



プランク衛星が観測したCMBの温度揺らぎ credit: ESA and the Planck Collaboration https://www.cosmos.esa.int/web/planck/picture-gallery

東京大学理学系研究科 鈴木昭宏



講義のアウトライン

- ・ 第 1 回: 天文学への導入と様々な時間・空間スケールの天体
- 第2回: 電磁波による宇宙の観測
- 第3回: 太陽系内天体と天体の運動
- ・ 第4回: 天体の距離、明るさ、色
- 第5回:恒星1-恒星のエネルギー源と核反応-





2

講義のアウトライン

- 第6回: 恒星2 恒星の分類と進化-
- 第7回: 星の誕生と星間物質
- 第8回:銀河1-銀河系の構成要素-
- 第9回:銀河2-銀河の分類と進化-
- 第10回: 超新星爆発と元素の起源

講義のアウトライン

- 第11回: 白色矮星、中性子星、ブラックホール
- 第12回: ニュートリノ天文学と高エネルギー天体
- 第13回: 重力波天文学と中性子星・ブラックホール
- ・ 第14回: 宇宙膨張の発見と宇宙の歴史
- 第15回: 系外惑星の世界



第14回: 宇宙膨張の発見と 宇宙の歴史

- ・ハッブル=ルメートルの法則と宇宙膨張の発見
- 宇宙マイクロ波背景放射と宇宙の構造形成
- ・宇宙の加速膨張と暗黒エネルギー
- 宇宙の始まりと進化

遠くの天体を観測する

- ・光の速さは有限(c=3x10⁸m/s):太陽から の光が地球に届くには8分程度かかる
- ・我々が見ているのは8分前の太陽の姿
- ・アンドロメダ銀河(距離2.5x10⁶光年)から 届く光は250万年かけて地球に到達
- もっと遠くの銀河はもっと古い姿を観て いる(遠くを観ることは過去を観ること)





- ・様々な系外銀河の観測:ドップラー法によ る銀河系に対する速度の計測(1929年)
- ・ある法則に気が付く
- ・遠くにある銀河ほど速い速度で銀河系か ら遠ざかっているように見える?
- .比例関係: $v = H_0 d$ (v: 後退速度, d: 距離)
- . H_0 : ハッブル定数(Hubble constant)







- ・遠くにある銀河ほどスペクトルが赤方 偏移して見える
- ・(運動学的)ドップラー効果だと解釈す ると、遠くにある銀河ほど速い速度で 銀河系から後退している

$$\lambda_{\rm obs} = \left(1 + \frac{v_{\rm los}}{c}\right)\lambda = \lambda + \frac{v_{\rm los}}{c}\lambda$$

・後で解説する宇宙論的ドップラー効果 と異なることに注意



観測者に対して 静止した放射源 観測者から 遠ざかる放射源



- ・様々な系外銀河の観測:ドップラー法によ る銀河系に対する速度の計測(1929年)
- ・ある法則に気が付く
- ・遠くにある銀河ほど速い速度で銀河系か ら遠ざかっているように見える?
- .比例関係: $v = H_0 d$ (v: 後退速度, d: 距離)
- . H_0 : ハッブル定数(Hubble constant)







- ・様々な系外銀河の観測:ドップラー法によ る銀河系に対する速度の計測(1929年)
- ・ある法則に気が付く
- ・遠くにある銀河ほど速い速度で銀河系か ら遠ざかっているように見える?
- .比例関係: $v = H_0 d$ (v: 後退速度, d: 距離)
- . H_0 : ハッブル定数(Hubble constant)



ハッブル宇宙望遠鏡による観測で得たハッブル=ルメートルの法則 credit: Freedman et. al. (2001) ApJ, 553, 47 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...553...47F

10



- ・銀河系が宇宙の特別な位置にいるとは考え
 にくい
- 「全ての銀河が(平均的には)お互いから遠ざ
 かっている」と考えるのがもっともらしい
- . $v_A = H_0 d_A$ かつ $v_B = H_0 d_B$ なら、

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{B}} - \boldsymbol{v}_{\mathrm{A}} = H_0(\boldsymbol{d}_{\mathrm{A}} - \boldsymbol{d}_{\mathrm{B}})$$

・銀河A,Bにも法則が成り立つ



ー様等方宇宙とその膨張

- ・宇宙に特別な位置はなく(一様)、どちらの方 向を見ても同じように(等方)、相対距離が広 がっている(膨張)=現在の標準的な宇宙モデ ル
- ・実は、一般相対性理論のアインシュタイン 方程式を、一様かつ等方の仮定の下で解く ことで膨張宇宙の解が得られる(フリードマ ン解,1922年)



過去の宇宙





ー様等方宇宙とその膨張

- ・宇宙に特別な位置はなく(一様)、どちらの方 向を見ても同じように(等方)、相対距離が広 がっている(膨張)=現在の標準的な宇宙モデ ル
- ・実は、一般相対性理論のアインシュタイン 方程式を、一様かつ等方の仮定の下で解く ことで膨張宇宙の解が得られる(フリードマ ン解,1922年) アインシュタインテンソル

宇宙項 x 計量テンソル





-様等方宇宙とその膨張

- ・遠くにある銀河ほど、地球に届くまでに長 い距離を飛ぶ
- その間に宇宙が膨張し、それに伴って光の 波長が伸びる(宇宙論的赤方偏移; cosmological redshift)
- ・遠くの銀河から届く光ほど、長い波長で観 測される → ハッブル=ルメートルの法則







-様等方宇宙とその膨張

- ・遠くにある銀河ほど、地球に届くまでに長 い距離を飛ぶ
- その間に宇宙が膨張し、それに伴って光の 波長が伸びる(宇宙論的赤方偏移; cosmological redshift)
- ・遠くの銀河から届く光ほど、長い波長で観 測される → ハッブル=ルメートルの法則







・様等方宇宙とその膨張

・系外銀河からきた光の波長が本来の波長か らどれだけ伸びているかを定量化して、そ の銀河が宇宙のどの時代に光を放っていた かを調べられる

赤方偏移(波長の伸び率) $z = \frac{\lambda_{obs}}{2}$

・赤方偏移zが大きいほど昔の宇宙で放射され た光





- ・例えば、現在の最遠方天体GN-z11は赤方 偏移z=11で発見された天体(分光確認され たもの)
- ・この天体からの光は約134億年かけて地 球までやってきた
- ・宇宙年齢は約138億年なので、宇宙の誕 生から約4億年後のこと

Galaxy GN-z11 • Redshift 11.1 • GOODS North Survey

現在の最遠方天体 GN-z11 credit: NASA, ESA, and P. Oeschi (Yale U.)



- ところが……
- ・最近NASAが打ち上げたジェームズ・ウェ ッブ宇宙望遠鏡がその記録を更新しつつ ある
- z=13の遠方銀河候補



ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 credit: ESA/ATG medialab



- ところが……
- ・最近NASAが打ち上げたジェームズ・ウェ ッブ宇宙望遠鏡がその記録を更新しつつ ある
- z=13の遠方銀河候補

JWSTで見つかった最遠方銀河候補 credit: NASA, ESA, CSA, M. Zamani (ESA/Webb), Leah Hustak (STScl), Brant Robertson (UC Santa Cruz), S. Tacchella (Cambridge), E. Curtis-Lake (UOH), S. Carniani (Scuola Normale Superiore), JADES Collaboration





- ・様々な赤方偏移(=距離=時代)での銀河の 観測
- ・銀河が平均してどれだけの星を作ってき たかということも分かっている
- ・z=2(だいたい100億年前)に星形成のピー クを迎え、あまり星を作らなくなってき ている



宇宙の星形成率密度の時間進化 credit: Madau & Dickinson 2014 ARA&A, 52, 415 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014ARA%26A..52..415M



遠方銀河と宇宙の大規模構造

- ・銀河は宇宙の中でどのように分布してい るのか?
- ・銀河が集まっているところと集まってい ないところ(ヴォイド; void)に分かれる
- ・ 宇宙の大規模構造(Large scale) structure)
- なぜ、このような空間分布になるのか? →第14回 宇宙論





Sloan Digital Sky Survey(SDSS) 2.5m望遠鏡 credit: Sloan digital sky survey https://www.sdss.org/instruments/

遠方銀河と宇宙の大規模構造

- ・銀河は宇宙の中でどのように分布してい るのか?
- ・銀河が集まっているところと集まってい ないところ(ヴォイド; void)に分かれる
- ・ 宇宙の大規模構造(Large scale) structure)
- なぜ、このような空間分布になるのか? →第14回 宇宙論





Sloan Digital Sky Survey(SDSS)が明らかにした銀河分布 credit: Sloan digital sky survey http://www.sdss3.org/images/gallery/sdss_pie2.jpg



- 様等方宇宙とその膨張

- ・ 膨張する宇宙はどこまで遡れるのか?
- ・現在の膨張速度がずっと保たれていたとし たら、過去のある時点では宇宙は一点から 始まったと考えられる(ビッグバン宇宙; big-bang)
- ・その仮定の下では、宇宙の年齢はハッブル 定数の逆数で与えらえる(ハッブル時間; **Hubble time**): 1/H₀=146億年 $(H_0=67 \text{km/s/Mpc})$



現在の宇宙

過去の宇宙 もっと過去の宇宙 一点?



・様等方宇宙とその膨張

- ・ 膨張する宇宙はどこまで遡れるのか?
- ・現在の膨張速度がずっと保たれていたとし たら、過去のある時点では宇宙は一点から 始まったと考えられる(ビッグバン宇宙; big-bang)
- ・その仮定の下では、宇宙の年齢はハッブル 定数の逆数で与えらえる(ハッブル時間; **Hubble time**): 1/H₀=146億年 $(H_0=67 \text{km/s/Mpc})$





ハッブル宇宙望遠鏡による観測で得たハッブル=ルメートルの法則 credit: Freedman et. al. (2001) ApJ, 553, 47 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...553...47F



第14回: 宇宙膨張の発見と 宇宙の歴史

- ・ハッブル=ルメートルの法則と宇宙膨張の発見
- ・宇宙マイクロ波背景放射と宇宙の構造形成
- ・宇宙の加速膨張と暗黒エネルギー
- 宇宙の始まりと進化



- 様等方宇宙とその膨張

- ・過去の宇宙はもっと小さかった
- ・ 熱力学の法則: 気体を小さな体積に押し込め ると、密度・温度が高くなる(何か冷やす過 程がない限り)
- ・宇宙は何処へもエネルギーの逃げ場はない はずなので、過去の宇宙は高密度かつ高温 度だったはず
- ・なにか証拠は?





宇宙マイクロ波背景放射とその発見

・宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background; CMB): 空のあ らゆる方向からやってくるマイクロ波の放射





- あかり衛星(赤外線): JAXA





すばる望遠鏡(可視光):国立天文台



すざく衛星(X線): JAXA

宇宙マイクロ波背景放射とその発見

- ・ 宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background; CMB): 空のあ らゆる方向からやってくるマイクロ波の放射
- ・1940年代、G.ガモフらによる予言: 宇宙が もっと熱かった時代からの電磁波放射が宇 宙空間を伝搬しているはず
- ・1964年、ベル研究所A.ペンツィアスとR.W. ウィルソンによって発見



ペンツィアス、ウィルソンとCMBを発見した望遠鏡 credit: ベル研究所(ノキア) http://www.bell-labs.com/about/awards/1978-nobel-prize-physics/



宇宙マイクロ波背景放射とその発見

- ・彼らは電波を受信するアンテナの雑音を減 らす研究をしていた
- ・どうしても減らせない雑音がある
- ・ 空のどの方向からもやってきている → 宇宙 から
- ・なぜ? 電波(マイクロ波)なので、エネルギ は低く、星などではなさそう



ペンツィアス、ウィルソンとCMBを発見した望遠鏡 credit: ベル研究所(ノキア) http://www.bell-labs.com/about/awards/1978-nobel-prize-physics/



CMBの温度ゆらぎ

- ・CMBはz≒1100(宇宙誕生から約38万年後)
 の宇宙で放射された電磁波を現在になって
 我々が観測していると理解されている
- ・その後の観測の発展で、CMBの観測は極め て精密に行われるようになった
- ・ CMBの温度は平均的に2.7Kだが、観る方 向によって温度に「ゆらぎ」がある



CMBの温度ゆらぎ

- ・CMBはz≒1100(宇宙誕生から約38万年後) の宇宙で放射された電磁波を現在になって 我々が観測していると理解されている
- ・その後の観測の発展で、CMBの観測は極め て精密に行われるようになった
- CMBの温度は平均的に2.7Kだが、観る方 向によって温度に「ゆらぎ」がある

各時代の衛星によって観測されたCMBの全天マップ credit: NASA/COBE/DMR; NASA/WMAP SCIENCE TEAM; ESA AND THE PLANCK COLLABORATION hhttps://www.forbes.com/sites/startswithabang/2018/07/19/how-the-planck-satellite-changed-our-view-of-the-universe/





宇宙マイクロ波背景放射

- ・宇宙がもっと熱く密度が高かったときの名 残
- ・光がまっすぐ進めないくらい密度が高い状 態から、光がまっすぐ進めるようになった (宇宙の晴れ上がり)
- ・宇宙が生まれて38万年くらいのとき
- そのときの光が宇宙膨張とともに波長を伸 ばしながら空間を伝搬している



宇宙マイクロ波背景放射

- ・2006年ノーベル物理学賞: 宇宙マイク 口波背景放射の観測と精密宇宙論
- ・人工衛星COBEによる観測的研究を率い たJ. C. MatherとG. F. Smootに授与さ れた



John C. Mather 氏とGeorge F. Smoot氏 credit: P. Izzo, J. Bauer, Nobel foundation https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2006/summary/



- ・CMBのゆらぎは、原始宇宙での密度ゆらぎ と関係している
- 密度が高い部分がさらに重力によって引き 寄せられることで、現在の星や銀河に溢れ る宇宙が形成された



- ・CMBのゆらぎは、原始宇宙での密度ゆらぎ と関係している
- ・ダークマター密度が高い部分がさらに重力 によって周りダークマターやバリオン(原子 などの普通の物質)を引き寄せ重くなってい く(ダークマターハロー; dark matter halo)
- ・ダークマターハロー内で、物質が冷えてさら に重力的に集まり、星や銀河が形成される

赤方偏移 z~1100 (t=0.38 Myr)



プランク衛星が観測したCMBの温度揺らぎ credit: ESA and the Planck Collaboration https://www.cosmos.esa.int/web/planck/picture-gallery

- ・CMBのゆらぎは、原始宇宙での密度ゆらぎ と関係している
- ・ダークマター密度が高い部分がさらに重力 によって周りダークマターやバリオン(原子 などの普通の物質)を引き寄せ重くなってい く(ダークマターハロー; dark matter halo)
- ・ダークマターハロー内で、物質が冷えてさら に重力的に集まり、星や銀河が形成される

赤方偏移 z=18.3 (t=0.21 Gyr)





- ・CMBのゆらぎは、原始宇宙での密度ゆらぎ と関係している
- ・ダークマター密度が高い部分がさらに重力 によって周りダークマターやバリオン(原子 などの普通の物質)を引き寄せ重くなってい く(ダークマターハロー; dark matter halo)
- ・ダークマターハロー内で、物質が冷えてさら に重力的に集まり、星や銀河が形成される



赤方偏移 z=5.7 (t=1.0 Gyr)





- ・CMBのゆらぎは、原始宇宙での密度ゆらぎ と関係している
- ・ダークマター密度が高い部分がさらに重力 によって周りダークマターやバリオン(原子 などの普通の物質)を引き寄せ重くなってい く(ダークマターハロー; dark matter halo)
- ・ダークマターハロー内で、物質が冷えてさら に重力的に集まり、星や銀河が形成される



赤方偏移 z=1.4 (t=4.7 Gyr)





- ・CMBのゆらぎは、原始宇宙での密度ゆらぎ と関係している
- ・ダークマター密度が高い部分がさらに重力 によって周りダークマターやバリオン(原子 などの普通の物質)を引き寄せ重くなってい く(ダークマターハロー; dark matter halo)
- ・ダークマターハロー内で、物質が冷えてさら に重力的に集まり、星や銀河が形成される



赤方偏移 z=0.0 (t=13.6 Gyr)





- ・CMBのゆらぎは、原始宇宙での密度ゆらぎ と関係している
- ・ダークマター密度が高い部分がさらに重力 によって周りダークマターやバリオン(原子 などの普通の物質)を引き寄せ重くなってい く(ダークマターハロー; dark matter halo)
- ・ダークマターハロー内で、物質が冷えてさら に重力的に集まり、星や銀河が形成される



Initial distribution of the dark matter based on the standard cosmology 300 parsec Structure formation via the gravitational instability 1/100 solar-mass Large-scale structure of the dark matter



A tiny embryo of the star (protostar)

ダークマターハローでの初代星形成

credit: Hosokawa et al. (2011)

https://www-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/~hosokawa/firststarstop_e.html



- ・観測的に明らかになった銀河の空間分布 と、シミュレーションで得られたダークマ ターの分布はかなり似ている
- ・銀河・ダークマターが集まったところと、 集まっていないところ
- ・宇宙初期の密度揺らぎが成長すること で、現在の銀河やその分布が作られた





Sloan Digital Sky Survey(SDSS)が明らかにした銀河分布 credit: Sloan digital sky survey http://www.sdss3.org/images/gallery/sdss_pie2.jpg



- ・ダークマターハローとその中にある銀河は合 体を繰り返し、現在まで成長してきたと考 えられる
- 階層的構造形成(hierarchical structure formation)
- こうして、現在の宇宙で観測される多種多 様な天体が形成されてきた







第14回: 宇宙膨張の発見と 宇宙の歴史

- ・ハッブル=ルメートルの法則と宇宙膨張の発見
- 宇宙マイクロ波背景放射と宇宙の構造形成
- 宇宙の加速膨張と暗黒エネルギー
- 宇宙の始まりと進化

43

宇宙膨張の歴史

- ・宇宙はどんな膨張の仕方をしてきたのか
- 数100Mpcでの観測からは比例関係(ハッ) ブル=ルメートルの法則) → 速度は一定
- もっと遠くではどうなっているのか知り たい
- もっと明るくて距離が分かる天体はない のか?



ハッブル宇宙望遠鏡による観測で得たハッブル=ルメートルの法則 credit: Freedman et. al. (2001) ApJ, 553, 47 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001ApJ...553...47F



la型超新星(核燃焼型超新星)

- ・連星系を成している白色矮星が相手の星か ら質量を受け取り、チャンドラセカール限 界質量を超えると爆発する
- ・白色矮星を構成する炭素や酸素の核燃焼が 点火し、暴走的に核燃焼が進む
- ・具体的にどのような進化過程を経て爆発に 至るのかはまだ未解明な部分が多い





la型超新星を説明する2つのシナリオ credit: NASA/CXC/SAO and GSFC/D. Berry https://aasnova.org/2018/10/24/ speeding-white-dwarfs-may-point-to-past-explosions/

la型超新星(核燃焼型超新星)

- ・連星系を成している白色矮星が相手の星か ら質量を受け取り、チャンドラセカール限 界質量を超えると爆発する
- ・
 ・
 白色矮星を
 構成する
 炭素や
 酸素の
 核燃焼が
 点火し、暴走的に核燃焼が進む
- ・具体的にどのような進化過程を経て爆発に 至るのかはまだ未解明な部分が多い



NGC4526で発生したIa型超新星 SN1994D credit: High-Z Supernova Search Team/HST/NASA https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/t/Type+la+Supernova



la型超新星による宇宙膨張測定

- Ia型超新星は最大光度が-19等から-20等 で、光度曲線の形を使って補正すること により、ほぼ光度一定の標準光源として 使うことができる
- ・ la型超新星とその母銀河(超新星が発生し た銀河)を観測すれば、より遠い銀河まで の距離と赤方偏移zが測定できる
- ・加速膨張する宇宙が支持される



S. Perlmutter (2012), Nobel lecture **REVIEWS OF MODERN PHYSICS 84**





la型超新星による宇宙膨張測定

- Ia型超新星は最大光度が-19等から-20等 で、光度曲線の形を使って補正すること により、ほぼ光度一定の標準光源として 使うことができる
- ・ la型超新星とその母銀河(超新星が発生し た銀河)を観測すれば、より遠い銀河まで の距離と赤方偏移zが測定できる
- ・加速膨張する宇宙が支持される





|a型超新星の赤方偏移z vs 距離(見かけの等級 - 絶対等級) credit: R. Kirshner (1999) PNAS 96 4224 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999PNAS...96.4224K



加速膨張の正体は何か?

- ・宇宙の膨張が「加速」するには何かがア クセルを踏んでいるはず
- それは何か?エネルギー源は?
- ・分からない
- ・暗黒エネルギー(dark energy)
- ・宇宙全体のエネルギーのうち、70%近く を占める

エネルギー運動量テンソル

 $g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{G_{\mu\nu}} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{C^4} T_{\mu\nu}$ アインシュタインテンソル 宇宙項 x 計量テンソル



バリオン(原子など) 5%

第14回: 宇宙膨張の発見と 宇宙の歴史

- ・ハッブル=ルメートルの法則と宇宙膨張の発見
- 宇宙マイクロ波背景放射と宇宙の構造形成
- ・宇宙の加速膨張と暗黒エネルギー
- ・
 宇宙の始まりと進化

宇宙の歴史

- ・CMBやその他天文観測により、宇宙の状態 や進化を特徴づけるパラメータ(宇宙論パラ メータ)は精密に測られるようになった
- ・現在では、宇宙年齢は138億年と見積もら れている
- ・138億年にわたる宇宙史の中ではどのよう なことが起こってきたのか?

各時代の衛星によって観測されたCMBの全天マップ credit: NASA/COBE/DMR; NASA/WMAP SCIENCE TEAM; ESA AND THE PLANCK COLLABORATION hhttps://www.forbes.com/sites/startswithabang/2018/07/19/how-the-planck-satellite-changed-our-view-of-the-universe/





宇宙史年表

 10^{-44}

 10^{-36}

	ビッグバン : 宇宙の誕生	.1
10-44 s	プランク時間 $t_{ m p} = \sqrt{\hbar G/c^2} = 5.4 imes 10^{-44} ext{ s} :$ 10 ⁻⁴⁴ 物理的な意味を持ち得る最小時間	F
10 ⁻³⁶ s	重力と強い力の枝分かれ	(
10 ⁻³² s	インフレーション: 宇宙が急激に膨張する時期 ^{量子ゆらぎ}	
10-11 s	電弱相転移 : 弱い力と電磁気力の枝分かれ	D星
10 ⁻⁵ s	クォークハドロン相転移 : クォークが陽子や中性子に閉じ込められる	



宇宙史年表

クォークハドロン相転移: クォークが陽子や中性子に閉じ込められる

ニュートリノ脱結合

10⁰ s

10⁻⁵ s

10 min

400 kyr

ニュートリノが宇宙空間を直進できるようになる

ビッグバン元素合成:

陽子や中性子が水素,ヘリウム,微量の軽元素に変わる

宇宙の晴れ上がり(recombination): 電子が原子核と結合し原子になる. それに伴って、光が宇宙空間を直進できるようになる

宇宙の暗黒時代(dark age):

天体ができる前





宇宙史年表

宇宙の暗黒時代(dark age):

天体ができる前

太陽系形成

300 Myr

初代天体形成(first stars): 宇宙の密度が濃い部分で初めて星や銀河が形成される

1 Gyr 遠方銀河の形成時期: 現在観測されている遠方天体は 既にこの時代には生まれていた



3 Gyr

ガイア-エンケラドス: 原始銀河系と近傍銀河との合体

credit: ESA/Gaia/DPAC

多種多様な天体の時代: さまざまな天体(星,惑星,銀河)が形成される

13.8 Gyr



credit: NASA, ESA, and P. Oeschi (Yale U.)

credit: Springel et al. (2005)





60K

z=20

z=10

z=3

z=0

credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)























