

## 数値シミュレーションで探る宇宙背景ガンマ線放射

早津 夏己 (東京大学宇宙理論研究室)

### Abstract

extragalactic gamma-ray background (EGB) は Fermi 衛星観測の解析により確認されている (Abdo et al. 2010)。しかし最近まで、考えられるガンマ線源の寄与を観測的・理論的に見積もっても、Fermi 衛星の結果を再現することが出来なかった (Ackermann et al. 2012)。例えば、ガンマ線源のうち星形成活動が盛んな銀河の寄与が大きいとされるが、Ackermann et al. (2012) による赤外線観測の結果を用いた見積りは Fermi 衛星の結果より一桁程度小さい。

ところが、Tamborra et al. (2014) による最新の赤外線観測の結果 (Gruppioni et al. 2013) を用いた見積りは Fermi 衛星の結果を再現した。合うようになった理由には、Ackermann et al. (2012) では考慮できなかった遠方宇宙 ( $2.5 < z < 5.0$ ) の銀河の寄与が入ることや、新たに複数の銀河種族の寄与を考慮したことなどが挙げられる。

本研究では、まず Ackermann et al. (2012) の見積り法を参考に、Shimizu et al. (2012) による大規模数値シミュレーションの結果から EGB を計算し、Fermi 衛星の結果と比較し考察する。シミュレーションから得た遠赤外線光度分布は、未だ観測されない暗い銀河の寄与まで計算されている。それらの EGB への寄与によって、本研究の計算結果は  $E > 10$  GeV の EGB の観測結果を再現した。そのうち、 $0.6 < z < 1.0$  の銀河の寄与は 60 ~ 70 % 程度であった。

## 1 ダスト光度の計算

本研究では Shimizu et al. (2012) による GADGET3 を用いた宇宙論的銀河形成シミュレーションの結果から、銀河のガンマ線スペクトルを見積もる。計算領域は  $100 \text{ Mpc}/h$ 、粒子数は  $N = 2 \times 640^3$  で、ダークマター粒子の質量は  $2.41 \times 10^8 h^{-1} M_{\odot}$  である。なお宇宙論モデルは  $\Lambda$ -CDM model、初期質量関数は Salpeter IMF を採用し、シミュレーションの計算結果は  $z < 0.6$  のデータを用いる。

まず星生成モデルの概説する (Okamoto et al. 2010)。各ガス粒子はその金属量に依存する冷却率をもち、一定密度まで収縮したガス粒子の一部が星になると仮定する。星生成率 ( $SFR$ ) は timestep 毎に生まれた星の質量から求められる。その際、超新星爆発によるガス流出の効果や熱不安定 (一定密度に達すると暖かいガスと冷たいガスに分かれ、冷たいガスのみが星になる) を考慮する。次に、星粒子のスペクトルエネルギー分布を計算コード PEGASE2 を用いて星の金属量・年齢・星質量から得る。これを各銀河ごとに足し合わせれば、ダストや星間ガス

による減光を考慮しない (intrinsic な) 銀河のスペクトルエネルギー分布が得られる。さらに、銀河の減光前の UV 光度のダスト吸収による減光分を各赤方偏移で観測された UV 光度関数から見積もり、この減光分をダストによる赤外線放射として計算しする。つまり、

$$L_{\text{dust}} = \int (L_{\text{int}}(\lambda) - L_{\text{real}}(\lambda)) d\lambda. \quad (1)$$

とする。これにより得られた  $SFR$  と  $L_{\text{dust}}$  の相関は図 1, 図 2 のようになる。 $SFR < 1$  の銀河を見ると、68 % の範囲内も 1.5 桁程度の広がりをもち、極端な場合は Kennicutt law と 3 桁も暗い、あるいは 1.5 桁明るい天体が存在する。

つぎに、dust luminosity の光度関数 (dust LF) を Gruppioni et al. (2013) の観測結果と比較する。ダスト光度は full simulation data からの場合と、 $SFR$  に Kennicutt et al. (1998) の経験則を代入して dust luminosity を変換した場合を用い、観測データは Gruppioni et al. (2013) の fitting function と比較する。ただし、観測の faint end はそれぞれ、 $z = 0.6$  付近で  $3 \times 10^{10} L_{\odot}$  程度、 $z = 3.6$  付近で  $5 \times 10^{11} L_{\odot}$  程度であ

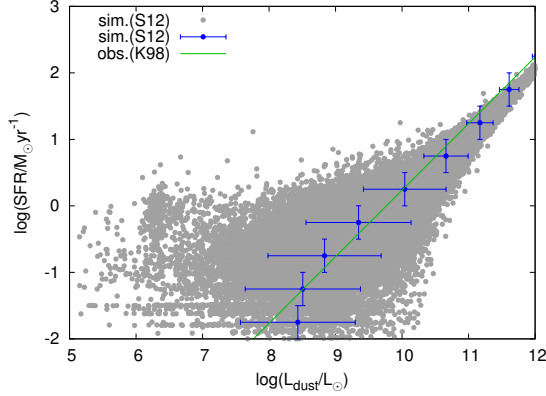


図 1:  $z = 0.6$  の  $SFR$  と  $L_{dust}$  の相関.

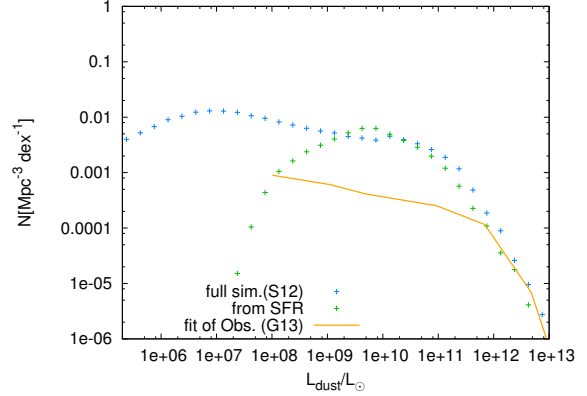


図 3:  $z = 0.6$  の遠赤外線高度関数.

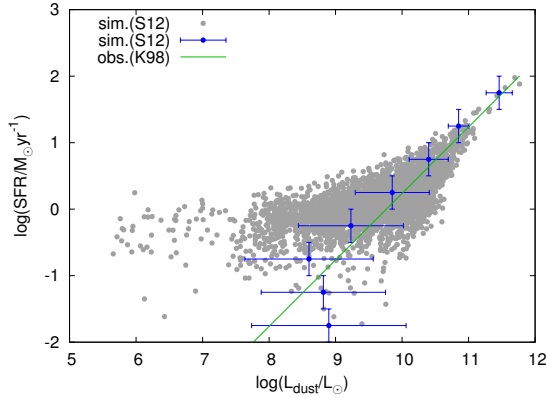


図 2:  $z = 9.0$  の  $SFR$  と  $L_{dust}$  の相関.

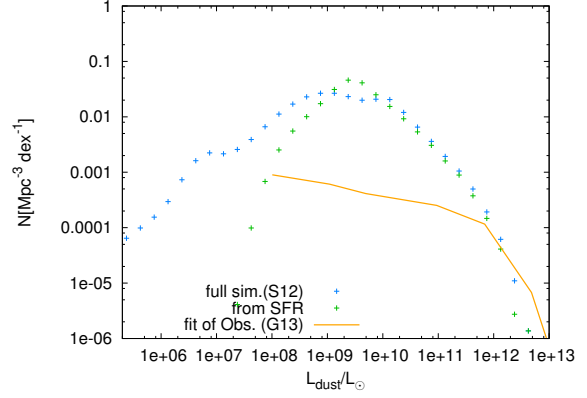


図 4:  $z = 3.6$  の遠赤外線高度関数.

る。図 3, 図 4 を見ると、観測されている bright end では観測とシミュレーションの結果は大体同じだが、観測されていない暗い光度で、シミュレーションから計算した銀河密度が factor 3 から 1 桁以上、fitting function より大きい。

## 2 Ackermann et al. (2012) の手法を用いた EGB の計算

ここからは、光子エネルギー  $E_0$  で観測される EGB の寄与を Shimizu et al. (2012) のシミュレ-

ーション結果から見積もる。

$$I(E_0) = \int_0^{z_{max}} \int_{L_{\gamma, min}}^{L_{\gamma, max}} \Phi(L_{\gamma}, z) \times \frac{dN}{dE}(L_{\gamma}, E_0(1+z)) \frac{d^2V}{dzd\Omega} dL_{\gamma} dz. \quad (2)$$

$I(E_0)$  の単位は  $[\text{ph/s/cm}^2/\text{str/GeV}]$ ,  $\Phi(L_{\gamma}, z)$  はガンマ線光度関数  $[\text{Mpc}^{-3}\text{GeV}^{-1}\text{s}]$ ,  $dN/dE(L_{\gamma}E_0(1+z))$  は differential photon flux  $[\text{ph/cm}^2/\text{s/GeV}]$ ,  $d^2V/(dzd\Omega)$  は comoving volume  $[\text{Mpc}^3/\text{str}/\Delta z]$ ,  $E_0$  は観測周波数でのエネルギー  $h\nu_0$ 、 $E$  は静止周波数でのエネルギー  $h\nu_0(1+z)$  である。

これは単純に分解されていない 1 つ 1 つの銀河の寄与について足し上げたものと一緒なので、

$$I(E_0) = \sum_{i=0}^{N_{tot}} \frac{dN_i(L_{\gamma}, E_0(1+z), F_{\gamma_0} < F_{lim})}{dE} \frac{1}{\Delta V} \frac{d^2V}{d\Omega dz} \quad (3)$$

を計算する。ここで、Shirasaki et al. (2014) を参考に  $F_{\gamma_0} > F_{lim} = 2 \times 10^{-9}$  ph/cm<sup>2</sup>/s の銀河は空間分解されているとして計算には入れない。

ダスト光度のガンマ線光度の換算には Ackermann et al. (2012) より、近傍宇宙の観測から得られた相関

$$\begin{aligned} & \log(L_{0.1-100\text{GeV}}/L_{8-1000\mu\text{m}}) \\ &= -4.3 \pm 0.1_{(\text{stastical})} \pm 0.2_{(\text{dispersion})}. \quad (4) \end{aligned}$$

を用いる。

赤方変位  $z$ , 光度  $L_\gamma$  の銀河の differential photon flux  $dN/dE(L_\gamma, E_0(1+z))$  は、Ackermann et al. (2012) では local group の 60 個の星形成銀河の SED (0.1 - 100 GeV) を power law

$$\frac{dN}{dE} = E^{-\Gamma}, \quad \Gamma = 2.2, \quad (5)$$

と fit して得ている。注意することは、これは non-detection の bin も 1 つのデータとして数えた fit (mumimum-likelihood fit) となっていて、さらに各周波数での flux を見積もる際に light curve を時間積分する際も maximum likelihood fit をしていることである。また、differential photon flux と flux density  $dS_\gamma/dE$  の関係は

$$\frac{dN}{dE} = \frac{dS_\gamma/(h\nu)}{dE}, \quad (6)$$

$$\frac{dS_\gamma}{dE} \propto E^{-1.2}, \quad (7)$$

$$\frac{dS_{\gamma_0}}{dE_0} \propto E_0^{-1.2}(1+z)^{-0.2}. \quad (8)$$

で、flux density と luminosity density の関係は

$$\frac{dL_\gamma}{dE} = \frac{4\pi d_L^2}{(1+z)} \frac{dS_{\gamma_0}}{dE_0} (\propto 4\pi d_L^2 E^{-1.2}). \quad (9)$$

さらに定数 A を用いて

$$\frac{dL_\gamma}{dE} = AE^{-1.2}. \quad (10)$$

とすると、 $L_\gamma = L_{0.1-100\text{GeV}}$  GeV/s なので

$$A = L_\gamma / \int_{0.1\text{GeV}}^{100\text{GeV}} E^{-1.2} dE. \quad (11)$$

計算すると、

$$\frac{dL_\gamma}{dE} = \frac{L_\gamma}{5.93} E^{-1.2}. \quad (12)$$

シミュレーション中の銀河は  $L_\gamma$  と光度距離  $d_L$  をもっているため、以上の行程をさかのぼることで differential photon flux を得ることが出来る。

$$\frac{dN}{dE}(L_\gamma, E_0(1+z)) = \frac{dS_{\gamma_0}}{dE_0} \frac{1}{(1+z)}, \quad (13)$$

$$= \frac{(1+z) dL_\gamma}{4\pi d_L^2 dE} \frac{1}{(1+z)}. \quad (14)$$

$$= \frac{1}{4\pi d_L^2} \frac{L_\gamma}{5.93} (E_0(1+z))^{-1.2} \quad (15)$$

となる。以上でシミュレーションの結果から得た  $L_{\text{dust}}$  から EGB を見積もる準備が整った。

### 3 Results

計算した結果は図 5, 図 6 のようになる。

図 5 のエラーバーは経験則の分散でつけている。Kennicutt law の方がエラーが大きくなっているのは、 $\text{SFR} \rightarrow L_{\text{dust}} (\pm 30\%) \rightarrow L_\gamma (\pm 0.3\text{dex})$  と、変換が 2 つはいつているためである。図 5 は、本研究の計算結果が  $E > 10$  GeV の EGB の観測結果を再現した事を示している。しかし、discussion で述べるように、今までの計算過程は、星生成銀河のガンマ線の寄与しか計算されておらず、AGN やブレーザーなどの寄与は計算されていない。つまり overestimate している可能性がある。また、二つの  $L_{\text{dust}}$  の計算結果に対する違いは大差なかった。これは LF のピークまではほぼ同じ高度分布であり、それより暗い銀河の寄与の違いは効いてこないためである。

図 6 は各 redshift range での EGB の寄与を示している。そのうち、 $0.6 < z < 1.0$  の銀河が全体の 6~7 割である。 $1.0 < z < 2.5$  の寄与は 2-3 割程度、 $2.5 < z$  の寄与は 1.2% 程度である。今回のシミュレーションでは、 $z < 2.5$  までの寄与まで考えれば EGB はほぼ説明できる事が分かった。

また、Shirasaki et al. (2014) を参考に  $F_{\gamma_0} > 2 \times 10^{-9}$  ph/cm<sup>2</sup>/s の銀河は空間分解されているとして寄与を考えないようにしたが、そもそもそんなに明るい銀河はいなかった。今最大に明るいのは  $z = 0.57$  の  $F_{\gamma_0} = 5.2 \times 10^{-13}$  ph/cm<sup>2</sup>/s で、もしこの銀河が  $z = 0.0$  にいればその寄与は考慮しないことになる。

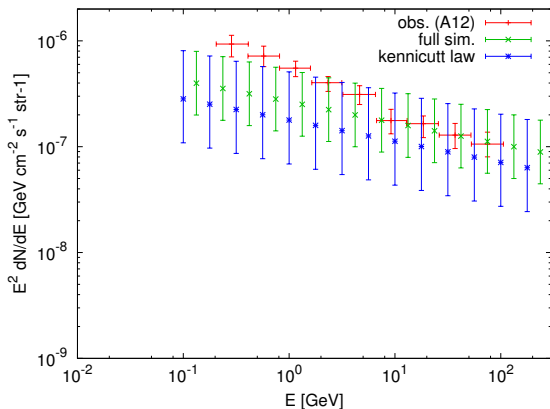


図 5: シミュレーションを使った EGB の見積もり.

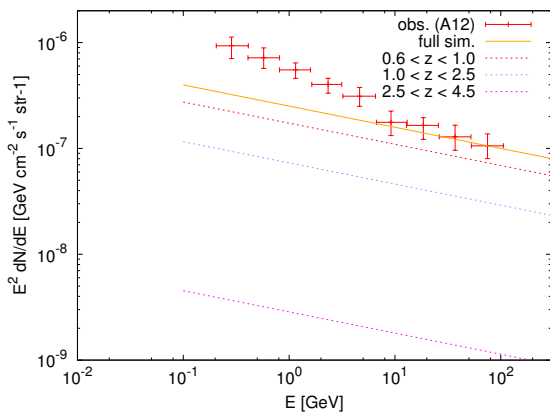


図 6: 各 redshift range の寄与 (full sim. の場合).

## 4 Discussion

まず、今回は使用した計算結果の都合上、 $z < 0.6$  のシミュレーションデータがなかったが、今後その寄与も含めて計算する必要がある。近傍に行くほど空間分解できる銀河も増え、その寄与を考えずにすむが、より暗い銀河の EGB への寄与も大きくなる。

もし図 5, 図 6 の見積もりを信じると、Ackermann et al. (2012) が EGB を説明できず Tamborra et al. (2014) が説明できた理由は、high- $z$  の観測データを入れたというのも 2 倍程度の効果としてあるが、種族を足したことの方がおおきな寄与だったと言えそうである。その意味で 10 GeV 以下の傾きの違いは興味深い。近傍の銀河の寄与が大きい分 redshift の

寄与がないと思えば、傾きの違いは種族の寄与の違いに当てはめられそうである。

また、本研究の見積もりと Ackermann et al. (2012) との大きな違いは、光度関数である。本研究では暗い銀河が多く、これが効いているが、光度関数の暗い側の妥当性を裏付けるような観測結果はまだ成されていない。

## 5 Conclusion

本研究の計算結果は  $E > 10$  GeV の EGB の観測結果を再現した。そのうち、 $0.6 < z < 1.0$  の銀河の寄与は 60 ~ 70 % 程度であった。近傍の銀河の寄与が大きい事から、10 GeV での傾きの切り替わりは銀河種族の寄与の違いである可能性がある。また、計算の過程で寄与が大きいのは LF の違いであるが、暗い側の光度分布の妥当性を証拠づける観測はまだ出ておらず、今後の観測で正当性が明らかになる。

今後は光学的厚みの寄与や、銀河種族、近傍銀河の寄与を入れて計算をすすめ、考察を深めていく。

## 6 Acknowledgement

今回はメインの研究でなく、研究室の人々と世間話的に思いついたテーマをやってみました。ここに書いた内容を指導教員に見せにいったら割と否定的な反応でしたが、それもいい経験だと思って非常に感謝します。未熟な段階でも新たな研究に挑戦できる機会を得られるのも、若手夏の学校の良い一面だと思います。成長する機会を与えて下さった若手夏の学校に感謝します。

## Reference

- Abdo et al. 2012. PhysRevLett, 104.101101
- M. Ackermann et al. 2012. ApJ, 755:164
- I. Tamborra et al. 2014. arXiv, 1401.1189
- C. Grupponi et al. 2013. MNRAS, 432:23
- I. Shimizu, N. Yoshida, and T. Okamoto. 2012. MNRAS, 427:2866
- R. C. Kennicutt, Jr. 1998. ARA&A, 36.1.189
- T. Okamoto et al. 2010. MNRAS, 406:208
- M. Shirasaki et al. 2014. arXiv, 1404.5503