

超高光度X線源(ULX)周りの 光の伝播の研究

筑波大学 宇宙理論研究室 4年 井上壮大

Introduction

- ULX (Ultra-Luminous X-ray source)

$$10^{39} < L_X < 10^{41} (\text{erg/s})$$

Off nuclear (AGNでない)

恒星質量BHのエディントン光度

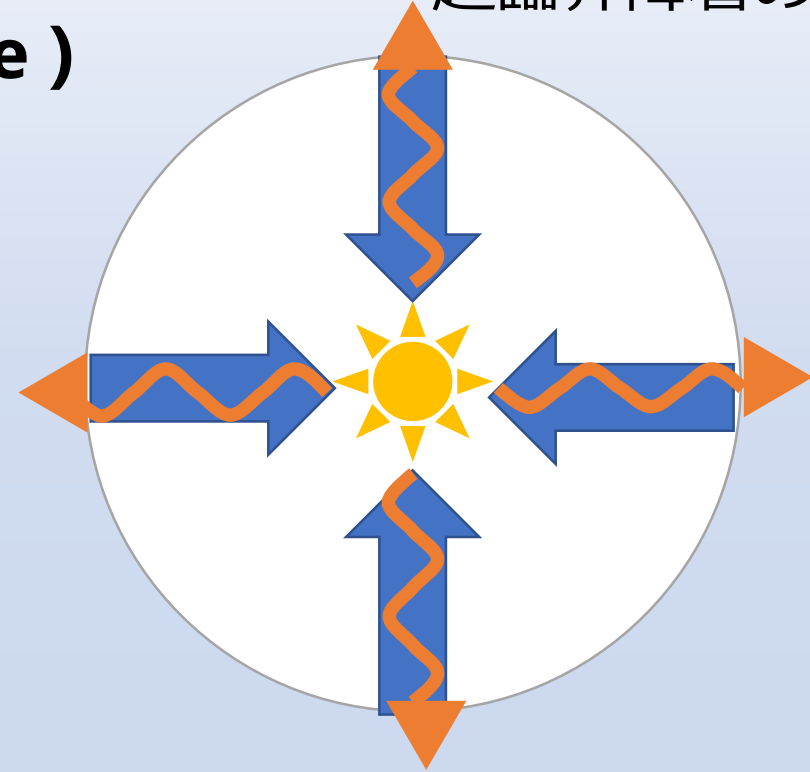
$$L_{\text{Edd}} \simeq 10^{38} (\text{erg/s})$$

を超えている



恒星質量BH×超臨界降着 or 中間質量BH×亜臨界降着

超臨界降着のイメージ図

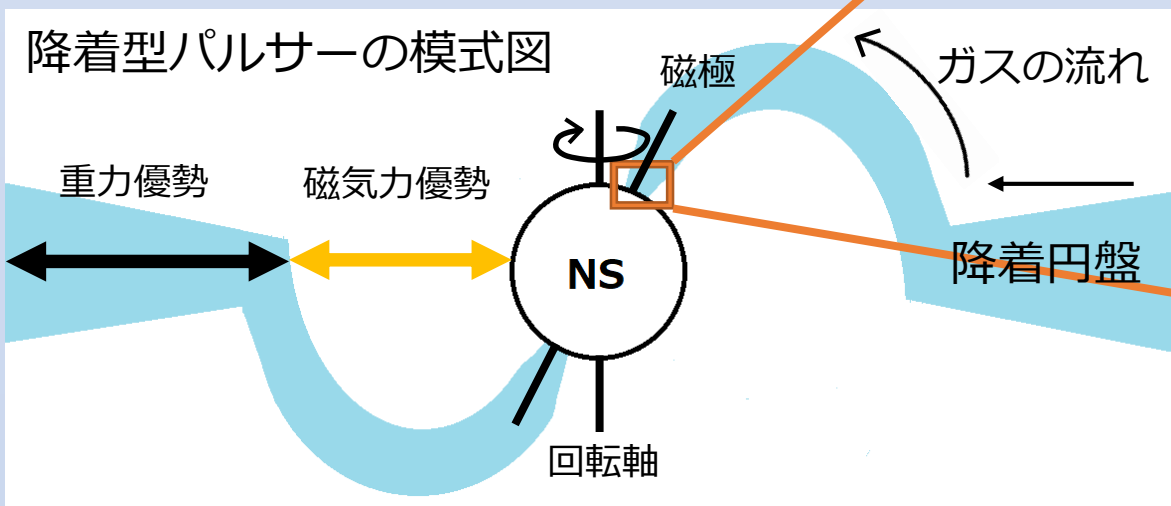


輻射圧 > 重力での降着

Introduction

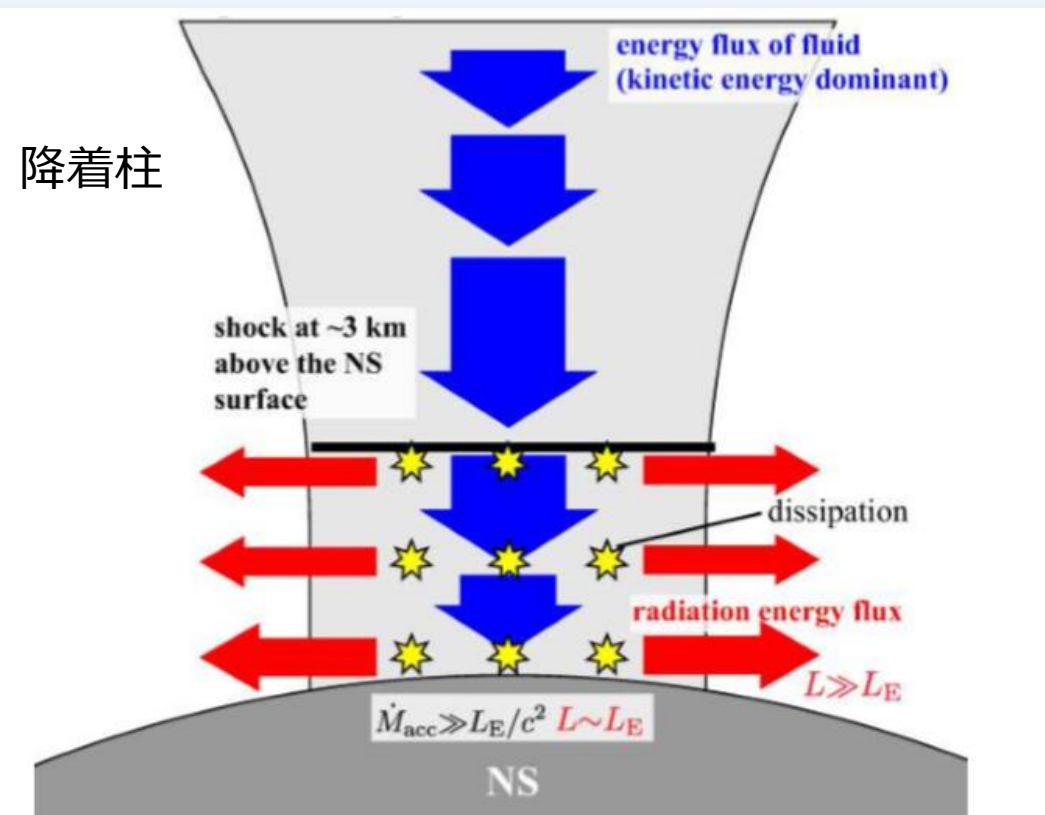
• ULX pulser の発見

M82 X-2(おおぐま座)の観測
(Bachetti et al. 2014)



「磁極」「回転軸」
が不一致の時可能

輻射圧とガス降着の異方性



Kawashima et al. 2016

青矢印：ガスの動き

赤矢印：輻射の流れ

ULXのいくつかは中性子星!!

Introduction

- ・ 本研究の目的

まだULXが実際にどのように観測されるか，光度曲線は観測と整合するのか，といったことは調べられていない．

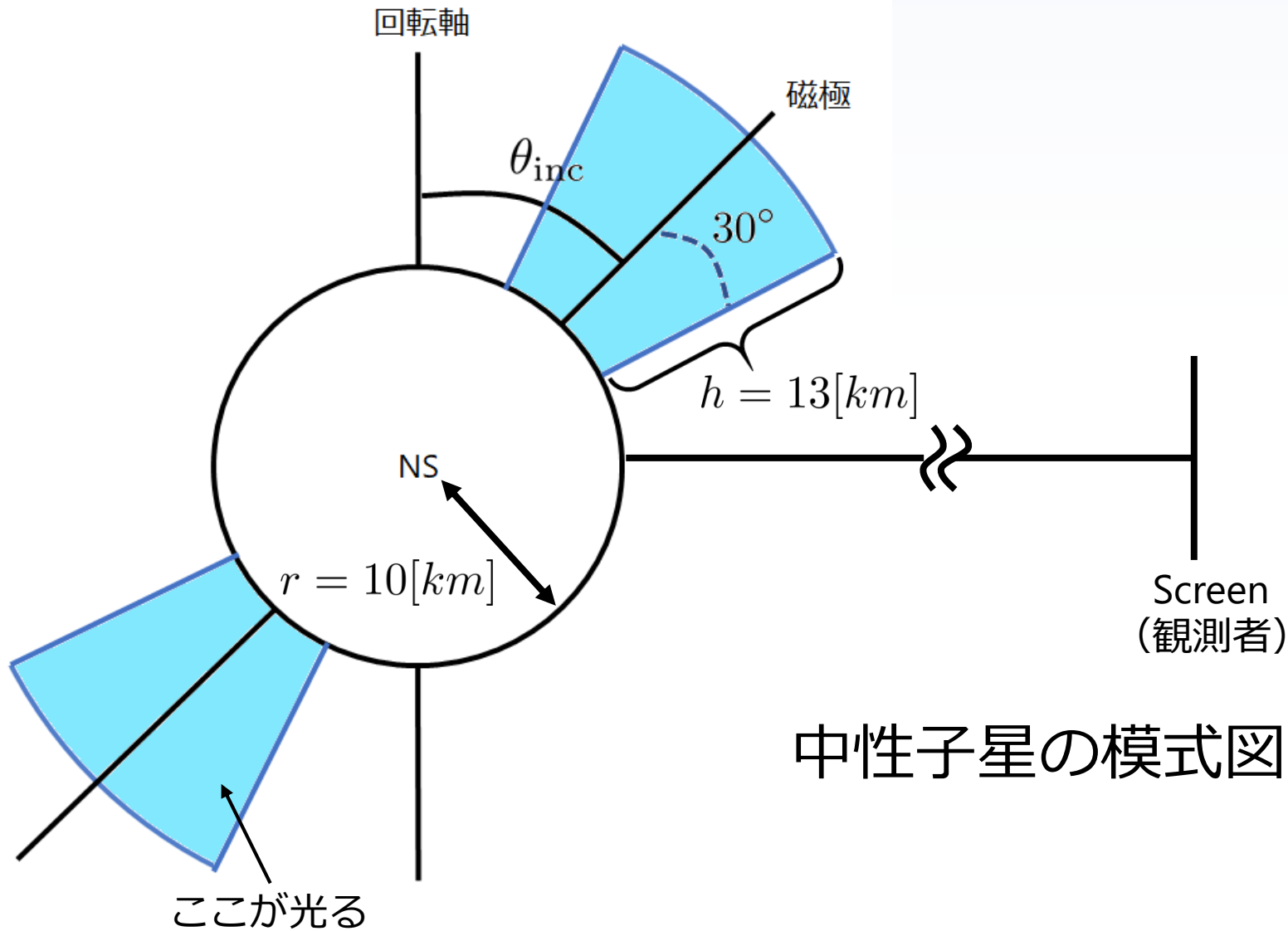
本研究の最終目標は降着柱を持つ中性子星の観測イメージと光度の時間変化を計算し，観測データと比較を行うこと

Assumption

1. 中性子星の質量と半径は $M = 1.4M_{\odot}$, $r = 10(\text{km})$ とする.
2. 降着柱は光学的に十分厚く, 開口角は $\theta_{\text{top}} = 30^{\circ}$ とする.
3. 降着柱の側面のうち中性子星表面から $h = 13(\text{km})$ の高さまでを一様な放射源とする.
4. 降着柱の側面のガスは自由落下しているとする.

以上のような仮定はKawashima(2016)の論文の結果をもとにしており, これを使って観測イメージと光度を計算する.

Assumption



中性子星のパラメータ

$$M = 1.4M_{\odot}$$

$$r = 10(km)$$


$$h = 13(km)$$

$$\theta_{top} = 30^\circ \text{ (開口角)}$$

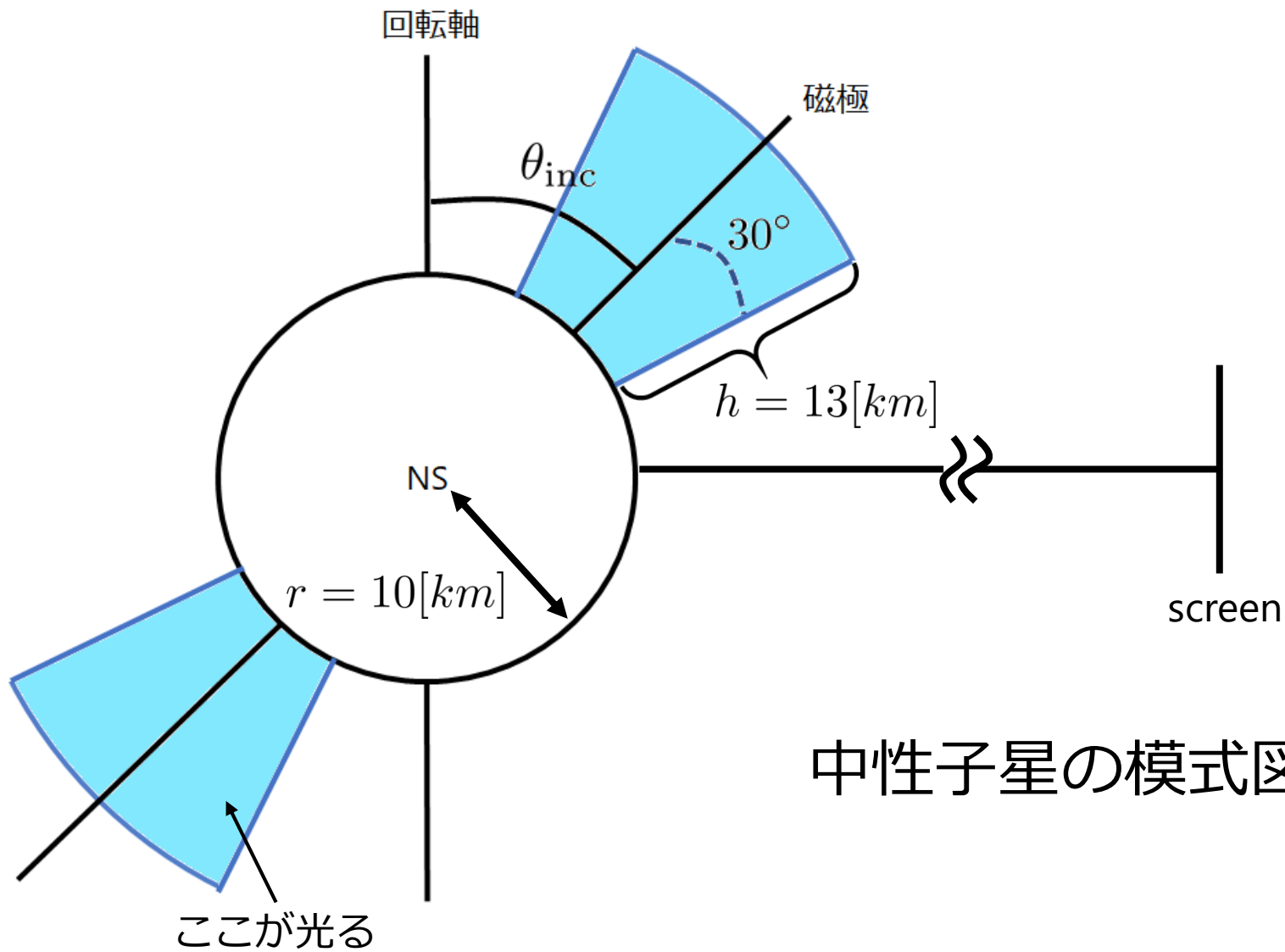
$$\theta_{inc} = 30^\circ, 60^\circ$$

中性子星の模式図とscreenの位置

Assumption

5. 中性子の磁極は回転軸から θ_{inc} だけ傾いており, 観測者は回転軸から90度の位置にいるとする.
6. 観測者は十分遠方にいるため, screenに到達する光は全て平行光線とする.
7. 中性子星の自転速度は十分遅く, 自転による特殊相対論効果は無視できるとする. (観測されているULX pulserの自転速度は光速に比べて十分遅い.)

$$v_{\text{rot}} \simeq 10^4 [\text{m/s}]$$
8. 時空はシュヴァルツシルド時空とする.
9. 中性子星と降着柱の外側領域は真空であるとする.

Assumption



中性子星のパラメータ

$$M = 1.4M_{\odot}$$

$$r = 10(km)$$

$$h = 13(km)$$

$$\theta_{top} = 30^\circ \text{ (開口角)}$$

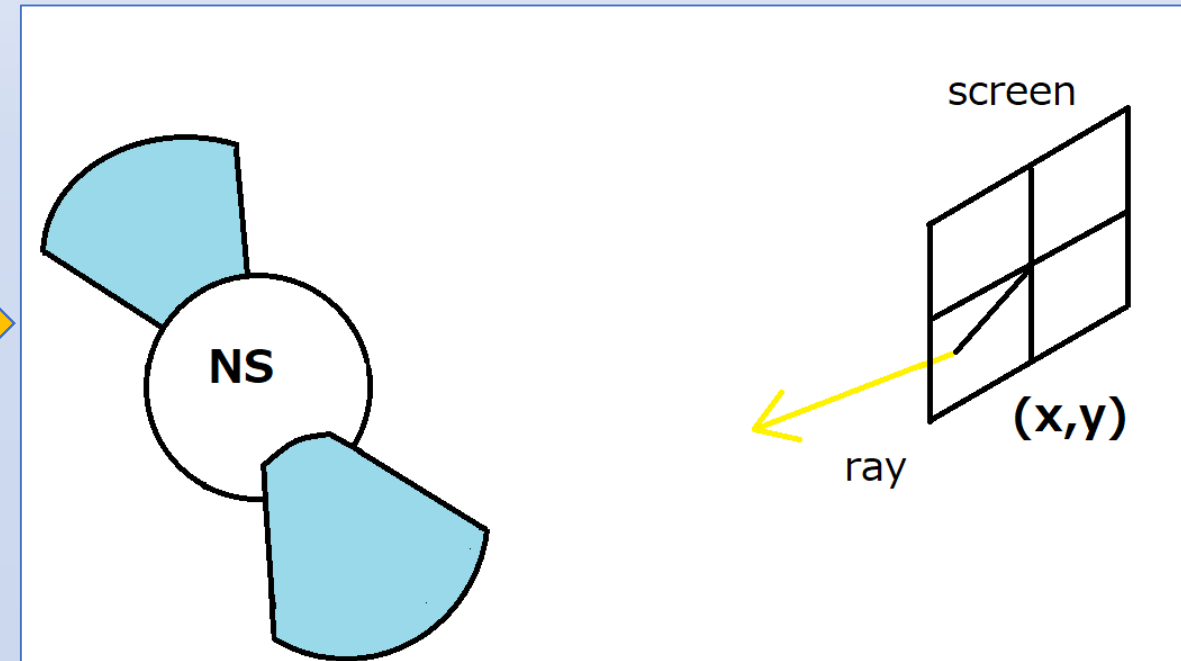
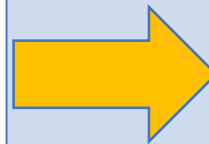
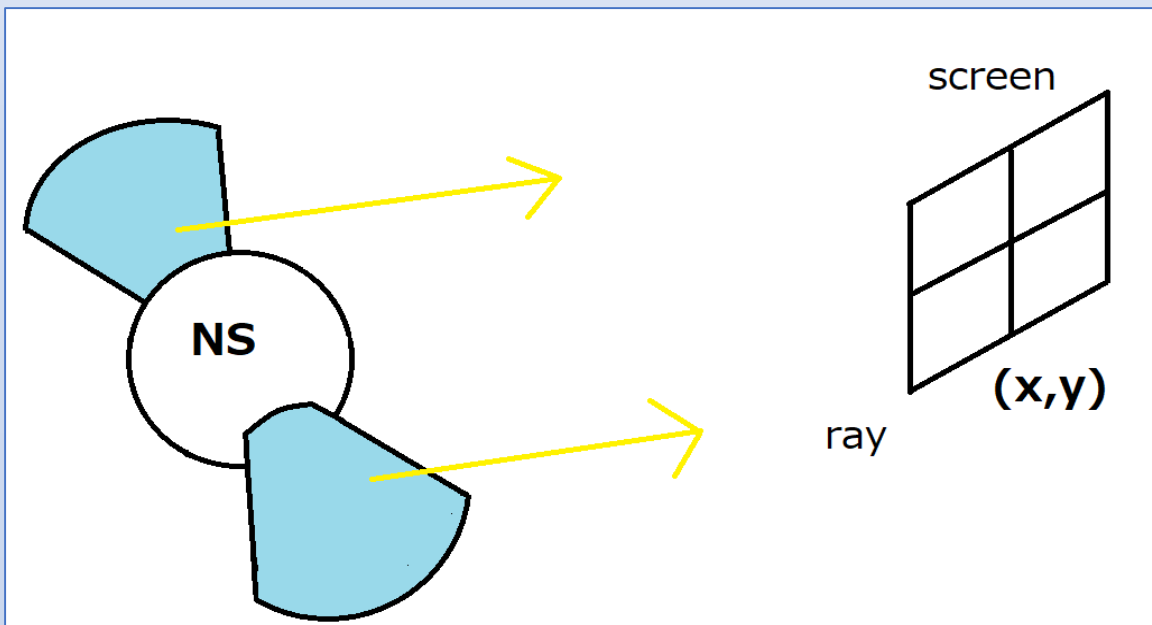
$$\theta_{inc} = 30^\circ, 60^\circ$$

中性子星の模式図とscreenの位置

Method

- 光線追跡法 (ray tracing)

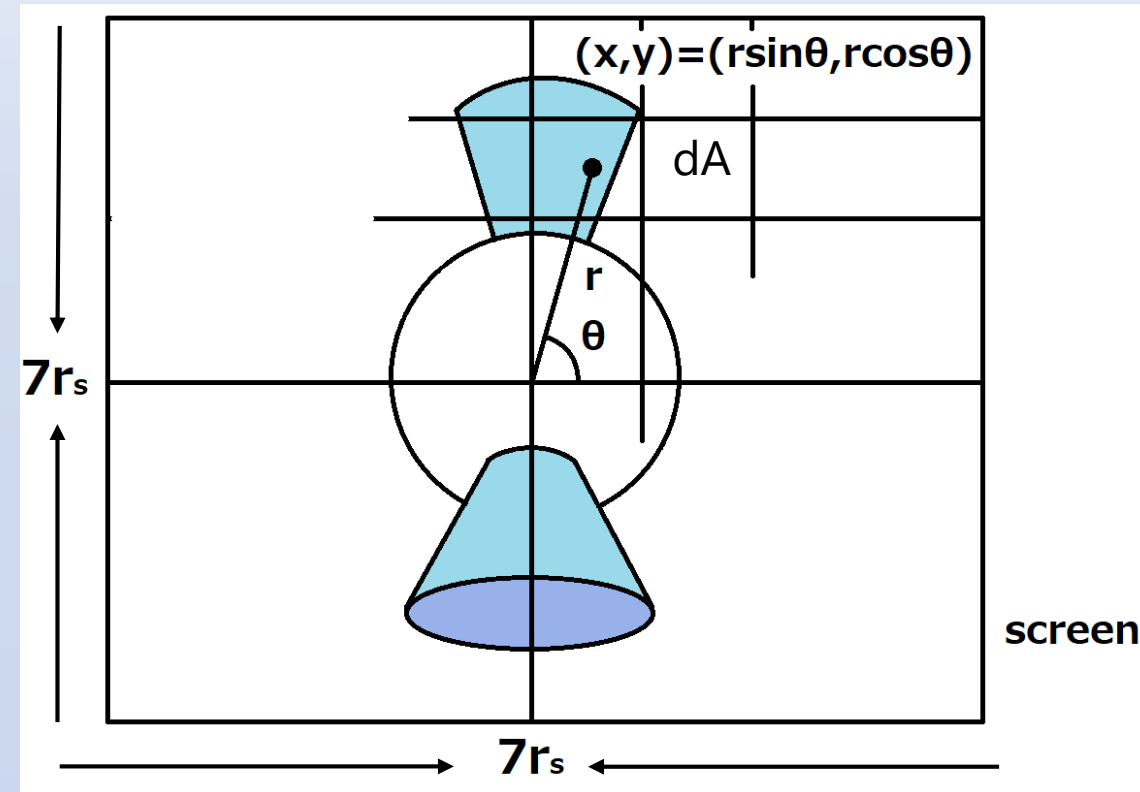
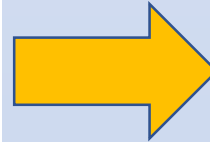
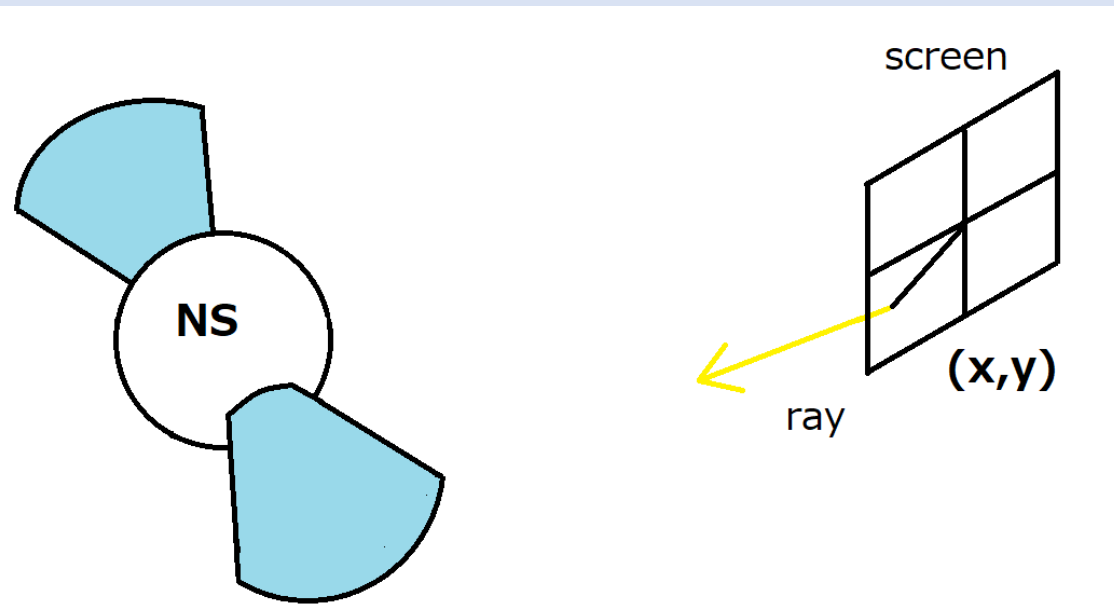
Screen size	$7r_s \times 7r_s$
分割数	140×140



光線を時間を巻き戻してscreenから発射させ
天体に到達した地点での輻射強度を計算する

Method

- 光線追跡法 (ray tracing)



光線が降着柱に到達した時そのマスは光を受け取ったと考える

Basic Equation and Method

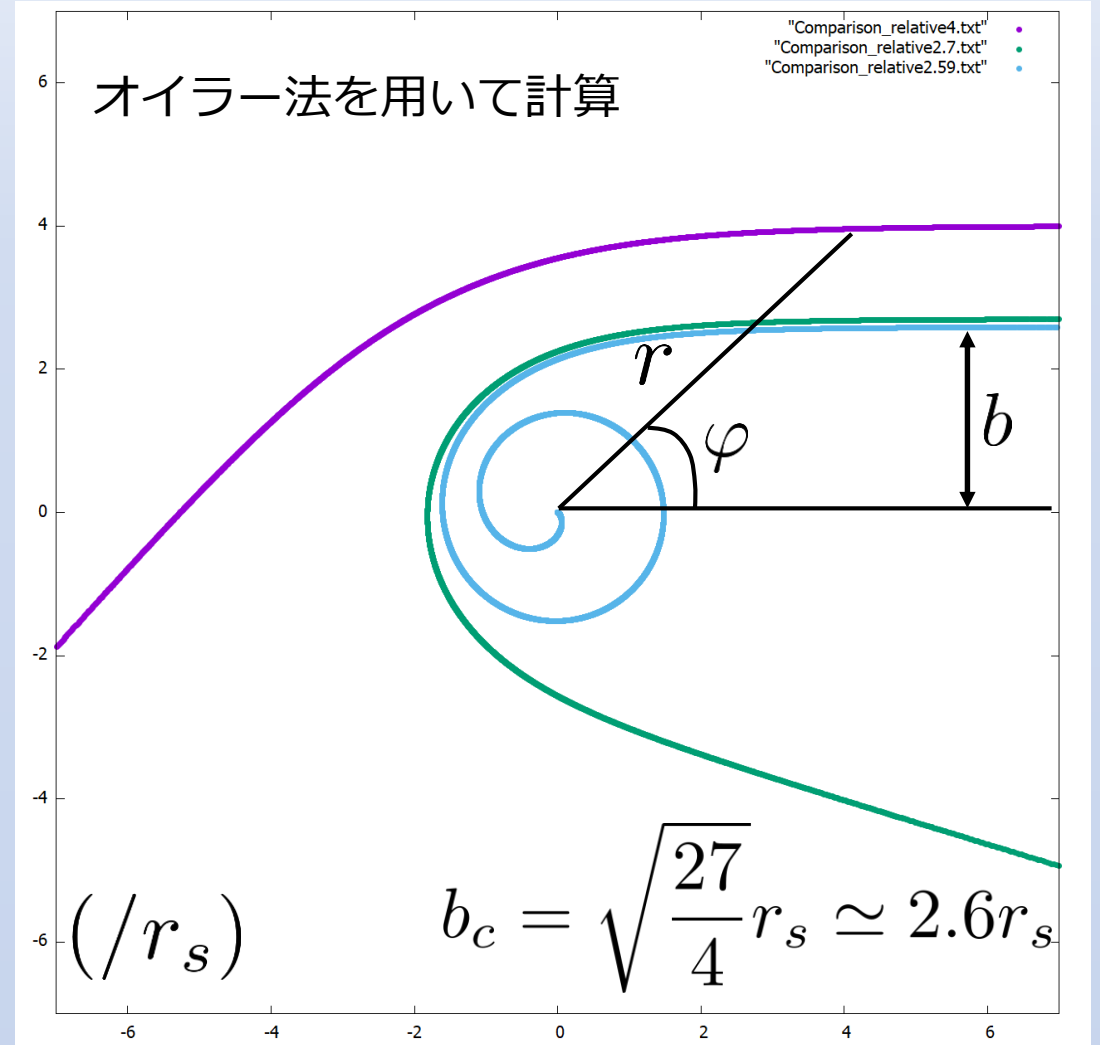
・ 光の測地線の方程式（シュバルツシルド時空）

$$\frac{d^2}{d\varphi^2} \left(\frac{1}{r} \right) + \frac{1}{r} = \frac{3r_g}{2} \left(\frac{1}{r} \right)^2$$

$$\left(r_s = \frac{2GM}{c^2} \right)$$

相対論補正の項

- Screen上のマスごとに光線を飛ばす.
- シュバルツシルド半径で方程式を規格化してから解く
- 実際は降着柱or中性子星に光線が到達した時点で計算終了
- 光線の軌道は原点を含む平面内で描かれるため、軌道を回転させることで3次元軌道を描ける.



Basic Equation and Method

$$I_{obs} = \frac{I_0}{(1+z)^4}$$

BLACK-HOLE ACCRETION DISK
S,Kato J,Fukue S,Mineshige(1998)

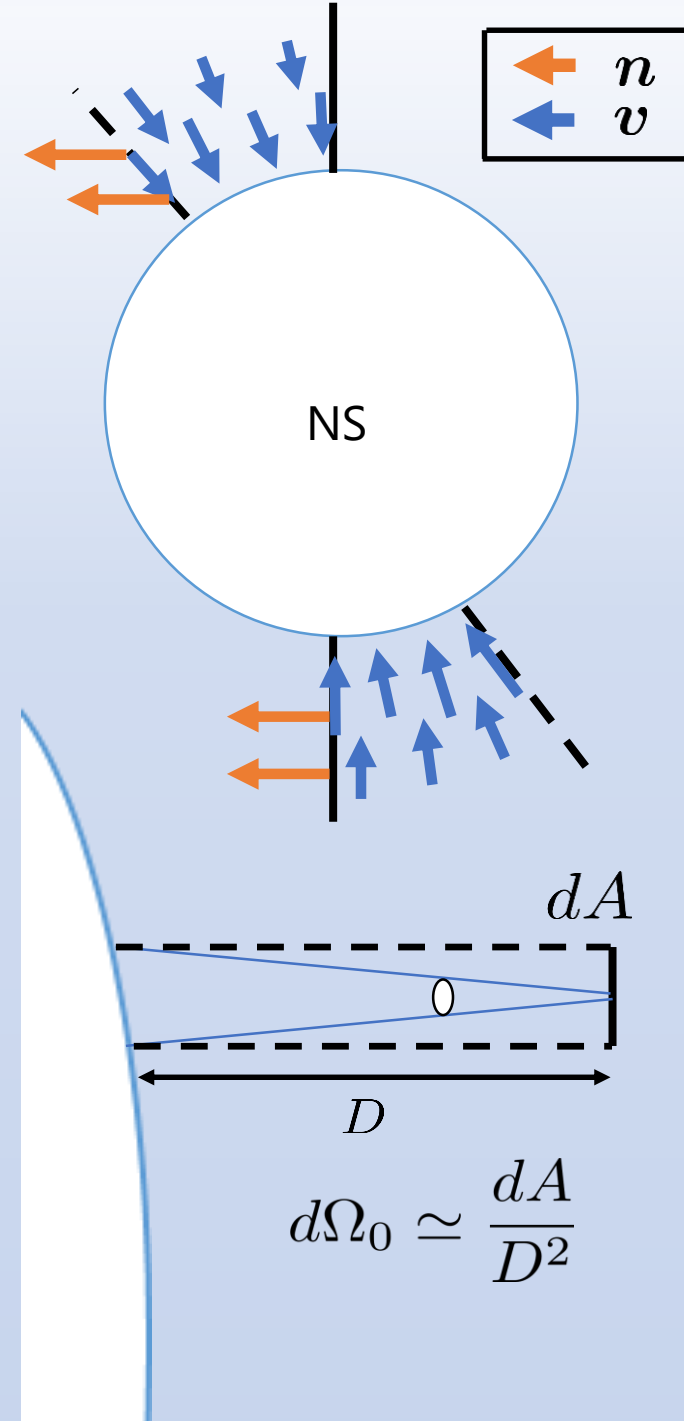
$$\left(1 + \underset{\substack{\downarrow \\ \text{赤方偏移}}}{z} = \frac{1}{\underset{\substack{\downarrow \\ \text{重力赤方偏移}}}{\sqrt{1 - \frac{r_s}{r}}}} \left[\underset{\substack{\downarrow \\ \text{ローレンツ因子}}}{\gamma} \left(1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}}{c} \right) \right] \right)$$

$$L_{obs} = 4\pi D^2 F_{obs}$$

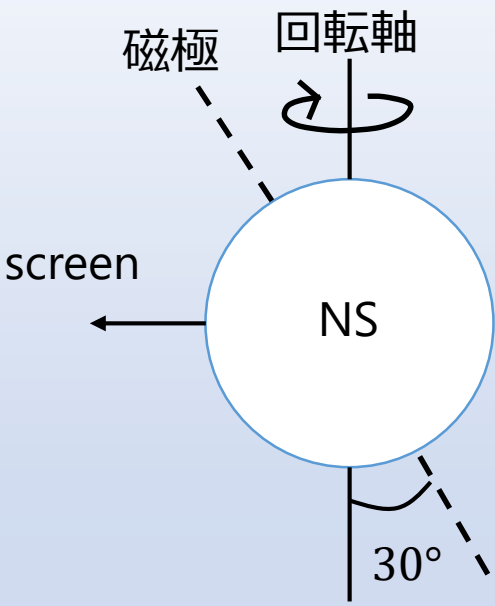
$$= 4\pi \sum_i \frac{I_0^i}{(1+z)^4} dA$$

$$\left(F_{obs} = \int I_{obs} \cos \theta d\Omega \right)$$

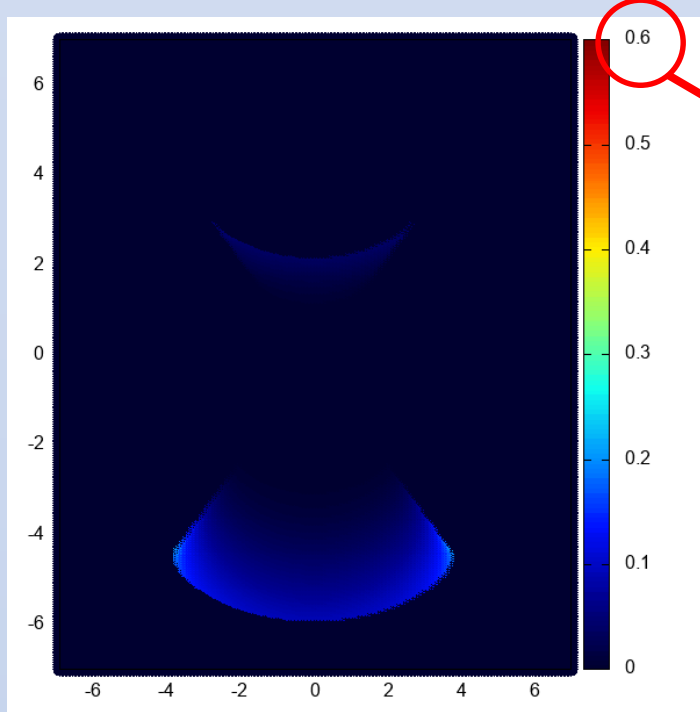
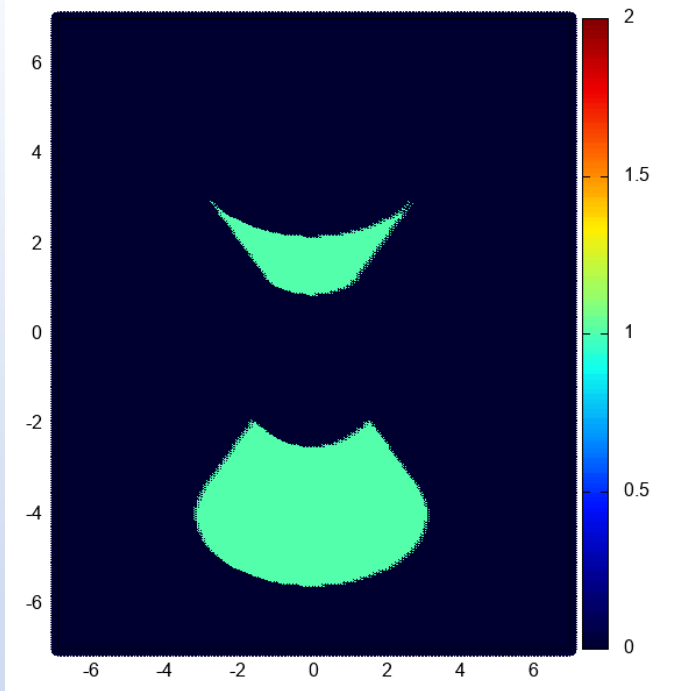
$$= \sum_i \frac{I_0^i}{(1+z)^4} d\Omega$$



Result

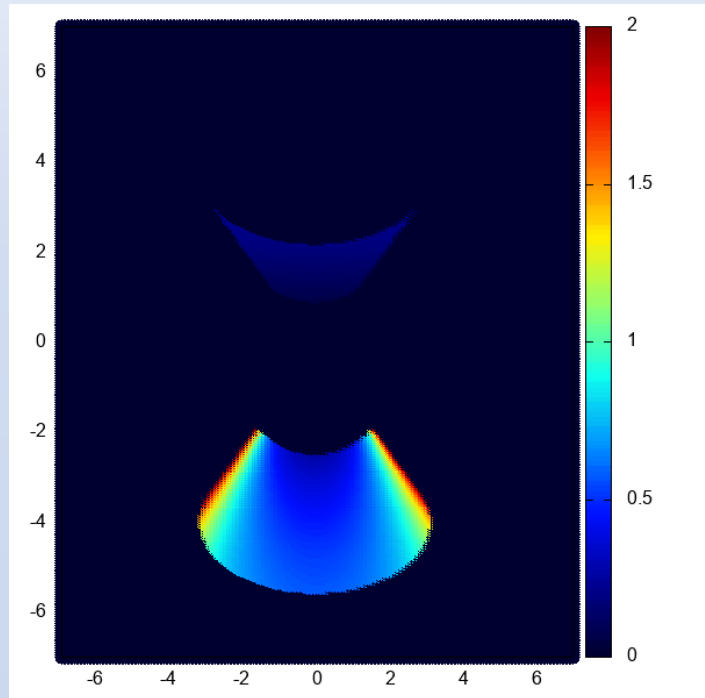


$$\theta_{\text{inc}} = 30^\circ$$
$$v_{\text{gas}} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$
$$\theta_{\text{top}} = 30^\circ$$
$$I_0 = 1$$



①非相対論

輻射強度 I_{obs} の分布



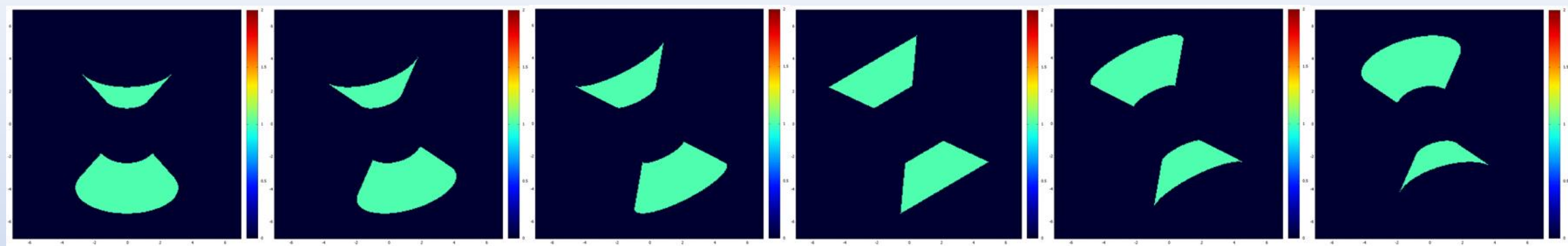
②特殊相対論効果のみ

③特殊相対論効果 + 一般相対論効果

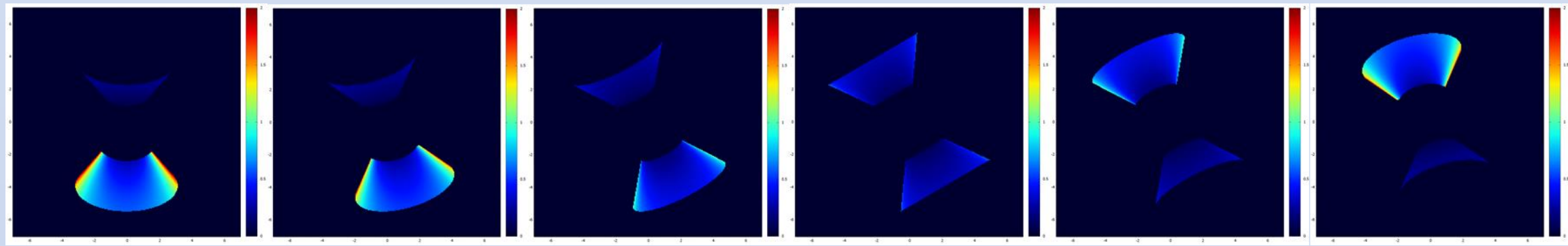
Result

θ_{rot} ごとの図

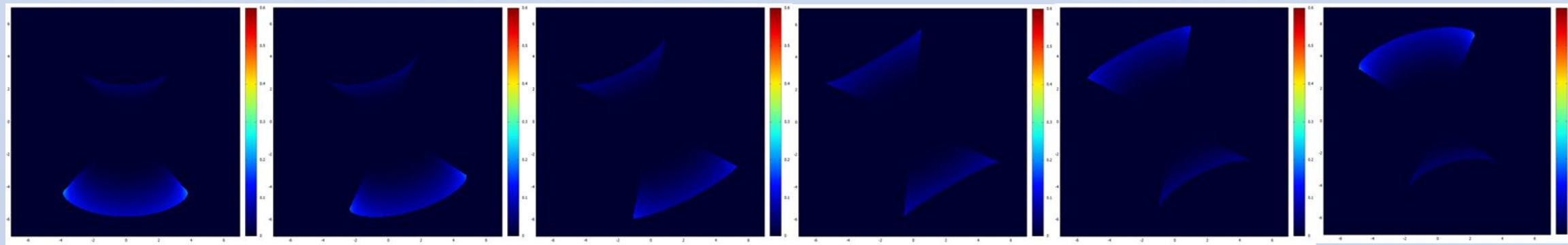
非相対論



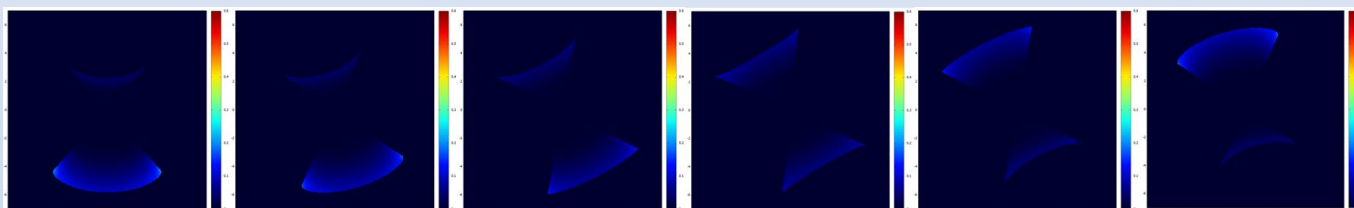
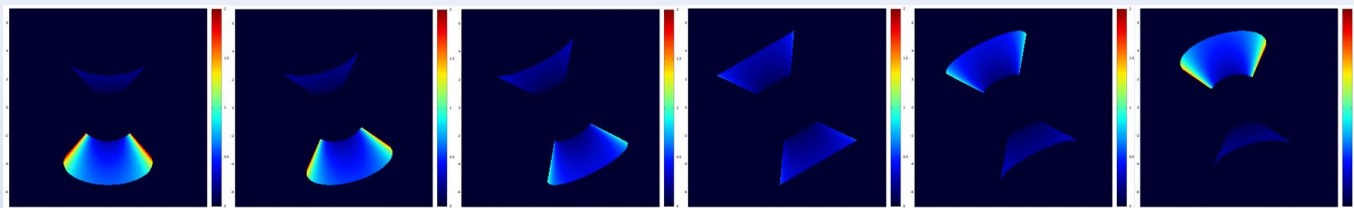
特殊相対論効果のみ



特殊相対論効果 + 一般相対論効果



Discussion



特殊

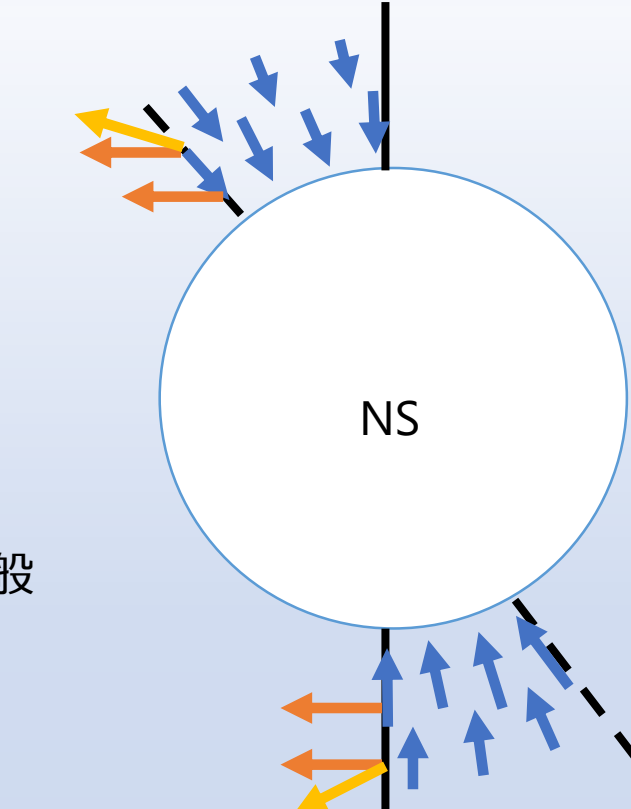
特殊+一般

特殊相対論効果

- 降着柱の軸がscreen側に傾いたとき，観測者側と反対側に傾いている降着柱が明るく光る．
- 反対に観測者側の降着柱は暗くなる．

一般相対論効果

- 降着柱が広がって見える
- 重力赤方偏移の影響から光が全体的に暗くなる
(n ベクトルと v ベクトルの内積の影響もある)

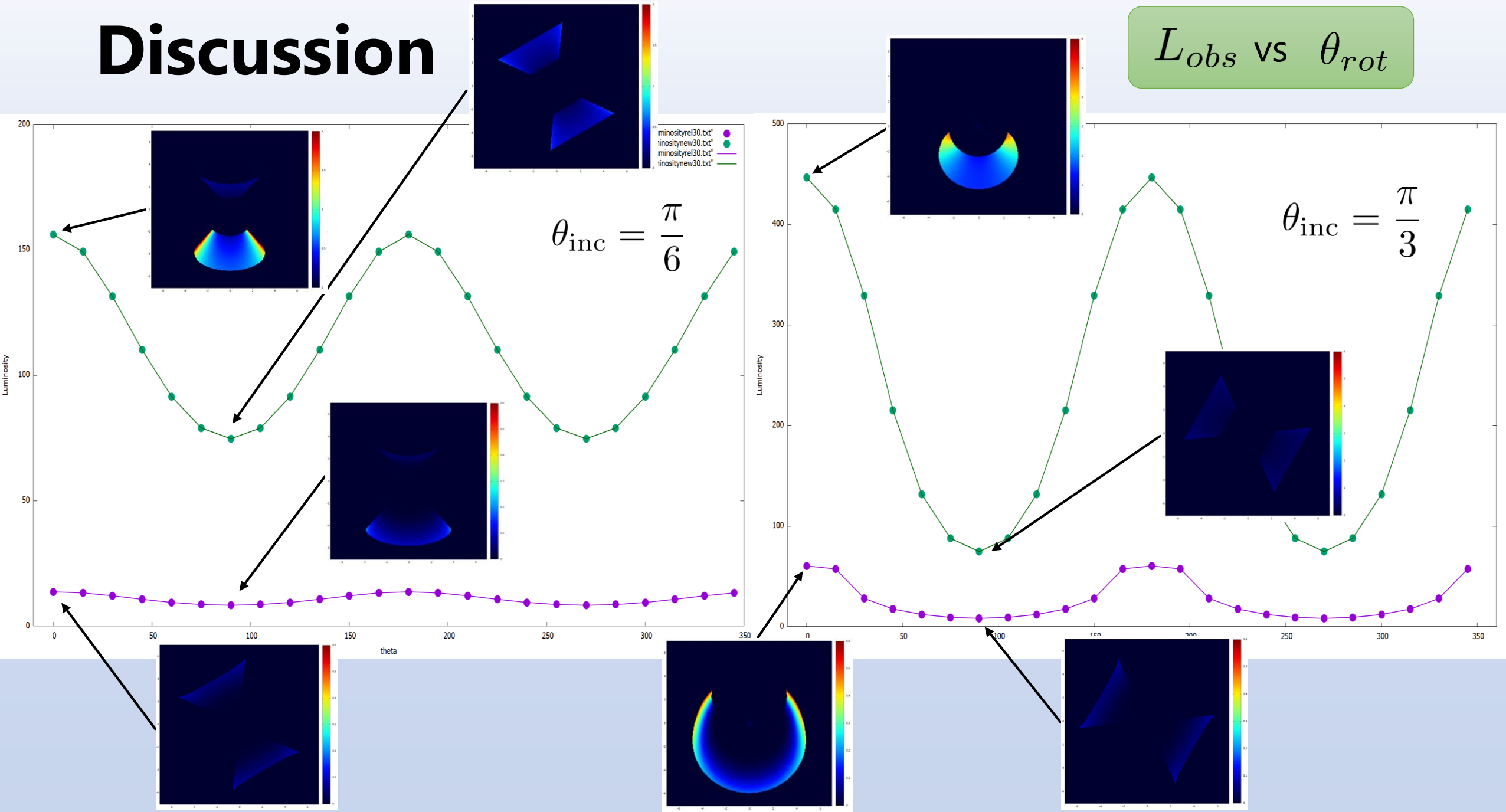


- ← n 一般相対論効果なし
- ← n 一般相対論効果あり
- ← v 降着柱の側面の速度

$$I_{obs} = \frac{I_0}{(1+z)^4}$$

$$\left(1+z = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{r_s}{r}}} \left[\gamma \left(1 - \frac{v \cdot n}{c} \right) \right] \right)$$

Discussion



Summary and Future work

- シュバルツシルト時空中での光の測地線方程式を解くコードを開発した。
 - 降着柱を持つ中性子星の観測イメージを計算することに成功した。
 - 特殊相対論効果による降着柱表面のIntensityの分布が確認できた
 - 一般相対論効果による降着柱の広がりが確認できた
-
- Kawashima(2016)のシミュレーション結果（降着柱側面の速度場&輻射強度分布）を採用し、より現実的な状況を調べる
 - その時の光度曲線を計算して観測との比較を行う。
 - 自転の効果を組み入れて、ミリ秒パルサーにも適用してみる（不要かも）