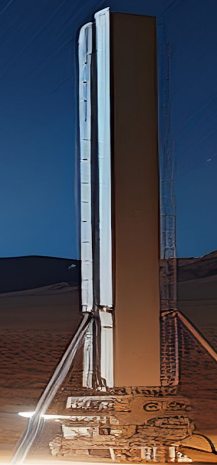


Kalibrace atmosféry pro astročásticové experimenty



FZU

Institute of Physics
of the Czech
Academy of Sciences

Vlastimil Jílek, Seminář SLO 14. května 2025



Palacký University
Olomouc

Tato práce byla spolufinancována Evropskou unií a podpořena MŠMT
ČR v rámci projektu FORTE - CZ.02.01.01/00/22_008/0004632.

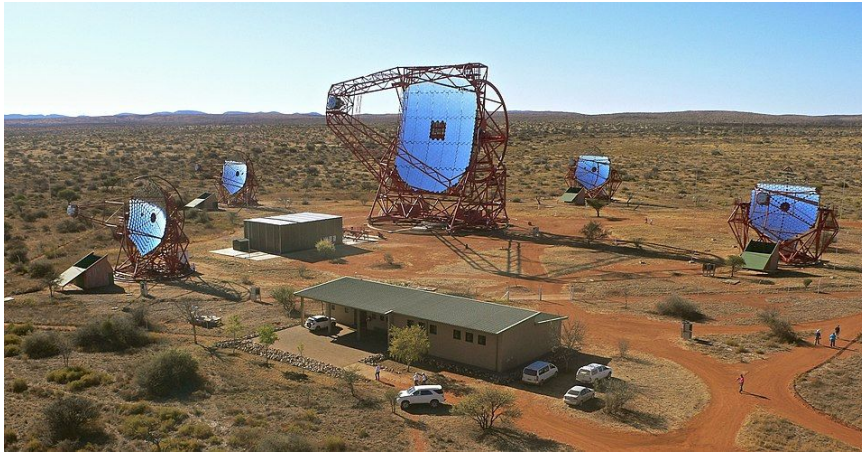


Spolufinancováno
Evropskou unií

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Kalibrace atmosféry

- Atmosféra jako kalorimetr pro astročásticové experimenty
 - Fluorescenční teleskopy (Pierre Auger Observatory, Telescope array, FAST)
 - Teleskopy pro gama záření(CTAO, H.E.S.S., Magic, SST1-M)



Obr. 1: Observatoř H.E.S.S. II s 5 teleskopy pro gama záření v Namibii.



Obr. 2: Fluorescenční teleskopy experimentu Telescope array.

Kalibrace atmosféry

- Síla signálu závislá na vlastnostech atmosféry
 - mraky
 - teplota
 - vlhkost
 - vítr -> částice v atmosféře
- Informace
 - celkový koeficient extinkce
 - profil koeficientu extinkce
 - pokrytí oblačností



Obr. 3: Teleskopy FAST a SST1-M na hvězdárně Astronomického ústavu AV ČR v Ondřejově.

Rozptyl světla v atmosféře

- **Světlo v atmosféře zeslabováno**

- absorpcí - lze zanedbat
- rozptylem

- **Dva typy rozptylu světla v atmosféře**

- rozptyl na molekulách

X

rozptyl na aerosolech

- **Složení atmosféry vertikálně je stejné do 100 km**

- **Vlastnosti atmosféry závislé na nadmořské výšce**

- teplota, vlhkost, hustota, tlak

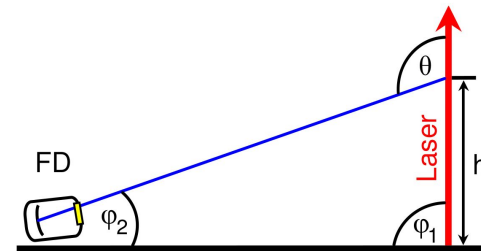
- **Rozptyl na částicích různého tvaru a velikosti**

- míra rozptylu světla závisí na
 - místě observatoře
 - typu částice
 - výšce nad povrchem
 - vlhkosti
- velký vliv na útlum světla ve výšce do 5 km nad povrchem

- **Proces rozptylu na aerosolech není možné analyticky vyjádřit**

Techniky kalibrace atmosféry

- Detekce signálu z CLF
 - Pouze pro fluorescenční teleskopy
 - Detekce signálu samotným teleskopem
 - Signál generován laserem v dané vzdálenosti
- Detekce světla hvězd
 - FRAM - robotický teleskop
 - zorný úhel $7^\circ \times 7^\circ$ nebo $15^\circ \times 15^\circ$
 - BGcam - statická kamera
 - 180° rybí oko
 - informace o pokrytí oblačností
 - pokračuje vývoj pro měření koeficientu zeslabení



Obr. 4: Náčres geometrie detekce signálu z CLF.



Obr. 5: Robotický teleskop FRAM.

Techniky kalibrace atmosféry

- LIDAR

- detekce zpětně odraženého světla z laseru
- skenování zorného pole teleskopu
 - detekce oblačnosti
 - profil optických vlastností atmosféry
- vlnová délka podle použitého laseru
 - Lidar Auger - $\lambda = 351 \text{ nm}$
 - Ceilometr - $\lambda = 1064 \text{ nm}$



Obr. 6: Lidar na observatoři Pierre Auger.

Ceilometr

- komerčně dostupný atmosférický lidar
 - Lufft CHM 15k Nimbus
- velké množství měřených vlastností atmosféry
 - detekce mraků a jejich vlastností, vlastnosti aerosolů, viditelnost,...



Obr. 7: Ceilometr Lufft CHM 15k.

Princip atmosférického lidaru

- **Složení Lidaru**

- laser a optika
- teleskop
- optický analyzátor
- PC

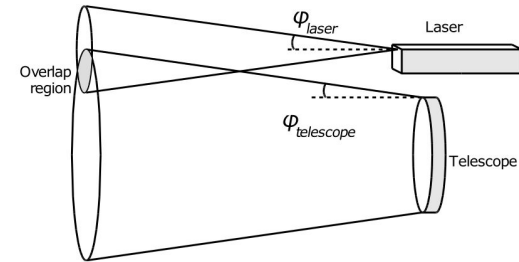
- **Laser kolimován**

- divergence v řádu stovek μ rad

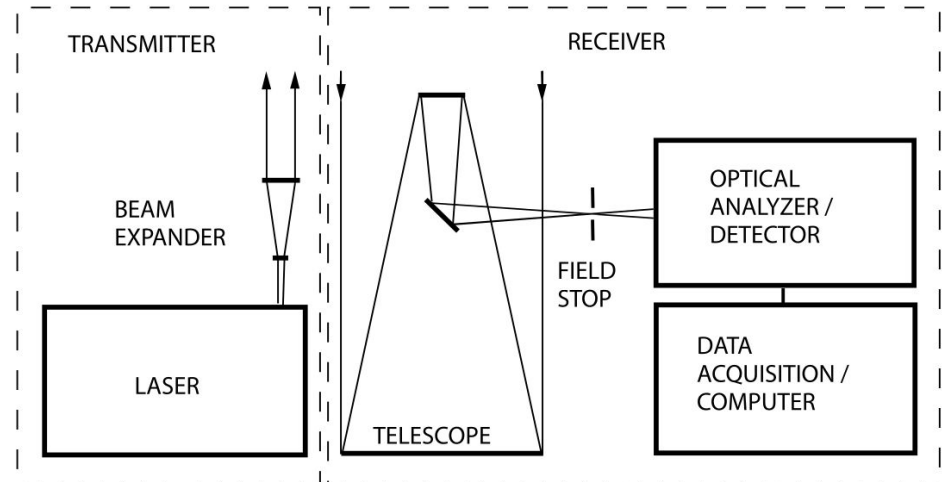
- **Analýza signálu**

- nejjednodušší - interferenční filtr
- pro složitější analýzu nutné složitější systémy, např polarizátory, mřížkové spektrometry, interferometry apod.

- Jako detektory se používají fotonásobiče a lavinové diody v geigerově módu



Obr. 8: Překrytí svazku laseru a zorného pole teleskopu.



Obr. 9: Schéma lidaru.

Lidarová rovnice

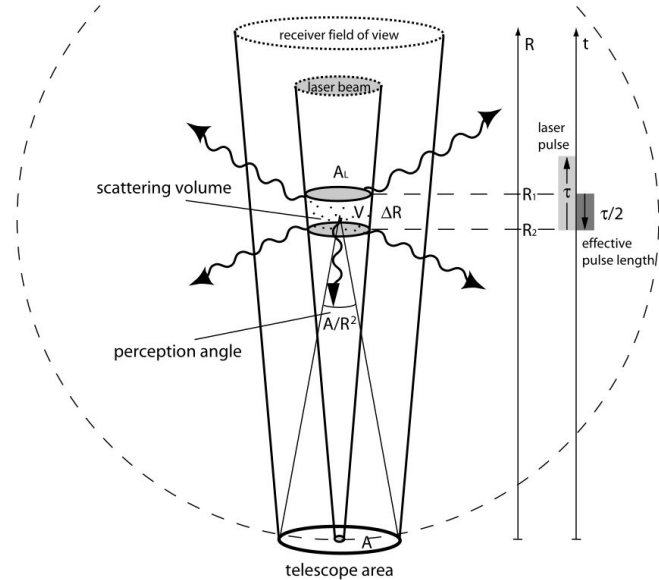
- $$P(R) = KG(R)\beta(R)T(R) = P_0 \frac{c\tau}{2} A\eta \frac{O(R)}{R^2} \beta(r) \exp\left[-2 \int_0^R \alpha(r) dr\right]$$

- $K = P_0 \frac{c\tau}{2} A\eta$ - konstanta pro lidar

- $G(R) = \frac{O(R)}{R^2}$ - geometrie měření

- $\beta(r) = \beta(r)_{aer} + \beta(r)_{mol}$

- $\alpha(r) = \alpha(r)_{aer} + \alpha(r)_{mol}$



Obr. 10: Náskres geometrie lidarů.

Lidarová rovnice

- $P(R) = KG(R) [\beta(R)_{aer} + \beta(R)_{mol}] \exp \left\{ - 2 \int_0^R [\alpha(r)_{aer} + \alpha(r)_{mol}] dr \right\}$
- Lidarový koeficient - $L(R)_{aer} = \frac{\alpha(R)_{aer}}{\beta(R)_{aer}}$, $L(R)_{mol} = \frac{\alpha(R)_{mol}}{\beta(R)_{mol}} = \frac{8\pi}{3} \text{ sr}$
- $Y(R) = L(R)_{aer} [\beta(R)_{aer} + \beta(R)_{mol}]$
- $P(R)R^2 L(R)_{aer} \exp \left\{ - 2 \int_0^R [L(r)_{aer} - L(r)_{mol}] \beta(r)_{mol} dr \right\} = KG(R) Y(R) \exp \left[- 2 \int_0^R Y(r) dr \right]$

Výpočet koeficientu zeslabení

- $$P(R)R^2 L(R)_{aer} \exp\left\{-2\int_0^R [L(r)_{aer} - L(r)_{mol}] \beta(r)_{mol} dr\right\} = KG(R) Y(R) \exp\left[-2\int_0^R Y(r) dr\right]$$
- $$\frac{d \ln\left(P(R)R^2 \exp\left\{-2\int_0^R [L(r)_{aer} - L(r)_{mol}] \beta(r)_{mol} dr\right\}\right)}{dR} = \frac{1}{Y(R)} \frac{dY(R)}{dR} - 2Y(R)$$
- Počáteční podmínka - $Y(R_0) = L(R_0)_{aer} [\beta(R_0)_{aer} + \beta(R_0)_{mol}]$

Výpočet koeficientu zeslabení

- $$\beta(r) = \frac{P(R)R^2 \exp\left\{-2\int_0^R [L(r)_{aer} - L(r)_{mol}] \beta(r)_{mol} dr\right\}}{\frac{P(R_0)R_0^2}{\beta(R_0)_{aer} + \beta(R_0)_{mol}} - 2\int_{R_0}^R [L(r)_{aer} - L(r)_{mol}] \beta(r)_{mol} dr}$$

- $$\alpha(R)_{aer} = L(R)_{aer} \beta(R)_{aer}$$

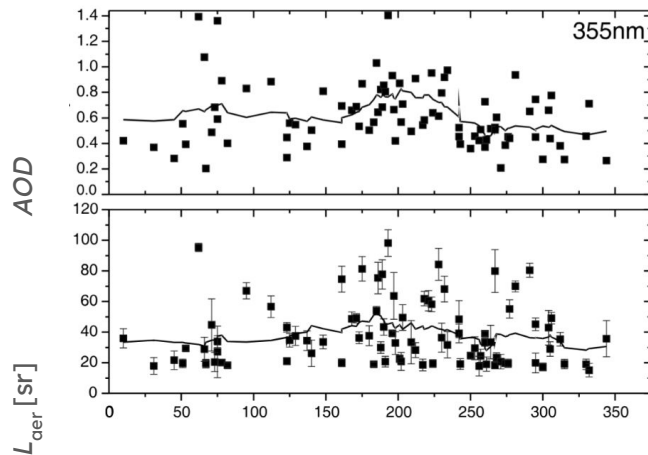
- Pro stabilitu výpočtu je lepší integrovat od podmínky R_0 dolů

- R_0 je určena pro výšku, kde

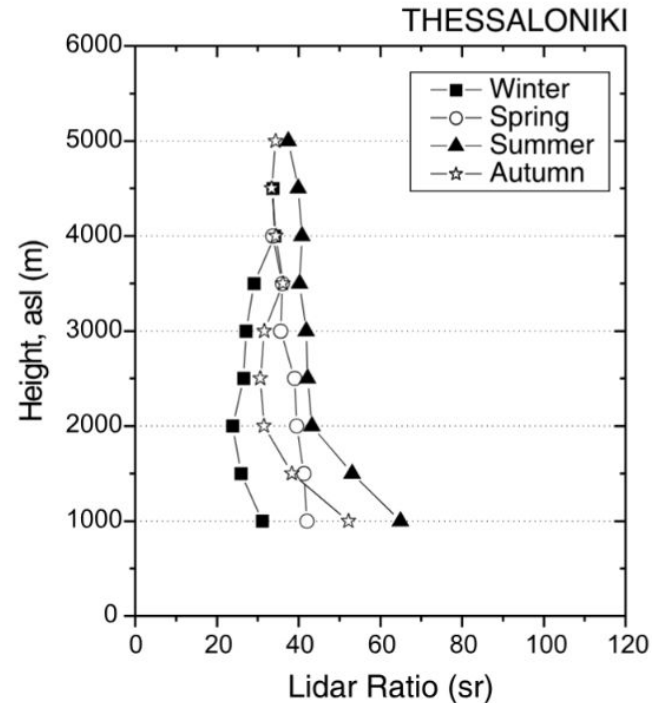
$$\beta(R)_{mol} \gg \beta(R)_{aer}$$

Lidarový koeficient

- kritický parametr výpočtu
- závisí na vlastnostech částic aerosolů
- silně závisí na výšce nad povrchem
- běžné hodnoty: 20 sr - 100 sr



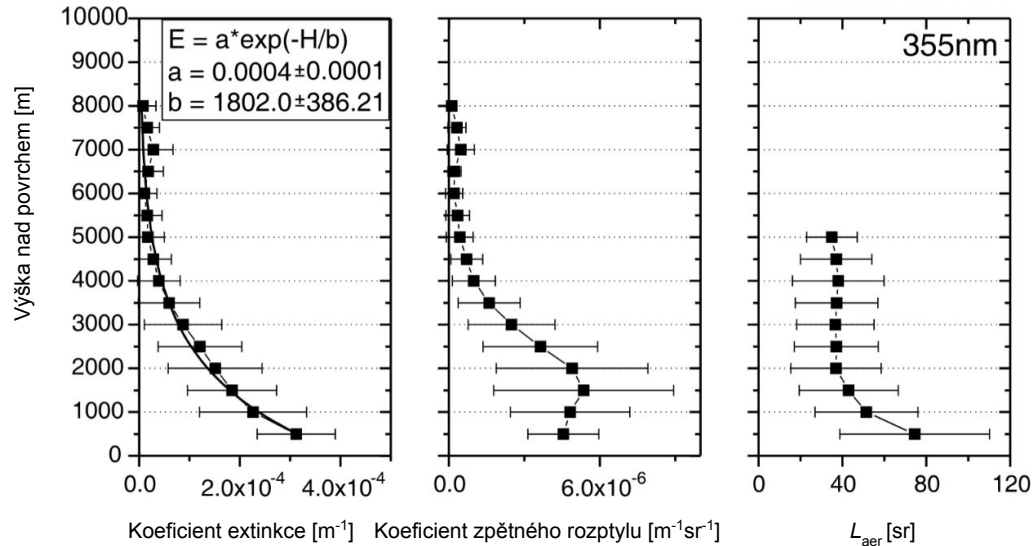
Obr. 11: Vývoj průměrného L_{aer} a AOD během roku. Měřeno v letech 2001 - 2004 v Řecku.



Obr. 12: Vývoj L_{aer} v závislosti na výšce nad povrchem. Měřeno v letech 2001 - 2004 v Řecku.

Lidarový koeficient

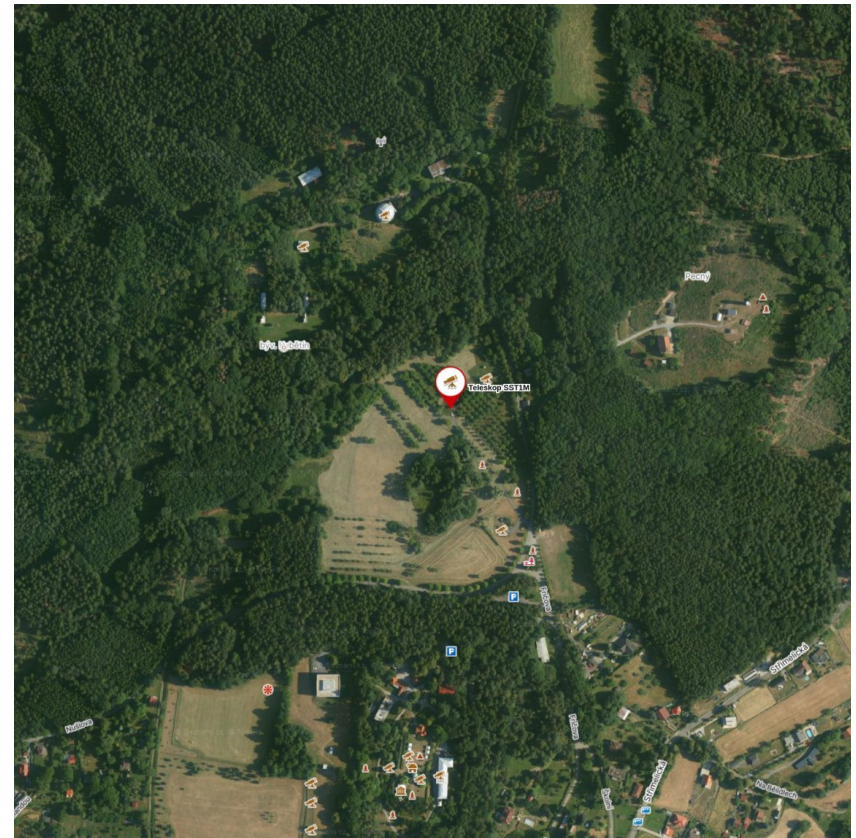
- Problém s přesným měřením
 - lze určit první odhad pomocí hodnoty celkového koeficientu extinkce



Obr. 13: Porovnání vývoje průměrného koeficientu extinkce, koeficientu zpětného rozptylu a L_{aer} v závislosti na výšce nad povrchem.

Naměřená data

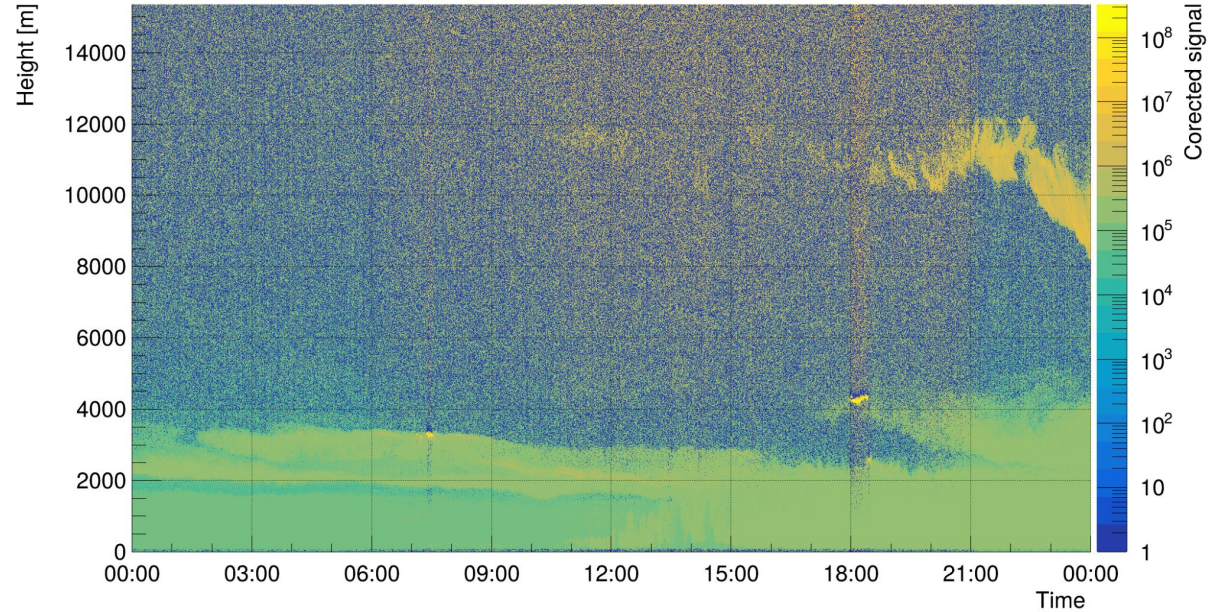
- Ceilometr CHM 1k
 - korigovaná signál
 - viditelnost
 - výška základny oblačnosti
 - maximální výška detekce
- Ondřejov, Hvězdárna AÚ AV ČR



Obr. 14: Umístění ceilometru u teleskopu SST1-M v areálu Ondřejovské hvězdárny.

Naměřená data

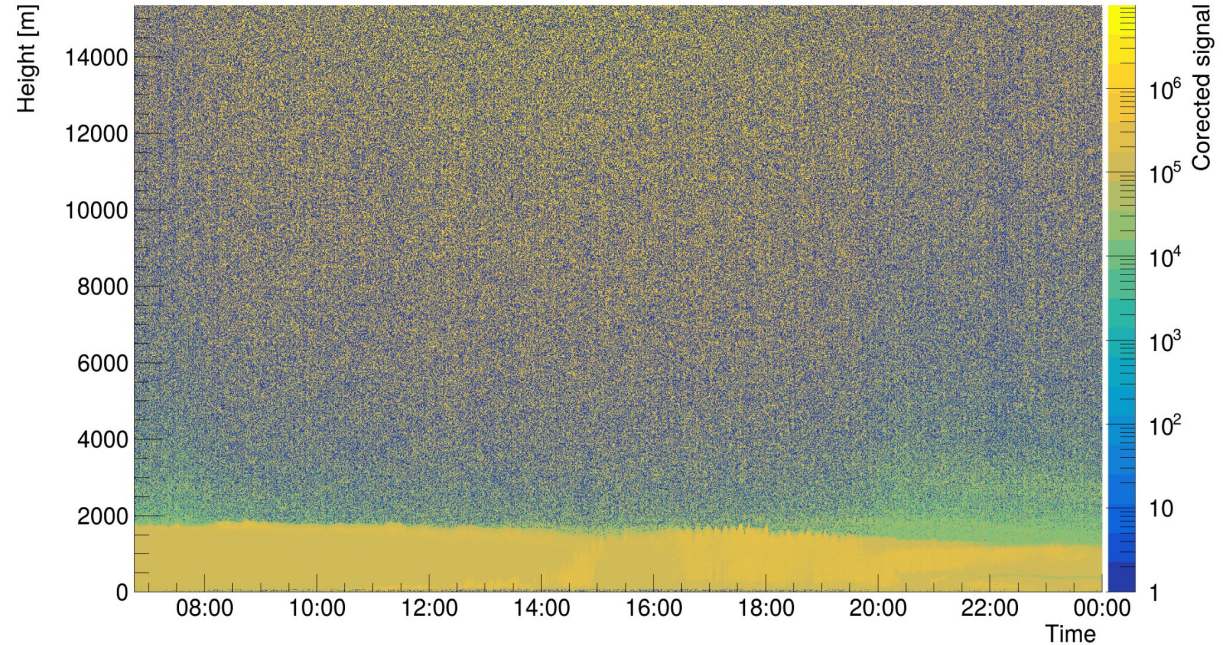
- korigovaný signál
 - maximální výška: 15 km



Obr. 15: Změřený korigovaný signál zpětného rozptylu z 31. července s odrazy střední a vysoké oblačnosti.

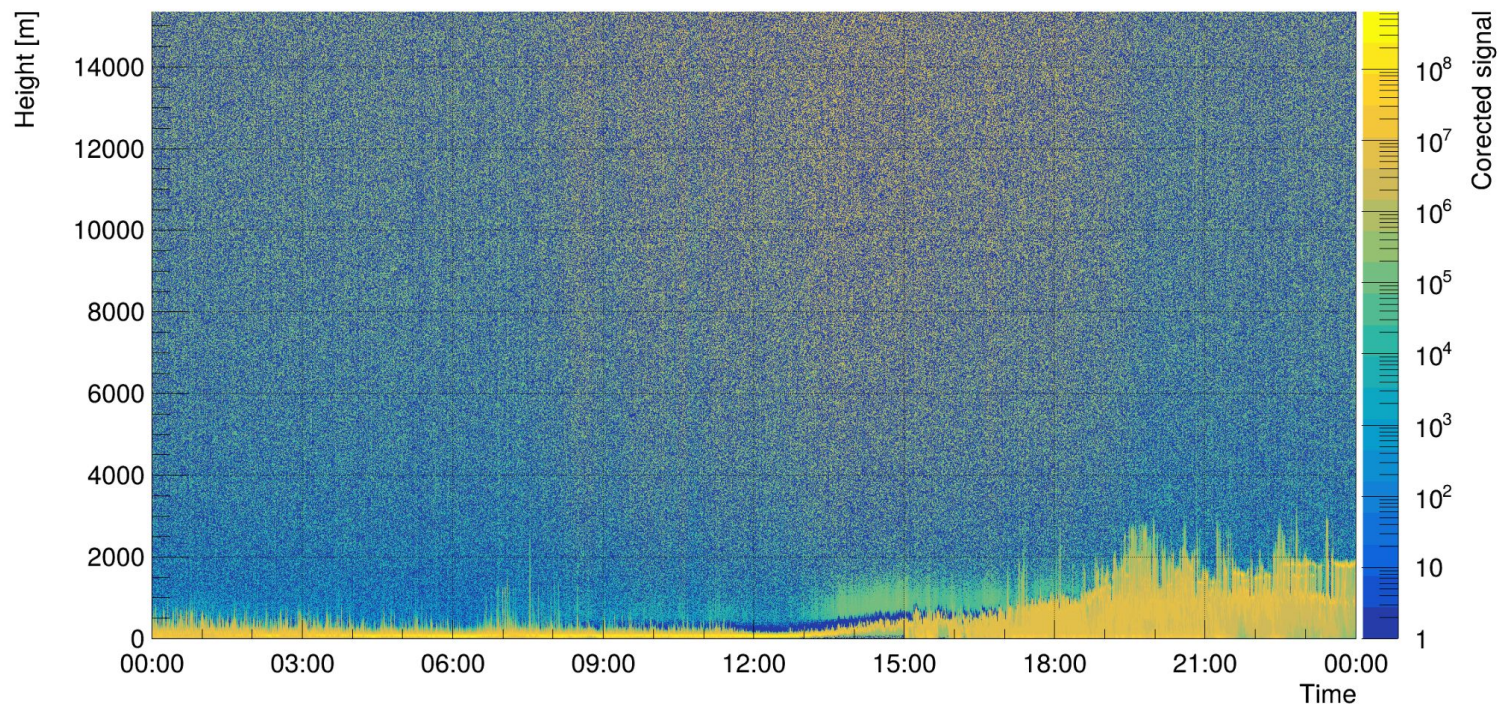
Naměřená data

- Bezoblačný den
- Zřetelná vrstva aerosolů do výšky 2 km nad povrchem



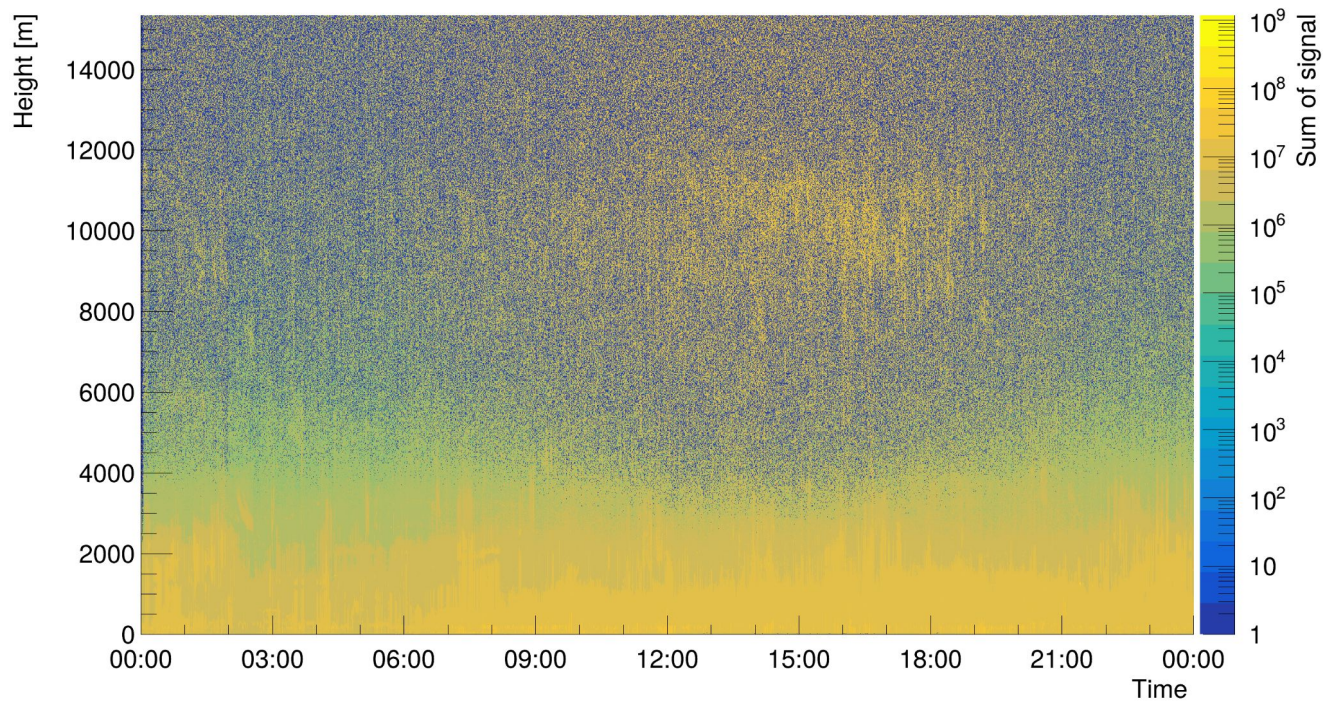
Obr. 16: Změřený korigovaný signál zpětného rozptylu z 21. března.
Bezoblačný den.

Naměřená data



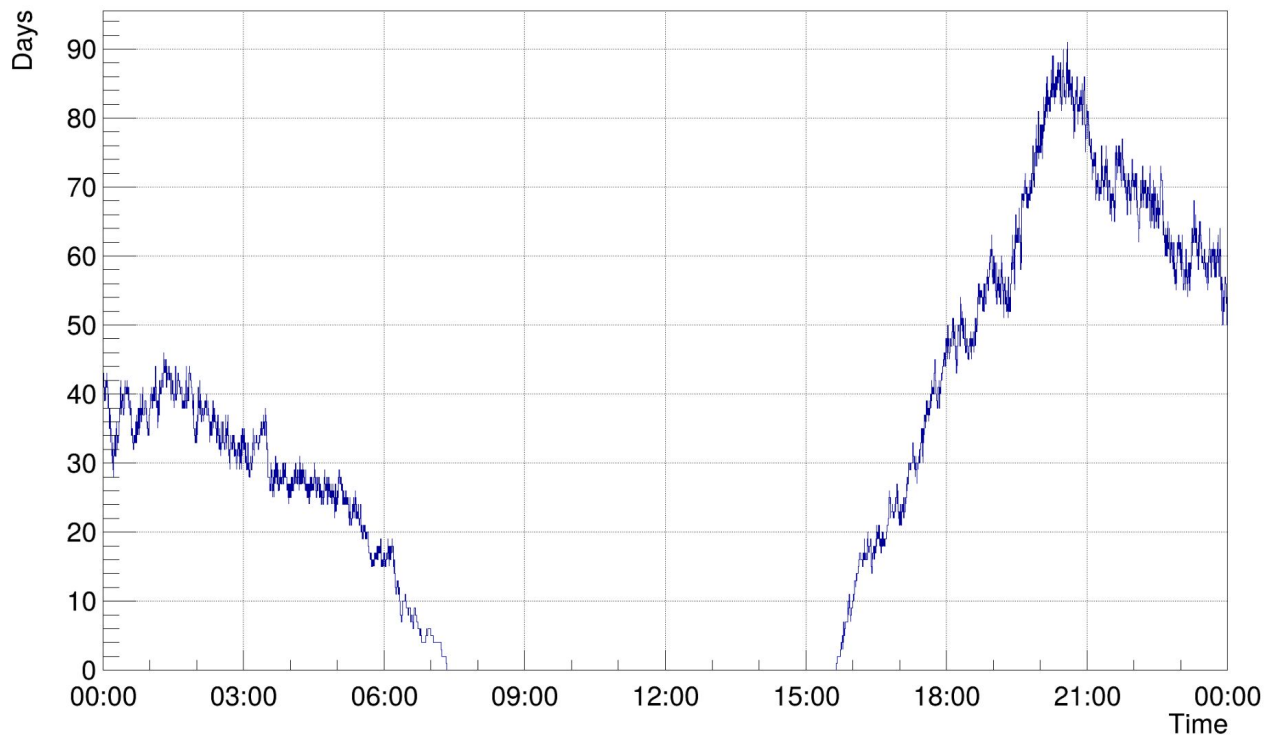
Obr. 17: Změřený korigovaný signál zpětného rozptylu z 14. září 2024.
Průběh podzimních povodní. Pravděpodobně silné srážky.

Naměřená data



Obr. 18: Suma korigovaného signálu od 1. června 2024 do 31. března 2025
pouze pro bez oblačnou oblohu.

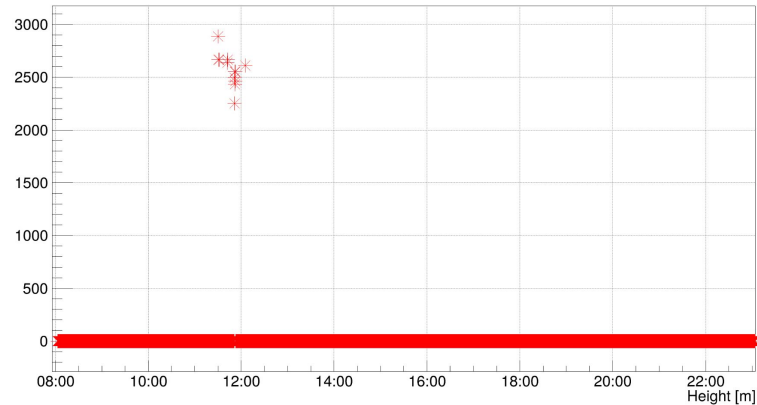
Naměřená data



Obr. 19: Histogram bezoblačných nocí v daný čas.

Analýzy dat

- Zpřesnění odhadu lidarového koeficientu
 - první odhad pomocí přepočtu z dat viditelnosti
 - Výpočet dle ISO standardu - $\int_0^{VIS} \alpha(r) dr = 3$
 - SNR > 5

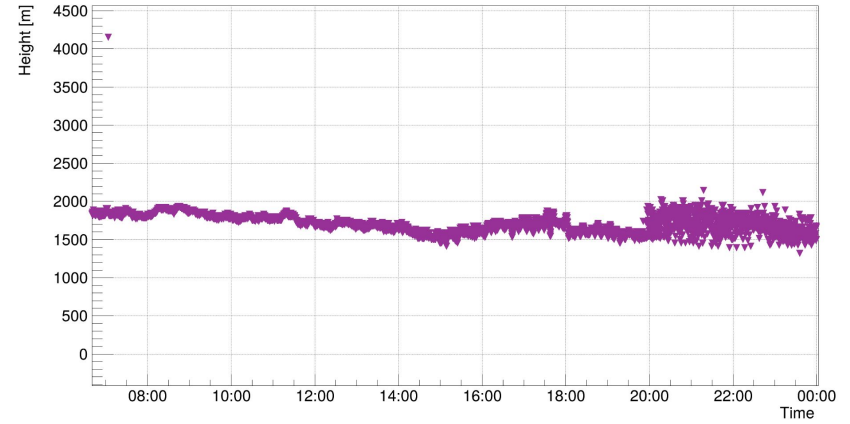
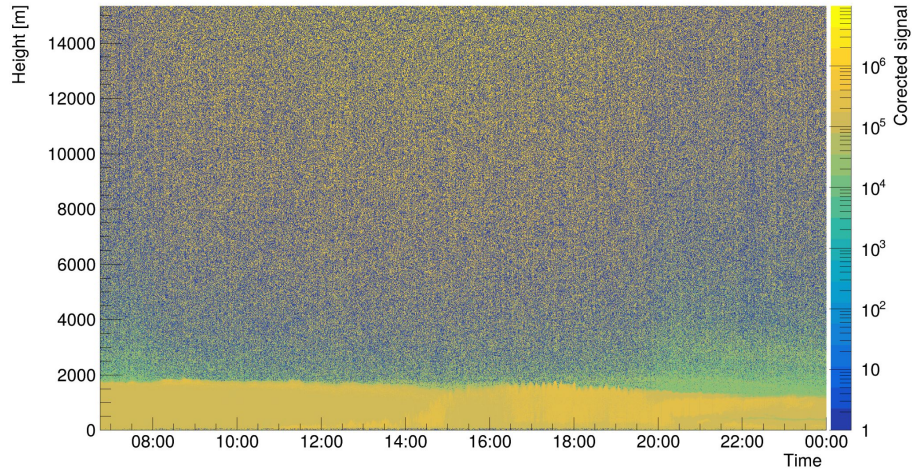


Obr. 19: Naměřená viditelnost ze dne 21. března.

Analýzy dat

- Maximální detekční výška
 - maximální vzdálenosti, ze které jsou ještě měřeny významné signály
 - Určena z S/N jako funkce vzdálenosti
- Lze použít pro určení počáteční podmínky pro výpočty
 - $$Y(R_0) = L(R_0)_{aer} [\beta(R_0)_{aer} + \beta(R_0)_{mol}]$$
 - R_0 je určena pro výšku, kde $\beta(R)_{mol} \gg \beta(R)_{aer}$

Analýzy dat



Obr. 20: Porovnání korigovaného signálu a maximální detekční výšce ze 21. března.

Literatura

- [1] K. Weitkamp, *Lidar: range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere*, New York: Springer, 2005 ISBN 978-1-4614-9763-9
- [2] V. Amiridis et al., *Four-year aerosol observations with a Raman lidar at Thessaloniki, Greece, in the framework of European Aerosol Research Lidar Network (EARLINET)*, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2005JD006190>
- [3] Lufft, *User Manual Lufft CHM 15k Ceilometer*, https://www.lufft.com/fileadmin/lufft.com/07_downloads/1_manuals/Manual_CHM15k_EN_R19.pdf
- [4] Pierre Auger Collaboration, S.Y. BenZvi et al., *The Lidar System of the Pierre Auger Observatory*, <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0609063>
- [5] GRADMA, *FRAM Telescopes*, <https://grandma.iiclab.in2p3.fr/fram/>