

「ハッブルの法則」から 「ハッブル-ルメートルの法則」へ



岡村 定 矩

〈東京大学エグゼクティブ・マネジメント・プログラム 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

日本天文教育普及研究会会長

e-mail: sadanori.okamura@emp.u-tokyo.ac.jp

2018年8月にオーストリアのウィーンで開催された第30回国際天文学連合（IAU）総会で、「宇宙の膨張を表す法則は今後『ハッブル-ルメートルの法則』と呼ぶことを推奨する」という決議案が提案され、10月に会員の電子投票で採択された。その背景、いきさつ、決議文の内容、及び教育現場を含む社会での望ましい対応について述べる。

この決議は学校教育にも関わる問題であることから、日本学術会議が2018年12月に提言^{*1}を発売し、筆者も日本天文教育普及研究会の会誌「天文教育」2018年11月号に解説記事を書いた。本稿はこれらとの重複も多いが、改めて事の次第をまとめる。

1. 背 景

2018年8月20-31日にオーストリアのウィーンで開催された第30回国際天文学連合（International Astronomical Union: IAU）総会で、「宇宙の膨張を表す法則は今後『ハッブル-ルメートルの法則』と呼ぶことを推奨する」という決議案が提案された。決議案に関して総会でさまざまな議論があり、それを踏まえた最終案が会員による電子投票に付されることになった。10月4日に電子投票の受付が開始され、10月26日の締め切りまでに会員の37%に当たる4070名が投票した。その結果、決議は、賛成78%、反対20%、棄権2%で採択された。

遠方銀河の赤方偏移から計算される後退速度^{*2}と銀河までの距離が比例するいわゆる「速度-距離関係」は、宇宙膨張の最も重要な観測的証拠である。この証拠を初めて示したのは、アメリカのハッブル（E. P. Hubble）が1929年に出版した論文¹⁾であると考えられていたことから、速度-距離関係はこれまで「ハッブルの法則」と呼ばれてきた。

一方、ベルギーの神父であり宇宙物理学者であるルメートル（G. Lemaître）はハッブルの論文の2年前、1927年に出版した論文²⁾で、アインシュタインの一般相対性理論の方程式の解を導出し、宇宙は膨張しており銀河の後退速度は距離に比例することを導いた。さらに彼は当時の観測データをもとに、後にハッブル定数と呼ばれることになる宇宙の膨張率の値も求めた。

ところがこの論文はフランス語で書かれ、多くの人の目に触れにくい雑誌に投稿されたので、出版直後には広く知られなかった。イギリスのエディントン（A. Eddington）の紹介で、1931年

^{*1} <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t273-1.pdf>

^{*2} 我々から遠ざかっているように見えるので後退速度と呼ばれたが、視線速度のことである。現在では後退速度という用語はあまり用いられない。

にこの論文は英文に翻訳されて英国王立天文学会誌に掲載された³⁾。ところが、この英文論文では原論文にあったいくつかの節、特にハッブル定数を求めた節と重要な脚注が削除されていた。誰が英訳を行ったのか、削除が何らかの意図のある「検閲」によるものであったのかどうか、2009年頃から関連研究者の間で大きな話題となった。

2. ハッブルの論文の概要

ハッブルが論文を出版した1929年当時、視線速度の観測されていた銀河^{*3}は46個であった。この論文は、その中で距離を推定した24個に対して速度-距離関係を求めたものである。ハッブルは銀河の距離を以下のいずれかの方法で求めた。彼がもっとも信頼できると考えたのはセファイド変光星及び新星や青色巨星など性質が既知の多数の星の明るさから(絶対等級を仮定して)推定する方法である。これによるものが7個ある(うち大小マゼラン雲はシャプレーが求めた距離^{4),5)}を採用)。次に、銀河中で最も明るい星の絶対等級はほぼ一定であると仮定して、それらの見かけの明るさから距離を求めたものが13個ある。最も不確かさが大きいものが、別途推定されたおとめ座銀河団の距離を適用した4個である。この論文には個々の銀河の距離決定の詳細は記述されていないが、手法については別の論文が参考になる⁶⁾。

一方視線速度は、太陽運動の補正を行って銀河系中心から見た銀河の速度にひき直した。視線速度に関しては、同僚のハマソン(M. Humason)の最新の測定値を4個の銀河に用いたが、それ以外はアメリカのヤーキス天文台のスライファー(V. M. Slipher)による観測データである⁷⁾。これ

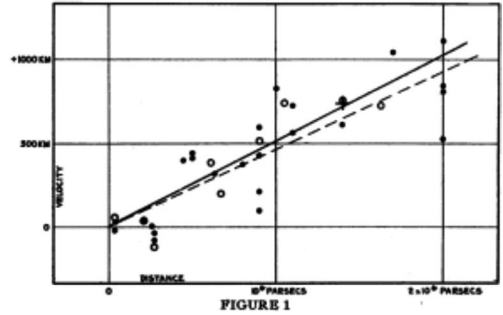


図1 距離の推定された24個の銀河(黒丸印)の後退速度を距離の関数としてプロットした図¹⁾。後退速度の最大値は約1000 km/s。白丸印はいくつかの銀河をグループにまとめたもの。実線と破線は黒丸と白丸に対するベストフィットの直線。プラス印は、距離精度の低い22個の銀河の平均値を示す。

らのデータから作成した図1が速度-距離関係を示した有名な図である。この図のデータからハッブルは、後退速度と距離の間の比例定数(今日ハッブル定数と呼ばれている)として500 km/s/Mpcという値を提唱している^{*4}。

ハッブルは、後退速度と距離の比例関係を指摘したが、その解釈については論文の最後でごく簡単に、ド・ジッター(W. de Sitter)の宇宙モデルに言及しているだけである。そこでは「比例関係は限られた距離範囲において近似的に成り立っているのかも知れない」との含みも持たせている。この論文を読む限り、この時点でハッブルが自らのデータが宇宙膨張の確実な証拠と信じていたとは筆者には思えない。実際、ハッブルは自分がハマソンとともに、さらに後にはサンデイジ(A. Sandage)ら後継者達が、次第に遠方銀河へと伸ばしてゆく速度-距離関係⁹⁾、あるいは速度-等級関係¹⁰⁾の理論的解釈については、亡くなるまで確信を持っていなかったように思われる^{11),12)}。

^{*3} 当時はgalaxy(銀河)ではなくextra-galactic nebula(系外星雲)という用語が多用されていたが、ここではそれらを原則「銀河」と訳す。

^{*4} 2019年時点でのハッブル定数の推定値は67-74 km/s/Mpcとなっている⁸⁾。当時の値との大きな違いの主な原因は、セファイドに2種類(種族Iと種族II)があることが分かったこと、及びハッブルが「最も明るい星」と思ったもののいくつかは実際は電離水素領域であったことなどである。

3. ルメートルの論文の概要

ルメートルは1927年の論文で、一様で質量一定の宇宙に対するアインシュタインの一般相対性理論の方程式の解を導出した。その解によると宇宙は膨張し、銀河の後退速度は距離に比例することが導かれる。さらにルメートルは、文献に基づいて彼がデータを利用できた42個の銀河に対して、ハッブル定数を625 km/s/Mpcと求めた（観測データへウエイトを付けなければ575 km/s/Mpcとなることが脚注に述べられている）。彼が用いたのは、ストレムベルグ（G. Strömberg）の論文¹³にある銀河の視線速度（大部分はスライファアのデータ）と、ハッブルの論文⁶の方法で推定した銀河の距離であった。英訳版では原論文にあったいくつかの節、特にハッブル定数を求めた節、及び速度-距離関係が宇宙の膨張に起因することやハッブル定数の不定性について述べた

重要な脚注が削除されていた。このことに気づいていた研究者もいたが¹⁴、2011年にカナダのバンデンバーグ（S. van den Bergh）の論文¹⁵が出るまで大きな話題とはならなかった。

4. 2011年のブームとリビオの論文

バンデンバーグの論文では、ルメートル論文のフランス語版と英訳版を比較して、削除された本文や数式の一部および脚注が詳細に指摘されていた（図2）。これをきっかけに、科学史家だけでなく天文学者らも真相究明に乗り出した。ルメートルの論文を英訳したのは誰か、また英訳に当たっていくつかの部分削除された理由は何か。さまざまな説が展開されたが、ハッブルが何らかの影響力を行使した、あるいは忖度があったと示唆するものが多かった。本稿ではそれらの詳細には立ち入らない。関心のある方は、須藤靖氏の解説記事¹⁶を参照されたい。

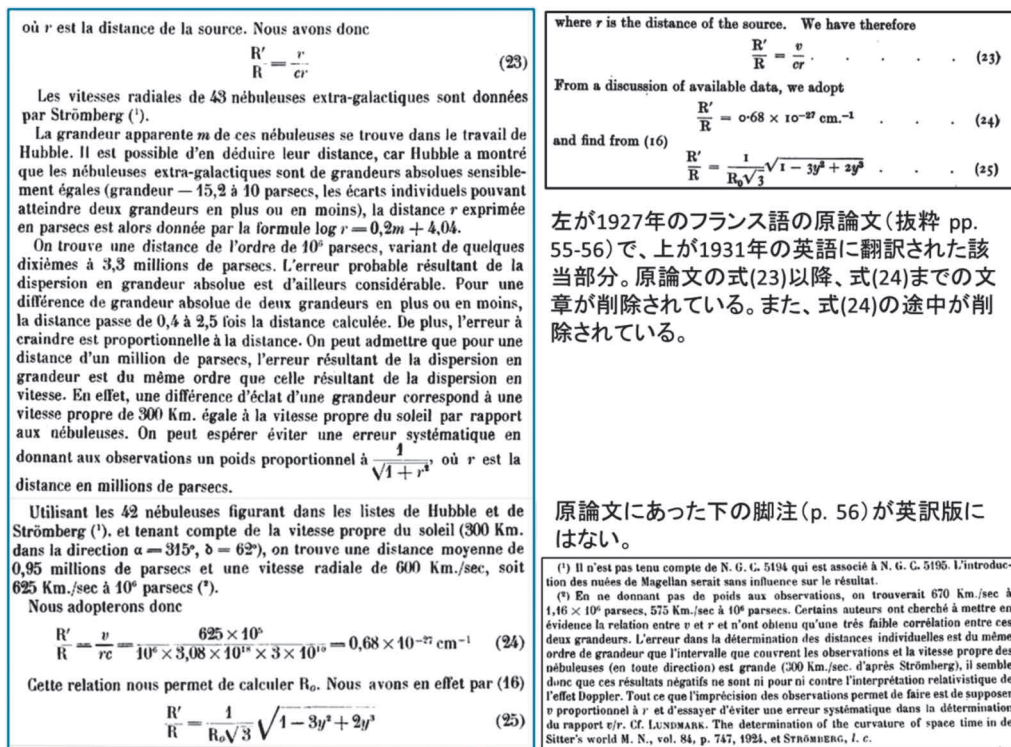


図2 ルメートルのフランス語の原論文から英訳される際に削除された部分。

この問題に結着をつけたのが原資料の調査を行ったリビオ (M. Livio) による論文¹⁷⁾ である。王立天文学会誌の当時の編集長であったスマート (W. M. Smart) とルメートルの間でこの件に関してやり取りした書簡や王立天文学会の議事録などを調査したリビオは、「英訳したのはルメートル自身であったこと。削除に関しては何らの圧力はなくルメートル自身が決めたこと」という証拠を得た。論文の最後で、リビオは次のように述べている。「ルメートルの手紙はまた、1920年代の(何人かの) 科学者の科学に対する思いをうかがわせる。ルメートルは彼自身の発見に対する優先権に固執することは決してなかった。ハッブルの結果が1929年に出版されたのであるから、それより以前の自分の暫定的な発見を1931年に再度繰り返し記述する意味はないと考えた。それよりも彼は、王立天文学会誌に彼の新しい論文『膨張する宇宙』¹⁸⁾ を出版することを望んだのであり、それは後に実現した。」ただし、ルメートルが優先権に全く固執していなかったというわけではないという指摘もある¹⁹⁾。

5. IAU 決議の内容

IAU 決議の原文は英文と仏文であり、IAU サイトに掲げられている²⁰⁾。原文との対応を取りやすいよう本稿ではあえて直訳に近い形式を残してある。[] は決議に附随する文献リストの番号である。

第30回総会
第30回総会に提案された決議
決議B4
ハッブルの法則の名称改定
IAU 執行委員会提案

国際天文学連合の第30回総会は、
以下のことを考慮して

1. 通常「ハッブルの法則」と言われている、銀

河が見かけ上我々から遠ざかって行くように見えるという発見は、天文学の過去100年間の発展の中の画期的な出来事の一つであり、現代宇宙論の基礎の一つであること；

2. ベルギーの天文学者であるジョルジュ・ルメートルが1927年に、「Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques (系外星雲の視線速度を説明する質量が一定で半径が増加する一様な宇宙)」という題名の論文 [1] を(フランス語で) 出版した。この論文の中で彼は、アインシュタインの一般相対性理論の方程式に対する膨張宇宙を記述するフリードマンの動的解を最初に再発見した(筆者注フリードマンの解は1922年に公表されていたが、ルメートルはそれを知らなかった)。さらに彼はまた、宇宙が膨張すれば遠方銀河のスペクトルが銀河までの距離に比例して赤方偏移することを示している。そして最後に彼は、出版されたデータに基づいて、銀河の速度と測光学的に求めた距離から(彼が理論的に見いだした比例関係を仮定して)、宇宙の膨張率を導き出したこと；

3. この論文が出版されたとき、ルメートルの論文が掲載された学術誌の知名度は低く、また用いられた言語のせいもあり、彼の画期的な発見は天文研究者にほとんど知られなかったこと、

4. ジョルジュ・ルメートル(1925年からIAUメンバー [2]) とアメリカの天文学者エドウィン・ハッブル(1922年からIAUメンバー [3]) はともに1928年7月にライデンで開催された第3回国際天文学連合総会に出席し、系外星雲の赤方偏移と距離の観測データは、あらたな宇宙の進化モデルに適合することに関して意見を交換した [4] こと；

5. エドウィン・ハッブルが1929年に「A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae (系外星雲の距離と視線速度の関係)」というタイトルの論文 [5] を発

表し、その中で、最終的には1931年のハマソンの共著論文 [6] に載せた新しい視線速度のデータも含めて、銀河に対する距離と速度の比例関係を提案し導出したこと；

6. 1931年に、Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (英国王立天文学会が出版する学術誌) の招待に応じてルメートルは彼の1927年の原著論文を英語に翻訳した [7]。そのとき彼は、「宇宙の膨張率を導き出した節は、明らかに今や関心のない、視線速度の暫定的な議論であり、また宇宙の幾何学に関する脚注は、この問題に関する過去及び新しく出た論文リストで置き換えられるので、再度ここに記述するのが良いとは思えない」 [8] との理由で、意図的に削除したこと；

また以下のことを強く希望して

- 7. ジョルジュ・ルメートルとエドウィン・ハッブルが現代宇宙論の発展に根本的な貢献をしたことを賞賛すること；
- 8. 自分自身の知名度よりも科学の発展により高い価値を見いだしたジョルジュ・ルメートルの知の高潔さをたたえること；
- 9. 意見を交換し国際的な議論を促進する国際天文学連合総会の役割を強調すること；
- 10. 将来の科学的な講演・論説・論文などに対して歴史的事実を示すこと；

次のように決議する

- 11. 第30回IAU総会は、今後、宇宙の膨張を表す法則は「ハッブル-ルメートルの法則」と呼ぶことを推奨する。

文献リスト

[1] Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, A47, p. 49-59 (1927)
 [2] Lemaître, G. 1950, Ann d' Ap., 13, 344, as translated by David L. Block, 2012, in Georges Lemaître: Life, Science and Legacy, eds. R.D. Holder and S. Mitton, Astrophysics and Space Science Library, Springer-Verlag, Berlin, Vol. 395, p. 89
 [3] IAU Transactions Vol. 1, 1922
 [4] Humason (<https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4686>), as reported by Sidney van den Bergh, 2011, JRASC, Vol. 105, p. 197
 [5] Proceedings of the National Academy of Science, USA, 15, 168 (1929)
 [6] "The velocity-distance relation among extra-galactic nebulae", Astrophysical Journal, Vol 74, p. 43-80 (1931)
 [7] Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 91, p.483-490 (1931)
 [8] Georges Lemaître, quoted by Mario Livio in Nature, Volume 479, Issue 7372, pp. 171-173 (2011)

6. 宇宙膨張発見の系譜

科学の大発見にはそれを成し遂げた人の名前が付けられることが多い。しかしそれら多くの発見は、発見には至らなかったものの、真理の探究に向けられた多くの先人の努力の上に可能となることが多い。「科学的発見に第一発見者の名前がつけられることはない」というスティグラーの法則というものまであるので、先人の努力が適切に評価されないことが多いと想像がつく。

そこで今回の話題である宇宙膨張の発見に至る系譜を簡単にまとめてみよう。

1922年: フリードマン (A. Friedmann) が一般相対性理論の動的解を導いた²¹⁾。ヴィルツ (C. Wirtz) が29個の渦巻星雲の後退速度と距離を調べた²²⁾。この年までにスライファーは41個の星雲の視線速度を測定し、研究者の依頼に応じて提供していた⁷⁾。セファイドの周期-光度関係を発見したリービット (H. Leavitt)²³⁾、その校正を行ったヘルツシュプリング (E. Hertzsprung) やシャプレー (H. Shapley)²⁴⁾ など、この年以前の人々の功績で銀河の距離決定が次第に可能になる。

1924年: ルントマルク (K. Lundmark) がさまざまな天体の距離と視線速度の関係を調べた²⁵⁾。ヴィルツが42個の渦巻星雲を調べ、距離とともに後退速度が大きくなると述べた²⁶⁾。渦巻星雲が銀河であることを示すハッブルの論文がアメリカ科学振興協会の会議で読み上げられた。

1925年: ストレムベルクが、球状星団と渦巻銀河に対して距離と視線速度の関係を調べた¹³⁾。シルバースタイン (L. Silberstein) が、ド・ジッター宇宙モデルと球状星団や銀河の距離と視線速度の観測データについて論評した²⁷⁾。ルントマルクが、見かけの小さい(遠い)渦巻き星雲ほど後退速度が大きいことを述べた²⁸⁾。

1927年: ルメートルが一般相対論の方程式の膨張解を導き、ハッブル定数を求めた²⁾。

1928年：ロバートソン（H. P. Robertson）が速度-距離関係の存在を理論的に予言し、ハッブル定数につながる値を導出した²⁹⁾。

1929年：ハッブルが銀河の後退速度と距離の比例関係を示す論文¹⁾を発表した。トールマン（R.C. Tolman）がドジッターモデルに基づいて速度-距離関係を議論した³⁰⁾。

1930年：ドジッターがハッブルとほぼ同じデータを使ってより詳細な解析を行い後退速度と距離の比例関係を確認した³¹⁾。

1931年：ルメートルの英訳版論文³⁾が出た。ハッブルとハマソンが遠方銀河（後退速度最大19600 km/s）までのデータを出版して⁹⁾、速度-距離関係が観測的にほぼ確立した。

今回の決議案は、天文学上の偉大な発見に大きな功績のあった二人の評価が、これまであまりにもバランスを欠いていたことを改善したいと考えたIAU執行部が提案をした。

7. IAU決議に対する望ましい対応

高等学校学習指導要領「理科」の中の「地学」では、「ハッブルの法則も扱うこと」と明記されている。日本学術会議物理学委員会傘下の天文学・宇宙物理学分科会とIAU分科会が提言を発出したのは、この決議が社会、特に学校教育現場に混乱を与えることがないように、その対応についての考え方を示すためであった。

もとより、IAUに科学法則の呼び名を決めたりその使用を強制する権限はない。つまり、今回の決議は、今後は「ハッブルの法則」を「ハッブルメートルの法則」と呼ばなければならないという規則改定ではないので、「ハッブルの法則」という用語は間違いとすべきという種類の問題ではないことに注意すべきである。今回の決議の目的の一つは、「意見を交換し国際的な議論を促進する国際天文学連合総会の役割」として「歴史的事実を示す」ことであった。そうした事情を十分理解したうえで対応することが最も重要である。ま

た「ハッブル定数」や「ハッブル時間」など、ハッブルの名前を冠する学術用語はたくさんあるが、「ハッブルの法則」以外はこの決議の影響を受けることはなく、従来通りである。

以下に、この決議に関して望ましい対応を示した日本学術会議の提言の骨子を再掲して本稿を閉じることとする。

(1) 学校教育で用いられる教科書における記述変更は直近の改訂時に対応する。それまでは教科書に対する特別の補充資料は作らず、現場での解説で対応する。

(2) 各種試験で、宇宙膨張の法則の名称そのものを問うて、「ハッブルの法則」か「ハッブルメートルの法則」かによって解答の正否が分かれるような問題は出さない。

(3) 学校教育現場に限らずしばらくの期間は、「ハッブルの法則」と「ハッブルメートルの法則」のどちらが使われていても問題とはしない。

(4) 一般書やマスコミなどの記述、講演会などで用いる名称は担当者次第であるが、IAU決議の趣旨を踏まえて「ハッブルメートルの法則」を用いることが望ましい。

参考文献

- 1) Hubble, E. P., 1929, Proc. National Academy of Science of the USA, Vol. 15, 168
- 2) Lemaitre, G., 1927, Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, A47, 49
- 3) Lemaitre, G., 1931, MNRAS, 91, 483
- 4) Shapley, H., 1924, Harvard College Observatory Circular, 268, 1 (LMC)
- 5) Shapley, H., 1924, Harvard College Observatory Circular, 255, 1 (SMC)
- 6) Hubble, E.P., 1926, ApJ, 64, 321
- 7) Slipher, V. M., 1917, Proc. American Philosophical Soc., 56, 403; Eddington, A. S., 1923, The Mathematical Theory of Relativity (Cambridge: CUP), 162; see also 13
- 8) Riess, A. G., et al. 2019, ApJ, 876, 85
- 9) Hubble, E., & Humason, M. L., 1931, ApJ, 74, 43
- 10) Humason, M. L., et al., 1956, AJ, 61, 97
- 11) <http://ads.nao.ac.jp/abs/2011arXiv1107.0442S> (Shaviv, G., 2011)
- 12) 家正則, 2016, ハッブル宇宙を広げた男 (岩波ジュニ



- ア新書)
- 13) Strömberg, G., 1925, ApJ, 61, 353
 - 14) Peebles, P. J. E., 1984, in *The Big Bang and Georges Lemaître*, ed. Berger, A.L. (Dordrecht: Reidel), 23
 - 15) van den Bergh, S., 2011, *Journal of R. A. S. of Canada*, 105, 151
 - 16) 須藤靖, 2012, 「ハッブルカルメートルか: 宇宙膨張発見史を巡る謎」, *日本物理学会誌*, 67, 311
 - 17) Livio, M., 2011, *Nature*, 479, 171
 - 18) Lemaître, G., 1931, *MNRAS*, 91, 490
 - 19) van den Bergh, S., 2011, *Nature*, 480, 321
 - 20) https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2018_ResolB4_English.pdf
 - 21) Friedmann, A., 1922, *Zeitschrift für Physik*, 10, 377
 - 22) Wirtz, C., 1922, *AN*, 215, 349
 - 23) Leavitt, H. S. and Pickering, E. C., 1912, *Harvard College Observatory, Circular Vol. 173*, 1-3
 - 24) Shapley, H., 1918, *ApJ*, 48, 154
 - 25) Lundmark, K., 1924, *MNRAS*, 84, 747
 - 26) Wirtz, C., 1924, *AN*, 222, 21
 - 27) Silberstein, L., 1925, *MNRAS*, 85, 285
 - 28) Lundmark, K., 1925, *MNRAS*, 85, 865
 - 29) Robertson, H.P., 1928, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 5, 835; see Sandage, A. 1993, in 'The Deep Universe', eds. Sandage, A. et al., *Saas-Fee Advanced Course 23* (Springer-Verlag), 96
 - 30) Tolman, R.C., 1929, *ApJ*, 69, 245
 - 31) de Sitter, W., 1930, *Proc. National Academy of Science of the USA*, Vol. 16, 474

From “Hubble Law” to “Hubble-Lemaître Law”

Sadanori OKAMURA

Executive Management Program, The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: A resolution to recommend that from now on the expansion of the universe be referred to as the “Hubble- Lemaître law” was presented at the XXXth General Assembly of the IAU held in August 2018 at Vienna. The resolution was passed by the electronic votes of members in October 2018. The background, circumstances, content of the resolution, and favorable responses, in particular, at schools, are described.