

# シミュレーションを用いた IXPE衛星による広がった天体の X線偏光解析手法の研究

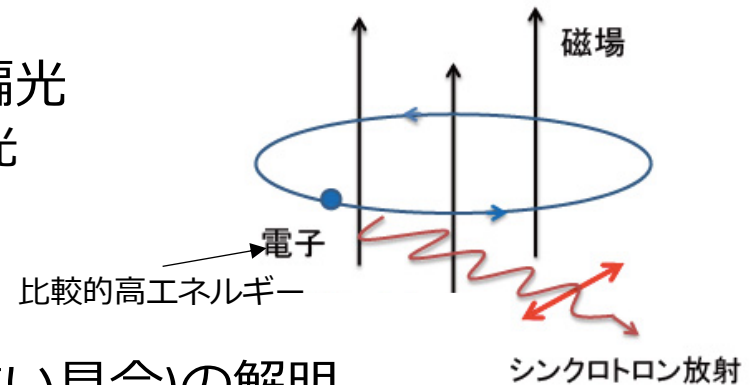
1. 序論	2P
2. 目的	1P
3. 手段	3P
4. 結果	5P
5. まとめと今後	1P

山本龍哉

水野恒史, 深沢泰司, 高橋弘充, 内田和海 (広島大), 玉川徹, 北口貴雄, 榎戸輝揚 (理研), 三石郁之, 清水貞行, 田原譲, 山口友洋 (名古屋大), 郡司修一, 斎藤耀 (山形大), 林田清, 朝倉一統 (大阪大), 内山慶祐 (東理大), 岩切渉 (中央大), Martin Weisskopf, Brian Ramsey, Stephen O'Dell (NASA/MSFC), Paolo Soffitta (IAPS/Rome), Luca Baldini (INFN/Pisa) (ほかIXPE衛星チーム)

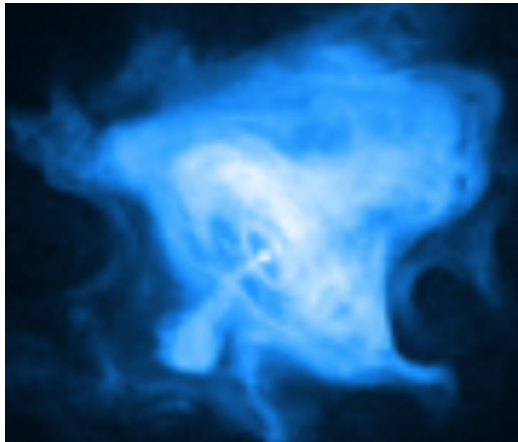
# 1-1.広がった天体のX線偏光観測

- 空間的に広がった天体の軟X線偏光
  - シンクロトロン放射由来の偏光
  - 磁場に垂直な偏光を示す
- ✓ 電子が加速される現場の観測
- ✓ 周辺の磁場構造(磁場の強さ、揃い具合)の解明



PWN

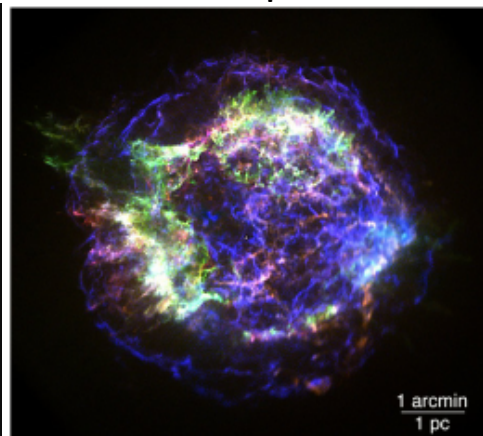
Crab Nebula Pulsar



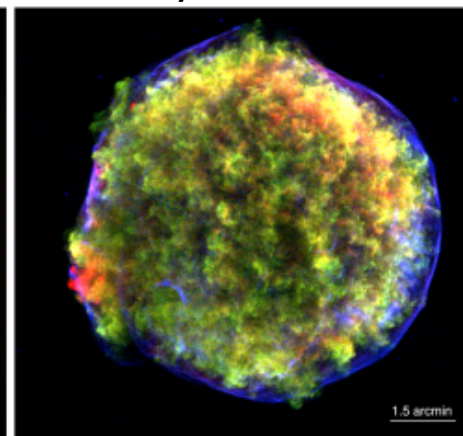
©NASA/CXO

SNRs

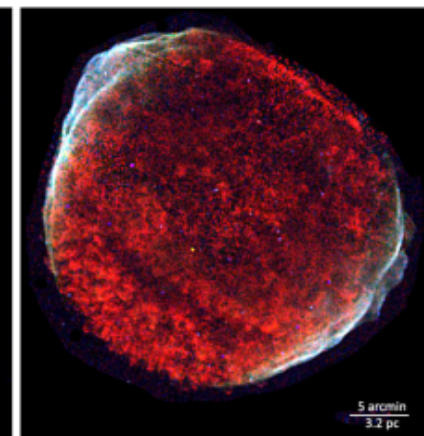
Cassiopeia A



Tycho's SNR



SN1006



©galaxies, 23 Feb 2018, Jacco Vink

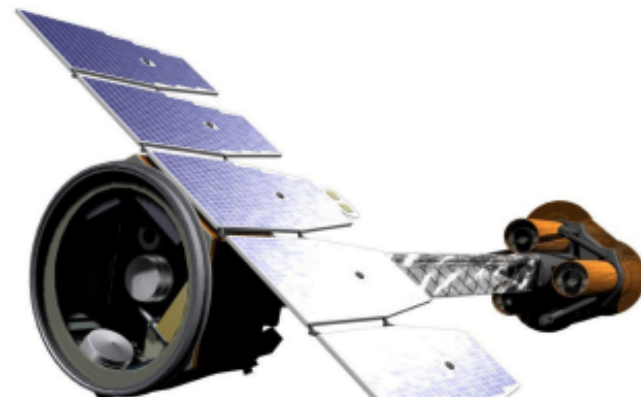
# 1-2.過去の観測とIXPE衛星



- The 8<sup>th</sup> Orbiting Solar Observatory
- NASA
- 1975年6月に打ち上げ
- ブラッグ散乱偏光計を搭載(2.6, 5.2 keV)

有為な結果は、明るく大きな偏光情報を持つかに星雲のみ

- **I**maging **X**-ray **P**olarimetry **E**xplorer
- アメリカ、イタリア、日本が国際協力
- 2021年4月打ち上げ予定
- 観測エネルギー帯:2~8 keV
- 初の**偏光撮像機能**をもつ
  - 光電効果を用いる
  - 3台の望遠鏡と3台の検出器



IXPE衛星 ©Proc. of SPIE The Imaging X-ray Polarimetry Explorer, Martin C. Weisskopf

## 2.目的

### 最終的な科学目標

#### かに星雲(Crab PWN)

場所ごとの磁場構造を解明し、粒子の加速(電磁エネルギーから粒子エネルギーへの転換)を明らかにする

#### 超新星残骸

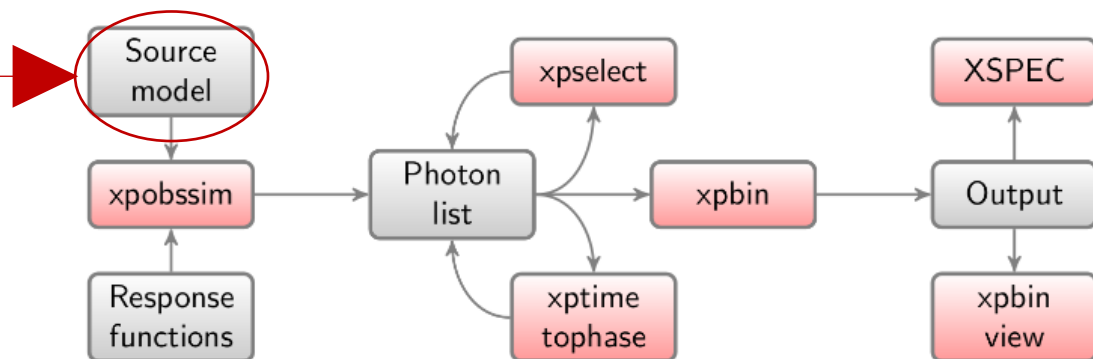
磁場の向きと整列度を空間分解して測ることで、宇宙線の加速プロセスを定量化する

有限な角度分解能によりデータが重なり合い、偏光情報はなまされてしまうため、広がった天体の偏光解析は難しい



専用のシミュレーターを用いて  
広がった天体における、正しい解析手法を確立する

## 3-1. IXPE OBSSIM ～観測シミュレーター～



ixpeobssimの内部構造: ixpeobssimのマニュアルより

天体の物理パラメータを設定し、予想される装置の応答を考慮しながらシミュレーションを行う

本講演では、かに星雲がInner-NebulaとOuter-Nebulaとで異なる偏光情報を持つと仮定したモデルをSource modelに入力した  
また望遠鏡3台のシミュレーションを行い、観測時間は30 ksecとしている

## 3-2.Stokes Parameters

### 今までの課題

- ✓ 低偏光度では、偏光度は負の値を取らないためにバイアスが生じやすい
- ✓ 場所ごとに区切った解析は難しい

### Stokes Parameter

- ✓ 負の値も取りうる
- ✓ 加算的である
  - 空間領域で、Stokes Q,Uの値を測定し、平均を取ることで空間分解したQ or U Mapを作成できる

以下Kislat +15, Vink +18にしたがって考え方を記す

$\theta_k$  をx軸と電場ベクトル(電子の射出方向と平行)の角度とし、イベント毎のストークスパラメータを以下のように定義する

$$i_k = 1, q_k = 2\cos 2\theta_k, u_k = 2\sin 2\theta_k$$

## 3-2. Stokes Parameters

全イベントのストークスパラメータは以下のようなになる

$$I = \sum_{k=1}^N i_k = N, Q = \sum_{k=1}^N q_k, U = \sum_{k=1}^N u_k$$

ここで、規格化されたストークスパラメータ

$$\hat{Q} = \frac{Q}{I}, \hat{U} = \frac{U}{I}$$

を用いると、偏光度・方位角は

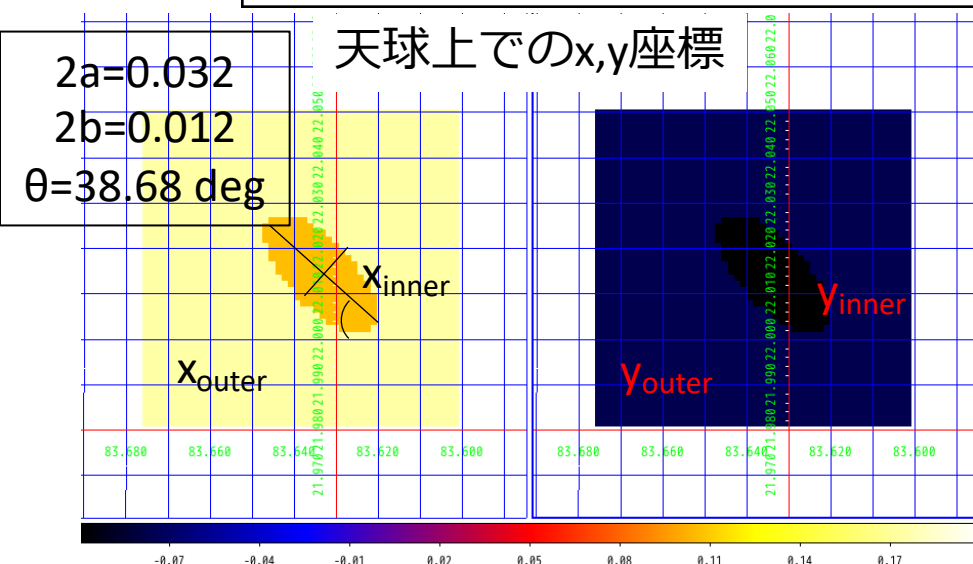
$$p_r = \frac{1}{\mu} \sqrt{\hat{Q}^2 + \hat{U}^2}, \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\hat{U}}{\hat{Q}}$$

で表される。この時 $\mu$ はモジュレーションファクターを表し、エネルギーバンド毎に異なる値である

# 4.Spatial-Resolved Analysis

イメージング能力を活かすために、過去の観測に基づく値を入力し、Nebulaの中と外とで分けて測定を行う。簡単のため、まずはNebulaのみでシミュレーション

	P.D. (%)	P.A. (deg)
Inner PoGO+ (20-160 keV) M. Chauvin +17	19	124
Inner+Outer OSO-8 (2.6, 5.2 keV) M. Weisskopf +1978	19	156

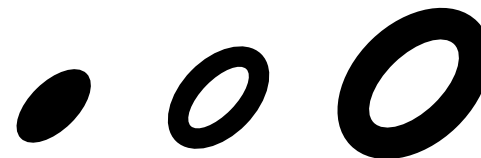


全領域での積分をOSO-8の結果に近づけるためにOuterのP.A.を160 degとして計算した時の偏光ベクトルのx、y軸成分の入力値

$X_{inner}$	0.106	P.D. <sub>inner</sub>	19 %
$Y_{inner}$	-0.157	P.A. <sub>inner</sub>	124 deg
$X_{outer}$	0.179	P.D. <sub>outer</sub>	19 %
$Y_{outer}$	-0.065	P.A. <sub>outer</sub>	160 deg



# 4-1.Spatially-Resolved Stokes Parameters



$$\frac{(x \cos \theta + y \sin \theta)^2}{a^2} + \frac{(-x \sin \theta + y \cos \theta)^2}{b^2}$$

	1 <sub>inner</sub>	2 <sub>inner</sub>	3 <sub>outer</sub>	4 <sub>outer</sub>
a	0.008	0.016	0.024	outside of 3
b	0.003	0.006	0.009	outside of 3

ROI(ellipse)	2.00~2.83 keV	2.83~4.00 keV	4.00~5.66 keV	5.66~8.00 keV
Q1	-0.009±0.002	-0.036±0.004	0.003±0.006	-0.106±0.014
U1	-0.033±0.002	-0.076±0.004	-0.089±0.006	-0.101±0.014
Q2	-0.015±0.002	-0.019±0.002	-0.031±0.004	-0.003±0.009
U2	-0.040±0.002	-0.072±0.002	-0.092±0.004	-0.086±0.009
Q3	-0.003±0.002	-0.012±0.002	-0.015±0.004	-0.003±0.010
U3	-0.032±0.002	-0.058±0.002	-0.091±0.004	-0.074±0.010
Q4	0.014±0.001	0.027±0.002	0.039±0.003	0.029±0.007
Q4	-0.039±0.001	-0.062±0.002	-0.073±0.003	-0.088±0.007

## 4-2.Spatially-Resolved Polarization

P.D. (%)	2.00~2.83 keV	2.83~4.00 keV	4.00~5.66 keV	5.66~8.00 keV
1	$18.8 \pm 0.8$	$14.7 \pm 1.0$	$11.8 \pm 1.4$	$16.0 \pm 2.3$
2	$16.2 \pm 0.8$	$16.4 \pm 0.5$	$16.6 \pm 0.8$	$14.5 \pm 1.5$
3	$15.1 \pm 0.8$	$15.8 \pm 0.5$	$15.5 \pm 0.8$	$23.8 \pm 1.5$
4	$16.6 \pm 0.4$	$14.6 \pm 0.5$	$14.2 \pm 0.6$	$18.7 \pm 1.2$

P.A. (deg)	2.00~2.83 keV	2.83~4.00 keV	4.00~5.66 keV	5.66~8.00 keV
1	$125 \pm 1$	$123 \pm 2$	$130 \pm 3$	$132 \pm 4$
2	$130 \pm 1$	$128 \pm 2$	$130 \pm 1$	$122 \pm 3$
3	$136 \pm 2$	$133 \pm 2$	$131 \pm 1$	$134 \pm 2$
4	$151 \pm 1$	$153 \pm 2$	$150 \pm 1$	$154 \pm 2$

- P.D. decreases as we go outward due to contamination from the brighter inner nebula
- P.A. increases significantly and approaches to the input as we go outward

## 4-3.Result with Pulsar+Nebula

We then include Crab Pulsar, assuming phase-dependent polarization in optical (P.D. $\sim$ 7.5 % P.A. $\sim$ 126 deg at the pulse peak(A. Slowikowska +09))

ROI(ellipse)	2.00~2.83 keV	2.83~4.00 keV	4.00~5.66 keV	5.66~8.00 keV
Q1	$-0.009\pm 0.002$	$-0.030\pm 0.003$	$-0.016\pm 0.005$	$-0.060\pm 0.010$
U1	$-0.029\pm 0.002$	$-0.060\pm 0.003$	$-0.062\pm 0.005$	$-0.065\pm 0.010$
Q2	$-0.015\pm 0.002$	$-0.019\pm 0.002$	$-0.028\pm 0.004$	$-0.004\pm 0.008$
U2	$-0.039\pm 0.002$	$-0.066\pm 0.002$	$-0.084\pm 0.004$	$-0.079\pm 0.008$
Q3	$-0.003\pm 0.002$	$-0.014\pm 0.002$	$-0.016\pm 0.004$	$0.003\pm 0.009$
U3	$-0.032\pm 0.002$	$-0.057\pm 0.002$	$-0.088\pm 0.004$	$-0.070\pm 0.009$
Q4	$0.014\pm 0.001$	$0.025\pm 0.002$	$0.037\pm 0.003$	$0.028\pm 0.007$
Q4	$-0.037\pm 0.001$	$-0.061\pm 0.002$	$-0.071\pm 0.003$	$-0.084\pm 0.007$

## 4-3.Result with Pulsar+Nebula

P.D. (%)	2.00~2.83 keV	2.83~4.00 keV	4.00~5.66 keV	5.66~8.00 keV
1	$12.8 \pm 0.8$	$16.4 \pm 0.7$	$12.6 \pm 1.0$	$15.0 \pm 1.7$
2	$17.6 \pm 0.8$	$16.8 \pm 0.5$	$17.4 \pm 0.8$	$13.5 \pm 1.4$
3	$13.5 \pm 0.8$	$14.4 \pm 0.5$	$17.6 \pm 0.8$	$12.0 \pm 1.5$
4	$16.6 \pm 0.4$	$16.1 \pm 0.5$	$15.7 \pm 0.6$	$15.1 \pm 1.2$

P.A. (deg)	2.00~2.83 keV	2.83~4.00 keV	4.00~5.66 keV	5.66~8.00 keV
1	$126 \pm 2$	$122 \pm 1$	$128 \pm 2$	$114 \pm 3$
2	$124 \pm 1$	$127 \pm 1$	$126 \pm 1$	$134 \pm 3$
3	$132 \pm 2$	$128 \pm 1$	$130 \pm 1$	$134 \pm 4$
4	$145 \pm 1$	$146 \pm 1$	$149 \pm 1$	$144 \pm 2$

Due to pulsar contamination,

1. P.D. in the innermost ROI decreases.
2. Change of P.A. less significant.

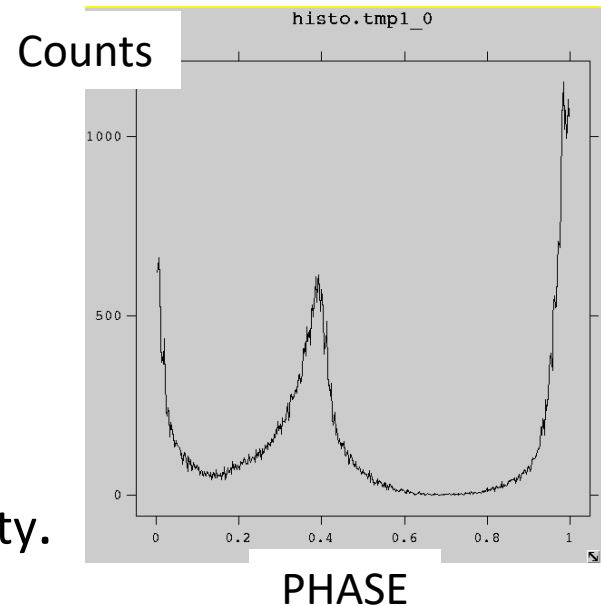
# 5. Summary

- ✓ We studied the feasibility to distinguish inner and outer nebulae polarization of Crab Nebula and confirmed the followings
  - ✓ If we ignore pulsar contribution temporarily, IXPE can clearly resolve inner/outer nebulae polarization signal with 30 ksec obs.
  - ✓ Spatially-resolved polarimetry still possible with the pulsar, but P.D. and P.A. values are affected by contamination from pulsar.

## ***Future Work***

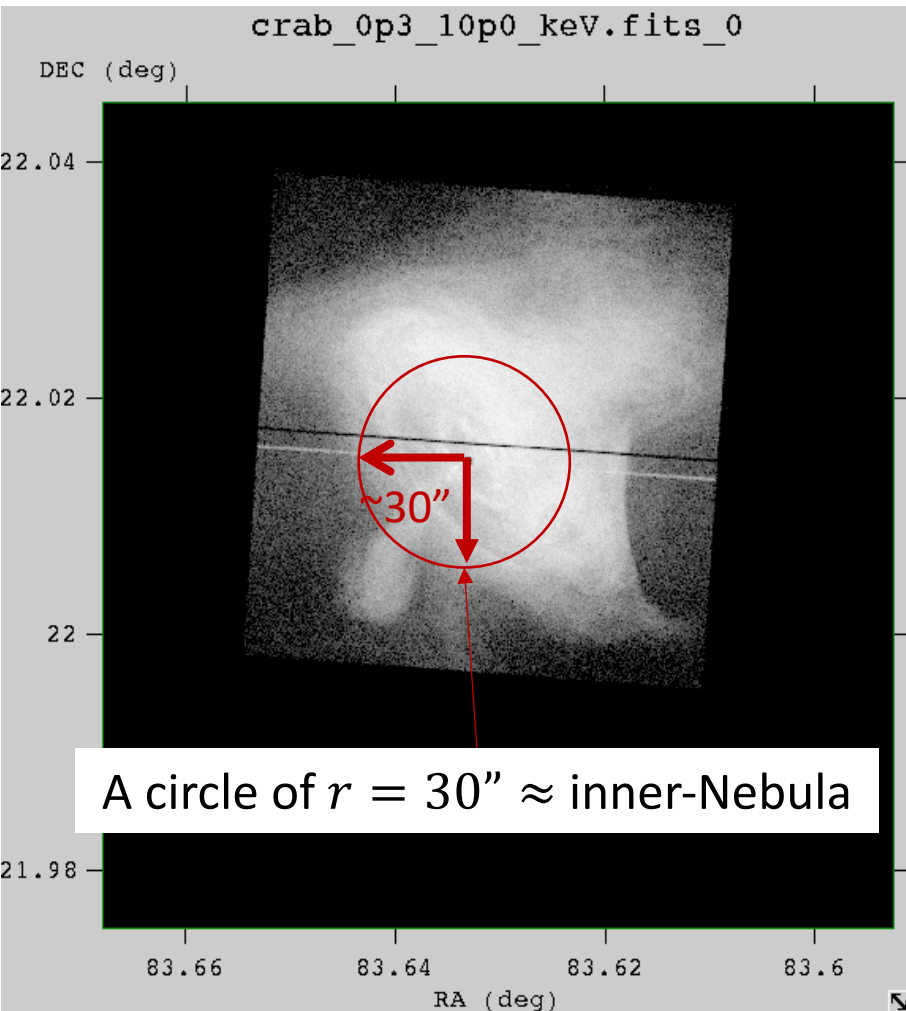
### ➤ Phase-resolved analysis

1. Analysis of all events.
2. Pulse-phase based cut to exclude pulsar contamination.
3. Compare 1 and 2, and optimise the event selection and discuss the feasibility.

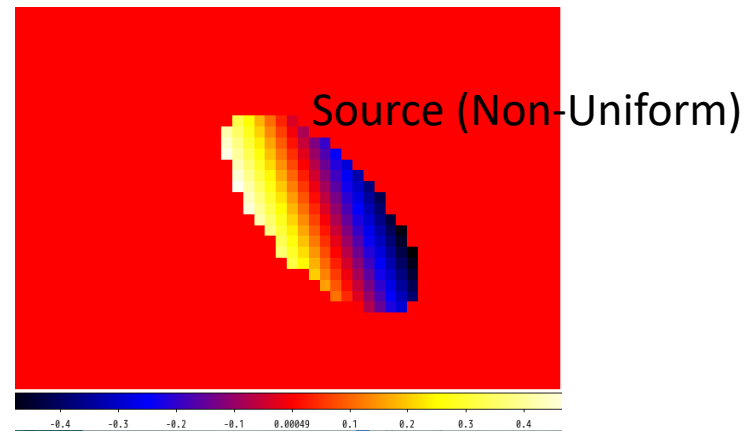


# Back Up Slide

## ① Imaging file by Chandra



## ② $Q_{\text{Sou}}$ of inner Nebula area



manipulate

