

第5回 日本天文学オリンピック 本選

実技問題

2026年2月22日 16時15分—17時45分

注意事項

- 1 試験開始の合図があるまで、この問題冊子を開いてはいけません。
- 2 問題冊子は全部で12ページあります。落丁、乱丁または印刷不鮮明の箇所があったら、手を挙げて監督者に知らせなさい。
- 3 解答には、必ず黒色鉛筆または黒色シャープペンシルを使用しなさい。
- 4 解答用紙・解答用グラフ用紙の指定欄に受験番号を記入しなさい。また、指定欄以外に受験番号を記入してはいけません。
- 5 解答は、必ず解答用紙・解答用グラフ用紙の指定された箇所に記入しなさい。
- 6 解答用紙・解答用グラフ用紙の解答欄に、関係のない文字、記号、符号などを記入してはいけません。
- 7 数値で解答する問題で、有効数字の指定がない場合には、各自で適切に判断し、妥当な有効数字で丸めた値を解答しなさい。過度に多すぎる、あるいは少なすぎる桁数で解答した場合は、有効数字を適切に考慮していないものとみなし、減点することがあります。
- 8 この問題冊子の余白は、草稿用に使用してもよいが、問題冊子は破いてはいけません。
- 9 解答用紙・解答用グラフ用紙は、持ち帰ってはいけません。
- 10 試験終了後、問題冊子・計算用紙・下書き用紙は持ち帰りなさい。
- 11 問題に関する質問は受け付けません。問題に不備があると考えた場合は、解答用紙・解答用グラフ用紙にその旨を記載してください。採点の際に考慮します。

第1問 (50点)

天体の観測に関する様々な事項について、以下の問い（問1～問4）に答えよ。また、解答用紙で指定されている問題では、解答に至るまでの式や考え方を書くこと。なお、観測地点はすべて東経 135° 、北緯 35° の地点とし、方位角は北から東向きに測るとする。

図1-1は、ある日の20時00分（日本標準時）に観測された全天星図である。なお、この時の東経 135° における地方恒星時は23時18分である。この星図において一部の太陽系内天体は省略されている。

※解答は解答用紙の図に記入すること

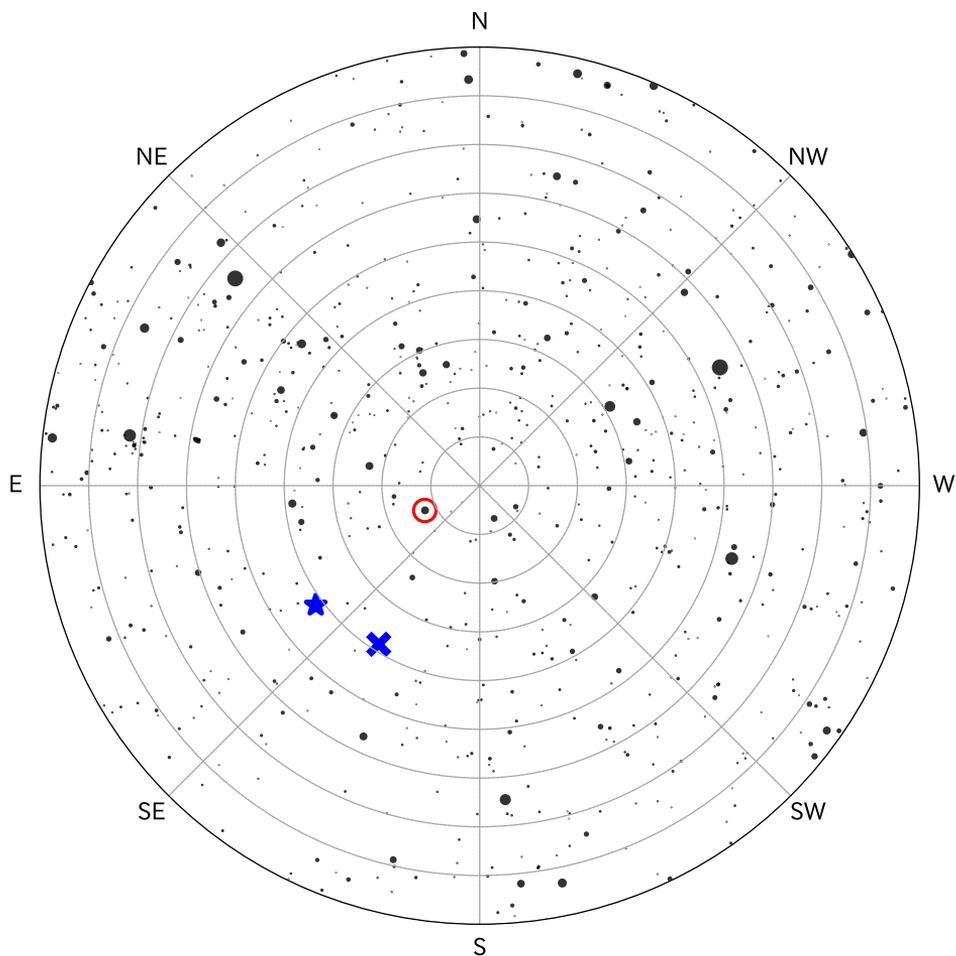


図1-1: ある日の20時00分（日本標準時）に東経 135° の地点から観測した星空。高度と方位角を表す線が引かれている。

問 1.

- (1) 図 1-1 において、赤い○がついた天体の固有名とバイエル符号を答えよ。
- (2) 解答用紙の星図 (図 1-1 と同じもの) において、以下のメシエ天体が存在する大まかな位置を×印で示せ。なお、各印のそばに天体の名前 (M1 等) を記入せよ。
M1, M31, M36

問 2. 解答用紙の星図において、銀河面 (銀緯が 0 度の線) を実線で記入せよ。

問 3. ある観測者が、双眼鏡を用いて夏の大三角付近にある「や座」を観測しようとしている。

- (1) 解答用紙の星図において、や座に属する恒星を 1 つだけ囲め。
- (2) や座の最も明るい 4 つの星を双眼鏡の視野内に収めるには、実視野が最低何度以上の双眼鏡を用いれば良いか、有効数字一桁で答えよ。ただし、解答は最低視野の 1.5 倍までの値を許容とする。

問 4.

- (1) 図 1-1 に青い×印で示された天体は、太陽系内の惑星 X である。また、惑星 X を一年後の同じ日時に観測したところ青い☆印で示された点に見えた。この惑星 X として適切なものを次の選択肢から一つ選び、惑星 X の公転周期を年を単位として見積もれ。
① 火星 ② 土星 ③ 天王星 ④ 海王星
- (2) 観測日において、惑星 X が南中した時の高度を求めよ。ただし、簡単のため、図 1-1 における観測時の惑星 X (青い×印) の高度は 50 度、方位角は 150 度とする。
- (3) 観測日において、惑星 X が南中するときの**地方恒星時**を求めよ。

第2問 (50点)

天体観測に用いる装置の特性と、得られるデータの質について、以下の問い（問1～問6）に答えよ。

検出器でデータを取得して天体の観測を行うとき、得られるデータには、天体からの信号 (signal) の他にも、様々な要因で生じるノイズ (noise) が含まれる。もしノイズが天体からの信号に比べて非常に強い場合には、天体からの信号はノイズに埋もれてしまい、天体を検出することが出来ない。天体の検出の優位性を示すため、天体からの信号強度 S をノイズ強度 N で割った値である信号雑音比 (S/N 比) が用いられる。以下の問題では特に注意がない限り、天体の明るさ I 、露光時間 t 、観測波長幅 w とするとき、 S は $I \times t \times w$ に比例し、 N は背景光 (明るさ B) 由来のポアソンノイズのみを考慮し $\sqrt{B \times t \times w}$ に比例するものとする。

問1. S/N 比は露光時間 t および観測波長幅 w の何乗に比例するか、それぞれ答えよ。

問2. ある光学系において、12等級の星を波長幅 100 nm、透過率が 1.0 のフィルターを用いて 1 秒間観測したところ、 $S/N = 10$ であった。背景光の明るさは一定であるとする。

- (1) 同じ設定で、15等級の星を $S/N = 20$ で測光観測するために必要な露光時間を求めよ。
- (2) (1) の設定から、用いるフィルターを波長幅 10 nm、透過率が 0.8 のナローバンドフィルターに変更した。この設定で、15等級の星を $S/N = 20$ で測光観測するために必要な露光時間を求めよ。

問3. 総露光時間 T を n 分割して撮影した n 枚の画像を合成して 1 枚の画像を得る。

- (1) 合成後のシグナルが単独画像の n 倍、ノイズが \sqrt{n} 倍になるとき、合成後の S/N 比と、時間 T を分割せずに 1 回で露光した際の S/N 比を比較せよ。
- (2) 実際の観測においては、ポアソンノイズの他に、読み出しノイズという露光時間に依存しないノイズが含まれることが知られている。1 枚あたりの全ノイズが $\sqrt{N_{\text{poisson}}^2 + R^2}$ (R は読み出しノイズ) で表されるとき、露光時間を細かく分割することのデメリットを、 S/N 比の観点から説明せよ。

問 4. ある天体の測光観測を行い、得られた画像データから星像の輝度プロファイル（ピクセルごとのカウント値の分布）を確認したところ、本来であれば山なりになるはずの頂点部分が、図 2-1 のように一定の値で水平に押しつぶされたような形状を示していた。このような現象が起こる理由を、検出器の物理的特性の観点から説明せよ。

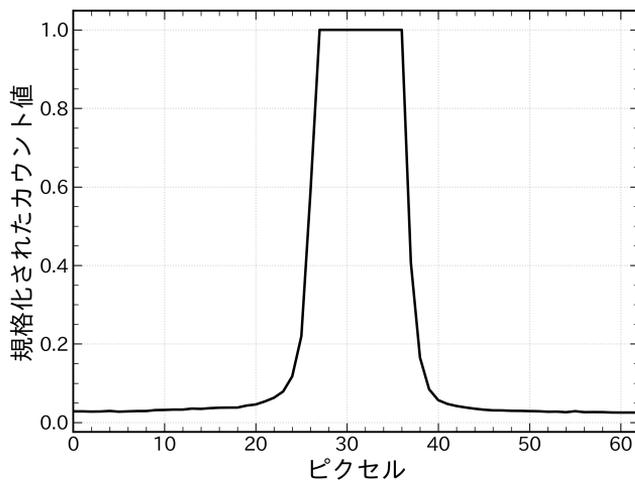


図 2-1: ある星像の輝度プロファイル

問 5. 問 4 のような現象を回避する目的以外に、1 枚の長時間露光撮影を行う場合と比較して、複数の短時間露光画像を合成する手法にはどのような利点があるか。簡潔に述べよ。

冷却 CCD カメラを用いた天体観測では、検出器の特性や光学系の影響を取り除き、天体本来の明るさ（物理量）を算出するために「一次処理」と呼ばれる較正作業が必要となる。一次処理では、天体の画像や別途取得された以下のような画像（フレーム）を用いる。

ライトフレーム：望遠鏡で天体を撮影した未加工の画像。天体の光に加え、検出器由来のノイズや光学系の不均一さが含まれる。

ダークフレーム：望遠鏡に蓋をして、ライトフレームと同じ露出時間・温度で撮影した画像。検出器由来のノイズのみが記録される。

フラットフレーム：一様な明るさの光源を撮影した画像。レンズや鏡の「周辺減光」等を記録する。通常、あらかじめダークフレームによる処理が施されており、明るさは 1 に規格化されている。

問 6.

ある 4×4 ピクセルの検出器を用いて、ライト、ダーク、フラットの各フレームを撮影し、以下のような値を得た。これらのデータをもとに、補正後の値を算出し、解答用紙の 4×4 のマス目を埋めよ。

ライトフレーム	ダークフレーム	フラットフレーム
55	3	0.9
79	8	1
65	1	1.1
37	5	1.1
74	9	1
96	2	1.1
80	7	1.1
43	4	1
58	6	1
81	1	1.1
53	10	1.1
29	2	1
25	5	0.9
33	4	1
24	3	1
19	8	0.9

第3問 (100点)

近年、観測技術の進歩により遠方銀河の探査が急速に進み、初期宇宙の理解が進んでいる。遠方銀河探査、およびその統計について、データ解析を行いながら以下の問い（問1～問2）に答えよ。本問では、等級の定義として AB 等級を用いる。

問1. 遠方銀河探査において重要な銀河のスペクトル特徴であるライマン α ブレイクについて説明した以下の文章を読み、次の問いに答えよ。

ライマン系列は、 n を主量子数とすると、水素原子における $n \geq 2$ と $n = 1$ のエネルギー準位間での電子の遷移に伴う線スペクトルの総称である。ライマン系列の中でも、 $n = 2$ と $n = 1$ のエネルギー準位間での遷移に伴う線スペクトルを、ライマン α 線と呼ぶ。中性水素を多く含むガス雲を紫外線域 (UV 域) の光が透過する際には、 $n = 1$ (中性状態) の水素を $n = 2$ に励起させることに使われるためライマン α の吸収線が生じる。またライマン α 線より **ア** 波長では、 $n = 1$ から $n \geq 3$ の各準位へ励起させるために、離散的なライマン吸収線が生じる。さらに、 $n = \infty$ (完全電離) と $n = 1$ の準位間の遷移に対応する波長をライマン端と呼び、ライマン端より **イ** 波長では中性水素の電離による、連続的な吸収が生じる。

高赤方偏移の遠方銀河からの UV 放射が我々に届くまでには、前景の様々な赤方偏移にある銀河間中性ガスによるライマン α 吸収線が卓越するため、ライマン α の波長より短波長側の光がほぼ吸収される。これにより、高赤方偏移銀河のスペクトルは、ライマン α の波長で短波長側に向かって急激にエネルギーフラックス密度が低下する特徴が見られる。このようなスペクトルの特徴をライマン α ブレイクと呼ぶ。

遠方銀河を探査際には、ライマン α ブレイクを用いたドロップアウト法と呼ばれる手法が用いられている。これは複数フィルターで測光観測を行い、隣接する 2 フィルターでライマン α ブレイクを捉え、特定の赤方偏移の候補天体を探査するというものである。一方で銀河のスペクトルには、ライマン α ブレイク以外にも、 $n = \infty$ と $n =$ **ウ** の準位間の遷移に相当する波長で生じるバルマーブレイクが生じることがある。ドロップアウト法を用いた探査では、より **エ** 赤方偏移の銀河のバルマーブレイクをライマン α ブレイクと間違えて選んでしまうこともあるため、注意が必要である。

- (1) 上の文章中の空欄 **ア** ~ **エ** に当てはまる語や数値を答えよ。
- (2) 水素原子において電子が 2 つの任意のエネルギー準位 n_1, n_2 ($n_1 < n_2$) 間で遷移するとき生じる線スペクトルの波長 λ は、リュードベリの式

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

に従うことが知られている。ただし R_{∞} はリュードベリ定数であり、 $R_{\infty} = 1.09737 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ である。リュードベリの式を用いて、ライマン α とライマン端の波長を、nm を単位として有効数字 4 桁で求めよ。

- (3) 図3-1はジェイムズ=ウェッブ宇宙望遠鏡を用いて取得された、ライマン α ブレイクが卓越しているある銀河のスペクトルである。この銀河の赤方偏移を求めよ。

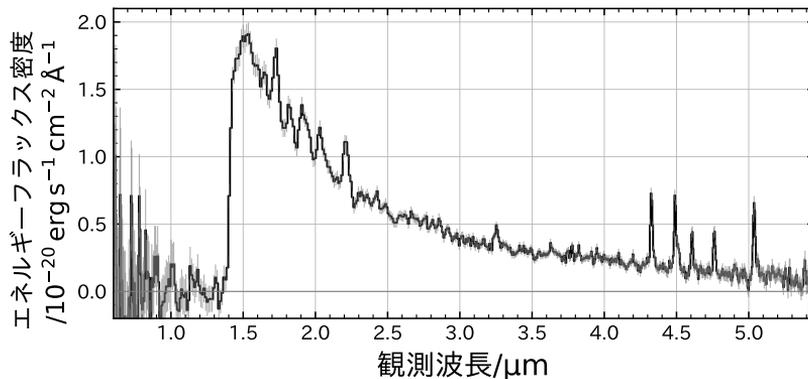


図3-1: ライマン α ブレイクが卓越している銀河のスペクトル。JADES DR4 (Curtis-Lake, E., et al. (2025), arXiv e-prints, arXiv:2510.01033) のデータ (doi:10.17909/8tdj-8n28) を利用。

- (4) ジェイムズ=ウェッブ宇宙望遠鏡のNIRCam撮像装置の複数フィルターでの測光結果からドロップアウト法を用いて遠方銀河探査を行ったところ、図3-2のようなスペクトルエネルギー分布を持つ銀河が見つかった。観測されている急激な等級の変化がライマン α ブレイクによるものであるとき、この銀河の赤方偏移として適切なものを選び。理由も簡潔に答えよ。

① 8 ② 10 ③ 12 ④ 14

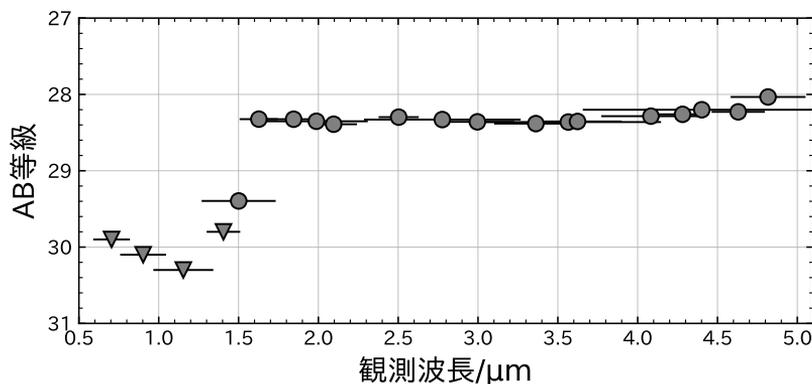


図3-2: ドロップアウト法で見つかった遠方銀河候補天体のスペクトルエネルギー分布。○印でプロットされた点は銀河の各フィルターでの等級を示しており、▽印でプロットされた点は、銀河が検出されなかったため、各フィルターで取りうる等級の上限値をプロットしている。波長軸方向のエラーバーは、各フィルターの波長範囲を示している。

問 2. 銀河は宇宙における星形成や化学進化の現場であり、銀河の数密度が赤方偏移到に応じてどのように変化するか、すなわち宇宙における銀河数密度の時間進化を理解することは重要である。しかし、銀河の数密度は光度に依存しており、一般には光度の高い銀河ほどその数密度は小さくなる。そこで、異なる赤方偏移で銀河の数密度を比較する際には、光度（絶対等級）の関数としてみた単位光度（絶対等級）あたりの数密度である光度関数を用いる。特に UV 域での光度（UV 域での絶対等級 M_{UV} ）の関数として作成した光度関数を、UV 光度関数 $\Phi(M_{UV})$ [$\text{Mpc}^{-3} \text{mag}^{-1}$] と呼ぶ。図 3-3 は UV 光度関数の例であり、 M_{UV} の小さい、すなわち UV で明るい銀河ほど、数密度が小さいことがわかる。

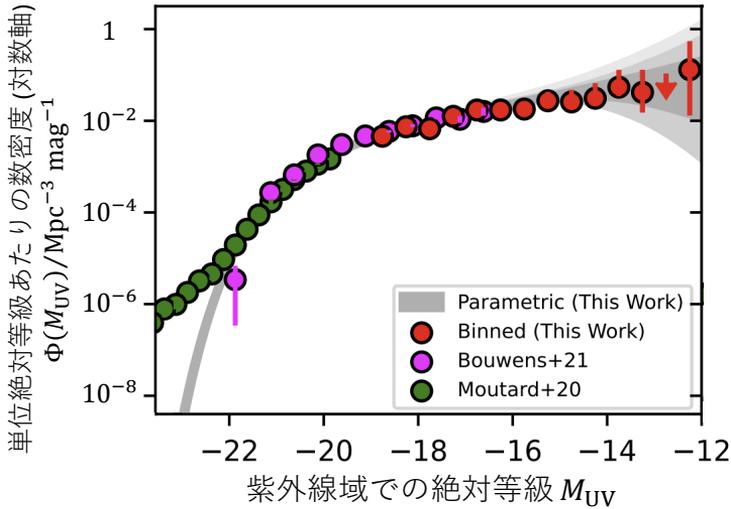


図 3-3: UV 光度関数の例。Bouwens, R. J., et al. (2022), *ApJ*, 940, 55 の $z \sim 2$ での結果を示している。

本問では、ドロップアウト法で発見された銀河の個数から、UV 光度関数を求めてプロットしてみよう。ドロップアウト法で $z = 5.5-6.5$ の銀河を選択可能なフィルターを用いて、 1.0 deg^2 の領域から遠方銀河を選択した。表 3-1 は、各 M_{UV} ビン内の光度を持つ遠方銀河の個数を示している。

表 3-1: ドロップアウト法で選択した $z = 5.5-6.5$ の遠方銀河の M_{UV} ビン別個数

M_{UV} ビン	個数	M_{UV} ビン	個数
-23.0 ~ -22.5	2	-21.0 ~ -20.5	969
-22.5 ~ -22.0	27	-20.5 ~ -20.0	2039
-22.0 ~ -21.5	110	-20.0 ~ -19.5	3792
-21.5 ~ -21.0	461	-19.5 ~ -19.0	6244

- (1) 今回天体を探索した領域の体積を、 Mpc^3 を単位として有効数字 2 桁で求めよ。ただし宇宙論的效果を考慮したときの $z = 5.5$, $z = 6.5$ までの距離はそれぞれ $8.02 \times 10^3 \text{ Mpc}$, $8.44 \times 10^3 \text{ Mpc}$ である。必要に応じて、全天の面積が 41253 deg^2 であることを用いてよい。
- (2) 単位等級幅あたりの天体の個数を探査領域の体積で割ることにより、 $z = 5.5$ - 6.5 での UV 光度関数 $\Phi(M_{\text{UV}})$ を $\text{Mpc}^{-3} \text{ mag}^{-1}$ を単位として求めよ。また、ポアソンノイズを仮定し、選択された銀河の個数 N の不確かさを \sqrt{N} と評価するとき、求めた光度関数の不確かさも求めよ。求めた値は、「光度関数の値 \pm 不確かさの値」という形式で解答用紙中の表に記載せよ。
- 【補足】実際のデータから探査を行うときには、暗い光度の天体ほど見逃してしまったり、バルマーブレイクとライマン α ブレイクとを間違えたことによるコンタミネーションの混入などが起こるため、こうしたコンプライトネスやコンタミネーションの効果を踏まえた補正を行う。今回は簡単のため、表 3-1 内の個数はこうした補正を行った後の値であるとする。
- (3) 問 2(2) の結果を用いて、横軸を M_{UV} 、縦軸を $\Phi(M_{\text{UV}})$ (対数軸) とした UV 光度関数 $\Phi(M_{\text{UV}})$ を、解答用グラフ用紙①にプロットせよ。図 3-4 の例も参考にして、(2) で求めた不確かさを縦軸方向のエラーバーとして示すこと。また、横軸の値は各 M_{UV} ビン内の M_{UV} の最小値と最大値の平均値を用い、各 M_{UV} ビンの範囲を横軸方向のエラーバーで示すこと。なお、解答用グラフ用紙①は片対数グラフ用紙であるので注意せよ。

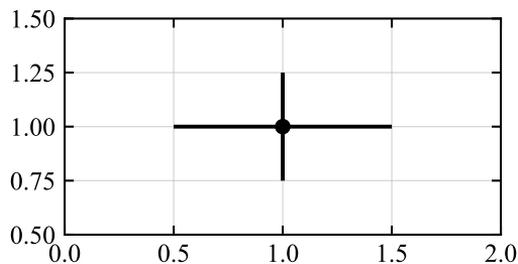


図 3-4: 問 2(3) における、エラーバーを含めたグラフの書き方の例。この例では、 $x = 1$ (x 軸方向のビン は $0.5 \sim 1.5$) で $y = 1$ のデータ点が、 y 軸方向に 0.25 の不確かさを持つ場合を示している。

各 M_{UV} ビンでの UV 光度関数 $\Phi(M_{\text{UV}})$ に, M_{UV} ビンの幅 ΔM_{UV} と対応する単位周波数当たりの UV 光度 $L_{\nu,\text{UV}}[\text{erg s}^{-1} \text{Hz}^{-1}]$ をかけ, 足し合わせていく ($L_{\nu,\text{UV}} \times \Phi(M_{\text{UV}})$, M_{UV} を M_{UV} 方向に離散的に積分していく) ことで, その赤方偏移における宇宙全体で平均した UV 光度密度 $\rho_{\text{UV}} [\text{erg s}^{-1} \text{Hz}^{-1} \text{Mpc}^{-3}]$ を計算できる。

- (4) 等級の定義として AB 等級を用いるとき, 見かけの等級 m と対応する単位周波数あたりのエネルギーフラックス密度 f_{ν} の間に,

$$f_{\nu} = 3.631 \times 10^{-0.4m} \times 10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$

が成り立つ。このとき, 絶対等級 M と単位周波数あたりの光度 L_{ν} との間に,

$$L_{\nu} = 4.34 \times 10^{-0.4M} \times 10^{20} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$$

という関係が成り立つことを示せ。ただし, $1 \text{ pc} = 3.09 \times 10^{18} \text{ cm}$ である。

- (5) 問 2(2) で求めた結果を用いて, $L_{\nu,\text{UV}} \times \Phi(M_{\text{UV}}) \times \Delta M_{\text{UV}}$ を $M_{\text{UV}} = -19$ から -23 まで足し合わせることで, $z = 5.5-6.5$ の宇宙における UV 光度密度 ρ_{UV} を $\text{erg s}^{-1} \text{Hz}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$ を単位として求めよ。各 M_{UV} ビン内では UV 光度関数 $\Phi(M_{\text{UV}})$ の値は一定であるとする。また, $L_{\nu,\text{UV}}$ は問 2(4) 中の式を参考に, 各 M_{UV} ビン内の M_{UV} の最小値と最大値の平均値を用いて評価すればよい。なお, UV 光度密度 ρ_{UV} の不確かさの評価は行わなくてよいものとする。

- (6) 銀河からの UV 放射は主に寿命の短い大質量星からの放射であるため、10 Myr 程度のタイムスケールで平均化した星形成率 (SFR [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$], 銀河内で 1 年あたりに作られる星の総質量) は $L_{\nu, \text{UV}}$ を用いて、

$$\text{SFR} = 1.4 \times 10^{-28} \left(\frac{L_{\nu, \text{UV}}}{\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}} \right) M_{\odot} \text{ yr}^{-1},$$

と書ける。これを参考にして、表 3-2 は、各 z ビンにおける UV 光度密度 ρ_{UV} を SFR 密度 [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$] に変換し、解答用紙中の表に記載せよ。ただし、 $z = 5.5$ -6.5 については問 2 (5) で求めた UV 光度密度 ρ_{UV} を用いて計算すること。

表 3-2: 各 z ビンにおける UV 光度密度 ρ_{UV}

z ビン	ρ_{UV} [$\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$]	z ビン	ρ_{UV} [$\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$]
0.1 ~ 0.3	7.6×10^{25}	2.3 ~ 2.7	3.6×10^{26}
0.3 ~ 0.5	1.1×10^{26}	2.7 ~ 3.1	3.0×10^{26}
0.5 ~ 0.7	1.6×10^{26}	3.1 ~ 3.5	2.4×10^{26}
0.7 ~ 1.1	2.4×10^{26}	3.5 ~ 4.5	1.7×10^{26}
1.1 ~ 1.5	3.4×10^{26}	4.5 ~ 5.5	1.0×10^{26}
1.5 ~ 1.9	4.1×10^{26}	6.5 ~ 7.5	4.4×10^{25}
1.9 ~ 2.3	4.1×10^{26}	7.5 ~ 8.5	3.2×10^{25}

- (7) 問 2 (6) の結果を用いて、横軸 z 、縦軸 SFR 密度とした SFR 密度の赤方偏移進化を、解答用グラフ用紙②にプロットせよ。横軸の値は各 z ビン内の z の最小値と最大値の平均値を用い、各 z ビンの範囲を横軸方向のエラーバーで示すこと。縦軸方向にはエラーバーはつけなくてよい。また、SFR 密度がピークとなる、すなわち宇宙で最も活発に星形成が進んでいた赤方偏移を有効数字 1 桁で答えよ。グラフの解答がない場合、赤方偏移についての加點も行わない。