

# X線偏光を考慮した 輻射輸送計算コードの開発

筑波大学理工学群物理学類 4 年

宇宙理論研究室

竹林 晃大

共同研究者：大須賀 健

# 目次

- 研究背景・目的
- 開発プログラムの内容
- 結果
- 今後の課題

# 研究背景・目的

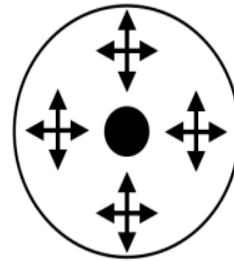
## X線偏光観測

電子散乱による偏光は  
BHなどの天体周囲の  
幾何構造の解析に有用

### BHの偏光

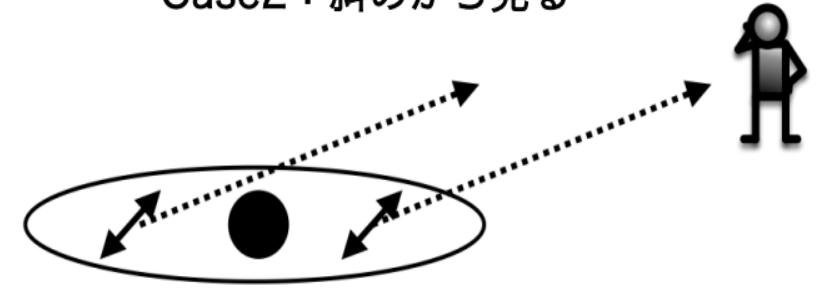
見込角によって偏光の様子が変化

#### Case1：真上から見る



対称なので無偏光

#### Case2：斜めから見る



単純な散乱理論だけ考えると偏光

最大12%程度の偏光

電子散乱による偏光を組み込んだ輻射輸送計算コードを開発、実行し、理論モデルと観測データとの比較から降着円盤の幾何構造を決定する。

＊現在はコード開発中

# 開発中のコード内容

- 散乱光子の軌跡を追跡するプログラム
- 偏光を取り入れたコンプトン散乱のプログラム

# 光子の軌跡の追跡プログラム

## • 光子の散乱位置の決定

光子が媒体内を $\tau$ 進んだときに散乱されない確率は $e^{-\tau}$ なので乱数 $r(0 \leq r \leq 1)$ から粒子の進行距離( $\tau$ 空間) $x$ を以下のように決定。

$$\int_0^x e^{-\tau} d\tau = r$$

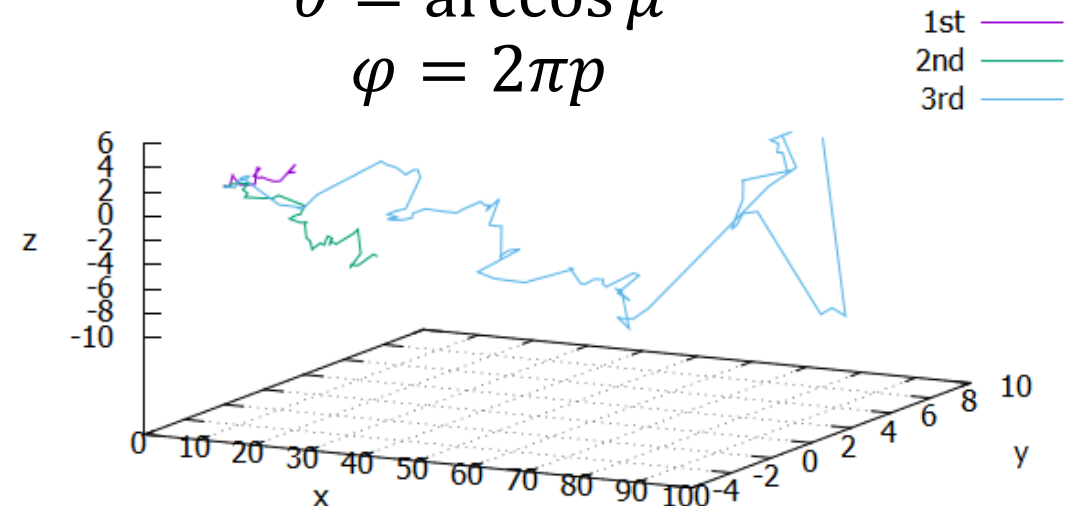
## • 散乱角の決定

等方散乱を仮定。仰角方向と方位角方向の2種を乱数で決定。

( $p, \mu$ を乱数として)

$$\theta = \arccos \mu$$

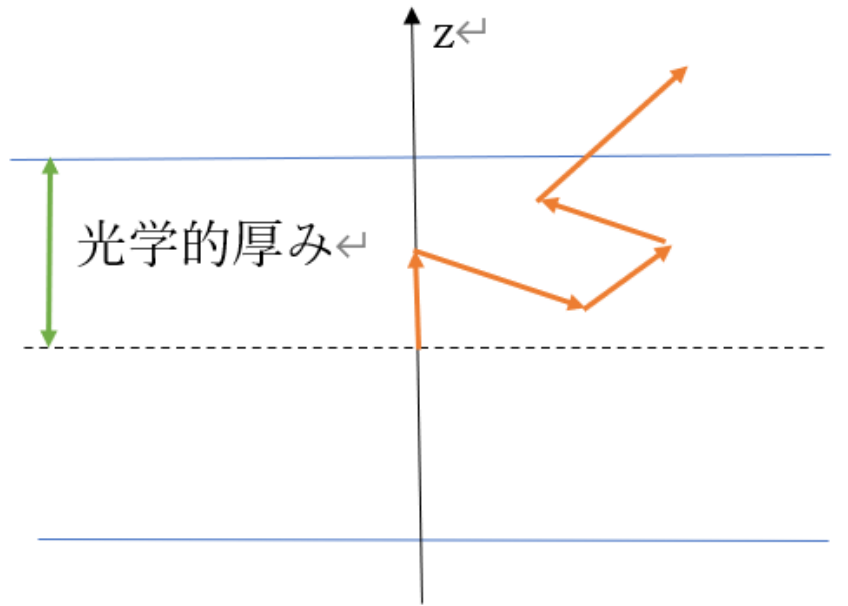
$$\varphi = 2\pi p$$



3 個の光子の軌跡の計算例

# 軌跡計算プログラムの結果

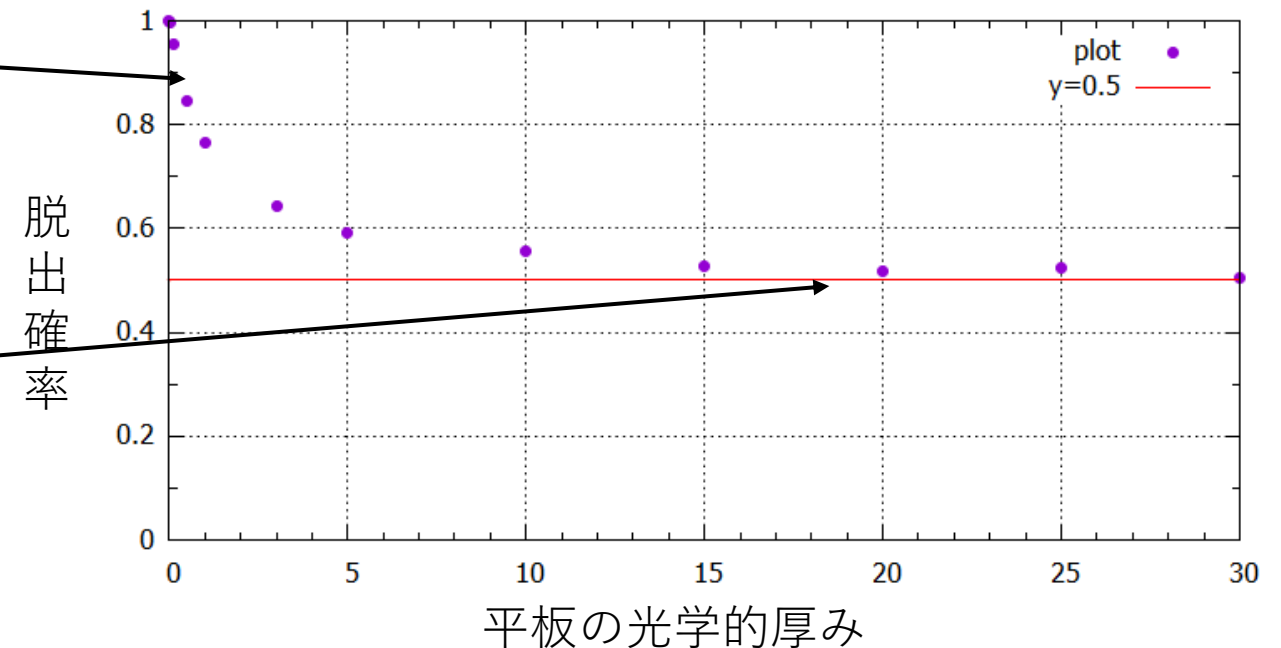
- 無限平行平板の中心から $z$ 軸方向に多数の光子を放出→上面からの脱出確率と脱出した際の角度を調査



(1) 平板の光学的厚みが薄いと散乱をあまり受けずに光子が脱出。

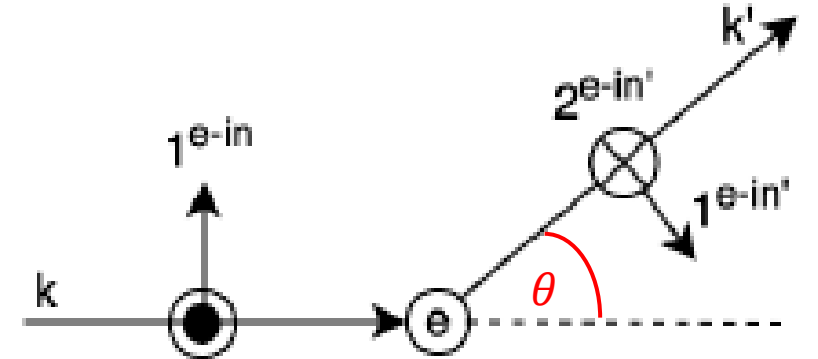
(2) 平板の光学的厚みが厚くなるほど、脱出確率が $1/2$ に近づく。

平板上方向に脱出した確率（試行回数10000回の平均確率）



# コンプトン散乱プログラム

- 散乱する電子を乱数で決定。
  - 散乱角と散乱後の光子の 4 元運動量を乱数で決定。
- Stokesパラメータを更新



\* 散乱断面積は偏光を考慮したKlein-仁科微分散乱断面積

$$\bullet \frac{d\sigma_{KN}}{d\Omega} = \frac{3\sigma_T}{16\pi} \left( \frac{k_0'^e}{k_0^e} \right)^2 \left[ \frac{k_0'^e}{k_0^e} + \frac{k_0^e}{k_0'^e} - (1 - q^{\{e^{-in}\}}) \sin^2 \theta \right]$$

$\sigma_T$ : トムソン散乱全断面積       $k_0^e, k_0'^e$ : 散乱前後の光子のエネルギー  
 $q^{e^{-in}}$ : Stokesパラメータの直線偏光成分     $\theta$ : 散乱角

# コンプトン散乱プログラム

- Stokesパラメータの更新（\* 今回のプログラムには未実装）

$$\begin{bmatrix} I\{e-ex'\} \\ Q\{e-ex'\} \\ U\{e-ex'\} \\ V\{e-ex'\} \end{bmatrix} = L^{-1}(\chi') F(k \rightarrow k') L(\chi) \begin{bmatrix} I\{e-ex\} \\ Q\{e-ex\} \\ U\{e-ex\} \\ V\{e-ex\} \end{bmatrix} \quad (\chi \text{は散乱面に第1基底をとる回転角})$$

基底の回転による作用  $L(\chi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\chi & \sin 2\chi & 0 \\ 0 & -\sin 2\chi & \cos 2\chi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

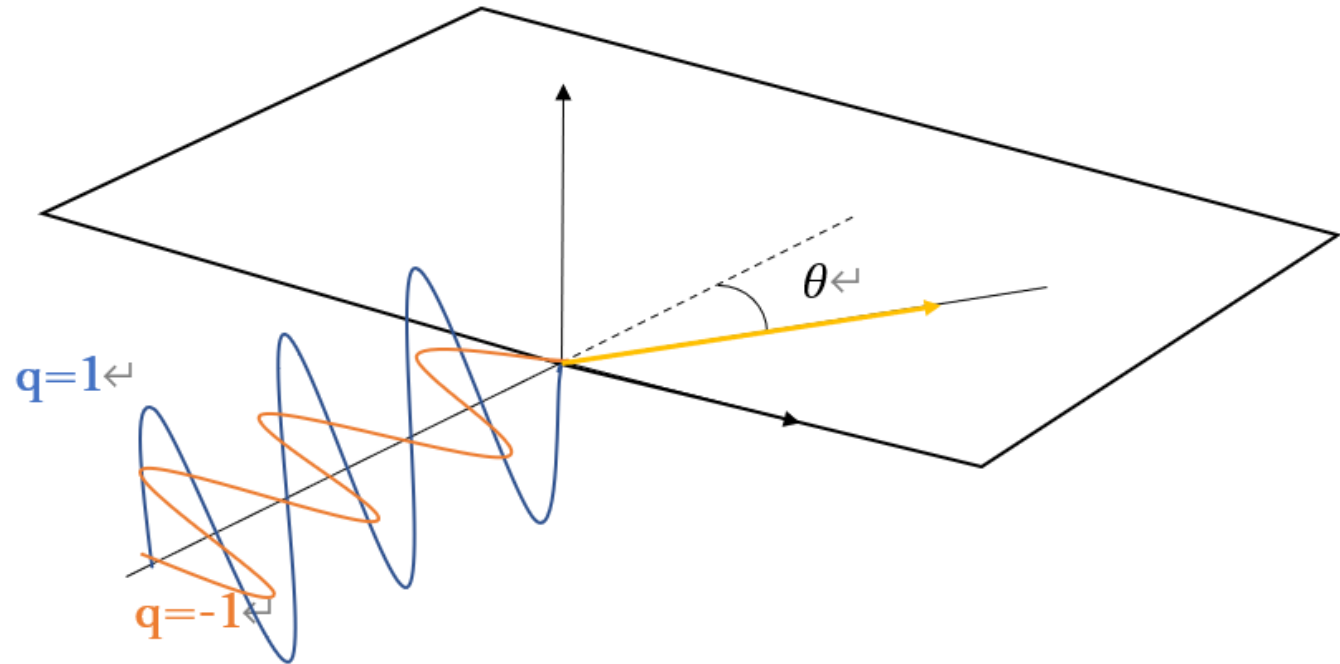
散乱による作用  $F(k \rightarrow k') = \begin{pmatrix} \frac{k_0'^e}{k_0^e} + \frac{k_0^e}{k_0'^e} - \sin^2 \theta & -\sin^2 \theta & 0 & 0 \\ -\sin^2 \theta & \cos^2 \theta + 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_0'^e}{k_0^e} + \frac{k_0^e}{k_0'^e} - \sin^2 \theta \end{pmatrix}$



# コンプトン散乱と偏光

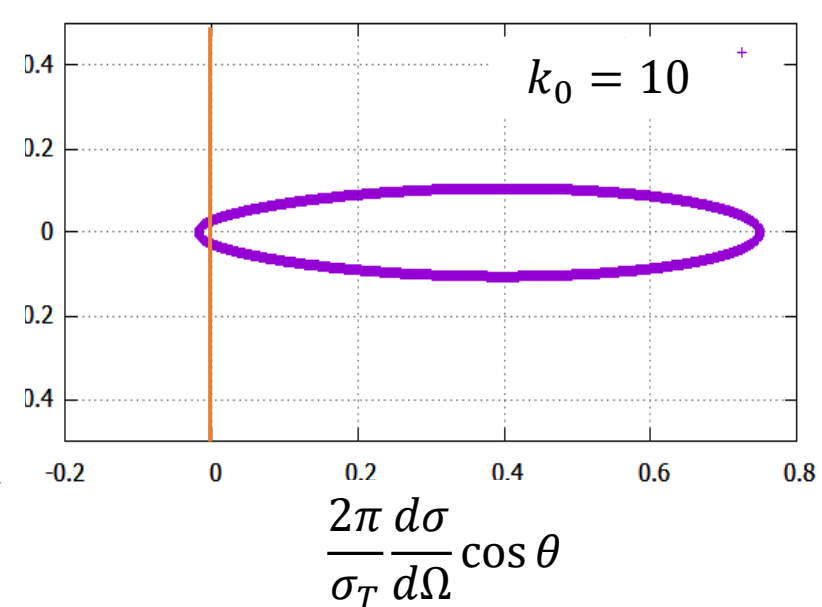
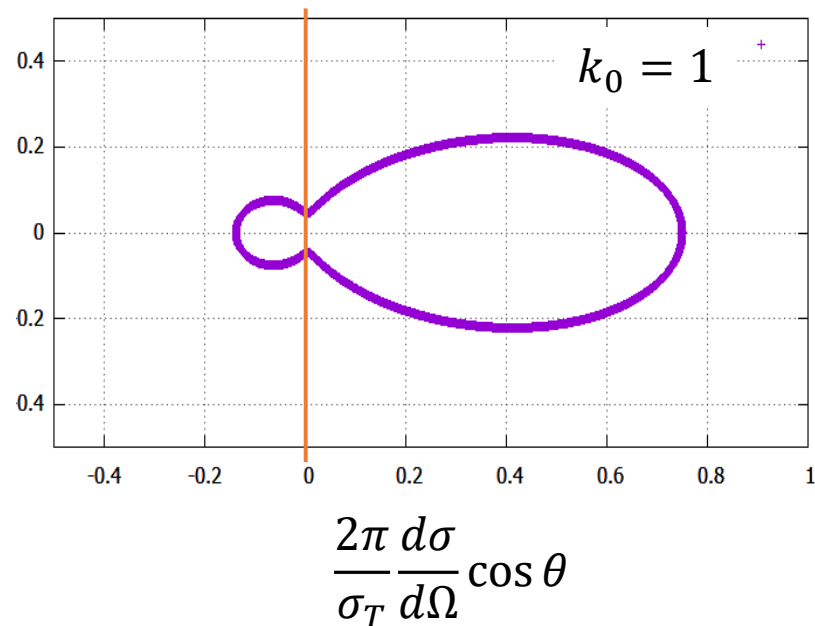
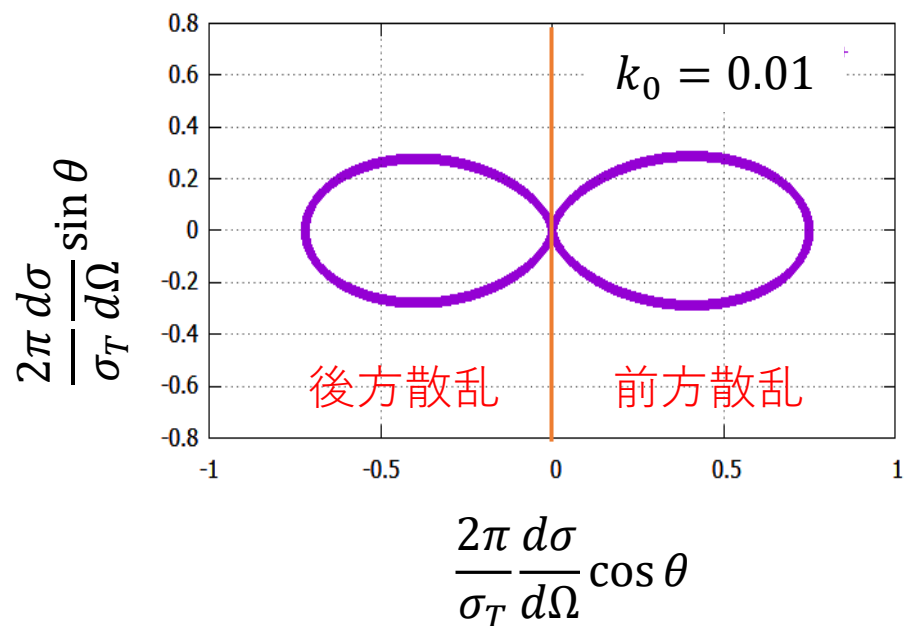
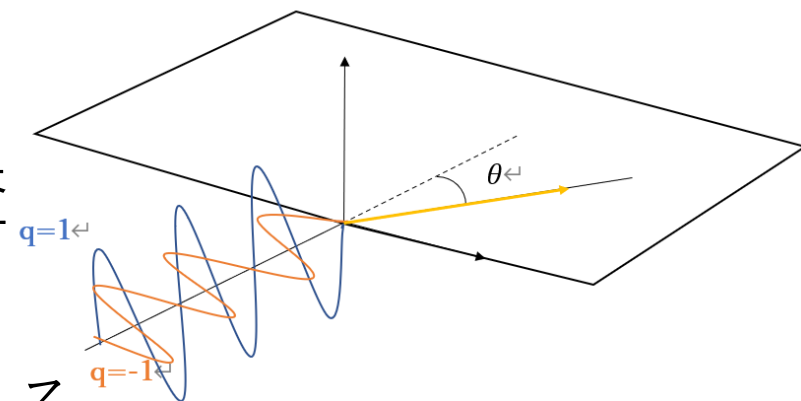
散乱面内における光子の散乱確率の $\theta$ 分布

- 電場ベクトルが散乱面に垂直な場合( $q=1$ )、等方的に光子が散乱される。
- 電場ベクトルが散乱面に水平な場合( $q=-1$ )、 $\theta = \pm 90^\circ$  方向には散乱はされない。



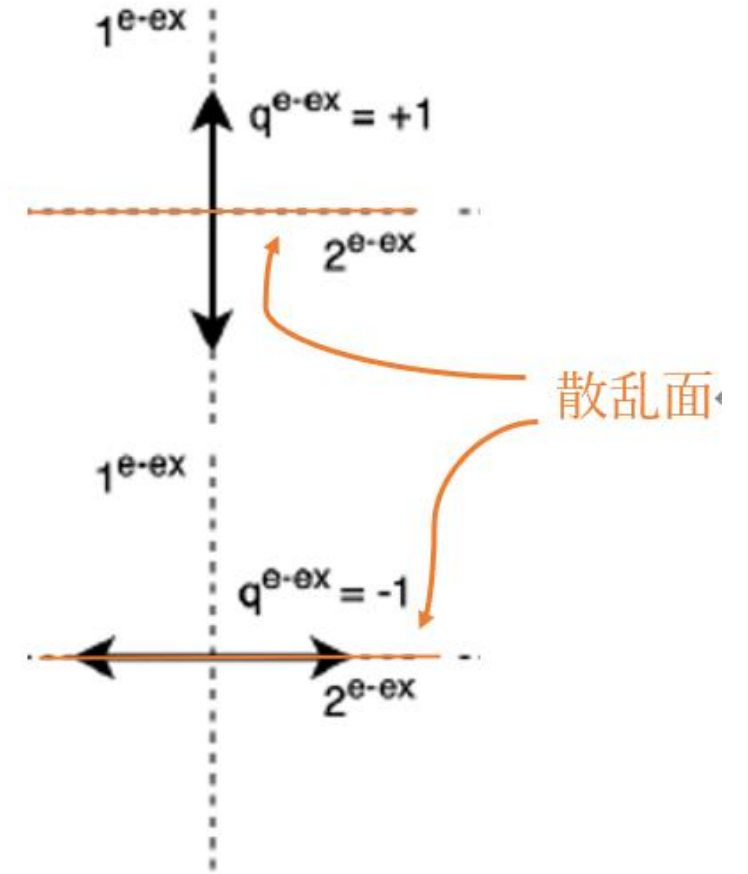
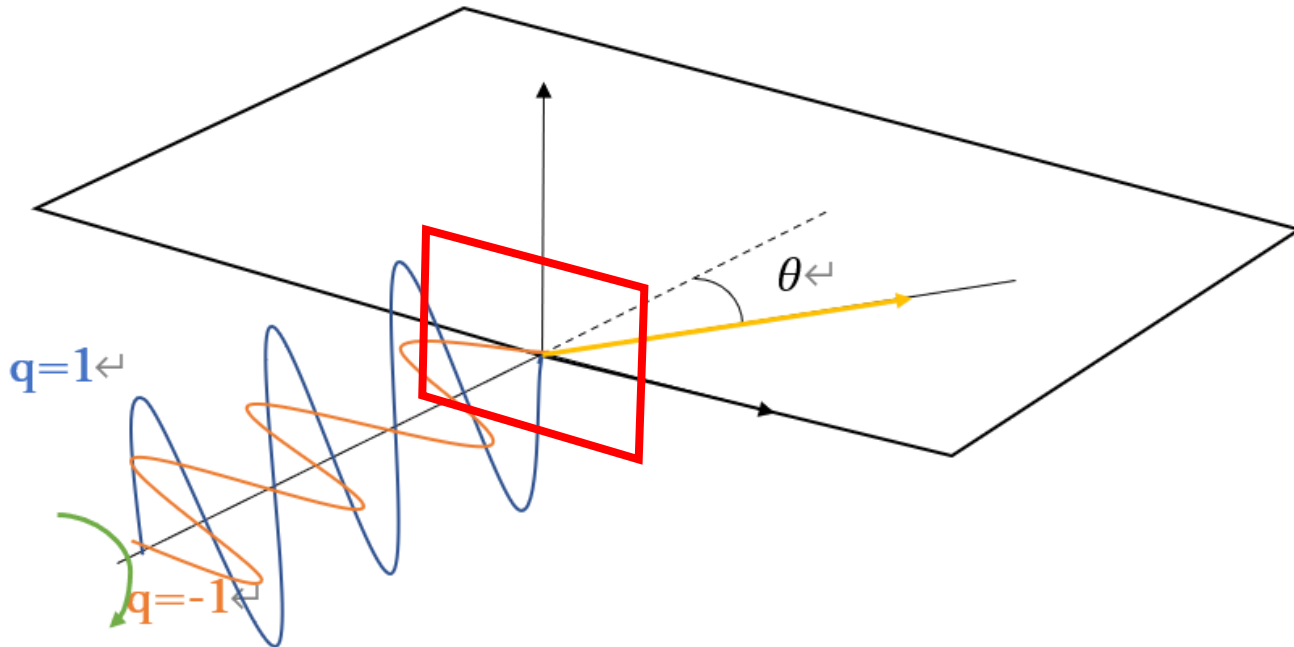
# コンプトン散乱のテスト（エネルギー依存性）

- Stokesパラメータを $q=-1$ に固定し、光子の
- エネルギーを変化させ、散乱方向の分布を調査
- 光子のエネルギーが大きくなるにつれて
- 偏光の効果が小さくなり前方散乱に散乱している。



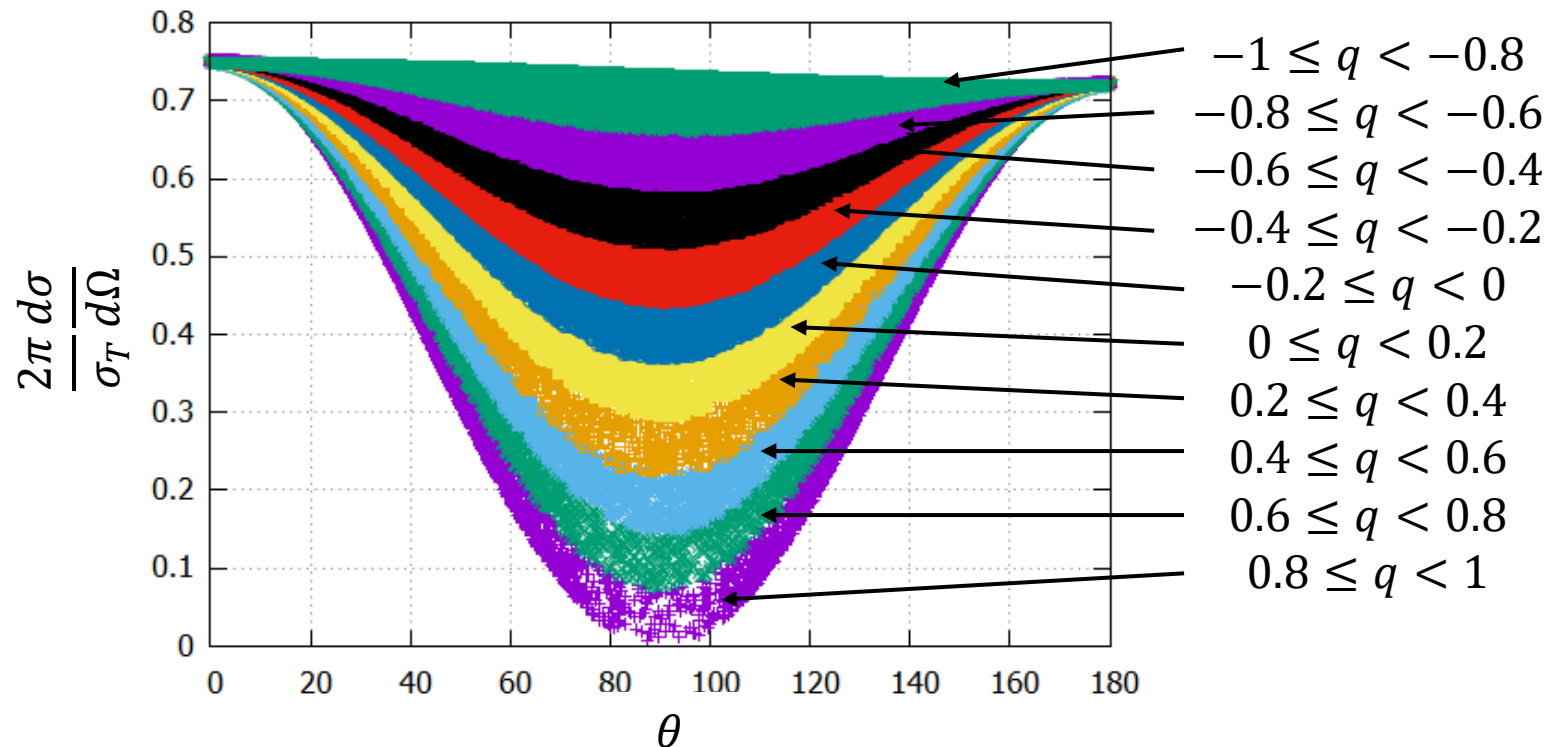
# コンプトン散乱とStokesパラメータ

- 散乱面を固定し、**Stokes**パラメータ  $q$  を変化させることで偏光の方向と散乱のしやすさの関係を調査。
- $q$  は-1から1まで0.2ずつビンを分けて描写。
- 光子は0.01[eV]のエネルギーで入射。



# 散乱とStokesパラメータの関係のテスト計算

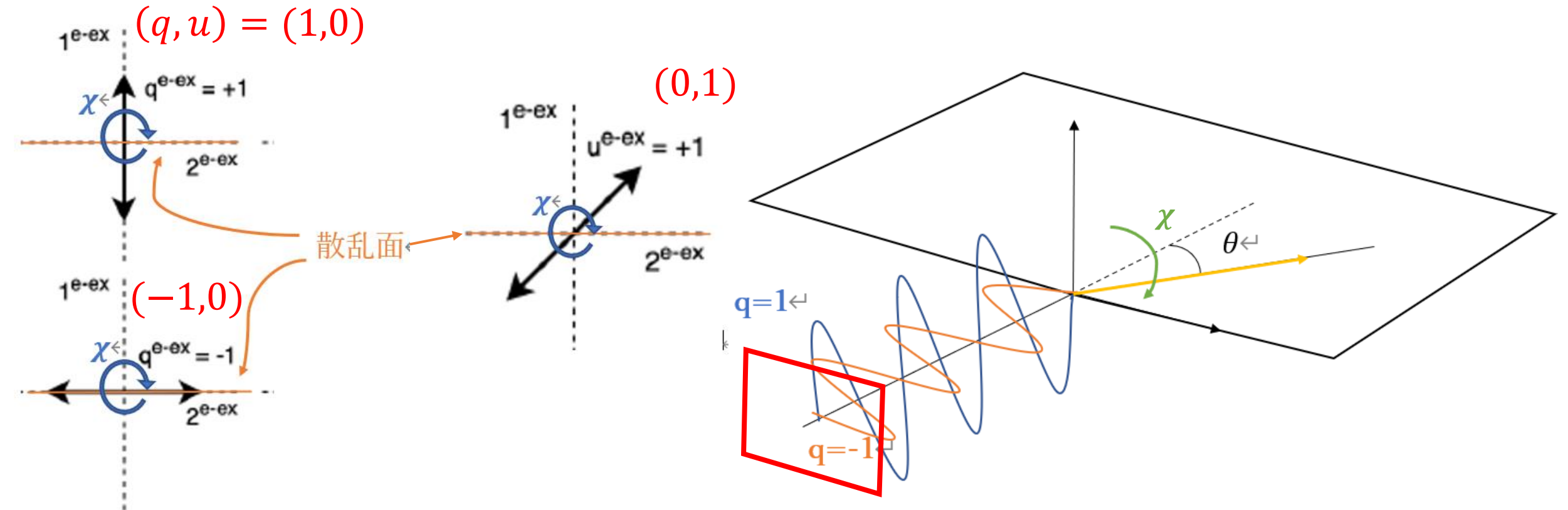
- 偏光を考慮したKlein-仁科断面積の偏光依存性から $q$ が1に近づくにつれて等方散乱性が見られる。
- 図が左側に傾いているのは若干の前方散乱性が原因



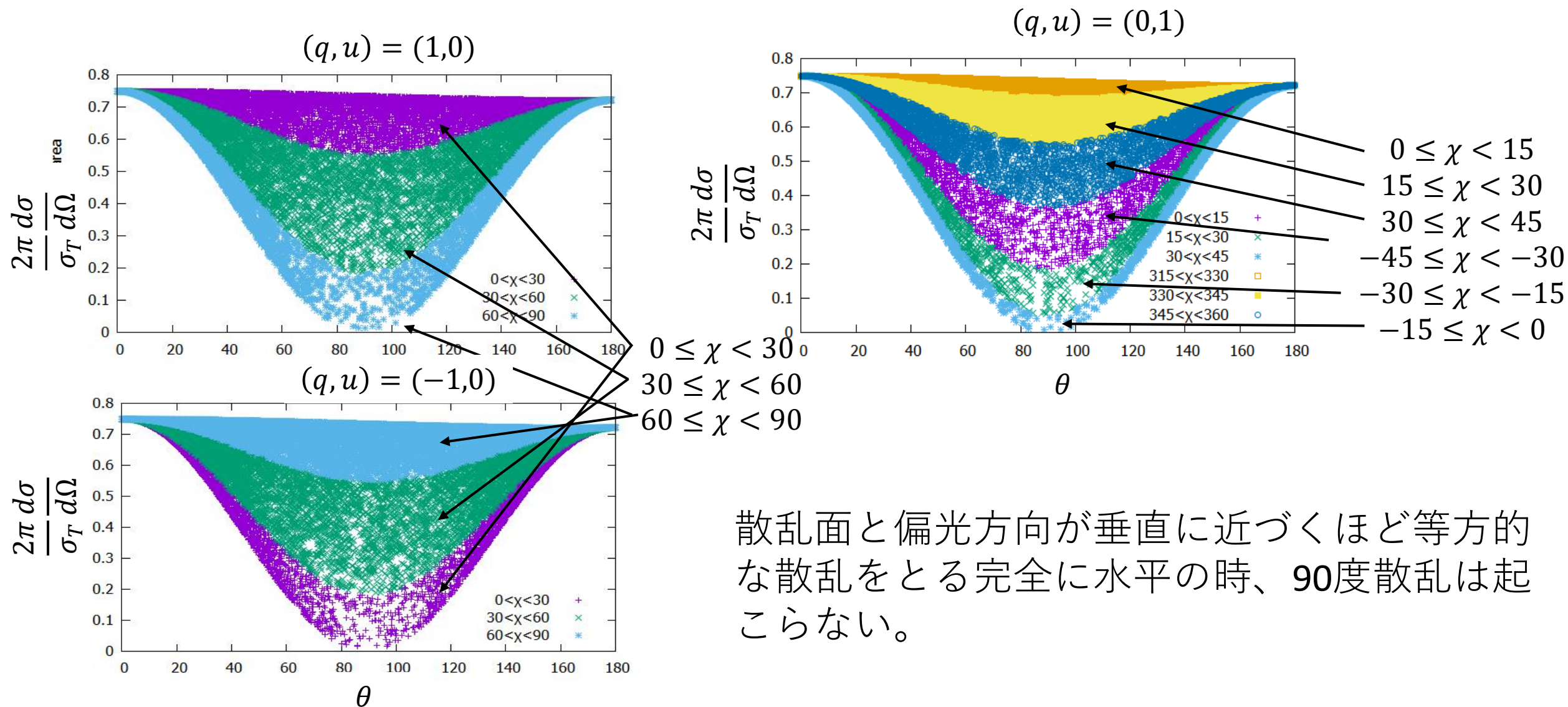
物理的にもっともらしい  
 $\theta$ 分布が見られる。

# 散乱面の回転と断面積計算

- Stokesパラメータ(直線偏光の方向)を固定し、散乱面の角度 $\chi$ を変化させ散乱角 $\theta$ 依存性を調査



# 散乱面と散乱断面積の関係のテスト計算



# まとめと今後の課題

## ここまでの成果

- 光子の軌道追跡プログラムの作成  
平板のテスト計算で正しい結果が得られた。
- 偏光を考慮したコンプトン散乱のプログラムの作成  
電子静止系において物理的にもっともらしい結果が得られた。

## 今後の課題

- コンプトン散乱によるストークスパラメータの変化を実装
- 流体の運動や電子の速度の効果を組み込む
- 軌道追跡プログラムとコンプトン散乱のコードの結合