

# マグネターの熱的放射に関する 偏光予想

早稲田大学 D3 矢田部 彰宏

共同研究者: 山田 章一 (早稲田大学)

Yatabe & Yamada, accepted in Astrophysical Journal

# 目次

1. モチベーション
2. 理論
3. 結果: 星の姿勢 (磁場の向き)
4. 結果: モード変換 (非線形QEDの効果)
5. 結果: マグネター

# 動機・目的

## 近い将来の軟X線における偏光観測

現在複数の軟X線偏光観測衛星(IXPE, XIPE, eXTP)が計画されている。  
IXPEは2020年に打ち上げ予定。

## マグネターの熱的放射は軟X線

IXPEのエネルギー領域は2-8keVである。  
マグネターの熱的放射はこの領域で観測される。

## 偏光は磁場構造や量子論的な効果を反映

量子電気力学(QED)によると偏光は磁場によって変化する。  
偏光は磁場とQED効果の情報を持っているはず。

マグネターの熱的放射の偏光をQED効果に注目し  
効率的に求めたい。

# 偏光を予想するためには

## 表面放射の性質

熱的な成分の偏光モードは大気で決まる

## 磁気圏での発展

偏光は磁気圏中で向きを変える

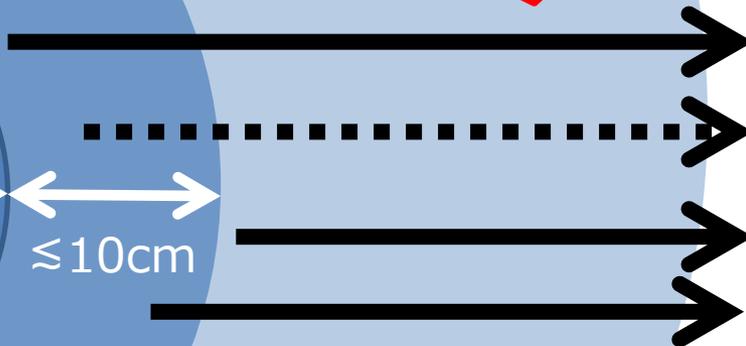
大気

中性子星

~10km

≲10cm

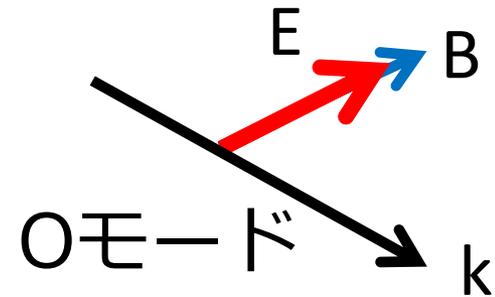
磁気圏



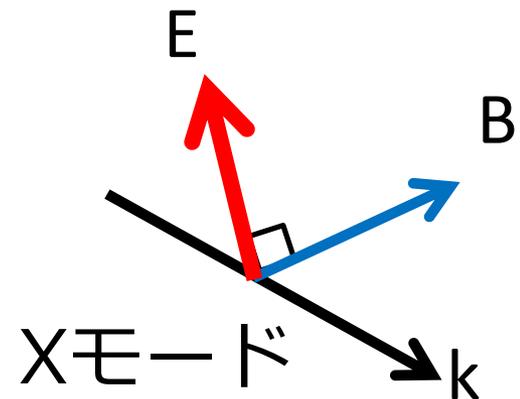
# 磁場、プラズマのもとでの偏光モード

## 電磁波の固有モード

Oモード  $E_0 // k-B$  平面  
Ordinary mode



Xモード  $E_x \perp k-B$  平面  
eXtraordinary mode  
Eモードということもある



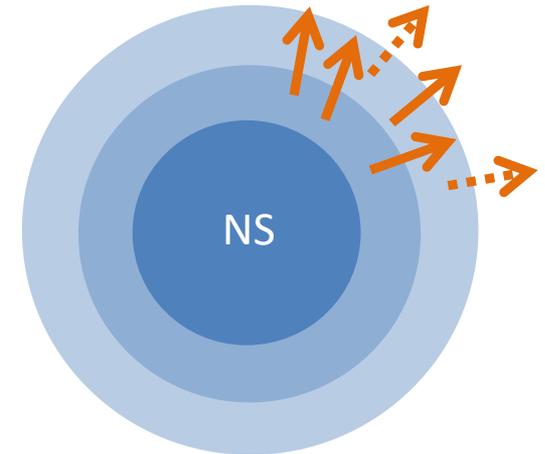
# 偏光した表面放射

## オパシティーは電磁波の偏光に依存する

大気は電離した水素などのプラズマからなるとすると、中性子星のような強い磁場のもとではXモードのオパシティーはOモードのものよりも小さくなる。

$$\kappa_e \sim (E/E_{Be})^2 \kappa_o$$

そのため、Xモードの電磁波は大気の内側の温度が高い部分からも放射されるので、Xモードの電磁波はOモードの電磁波よりも多く放射される。



- Xモード電磁波
- ...→ Oモード電磁波

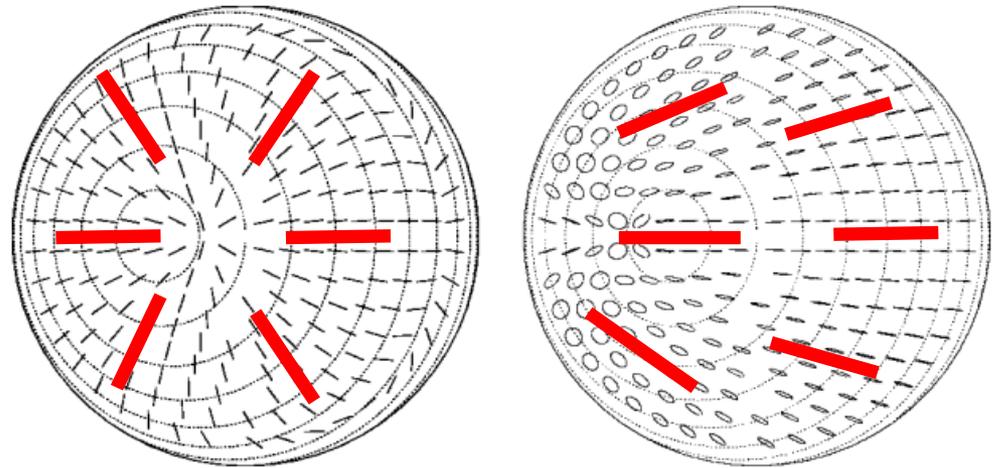
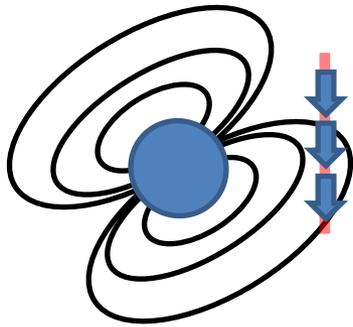
G. G. Pavlov, V. E. Zavlin,  
ApJ 529 (2000) 1011

⇒大気からの熱的放射は偏光している

# 磁気圏における偏光の発展を解く

大気から放射された電磁波はさらに磁気圏の影響を受ける

大気から放射された電磁波はさらに磁気圏の影響を受ける。星表面の近くでは偏光に対して磁場の影響が強く、また磁場の変化は偏光の変化に対してゆっくりとしているので、断熱的に偏光が変化する。



左：磁気圏のQED効果がないときは偏光の向きはバラバラ

右：磁気圏のQED効果があるときは偏光の向きはそろっている

J. S. Heyl, N. J. Shaviv,  
PRD 66, (2002) 023002

⇒外部の磁場構造を反映し、双極子磁場の場合はより偏光する

# Polarization-Limiting Radius

R. Taverna et al., MNRAS  
454(2015) 3254

効率よく解きたい場合は偏光の変化に関する距離のスケールと磁場の変化の距離のスケールを比較すると便利である。

偏光の発展を表す方程式  
(Z方向に進む偏光のベクトル $A_X, A_Y$ の発展)

$$\frac{d}{dZ} \begin{pmatrix} A_X \\ A_Y \end{pmatrix} = \frac{ik_0\delta}{2} \begin{pmatrix} M & P \\ P & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_X \\ A_Y \end{pmatrix} \quad l_A = 2/k_0\delta$$

ダイポール磁場の変化のスケール

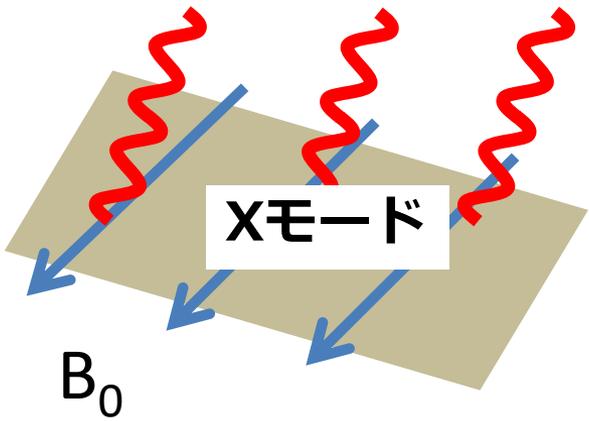
$$l_B = |\mathbf{B}||\mathbf{k}|/|\mathbf{k}\cdot\nabla\mathbf{B}| \sim r.$$

$l_A=l_B$ となる半径をpolarization-limiting radiusといい、そこでの磁場の向きが偏光を決定すると仮定する

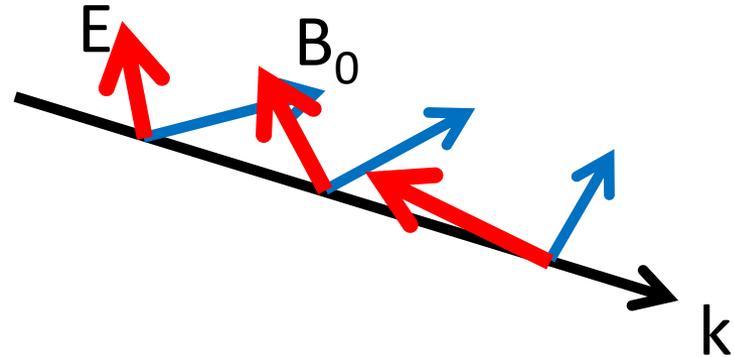
$$\frac{r_{pl}}{R_{NS}} \simeq 74 \left( \frac{B_p}{10^{14}\text{G}} \right)^{2/5} \left( \frac{E}{1\text{keV}} \right)^{1/5} \left( \frac{R_{NS}}{10\text{km}} \right)^{1/5}$$

# 先行研究 (Taverna et al. 2015)では

表面放射は同じ方向に偏光している  $\kappa_e \sim (E/E_{Be})^2 \kappa_o$



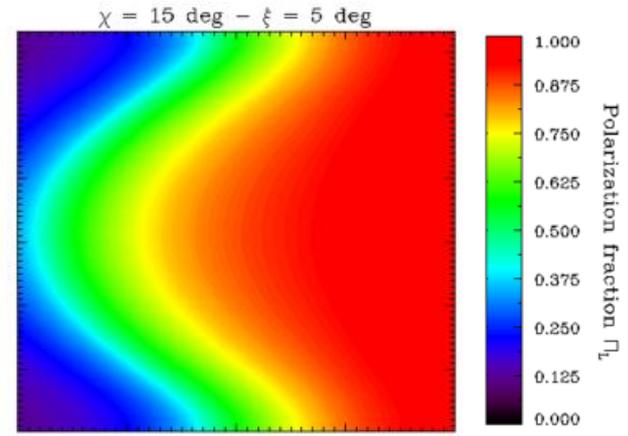
偏光は磁場に従って断熱的に変化する  
偏光の向きは中性子星から離れた位置  
(=polarization-limiting radius)の磁場で決まる



大気

磁気圏

中性子星



Taverna et al. (2015)

# 設定

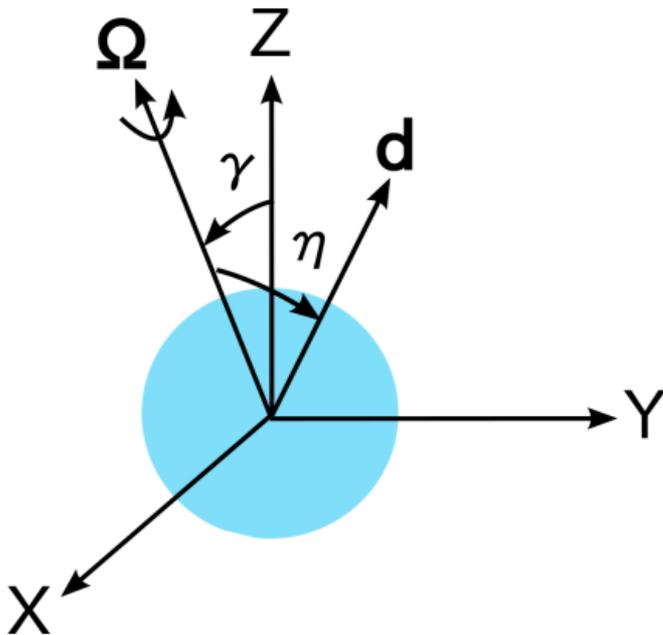
Observer



- 表面放射はすべてX-modeである。
- 偏光はpolarization-limiting radiusで決まる。
- 偏光度  $\Pi_L$  と偏光角  $\chi_p$  を求める

$$\Pi_L = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad \chi_p = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{U}{Q} \right).$$

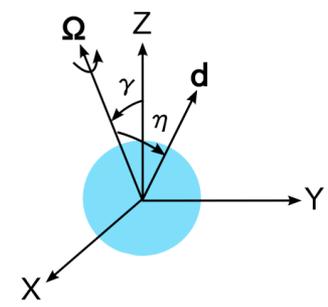
I, Q, U: Stokes parameter



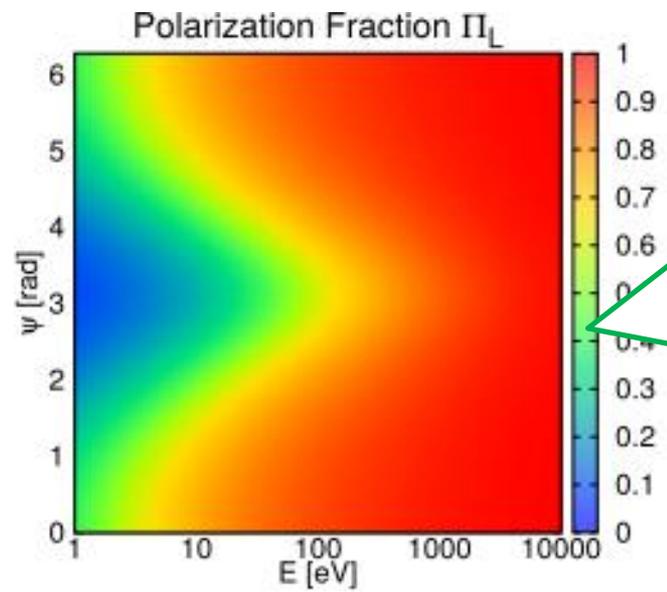
- 観測者はZ軸方向の無限遠にいる
- ダイポール磁場
- 放射はZ軸方向に伝播する
- 一般相対性理論の効果は考えない

# 大まかな理解

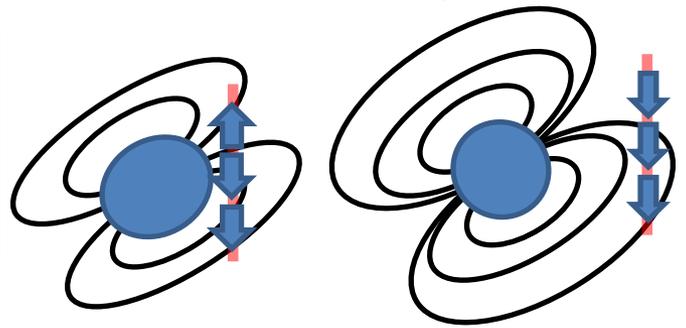
$\gamma=15^\circ, \eta=5^\circ, B=10^{13}G$   
 (Same as Taverna+ (2015))



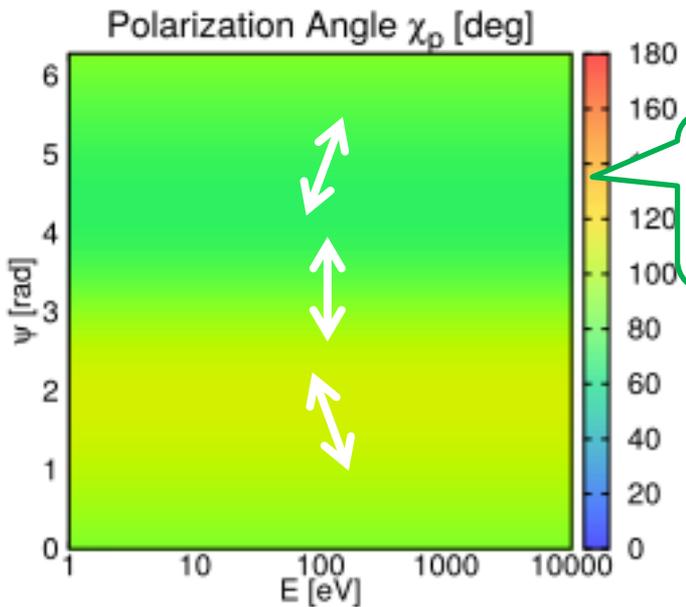
回転位相



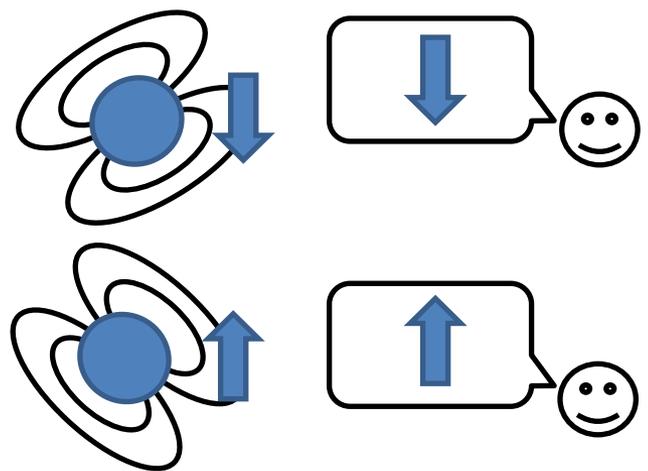
偏光度はエネルギーが高い光子ほど高くなりやすい



回転位相



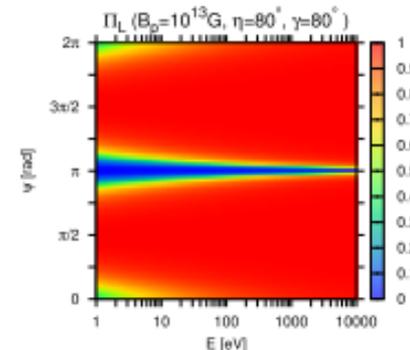
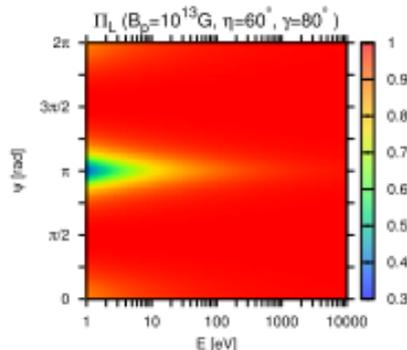
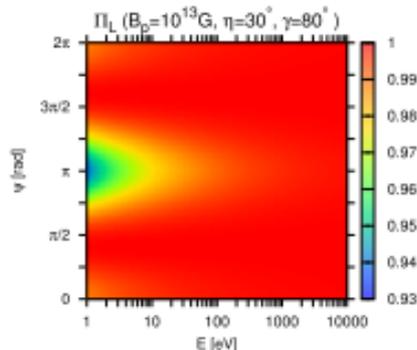
偏光角は自転とともに変化する



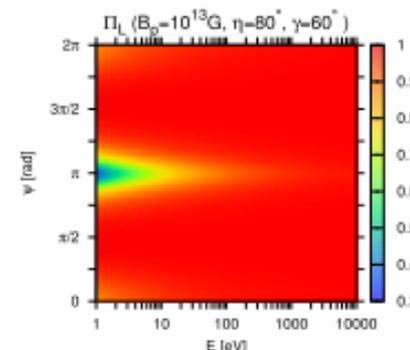
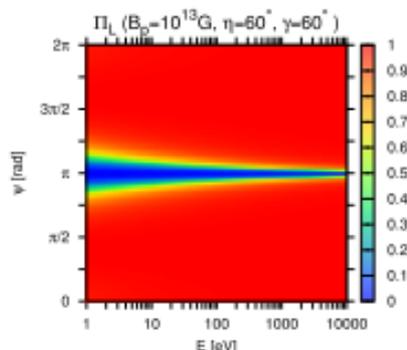
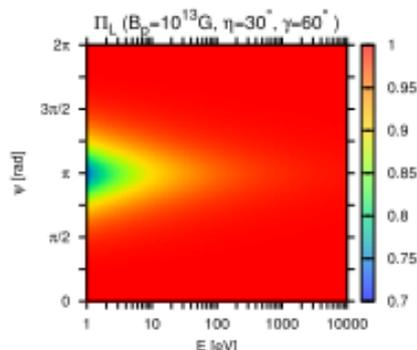
# 偏光度 ( $B=10^{13}\text{G}$ , モード変換なし)

※モード変換は後で説明します。

$\gamma=80^\circ$

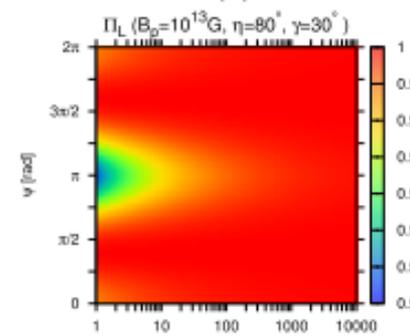
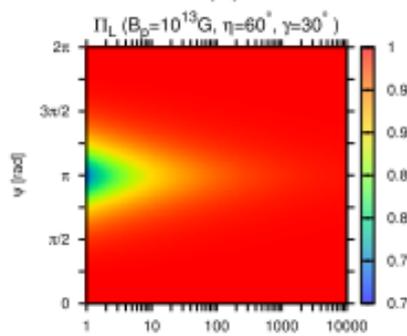
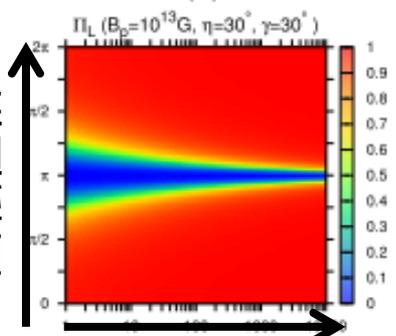


$\gamma=60^\circ$



$\gamma=30^\circ$

回転位相

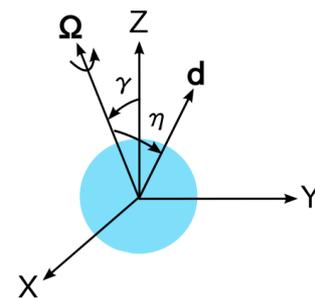


エネルギー

$\eta=30^\circ$

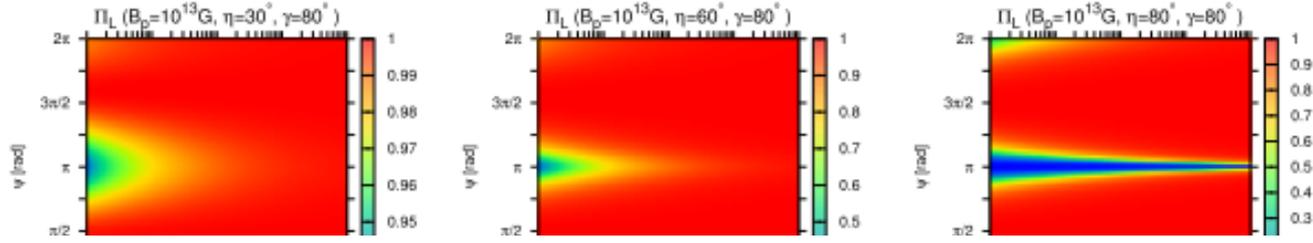
$\eta=60^\circ$

$\eta=80^\circ$



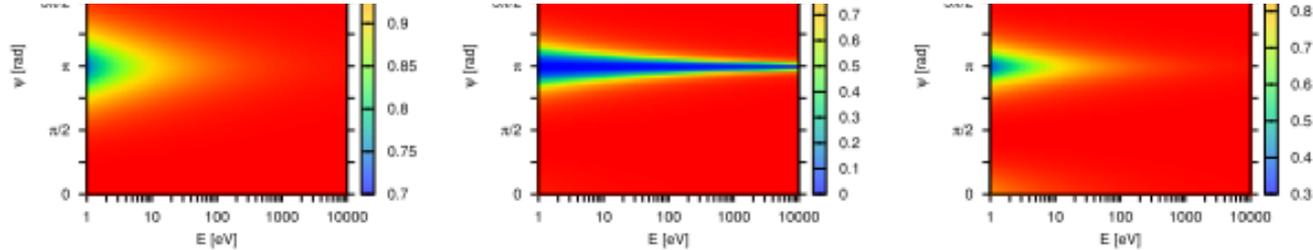
# 偏光度 ( $B=10^{13}\text{G}$ , モード変換なし)

$\gamma=80^\circ$

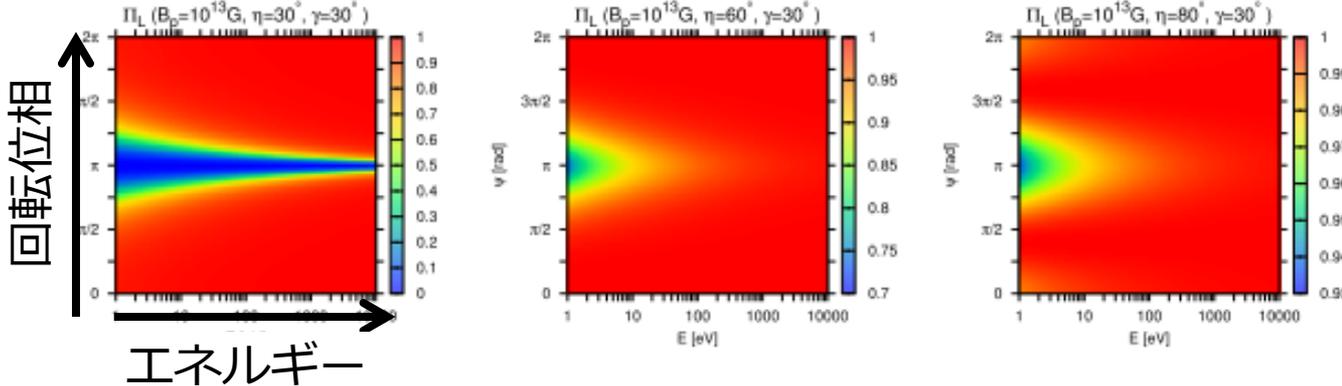


1-10keVにおいて偏光度はほとんどの場合でほぼ1になる。

$\gamma=60^\circ$



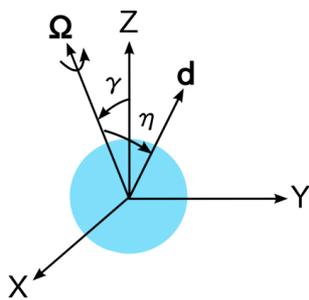
$\gamma=30^\circ$



$\eta=30^\circ$

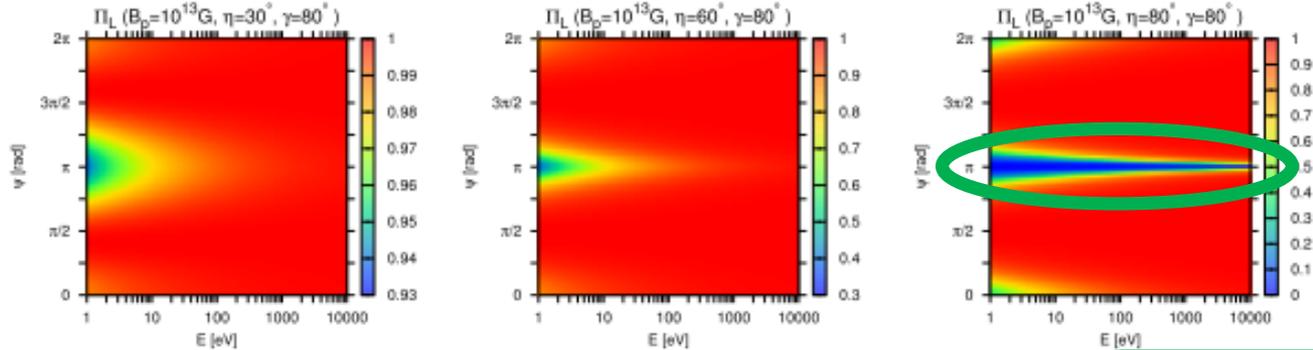
$\eta=60^\circ$

$\eta=80^\circ$

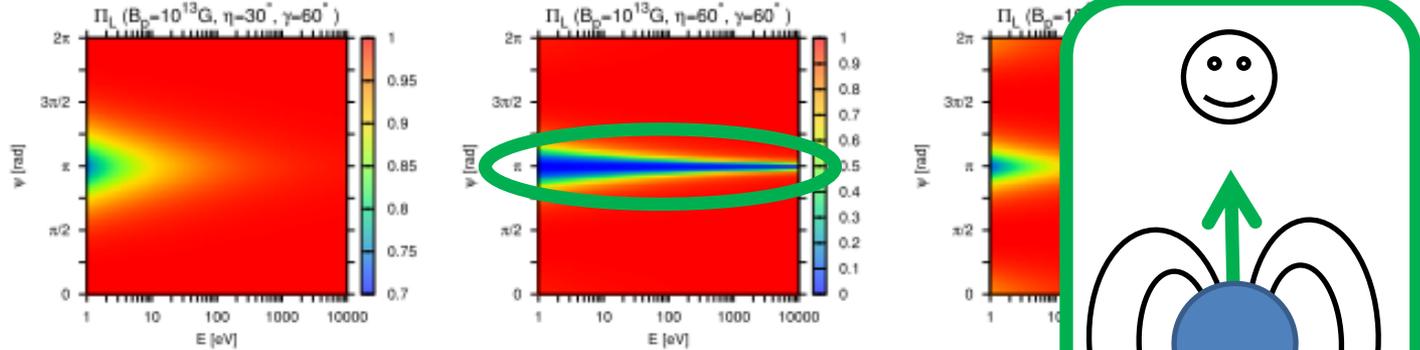


# 偏光度 ( $B=10^{13}\text{G}$ , モード変換なし)

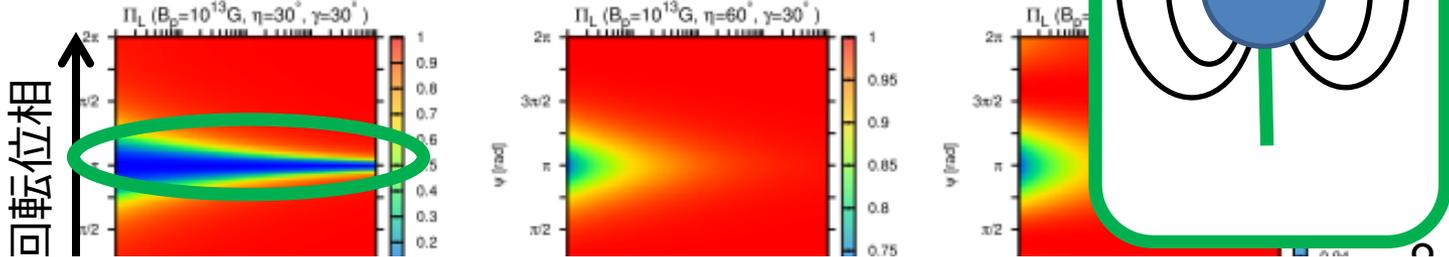
$\gamma=80^\circ$



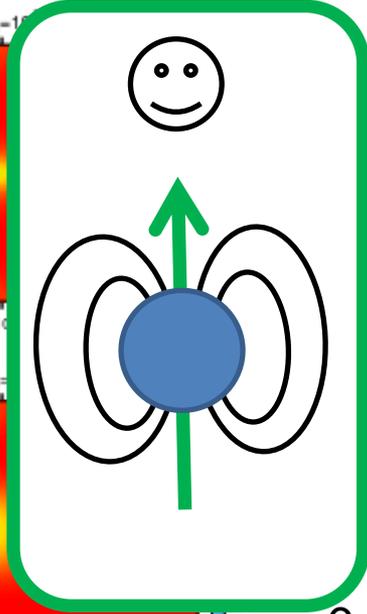
$\gamma=60^\circ$



$\gamma=30^\circ$



↑ 回転位相



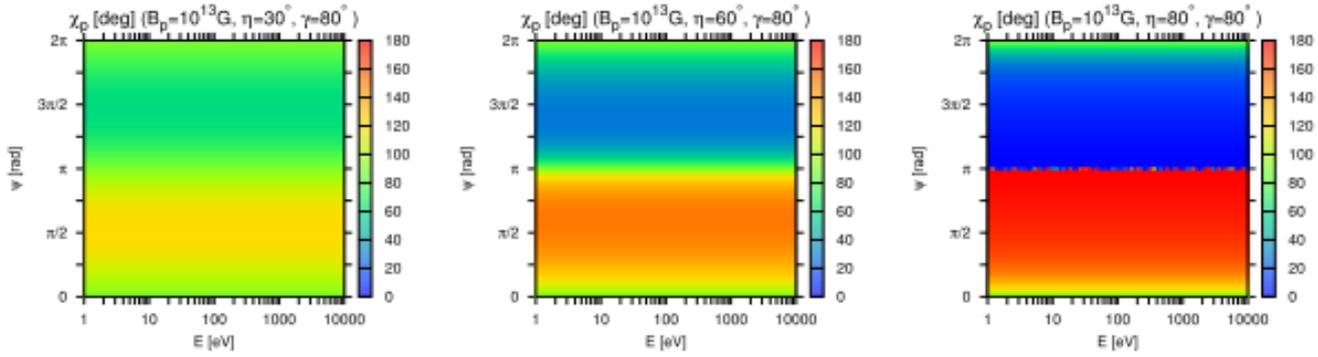
ただし、磁軸が視線方向に向くとダイポール磁場の対称性から偏光度がゼロになる。

→ Y

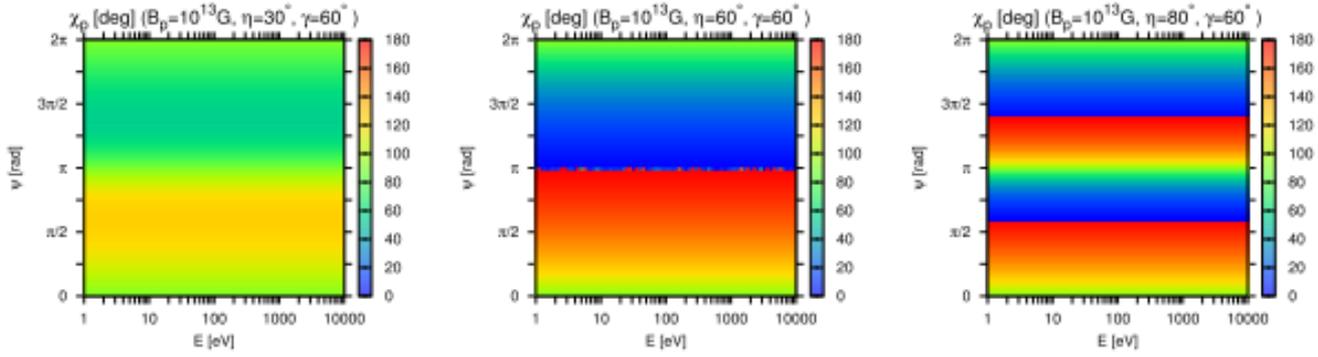
X ↙

# 偏光角( $B=10^{13}\text{G}$ ,モード変換なし)

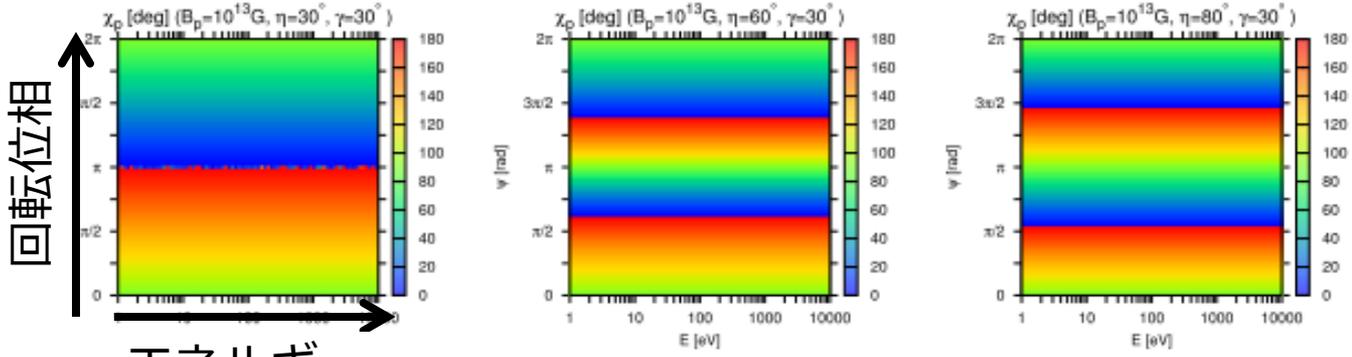
$\gamma=80^\circ$



$\gamma=60^\circ$



$\gamma=30^\circ$



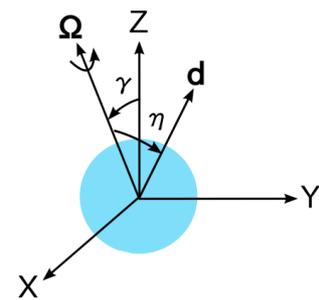
回転位相 ↑

エネルギー →

$\eta=30^\circ$

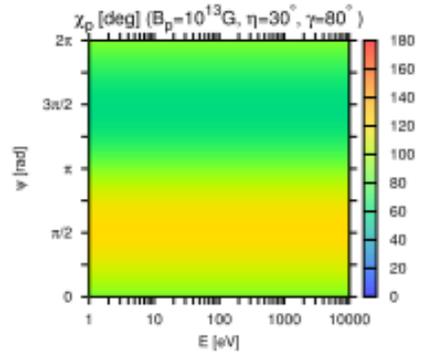
$\eta=60^\circ$

$\eta=80^\circ$

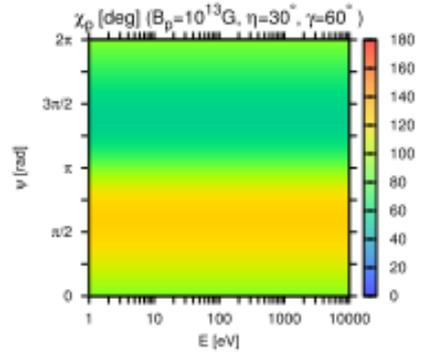


# 偏光角 ( $B=10^{13}\text{G}$ , モード変換なし)

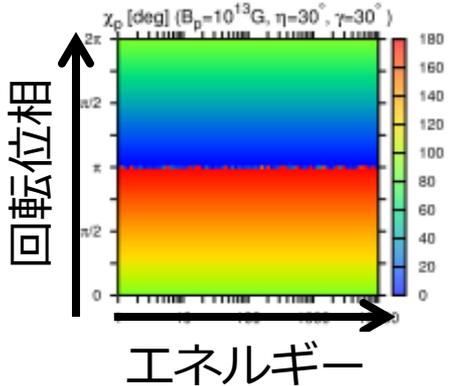
$\gamma=80^\circ$



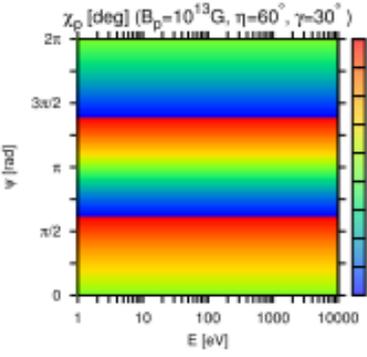
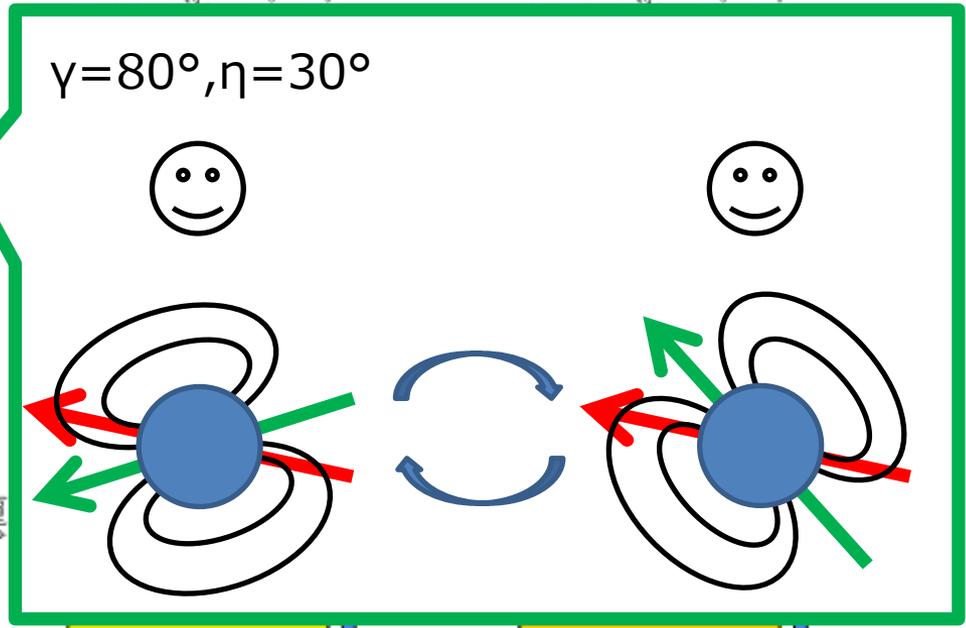
$\gamma=60^\circ$



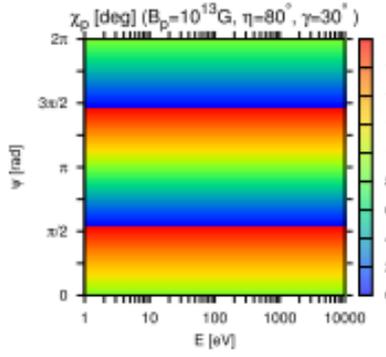
$\gamma=30^\circ$



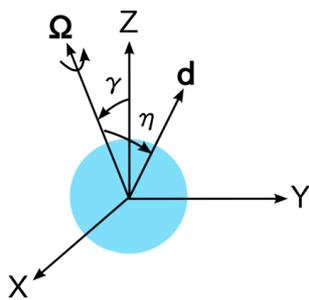
$\eta=30^\circ$



$\eta=60^\circ$

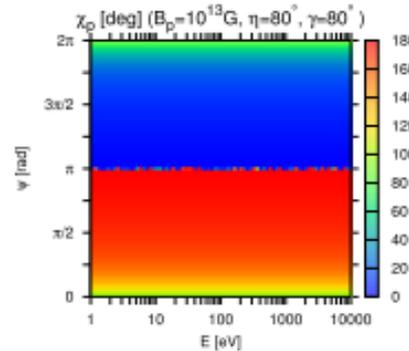
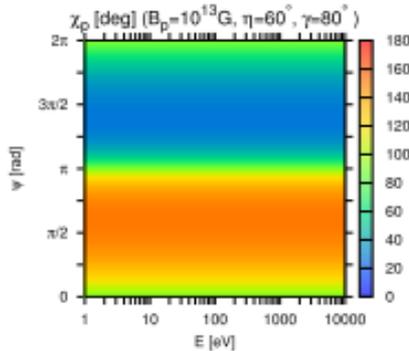
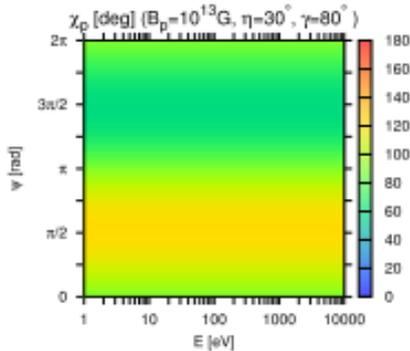


$\eta=80^\circ$

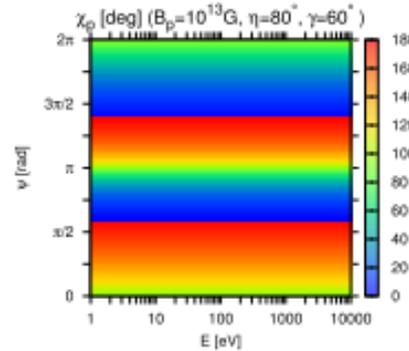
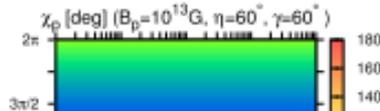
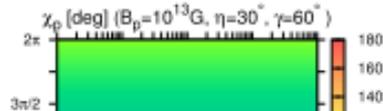


# 偏光角( $B=10^{13}\text{G}$ ,モード変換なし)

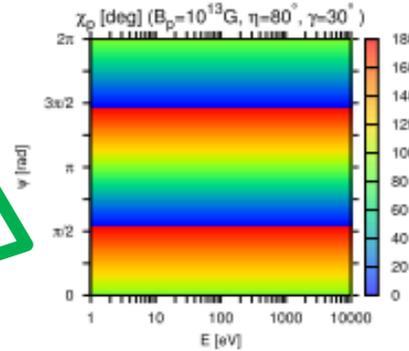
$\gamma=80^\circ$



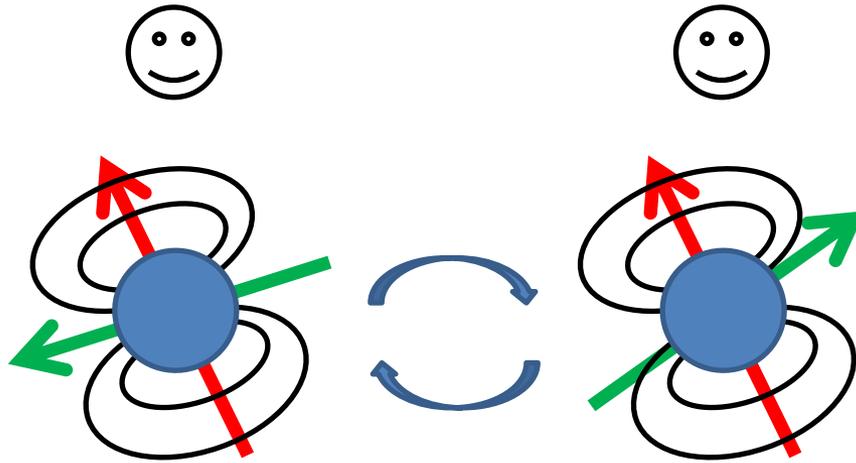
$\gamma=60^\circ$



$\gamma=30^\circ$



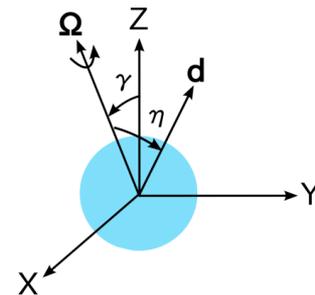
$\gamma=30^\circ, \eta=80^\circ$



$\eta=30^\circ$

$\eta=60^\circ$

$\eta=80^\circ$

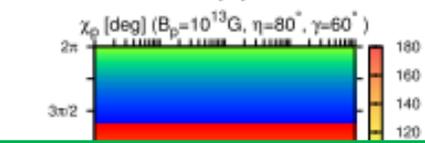
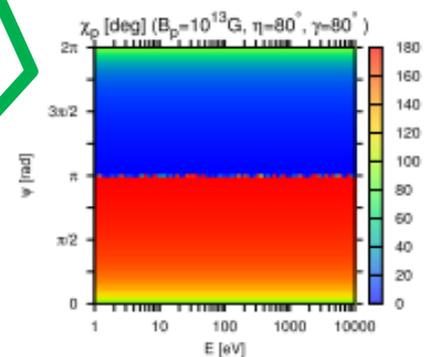
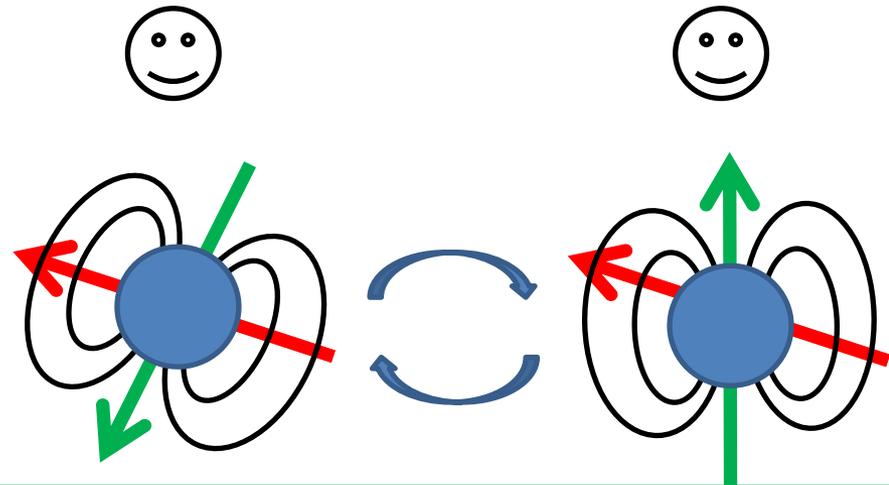


# 偏光

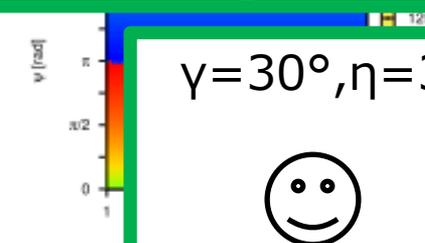
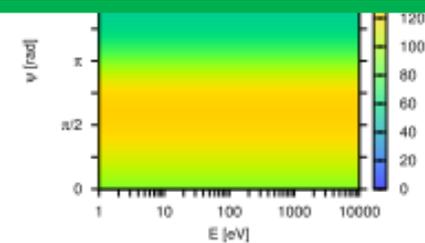
$\gamma=80^\circ, \eta=80^\circ$

(交換なし)

$\gamma=80^\circ$



$\gamma=60^\circ$



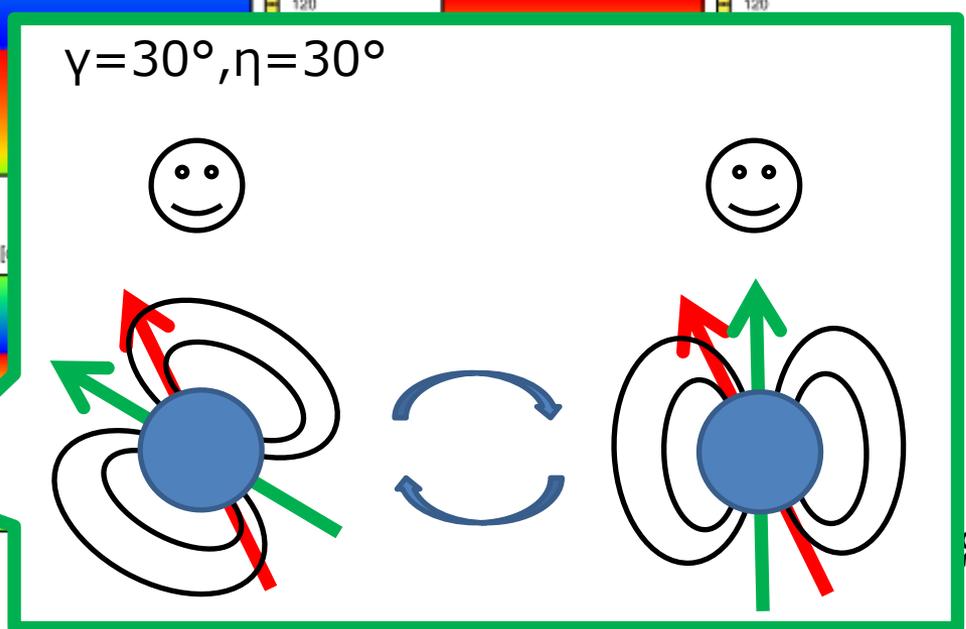
$\gamma=30^\circ, \eta=30^\circ$

$\gamma=30^\circ$

回転位相

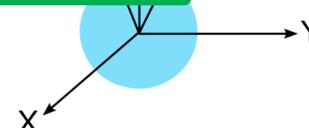
エネルギー

$\eta=30^\circ$



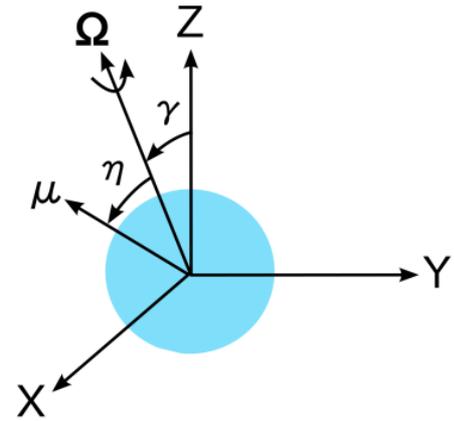
$\eta=60^\circ$

$\eta=80^\circ$

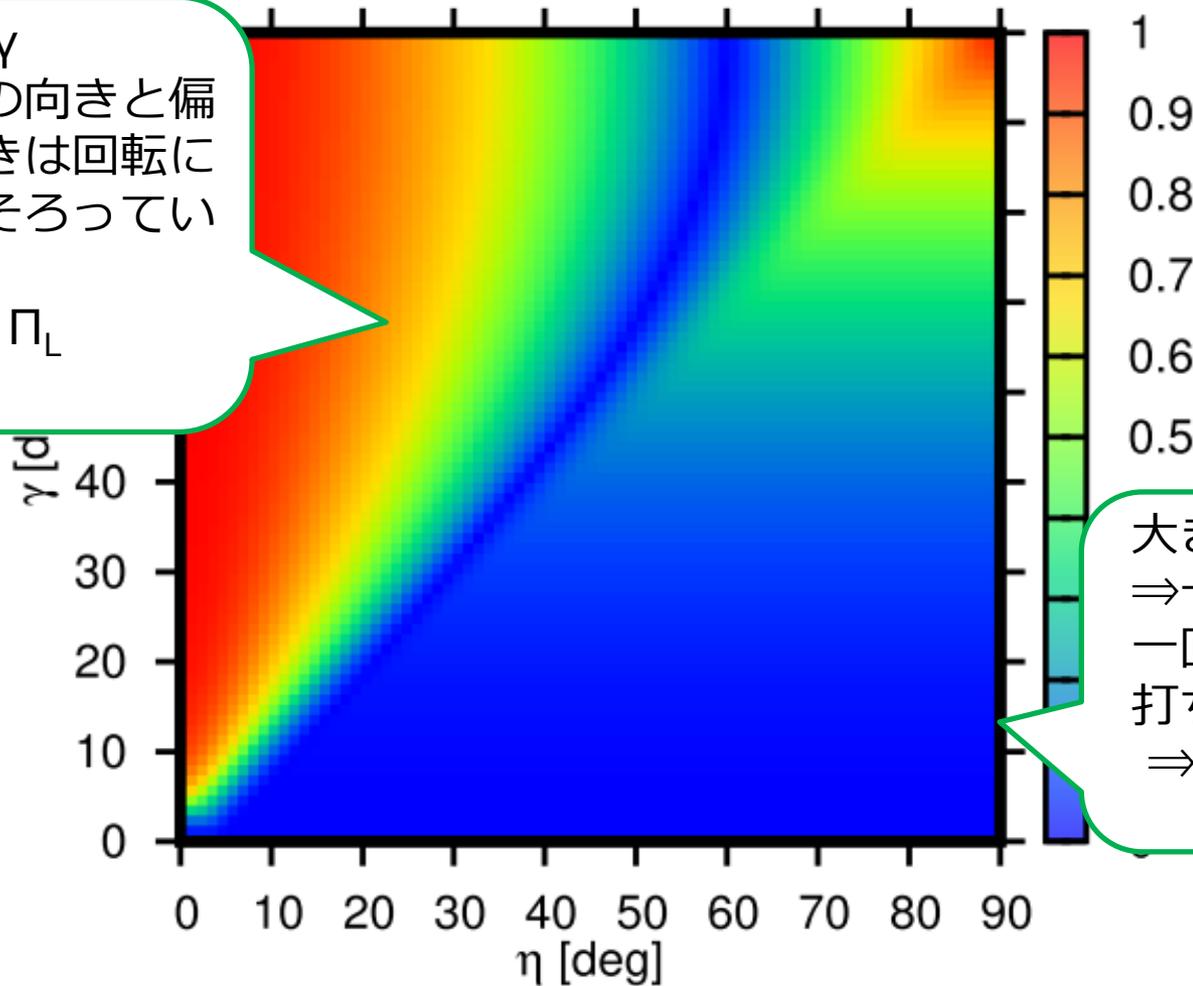


# 位相平均をとった偏光度(モード変換なし)

$B=10^{13}\text{G}$ ,  $E=5\text{keV}$



大きな  $\gamma$   
⇒ 磁場の向きと偏光の向きは回転に通してそろっている  
⇒ 高い  $\Pi_L$

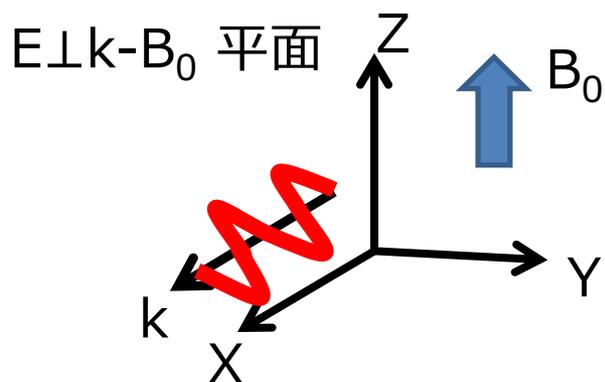


大きな  $\eta$   
⇒ 一周で磁場が一回転し、偏光が打ち消しあう。  
⇒ 低い  $\Pi_L$

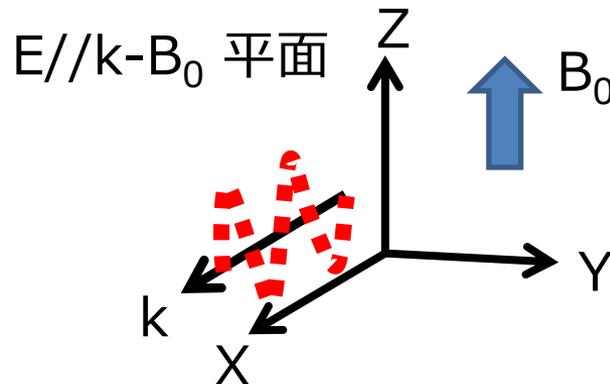
# モード変換

## 磁場中のプラズマにおける偏光モード

eXtraordinary(X)-モード



Ordinary(O)-モード



プラズマと真空偏極(QED過程の一つ)の効果の兼ね合いでモードが変換する

プラズマ効果：大

例えば



Xモード



QED効果：大



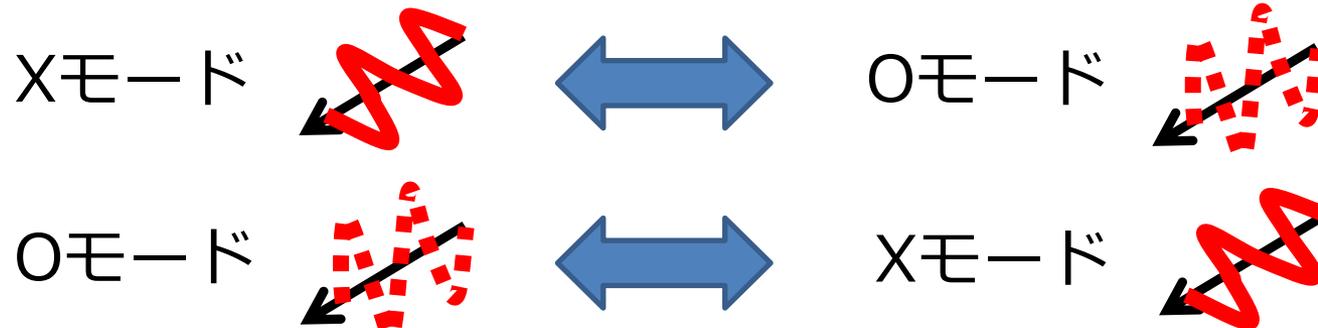
Oモード

# 熱的放射でのモード変換

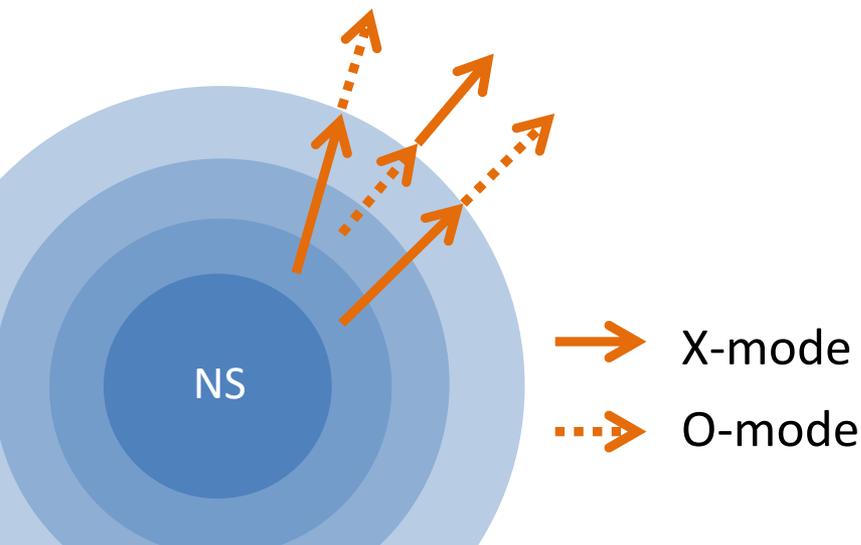
## 中性子星におけるモード変換

大気では

磁気圏では



## エネルギーと磁場の依存性



モード変換は

①光子のエネルギーが高い

$E \geq 2\text{keV}$

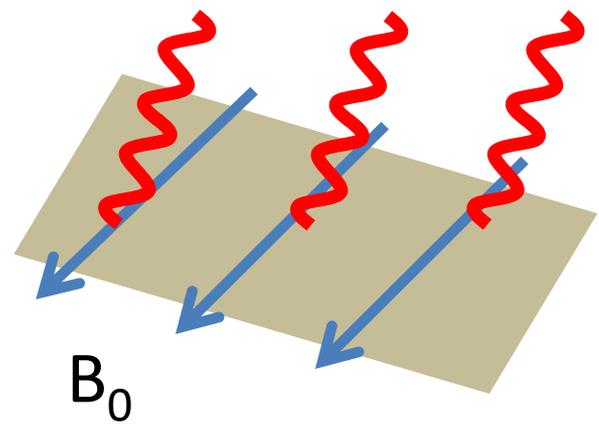
②表面磁場が極めて強くはない

$B \leq 7 \times 10^{13}\text{G}$

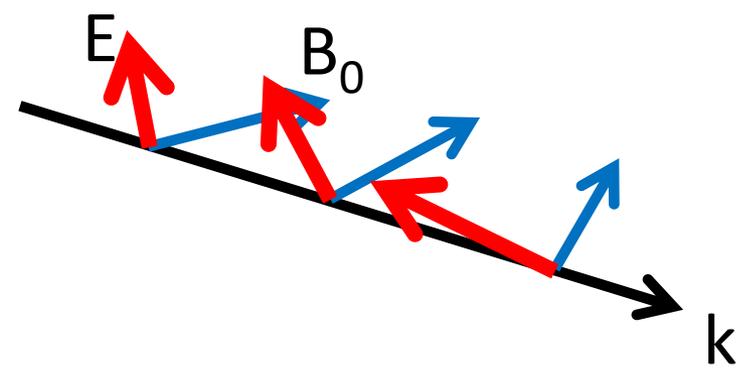
とよく起こる。

# モード変換も考慮した

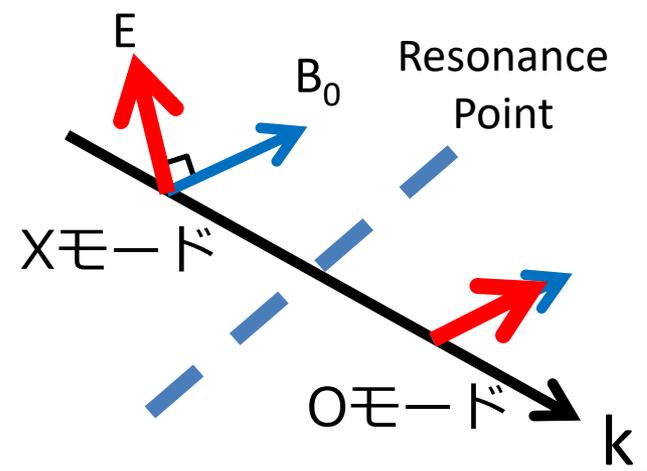
偏光した表面放射



磁気圏における偏光の発展



モード変換



大気

磁気圏

中性子星

~10km

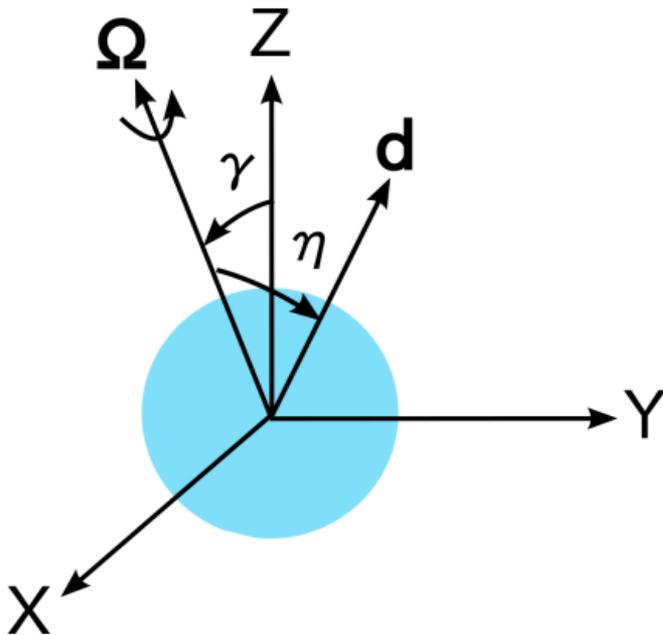
≲10cm

# 設定

Observer



- 表面放射はすべてX-modeであるが **モード変換** をエネルギーと磁場の依存性を考慮して取り入れる。
- 偏光はpolarization-limiting radiusで決まる。
- 偏光度  $\Pi_L$  と偏光角  $\chi_p$  を求める



$$\Pi_L = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad \chi_p = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{U}{Q} \right).$$

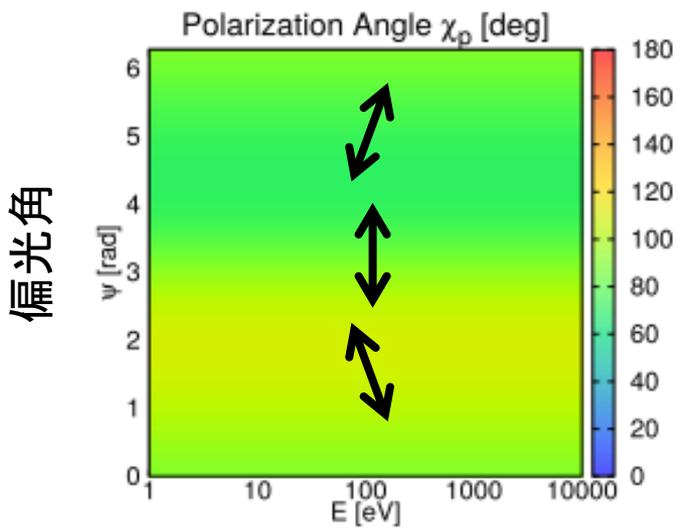
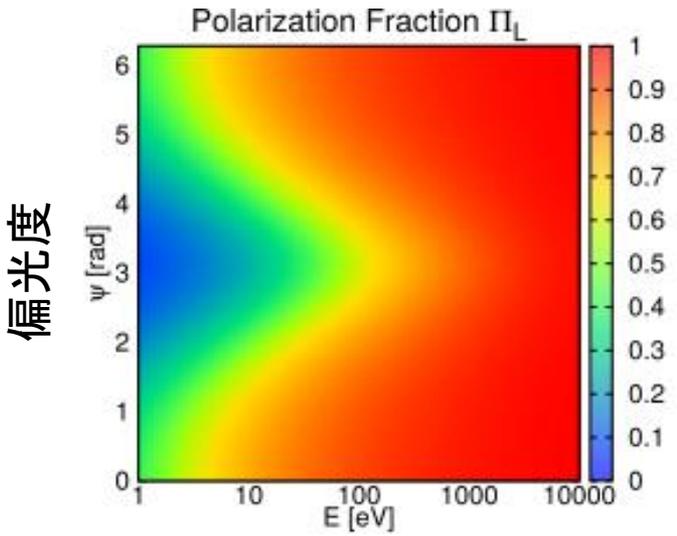
I, Q, U: Stokes parameter

- 観測者はZ軸方向の無限遠にいる
- ダイポール磁場
- 放射はZ軸方向に伝播する
- 一般相対性理論の効果は考えない

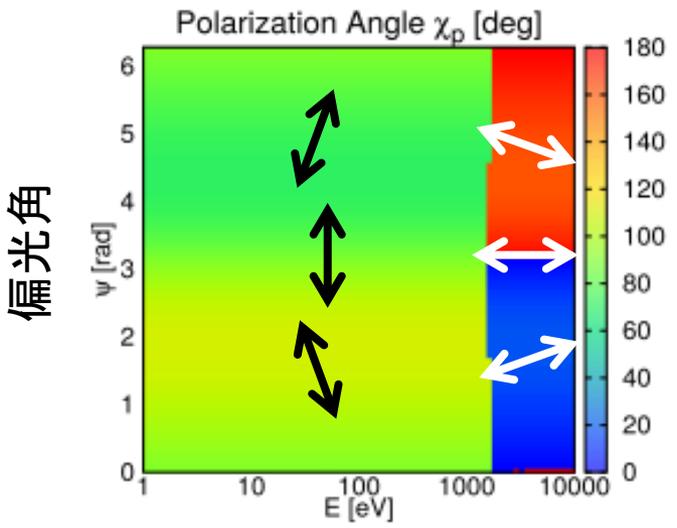
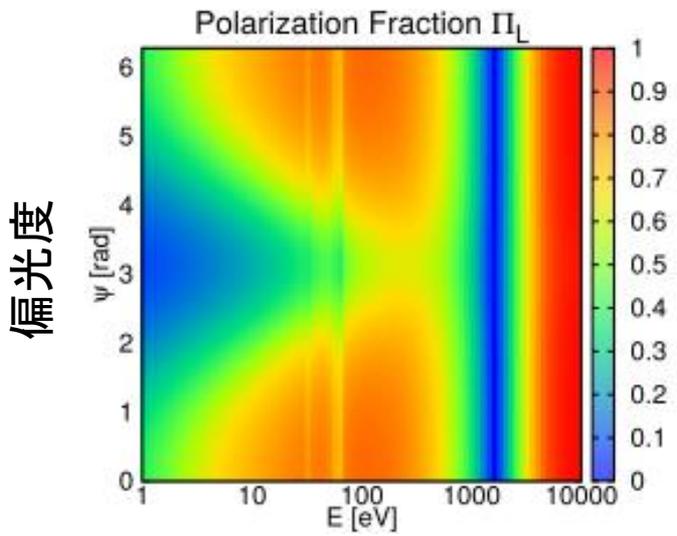
# モード変換の有無

$\gamma=15^\circ, \eta=5^\circ, B=10^{13}G$   
 (Same as Taverna+ (2015))

モード変換なし

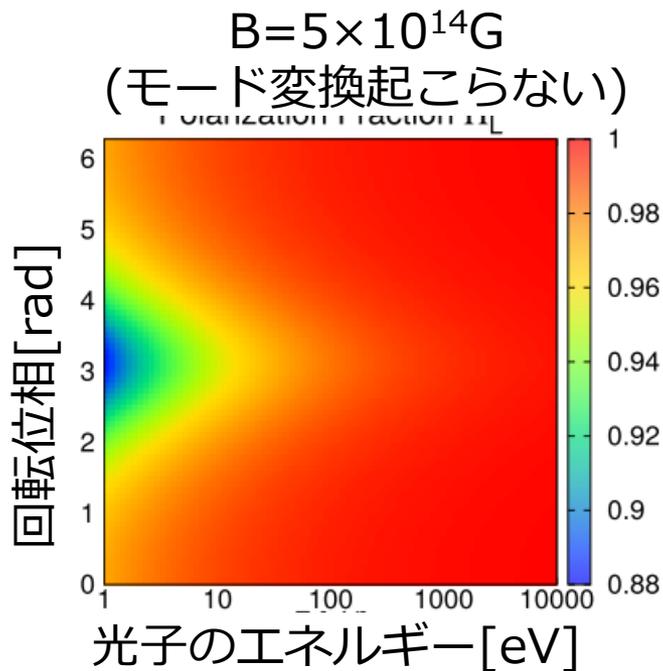


モード変換あり

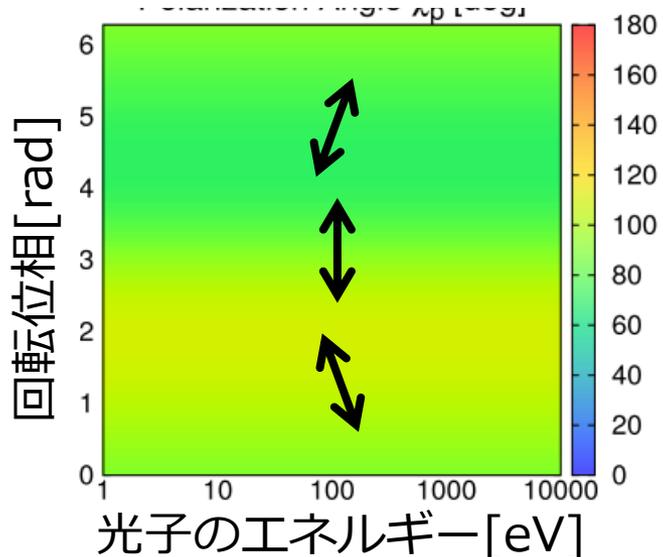
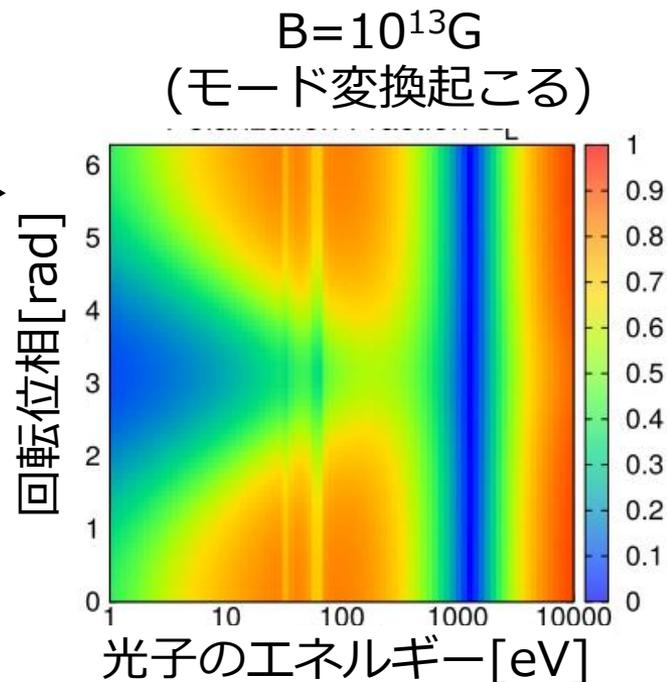


# 磁場の強度依存性

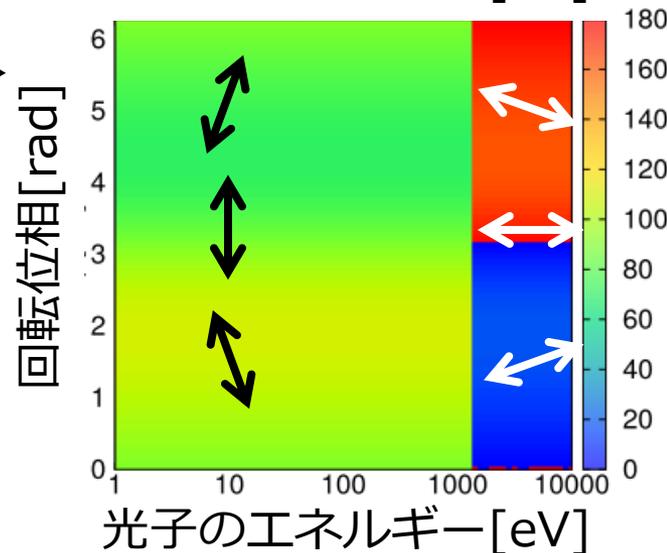
$\gamma=15^\circ, \eta=5^\circ, B=10^{13}\text{G},$   
 $T=0.4\text{keV}$



← 偏光度 →



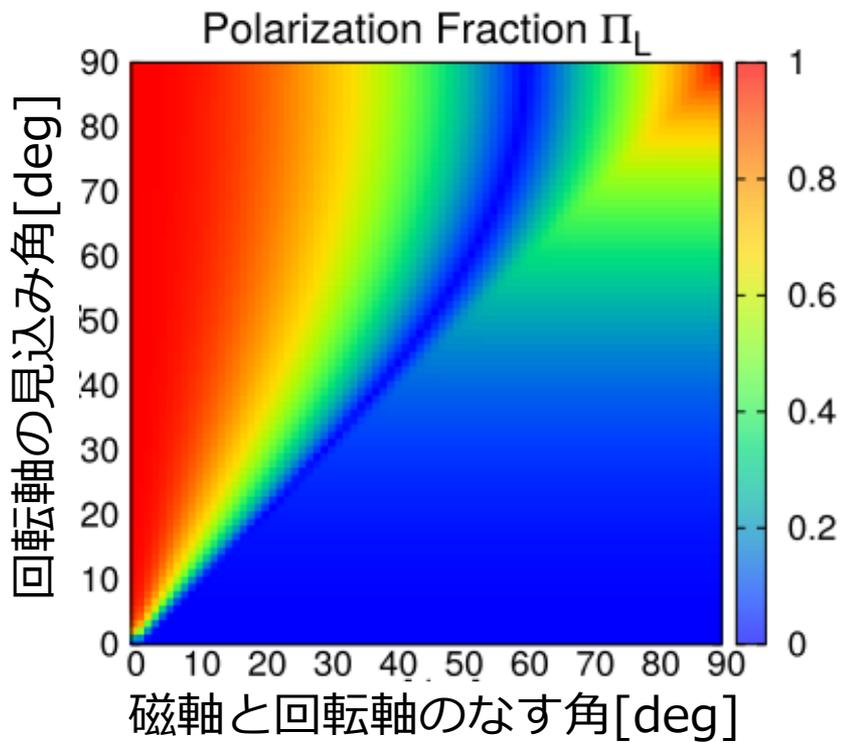
← 偏光角 →



モード変換は  
 $E \geq 2\text{keV}$ かつ  
 $B \leq 7 \times 10^{13}\text{G}$   
のときよく起こる。

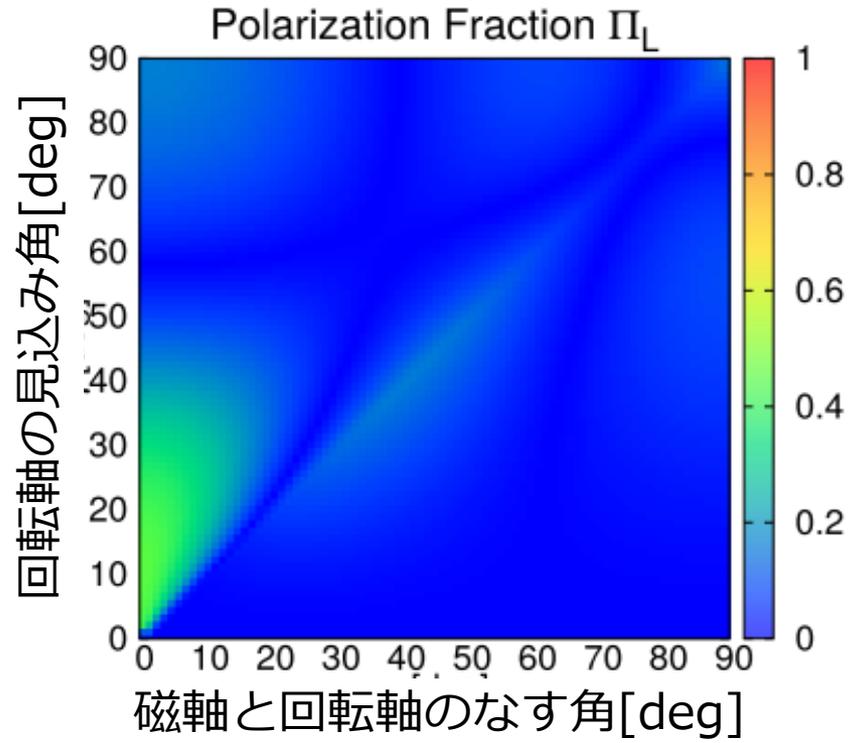
# Phase-averagedな偏光度 $E=5\text{keV}$ , $T=0.4\text{keV}$

$B=5 \times 10^{14}\text{G}$



モード変換が効かない  
偏光度：高

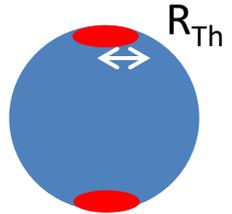
$B=5 \times 10^{13}\text{G}$



モード変換が効く  
偏光度：低

# マグネター

Magnetar	B	T	$R_{Th}$
1E 2259+586	$5.9 \times 10^{13}$ G	0.37 keV	5.0 km
4U 0142+61	$1.3 \times 10^{14}$ G	0.36 keV	9.4 km
SGR 0501+45	$1.9 \times 10^{14}$ G	0.70 keV	1.4 km
1RXS J17089.0-400910	$4.7 \times 10^{14}$ G	0.48 keV	4.5 km

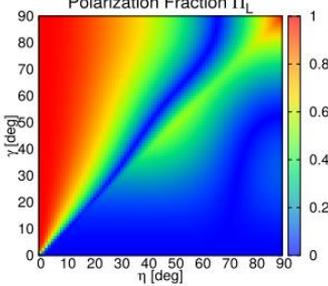


Y. E. Nakagawa et al.,  
PASJ 61(2009) 109

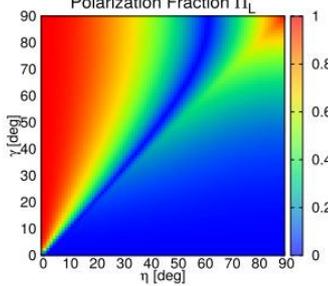
1, 2, ... 10 keVではモード変換の効果なし

1E 2259+586だけは1keV未満でモード変換が見える

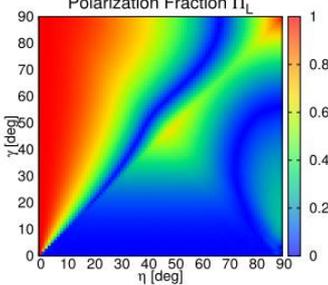
(a) 2259+58 ( $E = 5\text{keV}$ )



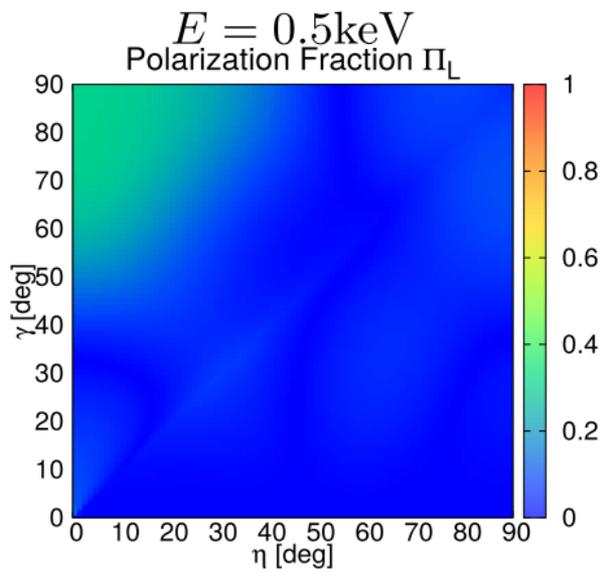
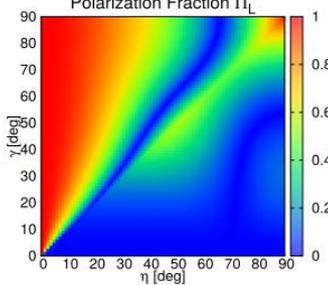
(b) 0142+61 ( $E = 5\text{keV}$ )



(c) 0501+45 ( $E = 5\text{keV}$ )

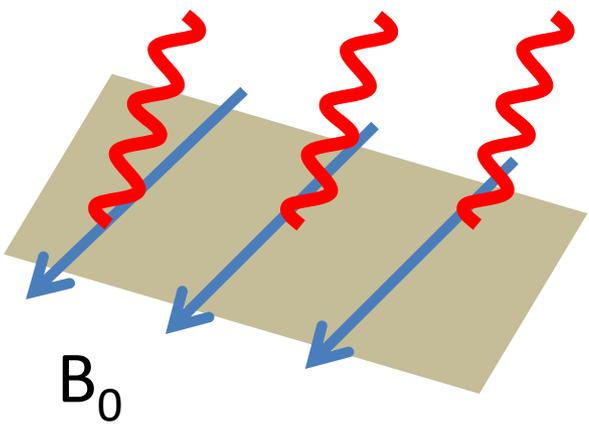


(d) 1708-40 ( $E = 5\text{keV}$ )

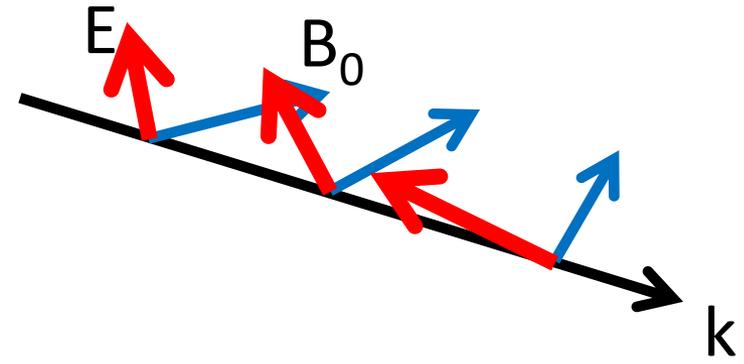


# (磁場が強い)マグネターの場合

偏光した表面放射



磁気圏における偏光の発展

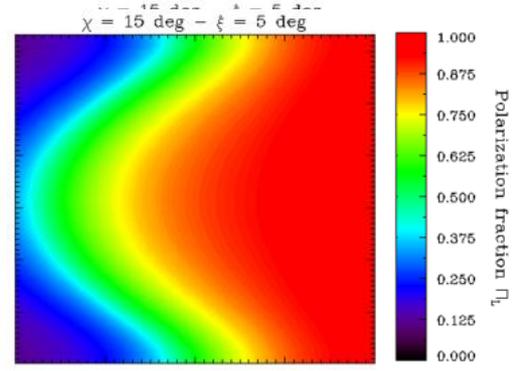


磁気圏  
大気

中性子星



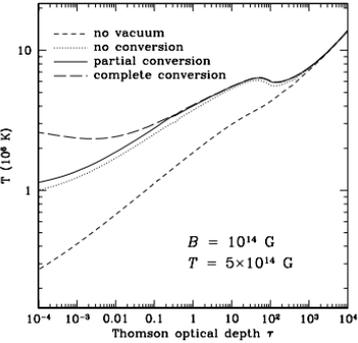
モード変換は効かない



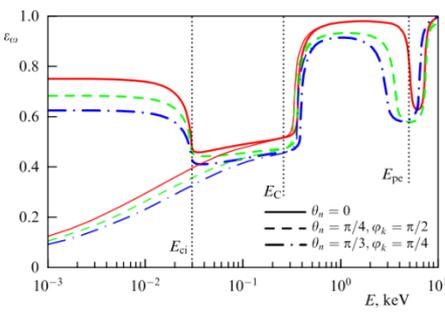
Taverna et al. (2015)

# 今後の展望

## 大気モデル

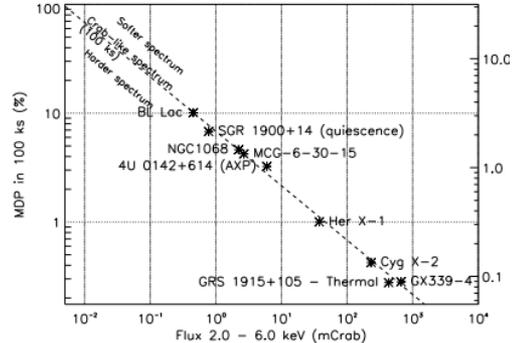


van Adelsberg & Lai (2006)



Potekhin (2014)

## 検出器での観測



Weisskopf et al. (2013)

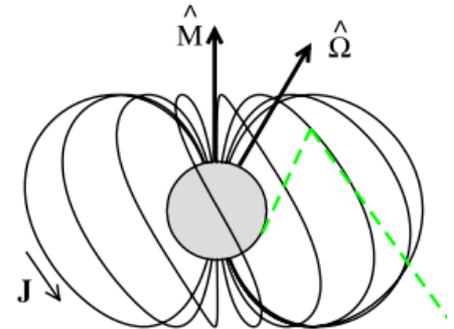
大気

磁気圏

中性子星



## 磁場の構造



Fernández & Davis (2011)

# まとめ

- 近い将来にマグネターの偏光が観測できるようになり、偏光は磁場構造とQEDの効果を反映している。
- モード変換の効果も考慮しなければ、回転位相ごとの偏光度は、多くの場合ほぼ1であり、偏光角は中性子星の姿勢によって大きく変化する。
- モード変換は偏光の向きを90度変えることがあり、磁場が極端に強くない場合に2keVを超えるエネルギーでは重要になる。
- マグネターの磁場が強いため、強い偏光が期待されるが、今回の例では1E 2259+681の1keV未満でしかモード変換は観測できない。

次世代の軟X線偏光観測衛星では

高い偏光度  $\Rightarrow B \gtrsim 10^{14} \text{G}$  のマグネター

モード変換  $\Rightarrow B \lesssim 10^{13} \text{G}$  の中性子星