

Color of the sky

空はなぜ「青く」、そして「明るい」のか？

尾田欣也 文献紹介 (Journal Club)

2026 年 6 月 9 日

紹介論文: K. Ishikawa & M. Takesada, arXiv:2605.28847

空はなぜ青い？

毎日見ているのに、理由を答えられる人は意外と少ない。

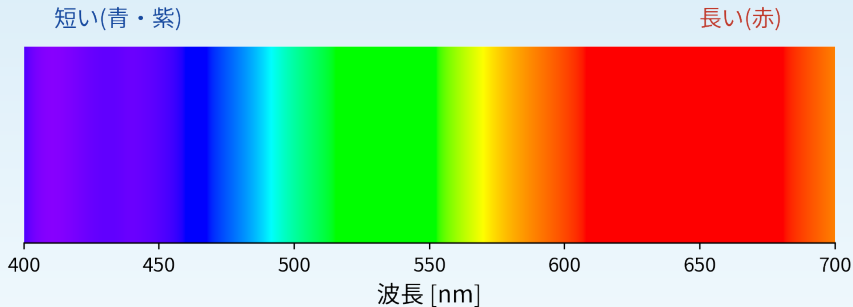
しかも「どれくらい明るいか」は、まだ説明しきれていなかった。

はじめに —— この発表のスタンス

- ・ 今日紹介するのは、**挑戦的で面白い主張**をする最新の論文(まだ査読前)。
- ・ 正直に言うと ——
この主張は間違っている可能性もけっこう高い、と私は見えています。
- ・ それでも紹介するのは、単純に**面白い**から。そして:
 - ・ 「論文に書いてある＝正しい」ではない。
 - ・ **どこを・なぜ疑うか**を考えるのが物理の練習。
- ・ 著者の石川さんは私の共同研究者。**人ではなく「主張」を疑う話**です。

まず前提: 光・色・散乱

- ・ 光は波。色のちがいは波長のちがい(青は短い・赤は長い)。
- ・ 太陽光が空気の分子に当たってあちこちに散らばる=「散乱」。
- ・ 私たちが見る「空の色」は、この散らばった太陽光。



1. なぜ空は青い? —— 古典物理の答え (色は説明できる)
2. でも「明るさ (絶対値)」が合わない —— と論文は主張
3. 量子の「大きな光の波」で解く —— 石川さんの挑戦的な主張

最後に「私が怪しいと思う点」をまとめます。

- ① なぜ空は青い?(古典の答え)
- ② でも「明るさ」が合わない
- ③ 量子の「大きな光の波」で解く(という主張)

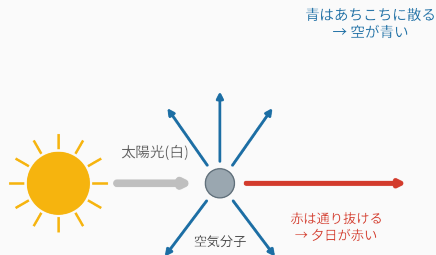
おまけ & 私の研究

① 古典の答え: レイリー散乱

- ・ 空気の分子は光の波長よりずっと小さい。
- ・ 散乱の強さは波長 λ で決まる:

$$(\text{散乱の強さ}) \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

- ・ 青 (短い λ) は赤より 5~10 倍強く散らばる $\Rightarrow$ 昼の空は青い。
- ・ 夕方は光が大気を長く通り、青が散り尽くして赤い夕焼け。



→ ①まとめ: 「色(青さ)」は古典物理できれいに説明できる。

バックアップ

補足: なぜ 散乱の強さ $\propto 1/\lambda^4$ か (直観)

核心: 振動する双極子の放射は「加速度²」に比例し、加速度は ω を 2 つ持つ。だから 4 乗。

1. 光 = 振動電場 $E(t) = E_0 \cos \omega t$ ($\omega = 2\pi c/\lambda$ 、青は ω 大 = λ 小)。
2. 分子は λ よりずっと小さく、可視光は分子の共鳴から遠い $\Rightarrow$ 分極率 α はほぼ振動数によらず一定。誘起双極子 $p = \alpha E_0$ 。
3. 加速する電荷は電磁波を再放射する (= 散乱)。放射の電場 $\propto$ 加速度 $\ddot{p}$ 。
4. $\ddot{p} = \frac{d^2}{dt^2}(\alpha E_0 \cos \omega t) \propto \omega^2 (\cos \text{を} 2 \text{回微分すると} \omega^2) \Rightarrow E_{\text{scat}} \propto \omega^2$ 。
5. 強さは電場の 2 乗: $I \propto E_{\text{scat}}^2 \propto \omega^4 \propto \frac{1}{\lambda^4}$. ■

数値: 青/赤 = $(700/450)^4 \approx 6$ 倍 (青を 400 nm に取れば ≈ 9 倍) $\Rightarrow$ 「5~10 倍」。

別角度 (次元解析・Rayleigh 1871): 双極子放射場 $E_{\text{scat}} \propto \frac{k^2 \alpha E_0}{R}$ ($k = 2\pi/\lambda$ 、 $\alpha \sim$ 分子体積 V) $\Rightarrow I \propto \frac{V^2}{\lambda^4 R^2}$ 。この k^2 こそ「2 回微分 = 加速度」の出どころで、同じ 4 乗を与える。

前提: 分子 $\ll \lambda$ かつ共鳴から遠い (α ほぼ一定)。共鳴近傍や大きな粒子 (雲 = Mie 散乱) では崩れ、散乱は白っぽくなる。

補足: 量子力学でのレイリー散乱 (Kramers – Heisenberg)

設定: 原子・分子は基底状態 $|i\rangle$ のまま、光子が $(\omega, \varepsilon) \rightarrow (\omega, \varepsilon')$ と向きだけ変える (弾性 = レイリー)。

摂動論: 相互作用 $H_{\text{int}} = -\frac{e}{mc} \mathbf{A} \cdot \mathbf{p} + \frac{e^2}{2mc^2} \mathbf{A}^2$ 。光子が 1 個入って 1 個出る過程は

- ・ $\mathbf{A} \cdot \mathbf{p}$ の 2 次 (中間状態 $|n\rangle$ 経由。吸収 $\rightarrow$ 放出 と 放出 $\rightarrow$ 吸収 の 2 通り)
- ・ $\mathbf{A}^2$ の 1 次 (seagull。自由電子なら Thomson 項)

をたすと Kramers – Heisenberg の分散公式。振動数依存の分極率が出る:

$$\alpha(\omega) = \frac{2}{\hbar} \sum_n \frac{\omega_{ni} |\langle n | d | i \rangle|^2}{\omega_{ni}^2 - \omega^2}, \quad \omega_{ni} = \frac{E_n - E_i}{\hbar}.$$

断面積 (双極子放射の ω^4 が前因子):

$$\sigma(\omega) = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{\omega}{c} \right)^4 |\alpha(\omega)|^2.$$

3 つの極限:

- ・ $\omega \ll \omega_{ni}$ (可視光 $\times$ 空気 = UV 遷移の下): $\alpha \approx \text{一定} \Rightarrow \sigma \propto \omega^4 \propto \lambda^{-4}$ (レイリー)
- ・ $\omega \rightarrow \omega_{ni}$ (共鳴近傍): 分母 $\rightarrow 0$ で α 発散 $\Rightarrow$ 共鳴蛍光、 λ^{-4} は崩れる
- ・ $\omega \gg \omega_{ni}$ (自由電子): Thomson 散乱、 $\sigma \rightarrow \text{一定}$

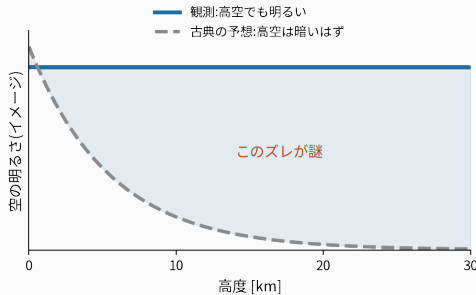
$\lambda^{-4} = (\omega/c)^4$ 前因子、 $\alpha \approx \text{const}$ は「共鳴から遠い」前提。cf. J.J. Sakurai, *Advanced Quantum Mechanics* (本論文 ref.[29])。

- ① なぜ空は青い?(古典の答え)
- ② でも「明るさ」が合わない
- ③ 量子の「大きな光の波」で解く(という主張)

おまけ & 私の研究

②「色」は合う。では「明るさ」は？

- ・ 色だけでなくどれくらい明るいはずか計算すると？
- ・ 古典の計算 $\Rightarrow$ 実際よりずっと暗い空に。
- ・ しかも高いところほどズレが大きい、と論文は言う。



概念図 (イメージ)

→「色は合うのに、明るさ (絶対値) が合わない」—— これが論文の出発点。

高度 10,000 m。

空気はほとんど無い。

なのに窓の外空は
まだ青くて明るい。

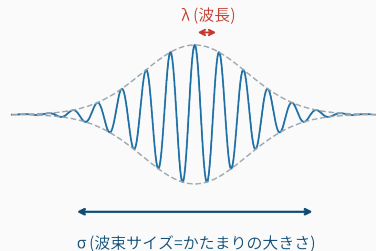
古典論では「高空はほぼ真っ暗」のはず。
観測と矛盾する、というのが謎。

- ① なぜ空は青い?(古典の答え)
- ② でも「明るさ」が合わない
- ③ 量子の「大きな光の波」で解く(という主張)

おまけ & 私の研究

③ 石川さんのアイデア: 光は「大きな波のかたまり」

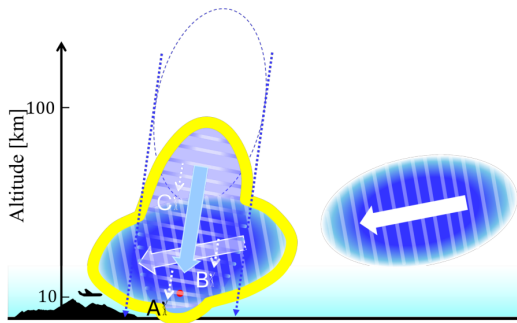
- 量子力学では光(光子)は点でなく広がった波のかたまり(波束)。
- 波束には2つの別スケールがあり、これが別物:
波長 λ (波の間隔=色、 $\sim 0.5 \mu\text{m}$) と サイズ σ (かたまりの大きさ)。
- 石川さんは太陽光の $\sigma \sim 100 \text{ km}(!)$ と仮定。中に $\sim 10^{11}$ 個の波が入る計算。
- この σ が大きいほど「新しい散乱の寄与」が効く、という筋書き。



模式図 (縮尺無視: 実際は $\sigma/\lambda \sim 10^{11}$)

散乱の起こりやすさ = ふつうの散乱 + 量子の新しい寄与 (専門的には $P = \Gamma T + P^{(d)}$)

③ 図で見る: 大きな波だから高空でも明るい(という主張)



- ・ 散乱するのは地表近くの分子。
- ・ でも光の波が巨大なので、散乱光は高度 10～20 km でも観測される。
- ・ だから高空でも空は明るい、と説明する。

図:Ishikawa & Takesada, arXiv:2605.28847, Fig. 1 (著者)

③ 数字も合う、と主張

- ・ 新しい計算だと、地球のアルベド (太陽光をどれだけ反射するか) が

$$\text{Albedo} \approx 0.27$$

となり衛星観測とよく一致する、と主張。

- ・ 高空の明るさも観測と合う、とする。

→ ③まとめ: 光を「大きな波」として量子で扱うと明るさが説明できる、と石川さんは言う。

バックアップ

補足: アルベドの式 (論文 Eq.(8) – (11))

レイリー散乱確率 P_R (前方・後方対称) を使い、地表での直達光・拡散光の割合と比:

$$f_{\text{direct}} = 1 - P_R, \quad f_{\text{diffuse}} = \frac{P_R}{2}, \quad r_d = \frac{f_{\text{diffuse}}}{f_{\text{direct}}} = \frac{P_R}{2(1 - P_R)}.$$

アルベド (太陽光の反射率) は

$$\text{Albedo} = \frac{P_R}{2} = \frac{r_d}{1 + 2r_d}.$$

r_d	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Albedo	0.25	0.27	0.29	0.30	0.32

論文は札幌の $r_d = 0.58$ を採り $\Rightarrow$ **Albedo** = 0.27、衛星観測の最新値とよく一致、と主張。

注: $r_d \rightarrow$ アルベドの関係式自体は妥当 (r_d は独立な観測量で、そこから別の観測量=アルベドを導き衛星値と一致 = 循環ではない整合性チェック)。本当に問うべきは予言される P_R の絶対値が正しいか (log 因子 1–10 等 + 波束サイズ依存、 $\rightarrow$ 次スライド)。

補足: 波束サイズの見積り — 石川さんの根拠と私の疑問

論文の見積り: 太陽光 $\sigma_\gamma \sim 100 \text{ km}$ (refs.[34,35])/ 分子 $\ell \approx 5 \times 10^{-7} \text{ m}$ (ref.[14])。 $\sigma_\gamma \gg \sigma_M$ で散乱光強度が高度に依らず一様(高度 $\lesssim 20-30 \text{ km}$ 、図 $R \approx 30 \text{ km}$)。実験室は比 $\sim 10^{-9}$ (= 第2類極小)。

石川さんの根拠(石川流の「波束サイズ」):

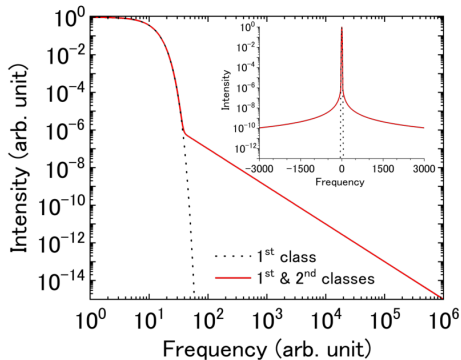
- ・ この形式では波束サイズは「環境で決まるパラメータ」で第2類量を左右する(論文本文が明言)。素朴な光学的コヒーレンス長とは別概念として扱う。
- ・ その評価法が ref.[14](Ishikawa-Jinnouchi「Wave packet sizes in QM Scatterings」)。太陽光は太陽の天体物理量(refs.[34,35])に基づき $\sim 100 \text{ km}$ と見積もる。
- ・ つまり「散乱に効く波束の大きさ」は素朴な値よりずっと大きい、が彼の主張の土台。

私の疑問: 標準的な光学では太陽光の coherence length は $\mu\text{m}-\text{mm}$ 。石川流の「環境で決まる $\sim 100 \text{ km}$ 」が大気レイリー散乱に効く正しい量かが核心。ここが本説の成否を分ける(私はかなり懐疑的)。

- ① なぜ空は青い?(古典の答え)
- ② でも「明るさ」が合わない
- ③ 量子の「大きな光の波」で解く(という主張)

おまけ & 私の研究

おまけ: 実験室でも兆候?(レーザー × ナノ粒子)



- ・ レーザーを微粒子に当てた光のスペクトル。
- ・ 中心の鋭いピーク = ふつうの散乱。
- ・ **なだらかな裾 (赤線) = 新しい寄与、と主張。**

図: Ishikawa & Takesada, arXiv:2605.28847, Fig. 2 (著者)

私(尾田)との関係

- ・ 著者の石川さんは私の**共同研究者** (前方散乱・波束の物理)。
- ・ 「光を点でなく**広がった波束**として扱うと散乱が変わる」—— この発想自体は私たちの研究と地続き。
- ・ だからこそ、今日の主張も**興味を持って・でも批判的に**見ている。

では、私はどこを疑っているか

- ・ **最大の疑問: 太陽光が「100 km の波のかたまり」?**
 - ・ 太陽光はバラバラの波長・位相の寄せ集め (インコヒーレント)。
 - ・ そろって振る舞える長さ (coherence length) はミクロン~mm 程度、が標準的理解。
 - ・ 100 km はそれより 10 桁以上大きい。ここが本当なら大概合う/嘘なら大概崩れる。
- ・ 地球アルベド ~ 0.3 は主に雲 (Mie)+地表。分子レイリーの寄与はもっと小さく、0.27 を分子散乱に帰すのは過大では?
- ・ そもそも「空が暗すぎる」謎は、ふつうの大気物理 (多重散乱) で説明済みでは?

→ 面白い。でも鵜呑みは禁物。

詳しい Claude による批判

(この回の発表アシスタント Claude が整理した批判。専門的には要検証。)

1. **波束サイズ 100 km の正当性 (最重要):** 標準光学では太陽光の coherence length は $\mu\text{m} - \text{mm}$ 。石川流の「環境で決まる $\sigma \sim 100 \text{ km}$ 」(ref.[14]) が大気レイリー散乱に効く正しい量か。ここが本説の成否を分ける。
2. 「謎」は本当に未解決か (そもそも世間でそう言われていない): 空の明るさは**放射輸送**(多重散乱 + オゾン Chappuis 吸収 + エアロゾル)で精密にモデル化される成熟分野で、未解決の謎とは見なされていない。論文の比較相手は「平面波 + 単一散乱」という藁人形。実際、古典の名研究 Hulburt (1953) はむしろ純レイリーが薄明天頂を観測の 2–4 倍に**過大評価**(=「暗すぎる」と逆向き)、オゾン吸収で一致と報告 — ズレの符号すら条件依存。1 回の散乱のレイリー断面積は実験でよく測れているので、多重散乱を足せば合う。立証責任は「正しい放射輸送でも食い違いが残る」を示す側にある。
3. **アルベドの帰属:** 地球アルベド ~ 0.3 は主に雲 (Mie)+**地表**。分子レイリーの寄与は $\sim 0.05 - 0.06$ 程度で、0.27 を分子散乱に帰すのは過大の疑い ($r_d \rightarrow$ アルベドの式自体は循環でなく妥当)。
4. **第 2 類の実在性 + 査読前:** 第 2 類項は運動エネルギー保存と「scattering into cones 定理」を破る — 有限時間の不確定性内で実験と無矛盾か要吟味。加えて本稿は**査読前 preprint(s12)**で独立追試・査読を経ていない。

まとめ

① 色は古典で OK ・ ② 明るさが謎 ・ ③ 「巨大波束」で解く主張

面白い挑戦。でも核心 (100 km 波束) が怪しく、私は懐疑的。

「論文に書いてある = 正しい」ではない。

どこを・なぜ疑うか —— それを持ち帰ってください。