

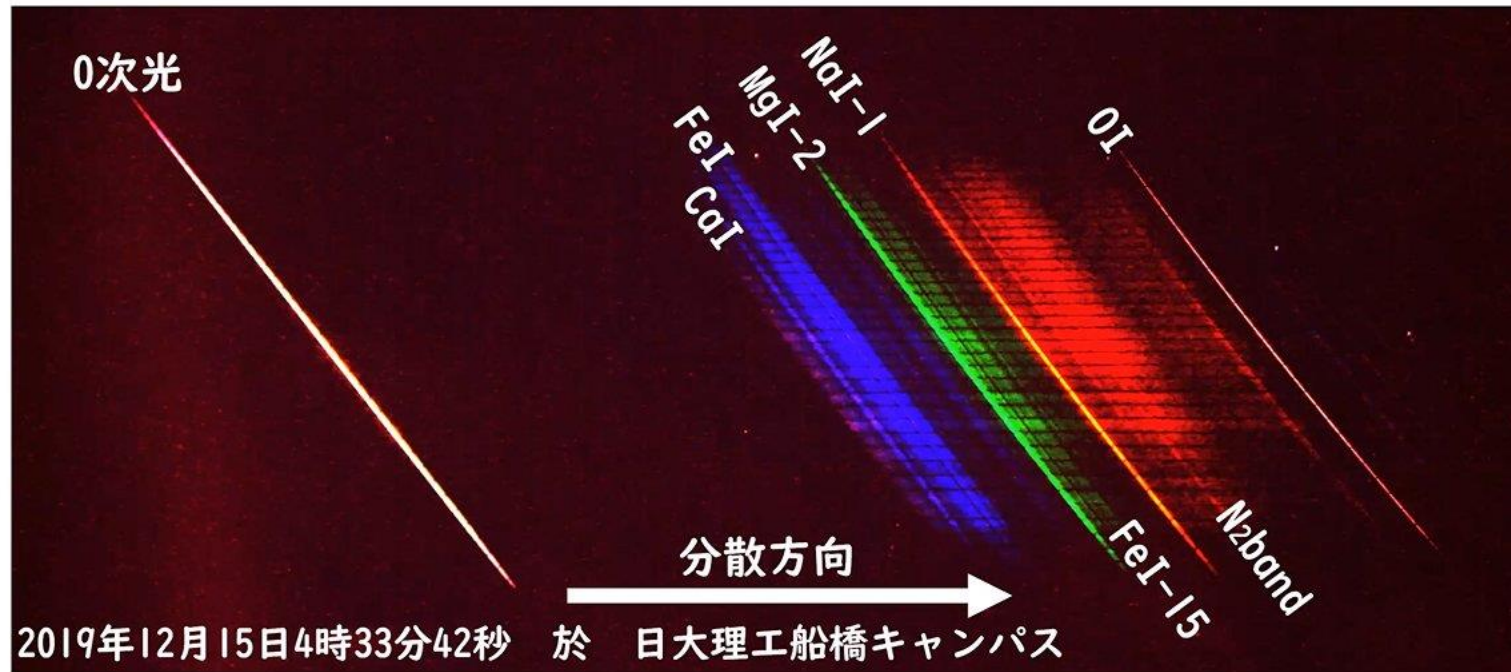
ふたご座流星群メテオロイドの ナトリウム変動量から探る太陽加熱効果の調査

阿部研究室OB 小川巧覽

研究背景

流星とは、彗星や小惑星起源のメテオロイドや惑星間塵が、12～72[km/s]で大気に衝突した際、それらが上層大気が衝突し、衝突励起することでプラズマ発光が起きる現象のことである

流星を撮像・分光することで、軌道や組成がわかるためメテオロイドや惑星間塵の由来となった母天体を間接的に探査することができる。つまり、宇宙に行かずとも太陽系内の小天体を探査できる

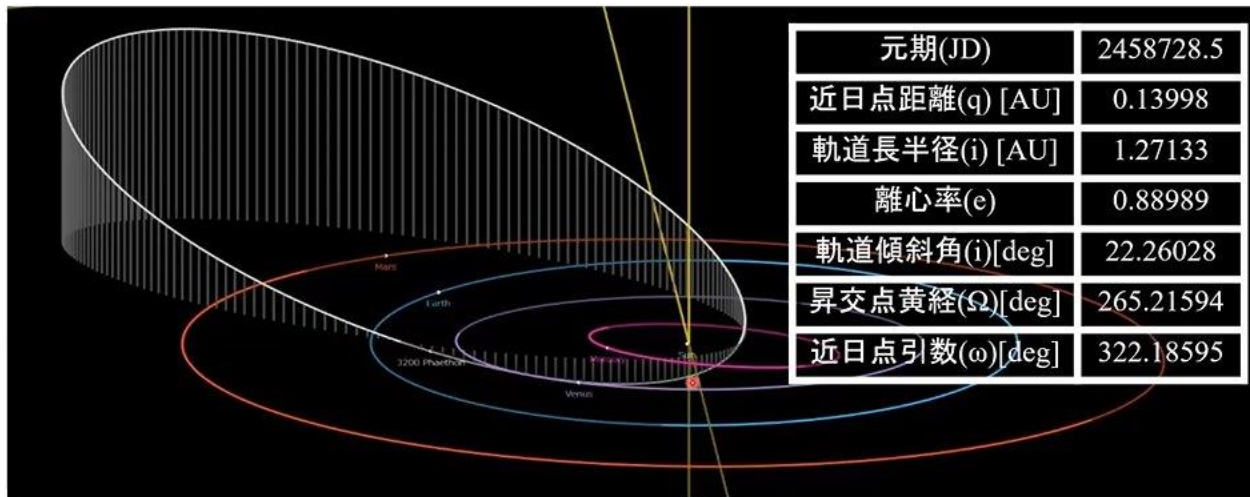


研究背景

ふたご座流星群の母天体は、軌道の類似性から(3200) Phaethonであることが分かっている。(Whipple, 1983)

(3200) Phaethonは、近日点距離0.14AUという太陽に近い軌道を持ち彗星活動も見られる活動小惑星で、ふたご座流星群のZHR(天頂出現数)は150と多いことから過去に活発な彗星活動があったとされ、その際にダスト・トレイルが形成されたと考えられている

このダスト・トレイルの年齢を軌道観測や数値計算で求めているが、数千年~数万年と幅がある(e.g. Ryabova, 1999)



JPL Small-Body Database Browser より



P. A. Taylor, et al. Arecibo Radar Observations of Near-Earth Asteroid (3200) Phaethon During the 2017 Opposition (2019) より

ふたご座流星群のダスト・トレイル 形成年代を分光観測から推定する

そのためには…

ふたご座流星群を数年に渡って分光観測することで、ダスト・トレイル内の異なる空間位置(太陽黄経)で、ナトリウム量に関する統計的なデータを取得する

太陽加熱によるナトリウム枯渇モデルとの比較を行うことでふたご座流星群のダスト・トレイル形成年代を推定する

観測機材

先行研究ではふたご座流星群の観測個数は1997年から2004年にかけて89個(Borovička, 2010)のため多くのデータを取得するため、高感度、広視野の観測機器を用いて、年間の観測個数を増やした



カメラ

記録用PC

- カメラ : SONY ILCE-7S
- 回折格子 : Edmund Optics VIS 600GPM
(波長域400 - 700[nm])
刻線本数は600本/mm

- キャプチャ : BlackMagic Intensity Pro 4K
- キャプチャソフト : UFO Capture HD2
- 観測用PC : i7-4790K+256GBSSD×2(RAID0)

観測結果

今回の解析で用いたデータの一覧

宮崎の観測結果は宮崎大学の前田幸治教授からデータを頂きました

観測年	観測地点	カメラ	レンズ	観測回数
2017	船橋	ILCE-7S-IR	SIGMA 35mm F1.4 DG HSM	2
	宮崎	ILCE-7S	Canon New FD24mm F1.4 L	63
2018	船橋	ILCE-7S-IR	SIGMA 24mm F1.4 DG HSM	5
	宮崎	ILCE-7S	SIGMA 35mm F1.4 DG HSM	79
2019	船橋	ILCE-7S-IR	SIGMA 24mm F1.4 DG HSM	23
	宮崎	ILCE-7S	SIGMA 35mm F1.4 DG HSM	12
2020	信楽	ILCE-7S-IR	SIGMA 24mm F1.4 DG HSM	46

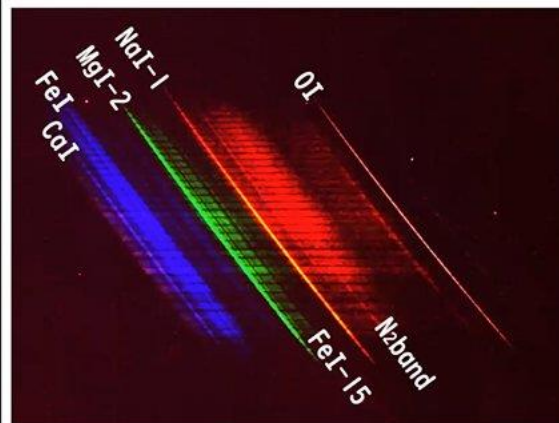
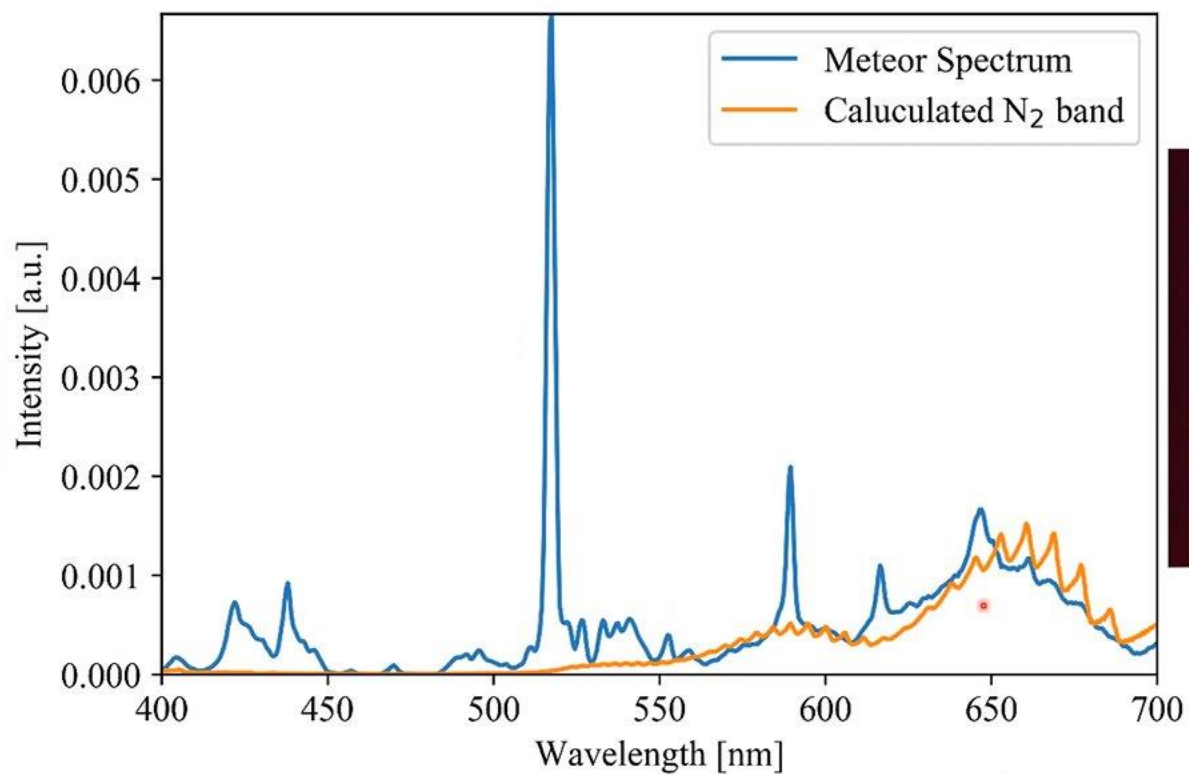
※カメラ名にIRがつく場合は赤外フィルタが無いカメラ
観測波長域が400-700[nm]から380-800[nm]に広がる

なお、軌道から放射点を求め、流星群を識別している

今回の観測で、4年間で230個の統計的なデータを得ることができた

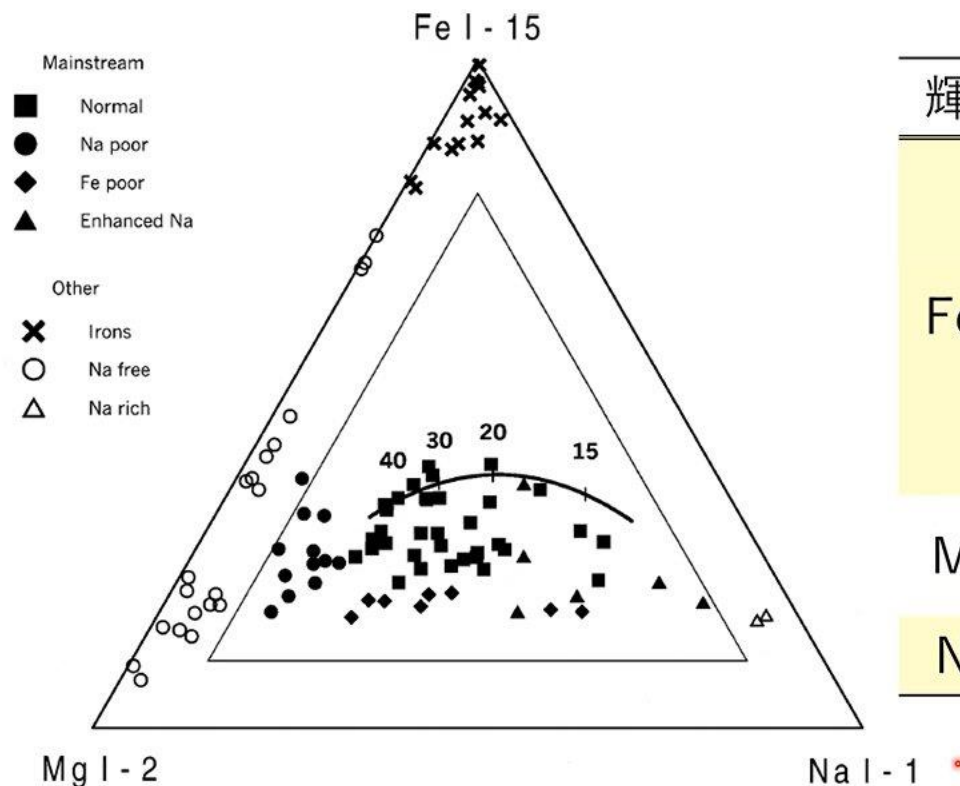
解析手法

得られたスペクトルから、窒素の分子バンド強度を輻射予測コード「SPRADIAN」(Fujita et al., 1997), 各輝線強度をガウシアンフィッティングで出した.



研究背景

また、観測した流星を分類するため、J. Borovičkaが2005年発表した論文「A survey of meteor spectra and orbits」より、Na,Mg,Feの500~600[nm]にある輝線強度比を三角図に示した



輝線名	波長[nm]
FeI-15	526.9541, 532.8042,
	537.1493, 540.5778,
	543.4527, 539.7131,
	542.9699, 544.6920,
	545.5613, 550.1469,
MgI-2	550.6782, 549.7519
	518.36042, 517.26843,
NaI-1	516.73216
	588.9953, 589.5923

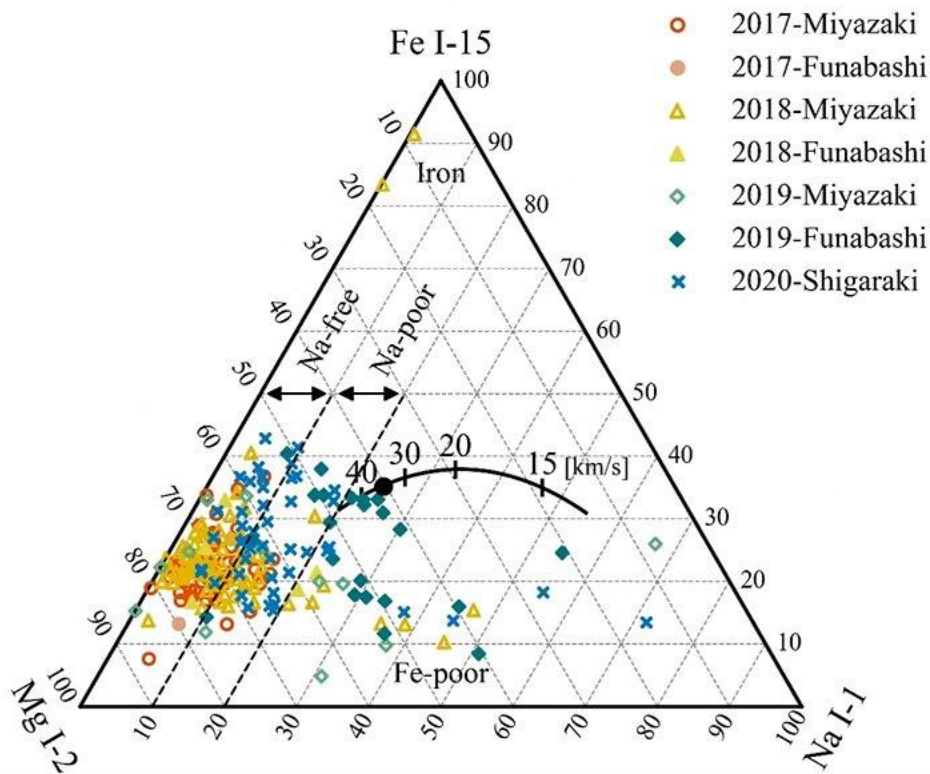
Moore Ch. E: A Multiplet Table of Astrophysical Interest. (1945) より

J. Borovička : A survey of meteor spectra and orbits (2005) より

解析結果

今回の観測結果の発光強度比を三角図に示した

ふたご座流星群の速度35[km/s]で、太陽組成の流星物質が大気に突入したときは黒丸の位置に点がプロットされるはずであるので、ふたご座流星群は全体的にNaが枯渇していることがわかる

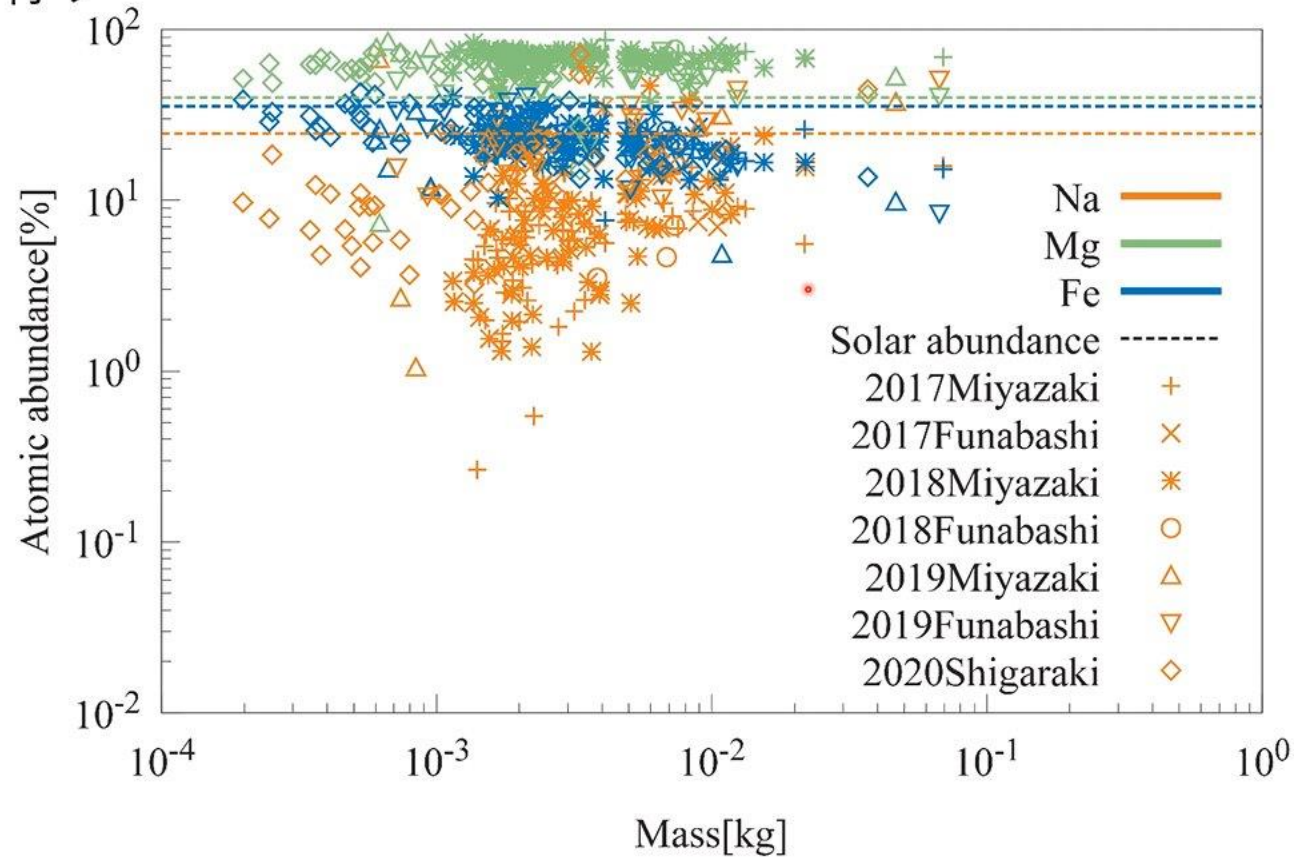


Na free : Na輝線がほとんど見えない流星 (Na < 10%)
Na poor : Na輝線が僅かに見える流星 (10% < Na < 20%)
Fe poor : Na輝線は見えるがFe輝線が少ない流星
Iron : 鉄流星. Fe輝線とMg輝線がほとんどでNa輝線は見えない

中央の曲線は太陽組成の物質が特定の速度[km/s]で突入した際の発光強度比である

解析結果

Na量のみ質量に依存して変動や減少(枯渇)する傾向がある. この分布から年代を推定するため, 質量とNa量に関するシミュレーションを行う



Na枯渇のシミュレーションについて

Čapek et al.(2011)を参考にした。以下の前提により計算する。

- ・ 流星物質は粒子の集合体である(バルク密度 $2.9[\text{g}/\text{cm}^2]$ (Kikwaya et al.,2011))
- ・ 流星物質表面にはNaは存在しない
- ・ 粒子同士の間隙に放出されたNaは即座に宙に放たれる
- ・ Naの放出に関する係数は、正長石と曹長石の値を参考にした
- ・ Naの放出の計算は熱脱離のみ(光刺激脱離、太陽風スパッタリング等の影響は小さいので無視、融点には達しない)



Orthoclase : 正長石



Albite : 曹長石

Na枯渇のシミュレーションについて

- ・ 流星物質は粒子の集合体である

粒子の大きさが10[cm]を超えると内部の温度が上がらずNaが放出されない場合がある

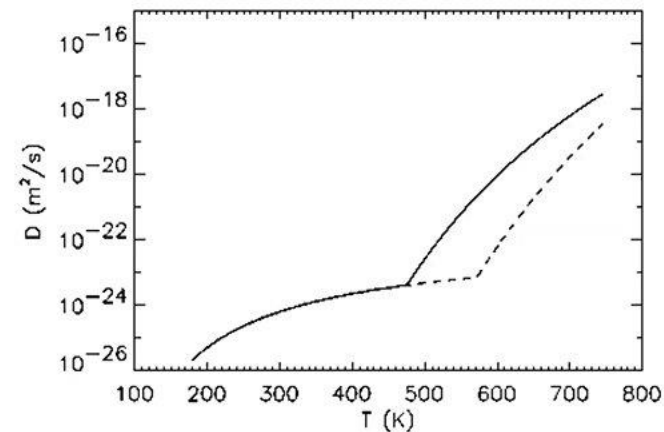
→大きな流星物質を一枚岩と仮定してしまうとNaが放出されない

- ・ Naの放出の計算は熱脱離のみ

太陽加熱の影響は受けるものの、流星物質内の鉱物が溶ける温度までは加熱されないので、昇華ではなく脱離によって放出される

温度の計算例(Čapek et al.(2011))

点線が正長石,
実線が曹長石



Na枯渴のシミュレーションについて

Naの放出に関する係数について,

albite:曹長石 orthoclase:正長石

$D_0(\text{m}^2\text{s}^{-1})$	$Q(\text{kJ mol}^{-1})$	$T_{\min}(\text{K})$	$T_{\max}(\text{K})$	$D_{\text{char}}(\text{m}^2\text{s}^{-1})$	ref.
albite $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$					
2.31×10^{-10}	79.4	473	873	4.3×10^{-18}	h
6.0×10^{-10}	96.0	1123	1213	6.8×10^{-19}	70
1.25×10^{-5}	176.	573	1073	2.5×10^{-20}	i
1.22×10^{-7}	149.	1123	1213	2.1×10^{-20}	c
5.3×10^{-8}	146.5	573	868	1.4×10^{-20}	j ₁
5.70×10^{-7}	175.6	573	1073	1.2×10^{-21}	69
1.0×10^{-22}	12.6	298	348	4.8×10^{-25}	j ₂
orthoclase KAlSi_3O_8					
8.90×10^{-4}	220.0	773	1073	1.3×10^{-21}	k
3.0×10^{-5}	213.0	1018	1324	1.4×10^{-22}	67

Naの放出にはすでにČapek et al.(2011)で(3200) Phaethonの軌道における平均拡散係数が出ているので、それを用いた

j_1, j_2, k が代表的な拡散係数の値

今回は小さな粒径で観測に近いとされた正長石のkの値を用いた

Na枯渇のシミュレーションについて

続いて、流星物質内部の粒子の大きさとお個数を定める。Čapek et al.(2011)では流星物質の総質量が考慮されていなかったため、新たに分布を用意した

$i = 0, 1, 2, 3 \dots N$

$$m_i = m_{min} \left(\frac{m_{max}}{m_{min}} \right)^{\frac{i}{N}}$$

$$n_i = F(m_i) \times \frac{m}{\sum_{n=0}^N m_n F(m_n)}$$

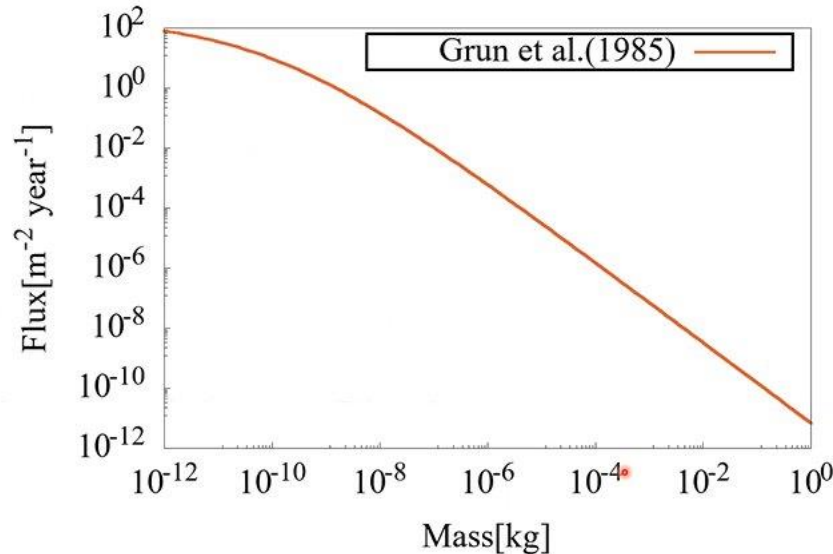
$$n_N = r$$

$$F(m) = 3.15576 \times 10^7 \times (2.2 \times 10^3 \times (m \times 10^3)^{0.306} + 15.0)^{-4.38} \quad (m > 10^{-9} \text{ g})$$

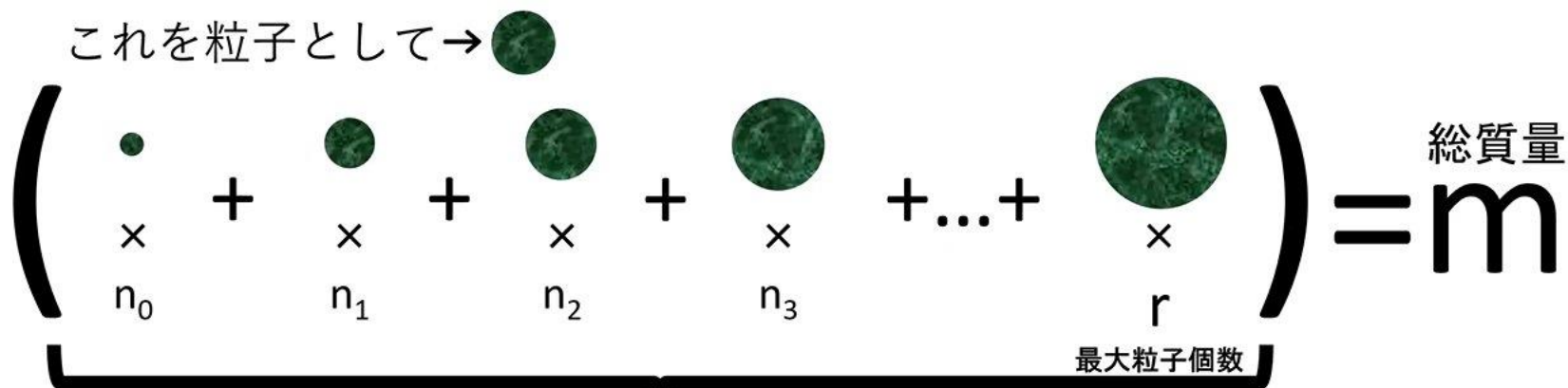
m_i :ある特定の粒子の質量, n_i : m_i の質量の粒子が何個あるか

m :流星体の質量 m_{min}, m_{max} :最大, 最小の質量 r :最大粒子の個数

$F(m)$: Grün et al.(1985)のモデル式による質量分布個数



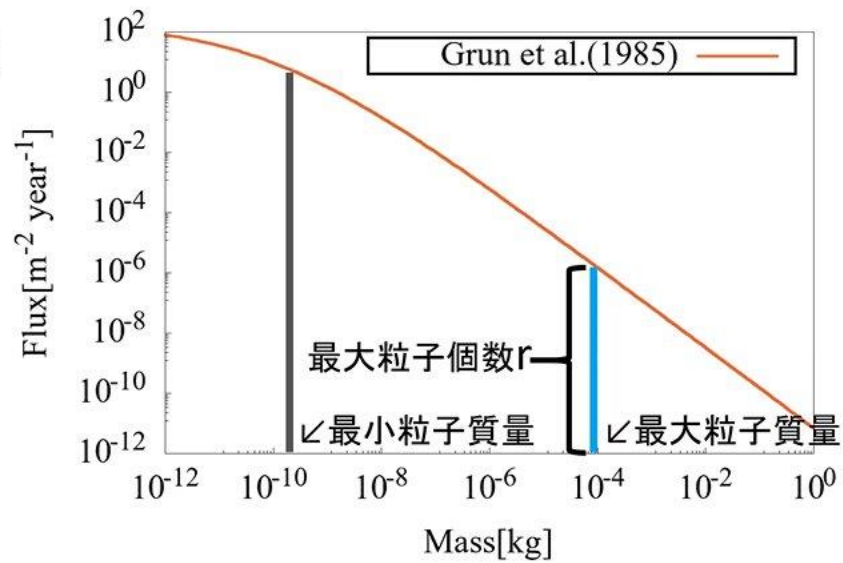
Na枯渇のシミュレーションについて



分割数=N種類

n_i は右図に示した最大粒子個数が r となるよう、それぞれの粒子の個数を相対的に求めていく

また、今回の計算では $N=100$ とし、最小粒子径はČapek et al.(2011) より $16[\mu\text{m}]$ とした



Na枯渇のシミュレーションについて

ナトリウム枯渇の計算

$$C_{Ri}(t) = \frac{8c_i^0 R_i^3}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2} \exp\left(-D_{ch} \frac{k^2 \pi^2}{R_i^2} t\right)$$

c_i^0 は初期ナトリウム含有量[m⁻³], tは時間, R_i は粒子の半径(半径は粒子のバルク密度から求める)

$$C(t) = \sum_{i=0}^N n_i C_{Ri}(t)$$

C(t)は流星体全体のナトリウム量. 流星体全体のナトリウム比が知りたいので, C(t)/C(0)の値を計算する.

先ほどの式のrとこのtを決めれば, 質量毎のNa枯渇率の傾きは一つに決まるので, この特性を利用して年代推定を行う

Na枯渇のシミュレーションについて

シミュレーションの一例

粒子分布の特徴は、

- ・ 質量 m が小さい流星物質ほど大きな粒子がない
- ・ 最大粒子個数 r が多いほど、小さな粒子の数が多くなる

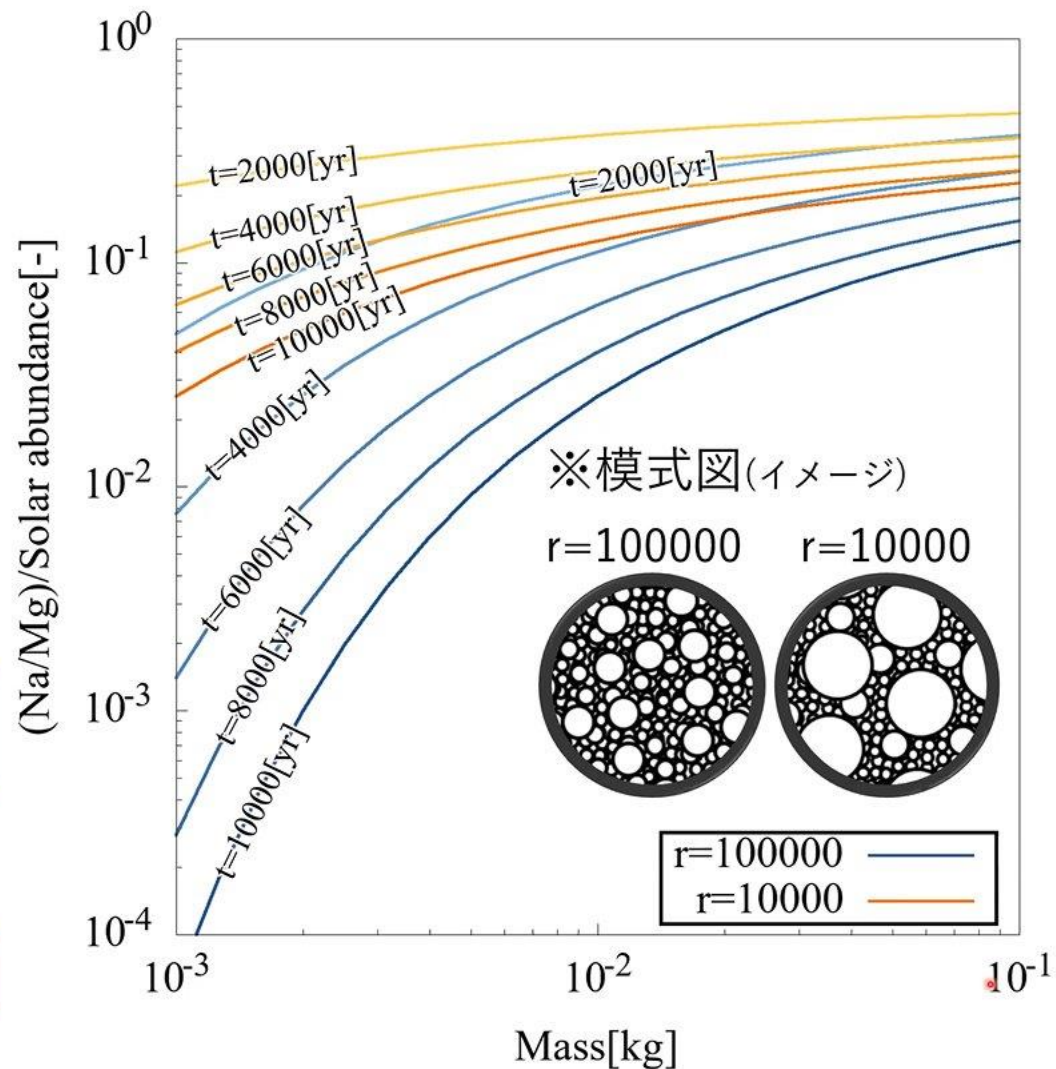
枯渇の計算の特徴は

- ・ 小さい粒子ほどNaが枯渇
- ・ 時間が経つほどNaが枯渇

r の値と時間 t の値によって、Na枯渇の分布形状が異なる



これを利用して年齢の推定



シミュレーションとの比較

シミュレーションとの比較のための二つの仮説を用意した

1. 「短期放出仮説」

ふたご座流星群のダスト・トレイルは、短期間に大量に放出されたものであり、Na分布の「ばらつき」、流星体の大きさと内部の粒子分布に依存する

2. 「回帰放出仮説」

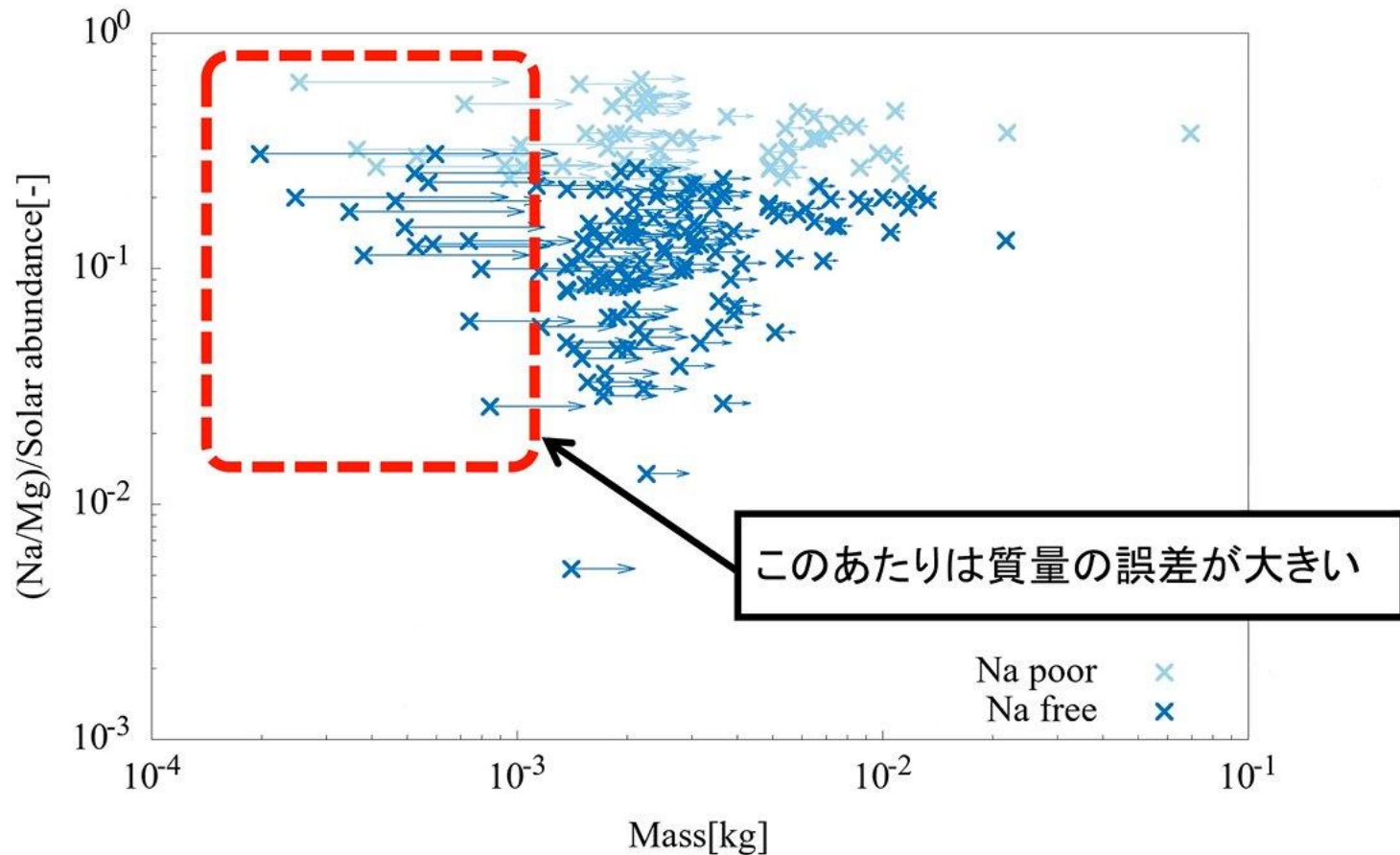
ふたご座流星群のダスト・トレイルは、太陽に回帰(接近)するたびに放出されており、Na分布の「枯渇」は、流星体の大きさと回帰数(年数)に依存する

なお、比較対象は太陽加熱の影響を受けていると考えられるナトリウム量が20[%]以下のNa freeとNa poorの流星のみとした

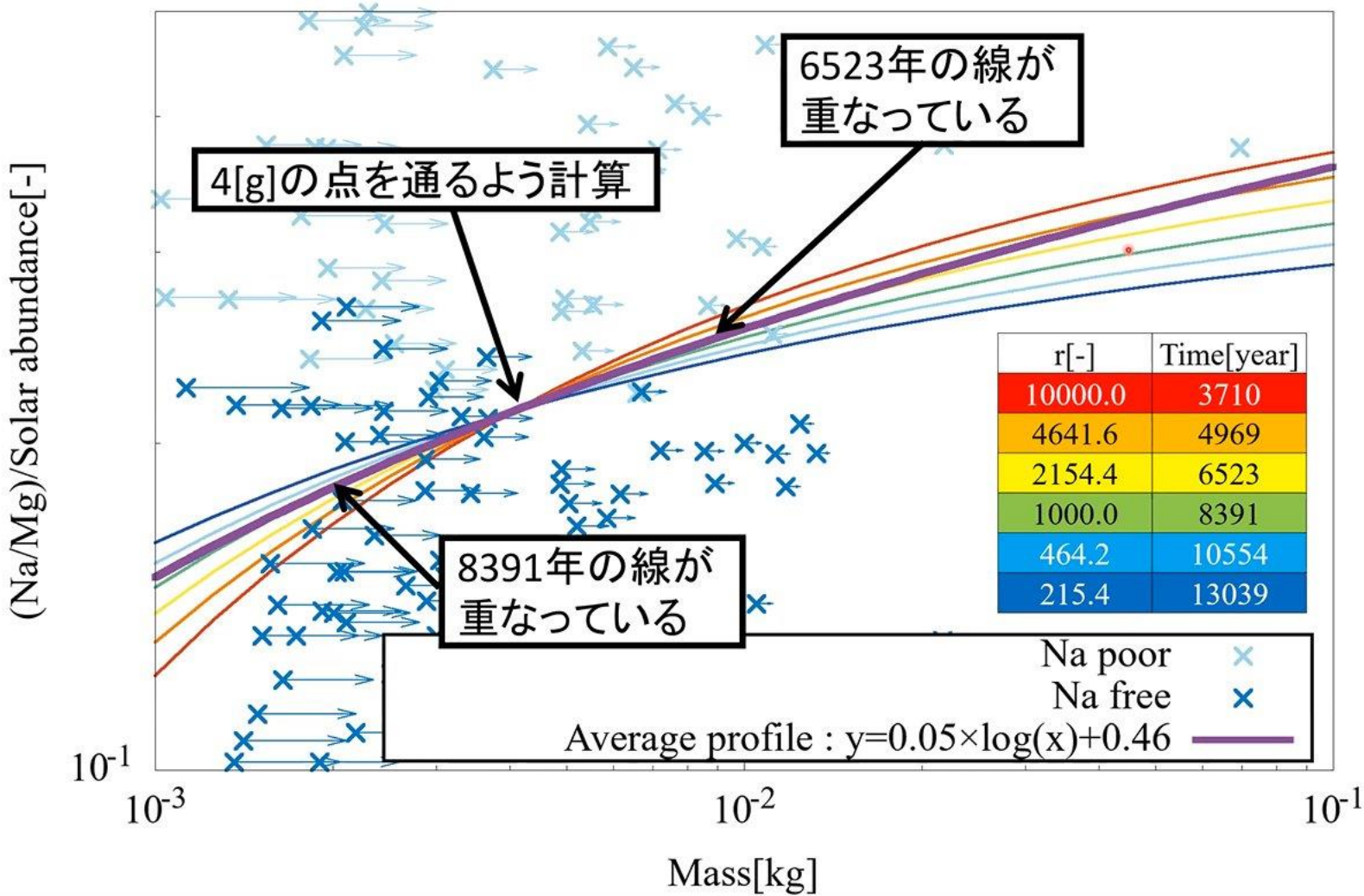
シミュレーションとの比較

また、観測誤差の影響が少ない 10^{-3} [kg]より大きい流星のみ考慮する

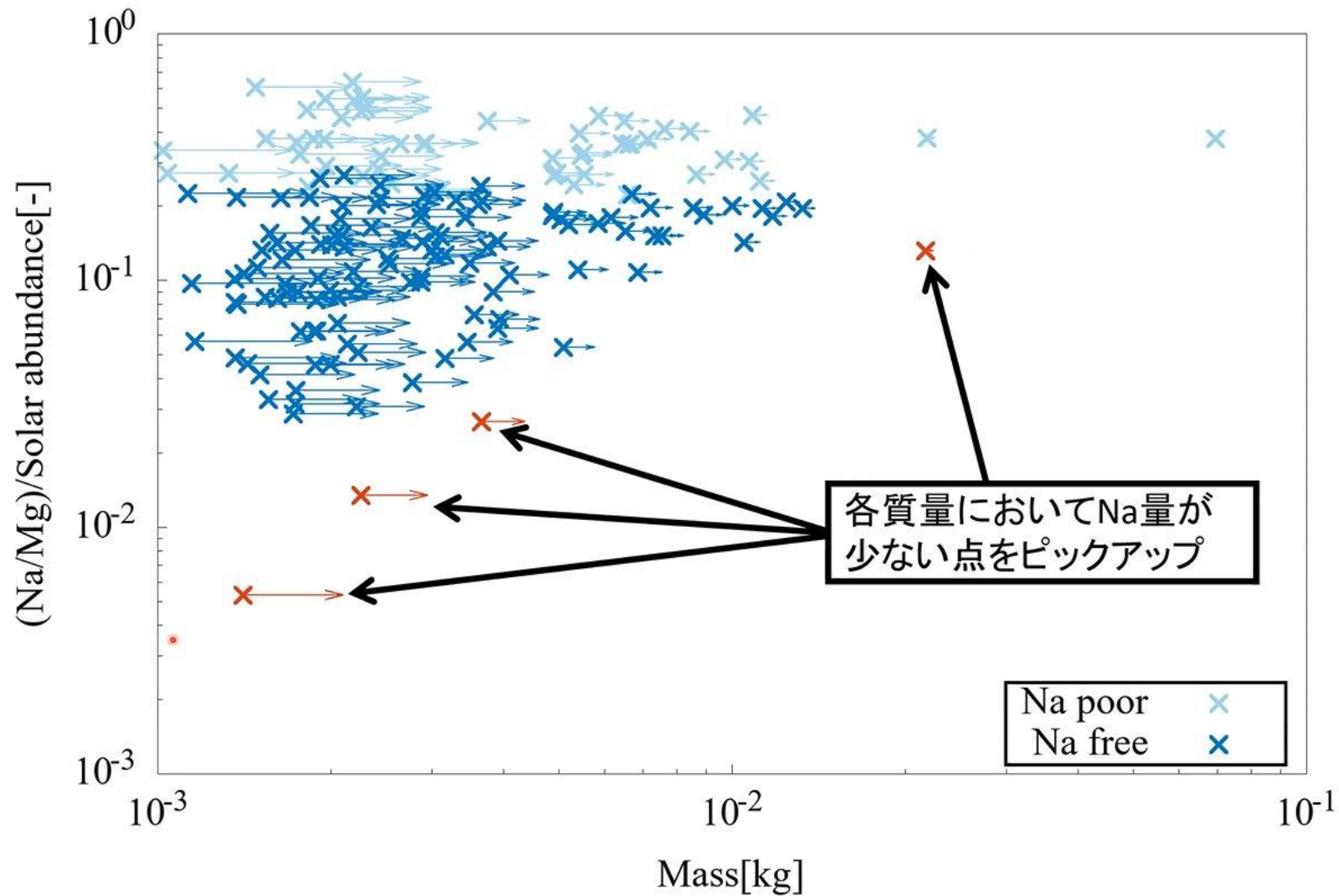
※流星の限界等級は1.1等、前後4フレームほど見えていないので、質量にして0.7[g]の観測誤差が出る



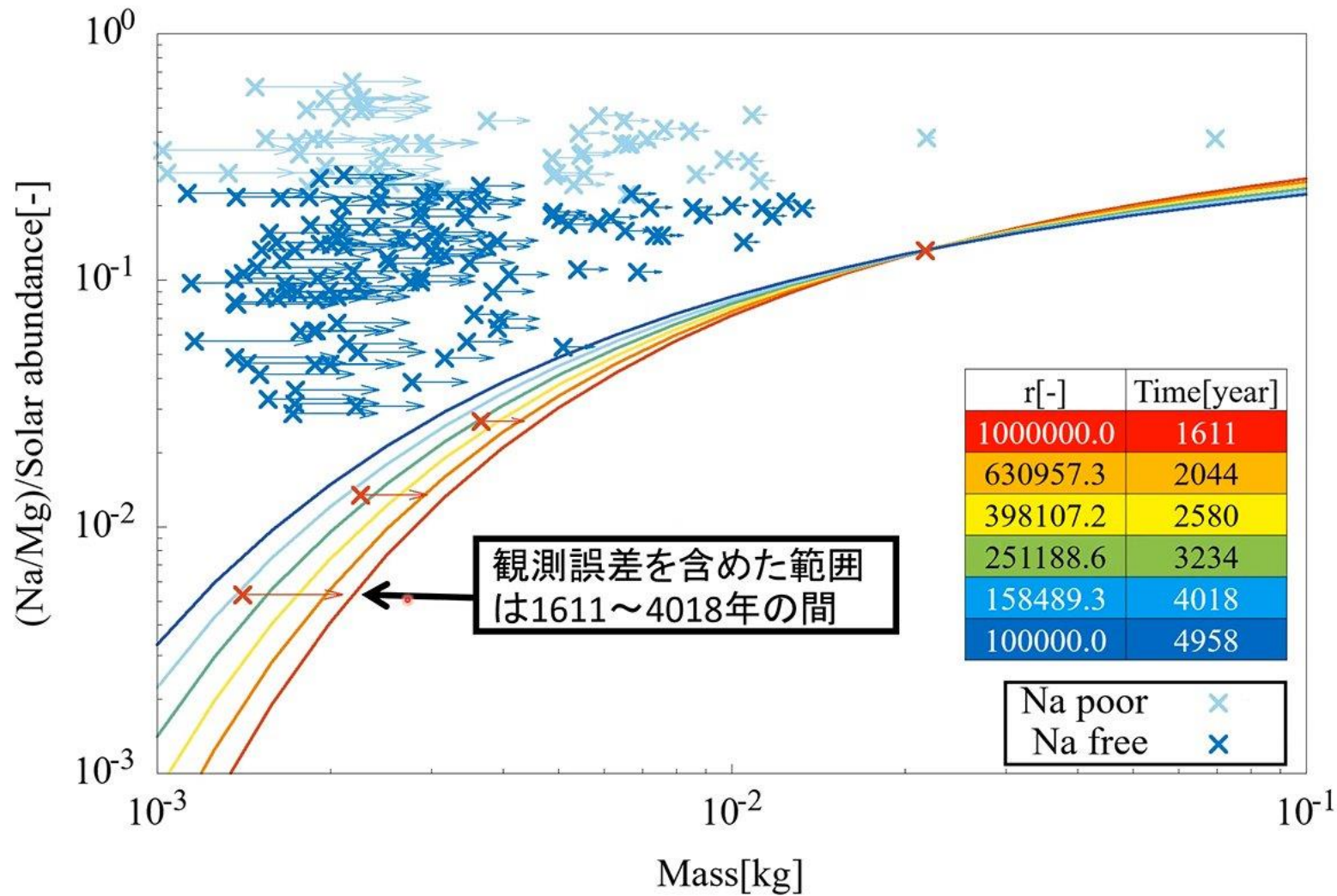
シミュレーションとの比較(短期放出仮説)



シミュレーションとの比較(回帰放出仮説)



シミュレーションとの比較(回帰放出仮説)



結論

ふたご座流星群の分光観測から
2017~2020年の分光観測の結果、ふたご座流星群のNa量は変動を示しており、約80 [%]は枯渇していた

シミュレーションとの比較から
短期放出仮説：流星物質の年齢が均一であると仮定した際、
ダスト・トレイルの年齢は6500~8400年と推定された
回帰放出仮説：流星物質の年齢に種類があると仮定した際、
ダスト・トレイルの年齢は1600~4000年と推定された