

マグネターの熱的放射の偏光の 系統的な予想

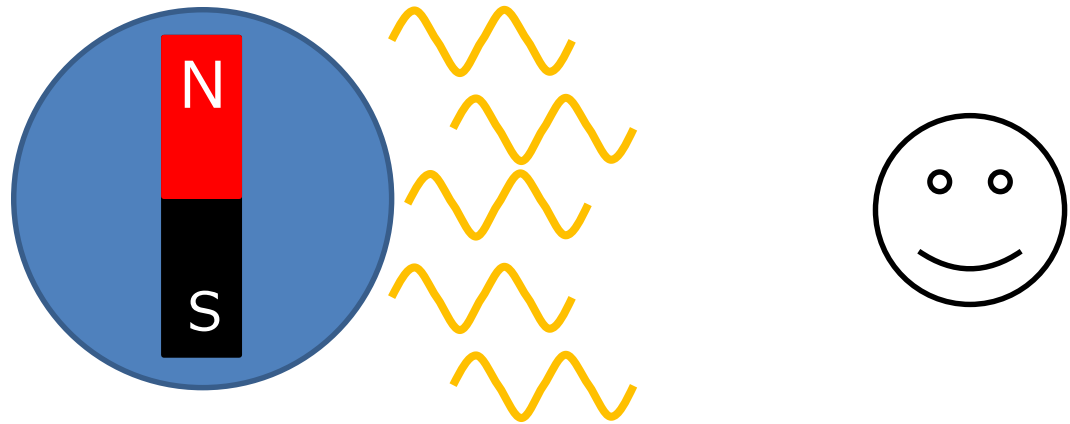
早稲田大学 D3 矢田部 彰宏

共同研究者: 山田 章一 (早稲田大学)

A. Yatabe & S. Yamada, ApJ 850 (2017) 185, arXiv:1712.03960

観測による中性子星自体の理解

中性子星は強い双極子磁場を持ち、表面からの放射と考えられている熱的放射が観測されている。

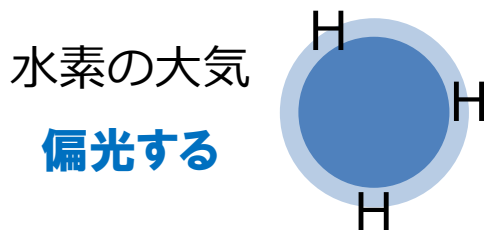


表面からの放射は表面の物理的な性質を反映しているはずなので、観測によって中性子星の表面の性質の手がかりを得られるだろう。

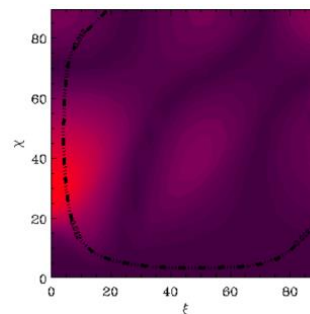
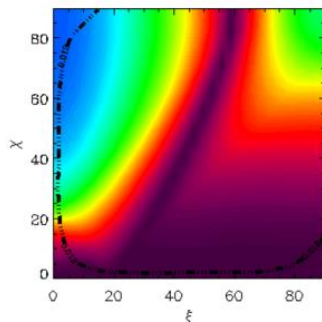
RX J1856.5-3754の偏光予想

XDINSと呼ばれる種類の中性子星の一つであるこの天体では、大気を持つ可能性と持たない可能性がある。その偏光を予想する理論研究が行われた。

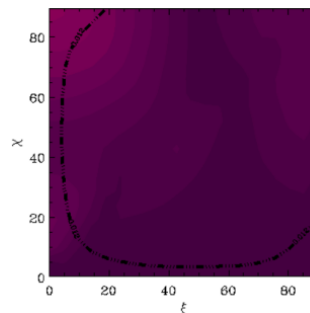
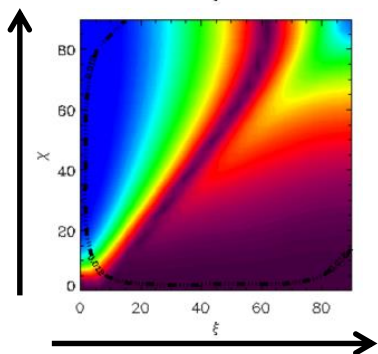
偏光度
(位相平均)



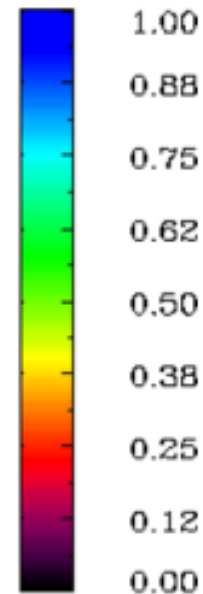
可視光
(2.5-3.1eV)



軟X線
(0.12-0.39keV)



強い偏光



無偏光

姿勢のパラメータ

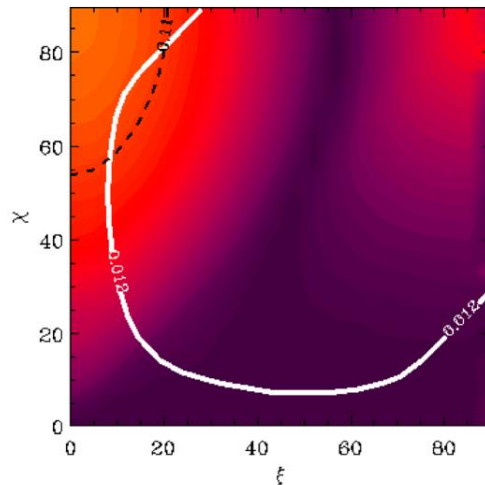
D. González Caniulef et al. MNRAS 459 (2016) 3585

RX J1856.5-3754の偏光観測(可視光)

R. P. Mignani et al. MNRAS 465 (2017) 492

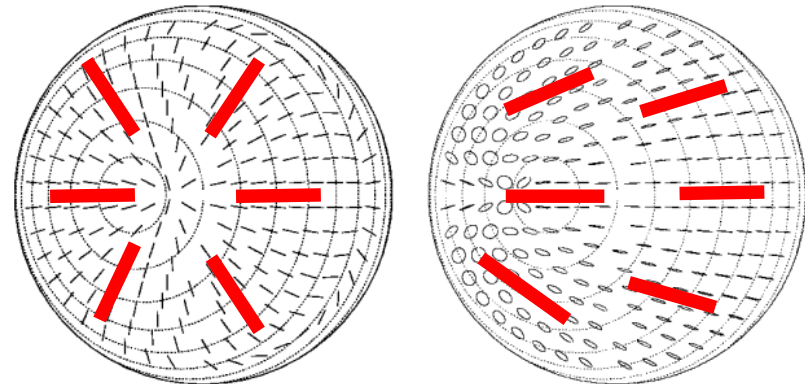
可視光での位相平均をとった偏光度は $16.43 \pm 5.26\%$
大気存在の決着はつかず、軟X線での偏光観測に持ち越し

しかし、16%の偏光度は強い磁場によるQED効果の一つである真空複屈折の効果を示唆する。



真空複屈折を考慮しないと、
大気がある場合でも偏光度
は低い。

R. P. Mignani et al. MNRAS 465 (2017) 492



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

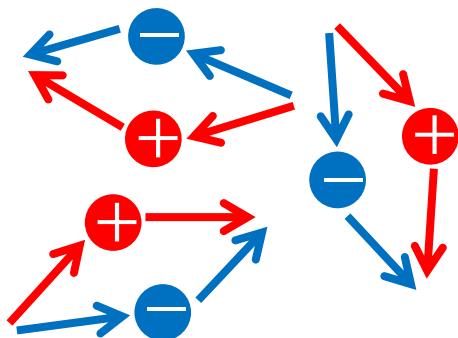
J. S. Heyl, N. J. Shaviv, PRD 66, (2002) 023002

非線形量子電気力学（非線形QED）

強い電磁場のもとでの電子と光子の振る舞いを扱う物理学

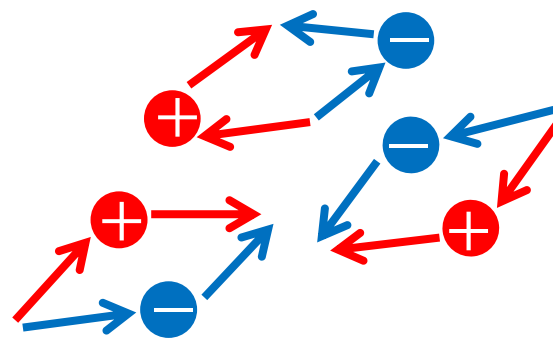
W. Heisenberg, H. Euler Z. Phys. 98 (1936) 714
J. Schwinger, Phys. Rev. 82 (1951) 664

量子論での真空



粒子（電子陽電子対）が生成と消滅を繰り返す

強い磁場のもとでは

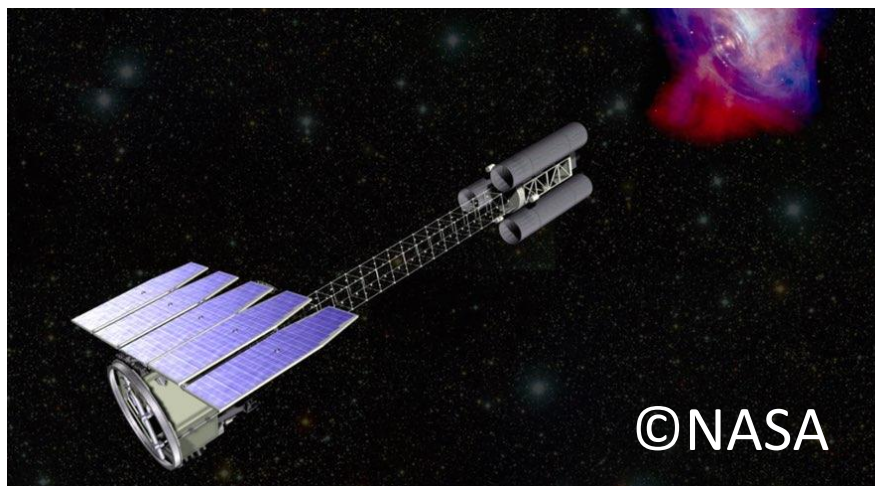


“軌道”の向きがそろい、結果的に屈折率が変化

J. S. Toll, PhD Thesis (1952)
S. L. Adler, Ann. Phys. 67 (1971) 599
K. Hattori, K. Itakura, Ann. Phys. 330 (2013) 23

近い将来の軟X線の偏光観測

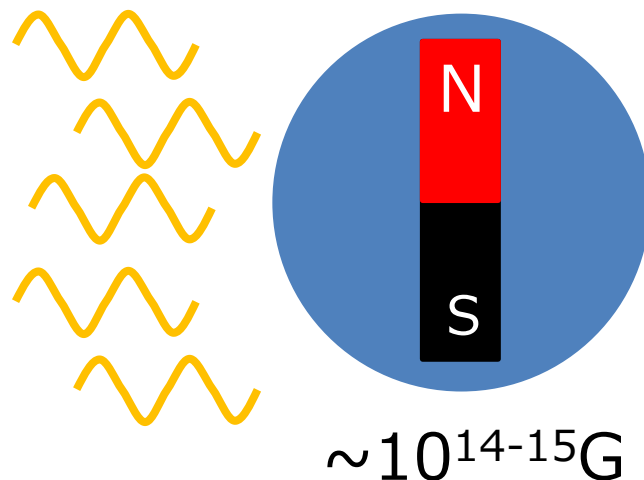
軟X線偏光観測衛星IXPE
(打ち上げ決定)



Weisskopf et al. (2013)

観測エネルギーは2-8keV
他にも複数の計画(XIPE, eXTP)がある

マグネターの定常放射はX線



S. Mereghetti Astron. Astrophys. Rev.,
15 (2008) 225

強い磁場により偏光に影響が見られる

本研究では非線形QEDを反映したマグネターの偏光を系統的に予想する

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

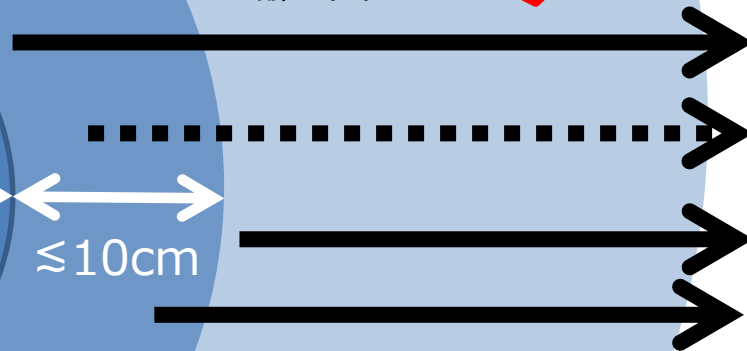
偏光は磁気圏中で向きを変える

大気

磁気圏

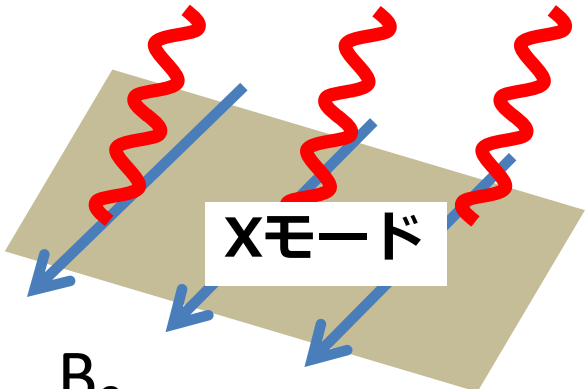
中性子星

~10km ≲10cm



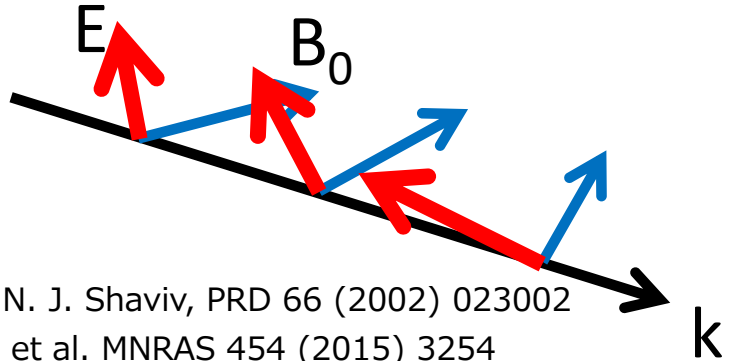
先行研究 (Taverna et al. 2015)では

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



B_0 J. Lodenquai et al. ApJ 190 (1974) 141

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

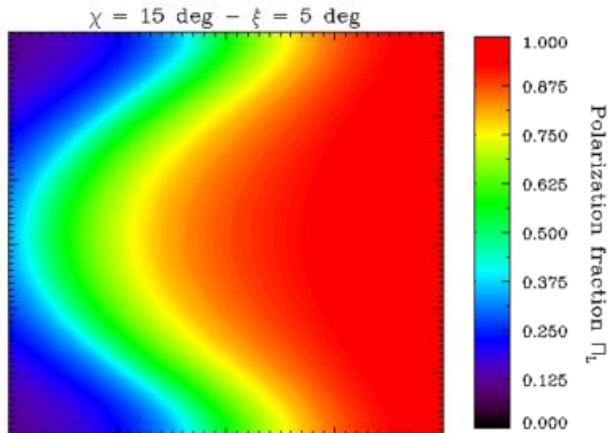


J. S. Heyl, N. J. Shaviv, PRD 66 (2002) 023002
R. Taverna et al. MNRAS 454 (2015) 3254

大気

磁気圏

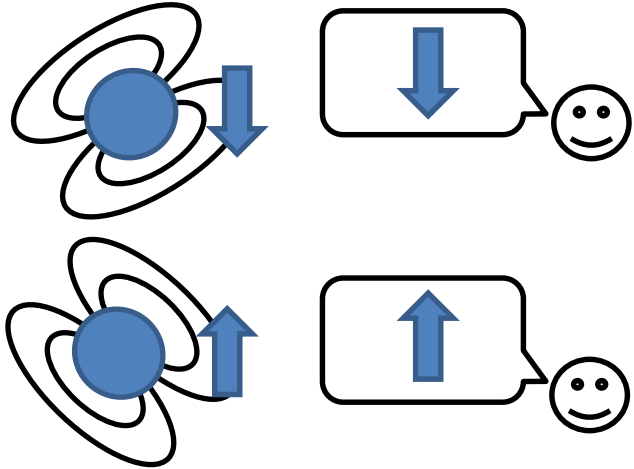
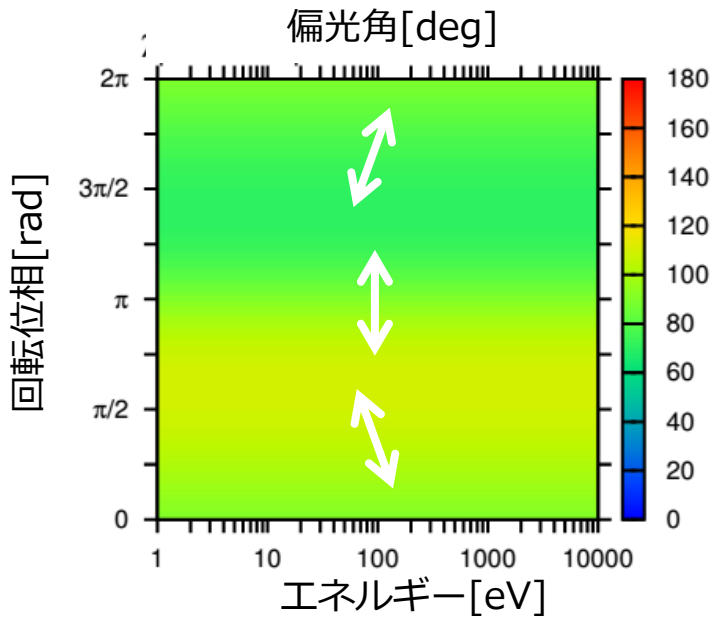
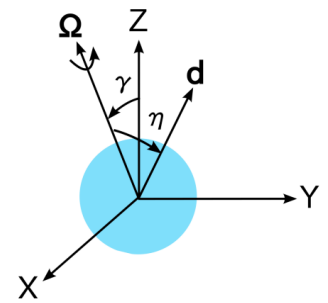
中性子星



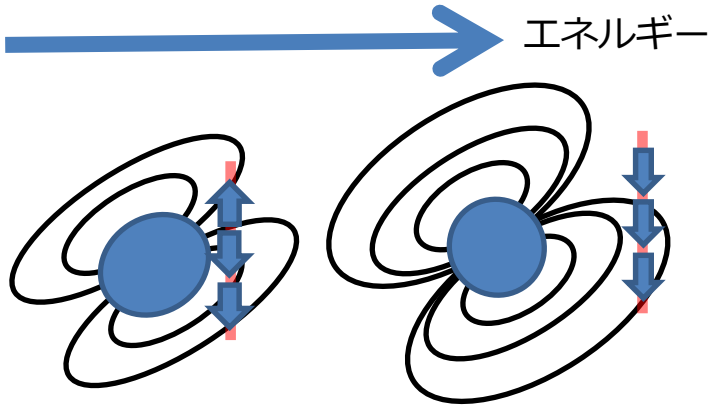
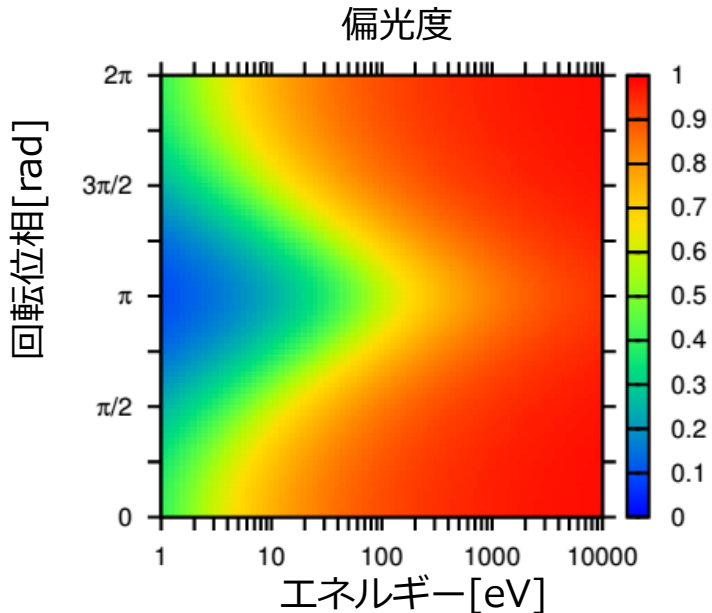
R. Taverna et al. MNRAS 454 (2015) 3254

大まかな理解

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



偏光角は自転とともに変化する



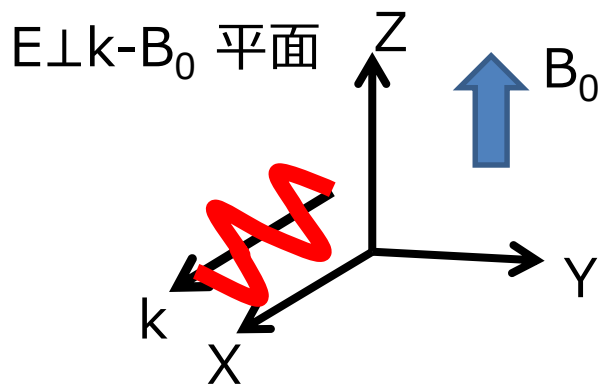
偏光度はエネルギーが高い光子ほど高くなりやすい

モード変換

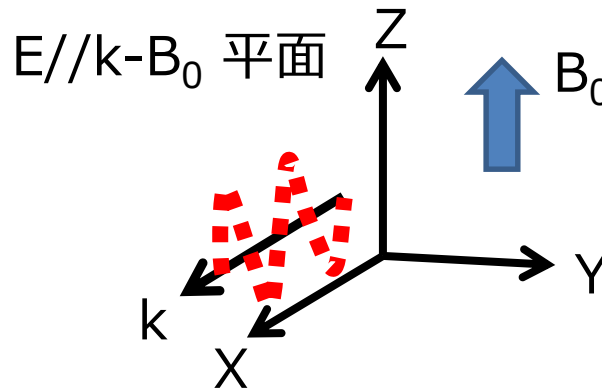
P. Mészáros, J. Ventura, PRD 19 (1979) 3565

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効果の一つ)の効果の兼ね合いでモードが変換する

プラズマ効果 : 大

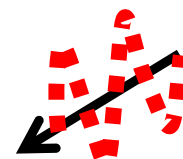
例えば



Xモード



QED効果 : 大



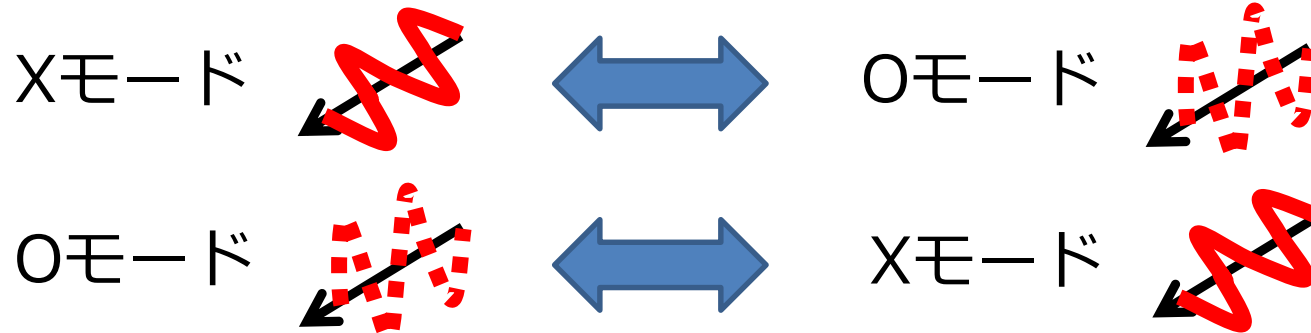
Oモード

熱的放射でのモード変換

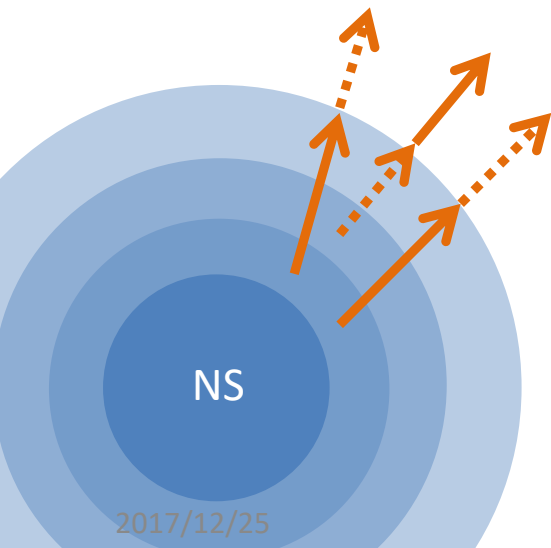
中性子星におけるモード変換

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

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

とよく起こる。

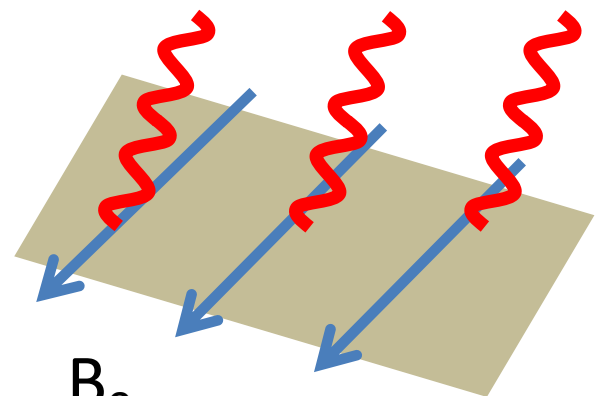
→ X-mode

⋯→ O-mode

D. Lai, W. C. G. Ho, ApJ, 588 (2003) 962

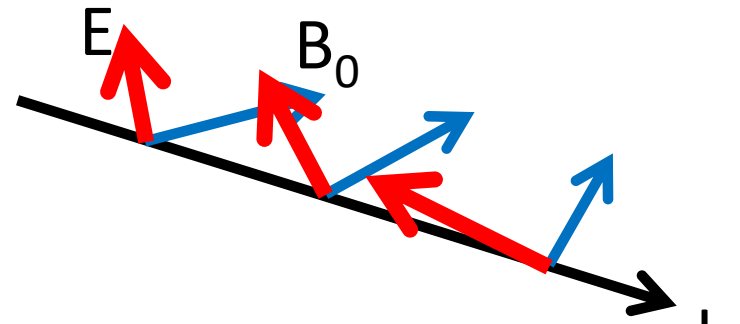
モード変換も考慮した

偏光した表面放射



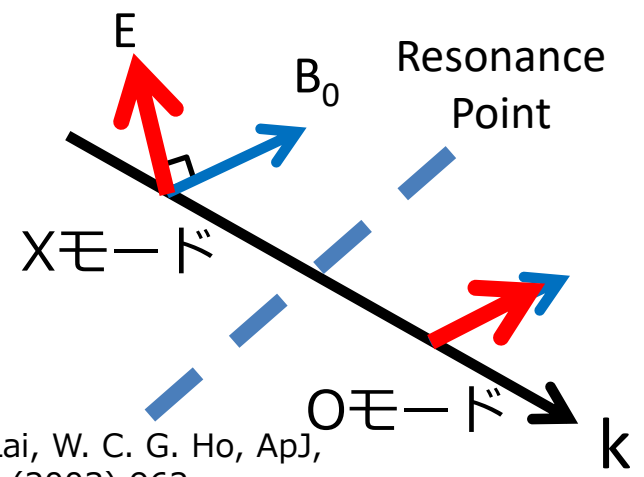
B_0 J. Lodenquai et al. ApJ 190 (1974) 141

磁気圏における偏光の発展



J. S. Heyl, N. J. Shaviv, PRD 66 (2002) 023002
R. Taverna et al. MNRAS 454 (2015) 3254

モード変換



D. Lai, W. C. G. Ho, ApJ, 588 (2003) 962

大気

磁気圏

中性子星

~10km ≲10cm

設定

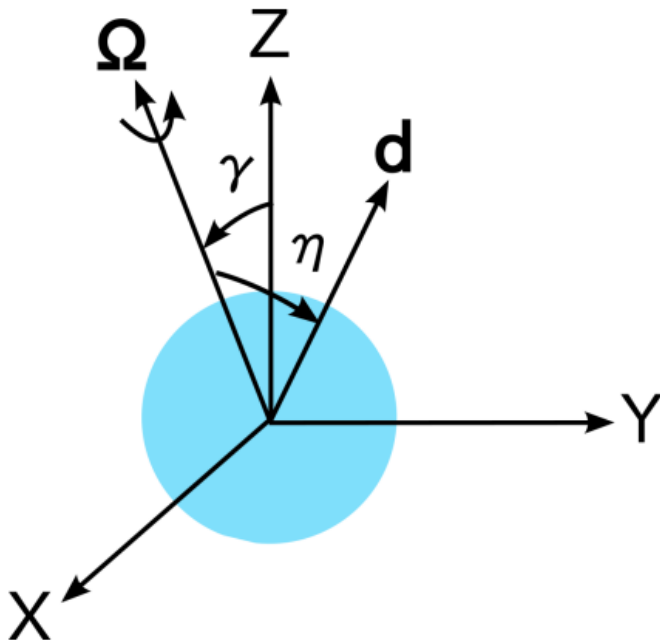
Observer



- 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 Π_L と偏光角 χ_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



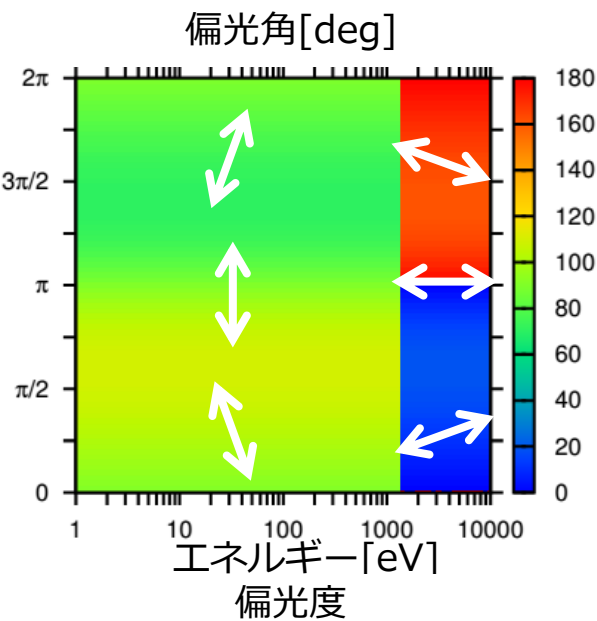
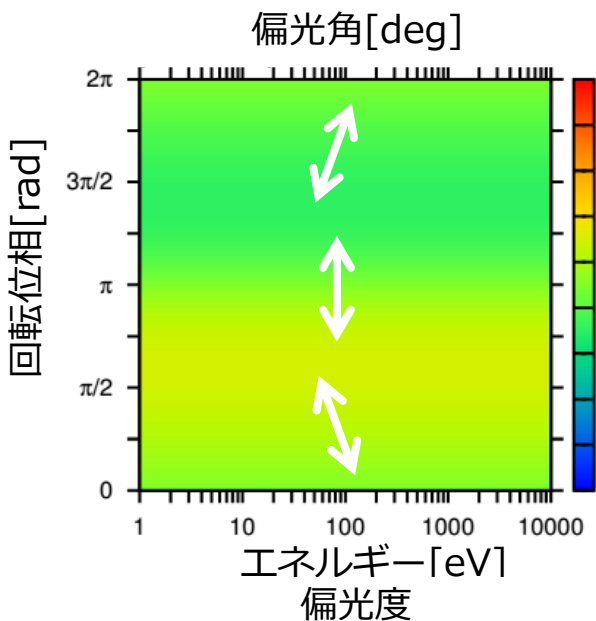
- 観測者はZ軸方向の無限遠にいる
- ダイポール磁場
- 放射はZ軸方向に伝播する
- 一般相対性理論の効果は考えない

モード変換の有無

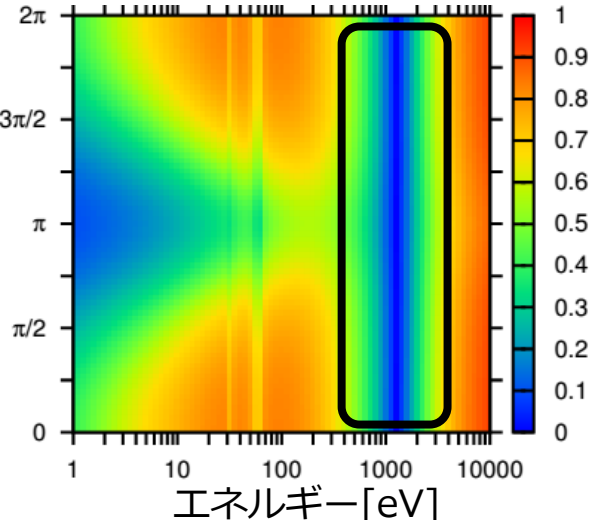
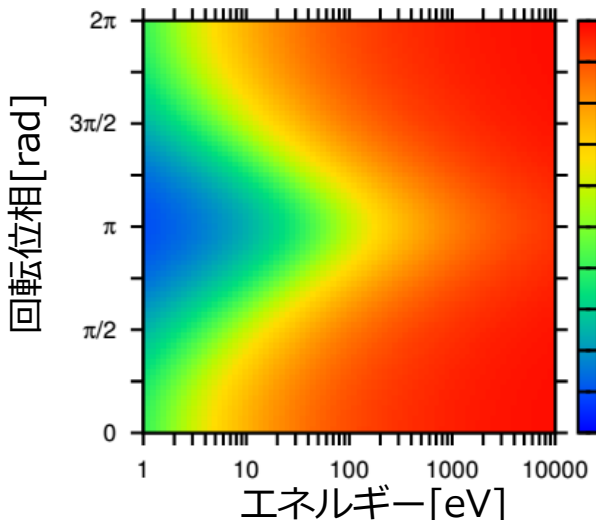
$\gamma=15^\circ, \eta=5^\circ, B_p=10^{13}\text{G}, T=0.4\text{keV}$

モード変換なし

モード変換あり



偏光角が
90度変化



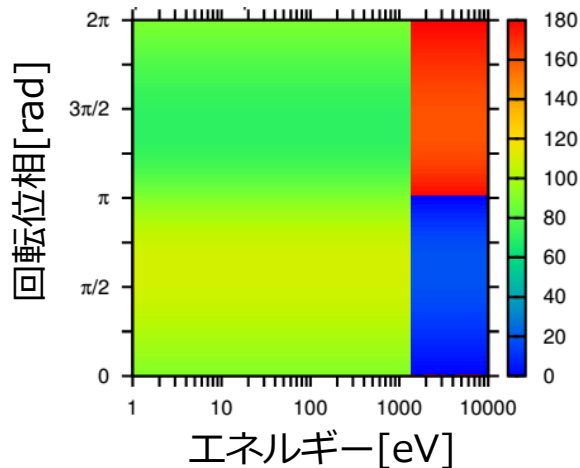
X,Oモード
の共存で、
偏光度減少

磁場強度の依存性

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

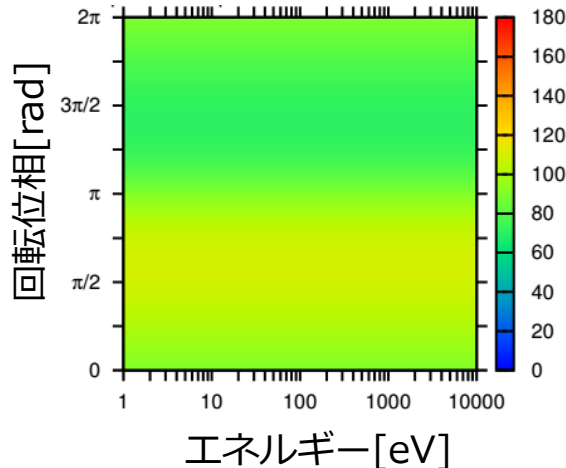
$B_p = 10^{13}\text{G}$

偏光角[deg]



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

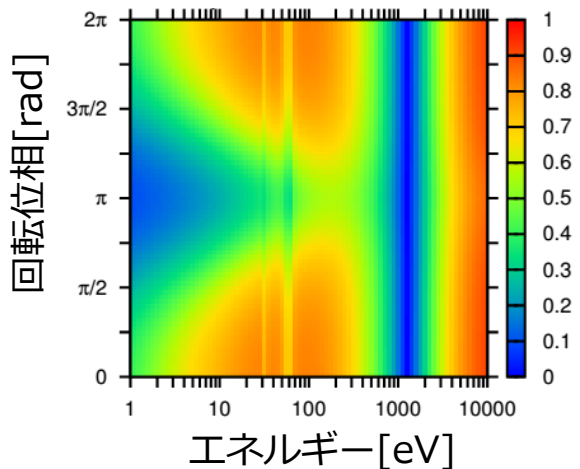
偏光角[deg]



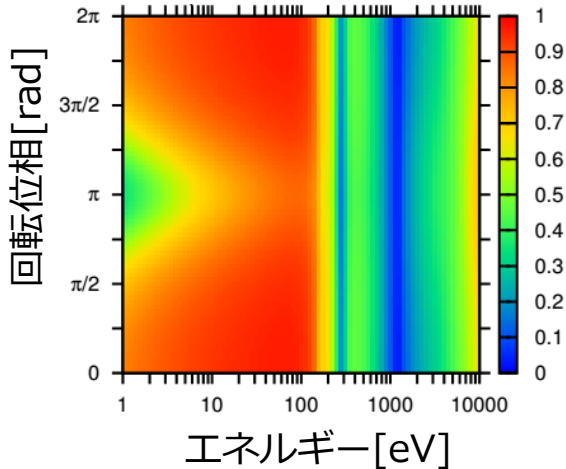
磁軸付近は磁場が強くモード変換する場所が光球面の内側に移動し、モード変換が見えなくなる。

$B_p = 10^{14}\text{G}$

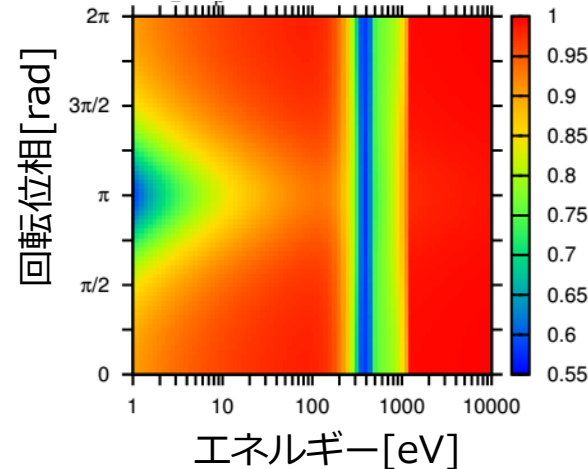
偏光度



偏光度



偏光度



位相平均をとった観測量

$E=5\text{keV}$, $T=0.4\text{keV}$

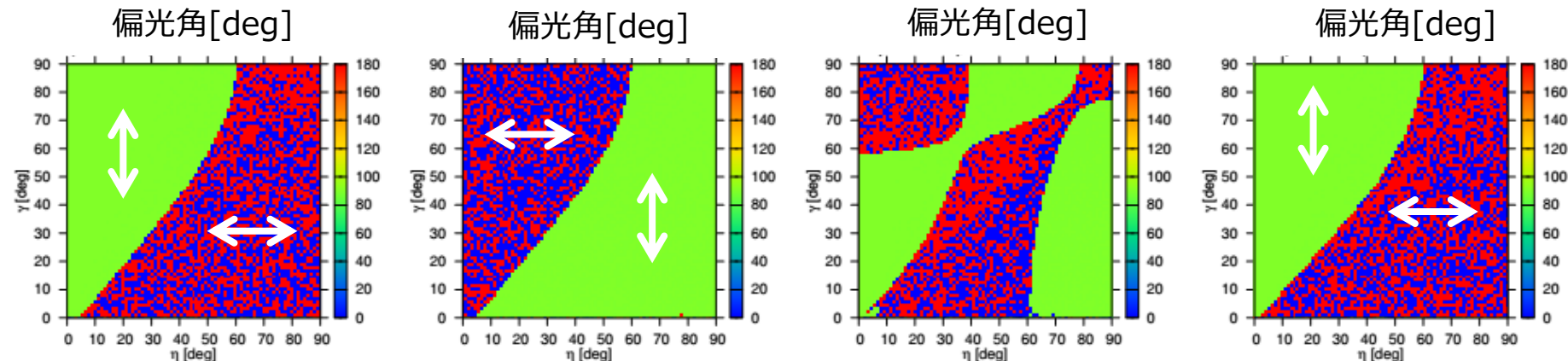
$B_p=10^{13}\text{G}$
モード変換なし

$B_p=10^{13}\text{G}$
モード変換あり

$B_p=5\times 10^{13}\text{G}$
モード変換あり

$B_p=10^{14}\text{G}$
モード変換あり

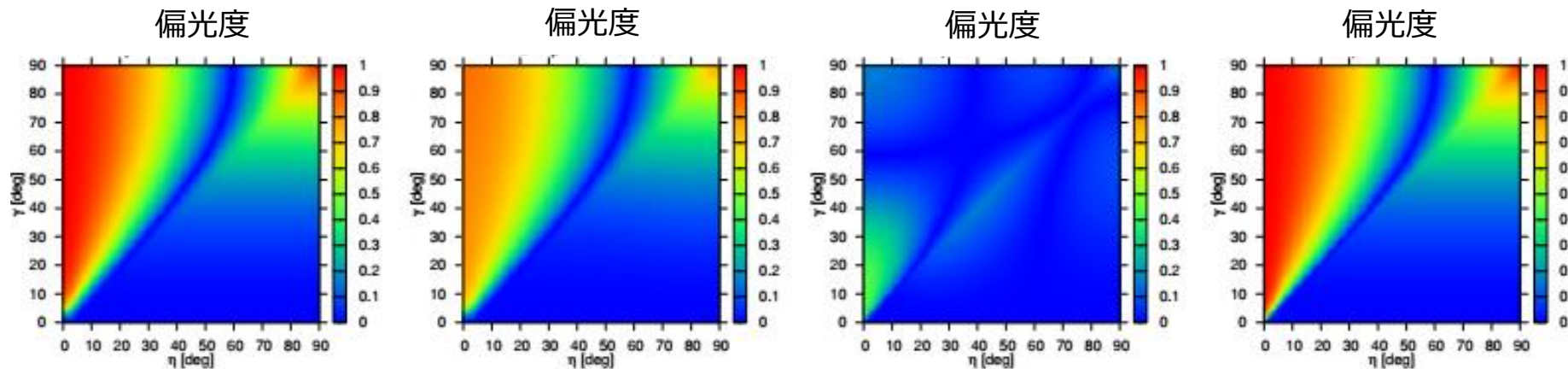
回転軸の見込み角[deg]



磁軸と回転軸のなす角[deg]

偏光角の変化

回転軸の見込み角[deg]

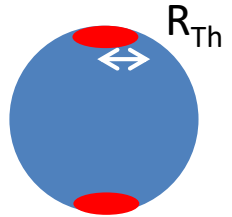


磁軸と回転軸のなす角[deg]

偏光の打ち消し

マグネター

Magnetar	B	T	R_{Th}
1E 2259+586	5.9×10^{13} G	0.37 keV	5.0 km
4U 0142+61	1.3×10^{14} G	0.36 keV	9.4 km
SGR 0501+45	1.9×10^{14} G	0.70 keV	1.4 km
1RXS J17089.0-400910	4.7×10^{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未満でモード変換の効果が見える

1E 2259+586 (E=5keV)

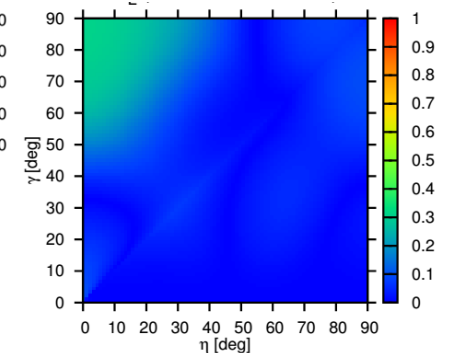
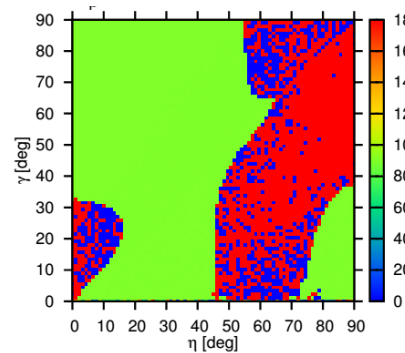
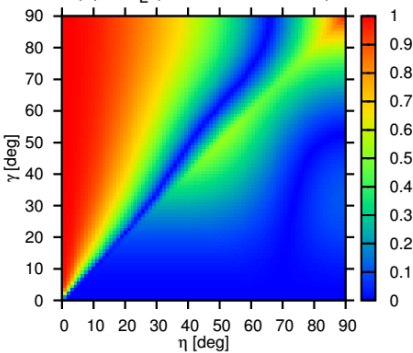
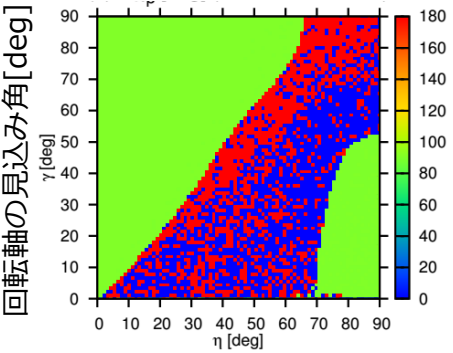
1E 2259+586 (E=0.5keV)

偏光角[deg]

偏光度

偏光角[deg]

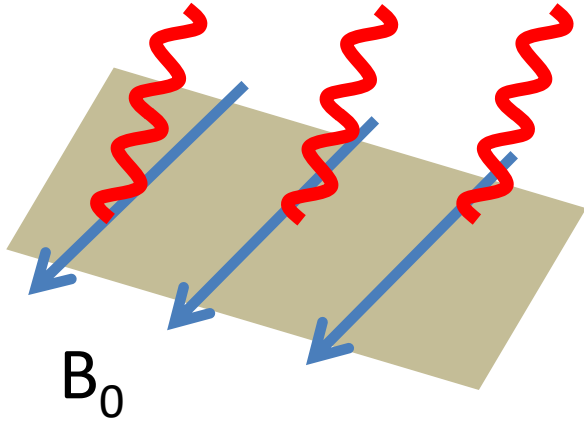
偏光度



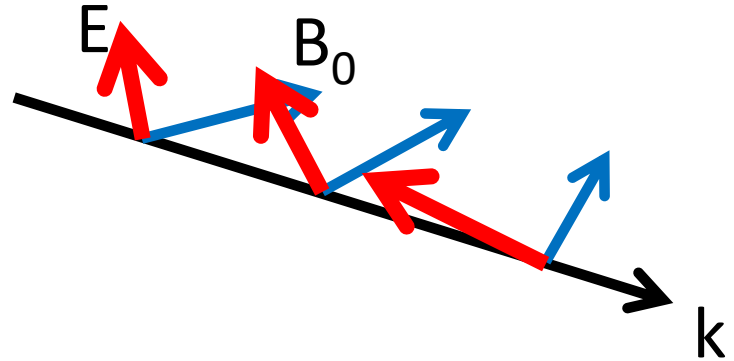
磁軸と回転軸のなす角[deg]

(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



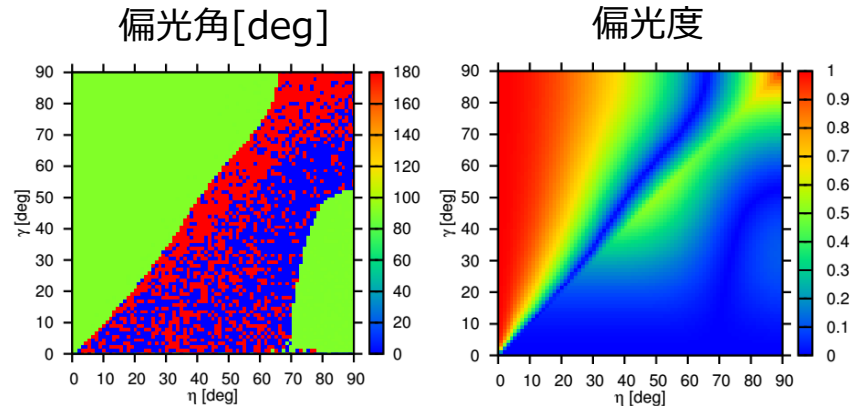
磁気圏

大気

中性子星

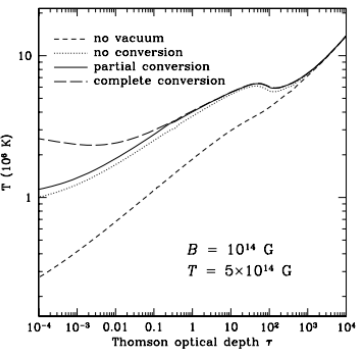
~10km ≲10cm

数keVではモード変換は効かない

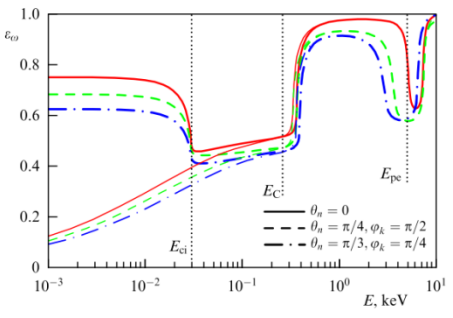


今後の展望

大気モデル

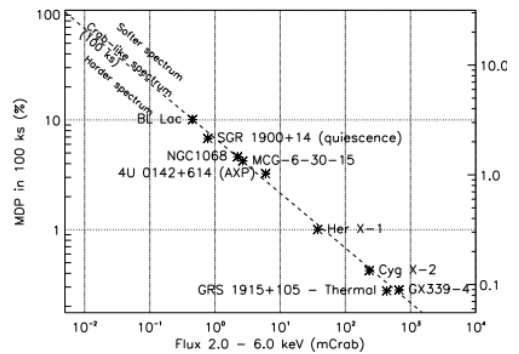


van Adelsberg & Lai (2006)



Potekhin (2014)

検出器での観測



Weisskopf et al. (2013)

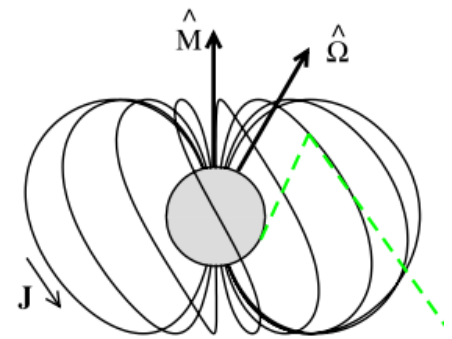
磁気圏

大気

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。
- 回転位相ごとの偏光度は、高エネルギー・強磁場のとき高くなり、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

$B \geq 10^{14} \text{G}$ のマグネター \Rightarrow 高い偏光度
 $B \lesssim 10^{13} \text{G}$ の中性子星 \Rightarrow モード変換