

観測的宇宙論入門 —宇宙はどこまでわかったか—

岡村定矩
法政大学教授(理工学部創生科学科)
東京大学名誉教授

Week 1

現在の宇宙の姿

Week 2

ビッグバン宇宙論

Week 3

ダークマターとダークエネルギー

Week 4

太陽系外惑星と元素の起源

第3週：ダークマターとダークエネルギー

3.1 力学質量と光学質量

3.2 ミッシングマスからダークマターへ

3.3 近年のダークマターの観測

3.4 ダークエネルギーの発端：I a型超新星

3.5 宇宙の加速膨張の発見

3.6 現代宇宙論のパラダイム

第3週：ダークマターとダークエネルギー

3.1 力学質量と光学質量

3.2 ミッシングマスからダークマターへ

3.3 近年のダークマターの観測

3.4 ダークエネルギーの発端：I a型超新星

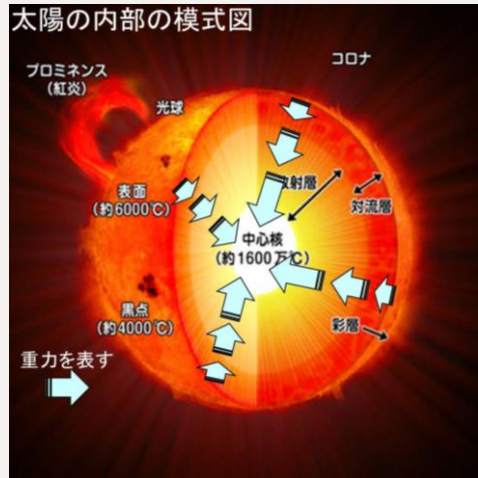
3.5 宇宙の加速膨張の発見

3.6 現代宇宙論のパラダイム

力学質量

宇宙では無重力??

宇宙で一定の形を保っている天体では、つぶれようとする**万有引力**(自己重力)とつり合う**「何らかの力」**が作用している。



http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0320a/contents/taiyoukei/taiyou/taiyou_03.htmlより改変

Wikipedia より (Credit: ESO)

東京大学木曾観測所

何らかの力

中心核で起きている核融合反応から出るエネルギーで高温になった**「ガスの圧力」**

何らかの力

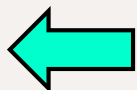
星々が無秩序に運動することによる**「圧力」**

何らかの力

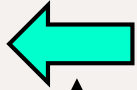
円盤が回転運動することによる**「遠心力」**

力学質量

(ビリアル質量)



「遠心力」や「圧力」と釣り合う**重力**を及ぼす質量

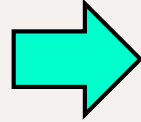


「遠心力」や「圧力」は、星やガスの**運動速度**を測ることでわかる

ビリアル定理(力学平衡状態)

二種類の質量

(1) 内部運動の速度を測って、それが自分の重力とつり合っている(力学平衡)と仮定して重力の大きさから質量を求める



力学質量
(dynamical mass)

内部運動の速度が大きすぎると系はばらばらになるし、小さすぎると自分の重力(万有引力)でつぶれてしまう。

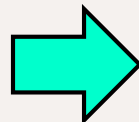
多くの場合こちらの方がだいぶ大きい



ミッシングマス
(行方不明の質量)




(2) 観測される光(星)や電波(ガス)の強度から星やガスの質量を推定する



光学質量
(luminous mass)

ミッシングマス (行方不明の質量) の指摘

- (1) ツビッキーが1937年に既に、**銀河団の内部運動速度**とつり合うには、銀河の質量がとても大きくなければならないことを指摘。
- (2) オールトが1962-65年に、**太陽近傍の星の運動速度**から、あるべき質量の約40%がまだ観測されていないことを指摘。



銀河団のミッシングマス

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL
AN INTERNATIONAL REVIEW OF SPECTROSCOPY AND ASTRONOMICAL PHYSICS
VOLUME 86 OCTOBER 1937 NUMBER 3

ON THE MASSES OF NEBULAE AND OF CLUSTERS OF NEBULAE
F. ZWICKY

ABSTRACT
Present estimates of the masses of nebulae are based on observations of the luminosities and internal motions of nebulae. It is shown that both these methods are unreliable; that from the observed luminosities of extragalactic systems only lower limits for the values of their masses can be obtained (see D), and that from internal rotational observations of the Coma cluster only a lower limit can be obtained. The average mass of one of these nebulae is therefore $\bar{M} > 9 \times 10^{46} \text{ gr.}$ (35)

Combining (33) and (34), we find $\bar{M} > 9 \times 10^{46} \text{ gr.} = 4.5 \times 10^{10} M_{\odot}$. (36)

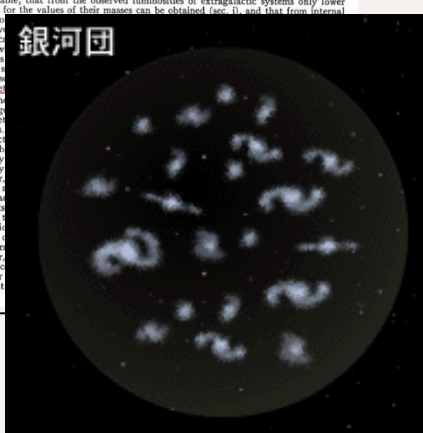
Inasmuch as we have introduced at every step of our argument inequalities which tend to depress the final value of the mass \bar{M} , the foregoing value (36) should be considered as the lowest estimate for the average mass of nebulae in the Coma cluster. This result is somewhat unexpected, in view of the fact that the luminosity of an average nebula is equal to that of about 8.5×10^3 suns. According to (36), the conversion factor γ from luminosity to mass for nebulae in the Coma cluster would be of the order $\gamma = 500$, $\gamma = 500$, $\gamma = 500$ (37)

as compared with about $\gamma' = 3$ for the local Kapteyn stellar system. This discrepancy is so great that a further analysis of the problem is in order. Parts of the following discussion were published several years ago, when the conclusion expressed in (36) was reached for the first time.³

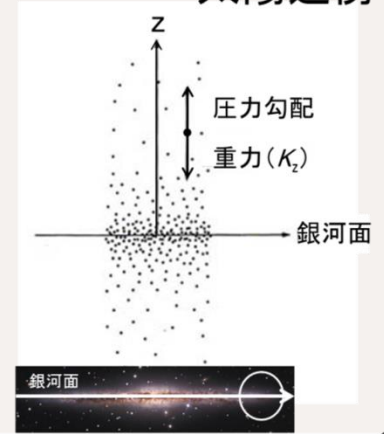
We inquire first what happens if the cluster considered is not st-a

質量-光度比

銀河団



太陽近傍のミッシングマス (Oort 1962, 1965)



圧力勾配
重力 (K_2)
銀河面

$$\frac{\rho_{\text{star}}(0) \sim 0.06 M_{\odot}/\text{pc}^3 + \rho_{\text{gas}}(0) \sim 0.03 M_{\odot}/\text{pc}^3}{\rho_{\text{lum}}(0) \sim 0.09 M_{\odot}/\text{pc}^3}$$

$$\rho_{\text{dyn}}(0) \sim 0.15 M_{\odot}/\text{pc}^3$$

約40% (0.15のうち0.06)の質量が行方不明 (missing)

$\rho(z) = \rho(0) \exp\left[-\frac{1}{\sigma_z^2} \int_0^z K_2(z) dz\right]$ 静水圧平衡

$\frac{dK_2}{dz} = -4\pi G \rho(z)$ ポアソン方程式

$\rho(z), \sigma_z$: 観測量 $\rightarrow K_2, \rho(0)$

M_{\odot} : 太陽質量を表す記号

M_{\odot}/pc^3 : 1立方パーセクの空間に太陽質量の何倍があるかという質量密度を表す記号

第3週の第1回はここまでです。

第3週：ダークマターとダークエネルギー

3.1 力学質量と光学質量

3.2 ミッシングマスからダークマターへ

3.3 近年のダークマターの観測

3.4 ダークエネルギーの発端：I a型超新星

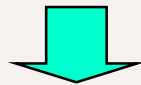
3.5 宇宙の加速膨張の発見

3.6 現代宇宙論のパラダイム

ミッシングマスからダークマターへ：概念の転換

1980年代初頭まで

ミッシングマス：どの分野にもあるちょっと不思議な問題

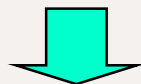


(1) 天文観測技術の進歩

渦巻銀河の平坦な回転曲線、楕円銀河のX線ハロー

(2) インフレーション理論は平坦な宇宙 ($\Omega_0=1$) を予言

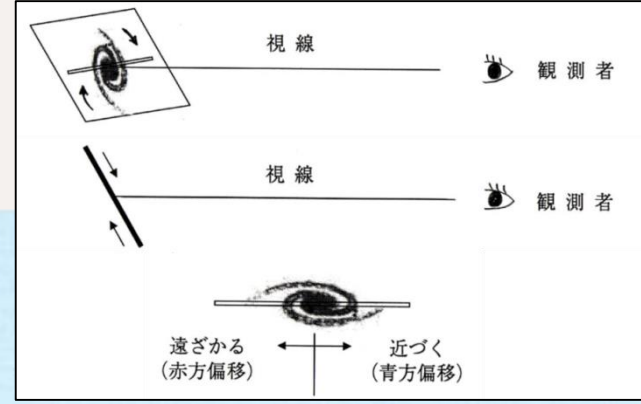
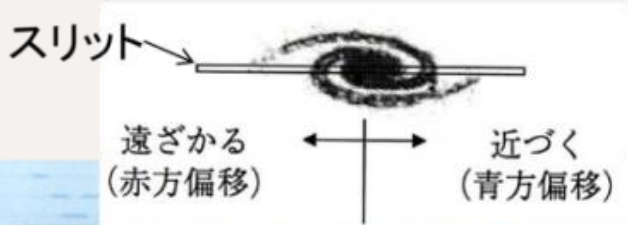
(3) 素粒子的宇宙像の開花 (超対称性粒子)



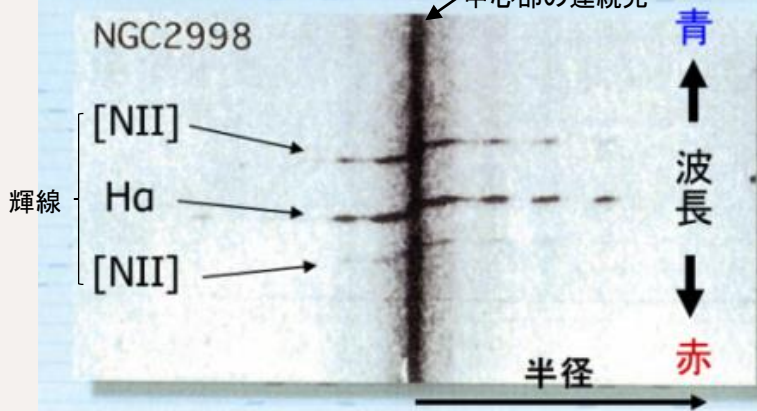
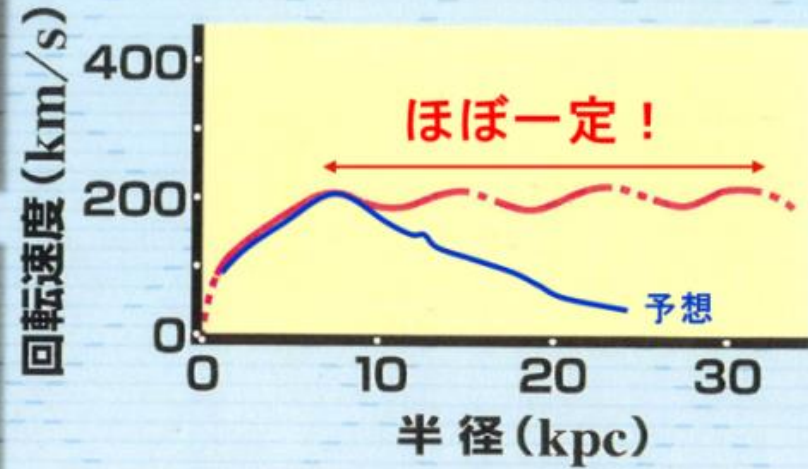
1980年代前半

ダークマター：天文学・物理学の根幹をなす基本的な問題

渦巻銀河の平坦な回転曲線 (Flat Rotation Curve)



予想外の結果



V.C. Rubin, N. Thonnard, W.K. Ford, Jr. 1980

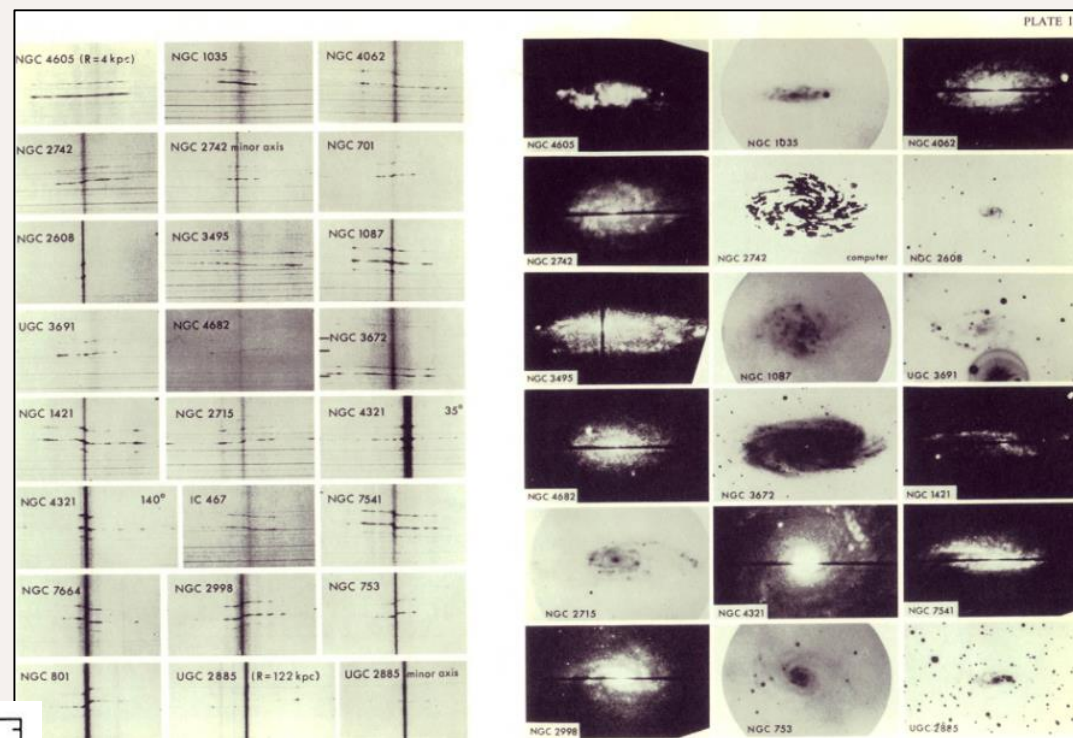
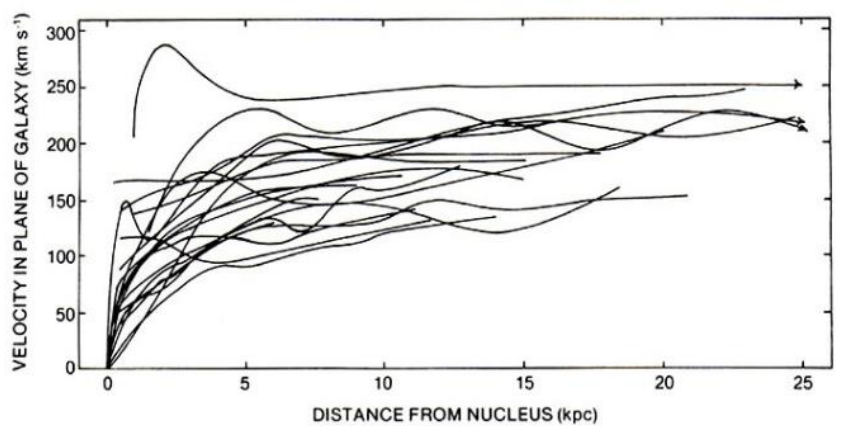
ベラ・ルービン (Vera C. Rubin, 1928-2016) による精力的な観測

高感度観測装置: 映像増倍管 (Image Intensifier) + IIIa-J 写真乾板



Carnegie Institution of Washington,
Dept. of Terrestrial Magnetism

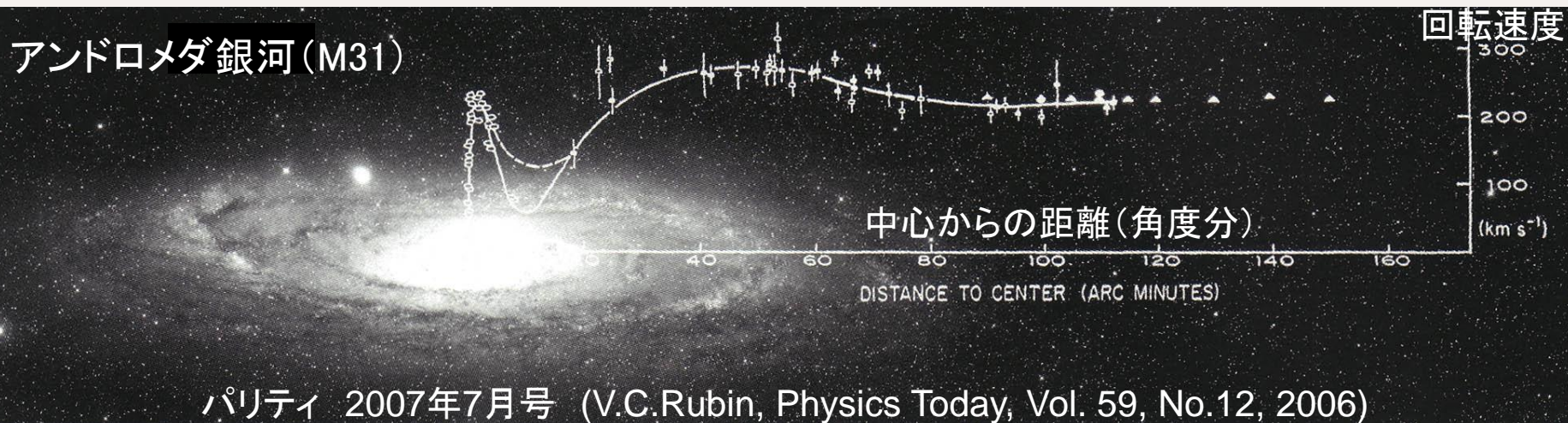
回転曲線の観測データ



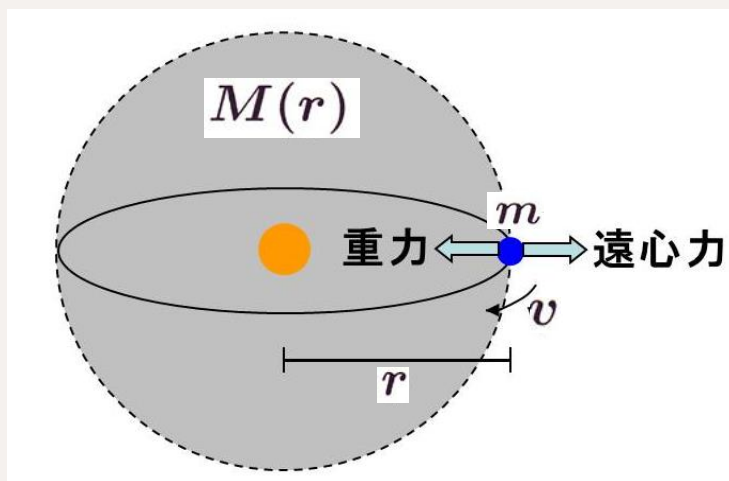
Rubin et al. 1980, Ap.J., 238, 471.

ほとんど全ての渦巻き銀河
で同じ現象が見られる

渦巻銀河にはダークマターが付随している



平坦な回転曲線はダークマターがある証拠



遠心力

重力定数

重力 (万有引力)

$$m \frac{v^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

↓

$$M(r) = \frac{1}{G} v^2 r$$

広い範囲で一定

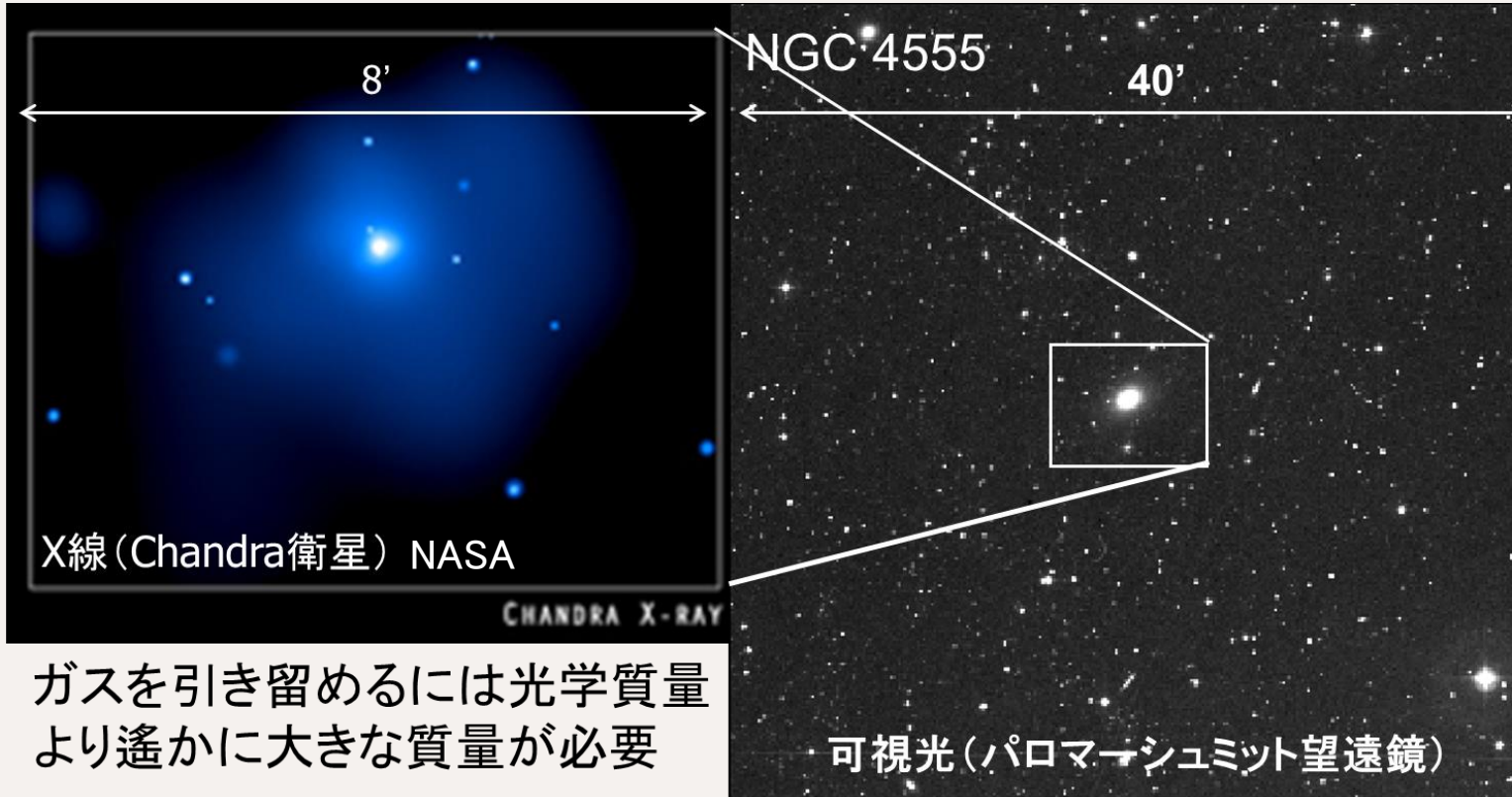
↓

$$M(r) \propto r$$

↑ 比例する

楕円銀河のX線ハロー(高温ガス)

高温ガス(数千万度)が星の2倍外側まで広がっている



ガスを引き留めるには光学質量より遙かに大きな質量が必要

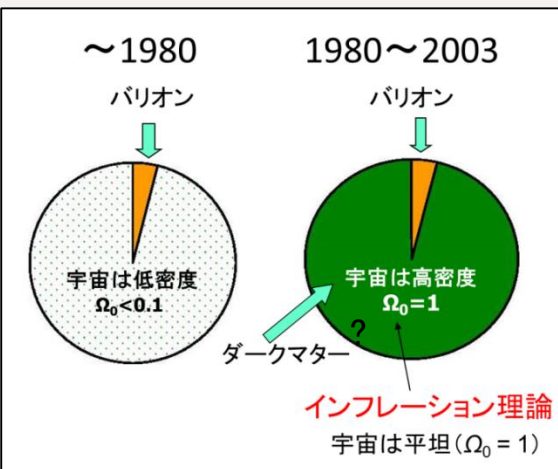
可視光 (パロマーシュミット望遠鏡)

楕円銀河にもダークマターが付随している。

宇宙にあまねく存在する銀河すべてにダークマターが付随している

インフレーション理論と素粒子的宇宙像

インフレーション理論は $\Omega_0=1$ を予言
(Ω_0 : 宇宙にある全てのもののエネルギー密度)



Cosmic Pie の変遷

観測されている**バリオン**
(**普通の物質**)の密度だけでは $\Omega_0 < 0.1$ にしかならないことは以前から知られていた。

↓
ダークマターによって $\Omega_0=1$ が実現されているのかも知れない。

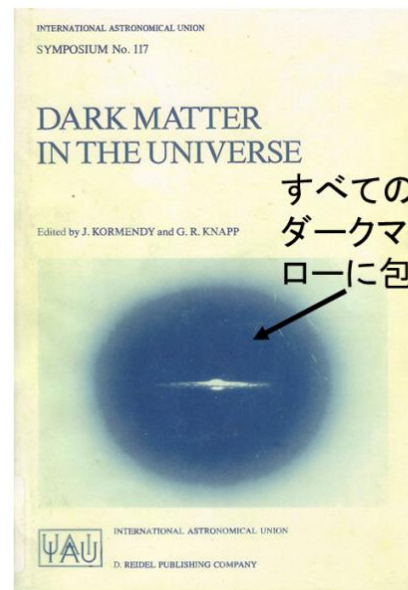
素粒子的宇宙像という潮流

超対称性理論

既知の素粒子の全てに未発見のパートナー粒子(超対称性粒子)が存在すると考える理論。多数の未発見素粒子の存在を予言。その中にダークマターの候補に適切だと考えられる粒子があった。バリオンの観測と矛盾せず $\Omega_0=1$ を実現する可能性に期待がかかった(未発見)。

ダークマターの存在が研究者の共通認識として確立

1985年にプリンストンで開催された国際天文学連合(IAU)シンポジウムの集録(IAU Symp. 117)



すべての銀河は
ダークマターのハ
ローに包まれている

第3週の第2回はここまでです。

第3週：ダークマターとダークエネルギー

3.1 力学質量と光学質量

3.2 ミッシングマスからダークマターへ

3.3 近年のダークマターの観測

3.4 ダークエネルギーの発端：I a型超新星

3.5 宇宙の加速膨張の発見

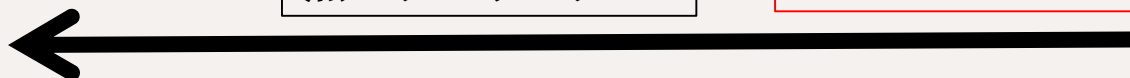
3.6 現代宇宙論のパラダイム

熱いダークマターと冷たいダークマター (Hot Dark Matter vs Cold Dark Matter)

様々なスケールの構造をダークマターのハローが包み込んでいる

熱いダークマター

トップダウンシナリオ



大きな構造から先にできる。ダークマターハロー
(小さな構造は消される)

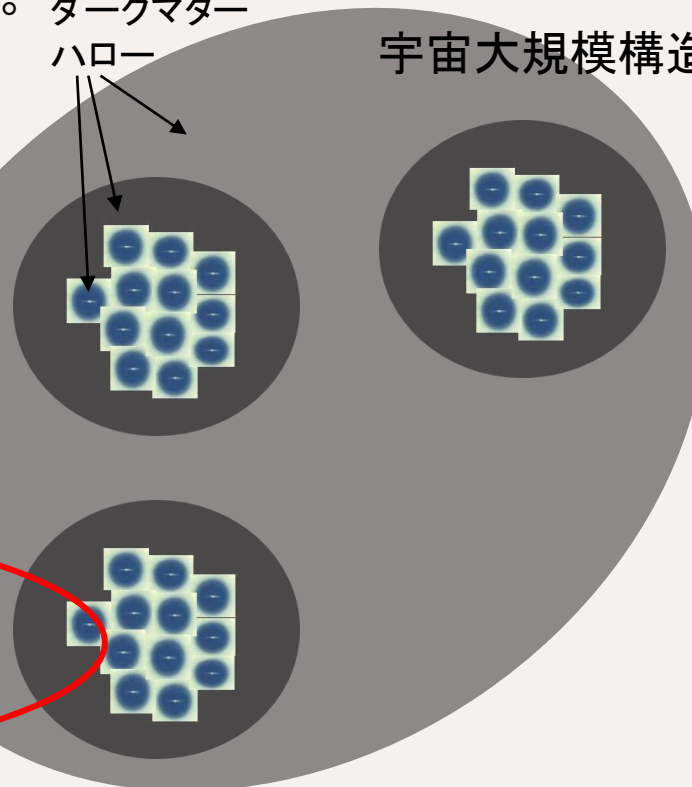
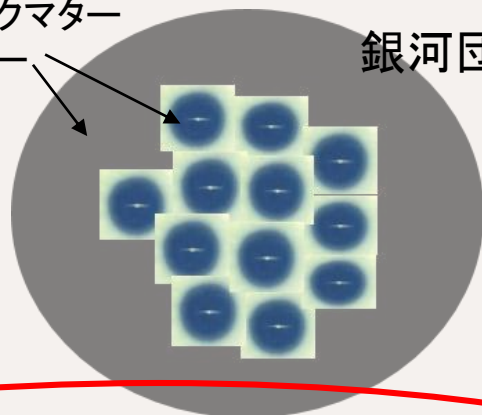
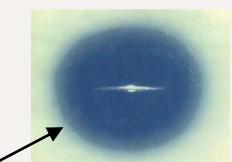
宇宙大規模構造

個々の銀河

ダークマターハロー

銀河団

ダークマターハロー



ボトムアップシナリオ

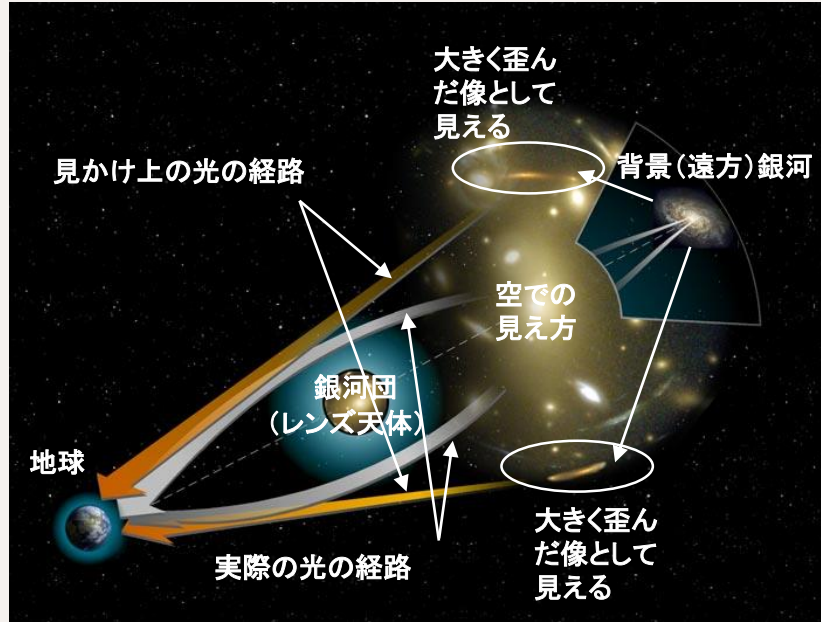
小さな構造から先にできる。

冷たいダークマター

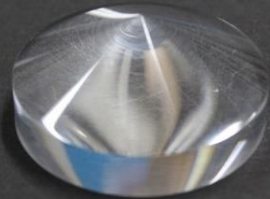


銀河団の強い重力レンズ効果

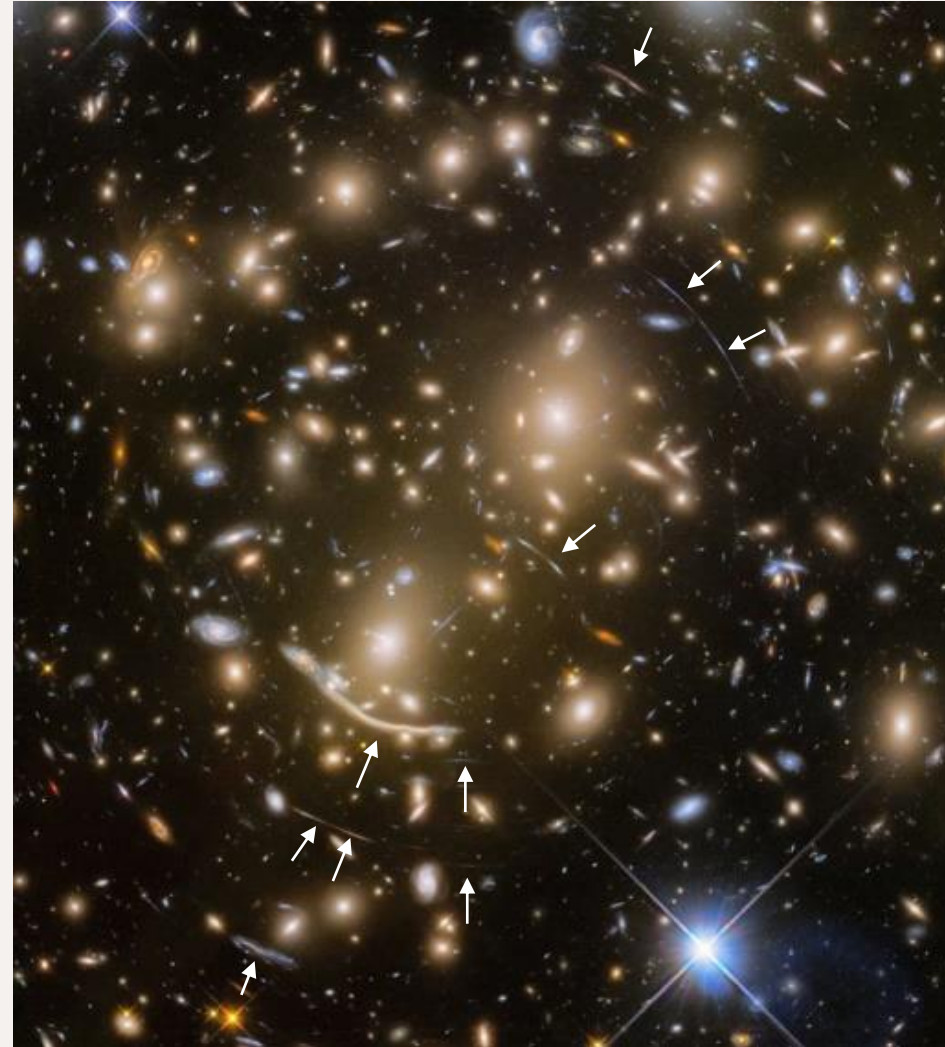
アインシュタインの一般相対性理論
大質量物体の周辺では空間が歪む



重力レンズを模擬したレンズ



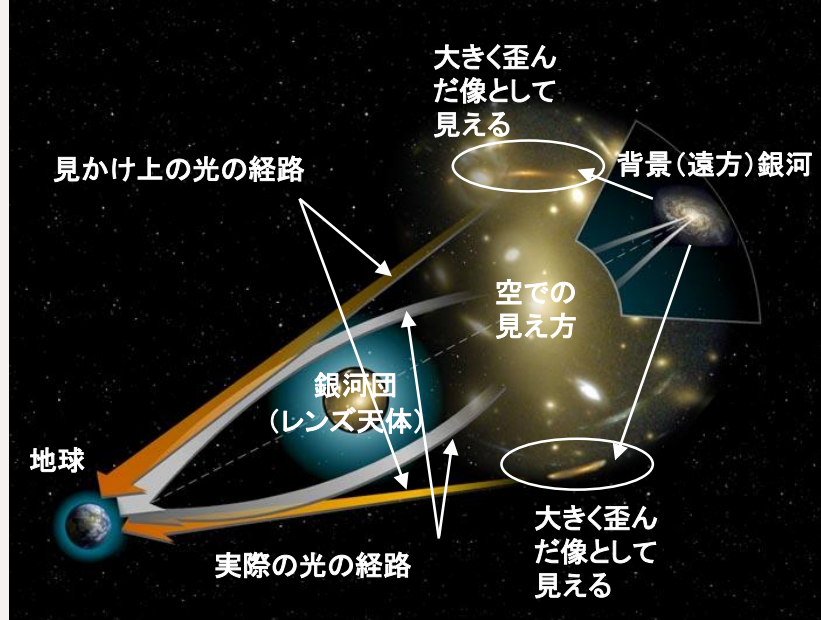
ムービーを見ます



銀河団Abell 370による重力レンズ像 (ハッブル宇宙望遠鏡)

銀河団の強い重力レンズ効果

アインシュタインの一般相対性理論
大質量物体の周辺では空間が歪む

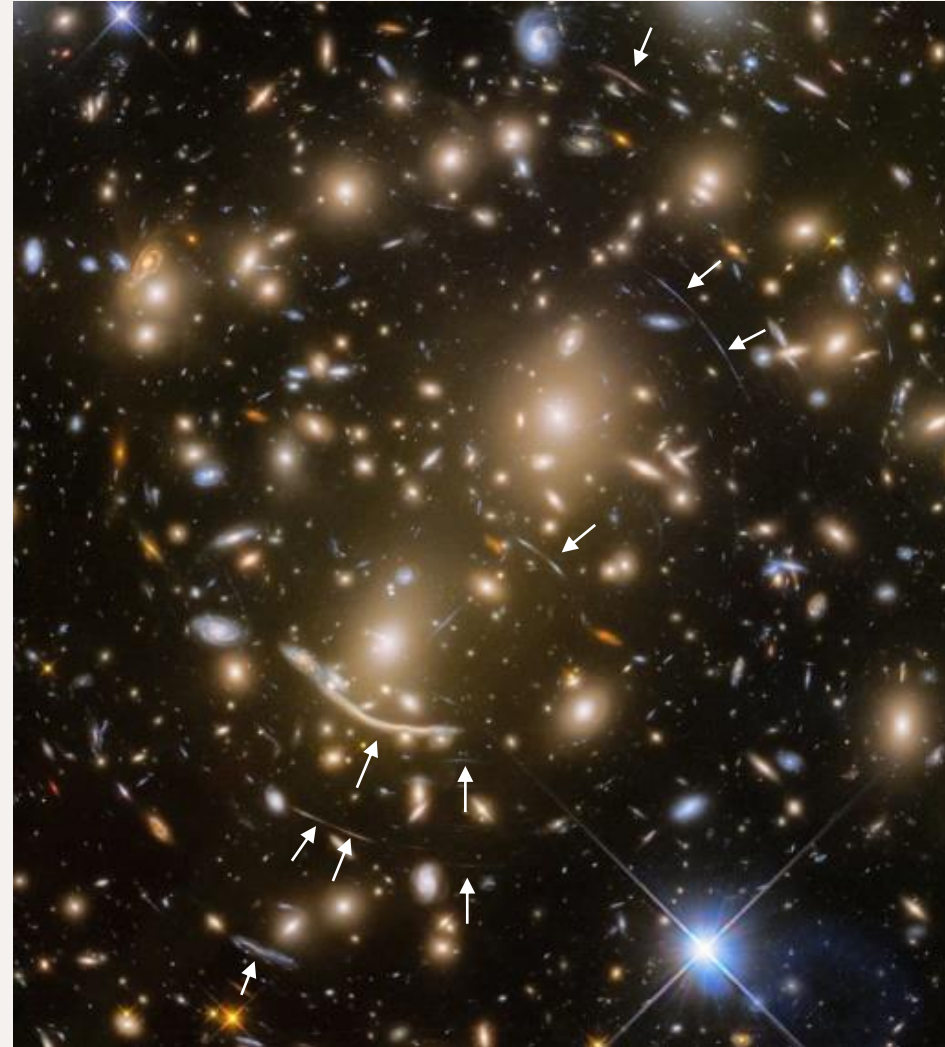


歪んだ像の解析から**銀河団の質量分布**がわかる。

多くの銀河団の観測結果



銀河団を莫大な量のダークマターが包み込んでいる。

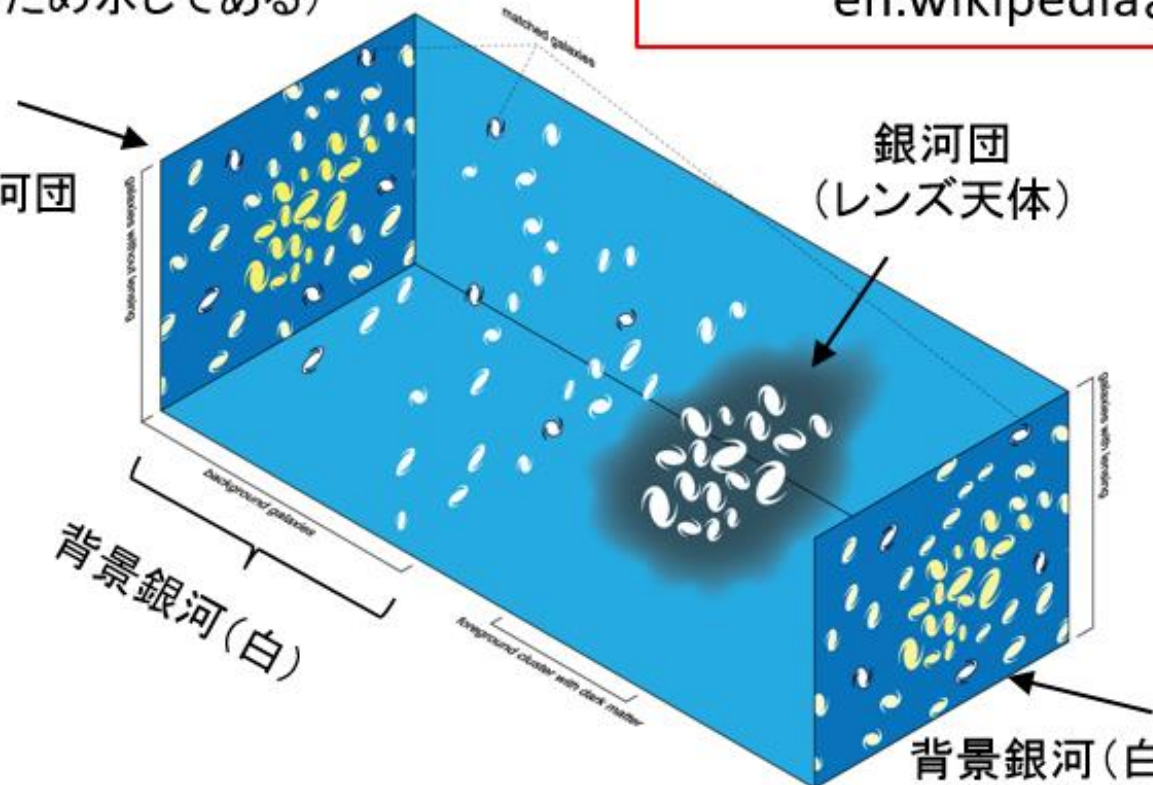


銀河団Abell 370による重力レンズ像(ハッブル宇宙望遠鏡)

弱い重力レンズ効果
en.wikipediaより

歪んでいないプロジェクショ
ン(比較のため示してある)

黄色は銀河団
の銀河



銀河団
(レンズ天体)

背景銀河(白)

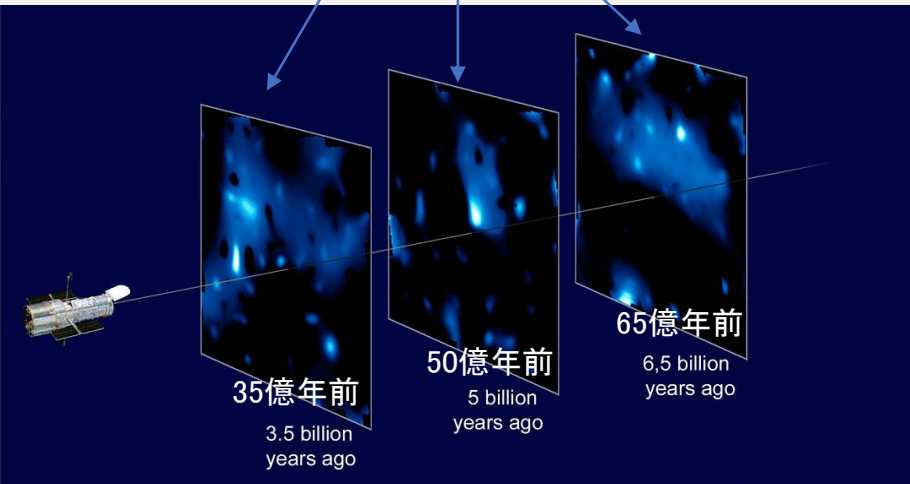
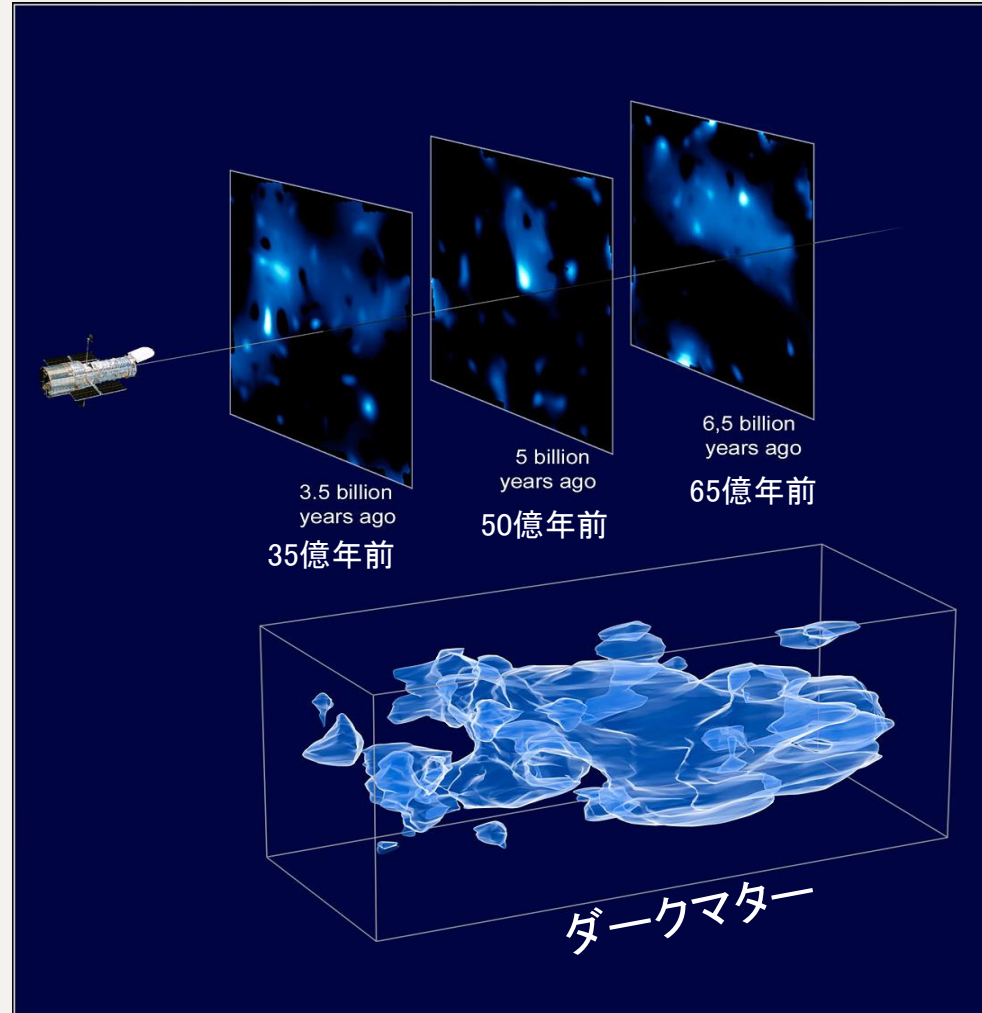
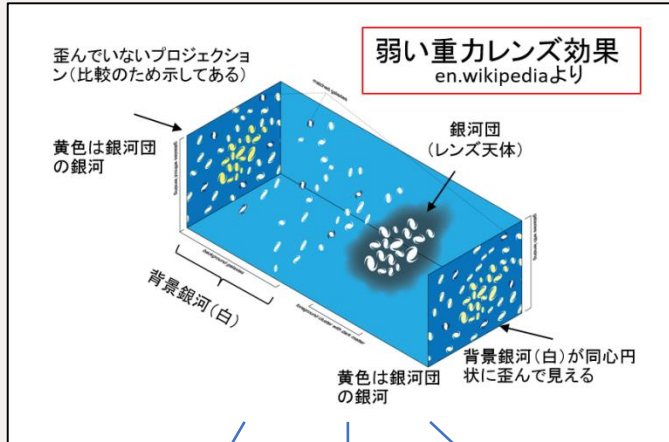
黄色は銀河団
の銀河

背景銀河(白)が同心円
状に歪んで見える

ダークマターの三次元空間分布

2007年1月7日 NASAの記者発表 (heic0701)

ハッブル宇宙望遠鏡、ヨーロッパのVLT、すばる望遠鏡の共同研究成果



地上やスペースにおけるダークマター粒子検出実験

ダークマター粒子は宇宙空間に充ち満ちている



<https://home.cern/about/experiments/ams>

ISS上のAMS-02実験

2013年4月3日にダークマター粒子の存在を示す可能性のあるデータを得たと発表(その後確認の発表はない)

ダークマター粒子はまだ
見つかっていない



XMASS実験

東大宇宙線研究所が神岡鉱山の地下で行っているダークマター粒子検出実験

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/library/gallery/index.html> より

第3週の第3回はここまでです。

第3週：ダークマターとダークエネルギー

3.1 力学質量と光学質量

3.2 ミッシングマスからダークマターへ

3.3 近年のダークマターの観測

3.4 **ダークエネルギーの発端：I a型超新星**

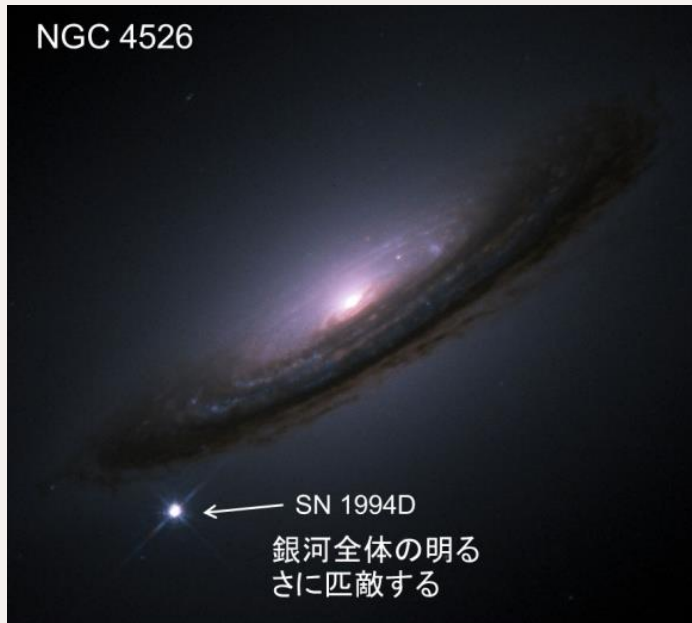
3.5 宇宙の加速膨張の発見

3.6 現代宇宙論のパラダイム

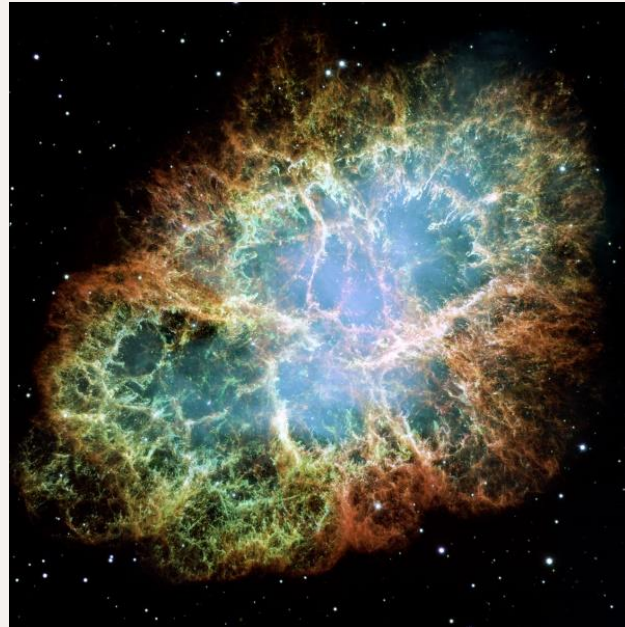
ダークエネルギーの発端: I a型超新星

超新星とは

→ 星が一生の最後に起こす大爆発。一つの星が銀河全体に匹敵するほど明るくなる。
一つの銀河では約100年に2-3個程度出現する



<http://apod.nasa.gov/apod/ap981230.html>



かに星雲。1054年に銀河系内で起きた超新星の残骸。ガスは秒速1000 kmで広がっている(「明月記」に記載がある)(ハッブル宇宙望遠鏡による)。

熱核反応暴走型 (I 型)

重力崩壊型 (II 型)

(次週の元素合成の話)

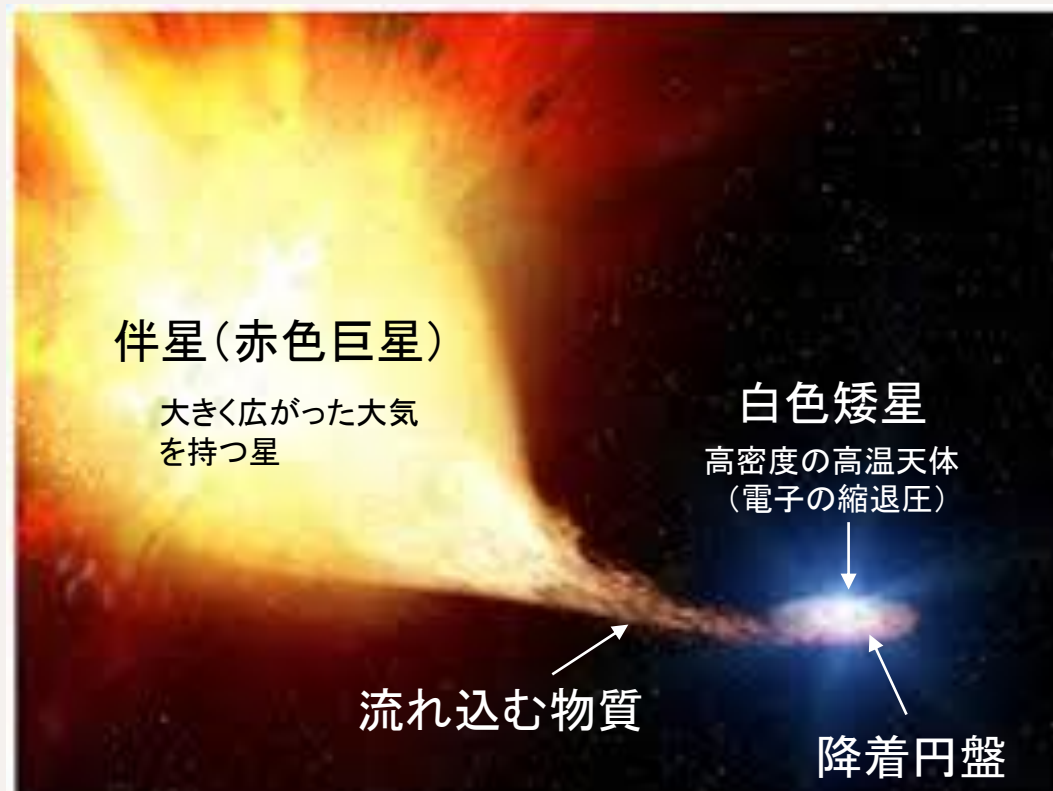
大きく分けて2種類

これからの話は I 型の中の

I a型超新星

I a型超新星

- ・連星系をなす白色矮星に伴星から物質が降り積もり、ある**限界質量**(チャンドラセカール限界:太陽質量の約1.4倍)を越えた時点で核反応が暴走して爆発する。
- ・**最大光度がほぼ一定**である(しかも銀河と同じくらい明るい)。
- ・すべてのタイプの銀河に出現する。



I a型であることの確認

↓ ← 大望遠鏡によるスペクトルが必要

最大光度(絶対等級)
がほぼ一定

標準光源

↓
見かけの明るさ(等級)を
観測すれば**距離が求まる**

見かけの等級 絶対等級 距離(pc)

$$\underline{m - M} = 5 \log r - 5$$

↑
距離指数(距離引数)
(distance modulus)

I a型超新星は「標準光源」

銀河の距離を測定することは観測的宇宙論の「きほんのき」

平均的な銀河で超新星が発生する頻度

全タイプ合わせて100年に2~3個

I a型は100年に1個程度

どの銀河でいつ出現するか分からない。

→

出現してもすぐに大望遠鏡でスペクトルを撮るのは難しい。

→

個別の銀河の距離測定ではなく、多数のデータを蓄積してハッブル定数の決定に使われていた。

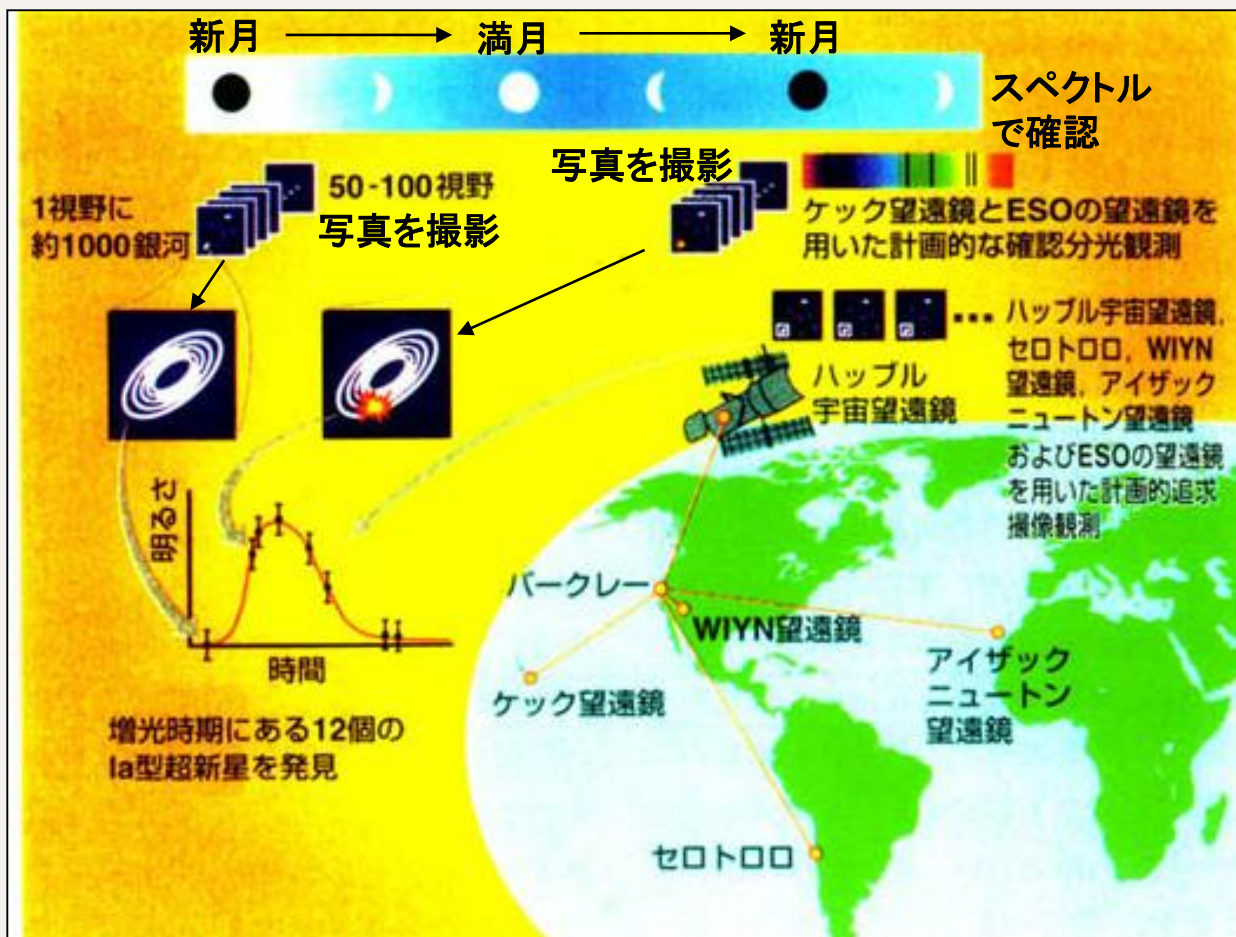
大望遠鏡の観測時間を確保するのは難しい

- ・半年ごとに観測提案を募集(観測可能時間の2-3倍かそれ以上)
- ・レフェリーによる審査→評価(点数)の高いもののみを採択
- ・半年ごとにあらかじめ観測時間を割り当て



オンデマンドの I a型超新星へ

オンデマンドの(要望に応じた) I a型超新星



1個の銀河では100年に1個程度だが、1回に数万個の銀河を観測すれば、1ヶ月間隔で必ず数個以上の超新星が見つかる。



I a型であることを確認するスペクトル観測が大望遠鏡で実行可能になる。
(必ず候補があるから)

従来より遠方の超新星の観測にウエイトが移った。



二つの競合グループが宇宙膨張の歴史を調べ始めた。



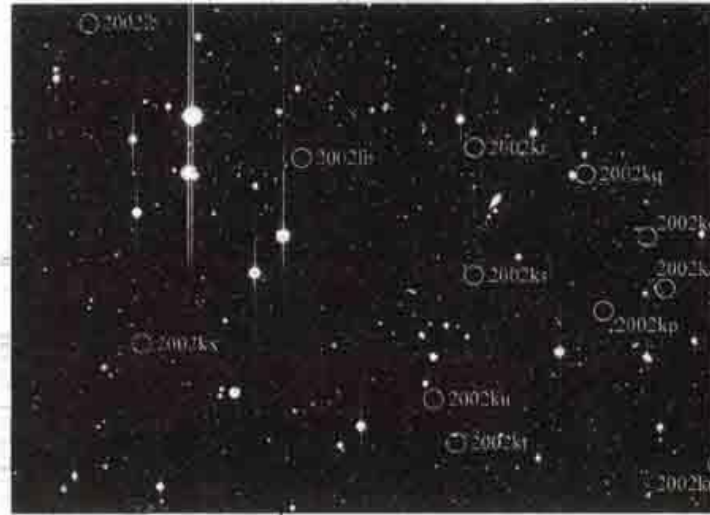
「パリティ」2003年12月号
Saul Perlmutter率いるSupernova Cosmology Project
(ソール・パールムッター)



Brian Schmidt率いるHigh-z Supernova Search
(ブライアン・シュミット)

すばる望遠鏡も活躍

専月 日 発行 星野 (夕刊) 2003年(平成15年)5月29日 木曜日 42086号 (日刊)



宇宙の運命 これで分かる?

超新星18個発見

ハワイ・すばる望遠鏡

超新星は、星が最後に 径8層級の大型望遠鏡のな
起こす大爆発。今回の18 個は、いずれも南天のく
個は、いずれも南天のく した形で、これほど多数
じら座の周辺でみつけ の超新星を一度に発見し
た。推定距離は40億〜70 たのは世界初という。
億光年。うち12個は1枚 膨張を続ける宇宙の将
の画像に写っていた。口 来は、膨張の仕方では決ま

膨張か収縮か観測へ

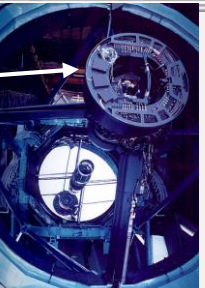
その速度が減速して いる場合、膨張が止まっ
て収縮に転じ、やがて宇
宙がつぶれてしまう可能
性もある。宇宙年齢を1
37億歳とした米航空宇
宙局NASAの今年2
月の発表は加速膨張を支持
したが、試算は間接的な
推計にとどまっていた。
膨張速度の変化をより
直接的に求めるには、数
十億光年以上遠方で、距
離も明確な超新星の明る
さの変化を調べればい
い。しかし、こうした超
新星は暗くて観測が難し
く、これまで数個しか見
つかっていなかった。
今回の超新星を今後、
何度か観測することで、
宇宙が現在の半分の大き
さだったころの膨張の様
子をみる事ができると
みられる。
土居助教授は「同じ超
新星を今秋以降にも観測
する予定で、それによっ
て宇宙の膨張について明
確な結論が得られるたろ
う」と話している。

画像1枚に12個

1枚の画像で発見した12個の超新星。
数字と文字付きの丸で囲んだ部分にあ
る。文字は超新星につけられた識別番
号。この画像の範囲は、満月がほぼす
っぽりと入る大きさに相当する。田中
啓さんとSXDSTチーム提供

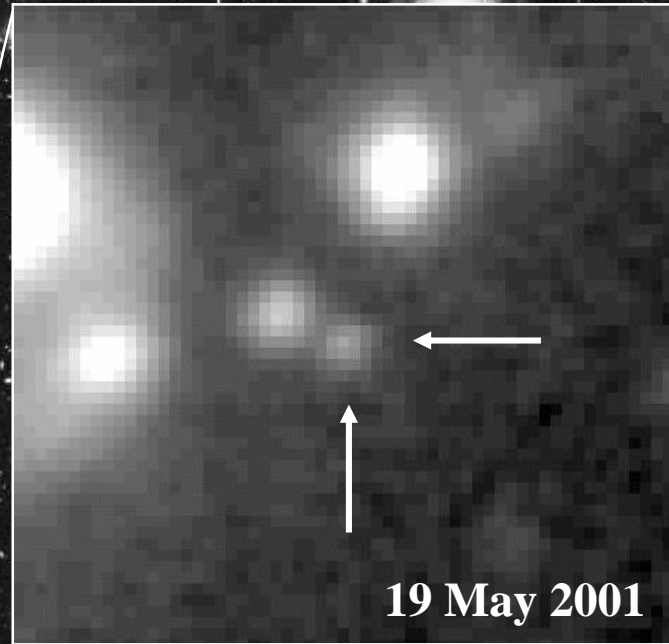
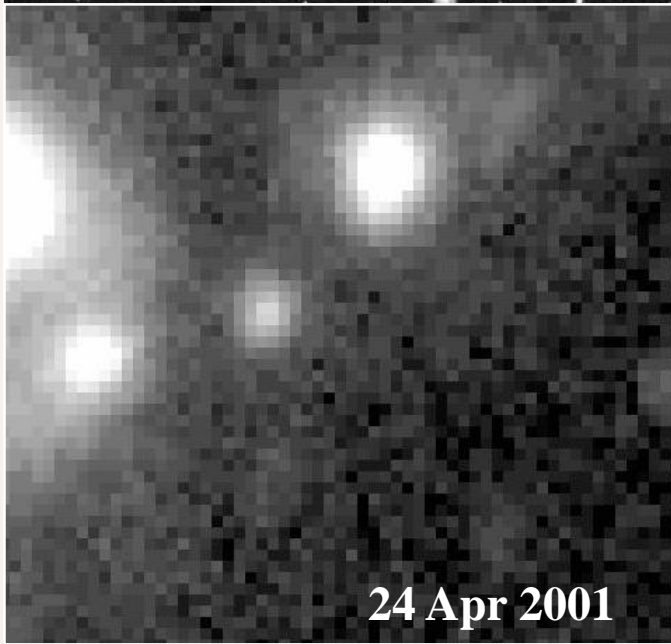


©朝日新聞社 2003年
〒104-8011 東京都
発行所 中央区築地5丁目3番2号
朝日新聞東京本社
電話 03-3545-0131



東大の土居 守助教授、安田直樹
助教授(当時)らのグループ
↓
パールムッターらの SCP Team

*Supernova at $z = 0.930$
Discovered by Suprime-Cam*



すばる望遠鏡

*S01A-079 M, Doi et al.
with Suprime-Cam / FOCAS team*

第3週の第4回はここまでです。

第3週：ダークマターとダークエネルギー

3.1 力学質量と光学質量

3.2 ミッシングマスからダークマターへ

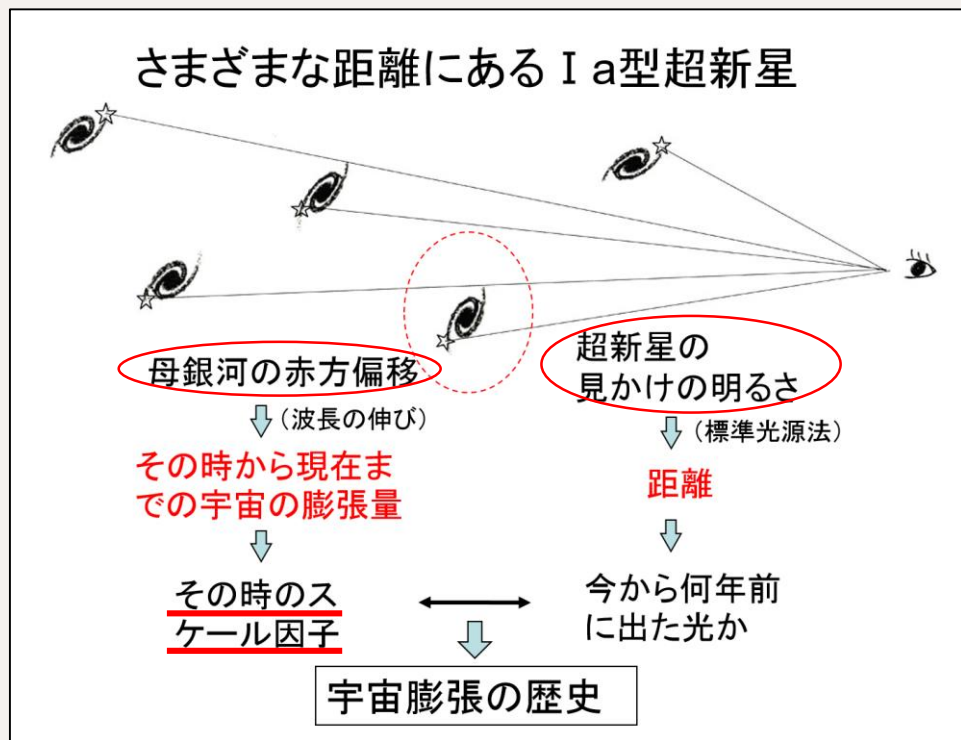
3.3 近年のダークマターの観測

3.4 ダークエネルギーの発端：I a型超新星

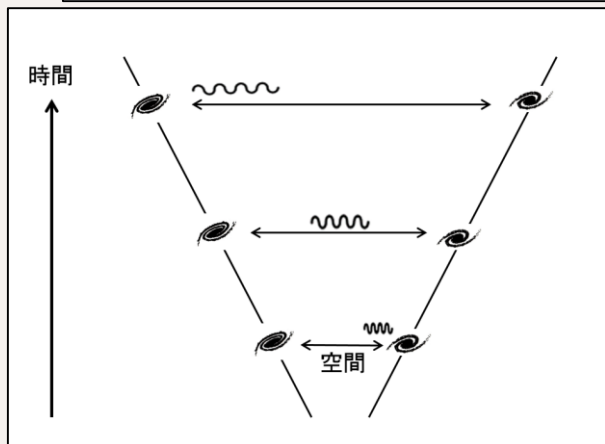
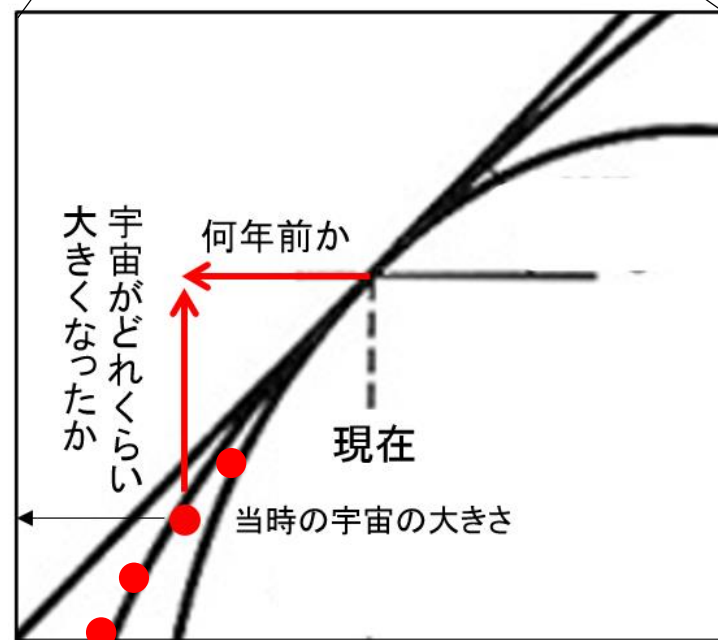
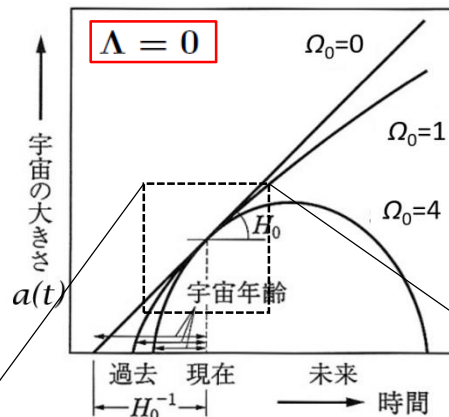
3.5 宇宙の加速膨張の発見

3.6 現代宇宙論のパラダイム

どのようにして宇宙膨張の歴史がわかるのか



フリードマン宇宙モデルによる宇宙膨張のようす



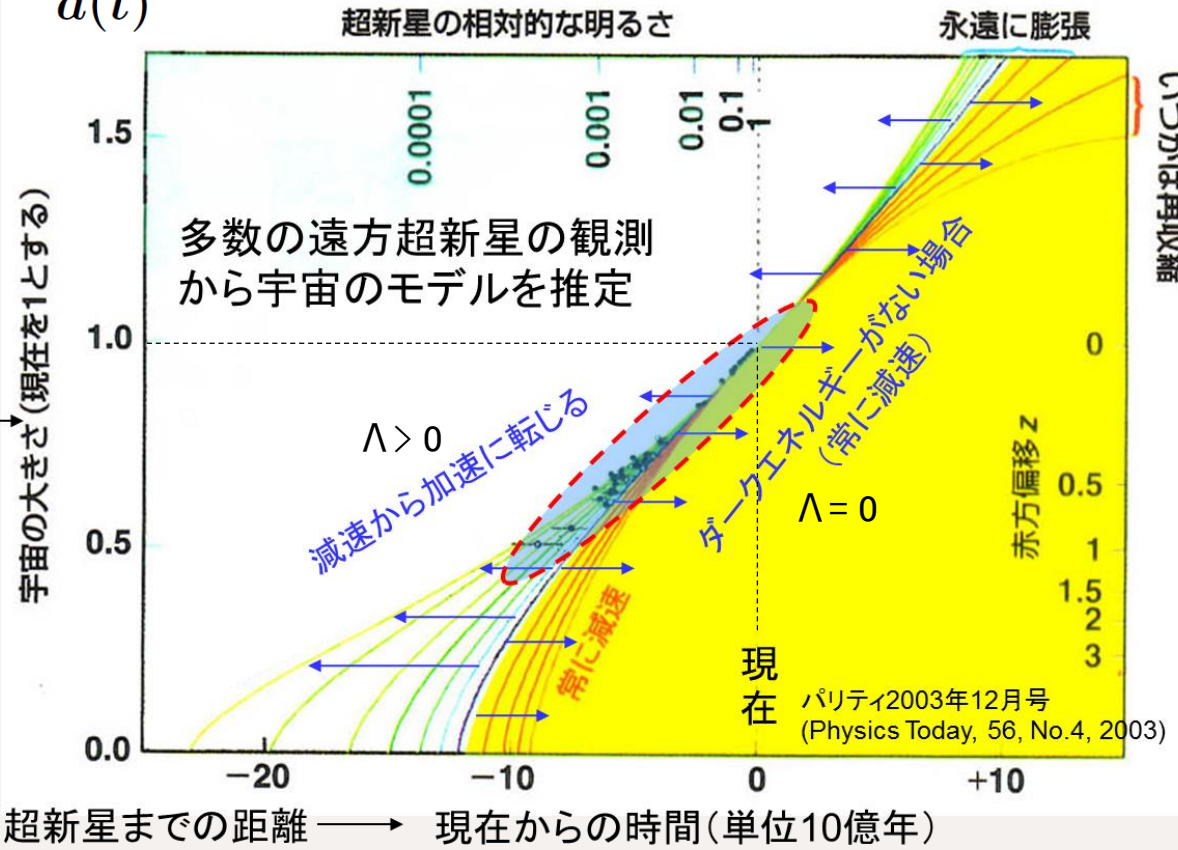
宇宙論的赤方偏移

↑
ドップラー効果
ではない

宇宙の加速膨張の発見

スケール因子 $a(t)$

母銀河の赤方偏移



多数の遠方超新星の観測から宇宙のモデルを推定

現在
パリティ2003年12月号
(Physics Today, 56, No.4, 2003)

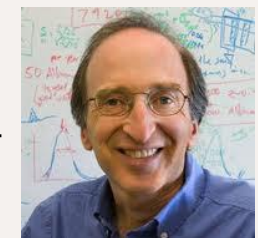
宇宙膨張は現在減速ではなく加速している

2011年度ノーベル物理学賞!!

その原因は不明(ダークエネルギーと「名付けられた」)

年齢はノーベル賞受賞時

52才



ソール・パールムッター (Saul Perlmutter)

44才

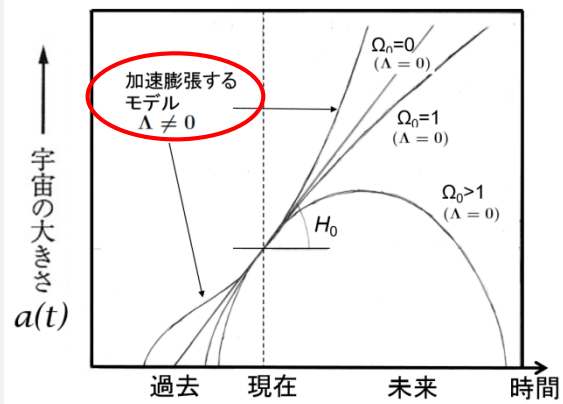


ブライアン・シュミット (Brian Schmidt)

41才



アダム・リース (Adam Riess)



ノーベル物理学賞受賞者・パールムッター博士、すばる望遠鏡を語る

http://subarutelescope.org/Topics/2011/12/29/j_index.html

2011年12月29日



2011年のノーベル物理学賞は、遠方超新星の観測により宇宙膨張の加速を明らかにしたとして、ソール・パールムッター博士 (米国・カリフォルニア大学バークレー校/ローレンスバークレー国立研究所)、ブライアン・シュミット博士 (オーストラリア国立大学)、アダム・リース博士 (米国・ジョンズホプキンス大学) の3氏に授与されました。

観測・理論・シミュレーション天文学の様々な分野で日本の研究者が活躍していますが、2011年のノーベル物理学賞の対象になった研究では、現在、日本の研究者たちが強力なメンバーとしてパールムッター博士のチームに参加しており、またその中ですばる望遠鏡が重要な役割を果たしています。

遠方超新星の観測を通じて宇宙観の広が

りを支えてきたすばる望遠鏡の成果や、またその中で育まれてきた人と人とのつながりについて、パールムッター博士にお話を伺いました。

写真:後列右から2人目が鈴木尚孝氏、はめ込み写真には土居守、安田直樹氏をはじめ日本人も多く見られる。

第3週の第5回はここまでです。

第3週：ダークマターとダークエネルギー

3.1 力学質量と光学質量

3.2 ミッシングマスからダークマターへ

3.3 近年のダークマターの観測

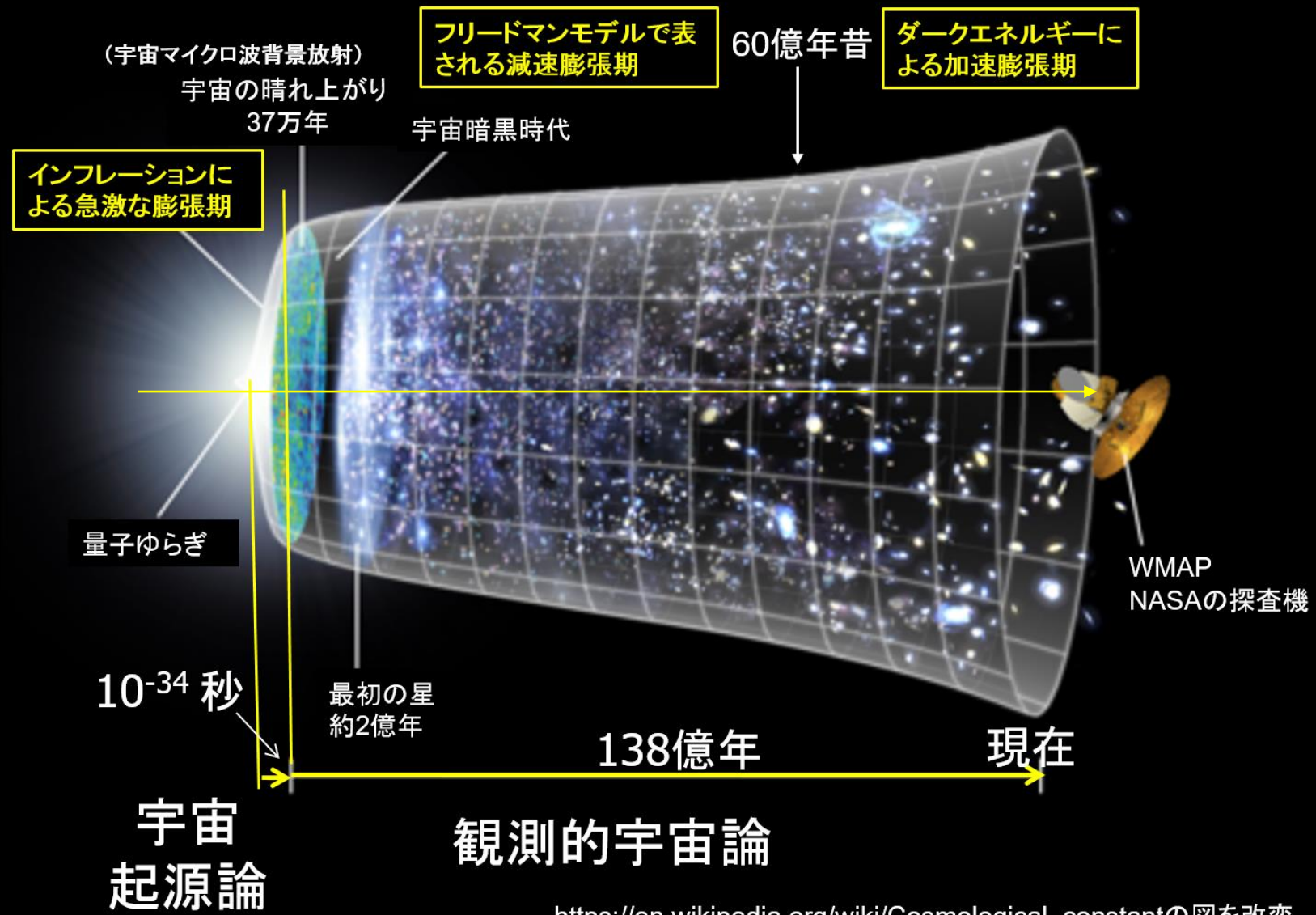
3.4 ダークエネルギーの発端：I a型超新星

3.5 宇宙の加速膨張の発見

3.6 現代宇宙論のパラダイム

↑
「その分野で規範となっている標準的な考え方」

宇宙進化のイメージ図

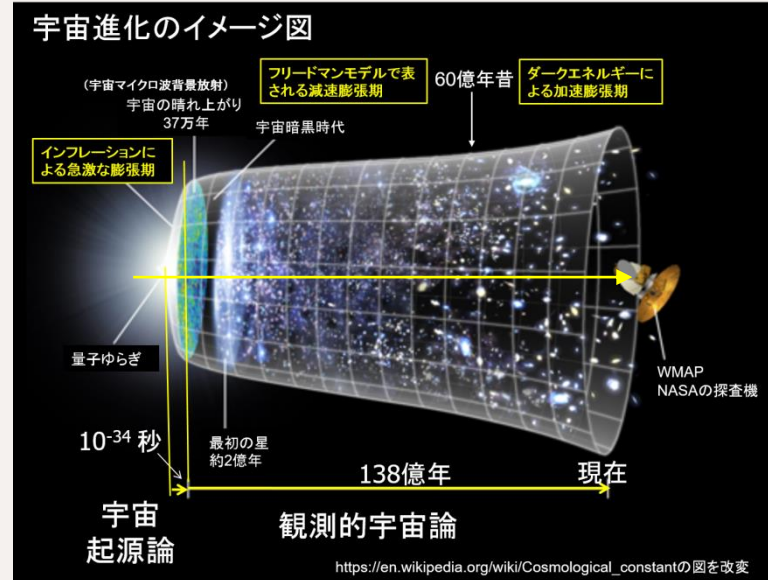


https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmological_constantの図を改変

- ・インフレーション
- ・冷たいダークマター (CDM)
- ・ダークエネルギー (Λ : 宇宙定数)
- ・ビッグバン宇宙論

Λ -CDMモデル

アインシュタインは「大失敗」していなかった



宇宙起源論

観測的宇宙論

量子論的ゆらぎによる「無」からの宇宙創生

↓ 真空のエネルギー ($P = -\rho$) に満ちた宇宙

インフレーションによる急激な膨張期

↓ 真空の相転移によるエネルギー (潜熱) の解放
量子ゆらぎを引き伸ばし、構造の種を形成

フリードマンモデルで表される減速膨張期

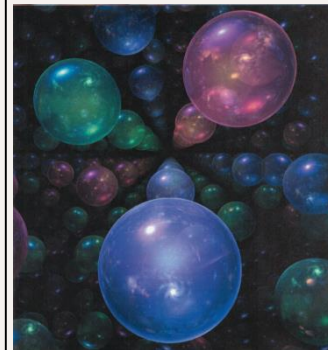
↓ 熱いビッグバン、軽元素の合成
宇宙の晴れ上がり
初代星の誕生、銀河の誕生
宇宙の再電離
宇宙大規模構造の形成

ダークマターが重要な役割を果たした

ダークエネルギーによる加速膨張期

la型超新星が示す加速膨張

インフレーション理論のもう一つの示唆



宇宙の多重発生
(並行宇宙:
parallel universe)

Universe



Multiverse

M. テグマーク著 「並行宇宙は実在する」参照
別冊日経サイエンス149 佐藤勝彦 編 (2005年)
「時空の起源に迫る宇宙論」

宇宙論パラメータ研究の最前線(精密宇宙論)

Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters, Planck Collaboration, Ade et al. **2016**, A&A., 594, 13 (arXiv:1502.01589)

2015年2月に公表された
Planckの最新結果

バリオン密度

$0.0222 h^2 \rightarrow 0.049$

ハッブル定数

67.3 km/s/Mpc, $h = 0.673$

ダークエネルギー密度

0.685

バリオン+ダークマター密度

0.315

ダークマター密度

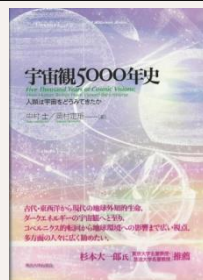
$0.315 - 0.049 = 0.266$

宇宙年齢

138億年

Parameter	TT+lowP 68 % limits	TT+lowP+lensing 68 % limits	TT+lowP+lensing+ext 68 % limits	TT,TE,EE+lowP 68 % limits	TT,TE,EE+lowP+lensing 68 % limits	TT,TE,EE+lowP+lensing+ext 68 % limits
$\Omega_b h^2$	0.02222 ± 0.00023	0.02226 ± 0.00023	0.02227 ± 0.00020	0.02225 ± 0.00016	0.02226 ± 0.00016	0.02230 ± 0.00014
$\Omega_c h^2$	0.1197 ± 0.0022	0.1186 ± 0.0020	0.1184 ± 0.0012	0.1198 ± 0.0015	0.1193 ± 0.0014	0.1188 ± 0.0010
$100\theta_{MC}$	1.04085 ± 0.00047	1.04103 ± 0.00046	1.04106 ± 0.00041	1.04077 ± 0.00032	1.04087 ± 0.00032	1.04093 ± 0.00030
τ	0.078 ± 0.019	0.066 ± 0.016	0.067 ± 0.013	0.079 ± 0.017	0.063 ± 0.014	0.066 ± 0.012
$\ln(10^{10} A_s)$	3.089 ± 0.036	3.062 ± 0.029	3.064 ± 0.024	3.094 ± 0.034	3.059 ± 0.025	3.064 ± 0.023
n_s	0.9655 ± 0.0062	0.9677 ± 0.0060	0.9681 ± 0.0044	0.9645 ± 0.0049	0.9653 ± 0.0048	0.9667 ± 0.0040
H_0	67.31 ± 0.96	67.81 ± 0.92	67.90 ± 0.55	67.27 ± 0.66	67.51 ± 0.64	67.74 ± 0.46
Ω_Λ	0.685 ± 0.013	0.692 ± 0.012	0.6935 ± 0.0072	0.6844 ± 0.0091	0.6879 ± 0.0087	0.6911 ± 0.0062
Ω_m	0.315 ± 0.013	0.308 ± 0.012	0.3065 ± 0.0072	0.3156 ± 0.0091	0.3121 ± 0.0087	0.3089 ± 0.0062
$\Omega_m h^2$	0.1426 ± 0.0020	0.1415 ± 0.0019	0.1413 ± 0.0011	0.1427 ± 0.0014	0.1422 ± 0.0013	0.14170 ± 0.00097
$\Omega_m h^3$	0.09597 ± 0.00045	0.09591 ± 0.00045	0.09593 ± 0.00045	0.09601 ± 0.00029	0.09596 ± 0.00030	0.09598 ± 0.00029
σ_8	0.829 ± 0.014	0.8149 ± 0.0093	0.8154 ± 0.0090	0.831 ± 0.013	0.8150 ± 0.0087	0.8159 ± 0.0086
$\sigma_8 \Omega_m^{0.5}$	0.466 ± 0.013	0.4521 ± 0.0088	0.4514 ± 0.0066	0.4668 ± 0.0098	0.4553 ± 0.0068	0.4535 ± 0.0059
$\sigma_8 \Omega_m^{0.25}$	0.621 ± 0.013	0.6069 ± 0.0076	0.6066 ± 0.0070	0.623 ± 0.011	0.6091 ± 0.0067	0.6083 ± 0.0066
z_{re}	$9.9^{+1.8}_{-1.6}$	$8.8^{+1.7}_{-1.4}$	$8.9^{+1.3}_{-1.2}$	$10.0^{+1.7}_{-1.5}$	$8.5^{+1.4}_{-1.2}$	$8.8^{+1.2}_{-1.1}$
$10^9 A_s$	$2.198^{+0.076}_{-0.085}$	2.139 ± 0.063	2.143 ± 0.051	2.207 ± 0.074	2.130 ± 0.053	2.142 ± 0.049
$10^9 A_s e^{-2\tau}$	1.880 ± 0.014	1.874 ± 0.013	1.873 ± 0.011	1.882 ± 0.012	1.878 ± 0.011	1.876 ± 0.011
Age/Gyr	13.813 ± 0.038	13.799 ± 0.038	13.796 ± 0.029	13.813 ± 0.026	13.807 ± 0.026	13.799 ± 0.021
z_*	1090.09 ± 0.42	1089.94 ± 0.42	1089.90 ± 0.30	1090.06 ± 0.30	1090.00 ± 0.29	1089.90 ± 0.23
r_*	144.61 ± 0.49	144.89 ± 0.44	144.93 ± 0.30	144.57 ± 0.32	144.71 ± 0.31	144.81 ± 0.24
$100\theta_*$	1.04105 ± 0.00046	1.04122 ± 0.00045	1.04126 ± 0.00041	1.04096 ± 0.00032	1.04106 ± 0.00031	1.04112 ± 0.00029
z_{drag}	1059.57 ± 0.46	1059.57 ± 0.47	1059.60 ± 0.44	1059.65 ± 0.31	1059.62 ± 0.31	1059.68 ± 0.29
r_{drag}	147.33 ± 0.49	147.60 ± 0.43	147.63 ± 0.32	147.27 ± 0.31	147.41 ± 0.30	147.50 ± 0.24
k_D	0.14050 ± 0.00052	0.14024 ± 0.00047	0.14022 ± 0.00042	0.14059 ± 0.00032	0.14044 ± 0.00032	0.14038 ± 0.00029
z_{eq}	3393 ± 49	3365 ± 44	3361 ± 27	3395 ± 33	3382 ± 32	3371 ± 23
k_{eq}	0.01035 ± 0.00015	0.01027 ± 0.00014	0.010258 ± 0.000083	0.01036 ± 0.00010	0.010322 ± 0.000096	0.010288 ± 0.000071
$100\theta_{s,eq}$	0.4502 ± 0.0047	0.4529 ± 0.0044	0.4533 ± 0.0026	0.4499 ± 0.0032	0.4512 ± 0.0031	0.4523 ± 0.0023
f_{2000}^{143}	29.9 ± 2.9	30.4 ± 2.9	30.3 ± 2.8	29.5 ± 2.7	30.2 ± 2.7	30.0 ± 2.7
$f_{2000}^{143 \times 217}$	32.4 ± 2.1	32.8 ± 2.1	32.7 ± 2.0	32.2 ± 1.9	32.8 ± 1.9	32.6 ± 1.9
f_{2000}^{217}	106.0 ± 2.0	106.3 ± 2.0	106.2 ± 2.0	105.8 ± 1.9	106.2 ± 1.9	106.1 ± 1.8

宇宙の標準モデル(Λ -CDMモデル)の主なパラメータ



(理科年表2014 天文部トピックス参照)

(2011年12月)

(2015年2月)

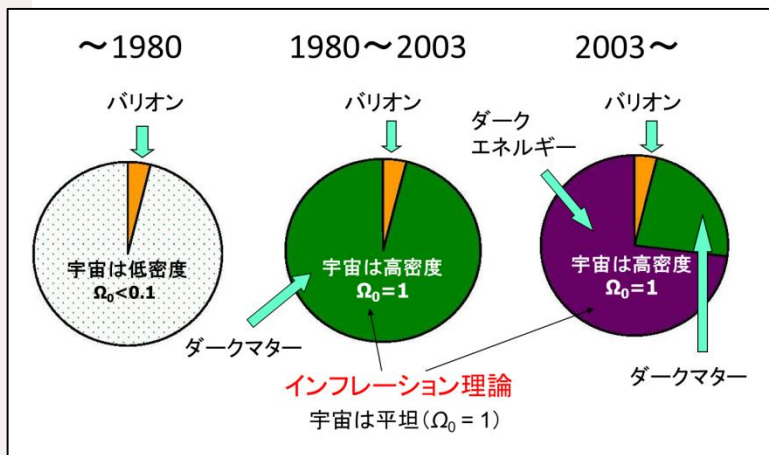
中村・岡村著「宇宙観5000年史」
(東大出版会)出版時

(2017年時点でも基本的には同じ)

宇宙年齢 (t_0)	137.6 \pm 1.1 億年
ハッブル定数 (H_0)	70.2 \pm 1.4 km/s/Mpc
物質 (バリオン) 密度* (Ω_m)	0.0458 \pm 0.0016 (4.6%)
ダークマター密度* (Ω_{DM})	0.229 \pm 0.015 (22.9%)
ダークエネルギー密度 (Ω_Λ)	0.725 \pm 0.016 (72.5%)
晴れ上がり時期 (t_{rec})	37.7 \pm 0.3 万年 ($z = 1091$)

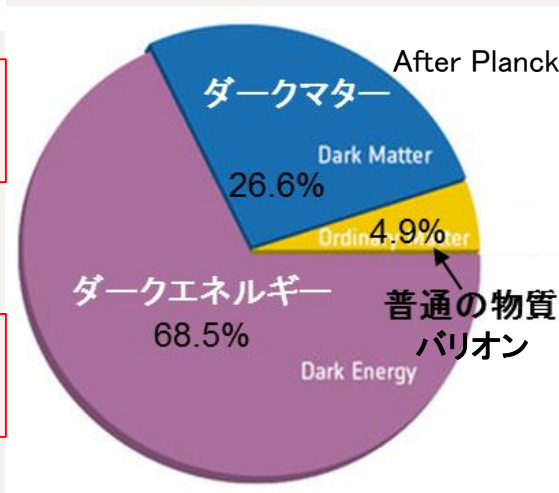
138.13 \pm 0.38
67.3 \pm 0.96
0.049 (4.9%)
0.266 (26.6%)
0.685 (68.5%)
($z = 1090.09$)

* エネルギー換算密度 ($\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_{DM} + \Omega_\Lambda = 1$).



宇宙年齢
138 億年

ハッブル定数
67 km/s/Mpc



Cosmic Pieの変遷

第3週はこれで終了です。

ここまでで観測的宇宙論の全体をまとめました。