

Spektroskopie meteorů

Jiří Borovička

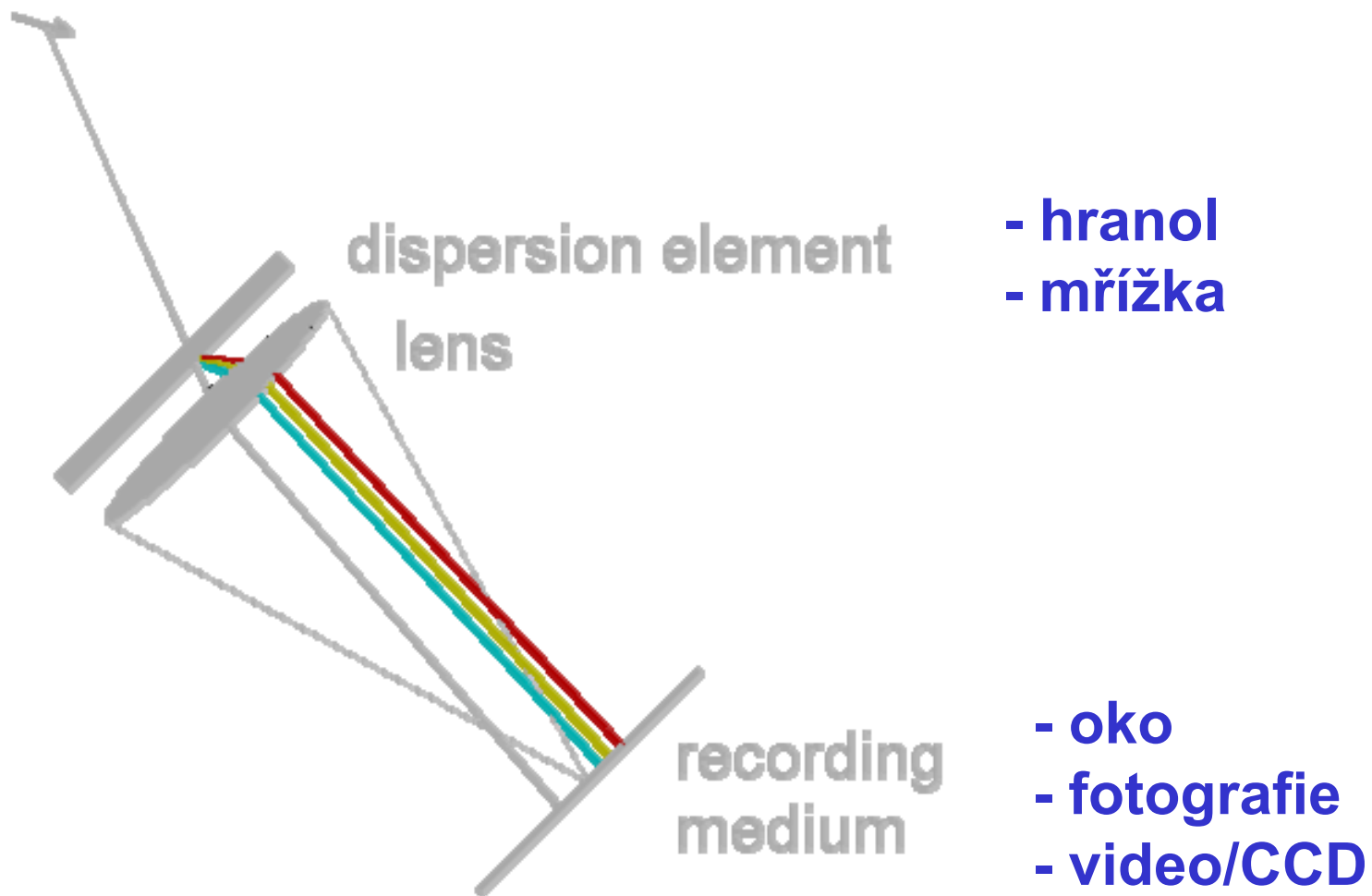
Astronomický ústav AV ČR, v.v.i.

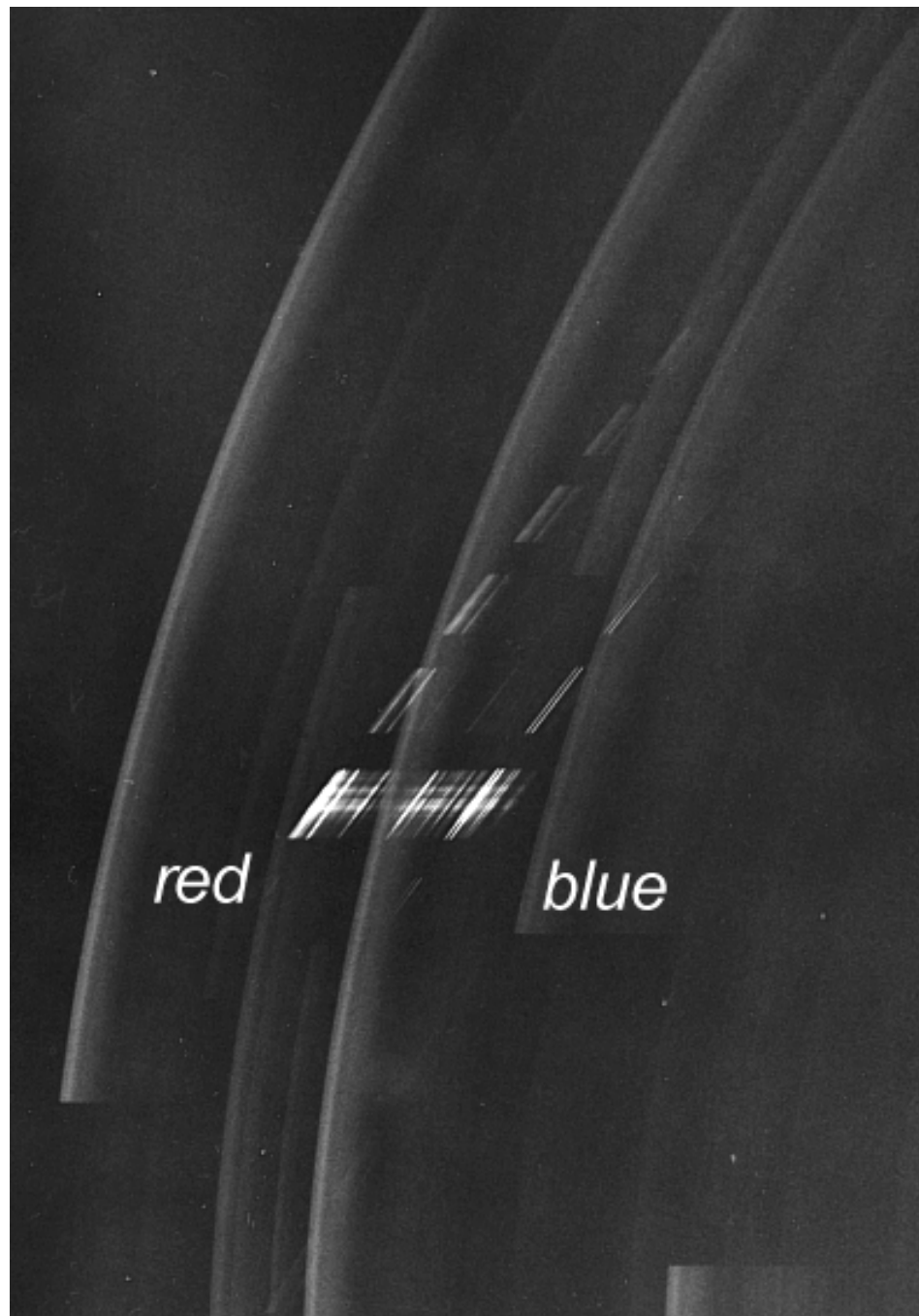
Ondřejov

`jiri.borovicka@asu.cas.cz`

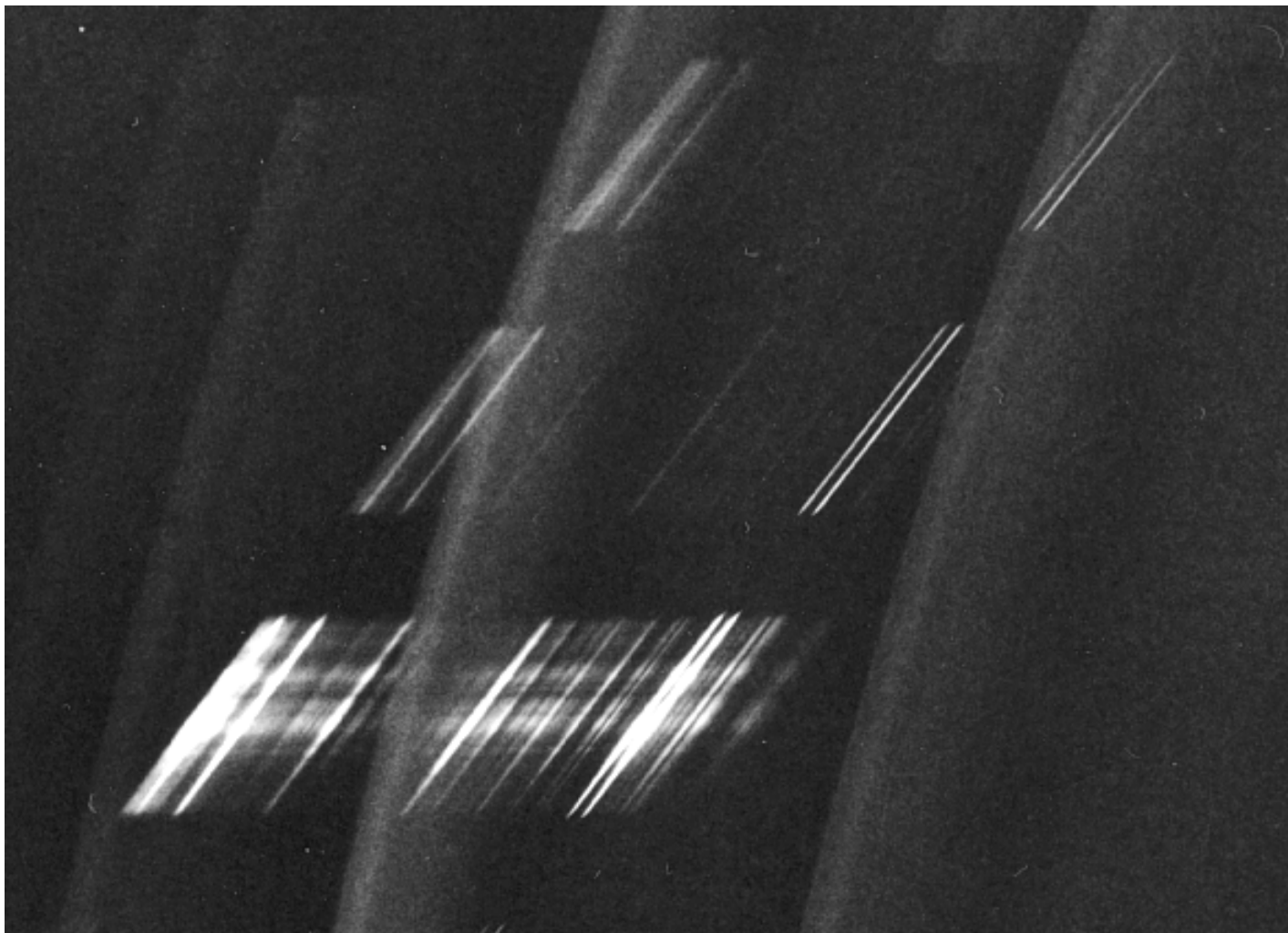
Přístroje

spektroskopie bez štěrbin



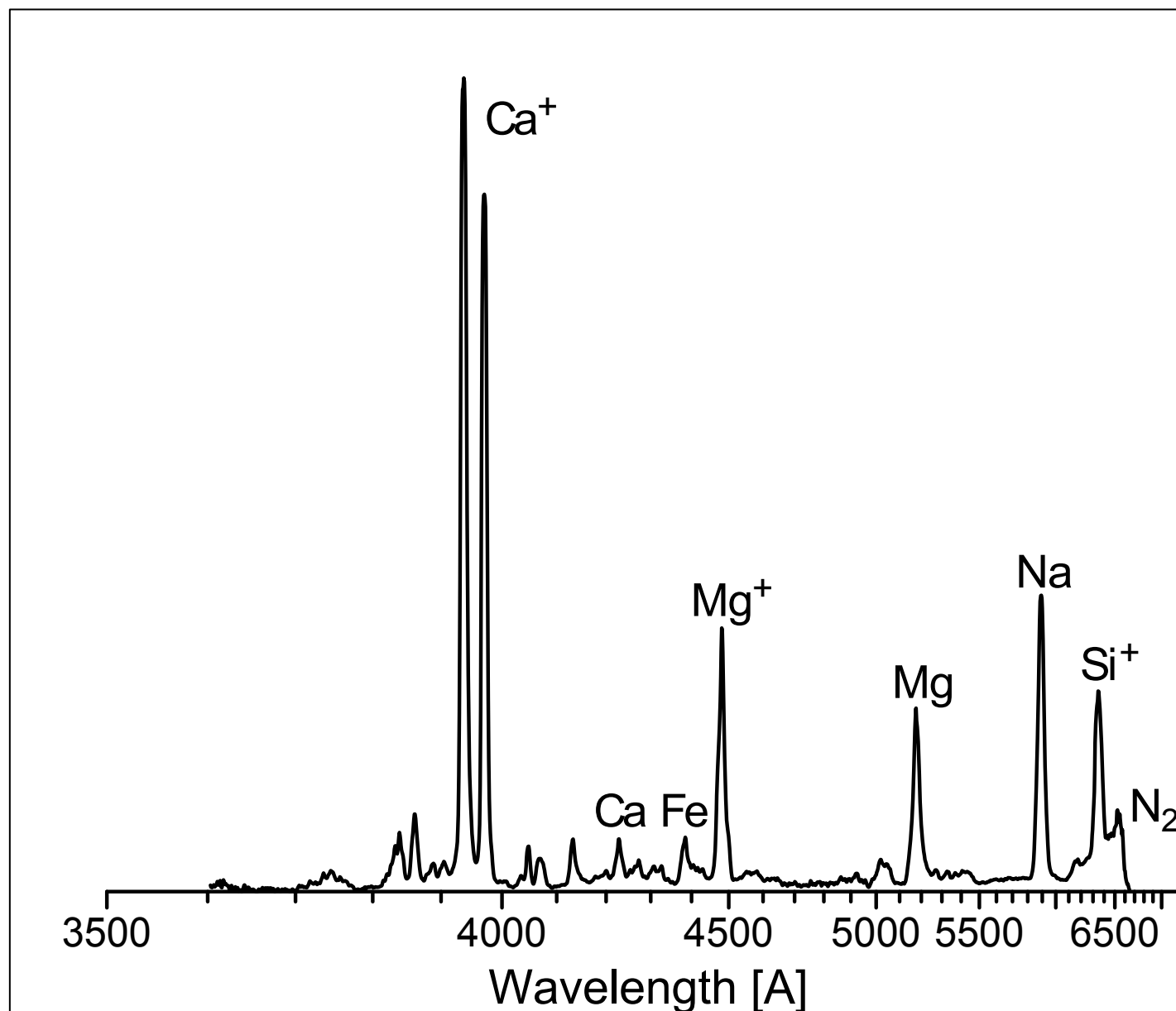


Příklad
fotografického
hranolového
spektra jasné
Perseidy



Detail hranolového spektra

Fotometrický řez hranolovým spektrem



Spektrum jasné Perseidy

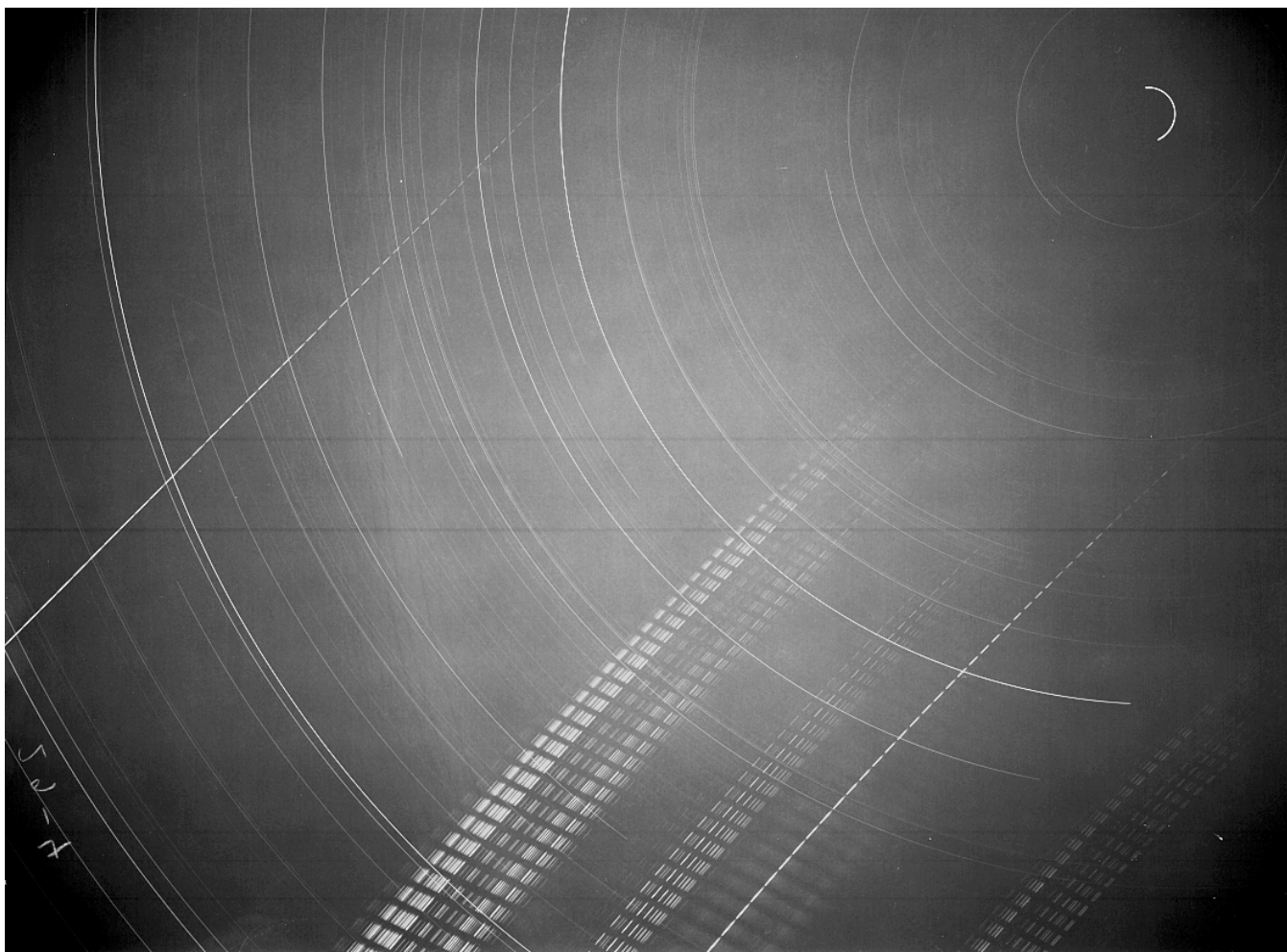
- emisní čáry meteorických par
- neutrální (Na, Mg, Fe, Ca) i ionizované prvky (Ca^+ , Mg^+ , Si^+)
- molekulární pásy atmosférického N_2



Baterie šesti fotografických kamer s
mřížkou a rotujícím sektorem v Ondřejově

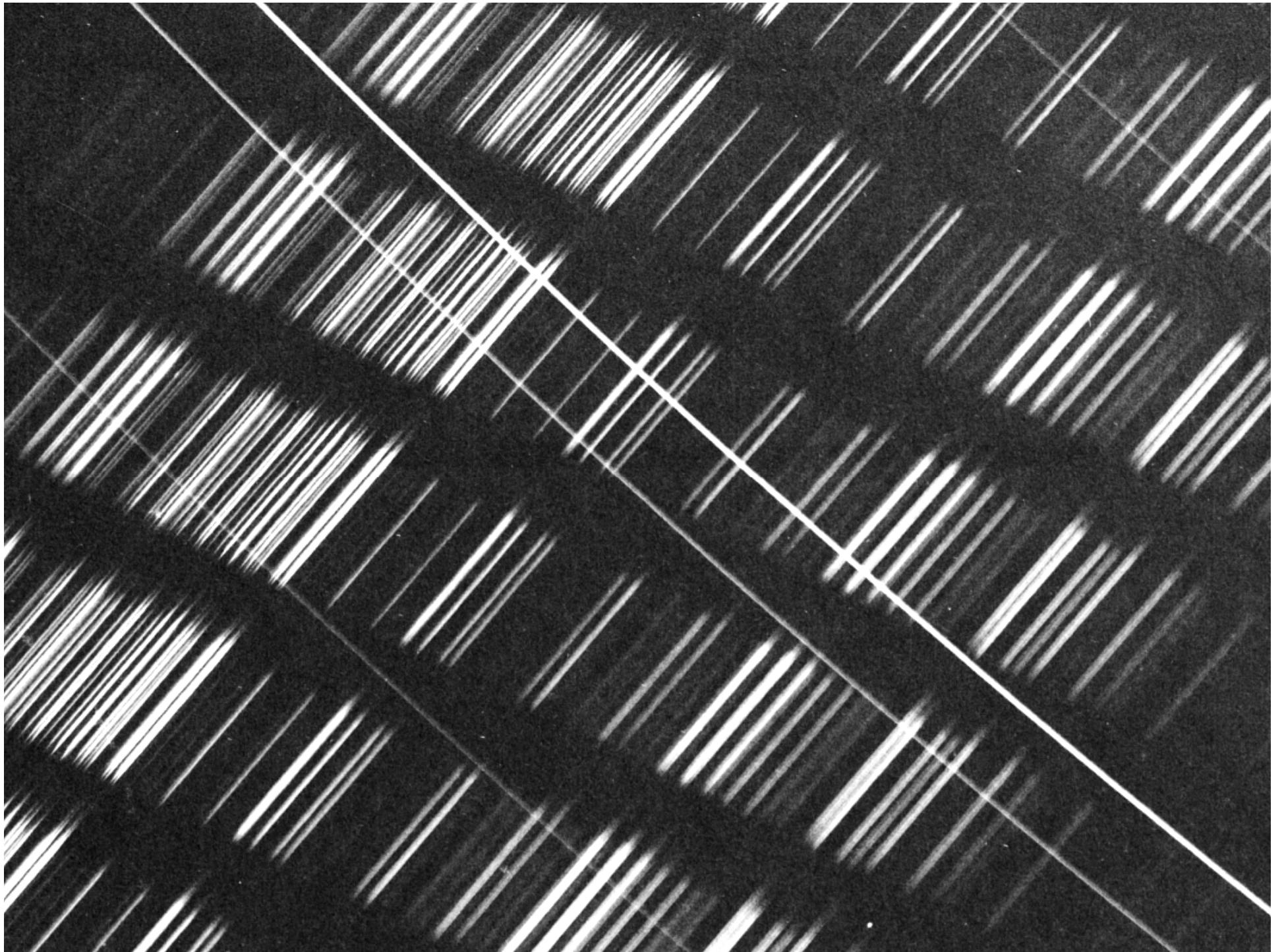
Příklad mřížkového spektra pomalého sporadického bolidu

nultý
řád



první řád

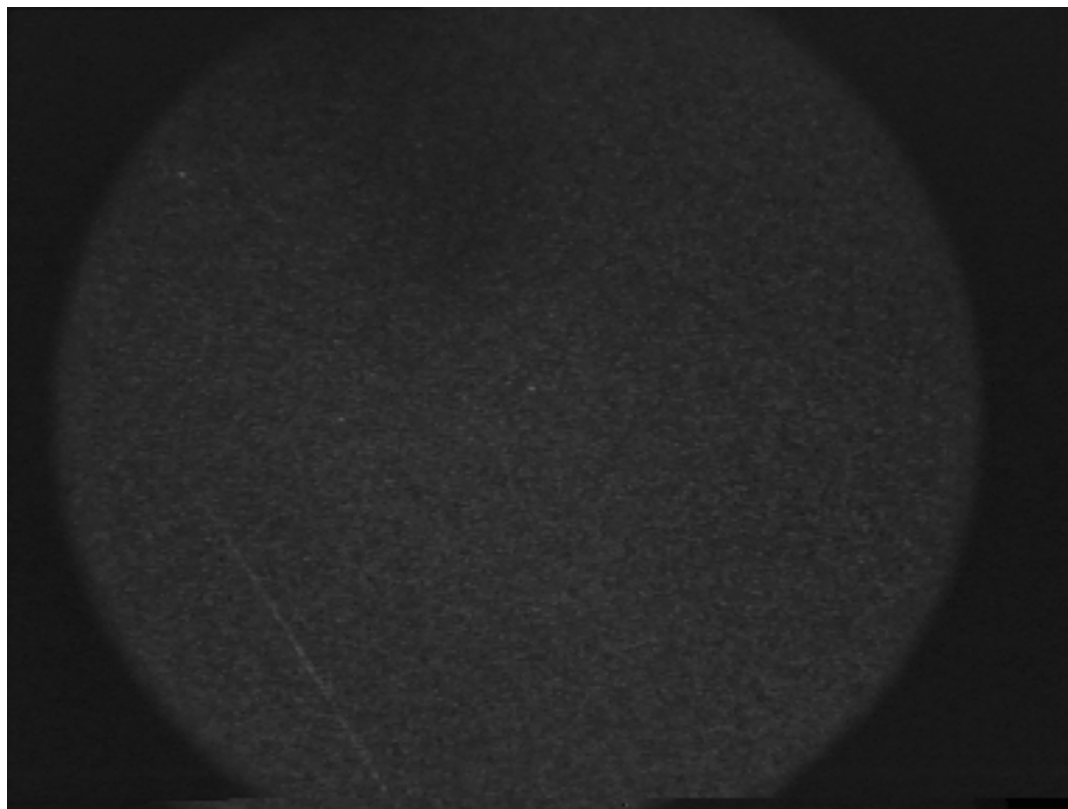
druhý řád



System for video spectroscopy

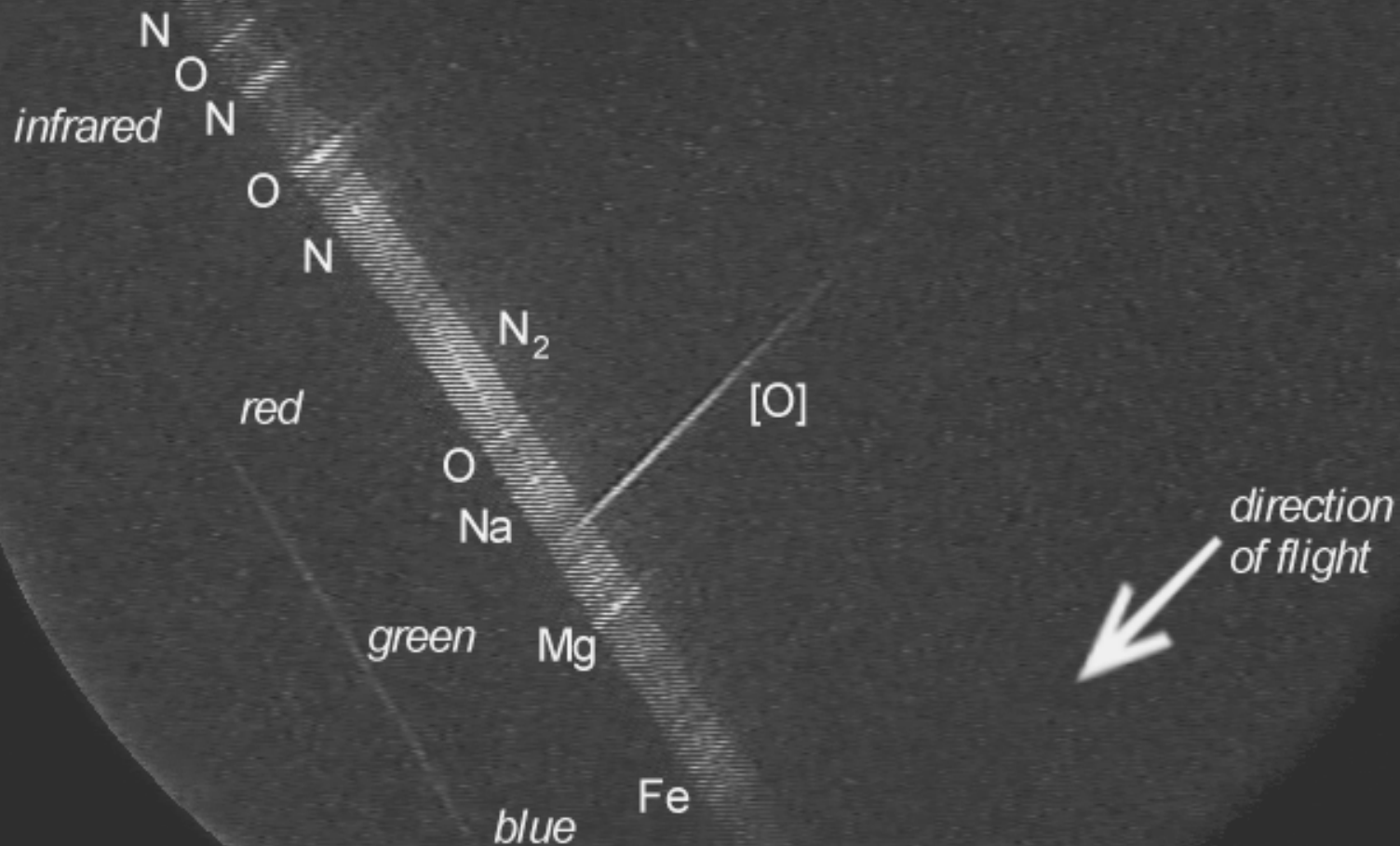


Příklad video spektra Leonidy



Spectrum of a Leonid meteor
November 18, 2001, 10:24:14 UT

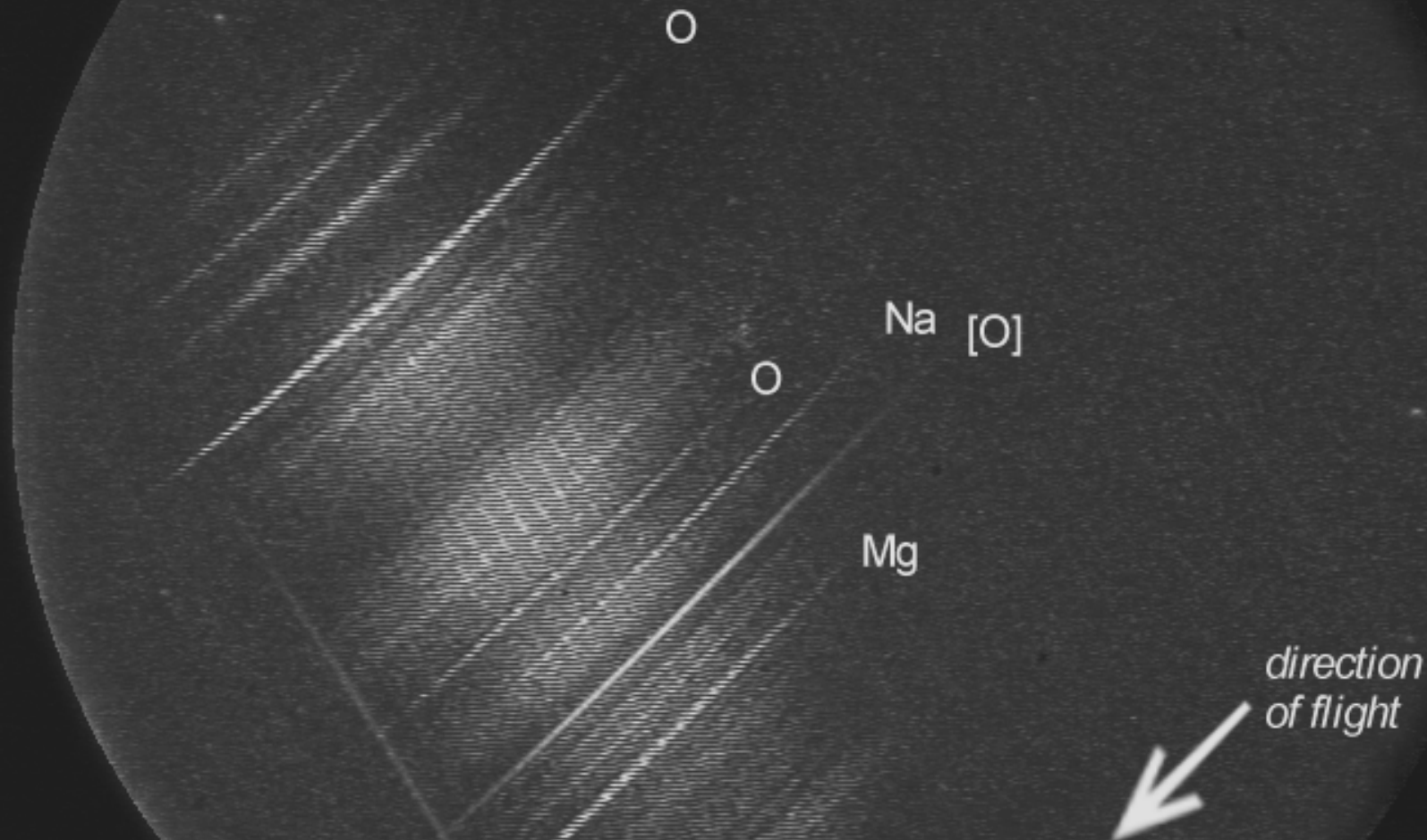
single frame



prepared by
Jiří Borovička
Ondřejov Obs

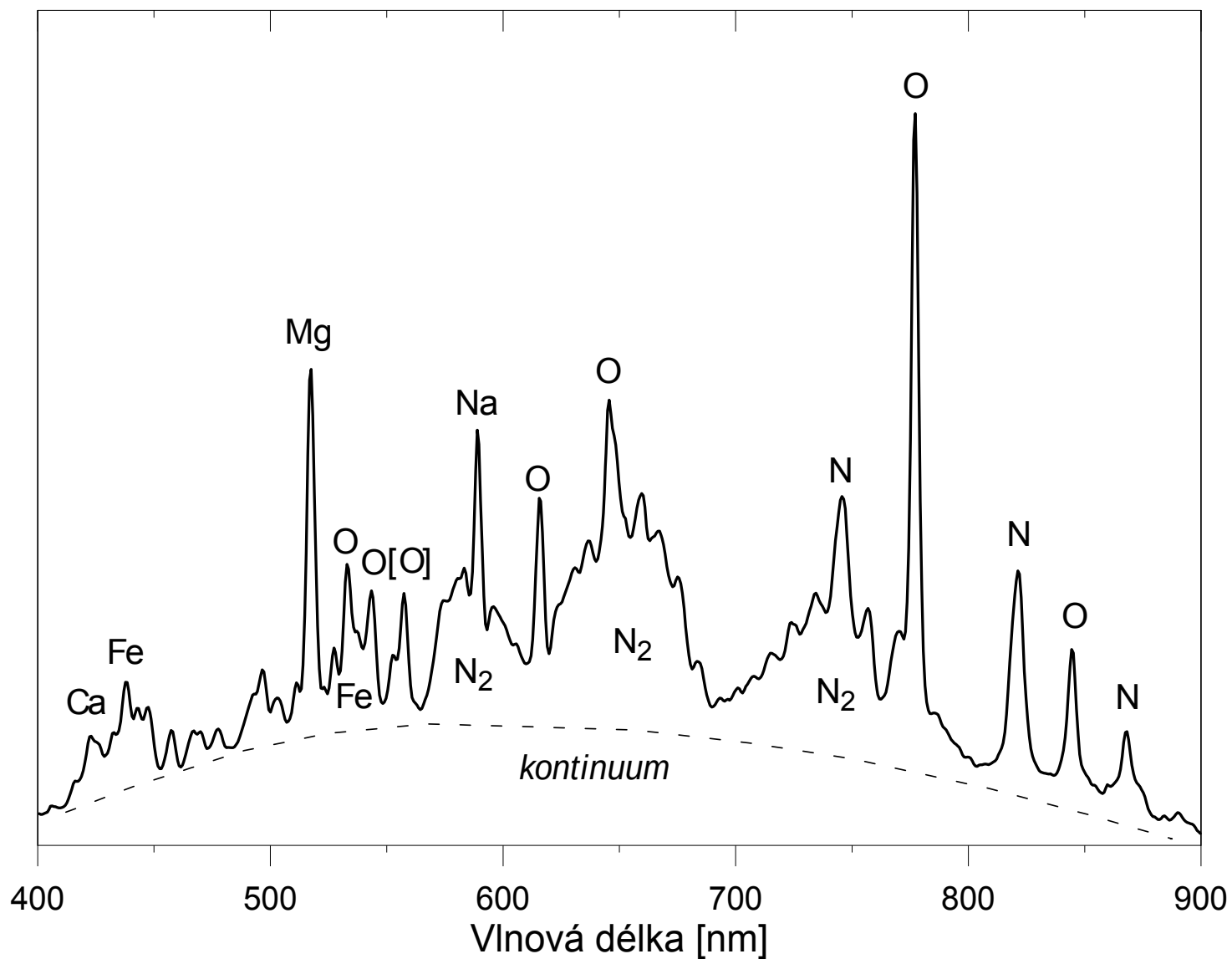
Spectrum of a Leonid meteor
November 18, 2001, 10:24:14 UT

summed image

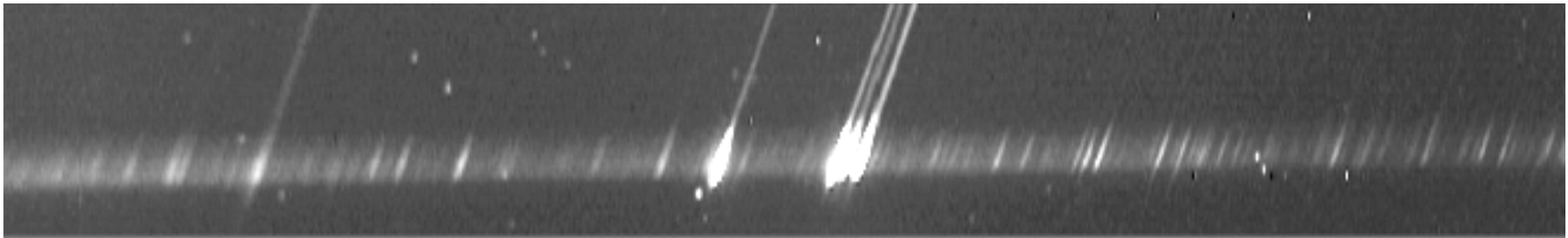


*prepared by
Jiří Borovička
Ondřejov Obs*

Fotometrický řez video spektrem



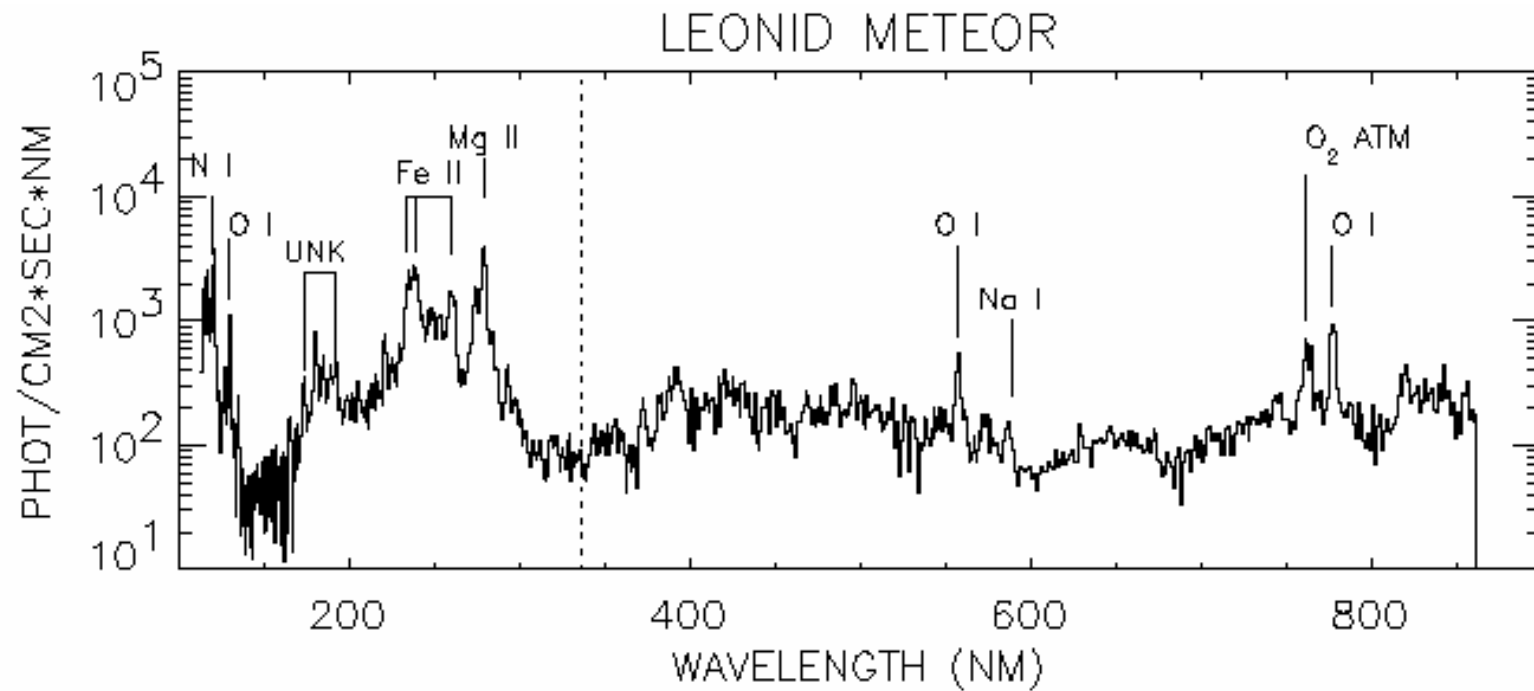
CCD spektrum jasné Leonidy



překrývající se spektrální řády

Jenniskens (2007)

„Kompletní“ spektrum Leonidy



From Carbary et al. (2003)

Záření meteorů

- Většina viditelného světla vychází z meteorických par ve formě emisních čar
- Záření zahřáté atmosféry je významné u rychlých meteorů, kde tvoří většinu infračerveného a dalekého UV záření
- Přítomno je také tepelné kontinuum
- Záření povrchu meteoroidu je málokdy důležité

Přenos záření ve spektrální čáře

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu$$

$$j_\nu = \frac{h\nu_0}{4\pi} n_2 A_{21} \Phi(\nu)$$

$$\alpha_\nu = \frac{h\nu_0}{4\pi} (n_1 B_{12} - n_2 B_{21}) \Phi(\nu)$$

$$(g_1 B_{12} = g_2 B_{21} \quad A_{21} = \frac{2h\nu^3}{c^2} B_{21})$$

$$S_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\frac{g_2 n_1}{g_1 n_2} - 1}$$

Předpoklad termodynamické rovnováhy

$$n_i = \frac{n}{U} g_i e^{\frac{E_i}{kT}}$$

$$S_\nu = B_\nu(T)$$

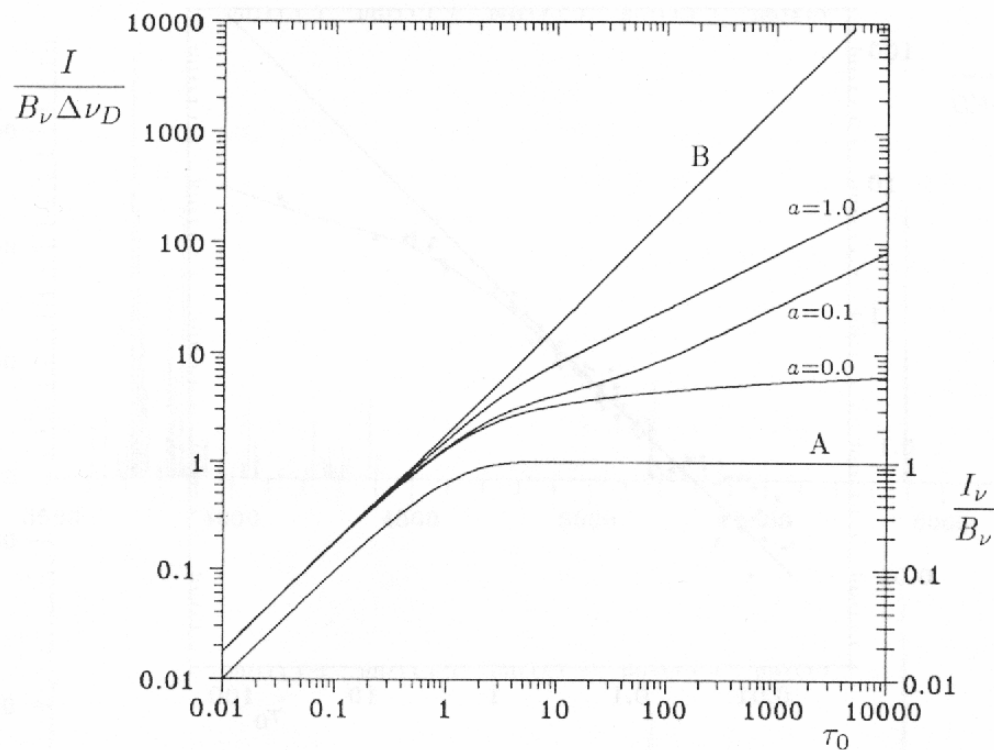
$$I_\nu = B_\nu(1 - e^{-\tau_\nu})$$

$$\tau_\nu = \int_0^s \alpha_\nu ds' \sim N g_1 f e^{-E_1/kT} \Phi(\nu)$$

$$(N = \int_0^s n ds')$$

$$I = P \int I_\nu d\nu$$

Emisní křivka růstu



Obrázek 3.3 Teoretické křivky růstu. Křivka A znázorňuje intenzitu ve středu čáry (platí pro ni šupnice vpravo). Ostatní křivky znázorňují celkovou intenzitu čáry zintegrovanou přes profil. Křivka B je myšlená závislost pro případ, že by neexistovala absorpce. Zbylé tři křivky jsou reálné křivky růstu pro různé hodnoty parametru a , tj. pro různé konstanty útlumu Γ .

Předpoklady pro interpretaci jasností emisních čar ve spektrech meteorů

- Záření pochází z vrstvy plynu o konečné tloušťce a viditelném efektivním průřezu P
- Obsazení hladin atomů je v celém objemu dané Boltzmanovým vztahem pro excitační teplotu T
- Nepředpokládáme, že plyn je opticky tenký

Volné parametry

- Excitační teplota, T
- Sloupcové hustoty pozorovaných atomů, N_j
- Efektivní průřez meteoru, P
- Konstanta útlumu, Γ

Určení chemického složení

1. Odhad elektronové hustoty
2. Sahova rovnice $(T, n_e) \rightarrow$
výpočet stupně ionizace
3. Přepočet zastoupení prvků neutrálních
prvků na celkové zastoupení

Odhad elektronové hustoty

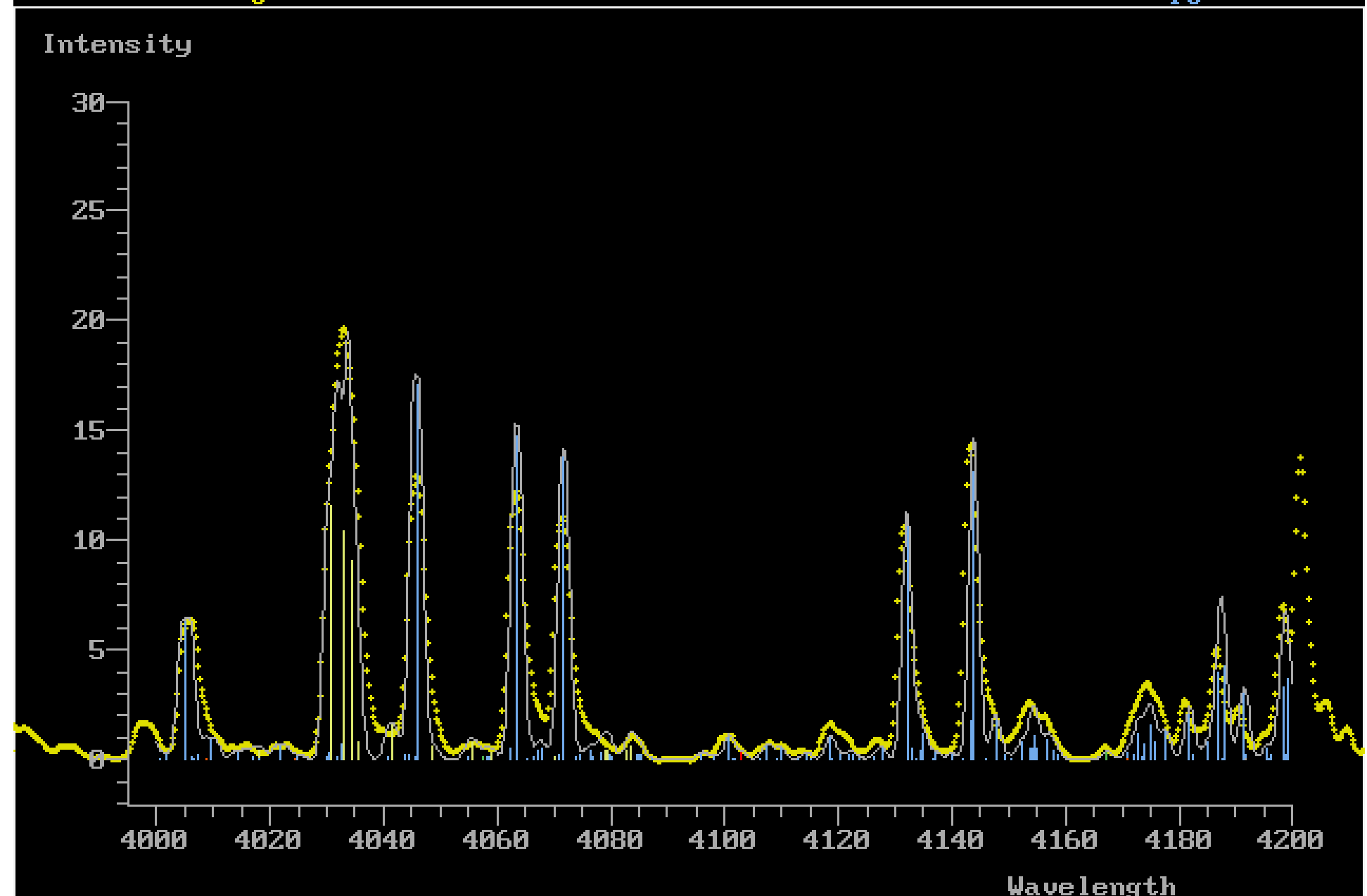
$$n_j = N_j/s$$

$$\frac{n_j}{n_j^+} = n_e \Omega_j(T)$$

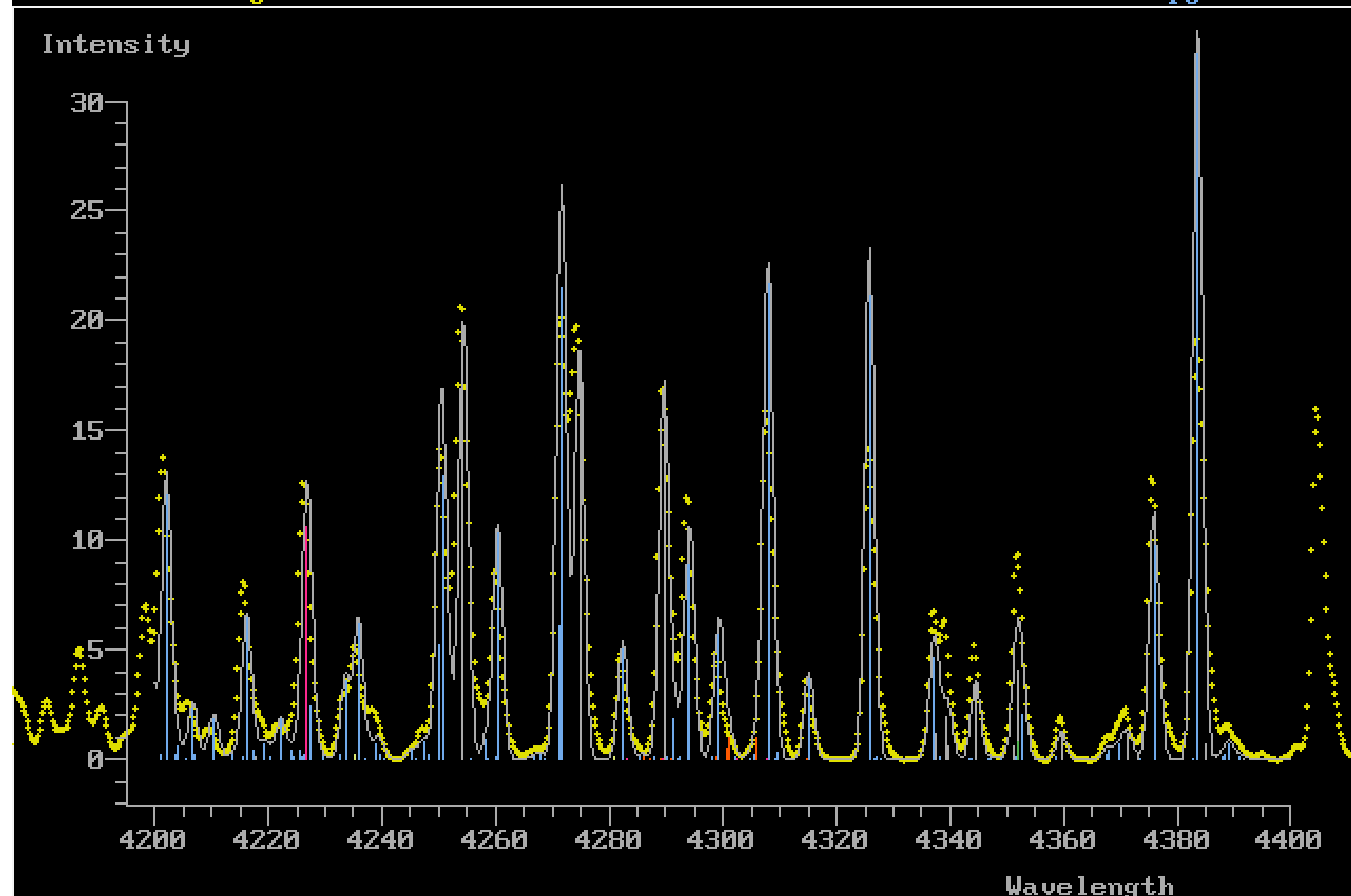
$$n_e = \sum_j n_j^+ = \sum_j \frac{n_j}{n_e \Omega_j(T)}$$

$$n_e = \sqrt{\sum_j \frac{n_j}{\Omega_j(T)}}$$

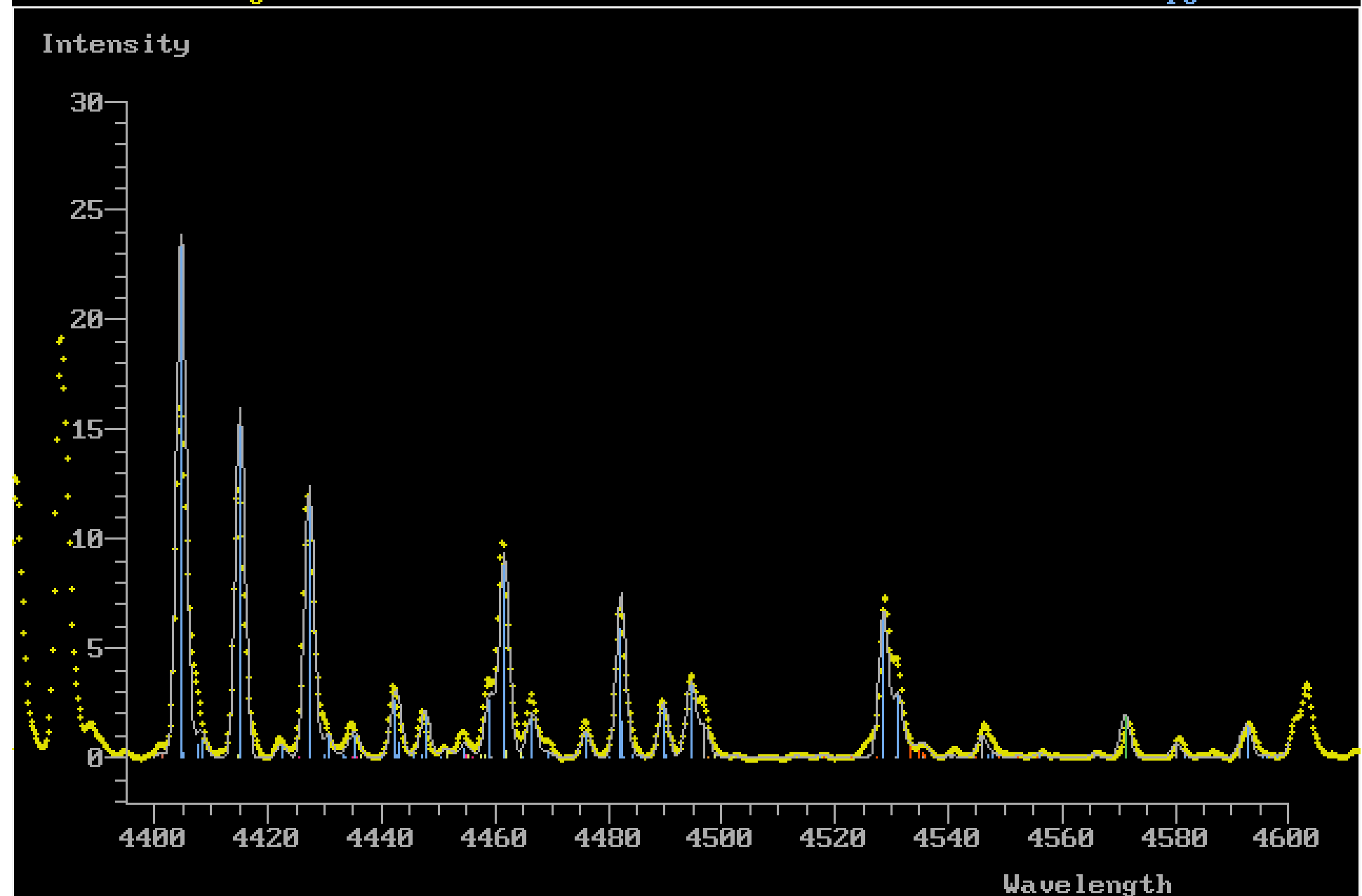
FE1 1.0E+0 CA1 2.6E-5 MN1 8.6E-3 TI1 4.3E-5 MG1 1.2E+0 NA1 2.2E-3 CR1 3.0E-3
NI1 2.8E-2 CA2 1.3E-3 LI1 7.9E-7 AL1 4.6E-5 SI1 2.5E+0
T= 3967. N=1.9E+16 G=5.0E+09 P=2.4E+06 RES:0.000E+00
SPECTRUM: u23mj.cs A B D E +L M ^N R S +T U +V W F2 F3 +F5 F9 ar pg en es



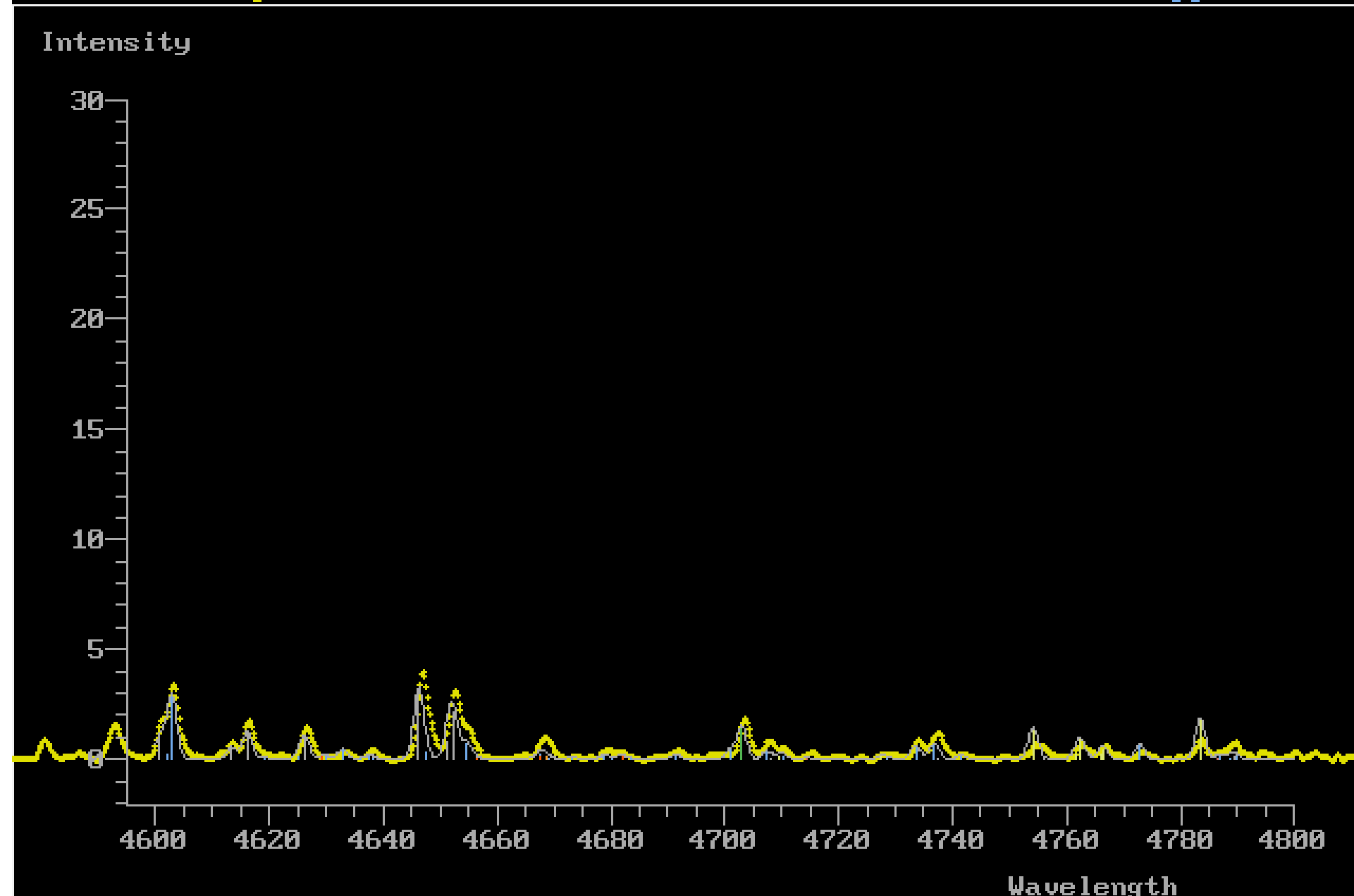
FE1 1.0E+0 CA1 2.6E-5 MN1 8.6E-3 TI1 4.3E-5 MG1 1.2E+0 NA1 2.2E-3 CR1 3.0E-3
NI1 2.8E-2 CA2 1.3E-3 LI1 7.9E-7 AL1 4.6E-5 SI1 2.5E+0
T= 3967. N=1.9E+16 G=5.0E+09 P=2.4E+06 RES:0.000E+00
SPECTRUM: u23mj.cs A B D E +L M ^N R S +T U +V W F2 F3 +F5 F9 ar pg en es



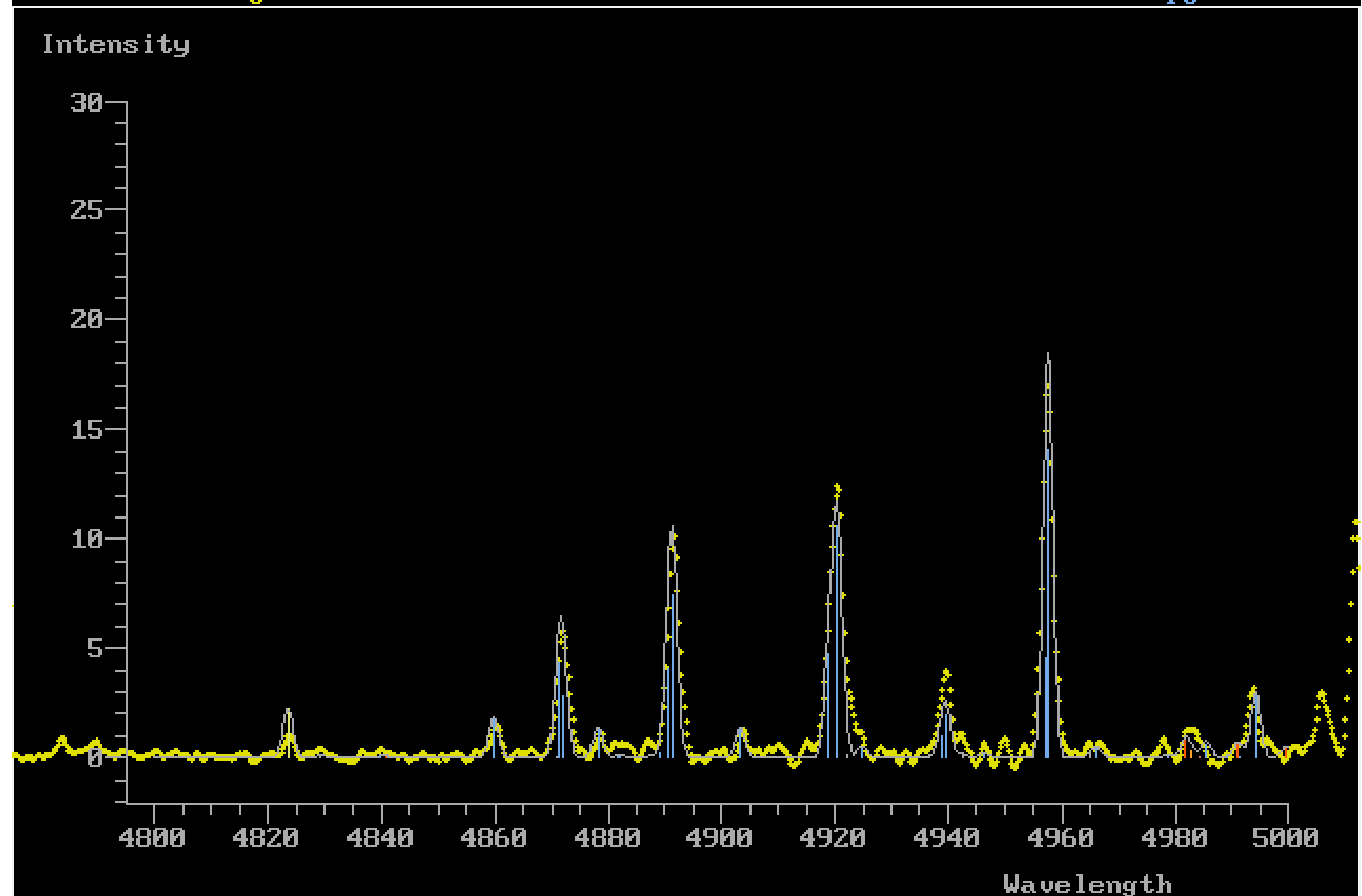
FE1 1.0E+0 CA1 2.6E-5 MN1 8.6E-3 TI1 4.3E-5 MG1 1.2E+0 NA1 2.2E-3 CR1 3.0E-3
NI1 2.8E-2 CA2 1.3E-3 LI1 7.9E-7 AL1 4.6E-5 SI1 2.5E+0
T= 3967. N=1.9E+16 G=5.0E+09 P=2.4E+06 RES:0.000E+00
SPECTRUM: u23mj.cs A B D E +L M ^N R S +T U +V W F2 F3 +F5 F9 ar pg en es



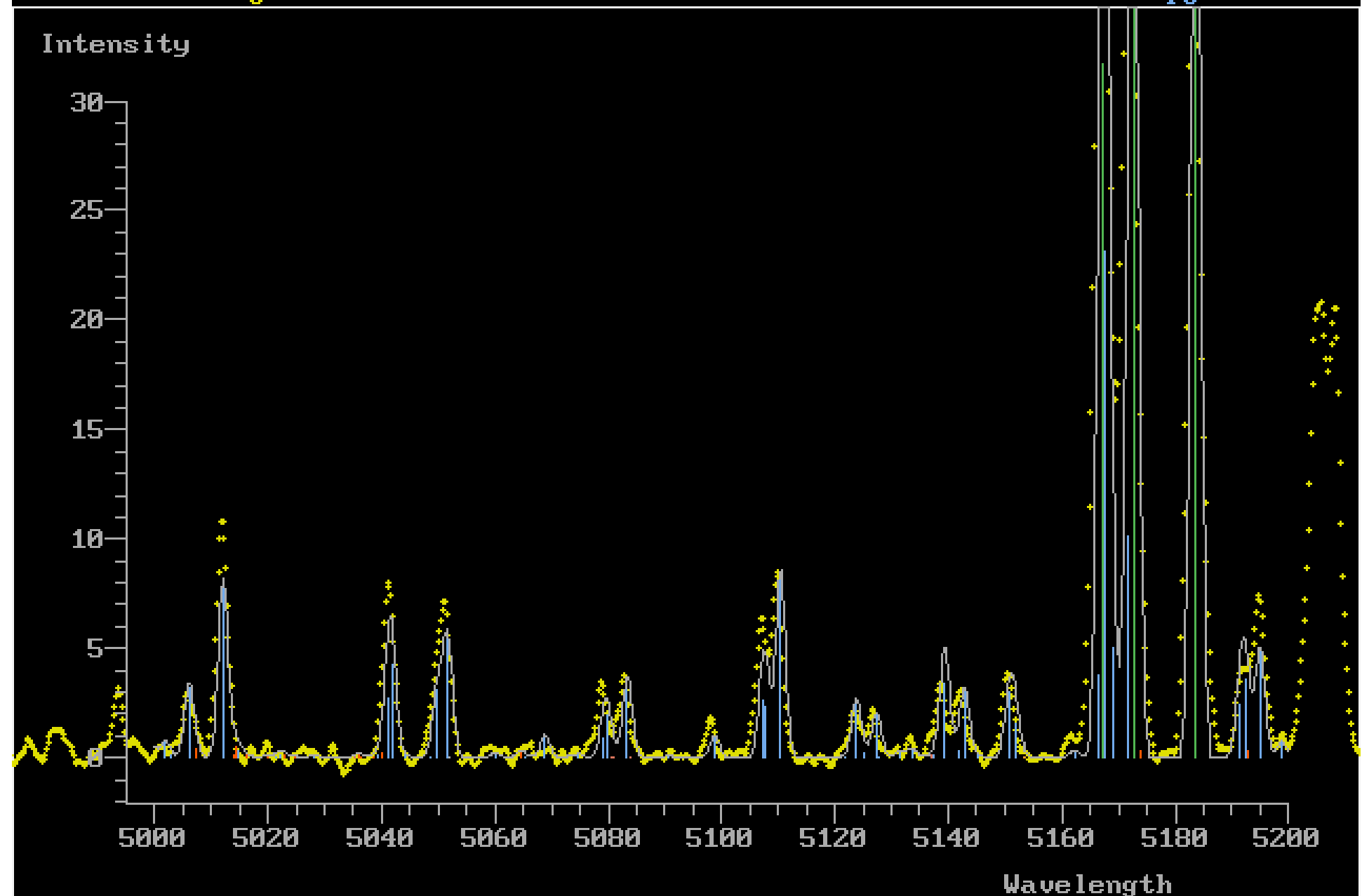
FE1 1.0E+0 CA1 2.6E-5 MN1 8.6E-3 TI1 4.3E-5 MG1 1.2E+0 NA1 2.2E-3 CR1 3.0E-3
NI1 2.8E-2 CA2 1.3E-3 LI1 7.9E-7 AL1 4.6E-5 SI1 2.5E+0
T= 3967. N=1.9E+16 G=5.0E+09 P=2.4E+06 RES:0.000E+00
SPECTRUM: u23mj.cs A B D E +L M ^N R S +T U +V W F2 F3 +F5 F9 ar pg en es



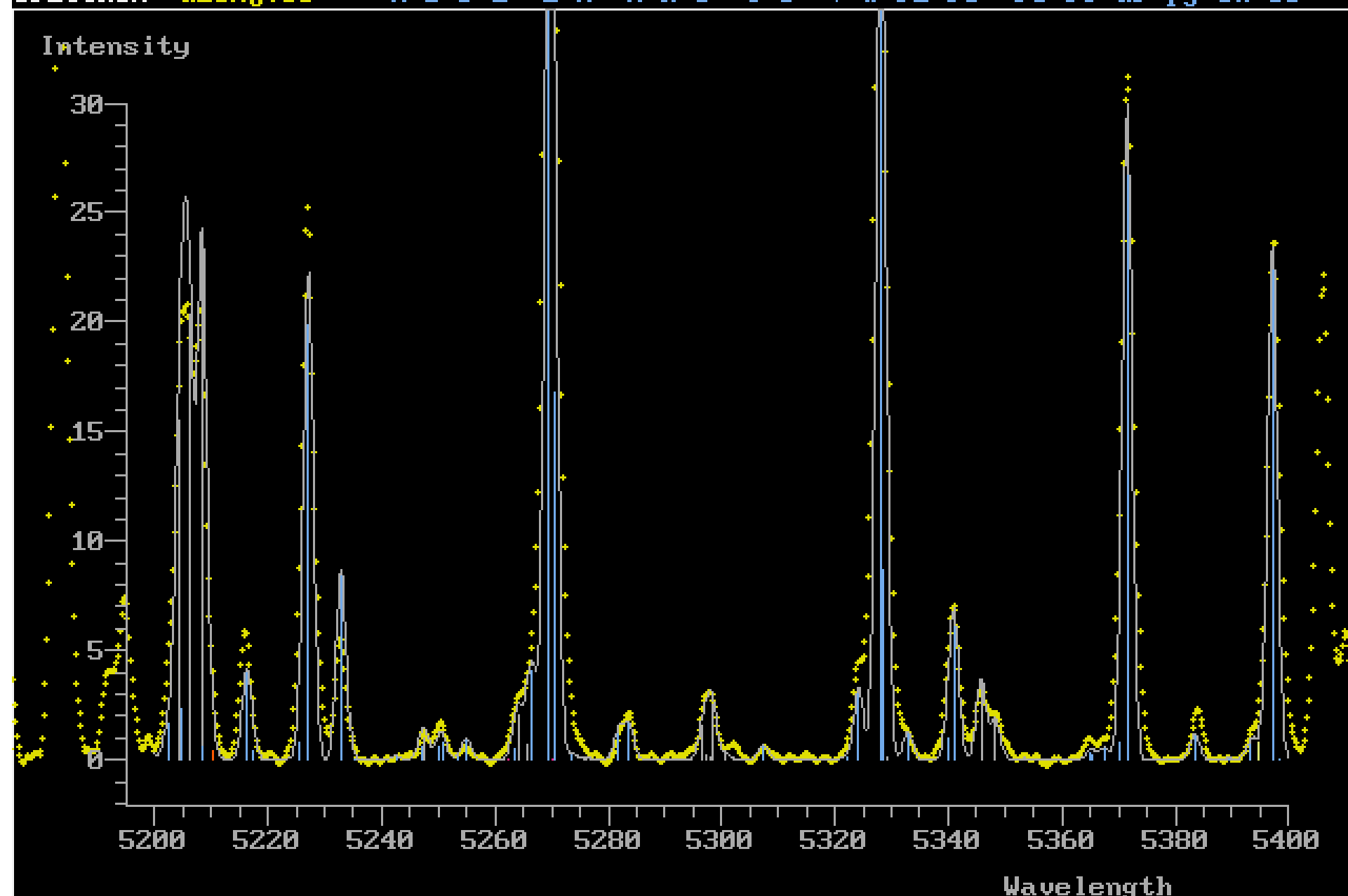
FE1 1.0E+0 CA1 2.6E-5 MN1 8.6E-3 TI1 4.3E-5 MG1 1.2E+0 NA1 2.2E-3 CR1 3.0E-3
NI1 2.8E-2 CA2 1.3E-3 LI1 7.9E-7 AL1 4.6E-5 SI1 2.5E+0
T= 3967. N=1.9E+16 G=5.0E+09 P=2.4E+06 RES:0.000E+00
SPECTRUM: u23mj.cs A B D E +L M ^N R S +T U +V W F2 F3 +F5 F9 ar pg en es



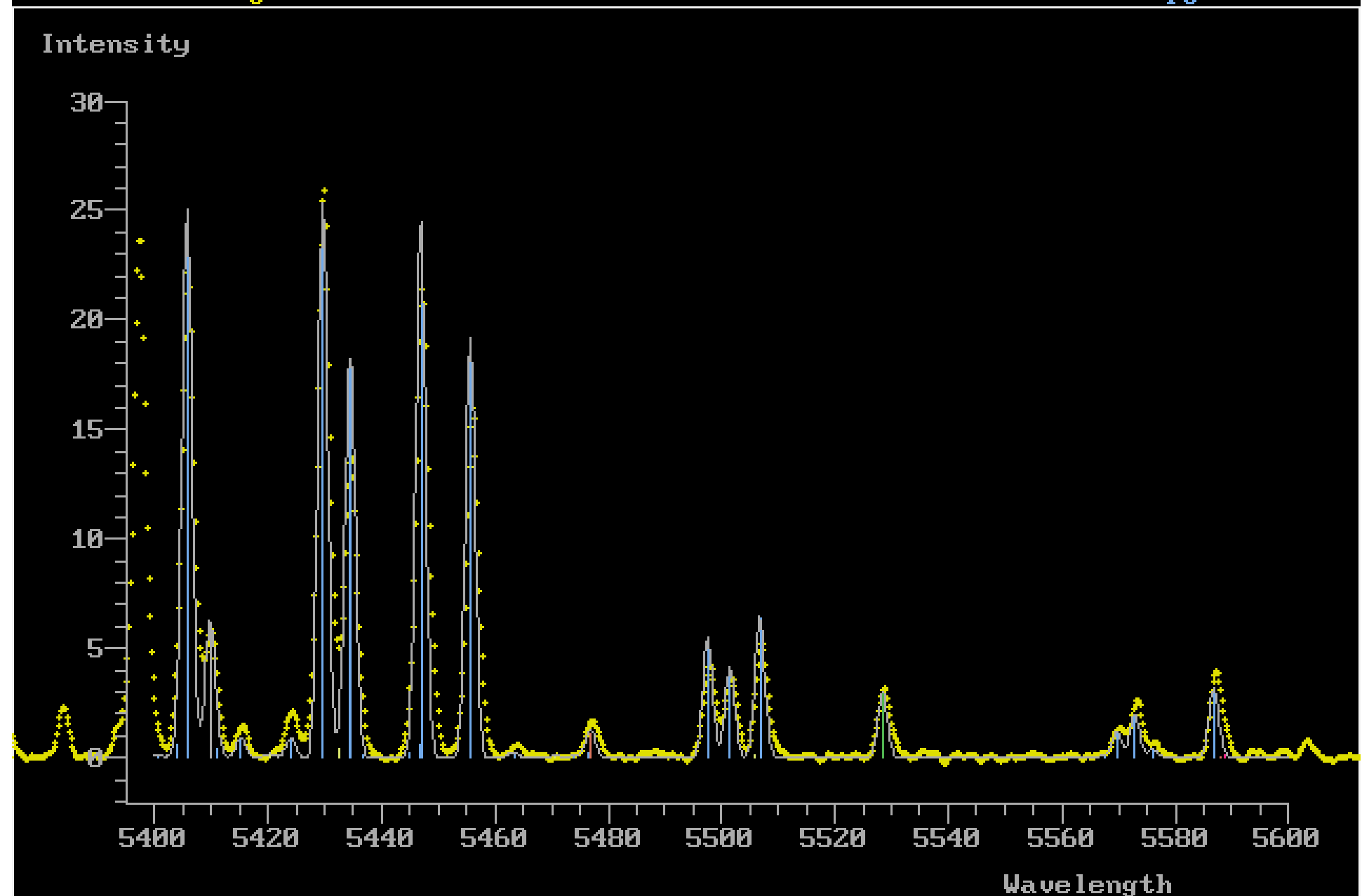
FE1 1.0E+0 CA1 2.6E-5 MN1 8.6E-3 TI1 4.3E-5 MG1 1.2E+0 NA1 2.2E-3 CR1 3.0E-3
 NI1 2.8E-2 CA2 1.3E-3 LI1 7.9E-7 AL1 4.6E-5 SI1 2.5E+0
 T= 3967. N=1.9E+16 G=5.0E+09 P=2.4E+06 RES:0.000E+00
 SPECTRUM: u23mj.cs A B D E +L M ^N R S +T U +V W F2 F3 +F5 F9 ar pg en es



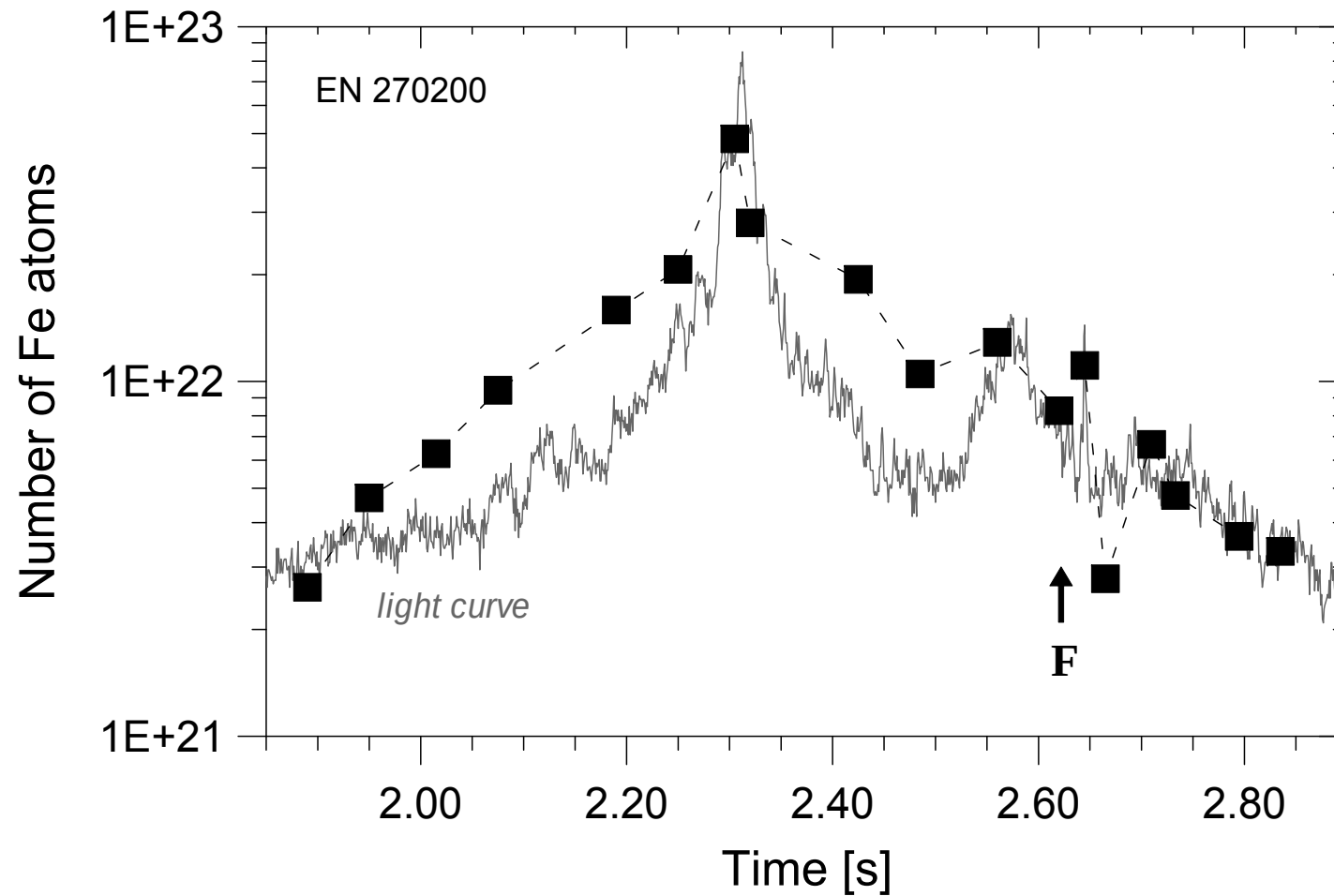
FE1 1.0E+0 CA1 2.6E-5 MN1 8.6E-3 TI1 4.3E-5 MG1 1.2E+0 NA1 2.2E-3 CR1 3.0E-3
NI1 2.8E-2 CA2 1.3E-3 LI1 7.9E-7 AL1 4.6E-5 SI1 2.5E+0
T= 3967. N=1.9E+16 G=5.0E+09 P=2.4E+06 RES:0.000E+00
SPECTRUM: u23mj.cs A B D E +L M ^N R S +T U +V W F2 F3 +F5 F9 ar pg en es



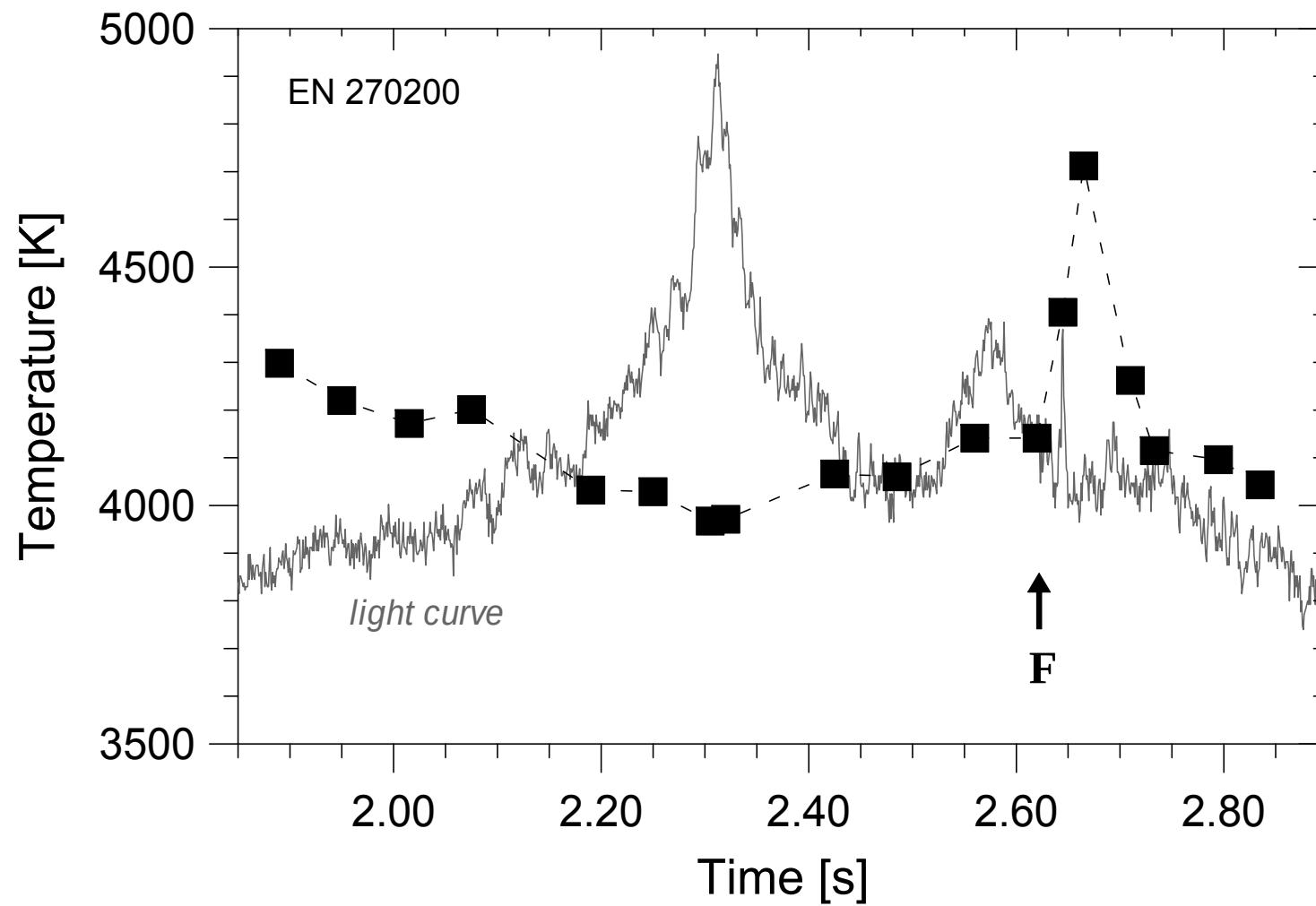
FE1 1.0E+0 CA1 2.6E-5 MN1 8.6E-3 TI1 4.3E-5 MG1 1.2E+0 NA1 2.2E-3 CR1 3.0E-3
NI1 2.8E-2 CA2 1.3E-3 LI1 7.9E-7 AL1 4.6E-5 SI1 2.5E+0
T= 3967. N=1.9E+16 G=5.0E+09 P=2.4E+06 RES:0.000E+00
SPECTRUM: u23mj.cs A B D E +L M ^N R S +T U +V W F2 F3 +F5 F9 ar pg en es



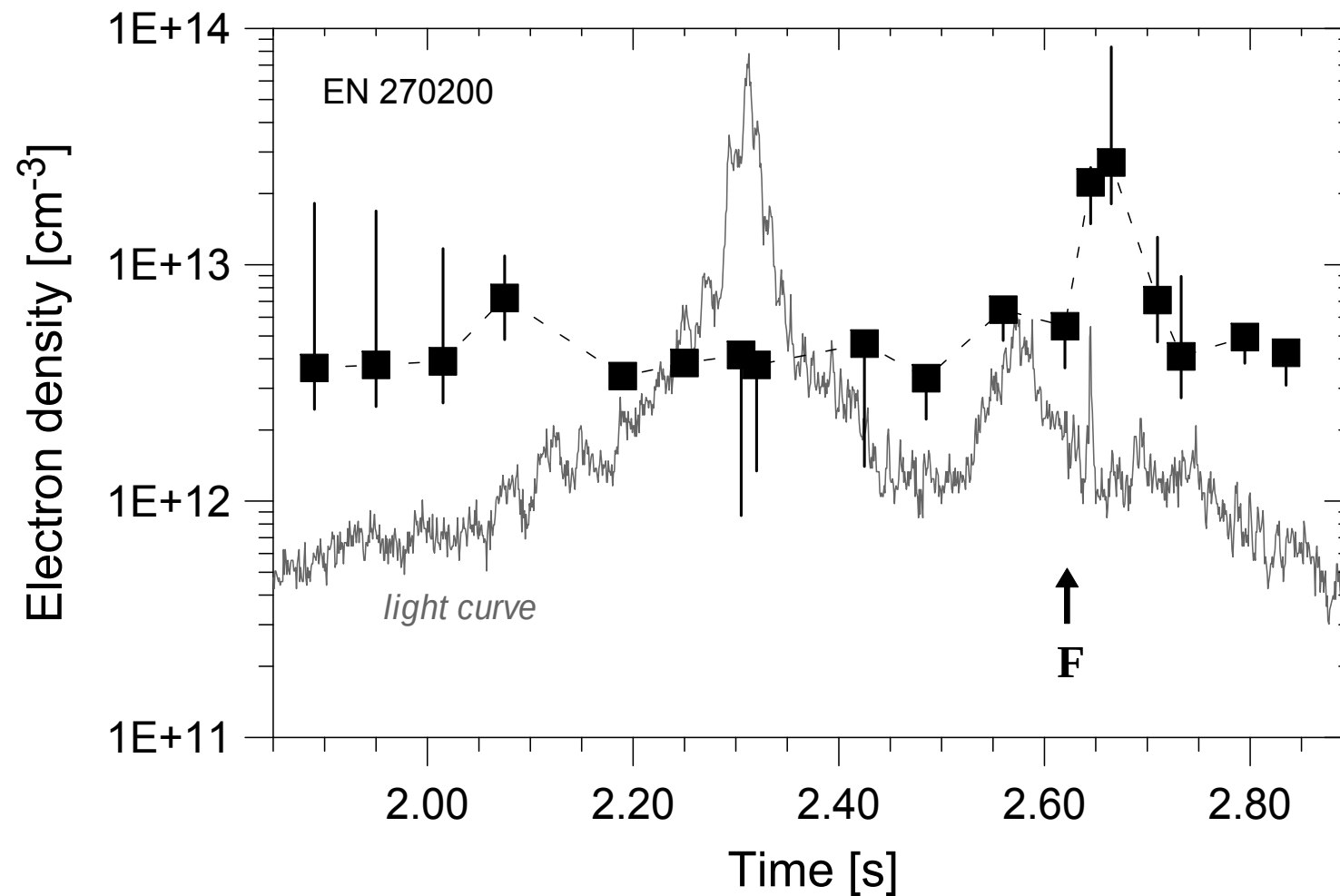
Celkový počet atomů Fe



Teplota



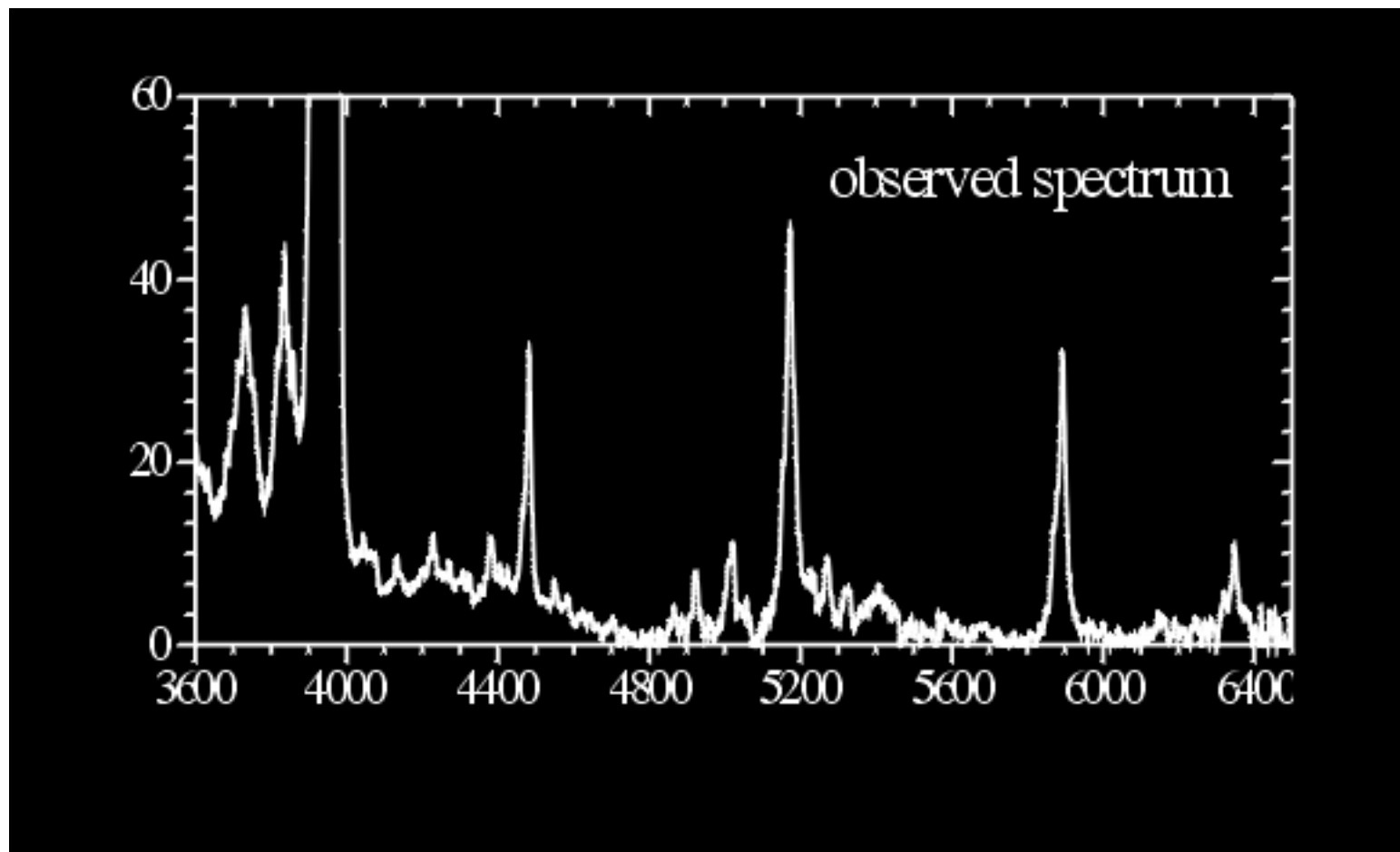
Elektronová hustota



Dvě složky ve spektrech meteorů

- Spektra mohou být vysvětlena dvěma složkami s různými teplotami
- Hlavní složka, $T = 4500 \text{ K}$
- Druhá složka, $T = 10\,000 \text{ K}$
 - jen u rychlých a jasných meteorů
- Teploty prakticky nezávisí na rychlosti a jasnosti meteorů, ale podíl (hmotnost) druhé složky roste s rychlostí a jasností meteoru

Dvě složky



Bolid z roje Perseid

Čáry hlavní složky

Fe I

Na I

Mg I

Si I

Mn I

Ca I

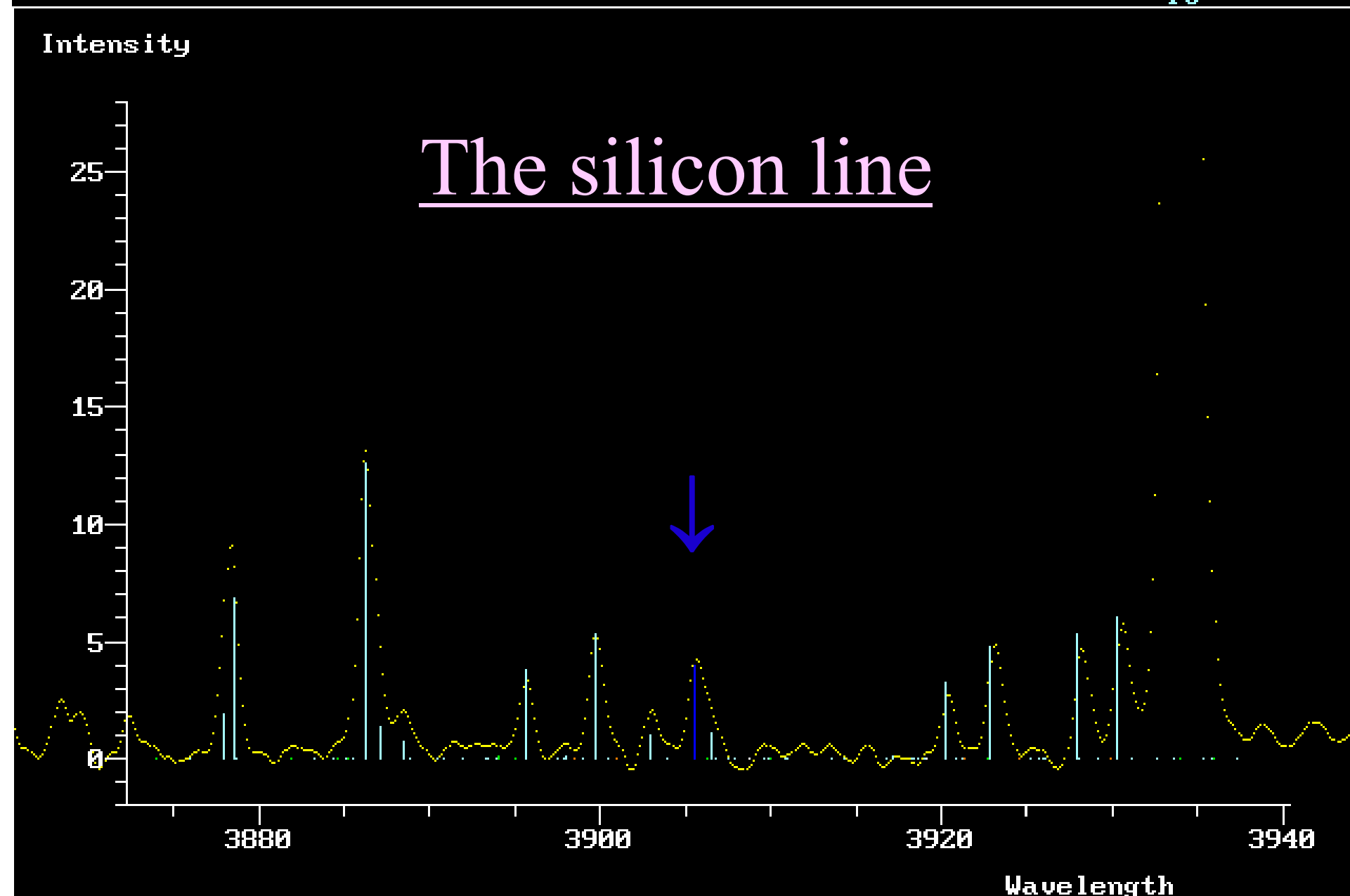
Cr I

Al I

Ni I

Ti I

FE1 1.0E+0 CA1 3.0E-4 MN1 4.3E-3 TI1 5.0E-4 MG1 5.9E+0 NA1 1.0E-3 CR1 3.0E-3
NI1 5.0E-2 SI1 2.0E+1 CO1 1.0E-2 AL1 3.4E-3
T= 4000. N=9.0E+13 G=4.0E+09 P=4.0E+06 RES:0.000E+00
SPECTRUM: modrc.2m A B D E +L M ^N R S +T U +V W F2 F3 +F5 F9 ar pg en es



Čáry druhé složky

Ca II

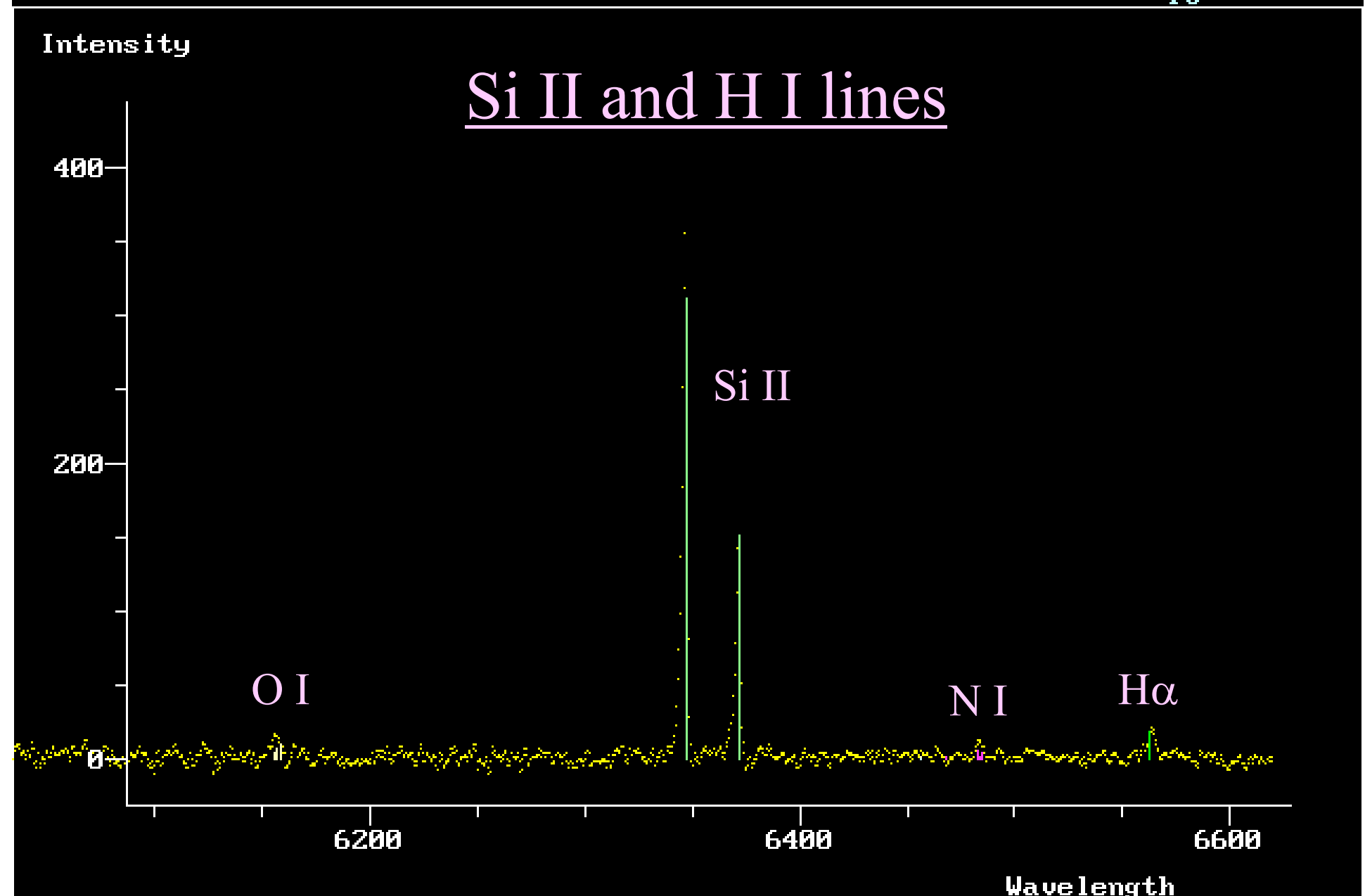
Fe II

Si II

H I

Mg II

FE2 1.0E+0 N1 1.0E+2 O1 6.0E+1 MG2 2.5E+0 SI2 1.9E+1 CA2 1.0E-2 TI2 2.1E-3
CR2 1.6E-2 SR2 3.8E-6 H 1.5E+0
T=10650. N=1.0E+12 G=4.0E+09 P=1.8E+08 RES:0.000E+00
SPECTRUM: s27922.cl A B D E +L M ^N R S +T U +V W F2 F3 +F5 F9 ar pg en es



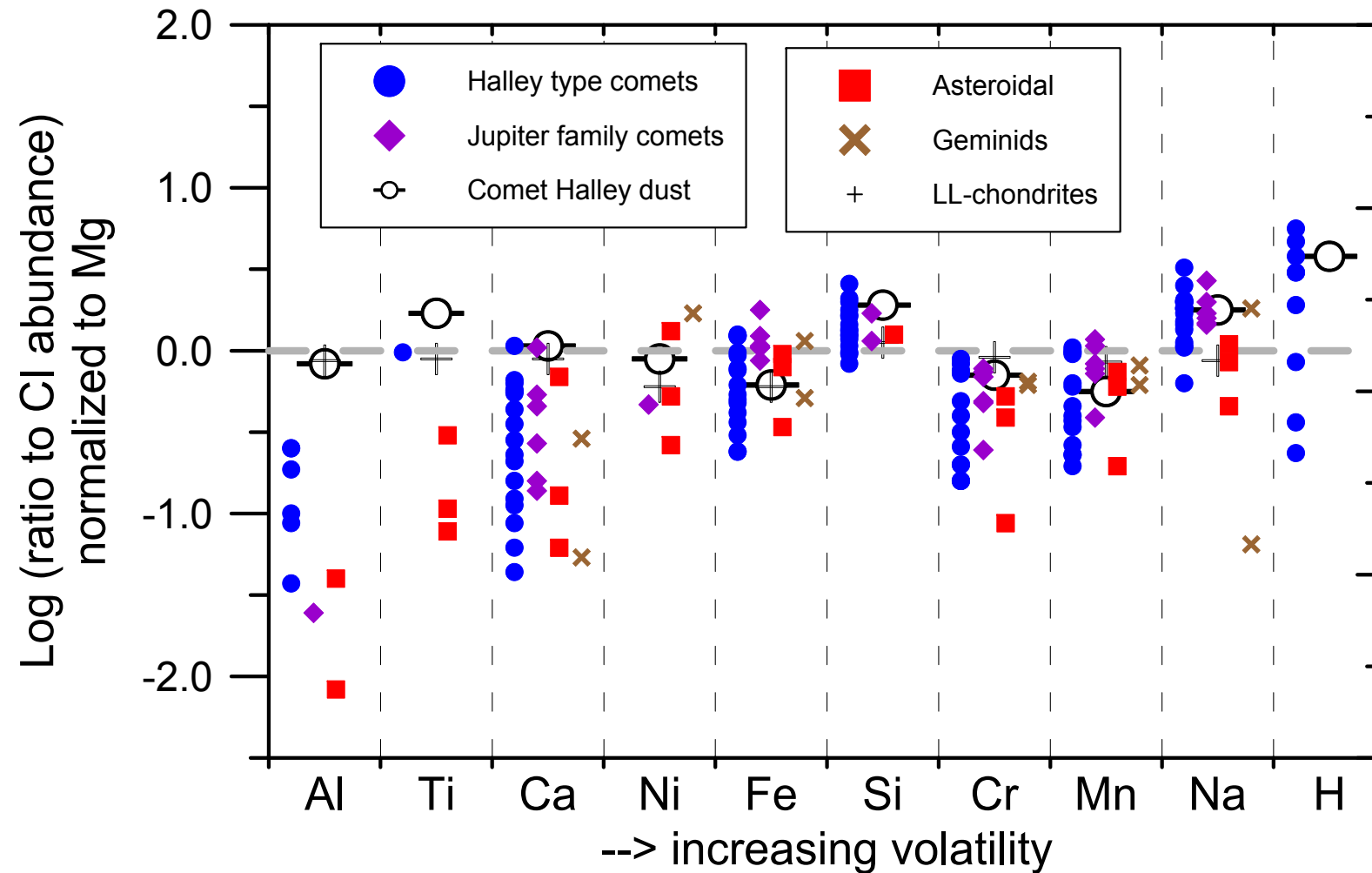
Složení velkých meteoroidů (> 10 cm)

- $> 90\%$ velkých meteoroidů má složení odpovídající chondritům
- Ostatní:
 - železné meteoroidy
 - achondrity (eukrity, diogenity)
 - meteoroidy bez sodíku (Karlštejn)

Typy meteoritů

- Kamenné (94% všech pádů)
 - chondrity (86%)
 - obyčejné (80%)
 - H (33%)
 - L (38%)
 - LL (9%)
 - uhlíkaté* (4%)
 - enstatické (2%)
 - achondrity (8%)
 - Železné (5%)
 - Železokamenné (1%)
- podobné složení
- *nejpůvodnější složení,
blízké zárodečné mlhovině

Kvantitativní analýza

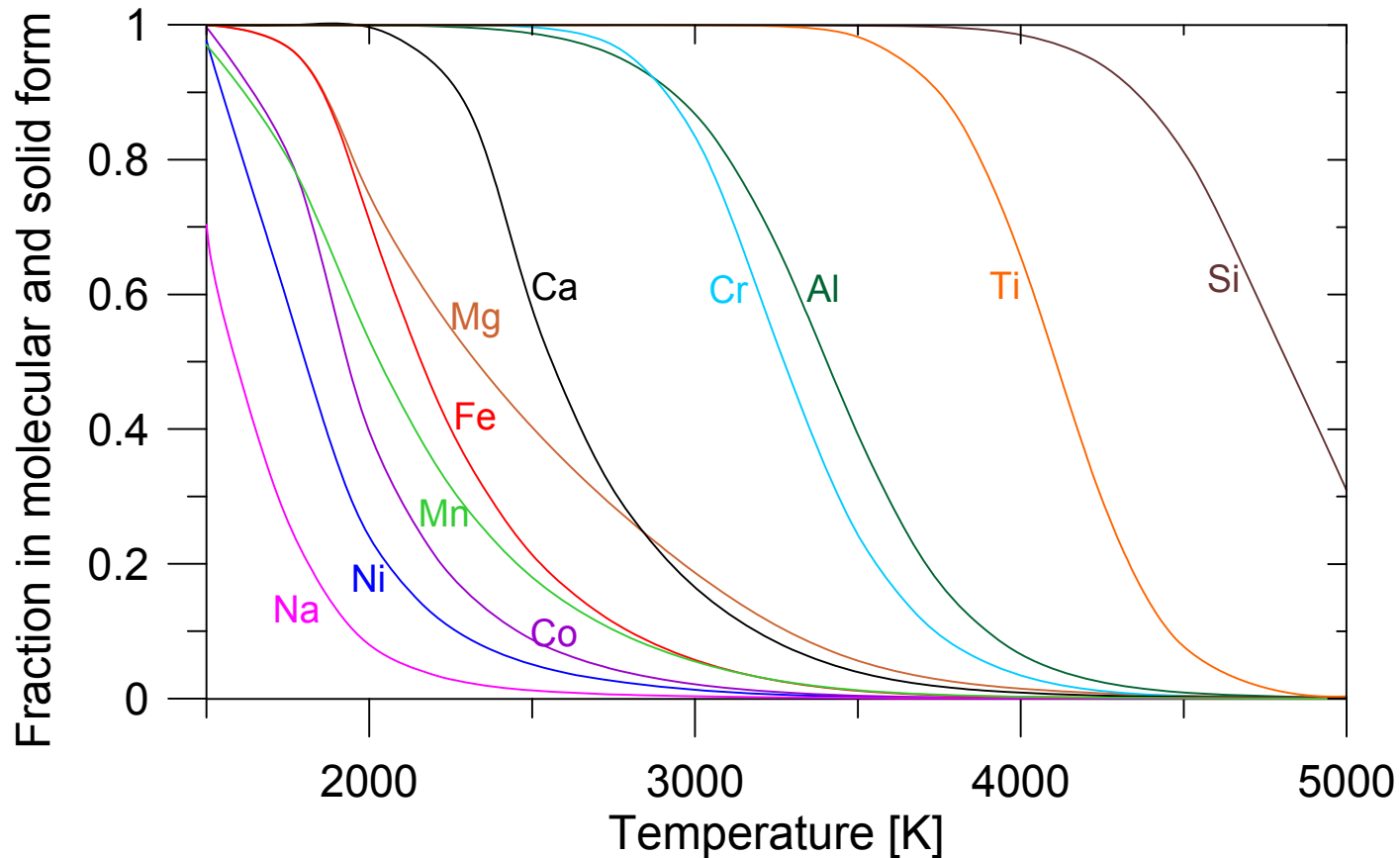


Problémy

- Složení zářících par nemusí odpovídat složení meteoroidu
- Důvody
 - Tvorba molekul
 - Differenciální ablace / neúplné odpařování

Poměrná část prvků v molekulách

(teoretický výpočet)

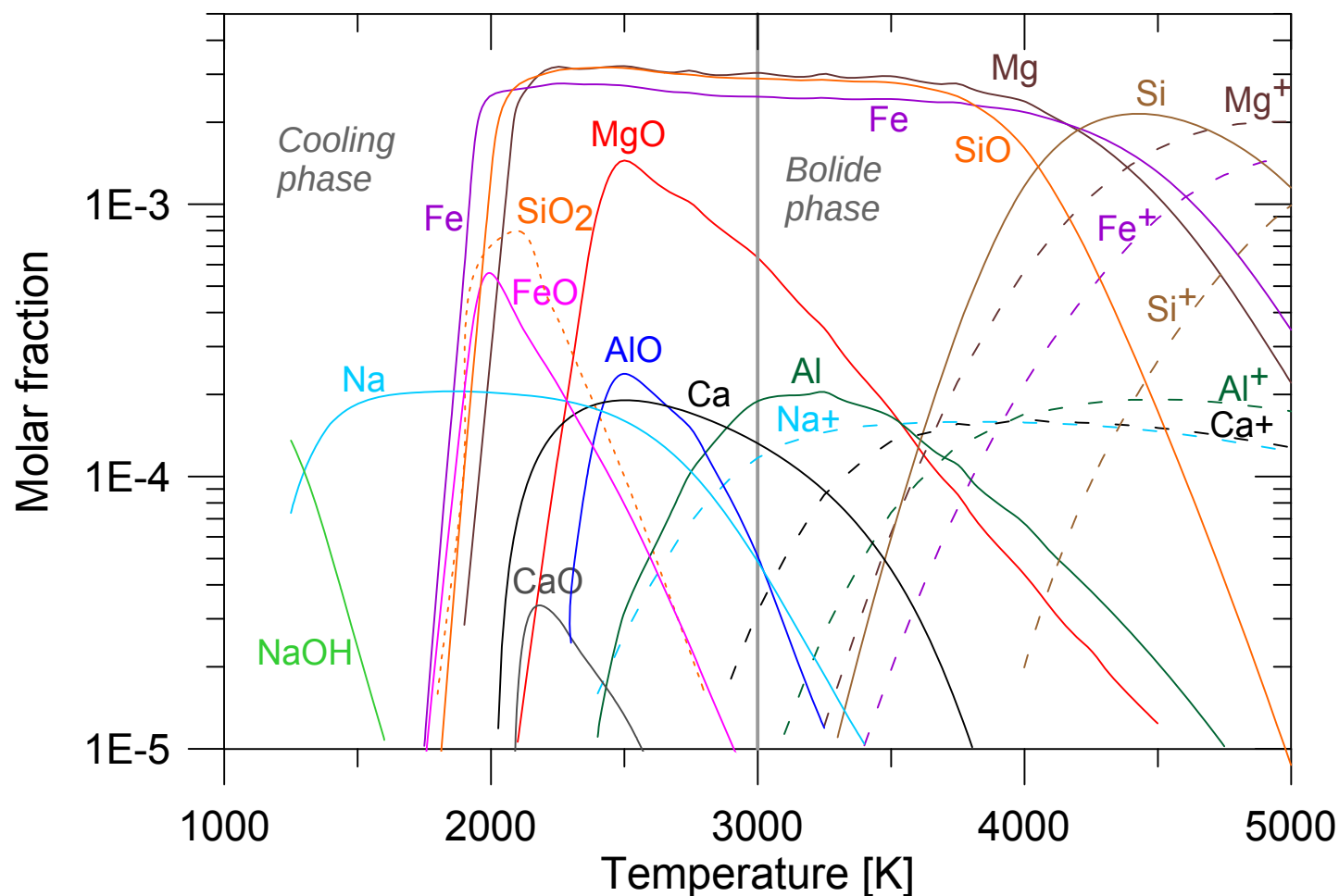


$p = 0.05$ bar
($h = 21$ km)

Berezhnoy & Borovička (2010)

Složení plynu – kovy *(teoretický výpočet)*

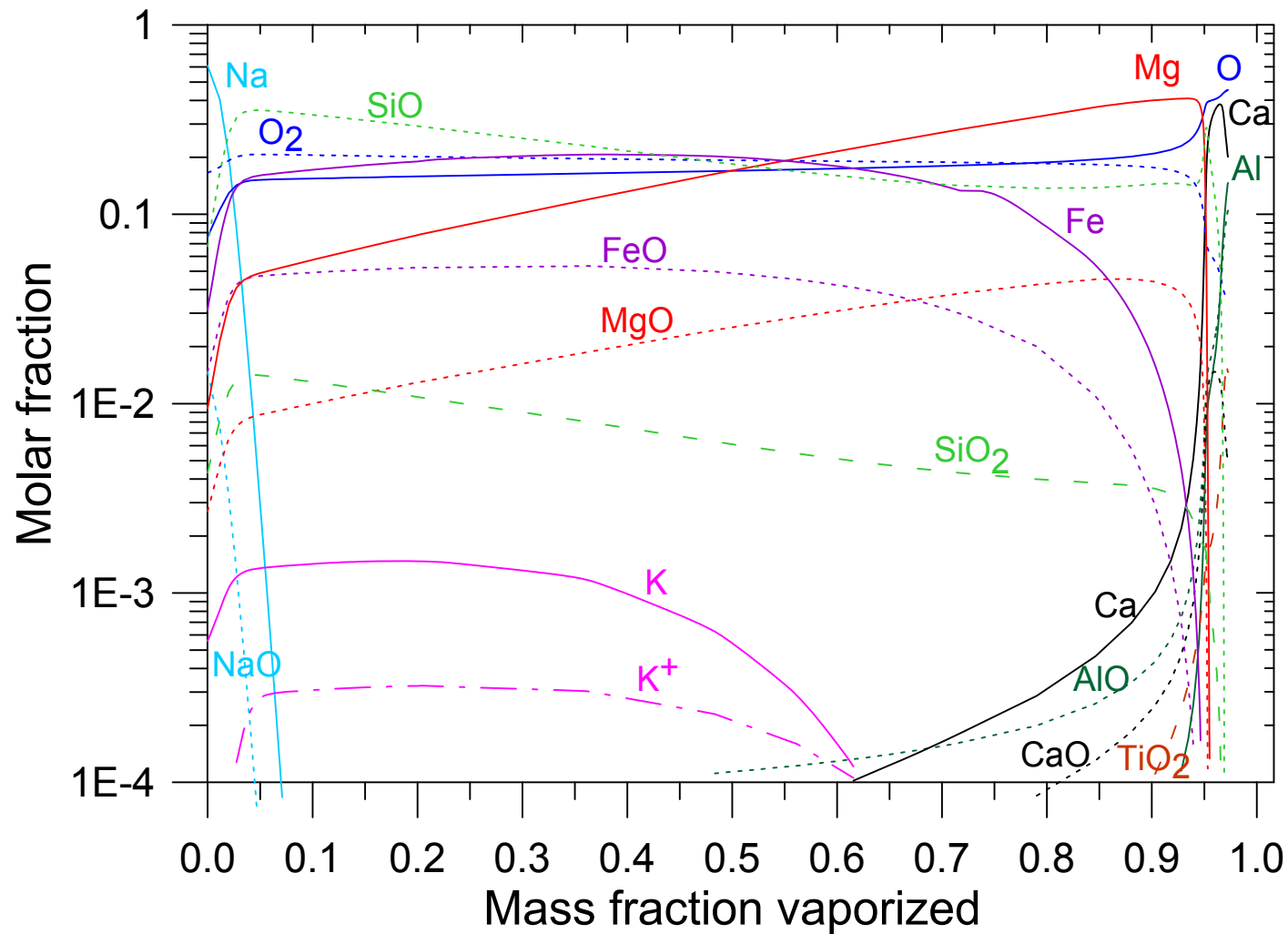
poměr vzduchu a par 30:1



$p = 0.001$ bar
($h = 50$ km)

Berezhnoy & Borovička (2010)

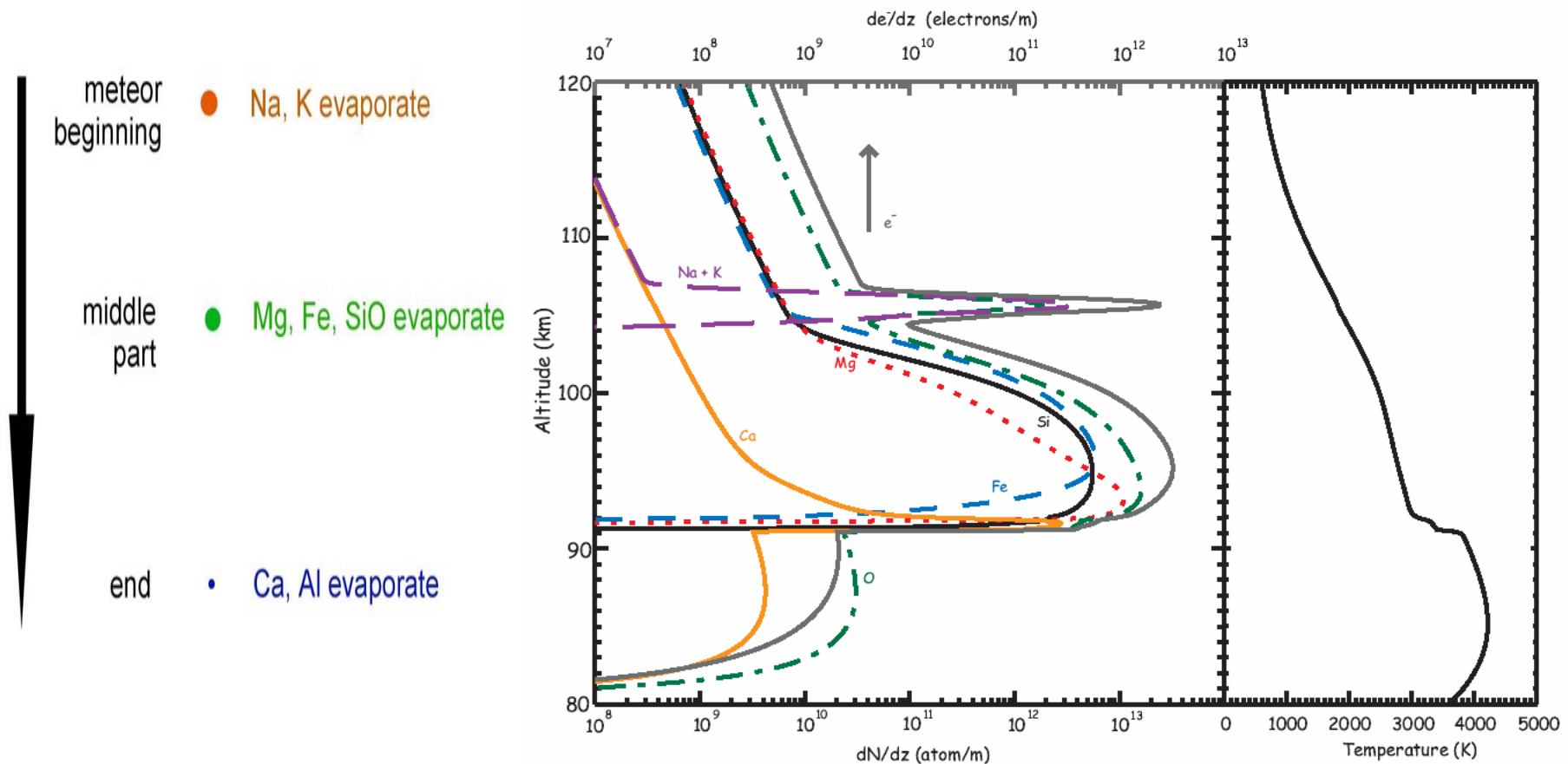
Postup ablace *(teoretický výpočet)*



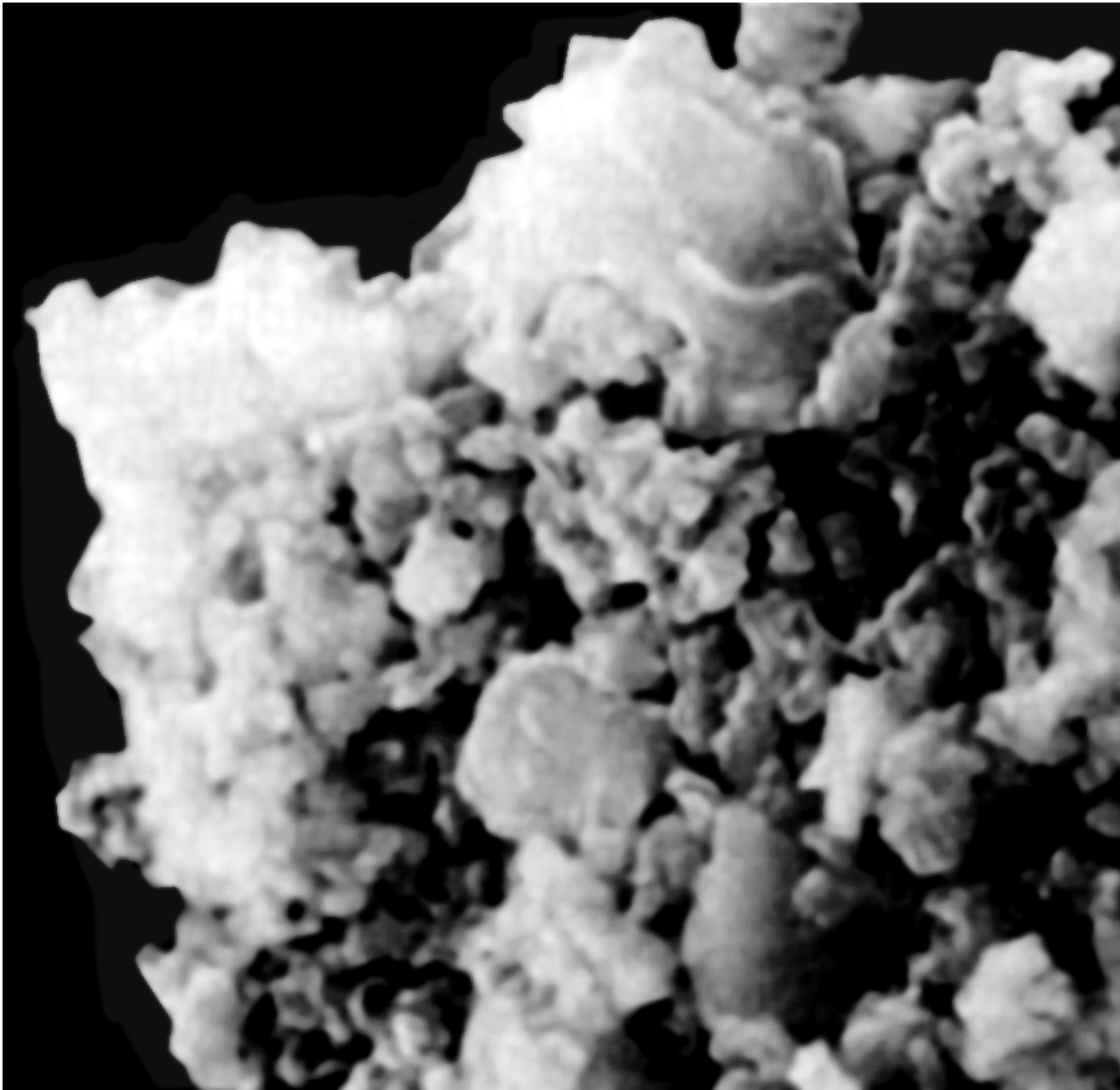
$T = 3000$ K
Cl composition

Berezhnoy & Borovička (2010)
using the MAGMA code (Schaefer & Fegley 2004)

Diferenciální ablaci malého ($\ll 1$ mm), rovnoměrně zahřátého meteoroidu (*teoretický výpočet*)

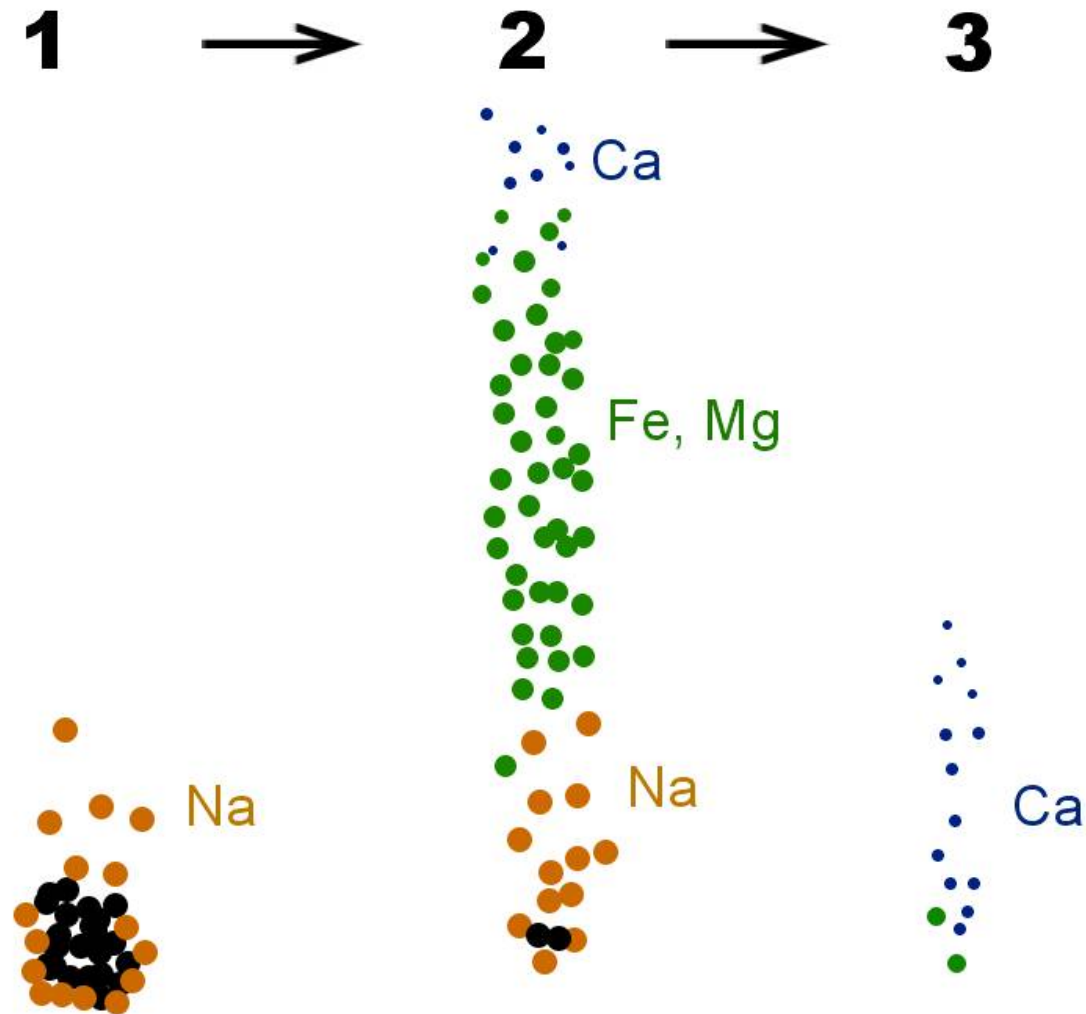


Janches et al. (2009)

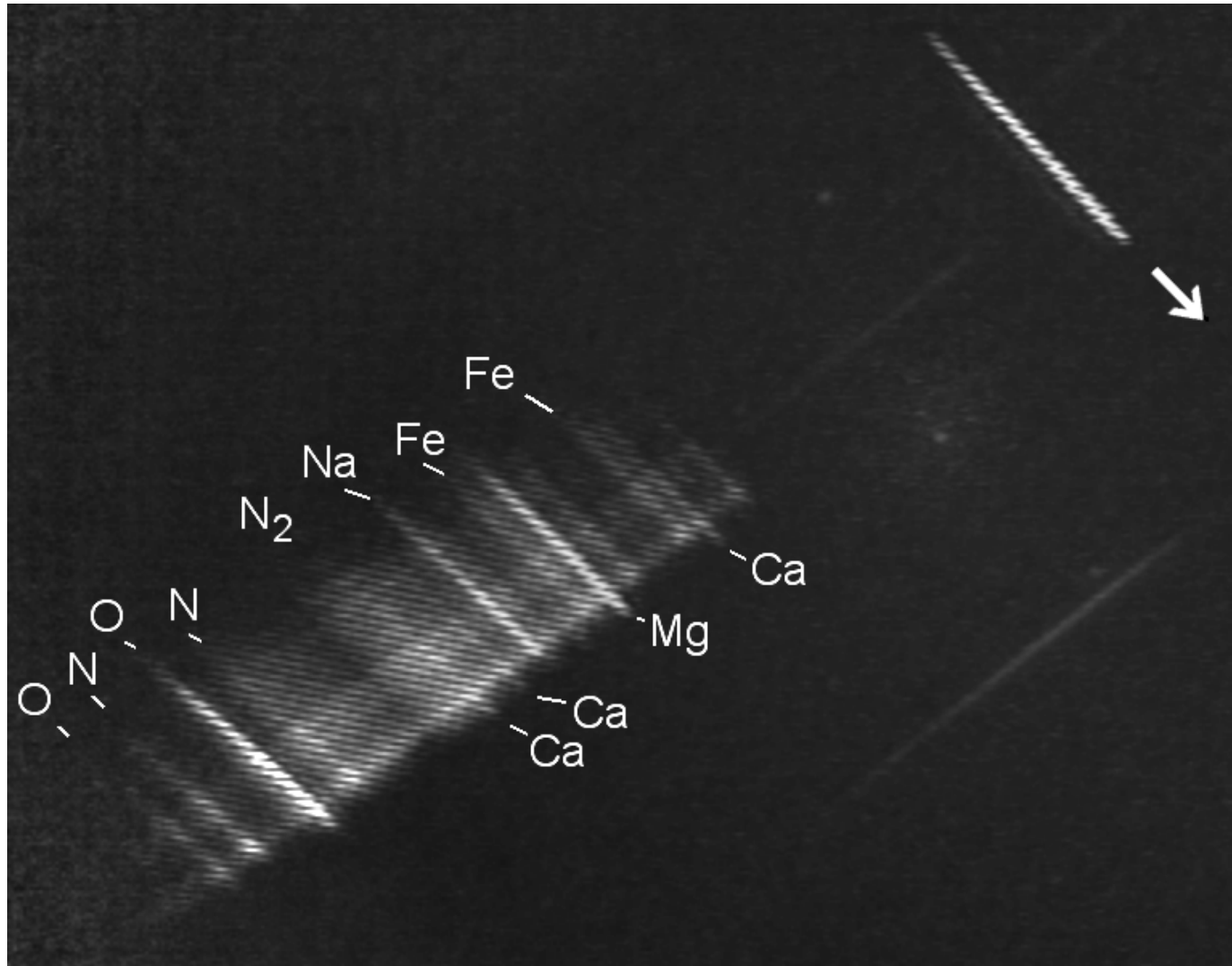


Porous IDP
(Rietmeijer 2002)

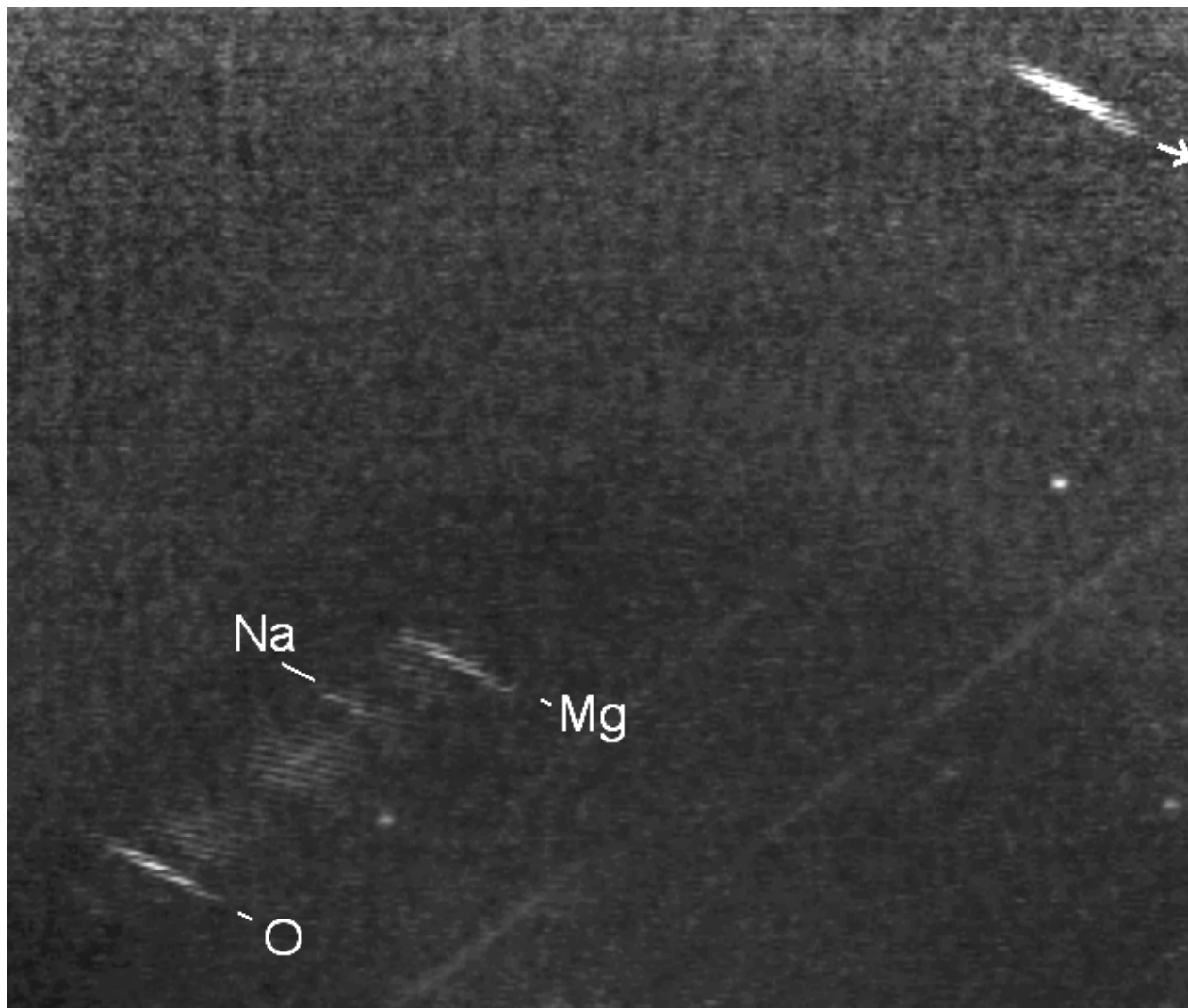
Diferenciální ablace většího porézního meteoroidu (*idea*)



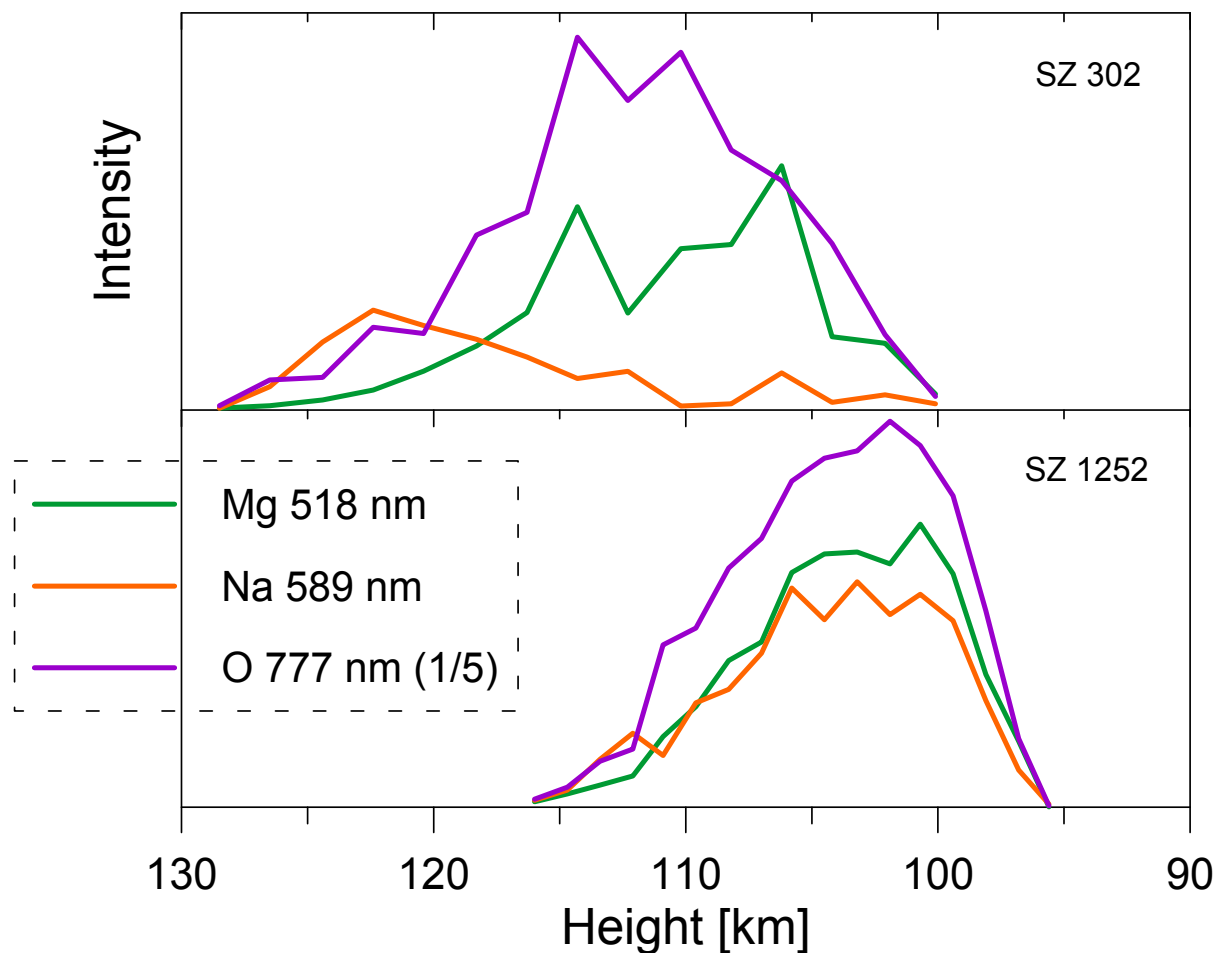
Složené video spektrum



Složené video spektrum (2)



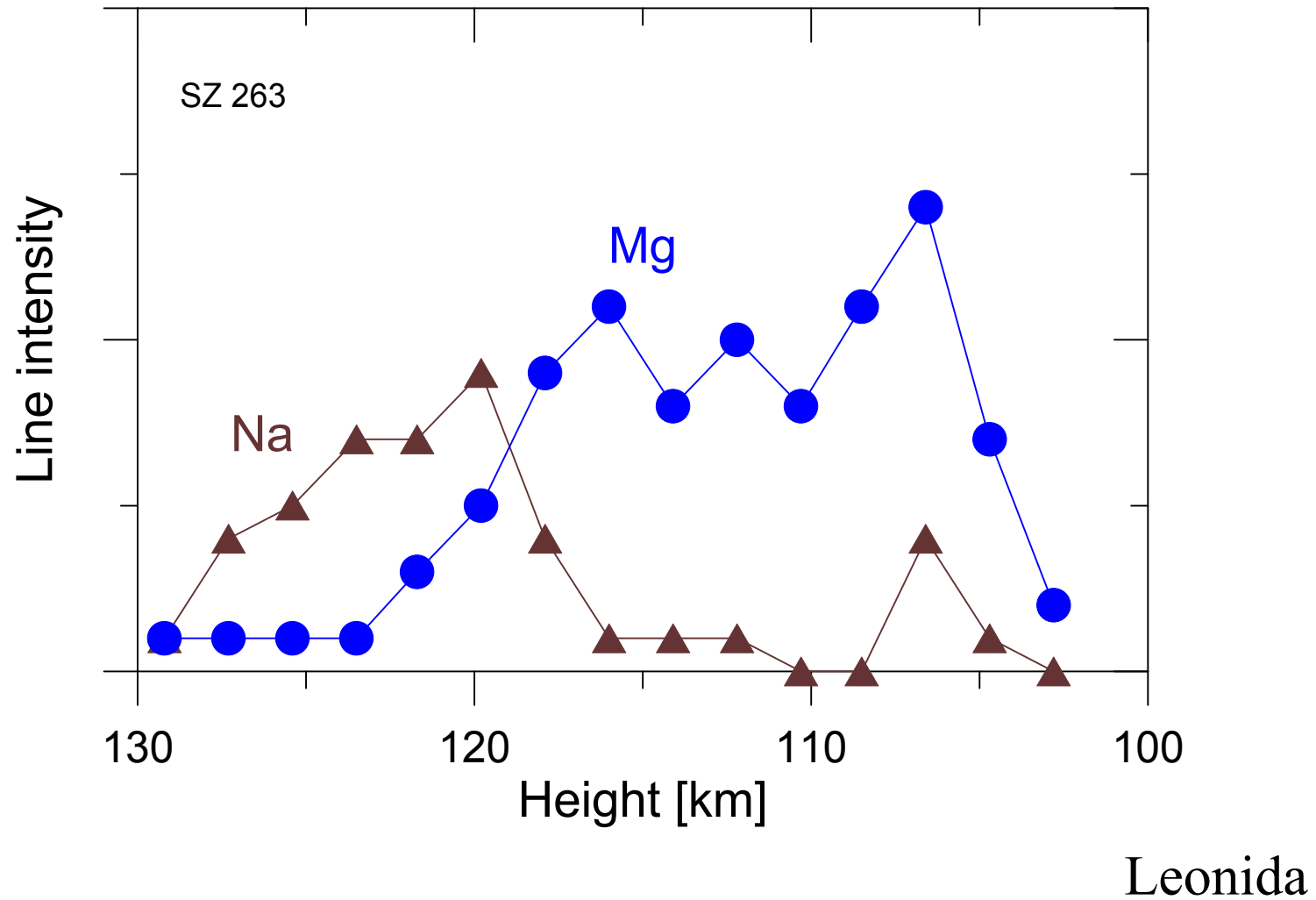
Přednostní odpařování sodíku



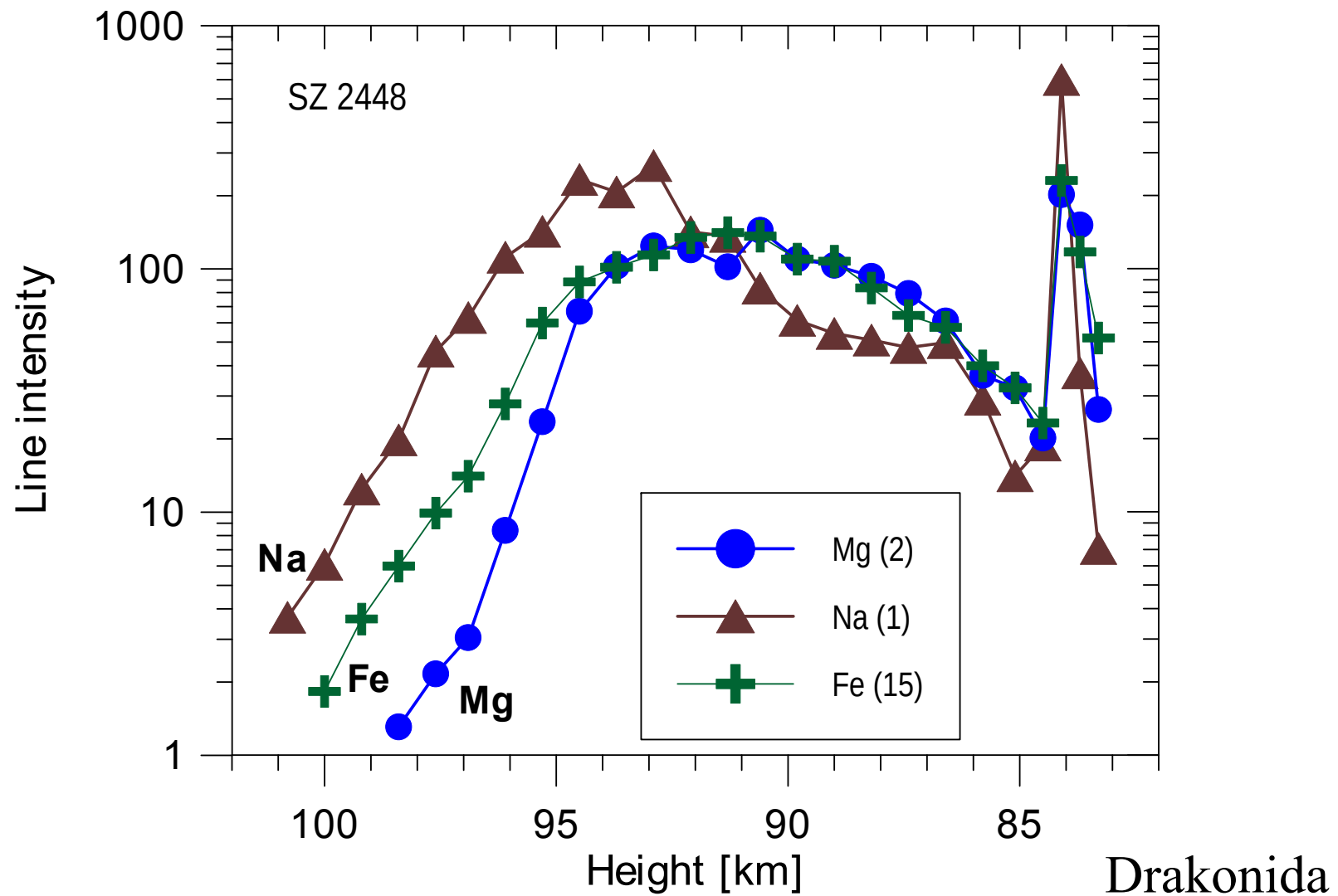
Různé meteor
od meteoru,
i v rámci
jednoho roje

Leonidy

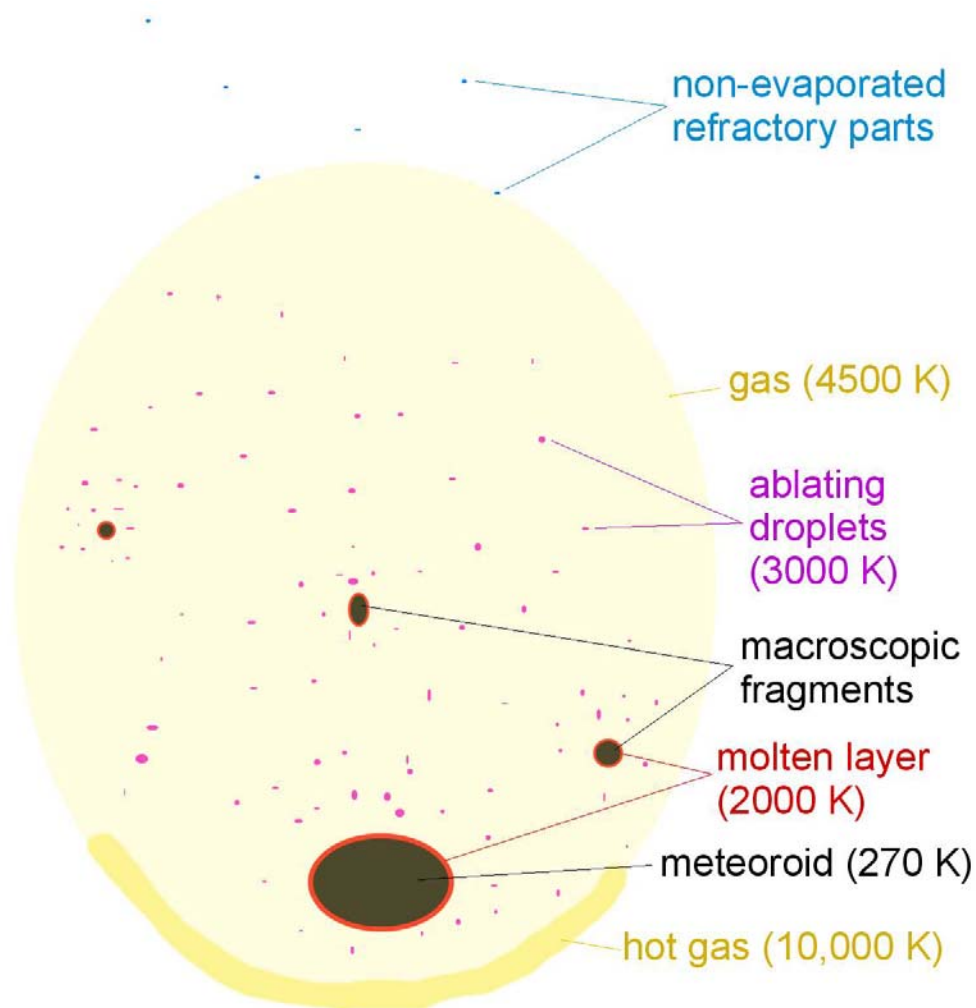
Extrémní případ



Dvě fáze rozpadu



Ablace velkých meteoroidů (≥ 10 cm)



- Všechny materiál není odpařen úplně
- V zářicím plynu (kromě horké složky) je snížený obsah refraktorních prvků
- Složení plynu závisí na teplotě a účinnosti odpařování

Změny podél dráhy

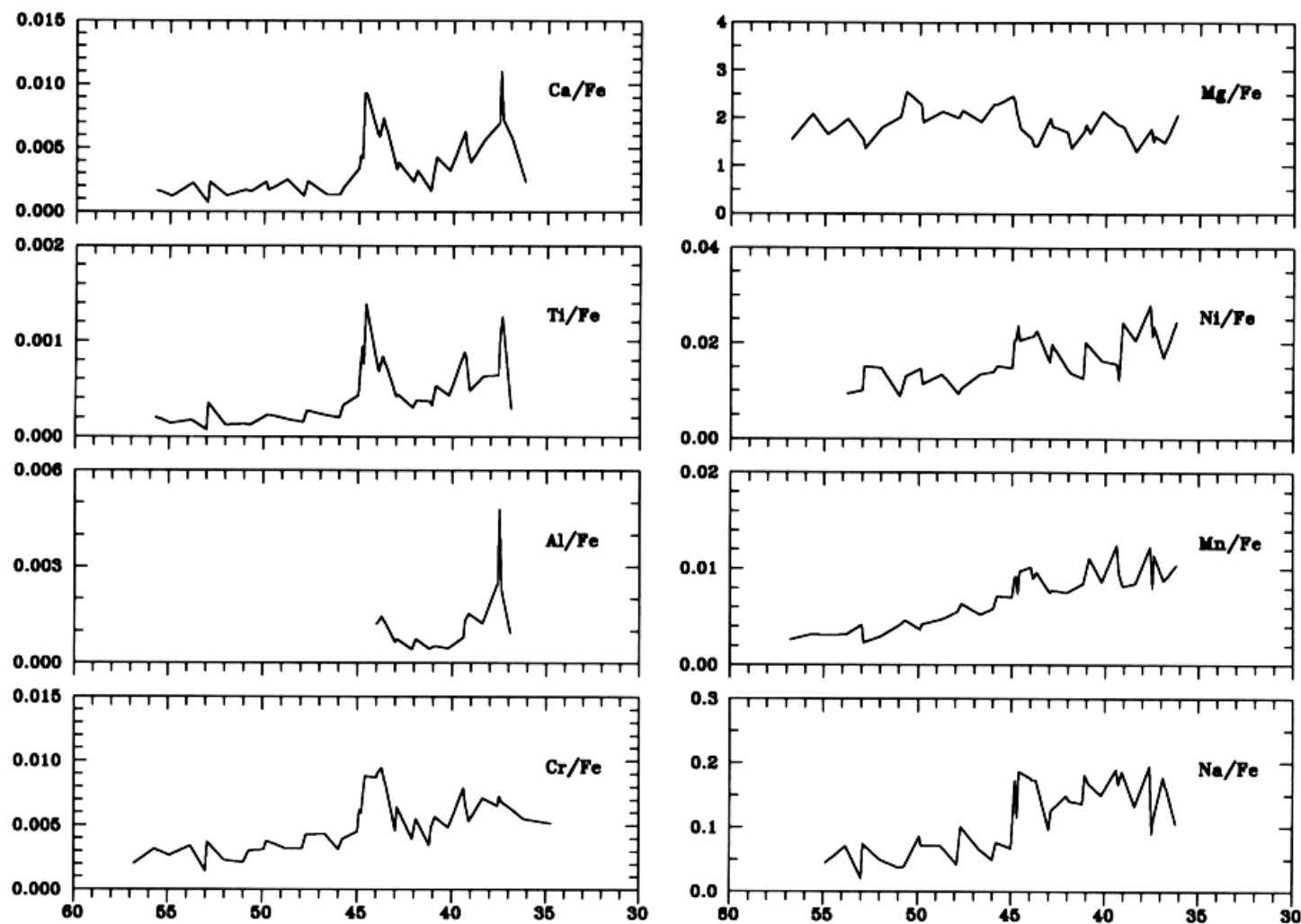
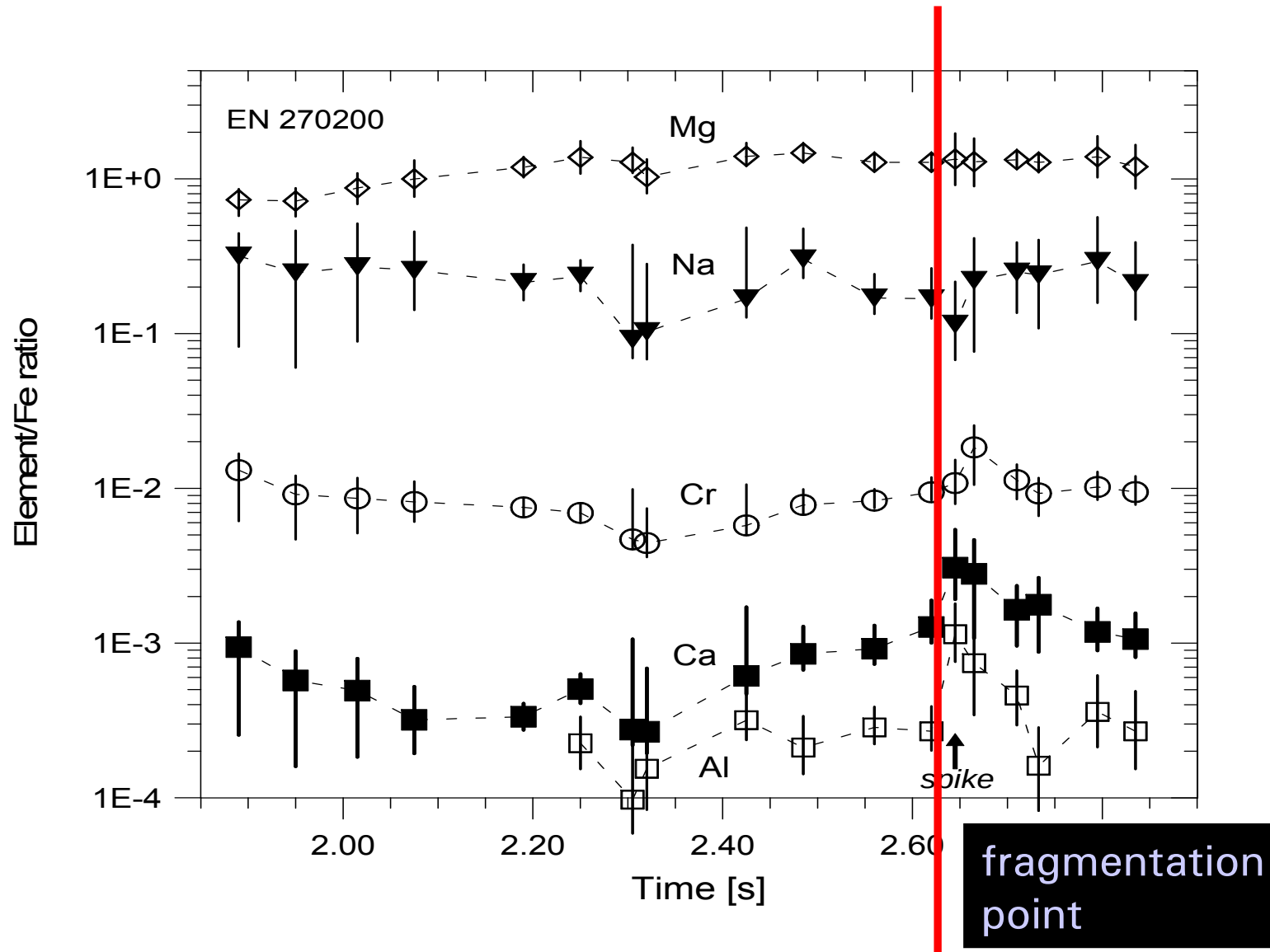


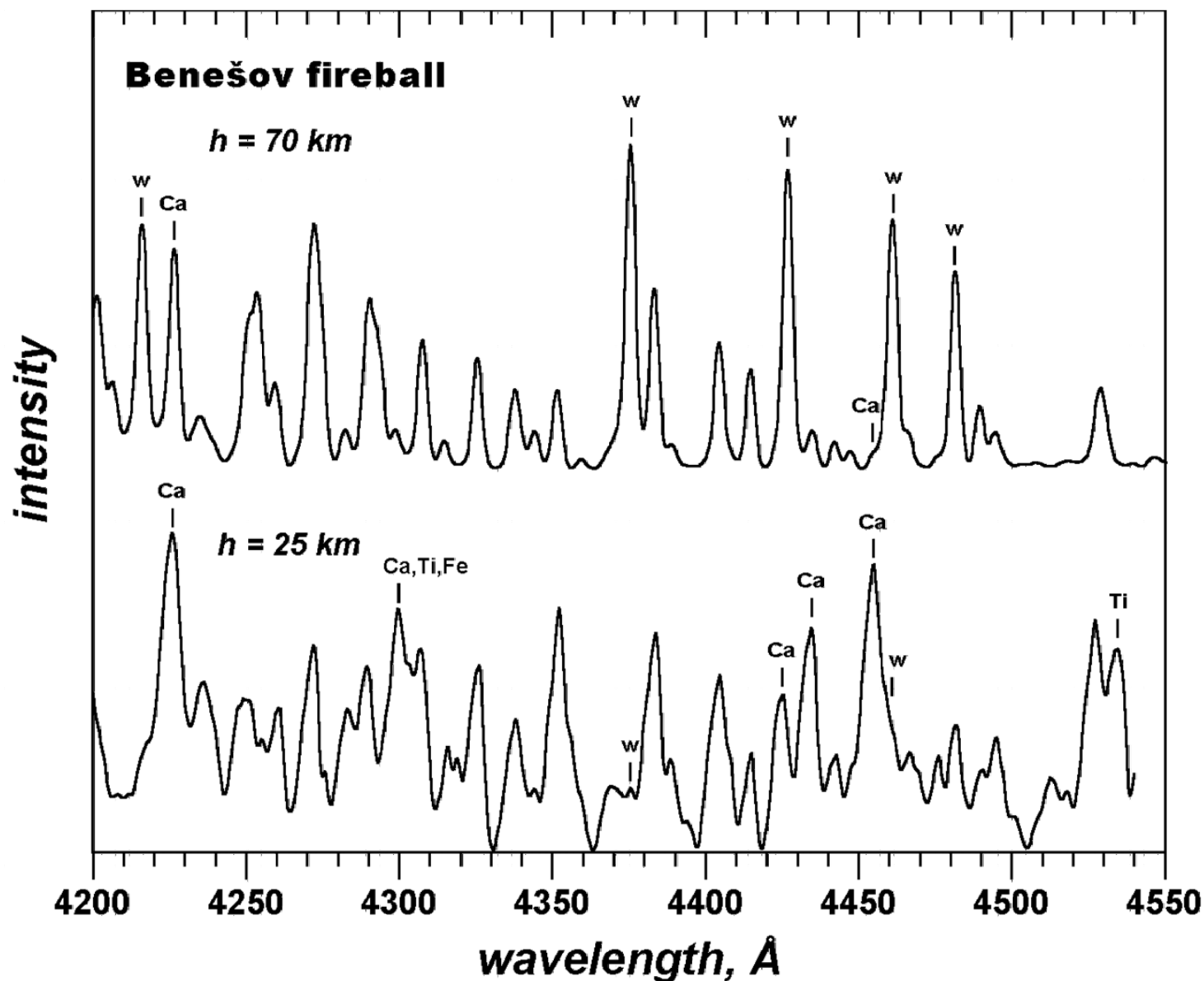
Fig. 14. The abundances (numbers of atoms) of eight chemical elements relative to iron as a function of fireball height [km]

(Borovicka 1993)

Změny podél dráhy (jiný bolid)



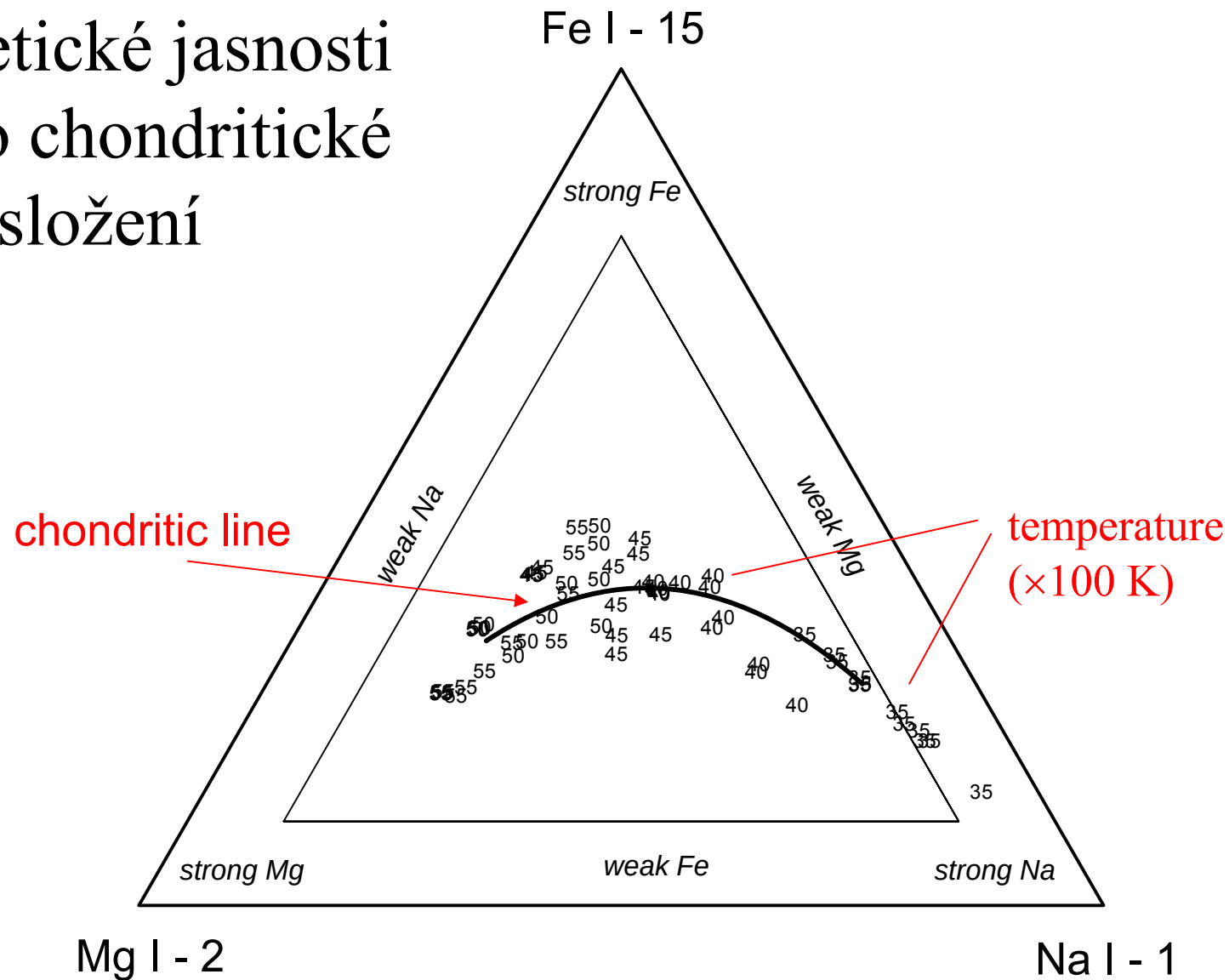
Benešov – účinné odpařování až ve výškách pod 30 km



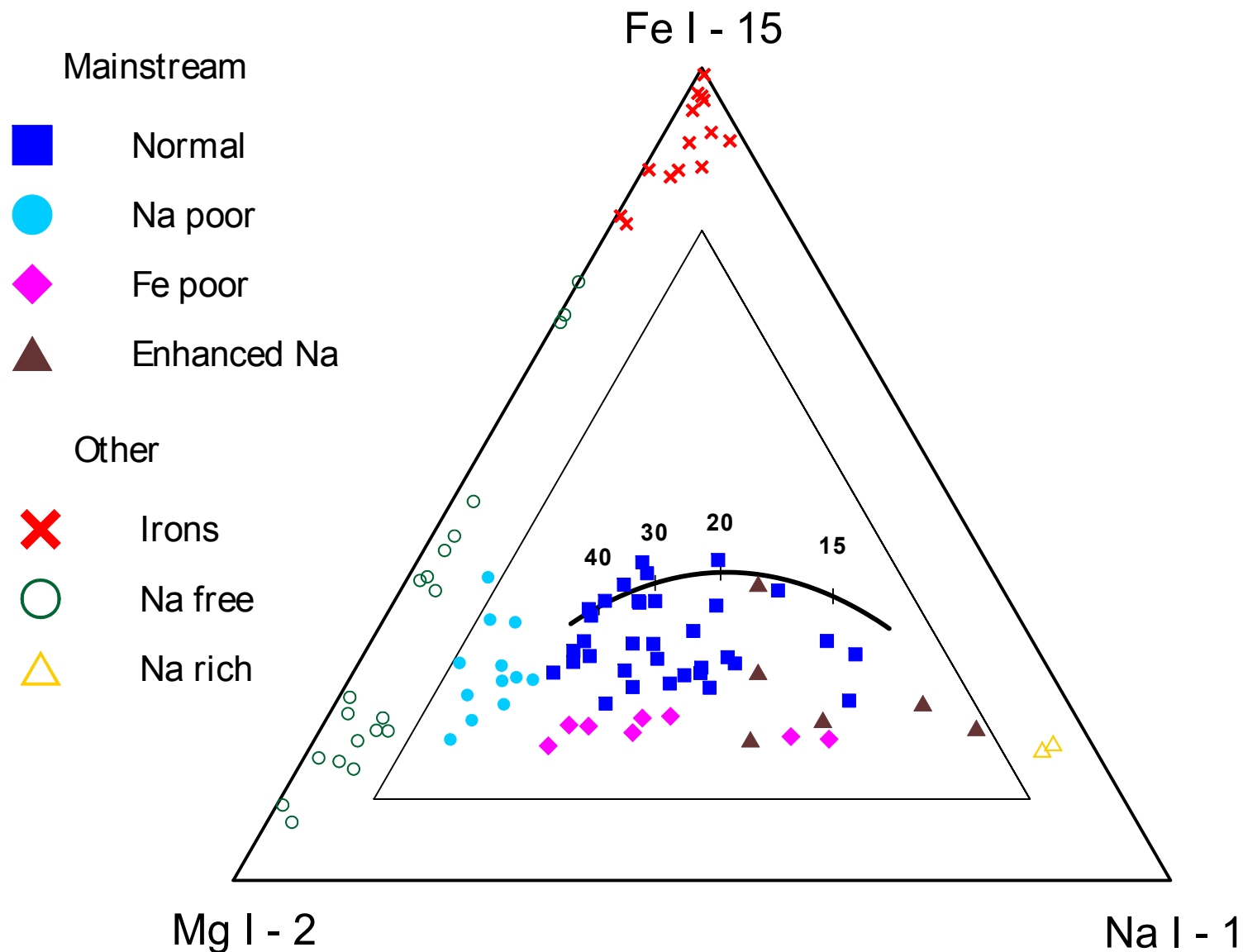
Složení malých meteoroidů

- Na základě integrace jasností čar podél dráhy
- Možné pouze pro Na, Fe, a Mg

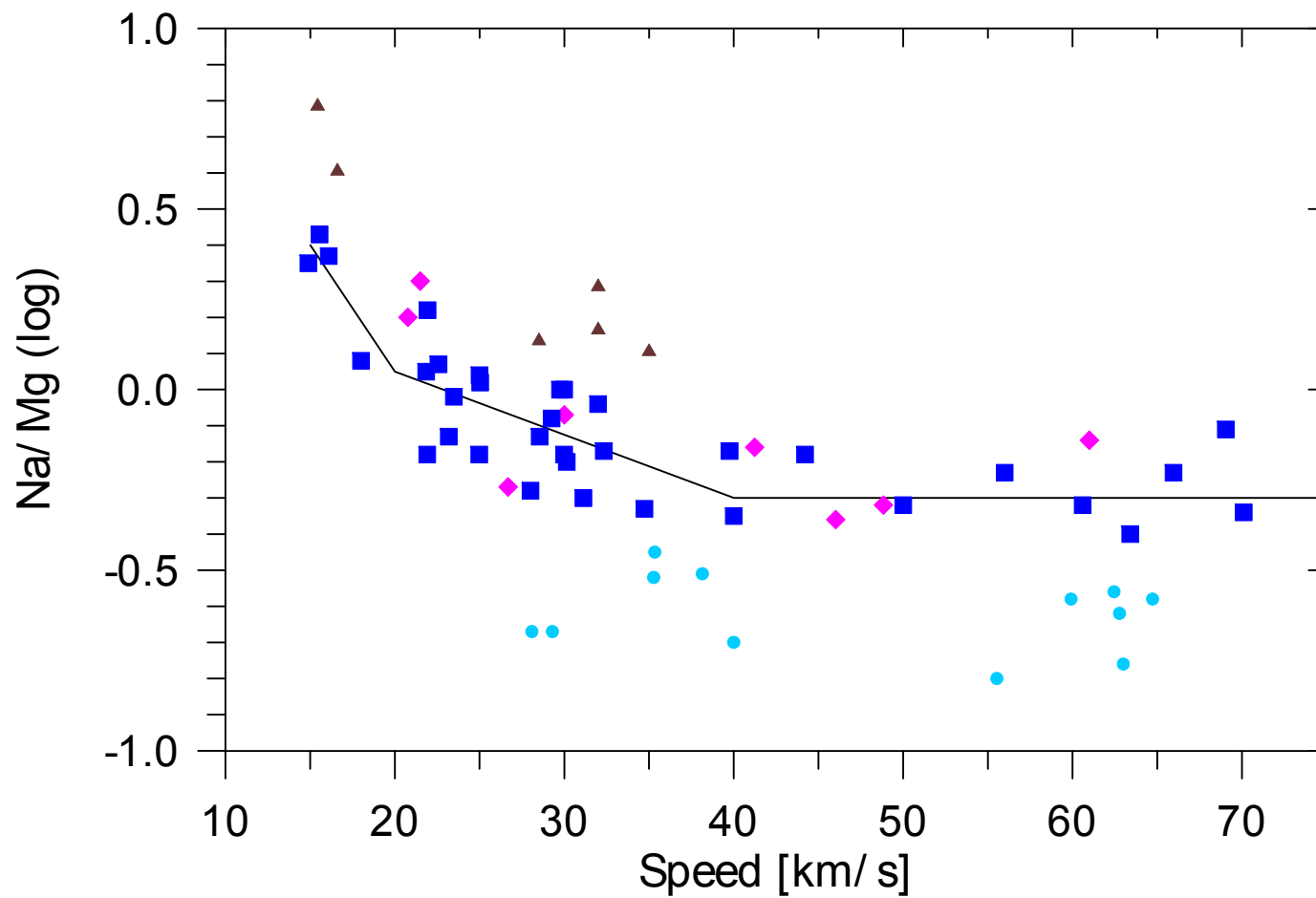
Theoretické jasnosti čar pro chondritické složení



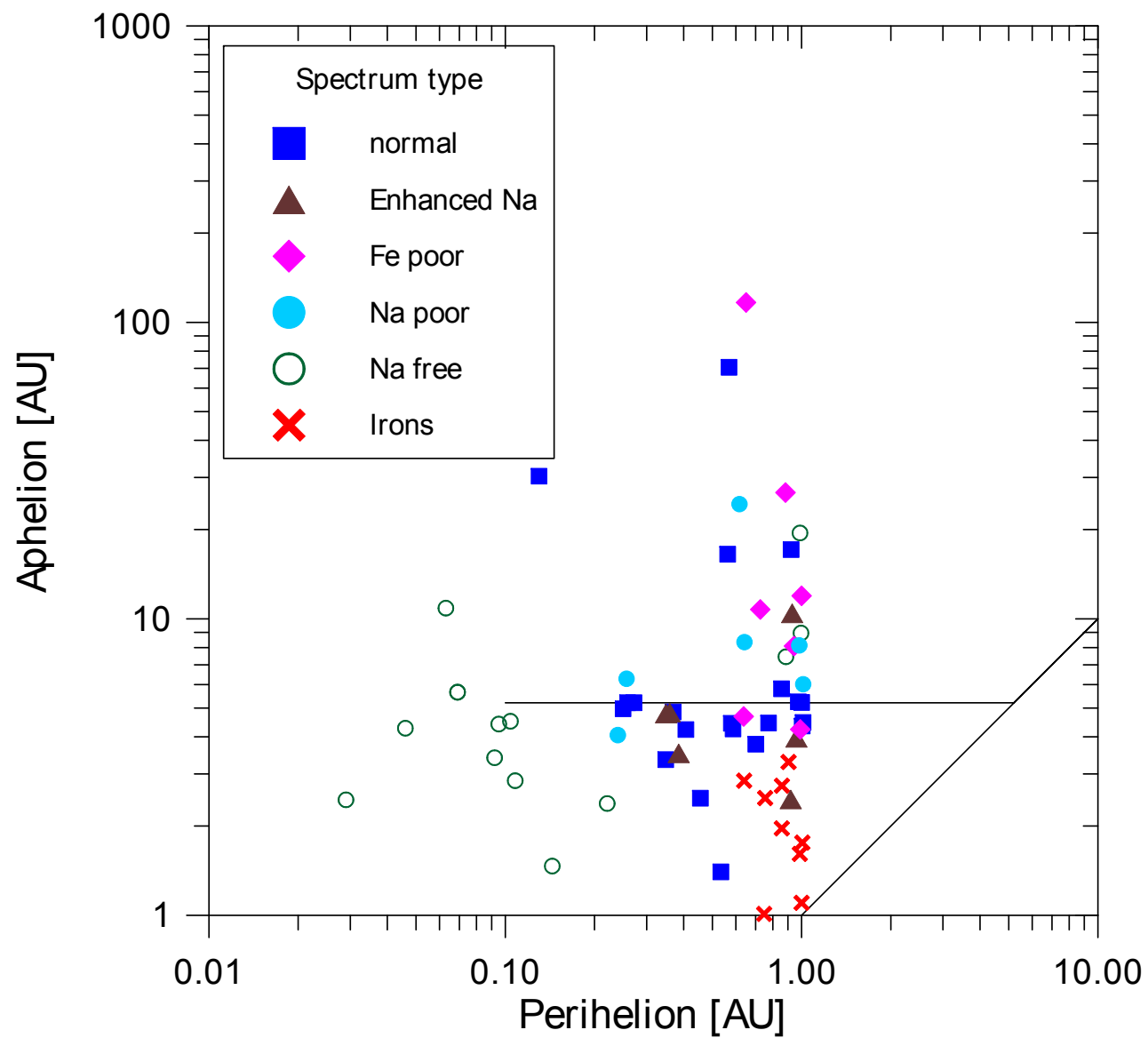
Spektrální typy sporadických meteoroidů



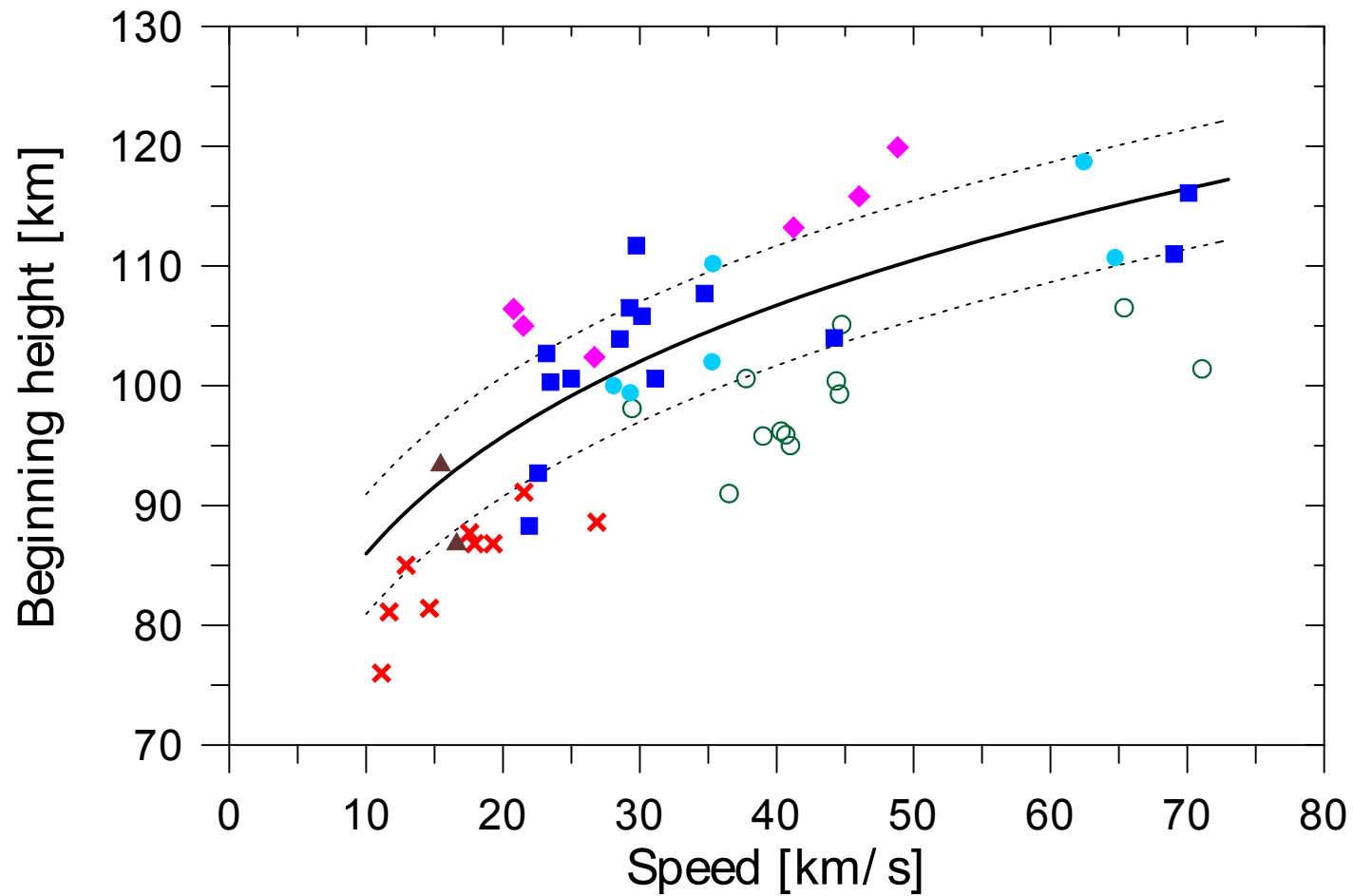
Poměr Na/Mg závisí na rychlosti meteoru



Orbitální rozložení



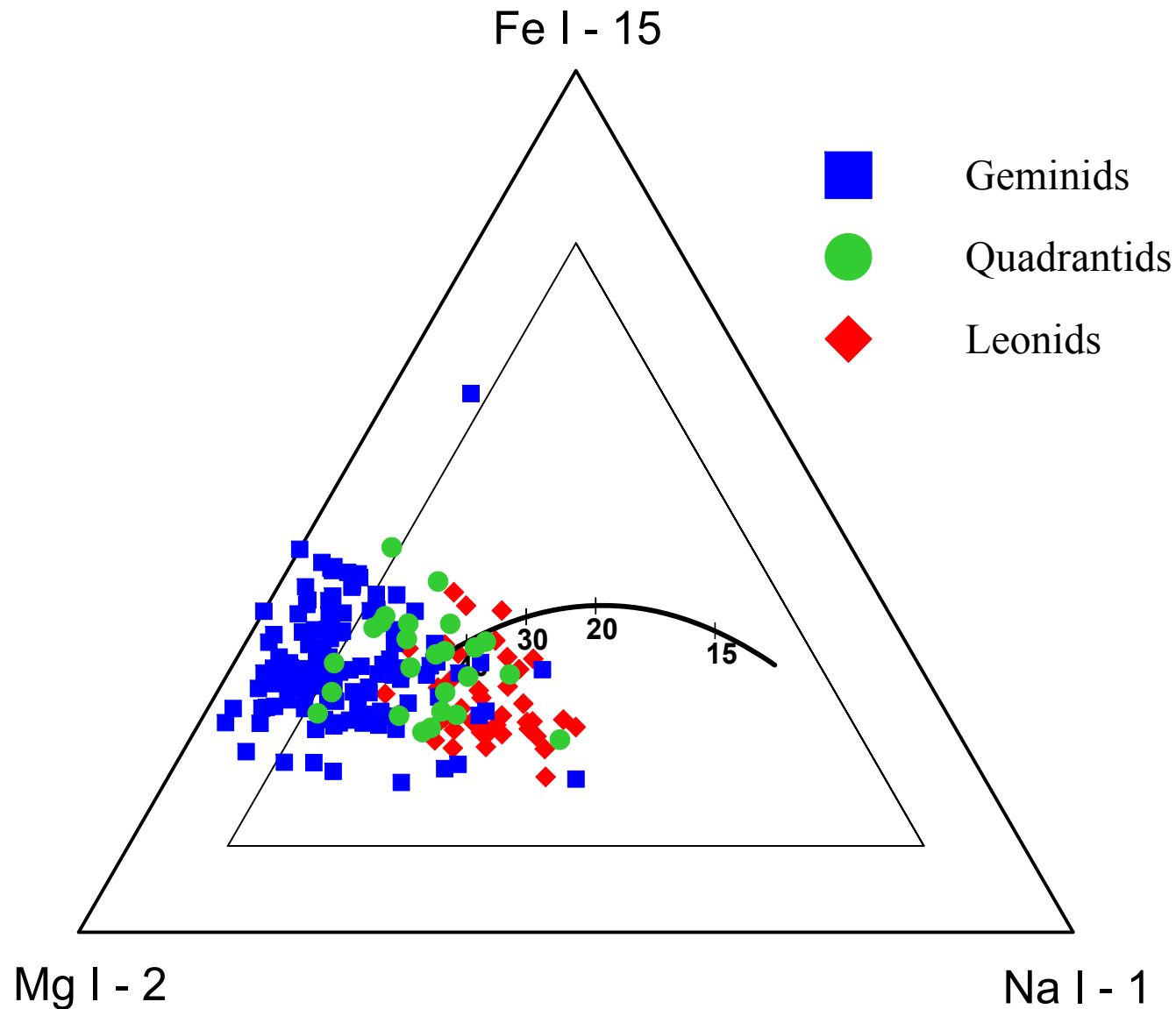
Mechanická pevnost



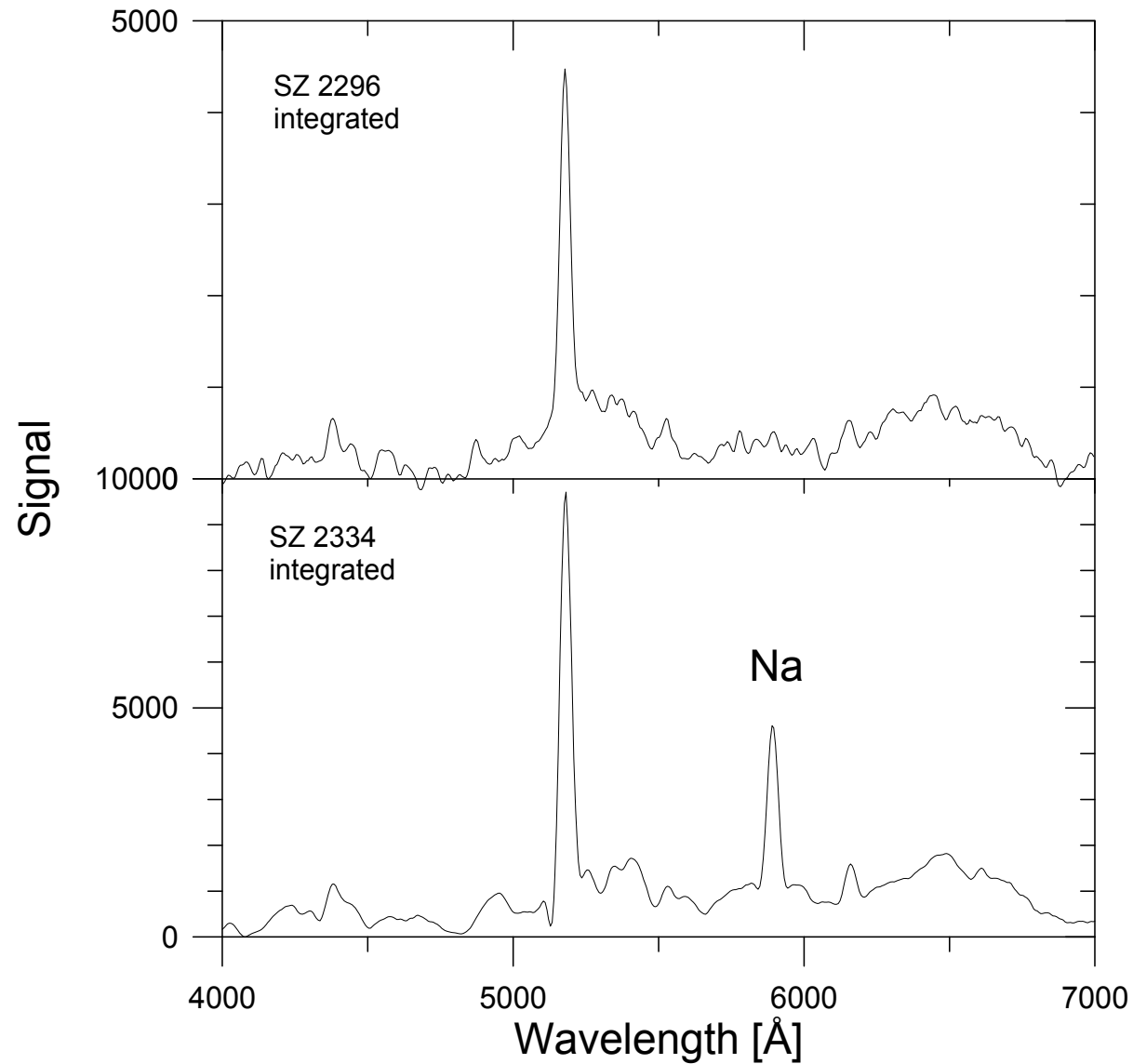
Rozmanitost

- Milimetrové meteoroidy jsou chemicky rozmanitější než větší tělesa
- Sporadické meteoroidy kometárního původu jsou rozmanitější než kometární roje

Geminidy, Quadrantidy a Leonidy



Rozdíly v obsahu Na v Geminidách jsou reálné

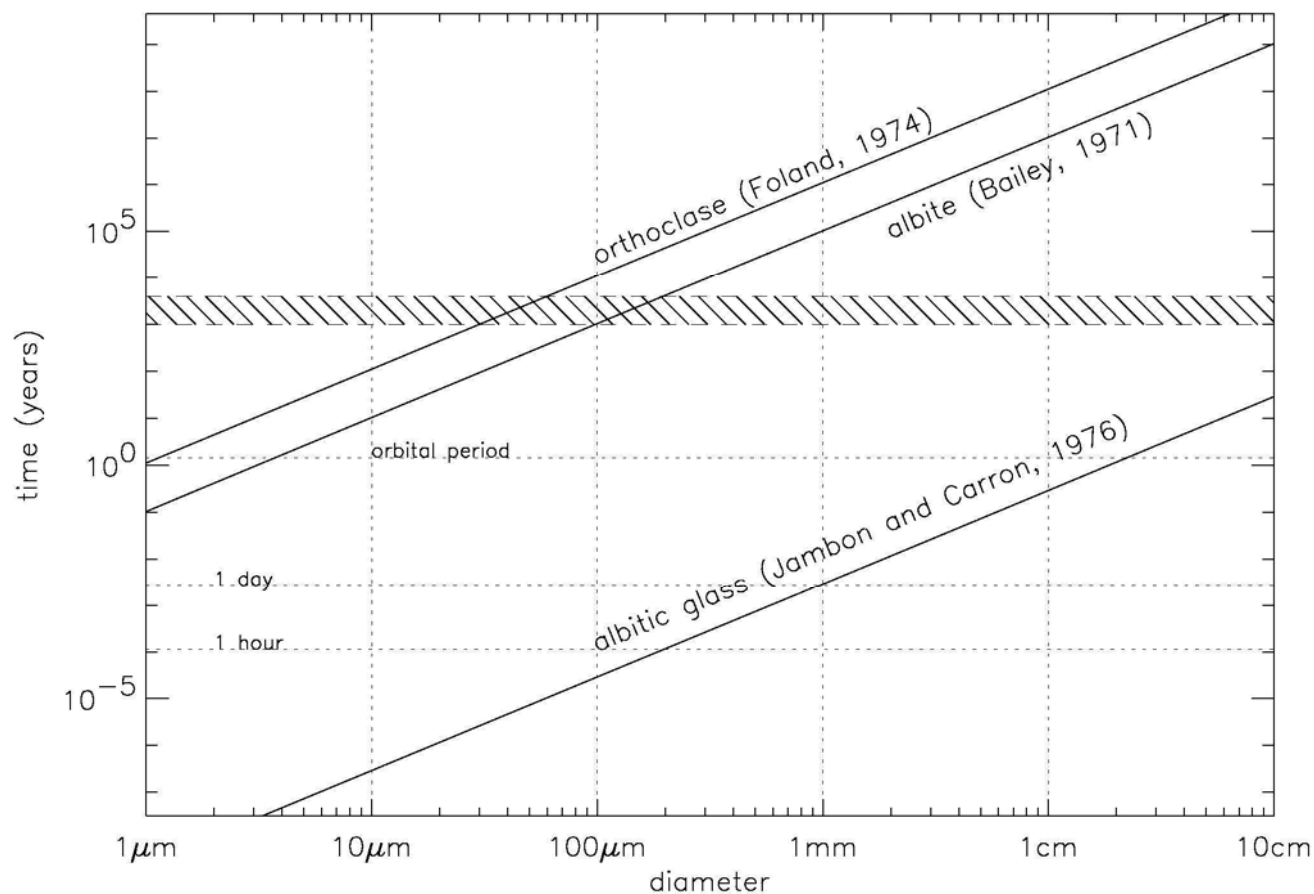


Výpočet ztráty sodíku v blízkosti Slunce

Čapek & Borovička (2009)

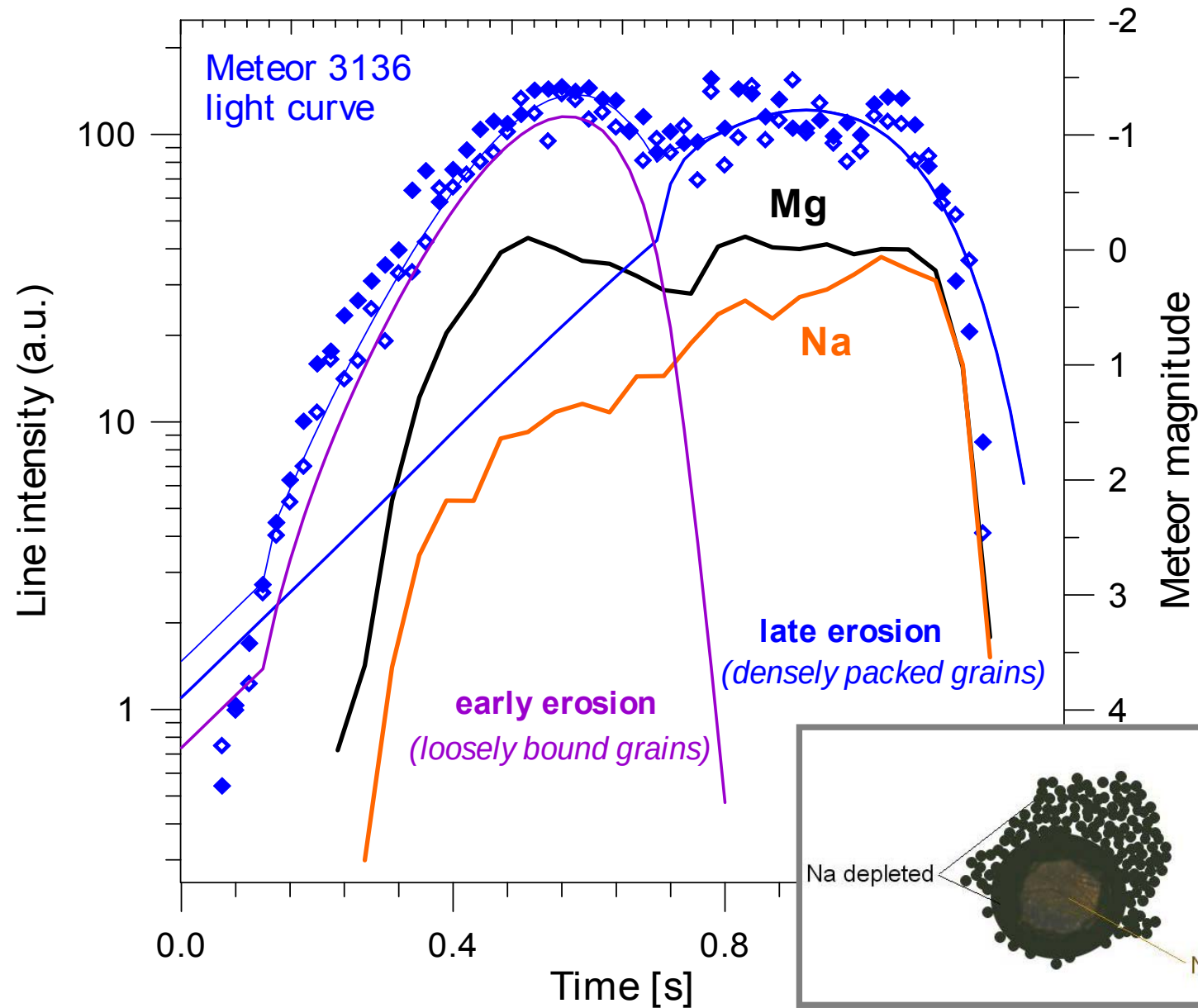
- Difúze Na z vnitřku na povrch meteoroidu nebo zrna
- Teploty Geminid:
180 K (afel) – 750 K (perihel)
(izotermální pro meteoroidy < 20 cm)

Trvání ztráty 90% sodíku v Geminidách



1000 let pro $100\mu\text{m}$ zrno s albitickým difúzním koeficientem

Pozorované rozmístění sodíku



Význam sodíku

- Sodík je dobrý indikátor struktury a historie malých (milimetrových) meteoroidů
- Snížení celkového obsahu sodíku ukazuje na porézní zrnitou strukturu a
 - vystavení silnému slunečnímu záření na $r < 0.2$ AU
 - nebo dlouhodobé ($\sim 10^9$ yrs) vystavení kosmickému záření (?)
- Přednostní odpaření sodíku ukazuje brzký rozpad na jednotlivá zrna při vstupu do atmosféry

Organický materiál v meteoroidech

- Vodík je běžný v kometárních meteoroidech, může být součástí minerálů
- Uhlík byl detekován v daleké ultrafialové oblasti (jedno spektrum Leonidy)
- CN, C₂, CH nejisté (CN/Fe < 0.03 v Leonidách)
- OH detekován v Leonidách a jejich stopách (UV a IR)