

宇宙物理学

羽部 朝男

(北海道大学理学研究院物理部門)

宇宙物理学専攻宇宙物理学研究室

2016.04.25

予定を変更して重力波

去年、重力波を検出したので

- 重力波とは？
- 今回の発見
- ブラックホールの合体ってどうしてわかるの？
- 10億年前に起きたこと？

レポートのテーマ

- 宇宙論におけるダークマターの役割についてレポートにまとめなさい。
- ハッブルの関係 $v=Hd$ から、宇宙年齢（ハッブル時間 $t=d/v=1/H$ ）を推定しなさい。ここで $H=70\text{km/s}/330\text{万光年}$ とする

「A4で1ページのレポート」の提出
締め切りは、次週月曜日の16:00
提出先はELMS

重力波とは？

- 電波は、電場と磁場の振動が空間を伝わる
- 空間は電波を伝える性質を持つ
- 重力は、時間と空間を歪める
- その歪みが振動して、波として伝わるのが重力波

1. 相対論と宇宙論 3

- 相対論は光速で物体が運動する時に適用される物理学である
- 宇宙論は、宇宙の生成や進化を研究する
- なぜこの二つが関係するのかをまず説明

重力が時間と空間を歪める？

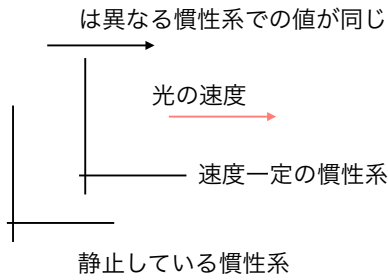
- 一般相対論とはどういうものか

相対論

- 光の速度が慣性系の速度によらない (マイケルソンモーレイの実験)
- 電磁気 (マックスウェル方程式) はローレンツ変換にしたがう
- 時間と空間もローレンツ変換に従い, 力学も変更される (特殊相対論: アインシュタイン)

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$



光が時間 dt の間に dx 進むとき

$dx^2 = c^2 dt^2$ 同じ光を違う系から見ると dx は違うはずだから dt も違う

相対論の時間と空間

- 3次元空間 (たて、よこ、高さ) x, y, z
- 時間軸を加えて4次元
- 異なる一定速度で動くふたつの系の間で時間の進み方が異なる (動く時計はゆっくり)

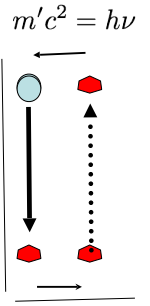


一般相対論

- 重力も相対論で扱おう
- 光は重力の影響をうけるはず
- 水星の近日点移動や日食の実験
- 重力の効果を時空のゆがみに

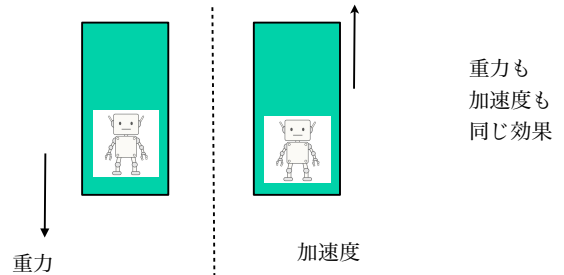
$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$

$$ds^2 = g_{\alpha\beta}(x)dx^\alpha dx^\beta \quad mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 = h\nu$$



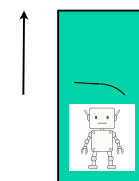
すこし一般相対論のお話

- 重力とエレベーター



すこし一般相対論のお話 (2)

- 重力で光が曲がる



加速度

重力で空間が歪む

重力で時間の進み方も影響をうける

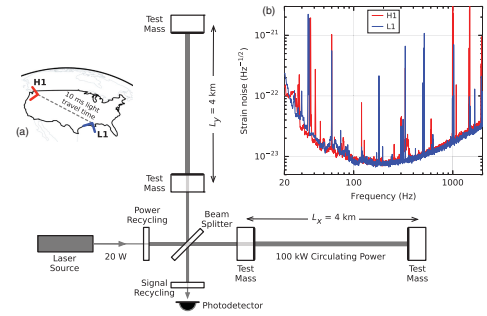
一般相対論によるGPSの誤差の補正

アインシュタイン方程式

$$G^{\alpha\beta} + \Lambda g^{\alpha\beta} = \kappa T^{\alpha\beta}$$

- 左辺は時空の性質，右辺は物質やエネルギーの分布
- 宇宙はなぜ一般相対論の対象なのか

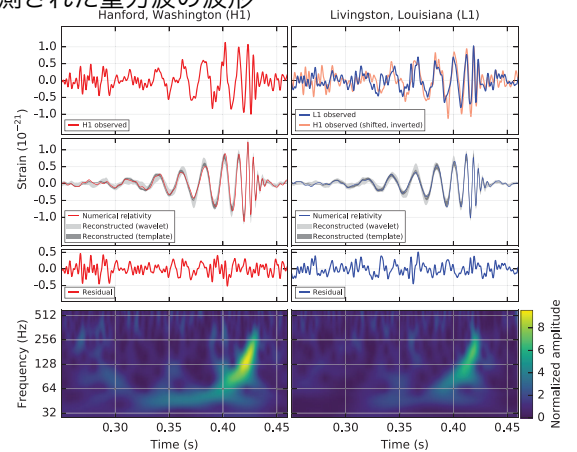
LIGO



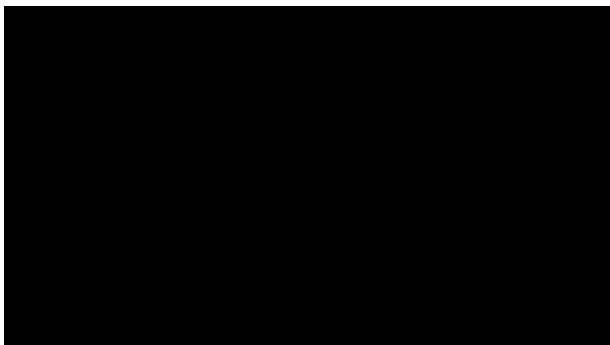
重力波の観測

- 2015年9月14日に観測
- 2台のLIGO ルイジアナ州とワシントン州
- 二つのブラックホールの合体
- 12億年前に放射された

観測された重力波の波形



重力波の放射と検出



LIGO

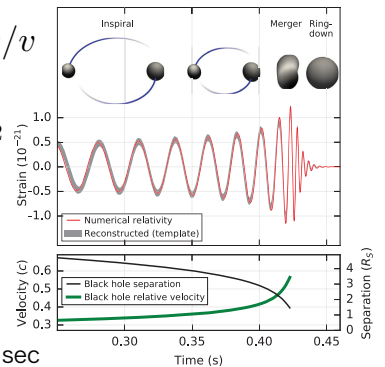
ブラックホールの合体

周期: $\tau = 2\pi r/v$

$r \sim 3r_g$

$r_g \sim 2GM/c^2$

$v \sim c$



115M_sun for $\tau=0.01$ sec

重力波の伝搬

重力波の振幅

$$\delta g_{\mu\nu} \sim r_g/3r$$

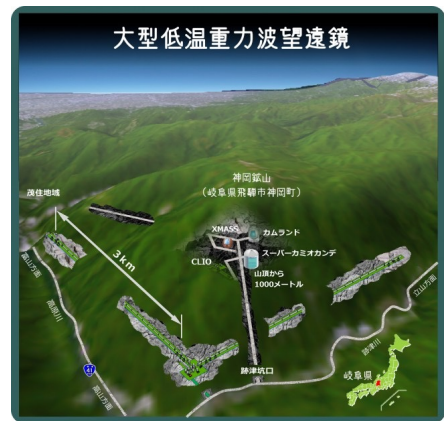
$$r_g \sim 300\text{km} \sim 3 \times 10^7\text{cm}$$

ブラックホールの質量 $M = 100M_\odot$

$$\delta g_{\mu\nu} \sim 10^{-21}$$

$$r \sim 0.3 \times 10^{21} r_g \sim 10^{28}\text{cm} \sim 3 \times 10^9 \text{ 光年}$$

KAGRA



日本

観測結果

TABLE I. Source parameters for GW150914. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of different waveform models. Masses are given in the source frame; to convert to the detector frame multiply by $(1+z)$ [90]. The source redshift assumes standard cosmology [91].

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_\odot$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_\odot$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_\odot$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

23

- この講義では、最近の研究で明らかにされた宇宙の様子を紹介しながら、現在の宇宙が形成される過程が現代物理学によって、どのように理解されているのかを紹介します。

次世代ネットワーク



1. 相対論と宇宙論

24

- 相対論は光速で物体が運動する時に適用される物理学である
- 宇宙論は、宇宙の生成や進化を研究する
- なぜこの二つが関係するのかをまず説明

相対論

25

- 光の速度が慣性系の速度によらない (マイケルソンモーレイの実験)
- 電磁気 (マックスウェル方程式) はローレンツ変換にしたがう
- 時間と空間もローレンツ変換に従い, 力学も変更される (特殊相対論: アインシュタイン)

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$

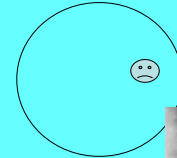
宇宙はなぜ一般相対論の対象なのか²⁸

- 宇宙はどこまで広がっているのか? -

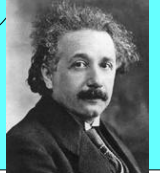
- ニュートンが考えたこと



宇宙は一樣でどこまでも広がってる



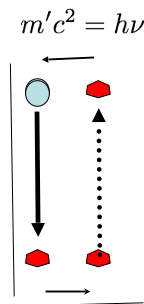
- アインシュタインが考えたこと
宇宙は一般相対論で考えるべき



一般相対論

26

- 重力も相対論で扱おう
- 光は重力の影響をうけるはず
- 水星の近日点移動や日食の実験
- 重力の効果を時空のゆがみに



$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$

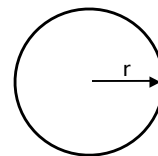
$$ds^2 = g_{\alpha\beta}(x) dx^\alpha dx^\beta \quad mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 = h\nu$$

一般相対論と宇宙

29

宇宙全体は一般相対論の対象となる理由

一樣な宇宙の中で半径 r の球を考える



カッコ内は質量

$$a = \frac{G \left(\frac{4\pi\rho r^3}{3} \right)}{r^2}$$

一樣な密度の球の重力加速度は半径に比例、半径を大きくすると重力加速度は大きくなる
無限に大きい半径では無限大に?

27

アインシュタイン方程式

$$G^{\alpha\beta} + \Lambda g^{\alpha\beta} = \kappa T^{\alpha\beta}$$

- 左辺は時空の性質, 右辺は物質やエネルギーの分布
- 宇宙はなぜ一般相対論の対象なのか

一般相対論的宇宙モデル 30

Einstein方程式を一樣等方宇宙に適用すると

Friedman方程式が得られる

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 - \frac{8\pi G\rho}{3} = -\frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$



$$\frac{1}{2}\dot{a}^2 - \frac{4\pi G\rho a^3}{3a} = -\frac{1}{2}kc^2 + \frac{\Lambda c^2 a^2}{6}$$

a: 宇宙のスケールファクター, Λ : 宇宙項 (ダークエネルギー)

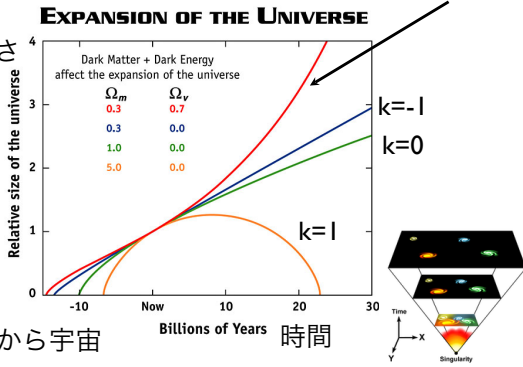
ρ : 宇宙の平均密度, k: 宇宙の曲率を表す定数

2番目の式は地上で物体を投げ上げたときの方程式に対応

膨張宇宙の解

加速膨張の解

宇宙の大きさ



現在の膨張から宇宙の過去を予想できる

31

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE

34



Edwin Hubble

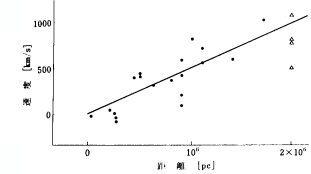
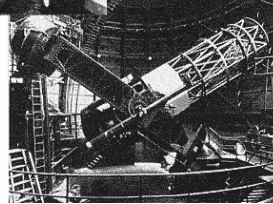


図 10 ハッブルの得た天体の距離・速度の関係 [Hubble, E.: The realm of the nebulae, Dover, p114, 1930]



最近の測定値
330万光年の銀河は
70km毎秒の速度

$v=Hd$
Mt. Wilson
100 Inch
Telescope

32

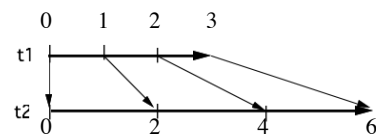
2. 一般相対論的宇宙論の予想と観測

- 宇宙は一様で等方的に膨張あるいは収縮する (ハッブルの観測がこれを裏付け)
- 宇宙の膨張のしかたは、宇宙の物質の量で決まる
- 宇宙が現在膨張しているの、初期の宇宙は高温で高密度だったと考えられる

35

一様膨張とハッブルの法則

一様なゴムを伸す



各点の速度は互いの距離に比例する

→ **ハッブルの法則**

33

宇宙は膨張している

- 銀河の速度を測定すると、銀河の距離に比例して大きくなっていることがわかった (ハッブル 1929)
- 銀河の速度と距離の比例関係は、宇宙は膨張していることを示している
- 遠くの銀河の速度を測定して、距離や何年前の光を推定する

36

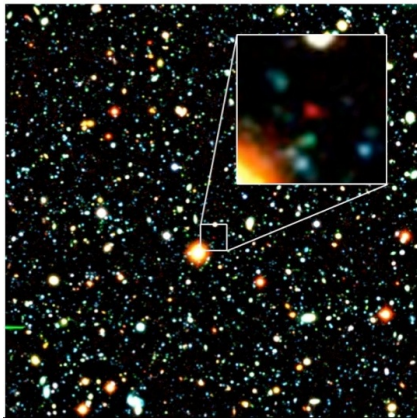
すばる望遠鏡が 遠くの宇宙を明らかにする

- すばる望遠鏡は口径8mの世界最大級の可視光の反射望遠鏡

- 口径8m
- 集光力
月の上の豆電球
- 分解能 0.1秒角



約1000km先の東京タワーのてっぺんに置いた本がわかる



Iye, Ota, Kashikawa+2006
 $z=6.964$ (宇宙年齢7.5億年)

現在確認されている
 最遠方の天体

0.97 μm の輝線で検出

130億光年かなた

宇宙の膨張のはじめは? 40

(ガモフ の考え1948)

宇宙の初めは非常に高温高密度であったので太陽の中心のように核融合反応が起きた (ビッグバン宇宙)

ヒントは、宇宙膨張と現在の宇宙の元素の比率

水素ヘリウムは多く、重元素は少ない

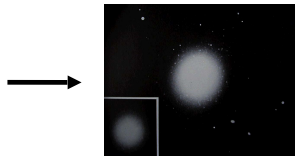
核融合反応で水素からヘリウムが生成

水素ヘリウムの元素の現在の比率から宇宙を満たす光の温度を予言 (宇宙背景放射の予言)

- ガモフはその温度は現在絶対温度 1.0 K を予想

銀河とは？

- 円盤銀河 円盤は多数の星 (10億から1000億個) とガス、円盤は全体として回転、星形成が活発
- 楕円銀河 楕円状に星が分布、星形成は起きていない

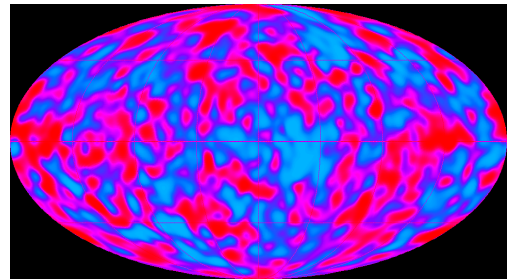


宇宙背景放射の発見 (1965) 41

その後、COBE衛星 (1990) による観測で

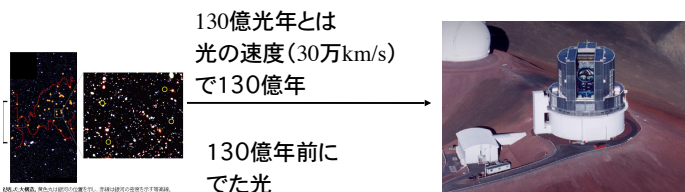
宇宙背景放射の絶対温度で2.7K

図の色の濃淡は2.7Kからのずれ (十万分の数度) を表している。



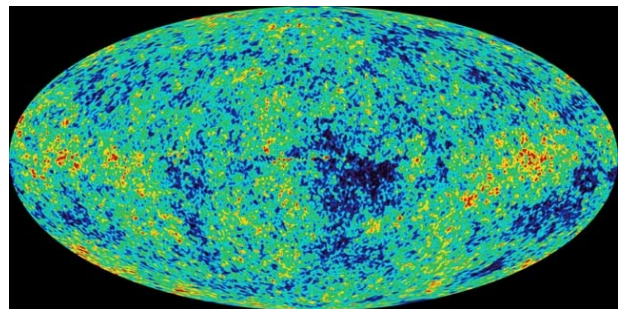
COBE衛星 (1990) による温度揺らぎの発見

- 遠方の宇宙を見ることは、過去の宇宙を見ること



WMAP衛星による宇宙背景放射の観測 (2003) 42

COBE衛星より詳細な観測



図の色は宇宙背景放射の温度の揺らぎを示している

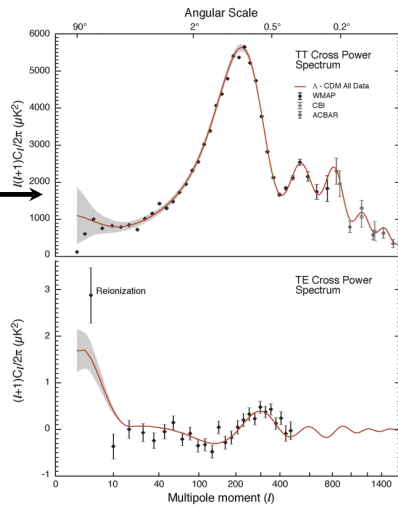
宇宙背景放射の温度揺らぎの様子

温度揺らぎの角度相関

一番左のピークは宇宙の晴れ上がりの時の宇宙の地平線サイズ

偏光の角度相関

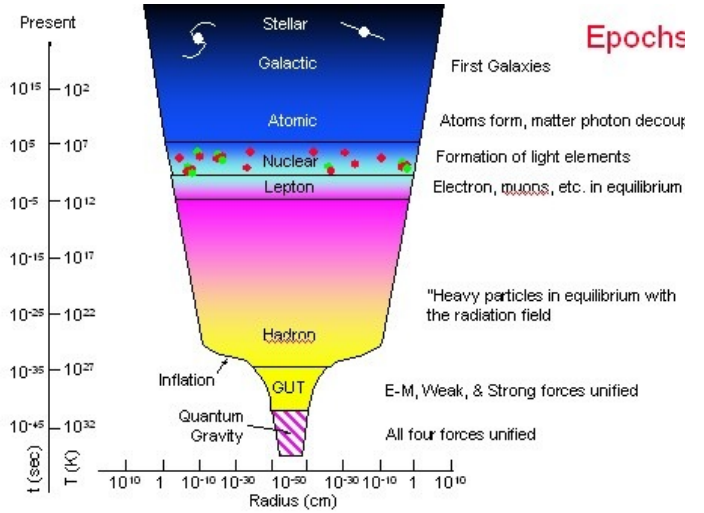
宇宙の再電離の情報



WMAP衛星の観測結果が 44

示す宇宙モデル

- 宇宙は平坦である
- 宇宙年齢は 13.8 億年
- 宇宙の物質の大半は dark matter
- 宇宙の晴れ上がりの時期の宇宙の地平線(角度で1度)を越えて温度揺らぎの性質が変わらないことから、インフレーション膨張を支持する



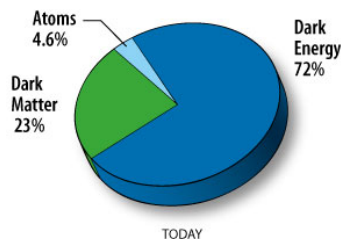
2011年

ノーベル物理学賞、宇宙膨張加速発見の3氏に

 <p>ソール・パールマター氏</p>	<p>スウェーデンの王立科学アカデミーは4日、今年のノーベル物理学賞を米ロレンス・バークリー国立研究所のソール・パールマター博士、オーストラリア国立大のブライアン・シュミット博士、米ジョンズホプキンス大のアドム・リース博士の3氏に贈ると発表した。授賞理由は「遠距離の超新星観測を通じた宇宙の膨張加速の発見」。</p>
 <p>ブライアン・シュミット氏 (The Australian National UniversityのHPから)</p>	<p>この研究では、「1a型」と呼ばれる超新星に注目した。1a型超新星は、銀河に相当するほどの光を放し、その明るさは宇宙のどこにあってもほぼ同じなので、その超新星のある銀河までの距離がわかるほか、超新星の色からどれだけの速さで遠ざかっているのかもわかる。</p>
 <p>アドム・リース氏 (ジョンズ・ホプキンス大HPから)</p>	<p>パールマター氏は1988年、1a型超新星を目安にして宇宙の膨張を調るため、「超新星宇宙論計画」を始めた。どの銀河でも100万年に数回しか発生しない超新星だが、電荷結合素子(CCD)を備えた4メートル級望遠鏡で数千の銀河を監視し、出現するたびに世界各地の観測施設に連絡する、といった手法で探していった。</p> <p>数十億光年かたにある50個以上の1a型超新星の地球からの距離と、遠ざかる速度を正確に求め、宇宙の膨張速度が速まっていることを見つけた。従来は膨張速度が減速していると考えられていた。</p> <p style="text-align: right;">→ 続きは朝日新聞デジタルでご覧いただけます</p> <p>関連記事</p> <ul style="list-style-type: none"> • 故スタインマン教授の受賞取り消さず ノーベル財団 (10/4) • ノーベル医学生理学賞に米のボイトラー氏ら3氏 (10/3) • ノーベル賞受賞スタインマン氏死亡していた 発表数日前 (10/3) <p style="text-align: right;">asahi.comより</p>

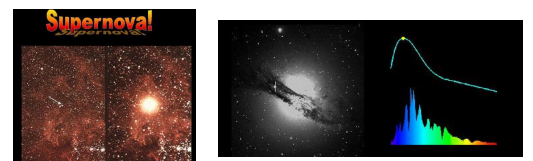
WMAP衛星の観測結果が 45

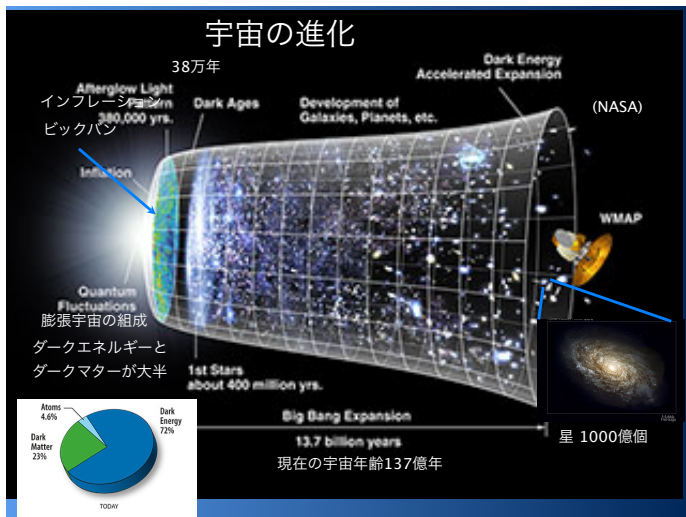
示す宇宙の物質の割合



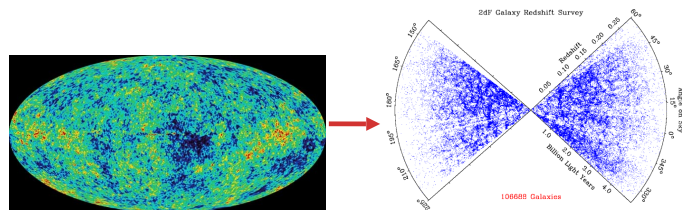
宇宙は加速膨張している 48

- 超新星 (1a型) 明るさの時間変化から最大値
- 遠くの超新星の明るさと宇宙膨張速度との比較 → 加速膨張
- 宇宙の物質の重力は引力 → 膨張が減速するはず 加速膨張は大変不思議
- 加速膨張させる原因をダークエネルギーと呼んでいる





宇宙は一様な初期宇宙から現在の宇宙へどのように進化?



宇宙背景放射
(宇宙年齢が38万年ころ)

現在の宇宙

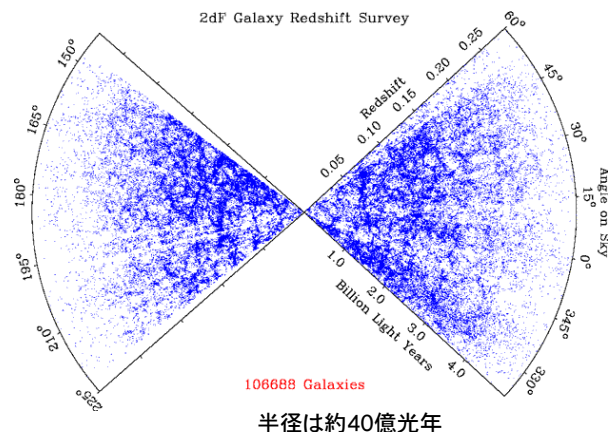
3. 構造のない初期の宇宙から構造を持つ現在の宇宙へ

- 宇宙背景放射は初期の宇宙が一様であったことを示している
- 現在の宇宙は、銀河の分布を調べると構造(階層構造)が見える
- こうした構造ができる過程で銀河が形成されたはず
- この構造形成の過程は?

4. 宇宙における構造形成の鍵を握るダークマター

- 宇宙の質量の大半をダークマターが占めている (WMAP衛星の観測も検証)
- ダークマターは光と相互作用しないので、ほぼ一様な背景放射と矛盾せずに、構造形成に必要な大きさの密度揺らぎを持てる。
- ダークマターの重力によって物質が引き寄せられて宇宙の構造が形成され、天の川銀河などが形成された

銀河分布の大規模構造 51



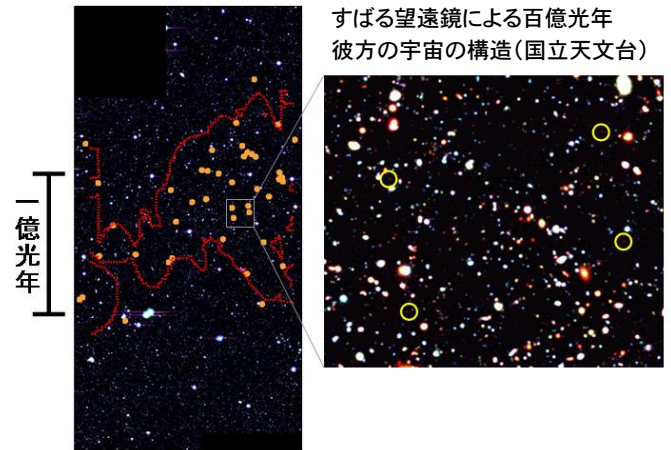
銀河団の重力レンズ (ハッブル望遠鏡)

- 銀河団の重力レンズ効果は、銀河の質量の総和の10倍の質量の存在を示している



ニュートリノを用いた天文学 55
小柴昌俊さんのノーベル賞

- ニュートリノとは、質量がほぼゼロの素粒子の一種で物質や光とほとんど相互作用しない
- 恒星の中心の核融合反応で大量に発生する
- 超新星爆発の際の反応で膨大な量が発生する
- これらを観測することで、恒星の中心や超新星爆発の際の物理的過程を調べる新しい天文学を小柴さんは作り上げた
- 太陽のニュートリノを観測して、質量を持つニュートリノの存在を示し、ダークマターの候補になりうることを示した
- しかし、ニュートリノではダークマターをうまく説明できない
- しかし



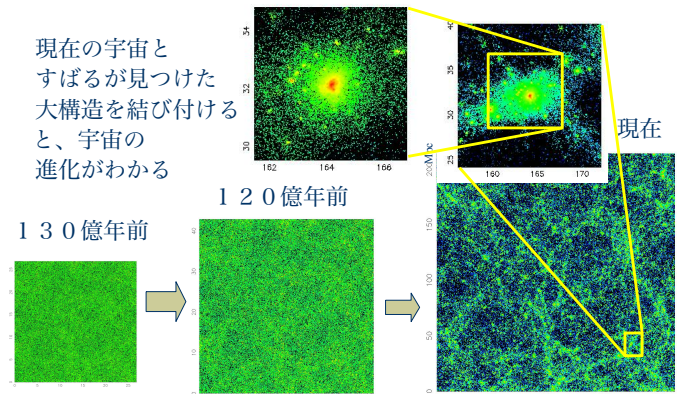
左図:発見した大構造。黄色丸は銀河の位置を示し、赤線は銀河の密度を示す等高線。



小柴昌俊さん

56

すばる望遠鏡が見つけた大構造から、宇宙について何が分かるのかを調べるための理論計算 59
北大グループ



5. 宇宙における構造形成を研究する良い対象である銀河団、そして原始銀河団

- 宇宙の構造は小さなものが先に形成され、大きなものはあとから形成される(クラスタリング仮説)
- 銀河団は宇宙最大の力学平衡系なのでもっとも最近形成されたはず
- 銀河団なら、形成過程の原始銀河団が観測可能では

60

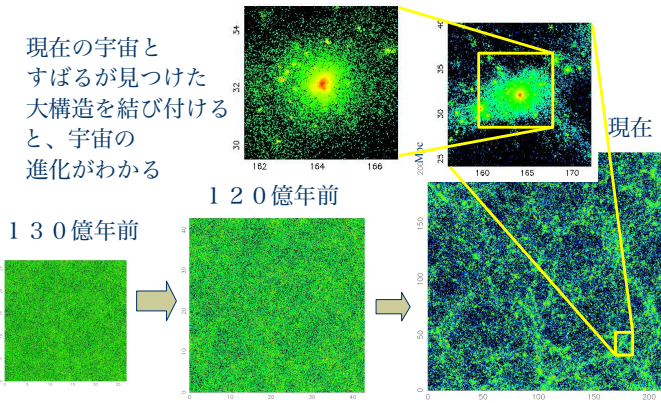
理論計算で用いた宇宙モデル

- WMAP衛星が求めた宇宙モデル
 - ダークエネルギーが支配する宇宙
 - ダークマターが普通の物質の10倍
 - 宇宙の年齢は137億年
 - 宇宙のはじめの温度の揺らぎ
- 計算領域
 - 7億5千万光年
 - ダークマター分布を1600万体の粒子で表す

すばる望遠鏡が見つけた大構造から、宇宙について
何が分かるのかを調べるための理論計算 ⁶¹

6. まとめと今後の展望 ⁶⁴

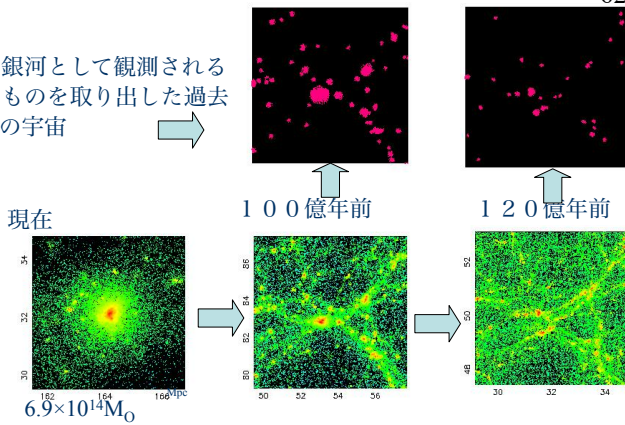
現在の宇宙と
すばるが見つけた
大構造を結び付けると、
宇宙の
進化がわかる



- 宇宙の始まりは一様な光と物質の世界
 - インフレーションによる物質と光の創出、密度揺らぎの生成
- 宇宙の膨張とともに密度揺らぎが重力によって成長
- 遠くの宇宙では、出来つつ有る銀河や銀河団が観測され、進化している様が見えつつある。
- ダークマターが物質の質量の90%を占める宇宙で理論的に予想されるものとの一致も良さそう
- 今後の課題
 - 宇宙で最初にできた天体とは何で、どのように形成されたのか
 - その後、宇宙の構造形成は、具体的にどう進んだのか
 - 世界的に大規模観測装置でより遠方の宇宙の観測

現在の銀河団の過去の姿を調べてすばるの観測と比較すると? ⁶²

銀河として観測される
ものを取り出した過去の
宇宙



レポートのテーマ

- 宇宙論におけるダークマターの役割についてまとめなさい。
- ハッブルの関係 $v=Hd$ から、宇宙年齢 (ハッブル時間 $t=d/v=1/H$) を推定しなさい。ここで $H=70\text{km/s}/330\text{万光年}$

「A4で1ページのレポート」の提出
締め切りは、次週月曜日の16:00
提出先はELMS

