

# パルサー磁気圏における粒子加速、 高エネルギー放射-Crab pulsar-

2006. 12/25-27 理論懇@立教大

○高田 順平 (TIARA, 台湾)

H.-K. Chang (清華大学/TIARA)

K.S. Cheng (香港大学)

柴田 晋平 (山形大学)

- 1, Introduction; Crab pulsar
- 2, High energy (optical-GeV) emission model
- 3, 計算 & 結果

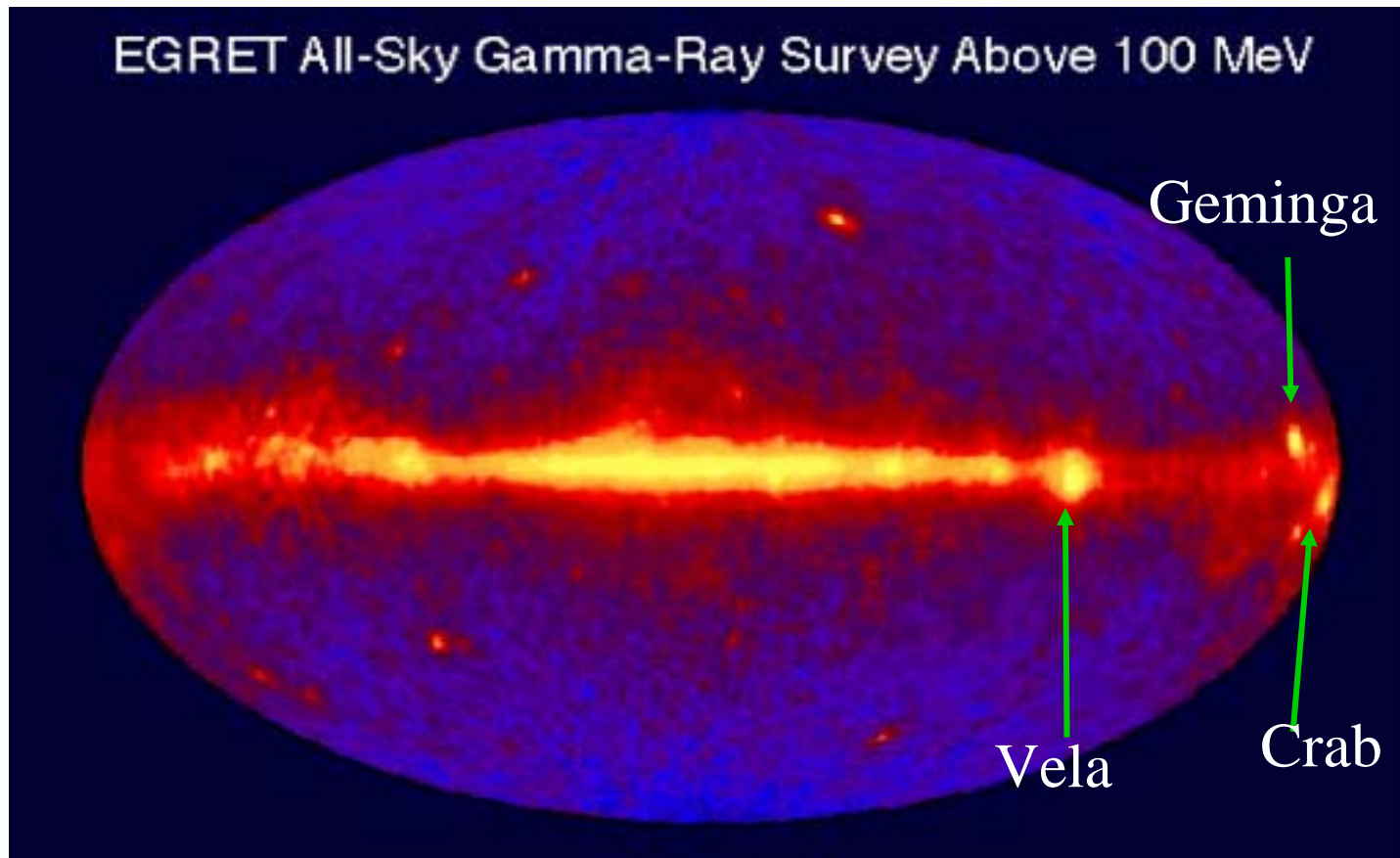


Theoretical Institute for Advanced Research in Astrophysics

高等理論天文物理研究中心

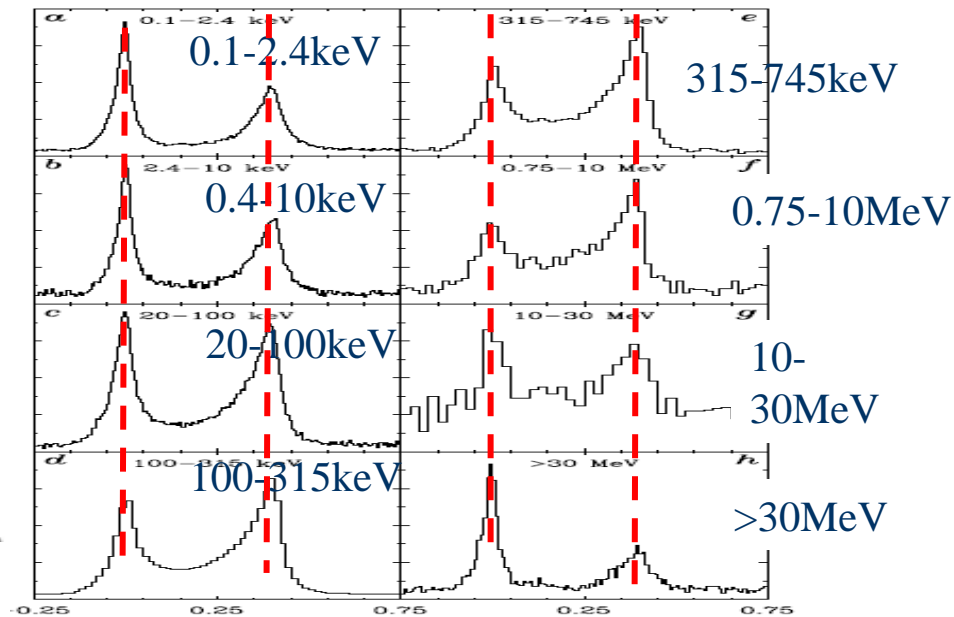
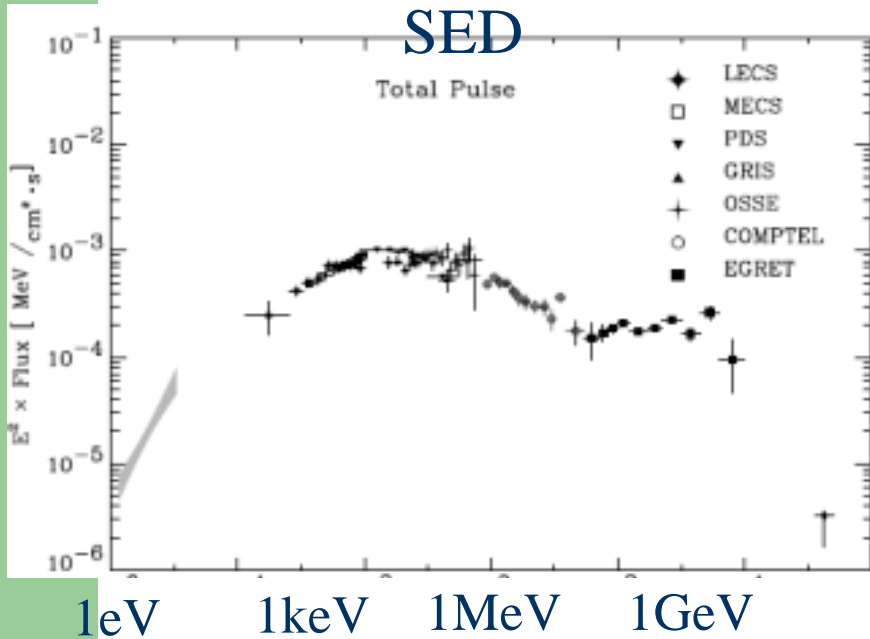
## 1, Introduction

# -ray emissions from the pulsars



1, Introduction

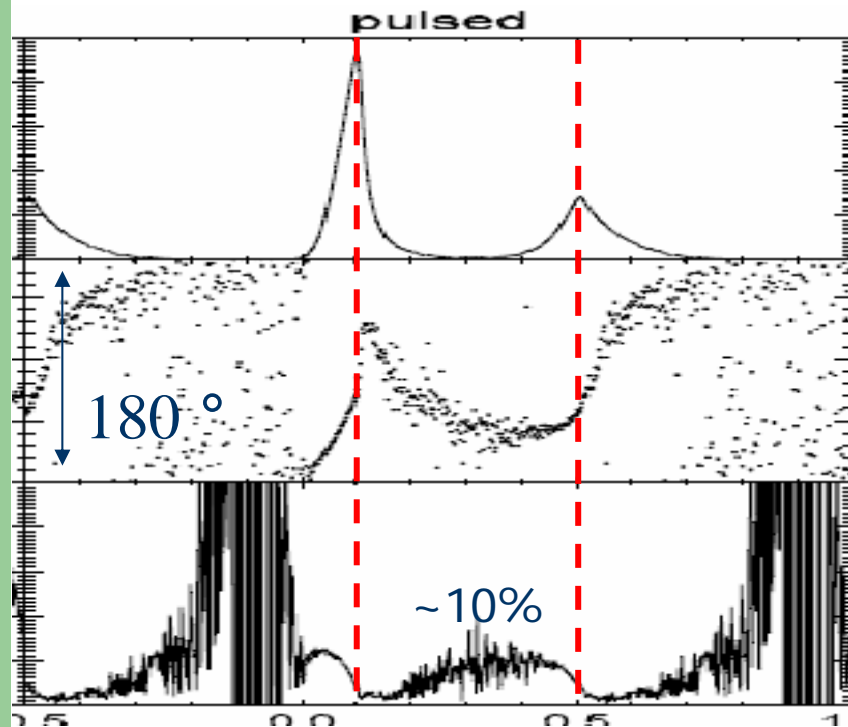
# The Crab pulsar (回転周期~33ms)



- 同じ領域でoptical-ガンマ線が放射されている。
- Crabパルサー磁気圏のどこで放射されているかは解明されていない。

1, Introduction

# Crab optical polarization



- ・OPTIMA による optical pulse の linear 偏光の観測 (Kanbach et al. 2005)
- ・パルス位相で、大きい偏光面の swing と、パルス間で約10% 偏光度

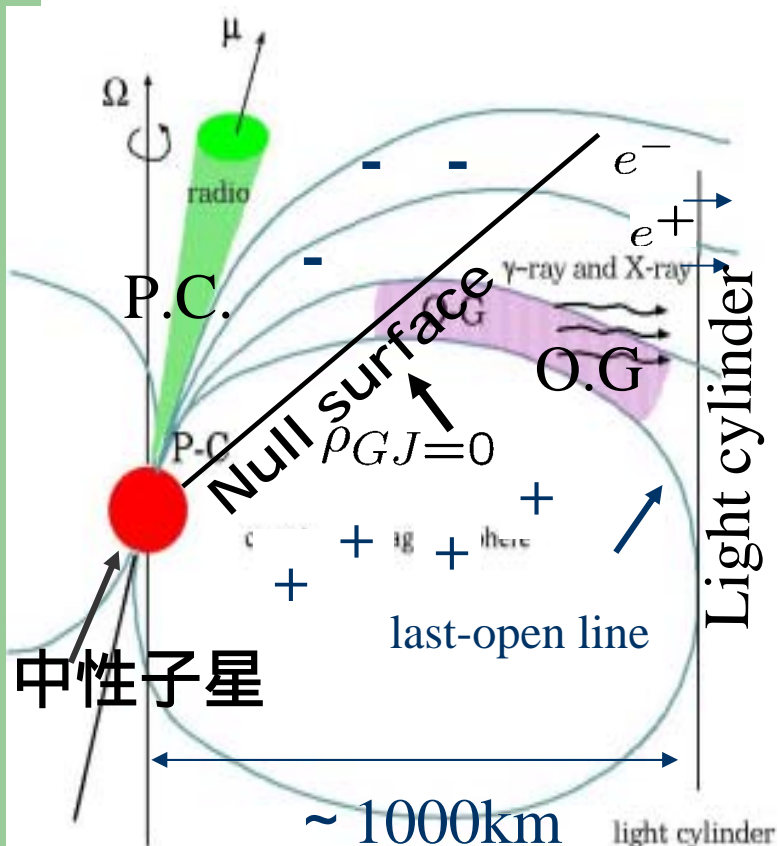
- 1, 偏光の観測は観測パラメータの数を2つ増やす
- 2, 粒子加速、放射モデルに大きな制限を加える

偏光面

偏光度

## 1, Introduction

# Particle acceleration



- パルサー磁気圏はプラズマで満ちている
- 大部分でforce-free条件が成り立っている

$$\mathbf{E} + \beta \times \mathbf{B} = 0$$

$$\rho_{GJ} = -\frac{\Omega \cdot \mathbf{B}}{2\pi c}$$

- 一部の領域( $\rho \neq \rho_{GJ}$ )で**磁力線に沿った電場成分**での粒子加速
- Outer-gap 領域(high-energy emission 領域?)

## 1, Introduction

# 目的

## 光度曲線、スペクトル、偏光を説明する 放射モデルを確立する

- 加速領域、放射領域はどのように広がっているのか？
- Opticalから 線まで↓放射メカニズムは？

- 1, 2-D electrodynamical study
- 2, 3-D geometrical study

2, High energy emission model

# 2-D electrodynamical model

- Poisson eq. of accelerating field

$$\nabla_{r,\theta}^2 \Phi_{nco} = -4\pi(\rho - \rho_{GJ})$$

- Continuity eq. of e- and e+

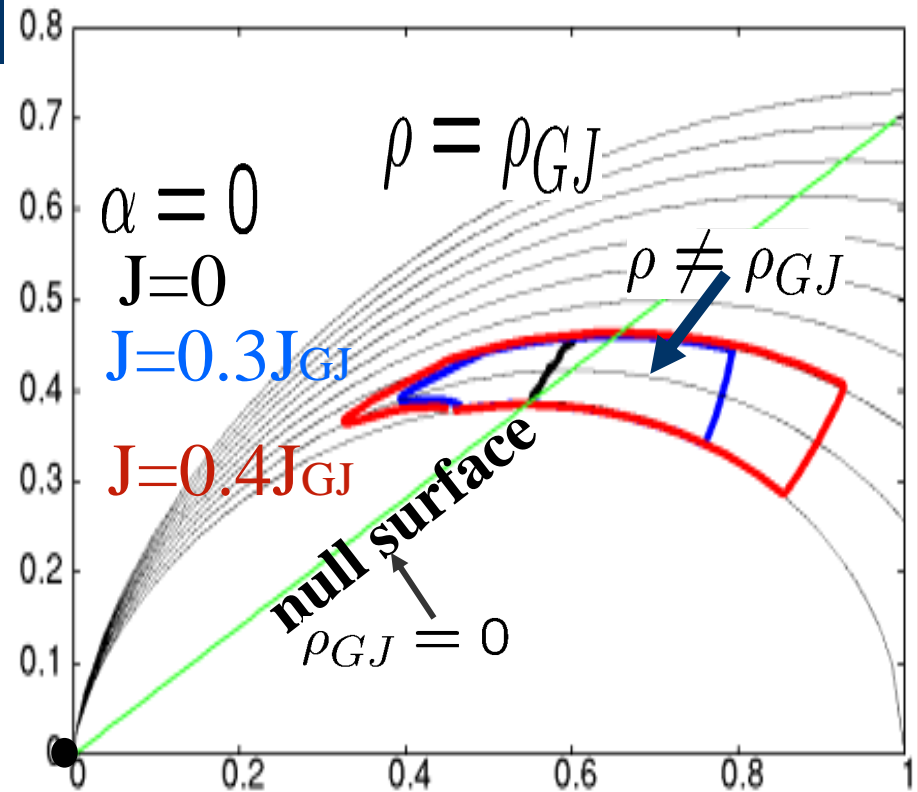
$$\mathbf{B} \cdot \nabla \left( \frac{v_{||} N_{\pm}}{B} \right) = \pm S(\mathbf{r})$$

- 曲率輻射

- photon-photon 对生成過程

- Inner boundary imposed both the Dirichelt and the Neumann-conditions

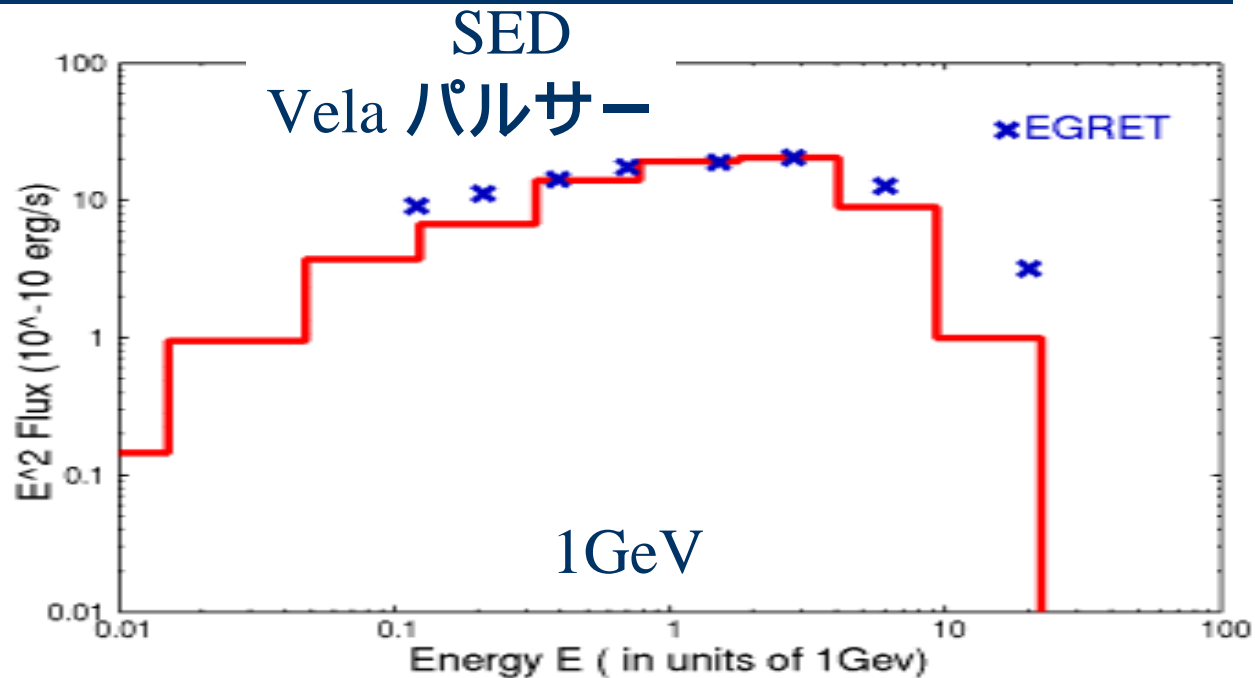
$$\Phi_n = E_{||} = 0$$



Radius in units of light radius  
(Takata et al., 2006 MNRAS)

2, High energy emission model

## 2-D electrodynamical model



加速粒子(  $\sim 10^7$ )の曲率輻射のSED

(Takata et al., 2006 MNRAS)



2, High energy emission model

# 3-D geometrical model the Crab pulsar

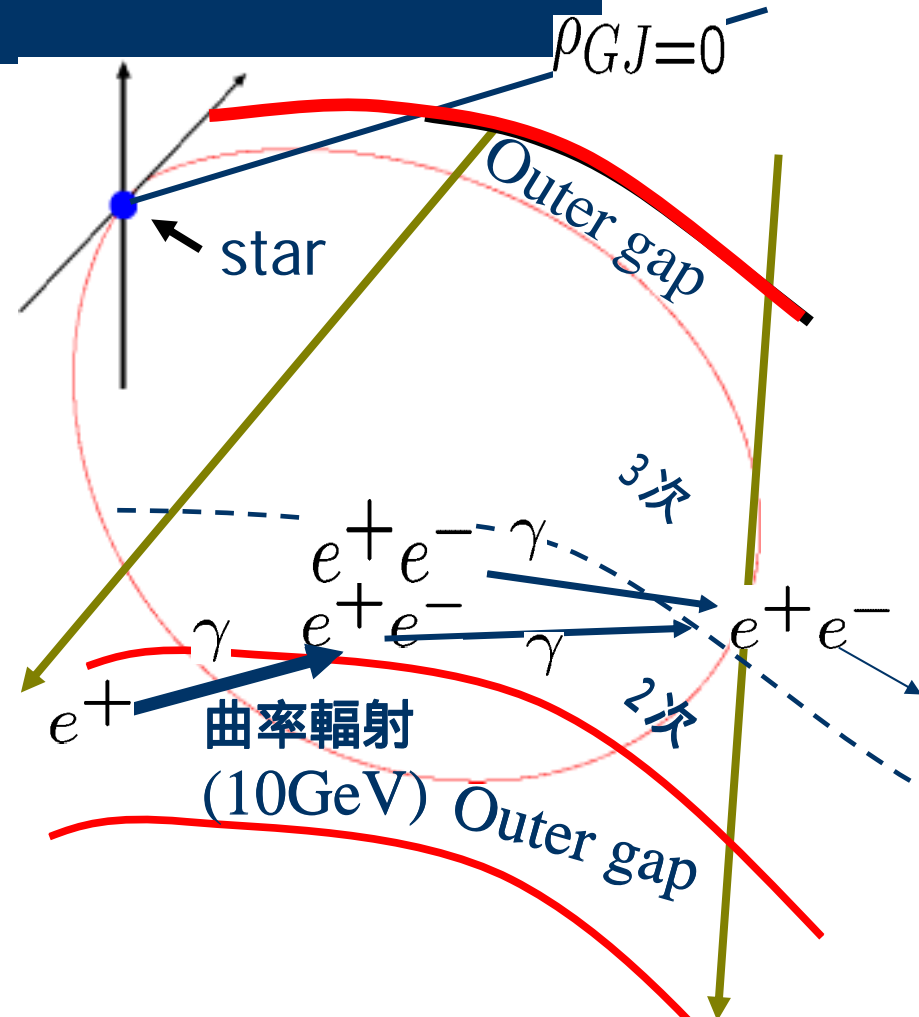
- Gapの3次元幾何学と電場構造を仮定して、曲率輻射を計算。
- 2次、3次pairsからの synchrotron-inverse Compton 放射を計算 (p~2を仮定)

- スペクトル
- 光度曲線
- 偏光放射 (synchrotron)

- 方向は粒子の運動方向 ( $\sim 10^3$ )

$$\vec{k}_1 = \beta_0 \cos \theta_p \vec{b} + \beta_0 \sin \theta_p \vec{b}_\perp + \vec{\beta}_{co}$$

磁力線に沿った + gyration + 共回転

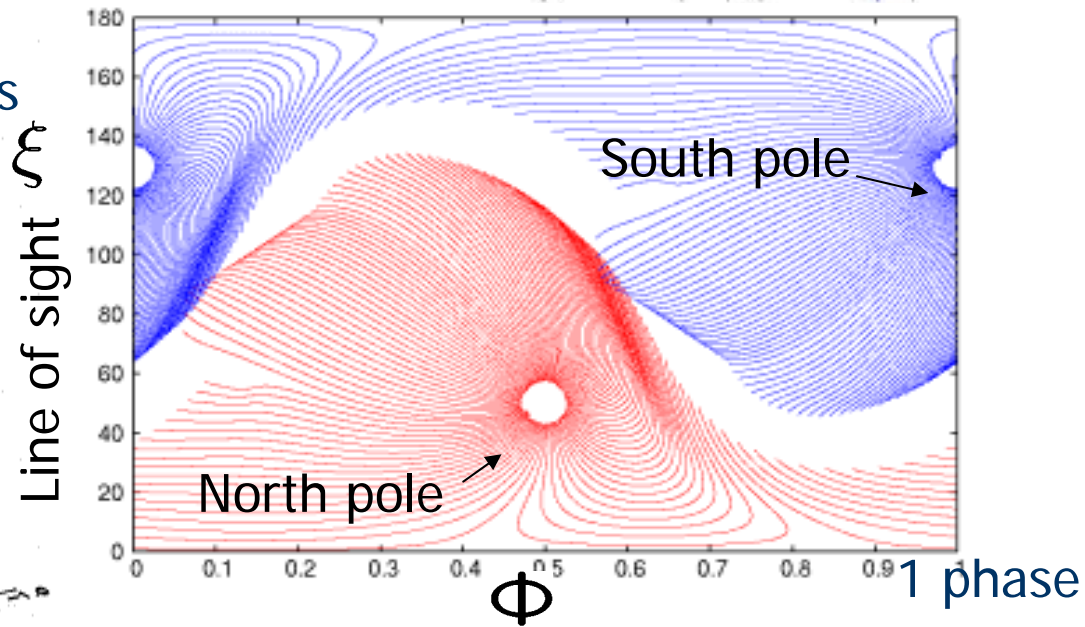
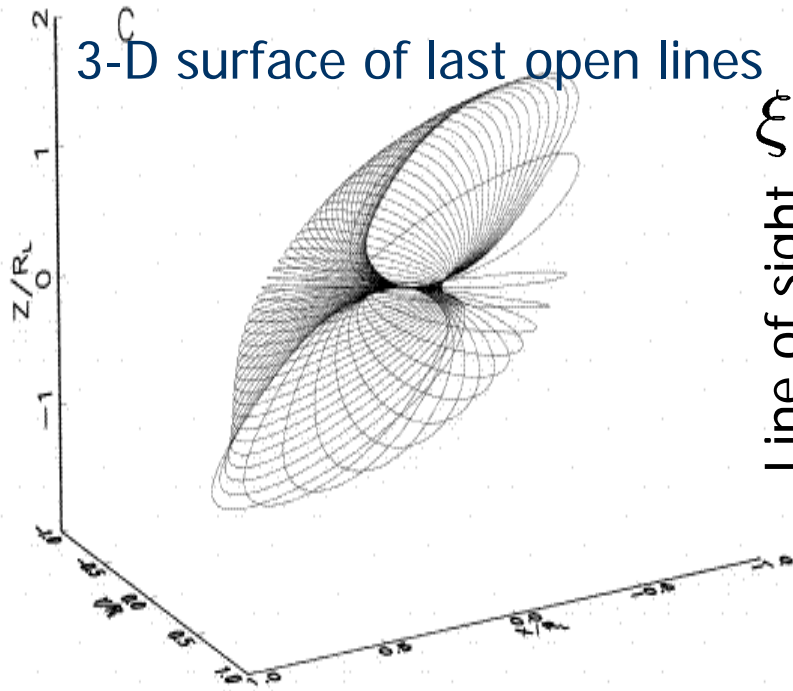
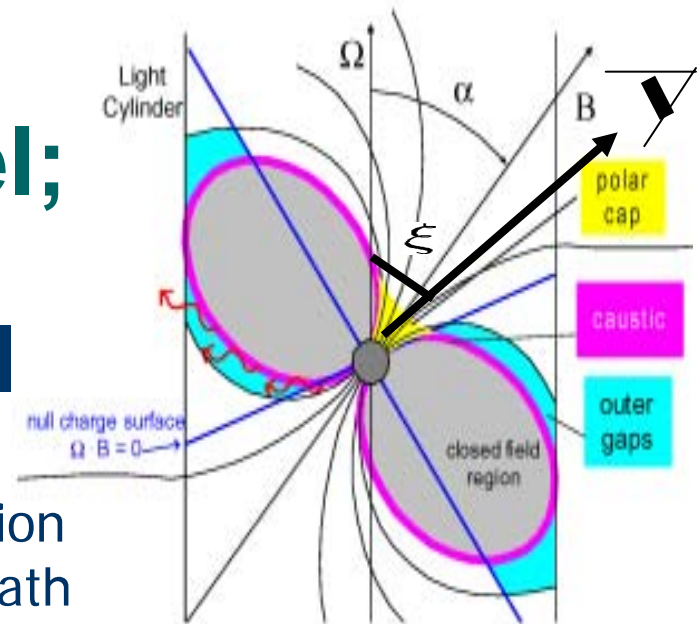


# 3-D geometrical model; Photon mapping

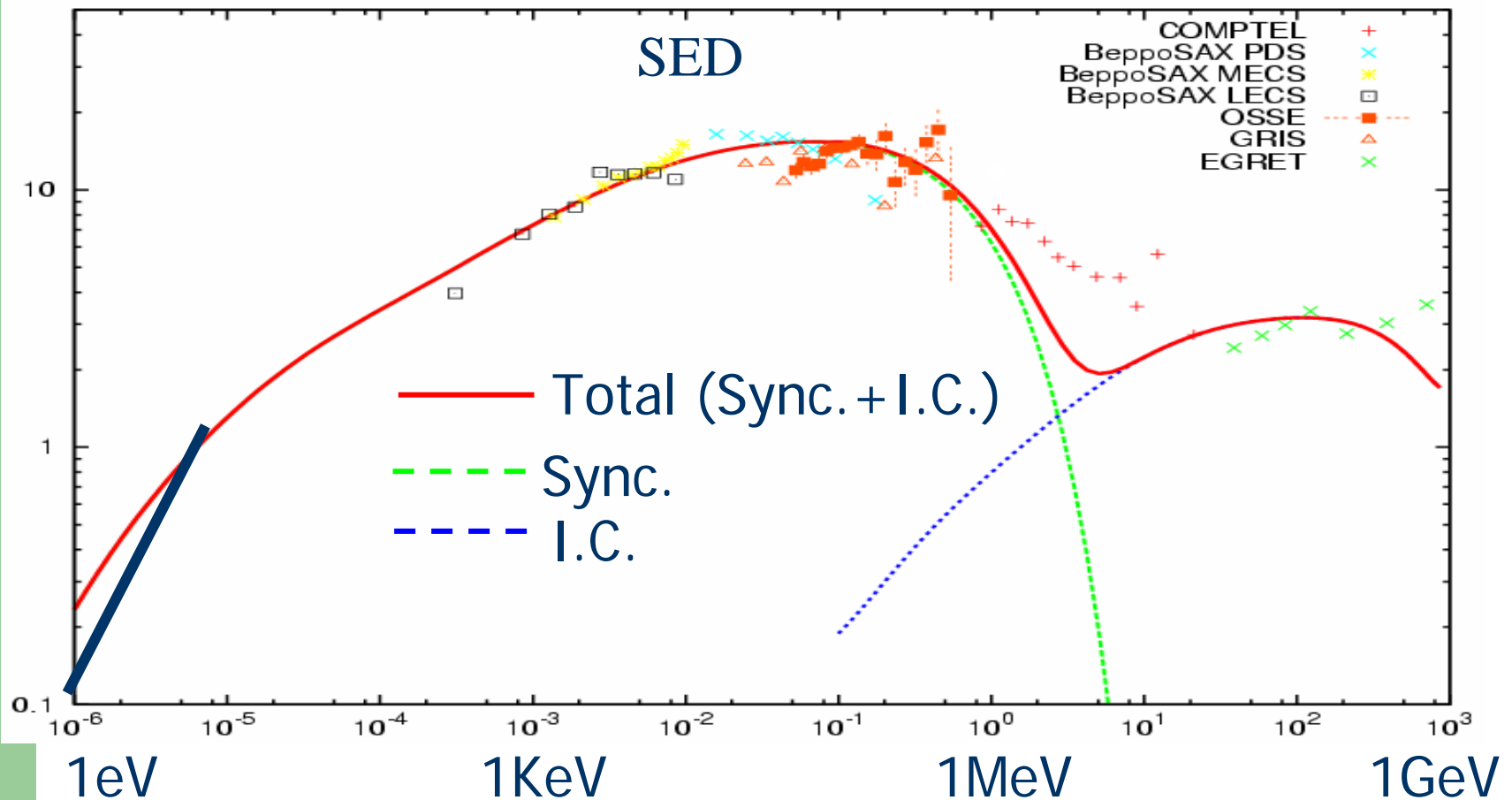
$$\vec{k}_1 = \beta_0 \cos \theta_p \vec{b} + \beta_0 \sin \theta_p \vec{b}_\perp + \vec{\beta}_{co}$$

磁力線に沿った + gyration + 共回転

- Aberration
- Flight path



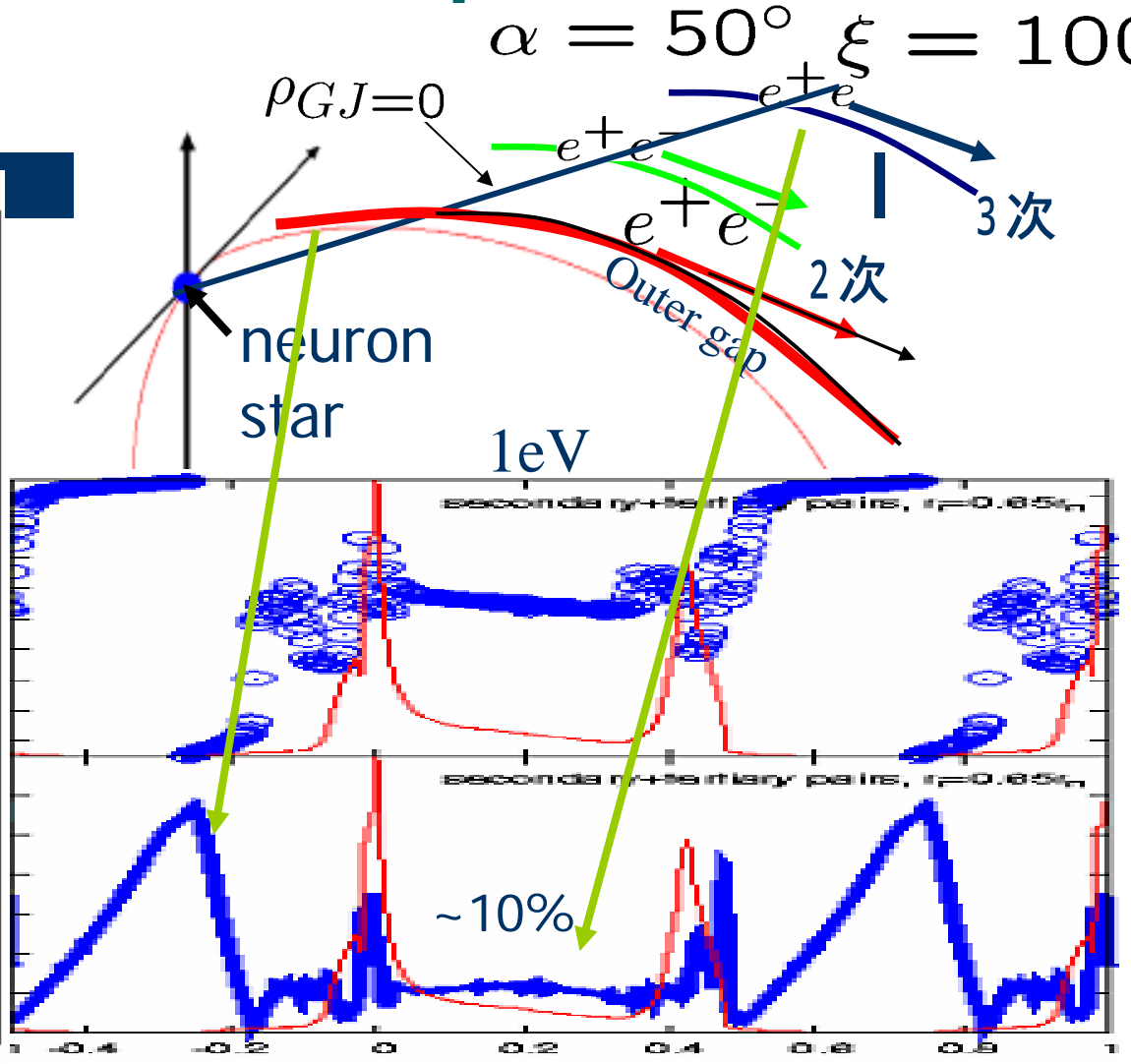
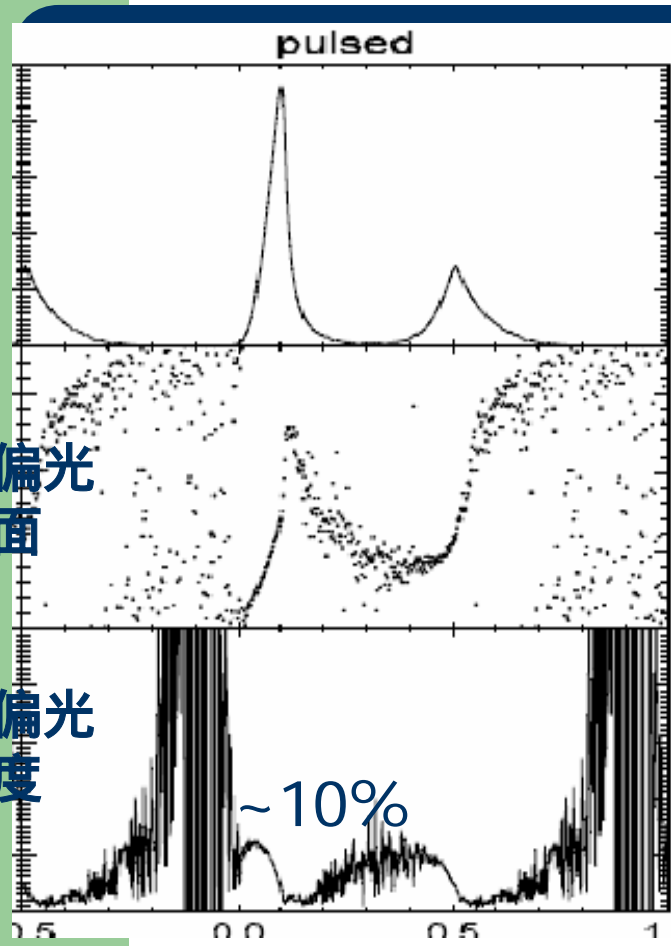
# Results スペクトル $\alpha = 50^\circ$ $\xi = 100^\circ$



# Results: light curve and polarization

$\alpha = 50^\circ$   $\xi = 100^\circ$

Optical





## まとめ

- 2-D electro-dynamicalも用いて、粒子加速領域は星表面近傍から光半径近くまで広がることを示した。
- 3-D geometrical modelを用いて、Crab パルサーの光度曲線、スペクトル、偏光の計算を行った。
- 2次、3次粒子からのシンクロトロン-逆コンプトンで、スペクトル、光度曲線を説明することができる。
- Outer gap の幾何学は(可視光で)偏光の観測を説明することができる。
- 偏光は放射機構、放射領域の詳細な情報を含んでいる。将来の軟X線から軟γ線領域における偏光の観測は、パルサーのみならず、高エネルギー天体を加速、放射の物理の解明に役立つはずである。

## In the future

- 偏光観測が高エネルギー天文学を探る新しいツールになるかもしれない。
  - AXP (2-10keV; Advanced X-ray Polarimeter)
  - POGO (25-200keV; POLarized Gamma Ray Observer)
  - NCT (0.2-10MeV; Nuclear Compton Telescope)
  - MEGA (0.4-5MeV; Medium Energy GAMMA-ray telescope)

# Calculation method of the linear polarization (基本方程式)

- 3-D 放射領域 (last-open line付近に方位方向に2 )、ピッチアングルを仮定
- 各地点での放射方向  
 [=particle(  $\sim 10^3$ ) motion direction]

$$\vec{k}_1 = \beta_0 \cos \theta_p \vec{b} + \beta_0 \sin \theta_p \vec{b}_\perp + \vec{\beta}_{co}$$

磁力線に沿った + gyration + 共回転

- シンクロトロン放射の偏光面

$$\vec{E}_{rad} // \vec{a} \rightarrow (\vec{a} \cdot \vec{k}_1) \vec{k}_1$$

天空面上に投影された加速度ベクトル

$$\vec{a} \propto \vec{b}_\perp$$

- 偏光度  $\Pi_{sy} = \frac{p+1}{p+7/3}$

$p \sim 2$ ; power law index of particle distribution

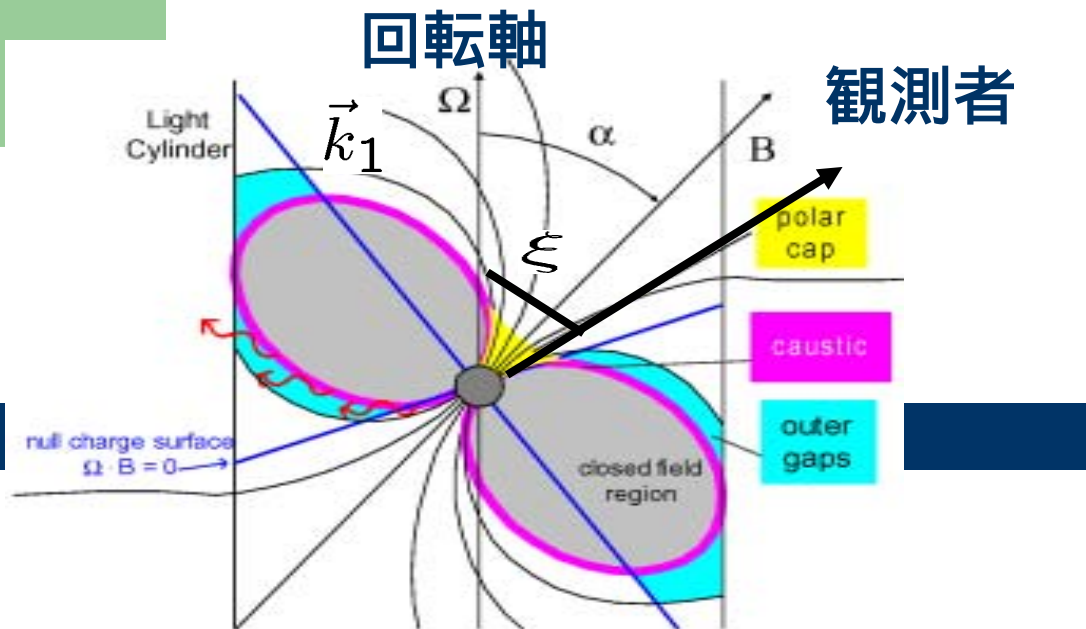
$\vec{b}$ : magnetic unit vector (rotating dipole field)

$$\vec{b}_\perp \equiv \cos \omega_B t \vec{k} + \sin \delta \omega_B t \vec{k} \times \vec{b}$$

$\omega_B$ : gyration frequency

$\vec{k}$ : curvature of field line

$\beta_{co}$ : co-rotation velocity



- Emission direction

$$\vec{k}_1 = \beta_0 \cos \theta_p \vec{b} + \beta_0 \sin \theta_p \vec{b}_\perp + \vec{\beta}_{co}$$



$(\xi, \Phi)$   $\xi$  viewing angle  
 $\Phi$  rotation phase  
 (aberration, flight path)

- Model parameter

- 1, inclination angle
- 2, viewing angle

- Observed the Stokes parameters

$$I(\xi, \phi) = \sum I^i$$

$$Q(\xi, \phi) = \sum Q^i$$

$$U(\xi, \phi) = \sum U^i$$

- Polarization degree

$$P(\xi, \phi) = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}$$

- Polarization position angle

$$\chi(\xi, \phi) = 0.5 \text{atan} \left( \frac{U}{Q} \right)$$