

Slunce ve vysokoenergetických oblastech spektra

Spektroskopie (nejen)
ve sluneční fyzice
LS 2011/2012

Michal Švanda

Astronomický ústav MFF UK
Astronomický ústav AV ČR

Podmínky ve svrchních vrstvách sluneční atmosféry

- Teploty 30 000 K až 30 MK, čili třířádová změna
- Emisní spektrum v blízké UV (VUV, 100-200 nm), extrémní UV (EUV, 10-100 nm) a měkké rentgenové (0,1-10 nm) oblasti
- Ideální diagnostických přístroj
 - Vysoké prostorové, časové i spektrální rozlišení s velkým zorným polem ($\sim 30'$) ve všech spektrálních oblastech => 4-D data (souřadnice, čas, vlnová délka)
 - *Nelze zkonstruovat!*
 - Materiálové vlastnosti silně závisí na vlnové délce
 - Úloha se musí rozdělit do spektrálních oblastí
 - Spektrometry (štěrbina), prostorové rozlišení skenováním
 - Imagery (\sim filtr)

Propustnost materiálů v UV oblasti

• VUV lze opticky fokusovat

- LiF, MgF₂, CaF₂, BaF₂, LaF₃, Al₂O₃ (safír) a podobně
 - Mají cut-off ke krátkým vlnovým délkám
 - Bombardování vysokoenergetickými elektrony zvyšuje opacitu materiálu – LiF nejhorší, BaF₂ nejlepší
 - LiF reaguje s vodou

• EUV

- Fólie propouštějící EUV oblast a blokující zbytek vlnových délek
- Be, Si, Al, Mg, Ge, In, polykarbonáty (vinyl, polypropylen, ...).
- Filtry kombinující organické materiály a kovy lze použít i pro výběr rentgenové oblasti

Odraznost materiálů v UV oblasti

- Nejlepší prostorové rozlišení – dopadové i odrazné úhly jsou téměř kolmé k optickému elementu
 - Běžně pro $\lambda > 50$ nm
- Al, SiC, B₄C odrážejí i UV oblast
- V oblasti ~10 nm se používají povrchy z prvků s vysokým Z (Au, Pt, Ir, atd.)
- Vícevrstvé povrchy: napařené vrstvičky (~1 nm tlusté) umožňují sestavit materiál odrazný jen v určité oblasti spektra ($d\lambda/\lambda \sim 0,01-0,1$). V oblasti 17-35 nm se používá kombinace Si-Mo, Si-Mo₂C nebo Si-B₄C. Laboratorně lze vyrobit povrch odrážející až 3nm fotony

- Světlo dopadá v malém úhlu, téměř tečně – pak je vysoká odraznost. Kritický úhel, nad nímž odrazivost prudce klesá

$$\sin \theta_c = \lambda_{\min} \left(\frac{N_e e^2}{m c^2 \pi} \right)^{1/2}$$

- Al: $N_e^{1/2} = 8,8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, pro Au, Pt, Ir cca 2,5krát větší
- Λ_{\min} je vlnová délka odpovídající θ_c .
- Wolterův objektiv pro fokusaci EUV a soft-X záření

UV spektrometry – konkávní sférická mřížka

Vstupní štěrbinu nebo apertura, disperzní element, fokusovací element, detektor. Disperzní a fokusovací element často splývají (kvůli nízké odraznosti).

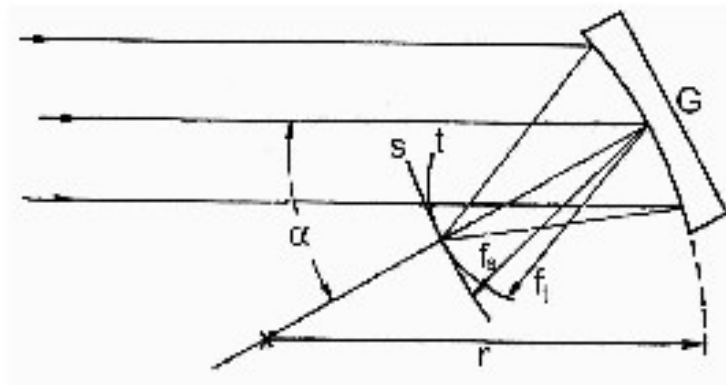
Neobvyklejší konstrukce: sférická mřížka s poloměrem R , přiléhající kružnici s poloměrem $R/2$ (Rowlandova kružnice). Svazek světla vstupující štěrbinou bude rozložen a zaostřen podél této kružnice.

Mřížková rovnice: $m \lambda = d (\sin \alpha + \sin \beta)$

Tangenciální a sagitální ohnisková vzdálenost:

$$f_t = \frac{R \cos^2 \beta}{\cos \alpha + \cos \beta}, \quad f_s = \frac{R}{\cos \alpha + \cos \beta}$$

Stigmatické zobrazení (obě ohniskové vzdálenosti stejné) pro $\beta=0$ (Wadsworthova montáž).



Rentgenové spektrometry

RTG záření lze jen obtížně fokusovat (spíš nelze, pouze otáčením kolimovaného svazku).

Nejčastěji krystalové, využívající Braggovu difrakci kolimovaného rentgenového svazku v závislosti na natočení krystalu.

$$m \lambda = 2d \sin \theta$$

Kolimace: série mřížek jemných vláken neprůhledných pro RTG záření. Otáčením krystalu kolem osy – spektrum zdroje.

Chceme-li část spektra simultánně

- “ohnutý” krystal – v různých částech různé dopadové úhly
- Použitím pozičně citlivé anody v plynovém detektoru lze vyčíst část spektra najednou.
- Nemá pohyblivé části!
- Větší efektivní plocha

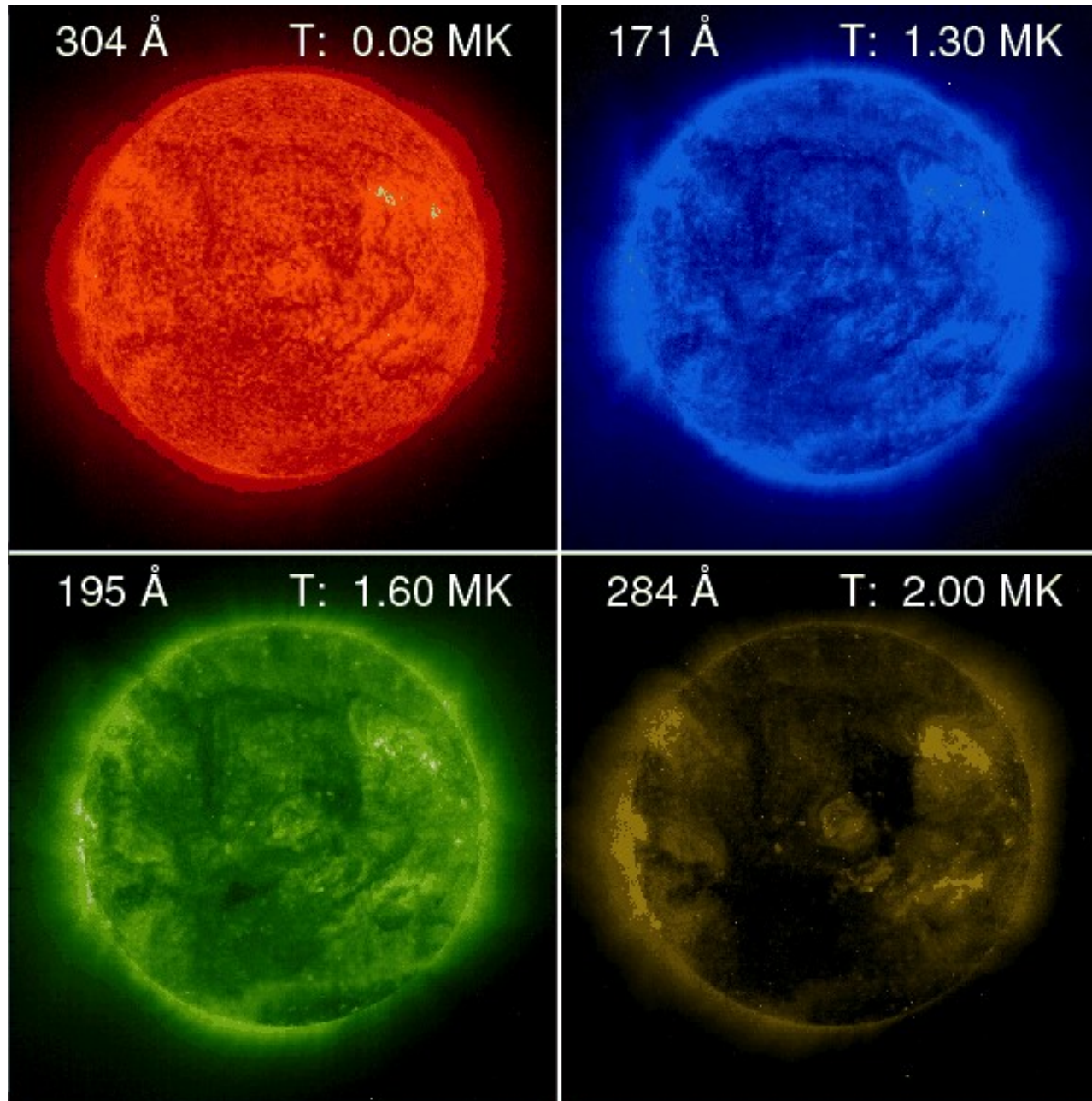
Neustálé pozadí znesnadňuje pozorování

Odstranění při redukci – výška pulzů signálu je výrazně vyšší než výška pulzů pozadí

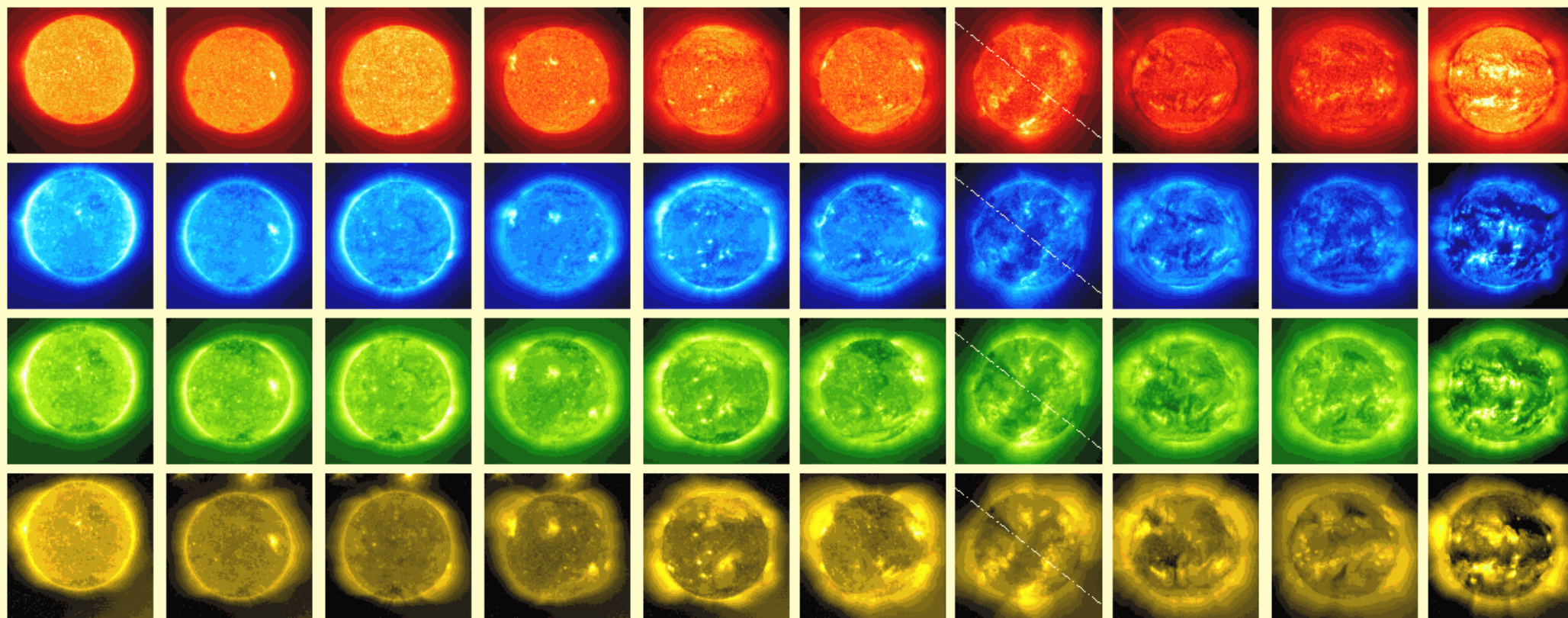
Prostorové rozlišení: skenování

- Fotografické desky nebo pásy
 - Malý dynamický rozsah → sada expozic též oblasti
 - Skylab
- Elektronické detektory – použitelné v UV oblasti
 - SOHO, Hinode, ...
- Plynové detektory
 - Rentgenové záření ionizuje plyn v komoře, ionizované elektrony jsou sbírány anodou, počet zachycených elektronů v pasti závisí na úrovni ionizujícího záření
 - GOES
- Scintilační detektory
 - Ionizující záření vyvolává záblesky viditelného světla ve scintilačním materiálu (NaI, Ge, ...), které se detekují fotonásobičem
 - Lze sestavit matici – prostorové rozlišení
 - RHESSI

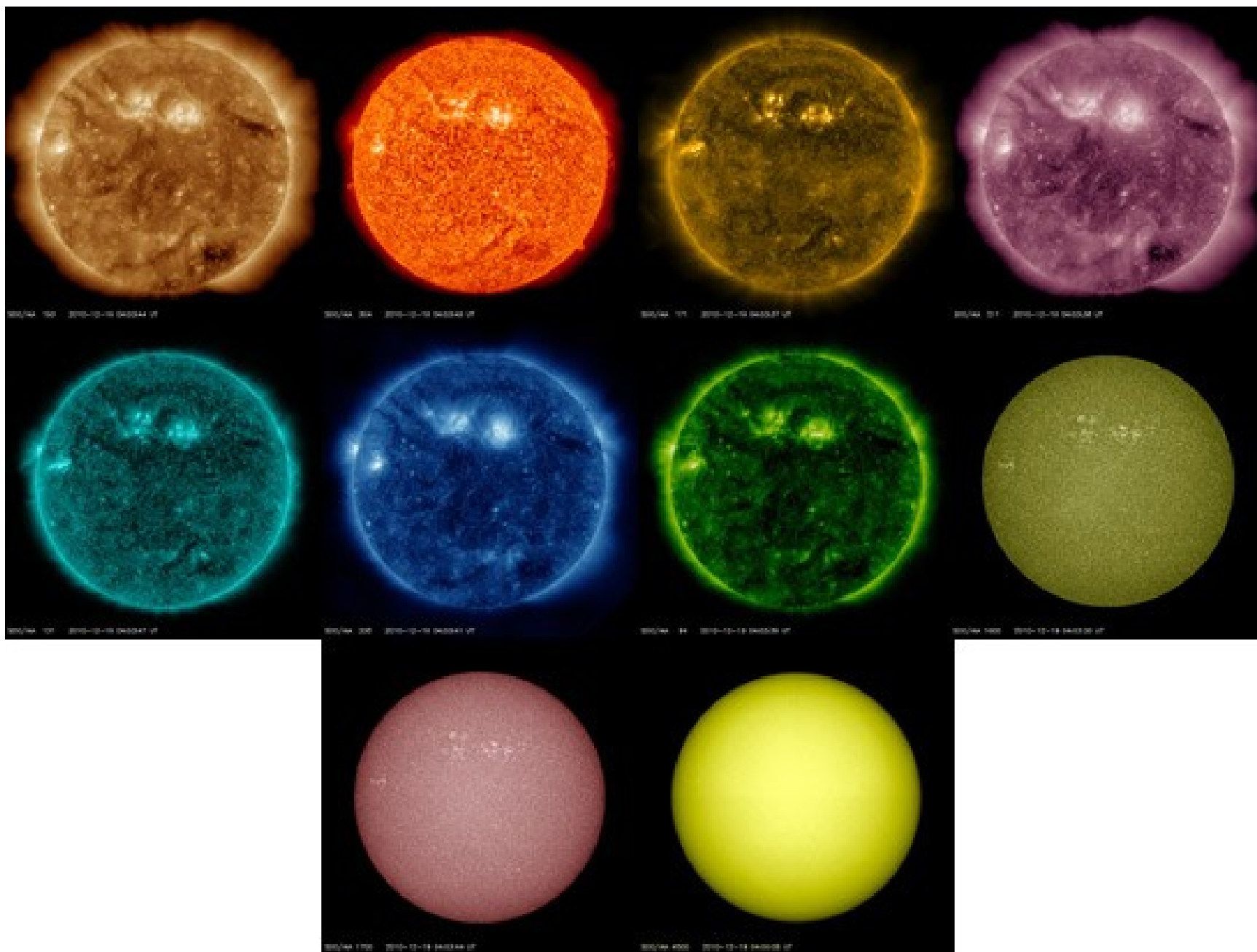
- UV oblast – obecně víceteplotní plazma
 - Je několik oblastí ve spektru dominovaných emisí iontů formující se při podobné teplotě
- Skenovací nebo vícevrstvá kolmo-dopadová optika
- EIT, TRACE, ... – vícevrstvé povrchy (systémy Cassegrain nebo Ritchey-Chrétien)
 - Hlavní zrcadlo je rozděleno na sektory s jinými vrstvičkami – každý odráží pouze určité oblasti UV spektra široké kolem 1 nm
 - Simultánní záznam oblasti na Slunci ve vybraných spektrálních pásech
 - 171 Å (Fe IX a Fe X), 195 Å (Fe XII, Fe XXIV a Ca XVII), 284 Å (Fe XV), 304 Å (EIT, He II a Si XI), 1600 Å (TRACE, C IV a Ly- α)



EIT v čase



15 Feb. 1996 12 Aug. 1996 11 Feb. 1997 13 Aug. 1997 10 Feb. 1998 23 Jun. 1998 18 Feb. 1999 14 Aug. 1999 11 Feb. 2000 3 Aug. 2000



UV a X emisní čáry

- 1-7 Å: krystalové spektrometry, čáry vodíku- a heliu- podobných ionů křemíku a niklu během erupcí a z jasných aktivních oblastí
- 7-23 Å: krystalové nebo tečně-odrazné spektrometry, čáry vodíku- a heliu- podobných iontů kyslíku až hliníku a čar s konfigurací s $n > 2$ z Fe XVII až Fe XXIV a Ni XIX po Ni XXVI emitovaných v erupcích a v aktivních oblastech
- 23-170 Å: tečně-odrazné spektrometry, většinou čáry s $n \geq 3$ lithiu- až chlóru-podobných iontů emitované při $T \sim 1-5$ MK a dovolené přechody s $n = 2$ Fe XVIII do Fe XXIII z aktivních oblastí a erupcí
- 170-630 Å: tečně- i kolmo-odrazné spektrometry, dovolené čáry konfigurací lithiu- až horčíku-podobných iontů s $n = 2$, emitované v širokém teplotním rozsahu a dovolené čáry s $n = 3$ Fe IX až Fe XVII
- 630-2000 Å mimo disk: kolmo-odrazné spektrometry. Ve vzdálenostech větších než $1,05 R_S$ je dominována dovolenými i zakázanými čarami s $n = 2$ a dovolenými čarami s $n = 3$ koronálních iontů formovaných při teplotách $T \geq 0,7$ MK
- 630-2000 Å na disku: většinou emisní čáry z chromosféry a přechodové oblasti všech prvků, Lymanovské kontinuu a malé množství jasných koronálních čar