

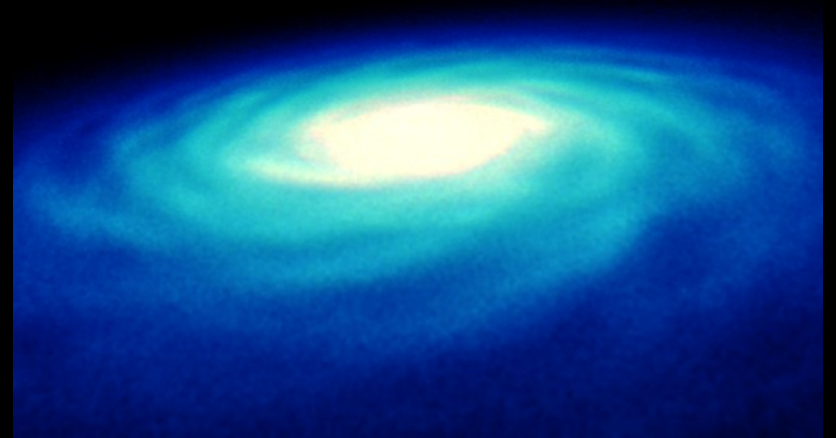
2010年度 N体シミュレーション大寒の学校

～プラズマのN体シミュレーションの紹介～

国立天文台CfCA 和田智秀

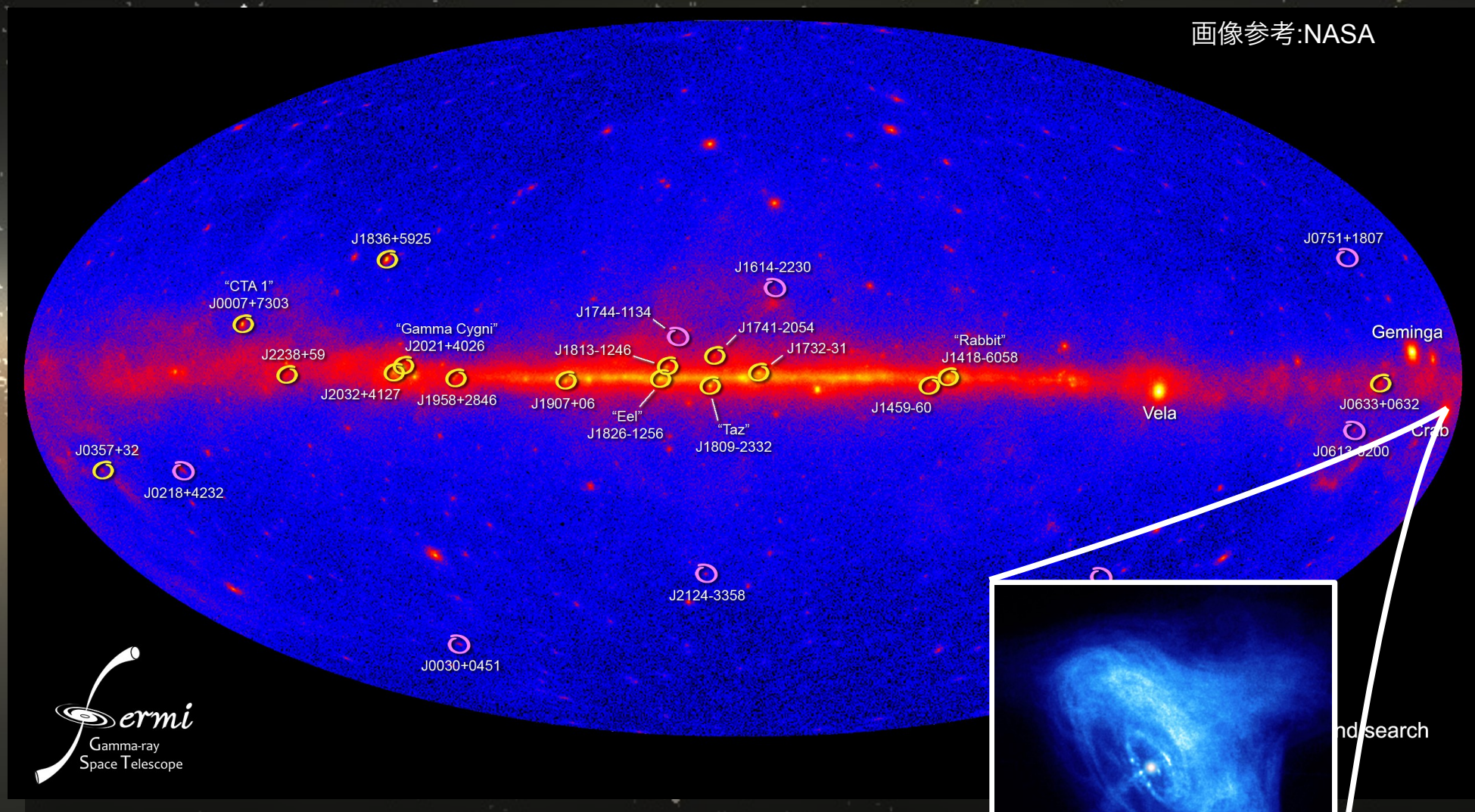


<http://4d2u.nao.ac.jp/>

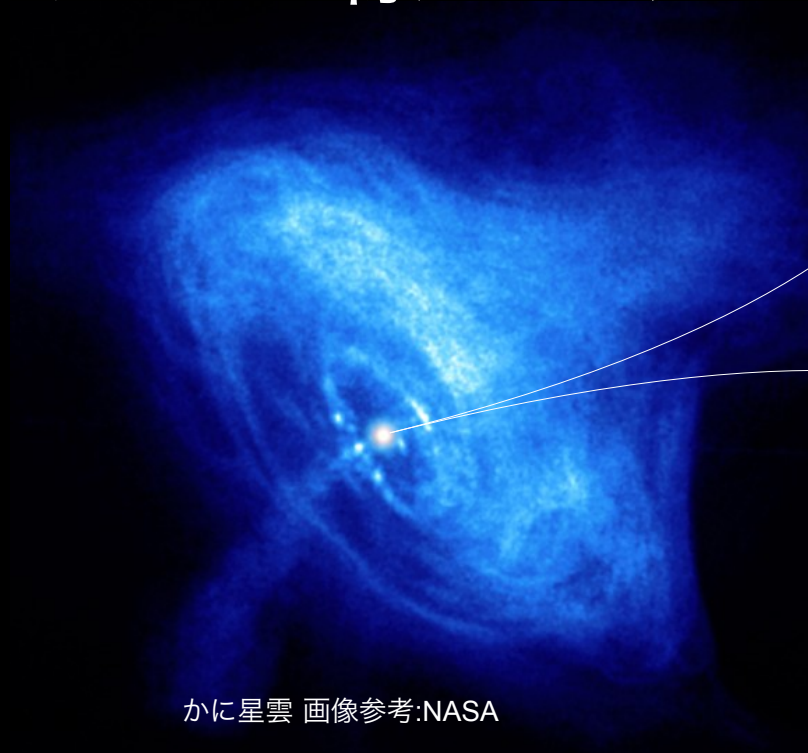


データ提供: 藤井さん

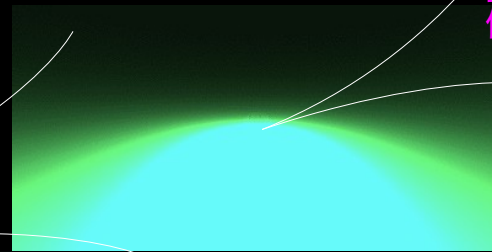
ガンマ線で観た天の川



ガンマ線パルサーとは

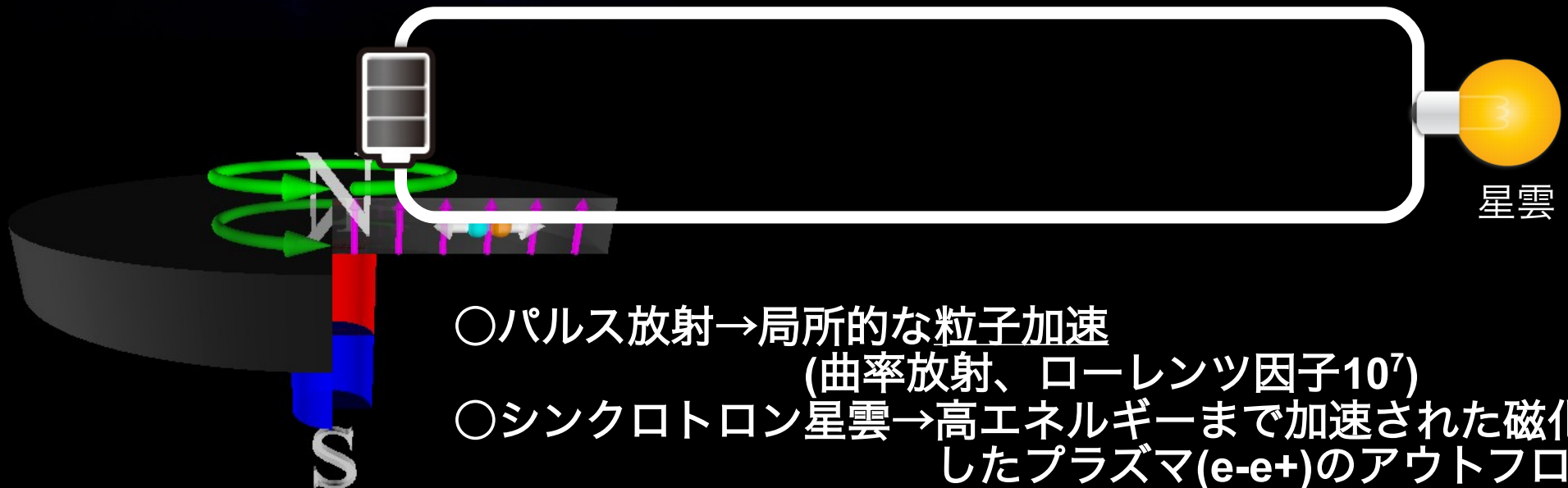


かに星雲 画像参考:NASA



磁力線

沿磁力線電場

ガンマ線放射と
放射の反作用質量: $M=1.4M_{\text{sol}}$ 半径: $R_{\text{NS}}=10^6 \text{ cm}$ 自転周期: $P \sim 0.03\text{-}1 \text{ sec}$ 表面磁場強度: $B_0=10^{12} \text{ gauss}$ 周期変化率: $dP/dt \sim 10^{-13} \text{ sec/sec}$ 

○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

大局的プラズマシミュレーション

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



ローレンツ力による
ジャイロ運動

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

沿磁力線電場

ガンマ線放射と放射の反作用

$$\epsilon_\gamma = 0.1 \left(\frac{R_c}{R_l} \right)^{-1} \left(\frac{\gamma}{\gamma_7} \right)^3 \text{ GeV}, \quad \gamma_7 \equiv 10^7$$

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

放射の反作用; アブラハム-ローレンツの式

$$\begin{aligned} \vec{f}_{\text{rad},i} = & \frac{2q_i^3 \gamma_i}{3mc^3} \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \nabla \right) \vec{E}_i + \frac{\vec{v}_i}{c} \times \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \nabla \right) \vec{B}_i \right] \\ & - \frac{2q_i^4}{3m_i^2 c^4} \left[\vec{E}_i \times \vec{B}_i + \frac{1}{c} \vec{B}_i \times (\vec{B}_i \times \vec{v}_i) + \frac{1}{c} \vec{E}_i (\vec{v}_i \cdot \vec{E}_i) \right] \\ & - \frac{2q_i^4 \gamma_i^2}{3m_i^2 c^5} \left[\left(\vec{E}_i + \frac{\vec{v}_i}{c} \times \vec{B}_i \right)^2 - \frac{1}{c^2} (\vec{E}_i \cdot \vec{v}_i)^2 \right] \vec{v}_i \end{aligned}$$

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \bullet -\nabla^2 \phi = 0 \\ \bullet -\nabla^2 \phi = 4\pi\rho \\ \text{境界条件;} \\ \phi(\vec{R}) = \frac{\mu\Omega \sin^2 \theta}{cR} + \text{const}, \quad \phi(\infty) = 0 \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \phi_i &= \underline{\phi_1} + \underline{\phi_4} + \underline{\phi_{ij}} \\ \vec{E}_i &= \underline{\vec{E}_1} + \underline{\vec{E}_4} + \underline{\vec{E}_{ij}} \end{aligned}$$

真空解 粒子間相互作用

磁場

$$\left\{ \begin{array}{l} \bullet -\nabla^2 \vec{A} = \vec{0} \\ \bullet -\nabla^2 \vec{A} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} \\ \text{境界条件;} \\ \vec{A}(\vec{R}) = \vec{e}_\varphi \frac{\mu \sin \theta}{R^2}, \quad \vec{A}(\infty) = \vec{0} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_i &= \underline{\vec{B}_d} + \underline{\vec{B}_{ij}} \\ \vec{A}_i &= \underline{\vec{A}_d} + \underline{\vec{A}_{ij}} \end{aligned}$$

真空解 粒子間相互作用

(軸対称な場合の)真空解

双極磁場

紫:磁力線
黄色:電気力線

$$\vec{A}_d = \vec{e}_\varphi \frac{\mu \sin \theta}{r^2} \quad \begin{array}{l} \mu: \text{磁気モーメント} \\ \theta: \text{colatitude} \end{array}$$

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

四重極電場+単極子(誘導起電場)

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

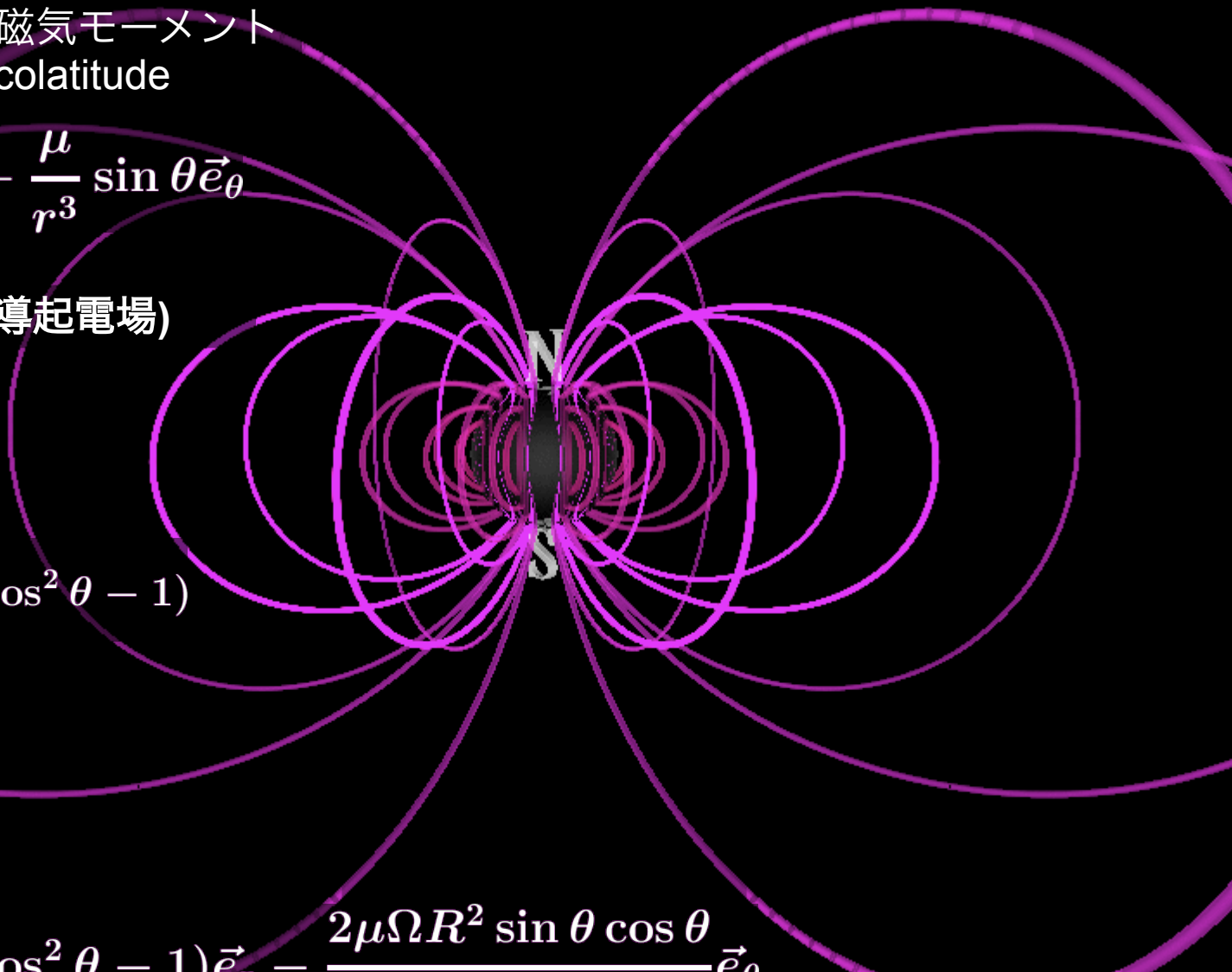
$$\phi_1 = \frac{Q_{\text{tot}}}{r}$$

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

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

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

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



粒子間相互作用

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

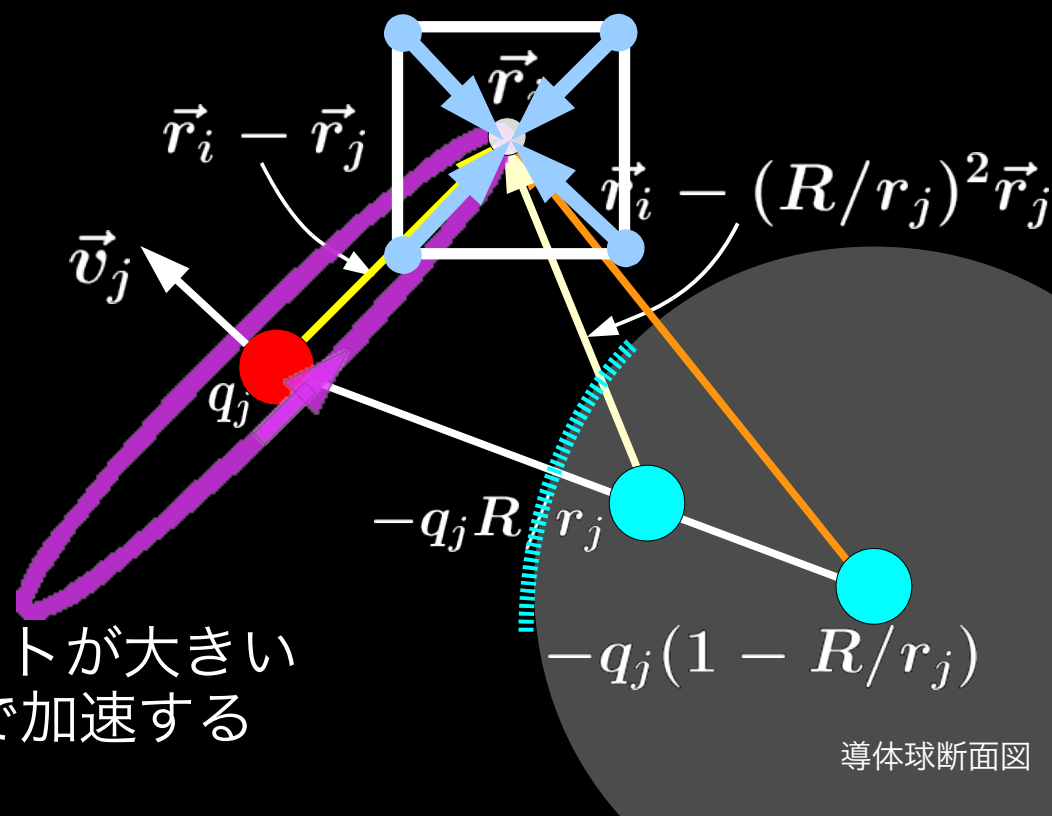
$$\phi_{ij} = \sum_j q_j \left[\frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} - \frac{R/r_j}{|\vec{r}_i - (R/r_j)^2 \vec{r}_j|} - \left(1 - \frac{R}{r_j}\right) \frac{1}{r_i} \right]$$

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

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

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

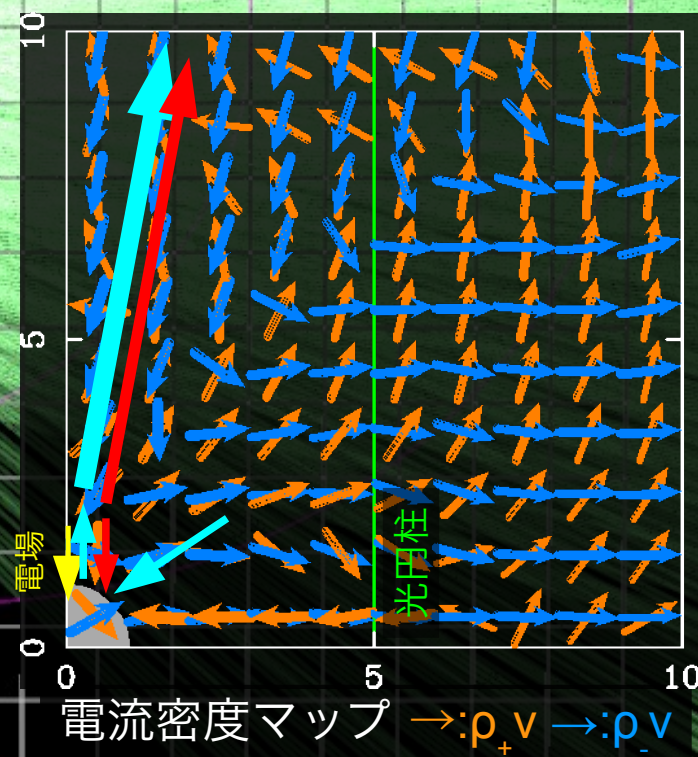
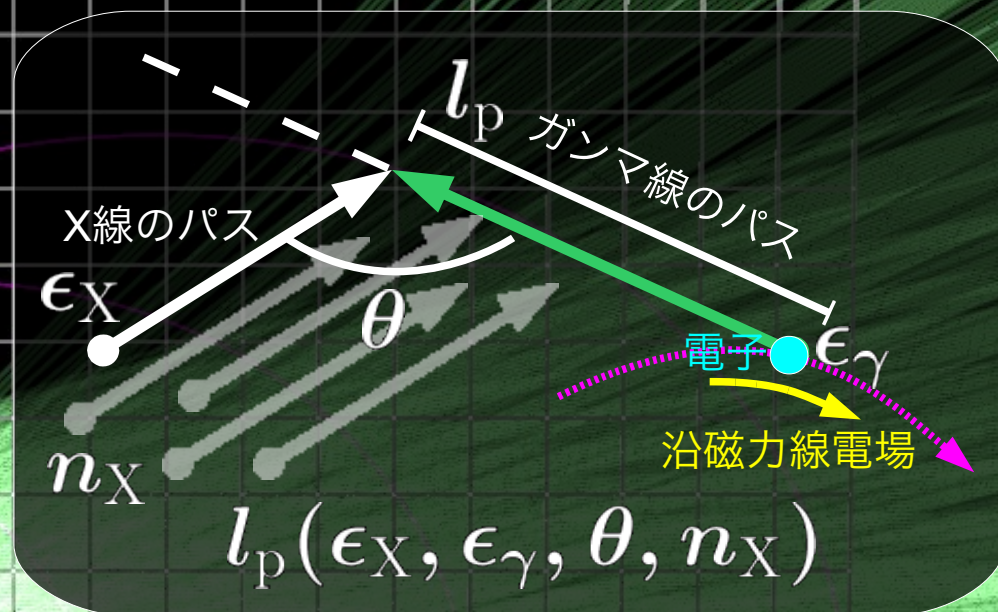
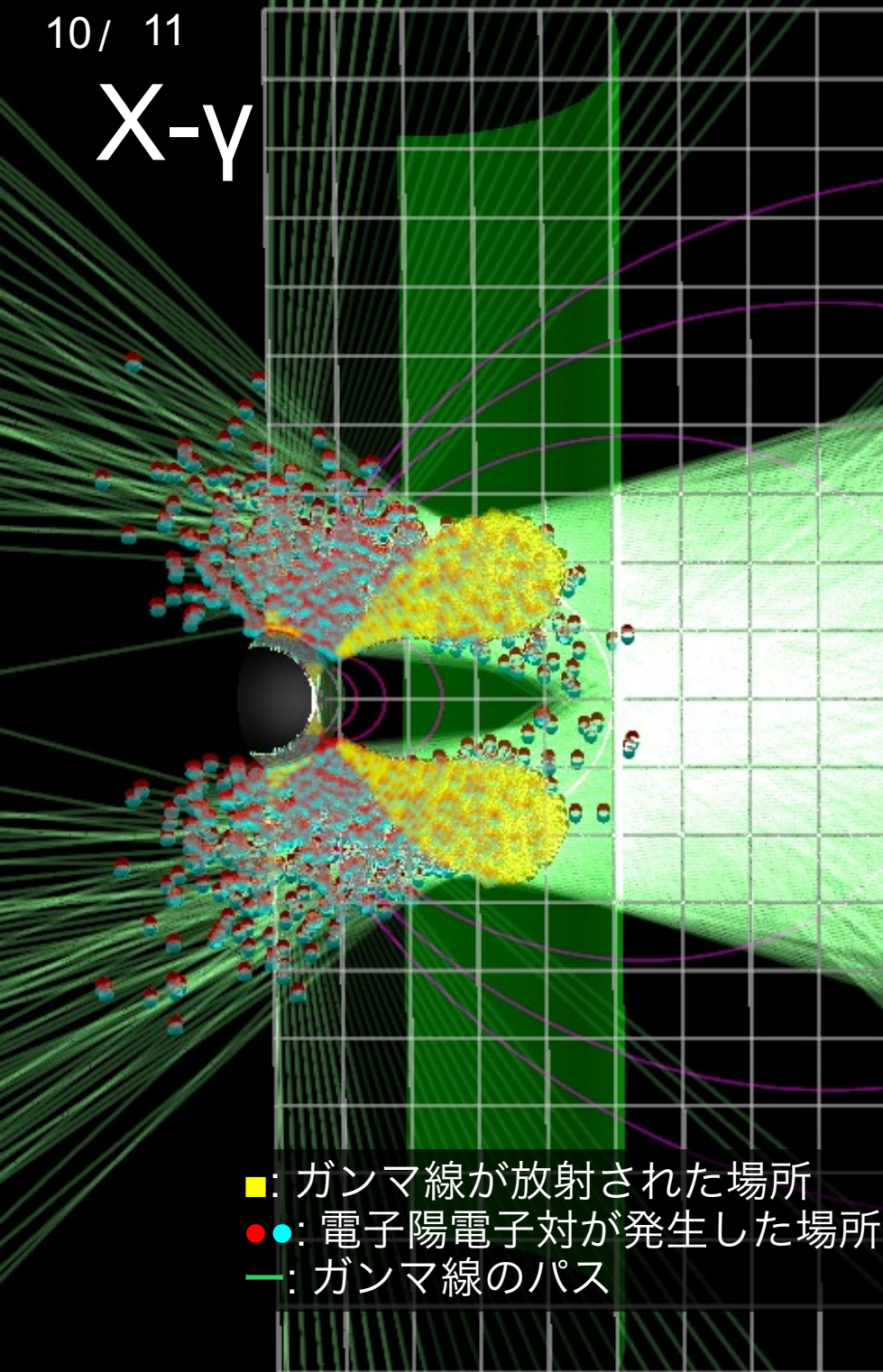
$$\vec{B}_{ij} = \sum_{j=1}^n \frac{q_j \vec{v}_j \times (\vec{r}_i - \vec{r}_j)}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3}$$



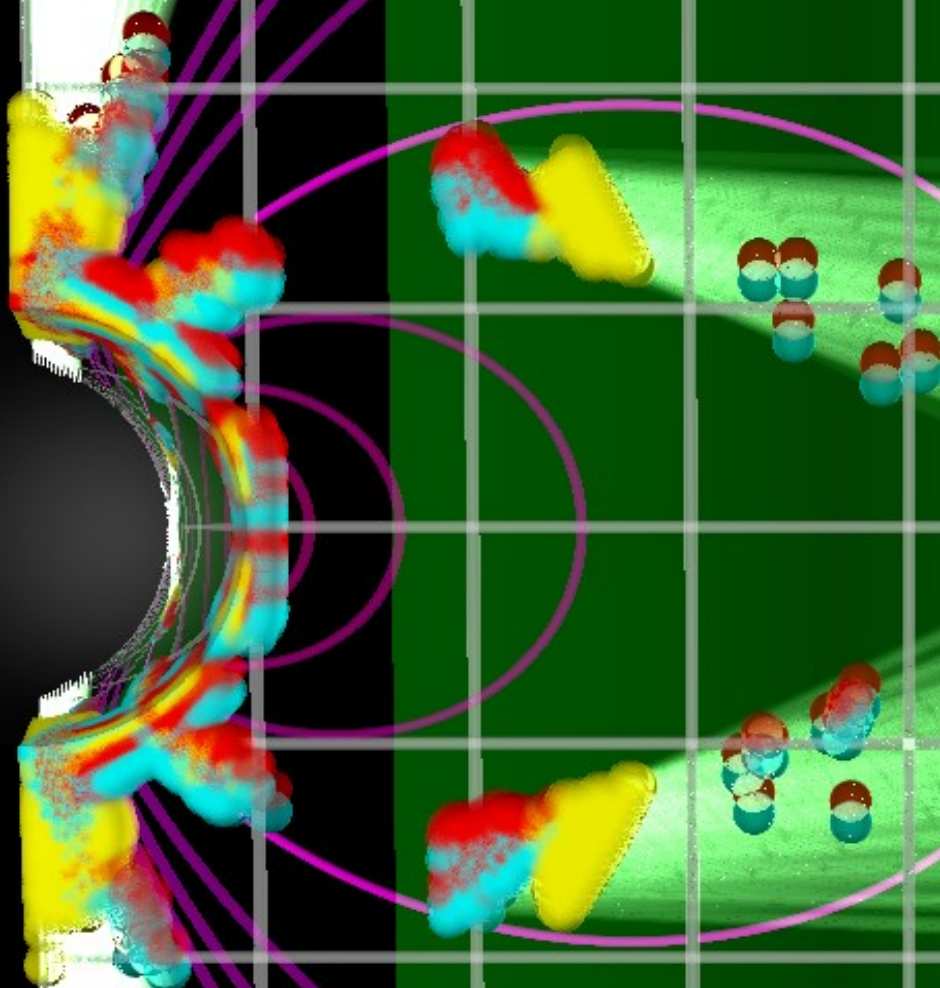
N^2 に比例する非常にコストが大きい
この計算をGRAPE-DRで加速する

定常磁気圏(真空に近い場合)

なぜか動画の挿入ができなかったので別窓で

X- γ 

B-γ



- : 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

