特殊相対性理論の効果を考慮した光子の拡散問題

筑波大学 宇宙物理理論研究室 B4

201810865 竹田麟太郎

研究の目的

ブラックホール周辺などで起こる光学的に厚い降着円盤やアウトフローでは,
特殊相対論的速度で運動する流体中で光子が拡散していると考えられている

→しかし, 特殊相対論の効果を考慮した光子の拡散はまだよくわかっていない・・・
（現状のシミュレーションコードの多くは, 光速で進むはずの光の速度を下げるなど
して, このような場での輻射の拡散を解いている）

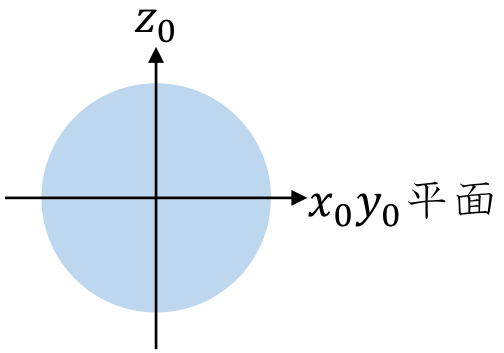
→相対論的光子散乱問題の解析解を導出するのが最終的な目的

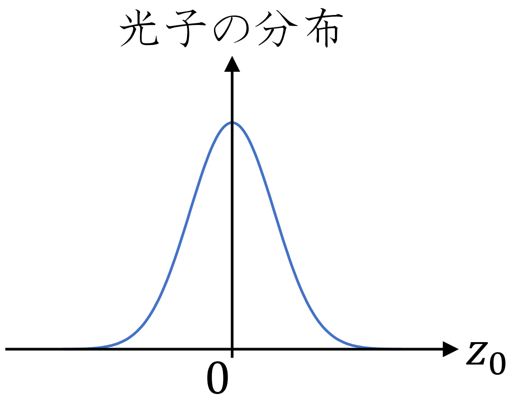
研究の目的

速度vで運動している流体中で光子が散乱している状況を考える

■共動系では・・・

光子は等方散乱

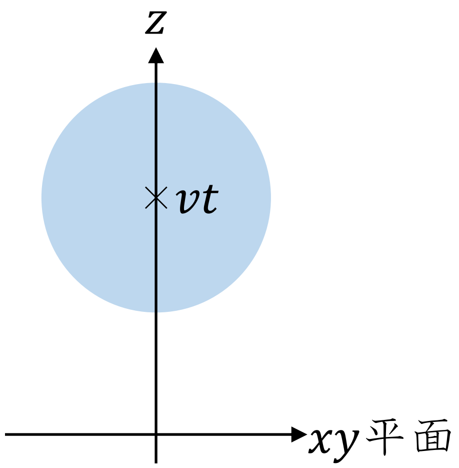


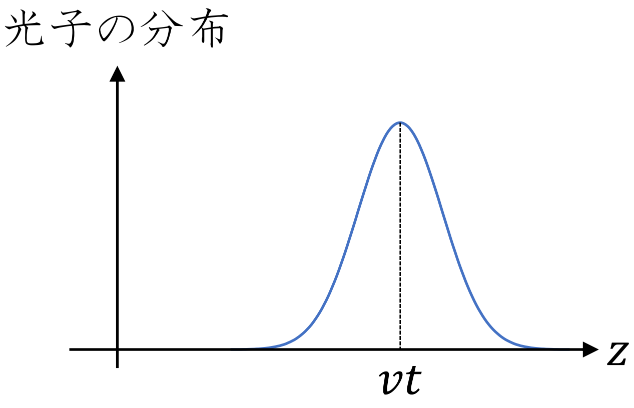


■実験室系では・・・

- 非相対論の範疇$(v \ll c)$なら・・・

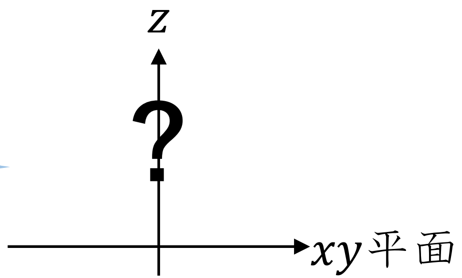
従来のシュミレーションコードの多くは
この分布を使用

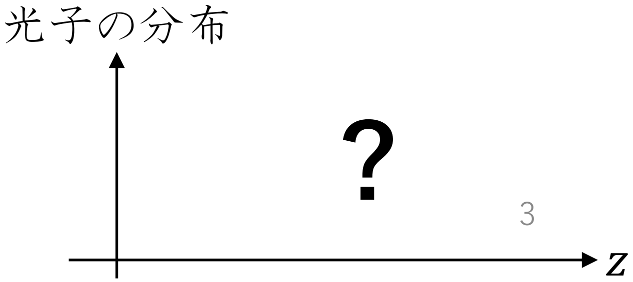




- 相対論的速度$(v{\sim}c)$なら・・・

単に共動系での分布の
ガリレイ変換/ローレンツ収縮でいいのか・・・？





研究の目的

→特殊相対性理論を考慮して、

任意の時刻･座標における光子の分布関数を求める

- Step1：モンテカルロシミュレーションによる分布の計算
- Step2：解析解との比較

本日の講演内容

→ブラックホールの降着円盤やジェットのなどの物理の理解に

役立つことを期待

計算方法

z 軸方向に運動する流体中での

光子の多重散乱を実験室系で調べる

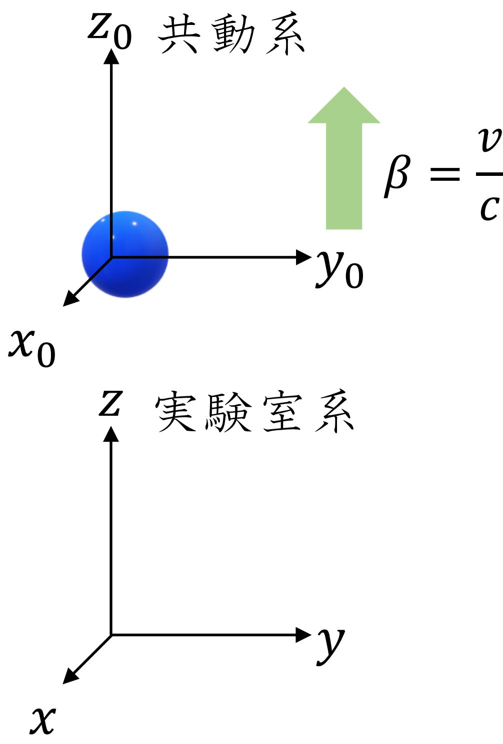
- 共動系において等方となるように，光子を発生（方向は乱数で決定）
- 光学的厚みを考慮し，乱数を用いて散乱位置を決定
- 共動系において等方となるように，乱数を用いて散乱後の光子の方向を決定
- このプロセスを繰り返す

これをN 個の光子について行う

→N 個の光子の全ての散乱時刻ctと位置を(x, y, z)を記録

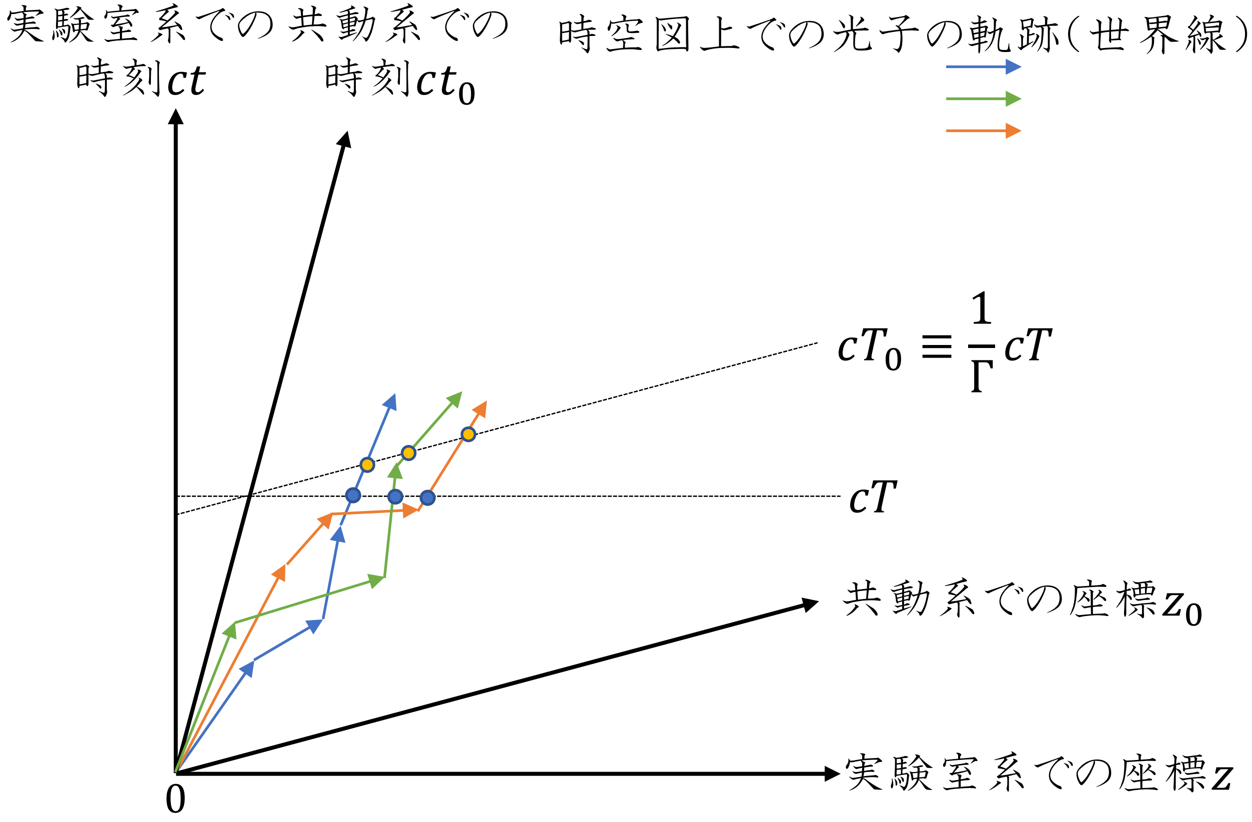
（N 個の光子の世界線を記録したのと等価）

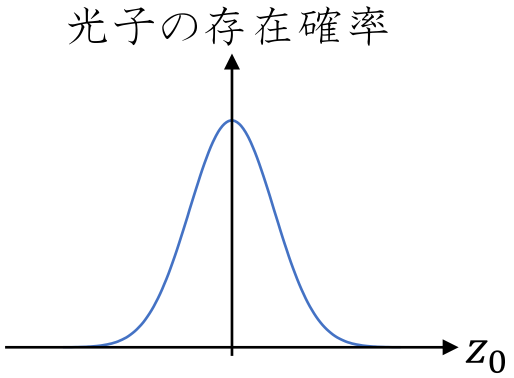
→共動系における散乱時刻ct_0と位置(x_0, y_0, z_0)に変換

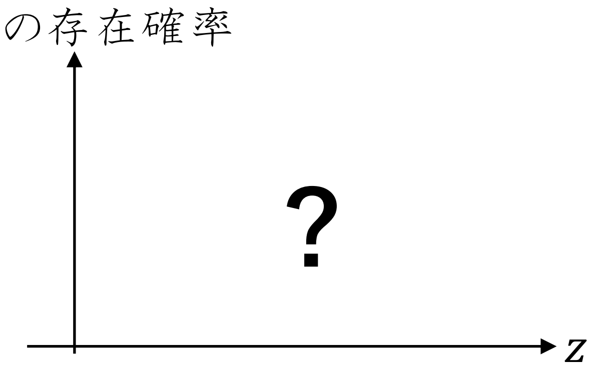


計算方法のつづき

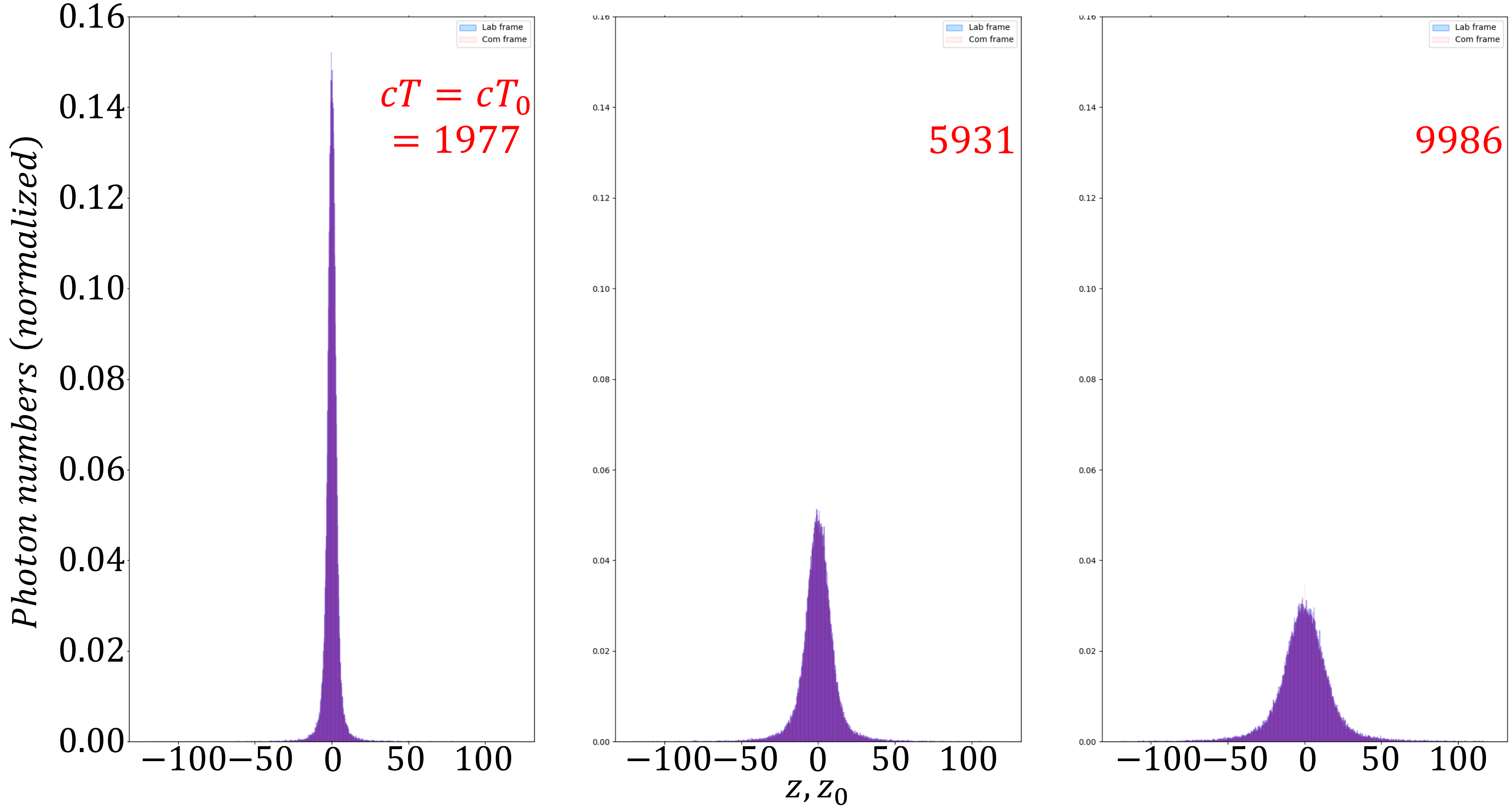
→ 時刻cTと$cT_0(\equiv {}^{cT}/_{\Gamma})$のときの光子の分布を調べ，比較する





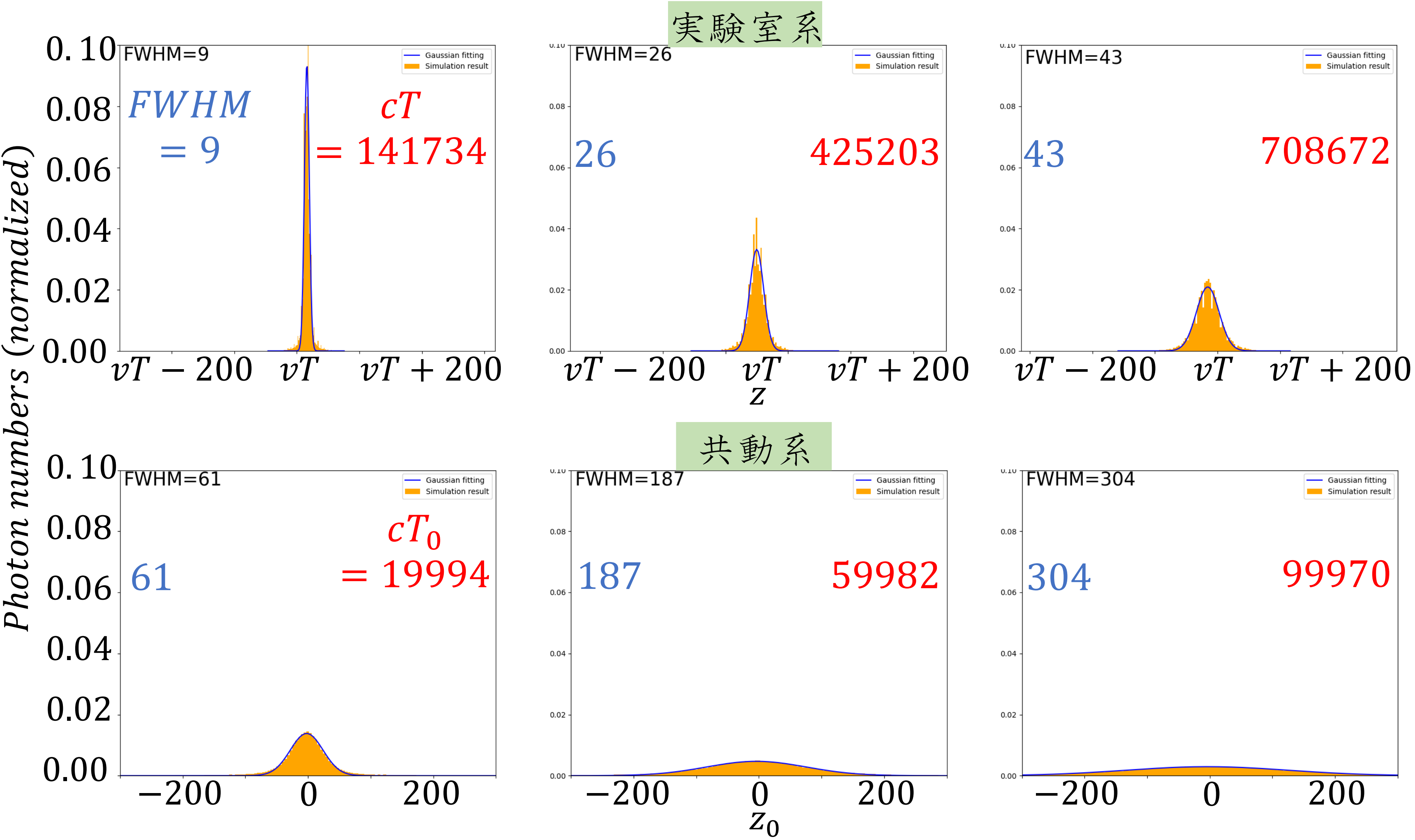


$\beta(\equiv {}^{v}/_{c}) = 0$ のとき



- 実験室系と共動系の分布が完全に重なっている(プログラムの正常性OK)
- 光子の分布は正規分布に近くなっている

$\beta = 0.99$ のとき（光子の分布と$FWHM$）



ガウシアン

シミュレーション

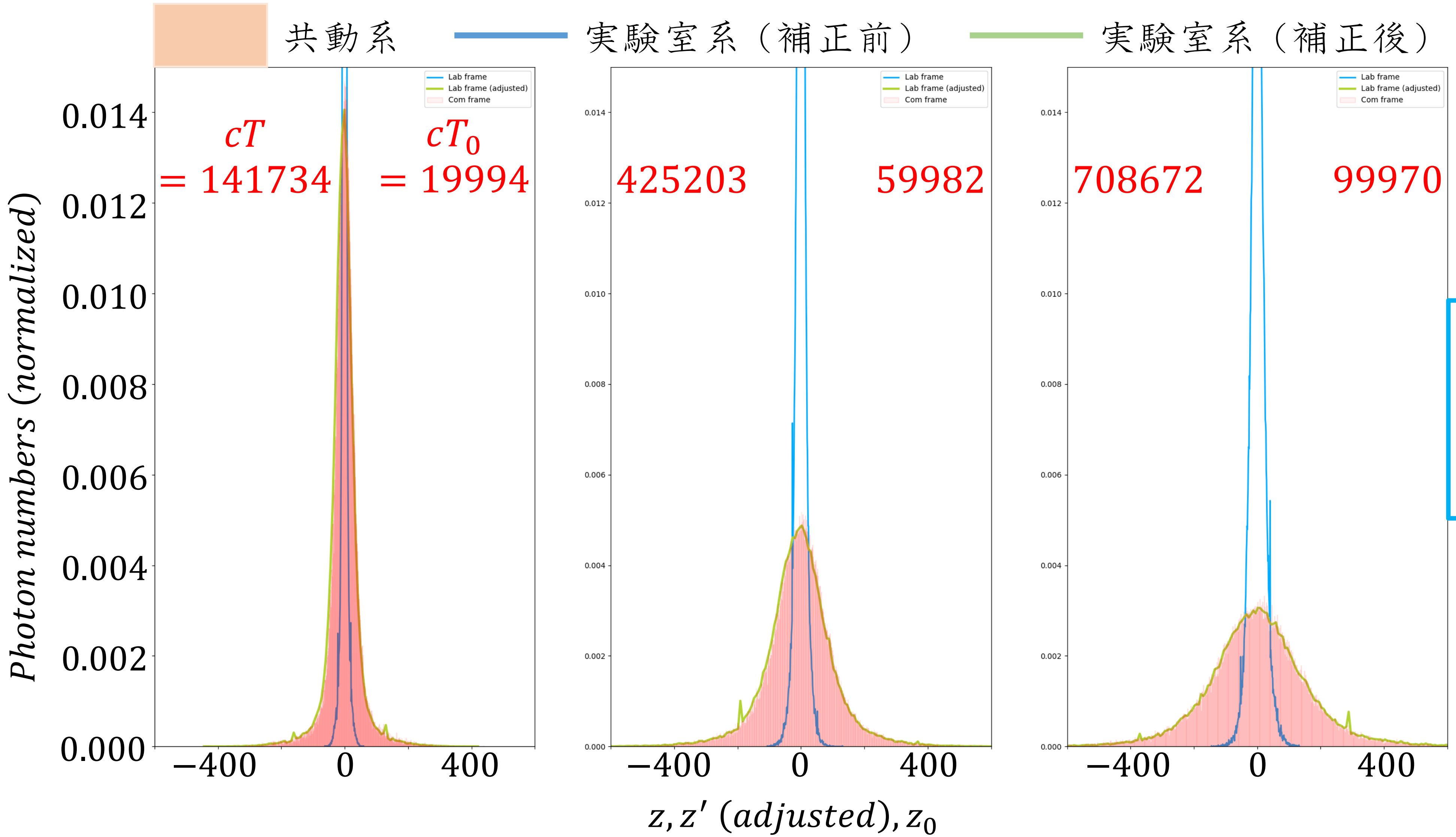
- どちらの系でも
  およそ正規分布
- 実験室系の$FWHM$
  は共動系より小さい

→ローレンツ収縮で
説明可能？

$\beta = 0.99$ のとき(ローレンツ収縮補正)

→実験室系の分布の幅をΓ倍し高さを$^1/_\Gamma$倍した

(ローレンツ収縮だけで説明できるなら分布の形は一致するはず・・・)



共動系と補正後の実験室系で, 分布は一致した

シミュレーション結果のまとめ

- ガウシアンフィット

  どのβでも実験室系と共動系の光子分布の概形は正規分布に近く

  $FWHM$の比はローレンツ収縮で説明できると考えられた

- ローレンツ収縮補正

  実験室系の分布に対し幅をΓ倍し高さを$1/\Gamma$倍したところ

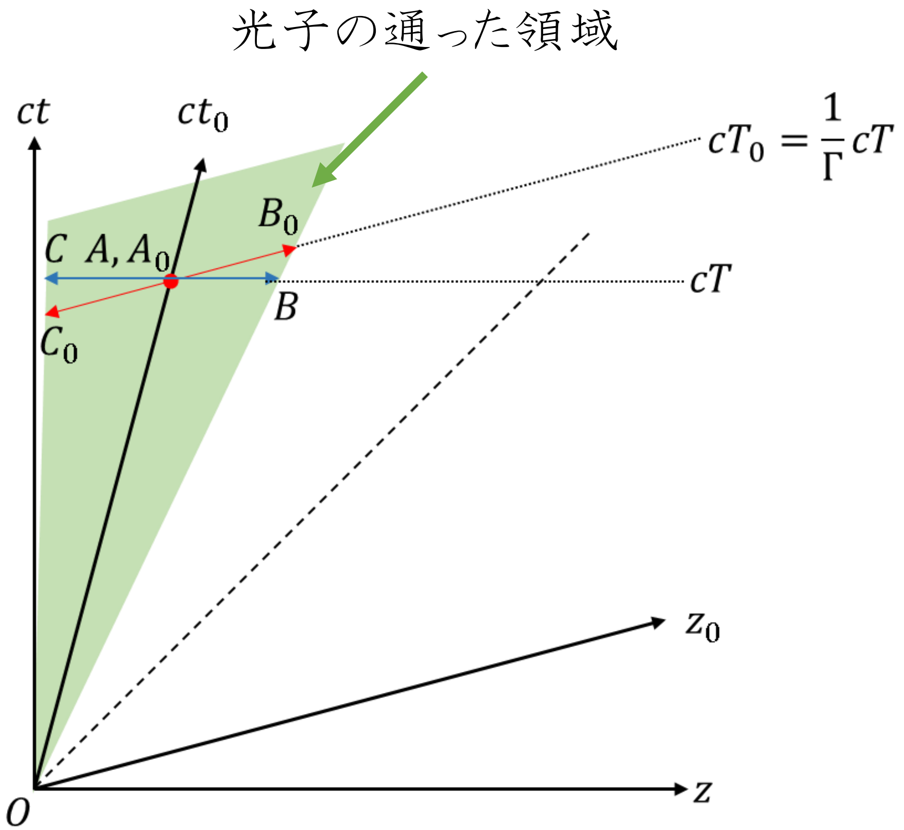
  どのβでも実験室系と共動系の分布は一致した

→実験室系での光子の分布関数は共動系での分布関数に

単にローレンツ収縮の効果を入れればOK・・・？

シミュレーション結果の考察

時空図をつかって，実験室系での分布の左右対称性について考えてみる



いま共動系で光子が等方散乱することを仮定しているため，

点B_0の共動系での速度(= 光子の拡散速度)をv_0とすると

点C_0の共動系での速度は$-v_0$となる

シミュレーション結果の考察

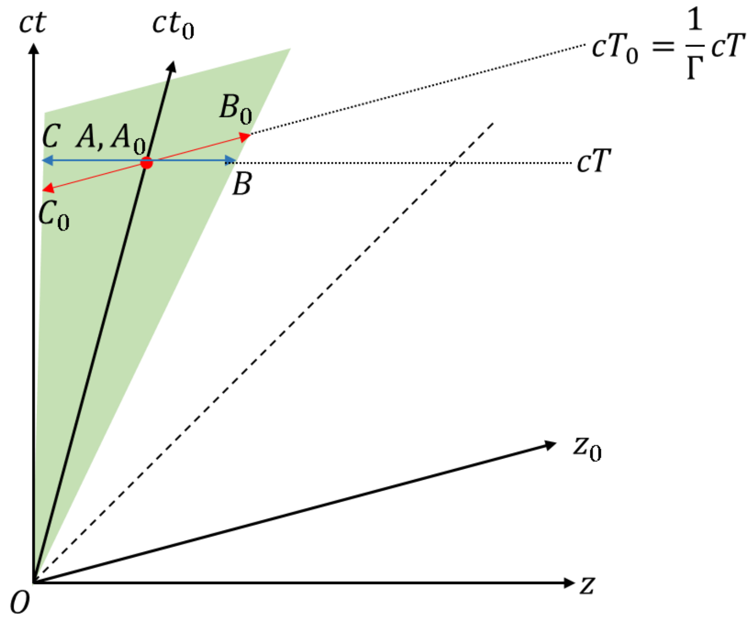
ここで, 点A_0の実験室系での速度v_Aは

$$v_A = v \quad (v\text{: 実験室系と共動系の相対速度})$$

で, B_0とC_0の実験室系での速度v_Bとv_Cは速度の合成則から

$$v_B = \frac{v + v_0}{1 + \frac{v v_0}{c^2}} \quad v_C = \frac{v - v_0}{1 - \frac{v v_0}{c^2}}$$

とかけ, これらはそのまま実験室系での点$A \cdot B \cdot C$の速度である



よって, AB間とAC間のz座標の距離の比は

$$\frac{AB}{AC} = \frac{v_B - v_A}{v_A - v_C} = \frac{1 - \beta \frac{v_0}{c}}{1 + \beta \frac{v_0}{c}}$$

→v_0が大きくなれば(= 光学的に薄くなれば), 実験室系での分布に偏りが出てくると考えられる

まとめと今後の課題

ランダムウォークによって等方散乱する光子の分布を，シミュレーションによって計算し
実験室系と共動系の両方から見た

→今回設定した光学的厚みでは分布の違いはローレンツ収縮のみとなっていたが，
より光学的に薄くして計算すると，実験室系での分布に左右非対称性が
表れることが予想できた

→今後
- 光学的厚みを変えてのシミュレーション
- 高橋労太氏によって導出されている共動系での光子の分布関数の解析解を，
  実験室系へローレンツ変換して，シミュレーション結果と比較する
- 実際の天文現象に適用する

を行っていく予定