

「膨張宇宙の年齢」

2020年10月04日(日)

東京学芸大学 自然科学系 宇宙地球科学分野
(教育学部・理科教室・地学) 講師 西浦慎悟

1. はじめに:

1927年～1929年頃、アメリカの天文学者エドウィン・ハッブル (Edwin Hubble) は、我々の銀河系から遠くに位置する銀河ほど、より早く銀河系から遠ざかるような運動をしていることを発見した。具体的には、銀河系から2倍遠くに位置する銀河は、2倍速く銀河系から遠ざかって行くような運動をしているのである。即ち、ある銀河までの距離を d (Mpc)、その銀河が銀河系から遠ざかる速さ (以下、「後退速度」と呼ぶ) を v (km/s) とすると、比例定数 H_0 を用いて、

$$v = H_0 d \quad (\text{式1})$$

と表されることが判明したのである。ここで比例定数 H_0 はハッブル定数 (Hubble constant) と呼ばれ、「km/s/Mpc」という単位を持つ。そして、この関係式はハッブルの法則 (Hubble law) と呼ばれ、発見当時、机上の空論と思われていた「膨張宇宙」の状況証拠の一つと受け取られた。何故ならこの関係式は、全ての銀河がある一点から後退運動を始めたことを如実に示しているからである。

ハッブルの法則は宇宙の膨張を示唆しており、ハッブル定数は、宇宙の膨張速度を示している。従って、銀河のまでの距離とその後退速度の関係 (ハッブルの法則) からハッブル定数を求めることで、宇宙の年齢を導出することが可能となる。宇宙の年齢を明らかにすることは、現代天文学の重要なテーマの一つである。今、この瞬間にも、天文学研究の最前線においては、極めて精密な観測装置を用いた、様々な方法で宇宙年齢の解明が試みられている。本教材では、その最初の一步として、極めて簡単な仮定と方法で、宇宙年齢を導出してみよう。

2. 基本原理:

ハッブル定数を求める前段階として、銀河までの距離と後退速度の関係を図にしてみる。このような関係図は**ハッブル図 (Hubble diagram)** と呼ばれる。図 1 に、ハッブルが初期に発表したハッブル図を示した。

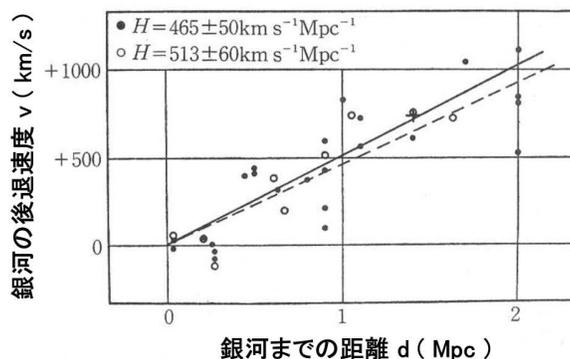


図 1 : ハッブルによる初期のハッブル図。横軸は Mpc 単位で表した銀河までの距離、縦軸は km/s 単位で表した銀河の後退速度。直線と点線は、それぞれ、この関係を最もよく表すと考えられる直線である。図の上部には、二つの直線から得られたハッブル定数 (ここでは「H」) が記されている。

ハッブル図を描くためには、幾つかの銀河に対して、観測から「銀河までの距離」とその「銀河の後退速度」を求めなければならない。

銀河の後退速度を求めるためには、まず分光観測からその銀河の**スペクトル**を得る。遠ざかる銀河から発せられた光のスペクトルは、**ドップラー効果**によって、波長が長い方 (振動数が短い方) にシフトする。この波長のシフト量は、あらかじめ出現する波長が分っているスペクトル線、例えば水素イオンから放射される波長 656.3 nm (1 nm = 10^{-9} m) や酸素イオンから放射される波長 500.7 nm などを用いる。図 2 に、実際に観測された、波長 656.3 nm の水素イオンから放射される線スペクトルの波長シフトの図を示した。

スペクトルの波長シフトの量を用いる方法は、その初期から、高い精度で銀河の後退速度を算出することができた。そこで、本実習でも**銀河の後退速度は、データ・ベースから得られた値をそのまま使うことにする**。これに対して、様々な困難を伴うのが、銀河までの距離を精度良く算出する方法である。ここでは、これらの詳細については触れないことにして、本教材による実習に必要な距離測定の方法を解説する。

遠くにあり本当の大きさが分らない物体の大きさを、我々は「それを見込む角度」で認識している。そのため、図 3 のように、全く同じ形・同じ大きさの物体であっても、遠くに位置する物体の方は、見かけ上、小さく見えることになる。

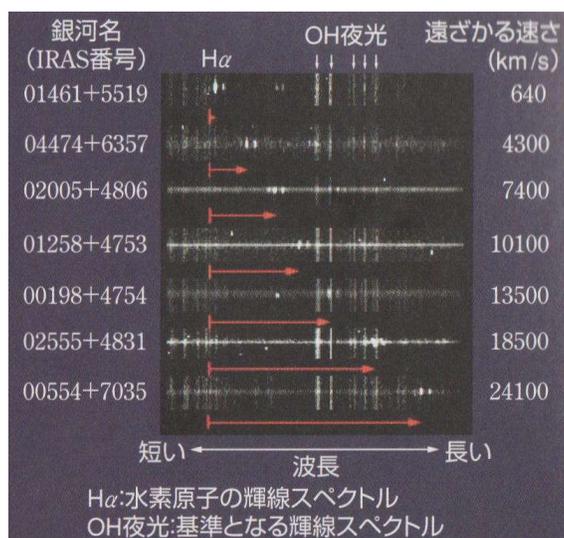


図2：様々な銀河のスペクトルに見られる波長シフト。横軸が波長で、左から右にかけて短波長から長波長であることを示している。縦は様々な銀河の名称とスペクトルを表している。図中の「H α 」とは、水素イオンから放射される波長 656.3 nm の線スペクトルの名称である。右端の数字は、銀河の後退速度である。各スペクトルに付いている赤矢印は「H α 」の位置が、本来の 656.3 nm 位置からどこまでシフトしているかを示している。(小川ほか, 2016, "新編 地学基礎", 数研出版, 東京, p.186)

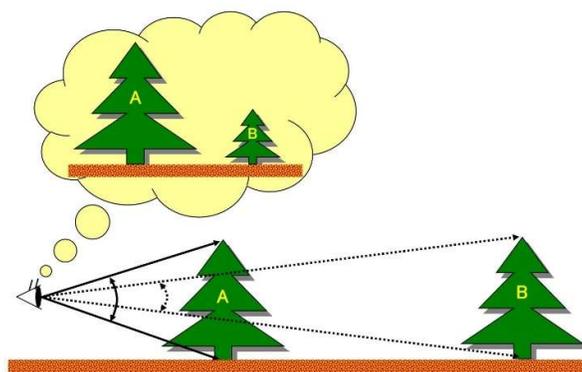
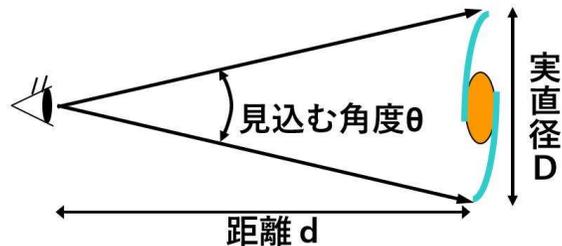


図3：同じ形・同じ大きさの物体を「見込む角度」と「見かけ上の大きさ」のイメージ図

これに、高校1年生の終わり頃(多分)に学ぶ数学を応用すると、「物体の真の大きさD」と「物体までの距離d」「物体を見込む角度 θ 」の間には、 θ が非常に小さい場合に限り、

$$d \theta = D \quad (\text{式2})$$

という関係が成り立つことが分る。この場合、 θ は一般的に知られる「度 (°)」ではなく、ラジアン (radian : 「rad」と表記) と呼ばれる量である。なお、角度 p (°) と θ (rad) の間の関係は、 θ (rad) = p (°) \times 3.14159/180 である。また、「D」と「d」の単位は同じになる。



- d** : 観測者と銀河間の距離 (Mpc)
- D** : 銀河の本当の直径 (Mpc)
- θ** : 観測者が銀河を見込む角度 (rad)

図4 : 銀河までの距離、真の大きさ (実直径)、見込む角度、の関係

従って、図4のように、銀河の真の大きさを D (Mpc)、その銀河までの距離を d (Mpc)、銀河を見込む角度を θ (rad) とすると、

$$d = D / \theta \quad (\text{式3})$$

となる。では、銀河の真の大きさ D はどのように決められるだろうか？実は、比較的精度良く真の大きさが測定されている銀河が一つある。それは、我々が住む銀河系である。銀河系の大きさをどのように算出するかは、省略するが、高校理科の地学基礎や地学の教科書では、銀河の真の大きさ (より正しく言えば銀河円盤の真の大きさ) は約 10 万光年と記されている。1 光年は 0.307 pc (パーセク) なので、ここでは、

銀河系の真の大きさ (直径) は、30.0 kpc (キロパーセク) [仮定1]

と仮定しよう。そしてさらに、

あらゆる銀河を正面から見た形は円である [仮定2]

あらゆる銀河の真の大きさは全て銀河系と等しい [仮定3]

と仮定し、銀河までの距離を Mpc(メガパーセク) 単位で表すことにすれば、

$$d = 0.030 / \theta \quad (\text{式4})$$

となる。つまり、銀河を見込む角度 θ を測定すれば、その銀河までの距離 d が簡単な計算で得られることになる。

本実習では、銀河の見かけ上の大きさを測定することで、その銀河までの距離を算出し、これとデータ・ベースから得られた後退速度の値を用いることでハッブル図を描画する。そして、ハッブル図の傾きからハッブル定数を決定し、さらに、ハッブル定数から宇宙年齢を導出することを試みる。

3. 銀河サンプル:

ハッブル図を描くための銀河のサンプルを、次のような観点から選んだ。

- ・ 後退速度において、できる限り均一で幅広く分布すること、
- ・ 同じ観測波長帯で画像が得られること、
- ・ 性質において何らかの均一性が見られること、

これらの条件を満たす銀河として、Rush ほか (1993) の研究論文から、後退速度が既知である I 型セイファート (Seyfert I) 活動性を持つ円盤銀河・渦巻銀河を 14 個選出した。そして、バーチャル天文台システム SkyView (<http://skyview.gsfc.nasa.gov/>) を用いて、これら 14 銀河の可視光画像を、デジタル・スカイ・サーベイ (Digitized Sky Survey = DSS) から収集した。ただし、その際に、サンプル銀河が画像の中央に来るように、かつ、視野が 5 分角 x 5 分角となるようにした。表 1 に、サンプル銀河の基本的なデータをまとめた。

表 1 : サンプル銀河の一覧

銀河名	赤経 (J2000.0)	赤緯 (J2000.0)	形態	活動性	後退速度 (km/s)	別名
UGC 00488	00 47 19.4	+14 42 13	Sab	Sy1	11572	MRK 1146
UGC 00774	01 13 51.0	+13 16 18	S?	Sy1	14720	MRK 0975
ESO 543-G011	01 40 15.6	-22 14 45	N	Sy1	25812	PGC 006176
MRK 1400	02 20 13.7	+08 12 20	S0	Sy1	8784	PGC 008899
NGC 931	02 28 14.5	+31 18 42	Sbc	Sy1	4917	MRK 1040, UGC 01935
MRK 1044	02 30 05.4	-08 59 53	SB0	Sy1	4887	PGC 009523
MRK 1187	02 48 22.0	+13 56 07	S	Sy1	13461	PGC 010618
IRAS 02553-1642	02 57 40.8	-16 30 46	---	Sy1	20386	
VII Zw 244	08 44 45.2	+76 53 09	S	Sy1	39663	PGC 024560
NGC 3080	09 59 55.8	+13 02 38	Sa	Sy1	10553	MRK 1243, UGC 05372
MRK 1347	13 22 55.4	+08 09 42	S	Sy1	15086	PGC 046743
MRK 885	16 29 48.2	+67 22 42	Sb	Sy1	7495	PGC 058354
MRK 896	20 46 20.9	-02 48 45	SBb	Sy1	7855	PGC 065349
II Zw 136	21 32 27.8	+10 08 19	Sa	Sy1	18880	MRK 1513, UGC 11763

4. 銀河までの距離の算出:

第2章で述べた様に、銀河までの距離は、それを見込む角度から得られる。ところが第2章の「仮定2」にも関わらず、表1から得られる様々な銀河の姿の多くは、全く円には見えない。測定すべき「銀河を見込む角度」とはどこの長さだろうか？

高校理科の地学基礎や地学の教科書に記されているように、実は多くの銀河は、中央部分が少し膨らんだ円盤型をしている。従って、図5のように、銀河の真の形が円であったとしても、それをどの方向から観測するかによって、見かけの形は変ることになる。ただし、見かけの大きさは、その銀河の最も長い部分であることが分るだろうか？手元に円盤型の物体があれば、実際にそれを手に持って、色々回転させて観察して欲しい。「銀河を見込む角度」とは、銀河の最も長い部分、銀河を楕円形と見なした時の長軸の長さに他ならないのである。

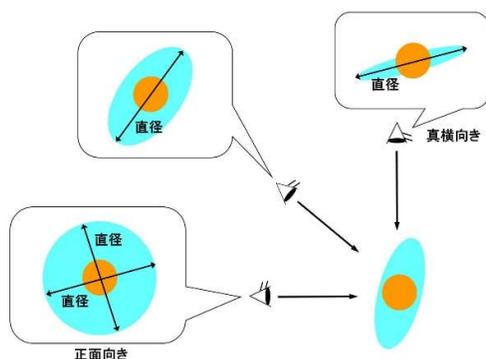


図5:「銀河を見込む方向」と「銀河の見かけ上の形」

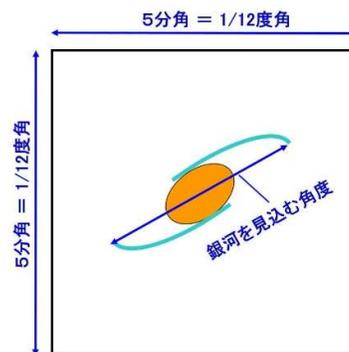


図6:「視野」と「銀河を見込む角度」

さらに、本実習で用意した画像は、その視野を5分角 x 5分角で統一している。従って、図6のように、この視野の大きさと比較することで、それぞれの銀河を見込む角度を計算することができる。なお、1分角 = 1/60度角、である。

5. ハッブル図の描画とハッブル定数・宇宙年齢の導出:

第4章までで各銀河までの距離 d (Mpc) と後退速度 v (km/s) のデータが揃ったことになる。そこで、銀河までの距離に対する後退速度の図、即ち、ハッブル図を描いてみよう。おそらく、とてもきれいな関係図とはならないはずである。しかし図7左図のような「より遠くにある銀河ほど、より後退速度が速い」という傾向は見られないだろうか。

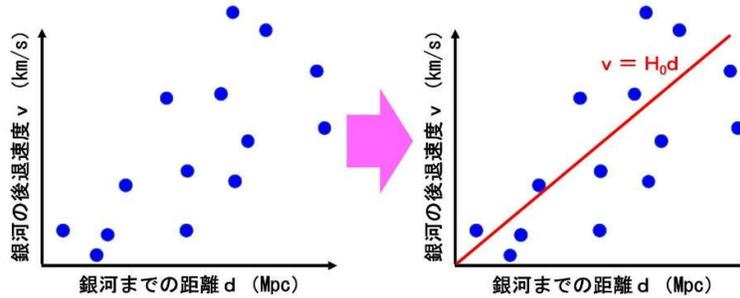


図7：ハッブル図とハッブル定数の導出

そこで次に、図7右図のように、完成したハッブル図の上に「より遠くにある銀河ほど、より後退速度が速い」という傾向を、もっとも良く表していると思われる直線を一本引いてみる。実際の研究では、このような場合には「最小二乗法」(または、最小自乗法)という方法を用いて、最適な直線を得るが、これについては大学や他の機会ですんで欲しい。今回の実習ではフィーリングで構わない。ただし、この直線は原点(0,0)を通るように引く。そして、この直線の傾きが、多くの研究者が真の値を知りたいと熱く挑んでいる「ハッブル定数」である。さて、どのような値が得られただろうか？

最後に、ハッブル定数から宇宙年齢を求める。ハッブル定数の逆数 $1/H_0$ の次元は時間である。そして、この定数の科学的な意味を考えれば、ハッブル定数が膨張宇宙の年齢を表していることは分るはずである。このハッブル定数の逆数 $1/H_0$ が示す宇宙年齢は**ハッブル時間 (Hubble time)**と呼ばれる。そこで、単位換算を行って、ハッブル時間の単位を「年」に直してみよう。これで得られた値が、膨張宇宙の年齢である。なお、 $1 \text{ Mpc} = 3.09 \times 10^{19} \text{ km}$ 、 $1 \text{ 年} = 3.16 \times 10^7 \text{ s}$ (秒) である。

謝辞

本実習用教材のオリジナルは、西浦が、東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター木曾観測所の研究機関研究員（PD 研究員）として勤務していた際に、当時の同観測所所員全員で開発したものである。オリジナルのアイデアを当時の所長中田好一氏が提案され、西浦がそれを検証・プロトタイプを作成を行った。教材の実用化には、当時の同観測所の三戸洋之氏、宮田隆志氏、青木勉氏、征矢野隆夫氏、樽沢賢一氏、田中由美子氏、同センターの峰崎岳夫氏に多大な協力を頂いた。皆様に感謝申し上げたい。なお本教材は、西浦ほか（2007）として公表されている。

参考文献

- ・浅野俊雄, 家正則, 磯村恭朗, 小川勇二郎, 高橋正樹, 武田康男, 田中浩紀, 中野孝教, 中村尚, 林美幸, 平野弘道, 丸山茂徳, 八木勇治, 吉田二美, 数研出版株式会社編集部 (2014), "もういちど読む数研の高校地学", 数研出版株式会社, 東京, 400p.
- ・西浦慎悟, 中田好一, 三戸洋之, 宮田隆志 (2007), "高校生のための天文学実習用教材「宇宙年齢を測る」の作成", 地学教育, 第 60 巻, pp.53-66.
- ・小川勇二郎, 浅野俊雄, 家正則, 磯村恭朗, 高橋正樹, 武田康男, 田中浩紀, 中野孝教, 中村尚, 林美幸, 平野弘道, 丸山茂徳, 八木勇治, 吉田二美, 数研出版株式会社編集部 (2016), "地学", 数研出版株式会社, 東京, 383p.
- ・Rush, B., Malkan, A. and Spinoglio, L. (1993), "The Extended 12 micron Galaxy Sample", *Astrophysical Journal Supplement*, 89, pp.1-33.