

目次

1	序論	2
1.1	研究内容・目的	2
1.2	研究動機・構成	3
2	宇宙論とは	4
3	制作した教材の構成と工夫	5
3.1	全体構成	5
3.2	A.1 物理で使われる単位と基本定数	5
3.3	A.2 天文学的な距離の測定	7
3.4	A.3. 波の特徴	11
3.5	A.4 原子・原子核	13
3.6	A.5 恒星の一生	14
3.7	A.6 事典	16
4	まとめ	17

1 序論

1.1 研究内容・目的

本研究では、宇宙論をインタラクティブに理解する Web ツール「Cosmo Navi」を開発した。

宇宙論とは、宇宙全体を対象とし、その創生から現在に至るまでの進化を主として物理学によって明らかにしようとする学問である。私が宇宙論を学ぶきっかけは、ゼミで「cosmology」の教科書 [1] を輪読したことである。輪読を進める中で、数式が多く、理解に苦しむ場面が多く、基礎的な段階でつまづくことが多かった。宇宙論は物理学や数学の幅広い前提知識を必要とし、専門外の学生にとっては、理解する事が難しい分野かもしれない。この経験から、宇宙論を理解するためには、文章や数式による説明だけでなく、図や視覚的な表現を通して直感的に捉えることが重要であると感じた。また、指導教員である真貝寿明教授は、武庫川女子大学でも宇宙論を教えており、文系の学生に授業をされている。私自身も輪読や先生の著書「現代物理学が描く宇宙論」 [2] を通して学ぶ中で、より直感的に理解を助ける教材の必要性を実感した。

既存教材の課題は、主に2つある。

第一に、紙の教科書では、図やイラストがあったとしても静的な表現しかなされない。宇宙論で扱う現象では動的な性質を持つが、図のみでは、値が変化した状態が分かりづらくリアルタイムに把握することが難しい。特に初学者にとっては、数式を読み解くだけでは物理的なイメージができず、受動的な学習ができない問題がある。第二に、既存の web 学習ツールの操作性と網羅性の課題である。宇宙論に関連するシミュレータや可視化ツールは既に存在するが、その多くは特定の物理現象の計算がメインであり、UI が直感的でなかったり、専門知識がないと操作が困難であったりするものが多い。また、個別の現象を扱うツールはあっても、宇宙論をインタラクティブに学べるような、学習者にとって親しみやすい総合的なツールは不足していると感じる。そこで本研究では、これらの課題を解決するために、以下の工夫を凝らした学習支援ツールを開発し、「Cosmo Navi」と命名した。

まず、静的な表現の限界を解消するため、HTML, JavaScript, Python を用いて、ユーザーが数値を入力すると結果が画面に反映される機能を実装した。具体的には、波の干渉を視覚化するシミュレータや、数値を入力するとスペクトル画像が左右に動き、赤方偏移を体験できるツールなどである。これにより、紙では把握しにくい変化を直感的に捉えることを可能にした。

次に、操作性と網羅性の課題に対しては、専門知識がない初学者でも迷わず操作できるよう、各シミュレーションに対応する説明文や解説文を充実させた。単に計算結果を表示するだけでなく、「その結果が何を意味するのか」を文で補足した。

以上の工夫により、数式への苦手意識を持つ文系の学生であっても、自らパラメータを操作し、その反応を確認することで、宇宙論の基礎概念を能動的に学習できる環境を実現した。本研究の目的をより明確にするため、先行研究との比較を行う。

宇宙論の教育に関する先行研究として、Simionato (2021) [3] は、赤方偏移 (Redshift) という概念が物理や天文学の教育において重要である一方、初学者が誤解しやすい項目であることを指摘している。この研究では、ドップラー効果や宇宙膨張による赤方偏移の混同を解消するため、具体的な演習や天文学の例を用いた教育手法が提案されている。しかし、こうした例は文章や静的な図表による説明が中心であり、ユーザーがパラメータを操作してその変化を体感できるような動的なツールの提供

には至ってはいない。

本研究の独自性は、Simionato が指摘したような「初学者がつまづきやすい概念」を、ブラウザ上で動作するインタラクティブなシミュレーションとして実装した点にある。Simionato が重視した「直感的な教育手法」と組み合わせ、フィードバックが得られる Web ツール「Cosmo Navi」として構築した。これにより、既存の教材では困難であったインタラクティブな学習の支援することが本研究のメインである。

1.2 研究動機・構成

本研究では、図表・図解・可視化ツールなどを積極的に利用し、高校生や文系の大学生でも宇宙論の基本概念をつかみやすい Web ページの制作を行った。筆者自身の経験から、初学者が宇宙論を学び進める際の最初の壁を取り除き、理解の懸け橋となるような、トピックを学び、単に文章を読み進めるだけでなく、動く図表を多用した学習支援ツールを目指した。論文の構成は、序論から始まり、宇宙論の説明、筆者が行ってきた研究内容、および今後の展望について順番に記述する。

2 宇宙論とは

本 Web サイトの導入として、宇宙論を以下のように定義した。

宇宙論：cosmology 宇宙全体を対象とし、その創生から現在に至るまでの進化を主として物理学によって明らかにしようとする学問のこと。

3 制作した教材の構成と工夫

3.1 全体構成

本 web ツールの全体構成は、表 1 に示す通りである。以下の表のようにになっている。これらの内容を掲載したページ全体は、宇宙の雰囲気をイメージしたデザインで統一した。背景色を黒くしたり、文字を光らせているような CSS を使用した。

テーマ	内容・ツール
A1 物理で使われる単位と基本定数	・指数計算 ・パーセク→光年・AU 変換ツール
A2 天文学的な距離の測定	・年周視差から距離(pc)計算 ・赤方偏移と光度距離(マウスオーバー) ・赤方偏移と宇宙年齢図 A.5(マウスオーバー) ・赤方偏移と宇宙年齢表 A.2(マウスオーバー)
A3 波の持つ性質	・波の干渉 ・ドップラー効果アニメーション ・赤方偏移ツール
A4 原子・原子核	・原子の基本まとめ ・水素原子スペクトル波長ツール
A5 恒星進化	・HR 図中心のまとめ(教科書付録外) ・HR 図ヒートマップ ・恒星進化アニメーション ・太陽進化アニメーション
A6 事典	・惑星 ・季節の代表恒星 ・ノーベル物理学賞受賞者

表 1 全体構成

3.2 A.1 物理で使われる単位と基本定数

本章は、教科書 [2] の A.1 章に対応するものである。ここでは、宇宙論を学ぶための準備として、物理学で頻繁に用いられる単位系や基本定数について整理した。高校生や文系の学習者にとって、宇宙論を理解するうえで最初の壁となるのが「単位」や「指数表記」に対する抵抗感である。まず、べき乗表示に慣れていない学習者のために、「基数」と「指数」を入力すると計算結果が表示される指数計算ツールを実装した。(下記の [A])

これにより、天文学で頻繁に登場する大きな数や小さな数を直感的に扱う練習ができるようにした。

次に、MKS 単位系 (Meter, Kilogram, Second) の説明を表形式で掲載し、物理量と単位の対応が視覚的に理解できるようにした。宇宙規模の現象を扱う際には日常単位では対応できないため、天文単位 (AU)、光年 (ly)、パーセク (pc) など、宇宙論で多用される単位についても表にまとめ、それぞれの定義と換算を明確に示した。

また、1 パーセクを光年・天文単位・km へ換算するツールを実装した (下記の [B])。教科書のような説明だけでなく、値を変えて確かめられる仕組みを取り入れることで、より深い理解を促すことを目指した。

[A] べき乗計算ツール

本ツールは、べき乗計算を補助するツールである。数値入力には HTML の number 型を使用し、数値以外の入力を防ぐことで操作ミスが減らす設計である。「計算」ボタンを押すと Javascript 関数が実行され、入力された基数と指数に基づき、べき乗計算を行い、その結果をページ下部に表示する仕組みである。これにより、指数を変更しながら繰り返し計算を行うことができる。例えば、基数に「10」、指数に「-2」を入力すると 0.01 と表示される。

[B] 距離の換算ツール

本ツールは、天文学で頻繁に使用される「パーセク (pc)」を「光年」「天文単位 (au)」「キロメートル (km)」

パーセク：parsec 年周視差が 1 角度秒となる距離。

光年：light year 光が 1 年間かかって進む距離。1 光年 = 9.46×10^{12} km。

天文単位：au 天文学で用いられる距離の単位。

へ相互換算を行うための補助ツールである。Web ページ内では、各単位の基本的な説明も加えてある。宇宙を表現する時の距離の単位には、このほかに赤方偏移 z もある。これらの説明は次節の A.2 にまとめている。

[A] で紹介した、べき乗計算ツールとは異なり、数値を入力した瞬間にすべての単位が即座に計算・更新されるため、ユーザーは複数の数値を比較しながらスムーズに距離感覚を把握できる設計となっている。指数表記による天文学的距離を km で表すと桁数が膨大になる。この課題に対し、JavaScript の toExponential() メソッドを用いて「 3.086×10^{13} km」といった表記を動的に生成した。例えば、1pc と入力すると 3.262 光年, 206,265 au, 3.086×10^{13} km と表示される。

3.3 A.2 天文学的な距離の測定

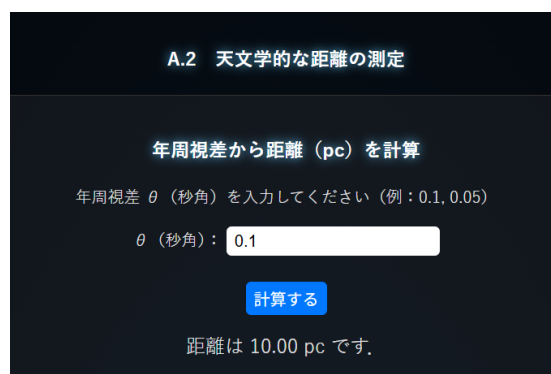
本章は、教科書 [2] の A.2 章に対応するものである。ここでは、宇宙論において重要な概念である「天文学的な距離の測定」について整理した。宇宙の恒星や銀河は非常に遠方にあるため、私たちが日常的に用いる距離の測り方をそのまま適用することはできない。そのため天文学では、年周視差・変光星・超新星等複数の観測手法を段階的に組み合わせた「距離のはしご」と呼ばれる方法を用いて、遠方天体までの距離を推定している。

また、宇宙は膨張しているため、距離の定義そのものではなく、光度距離といった観測量として定義された距離が用いられる。特に遠方天体では、赤方偏移が距離や宇宙年齢と深く結びついており、観測される赤方偏移の値から宇宙が膨張していることを読み解くことができる。

このページでは、年周視差から距離 (pc) の計算ツール (以下の [C])、教科書 [2]204 ページ図 A.4 赤方偏移と光度距離の対応のマウスオーバー 1(以下の [D])、教科書 [2]205 ページ図 A.5 赤方偏移と宇宙年齢の対応のマウスオーバー 1(以下の [E])、表 A.2 赤方偏移と宇宙年齢の対応のマウスオーバー 2(以下の [F]) を作成した。

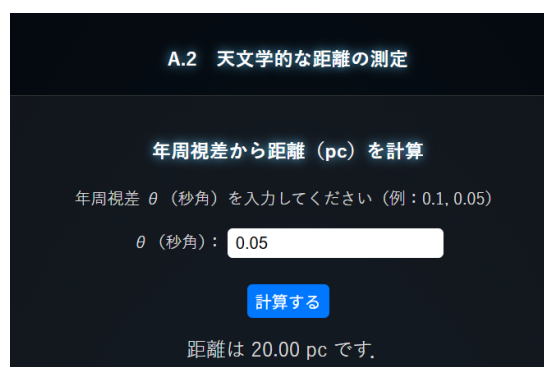
[C] 年周視差から距離 (pc) の計算ツール

本ツールでは、年周視差 θ (秒角) を入力すると、対応する距離 (pc) が計算される仕組みを実装した。実際の観測値に近い小さな視差角を入力することで、わずかな角度差から非常に大きな距離が導かれることを体感できる。例えば、図 1 では視差角に「0.1」を入力すると、距離が「10.00 pc」と計算される。図 2 では、さらに小さな値である「0.05」を入力すると、距離が「20.00 pc」へと大きく伸びることが確認できる。これにより、わずかな角度の差が宇宙規模ではどれほど巨大な距離の差を生むのかが分かる。web では、



The screenshot shows a web interface titled "A.2 天文学的な距離の測定". Below the title, it says "年周視差から距離 (pc) を計算". A prompt asks the user to input the annual parallax θ in arcseconds, with examples 0.1 and 0.05. The input field contains "0.1". A blue "計算する" button is visible. Below the button, the result is displayed: "距離は 10.00 pc です."

図 1 視差角に「0.1」を入力



The screenshot shows the same web interface as Figure 1, but with the input field containing "0.05". The result displayed below the button is "距離は 20.00 pc です."

図 2 視差角に「0.05」を入力

年周視差：annual parallax 視差のうち、地球の公転運動のために、天球上の天体の位置が変化して見える現象とその大きさのこと。
という説明を加えている。

[D] 赤方偏移と光度距離の対応のマウスオーバー

赤方偏移：redshift 一般に天体の発する光の波長が伸びて観測されることを、赤い側にずれるという意味で赤方偏移という。宇宙膨張の効果によるものである。十分遠方の天体はすべて赤方偏移を示すが、これを宇宙論的赤方偏移と呼ぶ。これは定性的にドップラー効果として説明す

ることが多いが、厳密にはそうではない。天体を発した光がわれわれ観測者に届く間に、宇宙空間が膨張したために光の波長が伸びたのである。

光度距離：luminosity distance 見かけの光度に基づいて遠方天体の距離を表す量。宇宙膨張や空間の曲率の効果が無視できないほど遠方では光度距離と角径距離という2つの異なる距離を使い分ける必要が出てくる。

天体からの光は、球面上に広がることにより、遠く離れたところでは、単位面積当たりのエネルギーは減少する。距離の R に対して、 R^{-2} 倍になる。重ねて、実際は、宇宙膨張の効果もあるため、距離はこれだけでは定まらない。現実には、宇宙膨張のモデルを決めた計算が必要である。教科書 [2] では、ハッブル定数 $H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}$ 、曲率 $k = 0$ 、全エネルギーのうち、物質密度 27%、宇宙項 73% とした図が用意されている。「Cosmo Navi」では、この図を用いて、マウスオーバーで値を読み取れる機能を実装した。

図3では、横軸は赤方偏移 z と縦軸は光度距離 $d(z)$ [Mpc] の関係を、マウスオーバー操作によって確認できる。Plotly[4] で図をプロットした。本図では、グラフ上の点や曲線にマウスカーソルを重ねることで、対応する赤方偏移と光度距離の数値が表示される。例えば、赤方偏移 $z = 0.1$ だと光度距離 $d(z)$ は 450 Mpc になる。

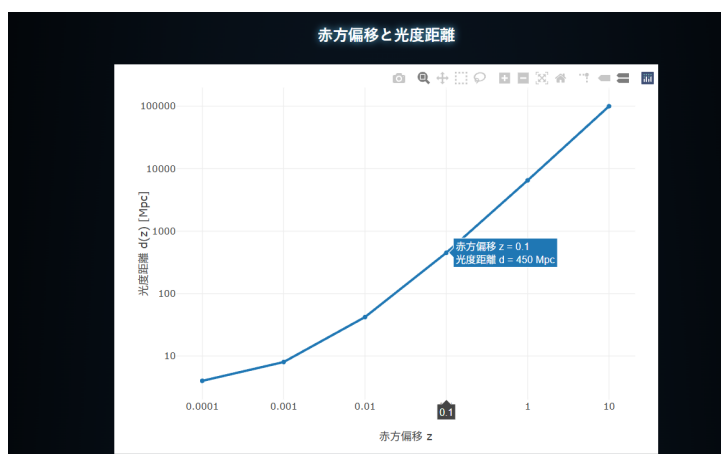


図3 赤方偏移と光度距離の対応

[E] 赤方偏移と宇宙年齢の対応のマウスオーバー 1

図4では、横軸は赤方偏移 z 、縦軸は時間 10 億年の関係を、マウスオーバー操作によって確認できるインタラクティブな図として Plotly で実装した。

本図では、グラフ上の点や曲線にマウスカーソルを重ねることで、対応する現在からの時間と宇宙年齢の数値が表示される。例えば、赤方偏移 z 10 だと現在からの時間は 13 と宇宙年齢 0.7 になる。

Web ページ内では、宇宙年齢の解説を以下のように掲載している。

宇宙年齢：age of the universe 宇宙は有限の過去から出発して現在に至ったものと考えられている。さまざまな観測データを組み合わせた結果、現在は誕生以来 138 億年が経過していると推定されている。これが現在の宇宙年齢である。ハッブル定数 H_0 の逆数であるハッブル時間が宇宙年齢の目安をあたえるが、実際の宇宙年齢はその定数倍となる。その定数は宇宙モデル（特に宇宙の成分比とそれらが従う状態方程式）によって異なる。

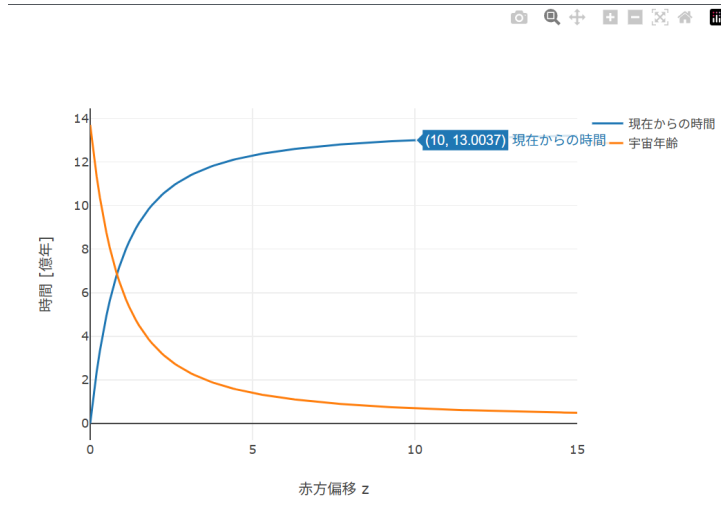


図 4 赤方偏移と光度距離の対応

[F] 赤方偏移と宇宙年齢の対応のマウスオーバー 2

図 5 のマウスオーバーは教科書表 A.2 のみをクローズアップして作成した。

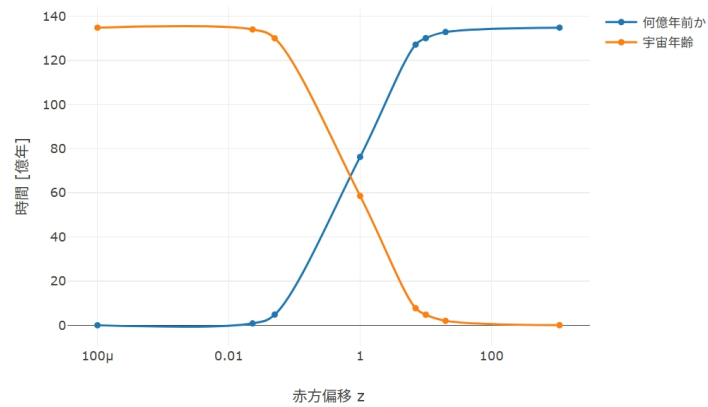


図 5 赤方偏移と宇宙年齢の対応 2

z	何年前か	宇宙年齢	
0	現在	137 億年	
0.023	3 億年前	134 億年	かみのけ座銀河団
0.05	7 億年前	130 億年	
1	77 億年前	60 億年	
7	129 億年前	8 億年	最遠方の銀河
10	132 億年前	5 億年	宇宙の再電離開始 (?)
20	135 億年前	2 億年	原始銀河の誕生 (?)
1090	137 億年前	38 万年	宇宙の晴れ上がり

表 2 赤方偏移と宇宙年齢の対応 (表 A.2)

3.4 A.3. 波の特徴

本章は、教科書 [2] の A.3 章に対応するものである。ここでは、「波」の基本的な性質について整理した。

波とは、物質そのものが移動するのではなく、振動の状態が空間を伝播していく現象であり、水面の波、音、光はいずれも同様の波動現象として統一的に扱うことができる。波は、振幅 A ・波長 λ ・周期 T ・振動数 f といった量によって特徴づけられ、これらの間には $f = 1/T$, $v = f\lambda$ という基本的な関係が成り立つ。波の伝播は正弦関数によって表すことができ、時間的・空間的に周期性をもつ運動として理解される。また、波は媒質の境界で反射や屈折を起こし、障害物の背後に回り込む回折現象を示す。複数の波が重なった場合には重ね合わせの原理が成り立ち、位相の違いによって強め合い・弱め合いが生じる干渉現象が現れる。これらは音や光の観測において重要な役割を果たす。

このページでは、波の干渉ツール [8]、ドップラー効果の説明をする救急車のアニメーション動画 [9]、および赤方偏移ツール [10] を作成した。

[8] 波の干渉ツール

2つの波が重なったときにどのような合成波が生じるかを確認するため、波長や位相のずれを入力すると、赤色と青色の \sin 波、およびその合成である緑色の \sin 波が描画されるツールを実装した。学習者は波長やずれを変更することで、強め合う干渉と弱め合う干渉の違いを直感的に理解できる。抽象的な「重ね合わせの原理」を視覚的に確認することで、干渉現象の理解を深めることを目的とした。

本ツールにおいて「ずれ」とは、2つの波の間の位相差を指す。プログラム内部では、2つの正弦波を以下の数式で定義し、これらを加算することで合成波を出している。

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - s)\right) \quad (1)$$

ここで、 A は振幅、 λ は波長、 s はユーザーが入力する「ずれ（位相のずれ）」である。

例えば、図6のように、波長を「100」に設定し、ずれを「0」とした場合、赤と青の波が完全に重なり、下のキャンバスに描画される緑色の合成波の振幅が2倍になる「強め合い」の状態を確認できる。一方で、図7のように、波長の半分である「50」をずれに入力すると、山と谷が打ち消し合い、緑色の合成波が平坦な直線（振幅0）となる「弱め合い」の状態へと変化する。

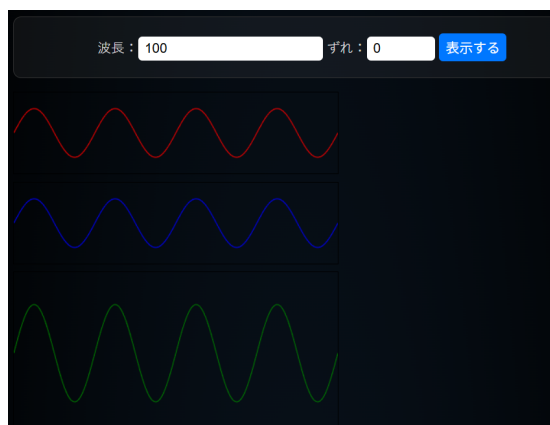


図6 波の干渉（強め合い）： $\lambda = 100, s = 0$

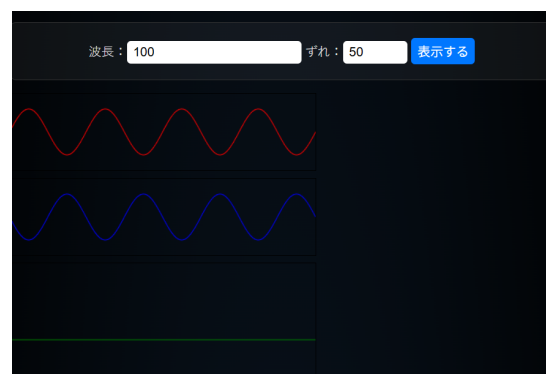


図7 波の干渉（弱め合い）： $\lambda = 100, s = 50$

[9] 音のドップラー効果動画

例えば、救急車が観測者に近づくときには、前方の観測者にとっては、1秒間に受け取る波の数が増えることになり、その結果振動数が大きくなる。これは音速が一定とすれば波長が短くなることに相当する。その結果音が高く聞こえることになる。逆に、観測者を通り過ぎて遠ざかる際には、波が引き伸ばされて波長が長くなり、音が低く聞こえる。この動画により、数式による説明だけではイメージしにくい「波の変化」を捉えて、赤方偏移の理解へと繋げるステップとした。webでは、

ドップラー効果：doppler effect 波の発生源と観測者の相対的な速度によって波の周波数が（従って波長も）変化して観測される現象。音波などの媒質を伝わる波と（特殊相対性理論に基づく）電磁波では周波数変化を計算する式がわずかに異なる。互いに近づく場合には周波数が高く、遠ざかる場合には周波数が低く観測される。光の場合には前者を青方偏移、後者を赤方偏移（運動学的赤方偏移）と呼ぶ。遠方の銀河からの光は赤方偏移しているが、これは宇宙膨張に起因する宇宙論的赤方偏移で、ドップラー効果による運動学的赤方偏移とは異なる。

の説明を加えている。

[10] 赤方偏移ツール

ドップラー効果を視覚化するために、赤方偏移の値 z を入力するとスペクトル画像が横方向に移動し、波長が伸びて赤い側へずれる様子を確認できるツールを制作した。天体が観測者から遠ざかるときに光の波長が伸びるという赤方偏移の性質を、式ではなく視覚的な変位として捉えられるようにしたものである。赤方偏移 z の大きさは距離の指標としても利用されるため、宇宙膨張やハッブルの法則を学ぶ前段階の理解に役立つ構成とした。例えば、図8の赤方偏移の値 z に「0.10」を入力すると、観測されるスペクトル画像が右側へずれる。これにより、本来の場所にあった水素の吸収線の位置が赤色の方へ移動する様子を確認できる。



図8 赤方偏移によるスペクトルのずれ

3.5 A.4 原子・原子核

本章は、教科書 [2] の A.4 章に対応するものである。ここでは、宇宙論の学習に必要な原子および原子核の基礎概念を整理した。

ページ前半では、陽子、中性子、電子の 3 つの粒子をそれぞれの性質を短くまとめた。また、原子番号 表形式で整理することで、文字だけでは捉えにくい数量の関係を理解しやすくした。本節は、後に扱う核融合反応や恒星の内部構造に向けた準備として、学習者が原子の基礎を気軽に理解できる導入部分となっている。

次に、水素原子の遷移と光の色ツール [11] を作成した。

[11] 水素原子の遷移と光の色ツール

原子核の周りにおける電子の軌道（エネルギー準位）と、放出される光の波長の関係を学ぶために実装した。電子が外側の軌道から内側の軌道へ遷移する時、そのエネルギー差が光として放出される。

本ツールにおいての n は、電子が存在する軌道の階層の中の主量子数である。水素原子では、外側の軌道（高いエネルギー）から内側の軌道（低いエネルギー）へ電子が移る「遷移」が起こる際、そのエネルギー差 ΔE が光として放出される。放出される光の波長 λ は以下の式である。

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

ここでの h はプランク定数で、 c は光速である。

本ツールでは、可視光領域の光を放つバルマー系列（ $n = 3$ から $n = 2$ への遷移）を対象としている。ユーザーは遷移前の軌道番号 n を選択することで、ジャンプする幅（エネルギー差）が大きいほど波長が短くなり、青紫寄りの色へと変化する。

例えば、図 9 の、遷移前の軌道として「 $n = 3$ 」を選択すると、パネルに赤色（波長 656.3 nm）が表示される。一方で、図 10 は、より外側の「 $n = 6$ 」から遷移させると、エネルギー差が大きくなるため波長が短くなって、紫色（波長 410.2 nm）へと変化する。これによって、電子のジャンプする幅と光の色（エネルギー）の対応関係を理解させて、バルマー系列の可視光のスペクトルを学習できる。



図 9 $n = 3$ から $n = 2$ への遷移



図 10 $n = 6$ から $n = 2$ への遷移

3.6 A.5 恒星の一生

本章では、恒星の一生についてまとめたページである。付録外だが、web ページでは、恒星の一生を HR 図を交えて記載している。進化の概要として、小質量星は赤色巨星を経て白色矮星になること、大質量星では超新星爆発が起こり、中性子星やブラックホールが形成される可能性があることを示した。これらの説明は、複雑な核反応の内容に踏み込みすぎず、全体像をつかむことを目的としている。また、恒星の進化段階を視覚的に理解するため、ヘルツシュプリング・ラッセル図 (HR 図) を掲載した。縦軸が絶対等級、横軸が色指数 (B - V) やスペクトル型を表すことを説明した。絶対等級では「距離によらない本当の明るさ」が比較できること、横軸では恒星の表面温度が読み取れることを強調した。こうした説明により、学習者が HR 図の意味を自然に理解できるよう構成している。

さらに、本ページでは太陽が HR 図のどの位置にあるかを紹介し、太陽が現在主系列星として安定した段階にあること、約 100 億年のうち半分程度を経過していることを示した。太陽が今後赤色巨星に進化し、最終的に白色矮星として残るという流れを太陽進化のアニメーションとともに説明している。次に、見かけの等級 m と距離 r [pc] から絶対等級 M を算出する「絶対等級計算ツール」を実装した。[12] ツールには、以下の式を使用した。

$$M = m - 5 \log_{10} r + 5 \quad (3)$$

[12] 絶対等級計算ツール

絶対等級 M を計算するために、見かけの等級 m と距離 r [pc] を入力するツールである。例えば、図 11 では、太陽を例にして、見かけの等級 m -26.7 で距離 r を 0.0000048 と入力すると、絶対等級 M は、4.89 という値が得られる。見かけでは明るく見える太陽が、実恒星の中ではごく一般的な明るさの主系列星に過ぎないことを数値で示すことができる。

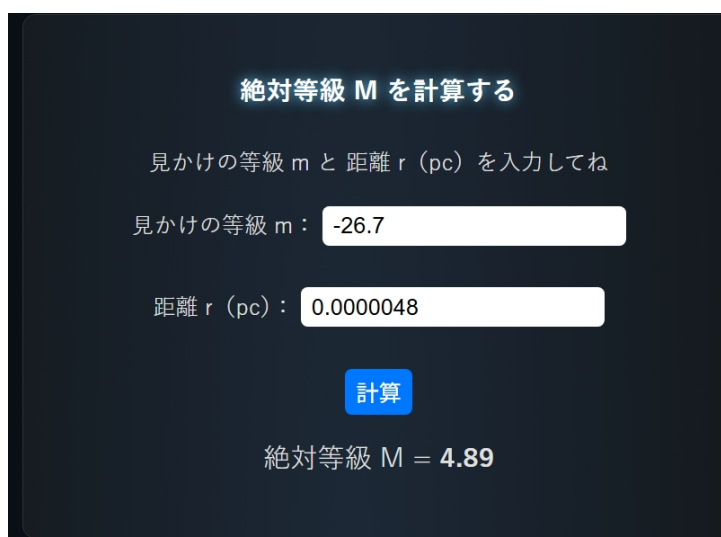


図 11 太陽の絶対等級を求める

web では、

見かけの等級：apparent magnitude 地球から恒星を見た時の明るさを表した量。地球から恒星までの距離に依存するため、恒星の実際の明るさではない。

絶対等級：absolute magnitude 天体を 10 パーセク (10 pc=32.6 光年) の距離から見た場合の見かけの等級。

ヘルツシュプルング・ラッセル図：Hertzsprung-Russell (HR) diagram

HR 図は、恒星の絶対等級（または光度）と表面温度（または色指数）の関係を示した散布図であり、20 世紀初頭にエイナー・ヘルツシュプルングとヘンリー・ノリス・ラッセルによって独立に考案された。HR 図を用いることで、恒星の進化、寿命、内部構造を視覚的に理解することができる。HR 図では、横軸に色指数（または表面温度）、縦軸に絶対等級（または光度）がとられる。という説明を加えてある。

3.7 A.6 事典

本章は、教科書 [2] の A.5 章に対応するものである。ここでは、ノーベル賞受賞者を表にまとめた。また、事典ベースにしている。惑星（天体名・公転半径・見かけの等級・絶対等級・大気・構成・写真）と、四季の代表的な恒星 10 個ずつをまとめた。

4 まとめ

本研究では、宇宙論の学習を支援するためのインタラクティブな Web サイト「Cosmo Navi」を制作した。

本研究の目的は、単に教科書のように数式や文章説明を羅列するのではなく、ユーザーが自ら操作し、その反応をリアルタイムに確認する能動的な学習を支援することにある。開発にあたり、以下の工夫を凝らした。

1. 物理で使われる単位と基本定宇宙規模の巨大な数値を扱うためのツール
 - **べき乗計算ツール**：指数表記に不慣れな学習者のため、基数と指数を分離して入力・計算できる仕組みを実装した。
 - **距離の相互換算ツール**：パーセク (pc) を入力すると、光年 (ly)、天文単位 (au)、キロメートル (km) の3つに変換して換算されるツールを構築した。
2. 天文学的な距離の測定天文学的距離をメインに、動的なマウスオーバーと計算機を作成した。
 - **年周視差計算ツール**：視差角の微小な変化が、いかに巨大な距離 (pc) の差を生むかを数値的に体感できるシミュレータを実装した。
 - **赤方偏移・光度距離・宇宙年齢の連動可視化**：データ可視化ライブラリ Plotly を活用した。教科書 [2] の静止図をインタラクティブ化し、グラフ上にマウスを重ねることで、特定の赤方偏移 z における「光度距離」や「現在からの時間 (宇宙年齢)」の値をピンポイントで読み取れる機能を実装した。
3. 波の特徴波の特徴を、ツールとアニメーションを用いて説明した。
 - **波の干渉ツール**：2つの正弦波の「波長」や「位相 (ずれ)」を操作し、その場で合成波 (強め合い・弱め合い) が生成されるプロセスを可視化した。
 - **ドップラー効果アニメーション**：救急車の音の変化を視覚化し、音波の伸縮を光の赤方偏移へ結びつける橋渡しとした。
 - **赤方偏移体験ツール**：赤方偏移の値 z に応じてスペクトル画像が赤側へスライドする機能を実装した。天体の後退速度と波長の伸びの関係を結びつけた。
4. 原子・原子核原子の構造をまとめ、水素原子の光の色ツールを作成した。
 - **水素原子の遷移と光の色ツール**：主量子数 n の選択により、電子のエネルギー遷移に応じたバルマー系列の発光色をパネルに表示し、光の色として観測される仕組みを再現した。
5. 恒星の一生恒星の一生を HR 図を中心に説明した。
 - **絶対等級計算ツール**：見かけの等級 m と距離 r から、天体の真の明るさ (絶対等級 M) を導出する計算機を実装した。太陽が実は一般的な主系列星であることを数値で示した。
 - **HR 図と恒星進化のアニメーション**：ヘルツシュプルング・ラッセル図上での太陽の移動と、赤色巨星から白色矮星へと至る進化過程を視覚的に提示した。

6. 事典惑星データ, 四季の恒星, ノーベル賞受賞者リストをデータベース化し, 事典としての機能を持たせた.

デザインの工夫: CSS を用いて宇宙空間をイメージさせる黒基調のデザインと光の演出 (ネオン効果) を採用した.

以上のツールを搭載した「Cosmo Navi」の開発により, 宇宙論をダイナミックに体験できる学習プラットフォームを実現した.

- **今後の展望:** 本研究により, インタラクティブに宇宙論学べる環境を構築したが, 以下の課題が挙げられる. 現在は教科書 [2] の付録内容が中心となっている. 今後は, 本文にも触れて加えたい. この web は日本語版しかないが, 英語版も作成したい.

公開してある URL は,

<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/cosmonavi/index.html> である.

本研究が, 宇宙論を学ぶユーザーに役立てば幸いである.

参考文献

- [1] Bryan Milner 著, Cosmology, (Cambridge University Press, 2000)
- [2] 真貝寿明 著, 現代物理学が描く宇宙論, (共立出版, 2018)
- [3] Simionato, M. 著, Redshift in physics and astronomy education, (2021)
- [4] <https://plotly.com/python/>