

## いろんな方法で観測された 170km という例外的な写り始めの高度を持っていた明るいペルセウス座流星群火球

Pavel Spurný, Lukáš Shrbený, Jirí Borovicka, Pavel Koten, Vlastimil Vojácek, そして Rostislav Štork

Astronomical Institute, Academy of Sciences, 25165 Ondrejov, Czech Republic (チェコ共和国：

e-mail: [pavel.spurny@asu.cas.cz](mailto:pavel.spurny@asu.cas.cz)

2013年12月17日受付、2014年1月28日正式受理

### 要約

我々はペルセウス座流星群に属している明るい火球を複数の手段による観測したものを報告する。そして、それは 11 台の全天写真カメラ、1 台の高解像度の 300mm 写真カメラ、2 台のデジタル全天空カメラ、1 台の広視野デジタル・カメラ、そして、2 台のアナログ イメージーインテンシファイヤービデオカメラで 2012 年 8 月 12 日 22:29:46UT に同時記録された。

170km という特別な写り始めの高度は、しし座流星群以外で正確な大気中実経路と日心軌道においてこれまでに観測された高高度の流星を最高度のペルセウス座流星群の今回の火球が記録を作った。

さらに、1 台のスペクトルビデオカメラが、火球のスペクトルを記録した。

スペクトルは 130 km より高い所で O 酸素、N 窒素と N<sub>2</sub> 窒素分子の大気発光だけを示している。

110km 以下の高度になると、スペクトルは他のペルセウス座流星群火球と著しく異なる。

永続痕のスペクトルはさらに記録された。そして、永続痕の同時観測はその水平動-上下動を提供した。

キーワード。隕石、流星、流星体

### 1. 序文

写真観測から導き出される流星の写り始めの高度は、ほとんど 70 km から 120 km までの範囲である (セプレハ、1958 年)。

藤原、他(1998 年)によって実施された 1995 年と 1996 年のしし座流星群 TV と写真による観測は、速い流星の写り始めの高度が 160km 付近の高さがあり、それはたぶん観測システムの感度で左右されることを示した。

1998 年しし座流星群に 199 km の写り始めの高さ、初期質量と観測システム次第であると報告した Spurný 他、2000 年 b ほかによって確かめられ、さらに上部に達した。

Spurný 他 (2000 年 b) は、高高度のしし座流星群流星の発光タイプを分析して、130 km より上で発した光が多分熱アブレーションと関係がないだろうことを示唆した。

それらのサンプルからの全ての高高度の流星は 130km より上に拡散する構造の彗星のように示した。そして、それは通常の高さで特有の移動しづく状を考案した。

それらは、高高度の流星の外観を 3 つの異なった段階に分けた：拡散、中間、シャープ。

シャープな (フェーズ) = 段階は、アブレーション・プロセスと連結させられた。

拡散する(フェーズ)=段階の間の光が発光されたのは標準のアブレーション理論によって説明できないので、新しいタイプの発光を考えられなければならない。

Brosch 他 (2001)、ヒル他 (2004)、ポポワ Popova 他 (2007)、そして、Vinkovic (2007) は、流星体表面から噴き出した粒子の熱化が高高度の大気圏での衝突でたくさん生じる。そして、それはそれから高高度の流星の発光を引き起こす。

スパッタリングは高速流星に効果的で、30km/s より遅い流星速度の場合無視できる。

運動体のモデル光度曲線と理論上の形状の両方は、観測と非常に良く一致していた。

高高度の流星 (130km より上の写り始め高度) は、しし座流星群流星 (流星速度 71 km/s) (藤原他、1998; Spurny 他、2000a,b; Koten 他、2006) で大部分が観測されたが、さらに、みずがめ座 η 流星群 (67 km/s)、ペルセウス座流星群 (60 km/s)、こと座流星群 (45 km/s) (Koten 他、2001) とオリオン座流星群 (68 km/s) (Olech 他、2013) の中で。

ここでは、我々はしし座流星群以外の流星が、少しあ高い写り始めとの、ペルセウス座流星群火球を報告する。

我々は、正確な実経路、軌道とスペクトルを提供する。

永続痕の発生は、さらに議論される。

## 2. 器械によるデータ

火球の普通の全天観測はチェコ共和国で 11 カ所観測地点で自動火球観測所(AFO)によって実施された(Spurny 他 2007)。

選んだ流星群の活動期間中、アナログ映像イメージインテンシファイヤービデオカメラは、狭い視野(50°)で 2 カ所の観測地にて使われた。

我々は、2012 年 8 月 12 日 22:29:46 UT に 11 カ所の全天写真カメラによって同時観測されたペルセウス座流星群に属する明るい火球 EN120812 の観測を報告する。

偶然に、それはさらに両方のビデオ観測所で非常に好都合にイメージインテンシファイヤービデオカメラの視野に飛び込んだ。

火球は、また 1 台の高分解能 300 mm 写真カメラ(実経路の末端部のみ)、2 台のデジタル全天カメラ、そして 1 台の広角デジタルカメラによって記録された。

さらに、1 台のスペクトルビデオカメラは、火球のスペクトルとその永続痕を記録した。

観測地点の位置と地上への EN120812 の投影は図 1 で示されている。そして、基本的詳細は表 1 にリストした最終の作業で使った全てのカメラを記載している。

測定について、フィルムは 5000 dpi(ドット/インチ)の解像度で写真スキャナでスキャンされた。そして、ビデオカメラのアナログ信号はリアルタイムに PC でデジタル化された。

直接の写真イメージングに加えて、各々の AFO(自動火球観測所)は、5000samples/s のサンプリングレートで、-1 等限度の感度(月のない夜)で 高速光測定器を備えている。

したがって、限界感度より明るい火球の光度曲線に関する非常に詳細な情報が得られている。

---

表 1。

EN120812 ペルセウス座流星群の記録とこの研究に使われた写真、ビデオ、デジタルカメラ。

注. DSLR は、デジタル一眼レフ・カメラを表す;

タイプ “f” は、写真フィルム、“a” はアナログ、そして “d” はデジタル記録を表わしている;

解像度は、ピクセルである;

FOV は、視野である。

イメージーインテンシファイヤーカメラは同じイメージーインテンシファイヤー Mullard XX 1332 を備えていて、1 秒につき 25 フレームで動かされた。

スペクトルビデオカメラは 600 本/mm でグレーティングを備えていた。そして、全ての DSLR カメラの露出時間は 31.5 秒であった。

図 1。

ENL20812 ペルセウス座流星群が記録された場所の概要表示と中央ヨーロッパ部の地図上のその大気中の実経路の投影。

黒い円は、ENL20812 火球が AFO によって記録された観測地をマークし、黒い×はそれ以外の検出としてマークしている。

他の検出は以下の通りである：

Ondrejov の 300mm レンズ写真カメラ、イメージーインテンシファイヤーによるビデオ、イメージーインテンシファイヤーによるスペクトルビデオ、そして全天 DSLR カメラ；

Kunzak のイメージーインテンシファイヤーによるビデオ、と全天 DSLR カメラ；

Pancir 山の広視野 DSLR。

---

我々はそれほど多くの異なる機器で前述の明るい火球をこれまで記録したことがなかった。それが我々にこの火球に関して複合的な独特的な機会と信頼できる結果を初めて得た。我々はさらに、1 つの流星に対して数種類の機器から独立してこれらの結果を比較することができた。

結果は 5 つの最高の全天と 1 つの高解像度の写真画像、3 つのビデオ記録(そのうち 1 つがスペクトル)、そして 3 つのデジタル画像と永続痕の 14 のデジタル画像をプラスしたものに基づいている。

### 3. 大気中の実経路と軌道

図 2 と 3 はそれぞれ火球とその光度曲線を表す。

例外的に長い大気中実経路 (145km) は、高精度で決定された。

我々が報告に全記録と写真記録のみで 18 メートルとして撮った単独で写真記録のために報告と 18 メートルに全ての記録を撮ったとき、発光している実経路の任意の位置の標準偏差は 31 メートルである。????

個々の位置の偏差は、写真とビデオ記録で測定され、計算された火球実経路からは図 4 で提示されている。

異なる技法から決定された末端の高度は、1km 以内である(表 2 を参照)。

最も低い値は、78. 6km でイメージーインテンシファイヤービデオカメラからである。

---

図 2。

異なる技法からの火球画像の比較。

上の画像は写真全天カメラ (Churanov) を装備した最も近い地点からの火球の詳細を示している。下

の画像は最も近い DSLR 記録 (Pancir) から撮られている。

写真カメラには、流星痕を切断してしまう回転シャッターがある。

---

図 3。

異なる観測地からの光度曲線。

絶対光度 (100km の距離) は、高度の関数として、ここで描かれている。

調整された AFO 光度曲線は、オリジナルデータが火球の距離と天頂距離に対して修正された (ラジオメーターの感度の変化による (Spurny 他 2012)) ことを意味する。

より暗い画像は、Ondrejov ビデオ記録から火球合成を示す。

---

火球は写り始めとは対照的に急激に消えた。

写り始め高度は探知器の感度の上で強く左右される (表 2 と図 5a を参照)。そして、それは Spurny 他 (2004) にて他の流星で研究され、証明された。

イメージインテンシファイヤビデオカメラは、+3 等の流星で高度 170.2 km のペルセウス座流星群を検出した。

これは、これまでに観測されたペルセウス座流星群の最も高いものである (160.7km は、これまで我々のカメラで観測された最も高いペルセウス座流星群であった)。そして、これまでにイメージインテンシファイヤカメラにて観測された最も高い流星のひとつである。 (Koten 他、2006)。

これまでに光学的に観測された最も高い流星は、最高値が 199 km の高度で観測された 1998 年のしし座流星群であった (Spurny et al. 2000a) .

---

図 4。

計算された火球実経路から写真およびビデオ記録で測定された個々の位置の偏差。 Length(経路長)

図 5。

実経路と永続痕の高度そして永続痕のスペクトル。

a) Ondrejov ビデオ記録からのペルセウス座流星群火球のコンポジット画像;

b) 火球通過後 1 秒の永続痕;

c) 火球通過後 1 秒の永続痕のスペクトル :

酸素線だけは高い高度で存在し、マグネシウムとナトリウムは低い高度で存在する。

---

デジタル全天と写真全天カメラからの写り始めの高度は、それぞれ 135 と 116km である。

他の大気パラメータは、通例のペルセウス座流星群流星を区別しなかった：

初速  $59.81 \pm 0.05 \text{ km s}^{-1}$ ;

地心速度  $58.61 \pm 0.05 \text{ km s}^{-1}$ ;

修正輻射点 :

赤経  $47.607 \pm 0.014^\circ$  赤緯  $59.547 \pm 0.007^\circ$  。

大気中実経路と日心軌道パラメータは、表 2 でまとめられている。

ENL20812 の初期質量  $60 \pm 10$  g は、3 カ所の写真と 2 カ所のビデオ記録の測光から決定された(図 3)。測光質量の決定は発光効率 ( $\tau$ ) に基づいて非常に強く左右される。そして、それはペルセウス座流星群として前述の高速流星のために導き出すのが非常に難しい。

59.81km s<sup>-1</sup> の初速に対して、 $\log \tau = -11.91$  の値 (c.g.s. 単位で 0 等の恒星に対して  $I=1$ ) が使われた (Ceplecha と McCrosky 1976)。そして、それは質量放出の総運動エネルギーの 1.8% と一致する。

最大の明るさにおける少しの矛盾がある：

写真フィルムは、我々のビデオカメラの CCD 検出器と比べるとスペクトル (ここではカルシウム II 線が示される) の青色部分でかなり敏感である。

これは、多分、複数の AFO からの最大の明るさがビデオカメラからより約 1 等明るいことによる理由のためだろう。

火球の最大の明るさの近くの飽和は、最も近い AFO の観測地点 Churinov でより低い最大の明るさについての説明であるかもしれない。

光度曲線は Martinsberg で決定したのと Kunzak での記録がほとんど同一である。

-9.2 ± 0.2 等の最大の写真光輝は、85km の高さのときに観測された。

放射測定光度曲線の絶対キャリブレーションは、写真記録の助けを借りて実行された。

85.0km の高さでの明るさは、-9 等 (84.5 から 85.5 km の高さの平均の明るさが-9 等である。) にセットされた。

---

## 表 2。

EN 120812 ペルセウス座流星群火球の異なる技法によって観測された写り始めと写り終わりの高さ、基本的な大気中のデータ、そして、輻射点と軌道要素 (J2000.0)。

カメラのタイプ

PE 系数/タイプ

注記。

異なる技法での高度と経路長は、100m で四捨五入されている。

ペルセウス座流星群の平均軌道は正確な写真軌道の IAU Meteor Data センター Catalog のデータに基づき、さらに 1992 年の近日点通過における母彗星 109P/スイフト-タットルの軌道が示されている。

---

最大の放射測定の明るさは 82.7 km の高さで、そのとき -9.7 等であり、写真記録では分析できない 22:29:46.6637 ± 0.0005 秒 UT の短いフレア (9 カ所の独立した放射測定記録からの最大輝度の平均時刻) と一致する。

Spurny 他 (2000b) は、高高度流星の出現を 3 つの異なった段階に分けた：

拡散、中間、鋭い。

130km より上空で観測される拡散する構造は、スパッタ粒子とそれらの以降の熱化と連結される。

鋭い段階は、古典的な流星アブレーションと連結される。

ENL20812 のイメージーインテンシファイヤービデオ記録は、139.1 km の高度までの彗星のような尾、そして、130.0 km までのわずかに拡散する外観で流星の個別の拡散する外観を示している。そこで、流星は普通のポイントのような物体に変化することが速く始まる。

この中間相は 124 km までに見られる。それから、流星は永続痕を残している異なったポイントのように見える。

短痕は、112.5km から見られる。

それは、ぴったりと、Spurny 他 (2000b) に記載されるしし座流星群のふるまいに似ている。

---

図 6。

EN120812 の光度は Churanov 観測地点での AFO によって記録された。

フレアの継続時間：

85.3kmあたりのフレアの 80 ms<ミリ秒 1ms=0.001s> (3 カ所の 10-20ms のフレアは、この幅広いフレアの部分部分である)、82.9km での 30 ms (火球最大の明るさと一致している 3.5 ms のフレアは、このフレアの部分である)、81.7 km での 15 ms そして 80.5 km での 10 ms。

輝度 (任意の単位)

---

支配的な光源が支配的であるアブレーションが始まる高度は、光度曲線の傾斜がかなり変わらる光度曲線の部分で、明らかに見えるはずである (Koten 他 2006)。

EN120812 (図 3) の光度曲線は、125 と 114 km の高度で、2 カ所の前述のポイントを示している。

スペクトル (下記参照) の比較に基づいて、最初の高度 (125 km) は、強い蒸発の始まりで、揮発性の部分 (Na) と第 2 の高度のアブレーションの始まりへと連結される。

我々が EN120812 の高度を比較するとき、アブレーションが支配的に (光度曲線によって) し始める所で、他の流星で、我々は以下の通りに流星群を分類することができる：

しし座流星群の 71 km/s に対して 125 km (Spurny 他 2000a,b; Koten 他 2006)、オリオン座流星群の 68 km/s に対して 115 km (Olech et al. 2013)、EN120812 ペルセウス座流星群の 60 km/s に対する 125 km。EN120812 の軌道は、ペルセウス座流星群火球についてこれまでに決定した最も正確な写真軌道のうちの 1 つである。

ペルセウス群の平均写真軌道 (Svoren 他、2006) と母彗星の軌道 (マースデン他、1993) の軌道と一緒に、軌道要素が表 2 に提示されている。

DsH 基準に基づいて、2 つの日心軌道を比較することについて役に立つ (サウスワースとホーキンズ 1963)、我々は EN120812 ペルセウス座流星群の軌道が黄道への軌道傾斜角がわずかに少し寄っているだけという特有の軌道を持つ写真ペルセウス群であると結論づける。

EN120812 軌道と平均軌道の DsH は、0.02 である。

Svoren 他 (2006)、写真軌道の IAU Meteor Data センターカタログに基づいて、ペルセウス座流星群流星体ストリーム内で 17 のフィラメントを特定した。

我々のペルセウス座流星群の軌道をフィラメントと比較して、フィラメント M が最も類似している要素 ( $DsH = 0.02$ ) があることを見いたした。

フィラメント M は最も多く (43%)、そして、その軌道要素は平均軌道と母彗星に似ている (彗星と EN120812 について  $DsH = 0.03$ )。

似ている要素で他のフィラメント ( $DsH = 0.04$ ) は F、K、そして R である。

#### 4. 物理的特性とスペクトル

我々は、さらに火球の物理的特性を研究した。

PE 基準(Ceplecha & McCrosky 1976)によれば、ENL20812 ペルセウス座流星群は柔らかい彗星の材質(PE = -5.48 PE タイプIII A)から成っており、通常のペルセウス座流星群火球と異なっていなかった。これは、さらに光曲線形状によっても確認されている。

AFO からの詳細な放射測定光度曲線は、多数のフレアを示す(図 6 参照)。

これらのフレアは、多分流星体の分裂と関係して、0.02MPa(メガパスカル)の動圧の下で、87km の高さにて始まっているのだろう。

---

図 7。

ENL20812 ペルセウス座流星群のビデオ・スペクトルの 1 次と 2 次オーダー。

違っているスペクトル線は、異なる高度から始まる。

図 8。

高高度のビデオ・スペクトル。

図は、スペクトル線が明白だったビデオ記録で最初の 12 フレームのたしあわせたものを示す。

高度は、154.4km から 130km までのものであった。

スペクトルは、カメラの分光感度に関して修正されていない。

---

肉眼的分裂はビデオ記録で見えなかった(見える断片でなかった)。しかし、フレアの高度は永続痕で観測される明るさの高度と一致する。

最も明るいフレアは 3.5 ms の長さであったけれども、フレア(最初から終わりまで)の代表的な継続時間は 10-20 ms であった。

観測されたフレアの短い継続時間というのは、たぶん、大部分の小粒が流星体のこれらの分裂現象の間に放たれたのだということをとても意味するだろう。

およそ 5%程度の軽微な減速は、ENL20812 の最終の末端で観測された。

減速は、アブレーション係数を決定するために、実経路のあまりに短い部分上で提示された。

終速は、約 55 km/s であった。

スペクトル(図 7)は、154km の高度から観測された。

写り始めでは、大気発光(O、N、N<sub>2</sub> 酸素 窒素 窒素分子)だけが存在した(図 8 を参照)。

そのとき、単一のスパッター原子は多くの大気中の原子と分子を励起するとき、これはスパッタリング過程と一致している。

不明な起源によるかすかな連続体は、さらに存在した。

我々の知る限りでは、提示したスペクトルは、これまでに 130km より上の高度で得られた良質の流星スペクトルである。

---

図 9。

単色の光度曲線。

時刻の 0 秒が 22:29:44.4 UT と一致する。そしてそれは、スペクトルビデオ記録で最初のフレームである。

左：火球のモノクロ光度曲線。

対数目盛の輝度は、高度の関数と火球出現後の経過時間として与えられる。

右：ビデオ記録からの火球（100km の高度以下）の永続痕の 3 つのモノクロの光度曲線は、時間の関数として与えられる。

輝度と時間共、対数目盛にしてある。

-----

Na 線 (589nm) は、130km で現れた。

他の通常の流星の線(マグネシウム、鉄)は、120km と 110km の間の高度でそれ以降に現れた。

110km 以下のスペクトルは他のペルセウス座流星群火球と著しく異ならなかった。

最大のところで、高い温度構成要素線(CaII、MgI)は優勢であった。

火球と永続痕のモノクロ光度曲線は、図 9 で提示されている。

## 5. 永続痕

火球通過の 1 秒後に、痕は 139 km と 79 km の高さの間でイメージーインテンシファイヤービデオ記録にて認識された。

永続痕の 2 番目と 3 番目の最大輝度の高さと流星光度曲線は、明るさの第 2、第 3 の極大値の高度は、2、3 百メートルの範囲内で互いに(図 5 と 6 を参照)一致した。

1 番目の最高輝度は 109 km で光度曲線におけるあらゆる特徴と一致していない。

初期の痕は、上部の O I 557nm 線の禁制線と、下部の Mg I, NaI, O I によって作られた(図 5c 参照)。

※：【禁制】 原子・分子などのエネルギー準位間の遷移によるスペクトル線のうち、普通では起こり得ない遷移が特殊な条件の下で起こる

Mg I と Na I 線の急速な初期減衰は約 3 秒の間で、その後安定した輝度が続くことが起こっていた(図 9)。そしてそれは再結合段階のものとされる(Boroviika 2006)。

この火球の永続痕の展開は、ほぼ 15 分の間デジタル・スチルカメラとアナログ・ビデオカメラによって検出された。

我々は、図 10 で最初の 4 分間 2 地点同時観測による痕の水平運動の再生を、図 11 で最初の 5 分間の単地点での変化していくようすを提示する。

大気中の実経路に対して垂直な最大の水平偏移は、91km の高さのときで 6.5km であった。

対応する平均速度は、地理的方位角 140° (風向 320° と一致している)で 27 m/s であった。

あらゆる方向の最大の水平偏移は、対応する平均速度 56 m/s で、方位角 230° にて 13.5km 長さの漂流であった。

81m/s の最高速度は、最初の分で測定された。

これらの 2 つの最大の漂流は、図 10 で灰色の楕円によって強調されている。

垂直運動は、2m/sあたりの特有の速度で 13.5m/s (最大の増加は 86km の高度からの 2km であって、最初の 2.5 分で観測された) まで、增速で全部の痕に沿って上昇運動を示している。

痕は、99 と 84.5 km の高度の間で、デジタル画像で認識できた。

-----

図 10。

永続痕の水平運動。

地球の表面の上の ENI20812 の大気中実経路の投影は、黒い線によって示される。永続痕の最大の移動は、灰色の楕円によって強調されている。

---

2つの特徴は観測された：

痕の 3 カ所(図 11 内の矢印を参照)の部分と二重の経路の形成において明るさが増している。

図 11 の 3 カ所の明るい部分の高度は、94、91.5 と 90km である。

二重の経路は 90 と 88 km の間で観測されて、長さ約 5km の長さであった。

二重経路のメカニズムは、ケリー他によって (2013) 記述されていて、対流的に不安定な経路の中で渦に関係する。

## 6. 結論

我々は、異なる技法によって記録された明るいペルセウス座流星群火球の観測を提示した。

主要な結論は、以下の通りにまとめられる。

- ENI20812 火球は、しし座流星群以外の日心軌道で、正確な大気中の実経路で今までに観測された最も高い所の流星で、これまでに観測された最も高高度のペルセウス座流星群である。

+3 等(その高度の絶対光度)の感度限界でアナログイメージーインテンシファイヤービデオカメラによって記録されたその写り始めの高さは 170.2 km であった。

---

図 11。

永続痕の運動。

画像は、火球通過の 1 分～ 5 分後に撮られた。白い矢印は、94、91.5 と 90km の地点で、永続痕の明るさの増大を表示する。

---

- ENI20812 のイメージーインテンシファイヤービデオ・スペクトルは、これまでに得られた流星で最も高い高度でのスペクトルである。

このスペクトルは、酸素、窒素、窒素分子の大気発光だけが 130km より上に存在した、そして、スペクトルが 110km 以下でこの他のペルセウス座流星群火球と著しく異なっていなかったことを示す。

- 写真、デジタル、イメージーインテンシファイヤービデオカメラにて記録に基づく大気中の実経路と軌道は、ペルセウス座流星群流星について、これまでに最も正確なものを得た。

発光中の実経路上のあらゆる任意の位置の標準偏差は、すべての 3 つの技法に対して 31 メートルである。

唯一の違いは、検出器の感度の写り始めの高さ強い依存関係である。

その軌道は、写真ペルセウス座流星群の代表的な軌道(黄道よりのわずかに小さな軌道傾斜角)である。

そして、母彗星 ( $D_{SH} = 0.03$ ) の軌道に似ている。

- 永続痕の最初の 4 分間の 2 点同時観測地は、86 km の高度から、2km の最大の鉛直ドリフトで、全体の痕が最高 13.5m/s (2m/s のあたりの特有の速度) 前方へ上昇運動を示した。

謝辞.

著者は、Petr Horalek にたいへんお世話になった。Pancir で彼のデジタルカメラを動かしてくれて、親切に彼の火球記録と測定のためのその永続痕を提供した。

この研究は raemium Academiae of the ASCR, and by GA CR grants P209/11/P651, 205/09/1302, P209/11/1382 によるプロジェクト RVO: 67985815 によって支援を受けた。

我々は、さらにレフェリー J. M. Madiedo 博士によるありがたく有益なコメントに感謝する。

#### 参考文献 略