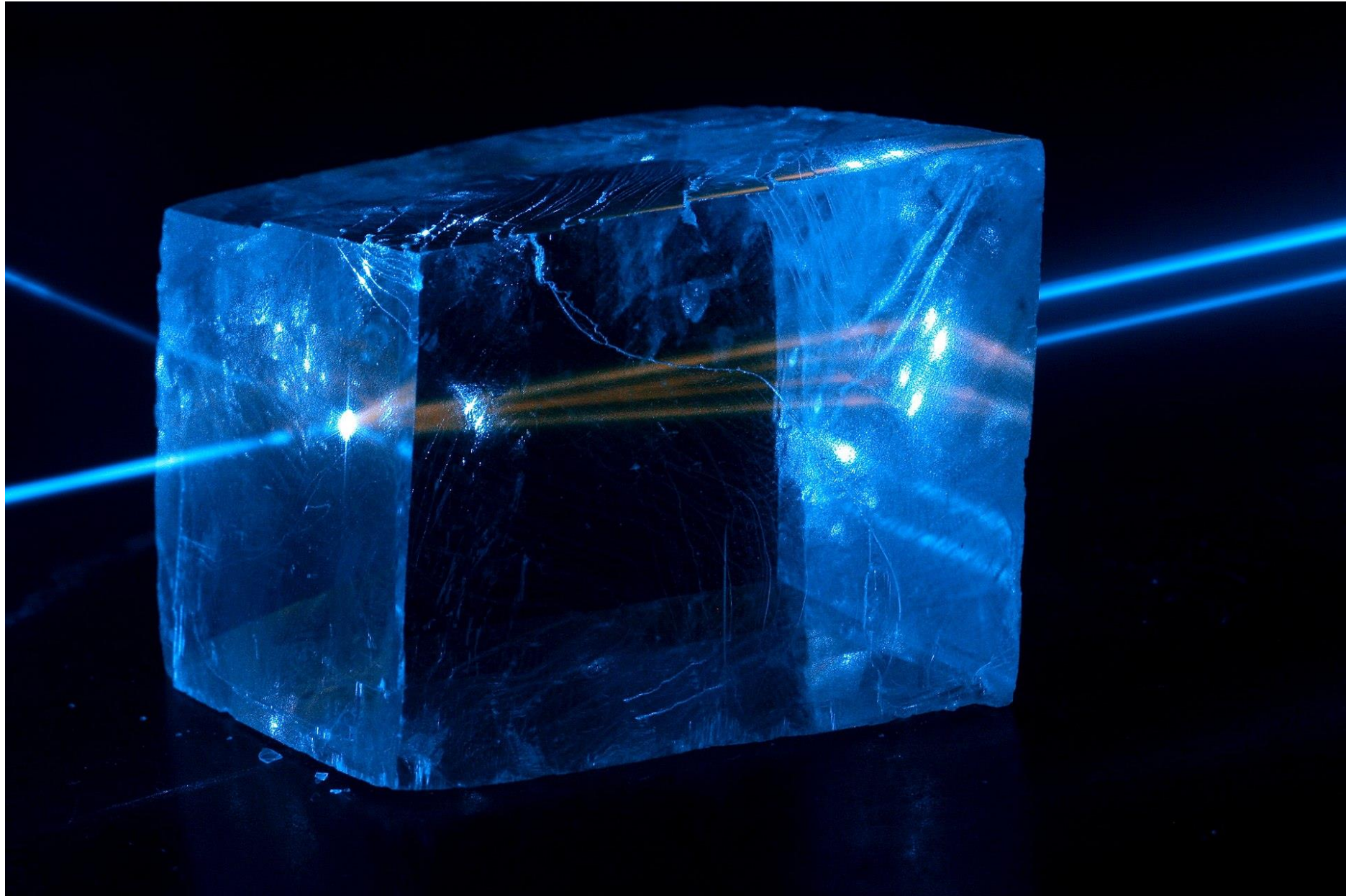


光線のなりたち

レイトレ合宿8

https://twitter.com/ishiyama_

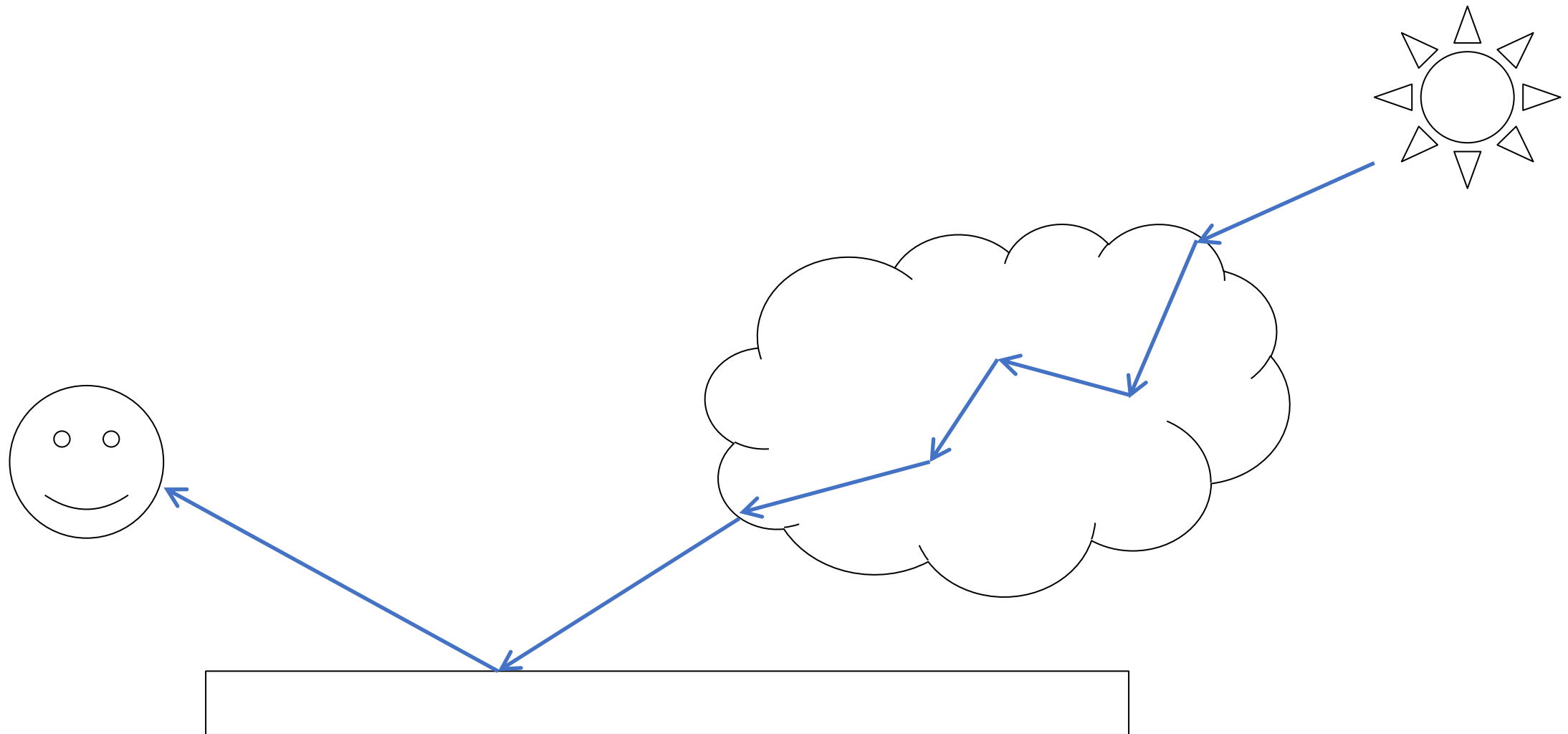
光線



<https://en.wikipedia.org/wiki/Photon>

- 光線は直進、反射、屈折する

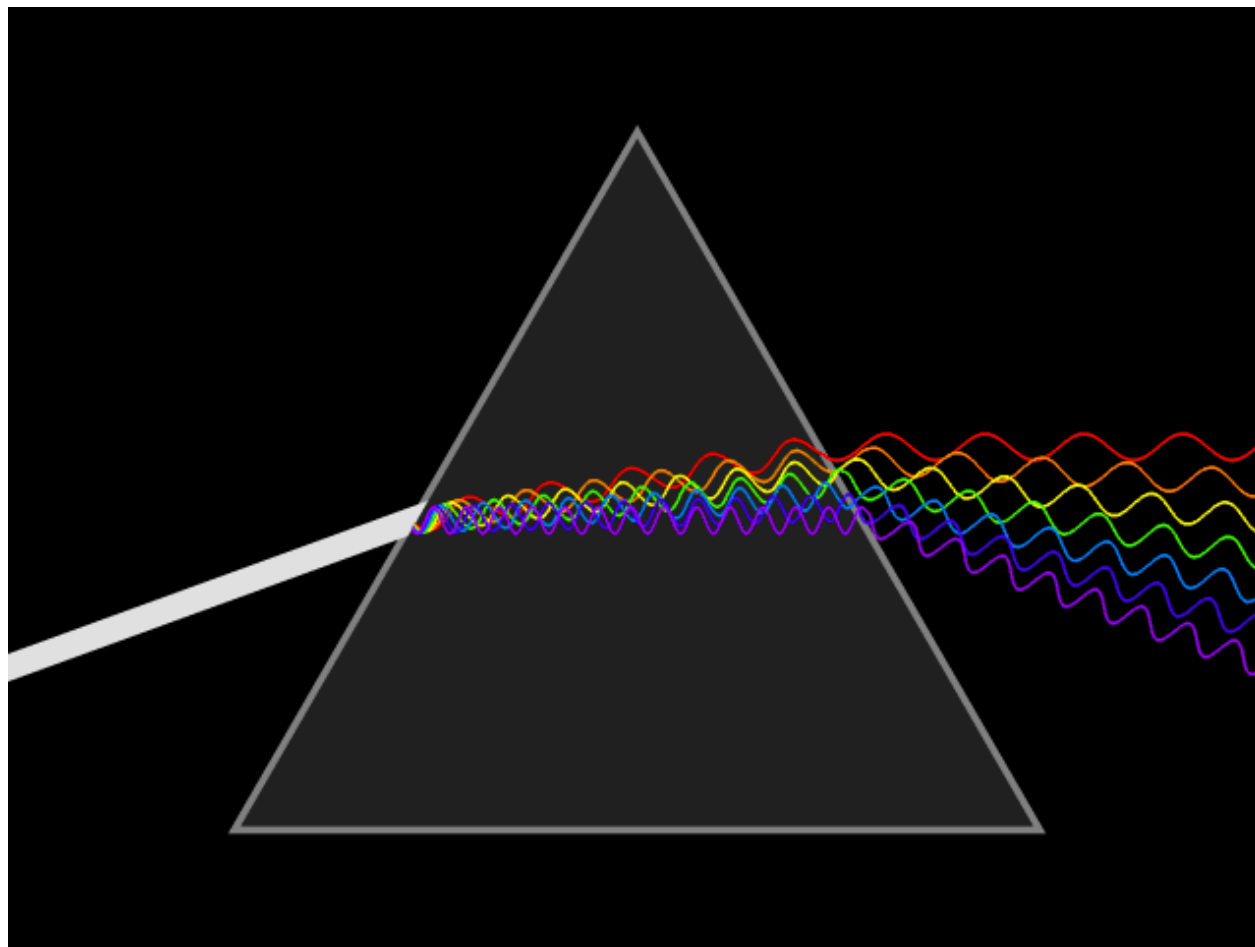
パストレーシングやフォトンマッピング



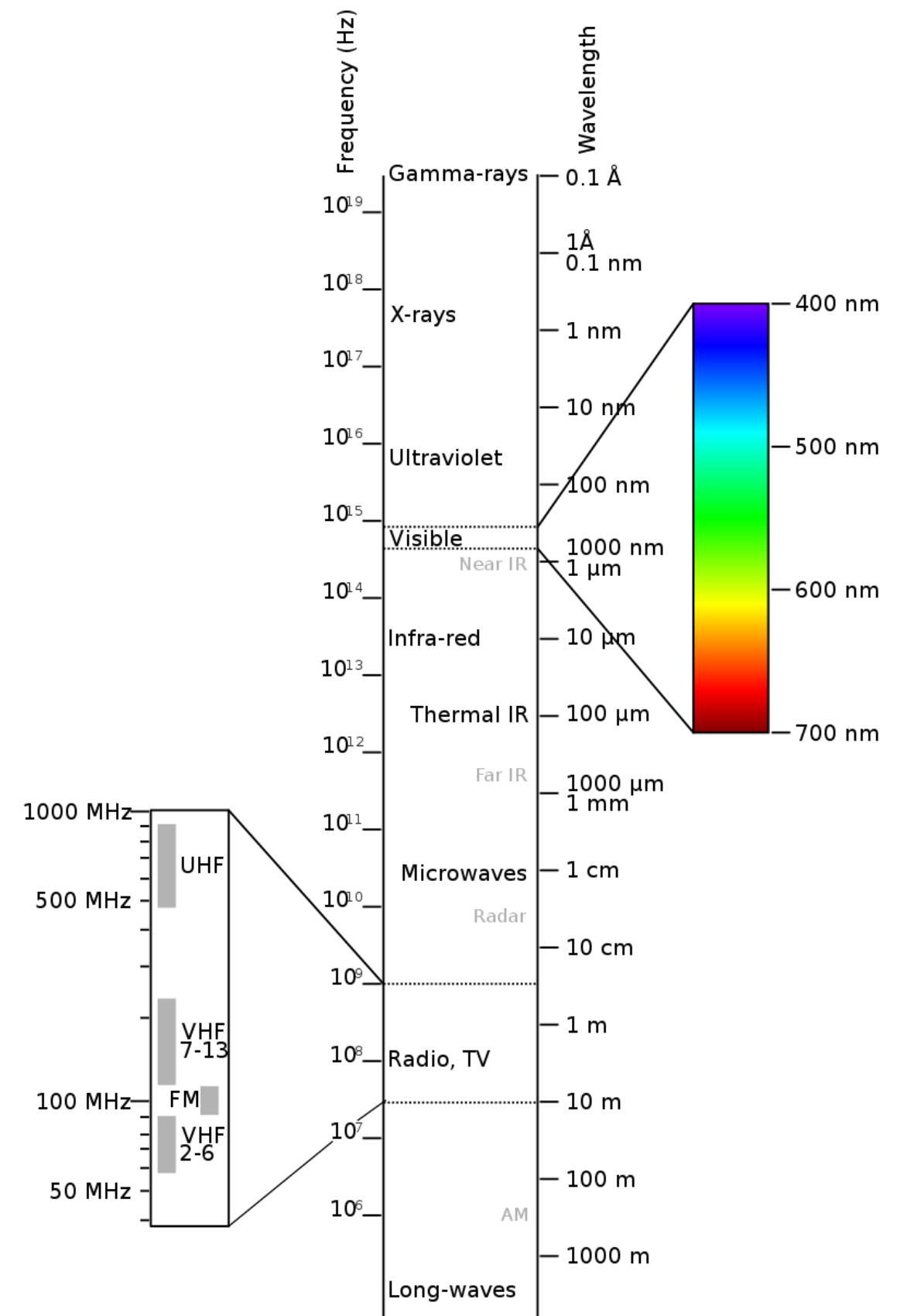
- 光線に沿って Radiative Transfer 方程式を再帰的に解くことで、写実的な画像が得られる
- 光線を詳しく知るために、**電磁波から光線のなりたちを追う**

光

- 光は電磁波の一種

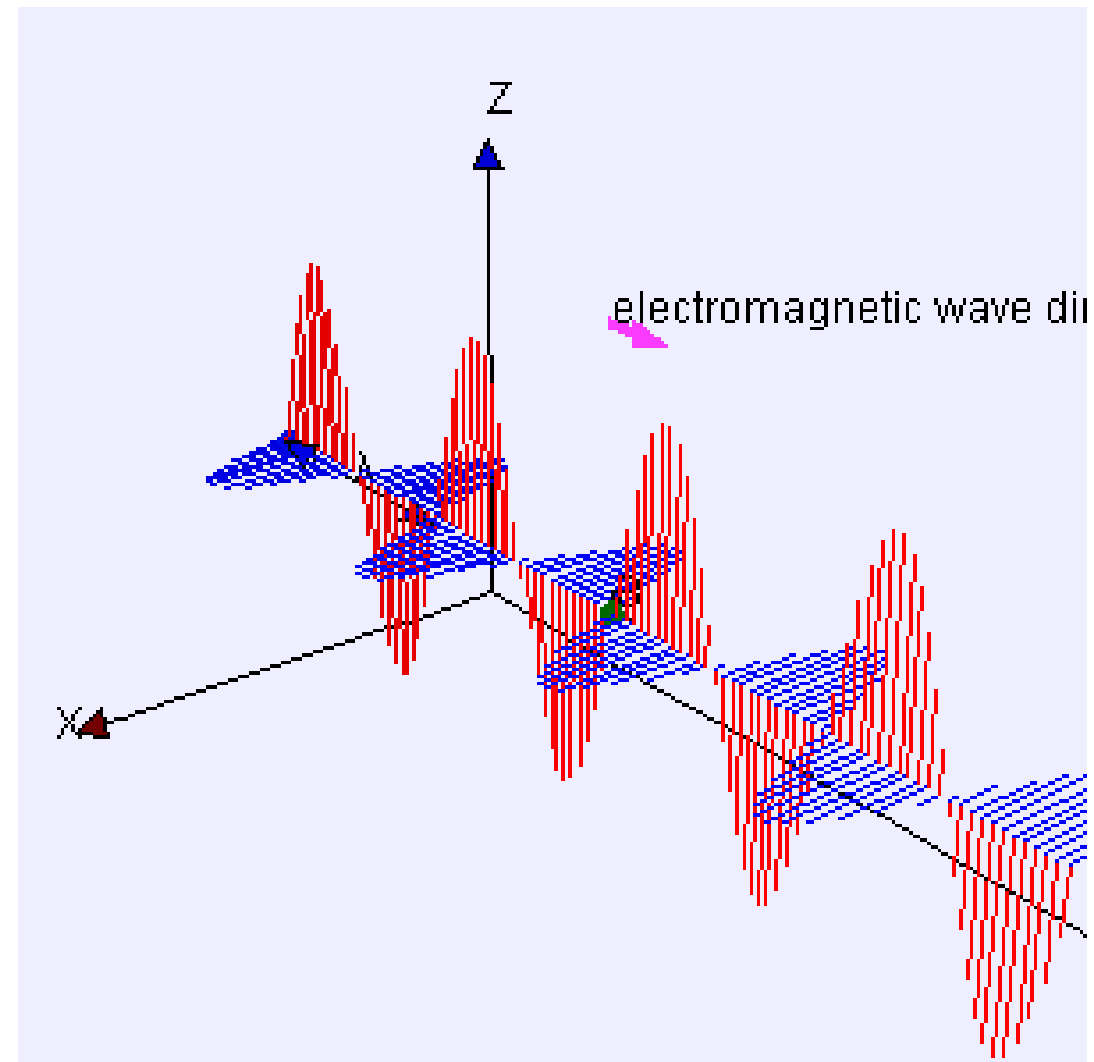
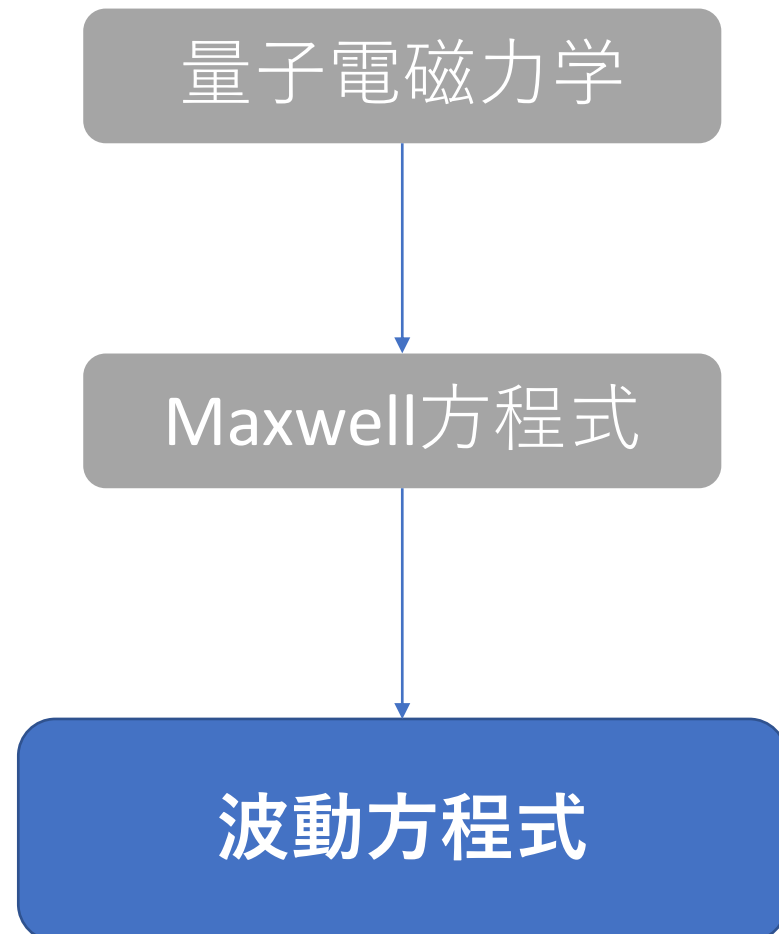


<https://en.wikipedia.org/wiki/Light>



https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum

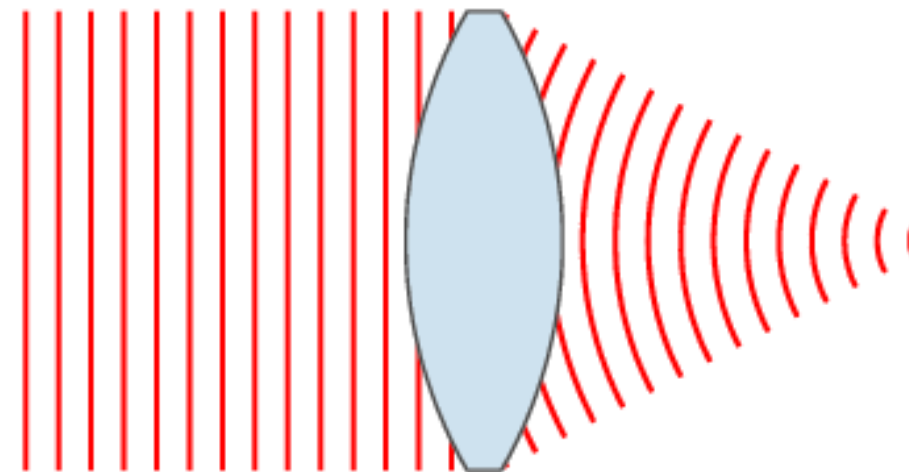
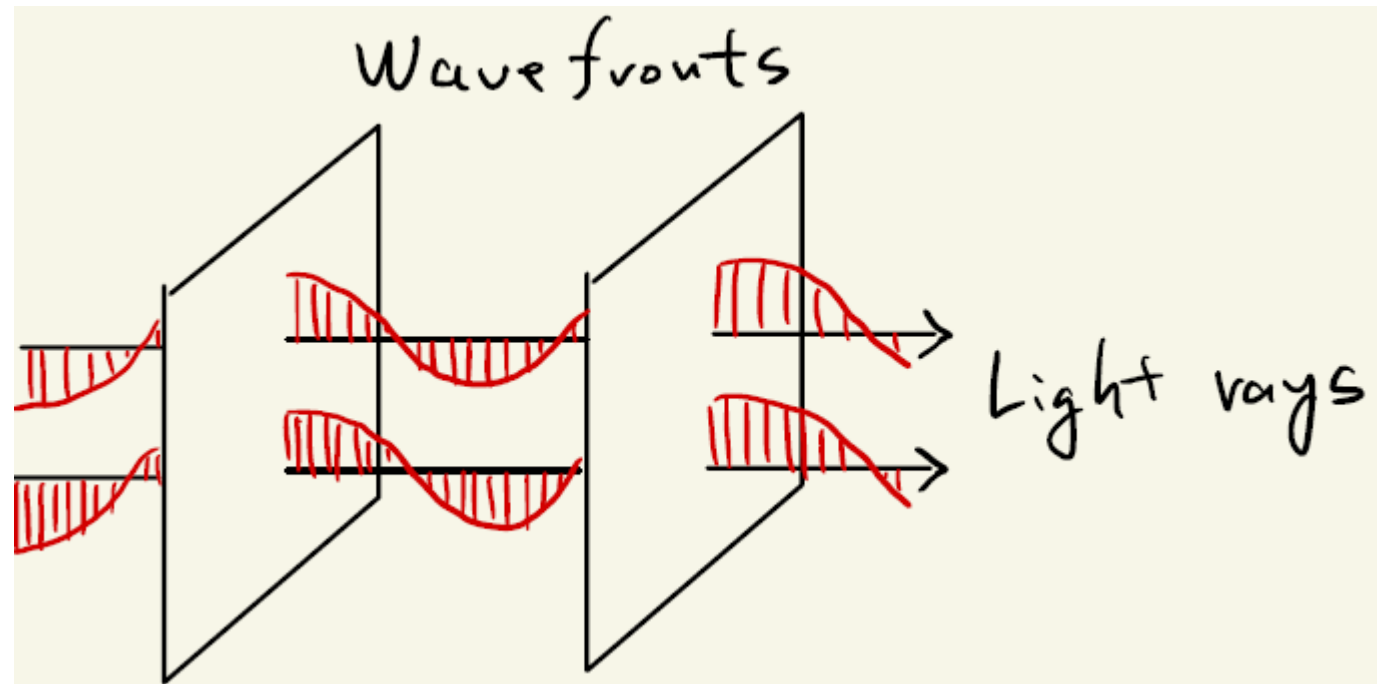
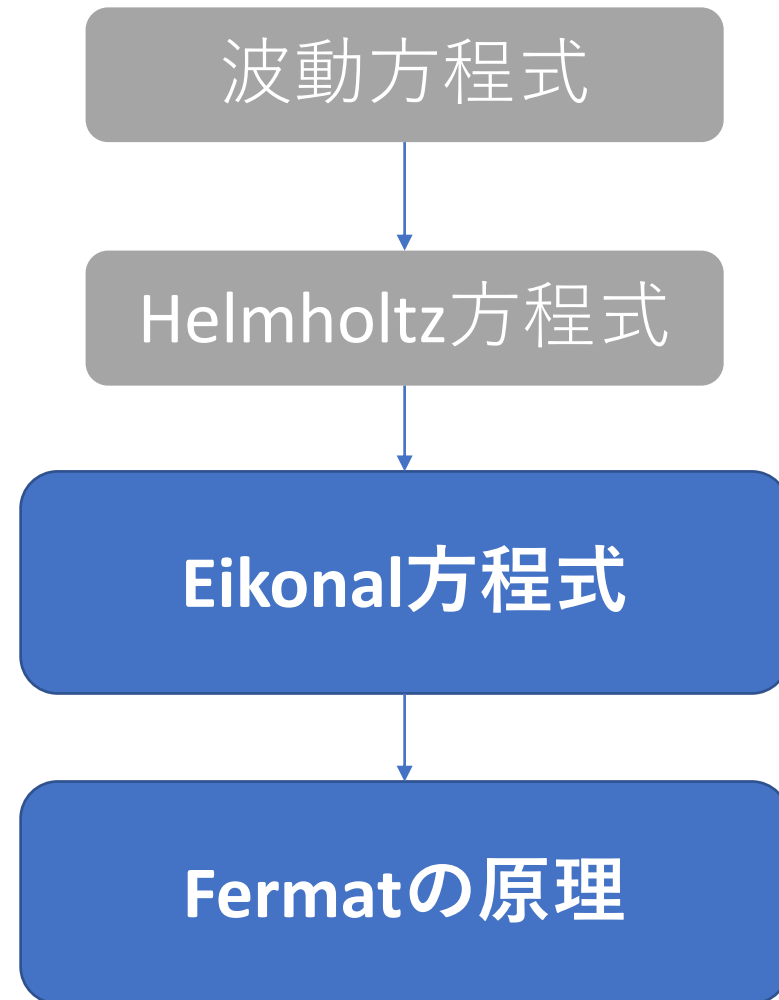
電磁波



https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_radiation

- **電磁波は電場と磁場が振動する横波**
 - 進行方向に沿ってエネルギーが流れる
 - エネルギーの時間平均は放射束密度 $[\text{W m}^{-2}]$

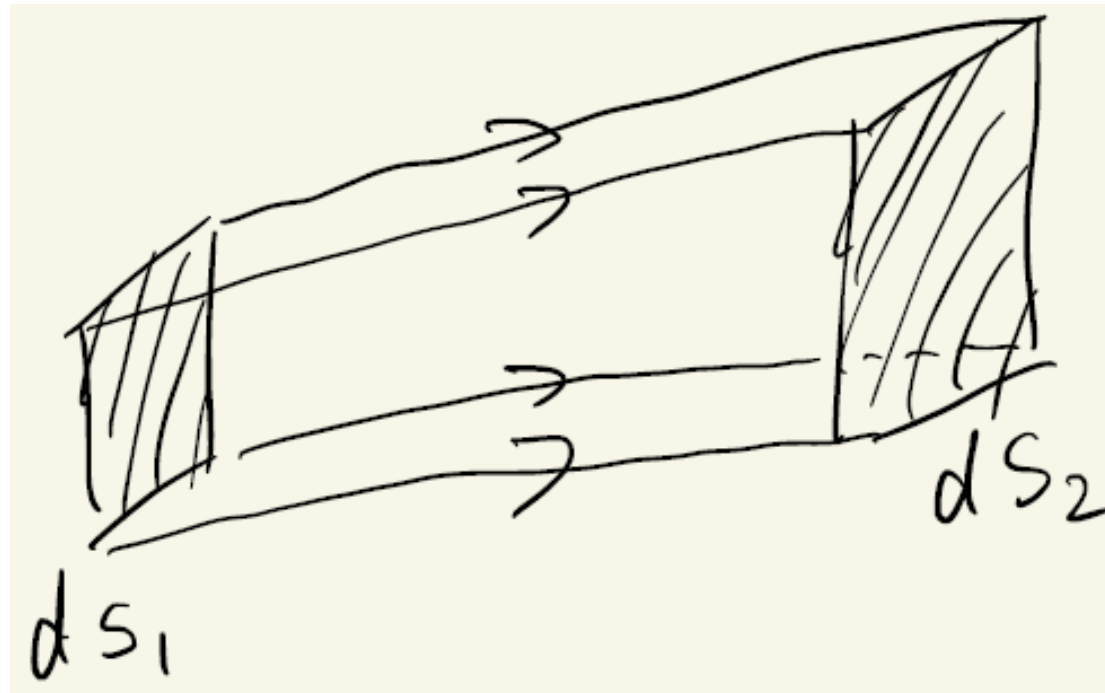
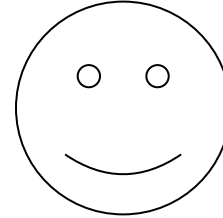
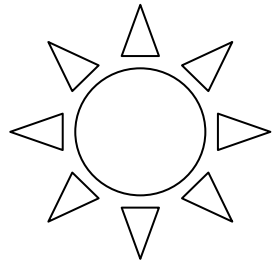
光線



<https://en.wikipedia.org/wiki/Wavefront>

- 光線は電磁波の進行方向に沿って引いた矢印
 - 波動的性質など無視して、幾何光学近似を仮定

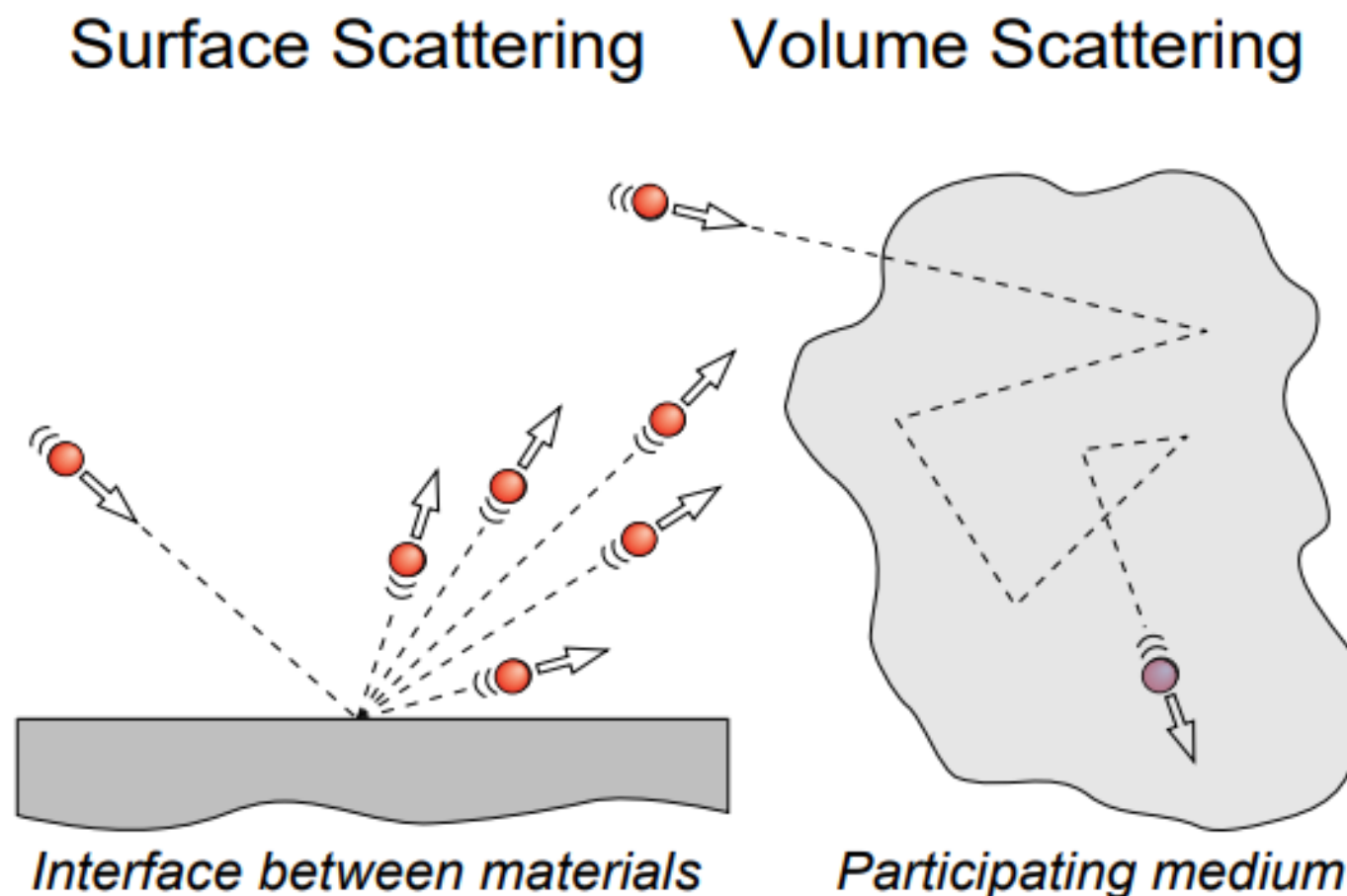
放射量



- 性質の同じ光線をまとめて放射量を作る
 - 上記の例は放射束 [W]
 - その他の放射量は [Born and Wolf 1980] を参照

Radiative Transfer 方程式の現象論的導出

- 放射量を運ぶ粒子の集団を考える
 - 散乱媒質：位相関数で散乱 → Volume Rendering 方程式
 - 境界面：BRDFで反射 → Rendering 方程式
 - 詳細は [Arvo 1993] [Fascione et.al. 2019]



[Arvo 1993]

まとめ

- 光線
 - 幾何光学近似のもとで、電磁波の進行方向を繋いだ矢印
 - 放射量も得られる
- Radiative Transfer 方程式
 - 放射量を運ぶ粒子と、散乱媒質や境界面との相互作用を記述
 - 散乱媒質 → Volume Rendering 方程式
 - 境界面 → Rendering 方程式
- ※ 最近の話題
 - 光の波動性を保つ光輸送 [Steinberg and Yan 2021] [Steinberg et. al. 2022]

参考文献

電磁気学

[Zangwill 2013] Zangwill, A., 2013. *Modern electrodynamics*. Cambridge University Press.

光学

[Born and Wolf 1980] Born, M. and Wolf, E., 1980. *Principles of Optics*, 7.

Linear Boltzmann 方程式としての Radiative Transfer 方程式の導出

[Cercignani 1988] Cercignani, C., 1988. *The Boltzmann equation and its applications*. Springer, New York, NY.

Radiative Transfer 方程式と、Rendering 方程式、Volume Rendering 方程式の現象論的導出

[Arvo 1993] Arvo, J., 1993. Transfer equations in global illumination. *Global Illumination, SIGGRAPH '93 Course Notes*, 2.

パストレーシングの総説

[Fascione et.al. 2019] Fascione, L., Hanika, J., Heckenberg, D., Kulla, C., Droske, M. and Schwarzhaupt, J., 2019. Path tracing in production: Part 1: Modern path tracing. In *ACM SIGGRAPH 2019 Courses* (pp. 1-113).

光の2重スリット実験

[Dimitrova and Weis 2008] Dimitrova, T.L. and Weis, A., 2008. The wave-particle duality of light: A demonstration experiment. *American Journal of Physics*, 76(2), pp.137-142.

光子に焦点を当てた場の量子論の解説

[Torre 2018] Torre, C.G., 2018. What is a Photon? *Foundations of Quantum Field Theory*.

波動的性質を保つ光輸送と CG への応用

[Steinberg and Yan 2021] Steinberg, S. and Yan, L.Q., 2021. A generic framework for physical light transport. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 40(4), pp.1-20.

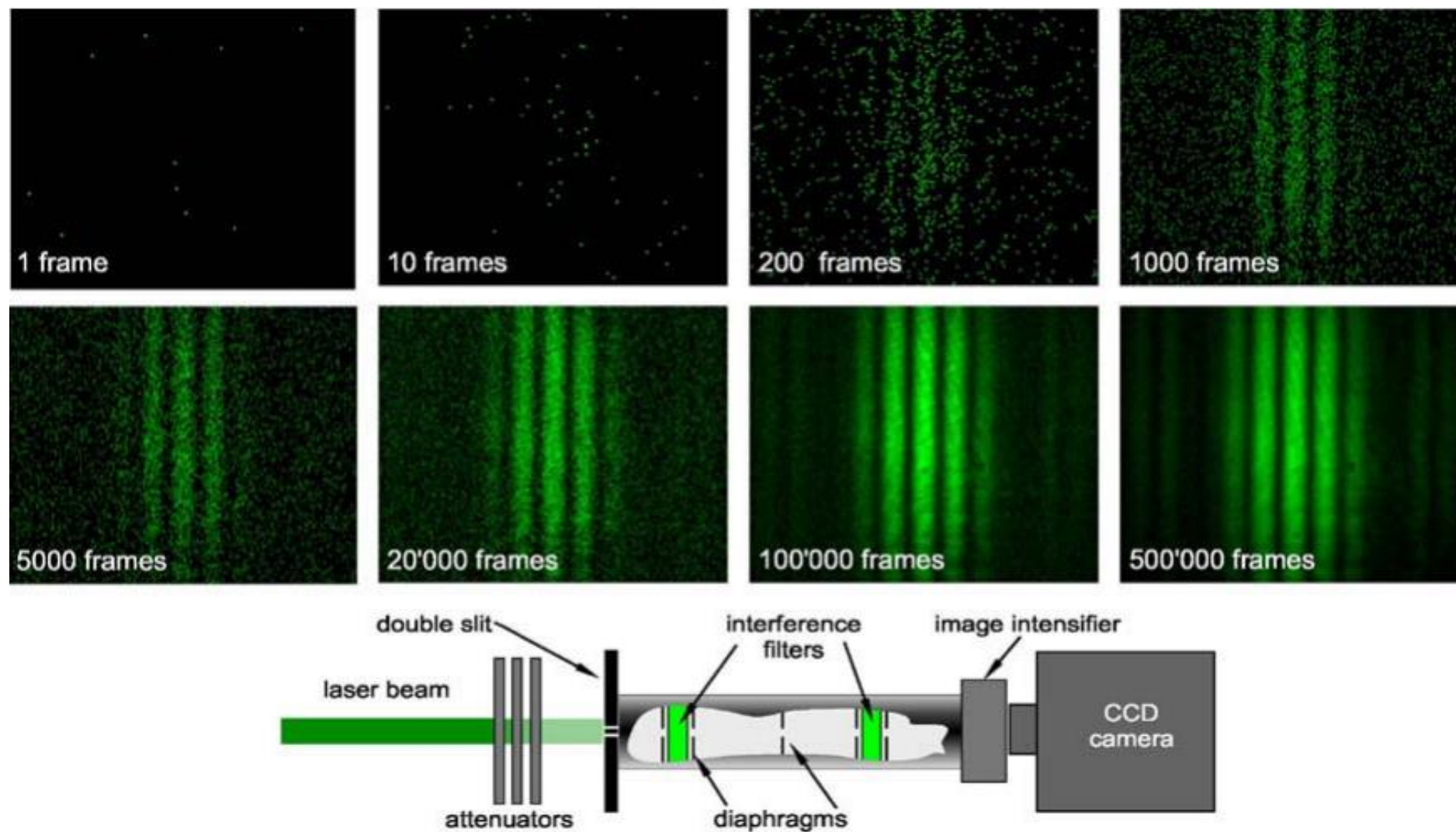
[Steinberg et. al. 2022] Steinberg, S., Sen, P. and Yan, L.Q., 2022. Towards Practical Physical-Optics Rendering. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 41(4), pp.1-13.

ふるく

「フォトン」？

- Radiative Transfer 方程式で一般に呼ばれる「フォトン」は、その粒子的な性質を抜き出したもの
- Radiative Transfer 方程式
 - 光のエネルギーを運ぶ粒子
 - 空間を粒子として飛ぶ
 - 密度分布を作れる
- 量子電磁力学
 - 電磁場の量子 [Torre 2018]
 - 空間を波動として伝わる
 - 局所的な粒子位置を決められない

粒子と波動の二重性



[Dimitrova and Weis 2008]

- 1個のフォトン(光子)
 - 波動として伝搬
 - 粒子として検出