

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



川畠史郎

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)

S O K E N D A I



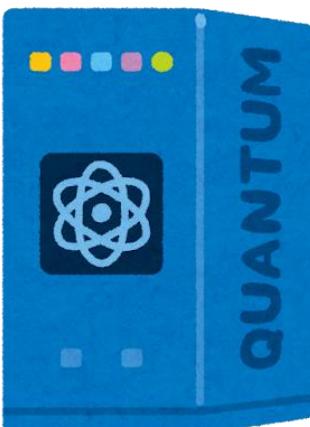
謝辞：門脇正史(産総研)・添田彬仁(NII)・佐藤周平(法政大/プロメテック・ソフトウェア)

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

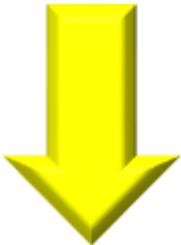
古典ボルツマン方程式

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

移流項 衝突項

f: 粒子分布関数

離散化

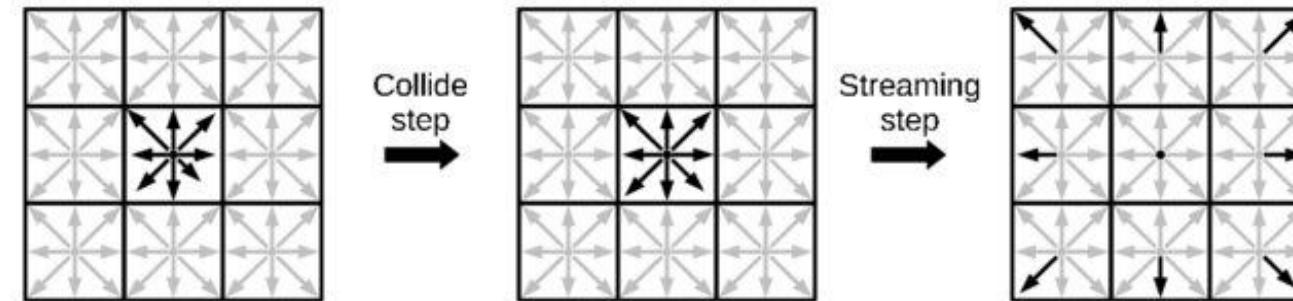
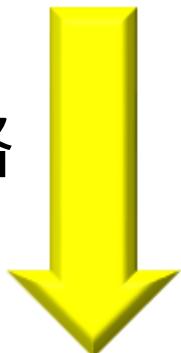


古典格子BGK方程式

計算量O(N) 😕

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

量子回路

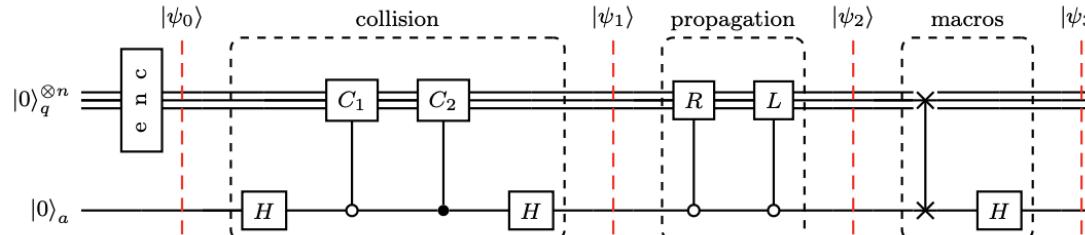


P. Neumann et al., Comm. Comp. Phys., 12 (2012) 65

量子格子ボルツマン法

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

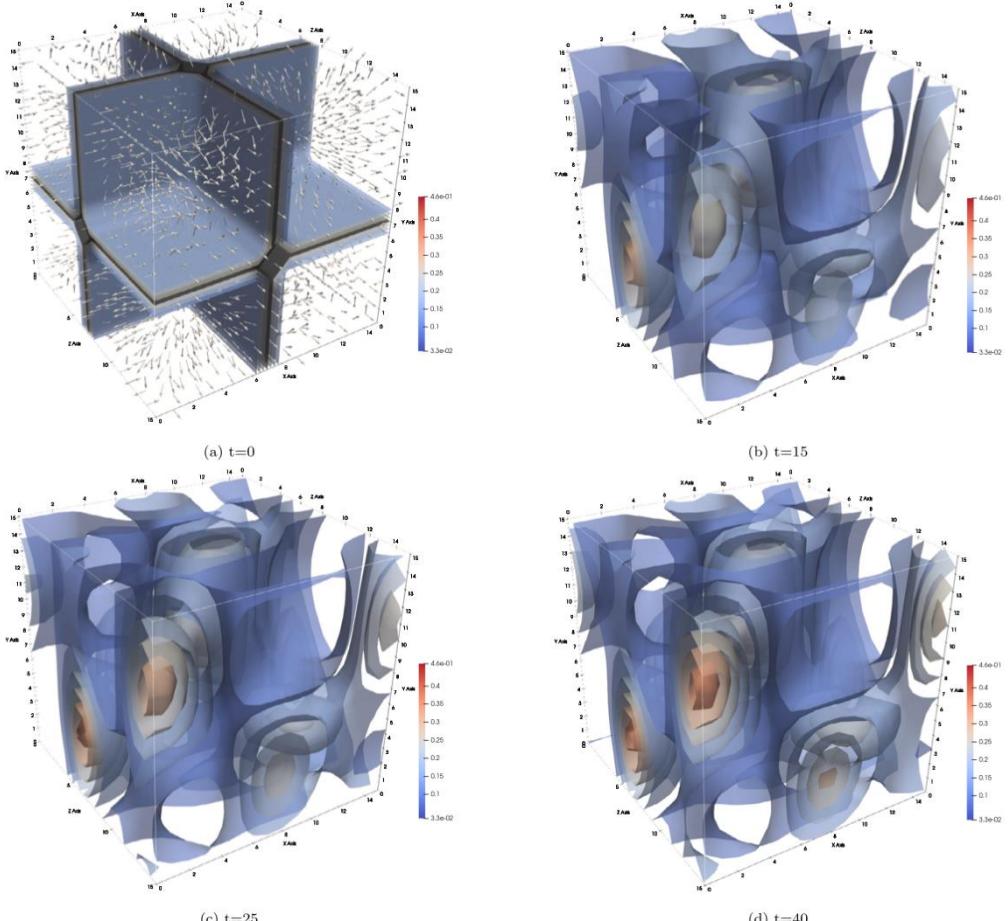
計算量O(log N) 😊



量子格子ボルツマン法によるCFDシミュレーション

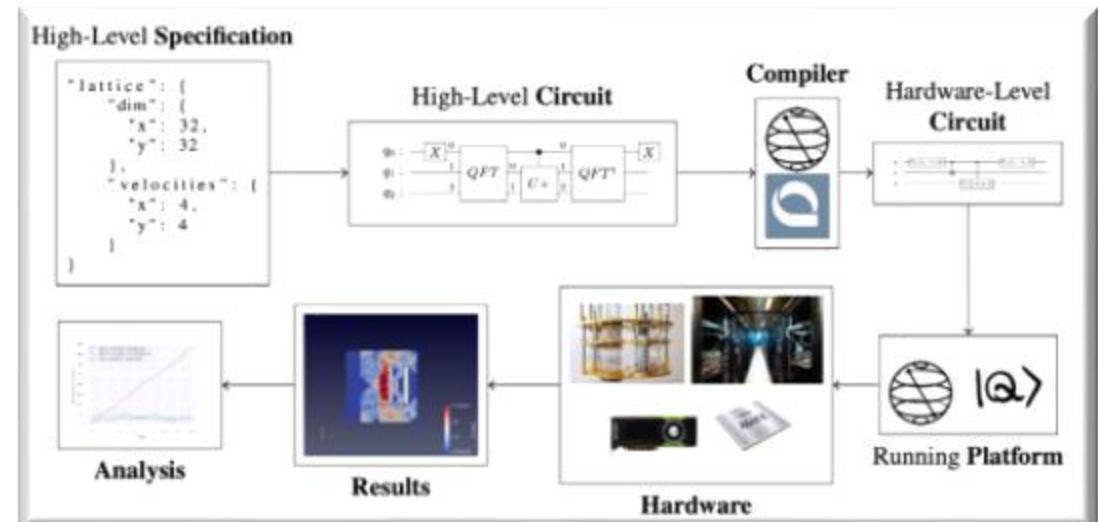
Taylor-Green渦(理想流体の初期渦構造)の3Dシミュレーション

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



フリーソフトQLBM

Georgescu et al., arXiv:2411.19439



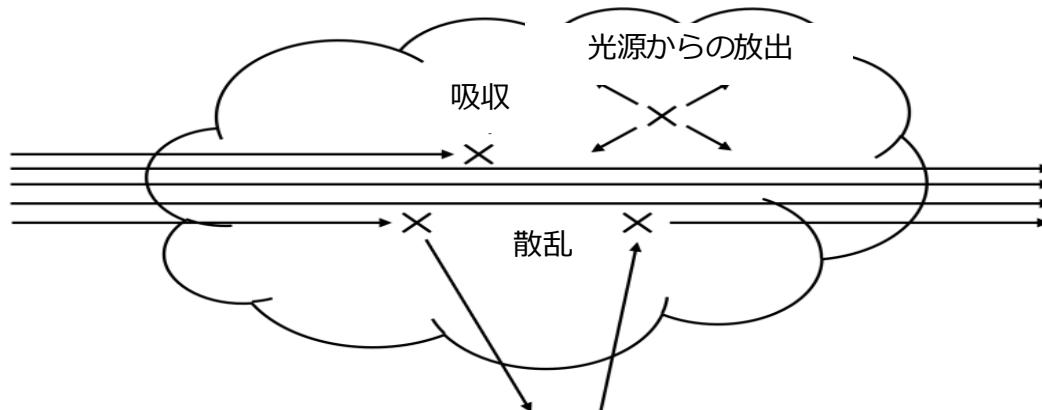
<https://github.com/QCFD-Lab/qlbm>

商用QLBMソフトQUANSCIENT Quantum(デモ版)

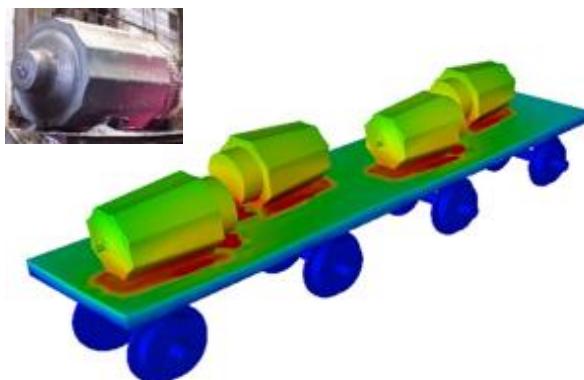
輻射輸送方程式の量子アルゴリズム

輻射輸送現象

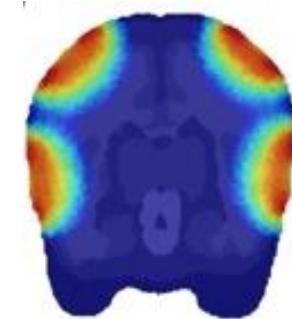
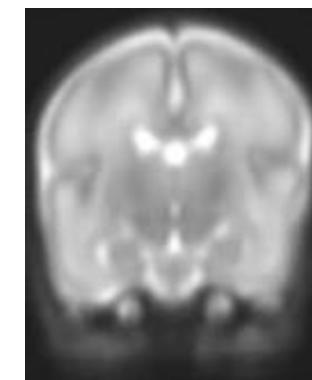
物質中を通過する電磁波によるエネルギー輸送



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



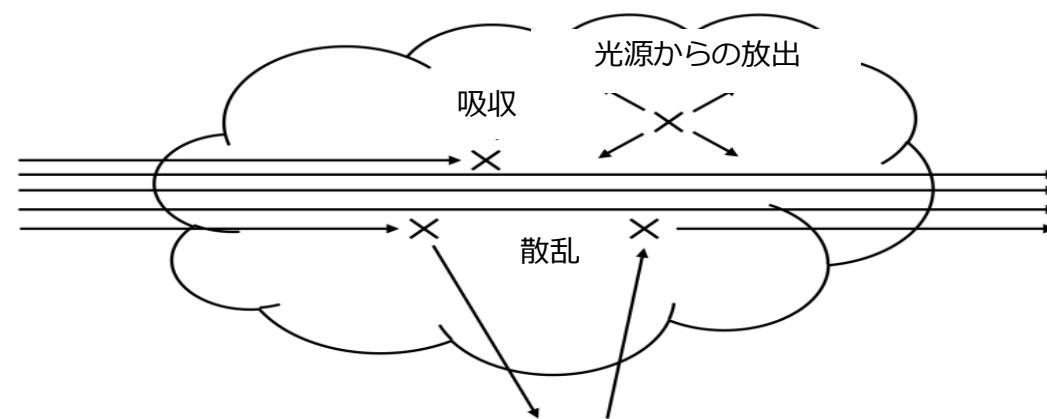
鉄インゴットの放射冷却シミュレーション
(THERCAST®)



MRI画像(左)とトモグラフィーモデル(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



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)

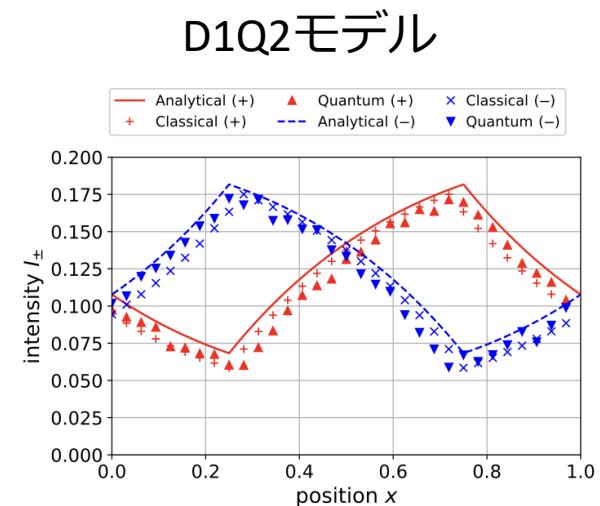
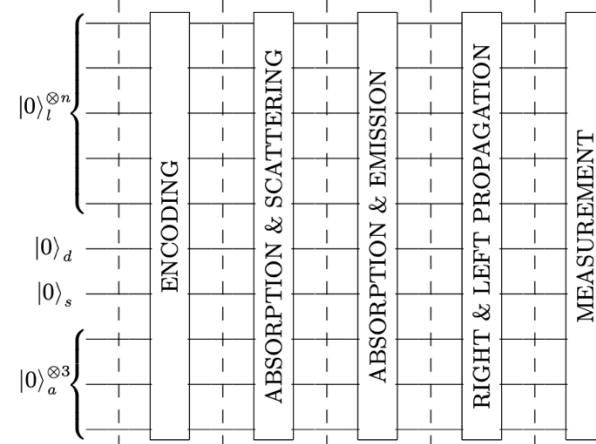
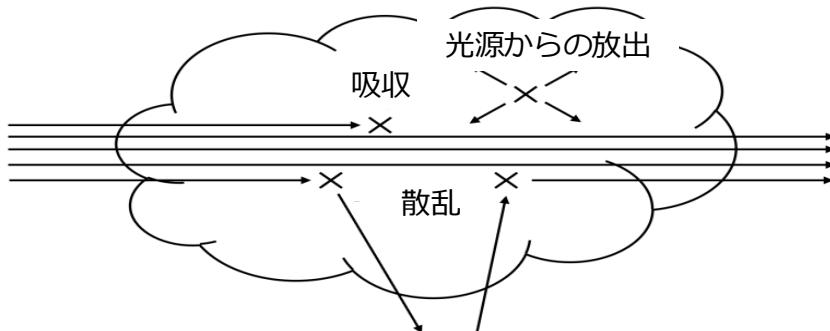
Quantum algorithm for the radiative-transfer equation

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

¹*Global 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*

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

³*NEC-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*



2次元輻射輸送方程式の量子アルゴリズム

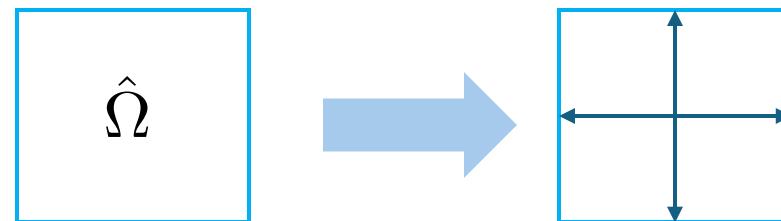
Kobayashi, Igarashi, Kawabata, in preparation

格子ボルツマン法

輻射輸送方程式(微積分方程式)

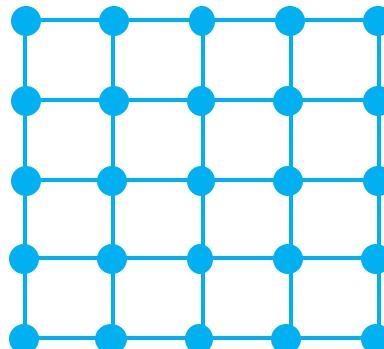
$$\frac{\partial I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t)}{c\partial t} + \hat{\Omega} \cdot \nabla I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t) = -\kappa_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t)I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t) + \sigma_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}, t) \int_{4\pi} I_\nu(\vec{x}, \hat{\Omega}', t) d\hat{\Omega}' + S_\nu(\vec{x},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

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)

A composite image. On the left, a quantum computer is shown with a large, glowing orange and yellow circular component in the foreground, and a complex circuit board structure in the background. On the right, a close-up of a cat's face is shown, with a network of glowing blue lines and dots forming a sphere around its head, suggesting quantum connectivity or a digital network.

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

コンピューターを用いて**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

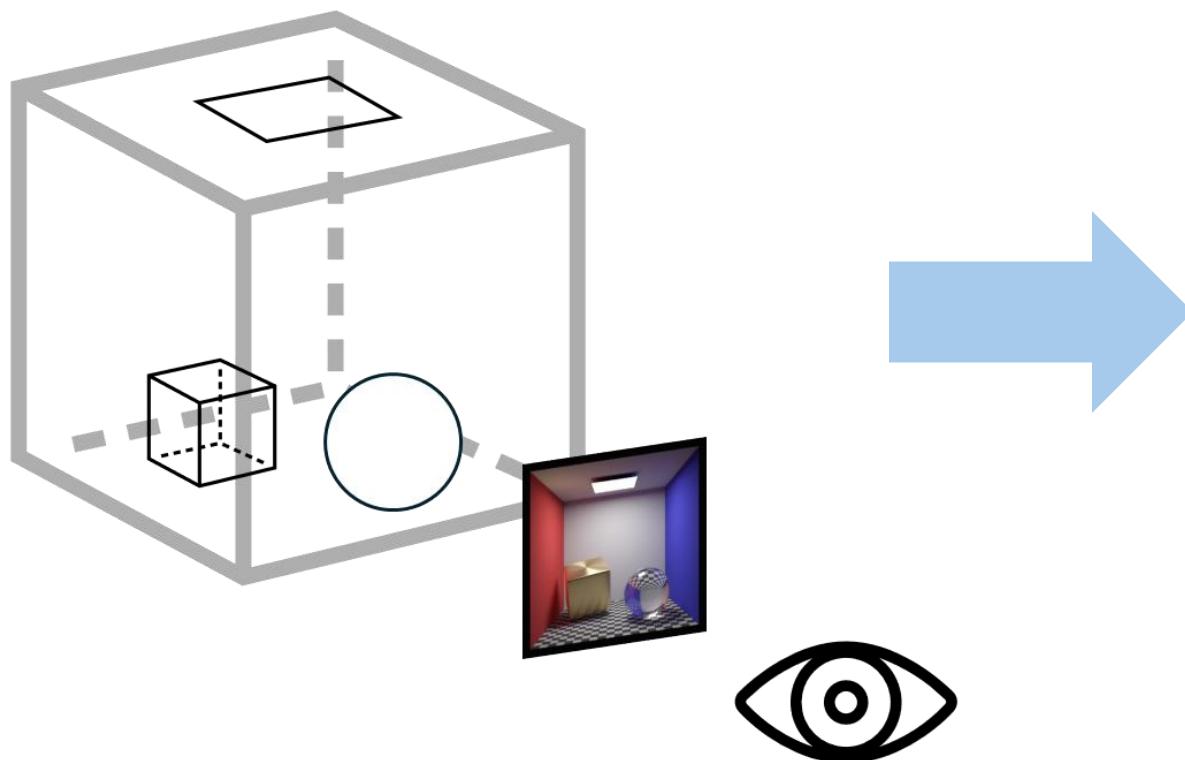
先端メディア技術：VR、AR



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://rayscale.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

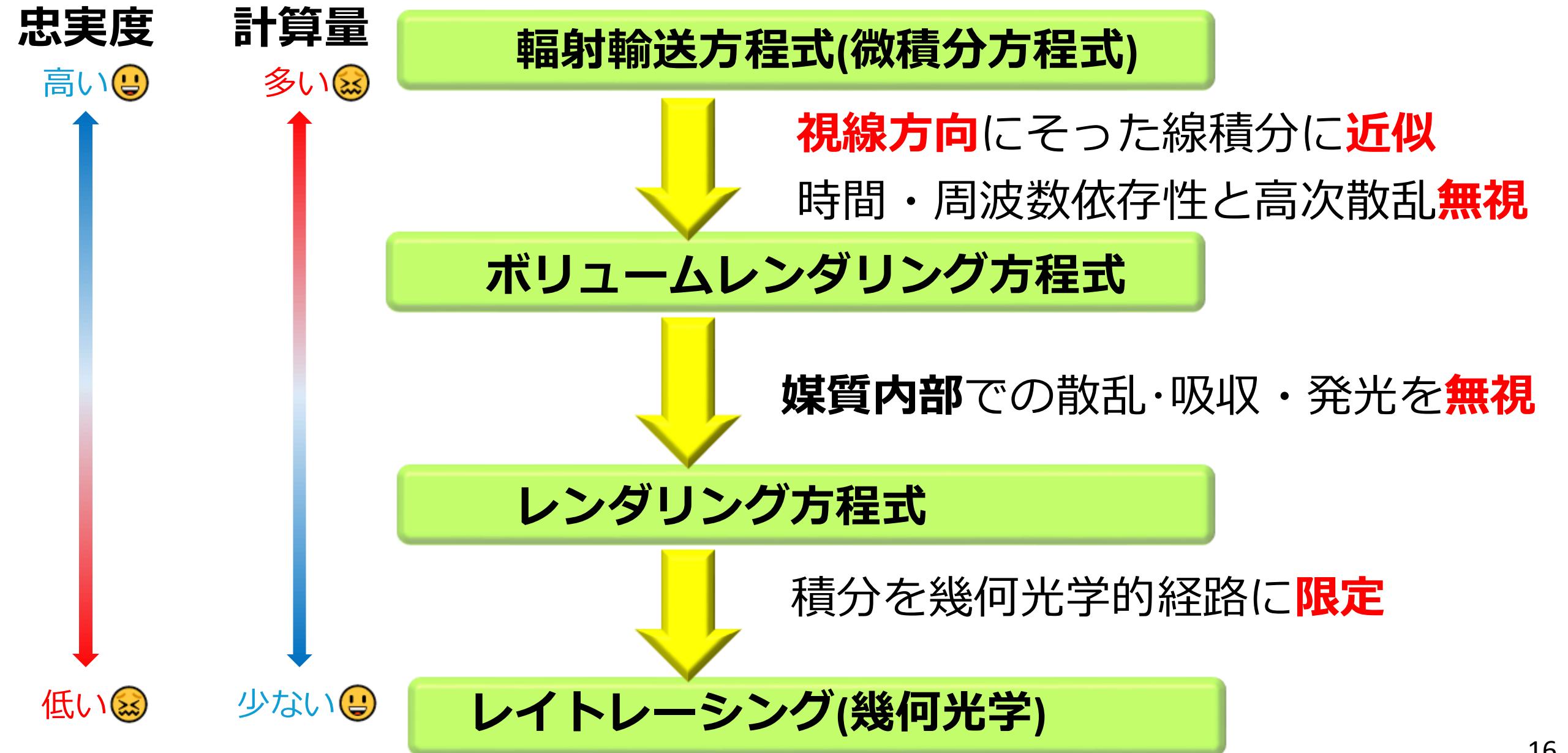
Appel, Proceedings of AFIPS68 (1968)37

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/>

輻射輸送方程式とレンダリング

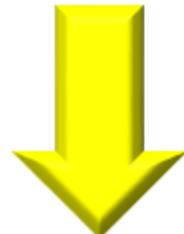


輻射輸送方程式とレンダリング

	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)