

X線・ γ 線偏光のサイエンス

當真賢二
(東北大 学際研)

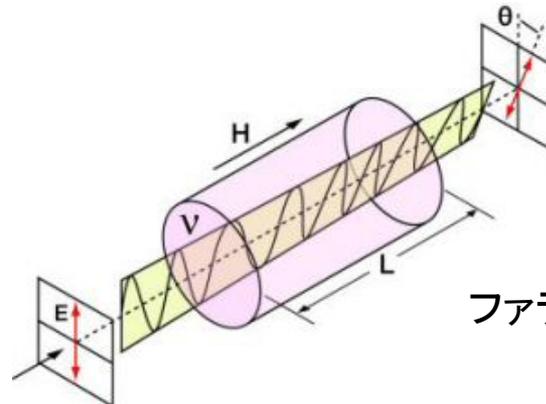
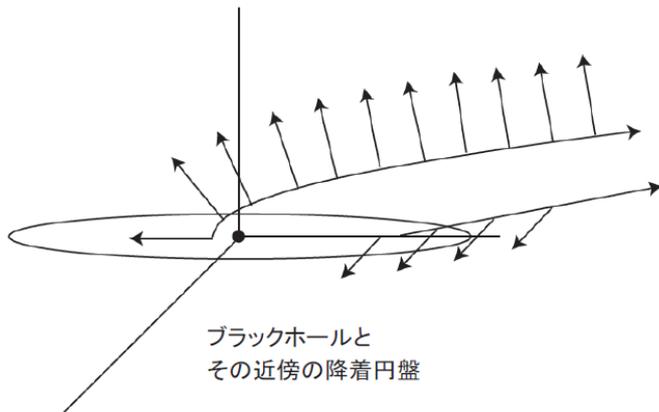
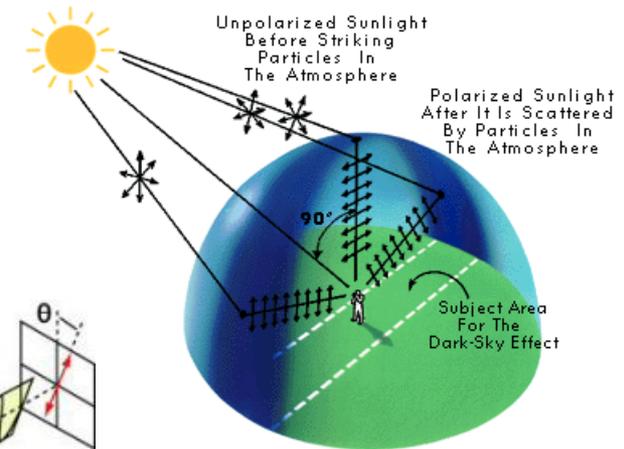
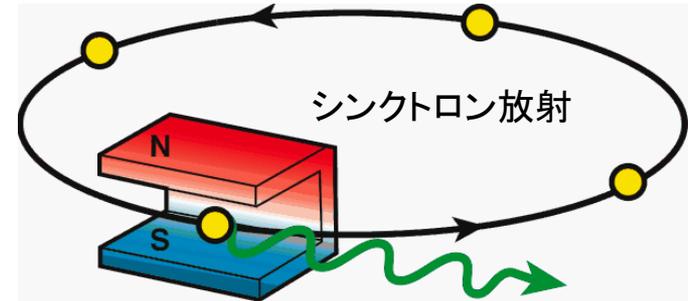
「2020年代の高エネルギー宇宙物理学：X線・ガンマ線天文学の展望」
2014年8月23, 24日 @宇宙科学研究所

Outline

1. 偏光: イントロダクション
2. ブラックホール時空構造の検証
3. 強磁場中性子星
4. 放射機構の解明(パルサー、GRB)
5. 磁場構造の解明(SNR、かに星雲など)
6. まとめ

X線・ γ 線偏光

- 強度、波長、イメージとは全く別の情報
- 残された次元
- 何が分かるのか？
 - 放射メカニズム
 - 構造(磁場・物質・時空)
 - プラズマの組成・エネルギー分布
 - 強磁場の量子論

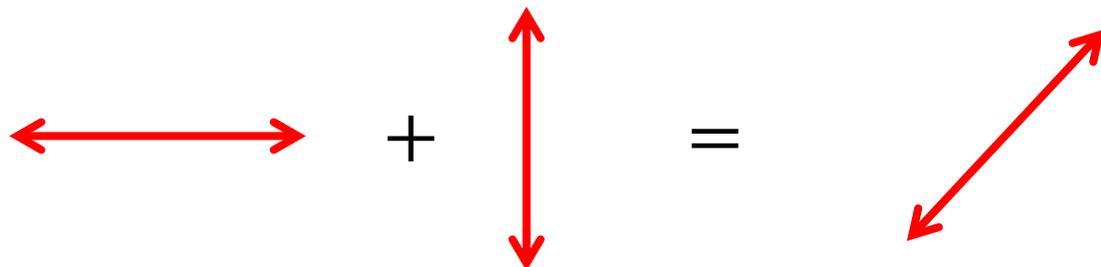


ファラデー回転

偏光を考える上での注意

偏光の重ね合わせ

異なる領域からの光が解像できず、足し合される場合

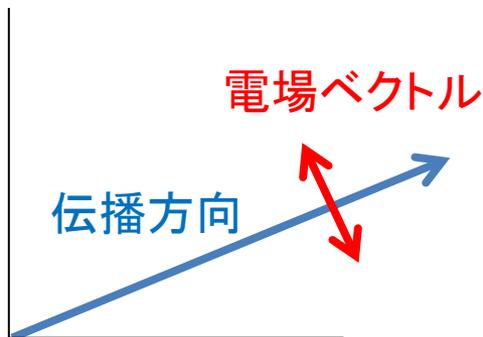
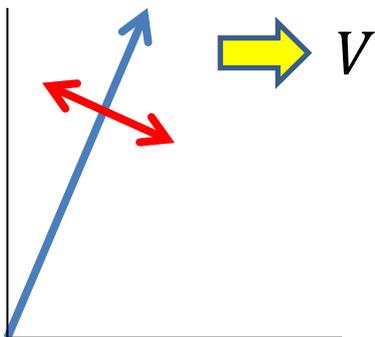


これは間違い

= 無偏光

これが正解

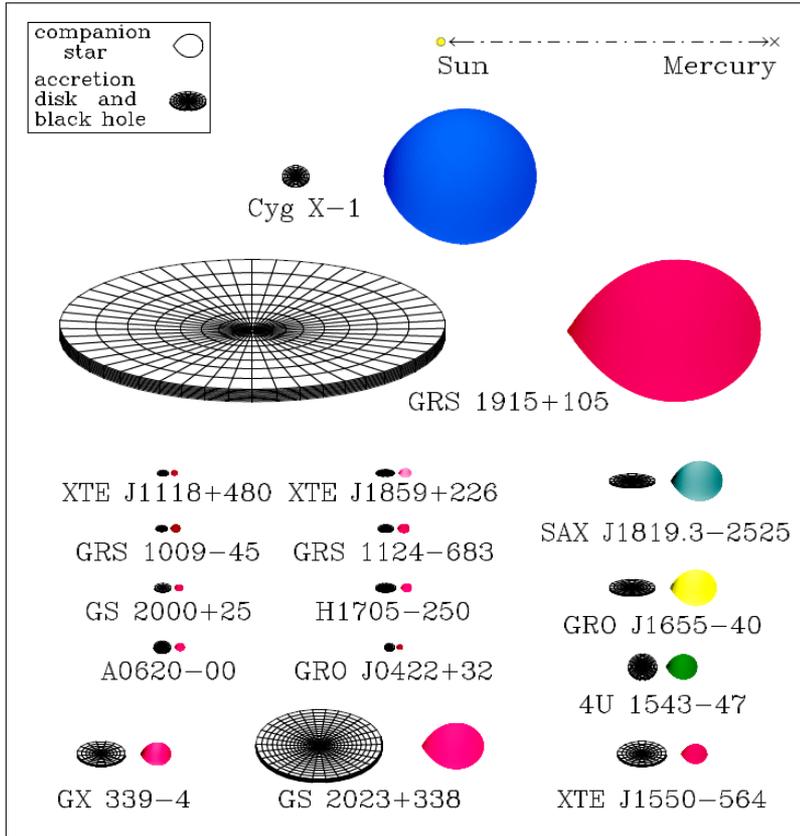
偏光のローレンツ変換



- 偏光面が回転
- 偏光度は不変

ブラックホール候補天体

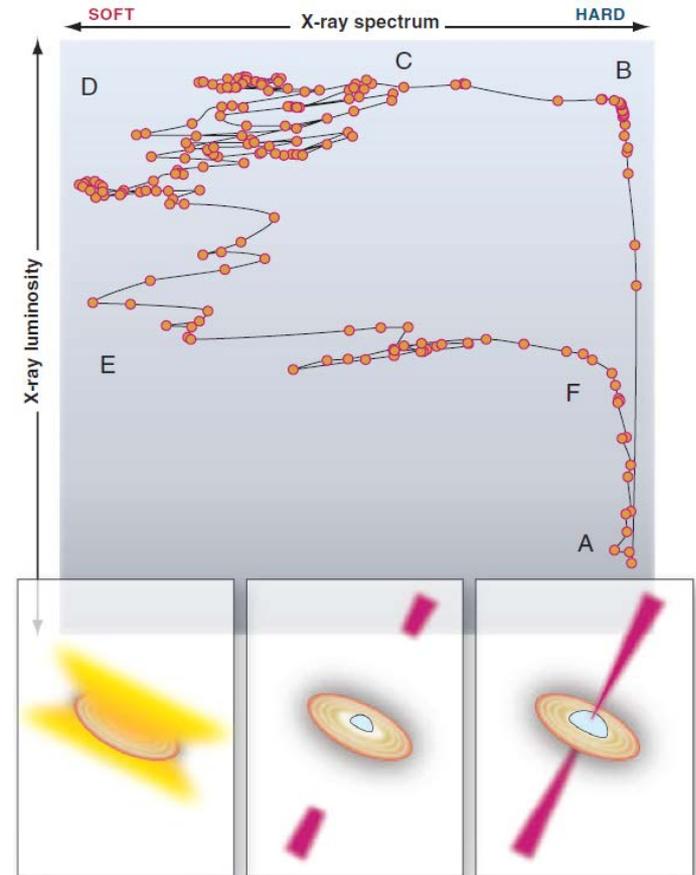
Black Hole Binaries in the Milky Way



(Remillard & McClintock 2006)

ハードネス

ルミノシティ

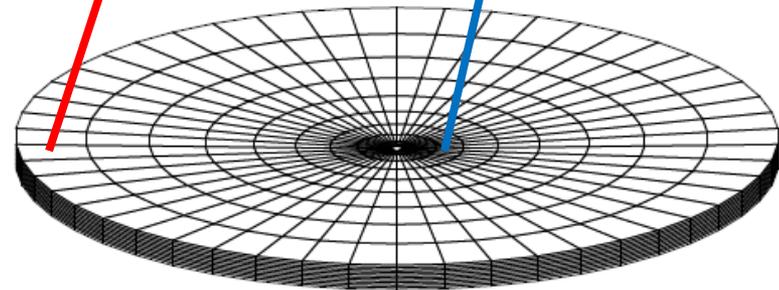
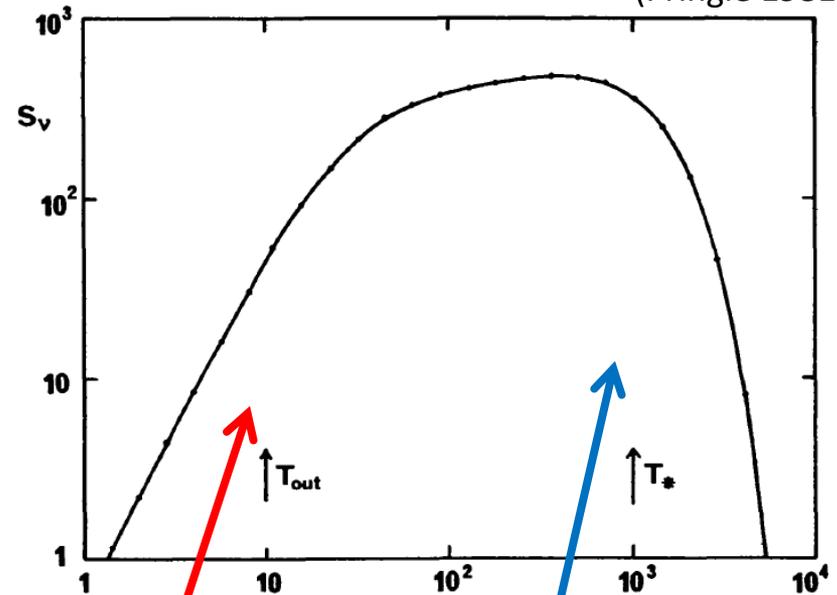
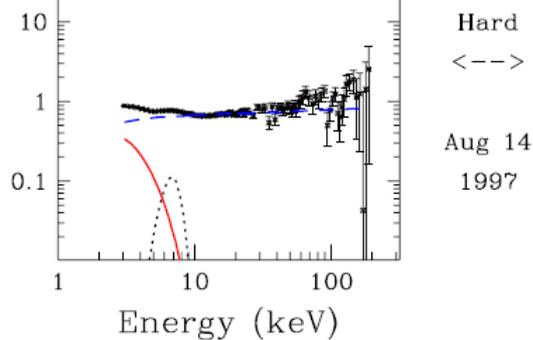
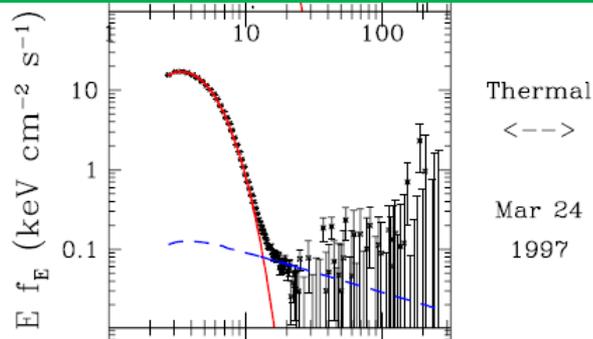
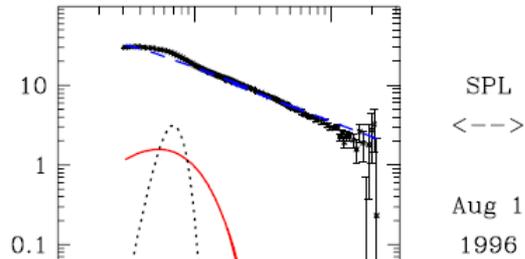


(Fender & Belloni 2004; 2012)

Thermal (high/soft) Stateに注目

GRO J1655-

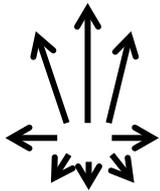
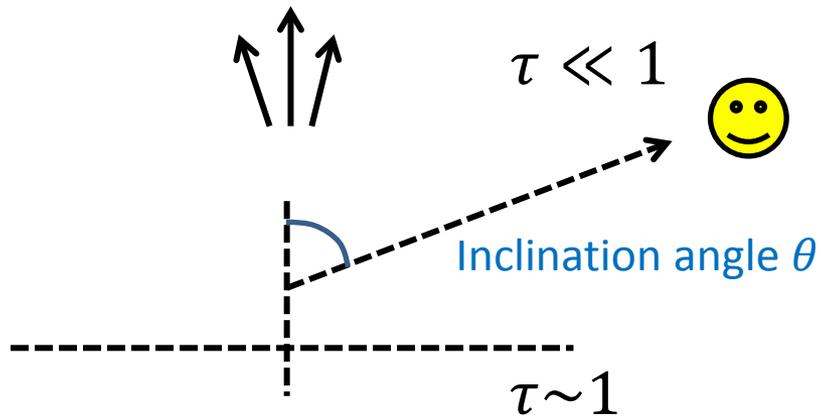
(Pringle 1981)



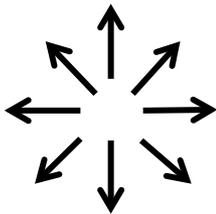
$$kT_* \sim 1 \text{ keV}$$

BH時空の検証

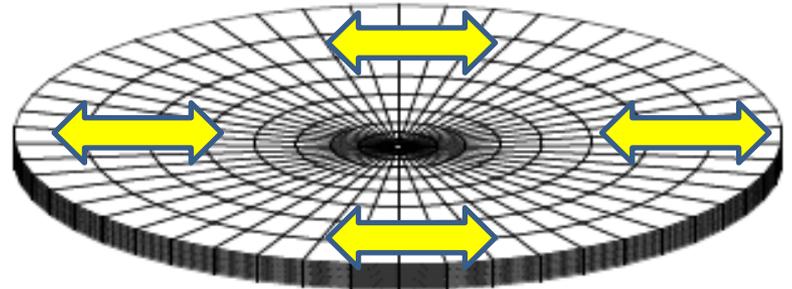
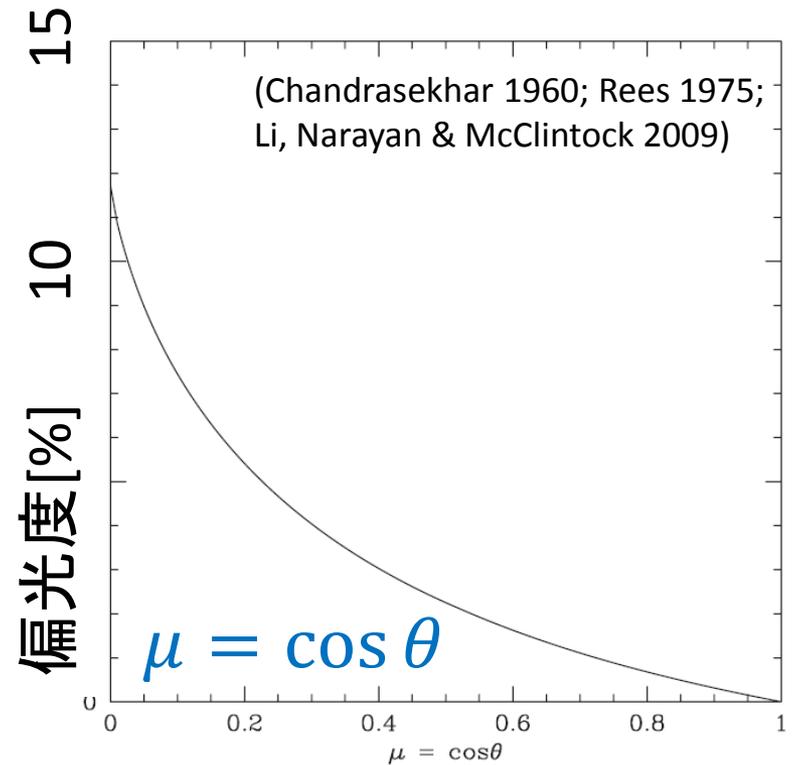
降着円盤からの偏光



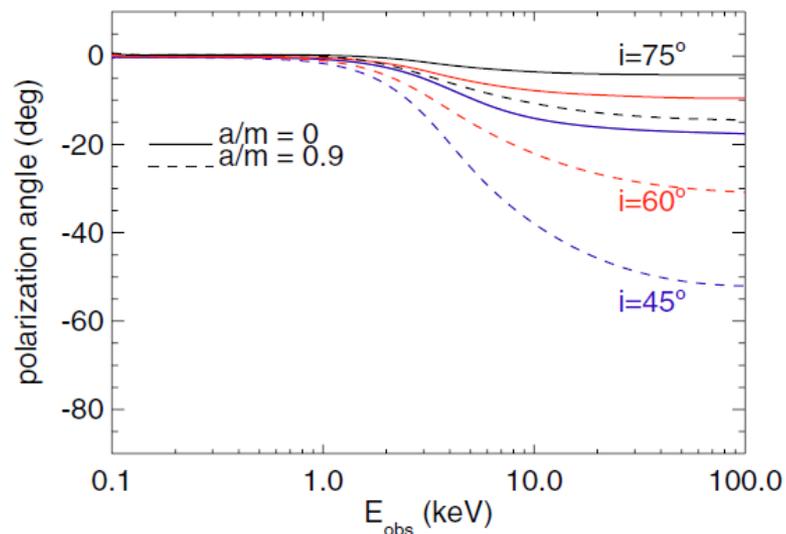
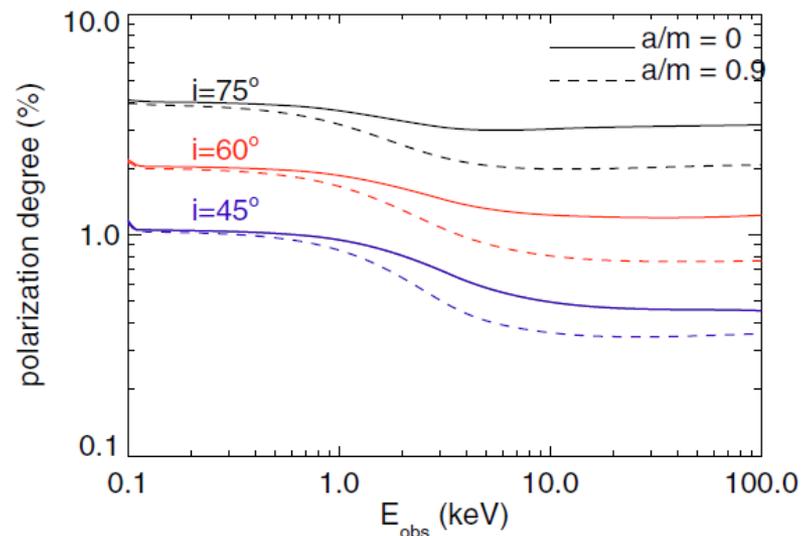
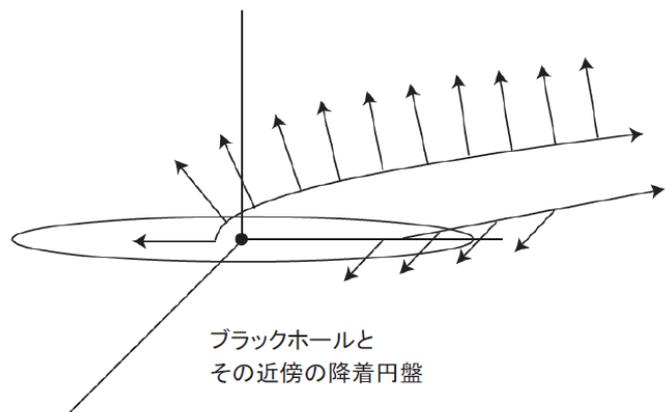
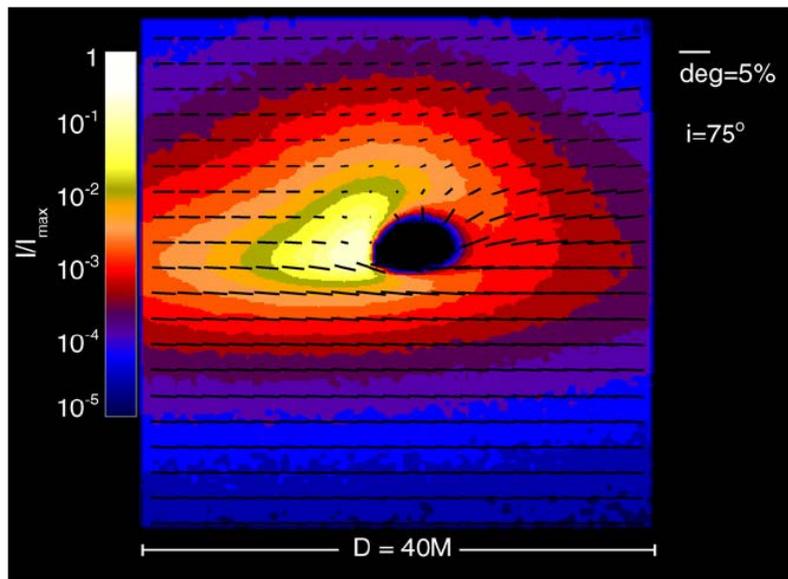
吸収より電子散乱
が支配的



$\tau \gg 1$

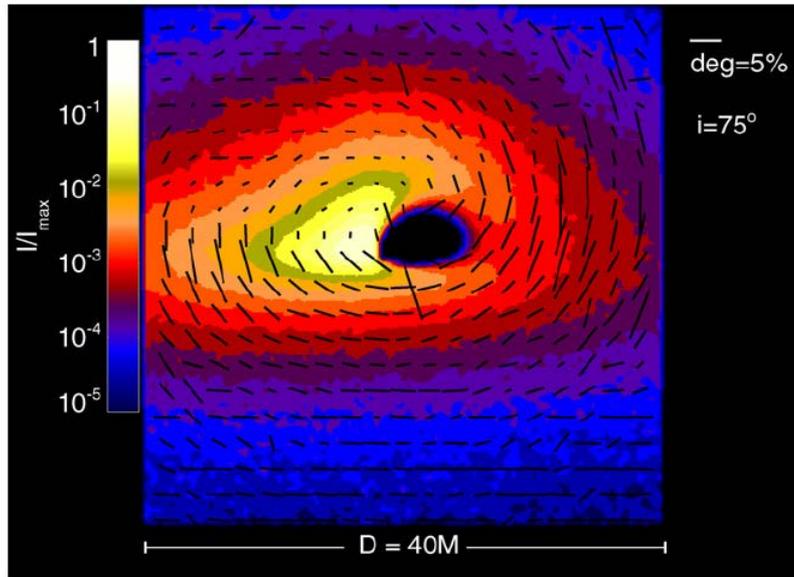


一般相対論的効果



より正しい計算： 出戻り光の効果

(Schnittman & Krolik 2009)



- 高エネルギーではReturning radiationの偏光が重要

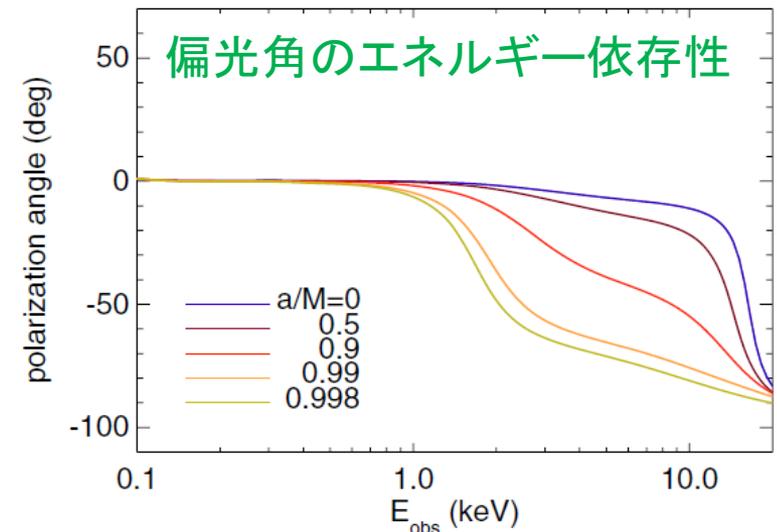
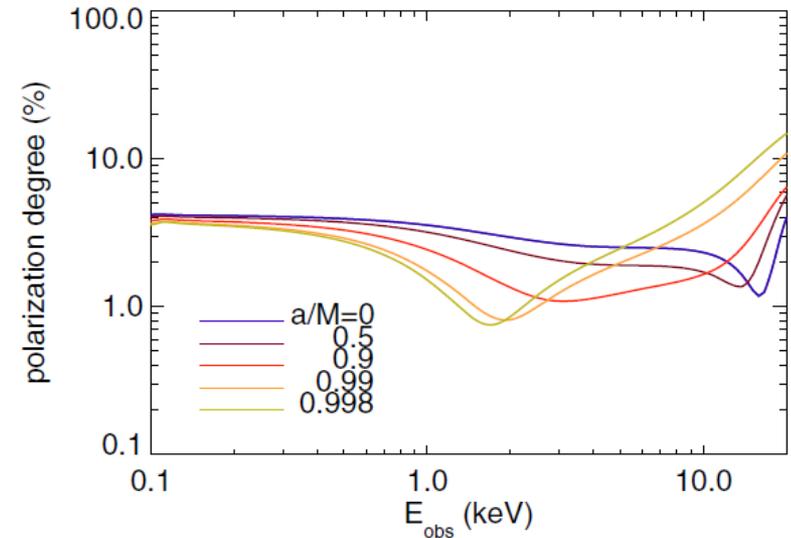
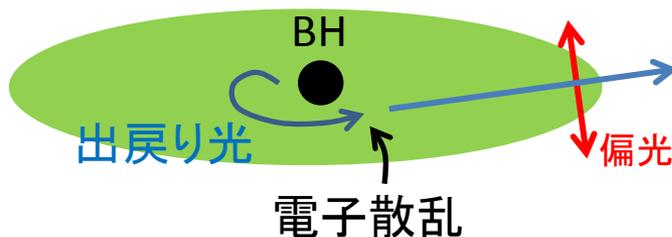
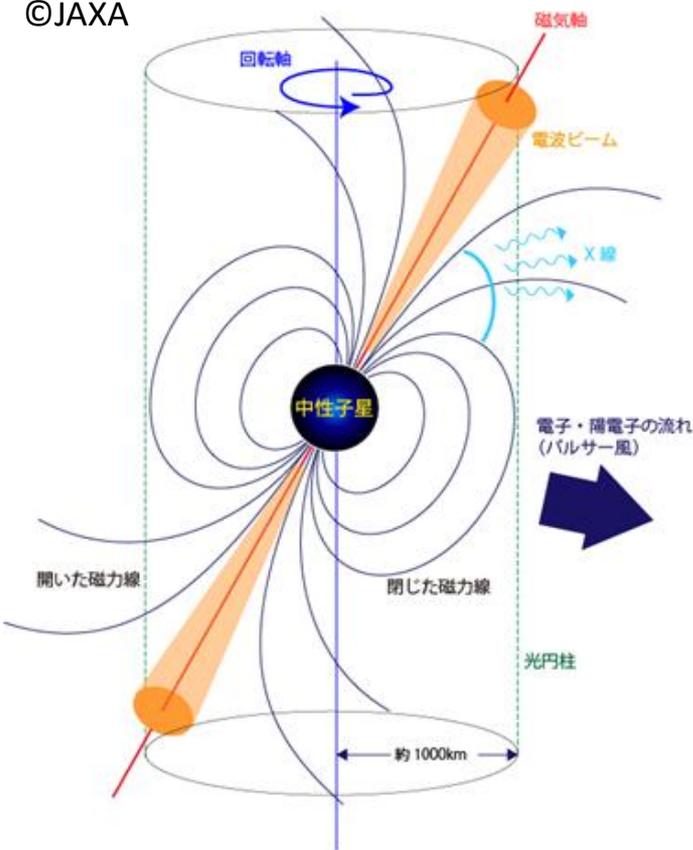


Figure 7. Polarization degree and angle for a range of BH spin parameters. All systems have inclination $i = 75^\circ$, BH mass $10 M_\odot$, luminosity $L/L_{\text{Edd}} = 0.1$, and Novikov–Thorne radial emission profiles.

中性子星

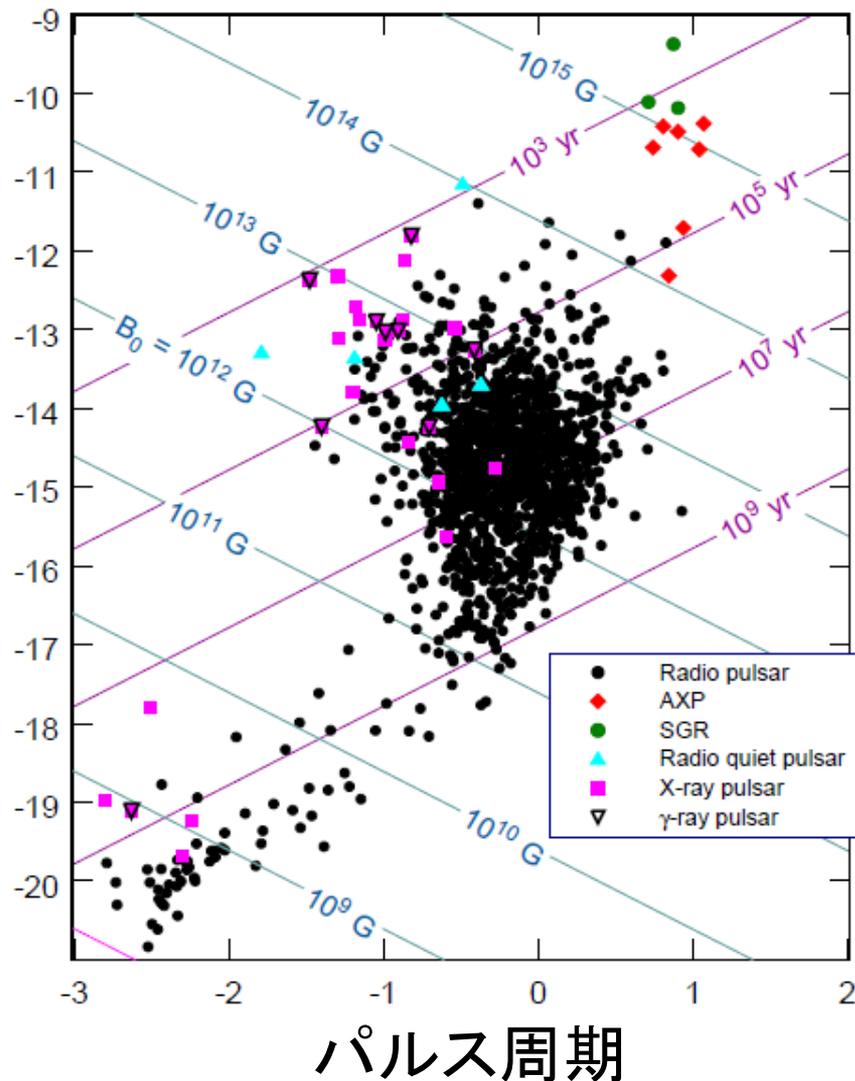
©JAXA



$$I\Omega\dot{\Omega} \sim \frac{B_*^2 R_*^6 \Omega^4}{6c^3}$$

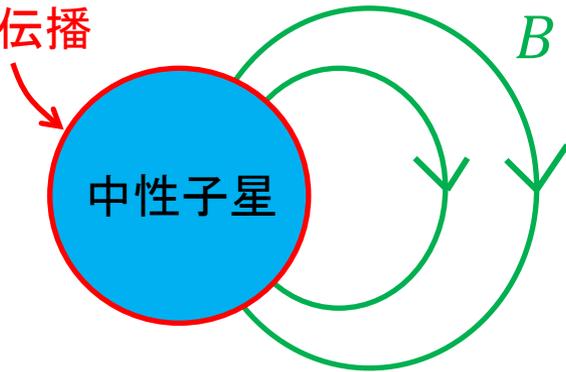
磁気双極子
モデル

パルス周期の時間変化率



中性子星の熱放射の偏光

表面大気中の伝播



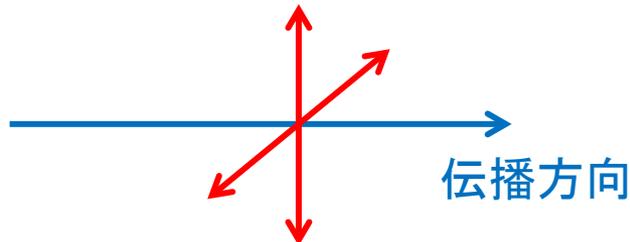
電子のサイクロトロンエネルギー

$$E_{ce} = \hbar \frac{eB}{m_e c} = 11.6 \left(\frac{B}{10^{12} G} \right) keV$$

媒質中を伝播する電磁波の基本モード

$$h\nu \ll E_{ce}$$

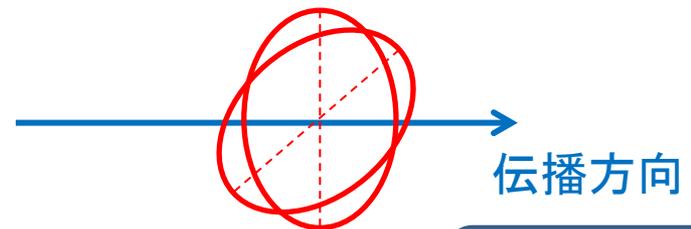
(中性子星近傍)



2つの直線偏光モード

$$h\nu \gg E_{ce}$$

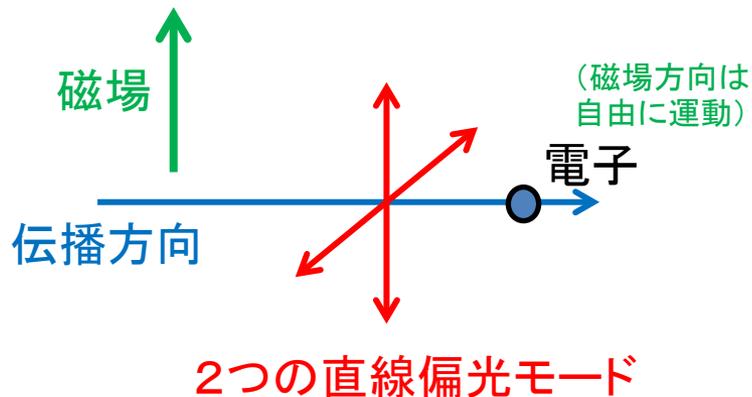
(e.g. 星間媒質)



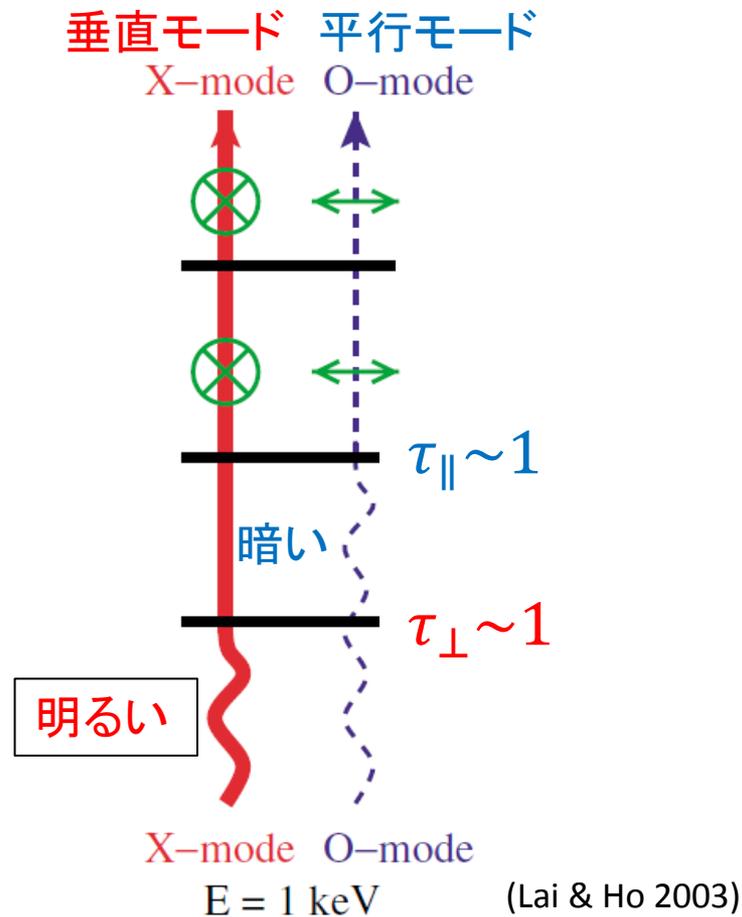
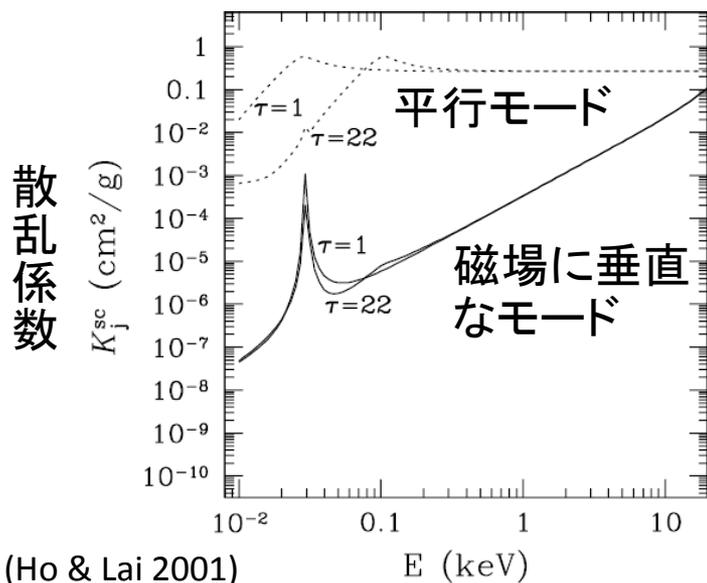
2つの円偏光モード

=ファラデー回転の原因

電子散乱の断面積



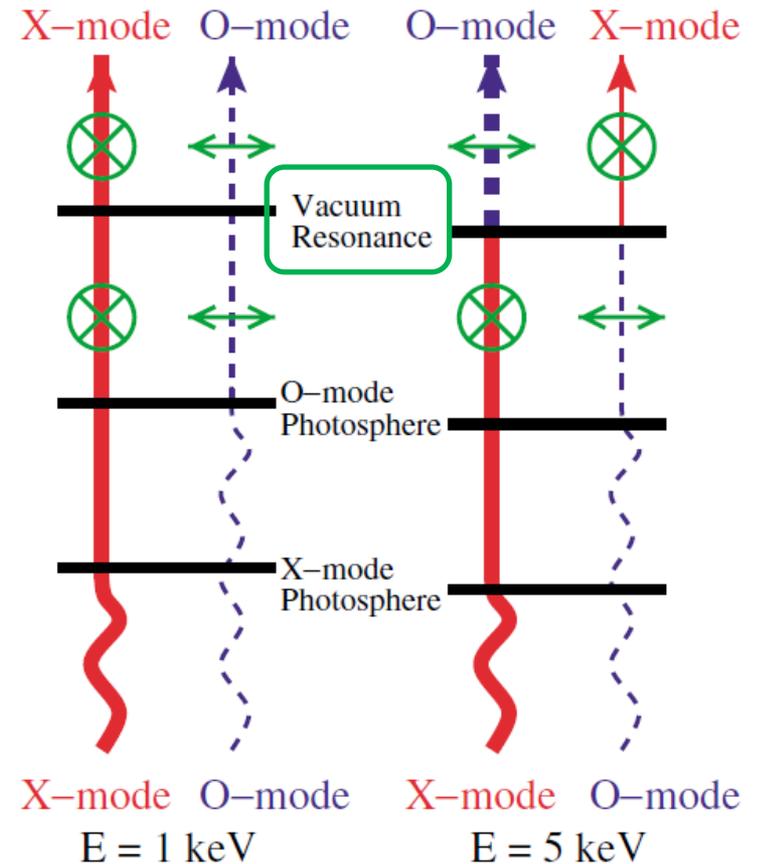
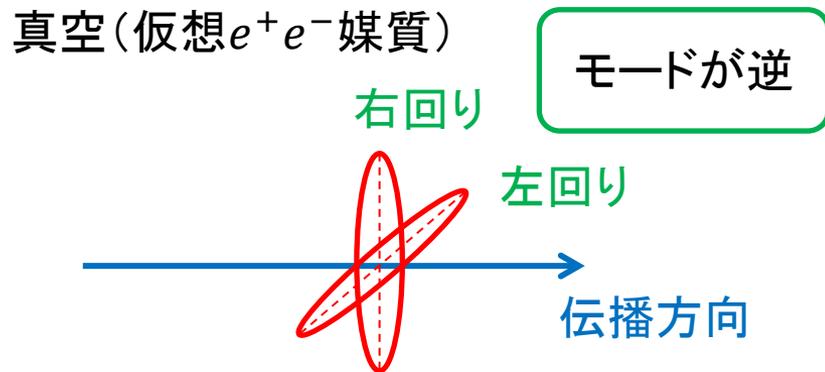
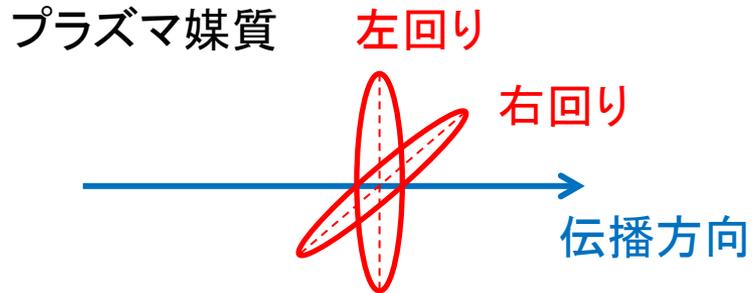
磁場に垂直なモードは散乱されにくい



Hotspotからの(熱的な)X線は
ほぼ100%の直線偏光

強磁場中の量子論の検証

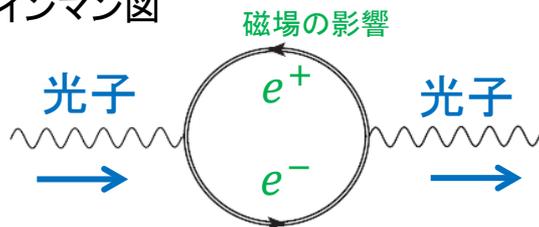
強磁場中を伝播する電磁波の基本モード

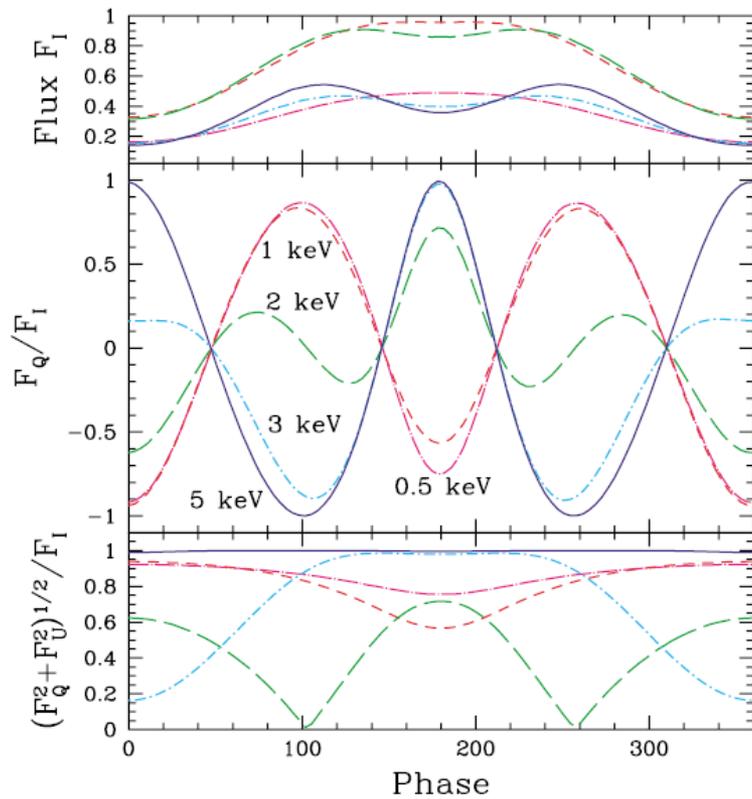


(Lai & Ho 2003)

高エネルギー側でモード変換
が起こる ($B \lesssim 7 \times 10^{13} G$)

ファインマン図

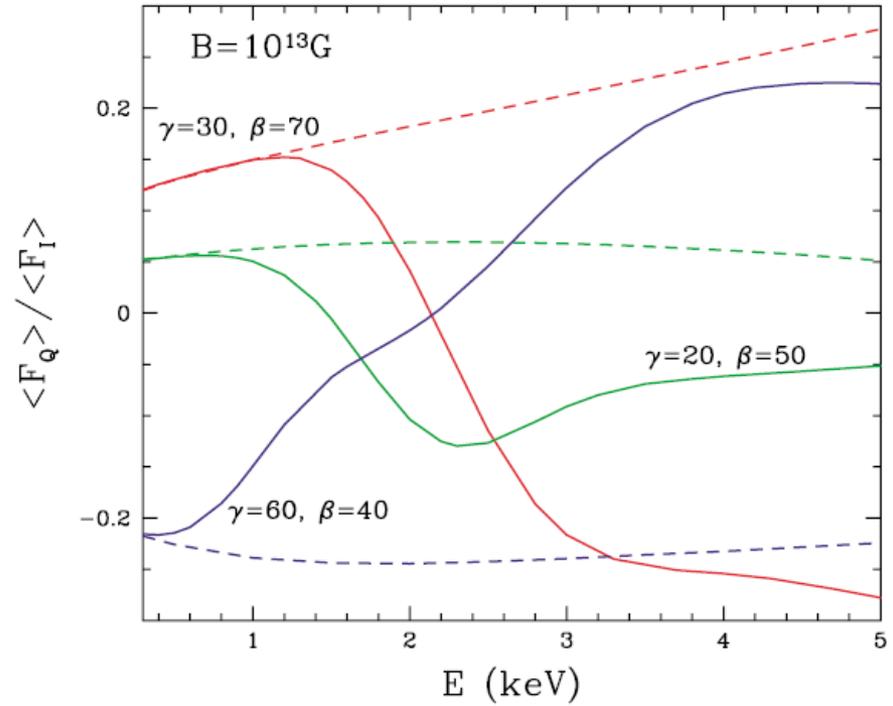




(Lai & Ho 2003; Lai et al. 2009)

Phase-averaged

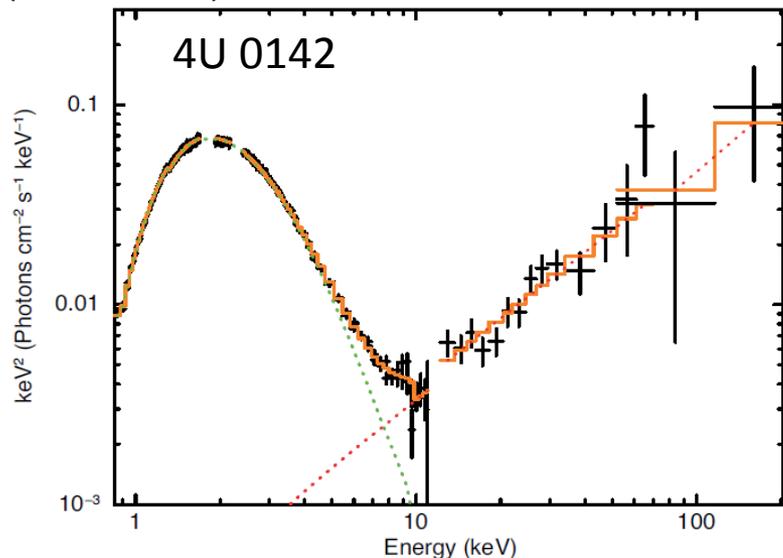
偏光角がエネルギー依存



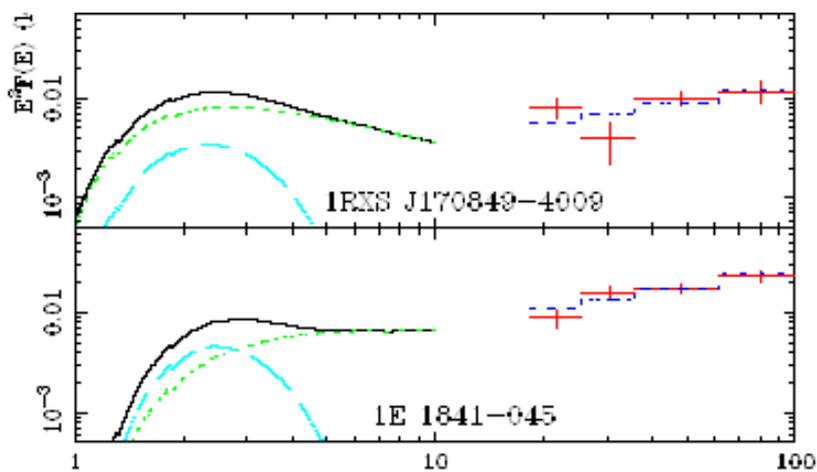
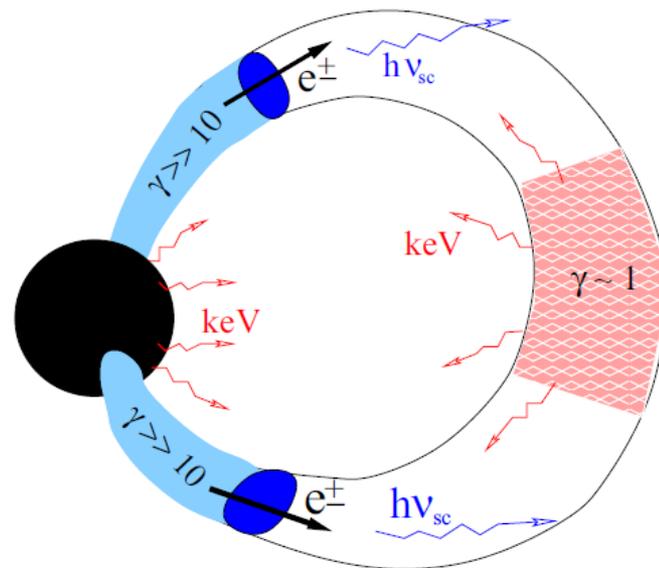
- 候補は非熱的成分の無い中性子星
 $10^{12} < B < 7 \times 10^{13} G, kT \sim 0.3 keV$
- 素粒子物理にインパクト
- レーザー実験も狙うテーマ
- Photon – axion oscillation?

Magnetars: 非熱的成分

(Enoto+ 2011)



(Beloborodov 2013)



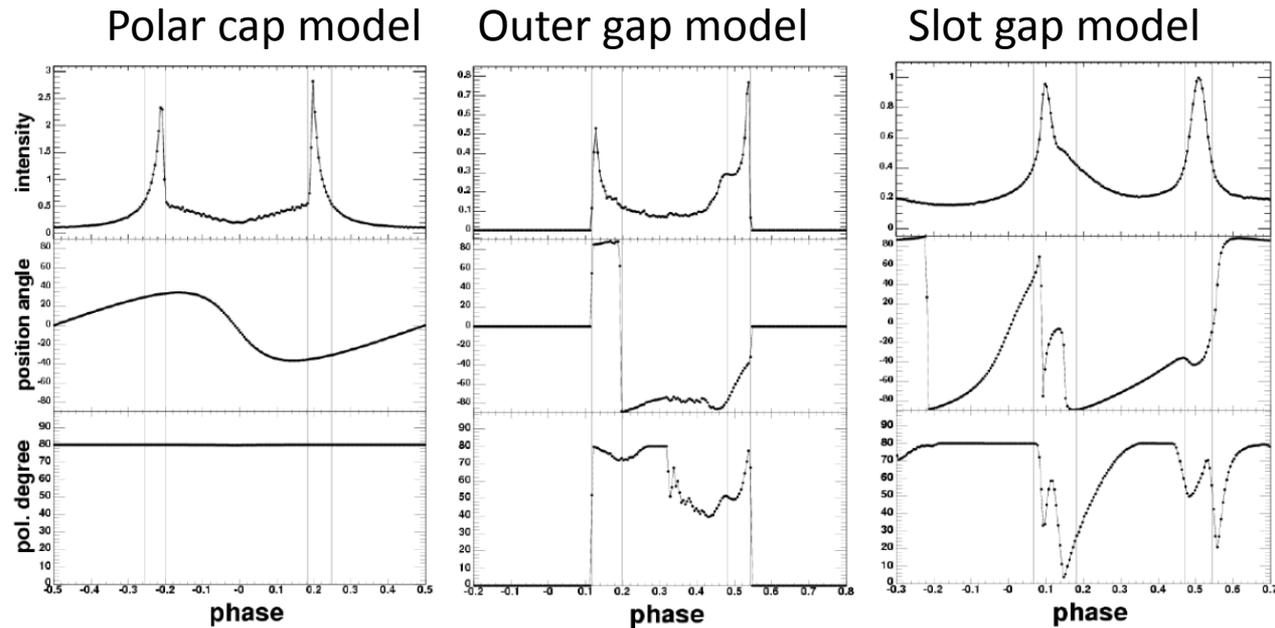
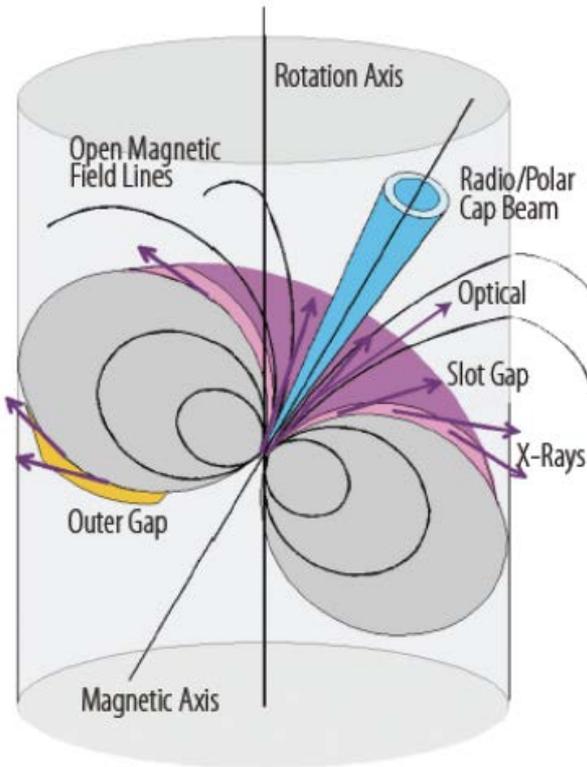
(Gotz+ 2006)

Energy (keV)

- 大気加熱 \Rightarrow 垂直モードが卓越しない可能性
- 磁気圏での電子共鳴散乱 \Rightarrow 偏光状態の変化
- 議論は収束していない

放射機構： 回転駆動パルサー

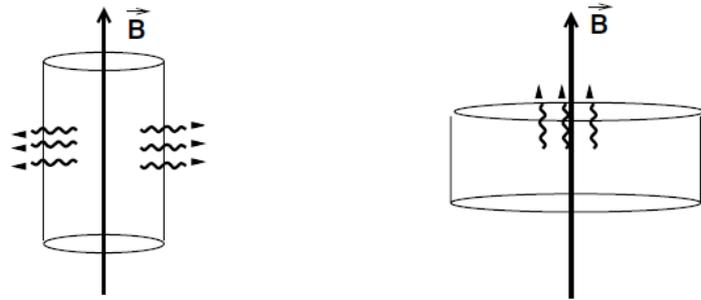
パルス放射



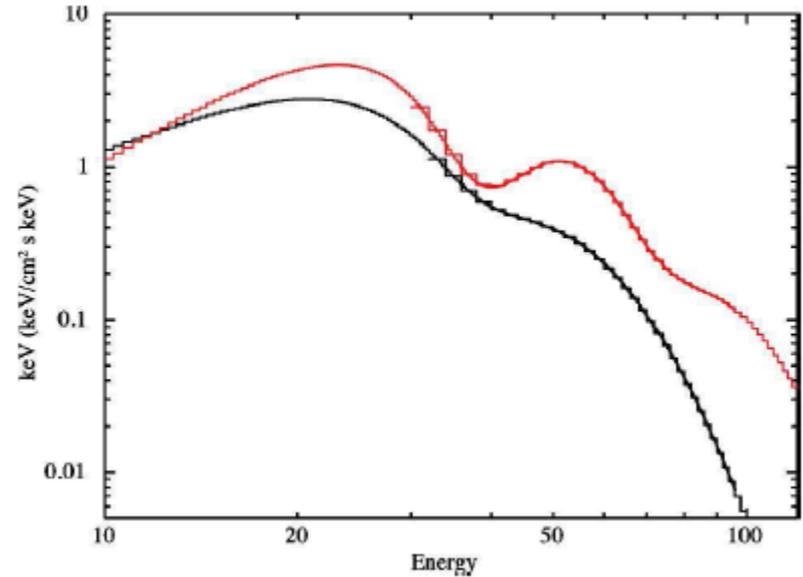
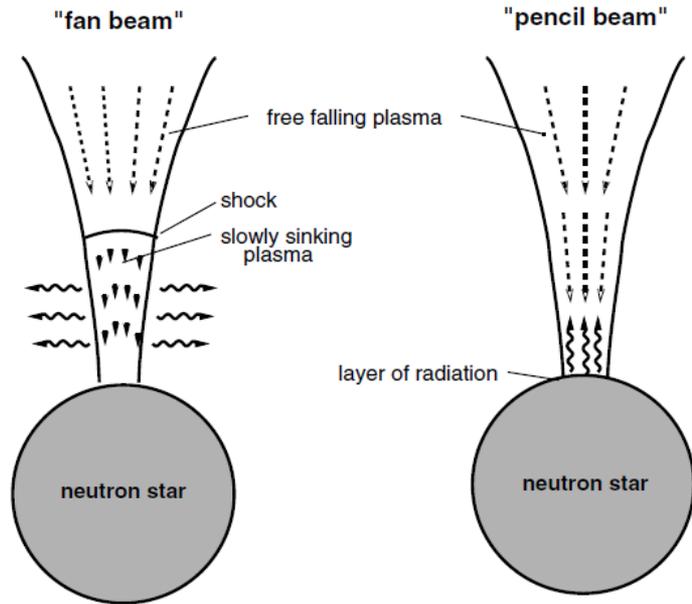
(Daugherty & Harding 1996; Romani & Yadigaroglu 1995; Dyks & Rudak 2003)

- X線パルスの放射機構
- 磁気圏プラズマのエネルギー分布

放射機構：降着駆動パルサー



(Enoto+ 2008)



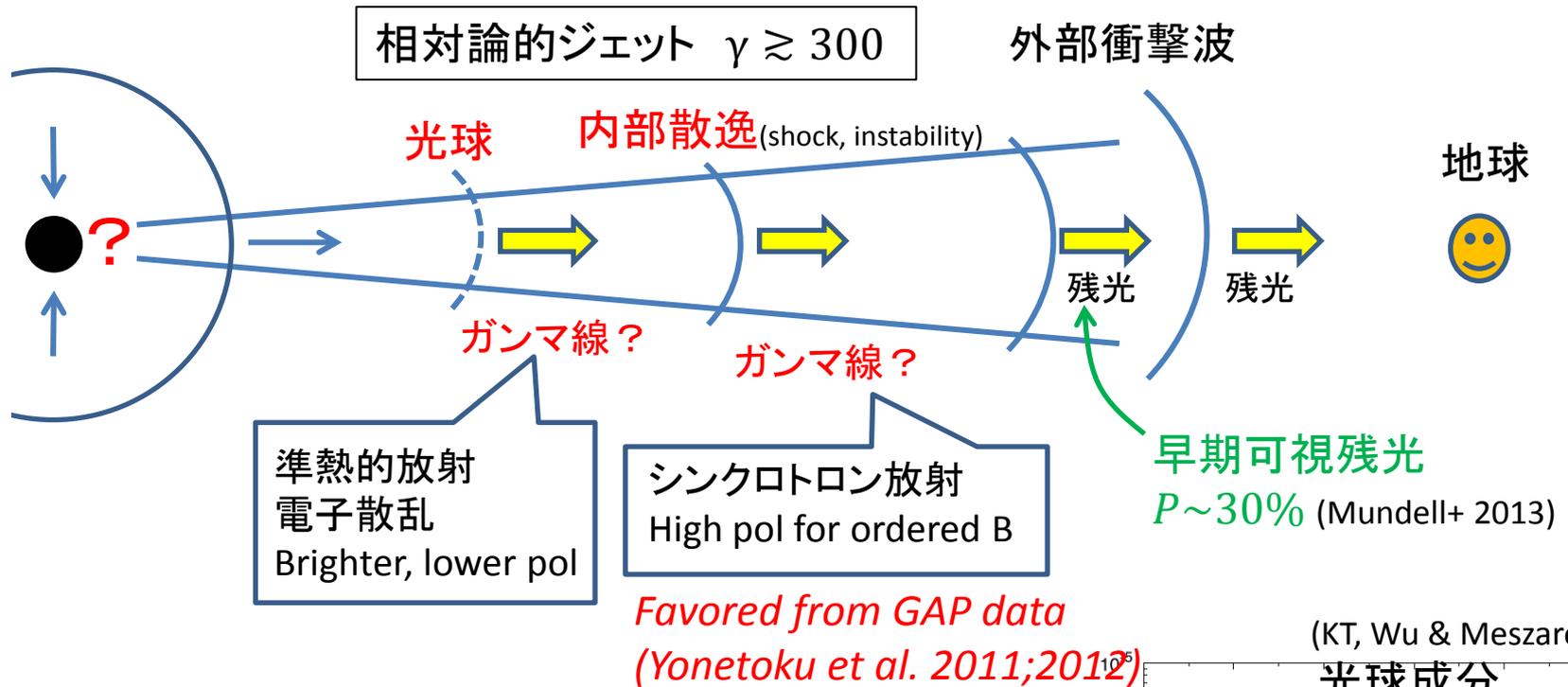
- 共鳴吸収線周辺の偏光スペクトル ⇒ 輻射輸送の物理の検証

(Kaminker, Pavlov & Shibano 1982)

(Schonherr+ 2007)

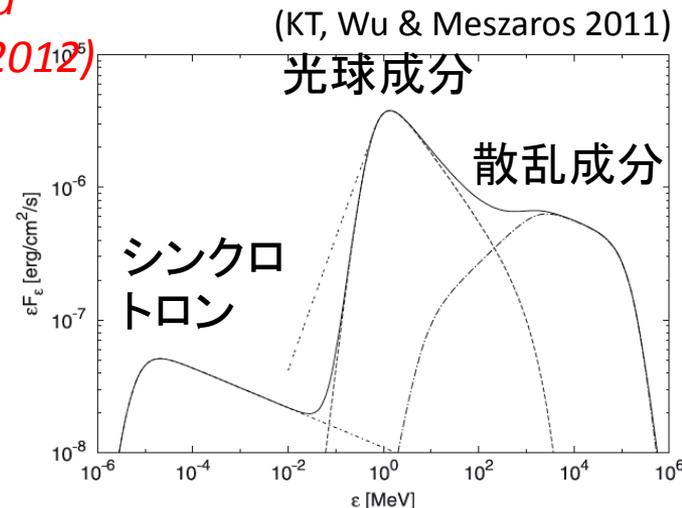
磁場構造も解明

放射機構：ガンマ線バースト

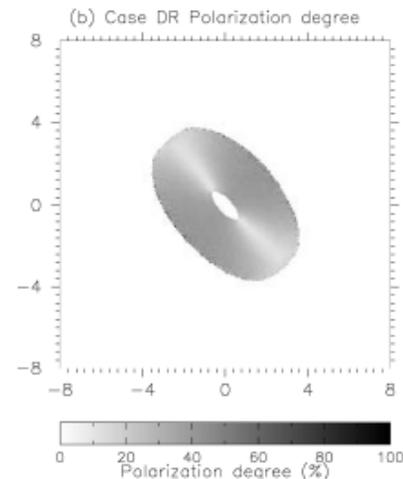
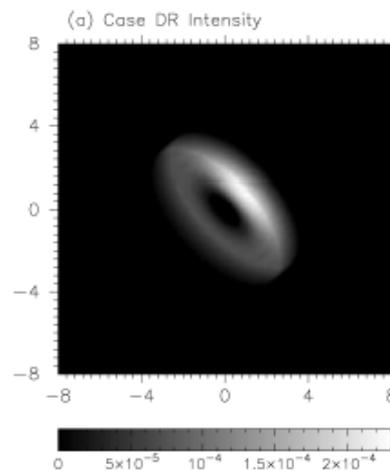
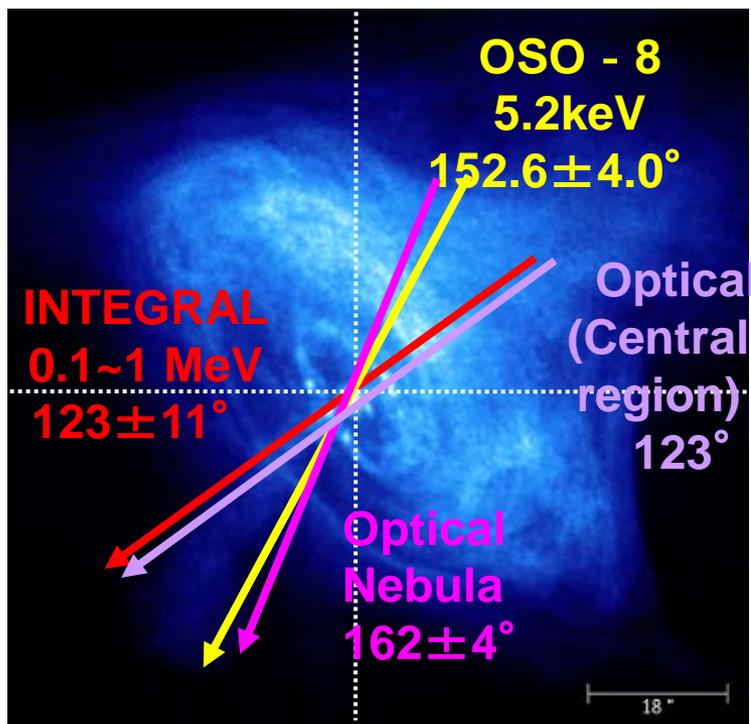


- ガンマ線放射機構の確定
- 相対論的ジェット (熱的か電磁的か)
- 可視偏光データとの関係
- GeV ガンマ線データとの関係
- 偏光度とredshiftの関係 (CPT破れなど)

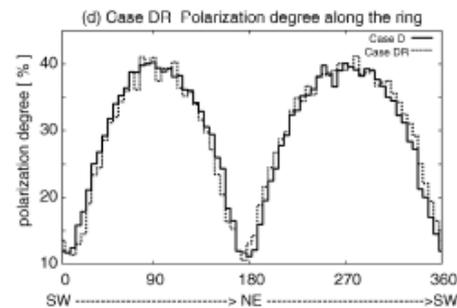
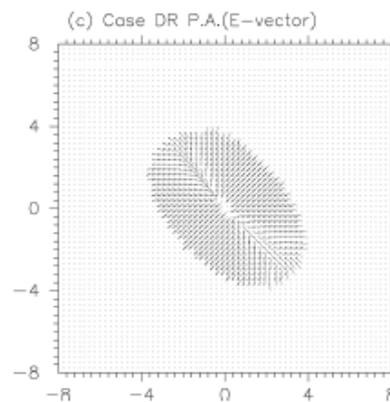
(KT et al. 2012)



磁場構造：かに星雲



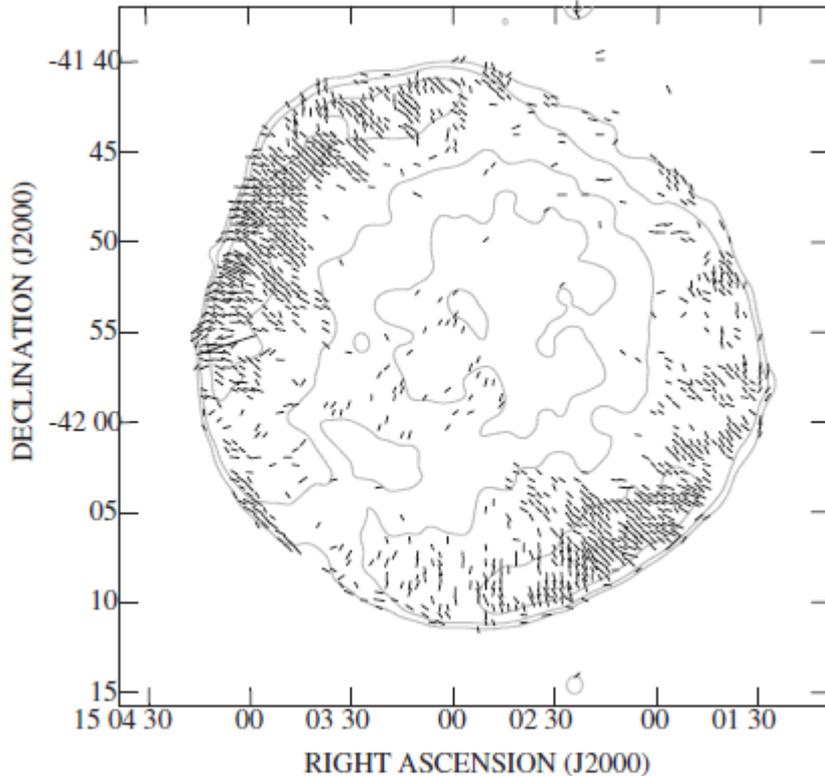
(Nakamura & Shibata 2007)



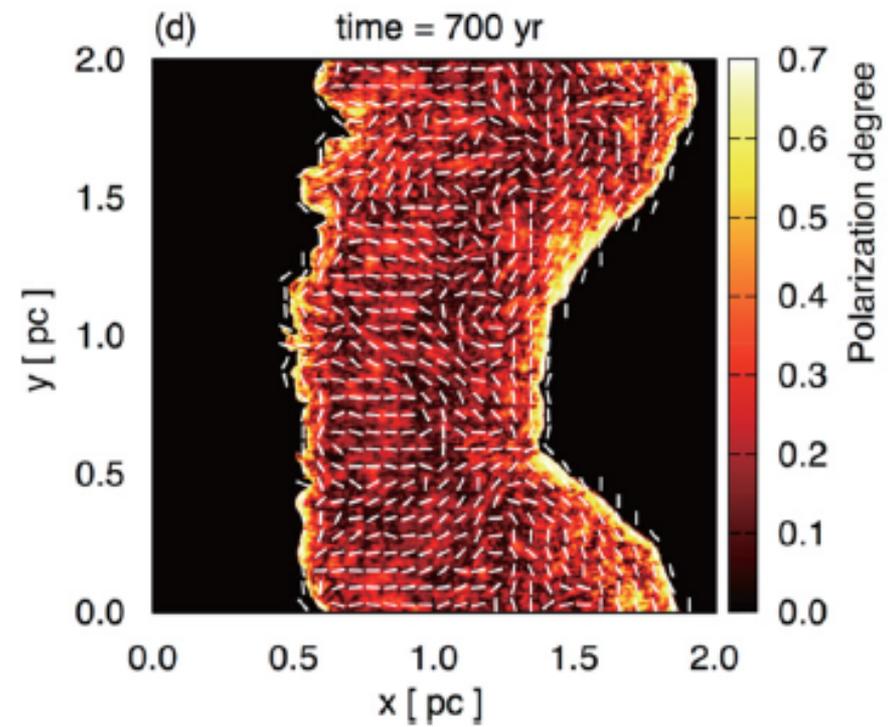
- トロイダル磁場構造の検証
- 乱流磁場成分の割合 ⇒ パルサー風加速、粒子加速機構
- 電波、可視、X線の偏光の比較

磁場構造： 超新星残骸

SN 1006: 電波偏光 (Reynoso+ 2013)



MHDシミュレーション

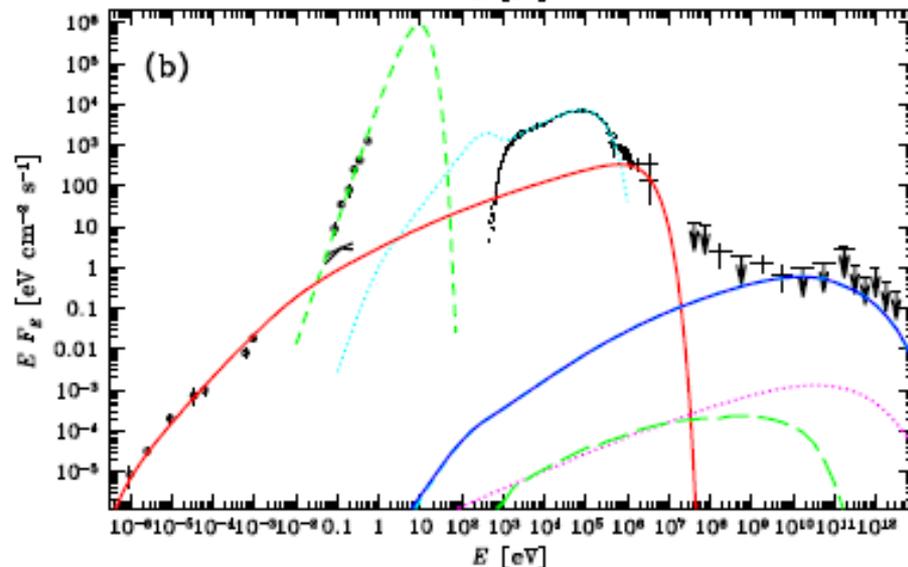
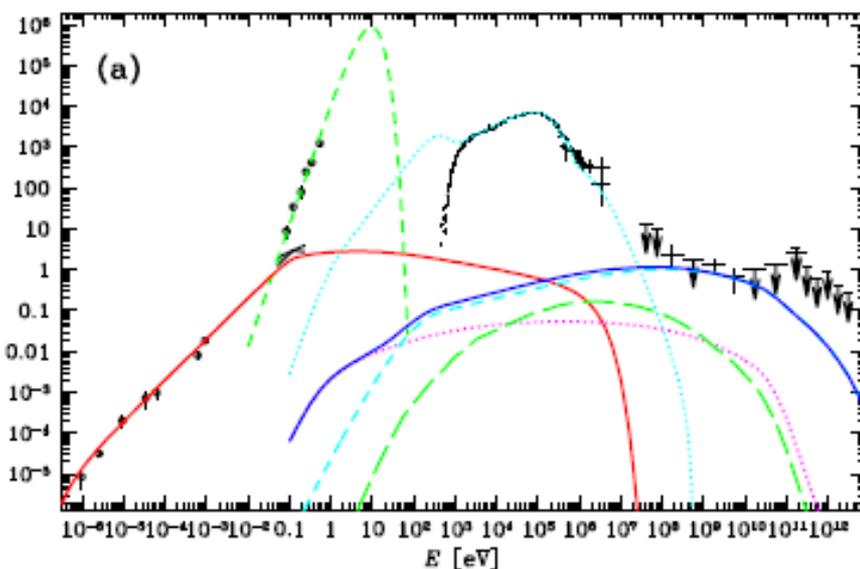
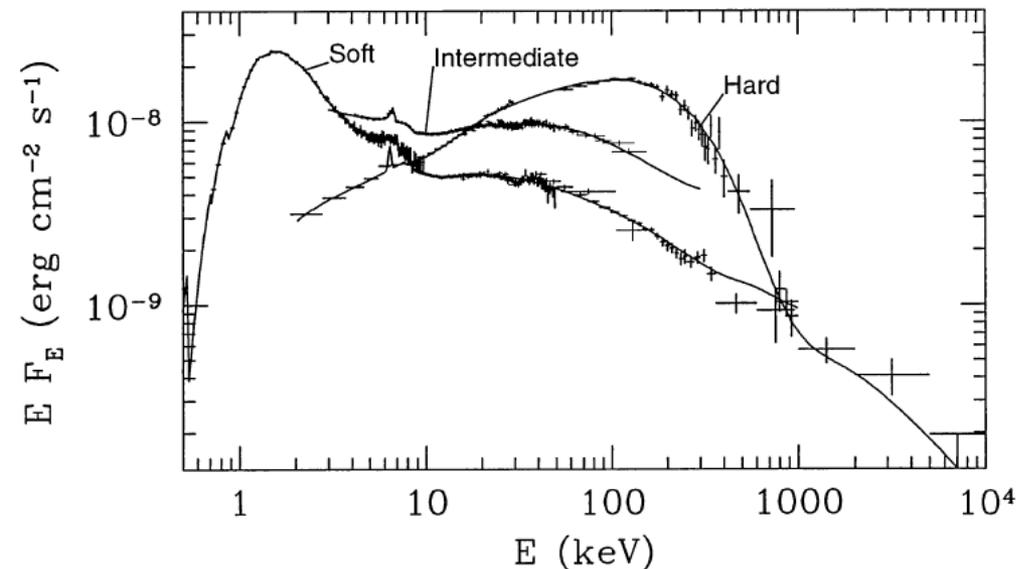


(Inoue, Shimoda, Ohira & Yamazaki 2013)

- 磁場増幅の物理 (プラズマ過程かMHD過程か)
- 電波、可視、X線の偏光の比較

Cyg X-1

(Zdziarski 2000; 2014)



- **軟ガンマ線偏光:** ジェット成分の寄与の有無に決定的
⇒ Astro-H SGD
- **X線偏光:** 逆コンプトン過程の物理の検証

Summary

- X線・ γ 線偏光のサイエンス
 - 一般相対論の検証
 - 強磁場中の量子論の検証
 - パルサーの放射機構、磁気圏プラズマ診断
 - ガンマ線バーストジェット of 駆動機構
 - 粒子加速現場(Crab Nebula, SNR)の磁場構造
- その他
 - 磁場構造 : Solar Flares, Blazars, ...
 - 物質構造 : Seyfert II, Galactic Center, ...

Backup Slides

モデル依存性

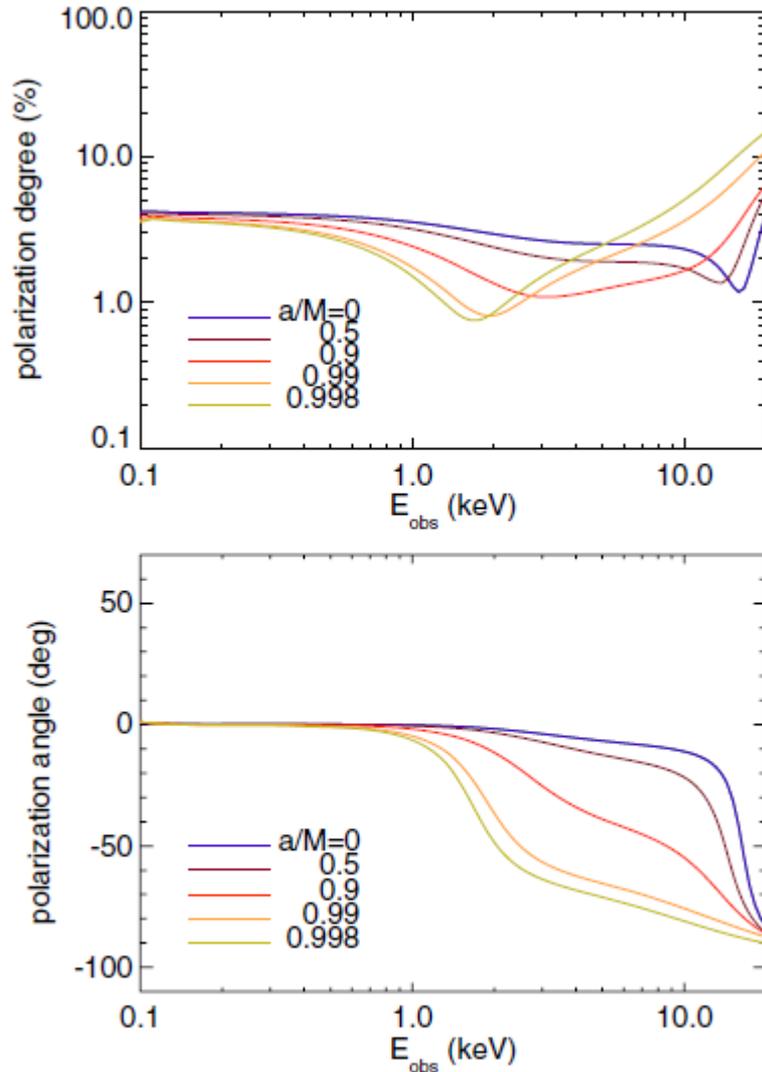


Figure 7. Polarization degree and angle for a range of BH spin parameters. All systems have inclination $i = 75^\circ$, BH mass $10 M_\odot$, luminosity $L/L_{\text{Edd}} = 0.1$, and Novikov–Thorne radial emission profiles.

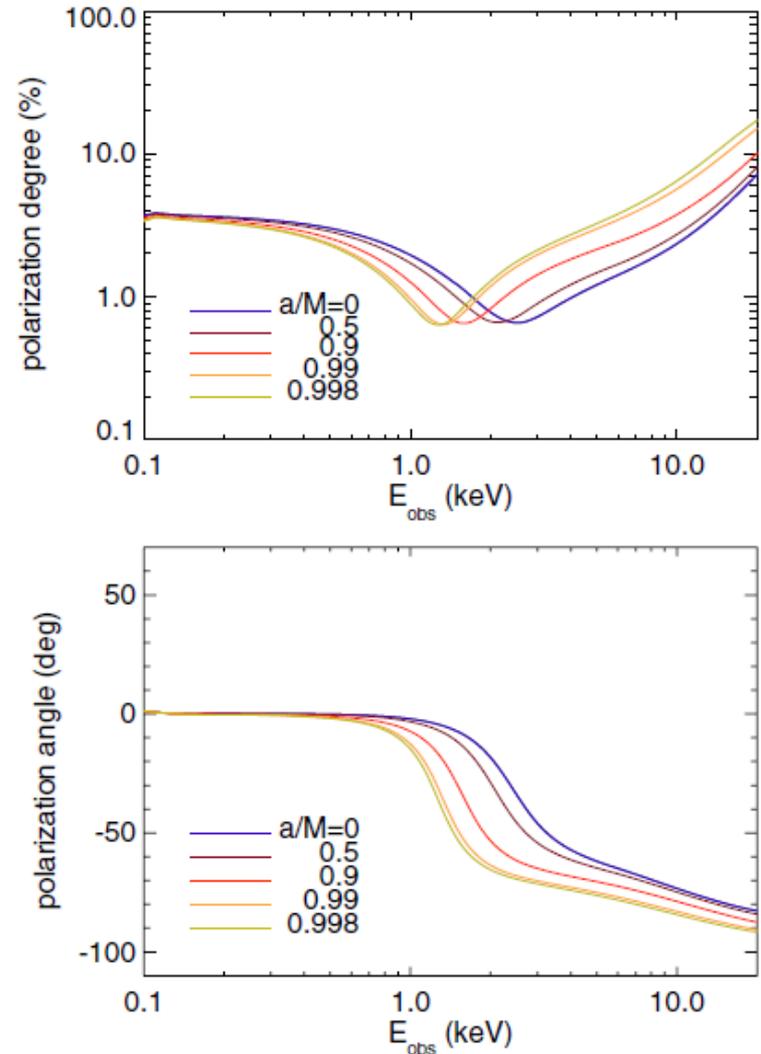
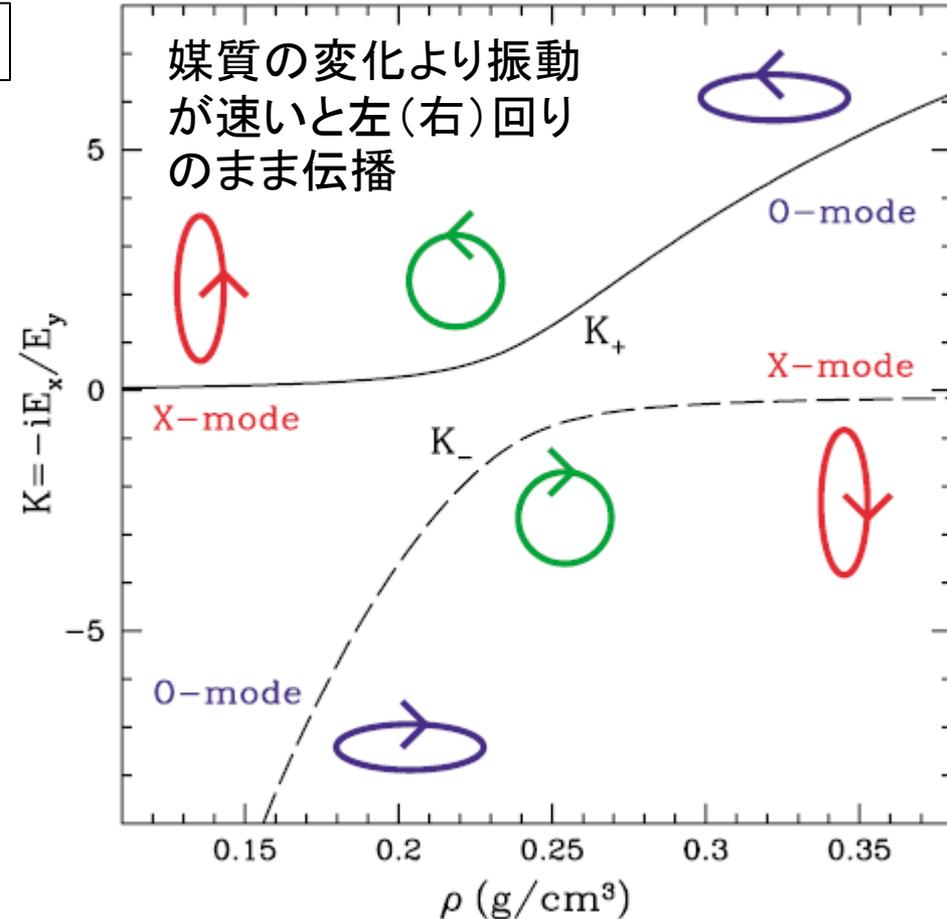
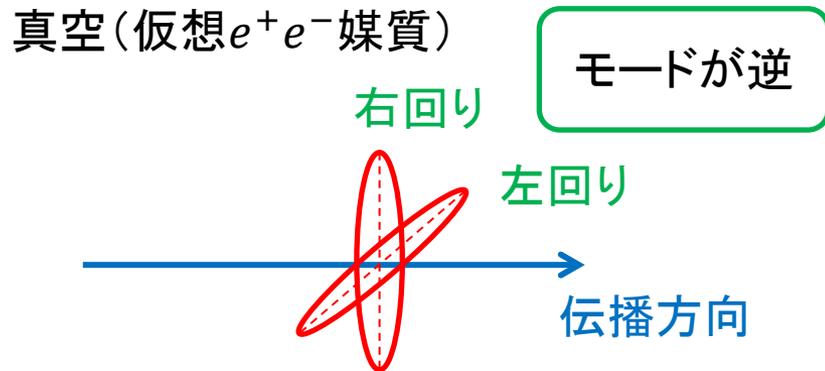
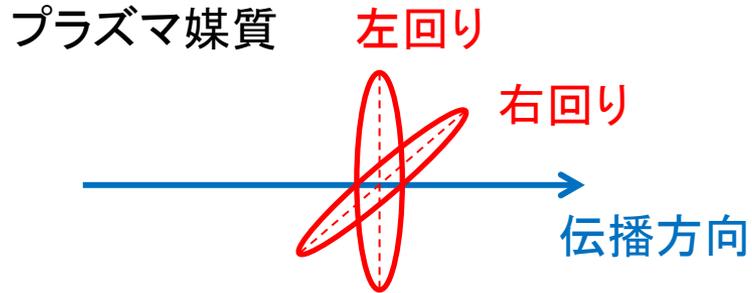


Figure 8. Same as Figure 7 but for a power-law emissivity profile $\mathcal{F}(R) \sim R^{-3}$ all the way to the horizon.

モード転換の条件

強磁場中を伝播する電磁波の基本モード

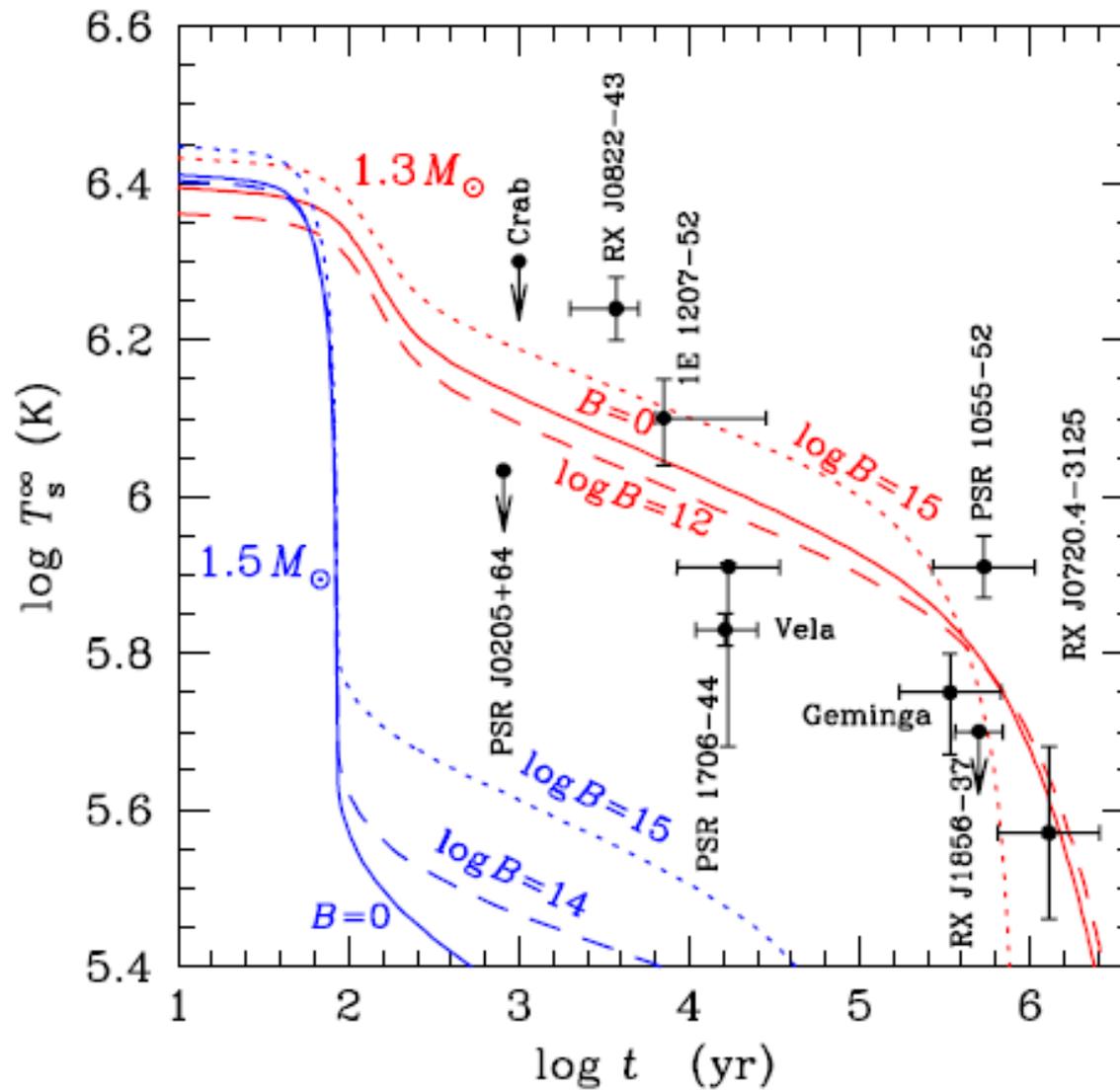


$$E \gtrsim E_{\text{ad}} = 2.52 (f \tan \theta_{kB} |1 - u_i|)^{2/3} \left(\frac{1 \text{ cm}}{H_\rho} \right)^{1/3} \text{ keV},$$

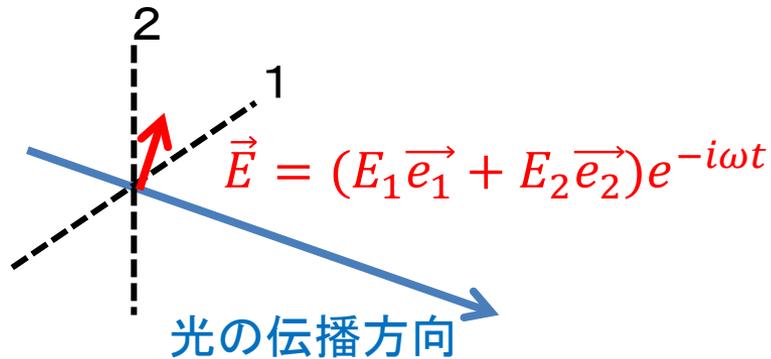
$$u_i = (E_{Bi}/E)^2$$

$$H_\rho = |dz/d \ln \rho|$$

中性子星の温度変化



偏光とは



実際、 E_1, E_2 は時間変化する。
意味を持つのは時間相関量

$$\langle E_i E_j^* \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T E_i(t) E_j^*(t) dt$$

$$T \gg 1/\omega$$

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} I + Q & U + iV \\ U - iV & I - Q \end{pmatrix}$$