

LIDAR (light detection and ranging)

Vítězslav Otruba

Lidarová dálková detekce

- Analyticky významná metoda využívaná pro citlivou analýzu ovzduší pomocí laserového záření v otevřené atmosféře
- Vzhledem ke své nízké divergenci je laserový svazek velice výhodný pro měření absorpce v otevřené atmosféře jako kyvetě s dlouhou optickou dráhou
- Pro měření v otevřené atmosféře může být využito několika uspořádání experimentu

Využití odrazu záření od instalovaného odražeče

- Paprsek je nasměrován do atmosféry, záření se vrací zpět po odrazu od odražeče
- Odražeč bývá instalován několik set metrů až několik kilometrů od zdroje záření
- Pro detekci se volí vlnové délky, kde neabsorbují základní atmosferické komponenty
- Nejčastěji se měření provádí v infračervené spektrální oblasti 9 - 13 μm
- Existují i proměřované oblasti v UV/VIS části spektra
- V infračervené oblasti se detegují zejména vibrační hladiny molekulárních polutantů
- V UV oblasti se využívá elektronických absorpčních přechodů atomů a molekul
- Pro detekci záření není potřeba zvláštní detekční techniky
- Jako laser lze používat i málo intenzivní polovodičové diody
- Citlivost stanovení se pohybuje v řádu ppb v závislosti na absorpčním koeficientu
- Metoda je velmi jednoduchá a experimentálně nenáročná
- Přijímaný signál zde přináší informaci o dění na celé optické dráze
- Prostorové rozložení koncentrací polutantu nelze touto metodou určit

Využití zpětného rozptylu na topografických překážkách

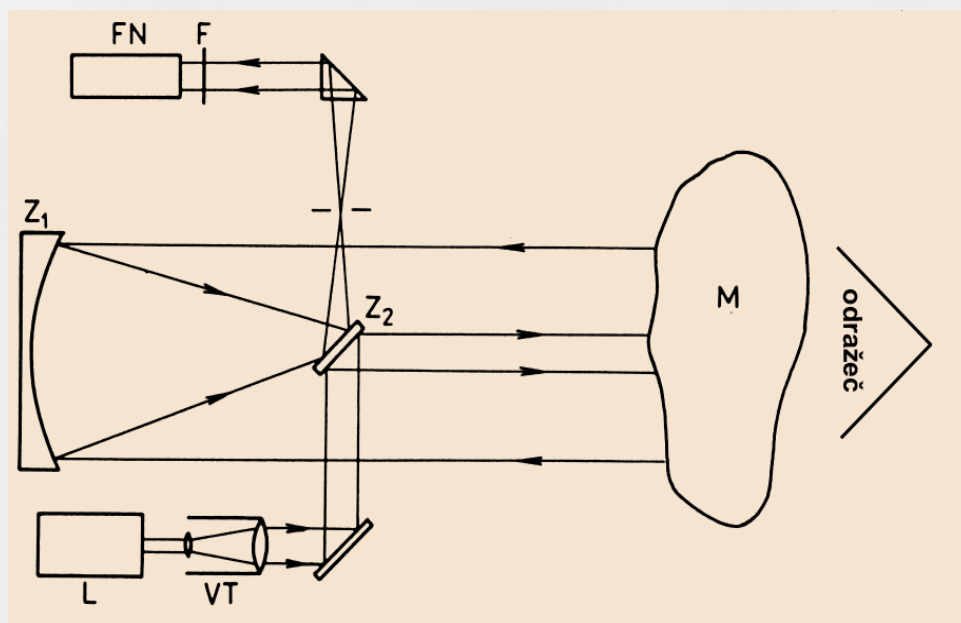
- Rozptyl na topografické překážce je všesměrový
- Pro detekci se využívá pouze část záření vracející se zpět
- Nároky na přijímací optiku a elektroniku jsou zde vysoké
- Pro měření se používají výkonné pulsní lasery
- Přijímaný signál zde opět přináší informaci o dění na celé optické dráze
- Výsledkem měření je střední koncentrace sledované látky na dráze laserového svazku
- Metoda neumožňuje určit koncentrační shluky převyšující hodnotu střední koncentrace
- Prostorové rozložení koncentrací polutantu opět nelze touto metodou určit

Využití zpětného rozptylu na částicích aerosolů a atmosferických plynů

- Metoda umožňující vrátit laserový svazek zpět z atmosféry bez pevných odražečů
- Rozptyl záření na částicích aerosolů a atmosferických plynů je všesměrový
- Část záření se odrazí zpět a simuluje zpětný odražeč rozložený po celé dráze
- Rozptyl na částech aerosolu se nazývá Mieův, na molekulách ovzduší Rayleighův
- Po vyslání nanosekundového pulsu do atmosféry se část záření postupně vrací zpět
- Časové zpoždění přijímaného záření je dáno dobou průletu světla k místu rozptylu
- V místech koncentračních shluků vykazuje rezonanční (měrná) vlnová délka pokles intenzity ve srovnání s referenční vlnovou délkou
- Metoda sledující koncentrační profil polutantu na dráze laserového svazku se nazývá DIAL - Differential Absorption Lidar
- Laser používaný v metodě DIAL musí být schopen rychlého přeladění mezi rezonanční a referenční vlnovou délkou
- Metoda lidarové dálkové detekce může být použita pro stanovení oxidů dusíku a síry
- Kromě absorpce lze pro dálkovou detekci použít též laserem indukovanou fluorescenci
- Metoda laserem indukované fluorescence může sloužit k detekci stratosferických částic, sledování chlorofylu (údaj o poškození zelené hmoty), testování vodních ploch (množství ropných látek, stav planktonu)
- Pouze vysoká cena lidarů brání většímu rozšíření těchto výjimečných přístrojů

LIDAR – měření vzdáleností

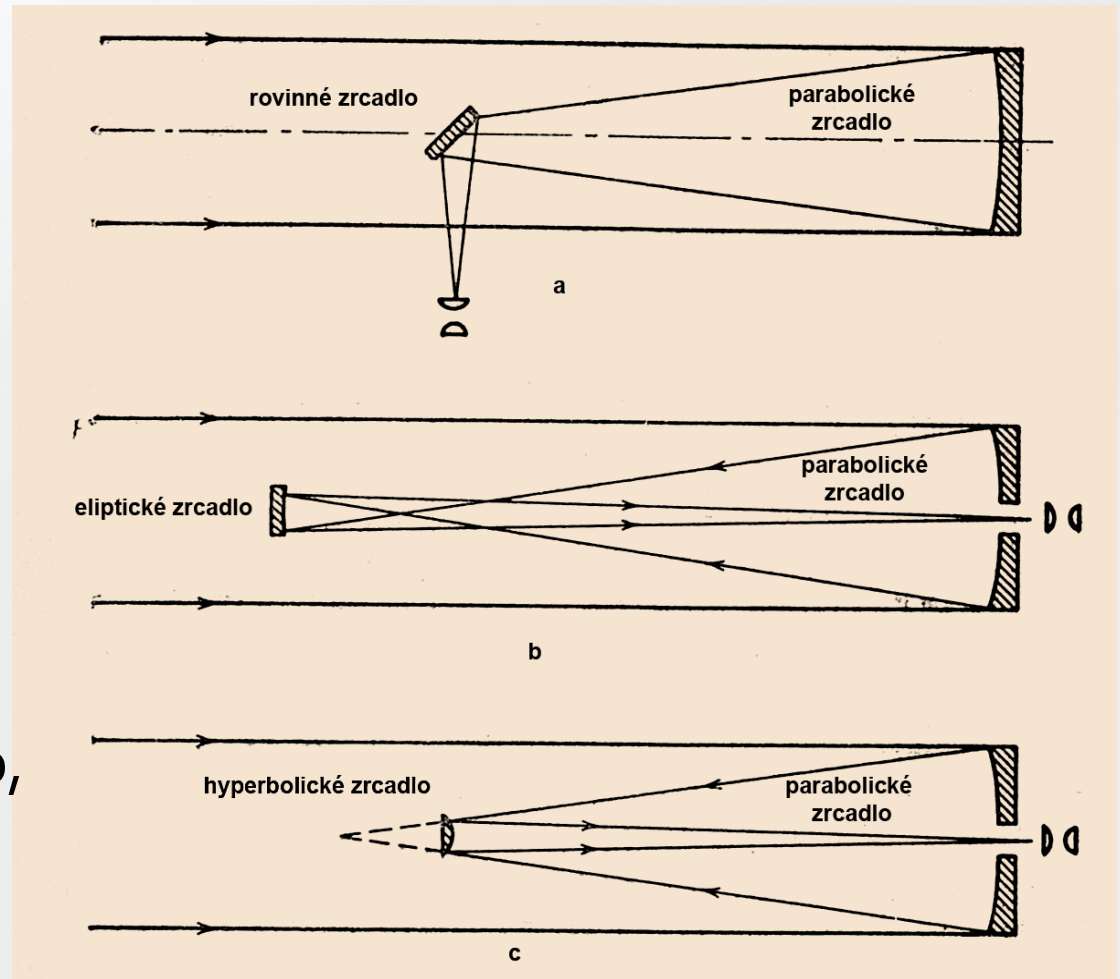
- Základní schéma lidaru s koaxiálním vysílačem a přijímačem:
L – laser, VT – vysílací teleskop, Z₁ a Z₂ zrcadla Newtonova teleskopu, M – monitorovaná oblast, F – filtr, FN – fotonásobič
Variantou je použití zpětného odražeče pro měření vzdáleností, event. optických vlastností prostředí v dráze laserového paprsku



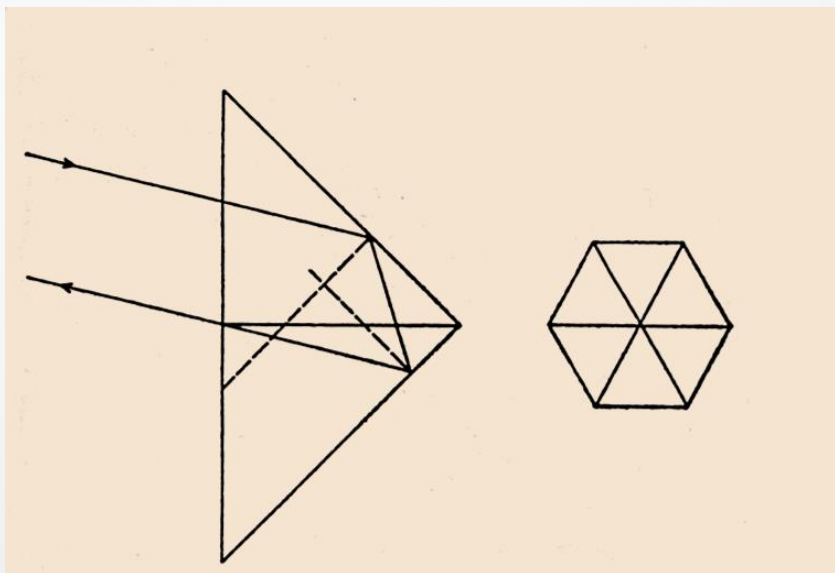
Teleskopy

Teleskop je afokální optická soustava sestavená nejméně ze dvou optických soustav (objektivu a okuláru). Úhlové zvětšení je dáno poměrem ohniskových vzdáleností objektivu a okuláru.

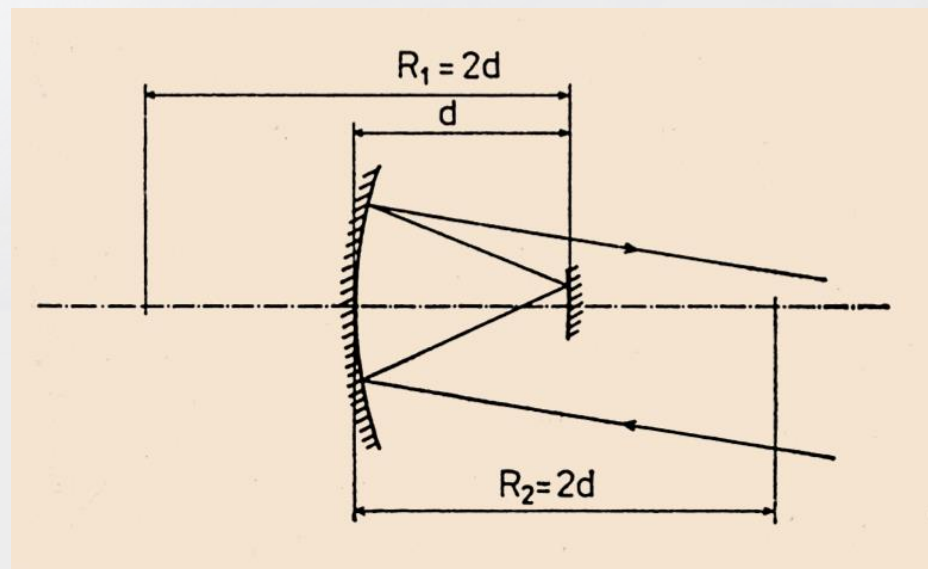
a – Newtonův teleskop, obraz převrácený
b – Cassegrainův teleskop, obraz převrácený
c – Gregoryho teleskop, obraz přímý



Odrážee

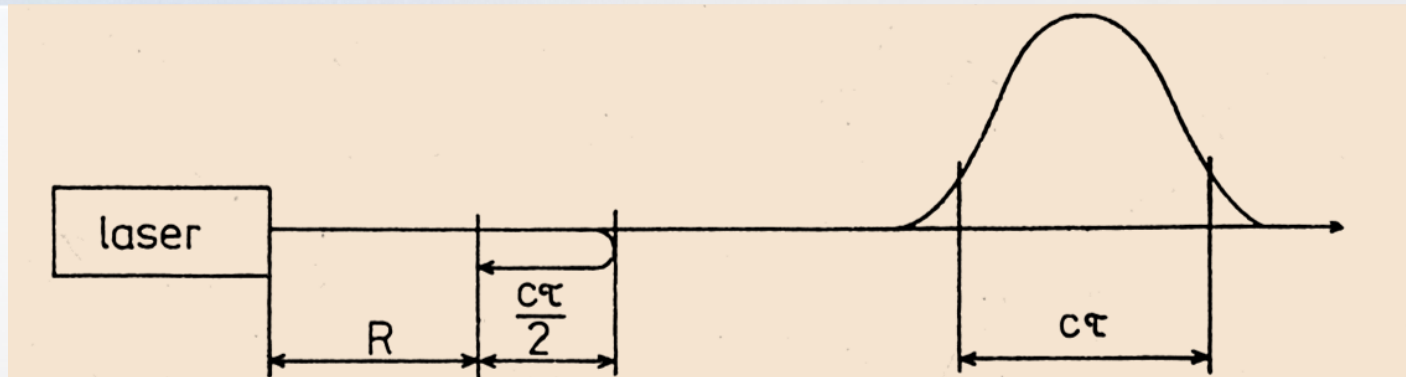


Koutový odražeč je troj- nebo šestiboký jehlan, jehož protilehlé odrazné stěny jsou navzájem kolmé. Paprsek, který vstoupí základnou jehlanu do vnitřní, zrcadlové části, vyjde po dvojnásobném odrazu od stěn jehlanu nazpět.



„Kočičí oko“ je optická soustava, využívající konkávních zrcadel. R_1 , R_2 jsou poloměry křivosti zrcadel

Lidarová rovnice



$$P_p(R) = P_v \left(c \frac{\tau}{2} \right) \beta(R) A_p R^{-2} \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr \right]$$

Výkon signálu přijímaného detektorem po odrazu od objektu ve vzdálenosti R , označený $P_p(R)$, se vypočte z výše uvedeného vztahu. Přijatý výkon je úměrný vysílanému výkonu P_v . Je-li τ délka impulsu záření je možné sledovat z nejmenší délky dráhy $c \tau/2$ v objektu (např. oblaku aerosolu) ve vzdálenosti R od lidarů. Koeficient zpětného odrazu je $\beta(R)$. A_p reprezentuje velikost plochy přijímací optiky spolu se ztrátami. R^{-2} vyjadřuje pokles intenzity záření s druhou mocninou vzdálenosti. Poslední člen v hranaté závorce jsou ztráty absorpcí a rozptylem záření po průchodu atmosférou na vzdálenost R .

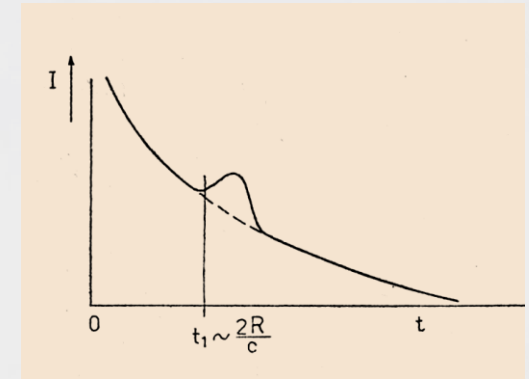
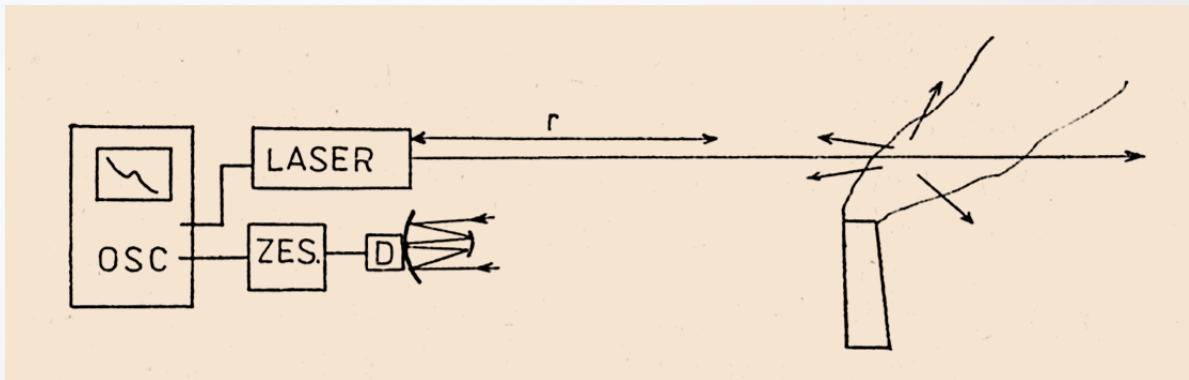
Laserové zdroje lidarových dálkoměrů

Pro přesnost měření je důležitá krátká a dobře definovaná náběhová hrana laserového impulzu, maximálně 1 ns, pro přesnější měření pikosekundy.

Klasické aplikace:

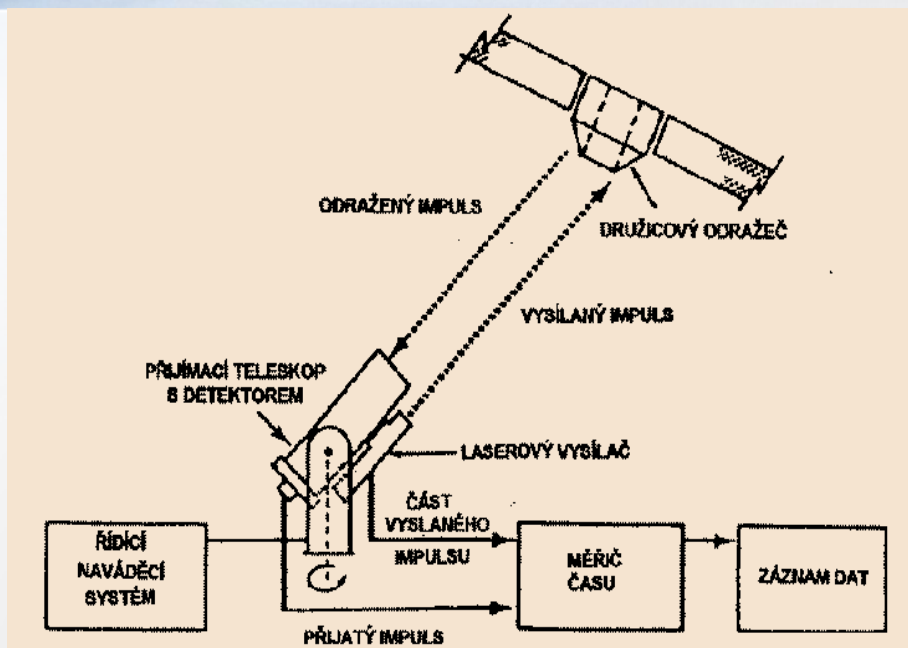
- GaAs laser, vzdálenost do 1 km, $\Delta l \approx 10$ cm
- Nd:YAG laser, vzdálenost do 10 km, $\Delta l \approx 1$ m
- Rubín 1 ns/100 W, vzdálenost do 1000 km, $P_p \approx 100$ fotonů, $\Delta l \approx 0,1$ m (vzdálenost družic, pohyb kontinentů, gravitační anomálie), vzdálenost Měsíce od Země $\Delta l \approx (1-10)$ m

Studium vzdáleností a rozměrů aerosolových oblaků (průmyslové exhalace a meteorologie)

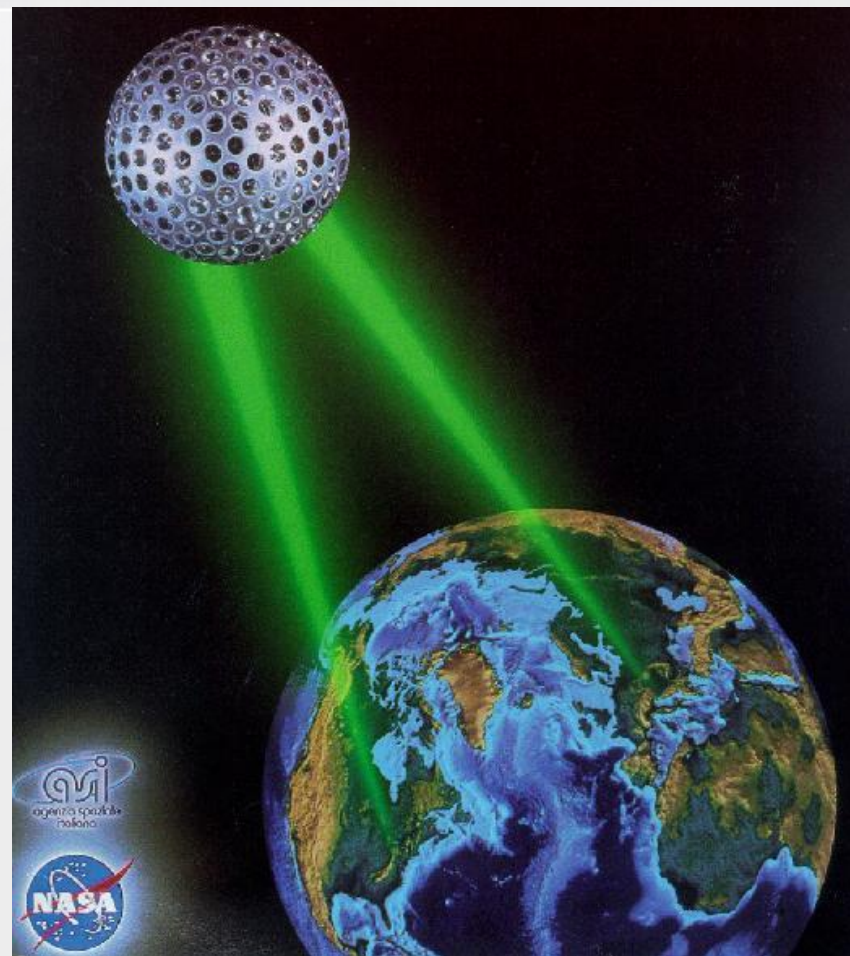


- Využívá se analýza časově rozvinutého rozptylu jediného impulzu, který je postupně rozptylován oblaky částic a vrací se s různým zpožděním. Hustší centra se projeví vyšším rozptylem a tím vyšší intenzitou signálu.
- Krátkovlnné lasery pro čela oblaků
- IR lasery pro koncentrační profily uvnitř oblaků

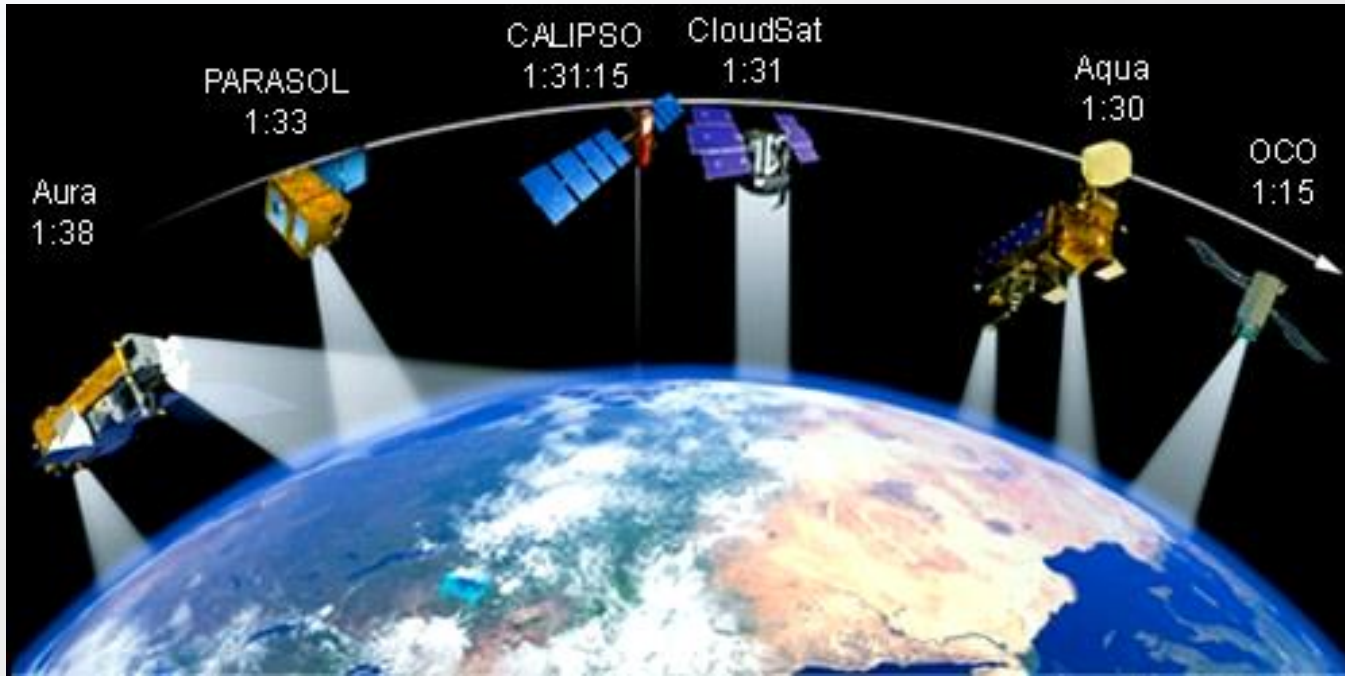
LAGEOS (LAsEr GEODynamics Satellite).



Původně používaný rubínový laser (délka vysílaného impulsu nanosekund y (10^{-9} sec) byl nahrazen Nd:YAG laserem s délkou impulsu o tři řády menší (desítky pikosekund 10^{-12} sec) a nově pro velmi přesná měření - laserovým systémem titan safírovým s délkou impulsu v oblasti femtosekund (10^{-15} sec).



A-Train

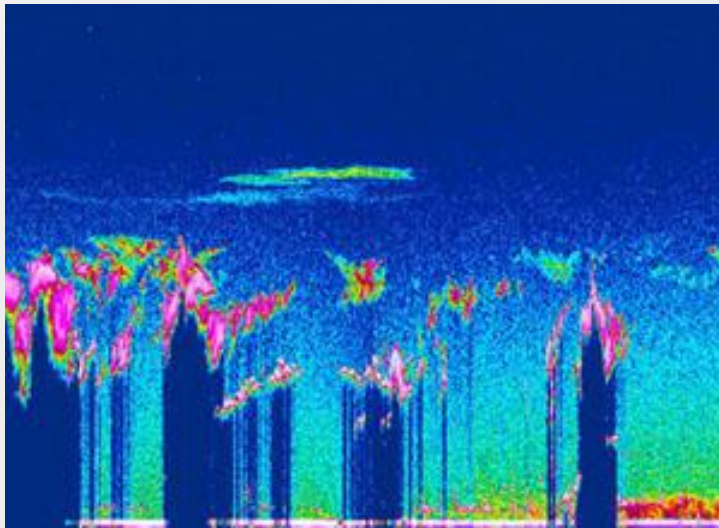
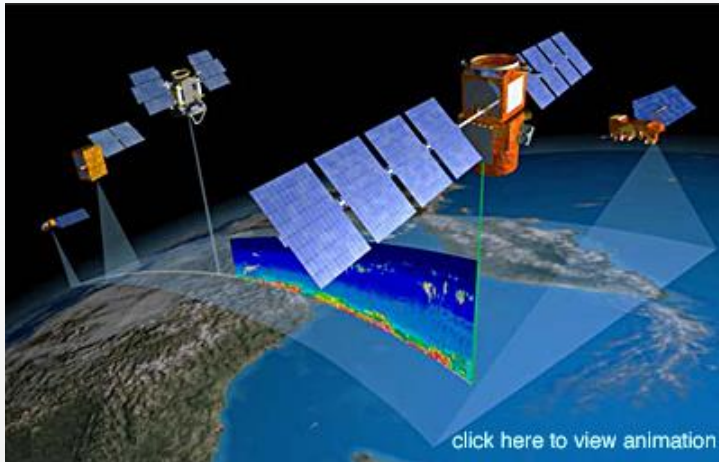


A-Train, tedy sled dnes již pěti družic, které nesou přístroje sledující určitou část atmosféry. Postupně tak nad celou zeměkoulí prolétají družice Aqua, CloudSat, CALIPSO, PARASOL a Aura. V budoucnosti je počítáno s šestou družicí OCO. Družice létají téměř na shodné polární dráze, poslední družice je o 8 minut opožděna za družicí první

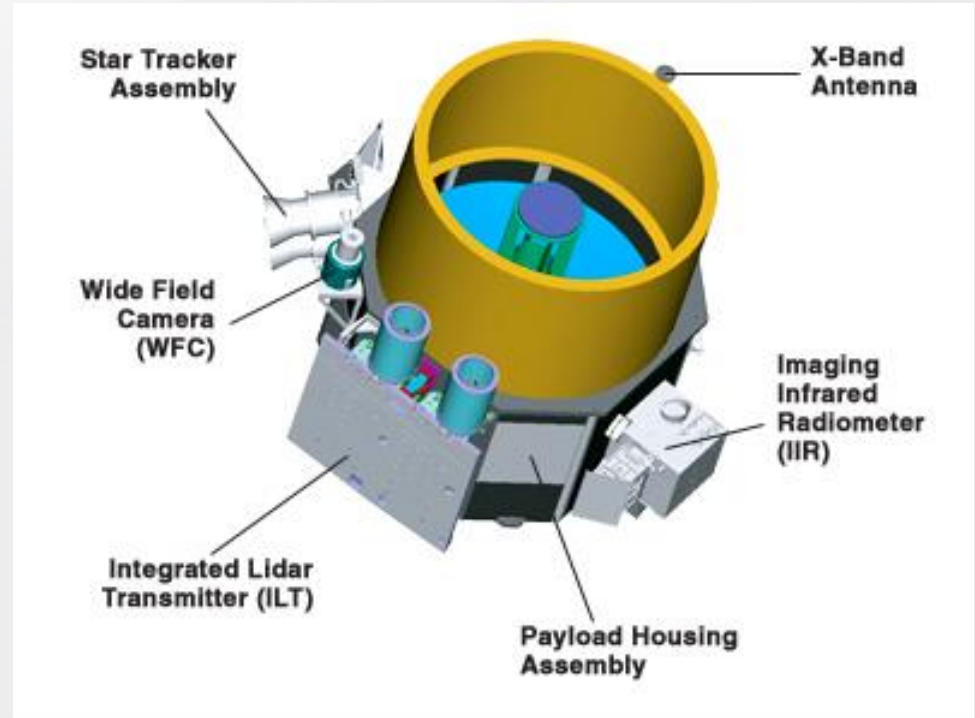
A-Train

- Vláček neboli A-Train je formace pěti meteorologických družic na polární dráze, které komplexně sledují atmosféru. Čtyři z družic patří NASA, jedna je produktem francouzské kosmické agentury CNES. Jde o družice Aqua, CloudSat, CALIPSO, PARASOL a Aura. První z družic byla vypuštěna v roce 2002, další dvě v roce 2004 a poslední dvě v roce 2006. V roce 2008 k nim přibude družice OCO. Družice jsou schopny zjišťovat výškový profil oblačnosti, zastoupení vody, oxidu uhličitého, ozónu, aerosolů a dalších komponent atmosféry. Některé jsou vybaveny lidary (laserovými obdobami radarů), k dalším přístrojům samozřejmě patří radar, mřížkový spektrometr a různé analyzátory. Tím, že družice prolétají nad stejným místem, je možné sledovat dynamiku dějů v atmosféře.

CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)

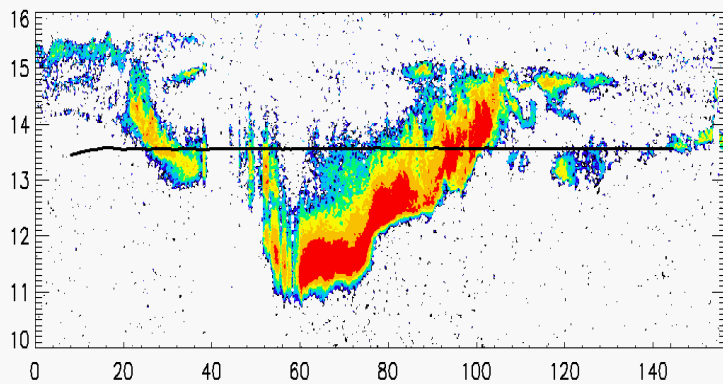


2010

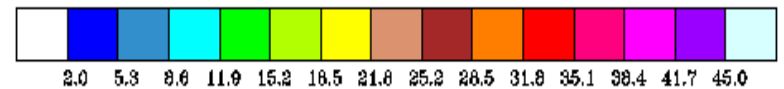
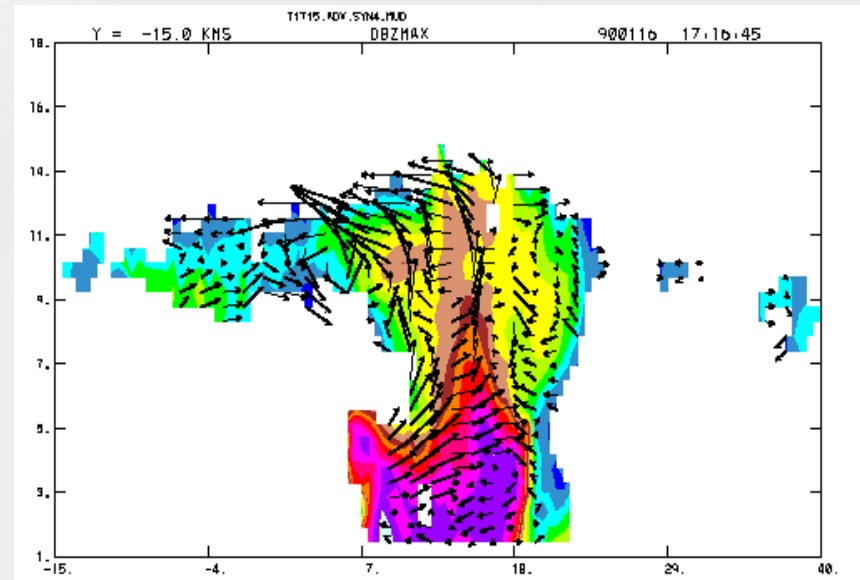


Na palubě družice je [lidar](#) umožňující měřit výškový profil aerosolů v atmosféře, detekovat obtížně viditelnou troposférickou oblačnost a polární stratosférickou oblačnost

Cloud and Rain Characteristics in the Australian Monsoon



Výška a vodorovná vzdálenost v km



Měření rychlosti proudění v oblacích
dopplerovým jevem (m/s)

- Sonda má robotické rameno se zařízením pro hloubení rýh do ledu a kamerou. Dalším přístrojem je stereoskopická zobrazovací jednotka SSI (Surface Stereoscopic Imager), která pořídí stereozáběry polárního ledu.
- Důležitý je přístroj TEGA (Thermal and Evolved Gas Analyzer), pícka s hmotovým spektrometrem určená ke zjišťování chemického složení vzorků. Velmi zajímavý je analyzátor MECA (Microscopy, Electrochemistry, and Conductivity Analyzer) chemická laboratoř s optickým a [AFM](#) .
- Posledním přístrojem je meteorologická stanice MET, kterou připravila Kanadská kosmická agentura. Kromě standardních teplotních a tlakových čidel obsahuje LIDAR pro sledování oblačnosti nad Marsovým povrchem.

Phoenix Mars Mission



National Aeronautics and Space Administration

Phoenix Scout Mission Entry, Descent, and Landing

Presented by Peter Smith on October 20, 2006
Lunar and Planetary Laboratory

Animation by Maas Digital LLC

© 2006 Eric M. De Jong, Dan Maas, Peter Smith
Solar System Visualization Project - CL#06-3287
California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory
University of Arizona, Lockheed Martin Space Systems

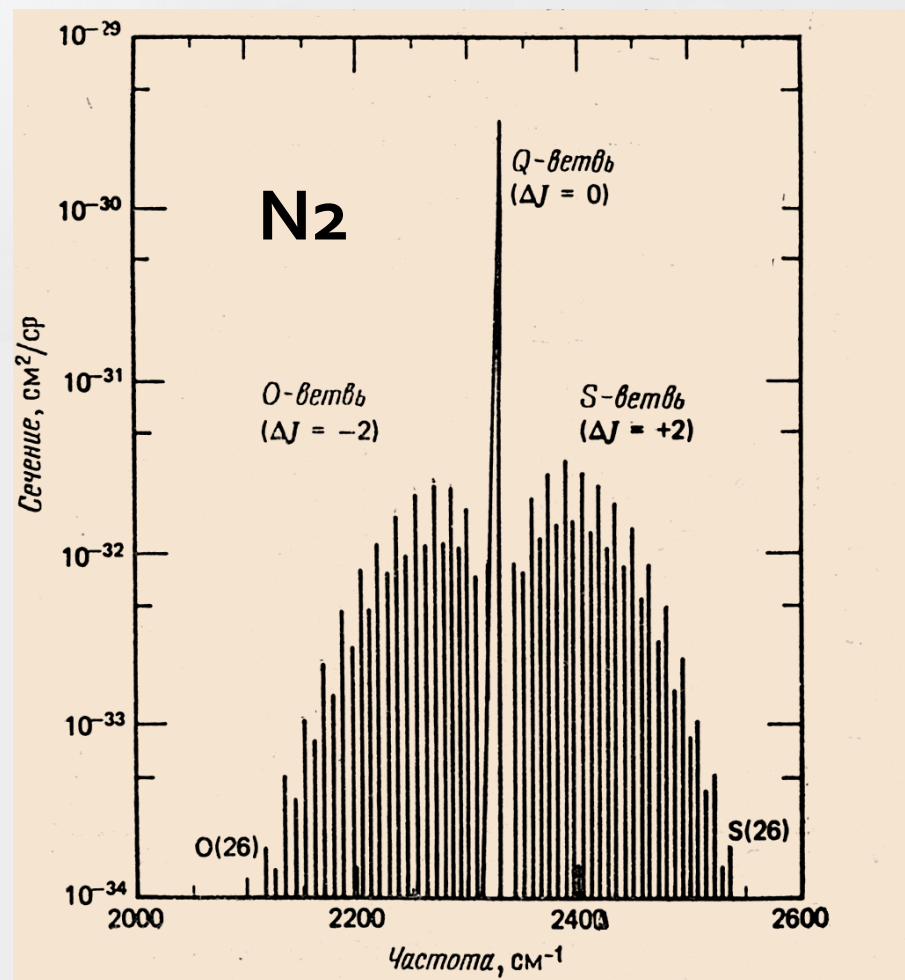
Na počátku animace uvidíte přistávací manévry včetně rozžhavení tepelného štítu a konečného sestupu sondy na padáku. Následuje odhození padáku, zažehnutí trysek a měkké přistání. V animaci můžete pozorovat práci stereoskopické kamery, robotického ramene hloubícího rýhy v povrchu Marsu i nasypaní vzorků do zařízení pro provedení chemického rozboru. V závěru se můžete pokochat činností lidaru sledujícího oblačnost nad Marsem a poněkud kýčovitým západem Slunce nad marsovskou krajinou

Analytický lidar

- Slouží k dálkové detekci iontů, atomů molekul i aerosolů při sledování znečištění atmosféry metodou dálkové detekce („remote sensing“) polutantů a nečistot.
- Lidar využívá spektroskopických principů, nevyžaduje odběr vzorků a měření je nedestruktivní.
- Vzhledem k vysoké ceně zařízení se používá pouze v případech, kdy nejde využít jinou analytickou metodu, např. měření na velké vzdálenosti.
- Analytický lidar patří mezi tzv. aktivní techniky, protože odezva analytů je vyvolána aktivním zásahem – vysláním laserového paprsku do atmosféry.

Ramanův lidar 1

- Záření rozptýlené neabsorbujícím plynem (atmosférou) obsahuje složky Ramanova a Rayleighova rozptylu, které je nutné oddělit spektrometrem.
- Rayleighův rozptyl se projeví poměrně silnou čarou, po jejíchž obou stranách se nachází větší počet Ramanových čar.

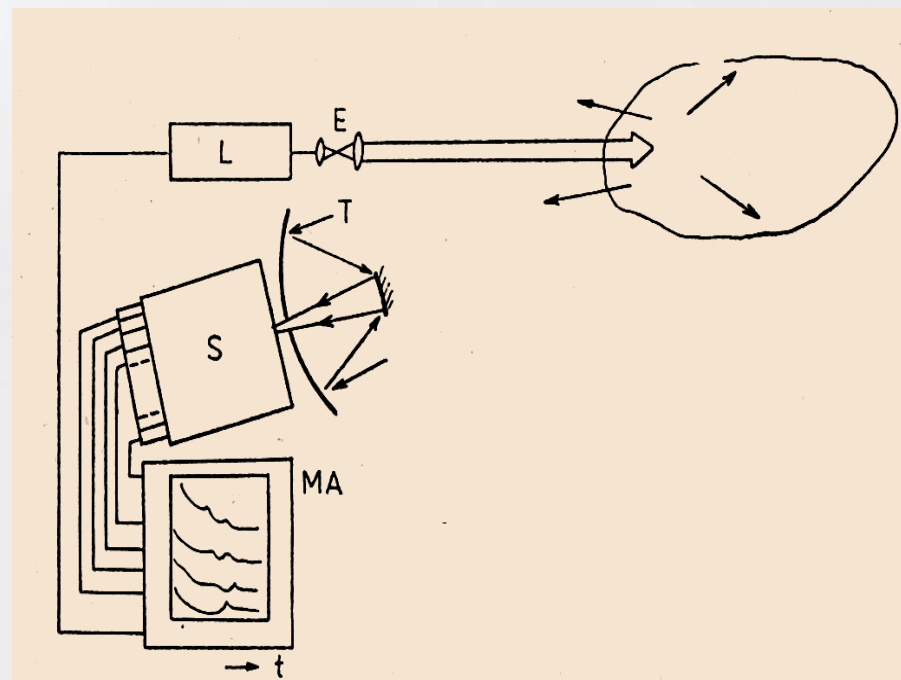


Ramanův lidar 2

- Ramanův rozptyl souvisí s rotačními a vibračními hladinami molekul, které lze z Ramanova spektra identifikovat
- Laserový paprsek se dostává do interakce se všemi molekulami v atmosféře, takže přináší informace o všech sloučeninách, nacházejících se v dráze paprsku
- Protože doba interakce fotonu s molekulou je velmi krátká a k rozptylu dochází v časovém intervalu 10^{-10} až 10^{-12} s, je možné v okamžiku příjmu signálu z polohy Ramanových čar určit sloučeniny přítomné v atmosféře a z jejich intenzit i koncentraci. Ze zpoždění signálu pak můžeme určit vzdálenost rozptylujících sloučenin od zdroje.

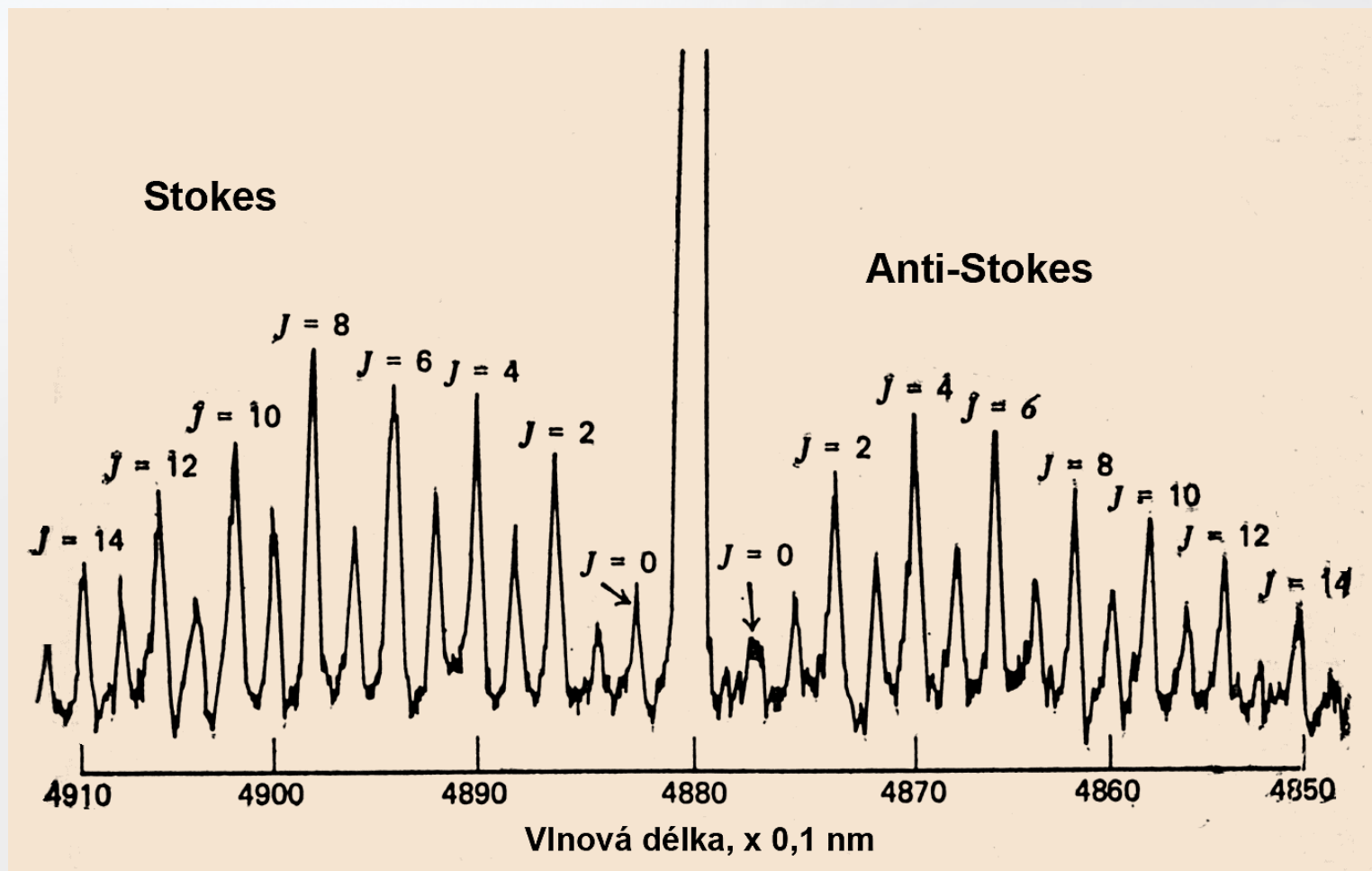
Schéma Ramanova lidaru

- Přijímané záření je fokusováno do vstupní štěrbině spektrometru, na výstupu je umístěn multikanálový detektor. Na zpracování signálu i detektor jsou kladeny extrémní požadavky díky zpracování slabých, krátkodobých a exponenciálně v čase klesajících signálů.
- Dovoluje současné selektivní stanovení všech molekul a umožňuje jejich prostorové rozlišení. Bohužel nízká intenzita signálu použití Ramanova lidaru omezuje.

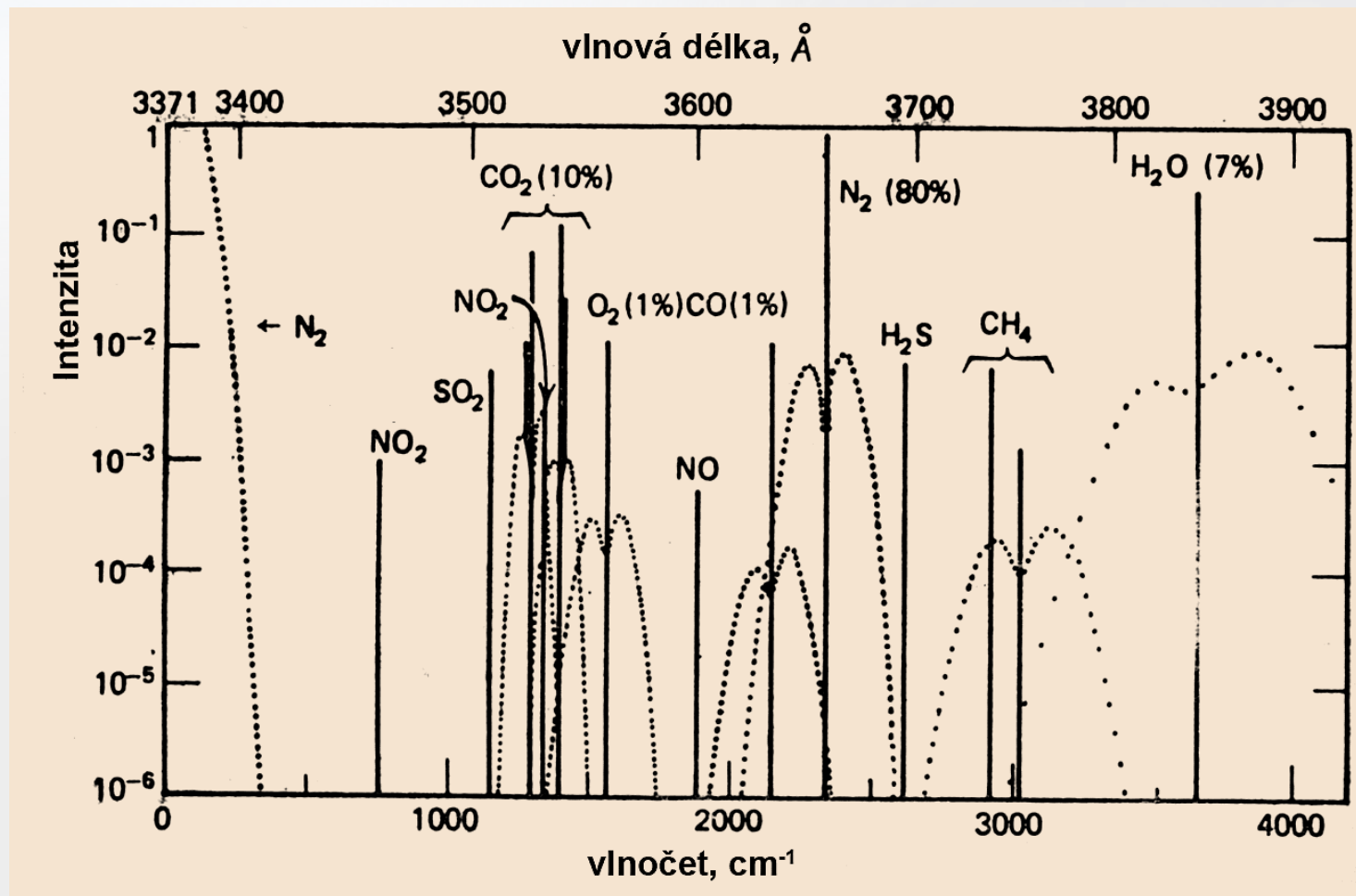


L – laser, E – expandér paprsku (kolimátor),
T – teleskop, S – spektrometr,
MA – multikanálový analyzátor

Ramanovský lidar – spektrum dusíku



Ramanovský lidar – spektrum dýmu hořící ropy

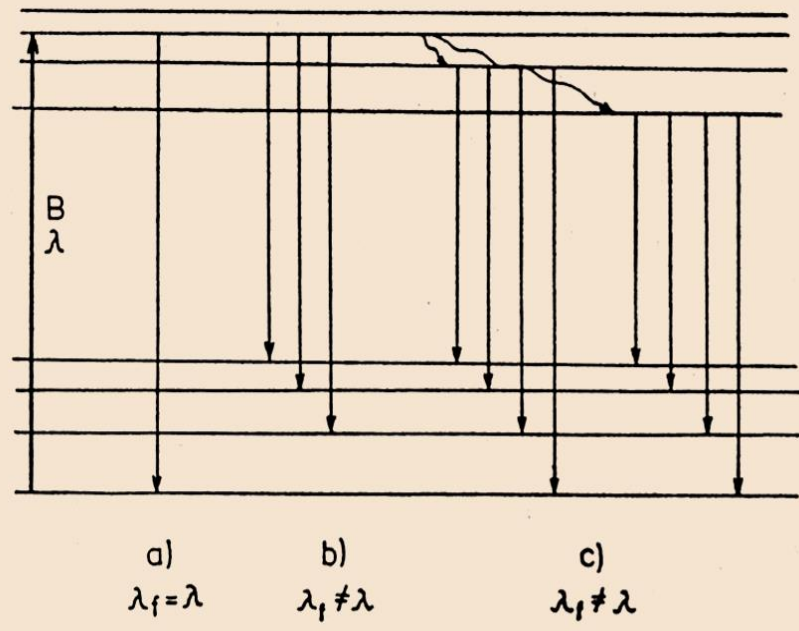


Ramanovský lidar - vlastnosti

- Intenzivní Ramanův rozptyl mají snadno polarizovatelné molekuly (O_2 , N_2), nižší intenzitu mají molekuly s permanentním dipólovým momentem, což je většina polutantů.
- Účinný průřez nerezonančního Ramanova rozptylu je pouze $10^{-29} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$, u rezonančního Ramanova rozptylu je cca 1000x větší.
- Intenzita Ramanova rozptylu roste se čtvrtou mocninou frekvence excitačního záření, s růstem frekvence ale klesá dosah svazku v atmosféře.
- Meze detekce SO_2 jsou cca 10 ppm/1 km, $\Delta l \approx 10 \text{ m}/1 \text{ km}$, laser Nd:YAG 2. harmonická

Fluorescenční lidar

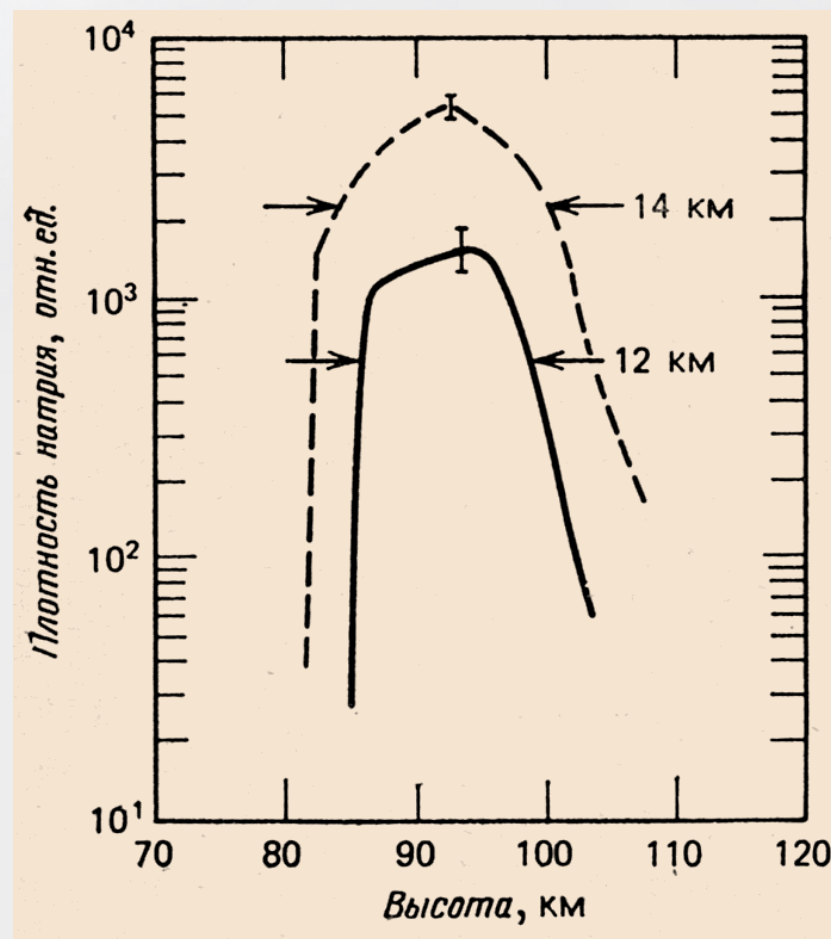
- Rezonanční techniky mají podstatně větší citlivost a dosah, vyžadují však většinou laditelné lasery. Velikost účinného průřezu je řádu $10^{-24} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$
- Příklad: SO_2 je možné stanovit na vlnové délce 300,1nm již od 1ppb/100m.



A – fluorescence na základní hladinu
B – okamžitá fluorescence na nižší hladinu
C – kaskádní fluorescence s nezářivou relaxací na horních hladinách

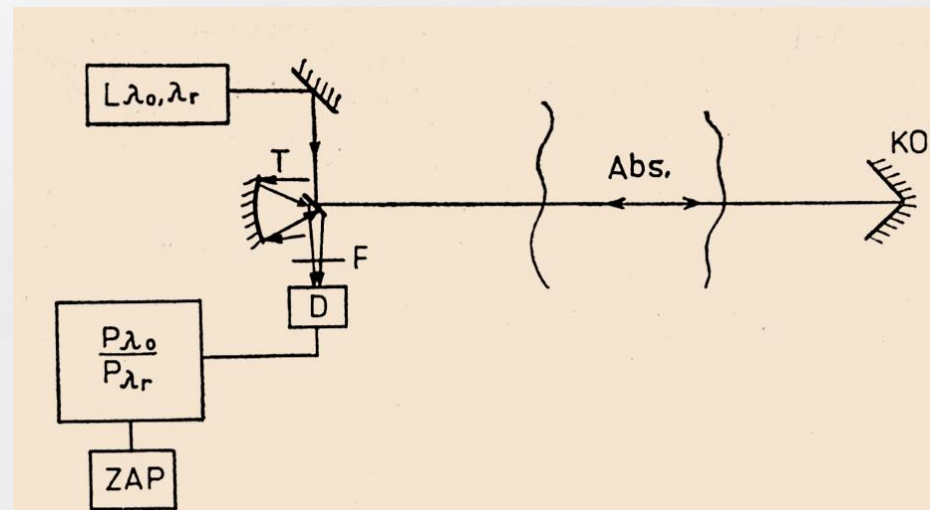
Fluorescenční lidar

- Největší fluorescenci jeví sodík, který je možné sledovat v atmosféře na vzdálenost 10 km a do výšky 100 km. Používá se ke stanovení distribuce sodíku ve stratosféře. Při měření distribuce Na je nutné uvažovat dobu života excitovaného stavu (cca 10^{-9} s)
- Na vedlejším grafu je distribuce sodíku při meteorickém roji Geminid nad Pacifikem (14. prosince 1971 v 0 hod. - plná čára, čárkovaná ve 3 hod. pacifického standardního času)



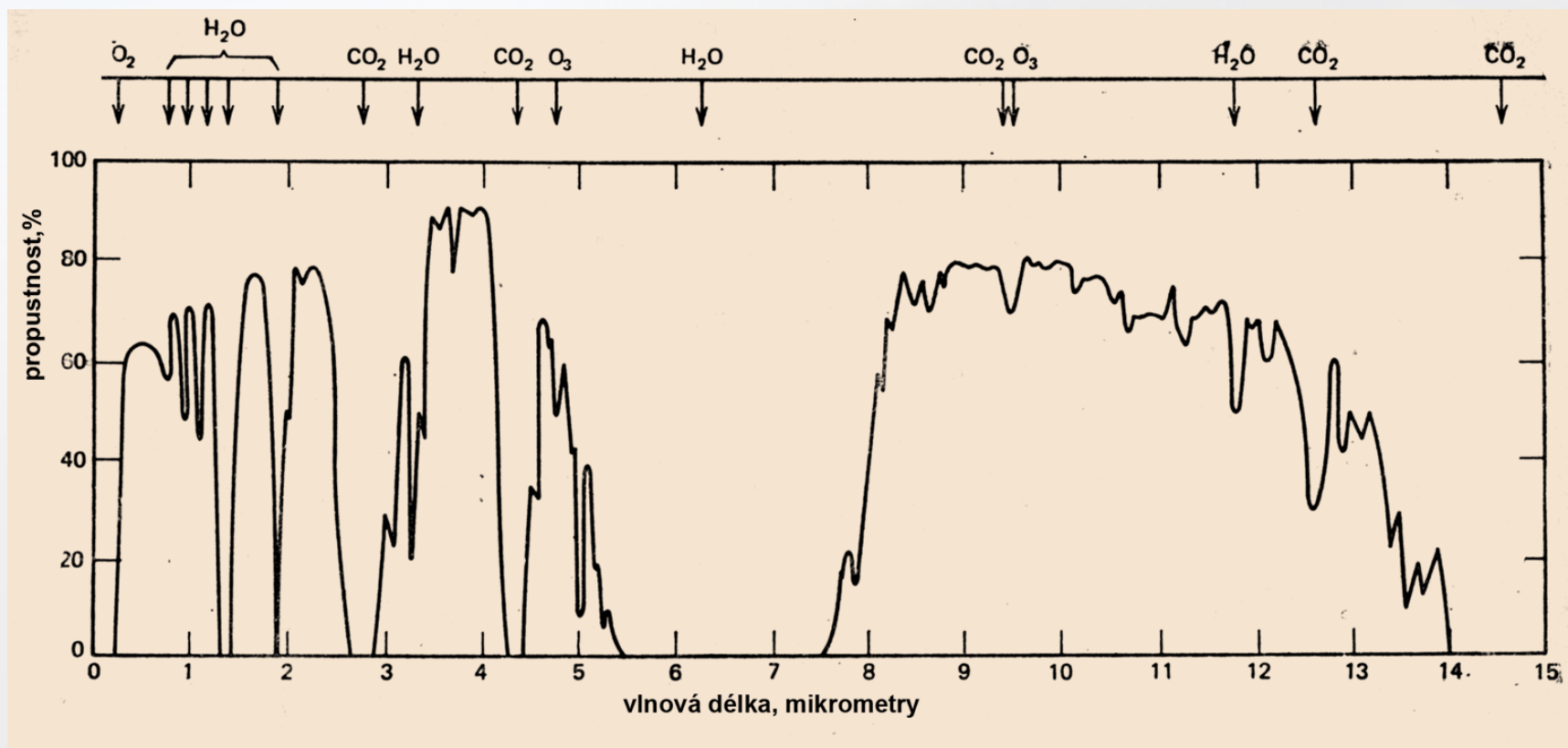
Diferenciální absorpční měření

- Používá se kontinuálních laserů, výsledkem je střední hodnota po dráze paprsku. V přijímacím zařízení se střídavě přijímá záření obou vlnových délek. Logaritmus podílu jejich výkonu odpovídá hodnotě střední koncentrace, detekční limity se pohybují v jednotkách ppt. Absorpční dráhy mohou být až desítky km.
- Použije-li se místo koutového odražeče difusní odraz od topografických cílů je dosah podstatně kratší – jednotky km.



L – laser vysílající záření na vlnových délkách λ_0, λ_r ; T – Newtonův teleskop; KO – koutový odražeč; Abs – absorbující oblast; F – filtr; D – detektor; $P_{\lambda_0}/P_{\lambda_r}$ – poměrový analyzátor (ratio meter); ZAP - zapisovač

Absorpční spektrum atmosféry

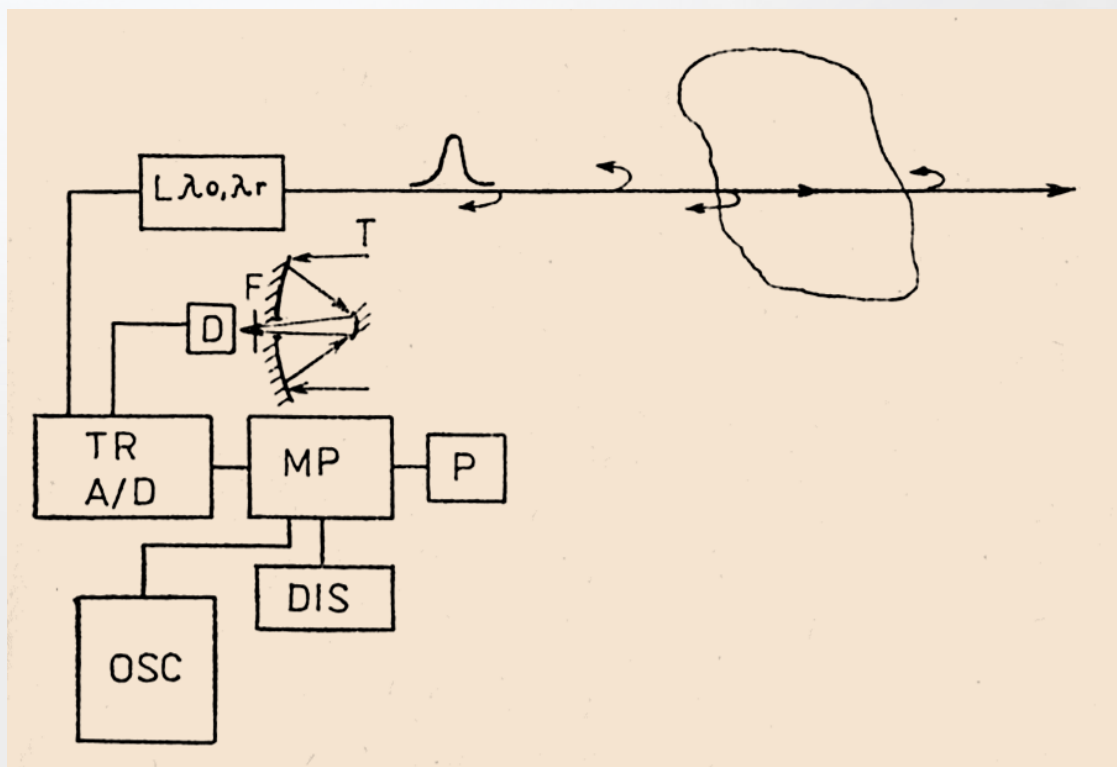


Pro měření je nutno vybrat spektrální oblast, ve které je malý útlum signálu.
Spektrum na horním obr. je absorpce vzduchu na dráze 1828 m na úrovni hladiny moře.

DASE lidar (differential absorption of scattered energy lidar; DIAL- differential absorption lidar)

- Tato varianta předchozích metod dovoluje využít absorpční měření k prostorovému rozlišení koncentrace analytů. Využívá rozptylu záření na aerosolech, jehož částicím přitom přísluší úloha v prostoru lokalizovaných rozptylových center. Metoda využívá dva svazky s rozdílnými vlnovými délkami, které jsou rozdílně absorbovány analytem. Při rovnoměrném rozložení aerosolu platí, že intenzita navracejícího se záření z různě vzdálených míst modeluje koncentrační profil analytu po dráze paprsku. Pro tuto metodu musí být použity výkonové impulzní lasery a citlivé a rychlé detektory.

Schéma diferenciálního absorpčního laseru

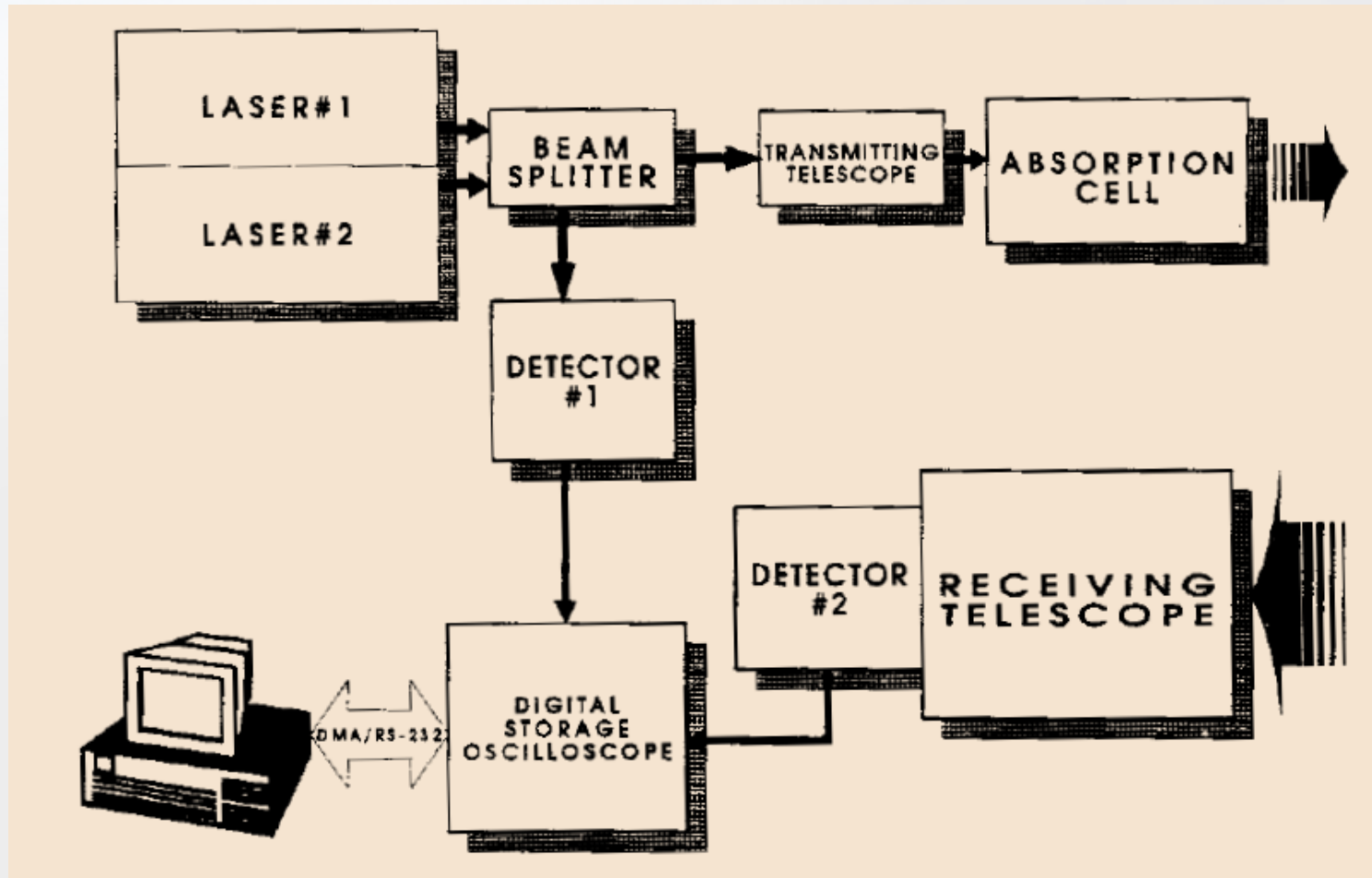


L – impulsní laser vysílající záření na vlnových délkách λ_0 , λ_r ; T – teleskop; F – filtr; TR – analyzátor přechodového děje (transient recorder); MP – počítač; P – paměť; OSC – osciloskop; DIS – displej; D – detektor; A/D – analogově-digitální převodník

Laser Remote Detector (VÚ 070 Brno)

- Princip: detekce diferenciální absorpce infračerveného záření v pásmu 10 μm detekované látky. Zařízení obsahuje dva TEA CO₂ lasery laditelné mřížkou, přijímací teleskop je Cassegrainova typu.
- Aplikace: zařízení je navrženo pro detekci bojových chemických látek v týlu bojových jednotek. Je možné přeprogramování pro použití v ekologických měřeních.
- Technická data: dosah 2000m; detekční čas pro jedno měření 45 s; detekční limit (CxL) 70 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{m}$; měřený prostor 120° horizontálně, 15° vertikálně, automatické měření.
- Měřené plyny: bojové látky GB, GD, GA a VX, fosgen; průmyslové exhalace – cca 100 látek, majících silnou absorpci v pásmu emise CO₂ laseru, např. amoniak, dichlorethan, freony, ozon, hydrazin, fluorid sírový, tetrachlorethylen, trichloethylen, ropné produkty atd.

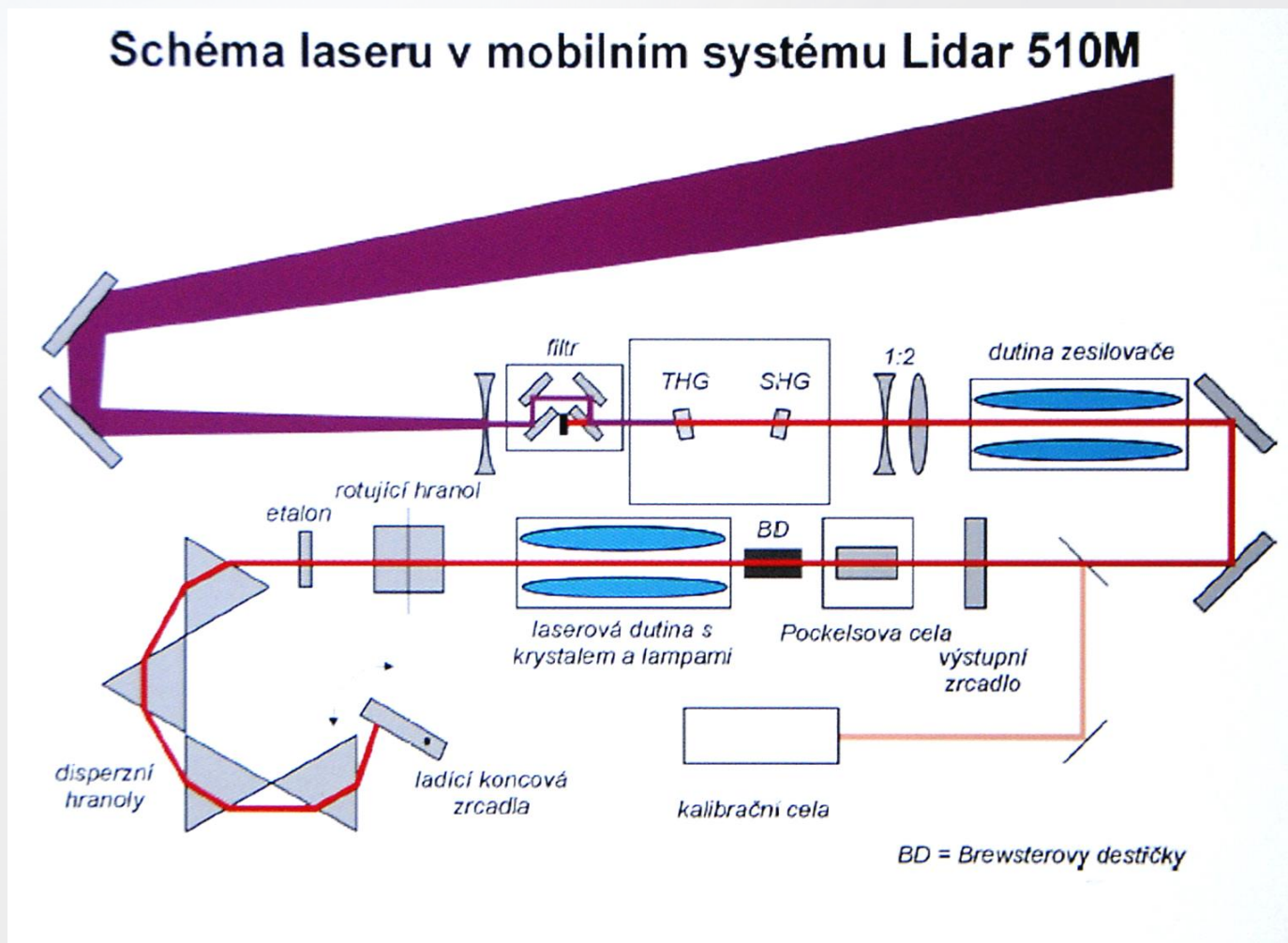
Laser Remote Detector (VÚ 070 Brno) - schéma



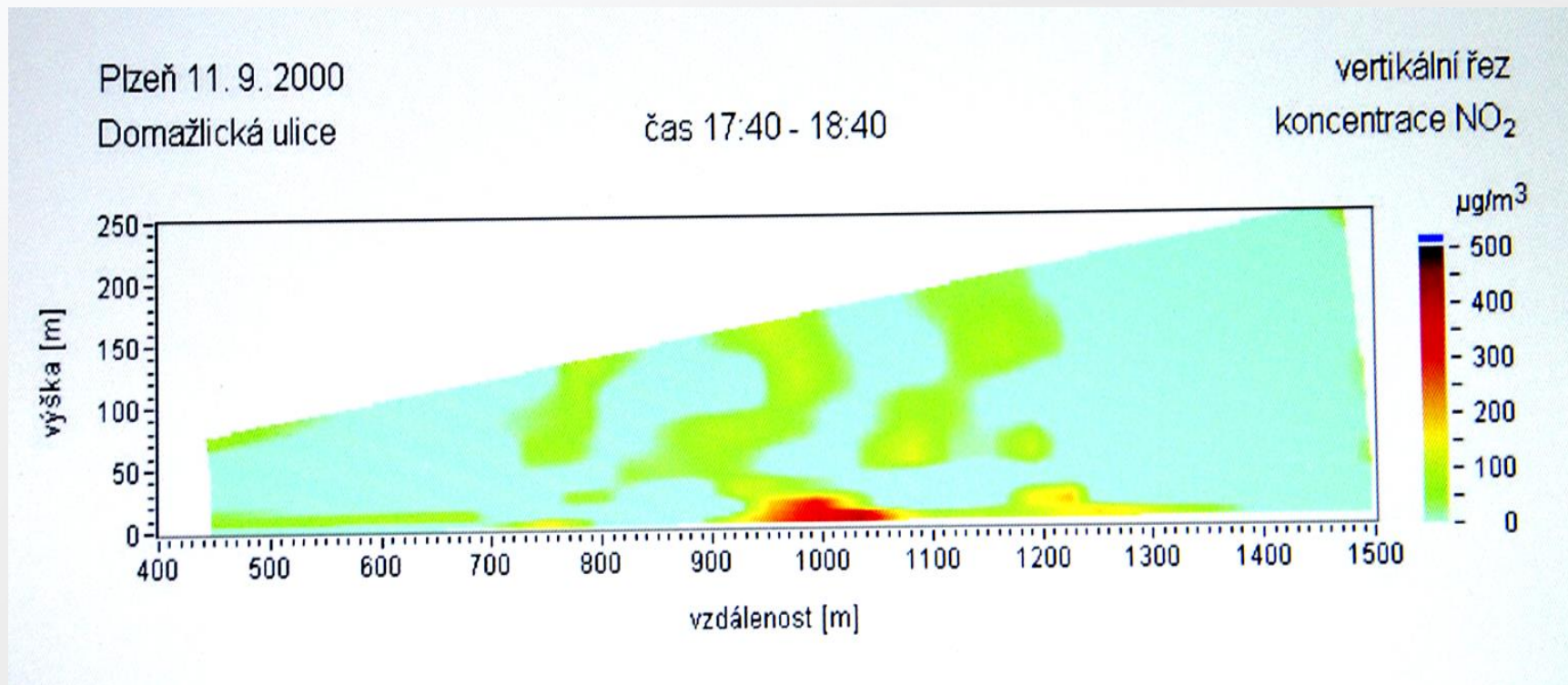
Lidarová měření ČHMÚ

- ČHMÚ stanovuje zařízením LIDAR 510M metodou DIAL ozón (vlnové délky 282,4 a 286,9 nm) a NO₂ (vlnové délky 398,3 a 397,0 nm), frekvence pulzů 20 Hz, délka pulzu 35 ns, maximální dosah 2500 m, detekční limit pro O₃ 2 ng/l, pro NO₂ 20 ng/l.
- Zařízení může měřit libovolným směrem a určovat průběh koncentrace měřené látky na různých paprscích. Je možné získat dvojdimenzionální horizontální a vertikální mapy znečištění ovzduší.

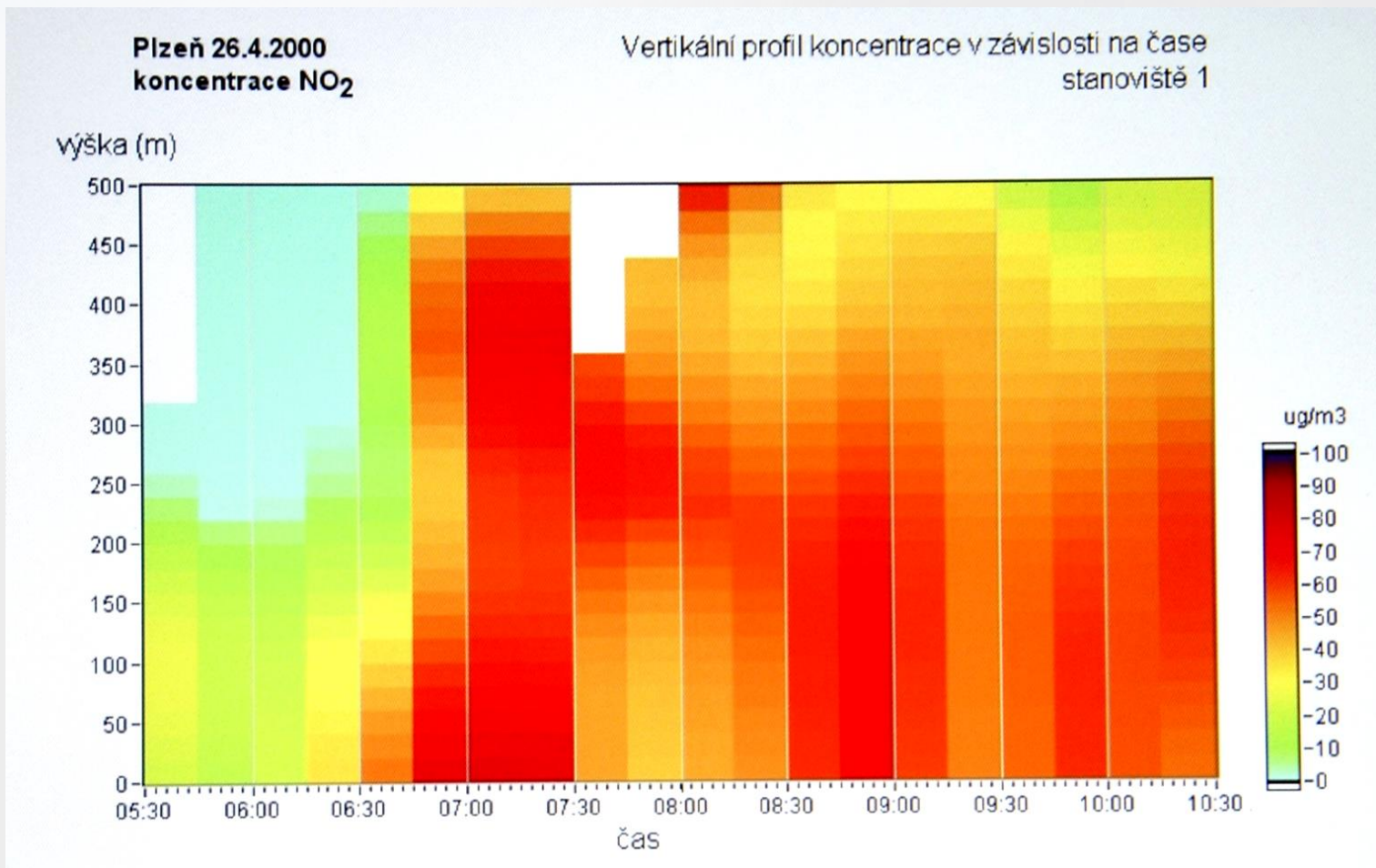
Schéma LIDAR 510M



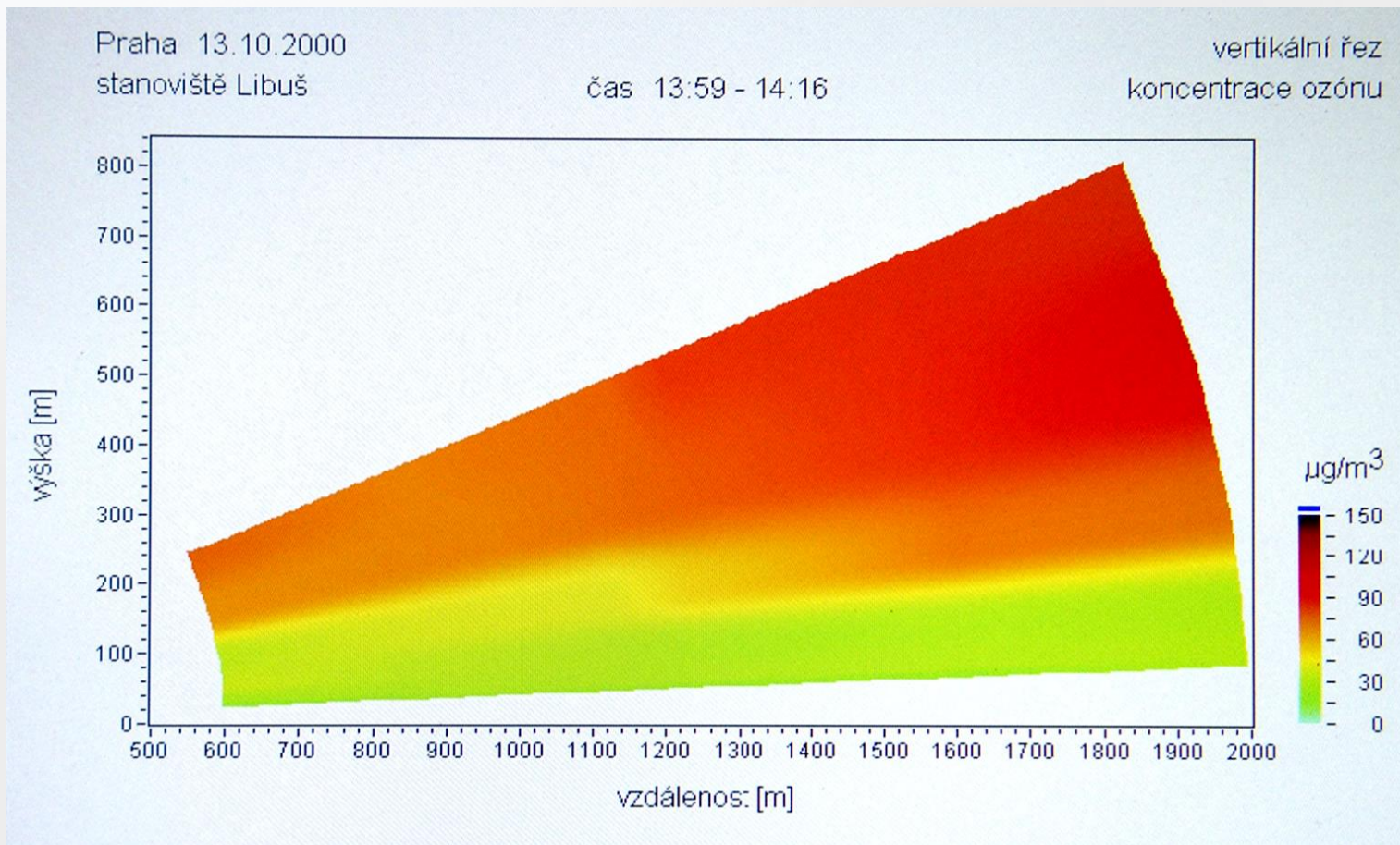
Výsledky lidarových měření NO₂



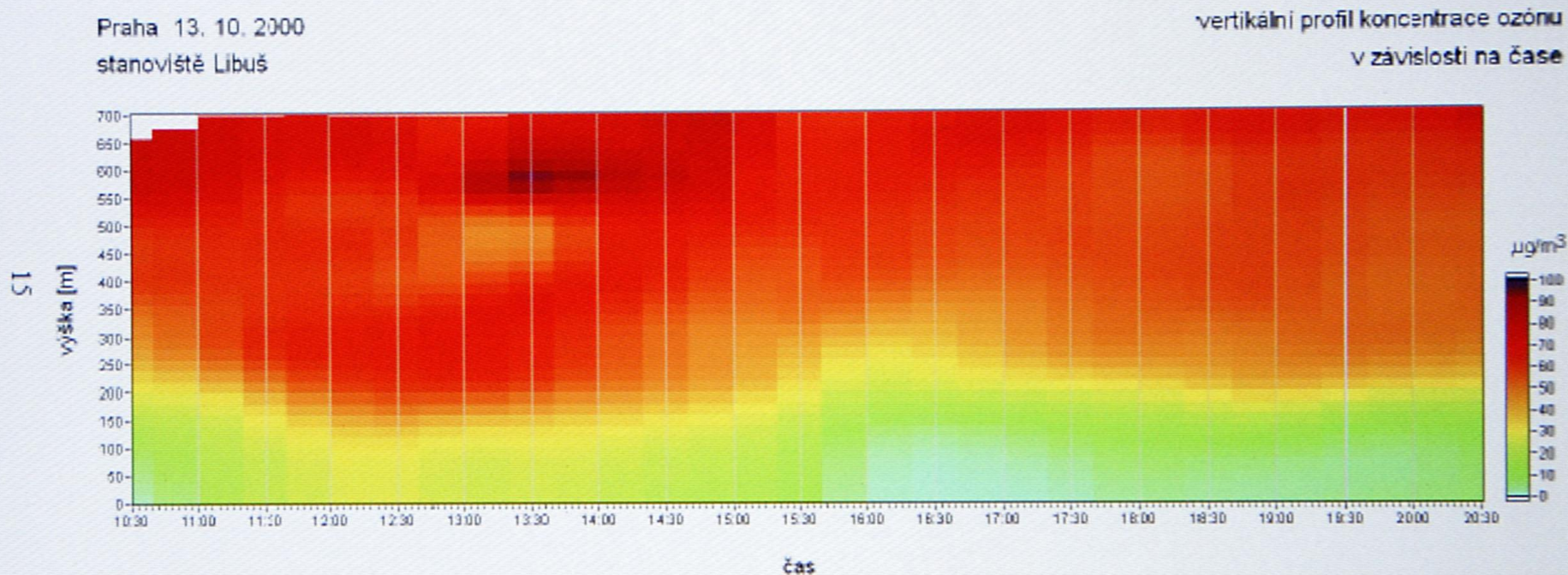
Výsledky lidarových měření NO₂



Výsledky lidarových měření O₃

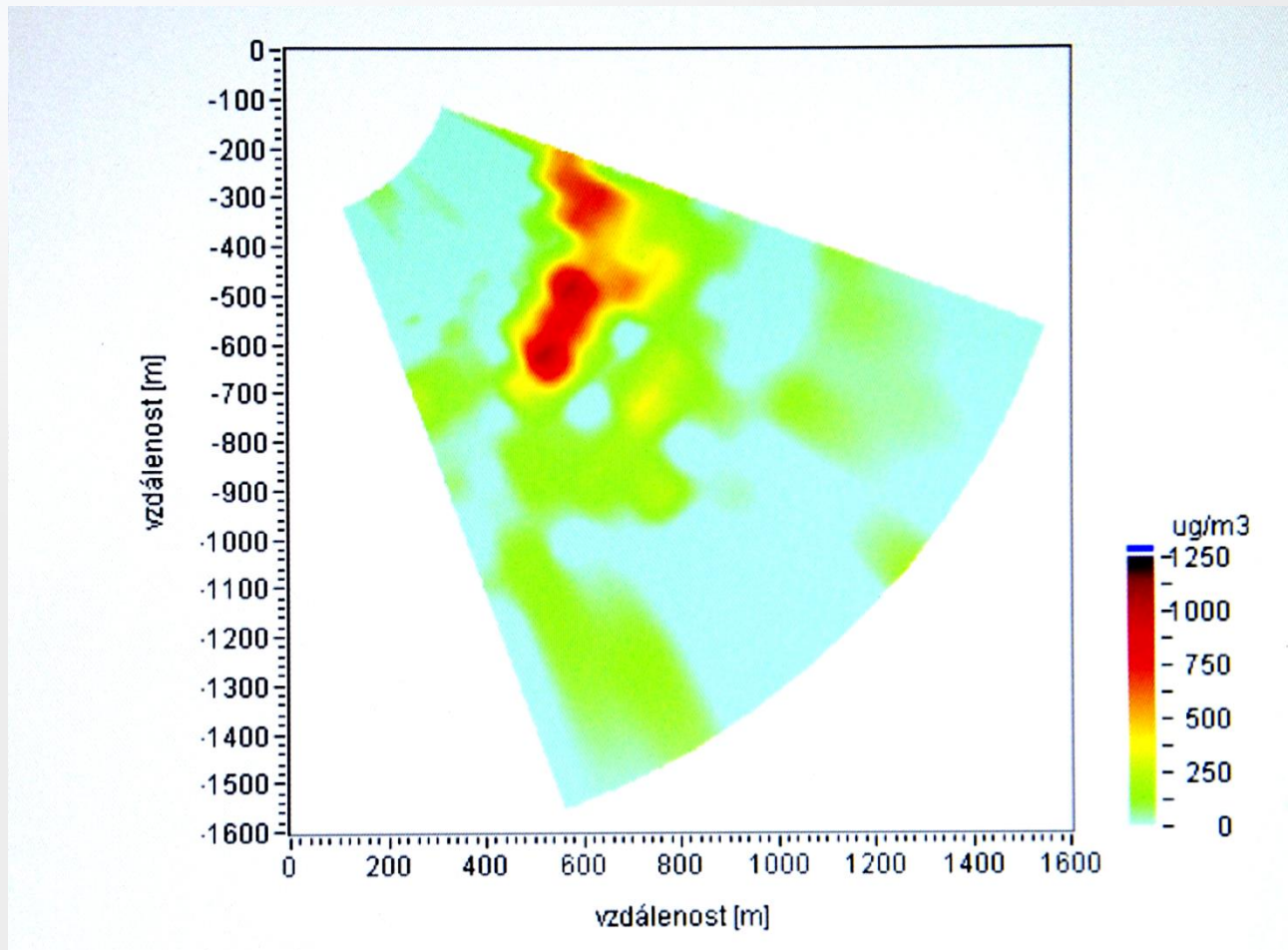


Výsledky lidarových měření O₃



Obr. 17 Časový průběh vertikálního rozložení koncentrace ozónu nad Libuší 13. 10. 2000

Horizontální řez koncentrace SO₂ nad rafinerií Esso v Antverpách

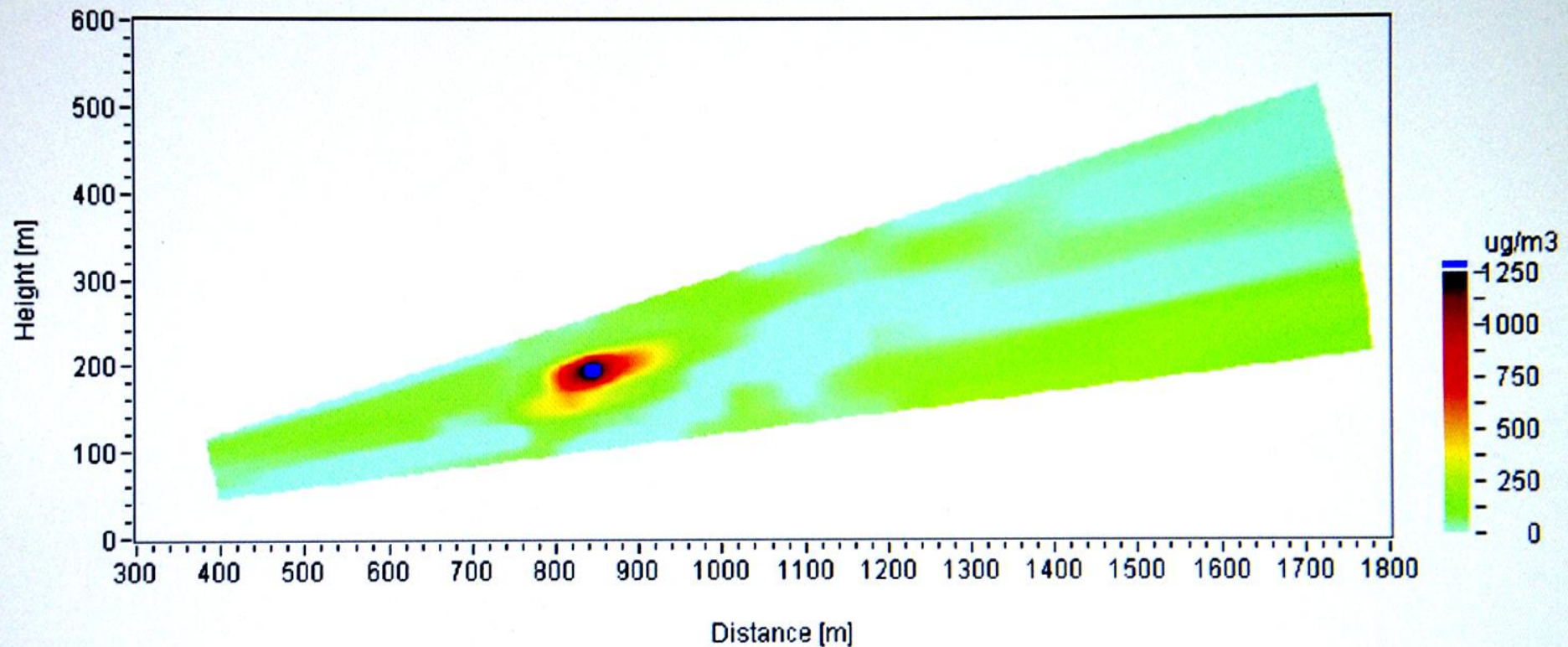


Řez kouřovou vlečkou (SO₂) – rafinerie Esso Antverpy

Concentration of SO₂
Plume of refinery stack

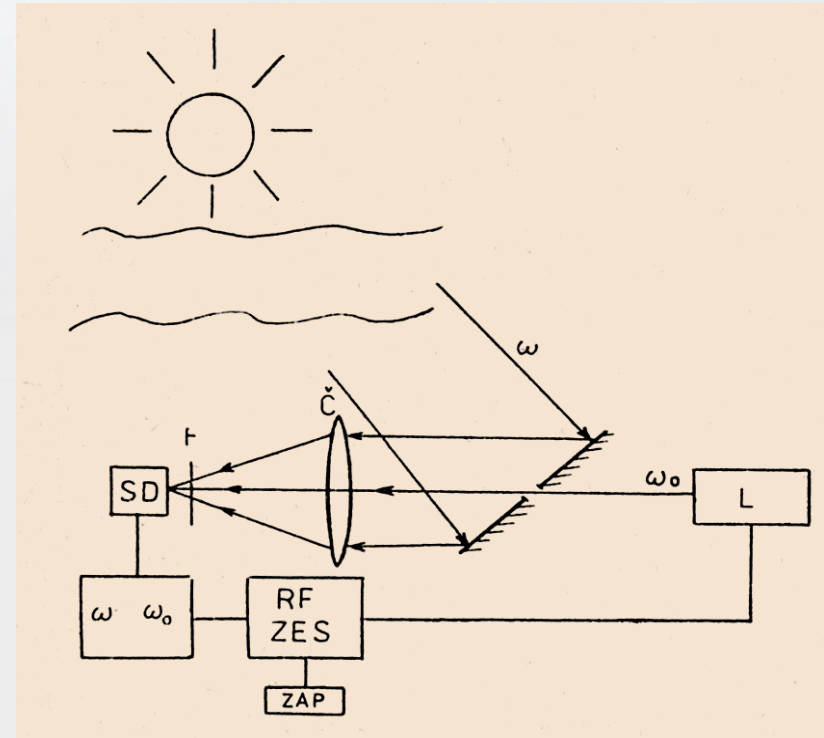
Vertical Scan V1

26.06.2000 16:03:53 - 16:18:21
Antwerp



Heterodynní detekce – absorpce slunečního záření v atmosféře

- Princip: Sluneční záření je směřováno se zářením laseru na nelineárním členu, tj. detektoru, kde je generováno záření rozdílové frekvence, ležící v radiofrekvenční oblasti, které je možné sledovat radiovou aparaturou (přijímačem). Tímto způsobem se získá spektrum s vysokým rozlišením. Podobně je možné měřit absorpční spektrum z letadla s využitím záření Země.
- Kombinace DIAL a heterodynní detekce pro spektra s extrémním rozlišením se nazývá heterodynní DIAL.



L- přeladitelný laser ω_0 ; Č – čočka; F – filtr; SD – směšovací detektor; $\omega - \omega_0$ mezifrekvenční filtr; RFZES – radiofrekvenční zesilovač; ZAP - zapisovač