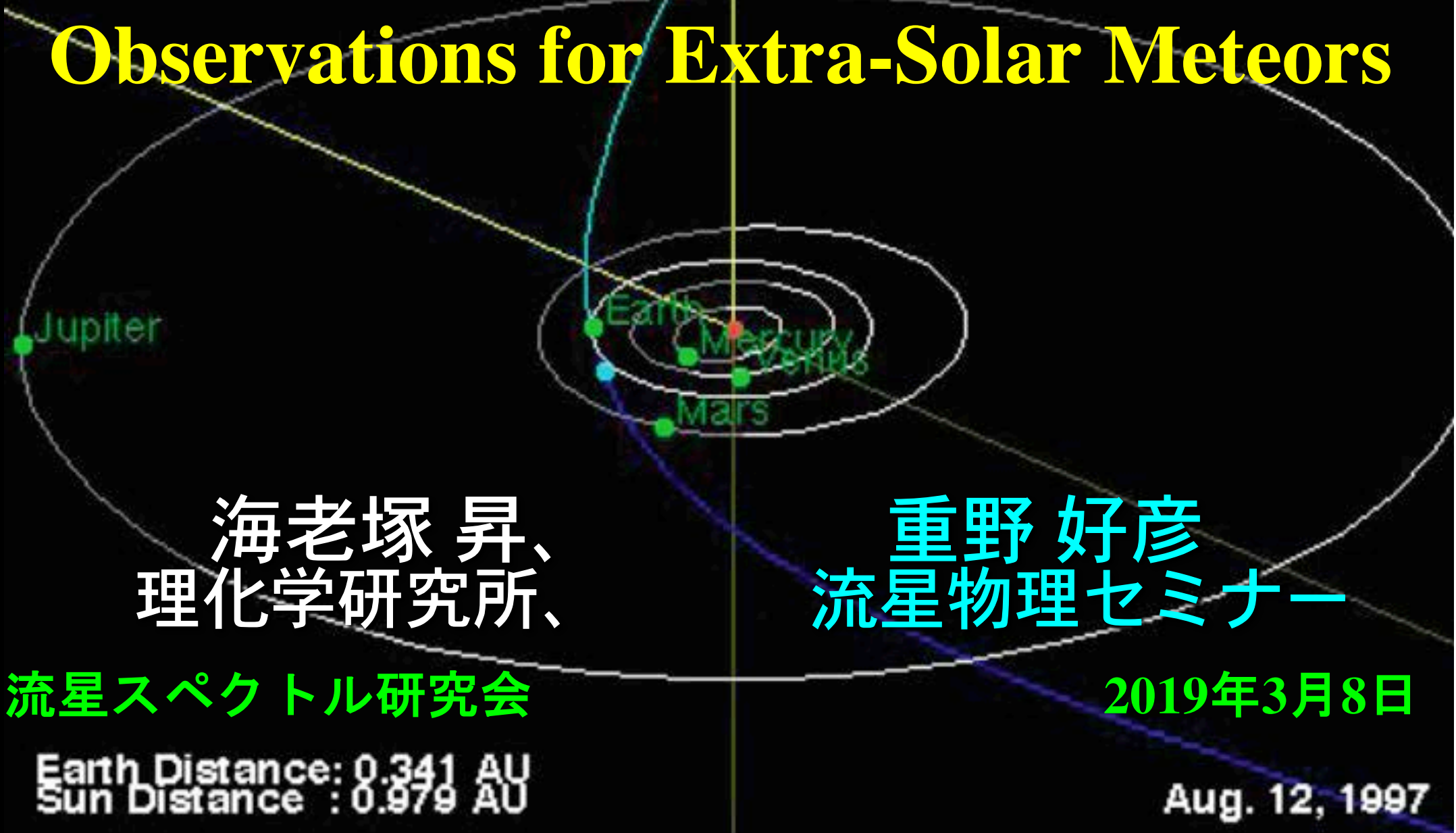


Stereoscopic and Spectroscopic Observations for Extra-Solar Meteors



海老塚 昇、
理化学研究所、

重野 好彦
流星物理セミナー

流星スペクトル研究会

2019年3月8日

Earth Distance: 0.341 AU
Sun Distance : 0.979 AU

Aug. 12, 1997

Optical Meteor Observations



Silver halide photography

<http://www.ne.jp/asahi/meteor/star/index.html>



I.I. video camera system
[Fujiwara, 2004]

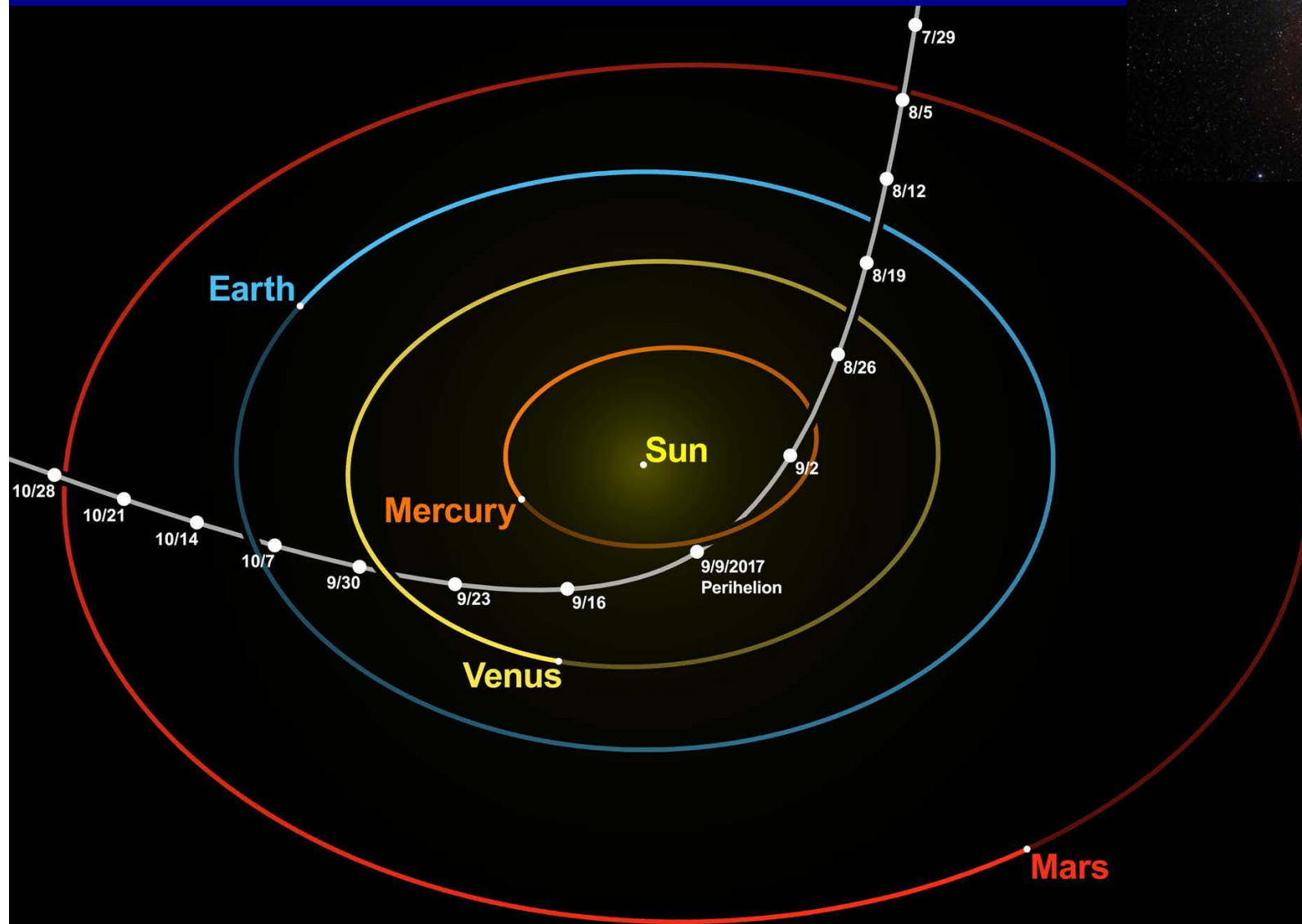
- IAU/MDC 銀塩写真 (-3 mag.~) [M. Hajduková Jr., 2006]
 $V_H > 42.1 \text{ km/s}$: $< 0.025\%$ (1/4,581?), $V_H > 46.6 \text{ km/s}^*$: 0.
- SonotaCo Net (2 mag.~) [M. Hajduková Jr., 2011]
 $V_H > 42.1$: 0.13% (19/14,763), $V_H > 46.6^*$: 0.
- カナダ I.I. ビデオ観測 (9.5 mag.~) [R. Musci, 2014]
 $V_H > 42.1, V_H - 42.1 > 1\sigma$: 0.98% (17/1,739), $V_H > 46.6^*$: 0.

* 46.6 km/s: 星間速度 (太陽系進入初速20 km/s = 近傍星に対する太陽系の相対速度)

近年の多くの光学観測では系外流星の存在に対して悲観的な雰囲気になっていた。 (ex. Hajduková Jr., 2016)

オウムアムア

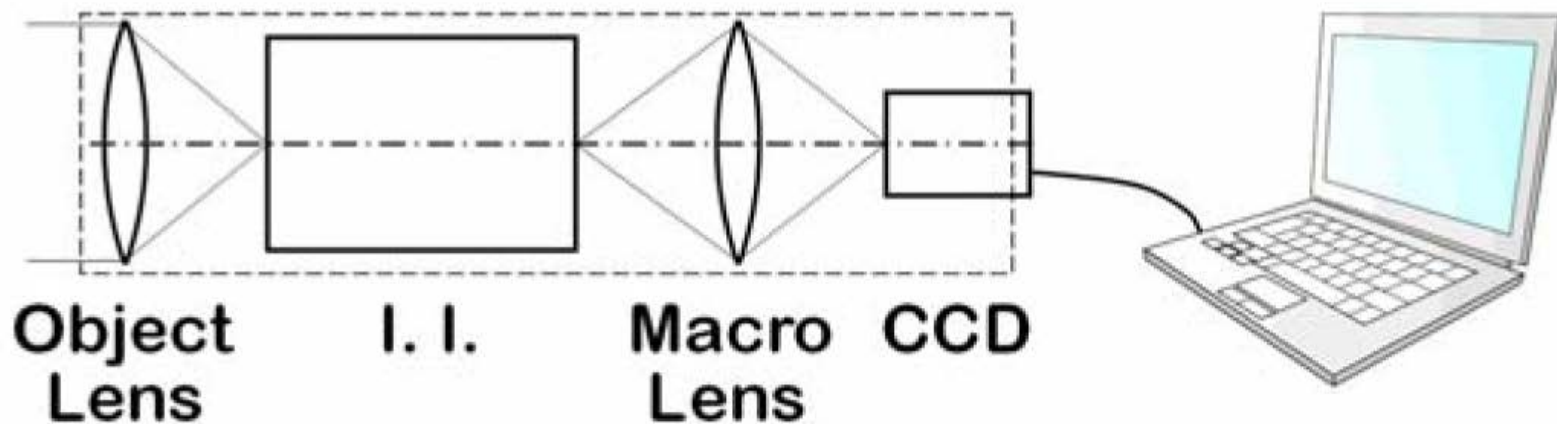
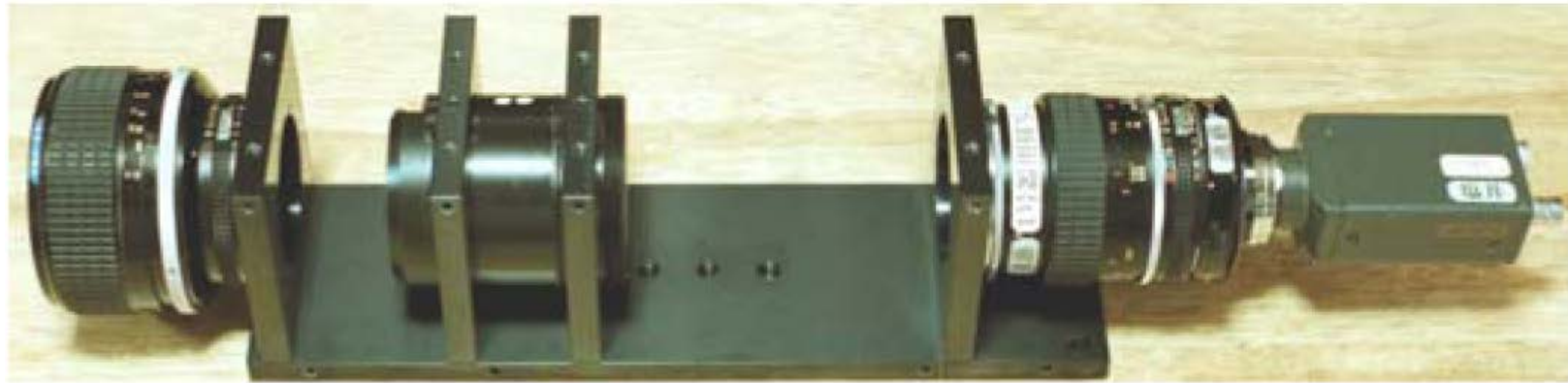
'Oumuamua 1I/2017 U1



a : -1.28 au
 e : 1.20
 q : 0.26 au
 ω : 241.7°
 Ω : 24.6°
 i : 122.7°

© Wikipedia

流星ステレオ観測



イメージ・インテンシファイド (I.I.) ビデオカメラ

- 写真観測：1983, 1987, 1989, 1991, 1992, 2001しし座流星群。
- I.I. ビデオカメラ1992 to 2009。
- 3,886 個の流星軌道データ (9.0 等星~) 。 [Shigeno et al., 1997]

ビデオと写真による流星軌道データのリスト

Instrument*	FOV** [Deg.]	LM*** Star	LM*** Meteor	All	All e > 1.0†	Shower	Shower e > 1.0†	Sporadic	Sporadic e > 1.0†	Remarks
II85/1.2	12 x 9	10.5	9.0	2,651	74	429	10	2,222	64	
II50/1.2	20 x 15	9.3	7.8	902	71	161	22	741	49	
II28/1.4	36 x 27	7.7	6.2	42	6	7	4	35	2	
II24/1.4	42 x 31	7.4	5.9	184	16	84	11	100	5	
P50/1.4×6	79 x 81	3.5	2.0	103	0	99	0	6	0	
P50/1.4×4	79 x 54	3.5	2.0	2	1	2	1	0	0	1987/05/04 η Aquarids
P24/1.4, P50/1.4×4	79 x 54	—	—	2	0	2	0	0	0	1983/01/03 Quadrantids
Total	—	—	—	3,886	168	782	48	3,104	120	

* II: イメージ・インテンシファイア, P: 写真, 焦点距離/F値

** FOV: 視野

*** LM: 限界等級

† e: 離心率

系外流星候補1

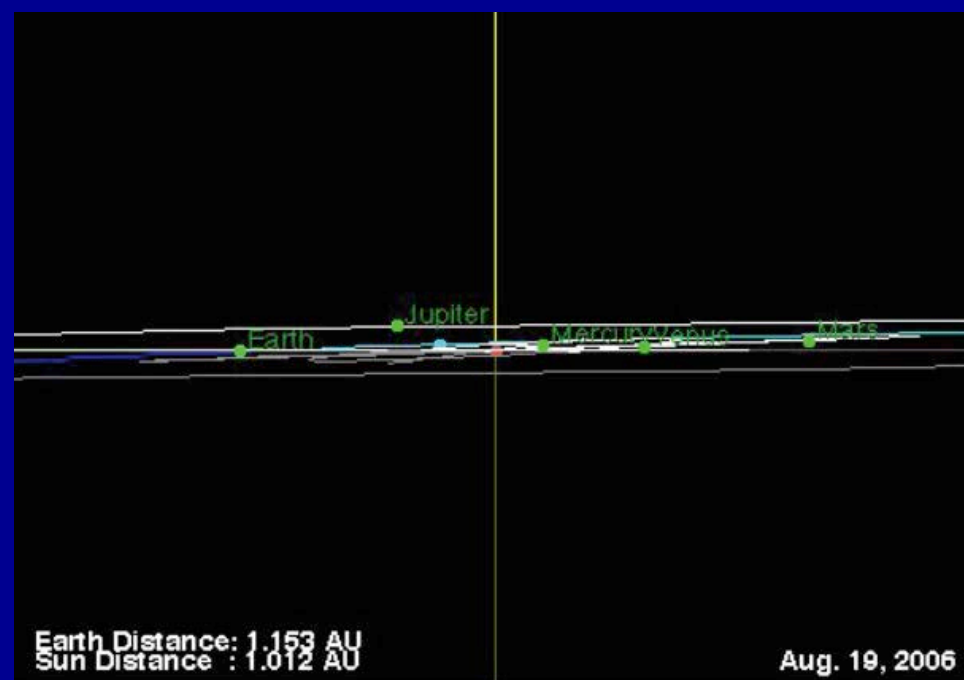
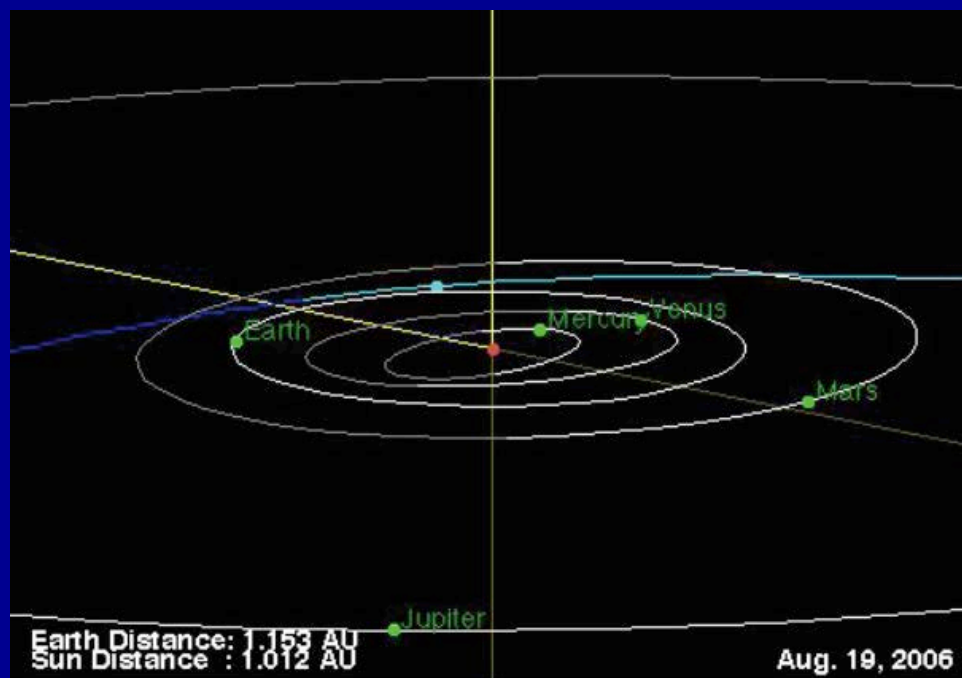
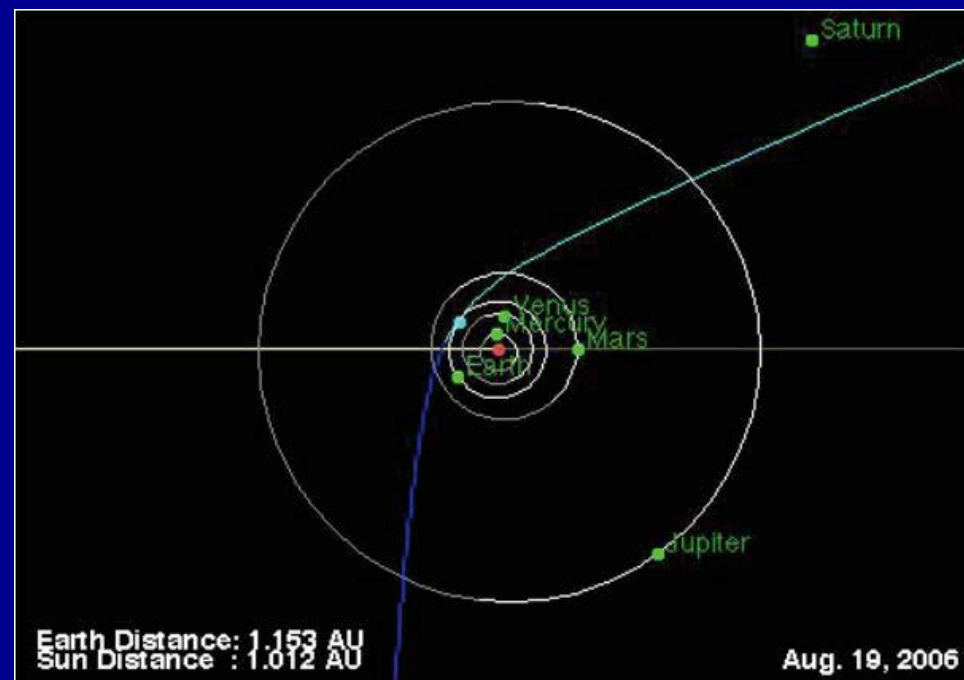
$e: 1.86$ $\omega: 182$

$q: 1.01$ $\Omega: 146$

$i: 178$

漸近線方向: しし座

土星に2 au接近



系外流星候補4

$e: 1.38$

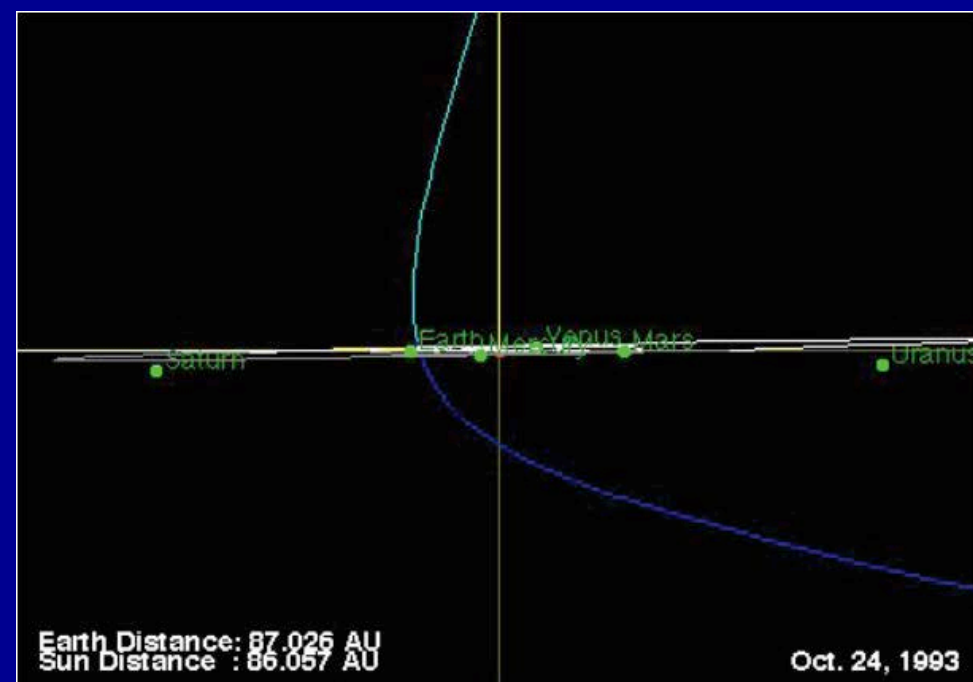
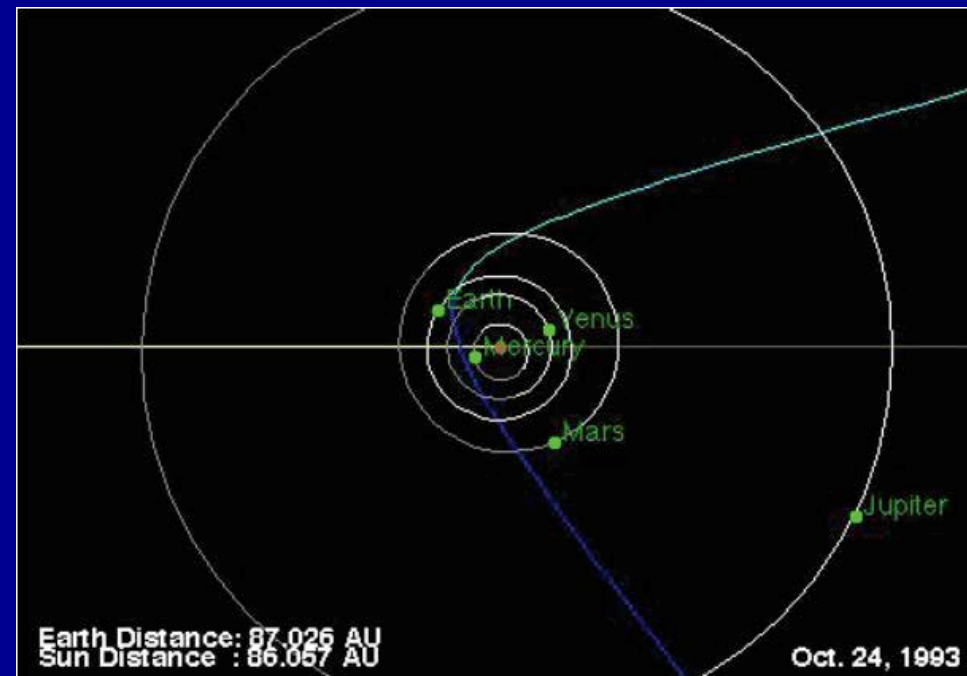
$\Omega: 212$

$q: 0.82$

$\omega: 226$

$i: 119$

漸近線方向: りょうけん座



系外流星候補8

e: 1.24

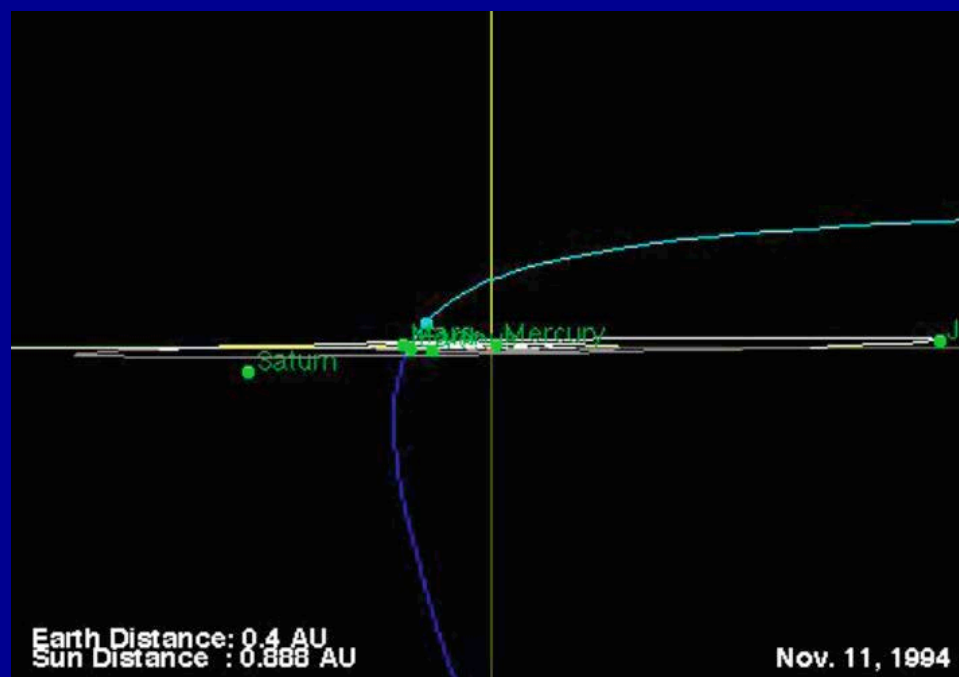
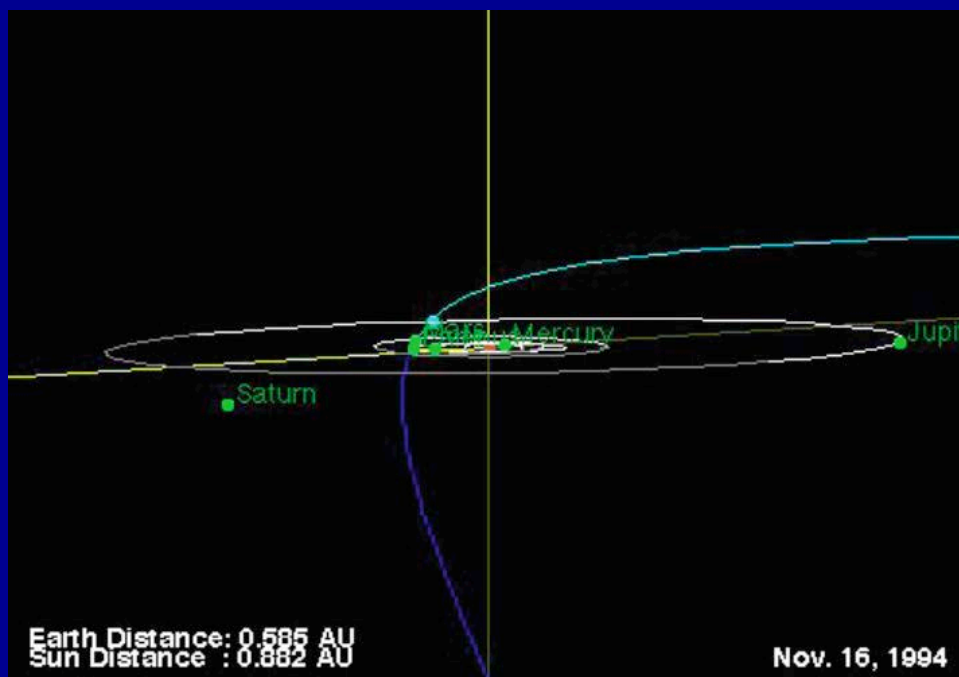
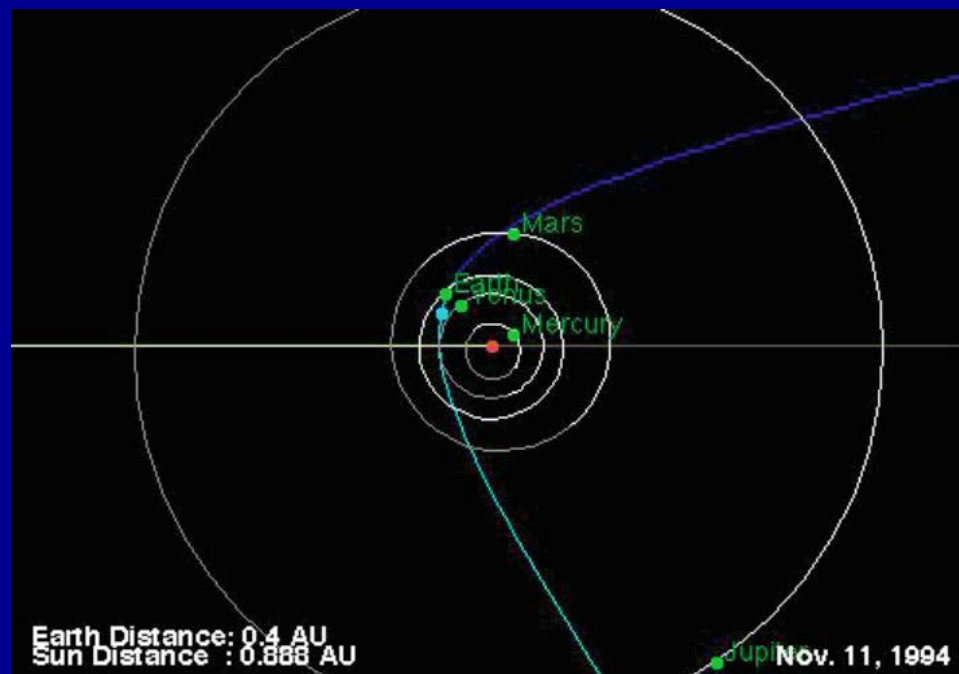
Ω : 54

q: 0.88

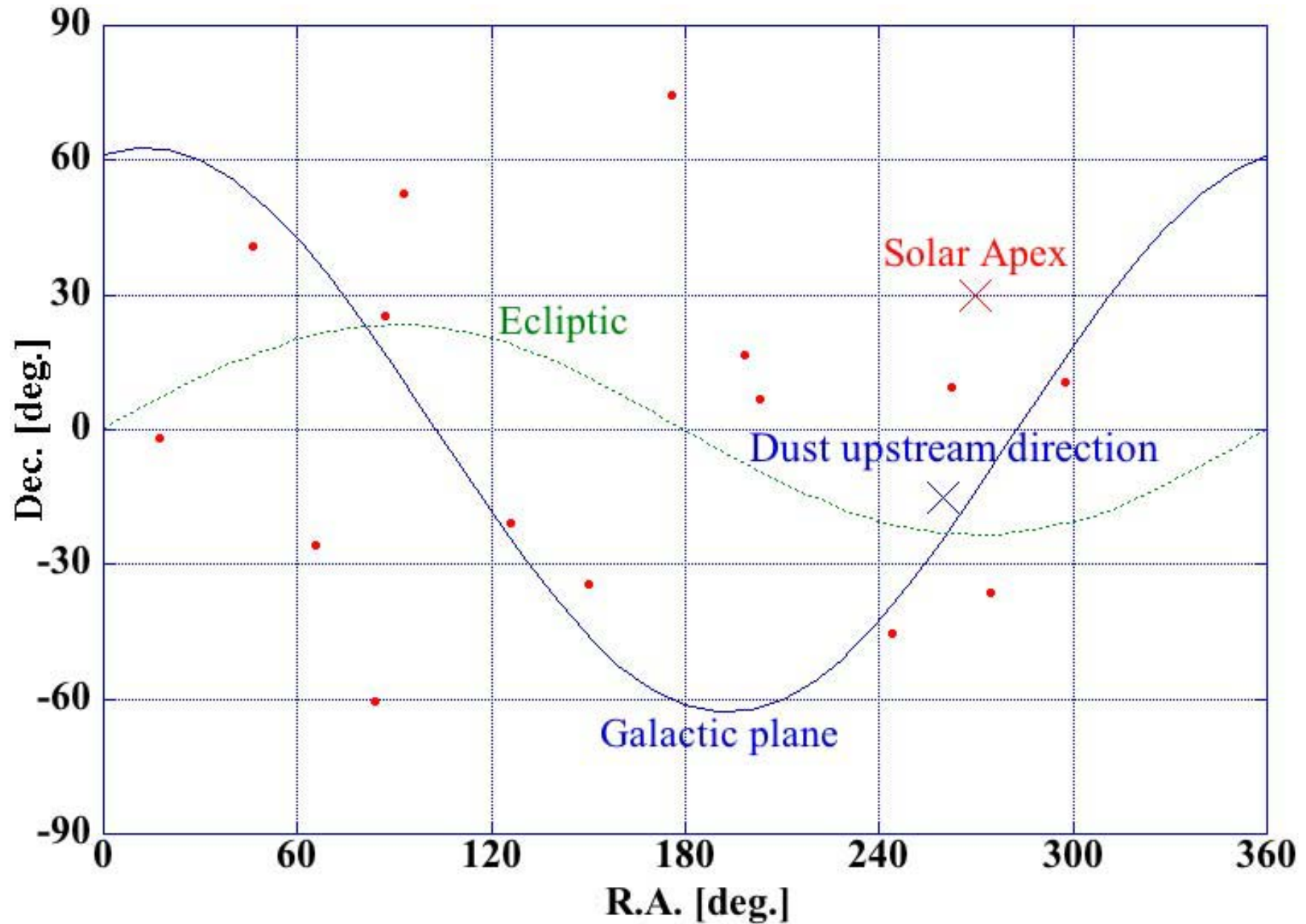
ω : 36

i: 135

漸近線方向: ポンプ座



系外流星候補の到来方向（赤道座標）

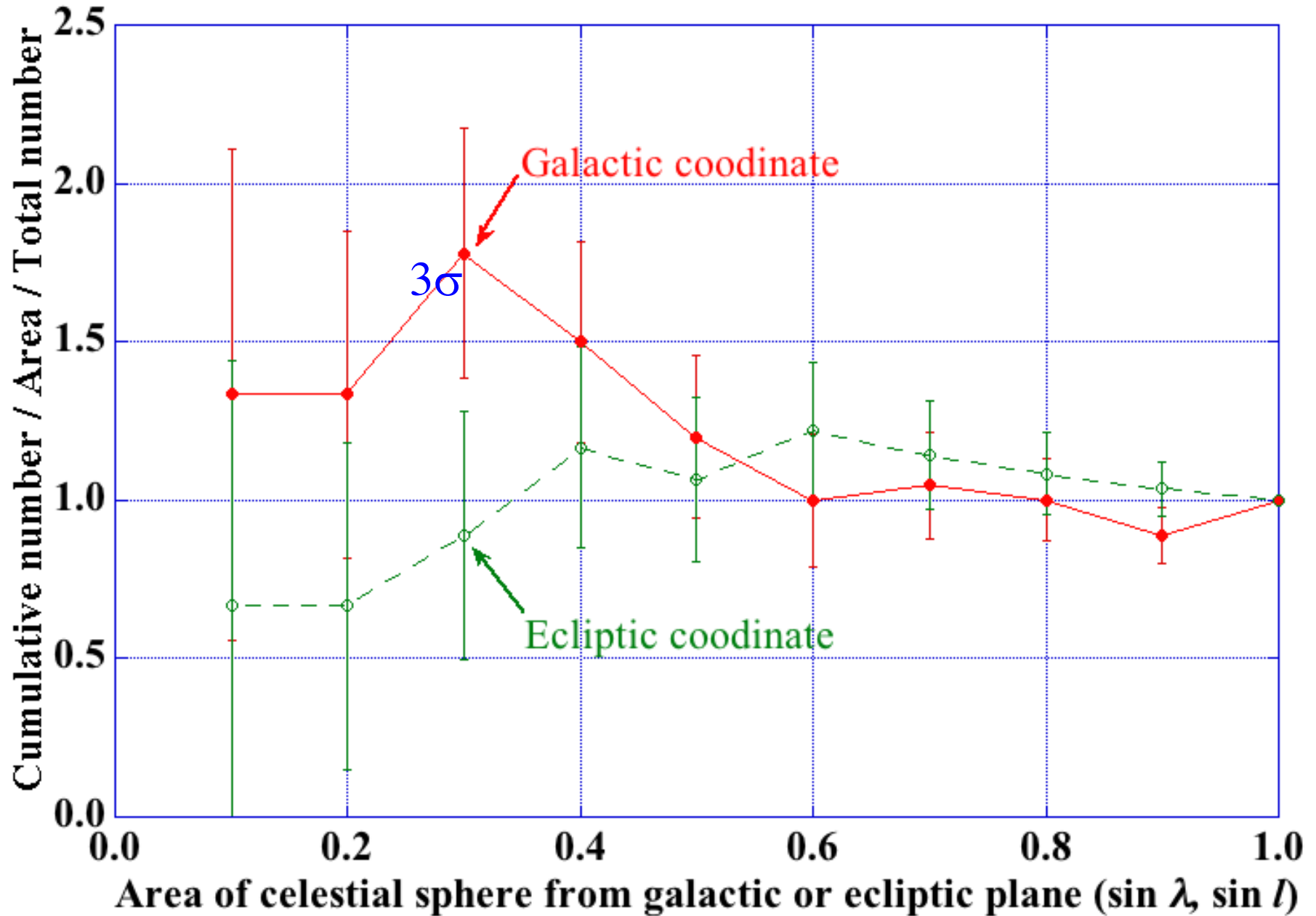


系外流星候補の軌道要素と到来方向

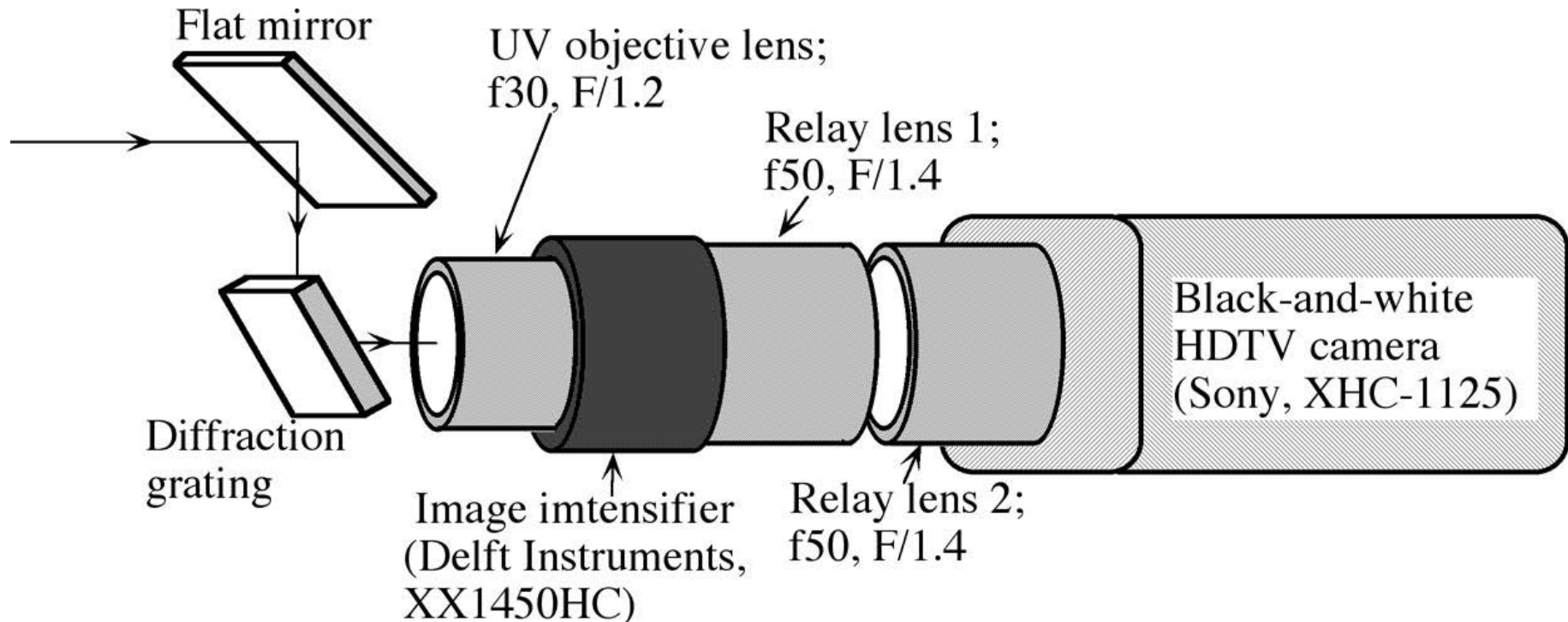
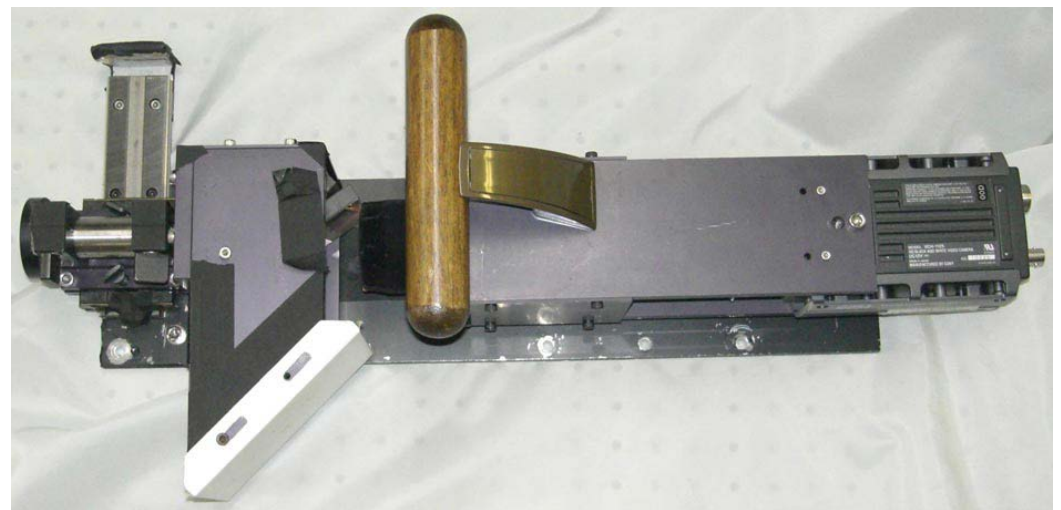
No.	軌道要素						到来方向							備考
	e	q [au]	i [deg.]	ω [deg.]	Ω [deg.]	T_0^*	Abbr.	R.A. [deg.]	Dec. [deg.]	β^* [deg.]	λ^* [deg.]	b^* [deg.]	l^* [deg.]	
1	1.86	1.01	178	182	146	2006/08/23	Tau	87	25	87	2	183	-2	
2	1.78	0.95	133	25	314	2002/08/22	Eri	66	-26	58	-47	224	-43	
3	1.44	0.85	149	223	31	2004/05/05	Aql	297	11	302	31	49	-8	
4	1.38	0.82	119	226	212	1993/11/19	Dra	176	75	123	61	129	42	
5	1.28	0.84	165	222	279	1993/01/24	Vir	203	7	199	15	331	67	
6	1.15	0.46	137	90	91	2007/01/27	Pyx	126	-21	144	-37	247	15	
7	1.28	0.96	151	18	123	2004/02/05	Sgr	274	-36	274	-13	357	-9	
8	1.24	0.88	135	36	54	1994/12/09	Ant	10	-34	168	-43	267	16	
9	1.17	0.70	86	116	209	1996/09/18	Pic	84	-60	64	-83	269	-33	
10	1.16	0.73	144	121	271	2006/11/22	Nor	244	-45	250	-24	336	4	
11	1.11	0.40	169	99	320	1996/09/18	Cet	18	-2	16	-9	134	-65	
12	1.12	0.53	148	264	16	2008/04/04	Oph	263	9	261	33	32	22	
13	1.03	0.15	42	312	263	2001/11/15	Per	46	41	56	23	149	-15	
14	1.21	0.98	143	200	140	1997/08/27	Aur	93	53	190	23	161	16	
15	1.13	0.84	156	223	260	2002/01/09	Com	199	17	92	29	331	78	

* T_0 : 近日点通過時刻, β : 黄経, λ : 黄緯, b : 銀径, l : 銀緯

天球上における系外流星候補の比率



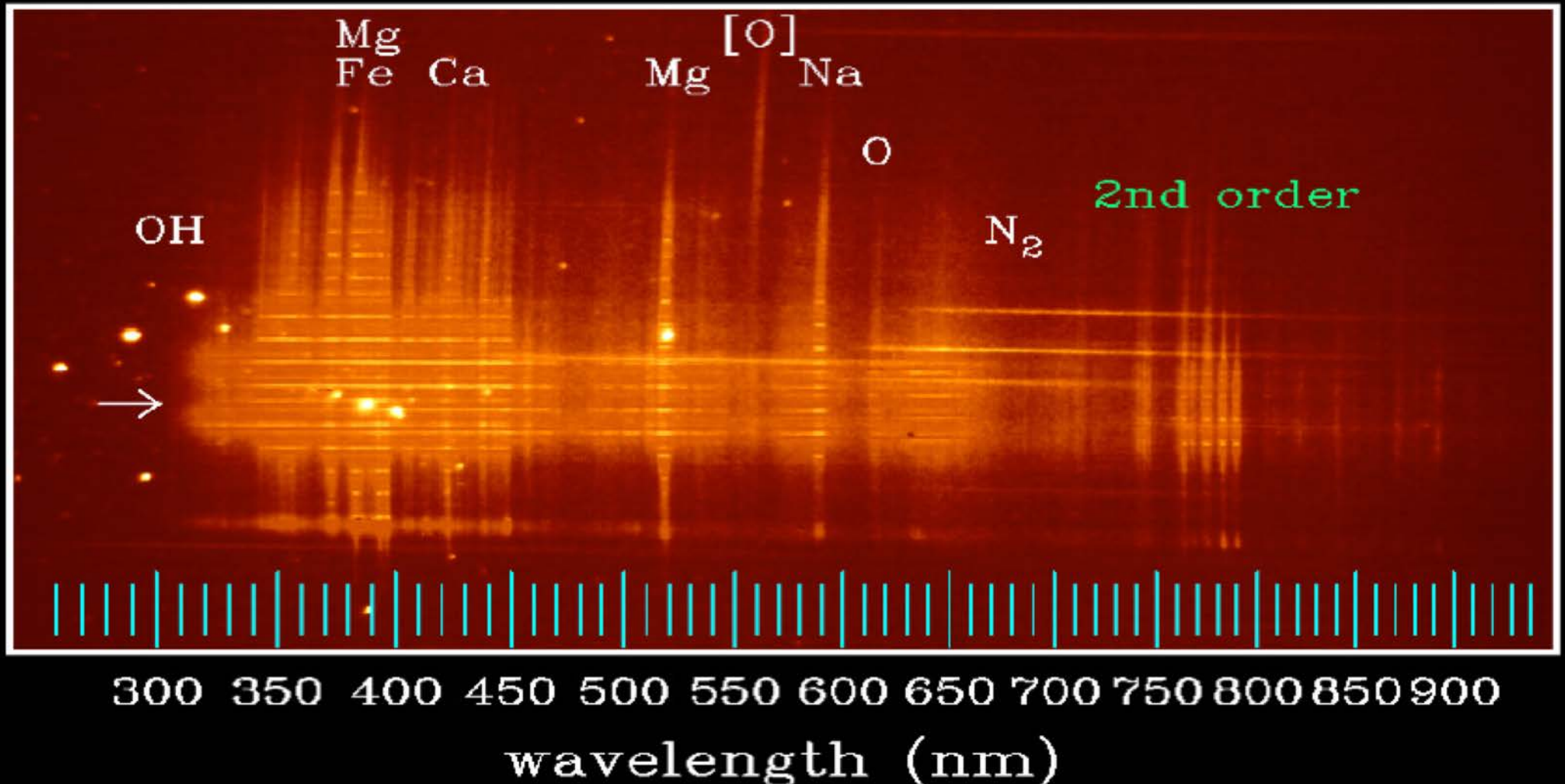
流星分光観測システム

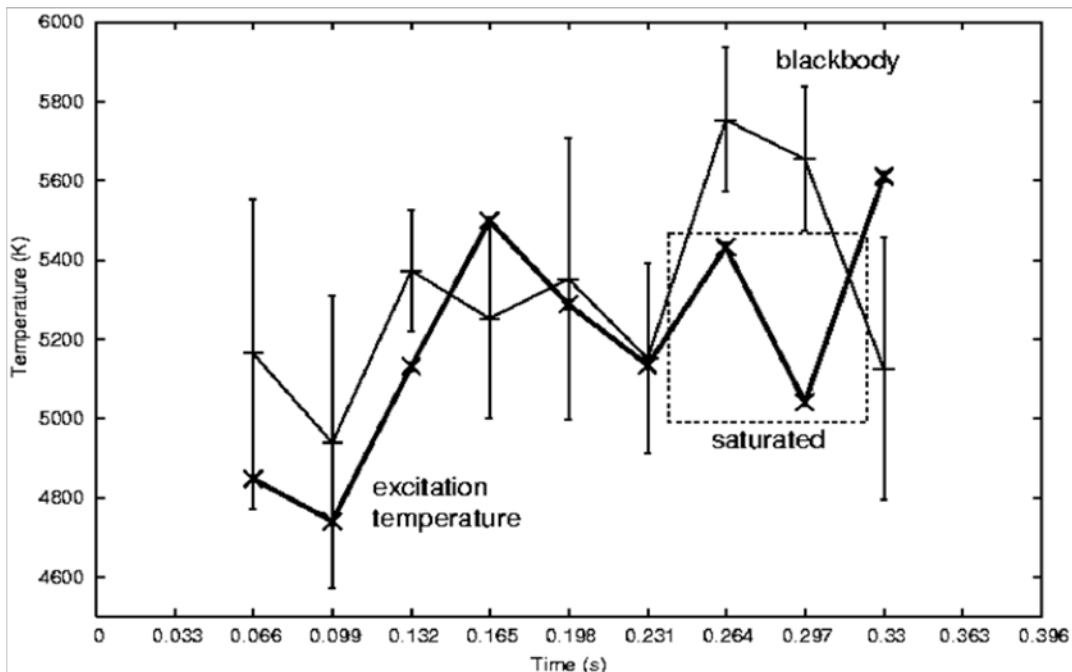
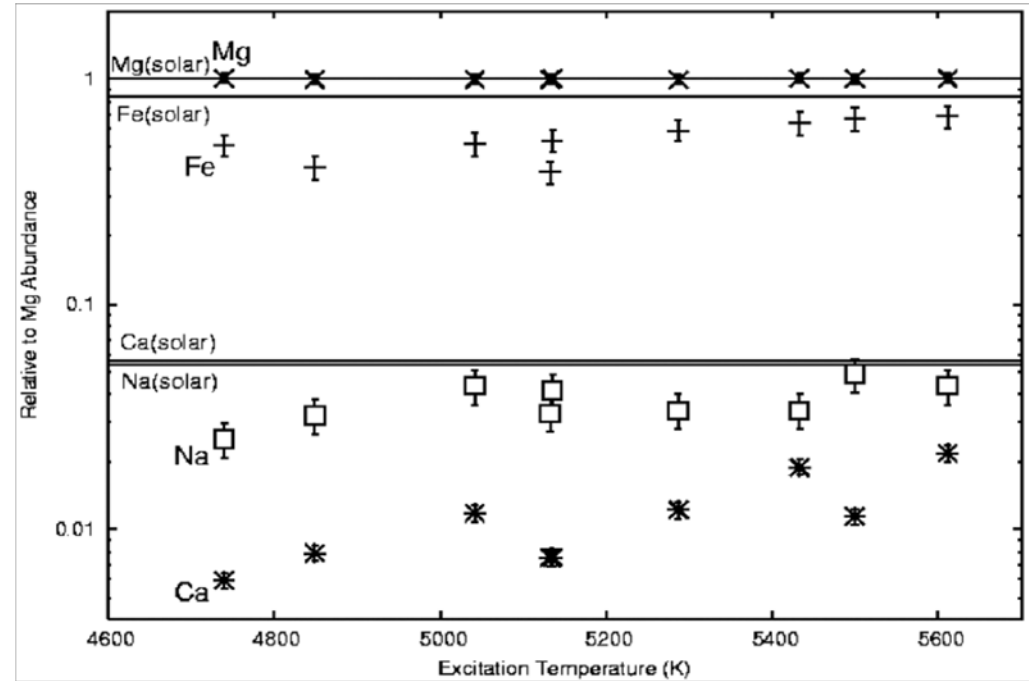
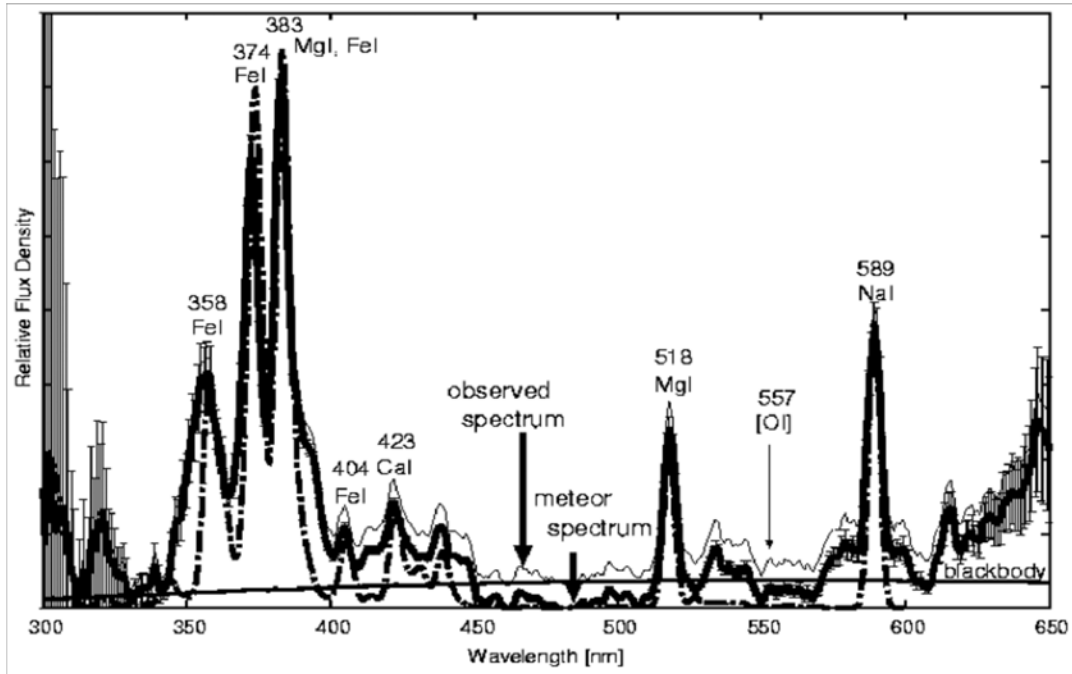


反射型回折格子の対物分光器+ UV I.I. HDTVシステム

しし座流星群の紫外-可視 スペクトルと発光物質

HDTV Spectrum of 2001 Leonid Meteor

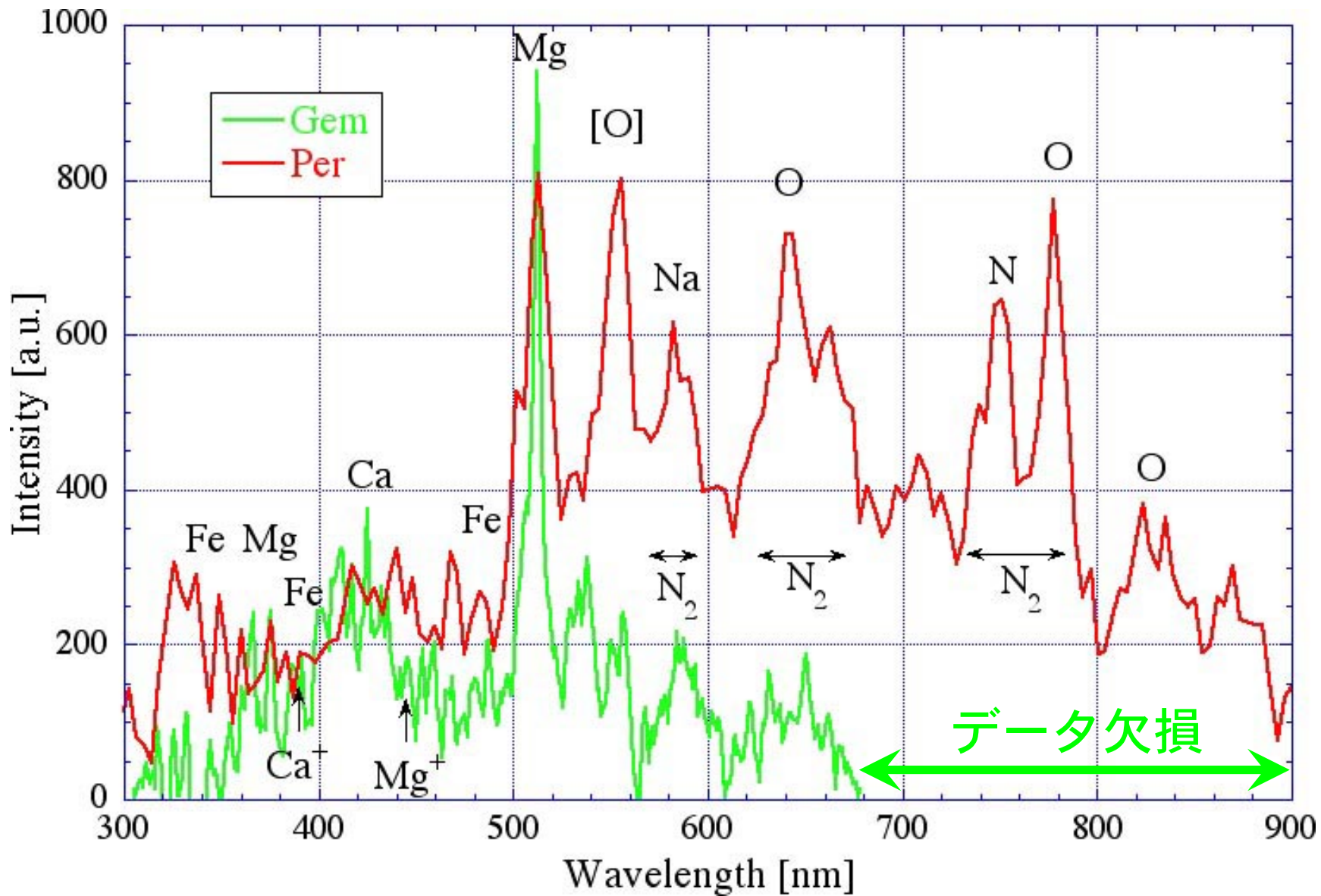




Metal abundances of Leonid meteor (NASA Aircraft)

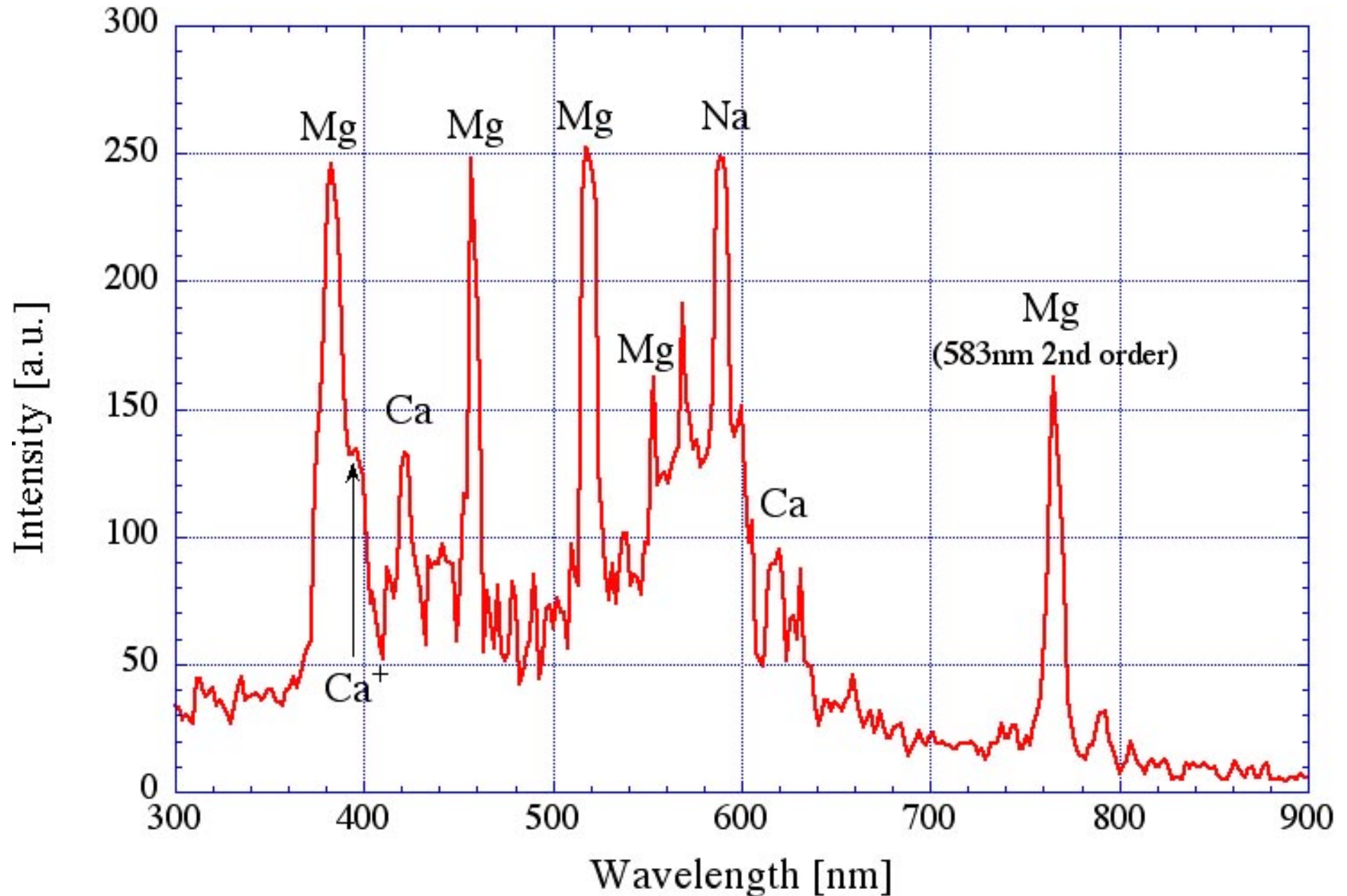
[Kasuga et al., 2002]

ペルセウス座とふたご座流星群のスペクトル

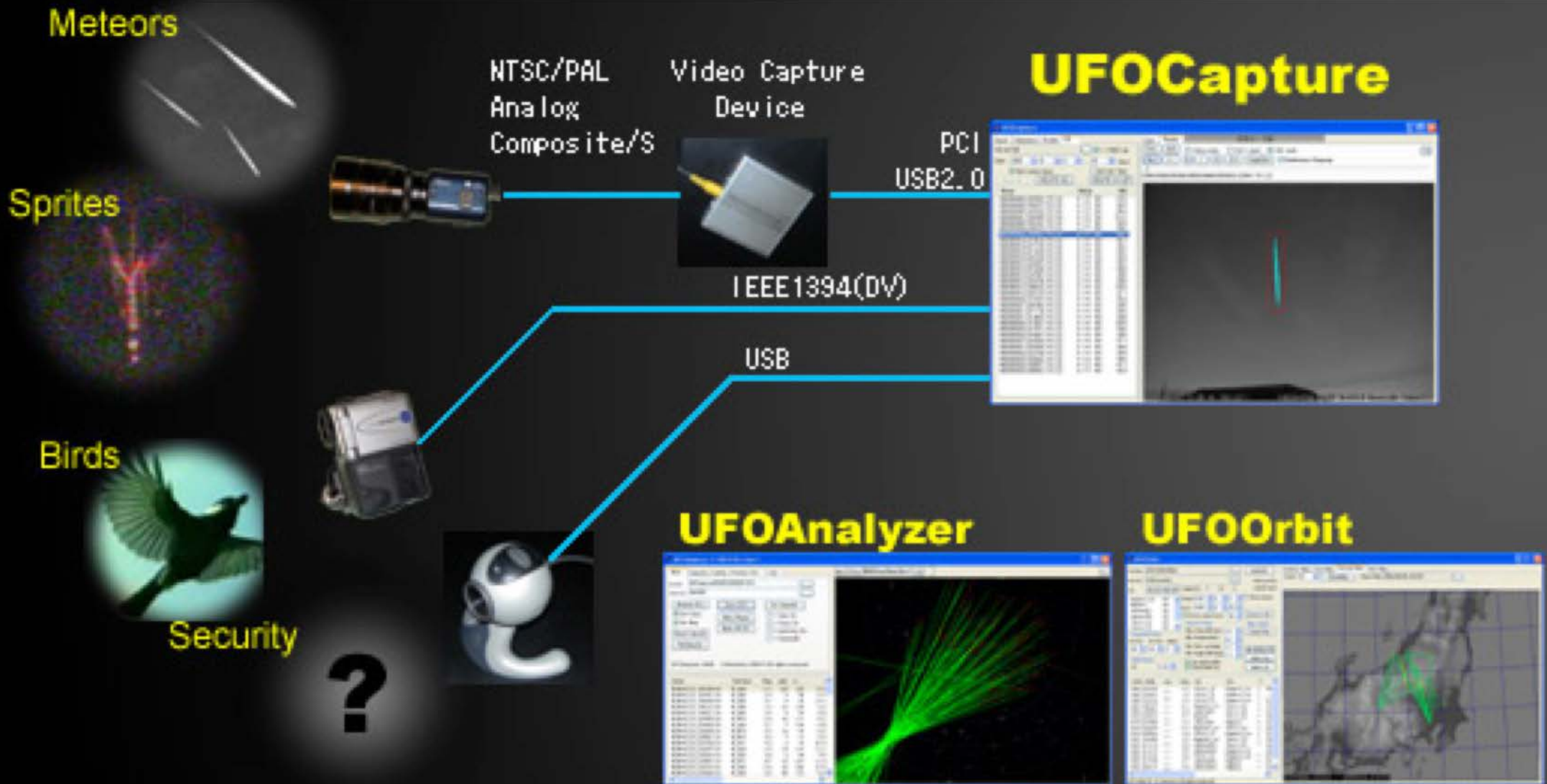


ペルセ群 (60Km/s) は酸素輝線や窒素分子バンドが強い。
ふたご群 (35Km/s) は紫外線から青側の金属輝線が強い。

しし座流星群の流星痕スペクトル



UFOキャプチャー



<http://sonotaco.com/>

系外流星のステレオ分光観測

- 最新のCMOSビデオカメラは高い感度を持ち、紫外線対物レンズが市販されるようになった。
- UFO-CaptureおよびUFO-Analyzer、UFO-Orbitによってそれぞれ自動ビデオキャプチャー、軌跡の測定、軌道計算が可能。
- それぞれ50km程度の距離の3地点ビデオ撮像観測と1,2箇所の分光観測。

撮像観測 : >8 mag., FOV: 32×36 [deg.] (II85/1.2の10.7倍),

120 流星/時 $\times 6$ h $\times 200$ 夜 = 144,000/年,

系外流星候補 (II85/1.2): $V_H > 44.0$: 0.45%, $V_H > 46.6$: 0.09%,

$144,000 \times 0.0009 \sim 0.0045 = 130 \sim 650$ /年,

分光観測 : >6 mag. \rightarrow 系外流星の金属組成比,

$130 \sim 650 \times 2.0^{(6-8)*} = 33 \sim 163$ /年

*散在流星の光度比: 1.8~2.2

Summary

- 重野氏と流星物理セミナーWGによって取得された3,886個の流星軌道を解析した。

- II85/1.2によって取得された系外流星候補 (9.0 mag.~)

$V_H > 42.1$ km,	$V_H - 42.1 > 1\sigma$:	0.99% (22/2,222),
$V_H > 46.6$,	$V_H - 42.1 > 3\sigma$:	0.09% (2/2,222).

- カナダのI.I.ビデオ観測 (9.5 mag.~)

$V_H > 42.1$,	$V_H - 42.1 > 1\sigma$:	0.98% (17/1,739),
$V_H > 46.6$:	0.

- 系外流星候補の8/15 (3σ)が銀河面から30%の範囲から到来。

- 最新の3地点CMOSビデオ撮像観測 :130~650 系外流星/年
(FOV: 32 × 36 [deg.])

- 分光観測 : 33~163 系外流星/年

- 系外流星の金属組成比

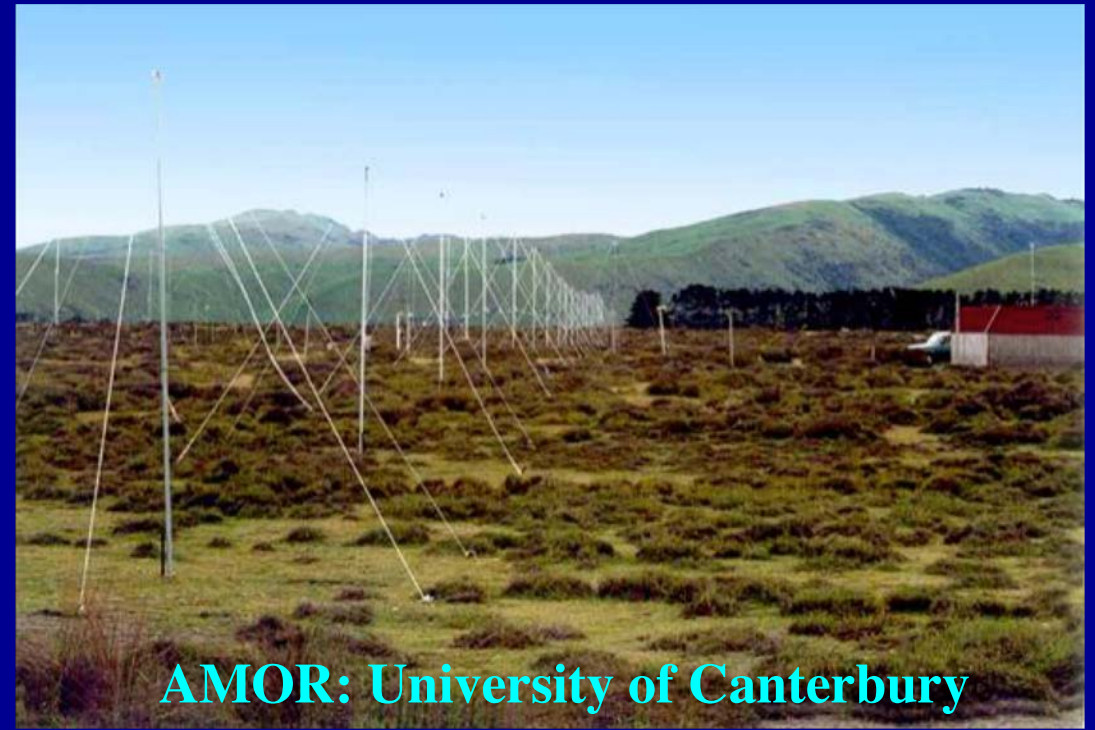
太陽系における星間物質の検出



- 探査機等のParticle counterによって $10^{-19} \sim 10^{-11} \text{kg}$ (直径: $0.005 \sim 2 \mu\text{m} @ 1\text{g/cm}^3$) の粒子を検出。
- 木星近傍では半数以上が星間ダストと思われる。
- 1auにおける粒子の3~30%は星間ダストと見積もられる。

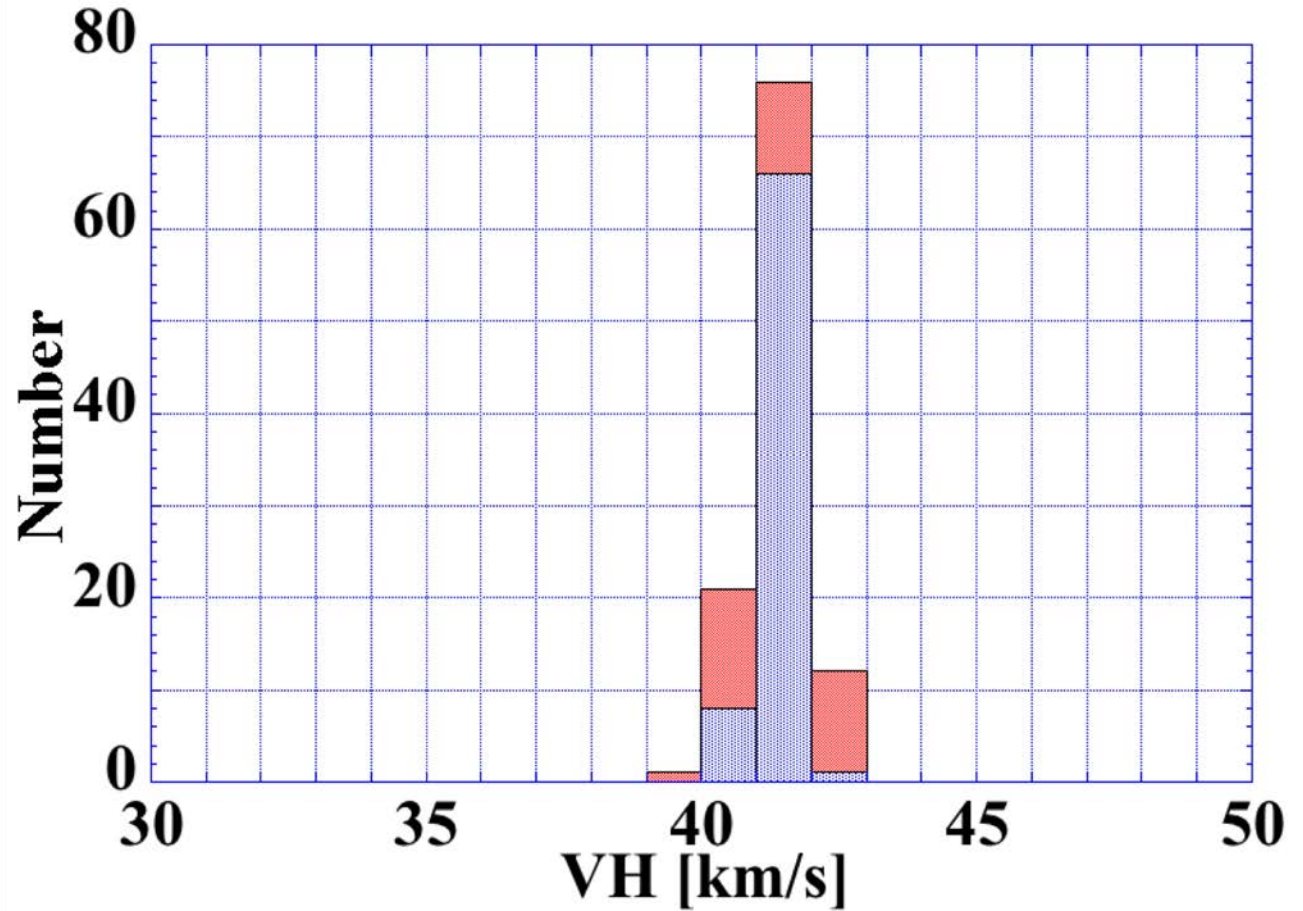
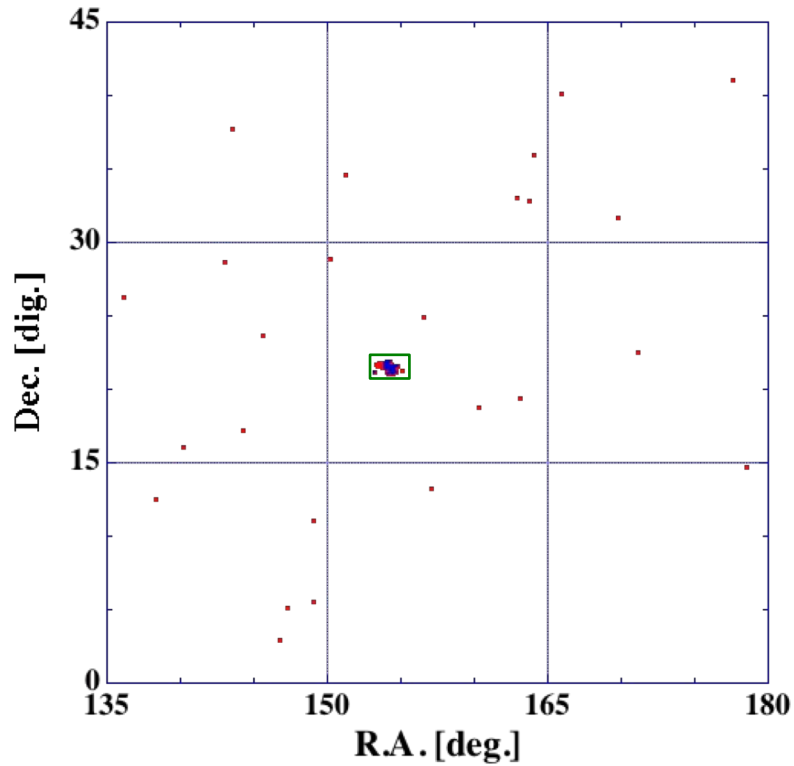
[M. Baguhl et.al. 1996]

流星レーダ観測



- $10^{-14} \sim 10^{-9} \text{kg}$ (直径: $0.2 \sim 10 \mu\text{m}$ @ 1g/cm^3) : **4.8%** (143/3000) が $e > 1.0$ (Arecibo, プエルトリコ, 口径300m, 430MHz)。
- $5 \times 10^{-9} \sim 10^{-6} \text{kg}$ (直径: $10 \sim 100 \mu\text{m}$ @ 1g/cm^3) : **3.2%** (7,911/250,000) が $e > 1.0$ (MARS: ウクライナ, 31.1MHz)。
- $> 10^{-10} \text{kg}$ (直径: $> 5 \mu\text{m}$ @ 1g/cm^3) : **0.46%** (1,600/350,000) が地心速度 $> 100 \text{ km/s}$ ($e > 2.5$, AMOR, ニュージーランド)。

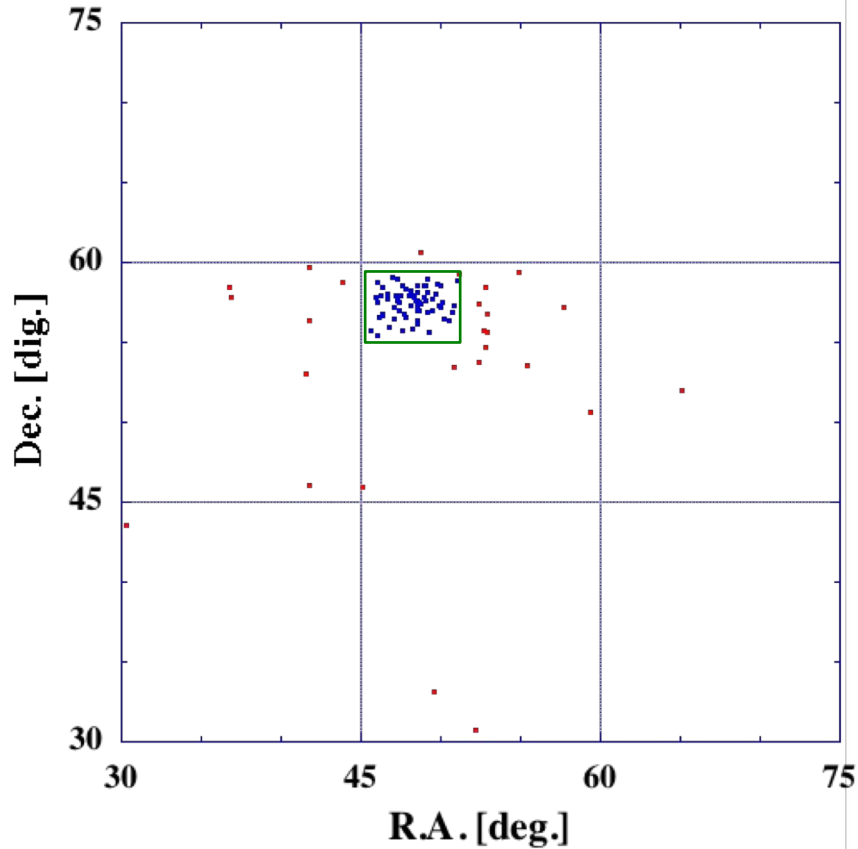
Distribution of Eccentricities of Leonids



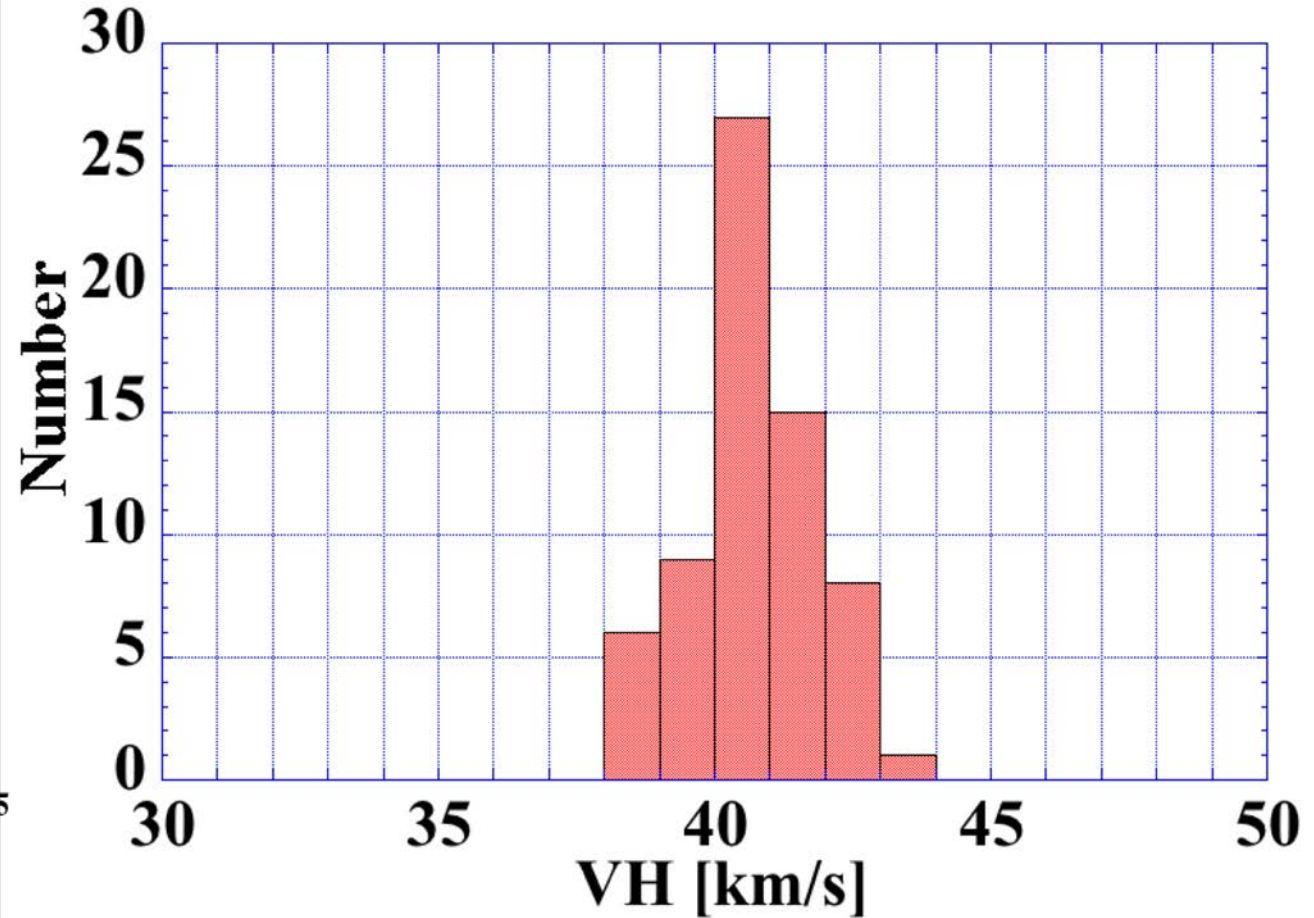
Radiant point of 2001. 11. 18,
R.A: 2° × Dec.: 1°

	Photo	I.I.
Number:	75	35
min :	40.6	39.4 [km/s]
max :	42.0	42.8
mean :	41.30	41.32 (41.3)
Median:	41.3	41.3
SD :	0.26	0.82

Distribution of Eccentricities of Perceids

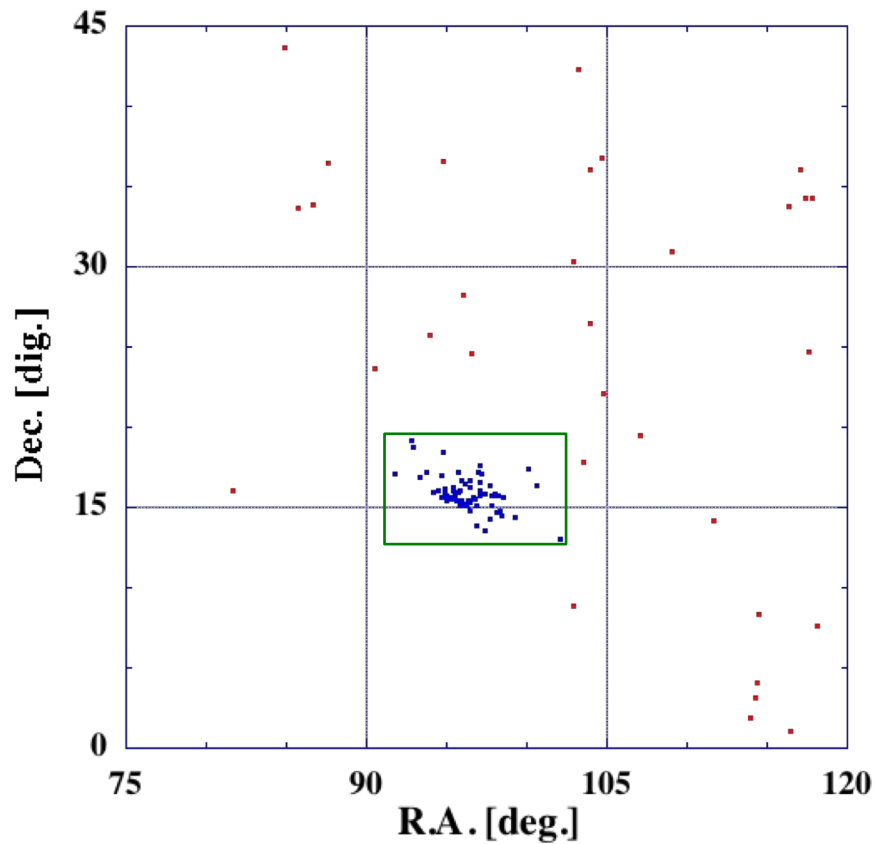


**Radiant point of 2004.8.12,
R.A: 4.4° × Dec.: 3.7°**

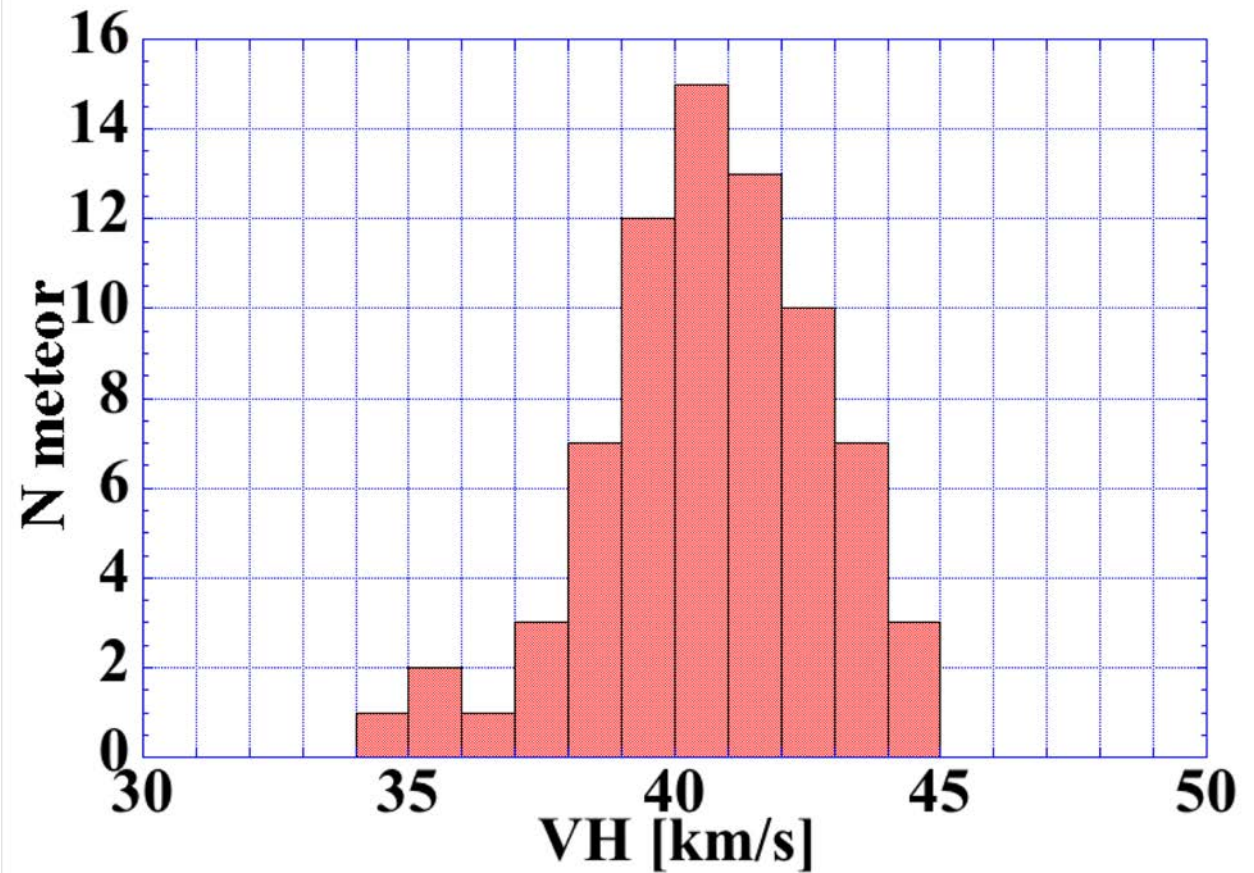


Number : 66
min : 38.1 [km/s]
max : 43.4
mean : 40.55 (40.7)
median : 40.5
SD : 1.10

Distribution of Eccentricities of Orionids

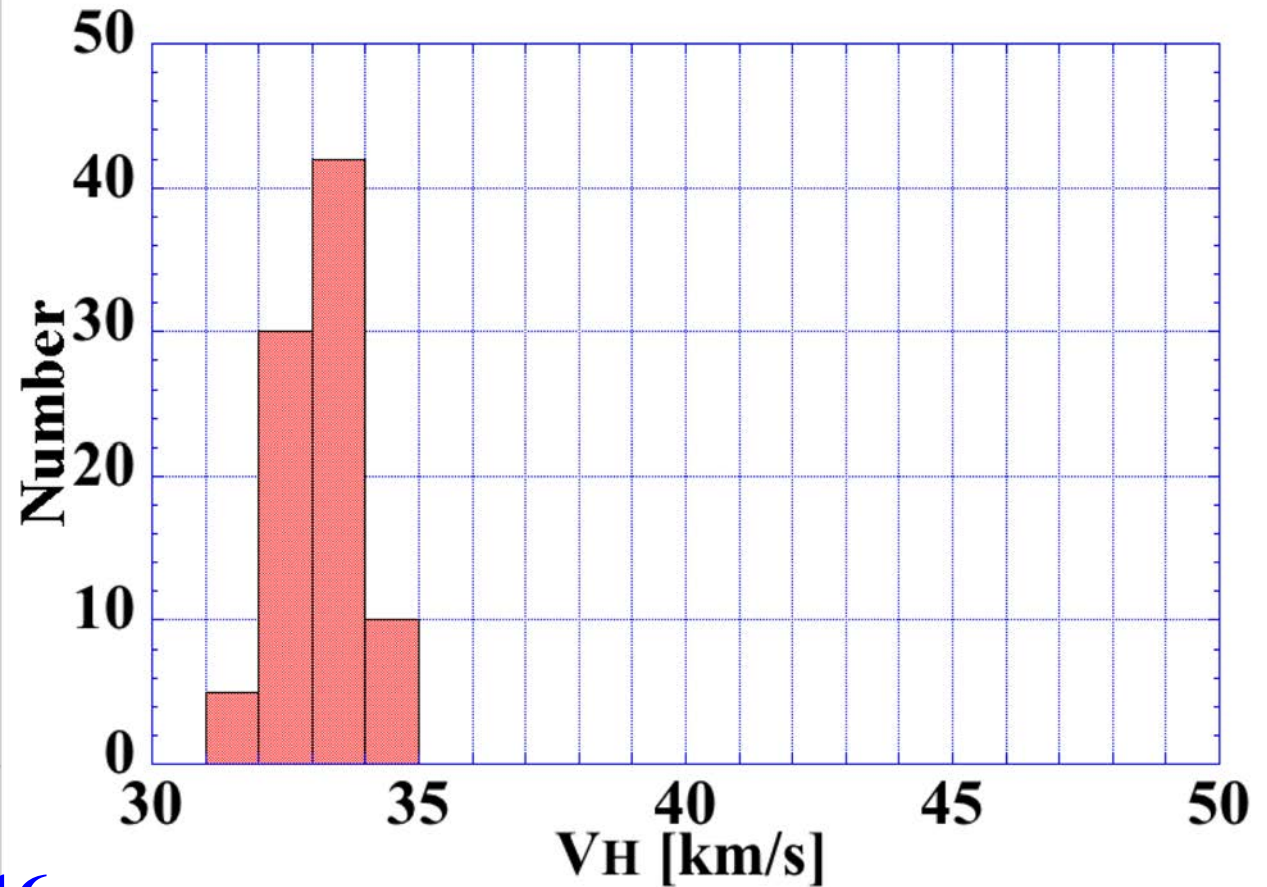
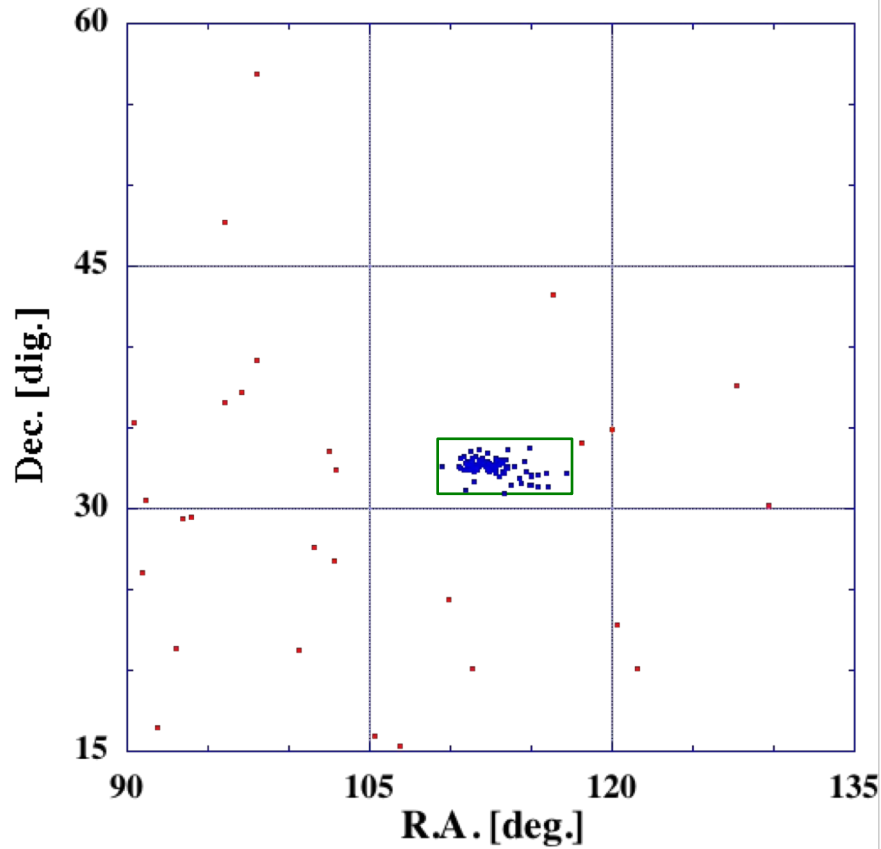


**Radiant point of Orionids,
R.A: 10.3° × Dec.: 6.2°**



Number : 74
min : 34.4 [km/s]
max : 44.9
mean : 40.59 (39.3)
median : 40.75
SD : 2.11

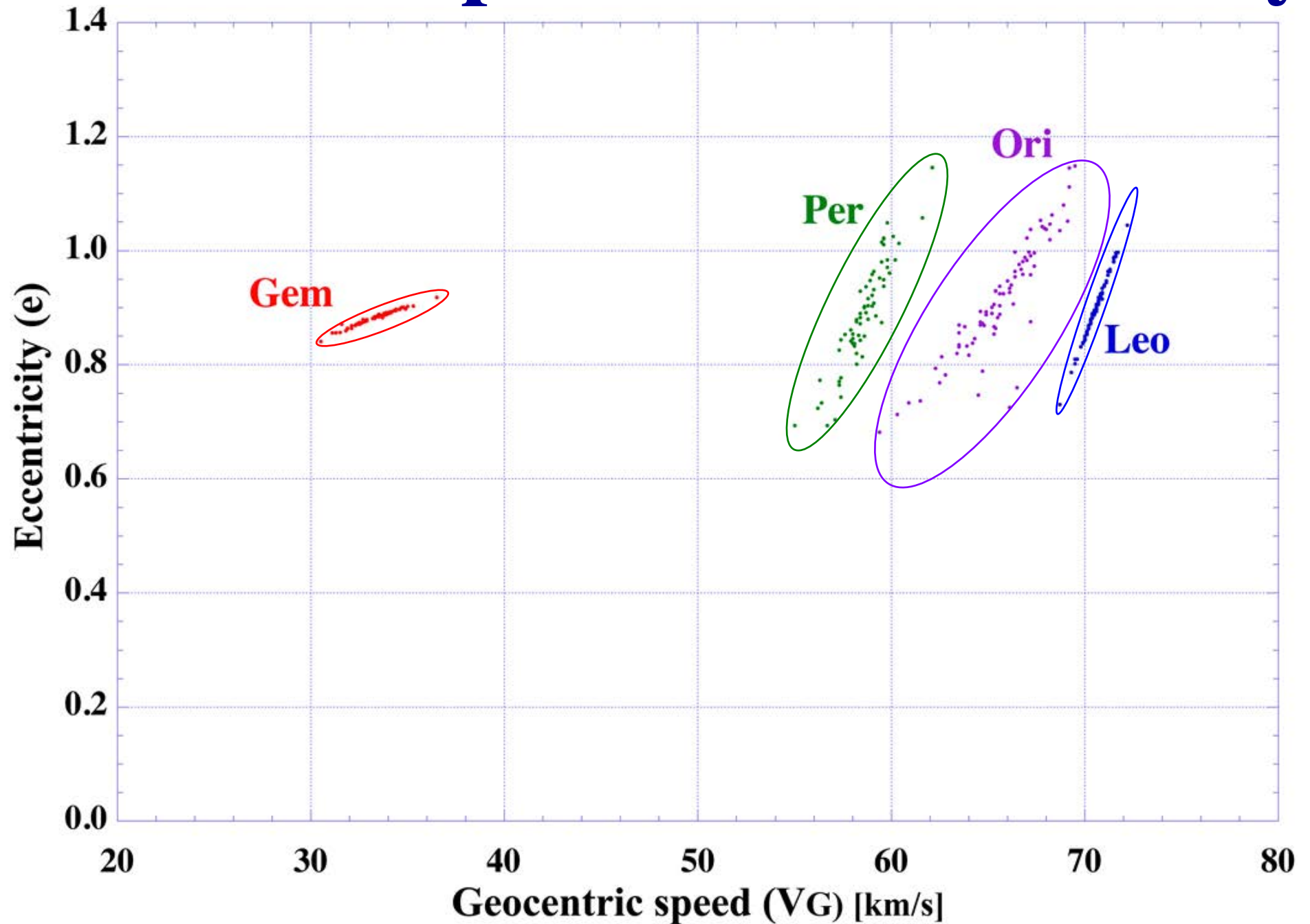
Distribution of Eccentricities of Geminids



Radiant point of 1999. 12. 12-16,
R.A: 7.7° × Dec.: 2.9°

number: 47
min : 31.5 [km/s]
max : 34.9
mean : 33.18 (31.3)
median : 33.1
SD : 0.75

Geocentric Speed and Eccentricity



V_H and absolute magnitude of meteor showers

Minimum absolute magnitude is arranged the same value within shower

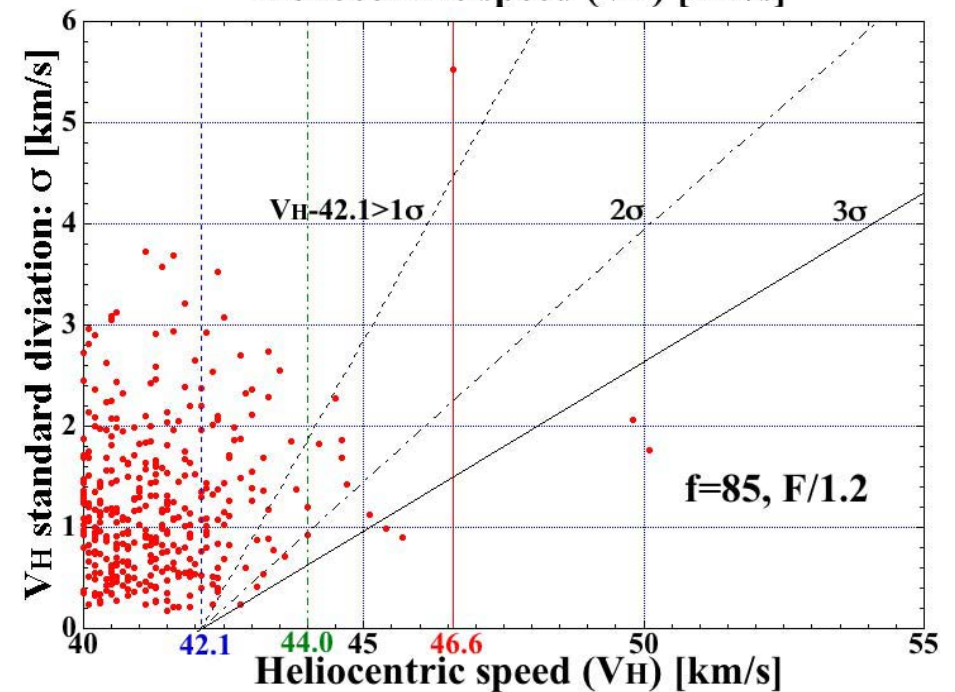
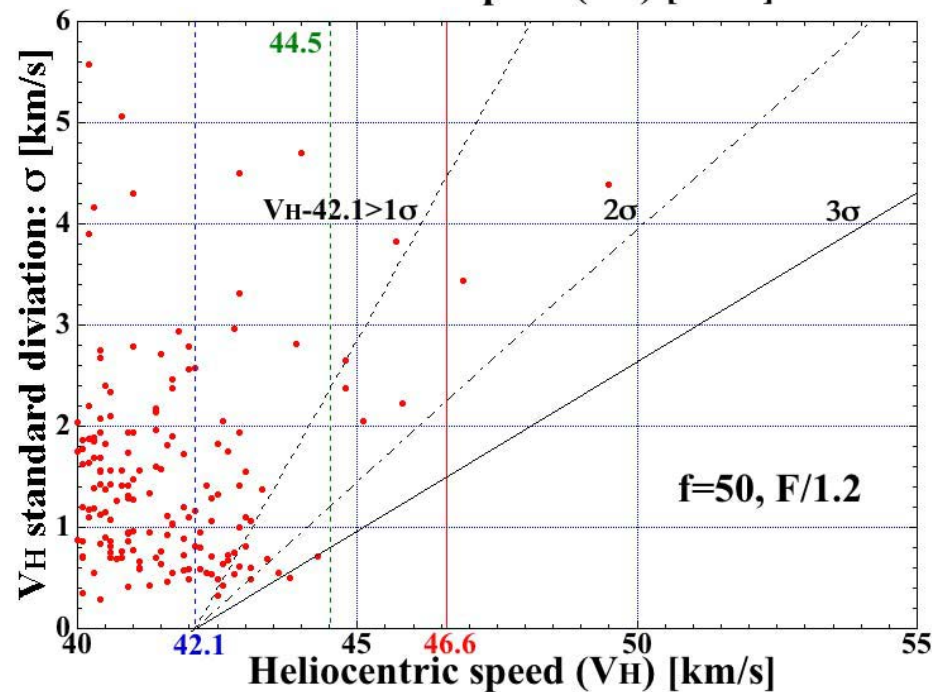
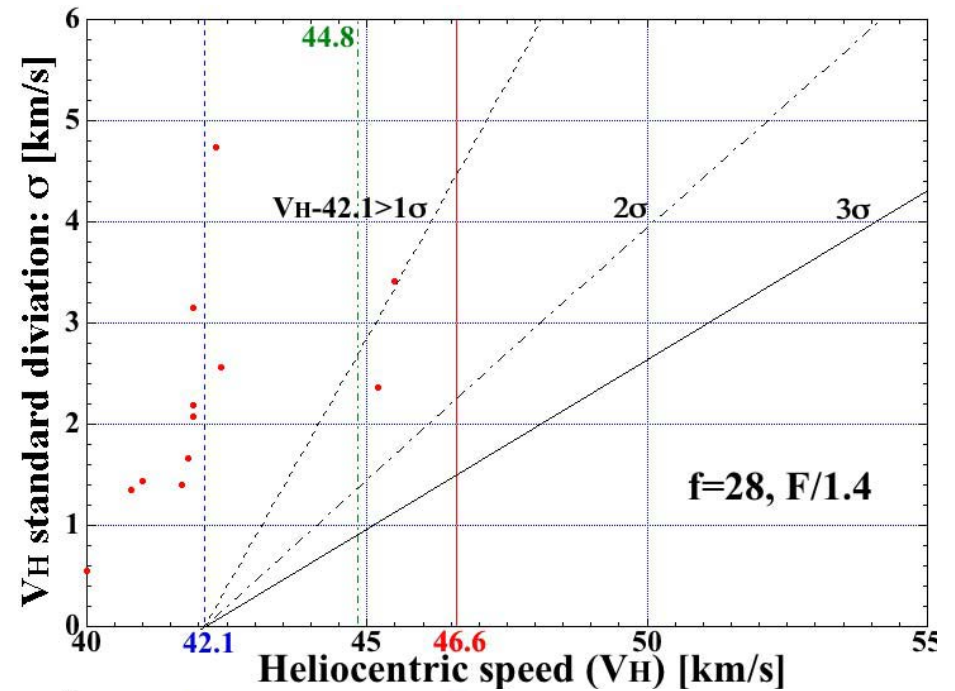
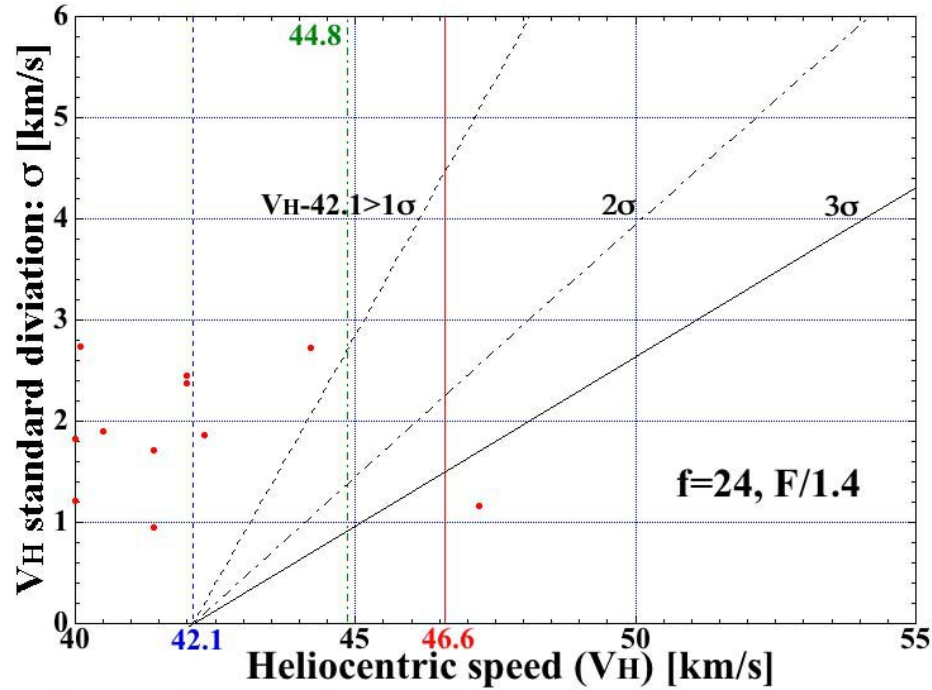
Shower	Date y/m/d	Instrum ent	Number	V_H [km/s]			Absolute Magnitude			Remarks
					Mean	δ	Min.	Mean	Max.	
Leo	2011/11/18	P50/1.4	75	41.3	41.3	0.26	1.8	0.5	-4.4	
		II85/1.2	35		41.3	0.82	4.9	0.9	-6.4	
Gem	1999/12/12	II85/1.2	47	31.3	33.2	0.75	7.0	4.6	0.5	
Per	1996/08/12	II85/1.2	34	40.7	40.7	1.19	5.0	2.7	-1.3	
	1997/08/12		24		40.6	1.16	5.3	2.2	-1.4	
	2004/08/12	II24/1.4	66		40.6	1.10	4.1	2.2	-2.3	
Ori	1993/10/24	II50/1.4	20	39.3	40.5	2.06	4.3	2.8	0.8	
	1996/10/20		18		41.1	1.78	3.7	2.2	0.7	
	2009/10/20	II85/1.2	25		39.9	1.61	5.5	3.5	1.9	
Leo	2011/11/18	P50/1.4	27	41.3	41.3	0.17	0.5	-0.8	-4.4	
		II85/1.2	19		41.5	0.69	0.5	-1.4	-6.4	
Per	1996/08/12	II85/1.2	15	40.7	41.0	0.63	3.0	1.2	-1.3	
	1997/08/12		13		41.0	0.84	2.9	0.7	-1.4	
	2004/08/12	II24/1.4	44		40.7	0.90	3.0	1.5	-2.3	
Ori	1993/10/24	II50/1.4	15	39.3	41.1	1.76	3.5	2.4	0.8	
	1996/10/20		18		41.0	1.98	3.4	2.1	0.7	
	2009/10/20	II85/1.2	12		40.8	0.82	3.5	2.8	1.9	

系外流星候補

Instrument	Sporadic	Sporadic $e > 1.0$	$42.1 + 3\delta < V_H < 46.6$ [km/s]		$46.6 < V_H$ [km/s]		Ratio [km/s]		
			$1\sigma < V_H - 42.1 < 3\sigma$	$3\sigma < V_H - 42.1$	$1\sigma < V_H - 42.1 < 3\sigma$	$3\sigma < V_H - 42.1$	$V_H - 42.1 > \sigma$	$V_H - 42.1 > 3\sigma$	$V_H > 46.6$
II85/1.2	2,222	64	6*	2	0	2	0.45%	0.18%	0.09%
II50/1.2	741	49	2*	0	1*	0	0.40%	0 %	0.13%
II28/1.4	35	2	1	0	0	0	2.9 %	0 %	0 %
II24/1.4	100	5	0	0	0	1	1.0 %	1.0 %	1.0 %

* 交差角が小さいデータを削除(< 9 deg.).

V_H and σ of Video Meteor Orbital Data



Candidates of ExoMeteor

No.	Date	UT	VH [km/s]	s [km]	n= (VH- 42.1) /s	Abs. mag.	Cross angle [Deg.]	Path length 1 [Deg.]	Path length 2 [Deg.]	Focal length [mm]	Remarks
	1994/03/06	17:41:19	54.7	7.5	1.7	3.9	4	3.2	2.7	50	Removed
1	2006/08/20	16:16:40	50.1	1.8	4.5	3.4	22	3.4	6.3	85	
2	2002/08/06	16:54:23	49.8	2.1	3.7	0.3	11	2.9	4.4	85	
	1994/03/06	17:11:24	49.5	4.4	1.7	4.6	2	2.8	4.5	50	Removed
3	2004/04/20	15:08:36	47.2	1.2	4.4	3.4	20	5.0	4.8	24	
4	1993/10/24	18:33:28	46.9	3.4	1.4	3.4	77	1.9	1.6	50	
5	1992/12/30	18:06:56	45.8	2.2	1.7	3.7	24	2.2	3.3	50	
6	2006/12/22	19:08:54	45.7	0.9	4.0	3.6	23	2.4	3.4	85	
7	2004/01/24	18:24:08	45.4	1.0	3.3	3.7	15	6.3	6.4	85	
8	1994/11/16	18:17:57	45.2	2.4	1.3	0.9	52	2.8	2.9	28	
	1994/10/14	16:58:11	45.1	2.1	1.5	2.5	8	4.2	5.4	50	Removed
	2006/12/22	17:24:33	45.1	1.1	2.7	2.9	7	4.9	4.5	85	Removed
	1993/11/16	16:03:11	44.8	2.7	1.0	3.5	7	2.7	3.0	50	Removed
9	1996/10/20	18:32:52	44.8	2.4	1.1	3.8	27	3.9	3.4	50	
10	2006/12/22	18:40:56	44.7	1.4	1.8	3.0	12	3.0	3.2	85	
	2006/12/22	16:20:42	44.6	1.9	1.3	3.4	4	6.9	7.2	85	Removed
11	1996/08/12	17:29:12	44.6	1.7	1.5	4.1	14	3.2	5.2	85	
12	2008/04/04	17:01:44	44.5	2.3	1.1	3.6	18	3.2	3.7	85	
13	2001/12/14	15:26:15	44.2	1.8	1.2	6.1	73	1.0	1.3	85	
14	1997/08/12	17:04:30	44.0	1.2	1.6	4.6	64	2.8	3.7	85	
15	2001/12/12	19:22:11	44.0	0.9	2.1	-0.4	60	2.0	1.6	85	

ExoMeteoroid Candidate 14

$e: 1.21$ $\omega: 200$

$q: 0.98$ $\Omega: 140$

$i: 143$

Asymptote direction: Aur

