

Catalogue of representative meteor spectra 輪読

前田 幸治

代表的な流星スペクトルのカタログ

V. Vojáček^{1,2}, J. Borovička¹, P. Koten¹, P. Spurný¹ and R. Štork

ボヤーチェク、ボロヴィチュカ、コテン、スプルニー、シュトール

1. 科学アカデミー天文学研究所 オンドレヨーフ天文台 チェコ共和国

2. 天文学研究所 プラハ Charles大学 数学・物理学部 チェコ共和国

受付：2014年9月24日 受理：2015年5月6日

概要

- 目的： この論文では、低解像度の流星スペクトルのカタログを提示。ここには、散在流星、小流星群、および主要流星群を含む。+2から-3等級の範囲で、流星体の大きさにすると1から10mmのサイズに相当。
- 方法： 二点ビデオ観測により、ここに載せたすべての流星の日心軌道が計算されている。ほとんどの観測が2006年から2012年までの主要群の活動期間中に実行。スペクトルはMg、Na及び鉄の低温輝線の相対強度を元に分類。
- 結果： 群流星のスペクトルは、みずがめ座 δ 南流星群とふたご座流星群の一部を除いて、通常の組成であることが判明した。ふたご座流星群では、Na含有量の多様性が見られた。Naの見られない（Naフリー）流星には3つの集団があった。第一の集団は鉄流星で、小惑星-コンドライト起源を持つ。しかし、その中に1つだけ、短近日点距離（0.11 AU）の流星があった。第二の集団は、太陽に接近する軌道を持っており、それによりNaは、熱解離（昇華）によって枯渇。第三の集団は彗星起源のNaフリー流星体。これは、オールト雲の中で、彗星表面への宇宙線の長時間暴露によってできた被膜の分解（風化）が、起源なのかもしれない。

目次

1. Introduction
2. Observations and equipment
3. Data reduction
4. Description and classification of the spectra
 - 4.1. Description of the spectra
 - 4.2. Classification of spectra
5. Meteoroid orbits
 - 5.1. Relation of meteor orbit to spectral classification
 - 5.2. Iron meteoroids
 - 5.3. Na-free meteoroids
 - 5.3.1. Sun-approaching meteoroids
 - 5.3.2. Cometary Na-free meteoroids
 - 5.4. Na-rich meteoroids
 - 5.5. Normal meteoroids
 - 5.6. Fe-poor meteoroids
 - 5.7. Na-poor meteoroids
6. Catalogue (20page)
7. Conclusions
- References (29)

1.はじめに

母天体（彗星、小惑星）

流星体



流星

地球に衝突

軌道



速度、飛跡



起源(彗星的、小惑星的)



化学組成



スペクトル

流星スペクトルの研究の歴史

- 1860年代 A. S. Hershel 眼視観測で開始 (Millman1963)
- 19世紀末以降、写真技術で流星スペクトル(sp)観測 (Millman1980)
- 第二次世界大戦前まで、流星spの写真での研究は多くはなかった

ただし、1930年台以降にP. Millmanによる体系的な研究

- 1950年代から、流星の分光器は、プリズムから透過型回折格子に進歩 大規模な流星分光観測プロジェクトが、米国、カナダ、旧ソ連、そしてその後、旧チェコスロバキアで行われた (Ceplechaら、1998)
- 1971年 Hemenwayら 最初の高感度ビデオ技術

他にもテレビ技術およびテレビデータ整約方法が発展

Millman & Clifton (1975)、Mukhamednazarov & Maltseva (1989)、Borovicka & Bocek (1995)、およびZenderら (2004)

流星スペクトルの構成と同定

- 流星スペクトルは、いくつかの分子バンドが付随した原子輝線と、連続スペクトルから構成
- 高分散写真スペクトルの輝線を同定した大規模なリストを公表 Halliday (1961) , Cepplecha (1971) , Borovicka (1994a)
- 輝線を低温及び高温の2成分に分けた Borovicka (1994b)

流星スペクトルサーベイ観測

- 流星分光のこの長い歴史にもかかわらず、流星スペクトルの広範囲のサーベイ観測はほとんどなし
- Harvey (1973) は、500の写真画像の流星スペクトルの目視検査の統計

Borovickaら (2005)  後ほど詳細

高感度ビデオ技術で97個のsp, 散在流星の+3~0等スペクトルは、Mg, Na, 鉄の相対的な輝線強度で分類
3つタイプのNaフリー流星を発見

- 本論文は、その研究を拡張し、散在と群流星両方で84個の流星spのカタログを提示
- 更に高感度ビデオ技術使用

ビデオspの特徴

写真sp 高分解能

ビデオsp 低分解能 数本の輝線
高感度 暗い流星のスペクトルが撮れる
本研究では、+2~-3.5等まで観測可能
 限界は、感度と飽和で決まる
流星体のサイズは1~10mm

ビデオスペクトルで見られる輝線 → 詳しくは4章

- たった4種の隕石（コンドライト）的要素（ナトリウム、マグネシウム、カルシウム、および鉄）
- O、N、およびN₂は大気起源

スペクトルカタログの意義

- このカタログの流星

1年のさまざまな期間のいろいろな時間帯

散在流星と主要流星群

得られた流星光度の範囲で、すべての一般的なタイプが含まれている ⇒ 網羅的

- Borovickaらの研究（2005）との比較

より広い視野のイメージインテンシファイア

⇒ 波長範囲の広いスペクトル

- このカタログは将来の流星のスペクトル研究のための標準として役立つことを意図

この論文前後の研究の流れ

流星スペクトル研究のタイプ（ビデオのみ）

- 単発の流星のスペクトル解析
- 流星群のスペクトル
- 流星スペクトルサーベイ（この論文）

以下はこの論文をreferしたものを中心に

[Borovička et al. \(2005\) Icarus](#) 最初のサーベイ （チェコ）

[Vojáček et al. \(2015\) AA](#) この論文 （チェコ）

[Vojáček et al. \(2017\) IMC p109](#) 「ビデオ観測で得られた微光流星の特徴」

-5.5～+3.5等、94個、流星体の構造

研究の流れ(2)

[Matlovič et al. \(2017\) IMC p99](#) 「流星スペクトルの研究」 (スロバキア)
AMOSの結果

[Matlovič et al. \(2019\) AA](#) 「中間サイズ流星体のスペクトルと軌道サーベイ」

AMOSの結果、202個、mm～cmサイズ、サイズの異なる流星体の特徴分布を調べる。非常に多くの鉄流星体が小惑星型軌道で発見。明るい流星ほどNaが多い。大きな流星では、鉄流星は少ない。ハレー型ではspの不均一性が高い。CAPとSDAは特に不均一性が大きい。CYGとTAUはspが類似で同じ母天体か

[Vojáček et al. \(2019\) AA](#) 「流星ビデオ観測による小流星体の特徴」

(チェコ)

152個、-5～+3等、Na,Mg,Feのライトカーブの比較、発光モデルとフィッティング、流星の尾とNaの関係、Naの量と構成する粒サイズの考察。Na欠損は流星の構造に依存。

[Čapek et al. \(2019\) AA](#) 「小さな鉄流星ーライトカーブの観測とモデル化」 (チェコ)

小流星のかなりの割合は鉄流星、低速の鉄流星を観測し、アブレーションのモデル化。鉄の液滴が表面からはがれて、その後蒸発するモデルでライトカーブ(LC)を計算し、観測と比較。LCは速度に依存せず。

Icarus 174 (2005) 15- 30

A survey of meteor spectra and orbits: evidence for three populations of Na-free meteoroids

流星スペクトルとその軌道のサーベイ：
Naを含まない3タイプの流星体の存在の証拠

J. Borovička *, P. Koten, P. Spurný, J. Bocek, R. Štork

Astronomical Institute of the Academy of Sciences, 251 65 Ondřejov Observatory,
Czech Republic

前田 幸治

概要

- 流星体のサイズ1~10 mm (+ 3~-1等) の97個の主に散在流星のスペクトルの調査結果
- 大多数の流星では、日心軌道あり
- Mg, Na, Feの線の相対強度に従ってスペクトルを分類
- コンドライト組成の流星体に対するMg, Na, Feの線の理論的な強度と、様々な励起およびイオン化条件を計算
- 流星体のほんの一部のみがコンドライト組成を示していることを見つけた
- Naを含まない流星体に3種の異なる集団があり、調査した範囲のサイズで散在性流星の約10%を占めた
- 第1の集団は、スペクトルにFe線のみを含み、おそらく鉄-ニッケル隕石に関連した小惑星軌道型の流星体
- 2番目の集団は、近日点距離が小さい軌道 (0.2 AU) の流星体。これは熱脱離によってNaが欠損
- 3番目の集団は、ハレー型彗星型軌道に帰属。このNaを含まない物質は、オールト雲中で宇宙線の彗星表面への照射によって形成された可能性がある。ハレー型軌道の流星体の組成は多様で、おそらく彗星の内部の不均一性を反映。平均すると、彗星ダストはコンドライトのFe / Mg比よりも低い。
- 驚くべきことに、鉄流星は、典型的なアポロ型軌道を持つmmサイズの流星体の中では優勢。また、ふたご群の流星体にNa量の変動が大きい。これは、ふたご群の流星体が同時に母天体から放出されなかったことを示唆。

構成 1

1. Introduction

背景

2. Observational techniques and obtained data

観測方法とデータ

3. Measurement of the spectra

測定方法

4. Mg-Na-Fe line intensities

Mg-Na-Fe三角組成図

5. Spectral classification of meteors

流星の分類

5.1. irons

5.2. Na-free meteoroids

5.3. Na-rich meteoroids

5.4 Mainstream meteoroids

5.4.1 Normal meteoroids

5.4.2 Na-poor meteoroids

5.4.3. Enhanced-Na meteoroids

5.4.4 Fe-poor meteoroids

構成 2

6. Orbital classification of meteoroids

軌道分類

7. Material strength classification of meteoroids

ライトカーブ分類

8. Discussion of meteoroid populations

各グループの詳細

8.1. irons

8.2. Na-free meteoroids

8.2.1. Sun-approaching meteoroids

8.2.2. Cometary Na-free meteoroids

8.3. Na-rich meteoroids

8.4. Normal meteoroids

8.5. Fe-poor meteoroids

8.6. Na-poor meteoroids

8.7. Enhanced-Na meteoroids

9. Discussion

議論

2. 観測方法とデータ

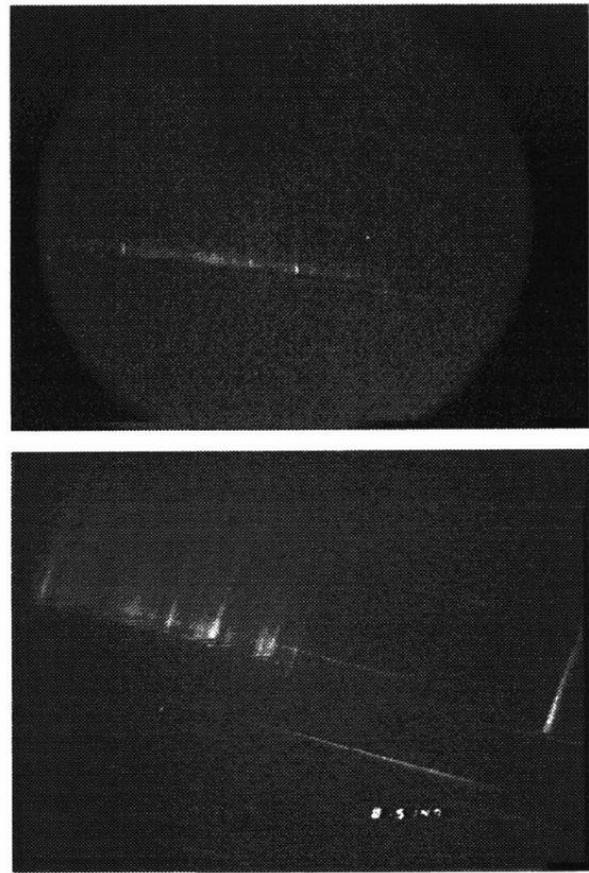


Fig. 1. Single frames from the video spectra of the same -0.5 magnitude Geminid meteor taken with the two cameras used at the Ondřejov Observatory, the image intensified camera (above) and the SIT-vidicon camera (below). The wavelengths increase from right to left on both frames. The lower frame contains also the meteor image (zero order) on the right. The meteor flew from above down. The spectrum from the SIT-vidicon camera is apparently longer because of the smaller field of view and an instrumental signal persistence.

図1 同じ -0.5 等級のふたご群のビデオスペクトルからの単一フレーム像。オンドレヨーフ天文台で使用されている、I.I.カメラ（上）とSIT-ビジコンカメラ（下）。

波長は両方とも右から左に増加。下のフレーム像には、右端に流星画像（ゼロ次）も含まれる。

流星は上から下へ飛んだ。SIT-ビジコンカメラのスペクトルは、視野が狭く、信号が持続するため、見かけ上長くなる。

3. 観測方法

Table 1
List of the most important atomic lines used to fit the spectra in the 4200–8500 Å range, ordered according to line groups

| λ (Å) | Atom & multiplet | Typical intensity | λ (Å) | Atom & multiplet | Typical intensity |
|------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------|
| <i>Low temperature lines</i> | | | <i>Wake lines^a</i> | | |
| 4226 | Ca I 2 | 80 | 4216 | Fe I 3 | 16 |
| 4273 | Fe I 42 | 30 | 4376 | Fe I 2 | 26 |
| 4308 | Fe I 42 | 25 | 4427 | Fe I 2 | 21 |
| 4326 | Fe I 42 | 25 | 4462 | Fe I 2 | 12 |
| 4384 | Fe I 41 | 45 | 4482 | Fe I 2 | 7 |
| 4405 | Fe I 41 | 25 | 4571 | Mg I 1 | 17 |
| 4920 | Fe I 318 | 11 | 5110 | Fe I 1 | 9 |
| 4957 | Fe I 318 | 16 | 5169 | Fe I 1 | 8 |
| 5047 | Fe I 114 | 13 | 5205 | Fe I 1 | 5 |
| 5182 | Mg I 2 | 200 | <i>Atmospheric lines</i> | | |
| 5269 | Fe I 15 | 23 | 5330 | O I 12 | 47 |
| 5328 | Fe I 15 | 19 | 5436 | O I 11 | 34 |
| 5371 | Fe I 15 | 17 | 6157 | O I 10 | 150 |
| 5404 | Fe I 15 | 15 | 6455 | O I 9 | 17 |
| 5431 | Fe I 15 | 13 | 6484 | N I 21 | 27 |
| 5449 | Fe I 15 | 11 | 7424 | N I 3 | 60 |
| 5528 | Mg I 9 | 22 | 7442 | N I 3 | 120 |
| 5589 | Ca I 21 | 5 | 7468 | N I 3 | 150 |
| 5892 | Na I 1 | 150 | 7774 | O I 1 | 1400 |
| 6163 | Ca I 3 | 4 | 8186 | N I 2 | 400 |
| 6439 | Ca I 18 | 3 | 8218 | N I 2 | 700 |
| 6463 | Ca I 18 | 2 | 8243 | N I 2 | 280 |
| 8194 | Na I 4 | 3 | 8446 | O I 4 | 800 |
| <i>High temperature line</i> | | | <i>Train line</i> | | |
| 4481 | Mg II 4 | 36 | 5577 | [O I] 3F | 31 |

^a Wake lines are low excitation intercombination lines with a small transition probability. They are so named because they are prominent in meteor wakes, i.e., in the radiation forming a “tail” just behind the meteor head. They may be, nevertheless, present also in meteor heads, in particular when the collisional deexcitation rate is low.

Table.1

重要な原子の発光線のリスト。これらは、4200-8500Åのスペクトルのフィッティングで使用

低温線、高温線、ウエイク線、大気線、短痕線に分類されている

注) ウエイクラインは、低遷移確率の励起異重項間遷移ライン。それらは、流星のwake（ウエイク）で目立つ。それは、流星の頭部の直後にある「尾」の発光で顕著であるため、そのように呼ばれる。しかし、特に衝突脱励起率が低い場合は、流星の頭部にも見つかる可能性がある。

4. Mg-Na-Fe三角組成図

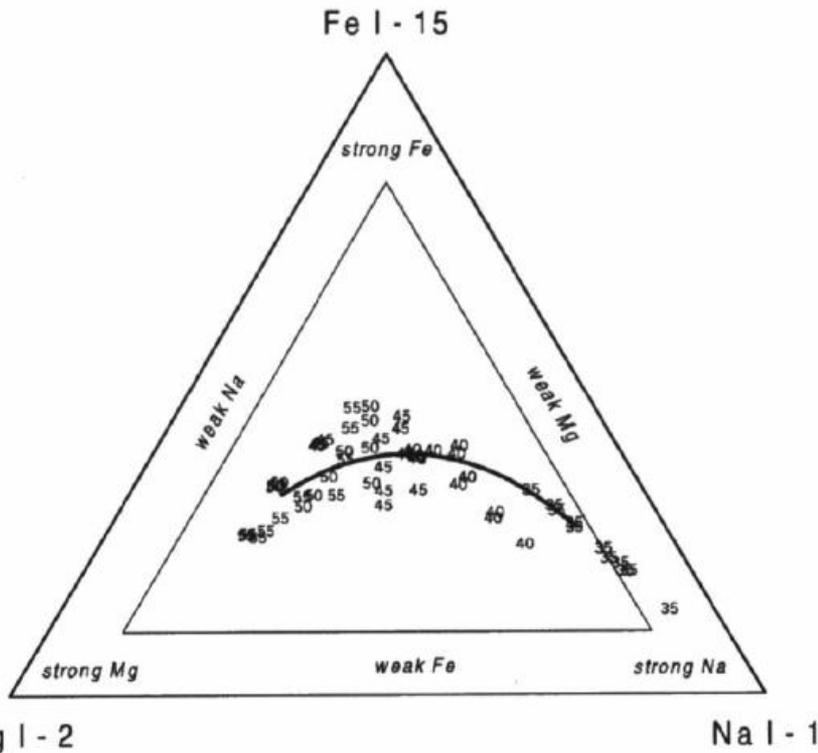


Fig. 4. Diagram showing computed relative intensities of the Mg I (2), Na I (1), and Fe I (15) multiplets in meteor spectra assuming chondritic composition and a wide range of temperatures, densities and sizes of the radiating gas. Solutions with the intensity ratio of Fe multiplets 41 to 15 larger than 3 were removed because such high ratio does not correspond to the observed spectra. The individual results are shown by their temperature values (in hundreds of kelvins). A mean curve is drawn through the points.

- 図4. 流星スペクトルにおけるMg I (2)、Na I (1)、およびFe I (15)線の計算された相対強度を示す図。ただし、コンドライト組成とそのプラズマの広範囲の温度、密度、サイズを仮定。
- ただし、Fe I (41)とFe I (15)の強度比が3より大きい計算結果の時は観測と合わないのを削除。個々の点は、温度を100分の1にした値で示す。(例: 40は4000K) 点を平均して曲線を描いた。

この図は、流星の速度でプラズマの温度が変わり、3原子の強度比が変わることを示している。

4. Mg-Na-Fe三角組成図

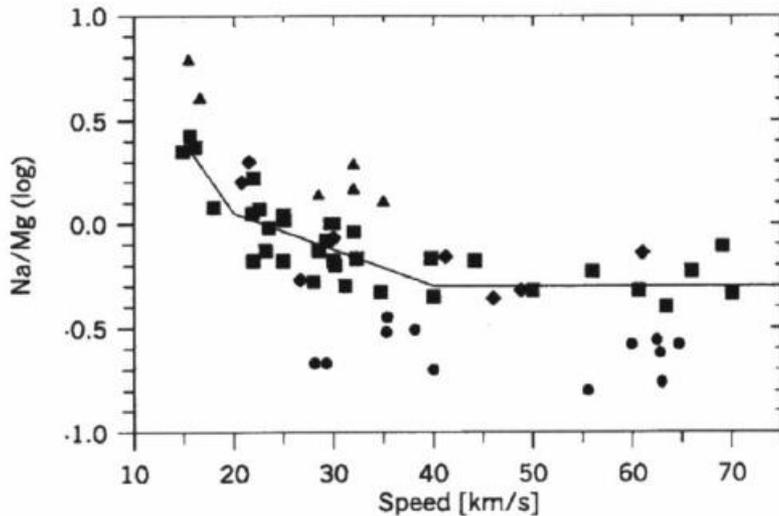


Fig. 5. The observed Mg/Na line intensity ratio in meteors as a function of meteor speed. The approximate fit (solid line) is drawn through the meteors classified as having normal Mg and Na abundances (marked by large symbols). See Fig. 6 for symbol explanation.

図5. 流星速度の関数として書いた流星のMg / Na線強度比。近似線（実線）は、通常のMgおよびNaの存在量を持つと分類された流星（大きな記号でマーク）を使って引かれた。記号は、図6を参照。



※ 縦軸は log に注意

5. 流星の分類

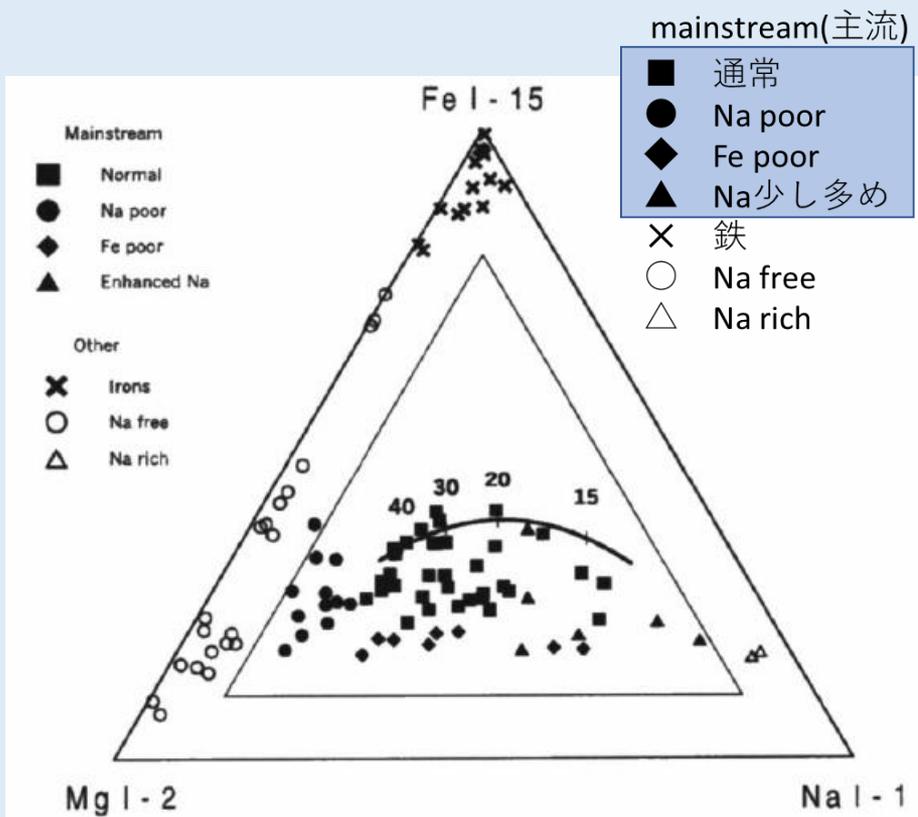


Fig. 6. Diagram showing the measured relative intensities of the Mg I (2), Na I (1), and Fe I (15) multiplets in 96 meteor spectra. This diagram forms the basis of spectral classification of faint meteors. Different classes are marked by different symbols. The solid curve shows the expected range for chondritic composition as a function of meteor speed. The speeds (in km/s) are marked with numbers. For speeds larger than 40 km/s, the line ratios should not change substantially.

図6. 96の流星スペクトルにおける、Mg I (2)、Na I (1)、およびFe I (15)線の観測相対強度の図。この図は、暗い流星のスペクトルの分類を元に作られた。実線の曲線は、コンドライト組成の流星体の速度の関数としての予想値。速度 (km/s)は数字で示す。40 km / sを超える速度の場合、強度比は実質的に変化しないはず。

内側の三角の外側はどれか1つの組成が10%以下に偏った組成を示す。
(どれか1つの組成が80%以上)

5.4.1. 通常のspの流星

図10. しし座流星群のスペクトルにおけるMg I (2)、Na I (1)、およびFe I (15)線の相対強度を示す三角組成図。

コンドライト組成の予想曲線も表示。しし群は高速 (71 km / s) なので、この曲線の左端近くになると期待される。

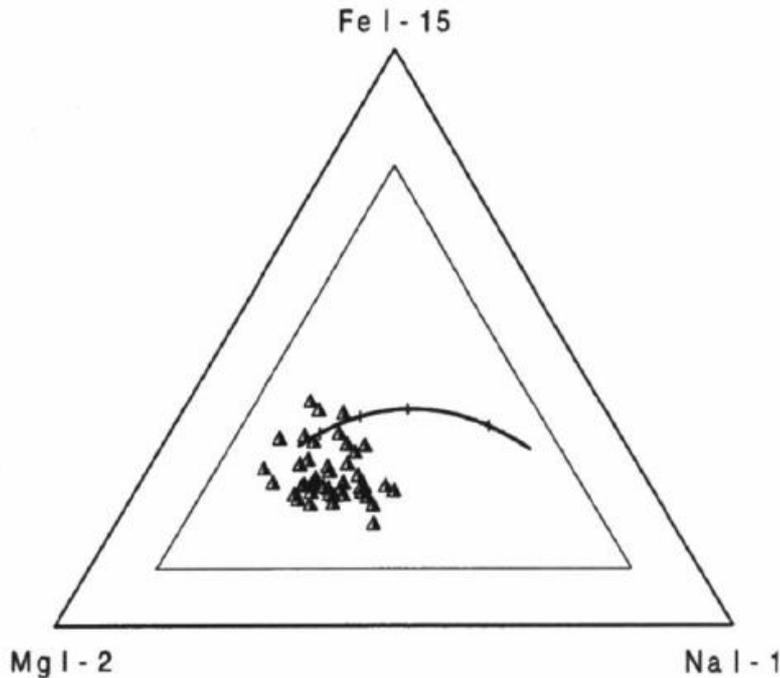
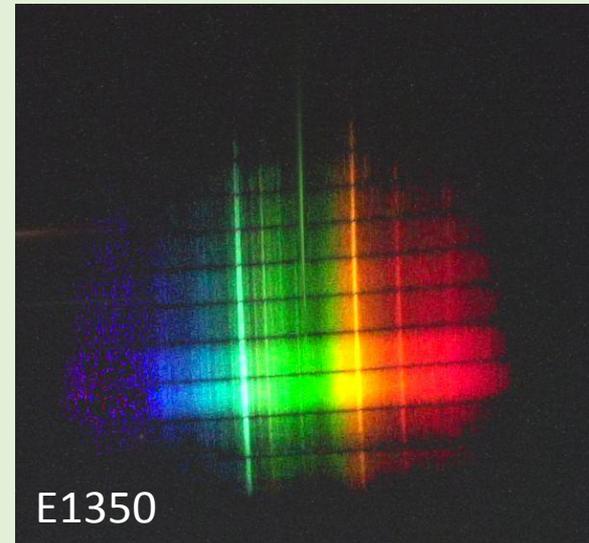


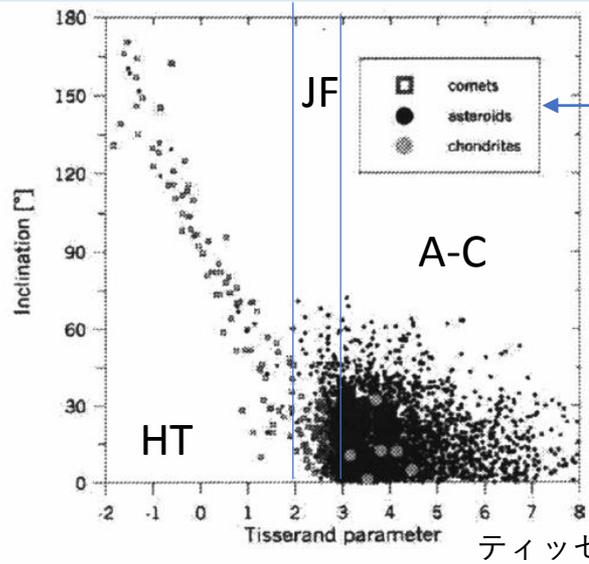
Fig. 10. Diagram showing the measured relative intensities of the Mg I (2), Na I (1), and Fe I (15) multiplets in Leonid meteor spectra. The expected curve for chondritic composition is shown as well. Leonids have high speed (71 km/s) and are expected to lie near the left edge of the curve.



典型的なしし群のスペクトル

6. 軌道の分類 (1)

軌道傾斜角



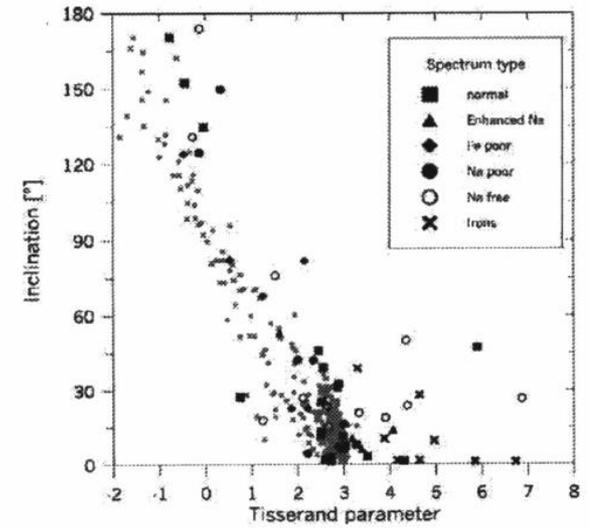
彗星
小惑星
コンドライト隕石

テッセランドパラメータ
軌道パラメータから長短期彗星と
小惑星などを分類する値

HT: ハレータイプ
JF: 木星属
A-C: 小惑星
SA: 太陽接近型
ES: 黄道系の流星群

5種に分類

Fig. 11. Inclination versus Tisserand parameter plot for asteroids, comets,



流星体の分類

- ・ 流星軌道の分布も彗星、小惑星などと同じ
- ・ ただし、流星体には小さな近日点距離で太陽に接近するものがあることに注目 (次ページ)

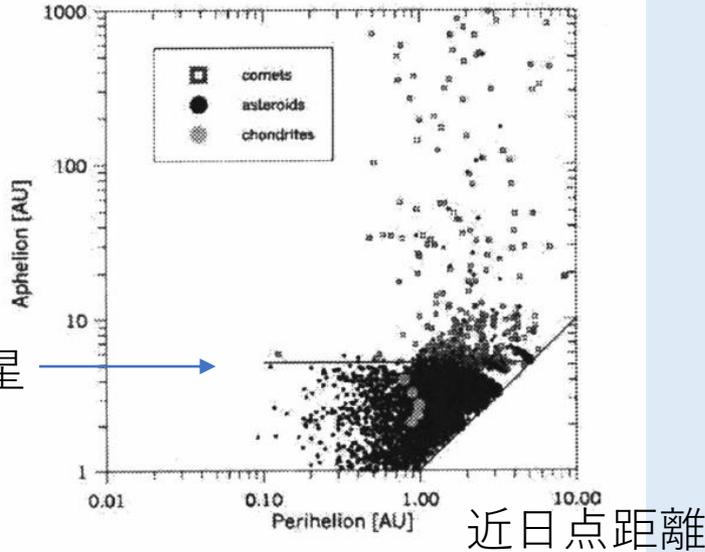
Fig. 13. Inclination versus Tisserand parameter plot for sporadic and minor-shower meteoroids grouped according to spectral classes. Comets are included as small symbols for reference.

参考に彗星は小さな記号として描かれている。

6. 軌道の分類 (2)

遠日点距離

木星



木星の遠日点距離で小惑星的軌道と彗星的軌道を分けられる

• 注目点

彗星と比べて
HTタイプの流星体はとても小さな軌道長半径と遠日点距離を持つ

近日点距離

Fig. 12. Perihelion versus aphelion plot for asteroids, comets, and meteorites. Asteroids from the central part of main belt and asteroids with per-

木星

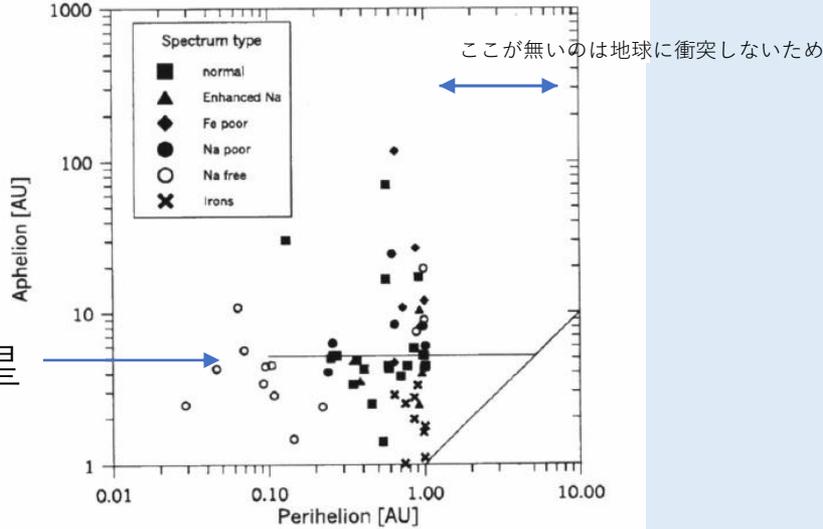


Fig. 14. Perihelion versus aphelion plot for sporadic and minor-shower meteoroids grouped according to spectral classes.

7. 流星体の強さの分類

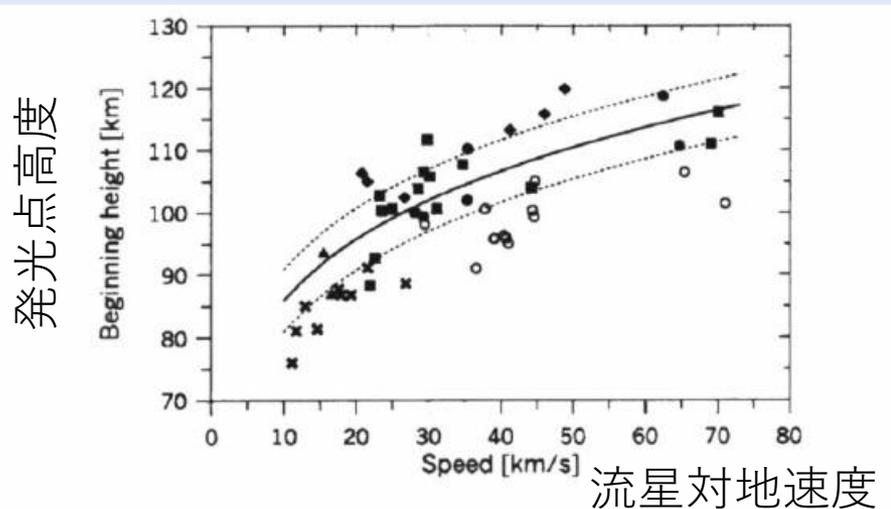


Fig. 15. Meteor beginning height as a function of speed. Different spectral classes are plotted by different symbols (see Fig. 6 for the key). The solid line and two dashed lines mark the mean beginnings of average strength meteoroids and their limits. The equation of the empirical mean line is $h_B = 60v^{0.156}$.

図15. 流星速度と流星の発光開始高度の関係 記号は図6を参照。 実線と2つの破線は、流星体の発光開始高度の平均とその限界を意味する。

経験的平均線の方程式は、

$$h_b = 60 v^{0.156}.$$

一般に、

力学的に強度の強い流星体は、発光点高度が低い

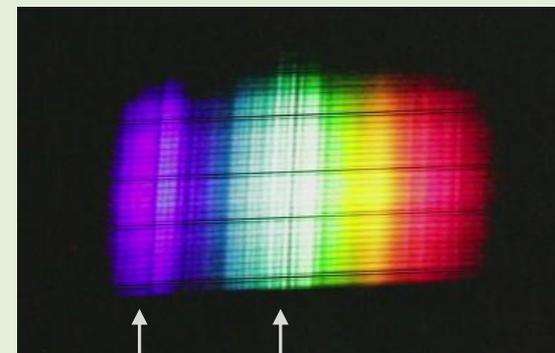
弱い流星体は高い

質量にも依存するが、ここではmmサイズに限っているため、質量はあまり関係ない

この関係を使って、後から流星体の分類の考察に使う

8.1. 鉄流星 (体)

鉄流星のスペクトルは低分解能では、輝線が見えずバンド状



Fe I (24) Fe I (15)

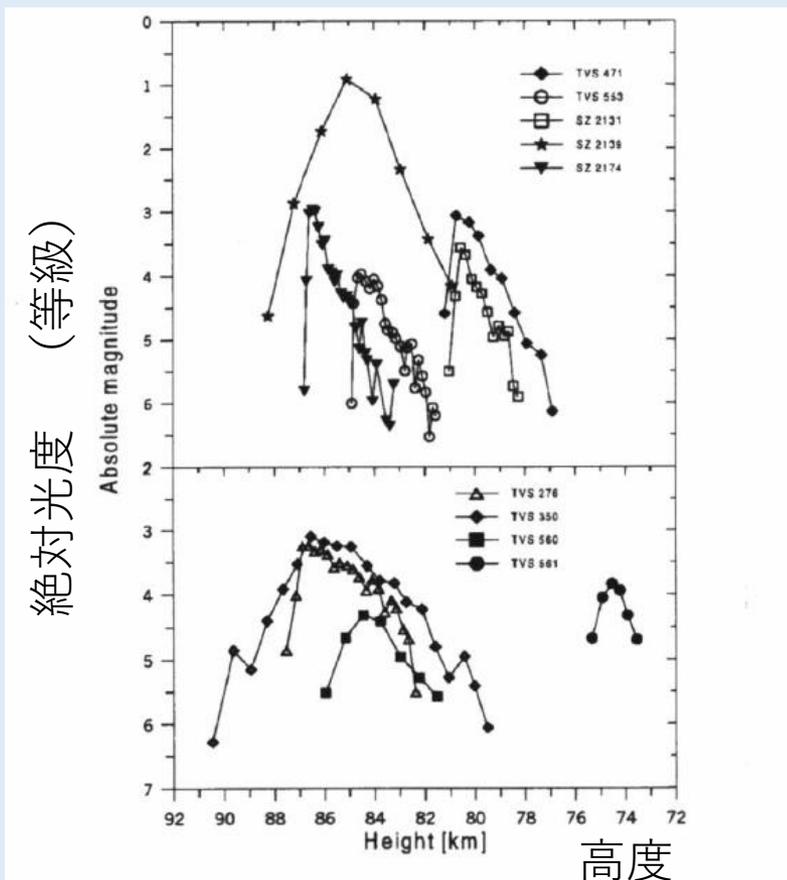


Fig. 16. The light curves of nine meteoroids classified as Irons. To avoid confusion, two separate plots have been constructed.

図16. 鉄流星として分類された9つの流星の光度曲線 (ライトカーブ)

- 強度が強いため、低空で発光
- 光度曲線も光りはじめが最も明るい他にないタイプ → 最近では Capek(2019) のLCの研究あり
- 軌道は小惑星的
- 群流星には無い
- 明るい写真流星スペクトルはほとんどない

8.2-8.7で各クラスを解説 (略)

9. 議論

- Naを含まない3種のグループを発見

Naの欠損は、主に太陽熱

- コンドライド組成を持つ流星体は意外に少ない
石質隕石がほとんどコンドライド組成を持つのに対して。この理由

①宇宙風化

②小粒子（mmサイズ）では、実際に少ない？

- ハレータイプの流星体は、組成のばらつきが大
 - ・ 表面の宇宙風化
 - ・ 彗星の元々の成分が多様性が大きい

議論 (続き)

- 散在流星は群流星より、多様性が大
- 軌道傾斜角が小さく、小惑星帯より内側に軌道のある流星体のほとんどが鉄流星体

ただし、Fe-Niの塊かどうかは、spだけからは分からない

Borovička (2005) 紹介終わり

- 謝辞

岡本 貞夫 様の 2016-03-19 十三塾で発表されたこの論文の訳が、大変参考になりました

- 終わり

3. 観測方法

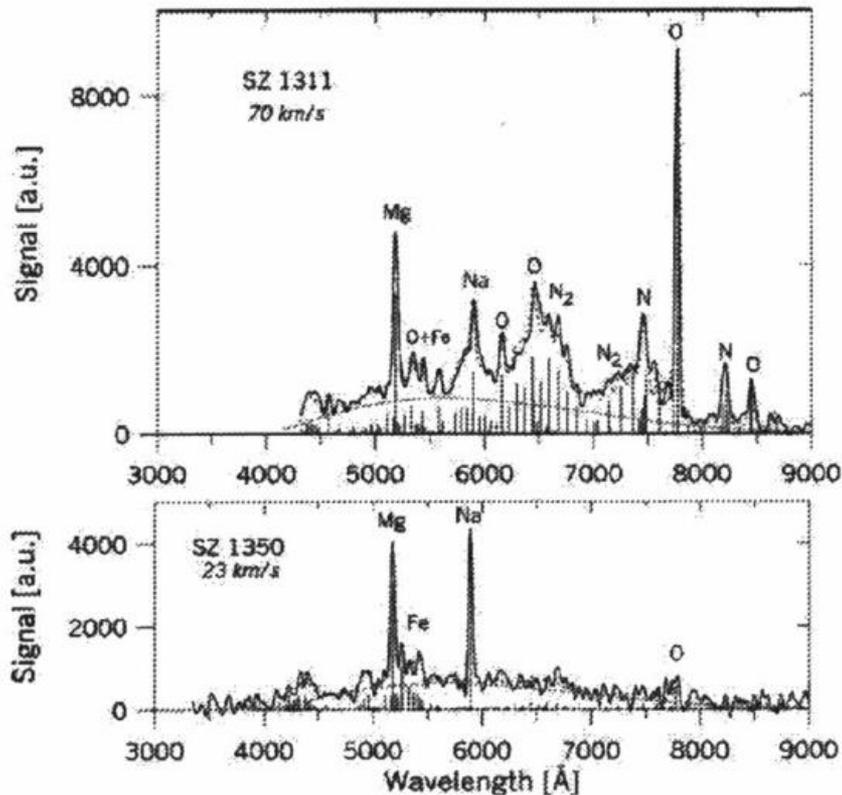


Fig. 3. The photometric scans of two meteor spectra and their fits. The fitting spectrum (dashed line) is a sum of intensities provided by the Planck continuum (smooth line near the bottom) and the line and band emissions (plotted as vertical lines). Observed signal in arbitrary units *not* corrected for spectral sensitivity of the instrument (given in Fig. 2) are plotted on vertical axis. Both spectra were taken by the image intensified camera.

- 図3. 2つの流星スペクトルの測光スキャンとフィッティングされたスペクトル（破線）。Planck連続成分（下部近くの幅広い成分）輝線およびバンド発光（垂直線としてプロット）強度の合計
- 観測された信号（縦軸）は、装置のスペクトル感度が補正されていないので、任意の単位です
- これらの2つのスペクトルは、I.I.カメラで撮影

スペクトルの分解能は高くないので
ラインが繋がっている
FeやN₂はバンド状
分解能は、1ピクセル11A

5.1. 鉄流星 (体)

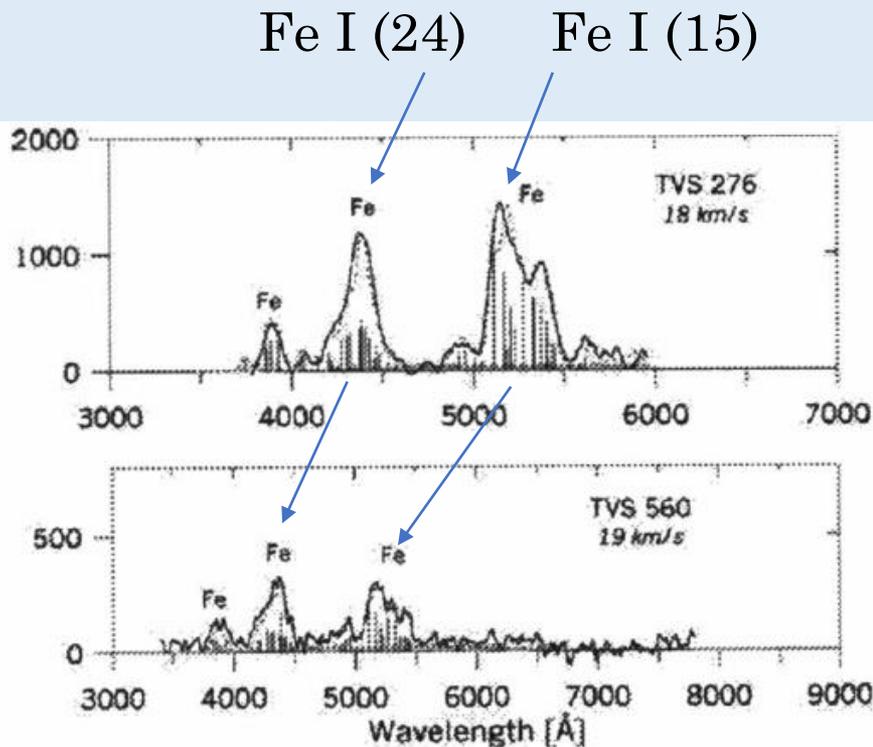
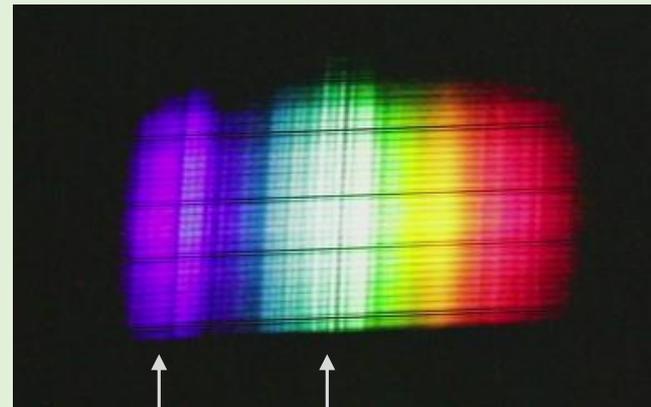


Fig. 7. Examples of two spectra of iron meteoroids and their fits. Both spectra were taken by the SIT-Vidicon camera. The red part of the TVS 276 spectrum was out of the field of view.

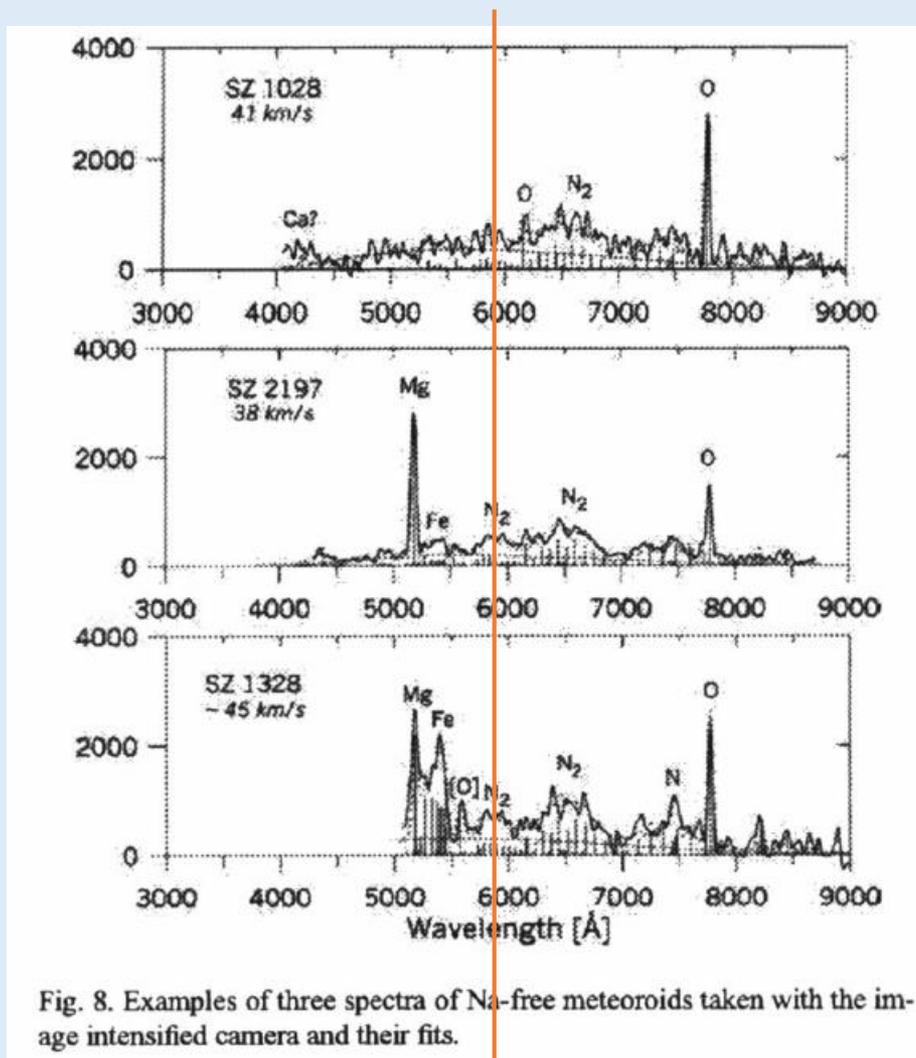
図7. 鉄流星の2つのスペクトルとそのフィッティング例。どちらのスペクトルもSIT-ビジコンカメラで撮影。TVS 276スペクトルの赤の部分は視野の外。

鉄流星のスペクトルは低分解能では、輝線が見えずバンド状



Fe I (24) Fe I (15)

5.2. Naフリー流星



Na I (1) 5892Å

図8. I.I.カメラで撮影したNaフリーの流星体の3つのスペクトルの例とそのフィッティング結果。

