

特集1

「すざく」WEB 解析ツールを使った

宇宙年齢の測定とその教材化

望月建男（静岡大学）、内山秀樹（静岡大学）

1. はじめに

「約 138 億年前、宇宙に始まりがあった」ことは広く知られており、小学生の多くも知っている。しかしながら、「なぜ宇宙に始まりがあったと言えるのか」という問いに対して、明確に答えられる人は大人でも少ない。

宇宙の始まりを示す観測的証拠の一つとして、ハッブル・ルメートルの法則が挙げられる。これは、多数の遠方銀河における距離と後退速度（赤方偏移）の測定から明らかになった、遠くにある全ての銀河が天の川銀河から遠ざかっており、銀河までの距離 d と後退速度 v が比例して大きくなっている（ $v = H_0 d$, H_0 :ハッブル定数）という観測事実である。これを単純に解釈すれば、全ての銀河が天の川銀河から一様に遠ざかっていることになり、我々の銀河が宇宙の特別な中心であるかのように思われる。しかし、宇宙全体が等方的かつ一様に膨張していると考え、この問題は解消される。この様にハッブル・ルメートルの法則は宇宙膨張の結果として解釈できる。この宇宙膨張について時間を遡って考えると、すべての銀河が同一点に集約していた時が存在することになる。この時点を宇宙の「始まり」と考えることができる。宇宙の大きさ、すなわち全ての銀河と天の川銀河との距離がゼロであった時がいつであったかを推定すると、宇宙年齢を見積もることができる。ここで任意の銀河を考え、その銀河と天の川銀河との現在の距離を d とする。後退速度 $v = H_0 d$ なので、 v が時間的に一定であると仮定すれば、距離 d を遡るのに要する時間 $t = d/v = d/H_0 d = 1/H_0$ となる。この様に、ハッブル定数の逆数

（ハッブル時間[1]）が、宇宙の年齢のおおよその目安となる。

我々は将来的な教材化を視野に入れつつ、Web 解析ツール UDON2 を用いて、「すざく」衛星のアーカイブデータの解析を行い、宇宙年齢（ハッブル時間）の導出を試みた。

2. 「すざく」衛星と WEB 解析ツール UDON2

「すざく」衛星は、ISAS/JAXA が中心に開発した X 線天文衛星である[2]。2005 年に打ち上げられ、2015 年運用停止、2025 年 1 月大気圏再突入した。約 10 年間分の観測データが、ISAS/JAXA 科学衛星運用・データ利用センター（C-SODA）が運用する、Web データアーカイブシステム DARTS [3] から公開されており、世界中の誰でも利用可能である。UDON2 [4]は、DARTS の一部をなす、「すざく」を含む X 線天文データの簡易解析ツールであり、イメージ・ライトカーブ・スペクトルを作成できる。WEB ブラウザがあれば、アプリ・ソフトをインストールせずに誰でも簡単に使用できる。こうした特長から、UDON2 を使った「すざく」データ解析は学校現場でも活用できる可能性があり、実際に高校授業での実践例も報告されている[5]。

3. 解析内容

ハッブル・ルメートルの法則を確認するために今回は主に銀河団（一部銀河・銀河群）の X 線データを解析した。銀河団は数百~数千個の銀河が集まった構造である。数千万度の高温プラズマガスを伴い、電子が 2 個しか残らない状態まで電離した He 状鉄イオン

(Fe²⁴⁺) 等の輝線を放射している。「すざく」の観測した銀河団（銀河群・銀河）のうち、He 状鉄イオンの K α 輝線が強く、赤方偏移とは独立な方法で距離が測られている（銀河・銀河団のデータベースサイト、NASA/IPAC Extra-galactic Database, NED [6]で調べた）天体を探し、14 天体を選別した（表 1）。

表 1 選別した 14 天体のリスト

Target Name	OBSID	NEDによる 距離 (Mpc)
A1060	800003010	80
A426	800010010	72
ABELL1795	800012010	285
CENTAURUS CLUSTER	800014010	40
NGC 507	801017010	69
M87 CENTER	801038010	17
A85	801041010	235
A2142	801055010	379
ABELL 2199 CENTER	801056010	118
A2256	801061010	237
A1831	801077010	301
A3667_CENTER	801096010	192
ABELL 262 CENTER	802001010	65
A3112	803054010	258

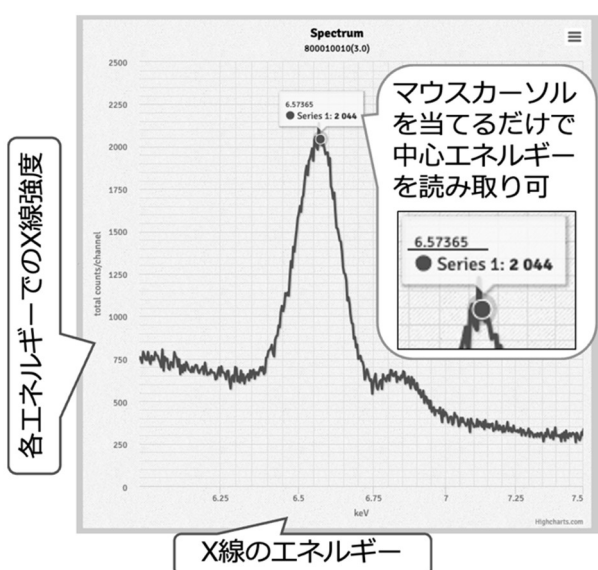


図 1 UDON2 [4] で表示したペルセウス座銀河団の He 状 Fe 輝線のスペクトル

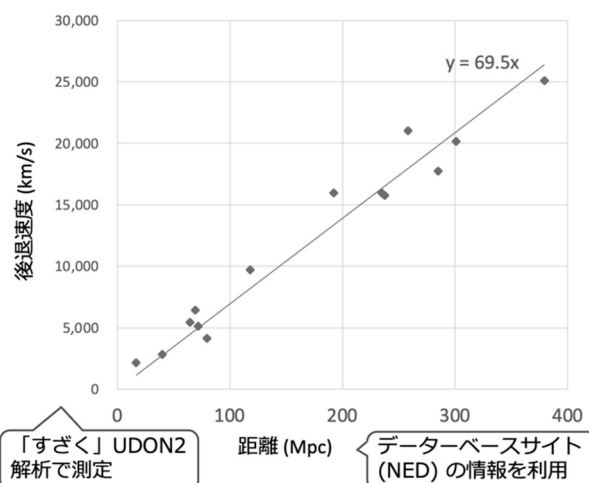


図 2 今回得た銀河団（銀河群・銀河）の距離－後退速度関係

UDON2 ではこれらの天体の X 線スペクトルを簡単に作ることができ（具体的な操作は [4] を参照）、かつ、マウスカーソルを輝線ピークに当てることで、そのエネルギー中心値を読み取ることができる（図 1）。先の 14 天体に対し、He 状鉄イオン K α 輝線のエネルギー中心値 E を上記の方法で測定した。静止系での He 状鉄イオン K α 輝線のエネルギー中心値 $E_0 = 6.68$ keV を用いると、高校物理で学ぶドップラー効果と光子のエネルギーの式から、後退速度 v は $v = c(E_0 - E)/E$ (c : 光速) で計算できる。この式を使って、各天体の後退速度を導出した。その上で、NED で調べた赤方偏移とは独立な方法で測った距離との関係をプロットすると図 2 となった。距離と後退速度に比例関係があり、ハッブル・ルメートルの法則を確認できた。近似直線の傾きから求めたハッブル定数は $H_0 \sim 70$ km/s/Mpc であり、ハッブル時間 $1/H_0 \sim 140$ 億年となった。プランク衛星の宇宙背景マイクロ波放射観測に基づく値は $H_0 = 67.36 \pm 0.54$ km/s/Mpc、宇宙年齢 137.97 ± 0.023 億年である [7]。今回の結果は有効数字 2 桁でプランク衛星での値と一致している。

4. 教材化に向けた展望

本解析は、高校授業でも実践できると考えられる。UDON2 の操作は高校生なら十分可能であり、おそらく中学生でも可能である。後退速度の計算に必要なドップラー効果、光子のエネルギーは高校物理の範囲内で計算できる。高校の地学におけるハッブル・ルメートルの法則の学習、物理におけるドップラー効果の学習に使える。また、自身の学ぶ物理で定量的に宇宙年齢を測れるという経験は、高校生に自身の学ぶ理科が実際に役に立つという実感を持たせ理科への学習の意欲を向上させる可能性がある。また、定量的な測定が可能なので探究学習での題材にもなり得る。

天文データを使用したハッブル・ルメートルの法則の教材は PAOFITS WG によるもの [8] が既にあり、こちらも教材化の参考にする予定である。ソフト (Makali'i など) のインストールや FITS データのダウンロードといった事前の準備が不要で、Web ブラウザさえあればすぐに利用できる点が、UDON2 と「すざく」データを使うメリットである。一方で、ハッブル・ルメートルの法則は、可視光での銀河の分光観測で発見された。銀河団の X 線分光を使うと、理解のために必要な前提知識 (X 線、光子のエネルギー、高温プラズマガス、銀河団の理解) が増えることも相まって、生徒が混乱する懸念がある。可視光ではなく X 線を使うことによるデメリットとそれに対する対策も検討が必要である、

現在、本題材を教材化の上、高校で実践を計画している。実践で得た知見を踏まえ、生徒や教員向けのマニュアルの作成・公開を目指している。ハッブル定数の測定では本来遠方銀河までの距離測定が課題になるが、現状ではそれがブラックボックスとなっている。宇宙の距離測定の方法を高校生向けに説明する資料も合わせて作成したい。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 24K06356 の助成を受けたものです。UDON2 を含む DARTS を運用する ISAS/JAXA C-SODA へ感謝します。

文 献

- [1] 天文学辞典「ハッブル時間」<https://astro-dic.jp/hubble-time/> (2025 年 6 月 13 日最終閲覧)
- [2] X 線天文衛星「すざく」<https://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/past/suzaku.html> (2025 年 6 月 13 日最終閲覧)
- [3] DARTS (Data ARchives and Transmission System) <https://darts.isas.jaxa.jp/> (2025 年 6 月 13 日最終閲覧)
- [4] UDON2 (Universe via Darts ON-line) <https://darts.isas.jaxa.jp/app/udon2/about.html> (2025 年 6 月 13 日最終閲覧)
- [5] 島野誠大ら「宇宙を題材にした高校物理の授業の試み～探究型実験と『すざく』データの活用～」(2025) 第 17 回小型衛星の科学教育利用を考える会 <https://wwp.shizuoka.ac.jp/sess/17th/> (2025 年 6 月 13 日最終閲覧)
- [6] NASA/IPAC Extra-galactic Database <https://ned.ipac.caltech.edu/> (2025 年 6 月 13 日最終閲覧)
- [7] Planck Collaboration (2020) “Planck 2018 results I. Overview and the cosmological legacy of Planck” A&A 641, A1
- [8] PAOFITS WG 「ハッブルの法則 (ハッブル・ルメートルの法則) [距離梯子 4]」<https://sites.google.com/view/paofits/Materials/fits> 教材/Hubble (2025 年 6 月 13 日最終閲覧)

望月 建男
内山 秀樹