

Optická spektroskopie

Zdeněk Navrátil

Ústav fyziky a technologií plazmatu
Přírodovědecká fakulta MU, Brno

říjen 2024

- ▶ Instrumentace pro UV, VIS a IR spektrální oblast
- ▶ Tvar spekter, spektra atomů a molekul ve viditelné oblasti
- ▶ Spektrum vodíku jako test fyzikálních teorií
- ▶ Spektroskopické metody studující polohu, profil a intenzitu spektrálních čar
- ▶ IR spektra

Optická spektroskopie

Spektroskopické metody studují záření a částice v závislosti na jejich energii.

- ▷ optická spektroskopie – „světlem“ je UV + VIS + IR
- ▷ různé spektrální oblasti se rozlišují vlnovou délkou λ , vlnočtem $\tilde{\nu}$, případně frekvencí ν
- ▷ energie fotonu

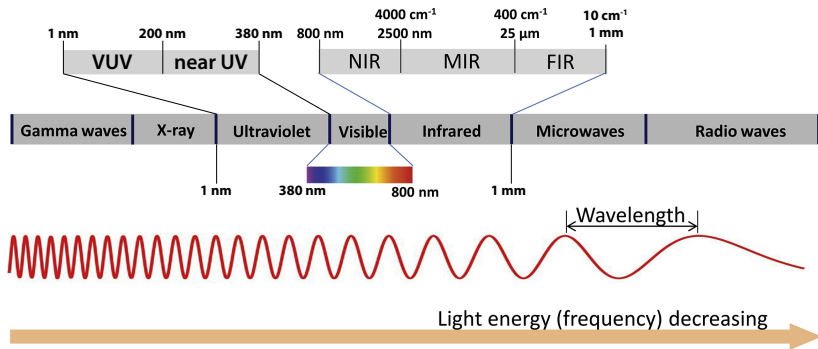
$$E = h\nu = hc/\lambda = hc\tilde{\nu}$$

$$1000 \text{ nm} = 1 \mu\text{m} = 10\,000 \text{ cm}^{-1} \quad 10 \mu\text{m} = 1000 \text{ cm}^{-1}$$

jsou i jiné spektroskopie:

- ▶ rádiová, rtg spektroskopie – elmg. záření v jiných oblastech
- ▶ hmotnostní spektroskopie – hmotnost (a náboj) částic
- ▶ elektronová spektroskopie – energie elektronů

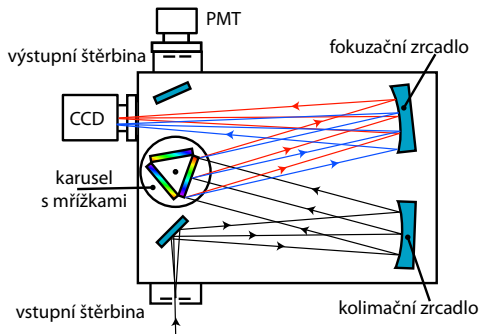
Elektromagnetické spektrum



Propustnost materiálů

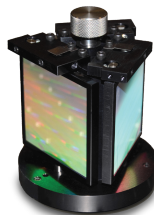
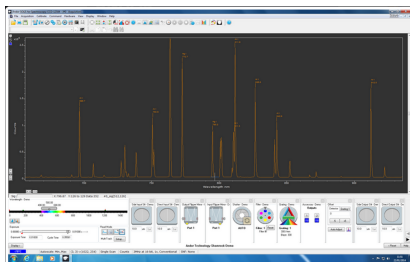
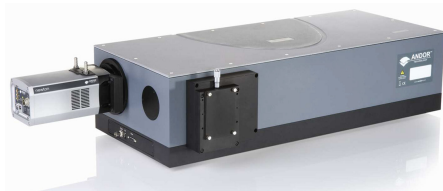
korunové sklo	380 nm – 2,1 μm
tavený křemen	190 nm – 2,1 μm
KBr	250 nm – 26 μm
vzduch	> 195 nm

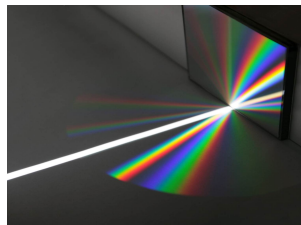
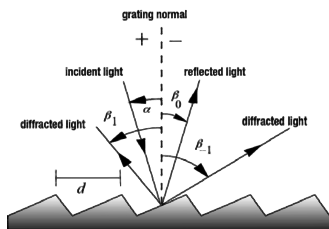
Univerzální OES spektrometr



- ▶ Czerny-Turner, 1930
- ▶ asymetricky toroidní zrcadla (řeší achromatismus, komu)
- ▶ rozkladným členem je difrakční mřížka na odraz
- ▶ 1D/2D detektory

Univerzální OES spektrometr





- ▶ používají se mřížky na odraz
- ▶ podmínka pro maxima

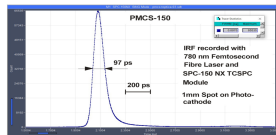
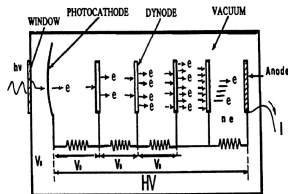
$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m \cdot \lambda,$$

kde α je úhel dopadu, β úhel difrakce.

- ▶ deviační úhel $D_V = 2K = \beta - \alpha$ je pevně dán konstrukcí monochromátoru – tj. polohou vstupní a výstupní štěrbin.
- ▶ Proměření spektra se realizuje otáčením mřížky (skenovací úhel ϕ), tj. současnou změnou α i β .

fotonásobič – PMT

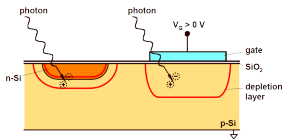
- ▶ 0D detektor – nutná výstupní štěrbina, monochromátor
- ✗ pomalé měření více vlnových délek
- ✓ vysoká citlivost až 1 foton – čítání fotonů
- ✓ superrychlý detektor – časové rozlišení ≈ 100 ps
- ✓ velmi rychlé zpracování signálu (100 ns)
- ▶ hybridní detektory až 15 ps



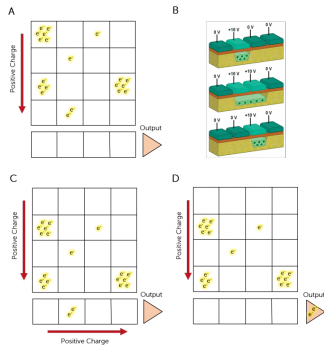
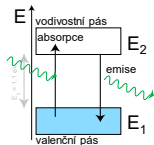
200mV výška, 1,5 ns šířka pulzu

Charge Coupled Device – CCD

- ▶ moderní spektrograf
- ▶ vnitřní fotoelektrický jev v polovodiči
- ▶ čipy z křemíku (do 1100 nm), InGaAs (do 1700 nm)
- ▶ Př.: Andor Newton 2048x512, Si, pixel 13.5 μm , chlazení Peltiérovým článkem na -80°C



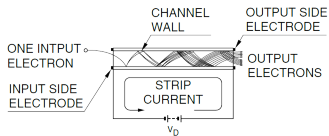
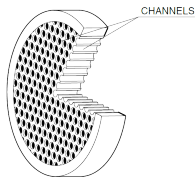
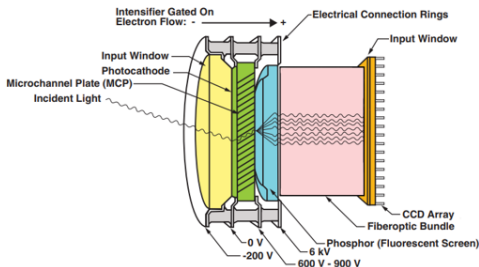
CMOS CCD



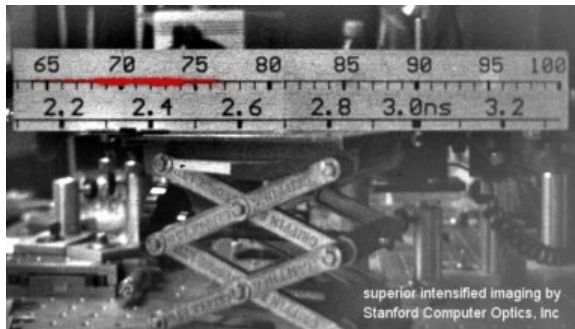
vyčítání fullframe ccd

Intensified CCD – ICCD

- ▶ zesilovač obrazu MCP obdobný v přístrojích pro noční vidění
- ▶ umožňuje velmi rychlý gating fotoelektronů (PI-MAX4: až 500 ps pulz, 10 ps krok zpoždění, 1 MHz opakovací frekvence)

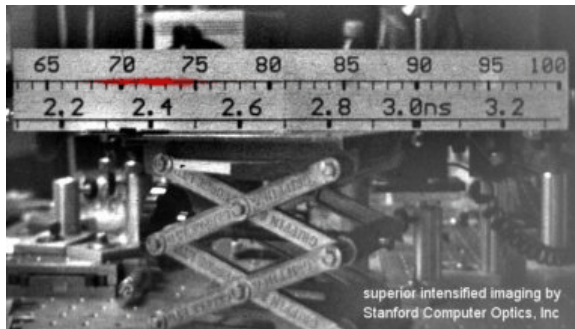


Co dokáže ICCD kamera



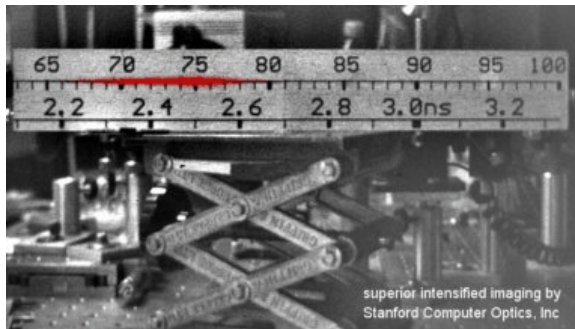
- ▶ pohyb laserového pulzu o délce 250 fs ($2,5 \cdot 10^{-13} \text{ s}$)
- ▶ doba otevření kamery 270 ps ($2,7 \cdot 10^{-10} \text{ s} \leftrightarrow 8 \text{ cm}$)
- ▶ záznam vzniká postupným oddalováním otevření kamery při opakovaném vysílání světelného pulzu

Co dokáže ICCD kamera



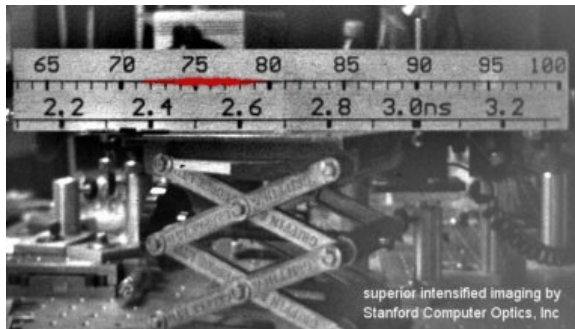
- ▶ pohyb laserového pulzu o délce 250 fs ($2,5 \cdot 10^{-13}$ s)
- ▶ doba otevření kamery 270 ps ($2,7 \cdot 10^{-10}$ s \leftrightarrow 8 cm)
- ▶ záznam vzniká postupným oddalováním otevření kamery při opakovaném vysílání světelného pulzu

Co dokáže ICCD kamera



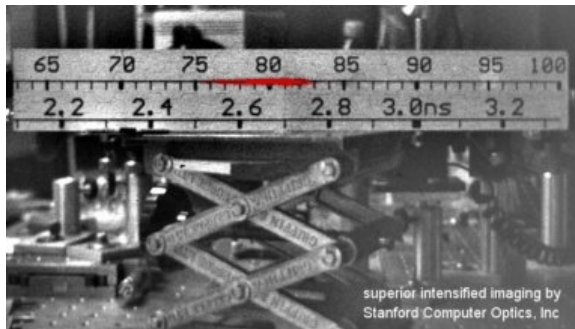
- ▶ pohyb laserového pulzu o délce 250 fs ($2,5 \cdot 10^{-13} \text{ s}$)
- ▶ doba otevření kamery 270 ps ($2,7 \cdot 10^{-10} \text{ s} \leftrightarrow 8 \text{ cm}$)
- ▶ záznam vzniká postupným oddalováním otevření kamery při opakovaném vysílání světelného pulzu

Co dokáže ICCD kamera



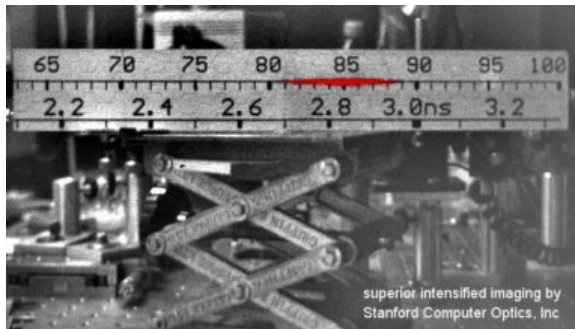
- ▶ pohyb laserového pulzu o délce 250 fs ($2,5 \cdot 10^{-13} \text{ s}$)
- ▶ doba otevření kamery 270 ps ($2,7 \cdot 10^{-10} \text{ s} \leftrightarrow 8 \text{ cm}$)
- ▶ záznam vzniká postupným oddalováním otevření kamery při opakovaném vysílání světelného pulzu

Co dokáže ICCD kamera



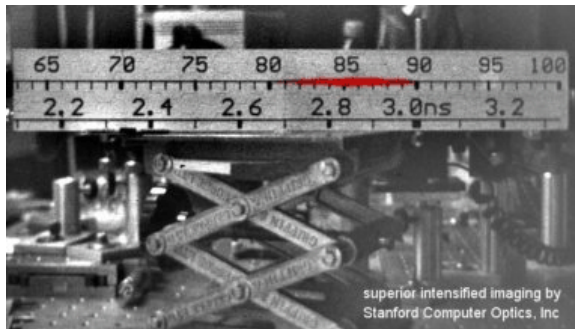
- ▶ pohyb laserového pulzu o délce 250 fs ($2,5 \cdot 10^{-13}$ s)
- ▶ doba otevření kamery 270 ps ($2,7 \cdot 10^{-10}$ s \leftrightarrow 8 cm)
- ▶ záznam vzniká postupným oddalováním otevření kamery při opakovaném vysílání světelného pulzu

Co dokáže ICCD kamera



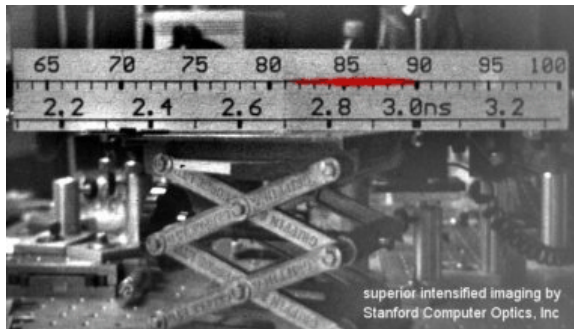
- ▶ pohyb laserového pulzu o délce 250 fs ($2,5 \cdot 10^{-13}$ s)
- ▶ doba otevření kamery 270 ps ($2,7 \cdot 10^{-10}$ s \leftrightarrow 8 cm)
- ▶ záznam vzniká postupným oddalováním otevření kamery při opakovaném vysílání světelného pulzu

Co dokáže ICCD kamera



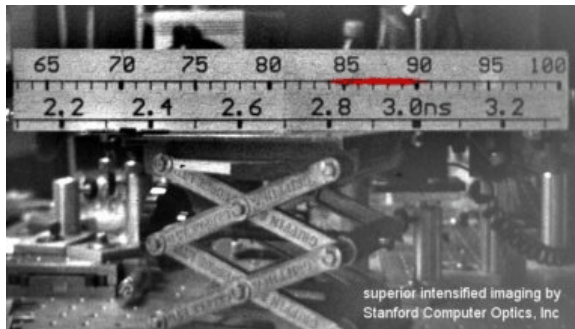
- ▶ pohyb laserového pulzu o délce 250 fs ($2,5 \cdot 10^{-13}$ s)
- ▶ doba otevření kamery 270 ps ($2,7 \cdot 10^{-10}$ s \leftrightarrow 8 cm)
- ▶ záznam vzniká postupným oddalováním otevření kamery při opakovaném vysílání světelného pulzu

Co dokáže ICCD kamera



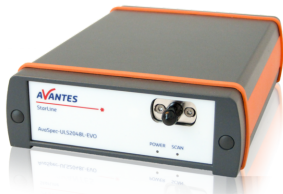
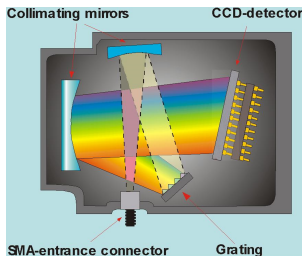
- ▶ pohyb laserového pulzu o délce 250 fs ($2,5 \cdot 10^{-13}$ s)
- ▶ doba otevření kamery 270 ps ($2,7 \cdot 10^{-10}$ s \leftrightarrow 8 cm)
- ▶ záznam vzniká postupným oddalováním otevření kamery při opakovaném vysílání světelného pulzu

Co dokáže ICCD kamera

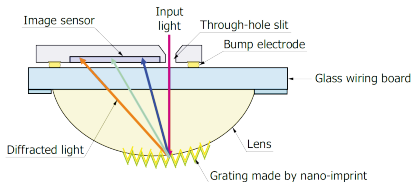
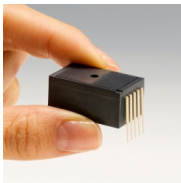


- ▶ pohyb laserového pulzu o délce 250 fs ($2,5 \cdot 10^{-13}$ s)
- ▶ doba otevření kamery 270 ps ($2,7 \cdot 10^{-10}$ s \leftrightarrow 8 cm)
- ▶ záznam vzniká postupným oddalováním otevření kamery při opakovaném vysílání světelného pulzu

Malé spektrometry



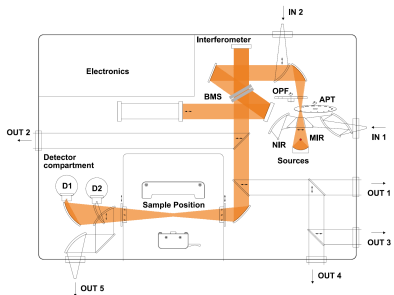
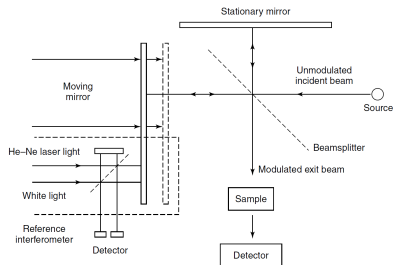
Avaspec 75 mm s pevnou mřížkou 300 vr/mm: 200-1100 nm, rozlišení 1 nm, 3600 vr/mm: 200-400 nm, rozlišení 0.06 nm (při šterbině 10 μm)

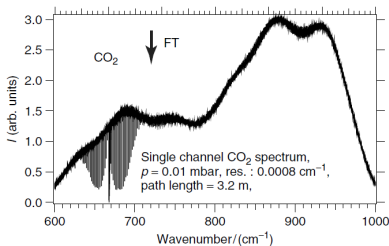
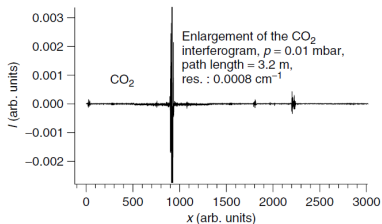


Hamamatsu minispektrometr (MS series), 340-750 nm, 12 nm FWHM

Spektroskopie v (nejen) infračervené oblasti – FTIR

- ▶ dva Michelsonovy interferometry v jednom přístroji
- ▶ skenuje se s jedním zrcadlem (nebo oběma)
- ▶ interference dvou paprsků neposkytuje spektrální rozlišení! (jako dvojštěrbina)
- ▶ navíc všechny vlnové délky se měří současně!





interference monochromatických koherentních zdrojů s intenzitou E

$$I(x) = 2E[1 + \cos(2\pi\tilde{\nu}x)]$$

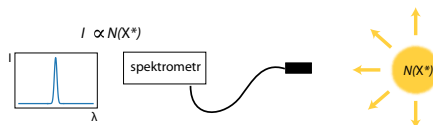
interferogram pro bílé světlo

$$I(x) = 2 \int_0^{\infty} E(\tilde{\nu}) \cos(2\pi\tilde{\nu}x) d\tilde{\nu}$$

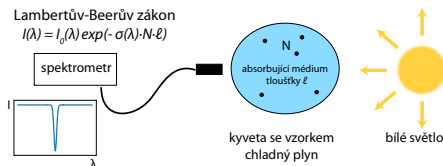
spektrum zpětně spočteme

$$E(\tilde{\nu}) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) e^{-i2\pi\tilde{\nu}x} dx$$

- ▶ optická emisní spektroskopie (OES) – studujeme vlastní záření objektu
 - ▶ vyšší teplota nebo jiný zdroj energie způsobující luminescenci

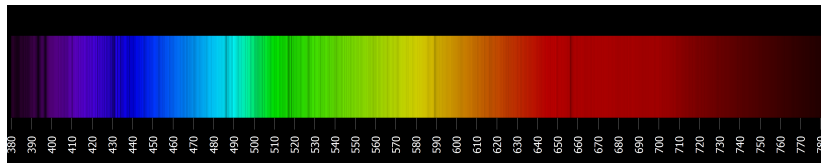
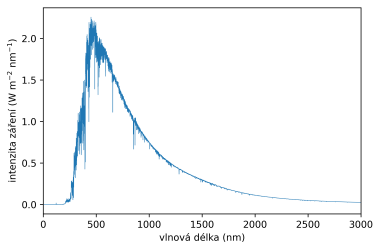


- ▶ optická absorpční spektroskopie (OAS)
 - ▶ studujeme pohlcení záření v látce
 - ▶ OAS s bílým světlem (*broadband absorption spectroscopy*)
 - ▶ OAS s monochromatickým světlem: výbojky s úzkými čarami, lasery



Absorpční a emisní spektra

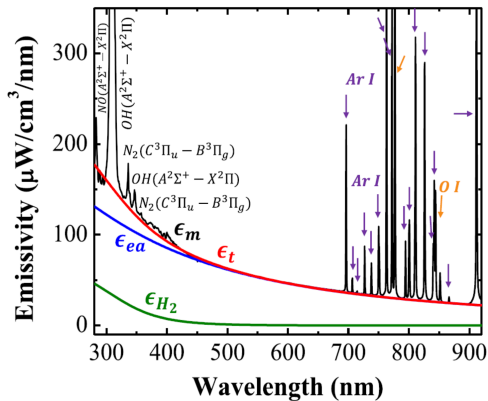
Typický příklad absorpce – Fraunhoferovy čáry ve spektru Slunce



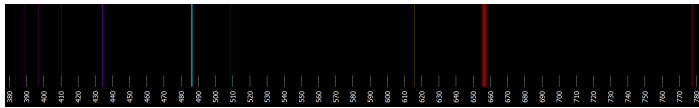
Spektrum Slunce (nad atmosférou Země)

Druhy spekter (zde OES)

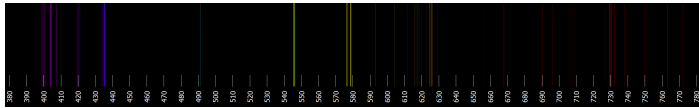
- ▶ čarová spektra – „line“
- ▶ pásová spektra – „band“
- ▶ spojitá spektra – „continuum“



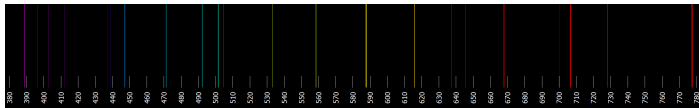
Příklady emisních spekter



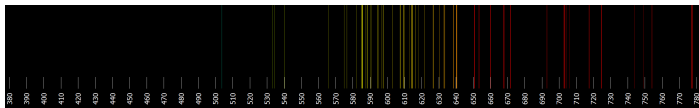
H



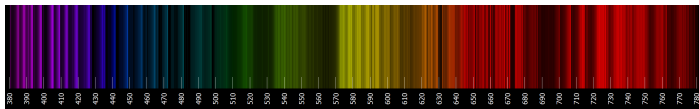
Hg



He

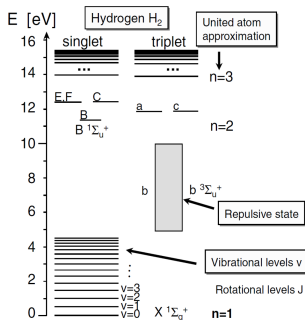
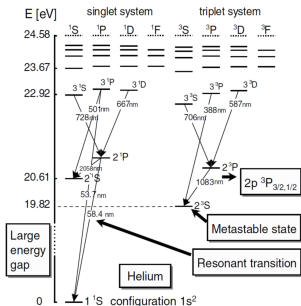


Ne



N₂

Energiové diagramy



- ▶ atom je výborný rezonátor – ostré energiové elektronické hladiny
- ▶ diskrétní stavy produkují čarové spektrum
- ▶ Grotrianův diagram rozlišuje termy stavů – výběrová pravidla
- ▶ vibračně-rotační struktura elektronických stavů molekul

NIST ASD, NIST Basic Atomic Spectroscopic Data

Energiové hladiny a vlnočty atomu vodíku

- ▶ energie stavu ψ_{nlm_l}

$$E_n = -\frac{Z^2 \mu e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2 n^2} = -hcR_H Z^2 \frac{1}{n^2}$$

- ▶ vakuový vlnočet jako rozdíl dvou termů

$$h\nu = E_n - E_m$$

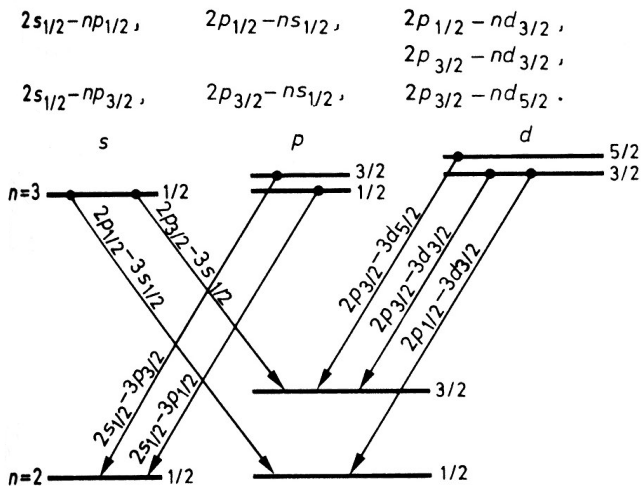
$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda_0} = RZ^2 \left[\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right]$$

- ▶ hmotnostní posuv Rydbergovy konstanty

$$R_H = \frac{\mu_H}{m_e} R_\infty, \quad R_\infty = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} = 10973731,568160(21) \text{ m}^{-1} (2 \cdot 10^{-12})$$

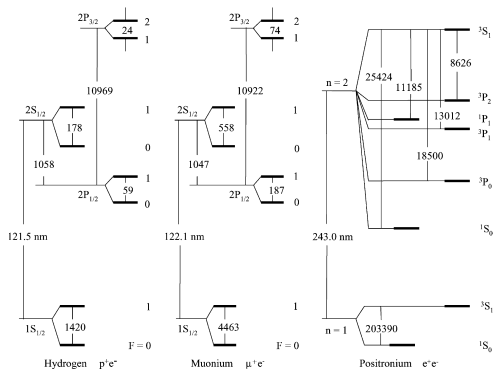
- ▶ Rydbergova energie $hcR_\infty = 13,6 \text{ eV} \times \text{energie v cm}^{-1}$

Jemná struktura čar Balmerovy série



nepravdivě zakreslená vzdálenost hladin způsobená spin-orbitální interakcí

Vodík – exotické atomy



- ▶ přesnost určení hladin H, D ovlivňuje struktura protonu → atomy z leptonů
- ▶ mionium: mion „těžký elektron“, doba života $2,2 \mu\text{s}$, nejistota v poměru $m_\mu/m_e \approx 206,8$ ($r \cdot 2 \cdot 10^{-8}$)
- ▶ Ps 124 ps (singlet, parapositronium) a 142 ns (triplet, ortopositronium)
- ▶ rozdílná redukovaná hmotnost $\mu = \frac{m_e \cdot m_j}{m_e + m_j}$
- ▶ rozdílná jemná a hyperjemná struktura čar

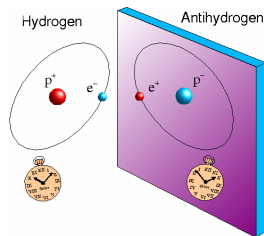
Antivodík – ALPHA experiment v CERNU

- ▶ standardní model očekává stejné energetické hladiny a spektrální čáry u H a \bar{H}
- ▶ syntéza \bar{H}
- ▶ magnetická past, laserové chlazení k E_k 0.54 K
- ▶ přechody: 1S–2S, také $Ly\alpha$ (1S-2P)
- ▶ dvoufotonová absorpce záření laseru 243 nm
- ▶ výsledek (2018):

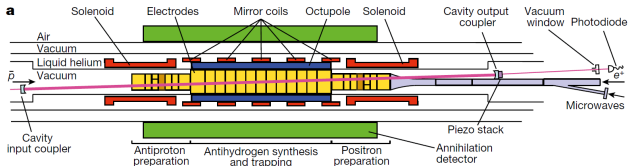
$$f_{dd}(antiH) = 2466061103079,4(5,4) \text{ kHz}$$

$$f_{dd}(H) = 2466061103080,3(0,6) \text{ kHz}$$

- ▶ kompatibilita výsledků $2 \cdot 10^{-12}$, nejpřesnější měření antimoty a dvojice č-ač



CPT teorém (náboj, parita, čas)



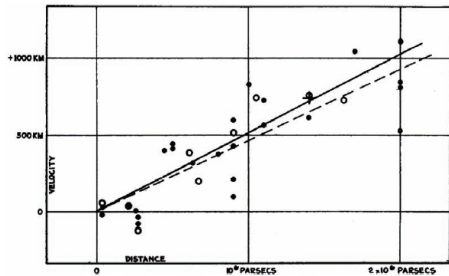
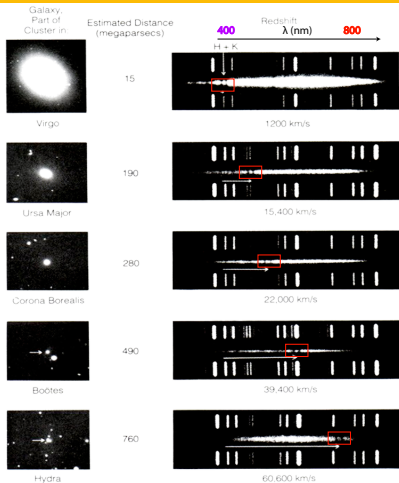
Co lze zjistit pomocí OS?

- ▶ chemické složení, přítomnost a koncentrace částic (neutrálních atomů, molekul, iontů, ...)
- ▶ teplota
 - ▶ neutrálního plynu (kinetická teplota Maxwellova rozdělení)
 - ▶ iontů, elektronů
 - ▶ excitační (teplota nabuzení, Boltzmannova rozdělení, Sahovo rozdělení)
- ▶ rozdělovací funkce elektronů
- ▶ tlak plynu
- ▶ elektrické pole, magnetické pole
- ▶ rychlost pohybu

Co lze sledovat u spektrálních čar

- ▶ polohu spektrálních čar = vlnové délky
- ▶ tvar a šířku spektrálních čar
- ▶ intenzity čar a jejich poměry

Dopplerův jev – kosmologický rudý posuv



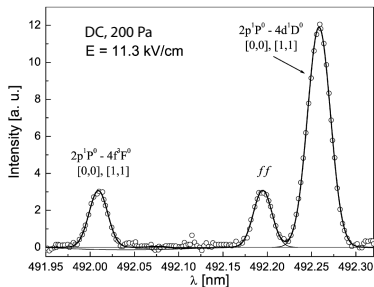
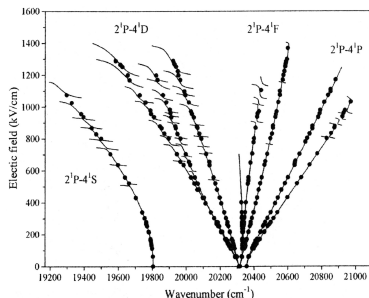
Hubbleův zákon

$$V = H \cdot r, \quad H = 75 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

$$z = \frac{\lambda_{\text{poz}} - \lambda_0}{\lambda_0}, \quad \text{Ca II H (396.85 nm), K (393.37 nm)}$$

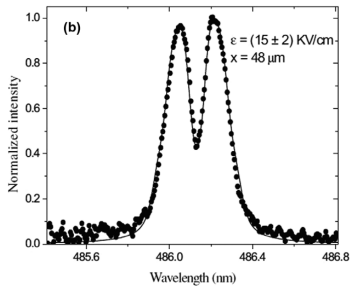
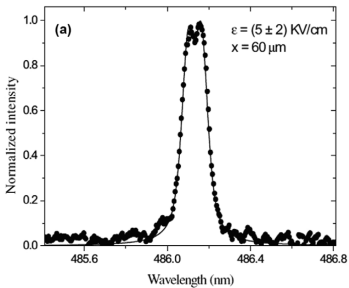
$$\text{pro } z > 0,1 : V = c \cdot \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$$

Starkův jev v heliu



- ▶ s růstem intenzity el. pole dochází k přechodu z kvadratického na lineární Starkův jev (degen)
- ▶ odpuzování hladin
- ▶ citlivost roste s n
- ▶ zakázané čáry, ff (field-free) čára

Starkův jev u vodíku

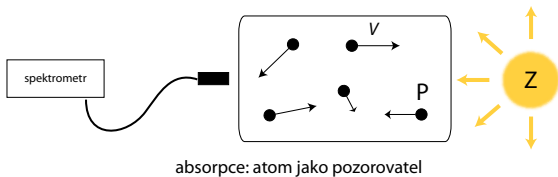
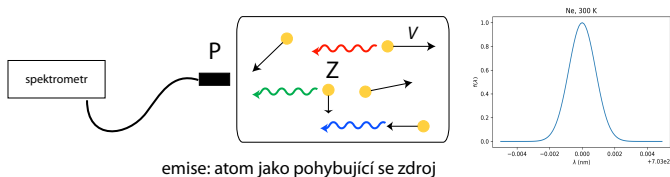


Rozšíření spektrálních čar

Druhy rozšíření

- ▶ přirozené (vliv radiační doby života stavu)
- ▶ Dopplerovo (tepelný pohyb částic)
- ▶ tlakové (vliv okolních částic)
 - ▶ Starkovo (srážky s nabitými částicemi: elektrony a ionty)
 - ▶ rezonanční (srážky atomů v rezonančním stavu (horní/dolní) s atomy stejného druhu v zákl. stavu)
 - ▶ Van der Waalsovo (srážky s atomy jiného druhu)
- ▶ samoabsorpční rozšíření (snížení intenzity ve středu čáry)
- ▶ přístrojové (nedokonalost spektrometru) – často dominuje u menších přístrojů!

Dopplerovské rozšíření



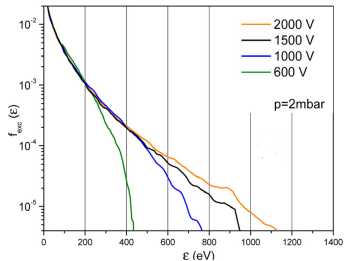
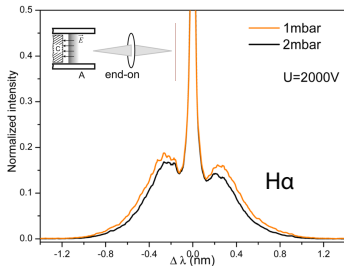
$$\text{Dopplerův posuv } \frac{\lambda_{\text{poz}} - \lambda_0}{\lambda_0} = -\frac{V}{c}$$

$$\text{Maxwellovo rozdělení } \sqrt{\frac{m}{2\pi\kappa T}} e^{-\frac{mv_x^2}{2\kappa T}} dv_x$$

$$\text{Dopplerův profil } f_D(\lambda - \lambda_0) = \frac{c}{\lambda_0} \sqrt{\frac{m}{2\pi\kappa T}} e^{-\frac{mc^2}{2\kappa T} \frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{\lambda_0^2}}, \quad \Delta\lambda_D = \frac{2\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{2\kappa T \ln 2}{m}}$$

Dopplerovské rozšíření

	V (km/s)	ε (eV)	$\Delta\lambda$ (nm)
tepelná rychlost atomu H, 300 K	2,5	0.03	0,005
atom H urychlený polem	400	1000	0,9
galaxie	1000		1,5



Cvetanovic 2011

Stanovení excitační teploty z intenzity atomových čar

- ▶ intenzita emisní spektrální čáry

$$I \propto n_i A_{if} \frac{hc}{\lambda}$$

n_i – koncentrace atomů v excitovaném stavu, A_{if} Einsteinův koeficient spontánní emise, λ vlnová délka čáry

- ▶ Boltzmannovo rozdělení pro populace excitovaných stavů (LTE plazma s vysokou n_e)

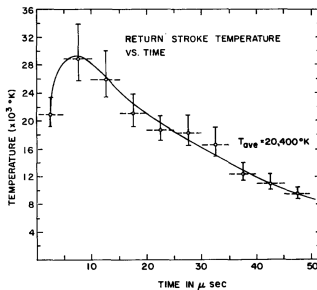
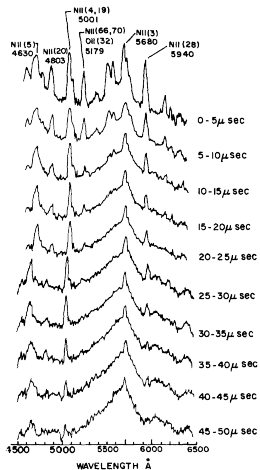
$$n_i = n \frac{g_i}{Q} e^{-\frac{\mathcal{E}_i}{k_b \cdot T_e}}$$

g_i – statistická váha stavu i , \mathcal{E}_i - excitační energie, n – celková koncentrace atomů, Q – stavová suma, T_e – excitační teplota

- ▶ poměr intenzit dvou čar

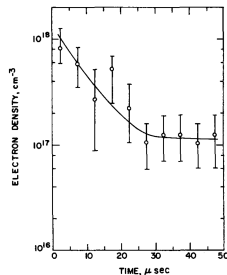
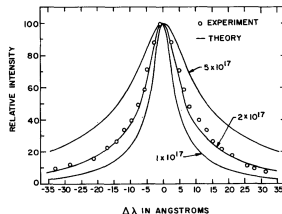
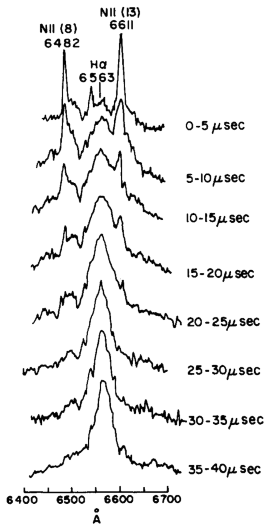
$$\frac{I_{nr}}{I_{mp}} = \frac{g_n}{g_m} \frac{A_{nr}}{A_{mp}} \frac{\lambda_{mp}}{\lambda_{nr}} e^{-\frac{\mathcal{E}_n - \mathcal{E}_m}{k_b \cdot T_e}}$$

Příklad – zpětný výboj blesku – teplota



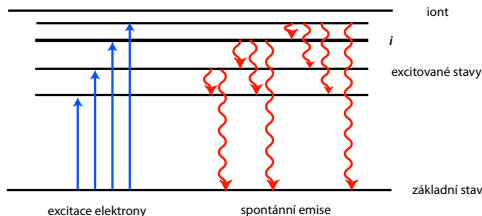
Video: záporný blesk
teplota z Ni II čar

Příklad – zpětný výboj blesku – koncentrace elektronů



Při tlaku 8 atmosfér, teplotě 30 000 K je $n_e \approx [\text{NII}] \gg [\text{NI}]$.

Koronová rovnováha



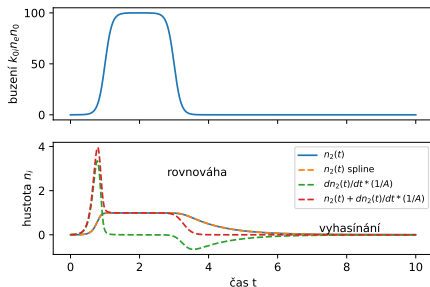
- ▶ v mnoha případech Boltzmannovo rozdělení neplatí
- ▶ je potřeba řešit, jak jsou excitované stavy populovány a depopulovány
- ▶ koronová rovnováha: excitace elektrony, deexcitace spontánní emisí

$$\frac{dn_i}{dt} = k_{0i}^{\text{el}}(E, T_e)n_e n_0 + \sum_{j>i} A_{ji}n_j - \sum_{j<i} A_{ij}n_i$$

$$\frac{dn_i}{dt} = k_{0i}^{\text{el}}(E, T_e)n_e n_0 - A_{ij}n_i$$

(1)

Koronová rovnováha



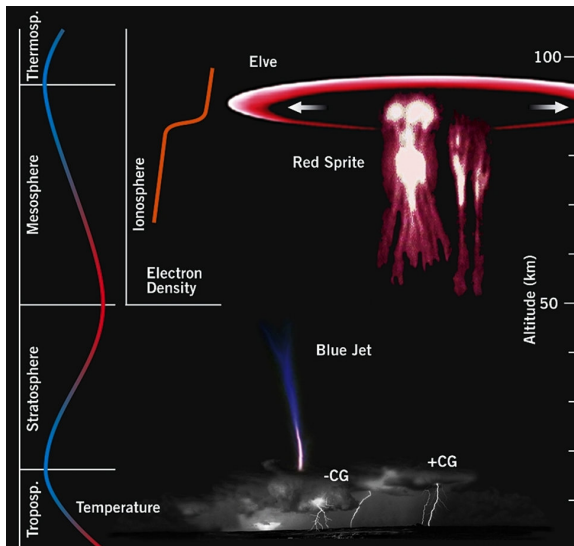
$$\frac{dn_i}{dt} = k_{0i}^{\text{el}}(E, T_e) n_e n_0 - A_{ij} n_i$$

v rovnováze:

$$k_{0i}^{\text{el}}(E, T_e) n_e n_0 = A_{ij} n_i \propto I$$

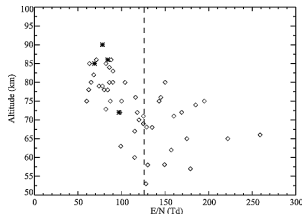
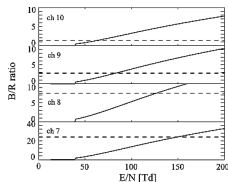
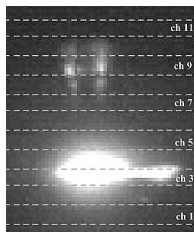
- ▶ měřením intenzity se dostaneme k hodnotě členu popisující excitaci
- ▶ lze určit vlastnosti elektronů, elektrické pole, ...

Příklad – sprites



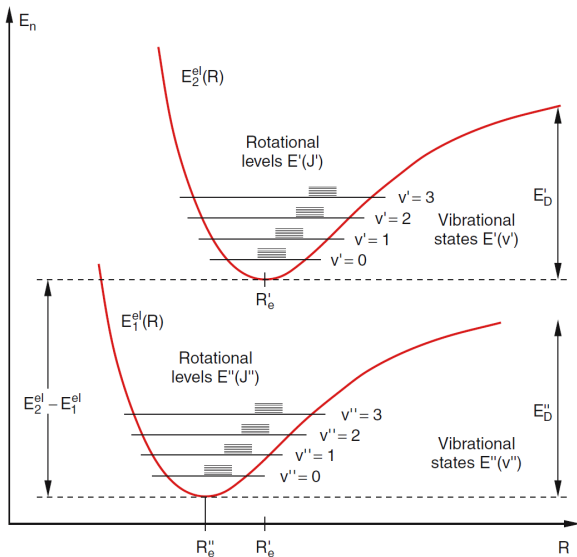
Příklad – sprites

$$B/R = \frac{I(N_2SP) + I(N_2^+FN)}{I(N_2FP) + I(N_2^+MN)} = f(E/N; h)$$



pozorování ze satelitu FORMOSAT-2, přístroj ISUAL (Imager for Sprites and Upper Atmospheric Lightning): ICCD s 6 filtry, 6x spektrofotometr, dual-color array PMT fotometr s filtry 360-470, 520-750 nm

Struktura energiových hladin molekuly



Molekula jako klasický harmonický lineární oscilátor

- ▶ pružná vazba nenulové rovnovážné délky R_e
- ▶ síla pružnosti (k tuhost vazby, $x = R - R_e$ výchylka z r. p.)

$$F_x = -kx, \quad V(x) = \frac{1}{2}kx^2$$

- ▶ celkem

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{\mu}x = 0$$

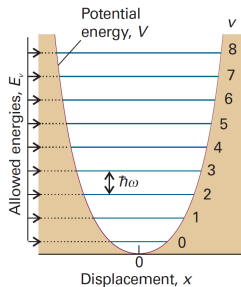
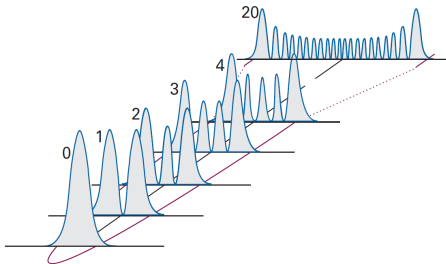
- ▶ řešením je časová závislost výchylky $x(t)$

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi),$$

- ▶ redukovaná hmotnost soustavy $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$

- ▶ $\omega = \sqrt{\frac{k}{\mu}}$ úhlová frekvence

Molekula jako kvantový lineární harmonický oscilátor



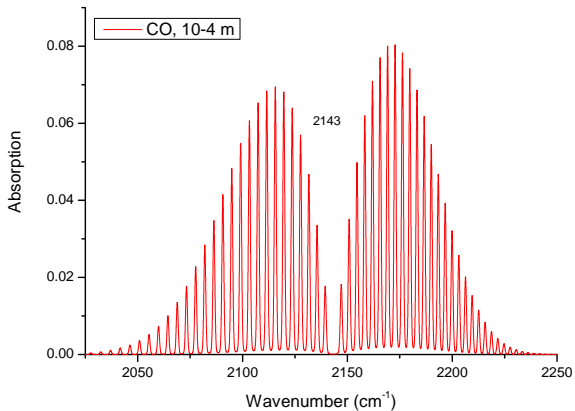
- ▶ vibrační spektrální term

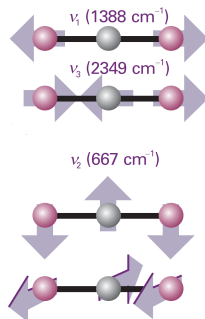
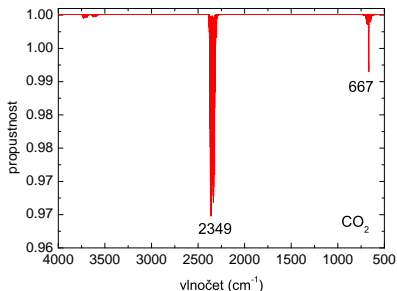
$$E(v) = \hbar\omega(v + 1/2), \quad G(v) = \omega_e(v + 1/2)$$

- ▶ při absorpci/emisi fotonu platí $\Delta v = \pm 1$:

$$\tilde{\nu} = G(v') - G(v'') = \omega_e = \frac{\omega}{2\pi c}$$

Vibračně rotační spektrum





kombinační a vyšší harmonické frekvence

2,7 μm (3613, 3713 cm⁻¹) –
 $(\nu_1 + \nu_3) + (2\nu_2 + \nu_3)$ Fermiho
 rezonance

2,0 μm – $\nu_1 + 2\nu_2 + \nu_3$

1,5 μm – $2\nu_1 + 2\nu_2 + \nu_3$

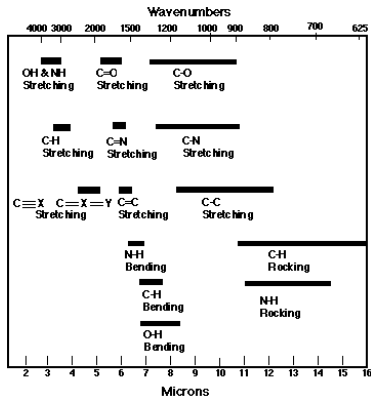
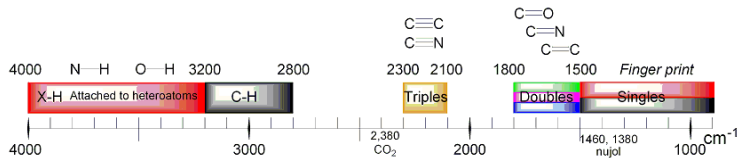
782,8 nm (12774 cm⁻¹) – $\nu_1 + 5\nu_3$

789,1 nm (12672 cm⁻¹)

869,9 nm (11496 cm⁻¹)

('Venus bands')

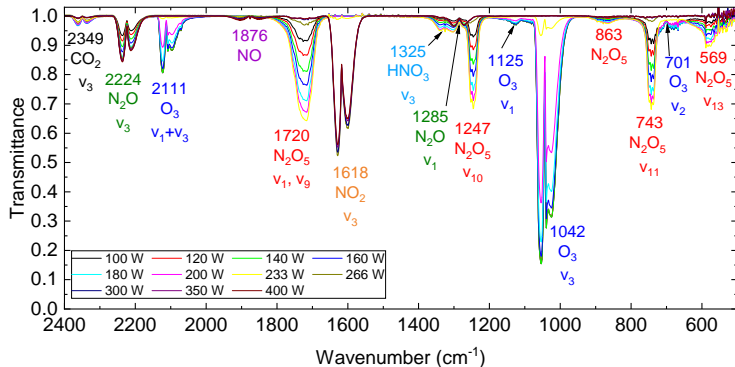
Absorpce vazeb



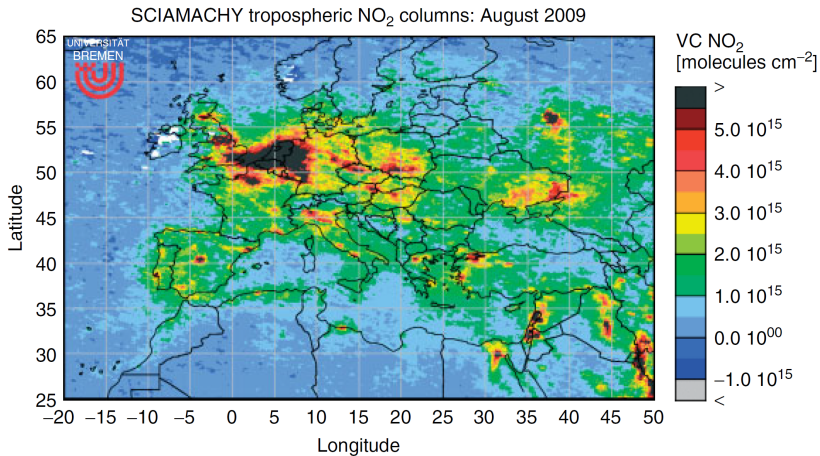
Fundamentální absorpce víceatomových molekul – příklady

molekula	ν_1		ν_2		ν_3		ν_4	
	(cm^{-1})	(μm)	(cm^{-1})	(μm)	(cm^{-1})	(μm)	(cm^{-1})	(μm)
$^1\text{H}_2\ ^{16}\text{O}$	3657	2,7	1595	6,3	3756	2,7		
$^{12}\text{C}\ ^{16}\text{O}_2$	NA	NA	667	15,0	2349	4,26		
$^{14}\text{N}\ ^1\text{H}_3$	3337	3,0	950	10,5	3444	2,9	1627	6,1

Analýza produktů koplanárního výboje – N₂/O₂

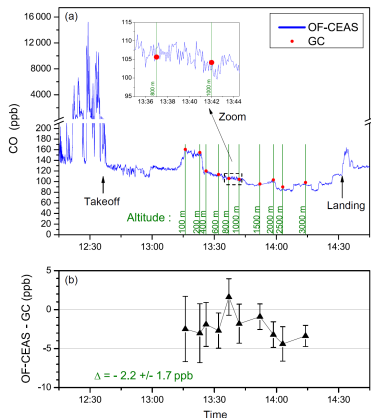


Environmentální aplikace – monitoring NO_2 v atmosféře



Absorpční měření koncentrace NO_2 (400 nm) satelitem Envisat (790 km, 2002–2012), UV/VIS/NIR spektrometr SCIAMACHY (240–2380 nm)

Environmentální aplikace – in-situ měření CO v troposféře



- ▶ 100 ppm nebezpečná koncentrace CO

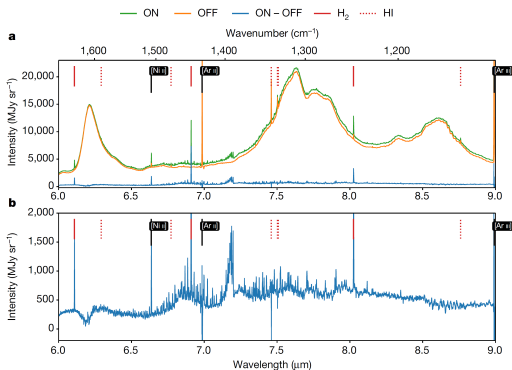
- ▶ absorpční laserová metoda s rezonační zrcadlovou kyvetou
- ▶ odrazivost zrcadel $R = 99,995\%$, 1 m nahradí 120 km kyvetu
- ▶ 0.2 ppb limit detekce CO!
- ▶ srovnání s GC provedeno zemi

JWST – objev CH_3^+ v protoplanetárním disku

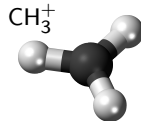
- ▶ CH_3^+ v mezihvězdném prostoru by mělo iniciovat produkci organických sloučenin (70.léta)
- ▶ emisní spektra horké části mlhoviny Orion bar v oblasti protoplanetárního disku 203-506



Orion bar

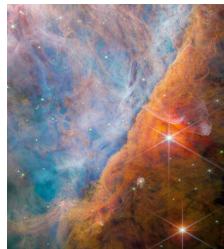


JWST MIRI (5-28) μm
mřížkový spektrometr

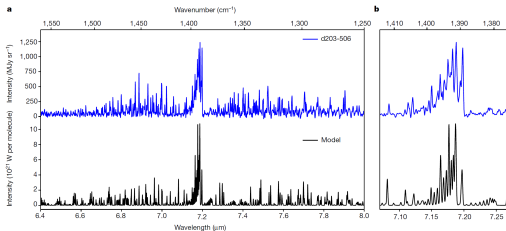


JWST – objev CH_3^+ v protoplanetárním disku

- ▶ CH_3^+ v mezihvězdném prostoru by mělo iniciovat produkci organických sloučenin (70.léta)
- ▶ emisní spektra horké části mlhoviny Orion bar v oblasti protoplanetárního disku 203-506



Orion bar



JWST MIRI (5-28) μm
mřížkový spektrometr

Berne 2023 Nature 621 56 10.1038/s41586-023-06307-x

