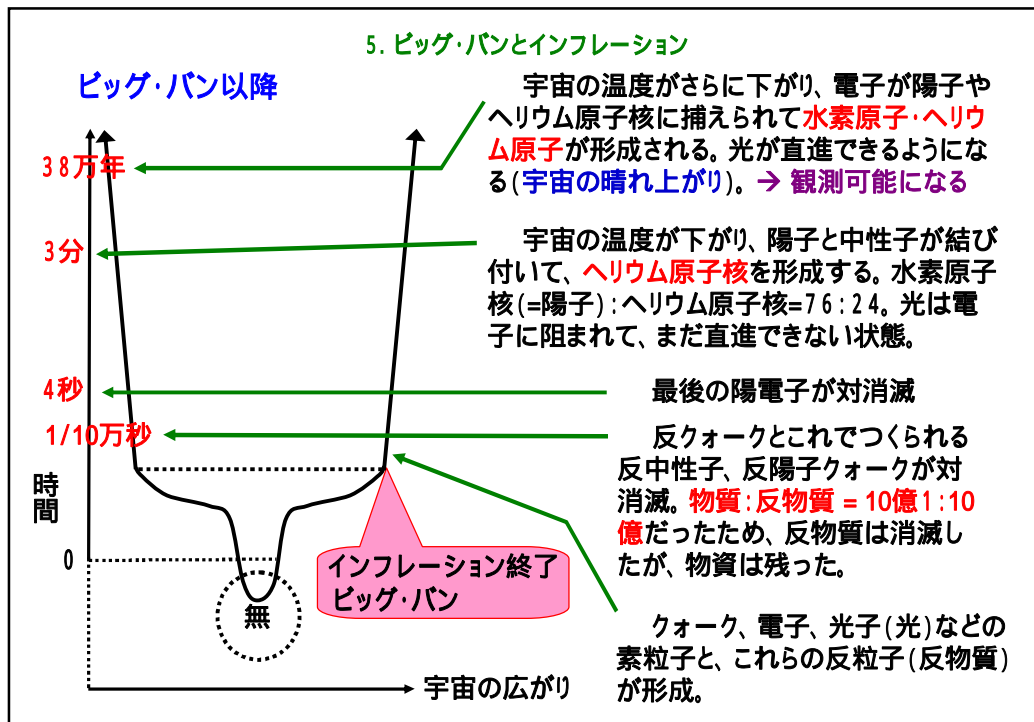
エネルギー

過冷却による
潜熱の開放



インフレーションを引き起こしたものは？

宇宙項(万有斥力)



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?)

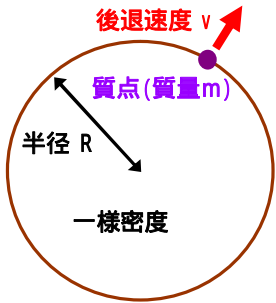
- ・ 初代の天体からの紫外線放射のエネルギーにより、晴れ上がり時に中性化した水素などが、再度電離(イオン化)し、現在に至っている。
- ・ 誕生後、約**9億年後**の宇宙には、既に**クェーサー**(超大質量ブラックホールを中心核とする銀河)が形成されており、そのスペクトルから、この時期にはほぼ**再電離**が完了していることが分った。

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。



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

(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:

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

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** ρ 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

- ・ 重力場方程式より、

運動方程式：

$$\frac{d^2 a}{d \tau^2} = - \underbrace{\frac{GM(a)}{a^2}}_{\text{Newtonian}} \left(1 + \frac{3P}{2}\right) + \frac{1}{3} c^2 a$$

万有引力の法則

→ $\beta = 0, P \ll 1$ の時、万有引力の法則と一致する。

エネルギー保存則：

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

全エネルギー

a : 宇宙の大きさ : エネルギー密度

G: 万有引力定数 P: 压力

c : 光速度 : 宇宙項

M (a) : a内の宇宙の質量 K : 空間の曲率

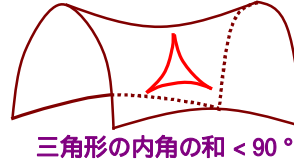
$K > 0$: 閉じた宇宙
球の表面



$K = 0$: 平坦な宇宙
無限の平面

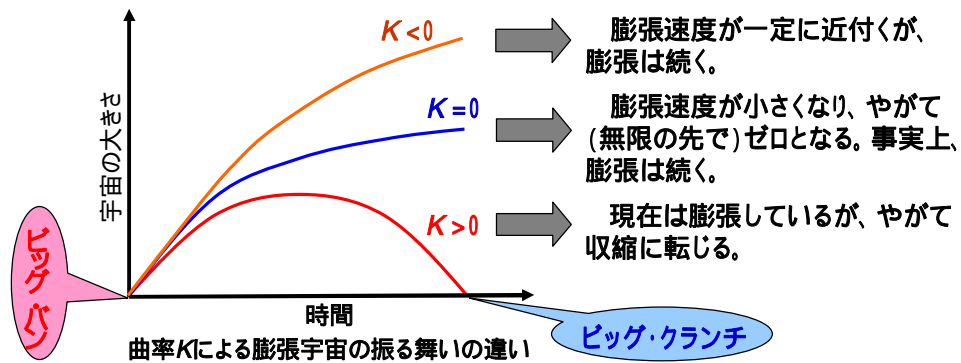


$K < 0$: 開いた宇宙
鞍形の表面



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

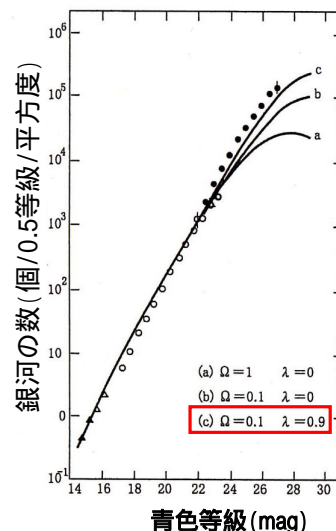
銀河のナンバー・カウント

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)。

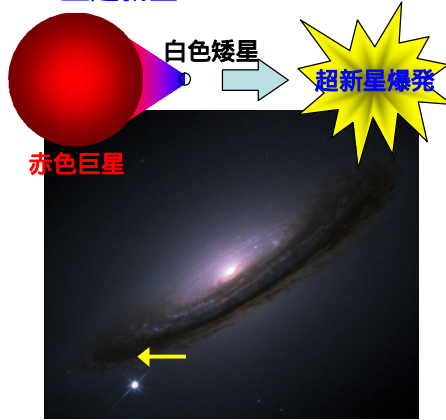
1990年: 福来等は、**タイソン**が行った銀河の深い撮像観測の結果と、理論に基づく計算結果を比較することで、**宇宙項**の存在を示唆した。

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)

Ia型超新星



NGC 4526に出現した超新星
SN 1994D (HST:NASA)

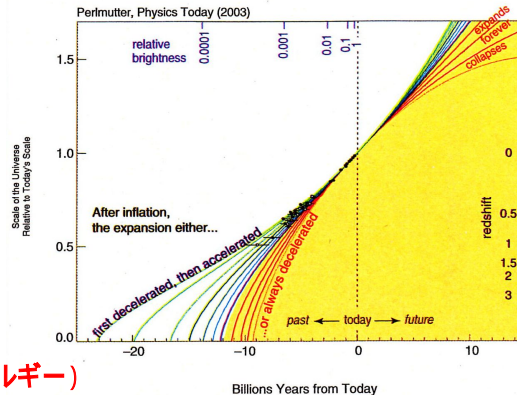
遠方銀河に現れたIa型超新星の観測
から、**宇宙項**の存在が示唆された。

- 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)

6. 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**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。

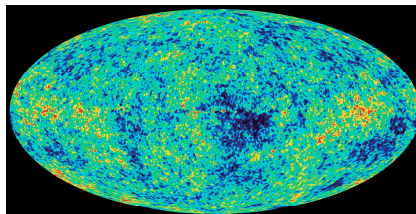
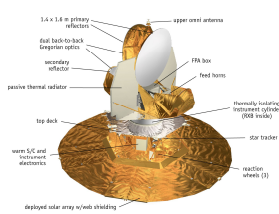
Expansion History of the Universe



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 ± 4) 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

ダーク・マター
とは何か？

ダーク・エネルギー
とは何か？

通常物質 4%

ダーク・マター 23%

ダーク・エネルギー
(宇宙項) 73%

WMAPが得た
宇宙の組成