

宇宙磁場研究の 現状と展望

高橋慶太郎

京都大学基礎物理学研究所

2007年9月12日@中間発表会

目次

- 1、これまでの研究
- 2、宇宙の電磁氣的性質
- 3、宇宙磁場の観測
- 4、今後の展望

1、これまでの研究

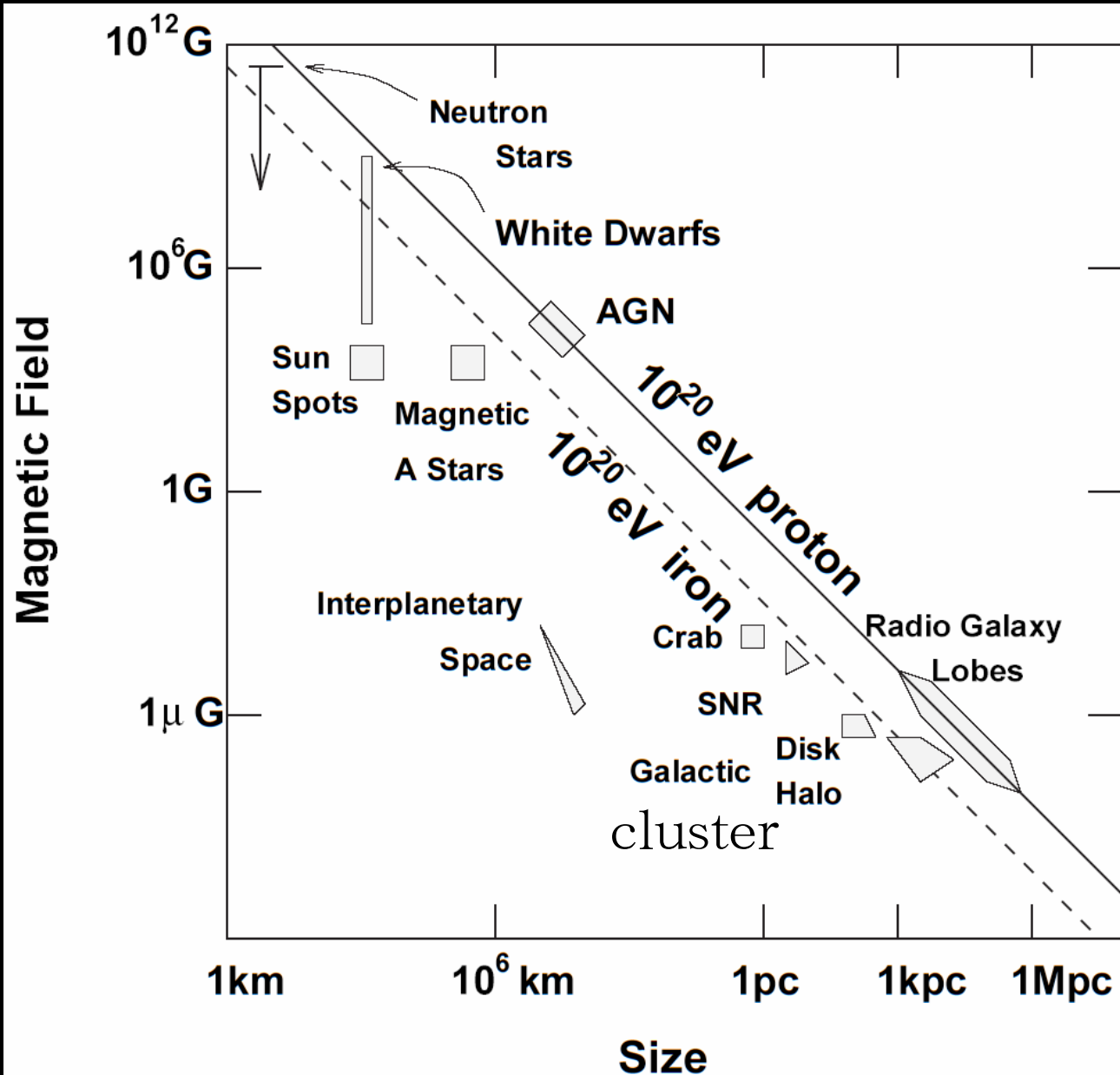
KT, K. Ichiki, H. Ohno & H. Hanayama,
PRL 95, 121301 (2005)

K. Ichiki, KT, N. Sugiyama, H. Hanayama & H. Ohno,
Science 311, 827 (2006)

K. Ichiki, KT, N. Sugiyama, H. Hanayama & H. Ohno,
astro-ph/0701329

T. Kobayashi, R. Maartens, T. Shiromizu & KT,
PRD 75, 103501 (2007)

ユビキタス磁場

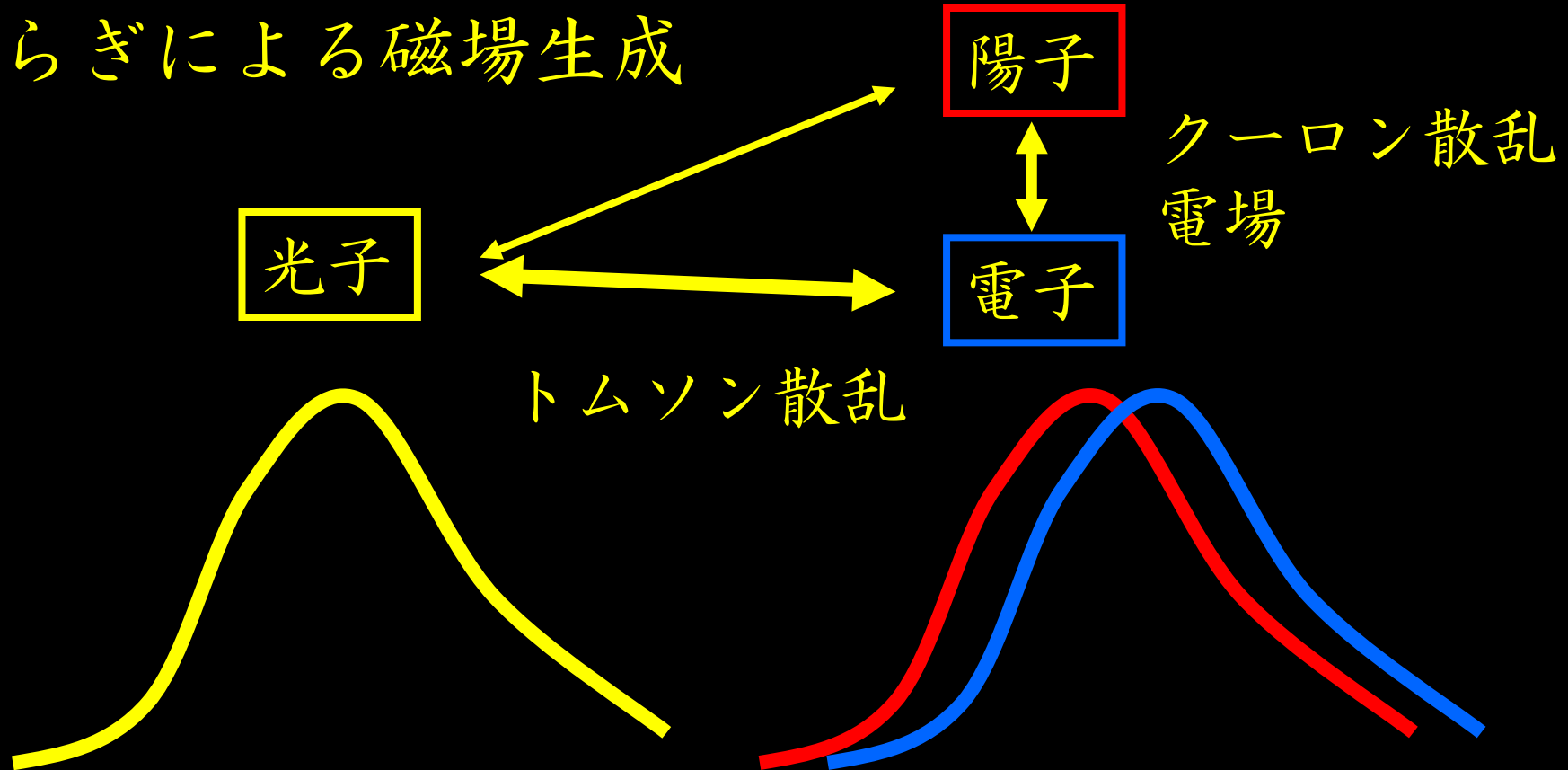


磁場は至る所にある
地球
太陽
銀河
銀河団

・
・
・
磁場の起源？
宇宙論的磁場？
宇宙進化への影響？

磁場生成

ゆらぎによる磁場生成



$$\partial_t \vec{B} = -\nabla \times \vec{E}$$

電場が必要 → 光子・陽子・電子の3流体
回転が必要 → 摂動2次

磁場の発展方程式

電子・陽子の運動方程式

→ 一般化されたオームの法則

+ アンペールの法則

→ 磁場の発展方程式

スリップ項

光子の
非等方ストレス

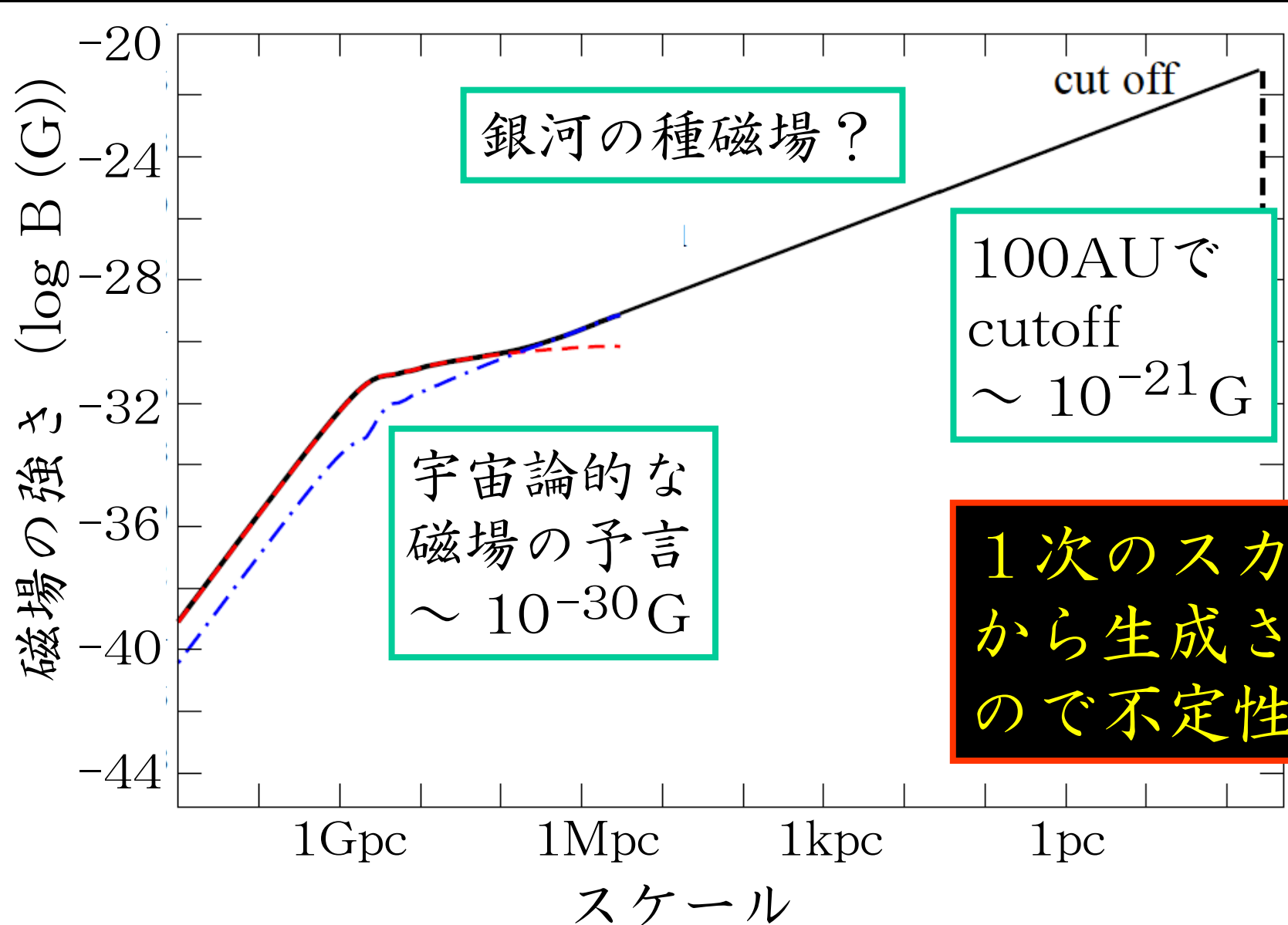
$$\dot{B}^i = \frac{4\sigma_T \rho_\gamma^{(0)} a}{3e} \epsilon^{ijk} \left[\delta_{\gamma,j}^{(1)} \left(v_{ek}^{(1)} - v_{\gamma k}^{(1)} \right) - \left(v_{ej,k}^{(2)} - v_{\gamma j,k}^{(2)} \right) - \frac{1}{4} \left(v_{el}^{(1)} \Pi_{\gamma j}^{(1)l} \right)_{,k} \right]$$

vorticityの差

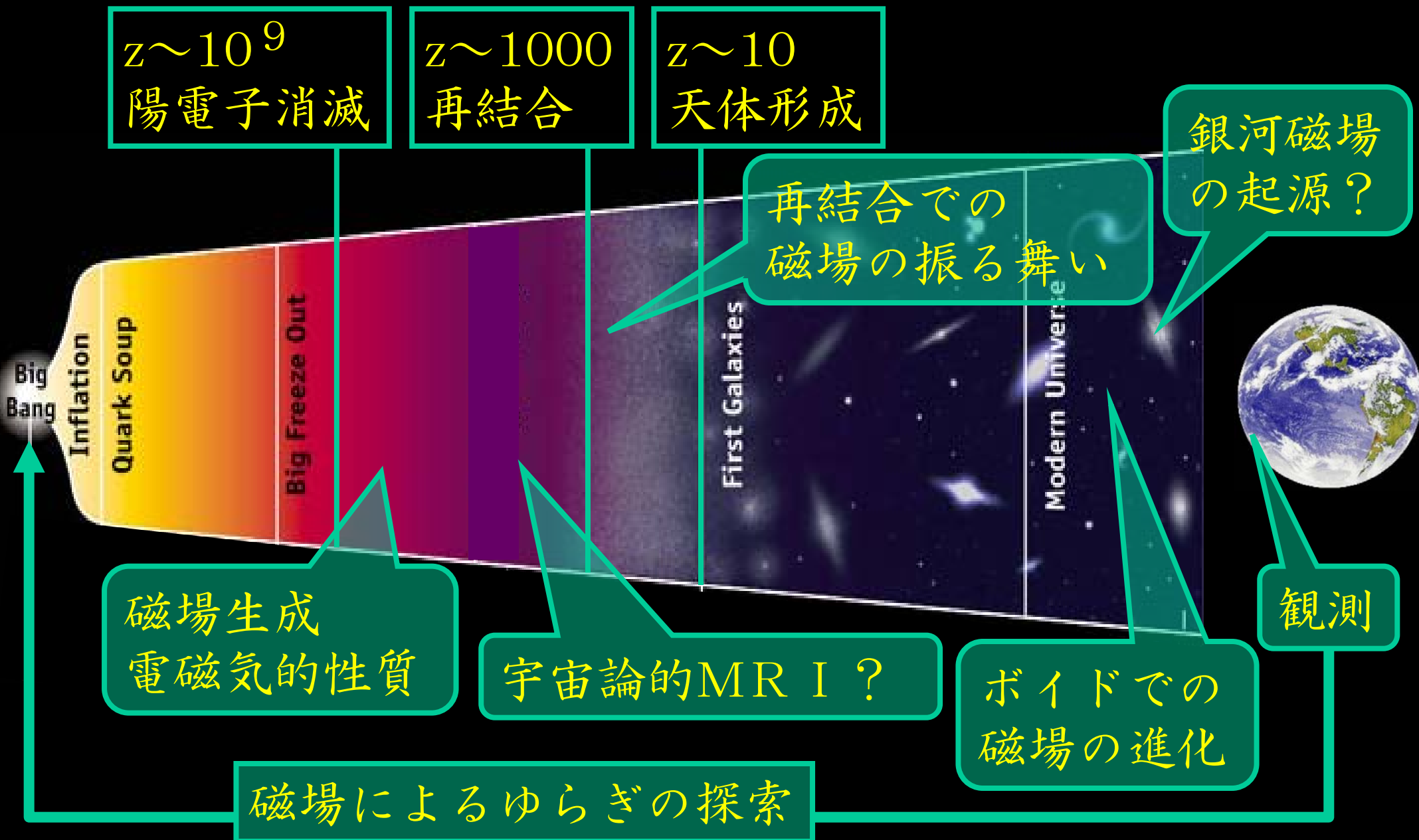
1次×1次の部分は簡単に評価できる

磁場のスペクトル

Ichiki, KT et al., 2007



磁場の生成・進化・観測



2、宇宙の電磁氣的性質

KT, K. Ichiki & N. Sugiyama, in preparation

宇宙の電磁氣的性質

これまでの研究は磁場にだけ注目してきた

- ・ その他の電磁氣的量はどうなっている？
- ・ 電流はある？ない？
- ・ 電気抵抗は大きい？小さい？
- ・ 再結合を考えるには全てをconsistentに扱わなければならない

全ての方程式を解く

- ・ 陽子電子の方程式から一般化オームの法則
- ・ マックスウェル方程式と連立
- ・ 光子による外力の発展を解く

運動方程式

光子・陽子・電子の運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{4}{3}\rho_\gamma [\partial_t \vec{v}_\gamma + (\vec{v}_\gamma \cdot \nabla) \vec{v}_\gamma] \\ &= -\frac{1}{3}\nabla\rho_\gamma - \frac{m_e^2}{m_p^2}\sigma_T n_p \rho_\gamma (\vec{v}_\gamma - \vec{v}_p) - \sigma_T n_e \rho_\gamma (\vec{v}_\gamma - \vec{v}_e) - \frac{4\rho_\gamma}{3}\nabla\Phi, \\ m_p n_p [\partial_t \vec{v}_p + (\vec{v}_p \cdot \nabla) \vec{v}_p] & \quad \text{トムソン散乱} \\ &= en_p(\vec{E} + \vec{v}_p \times \vec{B}) - e^2 n_p n_e \eta (\vec{v}_p - \vec{v}_e) + \frac{m_e^2}{m_p^2}\sigma_T n_p \rho_\gamma (\vec{v}_\gamma - \vec{v}_p) - m_p n_p \nabla\Phi, \\ m_e n_e [\partial_t \vec{v}_e + (\vec{v}_e \cdot \nabla) \vec{v}_e] & \quad \text{クーロン散乱} \\ &= -en_e(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) + e^2 n_p n_e \eta (\vec{v}_p - \vec{v}_e) + \sigma_T n_e \rho_\gamma (\vec{v}_\gamma - \vec{v}_e) - m_e n_e \nabla\Phi, \end{aligned}$$

無視：一般相対論的效果、宇宙膨張
光子の非等方ストレス

運動方程式の書き換え

陽子と電子：重心運動と相対運動に分離

$$\begin{aligned} n_b &\equiv \frac{n_p + \beta n_e}{1 + \beta}, & \delta n_{pe} &\equiv n_p - n_e, \\ \vec{v}_b &\equiv \frac{n_p \vec{v}_p + \beta n_e \vec{v}_e}{n_p + \beta n_e}, & \delta \vec{v}_{pe} &\equiv \vec{v}_p - \vec{v}_e, \end{aligned}$$

宇宙論的摂動で展開

$$\begin{aligned} \rho_\gamma(t, \vec{x}) &= \rho_\gamma^{(0)} + \rho_\gamma^{(1)}(t, \vec{x}) + \rho_\gamma^{(2)}(t, \vec{x}) + \cdots, \\ n_b(t, \vec{x}) &= n_b^{(0)} + n_b^{(1)}(t, \vec{x}) + n_b^{(2)}(t, \vec{x}) + \cdots, \\ \vec{V}(t, \vec{x}) &= \vec{V}^{(1)}(t, \vec{x}) + \vec{V}^{(2)}(t, \vec{x}) + \cdots, & \nabla \times \vec{V}^{(1)} &= 0 \\ \vec{B}(t, \vec{x}) &= \vec{B}^{(2)}(t, \vec{x}) + \cdots, \end{aligned}$$

運動方程式改

電流の運動方程式 → 一般化されたオームの法則

$$\begin{aligned} & \frac{m_e}{e(1+\beta)} \left[\partial_t \delta \vec{v}_{pe} + (\vec{v}_b \cdot \nabla) \delta \vec{v}_{pe} + (\delta \vec{v}_{pe} \cdot \nabla) \vec{v}_b \right] \\ &= \vec{E} - \left[en_b \eta + \frac{1+\beta^4}{(1+\beta)^2} \frac{\sigma_T \rho_\gamma}{e} \right] \delta \vec{v}_{pe} - \frac{1-\beta^3}{1+\beta} \frac{\sigma_T \rho_\gamma}{e} \delta \vec{v}_{\gamma b}, \end{aligned}$$

光子、光子 - バリオン相対運動の方程式

$$\begin{aligned} & \partial_t \vec{v}_\gamma + (\vec{v}_\gamma \cdot \nabla) \vec{v}_\gamma \\ &= -\frac{1}{4} \frac{\nabla \rho_\gamma}{\rho_\gamma} - \frac{3}{4} \sigma_T n_b \left[(1+\beta^2) \delta \vec{v}_{\gamma b} + \frac{1-\beta^3}{1+\beta} \delta \vec{v}_{pe} \right] - \nabla \Phi, \\ & \partial_t \delta \vec{v}_{\gamma b} + (\vec{v}_\gamma \cdot \nabla) \delta \vec{v}_{\gamma b} + (\delta \vec{v}_{\gamma b} \cdot \nabla) \vec{v}_\gamma - (\delta \vec{v}_{\gamma b} \cdot \nabla) \delta \vec{v}_{\gamma b} \\ &= -\frac{1}{4} \frac{\nabla \rho_\gamma}{\rho_\gamma} - \frac{1+R}{1+\beta} \frac{\sigma_T \rho_\gamma}{m_p} \left[(1+\beta^2) \delta \vec{v}_{\gamma b} + \frac{1-\beta^3}{1+\beta} \delta \vec{v}_{pe} \right] \end{aligned}$$

(摂動2次まで → ローレンツ項、ホール項は消える)

マックスウェル+オームを解く

マックスウェル方程式

$$\nabla \cdot \vec{E} = e\delta n_{pe},$$

$$\partial_t \vec{E} = \nabla \times \vec{B} - e(n_b \delta \vec{v}_{pe} + \delta n_{pe} \vec{v}_b),$$

$$\partial_t \vec{B} = -\nabla \times \vec{E},$$

$$\partial_t \delta n_{pe} + \nabla \cdot (n_b \delta \vec{v}_{pe} + \delta n_{pe} \vec{v}_b) = 0,$$

一般化されたオームの法則

$$\vec{E} = \frac{m_e}{e(1+\beta)} [\partial_t \delta \vec{v}_{pe} + (\vec{v}_b \cdot \nabla) \delta \vec{v}_{pe} + (\delta \vec{v}_{pe} \cdot \nabla) \vec{v}_b] + en_b \eta_{\text{eff}} \delta \vec{v}_{pe} + \vec{C}.$$

外力 (光子の風)

$$\vec{C} \equiv \frac{1-\beta^3}{1+\beta} \frac{\sigma_T \rho_\gamma}{e} \delta \vec{v}_{\gamma b}$$

宇宙論的摂動で
逐次解いていく

解き方のポイント

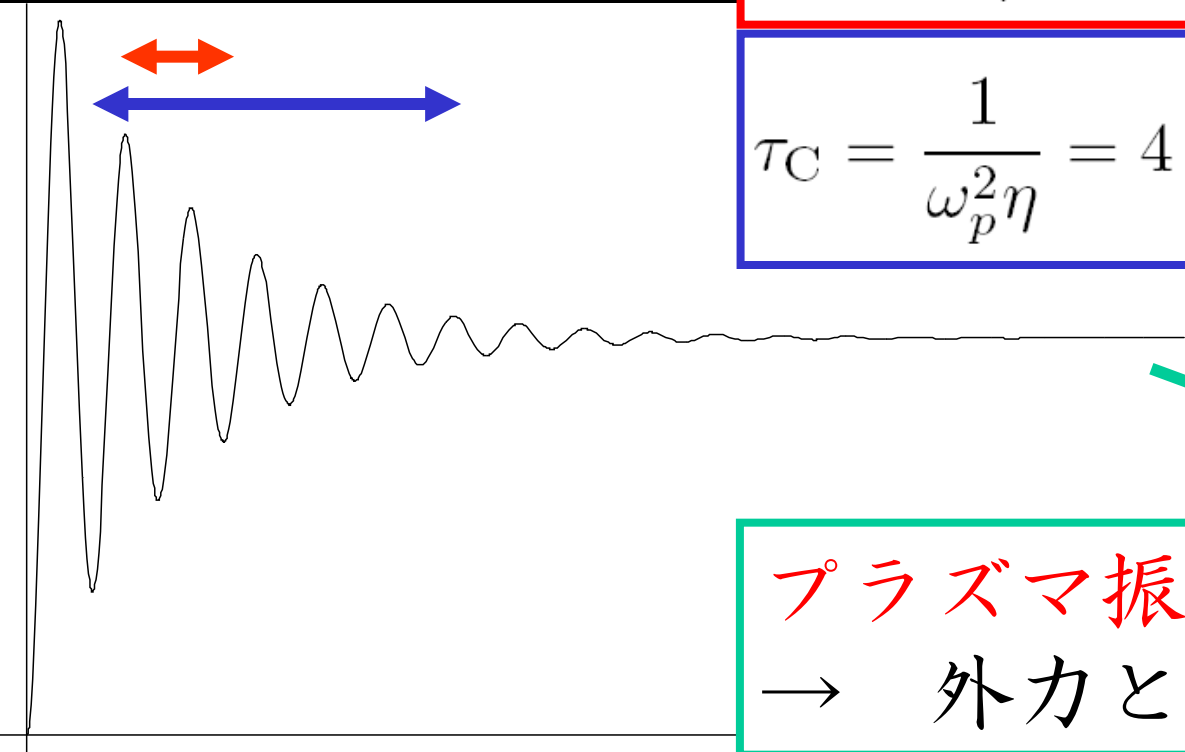
一般化オームの法則の発散

$$\frac{1}{\omega_p^2} \partial_t^2 \rho + \eta_{\text{eff}} \partial_t \rho + \rho = \nabla \cdot \vec{C}$$

外力（光子の風）
のある減衰振動

$$\omega_p^{-1} \equiv \sqrt{\frac{m_e}{e^2 n^{(0)}}} = 2 \times 10^{-9} \text{ sec} \left(\frac{1+z}{10^5} \right)^{-3/2}$$

$$\tau_C = \frac{1}{\omega_p^2 \eta} = 4 \times 10^{-3} \text{ sec} \left(\frac{1+z}{10^5} \right)^{-3/2}$$



$$\rho^{(1)} = \nabla \cdot \vec{C}^{(1)}$$

プラズマ振動と電気抵抗による緩和
→ 外力との平衡に落ち着く

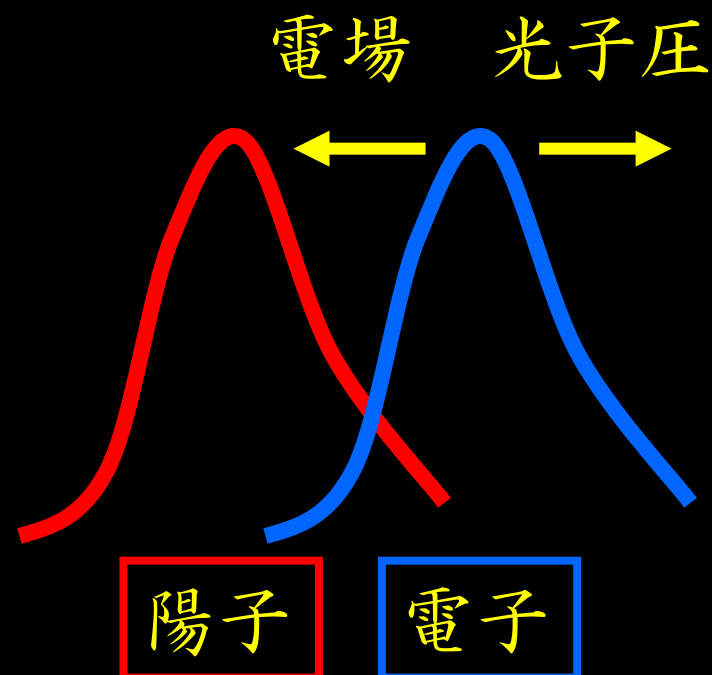
解

$$\rho = \nabla \cdot \vec{C},$$

$$\vec{j} = -\partial_t \vec{C} - \int dt \nabla \times \nabla \times \vec{C},$$

$$\vec{E} = \vec{C},$$

$$\vec{B} = - \int dt \nabla \times \vec{C},$$



- ・ オームの法則で電流項は効かない
 - 電子が光子に押されるのと電場がつりあう
 - 電気抵抗は大きくて小さい
- ・ 電流 → 変位電流を支える部分 + 磁場を支える部分
- ・ トムソン項がなくなると、電場・電荷密度は消える
磁場・電流は残る

おまけ：さらに解く

$$\begin{aligned} & \partial_t \delta \vec{v}_{\gamma b} + (\vec{v}_{\gamma} \cdot \nabla) \delta \vec{v}_{\gamma b} + (\delta \vec{v}_{\gamma b} \cdot \nabla) \vec{v}_{\gamma} - (\delta \vec{v}_{\gamma b} \cdot \nabla) \delta \vec{v}_{\gamma b} \\ &= -\frac{1}{4} \frac{\nabla \rho_{\gamma}}{\rho_{\gamma}} - \frac{1+R}{1+\beta} \frac{\sigma_T \rho_{\gamma}}{m_p} \left[(1+\beta^2) \delta \vec{v}_{\gamma b} + \frac{1-\beta^3}{1+\beta} \delta \vec{v}_{pe} \right] \end{aligned}$$

外力の発展を解くと
電磁氣的量が基本的
な量だけで表される

ポイント：
tight coupling 近似
(説明しない)

$$\rho = -\frac{1}{4} \frac{1-\beta^3}{1+\beta^2} \frac{1}{1+\bar{R}^{(0)}} \frac{m_p}{e} \frac{\nabla^2 \bar{\rho}_{\gamma}^{(1)}}{\bar{\rho}_{\gamma}^{(0)}},$$

$$\vec{j} = \frac{1}{4} \frac{1-\beta^3}{1+\beta^2} \frac{1}{1+\bar{R}^{(0)}} \frac{m_p}{e} \frac{\partial_t \nabla \bar{\rho}_{\gamma}^{(1)}}{\bar{\rho}_{\gamma}^{(0)}},$$

$$\vec{E} = -\frac{1}{4} \frac{1-\beta^3}{1+\beta^2} \frac{1}{1+\bar{R}^{(0)}} \frac{m_p}{e} \frac{\nabla \bar{\rho}_{\gamma}^{(1)}}{\bar{\rho}_{\gamma}^{(0)}},$$

$$\begin{aligned} \vec{B} = & -\frac{1}{16} \frac{(1+\beta)(1-\beta^3)}{(1+\beta^2)^2} \frac{\bar{R}^{(0)}}{(1+\bar{R}^{(0)})^3} \frac{m_p^2}{e \sigma_T \bar{\rho}_{\gamma}^{(0)}} \\ & \times \int dt \frac{\nabla \bar{\rho}_{\gamma}^{(1)}}{\bar{\rho}_{\gamma}^{(0)}} \times \left[\frac{\partial_t \nabla \bar{\rho}_{\gamma}^{(1)}}{\bar{\rho}_{\gamma}^{(0)}} + \int dt \frac{\nabla (\nabla^2 \bar{\rho}_{\gamma}^{(1)})}{\bar{\rho}_{\gamma}^{(0)}} \right] \end{aligned}$$

3、宇宙磁場の観測

K. Ichiki, S. Inoue & KT, in preparation

KT, K. Ichiki, K. Murase & S. Nagataki, in preparation

宇宙磁場の観測

初期宇宙で生成された磁場を観測したい

- ・理論の検証
- ・磁場で初期宇宙を探る

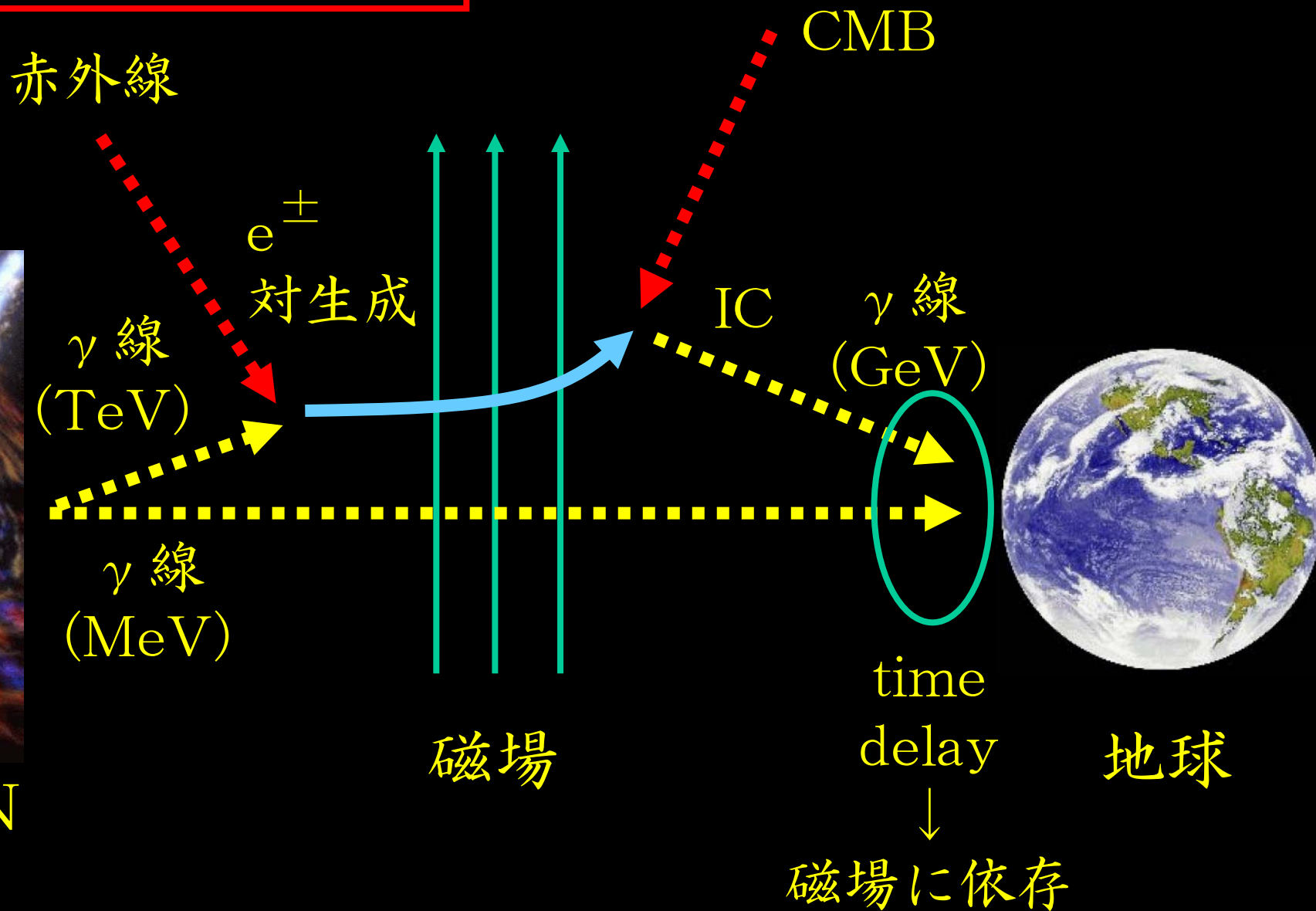
問題

- ・生成されたときの情報は残っているか？
→ ボイドの磁場をねらう
- ・そんな弱い磁場を観測できるか？
→ Plagaの方法を用いる

Plagaの方法概念図



GRB, AGN



ターゲット

GRB・ブレイザー

~ 50Mpc

$$\lambda_{\gamma\gamma} = 6\text{Mpc} \left(\frac{n_{\text{IR}}}{1\text{cm}^{-3}} \right)^{-1}$$

$$\lambda_{\text{IC}} = 1\text{Mpc} \left(\frac{E_{\gamma}}{1\text{TeV}} \right)^{-1}$$

地球



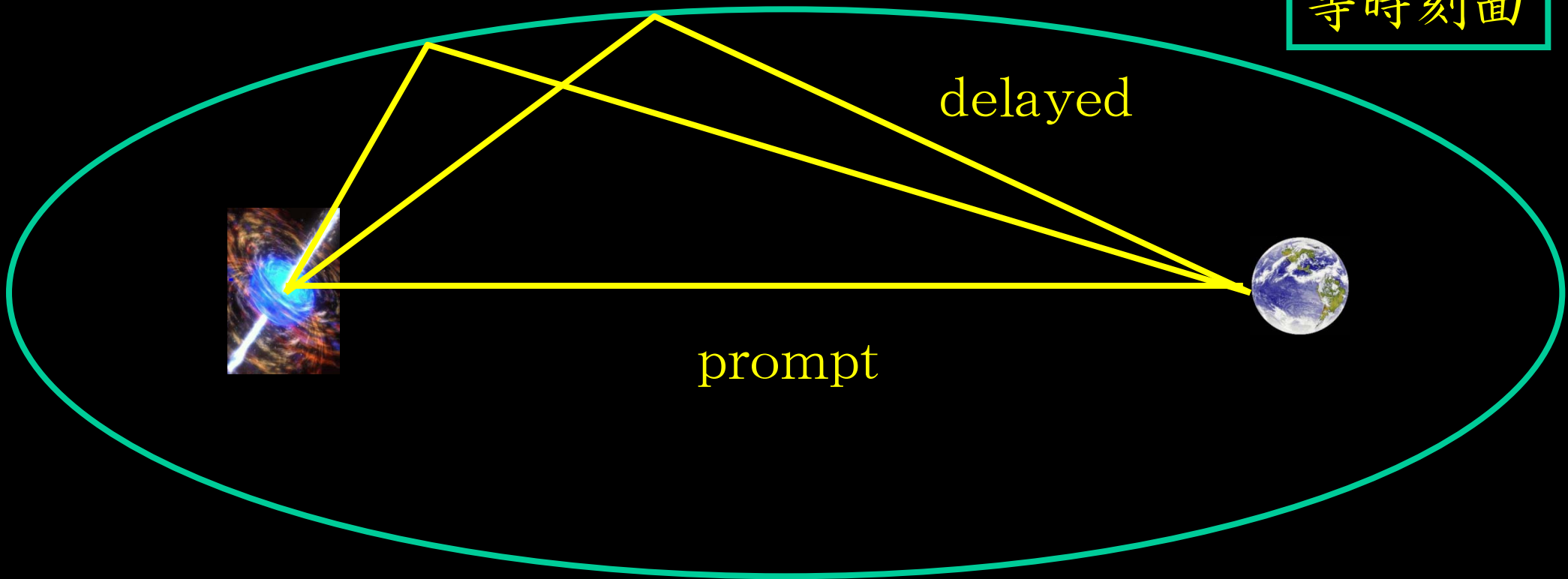
AGNの方が
やりやすい？

練習問題

Sazonov & Sunyaev, 2002

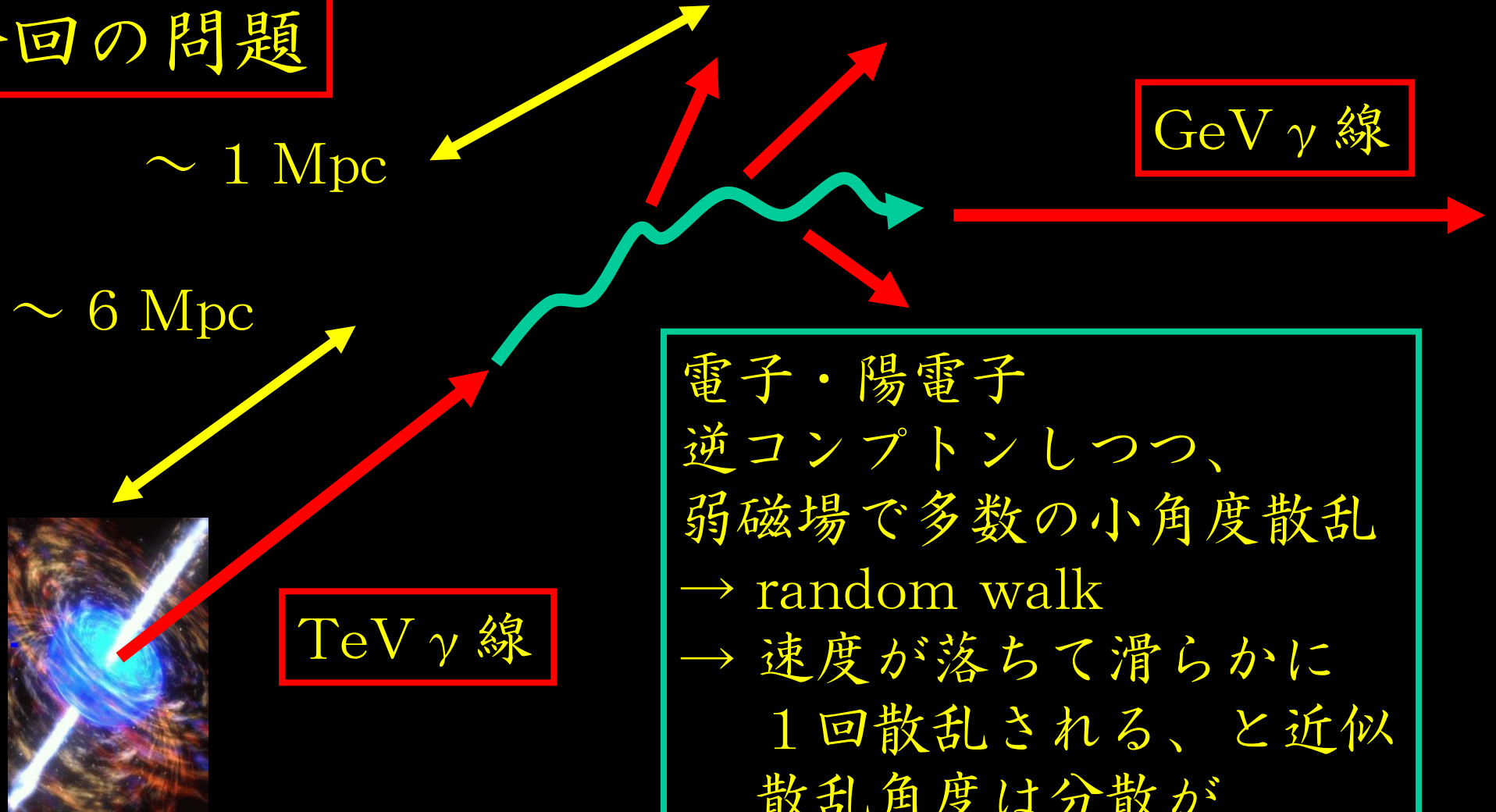
GRBのX線afterglowがdustで1回だけ散乱されたら
どんなものが見えるか？

等時刻面



等時刻面を考え、その面の各点でのfluxに散乱断面積を
かけて面上で積分すればよい

今回の問題



電子・陽電子
逆コンプトンしつつ、
弱磁場で多数の小角度散乱
→ random walk
→ 速度が落ちて滑らかに
1回散乱される、と近似
散乱角度は分散が

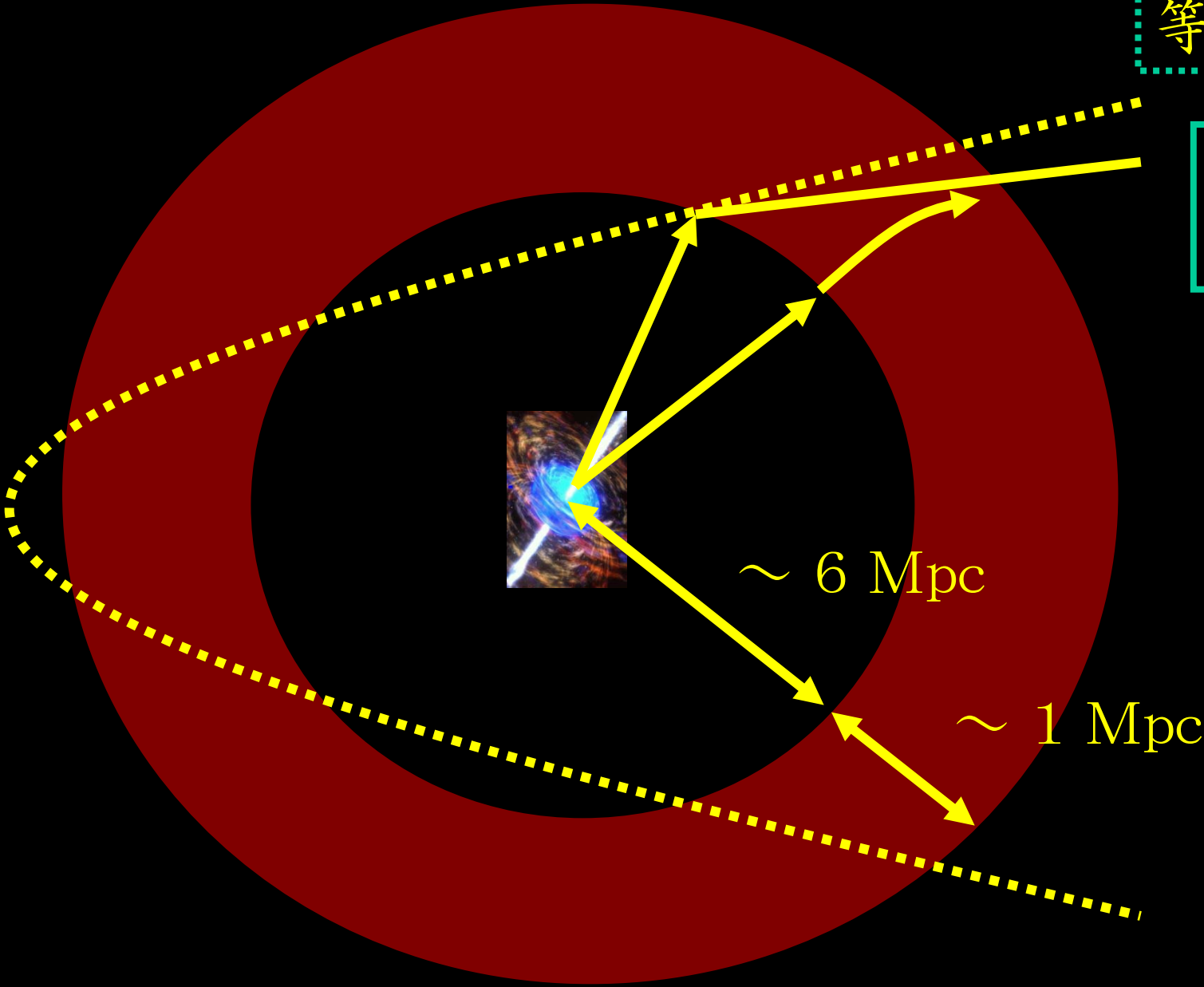
$$\langle \theta_B \rangle = \frac{r_{\text{coh}}}{r_L} \sqrt{\frac{d}{r_{\text{coh}}}}$$

のガウシアン

effective等時刻面

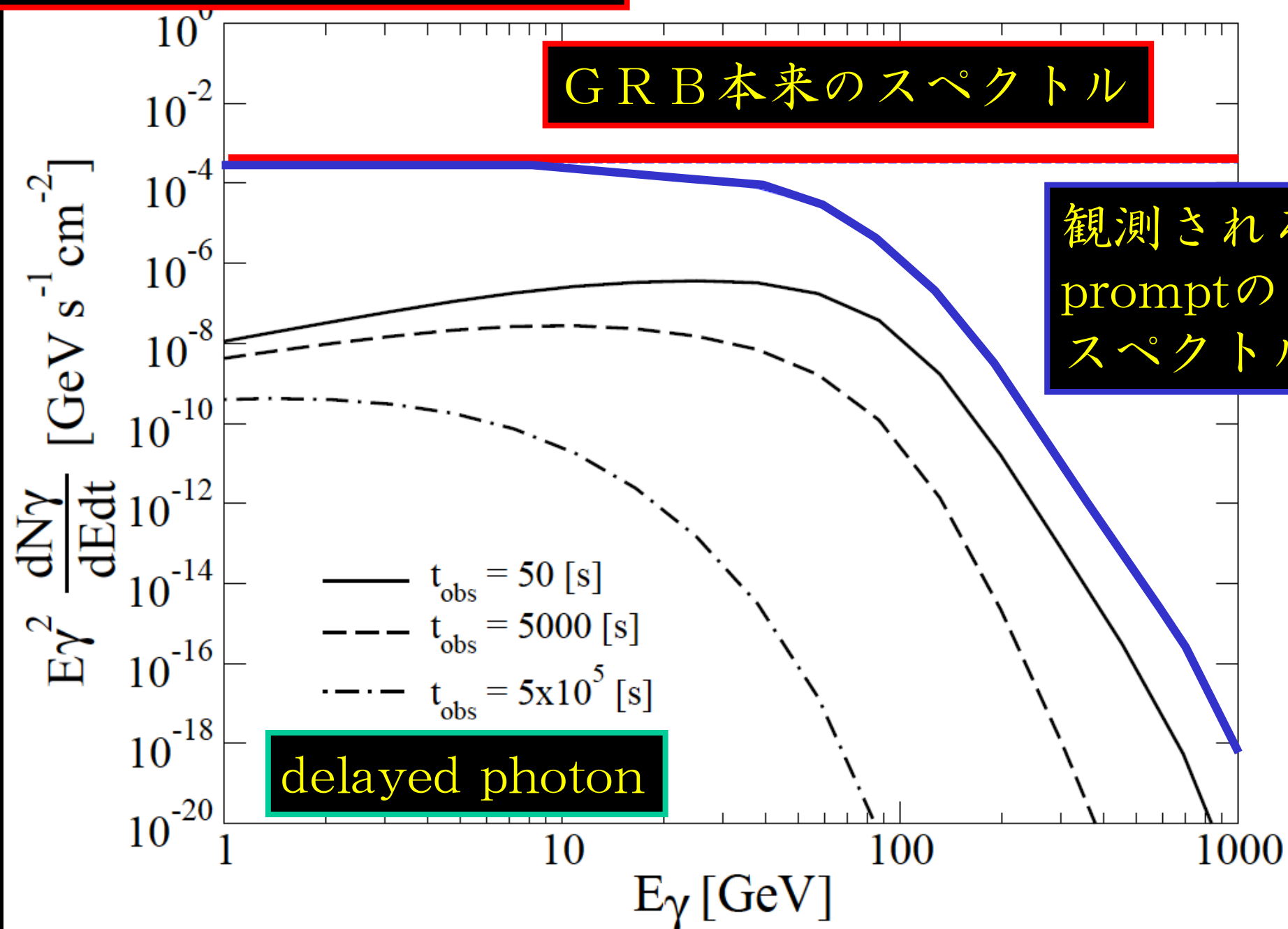
もともとの
等時刻面(楕円)

effectiveな
等時刻面



というふうに
改良する

delayed photonのflux

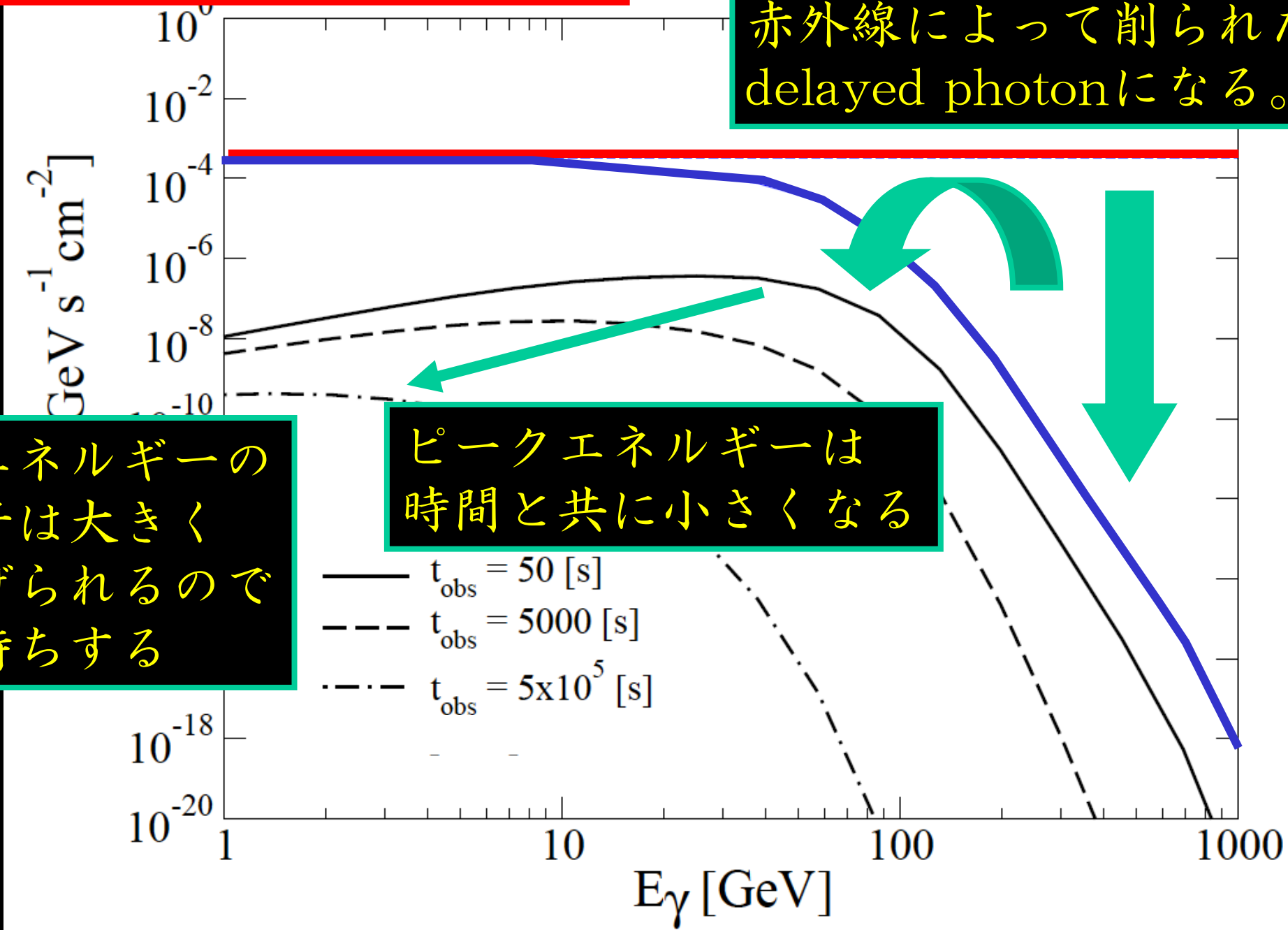


delayed photonのflux

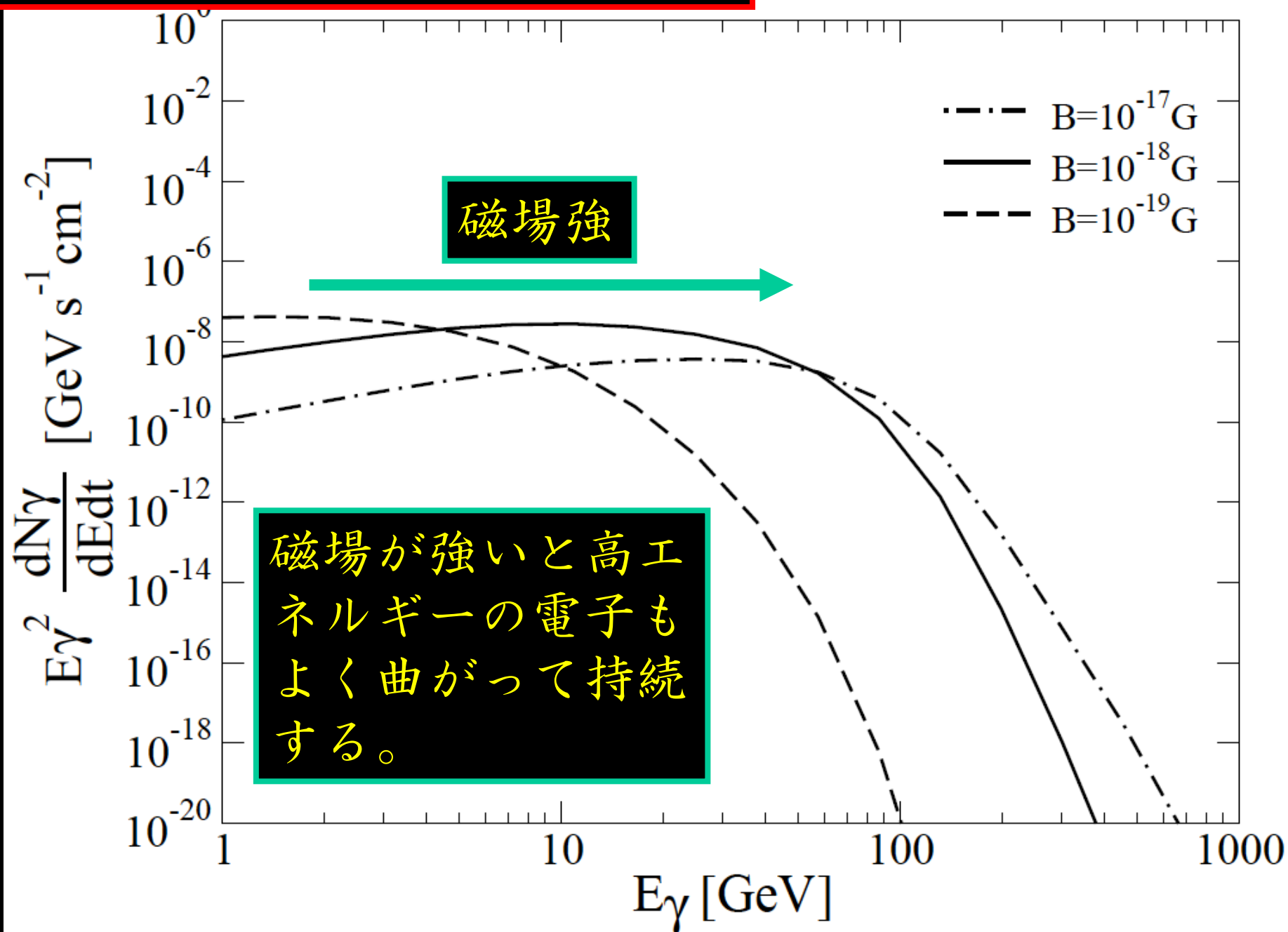
赤外線によって削られた分
delayed photonになる。

低エネルギーの
電子は大きく
曲げられるので
長持ちする

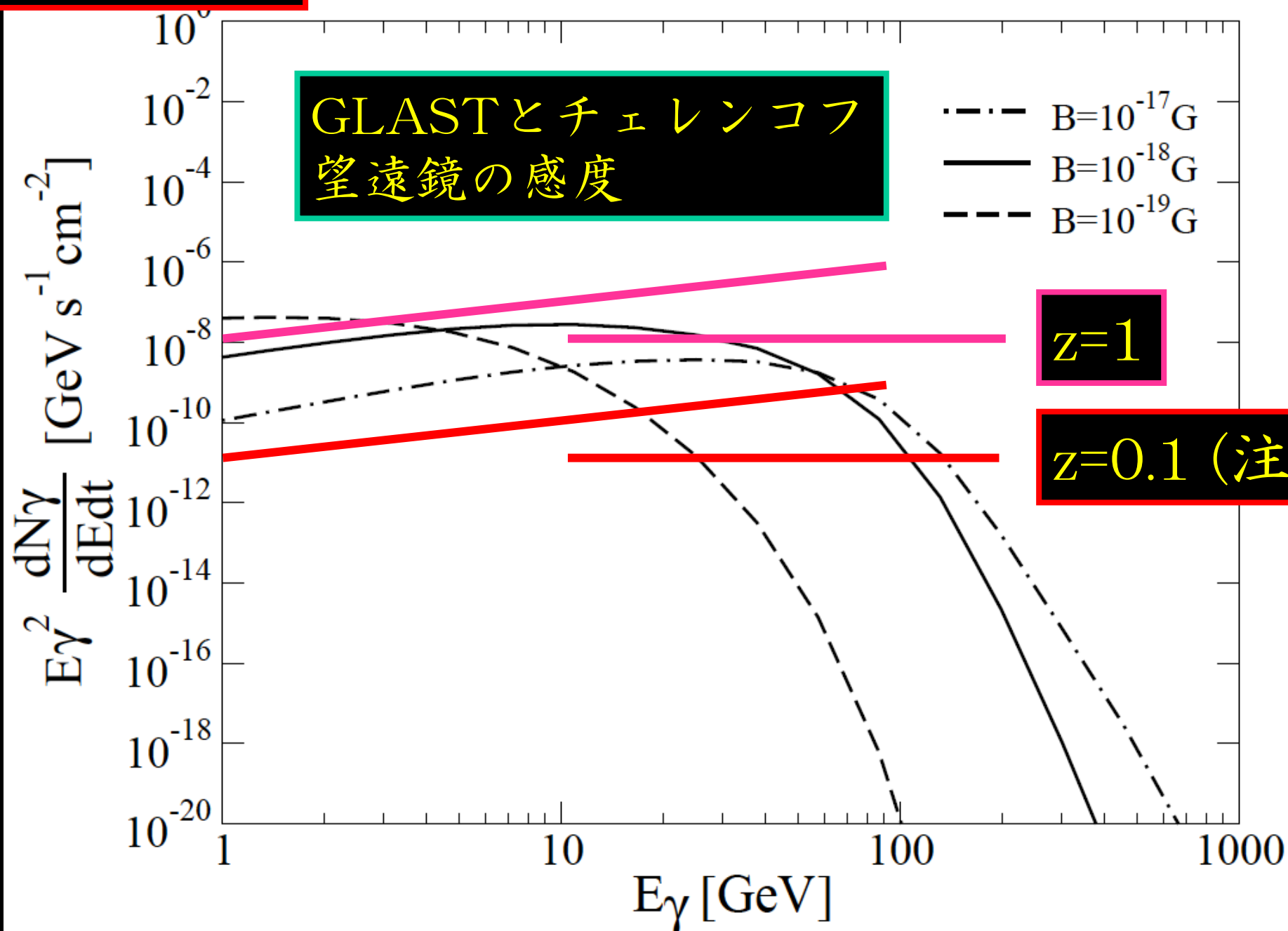
ピークエネルギーは
時間と共に小さくなる



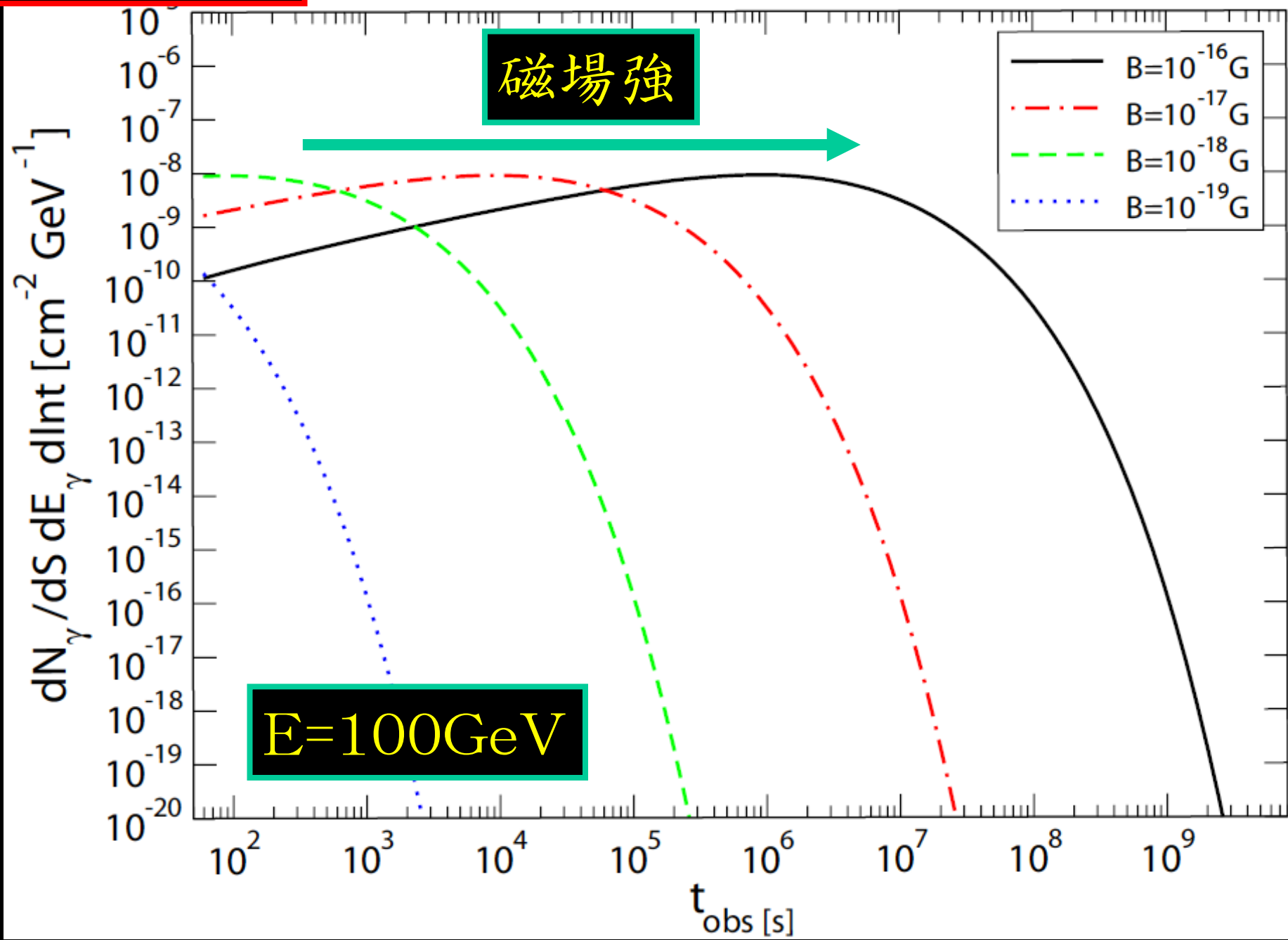
delayed fluxの磁場依存性



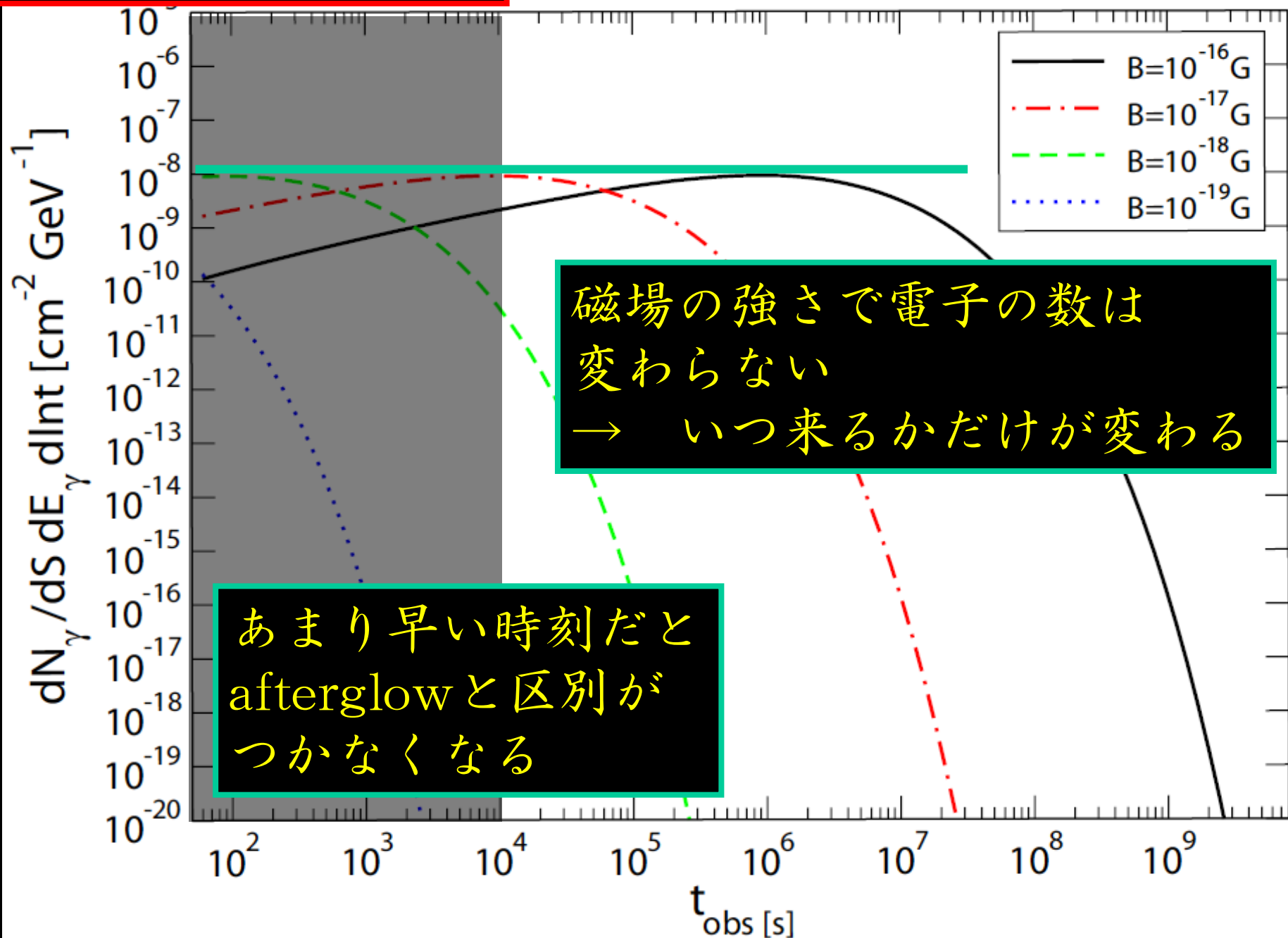
観測可能性



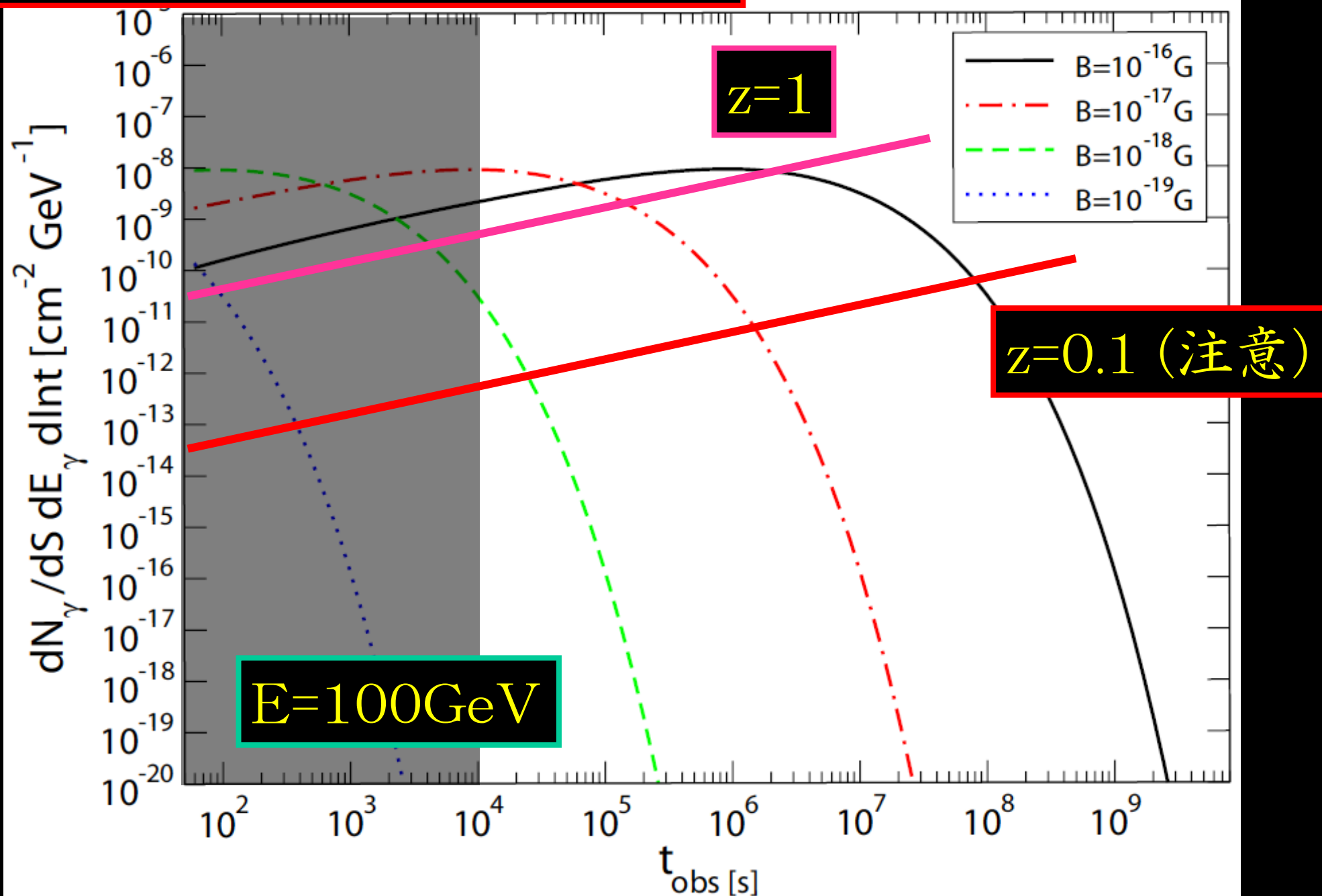
light curve



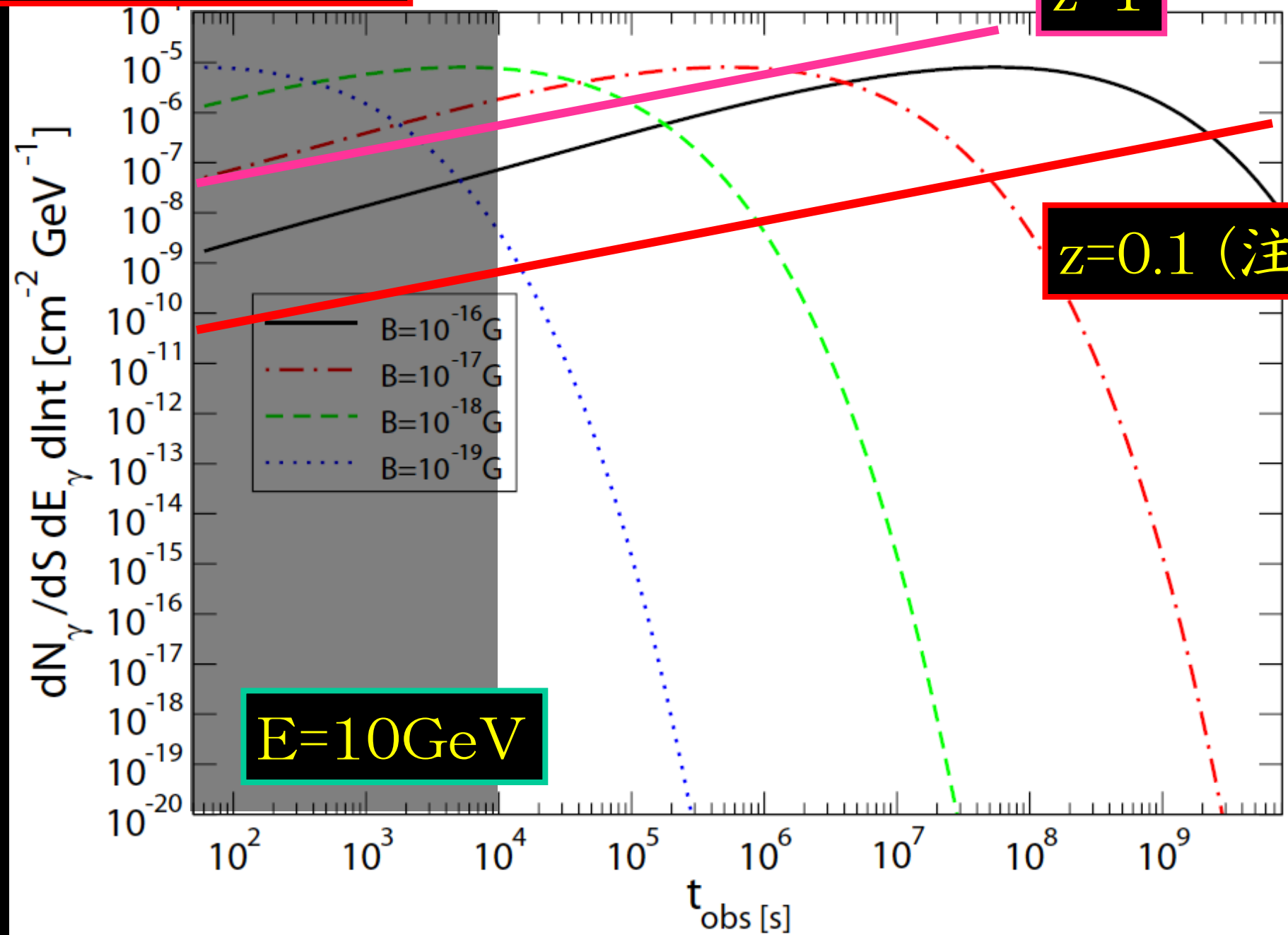
light curveの説明



チェレンコフ望遠鏡の感度



GLASTの感度

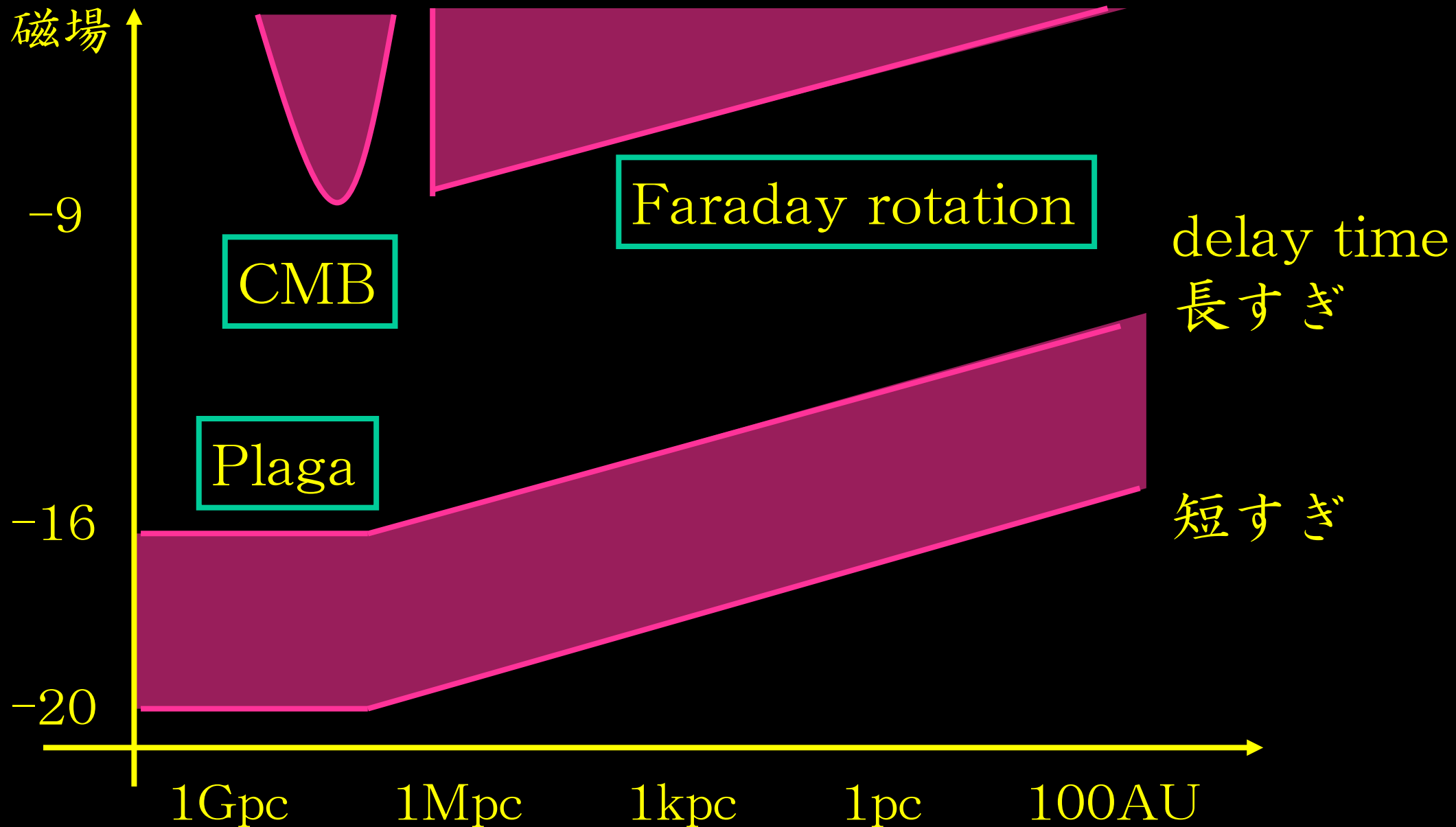


$z=1$

$z=0.1$ (注意)

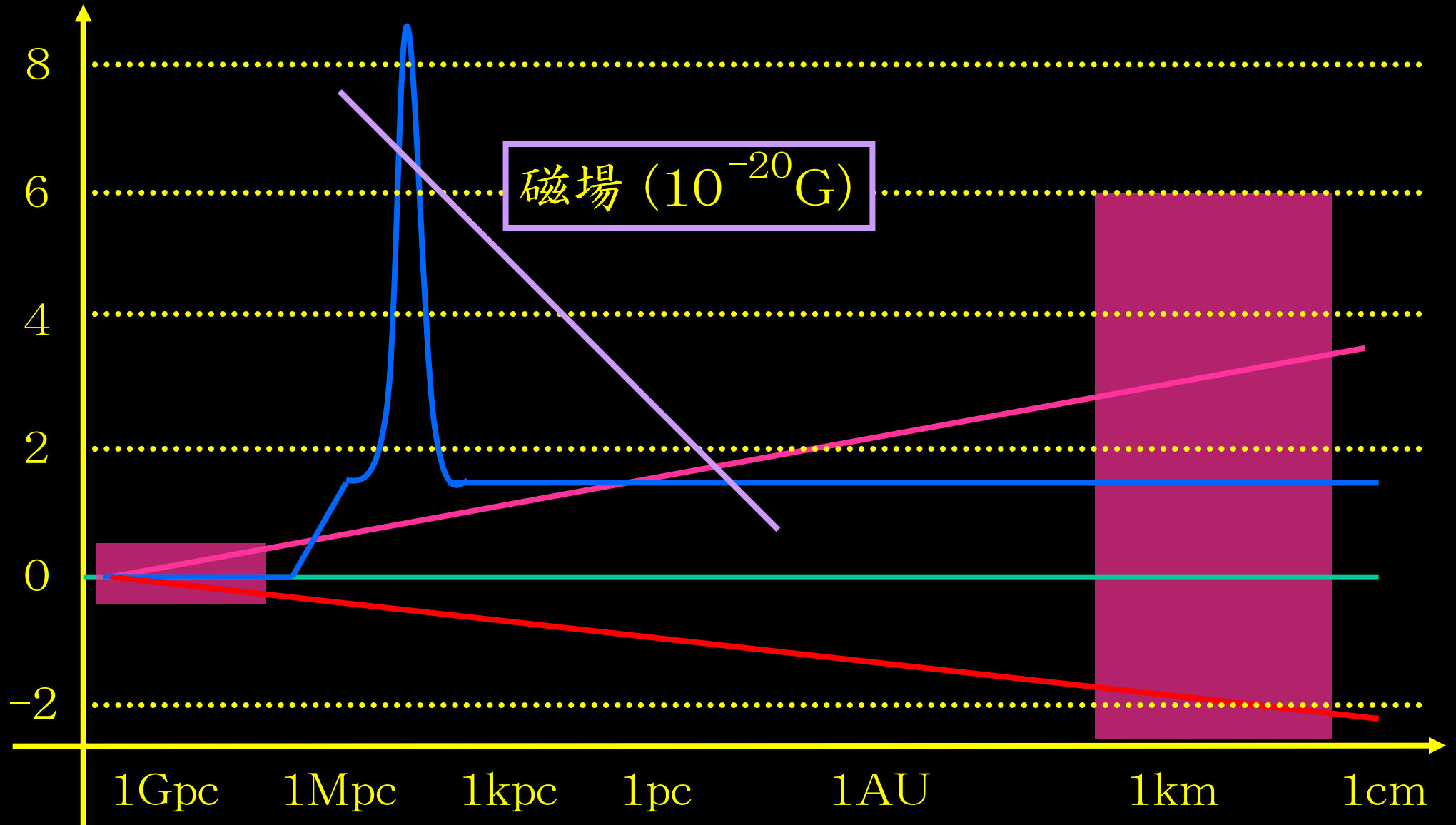
$E=10 \text{ GeV}$

non-detectionによる制限



最終目標：インフレーションモデルへの制限

$P(k)$



4、今後の展望

宇宙磁場研究計画

生成

基本的な定式化 → 100%

スペクトルの数値的評価 → 70%

物理的な解釈 → 80%

進化

宇宙論的MRI → 10%

ボイドにおける磁場 → 0%

観測

理論的な枠組み → 50%

観測に向けての戦略 → 20%

実際の観測 → 0%

進化

宇宙論的MR I

宇宙論的摂動2次+光子・バリオンのずれ

→ vorticity生成

磁場生成：光子・バリオンのvorticityの差

MR I：vorticityそのもの

→ 磁場生成の後（統計的に）MR Iで増幅？

ボイドにおける磁場

天体活動はないが宇宙線が飛び交っている

→ Alfven波が立つ

→ 磁場のスペクトルに影響？

観測

長い長い道のり

- 1、理論的枠組みの完成
- 2、とにかく delayed photon を観測
(系内の天体が使える?)
- 3、ブレーザーを使う
- 4、GRBを使う
- 5、ボイド磁場の探索
- 6、ゆらぎ起源の磁場探索

おわり