

修士論文

モンテカルロシミュレーションによる時間軸方向に注
目した半透明物体の光伝播の解析

佐藤 祐紀

2018 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

佐藤 祐紀

審査委員：

向川 康博 教授	(主指導教員)
清川 清 教授	(副指導教員)
舩富 卓哉 准教授	(副指導教員)
久保 尋之 助教	(副指導教員)
田中 賢一郎 助教	(副指導教員)

モンテカルロシミュレーションによる時間軸方向に注目した半透明物体の光伝播の解析*

佐藤 祐紀

内容梗概

コンピュータビジョンやコンピュータグラフィックス分野の多くの研究では光の速度は無限であると仮定されていた。しかし、超高速撮影技術等の発達により、光の伝播を撮影することができるようになった。そのため、現象の理解や予測を助けるために時間的な光伝播の効果的なシミュレーションおよび分析に関する研究がされ始めている。研究では、半透明物体内の時間的な光伝播の可視化と解析を行う。特に半透明物体内では散乱が起こるため、光路の時間的な解析が容易ではないが、半透明物体は実世界に多く存在する物体の一つであるため、光伝播の現象を可視化、解析することは、現象を理解するにあたって重要なことであると考えられる。本半透明物体の内部における光伝播を解析するため、フォトンの経路をモンテカルロ法でシミュレーションし、その結果から時間幅を拡張した光伝播の様子を可視化する。半透明物体として牛乳とコーヒーを対象とし、時間的遷移を解析した。

キーワード

時間遷移, 光伝播, 半透明物体, シミュレーション, 解析

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文, NAIST-IS-MT1651054, 2018 年 3 月 15 日.

Visualization of the temporal change of the light propagation of translucent objects by Monte Carlo simulation *

Yuki Sato

Abstract

In recent research to acquire transient imaging, detailed analysis and understanding of the movement of photons in semitransparent objects is required. In particular, scattering occurs in translucent objects, so understanding of temporal change of light propagation is considered to be important. So far, in the field of CG and CV, we focused on the spatial change of light, but the speed of light was assumed to be infinite. In this research, we aim to help understanding and prediction of phenomena of light propagation by devising a method expressing temporal change of light propagation, and simulate the instantaneous change of light propagation. In this report, we will use Monte Carlo simulation to accurately represent the temporal change of the light propagation of a translucent object, calculate stochastic scattering, and present the visualization of the temporal change of the photon.

Keywords:

Time transition, the light spread, transparent object, simulation, analysis

*Master's Thesis, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1651054, March 15, 2018.

目次

1. はじめに	1
2. モンテカルロシミュレーションによる光路の計算	2
2.1 モンテカルロシミュレーション	3
3. シミュレーション結果	4
3.1 フォトン強度の可視化	4
3.2 時間軸情報を取り入れたフォトンの可視化	8
3.3 ポイントクラウドによるフォトンの時間的遷移	8
3.4 フォトン強度の時間遷移の可視化	8
4. 時間遷移の解析	43
4.1 時間と x 軸方向	43
4.2 考察	46
4.3 時間と輝度情報	47
4.4 考察	57
5. まとめ	58
謝辞	59
参考文献	60

図目次

1 Femto-photography: Capturing and Visualizing the Propagation of Light	1
2 A Framework for Transient Rendering	2
3 不透明物体	2
4 半透明物体	2

5	シミュレーションのコンソール	4
6	シミュレーションのフローチャート	5
7	ポイントクラウドで表示した結果	9
8	可視化シーン	10
9	牛乳, 半径 10, $g=0$	11
10	牛乳, 半径 1000, $g=0$	12
11	牛乳, 半径 10000, $g=0$	13
12	牛乳, 半径 100000, $g=0$	14
13	牛乳, 半径 10, $g=0.6$	15
14	牛乳, 半径 1000, $g=0.6$	16
15	牛乳, 半径 10000, $g=0.6$	17
16	牛乳, 半径 10000, $g=0.6$	18
17	牛乳, 半径 10, $g=0.8$	19
18	牛乳, 半径 1000, $g=0.8$	20
19	牛乳, 半径 10000, $g=0.8$	21
20	牛乳, 半径 100000, $g=0.8$	22
21	牛乳, 半径 10, $g=0.974$	23
22	牛乳, 半径 1000, $g=0.974$	24
23	牛乳, 半径 10000, $g=0.974$	25
24	牛乳, 半径 100000, $g=0.974$	26
25	コーヒー, 半径 10, $g=0$	27
26	コーヒー, 半径 1000, $g=0$	28
27	コーヒー, 半径 10000, $g=0$	29
28	コーヒー, 半径 100000, $g=0$	30
29	コーヒー, 半径 10, $g=0.6$	31
30	コーヒー, 半径 1000, $g=0.6$	32
31	コーヒー, 半径 10000, $g=0.6$	33
32	コーヒー, 半径 100000, $g=0.6$	34
33	コーヒー, 半径 10, $g=0.8$	35

34	コーヒー, 半径 1000, $g=0.8$	36
35	コーヒー, 半径 10000, $g=0.8$	37
36	コーヒー, 半径 100000, $g=0.8$	38
37	コーヒー, 半径 10, $g=0.974$	39
38	コーヒー, 半径 1000, $g=0.974$	40
39	コーヒー, 半径 10000, $g=0.974$	41
40	コーヒー, 半径 100000, $g=0.974$	42
41	時間と x 軸方向の解析	43
42	milk, $r=100000$	44
43	coffee, $r=100000$	45
44	半径の違い	46
45	時間と輝度情報の解析	47
46	Milk, $r=10$	48
47	Milk, $r=100$	49
48	Milk, $r=1000$	50
49	coffee, $r=10$	52
50	coffee, $r=100$	53
51	coffee, $r=1000$	54
52	coffee, $r=10000$	55
53	coffee, $r=100000$	56
54	半径の違い	57

表 目 次

1	milk フォトン強度	6
2	coffee フォトン強度	7
3	フォトン放射の対象物のパラメータ	10

1. はじめに

コンピュータグラフィックスやコンピュータビジョン分野の多くの研究で、光の速度は定常状態で無限であると仮定されている。実際の光の速さはおよそ 30 万キロメートル毎秒であり、これは既存のイメージングハードウェアのほとんどが光の速度に比べて遅いため、これは合理的な仮定である。定常状態での光伝播はコンピュータグラフィックス例えば、[1],[2],[4] において検討されている。しかし、現在では、光の伝播する様子である、トランジェントイメージングを取得を目指す研究が進んでいる [3]。例えば、超高速カメラは通常のカメラよりも時間分解能を向上させることで、高速で動くものの様子を撮影することが可能になってきている。高速度カメラにより現象の時間方向の解析や爆発、衝突の瞬間の可視化や光波が伝播する様子を観測することが可能になってきている。図 1 はペットボトルに照射された光の伝播する様子を撮影したものである [5]。また、光伝播を用いて



図 1 Femto-photography: Capturing and Visualizing the Propagation of Light

距離を計測するカメラである Time of Flight カメラの研究では、距離計測だけでなく ToF カメラの距離計測時に散乱物体で起こりやすい計測のゆがみを用いて、材質分類の研究がなされている。

このようなカメラなどの光伝播を用いた解析ツールの予測を助けるために、時間的な光伝播の現象について、理解したいという要求がある。そこで、本研究では様々な材質における時間繊維の様子を明らかにするとする。特に本研究は、半透明物体での光伝播に注目し、時間的遷移を考える。不透明物体や透明物体では

光路は限られているため、図3時間軸方向の可視化は予測しやすいと考えられる。しかし、半透明物体内では図4のように、散乱や吸収が起こるため、光路が複数あり、時間軸方向に可視化するのは難しいと考えられる。半透明物体を対象物体に含むことで、実世界に多く存在する物での光伝搬の理解を助ける。

本論文の構成について述べる。まず、2章では光の経路の計算にもちいたモンテカルロシミュレーションについて記す。3章では、フォトンを放射した時の時間軸方向で可視化した結果を示す。4章では3章の結果を用いて時間軸方向に注目したフォトンの解析を行い、示す。5章では本論文をまとめる。

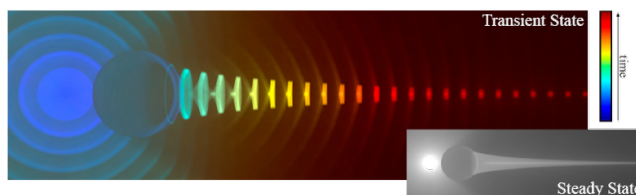


図 2 A Framework for Transient Rendering

2. モンテカルロシミュレーションによる光路の計算

光の伝播を取得するために、光の経路をシミュレーションする。光の経路を辿るシミュレーションをライトトレーシングという。物理的な光はいくつかの光学現象によって、様々な経路を持つ。反射、吸収、透過等それぞれの確率で光は様々な経路を辿る。これらを忠実に再現するシミュレーションも存在するが、計算コスト膨大になる。そのため、本研究で用いたシミュレータを、モンテカルロ法を



図 3 不透明物体

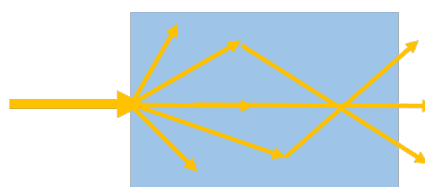


図 4 半透明物体

用いて乱数を用いて半透明物体内での散乱の現象を確率的に扱う。本研究では、ライトトレーシングをモンテカルロ法を用いて計算し、シミュレーションする。この手法について説明する。

2.1 モンテカルロシミュレーション

モンテカルロシミュレーションでは、例えば「(光のエネルギーのうち) 90 %が反射」という例では、90 %の確率で反射する現象であると置き換えてシミュレーションをする。これは1のエネルギーの光のシミュレーションをするときに、0.0001のエネルギーの光の粒(フォトン)が10000個あるものとみなし、計算する。この計算法をモンテカルロ法と呼ぶ。光源から出てきたフォトンが物体に衝突したとき、確率で反射するフォトンと、透過、屈折するフォトンに分ける。これらは物体の屈折率に依存して決まる。透過、屈折したフォトンが物体内部に入り込み、表面下散乱を起こす。例えば対象物体が牛乳であれば、牛乳粒子がたくさんあり、ある距離を進むと光は牛乳の粒子に衝突する。フォトンが粒子と衝突するまでの距離は消失係数によって決まる。

粒子に衝突したフォトン、粒子に吸収されていなくなるフォトンと、粒子に反射して他の方向に飛んでいくフォトンに確率で分かれる。この確率の大きさは吸収係数によって決まる。また、飛んでいく方向は位相関数の平均余弦 g というパラメータによって決まり、 $g = 0$ のときは一様にランダムな方向に飛ぶ。 g が1に近いときは前方に飛んでいく確率が大きくなる。内側から物体の表面に辿り着くまで、フォトンが散乱を繰り返しながら進行する。式1はモンテカルロシミュレーションで離散的に解いている式の一つである。左辺は放射輝度で、右辺第1項は散乱で損失、第2項は他の方向の光との足し合わせを表している。表面ではまた反射するフォトンと透過・屈折して外に出れるやつとに分かれる。これも屈折率で決まる。反射したフォトンがもう一度散乱を繰り返す。シミュレータは、表面に現れたフォトンの位置と距離、フォトン強度を図5のようなコンソールに表示する。また、このシミュレーションの計算の流れを図6に示す。

$$(\omega^*)L(x, \omega) = -\sigma_t(x)L(x, \vec{\omega} + \sigma_s(x) \int_{\Omega_{4\pi}}^p (x, \vec{\omega}, \vec{\omega})d\vec{\omega} \quad (1)$$

$$\sigma_t : \text{消滅係数} \sigma_s : \text{散乱係数} \quad (2)$$

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
Travel Distance: 991.695
Photon Pos: (-1.22215, 2.92674, 9.4837)
Power: 4.58168e-40
Travel Distance: 994.974
Photon Pos: (-0.216033, 0.468785, 9.98667)
Power: 5.82786e-14
Travel Distance: 991.673
Photon Pos: (-0.00426834, -0.0283574, 9.99996)
Power: 0.0313731
Travel Distance: 990.19
Photon Pos: (-1.60045, 1.17195, 9.80128)
Power: 2.3193e-27
Travel Distance: 993.368
Photon Pos: (-0.865443, -1.02591, 9.90952)
Power: 2.11181e-14
Travel Distance: 991.729
Photon Pos: (-0.238416, -1.5347, 9.87866)
Power: 3.49427e-29
Travel Distance: 993.598

```

図 5 シミュレーションのコンソール

3. シミュレーション結果

まず、前章で説明したシミュレーション結果を用いて、材質、半径、位相関数にの違いで光子強度の分布が異なることを示す。次に、時間軸情報を取り入れた、可視化を進める。

3.1 フォトン強度の可視化

まずは光子の到着時間に分けて光子強度を可視化した。シミュレーションで計算された光子強度の分布を見ることができる。表1は散乱パラメータに牛乳を用いた結果、表2には、コーヒーを用いた結果をまとめた。

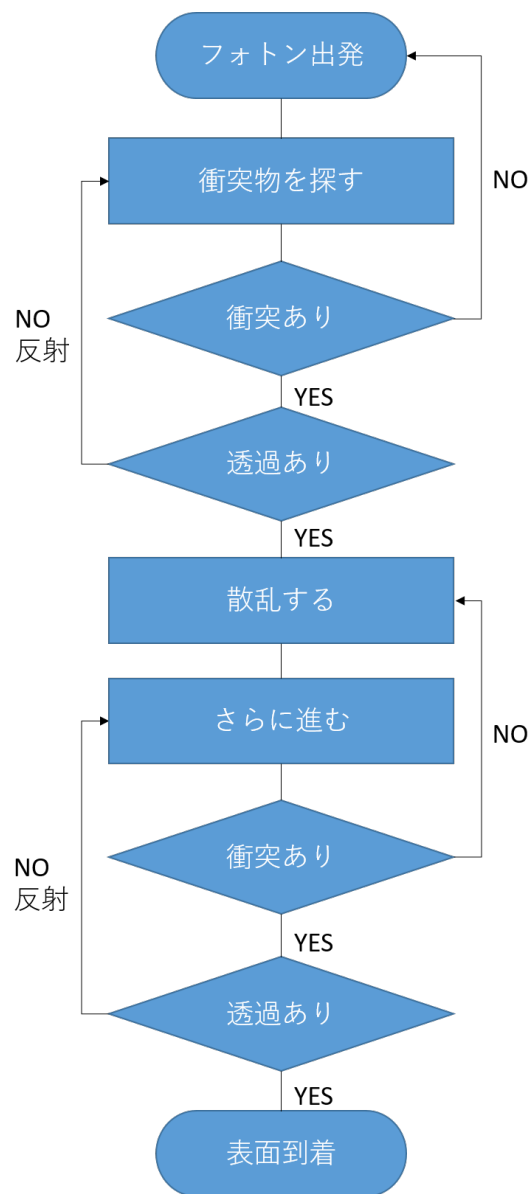


図 6 シミュレーションのフローチャート

表 1 milk フォトン強度

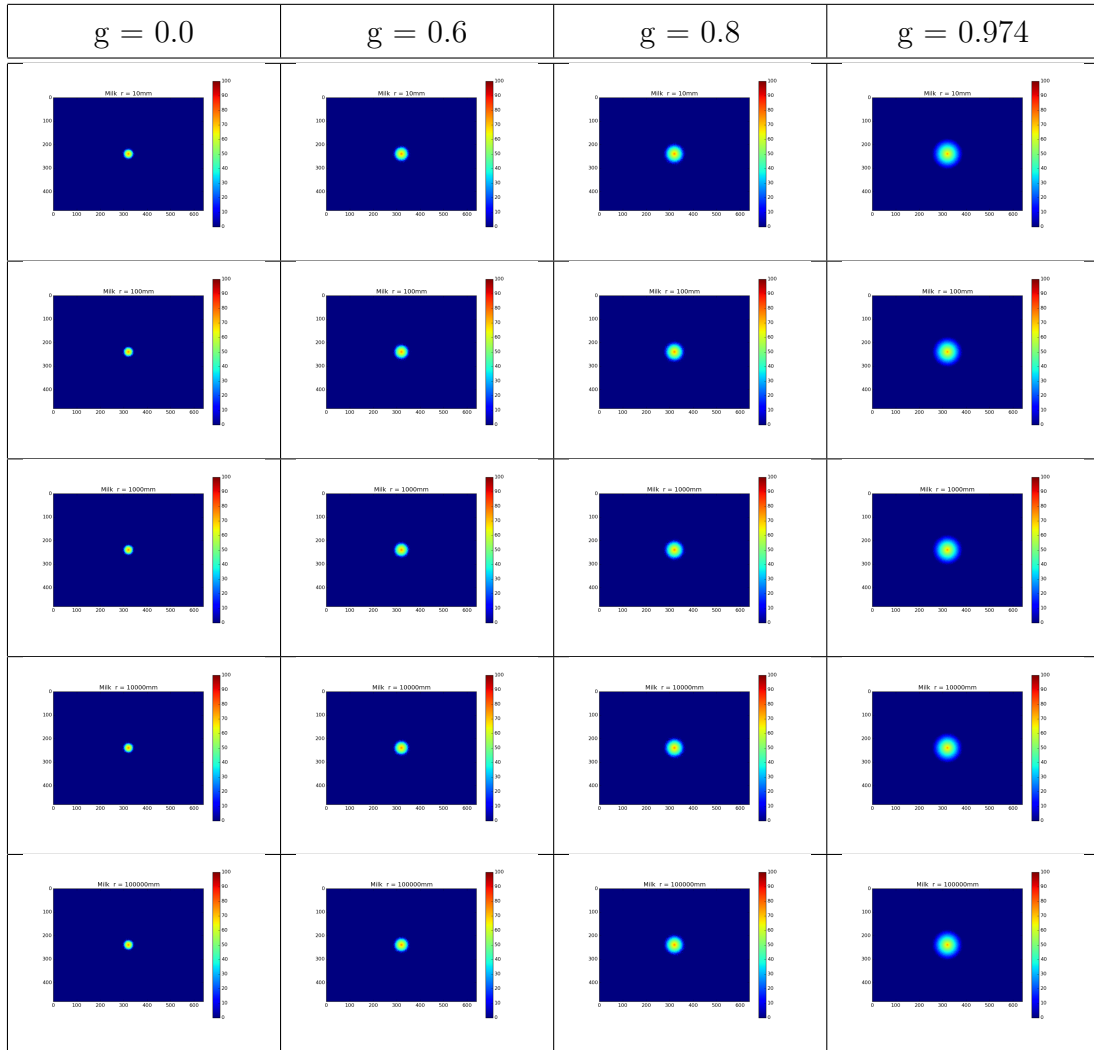
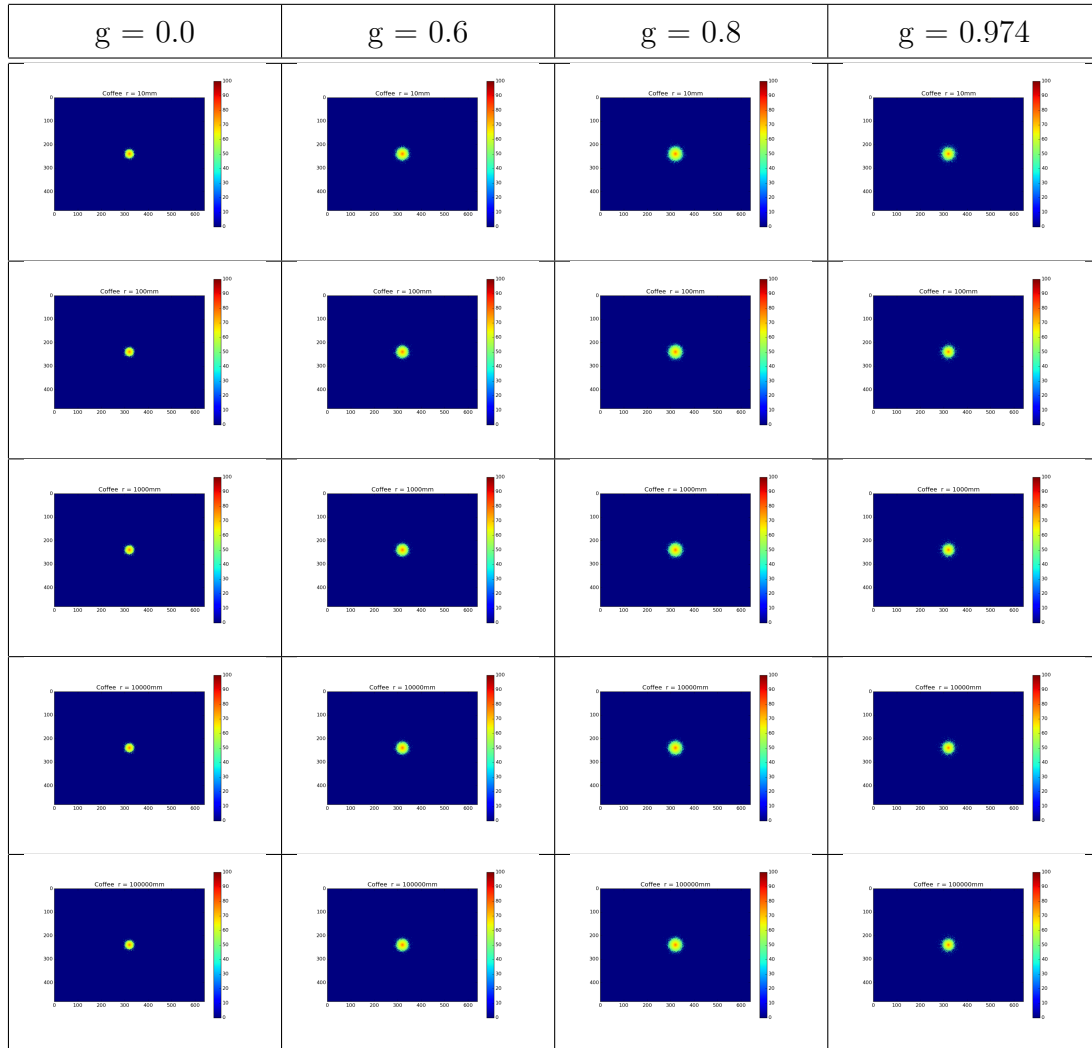


表 2 coffee フォトン強度



3.2 時間軸情報を取り入れたフォトンの可視化

シミュレーション結果を用いてフォトンが対象物体表面に到着するフォトンを実際の時間に分けて表示させることで、ある時刻に到着したフォトンを実視化させた。フォトンの時間経過に伴う到着位置を実示させる。到着位置を実視化は3次元CGソフトの1つである MeshLab を使った。次に固定した視点でのフォトンのふるまいと、明るさをシミュレーションで出力されるフォトン強度を用いて到着位置だけでなく、明るさを可視化させた。シミュレーション結果から、到着時刻ごとに分けてフォトンを実示させる。1フレームの時間を決め、その時間に物体表面に到着したフォトンずつに分けて、可視化させていく。例えば放射されて、0.00 秒～1.00 秒間に到着したフォトンを実1枚目のフレームとして、表示させていくことで、時間的な遷移を実作成をする。

3.3 ポイントクラウドによるフォトンの時間的遷移

まず、予備実験で、フォトンの到着位置を MeshLab を用いて瞬間的な時間に可視化させる。前節のように処理した後、フォトンの到着位置である (x, y, z) を用いて可視化させた。50 万個放射、散乱パラメータは牛乳、フォトンは半径 10 の球体に $(0,0,1000)$ の位置から $(0, 0, -1)$ 方向に放射させるシーンに 50 万個放射させた。図 7 に 40 枚をまとめて示す。次節では到着位置だけでなくフォトン強度を用いて輝度情報を含めた可視化を実示す。

3.4 フォトン強度の時間遷移の可視化

フォトン強度の情報をを用いることで、到着したフォトンの明るさを可視化させる。放射位置は球の頂点の 10mm 上で、放射方向は z 軸方向に -1 の方向。可視化をする視点は球体頂点の真上に視点を持つ時を考える。この時、射影変換を行い、フォトンの位置 (x, y, z) を画像上の (u,v) に変換する。また、 (u,v) に対応する画素にフォトン強度を足していくことで、フォトン強度を画像に反映させる。可視化するシーンは図 8 に示す。対象物体は表 3 示す各条件を対象に行った。対象

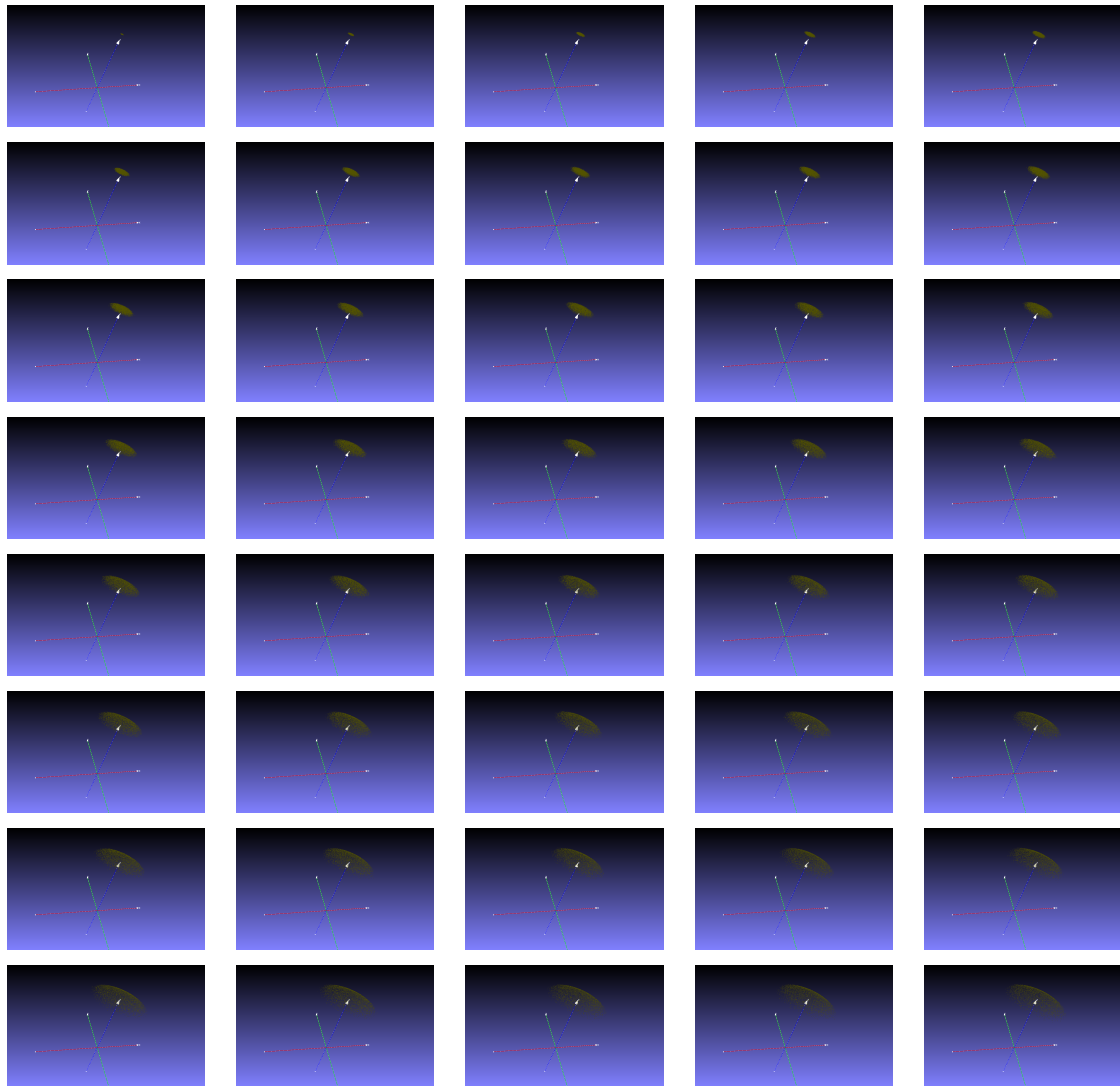


図 7 ポイントクラウドで表示した結果

物体の球の頂点に到着する 33[ps] から 48[ps] 間を 1[ps] 間に区切って表示させた結果を図 9 から図 40 に示す.

球の半径 [mm]	10	100	1000	10000	100000
位相関数 g	0	0.6	0.8	0.974	
散乱パラメータ (材質)	牛乳	コーヒー			

表 3 フォトン放射の対象物のパラメータ

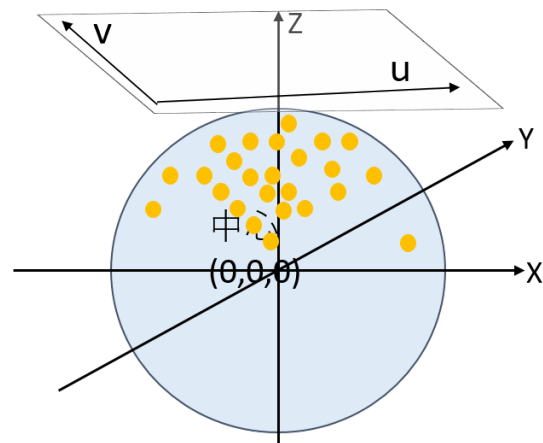


図 8 可視化シーン

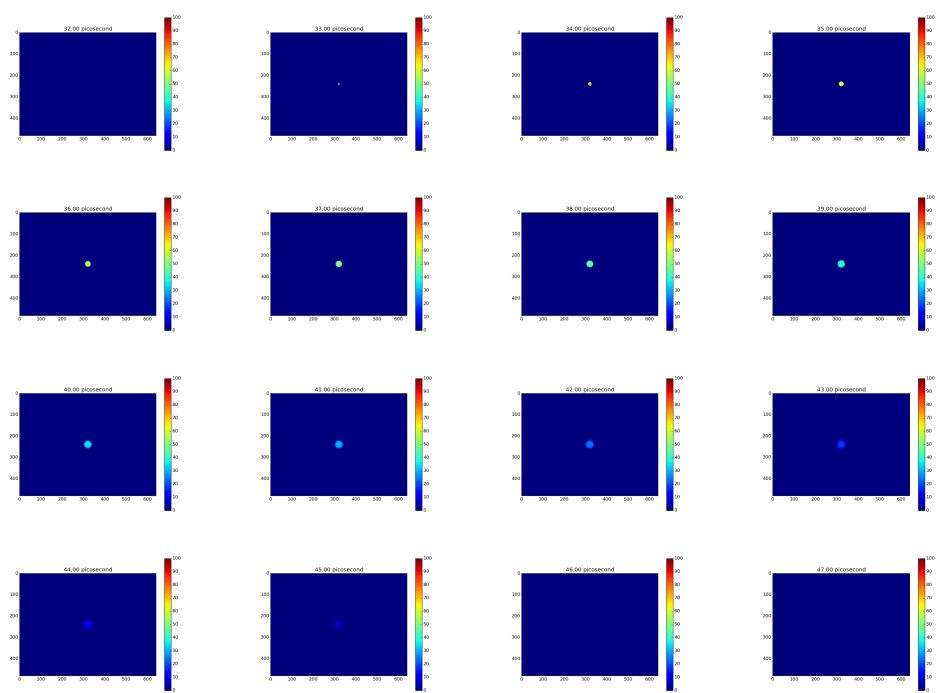


图 9 牛乳，半径 10， $g=0$

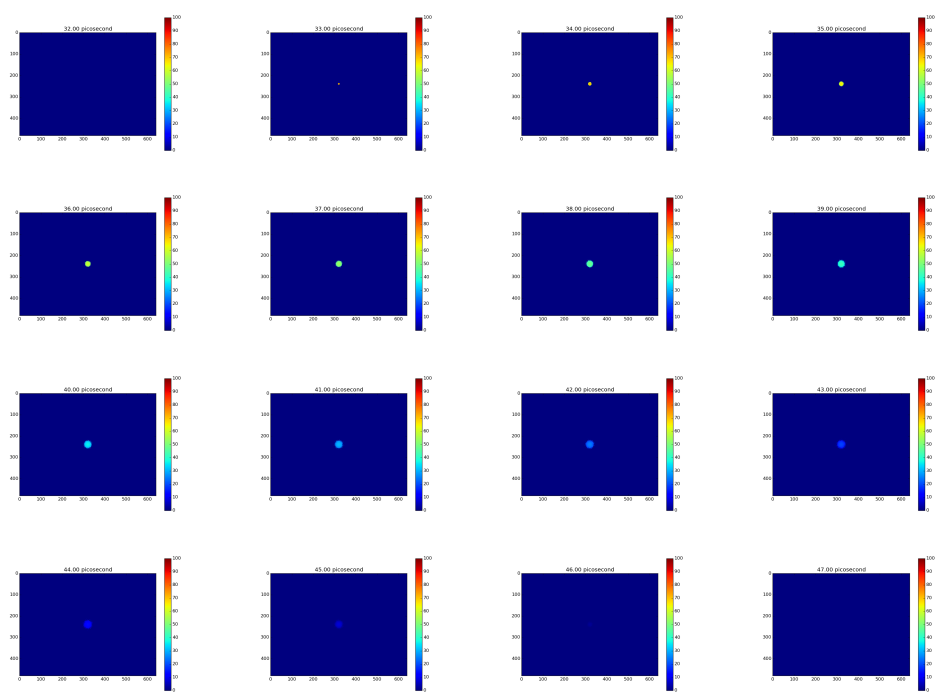


图 10 牛乳, 半径 1000, $g=0$

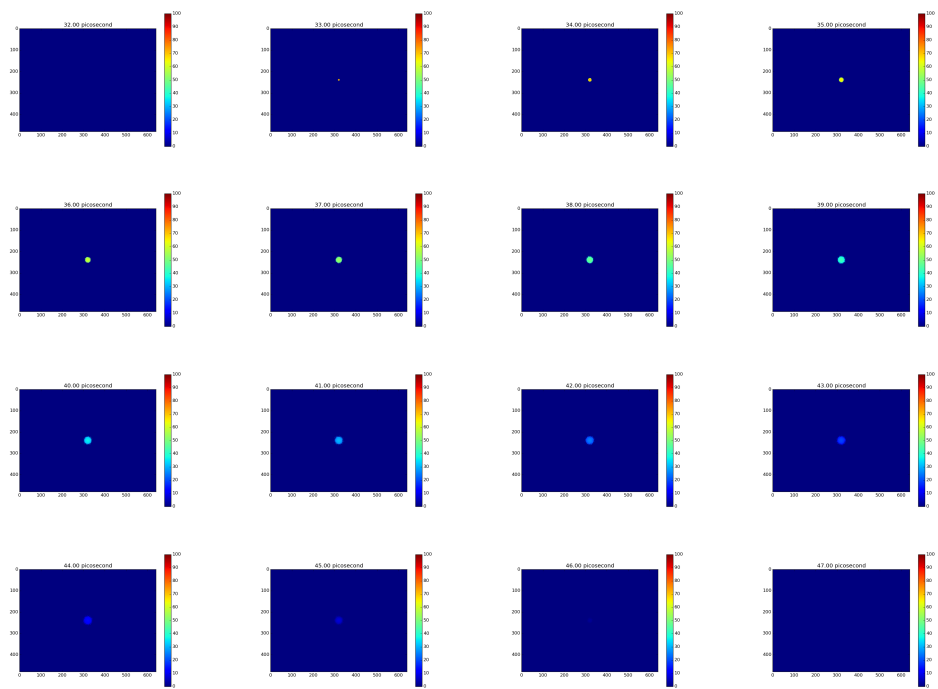


图 11 牛乳, 半径 10000, $g=0$

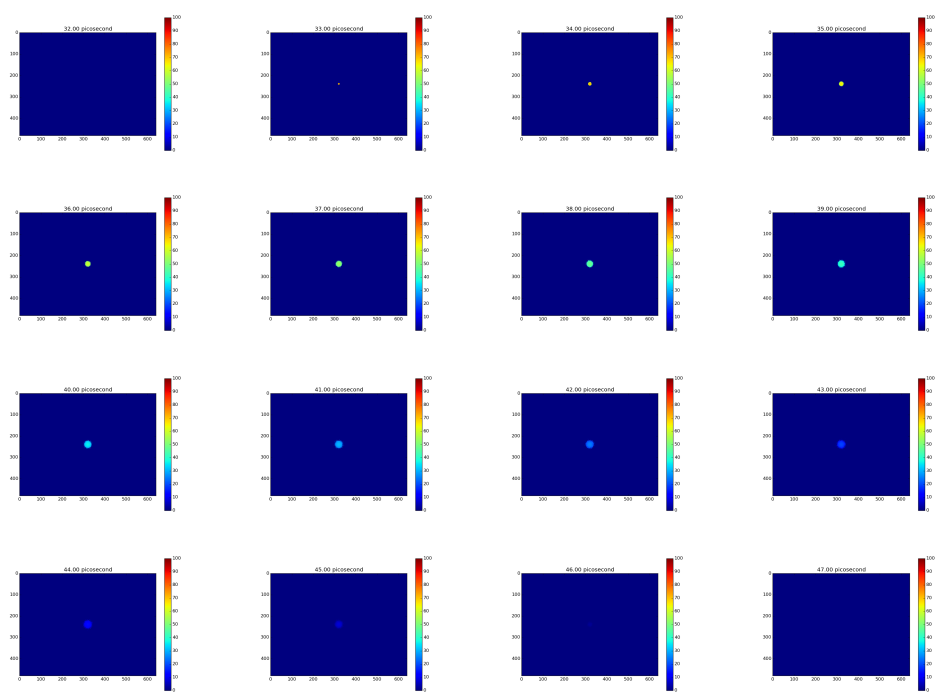


图 12 牛乳, 半径 100000, $g=0$

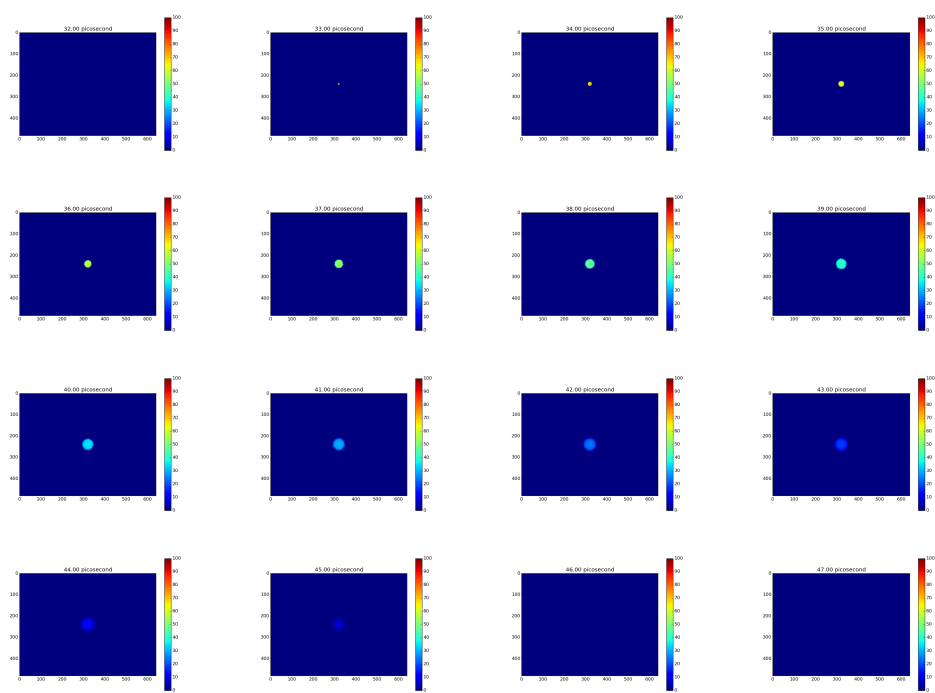


图 13 牛乳, 半径 10, $g=0.6$

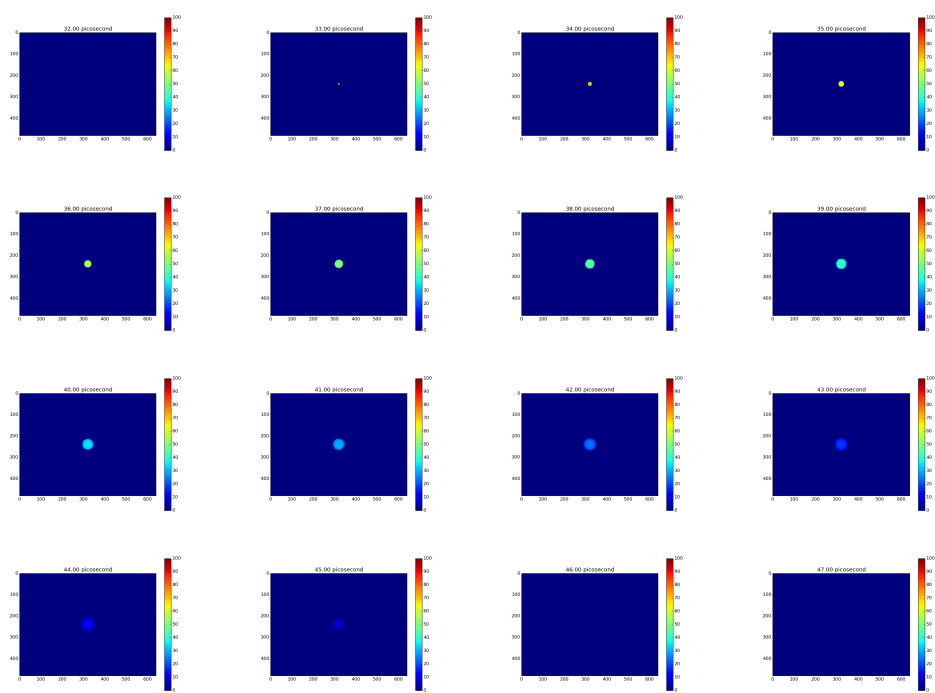


图 14 牛乳，半径 1000, $g=0.6$

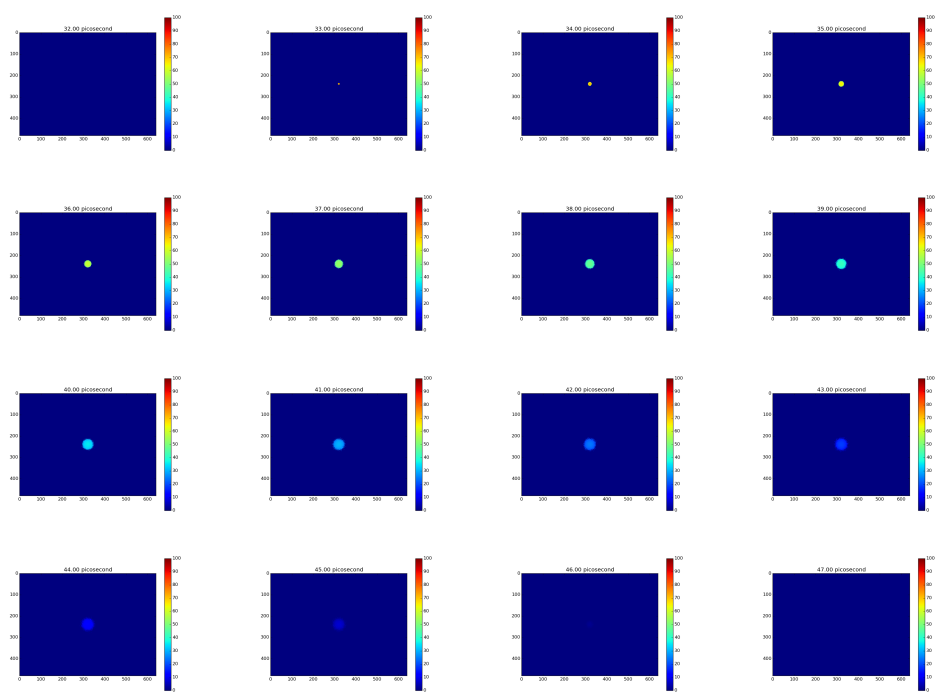


图 15 牛乳，半径 10000， $g=0.6$

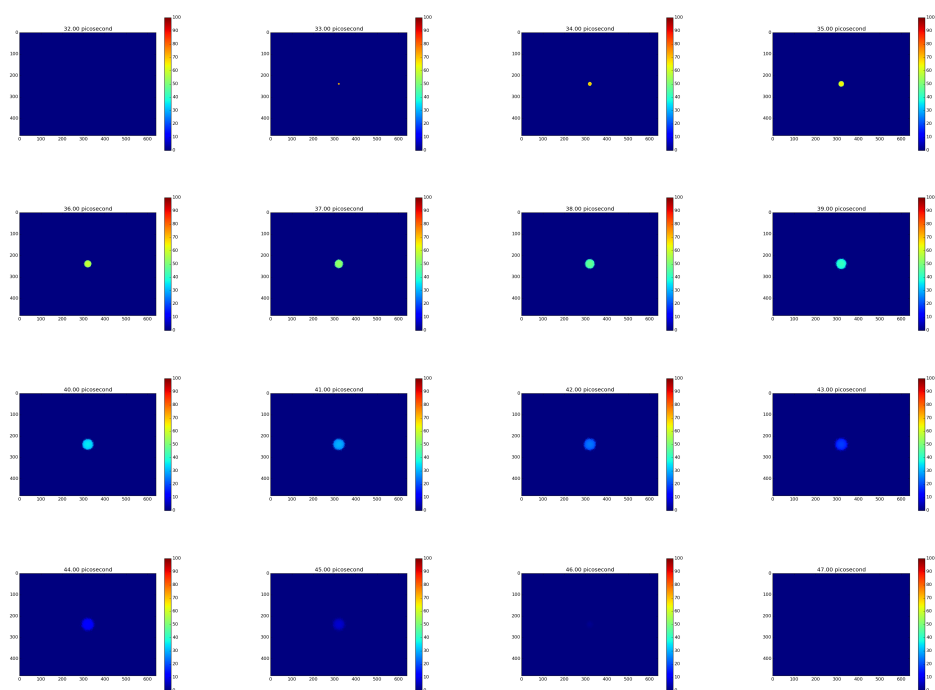


图 16 牛乳，半径 10000， $g=0.6$

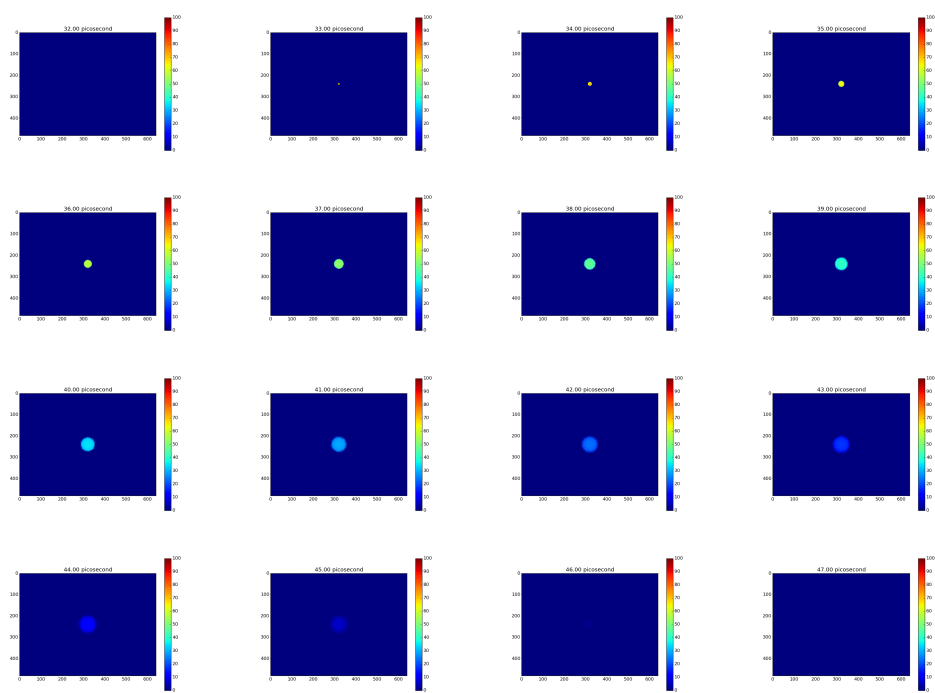


图 17 牛乳，半径 10， $g=0.8$

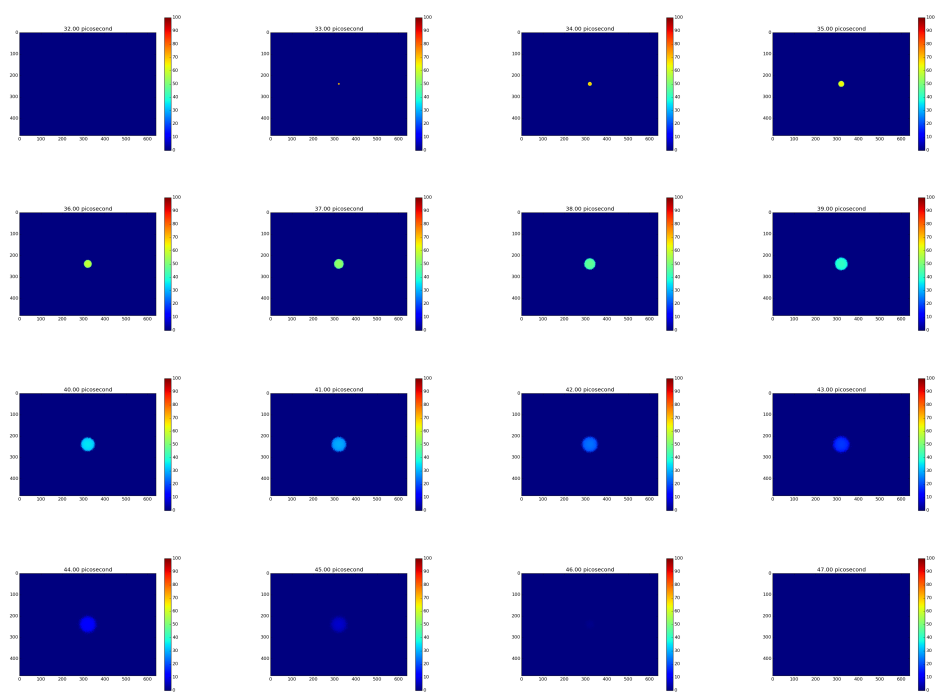


图 18 牛乳，半径 1000, $g=0.8$

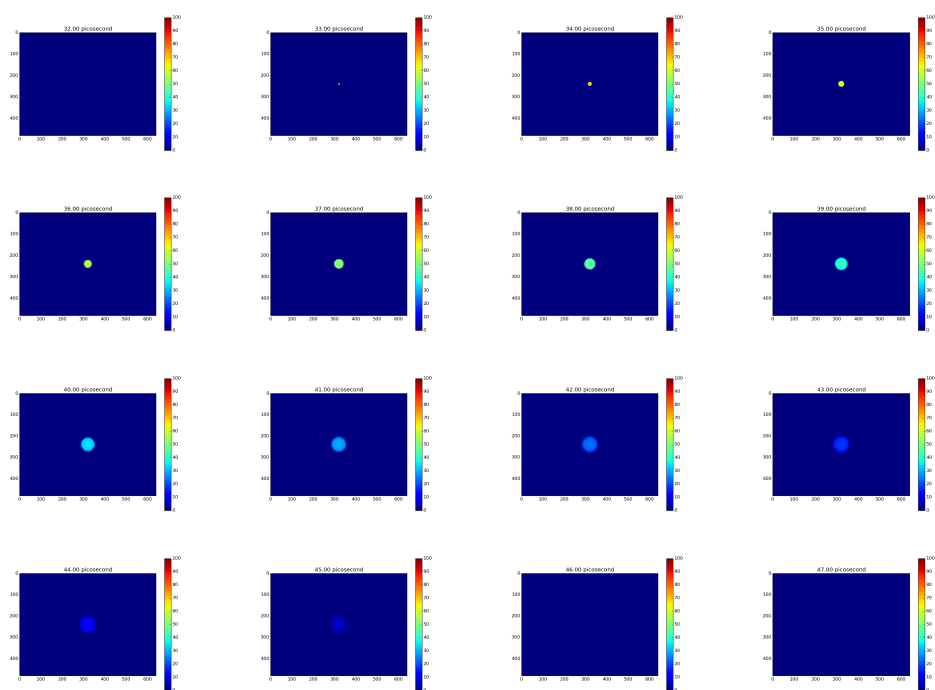


图 19 牛乳，半径 10000， $g=0.8$

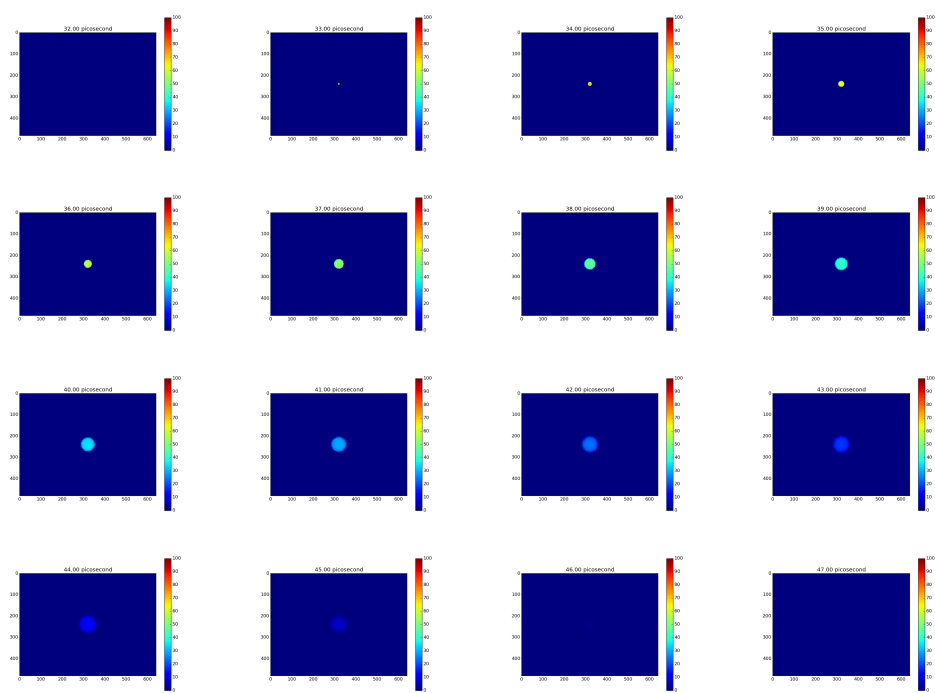


图 20 牛乳，半径 100000， $g=0.8$

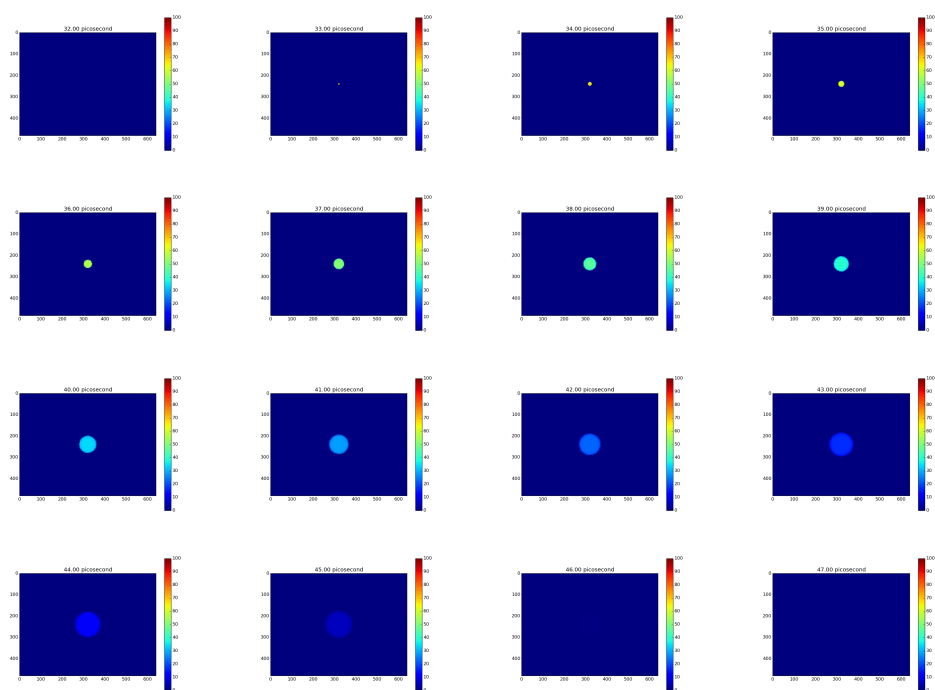


图 21 牛乳，半径 10, $g=0.974$

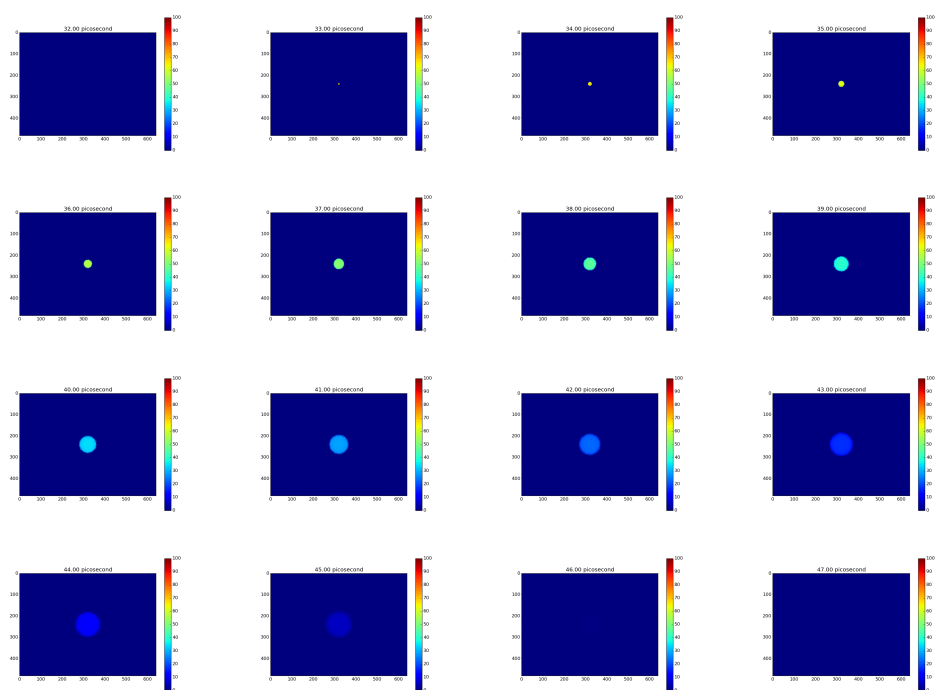


图 22 牛乳，半径 1000， $g=0.974$

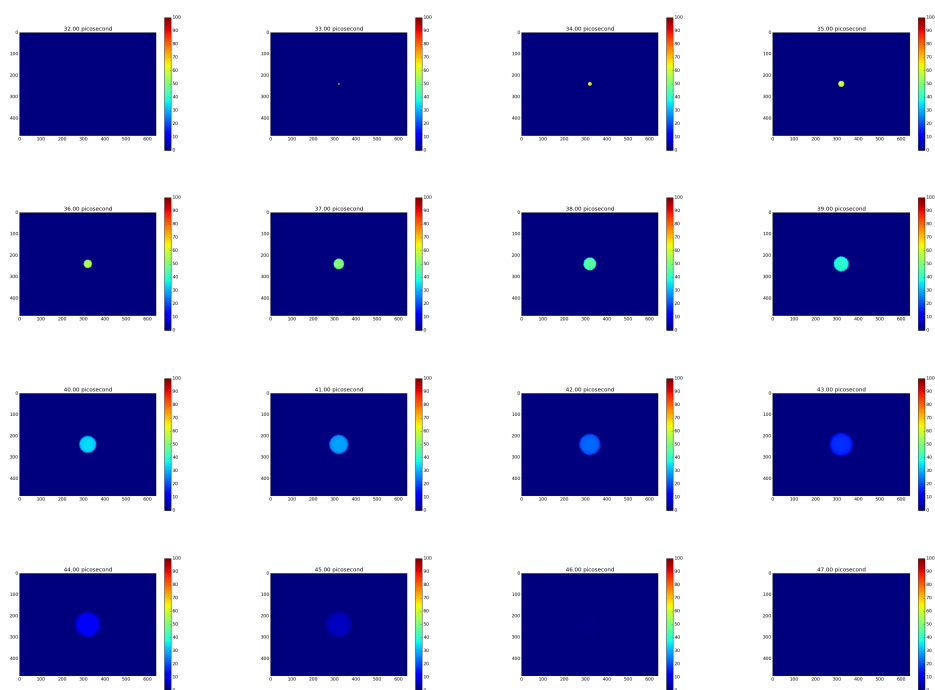


图 23 牛乳, 半径 10000, $g=0.974$

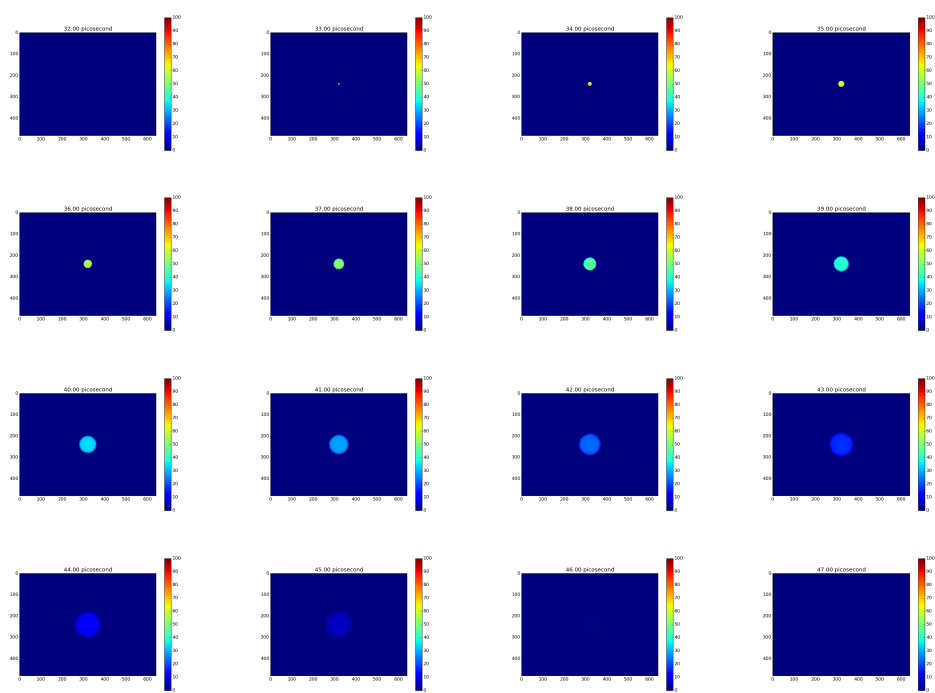


图 24 牛乳, 半径 100000, $g=0.974$

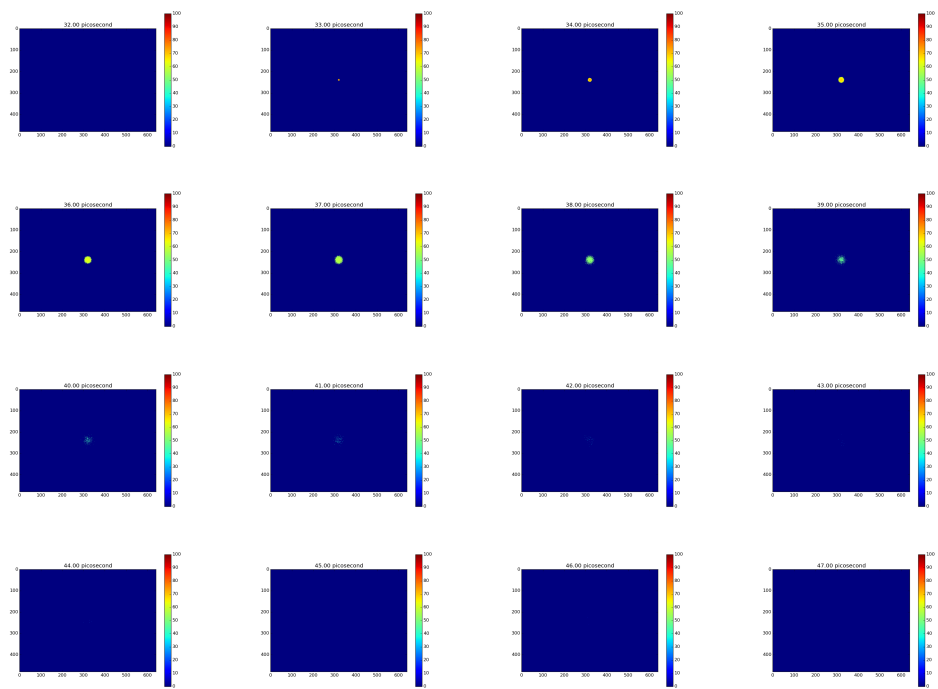


図 25 コーヒー, 半径 10, $g=0$

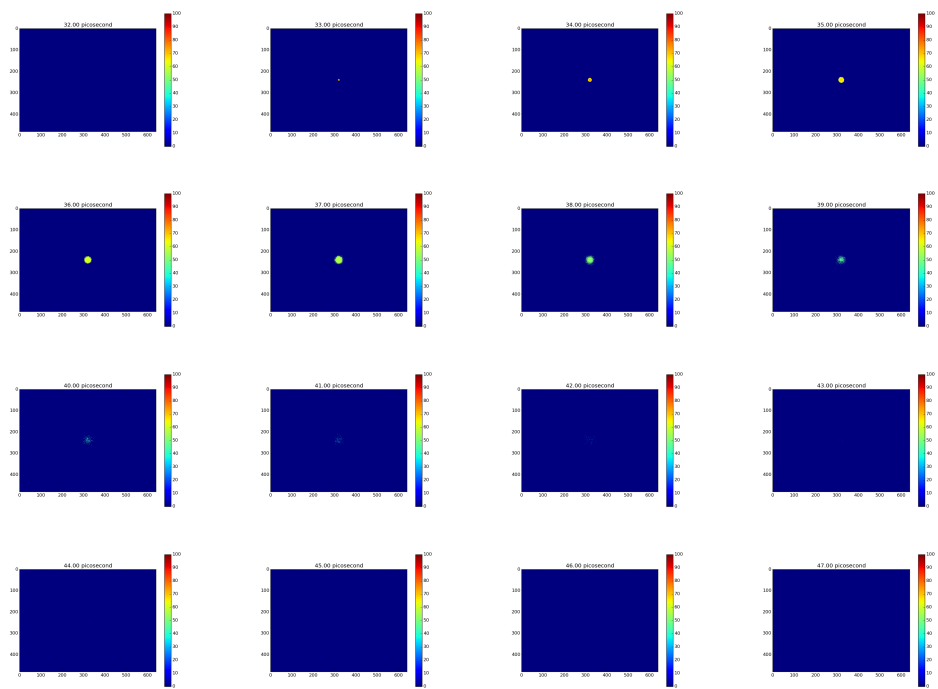


図 26 コーヒー, 半径 1000, $g=0$

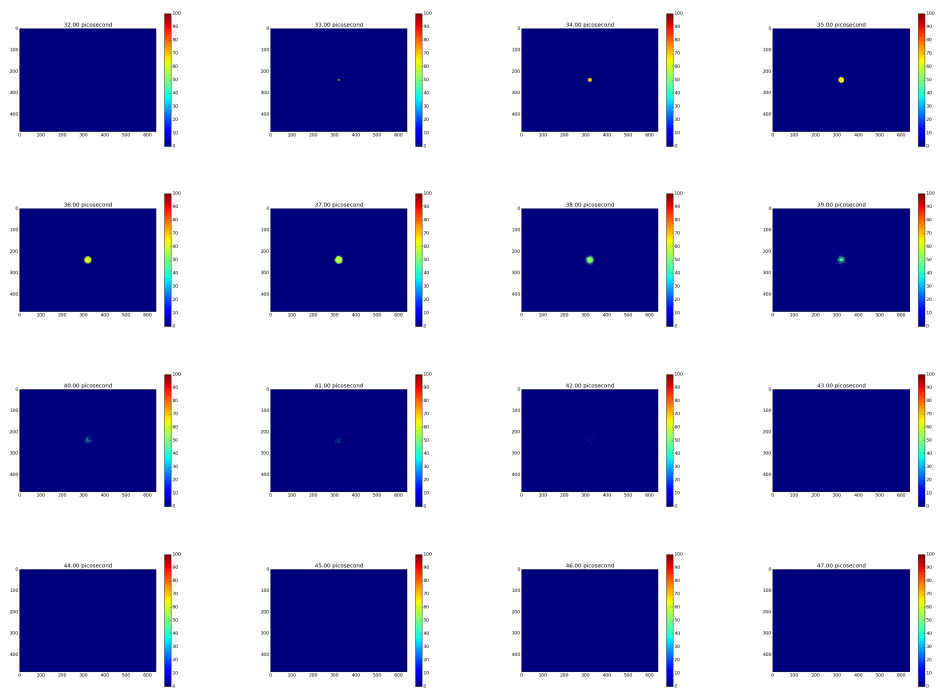


図 27 コーヒー, 半径 10000, $g=0$

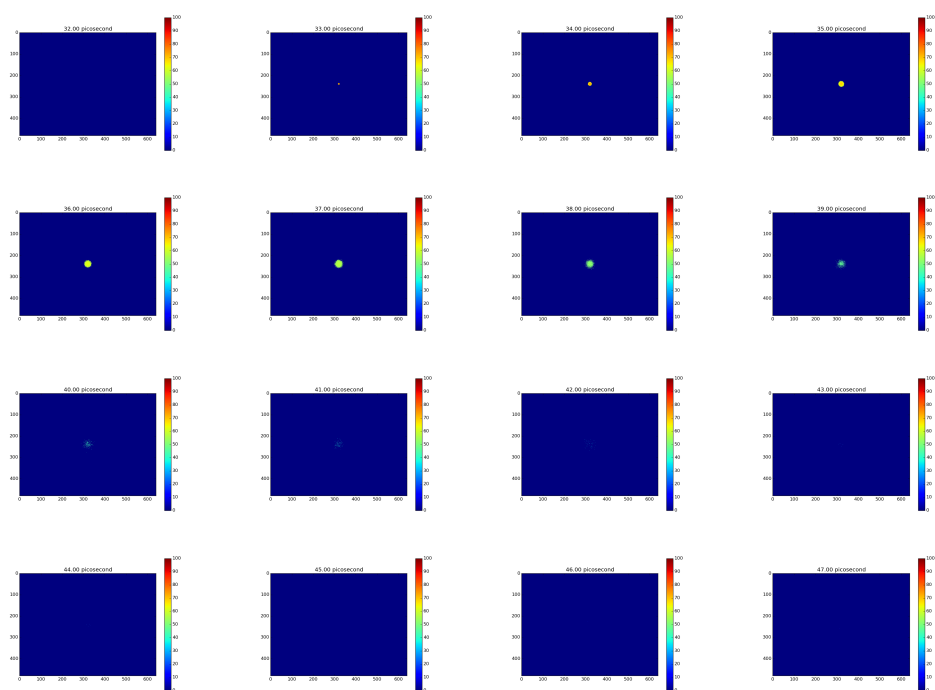


図 28 コーヒー, 半径 100000, $g=0$

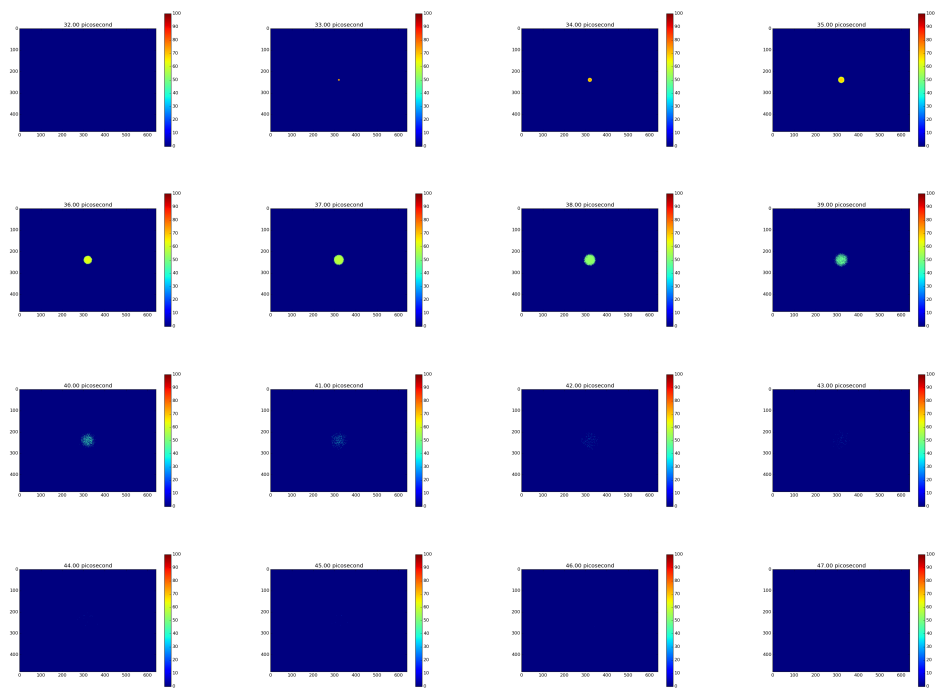


図 29 コーヒー, 半径 10, $g=0.6$

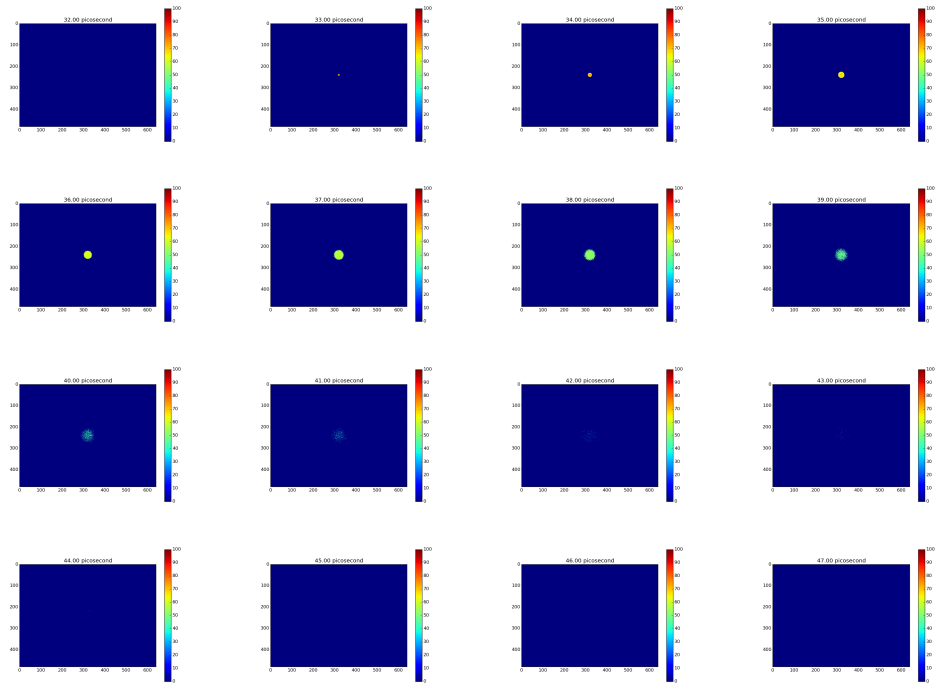


図 30 コーヒー, 半径 1000, $g=0.6$

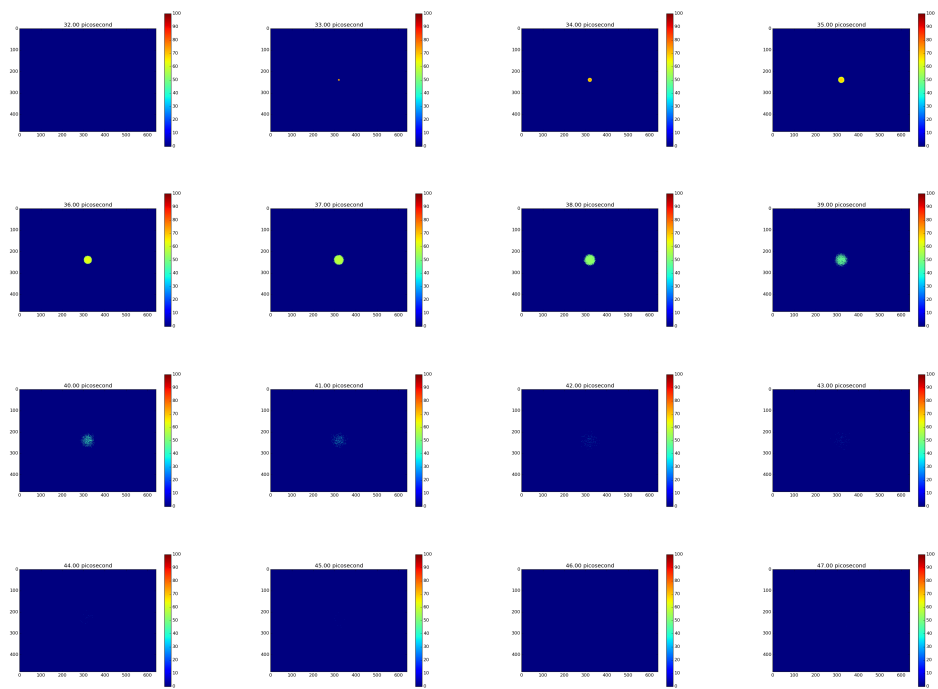


図 31 コーヒー, 半径 10000, $g=0.6$

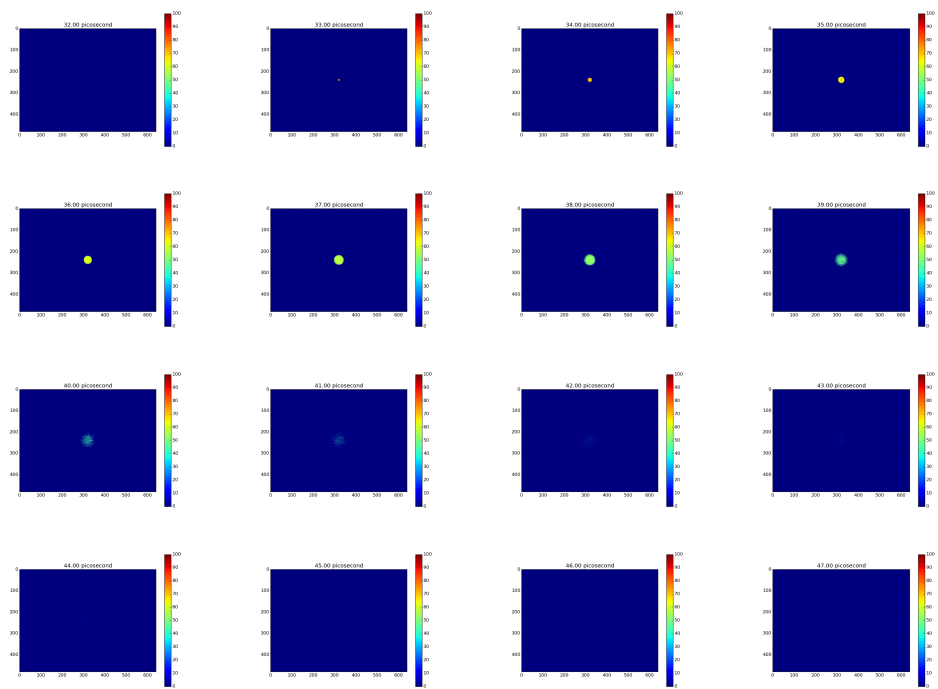


図 32 コーヒー, 半径 100000, $g=0.6$

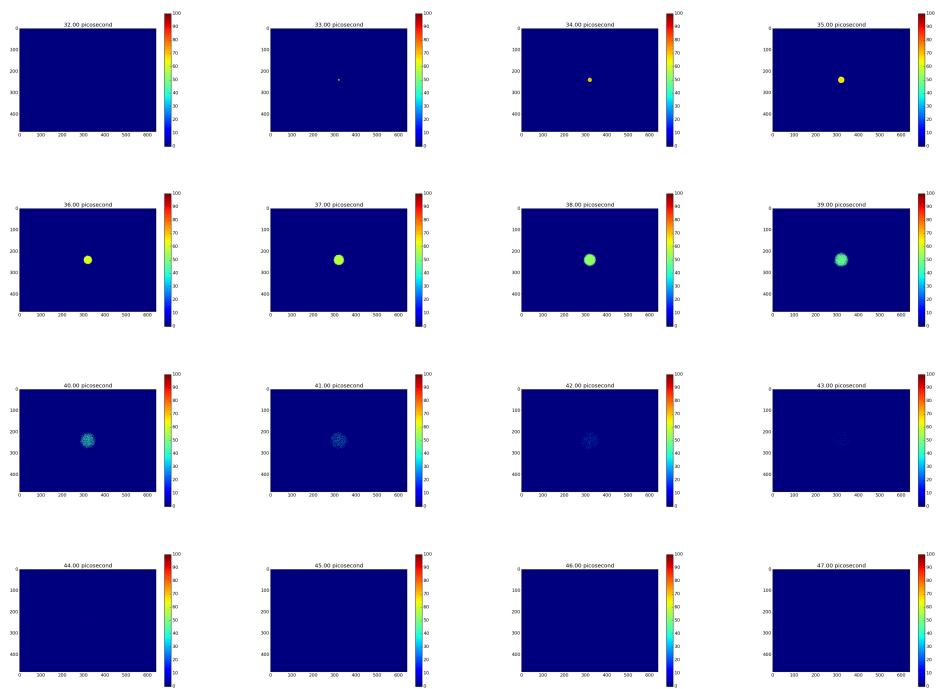


図 33 コーヒー, 半径 10, $g=0.8$

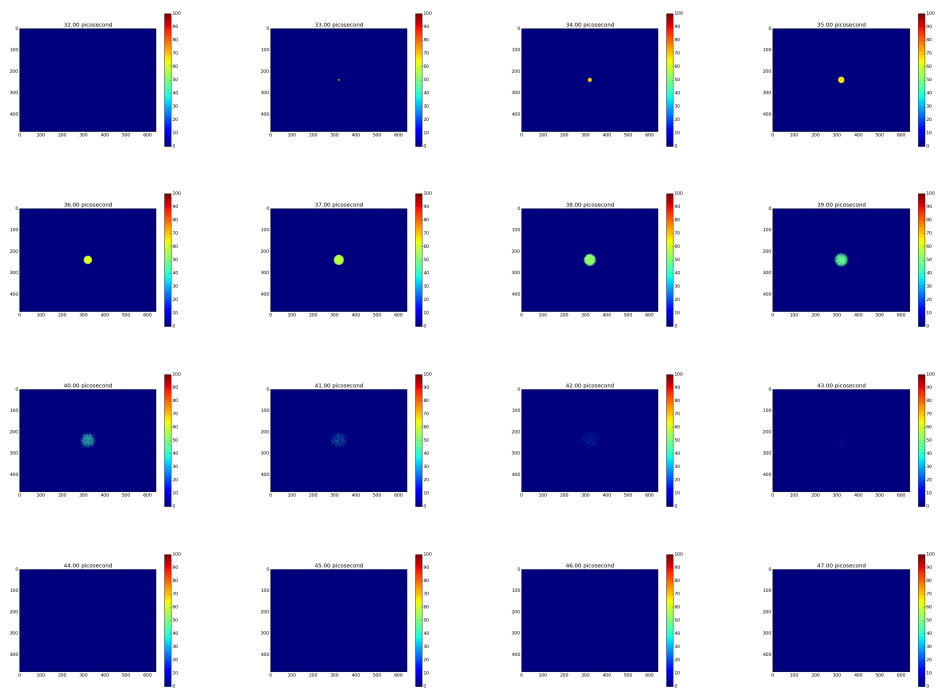


図 34 コーヒー, 半径 1000, $g=0.8$

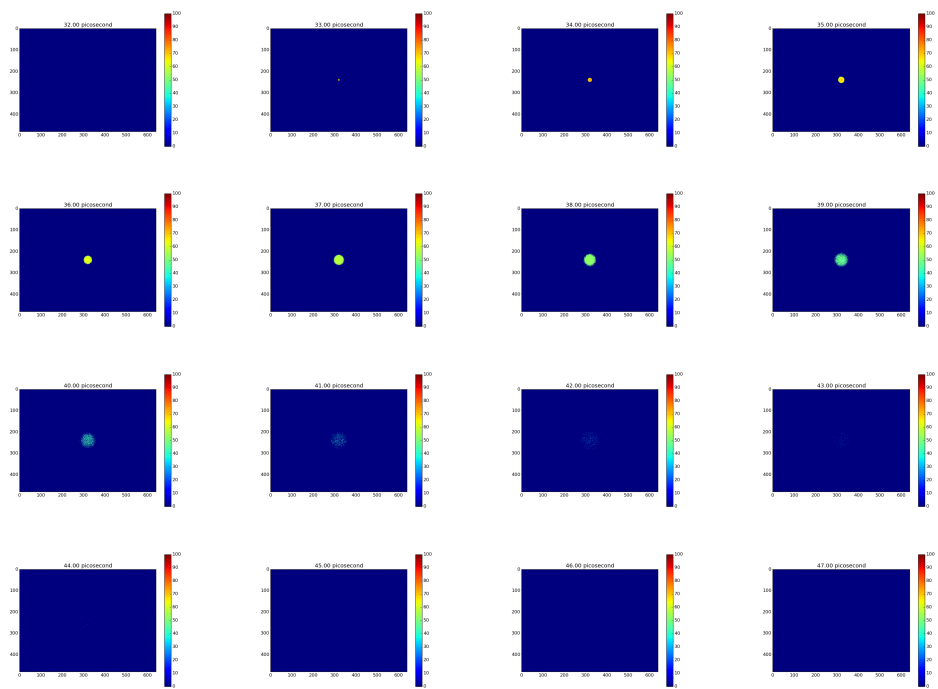


図 35 コーヒー, 半径 10000, $g=0.8$

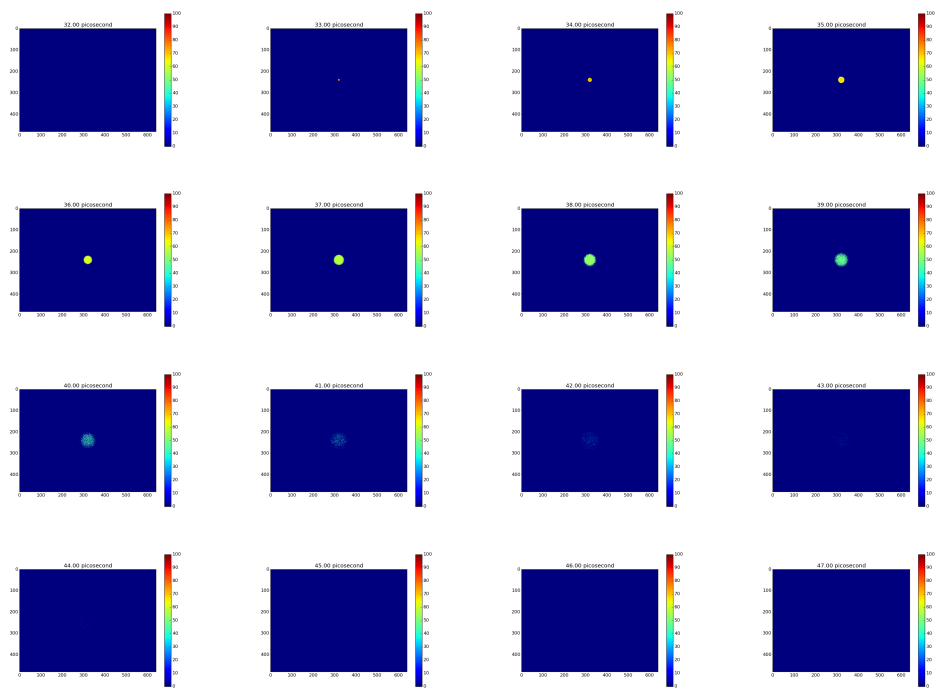


図 36 コーヒー, 半径 100000, $g=0.8$

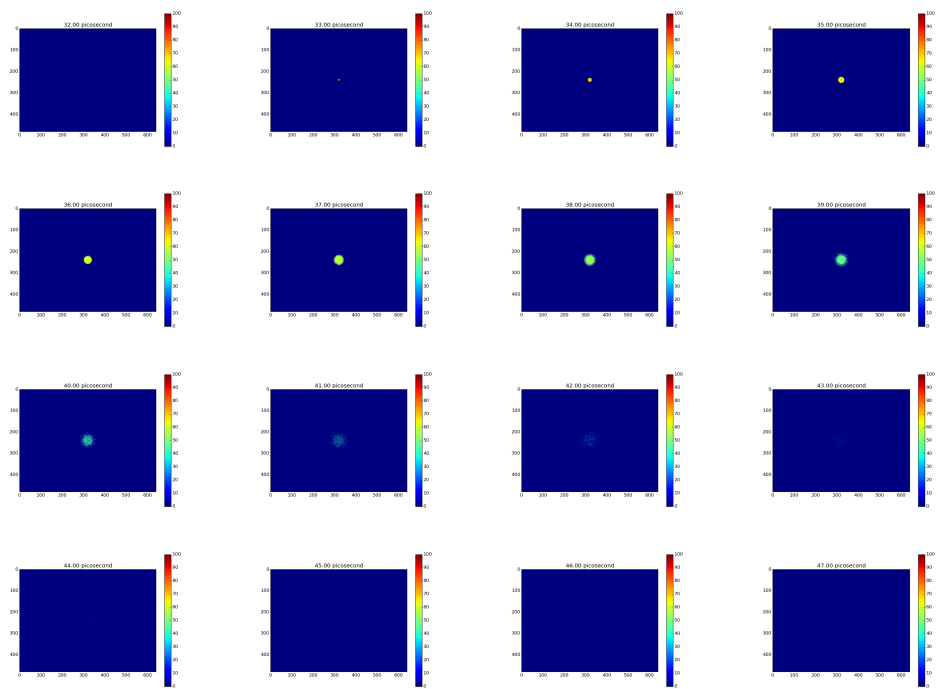


図 37 コーヒー, 半径 10, $g=0.974$

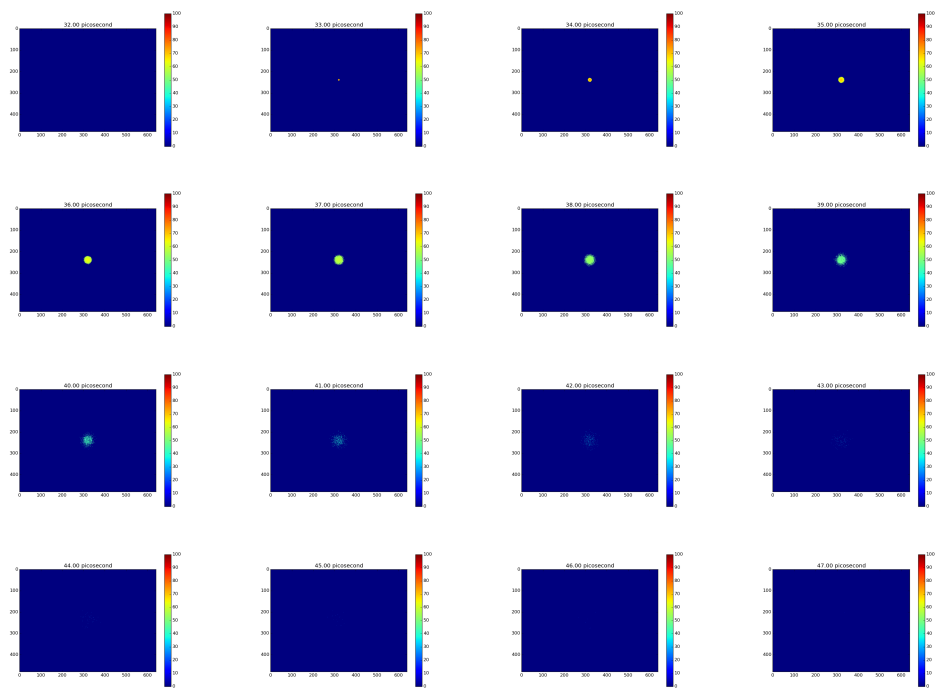


図 38 コーヒー, 半径 1000, $g=0.974$

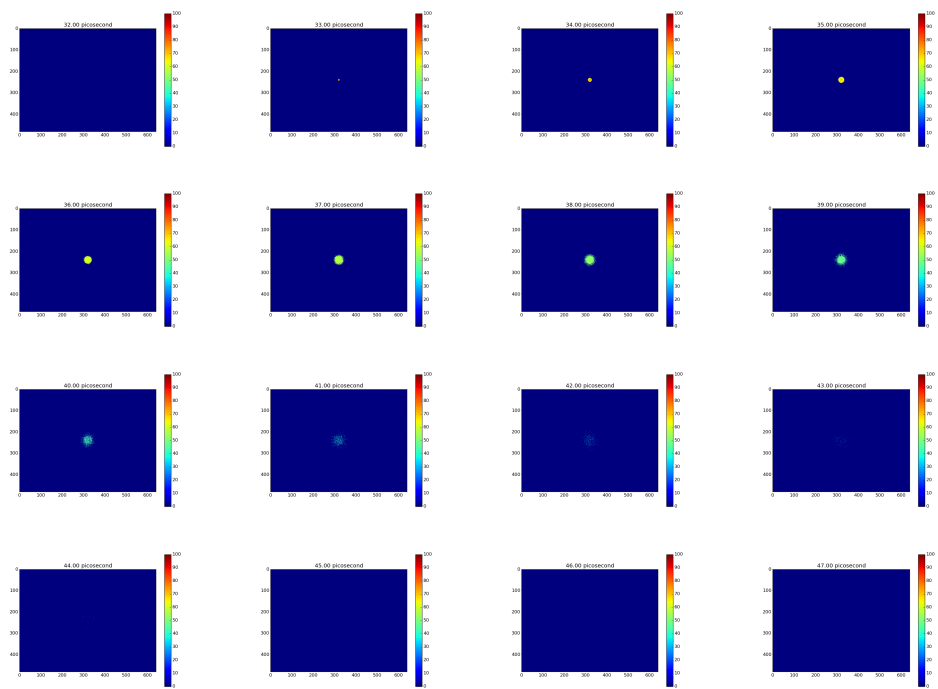


図 39 コーヒー, 半径 10000, $g=0.974$

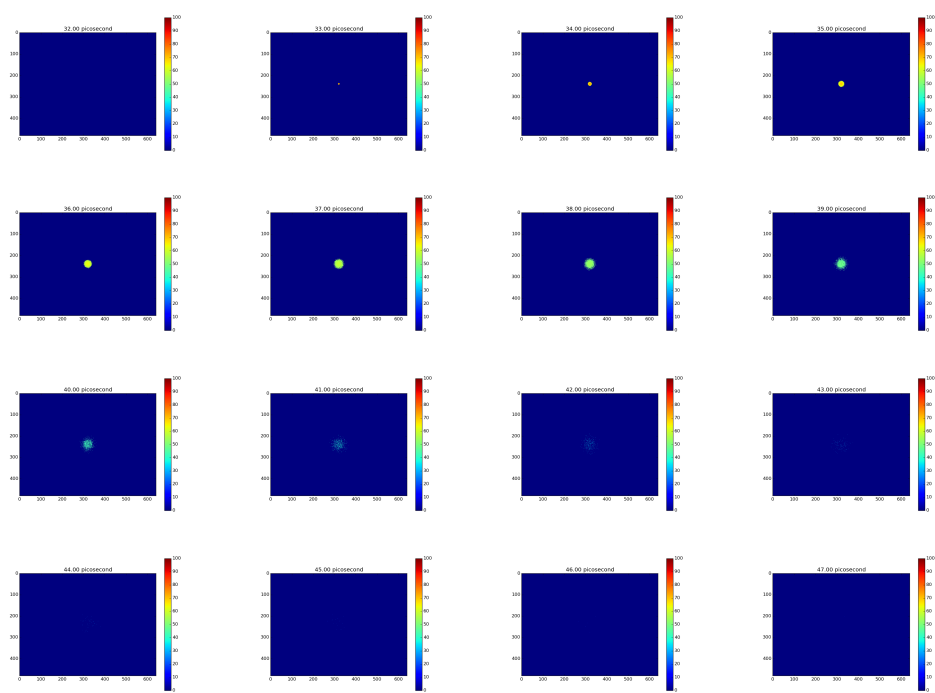


図 40 コーヒー, 半径 100000, $g=0.974$

4. 時間遷移の解析

前章で示した光子強度の分布を用いて、時間軸方向に注目した情報を得ることができる。対象物体の球の半径や、対象物の球の材質によって光子のふるまいを解析した。

4.1 時間と x 軸方向

図 41 可視化画像上で光子強度と時間の関係をグラフに示した。これにより、画像上の x 軸方向の光子強度を時間軸ごとにどのように分布するかを解析可能にした。単位時間ごとの光子強度を表示させた画像の x 軸方向の光子強度がわかる。位相関数の違いから光の広がりが違うことがわかる。解析結果を図 42 と図 43 に示す。

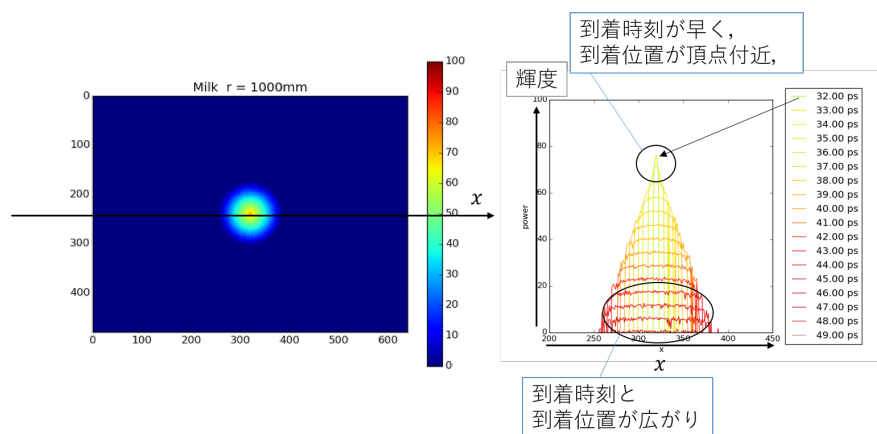
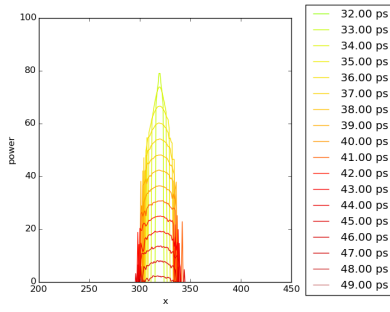
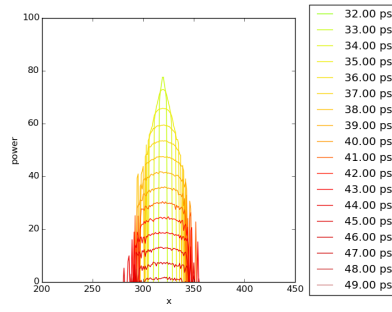


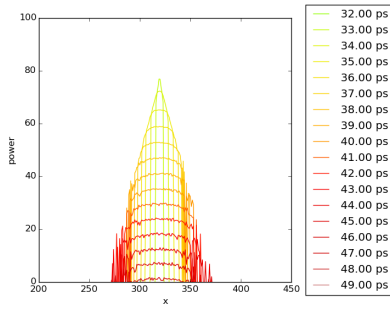
図 41 時間と x 軸方向の解析



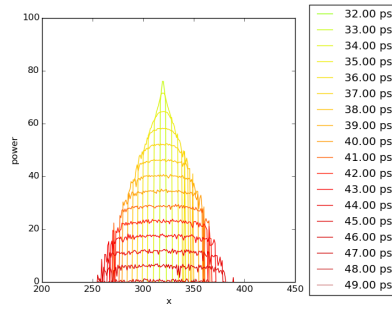
milk, $r=100000, g=0$



milk, $r=100000, g=0.6$

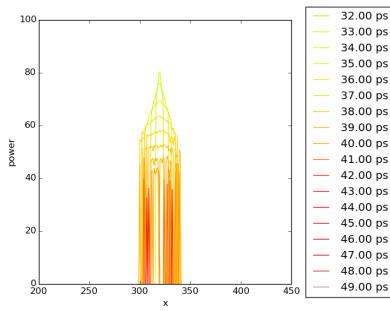


milk, $r=100000, g=0.8$

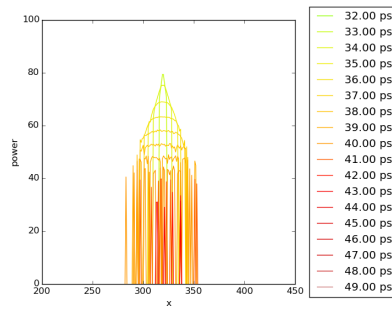


milk, $r=100000, g=0.974$

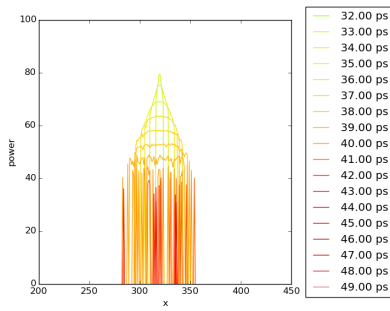
⊠ 42 milk, $r=100000$



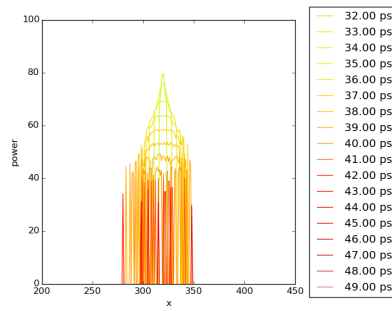
coffee, $r=100000, g=0$



coffee, $r=100000, g=0.6$



coffee, $r=100000, g=0.8$



coffee, $r=100000, g=0.974$

☒ 43 coffee, $r=100000$

4.2 考察

吸収の特性が大きい物体では、時間経過により、光子は様々な場所に到着し、散乱の特性が大きい物体では、一定の強さをもって広がって到着する．位相関数が0に近づくとき光子の到着範囲が狭くなる．図44に示しているように、半径の違いによる光子のふるまいの違いはほとんどなかった．

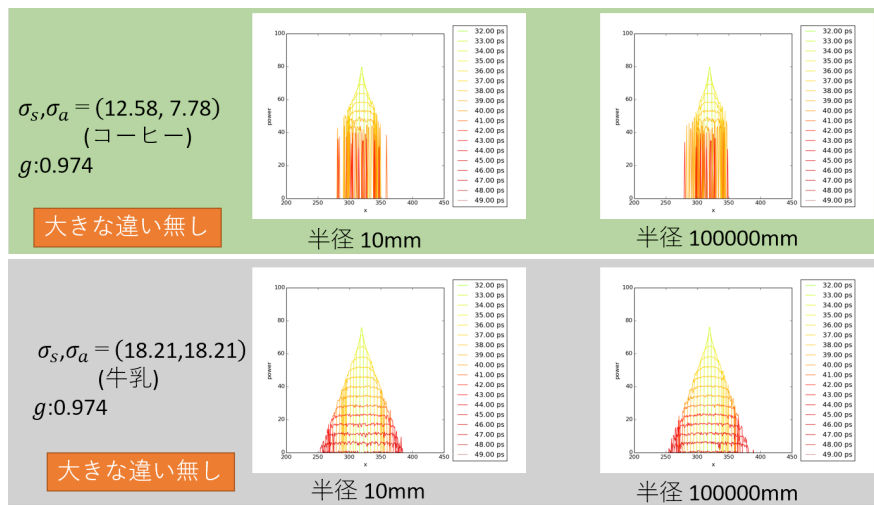


図 44 半径の違い

4.3 時間と輝度情報

図 45 に示すように単位時間 1 ピコ秒間に、光子強度がどのように変化するのかをグラフに示した。このグラフから、時間による光子強度の分布を見ることができる。また、対象物体が同じ材質、半径であっても位相関数が光子強度に与える影響等を見ることがもできる。

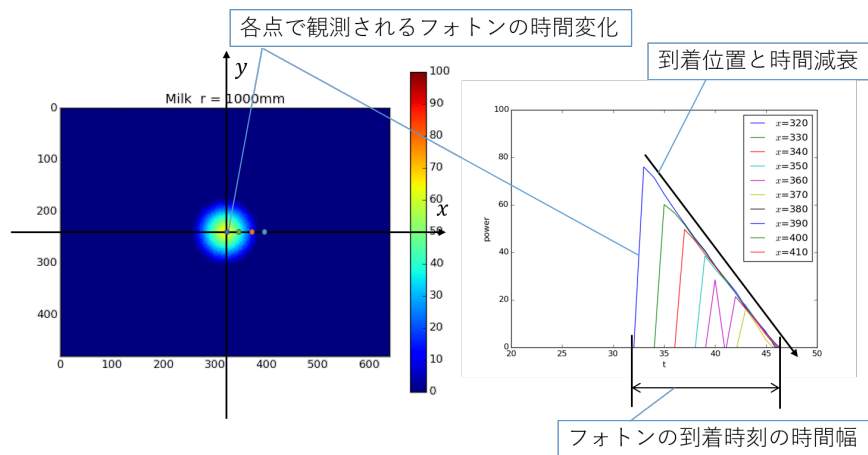
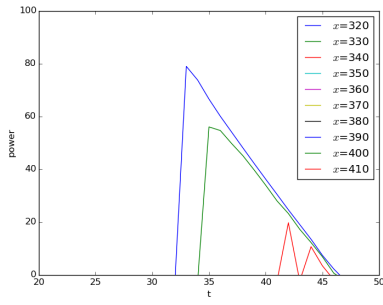
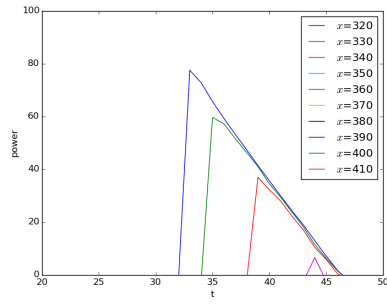


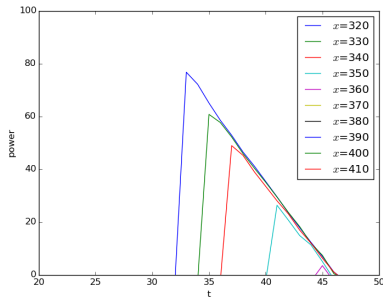
図 45 時間と輝度情報の解析



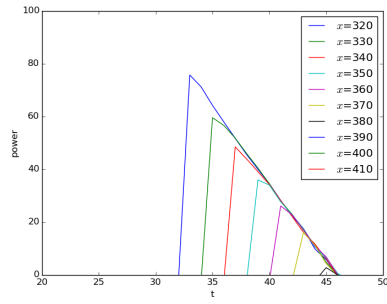
milk, $r=10,g=0$



milk, $r=10,g=0.6$

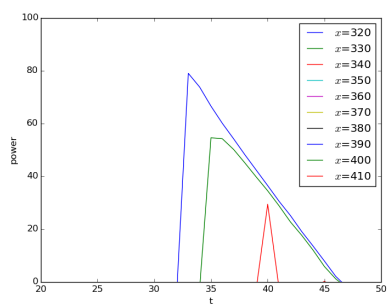


milk, $r=10,g=0.8$

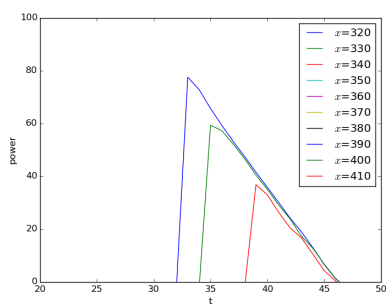


milk, $r=10,g=0.974$

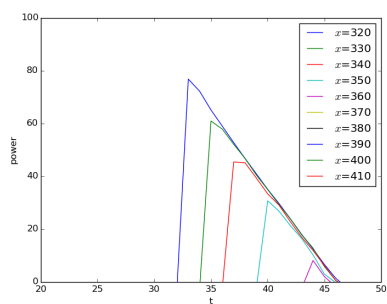
图 46 Milk, $r=10$



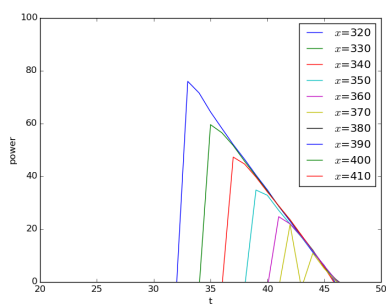
milk, $r=100, g=0$



milk, $r=100, g=0.6$

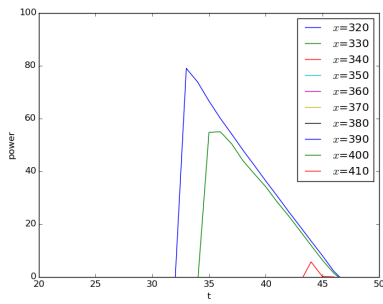


milk, $r=100, g=0.8$

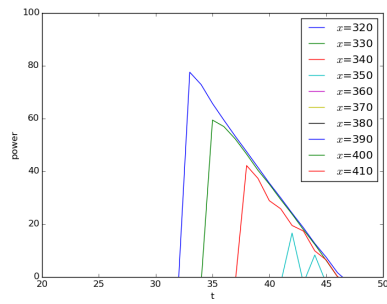


milk, $r=100, g=0.974$

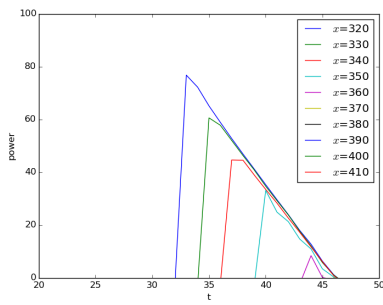
图 47 Milk, $r=100$



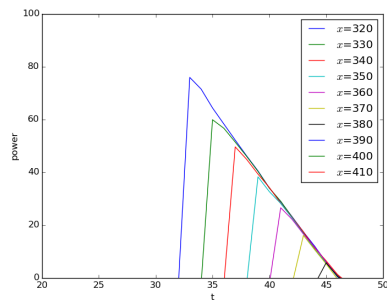
milk, $r=1000, g=0$



milk, $r=1000, g=0.6$

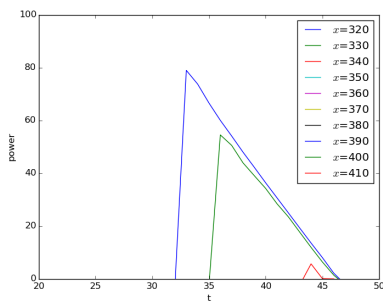


milk, $r=1000, g=0.8$

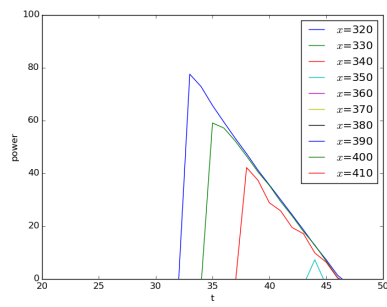


milk, $r=1000, g=0.974$

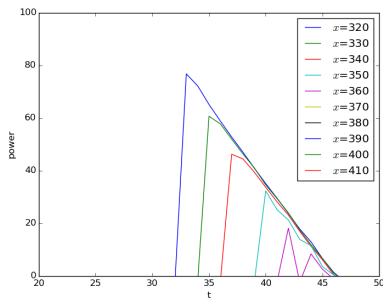
図 48 Mikl, $r=1000$



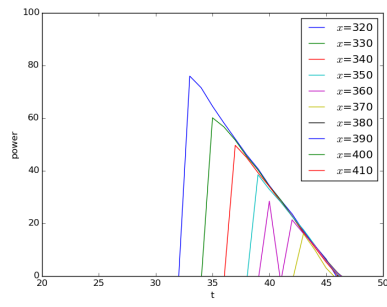
milk,r=10000,g=0



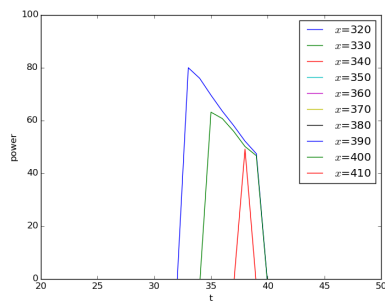
milk,r=10000,g=0.6



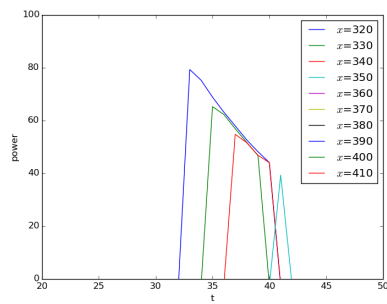
milk,r=10000,g=0.8



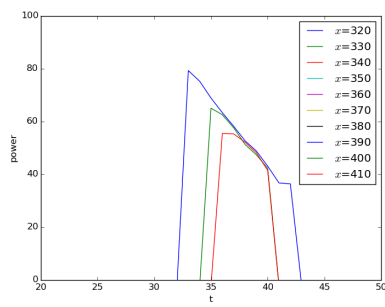
milk,r=10000,g=0.974



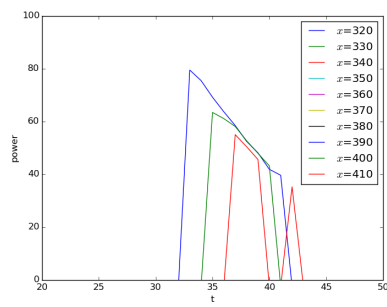
coffee, $r=10, g=0$



coffee, $r=10, g=0.6$

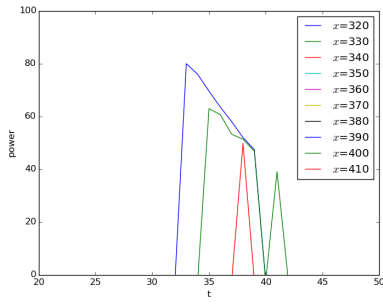


coffee, $r=10, g=0.8$

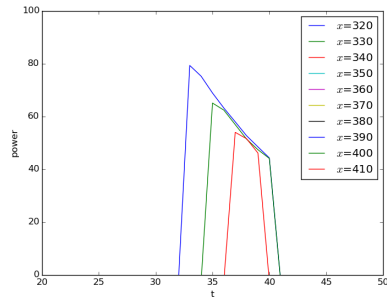


coffee, $r=10, g=0.974$

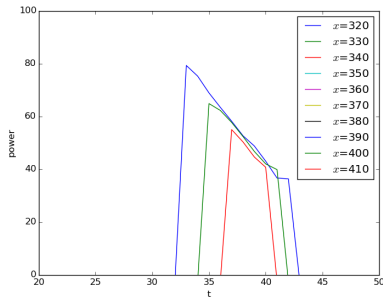
图 49 coffee, $r=10$



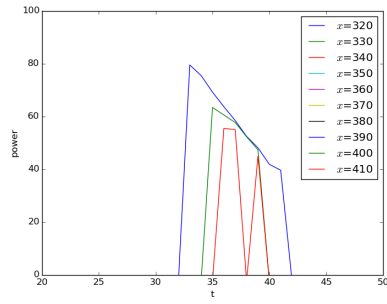
coffee, $r=100, g=0$



coffee, $r=100, g=0.6$

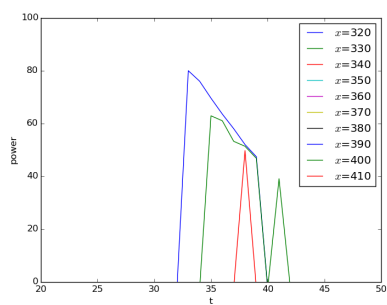


coffee, $r=100, g=0.8$

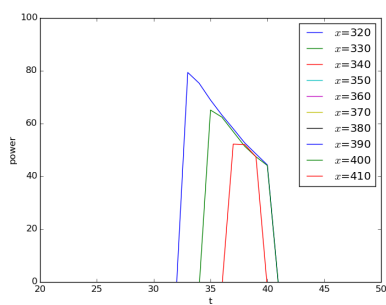


coffee, $r=100, g=0.974$

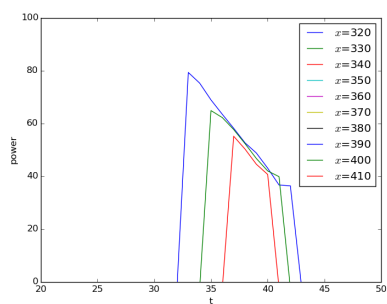
☒ 50 coffee, $r=100$



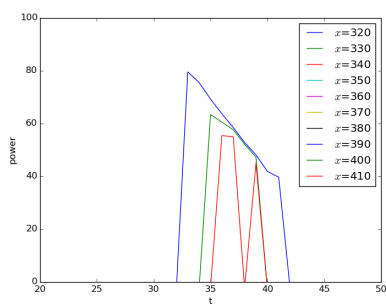
coffee, $r=1000, g=0$



coffee, $r=1000, g=0.6$

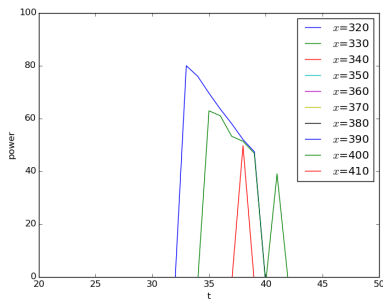


coffee, $r=1000, g=0.8$

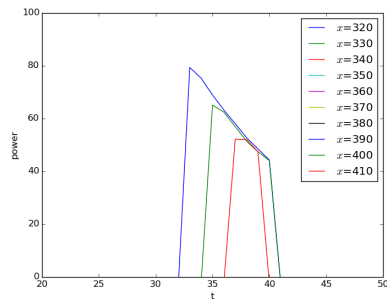


coffee, $r=1000, g=0.974$

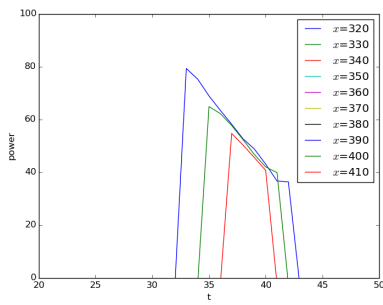
图 51 coffee, $r=1000$



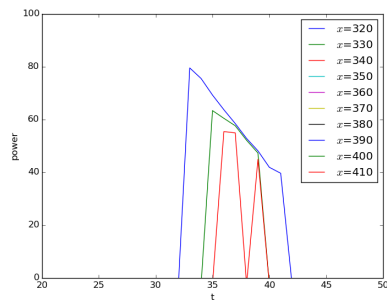
coffee, $r=10000, g=0$



coffee, $r=10000, g=0.6$

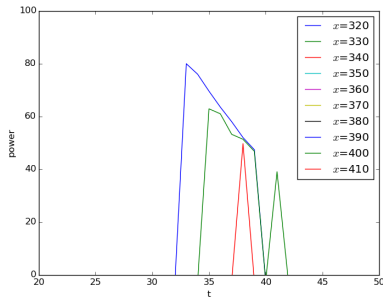


coffee, $r=10000, g=0.8$

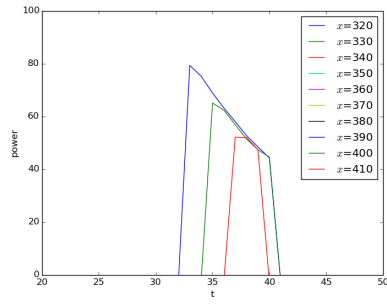


coffee, $r=10000, g=0.974$

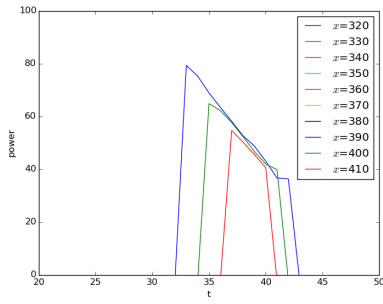
☒ 52 coffee, $r=10000$



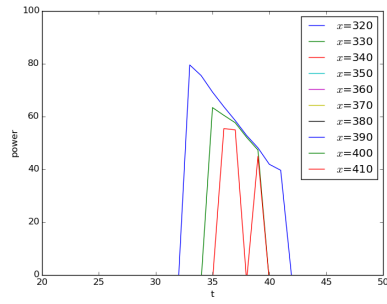
coffee, $r=100000, g=0$



coffee, $r=100000, g=0.6$



coffee, $r=100000, g=0.8$



coffee, $r=100000, g=0.974$

图 53 coffee, $r=100000$

4.4 考察

吸収が強い材質，散乱が強い材質ともに，位相関数を変えても輝度の時間的な衰退の違いは見られなかった．図 54 にまとめてあるように，吸収の強い材質では，半径が大きい方がフォトンの到着が早く，散乱の強い材質では，半径の違いによるフォトンのふるまいの違いはほとんどなかった．

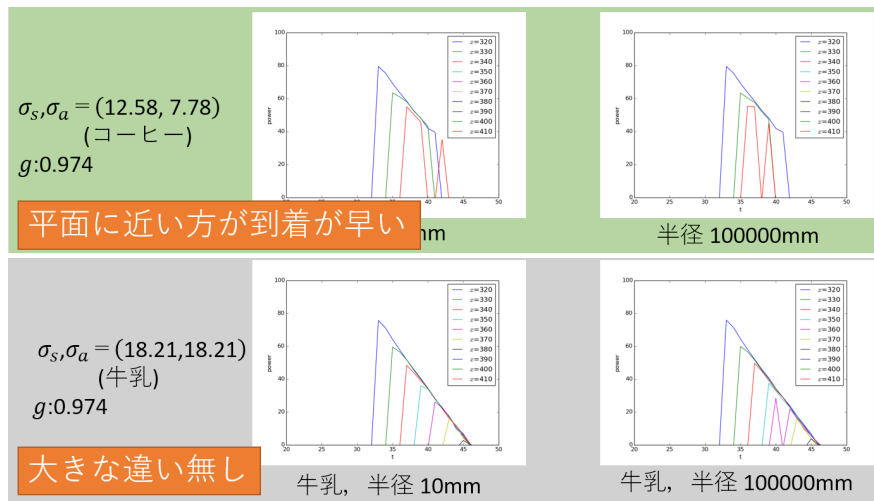


図 54 半径の違い

5. まとめ

フォトンの時間的なふるまいをモンテカルロシミュレーションを用いて行った。シミュレーション結果を用いて、フォトンの時間的なふるまいを解析したフォトンの時間軸方向の可視化と解析を行った。対象物体である球の素材の特性や、半径を変化させ、光伝播の時間的な変化を解析した。今後の展望として、光伝播を用いたツールの予測をするために、様々な形の対象物やシーンに対応するように考慮する必要がある。特に時間的な広がりを持つ物体やシーンを解析する必要がある。例えば、相互反射が起こるようなシーンである。相互反射が起こるシーンでは他の物体から反射した光が周りにある他の物体を照らすため、光の時間的な変化が期待できる。また、霧、煙などが起こる奥行きが見えないようなシーンでは光伝播の時間遷移の解析も有効であると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたって、数多くの方々からのご指導、ご助言、ご支援を頂きました。この場を借りて、御礼を申し上げます。ありがとうございました。光メディアインタフェース研究室向川康博教授には研究全般において、ご指導、ご助言をして頂きました。研究に対する姿勢について大変有意義なお話もたくさんして頂き、心より感謝を申し上げます。サイバネティクス・リアリティ工学研究室清川清教授にはゼミナール発表において、貴重な意見、ご助言を頂きました。心より感謝を申し上げます。光メディアインタフェース研究室舩富卓哉准教授には研究を進める上で数々のご助言を頂きました。先生の的確なご指摘やご助言はいつも私の不安の解消や考えの整理につながっていました。先生のご助言無しに修論の完成はありませんでした。久保尋之助教には、研究について数え切れな程の意見交換をしていただきました。長期の海外出張の間もきめ細やかな研究のご指導を頂きました。また、就職活動や生活の中での不安についても親身になって相談に乗ってくださり、ご助言をいただきました。久保先生のご助言のお陰で修士2年間の研究と修論の完成充実したものにすることができました。心より感謝を申し上げます。田中賢一郎助教には、研究室の中での生活だけでなく、学校付近の生活情報まで、とても詳しく教えて頂きました。心より感謝申し上げます。また、光メディアインタフェース研究室の皆様には研究についての意見交換のみならず、日常生活についても大変お世話になりました。特に、同期である池谷信寛君、大野大志君、梶原武紘君、北野和哉君、鈴木大介君、津田香林さん、坪田一総君、西川雅清君、峰友佑樹君、宮田明裕君には大変お世話になりました。同期11人で歩ませていただいた2年間はこれからの私の人生の中で大きな支えとなると確信しています。心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Philip Dutre, Kavita Bala, Philippe Bekaert, and Peter Shirley. *Advanced Global Illumination*. AK Peters Ltd, 2006.
- [2] Diego Gutierrez, Srinivasa G. Narasimhan, Henrik Wann Jensen, and Wojciech Jarosz. Scattering. In *ACM SIGGRAPH ASIA 2008 Courses*, SIGGRAPH Asia '08, pages 18:1–18:12, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [3] Adrian Jarabo, Julio Marco, Adolfo Muñoz, Raul Buisan, Wojciech Jarosz, and Diego Gutierrez. A framework for transient rendering. *ACM Trans. Graph.*, 33(6):177:1–177:10, November 2014.
- [4] Jaroslav Krivánek, Alexander Keller, Iliyan Georgiev, Anton S. Kaplanyan, Marcos Fajardo, Mark Meyer, Jean-Daniel Nahmias, Ondřej Karlík, and Juan Cañada. Recent advances in light transport simulation: Some theory and a lot of practice. In *ACM SIGGRAPH 2014 Courses*, SIGGRAPH '14, pages 17:1–17:6, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [5] Andreas Velten, Di Wu, Adrian Jarabo, Belen Masia, Christopher Barsi, Chinmaya Joshi, Everett Lawson, Mounsi Bawendi, Diego Gutierrez, and Ramesh Raskar. Femto-photography: Capturing and visualizing the propagation of light. *ACM Trans. Graph.*, 32(4):44:1–44:8, July 2013.