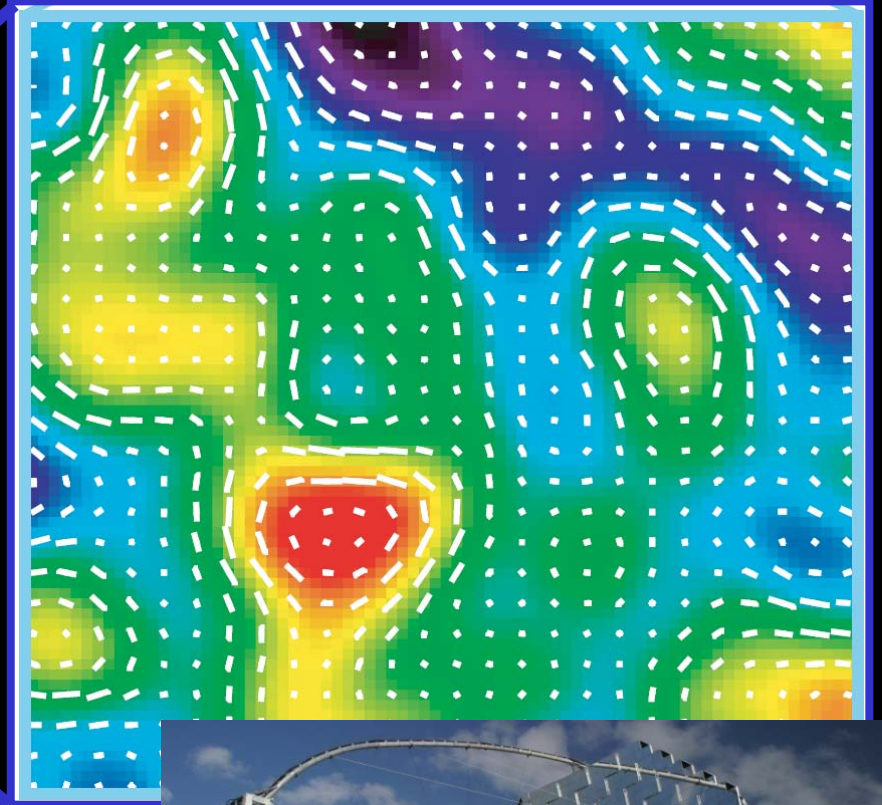
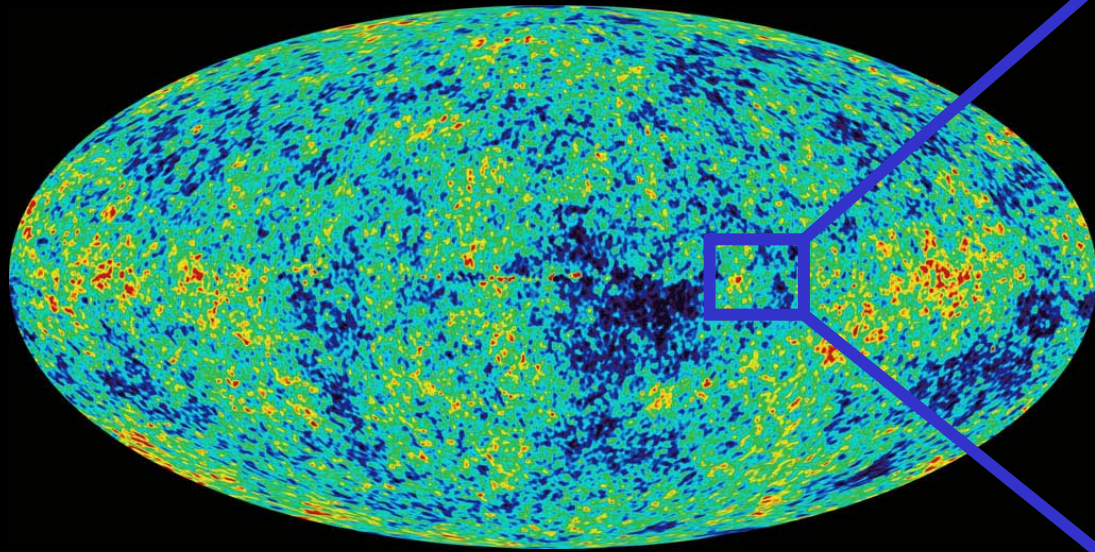


宇宙磁場の生成と観測

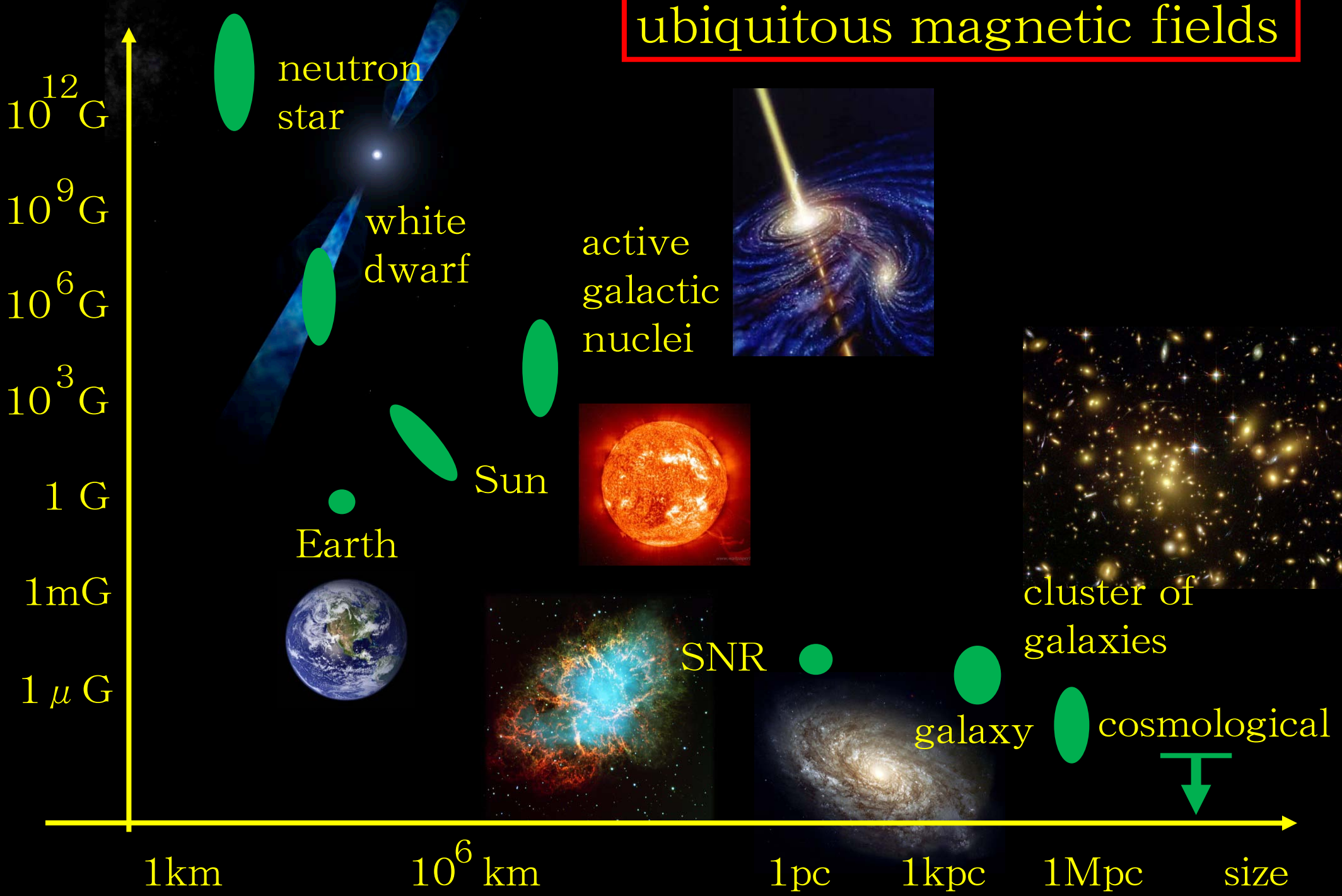


高橋慶太郎
京都大学基礎物理学研究所
2008年7月2日@名大



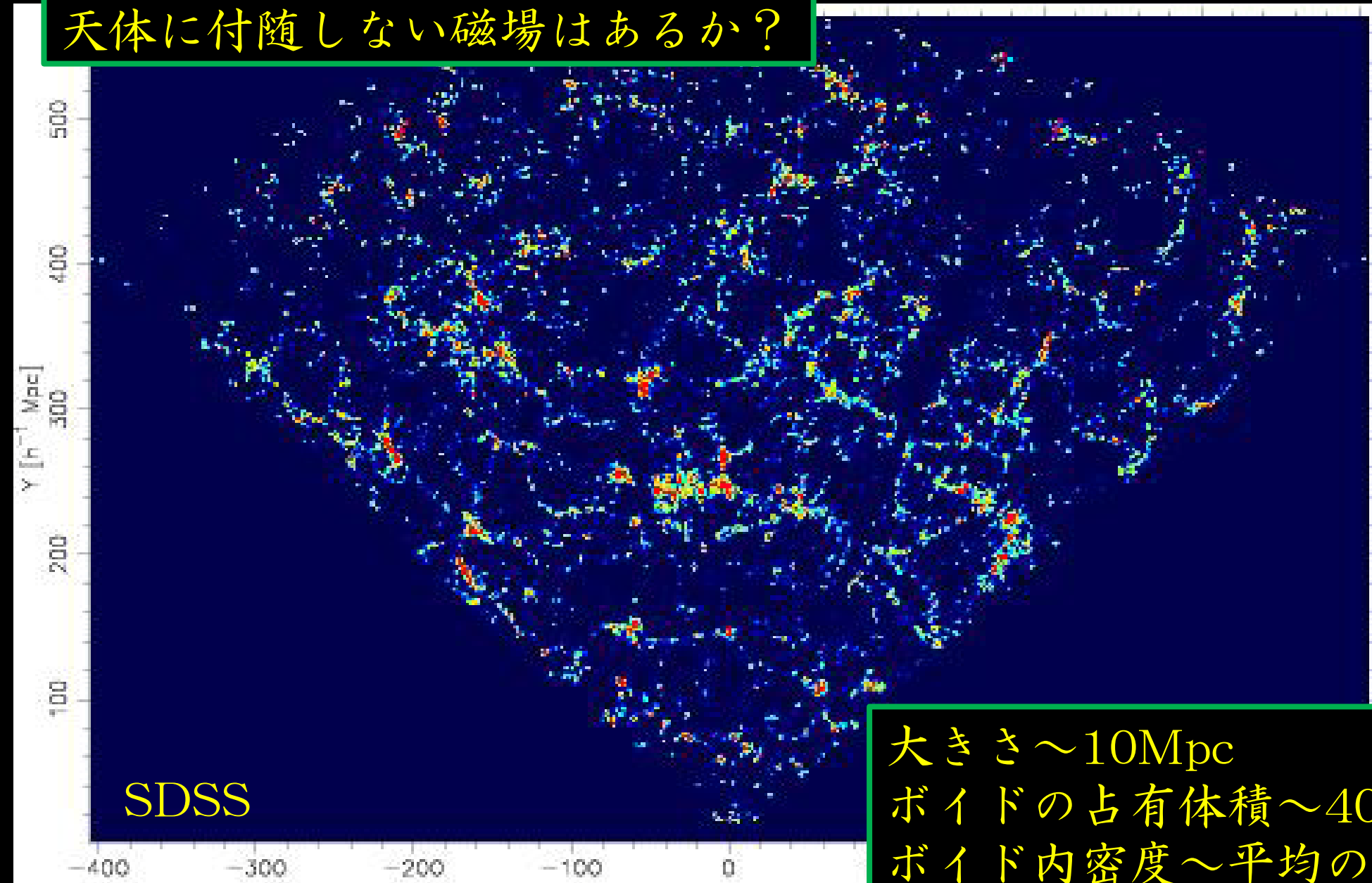
1、イントロダクション

ubiquitous magnetic fields



銀河間空間 (ボイド)

天体に付随しない磁場はあるか？



大きさ～10Mpc
ボイドの占有体積～40%
ボイド内密度～平均の10%

宇宙論的磁場の生成

物理による分類

●量子論的

電磁場の共形不変性を破る
相互作用を入れる

●radiation drag

光子・陽子・電子の系で
光子が電子を引きずる

● Biermann battery

ポリトロープでないガスで
密度と圧力の分布がずれる

時系列

インフレーション

相転移

ゆらぎによる生成

(第1世代星)

(原始銀河)

再イオン化

銀河や銀河団

からの流れ込み

モチベーション

磁場の起源

特に銀河や銀河団。弱い種磁場があればダイナモで増幅されるだろう。種磁場はどこから来た？

構造形成以前の宇宙を探る

構造形成以前のいろんな現象の名残が磁場としてボイドに現在まで残っているかもしれない。

構造形成への影響

第1世代星、原始銀河の形成に影響？

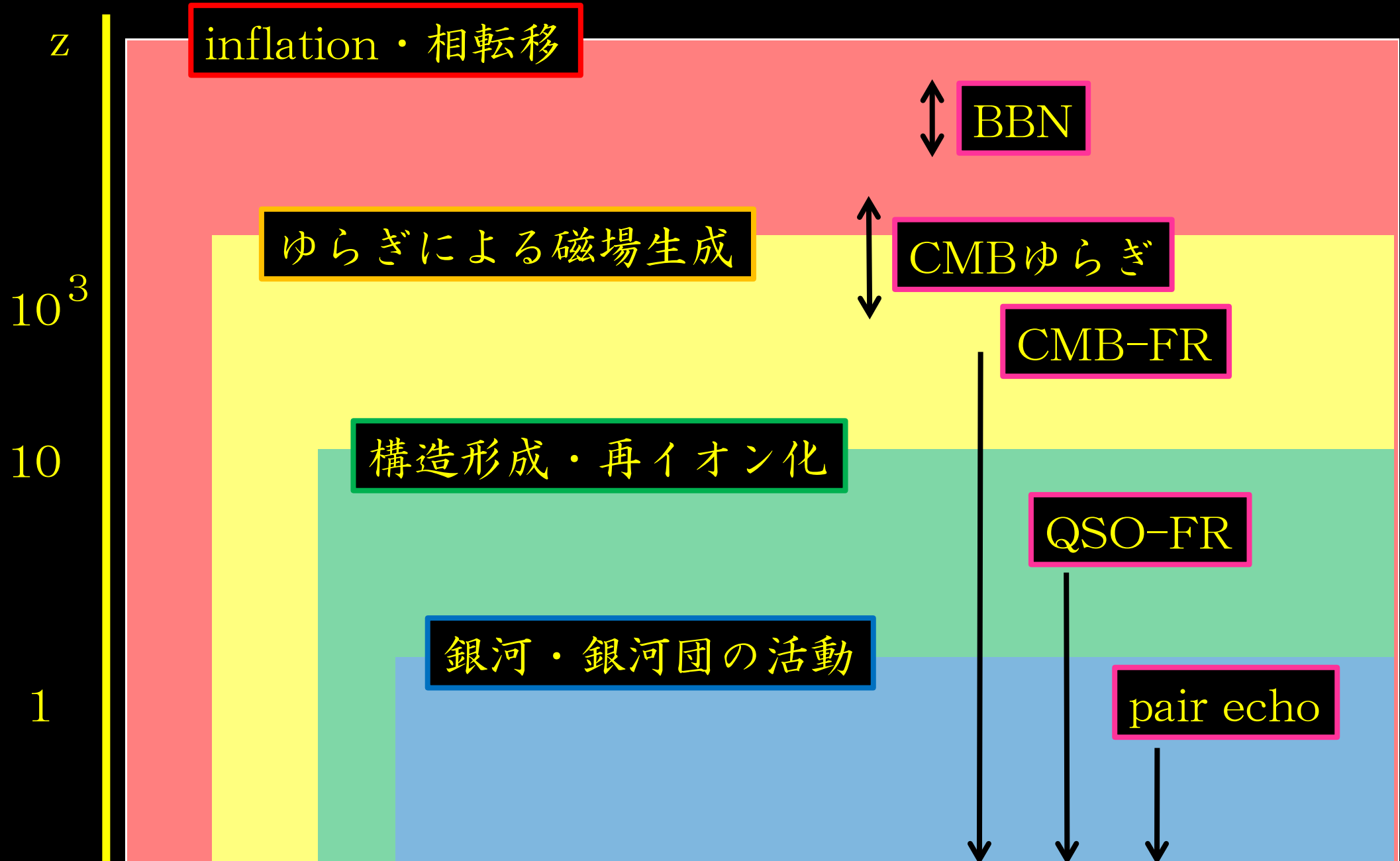
超高エネルギー宇宙線の伝搬

超高エネルギー宇宙線の軌道が曲げられてしまう。

ボイドの物理的状态

ボイドの中はどうなっている？銀河・銀河団との相互作用は？

宇宙論的磁場の生成と観測



今日の話

ゆらぎによる磁場生成

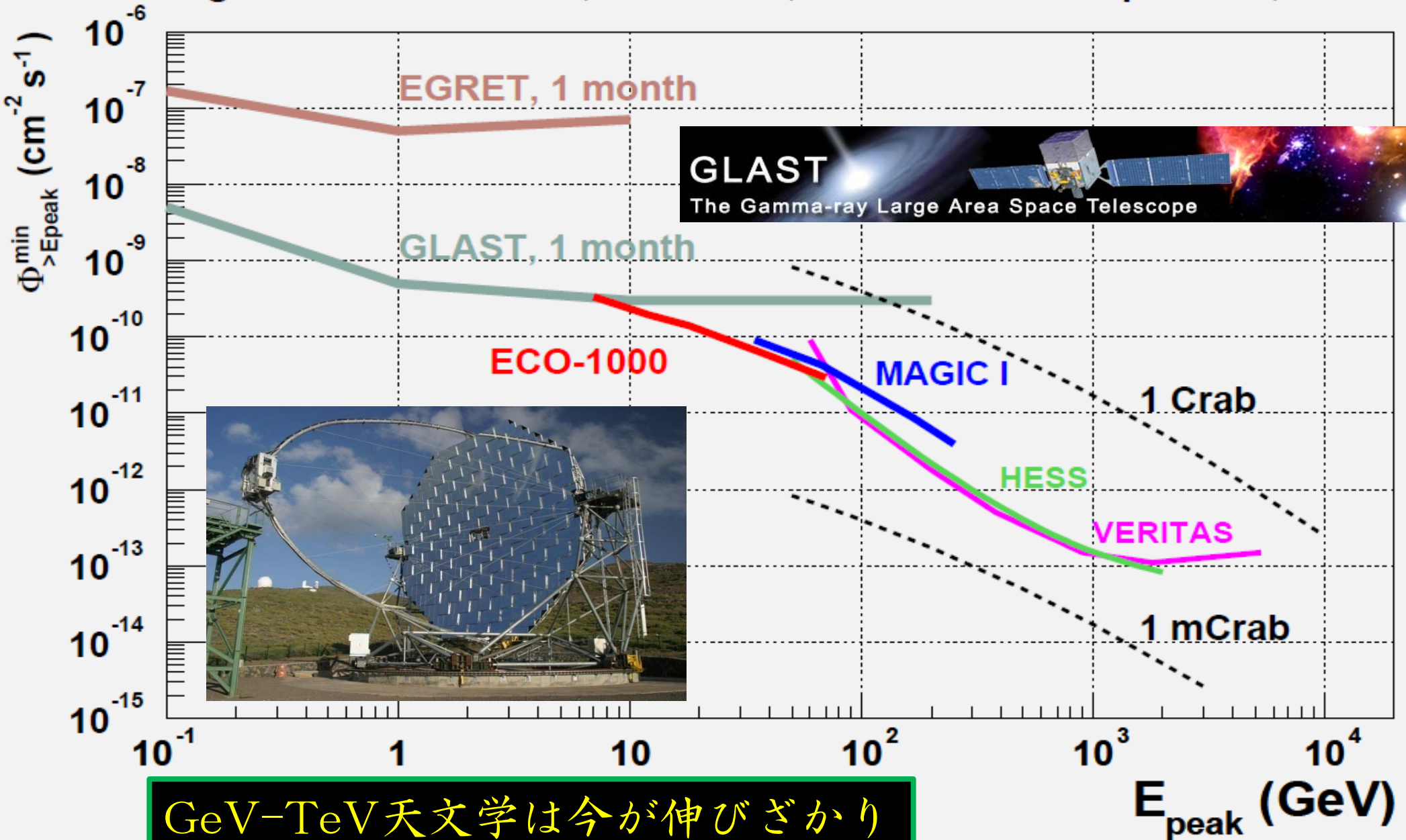
- ・初期宇宙での光子、電子、陽子、電磁場のふるまい
- ・2次摂動まで考える
- ・宇宙論的磁場の予言
- ・最大 $\sim 10^{-20}$ Gauss程度の磁場が生成される
- ・通常の宇宙論的パラメータの他には余分な仮定やパラメータがない

pair echoによる磁場観測

- ・TeV放射をしている天体からのGeV領域の遅延放射
- ・ 10^{-20} Gaussというとんでもなく弱い磁場を検出できる可能性
- ・だいたいボイド領域の磁場を測ることになる

VHE gamma-ray astronomy

Integral flux sensitivities, 5σ in 50 h, $E^{-2.6}$ diff. source spectrum, $\theta < 30^\circ$



GeV-TeV天文学は今が伸びざかり

2、宇宙磁場の生成

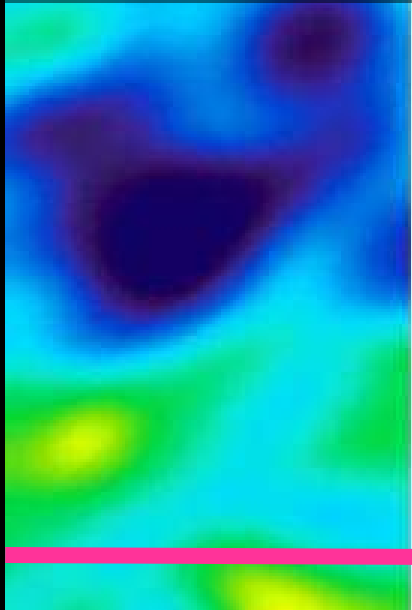
KT, K. Ichiki, N. Sugiyama 05, 06, 07, 08

宇宙論的摂動

摂動 = 一様等方からのずれ・ゆらぎ

- ・インフレーションで量子的に生成
→ 密度ゆらぎ・重力波
- ・その後、線形に発展
→ CMB・構造形成

宇宙背景放射



天体の形成



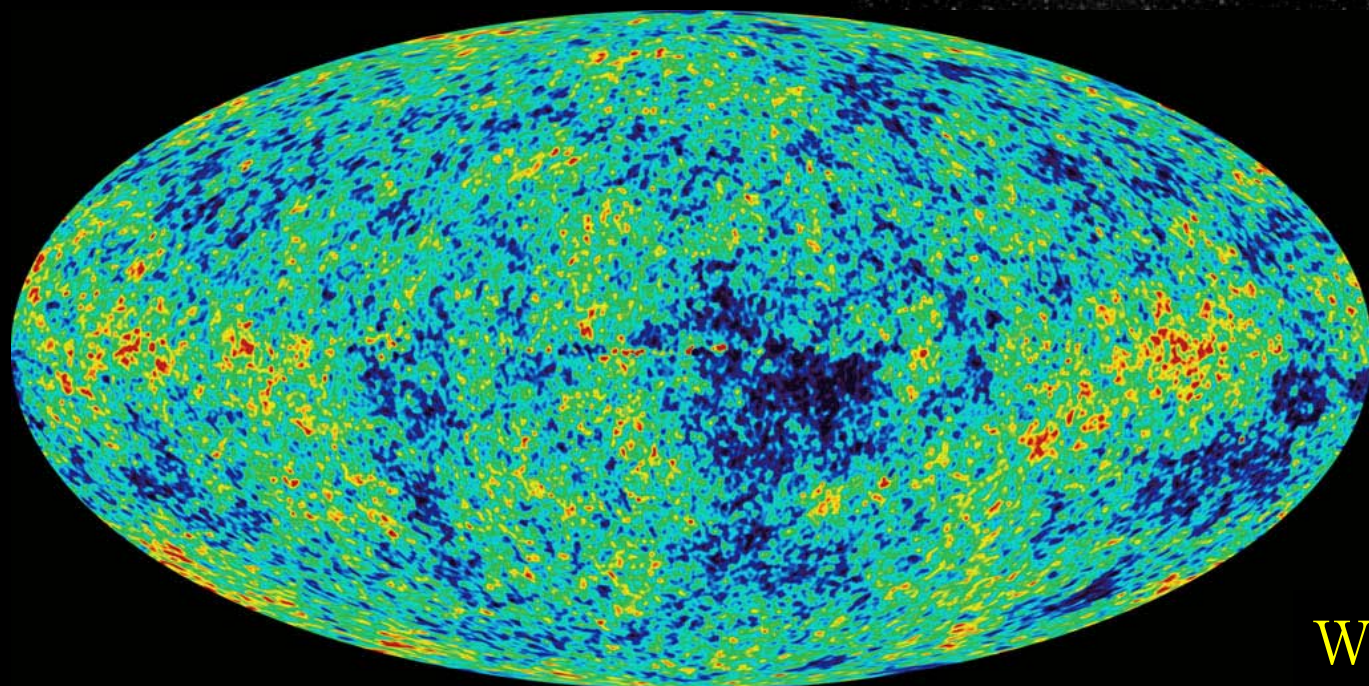
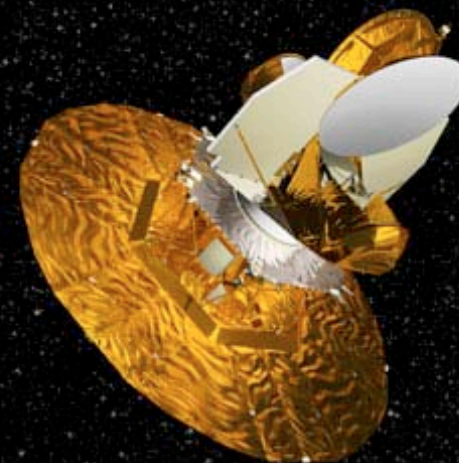
宇宙の大構造



重力によって進化

宇宙背景放射

宇宙背景放射の
温度に10万分
の1のゆらぎ



精密宇宙論
の始まり

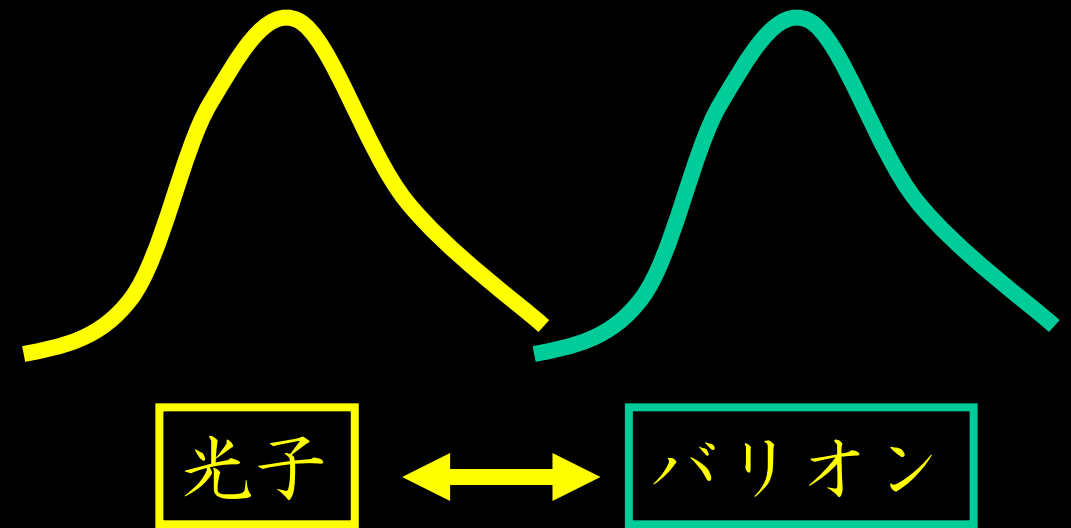
WMAP

初期宇宙の様子

登場人物

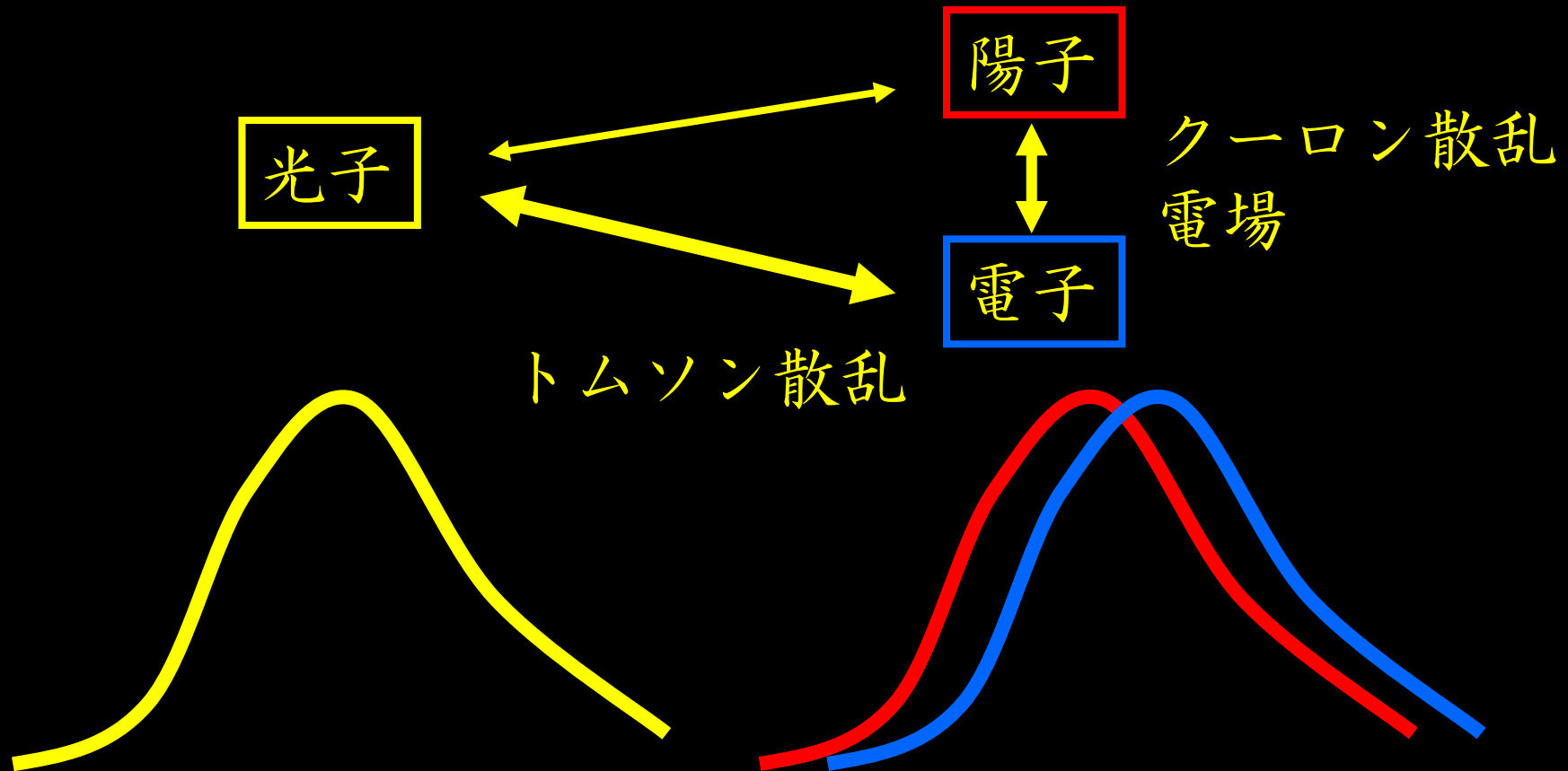
- ・光子
- ・バリオン (陽子+電子)
- ・ダークマター
- ・ニュートリノ

光子とバリオンは
トムソン散乱で
相互作用しながら
発展していく



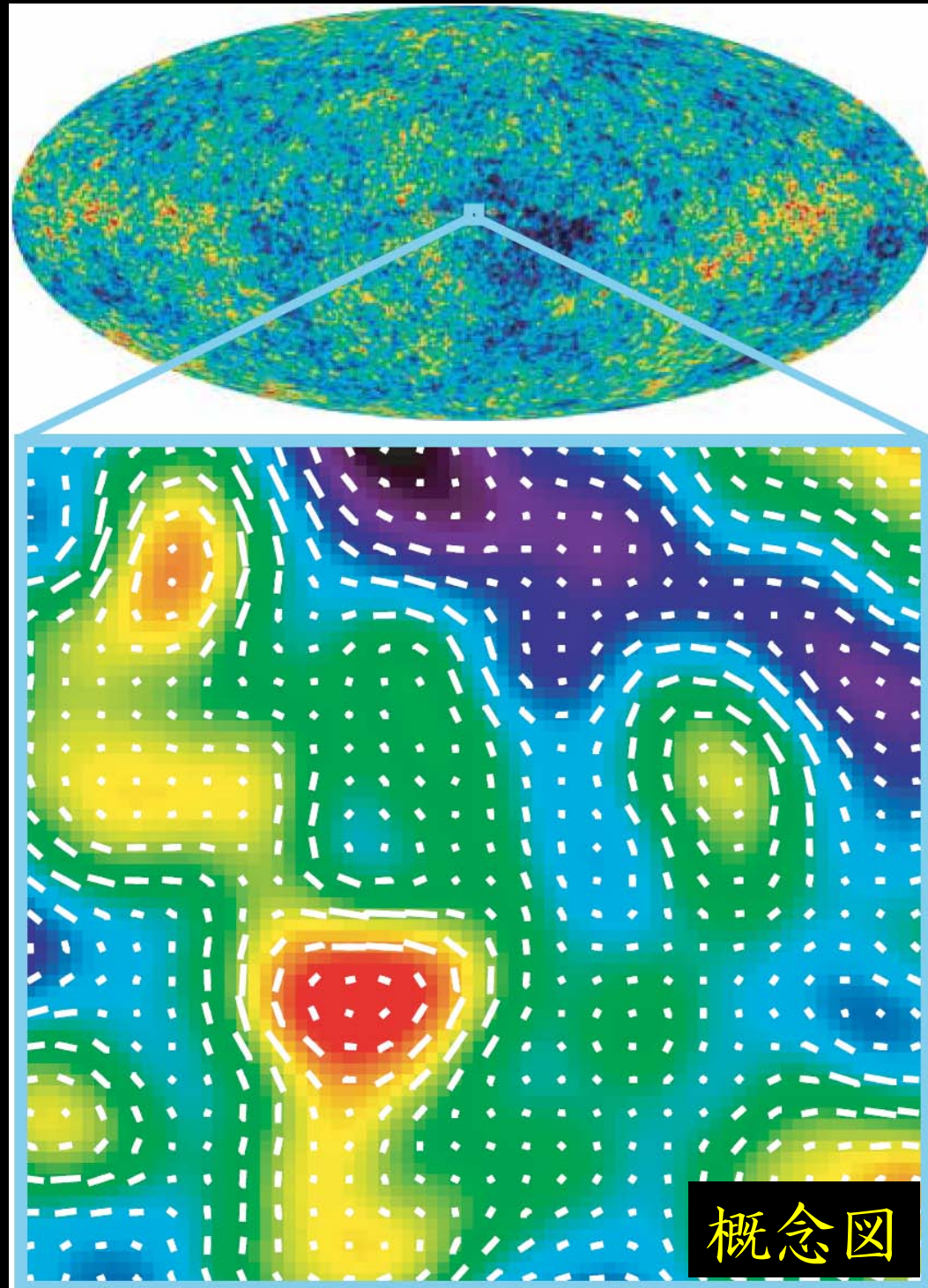
トムソン散乱

ゆらぎによる磁場生成



CMBと磁場の相関

ゆらぎから
磁場が生成
↓
CMBゆらぎと
磁場は相関



これまでの枠組みの拡張

磁場生成に何が必要か？

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

電場とその回転が必要

電場

- ・ これまで：光子とバリオンの2流体
 ↑ 観測するものは光子
- ・ 陽子、電子を独立に取り扱う必要あり

回転成分

- ・ 線形近似では回転成分が存在しない
- ・ 非線形効果で生成（1次スカラー → 2次ベクトル）
- ・ これまでは線形で十分だった

2つの点でこれまでの枠組みを拡張

一般化オームの法則

陽子・電子の運動方程式

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

$$m_e n_e [\partial_t \vec{v}_e + (\vec{v}_e \cdot \nabla) \vec{v}_e] \\ = -en_e (\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) + \underbrace{e^2 n_p n_e \eta (\vec{v}_p - \vec{v}_e)}_{\text{クーロン散乱}} + \underbrace{\sigma_T n_e \rho_\gamma (\vec{v}_\gamma - \vec{v}_e)}_{\text{トムソン散乱}} - m_e n_e \nabla \Phi,$$

一般化オームの法則

$$\frac{1}{\omega_p^2} \partial_t \vec{j} = \vec{E} - \eta_{\text{eff}} \vec{j} + \vec{C}$$

光子の「風」

$$\vec{C} \equiv \frac{1 - \beta^3}{1 + \beta} \frac{\sigma_T \rho_\gamma}{e} \left(\delta \vec{v}_{\gamma b} - \frac{1}{4} \vec{v}_b \cdot \Pi_\gamma \right)$$

初期宇宙の電磁場①

一般化オームの法則の発散

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

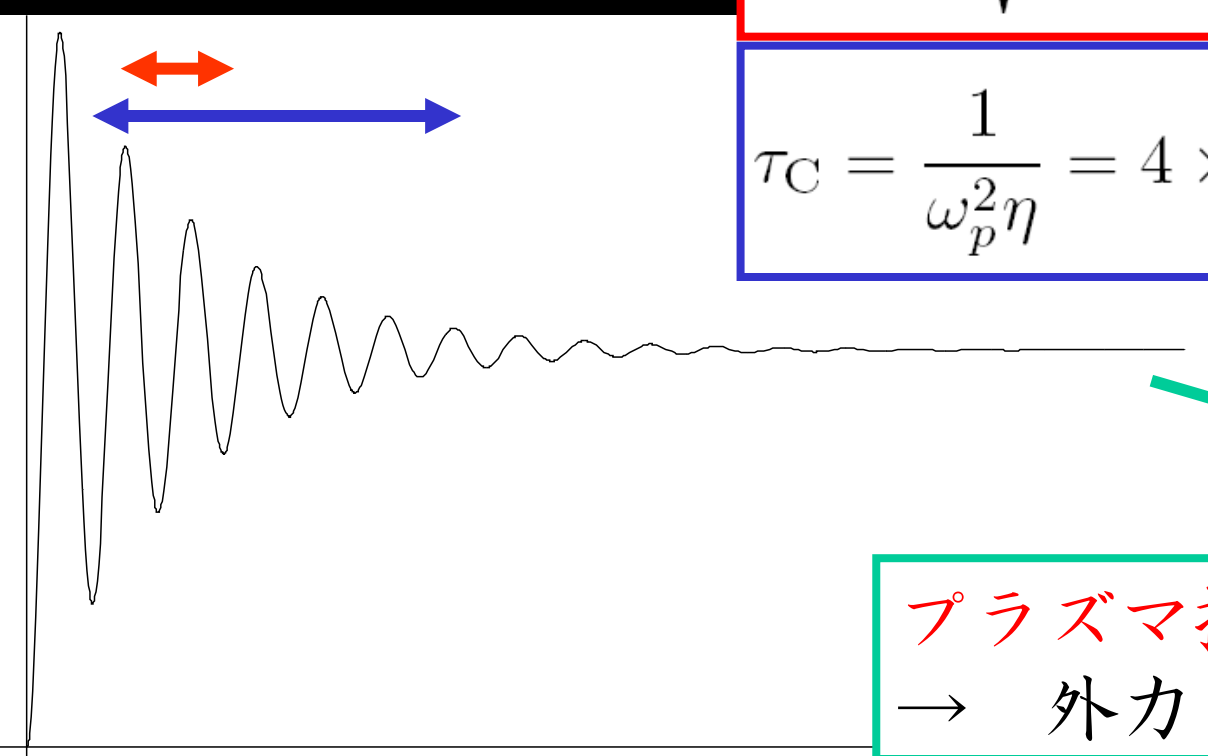
外力（光子の風）
のある減衰振動

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

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

$$\rho \approx \nabla \cdot \vec{C}$$

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



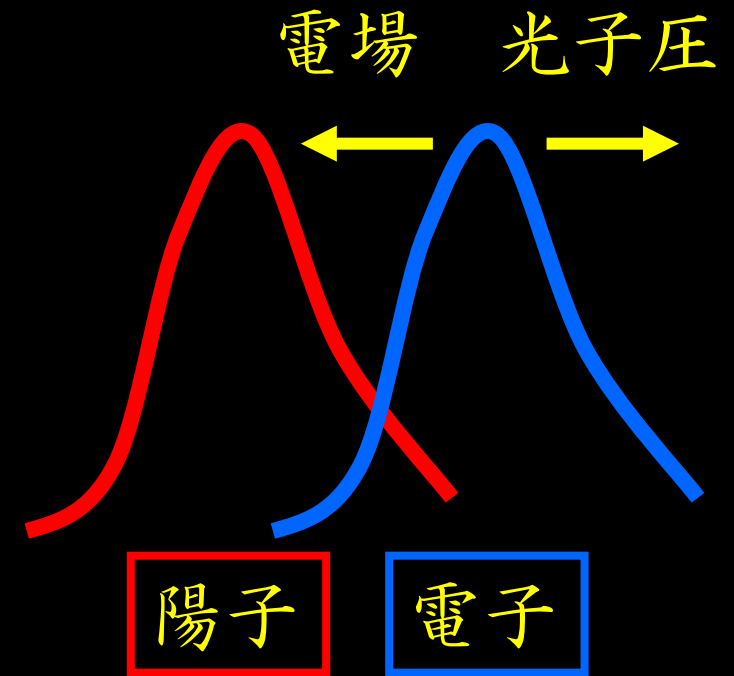
初期宇宙の電磁場②

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

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

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

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



- ・ 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
- ・ 電流 → 変位電流を支える部分 + 磁場を支える部分
- ・ 光子の風がなくなると、電場・電荷密度は消える
磁場・電流は残る

光子 - バリオンの相対運動

磁場のsource

$$\nabla \times \vec{C}^{(2)} = \frac{\sigma_T \rho_\gamma^{(0)}}{e} \left[\frac{\nabla \rho_\gamma^{(1)}}{\rho_\gamma^{(0)}} \times \delta \vec{v}_{\gamma b}^{(1)} + \nabla \times \delta \vec{v}_{\gamma b}^{(2)} \right]$$

速度差の方程式

$$\begin{aligned} & \partial_t \delta \vec{v}_{\gamma b} + (\vec{v} \cdot \nabla) \delta \vec{v}_{\gamma b} + (\delta \vec{v}_{\gamma b} \cdot \nabla) \vec{v} - (\delta \vec{v}_{\gamma b} \cdot \nabla) \delta \vec{v}_{\gamma b} \\ &= -\frac{1}{4} \frac{\nabla \rho_\gamma}{\rho_\gamma} - (1 + R) \frac{\sigma_T \rho_\gamma}{m_p} \delta \vec{v}_{\gamma b}. \end{aligned}$$

強結合近似を用いて解く $k\tau_T \ll 1$

$$\delta \vec{v}_{\gamma b} = k\tau_T \delta \vec{v}_{\gamma b}^{(I)} + (k\tau_T)^2 \delta \vec{v}_{\gamma b}^{(II)} + \dots$$

結果

$$\nabla \times \vec{C}^{(2)} = \frac{\sigma_T \rho_\gamma^{(0)}}{e} \left[\frac{\nabla \rho_\gamma^{(1)}}{\rho_\gamma^{(0)}} \times \delta \vec{v}_{\gamma b}^{(1)} + \nabla \times \delta \vec{v}_{\gamma b}^{(2)} \right]$$

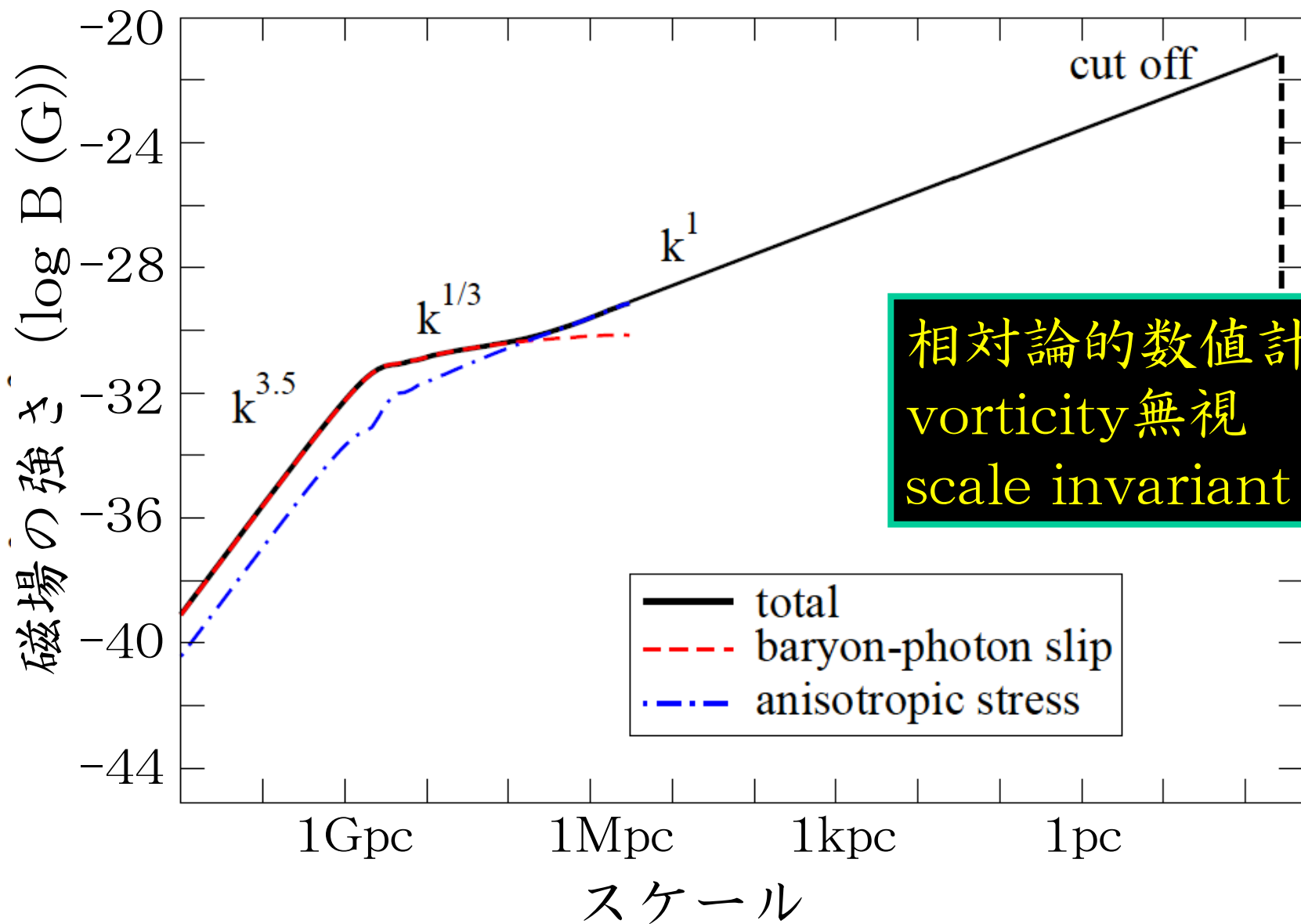
実は強結合近似の1次では外積はゼロで2次まで解く必要がある。

その結果、磁場は（その他の電磁気量も）基本的な量だけで表される。

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

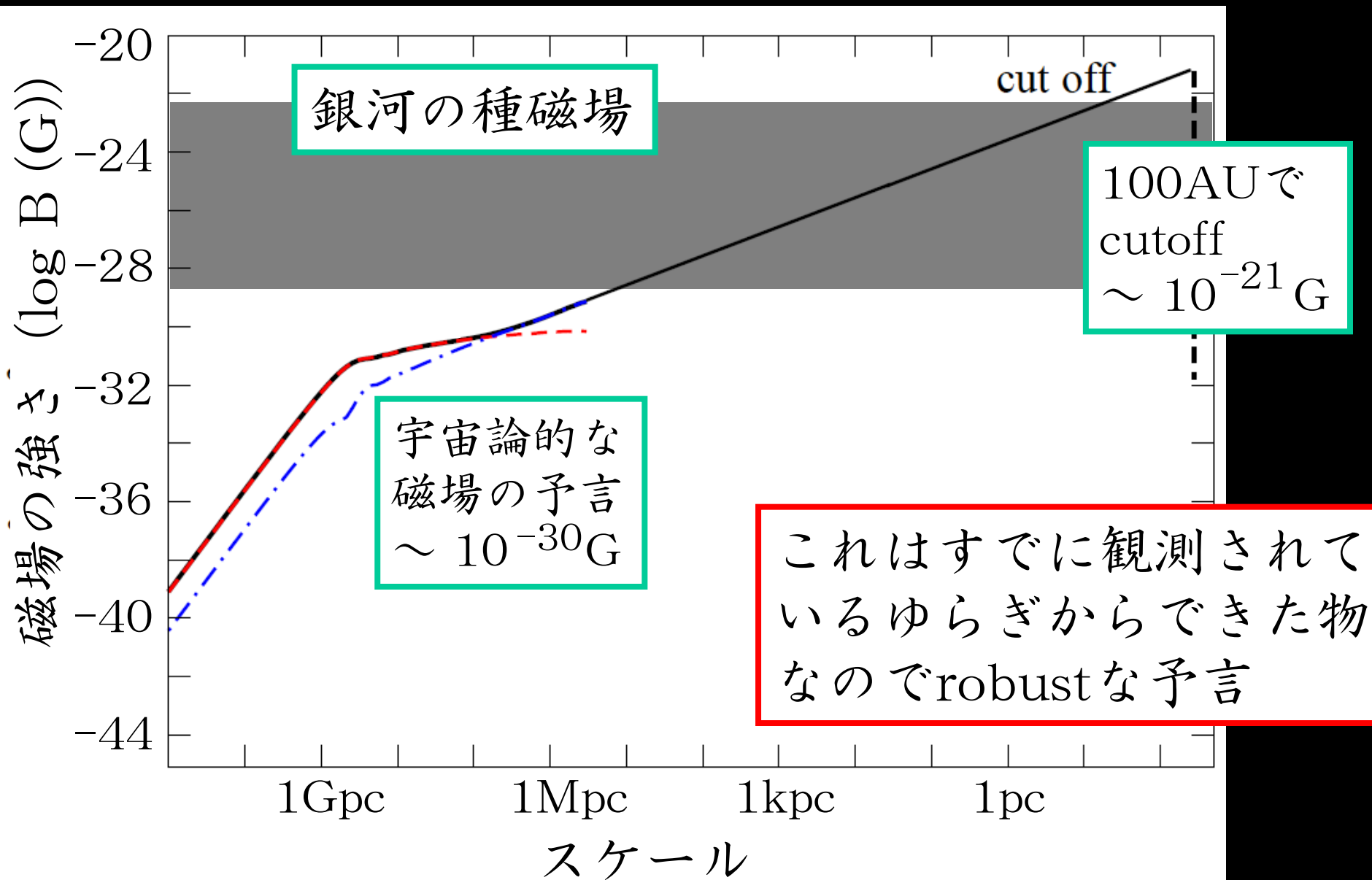
とても美しい式（だと思う）

磁場のスペクトル



相対論的数値計算
vorticity無視
scale invariantゆらぎ

磁場スペクトルの特徴



磁場のスペクトルまとめ

formalism

- ・ 2次摂動論
- ・ 電子と陽子を別々に取り扱う
→ 一般化オームの法則

メカニズム

- ・ 1次スカラー → 2次ベクトル
- ・ 光子が電子を選択的に押す

結果

- ・ 宇宙論的な磁場の存在を予言
- ・ 銀河の種磁場になるかも

3、宇宙磁場の観測

KT, K. Ichiki, K. Murase et al. 07, 08

ボイドの弱い磁場を観測できるか？

CMB・Faraday rotation

→ 現在の制限： $B < 1\text{nG}$

→ 望み薄

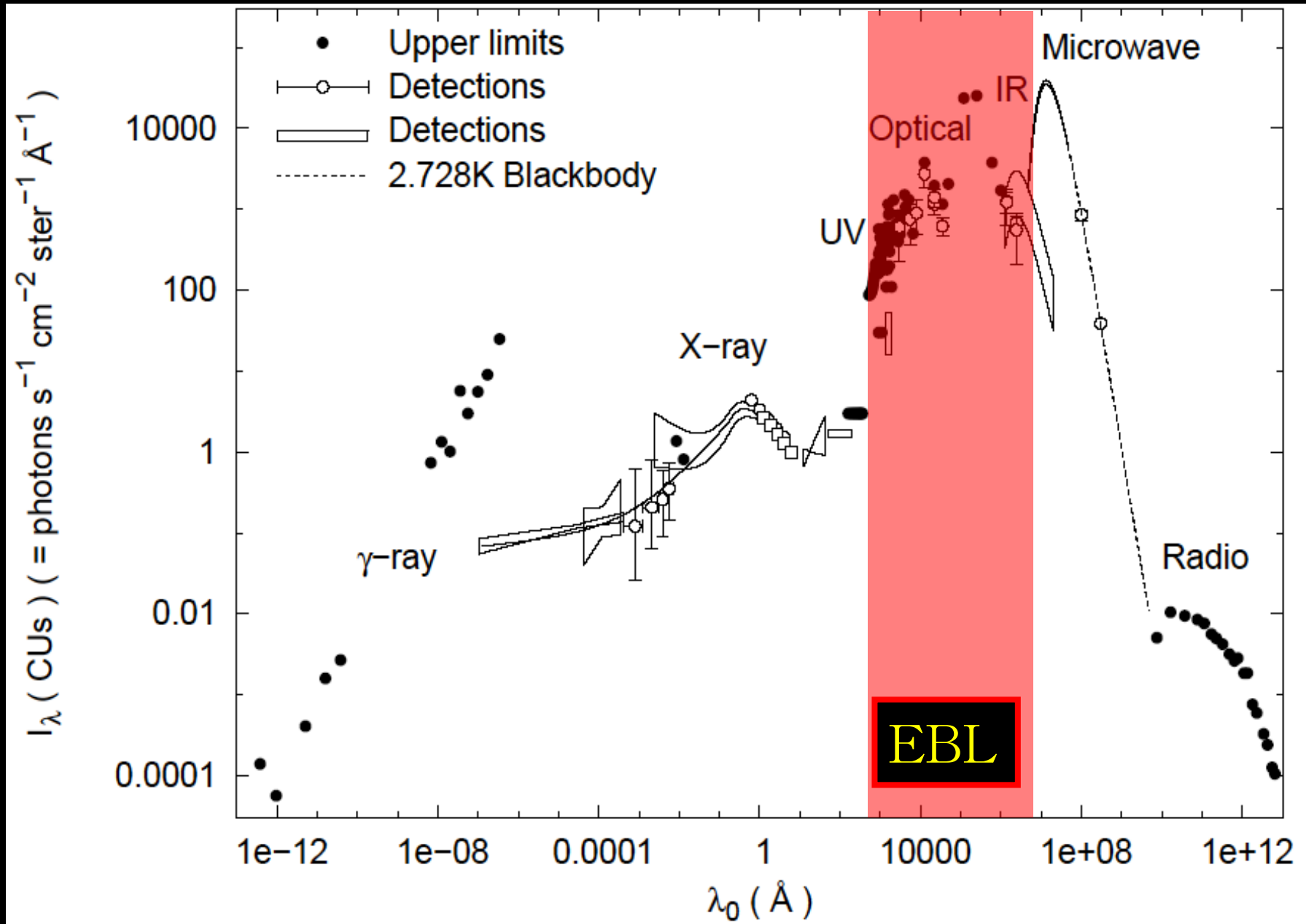
Plagaの方法 (Plaga, 1994)

GRB、blazarなど高エネルギーバースト
天体からのpair echoを使って非常に
弱い磁場を測る

→ $B = 10^{-16} \sim 10^{-20} \text{ G}$

→ 現在のところ最も強力な方法

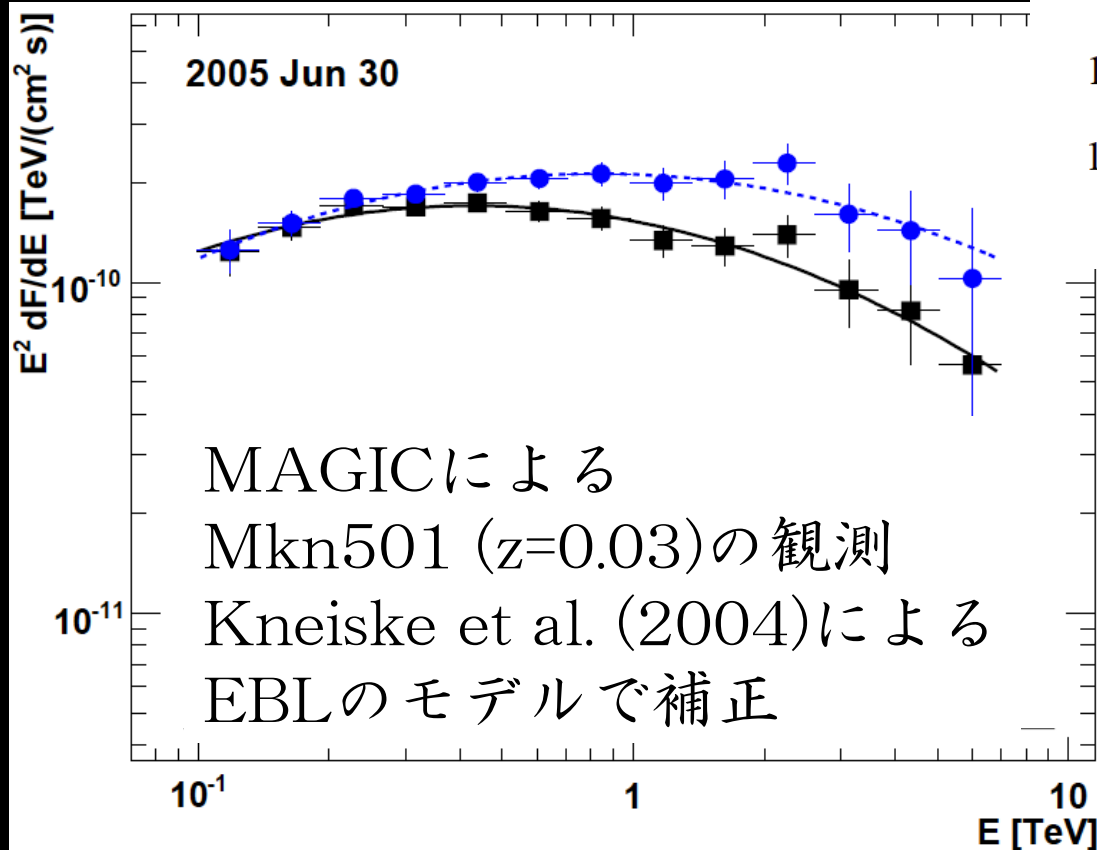
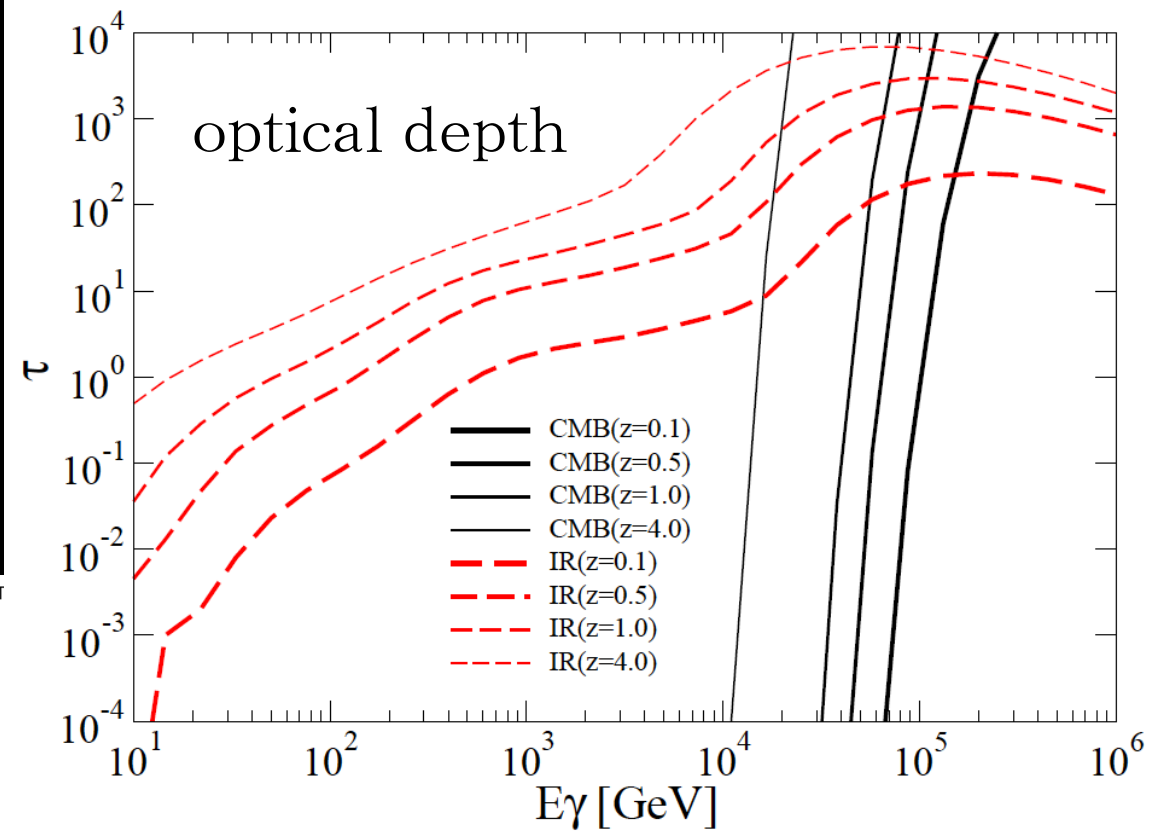
準備：extragalactic background light①



ガンマ線の吸収

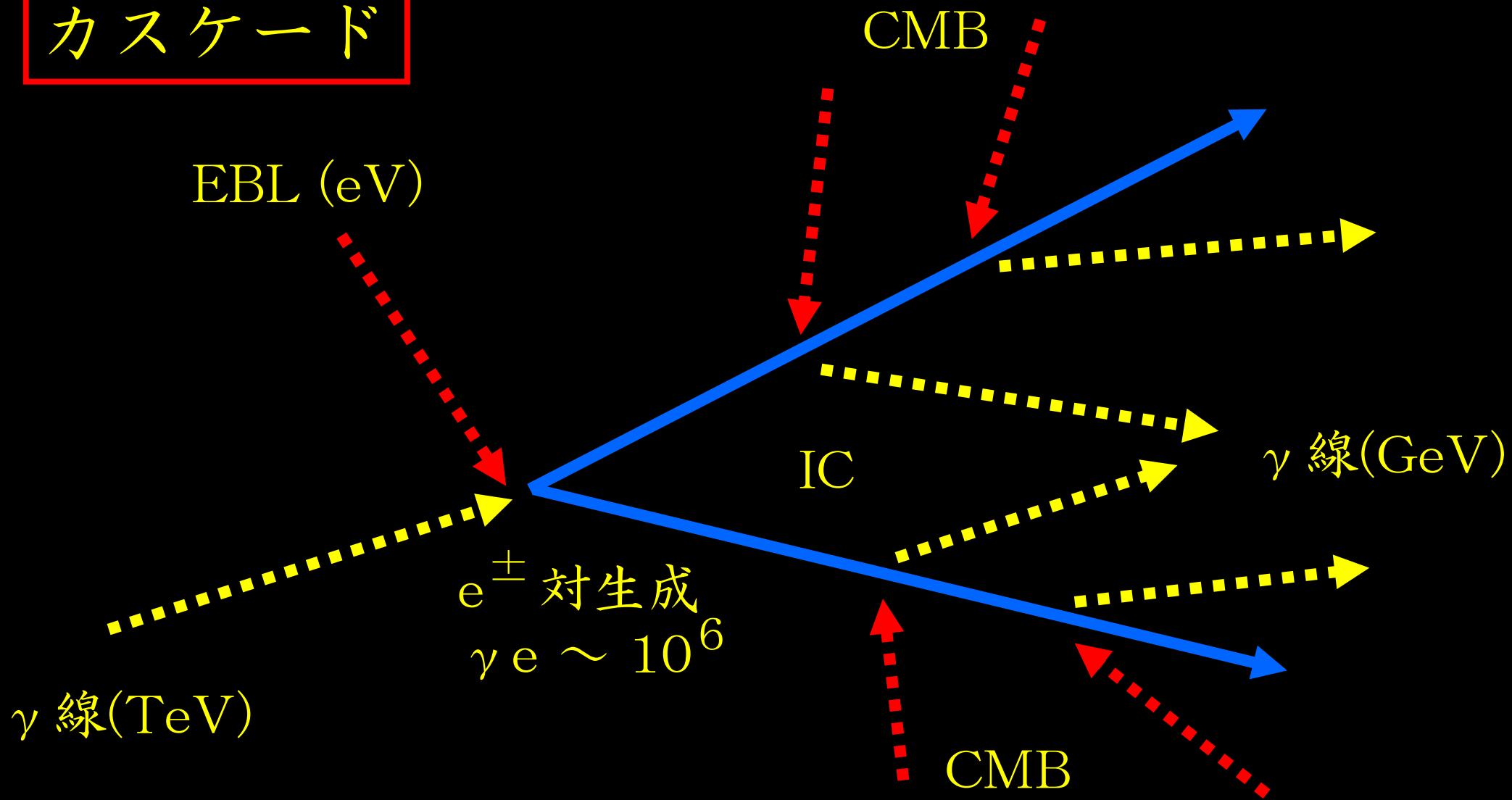
宇宙論的な距離の天体からの
TeV以上のガンマ線は吸収
される。

$$E_\gamma E_{\text{bg}} = m_e^2$$



では吸収されたガンマ線の
エネルギーはどうなるのか？

カスケード



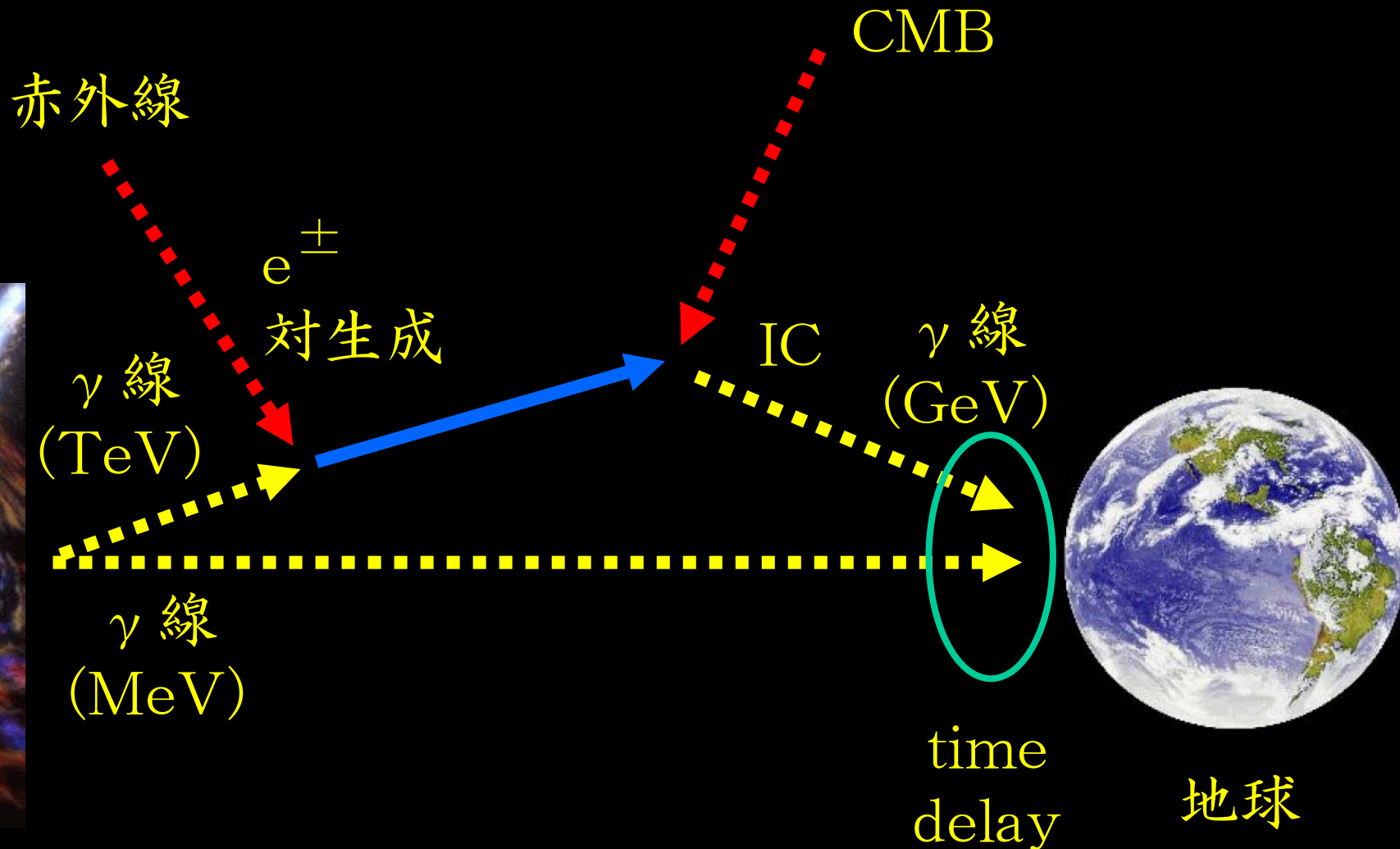
吸収された γ 線はエネルギーの低いガンマ線に変わる
* 角度は対生成・ICのたびに $1/\gamma e$ くらい変わる

pair echo

Cheng & Cheng (1996)
Dai & Lu (2002)



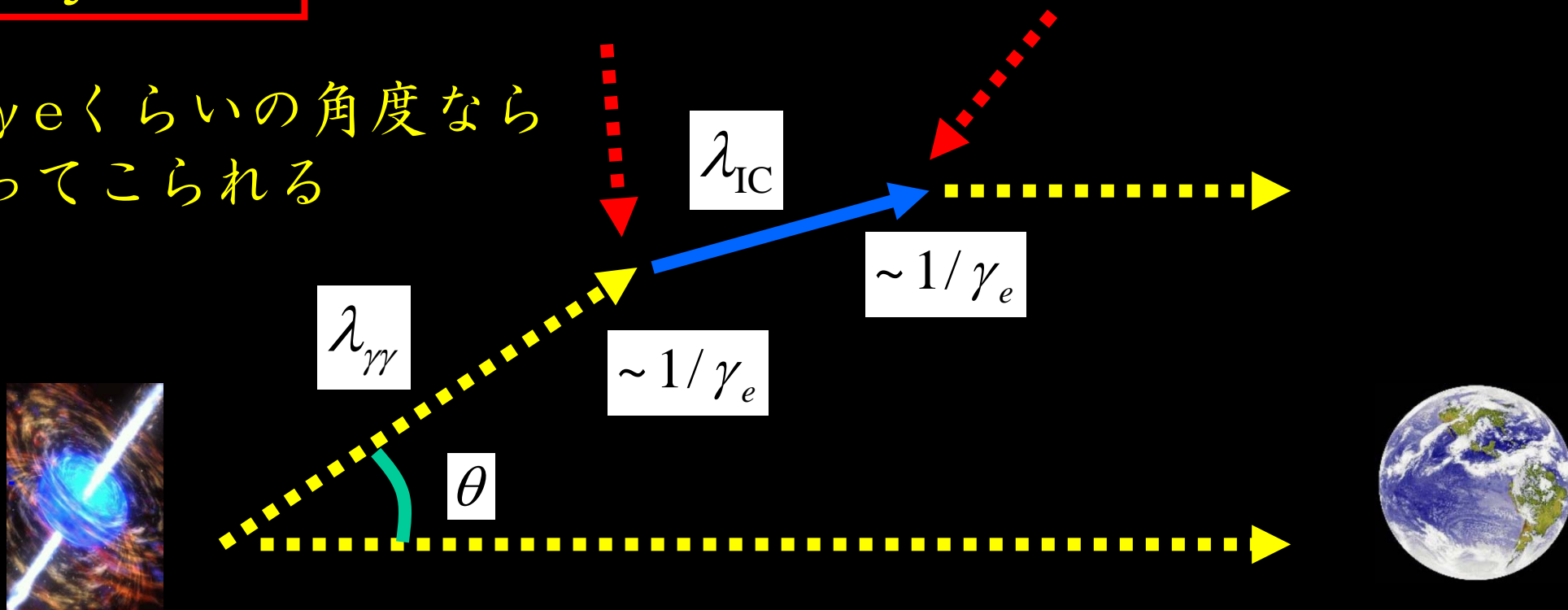
GRB, AGN



吸収された γ 線 \rightarrow pair echo

delay time

1/γ_eくらいの角度なら
戻ってこられる



$$\Delta t_{\text{delay}} = (1 - \cos(1/\gamma_e))(\lambda_{\gamma\gamma} + \lambda_{IC}) \approx \frac{1}{2\gamma_e^2}(\lambda_{\gamma\gamma} + \lambda_{IC})$$

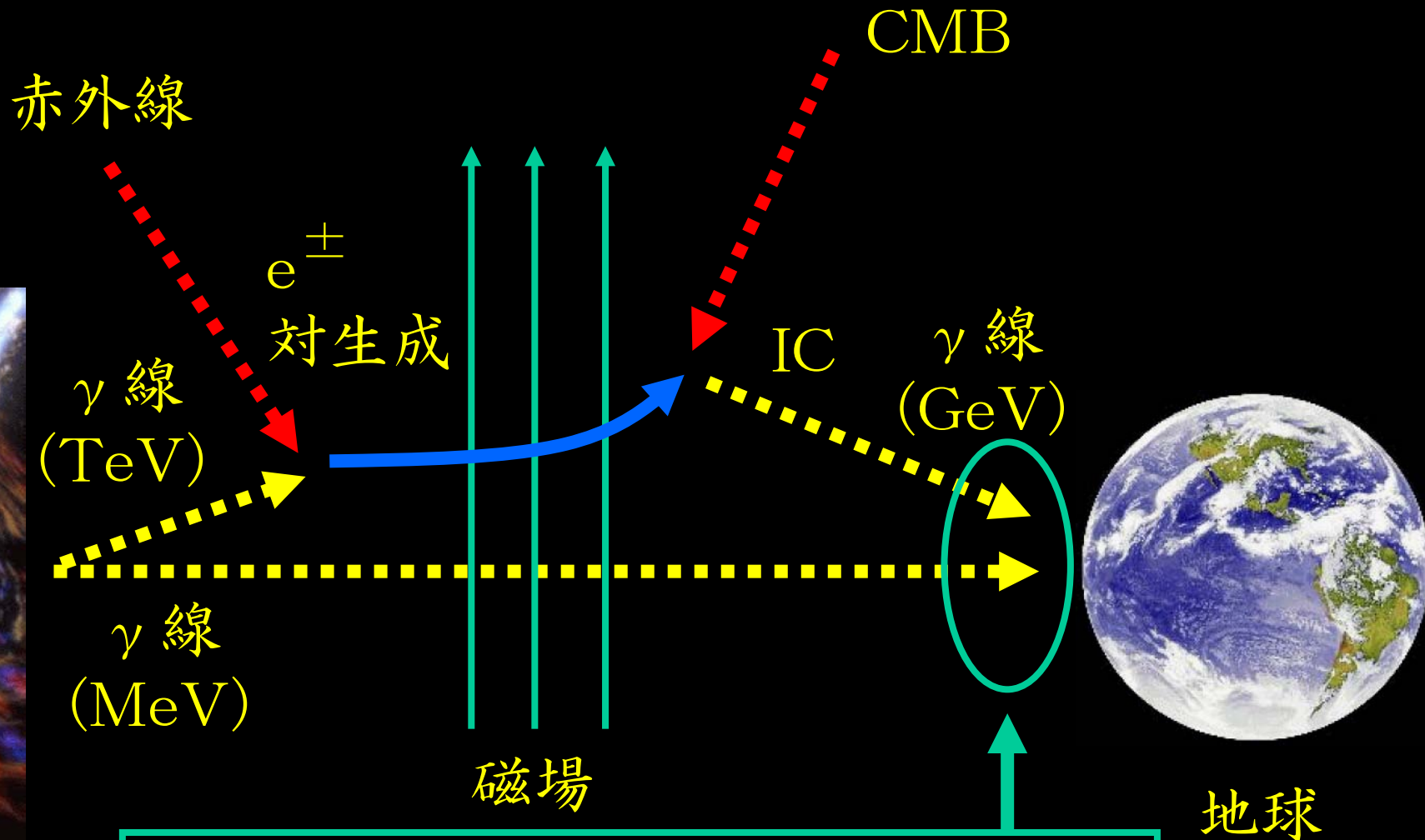
delay timeは平均自由行程とどれだけ曲がって来れるかで
決まる。高エネルギーほどあまり曲がらない。

pair echo with magnetic field

Plaga (1995)



GRB, AGN



磁場によりさらに到着時刻が遅れる
遅延時刻を測ることで磁場を測る

スケール感覚

赤外線

$$E_{\text{IR}} = 0.1 \text{eV} \left(\frac{E_\gamma}{1 \text{TeV}} \right)^{-1}$$

CMB

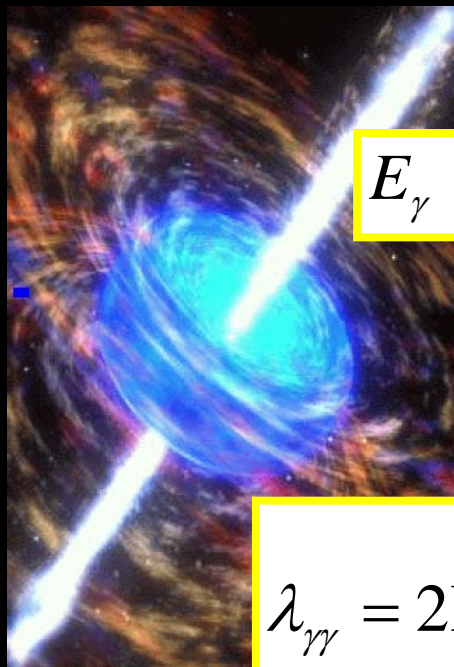
$$E_{\text{delay}} = 0.6 \text{GeV} \left(\frac{E_\gamma}{1 \text{TeV}} \right)^2$$

$$E_\gamma = 1 \text{TeV}$$

$$\lambda_{\gamma\gamma} = 2 \text{Mpc} \left(\frac{n_{\text{IR}}}{1 \text{cm}^{-3}} \right)^{-1}$$

$$\lambda_{\text{IC}} = 0.4 \text{Mpc} \left(\frac{E_\gamma}{1 \text{TeV}} \right)^{-1}$$

$$\Delta t_B = 0.5 \text{ day} \left(\frac{E_{\text{delay}}}{1 \text{GeV}} \right)^{-2} \left(\frac{B}{10^{-20} \text{G}} \right)^2$$



いろいろな数字①

$$E_\gamma = 1\text{TeV}$$

- ・ TeVブレーザー
- ・ GRBではパラメータ次第でTeVが出るのは割と自然

$$E_{\text{delay}} = 0.6\text{GeV} \left(\frac{E_\gamma}{1\text{TeV}} \right)^2$$

- ・ GLASTなど衛星の領域。
もう少し高いと地上のチェレンコフ望遠鏡の領域。

$$\Delta t_B = 0.5 \text{ day} \left(\frac{E_{\text{delay}}}{1\text{GeV}} \right)^{-2} \left(\frac{B}{10^{-20} \text{ G}} \right)^2$$

- ・ 強い (弱い) 磁場は高 (低) エネルギー γ 線で見える

いろいろな数字②

$$\lambda_{\gamma\gamma} = 2\text{Mpc} \left(\frac{n_{\text{IR}}}{1\text{cm}^{-3}} \right)^{-1}$$

- ・天体付近の濃い領域から出るのに十分大きい

$$\lambda_{\text{IC}} = 0.4\text{Mpc} \left(\frac{E_{\gamma}}{1\text{TeV}} \right)^{-1}$$

- ・上と合わせても基本的に反応はlocal

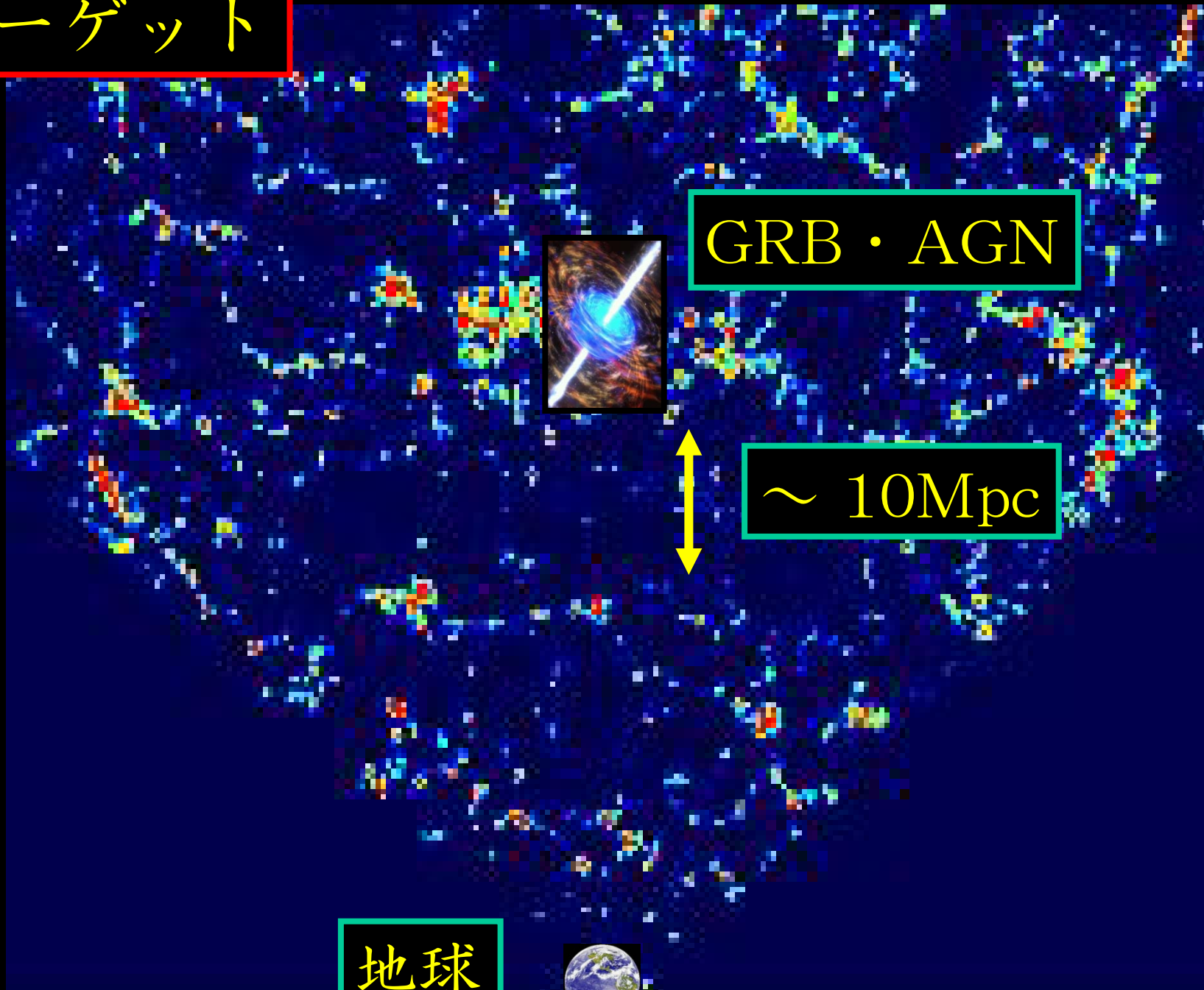
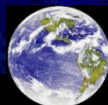
(もちろん場合によるが、) この方法で磁場が測定できるのはボイドの可能性が高い。
→ ゆらぎによる磁場生成の検証には都合がよい

ターゲット

GRB・AGN

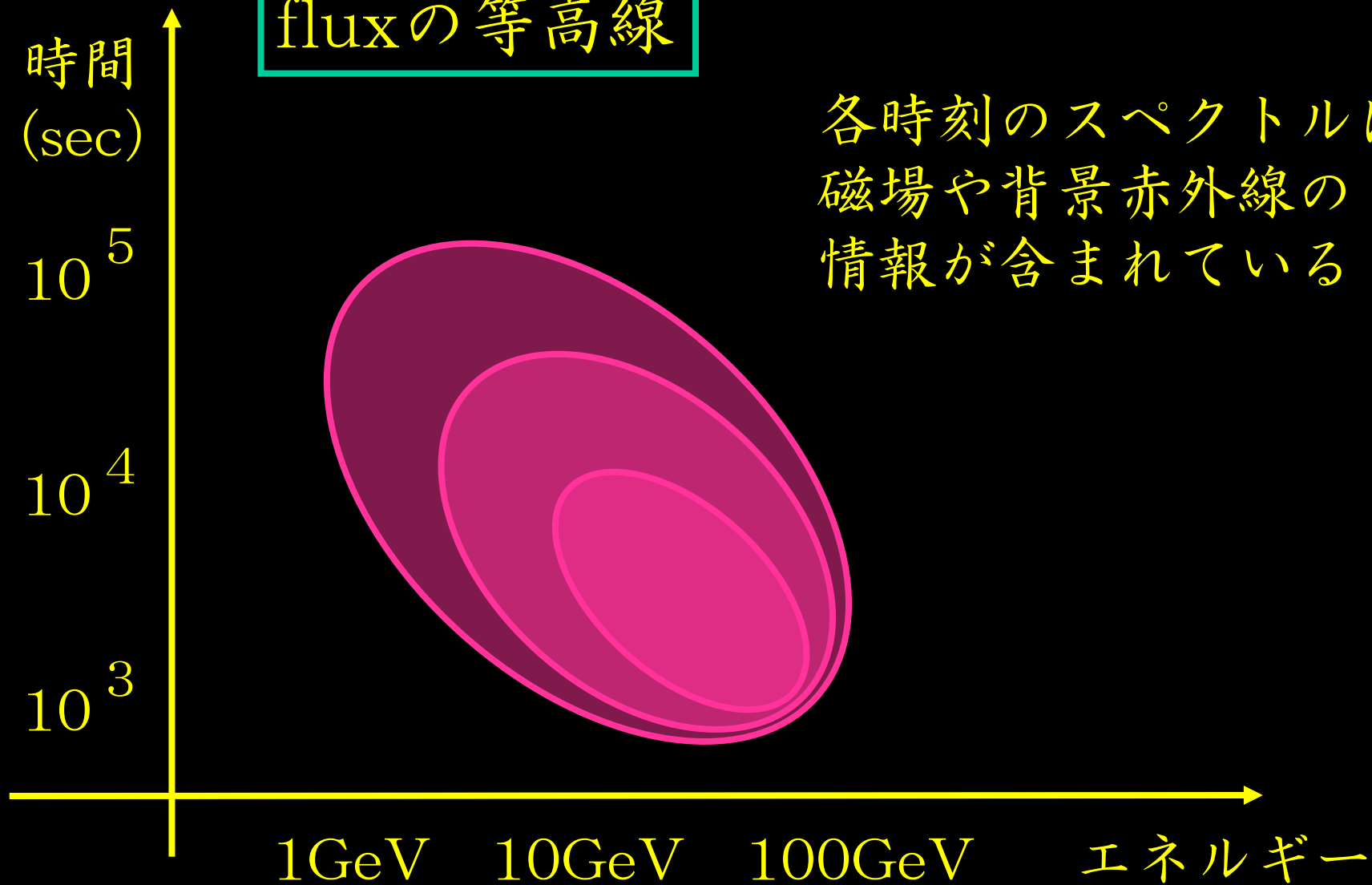
~ 10Mpc

地球



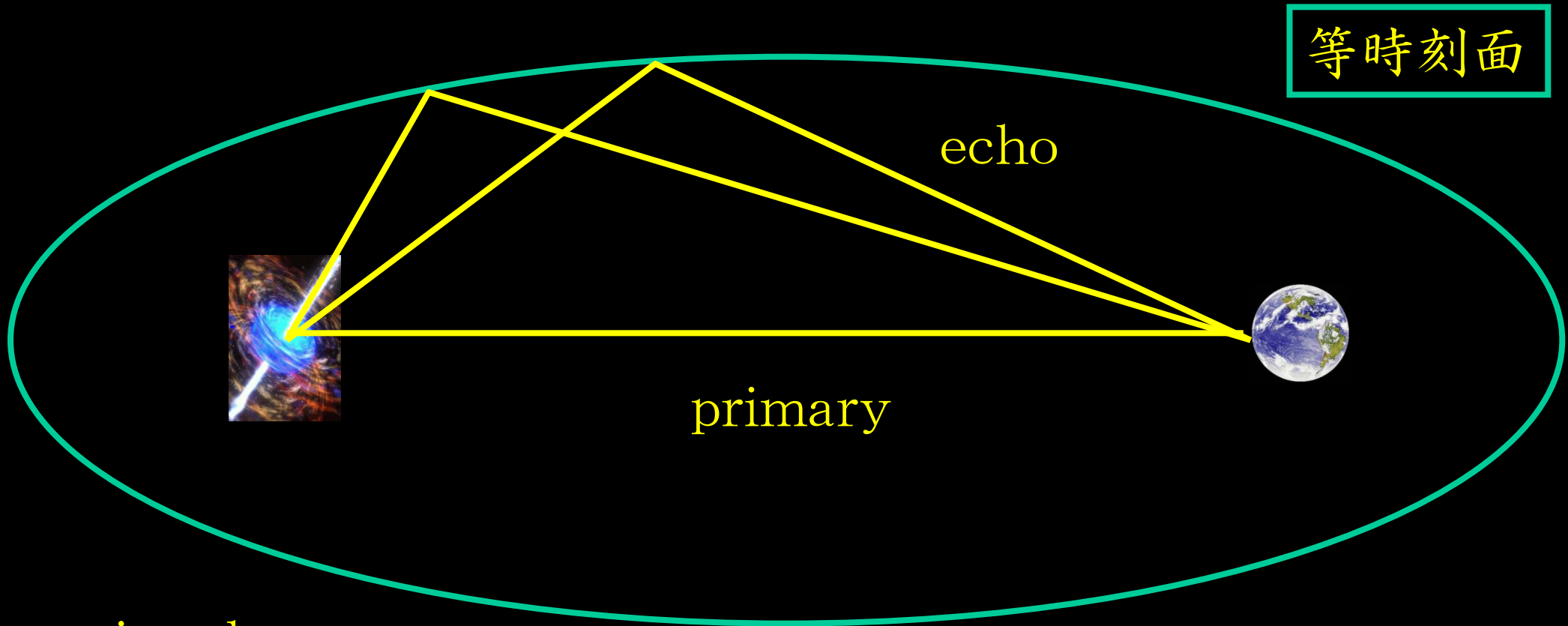
観測量

fluxの等高線



定式化

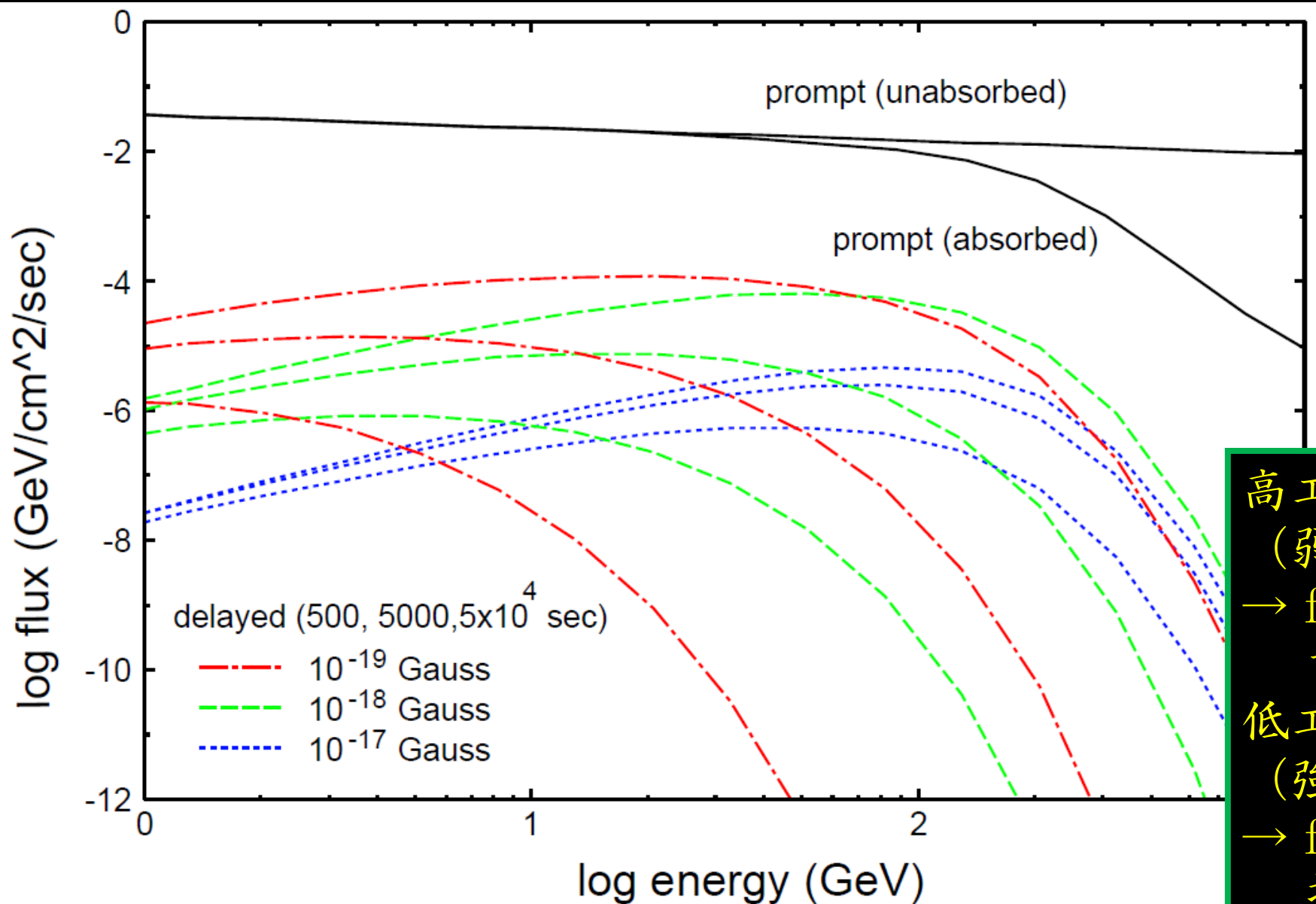
単なるecho：等時刻面を考え、その面上のfluxを積分する



pair echo

- ・ γ 線 \rightarrow 電子陽電子 \rightarrow γ 線
- ・ 対生成、IC、磁場で角度が変わる
- ・ 電子陽電子は連続的に光子を放出

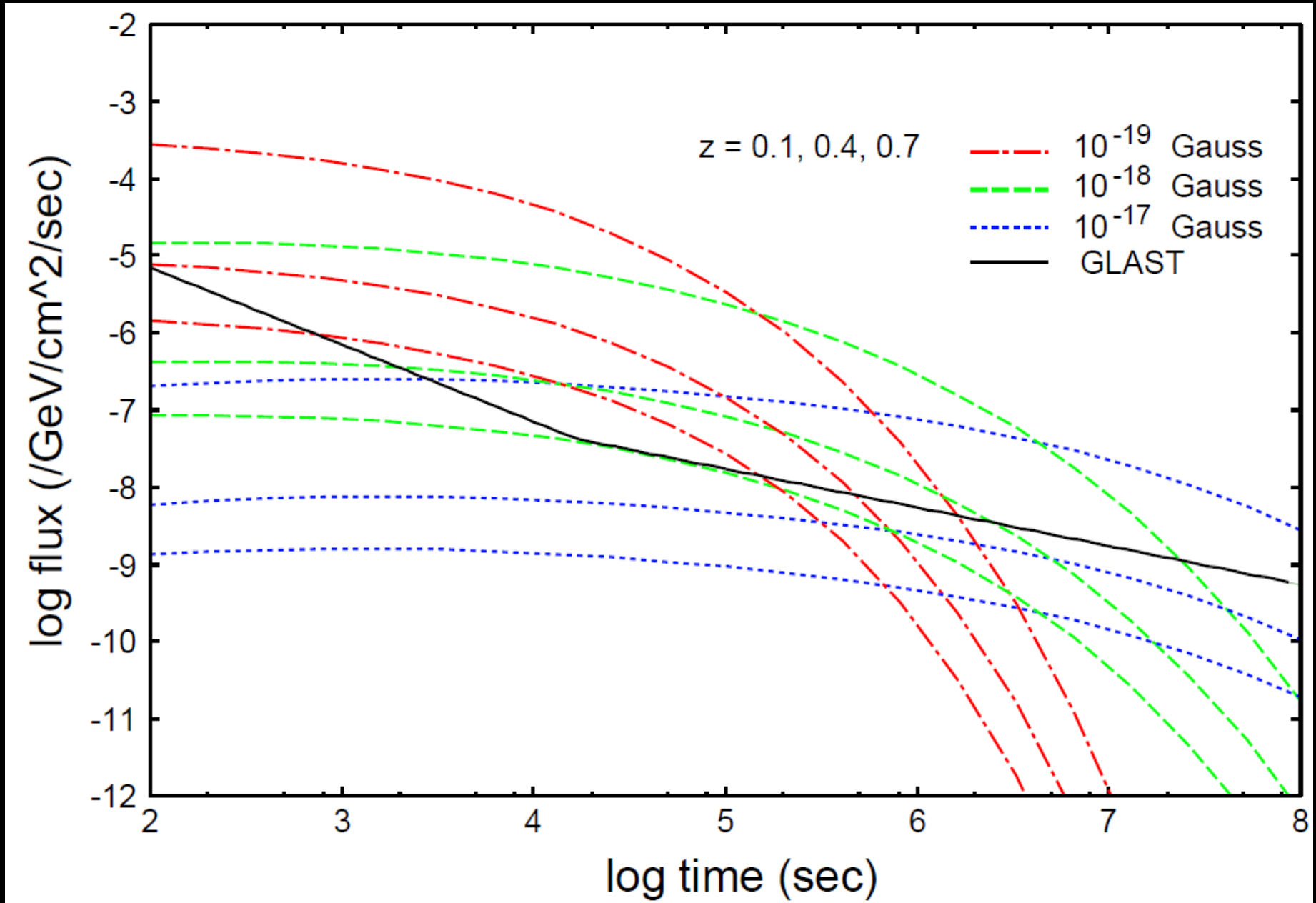
pair echoのスペクトル



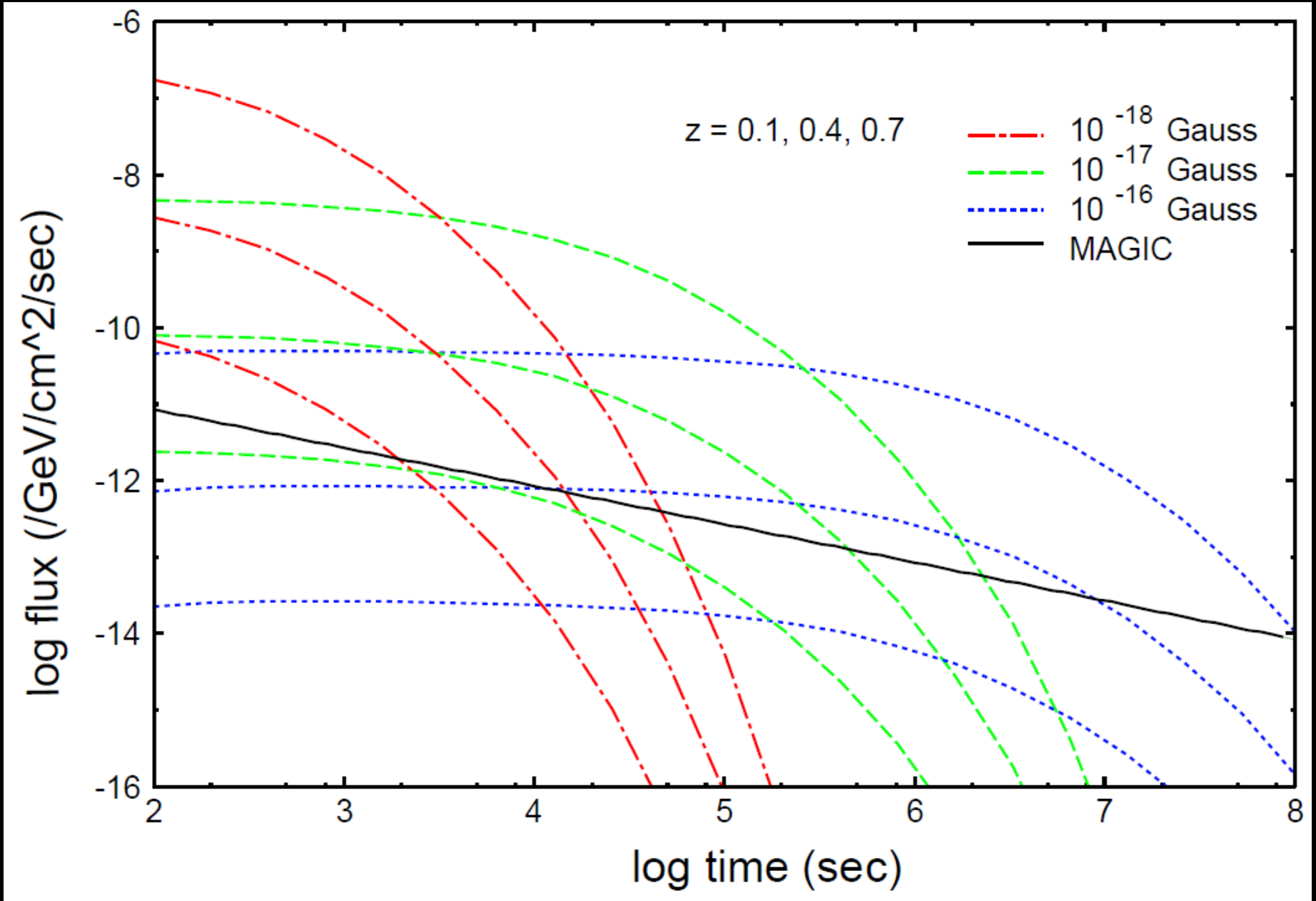
高エネルギー
(弱磁場)
→ fluxは大きい
すぐにへたる

低エネルギー
(強磁場)
→ fluxは小さい
持続する

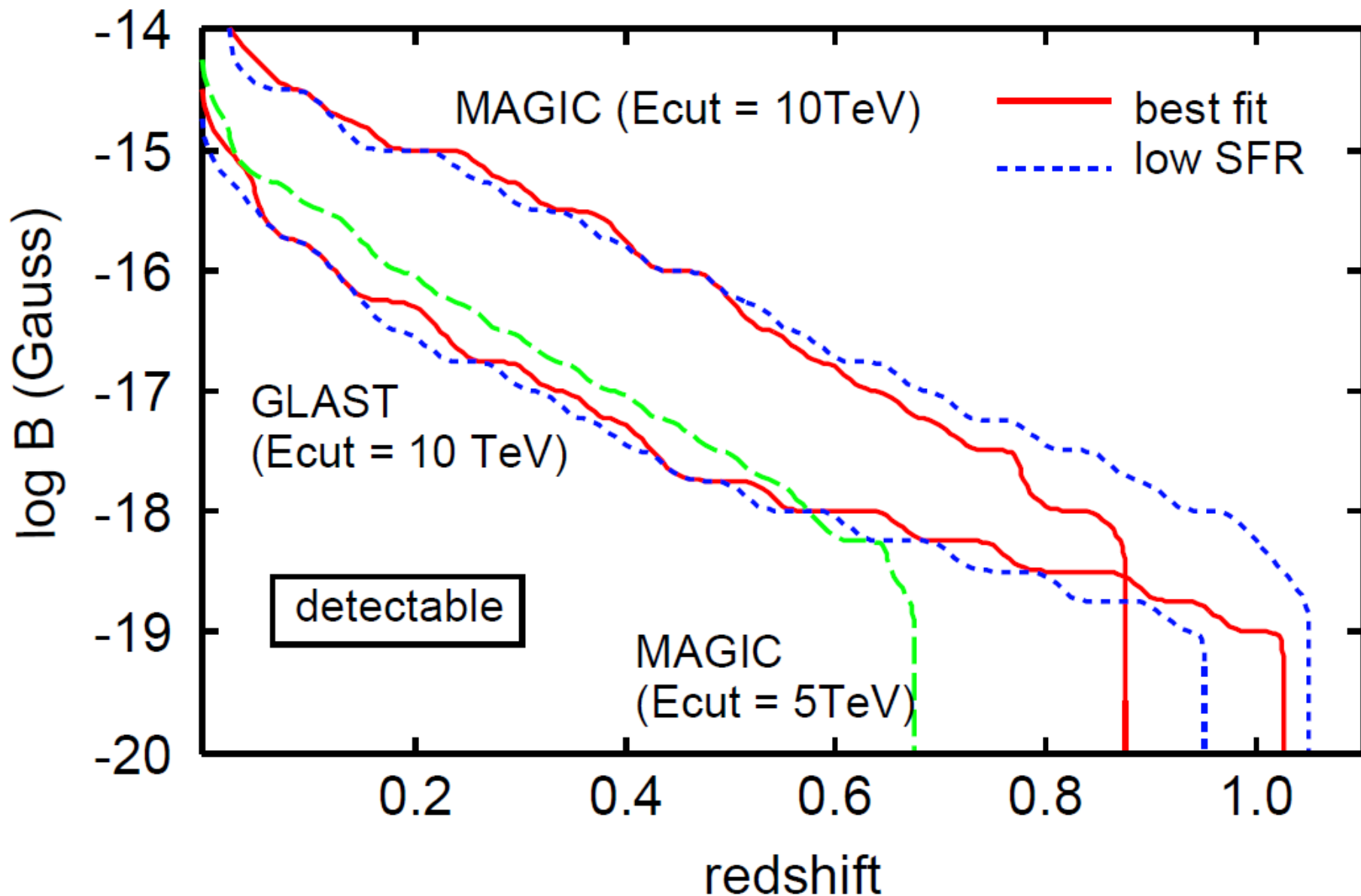
GLASTによる観測可能性



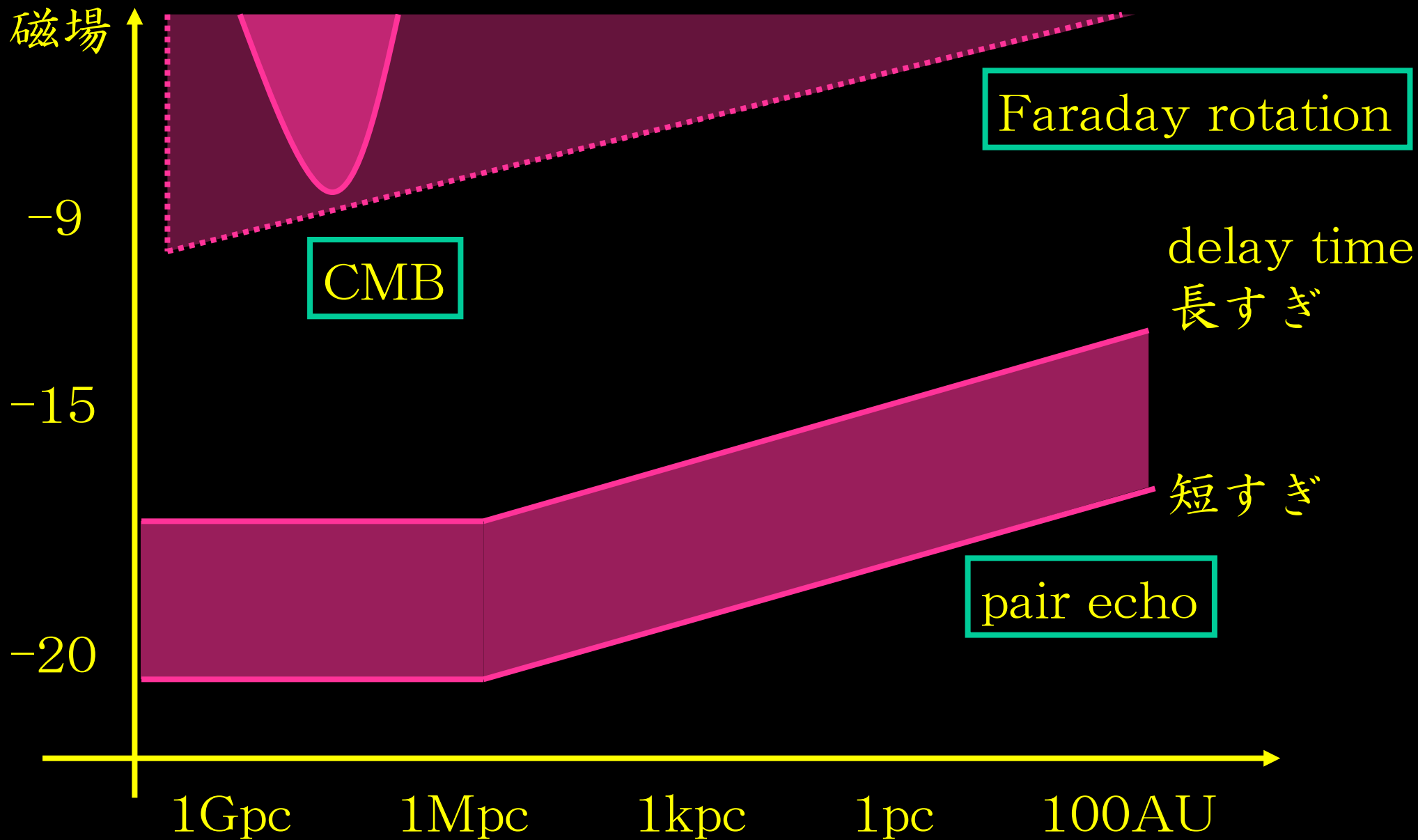
MAGICによる観測可能性



pair echoの観測可能性



pair echoで探索できる磁場



磁場観測まとめ

- ・ 高エネルギー天体からのpair echoを用いた微弱な磁場の検出
- ・ TeV γ 線
 - + EBL \rightarrow TeV電子・陽電子
 - + CMB \rightarrow GeV γ 線
- ・ 対生成とICで経路が曲がる
 - \rightarrow 最初変な方向でも地球に到達できる
 - \rightarrow 遅延時間の発生
- ・ $10^{-17} \sim 10^{-20}$ Gを検出可能？
- ・ GRBなら $z < 1$ の近いものを使う
- ・ TeVブレーザーは近くて場所もわかっているが定常放射が邪魔

まとめ

磁場の生成と観測

生成

- ・ 宇宙初期のゆらぎから生成
- ・ 光子、陽子、電子、電磁場
- ・ 2次摂動
- ・ robustな磁場の予言（宇宙論的磁場、種磁場）

観測

- ・ GRBやTeVブレーザーなどからのpair echo
- ・ $10^{-17} \sim 10^{-20}$ Gaussに感度
- ・ ボイド磁場の観測によって初期宇宙、再イオン化、銀河風などを探る