

[1] The Evolution of the Dust-to-Metals Ratio in High-Redshift Galaxies Probed by GRB-DLAs

P. Wiseman, P. Schady, J. Bolmer, T. Krühler, et al.

(submitted to A&A, arXiv:1607.00288)

Context. Several issues regarding the nature of dust at high redshift remain unresolved: its composition, its production and growth mechanisms, and its effect on background sources.

Aims. This paper aims to provide a more accurate relation between dust depletion levels and dust-to-metals ratio (DTM), and to use the DTM to investigate the origin and evolution of dust in the high redshift Universe via GRB-DLAs.

Methods. We use absorption-line measured metal column densities for a total of 19 GRB-DLAs, including five new GRB afterglow spectra from VLT/X-shooter. We use the latest linear models to calculate the dust depletion strength factor in each DLA. Using this we calculate total dust and metal column densities to determine a DTM. We explore the evolution of DTM with metallicity, and compare this to previous trends in DTM measured with different methods.

Results. We find significant dust depletion in 16 of our 19 GRB-DLAs, yet 18 of the 19 have a DTM significantly lower than the Milky Way. We find that DTM is positively correlated with metallicity, which supports a dominant ISM-grain-growth mode of dust formation. We find a substantial discrepancy between the dust content measured from depletion and that derived from the total V-band extinction, A_V , measured by fitting the afterglow SED. We advise against using a measurement from one method to estimate that from the other, until the discrepancy can be resolved.

19個の GRB host かつ DLA system の観測から, dust to metal ratio の制限.
金属量の変化に対して, 正の相関が見られた => ISM 中でのダスト生成を示唆.
しかし, 別の手法で見積もって見たら, そのような相関は見られなかった.

??

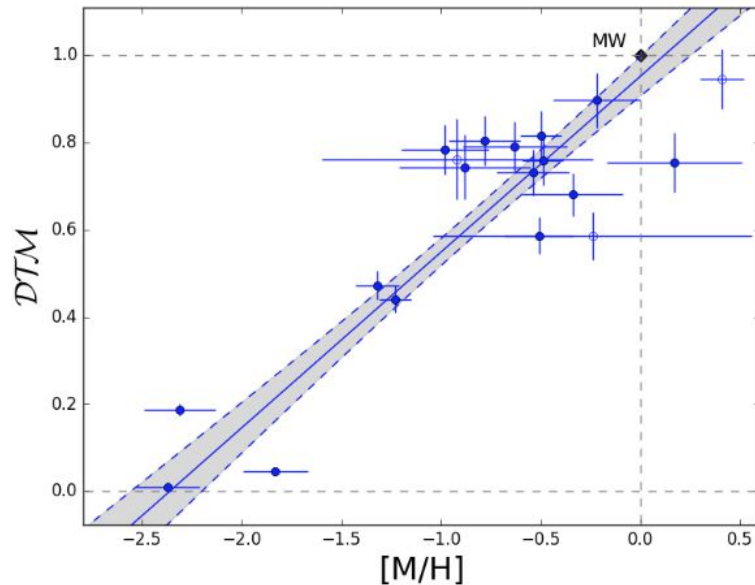


Fig. 6. DTM as calculated using Eq. 8 as a function of metallicity. The dashed line and shaded area is a linear fit to the data and its 1σ confidence interval respectively, tracing a significant positive correlation between the two variables. The trend is predominantly set by the lowest metallicity points, with those data points at $[M/H] > -1$ showing no obvious trend. The Milky Way is shown by a black point at $[M/H]=0$, $DTM=1$.

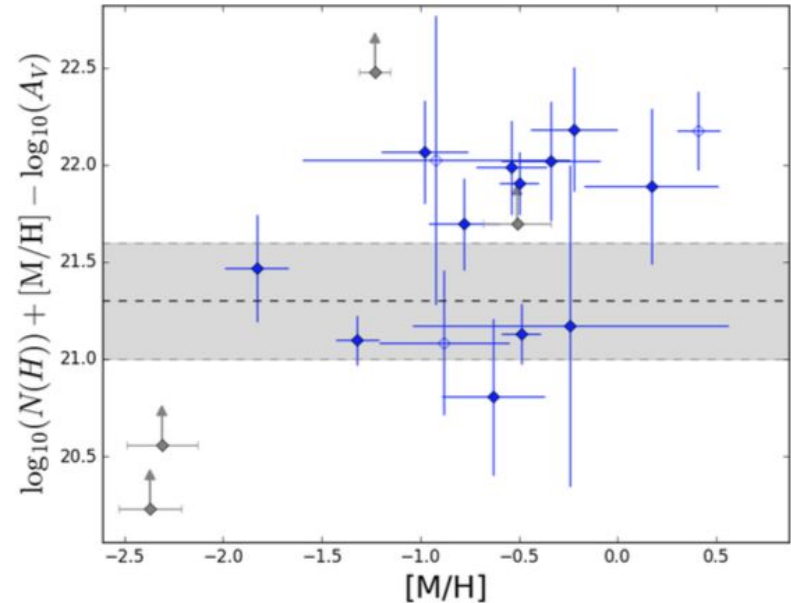


Fig. 7. The metals-to-dust diagnostic used by Zafar & Watson (2013), as applied to our data along with the Local Group average and standard deviation that they quote (Dashed line and shaded area).

左：論文中的の見積もり方. DTM = dust to metal ratio.

右：別の見積もり方で, しかも縦軸は metals to dust ratio.

うっすら正に相関しているようにも見えるが, この振る舞いは左図とは逆相関となっている.

なぜ dust to mass ratio を調べるのか

Dust to metal ratio とは

total metal に対する, dust phase metal の比率.

この論文では数密度比で定義されている.

(※ dust to gas ratio では, mass ratio の方が多く見かける ?)

Dust to metal ratio を調べると, interstellar dust の進化がわかる.

赤方偏移進化を見れば, まさにdust汚染の歴史がわかる.

(※ dust to gas ratio では, gas も金属輝線から見積もる場合もあり,
金属汚染の歴史と区別が困難 ?)

Dust to metal ratio の金属量依存性

- ・ダストがすべて星からできていたら

- ➡ dust to metal ratio は金属量によらない

- ・ダストがISM中で生成・成長している寄与が大きければ

- ➡ (星由来の成分に追加されるので) 金属量の増加に対して増える

Dust to metal ratio 推定法 (traditional way)

- ・visual extinction A_V から, metals to dust ratio (数密度比) を得る.

$$\text{gas metal / dust metal} = \log(N_{\text{HI}}) + [\text{M}/\text{H}]_{\text{gas}} - \log(A_V)$$

結局, 最初の2項でgas phase metallicity を表す.

N_{HI} : HI 柱密度, Ly α の吸収線から見積もる.

$[\text{M}/\text{H}]_{\text{gas}}$: gas phase metallicity, 金属の吸収線に対する
水素再結合吸収線のフラックス比から見積もる.

$$[\text{X}/\text{Y}] = \frac{\log N(\text{X})}{\log N(\text{Y})} - \frac{\log N(\text{X})_{\text{ref}}}{\log N(\text{Y})_{\text{ref}}}.$$

A_V : V バンド減光量. (絶対等級がわかっている)星が分解できるスケールの
近傍の観測で extinction law を得る → 銀河の intrinsic SED template
(IMF+銀河進化モデル(SSPなど), 金属量, 年齢, を仮定) を作成
→ extinction law に従って減光量を調節してSED fit → A_V を見積もる.

Dust to metal ratio 推定法 (depletion model; this paper)

・dust depletion という量を導入する. ある元素 x に関するdust depletion は,

$$\delta_X = [X/H]_{\text{obs}} - [X/H]_{\text{in}},$$

で表される. In は intrinsic, その系のガスとダストに含まれる金属量の総量.

obs は輝線/吸収線から得られる gas phase metallicity.

δ_x が負なら, 金属はダストに多く吸着している状況 (deplete = 使い尽くす, の意).

intrinsic metallicity は基本的には未知の量だが, ダストになりにくい元素, 例えばZnなどがすべて gas phase だと仮定して得たりする.

(※彼らは後述するdepletion model を使っている)

この量を使えば, dust to metal ratio (DTM) は以下のように表せる.

$$\text{DTM} = \frac{N(\text{dust})}{N(\text{metals})} = \frac{\sum_X 10^{[X/H]_{\odot}} (1 - 10^{\delta_X})}{\sum_X 10^{[X/H]_{\odot}}},$$

Dust to metal ratio 推定法 (depletion model; this paper)

・つづき.

$$\text{DTM} = \frac{N(\text{dust})}{N(\text{metals})} = \frac{\sum_X 10^{[X/H]_{\odot}} (1 - 10^{\delta_x})}{\sum_X 10^{[X/H]_{\odot}}},$$

これは, intrinsic metallicity; $N(\text{metals}) \approx N(\text{H}) \frac{Z}{Z_{\odot}} \sum_X 10^{[X/H]_{\odot}} \text{ cm}^{-2}$,

dust phase metallicity; $N(\text{dust}) \approx N(\text{H}) \frac{Z}{Z_{\odot}} \sum_X 10^{[X/H]_{\odot}} (1 - 10^{\delta_x}) \text{ cm}^{-2}$,

と表せることから理解できる. $(Z/Z_{\odot}) = 10^{[X/H]_{\odot}}$,

DTMを得るためには, 各元素の δ_x がわかれば良い.

DeCia et al. (2016) は,

各元素の gas phase metallicity, δ_x , total intrinsic metallicity の関係を
観測から得た (depletion model; 次のページ).

なので, δ_x , total intrinsic metallicity をパラメータにして,

観測された gas phase metallicity を X^2 fit することで δ_x を得られる.

Dust to metal ratio 推定法 (depletion model; this paper)

- つづき2. どうやってdepletion model をつくったか.

まずMilky Way の観測から出発.

→ 同じ視線方向上で, 異なる元素同士の δ_X は正に相関していた (Jenkins 2009)
この事実から, 観測する方向ごとに固有な値 F_* と適当な定数を導入して,

$$\delta_X = B_X + A_X (F_* - z_X)$$

とできる. ここで, $B_X < 0$, $A_X < 0$. F_* は最もdepletionが大きい視線方向で1, 小さい視線方向で0としている.

さらに DeCia et al. (2016) が, F_* と $[Zn/Fe]$ の間に相関を見つけた. $F_* = 1.48 [Zn/Fe] - 1.5$.

(Fe はダストによく取り込まれる元素.

なので, $[Zn/Fe] \sim \text{intrinsic}/(\text{intrinsic} - \text{dust})$
が大きいほど δ は負に近づく ($A_X < 0$).)

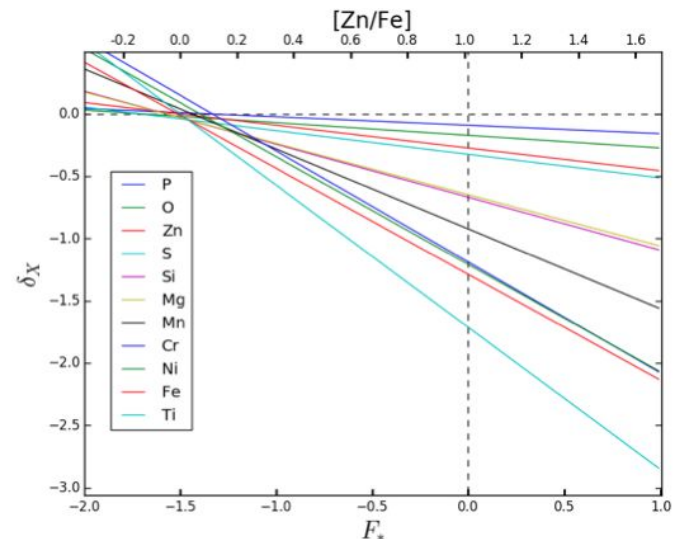


Fig. 1. Depletion δ_X is plotted as a function of F_* . The slope is defined by the parameter B , and the point of zero-depletion by A .

Dust to metal ratio 推定法 (depletion model; this paper)

・つづき3.

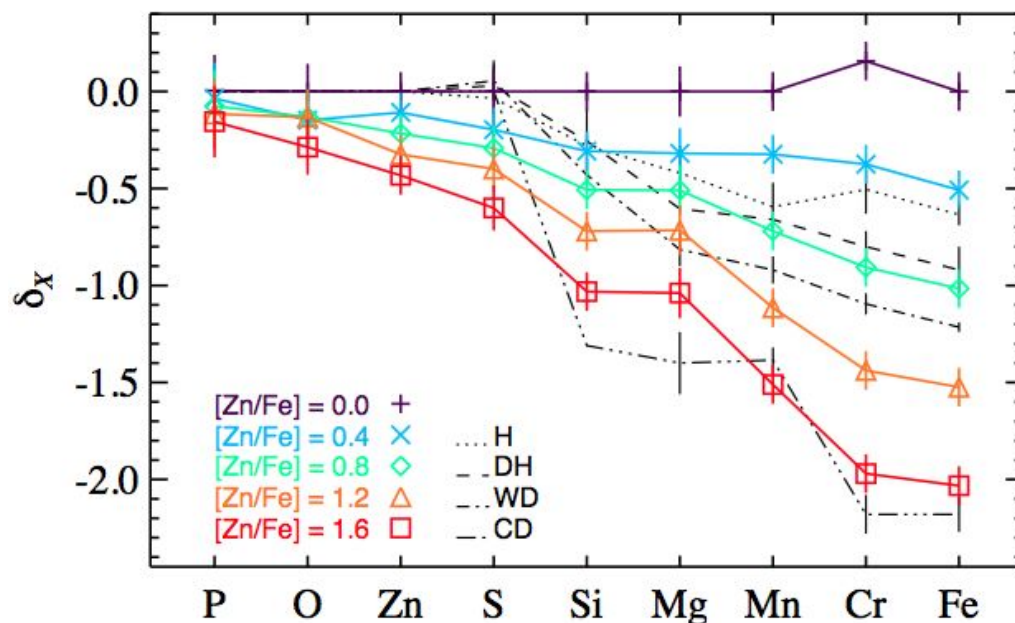
系による F_* を $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ で定義し直すことで、
この δx と $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ の関係を、他の系にも対応付けられるようになった。
DeCia et al. (2016) は、9 つの元素の δx と $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ の関係を、
74天体のQSO-DLAを用いて調べた。
 $z = 1.7\text{-}4$, 金属量は 1/100 solar までのものを用いた。

DeCia et al. (2016)

このようにして, depletion model
は作られた。

(各元素のgas phase metallicity,
 δx , total intrinsic metallicity
の関係)

※もっと細かくは, 元素合成モデル
を噛ませてintrinsic metallicityを
補正しているらしい...



GRB-DLA

- ・GRBは非常に明るいので広いredshift rangeでDTM調べられる.
- ・様々な金属量で起こる現象
- ・afterglow は特徴のないシンクロトン放射 => 吸収線が綺麗に得られる
- ・DLA = 中性ガス
 - ➡ 一階電離の金属からtotal metallicity を見積もっても許されそう
- ・輝線では力学的な影響を受けるが, 吸収線なら金属量に焼き直せる.

観測データは主にVLTのX-shooter によるもの.

$\text{Ly}\alpha$ 吸収線が検出されているGRB-DLAを選んでいる.

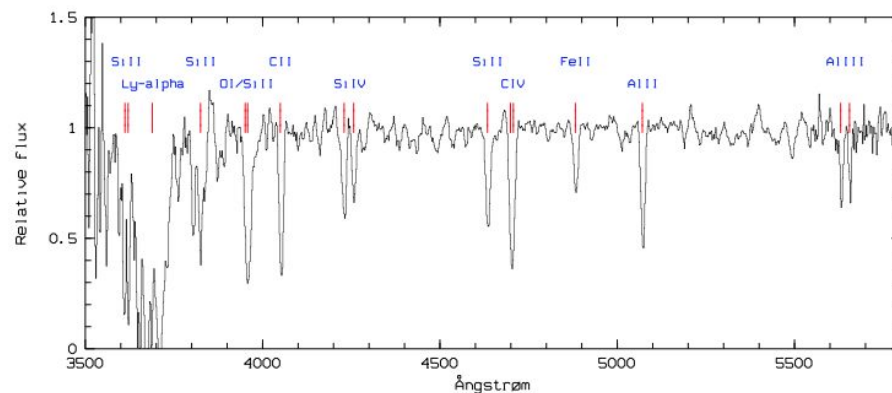


Fig. 2. The spectrum of GRB 000926 showing strong metal absorption lines as well as a damped $\text{Ly}\alpha$ absorption line at $z=2.0377$.

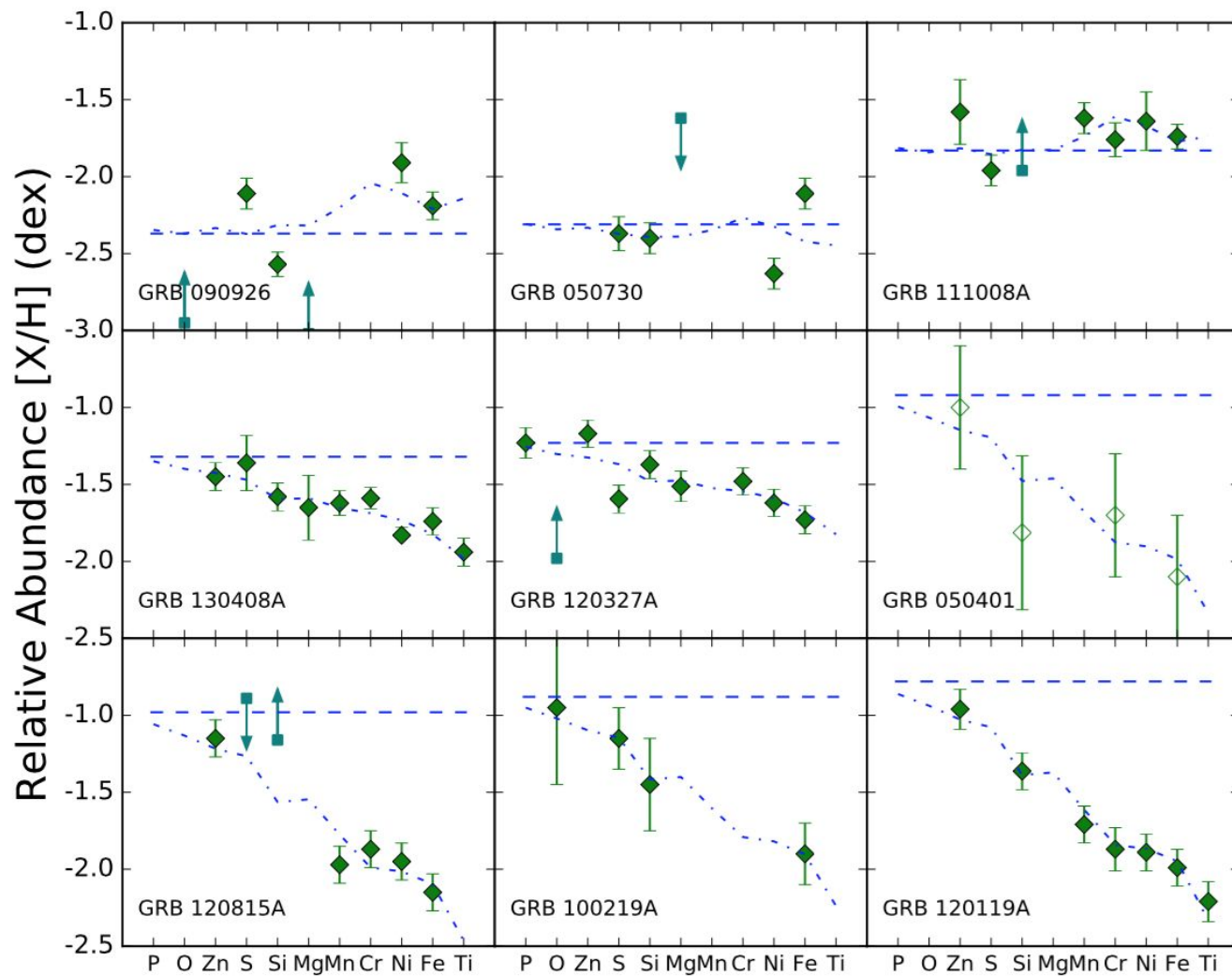


Fig. 2. Dust depletion fits for the nine lowest metallicity GRB-DLAs in our sample. The diamond points are the observed relative abundances, the dot-dashed line follows the expected depletion at a strength of the best fit F_* , and the dashed line represents the best fit metallicity. Unfilled markers represent low-resolution spectral data, and squares with up (down) arrows represent lower (upper) limits.

Dash-dotted : fitting の結果

Dashed ; expected total metallicity

うまくfitできている.

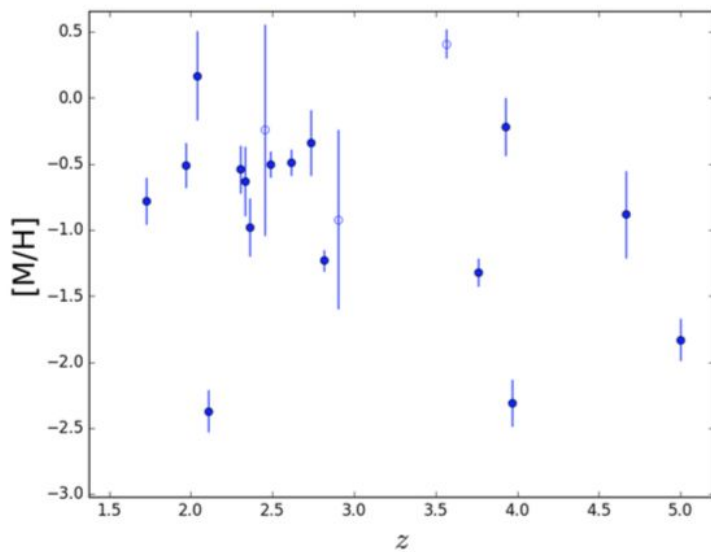


Fig. 4. The metallicity $[M/H]$ as a function of redshift. Open samples are those taken from low-resolution spectra.

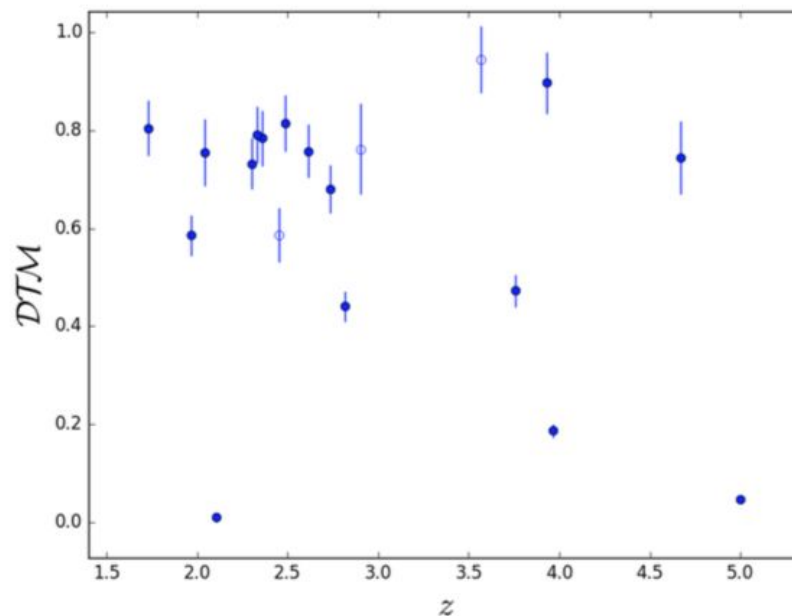


Fig. 5. The DTM as a function of redshift. z error bars are too small to be displayed. There does not seem to be any evolution over the redshift range of 1.7-5, but no conclusions can be drawn with such a small sample.

赤方偏移の依存性 : (totalの) 金属量の進化は, low-reso のデータを除けば緩やかな減少が見られる
 DTM の進化はあまり傾向は見られない .
 (※ A_V の見積もりよりも不定性が大きいらしい)

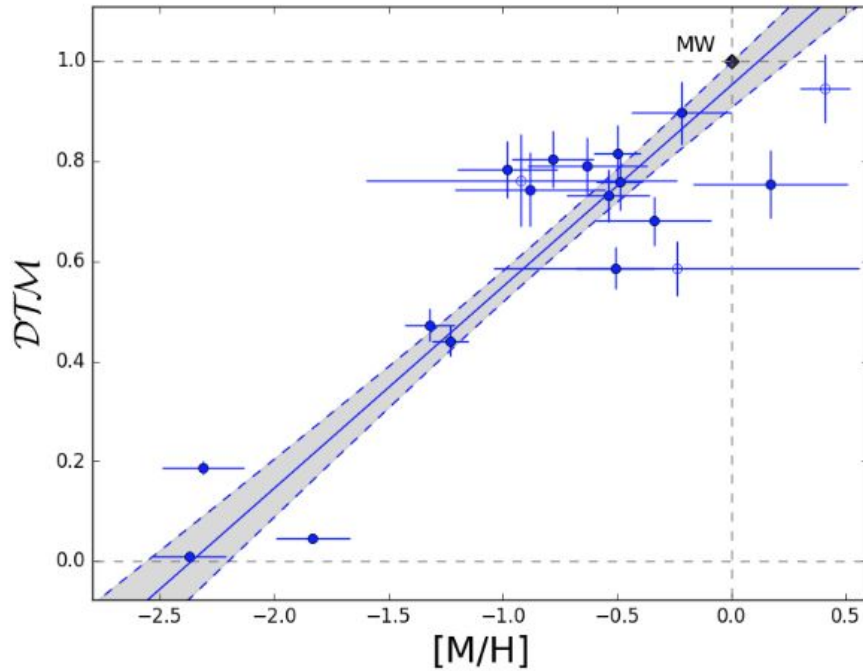


Fig. 6. DTM as calculated using Eq. [8] as a function of metallicity. The dashed line and shaded area is a linear fit to the data and its 1σ confidence interval respectively, tracing a significant positive correlation between the two variables. The trend is predominantly set by the lowest metallicity points, with those data points at $[M/H] > -1$ showing no obvious trend. The Milky Way is shown by a black point at $[M/H]=0$, $DTM=1$.

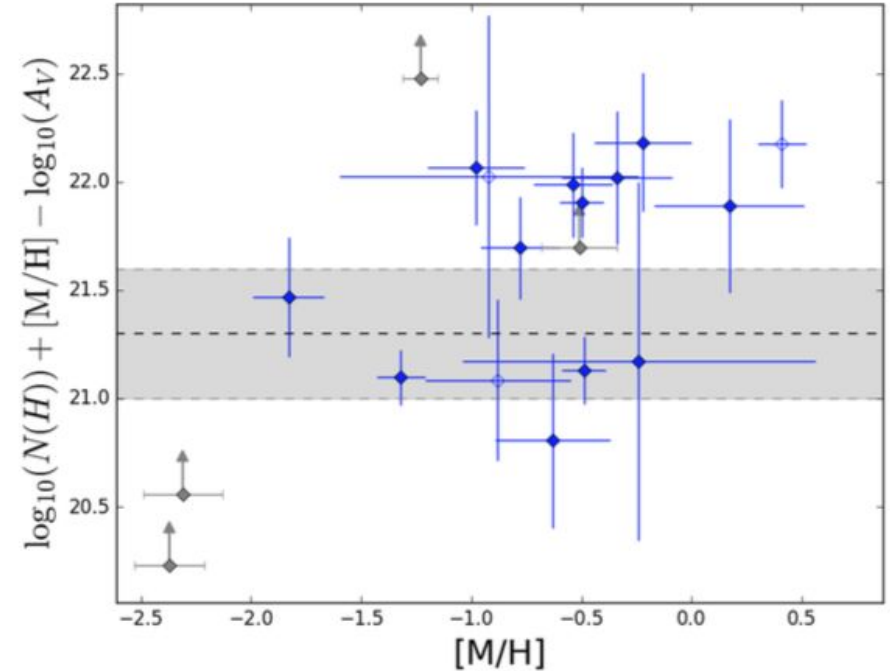


Fig. 7. The metals-to-dust diagnostic used by Zafar & Watson (2013), as applied to our data along with the Local Group average and standard deviation that they quote (Dashed line and shaded area).

Fig6: わりときれいに相関が見えている．横軸はtotal metallicity. **[M/H] is the metallicity of the system.**

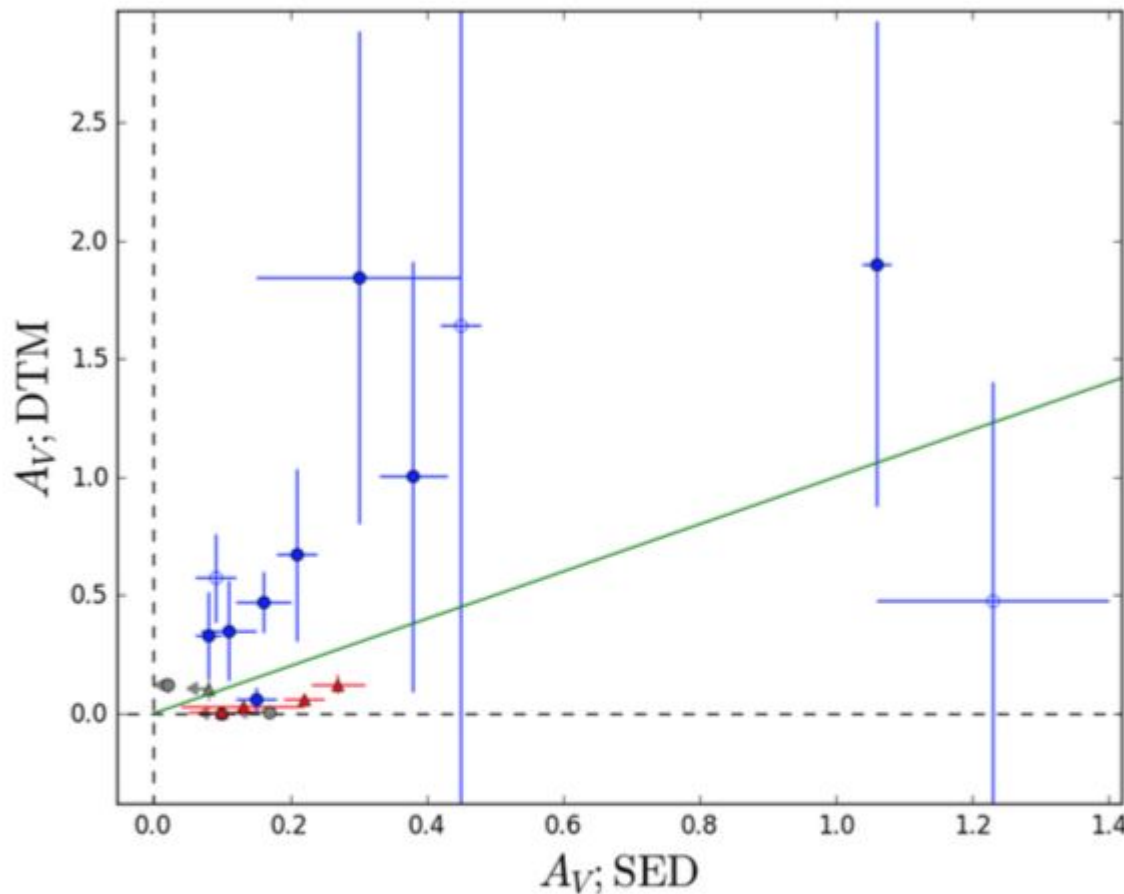
outlierは、absorberとhost galaxyの距離によるものかもしれない．

(あまりに近いと、SN時にダストが破壊されDTMが下がる)

Fig7: metals to dust ratio ; A_V による見積もり方ではなんの傾向も見られない．

やや右肩上がり？それはFig6とは逆の相関を意味する．縦軸の[M/H]はgas phase metallicity！

DTM: the extinction, A_V , is compared to the equivalent metal column density, $\log N(H) + [M/H]$, where $[M/H]$ is the logged metallicity of the gas.



$$A_V = 0.45 \frac{DTM}{DTM_{\text{Gal}}} \frac{Z}{Z_{\odot}} \frac{N(\text{H}) \text{ cm}^{-2}}{10^{21}} \text{ mag},$$

- ・今のところはその不一致の原因はわかっていない
A_Vの見積もり方に問題あり
- ・これはdust size の分布などで説明できない
(単純なモデルでは2つのグループを同時に説明できない)
- ・measureは一つの方法で信じない方がよい

Fig. 8. A_V as measured directly from the SED against that calculated from the DTM. The green line indicates a 1:1 conversion between the two. Blue circles represent SEDs best fit with a simple power-law, whereas red triangles are used for broken power-law fits. Empty points refer to depletion measured from low-resolution spectra.

図では best fit SED model の違いが見えているが、
論文中には詳しく言及されていないはず...