

輻射輸送方程式の量子アルゴリズム

コンピュータグラフィックスへの応用に向けて

川畑史郎

法政大情報科学部・NEDOイノベーション戦略センター
kawabata@hosei.ac.jp



共同研究者：小林玲奈(法政大/総研大/NII)・五十嵐朱嵐(NII)



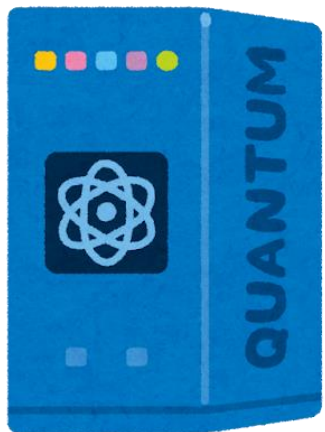
謝辞：門脇正史(産総研)・添田彬仁(NII)・佐藤周平(法政大/プロメテック・ソフトウェア)

量子コンピュータ×古典物理系シミュレーション

流体力学(CFD)・連続体力学・構造力学・電磁気学・熱力学・



量子アルゴリズム：HHL・ハミルトニアンシミュレーション・量子格子ボルツマン法



産業応用：建築・土木・機械・航空・船舶・通信・回路工学・
システム工学・化学工学・核融合・気象・・・

量子CAEへの期待

量子コンピュータ×古典物理系シミュレーション

定常状態

HHLアルゴリズム

Harrow, Hassidim, Lloyd, Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 150502

疎な線形**連立一次方程式**を高速に計算 計算量 $O(\text{poly}(\log N))$

ダイナミクス ハミルトニアンシミュレーション

Babbush et al., Phys. Rev. X 13 (2023) 041041

古典偏微分方程式を量子力学的に表現 (Maxwell方程式, 波動方程式、練成振動子など)

$$|\dot{\psi}(t)\rangle = -i\mathbf{H}|\psi(t)\rangle,$$

量子格子ボルツマン法

Budinski, Quantum Inf. Process. 20, 57 (2021)

離散化した古典ボルツマン方程式を量子コンピュータ上で計算
(流体、熱、弾性体, 電磁波など)

量子格子ボルツマン法

古典ボルツマン方程式

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + c_i \nabla f_i = \frac{1}{\tau} (f_i^{eq} - f_i)$$

移流項 衝突項

f: 粒子分布関数

離散化

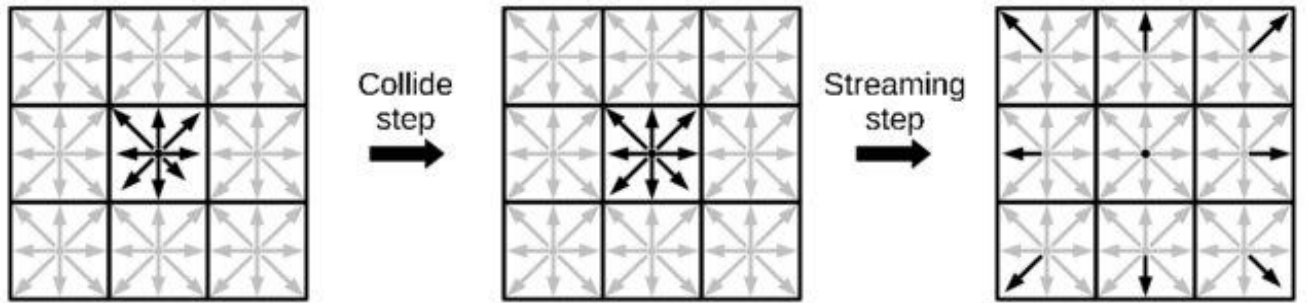
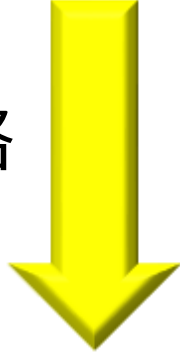


古典格子BGK方程式

$$f_i(r + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(r, t) + \frac{\Delta t}{\tau} [f_i^{eq}(r, t) - f_i(r, t)]$$

計算量O(N) 😞

量子回路

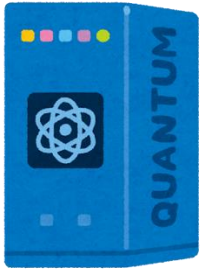
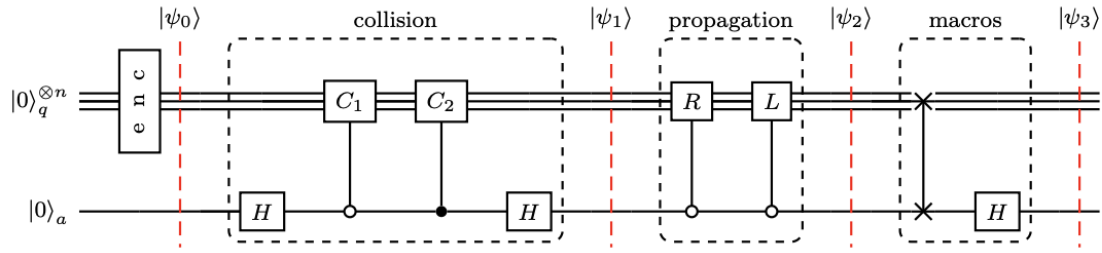


P. Neumann et al., Comm. Comp. Phys., 12 (2012) 65

量子格子ボルツマン法

Budinski, Quantum Inf. Process. 20 (2021) 57

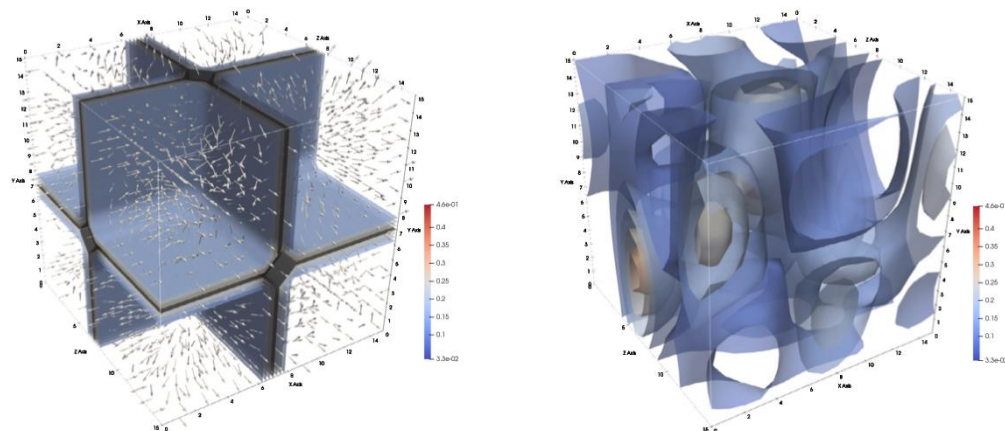
計算量O(log N) 😊



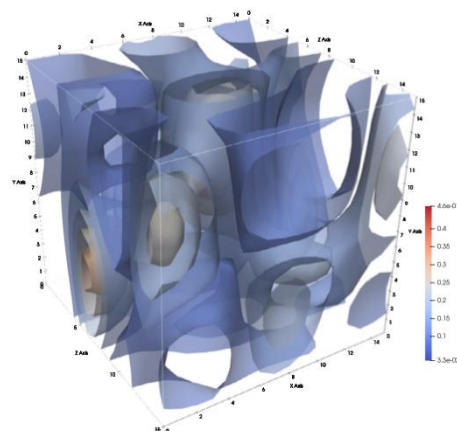
量子格子ボルツマン法によるCFDシミュレーション

Taylor-Green渦(理想流体の初期渦構造)の3Dシミュレーション

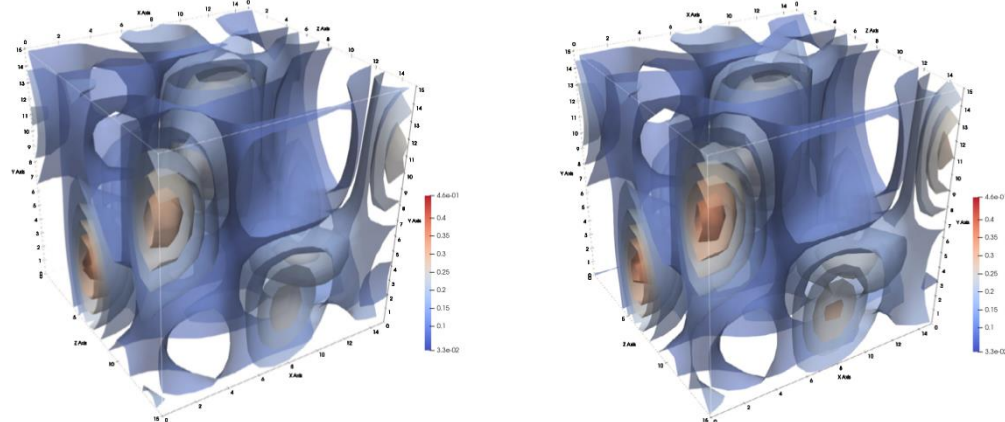
Wawrzyniak et al., Comp. Phys. Comm. 306 (2025) 109373



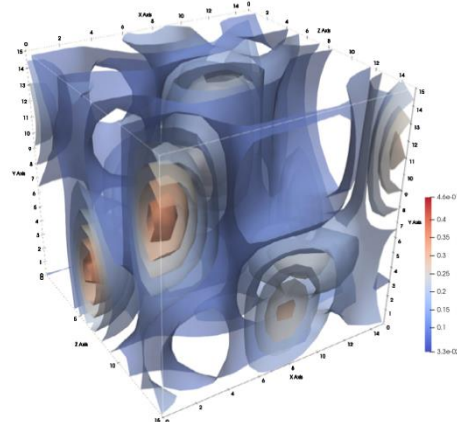
(a) $t=0$



(b) $t=15$



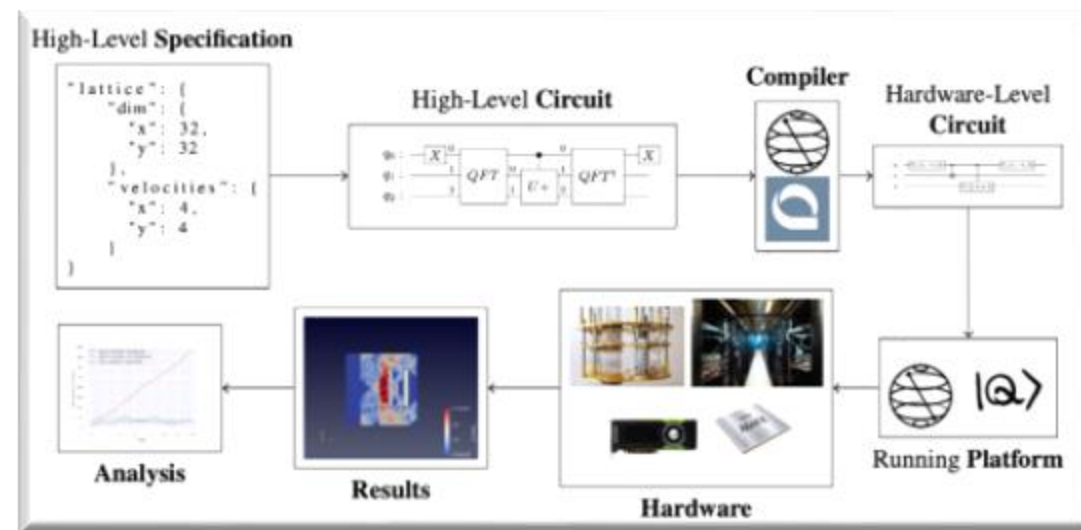
(c) $t=25$



(d) $t=40$

フリーソフトQLBM

Georgescu et al., arXiv:2411.19439



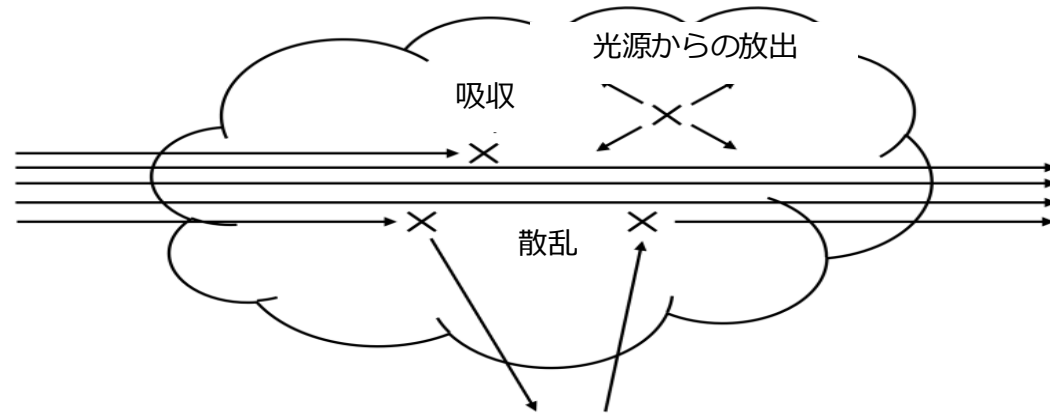
<https://github.com/QCFD-Lab/qlbm>

商用QLBMソフトQUANSCIENT Quantum(デモ版)

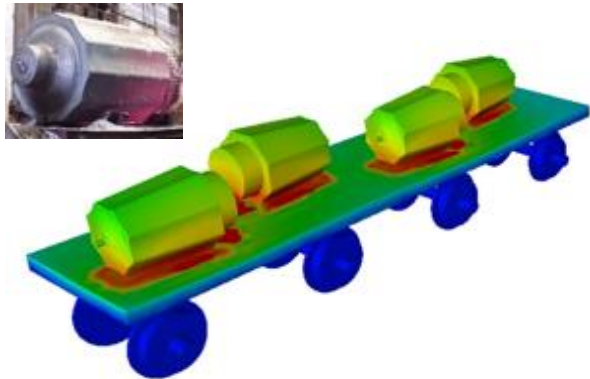
輻射輸送方程式の量子アルゴリズム

輻射輸送現象

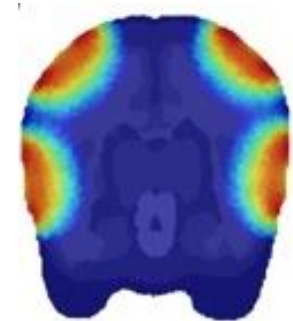
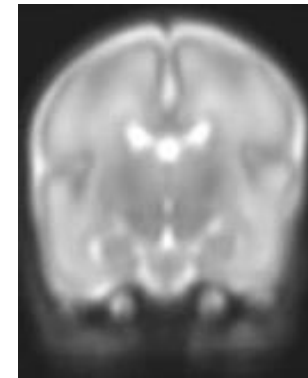
物質中を通過する電磁波によるエネルギー輸送



応用：輻射伝熱・流体解析、拡散光トモグラフィ(医療)、通信工学，核融合など



鉄インゴットの放射冷却シミュレーション
(THERCAST®)

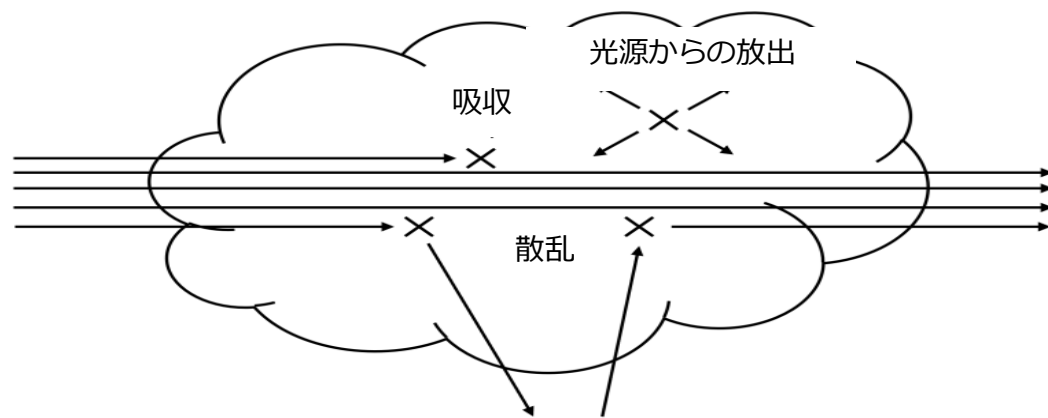


MRI画像(左)とトモグラフィーマデル (右)
(Brigadoi et al. 2014)

輻射輸送方程式

電磁波の媒質による散乱・吸収・放射などを記述する微積分方程式

$$\underbrace{\frac{\partial I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t)}{c \partial t}}_{\text{輸送}} + \underbrace{\hat{\Omega} \cdot \nabla I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t)}_{\text{放射強度 } I_\nu} = \underbrace{-\kappa_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t) I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t)}_{\text{吸収}} + \underbrace{\sigma_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t) \int_{4\pi} I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}', t) d\hat{\Omega}'}_{\text{散乱}} + \underbrace{S_\nu(\vec{x}, \Omega, t)}_{\text{光源からの放出}}$$



ボルツマン方程式に類似 & 線形方程式 → 量子格子ボルツマン法の適応 😊

1次元輻射輸送方程式の量子アルゴリズム

PHYSICAL REVIEW APPLIED **21**, 034010 (2024)

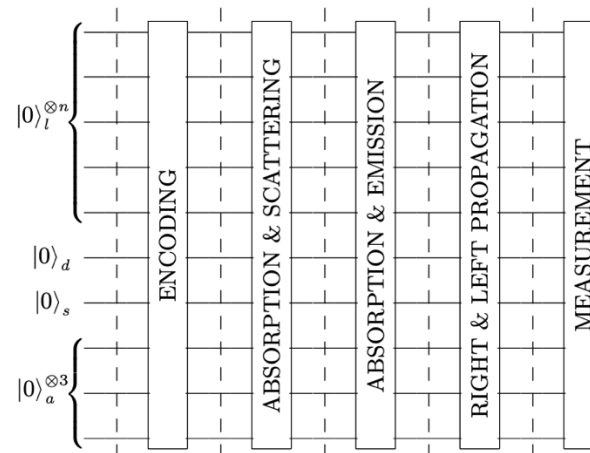
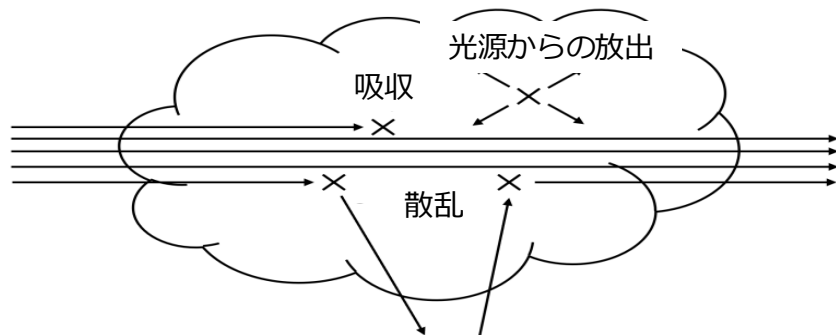
Quantum algorithm for the radiative-transfer equation

Asuka Igarashi,^{1,*} Tadashi Kadowaki^{1,2,†} and Shiro Kawabata^{1,3,‡}

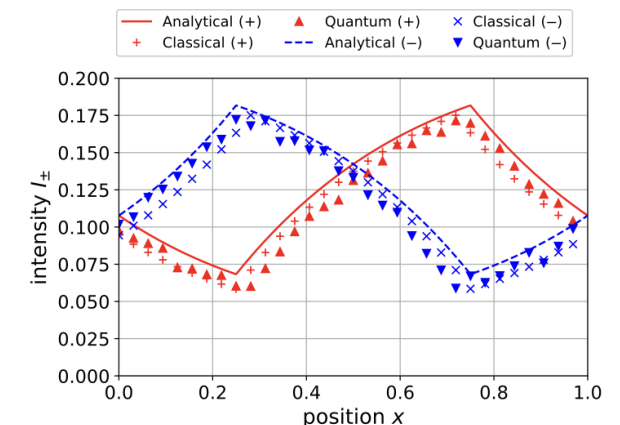
¹Global Research and Development Center for Business by Quantum-AI Technology (G-QuAT), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1, Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8568, Japan

²DENSO CORPORATION, 1-8-15, Kounan, Minato-ku, Tokyo 108-0075, Japan

³NEC-AIST Quantum Technology Cooperative Research Laboratory, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 1-1-1, Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8568, Japan



D1Q2モデル



2次元輻射輸送方程式の量子アルゴリズム

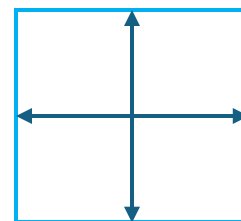
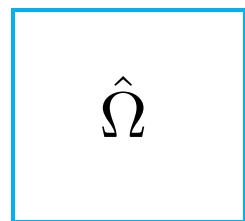
Kobayashi, Igarashi, Kawabata, in preparation

格子ボルツマン法

輻射輸送方程式(微積分方程式)

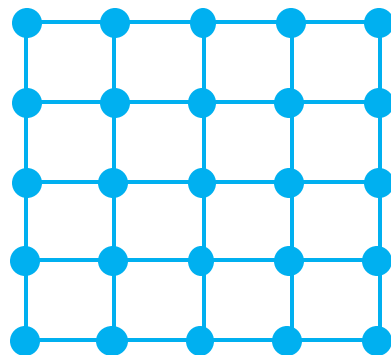
$$\frac{\partial I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t)}{c \partial t} + \hat{\Omega} \cdot \nabla I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t) = -\kappa_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t) I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t) + \sigma_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t) \int_{4\pi} I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}', t) d\hat{\Omega}' + S_\nu(\vec{x}, \Omega, t)$$

①速度空間の離散化



D2Q4モデル

②時空間の離散化



離散格子ボルツマン方程式(行列演算)

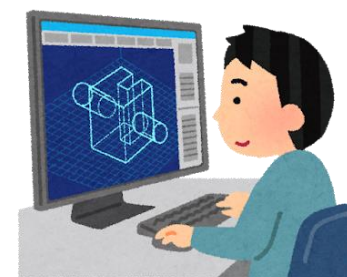
量子コンピュータグラフィックスへ

コンピュータグラフィックス

コンピュータを用いて**画像や映像を生成・処理**する技術

エンタメ：映画、ゲーム、アニメ、芸術

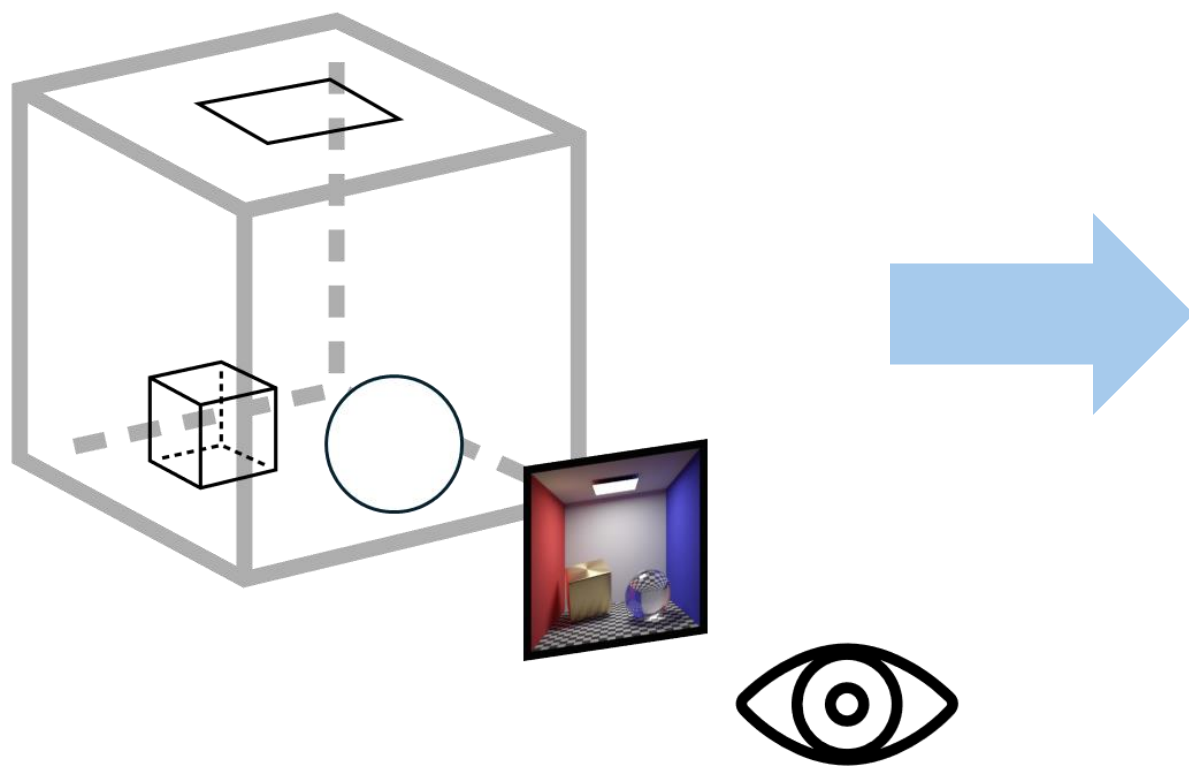
先端メディア技術：VR、AR



レンダリング

M. Pharr, W. Jakob, G. Humphreys, "Physically Based Rendering 4th Edition 日本語版" (2024)

3次元シーンの情報（形状・光・材質・カメラ位置）→2次元画像を生成



<https://rayspace.xyz/CG/contents/LTE1/>

レンダリング=物理シミュレーション

レイトレーシング

Appel, Proceedings of AFIPS68 (1968)37

Whitted, Communications of the ACM 23 (1980) 343

幾何光学に基づいて視点から3Dシーンに**光線**を送り、どの物体に当たったかを計算し、ピクセルの色や明るさを決定する**レンダリング**手法

<https://blogs.nvidia.co.jp/blog/whats-difference-between-ray-tracing-rasterization/>

https://knzw.tech/raytracing/?page_id=1154

映画 (Pixar, Disney) ・ ゲーム (Unreal Engine 5) ₁₅

輻射輸送方程式とレンダリング

忠実度

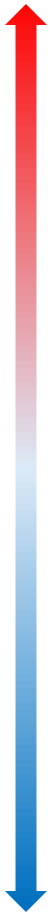
高い 😊



低い 😞

計算量

多い 😞



少ない 😊

輻射輸送方程式(微積分方程式)

視線方向にそった線積分に**近似**
時間・周波数依存性と高次散乱**無視**

ボリュームレンダリング方程式

媒質内部での散乱・吸収・発光を**無視**

レンダリング方程式

積分を幾何光学的経路に**限定**

レイトレーシング(幾何光学)

輻射輸送方程式とレンダリング

| | レイトレーシング(古典) | 輻射輸送方程式(古典) | 輻射輸送方程式(量子) |
|--------------|------------------------------------|--|----------------------|
| 手法 | 幾何光学による光線の トレーシング (近似) | 輻射輸送方程式の 直 接 数値計算 (厳密) | |
| 物理的忠実度 | 低 😞 | 高 😊 | 高 😊 |
| 計算量 | 少 😊 | 多 😞 | 少 😊 |
| リアルタイム 性能 | 高 (GPGPU) 😊 | 低 😞 | 高 😊 |
| 応用分野 | 映画 (Pixar, Disney) ゲーム | 医療・科学に限定 😞 | あらゆる分野 😊 |

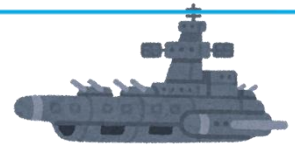
量子コンピュータグラフィックスに向けて

輻射輸送方程式の量子コンピュータによる高速処理
→リアルタイムかつ高忠度の究極のCG生成



量子エンターテインメント産業の創成

量子ゲーム(プレステQ?)・量子VFX・量子アニメ・量子アート



まとめ

- ・ **輻射輸送方程式**の量子アルゴリズムの開発

1次元 Igarashi, Kadowaki, Kawabata, Phys. Rev. Applied 21 (2024) 034010

2次元 Kobayashi, Igarashi, Kawabata, in preparation

- ・ 今後： **量子コンピュータグラフィックス**への展開

課題

- ・ **3次元系**への拡張
- ・ **古典情報の埋め込み問題** 😞
- ・ **出力のサンプリング問題** 😞
- ・ **GPU・画像生成AI**との連携：創造性(生成AI)×リアリティ(量子)