

# 相対論的ファイアボールからの 電子陽電子対消滅ライン放射

東北大学

和田知己

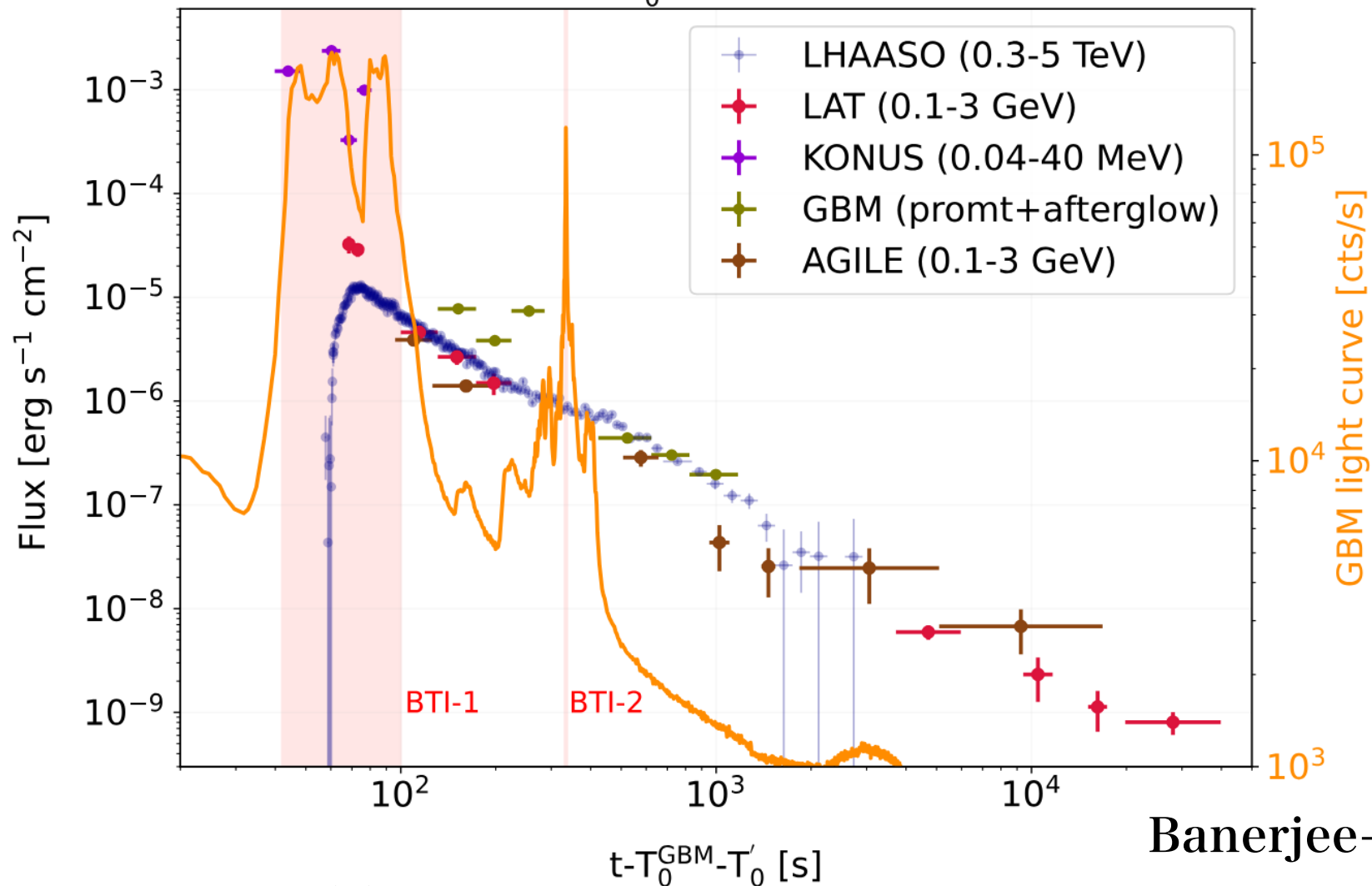


Collaboration with 木村成生

241112 高エネルギー現象で探る宇宙の多様性IV

# GRB 221009A: Motivation of this study

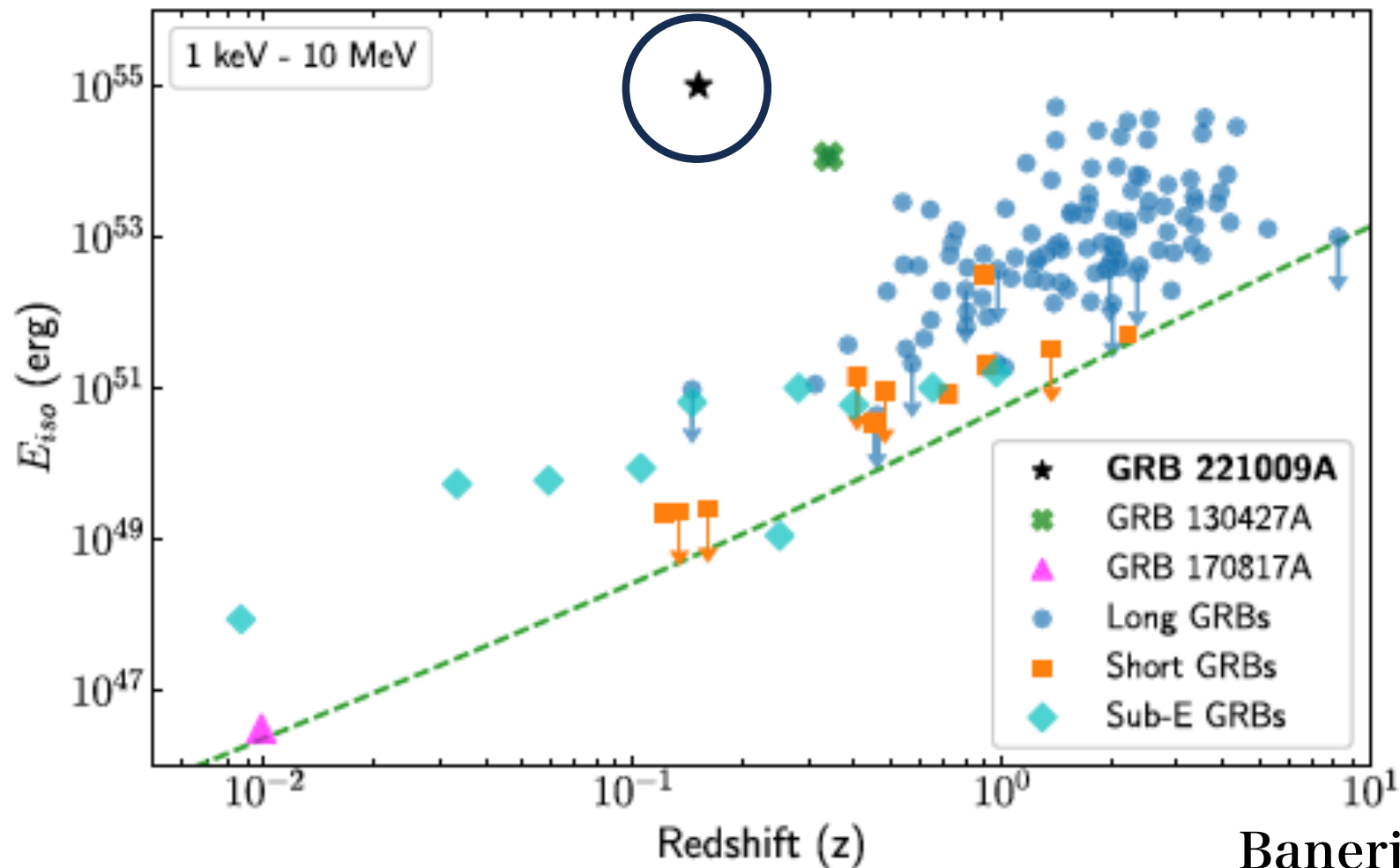
$T'_0 = 177$  s



史上最も明るいlong GRB

- $L_{\gamma,\text{iso}} \approx 10^{54}$  erg/s,  $E_{\gamma,\text{iso}} = 10^{55}$  erg
- $z = 0.151$

# GRB 221009A: Brightest Of All Time

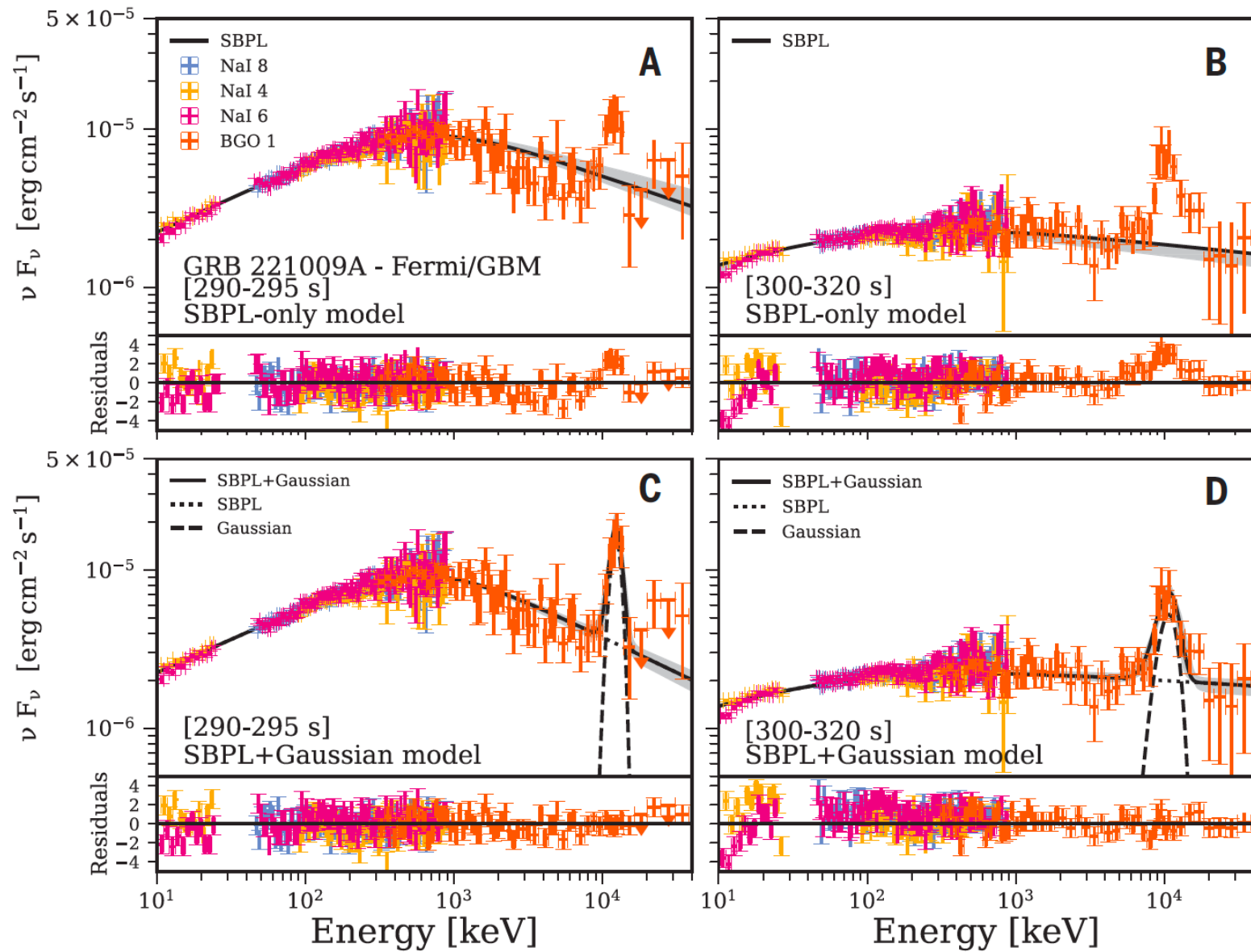


史上最も明るいlong GRB

- $L_{\gamma,iso} \simeq 10^{54}$  erg/s,  $E_{\gamma,iso} = 10^{55}$  erg
- $z = 0.151$

# MeV line emission

Ravasio + 2023 science



ガンマ線スペクトルにMeV lineが見えている。  
-  $L_{line,iso} \simeq 10^{50}$  erg/s  $\sim 10^{-5} L_{iso}$

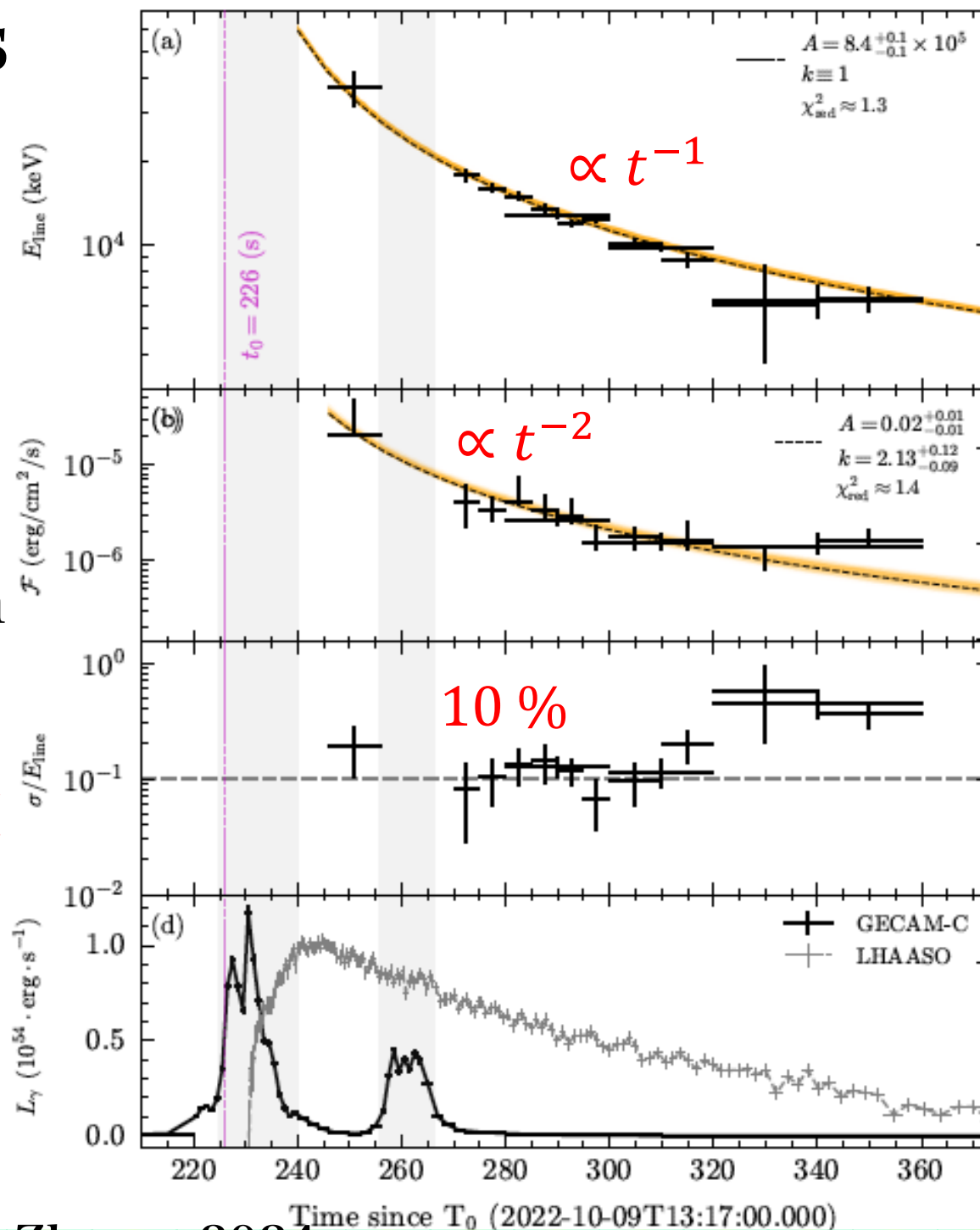
# MeV line scenarios

MeVのLineが見えていて

- 中心の時間進化
- スペクトル幅
- 幅の時間進化

## Scenarios

- High-latitude emission
- 重元素のライン
- $np \rightarrow D\gamma$ のライン
- **Fireball** における対消滅



# MeV line scenarios

MeVのLineが見えていて

- 中心の時間進化
- スペクトル幅
- 幅の時間進化

## Scenarios

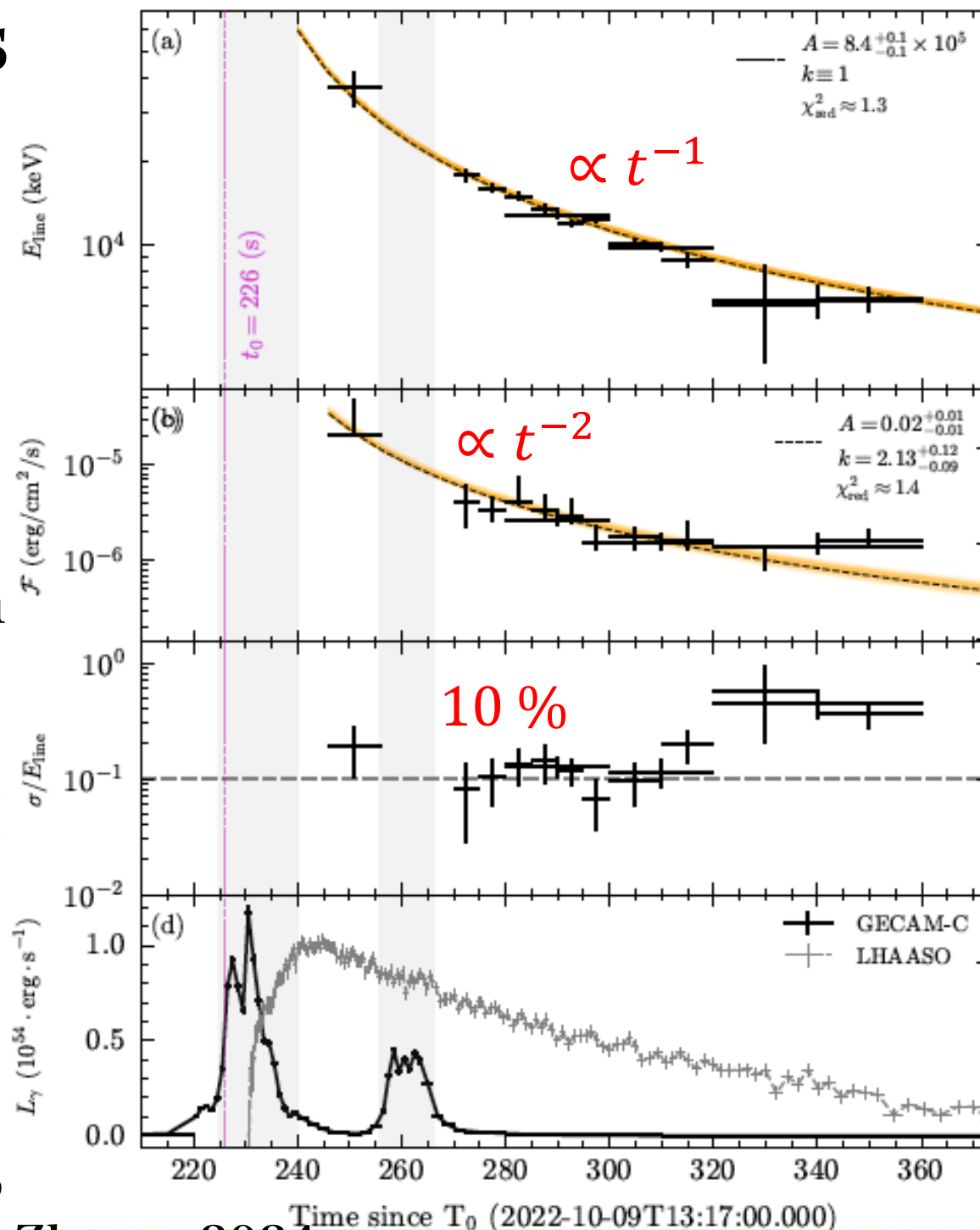
- High-latitude emission
- 重元素のライン
- $np \rightarrow D\gamma$ のライン
- **Fireball** における対消滅

## Non-dissipative Fireball

$$L_{line,iso} \sim \tau_{\gamma\gamma} m_e c^3 n_{\pm} r^2 \Gamma^2$$

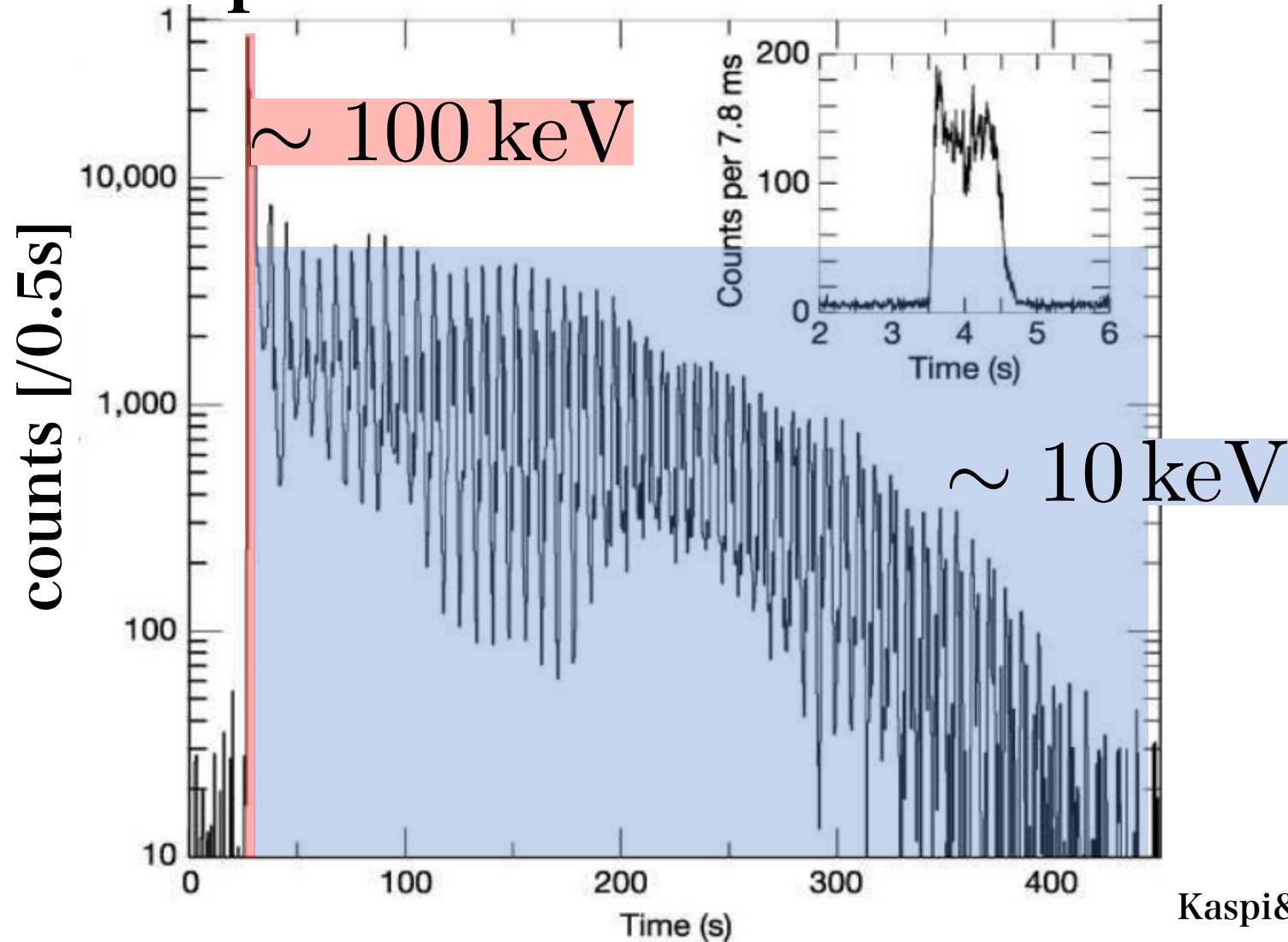
$$\sim 10^{-8} L_{iso}$$

c.f. obs:  $L_{line,iso} \sim 10^{-5} L_{iso}$





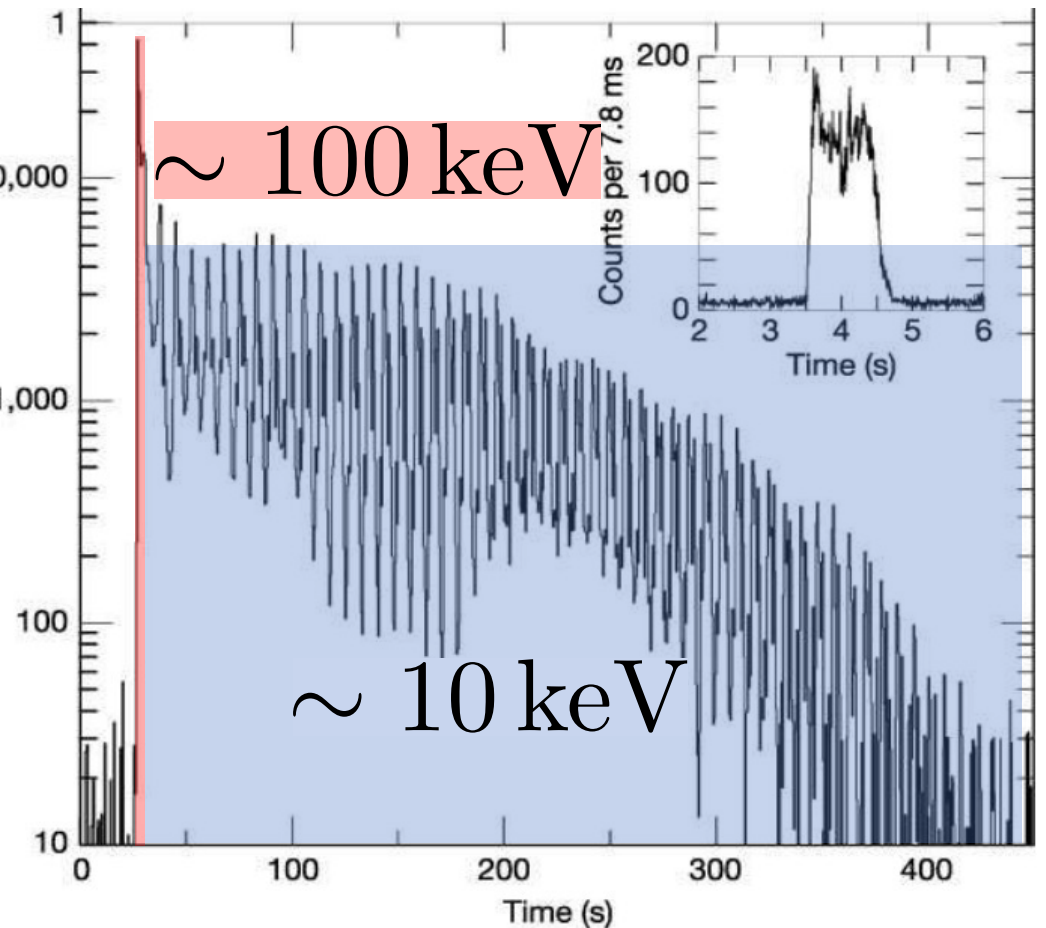
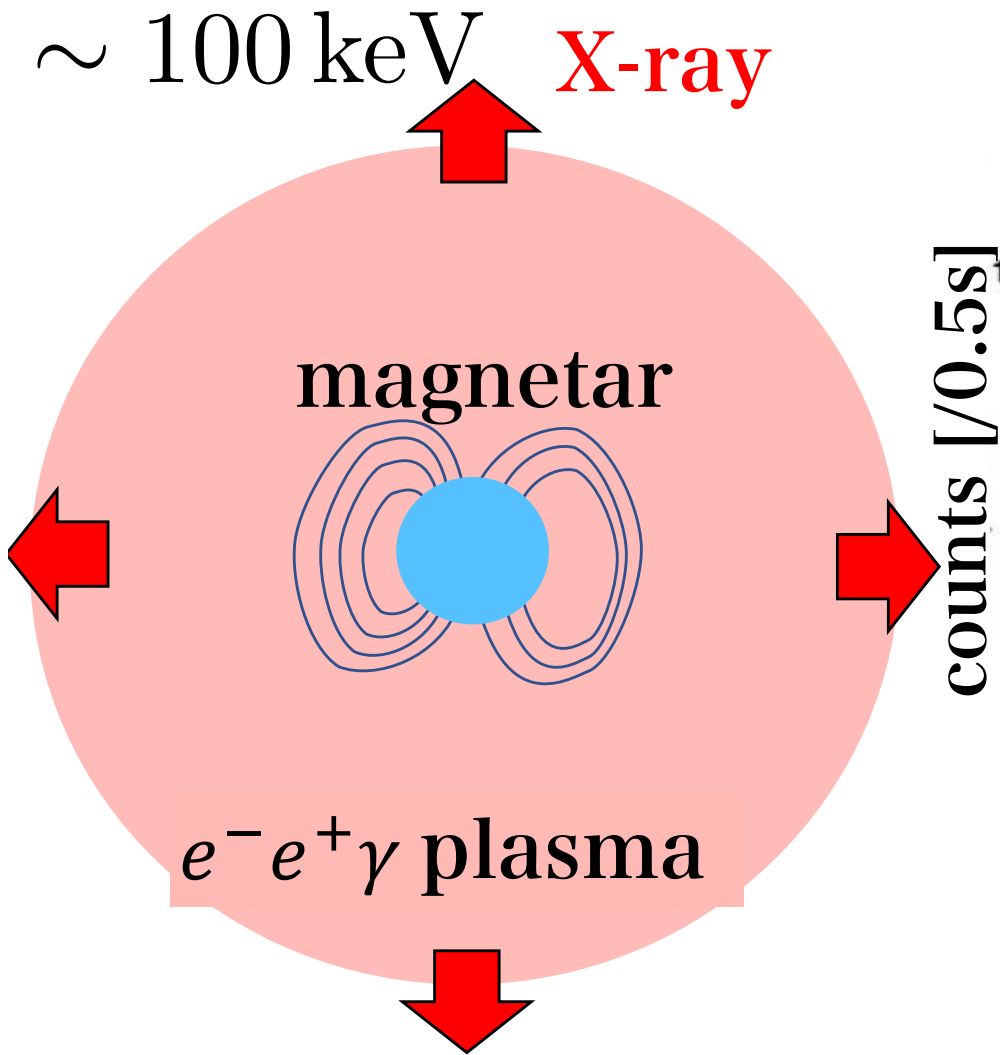
# Non-dissipative Fireballs in Transients



## Magnetar Giant Flare

- Luminous X-ray bursts:  $L_{\text{peak}} \sim 10^{44} - 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$
- Hard spike + pulsating tail

# Magnetar Giant Flare: Initial Spike

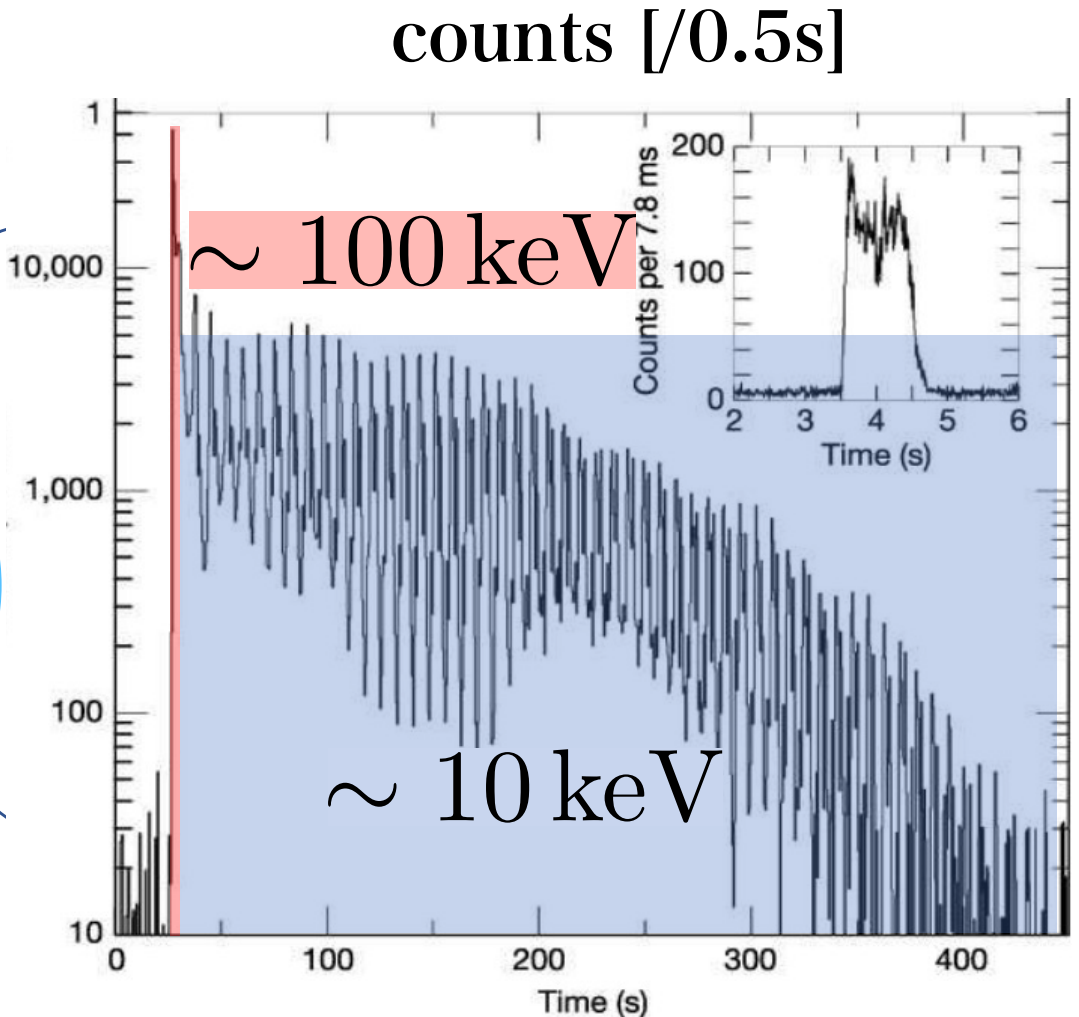
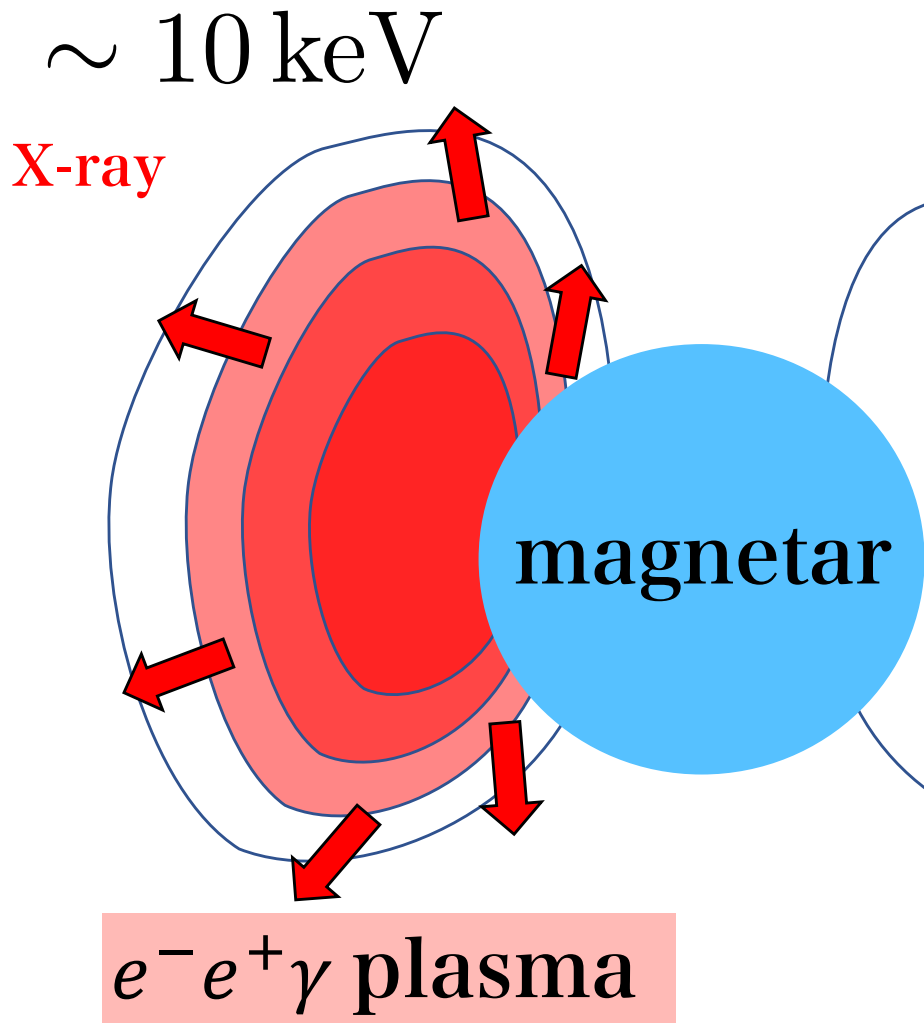


Kaspi&Beloborodov17

## Initial Spike: Expanding Fireball



# Magnetar Giant Flare: Pulsating Tail



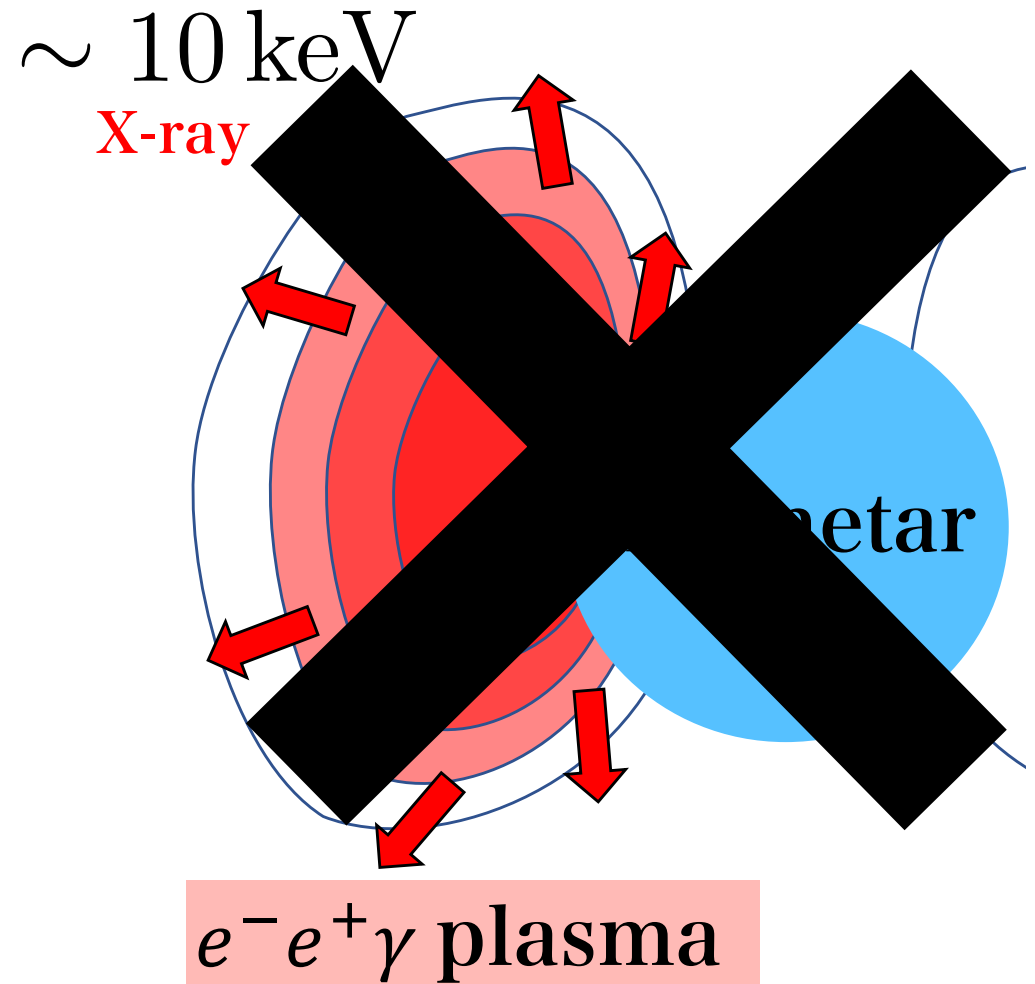
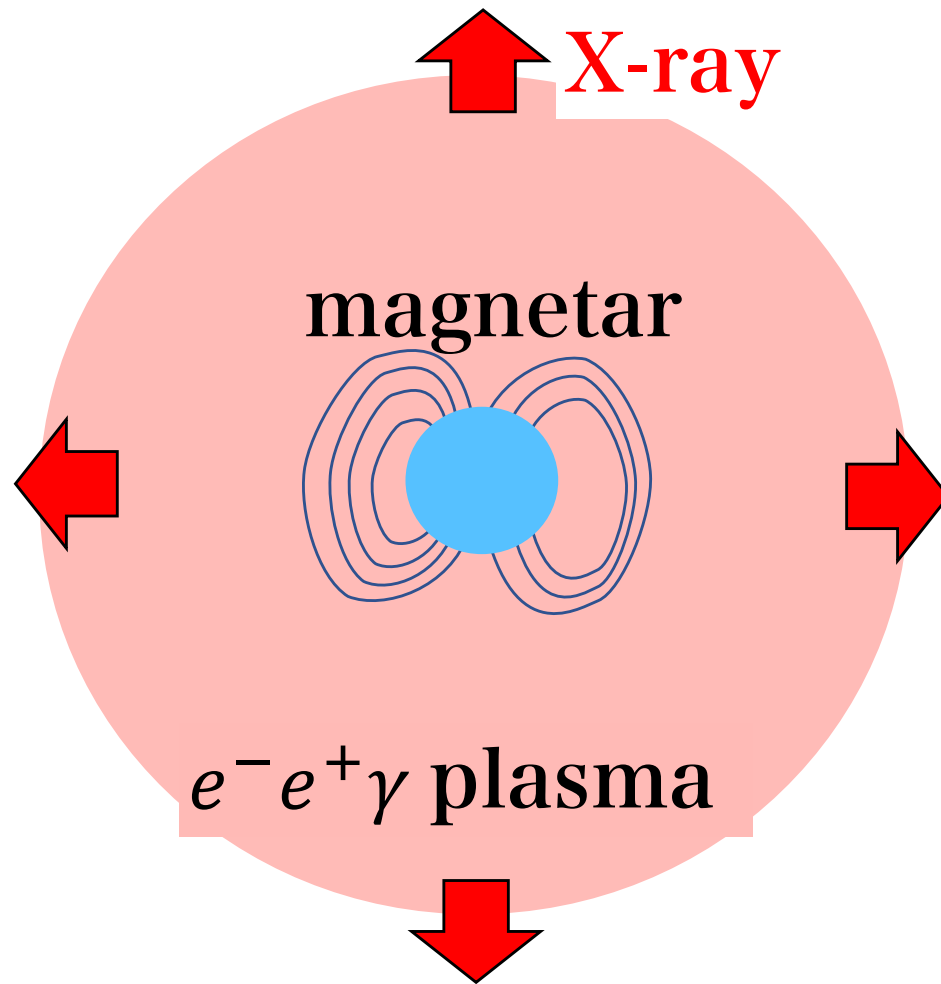
Kaspi&Beloborodov17

## Pulsating Tail: Trapped Fireball

# Line Emission from Magnetar Giant Flare

Initial spike

Pulsating tail



マグネターのフレアのinitial spikeにおける電子陽電子対消滅ラインはどの様に見えるか

# Dynamics of Expanding Fireball

## - Fireballの解析解

パラメータ:  $L_{iso}$ ,  $r_0$

## - ローレンツ因子 $\Gamma$ , 温度 $T$ , 電子陽電子数密度 $n_{\pm}$

@  $r < r_{ann}$

$$\Gamma = \bar{r},$$

$$T = T_0 \bar{r}^{-1},$$

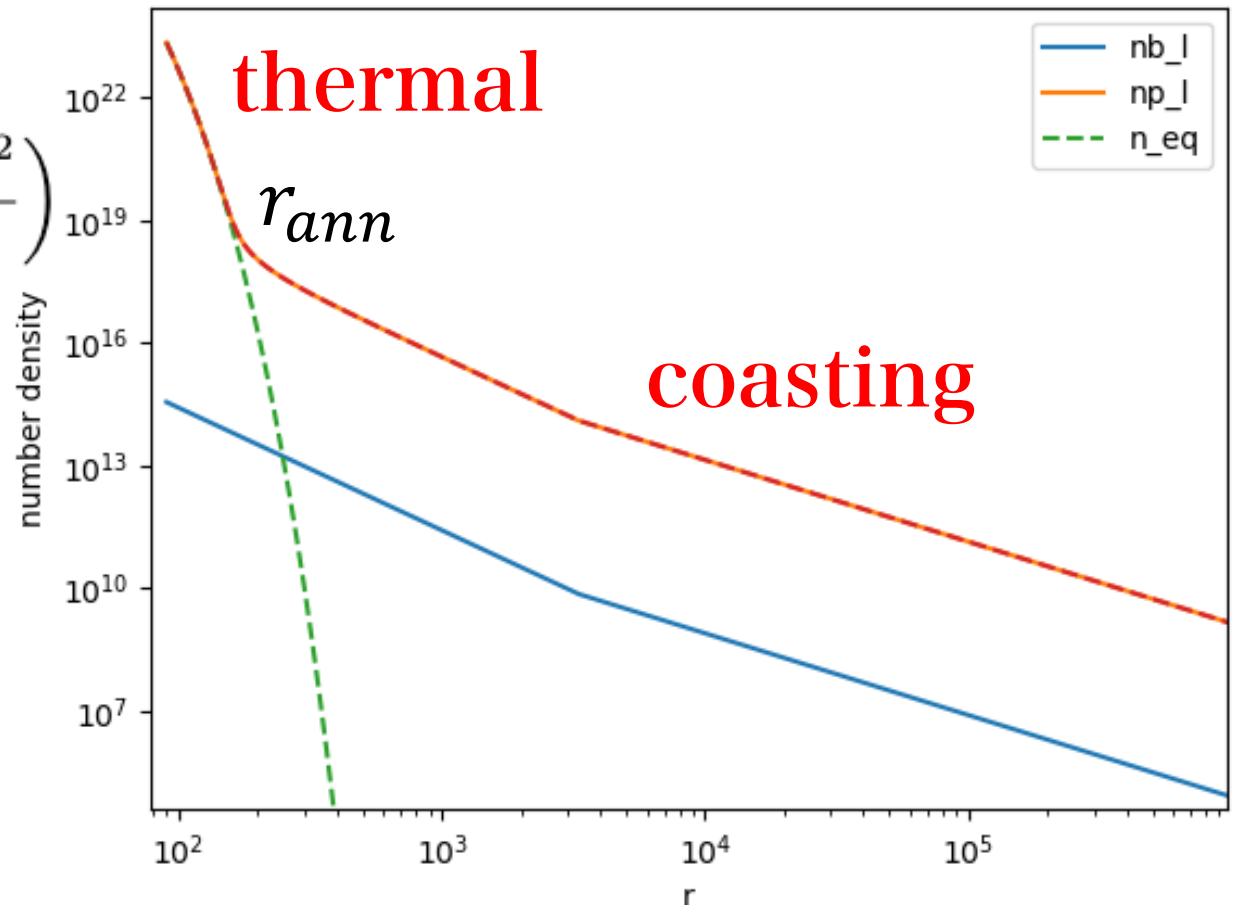
$$n_{\pm} = 4 \left( \frac{mT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mc^2}{T}\right)$$

@  $r > r_{ann}$

$$n_{\pm} = n_{\pm,ann} \frac{\Gamma_{ann} r_{ann}^2}{\Gamma r^2}$$

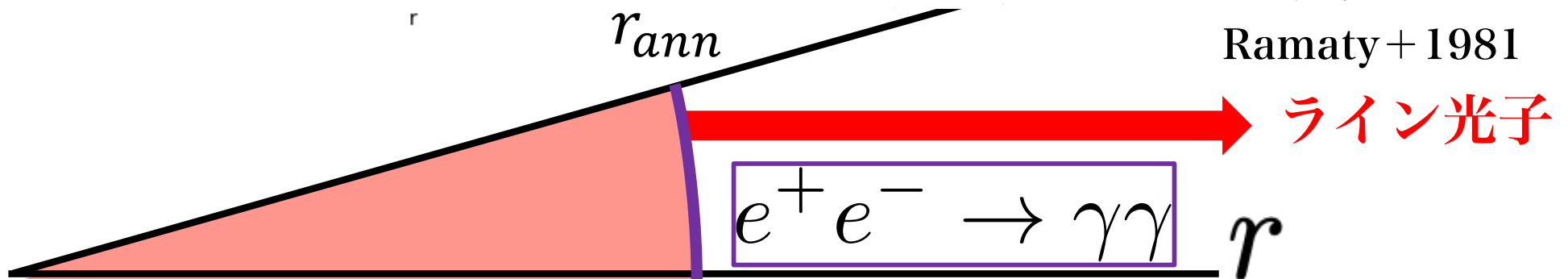
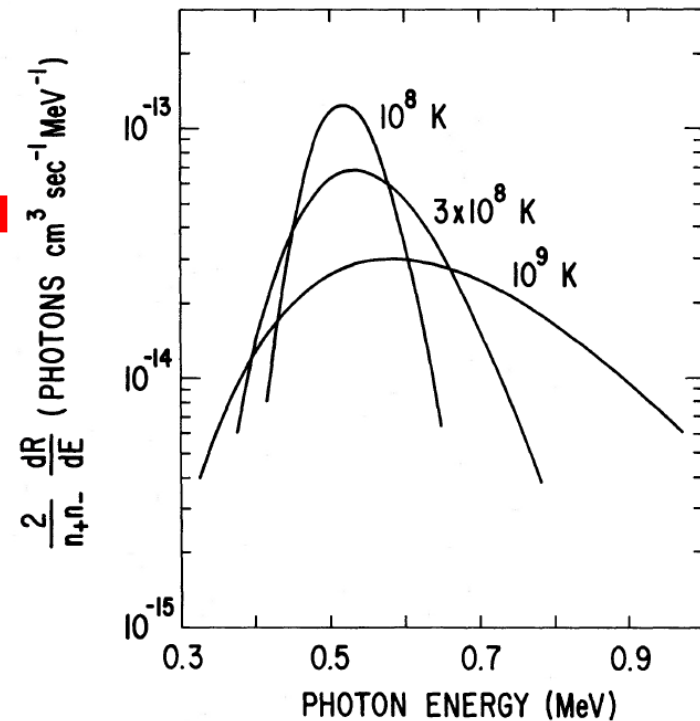
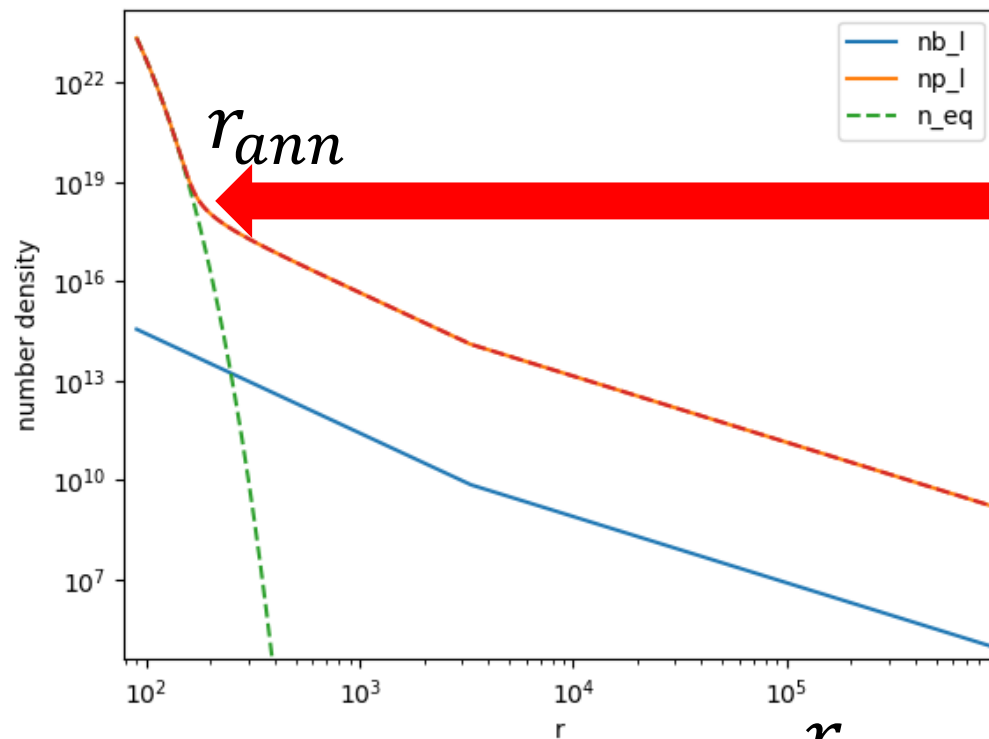
@  $r > r_{sat}$

$$\Gamma = \bar{r}_{sat} = \left( \frac{L_{iso} \sigma_T}{4\pi m c^3 r_0} \right)^{1/4}$$

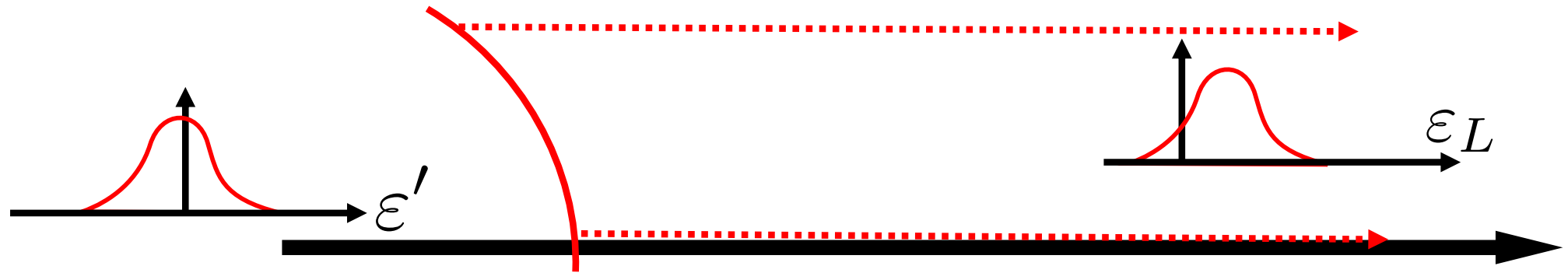


# Pair annihilation line in fireball

光学的に厚い電子・陽電子プラズマが膨張・冷却  
 -> 対消滅に伴って511keVの光子放射

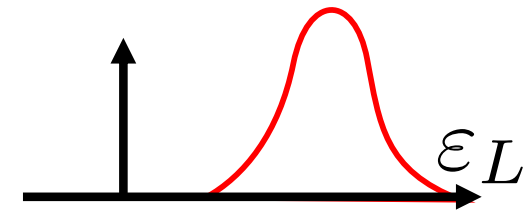


# Analytic modeling (single shell)



- ある半径で共動系でGaussian lineを仮定

$$\mathcal{F}(\varepsilon) = \frac{F_0}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(\varepsilon/\bar{\varepsilon} - 1)^2}{2\sigma^2}\right]$$



- 観測するフラックスは各シェルの足し合わせ

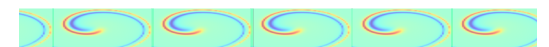
$$\frac{dF_o}{d\varepsilon_o} = 2\pi c^{-2} \left(\frac{r}{D_l}\right)^2 \int d\mu \mu \varepsilon_o^3 \mathcal{F}(\varepsilon_o \Gamma(1 - \beta\mu)) \theta(\mu)$$

$$\rightarrow \frac{dF_o}{d\varepsilon_o} = \frac{2\pi c^{-2}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \left(\frac{r}{D_l}\right)^2 \frac{\bar{\varepsilon}}{\Gamma\beta^2} \varepsilon_o^2 F_0 \int_{\Delta x} dx \left[1 - \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_o \Gamma}(x + 1)\right] \exp\left[\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right]$$

$\propto \varepsilon_o^2$

$$x = \frac{\varepsilon_o \Gamma(1 - \beta\mu)}{\bar{\varepsilon}} - 1$$

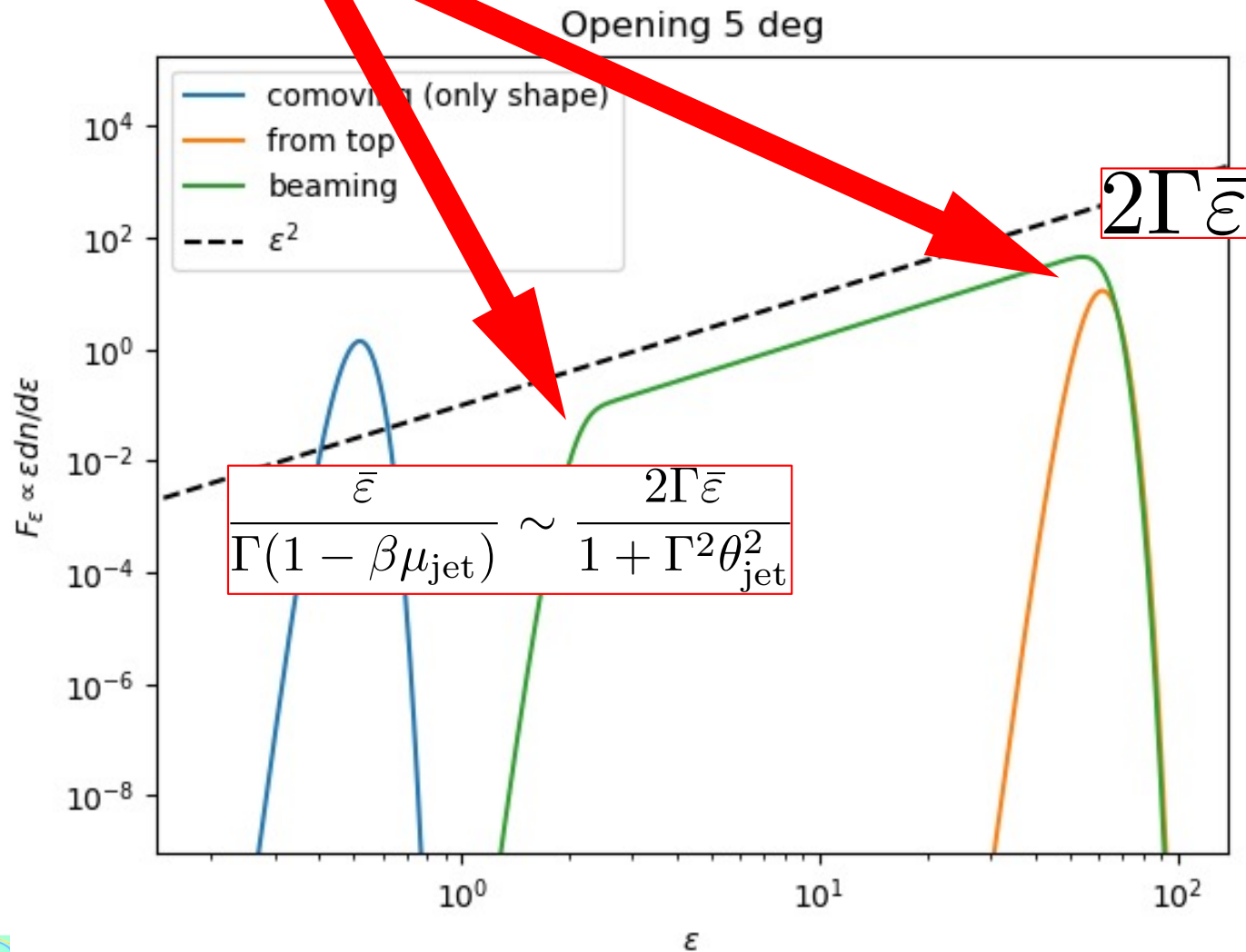
相対論的シェルからの放射を同時に観測すると、  
「ビーミング効果だけで」  $F_\nu \propto v^2$  が実現される。



# Analytic modeling

$$\int_{\Delta x} dx \left[ 1 - \frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_o \Gamma} (x + 1) \right] \exp \left[ \frac{-x^2}{2\sigma^2} \right]$$

$$x = \frac{\epsilon_o \Gamma (1 - \beta \mu)}{\bar{\epsilon}} - 1$$

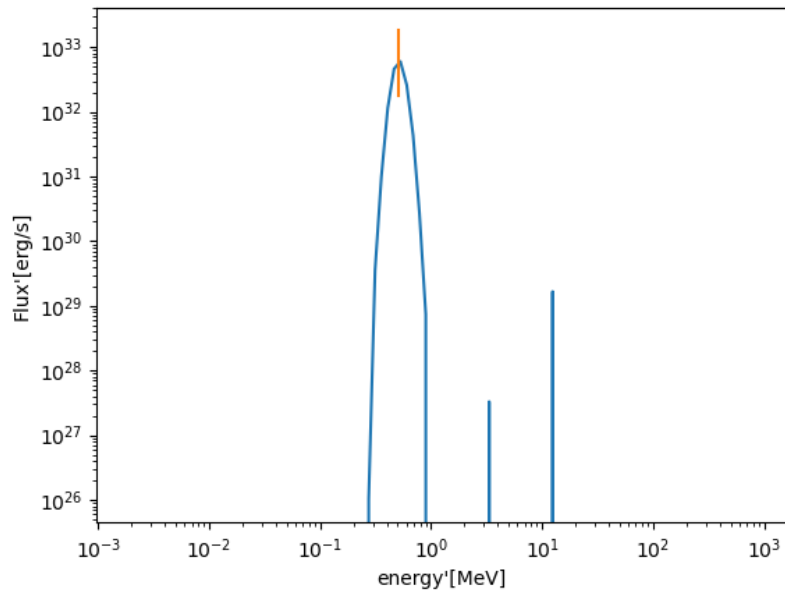


$$\frac{dF_o}{d\epsilon_o} \propto \epsilon_o^2$$

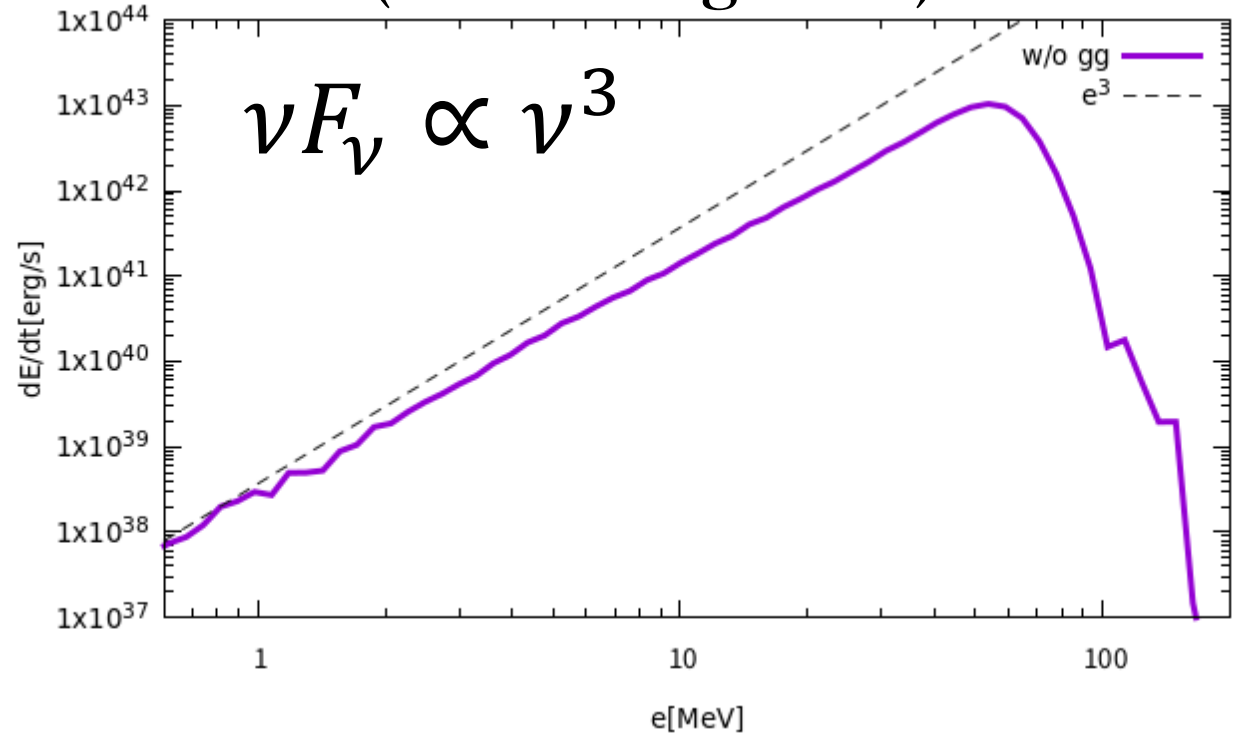


# Spectrum (w/o pair annihilation)

注入スペクトル  
in comoving frame



Observed spectrum  
(time-integrated)

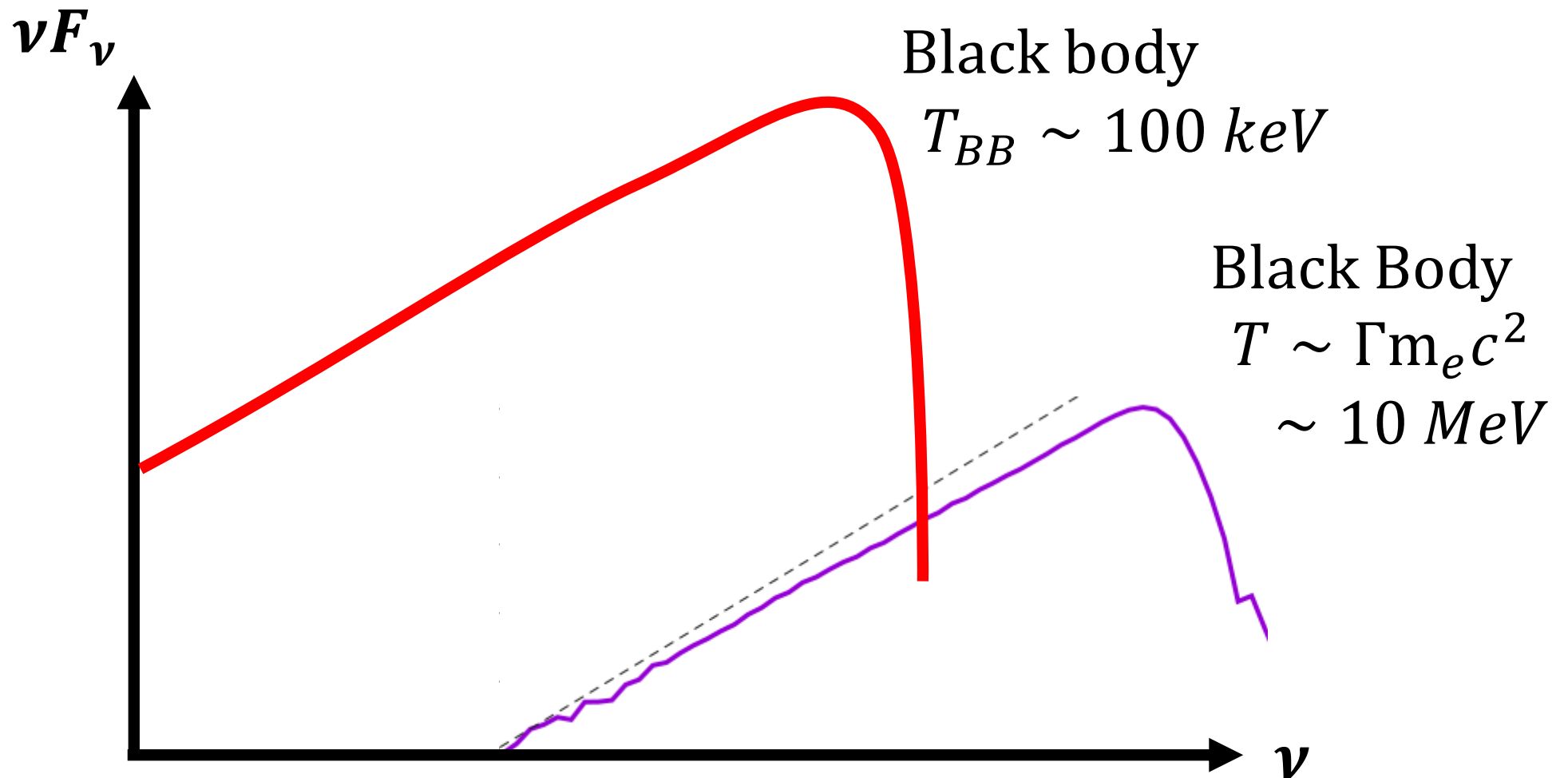


散乱のみを取り入れた場合のスペクトル

→ 注入はGaussianだが、観測されるのはべき分布

※fireballが小さいことによる

# Spectrum Shape: Two-temperature BB?



Fireballの黒体輻射  
+ Lineの黒体（と同じ形の）スペクトルが実現？

# Pair annihilation

対生成の光学的厚み

$$\frac{d\tau_{\gamma\gamma}}{dl} = \Gamma(1 - \beta\mu_L) \int d^3p' f_{\gamma}(p') \sigma_{\gamma\gamma}(1 - \mu'_{\gamma\gamma})$$

光子分布関数



→ iterationで  
収束先を求める

輻射輸送計算

光子分布関数

光学的厚み

対生成率の計算

Iteration

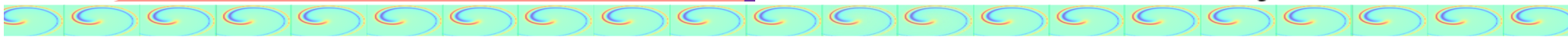
バリオン少ない場合

$\tau_{\parallel} \sim 1$

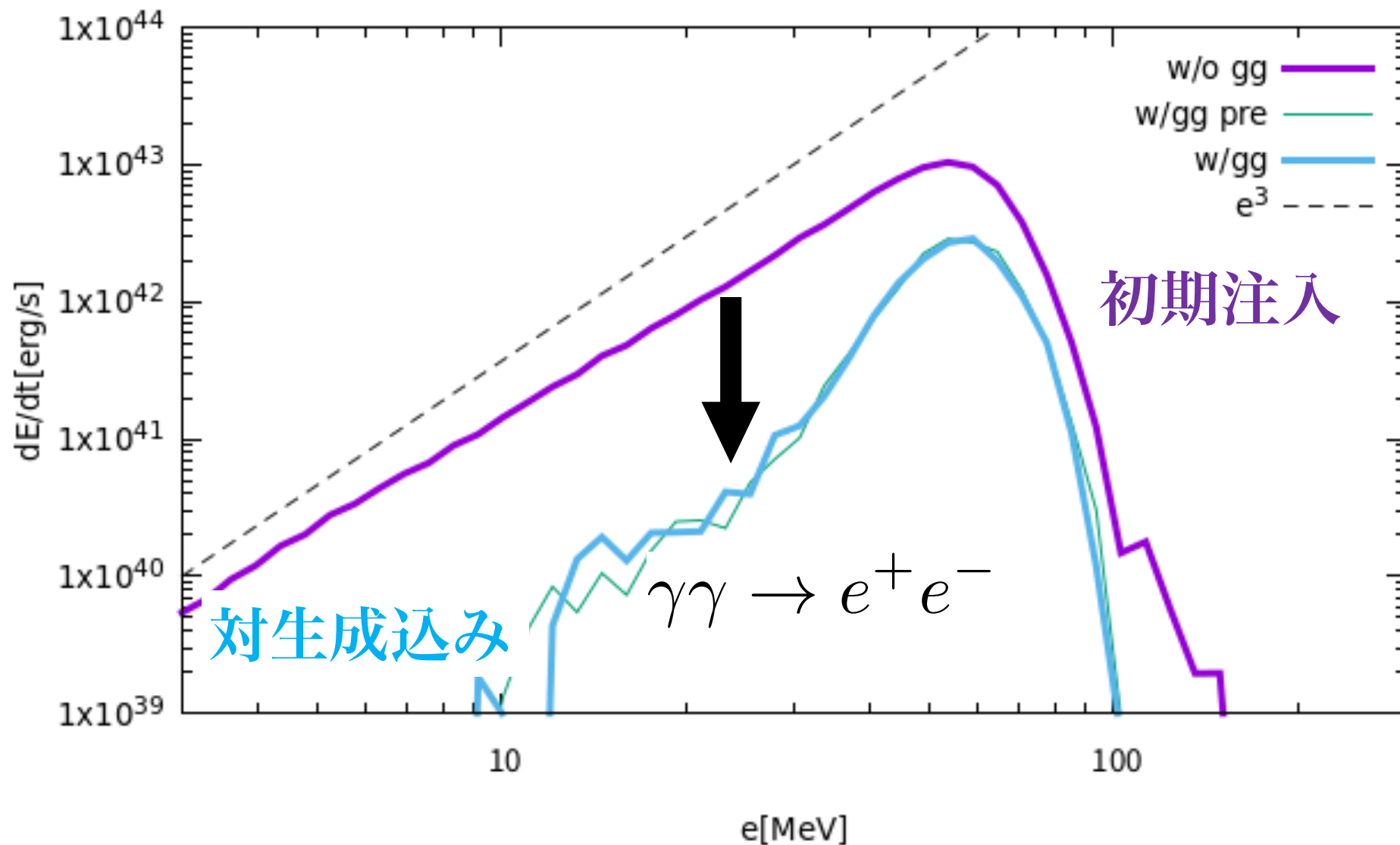
$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$

$\gamma$

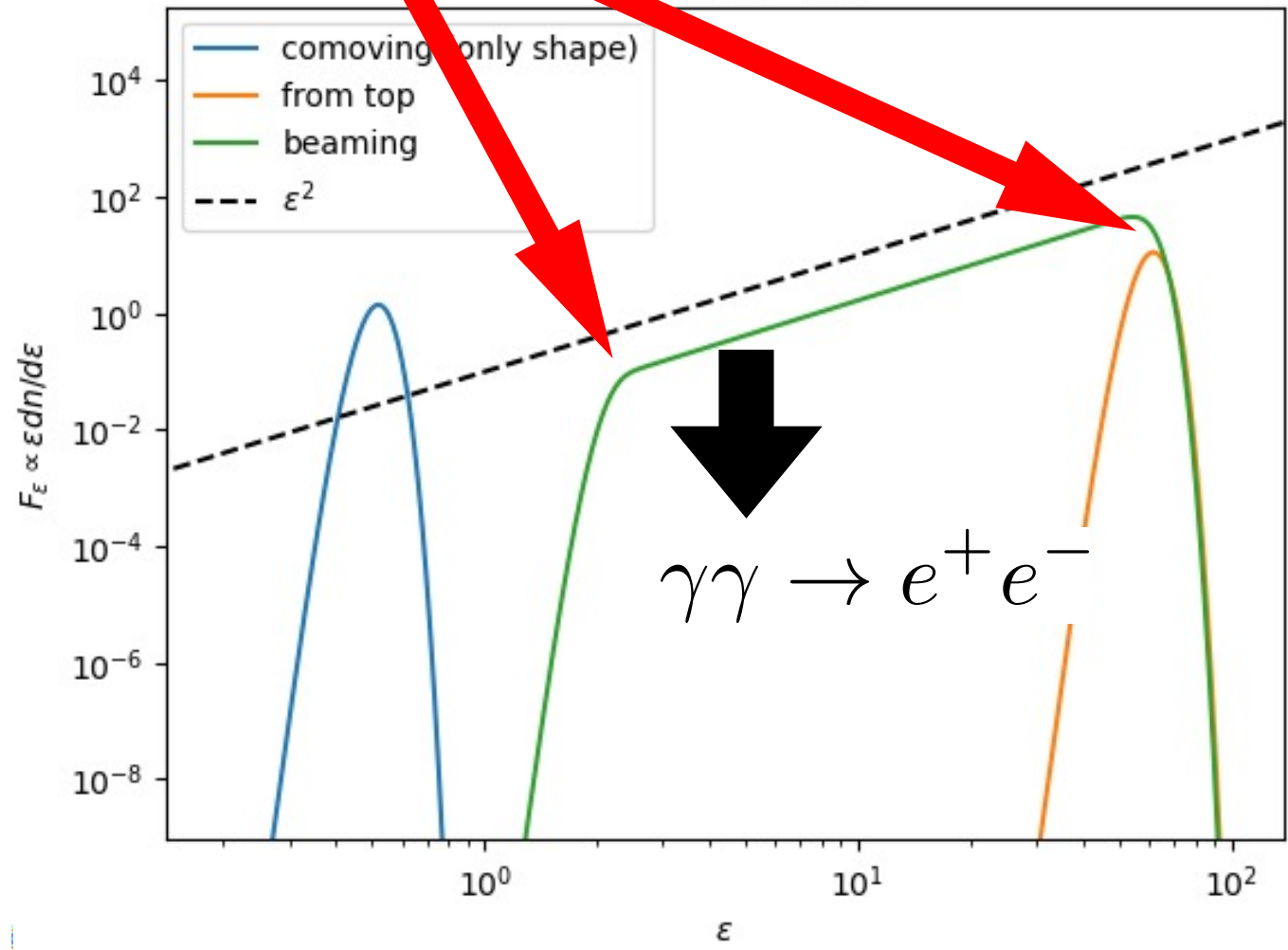
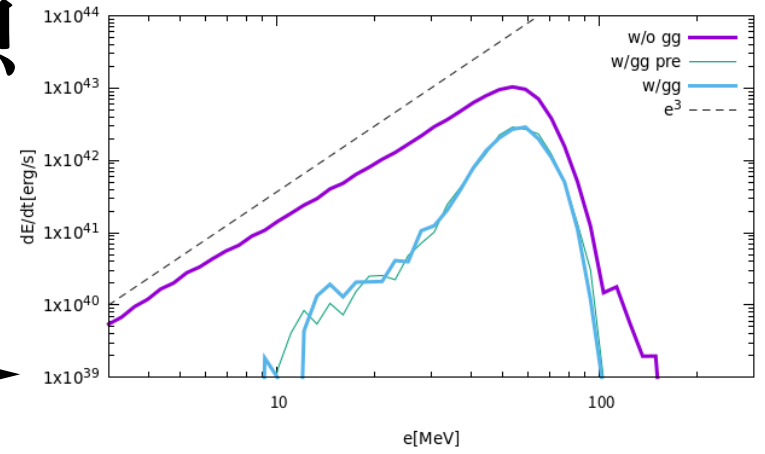
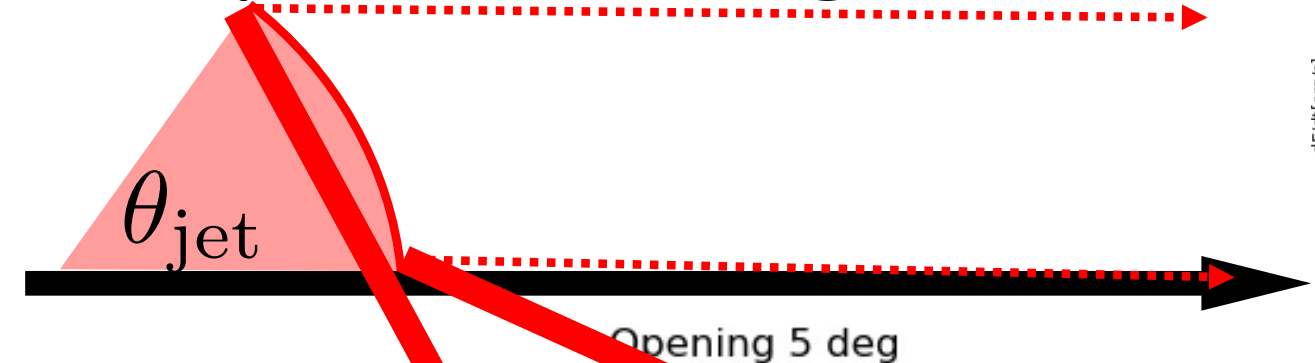


# Spectrum w/pair creation

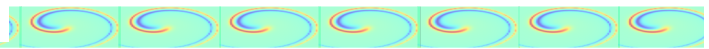


Gaussianのライン幅 ~ 0.2 c.f., obs ~0.1

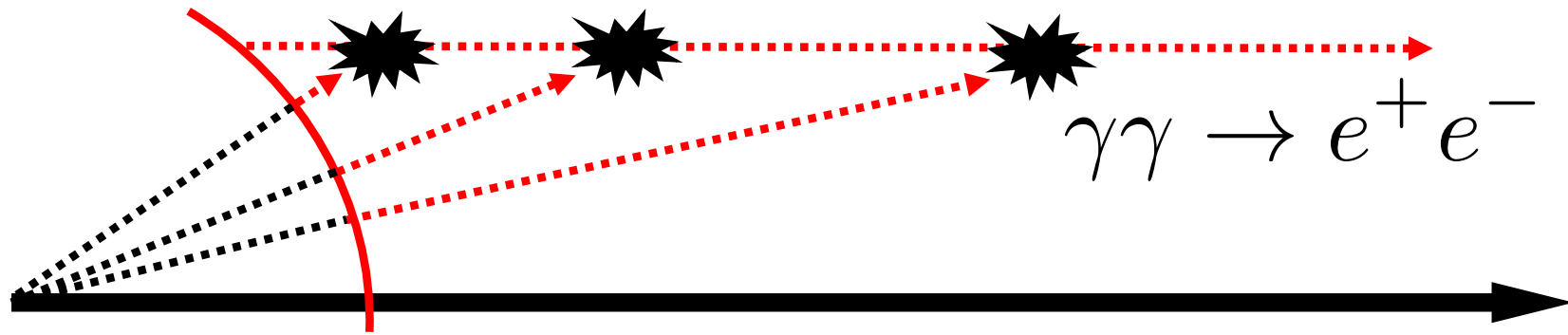
# Analytic modelingからの予想



対生成で減っているのは、High-latitudeからの光子



# Analytic model -- pair annihilation --



- 主に動径方向に伝搬する光子との対消滅を考える。  
注入はシェルでデルタ関数的に入れる。

$$\frac{d\tau_{\gamma\gamma}}{dl} = \Gamma(1 - \beta\mu_L) \int d^3p' f_\gamma(p') \sigma_{\gamma\gamma}(1 - \mu'_{\gamma\gamma})$$

$$\simeq \Gamma(1 - \beta\mu) \left(\frac{\Gamma_{\text{em}}}{\Gamma}\right)^3 \frac{n_{\gamma,\text{em}}\sigma_T}{20} \Theta(\mu_{\text{crit}} - \mu)$$

- 観測者が観測するフラックス

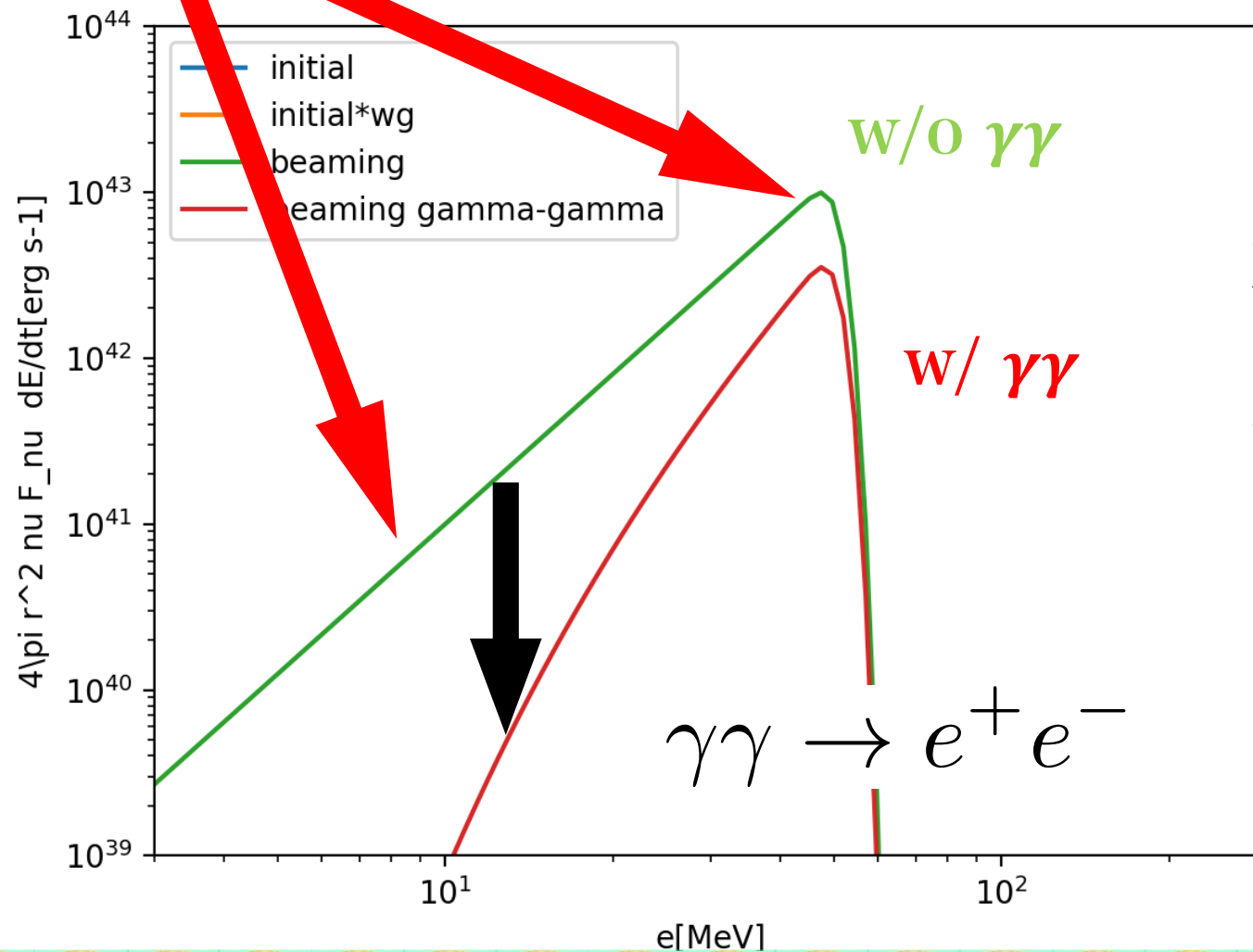
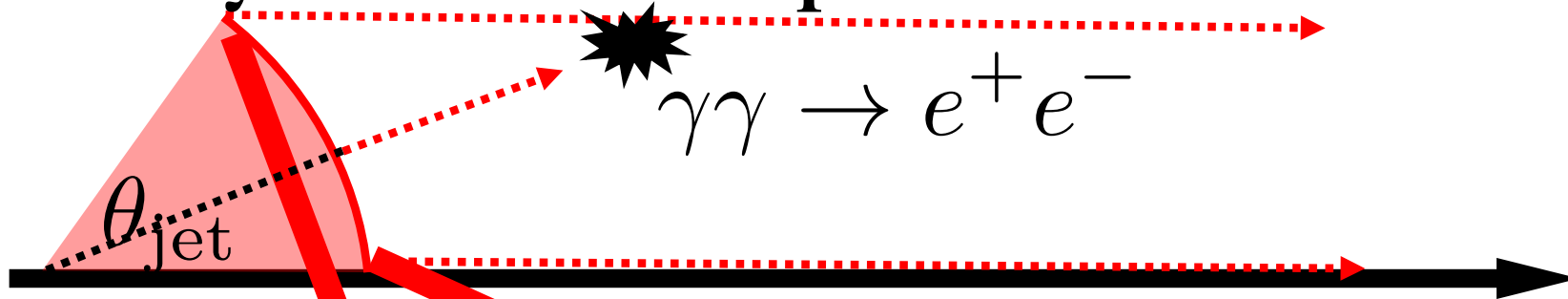
$$\frac{dF_o}{d\varepsilon_o} \propto \int d\mu_o \varepsilon_o^3 f(\varepsilon_o) \mu_o$$

$$\xrightarrow{\text{black arrow}} \int d\mu_o \exp[-\tau_{\gamma\gamma}(\mu_o)] \varepsilon_o^3 f(\varepsilon_o) \mu_o$$

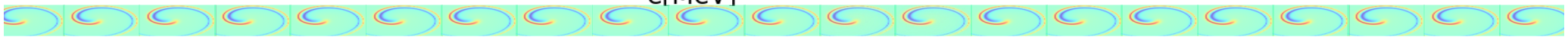
$$\varepsilon\varepsilon_t(1 - \mu_{\text{crit}}) = 2(m_e c^2)^2$$



# Analytic model -- pair annihilation --



対消滅により  
高緯度放射が  
弱くなることで、  
ピークが細くなる



# Result: Magnetar Giant Flare

$$L_{iso} = 10^{47} \text{ erg/s}$$

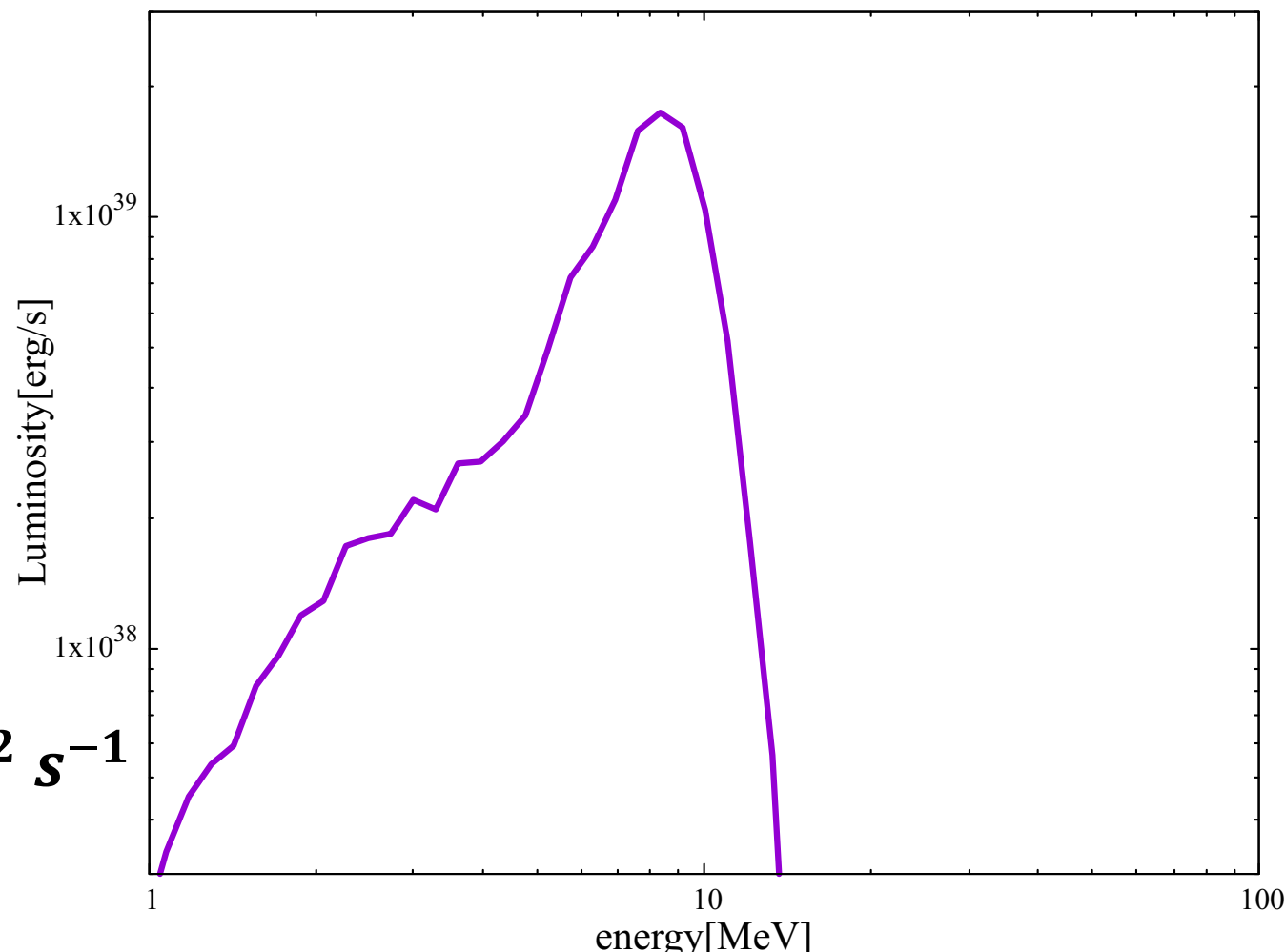
$$r_0 = 10^6 \text{ cm}$$

$$\Delta r = r_0$$

$$\rightarrow L_{line} \sim 10^{39} \text{ erg/s}$$

$$\rightarrow @ 10 \text{ kpc}$$

$$F \sim 10^{-7} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



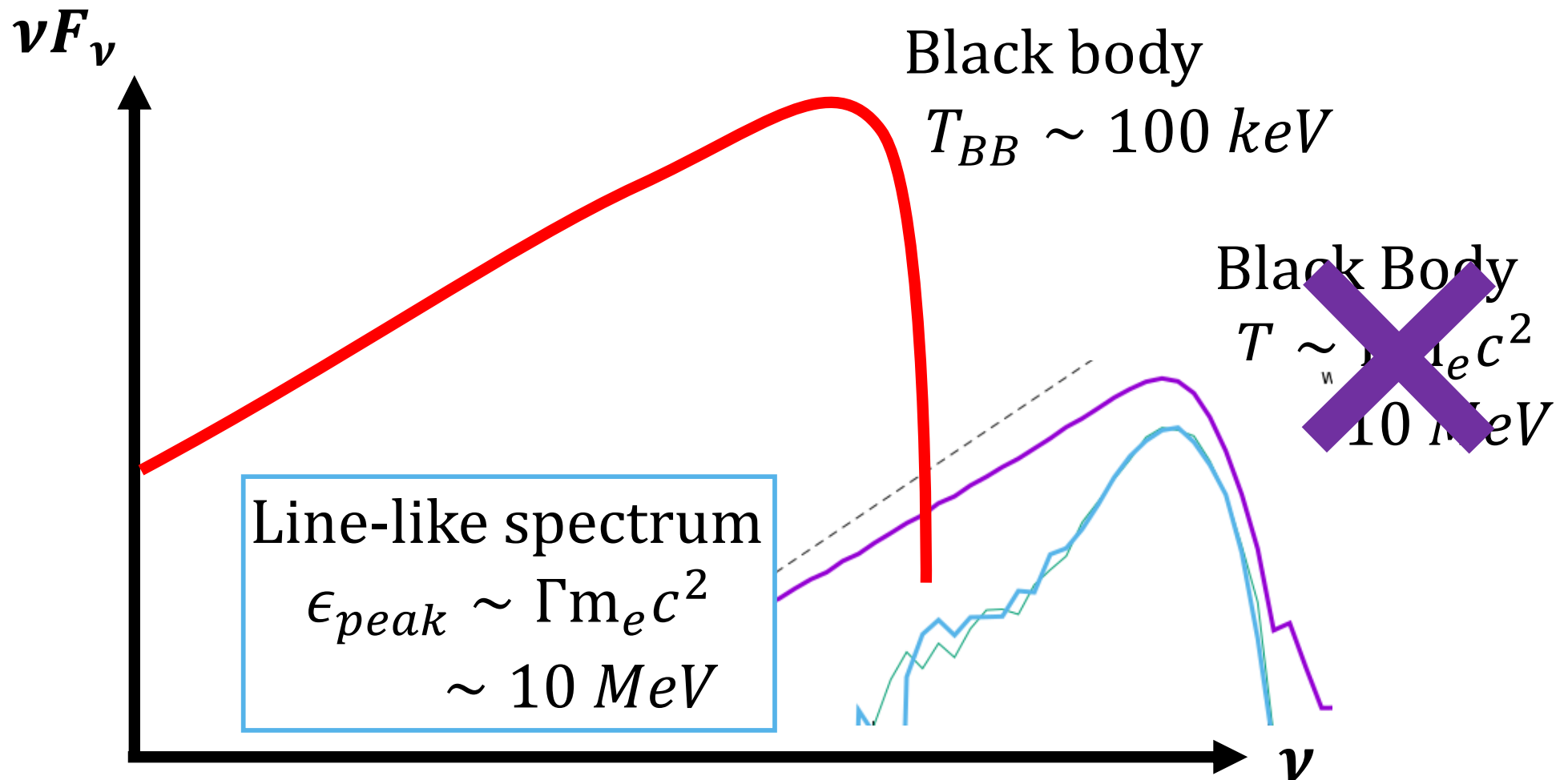
系内マグネターのジャイアントフレア

-> 将来のMeV望遠鏡で  
観測可能かもしれない。

$$E_{line} \sim 10 \text{ MeV}$$

$$\text{cf. } T_{BB} \sim 200 \text{ keV}$$

# Spectrum Shape: NOT Two-temperature BB



電子陽電子対生成によってライン状の放射が作られる

# GRB 221009A: Model 1

即時放射のガンマ線  
より、fireballは暗い。

$$L_{iso} = 10^{54} \text{ erg/s}$$

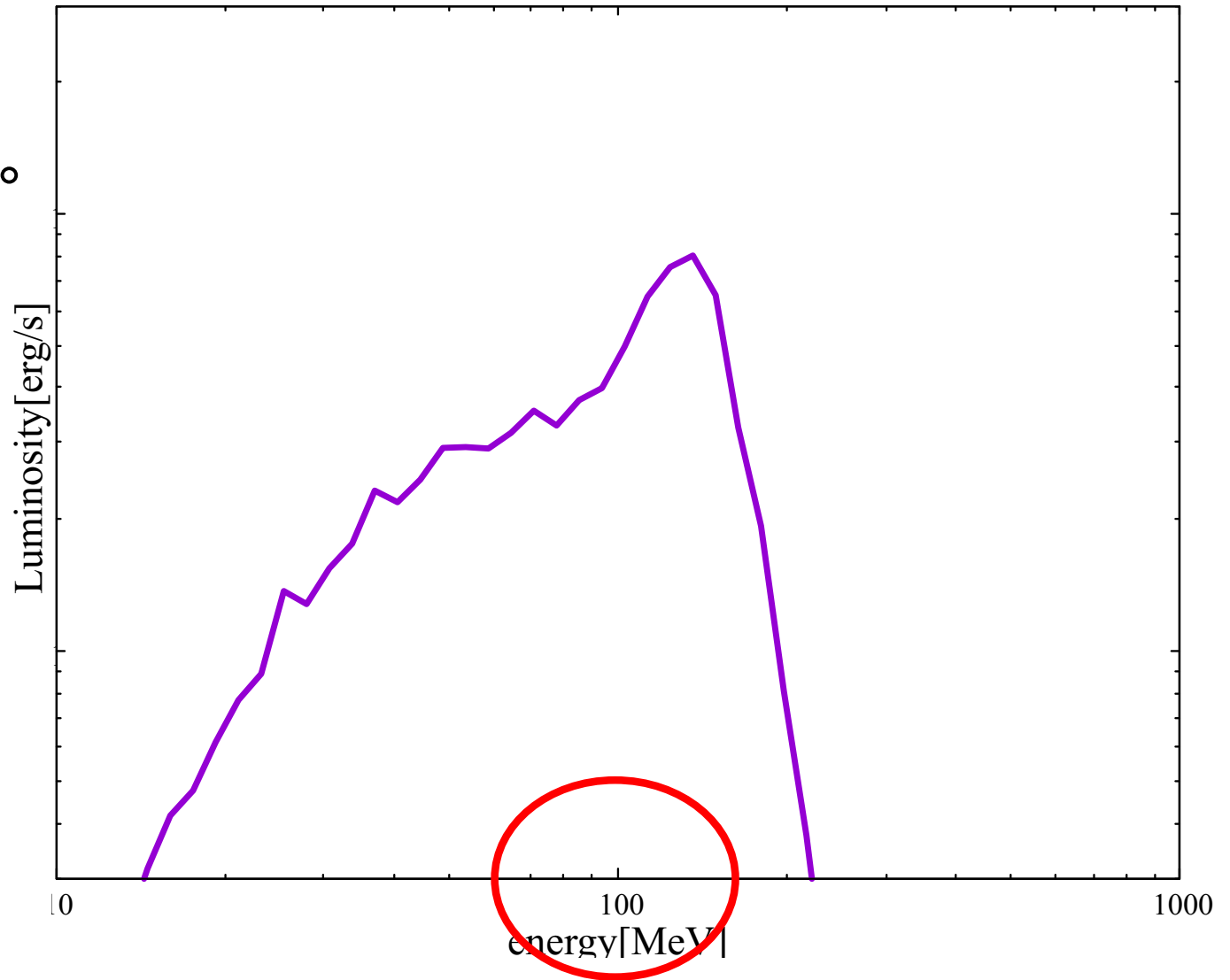
$$r_0 = 10^7 \text{ cm}$$

$$\Delta r = r_0$$



ラインの中心  
エネルギーが高い

$r \sim 10^2 r_0$ 付近で  
対生成が起こるため。



$$E_{line} \sim 100 \text{ MeV}$$

$$\text{cf. observation } E_{line} \sim 20 \text{ MeV}$$

# GRB 221009A: Model 2

即時放射のガンマ線  
より暗い。  
+ラインの位置を観  
測に合わせる

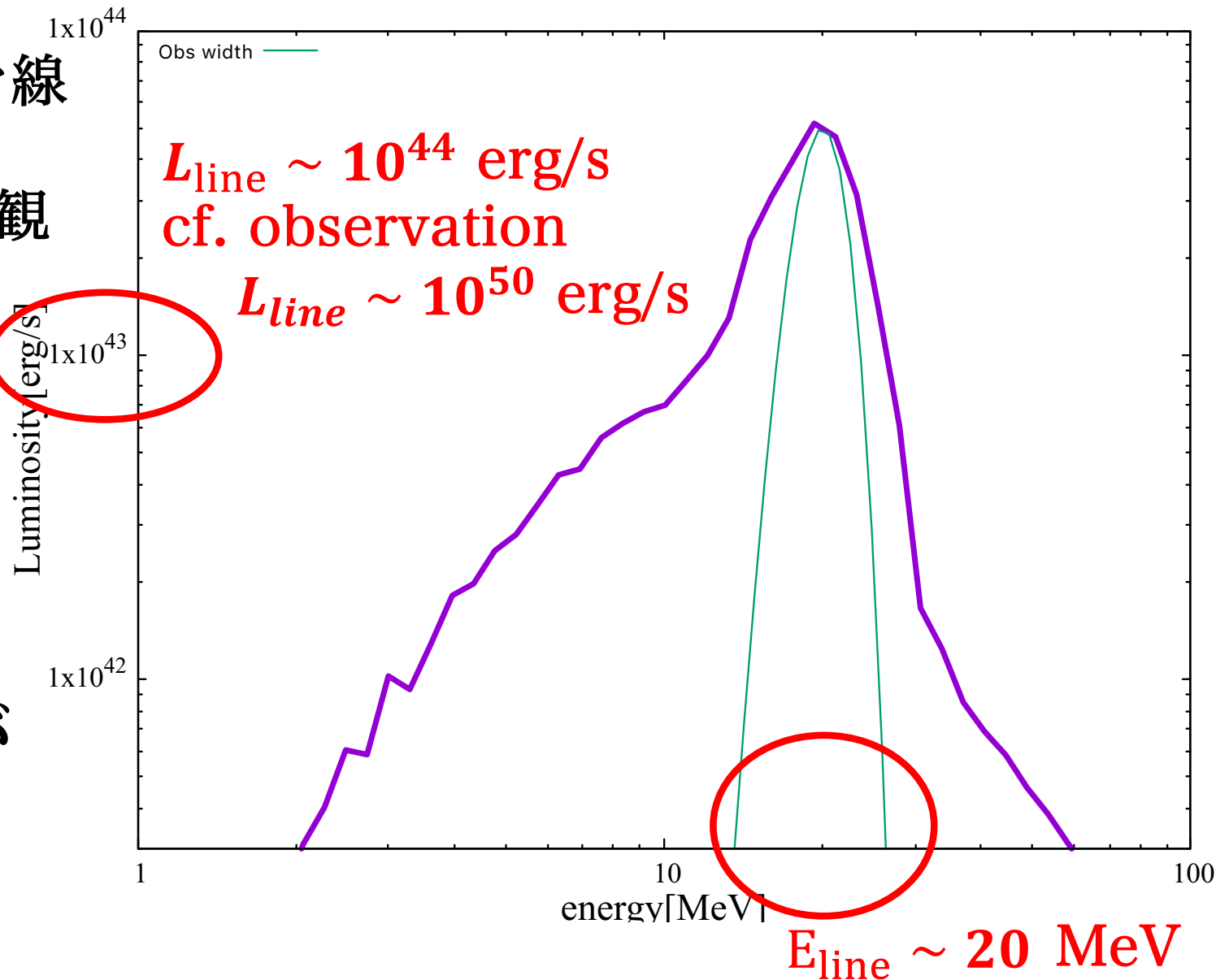
$$L_{iso} = 10^{54} \text{ erg/s}$$

$$r_0 = 10^9 \text{ cm}$$

$$\Delta r = r_0$$



ラインの光度が  
足りない。  
(Model 1でも  
足りてない。)



GRB 221009Aの観測をfireballで説明するのは難しそう



# Summary

- ファイアボールモデルを仮定して、対生成、対消滅、コンプトン散乱を考慮して輻射輸送の計算を行った。
- 相対論的ビーミングによりスペクトルは  $F_\nu \propto \nu^2$  。対生成があると、より細いスペクトルが実現する。
- GRB 221009Aの光度はnon-dissipative fireballだと光度が足りないが、系内マグネターのジャイアントフレアだと観測可能かもしれない。

