広角高精度望遠鏡を利用した大気透過率計測手法の開発

佐々木 真人[a], 浅岡 陽一[a], 野田 浩司[a], 甲賀 郁絵[b], 深川 俊介[b], 久世 宏明[b]
[a]東京大学 宇宙線研究所, [b]千葉大学 環境リモートセンシング研究センター

Abstract

Ashra (All-sky Survey High Resolution Air-shower) 望遠鏡計画は、宇宙線の起源と伝播の解明を目指し、超高エネルギー宇宙線の全天監視を行うプロジェクトである。Ashra望遠鏡では、超高エネルギー粒子の二次粒子群が、空気分子と反応して放出する蛍光とチェレンコフ光を観測する。このとき、大気エアロゾルの影響を受けるため、大気透過率を正確にモニタリングすることが必要となる。本研究では、バイスタティックライダーおよび、イメージングライダー観測における大気透過率計測手法について考える。

1. All-sky Survey High Resolution Air-shower detector (Ashra)

東京大学宇宙線研究所が主導する宇宙線実験。
宇宙から降り注ぐ粒子（宇宙線）と地球大気の反応によって生じる、蛍光とチェレンコフ光の撮像を狙う。
高エネルギー天体で起こっている様々な現象の解明が期待される。

宇宙線と大気の反応の様子

Ashra望遠鏡

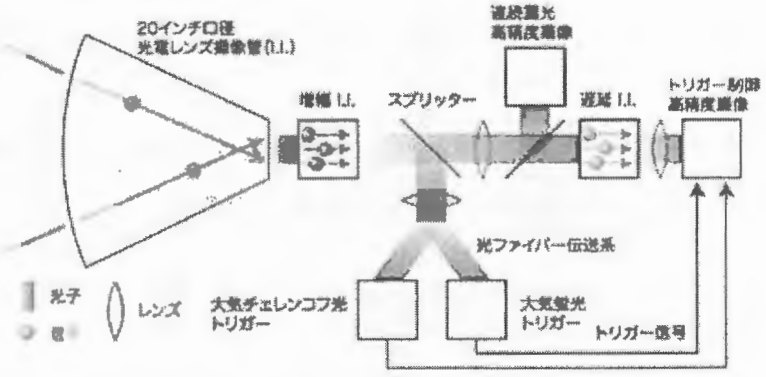
7枚の球面鏡
3枚の補正レンズ
光電撮像パイプライン
大口径UVイメージインテンシファイア

Ashraの特長：

- 1台の望遠鏡で、直径42度の超広視野
  → **全天を網羅する監視観測**
- 宇宙線実験として画期的な、分角の高解像度
  → **宇宙線の到来方向の決定精度が向上**
- 光電撮像パイプラインのインテリジェントトリガーによる、蛍光・チェレンコフ光の同時観測
  → **多種の宇宙線を使った、天体の多角的な理解**

インテリジェントトリガー（右図）とは：

宇宙線が来たかどうかを判断し、来た領域に対してのみ撮像命令（トリガー）を送るしくみ。バックグラウンドノイズによる信号の劣化を防ぐことができる。



光電撮像パイプライン模式図

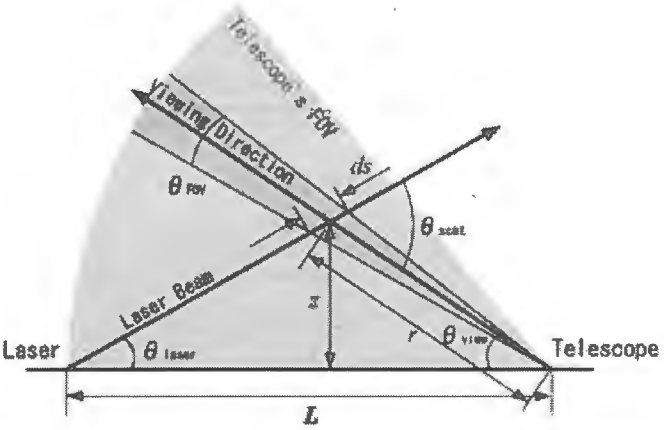
Ashra web page :
http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~ashra/

2. Lidar equation for bistatic measurement

$$P = P_0 \, K \frac{A}{r^2} \, ds \, \beta(\theta_{\mathrm{scat}}) \, T_{\mathrm{t}} \, T_{\mathrm{r}}$$

$$\begin{cases} \beta(\theta_{\mathrm{scat}}) = \alpha_{\mathrm{a}} \, f_{\mathrm{a}}(\theta_{\mathrm{scat}}) + \alpha_{\mathrm{m}} \, f_{\mathrm{m}}(\theta_{\mathrm{scat}}) \\ ds = \dfrac{r \, \theta_{\mathrm{FOV}}}{\sin(\theta_{\mathrm{scat}})} \end{cases}$$

P	Received power [W]
P_0	Emitted laser power [W]
K	Efficiency of the receiving optics
A	Area of telescope's mirror [m^2]
r	Distance between the target and the telescope [m]
ds	Portion of the laser beam path subtended by the FOV for a single pixel of the image sensor [m]
β	Side scattering coefficient [m^{-1}sr^{-1}]
α	Extinction coefficient [m^{-1}]
θ_{FOV}	FOV for a single pixel [deg]
θ_{scat}	Scattering angle [deg]
f	Phase function
T	Transmittance
Suffix	'a': aerosol, 'm': aerosol



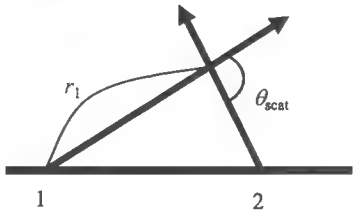
3. Coupled equations

Signal & laser @ site 1 $\quad P_{11} = P_0^{(1)} K^{(1)} \dfrac{A_1}{r_1^2} dr_1 \beta(\pi) T_1^2$

Signal & laser @ site 2 $\quad P_{22} = P_0^{(2)} K^{(2)} \dfrac{A_2}{r_2^2} dr_2 \beta(\pi) T_2^2$

Signal @ site 1 (laser @ site 2) $\quad P_{12} = P_0^{(2)} K^{(1)} \dfrac{A_1}{r_1^2} ds_1 \beta(\theta_{\mathrm{scat}}) T_1 T_2 \quad , \quad ds_1 = \dfrac{r_1 \theta_{\mathrm{FOV}}^{(1)}}{\sin \theta_{\mathrm{scat}}}$

Signal @ site 2 (laser @ site 1) $\quad P_{21} = P_0^{(1)} K^{(2)} \dfrac{A_2}{r_2^2} ds_2 \beta(\theta_{\mathrm{scat}}) T_1 T_2 \quad , \quad ds_2 = \dfrac{r_2 \theta_{\mathrm{FOV}}^{(2)}}{\sin \theta_{\mathrm{scat}}}$



4. Solution of the coupled equations

$$\begin{cases} Q_{11} = \beta(\pi) T_1^2 \\ Q_{22} = \beta(\pi) T_2^2 \\ Q_{12} = Q_{21} = \beta(\theta_{\mathrm{scat}}) T_1 T_2 \end{cases}$$

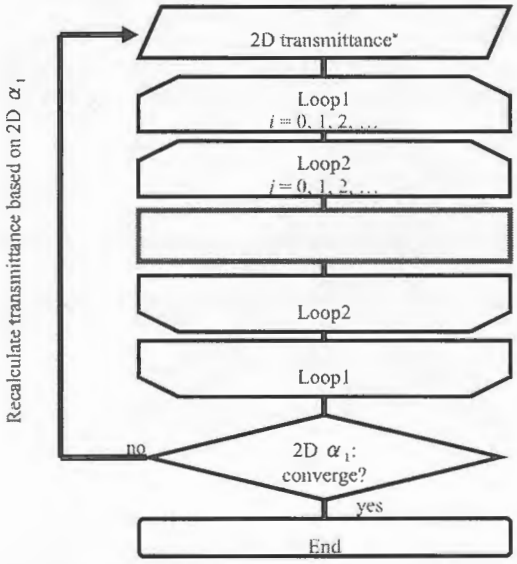
$\beta(\pi)$: backscattering coefficient

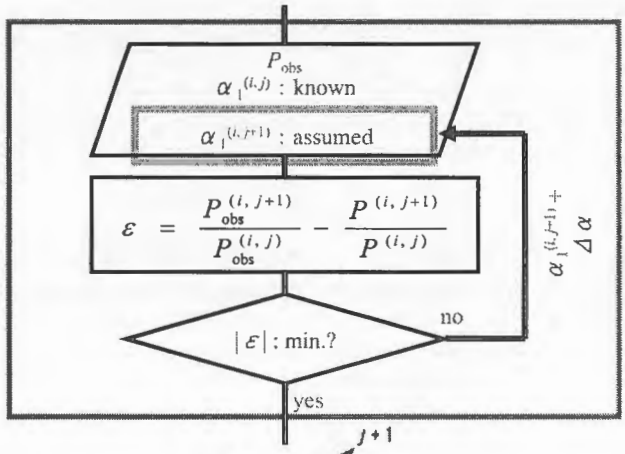
$$\boxed{\frac{\beta(\pi)}{\beta(\theta_{\mathrm{scat}})} = \frac{(Q_{11} Q_{22})^{1/2}}{Q_{12}} \quad , \quad T_2^2 = \frac{Q_{22}}{Q_{11}} T_1^2}$$

... General solution for non-homogeneous atmosphere

5. Inversion algorithm

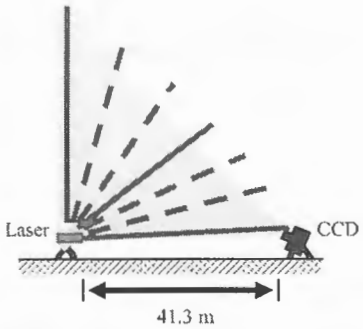
Two-dimensional distribution of the extinction coefficient is derived based on the iterative algorithm shown below:





* Transmittance is assumed to be unity in the first calculation.

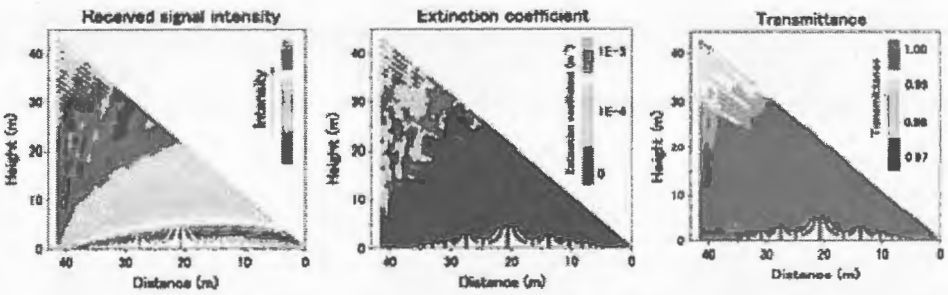
6. Simulation experiment

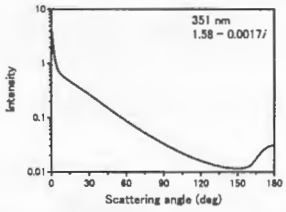


Preliminary experiment was conducted simulating the bistatic configuration with Ashra telescope.

Laser	
Type	Nd:YAG 532 nm
Repetition rate	10 Hz
Power	30 mJ
Cooled CCD	
Number of pixels	765 × 510 ≒ 0.4 Mpixels
FOV	46 deg for 765 pixels
Q.E.	0.65 @ 532 nm
A/D converter	16 bit

7. Result of inversion





Phase function calculated from the OPC data obtained simultaneously with the bistatic lidar measurements.

Distribution of the received signal intensity , that of extinction coefficient and that of transmittance. Extinction coefficient and transmittance are derived based on the algorithm described in Sec. 5.