

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23540288

研究課題名(和文) 宇宙に於けるエネルギー収支の型録化と相互作用の試験

研究課題名(英文) The Cosmic Energy Inventory: Construction and Consistency Investigations II

研究代表者

福来 正孝 (FUKUGITA, Masataka)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授

研究者番号：40100820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：銀河は「島宇宙」と云う言葉に代表される「閉じた」存在ではなく銀河に随伴した物質は銀河の重力半径以遠迄広がる。此は、暗黒物質と宇宙塵の研究に於て、全体量が部分量の総和より大きいと云ふ矛盾の解明に端を発した知見である。今回の研究では、観測的情報が受動的に得られる宇宙塵の分布を調べ、銀河で生成された宇宙塵中、約1/3が銀河に留まり、1/3はMgII吸収線天體に捕捉され、残りの1/3は銀河間空間に飛ばされてゐる事を示した。同時に減衰型Lyman alpha吸収線天體にも宇宙塵の存在が示され、吸収線天體に存在する重元素は銀河の星生成で創られたものが、銀河風で運ばれ吸収線天體に付着したと考へて矛盾しない。

研究成果の概要(英文)：Galaxies are not closed entities as depicted by the term 'Island Universe'. The matter associated with the galaxy is distributed extending far beyond its gravitational radius. This is illuminated by dark matter and dust: those associated with galaxies are less than their global values. In the present work we studied the distribution of cosmic dust, for which observational information can passively be obtained. We showed that while 1/3 of dust produced in star forming activity in galaxies remains in the galactic disc, 2/3 are expelled from galaxies: its half is captured in Mg II clouds. The rest 1/3 is expelled to intergalactic space. We detected dust in damped Lyman alpha absorbers, while the total amount is smaller than in Mg II clouds. Heavy elements in the clouds are inferred to be produced in star forming activities in galaxies, carried away and deposited in those clouds.

研究分野：天体物理学

キーワード：宇宙科学 宇宙物理 光学赤外線天文学

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙の大局的な成分構成に関しては現在迄に精確な理解が得られてゐる。此等の構成成分は総てエネルギーの形で書き表す事が出来るが、其の分布と分配及び進化に就て知らうとする試みとして始められたのが「宇宙エネルギーの型録化」(Cosmic energy inventory)である。此の途上に於て我々は、銀河が「鳥宇宙」と云う言葉に代表されるやうな「閉じた」存在ではなく銀河に随伴した物質分布は銀河の重力半径以遠に擴がって裾野を引き、物質は宇宙全體を被ふものであることを知った。

### 2. 研究の目的

銀河周辺領域は銀河の活動を反映してをり、亦銀河周辺領域の物理は銀河間空間の物理と連続的に繋つてゐる筈である。此の事は銀河間空間に於ても、「観測可能」な暗黒成分と宇宙塵に就て最初の知見が得られたのであるが、より詳細に此が何様に実現されてゐるのかに就て先ず調べることにした。特に銀河外天體として最も代表的と考へられる、MgII 吸収線天體、減衰型 Lyman alpha 吸収線天體(Damped Lyman alpha absorbers: DLA) を先ず調べる。

宇宙塵の存在が有つ意義を明らかにする爲に、併せて減光特性と宇宙塵の物理化学特性との關係を明らかにしてをく必要が生じた。

### 3. 研究の方法

先頃終結した Sloan Digital Sky Survey(SDSS) は天空の 1/4 に亘つて精確な測光データを與えてゐる。SDSS の測光は u, g, r, i, z の 5 色であるが、その後の GALEX 衛星は紫外領域(NUV, FUV) での測光データを與えて呉れ SDSS のデータに對して重要な補足を與へる。

我々は 1/100 乃至 1/1000 等級の明さの精度を問題とするので、単一天體の測光では斯様な精度を得る事は不可能であり、数千ヶ或るいは其以上の天體を平均することに依つてのみ目的の達成が可能である。此処で重要なのは、測光データの較正精度の全天に亘る一様性であり、SDSS 測光はこの様な要求を満す理想的なデータを與える。予備的な研究は GALEX 測光データも目的の達成に耐えるものである事を示した。

我々の研究では、quasar を光源としてその光束が前方にある雲状の天體に依つて如何様に変化するかを検出することに依つて為される。quasar よりも光束を基準として利用する必要上 quasar の選択を厳格に行い、光束の分布が何の程度揺らぐかを先ず調べる必要がある。此の揺らぎが解析の到達精度の限界を決定する。quasar は其のスペクトルが観測されてをり、其の吸収線は前景天體の本性に関する情報を與えて呉れる。宇宙塵の存在に関する情報は吸収線を示す quasar

の光束を吸収線を示さない quasar の光束と比較する事に依つて得られる。

此処で MgII 吸収線系に関しては Nestor et al.(2005) と Zhu, Ménard(2013)、DLA に就いては、Noterdaeme et al. (2012) に依つて型録が作られてをり、再精査の後、是を利用する。

此の研究の主な部分 Johns Hopkins 大學の Brice Ménard 氏との共同研究であり、亦宇宙塵の微視的性質に関しては野沢貴也氏との共同研究である。研究の中途段階では、報告者の長年に亘る共同研究者である、James Peebles 氏、矢張り長期に亘つて議論を續けてきた Bruce Draine 氏の恩恵を受けてゐる。

### 4. 研究成果

(1) MgII 天體に存在する重元素量の宇宙塵を用いた評価。quasar よりも発する光で MgII 吸収線を示すものは(此処では MgII 吸収線の静止系等価幅が 0.8 以上のものを MgII 吸収線系と定義する)は quasar の 27%であるが、その光束は赤化を示してをり、その赤化は宇宙塵に典型的なものである事が示される。これは MgII 吸収線系に宇宙塵が存在することの証拠である。圖に示す曲線は  $10^{19.5}/\text{cm}^2$  の水素量面密度(MgII 吸収線系に典型的な水素量面密度)を有つ天體が、太陽系と同じ重元素存在量を有つと仮定したときに存在するであらう宇宙塵が引き起す赤化を示し、データ点は 11900 ヶの MgII 吸収線天體より得られた赤化量の median 平均値であり、光束赤化が實際宇宙塵に拠るものである事を示す。

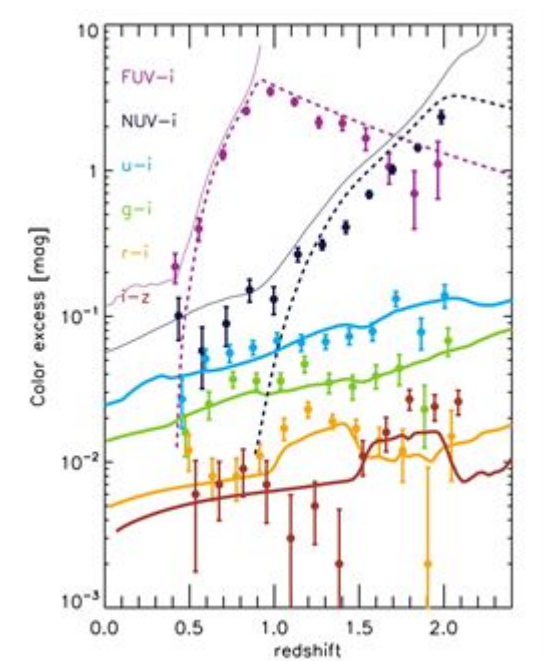


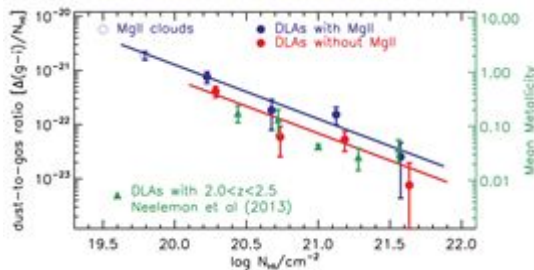
Figure1. Reddening induced by the presence of MgII absorbers with  $W_0 > 0.8$ , as a function of redshift for FUV-i, NUV-i, u-i, g-i, r-i and i-z colours in our quasar sample. The solid lines are reddening expected for clouds with SMC-type

dust having  $N_{HI} = 10^{19.8} \text{ cm}^{-2}$  but scaled to the dust-to-hydrogen ratio of 1/100, consistent with our determination given later. Dashed curves are the expectation for  $N_{HI} = 10^{18} \text{ cm}^{-2}$  clouds.

此の事は MgII 吸収線天體は宇宙初期ガスの集積ではなく、銀河同様に重元素で汚れた存在であることを示唆してゐる。これは、重元素は星による生成に限られる事、MgII 吸収線天體には星の存在は知られてをらず、且つ星は存在しないものと考へられる事を勘案すると不思議な現象である。今の處、理論的に辻褄の會ふ唯一の解釈は、此等の重元素は近傍の銀河に於ける星生成に依つて生成された重元素が銀河風に依つて銀河間空間に運ばれ吸収線天體に付着したとするものである。

赤化量より MgII 吸収線天體に存在する宇宙塵の總存在量を見積ると  $\approx 2 \times 10^{-6}$  であり、先に銀河外に存在すると見積つた宇宙塵量の約 1/2 となる。

(2) もう一つ考慮する必要のあるのが MgII 吸収線天體より多くの中性水素を包有する DLA である。此處では、87800 ケの quasar 中に検出された 12100 ケの中性水素吸収體に就いて、MgII 吸収線天體の場合と同様の解析を行った。圖 2 に示すのは、宇宙塵の視線積分量を水素面密度で割つた値、即ち metallicity 相当の量を DLA の水素面密度に對してプロットしたものである。metallicity は水素面密度に對して良い精度で逆相関 ( $Z \sim 1/N$ ) してゐる事が見てとれる。



**Figure 2.** Median dust-to-gas ratios for the absorbers as a function of  $N_{HI}$  for systems with  $2.1 < z < 2.3$ . Solid blue circles are median values for clouds showing the MgII absorption with  $W_0 > 0.8$ , solid red circles are that for clouds without MgII, both estimated from median reddening  $g-i$  colour. The lines are fit with the slope fixed to  $Z \sim N_{HI}^{-1}$ . The open symbol at  $\log N_{HI} = 19.8$  is for MgII absorbers. The right axis shows the inferred metallicity from the semiempirical  $\Delta(g-i)-Z$  relation. Green data symbols show spectroscopic metallicity for DLA in  $2.1 < z < 2.3$  from Neeleman (2013).

此は一見不思議に思へる結果である。若し宇宙塵が DLA 自體で発生するなら水素面密度が高い方が metallicity が大きくなるであらう。若し宇宙塵が星生成に歸せられ、星生成率が通常銀河で知られてゐる法則に従うなら metallicity は水素面密度に對して 0.4 乗で増加する筈であり、我々の視た結果と逆様である。従つて、DLA 中の重元素の起源は DLA 自體での星生成に歸する事はできず、此處でも重元素の起源を、近傍銀河よりの銀河風に拠る供託と考へると、各面密度当重元素供託量は一定、即ち  $Z \sim 1/N$  が理解される。

此處でも宇宙塵の總量評価を行ふ。先ず、中性水素の總量は DLA では MgII 吸収線天體に較べて 10 倍多い。然乍ら DLA 中の宇宙塵の總量は MgII 吸収線天體に較べて 1/5 程度に過ぎない(第 1 表参照)。従つて DLA の metallicity は銀河の 1/50 程度となり、DLA 中の宇宙塵の總量は宇宙塵の總量評価には殆ど影響しないと云へる。

**Table 1**  
Cosmic Densities of Hydrogen and Dust Traced by Different Types of Absorbers

Absorber	Estimates of $\Omega_{HI}$ in Absorbers		Total
	With Mg II	Without Mg II	
DLA	$1 \pm 0.3 \times 10^{-4}$	$8 \pm 2 \times 10^{-4}$	$9 \pm 2 \times 10^{-4}$
LLS	$\sim 1 \times 10^{-4}$	$1-3 \times 10^{-4}$	$2-4 \times 10^{-4}$
Ly- $\alpha$ forest	...	...	$0.03 \times 10^{-4}$
Total	$2 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^{-4}$	$10 \pm 2 \times 10^{-4}$
Absorber	Estimates of $\Omega_{dust}$ in absorbers		Total
	With Mg II	Without Mg II	
DLA	$0.2 \times 10^{-6}$	$0.5 \times 10^{-6}$	$0.7 \times 10^{-6}$
LLS	$2.1 \times 10^{-6}$	$< 2 \times 10^{-6}$	$2-4 \times 10^{-6}$
Total	$2.3 \times 10^{-6}$	$0.5-2.5 \times 10^{-6}$	$3-5 \times 10^{-6}$

銀河の星生成で生成された宇宙塵の行方に就ては次のやうな描像が描けるだらう。全體の 1/3 は銀河円盤内に留まる。此が通常言及されてゐる宇宙塵の存在量である。残りの 1/3 は銀河より余り遠くない位置に分布する MgII 吸収線天體に捕捉される。残りの 1/3 は銀河間空間に飛ばされる。此の描像が意味するのは銀河に對して MgII 吸収線天體の covering factor が 50%に上ると云ふ結論である。此の結論が支持されるか否かは今後に残された問題である。

もう一つの重要な結論は宇宙塵の生成と行方に就て完全な accounting が與えられた事である。即ち「生成量 = 観測量」の等式が 10%程度の精度で成り立つ。此は、一度生成された宇宙塵は effective に壊されてはいけなかつた事を意味してをり dust 物理の「常識」とは反する。若し宇宙塵が壊されることがあれば、再生成されなければならない。宇宙には余計に宇宙塵を作るやうな「燃料」は最早残されてゐない。

(3) 今迄に知られてゐる宇宙塵はその減光曲線に依つて我々の銀河(MW) タイプと小マ

ゼラン雲(SMC) タイプの2種に分れる。MgII吸収線天體とDLAの宇宙塵は何方もSMCタイプの宇宙塵として矛盾しない。此処でMgII吸収線天體の宇宙塵がSMCタイプであることは既に知られていた事実の追認であるが、DLAの宇宙塵は、明白な検出それ自體が新しい結果である。

我我(野沢とMF)はsilicateとgraphite粒子の光学特性を用いた宇宙塵の微視物理的な考察を行い、観測されてある減光曲線を再現する場合の粒子分布は或る大きさ(0.2 $\mu$ )で切断された冪分布( $q = -3.5$ )と考へて矛盾しないことを示した。此は一般に受容されてあるDraine達の模型とは異なる結果である。更に、この形状に體する結果は、MWとSMCの宇宙塵共に共通であり両者の光学特性が大きく異なる事は、silicateとgraphiteの構成比が異なる(SMCではgraphiteが1/4)と云う理由に帰着される。-3.5冪を持つ冪分布は衝突平衡の下で期待されるものであるが、大きさの切断の理由は不明である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 7 件)

M. Berry et al. (M. Fukugita), Milky Way tomography with SDSS: IV. Dissecting dust, *Astrophys. J.* 757, 166 (2012)

N. Inada et al. (M. Fukugita), The Sloan Digital Sky Survey quasar lens search. V: Final catalog from the Seventh Data Release *Astron. J.* 143, 119 (2012)

M. Oguri et al. (M. Fukugita), The Sloan Digital Sky Survey quasar lens search. VI: Constraints on dark energy and the evolution of massive galaxies, *Astron. J.* 143, 120 (2012)

B. Ménard, M. Fukugita, Cosmic dust in Mg II absorbers, with B. Menard, *Astrophys. J.* 754, 116 (2012)

M. Fukugita, Y. Shimizu, M. Tanimoto and T.T. Yanagida,  $\nu_{13}$  in neutrino mass matrix with the minimal texture, *Phys. Lett. B* 716, 294 (2012)

T. Nozawa, M. Fukugita, Properties of dust grains probed with extinction curves, *Astrophys. J.* 770, 27 (2013)

M. Fukugita, B. Ménard, The nature of damped Lyman- and MgII absorbers explored with their dust content, *Astrophys. J.* 799, 195 (2015)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

福来 正孝 (FUKUGITA, Masataka)  
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構  
特任教授  
研究者番号：40100820

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：