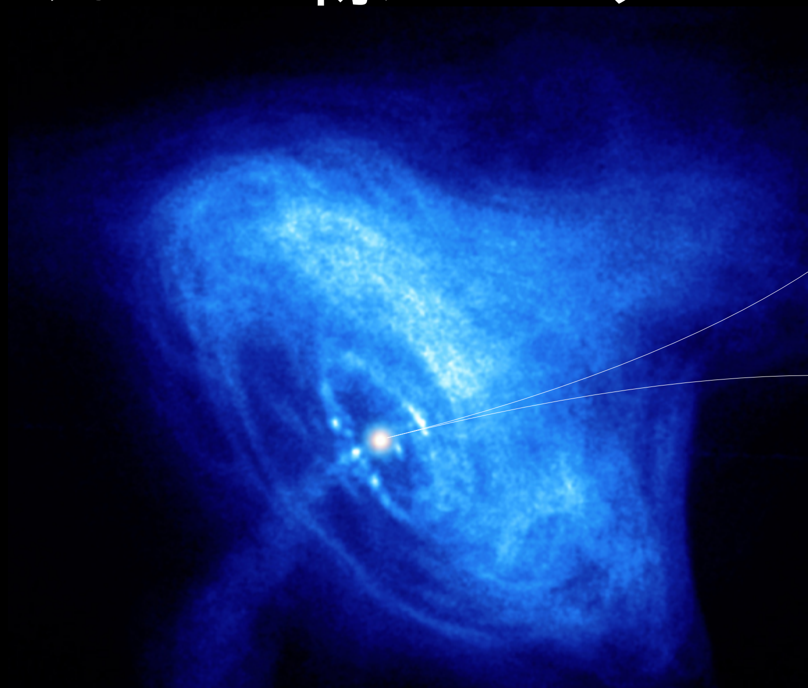
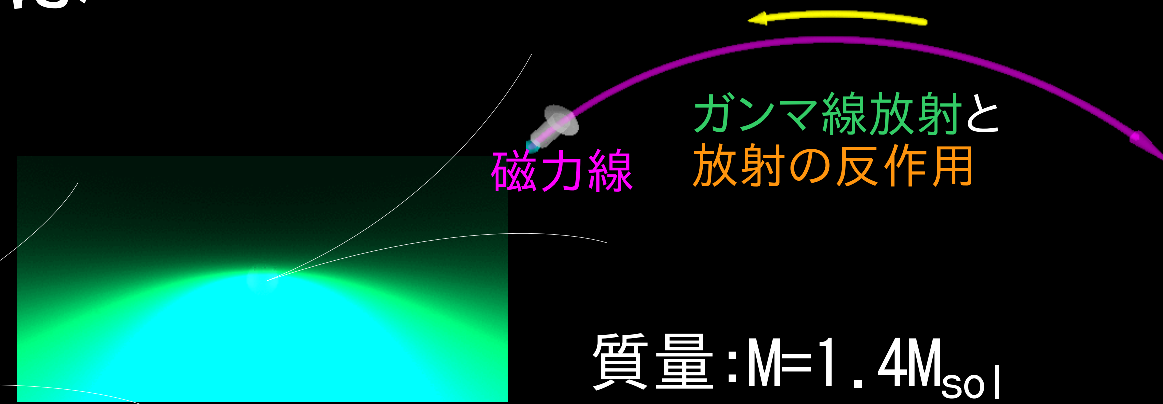
パルサー磁気圏の大局的構造の研究

MUVシステム: GRAPE-A

○和田 智秀(国立天文台)
高田 順平(香港大)
柴田 晋平(山形大)

ガンマ線パルサーとは


かに星雲 画像参考:NASA



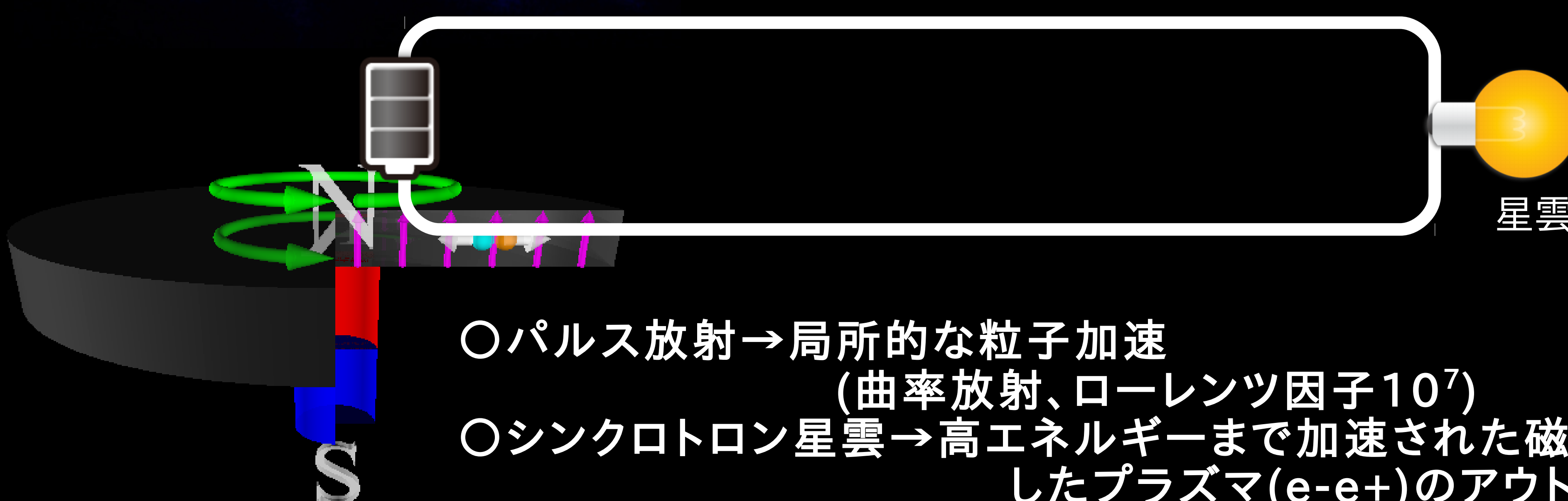
質量:$M=1.4M_{sol}$

半径:$R_{NS}=10^{6}$ cm

<u>自転周期</u>:$P\sim0.03\text{-}1$ sec

<u>表面磁場強度</u>:$B_0=10^{12}$gauss

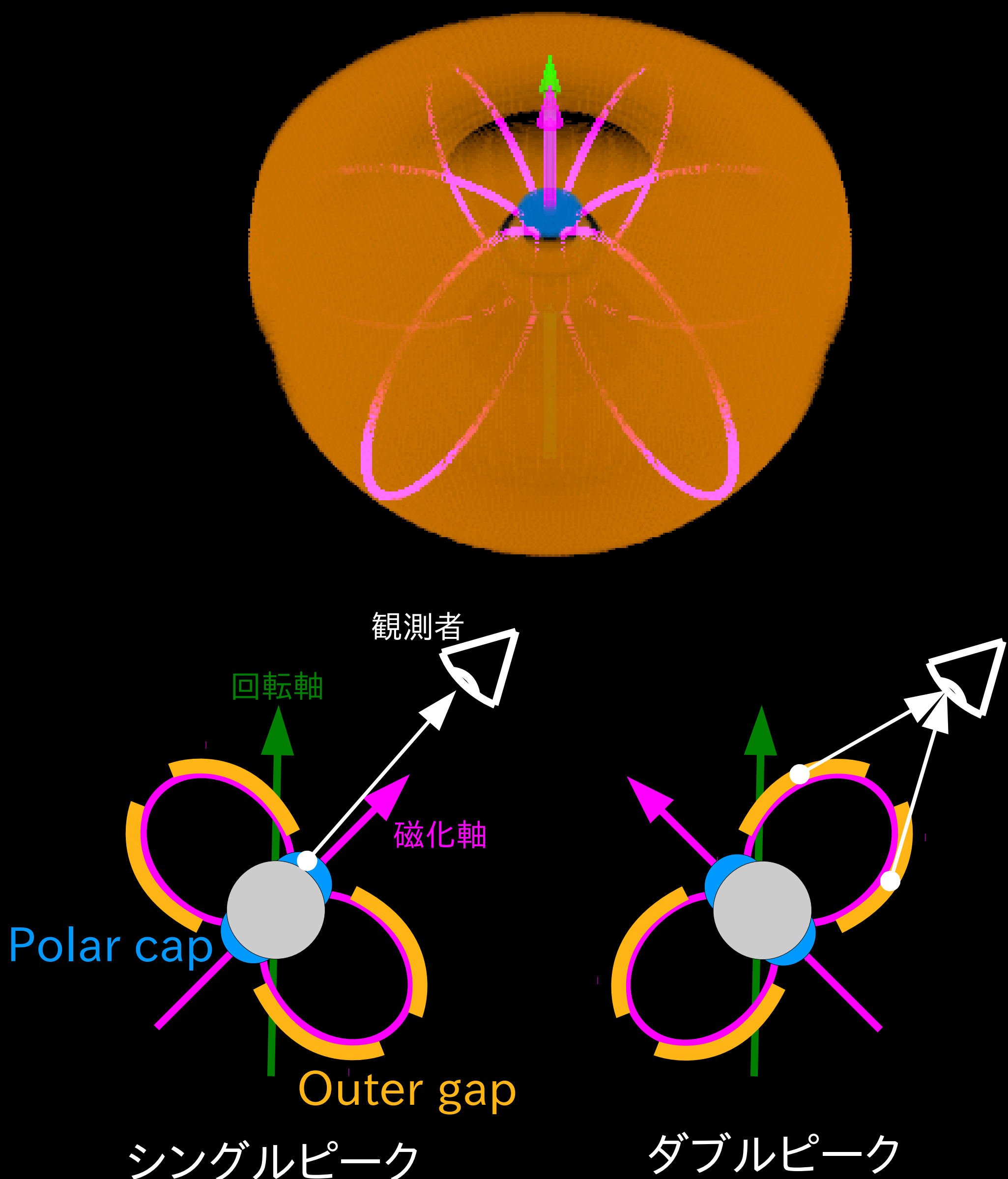
<u>周期変化率</u>:$dP/dt\sim10^{-13}$sec/sec

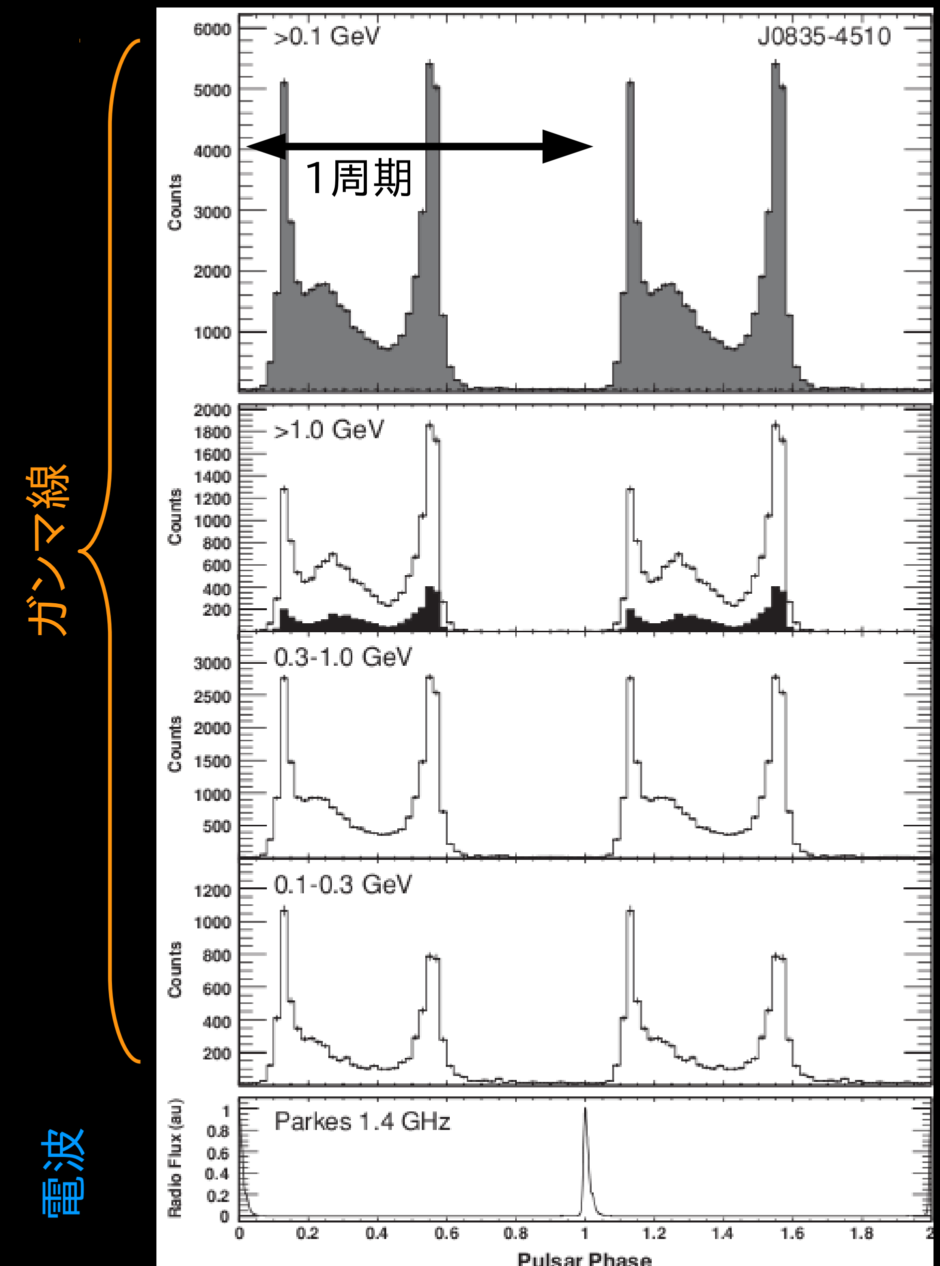


○パルス放射→局所的な粒子加速
(曲率放射、ローレンツ因子10^7)

○シンクロトロン星雲→高エネルギーまで加速された磁化したプラズマ(e-e+)のアウトフロー

現象論的粒子加速領域モデル





Vela pulsarの光度曲線: Abdo et al 2010, ApJ

大局的粒子シミュレーション

Gap
(局所的な粒子加速領域)

加速粒子から放射された
ガンマ線から生成される
電子陽電子対

磁気圏の大局的構造

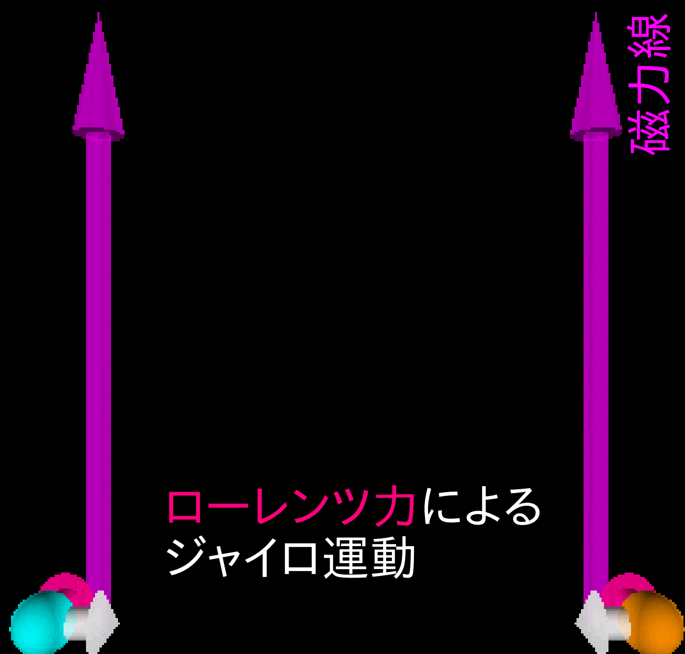
磁気圏のどこでどのように粒子加速が起きているのか?

MHD、force-freeなどの近似を使わず、**電子陽電子対生成**を考慮した磁気圏モデルで**粒子慣性・放射の反作用**を取り入れた**三次元**粒子シミュレーションを行い、磁気圏構造を調査する

プラズマ:
特殊相対論的運動方程式

電磁場:
定常Maxwell方程式

運動方程式



$$m_i \frac{\mathrm{d}\gamma_i \vec{v}_i}{\mathrm{d}t} = q_i \left[\vec{E}_i + \frac{\vec{v}_i}{c} \times \vec{B}_i \right] + \underline{\vec{f}_{\mathrm{rad},i}}$$

曲率半径

$$\epsilon_\gamma = 0.1 \left(\frac{R_\mathrm{c}}{R_\mathrm{l}} \right)^{-1} \left(\frac{\gamma}{\gamma_7} \right)^3 \mathrm{GeV} \quad , \gamma_7 \equiv 10^7$$

$$R_\mathrm{l} \equiv \frac{Pc}{2\pi} = 1.6 \times 10^2 \left(\frac{P}{P_{0.03}} \right) R_\mathrm{NS}$$

放射の反作用; アブラハム-ローレンツの式

$$\vec{f}_{\mathrm{rad},i} = \frac{2q_i^3\gamma_i}{3mc^3} \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \nabla \right) \vec{E}_i + \frac{\vec{v}_i}{c} \times \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \nabla \right) \vec{B}_i \right]$$

$$- \frac{2q_i^4}{3m_i^2 c^4} \left[\vec{E}_i \times \vec{B}_i + \frac{1}{c} \vec{B}_i \times (\vec{B}_i \times \vec{v}_i) + \frac{1}{c} \vec{E}_i (\vec{v}_i \cdot \vec{E}_i) \right]$$

$$\underline{- \frac{2q_i^4\gamma_i^2}{3m_i^2 c^5} \left[\left(\vec{E}_i + \frac{\vec{v}_i}{c} \times \vec{B}_i \right)^2 - \frac{1}{c^2} (\vec{E}_i \cdot \vec{v}_i)^2 \right] \vec{v}_i}$$

定常な電磁場の解法

- 内部で一様に磁化した回転する導体球が外部に持つ電磁場に対してラプラス方程式を満たす解(真空解)
- 粒子間相互作用についてはポワソン方程式を境界条件のもとで満たすグリーン関数の重ね合わせ

電場

- $-\nabla^2\phi = 0$
- $-\nabla^2\phi = 4\pi\rho$

境界条件;

$$\phi(\vec{R}) = \frac{\mu\Omega\sin^2\theta}{cR} + \mathrm{const}, \quad \phi(\infty) = 0$$

$$\phi_i = \underbrace{\phi_1 + \phi_4}_{\text{真空解}} + \underbrace{\phi_{ij}}_{\text{粒子間相互作用}}$$

$$\vec{E}_i = \underbrace{\vec{E}_1 + \vec{E}_4}_{\text{真空解}} + \underbrace{\vec{E}_{ij}}_{\text{粒子間相互作用}}$$

磁場

- $-\nabla^2\vec{A} = \vec{0}$
- $-\nabla^2\vec{A} = \frac{4\pi}{c}\vec{j}$

境界条件;

$$\vec{A}(\vec{R}) = \vec{e}_\varphi\frac{\mu\sin\theta}{R^2}, \quad \vec{A}(\infty) = \vec{0}$$

$$\vec{B}_i = \underbrace{\vec{B}_\mathrm{d}}_{\text{真空解}} + \underbrace{\vec{B}_{ij}}_{\text{粒子間相互作用}}$$

$$\vec{A}_i = \underbrace{\vec{A}_\mathrm{d}}_{\text{真空解}} + \underbrace{\vec{A}_{ij}}_{\text{粒子間相互作用}}$$

(軸対称な場合の)真空解

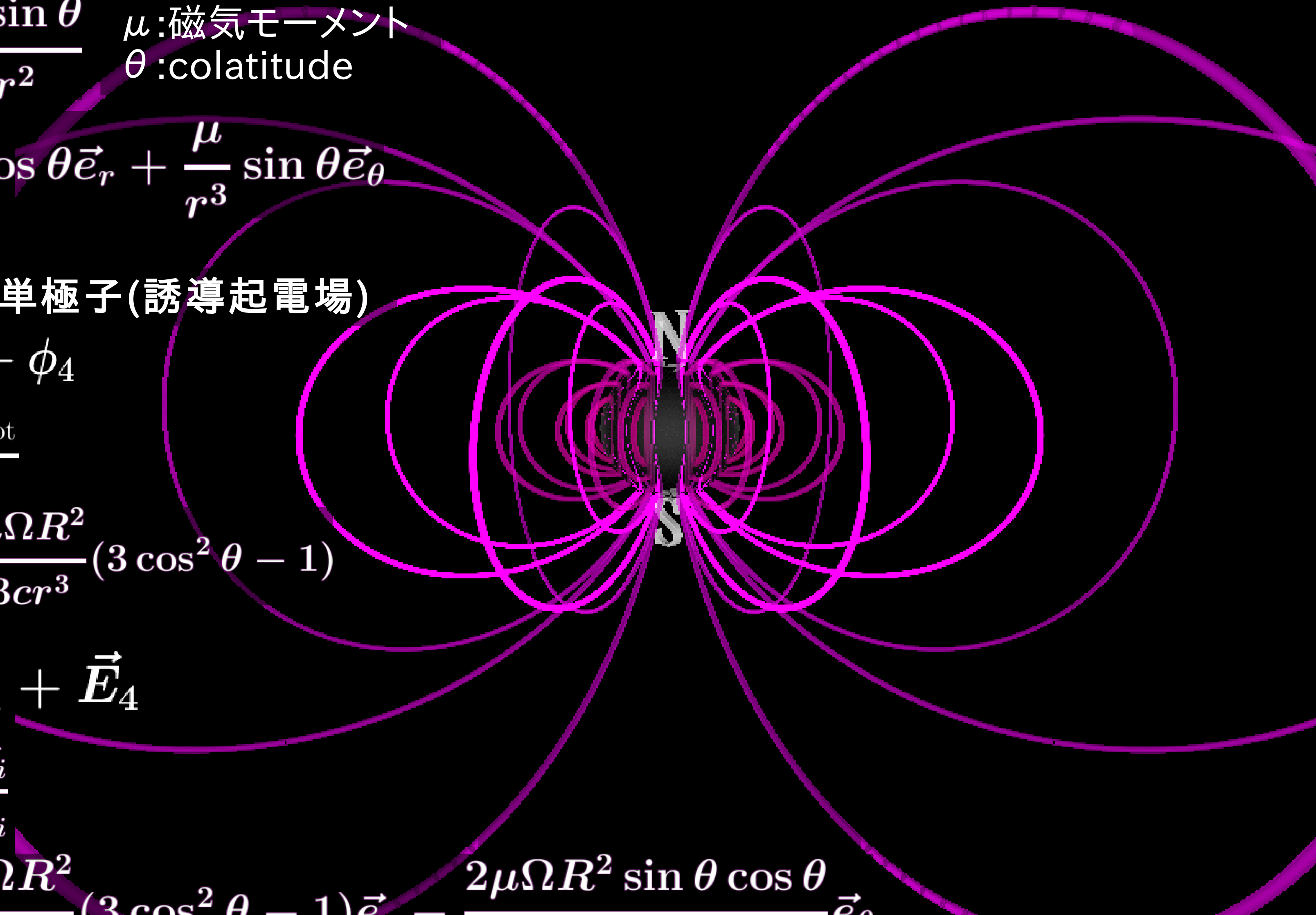
紫:磁力線
黄色:電気力線

双極磁場

$$\vec{A}_{\rm d} = \vec{e}_\varphi \frac{\mu \sin\theta}{r^2}$$

μ :磁気モーメント
θ :colatitude

$$\vec{B}_{\rm d} = \frac{2\mu}{r^3}\cos\theta \vec{e}_r + \frac{\mu}{r^3}\sin\theta \vec{e}_\theta$$



四重極電場+単極子(誘導起電場)

$$\phi_{\rm vac} = \phi_1 + \phi_4$$

$$\phi_1 = \frac{Q_{\rm tot}}{r}$$

$$\phi_4 = -\frac{\mu\Omega R^2}{3cr^3}(3\cos^2\theta - 1)$$

$$\vec{E}_{\rm vac} = \vec{E}_1 + \vec{E}_4$$

$$\vec{E}_1 = \frac{Q_{\rm sys}}{r^2}\frac{\vec{r}_i}{r_i}$$

$$\vec{E}_4 = -\frac{\mu\Omega R^2}{cr^4}(3\cos^2\theta - 1)\vec{e}_r - \frac{2\mu\Omega R^2 \sin\theta\cos\theta}{cr^4}\vec{e}_\theta$$

粒子間相互作用

$$\vec{E}_{ij} = -\nabla \phi_{ij}$$

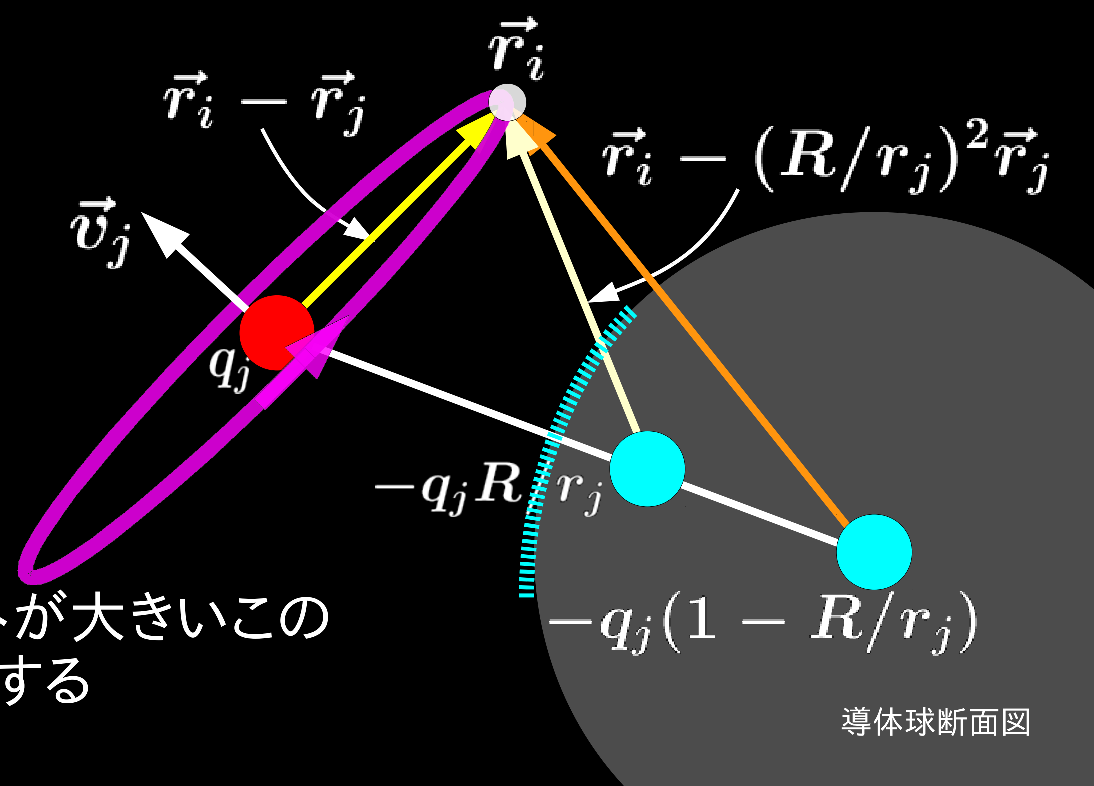
$$\phi_{ij} = \sum_j q_j \left[\frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} - \frac{R/r_j}{|\vec{r}_i - (R/r_j)^2 \vec{r}_j|} - \left(1 - \frac{R}{r_j}\right) \frac{1}{r_i} \right]$$

$$\vec{E}_{ij} = \sum_{j=1}^{n} q_j \left[\frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3} - \frac{R}{r_j} \frac{\vec{r}_i - (R/r_j)^2 \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - (R/r_j)^2 \vec{r}_j|^3} - \left(1 - \frac{R}{r_j}\right) \frac{\vec{r}_i}{r_i^3} \right]$$

$$\vec{B}_{ij} = \nabla \times \vec{A}_{ij}$$

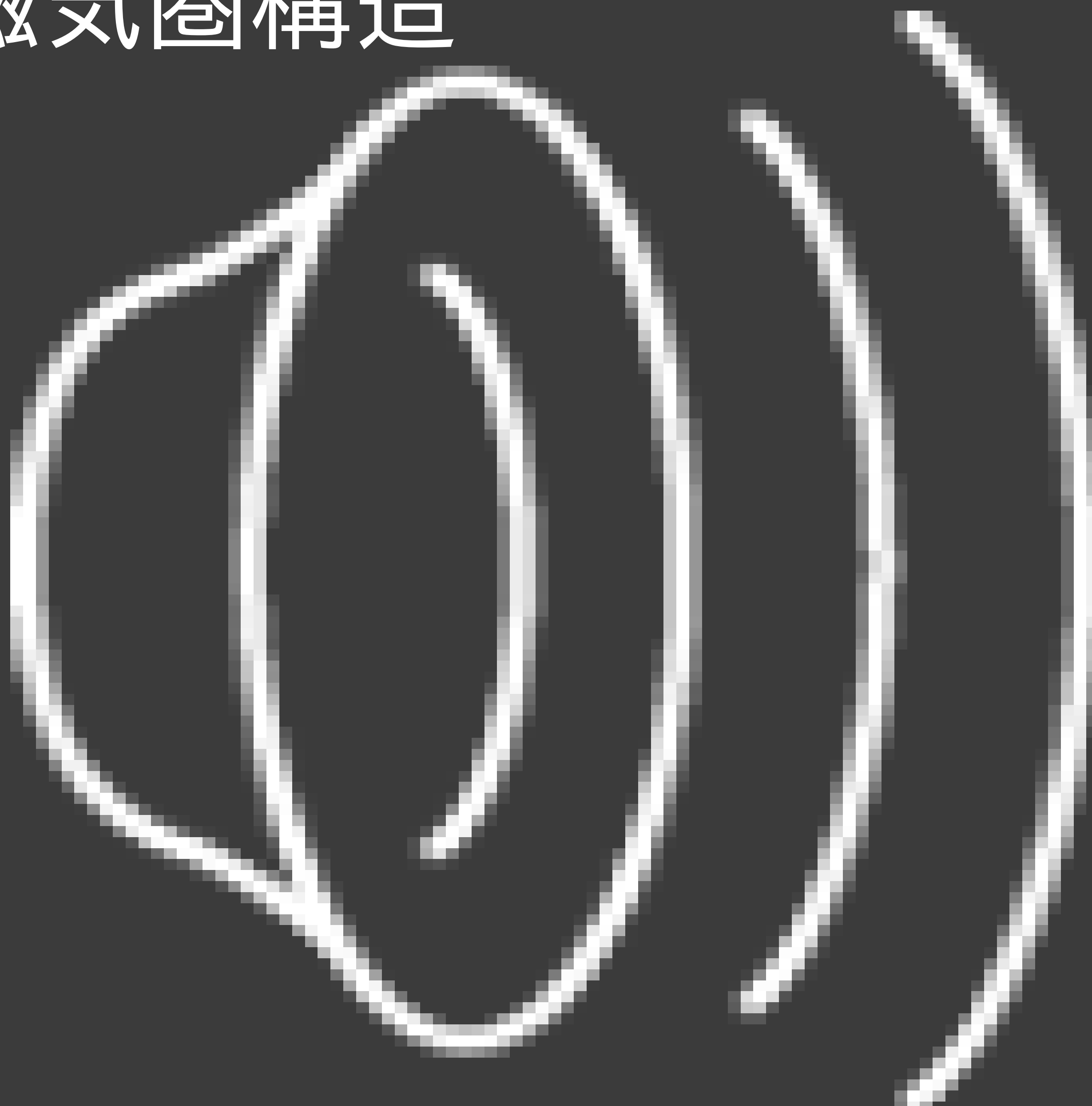
$$\vec{A}_{ij} = \frac{1}{c} \sum_{j=1}^{N} \frac{q_j \vec{v}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$

$$\vec{B}_{ij} = \sum_{j=1}^{n} \frac{q_j \vec{v}_j \times (\vec{r}_i - \vec{r}_j)}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3}$$



N^{2}に比例する非常にコストが大きいこの計算をGRAPE-DRで加速する

定常磁気圏構造



電子陽電子対生成の取扱い

- $$l_{\rm p} = \frac{4.4}{\alpha}\frac{\hbar}{mc}\frac{B_{\rm q}}{B_{\perp}}\exp\left(\frac{4}{3\chi}\right)$$; B- γ

  $$B_{\perp} = B\sin\theta$$;光子伝搬方向に対する磁場の垂直成分

  $$\chi = \frac{\epsilon_{\gamma}}{2mc^2}\frac{B_{\perp}}{B_{\rm q}} \qquad B_{\rm q} = \frac{m^2c^3}{c\hbar} = 4.41\times 10^{13}\,{\rm G}$$

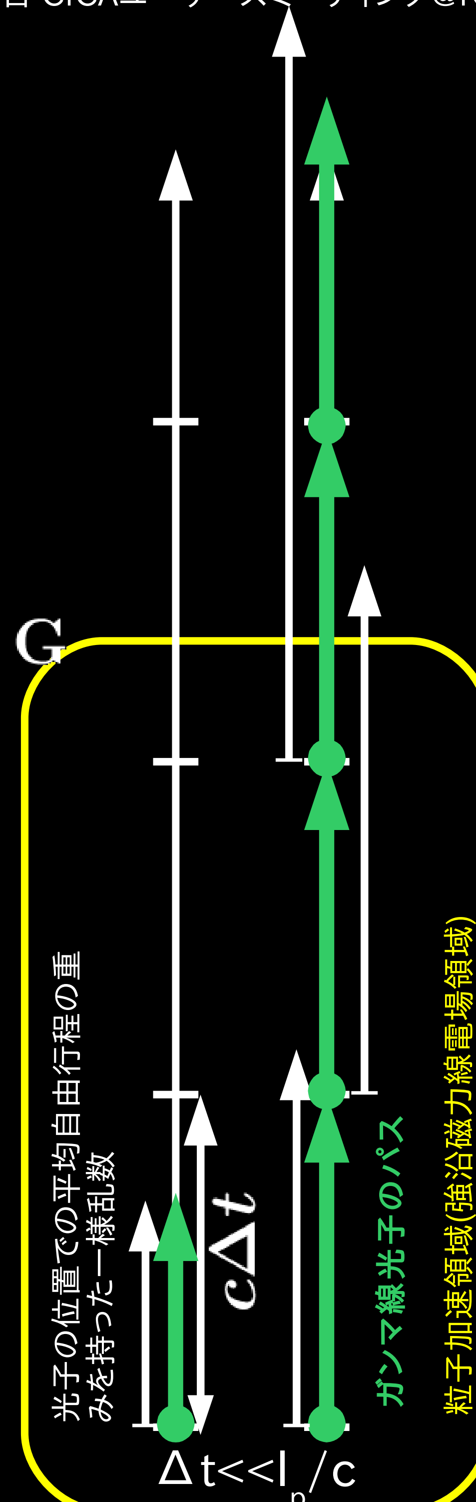
- $$l_{\rm p} = \frac{1}{n_{\rm X}\sigma_{\rm p}}$$; X- γ

  $$\sigma_{\rm p} = \frac{3}{16}\sigma_{\rm T}(1-v^2)\left[(3-v^4)\ln\frac{1+v}{1-v} - 2v(2-v^2)\right]$$

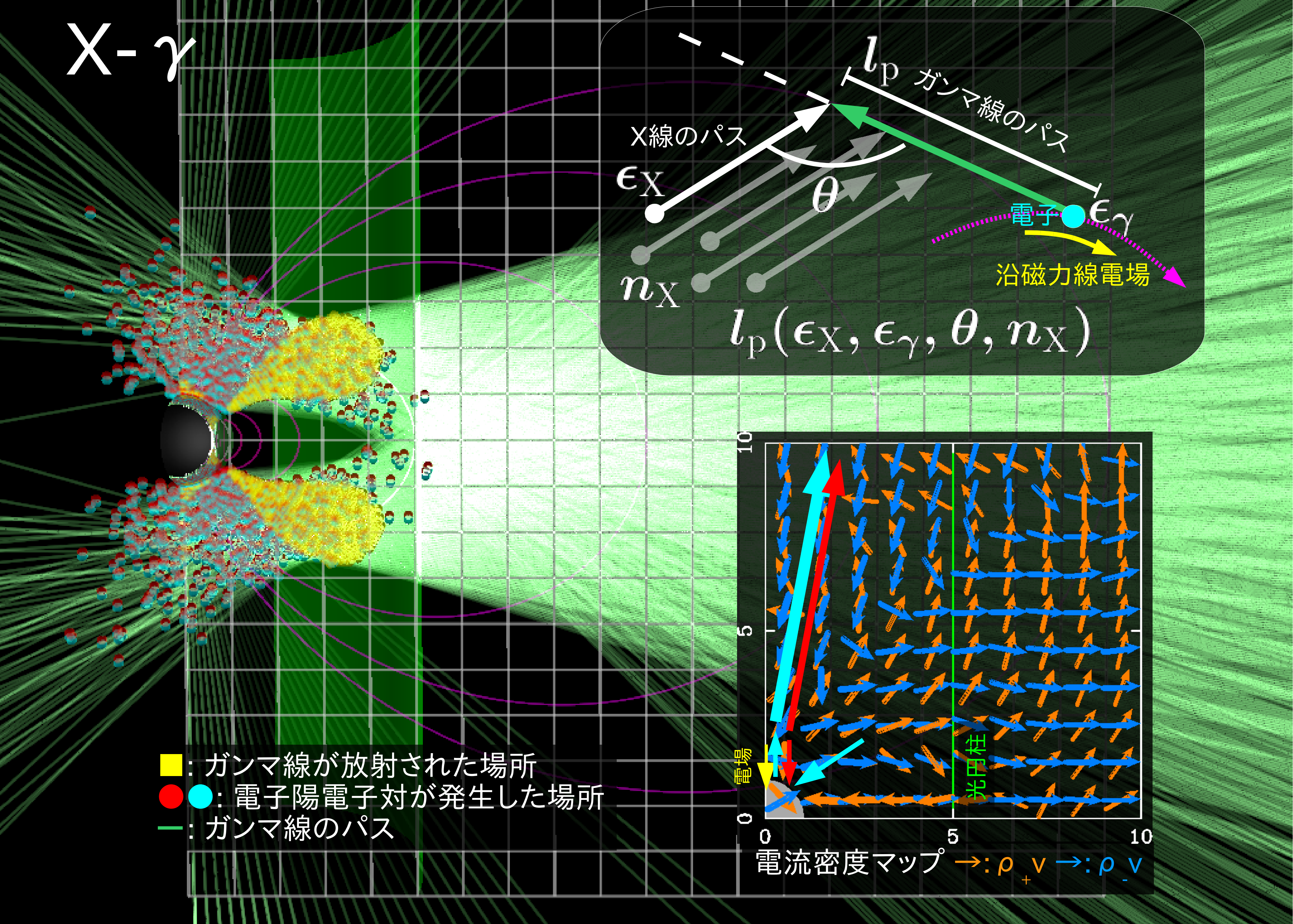
  $\sigma_{\rm T}$; トムソンの散乱断面積

  $$v = \sqrt{1-\frac{2}{1-\mu_{\rm c}}\frac{(mc^2)^2}{\epsilon_{\gamma}\epsilon_{\rm X}}}$$

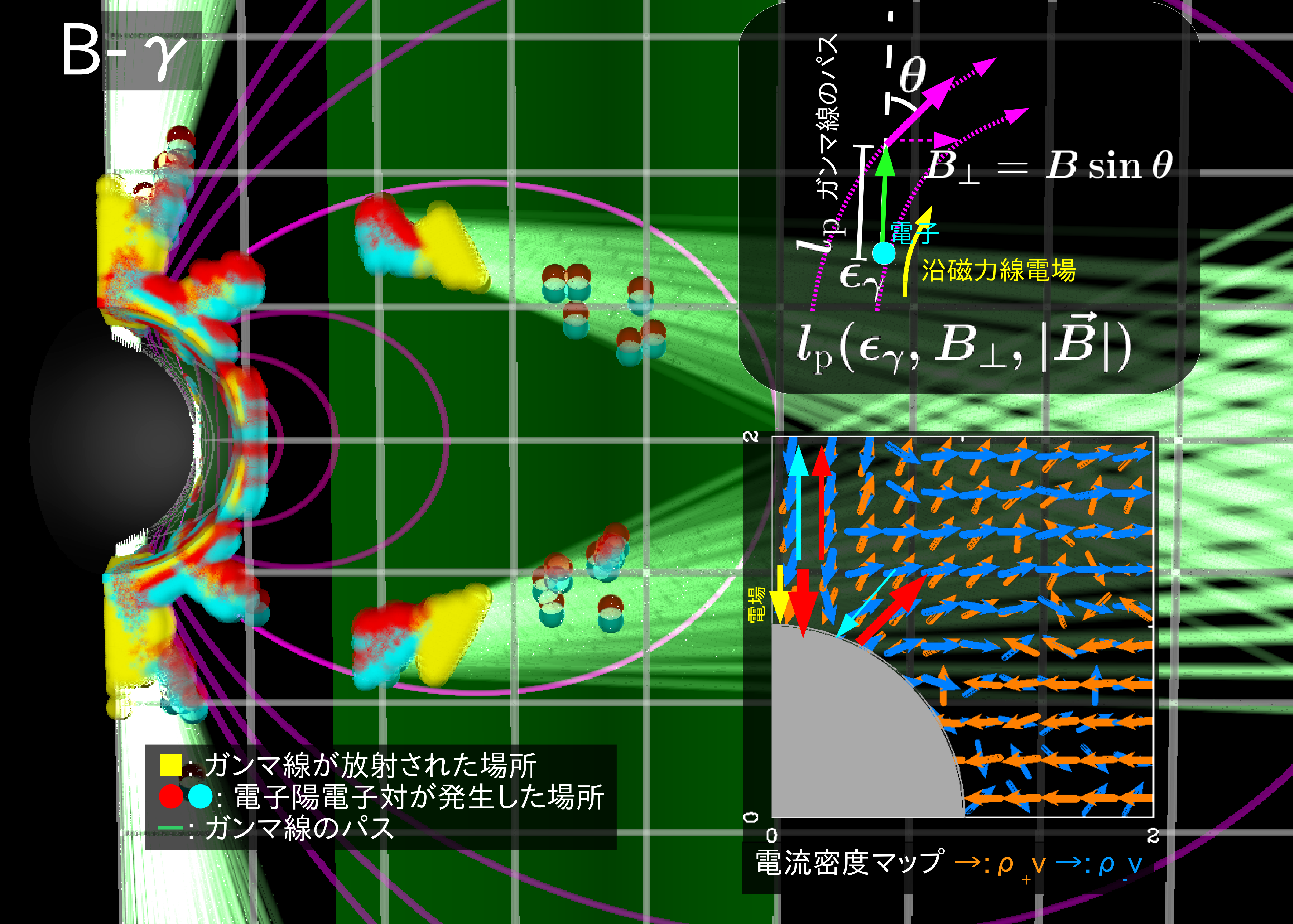
  $$\mu_{\rm c} = \cos^{-1}\theta$$; 光子の衝突角



X- γ

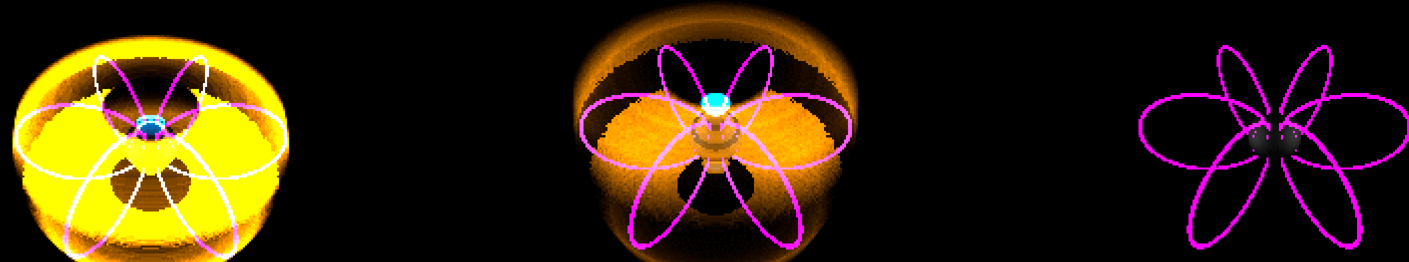

l_{p}
ガンマ線のパス
X線のパス
ϵ_{X}
θ
電子
ϵ_{γ}
沿磁力線電場
n_{X}
$l_{\mathrm{p}}(\epsilon_{\mathrm{X}}, \epsilon_{\gamma}, \theta, n_{\mathrm{X}})$
: ガンマ線が放射された場所
: 電子陽電子対が発生した場所
: ガンマ線のパス
電場
光円柱
0
5
10
電流密度マップ →: $\rho_+ v$ →: $\rho_- v$

B- γ



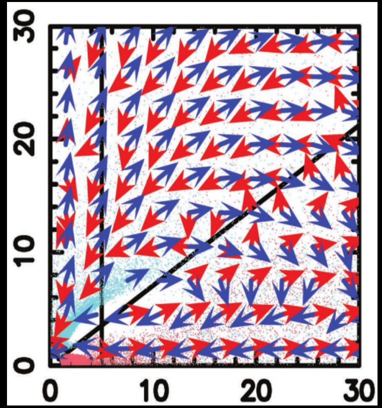
ガンマ線のパス
θ
$B_\perp = B\sin\theta$
l_p
電子
ϵ_γ
沿磁力線電場
$l_\mathrm{p}(\epsilon_\gamma, B_\perp, |\vec{B}|)$
2
電場
0
0
2
電流密度マップ →: ρ +v →: ρ -v
■: ガンマ線が放射された場所
●●: 電子陽電子対が発生した場所
—: ガンマ線のパス

まとめと今後の課題

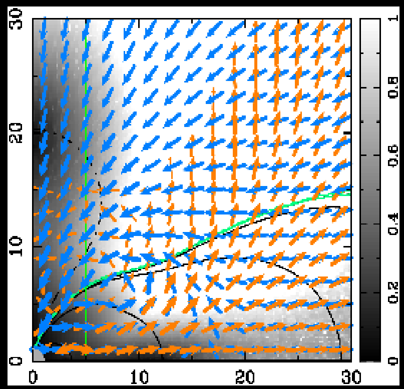


若年　中高年　老年

自転周期 (加速に使える電位差)	短 (大)		長 (小)
ガンマ線フラックス	多		少
電子陽電子対生成	多	B-γ	少
	多	X-γ	少
Gapサイズ	小		大
加速効率	低		高



Wada & Shibata 2007, MNRAS



Wada & Shibata 2010, submitted

謝辞

本研究を行うにあたり、高田順平さん、木坂将太さんには多くの議論をいただきました。また、数値計算および結果の可視化のための資源として国立天文台CfCAの機器を利用させて頂いています。合わせて感謝申し上げます。

4D2U FOUR-DIMENSIONAL DIGITAL UNIVERSE PROJECT, NAOJ

CfCA Center for Computational Astrophysics

国立天文台四次元デジタル宇宙プロジェクトでは皆様から提供頂いた研究データの可視化および四次元シアターでの上映作品の作成に積極的に取り組んでいます。研究者の皆様からのデータ提供・提案などお待ちしておりますのでよろしくお願い致します。

懇親会スタッフの皆様お疲れさまでした

↑餃子ハイ状態